THE KOREAN SOCIETY FOR COMPOSITE MATERIALS

2025년도 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025.4.30 ^{Wed}~5.2^{Fri} 제주신화월드 랜딩컨벤션센터

주최 : 💫 사단법인 한국복합재료학회

후원: KC ST 한국과학기술단체총연합회



인터넷 검색창에서 URL (http://file. hanrimwon.com/kscm) 입력 또는 QRCode를 스캔하시면 발표자료를 볼 수 있습니다.

발표자료 다운로드 이용 안내







- 3 모시는 글(학회장 인사말)
- 오시는 길
- 발표장 안내
- 06 등록 안내
- 07 식사, 버스킹(Busking) 장소 안내
- 08 특별 이벤트 안내

전 일정

프로그램

- ·기조강연: 랜딩볼룸 A
 ·제1발표장: 랜딩볼룸 A
 ·제2발표장: 랜딩볼룸 B
 16
- ●제3발표장: 랜딩볼룸 C 20

23

- ●제4발표장 : 한라룸 A+B
- ●제5발표장:한라룸C 27
- 제6발표장 : 어리목룸 30
- 제7발표장 : 백록룸 34
- 제8발표장 : 영주룸 38
- 제9발표장 : 올레룸 42

6 포스터 발표

존경하는 한국복합재료학회 회원 여러분께,

푸르름이 짙어지는 봄날, 2025년 춘계학술대회를 제주 신화월드에서 개최하게 되어 진심으로 반갑고 기쁜 마음으로 여러분을 맞이합니다.

이번 학술대회는 우리 학회 창립 이래 가장 많은 사전등록자와 논문 발표편수를 기록하며, 회원 여러분의 뜨거운 관심과 연구 열정이 고스란히 반영된 뜻깊은 자리입니다. 특히 15개 부문과 부문회장, 부문위원 여러분의 헌신적인 준비와 노력 덕분에 더욱 내실 있고 활기찬 학술대회가 마련될 수 있었습니다. 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

이번 대회는 단순한 연구 발표의 장을 넘어, 학계·산업계·연구기관이 함께 교류하고 협력하는 실질적인 장으로 마련하였습니다. 데크카본, 한국카본, 한화첨단소재, 코오롱스페이스웍스, ANH스트럭처, 한국항공 우주산업(KAI), 대한항공 등 국내 복합재료 산업을 대표하는 기업들이 참여하는 특별기획세션도 준비되어 있으며, 최신 기술 동향과 산업 현장의 경험이 공유되고 회원들과 직접 소통하는 귀중한 시간이 될 것 입니다.

또한 한국과학기술연구회 김영식 이사장님의 기조강연을 통해 과학과 기술, 특히 복합재료 기술의 현재와 미래를 통찰하는 자리가 될 것이며, 다양한 학술 발표와 토론을 통해 회원 여러분의 연구 성과가 더욱 빛나는 시간이 될 것입니다.

특히 이번 춘계학술대회에서는, 우리 학회의 창립에 주도적인 역할을 하신 고(故) 홍창선 교수님의 뜻을 기리기 위해 '홍창선 교수 기념사업회'에서 후원해 주신 기금으로 '한국복합재료학회 대상' 수상자에게 부상도 지급할 수 있게 되었습니다. 복합재료 분야의 우수 연구자에게 수여되는 이 상은 이미 우리 학회의 전통 있는 대표 상이지만, 올해는 특별히 고인의 학문적 유산과 정신을 계승하는 의미가 더해져 그 가치가 더욱 깊게 느껴집니다.

아울러, 학술적 교류뿐만 아니라 연구에 매진해온 회원 여러분께 쉼과 재충전의 시간이 될 수 있도록, 제주도의 자연을 만끽할 수 있는 프로그램과 문화 공연도 함께 준비하였습니다. 연구와 학술, 휴식과 영감이 어우러지는 이번 춘계학술대회가 여러분 모두에게 소중한 기억으로 남기를 바랍니다.

우리 학회는 앞으로도 학계, 산업체, 연구기관 간의 가교 역할을 충실히 수행하며, 복합재료 분야의 지속 적인 발전과 기술혁신을 선도해 나가겠습니다.

감사합니다.

한국복합재료학회 회장 윤성호 올림

4월 30일(수)

장 소	제1발표장	제2발표장	제3발표장	제4발표장	제5발표장	제6발표장	제7발표장	제8발표장	제9발표장
	오프라인	오프라인	오프라인	오프라인	오프라인	오프라인	오프라인	오프라인	오프라인
12:30	-								
12:35	5								
12:40	-			로보 및 자동하					
12:45	-			초청강연					
12:50	-			12:30~13:10					
12:55	-								
13:00	-								
13:05	-							세라믹 복합재료	
13:10			특별세션 5.	로보 및 자동하			구조 · 시스템	▲ 조정 및 일반강연	
13:15				학생구두			약생구누 10:00 14:00	12.30~13.50	
13:20				13:10-13:25			12.30~14.00		
13:25	-								
13:30			제비용 탄소섬유			방산 초청 및			
13.35			개발과 응용 및						
13.40	-	특별세션 2.	12:30~14:40			일반강연			
13.45	-	우주항공청	12.00 11.10			12:30~15:00			
13.50	-	항공혁신임부							
13.00	-	모등프도그램 하고요 人재·브푸							
14.00	-	R&D 소개							
14.00	-	12:50~15:00			그소 보하게고				
14.10	-				금속 속입세료 하새그드			-	
14.10	-				13:55~14:40				
14:25	-				10.00 11.40			세라믹 복합재료	
14:20	특별세션 1.							학생구두	
14:30	접착재료의 개요,							14:05~14:50	융복합 기술
14:30	개발, 적용 및			트냅니셔 7 1					학생구두
14:45	발전방향			· 국결세선 /~1. · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·					12:30~16:45
14:50	12:30~16:45			오르르 도굿ㅎ 보하소재					
14:55	-			13:30~16:10					
15:00							-		
15:05	-					바사 하새구드			
15:10		특별세션 3. 거석부야에서				812 4877 15:00~15:15			
15:15	-								
15:20	-								
15:25	-								
15:30									
15:35	-								
15:40		탄소복합재							
15:45	1	개발 및 활용 사례					진완경ㆍ에너시ㆍ		
15:50		(한국탄소산업진흥원,					비데시공시 하새구드	탄소 · 섬유재료	
15:55		한국탄소나노산업협회)			에코 · 바이오		14:15~17:30	학생구두	
16:00		15:15~16:15			고분자			15:05~16:50	
16:05					초청 및 일반강연				
16:10					14:55~17:10				
16:15				그님 미 카드란					
16:20				도돗 및 사공와		구조 · 시스테			
16:25				월한영원 및 하생구도		초청 및 일반강연			
16:30				16:10~16:45		15:30~17:30			
16:35									
16:40									
16:45		서하미							
16:50		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·							
16:55		나노목합새료 초청 및		특별세션 7-2.					
17:00		일반강연		_ 로봇용					
17:05		16:30~17:30		구조배터리					
17:10	-			및 미이크도 배터리 니					
17:15	4			16:50~17:30					
17:20	{			10.00 17.00					
17:30~18:00			I	하히기	 	루 △)		1	
18:00~18:30				<u> </u>	usking (비어가드)			
18:30~				7	산친회 (랜딩볼룸 C)			
				-					

전 일정

5월 1일(목)

09:30-09:40 개회식 09:40-10:20 기조강연	
10:20~10:40 경품추첨 및 휴식	
10:40~ 12:00 10:40~12:00 10:	
12:00~13:30 점심(신화테라스, 랜딩다이닝)	
13:30 특별세선 7-2. 인프라 해양 13:35 로봇용 구조 배터리 일반강연 13:40 및 마이크로 배터리 ॥ 에코 · 바이오 13:45 13:30~13:50 고부자	
13:50 특별세션 4. 고보건지 13:55 특별세션 4. 학생구두 14:00 구조·평가 복합재료 관련 로봇 및 자동화 14:05 13:30~14:30 기업 소개 세션 일반강연 14:10 13:30~14:40 13:50~14:30	포스터 발표 1 1~5부문
14:15 응복합 7/술 10:00 14:00 10:00 14:00 인프라 · 해양 14:20 일반강연 13:30~15:10 11:30 인프라 · 해양 안 생구두	13:50~14:30
14:35 로봇 및 자동화 13:50~15:0 14:40 학생구두 14:40	
14:45 14:45 14:50	
<u>15:00</u> 15:00 10:00 40:05 10:00 40:05	
<u>15:05</u> 15:10 스마트및 13:30~16:25 13:30~16:30	포스터 발표 2 6~8부문 14:50~15:30
<u>15:15</u> 초청및	
<u>15:20</u> 일반강연 학생구두 학생구두	
13:20 13:30~17:15	
15:35 기능성 고분자	
15:40금속 복합재료 학생구두 15:45초처간여 15:10~16:10	
15:50 15:25~16:05	
- 10:00 - 16:05 はののでので、 	포스터 발표 3
	9~14부문
	15:50~16:30
16:25 Transformed	
<u>16:30</u> <u>16:05</u>	
16:40 <u></u> 16:40 <u></u>	
16:45 일반강연 스마트 및	
16:5016:15~1/:15 Uzgdd	
17:00 16:00~17:45	
17:05	
17:15 전환경·에너지· 미래자동차	
17:20 학생구두	1
<u>1/:25</u> 17:30	
17:35	
17:40	
17:50	
17:55	

5월 2일(금)

장 소	제1발표장	제2발표장	제3발표장	제4발표장	제5발표장	제6발표장	제7발표장	제8발표장	제9발표장
발표형식	오프라인	오프라인	오프라인	오프라인	오프라인	오프라인	오프라인	오프라인	오프라인
9:30									
9:35	_								
9:40	_								
9:45									
9:50									
9:55									
10:00									
10:05									
10:10									
10:15									
10:20									
10:25									
10:30									
10:35									
10:40	한국복합재료학회								
10:45	발전방향 간담회								
10:50	9:30~12:00								
10:55									
11:00									
11:05									
11:10									
11:15									
11:20									
11:25									
11:30									
11:35									
11:40									
11:45									
11:50									
11:55									
12:00									

기조강연 (제1발표장)	
---------------------	--

과학기술, 오늘을	변화시키고	내일을	열다	2
<u> 김영식</u> (국가과	학기술연구회)		

특별세션 / 부문 초청 및 일반강연(제1발표장)

[일반강연]

모빌리티용 탄소섬유 복합소재 경량 부품 개발	··· 17
I일한영원 Advanced Carbon Fiber Polymer Composites with Fe₃ Si for High-Performance, Lightweight Synchronous Reluctance Motor Rotors ····································	··· 18
[일반강연]	
On the design and validation of the composite fan blade structure <u>Thuan Ho-Nguyen-Tan</u> , 홍곤의, 김영재, 김보성, 김민국, 윤순호(한국과학기술연구원)	20
[일반강연] NCF/에폭시 비대칭 적충판의 복합재 등가 탄성물성 측정을 위한 연구 ···································	··· 21
[일반강연] 하이브리드 불연속 복합재: 맞춤형 응력 분포를 위한 CFRTP-CFRP 동시 성형 공정	··· 22
[일반강연] 정렬불량 수윤활 복합재 저널 베어링의 최대 내하중 용량을 위한 최적 경계	23
금속 복합재료 초청 강연 / 일반 강연	
[초청강연] 금속기지복합재의 급속적층제조으로의 적용과 전산해석모델 구축	··· 25
[초청강연]	
디지털 이미지 상관기법을 이용한 알루미늄 금속복합소재의 변형거동 분석	··· 27
[일반강연] Fe계 금속복합소재의 첨가원소를 통한 열팽창계수 Tailoring 연구	··· 28
[일반강연] TiX(C, N, B ₂) 강화재 첨가에 의한 Inconel 718 복합재 분말의 적충제조 특성 비교	29
[일반강연] Gd ₂ O ₃ 적용 방식에 따른 Al 복합소재의 중성자 흡수능 및 방열 특성 변화	30

특별세션 / 부문 초청 및 일반강연(제2발표장)

특별세션 2. 우주항공청 항공혁신임무보증프로그램 항공용 소재·부품 R&D 소개
우주항공청 항공혁신임무보증프로그램 소개 ···································
항공용 AI합금 국산화를 위한 데이터베이스 개발 ···································
항공용 Ti 합금 국산화를 위한 데이터베이스 개발 ···································
엔진구조용 Ni계 고온부품 소재 국산화 개발 및 Database 구축 ···································
민·군 항공기 탄소소재 적용 날개 부품의 RTM 공정 고도화 기술 개발
신항공산업 생태계 구축을 위한 친환경 첨단 소재/부품 개발 ···································
특별세션 3. 건설분야에서 탄소복합재 개발 및 활용 사례 (한국탄소산업진흥원, 한국탄소나노산업협회)
탄소섬유보강재 및 긴장재 연구 동향 및 적용현황 ····································
FRP튜브보강 부분충전 콘크리트파일의 해석 및 설계
건설분야 복합재 적용 현황 및 최신 연구동향 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
성형 및 나노복합재료 초청강연 / 일반강연
[초청강연]
Highly Transparent, Colorless Optical Engineering Film with Outstanding Mechanical Strength and Folding Reliability Using Mismatched Charge-Transfer Complex Intensification
[초청강연]
인간 뇌/고분자 바이오복합재료 기반 3D 멀티스케일 분자지도화 기술 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~

<u>박주혁</u>(서울대학교)

[일반강연]

3DSW	/ continuous fiber-reinforced 3D printing mold for the autoclave / compression molding
pro	ocess
강-	<u> </u>
박역	경빈(울산과학기술원), Frank Henning(Fraunhofer Institute for Chemical Technology)

특별세션 4. 스탤스 재료·구조·평가

Transferred Nanomaterials for Load-Bearing and Broadband Radar Absorbing Structures	44
산소분압에 따른 캐노피 투명체 코팅의 성능 변화 연구	··· 45
<u>황민제</u> , 최광식(한국항공우주산업)	
저온 저압 신제조 공정을 활용한 고성능 산화물/산화물 세라믹 매트릭스 스텔스 복합재 구조 물성 평가	··· 46
<u>홍동준</u> , 장한나, 임채환(한국항공대학교), 최원호, 홍성원, 이현석(대한항공), 고현석, 이상훈(한국세라믹기술원), 남영우(한국항공대학교)	
회전익 항공기의 레이더 반사 면적 측정에 관한 연구 ···································	··· 47
유전 알고리즘과 멱 법칙을 통합한 마이크로파 흡수체의 최적 설계 ···································	48
연속 섬유 3D 프린트 기반 전파흡수구조의 RCS 저감 효과에 관한 연구	··· 49
전파흡수재료의 코팅 두께에 따른 고온 전자기 성능 평가	··· 50
스마트 및 신뢰성 초청강연 / 일반강연	
[초청강연]	
국내외 무인협동전투기 개발동향 및 시사점 ···································	··· 51
[초청강연]	
자가수리를 포함한 새로운 항공기 구조 건전성 프로그램 ····································	··· 52
[일반강연]	
적층 복합재 제조를 위한 탈오토클레이브 공정 최신 연구 동향 ···································	··· 53
스마트 및 신뢰성 학생구두	
고온용 전파흡수체 적용을 통한 노즐의 레이더 반사 단면적 분석	··· 55
금속 3D 프린팅된 얇은 벽 구조의 공정 변수에 따른 에너지 흡수 성능 평가	··· 56
변동하중조건에서 누적손상모델을 이용한 구리의 피로수명 예측	··· 57
3D 프린팅된 Kevlar-Onyx 복합재의 FDM 공정 특성에 따른 충격 저항성 분석	··· 58

설명 가능한 인공지능 기반 유한 요소 데이터 활용 손상 탐지 기법
Development of a Robotic Antenna Measurement System for Conformal Load-Bearing Antenna
Structures ····································
Inspection of Complex-Shaped Composite Structures Using a Robotic Pulse-echo Ultrasonic Propagation Imaging System
특별세션 / 부문 초청 및 일반강연(제3발표장)
특별세션 5. 저비용 탄소섬유개발과 응용 및 재활용
저비용 피치계 등방성 탄소섬유 제조 스케일 업 연구 ··································
저비용 탄소섬유의 발전: CPVC 기반 탄소섬유 ····································
복합소재의 가속시험을 이용한 내구성 분석
열처리 조건에 따른 재활용 탄소섬유의 표면특성에 미치는 영향 ···································
Closed-loop Ecology of Carbon Fiber through the Non-destructive rCF Reclaiming Process
슬래그섬유강화복합재(SFRP)의 이해와 활용 ···································
철도 초청강연 / 일반강연
[초청강연]
아이퍼듀르에서의 목입세료 작용 자데 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
절도 계자 내 목입세료 내장체 작용을 위한 조금파-입다당 기안 세료 절임 육장 기울
[일반강연] 시뮬레이션 기반 자율즈해 BRT 국적차량 기순 개발 ···································
<u>박찬호</u> , 김대현, 윤혁진(한국철도기술연구원)
[일반강연]
절도시설물 점검 드론 현황 및 복합소재 필요성 ···································

탄소·섬유재료 초청강연 / 일반강연
[초청강연]
고성능 탄소나노튜브 섬유 제조를 위한 습식방사 공정제어 기술 ···································
[초청강연]
탄소나노튜브를 활용한 복합표면구조 제작 및 첨단생산기술 응용 ···································
[일반강연]
높은 수분산성을 갖는 메틸피리디늄 염으로 기능화된 환원된 그래핀 옥사이드와 폴리비닐알코올 복합재료 ····································
[일반강연]
탄소나노튜브 섬유 제조를 위한 최적의 열 산화를 통한 비정질 탄소 제거 공정
[일반강연]
질산 표면처리 조건이 재활용 탄소섬유 표면특성에 미치는 영향 ······ 80 <u>이규선</u> , 김경하, 이현경, 김대업(한국생산기술연구원)

특별세션 / 부문 초청강연 / 학생구두(제4발표장)

장연우, 이하준, 김정효, 김민정, 김지윤(울산과학기술원)

로봇 및 자동화 초청강연 / 학생구두

[초청강연]

AI 기반 컴파운딩 소재 설계 및 사출성형 공정 최적화 전략 ······ 82 <u>유승화</u> (한국과학기술원)
[초청강연] 나노/마이크로 소재 및 구조를 활용한 기능성 표면 융합 기술 ······ 83 <u>강성민</u> (서강대학교)
소방용 로봇 재료를 위한 현무암 기지 복합재료의 기계적 특성 분석 ·······84 윤기현, 변도균, 윤성민(창원대학교)
특별세션 7-1. 소프트 로봇용 복합소재
Magnetic Anisotropy for Sensing and Actuation in Soft Robotics ······ 85 <u>하민정</u> (광주과학기술원)
Supercapacitor Integrated Magnetic Actuator 86 원희재, 김정효, 장연우, 김지윤(울산과학기술원)
Modular Soft Hand with High DOF Tendon-Driven Actuation for Versatile and Precise Manipulation 87

Enhanced Output and Actuation of TENG Systems Using Magnetically Responsive Polymeric Composites ·· 89 <u>김정효</u>, 이진표, 백윤경, 김지윤(울산과학기술원)

Magnetic-Field-Induced Enhancement of Piezoelectric Anisotropy Enabled by Axial Alignment and Assembly of BaTiO ₃ Nanowire across Piezoelectric Composites towards Stress-Direction-Selective Sensors 91 <u>김유빈</u> , 하민정(광주과학기술원)
생체의료용 초소형 자성 소프트 로봇 ···································
Toward Adaptive Tensegrity Systems: A Multimodal Approach Using Mobile Actuators and Variable-Stiffness Tendons
Magnetic swarm intelligence of mass-produced, programmable microrobot assemblies for versatile task
<u>양기준</u> , 원수경, 박정은(한양대학교), 전지수(인하대학교), 위정재(한양대학교)
로봇 및 자동화 일반강연 / 학생구두 [일반강연]
Advanced Carbon-Based Materials for Next-Generation Electro-Ionic Soft Actuators
Magnetic manipulation for anisotropic characteristics of nanocomposites ······· 97 <u>권혁주</u> , 하민정(광주과학기술원)
특별세션 7-2. 로봇용 구조배터리 및 마이크로 배터리
Building Next-Gen Micro-Battery Production at NNFC
건식 합성 방법을 이용한 황 말단기 맥신 제조와 이를 이용한 리튬황 전지 성능 개선
특별세션 7-2. 로봇용 구조배터리 및 마이크로 배터리
Development of micro all-solid-state battery technology through application of nano- semiconductor
tecnnology
Ni-Rich NCM622 Cathode for High-Efficiency All-Solid-State Thin-Film Batteries by Al ₂ O ₃ Protection
<u>김현석</u> (동국대학교)
Extraordinary dendrite-free Li deposition on nanostructured collectors 102 김이경, 김효근, <u>정희태</u> (한국과학기술원)
배터리 생산 공정의 로봇 협업을 위한 디지털트윈 ······· 103 <u>윤희택</u> (한국과학기술원)
구조전지를 위한 3D 프린팅 연구

로봇 및 자동화 일반강연 / 학생구두

[일반강연]

Nanoarchitectured Superstructures of Organic-Inorganic Hybrid Nanosheets with Tunable Electronic Structures for Sodium-Ion Batteries
<u>이민섭,</u> 김지민(경북대학교), 이나경(한국외국어대학교), 정병문(한국재료연구원), 박진균(한국외국어대학교), 백승민(경북대학교)
[일반강연]
Covalently introducing sulfur in a conductive metal organic frameworks toward lithium-sulfur
batteries 106
Mousumi Garai, 하자원, 오일권(안국과악기술원)
고체 폴리머 전해질 기반 탄소섬유 구조 전지 복합재료 개발 및 다기능성 예측
Mohamad A. Raja, <u>임수현</u> , 김원기, 김원빈, 이준호, 김성수(한국과학기술원)
특별세션 7-3. 복합재 구조물 생산용 로봇활용
Level set-based topology optimization and 3D printing for composite structures with tailored
fiber paths
<u>윤순호</u> , Thuan Ho-Nguyen-Tan, 김민국, Anand Prakash Jaiswal
Laser texturing based injection molded metal-composite joint for lightweight hybrid robotic
structures ······ 109
<u>홍성진</u> , 안성훈(서울대학교)
Automation and Inverse Design for the Robotic Manufacturing of Long Discontinuous Fiber Reinforced
Composites 110
<u>Akshay Zaveri</u> , 이현수(University of Connecticut), 이재열(한국로봇융합연구원), 전지호(University of Connecticut)
모바일 매니퓰레이터를 활용한 복합재 생산 공정 자동화 가능성 평가
<u>한지웅</u> , 장민우, 송근수, 이재열(한국로봇융합연구원)
항공 분야 복합재 가공 공정 개선을 위한 로봇 활용 모델 개발 연구
<u>지성철</u> , 김종찬, 이만기, 김승우(한국로봇융합연구원)
자동화 공정으로 구축된 섬유복합재 빅데이터를 활용한 도심항공모빌리티 동체 구조 설계에 관한 연구
고온 환경용 세라믹 섬유 복합재의 기계적 강도 및 난연 특성 연구
<u>노우승</u> , 신해름, 여승준(한국세라믹기술원), 박성훈(부산대학교), 김만태(한국세라믹기술원)
Additively Manufactured Core Frame with Composite-Reinforced Shell for Build-Efficient Robot
Frames
<u>이청화(</u> University of Connecticut), 안성훈(서울대학교), 전지호(University of Connecticut)
로봇을 활용한 복합재 및 이종접합 소재의 내부 결함진단을 위한 비파괴 검사 기술에 관한 연구

부문 초청 및 일반강연 / 학생구두(제5발표장)

금속 복합재료 학생구두	
차세대 배터리용 양극 활물질-유전체 복합소재의 표면 개질과 특성 분석 ···································	8
미소 기계적 시험을 통한 Cr 코팅 Zircaloy-4의 계면 특성 조사	7
TiC/FC250 금속복합재료의 미세구조 및 마모 특성에 미치는 열처리의 영향에 대한 고찰	1
에코ㆍ바이오 고분자 초청강연 / 일반강연	
[조정강연] 복합소재 수소 용기 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	2
[초청강연]	
바이오플라스틱 산업의 도전과 전망 ··································	3
[일반강연]	
Sustainable Shock-Absorbing Polymers with Dynamic Crosslinks	4
[일반강연]	
질화붕소 나노튜브 세라믹 소재의 친환경 섬유화 및 우주응용 ····································	5
[일반강연]	
고분자의 바이오유래 확인 분석법 및 생분해도 평가·인증 소개	5
[일반강연]	
첨단 소재를 위한 실크 플랫폼 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	7
에코ㆍ바이오 고분자 일반강연	
[일반강연]	
Structural Effects of Organic Cross-linkers on Infrared Transparent Sulfur Polymers	В
[일반강연]	
극저온 충돌 유도 기법을 통한 반결정질 고분자 내 자가 핵제 거동 및 특성연구 ····································	9

[일반강연]
Biodegradable Chitin-Based Polymers for Sustainable Energy Devices
[일반강연]
복합재료 재활용을 통한 재생 탄소섬유의 소재 부품화 개발 131 손유정, <u>김영수</u> (하도FNC)
에코ㆍ바이오 고분자 학생구두
Self-healing Polyimide with Dynamic Covalent Bonds and Aliphatic Siloxane Diamine
고성능 섬유를 위한 질화붕소나노튜브의 액정과 그의 유변학적 거동에 대한 연구
Novel Self-reinforced Chitosan Green Nanocomposite for Smart Food Packaging
기능성 고분자 초청강연 / 일반강연
[초청강연]
Functional nanocomposites based on boron nitride nanotubes
[일반강연]
차량용 재활용 섬유강화플라스틱 재료 모델링 연구 ······ 136 <u>윤상재</u> , 남경주, 김동휘, 홍채영(현대자동차)
기능성 고분자 학생구두
Experimental and Numerical Investigation of the Mechanical Behavior and Failure Modes in Epoxy/Flax Composite Face Sheet and Epoxy honeycomb Core Lab-made Sandwich Panels
재활용 섬유 강화 열가소성 고분자 복합재료의 접합 성능 평가 ···································
용매 공학을 통한 액정 탄성체의 분자 구조와 에너지 소산 간의 관계 규명
고분자 종류에 따른 실란트의 내유성 비교 분석

이동현, 김윤지, 권동준(경상국립대학교)

부문 초청 및 일반강연 / 부문 학생구두(제6발표장)

방산 초청강연 / 일반강연 / 학생구두

[초청강연] Metal and Carbon Nanomaterials for Electromagnetic Interference Shielding and Their Defense Applications 143 이동수, 최호광, 조수진, 배수강, 문병준, 주용호(한국과학기술연구원), 김태욱(전북대학교) [초청강연] <u>가동하</u>, 정희수(국방과학연구소), 양희만(한국원자력연구원), 이만종(건국대학교) [일반강연] 진영호(중앙대학교) [일반강연] 노영희, 김진성, 정상기(국방과학연구소) [일반강연] 김성권, 노태호, 김석주, 강승구(한국카본) [일반강연] 이형익, 조용윤, 이정민, 이지은(국방과학연구소), 윤성태, 권향주(데크카본), 박상효, 구형회(코카브), 노영희, 장혜진, 하동성, 이만영(국방과학연구소) [일반강연] 김수현, 김세영, 한인섭, 방형준, 성영훈, 이슬희(한국에너지기술연구원) 정지원(서울대학교), 이정민(국방과학연구소), 윤군진(서울대학교), 이만영, 이형익(국방과학연구소) 구조·시스템 초청강연 / 일반강연 [초청강연] 김지훈, 김진봉, 정문규, 주근수, 오재철, 최현석, 강민규(한국재료연구원) [초청강연] <u>양승화</u>(중앙대학교) [일반강연] 김혜규, 지우석(울산과학기술원), 장성욱, 이명규(한화시스템), 김동영(스페이스프로)

[일반강연]

다중 코어 샌드위치 구조가 적용된 무인기용 복합재 레이돔의 설계 기법 연구	158
[일반강연] 선박용 복합재 프로펠러의 충돌 특성에 대한 연구 ···································	• 15
[일반강연] 무인기용 복합재 레이돔에 대한 내환경 성능 평가 기법 연구 <u>박재형</u> , 이재민, 유대식(에이엔에이치스트럭쳐)	160
친환경·에너지·미래자동차 초청강연 / 일반강연	
[초청강연] 차세대 모빌리티를 위한 기계적 에너지 소산 설계 ···································	162
[초청강연] 화학작용제 보호/제독/탐지 소재기술 ····································	163
[일반강연] Layer-by-layer Assembled Polymeric Thin Films for Anti-flammable Coatings ····································	164
[일반강연] Preset a MnOX layer on high entropy alloy surface to achieve industrial grade electrocatalytic oxygen evolution performance <u>Benzhi Wang</u> , 정형모(성균관대학교)	า 165
[일반강연] Surface Imaging-based Property Modeling of Fiber-reinforced Composites Manufactured by HP-RTM Process ···································	166
[일반강연] 풍력추진용 경량 대형 샌드위치 구조 복합재의 피로성능 평가를 위한 피로시험 지그 설계 및 제작 ··································	168
[일반강연] 탄소섬유강화플라스틱 기반 마찰전기 나노발전기의 성능 향상을 위한 탄소섬유 표면 개질 ···································	170
[일반강연] 기능화된 CNT 섬유 기반 덴드라이트가 억제된 섬유형 아연 음극의 개발 ···································	171

[OTHP2F04]

[일안장연] Dynamic Restructuring of Molybdate-Modified High-Entropy Alloys for Stable Seawater Electrolysis … 172 Ziyang Duan, Zhang Zhihao, 서종환(성균관대학교)
[일반강연]
Triboresistive Sensing: Gridless Touch Point Recognition 173 <u>이영훈</u> (경희대학교)
[일반강연]
Hybrid Flame-Retardant and Antimicrobial Coatings
<u>Alemtsehay Tesfay Reda</u> , 박용태(명지대학교)
[일반강연]
High Temperature-Stable Triboelectric Nanogenerators Based on Low Vapor Pressure Liquids for
Energy Harvesting and Tactile Sensing
<u>Teklebrahan Gebrekrstos Weldemhret(</u> 동국대학교), Nebiyou Tadesse Debele(명지대학교), 정권범(동국대학교), 박용태(명지대학교)
친환경·에너지·미래자동차 학생구두
Enhancing Electrocatalytic Oxygen Evolution of Cobalt Oxide via Nanoclusterization to Trigger Robust
Lattice Oxygen Mechanism ········176 권순형, Benzhi Wang(성균관대학교), 허정연, 이지훈(경북대학교), 정형모(성균관대학교)
화학기상증착법 기반 다공성 구조체 코팅 공정 연구
<u>정채원,</u> 장혜경, 박병호(한국재료연구원), 함명관(인하대학교), 오영석(한국재료연구원)
고온 내구성이 우수한 탄소 나노 튜브-탄소 섬유 하이브리드 복합재
<u>김성희,</u> 장혜경, 박병호, 이정완, 김정수, 엄문광(한국재료연구원), 이승기(부산대학교), 오영석(한국재료연구원)
열가소성 탄소섬유 복합재의 유도 가열 접합 향상을 위한 나노 복합재
<u>김나영</u> , 백인석, 장혜경, 김정수, 박병호, 김진수(한국재료연구원), 성동기(부산대학교), 오영석(한국재료연구원)
다공성 나노탄소구조체의 기공구조 조절과 금속-공기전지 응용 ···································
부문 학생구두 (제7발표장)
구조ㆍ시스템 학생구두
스티칭 공법을 활용한 pitch계 탄소 섬유/에폭시 복합재 구조의 열전달 성능 향상 및 두께 방향 보강 특성 연구 182 오준혁, 최훈철, 곽병수(경상국립대학교)

이민주, 심소휘, 곽병수(경상국립대학교)

유한요소해석을 활용한 CF/PPS 열가소성 복합재 구조물 스탬프 성형 공정 최적화 ······· 이우주, 유재현(경상국립대학교), 지성하, 주현우(한국항공우주산업), 곽병수(경상국립대학교)

전자기 시뮬레이션을 통한 열가소성 복합재 구조 유도가열 공정 변수 영향성 평가	· 187
PEMFC 성능향상을 위한 기체확산층 전도성-초소수성 코팅 ···································	· 189
AFP공정을 활용한 복합재 자동적층기술개발 및 물성에 관한 연구	· 190
친환경 · 에너지 · 미래자동차 학생구두 도메인 적응을 이용한 자가진단 기반 복합재 블레이드 손상 진단 ···································	·· 191
Enhancing the EMI Shielding Effect of Polymer Composites through Metastructures by DLP Printing ·· <u>Huiying Jin</u> (성균관대학교), Zhihao Zhang(Xiamen University), 서종환(성균관대학교)	· 192
신뢰성 있는 충돌해석 모델을 위한 GFRP의 동적 재료 물성 모델에 관한 연구	· 193
Manual Driven Spinning-top Triboelectric Nanogenerator with Enhanced Electrical Output <u>공지민</u> , 서동원, 김석진, 정지훈(금오공과대학교)	· 194
Advanced Wettability-Controlled Materials for Enhancing Performance and Durability in Zinc-Air Batteries	· 195
Reliability Study on the Use of Adhesive Film in Co-Cured CFRP/PVC Foam Core Sandwich Composites <u>장우철</u> , 노형도(한양대학교)	· 196
Analysis of advanced joining of CFRTPs with copper reinforcing	· 197
Material-resistance tactile-force multimodal Self-powered sensor ····································	· 198
개패시터 기반의 소리 마찰대전 발전기	· 199
Elastoplastic constitutive modeling of FDM-printed cellular structures: a comparative analysis considering anisotropy and asymmetric tension-compression responses Quan Yuan, Zhihao Zhang, 서종환(성군관대학교)	· 200
상변화물질과 열전소자를 활용한 고효율 배터리 냉각 시스템 개발 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	· 201
업사이클링된 탄소 소재의 이차전지 응용 특성 연구 ···································	· 202

구조·시스템 일반강연

[일반강연]

Atomic Oxygen-Resistant Oxide/Oxide Ceramic Composites for Stealthy Satellites in Very Low Earth Orbit (VLEO) 2013 <u>Shanigarma Mallesh</u> , 임채환(한국항공대학교), 최원호, 홍성원(대한항공), 고현석, 이상훈(한국세라믹기술원), 남영우(한국항공대학교)	3
[일반강연] 소형발사체용 양산형 복합재 추진제 탱크의 설계 및 제작 기법 연구 ···································	5
[일반강연] 소형발사체용 양산형 복합재 추진제 탱크의 구조 및 기밀 성능 평가 기법 연구	6
[일반강연] 저밀도 탄소/페놀 복합재의 아크젯 평가 ···································	8
구조·시스템 학생구두 [일반강연]	
Ag powder를 활용한 전도성 서셉터의 발열 거동 및 GF/PEEK 복합재 구조 유도 용접 성능 평가	9
PEMFC 가스켓의 정량적 면압 평가를 위한 실험-통계 분석 및 하이브리드 접근법	1
<mark>동종 및 이종 재료의 멀티 볼트 조인트의 강도 예측</mark> ·······21. <u>김수지</u> , 김경식, 전흥재(연세대학교)	2
브레이딩 Type IV 수소압력용기의 경량화에 따른 내압 및 파열 성능 평가	4
결정화도 및 결정의 크기가 열가소성 복합재의 파괴 인성에 끼치는 영향 ······· 21! <u>박민수</u> , 지우석(울산과학기술원)	5
전자기파 흡수 대역 조절을 활용한 플루티드 코어 기반 능동형 레이더 흡수 구조 설계 및 해석	6
hBN 입자 분산과 Pitch계 탄소섬유 스티칭을 활용한 고열전도성 다기능 PAN계 CFRP 구현 ···································	7
친환경 선박 풍력 추진 시스템 복합재 Rotro Sail 기술개발에 관한 구조해석	9
Voronoi diagram을 활용한 복합재료용 코어재 구조 설계	0

- **주기패턴을 활용한** Quartz fiber/Oxide ceramic matrix 복합재의 레이돔 구조 설계 ······ 222 <u>장한나</u>, 홍동준, 임채환(한국항공대학교), 최원호, 홍성원(대한항공), 고현석, 이상훈(한국세라믹기술원), 남영우(한국항공대학교)
- **극한 환경에서 운용되는 무인항공기용 3D 프린팅 초소수성/전기열 열가소성 발열 복합재 패치 구조 …………………………… 223** <u>서한준</u>(한국항공대학교), 김태성(광주과학기술원), 남영우(한국항공대학교)

부문 초청 및 일반강연 / 부문 학생구두(제8발표장)

세라믹 복합재료 초청강연 / 일반강연 ^[초청강연]

섬유강화 세라믹 복합소재 적용 스크램제트 연소기 개발 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
[초청강연] 세라믹의 수축을 줄이기 위한 하이브리드 공정 : 수지 개질 및 건조 공정 최적화 ···································
[일반강연] 그동도 스러리 하지 및 먼저 고전은 이용하니까 탄스성은 강하네리면, 북하면크 팬즈
고송도 들더니 임점 및 PIP 등 8일 이용한 00 원조점류 영외 제더덕 독립세료 제조 ***********************************
[일반강연]
고온 구조용 탄화규소(SiC) 자가치유 강화를 위한 소량 첨가제 전략 ···································
세라믹 복합재료 학생구두
동결억제제 함량에 따른 세라믹 슬러리의 유변학적 거동 및 세라믹 특성 분석 ···································
Al-B-C 소결첨가제를 이용한 SiC의 저온 소결 및 전기전도성 연구 ···································
Cracking Behavior of Gadolinia Burnable Absorber Composite Fuel Pellet
탄소·섬유재료 학생구두
배터리 안전성 모니터링을 위한 탄소나노튜브 기반 충격 감지 센서 개발

촉매충 SEM 이미지로부터의 정량데이터 추출 AI알고리즘 기반 탄소나노튜브 구조체의 견실제조 공정 최적화 ···································	236
탄소나노튜브 배열의 열음향 특성 ···································	237
효율적인 수전해를 위한 탄소나노섬유 기반 TMS 이종구조 촉매 합성	238
Improving mode-II fracture toughness of woven carbon fiber composite using cellulose nanofibers… <u>Abuzar Jamil</u> , Maksym Li, 송정일(창원대학교)	239
Design Strategies for Optimizing Impregnation and Fiber Positioning in Self- Supporting 4D Printing of Continuous Carbon Fiber-Reinforced Shape Memory Polymer Composites	240
Self-Foaming을 이용하여 제조된 피치-페놀 탄소폼의 기계적 특성 연구	242
성형 및 나노복합소재 일반강연	
Tale 3 er Shellac based bio-composites coated paper as sustainable food packaging	243
[일반강연] 프리프레그 성형 시 정밀한 압력 제어를 위한 공압 프레스 개발 ···································	244
[일반강연] 탄소나노튜브 섬유 기반 구조특성 배터리 제조 ···································	245
[일반강연] Diol compound 첨가에 의한 산무수물계 에폭시 수지의 반응속도론적 분석 및 열기계적 특성 개선 연구	246
성형 및 나노복합소재 학생구두 [일반강연]	
섬유 직물의 직조 패턴에 따른 열변형 영향성 ···································	247
Temperature prediction of InBiSn alloy-embedded CFRP during transient response	248
Effects of the curing conditions on the mechanical behavior of room-temperature infused carbon/cyanate ester laminates <u>이인준</u> , 김상엽(서강대학교)	249
Development of Pneumatic Direct Ink Writing System for low melting point alloy	250

Influence of Tension Control on the Quality of Carbon Fiber-Epoxy UD Prepreg	···· 251
점탄성 모델을 이용한 냉각 속도에 따른 복합재의 잔류응력 예측	··· 252
전기저항과 인공지능을 이용한 복합재 제조의 실시간 유동선단 예측 ···································	··· 253
전기저항 모니터링과 딥러닝을 이용한 유리섬유복합재 진공 수지 주입공법에서의 드라이스팟 탐지 ···································	··· 254
현무암 섬유 표면의 CNT 성장이 기계적 및 전기적 특성에 미치는 영향	··· 255
GFRTP의 미세구조 분석을 통한 열성형 공정 최적화 ···································	··· 256
결정화 반응을 고려한 열가소성 복합재의 열성형 변형 예측 ···································	··· 257
부문 학생구두(제9발표장)	
융복합 기술 학생구두	
Enhanced Performance Electrode Development for Vanadium Redox Flow Batteries Using Carbon Felt Composites	259
<u>Gurpreet Singh</u> , Amanpreet Kaur, 임준우(전북대학교)	
A bending test methodology for the laminated fan blade structure	···· 261
Energy Absorption Behavior of Hat-Shaped Basalt Fiber-Reinforced Composites: Numerical and	
Experimental Analysis <u>Abdulrahman Adeiza Musa</u> , 윤순호(한국과학기술연구원), Azikiwe Peter Onwualu(African University of Science and Technology), 김민국(한국과학기술연구원)	···· 262
DNN기반 clustering을 통한 열성형 복합 채널의 형상에 따른 warpage의 상관관계 분석 ···································	··· 263
굴곡 구조가 고려된 직물 CFRP의 기계적 물성 예측	··· 264
Predicting Callus Geometry in Tibial Bone Fractures: Validation and Comparative Study of Implant Materials Using a Novel Algorithm <u>Mahtab Ali</u> , 장승환(중앙대학교)	··· 265
시드층 접착력 향상을 위한 플라즈마 처리 및 박막 두께 최적화	··· 266
테라헤르츠파륵 사용한 실시간 폴리머 영화 검사 기술에 관하 연구 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	268

Innovative Bone Plate Design for Optimized Tibial Fracture Healing: Enhancing Biomechanics and Tissue Regeneration
<u>Syed Zargham Abbas Hamdani</u> , 장승환(중앙대학교)
Phytic acid 코팅된 Mg wire/PLA 복합재료의 생분해에 대한 실험적 연구
생분해성 복합재료의 하중이 분해과정 및 기계적 성능에 미치는 영향에 대한 해석적 연구
다중 물리 시뮬레이션 기반 이방성 열-기계적 특성을 고려한 등가모델링 활용 대면적 반도체 패키지의 워피지 예측… 273 <u>유응규</u> , 백정현, 박종휘, 김학성(한양대학교)
성형 공정 중 변형에 따른 전기 전도도 변화를 고려한 전기차용 3D 복사 난방 히팅 모듈의 열 성능 예측 275 <u>백정현</u> , 김학성(한양대학교)
윤활 이론 기반 전기-유체 상사성과 들로네 삼각분할을 활용한 연속섬유 강화 복합재료의 횡방향 투수계수 예측 알고리즘 개발 및 검증 ··································
<u>배상윤,</u> 조현성, Kiyaranu P. P., 조재영, 이선도, 김성수(한국과학기술원)
복합재 고속 물성 분석을 통한 열경화성, 열가소성 복합재 충돌 흡수 장치 설계
인프라 해양 초청강연 / 일반강연
[초청강연]
복합소재 함정에 대한 건조 및 인증 현황 소개 ······· 279 <u>김영성</u> , 정민재, 이요한(한국선급)
[일반강연]
Application of Modified Burn-Off Testing in Sustainable Marine Composites
<u>오대균</u> (목포해양대학교), Jean-Baptiste R. G. Souppez(Aston University), 장재원(목포해양대학교)
[일반강연]
Enhanced Prediction Performance for Internal Defect Detection of Wind Turbine Blades using
Synthetic Data-Based Deep Learning282 <u> 전해명</u> , 정태경, 노재규(군산대학교)
[일반강연]
Environmental Impact Assessment of the Lightweight Design Effect of CFRP Ship based on LCA 284 Zhiqiang Han(Zhejiang Ocean University), 박지원, 오대균(목포해양대학교)
[일반강연]
천연섬유의 Glass Content 검증을 위한 수정된 ASTM 시험법 ···································
인프라 해양 학생구두
현무암섬유강화복합재의 열적 재활용에 관한 연구
<u>김진균,</u> 전해명, 노재규(군산대학교)

해상풍력발전기 블레이드 복합재료 결함 검출 방법에 관한 연구	8
Elium 수지의 성형 조건에 따른 기계적, 열적 특성 분석 ···································	9
3D 프린팅 탄소섬유 복합재 시편의 굽힘 특성 평가 및 이론 비교	0
DNV 규정 분석을 통한 3D 프린팅 복합재 파이프 설계 절차 연구	2
철도 학생구두	
철도차량용 투명 발열 창을 위한 고투과 저저항 면상발열체 표면처리 기술 개발	4
철도 차량 적용을 위한 고투과초고속 전기변색 창호 기술 ···································	5
차수용 전도성 그라우트의 최적 자가 진단 시스템 연구 ···································	6
철도차량 복사 난방용 발열 바닥 상판 개발 및 실물시제 성능 평가 ······· 29 <u>박주엽</u> , 강동훈(한국철도기술연구원)	7
위상최적화를 이용한 인보드 대차프레임의 경량설계 방안연구	8
철도차량용 복합소재 내장재 패널의 발열 기능화를 위한 탄소섬유 발열체 적용 실물 시제 제작 및 성능 평가 29 <u>박주엽</u> , 강동훈(한국철도기술연구원)	9
하이퍼튜브 적용 대차프레임 경량설계 방안연구 ····································	0

포스터 발표 1

1부문. 금속 복합재료

P1-1

Analysis of intermediate p	phase effect on the organic-inorganic hybrid bond	ding by correlative
microscopy study		
신근식, 강대영, <u>황준연</u> (한-	·국과학기술연구원)	

P1-2

단탄소섬유	의 배향을	을 통한 №	1g/CF 긑	<u> </u>	노재 특성 변화 연구	••••••	••••••	303
<u>이태호</u> ,	신상민,	박현재,	조승찬,	이상복,	이상관(한국재료연구원),	김양도(부산대학교),	김정환(한국재료연구원)	

P1-3

CBN-Mg 급속확합재료의 강환재 일도에 따른 열기계적 특성 연구	P1-4
절단훈, 초순석, 김민수, 김정환, 이상부, 이상판(한국제료연구원), 김양토(부산대학교), 초승천(한국제료연구원) 2부문, 기능성 고분자 P2-1 Immobilizing Ru-Ni Alloys on Highly Porous T _i C ₂ T _x MXene for Efficient and Durable Hydrazine-Assisted Hydrogen Production	cBN-Mg 금속복합재료의 강화재 입도에 따른 열기계적 특성 연구
2부문. 기능성 고분자 P2-1 Immobilizing RU-Ni Alloys on Highly Porous Ti ₅ C ₂ T _x MXene for Efficient and Durable Hydrazine-Assisted Hydrogen Production	<u>정다운</u> , 조은서, 김민수, 김정환, 이상복, 이상관(한국재료연구원), 김양도(부산대학교), 조승찬(한국재료연구원)
2부문. 기능성 고문자 P2-1 Immobilizing Ru-Ni Alloys on Highly Porous Ti ₅ C ₂ T _x MXene for Efficient and Durable Hydrazine-Assisted Hydrogen Production	
P2-1 Immobilizing Ru-Ni Alloys on Highly Porous Ti ₅ C ₂ T _x MXene for Efficient and Durable Hydrazine-Assisted Hydrogen Production 306 Themh Hei Nauven, Duy Thenh Tren, Deepenshu Melhotra, 김남훈, 이중희(전북대학교) 306 P2-2 Large-area Drop-on-demand Inkjet Printing for Grid-type Patterned Flexible Transparent Electrodes ·· 307 Sambeden jena, Duy Thenh Tren, 김남훈, 의중희(전북대학교) 92-3 Uttrafine Nanoalloy Encapsulated in Graphitic Carbon Shells as a Highly-active and Durable Electrocatalyst for AEM and PEM Water Splitting 308 Abhisek Majumdor, Duy Thenh Tren, 김남훈, 이중희(전북대학교) 308 P2-4 Iron oxide/graphene anchored carbon nanofiber based hybrid electrode for supercapacitor application 309 uttraft, Naioella S., 이중희(전북대학교) 310 01제호(r) 비행(-20) 310 P2-5 행용기 에어덕트용 고은 적용이 가능한 실리콘 고무 컴파운딩 연구(III) 310 311 비스데 텍 연구원), 윤주영(우양신소제), 도성열(r:이백연구원) 312 311 P2-6 Multi-Strategy Engineering of Earth-Abundant Electrocatalysts for Efficient Anion Exchange Membrane Water Electrolysis 311 Hoang Tuon Nguyen, Abhisek Majumdar, Duy Thanh Tran, 김남훈, 이중희(전북대학교) 312 712-7 Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSe ₂ -supported Co ₂ P for Overall Water Splitting 312 P2-8 PiAcHimh Zin&E 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합채로의 가운성 및 기계	2부문. 기능성 고분자
Immobilizing Ru-Ni Alloys on Highly Porous Ti ₅ C ₂ T _x MXene for Efficient and Durable Hydrazine-Assisted Hydrogen Production	P2-1
Hydrogen Production 306 Thanh Hei Nguyen, Duy Thanh Tran, Deepanshu Malhotra, 김남훈, 이중희(전북대학교) 306 P2-2 Large-area Drop-on-demand Inkjet Printing for Grid-type Patterned Flexible Transparent Electrodes - 307 Sambedan jena, Duy Thanh Tran, 김남훈, 이중희(전북대학교) 92-3 Utrafine Nanoalloy Encapsulated in Graphitic Carbon Shells as a Highly-active and Durable Electrocatalyst for AEM and PEM Water Splitting 308 Abhisek Majumdar, Duy Thanh Tran, 김남훈, 이중희(전북대학교) 308 P2-4 Iron oxide/graphene anchored carbon nanofiber based hybrid electrode for supercapacitor application 309 및으로, 김남훈, 이중희(전북대학교) 309 P2-5 항공기 에어덕트용 고은 적용이 가능한 실리콘 고무 컴파운딩 연구(III) 310 이제초ር(다)리텍연구원), 윤주영(우양신소계), 도성영(다)리텍연구원) 310 P2-6 Multi-Strategy Engineering of Earth-Abundant Electrocatalysts for Efficient Anion Exchange Membrane Water Electrolysis 311 Hoang Tuan Nguyen, Abhisek Majumdar, Duy Thanh Tran, 김남훈, 이중희(전북대학교) 312 P2-7 Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSe ₂ -supported Co ₂ P for Overall Water Splitting 312 Thokehom Anjoil Devi, Duy Thanh Tran, Manoj Bollu, 김남훈, 이중희(전북대학교) 313 P2-8 PL>64 Sty 전 및 기계적 물성 항상 연구 313 미스트해처치 컴파운드 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합재료의 가공성 및 기계적	Immobilizing Ru-Ni Alloys on Highly Porous Ti ₃ C ₂ T _x MXene for Efficient and Durable Hydrazine-Assisted
Thonh Hei Nguyen, Duy Thonh Tron, Deeponshu Molhotra, 김남훈, 이중희(전북대학교) P2-2 Large-area Drop-on-demand Inkjet Printing for Grid-type Patterned Flexible Transparent Electrodes ~ 307 Sombedon jena, Duy Thonh Tron, 김남훈, 의중희(전북대학교) P2-3 Ultrafine Nanoalloy Encapsulated in Graphitic Carbon Shells as a Highly-active and Durable Electrocatalyst for AEM and PEM Water Splitting Abhisek Mejumdar, Duy Thonh Tron, 김남훈, 이중희(전북대학교) P2-4 Iron oxide/graphene anchored carbon nanofiber based hybrid electrode for supercapacitor application 309 발로질, 김남훈, 이중희(전북대학교) P2-5 항공기 에어덕트용 고온 적용이 가능한 실리콘 고무 컴파운딩 연구(III) 310 이겐코르(trol텍연구원), 윤주역(우양신소객), 도성열(trol택연구원) 310 P2-6 Multi-Strategy Engineering of Earth-Abundant Electrocatalysts for Efficient Anion Exchange Membrane 311 Hoang Tuon Nguyen, Abhisek Majumdar, Duy Thanh Tron, 김남훈, 이중희(전북대학교) 312 P2-7 Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSe ₂ -supported Co ₂ P 312 Thokehom Anjoli Devi, Duy Thanh Tron, Manoj Bollu, 김남훈, 이중희(전북대학교) 312 P2-3 Thokehom Anjoli Devi, Duy Thanh Tron, Manoj Bollu, 김남훈, 이중희(전북대학교) 313 의진소트에버지 컴파운드 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합재료의 가공성 및 기계적 물성 항상 연구 313 <	Hydrogen Production
P2-2 Large-area Drop-on-demand Inkjet Printing for Grid-type Patterned Flexible Transparent Electrodes ~ 307 Sambedan jena, Duy Thonh Tran, 김남훈, 의중희(전북대학교) P2-3 Uttrafine Nanoalloy Encapsulated in Graphitic Carbon Shells as a Highly-active and Durable Electrocatalyst for AEM and PEM Water Splitting	Thanh Hai Nguyen, Duy Thanh Tran, Deepanshu Malhotra, 김남훈, 이중희(전북대학교)
P2-2 Large-area Drop-on-demand Inkjet Printing for Grid-type Patterned Flexible Transparent Electrodes ~ 307 Sambedan jena, Duy Thanh Tran, 김남훈, 의준희(전북대학교) P2-3 Utrafine Nanoalloy Encapsulated in Graphitic Carbon Shells as a Highly-active and Durable Electrocatalyst for AEM and PEM Water Splitting	
Large-area Drop-on-demand Inkjet Printing for Grid-type Patterned Flexible Transparent Electrodes ~ 307 Sambedan jena, Duy Thanh Tran, 김남훈, <u>이중희(전북대학교</u>) P2-3 Ultrafine Nanoalloy Encapsulated in Graphitic Carbon Shells as a Highly-active and Durable Electrocatalyst for AEM and PEM Water Splitting	P2-2
Sambedan jena, Duy Thanh Tran, 김남훈, 인중환(전북대학교) P2-3 Ultrafine Nanoalloy Encapsulated in Graphitic Carbon Shells as a Highly-active and Durable Electrocatalyst for AEM and PEM Water Splitting	Large-area Drop-on-demand Inkjet Printing for Grid-type Patterned Flexible Transparent Electrodes ·· 307
P2-3 Ultrafine Nanoalloy Encapsulated in Graphitic Carbon Shells as a Highly-active and Durable Electrocatalyst for AEM and PEM Water Splitting	Sambedan jena, Duy Thanh Tran, 김남훈, <u>이중희(</u> 전북대학교)
P2-3 Ultrafine Nanoalloy Encapsulated in Graphitic Carbon Shells as a Highly-active and Durable Electrocatalyst for AEM and PEM Water Splitting Abhisek Mojumdar, Duy Thonh Tron, 김남훈, 이중희(전복대학교) P2-4 Iron oxide/graphene anchored carbon nanofiber based hybrid electrode for supercapacitor application 309 별옥경, 김남훈, 이중희(전북대학교) P2-5 항공기 에어덕트용 고온 적용이 가능한 실리콘 고무 컴파운딩 연구(Ⅲ) 이재효(다이텍연구원), 윤주영(우양신소재), 도성열(다이텍연구원) P2-6 Multi-Strategy Engineering of Earth-Abundant Electrocatalysts for Efficient Anion Exchange Membrane Water Electrolysis Water Electrolysis Boong Tuon Nguyen, Abhisek Mojumdar, Duy Thonh Tran, 김남훈, 이중희(전북대학교) P2-7 Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSe₂-supported Co₂P for Overall Water Splitting P2-7 Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSe₂-supported Co₂P for Overall Water Splitting P2-7 Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSe₂-supported Co₂P for Overall Water Splitting P2-8 P1-54 bitki 컨파운드 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합재료의 가공성 및 기계적 물성 향상 연구 913 의진오. 이재영, 이지은(한국소재용합연구원)	
Ouranie Naroalogy Enclapsulated in Graphitic Carbon Shelis as a Highy-active and Ourable Electrocatalyst for AEM and PEM Water Splitting	P2-3
Electrocatalyst for AEM and PEM Water Splitting	Ultrafine Nanoalloy Encapsulated in Graphitic Carbon Shells as a Highly-active and Durable
Abnisek Pidjumaar, Duy Inahn Iran, 심금훈, 이중의(전복대학교) P2-4 Iron oxide/graphene anchored carbon nanofiber based hybrid electrode for supercapacitor application	Electrocatalyst for AEM and PEM water Splitting
P2-4 Iron oxide/graphene anchored carbon nanofiber based hybrid electrode for supercapacitor application	Adnisek Majumdar, Duy Inann Iran, 김님훈, 이중의(전국내학교)
Iron oxide/graphene anchored carbon nanofiber based hybrid electrode for supercapacitor application	P7-4
application 309 <u>박옥</u> 경. 김남훈, 이중희(전북대학교) P2-5 항공기 에어덕트용 고온 적용이 가능한 실리콘 고무 컴파운딩 연구(III) 310 <u>이재호</u> (다이텍연구원), 윤주영(우양신소재), 도성열(다이텍연구원) P2-6 Multi-Strategy Engineering of Earth-Abundant Electrocatalysts for Efficient Anion Exchange Membrane Water Electrolysis 311 Hoang Tuan Nguyen, Abhisek Majumdar, <u>Duy Thanh Tran</u> , 김남훈, 이중희(전북대학교) P2-7 Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSe ₂ -supported Co ₂ P for Overall Water Splitting 312 Thokchom Anjali Devi, Duy Thanh Tran, Manoj Bollu, <u>김남훈</u> , 이중희(전북대학교) P2-8 마스터배치 컴파운드 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합재료의 가공성 및 기계적 물성 향상 연구 313 <u>이진</u> 우, 이재영, 이지은(한국소재융합연구원)	Iron oxide/graphene anchored carbon nanofiber based hybrid electrode for supercapacitor
박옥경, 김남훈, 이중희(전북대학교) P2-5 항공기 에어덕트용 고온 적용이 가능한 실리콘 고무 컴파운딩 연구(Ⅲ) ····································	application
P2-5 항공기 에어덕트용 고온 적용이 가능한 실리콘 고무 컴파운딩 연구(표) ····································	바오겨 기나흐 이주희(저부대하교)
P2-5 항공기 에어덕트용 고온 적용이 가능한 실리콘 고무 컴파운딩 연구(피) ····································	<u></u>
항공기 에어덕트용 고온 적용이 가능한 실리콘 고무 컴파운딩 연구(III) ··································	P2-5
<u>이</u> 재호(다이텍연구원), 윤주영(우양신소재), 도성열(다이텍연구원) P2-6 Multi-Strategy Engineering of Earth-Abundant Electrocatalysts for Efficient Anion Exchange Membrane Water Electrolysis	항공기 에어덕트용 고온 적용이 가능한 실리콘 고무 컴파운딩 연구(Ⅲ)
P2-6 Multi-Strategy Engineering of Earth-Abundant Electrocatalysts for Efficient Anion Exchange Membrane Water Electrolysis	<u>이재호(</u> 다이텍연구원), 윤주영(우양신소재), 도성열(다이텍연구원)
P2-6 Multi-Strategy Engineering of Earth-Abundant Electrocatalysts for Efficient Anion Exchange Membrane Water Electrolysis Water Electrolysis Hoang Tuan Nguyen, Abhisek Majumdar, Duy Thanh Tran, 김남훈, 이중희(전북대학교) P2-7 Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSe2-supported Co2P for Overall Water Splitting 312 Thokchom Anjali Devi, Duy Thanh Tran, Manoj Bollu, 김남훈, 이중희(전북대학교) P2-8 PL스터배치 컴파운드 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합재료의 가공성 및 기계적 물성 향상 연구 313 이진우, 이재영, 이지은(한국소재융합연구원)	
Multi-Strategy Engineering of Earth-Abundant Electrocatalysts for Efficient Anion Exchange Membrane Water Electrolysis	P2-6
Water Electrolysis 311 Hoang Tuan Nguyen, Abhisek Majumdar, Duy Thanh Tran, 김남훈, 이중희(전북대학교) 92-7 Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSe ₂ -supported Co ₂ P for Overall Water Splitting 312 Thokchom Anjali Devi, Duy Thanh Tran, Manoj Bollu, 김남훈, 이중희(전북대학교) 312 P2-8 마스터배치 컴파운드 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합재료의 가공성 및 기계적 물성 향상 연구 313 이직우, 이재영, 이지은(한국소재융합연구원) 92-9	Multi-Strategy Engineering of Earth-Abundant Electrocatalysts for Efficient Anion Exchange Membrane
Hoang Tuan Nguyen, Abhisek Majumdar, <u>Duy Thanh Tran</u> , 김남훈, 이중희(전북대학교) P2-7 Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSe ₂ -supported Co ₂ P for Overall Water Splitting	Water Electrolysis
P2-7 Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSe2-supported Co2P for Overall Water Splitting 312 Thokchom Anjali Devi, Duy Thanh Tran, Manoj Bollu, 김남훈, 이중희(전북대학교) P2-8 마스터배치 컴파운드 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합재료의 가공성 및 기계적 물성 향상 연구 이진우, 이재영, 이지은(한국소재융합연구원) P2-9 Encircipation Functional Action Functional Actions	Hoang Tuan Nguyen, Abhisek Majumdar, <u>Duy Thanh Tran</u> , 김남훈, 이중희(전북대학교)
P2 / Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSe ₂ -supported Co ₂ P for Overall Water Splitting	D)_7
for Overall Water Splitting ····································	Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSes-supported CosP
P2-8 P스터배치 컴파운드 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합재료의 가공성 및 기계적 물성 향상 연구 ···································	for Overall Water Splitting
P2-8 마스터배치 컴파운드 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합재료의 가공성 및 기계적 물성 향상 연구 ···································	Thokchom Aniali Devi Duv Thanh Tran Manoi Bollu 긴난호 이주희(저부대하교)
P2-8 마스터배치 컴파운드 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합재료의 가공성 및 기계적 물성 향상 연구 ···································	
마스터배치 컴파운드 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합재료의 가공성 및 기계적 물성 향상 연구	P2-8
<u>이진우</u> , 이재영, 이지은(한국소재융합연구원) P2-9	마스터배치 컴파운드 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합재료의 가공성 및 기계적 물성 향상 연구
P2-9	<u>이진우</u> , 이재영, 이지은(한국소재융합연구원)
P2-9	
Frankessing houses an alting interfaces for multi-functional equation 214	P2-9
Engineering numan-machine interfaces for multi-functional sensing	Engineering human-machine interfaces for multi-functional sensing
<u>Zhaoyang Sun</u> , 오일권(한국과학기술원)	Zhaoyang Sun, 오일권(한국과학기술원)
Engineering numan-machine interfaces for multi-functional sensing	P2-9 Engineering human-machine interfaces for multi-functional sensing

P2-10

탄소섬유 섬	실란 처리	두께에 따른	를 계면 -	특성 ·	분석	 315
<u>이동현</u> ,	지형진,	권동준(경상	;국립대학	학교)		

P2-11

Gallol-Modified Chitosan/Hyaluronic Acid Hydrogel Patches for Enhanced Wound Sealing and Healing ·· 316 <u>현다한</u>(경북대학교), 신현호(원광대학교), 박준석(칠곡경북대학교병원), 류지현(원광대학교)

P2-12

건물·	통합	태양광	시스템	적용을	위한	탄화	커피박	기반	친환경	단열	복합재료	<u>.</u>	· 317
김	성진,	장우석	, 배정의	원, 김성	!륜(전	북대학	학교)						

P2-13

Ionic Liquid-Embedded Soft	Composites for	Enhanced	Shockwave	Dissipation	•••••	
<u>박준우,</u> 이재준(부산대학교)						

P2-14

Lewis-Acid Etching-Derived Defect-Rich MoB MBene for Efficient Alkaline Hydrogen Evolution ………… 319 <u>Tan Dat Nguyen</u>, Thanh Hai Nguyen, Duy Thanh Tran, 김남훈, 이중희(전북대학교)

P2-15

Ra	ational Design	of Pt-l	based	Alloys	Anchoring	on MBe	nes as	Efficier	nt Elect	trocatalyst	for pH-u	niversal	
	Hydrogen Ev	olution	Reacti	on	••••••	•••••	•••••		•••••		•••••		320
	Penghao Zhu	, Jinhai	Yang,	Thanh	Hai Nguy	ren, Duy	Thanh	Tran,	김남훈,	이중희(전북	대학교)		

P2-16

Pt Single Atoms-Modified Ni2P/WS2 Heterojunction Catalyst for Overall Efficient Water Splitting …… 321 Jinhai Yang, Penghao Zhu, Thanh Hai Nguyen, Duy Thanh Tran, 김남훈, 이중희(전북대학교)

P2-17

Sy	/nergetic	Modu	ulation o	f Electronic	Pro	perties	of C	ore-Shell	Structured	Nickel	Sulfide	via	"Ru"	Single	
	Atom fo	r Effi	icient Ov	erall Water	Spli	tting …	•••••	••••••	•••••	•••••		•••••	•••••		322
	Naresh I	Raut,	Abhisek	Majumdar,	Duy	Thanh	Tran	, 김남훈,	이중희(전북디	배학교)					

P2-18

Hi	igh-Entropy	Intern	netallics	son	Graphe	ne O	xides a	as A	Bifund	tional	Effic	cient C	Catalysts	for	Overall	Water	
	Splitting			•••••			•••••	•••••	•••••	•••••			••••••	•••••	••••••		3
	Phan Khan	h Linh	<u>Tran</u> ,	Duy	Thanh	Tran,	Nguy	en T	'ram A	nh Du	iong,	김남훈	, 이중희(2	전북디	배학교)		

P2-19

R	uthenium	and	Manganese	-Doped	Cobalt	Telluride	Porous	Nano	sheet	for	Enhanced	Bifunctional	Catalysis
	in Alkalii	ne M	edium	•••••	••••••	•••••	•••••	•••••	•••••		••••••	••••••	
	Keshav	Raj (Chapagain,	Abhisek	Majumd	lar, Duy	Thanh	Tran,	김남훈,	0]-	중희(전북대	학교)	

P2-20

P2-21

Enhanced Stability of Sodium Battery via a Novel Polyanionic Carbonophosphate-Based Cathode …… 326 <u>김한빛</u>, Sambedan Jena, Duy Thanh Tran, 김남훈, 이중희(전북대학교)

P2-22

P2-23

P2-24

P2-25

P2-26

Enhancement of	electrical and	d mechanical	properties o	f polyamide é	composites	with m	etal-coated	
carbon fibers	and multi-wa	lled carbon	nanotubes ·····	••••••	••••••	••••••	••••••	· 331
김민수, 배경은	, 김성륜(전북대	학교)						

P2-27

Optimizing	the s	synergisti	c effect	of	boron	nitride	hybrid	fillers	for	enhanced	thermal	conductivity	/ in	
thermal	inter	face mate	erials (TI	Ms)	•••••		•••••	•••••	•••••	•••••	••••••			32
장승연,	김기훈	, 김성륜(>	선북대학교	Z)										

P2-28

P2-29

Preparation of Nanocellulose from Non-Wood and Its CNF/PAA/PANI Composite Multilayer Films ……… 334 <u>김정우</u>, 유승민, 권오훈, 김승근, 김병석(전북대학교)

P2-30

P2-31

Hierarchically Controlled Porous Electrode Materials with Ultra-Long Cycle Stability Derived from Alkali-Treated Cellulose for High-Performance Supercapacitor Application
<u>이계열</u> , 공건호 ,정일영, 김병석(전북대학교)
3부문. 성형 및 나노복합재료
P3-1
3-D 레이저 스캔 장비를 활용한 복합재 열변형 분석
P3-2
압축 성형된 CF/Epoxy SMC 부품의 리브 구조에 대한 조사 및 성형 해석
P3-3
Effect of Optimized Curing Condition of Epoxy Resin on the Thermal and Mechanical Properties of
Glass Fiber Reinforced Plastics
P3-4
기능화된 탄소나노튜브섬유와 폴리아닐린 기반의 고강도 섬유형 슈퍼커패시터 ····································
P3-5
AFP(Automated Fiber Placement) 적충 조건에 따른 CFRP 성형성에 관한 연구
P3-6
Development of solid-state hybrid capacitor using carbon nanotube film as current collector 343 <u>박영진</u> , 우동욱, 전재영, 이군배, 정연수(한국재료연구원), Patrick Juhyun Kim(경북대학교), 김태훈(한국재료연구원)
P3-7
Investigation of Synergistic Effects on Thermal Conductivity in 2D GO/BN Hybrid Films via Optothermal Micro-Raman Technique
<u>김송미</u> , 이지은, 황상하(고등기술연구원)
P3-8
복합 난연제 배합에 따른 BFRP 특성 연구
<u>유다현</u> , 문소윤(한국세라믹기술원)
P3-9
Ultrasound-induced reactive wetting of Field's Metal onto Iron plates
왕세순, 강영우(서강대학교), 오영석(한국재료연구원), 김상엽(서강대학교)

P3-10

Enhanced Resin Impregnation in CNT film-Based Composites via Ultrasonication-Assisted De-bundling ·· 347 <u>권혁제</u> , 김태겸, 성동기(부산대학교)
P3-11
머신 비전을 이용한 면내 투과성계수 측정 장비의 유동 선단 측정 자동화 ···································
P3-12
MXene/CNT hybrid film for electromagnetic interference shielding film
P3-13
연속성형공정이 적용가능한 열가소성복합재 성형요소 연구
<u>김지민</u> , 임경서, 엄문광, 김진수(한국재료연구원)
P3-14
에틸 시아노아크릴레이트의 경화에 의한 표면 구조화 및 초소수성 특성 연구
<u>최헌주</u> , 조한동(목포대학교)
P3-15
Enhanced thermal conductivity and electrical insulation of polyetherimide-based composites
<u>송진우</u> , 김상엽(서강대학교)
P3-16
탄소나노튜브 섬유 기반 흑연 음극 배터리 제조
<u>박주현,</u> 최송규, 이균배, 장진호, 정연수(한국재료연구원), 성동기(부산대학교), 김태훈(한국재료연구원)
P3-17
Influence of CNT Fiber Stacking Structures on the Electrical and Mechanical Performance of CFRP ···· 355 <u>허수정</u> , 신주은, 성동기(부산대학교)
P3-18
Improved Epoxy Impregnation into CNT Film via Ionic Liquid-Assisted Process with Electrical System 356
<u>허수민</u> , 김태겸, 성동기(부산대학교)
P3-19
Development of Self-Healing Nanofiber-Reinforced green Composites for Enhanced Damage Recovery…357 <u>Xusheng Liu</u> , M.N. Prabhakar 이동우, 송정일(창원대학교)
P3-20
기계적 특성 향상을 위한 탄소나노튜브 섬유 표면 개질
<u>장진호</u> , 박경태, 이균배, 정연수(한국재료연구원), 이제인(부산대학교), 김태훈(한국재료연구원)
P3-21
촉매가 포함된 탄소나노튜브 집전체를 활용한 리튬황 전지 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
<u>김현우</u> , 이균배, 박영진, 정연수(한국재료연구원), 김주현(경북대학교), 김태훈(한국재료연구원)

P3-22

실리콘/탄소나노튜브섬유(CNTF) 기반 고에너지밀도·경량 전류 집전체 개발 ···································	·· 360
P3-23 Fabrication of high-performance CNT film-based composite by inducing nondestructive expansion using electrolysis <u>김태겸</u> , 성동기(부산대학교)	··· 361
4부문. 세라믹 복합재료	
P4-1 Study on the Characteristics of Ceramic-Coated Separator for LIBs using Fine Boehmite powder <u>김진애</u> , 오지희, 이동원(한국산업기술시험원), 신원호, 오종민(광운대학교)	362
P4-2 산화물계 소재에 따른 리튬이온배터리용 세라믹 코팅 분리막의 성능 평가	363
P4-3 입자 크기에 따른 흐름 및 응집 특성 분석 방법의 최적화 연구 ···································	··· 364
P4-4 수소전기차 전장 모듈용 3W/Mk 이상급 고방열 갭 필러 개발에 대한 실험 및 해석적 연구	365
P4-5 분말 조성 기반 B ₄ C-SiC 복합재의 기계적 특성 ···································	366
P4-6 HfC-SiC 나노복합섬유의 소결 거동 및 미세구조 변화 ···································	367
P4-7 흄드실리카 함양이 메타카올린 기반 지오폴리머 복합재의 미세구조 및 기계적 물성에 미치는 영향	·· 368
5부문. 에코·바이오 고분자	
P5-1 CFRP 및 알루미늄 휠의 진동 특성 분석에 대한 연구	369
P5-2 일체형 탄소섬유 월의 복합 하중 조건 응력 분석 연구	370

P5-3

Facile Fabrication of Mechanically Robust and High Filler Loading Graphite-Polystyrene Composite for Electromagnetic Interference Shielding Md Monir Hossain, 정현오, 장세규(한국과학기술연구원)
P5-4 Enhancing Fire Retardant properties of Cotton via Layer-by-Layer Deposition Using Halloysite Nano clay
P5-5 Synthesis and Characterization of Thermoplastic Polyurethane (TPU) from Bio-based Polyester Polyol ··· 373 <u>김대신</u> , 조보현, 천지원, 이동진(한국소재융합연구원)
P5-6 투명한 우주 방사선 차폐 필름 제조를 위한 폴리아미노보레인 합성 연구 ···································
P5-7 전기방사를 통한 폴리비닐 알코올/질화붕소나노튜브 섬유 합성 연구 ···································
P5-8 재활용을 위한 열경화성 수지 분해의 가속화 방안 연구 ···································
P5-9 테일러-쿠테 유동 및 수중대향충돌 기반 분쇄공정을 통한 멍게 유래 셀룰로스 나노섬유 제조
P5-10 Engineering Cellulose Nanoparticles with High Ice-Nucleating Efficiency for Enhanced Cloud Seeding ·· 378 <u>우홍균</u> , 이혜미, 김정규, 박성민, 엄준식, 이재준(부산대학교)
P5-11 천연자원 기반 화학적 재활용이 가능한 에폭시 수지 개발 및 CFRP 적용 ···································
P5-12 Ascorbic acid 기반 바이오 에폭시 수지 시스템 ···································
P5-13 화학적 분해 가능성이 있는 재활용 가능한 커큐민 기반 바이오 에폭시 수지의 합성

P5-14

폴리아닐린 필러의 도핑상태가 에폭시 수지의 열전도도에 미치는 영향
<u>우예원,</u> 차영우, 고문주(건국대학교)
P5-15
Oxime ester 결합 기반 화학적 재활용 가능한 신규 epoxy 수지
<u>이주영</u> , 홍영기, 고문주(건국대학교)

포스터 발표 2

6부문. 탄소·섬유재료

P6-1

자동	차·	복힙	재료용	탄소섬유	부직포	중간재의	물성분석	••••••	•••••		·· 387
	권오.	<u>훈</u> ,	강진균,	, 강건웅,	이건희(ECO융합	섬유연구원),	김승근(지리산한지),	김강재,	박재형(경북대학교)	

P6-2

P6-3

Ef	ffect	of	Atmo	ospheri	c Plasma	Surface	Treatment	on the	Mechanical	Properties	of Recycled	Carbon	
	Fibe	er R	leinfo	rced T	hermoset	t Plastic "	••••••		••••••		••••••		390
	강성	현,	한웅,	김민경	(한국탄소	산업진흥원), 김병주(전	주대학교), 김관우(한-	국탄소산업진흥	<u></u> 동원)		

P6-4

개발	극세	유리섬유	및	원단의	물성	연구	 . 39	71

<u>백영민</u>, 김영운, 김정수, 장우리, 신평수, 황예은(ECO융합섬유연구원)

P6-5

P6-6

P6-7

전기자동차	전장부품용 언	빈프라 소재 기반	복합재료의	기계적 및	열적 특성	연구	••••••	394
임재욱,	최상윤(럭키언	녠프라), 박재형,	이지은, 빜	<u>·현주</u> (한국소	재융합연구	원),	이진홍(부산대학교)	

P6-8

P6-9	
PSA 공정용 첨착활성탄소 제조 및 가스 흡착 성능 연구 ···································	• 396
P6-10	
Cycloaddition Functionalization of Carbon Nanotube Fibers for Improved Electrical Conductivity <u>하승호</u> , 박경태, 이균배, 정연수, 김태훈(한국재료연구원)	• 398
P6-11 차여차다용 여소서청 봉하대로 투서여기	. 200
<u>강지만</u> , 김만성, 김현지(한국섬유개발연구원)	577
P6-12	
Scalable Roll-to-Roll Fabrication of Lightweight and High-Durability Copper/Carbon Fiber Wire for	
Electromagnetic Shielding	· 400
<u>강기환</u> , 안주영, 김원석(한국탄소산업진흥원)	
P6-13	
PBO 고분자를 이용한 습식방사 기반 다중벽 탄소나노튜브 섬유(MWCNTFs) 제조	· 402
<u>백수현</u> , 구본철, 김서균(한국과학기술연구원)	
P6-14	
부유선별 무연탄을 이용한 열플라즈마 응용 탄소소재 개발	· 403
<u>경규홍</u> (영월산업진흥원), 연정미(철원플라즈마기술연구원), 신효준, 엄민주, 이용현(영월산업진흥원)	
P6-15	
Inspiring Photocatalytic Cr(VI) Reduction in $Ti_3C_2T_X$ MXene-modified ZIF-67/gC ₃ N ₄ via S-Scheme and	
Ohmic Junctions	· 404
<u>Lekha Paramanik</u> , Lagnamayee Mohapatra, 유승화(전북대학교)	
P6-16	
CFRP-CP 내부 콘크리트의 배합에 관한 연구	· 405
<u>김정회</u> , 정원식(아이에스동서)	
P6-17	
AFP 적층용 탄소 UD Tape 복합재료 Veil 소재 연구	• 406
<u> 김현지</u> , 강지만(한국섬유개발연구원), 김정철, 정종민(한국카본)	
P6-18	
열플라즈마법을 활용한 폐음극재 재생기술 개발	· 407
<u> 연정미</u> , 서인규, 김승민, 민경용, 임형섭, 강윤지, 최선용(철원플라즈마산업기술연구원)	
P6-19	
POSS를 도입한 PBO 나노복합체 섬유의 기계적 특성 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	· 408
<u>장용원</u> , 차태민(포항소재산업진흥원)	

P6-20
Forward osmosis-based ion recovery from spent lithium-ion batteries using a nanoporous graphene
oxide membrane ····································
<u>김정필</u> , 정현수(한국과학기술연구원), 김대우(연세대학교)
D/ 01
PO-21 다양하 형태이 폐 CERP 스크랜이르브터 탄소선으를 히스하기 의하 하하바온 신허반번로 저요 사례
기나혀 하재혀 기주여(카테에이치)
P6-22
Characterization of PES-Based Carbon Fiber Composites for 3D Printed Molds in VARTM Process 412
<u> 심영진</u> , 박종현(고등기술연구원), 최홍관, 서태철(쓰리디팩토리), 노형도(한양대학교), 황상하(고등기술연구원)
임조임당 중가에 따른 놀리엄꼬미될 심유의 난외경양 문식 ···································
<u>성 당신</u> , 농성과(인국접표기계융합인구현)
P6-24
그래핀 구조체를 이용한 열-전기변환 전지의 안정성 향상 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~
<u>한정민</u> , 신민기, 김태우(인천대학교)
P6-25
전자빔 조사가 단일벽탄소나노튜브(SWCNT) 내 족매 제거에 미치는 영향 분석 ···································
<u>김지현</u> , 유승와(선묵대학교)
P6-26
High-Efficiency Carbon Fiber Recovery Method and Characterization of Carbon Fiber-Reinforced
Epoxy/4,4'-Diaminodiphenyl Sulfone Composites
<u>이용민</u> , 김민경, 한웅(한국탄소산업진흥원), 김병주(전주대학교), 김관우(한국탄소산업진흥원)
P6-27
Multi-scale Modeling and Numerical Simulation of Fatigue Damage in Woven Composite Materials
Bowen Zheng, 김태리, 윤군신(서울대악교)
P6-28
BTO-P(VDF-TrFE) 기반 PENG 소자 내 탄소나노튜브 마이크로스캐폴드 통합을 통한 압전발전 성능 향상 420
<u>박종원</u> , 김광준, 김민욱, 옥종걸(서울과학기술대학교)
P6-29
반응 가스 유동 제어를 통한 다층 그래핀 합성
<u> 박광수</u> , 석지원(성균관대학교)
P4-30
Development of polycyclooctene carbon fiber
<u> </u>
P6-31

Defect Engineering through electron beam irradiation on TiO_2/MX ene to enhance photocatalytic
hydrogen evolution
<u>Subhashree Sabnam</u> , Lagnamayee Mohapatra, Lekha Paramanik, 유승화(전북대학교)
P6-32
복합소재 FDM 출력물의 굽힘 거동 분석을 위한 AM-공정 연계 구조해석 424
<u>설영훈</u> , 이긍현, 김정민(금오공과대학교), 윤민호(서울시립대학교), 한장우(금오공과대학교)
D4-22
고친 직증 판 이혼 꽃 성영-구조 면제 해직 영안을 활용한 단점유 경화 독립조세 구조물의 기계적 거흥 미교 ***********************************
<u>김정민</u> , 이긍현, 설영훈, 곽윤기, 한장우(금오공과대학교)
P6-34
니가중6 MWCRT/GNF Hybrid buckypaper. 전자파 자세 및 돌 기일 등8
우가현,김재후, 박종혁(한국과학기술연구원), 한태희(한양대학교), 이해석(고려대학교), 이웅, 김재우(한국과학기술연구원)

P6-35

P6-36

P6-37

Efficient Hydrogen/Deuterium Exchange of hydrocarbons in D₂O using Electron beam Irradiation ……… 429 Ithape Chetan Sharad, Lekha Paramanik, 유승화(전북대학교)

P6-38

P6-39

<u>황진욱</u>, 탁우성, 김경원(부산대학교), 조용준(한국세라믹기술원), 정영근(부산대학교), 김우식(한국세라믹기술원)

P6-40

 Rapid and Universal Electrochemical Enhancement of Carbon Nanotube Fibers for Energy Storage ······ 433

 이승주, 한민국, 정혜원, 천다연(한국과학기술연구원), 정희태(한국과학기술원), 정현수(한국과학기술연구원)

P6-41

P6-42

파크골프 클럽용 계층적 구조 탄소섬유 복합재의 감쇠 성능 연구	436
7부문. 구조·시스템	
P7-1	
HVOF 화염 유동 환경에서의 열 유속 조건에 따른 티타늄 합금 (Ti-6Al-4V)의 열 보호 특성 평가 ···································	437
P7-2	
변형률 속도에 따른 탄소 섬유 복합재와 유리 섬유 복합재의 기계적 거동 분석 ···································	439
P7-3	
제작 공정별 CFRP 섬유부피분율 및 기공율 분석에 관한 연구	440
<u>백중택,</u> 최수정, 이준숭, 문지훈(경북테크노파크), 박종관(태성에스엔이), 주성욱(경북테크노파크)	
P7-4	
MAT_4A_MICROMEC모델을 활용한 섬유강화 복합소재의 거동 특성 분석	• 441
<u>배덕근</u> , 황문영(한국자동차연구원), 강우종(경일대학교)	
P7-5	
단일 노치 인장 시험을 통한 고탄성 탄소섬유 복합재의 면내 균열 양상 비교 ···································	442
P7-6	
흡습에 따른 Epoxy Molding Compound의 기계적 물성 변화 ···································	443
P7-7	
이미지 분석 기법을 활용한 스티칭 된 탄소섬유강화 복합소재의 두께에 따른 박리 특성 연구	444
<u>이부건</u> , 배곽진(한국과학기술연구원), 김한규(Mississippi State University), 유재상(한국과학기술연구원)	
P7-8	
CFRP 복합재 구조의 공정 유도 변형을 고려한 형상 보정 설계 ~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	445
<u>김동협</u> , 김상우, 이 수용 (한국항공대학교)	
8부문. 로봇 및 자동화	
P8-1	
복각 조절형 리베팅 시스템 자동화를 위한 작업자 중심 설계 및 편의성 분석	446
<u>채석민</u> , 차재호(대구기계부품연구원), 김철규(케이디엠테크), 박기진(대구기계부품연구원)	
P8-2	
Helical Liquid Crystalline MoS2 Fibers for Versatile Wearable Sensors	447
<u>박준현</u> , 김봉훈(대구경북과학기술원)	

P8-3
Bio-Inspired and Wearable Sensors for Camouflage in Aquatic-Environment ······· 448 <u>김봉훈</u> (대구경북과학기술원)
P8-4 Sputtering-Based Interfacial Control and Artificial SEI Javor Formation in Lithium Metal Patterios www.449
<u>이삭</u> , 박준섭, 김현영, 한희, 조홍석, 안치원, 조수호(나노종합기술원)
P8-5
Shape Memory Alloy-Based Tensile Activated Kirigami with Enhanced In-plane Deformation for
Robotic Applications ····································
P8-6
Synthesis of nano Prussian Blue and its magnetic derivatives
P8-7
Biopolymer based multi-vapor responsive soft actuators ······ 452 <u>Vipin Kumar</u> , 오일권(한국과학기술원)
P8-8 베○지안 최적화 기반의 고용량 Na ₃ V ₂ (PO ₄) ₂ F ₃ 양극 소재 설계 ······· 453 <u>박상현</u> (한국과학기술원), 심윤수(LG에너지솔루션), 허준표, 지상현(한국과학기술원), 전동민, 이찬우(한국에너지기술연구원), 육종민(한국과학기술원)
P8-9
Guided Nanopattern Formation in Block Copolymer Films Using Temporary Thickness Gradients
P8-10
Laser-Directed Orientation of High-X Block Copolymers for Precision Nanopatterning on Silicon 455 <u>이지민(</u> 대구경북과학기술원), 진형민(충남대학교), 김봉훈(대구경북과학기술원)
P8-11
Dynamic Aquatic Camouflage System Inspired by Reef Squid Transparency 457
최준석, 김봉훈(대구경북과학기술원), 한승호(성균관대학교), 원상민(한국전자기술연구원)
P8-12
Extending the working range of a conductive ink-based textile Sensor 458 전은성, 김범수, 김상엽(서강대학교)
P8-13
다공성 탄소질 구형체 기반 로봇 개발
<u>윤동혁</u> , Ashhad Kamal Taseer, 오일권(한국과학기술원)

P8-14

맞춤형 2D 오그제틱 구조 기반 프로그래머블 구동 특성 연구	460
P8-15	
NdFeB-PDMS가 패턴된 이온성 고분자 기반 전기-자기 반응형 액추에이터	••••• 461
P8-16	
김현영(충남대학교), 김영실, 박준섭, 한희, 조홍석, 안치원, 조수호(나노종합기술원)	402
P8-17	
가변 강성 SMP 기반 모션 적응형 접착 전환 테셀레이션 피부 패치	463
P8-18	
가변 강성 SMP 복합소재 기반 자기 구동 소프트 인공근육 개발	464
P8-19 High-Porformanco Ristable Soft Actuator Enabled by Elastic Instability and Shano Momony Alloy	
	465
Yang Yang, 지원희, 노재우, 오일권(한국과학기술원)	
P8-20	
Nafion 필름의 레이저 각인을 통한 패턴된 IPMC actuator의 성능향상	466
P8-21	
자기 복합재 기반 3차원 오그제틱 구조체의 설계 및 기계적 특성 분석 ···································	467
P8-22	
3D 프린팅을 위한 액체 금속 복합 잉크의 전기-자기적 특성 분석 ···································	468
P8-23	
양력 제어들 위한 구조석 패터닝된 단풍씨앗 생체 모사 소프트 액주에이터	469
P8-24	
Optimized Electrodeposited Black Nickel Coatings for Enhanced Solar Thermal Collector Performance	e ·· 470

. <u>Akash Deo</u>, 오일권(한국과학기술원)

P8-25

P8-25
글로브타입 오그제틱 구조 형상기억합금 기반 착용형 햅틱 인터페이스
오세웅(Georgia Institute of Technology), 장재형, <u>지원희</u> , Yang Yang, Mannan khan(한국과학기술원),
Carmel Majidi (Carnegie Mellon University), 유지환(Georgia Institute of Technology), 오일권(한국과학기술원)
P8-26
Vacuum-driven Class-2 Tensegrity-based Mechanism for Quadrupedal Robot Motion
<u>이주오</u> , Hugo Rodrigue(성균관대학교)
P8-27
넓은 압력 범위와 장기 안정성을 갖춘 초고감도 피라미드 하이드로젤 압력 센서 473
<u>강병수</u> (서강대학교), 문승언, 김정훈(한국전자통신연구원), 강성민(서강대학교)
P8-28
기하학적 모델을 통한 삼축 브레이드 복합재의 기계적 물성 분석 474
<u>김원기</u> , 김원빈, 임수현, 이준호, 박종인, 김성수(한국과학기술원)
포스터 발표 3
9부문. 스마트 및 신뢰성
P9-1
- / 고성능 재료의 극한 충돌 시험 및 분석 ··································
박제희, 김윤호(서울대학교)
P9-2
고온 소재 평가 방법 개발 현황
<u>강태응</u> , 최병우, 배경훈, 이종광(한밭대학교)
P9-3
Debonding Diagnosis of Co-Cured CFRP/PVC Foam Core Sandwich Composites by UT A-Scan ········· 477 <u>정원종</u> , 장우철, 노형도(한양대학교)
P9-4
주기 패턴이 적용된 유리섬유강화플라스틱 시편 제작
<u>배경훈</u> , 강태웅(한밭대학교), 백상민(국방과학연구소), 이종광(한밭대학교)
10부문. 융복합 기술
P10-1
유도가열 시뮬레이션 정확도 개선을 위한 복합재료 물성 분석 연구
<u>백인석</u> , 김나영, 김진수, 엄문광, 오영석(한국재료연구원)
P10-2
자기강화 PET 복합재의 기계적 특성에 대한 수 환경의 영향성 평가 480
<u>김세윤(</u> 컴퍼지트솔루션즈), 이교문, Amuthesan Manikkavel, 김윤해(한국해양대학교)

P10-3 천연섬유 부산물 활용 다공질 부직포 반발 탄성 특성 분석
P10-4 Preparation and Characterization of Hydrogel Ophthalmic Lenses Using MXene/Silver Nano Composite ·· 482 <u>남혜원</u> , 성아영(대구가톨릭대학교)
P10-5 Optimization and Analysis of TRIS-based Silicone Hydrogel Lens Materials
P10-6 WBG 전력반도체 접합용 저온소결 은 나노페이스트 484 <u>김윤아</u> , 윤호연(성균관대학교), 김민수, 유민주(한국생산기술연구원), 김현국, 박동환(에이치엘옵틱스), 임병권(성균관대학교)
11부문. 방산
P11-1 무기고분자를 기지재로하는 내열 구조용 탄소섬유 강화 복합재료 개발
P11-2 3D Woven 복합재 L-조인트의 Pull-off 강도 특성 ···································
P11-3 Optimization of High-Toughness Epoxy Resin System for Mass-Produced Composites 487 <u>김병주</u> , 원종성, 이형익, 이만영(국방과학연구소)
P11-4 Study on Surface Modification of Ultra High Modulus Carbon Fibers through UV-ozone Treatment 488 <u>김미나</u> , 원종성, 이은혜, 이지은, 이만영(국방과학연구소)
P11-5 Synthesis of High Heat-Resistant Resin with Enhanced Thermal Properties
P11-6 Molecular Dynamics-Driven Insights into Pyrolytic Carbon Interfaces: Bridging Theory and Experiment in C/SiC Composites <u>이정민</u> (국방과학연구소), 정지원(서울대학교), 김연태, 길태건, 원종성, 김경범, 이만영, 이형익, 조용윤, 이지은(국방과학연구소), 윤성태, 권향주, 박태민(데크카본), 윤군진(서울대학교)

D11_7

P11-7 효율적인 화학작용제 차단을 위한 산화 그래핀과 고분자를 이용한 멤브레인 제조 ···································
P11-8 산화 그래핀(GO)과의 복합화를 통한 금속-유기 골격체의 물성 변화와 제독능의 비교
P11-9 탄소나노튜브를 이용한 에폭시 매트릭스 복합체의 기계적 특성 및 방탄성능 효과 ···································
12부문. 인프라·해양
P12-1 배관의 진원도 확보를 위한 보정 장치 적용 및 구조해석 연구 ······· 494 윤성원, <u>박창욱</u> (중소조선연구원)
P12-2 액화수소 이송용 이중진공배관 설계 건전성 분석 ···································
14부문. 친환경·에너지·미래자동차
P14-1 압축성형공정을 고려한 CFRP 제품의 구조강도 해석에 관한 연구
P14-2 CFRP 자동차 외장 부품의 외관 품질 결함을 해결하기 위한 저수축 에폭시 퍼티 개발
P14-3 변성 폴리우레탄을 활용한 유리섬유 SMC 중간재 제조 공정 및 물성 개선 연구
P14-4 Designing Hybrid structure on Carbon Framework Promoting Active Sites and higher current density Hydrogen Evolution
P14-5 Mechanically robust and recyclable CO ₂ -derived poly(carbonate) vitrimers
P14-6 탄소 자원화(CCU) 기술 기반 모빌리티 내장재 직물코팅 연구

<u> 손경태</u>, 박수경(부성티에프시)

P14-7

PE분리막 두께 측정을 위한 테라헤르츠파 중첩신호 분리 기법에 관한 연구	503
P14-8 MoS ₂ -Encapsulated SiO ₂ Nanoparticles for Enhanced Humidity-Resistant Triboelectric Nanogenerators in Self-Powered Gas Sensing <u>김도헌</u> , 백정민(성균관대학교)	504
P14-9 Esterification-Mediated Synthesis of High-Density Cu Single-Atom Catalysts for Selective CO ₂ Electroreduction to C ₂₊ product <u>AT</u> , 백정민(성균관대학교)	505
P14-10 Robust output performance of Moisture Electricity Generator via asymmetric water absorption regulatoin 류호준, 백정민(성균관대학교)	506
P14-11 Advanced Dielectric Properties of BaTiO ₃ @Additives@SiO ₂ Core-double Shell Structure via Co-precipitation Method for Multi-Layer Ceramic Capacitor (MLCC) ···································	507
P14-12 Self-Adaptive Bidirectional DC Triboelectric Nanogenerator with Integrated Mechanical Switching for Reliable Reciprocating Motion Energy Harvesting 채준민, 이동한, 조수민, 최동휘(경희대학교)	508
P14-13 Electret Film-Induced Charging and Electrostatic Manipulation of Droplets ······ <u>이동한</u> , 오정석, 최동휘(경희대학교)	509
P14-14 Enhancing Hydrogen Evolution Reaction Performance through Vacancy-Engineered Transition Metal Oxide Composites <u>송병곤</u> , Benzhi Wang, 정형모(성균관대학교)	[.] 510
P14-15 ZIF-8-Derived Nickel Catalysts for Efficient Polysulfide Immobilization and Conversion in Li-sulfur Batteries	· 511
P14-16 Lithium-Ion Transport Regulation Using 2D Transition Metal Oxide Nanosheets for a Dendrite-Free Lithium Metal Anode	· 512

<u>김동형</u>(성균관대학교), 박희정(단국대학교), 정형모(성균관대학교)

P14-17 나노셀룰로오스 기반 벌크 구조의 제조 및 물성 분석
P14-18 금속-유기 골격체 특성 기반 에너지 하베스터 ····································
P14-19 Three-dimensional structured fiber shaped advanced hybrid electrode materials for Supercapacitors… 515 <u>김민섭</u> , 김정길, 김민지, 김민우, 김남동(한국과학기술연구원)
P14-20 Synthesis of Carbon Nanohorn and its Application in Carbon-Metal Composite Catalyst for Water Splitting 516 김홍범, 김민우, Balaji Ravichandran, 김정길, 김민섭, 김민지, 김남동(한국과학기술연구원)
P14-21 아크 방전을 통한 이종원소 도핑된 결정성 탄소 물질의 합성 및 응용 ··································
P14-22 소수화 처리된 CNF를 컴파운딩한 Poly(lactic acid)복합재의 향상된 열적 및 기계적 물성
P14-23 수직 접촉 분리 모드 마찰 대전 발전 소자에 대한 통합된 이론 모델 ···································
P14-24 Ultrathin Biocompatible Multifunctional Polymeric Films for TENG Energy Harvesting and Flame-Retardant Coatings via Automated LbL Coating Process
P14-25 Enhancing Antibacterial Activity through Electrical Stimulation from Triboelectric Nanogenerator Using Hydrogel
P14-26 교차 센서 기반 실시간 위치 감지 시스템
P14-27 TPU-CNT 복합 열전 필라멘트 기반 3D 프린팅 EMI 차폐 필름 제작

P14-28

자동차 축의 회전력을 이용한 자가적응형 TENG/EMG 시스템	25
P14-29 친환경 제독제 제독성능향상을 위한 MOF와 건식 첨가물의 복합화	26
P14-30 이소시아네이트 개질 된 CNF 필러가 경질 폴리우레탄 폼의 압축 강도에 미치는 영향	27
P14-31 실란 증착을 통한 고정밀 금 나노입자 수소/이산화탄소 분리막 ···································	29
P14-32 Multifunctional Interface Engineering for Large-Area Vacuum-Deposited Perovskite Solar Cells with Air Annealing	30
P14-33 Design of a Protective Layer to Mitigate Self-Corrosion in Aluminum Anodes for Aluminum-Air Batteries	31

Yen Linh Nguyen, 권순형, 정형모(성균관대학교)





과학기술, 오늘을 변화시키고 내일을 열다 Science and technology, changing today and opening tomorrow

*김영식 ¹ * Y.S. Kim^{1,+}

¹국가과학기술연구회 ⁺E-mail: yskim@nst.re.kr

Keywords: Science and Technology, technomics, NST, GRIs

1. 시대 변화의 원동력, 과학기술

과학기술은 시대 변화를 일으키는 원동력이다. 1차 산업혁명부터 지금 막 꽃을 피우고 있는 4차 산업혁명을 거치면서, 과학기술은 정치·경제·사회, 안보 등 국가 전반에 걸쳐 지대한 영향을 미치고 있다.

2. 우리나라 과학기술 수준과 중국의 대약진

우리나라 역시 과학기술의 중요성을 인식하고 지속적으로 관련 재정을 투입한 결과, 2022년 기준 GDP 대비 R&D 투자 비중은 OECD 국가 중 2위를 차지 했다. 다만, 과학기술 발전은 다면적이어서 연구 개발비의 양적 증가에만 기대하기는 어려운 실정이다.

우리나라 과학기술 수준은 2022년 기준으로 미국, EU, 중국, 일본 등 주요국 중 최하위 수준으로 분석되었다. 최고 기술 보유국(미국, 100%) 대비 한국은 81.5%의 수준이며, 중국은 82.6%로 상대적인 약진이 두드러졌다[1]. 1인당 연구개발비의 경우 2021년 기준으로 한국과 중국은 비슷한 수준(약 18만 달러 선)이었지만, 현재는 이마저도 중국이 추월한 상황이다[2].

중국이 이렇게 급속히 성장한 배경에는 정부 주도의 연구개발과 과학기술 인력 육성에 대한 집중 투자가 있다. 중국통계국에 따르면 2024년도 기준 중국의 R&D예산은 약720조원에 이르며, R&D 인력 확보에도 총력을 기울이고 있다. 그 결과, 중국 R&D 전체 인력은 2022년을 기준으로 2013년부터 세계 1위(241만명)를 유지 중이며, 이는 한국(49만명)의 4.9배 수준이다 [3].

과거 양적 우위를 가지고 쏟아내던 논문들도 이제는 질적 경쟁력까지 확보하고 있다. 2022년도 기준 최근 5년간 SCI논문 피인용 횟수도 중국이 미국을 제치고 세계 1위를 기록하고 있다(한국은 13위)[4].

대한민국 위기의 심화, 그 해결책은 과학기술

인구감소국인 우리나라는 새로운 도약과 쇠퇴의 갈림길에서 있다. 신성장모델을 발굴하여 성장-정체-쇠퇴의 기존 성장모델에서 돌파구를 찾아야 하는 상황이다. 과학기술이 시대 변화의 원동력이라는 역사적 사실에 비추어 볼 때 과학기술의 위기는 곧 국가경쟁력의 위기이다. 역사적 교훈에 따라, 새로운 도약을 위한 신성장모델의 주역은 과학기술이어야 한다.

다행히도 우리나라 재료 분야에서는 국가 과학기술 발전에 기여하는 다양한 성공사례가 창출되고 있다. NST 소관 한국재료연구원은 코로나로 인해 수요가 확대되는 항균 소재 기술을 토대로 연구원 제2호 창업 기업을 설립하였고, 창업 1년만에 기업가치 120억원을 달성하였다. 인공지능과 재료 분야를 융합하여 성과를 창출한 사례도 있다. 한국화학연구원은 대학과 공동연구를 통해 물질의 화학식 정보만으로 합성에 필요한 최종 재료 물질을 예측하는 인공지능 방법론을 개발한 바 있다.

4. 과학기술 발전을 위한 NST 및 출연(연) 역할

NST를 비롯한 23개 정부출연연은 기술패권 시대에 중요한 미래 혁신기술 개발의 개척자 역할을 요구 받고 있다. 이를 성공적으로 수행하기 위해서는 최초 연구기획부터 수요처를 분명히 하는 완결형 과학기술 혁신이 중요하다. 기획단계부터 연구목표를 명확히 하고 개발과정부터 사업화를 연계·지원하여 결국에는 연구성과가 대형 기술이전이나 창업으로 이어져 국가 경제와 사회적 가치창출에 기여하는 역할로 변모하도록 노력해야 할 것이다.

참고문헌

- [1] '22년도 기술수준 평가, KISTEP, 2024.
- [2] 22년도 연구개발활동조사, 과학기술정보통신부, 2024.
- [3] ·22년도 주요국 연구개발인력 현황, KISTEP, 2024.
- [4] '22년도 한국의 과학기술논문 발표 및 피인용 현황, KISTEP, 2024.



- 3 -

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

구조용 접착제 솔루션 소개 Introduction of Structural Adhesives Solutions

*Hanbyol Shim¹, Junhyeoung Kim² ¹IATD of 3M Company, ²AASD of 3M Company ⁺E-mail: hshim2@mmm.com

Keywords: Structural adhesive, epoxy, acrylic, urethane

1. 3M에서 구조용 접착제의 역사

1950년대 미군 항공 분야에서 3M 구조용 접착제가 첫 적용이 된 이래로, 3M은 구조용 접착제 분야에서 70년 이상의 경험을 가지고 있습니다. 6개의 주요 케미스트리를 바탕으로 액상, 필름, 테이프를 포함한 다양한 형태로 제품을 생산해 오고 있으며, 가장 적용이 어려운 곳에서 혁신적인 접착 솔루션을 개발해 오고 있습니다.

2. 구조용 접착제 개론

2.1 구조용 접착제 소개

구조용 접착제는 높은 하중을 견디며, 1000 psi (7 MPa) 이상의 중첩전단강도를 보이는 접착제를 일컫습니다. 이는 좁은 접착 면적에 높은 접착력을 필요로 하는 경우에 사용되며 기계적 혹은 열적 체결 방식을 대체할 수 있습니다. 일반적으로 우수한 내환경성, 내용제성, 및 내열 특성을 가지고 있습니다.

2.2 구조용 접착제의 주요 장점

구조용 접착제는 강한 접착을 바탕으로, 높은 접착력, 내충격성, 및 실링 특성을 제공합니다. 또한 디자인의 유연성을 더욱 확보할 수 있어 심미적으로 더 나은 디자인, 소음, 진동 감소를 통한 더욱 우수한 제품 품질, 및 이종소재를 접착할 수 있습니다.

3. 3M 주요 접착제 케미스트리

3.1 에폭시계 접착제

에폭시계는 특히 금속 소재에 가장 우수한 접착강도를 보입니다. 표준 에폭시계(5분의 가사시간을 가진 단단한 에폭시계)는 탄성이 저하된 특성을 보이기 때문에 상대적으로 적은 응력과 충격을 견뎌야 하는 용도에 적합합니다. 유연한 에폭시계는 우수한 박리강도를 가지고 충격에 보다 우수한 내구성을 가지고 있기 때문에 유연하고 구부러짐을 요구하는 용도에 사용되기에 좋습니다. 취성강화 에폭시 (toughened epoxy)는 충격을 흡수할 수 있는 탄성 영역을 함유하고 있는 제품으로, 가장 우수한 전단강도, 박리강도, 내진동, 내피로도를 가집니다. 이런 특징으로 인해 취성강화 에폭시 제품들은 상당히 까다로운 용도에 사용하기에 적합합니다. 그러나 일반적으로 에폭시계를 사용하기 위해서는 표면의 오염물질을 엄격히 제거하는 것을 필요로 합니다.

3.2 아크릴계 접착제

아크릴계는 플라스틱에 가장 우수한 접착력을 보이며, 금속 그리고 방청유 처리된 금속에도 적합한 접착력을 보입니다. 반면에 이는 에폭시계와 비교하여 낮은 진동 저항성/내 충격성을 가짐으로 낮은 내피로성을 보인다는 점과, 고온 환경에서 상대적으로 낮은 접착력을 가진다는 약점을 가지고 있습니다. 최근 이런 약점을 극복한 다양한 신제품이 3M에서 출시되고 있는 상황입니다.

3.3 우레탄계 접착제

우레탄계는 상당히 유연하여 외부 충격에 대한 우수한 저항성을 가지고 있지만 특히 높은 온도에서 낮은 접착강도를 보이는 약점을 가지고 있습니다. 다양한 소재 예를 들어 플라스틱, 나무, 금속에 잘 접착이 되며, 다른 종류의 구조용 접착제와 비교하여 상대적으로 낮은 가격을 형성하고 있습니다.

4. 결론 및 향후과제

항공 및 자동차 분야의 글로벌 소재 업체로, 3M은 보다 효과적이고 안전한 소재를 제공하기 위해 노력하고 있습니다. 3M 구조용 접착제의 material data card 제공을 통해 고객의 새로운 디자인 모델링시에 보다 정확한 예측을 가능하게끔 도움을 드리고 있으며, 접착 공정의 자동화 교육, 데모를 통해 보다 효율적인 접착 공정이 가능하게끔 지원을 드리고 있습니다. 복합재료고객과의 보다 긴밀한 협력을 요청드립니다.

후기

2025년 봄 학술대회의 특별 세션에 참석하여 3M 구조용 접착제에 대해 설명할 기회를 주신 것에 대해 깊은 감사를 드립니다.

접착제 접합 구조물의 설계 및 해석 Design and Analysis of Adhesive bonded Structures

*김광수 ¹ * K.S. Kim¹

¹ 한국항공우주연구원 우주발사체연구소 발사체구조팀 ⁺E-mail: kskim@kari.re.kr

Keywords: Adhesively bonded joints, Adhesive, Composite structure, Joint design and analysis

1. 서론

경량화, 성능향상, 비용 절감 및 극한환경에서 내성 등을 위해 항공우주분야를 중심으로 복합재료의 사용이 증가하고 있다. 복합재료 구조물에서 접착제를 이용한 접합 조인트는 여러가지 이점을 제공한다. 예를 들면, 패스너를 이용한 기계 조인트에 비해 균일한 하중전달 및 응력집중의 감소, 얇은 접착 부재의 사용, 접합에 의한 부품 수 감소, 조인트 하중 능력 및 강성의 증가, 부드러운 외부 표면, 우수한 피로성능, 기밀 성능 부여 등이 있다. 이러한 장점은 결과적으로 비용감소 및 경량화에 도움을 줄 수 있는 장점들이다[1.2].

접합 조인트의 단점 또한 존재한다. 표면 처리와 같은 본딩공정에 대한 민감성, 정확한 본딩 검사의 어려움 등이 대표적이라고 할 수 있다. 또 한가지는 접합 조인트의 설계 해석이 다른 일반적인 구조 설계 해석보다 어렵다는 점도 언급할 수 있을 것이다.

본 논문은 복합재료 구조물에서 적용되는 접착제 접합 조인트에 대한 설계 해석 방법 및 사례에 대해 발표하고자 한다.

2. 접합 조인트 설계

접착제 접합 조인트의 설계에 대해서는 single lap, double lap 등 다양한 조인트 형상 및 연결 방식을 나열하고조인트 강도 효율을 상대적으로 비교한 내용, 접합길이에 따른 응력분포, 바람직한 조인트 하중 형태, 접착 길이와 두께의 적절한 선정, 접착 조인트 설계 시 고려사항 등 조인트 설계를 위한 가이드 라인을 기술자료 및 논문에서 찾을 수 있다[1,2].

이러한 접합 조인트의 설계 핵심은 조인트 형상(전단 형태가 효율적임)과 접착제(및 접합공정)을 적절하게 선정하고 접합 조인트의 전달 응력을 균일하게 하여 최대 응력을 감소하는 것이라고 할 수 있다.

하지만 구체적으로 설계를 진행하게 되면 조인트 내부 응력 분포에 영향을 미치는 항목 뿐만 아니라 조인트 허용강도에 영향을 미치는 많은 사항을 고려하고 결정해야 한다. 예를 들면, 접합부재 종류, 접착제 선택(경화조건, 강도, 환경 특성 고려), 표면 처리 방법(세척, 샌딩, 프라이머), 조인트 형상, 접착 면적, 파손 모드, 환경조건, 품질 검사 방법 등과 연계해서 설계를 진행해야 한다. 또한 접합 조인트는 구체적인 조인트 형상, 치수 및 본딩 공정에 따라 접합 조인트 허용 강도가 영향을 받기 때문에 설계를 확정하기 위해서는 접합 조인트에 대한 시험평가를 병행해서 수행하여야 한다.

3. 접합 조인트 해석

접합 조인트의 해석방법은 크게 두가지로 나눌 수 있다. 첫번째는 이론식을 이용한 해석적 방법으로 single-lap, double-lap 조인트와 같이 비교적 간단한 형상에 대해 응력 또는 변형률 분포 및 최대값을 계산하는 방법이다. 해석적인 방법은 여러가지 가정을 포함하기 때문에 실제 상황과 맞지 않는 부분이 발생할 가능성이 있으므로 이를 KDF(Knock Down Factor) 또는 보정계수 등으로 보정할 수 있다.

특

별

세

셔

두번째는 유한요소해석과 같은 수치 해석적인 방법이며 복합한 형상 및 하중조건의 본딩 조인트를 해석하기 위해서는 FEM과 같은 수치적인 방법이 필수적이다. 또한 정확한 수치해석을 위해서는 접착제 층의 끝단에서 발생하는 응력 특이점을 고려할 수 있도록 모델링을 반영해야 한다. 파손 평가 기준에 대해서는 응력 및 파괴역학적 모델을 고려하게 된다. 본 논문 발표에서는 복합재료 접합 조인트에 대한 몇가지 수치해석방법의 적용 사례[3-5]를 살펴볼 것이다.

4. 결론 및 향후과제

본 논문은 2025년 복합재료 춘계학술대회의 '접착재료의 개요, 개발, 적용 및 발전방향'이라는 특별세션으로 준비한 것으로 복합재료 구조물에서 적용되는 접착제 접합 조인트에 대한 설계 해석 방법 및 사례에 대해 소개한다.

참고문헌

- [1] ECSS-E-HB-32-21A Adeshive bonding handbook, 2011.
- [2] DOI:10.2478/tar-2021-0004, eISSN 2545-2835.
- [3] KS Kim et al. Composite Strucutres, 71, 2006, pp.477-485.
- [4] KS Kim et al. Key Enginnering Materials, 2007, pp.181-184.
- [5] KS Kim et al. Composite Strucutres, 82, 2008, pp.513-520.

이종소재 간 접착 강도 및 내구성 향상을 위한 모재 및 강화재 표면처리 연구 Surface Modification of Substrates and Reinforcements for Enhancing Adhesion

Strength and Durability in Dissimilar Material Bonding

김종현¹, 이동현², * 권동준^{1, 2+} J.H. Kim¹, D.H. Lee², * D.J. Kwon²⁺

¹ 경상국립대학교 그린에너지융합연구원, ² 경상국립대학교 나노신소재융합공학과 ⁺E-mail: djkwon@gnu.ac.kr

Keywords: Surface modification, Adhesion strength, Durability, Dissimilar material bonding

1. 서론

이종소재의 활용이 증가함에 따라, 금속-복합재 및 기타 하이브리드 구조재의 접착 강도와 내구성을 향상시키는 기술개발이 중요한연구 과제로 부각되고 있다. 전통적인 기계적 결합 방식은 소재 손상과 응력 집중 문제를 초래할 수 있으며, 용접은 열경화성 복합재 적용이 어렵다는 한계를 가진다. 이에 따라, 접착 결합이 효과적인 대안으로 주목받고 있으며, 특히 나노소재 기반 접착제 보강과 표면처리 기술이 계면 접착력 및 장기 신뢰성을 개선하는 전략으로 연구되고 있다 [1]. 본 연구에서는 이종소재 간의 접착 성능을 극대화하기 위해 모재 및 강화재의 표면처리 기법을 최적화하고, 이를 통해 접착 강도와 내구성을 향상시키는 방안을 제시하고자 한다.

2. 기재 표면처리를 통한 접착 특성 향상

2.1 기재 표면거칠기에 따른 접착 특성 향상

기재 표면거칠기는 접착제와 기재 간 기계적 결합을 강화하며, 표면 거칠기가 증가할수록 접착제의 침투 효과가 향상되어 접착 강도가 증가한다. 사포 처리, 샌드블라스팅 등의 기법을 통해 접착 계면의 유효 접촉 면적을 확대할 수 있지만, 과도한 거칠기는 응력 집중과 공극 형성을 유발할 수 있어 최적의 조절이 필요하다 [2].

2.2 기재 화학적 개질에 따른 접착 특성 향상

기재의 화학적 개질은 표면 에너지를 증가시키고 반응성 작용기를 도입하여 접착력을 강화하는 효과적인 방법이다. 플라즈마 처리, 산화 처리, 실란 커플링제 적용 등을 통해 화학적 친화도를 높이고, 실란처리는 접착제의 가교 반응을 촉진하며 플라즈마 처리는 표면 오염 제거와 극성 작용기 형성을 통해 접착 성능과 내구성을 개선할 수 있다.

강화재 도입 및 표면처리를 통한 접착 특성 향상

3.1 강화재 도입에 따른 접착 특성 향상

강화재는 접착제의 기계적 성질을 향상시키고 계면 강도를 증대시키는 중요한 요소로, 탄소 나노튜브, 할로이사이트 나노튜브, 나노실리카 등의 나노 보강재가 주로 활용된다. 이러한 나노소재는 접착제 내부에 균일하게 분산되어 전단 강도, 인성 및 내구성을 증가시키며, 피로 수명과 충격 저항성 을 개선하는 효과가 있다. 특히, 하이브리드 나노 보강재의 도입은 복합적인 성능 향상을 통해 접착 강도를 극대화할 수 있다.

3.2 강화재 화학적 개질에 따른 접착 특성 향상 강화재의 화학적 개질은 접착제와의 계면 친화성을 높여 접착 성능을 극대화하는 중요한 전략이다. 실란 커플링제 처리, 플라즈마 개질, 산화 개질 등의 기법을 통해 강화재의 표면을 기능화하면, 분산성이 향상되고 접착제 내에서의 계면 결합력이 증가한다. 특히, 이미다졸 개질 HNT는 경화 촉진 효과를 제공하여 접착제의 경화 속도를 증가시키고 열적·기계적 성질을 개선하는 데 기여할 수 있다 [3].

4. 결언

이종소재의 접착 성능을 극대화하기 위해서는 기재와 강화재의 표면처리 기술이 필수적이다. 기재의 표면 거칠기 조절은 접착 계면의 기계적 결합을 강화하며, 화학적 개질은 계면 친화도를 높여 접착 강도를 향상시킨다. 또한, 강화재의 도입은 접착제의 기계적 성질을 개선하고, 나노보강재의 화학적 개질은 분산성과 계면 결합력을 증가시켜 접착 내구성을 극대화할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 표면처리 및 보강 기법을 최적화하여 하이브리드 구조재의 접착 성능을 향상시키는 방안을 제시한다.

참고문헌

[1] DJ Kwon et al. Polym. Test. 93:106995, 2021.

[2] DJ Kwon et al. Compos. B: Eng. 170:11-18, 2019

[3] JH Kim et al. Adv. Compos. Hybrid Mater. 8(1):135, 2025.

후기

This work was partly supported by National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education and the Ministry of Science and ICT (No. 2020R1A6A03038697 and RS-2023-00211944); and by the Glocal University 30 Project Fund of Gyeongsang National University in 2024. 특

항공산업에서의 접착제 적용 및 개발방향 Adhesive Application and Development in Aerospace Industry

김희성¹, 안교진¹, *송민환¹ H.S. Kim¹, K.J. An¹, ^{*}M.H. Song¹

¹ 한국항공우주산업㈜ ⁺E-mail: mhsong@koreaaero.com

Keywords: Adhesive, Bonding, Aerospace

1. 서론

항공산업에서 접착제는 금속 및 비금속 부품의 결합과 밀봉 등 다양한 용도로 활용되며, 항공기의 경량화와 성능향상에 중요한 역할을 하고 있다. 본 연구는 항공 기에 적용되는 주요 접착제의 사례 분석과 국내 접착 제 개발 현황을 검토하며, 항공용 접착제의 개발 방향 및 애로사항을 논의하는 것을 목표로 한다.

2. 접착제 분류 및 적용 사례

항공기 제작간에는 부품간 결합 및 밀봉 목적으로 여러 종류의 접착제가 적용되고 있다. 형상 별로는 크게 필름형, 액상형, 테이프형으로 나눌 수 있으며, 용도 별로는 샌드위치 구조 접착, 이차 접합(Secondary Bonding) 등의 구조용 접착제와 브라켓(Bracket), 클립 (Clip) 접합 등의 비 구조용 그리고 낙뢰 보호 목적의 특수 목적용 접착제로 구분 할 수 있다. 특히 항공기 구조용 재료로 많이 적용되는 복합재, 알루미늄 및 티타늄과 같은 이종재료간의 접합에는 높은 내구성과 환경 저항성을 갖춘 접착제가 필수적이다. 국산 군용 기 플랫폼에는 설계 요구조건을 만족하는 에폭시, 아 크릴 등의 접착제가 기체구조 중량비의 약 5%, 규격서 종류로는 약 50 여종이 적용되고 있다.

3. 접착재료 국산화 및 규격화 사례

항공산업의 원가 경쟁력, 소재 수급 안정화 및 연관 산업의 경쟁력 강화를 위해 항공소재 국산화가 국내 에서 활발히 진행되고 있으며, 접착제의 국산화 또한 점진적으로 이루어지고 있다. 특히 수요기업인 우주 항공 체계업체와 소재 전문업체와의 협업을 통해 접착제 및 실란트 국산화 개발이 활발히 진행중이며, 이 중 구조용 에폭시 접착제의 경우 Fig.1의 개발 과정을 거쳐 국산화 개발을 완료하였다. 또한 이를 통해 해외 항공사 및 OEM 업체와의 협력 기회 확대를 모색하고 있다.



Fig. 1. Flow Chart of Adhesive Development

4. 결론 및 향후과제

항공용 접착제 시장은 소요 물량이 적고, 고도의 신뢰 성과 인증이 요구되는 특성이 있다. 이러한 이유로 국내에서는 독자적인 접착제 개발 및 대량 생산이 어려우며, 해외 선진 기업에 대한 의존도가 높은 실정이다. 이를 해결하기 위해서는 국내 항공기 개발 사업을 테스트베드로 활용하여 인증 사례를 축적 하면서 국내 시험 인프라를 구축하는 것이 필요하다. 또한, 해외 인증 기관과의 협력을 강화하고, 초기 단계에서부터 글로벌 표준을 고려한 소재 개발 전략을 수립하는 것이 중요하다. 최근 친환경, 고내열, 고 내구성 접착제 개발이 중요한 화두로 떠오르고 있으며, 해외 선진기업 또한 친환경을 고려한 제품 개발로 방향을 전환하고 있다. 본 연구는 이러한 배경을 바탕으로 항공용 접착제의 적용 및 개발 사례를 통해 기술 현황과 발전 방향을 제시하고, 국내 기업의 글로벌 시장 진출을 위한 전략적 접근 방향을 공유 하고자 한다.

자동차 산업에서의 구조용 접착제 적용사례 및 발전방향 Application Cases and Development Direction of Structural Adhesives in the Automotive Industry

*이춘수¹, 신성철² * C.S. Lee¹, S.C. Shin²

¹ 현대자동차 차량재료개발실, ² 현대자동차 표면처리재료개발팀 ⁺E-mail: cslee@hyundai.com, vvvici@hyundai.com

Keywords: Structural Adhesives, Adhesives, Application cases, Development Direction

1. 서론

자동차 산업은 경량화, 연비 효율성, 그리고 충돌 안전성 향상을 목표로 지속적인 기술 발전을 이루고 있다. 이러한 요구에 따라 구조용 접착제는 기존의 용접 및 볼트 체결 방식의 한계를 극복할 수 있는 대안으로 주목받고 있다. 특히, 알루미늄 및 복합소재와 같은 경량화 소재의 사용이 증가함에 따라 구조용 접착제의 적용 범위는 더욱 확대되고 있다. 이에 자동차 산업에서의 구조용 접착제 적용 사례를 분석하고, 향후 발전 방향을 제시하고자 한다.

2. 구조용 접착제 개요

2.1 구조용 접착제 정의 및 특징

구조용 접착제는 차량의 차체, 샤시 판넬 등 주요 구조 부위를 결합하기 위해 사용되는 고강도 접착제로 차체강성, 충돌성능, NVH 성능 향상을 위해 사용된다. 구조용 접착제는 다른 접착제와 마찬가지로 기계적 결합, 화학적 결합, 분자간 인력을 통해 피착재와 결합되며 에폭시, 우레탄, 실란, 아크릴 등의 구조용 접착제가 널리 사용되고 있다.



Fig. 1. Structural adhesive application areas and features

2.2 기존 접합방식(기계적 결합)과의 차이점

기존 기계적 결합 방식은 종류에 따라 이종소재 접합이 어려운 경우도 있으며 열에 의한 소재 변형, 국부 응력이 집중된다는 단점이 있다. 또한 고강도 소재에 적용이 어려운 기계적 결합 방식도 있다. 반면에 접착제는 열에 의한 소재 변형이 없으며 이종소재간 결합 및 응력 분산, 고강도 소재에 적용이 가능하다.

3. 자동차 산업에서의 적용 사례

초기부터 현재까지 가장 널리 사용되는 구조용 접착제는 에폭시 기반의 열경화 타입의 접착제로 차체공정에서 용접부위에 용접과 함께 적용된 후 도장공정의 오븐에서 경화되어 성능을 발휘하게 된다. 초기에는 강성 보강만을 위해 사용되었으나 현재에는 강성 뿐만 아니라 충돌성능도 향상시킨 구조용 접착제가 널리 사용되고 있다. 추가적으로 도장공정 오염을 최소화할 수 있는 고점도 에폭시 구조용 접착제, 차체의 제진성을 향상시킬 수 있는 제진 구조용 접착제도 적용하고 있는 추세이다.

최근에는 차체 조립방식이 변경되고 CFRP, 알루미늄 등과 같은 경량 차체가 적용되면서 상온에서 경화가 가능한 상온경화 접착제의 적용이 확산되고 있다. 이 밖에도 EV 차량 배터리의 열관리가 가능한 열전도율 향상 접착제 등이 있다.

4. 구조용 접착제의 발전방향

최근 환경 및 재활용에 대한 니즈가 높아지면서 차체 부품 재활용을 용이하게 하기 위한 분리용이 접착제 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 이는 사용 시에는 충분한 접착강도를 가지며 필요한 때에는 외부 자극에 의해 빠르게 접착강도가 저하되는 접착제로 외부 자극에는 열이나 전기 등이 있다. 또한 EV 차량 증가로 인해 모터에도 사용 가능한 고내열 접착제 적용도 검토 중이다. 끝으로 접착제의 Trade-off 관계에 있는 접착력과 신율을 동시 향상시키기 위해 두 개 이상의 수지를 혼합한 접착제의 개발이 끊임없이 이루어지고 있다.

5. 향후 전망

구조용 접착제는 차체 경량화, 충돌성능, NVH 개선을 위해 필수적으로 필요한 재료로 자동차 제조 공정의 효율성을 높이고 지속가능한 기술로 발전 중이다. 향후 변화되는 자동차 제조 방식 및 신규 경량소재에 적합하면서 친환경, 초고성능, 다기능의 접착제가 지속적으로 개발될 것으로 예상된다.

접착제 원료로써의 에폭시 수지의 이해와 응용 Understanding and Applications of Epoxy Resins as Adhesive Materials

*김민영 ¹ * Minyoung Kim ¹

¹ 국도화학주식회사 ⁺E-mail: mykim@kukdo.comc

Keywords: Epoxy Resin, Adhesive, Wind Blade, Aerospace

1. 서론

에폭시 수지는 접착제를 비롯하여 다양한 산업 분야에서 폭넓게 사용되는 열경화성 고분자 재료로, 우수한 기계적 물성, 내화학성, 내열성 및 우수한 접착 특성 등으로 인해 구조용 접착제의 대표적인 원료로 자리매김하였다. 특히, 에폭시 수지는 경화 과정에서 수지와 경화제 간의 반응을 통해 강력한 3차원 가교 구조를 형성하며, 이로 인해 높은 접착 강도와 뛰어난 내구성을 나타낸다. 이러한 장점들은 항공, 우주, 풍력 발전 등과 같이 극한 환경에서 작동하는 고성능 접착제에 있어 에폭시 수지를 필수적인 원료로 만들고 있다. 본 발표에서는 접착제 원료로써의 에폭시 수지의 기초적인 화학 구조, 경화 메커니즘, 주요 특성을 소개하고, 이를 기반으로 한 실제 응용 사례를 고찰한다.

2. 에폭시 수지의 기본 구조 및 경화 메커니즘

접착제 원료로써의 에폭시 수지에 대한 전반적인 이해를 돕기 위해 에폭시 수지의 기본적인 화학적 구조, 물성 및 경화 메커니즘에 대해 간략히 소개한다. 디글리시딜 에테르 형태로 대표되는 에폭시 수지의 분자구조와 에폭시 그룹의 특성을 중심으로, 대표적인 경화제(아민계, 무수물계 등)의 종류와 특성에 따른 물성 변화를 설명한다. 또한, 에폭시 수지 기반 접착제의 물리적 및 기계적 특성 평가 방법에 대해서도 다루며, 특히 접착 강도, 인장 전단 강도 및 충격 강도 측정과 같은 대표적인 평가법을 소개한다.

2.1 풍력발전기 블레이드 접착제 개발

풍력발전기는 극한의 환경 조건에서 장기간 높은 기계적 부하와 진동, 온습도 변화에 노출되므로 블레이드의 내구성과 신뢰성을 확보하는 것이 필수적이다.블레이드 접착에 사용되는 에폭시 수지의 필수 요구 성능, 즉 장기간 유지되는 우수한 접착력, 피로 저항성 및 내환경성을 확보하기 위한 소재 설계 방향과, 저밀도 첨가제를 이용한 경량화 및 접착제 점도의 조절 등 국도화학의 개발 방향등을 소개한다. 또한, 블레이드 생산 공정에 최적화된 에폭시 수지의 경화 특성 조정 및 자동화 생산을 위한 점도 관리 기술 등 실제 현장에서 요구하는 기술적 사항에 대해서도 논의한다.

2.2 우주항공 분야의 응용

최근들어 우주항공 분야에서 요구하는 고성능 구조용 접착제 및 접착 필름 개발에 대한 연구 현황을 소개한다. 우주항공 분야에서는 접착제의 극한 환경 내구성, 경량성 및 높은 접착 강도가 필수적이며, 현재 국내외 연구기관에서 이를 만족시키기 위한 다양한 에폭시 수지 기반 접착 시스템이 활발히 연구 중이다. 특국도화학에서 개발하고자 하는 상온 및 저온에서 높은 접착 성능을 유지하면서도 경량화등을 개선하기 위한 다기능성 에폭시 수지 개발 현황에 대해 소개한다.

4. 결론 및 향후과제

에폭시 수지 기반 접착제 개발에 있어 극복해야 할 기술적 한계와 향후 연구 방향성을 제안한다. 본 발표를 통해 에폭시 수지 기반 접착 기술의 현재 상태를 명확히 이해하고, 향후 연구개발에 있어 해결해야 할 과제 및 기술적 도전 과제를 함께 논의함으로써 관련 연구의 발전과 산업 현장에서의 실질적 활용을 촉진할 것으로 기대된다.

항공우주산업에서의 구조용 접착제의 개요와 활용 Structural adhesives for aerospace applications

*테드 완 ¹ * Ted Wan

¹ Henkel Aerospace APAC Application Engineering ⁺E-mail: ted.wan@henkel.com

Keywords: Structural Adhesives, Epoxy Paste, Epoxy Film, Light Strike, UAM

1. 서론

민항기, 군용기 그리고 미래항공모빌리티 등 다양한 항공기체에서 복합재를 활용한 동체 및 구조체 제작이 일반화 되었다. 소재나 산업의 특성상 경량화, 고강도, 신뢰성 등 요구되는 사항이 복잡해 졌으며, 개발자나 사용자가 선택할 수 있는 옵션도 다양해졌다.

실제 연구개발이나 양산의 과정에서 쉽게 적용할 수 있고 요구조건에 적합한 구조용 접착제를 선택할 수 있는 방안을 소개하고자 한다.

2. 구조용 접착제

2.1 에폭시 페이스트 / 필름 접착제

중요한 항공기 부품의 구조적 무결성을 유지하기 위해, 제조업체는 복합 재료 부품을 결합할 수 있는 적합한 접착제를 필요로 한다. 이 접착제는 뛰어난 화학적 저항성과 탁월한 기계적 성능을 제공해야 한다.

본 발표에서 소개할 제품은 복합 재료 결합에 필요한 모든 요구 사항을 충족하며, 엔지니어들이 효율적인 구조물을 설계할 수 있게 한다. 추가적인 물리적 고정이 필요 없고, 접착 두께가 낮고 복합 재료의 강성 특성을 잘 활용할 수 있으며, 이종 재료 사용의 효용성을 제공하는 다양한 제품과 솔루션을 소개한다.

2.2 낙뢰 충격 보호 (Lightning Strike Protection)

항공기와 같은 운송 수단에서는 낙뢰 충격으로부터 기체를 보호하는 것이 매우 중요하다. 번개가 항공기에 충돌할 경우, 그 충격은 항공기 구조와 전자 장비에 심각한 손상을 줄 수 있어 이를 방지하기 위해 항공기에는 다양한 낙뢰 충격 보호 시스템이 적용된다

복합 재료는 전도성이 낮기 때문에, 항공기 구조는 전도성이 좋은 재료로 설계되어 번개가 항공기를 통과하여 지면으로 안전하게 흐를 수 있도록 해야 한다. 이를 위해 전도성 메시(mesh) 또는 금속망이 적용되며, 이는 항공기의 다양한 형상에 맞게 제작되어 제조와 수리가 가능하다.

3. 도심항공모빌리티에서의 구조용 접착제 사례

도시생활의 트렌드가 전 세계적으로 계속 성장함에 따라, 새로운 혁신적인 도심 항공 모빌리티(Urban Air Mobility, UAM) 어플리케이션에 대한 수요도 증가하고 있다. 실제 국내에서도 유수의 해외 파트너들과 기체 및 시스템 개발을 협업하고 있으며, 정부의 지원과 독려도 적극적으로 이루어 지고 있다.

수십 년의 경험을 바탕으로 혁신적인 기술을 개발해온 접착 솔루션 제조사가 시장을 선도하는 공급업체들과 협력하여 eVTOL 드론과 기체 설계를 개선하고 지원하여 적용된 도심항공모빌리티 솔루션과 그 사례를 소개한다.



Fig. 1. Structural film adhesives application.

4. 결론 및 향후과제

산업이 발달하고 다양한 재료가 개발되어 새로운 소재에 대한 접착솔루션의 기대 또한 높아질 것이라 판단된다. 다양한 산업과 다른 국가의 개발/적용사례 등 집적된 정보와 기술들을 국내에도 소개하여 국내 산업발전에도 지속 공헌할 예정이다.

소재업체의 접착재료 개발 및 소개 Introduce and Develop adhesive materials from material manufacturer (SYENSQO)

*현동근 ¹⁺, Kingsley Kin Chee. Ho¹, 전지현¹, 구지수¹ * D.K. Hyun¹⁺, K.K.C. Ho¹, J.H. Jeon¹, J.S. Ku¹

> ¹ 사이언스코(Svensgo) ⁺E-mail: dongkeun.hyun@syensqo.com

Keywords: Adhesive, Fuseply, Aeropaste, Co-bonding, Secondary bonding

1. 서론

두가지 이상의 소재를 결합한 복합소재는 경량 및 고강성의 강점으로 항공산업의 주요 구조물로 이용되고 있다. 복합소재를 적용한 신기종의 개발로 인해 그 사용량이 급증하고 있으며, 소재 시장은 더욱 치열한 시장 경쟁 환경이 조성이 되고 있다. 전 세계 복합재료 시장은 22년부터 27년동안 약 6.45%의 연평균 성장률로 171억달러까지 성장할 것으로 예상하고 있다. [1]

항공 부품 제조사들은 항공기 무게 절감을 위해 다양한 방법의 제조 방법을 고민하고 있다. 작은 다품 단위의 부품에서 최근에는 일체화 및 대형화된 부품 제작을 통해 무게 절감을 연구하고 있다. 특히나 일체화 부품 제작에서 기존의 기계적 체결에서 접착제를 이용한 제조 방법이 주목을 받고 있다. 이로 인해, 소재 업체에서는 다양한 종류의 접착제를 연구하고 있으며, 새로운 제품을 매년 복합소재 시장에 선보이고 있다.

2. 접착제 제품의 기술 개발 동향

2.1 Aeropaste 1003

2024년 JEC에서 새롭게 소개한 Aeropaste 1003 (이하 AP1003)은 상온에서 경화가 진행되는 고성능 페이스트 접착제 제품이다. 기존 Aeropaste 제품들은 모두 일정 온도 이상에서 경화가 진행되면서 접착력을 가지는 제품들이였지만, 이번에 개발된 AP1003은 상온에서 경화를 할 수 있는 고성능 페이스트 접착제이다. 상온에서 경화를 진행함에도 불구하고 금속 및 복합재 가능하며. 구조물 접착제로 사용이 현장 수리용으로 용이하게 사용할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한, 간단한 혼합비 (2:1)을 가지고 있어 실제 현장 사용시 간편하게 제품을 섞어 사용할 수 있다. [2]

2.2 Fuseply

항공기 부품들이 최근 무게 절감의 요구에 따라 대형 및 일체화로 제작이 되어 지고 있다. 이로 인해 많은 제조사들이 일체화를 위한 본딩 소재 및 관련 기술에 큰 관심을 가지고 있다. Fuseply는 기존 공정인 Co-bonding 및 Secondary bonding 진행하면서, Peel ply 공정을 그대로 대신 Fuseply를 사용하는 방식이다. 경화될 부품의 본딩 영역에 Fuseply를 사용하여 부품을 경화 후 Fuseply의 film을 제거하게되면 경화된 부품의 표면에 20 ~ 70 µm 두께의 화학 Laver를 형성하게 된다.

특

별

세

셔

형성된 Layer는 추후 Co-bonding 및 Secondary bonding에 사용하는 접착제 (필름 또는 페이스트)와 함께 경화하면서 접착력을 높여주는 역할을 한다. Fuseply는 화학적 결합을 통해 해당 접착력을 더욱 높여, 설계 및 제작 측면에서 부품의 건전성 및 품질을 일정하고 개선할 수 있는 역할을 하고 있다. 동 제품은 현재 무게 절감에 상당히 높은 요구도가 발생하고 있는 Advanced Air Mobility (AAM) 분야에서 많은 관심을 가지고 있다.



2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

3. 결론

최근 주목받고 있는 무게 절감을 위한 일체화 공정 기술에 대해 소재업체인 SYENSQO에서도 관련 기술의 다양한 적용을 위해 새로운 접착제들을 개발하고 시장에 소개하고 있다. 이는 부품 제조사와 함께 항공산업의 발전 및 긴밀한 발전관계를 구축하여 신기술 발전에 많은 시너지 효과를 낼 것으로 전망된다.

참고문헌

- [1] Composite Materials Market Analysis, www.technavio.com.
- [2] Syensqo Engineered Materials, AEROPASTE 1003 TDS.
- [3] Syensqo Engineered Materials, FUSEPLAY 350 TDS.

Soft Sweat Microfluidics as a Diagnostic Platform

*Da Som Yang ¹⁺ ¹ Mechanical Engineering Department, Chung-Ang University ⁺E-mail: <u>dsyang@cau.ac.kr</u>

Keywords : Microfluidics, Wearable Sensors, Cystic Fibrosis, Disease Screening

1. Introduction

Non-invasive monitoring of biomarkers through eccrine sweat has emerged as a valuable approach for continuous health assessment and early disease diagnosis. Traditional wearable sweat sensors are generally limited in their precision, comfort, and ability to analyze diverse biomarkers simultaneously. Cystic fibrosis (CF). characterized by elevated chloride levels in sweat, exemplifies a clinical scenario that would greatly benefit from wearable sweat monitoring technology. Current clinical practices employ bulky, hospital-based equipment requiring trained personnel, limiting widespread use. There is thus a clear need for an advanced, user-friendly wearable technology capable of precise, multi-biomarker sweat analysis with minimal invasiveness [1].

2. Methods

2.1 Device Fabrication

The wearable platform integrates an iontophoresis-based active sweat stimulation system and a microfluidic channel network. Flexible printed circuit boards (fPCBs) incorporating gold electrodes facilitate iontophoretic delivery of pilocarpine, inducing localized sweating. Microfluidic structures are fabricated using soft, flexible polydimethylsiloxane (PDMS), including precisely designed microreservoirs and capillary bursting valves to ensure controlled, sequential filling. Hydrogel layers containing pilocarpine enable non-invasive activation of eccrine sweat glands.

2.2 Biomarker Detection

Colorimetric assays for chloride (silver chloranilate), zinc (5-Br-PAPs and salicylaldoxime), and iron (Ferene-S) were integrated directly into separate reservoirs, enabling simultaneous multi-biomarker analysis. Calibration of assays was performed using controlled standard solutions, validated through both optical image analysis and UV-visible spectroscopy.

3. Results and Discussion

The wearable platform demonstrated accurate sweat biomarker quantification with minimal volumes (2-3 μ L), significantly reducing the amount required compared to traditional clinical methods. Colorimetric assays provided clear, rapid, and quantitative readouts, covering clinically

relevant concentration ranges (chloride: 0-100 mM, zinc: 0-30 µM, iron: 0-20 µM). On-body trials involving healthy adults showed significant physiological variations in biomarker concentrations before and after meal intake, correlating well (r > 0.89, p < 0.01) with laboratory ICP-MS analysis. Further clinical validation with pediatric CF patients revealed chloride concentration measurements comparable to standard hospital-based sweat tests (Macroduct system), confirming diagnostic-grade accuracy. Additionally, measurements of zinc and iron provided valuable insights into potential nutritional deficiencies common in CF populations. Comfort and usability assessments indicated superior patient compliance and reduced discomfort compared to conventional clinical devices.



Fig. 1. Cystic fibrosis Lab Assessment Patch.

4. Conclusions

This study introduced a novel wearable platform that successfully combines active sweat induction via iontophoresis with passive, colorimetric sensing in a soft, flexible microfluidic structure. The device achieved laboratory-grade precision with minimal sweat volumes, validated in both healthy and CF-affected individuals. Its portability, and ease-of-use. accurate biomarker assessment highlight significant potential for broad clinical adoption. Future applications of this technology may extend beyond CF, supporting continuous, real-time and monitoring personalized healthcare health management in diverse patient populations.

References

[1] J. Kim et al. Biosens Bioelectron. 253:116166, 2024.

Acknowledgement

The Chung-Ang University co-authors would like to acknowledge ANSYS Korea for providing software support.

비목질계 셀룰로스 소재 산업동향 Industry trends in non-wood cellulose materials

*김상용¹ * S.Y. Kim¹

¹ 다이텍연구원 ⁺E-mail: ssarou@dyetec.or.kr

Keywords: Non-wood cellulose, Hemp fiber, Bio plastic

1. 서론

석유자원의 고갈과 지구 온난화로 인하여 각국의 환경 규제가 강화되고 있으며, 기존 플라스틱 기반의 자동차 내장재를 친환경 소재로 대체하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 유럽의 경우, 2012년부터 자동차 CO₂의 평균 배출량을 130g/km 이하로 규제하 고, 기존 권고방식에서 의무방식으로 전환되고 있으며, 북미의 경우, 2015년부터 35.5mpg(15.1km/liter)로 연비를 규제하고 있는데 이는 2008년 규제연비인 28.2mpg(12.0km/liter)와 비교하여 큰 폭으로 강화하고 있다.

주요 글로벌 완성차 업체들은 산업 패러다임 변화 및 연비규제에 대응하기 위해 자동차 경량화를 핵심 전략으로 추진하면서 경량화, 연비향상, 친환경성 소재의 사용, 고성능화에 기술개발의 중점을 두고 있으며, 이를 달성하기 위한 소재로 주목받고 있는 것이 셀룰로스 소재이다. 셀룰로스 소재 중 지속가능성이 높고, 비가역적 기후 변화보다 자원 재생 속도가 빠른 초본류 식생 자원을 사용할 때 지속가능성이 높은 소재로 분류되고 있다. 자연 생태계 보전 등 지속가능성 국가 발전 전략의 중요성이 부각되고 있고, 세계적으로 환경 친화적인 자연유래 섬유에 대한 요구가 급증하고 있으며, 이러한 환경 친화적인 자연유래 섬유로 초본류인 비목질계 셀룰로스 소재의 관심이 높아지고 있다.

기존에는 재생 셀룰로스 섬유의 주원료로 목재를 사용하고 있으나, 유럽을 중심으로 환경 및 산림 보호를 위해 목재 펄프 생산을 제한하고 있으며, 또한, 국제 정세 불안으로 인해 펄프 가격 상승 및 수출입 제한 위협이 있으며, 국내 펄프 및 원사의 경우 전량 수입에 의존하는 실정이다. 따라서, 기존 셀룰로스 섬유의 주원료인 목재를 지속가능한 비목질계 자원으로 대체하기 위한 비목질계 식생자원(저마, 양마, 대마, 칡 등)을 활용한 셀룰로스 소재 개발이 시급하다.

참고문헌

- [1] 국내산 천연섬유 100% 세섬도 방적사, 국내산 천연섬유 100% 인피섬유 부산물 기반 복합방적사 활용 한복 및 친환경 섬유제품 개발, 과기부, 2023.
- [2] 천연 셀룰로스 섬유 함량 50wt% 이상의 바이오 복합재료 및 이를 이용한 바이오매스 40% 이상 친환경 자동차 부품 개발, 산업부, 2024.

Performance Enhancement in Vanadium Redox Flow Batteries Using Carbon Felt Composite Electrodes

*Amanpreet Kaur¹, Jun Woo Lim²⁺

¹Graduate school of Flexible and Printable Electronics and LANL-JBNU Engineering Institute-Korea, Jeonbuk National University, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, 54896, Republic of Korea

²Graduate school of Flexible and Printable Electronics & LANL-CBNU Engineering Institute Korea and Department of Mechatronics Engineering, Jeonbuk National University, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, 54896, Republic of Korea ⁺E-mail: jul170@jbnu.ac.kr

Keywords: Vanadium redox flow battery, Electrode, Borophene, Composite.

1. Introduction

Progress in sustainable development leads to an increasing use of clean and renewable energy sources in place of fossil fuels. Nonetheless, renewable energy sources like solar and wind power require the implementation of extensive energy storage systems to ensure stability in energy production and to effectively utilize them in practical applications [1-6]. The vanadium redox flow battery (VRFB) plays a crucial role in energy storage systems due to its numerous advantages, including limitless storage capacity, reliable performance, long lifespan, and flexible design [7]. The VRFB comprises critical components such as bipolar plates, electrodes, membranes, and electrolytes. The energy efficiency of the VRFB is primarily determined by the interaction between vanadium ions and the electrode [8]. Carbon-based materials such as carbon felt and graphite felt are frequently employed as electrode materials due to their affordability, chemical stability, porous structure that facilitates electrolyte flow, and excellent electrical conductivity. The main drawbacks of carbon-based electrodes include insufficient electrochemical activity and limited wettability.

The present study developed a composite electrode based on borophene and carbon felt for utilization in the VRFB. Borophene, a two-dimensional nanosheet, has emerged as a highly promising electrode material for highperformance vanadium redox flow batteries (VRFB). A detailed morphological and structural analysis has been performed to assess the growth of borophene on the surface of carbon fibers in carbon felt.

2. Experimental section

2.1 Fabrication of the composite electrode: Borophene was synthesized via ultrasonication in a nitrogen environment. The borophene carbon felt composite electrode (B-CF) has been synthesized through the hydrothermal reduction of an aqueous borophene dispersion. An autoclave lined with Teflon was utilized with a 130 mL aqueous dispersion of borophene at a concentration of 2 mg/mL, maintained at 120°C. The

autoclave was maintained at a specific temperature for a duration of 14 hours. Following this, the specimen was subjected to the carbonization process at a temperature of 900°C. Following this, the B-CF underwent rinsing with deionized water.

2.2 Characterization: A cyclic voltammetry test was conducted to evaluate the electrochemical performance of the electrode in the battery. XPS research was performed to examine the surface functional groups. Scanning Electron Microscopy (SEM) study was conducted to examine the morphology of the electrode material

3. Results and Discussion

The CV profiles for bare CF, borophene-CF-1,2,& 3 CF in relation to the VO²⁺/VO₂⁺ redox reaction at a scan rate of 5 mV/s in a 0.5M VO²⁺ + 3.0 mol/L H₂SO₄ electrolyte are presented in Fig. 1. This indicates that carbon felt functions as an inert electrode, demonstrating negligible electrochemical activity in the VO²⁺/VO₂⁺ redox process. The composite samples exhibit peak currents ranked in the following order: B-CF-120 °C is greater than B-CF-150 °C, which in turn is greater than B-CF-90 °C. Bare CF is relevant for both reduction and oxidation processes. The decrease in electrochemical polarization of the electrode can be attributed to the active sites present on the surface of carbon fibers.



Fig. 1. CV profiles of bare CF and borophene-CF at different temperatures.

4. Conclusions

This investigation effectively developed a borophene carbon felt composite electrode aimed for use in vanadium redox flow batteries (VRFB). The composite reaction exhibited an increased electrochemical activity in comparison to the bare carbon felt in the redox reaction. The results demonstrate that borophene improves the electrocatalytic performance of carbon felt. The borophene facilitates rapid charge transport and uniform distribution of electrons and ions throughout the electrode. The presence of heteroatoms in the active sites significantly improves the electrocatalytic performance in vanadium redox reactions. The VRFB demonstrates significantly enhanced performance across all regions.

References

- JW Lim et al. J. Intell. Material Syst. Struct. 29: 3386-3395, 2018.
- [2] JW Lim et al. Compos Struct. 134: 927-949, 2015.
- [3] JW Lim et al. Compos Struct. 134: 483-492, 2015
- [4] JW Lim et al. J. Vis. Exp. 128: e55815, 2017
- [5] JW Lim et al. Compos Struct. 108: 757-766, 2014
- [6] Zhangxing He et al. Carbon 127 (2018) 297-304.
- [7] Ghimire et al. Carbon 155 (2019) 176-185.
- [8] Kim et al. Materials Chemistry and Physics 131 (2011) 547– 553

Acknowledgement

This study was supported by the KIST Institutional Program (Project No. 2Z06890-23-P052) and Guwon Scholarship Foundation (No. 2023-12-01). Their support is greatly appreciated.

모빌리티용 탄소섬유 복합소재 경량 부품 개발 Development of lightweight carbon fiber composite material components for mobility

*김보성¹, 자이스왈 아난드 프라카¹, 김민국¹, 윤순호¹⁺ * Bo Seong Kim¹, Anand Prakash Jaiswal¹, MinKook Kim¹, Soon Ho Yoon¹⁺

¹ 한국과학기술연구원 전북 복합소재기술연구소 구조용복합소재 연구센터 ⁺E-mail: soonho@kist.re.kr

Keywords: FSIM, AL/CFRTP, ABAQUS, FEA

1. 서론

모빌리티 수송 기기의 부품 경량화를 위한 고기능성, 재활용성, 저비용화 등 다양한 요구특성을 만족하기 위한 신소재 및 신공정 연구가 활발히 진행되고 있다. 그중 산업적으로 가장 널리 사용되고 있는 알루미늄 합금과 무게대비 비강성, 비강도가 높은 복합재료를 이종접합 기술을 활용하여 기존 금속 소재를 대체할 수 있는 하이브리드(AL/CFRTP) 소재 부품 개발이 전 세계적으로 활성화 되고 있다.[1] 본 연구에서는 차체 구조물인 프론트 사이드 인너 멤버(Front Side Inner Member, FSIM)의 이종소재 적용성을 검증하기 위해 단일 부품 및 시스템 단위 해석 모델을 개발하고, 해석적으로 구조적 성능 및 충돌 에너지 흡수 성능을 분석했다.

2. 부품 단위 해석 모델

2.1 유한요소 해석모델

FSIM는 자동차 BIW(Body In White)의 전체 강성을 확보하고 전방 충돌 시 충격을 효과적으로 흡수 하는 차체 전면 부의 주요 부품 중 하나이다. 이는 충돌 시 발생하는 운동에너지를 FSIM의 변형 및 파손을 통해 에너지를 분산시켜 Safety zone의 탑승객을 보호할 수 있도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 먼저 AL 단일소재를 활용한 부품 단위 모델을 ABAQUS/Explicit를 활용하여 해석을 수행 했다. 2차원 4절점 쉘 요소를 통해 FSIM의 축방향 강성을 선제적으로 검토하여 경량화 모델인 하이 브리드 소재를 적용한 컨셉 설계안에 대해서 기존 모델과 등가 성능을 구현하도록 해석 검증을 추가 적으로 수행했다.

2.2 컨셉 설계 모델 성능 비교

순수 알루미늄(A6082-T6) 소재만을 적용해 중앙 리 브를 포함한 기존 단면과 등가성능을 이루는 하이 브리드 소재 컨셉 모델을 제시했다.

3. 시스템 단위 해석 모델



Fig. 1. 시스템 단위 해석 조건.

FSIM은 단일 부품이 아닌 범퍼·서브프레임 등 다른 부품들과 함께 조립되어 기능을 수행한다. 따라서 실제 충돌 거동과의 정합성을 비교하기 위해 시스템 단위 해석이 필요하다. 이에 본 연구에서는 FSIM을 포함한 인접 구조(BAR, Subframe 등)를 모사하여 실제 저속 충돌 상황 조건을 제시하여 유한요소해석(FEA, Finite Element Analysis)을 수행하였다. 이에 질량이 1400kg인 물체의 20km/h 속도의 저속 충돌 조건에 대해서 ABAQUS/Dynamic Explicit을 활용하여 해석을 진행했다.

4. 결론 및 향후과제

현재 단일 부품과 시스템 단위에서의 초기 해석 모델을 개발했지만 모델의 정합성을 높이기 위해 복합재료의 Damage model이 적용된 Quasi-static 해석을 추가적으로 수행해야 한다. 또한 실제 부품 제작을 통해 해석과 시험 간의 데이터 비교를 통한 검증 업무를 수행할 예정이다.

참고문헌

[1] k-carbon 플래그십 개발 계획서, 산업통상자원부, 2024.

후기

본 연구는 k-carbon 플래그십 모델 개발 프로젝트로 산업통상자원부의 지원을 받아 수행됨

Advanced Carbon Fiber Polymer Composites with Fe₃Si for High-Performance, Lightweight Synchronous Reluctance Motor Rotors

*Anand Prakash Jaiswal¹, Minkook Kim¹⁺ and Soon Ho Yoon¹⁺

¹Institute of Advanced Composite Materials, Korea Institute of Science and Technology (KIST), 92 Chudong-ro, Bongdong-eup, Wanju-gun, Jeonbuk, 55324, Republic of Korea

⁺E-mail: soonho@kist.re.kr

Keywords : CFRP, Low weight motor, SynRM motor, COMSOL Multiphysics

1. Introduction

The increasing demand for high-efficiency, lightweight electric motors has led to significant advancements in electric vehicles (EVs), aerospace, and industrial automation [1]. Synchronous Reluctance Motors (SynRMs) have emerged as a competitive alternative due to their robust design, low cost, and high efficiency. However, conventional SynRM rotors rely on laminated silicon steel, which introduces challenges such as high weight, eddy current losses, and limited design flexibility [2].

Carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites are explored to address these limitations as a potential replacement for metallic rotors. CFRP offers a high strength-to-weight ratio and corrosion resistance but lacks the necessary electromagnetic properties for motor applications. To overcome this, Fe₃Si (iron silicide) microparticles are incorporated into CFRP to enhance its electrical and magnetic performance [3]. Fe₃Si, a soft magnetic material with high permeability and low coercivity, improves flux conduction while minimizing core and eddy current losses. This study aims to develop a hybrid CFRP-Fe₃Si rotor that optimally balances electromagnetic performance, and weight reduction for next-generation SynRMs.

2. Fabrication and design application for SynRM motor

2.1 Materials and Fabrication: Fe₃Si microparticles are embedded within a 3K plain weave carbon fabric to enhance electromagnetic properties. The Fe₃Si particles are dispersed in a epoxy resin, ensuring homogeneous distribution. The composite is fabricated using a precise hand-layering technique, followed by autoclave curing at 7 bar and 135° C to achieve optimal mechanical and thermal properties. The resulting composite maintains structural integrity while introducing magnetic functionality suitable for motor applications.

2.2 FE simulation of SynRM motor: This study investigates using Fe₃Si-modified composite fibers as a substitute for traditional metallic rotors in SynRMs. The primary advantages of this approach include reduced rotor weight and tunable electromagnetic properties, achieved by adjusting fiber orientation, volume fraction, and Fe₃Si

particle content. Finite Element Analysis (FEA) using COMSOL Multiphysics is employed to model the electromagnetic behavior of the composite-based rotor. Key parameters such as rotor geometry, material anisotropy, magnetic property and conductivity are incorporated into the simulations. Additionally, COMSOL's advanced meshing capabilities enable precise optimization of the permanent magnet angle, leading to improved efficiency and enhanced motor performance.

3. Results and Discussion

Parametric simulations in COMSOL are performed to assess the impact of rotor material composition and fiber magnetization on motor performance metrics, including efficiency and power factor. The visualization of magnetic flux density distribution provides insights into torque generation and field interactions within the composite rotor. The simulation results indicate that Fe₃Si-modified CFRP rotors effectively guide magnetic flux while significantly reducing overall motor weight.

Fig. 1. Fe₃Si-modified CFRP rotors effectively guide magnetic flux.

Moreover, efficiency evaluations across the operational range suggest that composite fiber-based rotors can achieve competitive performance compared to traditional metallic rotors, with the added benefit of reduced energy losses due to minimized eddy currents. These findings support the feasibility of CFRP-Fe₃Si composites for lightweight, high-efficiency SynRMs.

4. Conclusions

This study demonstrates the viability of composite fiberbased SynRM rotors infused with Fe₃Si microparticles as 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

a lightweight and high-performance alternative to conventional metallic rotors. COMSOL-based simulations reveal that varying rotor pole number, fiber orientation, and volume fraction significantly influence key performance metrics such as efficiency and power factor. The analysis of magnetic flux density distribution highlights improved torque generation, while efficiency evaluations suggest promising optimization opportunities. The proposed composite rotor design presents a breakthrough in electric motor technology, enabling significant weight reduction while maintaining high performance, paving the way for next-generation energyefficient motors in various industrial and transportation applications.

References

- [1] Waseem M et al. Next Energy, Energy storage technology and its impact in electric vehicle-Current progress and future outlook. 6:100202, 2025.
- [2] Lovelace EC et al. IEEE Trans Ind Appl, Mechanical design considerations for conventionally laminated, high-speed, interior PM synchronous machine rotors. 40:806-12, 2004.
- [3] Hojamberdiev M, et al. J Eur Ceram Soc, Single-sourceprecursor synthesis of soft magnetic Fe3Si and Fe5Si3 containing SiOC ceramic nanocomposites. 33:2465-72, 2013.

On the design and validation of the composite fan blade structure

^{*}Thuan Ho-Nguyen-Tan¹, Gonui Hong¹, Young Jae Kim¹, Bo Seong Kim¹, Minkook Kim¹⁺ and Soon Ho Yoon¹⁺⁺ ¹Institute of Advanced Composite Materials, Korea Institute of Science and Technology (KIST)

E-mails: ⁺minkook@kist.re.kr, ⁺⁺soonho@kist.re.kr

Keywords : Composite structure, Lamination design, Turbine fan blade, Draping analysis

1. Introduction

Carbon fiber-reinforced composites are widely used in the design of laminated structures, such as wind turbines, marine propellers, and automotive parts, due to their exceptional structural performance and lightweight properties. To enhance the mechanical performance of composite structures, the fiber-ply stacking sequence is optimized [1]. These optimization methods are developed based on the anisotropic characteristics of composite materials. In addition, fiber-orientation optimization has been employed as an alternative approach to optimize the mechanical performance of laminated structures [2]. Therefore, the variation in fiber orientation plays an important role in the design of laminated structures.

In this work, an effective draping analysis is used to predict changes in fiber orientation when a lamina is applied to a double-curvature mold during the lay-up process. [3]. For high manufacturability, ply-shape codes with clear boundaries are generated for the fabrication process. To this end, the marching squares algorithm is employed to accurately capture the shape of each ply-shape code. Both thermal and bending deformations are analyzed to demonstrate the effectiveness of the proposed method. Numerical simulations and experimental tests highlight the significance of draping analysis in enhancing the accuracy of structural performance.

2. Modelling and numerical simulation

2.1 Lamination modelling

A composite fan blade with varying stiffness is used in this study. Due to thickness variations, different lamination groups are generated.



Fig. 1. Lamination design for the composite fan blade.

2.2 Numerical simulation with draping analysis

Draping analysis is applied to predict changes in fiber orientation during the lamina lay-up process onto the fan blade mold. For structural analysis, finite element models are developed both with and without draping analysis. The structural analysis is conducted using ABAQUS/CAE software.

3. Experimental tests

First, process-induced thermal deformation is measured using a three-dimensional scanning technique. The experimental deformation is then compared with numerical results for validation. Multiple sections of the composite fan blade are extracted for result comparison. Next, a bending deformation test is conducted to further investigate the structural performance. The rection forcedisplacement curves are obtained for various study cases. Through comparison, it is found that the numerical results with draping analysis align well with those obtained from the experimental tests.

4. Conclusions

In this work, we present an effective methodology for the design and manufacturing of laminated composite fan blade structures. The proposed draping analysis accurately predicts changes in fiber orientation during the lay-up process. Numerical results show good alignment with the experimental outcomes for all study cases.

References

- [1] A Albanesi et al. Composite Structures. 184:894-903, 2018.
- [2] A Cutolo et al. Meccanica. 56:1555-1574, 2021.
- [3] T Ho-Nguyen-Tan et al. Composite Part B: Engineering. 281:111599, 2024.

Acknowledgement

This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT), (No. RS-2023-00304729).

NCF/에폭시 비대칭 적층판의 복합재 등가 탄성물성 측정을 위한 연구 Study on the measurement of equivalent elastic properties

for unsymmetric non-crimp fabric (NCF)/epoxy laminates

*이학구 ¹ * Hak Gu Lee¹

Hak Gu Lee

¹ 한국항공대학교 항공우주산업기술연구소 ⁺E-mail: hakgulee@kau.ac.kr

Keywords: FE solid model, PMM, NCF/epoxy composites, Correction factor

1. 서론

Non-crimp fabrics (NCFs)는 풍력 또는 조력발전기의 블레이드와 같은 초대형 복합재 구조물의 제작 공정에 널리 활용되고 있는 직물이다. NCF는 축방향 주섬유 다발(primary axial fiber bundle) 이외에도 스티칭 실(stitching thread)과 직물의 구조를 보강하는 후면의 보조 섬유 다발(backing fiber bundle)을 포함하고 있다. 이러한 특성들로 인하여, NCF로 제작된 적층판은 통상 두께방향으로 비대칭 특성을 갖는다.



Fig. 1. Structure of the non-crimp fabric.

2. 복합재 시편시험

2.1 원소재 정보

본 연구에서는 WindStrand®3000으로 제작된 UD NCF와 수지주입(resin infusion)용 에폭시로 복합재 적층판을 제작한 후, 이를 절단하여 물성시험용 시편을 제작하였다. 해당 UD NCF는 0도 방향 주섬유다발의 면밀도가 1192 g/m²이고, 90도 방향 보조 섬유다발의 면밀도가 40 g/m²이며, 스티칭 실의 면밀도가 8 g/m²다. 에폭시는 국도화학에서 생산하는 KFR-1258L/KFH-164이다.

2.2 복합재 시편

ASTM D3039와 ASTM D5379를 따라 시편 시험을 통해 측정한 복합재 물성은, 0도 인장강성, 90도 인장강성, 면내 전단강성, 면내 주포와송비(in-plane major Poisson's ratio)이다. ASTM D638-14를 따라 에폭시 시편 시험을 통해 측정한 물성은 인장강성과 포와송비이다. 각 시편 시험의 측정값 평균과 시편 두께의 평균값은 미소역학을 통한 측정 데이터 분석에 사용되었다.

3. 미소역학을 통한 측정 데이터 분석

Periodic microstructure micromechanics (PMM)의 텐서 지배방정식은 아래의 식과 같다 [1, 2].

 $\overline{\mathbf{C}} = \mathbf{C} : \left[\mathbf{1}^{(4s)} - v_f \{ (\mathbf{C} - \mathbf{C}^{\Omega})^{-1} : \mathbf{C} - \mathbf{S}^{P} \}^{-1} \right] \quad (1)$

여기서, C, C^{Ω}, \bar{c} 는 모재, 섬유, 복합재의 4차 강성 텐서이며, S^P, v_f , 1^(4s)는 주기적분 연산자(periodic integral operator)의 무한급수, 섬유체적률, 4차 대칭 단위텐서(identity tensor)이다.

PMM과 함께 Fig. 2와 같은 FE모델을 사용하여 시편의 측정단면에서 발생하는 변형률의 분포를 분석하였다.



Fig. 2. FE solid model for the V-notch specimen.

4. 결론 및 향후과제

정확한 복합재 등가물성을 산출하기 위해서는 측정물성에 보정계수를 적용한 후, 이를 미소역학을 통해 분석해야 한다는 것이 확인되었다. 본 연구의 방법론 및 계산 모델을 통해 비대칭 NCF/에폭시 복합재의 4가지 측정물성, 3가지 종류의 시편 두께, 에폭시의 2 가지 측정물성을 최대 오차 2.06% 내에서 모두 구현하였다.

참고문헌

[1] HG Lee et al. *Mater. Today Commun.* 36:106767, 2023.
 [2] HG Lee et al. *Mater. Today Commun.* 44:112085, 2025.

후기

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구 재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(과제번호 : 2022R1A6A1A03056784) 부

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

하이브리드 불연속 복합재: 맞춤형 응력 분포를 위한 CFRTP-CFRP 동시 성형 공정

Hybrid discontinuous composites: Novel co-molding of CFRTP-CFRP for tailored stress distribution

* 김윤상¹, 고민정^{1,2}, 김상우¹, 김정수¹, 이정완¹, 이진우¹⁺ * Yoon Sang Kim¹, Min Jeong Ko^{1,2}, Sang Woo Kim¹, Jung-soo Kim¹, Jungwan Lee¹, Jin Woo Yi¹⁺

> ¹ 한국재료연구원 융복합재료연구본부, ² 부산대 고분자복합재료연구실 ⁺E-mail: yjw0628@kims.re.kr

Keywords: Carbon fiber, Thermosetting polymer, Thermoplastic polymer, Discontinuous joints, Mechanical properties

1. 서론

탄소섬유강화복합재(CFRP)는 높은 강도와 경량성 으로 인해 항공, 자동차 산업을 비롯한 다양한 분야 에서 활용되고 있다. 그러나 CFRP의 불연속 접합부는 응력 집중과 층간 분리를 유발하여 기계적 성능 저하를 초래할 수 있으며, 손상 복구가 어려운 단점이 있다. 본 연구에서는 CFRTP와 CFRP를 결합하여 동시 성형(co-molding) 공정을 개발하고, 다양한 staggered distance, 두께, 접합 길이를 적용한 불연속 접합부의 기계적 특성을 평가하였다. 특히, PES-OH 및 에폭시 첨가제를 이용하여 CFRTP의 공정 온도를 낮추고, CFRP와의 계면 결합력을 향상시켜 접합부의 구조적 안정성을 확보하였다.

2. 본론

이를 극복하기 위해, 열가소성 수지를 이용한 CFRTP 가 새롭게 주목받고 있으며, 이는 높은 충격 저항성, 빠른 가공 속도 및 재활용 가능성을 갖춘다는 장점이 있다. 본 연구는 이러한 CFRP와 CFRTP의 장점을 결합하여, 두 소재를 단일 공정에서 동시에 성형함 으로써 복합재의 이종 접합부를 제조하고 그 기계적 성능을 체계적으로 분석하였다. 그림 1의 (a)와 (b)에 나타난 공정도는 CFRP와 CFRTP를 동시에 성형하기 위한 제조 방식을 설명하고 있다. CF(탄소섬유) 직물에 열경화성 수지와 열가소성 수지를 각각 함침한 후, 프리프레그(prepreg) 형태로 건조하고, 이들을 적층하여 단일 성형 공정을 통해 복합재 접합부를 제작하였다. 이를 통해 접합부 내에서 발생하는 각 소재의 상호작용을 최소화하면서도, 전체 구조의 강도와 내구성을 향상시키는 복합재 접합 방식을 제안하였다.

3. 결과

본 연구에서는 CFRP-CFRP 및 CFRTP-CFRP 불연속 접합부의 기계적 성능을 평가하였다. 인장 시험 결과, CFRP-CFRP 접합부에서는 staggered distance(계단 간격)가 6 mm까지 증가할수록 인장 강도가 향상되었 으며, 이후에는 추가적인 증가 효과가 제한적이었다. 두께가 증가함에 따라 접합 길이가 길어지면서 강도가 개선되었지만, 4.5 mm 두께에서는 접합부의 층간 부리가 발생하며 성능 저하가 관찰되었다.

CFRTP-CFRP 접합부에서는 CFRP-CFRP 대비 인장 강도가 28% 감소하였으며, 이는 열가소성 수지의 계면 특성과 관련이 있었다. 또한, 탄성률(Young's modulus) 감소가 CFRP-CFRP 대비 더 크게 나타나, 열가소성 수지가 강성에 미치는 영향을 확인할 수 있었다. SEM 및 OM 분석 결과, CFRP-CFRP 접합부에서는 층간 결합이 강하여 섬유 파괴가 주요 파손 메커니즘이었지만, CFRTP-CFRP 접합부에서는 층간 분리 및 섬유 인발이 주요 파손 형태로 나타났다.



Fig. 1. 불연속 CFRP-CFRP 및 CFRTP-CFRP 복합재의 계단형 접합부 구성 개략도.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 CFRP와 CFRTP를 동시 성형(comolding)하여 불연속 접합부를 제조하고, 기계적 성능을 체계적으로 평가하였다. 실험 결과, staggered distance와 두께 증가가 인장 강도 향상에 기여하였 으며, 특히 3 mm 두께의 CFRP-CFRP 접합부에서 접합 길이가 길어질수록 응력 분산이 균일하게 이루어져 높은 기계적 성능을 나타냈다. 반면, CFRTP-CFRP 접합부에서는 계면 결합력이 상대적으로 낮아 인장 강도가 CFRP-CFRP 대비 감소하였으며, 열가소성 수지의 영향으로 탄성률도 더 크게 저하되었다.

정렬불량 수윤활 복합재 저널 베어링의 최대 내하중 용량을 위한 최적 경계 An Optimum Boundary for Maximum Load-carrying Capacity in Misaligned Waterlubricated Composite Journal Bearings

*김원빈¹, 임수현¹, 김원기¹, 조동현¹, 키야라누 푸트라 파타르티완¹, 이민근¹, 박종인¹, 김성수¹⁺ * W.V. Kim¹, S.H. Lim¹, W.K. Kim¹, D.H. Jo¹, K.P. Pakartiwan¹, M.G. Lee¹, J.I. Park¹, S.S. Kim¹⁺

¹ 카이스트 기계공학과

+ E-mail: seongsukim@kaist.ac.kr

Keywords: Composite, Journal bearing, Elastohydrodynamic lubrication, Misalignment.

1. 서론

실제 저널 베어링은 불 균일한 하중 분포로 축의 정렬 불량을 수반한다. 낮은 점도인 물을 윤활제로 사용하는 수윤활 저널 베어링은 얇은 윤활막과 더불어 축의 정렬 불량으로 인해 극심한 마모를 야기할 수 있어, 우수한 기계 및 윤활 특성을 기반으로 하는 복합소재를 적용해왔다 [1]. 본 연구에서는 수윤활 복합재 저널 베어링의 축의 정렬 불량에 따른 특성 변화를 예측하고 이를 바탕으로 최대 내 하중 용량을 가질 수 있는 설계 방안을 제시하고자 한다.

2. 지배 방정식

2.1 레이놀즈 방정식

Fig. 1은 해석에 사용한 축 계를 나타낸 것이며, 이를 바탕으로 식 (1)의 레이놀즈 방정식을 도출할 수 있다.





Fig. 1. Coordinate systems.

2.2 복합재 베어링 라이너의 구성 방정식 식 (2)는 유압에 따른 복합재 베어링 라이너의 탄성 변형을 도출하기 위한 구성 방정식을 나타낸 것이며, 유한요소해석법 혹은 이론적 분석법을 통해 해를 도출할 수 있다[2].

$$\rho_{Bearing} \ddot{u_i} = \frac{\partial \sigma_{ji}}{\partial x_j} + f_i \text{ in } \aleph \tag{2}$$

2.3 유막 두께 방정식

유막 두께 방정식은 베어링의 중심 평면인 XY에 대하여 중심선의 상대적 위치를 통해 식 (3)와 같이 도출할 수 있다.

$$h = c(1 + \varepsilon_0 \cos(\theta - \varphi_0)) + \left(z - \frac{L}{2}\right)\varphi_Y \sin\theta - \left(z - \frac{L}{2}\right)\varphi_X \cos\theta + \delta$$
(3)



Fig. 2. (a) Pressure fields, (b) Film thickness distribution in misaligned water-lubricated composite journal bearings.



Fig. 3. Optimum boundaries for maximum loadcarrying capacity (a) Turbulence effect, (b) Bearing deformation



Fig. 4. Effects on optimum boundaries for maximum loadcarrying capacity (a) Turbulence, (b) Bearing deformation and Misalignment.

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

4. 결론 및 향후과제

축의 정렬불량, 난류 및 복합재 베어링 변형에 따른 수윤활 복합재 저널 베어링의 최대 내 하중 용량을 위한 최적 경계를 도출하였으며, 해당 거동을 설명할 수 있는 프레임워크를 최초로 수립하였다. 더 나아가 복합재 베어링 라이너의 재료 설계를 통한 최적 설계 수립 가능성을 확인하였다.

참고문헌

WV Kim et al. *JCDE*. 9.6:2506-2523, 2022.
 WV Kim et al. *Friction* (2024).

후기

성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00260461).

금속기지복합재의 금속적층제조으로의 적용과 전산해석모델 구축 Application of Metal Matrix Composites to Metal Additive Manufacturing and Development of Computational Analysis Models

*윤군진 ^{1,2+}, 정민규¹, 박재은¹ * Gun Jin Yun ^{1,2+}, Mingyu Chung¹, Jae Eun Park¹

¹ 서울대학교 항공우주공학과, ² 서울대학교 항공우주신기술연구소 ⁺E-mail: gunjin.yun@snu.ac.kr

Keywords: Multiphysics modeling, Metal Additive Manufacturing, Metal Matrix Composite, Discrete Phase Model

1. 서론

금속 기지 복합재(Metal Matrix Composites, MMCs) 는 단일 금속 기지(matrix)에 보강재(reinforcement)를 연속적으로 분산시키는 방식으로 제조된다. 이러한 금속 기지 복합재는 금속의 연성과 인성을 유지하면서도 보강 입자로 인해 높은 강도와 강성을 갖출 수 있다. 최근 극한 환경(고하중, 고마찰, 고온 조건)에 이러한 금속 기지 복합재를 적용하고자 하는 노력이 증가하고 있으며, 특히 항공우주 및 자동차 산업에서 유망한 소재로 활용되고 있다[1].

기존에는 주로 주조 등의 전통적 방법을 통해 금속 기지 복합재 부품을 제조하였으나, 최근에는 적층 제조를 통한 금속 기지 복합재 부품 제조가 중요한 연구 분야로 주목 받고 있다.

현재 레이저 적층 금속 기지 복합재 제조에서는 가열/냉각조건에서의 미세구조 제어와 소재의 변형과 균열 예측이 해결해야 할 두 가지 핵심 문제로 남아있으며, 이러한 문제를 해결하기 위해 수치 해석 방법을 적용할 수 있다. 본 연구에서는 금속기지 복합재 적층제조를 위한 전산해석 모델 구축을 다룬다.

2. 분말 분사에 대한 수치해석 모델

2.1 CFD-DPM 해석을 통한 분말 유입 거동 분석

분말이 용융풀에 유입되기까지 과정 중에는 항력, 양력, 그리고 중력이 분말의 크기, 질량, 및 구형도 (sphericity)에 따라 작용한다. 이러한 힘들을 계산하고 입자의 운동을 추적하기 위하여 DPM(Discrete Phase Model)이 사용되었다. DPM 해석에서는 금속 분말과 같은 입자는 라그랑지안(Lagrangian) 관점에서 추적 되며, 연속체(가스상)은 오일러리안(Eulerian) 관점에 서 계산된다. 이러한 DPM 해석에서 각 분말 입자에 대한 동적 지배방정식은 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다[2].

$$m_p \frac{d\vec{v}_p}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_L + \vec{F}_G \tag{1}$$

여기서 m_p 는 각 입자의 질량이고, \vec{u}_p 는 분말의 속도이다. 또한 \vec{F}_d , \vec{F}_l 과 \vec{F}_a 는 각각 Non-spherical 항력, Saffman 양력과 중력이다. 본 동적지배방정 식에 따라 용융풀에 유입되는 분말의 질량농도 (Mass concentration)은 Fig. 1.과 같다.



질량농도와 더불어 각 분말의 유입 위치, 속도, 입사각 등의 정보를 통계적으로 분석하여, 용융풀 예측을 위한 열유동 모델에서의 분말원 구축을 수행하였다.

8 융 풀 거 동에 대한 수치해석 모델 3.1 분말 거동 반영 용융풀 발달 예측

금속 적층제조 공정 중에는 비교적 작은 영역에 고에너지가 집중되기 때문에 금속 분말과 기판 (substrate)가 순간적으로 용융되고, 때로는 증발한다. 이러한 영역에서는 반발압(recoil pressure), 모세관힘 (capillary) 및 열모세관힘(thermo-capillary) 등과 같은 현상이 발생하여 용융 금속의 유동을 지배한다. 더욱이 용융풀의 외부에서 유입되는 분사 파우더의 영향으로 인해 유동이 바뀔 수 있다. 또한 소결 과정이 매우 짧은 순간에 발생하므로, 이러한 효과들을 모두 고려한 질량, 운동량 및 에너지 보존 방정식을 포함한 수치 모델을 구축하여야 한다. 또한 분말 기반 DED는 분사 시 분말이 가스와의 상호작용으로 인해 고속으로 용융풀 내로 유입이 되기 때문에, 질량과 모멘텀을

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

동시에 공급하여 용융풀 내 유동에 영향을 끼친다. 그러므로 정확한 DED 공정해석 모델을 구축하기 위해서는 앞서 수행한 분말 거동을 열유동 모델에 반영하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 상용 CFD 소프트웨어인 Flow-3D를 사용하여 이러한 모델을 구축하였으며, 이에 따라 예측된 용융풀은 Fig. 2.과 같다.



Fig. 2. Melt Pool Prediction

4. 용융풀 내 강화입자 분산 예측 모델 4.1 DPM 해석을 통한 강화 입자 거동 분석

본 연구에서는 ① 강화 입자의 용융점은 기지 재료보다 높아 레이저 조사시 녹지 않고 용융된 기지를 따라 흐르며, ② 강화 입자의 농도가 충분히 낮아 용융풀의 유동에 영향을 주지 않음을 가정하였다. 유동에 따른 강화입자의 용융풀 내 거동은 수식 (2)과 같이 힘평형 방정식으로 표현할 수 있다[3].

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \vec{F}_D + \vec{F}_L + \vec{F}_G + \vec{F}_T + \vec{F}_B \tag{2}$$

 \vec{F}_D , \vec{F}_T , \vec{F}_B 는 각각 나노 입자에 작용하는 Stokes-Cunningham 항력, 열영동력, 브라운력이다.



Fig. 3. Powder Initialization and State Variables for Tracking

DED 공정에 대해 입자 추적을 하기 위해 Fig. 3.와 같이 상태 변수를 도입하였다. 각 입자는 사전에 지정된 질량 분율에 따라 용용풀 위 레이저 조사부에 무작위로 분포된다. 이때의 상태 변수는 0으로 입자의 움직임이 제한된다. 이때, 입자가 용융된 셀에 위치하면 상태 변수는 1로 변경되며, 4.1의 힘평형 방정식에 따라 입자가 운동하게 된다. 이후, 입자가 응고된 셀에 위치하면 상태 변수는 2로 변경되며 다시 움직임이 제한된다. 이러한 과정에 따라 추적된 입자의 분포는 Fig. 4.과 같다.



Fig. 4. Powder Tracking Results for Power: 500W Scan Speed:300mm/min DED Process

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 금속기지복합재 적용 DED 공정의 전반에 대한 다물리 해석 모델 구축 및 그 결과를 보여준다. 다물리 해석 모델을 통해 분말의 거동을 구축하고, 이를 용융풀 해석 모델에 반영했으며, 이어서 용융풀 해석을 통해 예측된 유동장과 온도장 정보를 활용하여 MMC 분말에 함유된 강화입자의 용융풀 내 분산도를 파악할 수 있었다. 추후에는 파악된 강화입자와 온도장 정보를 활용하여 미세구조 예측을 수행하여, 금속기지복합재 적층제조 전산해석 모델을 확장시키고자 한다.

참고문헌

S. Kundu et al. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2635-2646, 2018.
 ANSYS. ANSYS FLUENT Theory Guide. 425-429, 2020.
 Q. Han et al. Powder Technology. 714-723, 2021.

후기

이 논문은 2025년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방 기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 21-106-A00-006(KRIT-CT-23-019), 반응성 고증착률 적층제조 기술 특화연구실)
디지털 이미지 상관기법을 이용한 알루미늄 금속복합소재의 변형거동 분석 Deformation behavior analysis of aluminum metal matrix composites using digital image correlation technique

*박창수¹⁺, 이민수¹, 안찬울¹, 조승찬², 전태성³ * C.S. Park¹⁺, M.S. Lee¹, C.W. Ahn¹, S.C. Cho², T.S. Jun³

¹ 한국생산기술연구원 강원기술실용화본부, ² 한국재료연구원 융복합재료 연구본부, ³ 인천대학교 기계공학부 ⁺E-mail:zionzia@kitech.re.kr

Keywords: Digital Image Correlation (DIC), Al-MMC, Mechanical behavior analysis, Strain localization

1. 서론

금속재료의 기능성 향상을 위하여 세라믹 강화재를 적용한 금속복합소재 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 다만 세라믹 강화재는 탄성계수, 강도 등 금속기지와 기본적인 특성 차이가 존재하므로, 순수 금속합금과는 다른 변형거동의 차이를 유발하며, 이는 구조재료로의 금속복합소재 활용을 제한하는 요소로 작용하기도 한다. 따라서 금속복합소재의 기계적 변형거동을 이해하고 개선하기 위한 연구가 매우 중요하다.

2. 연구방법

2.1 시편준비

본 연구에서는 교반주조 방식을 이용하여 원자력 분야의 사용후핵연료용 중성자흡수재로 사용되는 Al-30vol.%B₄C 금속복합소재 잉곳을 제조하였다 [1]. 이후 300℃ 이상의 온도에서 열간압연을 실시하여 3mm 두께의 판재를 제작하고, 인장시험을 위한 시료를 제작하였다.

2.2 DIC 기반 변형거동 및 미세조직 분석

온도에 따른 금속기지와 세라믹 강화재 계면에서의 변형거동 분석을 위하여, 25℃, 150℃ 및 300℃ 조건에서 인장시험을 진행하며 광학현미경 기반의 micro-scale 디지털 이미지 상관기법 분석을 실시하고, GOM 소프트웨어를 이용하여 시간 및 위치에 따른 변형결과를 분석하였다.

실험 전후 미세조직 및 잔류응력 변화 확인을 위하여, 광학현미경(OM), 주사전자현미경(SEM-EBSD), X-선 회절(XRD) 및 투과전자현미경(TEM) 기반 분석을 실시하고, 강화재가 금속기지 복합재료의 변형거동에 미치는 영향에 대해 고찰하였다.

3. 주요결과

변형온도가 증가함에 따라 Al-30vol.%B₄C 소재의 강도는 감소하고, 연신율은 증가하였다. 특히, 25℃ 조건에서는 변형량이 증가할 때 금속기지와 강화재

계면 사이에서 응력형성이 집중되며 불균일한 응력 분포를 나타내는 반면, 온도가 증가하는 경우에는 강화재 계면 뿐만 아니라 기지 내에도 응력 집중이 나타나며 변형에 대한 저항성이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.



→ : crack at Al/84C interface → : strain localization at Al/8, c interface → : strain localization in Al-ma Fig. 1. Strain localization at various micro-tensile temperature conditions (OM-DIC analysis results).

4. 결론 및 향후과제

Micro-scale OM-DIC를 이용하여 소성변형 온도에 따른 금속기지 및 강화재계면에서의 응력집중 변화를 분석하였다. 향후에는 이러한 실험방법을 기반으로 강화재계면에서의 응력집중 완화를 위한 표면처리 기술을 개발하고, 금속복합소재의 적용범위 확대를 위한 지속적인 노력이 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

[1] H Guo et al. J.Alloys.Compd. 829:154521, 2020.

Fe계 금속복합소재의 첨가원소를 통한 열팽창계수 Tailoring 연구 Research on Tailoring the Coefficient of Thermal Expansion in Fe-Based MMCs via Alloying Elements

*김민수 ¹, 박현재 ^{1,2}, 조은서 ^{1,2}, 조승찬 ¹, 이상복 ¹, 이상관 ¹, 권한상 ², 김정환 ¹⁺ * Minsu Kim ¹, Hyeonjae Park ^{1,2}, Eunseo Cho ^{1,2}, Seungchan Cho¹, Sangbok Lee ¹, Sang-kwan Lee ¹, Hansang Kwon ², Jeonghwan Kim¹⁺ ¹ 한국재료연구원, ² 부산대학교 재료공학부, ³ 부경대학교 융합소재공학부

⁺E-mail: jhwankim@kims.re.kr

Keywords: Metal Matrix Composites(MMCs), Nickel, Invar effect, Coefficient of thermal expansion.

1. 서론

Metal Matrix Composites(MMCs)은 매트릭스와 강화재의 조합을 이용하여 기존 소재보다 경량화 되면서도 사용환경에 맞게 고온 안정성, 열팽창 거동 등을 효과적으로 제어할 수 있다는 장점으로 주목받는 소재이다.[1] 예를 들어, Titanium Carbide(TiC)와 같은 세라믹 입자를 강화재로 하여 금속소재를 복합화 하면 경량화는 물론 고온 강도 및 내산화성을 향상시키고 항공 우주 구조재나 극한 온도에 노출되는 부품 등 다양한 분야에 활용이 가능하다.

그 중에서도 steel 기반의 TiC강화 MMCs는 SUS431, SKD11과 같은 다양한 강종으로 연구되어 왔으며, 이와 같은 기지를 사용한 복합소재는 기존 steel 보다 높은 강도와 강성을 갖고, 낮은 Coefficient of Thermal Expansion(CTE)를 갖는 TiC 세라믹 강화재로 인해 향상된 열안정성을 가진다. 하지만, 모재의 CTE가 강화재보다 높다면, 강화재의 CTE보다 우수한 복합소재는 제조될 수 없다는 한계가 있다.

본 연구에서는 복합소재 자체의 열팽창 특성을 낮출 수 있는 방안으로 Invar 효과와[2] 세라믹 강화재가 갖는 낮은 열팽창 특성이 상호작용하며 나타나는 열팽창 억제 효과에 초점을 맞추어, 복합소재의 열팽창 특성을 제어하는 방안을 모색하고자 한다.

2. 실험방법

MMCs는 자체 제작한 가압 함침 장비를 통해 GPI(Gas Pressure Infiltration) 공정으로 제조되었다. 강화재로 사용한 TiC powder는 1µm의 불규칙한 형상을 가지는 분말을 사용하였습니다. 강화재를 60vol.% 부피로 첨가하기 위해 흑연 몰드에서 일축 가압 하였으며, 1200℃의 소결온도로 소결하였다. 얻어진 40 vol.% 기공률의 프리폼에 Ni을 0, 10, 20, 30, 35, 40 wt.% 만큼 첨가한 기지금속을 1600℃Ar 분위기에서 10분간 유지후 로냉시켜 복합소재를 얻어내었다.

미세구조 관찰을 위해 colloidal silica suspension을 사용하여 연마 및 에칭 되었다. As-cast 상태의 시편의 미세구조는 FE-SEM(JIB-4601F, JEOL, JAPAN)으로 관찰되었다. 열팽창계수는 TMA(TMA Q400, TA Instruments, USA)를 통해 0에서 400℃의 온도범위에서 측정되었으며 MMCs의 상 분석은 Electron BackScatter Diffraction(EBSD; SymmentryS2, Oxford, UK)의 Phase map을 이용하여 시각화 되었다.

3. 결과 및 고찰

Fig.1.은 GPI 공정을 통해 제조된 복합소재의 FE-SEM Image 이다. Ni첨가에 따라 Pearlite- Bainite- Austenite 의 순으로 관찰 되며 Ni 첨가량이 증가함에 따라 Austenite 안정화가 일어나는 것을 볼 수 있다.



Fig. 1. FE-SEM microstructure image of Fe-Ni/TiC MMCs

이후 열팽창계수 측정을 통해 Invar 효과에 따라 감소하는 열팽창계수의 경향을 보았으며, 각 열팽창 특성의 원인을 규명하였다.

4. 결론 및 향후과제

Ni의 첨가량에 따라 바뀌는 기지의 성질을 이용하여 열팽창 특성의 제어를 수행하였다. 200℃의 온도에서 Invar 기지가 최소 CTE를 보였고, 400℃에서는 Fe-40Ni 기지가 최소의 CTE를 보였다.

향후 기지의 원소 첨가 뿐만 아니라 TiC 함량 조절을 통해 원하는 소재의 CTE에 매칭되는 소재를 연구할 예정이다.

참고문헌

K. Chawla: 'Metal Matrix Composites', 1-370; 2013,
 C. E. Guillaume, Nature, 1904, 71(1832), 134-139.

후기

본 연구는 과학기술정보통신부 나노및소재기술개발 사업 (RS-2024-00444649)과 중소기업혁신개발사업 수출지향형 (Tech-Bridrge)' (RS-2024-00487614)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

TiX(C, N, B₂) 강화재 첨가에 의한 Inconel 718 복합재 분말의 적층제조 특성 비교 Comparison of additively manufactured Inconel 718 composite powders with TiX(C, N, B₂) reinforcement

*정원종¹, 서주원², 김홍물³, 류호진⁴⁺ *W. Jeong¹, J. Suh², H. Kim³, H.J. Ryu^{1,4+}

¹한국과학기술원 기계기술연구소,² 원자력연구원 재료안전기술원,³ ㈜ 하나AMT,⁴ 한국과학기술원 원자력및양자공학과 ⁺E-mail: hojinryu@kaist.ac.kr

Keywords: Metal matrix composite, Inconel 718, reinforcement, Tensile properties

1. 서론

인코넬 초내열 합금은 우수한 고온 특성 및 부식 특성으로 인해 우주항공 및 원자력 산업에서 사용되고 있다. 하지만 이러한 우수한 기계적 특성으로 인해 부품을 제조함에 있어 어려움이 있으며, 사용되는 부품의 형태가 복잡하기 때문에 가공비가 크다는 단점을 갖는다. 또한, 시스템의 효율 상승 및 안전성 향상을 위해 더욱 우수한 기계적 특성이 요구되고 있다. 따라서 가공성 향상 및 우수한 기계적 특성 확보를 위한 노력의 일환으로 복합재 분말을 활용한 적층제조 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만, 강화재로 세라믹 강화재는 적층제조 공정 중 레이저 흡수율을 증가시켜 용해되며, 이에 빕 따라 미세조직적 특성이 변화함이 최근 보고되었다 [1,2]. 따라서 본 연구에서는 대표적인 초내열합금인 Inconel 718 분말에 TiX(C, N, B2)를 각각 첨가한 후, 적층제조 공정에 적용하여 침입형 원소에 따른 미세조직 및 기계적 특성 평가를 목표로 한다.

2. 실험

50-150 μm 크기의 Inconel 718 분말(HANA AMT)과 5 μm 크기 이하의 TiC, TiN, TiB₂ (Sigma Aldrich) 강화재 를 SMART (Surface Modification and Reinforcement Transport) 공정에 적용해 Inconel 718 기반 복합재 분말을 제작하였다 [3]. 강화재는 최대 3 wt%로 첨가한 후, LPDED (laser powder directed energy deposition) 공정에 적용하여 샘플을 제작하였다. 샘플을 제조하기 위해 420 W의 레이저 파워를 사용하였으며, zig-zag 스캔 전략을 이용하였다.

3. 결과



Fig. 1 (a) TiC, (b) TiB₂, 그리고 (c) TiN으로 강화된 Inconel 718 샘플의 열처리 전 인장 특성 분석

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 TiC, TiB2, TiB2를 Inconel 718에 첨가한 후 적층제조하여 기계적 특성을 평가하였다. 제작한 샘플은 각기 다른 기계적 물성을 보여주었다. 향후에는 열처리 후의 기계적 특성을 평가하고 강화 기구를 분석을 통해 interstitial 원자에 따른 특성 평가가 필요할 것으로 예상된다.

참고문헌

[1] W Jeong et al. Compos Part B Eng 2025.

- [2] W Jeong et al. J Mater Sci Technol 2025.
- [3] T Lee et al. Appl Surf Sci 2023.

Gd₂O₃ 적용 방식에 따른 AI 복합소재의 중성자 흡수능 및 방열 특성 변화 Effect of Gd₂O₃ Application Methods on Neutron Absorption and Thermal Properties of Al Matrix Composites

*강민우¹, 이동현¹, 김정환¹, 이상복¹, 이상관¹, 권한상², 이태규³, 조승찬¹⁺ * Minwoo Kang¹, Donghyun Lee¹, Junghwan Kim¹, Sang-Bok Lee¹, Sang-Kwan Lee¹, Hansang Kwon², Taegyu Lee³, Seungchan Cho¹⁺

¹ 한국재료연구원 융·복합재료연구본부, ² 부경대학교 신소재시스템공학과, ³ 한밭대학교 신소재공학과 ⁺E-mail: sccho@kims.re.kr

Keywords: Al matrix composites, Gadolinium oxide, Neutron absorption, Spent nuclear fuel

1. 서론

사용후핵연료(Spent nuclear fuel)의 운반 및 저장 안정성 향상을 위해 높은 중성자 흡수능과 우수한 열전도도를 동시에 확보할 수 있는 소재가 필요하다. 현재 상용 중성자 흡수소재로 사용되는 Boron carbide(B₄C)-Aluminum(Al) 복합소재는 B₄C 함량 중성자 흡수능이 향상되지만 증가에 따라 열전도도가 저하되는 한계가 존재한다[1]. 이를 해결하기 위해 Gadolinium oxide(Gd₂O₃)를 활용한 중성자 흡수소재에 대한 연구가 진행되고 있으나, self-shielding 및 neutron channeling 현상으로 인해 이론 대비 중성자 흡수능이 저하되는 문제가 있다[2].

본 연구에서는 B₄C 표면에 Gd₂O₃를 코팅층 형태로 적용하는 새로운 접근 방식을 도입하여 중성자 차폐 복합소재를 개발하고, 중성자 흡수능 및 열전도도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험방법

Gd₂O₃ 적용 방식에 따른 중성자 흡수능 및 열전도도 차이를 평가하기 위해 Gd₂O₃를 단순 입자상으로 첨가하는 방식과 B₄C 표면에 코팅층으로 형성하는 방식을 비교하였다.

Metal-Organic Framework (MOF) 기반 산화물 코팅 공정을 적용하여 B₄C 표면에 나노 수준의 균일한 Gd₂O₃ 코팅층을 형성하였다.

복합소재를 제조하기 위해 Pure Al 분말을 기지재로, 강화재로는 B4C, Gd₂O₃ 그리고 B4C@Gd₂O₃ 분말을 각각 사용하여 복합소재를 설계하였다. 제조 공정은 Spark Plasma Sintering (SPS) 공정을 활용하였으며 550 ℃, 40 MPa, 5분 유지의 조건으로 제조되었다.

3. 결과 및 토의

Fig.1의 B₄C@Gd₂O₃ 복합소재의 미세구조 분석 결과, B₄C 입자 표면에 약 100 nm 두께의 Gd₂O₃ 층이 균일하게 형성됨을 확인하였다. 중성자 흡수 단면적 계수 및 열전도도 측정 결과, B4C@Gd₂O₃ 복합소재는 단일 B4C 복합소재 대비 중성자 흡수능이 35%, 열전도도가 5% 향상되었으며, 입자상 첨가 방식보다 각각 20%, 10% 높은 개선 되었다. 이는 Gd₂O₃의 중성자 흡수능은 이론적으로 예측된 값의 96.6% 수준이다.



Fig. 1. (a) TEM analysis and (b) TEM-EDS result of $B_4C@Gd_2O_3/Al$ composites

4. 결론

본 연구에서는 B₄C-A1 복합소재의 중성자 흡수능과 열전도도의 동시 향상을 위해 Gd₂O₃ 적용 방식에 대한 연구를 수행하였다. MOF 기반 산화물 코팅 공정을 활용하여 B₄C 입자 표면에 Gd₂O₃를 균일하게 형성함으로써 이론에 가까운 수준의 중성자 흡수능을 달성하고, 열전도도 저하 문제를 완화할 수 있음을 확인하였다.

본 연구 결과는 사용후핵연료 저장용 B4C-A1 복합소재에 대한 새로운 전략을 제시하며, 중성자 차폐 및 열관리가 요구되는 다양한 응용 분야에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] Onur P., & Pul M. Journal of Materials:Design and Applications. 235:2746-2761, 2021

[2] Zhanga Peng et. al.. Vacuum, 162:92-100. 2019.

후기

본 연구는 본 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발 사업 (RS-2024-00420363) 과 과학기술정보통신부 나노및 소재기술개발사업 (RS-2024-00444649)의 지원으로 수행 되었으며 이에 감사드립니다.



- 31 -

우주항공청 항공혁신임무보증프로그램 소개

Introduction to the Aeronautics Innovation Mission Assurance Program of the KASA

최미진 ¹, 이명직 ¹, 박형욱 ¹, 김지현 ¹, 김현빈 ¹⁺ ^{} M.J. Choi¹, M.J. Lee ¹, H.W. Park ¹, J.H. Kim¹, H.B. Kim¹⁺

¹ 우주항공청

+E-mail: hyunbin5067@korea.kr

Keywords: Quality Assurance, Product Assurance, R&D, Aeronautics Innovation, Material & Component, Eco-friendly technology

1. 서론

항공산업은 지속 가능한 기술 개발과 안전성 강화를 위한 제도적 기반 마련이 중요한 시점에 있다. 우주항공청은 국가 차원에서 우주항공 분야의 경쟁력 강화를 담당하고, 항공혁신임무보증은 항공기술 발전과 안정성을 보장하는 핵심 활동을 수행한다. 본 발표에서는 우주항공청의 주요 업무와 항공혁신 임무보증의 역할, 그리고 소관 R&D 과제들이 항공산업 경쟁력 강화에 기여하는 방안을 다룬다.

2. 본론1 우주항공청 소개

2.1 우주항공청 소개

우주항공청은국가차원에서 우주항공 분야의 경쟁력을 강화하고, 우주항공 관련 산업의 지속 가능한 성장을 도모하는 핵심적인 기능을 수행하며, 주요 업무는 국가 우주항공 정책 수립, 핵심기술 확보, 산업 육성, 위험 대비, 국제 협력, 민군 협력 등을 포함한다.

2.2 항공혁신임무보증 소개

항공혁신부문은 '글로벌 신시장 선점을 위한 미래항공 핵심기술 개발', '항공부품 세계 생산 기지화를 위한 생태계 구축', '민군협력 및 국제공동개발 확대'라는 정책 방향을 통해서 신 항공산업의 주도권을 확보하는데 주력을 하고 있다. 그 중에서 항공혁신임무보증은 항공 기술의 발전과 안전성을 보장하기 위한 핵심적인 전략적 활동을 수행하고 있으며, 기존 항공분야 품질보증, 제품보증을 넘어 임무의 안정적 달성을 위한 항공혁신 임무보증 전략을 마련하고 있다.

3. 본론2 항공혁신임무보증 소관 R&D 소개

항공혁신임무보증 소관 R&D는 항공산업의 기술적 혁신과 경쟁력 강화를 위한 다양한 연구 개발 과제를 수행하고 있으며, 항공용 소재 및 부품의 성능 향상, 국산화, 친환경 혁신 기술 등을 R&D 과제로 수행하고 있다. 본 발표에서는 '항공용 경량소재 데이터 국산화 시험개발 사업', '항공 우주 부품 공정 고도화 사업', '신 항공산업 생태계 구축을 위한 친환경 첨단소재/부품 개발 기획'을 중심으로 설명하고자 한다.

4. 결론 및 향후과제

항공혁신임무보증은 항공 산업의 다양한 분야에서 기술적인 혁신을 실현하고, 이와 같은 과정에서 발생할 수 있는 위험을 최소화하고, 유지하기 위한 제도적 기반을 구축하고 있다. 향후에는, 민군 협력 및 국제 공동 개발을 통한 글로벌 협력 네트워크 강화를 통해 기술적 리더십을 지속적으로 확대할 것이며, 이를 바탕으로 국제 경쟁력 있는 기술 개발을 이어갈 것이다.

항공용 AI 합금 국산화를 위한 데이터베이스 개발 Development of Material Database for Aerospace Al Alloys

*손진일 ¹, 김효진 ², 마태동 ³⁺ * J.I. Son ¹, H.J. Kim ², T.D. Ma³⁺

¹ 테스코㈜ CTO, ² 테스코㈜ 시험평가부, ³ 테스코㈜ 시험평가부 ⁺E-mail: jison@testcor.co.kr

Keywords: Aerospace, MMPDS, Al alloy, AMS (Aerospace Material Specification), MMPDS, Tensile, Compression, Shear, Bearing, High-cycle fatigue, Fracture toughness, Fatigue crack growth rate, Stress-corrosion

1. 서론

본 과제는 우주항공청 지원으로 수행하고 있으며, 과제의 목표는 항공용 Al 합금의 국산화를 추진 하며 해당 합금을 대상으로 알루미늄 설계허용치 DB 개발 및 한국형 항공소재 물성 통계분석 기술 확보에 있다.

2. 본론

항공기용 소재 중 Al합금은 우수한 비강도 특성 으로 인해 항공우주 재료로 널리 사용되고 있으며 고부가가치 소재로 개발에 따른 산업적 파급효과가 높은 소재이다. 특히, 2000 계열 합금은 고온 및 극저온에서의 뛰어난 강도와 고온 크리프 저항성을 가지며, 7000 계열 합금은 계열 합금 중 상대적으로 높은 강도 특성을 가진다.

항공용 금속 소재는 AMS(Aerospace Material Specification) 규격에서 제조 방법 및 물성 요구도를 규정하고 있으며, 특정 물성 요구도의 경우 통계적 기법을 사용한 S-Basis 설계허용치를 요구한다. 이러한 항공기 설계에 사용되는 소재의 설계허용치 및 시험 요구사항은 MMPDS Handbook에 규정되어 있다. 항공 소재 국산화를 위해 우선 AMS 규격을 만족하는 소재의 제조 기술과 제조된 소재에 대한 설계허용치가 확보되어야 한다.



※ The FAA(Federal Aviation Administration) views the MMPDS handbook as a vital tool for aircraft certification and continued airworthiness activities.

Fig. 1. MMPDS 등재를 위한 프로세스

본 과제에서는 테스코㈜ 주관으로 항공기 OEM인 한국항공우주산업이 사용하는 다양한 형상의 2000 및 7000 계열 Al합금을 국내 5개 업체가 참여하여 설계 및 개발하였다. 이후, 개발 소재는 일련의 설계, 시제품 제작, 시편 제작, 5개 기관의 시험 평가 및 설계허용치 산출 과정을 거치게 되어 신뢰성 높은 물성 데이터가 확보된다.



Fig. 2. 소재 개발 프로세스

본 세션을 통해 개발된 소재의 시험평가 항목, 시험평가 프로세스 및 설계허용치 산출과정을 간략히 소개하고 항공 소재 국산화 개발을 앞당길 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

3. 결론 및 향후과제

항공용 Al 합금의 소재물성 DB 확보는 국내 항공산업의 경쟁력을 강화하기 위한 핵심 과제 중 하나로, 고신뢰성 데이터를 기반으로 한 설계허용치 구축이 필수적이다. 이를 위해 다양한 제조공정 및 열처리 조건에 따른 물성 데이터를 체계적으로 수집·분석하여 신뢰성 높은 DB를 구축해야 한다. 특히, 항공 소재 분야는 뿌리산업과 밀접하게 연관 되어 있으며, 국내 제조업 전반의 기술 고도화와도 직결된다. 따라서 국내 기업들의 기술력을 향상시키 고, 해외 의존도를 낮추기 위해서는 국가 차원의 지속적인 연구 및 지원이 필요하다.

이에 따라, 우주항공청과의 긴밀한 협력을 통해 국가 항공 소재 개발 전략을 수립하고, 국제 표준 (MMPDS)과 부합하는 물성 통계분석 기술을 정립함 으로써 한국형 항공소재의 신뢰성을 높이는 것이 중요하다. 궁극적으로, 이러한 연구 성과는 국내 항공우주산업의 글로벌 경쟁력을 확보하는 데 기여할 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 우주항공청 지원으로 수행되었습니다.

특

별

세

셔

항공용 Ti 합금 국산화를 위한 데이터베이스 개발 Development of Materials Database for Aerospace Grade Ti Alloys

*권용남 ¹+, 박현일¹ * Y.-N. Kwon ¹⁺, H. I. Park ¹

¹ 한국재료연구원 항공우주재료연구센터 ⁺E-mail: kyn1740@kims.re.kr

Keywords: Ti alloys, fastener, MMPDS, design allowable,

1. 서론

대부분 수입에 의존하고 있는 항공용 Ti 합금 및 패스너의 국산화를 추진하며 해당대상으로 항공기 설계용 소재 물성 데이터베이스를 개발하는 과제를 우주항공청 지원으로 수행하고 있다. 본 과제를 통해 국내 항공소재기업 지원하여 항공용 Ti 합금의 국산화를 달성하고자 하였으며 과제를 통해 개발된 내용을 본 발표에서 공유하고자 하였다.

2. 본론

항공우주용 소재는 AMS로 대표되는 규격을 만족하더라도 항공기 제작업체에서 설계에 필요한 물성 허용값을 제시하지 않으면 항공기 제작에 사용되기가 어렵다. 우리나라의 항공 소재 국산화가 미진한 이유는 항공 소재가 요구하는 높은 품질뿐만 아니라 물성 허용값 데이터를 제시하지 못한 것이 국산화가 미진한 원인으로 작용하였다.

본 과제에서는 한국재료연구원이 주관을 하고 항공기 OEM인 한국항공우주산업이 사용하는 Ti 합금 및 패스너를 다양한 국내기업들이 참여하여 개발하였으며 해당 소재들을 다수의 기관들이 참여하여 시험하였다. 시험결과를 항공기 설계용 물성 허용값을 개발 및 국내기업들의 항공 소재 국산화 현황을 소개하고 항공 소재 국산화 개발을 앞당기는 방안에 대해 토의할 예정이다.

3. 결론 및 향후과제

항공 Ti 합금의 소재물성 DB 확보는 항공 소재 국산화의 필수적인 사항으로 항공소재기업의 고부가가치를 실현할 수 있으며 국내 항공 OEM에게는 해외 제작사들이 진행하는 RSP 사업에 참여할 수 있는 기회를 확대하는 계기가 될 수 있다. 본 과제를 통해 항공기 기체에 사용되는 대표적인 합금의 물성 데이터를 확보하였으나 항공기 엔진 및 기체에 사용되는 다양한 합금의 국산화를 위해 항공소재물성 DB 개발이 지속적으로 진행될 수 있기를 기대한다.

후기

본 연구는 우주항공청 지원으로 수행되었습니다.



엔진구조용 Ni계 고온부품 소재 국산화 개발 및 Database 구축 Development of high-temperature Ni-based engine structural parts materials and establishment of a database

최현선 ¹⁺, 송영석 ², 주영규 ³, 이재현 ⁴, 민기득 ¹ ^{} G.D. Hong ¹, G.S. Hong ², B.J. Hangook³⁺

¹ ㈜피레타, ² ㈜세아창원특수강, ³ 한화에어로스페이스㈜, ⁴ 창원대학교 ⁺E-mail: hyunsun.choi@pileta.co.kr

Keywords: IN738LC, MMPDS, Material database

1. 서론

항공 엔진에 사용되는 고온부품은 고온·고압의 가혹한 환경에서 사용된다. 고온부품에 사용되는 소재는 우수한 고온강도, 안정한 미세구조 및 내산화성 등 다양한 기계적·화학적 물성이 요구된다. 특히, 국내에서는 4세대 전투기가 개발되었음에도 불구하고 가장 중요한 엔진은 GE의 해외 선진사 제품을 사용하고 있다. 최근에는 국산 엔진 개발을 진행하면서 엔진 품질에 대한 요구도도 해외 선지사 수준으로 높아졌다. 고온부품 소재의 경우 전세계적으로 전략무기 소재로 구분되고, 희토류 함유가 높아 국제 정세에 따라 수입에 큰 문제가 발생한다. 따라서, 국산 엔진을 개발함에 있어 소재부터 부품까지 국산화를 수행할 수 있는 소재 공정 개발 및 Database를 구축하였다.

2. 본론

2.1 IN738LC 공정개발

항공용 엔진에는 많은 종류의 고온소재가 사용된다. 그중에서 대상 소재는 엔진에 널리 사용되는 IN738LC에 대하여 합금 제작 공정, 정밀 주조 공정 개발을 수행하였다. 항공용 엔지에 사용되는IN738LC 경우 고청정/고품질의 제조기술이 필요하다. 이를 위해 Master Ingot 기술 확보가 필요하며, 특히 규격 요구도에 따른 주요 성분비율 관리 및 비금속 개재물 혼입 방지 기술에 대한 제조 기술 확보가 필수적이다.

2.2 IN738LC 물성 database 구축

국내 생산 ingot이 항공용 부품으로 사용하기 위해서는 외산 소재와의 동등성 입증과 신뢰성 검증을 위해 MMPDS(Metallic Materials Properties Development and Standardization) 기반 소재 평가 DB가 필수적으로 요구되고 있다. 그러나 현재까지 국내에서는 체계적인 평가 DB를 구축하지 못해 제작사 필수적 요구사항을 만족시키지 못하고 있다. 특히, MMPDS 핸드북에 일부 니켈 합금의 특성이 기재되어 있으나, 상온 인장강도 위주의 데이터들이며, 근래에 개발된 고성능 소재는 기재되어 있지 않은 경우가 대부분이다. 본 연구에서 구축하고자 하는 IN738 LC의 소재 DB 역시 MMPDS 문서에는 기재되어 있지 않기 때문에 개발소재에 대한 DB구축은 필수적이다. 개발기술을 활용한 부품 소재 국산화 성공은 필수적으로 국내외 항공기 제작사의 인증제품목록(QPL, qualified product list)에 반드시 등재되어야 해당 소재를 활용한 설계가 가능하다. 이러한 QPL 등재를 위해서는 설계사가 요구하는 필수 평가 Data package 제공과 제조 기술 검증 또한 필수적으로 수행되어야 한다.



Fig. 1. Procedure for building a database of domestic master ingots.

3. 결론 및 향후과제

성공적인 항공용 국산화 소재 개발을 통하여 소재 강국으로의 발돋움을 수행할 수 있다. 다양한 항공용 소재 개발함에 따라 소재 생산업체의 경쟁력 강화 및 산학연 독자 소재 개발이 지속 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] MMPDS-16, Chapter9

후기

이 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEII) 연구비지원에 의한연구임(20016472)

민·군 항공기 탄소소재 적용 날개 부품의 RTM 공정 고도화 기술 개발 Development of RTM process advancement technology for wing parts using carbon materials for civil and military aircraft

*김태곤¹, 신도훈¹ * T.G. Kim¹, D.H. Shin¹

¹ 대한항공 항공우주사업본부 ⁺E-mail: taigkim@koreanair.com

Keywords: Resin Transfer Molding, Wingtip Structure, BIS(Built In Sensor) Mold, Automated Preforming

1. 서론

탄소 중립 달성을 위한 항공기의 연비 향상, 신규 친환경 연료 개발 등의 기술 개발 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 특히 금속 대비 비강도, 비강성이 높은 탄소 섬유는 항공기 경량화를 위해 주목받고 있는 소재이다.

기존 항공기에 적용되는 복합재 부품은 Autoclave 성형 기술로 제작되고 있으며 이는 높은 에너지 소모와 생산 비용에 대한 한계가 있기 때문에 본 연구에서는 이를 탈피하고자 탈오토클레이브(OoA) 공정인 RTM 공정의 핵심 요소 기술들을 개발하고 Boeing 787 항공기 Wingtip 구조물에 개발된 기술을 적용하여 시제품을 제작하고자 한다.

2. 연구개발제품 정의

개발 대상품은 열경화성 탄소복합소재 항공기 날개 구조물이며, Boeing 787 항공기 날개 끝단에 장착되어 날개 끝 와류에 의해 발생하는 항력을 감소시켜주는 기능을 수행한다. 해당 구조물은 스킨(Skin), 스파(Spar) 및 리브(Rib)로 구성되며 기계적 체결을 통해 조립되는 형태이나 이번 개발품은 부품 일체화를 통해 무게 절감 및 조립 비용 감소를 추구하고 RTM 고도화 공정 기술 적용으로 생산성 확대 및 가격 경쟁력 확보를 목적으로 한다.

3. 핵심 요소 기술

3.1 RTM 일체형 Wingtip 설계 기술 개발

RTM 기반 일체형 구조물 설계 최적화 기술을 개발하고 Digitalization을 구현한 3D 도면(MBD) 체계 구축을 목표로 하고있다. 또한 프리폼 도면 창생, Net Edge 요건 및 건조 섬유의 성형성과 주름 등 RTM 특성에 맞는 제작 요구도를 고려하여 정의하고자 한다.

3.2 프리폼 자동화 기술 고도화

건조 섬유의 적층 및 성형 공정은 수작업 위주의 노동집약적 생산 방식이며 수지가 함침되어 있지 않아 프리프레그(Prepreg) 대비 작업성이 떨어진다. 또한 주름 및 보풀 발생 가능성이 높기 때문에 안정적이고 균일한 적층/성형 공정이 요구된다.

따라서, 주름 방지 공정 설계 및 자동화 기반 프리폼 적층/성형 공정 개발을 통해 생산성과 품질을 향상시키고자 한다.

3.3 센서 기반 치공구 기술 고도화

상하 금형과 다수의 내부 치공구를 요구하는 RTM 금형은 수지주입과 경화를 위한 열전달 및 기밀 기능이 요구되며,높은 에너지 효율 및 온도 균일도를 달성하기 위해 금형의 경량화 및 정밀 조절 열원 개발을 필요로 한다.

따라서, 금형 경량화 및 내장형 정밀 센서 설치/운용 기술 개발 등 치공구 기술 고도화를 수행하고자 한다.

3.4 실시간 데이터 기반 RTM 복합재 부품 개발

고품질 RTM 복합재 부품 개발을 위해 시뮬레이션을 이용한 수지 유동 경로 예측과 정밀 센서 시스템 실측 정보를 비교 분석하여 수지 주입/배출구를 설계하고 주입 및 경화 공정 최적화를 수행 하고자 한다. 개발된 일체형 RTM 공정 복합재 부품과 기존 레거시 공정(A/C) 적용 리벳 체결형 형상 부품과의 비교분석을 통해 개선 효과를 산출하고자 한다.

4. 결론 및 향후과제

본 과제는 1차년도(2024) 목표인 Wingtip 개념 설계, 축소형 시제 및 치공구 설계 수행을 완료 하였으며, 요소기술 개발을 위해 대형 일체형 RTM 공정 설계 조사, BIS 기반 치공구 조사 그리고 섬유 및 수지 물성 정량화 등을 수행하였다.

2차년도(2025)는 축소형 시제를 제작하고 결과를 반영하여 Wingtip 상세 설계를 진행하고 Upper skin용 치공구를 설계하고 제작 착수할 예정이다.

신항공산업 생태계 구축을 위한 친환경 첨단 소재/부품 개발 Development of Eco-Friendly Advanced Materials and Components for a New Aviation Industry Ecosystem

*이헌수 ¹⁺, 송운형 ² * H.S. Lee ¹⁺, W.H.Song ²

¹ 한국과학기술연구원 Ramp 융합연구단, ² ㈜ 대한항공 ⁺E-mail: a123@kist.re.kr

Keywords: Aviation, Ecosystem, Material, Components.

1. 서론

2024년 10월 시작된 우주항공청 신항공산업 생태계 구축을 위한 친환경 첨단 소재/부품 개발 탐색과제의 우선추진과제가 논의된다.

2. 사업 개요

2.1 사업의 목적

신항공산업 생태계 경쟁력 강화를 위한 항공기 열가소성 기체구조 핵심 기술 개발을 목적으로 함.

2.2 추진배경

항공산업은 규제 변화, 산업 재편, 환경 문제, 기술 혁신 등 다양한 요인의 영향을 받고 있다. 정부가 원자재에 대해 25% 관세를 최근 미국 예고함에 따라 항공기 제조비용 및 부품·소재 수입 비용이 증가할 것으로 예상되며, 이는 항공기 부품·소재 산업 전반에 걸쳐 심각한 영향을 미칠 우려가 제기되고 있다. 또한, 코로나19 팬데믹 이후 항공부품 업계는 재편의 시기를 맞이하고 환경에 있으며, 산업 효과적으로 급변하는 대응하기 위해 주기적인 소재 및 부품 수요 회복에 대비할 필요성이 강조되고 있다. IATA에 따르면, 글로벌 항공 여객 수요는 2024년 팬데믹 이전 수준을 초과하고, 2025년에는 약 47억 명에 이를 것으로 전망된다.

이와 더불어 기존 항공기 복합재료로 주로 사용되는 열경화성 소재는 재활용이 어려운 특성을 가지며, 폐기물 대부분이 소각 및 매립에 의존하고 있어 환경오염 문제가 심화되고 있다. 특히, 항공기 부품의 교체 및 정비 과정에서 발생하는 폐기물은 2021년 5,978톤에서 2024년 11,215톤으로 증가할 것으로 예상된다. 이러한 배경에서, 친환경 항공 부품의 고속 자동화 생산 기술은 작업시간 단축 및 수작업 감소를 통해 최소 40% 이상의 인건비 절감을 가능하게 하며, 新항공산업에서 글로벌 원가 경쟁력을 확보하는 핵심 전략으로 주목받고 있다.

3. 추진체계

주관부처인 우주항공청의 관리 하, 아래와 같은 추진체계로, 우선추진과제 총괄기획위원회와 기술 분과위원회의 협의를 통해 과제 기획이 진행 중이다.



Fig. 1. 추진체계

4. 결론 및 향후과제

본 학회에서 제시된 의견은 우선추진과제 총괄기획 위원회와 기술분과위원회에 공유되어 과제 기획 시 참고할 예정이다.

탄소섬유보강재 및 긴장재 연구 동향 및 적용현황

Research Trends and Application Status of Carbon Fiber Reinforced Polymer Rebars and Prestressing Tendon

*김장호 ¹ * JHJ Kim¹

¹ 연세대학교 건설환경공학과 ⁺E-mail: jjhkim@yonsei.ac.kr

Keywords: Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Rod, Grid, Tendon

1. 서론

CFRP는 기존 철근 대비 높은 강도를 가지면서도 무게가 훨씬 가벼워 구조물의 하중을 줄일 수 있으며, 부식에 강하기 때문에 해양 구조물이나 염해 환경에 노출된 교량 및 건축물에서 활용 가능성이 크다. 본 연구에서는 CFRP 보강재를 철근 대체재로 활용하기 위한 기술 개발 및 실용화 연구를 수행하고, 이를 통해 국내 건설 산업에서 CFRP의 적용 가능성을 높이고자 재료적 특성, 부재 성능, 실구조물 적용에 대한 연구를 진행하고 있다.

2. CFRP 복합체 건설분야 연구 현황

2.1 CFRP Rod 연구 현황

CFRP Rod의 적용 및 사용성을 평가하기 위해 CFRP Rod의 섬유와 폴리머의 혼합비율, 재료의 물성(인장, 압축, 내구성(염해, 탄산화, 내알칼리성)을 평가하였다. 또한 CFRP Rod를 보, 슬래브, 벽체에 적용하여 구조실험을 진행하였다. 보, 슬래브 실험에서는 휨, 전단, 부착력, 균열, 하중-처짐, 에너지 흡수율을 주요 변수로 평가하여 구조적 성능 및 내구성을 검토하였고 벽체 실험에서는 압축, 전단 저항성, 균열 거동을 주요로 평가하였다. 그림. 1과 같이 CFRP Rod의 실용화를 위하여 철도교 45m ZiPC 실물거터에 22.3%를 대체하여 적용하였다.

2.2 CFRP Grid 연구 현황.

콘크리트 구조물에 CFRP Grid는 그림. 2와 같으며 CFRP Grid 규격은 가로x세로(3,000mm x 1,000mm), 중간재 규격은 두께 1mm, 폭 20mm로 중간재 사이의 간격은 100mm이다. CFRP Grid는 CFRP Rod와 같이 재료의 물성, 콘크리트에 적용한 구조실험을 수행하였다.

2.3 CFRP Tendon 연구 현황

CFRP Tendon은 기존 PC(Prestressed Concrete) 강선이 가지는 부식과 피로, 자중 프리스트레스 손실 문제 등을 효과적으로 해결할 수 있어 건설 구조물의 내구성을 향상시키는데 기여할 수 있으나 CFRP 케이블의 성능 평가 기준 및 CFRP 케이블-콘크리트 복합재의 설계기준은 아직 전 세계적으로 확립되지 않은 상태이다. 따라서 CFRP 케이블의 안정적인 적용을 위해서는 표준화된 성능 평가 방법과 설계 기준을 마련하는 것이 중요하다.



Fig. 3. CFRP Tendon 직접인장시험

3. 결론 및 향후과제

CFRP Rod의 경우 실구조물 적용을 위하여 철도교 시공을 향후 목표이며, CFRP Grid의 실용화를 위하여 교량 슬래브 하부에 거더와 연결되어있는 데크에 적용할 예정이다. CFRP Tendon의 경우 단기손실 (정착, 마찰, 부착, 비부착, 릴렉세이션 등)과 장기손실 (크리프, 건조수축) 성능에 대한 연구가 지속적으로 수행할 예정이다.

참고문헌

[1] 탄소고분자 부식 ZERO 철근대체재 기술 연구개발 계획서, 국토교통과학기술진흥원, 2021.

FRP튜브보강 부분충전 콘크리트파일의 해석 및 설계 Analysis and design of partially filled concrete piles reinforced with FRP tubes

*정흥진 ¹ *H. Chung¹

¹ 전주대학교 토목환경공학과 ㈜코어텍 ⁺E-mail:hjchung@jj.ac.kr

Keywords: CFRP, Composite Piles, FRP Tubes, Numerical Analysis

1. 서론

콘크리트말뚝은 압축강도가 인장강도에 비하여 매우 크기 때문에 수직하중에 대한 저항성은 우수하나, 수평하중에 의하여 발생하는 휨에 대한 저항성은 상대적으로 취약하고, 강관말뚝은 압축강도와 인장 강도가 동일하기 때문에 휨강도가 우수하지만, PHC 말뚝에 비해서 경제성이 떨어 지고, 부식에 의한 단면 손실이 발생할 우려가 있으며, 압축부에서 좌굴이 발생할 우려가 있다.

일반적인 콘크리트 말뚝에 섬유보강 플라스틱 (FRP) 으로 제작한 튜브를 합성한 콘크리트 FRP합성말뚝의 경우, 휨강도와 부식에 대한 저항성이 우수하여 기존 말뚝의 대안으로 적용할 수 있으나 설계방법 및 해석 모델을 개발할 필요가 있다. 본 연구에서는 콘크리트 FRP합성말뚝의 현장적용을 위한 기초연구로서 이론적인 방법, 수치해석적인 방법, 실험적인 방법 으로 휨거동 및 휨강도를 각각 비교, 분석하였다

2. 수치해석모델 및 설계강도 산정

수치해석 모델의 적용성을 검증하기 위해 원심력으로 다져진 콘크리트의 압축강도시험 방법 (KS F 2454)을 적용한 실험값과 콘크리트 소성모델을 이용한 해석값 을 비교하여 콘크리트손상 소성모델을 검증하였다. 콘크리트의 비선형거동은 ABAQUS의 CDP (Concrete Damage Plasticity)모델을 사용하였고 FIB-Model-Code-1990 concrete Model에서 제시한 계수값을 적용 하였다. 변형률적합법은 선형분포를 보이는, 변형률에 대응 하는 각 재료의 응력을 구하여 단면의 강도를 산정 하는 방법으로 각 재료의 응력-변형률 관계만 정확 하게 주어 지면 적합조건 및 평형조건을 만족시키게 되므로, 정해에 가까운 결과가 얻어질 수 있다. 본 연구 에서는 변형률적합법을 이용하여 각 변형률에 대응 하는 힘과 모멘트를 산정하고 축방향 힘의 평형 조건 을 이용하여 FRP합성말뚝의 휨강도를 산정하였다.

3. 수치해석 및 실물실험 결과

수치해석 모델의 적용성을 검증하기 위해 직경이 500 mm인 콘크리트 FRP합성말뚝의 휨실험을 수행 하였고 그 결과를 수치해석결과와 비교하였다. 초기 강성에서 보이는 차이는 콘크리트 재료모델과 실제 강성과의 차이에서 비롯된 것으로 판단되며 최종적인 휨강도는 비교적 정확하게 예측하였다.



Table 1 Caption in 1 line, English only w/o period

특

별

세

셔

Flexural strength (kN·m)						
P. C.		Test1	Test2	Test3		
Equation	Analysis		Test ave.			
770.3	816.8	789.0	764.2	785.1		
			779.4			

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트 FRP합성말뚝의 현장적용을 위한 기초연구로서 변형률적합법을 이용한 이론적인 횜강도산정방법을 제시하였고, 콘크리트 손상거동을 고려할 수 있는 수치해석모델을 개발하였으며 이를 실험결과와 비교하여 정확성을 검증하였다.

참고문헌

- [1] Chung, H. J., and Paik, K. H. (2018), Analysis on Flexural Behavior of Hollow Prestressed Concrete Filled Steel Tube Piles, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 22, No. 2, 133-140.
- [2] Mohamed, H. M., and Masmoudi, R. (2010), Flexural strength and behavior of steel and FRP-reinforced concretefilled FRP tube beams, Enjineering Structures, Vol. 32, 3789-3800. Aenean et est sem. Phasellus nec lectus bibendum,.

건설분야 복합재 적용 현황 및 최신 연구동향 Current Status of Composite Material Applications in the Construction Sector and Latest Research Trends

*김정회 ¹⁺ * J.H. Kim ¹⁺

¹ 아이에스동서(주) 기술연구소 ⁺E-mail: special9373@isdongseo.co.kr

Keywords: FRP, Construction sector, CFRP Tube, CFRP Concrete pile, cable, CFRP cable

1. 서론

건설 분야에서는 복합재료의 특성 중 가볍고 내구성이 우수하며, 고강도인 재료의 특징을 반영한 연구가 활발히 진행되고 있었다. 그러나, 가격이 비싸고 국내 적용 기준이 명확하지 않아 그 활용도가 보수보강 부분에 국한되어 사용되어 왔다. 그러나 최근 GFRP 보강근의 설계기준(KDS 24 50 05:2024), 건설 표준시방서(KCS 24 50 05:2024)와 FRCM 복합재 구조설계 지침(KCI-PM217.1-24) 등이 제정되며 건설분야에 복합재 적용 기반이 다져지고 있다. 특히, 탄소섬유, 유리섬유 등이 건축 및 토목 구조물에 적용되고 있는 대표적 복합재료로 최근 주요 구조재로 사용을 위한 연구개발(R&D)이 활발히 진행되고 있다.

2. 보수보강

복합재의 건설분야 적용은 보수보강 분야에서 많이 활용되고 있다. 교량의 휨 강도 증대를 위해 CFRP 시트를 부착하여 구조적 안정성을 강화하거나, 내진 성능을 강화하기 위해 건축물의 기둥과 보에 복합재를 적용한 사례가 있다. 특히, 지진 다발 지역인 일본에서는 내진 보강에 활발히 적용되고 있으며, 부두나 교각에 적용하여 부식 방지와 수중 내구성 증대에도 활용되고 있다.



그림 3. 수중 구조물 부식

3. 연구동향

2024년 4월부터 2028년 12월까지 연구중인 산업 통상자원부 K Carbon 플래그십 과제는 총 15개의 세부 과제로 구성되어 있으며, 이중 건설분야 과제 는 2개로 복합재의 건설 주요 부재의 대표적인 최 근 연구과제이다.

"강관 파일 대체용 200톤급 CFRP 튜브 합성 콘 크리트 파일 개발"연구과제는 CFRP Tube와 원심성 형 고강도 콘크리트를 합성하여 내부식성, 고기능 /고성능, 재료의 효율성 증대를 통한 탄소발생저감 형 파일 개발을 목표로 하고 있다.



"건설용 강연선 대체를 위한 2,600MPa급 7연선 CFRP 케이블 제조 및 활용기술 개발"과제는 경량 화 및 내부식성 그리고 진동 감쇄 효과로 PSC 구조 물의 안전성 확보를 목표로 한 연구과제이다.



Highly Transparent, Colorless Optical Engineering Film with Outstanding Mechanical Strength and Folding Reliability Using Mismatched Charge-Transfer Complex Intensification

Sung Woo Hong

Green Circulation R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH) ⁺E-mail: swhong@kitech.re.kr *Keywords*: flexible displays, optical film, charge-transfer complex, folding reliability

1. Introduction

Flexible displays and electronics are advancing rapidly, which necessitates flexible display cover windows (fDCWs) that can replace rigid and fragile glass substrates while withstanding repeated folding and unfolding cycles. fDCWs generally require materials with high optical quality, mechanical strength, folding reliability, and processability for mass production.

In the development of fDCWs, extensive research has focused on ultrathin glass (UTG) and polymeric films. While UTG offers hardness and transparency, it lacks impact strength and manufacturability. On the other hand, polymeric films are more flexible but generally exhibit lower mechanical strength and optical quality. Among potential polymeric materials for fDCWs, polyimides (PIs) are particularly promising due to their exceptional mechanical robustness and thermal stability, which is attributed to the unique charge-transfer complex (CTC). However, conventional colorless polyimides (cCLPIs) often present a trade-off between mechanical and optical properties, typically exhibiting a yellowness because of CTC interactions.

This study presents a highly transparent, colorless, and flexible window film based on a functional CLPI, employing the concept of mismatched CTC intensification through multiple hydrogen bonding and salt complexation interactions.¹ The developed window film demonstrates excellent optical properties and outstanding bulk and surface mechanical strengths. To our knowledge, it exhibits the best-recorded balance between mechanical and optical properties for a highly flexible optical film.² Furthermore, it possesses remarkable mechanical durability and folding reliability.² These remarkable properties are attributed to the unique supramolecular structure with multiple hydrogen bonding and salt complexation interactions, which exhibits mismatched CTC intensification. The mismatched CTC intensification mechanism is also proposed in this study.

2. Results and Discussion

A series of window film (CLPI-X) samples were prepared as follows. An amine-terminated amide oligomer (AAO) was reacted with diamine and dianhydride monomers to synthesize CLPI-X. CLPI-X/S-Y samples were also prepared by adding salt to CLPI-X. The mechanical and optical properties of CLPI samples and commercial engineering plastic films (PC and PET) were analyzed using a universal testing machine and spectrophotometer. The resulting window film exhibited Young's modulus of 10.3 GPa, total transmittance close to 90%, and YI below 2.0. This is the best-recorded balance between mechanical strength and optical properties for a highly flexible optical film.

Window films must have excellent mechanical durability and folding reliability to successfully develop next-generation flexible displays. However, conventional polymers often suffer from significant wrinkling and creasing in folded areas due to permanent deformation beyond their elastic limits. A U-shaped dynamic folding experiment (a folding radius of 1.5 mm and a folding/unfolding time of 1 s) was performed to measure the mechanical durability and folding reliability. Surprisingly, unlike conventional polymers, the folded surface of CLPI-X/S-Y remained intact and showed no observable deformation, fracture, or damage even after over 300,000 folding/unfolding cycles.

In traditional PI systems, CTCs are formed by specific consecutive interactions between alternately formed electron donors and acceptors. This is the cause of the trade-off effect between the mechanical and optical properties. When the electron donors are replaced with AAO containing amide groups, the alternating electron donor/electron acceptor structure is broken, leading to mismatched CTC interactions. As a result, decolorization can be achieved owing to the weakened interactions resulting from the unique mismatched CTC structure. The weakening of the CTC interactions usually also decreases the mechanical strength; however, CLPI-X exhibited good optical properties and an excellent mechanical strength compared to those of the cCLPIs. It is also noted that multiple amide groups are localized in the AAOs, which means that multiple hydrogen bonds are created between the AAOs of the CLPI-X chains. As a result, the mismatched CTC interactions are intensified, which plays an important role in overcoming the trade-off effect. In addition, because CLPI-X/S-Y chains are connected via multiple hydrogen bonds, salt ions can be maximally complexed by four adjacent CLPI-X/S-Y chains. Owing to this unique supramolecular structure with multiple hydrogen bonding interactions and multiple complexation interactions, the interactions between CLPI-X/S-Y chains are more intense than those between CLPI-X chains.

3. Conclusions

In this study, we developed a novel, highly transparent, colorless window film for a flexible display cover window, employing the concept of CTC intensification. The resulting window film demonstrated excellent optical and mechanical properties upon optimizing the monomer compositions and intensifying the CTC interactions. More importantly, the window film showed the best-recorded balance between mechanical strength and optical properties among previously reported optical materials, including commercially available optical-grade engineering plastic films and glass substrates. In addition, the window film exhibited excellent mechanical durability and folding reliability over 300,000 folding/unfolding cycles. These were achieved by intensifying the mismatched CTC interactions based on a combination of multiple hydrogen bonding salt complexation interactions, leading to a unique supramolecular structure. We expect this work to provide a new avenue for fabricating highly flexible optical films for next-generation flexible displays and electronics.

References

[1] Hong et al. Adv. Funct. Mater. 32:2111040-2111050 2022.

[2] Unpublished Results.

인간 뇌/고분자 바이오복합재료 기반 3D 멀티스케일 분자지도화 기술 Processing human brain/polymer biocomposites for 3D multiscale molecular mapping

박주혁+

Juhyuk Park⁺

서울대학교 공과대학 재료공학부, 신소재공동연구소, 협동과정 바이오엔지니어링 ⁺E-mail: juhyukp@snu.ac.kr

Keywords: Biocomposites, Polymer Hydrogels, Tissue Processing, Brain Engineering

1. 서론

인간 뇌기능과 질환 이해를 위해서는 조직 내 단백질, RNA 등 생체분자의 3차원 이미징과 그에 기반한 표현형 분석이 필요하다 [1]. 이를 달성하기 위해 다양한 분자 표지 및 이미징 기술이 개발되었지만, 뇌의 약한 기계적 물성과 불투명성, 낮은 분자투과성 등 재료 물성적 한계 때문에 거대 조직의 고품질 3차원 분자 지도화를 달성하는 데에 한계가 있어 왔다. 본 연구에서는, 고분자 하이드로젤과 인간 뇌를 복합 재료화 하는 바이오복합재료 가공 기술을 개발하여 투명하고 탄성력이 높으며, 크기가 제어될 수 있는 신개념 인간 뇌조직 가공 기술을 개발하였다 [2]. 이를 통해 초고속 분자 표지, 멀티스케일 형광 이미징을 시연하고, 알츠하이머병 병리를 탐구하였다.

2. 투명, 고탄성, 크기가변, 하이드로젤 가공

목표로 하는 조직 가공 기술 개발을 위해, 투명하고 탄성이 우수하며, 크기 조절이 가능한 고성능 고분자 하이드로젤을 합성하였다. 탄성을 극대화하기 위해, 분자량이 높은 고분자를 저속 합성하여 고도로 엉킨 구조를 형성하였으며, 동시에 기능기의 가수분해를 크기 가변형 기능을 부여하였다. 이 고분자 하이드로젤 신소재를 mELAST (magnifiable entangled linkaugmented stretchable tissue-hydrogel)라 명명하였다 (Fig. 1) [2].



Fig. 1. mELAST 하이드로젤 및 인간 뇌/하이드로젤 복합재료 가공 [2].

3. 인간 뇌/하이드로젤 복합재료화 기술

개발된 mELAST와 인간 뇌 조직의 복합재료화를 통해 조직의 재료 물성을 강화하였다. 복합재료 공정에서 널리 사용되는 수지 이송 성형 (Resin Transfer Molding)에 착안하여, 고분자 단량체를 인간 뇌 조직 내에 균질하게 분산시킨 후, 열 개시제 기반 현장 중합(in-situ polymerization)을 통해 가공하였으며, 이후 후처리 공정을 거쳐 완성하였다.

4. 인간 뇌 3D 멀티스케일 분자지도화

가공된 인간 뇌/고분자 복합체(mELAST)의 고기능 화된 물성을 활용하여 인간 뇌의 3차원 분자 지도를 제작하였다. 탄력성을 기반으로 한 분자 표지 가속화 와 크기 가변성을 활용한 초고해상도 멀티스케일 이미징을 달성하였으며 (Fig. 2), 투명성을 이용해 이를 3차원으로 영상화할 수 있었다. 이러한 기술을 활용하여 인간 알츠하이머 질환의 원인 규명에 기여할 수 있었다.



Fig. 2. 인간 뇌 3D 멀티스케일 분자 지도 [2].

5. 결론 및 향후과제

본 연구는 고분자 하이드로젤과의 복합재료화를 통해, 인간 뇌 분석의 큰 장애물로 작용해 온 부족한 재료 물성을 해결하는 기술을 개발하였다. 기능화된 하이드로젤의 지속적인 개발과 적용, 그리고 다양한 질병에의 응용을 통해 재료과학과 뇌과학의 동반 발전을 이끌 것으로 기대된다.

참고문헌

K Chung et al. *Nature* 497 (7449), 332-337, 2013.
 J Park, et al. *Science* 384 (6701), eadh9979, 2024.

후기

본 연구는 JPB Foundation, National Institutes of Health, Institute for Basic Science 등에 의해 지원 받았음.

3DSW continuous fiber-reinforced 3D printing mold for the autoclave / compression molding process

*Gu-Hyeok Kang ¹⁺, Jonathan Haas¹, Andreas Menrath¹, Bjoern Beck¹, Young-Bin Park² and Frank Henning¹
¹ Fraunhofer Institute for Chemical Technology ICT, Karlsruhe, 76327, Germany, ² Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), UNIST-gil 50, Ulju-gun, Ulsan 44919, Republic of Korea
⁺E-mail: gu.hyeok.kang@ict.fraunhofer.de

Keywords : BAAM, 3DSW, continuous fiber reinforcement, composite autoclave mold

1. Introduction

In this study, we apply existing BAAM (Big Area Additive Manufacturing) technology with 3DSW (3D Skeleton Winding) to enhance molds for compression molding. This approach improves shape and surface quality through a machining process after BAAM, including the 3DSW process, to manufacture high-strength, continuous fiber-reinforced composite molds. The reinforced molds will be effectively used continuously and provide sufficient usability under autoclave processing conditions.

2. Manuscript

2.1 BAAM: The mold was produced using BAAM. It employs the mirror skirt mold and seat bracket side mold used by 'H' Motors, which were created through BAAM and finished through machining. The materials used for production include three types: PC, PPS, and ABS.

2.2 3DSW reinforcement: The 3DSW reinforcement method for composite molds has been studied, leading to the implementation of continuous fiber reinforcement. Using the reinforced molds, compression tests are conducted to verify their ability to withstand pressure during processing as shown in the Fig. 1.



Fig. 1. 3DSW reinforced molds for compression molding

3. Results and Discussion

By simulating the molds produced using BAAM, we were able to assess the strain during the process. As shown in Fig. 2, we identified that not only does mold failure occur during typical use, but also that the deformation of the mold affects the precision of the product.



Fig. 2. BAAM compression mold simulation

Through simulation, we identified the areas that require reinforcement and devised methods to strengthen the corresponding locations, as shown in Figure 1. To validate this, we produced a scaled-down version of the BAAM + 3DSW mold and conducted experiments. To verify the reinforcement effect of 3DSW, we performed compression tests using a universal testing machine, allowing for a comparison of the reinforcement effects based on the number of windings. This enabled us to predict effective reinforcement methods and the required number of windings for appropriate reinforcement.

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

Molds used for producing composite products typically have high costs when made of metal, presenting a significant issue. Through this BAAM + 3DSW mold study, we were able to address these concerns. The BAAM molds reinforced with continuous fibers demonstrated sufficient material properties, effectively suggesting a suitable mold manufacturing method for small-scale production.

Acknowledgement

This work was supported by Machinery Equipment Industry Technology Development Program (Grant No. RS-2024-00441896) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) of Korea through Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT).

Transferred Nanomaterials for Load-Bearing and Broadband Radar Absorbing Structures

Kinal Kim^{1}, Seongjun Kim¹ and Sang-Eui Lee^{1†} ¹Department of Mechanical Engineering, Inha University [†]E-mail: selee@inha.ac.kr

Keywords : Nanocarbon, radar-absorbing structure, frequency-selective surface, glass fiber, interlaminar shear strength

1. Introduction

Stealth technology often relies on frequency-selective surfaces (FSS) for radar absorption. Traditional FSS-RAS fabrication requires time-consuming steps involving conductive inks and metallic masks. This study replaces these with nanomaterial (NM) [1] patterns transferred onto glass fiber prepregs, forming an FSS-RAS based on a Jerusalem cross design. Nanocarbon is deposited on polyimide film, then pressure-rolled transferred on glass fiber fabric. The composite is vacuum-bagged and cured, achieving over a required radar absorption across an interesting frequency band with a less than 3.0 mm thickness. This scalable, straightforward approach facilitates precise patterning without complex tasks. Shortbeam shear test results also shows that interlaminar shear strength (ILSS) of composite increases when integrating NM as interlayer between each ply of glass fabric.

2. Experimental Method

The NM-based FSS pattern was produced by depositing NM on polyimide (PI) film. The electrical conductivities of NM was measured using 4-point methods. With these values, FSS-based RAS was designed based on Jerusalemcross pattern and simulated using CST Microwave Studio. After that, NM was transferred onto glass fabric prepreg using pressure-rolling technique. The composite RAS was fabricated using vacuum-bagging process. Finally, the electromagnetic absorption performance was measured using free-space measurements. The short-beam shear test were fabricated and tested according to ASTM D2344 standard using universal testing machine.

3. Results and Discussion

3.1 Radar Absorbing Performance

Fig. 1a shows the final FSS-RAS with optimized shapes of Jerusalem-cross FSS. The total thickness of the FSS-RAS is under 3.0 mm. The free-space measurement results shows that the return losses are less than a required absorption in the orthogonal angles (0°, 90°) modes (**Fig. 1b**). This result means that the fabricated RAS is capable of absorbing more than the required absorption of electromagnetic wave in the frequency range of interest.

3.2 Short-Beam Shear Test

Optical images of the fractured specimens are shown in

Fig. 1c. Failure due to delamination was observed in all specimen. For the $[GF_2/NM]$ specimens, delamination occurred only at the interfaces without NM, while the interfaces containing NM remained intact, even after fiber breakage. The calculated ILSS values (**Fig. 1d**) are 23.2 MPa, 24.0 MPa, and 29.0 MPa for [GF], $[GF_2/NM]$, and $[GF_1/NM]$, which correspond to increases of 3.2% and 25.1% for $[GF_2/NM]$ and $[GF_1/NM]$, respectively.



Fig. 1. (a) Schematic of NM pattern, (b) electromagnetic absorption performance, (c) Optical images of fractured SBS test specimens, and (d) interlaminar shear strength (ILSS) of GF composite with and without NM

4. Conclusion

An composite RAS based on FSS using transferred NM was fabricated, achieving over the required absorption across the interesting frequency band at less than 3.0 mm thickness. Short-beam shear test also revealed that the ILSS of glass-fiber composite was enhanced by integrating NM as interlayer. This novel technique has proven to be effective and scalable.

References

[1] S. E. Lee, et al. Compos. Stru. 76(4), 397 (2006).

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT). (No. NRF-2022R1A2C1006020).).

산소분압에 따른 캐노피 투명체 코팅의 성능 변화 연구 Effects of Oxygen Partial Pressure on Canopy Transparency Coatings

*황민제¹, 최광식¹ * M.J. Hwang¹, K.S. Choi

¹ 한국항공우주산업㈜ ⁺E-mail: minje.hwang@koreaaero.com

Keywords : Transparency, Canopy, Coating

Acknowledgement : 이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 제원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-020)

1. 서론

캐노피 투명체의 소재적 특성으로 인한 전자기과 및 태양광 투과 성능을 제한하기 위하여 다양한 캐노피 투명체 코팅기술 연구가 수행되고 있다. 본 연구를 통해 코팅을 통한 투명체에 전도성을 부여하는 연구를 수행하였으며 진공증착 시 산소분압을 달리하여 코팅을 수행하고 특성을 분석하였다.

2. 제작

150 x 150 mm 평판의 스트레치드 아크릴 기판에 캐노피 투명체 코팅을 수행하였다.

3. 결과

산소분압 비율이 감소됨에 따라 기존 공정보다 더 낮은 면저항 및 광투과도를 확보할 수 있었으며, 추가적으로 두께를 감소시킴에 따라 면저항 및 광투과도가 일부 상승하나 기존보다 우수한 성능이 유지되는 것을 확인하였다.



Fig. 1 Sheet resistance measurement results





4. 결론 및 향후과제

산소분압에 따른 캐노피 투명체 코팅 성능의 변화를 확인하였다. 공정개선을 통해 더 낮은 두께에서 면저항 및 태양방사투과율을 추가적으로 낮출 수 있었다.

저온저압 신제조 공정을 활용한 고성능 산화물/산화물 세라믹 매트릭스 스텔스 복합재 구조 물성 평가

Evaluation of mechanical properties in oxide/oxide ceramic stealth composites through innovative manufacturing techniques

*홍동준¹, 장한나¹, 임채환¹, 최원호², 홍성원², 이현석², 고현석³, 이상훈³, 남영우^{1,4+} * D.J Hong¹, H. Jang¹, C.H. Lim¹, W.H. Choi², S.W. Hong², H.S. Lee², H.S. Ko³, S.H. Lee³, Y.W. Nam^{1,4+}

> ¹ 한국항공대학교 일반대학원 항공우주 및 기계공학과, ²대한항공 항공기술연구원, ³ 한국세라믹기술원 수소·디지털융복합센터, ⁴ 한국항공대학교 스마트드론공학과

+ E-mail: ywnam@kau.ac.kr

Keywords: Stealth vehicles, Oxide/oxide CMCs, Ni-plated ceramic oxide fiber, Micro-structure

1. 서론

기존 연구된 세라믹 매트릭스 복합재(CMCs)는 주로 SiCf/SiC와 같은 비산화물 계열이며 극초음속 환경에서 추가적인 구조설계가 필요하다. 또한, 문헌 조사 결과 기존 소재들은 극초음속 환경에서 요구되는 고온 성능을 충족하지 못하는 한계가 있다 [1-2]. 이에 본 연구에서는 산화물 세라믹 복합재(O-CMCs)를 개발하기 매트릭스 위해 저온 · 저압 성형 공정을 적용하였으며 고내열 산화물 섬유 및 세라믹 매트릭스를 이용하여 대형화 및 정밀 형상화 구혀의 어려움을 개선하고자 하였다 [3-5]. 제작된 복합재는 기계적 물성과 온도 변화에 따른 전자기적 물성을 평가하였으며 고내열 세라믹 폼을 이용한 전파 흡수 구조체를 설계·제작하여 상온 및 고온 환경에서의 광대역 전파 흡수 성능을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료 준비

고온 환경에서도 구조적 안정성과 고내열 특성을 가지는 세라믹 산화물 섬유를 선정하였으며 전자기적 물성 개질을 위해 섬유 표면 OO 무전해 도금 공정을 적용하여 유전 손실 특성을 조절하였다. 세라믹 매트릭스는 저온·저압 성형 공정을 활용하여 알루미나 기반 슬러리 형태로 제작하였으며 기존의 지오폴리머기반 매트릭스의 변형 구조를 적용하였다. 세라믹 폼은 전파 산란 효과와 열 차단 성능을 고려하여 선정되었다. OOO 폼은 실리콘 카바이드 폼에 비해 낮은 열전도도와 우수한 화학적 안정성을 가지며 경량성과 다공성 구조를 통해 전파 흡수 성능을 극대화할 수 있어 최종적으로 적용되었다.

2.2 설계 및 방법

본 연구에서는 ASTM Standard 기반으로 세라믹 매트릭스 복합재의 상온 기계적 물성 시험을 수행하였다. 광대역 전과 흡수 구조체는 폼 코어와 다층 구조의 최적화를 통해 흡수 성능을 극대화하였다. 상용 소프트웨어인 CST Microwave Studio를 활용하여 최적 두께를 도출하고 광대역에서 우수한 전파 흡수 성능을 갖는 구조를 설계하였다.

3. 결론

본 연구에서는 세라믹 매트릭스 복합재 기반의 광대역 전파 흡수 구조체를 개발하고 기계적 및 전자기적 특성을 평가하였다. CT-scan 과 SEM 단면 이미지를 통해 기공률을 분석한 결과, 매트릭스 조성에서 입자 크기와 복합재 경화 공정이 기공률 및 기계적 물성에 미치는 영향을 확인하였다. 이를 통해 균일한 매트릭스 분포와 우수한 기계적 특성을 확보하였다. 상온 및 고온 환경에서 전파 흡수 성능을 평가한 결과, 광대역에서 최대 9.22 GHz 대역폭에서 90% 이상의 흡수 성능을 보였으며 고온 환경에서 온도 변화에 따른 전파 흡수 특성을 평가하였으며 성능을 유지함을 확인하였다.

참고문헌

- L. P. Zawada et al. Journal of the European Ceramic Society. 86(6):981-990, 2003.
- [2] A. Tontisakis et al.. Ceramic International. 47(4):5347-5363, 2021.
- [3] A. Débarre et al. *Journal of the European Ceramic Society*. 42(15):7149-7156, 2022.
- [4] E. Volkmann et al. Journal of Material Science. 49:7890-7899, 2014.
- [5] A. B. Peters et al. Materials Science. 15:3328, 2024.

후기

이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구(KRIT-CT-22-028)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00397400).

회전익 항공기의 레이더 반사 면적 측정에 관한 연구

A Study on the Measurement of Radar Cross Section of Rotary Wing Aircraft *박동진¹, 진도현¹, 이정률¹⁺ * D.J. Park¹, D.H. Jin¹, J.R. Lee¹⁺

¹ KAIST 항공우주공학과 ⁺E-mail:<u>leejrr@kaist.ac.kr</u>

Keywords: RCS(Radar Cross Section), Anechoic chamber, Rotary aircraft.

1. 서론

현대 전장 환경에서는 적의 탐지를 회피할 수 있는 스텔스 기술의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 특히 KF-X 사업과 F-35 도입 등으로 인해 고정익 스텔스 항공기에 대한 국내 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근에는 생존성 향상을 위한 회전익 항공기의 스텔스 기술 확보에 대한 관심도 증대되고 있다.

회전익 항공기는 복잡한 회전체 구조와 다양한 운용 환경으로 인해 고정익에 비해 RCS(Radar Cross Section) 분석 및 측정이 더 어렵고 정밀한 기술이 요구된다. [1] 이에 따라 본 연구에서는 회전익 항공기의 스텔스 기술 개발 동향과 함께, 실제 RCS 측정에 필요한 시험 환경 및 분석 기술에 대해 고찰하고자 한다.

2. 본론

2.1 회전익 항공기의 RCS 측정의 특수성

회전익 항공기는 메인로터, 테일로터 등의 회전체가 포함된 구조로, 이들의 회전 반경, 속도, 블레이드 각도 등의 요소에 따라 RCS 값이 시간에 따라 변화하게 된다. 특히 회전체가 레이더 빔 방향으로 접근하거나 이탈할 때 발생하는 도플러 쉬프트(doppler shift) 효과는 고정익 항공기에서는 나타나지 않는 동적인 주파수 변조(RCS modulation)를 유발한다. 따라서 회전익 항공기의 RCS는 고정된 값이 아니라 시간-주파수 영역에서 변화하는 스펙트럼 형태로 해석되어야 한다.

2.2 동적 RCS 측정을 위한 시험평가 기술

이러한 특성을 고려하기 위해서는, 단순히 정적인 조건에서 RCS를 측정하는 기존 방식이 아닌, 회전체의 회전 동작이 포함된 동적 환경에서의 시험평가 시스템이 필요하다. 예를 들어, 레이더 송수신기와 회전 시험대(로터 테스트 장치)를 동기화하고, 회전 상태에서 측정된 RCS 데이터를 스펙트로그램으로 분석함으로써 doppler 효과를 정량화할 수 있다.



Fig. 1. Experimental setup for rotating blade RCS measurements

3. 결론 및 향후과제

회전익 항공기의 회전체 구조는 고정익에 비해 RCS 측정 시 훨씬 복잡한 물리적 현상을 유발하며, 특히 doppler 효과를 고려한 동적 시험 환경이 필수적임을 확인하였다. 기존의 정적 RCS 분석이나 수치 해석 기반의 접근만으로는 실험적 검증이 어렵기 때문에, 실제 회전익 구조에 대한 시험 기반 데이터 확보가 시급한 과제로 남아 있다.

향후에는 실제 회전익 항공기의 RCS를 동적 환경에서 실험적으로 측정할 수 있는 시스템을 설계하고, 이를 기반으로 도플러 주파수 변화와 RCS 변동 간의 상관관계를 정량화할 수 있는 분석 체계를 구축하고자 한다.

참고문헌

 Timothy Conn (2005), "Time-Frequency Analysis of Time-Varying Spectra with Application to Rotorcraft Testing", IEEE, NRTF Operations, USA

후기

이 논문은 2022년 12월부터 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임. (No.KRIT-CT-22-082), 고속 장거리 기동 헬기 개발 기술(Build-I)

유전 알고리즘과 멱 법칙을 통합한 마이크로파 흡수체의 최적 설계 Optimal design of Microwave Absorbers integrating genetic algorithm and power law

*신승철¹, 홍명진¹, 이상의¹⁺ * S.C. Shin¹, M.J. Hong¹, S.E. Lee¹⁺

> ¹ 인하대학교 기계공학과 ⁺E-mail: selee@inha.ac.kr

Keywords: MWNT, Radar absorbing materials, Power law, Genetic algorithm(GA).

1. 서론

전자기 기술의 발전과 동시에 전자기기에서 발생하는 전자파 공해와 군사 시설 및 정교한 기기의 작동을 방해하는 전자파 간섭에 대한 관심이 많아지고 있다 [1]. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 전자파를 열에너지 또는 다른 형태의 에너지로 변환할 수 있는 전자파 흡수 소재의 합리적인 설계 및 제작이 필요하다. 본 연구에서는 유전 알고리즘과 멱 법칙을 결합하여, MWCNT 단일 filler를 이용한 X-band (8.2~12.4GHz) 전영역을 모두 커버하면서 최적의 두께를 갖는 레이더 흡수체를 설계하였다.

2. 실험

PDMS Base와 PDMS Curing agent를 10:1 비율로 혼합하였다. 이후 MWCNT를 0.0~2.0wt% 함량으로 PDMS와 혼합하였으며 Paste mixer를 사용하여 MWCNT가 matrix에 골고루 분산하도록 하였다. 이후 100 ℃ 이상의 온도에서 MWCNT-PDMS 복합재를 경화 시켰다. MWCNT-PDMS 복합재의 전자기 물성 평가를 위해 X-band 자유공간측정 장비를 이용하였다. 이후 Matlab과 CST studio 상용 소프트웨어를 사용하여 레이더 흡수체 설계 및 해석을 진행하였다.

3. 결과 및 토론

PDMS의 유전 특성을 고려하여 퍼콜레이션 이론에 기반한 기존 스케일링 법칙의 수치방정식을 수정하였으며, 복합재의 복소 유전율을 주파수와 필러 함량의 함수로 도출하였다.





Fig. 1 (a,b)를 보면 수정된 모델이 측정된 값과 잘 맞는 것을 확인할 수 있다. 이는 수정된 모델이 유전체 특성을 잘 예측한다고 볼 수 있다.



Fig. 2. Comparison of reflection loss

제작된 물성의 유전율에서 예측가능한 물성의 유전율까지 범위를 늘려 변수로 설정하였으며 GA를 통해 X-band에서 최적의 두께를 갖는 소재를 설계하였다. Fig. 2를 보면 X-band 에서 reflection loss가 모두 -10dB을 만족하였으며 흡수체의 두께는 3.0mm이었다.

4. 결론 및 향후과제

제안된 최적 설계 방법은 주파수 및 필러 농도에 따른 손실 유전체 복합재의 복소 유전율을 정량적으로 예측함으로써, 레이더 흡수체 설계 시 각 층에 대해 보다 다양한 변수 조합을 제시할 수 있었다. 이를 통해 측정된 물성 기반 기존 설계 방법에 비해 흡수체의 두께를 0.3mm 감소시켰다.

참고문헌

[1] X. Chen, H. Liu, D. Hu, H. Liu, W. Ma, Ceramics International 47, 2021, 23749-23761

후기

이 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받는 중견연구사업인 '단분자 플러렌 유도체를 이용한 금속 복합재료의 물성 제어 기술 개발' (2022R1A2C1006020)에 의해 수행되었습니다.

연속 섬유 3D 프린트 기반 전파흡수구조의 RCS 저감 효과에 관한 연구 Study on the RCS reduction effect of continuous fiber 3D printing-based Radar absorbing structure

*진도현¹, 박동진¹, 이정률¹⁺ * D.H. Jin¹, D.J. Park¹, J.R. Lee¹⁺

¹ 한국과학기술원 항공우주공학과 ⁺E-mail: leejrr@kaist.ar.kr

Keywords: 3D Printing, Optimization design, Radar absorbing structure, Radar cross section

1. 서론

3D 프린팅 공정은 복잡한 형상의 구조물을 빠르고 정확하게 제작할 수 있는 장점을 가져 3D 프린팅 기술 기반 복잡한 형상의 전파흡수체 설계 및 제작 연구가 활발히 수행되었다 [1]. 이러한 전파흡수구조는 전파의 경사 입사 조건에서 높은 흡수성능을 가지도록 설계 및 제작 가능하다 [2]. 본 논문은 경사 입사 전파 흡수에 특화된 전파흡수구조 (RAS, Radar absorbing structure)를 설계 및 제작한 뒤 wedge 형상의 시편에 적용하여 RCS (Radar cross section) 측정을 통해 전파흡수구조 적용에 따른 구조의 RCS 저감 효과를 분석하였다.

2. 연속 섬유 3D 프린팅 기술 기반 전파흡수구조의 RCS 저감 효과 연구

2.1 사각 볼록 요철면 다층 전파흡수구조 설계

본 논문에 사용된 필라멘트는 두종류로 고유전율 특성을 가진 Onyx ESD (Electrostatic discharge) 필라멘트와 절연성 특성을 가진 Fiberglass 필라멘트가 사용되었다. Onyx ESD와 Fiberglass로 제작된 다층 구조와 그 위에 사각 볼록 요철면 표면 구조를 합쳐 요철면 다층 전파흡수구조를 설계하였다. 요철면 표면이 돌출되지 않도록 구조 상부에 fiberglass 소재의 upper plate를 부착하여 전파흡수구조를 설계하였다. 각 설계 파라미터를 조절하여 변수로 TE/TM 모드의 경사 입사의 전파에 대한 최적의 전파 흡수 성능을 가지도록 Ansys HFSS 전자기 해석 소프트웨어를 통해 최적화 설계를 수행하였다. 설계된 전파흡수구조의 모식도는 Fig.1 (a) 와 같다.



Fig. 1. (a) 최적 설계된 전파흡수구조 및 (b) 전파흡수구조가 적용된 wedge 시편에 관한 모식도

2.2 전파흡수구조 적용된 wedge 시편 제작 및 RCS 측정

초음속 항공의 날개의 앞전 형상에 해당되는 wedge 형상 시편에 2.1절에 설계한 전파흡수구조를 적용 하였다. 전파흡수구조가 적용된 wedge 시편 모식도는 Fig.1 (b)와 같다. 연속 섬유 3D 프린트를 통해 전파흡수구조를 제작하여 wedge 시편 양 옆면에 적용하였고 가장자리 부분은 절연 소재인 fiberglass 소재로 제작하였다. 제작된 전파흡수구조 적용 wedge 시편에 대하여 RCS를 측정하였으며 동일 형상 및 크기의 알루미늄 소재의 wedge pec 시편의 RCS와 비교하였다.

3. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 경사 입사 전파 흡수에 특화된 전파흡수구조를 적용한 실구조에 대하여 RCS 저감 효과를 실험적으로 분석 및 확인하였다. 향후 전파흡수구조가 적용된 다양한 형상의 시편을 제작하여 RCS 저감 효과를 분석할 예정이다.

참고문헌

[1] J. Ren et al. *Materials*. 11:1249, 2018.

[2] D. Yubing et al. Materials & Design. 208:109900, 2021.

후기

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인이동체원천기술개발사업단의 지원을 받아 무인이동 체원천기술개발사업을 통해 수행되었습니다 (NRF-2020 M3C1C1A01084220).

전파 흡수 재료의 코팅 두께에 따른 고온 전자기 성능 평가 Evaluation of High-Temperature Electromagnetic Performance of Radar-Absorbing Materials According to Coating Thickness

*최병우¹, 강태웅¹, 배경훈¹, 백상민², 이종광¹⁺ * B.W. Choi¹, T.W. Kang¹, K.H. Bae¹, S.M. Baek², J.K. Lee¹⁺

> ¹ 한밭대학교 기계공학과, ² 국방과학연구소 ⁺E-mail: jongkwang@hanbat.ac.kr

Keywords: Stealth, Radar Absorbing Material, Reflection Loss, Free-Space Measurement, Resonant Frequency

1. 서론

스텔스(stealth)란 전파, 적외선, 음향 탐지 장치 등 다양한 탐지 장치의 추적에 탐지를 최소화하는 것을 의미한다[1]. 이러한 스텔스 기술이 적용된 항공기는 적의 탐지망을 쉽게 무력화할 수 있으며, 아군의 생존성 향상에도 직결된다[2]. 탐지 방법 중에서 전자기파에 의한 탐지 방법이 원거리에서 효과적으로 탐지가 가능하기 때문에, 이를 최소화하는 것은 매우 중요하다[3]. 최근에 레이더 탐지 기술이 발전함에 따라 비행체 배기구 및 첨두부 영역과 같은 고온 영역에 스텔스 기술 적용이 필수적으로 요구되고 있다[4]. 이 연구에서는 전파 흡수 재료(radar absorbing material)의 재료 코팅 두께에 따른 고온 전자기 성능 평가를 수행하였다.

2. 코팅 두께에 따른 상온에서의 반사 손실

전파 흡수 재료의 코팅 두께에 따라 상온에서의 반사 손실(reflection loss)을 비교하였다. 시편은 코팅 두께가 얇은 순으로 A, B, C로 표기하였다. 전자기 성능 측정은 측정 시편의 가공 및 온도에 따른 측정이 용이한 자유 공간 측정(free-space measurement) 방법을 사용하였다.

실험 결과, Fig. 1과 같이 전파 흡수 재료의 코팅 두께가 증가할수록 전자기파의 파장이 길어지면서 공진 주파수(resonant frequency)의 위치가 저주파 쪽으로 이동한 것을 확인하였다.



Fig. 1. Reflection loss at room temperature according to coating thickness.



별

세

셔

3. 고온 전자기 성능 평가

Fig. 02 ~ Fig. 04는 각각 시편 A, B, C에 대한 고온 반사 손실 결과이다. 세 시편 모두 온도가 증가할수록 최대 반사 손실이 증가하는 것을 확인하였다. 800 ℃에서의 공진 주파수를 비교한 결과, C시편이 목표 주파수에 가장 근접하였다.

4. 결론 및 향후계획

이 연구에서는 동일한 재료 및 재료 함유량을 가진 3개의 시편에 대해 코팅 두께에 따른 고온 전자기 성능 평가를 진행하였다. 실험 결과, 향후 목표 주파수에 더욱 근접한 시편 제작이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] CM Choi et al. KIICE. pp. 1331~1337, 2010.
- [2] DY Kim et al. KMS. pp. 210~215, 2012.
- [3] KS Choi et al. KSCM. pp. 201~215, 2022.
- [4] HS Lee et al. KSPE. pp. 583~583, 2020.

국내외 무인협동전투기 개발동향 및 시사점 Trends and Implications for the Development of Collaborative Combat Aircraft

*이창원, 이승현, 임종묵, 이현석, 성기문, 김무섭 ¹ * C.W. Lee, S.H. Lee, J.M. Lim, H.S. Lee, K.M. Seong, M.S. Kim ¹

¹ 대한항공

⁺E-mail: changwonlee@koreanair.com

Keywords: CCA, NCA, UAV, MUMT

1. 서론

미국 국방부는 부상하는 중국의 군사적 도전에 효율적으로 대응하기 위하여 다수 무인 자율 시스템을 신속하게 도입하는 Replicator Initiative를 2023년 8월 발표하였고, 이에 미국 공군은 무인 협동 전투기(CCA; Collaborative Combat Aircraft)라는 새로운 유형의 무인 무기시스템 개발을 적극적으로 추진 중이다.

본 논문에서는 미국에서 새롭게 제시한 무인 협동 전투기의 개념을 정리하고, 미국의 최신 개발 동향과 국내 현황을 살펴봄으로써, 향후 무인 협동 전투기의 향후 적절한 개발 방향을 모색해보고자 한다.

2. 무인협동전투기(CCA) 개념

무인협동전투기는 AI 기반 소프트웨어를 바탕 으로 인간 조종사와 협업하며, 공대공 전투, 공대지 전투, 전자전, 타겟팅, 감시 및 정찰 임무 등 다양한 임무를 수행할 수 있는 체계로서, 낮은 비용으로 전투기의 임무 범위를 확장하고 생존성을 극대화 할 수 있을 것으로 예상되고 있다. 이는 AI, IoT 등 4차 산업혁명 기술을 기반으로 미국 DARPA에서 새롭게 정립한 미래 작전수행방식인 모자이크전 (Mosaic Warfare)에 부합하는 체계라고 할 수 있다.

3. 미국 CCA 사업 개발현황

2024년 4월, 미국 공군은 General Atomics 및 Anduril을 CCA Increment 1 개발업체로 선정하였다. 두 회사는 CCA 상세 설계, 생산, 그리고 시험 비행을 진행하고 있으며, 2026년에 최종 생산 결정을 내리고 2029년까지 첫번째 시스템을 전력화할 계획이다. 미국 공군은 최소 100대의 CCA를 초기 도입할 예정이며, 장기적으로는 1,000대 이상을 확보하는 것을 목표로 하고 있다.



Fig. 1. CCA Increament 1.

현재 개념 정립중인 Increment 2는 스텔스 성능 향상, 전자전 능력 추가 등 다양한 기능이 포함될 것으로 예상되며, 엔진 추력은 3,000~8,000 lbf의 범위가 될 것으로 예상된다. Increment 2에서는 Increment 1에 선정되지 않은 업체(보잉, NG, LM 등)들을 포함하여 다양한 산업 파트너와 협력할 계획이며, 국제 파트너쉽까지도 모색하고 있다고 밝히고 있다.

4. 국내 CCA 개발현황

국내에서는 ADD와 대한항공이 유인전투기와 복합 편대를 구성해 미래 작전을 수행할 중형급 CCA인 저피탐 무인편대기를 개발 중에 있다. 저피탐 무인 편대기는 금년도 2월 기술시범기 1호기가 출고된 바 있으며, 2027년에 유무인 복합 비행시험에 진입하는 것을 목표로 하고 있다.

그리고 한국항공우주산업이 KF-21과 연계한 차세대 공중전투체계를 구성하기 위하여 다목적 무인기와 무인 전투기에 대한 개발을 진행중인 상황이다.

4. 결론 및 향후과제

미국의 CCA Increment 1 선정결과를 살펴보면 적정 성능, AI를 활용한 자율화 및 기체의 모듈화를 특징으로 볼 수 있으며, Increment 2에서는 수직 이착륙, 스텔스 성능 등이 주요한 옵션이 고려되고 있다. 향후 CCA의 성공적 국내개발을 위해서는 미국의 개발 동향을 참고하며, 한국의 지형적/ 작전적 특수성, 미래 수출을 위한 확장성 등을 복합적으로 고려하여 적절한 운영개념 및 개발 요구조건을 설정해야 할 것이다.

참고문헌

 AllAllen, G. C. and Goldston, I., "The Department of Defense's Collaborative Combat Aircraft Program: Good News, Bad News, and Unanswered Questions," CSIS, 2024.
 Hadley, G., "Now CCAs Can Do Things 'We Didn't Think Were Possible'," Air & Space Forces Magazine, 2025.

[3] U.S. Air Force Collaborative Combat Aircraft (CCA), CRS, 2025

자가수리를 포함한 새로운 항공기 구조 건전성 프로그램 New Aircraft Structural Integrity Program including Self-repair

*이정률 ¹⁺ * J.R. Lee ¹⁺

¹ 한국과학기술원 항공우주공학과 ⁺E-mail: leejrr@kaist.ac.kr

Keywords: Aircraft Structural Integrity Program(ASIP), Wireless Ultrasonic Device(WUD), Self-Repair, Thermoplastic composite

1. 서론

최근 제작되는 항공기는 구조재료로 복합재의 사용 비율이 높아지고 있으나, 복합재로 제작된 항공기 기체의 경우 분해조립이 어렵고, 단순한 형태가 아닌 복잡한 구조의 부품 또한 존재하므로, 손상 탐지를 위해 기존의 비파괴검사 방법을 적용하기 어려운 경우가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 기존의 항공기 구조 건전성 프로그램을 개선하기 위해 항공기구조 일체형 열가소성 자가수리 기술을 포함하는 새로운 복합재 항공기 구조 건전성 프로그램을 제안하고자 한다.

2. 자가수리 기술 적용 항공기 구조 건전성 프로그램

본 연구에서는 항공기구조 일체형 열가소성 복합재 자가수리 기술[1]과 무선 손상 모니터링/탐지 기술[2], 레이저초음파 기반의 정밀 손상 가시화 기술[3], AI 기반 손상 평가 기술, 데이터 기반의 손상예측/ 수리시기 판단 기술을 포함하는 새로운 복합재 항공기 구조 건전성 프로그램을 제안하고자 한다. Fig. 1과 같이 운영중인 복합재 항공기에서 반복적으로 노출되는 피로하중에 의해 증가하는 복합재 구조의 모재 균열을 주기적인 전영역 자가수리를 통해 미세한 모재균열을 수리하여 손상으로의 확대를 억제시킬 수 있다. 이 과정에서 억제되지 않고 영구 변형, 층간 분리, 디본딩 (Debonding) 등의 손상으로 진행될 경우 구조 일체형 PZT/FBG 기반의 무선 손상 모니터링/탐지 기술을 통해 손상을 실시간으로 탐지한다. 이때 손상영역은 자가수리 시스템을 통해 국부적으로 수리하고, 수리 전후의 손상 영역을 레이저초음파 검사 기반 정밀가시화 기술과 AI 기반 손상평가 기술을 통해 가시화하고 평가한다. 평가된 손상정보 데이터 기반 구조위험분석을 통해 복합재 항공기의 수명을 예측하고 적정한 수리시기를 판단한다. 이러한 새로운 항공기 구조 건전성 프로그램을 통해 복합재 항공기의 구조안전성을 증대시키고, 정비 비용 절감 및 작전지원율 향상이 가능할 수 있을 것으로 전망 된다.



Fig. 1. Configuration of damage Detection/diagnosisbased self-repair and life prediction.

3. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 항공기구조 일체형 열가소성 복합재 자가수리 기술과 무선 손상 모니터링/탐지 기술, 레이저초음파 기반의 정밀손상가시화 기술, AI 기반 손상 평가 기술, 데이터 기반의 손상예측/수리시기 판단 기술을 포함하는 새로운 항공기 구조 건전성 프로그램을 제안하였다. 향후 각 요소기술을 개발하여 제안된 새로운 구조 건전성 프로그램을 구현할 계획이다.

참고문헌

- [1] X Li et al. Composites Part B: Engineering, Vol. 262, 110814: 1-8, 2023.
- [2] J Park et al. Li et al. Smart Structures and Systems, Vol. 28(3): 333-341, 2021.
- [3] SC Hong et al. Optics and Lasers in Engineering, Vol. 99: 58-65, 2017

후기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단, 무인 이동체 원천기술 개발사업단의 지원을 받아 무인 이동체 원천기술 개발사업을 통해 수행되었음.(NRF-2020M3C1C1A01084220)

적층 복합재 제조를 위한 탈오토클레이브 공정 최신 연구 동향 Recent Advances and Research Trends in Out-of-Autoclave Processes for Manufacturing Composite Laminates

김재웅¹, 이전윤¹⁺ J.W. Kim¹, J.Y. Lee¹⁺

¹ 한국과학기술원 항공우주공학과 ⁺E-mail: jlee@kaist.ac.kr

Keywords: Prepreg, Laminate, Out-of-Autoclave

1. 서론

항공기의 효율적 운항을 위한 경량화는 필수적이며, 이를 달성하기 위한 대표적 방안으로 기존 금속 구조물을 복합재로 대체하는 전략이 널리 활용되고 있다. 복합재는 금속과 유사한 강도를 제공하면서도 낮은 비중으로 인해 뛰어난 경량화 효과를 발휘한다. 특히 항공우주 분야의 복합재는 주로 프리프레그 (prepreg)를 적층하여 라미네이트 형태로 제작되며 [1], 일반적으로 오토클레이브 (autoclave) 공정을 통해 생산된다. 오토클레이브 공정은 고온 및 고압 환경에서 복합재 내부의 기공을 효과적으로 제거할 수 있지만, 높은 설비 비용, 운영 비용 및 낮은 공정 효율성 등의 단점이 지속적으로 지적되어 왔다 [2,3]. 이에 따라 오토클레이브 공정을 사용하지 않고도 우수한 품질의 복합재 라미네이트를 제조할 수 있는 탈오토클레이브 (Out-of-Autoclave, OoA) 공정 기술에 대한 연구와 관심이 증가하고 있다.

2. 탈오토클레이브 공정

2.1 탈오토클레이브 공정의 종류

오토클레이브 공정에서 제공되는 고온·고압 조건을 대체하기 위해 다양한 탈오토클레이브 공정 기술이 개발 및 연구되고 있으며, 현재까지 보고된 주요 기술을 Table 1에 정리하였다. 이 중에는 최근 개발되었거나 새로운 기술적 돌파구를 통해 활발히 연구가 진행 중인 공정들도 포함되어 있다. 대표적인 탈오토클레이브 공정으로는 탈오토클레이브 프리프레그 공정, 직접 전기 발열 (direct electric heating), 마이크로파 발열 (microwave heating), 유도 가열 (induction heating) 등이 있으며, 본 연구에서는 이 네 가지 공정을 중심으로 최근 연구 동향을 분석하고자 한다.

2.2 탈오토클레이브 프리프레그

탈오토클레이브 프리프레그는 오토클레이브 없이 무결함 복합재를 제작하기 위해, 프리프레그 내부에 기공 배출 경로 (engineered vacuum channel)를 사전에 마련하고 레진의 유동성을 향상시켜 대기압만으로도 기공 제거가 가능하도록 설계한 프리프레그를 말한다. 이를 통해 고압 없이도 복합재 내부의 기공을 제거할 수 있으나, 기공 제거 성능의 안정성이 낮다는 한계가 Table 1 Summary of out of autoclaye processes

Table 1	Summary	of out-of-a	utoclave	processes

Process	Heat transfer mechanism	Explanation	Ref.
OoA prepreg	Convection	Modification of prepreg configuration and composition for improved void removal	[2,4,5]
Hot press molding		Compression with a high- temperature mold	[6]
Quickstep	Simultaneous application of heat and pressure via a heat-transfer fluid		[7,8]
SQRTM (Same- Qualified Resin Transfer Molding)		Injection of prepreg- compatible resin to maintain uniform pressure throughout the composite	[9]
Direct electric heating	Conduction	Resistive heat generation via electrical current	[3,10]
Microwav e heating	or volumetric heating	Internal heat generation through dielectric rotation by microwaves	[11,12]
Induction heating	Volumetric heating	Eddy current– based internal heating of conductive fibers	[13,14,15]

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

탈오토클레이브 프리프레그 공정은 오토클레이브를 사용하지 않고도 무결함 복합재를 제조하기 위해 개발된 기술로서, 프리프레그 내부에 기공 배출을 위한 특수한 진공 배출 경로 (engineered vacuum channel)를 사전에 형성하고 레진의 유동성을 개선하여 대기압 조건에서도 효과적인 기공 제거가 가능하도록 설계된 프리프레그를 활용하는 방법이다. 이를 통해 고압 없이도 복합재 내부의 기공 제거가 가능하지만, 기공 제거 성능의 일관성과 안정성이 낮다는 한계점이 지적되어 왔다 [2]. 최근 연구에서는 프리프레그의 두께 방향으로 추가적인 배출 경로를 형성하여 기공 제거 성능을 더욱 향상시키려는 시도가 활발히 진행되고 있다 [4,5].

2.3 직접 전기 발열

접 전기 발열 (direct electric heating) 공정은 라미네이트 내부의 탄소섬유 또는 라미네이트 외부에 배치된 전도성 막 (conductive membrane; 예: 탄소나노튜브 필름, 그래핀 나노판 필름 등)에 전류를 통과시켜 발생 하는 저항 열을 이용하여 복합재를 성형하는 방식이다. 본 공정은 오토클레이브 공정이 대류를 이용해 열을 전달하는 것과 달리, 전도를 통한 직접적인 열 공급 방식으로 공정 효율이 높다는 장점이 있다. 그러나 탄소섬유 배열 방향에 따라 발열 성능의 편차가 발생할 수 있으며 [10], 고성능 전도성 막의 높은 제조 비용이 단점으로 지적된다. 최근 연구에서는 전도성 막을 이용하여 복합재에 열을 균일하게 공급하는 동시에, 나노 다공성 네트워크 (nanoporous network)를 라미네이트 적층 계면에 삽입하여 모세관압 (capillary pressure)을 유도해 내부 기공 제거를 촉진하는 기술이 활발히 연구되고 있다 [3].

2.4 마이크로파 발열

마이크로파 발열 (microwave heating) 공정은 마이크로파를 활용하여 복합재 내부의 레진과 섬유 내 유전체 성분을 진동시켜 직접적으로 열을 발생시키는 방식이다. 본 공정은 높은 열전달 효율을 제공한다는 장점이 있으나, 탄소섬유 강화복합재의 경우 섬유 배열 방향에 따라 마이크로파의 침투도가 불균일하게 나타날 수 있는 한계가 보고되고 있다 [11]. 이를 극복하기 위해 최근 연구에서는 중간 매개체 (intermediate medium)를 마이크로파로 먼저 가열한 후, 간접적으로 복합재에 균일한 열을 전달하는 방식이 시도되고 있으며, 이를 통해 열 전달의 균일성과 공정 안정성 측면에서 유의미한 성능 개선이 이루어지고 있다 [12].

2.5 유도 가열

유도 가열 (induction heating) 공정은 고주파 교류 전류가 흐르는 금속 코일에서 생성되는 자기장에 의해 복합재 내부 탄소섬유에 와전류 (eddy current)가 유도 되어 저항 열이 발생하는 방식이다. 주로 열경화성 (thermoset) 수지보다 열가소성 (thermoplastic) 수지를 사용하는 경우에 대한 연구가 활발히 이루어지고

있으며, 이 공정은 유도 가열 접합 (induction welding)이라는 명칭으로도 널리 알려져 있다. 유도 가열 방식은 복합재와 직접적인 접촉 없이 빠르게 승온시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다 [13]. 그러나 금속 코일과 라미네이트 간의 근접 배치가 필수적이며, 와전류의 효과적인 발생을 위해서는 직교 적층을 포함한 다방향 적층 구조를 구현해야 한다는 제약이 존재한다 [14]. 본 분야는 상대적으로 연구 역사가 짧아 복합재의 수지 종류와 적층 순서가 유도 가열 성능에 미치는 영향을 분석하는 연구가 지속적으로 수행되고 있다[15].

3. 결과 고찰

탈오토클레이브 공정은 오토클레이브 공정에서 제공하는 고압 및 고온 환경을 대체하기 위해 개발 된 일련의 기술을 포괄한다. 그 중 탈오토클레이브 프리프레그 공정은 고압 조건 없이도 무결함의 복합재 제조가 가능하도록 설계된 소재 기술이며, 직접 전기 발열, 마이크로파 발열 및 유도 가열 공정은 기존 오토클레이브 공정의 열 전달 방식을 더욱 효율적인 발열 방식으로 대체하려는 기술적 접근이라 할 수 있다. 그러나 현 단계에서 각 탈오토클레이브 공정은 오토클레이브 공정을 완전히 대체하기에는 명확한 기술적 한계를 지니고 있으며, 이를 극복하기 위한 지속적인 후속 연구와 기술 개발이 활발히 요구되고 있다.

참고문헌

- [1] ISBN 978-1-85617-495-4
- [2] T Centea et al. Composites, Part A 70:132-154, 2015.
- [3] J Lee et al. Adv. Mater. Interfaces 7:1901427, 2020.
- [4] S Schechter et al. Composites, Part A 130:105723, 2020.
- [5] J Janzen et al. Polym. Compos. 44:8153-8167, 2023.
- [6] J Xie et al. Mater. 12:2430, 2019. [7] V Coenen et al. MPE-EuROPE conf. Proc. 2005.
- [8] J Zhang et al. Mater. Manuf. Processes 22:768-772, 2007.
- [9] S Black. Composites World, 2010.
- [10] S Liu et al. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 103:3479-3493, 2019.
- [11] J Zhou et al. Mater. Today Commun. 26:101960, 2021.
- [12] J Zhou et al. Compos. Sci. Technol. 218:109200, 2022.
- [13] A Mariani et al. Energies 16:4535, 2023.
- [14] M Li et al. Polym. Test. 130:108318, 2024.
- [15] W Grouve et al. Procedia Manuf. 47:29-35, 2020.

후기

본 연구는 한국연구재단 (NRF)의 우수신진연구 사업 지원을 받아 수행된 연구이다. (과제번호: RS-2023-00213782)

- 54 -

고온용 전파흡수체 적용을 통한 노즐의 레이더 반사 단면적 분석 RCS Analysis of a Nozzle with a High-Temperature EM wave absorber

*윤도형¹, 백상민², 이원준^{1,2+} * D.H. Yoon¹, S.M. Baek², W.J Lee^{1,2+}

¹ 과학기술연합대학원대학교 국방과학연구소캠퍼스, ² 국방과학연구소 ⁺E-mail: lwj@add.re.kr

Keywords: High-Temperature Electromagnetic Wave Absorber, Radar Cross Section, Metamaterials, Aircraft Exhaust

1. 서론

항공기 배기구는 RCS에 큰 영향을 미치며, 금속 소재는 전자기파를 강하게 반사해 스텔스 성능을 저하시킨다. 특히 고온 환경에서는 기존 전파 흡수체의 성능이 저하되므로 개선이 필요하다. 본 연구에서는 3D 메타구조의 전파흡수체 [1] 를 배기구에 적용하여 RCS 변화를 분석하였다. X-band 대역에서 기존 금속 배기구 및 온도에 따라 비교하여 스텔스 성능 개선 가능성을 검토하였다.

2. 본론

2.1 고온용 전파 흡수체 설계

고온 환경에서도 전자기파 흡수 성능을 유지할 수 있도록 SRR (Split-Ring Resonator) 기반의 메타물질 구조를 설계 하였다 [1]. 흡수체는 금속 기반의 SRR 구조에 YSZ (Yttria-Stabilized Zirconia) 세라믹 코팅을 적용하여 높은 온도에서도 안정적 이며 금속 구조와 결합하여 전자기파 흡수 성능을 구현하였다. 설계 과정에서 CST Studio Suite를 활용하여 X-band 주파수 대역에서 최적화를 진행하였으며, Genetic Algorithm을 적용하여 SRR 구조 형상 및 코팅 두께의 최적 변수를 설계 하였다.



Fig. 1. Design of RAS.

2.2 고온용 전파흡수체 시험

설계된 고온용 전파흡수체의 성능을 검증하기 위해 플라즈마 고온 전자파 측정장비를 이용한 시험을 수행하였다. 흡수체 시편은 DED (Directed Energy Deposition) 금속 3D 프린팅을 활용하여 제작 되었으며, 표면에 YSZ 플라즈마 코팅을 적용하였다. 제작된 시편을 RT, 100℃, 300℃, 500℃, 700℃의 온도조건에서 측정하여 전자기과 흡수 특성을 분석하였다. 반사 손실은 X-band 주파수 대역에서 측정되었으며, 각 온도 조건에서의 흡수 성능을 비교하였다.

2.3 Nozzle RCS 분석

설계된 고온용 전파흡수체를 항공기 배기구에 적용하였을 때, RCS 변화를 분석하기 위해 CST를 활용한 해석을 수행하였다. 기존 금속 배기구와 비교하여, 흡수체 적용 시 RCS 저감효과를 평가 하고, 배기구 구조물 적용 범위에 따른 성능 변화를 검토하였다.

RCS 해석은 X-band 주파수 대역 (8-12 GHz) 에서 진행되었으며, 배기구 형상과 입사각에 따른 반사 특성을 분석하였다. 고온용 전파 흡수체가 적용된 배기구는 특정 주파수에서 RCS가 감소하는 효과를 보였으며, 구조물 적용 범위에 따른 RCS 변화를 확인하였다.

3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 고온용 전파흡수체를 설계하여 항공기 배기구에 적용하고, RCS 저감 효과를 분석하였다. 3D metamaterial 기반 YSZ 코팅 시편의 등가의 유전율을 적용하여 시뮬레이션 결과, 기존 금속 배기구 대비 RCS가 감소하는 효과를 확인하였으며, 향후 연구 에서도 흡수체의 내구성 및 열 충격에 대한 신뢰성 평가를 수행할 예정이며, 온도 변화 조건에서의 RCS 분석을 통한 스텔스 성능 최적화를 위한 연구를 진행할 예정이다.

참고문헌

 DH Yoon et al. Metal-Ceramic Meta Structure for Electromagnetic Wave Absorption in High-Temperature Environments. *Electromagn. Eng. Sci* 35(9):687-69110:1-10,2024.

금속 3D 프린팅된 얇은 벽 구조의 공정 변수에 따른 에너지 흡수 성능 평가 Evaluation of Energy Absorption Performance Based on Process Variables of Thin-

Walled Structures Manufactured by Metal 3D Printing

*박건태 , 김윤호 ⁺ *Geon Tae Park, Yun Ho Kim⁺

서울대학교 항공우주공학과 극한환경 및 충돌 연구실 ⁺E-mail: spaceyhk@snu.ac.kr

Keywords: Laser Powder Bed Fusion(LPBF), Linear Energy Density(LED), AlSi10Mg, Thin-wall structure

1. 서론

LPBF(Laser Powder Bed Fusion)기술은 레이저로 금속 분말을 용융 시켜 부품을 제작 하는 금속 적층 제조 기술이다. 이 기술은 높은 정밀도와 우수한 기계적 성질을 제공하며 전통적인 제작 방식으로 구현하기 어려운 복잡한 구조를 제작할 수 있어 산업에서 널리 활용된다. 얇은 벽 구조는 경량화와 충격 흡수에 효율적이므로 항공우주 및 자동차 산업에서 널리 활용된다. 그러나 LPBF 공정으로 제작된 얇은 벽은 높은 온도 구배로 인해 Laser power, Scan speed같은 공정변수에 따라 물성이 크게 달라진다. 따라서 균일한 품질과 안정적인 제조를 위해 적절한 공정변수를 설정하는 것이 중요하지만 이에 대한 연구는 부족한 실정이다.



2. 연구 방법 및 내용

2.1 공정변수에 따른 얇은 벽 구조 물성 평가

금속을 용융 시키기 위해 레이저가 금속 분말에 전달하는 단위길이당 에너지를 LED(Linear Energy Density)라 하며 식(1)과 같이 Laser Power (P)와 Scan Speed(v)의 비율로 정의된다. 본 연구에서는 EOS M290 금속 3D 프린터를 이용하여 얇은 벽 구조를 출력하였다. LED의 공정 변수인 Laser Power 와 Scan Speed를 120W ~360 W 와 200 mm/s ~ 1200 mm/s 수준에서 변경해가며 제작하였고 표면 거칠기, 기공성에 따른 상대 밀도를 평가하였다. Figure2는 LED 0.45, 1.4로 제작된 시편 표면을 금속현미경으로

관찰한 결과이다. 에너지가 너무 높을 경우 넓은 범위의 용융풀이 형성되며 불완전 용융된 분말이 표면에 함께 소결되어 있음을 확인할 수 있다.

$$LED = \frac{P}{n} \tag{1}$$



Fig. 2. Surface of thin-walls with different LED values.

2.2 허니콤 구조의 에너지 흡수율 평가

허니콤 구조는 질량대비 높은 강도를 가지며 높은 에너지 흡수율을 제공한다. 얇은 벽 구조의 공정 변수에 따른 에너지흡수율을 평가하기 위해 금속 3D프린터로 허니콤 구조를 제작한 후 압축 실험을 진행하였다. 결과로 Specific Energy Absorption을 추출하여 공정변수에 따른 얇은 벽의 표면 거칠기와 상대밀도의 변화가 에너지 흡수율에 영향을 주는 것을 확인하려고 한다.

3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 다양한 수준의 공정변수로 제작된 얇은 벽 구조의 표면 거칠기, 상대밀도가 에너지 흡수율에 미치는 영향을 허니콤 압축 실험을 통해 평가하고자 한다. 향후 LPBF공정의 다른 변수인 Hatch Distance, Layer Thickness가 에너지흡수 성능에 미치는 영향을 분석할 계획이다.

참고문헌

- [1] J. Lee, et al. Additive Manufacturing. 2024
- [2] Y. Zhang, et al. Journal of Manufacturing Processes. 2021
- [3] F. Calignano, et al. Journal of Materials Processing Technology. 2018

변동하중조건에서 누적손상모델을 이용한 구리의 피로수명 예측 Fatigue Life Prediction of Copper Under Variable Loading Conditions Using a Cumulative Damage Model

*김윤아, 하형철, 김윤호⁺ Y.A. Kim¹, H.C. Ha¹, Y.H. Kim⁺

서울대학교 항공우주공학과 극한환경 및 충돌연구실 ⁺E-mail: spaceyhk@snu.ac.kr

Keywords: Fatigue Life Prediction, Fatigue Cumulative Damage, Variable Loading, Linear Damage Accumulation Rule

1. 서론

최근 우주 산업에서는 1단 로켓 재사용 연구가 활발히 진행되며, SpaceX의 Falcon 9과 같은 상용 재사용 로켓의 성공이 기술 발전을 가속화하고 있다. 국내에서도 누리호 발사 성공 이후 재사용 발사체 기술에 대한 관심이 증가하며 개발 논의가 활발하다. 특히, 재사용 발사체의 핵심은 엔진 부품의 내구성으로, 반복 사용 시 발생하는 열 피로와 진동 피로를 고려해야 한다. [1]

본 연구에서는 연소기 주요 재료인 구리의 피로 수명을 예측하는 코드를 작성하였다.

2. 연구 개요

랜덤 하중 조건에서 인탈산동(C1220)의 피로 수명을 예측하기 위해 MATLAB 프로그램이 개발 되었으며, 전체적인 알고리즘은 Figure 1에서 확인할 수 있다.





3. 본론

3.1 하중파형 사이클계산법(Cycle Counting)

발사체 발사와 같은 불규칙한 하중 조건에서 수명을 예측하려면, 피로 수명에 가장 큰 영향을 미치는 이벤트(event)를 추출하고 이를 일정 진폭 하중 분포로 변환하는 과정이 필요하다. 이를 하중 파형 사이클 계산법(Cycle Counting)이라 하며, 표준화된 방법은 ASTM E1049에서 규정하고 있다[2]. 특히, 레인플로법(Rainflow Counting)은 해석 과정이 복잡하지만, 피로 특성을 가장 정확하게 반영하는 기법으로 널리 활용된다.

3.2 누적손상법칙(Cumulative Damage Rule)

누적 손상 법칙은 변동 하중이 가해질 때 각 하중 사이클에 의해 피로 손상이 발생하고, 이 손상이 점진적으로 누적되어 특정 한계 값에 도달하면 피로 파괴가 발생한다고 가정하는 이론이다. 대표적인 선형 누적 손상 법칙인 Miner's rule은 피로 하중에 의해 재료가 흡수할 수 있는 일의 총량에 도달했을 때 파괴가 일어난다는 개념을 기반으로 한다[3]. 이 법칙에 따르면, 레인 플로법을 이용해 일정 진폭 하중으로 변환된 변동 하중은 S-N 선도를 통해 피로 손상의 누적으로 인한 파손 여부를 평가할 수 있다. 또한, Miner의 법칙에서는 누적 손상 계수(Cumulative Damage, D) 개념을 도입하여 피로 수명을 정량적으로 평가하며, 이에 대한 수식은 식(1)에서 확인할 수 있다.

$$\mathbf{D} = \frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \dots + \frac{n_k}{N_k} = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}$$
(1)

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 인탈산동(C1220)의 진동 피로 수명을 예측하는 프로그램을 제작하였다. 향후, 실험 데이터와의 비교를 통해 프로그램 검증을 진행하고, 다양한 하중 조건과 재료 특성을 반영하여 항공우주 산업에 활용 가능한 예측 도구로 발전시키는 것을 목표로 한다.

참고문헌

- [1] KO Lee et al. An Energy Method about Fatigue Life of Copper Alloy for Reusable Launch Vehicle, Proceeding of the SASE 2018 Spring Conference, 2018.
- [2] ASTM E1049-85, Standard Practices for Cycle Counting in Fatigue Analysis, ASTM International, 2023.
- [3] YH Kim et al. An expert system for fatigue life prediction under variable loading, Expert Systems with Applications, 2009.

후기

이 논문은 서울대학교 창의선도 신진연구자 지원사업 의 지원을 받아 수행된 연구결과임

3D 프린팅된 Kevlar-Onyx 복합재의 FDM 공정 특성에 따른 충격 저항성 분석 Impact Resistance Analysis of 3D Printed Kevlar-Onyx Composites Based on FDM Process Characteristics

*김현수¹, 송인해¹, 김윤호¹⁺ * H.S. Kim¹, I.H. Song¹, Y.H. Kim¹⁺

¹ 서울대학교 항공우주공학과 ⁺E-mail: mouseboy0427@snu.ac.kr

Keywords: 3D printed composite materials, Ballistic impact, Kevlar, Manufacturing defects

1. 서론

FDM(Fused Deposition Modeling) 방식은 열가소성 폴리머의 3D 프린팅 기술 중 가장 일반적으로 사용되는 방법으로, 연구에 따르면 이러한 폴리머에 짧은 섬유 또는 연속 섬유를 추가하여 구조물의 전체 강도와 강성을 크게 향상시킬 수 있다[1,2]. 또한, 3D 프린팅된 부품의 응용분야 확장과 성능 개선을 위해 동적 거동 특성에 관한 연구들이 주목받고 있다. Parametric Izod/Charpy 충격 시험[3,4], 낙하 충격 시험[5,6], 탄도 충돌 시험[7,8] 등 다양한 연구가 진행되어 왔으나, 3D 프린팅된 복합재의 성능이 전통적인 제조 방법에 비해 여전히 떨어지는 경우가 많다. 이러한 성능 저하의 이유는 명확히 밝혀지지 않았으며, 특히 FDM 공정에서 발생하는 섬유 사이의 미세 간격이 복합재의 기계적 성능에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 탄도 충돌 실험을 통해 Kevlar 연속섬유 보강이 있는 Onyx 복합재 구조의 동적 파단 거동 및 모델링에 대해 분석하고자 하며, 특히 FDM 공정 중 생성되는 섬유 사이의 미세 간격이 복합재의 충격 저항성 및 기계적 특성에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

2. 연구 방법 및 내용



Fig. 1. Front and back images of the specimen and Micro-CT scans after Ballistic Impact testing

2.1 3D 프린팅 복합재 제작 및 고속 충돌 실험

본 연구에서는 Markforged Mark Two 프린터를 사용하여 Kevlar 연속 섬유 보강 Onyx 복합재 시편을 제작하였다. 제작된 시편을 300m/s~500m/s의 속도로 Ballistic Impact 실험을 진행하였으며, 시편의 변형 및 파괴 형태를 분석하였다. 관통 여부에 따라 시편을 두 그룹으로 나누어 비교하였으며, 3D 프린팅 공정 중 발생하는 섬유 간 간격이 복합재의 충격 저항성에 중요한 영향을 미친다는 사실을 확인하였다. 특히, 간격이 큰 영역에서 충격 하중이 집중되고, 기계적 강도가 저하되는 경향을 보였다.

2.2 충격 거동 분석을 위한 모델링 및 Micro-CT 촬영 결과

고속 충돌 실험에서 섬유 사이의 간격은 충격 하중 분산을 저해하고, 균열 전파를 촉진하는 요인으로 작용할 수 있다. 이를 정량적으로 분석하기 위해, 실험 데이터를 바탕으로 3D 프린팅된 복합재 내부의 적층 구조와 간격 분포를 모델링하였고, 이를 바탕으로 유한 요소 해석(FEM) LS-Dyna 프로그램으로 충격 거동을 시뮬레이션하였다. 또한, 실험 전후의 시편을 Micro-CT 촬영하여 적층 구조와 충격 후 손상 분포를 정밀하게 분석하였다. CT 분석 및 시뮬레이션 결과, 간격이 큰 부위에서 충격 하중이 집중되는 것을 볼 수 있었다.

3. 결론 및 향후과제

본 연구는 FDM 공정에서 발생하는 섬유 간 간격이 복합재의 충격 저항성에 중요한 영향을 미칠 수 있다는 가능성을 시사하며, 향후 연구에서는 섬유 결합 강도와 같은 추가적인 요소들이 복합재 성능에 미치는 영향을 분석할 계획이다

참고문헌

- [1] Blok, L. G. et al. Additive Manufacturing. 22: 176-186, 2018.
- [2] Peng, Y. et al. Composite Structures. 207: 232-239, 2019.
- [3] Caminero, M. A. et al. Composites Part B: Engineering. 148: 93-103, 2018.
- [4] Zotti, A. et al. Composites Part B: Engineering. 153: 364-375, 2018.
- [5] Gu, G. X. et al. Extreme Mechanics Letters. 9: 317-323, 2016.
- [6] Ko, K. et al. Composite Structures. 238: 111951, 2020.
- [7] Islam, M. N. et al. Procedia Structural Integrity. 37: 217-224, 2021.
- [8] Islam, M. N. et al. Procedia Structural Integrity. 42: 785-792, 2022.

후기

본 연구는 서울대학교 창의선도 신진연구자 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임

설명 가능한 인공지능 기반 유한 요소 데이터 활용 손상 탐지 기법 Finite Element Data-Based Damage Detection Method Using Explainable Artificial Intelligence

*정인호¹, 김혜진¹, 박형범², 김태성³, 조해성¹⁺ * I.H. Jeong¹, H.J. Kim¹, H.B. Park², T.S. Kim³, H.S. Cho¹⁺

¹ 전북대학교 항공우주공학과, ² 인천대학교 기계공학부, ³ 덴마크공과대학교 풍력에너지시스템학과 ⁺E-mail: hcho@jbnu.ac.kr

Keywords: Damage detection, Digital image correlation, Class activation map, Explainable artificial intelligence.

1. 서론

항공우주 구조물의 국소 손상은 전체로 전파될 위험이 있어, 초기 탐지가 중요하다. 비접촉 방식인 Digital Image Correlation (DIC)을 활용할 수 있지만, 넓은 영역의 육안 분석에 한계가 있다. 본 연구에서는 Class Activation Map (CAM)을 적용해 손상 탐지 기법을 개발했으며[1], ASTM D638 Type 1 시편 검증 결과 99% 이상의 정확도를 보였다. 이때, 실제 손상 위치와 예측 결과의 높은 일치도를 확인하였다.

2. 설명 가능한 인공 지능 기반 손상 탐지

CAM은 Convolutional Neural Network (CNN) 기반 인공 지능으로 입력된 데이터를 손상 또는 손상 없음으로 분류하며 큰 가중치를 가지고 있는 영역을 제시하는 설명 가능한 인공 지능의 일종이다.

본 연구에서는 CAM을 활용한 구조물 손상 탐지 프레임워크를 제안하였다. 먼저, Step 1에서는 DIC로 획득한 구조물의 변위를 Gaussian quadrature를 이용해 Gauss 적분점에서의 변형률로 변환한 후, 입력 차원 감소를 위해 주변형률로 변환한다. Step 2에서는 전체 영역에서 얻어진 주변형률을 활용하여 부영역에서의 주변형률을 생성함으로써, 구조물 전체가 변형 되더라도 모델을 지속적으로 적용할 수 있도록 한다. 마지막으로, Step 3에서는 CAM을 학습하여 부영역 에서의 주변형률을 바탕으로 손상의 유무를 판별하고, 손상으로 인해 변화가 발생한 영역을 시각적으로 나타내는 CAM 이미지를 생성한다.

3. ASTM D638 Type 1 시편 인장 시험 데이터

본 연구에서는 ASTM D638 Type 1 시편(Fig. 1)으로 탐지 모델을 검증하였다. ABAQUS를 활용해 관심 영역의 변위를 도출하고, 유한 요소 데이터만으로 손상 탐지 모델을 생성한 결과, 99% 이상의 정확도 로 손상의 유무를 분류하였다. 이후 DIC를 이용해 실험 데이터를 측정하고, CAM 이미지를 생성한 결과(Fig. 2), 실제 손상 위치(하얀 박스)와 예측 된 손상 영역이 잘 일치함을 확인하였다.







Fig. 2. Principal strain fields and CAM image.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 설명 가능한 인공지능을 활용해 DIC 기반 구조물 손상 탐지 기법을 개발하였다. ABAQUS 수치해석 데이터를 학습한 모델을 ASTM D638 Type 1 시편 실험으로 검증한 결과, 99% 이상의 정확도로 손상의 유무를 분류하고 실제 손상 위치를 예측할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

[1] IH Jeong et al. Struct Health Monit. 22(5):3225-3249, 2023.

후기

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government(MOTIE)(RS-2022-KP002707, Jeonbuk Regional Energy Cluster Training of human resources).

Development of a Robotic Antenna Measurement System for Conformal Load-Bearing Antenna Structures

*Tomasz Korgul¹, Jin-Dong Park¹ and Jung-Ryul Lee¹⁺ Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) *E-mail: leejrr@kaist.ac.kr

Keywords: Conformal Load-Bearing Antenna Structures, Antenna Gain Measurement, Robotic Positioning, 3D Radiation Pattern

1. Introduction

The integration of antenna technology with composite load-bearing structures has led to the development of Conformal Load-Bearing Antenna Structures (CLAS), which are critical for aerospace and defense applications [1][2]. This research presents a novel robotic measurement system designed to characterize the gain and radiation patterns of CLAS in an anechoic chamber. The system enables real-time acquisition and visualization of 3D and 3D radiation patterns, facilitating efficient analysis of antenna performance.

2. Measurement System Description

2.1 Measurement Setup

The setup employs a 6-axis robotic arm for precise positioning of the Antenna Under Test (AUT) across a $\pm 90^{\circ}$ angular range in both vertical and horizontal planes, effectively covering a hemispherical measurement space. Gain measurements are conducted using a horn antenna as a reference, while automated positioning enhances accuracy and repeatability. The system operates in the C-band (4-6 GHz), with the AUT optimized for 5-5.5 GHz. Compared to conventional turntable-based methods, the proposed system provides broader measurement coverage, enabling more comprehensive evaluation of conformal antenna designs.

2.2 Experimental Validation

A custom-designed Graphical User Interface (GUI) is integrated into the setup, enabling the configuration of Vector Network Analyzer and defining the robot arm's movement path. The interface also provides real-time 3D gain visualization, allowing immediate analysis of antenna performance. Experimental validation was performed on two CLAS prototypes developed in our laboratory, confirming the effectiveness of the system in characterizing antenna gain and radiation patterns. The setup overcomes limitations of traditional measurement techniques, offering an accurate and efficient method for evaluation conformal antennas.

3. Results and Discussion

Results indicate that the developed measurement setup provides reliable and automated solution for CLAS performance evaluation. The robotic system accurately captures gain measurements and dynamical updates radiation patterns in real time. The integration of the robotic positioning system with a precision measurement process ensures repeatability and consistency in the obtained results. Figure 1 illustrates the experimental setup used for CLAS gain measurement in the anechoic chamber.



Fig. 1. Automated antenna measurement setup.

4. Conclusion and Future Work

This research introduces an advanced robotic antenna measurement setup tailored for conformal antenna structures. The system effectively characterizes gain and radiation patterns, offering an innovative alternative to conventional measurement methods. Future work will focus on refining the system's precision and expanding capabilities to accommodate a broader frequency range and structural configurations. The proposed setup can contribute to the design and evaluation of next-generation load-bearing antenna structures in aerospace applications.

References

- [1] CS You, W Hwang. Compos Struct., 2010. (Journal paper)
- [2] L Boehm et al. IEEE Trans. Antennas Propag., 2020. (Journal paper)

Acknowledgement

This research was supported by Unmanned Vehicles Core Technology Research and Development Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) and Unmanned Vehicle Advanced Research Center(UVARC) funded by the Ministry of Science and ICT, the Republic of Korea(NRF-2020M3C1C1A01084220).

This work has been supported by the R&D Program of the Korea planning & Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) through a grant funded by the Korea government (MOTIE) (No.RS-2024-00442735).

Inspection of Complex-Shaped Composite Structures Using a Robotic Pulse-echo Ultrasonic Propagation Imaging System

*King Sum Ma¹, Kyu-Jin Lee¹ and Jung-Ryul Lee¹⁺

¹ Department of Aerospace Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) ⁺E-mail: leejrr@kaist.ac.kr

Keywords : Laser ultrasonic testing, Robotics, Complex-shaped composites, Non-destructive testing

1. Introduction

Composite materials are increasingly used in aircraft structures and they require effective non-destructive testing (NDT) to ensure structural integrity [1]. Laser ultrasonic testing (LUT) is a contactless, medium-free NDT technique applied to various composite materials. The robotic pulse-echo ultrasonic propagation imaging (PUPI) system is designed for LUT of curved structures [2]. However, its algorithm is restricted to mathematically representable surface geometries, limiting its applicability to practical inspection scenarios. This study addresses this constraint by utilizing a 3D scan-generated path to control robot arm movement, enabling the inspection of complexshaped specimens using the robotic PUPI system.

2. Method

2.1 Robotic PUPI system: A Q-switched pulsed laser serves as the excitation source to generate ultrasonic signals, while a laser Doppler vibrometer (LDV) detects the echo signals. Both laser beams are focused on the same point on the inspection surface, with the specimen mounted on a six-axis robot arm during inspection (Fig. 1). Precise control of the robot arm's tool center point (TCP) maintains a constant standoff distance and a perpendicular beam incident angle between the specimen and the LDV. This setup ensures a high signal-to-noise ratio (SNR) in the detected ultrasonic signals and enables clear visualization of subsurface conditions.

2.2 Scan path generation: Generating a raster scan path for robot arm control is particularly challenging for composite structures with arbitrary curvatures. This study incorporates 3D scan data of the inspection target as the input for scan path generation. By translating the physical shape into executable robot arm control commands, the robotic PUPI system can inspect real-world composite specimens with complex geometries.

3. Results and Discussion

A non-planar CFRP specimen with pillow inserts embedded at different ply depths to simulate disbonding was inspected using the robotic PUPI system with a raster scan path generated from its 3D scan. These artificial subsurface defects were clearly visualized, and the entire region of interest (ROI) achieved high mean SNR with low mean errors. To demonstrate the feasibility of this approach in practical applications, it was further applied to an aircraft composite structure, successfully visualizing the positions and sizes of honeycomb cores beneath the laminates.



Fig. 1. Inspection of a complex-shaped composite structure using the robotic PUPI system.

4. Conclusions and Future Work

The experimental results demonstrate that the robotic PUPI system effectively inspects complex-shaped composite structures by integrating scan paths generated based on the shape of the inspection target. The scan path derived from the 3D scan enhances the system's feasibility for real-world applications. To further expand its inspection capability for larger curved composite structures, an improved configuration with a fixed specimen and moving lasers will be developed.

References

- [1] A. Zarei et al. Ultrasonics, 136: 107163, 2024.
- [2] K. J. Lee et al. *Advanced Composite Materials*, 34(2): 329-351, 2024.

Acknowledgement

This research was supported by Unmanned Vehicles Core Technology Research and Development Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) and Unmanned Vehicle Advanced Research Center(UVARC) funded by the Ministry of Science and ICT, the Republic of Korea(NRF-2020M3C1C1A01084220). This work has been supported by the R&D Program of the Korea planning & Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) through a grant funded by the Korea government (MOTIE) (No.RS-2024-00442735).


저비용 피치계 등방성 탄소섬유 제조 스케일 업 연구

Preparation of Low-cost Isotropic Pitch-based Carbon Fiber Using Pilot Scale Plant

*홍성화¹⁺, 이현철², 윤성호³ * S.H. Hong ¹⁺, H.C. Lee ², S.H. Yoon³

¹한국섬유기계융합연구원, ²㈜YSH, ³큐슈대학교 ⁺E-mail: shwhong@kotmi.re.kr

Keywords: Pitch, Carbon Fiber, Low-cost, Pilot

1. 서론

자동차 복합소재 산업에서 요구하는 최소한의 기계적 물성과 가격(인장강도 1.7GPa, \$12/Kg)을 만족하는 탄소섬유가 개발되면 탄소섬유 복합소재 시장이폭발적으로 성장할 것으로 예상되므로, 저가의 범용 탄소섬유를 제조하기 위한 새로운 전구체와 이러한 전구체를 활용한 공정혁신적 탄소섬유 제조기술에 대한 연구가 진행되고 있다.

본연구에서는 석유계 피치를 원료로 사용하여 연구실 규모로 기 개발된 원천기술을 바탕으로 사업화를 위한 스케일업 연구를 수행하였다. 탄소섬유의 피치 최적화 연구, 연신 공정, 방사 공정 개발, 물성 향상을 위한 기초 연구를 수행하고, 스케일업을 위한 연산 10톤 규모 파일럿 설비의 설계, 제작, 운영을 통한 양산 개발도 동시에 진행하였다.

2. 본론

2.1 원료

석유 부산물인 에틸렌바텀오일(EO)과 코크스로의 부산물인 콜타르를 혼합한 원료 피치를 제조한 후 용융방사를 통하여 탄소섬유를 제조하였다. 실험실 규모에서 진행한 등방성 피치계 탄소섬유 제조 연구 결과는 이전에 보고한 바 있다 [1]. EO와 콜타르의 THF 가용분(THFs)을 혼합한 후 브롬 촉매를 이용하여 인장강도 2.0GPa의 등방성 피치계 탄소섬유를 제조한 결과를 보고하였다.

석유계 피치는 분자량이 작고 방향족 분자 함량 이 낮으며 방사시 유동성 및 방사성을 부여하는 역할을 하고, 콜타르 피치는 섬유의 기계적 특성을 향상시키는 역할을 한다.

여천 NCC의 EO의 감압 증류 후 잔류물과 동서 화학공업㈜의 콜타르에서 THFs를 분리 후 각각을 원료로 사용하였다.

2.2 피치 제조

EO와 콜타르를 무게비 (1:1)로 혼합하고 중합촉매 로서 염소를 투입하며 110℃에서 2시간 처리 후 바로 2차반응기로 이송하여 320℃에서 3시간 중합하였다. 이 과정에서 잔류염소는 완전히 제거된다. 열중합 이 완료되면 박막증류장치 (Thin layer evaporator, TLE)로 이송하여 잔류 휘발분을 제거하며 270℃로 적절한 연화점을 조절하여 방사용 피치를 제조하며 마지막으로 pelletizer를 사용하여 펠릿 형태로 완성된다.

2.3 탄소섬유 제조

트윈익스트루더를 통과한 피치를 500홀 용융 방사기를 이용하여 300℃에서 방사한 후, 270℃에서 안정화, 1,100℃에서 탄화하여 탄소섬유를 제조 하였다.

시기 바랍니다.

3. 결론 및 향후과제

그림 1에 230 ~ 290℃에서 안정화 후 1,000℃ 에서 탄화한 섬유의 인장강도를 나타내었다.



fig. 1. Tensile strength Vs. stabilization temperature diagram

230℃ 및 250℃에서 안정화한 섬유는 안정화가 부족하여 일부의 융착으로 인장강도가 낮아지는 결과를 볼 수 있으며, 290℃에서의 과도한 안정화 는 산소 발생 및 배출에 의하여 생성되는 결함이 특

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

증가하여 인장강도가 감소하는 것으로 생각된다. 순수 EO를 이용하여 염소 촉매 처리 없이 320℃에서 3시간 열중합하면 인장강도 1,200MPa이 한계임을 확인할 수 있다.

그림 2에 270℃에서 1시간 안정화 처리한 후 800 ~ 1,600℃에서 탄화한 탄소섬유의 인장강도를 나타내었다.



Fig. 2. Tensile strength vs. carbonization temperature diagram

1,100℃에서 탄화한 섬유가 가장 높은 2,000MPa 의 인장강도를 보인다. 탄화온도가 낮아지면 결정 성장의 부족으로 인장강도가 떨어지며, 탄화온도가 높아지면 피치내에 포함되어 있는 금속 불순물에 의한 촉매가스화가 원인으로 섬유내의 결함이 증가하고 인장강도의 저하가 발생하는 것으로 생각된다.

이 사업의 목표 중 하나가 저가형의 탄소섬유를 제조하기 위한 양산공정 개발 및 기 개발된 실험실 규모 원천기술의 PILOT 설비 검증이므로 원료가 되는 EO와 콜타르에 특별한 정제 공정없이 공급된 원료를 그대로 사용하여 등방성 방사용 피치를 제조하였다. 금속 또는 무기물 성분이 500 ~ 1,000ppm까지 포함된 것은 확인이 되나 정제 공정으로 원료의 단가 상승을 방지하고자 함이다. 콜타르에 포함된 불순물은 THF 용해 과정에서 제거되지만 용매 처리과정이 단가 상승의 원인이 되며 EO에서 유래된 불순물로 생각된다.

본 연구의 결과에서 자동차 산업에서 요구하는 수준의 기계적 강도와 가격을 만족하는 저가형 탄소섬유 사업화의 가능성을 확인하였다. 실험실 에서 제조되는 탄소섬유의 결과를 500홀 방사기의 PILOT 설비에서 검증 완료하였으며, 향후의 사업화 가 기대된다.

참고문헌

[1] Byung-Jun Kim et al., Carbon, 99, 649, 2016

Acknowledgement:

This work was supported by the National Research Foundation of Korea Planning & Evaluation of Industrial Technology (KEIT) (RS-2024-00431543)

저비용 탄소섬유의 발전: CPVC 기반 탄소섬유

Advancements in Low-Cost Carbon Fiber : CPVC-based Carbon Fiber

이재웅 ¹

Jaewoong Lee¹

¹ 영남대학교 파이버시스템공학과 ⁺E-mail: jaewlee@yu.ac.kr

Keywords: Low-cost carbon fiber, Chlorinated polyvinyl chloride

1. 서론

최근 항공우주(항공기 및 우주 시스템), 자동차, 압력 용기,경량실린더,스포츠용품등다양한산업분야에 적용되는 복합소재의 중요성이 크게 증가하고 있다. 이러한 산업에서 사용되는 복합소재 중 일부는 탄소 섬유, 아라미드 섬유 등과 같은 슈퍼섬유 소재이며, 이 중 탄소 섬유는 다른 섬유와 차별화되는 뛰어난 기계적, 화학적 특성을 가지고 있다. 고성능 탄소섬유 제품은 전구체의 높은 가격과 그에 상응하는 공정비용으로 인해 사용이 제한적이기에 이를 대체할 수 있는 저비용 탄소섬유에 대해 많은 연구가 진행되었다. 본 발표에서는 기존 탄소섬유 전구체의 특성 및 응용분야에 대하여 알아보고 이를 대체할 수 있는 저비용 탄소섬유에 대한 간략한 소개 및 그 특성에 대해 소개하고자 한다. 또한, 저비용 탄소섬유의 제조공정에 대하여 알아보고 그 응용분야에 대해 실험적 및 이론적 관점을 제시하고자 한다.

2. 본론

Polyacrylonitrile(PAN) 계 전구체의 대체제로서 많은 고분자들의 연구가 진행되어 왔다. 하지만, 이러한 고분자들은 원료의 cost가 매우 높거나, 기계적 물성이 높은 탄소섬유를 제조해내지 못하고 있는 실정이다. 따라서 공정비용을 줄이거나, 또는 제조된 탄소섬유가 높은 기계적 물성을 갖도록 하는 연구의 필요성이 대두된다.

Chlorinated polyvinyl chloride (CPVC)는 Polyvinyl chloride(PVC)에서 자유 라디칼 반응(free radical reaction)으로 후염소화 과정을 거쳐 PVC보다 약 10% 정도 더 높은 염소함량인 62~72wt%의 염소를 가진 고분자이다. PVC와 비교하여 CPVC는 대부분 비슷한 물성과 특징을 갖고 있지만, PVC보다 더 나은 기계적 강도, 내열성 및 내화학성을 가지고 있다. CPVC는 2~3/Kg의 저가 고분자이며, 연구를 통해 PAN의 대체물질로써 가능성을 확인하였으며 추가적인 연구가 필요하다.

3. 결론

PAN 대체물질에 대한 연구개발이 현재까지 많이 시도되고 있지만, 만족스러운 결과를 얻지 못한 실정이다. 하지만 적합한 전구체와 첨단기술 간의 매치업에 대한 추가 연구가 이를 최적화하기 위한 추가적인 연구개발이 필요하다.

참고문헌

[1] J.W. Lee et al., Development of low cost carbon fibers based on chlorinated polyvinyl chloride(CPVC) for automotive applications, Materials & Design, 109682, 2021.

복합소재의 가속시험을 이용한 내구성 분석 Durability Analysis Study of Composites Using Accelerated Testing

*이재호 ¹⁺, 최순호² * J.H. Lee ¹⁺, S.H. Choi²

¹ DYETEC연구원 ⁺E-mail: hojae7304@dyetec.or.kr

Keywords: CFRP, Accelerated Test, Reliablity, Durability

1. 서론

현재 대부분의 제품들은 수많은 부품으로 구성되어 있으며, 일반적으로 다년간에 걸쳐 사용되기 때문에 구입 당시의 품질 요건도 만족시켜야 하지만 사용 기간에 고장 없이 안정적으로 제 기능을 수행하는 것이 중요하다[1]. 탄소섬유복합재의 경우 금속대비 높은 비강도를 가지므로 차세대 경량부품으로 연구개발이 많이 진행되고 있으며, 자동차·항공·우주 등 모빌리티 분야로의 적용이 크게 기대되고있어 소재의 신뢰성에 대한 연구가 필수적이다. 하지만 일상적인 사용조건에서 짧은 기간 내에 적절한 고장 혹은 성능 저하에 대한 데이터를 확보하는 것은 거의 불가능하다[2]. 이에 대한 해결책으로 가속시험은 정상 사용 범주보다 가혹한 환경을 부가하여 고장데이터를 단시간에 확보할 수 있다[1].

2. 가속시험 방법

2.1 가속시험의 종류

가속시험에는 온도, 습도, 자외선 등 환경적 요인을 실제 사용 조건보다 가혹하게 설정하여 단시간에 소재의 열화과정을 유도하는 가속열화시험, 반복적인 하중을 가하여 소재의 피로 특성을 평가할 수 있는 피로내구시험, 일정 하중을 장시간 가하여 소재의 변형 및 파괴 특성을 평가할 수 있는 크리프 시험 등이 있다.

2.2 가속시험

시험 시편은 매트릭스로는 열가소성수지인 m-PPO 수지와 보강재로 탄소섬유 T700를 이용한 CFRP를 활용하였다. 가속시험에는 초가속스트레스시험기를 이용해 120℃, 상대습도 100%의 환경적 요인을 주어 각각 96,144 시간 처리하였으며, 피로내구성 시험기로 각각 CFRP 인장강도의 90,80,70,60% 수준의 하중을 가하여 파괴될때까지의 반복 횟수를 측정하였다.

2.3 가속시험 후 물성 변화 및 내구성분석

가속열화시험 후 수지의 인장강도 유지율은 65 % 수준으로 시간이 증가함에 따라 인장강도가 감소하는 효과는 미비하였으나 CFRP의 인장강도 유지율은 92 % 로 수지 단독으로 사용할 때보다 보강재로 보강 시 내구성이 매우 높아지는 것을 확인하였다. 이는 보강섬유가 수지대비 높은 가속열화에 대한 내구성을 가져 단점을 보완해 줄 수 있음을 나타난다. 피로 내구성 테스트 결과는 가속열화와 반대로 수지 단독 적용 시 약 13만회의 반복하중을 견디는 반면 CFRP의 경우 435회에 그쳤다.



Fig. 1. Fatigue durability alterations of CFRP and PPO.

또한 가속열화 전후 충격강도도 인장결과와 유사하게 탄소섬유로 보강될 경우 충격강도 유지율이 크게 높아짐을 확인하였다.

 Table 1. Impact Strength Before and After Accelerated

 Stress Testing

Number	m-PPO	CFRP
Before(KJ/m ²)	24.47	41.01
After(KJ/m ²)	20.55	39.91

3. 결과 및 고찰

가속 시험 데이터를 바탕으로 통계적 해석을 이용한 내구성 분석에 대한 연구를 추가적으로 진행하고자 한다.

참고문헌

ISBN 978-89-363-2094-2.
 JH Sim et al.*Polymers*. 14:1028, 2022.

후기

본 논문은 산업부 소재부품기술개발사업 "저비용 탄소섬유 및 이를 이용한 차체 내외장재 부품 양산 기술 개발'(No. RS-2024-00431544)지원을 받아 연구된 논문입니다. 관계자 여러분께 감사 드립니다

열처리 조건에 따른 재활용 탄소섬유의 표면특성에 미치는 영향

Effect of heat treatment conditions on the surface properties of recycled carbon fibers

*이 청¹, 김경하¹, 김경은¹ 김대업¹⁺ * Chung Lee ¹, Gyungha Kim¹, Kyungeun. Kim¹, Daeup Kim¹⁺

> ¹ 한국생산기술연구원 ⁺E-mail: dukim@kitech.re.kr

Keywords : Recycled carbon fiber, Heat treatment, Surface energy, Surface properties

1. 서론

탄소섬유는 저밀도, 높은 비강도, 내열성, 우수한 열전도성 및 전기전도성을 가진 경량 소재로서, 항공우주산업 뿐만 아니라 향후 전 산업 분야로 적용이 확대될 전망이다. 하지만 탄소섬유의 높은 가격으로 인하여 고가의 부품에만 사용되며 자동차 등의 분야에 상용화 되기는 경제적으로 무리가 있다. 탄소섬유의 가격 절감 및 환경 오염 문제를 해결하기 위해서 사용된 탄소복합재를 회수하여 재활용할 수 있도록 업사이클링하는 기술이 절대적으로 필요하다. 본 연구에서는 질소와 산소 분위기에서 열처리 온도에 따른 탄소섬유의 기계적, 화학적 특성을 분석하고 열처리 조건에 따른 탄소섬유 표면의 화학적 상태 변화와 산소 작용기의 메커니즘을 규명했다.

2. 실험방법 및 특성분석

본 연구에서는 rCF (재활용 탄소섬유, Toray)를 사용하였다. 탄소섬유의 길이는 70 mm로 하였으며, 디사이징, 필터, 수세, 건조 과정을 거친 뒤 열처리를 진행하였다. Virgin 상태의 탄소섬유와 열처리된 탄소섬유의 표면 변화를 위해 FE-SEM 이미지를 관찰하였으며, 탄소섬유의 기계적 특성을 평가하기 위해 단섬유 인장 시험을 수행하였다. 또한 화학적 기능 변화를 분석하기 위해 XPS 분석을 진행하였다. 더해, whilhelmy plate method로 측정된 값으로부터 동적 접촉각 및 표면 자유에너지를 산출하였다.

3. 실험결과

FE-SEM 이미지 관찰 결과, 질소 분위기에서 열처리를 진행했을 때 500°C까지는 탄소섬유 표면의 변화가 관찰되지 않았다. 그러나 열처리 온도가 증가함에 따라 1000°C에서는 섬유 표면이 손상되며 깊게 파인 홈이 확인되었다. 반면, 산소 분위기에서는 300°C까지 큰 변화가 없었으나 500°C에서 탄소섬유가 산소와 반응하기 시작했고, 600°C에서는 반응이 더욱 강해져 탄소섬유의 직경이 크게 줄어들거나 일부가 소실되는 현상이 나타났다.

인장 특성 평가 결과, 질소 분위기에서는 온도 증가에 따른 특성 변화가 뚜렷하지 않았다. 그러나 산소 분위기에서는 300 °C까지 Virgin 상태와 큰 차이가 없었으나, 400 °C 이후 점진적으로 감소하였고, 600 °C에서는 열화가 심해져 인장 특성 평가가 불가능했다.

XPS 분석을 통해 질소 분위기에서 열처리한 경우, 500°C까지 탄소량이 증가하고 산소량이 감소했으며, 질소와 규소의 양이 약간 증가하는 경향을 보였다. 반면, 산소 분위기에서는 300°C에서 탄소량이 증가했으나 500°C에서는 감소하였고, 산소량은 탄소량과 반대되는 변화를 나타냈다.

표면 자유 에너지 변화를 평가하기 위해 친수성 및 소수성 습액을 이용한 동적 접촉각 측정 결과, 질소 분위기에서는 500°C까지 표면 자유 에너지의 변화가 거의 없었으며, 온도가 증가할수록 극성 자유 에너지가 약간 감소하는 경향을 보였다. 반면, 산소 분위기에서는 열처리 온도가 증가함에 따라 표면 자유 에너지가 점진적으로 증가했으며, 극성 자유 에너지의 비율 또한 점차 증가하는 양상을 나타냈다.

4. 결론

비활성 기체인 질소 분위기에서는 500℃까지는 Virgin 대비 동등한 인장특성을 나타냈었으나 1,000℃에서는 Virgin 대비 71%까지 저하되었으며, 열처리 온도가 증가할수록 자유에너지는 감소하였다. 반면에 활성 기체인 산소 분위기에서는 인장특성이 300℃까지는 Virgin과 큰 차이가 없으나 500℃까지 점차 감소하여 600℃에서는 측정이 불가능할 정도로 열화되었으며, 열처리 온도가 증가할수록 극성 자유에너지는 증가하였다.

후기

본 논문은 산업통상자원부 소재부품기술개발사업 (RS-2024-00431544)의 지원을 받아 연구된 결과이다.

Closed-loop Ecology of Carbon Fiber through the Non-destructive rCF Reclaiming Process

^{*}Jinsil Cheon¹⁺, Yeongbin Kim¹, Mir Mohammad Badrul Hasan², Anwar Abdkader²

¹ Composite Convergence Research Center, Korea Textile Machinery Convergence Research Institute,

² Institute of Textile Machinery and High Performance Technology (ITM), TUD Dresden University of Technology +E-mail: jscheon@kotmi.re.kr

Keywords : Induction Heating Pyrolysis, Recycling, Dielectric Performances, Carbon Fiber-reinforced Polymer Composites

1. Introduction

Since 2010, the demands of carbon fiber in various industries were dramatically increased to lightweight the structural materials. The problem of carbon wastes from the CFRP adapted industries are growing up because the CFRP composed of various polymer matrix with carbon fibers. The expanses for the recycling include the labor costs for the classification and separation with the type of polymer matrix in CFRP. Because of the pre-treatment for CFRP wastes, the aspect-ratio for the recycled carbon fiber (rCF) were shorten from millimeter to micrometer. For this reason, the application of rCF were limited.

This study proposes the novel recycling process through the non-destructive rCF reclaiming from the CFRP wastes The mechanical performances of single filament of rCF and rCF based thermoplastic composites which revalorized through the spun yarn manufacturing process.

2. Materials and Experimental Method

2.1 Reclaiming of Recycled Carbon Fiber

Induction based pyrolysis system (Figure 1) was used for preparation of recycled carbon fiber (rCF). This reclaiming system has no required the shredding or destructive process on the CFRP waste. Thus, rCF maintain their own longer fiber length and geometry, such as weaving pattern.



Fig. 1. Induction pyrolysis system for CFRP wastes

During the reclaiming of rCF, the atmosphere were controlled by flowing of inert gas (Dry N_2 , 15 L/min) to prevent the oxidation of rCF and explosion of backdraft,

and the combustion gas were collected and condensed by cyclone collector with temperature control system.

In this study, the rCF were prepared from the two different CFRP wastes. To compare the tensile performances of virgin carbon fiber (vCF) and rCF, the virgin carbon fiber-reinforced polymer composites (vCFRP) was fabricated with a 12k yarn plain-woven carbon fabric (T300, Toray Advanced materials, Japan) and two different types of polymer (PA6 and Epoxy). Thus, the rCF were reclaimed from this vCFRP as a resource.

In addition, the discontinuous rCF with 75 mm fiber length were reclaimed from the SMC wastes (3 inch, and used as raw materials of rCF/PP hybrid yarn and fabric which is a form of spun yarn fiber.

2.2 Composite Fabrication

The reclaimed carbon fabric derived from the vCFRP were used to manufacture the rCF-reinforced polymer composites with two different types of polymer (PA6 and epoxy resin). The vCFRP and rCFRP were manufactured by compression molding process. The fabricated composites were shown at Figure 2, and the mechanical performances of vCFRP and rCFRP were obtained to compare the effect of fiber characteristics in a form of composites.



Fig. 2. Photo-images for the vCFRP and rCFRP

In case of the discontinuous rCF (75 mm), rCF (Figure 3, a) were used to manufacture the rCF/PP hybrid yarn (Figure 3, b) for weaving process. rCF/PP hybrid yarn were prepared through the carding, drawing, spinning process. In this study, the resin contents were adjusted at 60 wt.%, and rCF/PP hybrid yarn were applied to weave the rCF/PP hybrid fabric (Figure 3, c). The rCFRP (Figure 3, d) with discontinuous rCF/PP hybrid fabric were manufactured by autoclave process.

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials



Fig. 3. Photo-images for rCF (a), rCF/PP hybrid yard (b), rCF/PP hybrid Fabric (c), rCFRP (d)

2.3 Characterization

The single fiber filament test (ASTM D3379) for the vCF and rCF were performed with 30 specimens to compare the maintenance of tensile performances after developed recycling process.

For the composite materials manufactured through the compression molding and injection molding with using the vCF and rCF were also characterized for mechanical performances.

The tensile test (ASTM D3039), inter-laminar shear strength (ILSS, ASTM D2344), IZOD impact strength (ASTM D256), and flexural test (ASTM D790) of the vCFRP and rCFRP were measured. Each test were performed with 10 specimens.

3. Results and Discussion

3.1 Tensile Performance of Single Fiber Filament

The tensile strength and modulus for the vCF and rCF were measured by using an universal testing machine with jig for single fiber filament test.

As shown in Figure 4, the tensile strength and modulus of the vCF and rCF recycled from the different types of polymer matrix composites. The tensile performances (strength and modulus) between vCF and rCF have no significant differences, regardless of the matrix types.



Fig. 4. Tensile performances of vCF and rCF

These similar tensile performances for the single fiber filament of rCF proves that the rCF was properly fabricated by induction pyrolysis process under the inert atmosphere without significant surface damages on the carbon fibers.

3.2 Tensile Performances of rCFRP

Figure 5 shows the tensile performances of rCFRP manufactured by injection molding process. rCFRP were prepared with different polymer matrix (PP and PA6) and fiber contents ($0 \sim 15$ wt.%).

The reclaiming process of rCF from CFRP wastes eliminated all the sizing materials on the fiber surfaces. Thus, amino-terminated silane were used to improve the interfacial bonding between polymer and rCF.



The tensile strength of rCFRP manufactured with polypropylene was decreased with increasing of fiber loading. However, the tensile strength of rCFRP manufactured with polyamide 6 was increased with increasing of fiber loading. From this result, the aminosilane treated rCF has poor chemical attraction between the polypropylene.

Tensile modulus of rCFRPs were increased with increasing of fiber loading, regardless of polymer types.

4. Conclusions

The novel technique for rCF fabrication process using the induction pyrolysis is preferable to obtain the high quality rCF from the massive CFRP wastes without the shredding process. Also, the obtained rCF maintains the mechanical performances of vCF, and even weaving patterns of virgin carbon fabrics which used in the vCFRP.

Acknowledgement

This research was supported by Zentrales Innovationsprogramm Mittelstrand (ZIM) and Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE) and German Government (BMWi). (No. P0026156)

슬래그섬유강화복합재(SFRP)의 이해와 활용 Understanding and Utilizing Slag Fiber Reinforced Composite (SFRP)

*김환국 ¹⁺ * H.K. Kim ¹⁺

¹ 한국섬유기계융합연구원 ⁺E-mail: hkim@kotmi.re.kr

Keywords: Slag, Slag Fiber, Glass fiber, Recycle, Inorganic long fiber

1. 서론

슬래그는 포스코, 현대제철 등 제선, 제강, 압연의 세 공정을 모두 갖춘 일관제철소 및 중소형 제철소 에서 철강 제련 후 발생하는 산업부산물로서 내열성, 내화성, 내화학성 등 우수한 특성을 가지고 있는 철 강 부산물로 발생량은 2024년 2,513만톤이 배출되어 주로 시멘트, 비료, 아스팔트 등의 원료나 골재 등 저 부가가치 산업에 재활용(97%)되고 있는 실정이다. 그러나 국내에서는 슬래그 재활용 광물을 이용한 필라멘트 무기섬유의 개발은 전무한 상황으로 매년 약 2,000만 톤 이상 발생하는 철강부산물 슬래그를 고기능성 산업용 무기광물섬유로의 고부가가치화 기 술개발을 통해 폐자원의 이용가치 극대화를 추구할 수 있다.

2. 본론

글로벌 탄소중립에 따른 '친환경'정책 강화와 더불 어 폐기물 등을 재활용해 제품을 생산하는 '업사이클 링'이 모든산업에서 새 트랜드로 주목하고 있다.

매년 약 2,000만 톤 이상 발생하는 철강부산물 slag는 대부분 시멘트 원료 56%, 토목용 골재 32%, 제철원 료 9%, 기타(비료, 인공어초등) 3%로 재사용되고 있다.

따라서 저 부가가치 산업에 재활용(97%)되고 있는 현 실정에서 벗어나 고부가가치 소재로의 활용이 필 요하며 슬래그를 활용한 산업용 섬유에 대한 제품은 존재하지 않아 섬유화 기술 선점이 필요하며 그 섬 유를 활용한 제품의 개발이 필요하다.

산업용섬유소재로 사용되는 탄소섬유, 유리섬유, 현무암섬유 등의 원소재는 대부분 수입에 의존, 그러 나 철강슬래그는 국내 년간 2천만톤 이상 발생 → 원소재 공급망 안정화에 대한 문제없으며, 이들 소재 에 대해 자국 내 소재 무기화한다면 국내공급망에 지대한 영향을 미친다.

특히, 슬래그 장섬유 개발 및 이를 활용한 SFRP (Slag Fiber Reinforced Plastics: 슬래그섬유강화플라스틱) 은 환경개선 및 자원 재활용뿐만 아니라, 고온(1,100℃ 이상)환경에서의 고분자 복합재료의 적용이 어려운 부품에 적용하여 고내열/고내화 성능을 요하는 산업 전분야에 응용이 가능하다.



Fig. 1. Slag fiber production and application

따라서 전 세계 가장 많은 양의 산업용 섬유인 유 리섬유를 대체한 경쟁력 높은 섬유 제품화로 산업용 섬유시장의 확대가 기대된다.

그리고 연간 500만톤 규모의 세계 유리섬유시장 중 슬래그섬유 출현으로 인해 유리섬유가 점유하고 있는 산업용섬유 시장의 상당 부분도 대체될 것으로 기대된다.

3. 결론

따라서 철강 슬래그(Slag)를 고기능성 산업용 무 기광물섬유로의 고부가가치화 기술개발을 통해 폐자 원의 이용가치 극대화를 추구할 필요가 있으며 "철 강 슬래그는 폐기물이 아닌 순환자원"으로서 새로 운 신소재의 선점역할을 수행해 나갈 것이다.

또한 슬래그를 활용한 산업용 섬유 및 연속섬유 활용한 제품의 경우 연구개발 사례가 없어 새로운 소재 및 새로운 소재 적용을 통한 제품화를 위해서 소재 및 제품의 표준화나 인증이 필요하며 부품 및 소재개발에 따른 수요업체에서 직접 시 생산을 위한 검증과 본격적인 양산 및 사업화를 위한 준비단계로 서 많은 투자가 이루어져야 할 것이다.

후기

이 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연 구비 지원에 의한 연구임.(과제번호: RS-2024-00442460) 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

하이퍼튜브에서의 복합재료 적용 사례 Application of Composite Materials in Hypertube Train

*김정석¹⁺, 이진호¹, 이창영¹, 김대현¹, 신광복² * J. S. Kim¹⁺, J. H. Lee¹, C. Y. Lee¹, D. H. Kim¹, K. B. Shin²

> ¹ 한국철도기술연구원,² 한밭대학교 ⁺E-mail: jskim@krri.re.kr

Keywords: Hypertube, Composite, Carbon, Superconducting, Train

1. 서론

하이퍼튜브는 1/1000기압의 튜브내부에서 시속 1200km로 주행가능한 신교통 수단이다. 아진공 튜브내에서 주행을 통해 고속에서 가장 큰 주행저항인 공력저항을 제거함으로써 고속주행이 가능하다. 현재 국내에서도 이러한 기술을 개발중이며, 개발중인 하이퍼튜브는 초전도 전자석을 이용한 자기부상 방식을 적용하고 있다. 초전도 자기부상 방식은 극저온에서 발생하는 초전도 현상을 이용하여 부상과 추진력을 발생시켜서 주행하는 개념이다. 이러한 자기부상 열차의 경우 부상 및 추진력 감소를 위해 차량 경량화 기술은 필수적이다.

본 연구에서는 현재 한국철도기술연구원에서 개발중인 하이퍼튜브 차량의 경량화를 위해 적용되고 있는 복합소재 기술에 대해서 소개하고 한다.

2. 하이퍼튜브 차량

하이퍼튜브 차량의 제원은 길이 약 20m이며 승객은 21명이 탑승 가능한 포드(pod) 형태의 차량이다. Fig. 1은 하이퍼튜브 차량의 개념도이다.



Fig. 1. Concept of Hypertube train.

하이퍼튜브 차량의 경량화를 위해서 본 연구에서는 우주발사체에 적용되는 탄소섬유 격자구조체를 적용하기 위한 연구를 수행하였다. 격자구조체는 소재와 기하학적 구조의 장점을 극대화 할 수 있는 구조로 경량화가 필수적인 하이퍼튜브 차량에 적합한 구조이다. Fig. 2는 하이퍼튜 차량에 탄소섬유 격자구조체를 적용한 해석 모델이다. 하이퍼튜브 차량을 구성하기 위해 3가지 형태의 격자구조체가 적용되었다.



Fig. 2. Lattice structures for Hypertube train.

본하이퍼루프 차체의 경량화를 위해 적용된 소재는 국산 탄소섬유 중 범용적으로 사용하고 있는 Carbon(H2550)/Epoxy룰 적용하였다. 차체의 제작은 필라멘트 와인딩 공법을 이용하였다.

3. 구조해석 및 제작

하이퍼튜브 차량에 적용되는 하중조건은 Table 1과 같다. 하중조건은 철도차량 안전기준에 근거하여 도출하였다. 이외에도 하이퍼튜브 차량은 아진공 환경에서 주행하므로 1기압의 외부압력이 동시에 가해지는 것을 고려하였다.

Table 1 Loading conditions

하중조건	값	
수직하중	9.6ton	
비틀림하중	4 ton-m	
3점지지하중	5 ton	

Fig. 3은 수직하중과 외부기압이 동시에 부과될 때 차체 구조물에서의 Tsai-Wu Index값을 나타낸 것이다. 석결과 Tsai-Wu Index 결과로서 출입문 프레임 하단부에 위치한 섬유 교차부에서 최대 Tsai-Wu Index인 0.46이 발생함을 확인하였으며, 이는 파손기준인 Tsai-Wu Index가 1보다 적은 값으로 파손 기준을 만족함을 확인하였다. 구조해석을 통해 하이퍼튜브 차량의 복합소재 부분은 구조적으로 안전한 것을 확인할 수 있었고 이를 근거하여 축소형 차체를 탄소섬유 격자구조체를 이용하여 제작하였다.

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials



Fig. 3. Tsai-Wu Index of Hypertube train dody.

Fig. 4는 필라멘트 와인딩 공법으로 하이퍼튜브 차체를 제작하는 것을 나타낸다.



Fig. 4. Manufacturing of Hypertube train body using filament winding.

하이퍼튜브 차체를 구성하는 3가지의 격자 구조체를 필라멘트 와인딩 기법으로 제작하고 이를 연결하여 축소형 하이퍼튜브 차체를 Fig. 5와 같이 제작하였다. 이렇게 제작된 탄소섬유 격자구조체는 Fig. 6과 같이 하이퍼튜브 시험용 초전도 전자석과 체결하여 주행시험을 수행하였다.



Fig. 5. Manufactured Hypertube train body.



Fig. 6. Hypertube train body assembled with superconducting magnet.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 국내에서 개발중인 초고속 주행시스템인 하이퍼튜브에 적용되는 복합소재 격자구조체에 대한 설계 및 제작에 대한 연구를 수행하였다. 이를 통해 탄소섬유 격자구조체는 하이퍼튜브와 같은 고속 주행체에 적용이 가능한 것을 확인 할 수 있었다.

참고문헌

- SW Lee et al. J. of Korean Society for railway 25(8):543-550, 2022.
- [2] HY Seo et al. J. of Korean Society for railway 22(11):872-879, 2019.

후기

본 연구는 한국철도기술연구원 기본연구사업인 "하이퍼튜브 실용화를 위한 핵심 장치 및 캡슐 운영 기술 개발(PK2501A1)"과제의 지원으로 수행되었습니다.

철도 객차 내 복합재료 내장제 적용을 위한 초음파-딥러닝 기반 재료 결함 측정 기술

Ultrasonic Wave and Convolutional Neural Network-Based Convergence method for damage assessment in GFRP panels for Train Cabins Interior Applications

이용희¹, 박주엽^{2,3}, 오용석⁴, 강동훈^{2}

* Y.H. Lee¹, J.Y. Park^{2,3}, Y.S. Oh⁴, D.H.Kang²⁺

¹ 창원대학교 첨단나노과학기술연구소, ² 한국철도기술연구원 철도안전연구센터, ³ 한양대학교 기계공학부, ⁴ 창원대학교 기계공학부

+ E-mail: dhkang@krri.re.kr

Keywords: CNN, Guided wave, micro damage, GFRP, delamination

초록

In this study, a damage assessment technique is investigated to evaluate the reliability of grass-fiber reinforced plastic (GFRP) used as an interior material in train cabins. To identify failures and delamination mode, a convergence approach integrating ultrasonic wave and convolutional neural network (CNN) is applied. For GFRP plates with a thickness of 6 mm, considering a shape of plate-like structure, proper Lamb wave modes are verified by analysis of experimental wave signals. The selected wave mode can be generated under conditions of a 35° incidence angle and a 450 kHz sinusoidal wave signal with five cycles. From the analysis of waveforms, the acceptable propagation distance is determined to be 250 mm. For a defect with dimensions of $20 \times 10 \times 0.025$ mm³, frequency response and attenuation effects, associated with amplitudes attenuation, are observed. Since the shallow depth of the defects, wave energy patterns alone are scarcely sufficient criteria for identifying damaged regions. To solve this drawback, frequency response image patterns derived by analysis of short-time transformation are utilized in conjunction with a CNN approach. For 100 frequency response images (FRIs), the Faster R-CNN architecture undergoes a learning process to verify the health condition of the GFRP plate. The proposed detection method plays a crucial role in identifying micro-damage.

후기

This research was supported by Global - Learning & Academic research institution for Master's PhD students, and Postdoc s(LAMP) Program of the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Ministry of Education(No. RS-2024-00444460).기 바랍니다.

시뮬레이션 기반 자율주행 BRT 굴절차량 기술 개발 Development of Autonomous Driving Technology for Articulated BRT Using Simulation-based Evaluation

박찬호¹, 김대현¹, 윤혁진¹ ^{} C. Park¹⁺, D.H. Kim¹, H.J. Yoon¹

¹ 한국철도기술연구원 ICT대중교통연구실 ⁺E-mail: chanho0@krri.re.kr

Keywords: Autonomous driving, BRT, Simulation, HILS

1. 서론

도시 교통 혼잡과 대기오염 문제를 해결하기 위한 대용량 대중교통 수단으로 BRT(간선급행버스)가 주목받고 있다. 본 연구는 전기 동력 기반의 대용량 굴절형 BRT 차량을 대상으로, 레벨 3 수준의 자율주행 기술을 시뮬레이션 기반으로 개발하고 이를 실차에 적용 가능한 수준으로 고도화하는 것을 목표로 한다. 기존 승용차 중심의 자율주행 기술과 달리, 굴절차량은 회전 반경, 길이, 무게 등에서 고유한 특성을 가지므로 이에 적합한 제어 알고리즘과 액추에이터 개발이 요구된다. 이를 위해 가상 시험환경과 정밀한 시뮬레이터를 구축하였으며, AI 기반 자율주행 시스템의 학습 및 검증에 필요한 데이터를 가상환경에서 효율적으로 생성·활용할 수 있도록 하였다【1】【2】. 본 초록에서는 이러한 시뮬레이션 기반 자율주행 기술 개발 과정과 핵심 성과를 소개한다.

2. 자율주행 제어기술 개발

2.1 굴절형 BRT 차량용 제어기 및 액추에이터 설계 굴절형 BRT의 전차륜 조향 특성을 반영한 자율주행 제어기를 설계하고, 가속·감속·조향 제어를 위한 전용 액추에이터를 개발하였다. 기계적 설치 제약을 고려하여 조향 계통은 위치 제어 기반 서보모터와 센서를 활용하였고, 감속/가속 페달 제어는 와이어 기반 액추에이터를 적용하였다. Take-over 대응 기능도 포함되어 수동모드 전환이 가능하다.

2.2 자율주행 판단 및 정밀제어 알고리즘

시나리오 기반의 판단 알고리즘, 실시간 고장 진단 로직, 센서 융합 기반 차선 추종 및 충돌 회피 알고리즘을 개발하였다. 정차 및 발차, 교차로 회전 등 대용량 차량의 특수 운행 상황을 고려한 주행 상태 전이(State Machine)와 경로 생성 로직도 함께 구현하였다.

3. 시뮬레이션 기반 시스템 개발

자율주행 시스템의 검증을 위해 시뮬레이터와 실제 제어기, 액추에이터를 연동한 HIL(Hardware-Inthe-Loop) 환경을 구축하였다. 시뮬레이터는 VTD (Vehicle Test Drive) 플랫폼을 기반으로 개발되었 으며, ADAS 및 자율주행 차량의 개발·검증을 위한 가상 환경 시뮬레이션을 지원한다. VTD에서 생성된 가상의 센서 데이터를 이용해 자율주행 제어기가 제어 입력을 산출하면, 실제 액추에이터가 동작하 게 되며, 그 동작 결과는 계측 장치를 통해 다시 시뮬레이터의 차량 동역학 모델에 입력되는 형태의 시뮬레이션이 구성된다. 이를 통해 제어기 로직과 실제 하드웨어 간의 통합 검증이 가능하며, 실차 수준의 개발 환경을 모사하여 시스템의 신뢰성을 높일 수 있다.



Fig. 1. Integrated Simulation and HILS Framework for Articulated BRT Autonomous Driving

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 시뮬레이션 기반의 자율주행 기술을 굴절형 BRT 차량에 적용하기 위한 제어기, 액추에이터, 시뮬레이터 및 가상 시험환경을 개발하였다. 추후 가상환경 기반의 시험환경을 고도화 하여 자율주행 시스템의 특징인 정밀정차 및 승객 승하차로 확대하여 적용할 계획이다.

참고문헌

 YL Kang et al. Trans Korean Soc Automot Eng. 29(6):547-556, 2021

[2] CH Park et al. J Korean Soc Railw. 24(9):757-765,

후기

본 연구는 한국철도기술연구원의 기본연구사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

철도시설물 점검 드론 현황 및 복합소재 필요성 Current Status of Railway Infrastructure Inspection Drones and the Necessity of Composite Materials

*김대현¹, 박찬호¹⁺, 윤혁진¹ Dae-Hyun Kim¹, Chanho Park¹, Hyuk-Jin Yoon¹

¹ 한국철도기술연구원 ICT대중교통연구실 ⁺E-mail: chanho0@krri.re.kr

Keywords: Railway, Facility, Inspection, Composite Materials.

1. 철도시설물 점검 드론 현황

시설물 점검에 드론을 활용하면 기존 인력 점검으로는 접근하기 어렵거나 육안으로 확인이 힘든 사각지대까지 효과적으로 점검할 수 있어 유지보수의 정확도와 효율성을 높이고, 중대재해 예방에도 기여할 수 있다. 특히 철도시설물 가운데 교량 하부, 전차선로, 낙석 우려 지점, 비탈면 등 인력 접근이 어렵거나 위험한 지역에서는 드론 점검이 적극적으로 활용되고 있다.

국내에서는 한국철도기술연구원이 드론 기반 철도시설물 자동 점검시스템을 개발하였다. 이 시스템은 드론, 이동형 지상관제시스템, AI 기반 손상 자동 분석 소프트웨어로 구성되며, 드론이 촬영한 영상에서 균열과 손상을 자동으로 탐지해 3D 손상지도를 생성한다. 드론은 GPS 없이도 약 18cm의 위치 정확도로 자율비행이 가능하고, 강한 열차풍과 전차선 전자기파에 대응할 수 있도록 헥사콥터(6개 프로펠러) 형식으로 설계되었다.

해외에서는 철도 인프라 유지보수에 드론이 폭넓게 활용되고 있다. 영국의 Network Rail은 약 32,000km의 철도 선로와 40,000여 개의 교량·터널을 드론으로 점검하며, 드론을 통해 열차 운행 중단 없이 위험한 작업을 최소화하고 있다. 특히 2021년에는 조종자 시야 밖 비행(BVLOS)을 활용한 25km 장거리 드론 시험비행에도 성공하였다.

프랑스에서도 철도시설물 유지보수에 드론을 적극 활용하고 있다. 프랑스 국영 철도회사(SNCF)는 교량, 터널, 전차선 등 접근이 어려운 시설물을 드론으로 점검하여 유지보수의 효율성을 높이고 있다. 드론을 통해 고해상도의 영상을 확보하여 균열과 부식 등의 손상을 조기에 탐지하고 예방적 유지보수를 시행한다. 또한, 시설물의 정밀한 3D 모델링을 수행하여 시설물 상태 평가 및 유지보수 계획 수립에 활용하고 있다. 이를 통해 작업자의 안전성을 높이고, 점검에 소요되는 시간과 비용을 절감한다.

미국의 BNSF 철도는 2015년 미 연방항공청(FAA)의 Pathfinder 프로그램에 선정되어 장거리 철도시설 드론 점검을 실증하였고, 이후 BVLOS 비행 허가를 받아 광범위한 자율비행 점검을 운영 중이다. 고해상도 카메라, 열화상 카메라, LiDAR 등 다양한 센서를 탑재하여 사람이 접근하기 어려운 구간의 데이터를 안전하고 효과적으로 수집하여 예지보전(predictive maintenance)에 적극 활용하고 있다.

2. 복합소재 필요성

2.1 드론 구조물에 적용되는 복합소재 기술 현황 드론의 본체 프레임과 구조물에는 주로 경량화 및 강도 향상을 위한 복합소재가 사용된다. 가장 대표적 으로 사용되는 탄소섬유 강화 플라스틱(CFRP)은 가벼우면서도 높은 강성을 가져 드론 비행 시 진동을 줄이고 안정성을 높이는 효과가 있다. 유리섬유 (GFRP)는 전기 절연성과 내환경성이 우수하여 통신부품 보호에 적합하고, 아라미드 섬유(케블라)는 충격 흡수성이 뛰어나 충돌이나 파손 위험이 큰 부위에 적용될 수 있다. 이처럼 복합소재는 드론의 다양한 부품과 구조에 맞추어 특성에 따라 최적화되어 활용되고 있다.

2.2 복합소재의 필요성

철도시설물 점검 드론은 철도 현장의 특수한 환경(강한 진동, 강풍, 전자기파 간섭 등)에 대응하기 위해 기존 소재 대비 뛰어난 특성을 갖는 복합소재 기술이 필수적이다. 드론의 안정적 비행을 위해서는 높은 강성 및 진동 흡수능력이 요구되며, 이는 탄소섬유 등 복합소재의 경량·고강도 특성이 필수적이다. 또한, 철도 시설 인근의 강력한 전자기파 환경에 대한 드론의 내성을 확보하기 위해 전자파 차폐 특성을 가진 유리섬유 복합재 활용도 요구된다. 협소한 공간에서 충돌 위험을 최소화하고 충격을 견디기 위해서는 아라미드 섬유(케블라)와 같은 충격흡수형 복합소재의 필요성이 높다. 즉, 철도시설 점검 드론의 성능과 신뢰성을 높이고 철도 현장의 극한 환경을 극복하기 위해서는 복합소재 기술 적용이 필수적이며, 이에 대한 지속적인 연구와 개발이 필요하다.

고강도 탄소나노튜브 섬유 제조를 위한 습식방사 공정제어 기술 Wet spinning process for high-performance carbon nanotube fibers

김서균 ¹⁺ S. G. Kim¹⁺

¹ 한국과학기술연구원 ⁺E-mail: seogyun.kim@kist.re.kr

Keywords: Carbon nanotube, Carbon nanotube fibers, Wet spinning, Liquid crystal solution, Rheology

1. 서론

최근 기계적·전기적 특성이 뛰어난 고성능 탄소나노튜브(CNT) 섬유를 제조하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이를 위한 주요 방사 방식으로 건식(직접) 방사와 습식(액정) 방사가 주목받고 있다. CNT의 섬유화는 CNT 소재의 활용에서 가장 기초적인 단계로, 전처리 및 후처리 여부와 관계없이 필수적인 과정이다. 그러나 방사 공정 자체에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 특히, 전통적인 고분자 섬유 제조 기술을 기반으로 발전해온 습식 방사 공정의 경우, CNT와 같은 나노 소재에 적용하기 위한 연구는 아직 미진하다.

습식 방사 과정에서 고분자나 CNT가 섬유화되는 동안, 섬유 내부에는 필연적으로 공극이 형성되며, 이 공극의 크기와 부피는 섬유의 기계적·전기적 성능을 결정짓는 핵심 요소가 된다. 따라서 내부 공극을 효과적으로 제어하는 것은 섬유의 거시적 물성을 향상시키는 중요한 방법 중 하나이다.

본 연구에서는 습식 방사 공정을 노즐 내 흐름, 연신, 응고의 세 가지 단위 공정으로 나누어 분석하며, 각 공정에서 공극을 최소화하고 CNT의 배향도를 향상시키는 방안을 전단 및 인장 유변학적 관점에서 고찰한다. 구체적으로, 노즐 내 흐름 단계에서는 전단 변형이 CNT 배향도에 미치는 영향을 살펴보고, 연신 공정에서는 인장 변형이 CNT의 배향 및 공극률에 미치는 변화를 분석한다. 또한, 응고 과정에서 발생할 수 있는 구조적 변화를 조사하여, 고성능 CNT 섬유를 제조하기 위한 최적의 방사 공정을 제안하고자 한다.

2. 본론

2.1 습식방사 공정의 단위공정

용액 방사 공정에서 섬유의 배향 및 내부 기공 제어를 위한 세부 과정은 세 가지 주요 단계로 나눌 수 있다(그림1). 노즐 내부는 흐름장(flow field)에 의해 CNT 도메인의 배향이 변화하는 주요 변형 영역 중 하나이다. CNT 용액은 고도로 정렬된 CNT를 포함하는 Lyotropic 액정 도메인과 무작위로 배향된 도메인으로 구성되며, 전단 흐름과 같은 거시적 정렬장에 의해 적절한 배향을 얻을 수 있다. 액정도프가 응고조로 방사될 때, 방사선(spin-line) 초기에 인장 변형이 발생하며, 이는 권취 속도에 따라 발생하는 인장력에 의해 유도된다. 섬유의 배향은 연신비(draw ratio)에 크게 의존하며, 인장 변형은 CNT 섬유의 정렬과 거시적 물성을 결정하는 중요한 요소이다. 또한 개별 CNT의 향상된 배향은 CNT 집합체의 고밀집화를 유도할 수 있다. 따라서 연신은 주로 CNT 다발 내부의 기공(수십 나노미터 이하의 규모)을 제어하는 역할을 할 수 있다.



Fig. 1. Unit operations for wet spinning.

3. 결론

용액 방사 공정에서 CNT 섬유의 구조적 배향과 내부 기공 형성을 분석하고, 이를 섬유의 거시적 물성과 연결하여 연구하였다. 노즐 내부에서 연신 흐름이 전단 흐름보다 초기 배향도를 높이는 데 더 효과적 이었으며, 최종 섬유의 배향은 주로 연신비(draw ratio)에 의해 결정된다는 것을 확인하였다. 또한, 배향도가 증가하면 섬유 내부와 다발 사이의 기공이 현저히 줄어들면서 밀도가 높아지는 경향을 보였다. 섬유의 최적 특성을 확보하기위한 방사 조건들을 제시하여 CNT 섬유 뿐 만 아니라 다양한 이방성 입자용액 시스템에서의 적용성 및 고성능 다기능 섬유 개발에 중요한 통찰력을 줄 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] S. G. Kim et al. Carbon. 196:59-69, 2022.
- [2] S. G. Kim et al. Chem. Eng. J. 412:128650, 2021.

부

문

초

탄소나노튜브를 활용한 복합표면구조 제작 및 첨단생산기술 응용

Fabrication of Composite Surface Structures using Carbon Nanotubes and Their Application in Advanced Manufacturing Processes

김산하 ⁺ Sanha Kim⁺

한국과학기술원 기계공학과 ⁺E-mail: sanhkim@kaist.ac.kr

Keywords: Carbon nanotubes, Advanced Manufacturing, Surface Structures, Pick and Place, Polishing

1. 초록

수직으로 정렬된 탄소나노튜브(CNT)의 첨단 합성기술을 활용하면 넓은 면적의 표면에 마이크로/나노 구조가 혼합된 멀티스케일의 아키텍처를 효과적으로 제작할 수 있으며, 추가적인 표면처리 공정들을 통해 다기능성 표면을 설계할 수 있는 새로운 기회를 제공한다. 본 강연 에서는 수직정렬된 CNT 기반의 복합계층적 형상구조를 활용하고 그 표면 특성을 조작함으로써 첨단생산 기술로의 응용한 예시들을 제시한다. 예를 들어, CNT 를 인쇄전자 공정을 위한 나노다공성 스탬프로 활용하여 기존 인쇄 공정을 훨씬 능가하는 고해상도 (<10 µm) 및 생산속도 (>0.1 m/s) 의 조함을 가능하게 한 연구를 소개한다. 또한 CNT 포레스트의 연한 기계적 성질, 거친 표면 거칠기와 높은 전도성을 활용함으로써 낮은 고유 접착력 표면에 외부 전압에 의해 넓은 범위의 전기적 인력을 부여함으로써 미세 전사공정에도 활용한 기술을 설명한다. 그 외에도 고효율 고성능 SERS 기관, 그리고 초정밀 연마를 위한 나노 사포 제작 및 활용 등 CNT 복합표면구조의 다양한 적용 가능성에 대해 논의한다.

참고문헌

- [1] S Kim et al. Science Advances, 2016.
- [2] S Kim et al. Science Advances, 2019.
- [3] MSH Boutilier et al. ACS Appl. Mater. & Interf., 2021.
- [4] D Mariappan et al. ACS appl. Nano Mater., 2023.
- [5] SJ Kim et al. Sensors and Actuators: B. Chemical, 2024.
- [6] J-H Ha et al. Advanced Functional Materials, 2024

후기

이 성과는 2025 년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 중견연구자지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

높은 수분산성을 갖는 메틸피리디늄 염으로 기능화된 환원된 그래핀 옥사이드와 폴리비닐알코올 복합재료

Methylpyridinium-Functionalized Reduced Graphene Oxide with Enhanced Water

Dispersibility for Poly(vinyl alcohol) Composites

*진정운, 구본철⁺, 유남호⁺ * J.U. Jin, B.C. Ku ⁺, N.H. You ⁺

한국과학기술연구원(KIST) 전북, 복합소재기술연구소, 탄소융합소재연구센터 ⁺E-mail: cnt@kist.re.kr ⁺E-mail: polymer@kist.re.kr

Keywords: Reduced graphene oxide, Functionalized graphene oxide, Composite, poly(vinyl alcohol).

1. 서론

그래핀 옥사이드(GO)의 기능화 및 환원 공정은 물성과 분산성에 큰 영향을 미친다. [1] 기존 화학적 환원법의 환원제는 유독성과 환원된 그래핀은 낮은 분산 특성으로 낮은 응용성을 보인다.[2] 본 연구에서는 메틸피리디늄 염을 이용한 새로운 환원제를 개발하여 GO를 환원과 기능화를 동시에 수행하였다. 특히 m-Py-rGO는 우수한 수분산성을 보였으며, 나노복합재료의 필러로서의 활용 가능성 을 보였다.

2. 실험

2.1 기능화된 환원 그래핀 옥사이드 합성

산화 그래핀(GO)을 에탄올에 분산시킨 후, 파라 및 메타 위치에 하이드라진기가 도입된 각각의 단량체 와 반응시켜 환원 및 기능화를 동시에 진행하였다. 반응은 80℃에서 24시간 Ar 분위기 하에서 수행되었으며, m-Py-rGO는 에탄올 및 물로 세척한 뒤 물에 재분산하여 동결 건조하였다.

2.2 m-Py-rGO/PVA 복합재료 제조

폴리비닐알코올(PVA)을 증류수에 90℃에서 완전 용해한 후, 초음파 및 교반을 통해 분산된 m-PyrGO 분산액을 다양한 필러 함량(0.1~1 wt%)으로 혼합하여 복합재료 필름을 제조하였다. 혼합 용액을 유리 기판에 코팅한 뒤, 실온에서 건조 후 60℃에서 진공 건조하여 필름화하였다.

3. 결과 및 분석

m-Py-rGO를 1 wt% 첨가한 복합재료는 순수 PVA 대비 인장 강도가 48% (85.95 MPa) 증가하고, 영률이 82% (4.27 GPa) 향상됨을 확인하였다 (fig. 1). 이는 기능화된 rGO의 균일한 분산성과 PVA와의 우수한 계면 상호작용에 기인하는 것으로 판단된다.



Fig. 1. Tensile strength and Young's modulus of the m-Py-rGO/PVA nanocomposite

4. 결론

본 연구의 구조적 이성질체 단량체 설계는 강화재 로서 그래핀을 환원 및 기능화 하는 효과적인 경로를 제시하며, 특히, m-Py-rGO는 우수한 수분산성과 기계적 강화 효과를 나타냈다. 또한, 복합재료 내에서 탁월한 계면 상호작용을 통해 물성을 크게 향상시켜 다양한 매트릭스 복합재료 제조 가능성을 보여준다.

참고문헌

[1] Stankovich, Sasha, et al. nature 442.7100, 282-286, 2006.

[2] Zhu, Yanwu, et al, Advanced materials 22.35, 3906-3924, 2010.

후기

이 연구는 한국과학기술연구원(KIST) 기관 고유 사업(2E32632) 및 K-Lab(2E32635의 지원을 받아 수행 되었습니다.

탄소나노튜브 섬유 제조를 위한 최적의 열 산화를 통한 비정질 탄소 제거 공정 Removal process of amorphous carbon through optimal thermal oxidation for manufacturing carbon nanotube fibers

*이동주¹, 정세은¹, 김중환¹, 임병우¹, 김지연¹, 구본철¹⁺, 김서균¹⁺⁺ *D. Lee¹, S.E. Jeong¹, J. Kim¹, B.W. Im¹, J. Kim¹, B.-C. Ku¹⁺, S.G. Kim¹⁺⁺

¹ 한국과학기술연구원 전북 복합소재기술연구소, 탄소융합소재연구센터 ⁺E-mail: cnt@kist.re.kr ⁺⁺E-mail: seogyun.kim@kist.re.kr

Keywords: Carbon Nanotube, Carbon Nanotube Fiber, Amorphous Carbon, Thermal Oxidation

1. 서론

탄소나노튜브(CNT)는 이론적으로 높은 강도와 전도도를 가지고 있으며, 초경량 소재로서 유망한 탄소나노물질로 알려져 있다 [1]. 우수한 물성을 기반으로 CNT를 습식 방사 공정을 통해 섬유화 하는 연구도 꾸준히 진행되고 있다 [2]. 이 과정에서 CNT는 정제, 산화공정과 같은 전처리 공정, 응고, 연신과 같은 방사공정, 열처리, 코팅과 같은 후처리 공정을 통해 고성능의 CNT 섬유를 제조할 수 있다 [3]. 특히 CNT의 정제 및 산화 조건 설정은 가장 기초적인 공정으로, CNT 섬유의 균일하고 향상된 물성을 발현하기 위해 필수적이다. 본 연구에서는 CNT의 산화 조건을 설정하는 방법론에 대해 고찰하고 공정 최적화에 대해 논의한다.

2. 탄소나노튜브의 산화 및 섬유 제조

2.1 열 산화

CNT의 열 산화는 특정 온도, 시간에 따라 공기중 에서 열처리 되었다. 산화 조건은 각각 350 °C, 12 시간 (0x350/12), 400 °C, 12 시간 (0x400/12), 400 °C, 24 시간 (0x400/24), 450 °C, 6 시간 (0x450/6), 500 °C, 1 시간 (0x500/1), and 500 °C, 6 시간 (0x500/6) 으로 설정하였다.

2.2 CNT 섬유 제조

산화된 CNT를 이용하여 습식 방사 공정을 통해 CNT 섬유를 제조하였다. 각 조건에 따라 산화된 CNT를 클로로술폰산 (CSA)에 10 mg ml⁻¹의 농도로 분산 시켰다. CNT 분산액은 아세톤 용매에서 토출 속도와 권취 속도에 따라 연신비가 조절되었고, 연신비는 2.2로 고정하였다.

3. 결과 및 고찰

특정 CNT의 산화 온도 및 시간에 따른 전처리 후 이를 섬유화까지 진행하였다. 우선 CNT의 산화 조건에 따라 비정질 탄소의 제거 유무를 확인 하였다. XPS를 통해 탄소의 스펙트럼을 분석한 결과 *sp²* carbon의 양이 0x400/12일 때 최대였음을 확인하였다. 한편 온도와 시간이 증가되었을 경우 오히려 CNT에 손상이 가해지는 것을 확인하였다. 각 샘플을 섬유화한 경우에도 강도와 탄성률이 비슷한 경향을 보이는 것을 확인하였다. 적절한 온도와 시간은 비정질 탄소를 제거하고 이에 따라 CNT간의 결합력을 향상시켜 우수한 강도와 탄성률 을 달성할 수 있게 하였다.



Fig. 1. TEM image of CNT bundles (left) before and (right) after thermal oxidation.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 CNT의 열 산화 조건에 따른 섬유의 물성 변화를 소개하였다. 열 산화의 온도와 시간은 CNT 표면의 비정질 탄소를 제거하기도 하지만 오히려 CNT에 손상을 입히기도 한다. 이에 따라 CNT 섬유의 물성도 영향이 미치는 것을 확인하였다. 최적의 산화 조건 확립은 순수한 CNT를 얻기 위한 필수적인 공정이고, 단순히 CNT 섬유 뿐만 아니라 CNT 필름 등 다양한 구조체의 적용을 위해 반드시 거쳐야 하는 공정이다. 결과적으로, 이러한 연구 결과는 다양한 CNT의 최적의 열 산화 조건을 확립하는 방향성을 제시하였다.

참고문헌

- [1] D Lee et al. Sci. Adv. 8:eabn0939, 2022.
- [2] SG Kim et al. Carbon 196:59-69, 2022.
- [3] SE Jeong et al. Funct. Compos. Struct. 7:015001, 2025.

부

질산 표면처리 조건이 재활용 탄소섬유 표면특성에 미치는 영향 Effect of surface treatment conditions of nitric acid on the surface properties of recycled carbon fibers

이규선 ¹, 김경하 ¹, 이현경 ¹, 김대업 ¹⁺ ^{} Gyuseon Lee ¹, Gyungha Kim ¹, Hyunkyung Lee ¹, Daeup Kim ¹⁺

> ¹ 한국생산기술연구원 탄소경량소재그룹 ⁺E-mail:dukim@kitech.re.kr

Keywords: Carbon fiber, Nitric acid, Surface treatment, Surface property

1. 서론

기사용된 탄소복합재로부터 회수한 재활용 탄소 섬유는 표면이 열화되어 탄소섬유와 수지 간의 계면 결합력이 저하되어 회수된 탄소섬유를 재사용 하기 위해서는 계면 결합력을 향상시키는 표면처리가 필연적이다. 본 연구에서는 재활용 탄소섬유의 업싸이클링을 위하여 질산 처리 공정을 도입하여 처리 온도 및 시간에 따른 기계적, 화학적 특성분석을 통해 탄소섬유와 수지간의 계면결합력을 향상시키기 위한 최적 조건을 도출하였다. 또한, 질산 처리 온도 및 시간에 따른 탄소섬유 표면의 화학적인 상태변화 및 산소 관능기 메커니즘을 규명하였다.

2. 실험 재료 및 실험 방법

본 연구에서는 탄소복합재에서 회수한 재활용 탄소섬유를 디사이징한 후 질산으로 표면처리를 실시 하였다. 질산 처리는 온도 25~100℃, 시간 0.5~5시간의 조건으로 실시하였다. 탄소섬유의 기계적 특성을 평가하기 위하여 단섬유 인장시험을 실시하였다. 표면에너지 변화를 분석하기 위하여 동적 접촉각 측정하여 표면 자유에너지를 산출하였다.

3. 실험 결과

질산 온도 25℃에서 5시간 및 100℃에서 3시간 까지는 untreated CF 대비 동등한 인장특성을 나타냈으나, 100℃에서 3시간 이후에서는 untreated CF에 비해 약간 감소함을 확인할 수 있었다. 질산으로 처리 시 온도의 영향이 시간의 영향보다 탄소섬유의 변화에 미치는 영향이 큰 것으로 사료 된다. 또한 25℃에서 5시간까지는 C-0 및 C=0의 산소 관능기 및 극성 표면에너지가 untreated CF 대비 약간 증가하였다. 반면에 100℃에서는 1시간까지는 C-0 및 C=0가 감소, 0=C-0의 양은 생성 및 증가하기 시작하였고. 5시간이 되면 C-0 및 C=0은 대폭 감소하고, 0=C-0는 급격하게 증가하여 5시간에서는 desized CF 대비 산소 관능기의 양이 92% 증가, 극성 표면에너지는 200% 증가하였다. 25℃에서 100℃, 1시간에서 5시간까지 증가할수록 100℃, 5시간에 untreated CF 대비 계면결합력의 지표가 되는 0/C의 비율이 0.33까지 증가하였다. 이는 25에서 100℃, 1시간에서 5시간으로 증가함에 따라 산소 관능기인 0=C-0가 생성 및 대폭 증가하여 극성 자유에너지의 증가로 탄소와 수지간의 계면 결합력이 증가한 것으로 판단된다.



Fig. 1. Variation of (a) surface free energy (b) polar surface energy of chemical treatment on carbon fibers.

4. 결론

질산 25℃에서 처리 후 1 시간에서 5 시간까지 untreated CF 대비 동등한 인장특성을 나타내었으며 탄소섬유 표면에 있는 C-O 및 C=O 에는 산소가 도입 되어 O=C-O 가 생성된다. 반면에 질산 100℃에서는 인장특성이 1 시간까지는 untreated CF 와 큰 차이가 없으나 1 시간 이후에서는 점차 감소하였으며 O=C-O 가 급격하게 생성 및 증가로 산소 관능기가 크게 증가하였다. 이로부터 질산 온도 100℃가 25℃에 비해 크게 극성 자유에너지가 증가하였으며, 100℃, 1 시간에서 가장 최적의 접촉각 및 극성 자유에너지를 나타내었다.

후기

본 논문은 산업통상자원부 K-Carbon 플래그십 기술개발 사업 (No. RS-2024-00416771)의 지원을 받아 연구된 결과 이다.





AI 기반 컴파운딩 소재 설계 및 사출성형 공정 최적화 전략 AI-Based Compounding Material Design and

Injection Molding Process Optimization Strategy

*유승화 ¹⁺ * Seunghwa Ryu¹⁺

¹ 한국과학기술원 기계공학과 ⁺E-mail: ryush@kaist.ac.kr

Keywords: Compounding, Material Design, Injection Molding, Process Optimization

1. 서론

본 연구는 AI 기반 접근법을 활용하여 컴파운딩 복합재 개발 및 사출 성형 공정 최적화를 수행하는 연구 프레임워크를 제안한다. 먼저, PP 기반 복합재를 대상으로 조성과 공정을 최적화하기 위해 실험팀과 협력하여 데이터를 구축하고, 베이지안 최적화와 확산 모델을 적용하여 실험 횟수를 줄이면서도 높은 기계적 성질을 갖춘 최적 조성을 도출하였다. 이후, 사출 성형 공정의 최적화를 위해 공정 변수와 환경 변수 간의 관계를 학습하고, 이를 기반으로 확산 모델을 활용해 결함 없는 제품을 생산할 최적 공정 조건을 공장 환경을 고려하여 실시간으로 추론하는 시스템을 개발하였다.

2. AI 기반 컴파운딩 복합재 개발

먼저, AI 기반 최적화 프레임워크를 도입하여 컴파운딩 복합재의 조성과 가공 공정을 동시에 최적화함으로써 사출 성형 제품의 기계적 성질과 내구성을 향상시키는 방법을 제안한다. 기존의 복합재 개발 방식은 연구자의 경험과 시행착오에 의존하여 비효율적이었으나, 본 연구에서는 PP(폴리프로필렌) 기반 복합재를 대상으로 기계 학습을 활용하여 조성 및 공정 변수를 최적화하였다. 실험팀과 협력하여 조성 및 공정 변수를 변경하며 데이터를 구축하고, 이를 활용해 베이지안 최적화와 확산 모델을 결합한 알고리즘을 개발하여 최적 조합을 도출하였다.

3. AI 기반 사출 성형 공정 최적화

기계 학습 기반 사출 성형 공정 최적화 시스템을 개발하여 환경 변화에 실시간으로 적응하면서 결함 없는 제품을 생산하는 방안을 제시한다. 기존의 수작업 공정 조정 방식은 효율성이 낮고 품질의 일관성이 떨어지는 문제가 있었으며, 이를 해결 하기 위해 대리 모델을 구축하여 공정 변수(사출 압력, 냉각 속도 등)와 환경 변수 간의 관계를 학습 하고, 이를 바탕으로 확산 모델(Diffusion Model)



Fig. 1. Generative AI Based Process Optimization Framework

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 사출 성형 공정과 복합재 개발을 최적화 하는 AI 기반접근법을 2가지 제시하였으며, 이를 통해 제조 효율성과 품질을 향상시킬 수 있음을 입증하였다. 복합재 개발에서는 AI를 활용해 조성과 공정을 최적화하여 우수한 물성을 확보하였고, 사출 성형 공정에서는 확산 모델을 기반으로 실시간 최적 매개변수를 생성하여 불량률을 낮추고 생산성을 높였다. 이러한 접근법은 기존 제조 방식의 한계를 극복할 수 있는 새로운 패러다임을 제시하며, 향후 금속-고분자 복합재 및 바이오 기반 복합재 등 다양한 소재 시스템으로 확장될 가능성이 크다.

참고문헌

 JY Kim et al. Journal of Manufacturing Systems. 79:162-178, 2025.

후기

본 과제는 한국화학연구원과 고등기술연구원과 협업을 통해 수행되었음.

나노/마이크로 소재 및 구조를 활용한 기능성 표면 융합 기술 Functional surfaces and applications using multiscale materials and structures

*강성민¹⁺ * S.M. Kang¹⁺

¹서강대학교 기계공학과 ⁺E-mail: smkang@sogang.ac.kr

Keywords: Polymer, Multiscale structures, Energy devices, Sensors

1. 서론

본 강연에서는 나노/마이크로 소재의 합성과 미세구조 제작 기술을 통한 기능성 표면 융합 기술에 대해 발표한다. 자연계로부터 유래한 혹은 인공적으로 합성한 고분자 소재는 표면의 기본적인 물성을 결정한다. 여기에 적용처나 구동 환경에 따라 최적 설계한 기능성 미세구조를 도입하여 해당 표면의 물성치를 강화/변경하거나 효율을 향상시킬 수 있다.[1]-[3]

2. 기능성 소재 합성 및 미세구조 개발

2.1 기능성 소재 합성

기능성 고분자 소재 합성은 기계, 전자, 바이오, 에너지 등 다양한 산업 분야에서 필수적인 핵심 기술이다. 먼저 특정 물성을 갖는 고분자 소재의 결정과 합성 방법을 제시하고, 기계적/전기적 특성, 자가치유성, 장기안정성을 평가하는 방법을 제시한다. 특히, 표면 미세구조 제작이 용이한 고분자 합성을 중심으로, 이들의 물리·화학적 조절을 통한 성능 향상 방안을 논의한다.

2.2 기능성 미세구조 제작 기술

고분자 표면에 기능성 미세구조를 제작하는 기술(패터닝 기술)은 광학, 센서 및 방오 코팅 등 다양한 분야에서 중요하게 활용된다. 이에 미세구조 패터닝, 소프트 리소그래피, 3D 프린팅 등의 공정을 이용하여 고분자 표면에 미세구조를 형성하는 방법을 소개한다. 특히, 젖음성, 접착력, 광학적 특성 조절 등의 기능을 구현할 수 있는 패터닝 기법의 사례들을 제시하고, 이를 위한 재료 및 공정 최적화 방법을 소개한다.

3. 다분야 융합 기술 개발

기능성 고분자 소재 및 표면 미세구조 제작 기술은 태양전지, 센서, 소프트 로봇, 디스플레이 등 다양한 첨단 분야에서 적용되어 성능과 효율을 향상시키는 중요한 역할을 한다. 표면 미세구조는 빛 반사 제어를 통해 고효율 태양전지를 개발하는 데 활용된다. 또한, 센서 분야에서는 미세패터닝을 적용하여 고감도 압력, 온도, 습도 센서를 제작할 수 있으며, 소프트 로봇에서는 자가치유성 및 변형 가능한 고분자 소재를 활용해 유연성과 내구성을 증대시킬 수 있다. 디스플레이 분야에서는 나노패터닝을 통해 고해상도 및 저전력 디스플레이 개발이 가능하다.



Wetting Control Opt

Fig. 1. Functional surfaces and applications using multiscale materials and structures.

4. 결론 및 향후과제

본 강연에서는 이러한 응용 기술을 기반으로 차세대 스마트 소재와 기능성 미세구조 제작 기술의 발전 가능성을 제시하고자 한다.

참고문헌

JH Kim et al. INT J PR ENG MAN-GT 7:239-245, 2020.
 JS Choi et al. Adv. Energy Mater. 12: 2201520, 2022.
 SM Kim et al. Chem. Eng. J. 506: 160042, 2025.

후기

This work has been supported by the Nano & Material Technology Development Program (RS-2023-00282896) through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT.

소방용 로봇 재료를 위한 현무암 기지 복합재료의 기계적 특성 분석 Mechanical characteristics analysis of basalt fiber reinforced polymer composites for fire fighting robots

*윤기현, 변도균, ⁺윤성민 * G.H. Yoon, D.G. Byeon, ⁺S.M. Yoon

> 국립창원대학교 기계공학부 ⁺E-mail: yoonsm@changwon.ac.kr

Keywords: BFRP, Fire fighting robot, Tensile property, High temperature

1.서론

최근 화재 및 재난 현장에서 소방 로봇의 활용이 증가함에 따라, 고온 환경에서도 안정적인 기계적 성능을 유지할 수 있는 복합재료의 필요성이 대두되고 있다[1]. 특히, 소방용 로봇의 구조재로 빈번히 적용되는 복합재료는 고온에서 안정적인 기계적 강도를 유지해야 하기 때문에, 내열성[2]과 내구성[3]을 동시에 만족해야 한다. 본 연구에서는 현무암 섬유를 기반으로 하는 복합재료의 고온 기계적 특성을 분석함으로써, 소방 로봇용 현무암 기지 복합재료(Basalt Fiber Reinforced Plastic, BFRP)의 고온 적용성을 평가하였다.

2.전 열처리 온도에 따른 복합재료의 인장강도 시험

2.1 시험편 제작 및 시험 방법

본 연구에서는 현무암 섬유를 보강재로, R118 에폭시 수지와 H141 상온 경화제를 사용하여 복합재료를 제작하였다. R118 에폭시는 고내열성 수지로, 약 180~200도의 유리전이온도 Tg 를 가지며, 고온에서 일정 수준 이상의 기계적 강도를 유지할 수 있다. BFRP 시험편은 6층 적층 구조로 1.75 ± 0.25mm의 두께를 가지기 위해 진공 수지 이송 성형법 (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding, VARTM) 으로 제조되었다. 인장 시험은 ASTM D3039 표준[4]을 따라 수행되었으며, 인장 전 내열성능 확인을 위해 시험편 전 열처리 온도는 상온, 80, 200, 260, 320도로 설정하였다 140. [5]. 일반적으로 섬유에 비해 폴리머의 내열성이 낮기 때문에 본 연구에서는 상온에서 320도 사이의 온도 환경이 설정되었다. 전 열처리에 의해 변화된 BFRP의 기계적 성능을 평가하기 위해 단축 인장 시험을 수행하였다.

2.2 기계적 특성 및 파단면 평가

각 온도에서 내열 인장 성능은 응력-변형률 선도를 근거로 하는 기계적 특성의 정량적 평가로 비교분석 되었다. 고온 환경에 의한 데미지, 즉 수지상태 및 섬유/수지 계면 사이의 파면 특성 분석을 위해 광학현미경(Optical microscopy, OP), 주사전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)을 활용하였다.

3. 실험 결과 및 분석

실험 결과, 실온에서 BFRP의 평균 인장강도는 750MPa 이상으로 측정되었으며, 전 열처리 온도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 200도 이상에서는 급격한 강도 저하가 나타났으며, 320도에서는 50MPa 이하로 감소하였다. 이러한 결과는 고온에서 수지의 연화와 섬유/수지 계면 결합력 감소에 기인한 것으로 판단된다. 파면 분석 결과, 140도 이하에서는 섬유의 균일한 파괴와 수지의 데미지가 주된 파손 형태였으나, 200도 섬유/수지 이상의 고온에서는 계면 탈락이 두드러지게 나타났으며 260도 이상에서는 수지의 탄화 현상이 관찰되었으며, 320도에서는 심각한 열분해가 발생하였다.

4. 결론

본 연구에서는 BFRP의 고온 기계적 성능을 평가하였다. 결과는 BFRP가 200도 이하에서는 비교적 우수한 기계적 강도를 유지하였으나, 250도 이상에서는 급격한 성능 저하를 보였다. 이는 수지의 Tg를 초과하는 온도에서 섬유-수지 계면의 결합력이 급격히 약화되기 때문으로 분석된다.

참고문헌

- [1] 윤병일 한국공업화학회 기획특집 17: 10-25, 2014.
- [2] 박용민 박사학위논문 전북대학교: 2023.
- [3] 김제헌 et al 한국재료학회지 7: 434-443, 1997.
- [4] 이재동 et al *한국접착및계면학회지* 22: 85-90, 2021.
- [5] T Li et al. Constr Build Mater. 342: 127983, 2022.

Magnetic Anisotropy for Sensing and Actuation in Soft Robotics

*Minjeong Ha+

Department of Materials Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology +E-mail: minjeongha@gist.ac.kr

Keywords : Magnetic anisotropy, soft robotics, flexible magnetic sensors, magnetic soft actuators

1. Introduction

Magnetic anisotropy in micro-/nano-materials has been significant attention due to its critical role in the development of high-performance magnetic sensors and actuators [1]. This characteristic, which determines the preferred magnetization direction, enhances selectivity, precision, and operational efficiency in various soft robotic applications. Magnetic sensors offer non-contact motion tracking and object proximity detection, which are crucial for flexible and stretchable electronics in soft robots. Furthermore, magnetic soft actuators enable programmable shape transformations and complex motion control without mechanical hinges, facilitating adaptive and reconfigurable robotic systems.

2. Magnetic Anisotropy for Sensing and Actuation

2.1 Flexible and Stretchable Magnetic Proximity Sensors: Magnetic field sensors provide a versatile and compact solution for motion tracking in soft robotics, allowing seamless integration onto pliable surfaces. In this study, we present printed giant magnetoresistive (GMR) sensors on ultrathin polymeric foils (3 µm thick), demonstrating a figure of merit of 3409 T⁻² at 0.88 mT. sensors maintain stable magnetoresistive These performance under extreme bending conditions (16 µm curvature radius) and sustain functionality under 100% biaxial strain. The key enabler is a novel triblock copolymer-based magnetic paste, incorporating multilayered [Py/Cu]₃₀ microflakes. The viscoelastic nature of the polymer enhances adhesion, mechanical stability, and percolation contact, thereby improving sensitivity and resilience. These flexible GMR sensors can be directly applied to human skin, enabling on-skin interactive electronics for touchless control applications [2].

2.2 Magnetic Soft Actuators: Magnetic soft actuators exhibit superior adaptability compared to traditional actuators by torque-induced deformation under uniform magnetic fields. We developed ultrathin (60 μ m) magnetic origami actuators using NdFeB microparticles embedded in a shape-memory polymer matrix. These actuators fold to 180° under a low magnetic field (~100 Oe) and unfold upon photothermal heating. Furthermore, integrating a 3 μ m-thick magnetic sensors enables real-time monitoring of the magnetization state and deformation of magnetic

origami. This facilitates feedback control for autonomous assembly and reconfigurable folding sequences without predefined hinges. By illuminating localized light and applying magnetic field, these soft robots can achieve remote, untethered, and intelligent morphing capabilities [3].



Fig. 1. Magnetic soft robot adapting to dynamic environments with enhanced actuating precision and performance through magnetic anisotropy. Integrated sensors and actuators enable closed-loop control, minimizing errors in task execution [1].

3. Conclusions

This study underscores the key role of magnetic anisotropy in enhancing the performance of flexible magnetic sensors and actuators for soft robotics. By controlling the magnetization orientation through intrinsic and extrinsic factors, we achieve highly sensitive magnetic-field sensors and shape-reconfigurable actuators. The advancements in printed magnetoelectronics and programmable magnetic soft actuators suggest next-generation autonomous soft robots with enhanced responsiveness, adaptability, and multifunctionality. Future work will focus on integrating sensors and actuators onto soft robot bodies to further enhance cognition and interactive capabilities in untethered robotic systems.

References

- [1] H Kwon et al. Nanoscale 16:6778-6819, 2024.
- [2] M Ha et al. Adv. Mater. 33:2008751, 2021.
- [3] M Ha et al. Adv. Mater. 33:2170091, 2021.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2022R1C1C1004845, RS-2024-00407155).

Supercapacitor Integrated Magnetic Actuator

Heejae Won^{1,*}, Junghyo Kim¹, Yeonwoo Jang¹, and Jiyun Kim¹⁺

¹ Department of Materials Science and Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology,

⁺E-mail: jiyunkim@unist.ac.kr

Keywords : Smart Material, Magnetic Actuation, Supercapacitor, On-Demand Cell Configuration.

1. Introduction

The integration of energy storage and actuation within a single system is essential for the development of compact and multifunctional platforms, especially in the fields of soft robotics and wearable electronics. To address this challenge, we present a novel Supercapacitor Integrated Magnetic Actuator (SIMA), which embeds NdFeB magnetic particles directly into the electrode of a flexible supercapacitor. This configuration allows for simultaneous electrochemical energy storage and magnetic-field-induced actuation, eliminating the need for separate components.

2. Fabrication and Characterization

2.1 Fabrication

SIMA is fabricated via a solution-based method using a composite electrode ink composed of conductive activated carbon, multi-walled carbon nanotubes, and NdFeB magnetic particles dispersed in a PVP/PVDF polymer matrix. The flexible substrate, C-PET, is coated with an Ecoflex layer to form an ion-shielding base. Laser cutting is used to precisely pattern the electrodes, and a nonwoven separator soaked in a thermally curable ionic-liquid electrolyte is sandwiched between the electrodes. The device is encapsulated and thermally cured to form a robust, flexible structure. Origami-inspired folding patterns are incorporated to enable mechanically reconfigurable circuits.

2.2 Characterization

Electrochemical measurements show stable energy storage performance with an areal capacitance of 13.3 mF cm⁻² and a retention rate of 97.2% after 500 magnetic actuation cycles. Cyclic voltammetry (CV) and galvanostatic charge-discharge (GCD) tests confirm reversible charge storage and symmetric capacitive behavior. Furthermore, magnetic characterization using a vibrating sample magnetometer (VSM) confirms that the embedded magnetic particles respond predictably to external magnetic fields, enabling controlled curvature. The response was tunable based on MP-to-carbon ratios and magnetic field intensity, enabling programmable deformation.

3. Results and Discussion

SIMA was integrated into a bio-mimetic firefly robot to demonstrate its multifunctionality. The robot exhibited LED blinking and simultaneous wing flapping when exposed to external magnetic fields. Additionally, SIMA modules were configured in various series and parallel combinations to create adaptable circuit behavior. The incorporation of origami patterns allowed the transformation of device shape and electrical connectivity in real time.



Fig. 1. Schematic illustration of the firefly robot.

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

SIMA demonstrates a new class of integrated devices capable of storing energy and generating motion in a programmable manner. Its fabrication simplicity, magnetic responsiveness, and structural adaptability make it a promising platform for next-generation soft electronics. Future work will focus on optimizing particle distribution, improving actuation force, and exploring applications in untethered robotics and electronic skin.

References

H. Song et al. *Nano Letters*, 20(7), (2020).
 J. Choe et al. *Advanced Materials* 36.18 (2024)

Acknowledgement

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) grants funded by the Korean government (NRF-2020R1A2C2102842 and NRF-2021R1A4A3033149). The authors would also like to thank MILAB(UNIST) for experimental assistance and valuable discussions

Modular Soft Hand with High DOF Tendon-Driven Actuation for Versatile and Precise Manipulation

Yeonwoo Jang¹, Hajun Lee^{1,2}, and Junghyo Kim¹, Minjeong Kim, Jiyun Kim¹⁺

¹ Department of Materials and Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, ² Department of Mechanical Engineering, University of California, Berkeley

⁺E-mail: jiyunkim@unist.ac.kr

Keywords : dexterous manipulation, soft robot materials and design, tendon/wire mechanism, modular system

1. Introduction

Soft Robots have been spotlighted owing to their potential for safe and robust manipulation of humanmachine interface and machine-machine interface [1]. To achieve the high performance, it is essential that soft robotic hands prossess the dexterity of individual fingers, as well as the appropriate configuration of these fingers.

A high degree of freedom (DOF) allows for multidirectional operation and the creation of various actuations. Although soft robotic hands driven by the pneumatic system can offer high DOF, it complicates their internal sturcture and requires additional tethers and larger actuation bodies [2]. This makes the control design of the robotic hand difficult. Other studies address this to build a modular form. However, it is difficult to seamlessly integrate pneumatic actuators into a single modul without heavy tethering [3]. Tendon-driven actuators, in contrast, enable simple adjustments to the DOF through straightfoward design modifications [4]. However, there is still necessity of integral consideration on challenges such as increased complexity in tendon routing, mechanical wear, and maintenance demands.

The configuration of soft fingers plays a crucial role in enabling cooperative motion in multifate robotic hands. The dexterity of a single finger alone, based on its material or integral design, is not sufficient to capture the coordination between multiple fingers [5]. Robotic hand motion depends on the arrangement of soft fingers, which defines the workspace of each finger. Effective design must consider both finger properties and their layout. Conventional soft robotic hands use fixed structures, which hinders task adaptation difficult and often necessitates full redesigns. Few studies address this, though some explore modular or shape-adaptive designs to ease reconfiguration [6].

We propose a modular tendon-driven soft robotic hand system with high DOF and easy reconfigurability for versatile manipulation tasks, as shown in Fig. 1. With the devised four distinct platform configurations, our system achieves adaptable manipulation for various tasks by leveraging high-DOF modules. These modules are quickly reassembeld, and we characterize both their motion primitives and cooperative capabilities.



Fig. 1. Overview of our soft hand system.

2. Materials and Methods

2.1 Fabrication information

The soft finger $(20 \times 20 \times 120 \text{ mm}^3)$ is fabricated using a molding method with Ecoflex 00-30 silicone (Smooth-On). The soft finger mold is 3D printed. Nitinol wire (0.5 mm, Alfa) serves as the tendon to minimize hysteresis during actuation. The soft hand components, including adapters, platforms, and cover, are all 3D printed. The platforms and its cover measure 25 mm and 120 mm in height, respectively.

2.2 Working mechanism

Actuation is initiated by the motors winding the tendons, which causes the soft finger to bend in a specific direction as shown in Fig. 2. The degree of bending depends on the motor revolutions. The bending angle and direction are adjustable by varying the revolution ratios of the corresponding motors. For example, simultaneous motor actuation in the +x and +y directions results in diagonal bending. In addition, contraction is dirived from operating all the motors uniformly. The actuation primitives enable a linear trajectory during bending, allowing for various task operations.

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials



Fig. 2. Actuation mechanism of the soft finger module.

3. Results and Discussion

The experimental evaluation explores four distinct configurations of the soft robotic hand. Configuration 1, a single soft finger integrated with a UR-5e robotic arm and controlled via a neural network performs an intricate letter writing task, thus achieving a level of precision that closely mimics human handwriting. Configuration 2 features a three finger design to facilitate robust and delicate gripping. This configuration successfully manipulates a range of everyday items. Configuration 3 and 4 address more challenging manipulations tasks.

Configuration 3, which features four radially oriented fingers, excels in tasks such as opening and closing bottle caps (38 to 70 mm) and textures (smooth and rough), with UR-5e's assistance for positioning as illustrated in Fig. 3.

Opening a bottle cap using in-hand manipulation is challenging due to the extremely tight tolerances. Furthermore, both rotational and linear motions are required to succesfully disengage the threaded cap, making a simple twist insufficient. The flexibility of the soft finger and high DOF reduce these challenges by enabling both contraction and flexion. When combined with the proper configuration and precise trajectory tacking, the system successfully opens the various caps. Interestingly, fastening the cap back is even more challening [7]. However, if the actuation sequence is simply revesed, the proposed soft hand can close the cap without requiring additional computations or contorl adjustments.



Fig. 3. Rotating performances of Configuration 3.

Configuration 4, which features linearly arranged fingers, excels in tasks that involve finger or palm manipulations. We demonstrate couning stack of letter paper. The paper counting task involves finger-based manipulations to accurately count each sheet in a numbered stack, combining tipping and scratching motions. The task is challenging due to thin, lightweight nature of sheets and static-caused adhesion between sheets. This coordinated approach ensures precise counting of each sheet without any slippage. This exibits configuration's accuracy in complex finger-based tasks, showing both the force and shear maintaned within a a narrow range throughout the pulling process.

4. Conclusions

The paper concludes by demonstrating that the proposed tendon-driven soft finger system offers a versatile and modular solution for building dexterous soft robotic hands. Featuring a high DOF and diverse actuation modes via a tendon-pulling mechanism, the design enables a wide workspace and intuitive finger control. Its compact, all-inone structure supports easy integration and customization for task-specific needs.

Four task-oriented configurations validate the system's adaptability: Configuration 1 performs precise logowriting, Configuration 2 enables gentle grasping of varied objects, and Configurations 3 and 4 handle complex tasks like cap twisting, sheet counting, and reorienting long objects. These results showcase the system's ability to perform both simple and sophisticated manipulations with efficiency and precision, making it a promising platform for real-world soft robotic applications.

References

- [1] D Rus et al. Nature. 521: 467-475, 2015.
- [2] W Hu et al. Robotics. 7: 24, 2018.
- [3] S Abondance et al. IEEE Robot. and Autom. Lett. 5: 5502-5509, 2020.
- [4] H Lee et al. Sci. Robot. 5: eaay9024, 2020.
- [5] Al LA et al. Soft Robot. 4: 274-284, 2017.
- [6] CB Teeple et al. *IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intell. on Robot.* and Sys. (IROS). p.7201-7208, 2021.
- [7] C Jiao et al. IEEE Trans. Ind. Electron. 71: 1823-1831, 2023.

Enhanced Output and Actuation of TENG Systems Using Magnetically Responsive Polymeric Composites

*Junghyo Kim¹, Jin Pyo Lee³, Youn-Kyoung Baek⁴, and Jiyun Kim^{1,2,+}

¹School of Materials Science and Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan 44919, South Korea, ²Center for Multidimensional Programmable Matter, Ulsan National Institute of Science and Technology, Ulsan 44919, South Korea, ³School of

Materials Science and Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore, ⁴Powder Materials Division,

Korea Institute of Material Science, Changwon 51508, South Korea

⁺E-mail: jiyunkim@unist.ac.kr

Keywords : Triboelectric nanogenerator, Magnetic composite, Sensory actuator

1. Introduction

The development of advanced functional materials has enabled novel strategies for actuation and sensing, especially within soft and flexible electronic systems. Among these, magnetic elastomer composites, comprising magnetic particles embedded in an elastomer matrix, have garnered significant attention for their remote actuation capability, high mechanical compliance, and integration potential into wearable, self-powered devices. Their responsiveness to magnetic stimuli allows for wireless operation, reducing the need for complex wiring and power infrastructure. Furthermore, the combination of mechanical flexibility and energy harvesting ability makes them ideal for next-generation adaptive electronics such as biomedical implants, haptic interfaces, and environmental sensors. However, while magnetic actuation has been extensively explored, incorporating self-powered sensing within these systems remains a critical challenge.

Recent approaches to multifunctional soft actuators have highlighted the limitations of conventional actuators and sensing strategies, particularly in terms of scalability, energy efficiency, and robustness. Self-powered sensing systems, particularly those based on triboelectric nanogenerators (TENGs) and electromagnetic mechanisms, offer promising alternatives due to their ability to convert mechanical stimuli into electrical signals without external power[1]. Several studies have demonstrated enhanced TENG performance through the incorporation of magnetic particles. These include hybrid TENG-EMG systems[2], capacitance enhancement via micro-capacitor effects from magnetic fillers[3], and magnetization-induced amplification of displacement current[4,5] which is the driving force of TENGs[6,7]. Notably, magnetically aligned particles have been shown to improve charge density, while the use of ferromagnetic electrodes or magnetized composites leads to significant output gains. These findings underline the potential of magnetic particle/polymer composites in simultaneously enabling actuation and energy harvesting within a single, integrated soft platform.

2. Results and Discussion

2.1 Triboelectric Enhancement by Magnetic Composite In this study, we developed a triboelectric nanogenerator (TENG) system enhanced by a high-concentration magnetic composite film composed of neodymium-based magnetic particles embedded in a polymer matrix. This magnetic composite film functions not only as a contact layer in the TENG but also contributes to output enhancement through multiple mechanisms: electromagnetic induction, increased dielectric constant, and displacement current amplification under magnetization. The composite was integrated with an additional conductive layer acting as an electrode, thereby improving charge transfer and energy harvesting capabilities. By fabricating magnetic layers with varying particle concentrations (0-80 wt%) and magnetizing them post-fabrication at 3 T, we achieved a well-dispersed microstructure that minimizes current leakage due to particle clustering.

별

세

셔

Triboelectric output performance was evaluated under contact-separation conditions, revealing a remarkable voltage enhancement for the 80 wt% sample, exceeding 1000% compared to a non-magnetic control TENG. The direction of magnetization also played a critical role; downward magnetized configurations showed an approximately 1140% increase in output. These results confirm that both magnetic particle concentration and magnetization direction significantly influence TENG performance. The findings support the use of magnetically responsive films as a strategy to enhance surface charge density and improve the overall electrical output of TENGs.

2.2 Magnetic actuation and sensing properties

Beyond energy harvesting, the magnetic composite films demonstrated high responsiveness to external magnetic fields, enabling actuation capabilities within the same material system. A 250 μ m-thick, 80 wt% magnetic layer showed a measurable curvature under a magnetic flux density of 222.6 mT, validating its mechanical deformability and magnetic actuation potential. This

magnetic response, integrated into the TENG configuration, allowed the development of a dual-functional device capable of both energy generation and physical movement. To enhance system stability and mechanical performance, a contact layer was added, and theoretical analysis confirmed the synergistic role of the magnetic layer in TENG enhancement and actuation.

This magnetically integrated structure, termed the Magnetically Enhanced TENG Sensory Actuator (METSA), was applied in multiple designs for advanced robotic and sensing applications. A somatosensory METSA, consisting of a three-layer structure (electrode, magnetic, and PTFE-based contact layer), exhibited diverse programmed deformations—including two-fold, rolling, one-peak, and 'm'-shaped motions—each producing distinct electrical signals. These shape changes enabled self-motion sensing and surface discrimination between materials such as wood, aluminum, and PTFE, based on triboelectric output variation.

3. Conclusions

In this study, we demonstrated a multifunctional sensory actuator system by integrating magnetically responsive composite films into triboelectric nanogenerators (TENGs). The incorporation of high-concentration magnetic particles significantly enhanced the triboelectric output through mechanisms such as increased dielectric constant, magnetically induced displacement current, and electromotive force. Simultaneously, the magnetic films enabled programmable actuation under external magnetic fields, allowing the device to function as both an energy harvester and a soft actuator. The developed METSA systems exhibited diverse mechanical deformations, environmental adaptability, and self-sensing capabilities, showcasing their potential for next-generation soft robotics and interactive electronics. Future work will focus on further optimizing material compositions and structural configurations to achieve more precise motion control, higher energy conversion efficiency, and broader applicability in biomedical interfaces, autonomous systems, and human-machine interaction platforms.

References

- [1] Y. Song et al., Nano Energy, 84, 105919, 2021.
- [2] L. Xu et al., Energies, 14, 6219, 2021.
- [3] R. Sun et al., Nano Energy, 78, 105402, 2020.
- [4] Z. L. Wang, Materials Today, 20, 74, 2017.
- [5] Z. L. Wang, Nano Energy, 68, 104272, 2020.
- [6] R. Sun et al., Nano Energy, 78, 105402, 2020.
- [7] Y. Li et al., Adv. Energy Mater., 11, 2003921, 2021.

Acknowledgement

This work was financially supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grants funded by the Korean government (RS-2023-00302525 and RS-2024-00407155), the fundamental Research Program of the Korea Institute of Materials Science (PNK8310).

Magnetic-Field-Induced Enhancement of Piezoelectric Anisotropy Enabled by Axial Alignment and Assembly of BaTiO₃ Nanowire across Piezoelectric Composites towards Stress-Direction-Selective Sensors

Yubin Kim and Minjeong Ha⁺

School of Materials Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology +E-mail: minjeongha@gist.ac.kr

Keywords : Piezoelectricity, Magnetism, Tactile sensors, Force Selectivity

1. Introduction

Over decades, a tremendous effort has been devoted to the development of tactile sensors to overcome the limitation at which conventional sensors were facing (e.g. low flexibility, few-modal sensing, coupled response signals, et cetera). In this regards, a number of research have recently reported the integration of multiple sensor units, employing ultrathin materials, and interdigital electrode arrangement, enriching the versatility and functionalities towards various field application. However, complex fabrication and a lack of signal decoupling are still regarded major obstacles to be further addressed. In we represent a magnetic-responsive this work. piezoelectric nanomaterial enables axial alignment and assembly across a composite, leading to a stress-directionselective sensitivity. We have systematically discovered piezoelectric anisotropy can be extraordinarily enhanced by a unique morphological aspect and further achieve a novel breakthrough for a next-generation tactile sensor.

2. Experimental section

2.1 Synthesis of magnetically modified anisotropic BaTiO₃ nanowire

Anisotropic BaTiO₃ nanowire (BTO NW) was hydrothermally synthesized by using a nano-templating technique and successive ion exchange reactions. Afterwards, a magnetic modification was conducted by decorating a Fe_3O_4 nanoparticle onto the surface of BTO NW.

2.2 Fabrication of piezoelectric composite sensors

A polyether-polyol-based polyurethane was dissolved in dimethylsulfoxide (DMSO). In a separate jar, magnetically modified BTO NW (FBTO NW) was mixed with the above polymeric solution. The mixture was cast to a mold upon applying a heat and directional magnetic fields (e.g. horizontal and vertical) to obtain a composite film with different alignment modalities of FBTO NW. Lastly, the composite films were cut into a desirable size and sandwiched with two Ni electrodes.

3. Results

A magnetic modification of a piezoelectric nanowire was firstly confirmed with the aids of scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD) spectra, scanning transmission electron microscopic energy dispersive spectroscopy (STEM-EDS), et cetera. After having verified the magnetic modification of the active material, we conducted a numerical estimation based on a theoretical background, which represented axial alignment of FBTO NW is facilitated along the direction of an external magnetic field applied. With a thorough examination with numerical and experimental results, we established a practical guideline for the fabrication of a magnetic-field-directed piezoelectric composite. Furthermore, depending on a magnetic field strength, we observed FBTO NW undergoes the formation of chainlike-assembled morphologies upon the directional alignment, which significantly enhances the piezoelectric characteristics of the composites in an anisotropic manner. This result would also regard the enhanced piezoelectric anisotropy provides the directional stress concentration and the corresponding selective electric response for composite sensors under various mechanical load environments (e.g. bending and compressing), leading to the realization of the stress-direction-selective sensor.



Fig. 1. Schematic illustration of the conceptual research design.

4. Conclusion

Throughout this study, we have systematically focused on a magnetic responsiveness of FBTO NW not only enables the directional alignment across composite materials, but improves the connectivity among FBTO NW due to the formation of the chain-like assembly, resulting in the gigantic enhancement of the piezoelectric anisotropy along specific directions. Concurrently, we also highlighted this unique morphological aspect can selectively generate an electric response signal when the directions of piezoelectric anisotropy and an applied mechanical load are simultaneously matched, resulting in the stress-direction sensitivity of the composite sensors.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2022R1C1C1004845, RS-2024-00407155).

생체의료용 초소형 자성 소프트 로봇 Magnetic miniature soft robots for biomedical applications

*변정환 ¹⁺ *J. Byun ¹⁺

¹ 한국과학기술연구원 전자융합소재연구센터 ⁺E-mail: junghwan@kist.re.kr

Keywords: soft robot, soft magnetic composite, microrobot, biomedical robot

1. 서론

소프트 로봇은 비정형적 체내 환경(특히, 매우 유연하고 유동적이며 복합적으로 굴곡진 소화기관)과 동적인 동시에 유연 재료 특성상 안전한 상호작용을 하는 데 용이하다. 체내 환경에서 소프트 로봇 구동을 위해서는 무선 자극원에 의한 형상 변형 및 보행 메커니즘의 개발이 필수적이며, 자기장, 초음파, 빛 등을 이용하는 것이 일반적이다[1]. 개중 자기장을 이용한 자성 소프트 로봇은 작동 거리, 국재성 (localization), 제어 및 반응속도 측면에서 기타 자극원을 활용한 로봇 대비 많은 장점을 지닌다[1]. 이에 따라 초소형 자성 소프트 로봇은 최소 침습적 또는 비침습적 치료, 조직 검사 및 표적 약물 전달 분야에서 미래 의료용 로봇의 핵심 기술로서 주목받고 있다[2].

2. 초소형 자성 소프트 로봇 기술

본 발표에서는 보자력(coercivity)과 잔류 자기(remanence)가 큰 NdFeB 자성 마이크로입자(직경 ~5 μm)를 실리콘 고무 내부에 복합화한 자성 복합소재를 기반으로 한 자성 소프트 로봇 설계 기술과 응용을 보인다. 자성 복합소재 내 자화 패턴(magnetization profile) 프로그래밍을 통해 복합적 외부 자기장에 대한 초소형 자성 로봇의 다양한 변형 및 보행 모드를 보이고, 체내 소화기관과의 상호작용 가능성을 보인다 (Fig. 1)[3].

다양한 생체의료용 어플리케이션을 수행하기 위해 필요한 기능을 구현할 수 있는 소프트 전자시스템 집적 기술을 소개하고[4], 통합된 초소형 자성 소프트 로봇의 기계적, 전기적, 생화학적, 치료학적 특성을 분석한다 (Fig. 2).

3. 결론 및 향후과제

체내 삽입형 의료용 로봇으로서 초소형 자성 소프트 로봇의 비전과 실질적 활용 가능성에 대해 논의한다.



Fig. 1. Magnetization profile (a) and locomotion (b,c) of the miniature magnetic soft robot [4].



Fig. 2. Photograph (a) and exploded-view schematic of the electronics-integrated miniature magnetic soft robot.

참고문헌

- [1] L. Hines et al. Adv. Mater. 29:1603483, 2017.
- [2] M. Sitti et al. Proc. IEEE 103:205-224.
- [3] W. Hu et al. Nature 554:81-85, 2018.
- [4] J. Byun et al. Sci. Robot. 3:eaas9020, 2018.

Toward Adaptive Tensegrity Systems: A Multimodal Approach Using Mobile Actuators and Variable-Stiffness Tendons

*S.W. Lee¹, H.J. Lee², Y.W. Jang¹, J.H. Kim¹, H. J. Won¹, M.J. Kim¹ and J.Y. Kim¹

¹ Department of Material Science and Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology, ² University of California,

Berkeley

⁺E-mail: swlsw147@unist.ac.kr

Keywords : Soft Robotics, Tensegrity, Reconfigurable Robot, Variable Stiffness

1. Introduction

Tensegrity robots offer high structural efficiency and compliance through the interplay of struts and tendons¹. However, their ability to undergo diverse shape transformations is limited due to structural instability in force-unbalanced states. In this study, we propose a novel tensegrity robot equipped with multifunctional tendon devices that integrate jamming and pneumatic actuators^{2,3}. These devices enable three key transformation primitives-variable stiffness, strut length change, and node translation-thereby expanding the robot's configuration space. Our design allows controlled transformations even under force imbalance, overcoming limitations of conventional tensegrity structures. We demonstrate versatile behaviors such as crawling, rolling, and shape-locking using two tensegrity types: prismatic and icosahedral. A transformation state map is developed to classify motions based on structural stability. This work presents a new approach for creating adaptive, reconfigurable tensegrity systems with enhanced multifunctionality.

2. Integration of Multifunctional Tendons and Struts

2.1 Design of Tensegrity Robot: We developed a tensegrity robot composed of multifunctional tendons and extensible struts to realize advanced transformation capabilities, as shown in Fig. 1. . Each tendon integrates a jamming actuator for stiffness modulation and a pneumatic actuator for node translation, enabling structural stability and mobility under force-unbalanced conditions. Stiffness is controlled by vacuum pressure, locking jamming particles in place. Node translation is achieved via pneumatic inflation, pushing rollers that move the node. Struts feature linear actuators to actively change length. These three motion primitives-jamming, node translation, and length changing—can be independently or simultaneously controlled, expanding the robot's form factors and transformation space.

2.2 Characterization of Motion Primitives: We characterized each primitive using mechanical tests. Jamming significantly increased stiffness, enabling shapelocking behavior and resistance to collapse under

compressive loads. The pneumatic actuator produced sufficient force to drive node translation above a certain pressure threshold. Deflection tests showed reduced bending in jammed conditions, confirming stiffness modulation. Struts exhibited up to 99% length variation with constant actuation speed, unaffected by orientation or jamming state. These results validate the functional synergy between the three primitives, supporting robust and reconfigurable tensegrity structures with diverse shape transformation capabilities. Fig. 2 illustrates the detailed internal components of both the strut and tendon.

3. Results and Discussion

We implemented two tensegrity robots—a prismatic and an icosahedral type—and demonstrated various transformation behaviors. Through integration of jamming, length-changing, and node translation, the robots performed crawling, rolling, tilting, and chirality transitions. We developed a transformation state map categorizing behaviors into force-balanced and forceunbalanced states. Jamming was essential for stability during force-unbalanced transitions. In prismatic robots, node translation enabled chirality shifts and directional control. In icosahedral robots, paired tendon design allowed efficient node movement and rolling/climbing motions. These results highlight the robot's versatility in reconfiguration and real-world adaptability.



Fig. 1. Design of Tensegrity Structures

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials



Fig. 2. Internal components of the tendon and strut elements

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

In conclusion, our study provides a novel approach to enhancing the transformation capabilities of tensegrity robots by enabling controlled force-unbalanced states. Through the integration of multifunctional tendon devices and extensible struts, our robots exhibit a diverse range of primitives, including stiffness modulation, node translation, and length-changing behaviors. These capabilities enable complex, adaptive transformations that overcome the limitations of traditional force-balanced tensegrity systems. While there are challenges to be addressed in terms of control complexity, environmental sensitivity, and scalability, the results presented here offer a promising strategy for developing next-generation adaptive and multifunctional robotic systems. Future work will focus on refining the control strategies, enhancing material performance, and testing the robots in more dynamic and challenging scenarios to fully realize their potential for real-world applications

References

- R. Skelton et al. Proc. IEEE Conf. Decis. Control. 40(5):4254–4259, 2001.
- [2] D.S. Shah et al. Soft Robot. 9(4): 2022.

ISBN 0-19-517877-7.

[3] R. Baines et al. IEEE Robot. Autom. Lett. 5:6567–6574, 2020.

Acknowledgement

The authors would like to express their sincere gratitude to Professor Jiyun Kim for his/her invaluable guidance and support throughout this work.

We also thank the members of the TheMILAB for their helpful discussions and assistance during the experiments.

Magnetic swarm intelligence of mass-produced, programmable microrobot assemblies for versatile task execution

*Kijun Yang¹, Sukyoung Won², Jeong Eun Park, Jisoo Jeon and Jeong Jae Wie¹⁺

¹ Department of Organic and Nano Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 04763, Republic of

Korea

²Program in Environmental and Polymer Engineering, Inha University, 100 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22212, Republic of Korea ⁺E-mail: jjwie@hanyang.ac.kr

Keywords: Microrobot swarms, Swarm intelligences, Magnetic actuations, Mass productions

1. Introduction

Swarm robotics has emerged as a promising methodology for accomplishing complicated tasks through the collective behavior of multiple robots. Through inter-robot communications, robotic swarms can execute terrain reconnaissance, pattern formation, and cargo transportation. However, in miniaturized robotic systems, robots possess low kinetic energy to operate in various environments owing to their low body mass. Furthermore, battery- and sensor-free actuation of robots complicates inter-robot communication, limiting the extension of their functionalities. Herein, we present multifunctional swarm intelligence capable of versatile task execution via massproduced magnetic microrobot swarms with programmed assembly configurations. The versatile task execution via microrobot swarms exhibits significant potential for various applications in robotic engineering, expanding foundational technology for developing advanced collective robot systems.

2. Results and Discussion

Battery- and sensor-free actuation of microrobots complicates heterarchical inter-robot communication. Herein, swarm intelligence of magnetically anisotropic microrobots is presented via the programming of magnetic interactions between the microrobots to self-assemble along their longitudinal, intermediate, or horizontal axis. Mass production is implemented through in situ replica molding and magnetization for hundreds of anisotropic microrobots on a single microarray mold. Under a rotating magnetic field, the anisotropic microrobots autonomously engage in local magnetic interactions, forming a swarm with a high aspect ratio, high packing density, or high assembly stiffness. The microrobot swarms are deployed to perform self-climbing, self-throwing over an obstacle, lifting of an obstacle, cargo transportation, wire connection and disconnection, liquid metal shape modification, tube unclogging, and organism guiding. The versatile task execution by mass-produced magnetic microrobots offers insights into high-throughput processing and swarm control of miniaturized robots, expanding the functional capabilities of robot collectives.

Task execution of microrobot swarms



Fig. 1. Task execution of microrobot swarms.

3. Conclusions, Significance and/or Future Works

We envision that the multifaceted mass-produced microrobot swarms offer extensive prospective applications in robotic engineering, such as microrobot manipulation in complex obstacle environments, shape control of high-surface-tension liquids, organism guiding, and potential biomedical solutions to address arteriosclerosis and thrombosis.

Acknowledgement

This research was supported by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by Ministry of Science and ICT (RS-2024-00407155), and partially by a grant from the NRF funded by the Korean government (NRF-2022R1A2C2002911). The authors also acknowledge support from the Asian Office of Aerospace Research and Development (AOARD; FA2386-22-1-4086). The authors thank Prof. Shim-Bong Sup at Inha University for providing the superworms.

Advanced Carbon-Based Materials for Next-Generation Electro-Ionic Soft Actuators

*Manmatha Mahato and Il-Kwon Oh+

Department of Mechanical Engineering

Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Republic of Korea

⁺E-mail: ikoh@kaist.ac.kr

Keywords : Soft robots, Carbon materials, Antagonistic nanoengineering, Electro-ionic artificial muscles

1. Introduction

Advancements in electroionic soft robotics underscore the significance of nanoengineered electrode materials in enhancing actuation efficiency. Carbon-based materials, featuring π -conjugated polar functional groups, have been demonstrated to facilitate ion transport, a critical component of electrochemical soft actuators. Nevertheless, the optimization of low-voltage actuation remains a formidable challenge. Covalent organic frameworks (COFs) emerge as a promising solution, offering stable single-ion conduction and enhanced electrochemical stability. This study focuses on the nanoengineering of COF-based carbon materials to optimize porosity, surface chemistry, and relaxing ions conduction. By refining actuation parameters, including response time, force output, and durability, our approach significantly improves electroionic soft actuator performance, advancing their integration into next-generation soft robotics [1-3].

2. Materials design

COF-based active electrodes: The methodology employed to design the COFs for active electrodes entails a multifaceted approach that considers surface functionality, electronic property, and electrochemical ions conduction. Initially, N,S-rich COF has been designed to understand the relationship between the structural functionalities and electrochemical actuation properties. Subsequently, intrinsic microporous PIM-1 based COF has been made to improve the electrochemical actuation. Finally, the proposal of polysulfonated COF as the optimal active electrode material for enhancing actuation performance is a significant conclusion of this study (Figure 1).



Figure 1. Polysulfonated COF for enhancing the electrochemical ion conduction.

3. Results and Discussion

The integration of polar functional moieties with electronically conjugated COFs backbone has been demonstrated to enhance electrochemical actuation performance by facilitating charge storage and rapid ion transport (Figure 1). This integration enables exceptional electro-ionic capacitance, as evidenced by the specific capacitance of PIM-1 COF, which delivers 522, 337, and 467 F g⁻¹ in acidic, alkaline, and ionic-liquid systems, respectively. The superior cyclic stability of PIM-1 COF is further highlighted by its ability to maintain its structural and electrical properties after multiple cycles. Figure 2 provides a visual representation of the PIM-1 COF and its corresponding ionic capacitances.



Figure 2. Scanning electron microscopic image of PIM-1 COF and electrochemical charge storage capacity of it (TP4: PIM-1 COF synthesized at 400 $^{\circ}$ C, while TP5 and TP6 are made of 500 and 600 $^{\circ}$ C, respectively.

The cyclic stability for the open-air actuation performance of PIM-1 COF were presented in the Figure 3. The fabricated COF actuator demonstrated exceptional bending displacement under ultralow electric potential, exhibiting 99% durability after 15,000 cycles. These results indicate the actuator's robustness and long-term stability (Figure 3).



Figure 3. Durability in actuation performance for PIM-1 COF based electrochemical soft actuator.

4. Conclusions

The study suggests that utilizing nanoporous, electronically conjugated COF materials with high ionic capacitance will be a key approach for optimizing electrochemical actuation and developing advanced soft robotic devices.

References

[1] M. Mahato et al. Adv. Funct. Mater. 30, 2003863, 2020

- [2] M. Mahato et al. Nat. Commun. 11, 5358, 2020
- [3] M. Mahato et al. Sci. Adv. 9, eadk9752, 2023.

Acknowledgement

Supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea Government (MSIT) (RS-2023-00302525, RS-2024-00345241, and NRF 2021M3H4A1A0 3047333).

Magnetic manipulation for anisotropic characteristics of nanocomposites

*Hyeokju Kwon¹ and Minjeong Ha¹⁺

¹ School of Materials Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology ⁺E-mail: minjeongha@gist.ac.kr

Keywords : Magnetic nanomaterial, anisotropic characteristic,

1. Introduction

Magnetic responsive materials can be aligned in a specific direction through magnetic dipole-dipole interactions when an external magnetic field is applied [1]. Within a composite system, the anisotropic orientation of nanomaterials can enhance certain properties depending on their alignment [2]. Consequently, by applying a magnetic field, the properties of the composite can be tuned to react differently to various external stimuli.

2. Magnetic control of multi-walled carbon nanotubes (MWCNT) for anisotropic electrical properties

2.1 Synthesis of magnetic responsive MWCNT : We synthesized magnetically responsive MWCNTs by growing ferrimagnetic iron oxide nanoparticles on their surfaces. Iron precursor and MWCNTs were initially dispersed using a sonochemical method, and subsequently, a solvothermal reaction was carried out to achieve uniform growth of iron oxide nanoparticles on the MWCNT surface. The magnetic responsiveness of MWCNT can be controlled by manipulating doping concentration of iron oxide nanoparticles. Consequently we successfully synthesized magnetic responsive MWCNTs with controlled magnetic properties (Figure 1).

2.2 Electrical property engineering through shape and alignment: Magnetic responsive MWCNT were dispersed in polydimethylsiloxane (PDMS) and aligned by magnetic field during curing of PDMS. As a result, we fabricated conductive and stretchable MWCNT/PDMS nanocomposites showing anisotropic electrical properties such as difference in conductivity, percolation threshold, and strain sensitivity.



Figure 1. Synthesis of magnetic responsive MWCNT

3. Conclusions

We have successfully synthesized magnetically growing responsive **MWCNTs** by uniformly superparamagnetic iron oxide nanoparticles on their surfaces, and adjusting the Fe precursor concentration enabled precise control of the magnetic properties in these hybrid nanostructures. Also, by dispersing the magnetically responsive MWCNTs in PDMS and aligning them during curing resulted in nanocomposites with anisotropic electrical characteristics, paving the way for designing advanced materials with tailored magnetic and electrical functionalities for diverse applications.

References

[1] H. Kwon et al. *Nansocale* 16:6778-6819, 2024 [2] G. Wang et al. *Chem. Eng. J* 474:145825, 2021

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2022R1C1C1004845, RS-2024-00407155)

Building Next-Gen Micro-Battery Production at NNFC

*Su-Ho Cho¹⁺, Hee Han¹, Hongseok Jo¹, Jae Hong Park¹, Jun-Seob Park¹, Hae Soo Yoon¹, Hyunyoung Kim¹, and Chi Won Ahn¹⁺

¹ National Nanofab center, Daehak-ro 291, Yuseong-gu, Daejeon *Republic of Korea* ⁺E-mail: csh0160@nnfc.re.kr

Keywords : Micro-Battery, Micro-Sower System, All-Solid State Battery, PVD Method

1. Introduction

The growing demand for sensor and wearable technologies has driven the need for efficient micro-energy storage systems, particularly micro-batteries. These systems are essential for powering compact devices such as wearables, medical sensors, and other portable electronics. To meet this demand, there has been significant focus on the development of manufacturing technologies that integrate Physical Vapor Deposition (PVD) methods to battery manufacturing. This approach ensures a controlled production process, which is critical for creating all-solidstate micro-batteries known for their enhanced safety, stability, and performance.

2. Results and Discussion

In our research, we have successfully developed a clustertype deposition system capable of accommodating substrates up to 8 inches in size. This system integrates PVD enabling a highly flexible, controlled manufacturing process for micro-batteries. The deposition system ensures that all stages of the battery production process, including the deposition of electrodes and electrolytes, are carried out without exposure to external atmospheric conditions. This controlled environment is crucial for preventing contamination and maintaining the integrity of the materials, leading to batteries with consistent performance and reliability.

The all-solid-state micro-batteries produced by this system demonstrate power outputs ranging from 50 to 250 μ Ah/cm², making them suitable for a broad range of applications, including wearable electronics, medical sensors, and compact energy storage devices. These batteries offer advantages in terms of size, safety, and energy density compared to traditional liquid-electrolyte batteries. Their high power output, combined with stable performance, makes them ideal for devices that require lightweight, long-lasting, and efficient energy storage solutions.

The integration of PVD methods in the production of these micro-batteries offers several significant advantages. First, these techniques allow for precise control over the material properties and uniformity of the thin films used in battery electrodes and electrolytes. The ability to fine-tune these materials is essential for ensuring optimal battery performance, including improved charge/discharge rates, cycle life, and energy density. Moreover, using PVD in a controlled environment helps eliminate the risks of oxidation or contamination, which is a common issue when working with sensitive materials.

Another major benefit of this approach is the scalability of the production process. As the system can accommodate large substrates and operate continuously without external exposure, it enables mass production of micro-batteries while maintaining high quality and consistency. This, in turn, leads to improvements in the overall efficiency and lifespan of the batteries.

Furthermore, the all-solid-state nature of these microbatteries ensures greater safety compared to traditional liquid-based systems. Since there is no risk of leakage or chemical instability, these batteries can be used in a wider range of applications, particularly in wearable electronics where safety and reliability are paramount. The seamless integration of these batteries with various electronic devices enhances their functionality, making them adaptable for use in a variety of consumer and industrial applications. This adaptability positions the developed micro-batteries as a key solution in advancing wearable technologies and other compact electronic systems.

3. Conclusions

The development of micro-battery systems through the integration of PVD methods to battery manufacturing process is essential for meeting the growing energy storage demands in wearable technology, micro-mechatronics, and nanoelectronics. The use of all-solid-state technology ensures safer, more stable batteries, making them ideal for a wide array of applications. As the technology advances, future research will focus on improving performance characteristics and expanding material options to enhance energy density, charge/discharge rates, and cycle life. This will further enable the integration of micro-batteries into next-generation electronic devices and wearables, providing portable energy solutions for the future.

Acknowledgement

This research was supported by by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (no. RS-2024-00450477). This work was supported by Semiconductor-Secondary Battery Interfacing Platform Technology Development Project of NNFC in 2025.
2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

건식 합성 방법을 이용한 황 말단기 맥신 제조와 이를 이용한 리튬황 전지 성능 개선

Dry Synthesis of Sulfur-Terminated MXene as Multifunctional Catalyst for Stable Lithium Sulfur Batteries

도 반 람¹, *하자원¹, 오일권¹⁺ Do Van Lam¹, *Jawon Ha¹, and II-Kwon Oh¹⁺ ¹ 한국과학기술원 기계공학과

+ E-mail: ikoh@kaist.ac.kr

Keywords: sulfur-terminated MXene, lithium-sulfur battery, modified separator

1. 서론

리튬-황 배터리의 주요 문제점인 셔틀효과를 억제하고 산화 환원 동역학을 가속화하기 위해서는 리튬폴리설파이드 흡착, 빠른 리튬이온의 확산, 뛰어난 촉매 활성을 갖춘 다기능 촉매의 개발은 필수적임.[1,2] 이를 위해, 황 말단기를 가진 MXene (MX-S)을 합성하여 리튬-황 배터리의 성능 개선에 활용하고자 함. 이 연구에서는 완전 건식 용융염 공정을 통해 MXene을 합성하였으며 합성된 황 말단 MXene은 Li-S 배터리의 분리막에 활용되어 다기능 촉매로서 빠른 리튬 확산, 효과적인 리튬폴리설파이드 흡착, 우수한 촉매 성능을 통해 리튬황 배터리의 성능 개선에 활용됨.

2. 실험

2.1 건식 합성 방법을 이용한 맥신 합성



MX-S의 합성은 용융염 방법을 이용한 완전 건식 합성법을 이용하였음. Ti₂AlX₂ MAX 전구체로 MX-Cl을 제작한 후 Li₂S와의 열처리를 이용해 Cl을 S로 표면 치환하여 합성하였음.

2.2 리튬황 분리막으로의 응용

합성된 MX-S를 PP 분리막에 코팅한 후 리튬황 코인셀을 제작하여 배터리의 성능을 확인하였음.







PP, PP/MX-Cl, PP/MX-S를 비교하였을 때 MX-S가 코팅된 PP를 사용한 경우 0.2C에서 1215 mAh g-1의 용량을 보였으며 분극 전압이 0.2V로 가장 작음을 확인함으로써 효과적인 산화환원 동역학을 촉진하는 것을 확인할 수 있었음.

4. 결론 및 향후과제

황 말단기 MXene이 코팅된 분리막을 사용한 리튬-황 전지는 1C에서 500 사이클 후 665mAh g-1의 고용량과 사이클당 0.05%의 현저히 낮은 용량 감소율을 보임. 이 연구는 MXene의 정밀한 표면 종단 제어가 리튬이온 배터리 기술을 더욱 발전시킬 수 있는 잠재력을 보여줌.

참고문헌

[1] T. Li et al, Adv. Funct. Mater. 2019, 29, 1901730.
[2] L. Fan et al, Joule 2019, 3, 361.

후기

이 연구는 한국 정부(과기정통부)가 지원하는 한국연구재단 (NRF) 과제(RS-2024-00345241)의 지원을 받아 수행되었음.

Development of micro all-solid-state battery technology through application of nano-semiconductor technology

Chi Won Ahn¹⁺

¹ Nanomaterial Technology Development Center, National Nanofab Center at KAIST ⁺E-mail: cwahn@nnfc.re.kr

Keywords : Nanotechnology, Microbattery, Solid state electrolyte, Composite thin film

1. Introduction

The National Nanofab Center at KAIST is jointly developing the "Semiconductor-Secondary Battery Interfacing Platform" technology by forming an industryacademia-research consortium to apply nanosemiconductor technology to secondary battery technology development.

In order to commercialize micro all-solid-state battery devices, the interlayer/interface - structure control technology of components such as "substrate - metal electrode - anode - solid electrolyte - cathode - metal electrode - packaging" is an important issue, and the development and application of nano-process technology that can control nanoscale structures and interfaces through thin film deposition process and patterning process are essential.[1, 2]

2. Results and Discussion

As a platform technology for applying semiconductor technology to secondary battery technology development, a semiconductor-secondary battery interfacing platform including thin film process equipment technology, secondary battery thin film material technology, nano process, and nano analysis technology was developed. In particular, we would like to introduce and discuss the process of developing thin film process technology using lithium compound specialized semiconductor-micro battery (SMB) sputtering equipment (Fig.1) and process technology for micro all-solid-state battery devices based on secondary battery technology.



Fig. 1. Schematic of Specialized Semiconductor-Microbattery(SMB) Sputtering System.



Fig. 2. The 8-inch wafer of micro-battery chips (2,000chips/wafer) are fabricated by thin film process by specialized SMB sputtering system.

It can realize wafer level process to fabricate 2,000 chips/wafer by using specialized SMB sputtering system (Fig.2).

3. Conclusions and Future Works

We would like to review the development results and introduce and discuss the preparatory process for future technology development and the joint development plan between industry, academia, and research institutes.

References

- All-Solid-State Thin Film μ-Batteries for Microelectronics, Adv. Sci. 8, 2100774, 2021.
- [2] All Solid State Thin-Film Lithium-Ion Batteries, ISBN 978-0-367-08682-4, CRC Press (2021).

Acknowledgement

This work was supported by Semiconductor-Secondary Battery Interfacing Platform Technology Development Project of NNFC and NRF (MSIT, NRF-2021M3H4A1A03047333) Nano-Process and Nano-Analysis was supported by technical staffs of NNFC.

Ni-Rich NCM622 Cathode for High-Efficiency All-Solid-State Thin-Film Batteries by Al₂O₃ Protection Layer

Hyun-Suk Kim*

Department of Energy & Materials Engineering, Dongguk University, Seoul 04620, Republic of Korea

*E-mail: khs3297@dongguk.edu

Keywords : Magnetron sputtering, Facing-target sputtering, Plasma-enhanced atomic layer deposition, All-solid-state thin film battery, Cathode

1. Introduction

Thin-film batteries are a promising energy storage solution for miniaturized electronics. However, interfacial instability between the electrode and the solid electrolyte affects battery performance. This study explores a Ni-rich NCM622-based thin-film cathode, optimizing postannealing conditions and introducing a facing-target sputtered (FTS) Al₂O₃ protection layer to enhance stability [1].

2. Experimental methods

2.1 Deposition of NCM622 thin films (TFs): NCM622 thin films were deposited via RF magnetron sputtering and annealed at various temperatures (400–700°C). To mitigate surface degradation, a thin Al₂O₃coating was applied using FTS, ensuring minimal plasma damage. Electrochemical performance was assessed through charge-discharge cycling, cyclic voltammetry, and electrochemical impedance spectroscopy.

2.2 Preparation of NCM based ASSB: A 600 nm thick LiPON was deposited on NCM500 cathode by using RF magnetron sputtering using a Li_3PO_4 target (3-inch, 99.99 % purity) under a reactive N₂ atmosphere (30 sccm). The applied RF power was fixed at 80 W, and the gas flow rate and the working pressure were Argon: 30 sccm and 5 mtorr. Following this, a 1 µm thick TF lithium metal anode and a 400 nm thick Cu current collector were sequentially deposited onto the LiPON layer in the same chamber using thermal evaporation.

3. Results and Discussion

Annealing at 500°C resulted in optimized electrochemical performance, minimizing crack severity while maintaining high crystallinity. FTS-deposited Al₂O₃ coatings[2] effectively reduced interfacial resistance, enabling a high cycling retention of 91% over 400 cycles. The full-cell configuration (F_AO@NCM500 cathode, carbon anode) delivered an initial discharge capacity of 325.3 mAh cm⁻³, retaining 77.8% after 100 cycles. Additionally, an all-solid-state thin-film battery (ASSTFB) incorporating LiPON electrolyte demonstrated an energy density of

50.98 mWh cm⁻³, suitable for compact electronic applications [3, 4].



Fig. 1. First discharge curve of the NCM500 ASSB at 0.01 C current rate after activation.

4. Conclusion

This study highlights the importance of interface engineering in Ni-rich thin-film cathodes. The use of FTS Al₂O₃coatings significantly improves interfacial stability, making NCM622 a viable candidate for high-performance thin-film batteries. Future work will focus on further optimizing the Al₂O₃layer and exploring other transition-metal oxide coatings to enhance long-term stability.

References

[1] J. B. Goodenough, K. S. Park, J. Am. Chem. Soc. 2013, 135, 1167.

[2] J. H. Kim, A. Song, J. M. Park, J. S. Park, S. Behera, E. Cho, Y. C. Park, N. Y. Kim, J. W. Jung, S. J. Lee, H. S. Kim, Adv. Mater. 2024, 36.

[3] S. Dong, L. Sheng, L. Wang, J. Liang, H. Zhang, Z. Chen, H. Xu, X. He, Adv. Funct. Mater. 2023, 33.

[4] W. Liu, X. Li, D. Xiong, Y. Hao, J. Li, H. Kou, B. Yan, D. Li, S. Lu, A. Koo, K. Adair, X. Sun, Nano Energy 2018, 44, 111.

Acknowledgement

This research was supported by Semiconductor-Secondary Battery Interfacing Platform Technology Development Project of National Nano Fab Center (NNFC) and the Dongguk University Research Fund of 2023 (S-2023-G0001-00096), and the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. RS-2024-00408783).

Extraordinary dendrite-free Li deposition on nanostructured collectors

Eekyung Kim, Hyogeun Kim and *Hee-Tae Jung+

Department of Department of Chemical and Biomolecular Engineering (BK-21 Plus), Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon 34141, Korea ⁺E-mail: heetae@kaist.ac.kr

Keywords : Lithium Metal Battery, Nanostructure, Anode, Thin film battery

Abstract

Despite much research focused on lithium metal batteries, an important issue concerning Li dendrite growth arising from non-uniform lithium deposition on the anode remains unresolved. Here we report upon dendrite-free lithium deposition using a novel Cu anode structure with sharp wrinkles and a [100] crystal facet over large areas, which is achieved by mass-producible chemical vapor deposition graphene growth process. We show that the deposited lithium is uniformly distributed across the entirety of the Cu current collector surface. This uniformity resulted in the elimination of dendritic lithium formation and long-term electrochemical cyclability with 99% Coulombic efficiency for more than 250 cycles in a Cu/Li half-cell. Additionally, 90% capacity retention was achieved for more than 200 cycles with no significant capacity decrease up to 500 cycles in a LiFePO₄/Li fullcell, which was obtained in a carbonate-based electrolyte. Observations conducted via electron microscopy and electron backscatter diffraction revealed that the wrinkled Cu surface with sharp hill-and-valley shapes and the unifying [100] crystal facet play important roles in enhancing the uniformity of the Li ion flux and the adsorption energy of the Li ions on Cu, respectively. We expect that this study will permit the use of a wide range of wrinkle orientations and crystal planes to obtain highenergy and long-term cycles of lithium metal batteries.

References

JY Kim, H.-T. Jung et al. *Small* 2307299, 2024
 J.-Y. Song, H.-T. Jung et al. J. Mater. Chem. A, 11, 16153, 2023

Acknowledgement

This research was supported by the Semiconductor-Secondary Battery Interfacing Platform Technology Development Project of the NNFC.

배터리 생산 공정의 로봇 협업을 위한 디지털트윈 Digital Twin for Collaboration between Manipulators for Battery Manufacturing Processes

*윤희택 ,¹⁺ *H.T. Yun¹⁺

¹ 한국과학기술원 기계공학과

+ E-mail: htyun@kaist.ac.kr

Keywords: Digital twin, Robotic manufacturing, Collaboration between robots, Virtual commissioning

1. 서론

배터리팩 운송, 팔레타이징 (Palletizing), 폐배터리 재활용 등에서 복수의 로봇이 밀집된 공간에서 작업을 수행하는 협업 기술이 주목받고 있다. 복수 로봇의 밀집을 통해 공간을 절약하고 동선 길이를 줄일 수 있으나, 로봇간 충돌을 예측하고 방지하기 위한 가상 시운전 기술이 필요하다. 또한 AMR (Autonomous Mobile Robot)을 이용해 시스템 유연성을 향상시킬 수 있으나 [1], 환경이 자주 변하고 시나리오가 복잡한 상황에 대한 학습 및 대응하기 위한 가상시운전 기술이 요구된다. 이에 본 논문에서는 복수 로봇의 협업 경로를 계획하기 위한 디지털트윈 기반 가상시운전 (Virtual Commissioning) 기술의 개발 현황을 소개한다.

2. 디지털트윈 기반 가상시운전

2.1 시스템 프레임워크

가상시운전을 위한 디지털트윈 프레임워크는 Fig. 1과 같다. 먼저, 각각의 컨트롤러에 내장된 로봇 스크립트를 JSON 형태로 표준화한다. 해당 JSON은 로봇 경로간 자세(Pose) 및 이송 형태를 내포하고 있다. 이어 Executor 가 자세간의 경로를 위해 필요한 6개의 조인트 각도를 보간(Interpolation) 하여 로봇 렌더링을 위한 중간 경로를 삽입한다. 마지막으로, 생성된 경로를 Unity 게임엔진 또는 Eyeshot 시각화 도구를 통해 가상에서 로봇을 시운전하게 된다.



Fig. 1. Framework of digital twin.

2.2 조인트 각도 보간 방법

로봇 스크립트의 Linear, Circular 움직임은 로봇의 Pose를 제공하며, 이를 Inverse Kinematics를 통해 조인트 각도로 변환하며, Point to Point motion 은 이 과정이 불필요하다. 스크립트에서 주어진 이송점을 모두 변환한 후, 두 이송점간의 경로를 각 조인트의 가감속 파라미터를 기반으로 중간 경로를 보간하여 생성한다.

3. 가상시운전 결과

서로 제조업체가 다른 두 로봇의 가상시운전을 수행하고, Mesh collision을 통해 로봇이 충돌하는 부위와 발생 스크립트 위치를 Fig. 2. 와 같이 나타낸다.



Fig. 2. Predicting collision of robots in digital twin.

4. 결론 및 향후과제

현재 복수의 로봇이 배터리 제조공정을 포함해 다양한 산업 분야에서 협업하기 위한 디지털 트윈을 개발하였으며, 추후 비정형 환경의 가상 로봇 학습, 동특성 반영 및 최적경로 생성 등을 추후 연구할 예정이다.

참고문헌

[1] Yanlong Peng et al. IROS by IEEE, 2024.

후기

이 연구는 2025년도 과학기술정보통신부 및 정보통신 기획평가원 연구비 지원으로 수행되었음 (No. RS-2024-00402782).

구조전지를 위한 3D 프린팅 연구 Three-dimensional printing for structural battery of robot

*Hyuneui Lim^{1,2,3 +}, Ji-Young Kim¹, Gyuhyeon Han¹, Ngoc Van Nguyen^{1,3}, Byunggil Lee^{1,3},

¹ 한국기계연구원 AI로봇연구소 바이오기계연구실, ² 한국기계연구원 자연모사연구단, ³ 과학기술연합대학원대학교 융합기계시스템학과

⁺E-mail: helim@kimm.re.kr

Keywords: three-dimensional printing, structural battery, robot.

1. 서론

생활과 산업전반에 걸쳐 다양한 로봇이 개발되고 활용되어지고 있다. 로봇의 활동과 기능이 매우 다양해짐에 따라 로봇의 활용에 필요한 동력을 오랜 시간 지속하는 것은 새로운 도전과제이다. 특히 생성형 인공지능(Artificial Intelligence, AI)을 기반으로 한 로봇들이 상용화되어 활발하게 사용되기 위해서는 에너지 밀도가 높고 강한 출력을 낼 수 있는 배터리의 개발이 필수적이며, 배터리의 형상도 자유롭고 가벼워야그 효과를 극대화할 수 있다[1,2]. 따라서 본 발표에서는 형태와 크기에 제약을 받지 않으면서도 로봇의 기능을 향상시킬 수 있는 구조전지를 제작하기 위한 3 D 적층 제조 기술에 대하여 발표하고자 한다[3,4].

2. 본론

2.1 3D printing: 로봇용 자유형상 구조전지 제작방법에는 여러 가지 방법이 있다. 기존 슬러리 코팅을 이용한 방법은 단일화된 규격의 이차전지 대량생산에 효과적이지만 크기에 따라 형상을 변화하기 위해 개별 생산 장비가 필요하고, 복잡한 형상의 부품을 제조하고 적층하여 이차전지를 제작하기 어렵다. 유연한 기판 및 부품을 사용하여 형상변화가 가능한 구조전지를 제작하는 방법은 전자기기 내 활용하지 못했던 곡면이나 변형되는 곳에 활용할 수 있는 장점이 있지만 제작방법이 기존과 유사하고 형상변화 정도의 제약이 있으며 부피 변화를 줄 수 없다. 따라서, 적층 방식의 3D 프린팅은 제품 생산을 위해 별도의 금형 없이 설계 도면대로 제품을 생산할 수 있으므로 로봇용 구조전지 제작에 적합하다[5].

2.2 DIW printer: 본 연구에서는 Direct Ink Writing (DIW) 방식의 3D 프린팅을 채택하여 3D printer를 개발하였다. 특히 UV 레이저를 추가하여 프린팅 과정에서 UV 조사로 실시간 경화를 일으켜 고체화 시킬 수 있게 하였다. 이와 같은 방법은 형상 유지가 어려운 재료를 포함하는 다양한 소재의 프린팅이 가능하다. 더불어 개발된 3D 프린터는 나노 직경을 가진 노즐이 위치하는 헤더와 100nm 수준의 분해능을 갖는 나노 스테이지, 측면에서 노즐 프린팅을 관찰할 수 있는 고해상도 현미경으로 구성되어 있어 미세구조물을 제작할 수도 있다.

3. 결과

기존 3D 프린팅을 이용하여 이차전지를 제작하는 방법은 양극, 전해질, 및 음극을 각 층별로 개별 프린팅 한 후 열처리 혹은 진공건조, 경화공정 등으로 후처리를 하여야 하지만, 개발된 3D 프린터는 연속된 프린팅으로 이차전지 적층이 가능함을 확인하였으며, 적합한 잉크물질과 전지의 효율을 높이는 계면에 대한 연구가 진행되고 있다. 또한 구조전지로써 사용하기 위한 물리적 특성을 높이기 위한 구조를 적용하는 연구도 진행 중이다.

4. 결론 및 향후과제

구조전지를 위한 3D프린팅 연구는 이제 초기단계이고, 풀어야할 과학기술적인 한계와 특히 상용화를 위해 가격경쟁력을 가져야 하는 어려움이 존재한다. 하지만, 새로운 로봇의 에너지원이 개발되기 전까지는 유일한 해답이므로 활발한 연구를 통해 가까운 시일내에 많은 문제들이 해결되리라 기대된다.

참고문헌

- [1] D B Ahn et al. Energy Storage Materials. 29:92-112, 2020.
- [2] Z Lyu et al. Joule. 5:89-114, 2021.
- [3] C M Costa et al. Energy Storage Materials. 28:216-234, 2020.
- [4] C Zhang et al. *Nature Communications*. 10:1795, 2019.
 [5] K Sun et al. *Advanced Materials* 25:4539-4543, 2013.

후기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구 재단 - 나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호 RS-2024-00450477).

Nanoarchitectured Superstructures of Organic-Inorganic Hybrid Nanosheets with Tunable Electronic Structures for Sodium-Ion Batteries

*Minseop Lee^{1,2}, Ji-Min Kim¹, Nakyeong Lee³, Byung Mun Jung², Jin Kuen Park³, and Seung-Min Paek¹⁺

¹ Department of Chemistry, Kyungpook National University, Daegu 41566, Republic of Korea, ² Korea Institute of Materials Science,

Changwon 51508, Korea, ³ Department of Chemistry, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, 17035, Gyeonggi-do, Republic of

Korea

⁺E-mail: smpaek@knu.ac.kr

Keywords : Covalent organic nanosheets, Heterostructures, Sodium ion batteries, MoS2

1. Introduction

In this study, we present a novel strategy for developing high-performance sodium-ion batteries (SIBs) using donor-acceptor covalent organic nanosheets (D/A-CONs). In previous literature, we demonstrated that D/A-CONs incorporating benzothiadiazole (BT) units exhibit excellent Na⁺ ion storage capabilities [1]. Here, we employ D/A-CONs as growth substrates for 2H-MoS₂, addressing issues associated with low electrical conductivity and volume changes during cycling.

2. Research Background

2.1 Covalent Organic Nanosheets (CONs)

As two-dimensional (2D) analogs of covalent organic frameworks (COFs), CONs offer tunable electronic structures and multiple redox-active sites, making them promising anode materials for SIBs [1]. Their 2D conjugated framework, large surface area, and ultrathin layers shorten charge transport pathways and facilitate rapid ion diffusion. Additionally, delocalized π -electrons and a robust network contribute to excellent mechanical, thermal, and electrochemical stability. The conductivity and polarity of CONs are primarily determined by their electronic structure, which can be optimized through bandgap modulation and fluorination, enhancing Na⁺ accessibility and long-term cycling stability [2].

2.2 Organic/Inorganic Hybrid Structures

The integration of CONs with graphene and transition metal oxide/dichalcogenides in 2D/2D hybrid structures maximizes the advantages of both organic and inorganic components, achieving superior conductivity, structural stability, and high capacity [3-5]. The inherently large surface area and nanoporous nature of CONs facilitate rapid Na⁺ ion transport, while their combination with high-capacity inorganic materials (e.g., SnS₂) enhances charge/discharge performance and extends cycle life. This synergistic approach presents a highly effective strategy for developing SIB anodes.

3. Results and Discussion

This work demonstrates a hollow-structured organicinorganic hybrid electrode materials (CON/MoS₂-HS) for SIBs. The fabrication strategy involves (i) layer-by-layer coating of polystyrene beads with D/A-CON and (ii) vertical growth of 2H-MoS₂ via solvothermal synthesis, followed by thermal treatment [6]. Characterization by PXRD, Raman, FT-IR, NMR, EPR, and XAS confirms that MoS₂ nanosheets form on D/A-CON and that the resulting hollow spheres maintain the chemical framework of both components. Notably, expanded (002) lattice spacings in MoS₂ (~6.31 Å) suggest the presence of structural strain and defects favorable for rapid ion transport. SEM/TEM analysis confirms the successful formation of hollow spheres and uniform MoS₂ nanosheet deposition. These vertically oriented MoS₂ nanosheets, combined with the conductive D/A-CON matrix, create the improved ionic diffusion pathways and effectively accommodate volumetric changes during cycling.

4. Conclusions

Our results show that the CON/MoS₂-HS hybrid anode exhibits a reversible capacity of 671.8 mA h g⁻¹ (~97% of its theoretical capacity) after 600 cycles at 100 mA g⁻¹, and it retains a remarkable capacity of 203.1 mA h g⁻¹ even after 5000 cycles at a high current density of 5000 mA g⁻¹. These results significantly outperform reference anodes, including reduced graphene oxide (rGO)/MoS₂-HS hybrids, due to the stronger interactions and better structural integration afforded by the CONs. Our findings contribute to the ongoing exploration of anode materials by leveraging organic/inorganic hybrid nanoscale architectures to enhance electrochemical properties while addressing the practical challenges of volume expansion, conductivity, and long-term stability.

References

- [1] M. S. KIM, et al. J. Mater. Chem. A, 8.34: 17790-17799. 2020.
- [2] M. LEE, et al. Chem. Eng. J., 477:147072, 2023.
- [3] M. LEE, et al. ACS nano. 17.3:3019-3036, 2023.
- [4] M. LEE, et al. ChemSusChem, 14.16:3244-3256, 2021.
- [5] J. H. Jang, et al. J. Mater. Chem. A, 11.25: 13320-13330, 2023.
- [6] M. LEE, et al. Chem. Eng. J., 159671, 2025.

Covalently introducing sulfur in a conductive metal organic frameworks toward lithium-sulfur batteries

*Mousumi Garai, Jawon Ha and Il-Kwon Oh⁺ Department of Mechanical Engineering Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Republic of Korea ⁺E-mail: ikoh@kaist.ac.kr

Keywords : Metal-organic frameworks, CNT, Sulfur, Lithium-sulfur battery

1. Introduction

Lithium-sulfur (Li-S) batteries are considered nextgeneration energy storage systems due to their high theoretical capacity (1,675 mAh/g) and cost-effective sulfur cathodes. However, their practical application is hindered by issues such as polysulfide shuttle, poor conductivity of sulfur, and rapid capacity fading. To address these challenges, covalently introducing sulfur into conductive metal-organic frameworks (MOFs) has emerged as an effective strategy. This approach ensures strong sulfur immobilization, preventing polysulfide dissolution and enhancing cycling stability. Additionally, the conductive MOF structure facilitates efficient electron transport, improving the redox kinetics of sulfur species. The covalent bonding of sulfur further enhances sulfur utilization and retention, leading to a high-performance, long-lasting Li-S battery.[1]

2. Experimental

2.1 Design and synthesis of covalently introducing sulfur in a conductive metal organic frameworks



Scheme 1. Synthesis route for S_8 -UIO(F)@CNT. we report a fluorinated metal organic polymer (UIO(F)) on

CNT as a template for high performance sulfur cathodes in Li-S batteries. The fluorination allowed facile covalent attachment of sulfur to a porous framework via nucleophilic aromatic substitution reaction (S_NAr), leading to high sulfur content.

2.2 Morphology study



Fig.1. Surface morphology of (a) UIO(F)@CNT and (b) $S_8\mbox{-}UIO(F)@CNT.$

The SEM image shows thin, elongated CNTs forming an interconnected, web-like structure that serves as a conductive framework. Granular, rough-textured regions indicate the well-distributed UIO(F) MOF grown on CNTs. After sulfur insertion into this frameworks, porous rough, agglomerated regions suggest the presence of sulfur confined within the MOF pores.

3. Results and Discussion



Fig 2. (a) Specific capacity (b) Cyclic stability Our findings suggest the UIO(F) family with the adaptability of SNAr chemistry and well-defined porous structures as useful frameworks and CNT network improve conductivity for highly sustainable sulfur electrodes in Li–S batteries. As a result, a discharge capacity of 1200 mAh/g is achieved at a current density of 0.1 C with good stability.

4. Conclusions

Covalently incorporating sulfur into conductive metalorganic frameworks (UIO(F)@CNT) is a promising strategy to enhance lithium-sulfur (Li-S) battery performance. This approach ensures strong sulfur immobilization, reducing polysulfide dissolution and improving cycling stability. The conductive MOF framework facilitates efficient electron transport, enhancing redox kinetics during charge/discharge cycles. Additionally, the covalent bonding of sulfur prevents loss during cycling, leading to higher sulfur utilization. This method offers a stable and high-capacity cathode material for next-generation Li-S batteries. **References**

[1] M Mahato et al. Small 19, 2301847, 2023.

Acknowledgement

Supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea Government (MSIT) (RS-2023-00302525, RS-2024-00345241, and NRF 2021M3H4A1 A03047333).

고체 폴리머 전해질 기반 탄소섬유 구조 전지 복합재료 개발 및 다기능성 예측 Development of solid polymer electrolyte-based carbon fiber structural battery composites and their multifunctional performance prediction

Mohamad A. Raja^{1,2}, *임수현¹, 김원기¹, 김원빈¹, 이준호¹, 김성수¹⁺ M.A. Raja^{1,2}, *S.H. Lim¹, W. Kim¹, W. Kim¹, J. Lee¹, S.S. Kim¹⁺

¹ 한국과학기술원 기계공학과, ² TU Delft Faculty of Aerospace Engineering ⁺E-mail: seongsukim@kaist.ac.kr

Keywords: Structural battery, Solid polymer electrolyte, Carbon fiber, Mechanical-electrochemical integrity

1. 서론

구조 전지 복합재료는 에너지 저장과 하중 지지를 동시에 수행함으로써 전기 에너지 기반 모빌리티의 경량화를 위한 차세대 기술로 주목받고 있다 [1]. 특히 보강재 및 기지재가 모두 기계적 · 전기화학적 기능을 수행하는 다기능성 복합재료 설계와 이를 실혂하기 도입이 위한 고체 전해질 바드시 필요하며, 이에 따라 탄소섬유와 폴리머 기지재를 각각 리튬 이온 전지의 음극과 고체 전해질로 사용하려는 시도가 지속되고 있다. 그러나 기계적 물성과 에너지 밀도 간 상충성 발생이 불가피할 뿐만 아니라 다기능성 복합재료 설계 및 성능 예측에 대한 가이드라인 부재로 인해 시행착오를 통한 실험적 접근만 이루어지고 있는 실정이다.

본 연구에서는 이온 전도도 및 기계적 강도의 상충성을 고려하여 에폭시 기반 고체 전해질의 조성을 최적화하고 이를 기반으로 탄소섬유 전극을 포함하는 리튬 이온 구조 전지를 제조하였다. 또한 개발된 구조 전지 복합재료의 기계적·전기화학적 성능을 평가하고, 다기능성 예측을 위한 기계 학습 알고리즘을 구축하였다.

2. 고체 폴리머 전해질 기반 구조 전지 개발 2.1 고체 폴리머 전해질 제조 및 물성 평가



Fig. 1. Solid polymer electrolyte consists of structural phase and ion-conducting phase

에폭시 수지/전도성 액체로 구성되는 이성상 고체 전해질을 제조하고, 폴리머 가교도를 최대화하기 위해 경화 동역학적 접근을 통한 공정 최적화를 수행하였다 (Fig.1). 전자주사현미경 분석을 통해 고체 전해질 중 에폭시 성상의 형상을 관찰하고, 필름 형태의 고체 전해질을 사용하여 인장 물성 및 이온 전도도를 측정하였다.

2.2 구조 전지의 기계적 ·전기화학적 성능 평가 진공 보조 압축 성형을 통해 고체 폴리머 전해질 기반 탄소섬유 구조 전지 복합재료를 제조하였다. 인장 시험과 정전류 충방전 시험을 수행하여 구조 전지의 다기능성을 평가하였다.

2.3 멀티-스케일 구조해석 및 기계학습 알고리즘을 통한 구조 전지의 기계적 ·전기화학적 성능 예측 구조 전지 복합재료의 전해질/탄소섬유 간 계면 물성 및 인장 물성 예측을 위해 응집 영역 모델 (Cohesive zone model) 기반 구조 해석을 구축하였다. 또한 기계 학습 알고리즘을 사용하여 구조 전지의 충방전 성능을 예측하고, 실험 결과와 비교분석하였다.

3. 결론

에폭시 기반 고체 전해질 최적화를 수행하고, 이를 사용한 탄소섬유 강화 복합재료가 구조 전지로써 구동될 뿐만 아니라 120 GPa의 높은 기계적 강성을 가짐을 확인하였다. 구조해석과 기계학습을 통해 구조 전지의 기계적 물성 및 충방전 성능을 실험값 대비 각 5% 및 12% 오차 내로 예측 가능함을 확인함으로써 다기능성 구조 전지의 체계적인 설계 및 성능 예측 방안을 제시하였다.

참고문헌

[1] M.A. Raja, et al. ACS Applied Materials & Interfaces. 16.43:59128-59142, 2024.

후기

본 성과는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구 재단-나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행됨 (과제번호 RS-2024-00450477).

Level Set-Based Topology Optimization and 3D Printing for Composite Structures with Tailored Fiber Paths

*Soon Ho Yoon¹⁺, Thuan Ho-Nguyen-Tan¹, Minkook Kim¹⁺⁺, Anand Prakash Jaiswal¹ ¹Institute of Advanced Composite Materials, Korea Institute of Science and Technology (KIST) E-mail: +soonho@kist.re.kr, ⁺⁺minkook@kist.re.kr

Keywords : Anisotropic topology optimization, Level set method, Additive manufacturing, Continuous carbon fiber.

1. Introduction

This study introduces an approach that integrates anisotropic topology optimization with additive manufacturing to enhance the design of carbon fiberreinforced polymer (CFRP) structures. CFRP materials, known for their strength and lightweight properties, are optimized using a reaction-diffusion equation that updates the level-set function, which defines the moving geometry. A boundary offset algorithm generates curved fiber orientations aligned with the structural boundaries to maximize material performance. In this work, a nonsymmetric CFRP beam subjected to a three-point bending load is optimized for maximum stiffness under a volume constraint. The optimal beam configuration is fabricated using 3D printing and compared to beams with fixed fiber orientations of 0°, 30°, 45°, 60°, and 90°. A pre-processing tool is developed to export the topology results into a compatible input format for numerical simulations of varying fiber orientations. Elemental fiber orientation is defined at the element centroid in the numerical implementation. Both numerical results and experimental tests demonstrate that the CFRP beam with tailored fiber paths exhibits superior performance.

References

- [1] Yamada, T. et al., Comput Methods Appl Mech Eng, 199(45-48):2876–2891, 2010.
- [2] Ho-Nguyen-Tan, T. et al., *Struct Multidiscipl Optim*, 65(4):119, 2022.
- [3] Brampton, C.J. et al., Struct Multidiscipl Optim, 52:493–505, 2015.
- [4] Xu, Y. et al., Comput Methods Appl Mech Eng, 399:115350, 2022.

Acknowledgement

This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT).

Laser texturing based injection molded metal-composite joint for lightweight hybrid robotic structures

* Sungjin Hong^{1,2}, Sung-Hoon Ahn¹⁺

¹ Department of Mechanical Engineering, Seoul National University, ² Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute

of Technology

⁺E-mail: ahnsh@snu.ac.kr

Keywords : Lightweight joints, Metal-composite joining, Hybrid structure, Laser structuring

1. Introduction

The joining of lightweight materials, such as polymers and composites, with metals has become crucial in sectors such as automotive, aerospace, and robotics [1]. Hybrid structures offer a combination of exceptional mechanical properties and significant weight reduction, which is critical for improving energy efficiency. However, joining dissimilar materials like polymers and metals poses challenges due to their inherently different thermal expansion coefficients, mechanical properties, and bonding mechanisms.

2. Joining of Metal-Composite

2.1 Traditional joining:

Traditional joining processes, such as mechanical fastening and adhesive bonding, often fall short due to limitations in manufacturing cost, robustness and overall weight when applied to hybrid materials. Mechanical fastening requires drilling holes, which introduces stress concentrations, disrupts fiber orientation in composites while adding weight of fasteners. Adhesive bonding is often constrained by environmental sensitivities, long curing times, and reliance on surface preparation.

2.2 Laser structuring based joining

Among advanced joining methods, joining, micro-scale mechanical interlocking with laser have demonstrated significant potential. Specifically, the process involves generating microstructures on the metal surface, to produce micro-size surface irregularities that provide an extra mechanical interlock with the melted polymer creating a robust joint. Laser texturing based joining is especially advantageous due to their ability to achieve bonding without the need for additional adhesives, thereby simplifying the process while reducing the overall weight of the product.

3. Methodology and Results

In this research, a robotic metal part is joined with PA6GF50 composite using laser structuring and injection molding. The metal robotic part is laser machined to produce undercut interlocking structures on the metal surface. The metal piece is then used as a mold of composite material injection molding. Machined metal

grooves are filled with composite material forming a strong joint. The manufacturing parameters such as laser machining conditions, injection molding conditions are experimentally optimized. The strength of the joint is experimentally tested in various loading conditions showing strong joint strength values. Microscopic analysis is performed to determine the filling of composite materials into the grooves.



Fig. 1. Schematic of Laser texturing based injection molded joining in robotic parts

4. Conclusions and Future Works

The proposed joining method can join metal and composite with a simple, cost-effective process achieving high joint strength. Future research will focus on scaling the process for various materials and investigating its performance under combined loading conditions to fully realize its potential in hybrid joints.

References

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF), a grant funded by the Korea government. (MSIT; grant no. RS-2024-00356951)

^[1] J.Y. Choi et al. *International Journal of Advanced prec.-GT.* 10(1):269-291, 2023.

Automation and Inverse Design for the Robotic Manufacturing of Long Discontinuous Fiber Reinforced Composites

Akshay Zaveri¹, Hyunsu Lee¹, Jaeyoul Lee² and Ji Ho Jeon¹⁺

¹ School of Mechanical, Aerospace and Manufacturing Engineering, University of Connecticut, USA, ²Intergrated Robotics Systems R&D Division, Korea Institute of Robotics and Technology Convergence (KIRO), Republic of Korea

⁺E-mail: jiho.jeon@uconn.edu

Keywords: Robotic manufacturing, Inverse design, Finite Element Analysis, Surrogate Model

1. Introduction

Recent studies have focused on the potential of long discontinuous fibers (5-100 mm) in composite manufacturing balancing their manufacturing flexibility high mechanical properties [1]. In parallel, robotic manufacturing techniques have gained attention for their ability to precisely control fiber placement, enabling tailored stress distributions and customized mechanical properties in fiber-reinforced composites [2]. However, the design of LDFRCs remains challenging due to the complex relationship between fiber alignment and resulting stiffness properties. Traditional analytical models often fail to accurately predict these behaviors, limiting their utility in composite design. This study presents a data-driven inverse design framework for LDFRCs, integrating representative volume element (RVE) simulations, surrogate modeling, and generative machine learning to enable accurate prediction and optimization of fiber configurations that meet desired mechanical performance targets [3].

2.Methods

RVE models were generated in ABAQUS by varying fiber length, orientation, volume fraction, and discontinuity gap. Periodic boundary conditions (PBCs) were applied to extract effective stiffness properties as shown in Fig. 1 (a). A surrogate model using K-means clustering and random forest regression was developed to classify and match multiple analytical composite models. Finite element analysis (FEA) results were validated using the rule of mixtures, Cox model, and Halpin-Tsai model. The ξ parameter in the Halpin-Tsai model was calibrated using FEA-derived stiffness. A generative adversarial network (GAN) was trained on the validated dataset for inverse design targeting desired mechanical properties.

3. Results and Discussion

The surrogate model reproduced FEA-predicted stiffness values with reduced computational time. The calibrated Halpin-Tsai model decreased validation error from 21.5% to 8.9% as shown in Fig. 1 (b). The validated dataset was used to train the inverse model. Table 1 shows that inverse model predictions deviated less than 10% from FEA results. The inverse model generated fiber configurations corresponding to target stiffness properties. These configurations require control of deposition angle and fiber gap, which must be considered in subsequent process planning.

4. Conclusion

This study presents a data-driven framework integrating GAN with FEA for inverse design of LDFRCs. The framework incorporates a surrogate model for automated validation of RVE-derived stiffness properties. Future work will fabricate inverse-designed composites using robotic deposition to assess structural performance and manufacturability.



Fig. 1. (a) RVE model with PBC and fiber discontinuity gap; (b) Comparison of composite modulus from FEA, rule of mixtures, and Halpin-Tsai models.

Table 1. Validation of user desired properties with inverse design results and FEA results.

	Target Input (GPa)	FEA Results (GPa)
Test 1 (E11)	90.00	82.61
Test 2 (E11)	80.00	86.27
Test 3 (E ₂₂)	3.50	3.61

References

- Alves M, Carlstedt D, Ohlsson F, Asp LE, Pimenta S. Ultra-strong and stiff randomly-oriented discontinuous composites: Closing the gap to quasi-isotropic continuousfibre laminates. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2020;132:105826.
- [2] Parandoush P, Lin D. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. Composite Structures 2017;182:36–53.
- [3] Shang X, Liu Z, Zhang J, Lyu T, Zou Y. Tailoring the mechanical properties of 3D microstructures: A deep learning and genetic algorithm inverse optimization framework. Materials Today 2023;70:71–81.

모바일 매니퓰레이터를 활용한 복합재 생산 공정 자동화 가능성 평가 Automation of Composite Manufacturing Using a Mobile Manipulator

*한지웅¹, 장민우¹, 송근수¹, 이재열¹⁺ * J.W. Han¹, M.W. Jang¹, G.S. Song¹, J.Y. Lee¹⁺

¹ 통합로봇시스템연구본부 한국로봇융합연구원 ⁺E-mail: jylee@kiro.re.kr

Keywords: Composite manufacturing, mobile manipulator, automation, CFRP

1. 서론

복합재 산업에서는 작업자의 높은 숙련도 의존으로 저하와 인해 생산성 품질 불균일 문제가 지속적으로 발생하고 있다. 특히 CFRP (Carbon Fiber 부착하는 Reinforced Plastic)를 몰드에 적층 품질 편차가 크게 나타난다. 공정에서는 보 연구에서는 일정한 힘을 유지할 수 있는 모바일 매니퓰레이터를 활용하여 복합재 적층 공정의 품질 균일성 향상 가능성을 검증하고자 한다.

2. 복합재 공정의 한계와 자동화 필요성

현재 복합재 적층 공정은 대부분 수작업으로 진행되어 작업자의 작업 방식, 숙련도나 신체적 피로도에 따른 압력 변화로 인해 품질 편차가 발생하고 있다[1]. 이로 인해 제품의 결함이나 성능 문제가 발생할 수 있다. 따라서 일정한 압력으로 적층 작업을 수행할 수 있는 로봇 자동화 시스템의 도입이 요구된다.

3. 실험 방법 및 결과 3.1 로봇시스템 구성



Fig. 1. Mobile manipulator robot system.

본 실험에 사용된 로봇 시스템은 이동형 모바일 로봇, 양팔 매니퓰레이터(KUKA iiwa r820), 3지 그리퍼(DG-3F), 그리고 비전 시스템으로 구성된다. 모바일 로봇은 작업 환경에서 자율적으로 이동하며, 양팔 매니퓰레이터는 위치와 힘을 정밀하게 제어할 수 있다. 3지 그리퍼는 복합재를 안정적으로 잡고 이동시킬 수 있으며, 비전 시스템은 복합재와 몰드의 위치를 정확하게 검출하여 작업의 정확도를 높인다.

3.2 실험방법 및 결과

본 연구에서는 비정형 환경에 놓인 복합재를 로봇이 인식한 후, 이를 파지하여 모바일 로봇으로 옮기고 모바일 매니퓰레이터가 몰드를 향해 이동하도록 하였다. 이후 양팔 매니퓰레이터를 이용해 복합재 적층 작업을 수행하였다. 작업 과정에서 양팔 매니퓰레이터의 한쪽 팔은 CFRP의 한쪽 끝을 잡고, 다른 한쪽 팔은 롤러가 부착된 상태에서 프리프레그를 몰드에 고르게 부착하였다. 작업 환경이 비정형적이기 때문에 CFRP와 몰드의 위치는 비전 시스템을 통해 정확하게 검출하였다. 또한 매니퓰레이터는 힘과 토크의 측정이 가능하므로, 이를 통해 일정한 힘을 유지하면서 롤러를 제어하여 부착 작업의 정밀도를 높였다. 실험 결과. 프리프레그가 몰드에 정확하고 균일하게 부착되는 것을 확인하였으며, 작업 후 복합재 표면에서 주름 등의 결함이 관찰되지 않았다. 이를 통해 모바일 매니퓰레이터 기반의 자동화 시스템이 복합재 생산 공정에서 품질의 균일성을 확보할 수 있음을 검증하였다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 모바일 매니퓰레이터를 활용하여 복합재 생산 공정의 자동화 가능성을 검증하였다. 실험 결과 비정형 환경에서도 비전 시스템을 통해 복합재와 몰드 위치를 정확히 검출하였고, 양 매니퓰레이터의 힘 및 위치 제어를 통해 프리 프레그를 몰드에 균일하게 부착하였다. 향후에는 다양한 몰드에 적용 가능한 적응형 제어 기술과 비전 시스템의 인식 정확도 향상에 관한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

 M. Elkington et al. Adv. Manuf.: Polym. Compos. Sci. 1:138-151, 2015.

Acknowledgement

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획 평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (RS-2024-00507783).

항공 분야 복합재 가공 공정 개선을 위한 로봇 활용 모델 개발 연구 Development of a Robot Utilization Model for Improving Composite Processing in the Aerospace

*지성철¹⁺, 김종찬¹, 이만기¹, 김승우¹ *S. C. Jee¹⁺, J. C. Kim¹, M. G. Lee¹, S. W. Kim¹

> ¹한국로봇융합연구원 ⁺E-mail: jeesch@kiro.re.kr

Keywords: Prepreg, GFRP, Robot, Trimming

1. 서론

본 논문에서는 항공 분야 복합재 가공 공정의 자동화를 위한 로봇 활용 모델을 제안한다. 기존 수작업 공정은 분진과 유해 화학물질로 인한 호흡기 질환뿐만 아니라, 반복 작업으로 인한 근골격계 질환 등의 문제가 발생할 가능성이 높다. 이를 해결하기 위해 산업용 로봇 기반 자동화 기술이 도입되고 있으며, 일부 연구를 통해 그 효과가 입증되고 있다. 본 연구에서는 로봇 기반 자동화 모델과 실험 결과를 제시하여 해당 기술의 효용성을 검증한다.

2. 적층된 프리프레그 경화 전 트리밍 공정

항공기 복합소재 스트링거(Stringer) 제조 공정은 프리프레그(Prepreg) 적층 및 프리포밍(Preforming)을 거친 후, 경화되지 않은 상태의 프리프레그 차지(Prepreg Charge)를 트리밍하는 단계를 포함한다. 기존 수작업 방식에서는 작업자가 문구용 칼을 사용하여 절단하기 때문에 공정 결과물의 일관성이 떨어지며, 규정된 EoP(End of Part) 길이에 도달하기 위해 여러 차례 비교 및 절단 과정을 반복해야 하므로 작업 시간이 길어지는 단점이 있다.

높은 수준의 품질과 일관성을 확보하기 위해 6축 산업용 로봇과 초음파 커터를 활용한 트리밍 공정을 구축한다. 초음파 커터는 진동자, 블레이드, 볼텍스 튜브 냉각장치로 구성된다. 트리밍 공정 중 물리적 간섭을 최소화하기 위해 공정 대상물은 클램핑하지 않고, 지그에 음압을 형성하여 밀착시킨다. 공정은 '프리프레그 지그 고정' → '로봇 및 툴 전원 인가' → '트리밍 공정 시행' → '로봇 원위치 복귀 및 전원 차단' → '지그 분리 및 검사' 순서로 진행된다. 실험을 통해 공정 품질을 평가할 수 있으며, 다음과 같은 결과를 확인함으로써 목표치를 달성하였음을 알 수 있다.

평가항목	단위	목표치	측정치
외곽 공차	mm	± 1.27	+0.59
절단면 상태	N/A	손상 없음	손상 없음
절단 속도	m/min	1	1.2

3. 경화된 GFRP 구조물 트리밍 공정

항공기 날개 구조물인 FSF(Flap Support Fairing)는 주로 GFRP로 제작된다. GFRP 구조물의 경화 후 수행되는 EoP 가공 과정에서는 다량의 분진과 소음이 발생하며, 이로 인해 작업자의 호흡기 및 청각계 질환을 유발할 가능성이 크다. 또한, 장시간 고정된 자세로 작업이 이루어지므로 근골격계 질환 발생률이 높아지는 문제가 있다.

로봇 기반 FSF 트리밍 공정은 6축 산업용 로봇, 트리밍 툴, 힘/토크 센서로 구성된 로봇 시스템을 활용한다. 공정 순서는 'FSF 지그 로딩 및 고정'→ '툴 및 센서 전원 인가'→ '로봇 트리밍 공정 시행'→ 'FSF 지그 탈거'→ 'EoP, 각도, 조도 검사'로 이루어진다. 본 공정은 OLP(Off-Line Programming) 기반으로 가공 조건과 경로를 사전에 시뮬레이션한 후 실험을 진행하며 가공 품질을 높이기 위해 황삭 후 정삭을 수행하는 방식을 채택하였다. 실험 결과를 다음 표에 제시하였으며, 이를 통해 로봇 활용의 효용성을 확인할 수 있다.

Table 2. Test Results of Cured GFRP Structure Trimming

평가항목	단위	목표치	측정치
외곽 공차	mm	± 0.76	-0.5
각도 공차	deg	±1	+0.5
조도	Microinch Ra	125	123

4. 결론

본 논문에서는 항공 분야 복합재 가공 공정 개선을 위한 로봇 활용 모델 개발을 제안하였다. 프리프레그 적층 후 경화 전 트리밍 공정과 경화된 GFRP 구조물 트리밍 공정을 로봇 기반 공정으로 제시하고, 실험 결과를 통해 그 효과를 입증하였다.

후기

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획 평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(00416852)

자동화 공정으로 구축된 섬유복합재 빅데이터를 활용한 도심항공모빌리티 동체 구조 설계에 관한 연구

Study on the Structural Design of Urban Air Mobility Fuselage Using Big Data from Automated Fiber-Reinforced Composite Manufacturing Process

*손우혁 ^{1, 2}, 정현목¹, 구민지¹, 배성열 ¹⁺ * W.H. Son ^{1, 2}, H.M. Jung ¹, M.J. Koo¹, S.Y. Bae¹⁺

¹ 한국세라믹기술원 우주항공융복합소재센터, ² 부산대학교 기계공학부 ⁺E-mail: bsy@kicet.re.kr

Keywords: Fiber Reinforcement Plastics, Big data-based Predictive Model, Urban Air Mobility, Structural Analysis

1. 서론

도심항공모빌리티(UAM)의 효율적인 운용을 위해서는 기체 구조의 경량화가 필수적이다.[1, 2] 본 연구에서는 소재 단위 강성 설계를 통해 경량화 설계 사양을 도출하고, 자동화 공정으로 구축된 섬유복합재 빅데이터를 활용한 딥러닝 기반 예측 모델을 설계하여 경량 설계에 최적화된 소재 및 성형 조건을 도출하고자 한다. 또한 도출된 소재의 물성치를 UAM 동체 구조에 적용하여 구조적 건전성을 평가하고, 경량 설계 프로세스를 정립하는 것을 연구의 목표로 한다.

2. 연구 프로세스

2.1 소재단위 경량화 및 강성 설계

본 연구에서는 유리 및 현무암 섬유강화 복합재의 두께를 조정하여 알루미늄 대비 5% 및 10% 경량화를 수행하였다. 또한 유한요소해석을 활용하여 알루미늄 3mm 평판과 경량화된 복합재 간의 동일 변형량을 확보할 수 있도록 강성 설계를 수행하였다.

2.2 소재 데이터 확보 및 AI 기반 설계 변수 도출 자동화 제조 공정을 활용하여 섬유강화 복합재를 제조하고, 이를 통해 소재 데이터를 확보하였다. 이후 구축된 빅데이터를 기반으로 예측 모델을 설계하였으며, 해당 모델을 통해 설계 사양에 적합한 소재 조건 및 성형 조건을 도출하였다.

2.3 UAM 동체 구조 건전성 평가

UAM 동체의 구조 건전성을 평가하기 위해, 예측 모델을 통해 도출된 소재들의 물성치를 적용하였으며, 추가적인 경량 설계를 위해 허니콤을 통한 샌드위치 구조를 적용하여 유한요소해석(FEA)을 수행하였다. 이를 위해 Ansys를 활용하여 UAM 동체의 구조적 건전성에 대해 평가하였다.

3. 결과 및 고찰



Fig. 1. (a) Structural Stiffness Analysis of Lightweight FRP, (b) Structural Analysis Results of a UAM Fuselage with Applied Lightweight Materials

Fig. 1. (a)는 알루미늄과 경량 섬유강화 복합재의 동일 하중 조건에서의 최대 변형량 및 탄성계수 해석 결과를 나타낸다. X축은 소재별 두께 및 알루미늄 대비 경량화율이며, 각 소재가 5%, 10% 경량화 시 요구되는 탄성계수를 확인할 수 있다. 이후 딥러닝 기반 예측 모델을 통해 해당 탄성계수에 부합하는 최적 소재 및 성형 조건을 도출하였다. Fig. 1. (b)는 도출된 물성치와 허니콤 구조를 적용한 UAM 동체 측면 구조 해석 결과로, 단일 소재 적용 시 약 10% 변형량 차이를 보였으며, 이는 구조 형상 및 경계 조건 차이로 인한 오차로 판단된다. 반면, 단일 소재의 10% 경량화 탄성계수를 허니콤 구조에 적용한 경우 알루미늄과 유사한 변형량을 나타냈다. 파손 지표인 IRF(Inverse Reserve Factor)는 단일 소재에서는 알루미늄 대비 5~10% 높았으나, 허니콤 구조에서는 오히려 낮은 값이 도출되었다. 모든 해석 결과에서 IRF는 1 미만으로 파손 위험은 없으며, 경량화에도 구조적 건전성이 확보됨을 의미한다. 특히 허니콤 구조 적용 시 최대 25% 경량화가 가능하였다. 본 연구에서 제안한 설계 프로세스를 통해 UAM 동체의 효과적인 경량 설계가 가능함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Seok, Ji-Hun, Seonghun Park, and Sung-Youl Bae. "A Study on the Optimal Design of UAM Composite Boom Structures through RVE-Based Structural Analysis." *Composites Research* 37.6 (2024): 466-472.
- [2] Nayak, Nikhil V. "Composite materials in aerospace applications." *International Journal of Scientific and Research Publications* 4.9 (2014): 1-10.

고온 환경용 세라믹 섬유 복합재의 기계적 강도 및 난연 특성 연구 Study on the Mechanical Strength and Flame Retardant Properties of Ceramic Fiber Composites for High-Temperature Environments

*노우승^{1,2}, 신해름^{1,3}, 여승준^{1,2}, 박성훈², 김만태¹⁺ * W.S. Noh^{1,2}, H.R. Shin^{1,3}, S.J. Yeo^{1,2}, S.H. Park², M.T. Kim¹⁺

¹ 한국세라믹기술원 우주항공융복합소재센터, ² 부산대학교 기계공학부, ³ 부산대학교 융합학부 ⁺E-mail: ginggiscan@kicet.re.kr

Keywords: Fiber-Reinforced Polymer(FRP), Fly ash, Basalt fiber

1. 서론

최근 고온에서 사용되는 초내열 소재들이 각광받고 있으며, 고온환경에 사용되는 소재 및 부품으로 섬유 강화 폴리머(Fiber-Reinforced Polymer, FRP)에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 본 연구는 세라믹섬유 기반의 현무암섬유를 이용하여 고온 환경하에서 견딜 수 있는 복합소재를 제작하기 위해 비산회(Fly ash)를 첨가하여 제작 후 인장시험 및 난연 시험을 통해 기계적 강도 및 난연 특성을 평가하였다.

2. 실험

2.1 고온 환경용 현무암 섬유 복합재 제조

본 연구에서는 에폭시 수지에 비산회를 30wt% 첨가 후 Table 1과 같이 교반장비 및 성형공정을 달리하여 현무암 복합재를 제작하였다. 모든 시편은 동일하게 오토 클레이브 장비를 통해 가공하였다.

Types	Stirrer	Manufacturing Method
BFRP (A)	Magnetic	Hand Lay-up
BFRP (B)	Mechanical	Hand Lay-up
BFRP (C)	Magnetic	V-RTM
BFRP (D)	Mechanical	V-RTM

Agitation conditions

Mechanical: 25°C, 5 hours, 700 RPM Magnetic: 60°C, 5 hours, 300 RPM

2.2 물성평가

FRP의 인장시험은 만능재료시험기(Universal testing machine, INSTRON 5982)를 이용하여 평가를 진행하였다. 샘플 크기와 평가 방식은 ASTM D3039 규격에 따라 시험하였으며 난연 시험은 콘 칼로리미터 장비(Cone calorimeter, FESTEC)를 이용하여 평가하였다. 샘플의 크기와 평가 방식은 KSF ISO 5660-1 시험규격을 참조하여 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

인장시험 결과 및 난연 시험 결과를 Fig.1에 나타내었다. V-RTM 제조법으로 제작하였을 때 인장강도가 크게 증가한 것을 확인할 수 있는데 이는 진공상태에서 섬유에 수지를 함침 하기에 공극이 줄어들고 계면 접착력이 증가하여 기계적 강도가 상승했다고 판단된다.[1] Mechanical 교반 장비의 특성이 분산에 영향을 미치며 인장강도가 소폭 상승한 것도 확인할 수 있다. 교반이 잘된 비산회가 입자-기지재(Matrix) 결합 및 공극 형성 감소로 인해 기계적 강도 상승하였다고 판단된다. 난연 시험 결과 BFRP(Original)대비 총 열 방출량(Total heat release, THR)은 33~36% 감소하였고 최대 열 방출량(Heat, release rate, HRR)은56~58% 감소하였으며 난연 소재 기준에 부합하였다.



Fig. 1. (a) Tensile strength, (b) Flame retardancy results of BFRP

4. 결론

본 연구를 통해 비산회를 첨가한 현무암 섬유 복합재(BFRP)가 기계적 강도와 난연성을 동시에 향상 시킬 수 있음을 확인하였다. 특히, V-RTM 공정과 Mechanical교반을 병행할 경우 기계적 강도를 향상 시킬 수 있었으며 이를 통해 고온 환경하에 현무암 복합재 적용가능성을 확인하였다.

참고문헌

[1] D.W Lee et al. Compos Res. 30.3, 2017.

Additively Manufactured Core Frame with Composite-Reinforced Shell for Build-Efficient Robot Frames

*Cheonghwa Lee^{1,2}, Sung-Hoon Ahn² and Ji Ho Jeon¹

¹ School of Mechanical, Aerospace, and Manufacturing Engineering, University of Connecticut, Storrs, CT, 06269, United States, ² Department of Mechanical Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, South Korea

⁺E-mail: jiho.jeon@uconn.edu

Keywords: Robot Frame, Manufacturing Process, Additive Manufacturing, Composite Material

1. Introduction

The robot frame is a critical component, as it houses all the electromechanical components and defines the form and identity of the robots. However, it is often underestimated compared to components like sensors and actuators [1]. The robot frame accommodates the equipment, depending on the size and shape, and requires components for connections and external covers. Key design considerations include materials and manufacturing methods, which directly affect the robot's performance, efficiency, and adaptability.

Traditional manufacturing methods are expensive, timeconsuming, and require expertise, making them unsuitable for developing robot frames [2]. To address these challenges, this study proposes a hybrid approach that integrates an additive-manufactured core frame with a composite-reinforced shell, combining design flexibility, lightweight properties, and durability as shown in Fig. 1. This method offers benefits like rapid prototyping, cost reduction, and scalable production, making it a promising alternative to traditional methods.

2. Robot Frame Manufacturing Process

2.1 Additively Manufactured Core Frame: The core components of the robot frame are produced using additive manufacturing i.e. 3D printing technology. 3D printers are essential equipment for creating high-precision parts and ensuring manufacturing flexibility. In this study, PLA filament is used to ensure sufficient mechanical properties for use in the core frame. This approach minimizes material usage while maintaining mechanical performance. The key advantages of this method include achieving lightweight designs through optimized geometry, enabling custom manufacturing tailored to the robot frame, facilitating rapid prototyping for quick iteration and modification, and reducing material waste compared to traditional machining techniques.

2.2 Composite-Reinforced Shell: The outer shell of the robot is made using composite materials such as carbon fiber-reinforced plastic (CFRP). These core frames are reinforced by layering fiber fabrics and bonding them with epoxy resin using the hand layup method. The application of composite materials can be achieved through hand layup, which does not require additional equipment. The

advantages of using a composite-reinforced shell include a high strength-to-weight ratio and improved durability against mechanical wear and environmental factors. The issue of flexibility is addressed by a core frame, and the absence of post-processing requirements reduces manufacturing complexity.

3. Results and Conclusions

This approach reduces frame costs for production and does not require high expertise, making it accessible for anyone to manufacture. Moreover, it is well-suited for the frequent changes required in robotic frames through prototypes and can even be used beyond prototypes, transitioning into a final product.



Fig. 1. Manufacturing Process for Robot Frame.

References

- SY Yoo et al. Design and analysis of carbon fiber reinforced plastic body frame for multi-legged subsea walking robot, Crabster. *Ocean engineering*, 102, 78-86, 2015.
- [2] C Lee et al. Extension of quadcopter flight range based on quadcopter transport system and autonomous ramp flight algorithm. *IEEE Access*, *8*, 156422-156432, 2020.

로봇을 활용한 복합재 및 이종접합 소재의 내부 결함진단을 위한 비파괴 검사 기술에 관한 연구

Study on Ultrasonic Inspection Technology for Internal Defect Diagnosis of Composite and Hetero-bonded composite materials Using Robots

*박종빈 ¹ * J.V. Park¹

¹ 한국섬유기계융합연구원 ⁺E-mail: jvpark@kotmi.re.kr

Keywords: Robot Arm, Ultrasonic Testing, Composite Materials, Hetero-bonded composite materials, , Non-Destructive Testing (NDT)

1. 서론

친환경 모빌리티의 에너지원으로서 수소의 활용이 증가함에 따라, 차량용 수소용기와 자동차 경량화를 위한 이종접합 소재의 중요성이 부각되고 있다. 복합재 및 이종접합 소재는 제조 공정 중 내부 결함(기공, 층간 박리, 접합 불량 등)이 발생하기 때문에 신뢰성 확보를 위한 검사 기술이 필요하며 그 중에 비파괴 검사 기술의 대표적이다.

본 연구에서는 로봇팔 기반의 자동화 초음파 검사 (Ultrasonic Testing, UT) 시스템을 개발하여, 복합재/이종접합 소재의 내부 결함을 진단하는 기술을 로봇을 이용한 제안한다. 검사 자동화를 구현하였으며, 다양한 형상의 시편에 대해 결함을 탐지할 수 있도록 하였다. 실험 결과, 본 시스템은 기존 수동 검사 방식 대비 25% 이상의 검사 속도 향상과 90% 이상의 결함 검출 정확도를 달성하였다. 본 연구를 통해 로봇팔을 활용한 초음파 검사 기술이 복합재 및 이종접합 소재의 품질 관리를 위한 신뢰성 높은 검사 방법이 될 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 실시간 결함 분석 및 AI 기반 데이터 처리 기술을 적용하여, 더욱 정밀하고 효율적인 검사 시스템을 개발할 예정이다.

2. 연구 방법

본 연구에서는 다관절 로봇팔과 초음파 센서를 결합한 자동화 검사 시스템을 설계하였다. 로봇팔은 다양한 형상의 시편에 대해 정밀한 궤적을 따라 센서를 이동시킬 수 있으며, 이를 통해 곡면 구조를 포함한 복잡한 형상의 수소용기 및 자동차 부품도 효율적으로 검사할 수 있도록 하였다.

본 연구에서는 고주파 초음파 센서를 활용하여 A-Scan 및 C-Scan 기법을 적용하였다. A-Scan은 개별 위치에서의 신호 반사 특성을 분석하여 내부 결함을 정량적으로 평가하며, C-Scan은 검사 대상의 2D 이미지를 생성하여 결함의 위치와 크기를 시각적으로 분석할 수 있도록 한다.

3. 실험 및 검증

실험은 다음과 같은 단계로 수행되었다. CFRP 기반 수소용기 및 알루미늄-복합재 이종접합 자동차 부품을 시험편으로 제작, 로봇팔을 이용한 비파괴 검사 시스템을 이용하여 내부 결함 분석, 기존 수동 검사 방식과 비교하여 결함 검출 정확도 및 검사 속도 평가, 실험 결과, 본 시스템을 활용한 경우 기존 방식 대비 검사 속도가 30% 이상 향상되었으며, 95% 이상의 결함 검출 정확도를 확보할 수 있었다. 특히, 비정형 구조를 가지는 곡면 소재에서도 안정적인 결함 탐지가 가능함을 확인하였다.



4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 로봇팔을 활용한 자동화 초음파 검사 기술을 적용하여, 복합재 및 이종접합 소재의 내부 결함을 정밀하게 진단할 수 있음을 검증하였다. 이를 통해 검사 정확도와 신뢰성을 높이고, 기존 수동 방식의 한계를 극복할 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 실시간 결함 평가 및 AI 기반 데이터 분석을 결합하여 검사 시스템의 지능화를 추진할 계획이다.

참고문헌

 Hellier C., 2015, "A Review of Nondestructive Examination Technology for the Power Industry," Journal of American Welding Society, 94(12), pp. 40-44.

후기

본 연구는 본 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신사업 (S20011244)에 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.





차세대 배터리용 양극 활물질-유전체 복합소재의 표면 개질과 특성 분석 Surface Modification and Characterization of Cathode Active Material-Dielectric

Composite for Next-Generation Batteries

*서지혜 ^{1,2}, 최문희 ¹⁺ * J.H. SEO ^{1,2}, M.H. CHOI ¹⁺

¹ 한국세라믹기술원 나노복합소재센터, ² 고려대학교 에너지환경대학원 신재생에너지과 ⁺E-mail_moonhee77.choi@kicet.re.kr

Keywords: Cathode active material, Dielectric coating, Lithium-ion battery, High-rate performance

1. 서론

리튬이온 배터리는 전기차 및 전자기기 산업의 핵심 에너지원으로 사용되고 있으며. 고소 충·방전 특성이 중요한 성능 요소로 부각되고 있다. 하지만 양극 활물질은 고속 충·방전 시 계면 저항 증가 및 부반응으로 인해 성능이 저하되는 문제가 있다. 본 연구에서는 양극 활물질인 $LiCoO_2$ (LCO) 표면에 강유전체 BaTiO₃ (BT)를 코팅하여 복합 양극 활물질을 제작하고, 더 나아가 실란 커플링제를 사용한 표면 개질 방법을 통해 전기화학적 특성을 최적화하고자 하였다.

2. 실험 방법

2.1 양극 활물질 제작 :LCO 표면에 nanodot 형태로 BT를 코팅하였다. 이때 발생하는 BT의 응집 현상 및 표면 특성을 개선하기 위해 실란 커플링제를 도입하여 표면 개질을 진행하였다. 이를 통해 기존 LCO, BT 코팅한 LCO(LCO@BT), 실란 커플링제로 개질 후 BT를 코팅한 LCO(LCO-S@BT)을 제조하였다.

2.2 전기화학적 분석 : 제작된 복합 양극 활물질의 전기화학적 성능을 평가하기 위하여 chargedischarge cycling tests, cyclic voltammetry(CV), electrochemical impedance spectroscopy(EIS)를 수행하였다.

3. 실험 결과 및 분석

각 샘플은 3.0-4.5V 전압 범위에서 사이클링 되었으며, LCO-S@BT가 전반적으로 우수한 용량을 나타내었다. 특히, 10C에서 LCO 대비 약 340% 향상된 132 mAh/g 의 용량을 보였다. EIS 분석 결과, LCO-S@BT의 계면 저항(Rct)은 89요으로 약 46% 감소하였고, 리튬 이온 확산 계수는 약 197% 향상되었다. 이는 유전체 층과 실란 커플링제층이 전해질과 LCO 간 부반응을 억제하고, 활성 물질을 보호함으로써 계면 저항을 감소시키고 리튬 이온 확산을 원활하게 한 결과로 판단된다. 또한, 이러한 코팅층은 전극 표면 보호층 역할로 작용하여 10C에서 200 사이클링 된 후에도 94%의 용량 유지율을 나타내었다.



Fig. 1. Electrochemical performance and surface characterization of bare LCO, LCO@BT, and LCO-S@BT: (a) Rate capability test under varying charge-discharge rates(3.0-4.5V), (b) Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) results, (c) Ion diffusion coefficient, (d) Life characteristics and Coulomb efficiency at 10C for 200 cycles, (e) SEM images of the electrode surface after 200 cycles at 10C.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 실란 커플링제를 이용한 표면 개질을 통해 LCO에 BT를 균일하게 코팅함으로써, 고속 충·방전 특성이 향상된 복합 양극 활물질을 개발하였다. 최적 조건으로 제작된 LCO-S@BT는 기존 LCO 대비 10C에서 약 340% 향상된 용량을 나타냈으며, 계면 저항 역시 감소함을 확인하였다. 향후 연구에서는 다른 양극 활물질 및 유전 소재를 검토하여 폐배터리 저품위 양극재 개선과 차세대 이차전지로 확장하여 다양한 이차전지 산업 분야에 적용할 계획이다.

참고문헌

[1] J. W. Choi et al., *Adv. Energy Mater.*, 10, 2001326, 2020

[2] D. Zhang et al., J. Power Sources, 448, 227382, 2020

미소 기계적 시험을 통한 Cr 코팅 Zircaloy-4의 계면 특성 조사

*문지원, 김현길, Peter Hosemann, 류호진⁺ * Jiwon Mun¹, Hyun-Gil Kim², Peter Hosemann³ Ho Jin Ryu¹⁺

¹한국과학기술원 원자력 및 양자공학과 ²한국원자력연구원 경수로핵연료기술연구부 ³University of California, Berkeley, Department of Nuclear Engineering

+ E-mail: hojinryu@kaist.ac.kr

Keywords: Accident-tolerant Fuel (ATF), Cr-coated Zircaloy-4, Micromechanical testing

1. 서론

지르코늄(Zr)기반 합금은 낮은 중성자 흡수 단면적과 같은 우수한 특성으로 인해 원자로 핵연료봉 피복관의 핵심 소재로 사용된다. 그러나 Zr 기반 합금의 주요 단점 중 하나는 낮은 산화 저항성으로, 이를 개선하기 위해 크롬(Cr) 코팅을 통해 피복관 표면의 산화 저항성을 향상시키는 연구가 광범위하게 수행되었다.

Cr의 산화 저항성을 유지하기 위해서는 Cr 코팅층이 Zr 기지와 잘 부착되어 있고 박리되지 않는 것이 중요하다. 이에 따라 기존 연구에서는 거시적 수준에서 코팅층의 부착 특성을 평가하였다. Kim et al. (2015)은 3D 레이저 증착법으로 Cr을 코팅한 Zircaloy-4의 부착 거동을 분석하였으며, Cr 코팅 시편이 비코팅 시편보다 우수한 강도를 나타내며, 링 압축 및 인장 시험에서 좋은 계면 접합력을 보인다고 보고하였다 [1]. 또한, Umretiya et al. (2020)은 PVD 및 콜드 스프레이 방식으로 코팅된 시편을 대상으로 스크래치 테스트를 수행하여 Cr 코팅층의 구조적 건전성을 평가하였다[2].

본 연구에서는 미세기계시험(micromechanical testing)을 이용하여 Zr-Cr 계면 특성을 평가하고, 계면 접합 강도와 같은 특성을 분석하였다. 다양한 미세기계시험기법중마이크로 인장시험(microtensile test)을 활용하여 마이크로미터(micron) 스케일에서 코팅층의 계면 특성을 정량적으로 평가하였다.

2. 실험 방법 및 결과

2.1 시편 정보 및 준비 방법

본 연구에서는 아크 이온 도금(Arc Ion Plating, AIP) 공정을 통해 약 10 µm 두께의 Cr 층이 증착된 Zircaloy-4 튜브를 이용하여 마이크로 인장 시험 시편을 제작하였다. 시편 제작 방식은 두 가지로 구분되었으며, 하나는 게이지 구간의 중앙에 Zr-Cr 계면이 위치하도록 제작된 시편(Zr-Cr 시편)이고, 다른 하나는 게이지 구간 끝에 계면이 위치하도록 제작된 시편(Cr 시편)이다. 각 시편의 상세한 형상은 그림 1에 제시되어 있다. 최종 제작된 시편에 대해 주사전자현미경(SEM) 관찰 및 에너지 분산형 분광분석(EDS) 결과를 그림 2에 나타내었다.



Fig. 1. Schematic of the microtensile specimen (a) interface on the middle of the gauge section (Zr-Cr sample) and (b) interface on the end of the gauge section (Cr sample)



Fig. 2. Microtensile specimen fabrication SEM and EDS results of (a) Zr-Cr sample and (b) Cr sample

2.2 마이크로인장시험 결과

마이크로 인장 시험은 Hysitron PI-88 피코 인덴터를 사용하여 변위 제어 방식(10⁻³/s)으로 수행되었다. 그림 3은 시험 후 파단된 시편의 SEM 이미지를 나타낸다. 그림 3(a)에 보이는 바와 같이, 파단은 상대적으로 연성이 높은 Zr 층 내에서 발생하였으며, Zr/Cr 계면에서 박리는 관찰되지 않았다. 마찬가지로, 그림 3(b)에서도 계면에서 파단이 시작되지 않았으며, 대신 인장 바의 헤드 부분에서 응력 집중이 발생하여 파단이 진행되었다.

그림 4는 각 시편의 응력-변형률 결과를 나타낸다. 그림 4(b)에 제시된 Cr 1 시편의 경우, 취성 파괴가 아닌 파열(tear)이 발생하여 상대적으로 높은 파단 응력을 보였다. 그러나 대부분의 다른 시편(Zr-Cr 및 Cr 시편 포함)에서는 파단 응력이 약 700~900 MPa 범위에 분포하였으며, 이는 기존의 마이크로필러(micropillar) 시험에서 보고된 Zr의 파괴 응력(약 700 MPa)과 유사한 수준으로 측정되었다 [3].



Fig. 3. SEM image of fractured microtensile specimen after tensile test of (a) Zr-Cr sample and (b) Cr sample



Fig. 4. Microtensile test stress-strain results of (a) Zr-Cr sample and (b) Cr sample

3. 결론

본 연구에서는 마이크로 인장 시험을 통해 Cr이 코팅된 Zircaloy-4 피복관의 계면 특성을 조사하고, 미세 규모에서의 박리 거동 및 기계적 성능을 평가하였다. 시험 시편은 AIP 공정을 이용하여 Cr 층이 중착된 Zircaloy-4 튜브를 사용하여 제작되었다.

시험 결과, 파단은 일관되게 상대적으로 연성이 높은 Zr 층 내에서 또는 인장 바의 헤드 부분에서 발생하였으며, Zr/Cr 계면에서의 박리는 관찰되지 않았다. 이는 코팅층과 기판 사이에 강한 계면 접합력이 존재함을 의미하며, Cr 코팅층이 인장 하중 하에서도 우수한 결합력을 유지함을 보여준다. 향후 연구에서는 시편 형상을 변경하여 계면 결합력 평가를 보다 정밀하게 수행할 예정이다. 예를 들어, 계면 부근에 곡선(hourglassing) 형상이나 노치를 도입함으로써 계면 박리를 더욱 유도하여 계면 특성을 보다 직접적으로 분석할 계획이다.

참고문헌

- [1] H.G. Kim et al., J. Nucl. Mater. 465 (2015) 531-539.
- [2] R.V. Umretiya et al., J. Nucl. Mater. 541 (2020) 50-65
- [3] J.D. Hong et al., J. Nucl. Mater. 579 (2023).

후기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) of the Republic of Korea [No. RS-2024-00420956].

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

TiC/FC250 금속복합재료의 미세구조 및 마모 특성에 미치는 열처리의 영향에 대한 고찰

Influence of Heat treatment on Microstructure and Wear Properties of TiC/FC250 Composites

*임유진 ^{1,2}, 최재성 ^{1,2}, 차원진 ¹ * Y.L Lim¹, G.S. Hong ², B.J. Hangook³⁺

¹ 동의대학교 신소재공학, ² 동의대학교 미래자동차 소재부품사업단 ⁺E-mail: jin25375@naver.com

Keywords: Grey cast iron, Metal Matrix Composite, Heat treatment, Wear properties

1. 서론

회주철은 일반적으로 내마모성 및 저렴하다는 장점이 있지만, 고온안정성 및 높은 질량으로 인한 단점을 가지고있다. 본 연구는 이를 해결하기 위해 회주철인 FC250 기지재에 TiC 강화재를 첨가해 용융가압함침 공정으로 금속 복합재료를 제조하였다. 또한, 금속 복합재료 제조 후 열처리를 적용시켜 열처리가 미세조직 및 기계적 특성에 어떠한 영향을 미치는지 연구하였다

2. 실험 과정

용융가압함침 공정을 통해 TiC/FC250 금속 복합재료를 제조하였다. 그 후 기계적 특성을 향상시키기 위해 austempering (900℃/30min Qil quenching→250/120min Air Cooling) quenching-

tempering (900℃/30min Water quenching → 200/30min Oil quenching) 열처리를 적용하였다. 미세조직 및 마모너비, 마모 메커니즘과 상분석은 SEM,XRD,EPMA를 통해 분석하였고 기지재와 복합재의 경도 분석은 비커스를 사용하여 측정하였다. 마모 시험은 Ball-on-disc 방식으로 진행하였고 마모 거리 150m, 마모 힘 50N, 마모 속도 400rpm의 조건에서 TiC의 높은 경도를 고려해 WC ball을 상대재로 사용하여 상온에서 진행하였다.

3. 실험 결과

Figure 1은 FC250 회주철과 TiC/FC250 금속 복합재료의 계면 분석을 위한 EPMA 분석 결과를 나타낸다. Figure 2는 회주철과 금속 복합재료의 열처리에 따른 마찰계수 그래프를 도시화 한 것이다. EPMA분석을 통해 금속 복합재료 제조 시 외부 상이나 결함은 관찰되지 않았고 계면에서의 이는 금속복합재료가 용융가압함침 공정을 통해 성공적으로 제조되었음을 나타낸다. 마모 시험 결과 기지재로 사용된 FC250에 비해 약 2배 낮은 마찰계수값을 관찰하였다. 열처리가 진행됨에 따라 미세조직이 pearlite에서 ausferrite, martensite로의 변태로 인해 경도가 향상되고, 내마모성이 향상되는 것을 확인하였다. Austempering 열처리된 시편에 비해 Quenching-Tempering 열처리 시 약 2배 낮은 마찰계수 값을 가진다.



Fig 1 EPMA mapping analysis of specimens before heat treatment: (a) FC-AS (b) TFC-AS. The white arrow represents graphite.



Fig 1. Average friction coefficient of FC250 matrix and TFC composites with different heat treatment.

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 용융가압함침 공정을 통하여 TiC/FC250 금속 복합재를 결함없이 성공적으로 제조하였고, 열처리를 통해 소재의 경도 및 내마모성을 효과적으로 향상시킬 수 있을것이라 생각된다.

참고문헌

[1] Lee, Y.-H et al. Mater. Charact. 2020, 162, 110202.

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

복합소재 수소 용기

* 윤영길

일진하이솔루스 ⁺E-mail: ijykyoun@iljin.co.kr

1. 서론

탄소섬유를 활용하여 만들어지는 탄소섬유 복합소재는 탄소저감, 경량화의 Trend에 따라 탄소섬유복합제를 활용한 다양한 Application에 적용되고 있으며, 이러한 Application중 고압수소용기에 적용시 요구되어지는 성능 및 용기의 구조, 인증, 시험방법 등을 알아보고 각국의 수소정책 및 모빌리티 시장에서의 활용, 시장 변화 등을 살표보고져 한다

2. 목차

2.1 일진하이솔루스 소개

2.2 복합소재 수소 용기

2.3 수소 Mobility 시장

3. 결론

탄소섬유 복합재를 활용한 다양한 Application이 있지만 이중 활발하게 적용되고 있는 고압 수소용기 분야는 안전을 기본으로 경량화, 효율화를 향상 하기 위한 연구와 개발을 끊임없이 진행 될 것으로 보이며 수소가 에너지원으로 적극적으로 활용 시 수소 모빌리티 시장에서의 탄소섬유 복합소재를 활용한 다양한 Application의 시장이 열릴 것으로 기대한다

바이오플라스틱 산업의 도전과 전망 Challenges and Prospectives of Korean Bioplastics Industry

*진인주

* In-Joo Chin⁺

¹ 인하대학교 고분자공학과, 한국바이오플라스틱협회 ⁺E-mail: ichin@inha.ac.kr

Keywords: Bioplastics, Biodegradable plastics, Circular economy, Bio-based plastics

요 약

바이오플라스틱 산업은 탄소중립 및 순환경제 달성을 위해 매우 중요한 국가적인 전략 산업이다. 특히, 기존 플라스틱 폐기물에 의한 환경 오염부하를 줄이고 물질순환을 이루는데 기여할 수 있는 생분해성 플라스틱과 석유계 원료 대신 바이오매스 원료를 사용하여 탄소 저감에 이바지할 수 있는 바이오매스 기반 플라스틱 산업 육성이 필요하다. 현재 한국의 바이오플라스틱 시장은 생분해성 플라스틱 제품 위주로 형성되어 있는데, 정부는 생분해성 플라스틱 페기물을 적절히 처리하여 자원 순환을 이루기 위한 인프라 구축의 필요성을 공감하고 규제특례 시범사업 을 통해 유효성 검증에 착수했다. 올해 초 유럽 연합은 포장 및 포장폐기물 규정(PPWR)을 제정·공포했으며 하반기에는 유엔 주도의 플라스틱국제협약 정부간 협상위원회 최종회의인 INC-5.2 회의가 예정되어 있어 석유계 플라스틱 및 바이오플라스틱과 관련한 산업 지형의 변화가 예상된다. 본 발표에서는 한국의 바이오플라스틱 산업의 현황과 당면한 도전을 살펴 보고 극복해야 할 과제들을 논의할 예정이다.

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

Sustainable Shock-Absorbing Polymers with Dynamic Crosslinks

Jaejun Lee

Department of Polymer Science and Engineering, Pusan National University +E-mail: jlee-pse@pusan.ac.kr

Keywords: shock wave, damping, dynamic covalent bond, supramolecular polymers

1. Introduction

The ability to dissipate high-strain rate stress waves from extreme events like high-speed impacts and explosions is crucial for structural integrity and safety. Traditional viscoelastic polymers struggle to respond effectively at such short timescales. Dynamic covalent and supramolecular chemistries offer reversible bond exchange mechanisms that enable rapid energy dissipation while maintaining structural stability. Here, we investigate lipoic acid-derived poly(disulfide)s and metal-ligand crosslinked polydimethylsiloxane (PDMS) with tunable exchange rates. Using laser-induced shock waves, we demonstrate their superior damping performance, selfhealing, and recyclability, presenting a promising approach to sustainable, high-performance energydissipating materials.

2. Experimental Methods

2.1 Material preparation

For the synthesis of poly(disulfides)s, lipoic acid-based monomers were synthesized via esterification and carbodiimide coupling with alcohols/amines, then polymerized using photo-initiated ring-opening polymerization. Metal-ligand crosslinked polymers were prepared by two steps, conjugation of imidazole on the PDMS chain and metal ion exchange. Polymer synthesis was confirmed by NMR, FT-IR, and XPS studies.

2.2 Shock-absorbing test

Shockwave dissipation efficiency was evaluated using laser-induced shockwave apparatus by measuring transmitted pressure across the polymer specimen.

3. Results and Discussion

Four distinct linear poly(disulfide)s were synthesized, each differing in aliphatic chain length and hydrogen bonding characteristics. High-strain rate stress wave dissipation was evaluated using laser-induced shock wave experiments, revealing a strong dependence on glass transition temperature (Tg). Among the tested polymers, poly(disulfide) with the lowest Tg, exhibited superior stress dissipation. Performance was further enhanced by incorporating 1,8-Diazabicyclo[5.4.0]undec-7-ene (DBU), a strong base catalyst, into crosslinked poly(disulfide). Notably, poly(disulfide) containing 10 wt% DBU, dissipated over 70% of stress waves across all shock pressures, outperforming conventional materials like epoxy and polyurea while rivaling PDMS, despite its significantly higher Tg. Additionally, leveraging cyclic disulfide chemistry, these materials demonstrated rapid self-healing at ambient temperature and efficient chemical recyclability to monomers. [1] (Fig 1)

Metallosupramolecular PDMS also exhibited superior performance on shock-absorbing. Three different metal ions were used including Cu²⁺, Ni²⁺, Zn²⁺. Metals form metal-ligand crosslinking with imidazole moieties in PDMS linear chains. Among them, Cu²⁺-crosslinked polymers exhibited the highest pressure mitigation (22.1% at 1.49 GPa), surpassing Zn²⁺ (9.1%) and Ni²⁺ (4.7%) due to strain-sensitive Cu²⁺ coordination. Laser-induced shockwave tests and DFT calculations provided molecular-scale insights for next-generation impactresistant materials.



Figure 1. Poly(disulfide)s with enhanced shock-damping and recyclability [1]

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

This study demonstrates that dynamic covalent bonds and supramolecular crosslinks excel as shock-absorbing materials at high frequencies. Our goal is to establish design principles for dynamic polymers optimized for lowfrequency damping, effectively dissipating vibrations and shocks in everyday applications.

References

[1] Lee, J. et al. Mater. Horiz. 11, 5220-5229, 2024.

Acknowledgement

This work was supported by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (RS-2024-00448445)

질화붕소 나노튜브 세라믹 소재의 친환경 섬유화 및 우주응용 Eco-friendly fabrication of Boron nitride nanotube fibers for space applications

*장세규 ¹⁺ * Se Gyu Jang ¹⁺

¹ 한국과학기술연구원 ⁺E-mail: segyu.jang@kist.re.kr

Keywords: Boron nitride nanotube, fiber, eco-friendly, Space

1. 서론

우주 환경은 Galactic cosmic ray (GCR) 및 Solar energetic particles (SEPs)와 같은 강한 방사선이 존재함. 우주 경제 시대의 개막과 인류의 우주 진출을 위해서는 상기 방사선의 인체에 대한 영향성 평가 및 이를 효율적으로 차폐할 수 있는 차폐재의 개발이 필수적임

2. 본론

2.1 우주방사선의 인체 영향성

GCR 및 SEPs는 그 자체의 강한 에너지로 인해 인체에 영향을 미치나 이것들이 우주비행체 혹은 달, 화성 등의 지표를 타격하여 생성되는 2차 방사선 또한 발생시킴. 그 중 대표적인 것이 중성자이며 에너지에 따라 일반적으로 전자선, 감마선 대비 최소 4배, 최고 20배 더 큰 영향을 끼치는 것으로 알려져 있음

2.2 우주방사선 차폐재로서의 질화붕소 나노튜브

달 및 화성 환경은 중성자가 다량 존재하며 이의 효율적 차폐를 위해서는 감속 및 포획의 기작을 이용하는 것이 효율적임. 수소 및 붕소는 중성자의 감속 및 포획을 위해 최적의 원소로 이를 다량 함유한 고분자 및 나노소재를 이용해 인체 영향성을 최소화 하는 것이 가능함. 특히 질화붕소 나노튜브를 구성하는 원소의 절반이 붕소인 점과 수소를 다량 함유한 고분자 물질과의 복합소재화는 우주방사선 대응에 있어 매우 효율적인 수단으로 판단됨

3. 질화붕소 나노튜브 섬유화

질화붕소 나노튜브를 섬유화할 경우, 페브릭, 섬유 강화 고분자 등 다양한 산업적 중간재 제조가 가능함. 따라서 섬유화를 위한 기반 기술이 필요하며 CNT의 사례와 같이 액정방사를 통해 고강도의 섬유 제조가 가능함. 액정 형성을 위해서는 고농도에서의 고안정성 분산이 필요한데 이를 위해 수용성 용액에서 질화붕소 나노튜브 액정을 형성할 수 있는 분산제와 분산기술을 개발하였으며 이에 대해 소개하고 제조된 섬유가 우주응용 기술에 활용될 수 있는 가능성을 제시하고자 함.

4. 결론 및 향후과제

질화붕소 나노튜브 섬유화를 통해 고강도, 고강성의 섬유강화 고분자 복합소재를 개발할 경우 현재 널리 사용되고 있는 알루미늄 내장재 대비 뛰어난 방사선 차폐성 구현이 가능할 것으로 판단됨.또한 경량화가 가능하여 발사 비용 절감이 가능할 뿐만 아니라 우주 미션 기간을 최대화하여 우주개척의 효율성을 극대화할 수 있을 것으로 판단됨.

고분자의 바이오유래 확인 분석법 및 생분해도 평가 • 인증 소개

Introduction to bio-based polymer identification methods and biodegradability evaluation and certification

*신은호 ¹⁺, 문창헌 ¹, 진용범 ¹, 강솔님 ¹ * Eunho SHIN ¹, Changheon MOON ¹, Yongbeom JIN ¹, Solnim KANG ¹

> ¹ (재)KATRI시험연구원 ⁺E-mail: ehshin@katri.re.kr

Keywords: Biobased carbon contents, biodegradability evaluation, certification.

1. 바이오고분자 평가 및 인증의 필요성

기후변화가 점점 심각해지면서 탄소중립은 인류의 선택이 아닌 필수 조건으로 바뀌고 있다. 바이오유래 고분자, 생분해성 고분자 역시 탄소중립의 한 축으로 중요한 부분이다. 바이오유래 고분자, 생분해성 고분자 사용 촉진을 위해 관련 평가 및 인증제도가 도입되어 시행되고 있지만, 기업 및 소비자들이 관련 인증을 잘 알지 못해 정보를 제공하고자 한다.

2.바이오 유래 고분자 확인 및 인증

2.1 가속질량분석기(AMS) 이용 바이오유래 탄소 측정

석유 원료가 아닌 천연물로부터 추출한 성분을 이용해 만든 고분자를 바이오유래 고분자로 정의하고 있다. 이 바이오유래 고분자는 석유 유래 고분자와 화학구조 가 동일하여 통상적인 구조분석으로 확인이 불가능 하다. 석유 유래 고분자와 바이오유래 고분자의 유일 한 차이점은 구성 성분 중 방사성탄소동위원소 (Radioactive carbon; ¹⁴C)를 포함하고 있어, 이를 바이오유래 탄소라고 부른다. 바이오유래 탄소함량 측정이 가능한 기기 중 가장 정밀한 분석이 가능한 장비가 가속질량분석기이다.

2.2 바이오유래 소재 인증



Fig. 1.은 국내외 바이오유래 소재 인증 마크이다.

바이오유래 소재 인증으로 미국 농무부에서 Bioprefered 인증, 유럽에서는 OK biobased 및 DIN-Geprüft biobased 인증, 일본은 BiomassPla 인증, 그리고 우리나라는 환경부의 친환경 인증이 있다.

3. 생분해도 평가, 인증 및 지원센터

3.1 생분해도 평가 및 인증

바이오유래 고분자는 생성시 원료를 천연(바이오 매스)에서 가져왔는지 확인하는 것이며, 생분해성 고분자는 사용 후 폐기시 썩어서 이산화탄소, 물 및 바이오매스로 분해되어 자연으로 돌아가는 고분자를 말한다.

고분자가 생분해되는 조건은 산업용 퇴비와 혼합하여 썩는 정도를 이산화탄소 발생량으로 평가하는 것이 가장 대표적이다. 이외에도 토양, 쓰레기 매립장, 담수, 해수 조건 등의 다양한 폐기 환경에서 실제 썩는지를 확인하는 평가 방법이 있으며 이에 따른 다양한 인증들이 존재한다.

3.2 생분해도 평가 지원 센터

다양한 생분해 조건에 맞춰, 장시간 시험을 하기 위해 다양한 평가 장비가 필요하다. 이런 지원을 위해 산업통상자원부, 전라남도, 여수시의 지원을 받아 KATRI시험연구원은 여수시에 생분해성 고분자의 생분해도 평가를 위한 지원센터를 건축 중이며, 올해 7월경에 완공 예정이다.



Fig. 2. Polymer biodegradation evaluation center

4. 감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 "생분해성 플라스틱 표준개발 및 평가 기반구축"(과제번호 KPASS P0025762, IRIS RS-2023-KI002787) 과제 지원을 받아 수행된 연구임

첨단 소재를 위한 실크 플랫폼 Silk as a platform for advanced materials

최재원¹⁺ Jaewon Choi¹⁺

¹ 경북대학교 고분자공학과

⁺E-mail: jwchoi@knu.ac.kr

Keywords: silk fibroin, hydrogel, aerogel, metal-organic framework

1. 서론

누에고치에서 추출된 천연 고분자인 실크 피브로인은 생체 적합성, 조절 가능한 생분해성, 우수한 기계적 강도를 갖추고 있으며, 필름, 나노섬유, 하이드로젤, 에어로젤 등 다양한 형태로 가공이 가능하여 특히 바이오메디컬 응용 분야에서 높은 관심을 받아 왔다 [1]. 최근에는 웨어러블 전자기기, 에너지 변환 및 저장 시스템, 자극 반응성 소재, 포토닉스, 광학, 센서 등 최첨단 기술 분야에서도 실크가 유망한 소재로 주목받고 있다 [2]. 본 발표에서는 이러한 첨단 분야에서 실크 단백질의 활용 기술과 향후 전망에 대해 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 실크 기반 하이드로젤

생물학적 시스템에서 금속 촉매에 의한 타이로신의 산화 반응은 다이타이로신과 3.4dihydroxyphenylalanine(DOPA)의 형성을 유도할 수 있지만, 이 반응 경로를 선택적으로 조절하는 연구는 상대적으로 부족한 실정이다. 특히, 홍합 접착 단백질에서도 발견되는 DOPA는 접착 성질에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 펜톤 반응을 활용하여 실크 단백질 내 타이로신 잔기의 산화를 조절함으로써 다이타이로신과 DOPA의 선택적 생성을 유도하였으며, 이를 바탕으로 생체 접착제로의 응용 가능성을 평가하였다.

2.2 실크 유래 탄소 소재

실크 피브로인은 탄소 전구체로 활용될 수 있으며, 이는 실크의 베타시트 결정 구조가 열분해를 통해 sp² 혼성화된 탄소 구조로 변환되어 높은 정렬도를 갖는 그래피틱 탄소를 형성할 수 있기 때문이다. 또한, 실크는 생체재료 중에서도 질소 함량이 높은 편(~16%)으로, 펩타이드 결합이 풍부하여 키토산(~7%)보다도 더 높은 질소 함량을 가진다. 따라서 실크는 자체 도핑 능력을 갖추고 있을 뿐만 아니라, 화학적으로 반응성이 높은 아미노산 잔기의 존재로 인해 도핑 원자의 결합 구성을 효과적으로 조절하는 데에도 유리하다. 본 연구에서는 이러한 특성을 활용하여 실크 유래 탄소 구조 내에서 질소의 결합 구성과 함량을 조절하는 방법을 소개하고자 한다.

2.3 실크/MOF 에어로젤

금속유기골격체(MOF)는 일반적으로 결정성 분말 형태로 합성되며, 본질적으로 취약하고 단단한 특성을 가지고 있어 산업적 적용에 여러 기술적 한계를 초래할 수 있다. 특히, 분말 형태는 물질 전달의 제한, 취급의 어려움, 충전층에서의 높은 압력 강하와 같은 문제를 유발할 수 있다. 최근에는 이러한 문제를 해결할 수 있는 우수한 구조적 안정성, 유연성, 화학적 특성을 갖춘 MOF 기반 에어로젤이 많은 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 실크/MOF 복합체 에어로젤을 제조하여 염료 흡착 성능을 평가하고, 이를 통해 환경 정화 소재로서의 가능성을 검토하였다.

3. 실크 소재의 전망

실크 피브로인은 생체 적합성과 뛰어난 기계적 특성을 바탕으로 바이오메디컬 분야를 넘어, 친환경적이면서도 다기능적인 특성을 활용해 첨단 기술 소재로서의 가능성을 꾸준히 넓혀가고 있다. 실크의 나노구조를 정밀히 제어하고 기능을 최적화하는 연구가 계속 이어진다면, 그 활용 분야는 더욱 확장될 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] K. Numata, *Polym. J.* 52:1043-1056, 2020
[2] Z. Zhou et al. *Adv. Mater.* 30:1706983, 2018

사사

본 연구는 과학기술정보통신부 재원으로 한국연구재단 이공분야기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: 2022R1F1A1074303).

Structural Effects of Organic Cross-linkers on Infrared Transparent Sulfur Polymers

*Miyeon Lee¹, Hyo Bin Keum^{1,2} and Nam-Ho You¹⁺

¹ Carbon Composite Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST) ² Materials Science and Engineering, Hanyang University

⁺E-mail: polymer@kist.re.kr

Keywords: Elemental sulfur, Inverse vulcanization, Sulfur polymer, Infrared transparency

1. Introduction

Organic cross-linkers significantly affect the properties of sulfur polymers synthesized through inverse vulcanization. In particular, the structural characteristics of organic crosslinkers are a key factor in the infrared optical applications of sulfur polymers. Unlike elemental sulfur, organic crosslinkers exhibit various absorption patterns in the infrared region, which affect transmittance and the optical performance of the polymer. Most previous studies have employed olefin cross-linkers [e.g., dicyclopentadiene (DCPD)] to synthesize sulfur polymers. However, varying site reactivity often leads to side reactions and by-products, which degrade the optical properties of the sulfur polymers this study, thiol-based (1). In cross-linkers [disulfanyltricyclo[5.2.1.0^{2,6}]decane (TCDSH)] were introduced to effectively control the side reactions and byproducts during inverse vulcanization. The thiol crosslinkers readily and uniformly reacted with sulfur, minimizing side reactions and facilitating the formation of sulfur polymers. The optical windows fabricated from the synthesized sulfur polymers exhibited enhanced infrared (IR) transmittance.

2. Experimental

Synthesis of sulfur polymers The thiol cross-linker TCDSH used for inverse vulcanization with elemental sulfur was synthesized via a two-step method (2). The mixture of elemental sulfur and TCDSH were reacted in a 185°C oil bath for 1 hour. The cured sulfur polymers (S-TCDSH) were obtained as bright yellow, transparent glassy materials. All of the sulfur polymer windows and films were homogeneously fabricated through melt processing.

3. Results and Discussion

Optical properties of sulfur polymers The S-TCDSH windows prepared using melt processing showed high refractive indices ($n_{av} = 1.85 \cdot 1.77$ at 637 nm) for all tested sulfur feed ratios (70-50 wt %). In addition, high-quality images were obtained through 1 mm thick S-TCDSH window in both mid-wave infrared (MWIR) and long-waver infrared (LWIR) regions (Fig. 1). The improved optical properties of sulfur polymers are attributed to the structural features of the thiol cross-linker TCDSH, which contains a TCD core that does not absorb IR due to C=C

bonds, and a thiol group that prevents side reactions, thereby preserving optical performance.



Fig. 1. (a) Digital images and (b) LWIR images for human obtained through 1 mm thick S-TCDSH and S-DCPD windows (sulfur 70 wt%)

4. Conclusions

Herein, we report the synthesis of IR-transmissive sulfur polymer via inverse vulcanization with elemental sulfur and thiol cross-linker [disulfanyltricyclo[$5.2.1.0^{2.6}$]decane (TCDSH)]. The synthesized sulfur polymer (S-TCDSH) with high refractive index (*n*) and IR transmittance. In particular, in the LWIR region, making them suitable for human thermal imaging applications. These findings indicate that incorporating thiol groups is a successful comonomer strategy for designing IR-transmitting sulfur polymers.

References

(1) Onose, Y.; Ito, Y.; Kuwabara, J.; Kanbara, T. Tracking side reactions of the inverse vulcanization process and developing monomer selection guidelines. *Polym. Chem.* 2022, 13, 5486–5493.

(2) Suzuki, Y.; Higashihara, T.; Ando, S.; Ueda, M. Synthesis and Characterization of High Refractive Index and High Abbe's Number Poly(thioether sulfone)s based on Tricyclo[5.2.1.0^{2.6}]decane Moiety. *Macromolecules* 2012, 45, 3402–3408.

Acknowledgement

The work was supported by a grant from the Korea Institute of Science and Technology Institutional (KIST) Open Research Program (2E33504).

국저온 충돌 유도 기법을 통한 반결정질 고분자 내 자가 핵제 거동 및 특성연구 A study on the self-nucleating behavior and properties of semi-crystalline polymers via the cryogenic impact-induced method

* 이아정 ¹, 박태훈 ¹⁺ * A Lee ¹, T.H. Park ¹⁺

¹ 한국재료연구원

+E-mail: ajong0303@kims.re.kr, thpark@kims.re.kr+

Keywords: Biomass-derived polymer, Semi-crystalline structure, Self-nucleation effect, Crystallization

1. 서론

바이오매스 유래 고분자는 기후변화 문제가 대두됨에 따라 친환경 플라스틱 소재로 각광받고 있다. 그 중에서도 Poly(lactic acid) (PLA)는 플라스틱 성형 공정에서 결정화 속도가 느려 핵제의 첨가가 일반적으로 필요하다. 핵제는 매트릭스 내에서 핵 생성 지점을 제공하여 에너지 장벽을 낮추고 결정화를 촉진하는 역할을 한다. 그러나 이러한 첨가제는 재활용 과정에서 분리 공정을 복잡하게 만들어 추가적인 에너지가 요구되는 단점이 있다. 이에 본 연구에서는 친환경성을 유지하면서도 PLA의 결정화 거동을 개선하기 위해 첨가제 및 화학적 개질을 배제하는 방식을 채택하였다. 극저온 충돌 유도 기법은 물리적인 충격력을 이용하여 매트릭스 내에서 자가 핵제(self-nucleation agent)를 형성할 수 있으며, 이를 통해 반결정질 고분자가 나타내는 결정화도 및 결정화 속도를 향상시킨다. 이 과정에서 PLA의 화학적 골격에는 변화가 발생하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 핵제 없이도 PLA의 물성을 효과적으로 개선할 수 있는 기법을 제시하고자 한다.



Fig. 1. Schematic of the self-nucleation mechanism induced by cryogenic impact

2. 자가 핵제 형성

PLA 펠렛의 정상적인 충돌 유도를 유지하고, 실험 과정 중 발생하는 국부적인 열로 인한 구조적 변형을 방지하기 위해 극저온 상태를 유지하였다. 이를 위해 펠렛을 액화질소에 침지하여 취성을 높인 후, 회전 챔버 내에서 펠렛 간 충돌을 유도하였다. PLA는 충돌 횟수에 따라 분류되었다. 물성 테스트용 샘플은 압축 필름 및 사출 성형을 통해 제작하였으며, 용융 온도는 190℃로 고정하였다.



Fig. 2. Preparation of the cryogenic impact-induced specimens and process

3. 결론

극저온 충돌 유도 기법을 통해 형성된 자가 핵제 는 결정화 및 내열성에 상당한 영향을 미쳤다. 자가 핵제 효과로 인해 결정화도가 36.2% 향상되었으며, 사출 성형 시 최대 67.1%까지 증가할 수 있었다. 또한, 결정화 속도는 42.8분에서 8.5분으로 단축 되며 80.1% 이상 증가하였고, 내열성은 최대 141.4℃까지 향상되어 113.7%의 개선 효과를 나타 냈다.



Fig. 3. POM images showing increased crystal nucleation points due to the self-nucleation effect

Biodegradable Chitin-Based Polymers for Sustainable Energy Devices

Seok Ju Kang¹⁺

¹ Department of Energy and Chemical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST) ⁺E-mail: sjkang@unist.ac.kr

Keywords : Chitin, battery, piezoelectric, separator

1. Introduction

The widespread use of conventional fluorine-based electro-active polymers in energy-related applications raises serious environmental concerns due to toxic residues from their synthesis and decomposition processes. To mitigate these environmental impacts, it is crucial to develop eco-friendly and sustainable functional polymers. In this study, we explored the potential of biodegradable chitin, the second most abundant natural polymer after cellulose, for use as a nonwoven fiber separator in lithium metal batteries (LMBs) and flexible piezoelectric materials.

2. Manuscript Format

2.1 First Part

Fabrication and Characterization of Chitin Separators: A chitin-based nonwoven fiber separator was developed, demonstrating excellent electrolyte uptake and effective suppression of lithium dendrite growth. The resulting enhanced safety and performance were evaluated thoroughly.

2.2 Main Part

Performance Evaluation in Lithium Metal Batteries: Charge-discharge cycling tests confirmed that the chitinbased separator exhibited superior electrochemical stability compared to conventional commercial separators, maintaining stable long-term cycling performance.

3. Results and Discussion

A high-performance biodegradable piezoelectric material was fabricated from squid pen-derived chitin polymer. The chitin film exhibited outstanding ferroelectric properties and exceptional piezoelectric performance under mechanical pressure, rivaling conventional fluorine-based piezoelectric polymers. Additionally, this biodegradable chitin polymer completely decomposed within eight days by chitinase enzyme activity, highlighting its environmental sustainability.



Fig. 1. Fabrication process of piezoelectric transducer from biodegradable chitin.

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

This study demonstrates the promising potential of chitinbased polymers as sustainable and eco-friendly energy materials. Future research should focus on optimizing manufacturing processes and assessing scalability for commercial applications.

References

[1] K Kim et al. Nano Energy 48, 275, 2018.

Acknowledgement

This work was supported by Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement(KRIT) grant funded by the Korea government(DAPA(Defense Acquisition Program Administration))(No. 21-107-D00-009, Design and development of core materials and single cells for seawater secondary batteries, 2024)

복합재료 재활용을 통한 재생 탄소섬유의 소재 부품화개발 Development of Renewable Carbon Fiber as Material Parts by Recycling Carbon Composite Materials *손유정,김영수+

^{*} Y. Son, Y. Kim⁺

(주)하도FNC

+ E-mail: kyoungs2@hadofnc.com

Keywords: Carbon nonwoven, recycling composite, fiber residual polymer. 1. 서론

탄소 복합재료는 근래 에폭시를 제거하고 탄소섬유를 재활용하는 기술이 개발되었다. 하지만. 고온에서의 에폭시 제거는 탄소섬유의 물성을 저하시키고, 저온에서의 제거는 탄소섬유의 물성을 유지시키는 장점이 있다. 이때, 재활용될 수 있는 탄소섬유의 섬유장과 잔류 고분자 물질의 양은 새로운 소재화, 부품화에 있어서 중요한 공정, 제품 품질의 요소이다. 본 연구에서는 재활용 탄소섬유를 상용화 하기 위해 필요한 섬유장과 자류 고분자의 제거에 대한 실험을 통해서 공정에서 문제없이 생산 가능하고. 자동차 품질기준을 달성할 수 있는 재활용 탄소섬유 소재 부품화 개발을 목표로 한다.

2. 실험

2.1 탄소섬유의 잔류 고분자 제거

재활용 탄소섬유로 소재를 만들 때 탄소섬유의 잔류 고분자의 함량이 높을 수록, Carding공정 단계에서 발생되는 잔열로 인해 잔류 고분자가 반응하여 Carding이 제대로 이루어지지 않는다. 잔류 고분자를 제거하기 위해 아세톤을 사용하여 제거 후 물로 수세 및 건조과정을 통해 잔류 고분자를 제거하였다.

2.2 상용화를 위한 탄소섬유 섬유장 최적화

재활용 탄소섬유의 상용화를 위해서는 Carding 공정이 원활이 이루어지는 적정 섬유장이 중요한 조건이 된다. 섬유장이 짧을 경우 Carding단계에서 섬유들이 낙면하여 다음단계로 넘어가지 못하고, 섬유장이 길 경우 Carding 단계에서 기계에 섬유들이 감겨 다음단계로 넘어가지 못하는 현상이 발생한다.

적정한 섬유장을 찾기 위해 15/30/45/51/64/76mm의 섬유를 가지고 Carding 테스트를 실험하였다.~

3. 결과 및 고찰

3.1 상용화를 위한 재활용 탄소섬유의 특징

1차적으로 재활용 탄소섬유의 상용화를 위한 적정 잔류 고분자의 양을 TMA와 Caring을 통해 확인하였다. TMA분석을 잔류 고분자의 양이 1%이내일때, Carding을 진행한 결과 잔류 고분자의 영향 없이 공정이 연속적으로 이루어졌다. .(Table.1)

Table.1. 잔류 고분자 함유량별 Carding 결과

No.	탄소섬유 함유량(%)	잔류 고분자 함유량(%)	Carding성
1	96	4	Х
2	97	3	Х
3	98	2	Х
4	99	1	0
5	99.50	0.5	Ô
6	99.93	0.07	0

2차적으로 탄소섬유의 섬유장 15/30/45/51/64/76mm 를 적용하여 Carding공정을 진행하였다. 15/30mm의 경우 대분의 섬유가 낙면되어 Carding단계에서 섬유가 제대로 배열되지 않았다. 64/76mm의 경우 Carding 단계에서 섬유들이 감기면서 섬유가 제대로 배열이 되지 않았다. 45/51mm의 경우 Carding단계에서 섬유가 제대로 배열됨을 확인하였다.(Table.2)

<u>Table.2. 섬유장별 Carding 결과</u>

No.	섬유장(mm)	Carding 여부	비고
1	15	Х	섬유 낙면
2	30	Х	섬유 낙면
3	45	0	-
4	51	0	-
5	64	Х	섬유 감김
6	76	Х	섬유 감김

4. 결론 및 향후과제

상용화를 위한 재활용 탄소섬유의 특성여부를 TMA와 Carding 공정을 통해 확인하였다. 또한 상용화를 위한 잔류 고분자 함유량 및 섬유장의 조건을 찾아내었다.

향후 앞서 찾아낸 조건으로 만들어진 탄소섬유를 적용하여 특성에 따른 평가를 통해 소재를 개발 및 부품화를 진행하여 상용화를 추진할 계획이다.

후기

이 연구는 2024년도 산업통산자원부의 K-Carbon 플래그십 기술개발 사업의 재원으로 한국산업기술기획평가원 (KEIT) 의 지원을 받음 (과제번호: RS-2024-00409214).

Self-healing Polyimide with Dynamic Covalent Bonds and Aliphatic Siloxane Diamine

* H. Shin^{1,2}, D. Park², J.H. Park¹, H.C. Ko², N.H. You¹⁺

¹ Korea Institute of Science and Technology, ² Department of Materials Sceience and Engineering, Gwangju Institute of Science and

Technology

⁺E-mail: polymer@kist.re.kr

Keywords: Polyimide, Self-healing, Thermal Conductivity

1. Introduction

Polyimides have excellent thermal and mechanical properties and are applied for electronics and aerospace. Repeated deformation leads to frequent scratches and damage that reduces the lifespan of the devices. Selfhealing polyimides have been studied and developed to efficiently repair damage and extend the lifespan of the devices [1]. In this study, high self-healing efficiency was achieved by using a dynamic exchangeable disulfide bond and an aliphatic siloxane diamine for improved chain mobility.

2. Experimental

2.1 Synthesis of polyimide and fabrication of PI films: 4-Aminophenyl disulfide (APD) and siloxane-containing diamine were dissolved in *N*-methylpyrrolidone (NMP) with different molar ratios, and 4,4'-biphthalic anhydride (BPDA) was added. The mixture was stirred at room temperature for 24 h to prepare a PAA solution. The PAA solution was spin-coated onto a glass substrate, and polyimide films were fabricated by thermal imidization at 100, 150, 200, and 250 °C for 1 h and at 300 °C for 30 min under a nitrogen atmosphere.

2.2 Characterization and self-healing of polyimide: The structure of polyimide was confirmed using Fouriertransform infrared spectroscopy (FT-IR; Nicolet IS10, Thermo Fisher Scientific, USA). The thermal properties of the polyimide film were analyzed using thermogravimetric analysis (TGA; Q50, TA instrument, USA) and differential scanning calorimetry (DSC; Q20, ΤA instrument, USA). The surface of the polyimide was damaged using a scratch tester, and self-healing was performed above the glass transition temperature. The selfhealing efficiency of the polyimide was confirmed by optical microscopy and a universal testing machine (UTM; Instron universal tester 5567, Instron, USA) before and after self-healing.

3. Results and Discussion

The damage recovery rate of the polyimide before and after self-healing was calculated by observing OM. For the polyimide with the adjusted ratio of APD and siloxane-containing diamine to 5:5, the damage was completely healed (~99%) at Tg + 20 °C. The self-healing efficiency was also calculated by testing the tensile strength before

and after self-healing. The polyimide exhibited a selfhealing efficiency of up to 98.9%. The polyimide with the ratio of the two diamines in the ratio of 5:5 showed a 74% reduced activation energy compared to the polyimide with the ratio of 10:0, indicating that faster bond exchange was possible.

Table 1 Self-healing efficiency and activation energy of polyimides

A:S [*] (molar ratio)	T _g (°C)	Healing efficiency (%)	Activation energy (kJ/mol)
3:7	122	98.9	12.0
5:5	155	92.2	21.8
7:3	194	80.9	55.2
10:0	244	59.6	82.8
* APD:Siloxane-containing diamine (molar ratio)			

4. Conclusions

A self-healing polyimide was developed with improved chain mobility due to aliphatic diamine that contains siloxane, which facilitates the exchange reaction of disulfide bonds. The polyimide exhibited high self-healing efficiency with the reduced activation energy of dynamic covalent bond exchange reaction. In addition, simple and rapid self-healing is possible at a temperature that does not threaten the stability of electronic devices, which can extend the lifespan of electronic devices.

References

[1] B. Wan et al. J. Mat. Chem. C 10:11307-15, 2022.

Acknowledgement

This study was supported by the Korea Institute of Science and Technology (KIST) Open Research Program (2E33504).

고성능 섬유를 위한 질화붕소나노튜브의 액정과 그의 유변학적 거동에 대한 연구 Study on Boron Nitride Nanotube Liquid Crystals and their Rheological Behavior for High-performance BNNT Microfibers

*김영경 ^{1,2}, *임홍진 ¹, 최시영 ², 장세규 ¹⁺ * Y-K Kim ^{1,2}, H.J. Lim ¹, S.Q, Choi ², S.G Jang ¹⁺

¹ 한국과학기술연구원, ² 한국과학기술원, ⁺E-mail: segyu.jang@kist.re.kr

Keywords: Boron nitride nanotubes, Lyotropic liquid crystals, Rheological behaviors, Polarized optical images, Wet-spinning

1. 서론

탄소나노튜브 액정(CNT-LC)에 의한 섬유 및 필름과 같은 거시적 정렬체는 고밀도 구조에 의한 우수한 특성으로 인해 주목을 받고 있다.[1] 한편, CNT의 유사한 구조인 질화붕소 나노튜브 (BNNT) 은 높은 비강도, 내산화성, 높은 중성차 차폐 성능을 가진 세라믹 나노튜브로, CNT와는 또다른 소재로 각광받고 있다.[2-3] 하지만 고온에서 높은 내산화성으로 인해 고농도에서 라이오트로픽 액정을 형성하기에는 분산 안정성이 좋지 않아 여전히 어려운 목표로 남아져 있다.[4-6] 본 발표에서 BNNT 맞춤형 고분자 분산 안정제를 통해 최대 22 wt%의 고농도에서도 안정한 BNNT-LC를 제작할 수 있는 쉬운 과정을 제시하고자 한다. 이를 유변학/광학 분석을 통한 BNNT-LC의 상전이 거동 분석을 기반으로, BNNT의 정렬과 향상을 통해 기계적 강도가 향상된 밀도를 복합섬유를 제작할 수 있었다.

2. 본론

2.1 고분자 분산제 설계 및 BNNT-LC 준비

유독한 CNT-LC 시스템과는 다르게 손쉽게 다룰 수 있고 다양한 분야에 응용 가능한 BNNT 맞춤형 분산 시스템을 위해 친환경적이고 물에 분산 가능한 전략을 세웠다. BNNT 표면에 잘 흡착되면서 적절한 반발력에 의해 고농도에서도 안정적인 분산을 유지하는 (+) 전하를 지닌 고분자 분산안정제를 합성했다. 이는 기존 상용 고분자에 비해 높은 분산 안정성과 최대 22 wt%의 고농도에서도 안정한 분산상을 유지하였다. 편광현미경을 통해 농도에 따른 상전이 관찰 시 기존 고분자에 비해 설계된 고분자 기반 BNNT 용액이 더 네마틱 액정으로의 낮은 농도에서 상전이가 관찰되었다. 추가적으로 유변학적 분석을 통해 농도에 따른 점도 변화가 전형적인 액정 거동을 보였으며, 전단 속도에 따른 점도 기울기 변화를 통해 BNNT 용액이 네마틱 액정임을 명확히 증명하였다.

2.2 습식 방사를 통한 BNNT-LC 섬유 제작

BNNT-LC 섬유 제작을 위한 wet-spinning 공정에서는 유변학적 거동 분석을 기반으로 BNNT의 고배향 유도를 위해 고농도 네마틱 액정 용액에 높은 전단 속도를 인가하였다. 방사된 섬유의 물성 평가를 위해 다양한분석 기법이 적용되었으며,특히 편광현미경을 통한 복굴절 관찰 결과 비정제 BNNT 섬유는 미미한 복굴절 특성을 보인 반면, BNNT-LC 섬유는 뚜렷한 복굴절 패턴을 나타내었다. 이러한 복굴절 특성은 설계된 고분자 분산 안정제 기반 섬유에서 더욱 두드러졌다. 배향도가 우수한 코폴리머 기반 액정 섬유는 호모폴리머 기반 섬유 대비 약 6배 향상된 인장 강도를 나타내었으며, 이는 고품질 액정상 형성 및 효과적인 나노튜브 배향으로 증가된 패킹 밀도가 나노튜브 간 마찰력을 극대화하여 우수한 기계적 물성을 발현한 것으로 판단된다.

3. 결론

본 발표에서는 최초로 물에서 라이오트로픽 BNNT 액정과 이를 이용한 복합 BNNT 섬유 제작 방법을 제시하였다. 설계된 분산 안정제는 최대 22wt%의 고농도에서도 뛰어난 안정성을 부여하였다. 광학과 유변학적 분석을 통해 기존 고분자에 비해 낮은 농도에서도 BNNT 액정을 얻을 수 있었다. 이 액정을 기반으로 섬유의 배향, 밀도, 기계적 강도를 크게 향상시켰으며, 향후 고성능 구조용 복합재 개발에 중요한 기여를 할 것으로 기대된다.

참고문헌

- Davis, Virginia A., et al. Nature nanotechnology 4.12 (2009): 830-834.
- [2] Arenal, Raul, et al. Nanotechnology 22.26 (2011): 265704.
- [3] Zhi, Chunyi, et al. Advanced Functional Materials 19.12 (2009): 1857-1862.
- [4] Zhi, Chunyi, et al. Angewandte Chemie-International Edition 44.48 (2005): 7932-7935.
- [5] Lim, Hongjin, et al. Journal of membrane science 551 (2018): 172-179.
- [6] Kleinerman, Olga, et al. Langmuir 33.50 (2017): 14340-14346.

Novel Self-reinforced Chitosan Green Nanocomposite for Smart Food Packaging

*Pawarit Chumpon¹, Dong Woo Lee², Prabhakar M.N² and Jung-il Song²⁺ ¹Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, ²Research Institute of Mechatronics, Changwon National University, ⁺E-mail: jisong@changwon.ac.kr

Keywords : Chitosan Bio-resin; Nanofibers; Bio-composites; Smart food packaging;

1. Introduction

The demand for sustainable food packaging has driven research into biodegradable materials [1]. Chitosan, a natural biopolymer, offers excellent biodegradability and antimicrobial properties [2] but requires reinforcement for improved performance. This study develops a selfreinforced chitosan green nanocomposite, integrating chitosan bio-resin with chitosan nanofibers to enhance mechanical, thermal, and functional properties. The resulting material ensures superior durability, active functionalities, and fully biodegradable, making it ideal for smart food packaging. This innovation addresses plastic pollution while advancing eco-friendly packaging solutions, aligning with global sustainability goals in the food packaging industry.

2. Materials and methods

2.1 Materials: Chitosan flakes (MW ~600,000, 80–95% deacetylation) were obtained from Kwang Jin Chemical, South Korea. D-sorbitol and genipin were sourced from Samchun Chemical and Thermo Fisher Scientific Korea, respectively. Poly(ethylene oxide) (PEO) was purchased from Sigma-Aldrich, USA.

2.2 Preparation of chitosan matrix: A 2% chitosan solution was prepared in 2% acetic acid and mixed with 50% sorbitol at 70 °C for 30 minutes. After adding 0.1% genipin for cross-linking, the mixture was cast onto a petri dish and dried in a vacuum oven at 70 °C for 48 hours, forming a dark-blue sheet.

2.3 Preparation of chitosan nano fiber: A 6% of chitosan was dissolved into 90% of acetic acid and mixing with the 4% of PEO diluted in 50% acetic acid in a ratio of 80:20 by volume. The CS-PEO solution was used for make CS nanofibers through Electrospinning by NS1 Nano Spinner (INOVENSO, Korea) with 19 kV, speed 0.125 mL/hr. condition, using bamboo-nonwoven fabric as collector.

2.4 Preparation of CS/CS composites: A chitosan matrix/chitosan nanofiber (CS/CS) composite was fabricated via the solution casting method. Chitosan nanofibers were dispersed in a chitosan matrix solution, cast onto a Petri dish, and dried in a vacuum oven at 70 °C for 48 h. The resulting dark-blue sheet confirmed successful cross-linking and composite formation.

2.5 Characterization: Surface morphology and crosssections were analyzed using FSEM (TESCAN). FTIR spectra were recorded with an FT-IR-6300 (JASCO, Japan). XRD analysis was conducted using a Bruker D8 Discover with Ni-filtered Cu-K α radiation at 30 mA to examine crystallinity.

3. Results and Discussion

SEM images (Fig.1) confirm well-dispersed, continuous nanofibers, enhancing structural integrity of chitosan-PEO interactions. FTIR spectra (Fig.2) indicate successful cross-linking through shifts in OH and NH groups. UV-Vis analysis shows reduced transmittance, improving UV protection for food packaging. XRD patterns reveal increased crystallinity, enhancing strength and rigidity. These structural and functional improvements highlight the potential of this self-reinforced chitosan green nanocomposite for sustainable, smart food packaging applications, offering an eco-friendly alternative with enhanced mechanical properties and barrier performance.



Fig. 1. SEM images of the surface morphology of CS nanofibers.



Fig. 2. FTIR spectroscopy comparison of CS-matrix, CS nanofibers and CS-CS composites.

4. Conclusions

This study highlights the potential of self-reinforced chitosan green nanocomposites for improved functionality and sustainability of smart food packaging. Chitosan offers an eco-friendly alternative, and future research should optimize fabrication techniques and explore mechanical properties for advanced bio-nanocomposite applications in sustainable.

References

Cheng et al., *Alexandria Engineering Journal*. Vol.91, 2024.
 Bhowmik et al., *Food Packaging and Shelf Life*. Vol.46, 2024.

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education and Ministry of Science and ICT(No. 2018R1A6A1A03024509 and 2023R1A2C1006234)
Functional nanocomposites based on boron nitride nanotubes

Seokhoon Ahn^{1*+}

¹ Institute of Advanced Composite Materials, Korea Institute of Science and Technology ⁺E-mail: ahn75@kist.re.kr

Keywords : BNNT, nanocomposite, polymer composite

1. Introduction

Boron Nitride Nanotubes (BNNTs) are emerging as a revolutionary material in the field of advanced composites, owing to their exceptional mechanical, thermal, and neutron shielding properties. The unique ability of BNNTs to absorb neutrons makes them ideal for applications in environments with high radiation exposure, such as nuclear facilities and aerospace applications. Recent developments in BNNT purification and functionalization techniques have unlocked new potentials in enhancing the compatibility of BNNTs with polymer matrices. This research focuses on developing a novel polymer composite integrating BNNTs to achieve effective neutron shielding while also incorporating self-healing capabilities. The introduction of self-healing properties aims to extend the service life and reliability of materials used in extreme environments, promoting sustainability and costefficiency ..

2. Experiments

2.1 Materials

BNNTs were synthesized by plasma pilot in Jeonbuk National University. Self-healing polymer was synthesized and used as a matrix for self-healing BNNTs composites.

2.2 Purification of BNNTs

BNNTs were purified using poly(4-vinylpyridine) (P4VP) as a dispersing agent. Initially, raw BNNTs were dispersed in a P4VP solution prepared by dissolving P4VP in an appropriate solvent, such as ethanol, at a concentration of 1% w/v. The mixture was subjected to ultrasonication for 30 minutes to ensure homogeneous dispersion of BNNTs. Following sonication, the solution was centrifuged at 10,000 rpm for 20 minutes to remove impurities and amorphous boron. The supernatant containing dispersant-modified BNNTs was then treated by acid to remove P4VP. The purified BNNTs were then collected by filtration and dried in a vacuum oven at 60°C for 24 hours [1].

3. Results and Discussion

The resulting BNNT-self-healing polymer composite demonstrated significant neutron shielding capabilities, evidenced by neutron transmission experiments compared to the neat polymer. The self-healing performance was evaluated at various temperatures. The composite exhibited notable self-healing efficiency with improved healing observed at elevated temperatures, aligning with the expected thermal activation of the healing process. More analysis data and discussion would be presented.



Fig. 1. Purification process of BNNTs using P4VP.



Fig. 2. Self-healing BNNT composites.

4. Conclusions

This study successfully developed a BNNT-based polymer composite that integrates effective neutron shielding with robust self-healing properties, presenting a multifunctional material for use in radiation-prone environments. The combination of BNNTs' intrinsic characteristics with advanced functionalization techniques enabled the enhancement of both mechanical properties and neutron attenuation capabilities. Moreover, the incorporation of self-healing functionalities extends the lifespan and resilience of the composite, offering significant advantages for applications in nuclear and aerospace industries.

References

[1] S. Ahn et al. Appl. Surf. Sci. 555, 149722, 2021

Acknowledgement

This work is supported by Korea Institute of Science and Technology Institutional Program.

차량용 재활용 섬유강화플라스틱 재료 모델링 연구 A modeling study on recycled fiber reinforced plastic for automobile applications

*윤상재 ¹⁺, 남경주 ¹, 김동휘 ¹, 홍채영 ¹, * S.J. Yoon ¹⁺, K.J. Nam ¹, D.H. Kim ¹, C.Y. Hong ¹

¹ 현대자동차

+ E-mail: yoon6644@hyundai.com

Keywords: Recycled Fiber Reinforced Plastic, Integrated Computational Materials Engineering, Multiscale Modeling, Injection Molding

1.서론

최근 탄소중립 키워드가 국가 및 사회적 이슈가 되면서,산업 전반적으로 제품 전주기 (Life Cycle)에서 환경적 문제 최소화를 위한 사용 소재의 재활용 가능성 및 폐기 용이성에 대해 활발하게 검토하고 있다.

자동차에는 다양한 소재가 사용되고 있으며 [1], 그 중 플라스틱 재료의 재활용에 대해 살펴보면, 모재가 열가소성 수지인 경우 재활용은 유리하나 그것으로 재생산된 소재에 대한 성능 검증이 충분하지 않아 이것을 자동차에 재사용하기 위해서는 재활용 과정에서 변화하는 소재의 특성 이해가 필요하다.

특히 사출 공법으로 성형하는 섬유 강화 열가소성 플라스틱(이하 섬유강화 사출재)은 현재에도 자동차 부품의 양산 소재로 널리 사용되고 있기 때문에 ELV (End-of-Life Vehicles) 소재로 가장 먼저 떠올릴 수 있지만, 재활용 공정에서 섬유가 손상되어 물성이 저하되기 때문에 안전을 요하는 부품의 소재로의 재사용은 아직 소극적이다.

재활용 섬유 강화 사출재의 섬유 손상 기구를 추적하기 위해 사출 성형 공정을 살펴보면, 펠렛 형태로 사출기 호퍼(Hopper)에 소재를 공급 후 가열 실린더 안에서 스크류(Screw)를 통과하며 제품이 성형될 때 섬유가 필연적으로 손상되는데, 그 성형품을 분쇄하여 재활용 할 때의 분쇄 공정, 재압출 공정, 재사출 공정은 섬유 추가 손상의 요인이 된다. 하지만 어떤 공정이 섬유 손상에 가장 큰 영향을 미치는지, 그리고 그 손상 정도가 소재 물성 저하에 미치는 영향을 예측하는 정보와 기술은 아직 부족하다. 또한 섬유 강화 사출재의 물성을 예측할 수 있는 기술로 섬유 수지 간 형상 정보를 반영한 평균장 균질화 (Mean-Field Homogenization) 및 RVE (Representative Volume Element) 모델링 등이 있으나, 신재를 대상으로 검증되었을 뿐 재활용 소재를 모델링 한 사례는 드물다.

2. 본론

2.1 샘플 제조, 평가 및 분석

재활용 공정을 모사하여 아래와 같은 원소재를 펠렛 형태로 제조하였다.

Case ① : 신재 Case ② : 재활용재 100%, Case ③ : 신재50% + 재활용재 50%

준비된 소재를 활용하여 시편 및 단품을 사출 성형하여 기계적 물성 평가를 실시하였으며, 성형품 일부를 절개하여 섬유 배향 및 길이 분석을 실시하였다 (Fig.1, Fig.2).



Fig.2 소재 별 섬유 잔존 길이

2.2 재료 모델링

분석을 통해 얻은 섬유 배향 및 길이 정보를 토대로 섬유가 Packing 된 RVE 모델로 Stress-Strain (S-S) Curve를 도출하였다 (Fig. 3).



Fig.3 소재 별 섬유 잔존 길이

3.결과

재활용 소재의 비율이 높을수록 물성 저하 정도가 컸으며, 인장 강도 기준 Case ① 대비 Case ②는 36%, Case ③는 18% 각각 저하되었다. 물성 예측 재료 모델은 실제 시험 결과와 S-S Curve의 비교를 통해

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

정합성을 확인하였으며, 분석을 통해 얻은 실제 섬유의 분포 특성을 현실적으로 반영할수록 (섬유 분포 층, 길이 분포, 길이와 직경의 비율 등) 예측 정확도가 개선되었다.

4. 결론

(1) 본 연구에서 사용한 섬유 강화 사출재의 분쇄 재활용 시 저하되는 물성은 인장강도 기준 약 36% 수준이었으며, 이를 고려한 신재와의 조합 비율 선정 및 부품 형상 설계 최적화가 필요하다. 단, 부품 설계 변경 시 물성 저하만큼 두께가 증가하게 되면 플라스틱 부품의 경량화 감소, 투입 소재 증가가 수반되므로, 탄소중립적 차원에서 합리적 계산을 통한 Trade-Off 를 고려해야 한다.

(2) 사출재 부품을 분쇄 재활용 시 분쇄 및 재압출/재사출 공정에서의 섬유의 기계적 손상은 피할 수 없지만 각 장비가 재활용을 목적으로 제작된 것이 아니므로 소재 특성을 고려한 부속품의 재설계가 필요하다. 예를 들어 분쇄 장비의 경우 블레이드 (Blade), 압출 및 사출기는 스크류 (Screw)의 형상 변경 등을 고려해볼 수 있다.

(3) 섬유 배향 및 형상 (길이) 정보는 이미지 프로세싱을 통해 분석 가능하다. 예측 모델 정확도 향상을 위해서는 충분한 시료 수 및 합리적인 통계 모델이 선정되어야 한다.

참고문헌

[1] Cimprich et al., J. Clean. Prod. 433, 2023

Experimental and Numerical Investigation of the Mechanical Behavior and Failure Modes in Epoxy/Flax Composite Face Sheet and Epoxy honeycomb Core Lab-made Sandwich Panels

Haftamu Abraha G.¹, Dong Woo Lee², Jung-il Song*

¹Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University, Changwon, S. Korea,

²Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Research Institute of Mechatronics, Changwon, S. Korea

*Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, Changwon, S. Korea

*Corresponding author: jisong@changwon.ac.kr

Keywords : Epoxy honeycomb core, Sandwich panel, Flexural strength, Failure modes

1. Introduction

Sandwich panels are widely used in lightweight applications for their high strength-to-weight ratio, flexural stiffness, and energy absorption [1]. They consist of strong face sheets bonded to a lightweight core, preventing buckling and improving load distribution [2]. This study evaluates the mechanical performance of an epoxy/flax sandwich panel through three-point bending tests and FEA simulations to assess flexural strength, stiffness, and failure mode. The findings aid in optimizing natural fiber-reinforced composites for lightweight and sustainable engineering applications.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

The materials used included a flat aluminum mold coated with a release agent, Twill 2-2 flax fabric $(250 \times 250 \text{ mm})$ stacked in three layers, and an epoxy resin pre-mixed with a hardener. A peel ply and resin flow net ensured uniform resin distribution. The setup also included a vacuum bag sealed with double-sided tape and 5 mm polyurethane pipes for resin inlet and outlet channels.

2.2 Methods

A vacuum pump set to 0.08 MPa was used to draw the degassed epoxy resin to manufacture the face sheet, ensuring thorough impregnation of the flax fabric during the VARTM process. A 3D printer, a silicone mold, and a hot press were used to manufacture the core and assemble the sandwich panel, Figure 1.

Fig. 1. Schematic representation of the VARTM process for face sheet manufacturing (a) and the sandwich panel manufacturing process (b).



3. Results and Discussion

The flax/epoxy face sheets exhibited high strength (100 MPa) and stiffness (5.6 GPa), while the epoxy honeycomb core provided shear resistance (13 MPa, 0.4 GPa). The assembled sandwich panel showed a flexural strength of 59.5 MPa and a modulus of 3.3 GPa, aligning with theoretical predictions. Core crushing and face sheet delamination were the primary failure modes, with FEA confirming stress concentrations at the face sheet-core interface. These findings underscore the importance of optimizing adhesion and material selection to enhance structural integrity and durability in lightweight composites.



Fig. 2. Flexural properties of constituent materials and the sandwich panel (a). Panel before and after bending tests, showing failure modes (b, c, & d).

4. Conclusions, Significance and/or Future

This study investigated the mechanical performance and failure mode of a lab-made epoxy honeycomb core and flax/epoxy face sheet sandwich panel. The panel exhibited 59.5 MPa flexural strength and 3.3 GPa modulus, with failure due to core crushing and delamination. FEA confirmed stress concentrations at the face sheet-core interface, highlighting the need for enhanced adhesion, hybrid reinforcements, and durability in lightweight, sustainable composites.

References

- [1] ISBN 978-0521499118.
- [2] Haq, E. et al. Journal of Sandwich Structures & Materials. 10.1177/1099636203005001584.

[3] de Oliveira, L. Á. et al. Discover Mechanical Engineering. 10.1007/s44245-022-00006-z.

Acknowledgement

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Education (Nos. 2018R1A6A1A03024509, and 2023R1A2C1006234).

재활용 섬유 강화 열가소성 고분자 복합재료의 접합 성능 평가 Bonding Performance on the Recycled Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Polymer Composites

*이재영 ^{1,2}, 이지은 ¹, 이진우 ¹⁺, 김윤해 ²⁺ * J.Y. Lee ¹, J.E. Lee ¹, J.W. Lee¹⁺, Y.H. Kim ²⁺

¹ 한국소재융합연구원, ² 국립한국해양대학교 ⁺Co-corespondence E-mail: jwlee@kimco.re.kr, yunheak@kmou.ac.kr

Keywords: Sanding conditions, Recycled carbon fiber, adhesive bonding

1. 서론

비강성 등의 특성이 우수하여 널리 사용되던 열경화성 복합재료가 수명이 끝나 감에 따라 수십 톤의 폐기물이 나올 것으로 예상된다[1]. 이러한 열경화성 복합재료의 폐기물 관리를 위해 강화 섬유를 재사용하기 위한 연구가 많이 진행되고 있다[2-3]. 재활용 섬유의 경우 단섬유의 형태로 열가소성 수지와 함께 컴파운드 되어 주로 사용된다. 특히 Polyamide 6/recycled carbon fiber(PA6/rCF)의 경우 내충격성 및 비강도 대비 가공성이 우수하기 때문에 인해 많은 관심을 받고 있다. 단섬유 강화 열가소성 복합재료의 경우 용융 접합을 위해 샌딩과 같은 물리적 표면처리 시 섬유의 노출로 인해 접합 성능이 달라질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 복합재료의 접합전의 표면 처리상태에 따른 표면 거칠기 및 표면에너지에 대해 분석하였으며, 접합 성능에 미치는 영향에 대해 평가하기 위해 수행되었다.

2. 재료 및 실험 방법

본 연구에서는 PA6/rCF 컴파운드를 사출 성형을 통해 제작하여 사용하였으며, 접착제를 사용한 용융 접합 공정을 진행하였다. 먼저 표면처리 조건의 경우 80, 150, 320, 400 총 4개의 sand paper grit으로 분류하였으며 각 조건마다 2분간 샌딩 진행이후 80, 150 grit의 경우 샌딩 이후 표면 오염을 제거를 위해 ASTM D2093에 의거하여 320 grit으로 1분간 추가 샌딩 공정이후 접합 공정을 진행하였다. 접합 성능 테스트의 경우 단일 랩 전단 시험을 위해 ASTM D5868에 의거하여 실험을 진행하였다. 또한 고분해능 광학 3D 표면 분석기를 통해 샌딩 조건에 따른 PA6/rCF 복합재료의 표면 거칠기를 분석하였으며, 접촉각 측각기를 통해 표면에너지에 대해분석하였다.

3. 결과 및 고찰

먼저 sand paper grit에 따른 표면 거칠기에 영향에 대해서 평가하자면 320, 400 grit으로 샌딩 시 이런 거칠기 차이가 완만해지며 낮은 표면 거칠기를 보였다. 80, 150 grit에서의 경우 큰 샌딩 입자를 통해 샌딩 방향에 따라 표면 요철이 더 심하게 발생하였다. 표면 에너지의 경우 표면 거칠기가 낮아짐에 따라 더 높은 표면에너지를 보였다. 단일 랩 전단 시험에서 샌딩을 하지 않았을 때 가장 낮은 접합 성능을 보였으며, 높은 320, 400과 같은 높은 grit 으로 샌딩 시 높은 표면에너지를 통해 더 높은 화학적 결합을 했던 것으로 보이며, 80. 150 과 같은 낮은 grit 으로 샌딩 시 표면 요철 형성으로 인해 접합 시 표면적이 넓어짐에 따라 더욱 강한 물리적 결합 형성을 통해 높은 grit으로 샌딩 했을 때 보다 더 높은 접합 성능을 보였다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 샌딩 조건에 따라 PA6/rCF 복합재료의 표면 거칠기 및 표면 에너지에 대해 분석하였으며, 접착제와 접합 성능에 대해 평가하였다. 낮은 grit으로 샌딩 시 입자 사이즈가 커짐에 따라 표면 요철이 생기는 정도가 더 커졌으며, 이러한 표면 요철은 복합재료의 표면에너지를 감소시키지만 접합 시 더 넓은 표면적을 제공하게 되면서 강한 물리적 결합을 통해 더 높은 접합 강도를 보였다. 높은 grit으로 샌딩 시 표면 거칠기를 더 미세하게 만들기 용이하였으며, 이로 인해 표면에너지가 더 높아짐으로 인해 샌딩을 하지 않았을 때보다 더 높은 접합 성능을 보인 것을 확인할 수 있다. 다양한 섬유 형태 및 샌딩 시 최적의 sanding grit 분석을 통해 추후 복합재료의 접합 공정에 있어 접합 성능을 예측하는 데 있어 기여할 수 있을 것이라 판단된다.

참고문헌

- [1] Sun H et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2015;78:10–7.
- [2] Goethals F et al. Polymers 2024;16.
- [3] Akonda MH et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 2012;43:79–86.

후기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부의 탄소융복합소재부품 실증사업 [00436616]과 양산성능평가지원 (RS-2025-01002968)에 의한 연구임.

용매 공학을 통한 액정 탄성체의 분자 구조와 에너지 소산 간의 관계 규명 Investigation of the relationship between molecular structure and energy dissipation

in liquid crystalline elastomers via solvent engineering

*최진수¹, 전승렬², 유웅열¹⁺ * J.S. Choi¹, S.Y. Jeon², W.R. Yu¹⁺

¹ 서울대학교 재료공학부, ² 한국과학 기술원 ⁺E-mail: woongryu@snu.ac.kr

Keywords: Liquid crystal elastomer, Solvent engineering, Soft matter, Energy dissipation

1. 서론

액정 탄성체 (Liquid Crystal Elastomer, LCE)는 Mesogen이가교 결합된 고분자로, 분자 간 상호작용에 의해 결정 구조를 형성하여 일반 고분자보다 우수한 탄성 및 에너지 소산 특성을 나타낸다 [1]. 합성 시 사용되는 용매는 Mesogen 배열과 결정 구조에 큰 영향을 미치며, 이에 따라 LCE의 기계적 특성에 영향을 미친다 [2]. 본 연구는 다양한 극성의 용매가 LCE의 미세구조와 에너지 소산 능력에 미치는 영향을 분석하여, 최적의 LCE 설계 방향을 제시하는 데 목적을 두고 있다.

2. 시편 준비 및 실험 방법

2.1 LCE 및 LCE 복합 소재 합성: Thiol-Acrylate Michael Addition 반응을 통해 LCE를 합성하였으며, RM257을 Mesogen, EDDET를 고분자 체인, PETMP를 가교제로 사용하였다. 용매의 경우 극성이 상이한 다섯 가지 용매를 사용하였다.

2.2 분석 방법: Dynamic Mechanical Analyzer를 이용하여 온도 변화에 따른 저장 탄성률, 손실 계수, 상 변화 온도를 측정하였다. 단축 인장 시험을 통해 탄성률을 측정하고, 하중-제거 시험 (Loading-Unloading)을 통해 에너지 소산 능력을 분석하였다.

3. 실험 결과

실험 결과, 열-기계적 분석에서는 각 용매에 따라 유리전이온도가 변화하는 것을 확인하였으며 (Fig. 1), 이러한 변화는 용매의 극성 차이에 기인한 것으로 판단된다.



Fig. 1. Loss coefficient of LCEs

또한, 하중-제거 시험을 통해 초기 소산 능력과 정상 상태 소산 능력을 구분하여 분석하였다. 그 이유는 초기 소산 능력은 Mesogen의 회전에 따른 효과를 반영하는 반면, 정상 상태 소산 능력은 고분자 네트워크의 점탄성 특성에 기인하기 때문이다 [3]. 이 때 동일한 LCE 조성임에도 불구하고 용매의 종류에 따라 에너지 소산 성능이 10 배 이상 달라지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 용매가 LCE의 미세 구조 형성에 결정적인 역할을 수행함을 시사한다.



Fig. 2. Loading-unloading test of LCEs (left) Initial state, (right) steady-state

4. 결론 및 향후 과제

LCE 합성 과정에서 용매의 종류를 변경하더라도 LCE의 고유한 특성은 유지되었으나, 결정 크기의 차이가 발생하여 에너지 소산 능력에 영향을 미치는 것을 확인하였다. 향후 계획으로 특정 용매 조성을 활용하면 기존 LCE에 Miscible하지 못하였던 CNT 및 Nanoparticles를이용해 복합 소재로 제작할 수 있을 것이라 기대하고 있다.

참고문헌

- [1] Sun, Dandan, et al. Polymers. 11: 1889, 2021 [2] Traugutt N.A., et al. Saft Matter, 12:20, 7012, 7025
- [2] Traugutt, N.A., et al. Soft Matter. 13.39, 7013-7025, 2017
 [3] Merkel, Daniel R., et al. Polymer. 166: 148-154, 2019

후기

본 연구는 2025년 한국연구재단 및 과학기술정보통신부의 지원을 받아 수행된 연구 (NRF-2023R1A2C2006014, RS-2023-00261543)이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다. 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

고분자 종류에 따른 실란트의 내유성 비교 분석 Comparison of oil resistance of sealants depend on polymer compositions

*이동현 ¹, 김윤지¹, 권동준 ¹⁺ * Donghyeon Lee ¹, Yunji Kim ¹, Dong-Jun Kwon ^{1,2,+}

Department of Materials Science and Convergence technology¹, Gyeongsang National University +E-mail: djkwon@gnu.ac.kr

Keywords: Sealant, Oil resistance, polymer composition

1. Introduction

In the construction, aerospace, and mobility industries, various materials and components are assembled to form structural connections, with sealants used to fill the resulting gaps. Sealants enhance structural stability and durability, and their applications vary by industry-specific requirements [1]. Common types include polyurethane and polysulfide sealants. Polyurethane sealants offer excellent adhesion and mechanical strength, while polysulfide sealants are widely employed in aerospace and industrial structures due to their superior chemical stability and environmental resistance [2]. Therefore, this study investigated the inherent properties of each material.

2. Experimental

2.1 Evaluation of Sealant Properties

In this study, thermal analysis was conducted using Thermogravimetric Analysis (TGA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC). Mechanical properties were evaluated through tensile testing, and adhesive characteristics were assessed using the Lap Shear Test.

2.2 Evaluation of Oil resistance

Oil resistance was assessed by immersing samples in kerosene, a close analog to aviation fuel, for seven days. Chemical changes were analyzed via Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), surface morphology via Scanning Electron Microscopy (SEM), mechanical properties via tensile testing, and adhesive characteristics via the Lap Shear Test

3. Results and discussion

Tensile strength analysis showed that PSF had significantly lower strength than PU but exhibited higher elongation at break. PU also demonstrated superior adhesive strength. Fracture surface observations showed a clean fracture surface in PSF, whereas PU exhibited a rough fracture surface, suggesting that PU maintains adhesion through such a failure mode.

Oil resistance evaluation after kerosene immersion indicated better strength retention in PSF, with lower degradation rates in both tensile and adhesive strength. Weight change analysis revealed that PU sealant experienced a significant increase in weight, which nearly disappeared after drying. In contrast, PSF sealant exhibited minimal weight change, with a greater amount of residual kerosene remaining after the same drying period. These results suggest that PU sealant absorbs and subsequently releases a large amount of kerosene, leading to crack formation, whereas PSF sealant exhibits partial kerosene absorption, minimizing structural degradation.



Fig. 1. Caption in 1 line English only w/ a period.

4. Conclusion

This study analyzed the properties of PU and PSF sealants. PU sealant exhibited superior mechanical strength and adhesive properties but showed lower oil resistance. In environments exposed to chemicals or aviation fuel, PSF sealant is more suitable; however, it has lower strength. These findings suggest the need for further research to enhance the oil resistance of PU sealants or improve the strength of PSF sealants.

Reference

- [1] A. A. Donskoi et al. Polymer Science. 49(2):182-187, 2007.
- [2] S. Giannis et al. *Journal of Applied Polymer Science*. 108:3073-3091, 2008.

후기

This results was surpported by the Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education and the Ministry of Science and ICT (2020R1A6A1A03038697, RS-2023- 00211944, Glocal University(Gyeongnam Aerospace and Defense Institute of Science and Technology (GADIST)) project).



- 142 -

Metal and Carbon Nanomaterials for Electromagnetic Interference Shielding and Their Defense Applications

*Dong Su Lee¹⁺, Ho Kwang Choi¹, Soo Jin Cho¹, Sukang Bae¹, Byung Joon Moon¹, Yongho Joo¹ and Tae-Wook Kim² ¹ Institute of Advanced Composite Materials, Korea Institute of Science and Technology (KIST), ² Department of Flexible and Printable Electronics, Jeonbuk National University

⁺E-mail: d.s.lee@kist.re.kr

Keywords : EMI shielding, Nanomaterials, Carbon nanotubes, Metal nanoplates

1. Introduction

The development of electromagnetic interference (EMI) shielding materials is crucial for protecting electronic devices, ensuring signal integrity, and safeguarding human health. These materials also support the advancement of emerging technologies such as 5G and 6G telecommunications, electric vehicles, and wearable electronics. Additionally, the importance of EMI shielding materials has been emphasized for national defense applications, including anti-jamming and electromagnetic pulse protection. Significant progress has been made in the development of EMI shielding materials utilizing diverse nanomaterials [1-3]. However, for practical applications, metal-based thin films, foils, and meshes remain widely used in various advanced electronic components, including those for flexible printed circuit boards.

We introduce single-crystalline copper nanoplates (CuNPs) [4,5] and single-walled carbon nanotubes (SWCNTs)/PEDOT:PSS composite as EMI shielding nanomaterials [6].

2. Experiment

2.1 Metal nanosheets for EMI shielding

The CuNPs were synthesized uisng a conventional hydrothermal method with copper chloride dihydrate (CuCl₂·2H₂O), hexadecylamine, glucose, and iodine. The CuNPs mixed in chloroform were spray-printed on a polyimide substrate. Through random deposition and layer-by-layer assembly, a hierarchically structured porous copper film was formed.

For SWCNT/PEDOT:PSS composites, first, SWCNTs were dispersed in 1.5 wt.% SDS by bath sonication at a starting concentration of 0.4 mg/mL in DI water. The obtained suspension was further sonicated and centrifuged to remove large aggregates of SWCNTs. After centrifugation, the upper 60% of the supernatant was collected. The well-dispersed SWCNT suspension was then filtered through a vacuum filtration system using a cellulose acetate membrane to form SWCNT films of various thicknesses. The PEDOT:PSS aqueous solution was diluted with the same amount of DI water to reduce its viscosity. The SWCNT films were then soaked in the diluted PEDOT:PSS solution resulting in complementary spatial arrangement of inherently conducting materials.

3. Results and Discussion

The CuNP films exhibited excellent EMI shielding performance compared to dense copper or other materials of the same thickness. The films demonstrated shielding effectiveness (SE) values of 100 dB and 60.7 dB at thicknesses of 15 μ m and 1.6 μ m, respectively. The strong absorption of electromagnetic waves is attributed to the internal layer-by-layer stacked structure of the CuNPs and the multiple reflection effect within the material, as demonstrated by FDTD simulations. This behavior is reminiscent of MXene materials [3].

The SWCNT/PEDOT:PSS composite film also exhibited outstanding EMI shielding effectiveness while offering advantages such as being lightweight and flexible. The composite demonstrated both high electrical conductivity and exceptional shielding performance, achieving an EMI SE of up to 55.53 dB in the X-band range. The composite's impressive shielding efficiency is attributed to the excellent conductivity of both SWCNT and PEDOT:PSS, which work synergistically within the material. Furthermore, the films demonstrated remarkable stability, maintaining performance under demanding environmental conditions. The scalability of the SWCNT film further highlights its potential for large-scale applications.

3. Conclusion

Our findings indicate that CuNPs fims hold great promise as potential EMI shielding materials for use in emerging technologies. Also, SWCNT composite film demonstrates a lightweight, highly effective EMI shielding material suitable for various fields of future applications, including defense systems, aerospace, precision components, and smart wearables.

References

- [1] Y Yang et al. Nano Lett. 5:2131-2134, 2005.
- [2] Z Chen et al. Adv. Mater. 25:1296-1300, 2013.
- [3] F Shahzad et al. Science 353:1137-1140, 2016.
- [4] JW. Lee et al. Small 14:1703312, 2018.
- [5] HK Choi et al. ACS Nano 15:829-839, 2021.
- [6] TTL Nguyen et al. Carbon 230:119567, 2024.

Acknowledgement

This work is supported by Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement grant funded by the Korea government (KRIT-CT-22-028).

핵 위협 대응을 위한 국방기술과 복합재료 기술 Defense Technology and Composite Materials Technology for Countering the Nuclear threat

*가동하 ¹⁺, 정희수 ¹, 양희만 ², 이만종 ³

* D.H. Kah¹⁺, H.S. Jung¹, H.M. Yang², M.J. Lee³

¹ 국방과학연구소, ² 한국원자력연구원, ³ 건국대학교 ⁺E-mail: <u>dhkah@add.re.kr</u>

Keywords: Nuclear Threat Response Technology, Composite Materials Technology.

1. 서론

북한 핵 위협 및 방사성물질을 사용한 테러 또는 국내 원자력관련 시설 사고 시, 우리 군에서 사용할 수 있는 전력화된 무기체계인 휴대용 방사선 측정기와 화생방정찰차에 장착된 방사선 측정기와 몇몇 특수목적으로 구입한 상용장비들이 있다. 이 장비로는 핵폭발 주변에서 피폭된 우리 군의 피폭 선량을 적절하게 감시할 수 없고, 후속 의료조치도 어려운 현실이다. 그리고 폭발 원점 주변 오염지역을 신속하게 식별하거나 방사성 낙진의 확산을 탐지할 수 있는 능력이 매우 부족한 현실이다. 첨단 복합 재료는 경량성, 고강도, 다기능성으로 핵 위협에 대한 생존력 향상에 핵심적인 역할을 수행할 수 있다. 방사선 탐지, 방사성 물질의 제거, 방사선 차폐 기술을 중심으로 복합재료 개발 방향에 대하여 논의할 것이다.

2. 핵 위협 대응 기술

핵폭발은 핵분열로 인한 열복사, 방사선, 폭풍충격파 등 다양하고 다면적인 위협을 초래하며 특히 방사성 물질은 군인과 장비에 즉각적이고 장기적인 손상을 초래한다. 이러한 효과를 완화하기 위하여 방사선 오염 탐지, 제거, 차폐 기술은 특히 중요하다.

2.1 탐지 기술

핵폭발이 발생하였을 때, 인명 구조와 부상자를 처리하기 위해서는 사전에 피폭정도를 알고 대량의 환자를 신속하게 구분하기 위한 기술이 필요하다. 또한 핵폭발 지점의 고 방사능 오염지역을 통제해야 하며 방사성 낙진입자의 확산을 감시할 수 있는 탐지 기술이 필요하다. 현재 산학연 주관 미래도전 국방기술 과제로 페로브스카이트 소재를 활용하여 고감도 방사능 탐지기를 개발하고 있다. 그림 1은 고품질 단결정 소재와 대량 합성을 위한 결정기술을 보여주는 사진이다.

방사선 탐지를 위해서는 선택성, 감도, 안정성, 복잡한 환경에서 내구성 있는 복합재료를 활용한 탐지 시스템 개발이 필요하고 야전 환경에서 사용 가능하도록 개발 되어야한다.



Fig. 1. Perovskite Crystals for Radiation Detection.

2.2 제염 기술

위험한 방사성 입자의 확산을 막고, 군사적으로 중요하거나 장비 또는 시설의 오염과 국민의 안전을 심각하게 위협하는 방사성 물질을 신속하게 제거하는 기술이 중요하다. 특별히 오염 후 쉽게 벗겨낼 수 있는 복합재료 코팅 개발을 연구하고 있으며 2차 폐기물 감소와 제염과정을 효율적으로 하기위한 연구가 진행 중이다. 그림 2는 민군겸용기술개발 사업으로 진행 중인 '스마트 제독코팅제 기반 광범위 방사성 오염 표면 신속 제독 신기술 개발'과제의 개념도이다. 방사성 낙진의 주요핵종으로 오염된 표면을 신속하고 효과적으로 제거할 수 있는 박리형/분사형 제독코팅제 제조기술을 확보하기 위하여 연구를 수행 중이다.



Fig. 2. Concept Diagram of Smart Decontamination Coating Technology.

2.3 차폐 및 방호 기술

마지막으로	방사능	오염	지역에	서 주요	임무를
수행하거나,	중요한	전략	·자산을	방사능	피폭에

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

보호하기 위하여 방사선 차폐 기술이 중요하다. 그림3은 방사선 피폭량을 모니터링 하면서 고선량 지역에서 사용할 수 있는 차폐기술 개념도이다.



Fig. 1. Concept Diagram of Intelligent Radiation Shielding Technology.

고선량의 감마선 위험지역에서 방사선을 차폐하려면 원자번호가 높은 물질이 필요하고, 핵연료 유출 등 중성자를 차폐하기 위해서는 원자번호가 낮은 물질이 필요하다. 이러한 물질은 무게가 매우 무거워서 의복형태로 만들기가 매우 어렵고 장갑차량의 도움이 필요할 수도 있다. 또한 핵방사선 위협뿐만 아니라 핵폭발 시 발생하는 폭풍충격파, 열복사와 고고도 핵폭발 때 발생하는 EMP로 인한 피해를 최소화 하기위한복합재료를 활용한 방호 기술의 개발은 필수 적이다.

4. 결론 및 향후 과제

핵폭발은 군인과 군 무기체계에 심각한 위협을 초래하며, 이에 대한 효과적인 대응을 위해서는 다기능성,경량고성능,스마트기능을 갖춘 복합재료 개발이 필수적입니다. 이번 학회를 통하여 제안한 탐지-제거-방호의 주요 개발 방향을 중심으로 산학연 협력을 통하여 핵폭발 환경에서 군의 생존력을 획기적으로 향상시킬 수 있는 혁신적인 복합재료 기술을 확보해야 한다. 또한, 개발된 복합재료의 성능을실제 핵폭발 환경과 유사한 조건에서 평가하고, 관련 표준 및 시험 방법을 마련하는 것도 중요하다. 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

다중위협 방호용 나노복합 적층소재기술과 실용화 연계를 위한 성능평가기법 소개

Introduction to Multi-Threat Protective Nano-Composite Laminated Material Technology and Performance Evaluation Methods for Practical Application *진영호

* Youngho Jin

¹ 중앙대학교 첨단소재공학과 ⁺E-mail: yhjin@cau.ac.kr

Keywords: Chemical agents, protective materials, decontamination technology, porous nanocomposite materials, performance evaluation, AI-based optimization

1. 서론

최근 화학 및 생물학 작용제(Chemical & Biological Agents, CBA)에 대한 위협 증가와 이상동기 범죄(Stab Crime)의 증가로 인해, 현장 대원 및 국민들의 생명과 안전을 보호할 수 있는 첨단 보호소재 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 화학작용제 보호 및 제독을 위한 다층 신소재 기술과 성능 평가 기법을 소개하며, 방탄 및 방검 위협에 대응할 수 있는 보호소재와 성능평가 기법을 제시한다. 특히, 촉매 기반 제독소재, 다공성 나노복합소재, 스마트 박막 및 멤브레인 기술, 섬유강화복합재료 등을 활용한 물리적 위협 보호 소재 연구결과를 소개하며, 다중 위협 통합 방호를 위한 다층 보호소재 개발 방향을 제시한다.

2. 다중위협 보호소재 개발

2.1 화생방위협 방호소재

화생방 위협을 효과적으로 방호하기 위해 다양한 다공성 흡착소재, 직물형 흡착소재, 멤브레인을 및 독성물질 분해 개발하여 보호 성능 성능을 확인하였다. 화생방 보호소재의 성능 평가는 (TD)GC/MS 분석법을 기반으로 한 침투 실험, 제독 효율 실험, 데이터베이스 검증 등의 방법을 적용하였으며, 실험 결과 다층 보호 소재가 기존 대비 95% 이상의 침투 저감 효과를 보임을 확인하였다. 또한, 친환경 촉매 기반 거품형 제독 시스템을 개발하여 기존 화학 제독제 대비 높은 분해 효율을 나타냈다.

본 연구에서 개발된 신소재는 국방 및 치안 분야에서 활용될 수 있으며, 향후 AI 기반 물질 최적화 및 빅데이터를 활용한 성능 예측 모델과 결합하여 보다 효율적인 보호 및 제독 시스템을 구축할 예정이다.

본 연구에서 개발된 신소재는 국방 및 치안 분야에서 활용될 수 있으며, 미래 신종 화학작용제 및 생물학적 위협 대응 기술로의 확장이 가능하다. 향후 AI 기반 물질 최적화 및 빅데이터를 활용한 성능 예측 모델과 결합하여, 보다 효율적인 보호 및 제독 시스템을 구축할 예정이다.

2.2 물리적 위협 방호소재

물리적 위협 방호소재는 각각 Hard Armor와 Soft Armor로 개발 중이다. Soft Armor는 기존의 아라미드. UHMWPE 등의 섬유와 유연고분자를 복합화하여 개발 중이며, Hard Armor는 이들 섬유와 열경화성/열가소성 고분자 기지상을 활용한 섬유강화복합재료로 개발 중이다. 섬유와 기지상의 계면 강화를 위해 CNT. 그래핀 등의 분산상을 활용한 방호능력 향상 관련 연구가 진행 중이다. 섬유 및 분산상의 표면 기능성화를 통해 우수한 계면 특성을 부여할 수 있으며, 분산상의 분산성 향상을 위한 기법을 적용하고 있다. 또한, 후면 변형 에너지에 의한 피해(Blunt Force)를 최소화하기 위한 전단농화유체 및 점탄성(viscoelastic) 고분자를 활용한 후면 변형 에너지 저감 기법 등의 연구도 진행 중이며 연구결과를 소개한다.



Fig. Multi-threats protective laminated nanocomposites . 4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 화학 및 생물학 작용제 보호와 물리적 위협 방호를 위한 다층 보호소재의 개발과 성능평가 기법을 제시하였다. 실험 결과, 다층 보호소재가 기존 대비 95% 이상의 침투 저감 효과를 보이며, 촉매 기반 친환경 제독 시스템이 높은 분해 효율을 나타냄을

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

확인하였다. 또한, 방탄 및 방검 보호소재의 성능 향상을 위한 연구를 수행하여, CNT, 그래핀 등의 첨단 소재를 활용한 계면 강화 및 에너지 흡수 기법을 제시하였다. 본 연구 결과는 국방 및 치안 분야에서 실질적인 응용 가능성이 높으며, 향후 AI 기반 물질 최적화와 빅데이터 분석을 활용한 보호 및 제독 시스템 개발로 확장될 것이다. 이를 통해 미래의 복합 위협에 대응할 수 있는 고성능 보호 기술을 확보하는 데 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] J. Lee et al. ACS Appl. Mater. Interfaces **2022**, 14, 32522–32532.
- [2] M Choi et al. Adv. Funct. Mater. 2021, 31 (24), 2101511.
- [3] D. Ka et al. Adv. Compos. Mater. **2022**, 2022, 2128266.
- [4] Y Jin et al. Nanomaterials **2021**, 11 (4), 940.
- [5] D Choi et al. Chem. Eng. J. **2021**, 426, 130763
- [6] M Choi et al. npj Clean Water 2022, 5 (1), 48.

고체추진기관용 초고온 복합재 쉘실린더의 열구조적 거동에 대한 수치적 접근 Numerical Approach to the Thermo-Structural Behavior of Ultra-High Temperature Composite Shell for Solid Rocket Motors

*노영희 ¹⁺, 김진성 ², 정상기 ³ * Y.H. Ro¹⁺, J.S. Kim², S.G. Jung³

> 국방과학연구소 ⁺E-mail: dudangel@nate.com

Keywords: Ultra-high temperature composite, Thermo-Structural behavior, Multi-scale approach

1. 서론

본 연구에서는 고체 추진기관의 노즐에 사용되는 내 열-내삭마재의 초고온 하 물리/화학적 변화(physicochemoical transformations)에 의한 기본적인 열구조적 거동을 수치적으로 접근하고자 한다. 이를 위해 다상 (Multi-phase)복합재의 온도별 재료 특성치(탄성계수, 열팽창계수, 열전도도, 강도 등)를 멀티스케일 기반 단 계적 수치 모델로 제안하고, 이를 쉘실린더 구조물로 확장시켜 열구조적 거동을 분석하고자 한다.

2. 열구조 거동의 수치적 접근

2.1 기본 프로세스

초고온하 다상복합재 내부의 열화학적 반응에 의한 여러 상(섬유, 기지, 공극 등) 변화를 기초로 하여, 미시 적(micro)-중간적(meso)-거시적(macro) 거동으로 단계 별 접근하였다. 이를 위해 미세구조와 매크로 변수간 의 다차원 관계를 포함할 수 있는 점근적 평균화 (Astmptotic averaging)기법을 적용한다.



Fig. 1. Main process with the multi-scale approch

2.2 수학적 모델

온도가 상승함에 따라 다상복합재 내부의 열구조 변 형률은 다음과 같이 요약된다.

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl} \sigma_{kl}^{m} + \eta_{ij} \Delta P + \alpha_{ij} \Delta T + \beta_{ij} \Delta M + \chi_{ij} \Delta v_{c}$$
stress pore thermal moisture decomposition
swelling (1)

재료별, 위치별 해당 수식의 각 항에 대해 수치해석을 통하여 전체 변형거동을 분석한다.

3. 다층복합재 쉘 구조의 열구조 거동 분석

앞장의 수치화 기법을 이용하여 카본-페놀릭을 재 료로 하는 쉘 실린더 구조물의 온도 상승 시간 별 주 요 거동 및 파손모드 변화를 계산 후 도식화 하였다.



Fig. 2. Time-dependent deformations

4. 결론

고체추진기관용 초고온 복합재의 고온 거동을 보다 정밀하게 이해하기 위해, 열화학적 상변화를 포괄하는 열구조적 거동에 대한 수치적 모델을 구축하고 거동을 분석하였다.

VARTM과 접착형 스커트 제작 공법을 적용한 복합재 연소관 저가화 제작 공법 Cost-effective Manufacturing Method of Composite Motor Case Using VARTM and Adhesive Skirt Production Techniques

*김성권¹, 노태호¹, 김석주¹, 강승구¹⁺ *S.K. Kim¹, T.H. Rho¹, S.J. Kim¹, S.G. Kang¹⁺

> ¹ 한국카본 부품연구소 ⁺E-mail: sgkang@hcarbon.com

Keywords: Motor Case, VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding), Adhesive Skirt

1. 서론

추진기관의 연소관은 사용시 추진제가 연소하면서 발생되는 고온과 고압의 환경에서 사용되는 구조체이다. 높은 성능을 위해 최근 제작되는 연소관은 복합재로 제작되는 연소관이 주를 이루며, 필라멘트 와인딩 공법으로 제작된다.

현재 제작되는 연소관은 높은 신뢰도와 성능을 위해 제작 공법이 선정되었다. 따라서, 연소관 개발과 제작에 높은 비용을 소요하고 있는 실정이다.

본 논문에서는 해외 연소관 제작 사례를 바탕으로 저가화 연소관 제작 방법에 대한 연구를 수행하였다.

2. 연소관 제작 공법

2.1 VARTM 공법

VARTM은 공정간 온도 조절을 통해 수지의 선택폭을 넓힐 수 있어 소재의 비용 절감이 가능하고 작업자들이 수지에 장시간 직접적으로 노출 되지 않아 안전하다는 장점을 가지고 있다. 또한, 연소관의 경우 복합재 내부에 열전대(Thermocouple), FBG(Fiber Bragg Gratings) 센서를 삽입하여 제작 공정 중 발생되는 문제를 확인가능하다.

본 논문에서는 연소관 저가화 제작을 위해 수지를 제외한 섬유만을 필라멘트 와인딩을 실시하고, VARTM을 통해 수지를 주입하는 것을 제안한다. 단, 수지 주입시 고른 수지 분포를 위해 회전을 실시한다.

2.2 양방향 회전 성형

필라멘트 와인딩된 연소관은 성형간 수지 뭉침을 최소화하고 고른 수지 분포를 위해 낮은 속도로 회전하며 성형을 실시하고 있다. 또한, 성형간 이상 유무를 판단하기 위해 연소관 맨드릴 내부에 열전대를 삽입하여 내부의 온도를 계측한다. 이때, 회전하는 움직임으로 발생하는 열전대의 꼬임을 해소하기 위해 슬립링(Slip-ring)을 필수적으로 사용하고 있다. 하지만, 사용되는 슬립링은 연소관 크기에 따라 주문제작되는 구조물로 크기와 수량에 따라 제작 비용이 매우 비싸다. 따라서, 본 논문에서는 연소관 제작의 저가화를 위해 단방향으로 회전하며 성형하는 장치를 양방향으로 회전 하도록하여 슬립링을 사용하지 않고 연소관 내부의 데이터를 계측할 수 있도록하였다. 그리고, 사용되는 센서의 수의 제한이 없도록 하였다.

2.3 접착형 스커트 제작

연소관의 스커트는 발사체의 다른 부품과 체결되어 하중을 지지하는 역할을 하는 구조물이다. 국내에서 제작되는 연소관은 필라멘트 와인딩 중 스커트 구조물을 일체형으로 만드는 공법을 사용하고 있다. 본 논문에서 제안하는 공법은 스커트 구조물을 별도로 제작,가공하고 접착하는 접착형 스커트 제작 공법이다. 접착형 스커트는 압력용기 제작을 위한 분리형 맨드릴 회수시간이 단축되고, Y-조인트에서 발생되는 미접착을 최소화할 수 있는 장점이 있다. 또한, 연소관 성형시 진공백을 사용 가능하게 하여 돔(Dome)에서 발생될 수 있는 미접착의 요인을 줄일 수 있다. Fig. 1은 본 논문에서 제안한 공정 흐름을 나타낸다.



Fig. 1. Overview of the proposed process flow

3. 결론 및 향후 과제

발사체의 가격 경쟁력을 확보하기 위해 연소관 저가화 제작 공법에 대한 연구를 수행하였다. 추후 본 논문에서 제안한 저가화 연소관 제작 공법을 시험하여 기존 공법과 비교할 예정이다.

참고문헌

[1] SH Kwak et al. Compos Res. 34:88-95, 2021.

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

고고도 미사일방어체계와 초고온 복합소재 High Altitude Missile Defense System and Ultra-high Temperature Composites

*이형익¹⁺, 조용윤¹, 이정민¹, 이지은¹, 윤성태², 권향주², 박상효³, 구형회³, 노영희¹, 장혜진¹, 하동성¹, 이만영¹

* H. I. Lee¹⁺, Y. Cho¹, J. Lee¹, J. E. Lee¹, S. T. Youn², H. J. Kwon², S. H. Park³, H. H. Koo³, Y. Ro¹, H. Jang¹, D. Ha¹, M.Y. Lee¹

¹ 국방과학연구소, ² 데크카본, ³ 코카브 ⁺E-mail: hyungic7575@gmail.com

Keywords: Missile Defense, DACS, High Temperature, Composite, Carbon Fiber, Silicon Carbide, C/SiC.

1. 서론

최근 급변하는 국제정세와 주변국 미사일 역량의 급성장에 따라, 이에 상응하는 전쟁 억제력 확보를 위하여 미사일방어체계에 대한 소요 역시 급격히 커지고 있다. 미사일방어체계를 개발/구현함에 있어 여러가지 요소기술 중, 직격요격체의 성능을 결정짓는 위치자세제어(Divert and attitude control system, DACS)장치와 이에 필수적인 초고온 내열복합소재의 중요도와 관심이 증대되고 있다.

2. 미사일방어체계와 초고온 복합소재

미사일방어체계는 일반적으로 탄도탄 등의 종말단계에서 요격 방어하게 되는데, 효과적 방어체계 구현을 위해. 고도에 따라 하층(40km 이하)과 상층(40km 이상) 영역에서의 다층적 방어체계로 이루어 진다.[1] 이중, 다층 방어체계의 최상층인 고고도 영역은 공기가 희박하여, 기존의 날개에 의한 추진제/추력 유도조정 대신 기반의 특화됝 위치자세제어장치(Divert and Attitude Control System, 이하 DACS)가 요구된다. (Fig. 1, 국방부)



Fig. 1. Divert and Attitude Control System.

DACS의 밸브조립체는 추진제의 연소과정에서 폭발적으로 발생하는 초고온/초고압/초고속의 열유동을 체계요구시간 동안 특정방향으로의 안정적 제어 여부가 실제 요격성능을 결정하게 된다. 요격체의 우수한 위치자세제어 및 요격성능을 갖추기 위해서, 추진제/내열구조/성능설계 등의 요소기술과 함께, 극한환경에서 극단적으로 낮은 삭마율을 발현하는 초고온 내열소재 기술이 중요하다.

보통 상대적으로 짧은시간(수초) 동안의 DACS 추력제어를 위해서는 WRe과 같은 초고온 내열금속이 개발/적용된다. 하지만, 특정시간 이상의 장시간 위치자세제어장치 운용을 위해서는 몇가지 열/기계적물성 이슈들로 인해, 고성능 C/SiC 내열복합소재의 개발/적용을 적극적으로 고려하게 된다.[2]

Table 1 High Temperature Torch Test Result of C/SiC

0	•	
Vn.	00112	and
	CUIII	ICHN.
~ P		

	-		
Sample	Coating Thickness (um)	Retardation Time (sec.)	Ablation Rate (um/sec.)
Specimen 1	50	6	8.33
Specimen 2	45	15	2.83



Fig. 2. Scanning Electron Microscopy of C/SiC Specimen and High Temperature Torch Test(inset)

DACS 밸브조립체는 초고온의 화염(2000℃ 이상), 매우 높은 압력(1000 psi 이상), 빠른 유속(음속 수준)의 극한환경에 노출되지만, 정밀한 추력제어 및 요격을 위해서 DACS의 밸브조립체는 극도로 낮은 삭마율 등의 성능이 요구된다.

3. 결론

본 발표에서는 미사일방어체계의 개발 추이, 최근 C/SiC 내열복합소재의 기술현황 및 향후 발전방향에 대하여 논의한다.

참고문헌

- [1] 서민수, 마정목, KSFS vol. 30, no. 1, p. 31, 2021
- [2] T.M. Besmann, B.W. Sheldon, R.A. Lowden, D.P. Stinton: Science Vol. 253(1991), p.1104.

Achnowledgement

This research was supported by the Core Technology Project conducted by the Agency for Defence Developement(ADD)

방산분야 고온부품 적용을 위한 LSI 공정기반 세라믹 복합소재 개발 Development of LSIed ceramic matric composites for high-temperature parts application in the defense industry

*김수현 ¹⁺, 김세영 ¹, 한인섭 ¹, 방형준 ¹, 성영훈 ¹, 이슬희 ¹ * S.H. Kim ¹⁺, S. Kim¹, I.S. Han¹, H.J. Bang ¹, Y.H. Seong ¹, S. Lee ¹

> ¹ 한국에너지기술연구원 고온수전해연구실 ⁺E-mail: <u>kishing@kier.re.kr</u>

Keywords: Ceramic matrix composites(CMC), Liquid silicon infiltration(LSI), High temperature parts, Turbine engine, Scramjet engine

1. 서론

국방 및 항공우주 분야의 추진 시스템에서는 성능 및 효율향상을 위해 연소기, 터빈, 노즐 등 고온부의 내열 온도 및 고온 내구성 향상이 중요하다. 최근 들어 국내 국방분야의 극초음속 비행체 개발 및 터빈엔진 국산화 등의 이슈와 함께, 기존 금속소재의 내열 한계를 극복 가능한 세라믹 복합소재(ceramic matrix composites, CMC)의 개발 연구가 주목받고 있다[1-3]. 본 발표에서는 용융실리콘침투(liquid silicone infiltration, LSI) 공정 기반 CMC 소재를 적용하여 터빈엔진의 shroud, Scramjet 엔진의 연소기, 노즐 등을 개발한 한국에너지기술연구원의 연구사례를 소개한다.

2. LSI 공정 기반 CMC 제작공정 확립

LSI 공정 기반 CMC 제작공정은 탄소섬유나 탄화규소 (SiC) 섬유에 페놀수지와 나노분말이 포함된 슬러리를 함침한 UD 혹은 2D 직물의 프리프레그를 만드는 것으로 시작한다. 터빈엔진용 고온부품의 경우 장기 내구성을 확보하기 위해 SiC 강화섬유의 계면에 BN 및 SiC 다중코팅을 적용하여, 고온의 제작공정 중 섬유 손상을 방지하고 섬유와 기지 사이의 pull-out 유도를 통한 기계적 물성 향상을 유도한다. 3차원 형상 몰드 위에 프리프레그를 적층한 후 경화하여 FRP 성형체를 만들고, 이를 불활성 분위기에서의 고온 열처리 및 LSI 공정을 통한 기지상 치밀화를 수행하여 CMC를 제작한다. 그 후 상온 및 고온에서의 인장강도, 피로수명, Creep 등 다양한 평가를 수행하여 CMC의 기계적/열적 물성 DB를 확보하였다.

3. CMC Shroud 및 연소기 시제품 제작

CMC를 고온부품에 적용하기 위해서는 물성 시험용 시편과 같은 단순한 판상이 아닌 3차원 복잡 형상으로의 성형 기술을 개발할 필요가 있다. CMC Shroud 개발과정에서는 90도로 굴곡진 금속 몰드 위에 적층하는 경우 FRP 성형 및 고온 열처리 과정에서 면내/외 방향 수축으로 인한 형상변형이 발생함을 확인하였다. 이를 방지하기 위해 전용 그라파이트 몰드를 설계 및 적용하여 열처리 과정 중에도 시제품 내/외부면에 지속적으로 압착력을 가하도록 하였다. Scramjet 엔진의 CMC 연소기 및 노즐 개발과정에서는 내부에 재생냉각 유로 채널을 포함하는 구조체를 일체형으로 제작하는 연구를 수행 중이며, 특히 원형 단면의 연소관 및 노즐의 경우 필라멘트 와인딩을 통한 형상화 공정 조건을 확립하고 있다. 본 과정에서도 형상변형을 방지하기 위한 그라파이트 맨드렐을 적용하고, 열처리 과정 중 섬유방향 별 수축률 정보를 확보하여 시제품의 구조해석 및 설계에 적용하기 위한 연구를 수행 중이다.

부

문

일

반 강

Ģ



Fig. 1. CMC shroud prototype and burner rig test.



Fig. 2. CMC combustor parts for scamjet engine

참고문헌

G Shim et al. *Ceram Int.* 48:1532–1541, 2022
 JB Choi et al. *Compos Res.* 36:180–185, 2023
 SH Kim et al. *ASME Turbo Expo*, 2024

후기

논문은 2024년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 22-107-F00-002(KRIT-CT-23-039), 극초음속 열차폐 경량구조 연소관 구조체 개발)

분자동역학 시뮬레이션을 활용한 C/SiC복합재 계면 형성을 위한 PyC 형성 및 증착 연구 Formation and deposition of PyC interface for C/SiC composites with Reax-FF molecular dynamics simulations

*정지원¹, *이정민², 윤군진¹⁺, 이만영², 이형익², * Jiwon Jung¹, Jungmin Lee², Gun Jin Yun¹⁺, Man Young Lee², Hyung Ik Lee²

¹ 서울대학교 항공우주공학과, ² 국방과학연구소, ⁺E-mail: <u>Gunjin.yun@snu.ac.kr</u> *Jiwon Jung and *Jungmin Lee are equally contributed to this work

Keywords: : C/SiC, PyC, Reax-FF, CVD, molecular dynamics

1. 서론

C/SiC 복합재는 극초음속 비행체의 모재로 사용되는 열방호 소재로 쓰이며, 계면에 PyC를 증착시켜 복합재의 성능을 향상시키는 연구가 최근에 활발히 이루어져 왔다 [1]. Reax-FF 분자동역학 시뮬레이션을 활용해 precursor로부터 PyC를 형성하는 연구 또한 최근에 이루어졌다 [2]. 이러한 방법론을 활용해 서로 다른 기체 조성에서의 PyC형성을 확인하고 실험 결과를 통해 이를 뒷받침 하였다.

2. Reax-FF MD를 활용한 pyC의 형성

2.1 초기 분자동역학 모델 설명 및 방법론:

Reax-FF는 기존의 all-atom 분자동역학 시뮬레이션과 달리 앙상블 중에 발생하는 화학 결합의 생성과 깨짐을 능동적으로 고려할 수 있다 [3]. 시뮬레이션은 1. 고온에서의 앙상블을 통한 Polycyclic Aromatic Hydrocarbons(PAHs)의 형성과 2. Carbon fiber로의 deposition의 두 단계로 구성된다 [2].

초기 모델은 CH4와 H2의 몰 비율이 2:1인 모델과 CH4와 N2의 몰 비율이 2:1인 모델로 두 가지가 존재한다. 각각의 밀도는 0.55g/cm³과 0.78g/cm³로 같은 압력 조건에서 해석되도록 설정하였으며, 3000K의 높은 온도에서 0.25fs의 time step으로 2.5ns동안 해석을 수행하였다. 이러한 높은 온도와 압력 조건은 분자동역학 시뮬레이션을 가속하기 위함으로 기존 문헌에도 이러한 조건이 활용된 바 있다.

2.2 PAH구조 형성 및 분석

시뮬레이션을 통해 형성된 PAH구조는 Fig.1에 표시되었으며, precursor들로부터 graphite와 같은 PyC구조가 형성된 것을 확인하였다. 질소가 혼합된 모델에서 보다 큰 구조체가 형성되는 것을 확인하였으며, 각 PAH 클러스터의 분자량 분포와 ring member를 분석하였다. 이러한 결과는 수소 원자의

경우 탄소 원자와 반응성이 높아 PAH구조의 형성을 방해하여 보다 작은 cluster를 형성하기 때문으로 해석된다.



Fig. 1. PAH structures from (a) methane & hydrogen model and (b) methane & nitrogen model.

3. PyC deposition 및 구조 분석

두 층의 graphene으로 구성된 carbon fiber 구조의 위에 PAH cell을 쌓고 2000K에서 1.5ns동안 NVT 앙상블을 통해 fiber위에 PAH구조를 적층하였다. 이러한 과정은 반복적으로 수행되었으며, 적층된 구조의 밀도와 결정화도를 분석하였으며,실험 결과와 비교, 검증하였다.

4. 결론

Reax-FF분자동역학 시뮬레이션을 활용해 서로 다른 기체 조성에서의 PyC층의 형성을 모사하였으며, 실험 결과와의 경향성을 비교하였다.

참고문헌

Sammaiah, et al. *AIP Conference Proceedings*. 2418:1, 2022.
 Xiao, C. et al. *Composites Part B: Engineering* 273:111266, 2024.

[4] Chenoweth, K. et al., *Journal of Physical Chemistry A*, 112(5):1040-1053, 2008. **후기**

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(2022M3H4A1A04096433)

부문 초청강연

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

복합재 및 풍력터빈 소재부품 개발을 위한 전문 시험센터 구축 및 시험기술 개발

Development of Test Center and Technology for Composite Materials and Components of Wind Turbines

*김지훈¹, 김진봉¹⁺, 정문규¹, 주근수¹, 오재철¹, 최현석¹, 강민규¹

* Ji-Hoon Kim¹, Jinbong Kim¹⁺, Munkyu Jeong¹, Geun-Su Joo¹, Jae-Cheol Oh¹, Hyeon-Seok Choe¹, Min-Gyu Kang¹

> ¹ 한국재료연구원 ⁺E-mail: jbkim@kims.re.kr

Keywords: Composite material, Test center, Wind turbine, Certification Test

1. 서론

최근 항공우주, 자동차, 재생에너지 및 해양 구조물 등 다양한 산업 분야에서 복합재료의 적용이 지속적으로 확대됨에 따라, 복합재료의 신뢰성 확보와 내구성 평가의 중요성이 더욱 부각되고 있다. 특히, 초대형 풍력 블레이드 및 대형 해양 구조물의 개발이 가속화되면서 복합재 구조물의 신뢰성 확보는 기술적 측면뿐만 아니라 사회적·경제적 관점에서도 핵심적인 요소로 작용하고 있다.

현재 유럽을 중심으로 복합재료의 소재-부분품-완성품에 이르는 전주기적 시험·인증 체계를 갖춘 종합시험기관이 운영되고 있으며, 이를 통해 복합재료의 품질 보증 및 산업 경쟁력이 강화되고 있다. 이에 대응하여, 한국재료연구원은 부안에 국내 최대 규모의 대형 풍력 블레이드 완성품 인증시험을 수행할 수 있는 시험 인프라를 구축하여 운영 중이며, 이를 더욱 확장하여 복합재료 산업 전반을 지원하는 소재-부분품-완성품 통합 시험·평가 체계를 마련하고 있다. 본 발표에서는 한국재료연구원이 수행 중인 풍력 핵심 소재부품 종합 시험기반 구축 사업의 진행 현황과 핵심 기술을 소개하고자 한다.

2. 본론

2.1 장비 및 설비 구축

기반구축 사업은 총 249.9억 원(국비 191.4억 원, 지방비 58.5억 원)이 투입되었으며, 2022년 1월에 착수하여 2025년 6월 완료를 목표로 추진 중에 있다. 본 사업을 통해 총 48종의 시험 및 가공 장비 구축을 목표로 하고있으며 현장 조립중인 2종의 장비를 제외하면 대부분의 장비가 구축 완료된 상태이다. 구축된 시험 장비는 크게 4개 분야로 구분되며 부분품 구조 시험 설비, 복합환경 시험 설비, 소재 물성 시험 장비, 물리분석 시험 장비로 구성된다. 이와 함께 복합재 시편 제작을 위한 워터젯 및 직물재단기 등의 가공 장비도 함께 구축되었다. 또한, 2024년 12월 17일 전북 부안에 관련 시험동 건물 준공을 완료하였으며, 현재 구축 완료된 장비의 안정적인 운용을 위한 최적화 및 시운전 작업이 진행 중에 있다.

2.2 소재/부분품 시험 기술 개발

기반구축 사업과 병행하여, 구축된 장비를 활용한 시험 기술 개발 사업도 2022년부터 착수하여 진행 중에 있다. 시험기술 개발 사업에서는 복합재 구조물의 부분품 및 소재단위에서의 신뢰성 평가를 위한 다양한 시험 기법을 개발하고 있으며, 주요 연구 분야는 다음과 같다. 첫째, 소재 및 부분품 시험 기술 개발을 통해 복합재 구조물의 파손 원인을 부분품 단위에서 정량적으로 분석할 수 있는 기술을 확보하고, 이를 실험적으로 재현하기 위한 부분품 구조시험 계획 수립 및 절차를 정립하고 있다. 둘째, 복합환경 내구성능 시험 기술 개발을 통해 복합재 해양 구조물 등 다양한 운용 환경에서 내구성능 변화를 예측 및 평가할 수 있는 시험 기법을 개발하고 있다. 특히, 국내 최초 강우 침식 손상 시험 장비를 도입하여 관련 시험 기술을 구축하고 있으며, 이를 기반으로 한 신뢰성 평가 서비스 제공을 목표로 하고 있다. 마지막으로 복합재 시험 및 분석 기술 고도화를 위해 레이다 간섭 영향성 평가 기술, 복합재 파괴 인성 데이터 확보, 고속 물성 획득 시험 기법, 비파괴 검사(NDT) 기술 등 다양한 시험·분석 기술을 개발 중에 있다.



Fig. 1. Full cycle testing stages from materials, parts, to finished products

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

3. 결론 및 고찰

2025년 6월까지 모든 기반구축이 완료되면 본격적인시험서비스운영이가능할것으로 예상된다. 이어서 2025년 하반기에는 구축된 시험 인프라와 확보된 다양한시험 기술을 활용하여, 국내 복합재 부품 및 소재의 평가 및 신뢰성 검증을 위한 체계적인 시험·연구 기반을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 복합재 구조물의 설계 최적화, 품질 향상, 신뢰성 평가 체계 구축이 가능해지며, 국내 복합재 산업의 기술 경쟁력 강화를 위한 핵심 연구·시험 기관으로 자리매김할것으로 전망된다.

후기

본 연구는 한국에너지공단 전력산업기반조성사업과 산업통상자원부산업기술혁신사업(No.202230300203 00) 의 지원을 받아 수행한 성과입니다.

K-멀티스케일 모델링: 나노복합재와 결함, 경계면, 계면상 K-multiscale modeling: defect, interface, and interphase in nanocomposites

*양 승 화 ¹ *S. Yang¹

¹ 중앙대학교 에너지시스템공학부 ⁺E-mail: fafala@cau.ac.kr

Keywords: Nanocomposites, Multiscale Modeling, Interface, Interphase, Defect

1. 서론

실리카, 탄화규소와 같은 유무기 나노입자를 비롯해 탄소나노튜브와 그래핀과 같은 저차원 나노카본이 첨가된 나노복합재에 강화재로 대한 연구는 2000년대를 기점으로 본격화 되었다. 나노복합재의 물성향상은 예상과는 다르게 많은 난관에 부딪히게 되었는데, 나노입자의 응집문제, 크기효과에 대한 규명, 나노카본과 고분자 간 계면의 불완전성 등은 현재에도 여전히 여러 학자들의 도전이 이뤄지고 있는 주제이다. 이에 따라 나노복합재의 물성에 미치는 상기한 인자들의 영향을 이론적으로 설명하기 위한 노력들이 경주되었다. 특히 분자동역학 전산모사라는 인실리코해석기법이 실제 실험을 대체할 수 있는 훌륭한 연구도구로 자리매김한 2000년대 중반을 전후로 하여 '나노복합재의 멀티스케일 모델링'을 주제로 한 수준 높은 연구결과들이 출판되었다. 우리나라 역시 이 시기 복합재 미시역학과 분자모델링기법을 연계한 연구결과가 출판되었으며, 크기효과, 불완전 계면, 분산도, 계면상 형성 등의 인자들을 고려할 수 있는 연구들이 꾸준히 출판되어 왔다

2. 나노카본 복합재 모델링

2.1 나노카본-고분자 간 경계면 불완전성

탄소나노튜브와 그래핀이 가진 가장 치명적인 일반적인 공업용 단점은 이들과 고분자와의 점이다. 좋지 못하다는 경계면특성이 이는 탄소공명구조 위에 산소, 수소, 질소 등의 원자등을 흡착시키는데 필요한 에너지를 제일원리 계산으로부터 도출한 연구에서 쉽게 결론을 얻을 수 있었는데, 공업용 고분자를 구성하는 이들 원소를 그래핀 표면에 흡착시키기 위해서는 반드시 외부에서 일을 해 주어야만 한다. 2012년 Yang 등[1] 은 무한한 길이의 무결점 탄소나노튜브가 첨가된 가로등방성 고분자 나노복합재 단위셀의 강성행렬을 예측하는 분자동역학 전산모사로 부터 나노튜브와 고분자 기지인 폴리프로필렌 간 경계면에서의 미끄러짐 현상이 매우 두드러짐을 보고하였다. 또한 이로부터 무결점 나노튜브가 첨가된 고분자 복합재의 물성을

균질화 해석을 통해 이론적으로 예측하기위해서는 강화재와고분자 간경계면에서의 불완전 결합 조건을 반드시 고려해야함을 확인하였다. 이에 따라 Mori-Tanaka 모델, Double inclusion model, Self-consistent model등과 같은 평균장 미시역학 이론에 대한 재조명도시작되었는데,특히계면에서의 불완전 결합 조건을 모사하기 위한 선형스프링 근사기법에 대한 연구가 활발히 진행되었다.

또한 나노카본이 가지는 불완전 경계면을 극복하기 위한 전략 중 하나인 공유 그래프팅의 효과를 규명하기 위한 분자동역학 해석 연구도 진행이 되었는데, 공유 그래프팅이 도입될 경우 계면에서의 하중전달특성은 분명히 향상된다. 그러나 공유 그래프팅이건 비 공유 그래프팅이건 탄소나노튜브의 표면을 기능기화하는 과정은 sp2구조를 와해시키기 때문에, 나노튜브 자체의 물성을 저하시키는 결과를 초래한다. 따라서 이 경우에는 소재 간 경계면 불완전성의 극복과 더불어 나노카본의 결함에 따른 물성 저하도 함께 고려해야만 하며, 자연스럽게 이들 두 인자의 영향을 모두 고려할 수 있는 멀티스케일 모델링기법의 연구로 이어졌다.

2.2 나노카본의 결함

2000년대 초반 M. Griebel[2] 을 비롯한 연구자들이 보고한 나노복합재의 분자모델링 및 물성예측에 관한 연구들은 모두 결함이 없는 나노튜브만을 고려했다. 그러나 나노튜브는 합성 이후 강화제로 첨가되기 이전 다양한 세정과정과 소성변형을 거치면서 결함이 발생하게 되며, 보다 정확한 물성예측을 위해서는 결함이 존재하는 나노튜브의 모델링이 필요하다. 등[3]은 2013년 '나노튜브에 존재하는 Yang TSW결함은 튜브와 고분자 간 계면 하중전달을 개선할 수 있다'는 매우 흥미로운 연구결과를 분자동역학 도출하였다. 여기서의 해석으로부터 결함은 2.1절에서의 결함과는 약간 다른데, 공유그래프팅에 따른 나노튜브의 혼성화가 인위적으로 설계되었다면, 공공, TSW결함 등은 합성과정에서 불가피하게 생성되는 근원적 결함이라고 할 수 있다. 결함생성 원인을 막론하고 결함에 의해 탄소나노튜브의 물성 자체는 감소하게 되며, 궁극적으로는 경계면물성

향상과 나노튜브 물성 저하라는서로 상반된 인자들에 의해 나노복합재의 물성은 큰 변화를 얻지 못한다는 결론이 가능하다. 이후 나노카본의 결함이 열전도 및 점탄성 등에 미치는 영향에 대한 후속연구들이 다른 연구자들에 의해 이어지게 되었다.

2.3 고분자 결정화 및 흡착에 따른 계면상

나노튜브의 표면기능기화나 공유그래프팅 유도는 상기한 이중효과로 인해 나노복합재 물성개선에 있으 큰 기대효과를 가져올 수 없을 것이라고도 생각할 수 있다. 그러나 탄소나노튜브와 같은 1차원 구조는 표면에만 원자가 존재하고 있어 크기효과를 극대화할 수 있는 구조이며, 이에 따라 고분자사슬이 나노필러 표면에서 결정화되면서 형성되는 계면상 (interphase)의 효과를 극대화할 수 있다. 2002년 Wei CY[4]가 수행한 분자동역학 해석결과에 따르면, 탄소나노튜브 표면에 형성되는 결정화된 상은 높은 밀도와 더불어 나노튜브의 축방향으로 결정화되는 경향을 가진다. 따라서 나노카본의 첨가는 고분자 내부에 고분자 기지와는 물성이 또 다른 새로운 상이 만들어지게 하는 역할을 하게 되는데, 나노카본의 계면기능기화나 결함, 공유그래프팅은 나노튜브와 계면상 간의 하중전달과 포논전달을 향상시킨다. 즉 불완전 계면 조건에서는 발현될 수 없었던 계면상의 물성이 향상된 소재 간 계면설계로 인해 비로소 활성화될 수 있는 것이다. 2022년 Yang[5]은 이러한 결함, 불완전경계면, 그리고 계면상의 상호영향을 고려한 멀티스케일 모델링기법을 개발하였으며, 나노튜브와 고분자 간 계면의 공유그래프팅을 유도한 복합재는 그렇지 않은 복합재에 비해 유의미한 물성개선 효과가 있음을 밝혔다. 또한 공유그래프팅이 도입된 나노복합재의 물성예측을 위해 Mori-Tanaka 모델과 같은 이론을 2상의 구조로 가정하여 적용하는 것보다는, 경계면과 계면상의 영향을 모두 고려할 수 있는 보다 엄밀한 물성예측 모델을 개발하여 적용하는 것이 필요함 또한 확인하였다.

3. 결론 및 향후과제

본 발표에서는 나노카본 복합재의 물성에 영향을 미치는 나노필러의 결함, 강화재-고분자 간 경계면, 그리고 고분자 사슬들이 결정화되면서 형성되는 경계상의 효과를 고려하기 위한 K-멀티스케일 모델링 기법에 대해 간략히 요약하였다. 현재까지 개발된 방법론은 나노튜브의 응집, 나노튜브의 굽힘형상 등을 고려하기 위한 방법론으로도 잘 확자되어 왔다. 그러나 여전히 물성예측 이론으로만 적용될 뿐, 나노입자의 표면처리 설계와 같이 재료공학적 설계와 복합재 미시역학에 기반한 구조-물성 상관관계 모델 간 완전한 결합이 이뤄지지는 않은 상태이다. 따라서 열정으로 이론적 연구자들의 정립된 여러 물성예측모델이 보다 유의미하게 기능성 나노복합재 설계과정에서 반영될 수 있는 새로운 아이디어들의 제시와 도전히 여전히 절실히 요구된다.

참고문헌

- [1] S Yang et al. Polymer. 53:623-633, 2012.
- [2] M Griebel, J Hamaekers. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 193:17-20, 2004.
- [3] S Yang et al. Carbon. 55:133-143, 2013.
- [4] W Chenyu et al. Nano Letters. 4:1949-1952, 2004.
- [5] S Yang. International Journal of Mechanical Sciences 220:107160, 2022.

후기

이 연구는 한국연구재단 중견연구자 지원사업에 의해 수행되었습니다(RS-2024-00340747).

샌드위치 복합재와 알루미늄 격자로 제작된 대형 안테나 구조물의 열응력 해석 FE-based thermal stress analysis of a large antenna structure made of sandwich composites and aluminum grids

*김혜규 ¹, 지우석 ¹⁺, 장성욱 ², 이명규 ², 김동영 ³ * H. Kim ¹, W. Ji¹⁺, S. Jang², M. Lee², D. Kim³

¹ 울산과학기술원 기계공학과, ² 한화시스템 기계시스템1팀, ³ 스페이스프로 우주방산사업팀 ⁺E-mail: wsji@unist.ac.kr

Keywords: Composite, Numerical analysis, Thermal stress

1. 서론

지대공 미사일의 구성 장비 중 다기능 레이더는 적기 탐색과 미사일의 중간 유도를 담당한다. 레이더 성능 향상을 위해 안테나부 구조물이 대형화되는 추세인데, 경량화를 위해 비강성이 높은 샌드위치 복합재가 도입되고 있다. 이러한 대형 복합재 구조물은 기계적 하중 뿐 아니라 고온 환경에서의 열응력도 고려해야 하나, 그 크기 때문에 시제품 제작 및 환경 시험에 제약이 있으므로 해석을 통한 건전성 평가가 필요하다. 본 연구에서는 샌드위치 복합재와 알루미늄 격자로 구성된 대형 안테나 구조물의 열응력 해석을 통해 고온 환경에서의 구조적 건전성을 평가할 것이다.

2. 구조해석

2.1 모델링

본 연구에서 사용된 샌드위치 복합재는 알루미늄 허니콤 코어와 탄소섬유/에폭시 스킨으로 구성되어 있다. 추가로 알루미늄 격자 및 탄소섬유/에폭시 블록 등의 부품이 부착되어 있다. 정확한 표면 상호작용을 위해 그림 1과 같이 샌드위치의 양쪽 표면을 두 장의 shell 요소로 모델링하고 TIE 기능으로 절점을 서로 연결하였다. 본 연구에서 사용된 소재 물성은 표 1과 같다.



Fig. 1. Two-layer shell modeling in this analysis.

2.2 경계조건 및 하중조건

대형 안테나 구조물이 운용중 태양광과 주변 기온에 의해 가열되는 상황을 가정하여 온도 변화 55℃를 모든 영역에 균일하게 가하였다. 구조물은 총 4개 지점에서 고정되며, 온도변화에 의해 고정부의 위치가 변하는 것은 무시하였다. 해석은 상용 소프트웨어 Abaqus/Standard를 통해 정적 해석으로 이루어졌다.

3. 결과

정적 열해석의 결과 그림 2와 같이 알루미늄과 샌드위치 복합재의 열팽창계수 차이에 의해 알루미늄 부품에 압축 응력이 가해졌다. 그 크기는 최대 197.7 MPa로 알루미늄의 항복강도 기준 안전율 1.21이었다. 복합재 내부에서도 열팽창 계수 차이에 의해 응력이 발생했다. 섬유 방향으로는 최대 250.6 MPa로 강도 기준 안전율 3.29의 값을, 전단 방향으로는 최대 29.98 MPa로 강도 기준 안전율 2.43의 값을 보였다.



Fig. 2. Thermal stress results in aluminum structure.

Table 1 Material properties used in the analysis

Composite skin	Honeycomb Core	Aluminum
<i>E</i> ₁₁ 60.19 GPa	<i>E</i> ₁₁ 2×10 ⁻⁴ GPa	E 70 GPa
<i>E</i> ²² 62.48 GPa	<i>E</i> ₂₂ 2×10 ⁻⁴ GPa	
<i>G</i> ₁₂ 3.73 GPa	<i>G</i> ₁₂ 0.345	G 27.6 GPa
ν_{12} 0.05	v ₁₂ 0.4	ν 0.27
α_{11} 3.0×10 ⁻⁶ /°C	α ₁₁ 23.6×10 ⁻⁶ /°C	α 23.6×10 ⁻⁶ /°C
α ₂₂ 3.0×10 ⁻⁶ /°C	α ₂₂ 23.6×10 ⁻⁶ /°C	

4. 결론

본 연구에서는 샌드위치 복합재와 알루미늄 격자로 구성된 대형 안테나 구조물에 대해 온도변화에 따른 열응력을 분석하였다. 금속 부품과 샌드위치 복합재 벽체 내부에 발생한 열응력을 모두 관측할 수 있었다.

후기

본 연구는 한화시스템의 수출형 MFR 개발사업의 지원으로 이루어졌습니다.

다중 코어 샌드위치 구조가 적용된 무인기용 복합재 레이돔의 설계 기법 연구 A Study on the Design Method for Composite Radomes of a UAV with a Multi-Core

Sandwich Structure

*이도엽¹⁺, 이재민¹, 황선영¹, 박재형¹, 문인우¹ * D.Y. Lee¹⁺, J.M. Lee¹, S.Y. Hwang¹, J.H. Park¹

> ¹ ㈜에이엔에이치스트럭쳐 ⁺E-mail: <u>dy.lee@anhstructure.com</u>

Keywords: , Radome, Multi-Core Sandwich Structure **1. 서론**

무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle) 탑재장치인 위성통신(SATCOM) 안테나, 합성개구레이더(SAR), 상부 및 하부 가시선(LOS) 통신장비 등의 원활한 임무 수행을 위해 레이돔은 전자기 신호 투과 특성과 온도 변화, 습기 침투, 조류 충돌, 낙뢰 피격 등 외부에서 발생하는 위협에 안테나를 보호할 수 있어야 한다. 특히 조류충돌에 가장 취약한 위성통신(SATCOM) 안테나의 보호를 위하여 다중 코어 샌드위치 구조를 이용한 복합재 레이돔의 설계 기법 연구 에 대하여 서술한다.

2. 레이돔 복합소재 및 다중 코어 영역

2.1 복합소재 레이돔 소재 선정

레이돔 소재의 선정을 위해 두 종류 이상의 열경화성 프리프레그 제품과 샌드위치 구조에 적합한 코어로 구성하였다. 프리프레그를 구성하는 섬유로는 E-glass선정하였다. E-glass의 경우 중량, 부피 대비 가격, 군용 장비에 적용, 화학적 또는 갈바닉 부식 저항 및 전기적 특성등의 장점을 가지고 있다. 코어의 경우에는 우수한 유전 특성과 레이더 주파수에서 전자기파 흡수 이점을 가진 폼 코어를 선정하였다.

2.2 복합재 다중 코어 샌드위치 영역

중심부 Window 영역은 조류 충돌 및 강도 허용치를 충족하면서 전파 투과 손실률을 최소화 할 수 있도록 단일 폼 코어가 포함된 샌드위치 구조를 적용하였다.

다중코어 영역은 조류 충돌에 비교적 쉽게 위협이 되는 영역으로 Fig.1.에 나타낸 SATCOM레이돔 전방부이다. 따라 전방부를 제외한 SATCOM레이돔의 구조는 단일코어를 적용하며 조류충돌에 취약한 전방부는 다중코어 영역으로 선정하였다.



Fig.1. Bird Strike Impact Location.

3. 해석 결과

단일 코어 샌드위치 구조와 다중 코어 샌드위치 구조의 조류충돌 구조성능 차이를 비교하기 위하여 시편으로 성능평가를 진행하며, 시험 전 성능 해석을 진행하여 어떠한 구조가 더 우수한지를 평가한다. 조류충돌 시험은 조류 속도, 중량, 피격 위치 등을 선정하여 출동 시험을 진행하며 이 때 사용되는 시험 조류는 젤라틴으로 모사하여 성능 해석을 진행하였다. 각각의 성능 해석 결과는 다음과 같다. 단일 코어로

작성된 모델은 Fig.2.(a)와 같이 코어 및 IML(Inner Mold Line)이 함께 파단 되었으며, 시간에 따른 변형량이 증가하는 것을 확인할 수 있으나 다중 코어 모델의 경우 Fig.2.(b)와 같이 코어만 파단 되었으며 시간에 따른 변형량이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 성능 해석 결과를 통하여 다중코어 구조가 조류 충돌에 구조적 안정성을 갖추고 있음을 확인할 수 있다.



4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통하여 다중 코어를 이용한 레이돔 설계를 연구하였고 조류충돌 구조성능 해석을 통하여 단일코어 보다 다중 코어 구조가 조류충돌에 더 안정적인 것을 확인 할 수 있었다. 추후 해당 구조를 적용하여 전자기적 해석과 시험을 통하여 최적의 다중 코어 레이돔 연구를 진행할 예정이다.

후기

본 연구는 국방기술진흥연구소 23-3차 무기체계 부품국산화 개발 지원사업(CS230023)에 의해 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

선박용 복합재 프로펠러의 충돌 특성에 대한 연구 A Study on the Impact Characteristics of Composite Propellers for Ships

*조광훈¹, 강민규¹⁺, 이우경¹, 박지상¹, 박석영¹, 최희영² *K.H. Jo¹, M.G. Kang¹⁺, W.K Lee¹, J.S Park¹, S.Y Park¹, H.Y. Choi²

> ¹ 한국재료연구원, ² HD 한국조선해양 ⁺E-mail: <u>medsgn@kims.re.kr</u>

Keywords: Composite propeller, High velocity impact, Composite laminate, Impact energy

1. 서론

복합재의 우수한 기계적 특성, 내환경성, 피로 저항성 및 감쇠 성능으로 인해 선박용 프로펠러 소재로 복합재료를 적용하는 연구가 시도되고 있다. 프로펠러는 해양 환경에서 부유물과의 충돌에 노출될 가능성이 높기 때문에, 복합재 프로펠러의 외부 충돌에 대한 영향을 평가할 필요가 있다[1,2].

본 연구에서는 Element 단위 시편 시험을 통해 리딩엣지 방향에서의 충돌 모사 및 복합재 적층 패턴 별 파손 특성을 분석하였다. 또한, 충돌 속도와 적층 구조가 복합재 프로펠러의 파손 양상에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 복합재 프로펠러 시편의 충돌 시험

2.1 선박용 프로펠러가 겪는 충돌 특성 정의

충돌 시험은 일반적으로 충돌 속도에 따라 저속 충돌(≤ 10 m/s)과 고속 충돌(>10 m/s)로 구분되며, 선박용 프로펠러가 겪는 충돌 속도는 고속 충돌 범위에 해당한다. 본 연구에서는 두 가지 충돌 유형에 따라 파손 양상과 에너지 흡수 방식에 차이를 확인하였다[3].

2.2 프로펠러 리딩엣지 시편 형상 설계

실제 선박용 프로펠러 운용 환경에서의 충돌 조건을 가정하여, 프로펠러 블레이드의 회전 속도 및 충돌 각도에 따른 충돌 속도를 산정하였다. 이때 충격 하중(Impact force)이 가장 높은 위치(블레이드 반경)에서의 리딩 엣지 곡률반경 값을 반영하여 충돌 시험용 시편 형상을 설계하였다.

2.3 리딩엣지 시편 충돌 시험 시나리오

리딩엣지 시편 충돌 시험은 2가지 시험으로 구성되어 있다.

Table 1 Impact test conditions for leading edge specimens

Test	Test variables	Fixed variables
Test 1	Velocity	Energy level
Test 2	Composite laminate pattern	Velocity

Table 1은 충돌 속도 레벨에서 저속 및 고속 충돌 조건의 파손 양상을 분석하는 목적이며, Test 2는 복합재 적층 구조가 파손 거동에 미치는 영향을 분석하는 목적이다.

2.4 리딩엣지 시편 충돌 시험 결과

Test 1 수행을 통해, 저속 충돌과 고속 충돌의 파손 양상이 다르며, 고속 충돌 조건 내에서의 파손 양상은 유사함을 확인하였다. Test 2에서는 적층 구조에 따라 시편이 받는 최대 하중 및 파손양의 차이를 확인할 수 있었다.

Table 2 Impact test conditions for leading edge specimen

Test	Velocity [m/s]	Target energy[J]	Total energy[J]
Test 1	20	800	673.11
Test 2	15	1000	760.97(Avg.)

3. 결론 및 향후과제

본 연구의 충돌 시험에 사용된 임팩터는 금속 소재로 제작 되었으나, 실제 해양 환경에서는 나무 등 부유물과의 충돌이 더 일반적이다. 특히 나무의 경우, 프로펠러와 충돌 시 자체적인 파손과 함께 충격을 전달하기 때문에, 본 연구의 실험결과와 다소 다른 양상을 보일 수 있다. 때문에 향후 연구에서는 나무 소재 임팩터를 활용한 시험을 통해 실제 환경에 보다 근접한 충돌 특성 분석을 수행할 예정이다.

참고문헌

Faisal islam et al. *Composistes Part C: open Access.* 8, 2022.
 L.S. Sutherland et al. Composites Structures. 188:197-208, 2018

[3] J.Jefferson Andrew et al. Compos Structures. 224, 2019.

후기

본 연구는 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업(No. 202130020120, 20223030020300)으로 지원된 연구 결과입니다.

무인기용 복합재 레이돔에 대한 내환경 성능 평가 기법 연구 A Study on the Environmental Resistance Performance Evaluation Method for Composite Radome of UAV

*박재형¹⁺, 이재민¹, 유대식¹ * J.H Park¹⁺, J.M Lee¹, D.S Yu¹

¹¹ ㈜에이엔에이치스트럭쳐 ⁺E-mail: <u>jaehyeong.park@anhstructure.com</u>

Keywords: Radome, Environmental Test, Structure, Unmanned Aerial Vehicle .

1. 서론

무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle) 탑재장치인 위성통신(SATCOM) 안테나, 합성개구레이더(SAR), 상부 및 하부 가시선(LOS) 통신장비 등의 원활한 임무 수행을 위해 레이돔은 온도 변화, 습기 침투, 조류 충돌, 낙뢰 피격 등 외부에서 발생하는 위협에서 안테나를 보호하고, 전자기파 투과 특성을 유지해야한다. 본 연구는 MIL-STD-810G 표준을 기반으로, Building Block Approach를 활용하여 레이돔의 내환경 성능을 체계적으로 평가하는 기법을 제안한다. 이 접근법은 시편단위에서 시작하여, 구성요소, 부품 조립체, 전체구조로 확장되는 평가 체계를 통해 레이돔의 설계 최적화를 이끌어내고자 한다.

2. 환경시험 시편 설계

2.1 복합소재 레이돔 소재 선정

레이돔 소재는 E-glass 프리프레그와 폼 코어로 선정하였다. E-glass는 경량화, 경제성, 화학적 및 갈바닉 부식 저항성, 우수한 전기적 특성을 갖춘다는 점에서 레이돔에 적합하다. 폼 코어의 경우에는 우수한 유전 특성을 가지며, 레이더 주파수에서 전자기파 흡수 성능을 제공하여 전파 투과 특성을 향상시킨다.

2.2 환경시험 패널 설계

환경시험 패널은 적층 시 폼 코어 둘레 전체를 Ramp 형상으로 가공하고, 그 위에 E-glass 프리프레그를 적층하는 방식으로 제작하였다(Fig 1. 참조). 이를 통해 시험 중 시편 내부로의 수분 침투를 최소화하고, 정확한 평가가 가능하도록 하였다.



Fig. 1. Specimen Shape.

3. 레이돔 내환경 성능 시험 절차

레이돔 성능 시험 절차는 Fig. 2.의 절차를 따른다. 본 문서에서는 내환경 성능 시험에 해당하는 Elements Level과 Components Level을 서술한다.

3.1 Elements Level

MIL-STD-810G 표준을 준수하여 제작한 환경시험용 복합재 샌드위치 패널을 대상으로 저장온도, 운용온도, 습도시험을 수행하고, 온도 변화 및 습기 침투에 따른 물리적 손상(균열, 변형, 박리 등)과 표면 코팅 및 접착제의 변형 또는 분리 여부를 평가한다.

또한, 염수분무, 일광, 유체오염, 균류, 강우침식, 우박충돌 시험을 통해 외부 물리적·화학적 스트레스 요인에 따른 레이돔 표면의 부식, 변질, 변형 등의 문제가 발생 여부를 분석한다.

3.2 Components Level

레이돔 부분품을 활용한 고전압 시험을 수행하여 항공기 운용 중 발생할 수 있는 낙뢰 환경에서 구조적 건전성을 유지할 수 있는지 평가한다. 시험을 통해 고전압 충격에 따른 균열, 박리, 변형 등의 물리적 손상 여부를 분석한다. 이 시험을 통해 낙뢰 환경에서 레이돔이 전기적·기계적 특성을 유지할 수 있는지를 분석하고, 내환경 설계 개선에 필요한 데이터를 확보한다.



Fig. 2. Test Matrix..

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

시험종류	MIL-STD-810G/기타	
1.저장온도	Method 501.5	
/운용온도	Method 502.5	
2.습도시험	Method 507.5	
3.염수분무	Method 509.5	
4.일광시험	Method 505.5	
5.유체오염	Method 504.1	
6.균류시험	Method 508.6	
7.강우침식	222km/h, 15.0mm/h	
8.우박충돌	56km/h, 0.75 in. Dia	

Table 1 Types of Environmental Test

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 내환경시험을 수행하여 레이돔의 신뢰성 및 내구성을 검증하고, 시험 결과를 바탕으로 소재 사용 최적화 및 설계 개선을 위한 피드백을 제공할 수 있다. 현재 Coupon Level과 Elements Level 시험이 진행 중이며, 이후 Components Level을 거쳐 Full-scale Level 시험까지 단계적으로 수행하여 레이돔 개발을 완성할 예정이다.

참고문헌

[1] MIL-STD-810G Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests.

후기

본 연구는 국방기술진흥연구소 23-3차 무기체계 부품국산화 개발 지원사업(CS230023)에 의해 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

차세대 모빌리티를 위한 기계적 에너지 소산 설계 Designing Mechanical Energy Dissipation for Next-Generation Mobility

*전승렬¹ * S.-Y. Jeon¹⁺

¹ 한국과학기술연구원 전북 복합소재기술연구소 ⁺E-mail: syjeon@kist.re.kr

Keywords: Mechanical energy dissipation, Impact resistance, Viscoelastic materials, Liquid crystal elastomers

1. 서론

미래 모빌리티의 핵심은 경량화와 전기 동력 사용이다. 초경량 소재는 강도가 낮아 충격 안정성 확보가 필수적이며, 노면 진동이 쉽게 전달되고, 전기모터의 저속 토크 증가로 인해 진동이 두드러져 우수한 진동 감쇠 특성을 갖춘 소재가 필요하다. 본 연구는 점탄성 소재인 액정 엘라스토머(Liquid crystal elastomers)의 특성을 구조화 및 복합화를 통해 향상시키고, 모빌리티 분야에서의 응용 가능성을 탐구한다.

2. 본론

액정 엘라스토머는 액정 분자와 고분자 네트워크 간의 동적 결합으로 인해 우수한 기계적 에너지 소산 거동을 나타내는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 액정 엘라스토머의 충격 흡수 성능을 향상시키기 위한 전략을 제시한다. 첫째, 구조화된 액정 엘라스토머의 속도 의존적 에너지 흡수 거동을 분석한다[1]. 이를 위해 액정 엘라스토머의 에너지 소산 충격 능력을 준정적(10⁻⁴~10⁻¹s⁻¹) 및 동적(최대 10³s⁻¹) 하중 조건에서 다양한 기계적 테스트 시스템을 통해 평가하였다. 특히, 액정 엘라스토머의 점탄성 충격 흡수 거동이 변형률 속도에 따라 Power law를 따라 증가하는 현상을 엘라스토머 구조체로 구현하고, 구조와의 시너지적 상호작용을 통해 충격 에너지 흡수 밀도를 더욱 향상시킬 수 있음을 보일 예정이다. 강화 복합재의 둘째, 섬유 기지재(matrix)로 액정 엘라스토머를 활용하여 높은 에너지 소산 능력을 갖는 충격 흡수 소재를 개발하는 방법을 제시한다[2]. 일반적으로 에너지 소산 능력이 미미한 탄소 섬유 직물로 강화된 액정 엘라스토머 복합재는 변형률 속도에 따른 우수한 충격 흡수 특성을 나타내며, 섬유와 엘라스토머 간 계면 특성으로 인해 기존 섬유 강화 복합재 대비 두 자릿수 이상 높은, 약 0.1의 감쇠 손실 계수를 보임을 확인할 예정이다.



Fig. 1. Ashby plot of the loss coefficient versus Young's modulus for different classes of materials[3].

3. 결론 및 향후과제

Fig. 1은 기존 소재들의 영률과 에너지 소산성을 나타내는 감쇠 손실 계수(Loss coefficient) 간의 상관관계를 보여주는 Ashby plot이다[3]. 소재의 구조화를 통해 경량화를 실현하는 동시에 감쇠 손실 계수를 소폭 증가시킬 수 있으며, 복합화 과정에서는 감쇠 손실 계수가 다소 감소하지만 비약적으로 영률이 증가하는 경향을 보인다. 이러한 특성을 활용한 소재 설계는 차세대 모빌리티가 요구하는 물성을 충족시키기 위한 효과적인 프레임워크가 될 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] SY Jeon et al. Adv. Mater. 34(14):2200272, 2022.
- [2] BG Cho et al. Compos. Sci. Technol.246:110377, 2024.
- [3] JM Rickman et al. Acta Mater. 168:473-510, 2019.

화학작용제 보호/제독/탐지 소재기술

CWA threatsreducing nanocomposites for sensing, protection, and decontamination *진영호

* Youngho Jin

¹ 중앙대학교 첨단소재공학과 ⁺E-mail: <u>yhjin@cau.ac.kr</u>

Keywords: Chemical agents, protective materials, decontamination, permeable membranes, Wearable sensing

1. 서론

기체, 액체, 고체상 화생방 위협에 대한 효과적인 방호 및 최적화된 보호소재 개발을 위한 연구가 진행중이다. 본 연구에서는 나노복합소재를 활용한 화학작용제 탐지, 보호, 분해 기술과 성능평가 기법을 소개한다. 금속유기골격체, 제올레이트, 활성탄소섬유 및 이들의 복합소재를 활용한 독성물질 흡착, 분해 및 웨어러블 센싱 기술을 소개한다.

2. 화생방 위협 탐지/보호/제독 기술

2.1 화생방위협 대응 소재기술

화생방 무기를 포함한 위해 물질로부터 인명 및 보호하기 위한 다양한 소재의 환경을 개발이 진행중이다. 위해성 기체를 효과적으로 흡착할 수 있는 입자형, 직물형 흡착소재 기술이 개발중이며, 독성을 중화할 수 있는 다공성 촉매소재 역시 위협에 대응하는 기술로 활발한 연구개발이 진행중이다. 방호성능 향상을 위한 미세구조 최적화, 표면 기능성화, 다층 복합화 기술이 개발되고 있다. 에어로졸화 된 독성물질의 차단을 위한 공기투과성/ 비투과성 나노멤브레인은 흡착소재 기술과의 시너지 효과를 기대할 수 있다. E-textile을 활용한 보호소재는 웨어러블 센서로서의 활용을 기대할 수 있으며, 보호와 제독, 보호와 탐지, 제독과 탐지 기능을 복합소재 개발을 통하여 다양한 위협에 효과적으로 대응할 수 있는 소재의 개발이 가능하다.

2.2 성능평가 결과

보호소재의 성능평가를 위하여 확산/대류에 의한 기체분자 투과실험을 진행하고 있으며, 비독성 유사물질을 활용한 시험평가를 실시하여 실 독성물질과의 상관관계를 규명하고자 한다. 또한 오염원 제거 및 분해를 위해 표준시험법을 제정하여 나노복합소재를 활용한 건식/습식 제독실험을 추진하고 있으며 그 연구결과를 소개한다.

Multifunctional e-fabrics



Self-powered sensing

Fig. CWA protection, decontamination, Sensing nanomaterials .

4. 결론 및 향후과제

화생방 테러/누출 상황하 국민의 생명을 보호할 수 있는 탐지, 보호, 제독 소재 기술을 개발하고 있으며, 성능향상을 위한 다양한 복합화 기술을 소개한다.

참고문헌

- [1] J. Lee et al. ACS Appl. Mater. Interfaces **2022**, 14, 32522–32532.
- [2] M Choi et al. Adv. Funct. Mater. 2021, 31 (24), 2101511.
- [3] D. Ka et al. Adv. Compos. Mater. **2022**, 2022, 2128266.
- [4] Y Jin et al. Nanomaterials 2021, 11 (4), 940.
- [5] D Choi et al. Chem. Eng. J. 2021, 426, 130763
- [6] M Choi et al. npj Clean Water 2022, 5 (1), 48.

Layer-by-layer Assembled Polymeric Thin Films for Anti-flammable Coatings

*Yong Tae Park Division of Mechanical Systems Engineering, Myongji University *E-mail: <u>ytpark@mju.ac.kr</u>

Keywords : Polyurethane foam, flame retardancy, layer-by-layer coating, interfacial polymerization

1. Introduction

Polyurethane foams (PUFs) require surface modification in order to improve flame retardancy (FR) and add advanced functionality [1-4]. We used a two-step coating technique in this work that combines in situ interfacial polymerization with layer-by-layer (LbL) assembly. In addition to increasing PUFs' flame resistance, this technique increases their suitability for use in complex domains like triboelectric performance.

2. Research Results 2.1 Hybrid LbL-PEC FR Coating



Fig. 1. Hybrid Layer-by-layer and polymer electrolyte complex coating.

2.2 Phosphorus-doped Mesoporous Carbon FR



Fig. 2. Phosphorus-doped mesoporous carbon flame retardant coating

2.3 TiO₂/PAA/MMT Tri-layer FR Coating



Fig. 3. TiO₂/PAA/MMT tri-layer flame retardant coating

2.4 Dual Clays-based Multi-Layer FR Coating



Fig. 4. Dual clays-based multi-layer flame retardant coating

4. Conclusions

A layer-by-layer and hybrid coating, consisting of flameretardant layer with a novel material such as clay, carbon, *etc.*, was effectively applied to polyurethane foam (PUF). This coating markedly enhanced the flame-retardant characteristics of PUF, and its impact on other functional performance is currently being studied.

References

- [1] TG Weldemhret et al. Prog Org Coatings 161:106480, 2021.
- [2] TG Weldemhret et al. ACS Appl Nano Mater 5(9):12464, 2022.
- [3] I Lee et al. ACS Appl Nano Mater 7(23):26843, 2024.
- [4] I Lee et al. Prog Org Coatings 183:107784, 2023.
- [5] TG Weldemhret et al. Chem Eng J. 450:2022.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (Nos. 2022R1A2C2006081 and RS-2025-00518552).

Preset a MnO_x layer on high entropy alloy surface to achieve industrial grade electrocatalytic oxygen evolution performance

Benzhi Wang ¹, and Hyung Mo Jeong ²⁺

¹ School of Mechanical Engineering and Institute of Advanced Machinery & Technology, Sungkyunkwan University, 2066 Seobu-ro, Suwon 16419, Republic of Korea

² School of Mechanical Engineering and Department of Smart Fab. Technology, Sungkyunkwan University, 2066 Seobu-ro, Suwon 16419, Republic of Korea

+E-mail: hmjeong@skku.edu

Keywords: High entropy alloy, Oxygen evolution reaction, 3D print, MnOx layer.

1. Introduction

Developing renewable energy through electrochemical water splitting is crucial to alleviating the energy crisis and achieving global carbon neutrality goals [1], but the slow kinetics of the anodic oxygen evolution reaction (OER) severely limits the performance and industrial application prospects of electrochemical water splitting [2]. High entropy alloys (HEAs) have attracted extensive attention in the field of electrocatalysis in recent years due to their unique properties [3]. However, during the oxygen evolution reaction (OER), there are significant differences in oxygen affinity and corrosion potential between metals in HEAs, leading to selective oxidation and dissolution behavior within the alloys. Although researchers have made great progress in addressing these challenges, it is still difficult to fully meet the industrial requirements of OER catalysts, such as low cost, high activity, long-term durability, and simplified manufacturing processes.

2. Preset MnO_x on HEA surface

The self-supporting highly active anode porous electrode was fabricated via 3D printing (SLM250 printer). The HEA powder with sizes ranging from 15 to 45 μ m was spread evenly over the build surface in 60 μ m-thick layers using a powder scraper. The printing system was equipped with a continuous-wave fiber laser (Gaussian distribution, wavelength: 1064 nm, maximum output power: 500 W). The laser rapidly melts the fine powder within microseconds, followed by solidification at extremely high cooling rates, achieving values in the range of 10⁵ to 10⁷ K/s. Notably, unlike traditional printing processes, this fabrication process is carried out under ambient air to preset MnO_x on HEA surface, respectively.

3. Result and Discussion

A series of systematic characterizations such as SEM, TEM, Raman and XPS proved that the MnO_x layer was successfully prefabricated on the surface of the high entropy alloy by 3D printing. The electrochemical performance tests showed that HEA-ML exhibited excellent OER performance with low overpotential and small Tafel slope. In situ electrochemical tests and simulation analysis show that the pre-setting of the MnO_x layer can accelerate the electrochemical oxidation process and the bubbles diffusion in the electrolyte, thereby enabling the catalyst to exhibit excellent OER activity.



Fig. 1. Schematic diagram of preset MnO_x layer and OER catalytic performance.

4. Conclusions

System characterization shows that 3D printing technology can pre-deposit MnO_x on the surface of HEA. The presence of MnO_x effectively prevents the catalyst from undergoing complex oxidation-reconstruction processes, accelerates the electrocatalytic oxidation process, enhances mass transfer, and promotes the adsorption of electrolytes on the catalyst surface and bubble diffusion, making the catalyst exhibit fast reaction kinetics, as well as excellent OER activity and stability.

References

- [1] W Shen et al. J. Am Chem. Soc. 146: 5324-5332 2024.
 [2] F Wang et al. Nat. Commun. 14: 6019 2023.
- [3] Y Yang et al. Energy Environ. Sci. 17: 5854-5865 2024

Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (20013794, Center for Composite Materials and Concurrent Design) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea)

Surface Imaging-based Property Modeling of Fiber-reinforced Composites **Manufactured by HP-RTM Process**

*Chanwoo Joung¹, and Young-Bin Park¹⁺

¹ Department of Mechanical Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology,

⁺E-mail: vpark@unist.ac.kr

Keywords : Surface imaging, Property modeling, FRP, HP-RTM

1. Introduction

Fiber orientation is a crucial factor in determining the mechanical properties of fiber-reinforced composites. In particular, for textile-based composites, the regularity of fiber arrangement and subtle variations in fiber alignment have significant effect on their mechanical behavior.

The High-Pressure Resin Transfer Molding (HP-RTM) process is an advanced composite manufacturing technique that enables high production speed and superior quality. However, the orientation of fibers may be altered by the high-pressure resin injection, which can directly affect the mechanical properties of the final composites.

Various high-resolution three-dimensional imaging techniques are available for analyzing the microstructure and fiber orientation of composites. These include strain analysis using Digital Image Correlation (DIC) and Digital Volume Correlation (DVC), as well as three-dimensional internal structure analysis through CT scanning [1]. However, these methods require expensive equipment and involve complex analytical processes.

Meanwhile, Lee [2] proposed a method for predicting the material behavior of recycled composites based on surface images. Building upon this approach, this study aims to measure fiber orientation and predict tensile behavior of composites through a simplified surface image analysis.

In this study, a standard office scanner was used to acquire surface images of plain-woven carbon fiber/epoxy composites fabricated by the HP-RTM process. The degree of fiber misalignment was quantitatively analyzed, and this information was incorporated into a finite element model to predict the tensile properties of the composite.

2. Experiment and Simulation

2.1 Specimen preparation: A plate of carbon fiber/epoxy composites was manufactured by the HP-RTM process, with fiber layers of T700 plain-weave carbon fiber fabric stacked. The process was conducted using a hightemperature, high-precision compression molding press (Schuler, CHAPU-2500-2.8X2.0) combined with a highspeed resin injection system (Hennecke, Streamline). Subsequently, tensile specimens were machined from the composite panel using waterjet cutting (TOPS, T500 3015 HYBRID) for image acquisition and tensile testing

2.2 Surface imaging analysis: The front and back surfaces of the machined tensile specimens were scanned using an office scanner (Canon, DR-F12120) to acquire images at the gauge section of tensile testing.

The scanning resolution was set to 600 dpi, corresponding to a pixel size of approximately 0.0423 mm. Gray-scale thresholding-based binarization, edge detection, and morphological analysis were combined to separate the warp and weft fibers, and the orientation of each fiber was subsequently calculated.



Fig. 2. Angle distribution of warp and weft 2.3 Tensile testing: Tensile modulus of the composite was measured according to ASTM D3039 standard. Testing speed was set to 2 mm/min, and tensile strain was measured using 1-axis clip-type extensometer (Instron 2630-100 sereis).

ò 20

Angle (degree)

40 60 80 100

2.4 Finite element analysis: Surface image analysis was used to calculate the fiber orientation at each pixel for both surfaces of the composites, and this information was incorporated into the finite element analysis model. The effective properties at each pixel were determined using classical laminate theory. A virtual tensile testing was then simulated to evaluate the initial stiffness at the specimen level.

3. Results

In this study, fiber orientation was calculated through imaging analysis for tensile specimens surface manufactured using HP-RTM, and the material properties

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

were determined at the specimen level by incorporating this information.

Table 1 Comparison of modulus in tensile direction

Туре	Modulus (GPa)
Prediction (perfectly aligned)	67.8
Prediction (mis-aligned)	66.2
Measurement (mis-aligned)	65.76

References

[1] Holmes, J. et al. Composite Structures, 279:114775, 2022

[2] Shim, Y.-B. et al. Composites Science and Technology, 249:110464, 2024.

Acknowledgement

This research was supported by the Materials/Parts Technology Development Program (Grant No.20024384) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) of Korea through Korea Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT).

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

풍력추진용 경량 대형 샌드위치 구조 복합재의 피로성능 평가를 위한 피로시험 지그 설계 및 제작

Design and Fabrication of a Fatigue Test Jig for Evaluating the Fatigue Performance of Lightweight Large Sandwich-Structured Composites for Wind Propulsion

강명구 ¹, 하종록 ¹⁺ M.G.Kang¹, J.R. Ha ¹⁺

¹ 중소조선연구원 미래핵심기술연구본부 ⁺E-mail: <u>mgkang@rims.re.kr</u>

Keywords: Sandwich structure, Fatigue test, Mechanical properties, Wind Turbine Blades, Jig design and fabrication

1. 서론

풍력추진 시스템은 친환경 에너지 절감 기술로 주 목받고 있으며, 이에 따라 경량 대형 샌드위치 구 조 복합재의 활용이 증가하고 있다. 이러한 복합재 는 우수한 강성과 경량성을 가지지만, 반복적인 하 중이 가해질 경우 피로 성능 평가가 필수적이다. 본 연구에서는 ASTM D7774 규격을 적용한 4-point bending 시험을 수행하기 위해 피로시험 지그를 설 계 및 제작하고, 시험 수행 시 발생할 수 있는 문 제점을 분석하여 개선 방안을 제시하고자 한다.

2. 설계

ASTM D7774 규격에 따라 4-point bending 시험을 수행하기 위해 상부 및 하부 지그를 설계하였다.

2.1 상부 지그 (Load Applicator) 설계

- 형상 : 두 개의 롤러를 포함하는 빔 구조
- 치수 : 가로 50 mm 이상, 롤러 직경 10 mm, 높이 100 mm
- 특징 : 하중을 균일하게 전달하기 위해 회전 가능한 베어링 장착, 롤러 간격은 시편 길이에 따라 조정 가능

2.2 하부 지그 (Support Base) 설계

- 형상 : 두 개의 롤러를 포함한 U자형 구조
- 치수 : 가로 50 mm 이상, 롤러 직경 10 mm, 높이 120 mm
- 특징 : 시편을 안정적으로 지지할 수 있도록 롤러 간 간격 조절 기능 포함



Fig. 1. Fatigue test jig design

2.3 설치 및 간섭 고려 사항

- 상부 및 하부 롤러의 정렬이 정확하지 않으면 시편이 기울어질 가능성이 있음
- 롤러 직경이 너무 크거나 지그 고정 방식이 복잡하면 시편 장착이 어려울 수 있음

• 시편이 변형될 때 하부 롤러와 예상치 않은 마찰이 발생할 수 있음

3. 제작

설계된 지그는 고강도 알루미늄 합금을 사용하여 제작되었으며, 실험 중 변형을 최소화하도록 정밀 가공하였다.

3.1 제작 과정

• CNC 가공을 통해 정밀한 치수로 롤러 및 지그 프레임 제작

• 베어링 삽입을 통해 롤러의 원활한 회전 확보

• 볼트 체결 방식으로 조립하여 롤러 간격 조정이 가능하도록 설계



Fig. 2. Fatigue test jig manufacturing

3.2 제작 후 검증

• 시편 장착 테스트를 통해 정렬 정확도 및 간섭 여부 확인

• 시험 시 하중이 균등하게 분포되는지 확인하기 위해 시뮬레이션 수행

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials



Fig. 3. Specimen mounting testing and simulation

4. 결과 및 고찰

설계 및 제작된 4-point bending 피로시험 지그는 ASTM D7774 규격을 충족하며, 시편 장착 및 시험 수행의 편의성을 향상시키기 위해 다음과 같은 개선 방안을 적용하였다.

- 가이드 장착 : 시편 정렬을 쉽게 할 수 있도록 시편 폭, 길이 부분에 조절 가능한 가이드 구조 적용
- · 롤러 높이 조절 기능 : 다양한 두께의 시편을 시험할 수 있도록 롤러 높이 조절 기능 추가



Fig. 4. Apply improvement measures

본 연구에서는 3-point bending 시험이 아닌 4-point bending 시험을 적용하였다. 3-point bending 시험에서는 최대 응력이 하중이 가해지는 중앙점에 집중되는 반면, 4-point bending 시험에서는 순수 굽힘 영역이 넓게 형성되어 재료의 피로 거동을 보다 균일하게 평가할 수 있다. 또한, 복합재의 층간 전단 응력 영향을 최소화할 수 있어 보다 신뢰성 높은 피로 성능 평가가 가능하다. 설계 및 제작된 피로시험 지그는 복합재구조물의 피로 성능 평가에 효과적으로 적용될 수 있으며, 향후 실험을 통해 추가적인 성능 검증을 진행할 계획이다.

참고문헌

- [1] ASTM D7774-12, "Standard Test Method for Flexural Fatigue Properties of Plastics," ASTM International, 2012.
- [2] Soden, P. D., Hinton, M. J., & Kaddour, A. S. "Laminated composite materials: mechanical property characterization and structural reliability," Composites Science and Technology, 2002.
- [3] Daniel, I. M., & Ishai, O. "Engineering Mechanics of Composite Materials," Oxford University Press, 2005.
- [4] Zenkert, D. "The Handbook of Sandwich Construction," Engineering Materials Advisory Services Ltd, 1997.

[5] Gibson, R. F. "Principles of Composite Material Mechanics," CRC Press, 2016.

후기

이 연구는 2021년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT)의 [소재부품기술개발사업]의 지원을 받아 연구되었음 (20024953, 탄소배출 저감의 친환경 선박 풍력추진 시스템 제작 기술개발 및 실증) 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

탄소섬유강화플라스틱기반 마찰전기 나노발전기의 성능 향상을 위한 탄소섬유 표면 개질

Surface modification of carbon fibers for enhanced energy harvesting performance of carbon fiber-reinforced plastic-based triboelectric nanogenerator

*이성환 ¹, 박영빈 ¹⁺ * S.H. Lee ¹, Y.-B. Park¹⁺

¹ 울산과학기술원 기계공학과 ⁺E-mail: <u>ypark@unist.ac.kr</u>

Keywords: Carbon fiber reinforced plastic, Energy harvesting, Triboelectric nanogenerator, Fiber modification

1. 서론

탄소섬유강화플라스틱(CFRP)를 활용하면 마찰을 통해 전기를 생산하는 마찰전기 나노발전기 [1] 혹은 자가발전 센서 [2] 로 개발할 수 있다. 수지 모재를 마찰층으로, 탄소섬유를 전극으로 사용하였다. 탄소섬유 표면을 그래핀 기반 물질로 개질하여 전하 제어층을 구현하였으며, 그에 따른 에너지 발전 성능 변화를 분석하였다.

2. 실험

2.1 시편

플라즈마 처리한 탄소섬유를 산화그래핀(GO)이 분산된 물:에탄올(7:3) 용액에 1분간 침지한 후, 60℃에서 건조하여 탄소섬유 표면을 개질하였다. 표면 개질된 탄소섬유를 핫 프레스에서 3 MPa의 압력으로 30 분간 가열하여 표면의 산화그래핀을 환원시켰다. 핸드레이업 공법을 이용해 표면 개질된 탄소섬유를 폴리디메틸실록산(PDMS)에 함침시켜 CFRP를 제작하였다. 양극 대전체로 에폭시 기반 CFRP를, 음극 대전체로 PDMS 기반 CFRP를 사용하였다.

2.2 실험 조건 및 분석

환원 공정 중 온도 변화에 따른 환원 산화그래핀의 환원율을 FT-IR 및 XRD로 분석하였다. 리니어 모터를 이용하여 마찰전기 나노발전기의 상단 마찰층을 상하 운동시키며 수직 접촉-이격시켰다. 이 과정에서 산화그래핀 환원 온도에 따른 마찰전기 나노발전기의 성능을 비교·분석하였다.



Fig. 1. (a) 시편 개요도, 복합재 단면 개요도 (b)표면 개질 전, (c) 표면 개질 후

3. 결과

순수 탄소섬유 기반 마찰대전 나노발전기의 개방 전압과 이동 전하량은 각각 130 V와 47.2 nC 이었고, 환원 산화그래핀으로 표면 개질된 탄소섬유 기반 나노발전기에서는 각각 154 V와 56 nC로 나타났다. 개방 전압과 이동 전하량이 표면 개질된 시편에서 각각 18.46 %, 18.64 % 증가하여 유사한 증가율을 보였다. 섬유의 표면 개질 두께가 얇아 마찰대전 나노발전기의 내부 정전용량에는 큰 변화가 없는 것을 알수 있다.



4. 결론

본 연구에서는 CFRP 기반 마찰전기 나노발전기의 에너지 수확 성능을 향상시키기 위해 CFRP 섬유 표면을 그래핀 기반 물질로 개질하여 비교·분석하였다. 그 결과, 섬유 표면 개질은 에너지 수확 성능 향상에 유의미한 효과가 있음을 확인하였다.

참고문헌

S Niu et al., Energy Environ. Sci. 6, 3576-3583, 2013.
 S. Lee, Y.-B. Park, Nano Energy, 128, A, 109818, 2024.

후기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단을 통해 지원하는 기초연구사업(중견연구, NRF-2021R1A2C2009726)으로 수행된 연구결과입니다.
기능화된 CNT 섬유 기반 덴드라이트가 억제된 섬유형 아연 음극의 개발 The development of dendrite-suppressed fiber-shaped zinc anode based on Functionalized CNT fibers

*김정길¹, 유하영¹, 김민지^{1, 2}, 김민우^{1, 2}, 김민섭^{1, 2}, 이진우³, 정현수¹, 김남동¹⁺ * J.G. Kim^{1,2}, H. Yu¹, M.J. Kim^{1,2}, M.W. Kim^{1,2}, J. Lee³, H.S. Jeong¹, N.D. Kim¹⁺

¹ 한국과학기술연구원 기능성복합소재연구센터, ² 광주과학기술원 신소재공학부, ³ 한국과학기술원 생명화학공학과 ⁺E-mail:ndkim@kist.re.kr

Keywords: Energy Storage Devices, Fiber-Shaped Energy Storage Devices, CNT Fibers, Zinc anode

1. 서론

웨어러블 전자기기의 안전한 전원으로 섬유 형태의 아연 금속 전지(FZB)는 비가연성 특성으로 주목받고 있으나, 충·방전 시 발생하는 수지상 덴드라이트 형성이 큰 문제이다 [1]. 기존 평판형 전지에서는 기판과 아연의 격자 정합을 높이거나, 기판 표면의 헤테로원소 통해 이를 억제할 수 도핑을 있다고 보고되었지만, 원통형 섬유 기하구조에서는 연구가 부족한 실정이다 [2]. 섬유형 탄소 나노소재의 곡면에 따른 계면 변형과, 다발로 이루어진 섬유 내부의 독특한 구조는 아연 증착에 새로운 변수로 작용할 수 있다. 따라서 섬유 기판 위 아연 증착의 거동을 면밀히 규명하고, 이를 제어하는 기술 개발이 고성능 FZB 구현을 위해 중요하다.

2. 산소기능화된 고 밀집화 CNT 섬유의 제조

산처리를 실시하여 산소기능기를 도입된 CNT를 제조한 후 액정 방사를 통해 고 밀집화 산소 기능화된 CNT 섬유 (Oxvgen functionalized CNT fibers, OCNTFs)를 제조하였으며 이 고결정성 및 산소기능기를 갖는 섬유를 아연 음극의 core 섬유로 활용하였다. 간단한 전기도금 방식으로 아연을 다양한 전류밀도와 용량을 갖도록 복합화하였다. 대조군으로 비정질 구조가 발달된 탄소 섬유 (Carbon fibers, CFs), 고결정성 CNT 섬유 (CNTFs)를 선정하여 미세구조와 표면 화학 상태 변화에 따른 아연 증착 거동을 이해하고자 하였다.

3. 섬유 특성에 따른 덴드라이트 억제 능력

고결정성 특성과 표면 개질에 의한 효과를 관측하기위해 다양한 탄소계 섬유 기판을 비교 평가하였다. 결함이 많은 CF는 높은 핵생성 과전압으로 인해 전극 표면에 수소 발생 반응과 이에 따른 불균일한 아여 증착으로 덴드라이트가 두드러 지게 형성되었다. 반면, CNTF는 결정성이 높아 비교적 안정적인 증착을 보였으나. 가혹 조건에서는 여전히 덴드라이트가 관측된다. OCNTF의 경우 고결정성 특성을 유지하며 높은 전기음성도로 인해 균일한 핵 생성과 성장이 이루어지며, 이에 따라 아연이 증착된 OCNTF의 표면은 매끄럽고 균일한 아연층이 확인된다. 특히 제조된 Zn@OCNTF 전극은 다른 탄소계 섬유 기판에 비해 수소 발생 반응에 대한 높은 저항성과 부식 안정성이 확인되며 동시에 훌륭한 전기화학적 안정성이 확인된다.



Fig. 1. Morphologies of Zn@CF, Zn@CNTF, and Zn@OCNTF.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 산소기능화 탄소나노튜브 섬유(OCNTF)를 이용하여 덴드라이트가 억제된 고성능 섬유형 아연 음극을 개발하였다. 향후 장기 안정성 평가와 기계적 신뢰성 확보, 대량생산 공정 개발 등 다양한 접근을 통해 섬유형 배터리의 실용화를 견인 할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

P. Ruan et al. Angew. Chem. Int. Ed. 134:e202200598, 2022
 X. Zhang et al. InfoMat. 4:e12306, 2022

Dynamic Restructuring of Molybdate-Modified High-Entropy Alloys for Stable Seawater Electrolysis

*Ziyang Duan¹, Zhihao Zhang^{1,2} and Jonghwan Suhr¹⁺

¹ Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon, 16419, Korea ² College of Materials, Xiamen University,

Fujian, Xiamen, 361005, China

⁺E-mail: <u>suhr@skku.edu</u>

Keywords : High-entropy alloys, Additive manufacturing, Seawater splitting, Surface reconstruction

1. Introduction

The development of seawater electrolysis requires electrode materials with high activity, selectivity, and corrosion resistance. [1,2] However, anodes operating at oxidative potentials are highly susceptible to dissolution and chloride-induced corrosion. Moreover, the oxygen evolution reaction (OER) remains a significant bottleneck due to its sluggish kinetics and the complex four-electron transfer process involving O–H bond breaking and O–O bond formation. [3] Here, we present a rapid and versatile additive manufacturing approach for fabricating high-entropy alloy (HEA) electrodes. These electrodes undergo dynamic reorganization during the OER process, with Mo leaching enhancing their catalytic activity and durability in seawater electrolysis.

2. Method

2.1 Structure characterization: The crystal structures and phase compositions of as-prepared catalysts were identified by a Japan Rigaku X-Ray Diffractometer (Rigaku, Smart Lab).. The Raman spectra of the materials were obtained with a Renishaw Raman system model 1000 spectrometer operating with a 20 mW air-cooled argon-ion laser (532 nm) as the excitation light source.

2.2 Electrochemistry characterization: Electrochemical measurements were conducted on a standard three-electrode configuration with a CHInstrument (Model 660E). 1 M KOH with 1 M NaCl were used as electrolytes. An Hg/HgO electrode was used as the reference electrode.

3. Results and Discussion

The OER performance of the HEA catalyst was first evaluated in a conventional three-electrode cell. As shown in Figure 1, the chronopotentiometry curves indicate that our catalyst requires an overpotential of 770 mV to achieve a current density of 100 mA cm⁻². Notably, after a 50-hour stability test in 1 M KOH at 100 mA cm⁻², the OER activity improved, with the overpotential decreasing by 230 mV, suggesting a sustained activation process. Continuous testing at 100 mA cm⁻² further confirmed the catalyst's excellent durability, maintaining stability beyond 50 hours. Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) analysis of the electrolyte before and after the 50-hour test revealed a significant increase in Cr and Mo content, suggesting elemental leaching. As illustrated in Figure 2,

these findings indicate that the HEA catalyst undergoes structural reconstruction during the OER process. Over time, Ni, Fe, and Co oxidize, while Cr and Mo leach from the catalyst surface, forming an in situ molybdate passivation layer.







Fig. 2. Schematic diagram of HEA surface reconstruction.

4. Conclusions

In situ generated MoO⁴⁻ effectively protects metal active sites from cathodic oxidation during interstitial processes and mitigates halide ion adsorption under off conditions, thereby enhancing both OER activity and aqueous stability.

References

- [1]Sha, Qihao, et al. Nature (2025): 1-8.
- [2]Reier, Tobias, et al. Adv Energy Mater 7.1 (2017): 1601275.
- [3]Malek, Abdul, et al. Angew Chemie 135.40 (2023): e202309854.

Acknowledgement

1.This work was supported by the Technology Innovation Program (20013794, Center for Composite Materials and Concurrent Design) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, KOREA) 2. This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (2022R1A2C3011968)

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

Triboresistive Sensing: Gridless Touch Point Recognition

Younghoon Lee1+

¹ Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University

⁺E-mail: lyh@khu.ac.kr

Keywords : iontronics, triboresistive sensors, hydrogels, soft materials

1. Introduction

Conventional touch sensors often rely on multilayer electrode grids and external power sources, which limit flexibility, transparency, and stretchability. To overcome these challenges, this study proposes a triboresistive touch sensing mechanism using a monolayer ionic PDMS that functions as both power generator and position sensor [1].

2. Results and Discussion

2.1 Design of ionic PDMS

To develop a touch sensor without traditional grid electrodes or stacked conductive layers, a monolayer ionic PDMS was designed by incorporating an ionic liquid, [DMIM]+[TFSI]-, into hydroxyl-functionalized PDMS (DMS-U21). The strong hydrogen bonding between –OH groups in DMS-U21 and –CF₃ groups in [TFSI]-, combined with van der Waals interactions from long alkyl chains, enabled homogeneous mixing and stable ion conduction. This design overcame the phase separation issues seen in other PDMS-IL combinations and yielded high transparency (96.5% at 550 nm), excellent stretchability (up to 539.1%), and mechanical resilience (99% recovery after 1000 cycles at 1.5× stretch).

The optimized composition—DMS-U21 with 10 vol% [DMIM]+[TFSI]-—maintained transparency and soft mechanical properties while enabling ionic conduction necessary for electrostatic induction. This composition was validated via UV-vis spectroscopy, FT-IR analysis, DSC for glass transition temperatures, and stress–strain measurements. Compared to traditional gel-type conductors, the resulting ionic PDMS eliminated issues such as solvent evaporation and interface instability, making it more durable and long-lasting under real-use conditions.

2.2 Power Generation and Triboresistive Mechanism

The ionic PDMS generates voltage through ion conduction when a mechanical touch induces an electric field. This differs from conventional TENGs, which require dielectric-conductor pairs and are limited by the need for electrode grids. Here, power was generated directly from a single PDMS layer. Voltage output was significantly enhanced ($\sim 61 \times$) when 10 vol% [DMIM]+[TFSI]– was used, and the optimal voltage generation varied with both PDMS thickness and IL concentration. Notably, thicker samples exhibited increasing voltage generation due to enhanced ion pathways, unlike conventional TENGs where thicker layers reduce performance.

This triboresistive mechanism enabled direct sensing of touch location based on differential voltage at the PDMS corners(Figure 1). The resistance between the touch point and each corner determines the voltage drop, which is then used to triangulate the touch position mathematically. Experimental validation confirmed that the system can distinguish positions as close as 1 mm apart and maintains accuracy even when stretched by 50%, unlike conventional grid sensors whose resolution suffers under deformation.



Fig. 1. Working mechanisms of triboresistive position sensing.

3. Conclusions, Significance and/or Future Works

This triboresistive sensing approach enables grid-free, transparent, stretchable, and self-powered touch detection. Its versatility in reconfiguration and integration with robotics highlights its potential for next-generation human–machine interfaces and soft electronics.

References

[1] Y. Lee et al. Advanced Materials, 2108586. 2022

Acknowledgement

This work was supported by National Research Foundation of Korea (Nos. 2021R1C1C2009703)

Hybrid Flame-Retardant and Antimicrobial Coatings

*Alemtsehay Tesfay Reda and Yong Tae Park⁺ Myongji University, Cheoin-gu, Yongin, Gyeonggi 17058, Republic of Korea ⁺E-mail: <u>vtpark@mju.ac.kr</u>

Keywords : Flame retardancy, Antimicrobial coatings, ZnO nanomaterials, Hydroxy double salt

1. Introduction

Developing multifunctional materials with simultaneous flame-retardant and antimicrobial properties is essential for applications in fire safety and healthcare [1]. Traditional coatings address either thermal stability or microbial resistance, but integrating both functions into a single material remains challenging. This study presents a layered ZnO/TMAH-HDS/PVA coating on PUF for such purpose. The hybrid improves flame retardancy and microbial inhibition, making it suitable for protective applications in fire-sensitive environments.

2. Materials and methods

2.1 Reagents: Reagents such as Tetramethylammonium hydroxide (TMAH), Polyvinyl alcohol (PVA) (Mw \sim 89 000–98 000 g/mol) powder, ZnO, Zn(NO₃)₂· 6H₂O, HNO₃, NaOH, were bought from Sigma-Aldrich. All the chemicals were analytical grade and used directly. Deionized water was used during the whole synthesis process unless mentioned.

2.2 Synthesis and testing: The hydroxy double salt (HDS) was synthesized following a previously report [2], while ZnO nanoflowers (ZnONFs) were prepared using solution evaporation technique. The coating process followed a layer-by-layer deposition, where an initial HDS-PVA layer was applied onto the foam substrate, followed by a ZnO-TMAH layer, as illustrated in Fig. 1A.



Fig. 1. Schematics of synthesis and testing methods

The flame retardant and antimicrobial test of the material were conducting according to the schemes in Fig. 1B and 1C, respectively.

3. Results and Discussion

The ZnO/TMAH-HDS/PVA@PUF composite exhibited strong antimicrobial and flame-retardant performance. Antibacterial tests showed significant inhibition against *L. monocytogenes* (12.5 mm), *P. aeruginosa* (6.5 mm), *S. aureus* (5.2 mm), and *E. coli* (5.0 mm) due to Zn²⁺ ion release and electrostatic interactions. The variation in inhibition suggests that cell wall thickness and membrane properties influence bacterial susceptibility. Fig. 2 confirms the enhanced fire resistance of the composite. The coated samples retained up to 97.4% weight after burning (Fig. 2A), while peak HRR dropped from 480.88 W/g (PUF) to 90.91 W/g (Fig. 2B). LOI increased to 35.78% (Fig. 2C), and HRC significantly decreased (Fig. 2D), demonstrating improved flame retardancy.



Fig. 2. pHRR, LOI, and char residue comparisons

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

The composites demonstrated superior antimicrobial and flame retardancy. The coating improved thermal stability, lowering HRR, increasing LOI, and promoting char formation. These findings highlight the potential of hybrid coatings for advanced fire-safe and antimicrobial applications. Future work will focus on optimizing coating durability and scalability for broader industrial use.

References

- [1] F. Carosio, A. Fina. Front. Mater. 6 (2019) :1-10, 2019
- [2] Richardson-Chong SSD et al. Ind. Eng. Chem. Res. 51:2913– 2921, 2012.

Acknowledgement

This work was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Korea government (No. RS-2023-00248677 and RS-2025-00518552).

High Temperature-Stable Triboelectric Nanogenerators Based on Low Vapor Pressure Liquids for Energy Harvesting and Tactile Sensing

*Teklebrahan Gebrekrstos Weldemhret¹, Nebiyou Tadesse Debele², Kwun-Bum Chung¹ and Yong Tae Park²⁺

¹ Department of Physics and Semiconductor Science, Dongguk University, Seoul, Republic of Korea, ² Department of Mechanical

Engineering, Myongji University, Yongin, Republic of Korea

⁺E-mail: <u>ytpark@mju.ac.kr</u>

Keywords: Energy harvesters, liquid-triboelectric nanogenerators, stretchable and deformable electronics, tactile sensors

1. Introduction

Aqueous solution-based liquid electrode triboelectric nanogenerators (TENGs) have garnered considerable interest in recent years due to their exceptional stretchability, deformability, and inherent shape-adaptability. However, previous aqueous solution-based TENGs face challenges related to drying, which can lead to operational failures [1-3]. In this research, we present a low vapor pressure liquid (LVPL) electrode TENG (LVPL-TENG) that utilizes branched polyethyleneimine (bPEI) or deep eutectic solvent, choline chloride/glycerol (ChCl:Gly), to enhance the stability of TENGs under elevated temperatures.

2. Experimental

The fabrication and working mechanism of the LVPL-TENGs is given in Fig. 1.



Fig. 1. (A) Schematic illustration for the fabrication process of the LVP-TENGs. (B) Chemical molecular structure of bPEI. (C) Chemical molecular structure of the choline chloride (ChCl)-glycerol (Gly) deep eutectic solvent (DES). (D) Schematic illustration of the electricity generating mechanism of the LVP-TENGs.

3. Results and Discussion

Fig. 1A-D illustrates the high-temperature stability of the LVPL-TENGs. A comparative analysis was also conducted on the stability of the aqueous-based liquid TENG utilizing a NaCl solution (10 wt.%). Initially, the

peak-to-peak voltage (V_{pp}) and peak-to-peak current (I_{pp}) of the NaCl liquid TENG were approximately 193 V and 31 μ A, respectively. However, after being stored for 24 hours in an oven at 100 °C, the V_{pp} and I_{pp} significantly decreased to around 11 V and 3 μ A, retaining only about 6% of the original V_{pp} and 10% of the I_{pp}. In contrast, the V_{pp} and I_{pp} of the LVPL-TENGs remained stable after being subjected to 24 hours in an oven at 100 °C, attributed to the superior thermal stability of bPEI and ChCl:Gly. For instance, the V_{pp} and I_{pp} of bPEI LVPL-TENG before and after being stored in an oven at 100 oC were 212 V and 40 μ A and 217 V and 39 μ A, respectively.



Fig. 2. Comparison of the electrical outputs of the LVP-TENGs (A and B for bPEI and C and D for ChCl) and NaCl-based liquid TENG before and after being stored at $100 \,^{\circ}$ C for 24 h.

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

In this research, we present a low vapor pressure liquid (LVPL) electrode triboelectric nanogenerator (TENG) that utilizes either bPEI or ChCl:Gly that maintain a consistent electrical output after being subjected to temperatures up to 100 °C for 24 hours, completely avoiding the dehydration or evaporation of the liquid solvent.

References

- [1] Y Wu et al. Nano Energy. 75:105027, 2020.
- [2] X Wang et al. Nano Energy. 39:429, 2017.
- [3] H Patnam et al. Adv Compos Hybrid Mater. 7:56, 2024.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2025-00518552 and RS-2024-00352476).

Enhancing Electrocatalytic Oxygen Evolution of Cobalt Oxide via Nanoclusterization to Trigger Robust Lattice Oxygen Mechanism

*Sunhyeong Kwon^{1, 3}, Benzhi Wang^{2, 3}, Jeong Yeon Heo^{4, 5}, Ji Hoon Lee^{4, 5+}, and Hyung Mo Jeong^{1, 2, 3+} ¹ Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, ² Department of Smart Fab. Technology, Sungkyunkwan University, ³ Institute of Advanced Machinery and Technology, Sungkyunkwan University, ⁴ School of Materials Science and Engineering, Kyungpook National University, ⁵ KNU Advanced Material Research Institute, Kyungpook National University ⁺E-mail: <u>hmjeong@skku.edu</u> and ⁺E-mail: <u>jihoonlee@knu.ac.kr</u>

Keywords : lattice oxygen mechanism, cobalt oxide, oxygen evolution reaction, electrocatalyst

1. Introduction

The oxygen evolution reaction (OER) has garnered significant attention as a crucial process in energy conversion and storage.[1, 2] As an alternative to the precious metal oxide based OER catalysts, cobalt (Co)based transition metal catalysts have gained traction due to their high catalytic activity and stability. Recent studies have demonstrated that Co-O bond contraction during OER plays a key role in enhancing catalytic efficiency. [3] However, there are lacks of studies to be correlated with the OER mechanism: the adsorbate evolution mechanism (AEM) and the lattice oxygen mechanism (LOM). In this study, the correlation between Co-O bonding dynamics and lattice oxygen activity is explored through nanoclusterization. To bridge this gap, our study aims to investigate this relationship in depth, shedding light on its role in achieving high-performance OER catalysts.

2. Control of Co-O bond length via nanoclusters

Cation Implantation Engineering (CIE) method was introduced to control the Co-O bond length. The cobalt oxide electrode was fabricated by slurry casting on the copper foil. The lithium ion battery coin cell was assembled, then applied with the continuous dischargecharge cycles. Finally, the Co-O bond length controlled electrocatalyst was collected. [4]

3. Results and Discussion

We investigated the relationship between AEM and LOM in correlation with Co-O bonding environments. Focusing on nanoclusterization in Co-based oxides, we explored how metal-oxygen (M-O) bond contraction is influenced by nanoparticle size due to intensified surface stress. Leveraging our previously reported cation implantation engineering (CIE) process, we precisely controlled Co₃O₄ nanoparticles, generating nanoclusters (*n*L-CoO_x) under varying lithiation cycles. The optimized 5L-CoO_x catalyst, with a sub-2 nm scale, exhibited a significantly contracted bond length, enhancing LOM engagement and achieving an overpotential of 260 mV at 10 mA cm⁻². Co-O bond contractions were characterized using *ex situ* XAFS, while *in situ* ATR-FTIR, Raman spectroscopy, and further analytically investigated by *ex situ* EXAFS/EELS provided insights into their behavior before and after OER. Our findings confirm that nanoclusters induce stronger Co-O contractions, improving catalytic efficiency regardless of initial states. Furthermore, we explored the scalability of 5L-CoO_x in energy storage and conversion devices, demonstrating its potential for advanced OER catalyst design through controlled bond contraction.



Fig. 1. Illustration of control of Co-O bond length via CIE method, HAADF-STEM image, catalytic performance, and bond length study before/after OER

4. Conclusions

This study developed $5L-CoO_x$ nanoclusters via cation implantation engineering (CIE), demonstrating enhanced OER performance. In-depth *in situ* and *ex situ* analyses revealed that bond contraction and AEM-to-LOM transition improve electrocatalytic OER activity and stability. This catalyst applicability in AWE, ZAB, and AEMWE underscores its potential for next-generation energy technologies.

References

- [1] Z W Seh et al. Science 355:146, 2017.
- [2] F-Y Chen et al. *Joule* 5:1704-1731, 2021.
- [3] F T. Haase et al. Nat. Energy 7:765-773, 2022.
- [4] H M Jeong et al. PNAS 112:26, 7914-7919, 2015.

Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (20013794, Center for Composite Materials and Concurrent Design) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE, Korea)

화학기상증착법 기반 다공성 구조체 코팅 공정 연구 Study on the Coating Process of Porous Structures Based on CVD

*정채원 ^{1,2}, 장혜경¹, 박병호 ¹, 함명관 ²⁺, 오영석 ¹⁺

^{*} Chaewon. Jeong ^{1,2}, Hyekyeong. Jang¹, Byeongho. Park¹, Myunggwan. Hahm²⁺, Youngseok. Oh¹⁺

¹ 한국재료연구원 융·복합재료연구본부, ² 인하대학교 신소재공학과 ¹⁺E-mail: youngsoh@kims.re.kr, ²⁺E-mail: mghahm@inha.ac.kr

Keywords: porous structure, carbon aerogel, CVD, coating

에너지 사용으로 인한 온실가스 배출량을 줄이기 위해 에너지를 효율적으로 사용할 수 있는 단열재의 필요성이 높아지고 있다. [1]. 대표적인 단열재로는 진공 단열 패널, 폼, 에어로젤 등이 있으며, 그 중 에어로젤은 개기공 다공체로써 낮은 밀도와 우수한 단열 성능을 보인다. [2] CNT 에어로젤에서 1차원 CNT는 반데르발스 힘에 의해 랜덤하게 분포하여 3차원 네트워크 구조를 형성하는데 이때, 단일 CNT의 높은 열전도율 (~3000 W/m·K)에도 불구하고 네트워크 내에서는 낮은 열전도율 (0.025W/m·K)을 기록하게 된다.



Fig. 1. Thermal conductivity of CNT aerogel dependent on gas type [2].

이처럼 CNT 에어로젤은 뛰어난 단열 성능을 가지고 있으나, 고온에서 산화로 인해 손상이 발생하며, 온도 상승에 따라 복사에 의한 열전달이 T³에 비례하여 급격하게 증가하는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 이번 연구에서는 방사선에 의한 열전달을 효과적으로 차단하고, 에어로젤의 열 안정성을 향상시키기 위한 세라믹 코팅 기술을 적용하고자 하였다.

코팅 공정으로는 화학기상증착법(CVD)을 채택 하였으며, 전구체로 B₂O₃와 NH₃, H₃N-BH₃(Ammoniaborane complex) 등을 사용하였다. 또한, 합성 과정에서는 아르곤과 수소 혼합가스를 진공 환경에서 주입하여 전구체의 기화가 시작되는 온도를 낮추고, 기체 분자의 평균자유행로를 증가시켜 샘플까지 도달할 수 있도록 하여, 1050℃의 저온에서 반응을 진행하였다.



Fig. 2. Schematic diagram of chemical vapor deposition [3].

초기 실험에서는 B₂O₃ 와 Urea 고체 시약을 이용하였으나, Urea의 기화 및 공급량 제어가 어려웠고, 반응 도중 시약이 조기 소진됨에 따라 충분한 코팅이 이루어지지 않는 문제가 확인되었다. 이를 개선하기 위해 B₂O₃에 NH₃ 기체를 사용하여 질소(N) 공급을 증대시키고자 하였으나, 단일벽 탄소나노튜브를 템플릿으로 활용하는 공정 특성상, 반응 과정에서 생성된 B₂O₃의 산소 성분에 의해 에어로젤이 산화되는 문제가 지속적으로 발생하였다.

이러한 한계를 극복하기 위해 최종적으로 H₃N-BH₃를 전구체로 사용하여 CNT의 튜브 형태를 유지하면서 손상 없이 코팅을 형성하는 방식을 채택하였다. 다만, H₃N-BH₃ 기반 코팅은 주로 샘플 표면에 집중적으로 형성되는 경향이 있어, 향후 BCl₃를 활용하여 내부까지 균일한 코팅이 가능하도록 연구를 확장할 계획이다.

참고문헌

- [1] Adv. Funct. Mater. 2020, 30, 1904815
- [2] Adv. Mater. 2013, 25, 2926-2931
- [3] ACS Appl. Nano Mater. 2023, 6, 15374–15384

고온 내구성이 우수한 탄소 나노 튜브-탄소 섬유 하이브리드 복합재 High-Temperature Resistant Carbon Nanotube-Carbon Fiber Hybrid Composites

*김성희 ^{1,2}, 장혜경 ¹, 박병호 ¹, 이정완 ¹, 김정수 ¹, 엄문광 ¹, 이승기², 오영석¹⁺ *S.H Kim^{1,2}, H.K Jang¹, B.H Park¹, J.W Lee¹, J.S Kim¹, M.K Um¹, S.K Lee², Y. Oh¹⁺

> ¹ 한국재료연구원 융·복합재료연구본부² 부산대학교 재료공학과 ⁺E-mail: youngsoh@kims.re.kr

Keywords: Carbon nanotube, Carbon fiber, Thermal resistance

경량성과 내열성을 갖춘 고분자 탄소 복합소재에 대한 수요가 여러 산업에서 증가하고 있다. 단일벽 탄소나노튜브(SWCNT)는 높은 탄성률과 인장강도로 인해 고분자 복합재의 강화재로 많이 사용되지만, 작은 직경으로 인해 강한 반 데르 발스 상호작용으로 쉽게 응집되어 기계적 성능 향상에 한계가 있다. 이를 해결하기 위해, 잘 분산된 SWCNT를 고분자 복합재 제작용 프리폼(preform)으로 사용하였다. 이 프리폼은 등방성 미세 기공으로 높은 표면적을 통해 기계적 및 열적 안정성을 제공하여 복합재의 성능을 향상시킨다. SWCNT 기반의 고분자 복합재 프리폼은 나노다공성 네트워크를 형성하여 고분자 사슬의 움직임을 제어하여, 고온에서의 기계적 안정성을 유지한다. 고분자 사슬의 공간적 분포보다 작은 CNT 네트워크 가격은 고분자 사슬의 자유로운 움직임을 억제함으로써 기계적 안정성을 향상시켰다. SWCNT 함량이 증가함에 따라 고분자 사슬의 이동성이 감소하여 열가소성 고분자 복합재의 내열성 또한 증가하는 결과를 얻었다.[1] 본 연구에서는 복합재 프리폼을 탄소 섬유와

복합화하여 경량성과 내열성을 모두 만족하는 탄소나노튜브-탄소섬유 복합재를 제작하였다. 이 복합재의 기계적 특성과 열 물성 평가를 통해 고온 환경에서도 안정적인 구조적 성능을 유지할 수 있음을 확인하였다. 항공우주 및 고온 환경에서의 구조 부품으로의 적용 가능성을 더욱 확대시킬 수 있다.



Figure 1. Thermomechanical characteristics of composites[1]



Figure 2 . Carbon Nanotube/Polyimide Preform-Carbon Fiber Hybrid Composite

References

[1] Y. Oh et al. ACS Nano. 2015, 9, 4, 4103–4110

열가소성 탄소섬유 복합재의 유도 가열 접합 향상을 위한 나노 복합재

Polymer Nanocomposite Susceptors for the Induction Fusion Welding of the Carbon Fiber Reinforced Thermoplastics (CFRTP)

* 김나영^{1,2}, 백인석¹, 장혜경¹, 김정수¹, 박병호¹, 김진수¹, 성동기², 오영석¹⁺ * N.Y. Kim¹, I.S. Pack¹, H.K. Jang¹, J.S. Kim¹, B.H. Park¹, J.S. Kim¹, D.G. Seong², Y.S. Oh¹⁺

> ¹ 한국재료연구원 융·복합재료연구본부, ² 부산대학교 고분자공학과 ⁺E-mail: youngsoh@kims.re.kr

Keywords: CFRTP, SWCNT, Induction heating, Susceptor

열가소성 탄소섬유 강화 복합재(CFRTP)는 경량 및 고강도 소재로 재활용이 가능하고, 용접을 통한 접합이 가능하여 항공 우주, 자동차, 건축 산업 등에서 널리 사용되고 있다.[1] 기존의 복합재 체결에는 금속을 사용하는 것이 일반적이지만, 이는 중량 증가와 응력 집중으로 인한 파손 문제를 유발한다. 이러한 문제를 해결하기 위한 대안으로 물리적 체결을 대체할 수 있으며, 짧은 공정 시간의 이점을 제공하는 유도 용접 공정이 주목받고 있다. 그러나 유도 용접 시 코일과 인접한 면에서의 국부적 과열과 접합 계면에서의 불균일한 온도 분포로 인해 복합재가 손상되고, 접합 품질이 저하될 수 있다.

본 연구에서는 유도 가열 시 계면 접합 소재를 사용하여 CFRTP의 접합 계면을 신속하게 가열하고, 표면 손상을 최소화하면서 접합부의 신뢰성을 향상시키고자 하였다. 계면 접합 소재로는 PA6, CNT, Fe₃O4를 복합화하여 제작하였다. 계면 접합 소재의 유도 가열 특성을 확인하기 위해 Laminate와 계면 접합 소재의 온도 특성을 비교하였다.

170V의 전압을 이용한 유도 가열 실험을 통해 초기 가열 속도를 비교한 결과, Laminate는 온도가 점진적으로 상승하는 반면, 계면 접합 소재는 1초 이내에 급격한 온도 상승을 보이며 Laminate보다 빠르게 공정 온도에 도달하는 것으로 나타났다. 또한, Laminate 위에 계면 접합 소재를 배치하였을 때, 해당 소재를 사용하지 않은 경우보다 신속하게 공정 온도에 도달함을 확인하였으며, 이는 유도 가열 거동 향상에 효과적인 역할을 수행함을 시사한다. 이러한 결과를 바탕으로, 계면 접합 소재가 접합 계면의 온도를 효과적으로 상승시키며, CFRTP 간 유도 가열 접합용 소재로서의 활용 가능성을 확인하였다.



Fig. 1. Schematic diagram of induction heating

참고문헌

[1] N. Forintos et al. Journal of Compos B, pp. 331-43 (2019)

다공성 나노탄소구조체의 기공구조 조절과 금속-공기전지 응용 Engineering of a Tunable Porous Nanocarbon Electrode for Metal-Air Batteries

*김다영¹, 박병호¹, 성동기², 오영석¹⁺ * DaYoung Kim¹, ByeongHo Park¹, DongGi Seong², YoungSeok Oh¹⁺

¹ 한국재료연구원 융·복합재료본부,² 부산대학교 고분자공학과 ⁺E-mail: youngsoh@kims.re.kr

Keywords: Metal-air battery, Nanocarbon, Energy storage

1. 서론

금속-공기 전지는 이론상 매우 높은 에너지 밀도를 제공하여 차세대 에너지 저장 시스템으로 주목받고 있다[1]. 기존 공기극은 다공성 탄소를 이용해 방전 생성물을 저장하지만, 단독으로는 충분한 기계적 강도와 전기전도도를 확보하기 어려워 보통 니켈 폼, 메탈 메쉬, 카본 페이퍼 등 집전체에 로딩된다[2][3][4], 이 방식은 부가 구성 요소로 인해 부반응 발생 가능성은 물론 전극의 총 질량과 부피가 증가해 전지의 에너지 밀도에 악영향을 미친다. 본 연구에서는 나노카본으로 구성된 구조체를 제조하고, 합성 조건에 따른 기공 구조 조절로 서로 다른 다공성을 가진 전극이 금속-공기 전지 성능에 미치는 영향을 체계적으로 분석하고자 한다.

2.실험

2.1 전극 제조

본 연구의 전극은 등의 탄소나노튜브 나노카본을 분산, 젤 형성, 건조의 과정을 통해 합성되었으며, 조건을 달리하여 기공 크기와 조절하였다. 이로써 분포를 별도의 집전체나 바인더 없이도 충분한 기계적 강도와 높은 전기전도도를 가진, 서로 다른 다공성을 지닌 전극을 제작할 수 있었다.

2.2 셀 조립

서로 다른 다공성의 전극을 이용해 금속-공기 전지를 조립하였다. 셀은 일반적인 금속-공기 전지 구성에 맞추어 제작되었으며, 개방 전압이 정상 범위 내에 있는 것을 확인하였다. 이후 방전 테스트를 통해, 전극의 기공 구조 차이가 전지의 방전 용량에 미치는 영향을 평가하였다.

3. 결과

방전 테스트 결과, 금속-공기 전지의 공기극으로 성능은 전극의 기공 구조에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 기공 구조 조절을 통해 방전 생성물을 효과적으로 저장함으로써 높은 방전 용량을 구현했고, 사용 후에도 전극 구조의 안정성을 유지하는 것으로 확인되었다. 반면, 기공 구조가 방전 생성물을 저장하기 힘든 경우. 상대적으로 낮은 방전 용량과 전류 밀도의 증가에 따라 급격한 성능 변화를 보였다. 이러한 결과는 구조가 금속-공기 전극 내부의 기공 전지의 저장 전기화학 반응 및 방전 생성물 능력에 직접적인 영향을 미침을 시사한다.



Fig. 1. Diagram of Metal-Air Battery[5]

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 나노탄소구조체를 활용해 집전체 없이도 금속-공기 전지 전극을 구현하고, 합성 조건에 따라 조절 가능한 다공성 구조가 전지의 성능에 미치는 영향을 확인하였다. 향후 연구에서는 나노탄소구조체 합성 공정을 더욱 정밀하게 제어하여 원활한 산소 확산과 방전 생성물 증착을 이끄는 최적의 전극 구조를 전극을 도출하고, 대면적의 제조해 실용화 가능성을 높이는 데 주력할 계획이다.

참고문헌

- [1] D. Geng et al., Adv. Energy Mater., 6:1502164, 2016.
- [2] D. Su et al., NPG Asia Materials., 8:e286, 2016.
- [3] H. Lim et al., Adv. Mater., 25:1348-1352, 2013.
- [4] F. Wang et al., Journal of Power Sources, 272:1061-1071, 2014.
- [5] A. G. Olabi et al., Energies, 14:7373, 2021.





2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

스티칭 공법을 활용한 pitch계 탄소 섬유/에폭시 복합재 구조의 열전달 성능 향상 및 두께 방향 보강 특성 연구

Enhancing Thermal Conductivity and Through-Thickness Reinforcement of Pitch-

Based Carbon Fiber/Epoxy Composites Using Stitching Process

*오준혁¹, 최훈철¹, 곽병수¹⁺ * J.H. Oh¹, H.C. Choi¹, B.S. Kwak¹⁺

¹ 경상국립대학교 기계항공공학부 ⁺E-mail: <u>bs.kwak@gnu.ac.kr</u>

Keywords: Thermal Conductivity, pitch - based carbon fiber, Stitching process, Through-Thickness reinforcement

1. 서론

CFRP는 열관리 성능의 한계로 위성 외부 구조물 적용에 제약이 있다[1-2]. pitch계 CFRP는 고강성 및 고열전도도 특성으로 우주환경 적용에 기대되는 소재이지만, 면내 대비 두께 방향 열전도도가 낮다[3]. Stitching 공법은 CFRP의 두께 방향 보강을 위한 기법으로, 이를 열전달 경로로 활용하여 열전도도 개선과 기계적 보강 효과를 동시에 기대할 수 있다.

본 연구에서는 pitch계 CFRP에 두께 방향으로 pitchbased carbon fiber를 삽입하는 Stitching 공법을 적용하여 고열전도도 복합재 구조를 구현하였다.

2. 시편 제작 및 시험

2.1 고열전도도 복합재 시편 제작

본 연구에서는 pitch계 CFRP에 pitch-based carbon fiber를 Stitching하여 고열전도도 복합재 시편을 제작하였다. Stitching 간격(3 mm, 5 mm, 10 mm)을 조절하여 Stitching density를 변수로 설정하였으며, 열전도도 개선을 비교하기 위해 PAN계 CFRP도 동일한 공정을 적용하였다. 모든 시편은 Hand lay-up 방식으로 적층한 후, Autoclave 공정을 통해 제작되었다.

2.2 열전도도 및 기계적 성능 평가

제안된 구조의 면내 및 두께방향의 열전도도를 획득하기 위해 식(1)을 활용하여 계산하였다.

$$TC = \alpha \cdot \rho \cdot Cp$$

(1)

제작된 CFRP 시편의 밀도는 전자 마이크로저울과 마이크로미터를 이용하여 산출하고, 비열은 시차주사열량계를 활용하여 측정하였다. 또한, 두께 및 면내 방향 열확산도는 ASTM E1461을 준수하여 Laser Flash Analysis (LFA)로 측정하였다.

Stitching density에 따른 두께 방향 보강 효과는 ASTM D5528를 준수하여 Mode I DCB 시험을 통해 시편의 두께 방향 파손하중을 측정하였다.

3. 시험결과 및 분석

pitch계 CFRP의 면내 및 두께 방향 열전도도 확인 결과, Stitching 하지 않은 pitch계 CFRP 시편 대비 최대 39.9%, 206.4% 개선되었으며 Stitching density에 비례하여 증가하였다. 이는 Stitching density가 증가함에 따라 열전달 경로가 추가적으로 형성된 결과로 분석하였다. 반면, PAN계 CFRP의 열전도도 개선은 Stitching 하지 않은 PAN계 CFRP의 열전도도 개선은 Stitching 하지 않은 PAN계 CFRP 시편 대비 최대 116.0%, 3917.0%로, pitch계 CFRP보다 더 큰 개선 효과를 보였다. 면내 방향은 모재와 Stitched fiber의 열전도도 차이가 PAN계 CFRP가 크기 때문에 개선 효과가 뚜렷한 것으로 분석하였고, 두께 방향은 pitch계 CFRP의 높은 열전도도로 인해 두께 방향으로 진행되던 열이 면내 방향으로 소산된 결과로 판단하였다.

pitch계 CFRP의 DCB 시험 결과, 두께 방향 파손하중은 최대 299.4% 개선되었지만, Stitching density와 비례하여 증가하지 않았다. 이는 Stitched fiber의 하중지지와 Stitching 과정에서 발생한 모재의 기계적 파손 중첩 때문으로 분석하였다.

4. 결론

본 연구에서는 pitch계 CFRP에 Stitching 공법을 적용하여 열전도도 및 두께 방향 보강효과를 분석하였다. Stitching density의 증가에 따라 열전도도와 두께 방향 보강효과가 개선되었으며, PAN계 CFRP는 pitch계 CFRP 대비 열전도도 개선 효과가뚜렷하게나타났다.또한, Stitching 공법이 두께 방향 하중 지지에 기여함을 확인하였으나, 지나친 Stitching density는 복합재 내부 손상으로 인해 기계적 성능 개선에 한계가 있음을 확인하였다.

참고문헌

[1] D Sciti et al. Journal of EcerS. 41(5):3045-3050, 2021.

- [2] A Ismail et al. *Analog Integr. Circuits Signal Process.* 93:1-13, 2012.
- [3] HB Shim et al. J. Mater. Sci. 37:1881-1885, 2002.

후기

2025년 경상국립대학교 글로컬 대학 30 프로젝트 재원의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아수행된 연구입니다.(RS-2024-00397400).

Stitching 공법을 적용한 Cu-coated Carbon Fiber/Epoxy Composit위 열적 · 기계적 특성 평가

Evaluation of the Thermal and Mechanical Properties of Cu-Coated Carbon

Fiber/Epoxy Composite with Stitching Process

이민주 1. 심소휘 1. 곽병수 1

* M.J. Lee¹, S.H. Sim¹, B.S. Kwak¹⁺

¹ 경상국립대학교 기계항공우주공학부 + E-mail: bs.kwak@gnu.ac.kr

Keywords: Copper-coated carbon composite, Thermal conductivity, Stitching process, mechanical property.

1. 서론

CFRP는 위성에 적용 시 초경량 설계가 가능하지만 열관리 한계로 인해 적용의 제한이 있다[1]. Pitch-based carbon fiber 등 고열전도도 소재를 사용할 수 있지만 두께 방향 열전도도는 크지 않으며, PAN-based carbon fiber 대비 기계적 물성이 부족한 한계가 있다[2-3].

본 연구에서는 복합재의 열전도도를 향상시키기 위해 구리 코팅된 PAN-based carbon fiber에 고열전도도 소재인 Pitch-based carbon fiber를 삽입한 고열전도도 복합재를 제안하였다.

2. 고열전도도 복합재 제작 및 물성 측정

2.1 고열전도도 복합재 제작

본 연구에서는 Cu-coated CFRP (CCF)의 두께 방향으로 pitch-based carbon fiber를 삽입하는 Stitching 과정을 통해 고열전도도 복합재를 제작하였다. 이때 Stitching density를 10 mm, 5 mm로 조절하였으며, Cucoated CFRP의 적층 비율과 적층 순서를 Table 1에 나타내었다. 모든 시편은 Hand lay-up으로 제작하여 오토클레이브 공정을 통해 고열전도도 구리 코팅 탄소 복합재를 제작하였다.

Table 1	Stacking	sequence of	Cu-coated	CFRP
---------	----------	-------------	-----------	------

2.3 기계적 물성 시험

Cu-coated CFRP의 적층 비율 및 적층 순서에 따른 계면 물성을 확인하기 위해 ASTM D2344를 준수하여 Short beam shear test를 수행하여 층간 전단강도를 확인하였다. 또한 Stitching density에 의한 기계적 물성을 평가하기 위해 ASTM D3039를 준수하여 인장 시험을 수행하였다.

3. 결과 및 분석

열적 물성의 경우 구리 코팅 섬유의 적층 비율이 증가할수록 면내 방향 열전도도가 향상되었으며, Stitching density가 증가할수록 두께 방향 열전도도가 향상되는 경향을 확인하였다. 이는 구리 코팅층과 pitch-based carbon fiber가 열전달 경로를 형성하였기 때문이라고 판단된다.

기계적 물성 측정 결과 구리 코팅 탄소섬유와 계면이 증가할수록 층간 전단강도가 감소하는 것을 확인하였다. 이는 구리 코팅으로 인한 섬유와 수지의 결합력 약화로 인한 계면 결합력 감소 때문으로 분석하였다. 또한, Stitching density가 수록 증가할 인장강도가 감소하였다. 이는 Stitching으로 발생한 Composite laminate의 기계적 파손이 인장강도를 저하시킨 것으로 분석하였다.

Туре	Specimen ID	Stacking sequence	4. 결론 및 향후과제
	0%	[CF] ₈	본 연구에서는 PAN-based carbon fiber에 고열전도도
Cu-coated	50%_1	$[CF_2/CCF_2]_S$	소재인 구리를 코팅하고, pitch-based carbon fiber를
CFRP	50%_2	$[CCF_2/CF_2]_S$	두께 방향으로 삽입한 고열전도도 복합재를
-	100%	[CCF] ₈	제안하였다. Cu-coated CFRP의 적층 비율 및 stitching
			density의 증가에 따라 열적 물성은 창승하고, 기계적

2.2 열적 물성 측정

Cu-coated CFRP의 적층 비율 및 순서, Stitching density를 조절하여 제작한 고열전도도 복합재 시편의 열적 물성을 확인하기 위해 Laser Flash Analysis (LFA) 방식을 활용하여 제작한 복합재 시편의 면내 방향 및 두께 방향의 열확산도를 측정하였다.

물성이 저하되는 경향을 확인하였다. 향후 위성 적용을 고려하여 열진공 챔버를 이용한 Stitching된 Cucoated CFRP의 우주 환경 적합성 평가를 수행할 예정이다.

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

참고문헌

- [1] Yanko et al. Transactions on Aerospace Research. 1-10, 2021.
- [2] AbubakarGamboMuhammadl. MelikasahUniversity, 2014.
- [3] Ganguli et al. Carbon :46.5, 2008, 806-817.

후기

이 성과는 2022년 우주항공청의 재원으로 미래우주교육센터(RS-2022-NR067079)의 지원과 2025년 경상국립대학교 글로컬 대학 30 프로젝트 재원의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

유한요소해석을 활용한 CF/PPS 열가소성 복합재 구조물 스탬프 성형 공정 최적화 Optimization of Stamp Forming Process for CF/PPS Thermoplastic Composites Using Finite Element Method

*이우주 ¹, 유재현 ¹, 지성하 ², 주현우 ², 곽병수 ¹⁺ * W.J. Lee ¹, J.H. Yoo ¹, S.H. Ji ², H.W. Ju ², B.S. Kawk¹⁺

¹ 경상국립대학교 기계항공우주공학부, ² 한국항공우주산업㈜ ⁺E-mail: <u>bs.kwak@gnu.ac.kr</u>

Keywords: Thermoplastic composite, Stamp forming process, Out of Autoclave, Finite element method

1. 서론

스탬프 성형(Stamp Forming) 공정은 짧은 공정 시간으로 열가소성 복합재 구조물의 대량 생산을 가능하게 한다 [1]. 하지만 제작 과정에서 압력, 온도 및 Tensioner와 같은 다양한 공정변수에 따라 제품 품질 차이가 발생한다 [2]. 따라서 제품 품질 향상을 위해 최적의 공정 변수를 도출하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 CF/PPS 열가소성 복합재 구조물 성형성을 유한요소해석을 통해 예측하고, 실제 제작을 통해 검증하였다.

2. 성형해석

2.1 성형해석 조건

성형 해석은 상용 소프트웨어 Aniform을 활용하였다. 사용된 유한요소 모델은 2D 요소인 trias로 구성하였으며, grid size는 2.2 mm로 설정하였다. 스탬프 성형 공정 동안 블랭크에 균일한 장력을 가하기 위해 Tensioner를 블랭크에 체결하였다. Table 1에 나타낸 변수를 조정하여 최적의 공정변수를 도출하였다.

Table 1 Process Parameters for Finite Element Method

공정 변수	값
Tensioner 계수(N/mm)	0.5, 1.0, 2.0, 3.0
Tensioner 수(ea)	6, 10, 17
초기 하중(N)	0, 10, 20, 30
금형 온도(℃)	160, 170, 180, 200
가압 압력(bar)	20, 30, 40, 50

2.2 성형해석 결과

본 연구에서는 Sher angle, Fiber stress, Thickness, Fold 결과를 통해 성형 해석 결과를 평가하였다. Shear angle 분석을 통해 제작물의 주름 발생 가능성을 평가하고, 적절한 Trim을 적용하여 Shear angle을 줄이며 균일한 Laminate thickness를 확보하였다. Tensioner의 스프링 계수와 개수가 감소할수록 Shear angle 및 Fiber stress가 감소하였다.

3. 제작 및 평가

3.1 열가소성 복합재 구조물 제작

본 연구에서는 유한요소해석을 통해 도출된 공정변수를 기반으로 CF/PPS 블랭크를 스프링 상수 0.5 N/mm, 초기하중 0 N을 가진 Tensioner로 고정하였다. 블랭크를 IR heater로 320 ℃ 까지 가열한 후 2분간 유지하였다. 그 후 180 ℃로 가열된 금형으로 이송 후 40 bar의 압력으로 120초간 가압 후 냉각하였다. 성형된 복합재의 열변형을 최소화하기 위해 유리전이 온도 이하에서 탈형하였다.

3.2 유한요소모델 검증

열가소성 복합재 구조물의 성형성을 평가하기 위해 성형 중 발생한 주름을 유한요소해석 결과와 비교하였다. 제작된 구조물에서는 유한요소해석 결과에서 예측된 주름 발생 영역에 주름이 나타나지 않았으나, 해당 영역에서 Resin rich area가 형성되었다. Tensioner가 체결된 부근에서 주름이 발생하였으나, 이는 실제 기능부가 아닌 추후 제거될 영역이므로 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단하였다.

3D-Scan을 활용해 구조물의 두께를 측정하였다. 총 12개 지점에서 두께를 측정하였으며, 측정된 모든 구조물의 두께는 허용 기준인 ± 8%이내에 해당하여 제품의 품질이 적합함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 활용하여 스탬프 성형 공정의 최적 공정변수를 도출하고 이를 통해 균일한 두께 분포와 최소한의 주름 영역을 가진 블랭크 형상을 설계하였다. 대부분의 기능부 영역에서는주름이발생하지 않았으며,결함을 정확히 예측함으로써 유한요소해석의 타당성을 확인하였다.

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

참고문헌

BE Lee et al. *Mater Trans.* 27:60-65, 2018.
 Bean et al. *Polymers.* 14.9: 1877, 2022

후기

본 연구는 우주항공청(KASA)의 "일체형 복합재 비행 조종면 및 구동 메커니즘 기술개발(RS-2023-00257080)" 과제의 지원을 받아 수행된 연구 결과임과 2025년 경상 국립대학교 글로컬대학 30사업에 의하여 수행된 연구입 니다.

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

전자기 시뮬레이션을 통한 열가소성 복합재 구조 유도가열 공정 변수 영향성 평가

Evaluation of Process Parameter Effects in Induction Heating of Thermoplastic

Composite Structures Through Electromagnetic Simulation

강윤주 ¹, 지성하 ², 주현우 ², 곽병수 ¹⁺ ^{} Y.J. Kang¹, B.S. Kwak¹⁺

¹ 경상국립대학교 기계항공우주공학 ² 한국항공우주산업㈜ ⁺E-mail: bs.kwak@gnu.ac.kr

Keywords: Finite Element Analysis, Induction welding, Thermoplastic composites, Heating behavior

1. 서론

유도용접 공정은 비접촉식 접합 공정으로 다양한 산업 분야에서 활용된다 [1]. 열가소성 복합재는 고화 및 용융 특성으로 유도 용접 공정을 통해 접합이 가능하다. 유도 용접 공정은 Coil 형상, 전류의 세기 등 공정변수에 따라 자기장의 분포가 달라지며 열가소성 복합재의 발열 거동에 크게 영향을 미친다. 이를 제작을 통해 확인하는 데는 막대한 시간과 비용이 소요된다 [2-3].

따라서, 본 연구에서는 유한요소 해석을 통해 유도가열의 공정 변수의 영향성을 평가하였다.

2. 유도 가열 해석

2.1 해석 조건

본 연구에서는 복합재의 유도 가열 거동을 분석하기 위해 유한요소해석을 수행하였다. COMSOL Multiphysics를 사용하여 해석을 수행하였으며, 재료로는 열가소성 복합재인 Carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide (CF/PPS)를 사용하였다. 해석 모델을 3차원 Solid 요소 기반으로 모델링하였고, 유도 Coil과 복합재 간의 거리, 주파수 변수는 동일하도록 하였다. Coil 형상, 전류의 세기를 변수로 두고 발열 거동을 해석으로 평가하였다.

2.2 공정 변수에 따른 발열 거동 평가

유도가열 거동 평가를 위한 공정변수로 Coil 형상, 전류의 세기를 선정하였다. Coil의 형상은 Pancake, Rectangle, Simple coil로 3가지를 설계하였으며, 전류의 세기는 400A, 550A, 600A, 650A로 4가지 케이스를 공정변수로 설정하였다. 해석 결과는 Fig.1과 같이 Coil 형상 및 전류의 세기에 따른 복합재 접합부의 발열 거동을 분석하였다.



Fig. 1. Simulated heating behavior of CF/PPS

3. 결과 및 분석

발열 거동 평가 결과, Pancake coil이 가장 균일한 발열 분포를 보였으며, 동시에 가장 높은 온도에 도달하였다. 반면, Simple Coil은 전류의 세기가 높아져도 복합재의 녹는점에 도달하지 못하는 결과를 보였다. 모든 코일 형상에서 전류의 세기가 증가할수록 발열량이 증가하는 경향을 확인하였다. 또한, 코일 형상별 복합재의 녹는점 도달 시간, 가열 면적 등을 확인하였다

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 공정변수에 따른 유도가열 거동을 평가하였다. Coil 형상에 따라 발열 분포가 달라지며, 전류의 세기가 증가할수록 발열 효율이 향상됨을 확인하였다. 이러한 연구 결과는 유도 용접 공정의 최적화 및 효율성 향상에 기여할 것으로 기대된다.

향후 연구에서는 소재의 적층 순서를 고려한 모델 고도화가 필요하며, 유한요소해석에서 획득한 공정 변수를 기반으로 실제 공정에서의 발열 거동을 평가할 예정이다.

참고문헌

- [1] TJ Ahmed et al. Compos Part A Appl Sci Manuf. 37:1638-1651, 2006.
- [2] M Duhovic et al. ECCM 16–European conference on composite materials, 2014
- [3] T Bayerl et al. Compos Part A Appl Sci Manuf. 57:27-40, 2014.

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

후기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00397400)과 2025년도 경상국립대학교 글로컬대학30 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 또한, 우주항공청(KASA)의 "일체형 복합재 비행조종면 및 구동 메커니즘 기술개발(과제번호: RS-2023-00257080)"과제의 지원을 받아 수행된 연구 결과입니다.

PEMFC 성능향상을 위한 기체확산층 전도성-초소수성 코팅 Conductive superhydrophobic coating on gas diffusion layer for enhanced proton exchange membrane fuel cell performance

*홍명진, 신승철, 엄태식, 이상의⁺ *M.J. Hong, S.C. Shin, T.S. Eom, S.E. Lee⁺

인하대학교 기계공학과

⁺E-mail: selee@inha.ac.kr

Keywords: Gas Diffusion Layer, Carbon nanotube, Nanocomposites, Proton Exchange Membrane Fuel Cell

1. 서론

Gas diffusion layer(GDL)은 다공성 탄소종이 기판 (Gas diffusion backing layer,GDB)위에 탄소기반 미세다공성층(Microporous layer,MPL)이 도포되며 PEMFC 작동시 물,기체,전자를 이송함^[1]. 상용품에는 원활한 기체 이동을 위해 물이 기공을 막지않도록 GDB에 소수성 불소수지 PTFE 코팅을 진행하나 PTFE는 절연성을 가지는 문제가 있음^[2]. 본 연구에서 는 함량별 CNT/PTFE 복합재로 GDB의 전기전도성과 MPL과의 접촉저항을 개선함. 최종적으로 GDL의 소수성, 구조성능, 전기전도성, PEMFC 셀성능을 균형있게 갖추도록 하는 CNT/PTFE 함량을 도출함.

2. 실험

함량별 CNT/PTFE 수분산액(코팅액)을 GDB에 코팅후 고온소결하여 CP-GDBs(CxxPyyB,xx/yy는 수분산액에서 CNT와 PTFE의 질량비)를 제작하였고, 카본블랙 기반 자체제작 MPL을 도포하여 CP-GDL (CxxPyyL)을 제작함. 이후 SEM 촬영, 접촉각 측정, 전기전도도 측정, 압축실험을 통해 CP-GDBs와 CP-GDLs를 특성화하였고, CP-GDLs를 Cathode GDL로 사용하여 셀 성능평가를 진행함.

3. 결과 및 분석

3.1 CP-GDBs 물성

CP-GDBs에서 CNT/PTFE 복합재가 탄소종이의 섬유 층간에 침투하여 소수성을 가지면서도 PTFE 코팅 대비 높은 전기전도성을 가짐. 함량별로는 코팅액의 CNT함량 증가(PTFE 함량 감소)에 따라 전기전도도는 증가하고, 압축율 또한 증가함. 압축율의 증가는 기계적 강성의 감소를 의미함. C50P50B까지는 코팅을 통해 적절한 소수성 특성을 지니게 되었으나, C90P10B의 경우 과량의 CNT 및 적은 PTFE로 인해 소수성 특성을 갖지 못함을 확인 가능함.

3.2 PEMFC 셀 성능

CP-GDLs를 Cathode GDL로 사용하여 셀 성능평가를 진행하였음. 코팅액의 CNT 비율 증가에 따라 max power density가 증가함. 이는 GDL 전기전도도 증가에 따른 cell ohmic loss 감소의 영향으로 확인됨. 고전류밀도 구간에서 CNT는 부족한 소수성으로 인해 flooding이 발생하여 C50P50L에 비해 낮은 power density를 나타냄.



Fig. 1. (a) Structure and schematic of CP-GDLs, (b) performance evaluation of PEMFC using CP-GDLs as cathode GDL

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 CNT/PTFE 나노복합재 코팅을 통해 GDL의 전기적 성능을 향상시켰고, 코팅액 함량별로 GDB와 GDL의 물성을 종합적으로 분석함. 코팅액의 CNT함량 증가에 따라 전기전도성은 증가하지만 소수성과 기계적 물성은 감소함. Max power density는 코팅액 CNT함량 증가에 따라 증가하지만 과량의 CNT가 코팅된 C90P10L은 flooding 문제가 발생함. 종합적으로 분석하였을 때, C50P50 코팅액이 소수성, 구조적 안정성, 전기전도도, 셀 성능을 균형있게 갖춘 최적 비율임을 도출함.

참고문헌

X.Z. Yuan et al. J. Power Sources. 491:229540, 2021.
 M.S. Ismail et al. J. Power Sources. 195(9):2700-2708, 2010.

후기

이 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받는 중견연구사업인 '단분자 플러렌 유도체를 이용한 금속 복합재료의 물성 제어 기술 개발' (2022R1A2C1006020)에 의해 수행되었습니다.

AFP공정을 활용한 복합재 자동적층기술개발 및 물성에 관한 연구 A study on composite material automated lay-up technology development and properties using AFP process

*윤동환¹, 최재혁¹, 황민성¹, 김주식², 박동진², 박상윤³, 황경정³, 최진호¹⁺ * D.H. Yoon¹, J.H. Choi¹, M.S. Hwang¹, J.S. Kim², D.J. Park², S.Y. Park³, K.J. Hwang³, J.H. Choi¹⁺

> ¹ 경상국립대학교 산학협력단 방위산업기술융합연구소 ² ㈜ANH Structure ³ ㈜현대자동차

> > + E-mail: choi@gnu.ac.kr

Keywords: AFP Process, Composite, Automated Lay-up Technology

1. 서론

현재 국제 환경 이슈 및 연비규제 강화에 따라 친환경 자동차 개발 및 차량 경량화를 촉진하는 추세에 있다. 그 중 경량화와 관련된 대표적인 기술은 탄소섬유복합재를 활용한 구조물을 제작하는 기술로 다수의 제작 공법이 존재한다. 본 연구에서는 AFP(Automated Fiber Placement)공정을 활용해 복합재를 적층하는 자동적층기술을 개발하고 검증용 평판을 제작해 기계적 물성시험을 통한 섬유별 특성을 비교하였다.

2. 장비 및 소재 선정

AFP적층장비는 ㈜ANH Structure에서 보유중인 Mtorres 社 장비를 사용하였으며 이동길이 10m, 작업 부품 최대 직경 4m, 최대 길이 7.5m 까지 적층이 가능하다. 또한 8개 Tow를 걸 수 있으며 한번 작업 시 50.8mm의 작업이 가능하다. 1tow의 너비는 1/4inch(6.35mm) 이다.

소재는 총 4가지의 소재를 사용하였으며 국내 소재사 제품인 Prepreg 2종(TORAY 社), Towpreg 1종(KOLON 社), 해외 소재사 제품인 Prepreg 1종(SOLVAY 社)을 선정해 사용하였다.



Fig. 1. AFP Equipment with Prepreg and Towpreg Installed.

3. 시편 제작 및 가공

시편 제작은 ASTM 규정에 따른 적층 패턴으로 적층하였으며, Autoclave 공정을 활용해 시편을 경화하였다. 경화온도는 125℃에서 120분, 압력은 3.1bar를 가하였다.



Fig. 2. Process of Panel Cure.

4. 결과 및 향후계획

본 연구를 통해 AFP적층장비를 활용해 자동적층기술을 개발하고, 적층 시 제어해야 할 공정 변수를 확인하고 결과를 도출하였다. 섬유의 Tacky 정도와 적층 시 Head의 이송속도, 압력, 온도는 적층 품질을 높일 수 있는 주요 인자로 확인되었다. 또한 Slitting된 섬유의 이형지와의 분리도 매우 중요한 요소이며, 이형지의 두께와 폭은 기존의 제품에 비해 개선 할 필요가 있다. 또한 기계적 물성 실험을 통한 결과값들의 상호 비교를 통해 적층 품질의 영향성에 대해서도 깊게 연구할 필요가 있다.

참고문헌

 H, Pan. W, Qu. D, Yang. J, Li. Y, Ke., Analysis and Characterization of Interlaminar Tack for Different Prepreg Materials During Automated Fiber Placement, Polymer Composites, 43, 4737-4748, 2022

도메인 적응을 이용한 자가진단 기반 복합재 블레이드 손상 진단 Self-Sensing-Based Damage Classification via Domain Adaptation

장주형¹, 이영석¹,이인용², Björn Beck³, Frank Henning³, 박영빈¹⁺ ^{} J. Jang¹, Y. Lee¹, I.Y. Lee², B. Beck³, F. Henning³, Y.-B. Park¹⁺

¹ 울산과학기술원 기계공학과 ² 동아대학교 기계공학과 ³ Fraunhofer Institute for Chemical Technology (ICT) ⁺E-mail: <u>ypark@unist.ac.kr</u>

Keywords: Structural Health Monitoring, Fault Analysis, Carbon Composites, Machine Learning

1. 서론

테일 로터 블레이드는 항공기의 균형 유지에 중요한 역할을 하며, 고강도·경량의 탄소섬유 강화 폴리머(CFRP)로 제작되었지만 높은 원심력, 피로, 충격 등으로 인해 손상에 노출되어 있다[1]. 본 연구에서는 일반화된 테일 로터 블레이드의 구조물 건전성 모니터링을 위해 도메인 적응 기법을 활용하여 환경적 요인을 제거하고, 파손 특성만을 추출하여 범용적인 손상 감지 모델을 구축하였다.

2. 본론1 소제목

2.1 재료 및 시편

CFRP 샌드위치 블레이드(NS14*4.8 Prop-2PCS/PAIR, T-motor, China)는 T800 스프레드-토우 평직 탄소 섬유 직물과 폴리메타크릴이미드(PMI) 폼을 활용하여 제작되었다. 전극 설치를 위해 블레이드 표면의 에폭시 층을 제거한 후, 약 3 mm² 크기의 원형 영역을 정밀하게 연마하였다. 이후, 30 AWG 구리선을 배치하고, 섬유와 전선 간 접촉 저항을 최소화하기 위해 실버 페이스트(Elcoat P-100, USA)를 도포하여 전극을 형성하였다.

2.2 테스트 베드



Fig. 1. Testbed

본 실험은 SunnySky V3508 브러시리스 모터와 Covis 슬립링을 사용하여 회전 실험을 진행하였고, 전기저항 신호는 Keithley 7510을 통해 측정되었다.

2.3 알고리즘

본 연구에서는 특징 추출 후, 두 개의 출력 분기를 통해 손상 상태를 분류하는 라벨 분류 네트워크와 도메인 차이를 최소화하는 도메인 분류 네트워크로 동작한다. 도메인 분류 네트워크의 Gradient는 Gradient Reversal Layer를 통해 반전되어 도메인 간 분포 차이를 줄이면서 일반화 성능을 향상시킨다.

3. 결과

Fig. 2(a,b)에서 확인할 수 있듯이, 동일한 파손 유형이라도 환경에 따라 전기저항 거동이 차이를 보인다. Fig. 2(c,d) 통해, 제안된 모델이 도메인과 무관한 특징을 효과적으로 학습했음을 확인할 수 있다.



Fig. 2. t-sne feature distribution by original features classified by (a) domain and (b) label and by after domain adaptation classified by (c) domain and (d) label

4. 결론 및 향후과제

도메인 차이를 줄이는 도메인 적응 알고리즘 개발을 통해 구조물 건전성 모니터링의 일반화 성능을 향상시켰다. 향후 실환경 데이터 셋을 활용한 연구를 통해 적용 가능성을 확장할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] Chen X, et al. Compos Part A Appl Sci Manuf. 140:106189, 2021.

후기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00397400).

Enhancing the EMI Shielding Effect of Polymer Composites through Metastructures by DLP Printing

*Huiying Jin¹, Zhihao Zhang² and Jonghwan Suhr¹⁺

¹ School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University

² Department of Materials Science and Engineering, College of Materials, Xiamen University

⁺E-mail: suhr@skku.edu

Keywords : Polymer Composite, Metastructure, DLP Printing, EMI Shielding

1. Introduction

With the rapid development of smart and highly integrated electronics, EMI shielding components require to be smaller, lighter, customizable, and efficient[1]. Polymer composites have advantages for EMI shielding applications due to their high stability, processability, and low density, but their shielding performance is still lower than traditional metals. By integrating metastructures into the design of EMI shielding components, it is possible to achieve higher shielding efficiency through internal reflections[2]. In this study, we propose a DLP-printable resin with high conductivity, transparency, and low viscosity, and enhance its shielding effect by printing of the honeycomb metastructure.

2. Experiment

2.1 Preparation of polymer composite resin:

The MWCNT filler was functionalized by refluxing in the acid matrix to improve dispersion in the polymer matrix and the HEMA(2-hydroxyethyl methacrylate) solution was added to the resin matrix as a diluent to decrease the viscosity of composite resins. Polymer composite resins were then synthesized with MWCNT and f-MWCNT(functionalized-MWCNT) fillers via the solvent-assisted mixing method at the filler content of 0.1, 0.2, 0.3, and 0.4 wt%.

2.2 DLP Printing of Metastructure:

Printing parameters were determined from the working curve, which illustrates the relationship between curing thickness and UV exposure time. Subsequently, printing parameters of composite resins were optimized to ensure the manufacturability and printing of the honeycomb metastructure for subsequent characterization of EMI shielding properties.

3. Results and Discussion

The FT-IR analysis confirmed the successful synthesis of the f-MWCNT filler. Characteristic peaks of -OH and C=O indicated the carboxyl group on the filler surface.

A cylindrical specimen with various composite resins was used to measure electrical conductivity using a digital multimeter.







Fig. 2 . (a) Viscosity of different contents and types of filler at a shear rate of 1 s⁻¹; (b) Curing thickness of composite resins with different time.

4. Conclusions and Future Works

The f-MWCNT filler shows better dispersion in the polymer resin matrix, resulting in higher electrical conductivity and transparency of the composite resin. At a filler content of 0.4 wt%, the composite resin with f-MWCNT exhibits an electrical conductivity of 0.97 S/m. For future work, we will optimize the printing parameters and fabricate shielding components with bulk structure and honeycomb metastructure. Subsequently, the enhancement attributed to structural factors will be investigated by characterizing EMI shielding properties.

References

- [1] Liu Ji, et al. Materials Today. 66:245-272,2023.
- [2] Zhou Siyuan, et al. *Materials Chemistry Frontiers.6*(13), 1736-1751, 2022.

Acknowledgement

1. This work was supported by the Technology Innovation Program (20013794, Center for Composite Materials and Concurrent Design) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, KOREA).

2. This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (2022R1A2C3011968).

신뢰성 있는 충돌해석 모델을 위한 GFRP의 동적 재료 물성 모델에 관한 연구 Material model improvement of GFRP composite for impact analysis

*김승원¹, 김민겸¹, 김주원¹, 김태환¹, 신경훈², 서종환¹⁺ * S. Kim¹, M.-K. Kim¹, J. Kim¹., T. Kim¹, K.H. Shin², J. Suhr¹⁺

> ¹ 성균관대학교 기계공학과, ² ㈜현대자동차 ⁺E-mail: suhr@skku.edu

Keywords: GFRP, Intermediate strain rate, High velocity test

1. 서론

전기차 배터리 팩에 대한 안전성 문제가 주요하게 자리잡은 가운데, 연구에 드는 시간과 비용을 획기적으로 줄이기 위해서는 실제 모델과 적합한, 신뢰성 높은 해석 모델이 필수적이다. 다만, 충돌해석을 진행할 때에 기존의 정적 물성만으로는 변형률 속도에 따라 달라지는 재료의 특성을 반영하지 못한다[1]. 이에 따라 본 연구에서는 배터리 시스템에 사용되는 알루미늄과 유리섬유 강화 복합소재(GFRP)에 대해 고속 물성을 파악함으로써, 해석 모델을 개선하고자 한다.

2. 시험 방법

동적 물성을 파악하기 위해 중변형률 속도 (intermediate strain rate)에 해당하는 0.01-1000/s 범위 내에서 고속 인장 시험을 진행하였다. 고속 시험은 시험법이나 시편 규격과 관련하여 명확한 표준이 존재하지 않는다. Strain gauge 부착의 방식으로 값을 측정이 어려우며, 고속 카메라를 이용하여 Digital Image Correlation (DIC) 기법을 사용하여 변형률을 얻었다.

복합 소재 시편은 준정적 인장 시험 기준인 ASTM D3039를 참고하여, 장비(Instron, VHS 65/80-25) 사양에 맞게 제작하였다[2]. 그립부 파손을 방지하기 위해 시편 양끝에 알루미늄 탭을 부착한 뒤에 시험하였다.

3. 시험 결과 분석

고속 인장 시험 시 동적 응력 평형 상태에 도달했는지 확인하기 위해, 1차원 응력파 전달 이론을 적용하였다. $v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 3.464 m m/\mu s$ (1)



Fig. 1. Test setup (Courtesy KCarbon).

응력파가 표점 거리를 왕복하는데 약 20µs 가 걸리며 파단까지 최소 10회 이상 왕복했으므로, 파단 전에 동적평형 상태에 도달했다고 볼 수 있다[2,3].



Fig. 2. Image result.

Table 1 Result of high speed tensile test

Strain rate	Cross head speed	Tensile strength
0.00022/s	2mm/min	265MPa
200/s	7m/s	353MPa
300/s	10.5m/s	395Mpa
500/s	17.5m/s	473MPa

4. 결론 및 향후과제

중변형률 속도 내에서 GFRP의 고속 인장 시험을 통해, 준정적과 다른 동적 거동을 보임을 확인하였다. 이를 통해 변형률 속도에 따라 달라지는 물성 거동을 확인할 수 있었고, 향후 이를 반영하여 충돌 해석 모델의 신뢰성을 높일 수 있다.

참고문헌

Brown, K.A. et al. *Compos Sci Technol*, 70:272-283, 2010.
 Zhang, X. et al. *Compos. Part B: Eng.*, 164:524-536, 2019.
 Chenm W. et al. *Compos. Part B: Eng.*, 125:123-133, 2017.

후기

본 연구는 현대 NGV의 재원으로 현대자동차 연구개발본부의 지원(T101600124010370)을 받아 수행되었음. 이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임('20013794').

Manual Driven Spinning-top Triboelectric Nanogenerator with Enhanced Electrical Output

*Jimin Kong¹, Dongwon Seo¹, Seokjin Kim¹, and Jihoon Chung²
 ¹ Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology
 ² School of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology
 *E-mail: jjimin9909@kumoh.ac.kr

Keywords : Triboelectric nanogenerator, Design optimization, Energy harvesting, Spinning disk

1. Introduction

The era of Internet of Things (IoT) has led to an unexpected need for a large number of sensors [1], resulting in a huge demand for batteries as power source. Among the various energy harvesting methods so far, triboelectric nanogenerators (TENGs) is rising as a promising energy harvesting technology that can generate electrical output with mechanical motion coupled with electrostatic induction and triboelectrification [2]. In this study, we suggest a spinning disk-type TENG (SD-TENG) that can efficiently harvest biochemical energy.

2. Results and Discussion

2.1 Overview of SD-TENG



Fig. 1. (a) The schematic image of SD-TENG (b) The mechanism of SD-TENG.

Figure 1a shows a schematic image of the SD-TENG, which consists of two TENGs on each side. **Figure 1b** shows a schematic diagram of the SD-TENG mechanism. When a biomechanical input is given, the twisted string unwinds, and the rotor starts to rotate. The PTFE layer with a negative surface charge on the rotor slides over the positive triboelectric layer consisting of TPU and copper. This fast relative movement generated a high frequency alternating current (AC) electrical output.

2.2 Theoretical study of spinning disk



Fig. 2. The comparison between theoretical and experimental analysis with respect to (a) string radius, (b) spacing between holes, and (c) string length

Figure 2a–c shows comparison of maximum theoretical and experimental rotational speeds, which were normalized to provide obvious comparison. Overall, the theoretical and experimental results show the same trends, but deviate from each other. In particular, theoretical and experimental results were enhanced by 7 % and 16 %, respectively, compared to their minimum values by increasing the string thickness from 5 mm to 8 mm. In addition, they elevated by 13 % and 42 %, respectively, compared to their minimum states by changing the string length from 10 cm to 25 cm.

2.3 Electrical output of SD-TENG



Fig. 3. The RMS output comparison by (a) positive materials and (b) negative materials

Figure 3a-b shows the RMS output difference by triboelectric materials. As shown in the plot, PTFE exhibited highest electrical output among negative materials. In the meantime, TPU assured its superiority with the highest electrical output. PTFE and TPU are one of the well-known materials with their excellent polarity [3], so it is clear that they showed the best performance.

3. Conclusions

This study proposes an optimized geometric structure for a hand-driven TENG with high rotational speed and improved electrical output. Our experimental results demonstrate an effective optimization method for a spinning disk-shaped TENG operated by simple hand movements, which improves its electrical output performance and enhances its potential as a portable power source..

References

- [1] A. Banotra et al. Comput Netw. 236:110011, 2023
- [2] X. Chen et al. Nano Energy. 111:108435, 2023
- [3] Z. Zhao et al. Nat Commun. 12:4686, 2021

Acknowledgement

This work was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MSIT) (No. RS-2023-00210363).

Advanced Wettability-Controlled Materials for Enhancing Performance and Durability in Zinc-Air Batteries

*Chenyao Huang¹, *Kyungwho Choi²⁺, Dukhyun Choi^{1 2+}

¹ Department of Future Energy Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, South Korea
²School of Mechanical Engineering, College of Engineering, SungKyunKwan University (SKKU), Suwon 16419, Republic of Korea
⁺E-mail: <u>kw. choi@skku.edu</u>

Keywords : Zinc-Air Batteries, Wettability-Controlled Materials, Electrolyte Management, Durability

1. Introduction

Zinc-air batteries (ZABs) have gained significant attention as promising energy storage devices due to their high energy density, environmental friendliness, and costeffectiveness. However, challenges such as electrolyte instability, electrode degradation, and side reactions hinder their practical applications. Recent studies have highlighted the importance of wettability-controlled materials in optimizing electrolyte distribution and improving battery durability. By tailoring surface wettability, the electrochemical environment can be precisely regulated, minimizing performance loss and enhancing long-term stability.

2. Experimental Methods

2.1 Materials and Methods: Reagents were purchased from Aladdin Reagent. The (304) stainless steel mesh samples with an average pore diameter of approximately 100 μ m were used as substrates. [1]

2.2 Sample Preparation: The detailed fabrication process can be described as follows. The stainless steel mesh substrates were cleaned by water and then successively ultrasonically washed in a hydrochloric acid (2 mol/L) solution (10 min), acetone (5 min), ethanol (2 min), and deionized (DI) water in order to remove oxidizing material, organic compounds, oil, and other remnant dirt. Finally, the mesh was immersed into ethanol solution containing HCl with the concentration varying from 1 to 8 mol/L. [2]

3. Results and Discussion

The results demonstrate that controlled wettability significantly influences electrolyte distribution, improving reaction kinetics at the electrode interface. Hydrophobic coatings reduced excessive electrolyte absorption, preventing unwanted side reactions such as carbonate formation and hydrogen evolution. Conversely, hydrophilic treatments enhanced electrolyte retention in critical regions, promoting uniform ion transport. Electrochemical testing showed that optimized wettability reduced overpotential, increased current density, and extended cycle life. The durability assessment revealed that batteries with wettability-engineered electrodes



Fig. 1. After HDFS, stainless mesh became more superhydrophobic and contact angle improved significantly.

retained over 85% of their initial capacity after 500 cycles, compared to a 60% retention rate in conventional designs. These findings suggest that surface wettability

modification is a viable strategy for enhancing ZAB efficiency and longevity.

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

This study demonstrates that wettability-controlled materials can significantly improve the electrochemical performance and durability of zinc-air batteries. By optimizing electrolyte interactions, unwanted side reactions are minimized, leading to enhanced stability and prolonged cycle life. Future research will focus on scaling up these techniques for commercial applications and further refining surface engineering strategies to maximize energy efficiency.

References

- [1] B.G. Park and W.B. H. Scripta Materialia 113 (2016). (Journal papers)
- [2] Lao-atiman, W., Olaru, S., Arpornwichanop, A. et al. Discharge performance and dynamic behavior of refuellable zinc-air battery. Sci Data 6, 168 (2019). (Journal papers)

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge financial support from [National Research Foundation of Korea(NRF)].

Reliability Study on the Use of Adhesive Film in Co-Cured CFRP/PVC

Foam Core Sandwich Composites

*Woo Cheol Jang¹, Hyung Doh Roh¹

¹ Department of Mechanical Engineering and BK21 Four ERICA-ACE Center

+E-mail: rhd1213@hanyang.ac.kr

Keywords : sandwich composites, co-curing, adhesive film, lightweight

1. Introduction

Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) offers a high strength-to-weight ratio, and its properties are enhanced in a sandwich structure with a low-density core. This structure is widely used in aerospace and wind turbine blades due to its stiffness and lightweight characteristics [1]. With stricter fuel economy regulations, lightweight design is also crucial in the automotive industry. Reducing processing time, costs, and weight in sandwich composites remains a key challenge [2].

2. Experimental program

2.1 Material properties

The materials used are carbon prepreg UD, 3K, 6K, and 12K, with a PVC core, as shown in Table 1.

Table 1. Material properties

Property	CORE	UD	3K	6K	12K
Density	$80 g/m^3$	150 g/m ²	210 g/m ²	416 g/m ²	450 g/m ²
Pattern	Plain	UD	2x2 Twill	2x2 Twill	2x2 Twill
thickness	5mm	0.15 mm	0.25 mm	0.45 mm	0.45 mm
Resin	-	37 %	42 %	38 %	38 %

Each CFRP prepreg was laminated with the core at a thickness of 0.9mm to 1mm and co-cured using an oven and hot press.

2.2 Test

The manufactured sandwich panels were machined into 5 sets per specimen using NC processing according to ASTM C297 standards and bonded to the tensile test fixture [3]. The tensile test was then conducted at a standard tensile speed of 0.5 mm/min.

3. Results and discussion

Specimen	Film	Failure Mode (EA)
UD	Х	Skin failure and core failure (3) Core failure and adhesive failure (7)
3K	Х	Core failure (10)
6K	Х	Core failure and adhesive failure (10)
12K	Х	Core failure (10)
UD	0	Core failure (10)
3K	Ο	Core failure (10)
6K	0	Core failure (10)
12K	0	Core failure (10)

The tensile test results (Table 2) showed that the 3K and 12K samples exhibited sufficient bonding strength even without the use of adhesive film, resulting in core failure. In contrast, the UD and 6K samples experienced failure at both the adhesive interface and the core interface. Additionally, as observed in the tensile strength graph (Fig. 1), the 3K and 12K samples showed no significant difference in strength regardless of the use of adhesive film, whereas the UD and 6K samples exhibited a notable difference. These findings indicate that while 3K and 12K provide adequate bonding strength without adhesive film, UD and 6K are significantly influenced by its presence.



4. Conclusions and Future Works

The experimental results confirmed that 3K and 12K can achieve sufficient reliability even without the use of adhesive film. Additionally, eliminating the adhesive film can contribute to weight reduction and cost savings. However, for UD and 6K, modifications to the process conditions or an increase in resin volume may be necessary to ensure proper bonding without adhesive film. Therefore, additional experiments will be conducted with adjusted process conditions to determine the optimal bonding conditions for UD and 6K without adhesive film, followed by further validation through AU.

References

- V. Birman, G. A. Kardomateas, Composites Part B: Eng. 142:221-240, 2018.
- [2] C. Soutis, Polym Compos Aerosp Ind. 1:1-18, 2015.
- [3] ASTM C297, ASTM Int. Standard Test Method for Flatwise Tensile Strength of Sandwich Construction, 2010.

Acknowledgement

This research was supported by Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korea Government(MOTIE) (RS-2024-00409639, HRD Program for Industrial Innovation).

Analysis of advanced joining of CFRTPs with copper reinforcing

*Yakun Li, Hyung Doh Roh⁺

Department of Mechanical Engineering and BK21 Four ERICA-ACE Center +E-mail: rhd1213@hanyang.ac.kr

Keywords: CFRP, adhesive bonding, joining, shear strength

1. Introduction

Carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composites are widely used in aerospace, automotive, and civil engineering due to their high strength, low weight, and durability. However, conventional adhesive bonding often exhibits performance limitations under high loads, vibrations, and harsh environments [1]. This study introduces copper reinforcement at the adhesive interface to enhance bonding strength and durability. By leveraging copper's strength as well as its thermal and electrical conductivity, this approach enhances CFRP performance and expands its applications in aerospace, electric vehicles, and structural energy storage.

2. Experimental setup

2.1 Material : The T700-grade polypropylene-based CFRP composites used in this study were supplied by Dezhou Carbon Fiber Composite Materials, while DP-460 epoxy resin was selected as the adhesive. To further enhance the adhesive performance, copper reinforcement was introduced at the bonding interface, leveraging copper's high mechanical strength and its excellent thermal and electrical conductivity. Additionally, the CFRP specimens underwent surface treatment by sanding with 150-grit abrasive paper and cleaning with acetone to ensure optimal bonding quality.

2.2 Sample Preparation : In this study, DP-460 epoxy resin (3M) was used as the adhesive, with copper wires, meshes, and films introduced at the bonding interface to enhance CFRP composite adhesion. Specimens were prepared under room temperature, elevated temperature, and vacuum environments. The effects of copper reinforcement type, size, and orientation on adhesive strength were analyzed. Applied curing pressures ranged from 11.99 N to approximately 0.054 MPa (atmospheric pressure), followed by slow cooling to room temperature.

3. Results and Discussion

The results of the single lap shear tests are shown in Fig. 1. Fig. 2 illustrates different failure modes of specimens with various bonding methods, including cohesive failure within the adhesive layer, adhesive interfacial failure, and fiber pull-out. Compared to specimens bonded with adhesive alone, those reinforced with copper exhibited a significant increase in both maximum failure load and failure displacement. In addition to the shear resistance provided by the adhesive itself, frictional forces generated at the interface between the copper reinforcement and CFRP also contributed significantly to the overall shear load-bearing capacity of the specimens.



Fig.1. Photographs of the interface after failure



Fig.2. Maximum load during single-lap shear testing

4. Conclusions, Significance and Future Works Specimens reinforced with copper exhibited notably higher maximum failure loads and displacements compared to those bonded solely with adhesive. Additionally, the distribution ratio of copper materials and adhesive under different curing conditions exhibited varying effects on adhesive strength. Specimens utilizing copper mesh demonstrated superior maximum failure loads and displacements compared to those reinforced with other copper forms. Furthermore, the inherent electrical conductivity of copper and carbon fiberreinforced polymer (CFRP) composites offers significant potential for structural health monitoring (SHM) applications [2].

References

[1] Pramanik, A et al. Composites Part A. 2017. 101: p. 1-29.
[2] Hyung Doh Roh et al. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology 3:311-321, 2016

Acknowledgement

This research was supported by Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korea Government(MOTIE) (RS-2024-00409639, HRD Program for Industrial Innovation).

Material-resistance tactile-force multimodal self-powered sensor

*D.W.Seo¹ and J.H. Chung²⁺

¹ Department of Mechanical Engineering, Kumoh National Institute of Technology, ² Department of Mechanical System Engineering,

Kumoh National Institute of Technology

+E-mail: sdw2051@kumoh.ac.kr

Keywords : Triboelectric nanogenerator, Material-resistance, Self powered sensor, Artificial intelligence

1. Introduction

With IoT and AI advancements, self-powered sensors are essential for reducing maintenance needs [1]. Triboelectric nanogenerators (TENG) offer a promising solution, but conventional designs suffer from material-dependent issues [2]. In this paper, we purpose material-resistant tactile-force triboelectric multimodal sensor (MR-TENG) using a four-bar linkage for accurate, material-resistance force measurement. Furthermore, by AI integration, enables the sensor available for surface tactile sensing. **2. Results and Discussion**

2. Reputts and Discussion

2.1 Design and mechanism



Figure 1. (a) Schematic image of MR-TENG (b) kinematics of MR-TENG

MR-TENG has two main parts: force conversion and signal generation. The force conversion part uses a fourlink structure and switchable spring to convert vertical motion into linear displacement of a copper rod, triggering signal generation. The signal processing part includes a triboelectric layer, interdigitated electrodes (IDE), and a copper rod. As the rod moves over each electrode, electrostatic equilibrium breaks, inducing electron movement via the freestanding mode TENG mechanism [3], generating an AC waveform. The number of signals corresponds to rod displacement, which is expressed as

$$x = Y_0 + \sqrt{Y_0^2 - 2X_0X_A - X_A^2}$$
(1)

Since vertical displacement is constrained by spring compression, counting signal peaks allows vertical displacement calculation. Using Hooke's law, the applied force is determined by multiplying the spring constant.

2.2 Force measurement and Material-resistance

As shown in figure 2 a. The MR-TENG system accurately measures force over a broad dynamic range by switching spring constants (0.5-3 N/mm). Its four-bar linkage converts force into horizontal motion, ensuring material-independent output in figure 2b. Tests with various surfaces confirmed that peak generation depends only on

force. This allows consistent force measurements while also capturing tactile surface data.



Figure 2. (a) Measured force by MR-TENG and accuracy (b) Number of peaks difference by contacting Materials

2.3 Tactile sensing



Figure 3. (a) Architecture of 1D-CNN (b) Confusion matrix of Tactile recognition

The MR-TENG system converts external contact signals into digital data for tactile recognition using a 1D-CNN algorithm, as shown in Figure 3a. With different rigidities were tested, the 1D-CNN model achieved 92% accuracy without overfitting, proving the reliability for tactile recognition.

3. Conclusions

A material-independent triboelectric force sensor (MR-TENG) was developed with an adjustable dynamic range using a spring. The four-link mechanism was modeled accurately, and measured force precisely with materialresistance. For tactile sensing, 1D-CNN model achieved 92% accuracy in contact material recognition without external power, highlighting the potential of system for tactile sensing and force detection.

References

- [1] Zhou YK et al. Nano Energy. 84:105887, 2021.
- [2] Mu SL et al. Nano Energy. 116:108790, 2023.
- [3] Wang SH et al. Adv Mater. 26:2818-2824, 2014.

Acknowledgement

This work was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MSIT) (No. RS-2023-00210363).

캐패시터 기반의 소리 마찰대전 발전기 Capacitor-based Sound Triboelectric nanogenerator

*손기영 ¹, 정지훈 ²⁺ * G.Y. Son ¹, J.H. Chung²⁺

¹ 국립금오공과대학교 기계공학과, ² 국립금오공과대학교 기계공학부 기계시스템 전공 ⁺E-mail:jihoon@kumoh.ac.kr

Keywords: Triboelectric nanogenerator, Acoustic Energy Harvesting

1. 서론

본 연구에서는 소리의 낮은 에너지 밀도로 인한 출력 한계를 극복하기 위해 커패시터 기반 소리 마찰대전 발전소자(CS-TENG)를 제안한다[1]. 내부 유전체의 전하 축적 향상과 비접촉 구조를 통해 전기적 출력과 기계적 안정성을 향상시켰다. 실험 결과, CS-TENG는 200Hz, 90dB에서 14.24V의 피크 개방전압과 0.87μA의 피크 단락전류를 달성하였으며, 소리 기반 발전기로서의 가능성을 확인하였다.

2. CS-TENG

2.1 유전

CS-TENG는 내부 유전체 물질이 금속의 표면 전하에 의해 분극된다는 점에서 기존 TENG와 차별화된다. CS-TENG의 커패시터 구조는 유전체의 분극 효과를 강화시켜 더 많은 전하가 저장될 수 있도록 한다. 이를 통해 전기적 출력이 향상되며, 소리 에너지의 낮은 밀도로 인한 출력 한계를 보완한다.

2.2 비접촉 구조

소리 에너지는 고주파수의 진동 특성을 가지므로, 접촉 구조에서는 빠른 마모가 발생한다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 비접촉 구조를 적용한 설계를 도입하였다. 비접촉 구조는 마모로 인한 성능 저하를 방지하고, 장기적인 안정성과 내구성을 확보하는 데 기여한다. 이를 통해 CS-TENG는 지속적인 성능 유지와 소리 기반 에너지 수확의 효율성을 높일 수 있다.

3. 실험 결과

Fig 1a에서 유전체가 존재할 경우 피크 전압이 59.74% 상승하여 14.24V를 달성하였다. 또한, Fig 1b에서는 피크 전류가 85.1% 상승하여 0.87µA에 도달하였다.

Fig 2는 유전 물질의 특성이 CS-TENG의 출력에 미치는 영향을 나타낸다. 다양한 유전 물질을

적용한 결과, 높은 유전상수를 가진 물질을 적용한 경우 전기장 강화 및 전하 축적 능력이 극대화되며, 결과적으로 CS-TENG의 성능이 향상되었다.







Fig 2 Comparison of the voltage of CS-TENG by dielectric materials.

4. 결론 및 향후과제

유전체의 존재 및 유전상수의 조정이 CS-TENG의 성능 개선에 기여함을 시사하며, 본 연구에서 제시된 유전체 기반 성능 향상 전략은 향후 다양한 에너지 수확 장치의 성능 최적화에 기여한다

참고문헌

[1] N. Cui, L. Gu, J. Liu, S. Bai, J. Qiu, J. Fu, X. Kou, H. Liu, Y. Qin, Z.L. Wang, High performance sound driven triboelectric nanogenerator for harvesting noise energy, Nano Energy. 15 (2015) 321–328.

후기

This work was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MSIT) (No. RS-2023-00210363).

Elastoplastic constitutive modeling of FDM-printed cellular structures: a comparative

analysis considering anisotropy and asymmetric tension-compression responses

^{*}Quan Yuan¹, Zhihao Zhang^{1,2} Jonghwan Suhr¹⁺

¹ Department of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 16419, Korea

² College of Materials, Xiamen University, Fujian, Xiamen, 361005, China

⁺E-mail: <u>suhr@skku.edu</u>

1. Introduction

Fused deposition modeling (FDM) has attracted considerable attention for its capability to rapidly fabricate complex structures from various materials. Cellular structures, widely recognized for their lightweight, high strength, and excellent energy absorption properties, pose significant challenges for traditional manufacturing processes but can be efficiently produced via FDM printing [1]. However, the layer-by-layer nature of the FDM process introduces anisotropic mechanical behavior [2] and tension-compression asymmetry [3], complicating accurate performance predictions. This study aims to comparatively evaluate elastoplastic constitutive models that address these specific material behaviors.

2. Materials and Methodology

2.1 Fabrication and testing methods:

An Ultimaker S5 3D printer with black tough PLA filament was used to fabricate tensile test specimens according to ASTM D638-I and compressive test specimens according to ASTM D695 standards. An ST-1002 universal testing machine equipped with digital image correlation (DIC) and strain gauges was employed to measure the elastoplastic properties of the FDM-printed materials along three typical printing directions (0° , 45° , 90°).

To characterize the anisotropic mechanical behavior and tension-compression asymmetry of FDM-printed materials, transversely isotropic elastic models and Hill anisotropic yield models were developed based on tensile and compressive test data, respectively. Additionally, a bimodular elastic model considering both tensile and compressive moduli was established. The evaluated material models are summarized in Table 1.

Table 1. The developed elastoplastic material models.

Material Models	Material behavior	
M1	Isotropic elastic model and yield strength (Tension, $\theta = 90^{\circ}$)	
M2	Isotropic elastic model and yield strength (Compression, $\theta = 90^{\circ}$)	
M3	Transversely isotropic elastic model and Hill's yield criterion (Tension)	
M4	Transversely isotropic elastic model and Hill's yield criterion (Compression)	
M5	Bimodular elastic model and Hill's yield criterion (Tension)	
M6	Bimodular elastic model and Hill's yield criterion (Compression)	

2.2 Representative cellular unit cell:

To assess the accuracy of the elastoplastic constitutive models, four representative cellular unit cells were designed (as shown in Fig. 1). Finite element analysis (FEA) simulations were conducted using Abaqus 2022, applying the developed constitutive models to predict the compressive elastoplastic performance of these cellular structures. Corresponding experimental tests of the printed cellular unit cells will be performed, and the experimental data will subsequently be used to validate the accuracy of the developed material models.



Fig. 1. 4 types of representative unit cells for simulation.

3. Results and Discussion

The elastic moduli of FDM-printed tough PLA from tensile tests along the 0°, 45°, and 90° printing directions were 2622 MPa, 1763.5 MPa, and 2238.6 MPa, respectively, while the corresponding 0.2% offset yield strengths were 40.6 MPa, 27.4 MPa, and 33.9 MPa, highlighting clear anisotropy. In compression tests, the elastic moduli for the same printing directions were 1485.4 MPa, 1535.2 MPa, and 1512.8 MPa, indicating negligible anisotropy. However, the compressive yield strengths (0.2% offset) were 47.1 MPa, 43.8 MPa, and 37.5 MPa, revealing significant anisotropic characteristics.

The finite element analyses of cellular unit cells using the developed constitutive models are currently underway.

4. Future Works

Future research will focus on comparing the simulated elastoplastic behavior of the cellular structures with experimental results, analyzing discrepancies, and exploring potential causes of deviations. This study aims to provide practical guidelines for optimizing the design of FDM-printed cellular structures.

References

- [1] M Ali et al. Eng Anal Bound Elem. 142:93-116, 2022.
- [2] S Wang et al. Addit Manuf. 33:101104, 2020.
- [3] M-M Pastor-Artigues et al. Mater. 13:15, 2019.

Acknowledgement

1. This work was supported by the Technology Innovation Program (20013794, Center for Composite Materials and Concurrent Design) funded by the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, KOREA)

2. This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (2022R1A2C3011968)

상변화물질과 열전소자를 활용한 고효율 배터리 냉각 시스템 개발 Development of a High-Efficiency Battery Cooling System Using Phase Change

Material and Thermoelectric Module

*정성규¹, 최경후¹⁺, 최덕현^{1,2+}

* S.K. Chung, K.W. Choi⁺

¹성균관대학교 기계공학부, ²성균관대학교 미래에너지공학과

+ E-mail: kw.choi@skku.edu

Keywords: Phase change material, Thermoelectric module, Battery thermal management system

1. 서론

리튬 이온 배터리는 전기자동차에서 주로 사용되며, 최적의 작동 온도 범위는 15~35℃로 알려져 있다. 그러나 50℃를 초과할 경우 열 폭주 현상이 발생할 수 있다 [1]. 이러한 문제를 완화하고 배터리의 성능을 유지하기 위해 상변화물질(PCM)과 열전소자(TEM)를 활용한 냉각 장치를 개발하였다. 특히, 열전소자의 발열부에 상변화물질을 부착하여, 상변화물질의 잠열 효과를 통해 방열 성능을 향상시키고, 이에 따라 열전소자의 냉각 효율을 극대화하였다.

2. 실험 재료 및 장비

2.1 실험 재료

본 연구에서는 단일 상변화물질이 아닌 멀티 상변화물질을 적용하여, 단일 상변화물질을 사용할 경우보다 더욱 넓은 온도 범위에서 효과적인 열 관리를 수행할 수 있도록 하였다 [2]. 사용된 상변화물질은 다음과 같다.

Table 1 Thermal properties of PCMs used in experiments

Phase change material	Melting point
Parafol 23-95	44 °C
Celpar 40	40 °C
Parafol 20z	35 °C

표 1에 제시된 바와 같이, 선정된 상변화물질의 각각의 녹는점은 35℃, 40℃ 및 44℃이다. 이러한 PCM들을 선택한 이유는, 리튬 이온 배터리가 열 폭주 현상에 돌입하는 임계 온도인 50℃에 도달하는 것을 효과적으로 방지하기 위함이다.

2.2 실험 장비

실험 장비의 형상은 Fig. 1에 제시된 바와 같다. 실험 장치는 전체적으로 알루미늄으로 제작되었으며, 각 층마다 열전대를 설치하여 온도를 측정할 수 있도록 설계되었다. 또한, 실험 장치의 바닥면에는 Heat film이 내장되어 있어 배터리의 발열 특성을 모사하였으며, 열전대를 활용하여 온도를 정밀하게 측정하였다.



Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

3. 실험 방법

Heat film은 리튬 이온 배터리 단일 셀의 발열 특성을 모사하기 위해 40W의 전력을 공급하였다. 실험에서는 다양한 조건을 변경하며, 알루미늄 플레이트의 온도가 50℃에 도달하는 데 걸리는 시간을 측정하고 비교하였다. 실험 조건은 다음과 같이 설정하였다. 첫 번째는 추가적인 열 관리 요소 진행한 Only Fin 실험. 두 번째는 없이 열전소자만을 적용한 Only TEM 실험, 세 번째는 상변화물질만을 사용한 실험, Only PCM 마지막으로 상변화물질과 열전소자를 함께 적용한 PCM + TEM 실헊이다.

4. 결론 및 향후과제

Only PCM 실험에서는 4,100초, PCM + TEM 실험에서는 6,100초가 소요되었다. 반면, Only Fin과 Only TEM 실험에서는 각각 2,060초와 1,940초가 걸렸다. 이러한 결과를 종합하면, PCM과 TEM을 병합하여 사용한 경우가 냉각 성능이 월등히 우수한 것을 알 수 있다. 이는 PCM과 TEM이 상호 보완적으로 작용하여 방열 성능을 향상시키고, 배터리의 온도 상승을 효과적으로 지연시킴을 시사한다. 향후 연구에서는 실험장치를 재설계하여 더욱 간소화된 모델을 통해 실험을 진행할 예정이다.

참고문헌

[1] Manzetti, S et al. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 51, 1004-1012, 2015

[2] Mosaffa, A. H., et al. Energy Conversion and Management 67 1-7. (2013)

후기

[1] 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00338055).

[2] 이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (20013794).

업사이클링된 탄소 소재의 이차전지 응용 특성 연구 Electrochemical Properties of Upcycled Carbon Materials for Secondary Batteries

* 박현주¹, 김대업¹⁺, 양정훈¹⁺ * Hyunju Park¹, Daeup Kim¹⁺, Junghoon Yang¹⁺

¹ 한국생산기술연구원 ⁺E-mail: dukim@kitech.re.kr, jyang@kitech.re.kr

Keywords: Secondary Batteries, Upcycling, Sodium-ion Batteries, Carbon Materials

1. 서론

이차전지의 성능 향상을 위해 다양한 탄소 소재가 연구되고 있으며 PET와 같은 폐기물의 업사이클링을 통한 새로운 전극 소재 개발이 주목받고 있다. 본 연구에서는 PET를 업사이클링하여 하드 카본을 합성하고 그구조적 및 전기화학적 특성을 분석하였다. 탄화 온도에 따른 구조적 변화를 통해 전극 소재의 성능 차이를 평가하였으며, 나트륨 이온 배터리의 전극으로서의 가능성을 탐구하였다.

2. 실험 재료 및 방법

폐 PET를 원료로 사용하여 탄소 전극 소재를 제조하였다. PET는 열처리를 통해 탄소화되었으며, 합성된 하드 카본의 구조적 특성을 분석하기 위해 XRD, Raman, XPS, BET, TEM 분석을 수행하였다. 구조적 특성이 전기화학적 성능에 미치는 영향을 평가하기 위해 코인셀 형식의 half-cell에서 사이클 성능 및 고속 충방전 테스트를 진행하였다.

3. 실험 결과

3.1 구조적 변화 연구

XRD 및 Raman 분석 결과, 열처리 온도가 높을수록 보다 평탄한 구조와 향상된 결정성을 보였다. BET 분석에서는 열처리 온도가 낮은 샘플이 높은 비표면적과 미세기공 구조를 가지는 반면, 열처리 온도가 높은 샘플은 낮은 비표면적과 내부 기공을 포함한 구조를 형성하는 것으로 나타났다. TEM 분석에서도 열처리 온도가 높은 샘플은 탄소층이 정렬된 구조를 형성하며, 열처리 온도가 낮은 샘플은 상대적으로 높은 비균질성을 보였다. 이러한 차이는 탄화 온도가 증가할수록 탄소층이 정렬되며 내부 기공이 형성됨을 의미한다.

3.2 전기화학적 특성 연구

구조적 차이는 전기화학적 성능에도 영향을 미쳤다. 열처리 온도가 낮은 샘플은 sloping 영역(표면 흡착)에서 높은 용량을 보였으며, 열처리 온도가 높은 샘플은 plateau 영역(충간 삽입 및 기공 충전)에서 더 높은 저장 용량을 나타냈다. 두 번째 사이클의 충전 용량 기준으로, 열처리 온도가 낮은

샘플의 sloping 영역 용량은 91.77 mAh g⁻¹, plateau 영역 용량은 128.48 mAh g⁻¹이었다. 반면, 열처리 온도가 높은 샘플의 sloping 영역 용량은 68.45 mAh g⁻¹, plateau 영역 용량은 206.79 mAh g⁻¹으로 Plateau 영역의 기여도가 더욱 증가하였다.이러한 경향은 열처리 온도가 낮은 샘플은 표면 흡착과 층간 삽입이 주요 저장 메커니즘인 반면, 열처리 온도가 높은 샘플은 층간 삽입과 기공 충전이 주요 기여 메커니즘임을 보여준다. 속도 특성 평가에서는 열처리 온도가 높은 샘플이 높은 전류 밀도에서 더 높은 용량 유지율을 보이며 우수한 속도 특성을 나타냈다. 그러나 장기 사이클 안정성에서는 열처리 온도가 낮은 샘플이 100사이클 이후 92%의 용량 유지율을 보이며 열처리 온도가 높은 샘플(88%)보다 안정성이 우수한 것으로 나타났다. 이는 비정질성이 높은 구조가 장기 충방전 과정에서 구조적 변화를 더 효과적으로 흡수할 수 있음을 시사한다.

4. 결론

본 연구에서는 폐 PET 기반 하드 카본의 구조적 변화 및 이에 따른 전기화학적 성능 차이를 규명하였다. 높은 탄화 온도에서 합성된 샘플은 구조적으로 정렬되고 내부 기공을 형성하며 높은 plateau 용량과 속도 성능을 보였으며, 상대적으로 낮은 탄화 온도에서 합성된 샘플은 비정질성이 높아 sloping 영역에서 더 높은 저장 용량과 장기 안정성을 확보하였다. 이러한 결과는 탄화 온도 조절을 통한 하드 카본의 미세구조 제어가 SIB 음극 성능 최적화에 중요한 요소임을 시사한다.

후기

본 논문은 환경부 사업 '이차전지 순환이용성 향상 기술개발사업' (No. RS-2024-00337828)의 지원을 받아 연구된 논문임.

Atomic Oxygen-Resistant Oxide/Oxide Ceramic Composites for Stealthy Satellites in Very Low Earth Orbit (VLEO)

*Shanigaram Mallesh¹, Chae-Hwan Lim¹, Won-Ho Choi², Seong-Weon Hong², Hyeon-Seok Ko³, Sang-Hun Lee³, Young-Woo Nam^{1,4+}

¹ Graduate School of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University
² Aerospace R&D Center, Korean Air

³ Materials Digitalization Center, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology

⁴ Department of Smart Drone Engineering, Korea Aerospace University

+E-mail: ywnam@kau.ac.kr

Keywords : VLEO (Very Low Earth Orbit), Atomic oxygen, Oxide/oxide ceramic matrix composites, Stealth satellite composites

1. Introduction

The Very Low Earth Orbit (VLEO) environment extends from approximately 160 km to 450 km above Earth's surface. Compared to Low Earth Orbit (LEO), lower altitudes in VLEO offer reduced radiation exposure and access to a broader range of frequency bands, minimizing interference from rainfall while enhancing launcher lift capability [1]. These characteristics make VLEO a strategically significant orbit for satellite systems [2]. Furthermore, with the growing demand for stealth satellites in military applications, nations are intensifying efforts to monitor adversary satellites and respond to their space missions [3]. However, the VLEO environment poses extreme challenges, including high atmospheric drag (~10⁻¹¹ kg/m³), severe thermal cycling (-150°C to 150°C), intense ultraviolet (UV) radiation (100-400 nm), and material degradation caused by atomic oxygen (AO) exposure, with a flux of 1015-1016 atoms/cm2.s and kinetic energy of 5.3 eV. Zhang et al. proposed improving the stealth performance of satellite radomes by incorporating a sandwich-type artificial electromagnetic structure [4]. Nam et al. The silver-coated aramid/epoxy composite demonstrated microwave absorption performance and hypervelocity impact resistance, indicating its potential applicability for stealth satellite protection [5]. Similarly, Laifei et al. evaluated the AO resistance of carbon/graphite composites by applying a SiC coating. When AO interacts with the SiC coating, Si atoms in the CVD SiC laver preferentially react with AO particles. Additionally, AO contributes to stress redistribution within the coating, leading to improved surface stress resistance and enhanced bending performance [6].

This study evaluated the stability of an oxide/oxide ceramic matrix composite under harsh conditions that simulate the VLEO environment using a space environment simulation facility. Additionally, we demonstrated that the developed structure exhibits excellent broadband electromagnetic absorption performance, confirming its potential as an ideal stealth material for the VLEO environment.

2. Materials and methods

2.1 Materials

In this study, we developed an electromagnetic waveabsorbing structure for the VLEO environment using oxide ceramic fibers and an oxide ceramic matrix. The oxide ceramic fibers provide excellent mechanical strength and chemical resistance, making them highly suitable for atomic oxygen (AO) exposure [7]. To enhance electromagnetic wave absorption, electroless-plated metal was applied to the oxide ceramic fibers. The oxide ceramic fiber/oxide ceramic matrix composite was fabricated using a hand lay-up process to assess its performance under VLEO environmental conditions and evaluate its electromagnetic properties. The composite was cured in an autoclave at 100°C under 7 bar pressure for 24 hours.

2.2 VLEO space environment test

The VLEO environment simulation facility in our lab can generate ultra-high vacuum, thermal cycling, ultraviolet radiation, and atomic oxygen (AO) exposure. AO is produced using a DC high-voltage plasma source through a reduction reaction, where oxygen ions gain an electron and transform into neutral AO. An ion beam gun accelerates the AO to simulate high-velocity particle impacts.

Exposure tests were conducted for 24 hours under the following conditions: ultra-high vacuum (~10⁻⁶ Torr), thermal cycling (-80 to 150 °C, 90-minute cycles), ultraviolet radiation (280–420 nm), and an AO flux of 1.35 $\times 10^{17}$ atoms/cm²·s. The AO flux parameters were calibrated so that 1 hour of exposure corresponds to 10 days of cumulative flux in the VLEO environment [8].

부

To evaluate changes in mechanical properties before and after VLEO exposure, tensile tests were performed following ASTM C1275 standards [9]. The results confirmed that AO exposure significantly contributed to mass loss.

3. Results and Discussion

The complex permittivity of the composite before and after exposure was measured using a free-space measurement system. Based on the measured permittivity, an electromagnetic (EM) wave absorber was designed, incorporating the exposed composite material as the outermost layer. To enhance atomic oxygen (AO) resistance, a stealth wave-absorbing structure was developed using ceramic foam, which exhibits excellent durability in harsh environments. The EM wave-absorbing performance was then evaluated using CST Microwave Studio.

The oxide/oxide ceramic matrix composites demonstrated excellent durability under simulated VLEO space environment conditions. The reaction with AO resulted in the formation of a protective layer, enhancing erosion resistance. High-energy AO particles directly interact with ceramic matrix composites, oxide/oxide initially promoting surface oxidation and the formation of an oxide layer. This oxidation process is accompanied by volume expansion, leading to stress accumulation within the material. Over prolonged AO exposure, grain growth occurs, further influencing the microstructural evolution and mechanical properties of the composite. However, tensile test results revealed a slight decrease in mechanical strength even after minimal exposure, attributed to changes in surface oxidation, which affected the microstructure and increased porosity. SEM, EDS, XRD, and XPS analyses confirmed that the primary components of the ceramic matrix reacted with AO, forming a protective layer through phase transformation, thereby exhibiting superior resistance to atomic oxygen.

A reflection loss analysis was conducted on the designed ceramic foam structure. Despite its thin profile, it exhibited excellent broadband electromagnetic wave absorption, with peak absorption occurring in specific frequency bands. The enhanced EM absorption performance can be attributed to the unique structure of the composite, which optimizes dielectric properties. Strong dielectric loss, originating from multiple mechanisms such as interfacial polarization, dipole polarization, and conduction loss, contributes to efficient attenuation of incident EM waves across a broad frequency range. This design effectively balances lightweight construction with high absorption efficiency, highlighting its potential for advanced stealth applications.

4. Conclusions

This study evaluated the mechanical and electromagnetic properties of oxide/oxide ceramic composites through simulated space environment tests to assess their potential for stealth satellite applications in the VLEO environment. Microstructural analysis after VLEO exposure revealed that the oxide ceramic components effectively mitigated erosion caused by AO by forming a protective layer through phase transformation. These findings were further supported by tensile testing and mass loss analysis. Additionally, the ceramic foam-based electromagnetic wave-absorbing structure exhibited excellent broadband absorption performance. Therefore, this study suggests that the fabricated oxide/oxide ceramic matrix composite is a strong candidate for stealth satellite applications in the VLEO environment..

References

[1] L Berthoud, et al. CEAS Space Journal, 10: 609-623, 2022.

- [2] PP Ray, Journal of King Saud University Computer and Information Sciences, 34:6949-6976, 2022.
- [3] NH Crisp, et al. Progress in Aerospace Sciences, 117: Article 100619, 2020,
- [4] R Verker, et al. Acta Astronautica, 173: 333-343.
- [5] YW Nam, et al. 193: 113-120 2018.
- [6] G. Liu, et al. Journal of Materials Science & Technology, 35: 2957-2965, 2019.
- [7] R Jiang, et al. Journal of the European Ceramic Society, 41: Issue 10: 5394-5399 2021.
- [8] Y Kimoto, et al. Acta Astronautica, Vol. 179, 2021, pp. 695-701.

[9] ASTM International, ASTM C1275-15: Standard Test Method for Monotonic Tensile Behavior of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics with Metallic Filaments at Ambient Temperature, West Conshohocken, PA: ASTM International, 2015.

Acknowledgement

This paper is research supported by the Korea Research Institute for Defense Technology Planning and Advancement (KRIT) Grant funded by the Defense Acquisition Program Administration (DAPA)(KRIT-CT-22-028) and a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Ministry of Science and ICT (RS-2024-00397400).

- 204 -

소형발사체용 양산형 복합재 추진제 탱크의 설계 및 제작 기법 연구 Study on Design and Manufacturing Method of Linerless Composite Propellant Tank of Small-Lift Launch Vehicles

*문성훈¹, 최수영¹⁺, 오새롬¹, 이주형¹ *S.H. Mun¹, S.Y. Choi¹⁺, S.R. Oh¹, J.H. Lee¹

> ¹ ㈜에이엔에이치스트럭쳐 ⁺E-mail: sychoi@anhstructure.com

Keywords: Composite Propellant Tank, Cryogenic Tank, Launch Vehicle, AFP(Automated Fiber Placement)

1. 서론

최근 민간기업 주도의 우주개발이 활성화되며 소형 위성 및 소형발사체 수요가 크게 증가하고 있다. 이에 따라 전체 소형발사체의 약 80 %를 차지하는 추진제 탱크의 경량화 및 양산화가 필요한 상황이다. 이에 따라 본 연구에서는 양산을 고려한 소형발사체용 복합재 추진제 탱크를 설계하고 자동 적층 장비(AFP; Automated Fiber Placement) 장비를 활용한 제작 기법을 연구하였다.

2. 설계 및 제작

2.1 개발 대상

본 연구에서의 개발 대상은 직경이 약 1.4 m인 소형 발사체의 2단 연료 탱크와 산화제 탱크이다. 각 탱크는 내압을 지지하고 연료 및 산화제를 포함하는 Barrel과 비행 하중을 지지하고 상하부 동체와 체결되는 Skirt로 나뉜다. 본 대상품은 기존 금속제 대비 약 30% 이상의 경량화와 -182 ℃ 이하 조건에서 구조적 성능 및 기밀 특성이 만족하도록 설계하였다.



Fig. 1. Composite Propellant Tank Layout.

2.2 설계 최적화

본 연구에서는 두 단계의 최적화 과정을 통하여 추진제 탱크의 형상을 정의하였다. Phase I에서는 구조적 성능 및 외형적 성능을 고려하여 최적의 Elliptical Ratio를 반영한 타원형의 Dome 형상을 설계하고, 좌굴 및 Ply-by-Ply 기반의 강도 평가를 고려한 두께를 정의하였다. Phase II에서는 AFP 장비를 활용한 제작성을 고려하여 적층 패턴을 정의하고 최종 적층 패턴을 유한요소해석을 통해 검증하였다.



Fig. 2. 1st Buckling Mode by Elliptical Ratio.

2.3 제작 공정

본 연구에서는 Barrel과 Skirt를 Hand Lay-up 및 AFP 장비를 활용하여 적층하고 Autoclave에서 경화하여 추진제 탱크를 제작하였다. AFP 공정을 적용함으로써 균일한 품질의 제품을 제작함을 확인하여 양산성을 확보하였다.



Fig. 3. Manufacturing Process

3. 결론 및 향후과제

본 문서에서는 소형발사체용 양산형 복합재 추진제 탱크의 설계 및 제작 기법에 대해 계략적으로 서술하였다. 구조적 성능 및 외형적 성능, 제작성을 고려하여 설계하고 AFP 공정을 적용하여 시제품을 제작하였다. 현재 극저온 내압 시험 및 기밀 시험은 진행하여 구조 및 기밀 성능을 검증하였으며 추후 비행하중 시험으로 추가적으로 구조적 성능을 검증할 예정이다.

후기

본 연구는 국방기술진흥연구소 주관 2023년도 방산혁신기업 100 전용 R&D 지원사업 (과제번호: R230107)의 연구 과제로 선정되어 수행 중에 있으며, 이에 진심으로 감사드립니다.

소형발사체용 양산형 복합재 추진제 탱크의 구조 및 기밀 성능 평가 기법 연구 Study on Structural and Leak Test Method of Linerless Composite Propellant Tank of Small-Lift Launch Vehicles

*이주형¹, 최수영¹⁺, 오새롬¹, 문성훈¹ * J.H. Lee¹, S.Y. Choi¹⁺, S.R. Oh¹, S.H. Mun¹

> ¹ ㈜에이엔에이치스트럭쳐 ⁺E-mail: sychoi@anhstructure.com

Keywords: Composite Propellant Tank, Cryogenic Tank, Launch Vehicle, Leak Test, Cryogenic Pressure Test

1. 서론

최근 민간기업 주도의 경제적 우주개발이 활성화되며소형위성 발사 및소형발사체 수요가 크게 증가하고 있다. 이에 따라 전체 소형발사체의 약 80%를 차지하는 추진제 탱크의 경량화 및 양산화가 필요한 상황이다. 이에 따라 본 연구에서는 금속재 탱크의 설계 신뢰성을 유지하며 양산을 고려한 소형발사체용 복합재 추진제 탱크를 설계하여 구조 및 기밀 성능 평가 기법을 연구하였다.

2. 개발 대상 및 목표 성능

2.1 개발 대상

본 연구에서의 개발 대상은 직경이 약 1.4 m인 소형 발사체의 2단 추진제 탱크이다. 각 탱크는 내압을 지지하고 연료 및 산화제를 포함하는 Barrel과 비행 하중을 지지하고 상하부 동체와 체결되는 Skirt로 나뉘며, -182 ℃ 이하 조건에서 구조적 성능 및 기밀 특성이 만족하도록 설계하였다.



Fig. 1. Composite Propellant Tank Layout.

2.2 구조 설계 및 해석

추진제 탱크의 상하부 Dome의 형상은 구형, 타원형 등 요구도에 부합하는 다양한 형태로 설계될 수 있다. 본 연구에서는 유한요소해석을 수행하여 Dome Knuckle부 압축하중으로 인한 국부적인 좌굴 모드를 제거하기 위한 Elliptical Ratio를 산정하여 타원형 Dome을 설계하였다. 동시에 Ply-by-Ply 기반의 강도(Plain Strength)를 평가하여 복합재 추진제 탱크의 두께 및 적층 패턴을 정의하였다.



Fig. 2. Static and Buckling Analysis Result.

2.3 구조 및 기밀 성능 평가

유한요소해석 결과를 기반으로 설계된 복합재 추진제 탱크를 자동 적층 장비(AFP: Automated Fiber Placement)로 제작하였다. 제작된 복합재 추진제 탱크에 액체 질소를 약 94% 충진하고 MEOP (Maximum Expected Operating Pressure)의 1.25배를 가압하여 구조 건전성을 확인하였다. 또한, 헬륨 누설 측정기로 맨홀 덮개 체결부에서 발생할 수 있는 가스 누설 여부를 확인하여 기밀 성능을 검증하였다.



Fig. 3. Test Matrix.
2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 유한요소해석을 이용한 소형발사체용 양산형 복합재 추진제 탱크를 설계하고 AFP 장비를 활용하여 제작하였으며, 극저온 내압 시험 및 기밀 시험으로 구조 및 기밀 성능 평가 기술을 확보하였다. 추후 비행 하중 시험을 통해 구조적 성능을 추가적으로 검증할 예정이다.

후기

본 연구는 국방기술진흥연구소 주관 2023년도 방산혁신기업 100 전용 R&D 지원사업 (과제번호: R230107)의 연구 과제로 선정되어 수행 중에 있으며, 이에 진심으로 감사드립니다.

저밀도 탄소/페놀 복합재의 아크젯 평가 Arc-jet Test of Low-Density Carbon/Phenolic Composite

*신재성¹⁺, 이진우², 송문원³ * J.S. Shin¹⁺, J.Y. Lee², M.W. Song³

¹ 한국항공우주연구원 소형발사체연구부, ² 한국재료연구원, 8·복합재료연구본부 ³ 전북대학교 고온플라즈마센터 ⁺E-mail: jsshin@kari.re.kr

Keywords: Re-entry, TPS(Thermal Protection System), PICA(Phenolic Impregnated Carbon Ablator), Arc-jet

1. 서 론

우주비행체가 지구 귀환시에는 초고온에 노출되고, TPS는 위 환경으로부터 본체를 보호하는 필수적인 수단이다.

PICA는 대표적인 수단 중 하나로 널리 알려져 있다. 그러나, 제작공법 및 물성은 보안으로 공개 하지 않으며 ITAR규정으로 입수가 불가하다. 이에 따라, 국내에서도 PICA를 목표로 하는 경량형의 시작품을 제작하였고, 아크젯 평가를 수행하였다.

2. 시험준비

2.1 시편 제작

삭마형TPS는 복합재 형식으로 구성되어 있고, 주로 탄소섬유와 폐놀레진을 활용한다. 폐놀레진은 약 50% 수준으로 높은 탄화율(Char yield)을 지니므로 레진으로서 주로 채택된다. 본 문헌에서도 동일한 구성으로 시작품을 제작하였고, 결과적으로 밀도 0.36 g/cc 급의 탄소/폐놀 기반의 경량형 복합재를 제작하였다.

2.2 시험 평가

앞서 제작된 시편으로 아크젯 시험평가를 수행하였다. 아크젯 설비는 재진입의 가열환경을 모사하는 지상설비 장치로서 TPS의 평가시에 사용된다. 본 문헌에서는 전북대학교 고온 플라즈마 센터의 아크젯 설비를 사용하여 시험하였다. 시편의 형상은 반경 0.4cm를 지니는 평판형 실린더로서 직경 2cm, 길이 2.3cm이다.

3. 시험수행

시험 열유속은 정체점에서의 열전달 경험식인 Zoby 관계식[1]을 참고하여 7.58 MW/m²로 설정되었다.

시험시간은 시편의 남는길이를 위하여 실시간 모니터링을 통해 실제 수행된 시간을 의미하며, 본 경우 10초간 수행되었다.

본 시험을 통해 후퇴율을 도출하였다. 후퇴율은 시편의 시험 전후 길이변화에 시험시간을 나누어서 계산되는데, 본 시작품의 경우는 약 0.524 mm/s로 계산되었다. 이는 PICA대비 약 2배 이상의 후퇴율로 판단된다[2].



Fig. 1. (a) Arc-jet test and (b) Specimen B/A

Table 1 Test Results

riangle L [mm]	Recession Rate [mm/s]
5.24 (=22.9 - 17.66)	0.524

4. 결 론

PICA를 목표로 하는 경량형 삭마제를 제작하였고 평가를 하였다. 본 시작품의 밀도가 PICA(0.28 g/cc)대비더 높음에도 불구하고, 후퇴율이 약 2배 이상 높은 것을 볼 수 있다. 이는, 높은 후퇴율의 발생 원인을 파악하고 이를 보완하는 제작 공법이 필요함을 암시한다.

참고문헌

[1] Ernest V. Zoby. NASA-TN-D-4799. 1968.

[2] F.S. Milos et al. JSR. Vol. 47, No. 5, 2010.

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

Ag powder를 활용한전도성 서셉터의 발열 거동 및 GF/PEEK 복합재 구조 유도 용접 성능 평가

Evaluation of Heating Behavior of Conductive Susceptor Using Ag Powder and Induction Welding Performance of GF/PEEK Composite Structures

*주민수 ¹, 하지환 ¹, 곽병수¹⁺ * M.S. Joo ¹, J.H. Ha ¹, B.S. Kwak¹⁺

¹ 경상국립대학교 기계항공우주공학부 ⁺E-mail: <u>bs.kwak@gnu.ac.kr</u>

Keywords: Induction welding, Thermoplastic composite, Susceptor, Thermal and mechanical properties

1. 서론

최근 비접촉식 공정으로 복합재 손상을 최소화할수 있는 유도 용접 기술이 주목받고 있다.[1] 그러나 현재까지의 유도 용접 연구는 전도성 열가소성 복합재 중심으로 이루어졌으며, 비전도성 열가소성 복합재의 접합을 위한 서셉터에 대한 연구는 부족한 실정이다.[2]

따라서, 본 연구에서는 비전도성 열가소성 복합재의 접합을 위해 Ag powder를 활용한 전도성 서셉터의 발열 거동을 평가하고, 이를 적용한 비전도성 열가소성 복합재 구조의 유도 용접 성능을 평가하고자 한다.

2. 제작 및 시험

2.1 열가소성 복합재 및 전도성 서셉터 제작

열가소성 수지 Poly-ether-ether-ketone (PEEK) powder와 전도성 소재 Ag powder (40 wt.%, 50 wt.%, 60 wt.%)를 혼합한 뒤, 자력 교반 및 초음파 처리를 통해 분산하였다. 이후, Hot-press 공정을 통해 Film 형태의 Ag/PEEK 전도성 서셉터를 제작하였다. 유도 용접에 활용할 피착체는 Woven glass fiber (GF)와 PEEK film을 사용하여 Hot-press 공정으로 제작하였다.

2.2 유도용접 시뮬레이션

Ag/PEEK 전도성 서셉터의 성능을 확인하기 위해 전자기 해석 시뮬레이션을 수행하였다. 장비 규격을 고려하여 Pancake 코일에 250 kHz, 400 A의 전류를 인가하였을 때, 시간에 따른 Ag/PEEK 전도성 서셉터의 발열거동을 평가하였다. 해석 결과, Ag 함량이 증가할수록 발열 성능이 향상되는 것을 확인하였으며, 10초 동안 가열 시 모든 Ag/PEEK 전도성 서셉터가 PEEK의 녹는점보다 높은 온도에 도달하였다. 이러한 결과를 바탕으로 실제 유도 용접 공정에서의 코일 이동 속도를 2 mm/s로 설정하였다.

2.3 유도 용접 공정

GF/PEEK 사이 접합부에 Ag/PEEK 전도성 서셉터를 삽입하여 유도 용접을 수행하였다. 접합 성능 향상을 위해 Steel Roller를 이용하여 150 N의 하중을 가하며 유도 용접을 수행하였다.

2.4 기계적 물성 시험

Ag/PEEK 전도성 서셉터를 이용한 GF/PEEK의 용접 성능을 확인하기 위해서 층간 전단 강도 (ILSS) 시험과 단일 겹침 전단 강도(SLSS) 시험을 하여 접합 강도를 확인하였다. ILSS 시험과 SLSS 시험은 각각 ASTM D2344와 ASTM D5868 규격을 따라 수행하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 발열거동

시뮬레이션을 통해 평가한 Ag/PEEK 전도성 서셉터 의 발열 성능 검증을 위해 Ag/PEEK 전도성 서셉터의 발열 거동을 측정하였다. 측정 결과, 시뮬레이션 결과와 같이 Ag 함량이 증가할수록 발열 성능이 항상되는 것을 확인하였으며, 10초 이상 전자기장에 노출 시 모든 Ag/PEEK 전도성 서셉터가 PEEK의 녹는점보다 높은 온도에 도달하는 것을 확인하였다. 이를 통해 Ag/PEEK 전도성 서셉터의 발열 성능을 검증하고, 유도 용접 공정 적용 가능성을 확인하였다.

3.2 접합강도 평가

기계적 물성 시험 결과, 우수한 접합강도를 가진 50 wt.% PEEK/Ag susceptor의 SLSS와 ILSS는 각각 18.5 Mpa과 12.3 MPa이며, 이는 서셉터로서 많이 사용되는 Stainless steel mesh 대비 각각 54.4 %, 127.7 %의 높은 결과를 보였다. 40 wt.%와 60 wt.% Ag /PEEK 서셉터의 경우 부분적으로 발생한 비접촉 영역으로 인해 50 wt.% PEEK/Ag 서셉터 대비 낮은 SLSS와 ILSS를 보였지만 Stainless steel mesh 대비 우수한 접합 강도를 보였다.

4, 결론

본 연구를 통해 Ag/PEEK 전도성 서셉터의 발열 거동과 비전도성 열가소성 복합재 구조의 유도 용접 성능을 평가하였다. 유도 용접 환경에서 Ag/PEEK 서셉터가 우수한 발열 거동을 보이는 것을 확인하였고, Stainless steel mesh 대비 우수한 접합 성능을 보이는 것을 확인하였다. 본 연구결과를 바탕으로, Ag powder를 이용한 전도성 서셉터가 비전도성 열가소성 복합재 접합에 효과적으로 적용될 수 있음을 입증하였다.

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

참고문헌

[1] Ageorges. et al. Compos.-A:appl.Sci.Manuf. 32: 10631612, 2001

[2] Martin. et al. Adv. Eng. Mater.24: 2100877. 2022

후기

이 성과는 2022년 우주항공청의 재원으로 미래우주교육센 터(RS-2022-NR067079)의 지원을 받아 수행된 연구임과 이 연구는 2025년도 경상국립대학교 글로컬대학30사업에 의하 여 수행되었음.

PEMFC 가스켓의 정량적 면압 평가를 위한 실험-통계 분석 및 하이브리드 접근법 Experimental statistical analysis and hybrid approach for quantitative contact pressure evaluation of gasket in polymer electrolyte membrane fuel cell

* 전재안, 홍명진, 신승철, 이상의*

* J.A. Jeon, M.J. Hong, S.C. Shin, S.E. Lee⁺

인하대학교 기계공학과, ⁺E-mail: <u>selee@inha.ac.kr</u>

Keywords: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, Gasket, Contact pressure, Finite element analysis

1. 서론

고분자 전해질막 연료전지 (Polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC) 가스켓의 적절한 면압은 시스템의 성능과 안정성에 중요함. 가스켓 면압 측정에 많이 사용되는 감압지를 활용한 방식은 낮은 압력 및 작은 면적에서 정량적 데이터 분석에 한계가 있음 [1]. 본 연구에서는 이러한 한계의 극복을 위해 실험-통계 분석과 하이브리드 접근법을 제안함.

2. 시편 설계 및 실험 방법 2.1 재료 및 시편

Ethylene-propylene-diene monomer (EPDM) 소재를 사용하여, 실제 PEMFC 스택의 가스켓 형상을 모방하여 시편을 제작함. 본 시편은 3 cm 길이의 직선 형태를 가지며 SUS 소재의 plate에부착되어 있음.

2.2 실험 방법

기체 확산층 성능 평가 장비를 개조하여 하단에는 면압지를 고정하고 상단에는 시편을 고정할 수 있게 장비를 구성함. 0.15 mm 와 0.17 mm 압축에서 Fujifilm의 LLW 타입 Prescale 면압지와 FPD-8010E를 사용하여 면압 측정 및 분석을 수행함.

3.실험-통계 분석

3.1 분석 방법론

통계적 분석을 위해 세 가지 가정을 적용하여 측정 위치 별 데이터의 편차를 감소시킴. 수정 데이터의 통계평균값은 대표 면압으로 지칭하여 분석에 사용함.

3.2 결과 및 분석

반복 시험 및 다양한 압축 조건 하에서 유사한 면압 측정 결과를 얻어 실험 방법의 신뢰성을 확인함. 하지만 하중 평형 이론을 통한 평균 면압 비교에서, 실험-통계 분석 방식은 측정 하중을 바탕으로 한 평균 면압과 비교했을 때 더 낮은 값을 보임을 확인함.

4. 하이브리드 접근법

4.1 해석 모델링

하이브리드 접근법은 실험 데이터를 기반으로 유한요소 해석 데이터를 보정하여 면압 측정에 사용함. 해석에는 초탄성 재료의 거동을 묘사하기 위해 변형률 에너지 밀도 함수 중 하나인 Mooney-Rivlin form을 활용함.

4.2 결과 및 분석

각 압축조건 별 실험-해석 하중 데이터 비교 결과 14.8 (±1.35)%의 일정한 수준의 오차를 보임. 실험-해석의 오차를 바탕으로 해석 결과에 1.148의 보정치를 적용하여 각 압축조건의 면압 데이터를 도출함. 도출된 면압 데이터는 하중 평형 이론을 통해 측정 정확도 검증을 진행하였으며 2.38 (±1.24)%의 오차를 보여 실험-통계 분석에 비해 향상된 정확도를 보여줌.



Fig. 1. (A) Actual test configuration, (B) FEA model, (C, D) Experimental statistical analysis results: 0.15 mm and 0.17 mm and (D) average contact pressure results.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 PEMFC 가스켓의 정량적 면압 평가를 위한 두 가지 측정 방법을 제안함. 실험-통계 분석은 반복되는 실험 및 다른 압축 조건 하에서 데이터의 신뢰성을 보여주었지만 정확도 측면에서 한계를 보임. 반면, 하이브리드 접근법의 경우 향상된 정확도를 보여줌. 본 연구 결과는 PEMFC 시스템에 최적화된 가스켓 면압을 설계하고 평가하는 데 중요한 토대를 제공할 것으로 기대됨.

참고문헌

[1] J.Y. Yoo et al. Int. J. Hydrog. Energy. 50(C):1194-1206, 2024.

후기

이 연구는 현대NGV의 지원을 받는 산학과제인 '연료전지 시스템 기밀 성능 예측을 위한 가스켓 면압 기준 개발'에 의해 수행되었습니다.

동종 및 이종 재료의 멀티 볼트 조인트의 강도 예측 Strength Prediction of Multi Bolt Joints with Similar and Dissimilar Materials

*김수지¹, 김경식², 전흥재³⁺ * S.J. Kim¹, K.S. Kim², H.J. Chun³⁺

> ¹ 연세대학교 기계공학과 + E-mail: hjchun@yonsei.ac.kr

Keywords: Strength Prediction, Multi Bolt Joint, Dissimilar Materials, Characteristic Length.

1. 서론

볼트 조인트는 다양한 구조에서 널리 사용되지만, 구멍 주변의 응력 집중으로 인해 정밀한 해석 기법이 필요하다. 높은 하중이 걸리는 경우에는 Multi bolt joint 구조를 사용하며 이종 재료 접합은 다중소재 설계 시 강성과 강도가 높은 부품을 결합하는 방식이다. 동종 재료(Carbon-Carbon)와 이종 재료(Carbon-Steel)를 비교하여 재료 조합이 강도에 미치는 영향을 평가하고, One hole 및 Two hole 조인트의 강도를 예측한다.

2. 특성길이

2.1 특성길이 이론

볼트 조인트는 볼트 구멍 주변에서 일어나는 응력 집중으로 인해서 응력 분포가 불균형하게 나타난다. 이 때문에 유한요소해석을 통해 예측한 파단 하중은 실제 시편의 파단 하중보다 낮게 측정된다. 이러한 차이를 보정하기 위해 도입한 것이 특성길이이다. 특성길이는 원공의 가장자리에서 특정한 거리만큼 떨어진 지점에서 파단을 예측하는 방법이다.

2.2 인장 및 압축 특성길이 도출

인장 및 압축 특성길이를 구하기 위해 각각 인장 실험과 베어링 실험을 통해서 파단 강도와 파단 하중을 구한다. 볼트 사이의 로드쉐어링이 미치는 영향을 확인하기 위해 One hole일 때와 Two hole인 경우에 대한 실험을 각각 수행하였다. 사용된 재료는 금속 시편 SS400과 SK케미컬 사의, USN125 단방향 Prepreg(Carbon/epoxy)이며 적층각은 [±45°]₅,이다.

실험을 통해 구한 파단강도와 파단하중을 사용하여 유한요소해석을 진행해 응력분포를 구한다. 원공 주변에서 나타나는 응력 분포가 파단강도와 동일한 값을 갖게 되는 위치까지의 거리를 특성길이로 정의한다. 유한요소해석은 상용프로그램인 ABAQUS 6.14를 사용하였다.

3. 조인트 파단강도 예측

3.1 특성곡선

인장특성길이와 압축특성길이를 이용하여 원공 주변부에서 특성곡선을 도식화 할 수 있다[1]. Fig.1는 원공 주변에서의 특성곡선을 나타낸 그림이다.



Fig. 1. Characteristic curve.

 θ_{fal} 는 파단 위치에 따라 달라지며, R_{or} 는 인장특성길이, Ror는 압축특성길이, d는 원공의 직경, r,는 원공 중앙에서 특성곡선까지의 거리를 나타낸다.

이러한 특성곡선은 다음 식을 통해 얻을 수 있다. $r_c(\theta) = d/2 + R_{OT} + (R_{OC} - R_{OT}) \cos\theta$ (1)

3.2 인장 및 압축 특성길이 도출

유한요소해석을 통해 파단 하중을 예측하기 위해 유한요소해석 모델을 구축하였다. 해당 모델에서 특성곡선에 해당되는 부분을 지정해주고 하중을 부여한다. 가장 먼저 Tsai-Wu index 값이 1이 되는 부분에 인가되고 있는 하중을 구한다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 볼트조인트의 특성곡선을 실험과 유한요소해석을 통해 도출하였고, 이러한 특성곡선을 통해 볼트 조인트의 파단 강도를 예측하였다.

볼트 간의 로드쉐어링이 특성길이에 어떠한 영향을 미치는 지 알아보기 위해 One hole일 때와 Two hole일 때 조인트의 특성곡선을 각각 도출하였다.

특성곡선을 사용하여 유한요소해석으로 예측한 실험을 통해 얻은 파단강도와 파단강도를 비교하였으며, 오차율을 10% 미만임을 확인하였다.

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

One hole일 때의 특성곡선은 Two hole일 때의 특성곡선과는 달랐다. 볼트의 개수에 따라 로드 쉐어링으로 인해 특성곡선이 달라짐을 확인할 수 있었다.

또한, 동종재료의 볼트 조인트일 때보다 이종재료일 때 강도가 29.85% 증가함을 확인하였다.

참고문헌

[1] JI Choi et al. Composite Structures. 189: 247-255, 2018.

후기

This work was supported by Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement(KRIT) grant funded by the Korea government(DAPA(Defense Acquisition Program Administration)) (No.20-105-E00-005(KRIT-CT-23-010), VTOL Technology Research Center for Defense Applications, 2025).

브레이딩 Type IV 수소압력용기의 경량화에 따른 내압 및 파열 성능 평가 Internal and Burst Pressure Resistance Performance of Braiding-based Type IV Lightweight Hydrogen Vessels

* 김정섭¹, 지우석 ¹⁺ * J.S. Kim¹, W.S. Ji¹⁺

¹ 울산과학기술원 기계공학과 ⁺E-mail:<u>wsji@unist.ac.kr</u>

Keywords: Hydrogen Pressure Vessel, Braided Composite, Finite Element Analysis, Extrapolation Method.

1. 서론

최근 친환경 에너지원으로 수소가 주목받고 있다. 안전한 저장 및 운송을 위해서는 견고한 압력 용기가 필수적이나기존 금속 용기는 중량이 커서 운송효율이 떨어진다. 이를 해결하기 위해 부분적으로 복합재를 사용한 경량 압력 용기가 개발되고 있다. 그러나 복합재의 높은 생산 비용 때문에 실험에 한계가 있어, 형상 설계 과정에서 해석을 통한 사전 성능 평가가 요구된다. 본 연구에서는 기존에 설계된 수소 압력 용기와 금속부를 줄여 경량화를 진행한 압력 용기의 내압 성능 및 파열 성능을 비교 평가하였다.

2. 물성 및 해석 조건

2.1 구성 요소 및 물성치

본 연구에서는 Type 4 수소 압력 용기를 대상으로 하였다. 이는 피팅, 슬리브, 라이너 조립체를 삼축 브레이딩 복합재로 감싼 구조로 이루어져 있다. 피팅은 스테인리스 스틸, 슬리브는 알루미늄, 라이너는 PA11 폴리머 소재이다. 삼축 브레이딩 복합재는 65°로 직조된 탄소섬유/에폭시 복합재를 적용하였다. 이 복합재의 물성은 30°, 45°, 60° 에서 측정된 실험 데이터를 바탕으로 도출되었다.

2.2 경계조건 및 하중조건

수소 압력 용기의 해석 효율을 높이기 위해 회전 및 면 대칭 경계조건을 적용하여 모델링 범위를 축소하고 계산 시간을 단축하였다. 가압 실험 조건을 반영해 경계조건으로 밸브 체결 부위의 반경 방향(*U_R*) 및 각 방향(*U_θ*) 자유도를 고정하였다. 하중으로 최소 파열압 기준인 157.5 MPa을 부가하였다.



Fig. 1. Materials and Boundary conditions

3. 해석 결과

경량화 모델은 피팅-슬리브 조립체의 무게를 32% 줄였음에도, 최소 파열압 하중에서 안전계수가 1을 초과하여 구조적으로 안전한 것으로 나타났다. 복합재 hoop 방향의 안전계수는 기존모델에서 1.24, 경량화모델에서 1.14로 나타나, 경량화 후에도 내압 성능이 유지됨을 확인할 수 있었다.



Fig. 2. Simulation Results: (a) Type A, (b) Type B

4. 결론 및 향후 과제

이번 연구는 수소압력용기의 경량화 설계가 구조적 안정성을 확보하면서도 성능을 유지할 수 있음을 해석적으로 분석했다는 점에서 의의가 있다. 향후 연구에서는 실험적 검증을 통해 해석 모델 및 결과를 보완하고자 한다.

후기

·본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원 (KEIT) 기계장비산업기술개발사업 (20018217)에 의해 수행되었으며, 지원에 대해 감사드립니다. 부

결정화도 및 결정의 크기가 열가소성 복합재의 파괴 인성에 끼치는 영향 Effect of crystallinity and crystalline size on fracture toughness of thermoplastic composite

*박민수 ¹, 지우석 ¹⁺ * M.S. Park ¹, W. Ji ¹⁺

¹ 울산과학기술원 기계공학과 ⁺E-mail: wsji@unist.ac.kr

Keywords: Thermoplastic composites, Mechanical behavior, Crystallinity, Crystalline structure size.

1. 서론

열가소성 복합재의 기계적 거동은 결정 구조의 특성에 영향을 받는다. 기존 연구들은 열 이력에 따른 결정화도와 기계적 거동 변화를 집중적으로 분석하였다. 하지만, 열 이력은 결정 구조 크기에도 영향을 미친다. 결정 구조 크기가 기계적 거동에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 미비하다. 본 연구는 결정 구조 크기가 열가소성 복합재의 기계적 거동에 미치는 영향을 확인하였다.

2. 시편 제작 및 시험 방법

2.1 열 이력이 다른 복합재의 제작

복합재는 Toray TC1225 UD Tape를 사용하여 핫프레스로 성형하였다. 복합재 평판은 어닐링 적용 여부와 냉각속도를 다르게 하여 제작하였다. A00FC는 어닐링 없이 빠르게 냉각한 조건, A10FC는 어닐링 후 빠르게 냉각, A10SC는 어닐링 후 느리게 냉각한 조건을 뜻한다.

2.2 열 이력에 따른 결정 구조 특성 분석

결정화도는 시차주사 열량계를 사용하여 질소환경, 온도 40°C~350°C, 승온 속도 10°C/min 조건으로 측정하였다. 결정 구조는 편광현미경으로 관측하였다. 시편은 유리 슬라이드 사이에 PI 필름, 절편한 열가소성 수지, 탄소 섬유를 적층하여 제작하였다.

2.3 결정 구조 특성에 따른 기계적 거동 비교

복합재의 기계적 거동은 compact tension 시험으로 Mode 1 파괴인성을 측정하여 비교하였다. 시험은 가력/비가력을 교차 수행하여 변위를 0.1mm씩 증가시키며 진행하였다. Mode 1 파괴 인성은 compliance calibration 방법으로 계산하였다.

3. 시험 결과

Table 1은 열 이력에 따른 복합재의 결정화도와 결정 구조 크기를 나타낸다. A00FC는 빠른 냉각으로 낮은 결정화도를 가지며, A10FC와 A10SC는 어닐링을 통해 높은 결정화도를 가진다. A00FC의 결정 구조가 가장 작았으며, A10FC와 A10SC의 결정 구조는 각각 A00FC 보다 두 배 이상 컸다. A10FC는 A10SC와 결정화도는 비슷하나 결정 구조가 약 두 배 작았다.

Table 1 Characteristics of crystalline structures

	A00FC	A10FC	A10SC	
Crystallinity [%]	9.0±1.5	25.2 ± 2.2	27.0 ± 0.2	
Spherulite size [µm]	3.2 ± 0.8	5.8 ± 1.8	11.1 ± 2.7	
Transcrystalline size [μm]	1.6±0.3	2.4 ± 0.7	5.2±1.9	

Fig. 1은 복합재의 열 이력에 따른 compact tension 시험 결과를 보인다. A00FC와 A10FC는 연성 거동을 나타낸 반면, A10SC는 취성 거동을 보였다. 특히, A10FC는 높은 결정화도를 가짐에도 연성 거동을 보인다. 결정 구조 크기가 작은 복합재는 결정화도가 높더라도 연성을 유지할 수 있음을 확인하였다. 또한, 복합재의 파괴 인성은 결정 구조의 크기가 작을수록 증가하는 경향을 보였다.



Fig. 1. Result of compact tension test.

4. 결론

본 연구에서는 결정화도는 비슷하나 결정 크기가 다른 복합재를 제작하였다. Compart tension 시험을 통해 결정화도 뿐 아니라 결정의 크기도 파괴 인성에 영향을 끼치는 것을 확인하였다.

후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2023-00240918)

전자기파 흡수 대역 조절을 활용한 플루티드 코어 기반 능동형 레이더 흡수 구조 설계 및 해석

Design and Analysis of an Active Radar Absorbing Structure Based on Fluted Core for Electromagnetic Wave Absorption Band Control

*배종인¹, 박권우¹, 곽병수¹⁺ * J.I.Bae¹, K.W.Park¹, B.S.Kwak¹⁺

¹ 경상국립대학교 기계항공우주공학부 ⁺E-mail: bs.kwak@gnu.ac.kr

Keywords: Stealth technology, Active Radar-absorbing structure, Fluted Core, Tunable Electromagnetic Absorption

1. 서론

레이더 흡수 구조(Radar-absorbing structure, RAS) 는 스텔스 기술의 핵심 요소이다 [1]. RAS는 전자 기파 흡수 대역을 조절할 수 없는 수동형과 조절 가능한 능동형으로 나뉜다. 수동형 RAS는 다층 구 조를 통해 우수한 기계적 물성을 확보할 수 있으 나, 이에 따른 두께 및 무게 증가가 주요 한계점으 로 작용한다. 이러한 문제를 극복하기 위해 능동형 RAS에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. [2-3].

본 연구에서는 플루티드 코어 기반 샌드위치 복 합재로 능동형 RAS를 설계하여 광대역 (4-18 GHz) 에서 90% 이상의 전자기파 흡수를 구현하고, 시뮬 레이션을 통해 성능을 분석하였다.

2. 본론

2.1 능동형 레이더 흡수 구조 설계

본 연구에서는 Salisbury screen 흡수체 원리를 적 용한 샌드위치 복합재 구조를 설계하였다. 본 구조 의 코어는 내부 구조의 활용성이 높은 플루티드 코 어를 채택하였다. Cell Size는 25 × 25 mm 크기로 설계하였다. 코어 내부에는 구리 테이프가 부착된 Cu-plate을 포함하여 설계하였고, 최외각 표면에는 저항 시트를 부착하였다. 저항 시트의 면저항은 무 반사 조건을 만족하는 377 Ω/sq을 선정하였고, 전 자기적 물성은 유리섬유/에폭시 복합재의 유전율을 사용하였다.

전자기파 흡수 대역을 조절하기 위해 Cu-plate와 코 어 내부 상단 사이의 간격 (GAP) 조절, Cu-plate의 중심 과 양 끝 Web 사이의 각도 조절 ('V' 및 'Λ' 형상), 그리 고 Cu-plate ('V' 및 'Λ' 형상)의 반복적 다중 배열을 각 각 변수로 적용하여 분석하였다. 이후 하나의 변수만 적용한 경우와 두 가지 이상의 변수를 조합한 경우에 대한 전자기파 흡수 성능을 비교 및 분석하였다.

2.2 시뮬레이션 결과 및 분석

간격 조절 시, 간격이 증가하면 공진 주파수가 저주파로 이동하고 대역 폭이 감소하는 경향을 보 였으며, 반대로 간격이 감소하면 고주파로 이동하 며 전자기파 흡수 범위가 확대되었다. 각도 조절 시, 'V' 형상의 경우 각도가 증가할수록 공진 주 파수가 저주파로, 'Λ' 형상은 고주파로 이동하였 다. 반복적 다중 배열을 적용한 경우 Cu-plate의 배 열 개수가 증가할수록 'V' 형상은 고주파로, 'Λ' 형상은 저주파로 이동하는 경향을 보였다. 두 가지 이상의 변수를 조합하여 분석한 결과,

간격 조절과 각도 조절 및 반복적 다중 배열을 조 합한 경우, 한 가지의 변수만을 적용한 경우에 비 해 광대역에서의 우수한 전자기파 흡수 성능을 보 인다는 사실을 확인하였다.

3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 Cu-plate 의 이동 및 형상의 배열 변화를 통해 전자기과 흡수 대역을 가변 가능한 능 동형 RAS 를 설계하고, 간격 조절과 각도 조절, 반 복적 다중 배열을 변수로 적용하여 광대역에서 최 적의 전자기과 흡수 성능을 분석하였다. 분석 결 과, 간격 조절과 각도 조절 및 반복적 다중 배열을 조합한 경우, 최소한의 가변으로 광대역에서의 우 수한 전자기과 흡수 성능을 나타내었다. 향후 본 연구에서 제안한 구조를 실제 제작하고 실험을 통 해 성능을 검증할 예정이다.

참고문헌

[1] Mallesh, S., et al. Journal of Alloys and Compounds. 968:171979, 2023

- [2] Wei, K., et al. 2024, 95–98, IEEE.
- [3] Qi, D., et al. Advanced Engineering Materials, 2024, 26(21), 2401121.

후기

본 연구는 연구개발특구진흥재단의 '지역혁신 메가 프로젝트' 사업의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (2023-DD-UP-0026)

본 연구는 2025년 경상국립대학교 글로컬 대학 30 프 로젝트 재원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

hBN 입자 분산과 Pitch계 탄소섬유 스티칭을 활용한 고열전도성 다기능 PAN계 CFRP 구현

High Thermal Conductivity Multifunctional PAN-based CFRP with hBN Particles

Dispersion and Pitch-based Carbon Fiber Stitching

*이준경¹, 박규범¹, 곽병수¹⁺

* J. K. Lee¹, G. B. Park¹, B. S. Kawk ¹⁺

¹ 경상국립대학교 기계항공우주공학부 ⁺E-mail: bs.kwak@gnu.ac.kr

Keywords: Carbon fiber reinforced plastic (CFRP), Thermal conductivity, Hexagonal boron nitride (hBN), Stitching process

1. 서론

위성 내부 탑재체는 극한 환경에서도 정상 작동 온도 유지를 위한 효율적인 열 제어 시스템이 필요하다 [1]. 최근 위성 경량화·소형화로 금속 대신 탄소섬유 강화 플라스틱 (CFRP) 활용이 증가하고 있다 [2]. 그러나, CFRP는 금속 대비 열전도도가 낮은 한계가 있다 [3-4].

본 연구에서는 CFRP의 열전도도 개선을 위해 hBN (Hexagonal boron nitride)입자를 에폭시에 분산하고, 스티칭 공법을 적용한 고열전도도 PAN (Poly Acrylo Nitrile)계 CFRP를 구현하였다. 입자 함량 및 스티칭 유무에 따른 열전도도 및 기계적 물성을 분석하였다.

2. 시편 제작 및 시험

2.1 재료 선정 및 시편 제작

설계 변수는 hBN의 입자 함량으로 설정하였다. Epoxy에 hBN을 입자 함량에 따라 분산하여 pristine, h_10wt.%, h_20wt.%, h_30wt.%의 hBN/epoxy를 제조하였다. 이어서, PAN-based Carbon fabric에 Carbon fiber/epoxy 8 plies로 hand lay-up하여 PANbased Carbon fiber/epoxy를 제작하였다. 또한, h_30wt.% 시편에는 Pitch 계 탄소섬유 스티칭을 적용한 h_30wt.%_S 시편을 추가로 제작하였다. 모든 시편은 오토클레이브 공정을 통해 제작하였다.

2.2 열전도도 및 기계적 물성 시험

제작된 시편의 열관리 성능을 평가하기 위해 열확산도를 측정하였다. 열전도도는 밀도, 비열, 열확산도를 측정하여 도출하였다. 열확산도, 밀도, 비열은 각각 Laser flash analysis 방식 기반의 LFA-467 장비, 아르키메데스 방식의 밀도계, 시차 주사 열량 분석 장비를 통해 측정하였다.

측정한 열전도도를 기준으로 열전도 성능이 가장 우수한 h_30wt.%_S에 대해 기계적 물성을 평가하였다. 기계적 물성 평가를 위한 시험으로 압축, 인장, 층간 전단 시험을 수행하였으며, 각각 ASTM D6641, ASTM D3039, ASTM D2344 규격을 준수하였다.

3. 시험결과 및 분석

열전도도 측정 결과, hBN의 함량이 증가할수록 면내 및 두께 방향 열전도도가 증가하는 경향을 이는 hBN 입자량이 많을수록 보였다. 인접하 직접적인 경로를 형성하여 입자간의 열전달 열전도도 성능을 향상시킨 것으로 판단하였다. pristine 대비 h 10wt.%, h 20wt.%, h 30wt.%, h 30wt.% S 시편의 면내 방향 열전도도는 24%, 63%, 137%, 90% 증가하였으며 두께 방향 열전도도는 6%, 20%, 52%, 3,128% 증가하였다.

h_30wt.%_S의 경우 Pitch 계 탄소섬유 스티칭을 통해 두께 방향으로 직접적인 열전달 경로가 형성되어 두께 방향 열전도도가 향상되었다. 그러나, 스티칭 과정에서 섬유와 매트릭스에 파손이 발생하였고, hBN 입자 간 열전달 경로에 간섭이 발생하여 면내 방향 열전도도는 다소 감소한 것으로 판단된다.

효과적인 가장 열전도도 성능을 나타내는 h 30wt.% S의 기계적 물성은 압축 강도와 강성이 각각 pristine 대비 49%, 28% 감소하였으며, 인장 강도와 강성도 각각 61%, 43% 감소율을 보였다. 또한, 전단강도는 층간 pristine 대비 60% 스티칭으로 감소하였다. 이는 인해 섬유가 굴절되고 일부 파손됨에 따라 강도와 강성이 감소하였으며, 분산된 hBN이 매트릭스인 epoxy의 계면 결합력을 약화시켜 CFRP의 층간 강도를 저하시킨 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 hBN 입자 분산과 스티칭 공법을 활용한 CFRP 를 제작하고 열전도도 및 기계적 물성을 평가하였다. hBN 입자의 함량에 따라 면내 및 두께 방향 열전도도가 향상되었음을 확인하였다. 그러나 기계적 물성은 감소하는 경향을 보였고, 향후 연구에서 열전달 경로를 유지하면서 기계적 특성 저하를 최소화하는 방법에 대해 연구를 수행할 예정이다.

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

참고문헌

- [1] GN Kim et al. KSAS J. Aeronaut. Space Sci. 2002.
- [2] L Ren et al. Compos. A: Appl. Sci. 163:107209, 2022
 [3] Blaza S et al. Appl. Eng. Lett. 3(2):52-62, 2018.
- [4] Ran Y et al, Compos. Sci. Technol. 18:727-733, 2010.

후기

이 성과는 2022년 우주항공청의 재원으로 미래우주교육 센터(RS-2022-NR067079)의 지원을 받아 수행된 연구임 과 2025년 경상국립대학교 글로컬 대학 30 프로젝트 재 원의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

친환경 선박 풍력 추진 시스템 복합재 Rotor Sail 기술개발에 관한 구조해석 A Structural Analysis on Composite Rotor Sail Technology for Eco-Friendly Ship Wind Propulsion System Development

*김성현¹, 황민성¹, 김정규¹, 민병훈¹, 최진호¹⁺ * S.H. Kim¹, M.S. Hwang¹, J.G. Kim¹, B.H. Min¹, J.H. Choi¹⁺

> ¹ 경상국립대학교 기계항공공학부 ⁺E-mail: <u>choi@gnu.ac.kr</u>

Keywords: Composite, Rotor Sail, Composite structure

1. 서론

국제해사기구(IMO)는 선박에서 배출되는 온실가스를 감축하기 위해 점진적으로 환경 규제를 강화하고 있다. 이러한 규제에 대응하기 위해 해운업계는 보조 추진 시스템 개발 등 다양한 방안을 모색하고 있다. Rotor Sail은 보조 추진 시스템 중 하나이며, 연료 소비를 줄이고 온실가스 배출을 저감할 수 있는 유망한 기술로 주목받고 있다. 이에 따라 경량화와 내구성을 동시에 만족하는 복합재 Rotor Sail의 개발이 필요하다. 본 연구는 복합재 Rotor Sail의 구조적 안전성을 평가하기 위해 구조해석을 진행하였다.

2. 형상 및 경계조건

2.1 해석 모델

복합재 Rotor Sail 해석 모델은 총 길이 35m, 직경 5m (높이 20m, 15m 의 Cylinder 2개)로 구성되어 있다. 샌드위치 구조로 구성되어 있는 Rotor Sail의 소재는 Glass fiber, Foam core를 적용하였다.

ANSYS ACP-Pre module 을 이용하여 소재 적층 모사를 하였다.



Fig. 1. Composite Rotor Sail Modeling.

2.2 경계조건 및 하중조건

Rotor Sail의 경계조건은 Steel Flange에 연결된 Shaft 내경과 하부 Wheel에 적용하였다. Shaft 내경에는 3개의 병진(Translation) 자유도와 3개의 회전(Rotation)자유도를 구속하여 고정단(Clamped Condition)을 구현하였다. 하부 Wheel에는 3개의 병진(Translation) 자유도 만 구속하였다.

하부Wheel의 경우 롤러 베어링 접촉 위치로부터 Rotor Sail 회전 축을 연결하는 Spring 요소를 30° 간격 방사 형태로 적용하였다. 정해석 하중조건의 경우 미래하이테크, KOMERI(한국조선해야 기자재 연구원)으로 부터 제공 받은 하중을 적용하여 해석을 진행했다. 동적해석의 경우 설계된 Rotor Sail 의 공진주파수를 검토하기 위해 ANSYS Modal Analysis를 이용하여 비구동상황과 구동상황일때의 공진을 확인하고 Campbell diagram을 통한 위험 속도(critical speed)를 분석한다.추가적으로 공정상황에서 발생하는 불평형질량으로 인한 편심 하중조건 상황에서 구조물의 안전성을 확인한다.



Fig. 2. Boundary Condition of Rotor Sail

3. 안전성 평가

Rotor Sail의 구조적 안전성 평가를 위해 해석결과를 기반하여 Laminate, Ply 기준 안정성 평가를 진행하였다. 중소조선연구원으로부터 제공받은 인장 시험 결과를 이용하여 Laminate 기준 안전계수를 평가하였다.또한, 복합재 파손 이론 중 하나인 Tsai-Wu 파손 이론을 통해 Ply 기준 파손 지수를 평가하였다.

4. 결론 및 향후과제

정적, 동적 해석을 기반하여 안전성 평가를 통해 구조적으로 안전하다는 것을 판단하였다. 추가적으로 Glass fiber 와 Carbon fiber 를 적용한 하이브리드 복합소재에 대한 구조적 안전성 평가를 진행 할 것이다.

Voronoi diagram을 활용한 복합재료용 코어재 구조 설계 Core Structural Design for Composite Materials Using Voronoi Diagram

*박정주 ^{1,2}, 유성환 ², 이원오 ¹⁺ * Jeongju Park ^{1,2}, Seonghwan Yoo ², Wonoh Lee ¹⁺

¹ 전남대학교 기계공학부 ² 한국광기술원 ⁺E-mail: wonohlee@jnu.ac.kr

Keywords: Voronoi diagram, 3-Point Bending, 3D Printing, Core structure

1. 서론

허니콤, PVC Foam과 같은 기존에 사용되는 코어재의 경우 복잡한 형상을 구현하기 위해 추가적인 가공이 필요하다. 본 연구에서는 3D 프린터를 이용하여 코어재의 구조설계를 위한 기초연구를 수행하였다. 경랑화 구조의 균일 배열과 무작위 배열의 응력을 비교한 연구에서, 무작위 배열에서 굽힘 강성 및 최대하중이 증가한 선행연구를 분석하였다[1]. 이에 구조의 무작위 배열을 위해 Voronoi diagram 활용하여 구조 설계 후, 3점 굽힘 시험을 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 제작 및 형상

본 연구에서는 BOML의 Epsilon W50 3D 프린터를 이용하였고, 재료는 3D 프린팅, 포장재, 의료용 임플란트 등 다양한 용도로 널리 사용되고 있는 HA(Polylactic Acid)를 사용하였다. 시편은 가로 200 mm, 폭 15 mm, 높이 10 mm로 ASIM D790을 참고하여 Fig. 1.과 같이 제작하였다[2]. 200 mm × 15 mm의 면적에 Voronoi diagram을 적용하여 50 points, 100 points, 150 points의 점을 무작위로 분포시키고, 선으로 이어 0.5 mm의 두께를 가지는 구조를 제작하였다.



Fig. 1. Specimen manufacturing geometry.

2.2 3점 굽힘 시험

본 연구에서 3점 굽힘 시험은 Instron社의 5966 만능재료 시험기를 이용하여 시편조건 당 각 3회의 3점 굽힘 시험을 실시하여 굽힘 강도를 측정하였다. 이 때, Support radius와 Loading radius는 5 mm를 사용하였고 Support span은 160 mm, 실험속도는 2 mm/min으로 설정하였다.

3. 시험 결과 및 분석

본 연구에서는 3점 굽힘 시험을 통하여 굽힘 강도를 측정하여 각 조건당 시편의 비강도를 계산하여 Table 1과 같이 나타내었다. 각 조건(50 points, 100 points, 150 points) 당 굽힘 강도의 평균값은 순서대로 1.44 MPa, 2.93 MPa, 13.64 MPa로 측정되었고, 비강도의 평균값은 7.72 MPa· cm³/g, 11.49 MPa· cm³/g, 13.64 MPa· cm³/g로 나타났다. Point 수가 증가함에 따라 굽힘 강도 및 비강도가 증가하는 것으로 보여지지만, 50 points에서 150 points로 증가하는 두 구간의 비강도 증가량의 차이가 감소하였다. 이는 일정한 수의 point가 넘어가면 굽힘 강도는 계속 증가하지만 비강도가 감소할 수 있을 것 으로 판단된다.

Table 1 Test results and specific strength

			1		0
시머ス거	굽힘 강도	무게	부피	밀도	비강도
기진표전	(MPa)	(g)	(cm ³)	(g/cm ³)	(MPa·cm ³ /g)
	1.36	5.62	30	0.19	7.26
50 points	1.48	5.65	30	0.19	7.86
	1.49	5.56	30	0.18	8.04
100 points	2.97	7.63	30	0.25	11.68
	2.99	7.61	30	0.25	11.79
	2.83	7.72	30	0.26	11.00
150 points	4.33	9.20	30	0.31	14.12
	4.12	9.21	30	0.31	13.42
	4 1 1	9.21	30	0.31	13 39

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 코어재의 구조 설계를 위한 연구에 Voronoi diagram을 활용하여 시편 제작 후 3점 굽힘 시험을 시행하여 굽힘 강도와 비강도를 확인 하였다. point수가 증가함에 따라 굽힘 강도 및 비강도가 증가함을 확인 할 수 있었다. 향후 point수를 증가시켜 굽힘 강도 및 비강도 값의 추이를 확인하고, 기존 코어 재료들과의 비교를 통해 Voronoi diagram을 활용한 구조설계를 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] Yun Lu Tee et al. Bioinspir Biomim. 18:046003, 2023.
- [2] ASTM D790. Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics.1997

후기

본 연구는 중소벤처기업부 중소기업기술정보진흥원의 (과제번호 : I&-2024-00468472)의 지원을 받아 수행한 연구임.

고온(300 ℃) 환경에서 운용 가능한 고성능 유리섬유/비스말레이미드 코르게이티드 샌드위치 광대역 스텔스 복합재 구조 설계 Design of a high temperature (300 ℃) broadband corrugated core sandwich composite structure using a Ni-Plated glass fabric/Bismaleimide resin

* 강승현¹, 홍동준¹, 심재원¹, 이건규¹, 김민성², 남영우^{1,3+} * S.H. Kang¹, D.J. Hong¹, J.W. Shim¹, G.G. Lee¹, M.S. Kim², Y.W. Nam^{1,3+}

¹한국항공대학교 일반대학원 항공우주 및 기계공학과, ²국방과학연구소, ³한국항공대학교 스마트드론공학과 ⁺E-mail: ywnam@kau.kr

Keywords: Radar absorbing structure, Corrugated core, High temperature, Mechanical properties

1. 서론

스텔스 기술 구현의 주요 지표 중 하나인 레이더 반사 단면적(Radar Cross Section, RCS) 저감을 위해 전자기파를 흡수하는 전파흡수구조(Radar absorbing structure, RAS)가 적용된다. 전파흡수구조는 하중지지능력과 전파흡수성능을 동시에 구현할 수 있는 다기능 복합재 구조물로 작용한다. Corrugated 코어 구조는 형상의 특성상 내부에서 전파의 다중 반사 및 산란을 유도하여 우수한 전파흡수 성능을 구현할 수 있으며, 허니컴 코어 구조와 비교하여 우수한 기계적 특성을 보인다[1-3]. 본 연구에서는 비스말레이미드 레진 과 니켈이 도금된 유리섬유 복합재를 활용하여 고온 전파흡수구조를 설계 및 제작하여 전파흡수 성능과 기계적 물성을 평가하였다.

2. 본론

2.1 재료

본 연구에서 제안하는 Corrugated 코어 샌드위치 구조는 전파의 흡수를 위해 니켈이 도금된 유리섬유를 활용하였고 우수한 기계적 물성 내열성을 갖는 고온용 열경화성 및 수지인 비스말레이미드(Bismaleimide)를 사용하였다. 해당 소재의 복소 유전율 및 투자율을 도출하기 위해 자유공간 측정 장비를 활용하 투과 계수 및 반사 계수를 측정하였다.

2.2 스텔스 복합재 구조 설계

측정된 니켈 도금된 유리섬유/BMI 복합재의 복소 유전율을 바탕으로 상용 소프트웨어인 CST Microwave Studio을 활용하여 Corrugated core 샌드위치 전파흡수구조를 설계하였다. 코어의 높이, 각도, 길이 등 5개의 설계 변수를 바탕으로 설계된 전파 흡수 구조는 C, X, Ku - band 대역에서 우수한 전파흡수 성능을 확인하였다.

2.3 기계적 물성(인장/압축/전단) 평가

제안된 니켈이 도금된 유리섬유/BMI 복합재의 기계적 물성을 평가하기 위해 인장, 압축, 면내 전단 시험을 각각 ASTM D3039, D6641, D5379 규격에 따라 수행하였다. 또한, 코르게이티드 코어의 압축 물성을 평가하기 위해 ASTM C365 규격에 따라 샌드위치 코어의 압축 시험을 수행하였다.

3. 결론

연구에서는 Corrugated 코어를 보 활용한 고온용 광대역 전파흡수 샌드위치 구조 복합재를 제안하였다. 니켈 무전해 도금을 통해 재료의 전자기적 물성을 개질하였으며, 이를 활용하여 Corrugated 코어 전파흡수 구조를 설계하였다. 제작된 시편을 상온 환경에서부터 300°C까지 분 당 10 °C 간격으로 승온하여 시편의 고온 환경에서의 흡수 성능을 평가하였다. 그 결과 C, X, Ku-band 대역에서 우수한 전파흡수성능을 만족하였으며 고온 환경에서도 흡수 성능을 유지하였다.

참고문헌

- [1] M. R. M. Rejab et al. The mechanical behaviour of corrugated-core sandwich panels, *Composites: Part B*, 47: 267-277, 2013
- [2] B. S. Kwak et al. Microwave-absorbing honeycomb core structure with nickel-coated glass fabric prepared by electroless plating, *Composites Structures*, 256:113148, 2021
- [3] S. Mallesh et al. Folded-core radar-absorbing sandwich composite with sendust particle-added Ni-plated glass/polyether ether ketone thermoplastic resin in the ultrahigh- frequency band, *Composites: Part B*, 264:110921, 2023

후기

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 항공 피탐지 감소기술 특화연구실 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD220003JD).

주기패턴을 활용한 Quartz fiber/Oxide ceramic matrix복합재의 레이돔 구조 설계

Design and analysis of periodic pattern radome using Quartz fiber-Oxide ceramic

matrix composites

*장한나 ¹, 홍동준 ¹, 임채환 ¹, 최원호 ², 홍성원 ², 고현석 ³, 이상훈 ³, 남영우 ^{1, 4+} * H. Jang ¹, D.J. Hong ¹, C.H. Lim ¹, W.H. Choi ², S.W. Hong ², H.S. Ko ³, S.H. Lee ³, Y.W. Nam ^{1, 4+}

¹ 한국항공대학교 일반대학원 항공우주 및 기계공학과, ²대한항공 항공기술연구원, ³ 한국세라믹기술원 수소·디지털융복합센터, ⁴ 한국항공대학교 스마트드론공학과, ⁺E-mail: ywnam@kau.ac.kr

Keywords: Frequency selective surface, Periodic pattern, Metasurface, Oxide/Oxide ceramic composites

1. 서론

Quartz fiber/Oxide ceramic matrix 복합재는 우수한 전파 투과성과 내열성을 갖추어 레이더 및 항공우주 응용에서 널리 사용된다. 그러나 특정 주파수 대역에서의 전파 반사 문제를 해결하기 위해 선택적 전파 흡수 기능과 투과 기능이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 Quartz fiber/Oxide ceramic matrix 복합재를 유전체 기판으로, 전도성 코팅층에 주기패턴을 구현하여 선택적 전파 흡수 구조를 설계하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 재료 준비

Quartz fiber 는 Saint-Gobain 사의 5H SATIN, 80tex 제품을 사용하였다. 유전 상수는 OO, 손실 탄젠트는 00으로 다른 섬유에 비해 낮은 유전상수와 손실 탄젠트를 가지고 있으므로 전파 투과율이 높아 선택적 전파 흡수 구조 재료로서 우수한 특성을 가진다. 또한, 99%의 고순도 SiO2를 함유하므로 Oxide ceramic matrix와 성형하였을 때 산화저항성이 매우 우수하고 높은 기계적 강도를 기대할 수 있다 [1-5]. Oxide ceramic matrix는 지오폴리머 기반 매트릭스를 제작하였다. 구조로 제작된 변형시킨 Ouartz fiber/oxide ceramic matrix 유전체 기판의 유전율은 OOjOO @OO GHz으로, 손실 탄젠트 값은 OO이다. 또한, 주기패턴을 구현한 전도성 코팅층의 전기전도도는 2 × 10⁶ S/m이며, 두께는 5~15 µm 이내로 제한하였다.

2.2 설계 방법

본 연구에서는 Fabry-Pérot 공진 구조(FPRS, Fabry-Pérot Resonant Structure)를 기반으로 한 선택적 전파 흡수 구조를 설계하였다. Fabry-Pérot 공진 구조는 두 개의 반사면 사이에서 전자기파가 다중 반사하며 특정 주파수에서 강한 공진을 형성하는 원리를 이용한다. 이를 활용하여 Quartz fiber/Oxide ceramic matrix 복합재와 주기적 패턴을 결합함으로써, O-band에서의 전파 투과를 극대화하고, 비공진 주파수에서는 흡수를 증가시키는 구조를 구현하였다. 상용 소프트웨어인 CST Studio Suite을 활용하여 반사면 간격 및 패턴 형상을 조정하여 S-parameters를 제어하였으며, 전자기적 성능을 최적화하였다.

타겟 주파수 대역인 O-band에서 전파 흡수 성능을 높이기 위해 O-band의 파장인 $\lambda = OO-OO$ mm를 기준으로 주기 패턴 간격을 $\lambda/6$ 인 약 O-O mm로 두었으며 패턴 사이즈는 $p \times 0.8$ 인 O-O mm로 parameter sweep 기능을 이용하여 설계하였다.

3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 O-band에서 전파 흡수 성능을, 그 외 대역에서 전파 투과 성능을 최대화하기 주기패턴을 활용하여 주파수 선택적 전파 흡수 구조를 설계하였다. Quartz fiber/Oxide ceramic matrix 복합재를 유전체 기판으로 사용하여 전파 흡수 성능을 높였으며, 전도성 코팅층에 주기패턴을 구현하여 전파 투과 성능을 향상시켰다. 또한, Quartz fiber/Oxide cermic matrix 복합재는 산화 저항성 및 내열성이 우수하므로 추후 고온에서도 선택적 전파 흡수 성능을 검증할 필요성이 있다.

참고문헌

- [1] M. Y. Akram et al. J Eur Ceram Soc. 39(7):2510-2517, 2019.
- [2] A. Tontisakis et al.. Ceram Int.. 47(4):5347-5363, 2021.
- [3] R. Jiang et al. J Eur Ceram Soc. 41(10):5394-5399, 2021.
- [4] E. Volkmann et al. J Mater Sci. 49:7890-7899, 2014.
- [5] H. Li et al. Int J Appl Ceram Technol. 19(4):1970-1980, 2022.

후기

이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구(KRIT-CT-22-028)와 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00397400). 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

극한 환경에서 운용되는 무인항공기용 3D 프린팅 초소수성-전기열 열가소성 발열 복합재 패치 구조 3D Printed composite patch with electrothermal self-heating

superhydrophobic element for extreme conditions

*서한준¹, 김태성², 남영우^{1,3+} * H.J. Seo¹, T.S. Kim², Y.W. nam^{1,3+}

¹ 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과, ² 광주과학기술원 기계로봇공학과, ³ 한국항공대학교 스마트드론공학과 ⁺E-mail: <u>ywnam@kau.ac.kr</u>

Keywords: Multifunctional thermoplastic composites, Superhydrophobic surfaces, Electrothermal heating element, Anti/de-icing performance

1. 서론

무인항공기(UAV) 부품에 빙결이 발생하면 항력이 증가하고 양력이 감소하며 모멘트 특성이 변화하여 운용 성능에 심각한 영향을 미치게 된다[1]. 이에 더해, 결빙 이전에 물 축적 및 물방울 부착을 최소화하기 초소수성(superhydrophobic) 코팅이 제안 위한 되었는데, 일반적으로 접촉각(WCA)이 150° 이상인 초소수성 표면은 낮은 표면에너지와 미세/나노 구조를 통해 물방울의 부착을 줄이는 기능을 수행한다[2-3]. 본 연구에서는 전기열 발열 특성과 초소수성 특성을 융합한 복합재를 3D 프린팅 방식으로 제작하고자 하였으며, 이를 위하여 다중 벽 탄소나노튜브 (MWNT)로 보강된 열가소성 플라스틱과 표면 위 미세 패턴 표면(microscale pattern surface)을 형성하는 방법을 제안하여 효과적인 방제빙 복합재를 제작하였다.

2. 본론

2.1 재료

본 연구에서는 전기열 발열을 구현하기 위하여 다중벽 탄소나노튜브(MWNTs)와 폴리에테르에테르 케톤(PEEK)을 200 rpm에서 2시간 동안 볼밀(ball milling) 처리하여 1-15중량%의 MWNT가 함유된 혼합물을 제조한 뒤, 이를 필라멘트로 압출한 후 Fused Deposition Modeling(FDM) 방식으로 전기열 발열 요소를 제작하였다. 제작된 시편의 표면에 Hot press 장비와 metal mesh 활용하여 미세 패턴 표면을 형성하였으며. 저에너지 구현하기위해 표면을 초소수성 코팅을 진행하였다. 결빙 방지 성능 평가에 앞서, ASTM D5946 규격에 따라 열가소성 폴리머 복합재의 접촉각(Contact Angle, CA)을 측정하였으며, 추가로 ASTM D7490에 근거하여 표면에너지를 산출하였다.

2.2 시편 제작

전기열 발열 요소는 PEEK를 기재로 하고 MWNT를 전도성 필러로 사용하여 FDM 방식 3D 프린터를 통하여 제작하였다. 노즐 온도, 베드 온도, 프린팅 속도, 내부 채움(infill) 패턴 등의 주요 파라미터를 최적화 함으로써 안정적인 전기열 성능을 확인하였다. 제작된 시편위에 metal mesh를 적층 한 후 Hot press 장비를 이용하여 압력과 열을 가하였다. 이후 metal mesh를 시편으로부터 제거한 후 전자현미경 관찰을 통해 미세 패턴이 성공적으로 형성되었음을 확인하였다. 제작된 미세 표면에 초소수성 코팅을 적용하여 효과적인 초소수성 표면 구조를 제작하였다.

3. 결론

본 연구에서는 초소수성과 전기열 발열 기능을 융합한 복합재 시스템을 3D 프린팅 방식으로 개발하였다. Metal mesh와 Hot press 장비를 활용하여 표면에 미세 패턴 표면을 형성해 물 접촉각을 크게 높였으며, MWNTs로 보강한 PEEK를 통해 효율적인 전기열 발열을 구현하였다. 결빙 환경 조건에서의 실험 결과, 본 복합재는 빙결 형성을 억제하고 신속한 제빙을 가능하게 하였으며, 이를 통해 무인항공기가 결빙 환경에서 핵심 시스템 성능을 유지할 수 있음을 시사한다.

참고문헌

- [1] SK Thomas et al. J Aircr. 33(5):841-854, 1996.
- [2] G Momen et al. Appl Surf Sci. 349:211-218, 2015
- [3] Z Zhao et al. Surf Coat Technol. 349:340-346, 2018

후기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00397400).

Multiple I-fiber Stitching 공법으로 보강한 십자형 복합재 체결부의 강도 평가 및 예측

Strength Evaluation and Prediction of Cross-Shaped Composite Joints Reinforced with Multiple I-Fiber Stitching Method.

*최재혁⁻¹, 윤동환 ²,황민성² ,최진호 ³⁴

* J.H.Choi¹, D.H.Yoon², M.S.Hwang² J.H.Choi³⁺

¹ 경상국립대학교 산학협력단 글로벌항공핵심기술선도연구센터 ⁺E-mail: cjh980530@naver.com

Keywords: Multiple, I-fiber, Spring Element, Cohesive Element

1. 서론

본 연구는 Multiple 형태의 I-Fiber가 삽입된 십자형 복합재 구조물을 제작하고, 해당 구조물의 파손 강도를 실험적으로 평가한 후, 유한요소 해석 결과와 비교하였다. I-Fiber 스티칭은 2×2, 3×3, 4×4 형태로 배치되었으며, 십자형 접합부의 접착 유무에 따라 2가지 유형의 시편을 제작하였다. 십자형 복합재 구조물의 유한요소 모델링 시, 스프링 요소(Spring Element)로 단순화하여 모델링하였으며, 접착부는 CZM(Cohesive Zone Method)을 적용하여 해석을 수행하였다. 본 연구는 I-Fiber 스티칭이 복합재 구조의 기계적 성능을 분석하고, FEM 향상시키는 효과를 정량적으로 해석을 통해 파손 거동을 예측하는 것을 목표로 한다.

2. 시험 결과 분석

2.1 No-Bonding 결과비교

No-Bonding 2x2 시편은 REF 시편 대비 37.57%
 낮게 평가되었고 No-Bonding 3x3 시편은 50.54%
 높게 평가 되었으며, No-Bonding 4x4 시편은 143.11& 높게 평가되었다.

2.2 Bonding 결과비교

Bonding 2x2 시편은 REF 시편 대비 24.5% 높게 평가되었고, Bonding 3x3 시편은 82.62% 높게 평가되었으며, Bonding 4x4 시편은 159.44% 높게 평가되었다.

3. 유한요소해석 (FEM)

유한요소해석(FEM)은 ANSYS 2021 R1을 사용하였다. I-fiber 스티칭 공법을 구현하기 위해 Spring Element를 사용하였으며, 접합부 계면의 접착조전을 구현하기 위해 Cohesive Element를 사용하였다. Spring Element의 강성은 841N/mm이며 파손하중은 589N에 도달하며 I-fiber 스티칭으로 보강된 보강섬유가 파손 되었다고 가정하고 해석을 진행하였다.[1] 또한, Maximum Normal Contact Stress (T)은 해석 결과와 실험 결과를 최대한 맞추기 위해 여러 번 해석을 진행하였으며, 실험을 통해 Critical Energy Release Rate (Gc)값을 도출하였으며, Stiffness (K)는 자동으로 설정된다. Fig.1.은 Bonding 4x4 해석결과와 시험결과를 비교하여 나타내었다



Fig. 1. Interpretation of Co-Cu_4 Experimental Results and FEM Simulation Results

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 I-Fiber Stitching의 강도 향상 효과를 정량적으로 분석하고 FEM 해석을 통해 실험 결과와 비교함으로써, 복합재 구조 설계에 있어 실용적인 가이드를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, I-Fiber Stitching 기법은 복합재 접합부의 강도를 효과적으로 향상시키는 방법으로, 항공우주 및 자동차 산업 등 다양한 분야에서 활용 가능성이 높다.

참고문헌

[1] 박규영. 2021, 단일 스티칭 섬유의 Mode I 파손 하중 평가 및 해석, 국내석사학위논문, 경상대학교 대학원



섬유강화 세라믹 복합소재 적용 스크램제트 연소기 개발 Development of a Fiber-Reinforced CMC-based Scramjet Combustor

*김세영¹, 한인섭¹, 방형준¹, 김수현¹, 성영훈¹, 이슬희¹ * S.Y. Kim¹, I.S. Han¹, H.J. Bang¹, S.H. Kim¹, Y.H. Seong¹, S.H. Lee¹

> ¹ 한국에너지기술연구원, 수소에너지연구소 ⁺E-mail: saykim@kier.re.kr

Keywords: CMC, Ceramic Matrix Composites, Scramjet, Combustor

1. 서론

극초음속 비행체는 마하 5 이상의 초고속 비행 환경에서 연소가 이루어지기 때문에 기존의 Ni기 기반 고온 합금 소재를 활용한 설계로는 구조적 및 열적 한계를 극복하는 것이 매우 어렵다. 일반적인 금속 소재는 1,000°C 내외에서 기계적 성능이 급격히 저하되기 때문에 냉각 시스템을 필수적으로 도입해야 하며, 이로 인해 비행체 무게 증가 및 비행 지속시간 제한이라는 기술적 문제점이 발생한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 미국과 유럽을 비롯한 선진국들은 기존 금속 대비 밀도가 약 1/3 수준이며, 1,300°C 이상의 고온 내열성 및 우수한 비강도를 동시에 만족하는 섬유강화 세라믹 복합소재(CMC, Ceramic Matrix Composite)를 중심으로 연구개발을 활발히 진행하고 있다. 특히 C/SiC, C/C, C/C-SiC 복합소재는 경량성 및 내열성 측면에서 극초음속 추진체의 주요 부품 소재로 적용 가능성이 높아 국제적으로 연구의 중심이 되고 있다.[1]

2. 국내외 CMC 적용 사례

2.1 PTAH-SOCAR 프로그램: 유럽에서는 1999년부터 Astrium, MBDA France, EADS IW 등 주요 연구 기관이 참여하여 PTAH-SOCAR 프로그램을 통해 CMC 소재를 적용한 극초음속 및 로켓 추진체 관련 연구를 수행하고 있다. 이 프로그램은 3D 직조 프리폼 및 LSI(Liquid Silicon Infiltration) 공정을 활용하여 고온 환경에서 우수한 냉각 성능 및 내구성을 가진 연소기 구조를 개발하였다. 특히 연료를 활용한 재생 냉각 구조의 도입으로 극초음속 연소기의 경량화 및 효율 향상 효과를 얻었으며, 실험적으로 최대 3,230° C의 극한 연소 환경에서도 우수한 내구성을 입증하였다. PTAH-SOCAR의 연구결과는 LAPCAT II 등 극초음속 항공기 및 로켓 엔진 분야에도 적극적으로 활용되고 있다. [2,3].



[Fig.1] PTAH-SOCAR fuel-cooled composite materials structure

2.2 국내 CMC 적용 프로그램: 국내에서는 2016년부터 CMC 소재 기반 스크램제트 연소기의 개발이 시작되었으며, 특히 연소기 벽면 냉각을 위한 C/SiC 복합재 기반의 연료 냉각 채널 기술 개발이 수행되었다. 초기 연구에서 최대 연료 온도는 500°C, 작동 시간은 최대 60초, 연료 압력은 최대 40bar 조건에서 연소기 벽면 온도를 1,300°C까지 성공적으로 시험하였다.

최근 국내 연구는 C/SiC 복합소재의 내구성을 보다 향상시키기 위해 초고온 세라믹(UHTC) 소재인 HfC(Hafnium Carbide)를 복합재료 표면에 경사적으로 첨가하는 기술을 개발 중이다. 경사형 HfC 적용 기술을 통해 극초음속 연소 환경에서 요구되는 우수한 고온 삭마 저항성 및 열적 안정성을 향상시키고 있으며, 고밀도 HfC 첨가량을 표면부에서 최대화하고 내부로 갈수록 점진적으로 감소시켜 밀도와 내열성의 최적화를 동시에 이루고 있다.



[Fig.2] C/SiC-HfC composites and torch test

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

3. 결론 및 향후과제

섬유강화 세라믹 복합소재(CMC)를 적용한 극초음속 추진체 연소기 기술은 높은 내열성, 경량화, 내구성 측면에서 기존 금속소재를 대체할 수 있는 가장 현실적인 대안으로 자리 잡고 있다. 유럽의 PTAH-SOCAR 프로그램과 국내 연구 사례는 이 기술의 우수성을 입증하며 향후 극초음속 추진체 개발의 필수적인 기술로 인정받고 있다. 향후 과제로는 CMC 소재의 장기적 내구성 평가, 실비행 환경에서의 신뢰성 검증, 그리고 소재 및 공정

실미영 환경에지의 신외성 심증, 그디고 도재 및 증정 기술의 최적화를 위한 심도 있는 연구가 요구된다. 또한, 극한 고온 환경에서의 다양한 냉각 기법과의 통합 연구를 통해 실용적인 극초음속 비행체 엔진 기술을 구현하는 것이 중요하다.

참고문헌

- Shibin Luo, "A review of regenerative cooling technologies for scramjets", Applied Thermal Engineering, Vol. 190, 2021.
- [2] Steffen Beyer, "Technology status of fuel cooled ceramic matrix composites for dual-mode ramjet and liquid rocket applications", AIAA/3AF, 2012
- [3] M. Bouchez, "PTAH-SOCAR fuel-cooled composite materials structure", Progress in propulsion physics, vol. 1, pp. 627-644, 2009

후기

이 논문은 2023년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (21-107-F00-013-04, 광역마하수 추진기관 열보호 및 연소 증진 기술)

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

세라믹의 수축을 줄이기 위한 하이브리드 공정 : 수지 개질 및 건조 공정 최적화 Hybrid approach to reduce ceramic shrinkage: Resin modification and drying optimization

*최현희¹, 윤지수^{1,2}, 이세훈¹⁺ * H.H. Choi¹, J.S. Yoon ^{1,2}, S.H. Lee¹⁺

¹ 한국재료연구원 극학재료연구소, ² 부산대학교 재료공학부 ⁺E-mail: choihh12@kims.re.kr

Keywords: Ceramic, Shrinkage, Hybrid binder, Hybrid drying

1. 서론

세라믹 슬러리의 건조 과정에서 급격하거나 불균형한 수축이 발생하면 내부 응력이 축적되어 균열, 휨, 비틀림 등의 결함이 유발될 수 있다 [1, 2]. 이에 본 연구에서는 세라믹 기반 전구체와 epoxide 계를 조합한 하이브리드 수지를 적용하여 수축 저항성이 향상된 세라믹 바디를 제조하였으며, 하이브리드 건조 공정을 통해 수계 슬러리의 건조 수축을 최소화하였다.

2. 실험 방법

2.1 하이브리드 수지 개질

2-(3,4 epoxycyclohexyl)ethyltrimethoxysilane 와 dimetyldimethoxysilane를 출발물질로 하여 HCl 첨가를 통해 실란의 졸-겔 반응을 촉진시켰다. 이 후 생성된 용매를 제거하여 하이브리드 수지를 완 성하였다. 경화제 및 촉매를 혼합한 수지를 세라믹 분말과 혼합하여 성형체를 제조하였고, 조성에 따 른 성형체의 기계적 및 열적 특성을 비교하였다.

2.2 하이브리드 건조 공정 최적화

DI Water, PAA를 용매 및 분산제로 적용하여 세라믹 분말이 62 ~ 66vol%인 슬러리를 제조하였다. 이후 항온 항습조에서 0 ~ 30wt%의 수분을 건조한 후 동결 건조를 통해 성형체를 제조하였다. 수분 제거량에 따른 성형체의 결함을 분석하여 최적 건조 조건을 확보하였다.

3. 실험 결과

3.1 하이브리드 수지 개질

최적 조성의 세라믹 바디는 높은 밀도와 강도를 나타내었으며, 소결 후 더 우수한 기계적 강도를 나타내었다. 또한, 1300℃ 이상의 고온에서도 1% 미만의 수축률로 우수한 열적 안정성을 나타내었 다.



Fig. 1. (a) Dilatometer measurement results of the ceramic green bodies using hybrid resin, and (b) shrinkage rate of the ceramic bodies after sintering.

3.2 하이브리드 건조 공정 최적화

슬러리의 수분을 약 23 ~ 25 wt% 정도 제거하였을 때, 표면 결함 및 수축율이 거의 없는 세라믹 바디를 제작할 수 있었다.



Fig. 2. Surface of a ceramic green body with an applied hybrid drying process.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 하이브리드 수지를 적용하여 기계적 특성 및 열적 안정성이 우수한 세라믹 바디를 제조하였고, 하이브리드 건조 공정 최적화를 통해 세라믹스의 수축 결함을 최소화하였다. 향후 연구에서는 대형 부분 적용을 위한 균일한 건조 공정 확립 및 기계적 강도 향상을 위한 추가적인 공정 개선이 필요하다.

참고문헌

M. Yada et al. J. Euro. Ceram. Soc. 44(4):2677-2684, 2024.
 S. W. Jiang et al. J. Mater. Res. 22:244-248, 2007.

후기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 나노소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00455314)

고농도 슬러리 함침 및 PIP 공정을 이용한 UD 탄소섬유 강화 세라믹 복합재료 제조

Fabrication of 2D Carbon Fiber Reinforced Ceramic Matrix Composites Using High-Concentration Slurry Infiltration and PIP Process

*정상현¹, 박민성¹, 윤지수^{1,2}, 이세훈¹⁺ * S.H. Jung¹, M.S. Park¹, J.S. Yun^{1, 2}, S.H. Lee¹⁺

¹ 한국재료연구원 극한재료연구소, ² 부산대학교 재료공학부 ⁺E-mail: seahoon1@kims.re.kr

Keywords: PIP(precursor impregnation & pyrolysis), UHTC, SiC, CMC

1. 서론

탄소섬유 강화 세라믹 복합재료는 우수한 기계적 강도, 내열성 및 화학적 안정성으로 인해 항공우주 부품, 브레이크 디스크, 열교환기 등에서 활용된 다. 기존의 화학기상침투(CVI), 액상 실리콘 침투 (LSI), 핫 프레스(HP) 공정은 복잡하거나 비용이 높다. 이에 비해 폴리머 침투 및 열분해(PIP) 공정은 상 대적으로 간단하고 복잡한 형상의 부품 제작이 가 능하다.본 연구에서는 슬러리 침투와 PIP 공정을 결 합하여 미세 구조와 기계적 특성을 개선한 탄소 섬 유 강화 SiC 및 UHTC 복합재료를 제조하였다.

2. 본론

탄소 섬유 강화 SiC 및 UHTC 복합재료의 제조에 사용된 강화 섬유는 세라믹 분말 슬러리의 침투가 원활히 진행 되도록 탄소섬유 다발을 스프레딩 공 정으로 24~25mm 의 폭을 갖는 리본 형태로 제조하 였다.섬유 표면 코팅은 CVI(Chemical Vapor Infiltration) 공정을 통해 PyC와 SiC의 이중 레이 어 구조로 섬유 전체에 균일하게 코팅되었으며, PyC및 SiC 코팅의 두께는 각각 200, 100 nm 이다.

기지상 제조는 기계적 합금법 (Mechanical alloying, MA)으로 제조된 SiC 분말 (d₅₀: 170nm) 을 최적의 분산제 및 첨가량 선정, 최적의 pH 조 절, 표면 플라즈마 처리 등을 통하여 62 vol% 의 고형량을 갖는 고농도 수계 SiC 슬러리를 제작하였 다. UHTC의 경우 ZrB2 분말을 사용하였으며, 유성 밀을 이용한 분쇄 및 표면 산화와 분산 최적화를 통하여 55vol%의 슬러리를 제조하였다. 이러한 고 농도 슬러리를 진공-가압 또는 진공 -초음파 함침 을 통해 탄소 섬유 사이로 침투 시켜 prepreg shet 의 형태로 제조하였다. 제작한 prepreg sheet를 건 조 후 UD구조로 적층하여 열처리 공정을 거쳐 성형 체를 제작하였으며 SiC계 액상 세라믹 전구체의 함 침 및 열처리 공정 (PIP, precursor impregnation & pyrolysis) 을 통하여 SiC 및 UHTC 세라믹 복합 재료를 제조하였다.



Fig. 1. SEM and EDS image of PyC-SiC coated C_f



Fig. 2. Fracture Surface of C_f/SiC composite(SEM)

4. 결론 및 향후과제

62 vol%의SiC 및55 vol%의 ZrB2 슬러리를 UD 탄소섬유 다발에 함침 시켜 탄소섬유강화 복합재료를 제조하였다. 고농도 SiC 및 UHTC 슬러리는 탄소섬유 다발 내부까지 기지상을 형성하였으며 pull-out을 통한 균열 회절 거동을 보여주었다. C/SiC 복합재의 설계 및 활용을 위해서는 1800°C 이상의 초고온 환경에서의 기계적 특성 연구가 필수적이다. 향후 1800°C이상의 환경에서 강도 특성을 분석하여 초고온 구조용 소재로서의 가능성을 평가할 예정이다.

참고문헌

[1] M Park et al. Nanomaterials. 14:72-84, 2024.

[2] S.H. Lee et al. J. Mater. Res. 32, 3302-8, 2017 후기

이 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단 -나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구 임 (RS-2024-00455314). 부

고온 구조용 탄화규소(SiC) 자가치유 강화를 위한 소량 첨가제 전략 Minor additives strategy for enhancing self-healing of silicon carbide (SiC) in hightemperature structural applications

*박민성¹, 권우현^{1,2}, 정상현¹, 이세훈¹⁺ * M.-s. Park¹, W. Kwon^{1,2}, S.H. Jung¹, S.-H. Lee³⁺

¹ 한국재료연구원 (KIMS), 극한재료연구소; ² 서울과학기술대학교, 신소재공학과 ⁺E-mail: seahoon1@kims.re.kr

Keywords: SiC; field-assisted sintering technology/spark plasma sintering (FAST/SPS); cold isostatic pressing (CIP); precursor impregnation and pyrolysis (PIP)

1. 서론

탄화규소(SiC)는 뛰어난 기계적 물성과 열적 안정성 등 고온 환경용 구조체에 적합한 성질을 가지고 있어, 소결 및 가공의 어려움에도 불구하고 활발한 연구와 응용이 이루어지고 있다. 하지만 SiC의 전통적 소결 공정에서 필요한 높은 온도와 압력 혹은 다량의 소결조제는, 제품의 크기와 형상이 제한되고 많은 에너지를 소비하거나, 열적 성질을 열화하고 세라믹 기지상 복합재(CMCs)를 비롯한 복합소재에 적용하기 부적합하여 SiC 제품의 고온에서 유용성을 저해하였다. 이런 이유로 고온 성능이 높은 SiC 소재의 제작에 상이한 접근의 밀도화 공정들을 활용한다.

2. 고온 구조 소재로서 SiC

2.1 SiC 밀도화 공정

하지만 다른 밀도화 공정들도 효율이나 성능에서 제각기 난점을 가진다. 대표적으로, 자동차와 항공 산업에서 상용화한 액상규소함침(liquid silicon infiltration, LSI(혹은 melt infiltration, MI))은 기지상에 잔류한 Si가 성능을 낮춘다. 화학기상침투(chemical vapor infiltration, CVI)는 균질한 고성능 기지상 획득에 유리하지만 증착 시간을 비롯한 비용 소요가 매우 크다. 마지막으로, 액상 전-세라믹 고분자를 이용하는 전구체함침열분해(precursor infiltration (혹은 impregnation) and pyrolysis, PIP)는 물성과 범용성 등에 강점이 있지만 높은 정도의 밀도화를 위해 반복 공정이 필요하다. 이런 한계들을 극복하기 위해 여러 공정을 복합화하는 시도들도 발표되고 있다.

2.2 SiC 자가치유

높은 순도의 SiC는 대부분 물질과 달리 섭씨 1200도 이상 고온에서 강도가 높아지는 '자가치유'의 흥미로운 특성을 가진다 [1]. 하지만 이런 SiC 고유 성질을 소재에 구현하려면, 첨가제나 공정 잔여물의 제어가 요구된다. 저자들은 첨가제를 배제하고 산소 접촉을 제어한 PIP 공정으로 효과적인 밀도화를 이루는 방법과 [2-3], 이를 적용하여 제작한 탄소 섬유 CMC가 불활성 분위기 2000 ℃까지 계속 강화가 이루어짐을 발표한 바 있다 [4].

3. 첨가제에 따른 밀도화 거동과 기계적 물성

물리화학적 안정성이 특징이 SiC지만, 고온에서 '자가치유'와 강화는 첨가물을 통해 촉진될 수 있다. 첨가물에 따라 산화물 보호층의 생성과 부분 소결 등 고온에서 강화가 일어나는 기작에서 기지상 보호나 결함 보완 정도에 차이가 난다.

저자들은 고에너지 유성밀을 이용하여 SiC를 합성하고 소량의 첨가제가 SiC와 균일하게 분포하도록 했다. 이때 첨가제는 산화물이 순수 SiO₂보다 보호 효과가 뛰어나거나, SiC 소결 혹은 SiC 기지상 강화에 기여를 기대할 수 있는 물질로 선정하였다. B, 희토류계를 비롯하여 소량의 서로 다른 첨가제를 가진 SiC 세라믹에서 소결 등 밀도화 거동과 기계적 물성에의 영향을 추적하였다.

4. 결론 및 향후과제

저자들은 항공기용 가스터빈 엔진 등 SiC-기반 고온용 구조재 적용을 염두에 두어 첨가제를 탐색하였고, 잠재적으로 적절한 첨가제들을 도출하여 연구를 이어가고 있다. 특히, 기존에 고온 물성을 열화한다고 알려진 첨가제도 용량과 분포에 따라 고온 물성을 악화하지 않거나 오히려 개선할 수도 있었다.

연구의 성과로 밀도화 공정들을 효율적으로 개선 하거나, 목표 물성을 보다 용이한 공정으로 획득할 전략을 제시할 수 있기를 희망한다.

참고문헌

- [1] R. G. Munro, J. Phys. Chem. Ref. Data 26: 1195, 1997.
- [2] J Gu et al. J. Eur. Ceram. Soc. 41:4037-4047, 2021.
- [3] J Gu et al. J. Eur. Ceram. Soc. 41:2297-2305, 2021.
- [4] M-s Park et al. *Nanomaterials* 14:72-84, 2024.

후기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) founded by the Korea government (Ministry of Science and ICT, MSIT) (RS-2024-00455314).

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

동결억제제 함량에 따른 세라믹 슬러리의 유변학적 거동 및 세라믹 특성 분석

Analysis of the rheological behavior and ceramic properties of ceramic slurry according to cryoprotectants content

*윤지수 ^{1,2}, 최현희 ¹, 이세훈 ¹⁺ * J.S. Yoon ^{1,2}, H.H. Choi ¹, S.H. Lee ¹⁺

¹ 한국재료연구원 극한재료연구소, ² 부산대학교 재료공학부 ⁺E-mail: yjs3652@kims.re.kr

Keywords: ceramic, cryoprotectant, freeze drying

1. 서론

수계 세라믹 슬러리는 건조 과정에서 수분의 증발로 인해 성형체 내에서 수축, 균열, 왜곡과 같은 결함이 발생할 수 있다 [1,2]. 이에 본 연구에서는 동결억제제를 적용한 세라믹 슬러리를 제조하였으며, 슬러리의 유변학적 거동 및 성형체의 미세구조를 평가하여 동결억제제 함량을 최적화하였다.

2. 실험 방법

2.1 세라믹 슬러리 흐름성 및 분산 특성 평가

Polyacrylic acid (PAA), deionized water (DI water)를 분산제 및 용매로 활용하여 동결억제제를 DI water의 10wt - 20wt%를 첨가한 후 세라믹 슬러리를 제조하였다. 동결억제제 조성에 따른 슬러리의 유변학적 거동을 비교하고, 동결억제제 가 슬러리의 흐름성과 분산 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2.2 동결억제제 함량 최적화

세라믹 슬러리를 동결 건조하여 성형체를 제조한 후 Spark Plasma Sintering (SPS)를 이용한 열처리, 전구체 함침 및 열분해법(PIP)을 진행하여 성형체의 미세구조를 분석하였고, 동결억제제 함량에 따른 최적의 조성 조건을 도출하였다.

3. 실험 결과

동결억제제를 적용하여 성형체의 표면 결함과 수축률 감소가 우수한 세라믹 바디를 제작할 수 있었다. 동결 건조 및 열처리 후 SEM 및 Micro-CT 분석을 통해 성형체의 미세구조와 기공 분포를 확인하였으며, 이를 바탕으로 동결억제제의 최적 조성을 확립할 수 있었다.

DMSO (wt%)	0	0	10	10	15	15	20	20
Picture in front of Specimen			Sid	in .		5-		24

Fig. 1. Surface of ceramic green body with an applied cryoprotectant.



Fig. 2. Microstructure of ceramic green body with an applied cryoprotectant.



Fig. 3. Porosity distribution of ceramic green body with an applied cryoprotectant.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 동결억제제를 적용하여 수축 결함을 최소화한 세라믹 성형체를 제조하였다. 향후 연구에서는 성형체의 치밀화를 위한 균일한 건조 공정을 수립하고, 기계적 강도 향상 및 열적 안정성을 위한 추가적인 공정이 필요하다.

참고문헌

B. Nait-Ali et al. Open Ceram. 17:2666-5395, 2024
 G. W. Scherer. J. AM. Ceram. Soc. 73(1):3-14, 1990

후기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 나노소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00455314)

Al-B-C 소결첨가제를 이용한 SiC의 저온 소결 및 전기전도성 연구 Low-temperature densification of nano Si-C powder containing Al-B-C additives

*권우현 ^{1,2}, 박민성 ¹, 이세훈 ¹⁺, 류도형 ²⁺ * W. Kwon ^{1,2}, M.S. Park ¹, S.H. Lee ¹⁺, D.H. Ryu ²⁺

¹ 한국재료연구원, ² 서울과학기술대학교 신소재공학과 ⁺E-mail: dngusl1@kims.re.kr

Keywords: SiC, Sintering, Sintering additive, Electricity.

1. 서론

탄화규소(SiC)는 화학적으로 안정한 물질로, 우수한 열적 특성, 내화학성, 내플라즈마성을 가지며, 첨가제 를 통해 전기전도성도 조절할 수 있어, 반도체 공정을 비롯한 부식석 환경의 공정에서 발열체로 활용되고 있다. 급격한 온도변화를 겪는 발열체의 유효수명을 담보하기 위해서는 열응력을 견디기 유리한 잔류 기공이 없는 완전한 소결체가 필요하다.

그러나 SiC는 강한 공유결합과 낮은 자기확산계수로 인해 소결이 어려운 특성이 있어, 대개의 공정에는 소결첨가제를 적용한다.

2. 소결첨가제의 도입

2.1 AI-C 소결첨가제

본 연구팀은 수년전에 Al과 C를 소결첨가제로 활용한 연구를 수행한 바 있으며, 이를 통해 비교적 낮은 온도와 압력에서도 96% 이상의 상대밀도를 갖는 SiC소결체 제조가 가능하였다[1]. 그러나 Si 격자점에 치환하는 Al 함량이 증가함에 따라 격자가 팽창하여, 결정구조가 고 적층 결함이 생기는 것을 확인했으며, 이는 경도 등 기계적 물성에도 영향을 미친다는 것을 알게 되었다.

2.2 AI-B-C 소결첨가제

이에 본 연구에서는 Al-B-C 소결첨가제를 동시에 사용하여 소결첨가제의 사용량을 줄이고자 하였다. FAST/SPS를 이용하여 소결체를 제작하였고, 소결첨 가제의 조성과 열처리 조건에 따른 소결 거동과 전기전도성 및 기계적 성질을 확인하였다. 이를 바탕으로 소결체의 물성과 소결 거동의 관계를 이해하고 효과적인 소결을 위한 가압 열처리 조건을 제시하고자 한다.

3. 소결체의 물성

Al-C 소결첨가제의 경우 소결첨가제의 양이 감소 할수록 동일 상대밀도에서 비저항이 전반적으로 낮아짐을 확인하였다[1]. 이때 소결 온도를 낮추기 위해서는 고용한계이상 소결첨가제가 사용되어야 하였지만 Al-B-C 소결첨가제를 사용한 샘플의 경우 적은 양의 첨가제로도 1700-1800℃의 낮은 온도 에서 소결한 후에도 비저항 값이 10⁻³ - 10⁻⁴Ω·cm 범위로 낮게 나타나는 것을 확인하였다.

Table 1 Powder composition

Powder name	Si [wt%]	C [wt%]	Al [wt%]	B [wt%]
P-SiC	70.1	29.9	0	0
Al12.5C1	62.5	30.17	7.33	0
B ₄ C-SiC	68.64	30.36	0	0.8
B05Al1C1	68.29	30.21	1	0.5
B05Al2C1	67.59	29.91	2	0.5

4. 결론 및 향후과제

Al-B-C를 사용하여 종전 연구에서 사용된 소결첨가제 보다 적은 양을 이용해 효과적으로 소결체를 제조할 수 있었다. 1800℃, 15 MPa, 30분의 열처리 조건에서 96% 이상의 소결체를 성공적으로 제조하였으며, 기계적 물성 또한 향상됨을 확인하였다.

향후에는 Al-B-C 소결첨가제를 이용한 소결체의 1500℃ 고온강도를 측정하여 고온용 구조재료로의 활용방안도 탐색해 볼 계획이다.

참고문헌

 B. Yoon. et al. Ceramics International 2017 43, 12-19.

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) founded by the Korea government (Ministry of Science and ICT, MSIT) (RS-2024-00455314).

Cracking Behavior of Gadolinia Burnable Absorber Composite Fuel Pellet

*Hyeong Jin Kim¹ and Ho Jin Ryu¹⁺

¹ Department of Nuclear and Quantum Engineering, KAIST, Daehak-ro 291, Yuseong-gu, Daejeon, 34141, Korea ⁺E-mail: hojinryu@kaist.ac.kr

Keywords : Burnable absorber, Cracking, Finite-element method (FEM), Extended FEM (xFEM)

1. Introduction

Burnable absorbers are used in nuclear reactors to control the reactivity, typically composed of materials with high neutron absorption cross-sections such as boron and gadolinium. While boric acid is commonly utilized in pressurized water reactors (PWRs), its intrinsic positive moderator temperature coefficient (MTC) has driven research toward low-boron or boron-free reactor concepts. Here, solid burnable absorbers such as gadolinia can be adopted for reactivity control. However, conventional mixed fuel (UO₂-Gd₂O₃) design leads to a reduced thermal conductivity, resulting in fuel temperature increment. Additionally, the rapid depletion of the dispersed gadolinia limits the application for high burnup operations.

A new approach, fuel concept embedding lump gadolinia into UO_2 pellets [1, 2] resolves the thermal conductivity and rapid depletion issue, through self-shielding effects. However, in this brittle ceramic-ceramic composite system, cracking remains a crucial concern. To implement the design in nuclear reactors, the cracking behavior of the composite fuel pellet should be evaluated.

In this study, we predicted the mechanical stability and stress-crack behavior of burnable absorber composite pellets using the finite element method (FEM). Thermal shock tests were conducted using a surrogate pellet and the results were compared with the simulation results.

2. Methods and Results

2.1 Material model construction

A thermo-mechanical property database for nuclear fuel and burnable absorber material was constructed [3, 4]. Thermal expansion, thermal conductivity, and stress-strain curve data were collected and formulated for use in finite element analysis.

2.2 Thermo-mechanical analysis of composite fuel

Finite element simulation using Abaqus software predicted the high-temperature behavior of burnable absorber composite fuel pellets. Elastic calculation results identified the stress concentration region: potential crack initiation sites. Extended FEM (xFEM) results demonstrated a similar crack pattern of composite fuel compared to conventional pellet and indicates the concerns regarding structural defects in the composite fuel pellet due to the failure of gadolinia burnable absorbers are minimal.



Fig. 1. Temperature and stress calculation results



Fig. 2. Crack calculation results

2.3 Thermal shock test on mockup pellet

Thermal shock tests on mockup pellets using ceria surrogate material were conducted. Ceria-gadolinia pellets were fabricated and subjected to quenching tests. Composite pellets were heated to 1000°C for 1 hr and water-quenched. Microstructural analysis on quenched samples was conducted using visual inspection and SEM. Test results suggested that the composite fuel should be fabricated with higher completeness compared to the conventional fuel pellets, to ensure sound integrity without the formation of initial microcracks. However, low concern of failure of gadolinia burnable absorber was also confirmed.

3. Conclusions

This study investigated the cracking behavior of burnable absorber composite fuel pellets to support the development of long-cycle, high-burnup fuel technology. Finite element analysis indicated that the cracking occurs at the first rise of temperature, while xFEM results provided the detailed cracking propagation behavior. Additionally, thermal shock tests on mockup pellets were conducted. Results suggested the requirement of improved fabrication technique of composite fuel pellet and ensured the low

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

concern of burnable-absorber failure. This work contributes to the enhanced fuel safety and development of innovative nuclear fuel.

References

- XH Nguyen et al. NET. 51.2:369-376, 2019
 YG Jo et al. NET. 54.4:1464-1470, 2022
- [3] WG Luscher et al. PNNL-19417; NUREG/CR-7024, 2010
- [4] Q Mistarihi et al. Front. Energy Res. 9:651339, 2021

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT) of the Republic of Korea [No. RS-2024-00420956].

배터리 안전성 모니터링을 위한 탄소나노튜브 기반 충격 감지 센서 개발 Development of a Carbon Nanotube-Based Impact Sensor for Battery Safety

Monitoring

*엄가현¹, 정유진², 장승환²⁺ *G.H. Eom¹, Y.J. Jung¹, S.H. Jang³⁺

¹ 한양대학교 ERICA 스마트시티공학과, ² 한양대학교 ERICA 건설환경공학과 ⁺E-mail: sj2527@hanyang.ac.kr

Keywords: Carbon Nanotube/Epoxy Composite, Self-Sensing, Screen-Printing Technique

1. 서론

탄소나노튜브(CNT) 에폭시 복합재는 우수한 기계적 강도와 전기적 감지 특성을 지녀 충격 감지 센서로의 활용 가능성이 높다. CNT 네트워크의 형성에 따라 충격에 대한 민감한 전기저항 변화를 유도할 수 있으며, 스크린 프린팅 공정을 활용하면 경량화와 대량 생산이 용이한 센서를 제작할 수 있다. 본 연구에서는 CNT-에폭시 복합재를 기반으로 한 충격 감지 센서를 설계하고, 이를 배터리 인클로저에 적용하여 충격 감지 성능을 평가하였다. 이를 통해 CNT 복합소재가 전기차 안전성 모니터링 센서로서의 가능성을 제시하고자 한다.

2. 시편 제작 및 실험 방법

2.1 시편 제작

Fig. 1은 시편 제작 과정을 나타낸다. 복합체 제조 과정에서는 초음파 분산기를 이용해 에폭시 Resin 에 탄소나노튜브가 균일하게 분산되도록 유도한 뒤, 분산이 완료된 용액에서 아세톤을 증발시켰다. 이후 에폭시 Hardner를 혼합하여 최종 복합재를 제조하고, 이를 스크린 인쇄 기법으로 필름 표면에 프린팅한 다음 하루 동안 경화 과정을 거쳐 시편을 제작하였다.



Fig. 1. Fabrication of screen-printed composite

2.2 실험 방법

다양한 충격 에너지(0.2 J~ 1.0 J)를 부여한 뒤 낙하 충격 시험으로 센서의 저항 변화를 실시간으로 측정해 감지 민감도를 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2는 복합재에 충격 하중을 가했을 때 나타나는 전기 저항 변화를 그래프로 보여준다. 실험 결과, 충격이 커질수록 전기 저항이 급격히 상승하는 경향을 보였으며, 하중 세기에 따라 저항 변화 폭도 함께 증가하였다. 또한, CNT 함량이 1.5 wt.%인 센서가 가장 높은 감지 성능을 나타냈다.



Fig. 2. Electro-mechanical characteristics of composite under various impact loads

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 탄소나노튜브 에폭시 복합체 기반 임베디드 센서가 배터리 인클로저의 충격 감지에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

 Jung, Y.-J.; Jang, S.-H. Crack Detection of Reinforced Concrete Structure Using Smart Skin. Nanomaterials 2024, 14, 632

후기

본 연구는 2024년 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(RS-2024-00407856)과 2025년도 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원(RS-2023-00268377)에 의한 연구이며 이에 감사드립니다.

촉매층 SEM 이미지로부터의 정량데이터 추출 AI알고리즘 기반 탄소나노튜브 구조체의 견실제조 공정 최적화

Reliable growth of CNT microstructures based on the AI-based algorithm for quantitative data extraction from the SEM images of catalyst layers

김광준 ¹, 박종원 ¹, 김용태 ¹, 옥종걸 ¹⁺ ^{} K. Kim ¹, J. Park ¹, Y. T. Kim ¹, J. G. Ok ¹⁺

¹ 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 ⁺E-mail: jgok@seoultech.ac. kr

Keywords: Carbon nanotube, Artificial intelligence, Image processing, Microstructure

1. 서론

탄소나노튜브 (Carbon Nanotube, CNT)는 독특한 기계적, 전기적, 광학적 특성을 바탕으로 반도체, 에너지, 전자소재 등 다양한 분야에서 활발히 활용되고 있다. 화학기상증착법 (Chemical Vapor Deposition, CVD)을 통해 수직배향된 형태로 성장하는 CNT는 그 구조를 그대로 유지함으로써 높은 비표면적과 우수한 전기·광학적 특성을 극대화할 수도 있다. 본 연구에서는 이러한 수직배향 CNT의 활용도를 극대화하기 위해 성장 촉매의 역학적 해석과 인공지능 기반의 해석·실험 최적화 과정을 수행하였으며, 이를 바탕으로 다양한 CNT 소자 응용 사례를 제시하고자 한다.

2. 생성형 인공지능 기반 CNT 성장 촉매 예측

2.1 이미지 전처리 기술

본 연구에서는 통계 기법 중 하나인 가우시안 블러와 히스토그램 평활화를 결합한 통계 기법을 활용하여 필터링 기반 전처리를 수행하였다. 여기서 가우시안 블러는 이미지의 noise를 줄여 픽셀간 경계를 더욱 명확히 하기 위해 사용되었고 평활화는 대비값 일정하게 분포시켜주는 역할을 수행한다.



Fig. 1. Developed image preprocessing module 2.2 생성형 인공지능 모듈 및 예측 정확도 전처리된 이미지로부터 CNT 구조체 성장에 지배적 영향을 미치는 촉매 나노파티클의 형상적 특성 (직경, 면적, 분포밀도)을 추출한다. 이는 개발한 생성형 인공지능을 위한 학습데이터로써 활용된다. 나아가, 본 데이터를 기반으로 구성한 판별자 (discriminator)는 생성한 데이터 (촉매 이미지)의 정확도를 향상시키며, 생성된 이미지를 실험적으로 검증하였을 때, 98% 이상 동일함을 확인하였다.



Fig. 2. Developed AI module and generated SEM image

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 탄소나노튜브의 수직 정렬 구조체를 적극 활용하기위한 기반 기술로써 견실 성장을 위하여 SEM 이미지 전처리 및 정량데이터 추출 기술 개발과 생성형 인공지능을 기반으로 성장 기술을 개발하였다. 이는 탄소나노튜브의 구조체로써의 활용 연구에 큰 박차를 가할 것으로 기대되며 나아가, 탄소복합체 및 탄소소재기반 에너지 기술 분야에 비약적인 발전을 가져올 것으로 기대된다.

후기

이 연구는 정부(과학기술정보통신부) 재원 한국연구재단 나노및소재기술개발사업(NRF-2021M3H4A3A02099204, RS-2024-00449882), STEAM연구사업(NRF-2022M3C1A3081178) 및 글로벌기초연구실(RS-2024-00413607) 과제 및 정부(교육부) 재원 한국연구재단 보호연구(NRF-2022R111A2073224) 과제의 지원으로 수행됨.

탄소나노튜브 배열의 열음향 특성

Thermoacoustic characteristics of a carbon nanotube array

*이한영¹, 석지원^{1,2,3+} *H.Y. Lee¹, J.W.Suk^{1,2,3+}

¹ 성균관대학교 기계공학부, ² 성균관대학교 지능형펩테크융합전공, ³ 성균관대학교 성균나노과학기술원(SAINT) ⁺E-mail: <u>jwsuk@skku.edu</u>

Keywords: Thermophone, Thermoacoustic, Carbon nanotube, Ultrasound, Phased array

1. 서론

서모폰(thermophone)은 기계적 진동 없이 열에너지를 이용해 소리를 발생시키는 장치로[1], 탄소나노튜브(CNT) 시트와 같이 단위 면적당 열용량(heat capacity per unit area, HCPUA)이 낮은 물질을 사용할 경우 높은 음압을 달성할 수 있다[2]. 하지만 열음향 원리로부터 단일 소자 내에서도 상쇄 간섭이 발생하여 음압이 감소하는 현상이 발생한다[3]. 따라서 본 연구에서는 이를 극복하기 위해 CNT 기반 위상 배열을 제작하고, 위상 조절을 통해 음향 빔 형성 및 스티어링을 구현하여 배열 성능을 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 CNT 음원 배열 제작

CNT 포레스트에서 추출한 CNT 시트를 기관에 배열하고, 각 요소에 독립적인 전극을 연결하여 위상 조절이 가능한 열음향 위상 배열을 제작하였다.

2.2 열음향 특성 측정

제작된 배열에 대해 음향 빔 형성 및 스티어링 특성을 평가하였다. 초점 거리 10 cm에서 위상 조절 전후의 음압을 비교하고, 위상을 조절하여 음향 빔을 15°로 스티어링한 후 음장 변화를 측정하였다.

3. 결과

3.1 빔 형성 성능 평가

위상 조절을 통해 10 cm 초점 거리에서의 최대 음압이 위상 제어를 적용하지 않은 경우 대비 약 1배 향상되었다. 이는 위상 정렬을 통한 간섭 효과 감소에 기인한다.

3.2 빔 스티어링 성능 평가

빔 스티어링 실험에서 15° 방향으로 빔을 조절할 수 있었으며, 실험적으로 빔의 방향 변경을 확인하였다. 그러나 스티어링 시 사이드로브가 강하게 발생하는 현상을 관측하였다.



Fig. 1 Acoustic field simulations of unfocused and focused thermoacoustic array.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 CNT 시트를 이용한 6×6 열음향 위상 배열을 제작하고, 빔 형성 및 스티어링 특성을 평가하였다. 위상 조절을 통해 음압을 증대시키고 방향 조절이 가능함을 확인하였으며, 차후 배열 요소 수를 증가시키는 등의 방법을 통해 정밀한 음향 제어가 가능하도록 연구를 진행할 예정이다.

참고문헌

- Xiao, L et al. "Flexible, Stretchable, Transparent Carbon Nanotube Thin Film Loudspeakers." *Nano Letters* 8.12 (2008): 4539-4545.
- [2] SUK, Ji Won, et al. "Thermoacoustic Sound Generation from Monolayer Graphene for Transparent and Flexible Sound Sources." *Advanced Materials* 24.47 (2012): 6342.
- [3] XIAO, Lin, et al. High frequency response of carbon nanotube thin film speaker in gases. *Journal of Applied Physics*, (2011): 110.8.

후기

이 연구는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 산업기술평가관리원을 통해 차세대지능형반도체기술개발사업의 지원을 받아 수행됨(No. 20023574). 또한 이 연구 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A2B5B02002413).

효율적인 수전해를 위한 탄소나노섬유 기반 TMS 이종구조 촉매 합성 Synthesis of heterostructures of transition metal sulfides on carbon nanofibers for efficient water splitting

*김명인¹, 임태경², 신상호¹, 석지원^{1, 2, 3+} * Myung-In Kim¹, TaeGyeong Lim², Sangho Shin¹ and Ji Won Suk^{1, 2, 3+}

¹ 성균관대학교 지능형팹테크융합전공, ² 성균관대학교 기계공학부, ³ 성균관대학교 성균나노과학기술원 ⁺E-mail: jwsuk@skku.edu

Keywords: heterostructure, water-splitting, electrocatalyst

1. 서론

지구온난화로 인해 화석 연료 대신에 친환경적인 수소를 생산하는 기술을 발전시키는 것은 중요하다[1]. 수소를 효율적으로 생산하기 위해서는 Pt나 Ru과 같은 귀금속 물질을 사용하지만 가격이 비싸고 지구에서 드물기 때문에 사용이 제한된다[2]. 이러한 한계를 극복하기 위해 귀금속 대신에 비 귀금속인 전이금속을 활용한 연구가 많이 진행되고 있다[3]. 따라서, 본 연구에서는 효율적인 수전해 향상을 위해 TMS 이종구조 촉매를 합성하였다.

2. TMS 이종구조 촉매 합성 및 분석

2.1 TMS 이종구조 촉매 합성

PAN을 DMF에 분산한 후, 전기방사를 통해 PAN 섬유를 얻었다. 얻어진 PAN 섬유를 탄화하여 탄소 나노 섬유 시트를 합성하였고 Mo, Co, S의 전구체들과 함께 수열합성을 진행해 최종적으로 TMS 이종구조 촉매를 합성하였다.

2.2 TMS 이종구조 촉매 분석.

X선 회절분석기 (XRD)를 통해 TMD 에 해당하는 회절 핀이 발생함에 따라 TMS 이종구조 촉매가 합성되었음을 알 수 있다. 주사전자현미경 (SEM)과 투과전자현미경 (TEM)에 의해 TMS 이종구조 촉매는 나노 입자 형태로 탄소 나노 섬유 표면 위에 균일하게 성장이 되어 있는 것을 확인할 수 있고 고분해능 투과전자현미경(HRTEM)에서 격자 간격이 MoS₂는 0.62 nm, CoS₂는 0.28 nm라는 것을 알 수 있다. 또한, 에너지 분산 X선 분광법 (EDS)에서 Mo, Co, S, N, C원소들이 균일하게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있었다. 라만 분광법과 X선 광전자 분광법 (XPS)을 통해 MoS₂는 상이 존재하는 것을 확인할 수 있었고 CoS2에 해당하는 픽이 존재함에 따라 TMS가 이종구조로 성공적으로 합성되었음을 알 수 있다.

3. TMS 이종구조 촉매 성능 평가

알칼라인 전해질 (1.0 M KOH)에서 TMS 이종구조 촉매는 HER과 OER에서 과전압이 전류밀도 10 mA cm⁻²에서 단일 구조인 MoS₂와 CoS₂ 보다 약 1.5배 낮게 나타나 다른 소재들보다 우수한 성능을 보였으며 타펠 기울기 또한 HER과 OER에서 다른 소재보다 낮아 수소와 산소가 발생할 수 있는 빠른 메커니즘을 나타냈다. 또한, 초기와 3000번의 CV를 반복적으로 측정을 한 이후를 비교했을 때, HER과 OER에서의 LSV는 변화가 거의 없었으며 24시간동안 우수한 지속성을 보여주었다.



Fig. 1. Schematic illustration for fabrication process of -TMS heterostructure electrocatalyst.

4. 결론

수전해 촉매로서 귀금속 물질을 대체하여 수소와 산소를 효율적으로 생산할 수 있는 TMS 이종구조 촉매를 성공적으로 합성하였다. TMS 이종구조 촉매는 알칼라인 전해질에서 낮은 과전압, 타펠 기울기, 전하이동저항을 보여주었으며, 우수한 안정성 및 지속성을 나타냈다.

참고문헌

- Bang, Jangwon, et al. *Small Structures*. 4.8:2200283, 2023.
 Ji, Xixi, et al. *Nature Communications*. 12.1:1380, 2021.
- [3] Zhu, Jing, et al. *Chemical Reviews*. 120.2:851-918, 2019.

후기

본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 제원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A4A1031182). 또한, 정부(산업통상자원부)의 재원 으로 산업기술평가관리원을 통해 차세대지능형반도체기 술개발사업의 지원을 받아 수행됨(No. 20023574). 부

문

Improving mode-II fracture toughness of woven carbon fiber composite using cellulose nanofibers

*Abuzar Jamil¹, Maksym Li² and Jung-il Song²⁺

¹ Department of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University, ² The Research Institute of Mechatronics,

Changwon National University

⁺E-mail: jisong@changwon.ac.kr

Keywords: Carbon fiber, fracture toughness, cellulose nanofibers, mode-II fracture

1. Introduction

The design of lightweight structures has been made possible using carbon fiber composites (CFRP) [1]. The interlaminar geometry of composite materials makes it possible to tune their properties like strength and durability. The brittle behavior of CFRP makes it susceptible to interlaminar cracks and delamination failure [2]. In this work cellulose nanofibers (CNFs) derived from natural sources are loaded in different weight percentages at the crack interface and their effect on the shear fracture behavior (mode-II) is studied using the end-notched flexural (ENF) test and digital image correlation.

2. Materials and Methods

2.1 Materials: Plain woven carbon fiber provided by Hankuk Carbon Co.; South Korea was used as reinforcement and Vinyl ester as matrix provided by CCP Composites South Korea. CNFs were extracted from Imperata cylindrica grass using a combined chemical and mechanical process. The CNFs were sprayed on the carbon fiber layer placed at the crack interface. The composite was prepared using a conventional vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM) process.

2.2 Testing and characterization: The ENF test specimen was prepared according to the ASTM D7905 standard. The ENF test was performed on a universal testing machine in a three-point bending mode. The crack propagation was inspected using a highspeed camera and digital image correlation (DIC) using Ncorr software. The cracked surfaces were inspected using a 3D optical microscope and scanning electron microscope (SEM).

3. Results and Discussion

The CNFs were loaded in 0.05, 0.1, and 0.2% weight percentages on the carbon fiber as shown in Figure 1. Figure 2 exhibits the mode-II fracture toughness (G_{II}) of CFRP and CFRP with different weight percentages of CNFs. The results show the positive effect of CNFs on mode-II fracture toughness of CFRP. At 0.05% weight percentage of CNFs, the mode-II fracture increased by 8%, while the maximum increase was observed at 18% for the 0.1% CNF-loaded CFRP. The 0.2% percentage showed almost similar G_{II} compared to pure CFRP. The experimental load-displacement plots exhibited crack softening behavior near the crack initiation point i.e., Pmax for the CNFs loaded CFRP. The crack-softening behavior was captured by the high-speed camera and DIC visuals where a delay in crack propagation was observed for the CNFs loaded CFRP. SEM analysis showed the deviation of the crack path and increased damage at the crack interface of the CNF-loaded CFRPs compared to pure CFRP.



Fig. 1. Carbon fiber loaded with cellulose nanofibers.

Fig. 2. G_{II} values of CFRP and CNFs loaded CFRPs.

4. Summary

The effect of cellulose nanofibers on arresting crack propagation under mode-II fracture of woven carbon fiberreinforced composite material is presented in this study. The CNFs loaded at certain weight percentages exhibited their effectiveness by deviating the crack path and resulting in crack softening behavior. The results confirm that at higher percentages CNFs act as an impurity and the positive effect of delaying the crack is impacted negatively [3]. The employed method of coupled high-speed camera and DIC analysis was efficient in capturing the crack delay. The current study highlights the scope of bio-derived nanoparticles and their future scope in enhancing the mechanical properties of composite materials.

References

 A. Gliszczynski and N. Wiącek. Composite Structures, 258:113-190, 2021

[2] X. Zhu et al. Composites Communications, 28:100-940, 2021

[3] G. Giuliese et al. Composite part-B, 78: 384-392, 2015

Acknowledgement

This work was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science Education (2018R1A6A1A03024509, 2022R1IIA1A01069282 and 2023R1A2C1006234).

Design Strategies for Optimizing Impregnation and Fiber Positioning in Self-Supporting 4D Printing of Continuous Carbon Fiber-Reinforced Shape Memory Polymer Composites

*Hyeon-Ju Jang¹ and Woong-Ryeol Yu²⁺

¹ Department of Materials Science and Engineering and Research Institute of Advanced Materials (RIAM), Seoul National University ⁺E-mail: woongryu@snu.ac.kr

Keywords : Self-supporting 3D/4D printing, Continuous carbon fiber-reinforced composites, Degree of impregnation, Fiber positioning

1. Introduction

Continuous carbon fiber-reinforced shape memory polymer composites (cCF-SMPCs) offer high strength, stiffness, and shape memory properties, making them ideal for aerospace and structural applications. However, conventional manufacturing methods limit them to planar structures, while existing 3D printing techniques require substrate support, restricting freeform fabrication. Frontal polymerization (FP) enables self-supporting printing through a self-sustaining polymerization reaction, but its application to continuous fiber composites remains underexplored. Key challenges include insufficient degree of impregnation (DOI) and fiber exposure, which degrade mechanical performance. To address this, we introduce an in-situ pin-assisted impregnation system to enhance DOI and an extruded core-shell nozzle design for precise fiber positioning.

2. Experimental

2.1 Optimization of ink rheology and polymerization conditions for stable mid-air 3d printing

To establish conditions for mid-air 3D printing, the ink's rheological properties were analyzed after incubation at 25°C to assess printability. Mid-air printing was performed at different incubation times to evaluate ink stability and carbon fiber integrity. Frontal polymerization behavior was examined by measuring frontal velocity ($v_{\rm fp}$) with temperature changes monitored using an infrared camera. These evaluations optimized ink properties and polymerization conditions for stable, self-supporting 3D-printed structures.

2.2 Optimization of impregnation and fiber positioning for improved quality in self-supporting mid-air 3d printing

To optimize DOI and fiber positioning in mid-air printing, the effects of ink viscosity, pin configuration, and printing direction on DOI were analyzed. DOI was assessed by embedding composite strands in epoxy, polishing crosssections, and observing them under optical microscopy. Fiber positioning was evaluated by printing with different nozzles, followed by cross-sectional analysis to quantify fiber displacement. These investigations provided insights into controlling fiber impregnation and alignment for improved structural integrity in self-supporting 3D printing.

3. Results and Discussion

Rheological analysis confirmed that ink viscosity and carbon fibers influence printability, with lower viscosity enabling stable printing and excessive viscosity causing fiber damage. $V_{\rm fp}$ was optimized at 63.6 mm/min, as carbon fibers accelerated heat conduction. DOI was enhanced using a four-pin system, achieving over 80% DOI across various printing angles. An extruded core-shell nozzle improved fiber positioning, preventing edge exposure.



Fig. 1. Extruded appearance at each rheological state.

4. Conclusions

We developed a self-supporting 3D printing system for cCF-SMPCs by optimizing ink rheology, frontal polymerization, and fiber impregnation. This approach enables structurally stable, free-standing composite printing, overcoming limitations of traditional substrate-dependent fabrication. The findings contribute to advancing multifunctional, lightweight, and adaptive composites for aerospace, robotics, and wearable applications. Future research will explore complex geometries, multi-material integration, and real-world deployment to expand the potential of cCF-SMPCs in high-performance engineering fields.

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (NRF-2023R1A2C2006014). This research was supported by Nano Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by Ministry of Science and ICT(RS-2024-00455314).

Self-Foaming을 이용하여 제조된 피치-페놀 탄소폼의 기계적 특성 연구 A Study on mechanical properties of pitch-phenol carbon foams manufactured by selffoaming

*신해름 ^{1,2}, 노우승 ^{1,3}, 여승준 ^{1,3}, 김만태 ¹⁺ * H.R. Shin ^{1,2}, W.S. Noh ^{1,3}, S.J. Yeo ^{1,3}, M.T. Kim ¹⁺

¹ 한국세라믹기술원 우주항공융복합소재센터, ² 부산대학교 융합학부, ³ 부산대학교 기계공학부 ⁺E-mail: <u>ginggiscan@kicet.re.kr</u>

Keywords: Actived Carbon Fiber, Micropore, Toluene, VOCs, Adsorption

1. 서론

탄소폼의 기공 구조와 기계적 강도는 전구체 배합과 공정 조건에 따라 달라진다. 본 연구에서는 Self-foaming법을 이용하여 피치-페놀 배합비에 따른 탄소폼 형성과 기계적 특성을 분석하였다.

2. 실 험

2.1 탄소폼 제조

석탄계 피치 70%, 50%, 30%, 10%를 페놀과 혼합 후 Self-foaming을 위해 흑연 몰드내 용융점 이상에서 열처리 후 동일한 크기의 탄소폼을 제조하였다.

2.2 압축 강도 시험

배합비별 20×20×30mm(가로×세로×높이)의 크기로 동일하게 시편을 제작하고 만능시험기(Model 4202, Instron, JAPAN)를 이용하여 500kg load cell, cross speed 1mm/min의 조건으로 측정하였다.

2.3 결정화도 분석

원료 및 제조한 시편에 대해 Cu 타겟이 부착된 X-선 회절분석기(A25, Bruker AXS, USA)를 이용하여 결정화도 변화를 조사하였다.

3. 시험결과

Self-foaming법으로 제조된 피치-페놀 배합별 탄소 폼 단면을 Fig.1에 나타내었다. 사진에서 알 수 있 듯, 피치 함량이 증가함에 따라 작은 크기의 기공 들이 균일하게 형성되었음을 확인하였다.



Fig.1 Carbon foam specimens (a)70%, (b)50%, (c)30%, (d)10%

Table 1은 제조된 피치-페놀폼의 겉보기 밀도와 압 축강도 결과를 나타낸다. 제조된 탄소폼은 모두 0.3g/cm³이하 정도로 낮은 밀도를 가지며 다공성임 을 알 수 있다. 7:3 조건에서 압축강도는 최대 1.6 배 증가하였으며 이는 작은 기공과 균일한 기공 구 조에 기인한 것으로 판단된다.

Table 1 Compressive test result				
Pitch/phenol	Bulk density	Compressive		
ratio	(g/cm^3)	strength (MPa)		
7:3	0.27	0.67		
5:5	0.12	0.44		
3:7	0.10	0.43		
1:9	0.09	0.41		

Fig.2는 제조된 탄소폼의 (002)면에서의 결정화정 도를 나타낸다. 피치 함량이 증가함에 따라 결정화 도가 높아짐을 알 수 있다. 페놀의 경우 비정질 탄 소재로 열처리 후에도 결정화도 변화가 거의 없지 만 피치는 그래핀 층들이 정렬되며 탄소화가 이루 어진 것을 알 수 있다. 이러한 결정화도 특성은 Table 1에서도 확인할 수 있 듯이 피치 함량이 높 은 조건에서는 구조적 안정성이 증가함에 따라 기 계적 강도가 향상되었음을 시사한다.



Fig.2 X-ray diffraction patterns of carbon foam

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 Self-foaming법을 이용하여 제조된 피치-페놀 탄소폼의 기계적 특성을 분석한 결과 피 치 함량이 높을수록 우수하였음을 알 수 있다.

참고문헌

[1] S. Farhan et al. Anal. Apple. Pyrol. 26: 587-592, 2014.
Shellac based bio-composites coated paper as sustainable food packaging

*Kalpana Pandey¹, Deepak Poddar, Hyeongmin Yoo³⁺

¹ Advance Material Manufacturing laboratory, Department of Mechanical Engineering, Korea University of education and Technology ⁺E-mail:yhm2010@koreatech.ac.kr

Keywords : Shellac, sustainable packaging, electrospinning, paper packaging

1. Introduction

In recent decades, growing concern about the discarding of plastic materials packaging, as well as high level of food safety and increased knowledge of food contamination hazards, has derive us to the development of innovative technologies such as multifunctional biodegradable packaging to mitigate these effects[1]. Packaging based on paper considered to be feasible alternative as they are ecofriendly, biodegradable and renewable. Though, since to its highly porous structure and presence of polar hydroxyl, carbonyl functional groups make paper packaging lacks suitable moisture and water barrier qualities and has low oil resistance. As a consequence, it cannot place significant restrictions on food goods including instant, dried, freezing, and chilled foods in order to preserve appropriate shelf life and quality[2,3].

2. Manuscript Format

2.1 First Part Smart packaging exhibiting long-term food freshness without harming the environment is a highly demanded product. Shellac is a promising biopolymer which is biodegradable and specifically introduces high water barrier properties. We describe shellac bio composites that is applied using electrospraying, a simple method for covering commercially made paper with microparticles.

2.2 Main Part

Incorporating active substances into food packaging, such as essential oil (EO), is an innovative strategy for ensuring food safety while minimizing environmental impact. However, the retention during storage (SR) and release kinetics (RK) of EO are inconsistent. In this study, EO (thyme oil) was loaded into shellacbased electro sprayed microparticles at various ratios (10-30 %v/w) to form distinct particle structures such as monophasic (Mx), biphasic (Bf), and core shell (Cs).

3. Results and Discussion

The particles formed a defect-free coating after four coats of electrospraying and heating simultaneously. Coated paper significantly improves water vapor transmittance rates for oxygen (WVTR 91.7%) and water (COBB 88.43%) with a 27.2% change in energy ΔE value. Soil burrier degradation confirmed the further sustainability of the packaging films, achieving 18.16% weight loss and 92.8% germination

of cherry tomatoes within a 13-day time interval. The particles were coated on paper and tested for loading efficiency (LE), RK, and SR and found LE up to 86.3 %, RK up to 76.5 % in 60 h, and SR of 95.7 and 77.7 % at 14 days at 27 °C and 40 °C, respectively. Further the antioxidant study suggested the strong radical scavenging and material showed >10 mm of inhibition zone against gram E. coli and S. aureus bacteria. The sustainability of the packing films was then tested using soil burrier and water immersion degradation confirm the film's sustainability by suggesting the 200% faster degradation then paper.

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

The strawberries and shrimp were packaged in shellac-coated paper, which showed that they increased in freshness by around 300% (shrimp) and 400% (SB) with the significant retention of inherent food properties. Higher radical scavenging inhibition ability, along with superior antibacterial properties against S. aureus and E. coli bacteria, was found to be the reason for the prolonged freshness. The shellac: EO-coated paper's environmental interaction demonstrated its biocompatibility and suggested faster degradation when compared with paper. Therefore, the study directs us to further develop a 100% bio-based biodegradable material that can serve as a substitute for PE films. We can further investigate some of the study's drawbacks, such as the coated paper's brittleness and transparency. References

- P. Tyagi, K.S. Salem, M.A. Hubbe, L. Pal, Advances in barrier coatings and film technologies for achieving sustainable packaging of food products – A review, Trends Food Sci Technol 115 (2021) 461–485. https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2021.06.036.
- [2] P.K. Kunam, D. Ramakanth, K. Akhila, K.K. Gaikwad, Biobased materials for barrier coatings on paper packaging, Biomass Convers Biorefin 14 (2024) 12637–12652. https://doi.org/10.1007/S13399-022-03241-2/FIGURES/5.
- [3] A. Trajkovska Petkoska, D. Daniloski, N.M. D'Cunha, N. Naumovski, A.T. Broach, Edible packaging: Sustainable solutions and novel trends in food packaging, Food Research International 140 (2021) 109981. https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2020.109981.

Acknowledgement This paper was supported by the postdoc program of KOREATECH in 2024 and GKS program supported by NIIED, South Korea. The authors would like to thank the Public Equipment Centre at KOREATECH for assistance with TGA, FT-IR, and surface roughness analysis.

프리프레그 성형 시 정밀한 압력 제어를 위한 공압 프레스 개발 Development of a Pneumatic Press for Precise Pressure Control in Prepreg Molding

*곽성훈 ¹, 문지훈 ¹, 공도현 ², 임민구 ²⁺

* S.H. Kwak¹⁺, J.H. Mun¹, D.H. Gong¹, M.G. Im¹

'경북테크노파크, ² 현대자동차㈜남양연구소

⁺E-mail: mingoo@hyundai.com

Keywords: PCM, Prerepg, Compression molding, Pneumatic Press 1. 서론

프리프레그 프레스 성형 과정 시 성형 중 점도가 낮아지면서 압력에 의해 섬유 다발 내부로의 완전한 함침이 어려운 문제가 있다. 특히 개방형 구조의 금형에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 다단압축 성형이 요구되며, 이를 위해서는 정밀한 압력 제어 기술이 필요하다.그러나 일반적인 유압프레스는 초기 압력의 정밀 제어가 어렵다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 상부에는 유압 실린더를 적용하여 프레스의 개폐 및 위치를 제어하고, 하부에는 공압 실린더를 활용하여 복합재 성형을 보다 정교하게 수행할 수 있도록 프레스를 제작하였다. 이를 통해 성형 재현성을 확보하고 복합재 부품의 품질을 향상시키는 방안에 대해 연구하였다.

2. 연구방법

실험에 사용된 소재는 Toray-T700S-12K Twill/S22Q 프리프레그이며, 성형 장비는 상부 20톤 유압 실린더와 하부 10톤 공압 실린더가 적용된 프레스를 사용하였고, 프리프레그 성형 과정에서 두께, 압력, 온도, 시간 데이터를 기록하여 분석한 후 제작된 샘플에 대해 초음파 C-Scan과 ASTM D6641 기준의 압축 시험을 실시하여 공정의 품질을 검증하였다.



Fig. 1. Auto-PCM machine



Fig. 2. Process Optimization Results

3. 실험결과

최적조건으로 성형될 경우 초음파 C-scan에서 Fig.3 과 같이 결함이 관측되지 않았다. 또한 압축강도는 500 MPa 이상이었으며 변동계수는 5% 정도로 안정적임을 확인하였다.



Fig. 3. Ultrasonic C-Scan Results

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 하부 공압 실린더를 활용한 다단압축 성형방법이 압축강도를 높이고 재현성이 높은 부품 성형할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

 Akiyama, K., "Development of PCM* Technology," SPE Automotive and Composites Divisions-11th Annual Automotive Composites Conference and Exhibition, ACCE 2011, 2011.

후기

본 연구는 현대자동차㈜남양연구소의 기술용역 (ROMS23042460000)으로 수행된 연구결과입니다. 지원대해 깊이 감사드립니다.

탄소나노튜브 섬유 기반 구조특성 배터리 제조 Preparation of Carbon Nanotube Fiber-based Structural Battery

*우동욱 ¹, 이균배 ¹, 정연수 ¹, 김태훈 ¹⁺ * D.U. Woo¹, K. Lee ², Y. Jung ¹, T. Kim ¹⁺

¹ 한국재료연구원 융·복합재료연구본부 ⁺E-mail: tkim67@kims.re.kr

Keywords: Structure battery, CNT Sheet, Solid state electrolyte, Electrode

1. 서론

리튬 이온 배터리의 무거운 무게는 전기차, 로봇, UAM 등 다양한 적용분야에 문제점으로 작용하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 새로운 디바이스인 구조 배터리는 이동체의 외피가 전기 에너지를 저장할 수 있게 하여, 증량 없이 주행거리를 향상시킬 수 있는 디바이스이다. 구조 배터리에 주로 사용되는 전극 소재는 탄소섬유를 사용하고 있으나 탄소섬유의 다소 낮은 전기전도성, 불충분한 에너지 저장 특성, 불안정한 사이클 특성 등의 문제로 인해, 본질적으로 새로운 전극 소재에 대한 연구가 필요한 상황이다. 본 연구에서는 경량, 고강도 특성을 동시에 가지는 CNT Sheet를 구조배터리의 전류 집전체로 활용하여 새로운 전극 소재의 가능성 확인과 탄소섬유 복합소재를 외장재로 한 구조 배터리를 제작하여 뛰어난 강성을 가지며 Air 분위기 하에서 구동이 가능한 구조배터리를 제안하였다.

2. 실험 방법

2.1 전극 제조

구조 배터리 전극으로 사용되는 CNT Sheet의 직접방사방법으로 제작이 되었으며[1], 제작된 CNT Sheet 위에 양극물질로 NCM811, 음극물질로 LTO를 Dr. blade로 캐스팅하여 전극을 제조하였다.

2.2 구조 배터리 제조

CNT Sheet 기반 전극과 분리막을 조립한 후 LiTFSI in EMIM TFSI, PVDF-HFP로 구성된 전해질을 주입, 겔화 시켜 cell을 제작하였다. 이후 Hand lay-up 방법으로 에폭시가 함침된 탄소섬유로 밀봉한 후 경화하여 구조 배터리를 제작하였다.

3. 실험 결과

Figure 1은 직접방사방법으로 제작된 CNT Sheet의 모습이다. 제작된 CNT Sheet는 기존의 금속 집전체인 Al foil (146 MPa), Cu foil(238 MPa) 대비 높은 인장강도(278 MPa)를 가지면서 밀도는 0.5~1 g/cm³을 나타내며 고강도이면서 경량 소재의 특성을 보여주었다. Figure 2는 제작된 구조배터리의 0.1C 3cycle 데이터로 183.09 mAh/g의 용량과 우수한 사이클 특성을 보이고 있다. 이를 통해 CNT Sheet의 우수한 특성, 집전체로써의 성능 및 탄소섬유 복합재의 충분한 밀봉 성능을 확인하며, 구조 배터리를 제작하였다.



Fig. 1. CNT Sheet fabricated by direct spinning method



Fig. 2. CNT film based structural battery 0.1C, 3 cycles

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 새로운 전극 소재와 고체 고분자 전해질 기반의 구조배터리 구현 가능성을 볼 수 있었으며, 추후 에폭시 전해질 개발 연구를 통해 구조배터리의 강성을 더 향상할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] T Kim et al. Comp Part. A 140:106182, 2021

후기

본 연구는 재료연구원 주요사업(PNKA610)의 지원으로 수행되었습니다.

Diol compound 첨가에 의한 산무수물계 에폭시 수지의 반응속도론적 분석 및 열기계적 특성 개선 연구 Kinetics Investigation of Anhydride-Cured Epoxy Resin with Diol Compound for Improved Thermomechanical Properties

*김상우^{1,2}, 김재준², 이종찬², 이진우¹⁺ * Sang-Woo Kim¹, Jejun Kim¹, Jongchan Lee¹, Jin-Woo Yi¹⁺

¹한국재료연구원 융복합재료연구본부, ²서울대학교 화학생명공학과 ⁺E-mail: <u>yjw0628@kims.re.kr</u>

Keywords: anhydride-cured epoxy resins, epoxy formulations, crosslinked network, reaction kinetics.

1. 서론

열경화성 에폭시 수지는 높은 열적 안정성과 기계적 강도를 가져 섬유강화복합재의 모재(matrix)로서 널리 사용됩니다. 그러나 에폭시의 가교 구조는 취성과 균열에 취약하게 만듭니다. 본 연구는 Diol compound 첨가를 통해 열경화성 에폭시의 열/기계적 물성을 향상시키기 위한 방안에 대해 탐구합니다. 이를 위해 Diol compound가 첨가된 산무수물계 에폭시 수지의 반응속도론적 분석 및 열/기계적물성을 평가했습니다.

2. 실험

2.1 소재: 본 실험을 위해 Bisphenol A diglycidyl ether (DGEBA, 170 g/eq.), Bisphenol A (BPA, 114 g/eq.), Methyl tetrahydrophthalic anhydride (MeTHPA, 166 g/eq.), N,N'-dimethylbenzyl amine (BDMA)이 사용되었으며, 모든 경우에 1 mol%의 BDMA가 amine계 촉매로 사용되었습니다.

2.2 반응속도론적 분석: 산무수물계 에폭시 수지의 반응은 DSC를 사용하여 분석되었습니다. Kissinger 방법은 반응의 전체 반응속도론적 인자들을 도출하고, Flynn-Wall-Ozawa (FWO) 방법은 경화 정도에 따른 반응속도론적 인자들을 도출합니다.

2.3 열/기계적 물성 평가: 반응 산무수물계 에폭시 수지의 열적 물성은 DSC, TGA와 DMA를 통해 평가되었습니다. 또한 기계적 물성은 인장(ASTM D638), 굴곡(ASTM D790) 실험을 통해 평가되었습니다.

3. 분석 및 측정

반응속도론적 분석 결과에 따르면, epoxide 그룹은 먼저 hydroxyl 그룹과 반응하여 선형 hydroxyether를 형성하고, 남은 epoxide 그룹은 이후 anhydride 그룹과 반응하여 cross-linked network를 형성합니다. 따라서 diol compound 첨가는 산무수물계 에폭시의 topology를 변화시킬 수 있습니다.



Fig. 1. Topological modification of anhydride-cured epoxy with diol compound.

Diol compound가 첨가된 산무수물계 에폭시의 열/기계적물성을 평가한 결과, 기존 산무수물계 에폭시 보다 열적 특성이 향상되었으며, 기계적 강도 증가와 취성이 감소되었습니다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 Diol compound 첨가를 통해 산무수물계 에폭시 수지의 열/기계적 특성을 향상시킬 수 있음을 보여줍니다. 이러한 결과는 에폭시 기반 고성능 재료의 설계와 산업적 응용에 중요한 시사점을 제공합니다. 향후 연구에서는 diol compound의 topological modification에 대해 분석하고, 상업적 응용 을 모색하고자 합니다.

참고문헌

 [1] M. M. Abu-Omar et al. ACS Sus. Chem. Eng. 4, 11:6082– 6089, 2016

[2] Kong et al. Polymer, 99: 376-385, 2016

후기

본 연구는 산업통상자원부의 K-carbon 플래그쉽 기술개발 사업 (RS-2025-00417957) 그리고 소재부품기술개발사업-패키지형 (00432777) 한국재료연구원 내부사업 (PNKA400) 의 지원으로 이뤄졌습니다.

섬유 직물의 직조 패턴에 따른 열변형 영향성 Effects of Thermal Deformation on Weaving Patterns of Fiber Textiles

*김우섭 ^{1,2}, 엄문광 ¹, 김위대 ², 이정완 ¹⁺ * W.S Kim¹, M.K Um¹, W.D Kim¹, J.W Lee ¹⁺

¹ 한국재료연구원, ² 부산대학교 항공우주공학과 ⁺E-mail: dksk1877@kims.re.kr

Keywords: woven fabric, weaving pattern, thermal deformation

1. 서론

복합재 제작에 사용되는 continuous finer의 경우 섬유 가닥이 쉽게 흐트러지지 않는 장점이 있어 woven fabric으로 많이 사용이 된다.

woven fabric의 경우 섬유 롤 방향 기준 inner side와 outer side의 면을 구분할 수 있다. 이때 직조 패턴에 따라서 inner와 outer의 면이 직조 패턴이 동일하거나 다를 수 있는데 표면 직조 패턴에 따른 열변형 형상 을 확인 및 분석하기 위한 실험을 진행하였다.

2. 실험

2.1 소재

섬유의 패턴에 따른 열변형 차이를 확인하기 위함 임으로 수지는 열경화성 RTM6-2 수지를 동일하게 사용하였다

사용한 섬유는 weft와 warp의 yarn count가 동일한 섬유를 사용하였고 섬유의 종류는 5.11 yarn/cm 인 2x1 twill 탄소 섬유, 5.15 yarn/cm 인 2x2 twill 탄소섬유, 13.47 yarn/cm 인 3x1 twill 유리섬유, 5.10 yarn/cm 인 1x1 plain 탄소섬유, 총 4가지 타입의 섬유들을 사용하였다.

2.2 실험 방법

복합재 제작은 RTM 공정으로 제작하였으며 열변형 형상을 관찰하기 위해 $[0_n/45_n]$ 의 비대칭 적층 각도로 적층하여 패널을 제작하였다.

이때 표면 직조 패턴의 영양성을 분석하기 위해 ply의 outer side 위로 오도록 적층 한 AS1과 inner side 위로 오도록 적층 한 AS2, 2가지 타입으로 각 섬유 마다 동일한 적층 각도에서 적층 기준면만 다르게 하여 패널을 제작하였다.

이후 제작된 패널의 하부 표면을 레이저 스캔하여 변형 형상 데이터를 얻은 후 최소 자승법 및 고유값 문제를 이용해 각 패널들의 주 곡률 방향을 찾았다.

3. 실험결과

2x1 twill과 3x1 twill의 경우 같은 적층 각이지만 기준 적층 면에 따라 열변형 형상 및 주 곡률 κ₁과κ₂가 방향이 반대로 나오는 것을 확인하였다. 이에 반해 yarn count가 동일하지만 섬유 위아래 패턴이 다른 2x2 twill의 경우 어느 면을 기준으로 하든 주 곡률 κ1과 κ2의 방향이 바뀌진 않음을 확인할 수 있었다 또한, Yarn count와 패턴 모두 동일한 Plain의 경우 열변형 형상 및 주 곡률 방향이 일정하지 않음을 확인 할 수 있었다.



4. 결론 및 향후과제

ply의 inner와 outer의 패턴이 다른 경우, 어느 면을 적층 기준면으로 할 것인지에 따라 주 곡률 κ_1 과 κ_2 의 위치가 반대로 나와 구분해서 사용해야 되는 것을 확인하였다 또한 warp와 weft의 섬유 비가 적어질수록 주 곡률이 회전하는 각도 또한 적어지는 거동을 띄는 것을 확인하였다.

추후 해당 주 곡률을 바탕으로 antisymmetric stacking pattern을 갖는 기준 좌표계를 찾은 뒤 열변형에 주된 효과를 내는 유효 적층 방향을 특정하고 섬유 비마다 등가 시킬 수 있는 유효 섬유 방향을 정의할 계획이다.

참고문헌

[1] Jungwan Lee et al. Composite Structures 1 January 2025, 118619

Temperature prediction of InBiSn alloy-embedded CFRP during transient response

*Tae Yeop Kim¹ and Sang Yup Kim¹⁺ ¹ Department of Mechanical Engineering, Sogang University ⁺E-mail: <u>sangyupkim@sogang.ac.kr</u>

Keywords : Phase change material, Thermal transient response, Heat management

1. Introduction

Polymer matrices in CFRP (Carbon Fabric Reinforced Polymer) pose a risk of thermal deformation at high temperatures, which can reduce the structural stability of the composite.[1] To enhance the thermal stability of CFRP at high temperatures, this study investigates the use of phase change materials for delaying the temperature rise and achieving the rapid cooling. Specifically, InBiSn alloy, a type of Phase Change Material, is embedded into CFRP. The transient thermal response of the CFRP with InBiSn alloy is analyzed both experimentally and numerically.

2. Materials and methods

2.1 Materials

InBiSn alloy ingots are purchased from Eutectica and used as phase change materials. The 3k carbon twill weave is purchased from HEXCEL Corporation. The epoxy resin INF-114 and amine-based hardener INF-212 are purchased from PRO-SET. Nano aerogel felt is purchased from Beerenberg Corporation and used as an insulator. Thermal grease is purchased from ARCTIC.

2.2 Fabrication

Four types of CFRP are fabricated in this study: Neat CFRP, CFRP with aluminum plates (Al plate CFRP), CFRP with InBiSn alloy plates (2D IBS CFRP), and CFRP with InBiSn alloy particles (0D IBS CFRP).

All specimens are manufactured using vacuum-assisted resin transfer molding (VARTM). An epoxy/amine resin mixture with a mixing ratio of 3.65:1 is injected into all CFRP samples. In the case of the plate-inserted CFRP, the Al or FM plate is positioned at the mid-plane of the 6-ply carbon fabric. For the FM particles CFRP, the InBiSn alloy particles are evenly distributed between each ply of the composite [2].



Fig. 1. Microscopic cross-sectional image of the 0D IBS CFRP specimen.

2.3 Method

The heating and cooling experiments are conducted for the four CFRP samples. In the heating experiment, transient

thermal responses of samples are observed. In the cooling experiment, the temperature variation of the object is measured to assess the cooling performance of the samples. Numerical simulation is performed using COMSOL Multiphysics reflecting the experimental conditions.



Fig. 2. Schematics of test conditions .

3. Results and discussion

Cooling and heating tests are conducted experimentally and numerically for the four types CFRP samples. Numerical analysis is conducted and compared with experimental results to validate the thermal behavior of FM-embedded CFRP. In Fig. 3, the presence of a InBiSn alloy plate effectively delays the temperature rise.



Fig. 3. Heating simulation result of the Al plate CFRP and the 2D IBS CFRP.

4. Conclusions and Future Works

In this study, CFRP samples are fabricated by incorporating InBiSn alloy between carbon fiber layers. Through both simulations and experiments, it is confirmed that the addition of InBiSn alloy altered the heat absorption characteristics and transient thermal response of the CFRP

References

[1] JM Park et al. Sci Adv. 10(28):eadp0729, 2024.

[2] SJ Wang et al. Compos Part B Eng. 286:111792, 2024. Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (No.RS-2024-00448445)

Effects of the curing conditions on the mechanical behavior of roomtemperature infused carbon/cyanate ester laminates

*Injun Lee¹, and Sang Yup Kim¹⁺

1,1+ Department of Mechanical Engineering, Sogang University

⁺E-mail: <u>sangyupkim@sogang.ac.kr</u>

Keywords: Residual stress, Cyanate ester, Mechanical properties;

1. Introduction

With the increasing demand for high-performance composites in aerospace, automotive, and energy applications, there is a growing need for carbon fiber-reinforced polymers (CFRPs) with superior thermal stability. [1] Therefore, studies have been conducted on composites based on polymers with high glass transition temperatures (Tg), such as cyanate ester (CE) and BMI (Bismaleimide).

During the fabrication of carbon fiber/cyanate ester composites, significant residual stress accumulates during the curing process due to the elevated curing temperatures required.

When impregnated at room temperature and subsequently cured at high temperatures, the large temperature variation affects the mechanical properties of the composite. This leads to variations in residual stress distribution and changes in the overall structural integrity. Therefore, understanding the relationship between curing conditions, residual stress accumulation, and the resulting mechanical performance is essential for optimizing composite processing and ensuring reliability in hightemperature applications.

2. Materials and experimental methods

2.1 Specimen fabrication

Cyanate ester resin used is LECy, purchased from Primaset Co. As shown in Fig. 1, CFRP are fabricated using the vacuum assisted resin transfer molding (VARTM) process. Tensile specimens are prepared with stacking sequences of $[0_4]$ and $[90_8]$, with dimensions of 20 cm in length and 15 cm in width. Bilamina specimens are fabricated with a $[0,90_4]$ stacking sequence and length of 13cm and 3cm in width to intensify effect of residual bending.



Fig. 1. Schematic of Vartm setup.

Fig.1. shows the VARTM setup for room temperature infusion and high-temperature curing, utilizing materials with high thermal durability.

3. Results and Discussion



different curing cycle

Fig.2. shows the DSC curve of the cyanate ester resin at different cure cycle. It represents the Tg and degree of cure of the resin under different curing conditions, showing that Tg increases as the degree of cure increases.



Fig. 3. Bending result of bi-lamina specimen

Fig.3. shows the bending response induced by thermal residual stress during the curing cycle. Higher curing temperatures result in greater bending deformation. Even under the same curing temperature, differences in bending response occur due to variations in the degree of cure resulting from different curing time.

4. Conclusion

Variations in curing conditions alter the mechanical properties, which in turn influence the deformation behavior. As a result, residual stress accumulated during the curing process significantly affects the bending response of carbon fiber/cyanate ester composites.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MEST) (No.RS-2024-00448445)

Development of Pneumatic Direct Ink Writing System for low melting point alloy

*Hyeong Woo Kang¹, Youngseok Oh² and Sang Yup Kim¹⁺

¹ Department of Mechanical Engineering, Sogang University, ² Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, 797

Changwondaero, Changwon, Gyeongnam 51508, South Korea

⁺E-mail: sangyupkim@sogang.ac.kr

Keywords : Liquid metal, Rapid production, Direct ink writing (DIW), In-Bi-Sn alloy

1. Introduction

Low-melting-point alloys have gained significant attention in soft electronics due to their unique combination of metallic conductivity and deformability [1]. Among these Field's metal (In-Bi-Sn, materials, $Tm=62^{\circ}C$ demonstrates exceptional potential for applications requiring rapid solidification into functional 3D structures. However, its inherent material properties - including high surface tension (410 mN/m) and low viscosity (27 mPa·s) - present critical challenges for direct ink writing (DIW) compared to conventional room-temperature liquid metals like eutectic gallium-indium (EGaIn) [2]. This study addresses the fundamental limitations in Field's metal fabrication through pneumatic control mechanisms.

2.2. Material and Method

2.1 Printing materials

Field's Metal (32.5% Bismuth, 51% Indium, 16.5% Tin) with a melting point of 62°C, was used in this study (Eutetica,Co,Ltd) Molten Field's metal has a large surface tension of around 410 mN m⁻¹ at 108 °C and a low viscosity of about 27 mPa s at 80 °C.

2.2 Customized Printing Apparatus



Fig. 1. Field's metal pneumatic printing system: (a) Complete assembly (b) Ink leakage due to pressure buildup; (c) Stable extrusion with pneumatic control.

Two printing speed control mechanisms are developed for Field's metal. Initially, a CNC3018-based system with syringe actuation is employed. A silicon heater (100x100mm, 200W) was implemented to melt the metal. However, oxide layer formation on the syringe hampers actuation. Additionally, water introduced during the double boiling process cause pressure buildup and uncontrolled extrusion. To address these limitations, a pneumatic control system is designed. This system regulates pressure within the syringe barrel using a vacuum tank, balancing gravity and surface tension for controlled ink flow. This achieved homogeneous ink dispensing and adjustable flow rates, overcoming the challenges of mechanical actuation. Print quality was evaluated via optical imaging and MATLAB.

3. Results and Discussion



Fig. 2. Field's metal printing process: (a,b) Printing defect (c) Comparison of printing results at different nozzle heights, and (d) printed zigzag pattern.

Field's metal printing exhibited defects like beading, related to nozzle height and excessive flow. Controlled pneumatic pressure (-1.6 kPa, 0.4mm nozzle height, 400mm/s) enabled printing of 50x50mm patterns on PPS film. Optimal printing occurred when the liquid metal formed a cone at the nozzle tip, balancing gravity and surface tension. Under optimal conditions, printed pattern showed low width standard deviation.

4. Conclusions

This work establishes pneumatically controlled DIW as a viable method for Field's metal fabrication, overcoming limitations through precise pressure modulation.

The pneumatic control approach offers several advantages over conventional mechanical extrusion methods, including more consistent flow rates, reduced sensitivity to oxide formation, and improved geometric accuracy of printed structures. This work represents a step forward in low-melting-point alloy printing technology for rapid manufacturing of conductive components for soft electronics applications.

References

- [1] Y. Han, J. Dong, Adv. Mater. Technol. 2014, 3, 1700268
- [2] Boley, J. W et al, Adv Funct Materials 24, 3501-3507
- [3] Parekh, D. P et al, Adv. Mater. Technol. 2018, 1, 1600047

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute of Materials Science (Grant number: PNKA100)

Influence of Tension Control on the Quality of Carbon Fiber-Epoxy UD Prepreg

*Minsoo Kim¹ and Sang Yup Kim¹⁺ ¹ Department of Mechanical Engineering, Sogang University ⁺E-mail: sangyupkim@sogang.ac.kr

Keywords : Tension control, Carbon Fiber, Tow Winding, Prepreg

1. Introduction

Filament winding is widely employed to manufacture high-quality unidirectional (UD) prepreg composites, integral to advanced aerospace and engineering applications due to their superior mechanical properties. Maintaining constant tension throughout the filament winding process is critical, as variations in fiber tension directly influence fiber alignment and laminating consistency [1]. This study details the design, implementation, and evaluation of a benchtop prepregger machine featuring a tension control system consisted of a PID controller based magnetic powder brake and a pneumatic cylinder dancer roller.

2. Methods

2.1 Overview of the Benchtop Prepregger Machine

A comprehensive benchtop-scale prepregger machine as shown in Fig. 1. is developed, incorporating key components such as the fiber bobbin, tension control unit, resin impregnation unit, and a winding core. To achieve dynamic tension control, a pneumatic dancer roller mechanism is integrated, which pivots to adjust the tow path length dynamically in response to tension variations. The pneumatic mechanism acts as a mechanical damper, spikes absorbing transient tension effectively. Additionally, a load cell downstream from the dancer roll is implemented for direct tension measurement, enabling closed-loop PID control of a magnetic powder brake system to ensure consistent tow tension.

2.2 Experimental Setup

The effectiveness of the tension control system is first validated through tension monitoring, demonstrating reduced variability compared to an uncontrolled setup. Subsequently, system performance is evaluated by comparing multiple controlled tension scenarios (\sim 15 N) against a baseline with minimal tension (\sim 0.2 N). UD prepreg plies are stacked to a thickness of 2 mm and subsequently hot-pressed to form cured laminates, ensuring consistent processing conditions for comparative analysis. The mechanical properties of cured laminates, fiber alignment quality, void content, and laminate consistency are analyzed for each tension level.

3. Results and Discussion

Preliminary results indicate that controlled pre-tension levels (≥ 5 N) significantly improved fiber alignment and laminate uniformity compared to the low-tension baseline (~ 0.2 N). Pre-tension also substantially reduced fiber slack, enhancing both mechanical performance and thickness uniformity. However, higher tension levels are observed to increase fiber breakage risks and elevate compressive residual stresses within the prepreg. Initial findings suggest an optimal tension threshold exists, balancing enhanced mechanical performance with minimal fiber damage and manageable residual stresses.



Fig. 1. Image of the benchtop prepregging setup.

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

The tension control system successfully enhance fiber alignment and mechanical performance in benchtop-scale prepreg manufacturing. Future studies will further optimize tension parameters to comprehensively balance mechanical advantages against potential processing drawbacks. Subsequent work will involve rigorous mechanical characterization and detailed microstructural analysis to evaluate the implications of residual stresses and tension-induced variations in fiber morphology.

References

[1] D Cohen et al. Compos P A. 28(12), 1997.

Acknowledgement

This work was supported by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00412289).

점탄성 모델을 이용한 냉각 속도에 따른 복합재의 잔류응력 예측 Prediction of Residual Stress in Composite by Cooling Rate Using a Viscoelastic Model

*임정현¹, 김경민¹, 김위대¹⁺ *J.H. Rhim¹, G.M. Kim¹, W.D. Kim¹⁺

> ¹ 부산대학교 항공우주공학과 ⁺E-mail: wdkim@pusan.ac.kr

Keywords: Thermoset composite, Cooling rate, Residual stress, Viscoelastic model

1. 서론

항공우주 구조물에는 우수한 비강도와 비강성을 갖는 열경화성 복합재가 사용되며, 주로 오토클레이브 공정을 통해 제조된다.

하지만 냉각 과정에서 발생하는 잔류응력은 제품의 치수 안정성에 영향을 미치는 주요 요인이므로, 냉각 속도에 따른 잔류응력을 예측하는 연구가 필요하다.

본 연구에서는 복합재 수지 거동을 반영하는 점탄성 모델을 활용하여, 오토클레이브 공정 중 냉각 속도에 따른 AS4/3501-6 복합재의 잔류응력을 예측하였다.

2. 이론적 배경

2.1 점탄성 모델

복합재 수지는 점탄성 거동을 보이므로 경화도, 온도, 시간을 고려하여 정의되며, 섬유는 열변형이 거의 발생하지 않으므로 물성은 일정하다고 가정한다. Kim[1]은 AS4/3501-6 복합재의 응력 완화 실험을 통해 식 (1)과 같은 점탄성 모델을 제안하였다.

$$Q_{ij}(\alpha,\xi,T) = Q_{ij}^{\infty}(\alpha,T) + Q_{ij}^{*} \sum_{\omega=1}^{N} W_{\omega}(\alpha,T) \exp\left(-\frac{\xi(\alpha,T)}{\tau_{w}(\alpha)}\right)$$
(1)

여기서, Q_j^{∞} 는 섬유의 완화 탄성계수, Q_m^{*} 은 수지의 완화 탄성계수, W_{ω} 는 가중치, ξ 는 완화시간, τ_w 는 응력 완화 시간을 나타낸다[1].

2.2 열변형률

복합재 성형 시 온도 변화와 열팽창계수에 의해 열변형이 발생하며, 시간에 따른 열변형률은 식 (2)와 같이 표현된다. 경화 완료 후 Δα(t) = 0 이 되어 식 (3)으로 정리할 수 있으며, 냉각 속도에 따라 열변형률이 달라지는 것을 확인할 수 있다.

 $\varepsilon_j(t) = \phi_j(\alpha, T) \Delta T(t) + \gamma_j(\alpha, T) \Delta \alpha(t)$ (2)

$$\varepsilon_i(t) = \phi_i \cdot \Delta T(t) \tag{3}$$

여기서, ϕ_j, γ_j 는 유효 열팽창계수, 화학 팽창계수, $\Delta T(t), \Delta \alpha(t)$ 는 시간에 따른 온도 변화, 경화도 변화를 의미한다[2].

3. 유한 요소 해석

본 연구에서는 Wang[3]의 3D 점탄성 평판 모델을 참조하여 물성치, 모델 치수, 적층 배열, 하중 및 경계 조건을 설정하고, 3D 육면체 요소 10,000개를 사용하여 열-구조해석을 수행하였다. 298.15 K까지 냉각시킨 후, 모델 표면의 적층 방향 잔류응력을 기존 연구[3]와 비교하여 해석 결과의 신뢰성을 검증하였으며, -1.25~-40.00 K/min에서 6가지 냉각 속도에 따른 적층 방향 잔류응력을 분석하였다.

4. 결론 및 향후과제



Fig. 1. Residual Stress by Different Cooling Rates

Fig. 1.에서 약 250분까지는 모든 냉각 속도에서 잔류 응력이 유사한 경향을 보였으며, 이후 냉각 속도에 따라 21.09 MPa에서 41.96 MPa까지 증가하였다. 이는 경화가 완료된 후 냉각 과정에서 온도 변화로 인해 모델이 수축하면서 잔류응력이 형성된 것으로 판단된다. 또한, 모든 냉각 속도에 대한 해석을 통해 냉각 속도가 잔류응력의 크기에 직접적인 영향을 미친다는 것을 확인하였다.

향후 연구에서는 복합재 모델의 형상을 변경하여 냉각 속도에 따른 잔류응력을 분석할 예정이다.

참고문헌

Y.K. Kim et al. Univ Illinois Urbana-Champaign, 1996.
 Y.K. Kim et al. Mech Compos Mater Struct. 4:361-387, 1997.
 Q Wang et al. Mater Today Commun. 32:104094, 2022.

후기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 미래우주교육센터(2022M1A3C2076724)의 지원을 받아 수행된 연구임.

전기저항과 인공지능을 이용한 복합재 제조의 실시간 유동선단 예측 Real-time Prediction of Flow-front in Composite Manufacturing Using Electromechanical Behavior and Artificial Intelligence

*이다훈¹, 이인용²⁺, 박영빈¹⁺ * Dahun Lee¹, In Yong Lee²⁺, Young-Bin Park¹⁺

¹ 울산과학기술원 기계공학과, ² 동아대학교 ⁺E-mail: <u>number1dog@dau.ac.kr</u> ⁺E-mail: ypark@unist.ac.kr

Keywords: Carbon fiber, Resin transfer molding, Electromechanical behavior, Artificial Intelligence

1. 서론

경량화 소재는 다양한 산업에서 이점을 제공하고 있으며, 그 중 탄소섬유 강화복합재의 우수한 물성으로 각광받고 있다. 하지만, 공정 변수가 많기에 다양한 공정 모니터링 기법을 통해 품질을 확보하고자 한다. [1]. 인공지능의 발달로 다양한 모니터링 기법에 적용되고 있으며 보다 정확하고 빠른 예측 및 진단을 가능하는 연구들이 활발히 진행되고 있다. [2].

2. 실험 조건 및 방법

2.1 시편: 산업에서 적용될 복합재의 크기를 기반으로 0.5 m x 1 m의 평직방향 탄소섬유 20장을 적층하였다. Copper wire와 silver paste를 이용하여 1st, 19th ply에 6개씩 총 12개의 전극을 설치하였다. 전극 간의 길이는 길이방향으로는 40 cm, 횡단방향으로 약 30 cm 로 이루어져 있다.

2.2 실험 조건 및 방법: 수지가 주입되는 동안 전기저항을 실시간으로 측정하였다. 측정된 전기저항 신호를 통해 실현 가능한 유동선단 시나리오를 파악하고 적대적 생성형 신경망 (generative adversarial network)를 다양한 형상을 생성하였다. 이를 토대로 tree-structure를 구성하여 유동선단 예측을 진행하였다.

3. 결과

주입 시 실시간으로 측정된 전기저항을 토대로 전극의 위치에 따라 총 3개의 구역으로 나누고 각 구역에 가능한 유동선단 시나리오를 Fig.1(a,b)와 같이 설정한다. 사전에 설정된 시나리오에서 유동선단의 모양을 적대적 생성형 신경망 (generative adversarial network, GAN)을 통해 Fig. 1(c)와 같이 다양한 유동선단 형상을 생성하게 된다. 이 기법은 시편 끝에서 발생하는 racetracking 현상을 다양한 형상을 통해 파악 할 수 있게 해주며, treestructure 형태를 따라 각 구역마다 유동선단을 파악 및 향후의 유동선단 모양을 예측할 수 있다.



Fig. 1. (a) changes in electrical resistance on thickness direction, (b) tree-structured decision model for prediction, and (c) generated images from GAN.

4. 결론 및 향후과제

실시간으로 측정되는 전기저항을 tree-structure 형태와 인공지능을 통해 보다 정확한 복합재 공정 모니터링 기법을 개발하였다. 더 나아가 곡면의 형태의 제품에서 유동선단 예측을 진행하고자 한다.

참고문헌

H Dai et al. *Carbon*, Vol 164: 28-41, 2020.
 Wang, Y et al. *Compos. B: Eng.* 111740, 2024.

후기

본 연구는 연구개발특구진흥재단의 '지역혁신 메가프로젝트' 사업으로 수행되었습니다. (과제번호: 2023-DD-UP-0026).

전기저항 모니터링과 딥러닝을 이용한 유리섬유복합재 진공 수지 주입공법에서의 드라이스팟 탐지

Dry-spot Detection of Glass Fiber/Epoxy Composite Vacuum-assisted Resin Transfer Molding Using Resistance-Based Monitoring and Deep Learning

김수현¹, 이다훈¹, 박영빈¹⁺ ^{} Suhyeon Kim¹, Dahun Lee¹, Young-Bin Park¹⁺

> ¹ 울산과학기술원 기계공학과 ⁺E-mail: ypark@unist.ac.kr

Keywords: Non-conductive Composites, Vacuum Assisted Resin Transfer Molding, Flow-front, Manufacturing Monitoring

1. 서론

공정모니터링은 복합재의 효율적인 생산과 뛰어난 품질을 보장하는 데에 필수적임. 본 연구에서는 격자구조의 전기저항네트워크 모델을 제안하여 유리섬유복합재의 전기저항 변화를 해석하고 수지의 유동 패턴과 연계할 수 있도록 함. 또한 수지 유동 시뮬레이션을 통해 다양한 유동 형상과 전기저항을 대응시키는 데이터를 생성하였고. 딥러닝 기법인 BiLSTM(Long Short Term Memory) classification을 적용하여 전기저항 데이터를 이용해 드라이스팟을 탐지하는 방법을 제시함. 제안된 방법은 기존의 유전 센서 및 광섬유 격자(FBG) 센서보다 비용 효율적이며, 소재물성에 끼치는 영향을 최소화한 대안으로서 복합재 제조 공정의 최적화에 기여할 것으로 기대됨.

2. 실험 조건 및 방법

2.1 시편

평직 방향 유리 섬유 1장(10cmX20cm)에 15cm 간격으로 2개의 전극을 설치하였음. 에폭시 수지를 사용하여 VARTM을 진행함.

2.2 실험 방법

고저항 측정용 멀티미터 (Keithley 6517B, USA)를 이용하여 수지 주입에 따른 전극사이의 저항 변화를 기록함. 전기저항의 변화와 촬영된 동영상을 비교하여 함침을 판단함. 함침패턴은 저항네트워크 모델(Resistive Grid Circuit)을 도입하여 분석한 후 측정된 저항 값과 비교함.

3. 결과

VARTM 공정 중 수지 유동에 따라서 전기저항이 감소하였으며, 이는 Fig. 1에서 측정데이터와 계산된 데이터를 비교하여 나타냄. 함침이 진행됨에 따라 에폭시의 전기저항이 우세해지며, 노드 간의 전기저항이 급격히 감소하는 현상을 관찰함. 특히, 저항 네트워크 모델을 적용하여 각 함침 위치가 전체 신호에 기여하는 비중이 다름을 확인할 수 있었음. 시뮬레이션으로 대량의 데이터셋을 생성하였으며, 딥러닝 기법을 적용하여 전기저항 데이터를 기반으로 드라이스팟 유무를 효과적으로 판별할 수 있음을 확인함.



Fig. 1. Electrical resistance change during the infusion process (a) experimental (b) simulation

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 유리섬유복합재 제조 공정 중 전기저항 변화를 기반으로 수지 유동특성을 분석하는 방법을 제안하였음. 전기저항 네트워크 모델을 도입하여 수지 유동과 전기적 특성 간의 관계를 정량적으로 분석하였으며, 시뮬레이션으로 딥러닝 기법으로 생성된 데이터를 학습시켜 공정결함을 탐지하는 모델을 개발함.

향후 연구에서는 다양한 제조 조건 및 소재를 고려하여 모델의 범용성을 검증할 필요가 있음. 또한, 3D network 및 복잡한 형상에서의 연구를 수행하여 산업 현장에서 실용적으로 적용될 수 있도록 발전시킬 계획임.

참고문헌

Ghazzawi, S. M et al. Compos. Sci. Technol. 243, 110251.
 Haider, M. F et al. AIP Conf. Proc. (Vol. 1754, No. 1).

후기

본 연구는 연구개발특구진흥재단의 '지역혁신 메가프로젝트' 사업으로 수행되었습니다. (과제번호: 2023-DD-UP-0026) 현무암 섬유 표면의 CNT 성장이 기계적 및 전기적 특성에 미치는 영향

Effect of CNT growth on the surface of basalt fibers on mechanical and electrical

properties

*여승준 ^{1,2}, 노우승 ^{1,2}, 신해름 ^{1,3}, 김만태 ¹⁺ * S.J. Yeo ^{1,2}, W.S. Noh^{1,2}, H.R. Shin^{1,3}, M.T. Kim¹⁺

¹ 한국세라믹기술원 우주항공융복합소재센터, ² 부산대학교 기계공학부, ³ 부산대학교 융합학부 ⁺E-mail: <u>ginggiscan@kicet.re.kr</u>

Keywords: Carbon nanotube, CNT growth, Basalt fiber, Chemical Vapor Deposition

1. 서론

섬유강화복합재의 기계적 및 전기적 특성을 향상시키기 위한 CNT를 적용한 멀티스케일 복합재 연구가 활발하다.[1] 그러나 CNT의 분산이 어려워 효과적인 분산 방법이 필요하다. 현무암 섬유는 친환경적이며 우수한 물성을 가져 복합재로서의 활용가능성이 높다. 본 연구에서는 기존의 고온(600℃ 이상) CNT 성장 공정과 달리, 저온(400~450℃)에서 현무암 섬유 표면에 CNT를 성장시켜 기계적 및 전기적 특성에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 실험

2.1 촉매 제작 및 CNT 성장

Co-Cu 촉매를 제조하여 현무암 섬유를 코팅한 후, 저온 CVD(Chemical Vapor Deposition) 공정을 통해 CNT를 성장시켰다. 성장 온도는 400℃, 450℃이며, 성장 시간은 15분, 30분, 45분으로 설정하였다.

2.2 나노 복합재 제작

CNT가 성장된 현무암 섬유를 에폭시 매트릭스와 함께 Hand-layup 방식으로 적층한 후, 오토클레이브 공정을 통해 ASTM D790 규격을 참고한 복합재를 제작하였다.

3. 결과

CNT가 성장된 현무암 섬유의 전기전도성을 비교하고 균질성을 확인하기 위해 전기저항을 측정하여 Fig.1에 나타내었다. 성장 온도가 높고 성장 시간이 길수록 전기저항이 감소하는 경향을 보였으며, 이는 CNT의 양이 증가함에 따라 전기전도성이 향상됨을 나타낸다.



Fig. 1. Electrical conductivity of basalt fiber with CNT growth.

공정 조건에 따른 복합재의 기계적 특성을 비교하기 위해 굽힘 시험을 진행하였으며, Fig.2는 성장 온도와 시간에 따른 굽힘 강도 변화를 보여준다. 400℃와 450℃에서 15분 성장한 경우 가장 높은 굽힘 강도를 보였으며, Neat BFRP보다 약간 높은 값을 나타내었다. 반면, 성장 시간이 30분 이상일 경우 굽힘 강도가 감소하는 경향을 보였으며, 이는 과도한 CNT 성장으로 인해 계면 결합이 저하되고 섬유의 열손상으로 인한 결과로 판단된다.



Fig. 2. Flexural strength of basalt fiber reinforced composites with CNT growth.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 저온 CVD 공정을 통해 현무암 섬유 표면에 CNT를 성장시키고, 성장 조건이 전기적 및 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 전기전도성은 성장 온도와 시간이 증가할수록 향상되는 경향을 보였으며, 기계적 특성(굽힘 강도)은 450℃에서 15분 동안 성장시킨 경우 가장 우수한 결과를 나타내었다. 본 연구를 통해 CNT 성장 조건을 최적화함으로써, 전기전도성과 기계적 강도를 균형 있게 개선할 수 있는 복합재 제조 가능성을 제시하였다.

참고문헌

 ÖF Erkendirci et al. "Effects of nanomaterials on the mechanical properties of epoxy hybrid composites." SN Applied Sciences. 2:1-8, 2020 부

문

GFRTP의 미세구조 분석을 통한 열성형 공정 최적화 Research on GFRTP Thermoforming Process based on Microstructure Analysis

* 신요중 , 노형도 ⁺ * Yao Zhong Xin , Hyung Doh Roh⁺

한양대학교 ERICA 기계설계공학과 ⁺E-mail: <u>rhd1213@hanyang.ac.kr</u>

Keywords: GFRTP, Python, Thermoforming, Thermoplastic composite

1. 서론

유리섬유 강화 열가소성 복합재(GFRTP)는 우수한 기계적 특성과 재활용 가능성으로 인해 항공, 자동차 및 산업 분야에서 중요한 소재로 자리 잡고 있다. 하지만 열성형 공정 중 기공형성 문제는 품질 균일성을 저해하는 주요 요인 중 하나이다 [1, 2]. 본 연구에서는 미세구조 분석을 통해 GFRTP의 열성형 공정을 최적화하고자 한다. 특히, 온도, 압력, 적층 각도 및 가열 시간을 체계적으로 조정하여 미세구조 변화를 분석하고, Python 기반 영상 분석을 활용하여 기공율을 정량적으로 평가하였다 (Fig. 1).



Fig. 1. Overall research process of the composite manufacturing and its evaluation.

2. 실험 방법

2.1 GFRTP 시편 준비 : 본 연구에서는 Celanese사의 유리섬유 강화 폴리프로필렌(PP) 프리프레그 테이프를 사용하였으며, 섬유 함량은 70%이다. 적층 테이프는 온도, 압력, 시간, 적층 각도를 변수로 하여 열성형 후 표준화된 크기로 절단하였다.

2.2 미세구조 분석 :제작된 시편은 광학 현미경을 이용하여 200배 확대하여 관찰하였으며, Python을 이용한 영상 분석을 통해 기공율을 계산하였다. 영상의 밝기 보정 및 이진화 처리를 거쳐 기공 면적 비율을 산출하였다.



Fig. 2. Void Visualization results.

3. 결과 및 논의

인공지능 기반 인공신경망(ANN) 모델을 활용하여 최적의 열성형 조건을 예측하였다. ANN 모델을 통해 도출된 최적 조건은 161℃, 3분, 31bar, 적층각 [0]8이며, 이 조건에서 최소 기공율 0.23947%를 달성하였다. 실험 결과와 ANN 예측값 간의 상관성이 높아 본 연구의 최적화 접근법이 유효함을 입증하였다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 GFRTP의 열성형 공정 최적화를 위해 미세구조 분석과 ANN 모델링을 결합한 방법론을 제안하였다. 기공율 저감을 위한 최적 조건을 제시함으로써 복합재 제조 공정의 효율성을 높이고 품질 균일성을 개선할 수 있음을 확인하였다. 향후 연구에서는 ANN 데이터베이스를 확장하고 기계적 특성과의 상관관계를 추가적으로 분석할 예정이다.

참고문헌

- Smith, R., and Johnson, P., "Mechanical properties of hybrid fiber reinforced thermoplastics," Functional Composites and Structures, 2020.
- [2] Kim, H., and Lee, D., "Advanced processing techniques for thermoplastic composites," Composites Research, 2021.

후기

이 연구는 한양대학교 ERICA 기계공학과 및 BK21 Four ERICA-ACE 센터의 지원을 받았습니다.

결정화 반응을 고려한 열가소성 복합재의 열성형 변형 예측 Prediction of thermoforming-induced deformation in thermoplastic composites considering crystallization

*김솔미 ^{1,2,4}, 김동협 ^{1,4}, 김상우 ^{1,2,3,4+}, 이수용 ⁴ * S. Kim ^{1,2,4}, D.H. Kim ^{1,4}, S.W. Kim ^{1,2,3,4+}, S.Y. Lee ⁴

¹ 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과, ² 한국항공대학교 스마트항공모빌리티학과, ³ 한국항공대학교 항공우주공학과, ⁴ 한국항공대학교 항공우주산업기술연구소 ⁺E-mail: swkim@kau.ac.kr

Keywords: Caron fiber reinforced thermoplastic (CFRTP), Thermoforming, Crystallization, Finite element method (FEM)

1. 서론

열가소성 복합재는 우수한 기계적 특성과 높은 생산성 을 갖추어 다양한 산업 분야에서 활용된다. 그러나 열 성형 과정에서 수지의 결정화가 진행되면서 내부 잔류 응력이 형성되며, 이는 치수 변형을 유발한다. 따라서 이러한 변형을 사전에 예측하여 복합재와 금형 설계에 반영해야 한다. 특히, 결정화도에 따라 복합재의 기계 적 물성과 열화학적 거동이 달라지므로, 이를 고려한 고정밀 열성형 해석과 변형 예측 기법이 요구된다.

본 연구에서는 열가소성 수지의 결정화 거동을 반영한 복합재의 열성형 변형 예측 기법을 제안한다. 유한요 소법을 활용한 3단계(성형, 유지, 탈형) 연계 해석을 수 행하여 최종 성형된 복합재 구조의 변형을 분석한다.

2. 결정화도 예측 모델

Nakamura 등[1]이 제안한 비등온 결정화 모델을 기반 으로 수정된 비등속 결정화 모델[2]을 사용하여 열가 소성 수지의 열성형 과정에서의 결정화도(θ)를 계산하 였다(식 1).

$$\frac{d\theta}{dt} = nK(T)(1-\theta)\left(-\ln(1-\theta)\right)^{\frac{n-1}{n}}$$
(1)

여기서 t는 시간, n은 Avrami 지수, K(T)는 결정화 속도 상수를 나타내며, 계산된 결정화도를 기반으로 수지의 탄성계수 변화를 계산하였다. 이후, 미시역학적 모델 을 활용하여 복합재의 유효 물성을 산출하였고, 이를 열성형 공정 해석에 적용하였다.

3. 열성형 공정 해석

그림 1에 나타낸 열가소성 복합재 평판을 대상으로 상 용 유한요소해석 소프트웨어 ABAQUS를 활용하여 성 형, 유지, 탈형의 3단계로 구성된 V자형 열성형 해석을 수행하였다. 각 단계의 최종 증분에서 도출된 온도와 응력 분포 결과 데이터를 다음 단계 해석에 반영하였 으며, 사용자 정의 부프로그램(UMAT)을 ABAQUS와 연계하여 결정화도에 따른 열기계적 거동을 모사하였 다. 또한 복합재와 금형 간 열전도 및 마찰, 금형 열팽 창, 대류를 종합적으로 고려하기 위해 열-구조 연계 해 석을 수행하여 공정 중 발생하는 잔류 응력과 최종 구 조물의 변형을 정밀하게 분석하였다.

4. 결과 및 결론



Fig. 1. Deformation result of thermoforming simulation.

그림 1에 나타낸 것과 같이, 최종 성형된 V자형 복합재 구조물에서 길이 방향으로 구조물의 양쪽에 각각 약 6.23°의 스프링인과 폭 방향으로 약 1.85 mm의 굽힘 변 형이 발생했다.

본 연구에서 제안된 열가소성 복합재의 열성형 공정 해석 기법은 다양한 제조 및 공정 변수와 수지의 결정 화 거동을 단일 해석 플랫폼 내에서 빠르고 효율적으 로 반영할 수 있다. 이를 통해 최종 구조물의 형상 왜곡 과 치수 오차를 신속하게 예측하고 금형 설계에 적용 함으로써 제품 개발 비용과 시간을 절감할 수 있으며, 제품의 구조적 성능을 향상시키는 데 기여할 것이다.

참고문헌

K Nakamura et al. *J Appl Polym Sci.* 17:1031-1041, 1973.
 JA Martins et al. *Polym.* 41:6875–6884, 2000.

후기

이 연구는 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2022R1A6A1A0 3056784). 또한 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가 원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(No.RS202400433049).



Enhanced Performance Electrode Development for Vanadium Redox Flow Batteries Using Carbon Felt Composites

*Gurpreet Singh¹, Amanpreet Kaur², Jun Woo Lim²⁺

¹Graduate school of Flexible and Printable Electronics and LANL-JBNU Engineering Institute-Korea, Jeonbuk National University, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, 54896, Republic of Korea

²Graduate school of Flexible and Printable Electronics & LANL-CBNU Engineering Institute Korea and Department of Mechatronics Engineering, Jeonbuk National University, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, 54896, Republic of Korea ⁺E-mail: jul170@jbnu.ac.kr

Keywords: Vanadium redox flow battery, Electrode, Electrocatalytic activity, MXene, Composite.

1. Introduction

Progress in sustainable development is leading to increased usage of clean and renewable energy sources instead of fossil fuels. However, renewable energy sources such as solar and wind power demand significant energy storage systems to steady production and effectively use them in practical applications. [1-6]. The vanadium redox flow battery (VRFB) is essential in energy storage systems due to its numerous advantages, including limitless storage capacity, dependable performance, extended lifespan, and design flexibility. Critical components of the VRFB include bipolar plates, electrodes, membranes, and electrolytes. The interaction between vanadium ions and the electrode is primarily responsible for the VRFB's energy efficiency. [8]. Carbon-based materials, like graphite felt and carbon felt (CF), are commonly used as electrode materials due to their high electrical conductivity, chemical stability, affordability, and porous structure that facilitate electrolyte flow. The main shortcomings of carbon-based electrodes are their low electrochemical activity and wettability.

In this research, a composite electrode made of MXene, reduced graphene oxide (MXene-rGO-CF), and carbon felt was developed for use in vanadium redox flow batteries (VRFBs). The MXene-rGO-CF composite is specifically designed to enhance the reaction kinetics of the redox couples, improving battery performance.

2. Experimental section

2.1 Fabrication of the composite electrode: Firstly, rGO was initially made by heating graphene oxide (GO) to 150°C for six hours. Afterwards, MXene-rGO composites were created using four different temperatures for 8 hours: 130°C, 150°C, 170°C, and 180°C.

2.2 Characterization: The electrocatalytic performance and mass transport characteristics of the resulting electrode are examined by experimental techniques. The materials were completely analyzed using X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy, cyclic voltammetry (CV), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), and electrochemical impedance spectroscopy (EIS).

3. Results and Discussion

Figure 1 illustrates the CV profiles of bare carbon felt (CF) and samples prepared at various temperatures for the vanadium redox process at a scan rate of 5 mV/s in an electrolyte. The results reveal that carbon felt behaves as an inert electrode, showing very limited electrochemical activity in the redox reaction. The composite samples are arranged as follows based on their peak currents: MXene-rGO -CF-150°C > MXene-rGO -CF-180°C > MXene-rGO-CF-170 > MXene-rGO-CF-130°C Bare CF is important for processes involving both oxidation and reduction. The reduction in electrochemical polarization of the bare CF electrode is likely due to the presence of active sites on the surface of the carbon fibers.



Fig. 1. CV profiles of bare CF and MXene-rGO-CF at various temperatures.

4. Conclusions

This work suggests an approach for developing highperformance electrodes that could considerably improve the overall efficiency and durability of VRFB systems. Our findings show that the composite produced by first synthesizing rGO at 150°C for 6 hours, followed by the MXene-rGO composite at 150°C for 8 hours, performed excellently. This electrode performs exceptionally well over 120 battery cycles. At a current density of 100 mA/cm², stability is achieved with 96.5% coulombic efficiency, 86% voltage efficiency, and 85% energy efficiency. The improved efficiency and stability result from optimized synthesis conditions, which strengthen the interaction between MXene and reduced graphene oxide (rGO), leading to better electrochemical performance. This study highlights the crucial role of temperature optimization in the hydrothermal synthesis process.

References

- [1] JW Lim et al. J. Intell. Material Syst. Struct. 29 : 3386-3395, 2018.
- [2] JW Lim et al. Compos Struct. 134 : 927-949, 2015.
- [3] JW Lim et al. Compos Struct. 134 : 483-492, 2015
- [4] JW Lim et al. J. Vis. Exp. 128 : e55815, 2017
- [5] JW Lim et al. Compos Struct. 108 : 757-766, 2014
- [6] Zhangxing He et al. Carbon 127 (2018) 297-304.
- [7] Ghimire et al. Carbon 155 (2019) 176-185.
- [8] Kim et al. Materials Chemistry and Physics 131 (2011) 547– 553.

Acknowledgement

This study was supported by the KIST Institutional Program (Project No. 2Z06890-23-P052) and Guwon Scholarship Foundation (No. 2023-12-01). Their support is greatly appreciated.

A bending test methodology for the laminated fan blade structure

*Gonui Hong¹, Thuan Ho-Nguyen-Tan¹, Bo seong Kim¹, Minkook Kim¹⁺, and Soon ho Yoon¹⁺⁺

¹ Composite Materials Applications Research Center, Institute of Advanced Composite Materials, Korea Institute of Science and

Technology

⁺E-mail: +minkook@kist.re.kr , ++soonho@kist.re.kr

Keywords : Laminate fan blade, Bend-twist coupling, Bending test

1. Introduction

Laminated composite structures are widely used in lightweight and specific stiffness application fields such as aerospace, gas turbines, and automotive parts. Among various composite structures, carbon fiber-reinforced laminates can offer high structural performance due to the anisotropic properties [1]. During the manufacturing process, the fiber angle must be changed to fit onto the mold with a geometric curvature. These changes need to be considered for optimization of mechanical properties in the numerical simulation [2]. In this study, laminated fan blades are manufactured with different ply-stacking sequences, including $[0/90]_s$, $[[\mp 45]_s$, and $[-60/30]_s$. The numerical simulations are compared with experimental results for all cases. Paths of 14.5%, 41.2%, 61.4%, and 79.2% from leading edge are selected for the comparison. We found that the deformation on the path of 41.2% from leading edge closely aligns with that of numerical simulation. Additionally, the bend-twist coupling behavior is also observed on the experimental test.

2. Bending test methodology



Fig. 1. Experimental overview diagram for the tests.

In this work, the jig model is designed with fully clamped constraints of a 50 mm length at the root for the testing. The ball socket, which supports the vertical load through beam, is located at two-third of the visible fan blade length. All boundary conditions are must be coincide between experiments and numerical analysis for an accurate comparison. It is used araldite AW 106 for make those condition between the fan blade and jig.

The points are defined as locations close to the coordinate system in numerical simulation and they are connected for comparing bend-twist coupling. When it gives specific force during the test, the shifted distance from crosshead is compared with finite element analysis program, ABAQUS. It is used dial gauges for measuring shifted distances at the points and compare results for checking bend-twist coupling.

3. Result comparison

The experimental result is compared with the numerical simulation using two different finite element models, including draping angle called 'with drape' and excluding draping angle called 'without drape'. From the result comparison, it is confirmed that the 'with drape' analysis is closer to experimental result than 'without drape'. Additionally, in order to figure out bend-twist coupling, validation through comparison of the 'with drape' analysis and experimental results is checked by comparing paths. In this work, numerical analysis shows less bend-twist coupling than experimental results.

4. Conclusions and future work

The comparison between the experimental results and the simulation data presents good alignment along the pitch axis. The bend-twist coupling bahavior has been observed on the paths located far from the pitch axis of the fan blade. Therefore, further investigation is currently being conducted to analyze the effects of bend-twist coupling on the structural performance.

References

- Amoo, L. M. (2013). Progress in Aerospace Sciences, 60, 1-11.
- [2] T Ho-Nguyen-Tan et al. Composite Part B: Engineering. 281:111599, 2024.

Acknowledgement

This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT), (No. RS-2023-00304729).

Energy Absorption Behavior of Hat-Shaped Basalt Fiber-Reinforced Composites: Numerical and Experimental Analysis

*Abdulrahman Adeiza Musa^{1,2}, Soon Ho Yoon², Azikiwe Peter Onwualu¹⁺, Minkook Kim²⁺⁺ ¹Department of Materials Science and Engineering, AUST, Abuja-Nigeria ²Institute of Advanced Composite Materials, KIST, Republic of Korea E-mail: ⁺aonwualu@aust.edu.ng,⁺⁺minkook@kist.re.kr

Keywords: Hat-shaped BFRP, Interfacial bonding, Energy absorption, Basalt fiber

1. Introduction

The automotive industry increasingly prioritizes lightweight and eco-friendly materials to comply with global environmental regulations [1-2]. While conventional fiber-reinforced polymers (FRPs), such as carbon and glass fiber composites, are widely used to enhance vehicle safety and reduce weight, basalt fiberreinforced polymers (BFRPs) remain underexplored despite their superior mechanical properties and environmental advantages. Currently, no dedicated study has examined the potential of BFRP components for energy absorption in vehicle structures. This research aims to bridge that gap by analyzing the deformation and energy absorption characteristics of a hat-shaped BFRP component. Through numerical simulations and experimental testing. the study evaluates its crashworthiness. structural integrity. and failure mechanisms under impact loading.

2. Materials and method

2.1 Materials

Twill woven basalt fiber with a thickness of 0.23mm and an area density of 210 ± 10 g/m² was utilized in the fabrication of BFRPs. Additionally, other materials employed in this study comprised epoxy resin (Epotec YD-128), 4,4-Methylenedianiline (MDA) hardener, 3aminopropyltrimethoxysilane (APTES), cellulose nanocrystal (CNC)

2.2 Method

Hat-shaped BFRP component was fabricated using the hand lay-up method and subsequently cured in an autoclave to ensure optimal material properties. A corresponding hat-section with identical dimensions was modeled in Abaqus CAE 2022, as illustrated in Fig. 1, to facilitate numerical analysis and validate the experimental findings. To overcome the weak interlaminar strength of basalt fiber (BF) in polymer resin and enhance the energy absorption performance of BFRP, cellulose nanocrystal (CNC) was incorporated to modify the BF/epoxy (EP) composite interface. The effectiveness of this modification was evaluated by comparing the performance of the CNCmodified composite with that of the unmodified BFRP through both experimental testing and numerical simulations, providing a comprehensive assessment of its impact on structural integrity and energy absorption capabilities.



3. Results and Discussion

The experimental results were systematically compared with numerical simulations, revealing a strong correlation between the two. This alignment validates the accuracy of the numerical model and confirms the reliability of the experimental approach. Furthermore, the findings highlight the potential of CNC in enhancing the delamination resistance of BFRP and improving its impact energy absorption capabilities, making it a suitable material for protecting occupants during vehicle crashes.

4. Conclusions

This study investigated the potential of basalt fiberreinforced polymers (BFRPs) as an alternative material for automotive applications. Additionally, the findings demonstrated the viability of CNC-modified BFRPs for enhanced impact resistance in vehicles, making them a promising choice for lightweight, high-performance structural components. Beyond their mechanical advantages, these materials also offer significant environmental benefits, further supporting their adoption in sustainable vehicle design.

References

- [1]. Oh et al. Advanced Composite Materials, 2024.
- [2]. Zahoor et al. Energy Conversion and Management, 321, 118996, 2024

Acknowledgement

This work was supported by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE) grant funded by the Korea government (Project Number: P0022334) and Partnership for Skills in Applied Sciences, Engineering, and Technology (PASET) – Regional Scholarship and Innovation Fund (RSIF).

DNN기반 clustering을 통한 열성형 복합 채널의 형상에 따른 warpage의 상관관계 분석

Correlation analysis of warpage according to the shape of thermoformed composite channel through DNN-based clustering

조성욱 ¹, 지승민 ¹, 권승호 ¹ , 전성식 ¹⁺ ^{} Sungwook Cho ¹, Seungmin Ji ¹,Seungho Kwon, Seong S. Cheon¹⁺

> ¹ 공주대학교 기계공학과 ⁺E-mail: sscheon@kongju.ac.kr

Keywords: Thermoforming anlysis, glass fiber reinforcement thermoplastic, Deep neural network, springback, warpage

1. 서론

섬유 강화 복합재의 열 성형 공정으로 인해 발생하는 탄성 특성과 국부 잔류 응력은 warpage를 발생시켜 복합재 부품의 정확도를 저하시킨다 [1]. 결국 복합재 부품의 조립 불량은 바람직하지 않은 열등한 제품으로 이어지므로 열성형 후 warpage가 적은 것이 좋다. 본 연구에서는 제조 가능성을 고려하여 제품 표면에 밀리미터 크기의 기하학적 패턴을 생성하여 열 성형 후 복합재 채널의 허용 가능한 warpage가 발생되도록 유도하는 것이 제안되었다. 이러한 기하학적 패턴 변수가 warpage에 미치는 영향을 파악하기 위해 여러 형상 변수에 따른 warpage 데이터셋을 열성형 해석을 통해 구축하였으며, 이를 DNN(Deep Neural Network)에 적용하여 기하학적 패턴에 따른 warpage 예측 모델이 선행 구축되었다. 생성된 warpage 예측 DNN모델을 통해 데이터셋을 증강하여 다양한 형상 변수에 따른 데이터셋을 생성하였으며, 생성된 데이터셋을 통해 비지도학습인 군집화 기법을 통해 형상 변수에 따른 warpage 분포 특성 파악이 이루어졌다.

2. 복합재 채널의 열성형 해석

채널 형상에 대한 복합재 열성형 해석은 Fig. 1과 같이 수행되며, 열성형 공정은 Loading, Holding, Unloading 총 3가지 공정으로 수행되었다. 복합재는 glass fiber reinforcement thermoplastic (GFRTP)이며, polypropylene기반의 woven type이다[2]. 복합재 채널의 열성형 해석은 Abaqus를 통해 수행되었으며, 실험을 통해 도출된 GFRTP의 온도에 따른 stress-strain curve와 열팽창계수, 열전도도 적용되었다.



데이터셋 구축을 위해 Fig.2에서와 같이 상판의 비드 패턴에 따른 열성형 해석이 각기 진행되며, 각 해석에서는 warpage가 도출되게 된다.



Fig. 2. 복합재 채널의 비드 패턴 변수화

3. 형상 변수에 따른 warpage 상관관계 분석

구축된 warpage 예측 DNN모델을 활용하여 랜덤 형상 변수에 대응하는 warpage결과를 기존 데이터셋에 추가하여 데이터 증강이 수행되었다. 생성된 최종 데이터셋은 차원축소후 K-means clustering, DBSCAN(Density-Based Clustering), Hierarchical clustering을 통해 다양한 군집화 기법을 통한 분석이 이뤄졌으며 [3], 특정 형상 변수 조합이 warpage에 미치는 영향을 정량적으로 나타낼 수 있었다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 열가소성 복합재의 채널 형상에 warpage를 최소화 하기 위한 비드 패턴 형상을 제안하였으며, 열성형 해석을 통해 구축된 데이터셋을 통해 warpage 예측 모델이 생성되었다. 생성된 모델은 데이터 증강에 사용되었으며, 군집화 기법을 통해 상부 비드 패턴 형상 변수와 warpage간의 상관관계를 나타냈다. 본 연구를 통해 추후 단방향 복합재의 적층순서와 warpage간 상관관계 분석에도 적용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] Divekar et al., JTCM 35.9 (2022): 1231-1248.

- [2] Feih, S., et al. ICCM 17, 2009.
- [3] Milligan et al., APM 11.4 (1987): 329-354.

후기

이 연구는 2022 년도 산업통상자원부 및 한국산업 기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 ('20017947').

굴곡 구조가 고려된 직물 CFRP의 기계적 물성 예측 Prediction of Woven CFRP Mechanical Properties considering crimp

*권승호¹, 지승민¹, 조성욱¹, 전성식¹⁺ *S.H. Kwon¹, S.M. Ji¹, S.W. Cho¹, S.S. Cheon¹⁺

> ¹ 공주대학교 기계공학과 ⁺E-mail: sscheon@kongju.ac.kr

Keywords: CFRP, Woven, Weaving structure, Deep learning

1. 서론

최근 경량화와 고강도 소재에 대한 산업적 요구가 급증함에 따라 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic) 는 스포츠 장비, 로봇, 자동차 등 다양한 분야의 핵심 소재로 자리잡고 있다[1]. 특히 직물 CFRP는 다방향 하중에 대해 균형 잡힌 강도를 제공하는 장점이 있다. 하지만, 직물 CFRP는 위사와 경사가 얽힌 복잡한 기하학적 구조를 가지고 있어, 직조 방식 에 따라 원사의 굴곡과 기계적 거동이 크게 달라진다. 따라서 본 연구에서는 다양한 직조 패턴과 그에 따른 원사의 굴곡 변화가 직물 CFRP에 미치는 영향이 분석 및 예측되었다.

2. 유한 요소 해석

본 연구에서는 다양한 직조 패턴이 적용된 메조 규모의 RVE(Representative Volume Element) 모델이 구축되었으며, 탄소 섬유 직물과 epoxy 수지로 구성되어 있다.여기서,내부 직물 구조는 평직(Plain), 능직(Twill), 새틴(Satin)의 기본 구조와 이 외에 비균일한 패턴으로 구성되어 있다.

구축된 RVE 모델은 2×2 및 4×4 규모로 구성되었으며,동일한 2×2 직조 패턴을 갖는 경우에도 Fig.1에서 나타난 바와 같이 RVE 영역 외부의 경사와 위사의 배열이 고려되어 설계되었다. 즉,동일한 직조 패턴과 크기의 RVE 모델이어도 주변 영역과의 연속성이 반영되어 원사의 굴곡 구조가 다르게 구현되었다. 이를 통해 2×2 규모의 RVE 모델을 조합하여 4×4 규모의 RVE 모델에서 얻은 기계적 물성 데이터를 바탕으로 4×4 규모의 직물 복합재의 물성이 효과적으로 예측될 수 있게 되었다.



Fig. 1. Woven composite RVE model considering crimp

Ansys를 통해 다양한 직조 패턴을 가진 직물 복합재 RVE 모델의 인장 및 전단 FEA(Finite Element Analysis)가 수행되었으며, 이를 통해 직조 패턴에 따른 인장 탄성계수와 전단계수의 차이가 분석되었다.

3. 딥러닝

2×2 및 4×4 규모의 직물 복합재에 대한 구조해석이 수행되었고, 이를 통해 직조 구조에 따른 기계적 물성에 대한 데이터베이스가 구축되었다. 구축된 데이터베이스와 딥러닝 기법이 활용되어 Fig.2와 같이 두 규모 복합재 간 기계적 물성 상관관계가 예측되었다. 딥러닝 모델은 DNN(Deep Neural Network)가 사용되었고, K-fold 교차검증을 통해 딥러닝 모델이 검증되었다.



Fig. 2. Prediction of correlation between 2×2 and 4×4 scales using deep learning model

4. 결과 고찰

본 연구에서는 다양한 직조 구조에 대한 인장 및 전단 하중이 작용되었을 때기계적 거동 차이가 FEA를 통해 비교 및 분석 되었다. 직조 패턴과 굴곡에 따른 기계적 물성 차이가 확인되었으며, 평직에 가까워질수록 탄성계수가 감소하는 경향을 보였다. 이는 평직 구조의 높은 원사 굴곡으로 인해 응력 집중이 발생되기 때문으로 판단된다. 또한, 2×2 규모의 데이터를 기반으로 4×4 규모 직물 복합재의 기계적 물성이 딥러닝 기법을 통해 예측될 수 있음이 입증되었다.

참고문헌

[1] Marsh, G., et al. Reinforced Plastics. 56.6: 32-35, 2012

후기

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획 평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임('20017947').

Predicting Callus Geometry in Tibial Bone Fractures: Validation and Comparative Study of Implant Materials Using a Novel Algorithm

* Mahtab Ali¹, Seung Hwan Chang^{1, *}

¹School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, 84, Heukseok-ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06974, Republic of Korea

⁺E-mail: Phigs4@cau.ac.kr

Keywords : Callus, Bone Healing, FEA, Material Property Effects

1. Introduction

Healing of a diaphyseal fracture in tibia strongly depends upon the biomechanical environment, which is influenced by implant type and material[1]. Flexible implants mimic bone stiffness and facilitate secondary healing, favorable for diaphyseal fractured tibial bones. This process involves differentiation of mesenchymal stem cells (MSCs) from the periosteum layer into chondrocytes and subsequent callus extracellular formation through matrix development[2]. Many researchers tried several techniques to incorporate these effects. Despite the considerable advancements in the field, the precise shape and size of the callus are often overlooked in many studies. [3]. This study aims to evaluate implant materials' influence on callus formation by employing a novel callus shape prediction algorithm.

2. Methodology

2.1 Predictive algorithm

We developed and validated a novel callus shape algorithm method using data from two distinct *in vivo* and *in silico* studies[4], [5]. This algorithm involve elements removing from large callus which accurately predicts callus shape formation based on biomechanical stimuli Eq. (2) and local cellular activities as deviatoric strain Eq. (1).

2.2 Tibia bone development

The validated algorithm was applied to human tibial fractures stabilized using intramedullary (IM) nails made from three different implant materials: stainless steel, titanium alloy, and glass/polypropylene Twintex composite. A biphasic mechano-regulation algorithm was incorporated to predict cell differentiation, coupled with a diffusion equation to estimate local and temporal cell concentrations.

3. Results and Discussion

The predicted callus shapes from all three materials showed distinct biomechanical influences. The integration of deviatoric strain in our approach allowed for enhanced prediction accuracy, particularly in regions experiencing complex stress states, resulting in a more physiologically accurate distribution of callus tissue. Flexible Twintex composite implants demonstrated superior biomechanical environments, leading to more favorable callus shapes compared to stainless steel and titanium alloy implants. The results highlighted the significant influence of implant

stiffness and material properties on the callus formation pattern and healing potential.



Fig. 1. Effect of implant material on callus and callus.

$$DS = \frac{2}{3}\sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$
(1)
$$BMS = \frac{DS}{3.75} + \frac{FF}{3}$$
(2)

4. Conclusions

The study successfully demonstrated that implant material considerably impacts callus shape and healing outcomes, with flexible Twintex composite implants providing optimal conditions for secondary healing. Future research will include clinical validation of the callus shape algorithm and exploration of additional composite materials for orthopedic implants.

References

[1]Mehboob A et al.compstruct.2017.01.076.

[2]Rizvi SHA, et al.compositesb.2021.109429.

[3] Wang M, et al. Wiley-VCH Verlag; 2018, p. 2223-38

[4]Comiskey DP et al, Biomed Engin 2012;15:779–85.

[5]Hedayatzadeh Razavi A et al. Sci Rep 2024;14.41598-024-80502-2.

Acknowledgement

This study was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MSIT) (RS-2023-00208286).

시드층 접착력 향상을 위한 플라즈마 처리 및 박막 두께 최적화 Enhancing adhesion of Ti/Cu seed layers through plasma treatment and seed layer

thickness optimization

*이세민¹, 엄희진¹, 전나현¹, 노현지¹, 정순오², 한영주², 김무성², 김학성^{1,3+} * S.M. Lee¹, H.J. Um¹, N.H. Jeon¹, H.J. Rho¹, S.O. Jung², Y.J. Han², M.S. Kim², H.S. Kim^{1,3+}

¹ 한양대학교 융합기계공학부, ² LG 이노텍,³ 한양대학교 첨단반도체패키징센터 E-mail: * Se-Min Lee, minhappy96@hanyang.ac.kr, ⁺Hak-Sung Kim, kima@hanyang.ac.kr

Keywords: Plasma treatment, Sputtering, Seed layer, Adhesion, ABF(Ajinomoto Build-up Film)

1. 서론

최근 고접적 반도체 패키징의 수요 증가로 인해 인쇄회로기판(PCB) 제조 공정에서 Ajinomoto Build-up Film (ABF)와 금속층 간의 접착력 확보가 중요한 과제가 되고 있다[1]. 특히, 반도체 패키징의 미세화에 따라 10µm 이하의 미세 비아 형성이 가능해야 하며, 이를 위해 스퍼터링을 이용한 Ti/Cu 시드층 증착 공정이 널리 사용되고 있다. 그러나 Ti/Cu 시드층과 ABF 기판 사이의 낮은 접착력은 전기적 신뢰성 문제를 유발할 수 있다[2,3]. 본 연구에서는 Ar 플라즈마 표면처리 및 Ti/Cu 박막 두께 최적화를 통해 ABF 기판과 Ti/Cu 시드층 간의 접착력을 향상시키는 방안을 제안하고자 한다

2. 플라즈마 처리에 따른 표면 특성 변화 2.1 Ar 플라즈마 처리의 효과

Ar 플라즈마 처리를 통해 ABF 기판의 표면 조도 및 화학적 조성이 변화하는 것을 확인하였다. 접촉각 및 XPS 분석을 통해 Ar 플라즈마 처리 시간이 증가할수록 표면의 친수성이 증가하고, SiO₂ 필러의 노출이 증가함을 확인하였다. FTIR 분석 결과, Ar 플라즈마 처리는 ABF 표면의 C-C, C=O, C-OH 결합을 변화시켜 표면 에너지를 증가시켰다. 또한, XPS 분석을 통해 C Is 신호가 감소하고 Si 2p와 O Is 신호가 증가하는 것을 확인하였으며, 이는 에폭시 매트릭스의 변화를 의미한다. 이러한 화학적 변화로 인해 Ti 층의 접착력 향상이 이루어졌으며, Figure 1에 나타낸 90° peel 테스트를 통해 Ar 플라즈마 처리 시간이 길어질수록 접착력이 증가하는 것을 확인하였다.

2.2 O₂ 플라즈마 처리의 영향

O₂ 플라즈마 처리는 ABF 표면의 에폭시 성분을 선택적으로 제거하여 실리카가 노출되는 효과를 보였다. FTIR 분석 결과, O₂ 플라즈마 처리는 C-C 및 C-H 결합을 감소시키며, 표면의 SiO₂ 함량을 증가시켰다. 그러나 과도한 O₂ 플라즈마 처리는 접착층 형성을 방해하여 오히려 접착력을 저하시킬 수 있음을 확인하였다. Peel 테스트 결과, O₂ 플라즈마 처리 시간이 증가할수록 접착력이 감소하며, 특정 조건에서는 Ti/Cu 계면이 아닌 ABF 내부에서 파단이 발생함을 확인하였다.

3. Ti/Cu 시드층 두께에 따른 접착력 변화

Ti 박막 두께 변화에 따른 접착력을 분석한 결과, 50 nm 두께의 Ti 박막이 가장 높은 접착력을 보였으며, 이는 (002) 결정 배향이 우세하고 미세한 결정립 크기를 가지기 때문으로 해석된다. GI-XRD 분석을 통해 Ti 박막의 결정 구조를 분석하였으며, 90° peel 테스트를 통해 접착력 변화를 평가하였다. 또한, TEM 분석을 통해 Ti/Cu 시드층과 ABF 기판 사이의 계면 특성을 분석한 결과, Ar 플라즈마 처리된 ABF 기판에서는 플라즈마 처리하지 않은 기판에서 대비 나노스케일의 거친 계면이 형성되어 시드층과 접착력이 향상됨을 확인하으며, 이는 접착력 향상의 중요한 요인으로 작용하였다.



Fig. 1. Schematic of peel test setup and specimen.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 Ar 및 O₂ 플라즈마 처리를 통해 ABF 기판과 Ti/Cu 시드층 간의 접착력을 향상시키는 방안을 연구하였다. Ar 플라즈마 처리를 통해 ABF/Ti 계면의 친수성을 증가시키고, 화학적 변화(C-C 및 C=O 결합의 감소, SiO₂ 노출 증가)를 유도하여 최적화된 Ti 박막 두께를 적용할 경우 최적의 접착력을 확보할 수 있음을 확인하였다. 반면, O₂ 플라즈마 처리의 경우 과도한 에폭시 제거로 인해 접착력이 오히려 감소할 수 있음을 확인하였다. 향후

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

연구에서는 다양한 플라즈마 가스 조성 및 공정 변수를 추가적으로 분석하여 접착력 향상 메커니즘을 보다 구체적으로 규명할 예정이다.

참고문헌

- H. Narahashi, S. Nakamura, and T. Yokota, "Novel thin copper transfer films for fine line formation on PCB substrates," Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging, vol. 3, no. 1, pp. 86-90, 2010.
- [2] Oh, Yoong, et al. "Adhesion of sputter-deposited Cu/Ti film on plasma-treated polymer substrate." Thin Solid Films 600 (2016): 90-97.
- [3] Hegemann, et al. "Plasma treatment of polymers for surface and adhesion improvement." Nucl Instrum Meth B 208 (2003): 281-286.

후기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구 재단-나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00428299). 이 논문은 2021년도 정부(산업 통산자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20212020800090, 정온물류 운송 및 물류센터 에너지 효율화 기술 개발 및 실증.). 이 논문은 산업통상자원부(중앙행정기관)의 재원으로 한국산업기술 평가관리원을 통해 일부 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00418263). This research was funded by CTO division of LG Innotek Co Ltd (KT23-K399546-0100).

테라헤르츠파를 사용한 실시간 폴리머 열화 검사 기술에 관한 연구 Real-time inspection of polymer thermal degradation using terahertz

*김태완¹, 김상일¹, 정현진¹, 김헌수¹, 김학성^{2,3+} * Tae-Wan Kim¹, Sang-Il Kim¹, Hyun-Jin Jung¹, Heon-Su Kim¹. And Hak-Sung Kim^{2,3+}

¹ 한양대학교 융합기계공학과, ² 한양대학교 기계공학부, ³ 한양대학교 첨단반도체패키징연구센터 E-mail: * Tae-Wan Kim, kty98031314@gmail.com, ⁺Hak-Sung Kim, kima@hanyang.ac.kr

Keywords: Terahertz, polymer, Thermal degradation, polyethylene terephthalate (PET).

1. 서론

폴리머는 우수한 비강도, 가공성, 내부식성, 절연성 등으로 반도체 공정, 베터리 제조 공정, 자동차 및 항공 우주 분야의 복합재료 구조물로 사용된다. 하지만 이러한 폴리머 부품들은 저온/고온 공정, 반복적인 열 사이클 등 가혹한 환경에 지속적으로 노출되어 열화가 발생한다. 특히 적층 반도체의 절연층으로 사용되는 폴리이미드(polyimide), 패키지 몰딩 공정에 사용되는 EMC(Epoxy Molding Compound), 전기차 베터리 팩의 열가소성 엘라스토머(TPE) 등은 지속적인 열화에 노출되어 높은 열적 신뢰성이 요구된다. 따라서 본 연구는 복합재료에 사용되는 폴리머 부품의 열화 상태를 실시간으로 검사하기 위해 terahertz timedomain spectroscopy (THz-TDS) 시스템을 사용하였다.

2. 폴리머 열화 검사 시스템 구축

2.1 폴리머 열화 시편 제작

본 연구에 사용된 폴리머는 가장 범용적으로 사용되며, 높은 열/기계적 물성을 가진 polyethylene terephthalate (PET) 로 선정하였다. PET 열화 시편은 유리전이 온도(약 78℃)를 기점으로 서로 다른 열화 메커니즘을 고려하여, PET 평판을 유리전이 온도 이상(90℃)과 이하의 온도 조건(50℃)에서 가열 시간에 따라 제작을 진행하였다. [1], [2]



Fig. 1. PET thermal degradation mechanism : (a) 유리전이 이하 온도 열화, (b) 유리전이 이상 온도 열화.

2.2 폴리머 열화에 따른 THz 광학 물성 평가

열화된 PET 시편들은 THz-TDS 시스템 투과모드로 검사하였다. PET 시편을 투과한 시간 영역의 THz 신호는 Fourier transform 하여 Fresnel's equation을 기반으로 매질간 계면에서의 투과계수, 전파계수를 활용하였다. [3] 시편을 투과한 신호와 투과하지 않은 reference 신호 비교를 통해 위상차와 진폭비를 구하고, 이를 통해 시편의 복소 굴절률을 계산하였다. 최종적으로 소멸계수로부터 흡수계수를 도출하여 분석하였다. 그 결과, 각 열화 조건별 열화 시간이 증가함에 따라 서로 다른 주파수 대역에서 흡수계수 변화를 확인하였다.



Fig. 2. THz-TDS transmission mode system.

폴리머 열화의 열적, 기계적, 광학적 상관관계 분석

폴리머 열화 검사로 주로 사용되는 시차 주사 열량 측정(DSC)으로 열곡선(heat flow curve)을 분석하였다. 유리전이 온도 부근 peak, 냉결정화 온도 peak, 용융 온도 부근 peak 변화를 통해 주파수 범위 전반에 걸친 THz 흡수 계수 변화 추세가 열화로 인한 폴리머의 결정화도 및 밀도 변화 추세와 일치함을 확인하였다. 또한 기계적 인장 시험을 통해 DSC 분석에 기반한 폴리머의 결정화도 및 내부 부피 변화가 기계적 물성에 미치는 영향을 확인하였다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 유리전이 온도 이하와 이상의 온도에서 THz-TDS 시스템을 사용하여 비파괴, 비접촉 방식으로 PET의 열화를 검사 하였다. 결과적으로, 열화 온도와 시간에 따른 폴리머 구조 변화를 THz 파로 측정한 광학적 물성으로 모니터링 할수 있음을 확인하였다. 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

개발된 THz 검사 기술은 실시간 비접촉 및 비파괴 검사 방법을 통해 폴리머 부품의 열화 상태를 진단하여 공정 수율을 향상시킬 것으로 기대된다.

참고문헌

- Hutchinson, J. M. (1995). Physical aging of polymers. Progress in polymer science, 20(4), 703-760.
- [2] Gigliotti, M., Minervino, M., Lafarie-Frenot, M. C., & Grandidier, J. C. (2016). Effect of thermo-oxidation on the local mechanical behaviour of epoxy polymer materials for high temperature applications. Mechanics of Materials, 101, 118-135.
- [3] Duvillaret, L., Garet, F., & Coutaz, J. L. (1996). A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy. IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, 2(3), 739-746.

후기

이 논문은 2021년도 정부(산업통산자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20212020800090, 정온물류운송 및물류센터에너지 효율화 기술 개발 및 실증). 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00260527). 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노및소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00428299).

Innovative Bone Plate Design for Optimized Tibial Fracture Healing: Enhancing Biomechanics and Tissue Regeneration

Syed Zargham Abbas Hamdani¹, Seung Hwan Chang^{1,*}

¹ School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, 84, Heukseok-ro, Dongjak-Gu, Seoul, 06974, Republic of Korea

⁺E-mail: phigs4@cau.ac.kr

Keywords : Tibia Fracture, endochondral ossification, Callus, Interfragmentary Strain, Rule of Mixture.

1. Introduction

Tibial fractures is the most frequent long bone injuries, present major treatment challenges due to the tibia's essential function in supporting weight and enabling movement [1]. Bone plates, widely used for fixation, offer advantages such as minimal soft tissue disruption and enhanced plate-bone interface [2,3]. Promoting favorable healing conditions. The biomechanical environment at the fracture site, particularly interfragmentary movements (IFMs), plays a crucial role in secondary healing, where excessive or insufficient IFMs can impede bone regeneration. Traditional metal plates, though strong, often cause stress shielding and implant related complications [4], prompting interest in composite materials like fiberreinforced polymers, which offer a modulus closer to natural bone [5] and reduce stress shielding. Optimizing bone plate design through adjustments in working length, screw configuration, and material composition ensures the ideal balance of stability and flexibility, facilitating controlled micro-motion and efficient load distribution for enhanced fracture healing. By integrating biomechanical principles and advanced materials, modern bone plates can improve clinical outcomes and accelerate tibial fracture recovery.

2. Modeling of Bone Plate Assembly

2.1 Generation of Finite Element Model:

The tibia was modeled in ABAQUS as a cylindrical structure with cortical and trabecular bone, incorporating a 3 mm fracture gap enclosed by an external callus to simulate healing. The callus, assigned granulation tissue properties, was modeled using poroelastic elements to allow fluid flow. A bone plate was secured to the cortical bone with screws, ensuring stability and controlled load distribution.

2.2 Smoothening procedure and blood vessel growth:

We used a deviatoric strain-based mechanoregulation (MR) algorithm to simulate tissue differentiation during bone healing. Principal strains (ε_1 , ε_2 , ε_3) were used to calculate deviatoric strain at each finite element in the callus, determining tissue phenotypes. The finite element model applied a predetermined load, iteratively updating tissue properties based on MR theory. A smoothing procedure (**Eq.1**) averaged Young's modulus over ten iterations to ensure a gradual transition between tissue types. Additionally, the Rule of Mixtures (RoM) **Eq.2** incorporated blood vessel growth and cell proliferation to refine mechanical properties[5], ensuring realistic tissue maturation.

$$E_{n+1} = \frac{1}{10} \sum_{i=n-9}^{n} E_i \tag{1}$$

$$RoM = \frac{c^{max} - c}{c^{max}} E_{gran.} + \frac{c}{c^{max}} E_{tissue}$$
(2)



Fig. 1. Bone plate model with tissue phenotypes

3. Results and Discussion

The Twintex composite plate showed better bone healing than the steel plate by promoting higher interfragmentary strain (IFS), which enhanced tissue differentiation and faster callus maturation especially at the latter stage of healing. Its lower stiffness allowed gradual stiffening, creating an optimal healing environment. In contrast, the steel plate restricted motion, reducing strain levels and potentially delaying healing.

4. Significance and Future Works

This study provides valuable insights into selecting the optimal bone plate shape for enhanced bone healing by incorporating both mechanical and biological factors in the simulation. To further improve the healing process, future work will focus on integrating additional factors such as oxygen supply, which plays a crucial role in tissue regeneration. This will help refine the model and provide a more comprehensive understanding of the biological environment needed for effective fracture healing.

References

- [1] Mehboob, et al. Composite Structures 2014;118:328-41.
- [2] Xue XH, et al. Injury 2014;45:667-76..
- [3] Vallier HA et al. Journal of Orthopaedic Trauma
- 2011;25:736-41.
- [4] Niinomi M, et al. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 2008;1:30-42.

[5] Mehboob, et al. *Composite Science and Technology* 2018;167:96-105.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MSIT) (RS-2023-00208286)

Phytic acid 코팅된 Mg wire/PLA 복합재료의 생분해에 대한 실험적 연구 Experimental study on biodegradation of phytic acid coated Mg wire/PLA composites *이호석¹, 차가락¹, 장승환¹⁺

* H.S. Lee¹, J.L Che¹, S.H. Chang¹⁺

¹ 중앙대학교 기계공학과

⁺E-mail: phigs4@cau.ac.kr

Keywords: Biodegradable composite, dip coating, property reduction.

1. 서론

생분해 재료는 체액 환경에서 분해되어 점차 기계적 물성 및 특성이 점차 감소하는 물질이다. 이러한 특성을 적용하여 결손 및 기능이 저하된 부분의 회복을 위해 임플란트나 골절 치료 보철구 등의 형태로 일정기간 해당 부분의 역할을 대체하는 연구가 지속되고 있다[1,2]. 생분해 재료는 분해속도를 제어하여 회복 기간동안 충분한 기계적 물성을 유지하는 것이 중요하다. 그러나 생분해 재료인 Mg 합금, 생체활성유리 (Bioactive glass, BG), polylactic acid(PLA) 등의 사용은 분해될수록 주변 체액의 산성도를 산성 혹은 알칼리성으로 변화시키고 생분해 재료의 분해를 가속화하며 염증과 같은 부작용을 발생시킬 위험이 있다[3]. 여러 생분해 재료를 생분해 복합재료로 Mg/PLA, BG/PLA와 같이 구성하게 되면 기계적 물성을 제어가 가능하면서도 분해 되었을 때 주변 환경의 산성도 변화를 어느정도 중화할 수 있다[4]. 뿐만 아니라 분해 속도가 다른 생분해 재료의 조합으로 각 생분해 재료의 분해산물이 다른 생분해 재료의 분해에 영향을 주어 분해 속도를 조절 가능하게 한다[5]. 이러한 생분해 복합재료의 물성 및 내식성 제어는 골절 치유를 위한 보철구에 설계에 사용함으로써 기존 금속 보철구의 높은 물성으로 발생하는 응력 차폐로 인한 부작용 방지 및 하중지지능력의 회복되면서 세포 성장 및 분화의 촉진을 위한 자극 강화 등 여러 유용한 효과를 기대할 수 있다[6]. 본 연구는 골절 치료를 위한 보철구 설계를 위해 Mg 와이어와 polylactic acid (PLA)를 도입하여 생분해 복합재료를 구성하고 Mg 와이어의 표면에 dip coating 방식의 phytic acid (PA) 표면처리를 도입한 생분해 복합재료의 특성을 평가하는 것이 목표이다.

2. 시편 및 시험 설정

본 연구에서 생분해재료 Mg 합금인 AZ31를 직경 300µm wire, PLA는 두께 300µm sheet 형태로 사용하였다. Mg 와이어에 장력을 주어 일렬로 정렬된 상태로 dip coating 방식으로 10g/L PA 용액에 29℃에 30분간 표면처리 후 PLA/Chloroform (1:40g/ml) 용액을 도포한 후 건조하여 Mg laminar를 제작하였다. Mg laminar와 같은 크기로 PLA 시트를 절단하여 Mg 와이어의 부피분율이 50%가 되도록 PLA laminar를 교차하여 금형에 넣고 hot press에서 170℃에서 10분동안 가열한 후 1MPa의 압력을 10분동안 주어 열성형 과정을 거쳐 PA 코팅 Mg wire/PLA를 제작하였다. 제작한 시편은 생분해 용액인 Phosphate-Buffered Saline (PBS)에 침지하여 1, 4, 7, 14, 21, 28일 동안 시험관 내 생분해를 진행하였다. 생분해를 진행한 시편은 3점 굽힘 시험과 단면 관찰로 인해 분석되었다.



Fig. 1. Material test of degraded PA coated Mg wire/PLA

3. 결론 및 향후과제

생분해된 시편은 초기 PA 코팅층이 박리되면서 물성감소가 발생하였지만 14일 동안 물성을 어느정도 유지되었다. 이러한 반응은 초기 Mg의 빠른 부식으로 인해 방출에 의한 내부응력으로 발생하는 파손이 PA 코팅에 의해 부식반응이 제어 되어 발생하였다. 추후 생분해 복합재료의 물성을 높이고 보철구의 구멍 주위 안정성을 위해 생적합 비분해 복합재료인 CF/Nylon을 사용한 하이브리드 복합재료가 보철구와 같은 방향의 편심 하중이 반복적으로 작용할 때 피로 내성을 평가할 필요가 있다.

참고문헌

- Y Zheng et al. Journal of Materials Science & Technology. 147:132-144, 2023.
- [2] A Mehboob et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 135:105929, 2020.
- [3] Y Ramoy et al. Advanced Drug Delivery Reviews. 107:153-162, 2015.
- [4] X Li et al. Acta Biomaterialia. 48:468-478, 2017.
- [5] SC Cifuentes et al. Acta Biomaterialia, 32:348-357, 2016
- [6] MU Zaheer et al. Composite Part B: Engineering. 233, 2022.

후기

본 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00208286).

생분해성 복합재료의 하중이 분해과정 및 기계적 성능에 미치는 영향에 대한 해석적 연구

Analytical research on the effect of load on the degradation process and mechanical properties of a biodegradable composites

*차가락', 이호석', 장승환 '+

^{*} J.L. Che¹, H.S. Lee¹, S.H. Chang¹⁺

1중앙대학교 기계공학부

⁺E-mail: <u>phigs4@cau.ac.kr</u>

 Keywords:
 Biodegradable composite, Load, Degradation process, Simulation.

 1. 서론
 분해 실

스테인리스 강이나 티타늄 합금 등 금속재료는 골절치료용 고정판에 널리 사용된다. 금속재료는 안골과의 강성차이가 크기 때문에 응력 차폐 현상을 유발하여 골다공증을 발생시킬 수 있다[1]. 이런 문제 해결하기 위해 마그네슘이나 PLA (Polylactic acid) 등의 다양한 생분해성 복합재료로 고정판을 만드는데 널리 사용되고 있다[2]. 이전 연구에서 Mg wire/PLA 복합재료 고정판을 체액을 모사한 환경에서 피로실험을 수행하였다. 피로실험 결과 고정판의 구멍위치에 분해가 많이 발생하여 고정판이 하중 지지를 못 하는 것을 확인 되었다[3]. Li[4]는 Mg wire/ PLA 복합재료 시편의 압력이 기계적 성능에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 실험 결과 하중 크기 및 주기가 증가하면 시편의 기계적 성능이 저하 속도가 증가하는 것이 확인 되었다. Che[5]는 Mg wire/ PLA 복합재료 시편의 체액 환경에서 분해과정 및 기계적 성능 변화에 대한 해석적 연구 수행하였다. 생분해성 복합재료 분해 해석 기법을 고도화하여, 우수한 해석 결과 얻었다. 본 연구에서 생분해성 복합재료 분해 해석 기법을 사용하여, 하중이 분해과정 및 기계적 성능에 미치는 영향에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 해석 기법의 정확성을 확인 하였다.

2. 복합재료 시편 분해 시뮬레이션 2.1 시편 및 실험

본 연구에서 사용된 생분해성 복합재료는 직경이 0.3mm인 마그네슘 합금(AZ31) 와이어 (Mg wire)이다. 시편 사이즈는 50mm × 12mm × 2mm인다. 제작한 시편의 Mg wire의 부피분율은 10%이다. 분해실험에 적용되는 압력이 0.1MPa에서 0.9MPa로 증가하거나 주파수가 0.5Hz에서 2.5Hz로 증가하였다. 실험결과 압력 및 주기가 증가하면 분해속도가 증가하는 것이 확인 되었다[4].

2.2 분해 시뮬레이션

본 연구에서는 Fick's law 및 Weibull distribution을 사용하여 체액에서 하중에 따른 Mg wire/PLA 시편의 분해 과정을 시뮬레이션 하였다. 마그네슘과 PLA의 분해 실험 결과에 따라 유한 요소에 흡수된 수분 농도가 일정 수준에 도달하면 요소를 삭제하였다 (Fig. 1 참조). 이를 통해 시편의 기계적 성능의 변화를 얻은 후 실험값과 비교하는 방식으로 해석 기법을 보정하였다.



Fig. 1. Mechanism of degradation process simulation of Mg wire/ PLA composite.

3. 결론

하중에 따른 Mg wire/PLA 복합재료 시편의 체액에서 의 분해 과정 및 기계적 성능 변화과정을 모사하기 위한 해석을 수행하였다. 해석결과, 압력이 0.9MPa 일 때 분해 속도가 압력이 0.1Mpa일 때 보다 20.7% 증가하였고, 동일한 압력에서 주기가 2.5Hz될 때 0.5Hz보다 23.2% 증가하는 것을 확인 되었다. 향후 본 연구에서 개발된 해석 기법을 사용하여 구멍이 있는 생분해성 복합재료 고정판 하중이 분해과정 및 기계적 성능에 미치는 영향을 예측할 예정이다.

참고문헌

- [1] DA Wiss et al. *Journal of bone and joint surgery*. 74.9:1279-1285, 1992.
- [2] Ruben et al. Polymers: 15(24).4667, 2023.
- [3] Rizvr et al. Composiet structure: 272. 114267, 2021.
- [4] Li et al. Acta Biomaterialia: 64: 269-278, 2017.
- [5] Che et al. Advanced Composite Materials: 33(5): 726-745, 2024.
- 후기

본 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00208286).

다중 물리 시뮬레이션 기반 이방성 열-기계적 특성을 고려한 등가모델링 활용 대면적 반도체 패키지의 워피지 예측

Prediction of the warpage for large-scale semiconductor package using equivalent model considering the anisotropic thermomechanical properties based on multiphysics simulation

유웅규^{1†}, 백정현¹, 박종휘¹,김학성^{1,2*} Woong-Kyoo Yoo1[†], Jung-Hyun Beak¹, Jong-Whi Park¹, Hak-Sung Kim^{1,2*}

¹ 한양대학교 기계공학과, ² 한양대학교 첨단 반도체 패키징 연구센터 E-mail: [†]Woong-Kyoo Yoo, ywk1105@gmail.com, ^{*}Hak-Sung Kim, kima@hanyang.ac.kr

Keywords: Semiconductor package, Reliability evaluation, Warpage, Equivalent model.

1. 서론

반도체 패키지의 워피지(warpage) 문제는 고연산 고효율 인공지능용 시스템 반도체의 운용과 생산에 치명적인 영향을 미친다. 특히, SOCAMM(System on Chip Advanced Multi-chip Module) 과 같은 대면적 패키지는 열-기계적 거동이 복잡하게 상호 작용하며, 워피지 문제는 전기적 연결 불량, 성능 저하, 시스템 고장을 초래할 수 있다 [1]. 따라서, 작동 중 열-기계적 해석 비용 저감이 가능한 신뢰성 평가 및 수명 예측이 가능한 새로운 해석 기법이 필요하다.

2. 워피지 예측을 위한 등가모델

2.1 자동패턴구분 기법 활용한 패키지 등가모델링 패키지 내 복잡한 패턴은 방향성과 Cu 분율 분석을 기반으로 구분된다. 먼저, HOG (Histogram of Oriented Gradients) 오픈소스 코드를 활용하여 회로 이미지를 분석하고, 구획별 패턴 방향성을 나타내는 행렬을 도출하였다. 이후, VF (Volume Fraction) 계산 코드를 이용해 회로를 구성하는 구리 배선과 절연체의 부피 분율을 계산하였다. 이렇게 얻어진 두 개의 행렬을 교차 연산하여 패턴별 방향성과 L/S(Line/Space)를 동시에 반영한 새로운 행렬을 생성하였으며, 이를 등가 모델에 적용함으로써 고집적 회로에 적합한 유효 등가 모델을 구축할 수 있었다.



Fig. 1. Results of equivalent pattern classification of complex circuit in semiconductor packages.

2.2 유효등가물성 계산

2.1 에서 분석된 등가 패턴을 활용하여 워피지를 예측하기 위해 등가 시뮬레이션 모델에 유효한 등가 물성의 반영이 요구된다. 이 때, 패키지 내 회로는 Cu 배선의 방향성에 따라 이방성을 띠므로, 방향별 물성 반영이 필수적이다. 또한, 폴리머(polymer) 기반 절연체는 점탄성을 띄므로, 방향성과 점탄성을 모두 고려한 이방성 점탄성 물성 적용이 중요하다 [2]. 패키지 작동 중 발생하는 열은 Cu 배선의 분포에 따라 방향에 따라 열이 다르게 전도되는 이방성 열전도도의 반영 또한 중요하다.

3. 패키지 작동 중 워피지 예측 시뮬레이션

등가 패턴에 반영되는 이방성 점탄성 물성은 소재의 비선형 거동을 고려한 유한 요소 해석을 통해 도출되었다. 또한, 이방성 열전도도는 Cu 배선과 비아(Via) 형상을 구분하여 방향별 등가 열저항을 기반으로 계산되었다. 계산된 물성은 ABAQUS 서브루틴(sub-routine)을 통해 적용되었다. 패키지 작동 중 워피지를 예측하기 위해 먼저 시간에 따른 열 전달 해석을 수행하여 각 노드 별 온도 분포를 도출하였으며, 이를 연성 해석 기법을 활용한 3차원 비선형 해석 모델에 적용하여 이방성 점탄성을 반영한 워피지를 예측하였다 [3].

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials



Fig. 2. Temperature and warpage prediction results during semiconductor operation

4. 결론 및 향후과제

위 결과로부터 이방성 점탄성 및 열 전도도가 반영된 반도체 패키지 해석 모델이 구축되었다. 추후, 고전력 열 테스트 (thermal test vehicle, TTV) 패키지 제작 및 침지 냉각(immersion cooling) 환경에서의 고전력 열 신뢰성 평가 및 예측 수행할 예정이다.

참고문헌

- Shih, Meng-Kai, Tai-Kuang Lee, and Jin-Gyao Chang. "Warpage modeling and characterization of intelligent power modules (IPMs)." Journal of Mechanics 37 (2021): 543-550.
- [2] Kim, Do-Hyoung, et al. "Anisotropic viscoelastic shell modeling technique of copper patterns/photoimageable solder resist composite for warpage simulation of multi-layer printed circuit boards." Journal of Micromechanics and Microengineering 25.10 (2015): 105016.
- [3] Cheng, Zhiqiang, et al. "Coupled thermo-mechanical analysis of 3D ICs based on an equivalent modeling methodology with sub-modeling." IEEE Access 8 (2020): 14146-14154.

후기

This research was supported by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by Ministry of Science and ICT(RS-2024-00428299). This work was supported by the Korea Planning and Evaluation Institute of Industrial Technology (KEIT) and Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE) of the Republic of Korea (RS-2024-00418263). This work was supported by Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government(MOTIE)(20212020800090, Development and Demonstration of Energy-Efficiency Enhanced Technology for Temperature-Controlled Transportation and Logistics Center)

성형 공정 중 변형에 따른 전기 전도도 변화를 고려한 전기차용 3D 복사 난방 히팅 모듈의 열 성능 예측

Heating simulation of 3D radiant heating modules for electric vehicles considering the forming process

*백정현 ¹, 김학성 ^{1,2+} * J.H. Baek ¹, H.S. Kim ^{1,2+}

¹ 한양대학교 기계공학부, ² 한양대학교 첨단반도체패키징센터 ⁺E-mail: kima@hanyang.ac.kr

Keywords: 3D Radiant heating module, Mechanical-Electro-Thermal integrated simulation, Forming, Joule-heating

1. 서론

기존 내연기관 차량은 엔진의 폐열을 활용하여 실내를 난방하는 반면, 전기차는 이를 대체할 별도의 고효율 난방 시스템이 필요하다. 또한, 자동차 실내 공간을 더욱 넓고 쾌적하게 구성하기 위해, 히터 설치 공간을 최소화할 수 있는 3차원 형상의 필름 면상 발열체 도입이 적극 검토되고 있다. 고연신성 필름을 이용해 3차원 곡면으로 성형할 경우, 발열부에 과도한 연신이 발생함에 따라 저항 증가를 초래할 수 있다[1]. 따라서, 고효율 복사히터 제작을 위해서는 설계 단계에서부터 필름 발열부의 연신에 의해 유도된 저항 변화를 고려하여 정확한 발열 성능을 예측하는 것이 중요하다.

2. PCT/CNT 필름의 연신에 따른 저항 특성 및 발열 평가

2.1 PCT/CNT 필름 고온 환경 기계/전기적 특성 평가 PCT/CNT 필름의 고온에서의 인장 특성과 전기 저항 변화가 동시에 측정되었다[2]. PCT/CNT 필름 시편은 동일한 0.065 mm 두께의 PCT 필름 두 장 사이에 0.05 mm 두께의 CNT 층이 삽입된 구조로 제작되었다. ASTM D-882 를 기반으로 DIC(Digital Image Correlation) 기법을 활용하여 PCT/CNT 필름의 연신율이 측정되었다. 동시에, PCT/CNT 필름에 전압이 인가된 상태에서 NI-DAQ 모듈(NI 9246)과 LabVIEW 소프트웨어를 이용하여 저항 변화가 측정되었다. 이를 통해 성형 온도에서의 PCT/CNT 필름의 연신율과 전기 저항 변화 간의 관계가 규명되었다.

2.2 PCT/CNT 필름 히터 샘플 발열 성능 평가

PCT/CNT 필름 히터 샘플은 CNT 패턴이 Ag 회로로 연결된상태에서 PCT 필름으로 합지하여 제작되었다. 필름 히터 샘플은 상온에서 1시간 이상 안정화 과정을 거친 후, 파워 서플라이를 통해 일정한 전압(DC 48V)을 인가하여 작동시켰다. 작동 중 필름 히터의 온도는 열전대와 열화상 카메라를 이용해 측정되었다.

3. PCT/CNT 필름 히터의 성형-발열 연계 해석

ABAQUS 상용 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 CNT-patterned PCT 필름이 열압착을 통해 Crash pad 형상으로 성형되는 과정을 모사하는 Dynamic 해석이 수행되었다. 이 과정에서 VUSDFLD 서브루틴을 이용해 실험적으로 측정한 연신율에 따른 저항 변화 물성을 CNT 패턴 필름에 반영하였으며, 이를 통해 성형 후 PCT/CNT 필름 히터의 부위별 전기저항이 도출되었다. 이후, 변형된 필름 히터 형상과 도출된 전기저항 분포가 Coupled thermal-electric implicit 발열 해석 모델에 Mapping 되어, Surface current 인가를 통한 Joule-heating 해석이 수행되었다.(Fig. 1.)



Fig. 1. Coupled forming and thermal simulation.

4. 결론 및 향후과제

필름 히터의 성형 온도에서 인장 시험을 수행하여 연신율과 저항 변화를 동시에 측정하였다. 또한, 발열부의 연신에 따른 저항 변화율을 반영한 유한요소해석 모델을 활용하여 필름 히터의 발열 성능을 예측하고, 이를 실증 실험 결과와 비교하여 모델의 정합성을 검증하였다. 분석 결과, 필름 히터 발열부의 연신에 따른 저항 변화를 고려하지 않을 경우, 발열 온도가 과도하게 높게 예측됨을 확인하였다. 이를 통해 성형 공정을 거쳐 제작된 필름 히터의 발열 성능을 정확히 예측하기 위해서는 히터 발열부의 연신에 따른 저항 변화율을 반드시 고려해야 함을 확인하였다. 부

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

참고문헌

- Matos, Miguel AS, et al. "Predictions of the electromechanical response of conductive CNT-polymer composites." Journal of the Mechanics and Physics of Solids 114 (2018): 84-96.
- [2] Park, Myounggu, Hyonny Kim, and Jeffrey P. Youngblood. "Strain-dependent electrical resistance of multi-walled carbon nanotube/polymer compositefilms." Nanotechnology 19.5 (2008): 055705.

후기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구 재단-나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00428299). 이 논문은 2021년도 정부(산업 통산자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20212020800090, 정온물류 운송 및 물류센터 에너지 효율화 기술 개발 및 실증.). 이 논문은 산업통상자원부(중앙행정기관)의 재원으로 한국산업기술 평가관리원을 통해 일부 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00418263).

윤활 이론 기반 전기-유체 상사성과 들로네 삼각분할을 활용한 연속섬유 강화 복합재료의 횡방향 투수계수 예측 알고리즘 개발 및 검증

Development and Verification of an Algorithm for Predicting Transverse Permeability of Continuous Fiber-Reinforced Composites using Electric-Fluid Analogy based on Lubrication Theory and Delaunay Triangulation

*배상윤¹, 조현성¹, 키야라누 푸트라 파카르티완¹, 조재영¹, 이선도¹, 김성수¹⁺ *S. Bae¹, H. Jo¹, Kiyaranu P. P.¹, J. Jo¹ S. Lee¹, S. S. Kim¹⁺

> ¹ KAIST 기계공학과 ⁺E-mail: seongsukim@kaist.ac.kr

Keywords: Fiber Reinforced Composite, Permeability. Delaunay triangulation, Circuit analogy

1. 서론

세계적으로 증가하는 섬유 강화 복합재료 수요에 따라 복합재료 제조 공정 개발 및 최적화에 대한 관심도 높아지고 있다. 본 연구에서는 공정 중 지속적으로 변화하는 섬유 배열을 반영하여 투수계수를 실시간으로 예측할 수 있는 알고리즘을 개발 및 검증하였다. 계산 시간을 단축하기 위해 전기-유체 상사성을 적용한 솔버를 개발하였으며, 복합재료 내부 공간의 회로화를 위해 들로네 삼각분할을 활용하였다. 개발된 알고리즘의 투수계수 예측 시간이 기존 상용프로그램 대비 비약적으로 감소하였다.

2. 본론

2.1 대표 체적 요소 생성

다양한 섬유 부피 분율을 가진 대표적인 부피 요소는 무작위 순차 확장 알고리즘을 사용하여 생성되었으며, 새로운 섬유 배치는 이전에 생성된 섬유와 겹치지 않고 주기 경계 조건을 충족하도록 배열되었다.

2.1 들로네 삼각분할을 활용한 대표 체적 요소 이산화

들로네 삼각분할을 활용해 섬유의 중심을 기준으로 대표 체적 요소 내부 공간이 삼각형들로 분할되었다. 최외곽에 생성되는 둔각삼각형이 제거함으로써, 대표 체적 요소의 주기 경계 조건을 만족시켰다.

2.3 전기-유체 상사성을 적용한 솔버 알고리즘

다공성 매질을 통과하는 유체의 유동은 분자 사이를 이동하는 전자의 유동과 매우 유사하다. 이에 윤활 근사와 회로 이론을 적용하여 다공성 매질의 투수계수의 역수인 유동 저항성을 도출할 수 있다. 본 연구에서는 다공성 매질 내부의 유체 압력 강하를 노달 회로 분석에서 전자의 위치 에너지 감소와 등가의 물리량으로 취급하여 평균 유동 저항성을 계산하였고 이를 scale factor를 적용해 투수계수를 도출하였다. 상용 프로그램을 통한 알고리즘 검증 툴인 알고리즘의 검증을 위해 상용 시뮬레이션 통해 ANSYS (FLUENT 2021 R1, ANSYS Inc., USA)를 동일한 대표 체적 요소에 대한 시뮬레이<u>쇼율</u> 진행하였다. 시뮬레이션을 통해 대표 체적 통해 내부의 유동 속도장을 확인하고, Darcy's Law를 투수계수를 도출하였다. 이를 Fig.1 과 같이 알고리즘



Fig. 1. Comparison of predicted permeability with reference data

4. 결론

결과와 비교하였다.

본 연구를 통해 연속섬유 강화 복합재료의 횡방務% 투수계수 예측 알고리즘이 개발되었다. 알고리즘은 이상의 높은 정확도를 가지며 투수계수의 확률좌 속성을 반영하였다. 또한, 상용 프로그램 대비 1700배의 평균 계산 속도 감소를 달성하였다.

참고문헌

- [1] S. Bae et al. Compos Res. 35.5 (2022): 334.339
- [2] Zarandi, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 119 (2019): 73-87.

후기

This work was supported by the National R&D Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by Ministry of Science and ICT (RS-2023-00260461)

This work was supported by Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korea Government(MOTIE). (2410006765, HRD Program for Industrial Innovation)

복합재 고속 물성 분석을 통한 열경화성, 열가소성 복합재 충돌 흡수 장치 설계 Design of Crash Absorption Devices Using Thermoset and Thermoplastic Composites Through High-Speed Material Property Analysis of Composites

*지승민¹, 조성욱¹, 권승호¹, 전성식¹⁺ * S.M. Ji¹, S.W. Cho², S.H. Kwon², S.S. Cheon¹⁺

> ¹ 공주대학교 기계공학과 ⁺E-mail: sscheon@kongju.ac.kr

Keywords: Crash tube, Damage parameter, Composite materials

1. 서론

압착 구조물은 항공기 및 자동차를 포함한 많은 응용 분야에서 충돌 시 에너지를 흡수하고 탑승자와 중요 구성 요소를 높은 가속도로부터 보호하는 데 사용된다. 복합재를 이용한 에너지 흡수 구조물은 강도 및 강성 조정 가능성과 감소된 무게로 동등한 구조적 성능을 제공하는 능력으로 인해 금속 구조물에 비해 뚜렷한 이점이 있다 [1, 2]. 하지만두 개 이상의 재료가 합쳐진 복합재의 파괴 거동을 예측하는 것에는 어려움이 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 시편단위의 복합재 고속 압축 물성 분석을 통해 부품 단위의 crash tube의 수지에 따른 충돌 흡수를 위한 트리거 설계 방법에 대해 분석되었다.

2. 복합재료 충격 흡수 장치

2.1 복합재 고속 물성 분석

복합재의 in-plane 방향 고속 압축 물성을 분석하기 위해서 열경화성 수지관련한 물성 분석은 Koerber and Camanho의 split-Hopkinson pressure bar (SHPB) 실험을 통한 Carbon/Epoxy 소재의 고속 압축 시험 결과를 바탕으로 분석되었다 [3]. 또한, 열가소성 수지관련한 물성 분석은 Pan et al의 SPHB 실험을 통한 Carbon/PEEK 소재의 고속 압축 시험 결과를 바탕으로 분석되었다 [4].

2.2 Crash tube 유한요소해석 모델

본 연구에서는 차량의 crash box와 항공기의 strut과 같은 충돌 시 에너지를 소산시키기 위해 많이 사용되는 구조물 중 실린더 형태의 crash tube를 바탕으로 수지 변화에 따른 trigger 설계 영향에 대한 분석이 진행되었다.

Fig. 1은 열경화성 복합재의 trigger 위치에 따른 충격 흡수 성능 변화를 비교하기 위해서 진행된 해석 모델들로 (a)는 trigger가 없는 기본 모델이고, (b)는 상단에 trigger를 위치해 충격 방향을 변경시키는 모델, (c)는 중앙에서 좌굴을 유도하기 위한 모델이다.



Fig. 1 Configuration trigger types



Fig. 2 Crash analysis result by trigger types

3. 결과 고찰

Fig. 2는 trigger 위치에 따른 하중-시간 결과 그래프이다. Trigger가 상단에 위치할 경우 최대 하중은 기존 모델보다 낮아지지만 이후 지지 하중이 증가하면서 에너지 흡수율이 높아지는 것을 확인할 수 있고 trigger가 중앙에 위치할 경우 최대 하중은 기존 모델과 유사하게 나타나지만 이후 지지 하중이 낮게 나타나 에너지 흡수율이 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

참고문헌

- [1] J Ye et al. Compos Struc. 279:114856, 2022.
- [2] W Bai et al. Compos Sci. Tech.. 234:109946, 2023.
- [3] H. Koerber et al. Compos. Part A, 42:462470, 2011.
- [4] Z. Pan et al. Int. Mech. Sci., 235:107740, 2022.

후기

- 278 -

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획 평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 ('20017947').
복합소재 함정에 대한 건조 및 인증 현황 소개

Overview of Construction and Certification Status of Composite Material Naval Vessels

*김영성 ¹, 정민재 ², 이요한 ³ * Y.S. Kim ¹, M.J. Jung ², Y.H. Lee ³

¹²³ 한국선급

⁺E-mail: kimys@krs.co.kr

Keywords: Composite Material Naval Vessels, FRP, HDPE, Korean Register

1. 서론

최근 해군/해경 및 해양산업에서 경량화와 내구성을 동시에 확보할 수 있는 복합재료 함정 및 선박에 대한 관심이 증가하고 있다. 복합재료는 기존의 강재나 알루미늄 소재에 비해 높은 내충격성과 내식성을 갖추고 있어 차세대 소형함정/선박 개발의 주요 요소로 부각되고 있다. 본 연구에서는 국내 복합소재 함정의 건조 현황과 함께, 주요 인증 절차 및 기술적 요건을 종합적으로 분석하였다.

2. 복합재료 함정의 건조 현황

2.1 FRP 함정 건조 현황

FRP(Fiber Reinforced Plastic, 섬유강화플라스틱)는 가벼우면서도 높은 강도와 내구성을 제공하는 특성을 갖고 있어 소형 함정을 중심으로 널리 활용되고 있다. FRP 함정은 전통적인 강재 함정에 비해 부식에 강하고, 비자성을 갖으며, 유지보수가 용이하고, 생산 공정이 상대적으로 간소화될 수 있다는 장점이 있다. 이에 따라, 국내·외 조선소에서는 FRP를 활용하여 고속단정, 소해함정, 잠수함(외부선체) 등에 건조가 활발하게 이루어지고 있다.

2.2 HDPE 함정 건조 현황

HDPE(High Density Polyethylene, 고밀도 폴리에틸렌) 은 최근 친환경 복합재료로 각광받으며 소형 선박 및 함정 건조에 적용이 확대되고 있다. FRP와 비교했을 때, HDPE는 우수한 내충격성, 높은 내식성, 용접을 통한 쉬운 수리 및 재활용 가능성을 갖추고 있다. 이에 따라, 해양오염 문제를 줄이고 유지보수 비용을 절감할 수 있는 대안으로 연구 및 실용화가 진행되고 있다.

국내외에서 HDPE 선박이 적용된 사례를 보면, 어선, 구조정, 해군/해경 소형함정 등에서 활용되고 있으며, 특히 미국, 터키, 유럽 국가들을 중심으로 HDPE 기반의 고속정과 상업용 선박 건조가 활발하게 이루어지고 있다.

3. 복합재료 함정의 선급인증 절차 3.1 FRP 함정 선급인증 절차

FRP 함정의 선급인증 절차는 함정의 안전성과 성능을 확보하기 위한 필수 과정이다. 선급인증은 함정의 설계, 건조, 운용에 있어 국제 및 국내 규정을 준수하는지 평가하는 과정으로, 도면승인, 제조중 검사, 운용간 검사 등 단계별 검사 절차를 포함한다. 본 절에서는 FRP 함정의 선급인증 절차를 한국선급의 "FRP선 규칙(2020)"을 바탕으로 상세히 기술한다.

3.2 HDPE 함정 선급인증 절차

친환경 선박 재료로 주목받고 있는 HDPE는 특성상 열팽창, 기계적 강도 변화, 용접 특성 차이 등이 존재하며, 이에 따라 기존 선급인증 기준과는 차별화 된 절차가 요구된다.

한국선급은 "KR_Polyethylene 재질 선박에 대한 지침서"를 통해 HDPE 선박의 설계, 건조, 검사 및 선급등록에 대한 지침을 제공하고 있으며, 선급유지와 정기검사를 통해 지속적인 안전성을 확보해야 한다.

4. 환경적 장점 및 지속 가능성

최근 해양 환경 보호와 지속 가능한 선박 건조 기술에 대한 관심이 증가함에 따라, HDPE 함정이 기존 강재 및 FRP 함정을 대체할 수 있는 친환경 대안으로 주목받고 있다. HDPE는 재활용 가능성, 내식성, 낮은 탄소 배출량 등의 특성을 갖추고 있어 해양 환경 보전에 기여할 수 있다. HDPE 함정의 환경적 장점과 지속 가능성을 평가하고, 향후 발전 방향을 제시한다.

5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 국내 복합재료 함정의 건조 현황과 함께, 선급 인증 절차 및 기술적 요건을 분석하였다. 이를 통해 복합재료 함정의 설계 및 건조 과정에서 고려해야 할 인증 요소를 제시하고, 향후과제를 도출하였다. 본 연구 결과는 복합재료 함정 개발 및 관련 정책 수립에 기여할 것으로 기대된다.

Application of Modified Burn-Off Testing in Sustainable Marine Composites

*Daekyun Oh¹, Jean-Baptiste R. G. Souppez² and Jaewon Jang³⁺

¹ Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University, ² Department of Mechanical,

Biomedical and Design Engineering, Aston University, UK, ³ Industry-Academy Cooperation Foundation of Mokpo National Maritime University

⁺E-mail: wodnjs1910@naver.com

Keywords : Marine composites, Natural fiber, Glass content, Burn-off test, Ship design

1. Introduction

Natural fibers, such as hemp and flax, are sustainable materials that offer biodegradability, low density, and lightweight advantages. These properties have led to their increasing application in the automotive and construction industries, with marine applications also showing promising potential[1][2]. However, cellulose-based fibers have inherent challenges, including moisture absorption at ambient conditions and interfacial adhesion issues between fibers and the polymer matrix, necessitating optimized fabrication techniques.

In hemp fiber composites, increasing the fiber volume fraction results in higher moisture absorption, which can lead to degradation in mechanical properties[3]. Since composite structures must maintain consistent glass content as per design specifications[4][5], it is crucial to investigate the effects of moisture absorption on glass content in hemp- and flax-based natural fiber composites. However, due to the boiling point variations between cellulose fibers and synthetic resins, conventional burn-off test methods[6] are not applicable. Thus, an adapted version of ASTM D3171 was employed in this study to accurately evaluate the fiber content of hemp and flax composite materials using a modified burn-off test.

2. Characteristics of Sustainable Composite Materials

Hemp and flax fibers, as cellulose-based reinforcements, exhibit moisture sensitivity at ambient temperatures, with an absorption capacity of up to 10–15%[7]. However, this is highly dependent on environmental humidity, fiber type, matrix properties, fiber-matrix interface treatment, and alkaline chemical modifications. Additionally, moisture absorption behavior varies with ply number, specimen surface exposure, and fabrication technique.

A key concern is that as the fraction of natural fiber increases within a composite laminate, the overall moisture absorption rate also rises, potentially leading to reduced mechanical strength[8]. Consequently, accurately assessing the natural fiber fraction within laminate composites, particularly the glass content (Gc%), is essential for ensuring material consistency and reliability.

3. Methodology

3.1 Non-Wood Cellulose Hemp and Flax Composites

The study fabricated non-wood cellulose-based hemp and flax composites using chopped strand mat (CSM) reinforcements with epoxy resin. The material configurations are as follows:

- Hemp Composite Laminates:
- Hand-Laminated: 9-ply, $t \approx 2.8$ mm, Gc $\approx 45\%$
- Vacuum-Infused: 7-ply, $t \approx 3.7$ mm, Gc $\approx 39\%$
- Flax Composite Laminates:
- Hand-Laminated: 4-ply, $t \approx 6.0$ mm, Gc $\approx 17\%$
- Vacuum-Infused: 5-ply, $t \approx 6.0 \text{ mm}$, $Gc \approx 29\%$

3.2 Modified Burn-Off Test for Natural Fiber Composites A modified burn-off testing method was implemented to accurately measure fiber content while considering the thermal decomposition characteristics of natural fibers. The process included: Pre-heating of specimens in an electric furnace to eliminate moisture content. Burn-off and cooling cycles, where specimens were subjected to controlled combustion before the epoxy matrix was fully calcinated. Final fiber content measurement, by weighing the remaining hemp and flax fibers after burn-off[9].

4. Results and Discussion

The study analyzed moisture absorption behavior and void content in hemp and flax composites based on preheating and burn-off testing.

- 4.1 Moisture Absorption Analysis after Pre-heating
 Hemp Composites:
 - Hand-Laminated: Moisture reduction of 3.2%.
- Vacuum-Infused: Moisture reduction of 1.59%.
 Flax Composites:
- Hand-Laminated: Moisture reduction of 2.86%.
- Vacuum-Infused: Moisture reduction of 1.09%.

4.2 Void Content Evaluation

- Hemp Composites:
- Hand-Laminated: Void Content: 13.82–16.17%
- Vacuum-Infused: Void Content: 4.31–6.41%
- Flax Composites:
- Hand-Laminated: Void Content: 21.95–29.32%
- Vacuum-Infused: Void Content: 8.02–11.66%

Hemp composites exhibited slightly higher moisture absorption compared to flax composites. Flax composites had a significantly higher void content, suggesting greater porosity and lower fiber-matrix adhesion. Vacuum infusion significantly reduced void content, demonstrating improved fiber wetting and matrix infiltration compared to hand-laminated specimens.

5. Conclusion

The modified burn-off test successfully quantified fiber content in hemp and flax composite laminates, accounting for the moisture sensitivity and combustion characteristics of natural fibers. The findings indicate that:

- Hemp composites absorbed more moisture than flax composites, which may affect long-term mechanical properties.
- Flax composites had higher void content, highlighting potential fabrication challenges.
- Vacuum infusion yielded superior laminate quality, minimizing void content and enhancing fiber-matrix bonding.

These results provide critical insights for the standardization of natural fiber composite materials in marine applications, contributing to the ongoing development of sustainable composites for regulatory inclusion[2]. However, it should be noted that these results may vary depending on fiber type and specimen dimensions, and further studies are required to validate findings across a broader range of natural fiber composites.

References

[1] Souppez, J.-B. R. G., Jang, J., & Oh, D. (2024, November). Future trends in sustainable marine composite materials and regulations. *Proceedings of the 2024 Fall Conference of the Korean Society for Composite Materials*, Busan, South Korea.

[2] Souppez, J.-B. R. G., Rodríguez Ruiz, P., Raihan, M. A., & Oh, D. (2025). Towards the regulatory inclusion of sustainable composite materials. *Conference on Composite Structures and Yacht Sustainability (CSYS 2025)*.

[3] Dhakal, H. N., Zhang, Z. Y., & Richardson, M. O. W. (2007). Effect of water absorption on the mechanical properties of hemp fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Composites Science and Technology*, 67(7–8), 1674–1683.

[4] Han, Z., Jang, J., & Oh, D. (2022). Effects of fabric combinations on the quality of glass fiber reinforced polymer hull structures. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 14, 100462.

[5] Jang, J., Maydison, Kim, Y., Han, Z., & Oh, D. (2023). Effect of void content on the mechanical properties of GFRP for ship design. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(6), 1251.

[6] Han, Z., Jeong, S., Noh, J., & Oh, D. (2020). Comparative study of glass fiber content measurement methods for inspecting fabrication quality of composite ship structures. *Applied Sciences*, 10(15), 5130.

[7] Chandramohan, D., & Bharanichandar, J. (2018). Effect of moisture absorption on the properties of natural fiber reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 294–298.

[8] Atmakuri, A., Palevicius, A., Janusas, G., & Eimontas, J. (2022). Investigation of hemp and flax fiber composites in maritime applications.

[9] Jang, J., Souppez, J.-B. R. G., & Oh, D. (2024). Burn-off testing for natural fiber in sustainable marine composites. In 2024 Fall Conference of the Korean Society for Composite Materials (p. 2). *Korean Society for Composite Materials*.

Acknowledgement

This work was funded by the Lloyds Register Foundation of the UK, and the author would like to express his most sincere thanks to Dr. Jean-Baptiste R. G.Souppez.

Enhanced Prediction Performance for Internal Defect Detection of Wind Turbine Blades using Synthetic Data-Based Deep Learning

*Haemyung Chon¹, Taegyeong Jeong² and Jackyou Noh²⁺

¹ The Innovation Research Center for Giant Wind Turbine System, Kunsan National University, ² Department of Naval Architecture, Kunsan National University

⁺E-mail: snucurl@kunsan.ac.kr

Keywords : wind turbine blade, defect detection, internal defect, thermal inspection

1. Introduction

Wind turbine blades can develop internal defects over time due to prolonged use and external environmental factors, which may lead to reduced efficiency and significant economic losses [1]. Traditional infrared thermographic inspection methods heavily rely on the inspector's experience, resulting in inherent limitations [2,3,4,5]. This study proposes a novel approach that automatically detects internal defects using deep learning models (ResNet-50 [6], DenseNet-121 [7], and ViT [8]) based on synthetic thermographic data. To achieve this, a preprocessing technique—referred to as the Transformation Module was introduced to align synthetic and real data by minimizing the domain gap, thereby overcoming issues related to class imbalance and the challenges of data collection.

2. Thermography Data Collection and Preparation

2.1 Real and Synthetic Thermographic Image Dataset Generation

For simulated wind turbine blade specimens made from composite materials (CFRP, GFRP), thermographic images were captured using a FLIR E96 infrared camera after heating them to a constant temperature with an embedded heating panel. The specimen thickness was selectively combined in four cases: with CFRP thicknesses of 2.4 mm and 2.9 mm, and GFRP thicknesses of 3.6 mm and 6.3 mm. For the defective specimens, defect sizes were configured as 10 mm × 10 mm, 20 mm × 20 mm, 30 mm × 30 mm, 35 mm × 35 mm, 40 mm × 40 mm, and 50 mm × 50 mm. A real thermographic image sequence was created using six non-defective specimens and twenty defective specimens.

To overcome the limitations of anomaly detection environments where obtaining real data is challenging, synthetic thermographic data for defective specimens were generated. Using the FEM in Ansys, 26 3D synthetic specimen models were created that reflect the material properties and defect conditions (such as thickness, defect location, and defect size) of the real specimens. Then, based on the temperature distribution data obtained from heat transfer analysis within the models, synthetic thermographic images similar to real thermographic images were produced.

2.2 Transformation Process

Synthetic data exhibits a domain gap due to differences in the acquisition environment compared to real data. To address this, a Transformation Module was employed to reduce the gap between synthetic and real data. The Transformation Module consists of a product layer and a noise layer. The product layer reconstructs the grayscale image by symmetrically reconfiguring only those pixel values above the average, thereby adjusting the temperature differences to more closely resemble those in the real data. The noise layer further transforms the data using style transfer [9] techniques and a random variable matrix to mimic the nonlinear characteristics of real thermographic data. Through this process, the statistical properties of the synthetic thermographic data, such as its mean and standard deviation, are adjusted to be more similar to those of the real data.



Fig. 1. Transformation module

3. Performance Evaluation and Analysis

3.1 Impact of Preprocessing on Model Performance

After applying the Transformation Module to the synthetic data, ResNet-50's accuracy improved by 3.54% and the ViT model by 7.3%. Additionally, DenseNet-121's precision increased by 9.71%. When evaluating the same real thermographic data on models before and after preprocessing, it was confirmed that the preprocessed data reduced the domain gap, enabling the deep learning models to learn the actual defect patterns more accurately.

After applying the preprocessing, both ResNet-50 and ViT showed improved similarity between real and

synthetic data in their feature maps, resulting in enhanced defect detection accuracy and reliability. However, DenseNet-121 exhibited relatively insufficient preprocessing effects, with some evaluation metrics showing only minor improvements or even declines. Each model demonstrated different influences on data adaptation after preprocessing due to their structural characteristics (such as residual connections, dense connections, and patch-based transfer).



(a) RD78-50 at 4 seconds (b) RD78-50 at 150 seconds Fig. 2. Real and Synthetic Thermographic Image

3.2 Analysis of Model Performance Based on Defect Depth and Size

It was confirmed that the detection performance of the deep learning models varies depending on the defect and its size in the specimens. While deeper or larger defects are easier to detect due to a distinct temperature difference, shallower or smaller defects tend to be more difficult to detect because of subtle temperature changes. The application of the preprocessing technique suggests that the models' sensitivity and accuracy have generally improved across various defect conditions.

4. Conclusion

This study confirmed that by utilizing synthetic data to overcome the limitations of data collection and class imbalance, and by effectively reducing the domain gap between synthetic and real thermographic data through a preprocessing technique, the predictive performance of internal defect detection in wind turbine blades was improved. In particular, the ResNet-50 and ViT models showed remarkable performance improvements after preprocessing, thereby enhancing the practical viability of deep learning-based defect detection systems.

References

- Technical Application Papers, No.13-Wind Power Plants. https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID
 =1SDC007112G0201&LanguageCode=en&DocumentPartI
 d=&Action=Launch (accessed on 13 December 2024).
- [2] Keegan, M.H.; Nash, D.H.; Stack, M.M. On erosion issues associated with the leading edge of wind turbine blades. J. Phys. D Appl. Phys. 2013, 46, 383001.
- [3] Sheng, S.; Yang, W. Wind turbine drivetrain condition monitoring-an overview (presentation). In Proceedings of the 2013 ASME Turbo Expo, San Antonio, TX, USA, 3–7 June 2013.
- [4] Lin, Y.; Tu, L.; Liu, H.; Li,W. Fault analysis of wind turbines in China. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016, 55, 482–490.

- [5] Du, Y.; Zhou, S.; Jing, X.; Peng, Y.; Wu, H.; Kwok, N. Damage detection techniques for wind turbine blades: A review. Mech. Syst. Signal Process. 2020, 141, 106445.
- [6] He, K.; Zhang, X.; Ren, S.; Sun, J. Deep residual learning for image recognition. In Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Las Vegas, NV, USA, 30 June 2016.
- [7] Huang, G.; Liu, Z.; Van Der Maaten, L.; Weinberger, K.Q. Densely connected convolutional networks. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Honolulu, HI, USA, 21–26 July 2017; pp. 4700–4708.
- [8] Dosovitskiy, A.; Beyer, L.; Kolesnikov, A.; Weissenborn, D.; Zhai, X.; Unterthiner, T.; Dehghani, M.; Minderer, M.; Heigold, G.; Gelly, S.; et al. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. arXiv 2020, arXiv:2010.11929.
- [9] Gatys, L.A.; Ecker, A.S.; Bethge, M. Image style transfer using convolutional neural networks. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Las Vegas, NV, USA, 27–30 June 2016; pp. 2414–2423.

Acknowledgement

This work was partly supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea (No. RS-2023-00301997) and partly supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP) grant funded by the Korea government(MOTIE) (20224000000220, Jeonbuk Regional Energy Cluster Training of human resources).

Environmental Impact Assessment of the Lightweight Design Effect of CFRP Ship based on LCA

* Zhiqiang Han¹, Jiwon Park² and Daekyun Oh³⁺

¹ School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, ² Department of Ocean System Engineering, Graduate School, Mokpo National Maritime University, ³ Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National Maritime University

⁺E-mail: dkoh@mmu.ac.kr

Keywords : CFRP, Carbon fiber weight fraction (Gc), Hull structure design, Life Cycle Assessment (LCA).

1. Introduction

Nowadays, innovative ship design and materials like carbon fiber-reinforced polymers (CFRP) are critical. CFRP's superior strength-to-weight ratio enables vessel lightweighting, reducing fuel consumption and emissions. However, CFRP's energy-intensive production raises environmental concerns. This study employs Life Cycle Assessment (LCA) to evaluate CFRP lightweight design impacts across production and operational phases, which is the main phase of a typical vessel, taking a 36-foot CFRP patrol as a case study.

2. Method

The authors previously developed a lightweight design method for FRP hull laminates. This method optimizes the specific strength of materials by adjusting the fiber weight ratio (Gc) in composite laminates while complying with ISO standards and RINA classification rules, thereby achieving hull structural weight reduction. This study conducted a lightweight design for outer plates of a 36-foot CFRP patrol boat based on Gc optimization algorithm in accordance with RINA rule.

The Life Cycle Assessment (LCA) method was applied to evaluate environmental impacts, focusing on production and operational phases to analyze the effect of lightweight effect of hull structure on environmental impacts.

3. Results and Discussion

3.1 Lightweight effect of Target ship

The weight reduction was achieved by lightweight design. However, due to the overall increase in Gc across structural laminates, the absolute weight of carbon fiber increased by 39.77 kg (17.21% growth), resin usage decreased from 346.59 kg to 234.59 kg, representing a 32.31% reduction. This demonstrates that the CFRP hull lightweight design method enhances structural strength through increased fiber utilization while reducing resin consumption, ultimately leading to a net decrease in total hull mass.

3.2 LCA results

The LCA results reveal a trade-off in environmental impacts between the production and operational phases of CFRP hull lightweight design. During the production phase, the energy-intensive production of carbon fiber increased the Global Warming Potential (GWP) by 10.24%. Conversely, the operational phase demonstrated a 4.13% reduction in GWP due to fuel savings (cumulatively 323.98 tons over a 25-year lifespan) enabled by hull mass reduction.

Critically, the long-term operational benefits substantially offset the elevated environmental burdens incurred during production, highlighting the necessity of lifecycle-oriented optimization for sustainable maritime decarbonization.







Fig. 2. Global Warming Potential of operational phase (25 years)

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant, funded by the Korean Government (MOTIE) (P0017006, The Competency Development Program for Industry Specialist).

천연섬유의 Glass Content 검증을 위한 수정된 ASTM 시험법 Revised ASTM Test Method for Determining Glass Content in Natural Fiber Composites

*장재원¹, 박지원², 이진혁², Jean-Baptiste R. G. Souppez³, 오대균⁴⁺ * J.W. Jang¹, J.W. Park², J.H. Lee², Jean-Baptiste R. G. Souppez³, D.K. Oh⁴⁺

¹ 국립목포해양대학교 스마트야드전문인력양성사업단, ² 국립목포해양대학교 대학원, ³ Department of Mechanical, Biomedical and Design Engineering, Aston University, UK, ⁴ 국립목포해양대학교 조선해양공학과 ⁺E-mail: dkoh@mmu.ac.kr

Keywords: Marine composites, Natural fiber, Glass content, Burn-off test

1. 서론

유리섬유강화플라스틱 (Glass Fiber Reinforced Plastics, GFRP)는 우수한 비강도, 내구성, 가공성, 내식성 등의 장점으로 선박, 항공, 자동차 등의 분야에서 널리 사용되어 왔다 [1]. 하지만 유리섬유와 같은 함성섬유는 재활용이 어렵고, 생 분해되지 않아 전 세계적으로 친환경 소재를 도입하기 위한 노력에 한계를 가지고 있다. 이와 같은 이유로 대마 (Hemp), 아마 (Flax)와 같이 완전 분해가 가능한 천연섬유 [2]가 유리섬유의 대안으로 수요가 늘어나고 있다. 천연섬유를 활용한 해양 복합재를 선박의 구조로 활용하기 위해서는 재료의 섬유 함량 (Glass Content, Gc)과 Void와 같은 내부결함을 파악하는 것이 중요하다 [3]. 기존 GFRP는 Burn-off test를 통하여 Gc와 내부결함을 파악 가능하지만, 천연섬유 복합재 (Natural Fiber Reinforced Plastics, NFRP)의 경우 천연섬유의 특성을 고려하여 기존의 시험법을 수정해야 파악이 가능하다. 본 연구에서는 천연섬유의 특성을 고려하여, NFRP의 Gc와 내부결함 확인이 가능한 수정된 시험법을 제안하고자 한다.

2. 연구내용

2.1 기존의 Burn-off Test와 천연섬유의 특성

Burn-off test는 GFRP의 유리섬유 함량과 내부결함을 파악하기 위한 가장 정확한 방법으로 알려져 있다. Burn-off test는 GFRP 시편을 구성하는 유리섬유와 수지 (Resin)의 burn-off 되는 온도차이를 활용하여 복합재 내의 구성비와 결함을 검출하는 방법이다. 즉 burn-off 전과 후의 시편의 무게를 비교하여 정확한 구성비와 결함을 확인할 수 있다. 선행 연구들에 따르면 일반적으로 수지는 500 ~ 600℃에서 burn-off되며, 실험시간은 시편의 두께에 따라 변화하며 300분 이내로 종료된다.

천연섬유인 대마 (Hemp)와 아마 (Flax)는 유리섬유와 달리 셀룰로스(Cellulose), 헤미셀룰로스 (Hemi-cellulose), 리그닌 (Lignin) 등으로 이루어져 있다. 또한 물과 친화적인 성질을 띠고 있으며, 본질적으로 화학구조 내에 약 7 ~ 12%의 수분을 함유하고 있다[4]. 다음으로는 유리섬유 대비 낮은 발화점 (Ignition Point)을 가지는 특징이 존재한다. 일반적인 유리섬유는 불연성 (Incombustible) 소재로 연화점 (Softening Point)이 약 850 ~ 900℃, 용응점 (Melting Point)이 1100℃ 이상으로 알려져 있다. 반면 천연섬유의 경우 발화점이 약 200 ~ 300℃로 유리섬유 대비 낮은 온도에서 발화가 시작된다. 또한 점화되면서 수지와 화학적 반응 (Sooting)이 발생하기도 한다. NFRP의 경우 이와 같은 특징들이 존재하기 때문에 기존의 Burn-off test로 Gc와 내부결함을 파악하는데 어려움이 존재한다.

2.2 천연섬유의 특성을 고려한 수정된 Burn-off test

정리된 천연섬유의 특성을 고려하여, 수정된 Burnoff test는 Fig. 1과 같다. 기존의 Burn-off test 방법과 달리 NFRP의 정확한 분석을 위해서 시편 내부의 수분을 사전 건조하였으며, 온도와 시간은 선행 연구결과를 참고하여, 50 ~ 70℃로 2 ~ 3시간 진행하였다. 또한 기존의 Burn-off test 방법과 달리 섬유를 하소(Calcination)시켜 남은 수지의 무게를 측정하여 Gc와 내부결함을 확인하였다. 섬유를 하소 시키기 위한 온도는 대마 (Hemp)와 아마 (Flax)의 발화점을 고려하여 200 ~ 300℃로 5분 간격으로 실험을 진행하였다.



Fig. 1. Revised burn-off test

3. 결론 및 고찰

수정된 Burn-off test 방법에 따라 수적층 (Hand layup), 진공적층 (Infusion)으로 만들어진 대마 (Hemp)와

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

아마 (Flax)로 만들어진 NFRP의 Gc와 내부 결함을 측정하였다. 그 결과 기존의 Burn-off test와 동일하게 NFRP의 Gc와 적층공법에 따른 내부결함 검출이 가능함을 확인하였다 (Fig 2).



Fig. 2.Revised burn-off test results.

대마 (Hemp) 섬유로 제작된 NFRP의 경우 약 230℃에서 섬유가 발화하였으며, 시편에 따라 편차는 존재하지만 약 300분 내외로 검출이 가능함을 확인하였다. 아마 (Flax) 섬유로 제작된 NFRP의 경우 대마 (Hemp) 보다 소폭 낮은 210℃에서 약 1000분 내외에서 검출이 가능함을 확인하였다. 기존의 Burnoff test를 기반으로 사전 건조, 가열 온도를 수정하여 천연섬유 특성을 반영한 수정된 Burn-off test를 활용하면 NFRP의 Gc와 내부결함을 정확하게 측정 가능할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Summerscales, J., et al. Mar. Appl. Fibre-Reinf. Compos. 185-213, 2016.
- [2] Diversitech Global. 2024.
- [3] Jang, J., et al. J. Mar. Sci. Eng. 11:6, 2023
- [4] Cho, D., and Kim, H. Elastomer and Composites. 44:1, 2009

후기

본 연구는 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업 기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (P0017006, 2025년 산업혁신인재성장지원사업).

현무암섬유강화복합재의 열적 재활용에 관한 연구 A study on thermal recycling methods of basalt fiber reinforced polymer

*김진균¹, 전해명², 노재규¹⁺ * Jingyun Kim¹, Haemyung Chon², Jackyou. Noh³⁺

¹ 국립군산대학교 조선공학과, ² 국립군산대학교 초대용량풍력발전시스템혁신연구센터 ⁺E-mail: wlsrbs0303@kunsan.ac.kr

Keywords: Basalt Fiber Reinforced Polymer, Thermal recycling

1. 서론

풍력 블레이드는 주로 유리섬유 또는 탄소섬유 기반의 복합재로 제작된다. 이 중 유리섬유는 일반적으로 재활용이 어렵고, 재활용 시 경제성이 확보되지 않아 풍력 블레이드의 수명이 끝난 후 폐기물로 처리된다. 이러한 복합재 폐기물은 환경 오염의 원인이 될 수 있다. 이를 해결하기 위해서는 풍력 블레이드 제작에 사용되는 재료들의 재활용 가능성을 높이기 위한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 가열 온도 및 가열 시간에 따른 현무암섬유 강화복합재의 손상 정도 비교를 통해 풍력 블레이드에 사용되는 현무암섬유강화복합재의 열적 재활용 방안을 제시하고자 한다.

2. 현무암섬유강화복합재의 열적 재활용

2.1 가열 방법

Feih et al., (2011) [1]의 연구에 따르면 복합재료 제작에 사용되는 폴리머 수지는 300℃-400℃에서 분해가 시작되며, 가열 과정 중 섬유의 기계적 특성에 큰 영향이 없다. 이에 따라, 본 연구에서는 현무암섬유에 대해 다양한 가열 온도 및 가열 시간에 따라 손상 정도를 비교하였다. 현무암섬유 가열에는 머플 가열로 (muffle furnace)를 사용하였으며, 온도는 150℃, 200℃, 250℃, 300℃, 350℃, 450℃, 600℃, 시간은 300s, 900s, 1,800s, 3,600s, 7,200s 로 총 35개의 case에 대해 비교를 수행하였다.

2.2 가열 온도 및 가열 시간에 따른 손상 정도 비교 가열 온도 및 시간에 따른 현무암섬유의 손상 정도를 비교할 기계적 특성으로는 현무암섬유 가닥(filament)의 파단 강도를 선정하였다. 현무암섬유 필라 멘트의 파단강도 및 탄성계수 측정을 위해 ASTM C1557-20 표준[2]을 준수하여 인장 시험을 진행하였다.

3. 손상정도 비교 결과 및 분석

인장 시험 결과, 150℃에서 가열된 섬유의 평균 파단강도는 가열 시간이 길어짐에도 불구하고 파단강도 감소가 미비했으며, 200℃-300℃ 온도 구간



Fig. 1. The measurement results of the fracture strength of basalt fiber at different heating temperatures and times

에서는 가열 시간이 길어짐에 따라 점차 감소하는 경향을 확인하였다. 350℃ 이상, 특히 600℃에서 가열된 현무암 섬유의 파단강도는 짧은 시간 가열되었음에도 불구하고, 파단강도가 급격히 감소하는 특성을 보였다.

4. 결론

비교적 저온에서 재활용 된 현무암 섬유는 다시 복합재료 형태로, 고온에서 재활용 된 복합재는 다른 방법, 형태로 재활용 하는 것이 효율적인 재활용 방안으로 판단된다.

참고문헌

- [1] S Feih et al. Mechanical properties of termally treated and recycled glass fibres. *Compos B Eng 42*. 3:350-358, 2011.
- [2] ASTM C1557-20 Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus of Fibers, 2020.
- [3] T Bhat et al., Properties of thermally recycled basalt fibres and basalt fibre composites. *Composites*, 53:1933-1944, 2018.

후기

본 연구의 일부는 산업통상자원부(MOTIE)의 제원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 연구 과제(과제번호: RS-2023-00301997)의 지원을 받아 수행되었으며, 일부는 산업 통상자원부(MOTIE)의 제원으로 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 연구 과제(과제번호: 20224000000040)의 지원을 받아 수행되었습니다.

해상풍력발전기 블레이드 복합재료 결함 검출 방법에 관한 연구 A Study on Defect Detection Methods for Composite Materials of

Offshore Wind Turbine Blades

*정태경¹, 전해명², 노재규¹⁺ * Taegyeong Jeong¹, Haemyung Chon², Jackyou Noh¹⁺

¹ 국립군산대학교 조선공학과, ² 국립군산대학교 초대용량풍력발전시스템 혁신연구센터 ⁺E-mail: just313000@kunsan.ac.kr

Keywords: Anomaly detection, Autoencoder, Imbalanced Dataset

1. 서론

국내에서 꾸준히 증가하는 풍력발전기 연구에 대한 관심 덕분에, 전 세계적으로 각광받는 신재생 에너지원으로서 풍력발전이 더욱 주목받고 있다⁽¹⁾

·평균 1,606hr/회의 정지 시간을 발생시키는 블레이드 고장은, 풍력발전기의 이용 가능율 저하라는 결과를 초래하며 주요 문제점으로 지목된다. 풍력발전기의 용량이 증가함에 따라, 해상풍력발전기의 설치 확대라는 변화가 점진적으로 나타나고 있으며, 이로 인해 해상풍력발전단지에 접근하기 어려운 상황이 발생했다. 이러한 상황에서는, 육상 풍력발전기에 비해 유지보수가 어려운 해상풍력발전기 블레이드 결함을 원격으로 탐지하여 고장을 예방하는 기술의 도입이 더욱 필요하다는 점이 강조되고 있다.

본 연구에서는 이면 발열체(Heating panel)를 적용하여 획득한 열화상 영상 데이터셋에 딥러닝을 활용함으로써, 해상풍력 블레이드의 스파캡(Spar-Cap)을 모사한 복합재의 결함을 탐색할 수 있는 기법을 제안하였다.

2. 본론

본 연구에서는 이상 탐지(Anomaly detection)에서 우 수한 성능을 보여주는 오토인코더를 활용하고자 하였 다⁽⁴⁾. 학습에 사용된 데이터셋은 정상 상태(Non-defect condition)의 열화상 영상과 소수의 결함 상태(Defect condition) 열화상 영상으로 구성된 불균형 데이터셋 (Imbalanced dataset)으로, 이는 실제 운용 환경에서 결 함 데이터를 얻기 어려운 상황을 반영한 것이다. 이러 한 불균형 데이터셋으로 오토인코더를 학습시키면, 오 토인코더는 정상 상태 열화상 영상의 규칙적인 패턴을 효과적으로 학습하게 된다. 입력한 영상을 행렬 D, 부 호화와 복호화 과정을 거쳐 출력된 영상을 행렬 Д이 라고 한다면 이상치 점수는 D-D이로 정의할 수 있 다. 오토인코더에 정상 상태와 결함 상태의 열화상 영 상을 입력하면, 각기 다른 이상치 점수가 도출되며, 이 를 기반으로 적절한 임계값을 설정하여 결함 여부를 판별하는 이상 탐지 기법을 구현할 수 있다.

3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 정지상태의 블레이드의 전체 면적을 비접촉식으로 검사할 수 있는 열화상 기반 결함 검출 기법을 제안하였다. 기존 열화상 기법이 자연 열원을 활용한 수동적인 열대비에 의존한 반면, 본 연구에서는 이면 발열체를 활용한 능동적 열 대비 방식으로 열화상 영상을 획득하였다. 획득한 정상 열화상 영상과 소수의 결함 열화상 영상으로 구성된 불균형 데이터셋을 바탕으로 딥러닝 기반 진단 알고리즘을 개발하였다. 해당 알고리즘에는 이상 탐지 분야에서 우수한 성능을 보이는 오토인코더를 적용하였다. 실험 결과, 개발한 알고리즘이 기존 결함 검출 기법들에 비해 더 나은 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] Chou, J. S., Chiu, C. K., Huang, I. K. and Chi, K. N., 2013, "Failure analysis of wind turbine blade under critical wind loads," Engineerng Failure Analysis, Vol. 27, pp. 99~118.

후기

본 연구의 일부는 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너 지기술평가원(KETEP)의 연구과제(과제번호: 2022400000040)의 지원 을 받아 수행되었으며, 일부는 산업통상자원부(MOTIE)의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 연구과제(과제번호: RS-2023-00301997)의 지원을 받아 수행되었습니다.

Elium 수지의 성형 조건에 따른 기계적, 열적 특성 분석 Analysis of mechanical and thermal properties according to molding conditions of Elium resin

*채효병 ¹, 최성웅 ⁺

* H.B.Chae¹, S.W.Choi⁺

경상국립대학교 기계시스템공학과,² 경상국립대학교 기계시스템공학과 ⁺E-mail: <u>cogyqud97@gmail.com</u>

Keywords: thermoplastic, nano filler, thermal properties, mechanical properties

1. 서론

열가소성 수지인 Elium수지의 경우 낮은 점도와 재활용의 이점을 지녀 풍력발전기의 날개성형에 사용되는 등의 높은 활용성을 보인다.

그래핀의 경우 복합소재의 나노 필러로 활용할 경우 인장강도 증가 등의 물성향상에 도움되지만 분산의 문제점으로 인하여 낮은 점도의 기지재(matrix)를 필요로 한다. Elium의 경우 2017년도에 나온 신소재로 복합소재 관련 연구가 활발하나 아직 물성치 데이터가 미흡하다. 따라서 Elium과 그래핀을 활용한 복합소재를 다양한 성형조건에서 성형하고 이에 따른 물성치 변화를 측정하는 연구를 진행하였다.

2. 성형 조건

2.1 성형온도

함유량에 따른 특성 변화 측정하여 복합소재 성형 시 기계적, 열적 특성의 개선 및 타협점을 찾아 수지 성형 과정 중 장점을 이끌어내기 위한 성형온도를 도출하였다.

2.2 그래핀 나노 필러 함유량

함유량에 따른 특성 변화 측정하여 복합재료 성형 시 기계적, 열적 특성의 개선 및 타협점 찾아 복합재료의 성능향상을 위한 함유량을 도출하였다.

3. 성형조건에 따른 특성 변화

3.1 열적 특성 변화

성형온도와 함유량 변화에 따른 시편의 분자량 경향성과 성형과정 중 발열량을 통한 중합도 경향성을 DSC(시차주사열량계)와 GPC (겔투과크로마토그래피)를 통해 측정하여 확인하였다.

3.2 기계적 특성변화

성형온도와 그래핀 나노 필러의 함유량 변화에 따른 시편의 인장강도 경향성과 측정한 인장강도 및 분자량, 중합도의 연관성 확인하였다.

4. 결론 및 향후과제

성형온도 및 나노 필러 함유량에 따른 Elium 복합소재의 중합속도, 발열량, Tm, Td, 분자량의 경향성을 확인하였다.

성형조건에 따른 점도 측정과 인장강도 실험을 위한 성형 최적화 진행중이다.

이후 온도 및 함유량에 따른 기계적, 열적 특성의 경향성을 테이블로 정리할 예정이다.



Fig. 1 Elium based graphene composite



Fig. 2 Molecular weight of a composite sample by GPC

참고문헌

- TSAGKALIAS, Ioannis S.; MANIOS, Triantafyllos K.; ACHILIAS, Dimitris S. Effect of graphene oxide on the reaction kinetics of methyl methacrylate in situ radical polymerization via the bulk or solution technique. Polymers, 2017, 9.9: 432.
- [2] UPPIN, Vinayak S., et al. Mechanical Response of Glass-Epoxy Composites with Graphene Oxide Nanoparticles. Materials, 2022, 15.23: 8545.

3D 프린팅 탄소섬유 복합재 시편의 굽힘 특성 평가 및 이론 비교 Evaluation of Flexural Properties of 3D-Printed Carbon Fiber Composites and Comparison with Theoretical Predictions

*유용훈 ¹, 서형석 ¹⁺ * Y.H. Yu¹, H.S. Seo¹⁺

¹ 충남대학교 자율운항시스템공학과 ⁺E-mail: seohs@cnu.ac.kr

Keywords: Topology Optimization, Three-point bending test, 3D Print, Composite materials

1. 서론

3D 프린팅 기술은 한 층 씩 재료를 쌓는 적층 가공(Additive Manufacturing)으로 복잡한 구조를 쉽게 제작할 수 있다는 이점과 높은 기계적 강도를 동시에 확보할 수 있기에 3D 프린팅 복합재를 사용한 위상최적화(Topology Optimization) 연구가 활발히 진행되고 있다.[1] 그러나 내부 위상 형상이 3D 프린팅 복합재의 굽힘 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 미비하다. 본 연구에서는 기존에 수행되었던 3D 프린팅 복합재의 3점 굽힘 시험 보고서를 바탕으로 기계적 성질을 평가하고, 기존 Markforged 복합재의 물성치와 비교하였다.[2~4] 실험을 통해 내부 위상 형상이 복합재의 구조적 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 실험 데이터 해석을 통해 내부 위상 형상이 단순 적층 복합재 대비 굽힘 성능에 어떠한 변화를 초래하는지 검토하였다.

2. 3점 굽힘 실험을 통한 물성 획득 2.1 시편 제작

본 연구에서 시편은 ASTM D790[3] 표준에 따라 Markforged사의 Mark Two 3D 프린터를 통해 제작하였다. 사용된 복합재의 물성치는 Composite V5.2를 기반으로 Table 1에 정리하였다.[4] 복합재료 시편은 탄소섬유(Carbon Fiber) 와 오닉스(Onyx) 소재를 사용하였다. 시편은 내부 위상 형상을 고려하여 전체 길이 200mm, 폭 30mm, 두께 6mm의 크기를 가지며 Fig. 1과 Fig. 2와 같이 각 50mm×3mm×2mm와 30mm×5mm×2mm 의 직사각형 위상형상 6개가 배열된 두 가지 Type에 대해 설계하였다. 연구에 사용된 시편의 적층 정보는 Table 2에 정리하였다.

Table 1	Com	posite	Material	pro	pertv
		000100		P • •	

Material	Flexural Modulus (GPa)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Strain (%)
Onyx	3	71	-
Carbon	51	540	1.2

Table 2 I	Laminate inform	nation of	specimen
Material	Fiber orientation	layer No.	layer thickness (mm)
Onyx	$\pm 45^{\circ}$	4	0.5
Carbon fiber/	0°	40	5
Nylon			
Onyx	$\pm 45^{\circ}$	4	0.5
(a)		• 5	0mm
1		1	
100 mm			ſ.







Fig. 2. The cross section of specimen[3]

2.2 3점 굽힘 시험

본 실험은 만능재료시험기(DTU-900MHA)를 통해 수행되었으며 Fig. 3 은 3 점 굽힘 시험의 실험 조건을 보여준다. 시험은 ASTM D790 의 규정에 따라 시편의 중앙으로부터 48mm 에 양 지점을 지지하였으며 중앙의 가압봉을 이용해 3mm/min의 속도로 시편의 중앙에 하중을 가하였다. 시편의 기계적 강도를 평가하기 위해 굽힘 탄성률과 굽힘 강도를 계산하였다.

$$E_{fm} = \frac{L^3}{48I} \frac{\Delta F}{\Delta S} \tag{1}$$
$$\sigma_{fm} = \frac{My}{L} \tag{2}$$

식 (1)과 (2)는 각각 굽힘 탄성계수와 굽힘 강도의 식을 나타낸다.[3] L은 지지점 사이의 거리, M은 모멘트, y는 중립축에서 섬유까지 거리, ΔF 는 하중변화량 이며 ΔS 는 변위 변화량, I는 단면 2 차 모멘트를 나타낸다.

$$I_{ex} = I \times I_{type} \tag{3}$$

식 (3)은 내부 위상 형상을 반영한 식이며 *I*는 기존 직사각형 단면 2 차 모멘트, *I_{type}는 위상형상이* 적용된 단면 2 차 모멘트이다. 이를 통해 내부 위상 형상이 굽힘 성능에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였으며 실험결과는 Table 3 에 정리하였다.

3. 결과

내부 위상 형상이 있는 3D 프린트 복합재 시편의 3점 굽힘 실험을 통해 얻은 하중-변위 그래프를 식 (1)과 (2)를 활용하여 응력-변형률 그래프로 환산하여 Fig. 4 와 Fig. 5 에 나타내었다. 실험결과 Type 1(50mm×3mm×2mm)의 최대 하중은 2.55kN, 최대 변위는 10.69mm 로 측정되었다. 굽힘 탄성률 5.6GPa, 굽힘 강도 173.85MPa, 최대 굽힘 변형률은 7.9%를 나타냈다. Type 2(30mm×5mm×2mm)의 최대 하중은 2.39kN, 최대 변위는 9.01mm 를 나타냈으며, 굽힘 탄성률 5.14GPa, 굽힘 강도 165.34MPa, 최대 굽힘 변형률은 7.0%이다. Markforged 의 물성치와 비교했을 때 Type 1 의 굽힘 강도는 Onyx 보다 144.8% 높고 Carbon 보다 67.8% 낮게 나타났다. 굽힘 탄성률은 Onvx 보다 86.7% 높고 Carbon 보다 89% 낮은 값을 보였다. Type 2 의 굽힘 강도는 Onyx 보다 132.8% 높고 Carbon 보다 69.4% 낮았다. 굽힘 탄성률은 Onyx 보다 71.3% 높고 Carbon 보다 89.9% 낮다. 최대 굽힘 변형률은 Carbon에 비해 Type 1은 558.3%높고 Type 2는 483.3% 높은 변형률을 나타내었다. 이를 통해 시편 내부에 위상 형상이 있는 복합재 시편의 경우 내부 위상 형상이 없는 시편에 비해 강도는 68~89% 감소하는 경향을 보였고, 굽힘 탄성률은 89~90% 감소하는 것으로 나타났다.



Fig. 4. Stress-strain curve of Type 1



Fig. 5. Stress-strain curve of Type 2

Table 3 Three-Point Bending Test Results

Туре	Load (kN)	Displacement (mm)	Flexural Strength (MPa)	Flexural Modulus (GPa)	Strain (%)
1	2.55	10.69	173.85	5.6	7.9
2	2.39	9.01	165.34	5.14	7.0

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 내부 위상 형상이 3D 프린팅 복합재 시편의 굽힘 성능을 평가하고 Markforged 복합재의 물성치와 비교 분석하였다. 실험 결과, 굽힘 강도와 굽힘 탄성률 측면에서는 Carbon fiber 가 기여하는 역할이 제한적이었으며, Onyx 가 주요 구조적 역할을 수행한 것으로 판단된다. 반면, 최대 굽힘 변형률에서는 Carbon 이 높은 변형률을 유지하는 데 기여한 것으로 분석되었다. 그러나 실험값과 이론값 사이의 차이가 상당히 크며, 내부 위상 형상의 최적화가 필요한 상황이다. 따라서, 향후 연구에서는 위상 최적화(Topology Optimization)를 적용하여 강도와 강성을 향상시키는 방안을 모색하고자 한다. 또한 유한요소해석 (FEA)를 수행하여 실험결과와 해석 결과를 비교 분석하고, 내부 위상 형상이 굽힘 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 예정이다.

참고문헌

[1] Jeong, D.G., and Seo, H.S., "Study on Mechanical Performance of 3D Printed Composite Material with Topology Shape Using Finite Element Method," *Journal of Functional Composites and Structures*, Vol. 3, No. 3, 2021, 035003. [2] 3 점 굴힘시험보고서, school of Naval Architecture & Ocean Engineering University of Ulsan, 2024. [3] ASTM D790 [4] Material Data Sheet, Markforged, 2022.

후기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 무인이동체원천기술개발사업(NRF-2020M3C1C1A01084221)과 2025 년도 정부(산업통상자원부) 의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (P0023684, 2025 년 산업혁신인재성장지원사업) 부

DNV 규정 분석을 통한 3D 프린팅 복합재 파이프 설계 절차 연구 A Study on the Design Process of 3D-Printed Composite Pipes Based on the Analysis of DNV Regulations

이수림 ¹, 김동욱 ², 서형석 ^{1*} S.L. LEE ¹, D.U. KIM ² H.S. SEO^{1*}

¹충남대학교 자율운항시스템공학과, ²DNV Korea ⁺E-mail: seohs@cnu.ac.kr

Keywords: DNV, Composite Pipe, 3D printed, Pipe, 3D Printed Pipe Design Process

1. 서론

조선해양산업에서 주로 사용되는 파이프는 부식 저항성, 경량화 그리고 내구성의 성능을 요구한다. 이를 위한 복합재 파이프는 기존의 금속 소재에 비해 부식에 강하고 가벼우며 기계적 강도가 우수하여 해양 환경에서의 유지보수 비용 절감과 구조적 신뢰성을 향상시키는 중요한 대안으로 떠오르고 있다[1]. 최근 3D 프린팅(Additive Manufacturing, AM, 적층 제조) 기술의 발달은 복합재 파이프의 설계 및 제조 방식에도 변화를 가져오고 있으며, 복잡한 형상 구현, 맞춤형 제작, 생산 공정 단축 등 다양한 장점을 바탕으로 선박 기자재 제작에서 주목받고 있다[2]. 특히. 노르웨이 선급협회(DNV)는 3D 프린팅 기술의 활용 가능성을 인식하고 관련 기술 인증 및 가이드라인을 개발 중이다[3]. 그러나 현재까지 3D 프린팅 복합재 파이프에 대한 명확한 국제 표준이나 선급 규정이 없어 관련 연구가 필요하다. 본 연구에서는 조선해양산업에서 3D 프린팅 복합재 파이프의 설계 및 제작 과정에 대한 체계적인 절차를 확립하고, 선급 규정을 기반으로 한 안정성 평가 및 표준화 방안에 대해 연구를 수행하였다.

2. 기존 규정 분석

2.1 DNV 중심의 대표 선급들 규정 분석

복합재 파이프 설계 관련해서 고려해야할 점이 크게 하중, 환경 영향, 구조적 요구 사항, 재료 선택 및 설계 등이 있다. 하중의 경우 섬유강화 플라스틱(FRP) 구조물 설계 시 한계 상태 설계 방식을 적용하며, 하중 및 저항 계수 설계(LFRD) 방식을 따른다. 하중 효과(특성 하중 값)와 저항 변수(특성 저항 값)에 부분 안전 계수(하중 계수 및 저항 계수)가 적용된다. 피로 분석 시 응력 또는 변형률을 사용하며, 레인플로우(Rainflow) 분석을 통해 응력의 평균 및 진폭 이력을 이산 형식으로 설정해야 한다. 이어서 온도 변화, 수분 및 화학 물질 노출, UV 및 기타 방사선 영향이 복합재의 기계적 특성에 미치는 영향을 분석해야 한다. 그리고 해양에서 사용되는 파이프의 경우 해양 환경을 고려한 염도/부식, 해양 생물 오염 등의 요인을 설계 시 반드시 고려해야 한다[3]. 구조적 요구 사항에는 고압 및 부식 환경에 노출되므로 앞서 말했듯이 하중 시나리오, 하중 분류, 설계 하중 효과 등을 평가해야 하는 데 여기서 기능 하중은 무게, 내부 압력, 외부 수압 등을 최소한으로 고려해야 하며 극심한 파도, 선박 충격, 낙하 물체 등의 비정상적인 하중 발생을 분류하는 우발 하중도 평가해야 한다. 과도한 타원화를 방지하기 위해 제작 공차 및 하중 작용으로 인한 변형이 3%를 초과하지 않아야 한다[4]. 재료설계의 경우 섬유강화플라스틱 구조물은 적층 순서에 따라 제작되며, 각 적층의 재료 및 순서를 명확하게 정의해야 한다. 그리고 기지재는 섬유와의 상호 작용을 통해 기계적 특성을 결정해야 한다. 특정 하중 조건에서 필요하지 않은 특성은 문서화하여 생략 가능하다[3]. BV 에서는 FRP 수지에 사용되는 접착제는 승인된 제품만 사용 가능하다[5].

2.2 3D 프린팅 관련 선급 규정 분석

3D 프린팅 관련 직접적인 언급은 없으나, 복합재 파이프 제작 시 적용 가능한 내용들을 정리하면 다음과 같다. 적층 방향에 따라 기계적 특성이 다를 수 있으므로 프린팅 된 복합재의 적층 구조가 단방향, 교차, 등방성 플라이와 어떻게 연관되는지 분석이 필요하다[6]. UV, 수분, 온도 변화 등에 대한 내구성을 확인해야 하며, 특히 3D 프린팅 과정에서 발생하는 미세한 기공이나 레이어 간 접합 강도를 분석을 통해 3D 프린팅 복합재가 기존의 수작업 적층 복합재와 동일한 성능을 발휘하는지 실험적으로 검증해야 그리고, 다양한 3D 프린팅 복합재의 한다[3]. 제조방법인 FDM(Fused Deposition Modeling). SLA(Stereolithography) 등에 대한 규정을 참고하여 파이프 제작에 가장 적합한 규정을 재정립하는 것이 필요하다.

3. 3D 프린팅 복합재 파이프 설계 절차

설계 과정은 6 단계로 나누어지며, 각 단계에서 3D 프린팅의 특성을 고려한다. 1 단계 요구 사항 정의 및 기준 검토에서는 기존 복합재 파이프 설계와 같으나 프린팅 방향을 고려한다. 2 단계 3D 프린팅 재료/장비 선택에서는 요구사항에 적합한 재료와 장비를 선택한다. 3 단계 모델링/설계/해석은 3D 프린팅 복합재 제조 방법을 선택하고 3D 프린팅 공정에서 나타나는 한계점들을 고려하여 각종 실험을 위한 시편을 설계 및 제작한다. 4 단계 시뮬레이션 및 실험에서는 3D 프린팅 공정 변수 변화에 따른 성능 변화 예측 및 실험을 진행한다. 5 단계 3D 프린팅 프로토타입 제작에서는 앞선 과정의 결과를 활용하여 실제 파이프를 제작한다. 6 단계 품질 관리 및 인증 절차는 선급에서 최종 인증을 받으며 마무리된다. 3D 프린팅 복합재 기계적 특성 파이프 외에도 설계는 프린팅 가능성과 재료의 물리적 특성, 프린팅 과정에서의 결함을 비롯한 기술적 한계점 등을 복합적으로 고려하는 점에서 기존의 전통적인 복합재 파이프 설계와 차이를 보인다.



Fig.1 3D Printed Pipe Design Process

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 3D 프린팅 복합재 파이프 설계에 필요한 기초 자료를 제공하는 것을 목표로 하여, 기존 DNV, LR, BV 규정집을 분석하고 이를 3D 프린팅 복합재 파이프에 적용할 수 있는 설계 및 해석 정보들을 조사하고 정리하였으며, 3D 프린팅 복합재 파이프 설계 절차를 제안하였다. 추후 실제 3D 프린팅 복합재 파이프 설계, 해석, 제작을 통해 설계 절차에 대한 세부 연구를 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] Navigating the Seas: The Vital Role and Maintenance of Marine Vessels, ICRSE, 2024.
- [2] Assessment on the Design and Production of a Composite Island Waterway Vessel by Means of Additive Manufacturing, Master's thesis, Delft University of Technology, 2018.
- [3] DNV-ST-C501: Composite Components, DNV, 2022.
- [4] DNV-ST-F101: Submarine Pipeline Systems, DNV, 2021.
- [5] Hull in Composite, Plywood, and High-Density Polyethylene Materials NR546, Bureau Veritas (BV), 2022.
- [6] LR-RU-004 Rules and Regulations for the Classification of Naval Ships v2 pt7: Piping Systems, Lloyd's Register (LR), 2025.

후기

본 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술 진흥원과 산업통상자원부의 재원과 산업기술평가관리원의 지원[RS-2022-00143053, 안전기반 40 인승 350kW 급 수소추진선박 설계·해석·건조단계 엔지니어링·실증 기술개발]의 지원과 2025년도 정부 (산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. (P0017006, 2025년 산업혁신인재성장지원사업)

철도차량용 투명 발열 창을 위한 고투과 저저항 면상발열체 표면처리 기술 개발 Surface Modification Strategy for Enhancing Optical and Electrical Properties of Planer Heaters for Transparent Heating Windows in Railway Systems

*조재정 ¹, 이찬경 ², 최두호 ³⁺ * J.J. Jo¹, C.K. Lee ², D.H. Choi³⁺

^{1,2,3} 가천대학교 반도체공학과 ⁺E-mail: dhchoi802@gachon.ac.kr

Keywords: Transparent conductive electrode, Ar+ ion plasma treatment, Oxygen vacancy, Haack Figure of Merit

1. 서론

현재 상용으로 출시되고 있는 투명발열 창유리 제품의 경우 열선 기반의 선상발열 제품이 주를 이루고 있다. 이러한 선상발열체는 낮은 열효율과 부분 단락 시 전체 기능이 불능이 되는 적용 상의 한계가 존재한다. 이에 따라 기존 선상발열체의 한계를 극복할 수 있는 면상발열 기술이 도입되어 활발히 연구되고 있다. 본 연구에서는 이러한 면상발열체의 투과도와 면저항을 동시에 개선할 수 있는 표면처리 기술을 제시한다.

2. 고성능 면상발열체 제작 및 표면처리 기술

2.1 고성능 면상발열체 제작

최근 활발히 연구되어 오고 있는 면상발열체 중 산화물/금속/산화물 다층 박막 구조의 투명 전도성 전극을 사용하였다. 이러한 구조의 면상발열체는 기존에 사용되어 오고 있는 ITO에 비해 별도의 열처리가 필요하지 않고 저렴하며, 유연성을 가지고 있다는 것이 특징이다. 기판으로는 철도차량용 투명 발열 창에 사용되는 유리기판을 사용하였으며, DC magnetron 스퍼터링을 이용해 반응성 스퍼터링으로 하부 TiO_x 층을 중착한 후 Ag, ZnO 층을 순서대로 증착하여 고성능 면상 발열체를 제작하였다.

2.2 고성능 면상발열체를 위한 표면처리 기술

산화물/금속/산화물 구조의 면상발열체는 금속의 두께가 두꺼워질수록 투과도는 낮아지고, 두께가 얇아질수록 투과도는 높아지는 Trade-off 의 관계에 있기 때문에 동시에 개선하는 것이 불가능하다. 본 연구에서는 하부 TiO_x 층 표면에 Ar⁺ 이온 플라즈마 표면처리 기술을 적용함으로써 투과도와 면저항의 동시 개선이라는 기존의 법칙에 반하는 결과를 도출하였다. 표면처리는 스퍼터 내에서 진행되었으며, 아르곤 가스 주입 후 기판 바이어스를 인가하여 표면처리를 하였다.

물리적 화학적 상태 변화를 통한 투명 전도성 전극의 투과도와 면저항의 동시 개선

표면처리를 통해 면저항과 투과도를 동시에 개선하였으며, 이를 통해 고투과 저저항 면상발열체를 제작하였다.



Fig. 1. Sheet resistance and transmittance compared

표면처리 기술 적용 시 산화물/금속 계면의 거칠기가 개선되는 효과를 확인하였다.



Fig. 2. TEM image of non modified and surface modified

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 Ar⁺ 이온 플라즈마 표면처리를 통해 면저항과 투과도를 동시에 개선하여 세계 최대의 Haccke 성능지수를 달성하였으며, 대면적 면상발열체 개발 연구를 진행하여 해당 기술을 철도차량용 투명 발열 창에 보다 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] T. Lee et al. Adv. Funct. Mater. 31:2104372, 2021

후기

본 연구에서는 투명 면상발열체의 면저항과 투과도를 동시 개선할 수 있는 표면처리 기술을 제시하였으며, 이러한 기술이 철도차량의 발전에 기여하고 후속 연구가 촉진될 것으로 기대된다. 부

철도 차량 적용을 위한 고투과·초고속 전기변색 창호 기술 High-Transparency and Ultra-Fast Electrochromic Window Technology for Railway Vehicle Applications

*강건우¹, 박재우², 최두호³⁺ *G.W. Kang¹, J.W. Park², D.H. Choi³⁺

> ^{1, 2, 3} 가천대학교 반도체공학과 ⁺E-mail: dhchoi802@gachon.ac.kr

Keywords: Electrochromic device, Transparent heater, Redox reaction, Sub-zero temperature

1. 서론

최근 철도 차량, 항공기, 자동차 등 다양한 교통 수단에 전기변색 소자의 적용률이 증가함에 따라, 전기변색 창호의 수요가 증가하고 있다. 하지만 전기변색 창호의 대면적화로 인해 전기변색 속도의 저하에 의하여 보다 넓은 범위로의 적용 가능성이 제한된다. 본 연구에서는 고성능 투명 히터를 접목하여 사계절 사용이 가능한 고투과·초고속 전기변색 창호 기술에 대한 보고이다.

2. 고성능 투명 히터 제작

2.1 Zn0/Ag/Zn0 투명 히터 최적화

최근 고투과·저저항의 뛰어난 특성을 보유한 산화물/금속/산화물 구조의 투명 히터를 전기변색 소자에 적용하고자 하며, 가장 뛰어난 가시광선 투과도와 낮은 면저항을 동시에 보유하기 위하여 각 산화물/금속 층의 두께 최적화를 진행하였으며, 결과적으로 가시광선 영역 투과도 90%, 면저항 7.6 Ω/sq.를 달성.

2.2 Zn0/Ag/Zn0 투명 히터 발열 성능

제작된 고성능 투명 히터의 발열 성능 평가를 진행하여 126 ℃까지 발열 가능한 고온 내구성, 15초 이내에 목표 온도의 80%에 도달하는 뛰어난 발열 반응성, 80 ℃에서 10,000분간 지속적인 발열에도 발열 성능의 변화가 없는 발열 안정성 등을 보유함을 확인.

3. 고투과·초고속 전기변색 소자

제작된 전기변색 소자가 일반적으로 사용되는 상온 환경에서 발열 온도에 따른 성능 변화를 파악하기 위하여 변색 속도 평가가 진행되었으며, 결과적으로 45초 동안 착색 시 11.4%, 탈색 시 14.4%의 전기변색 속도의 향상을 확인하였다. 이러한 결과는 전기변색 물질 내부의 화학 반응 속도가 투명 히터의 열 에너지에 의한 이온 이동도의 향상으로 인하여 더욱 증가하였기 때문이며, 이온의 이동도가 눈에 띄게 감소하는 저온 환경에서의 전기변색 소자의 성능 변화를 평가하여 상당한 수치적 향상을 확인하였다.



Fig. 1. Schematic of the proposed electrochromic device

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서 달성한 상온 및 저온 환경에서의 비약적인 전기변색 속도의 향상을 통하여 기존의 대면적화 시 변색 속도가 크게 감소하는 문제점에 봉착하여 대면적 창호로의 적용이 어려운 전기변색 연구 기술에 대하 새로운 방향성을 소자 제시하였으며. 추후 다양한 공정 기술을 적용하거나 넓은 분야로의 적용을 위한 후속 연구 등을 수행할 가능성이 기대된다.

참고문헌

- J Yu, WL Gao, G Qiao, MF Lin, C Wei, J Chen, S Li, Nanoscale, Advance Article 2025
- [2] PR Somani, S Radhakrishnan, Mater. Chem. Phys., 77:117, 2003
- [3] CG Granqvist, Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 23:369, 1994

후기

본 연구에서 고투과·초고속 전기변색 소자, 창호의 가능성을 확인하였으며, 달성한 결과는 기존 전기변색 창호의 속도 문제를 극복하는데 중요한 시사점을 제공할 것으로 기대된다.

차수용 전도성 그라우트의 최적 자가 진단 시스템 연구 Study on the optimal self-sensing system of conductive grout for water cutoff

*성지혜¹, 정동섭¹, 유일환², 박정준³⁺, 이희업³, 이승정¹⁺ *J.H. Sung¹, D.S. Jeong¹, I.H. You², J.J. Park³⁺, H.U. Lee³, S.J. Lee¹⁺

¹ 인천대학교 건설환경공학과, ² 전북대학교 지역건설공학과, ³ 한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 ³⁺ E-mail: <u>jipark@krri.re.kr</u>, ¹⁺E-mail: <u>seungjung@inu.ac.kr</u>

Keywords: conductive grout, MWCNTs, self-sensing, water infiltration

1. 서론

하저 및 해저 터널은 지하 교통망 확충을 위해 지속적으로 설계되고 있지만, 차수 성능에 대한 지속적인평가방안이부족한 현실이다. 따라서 전도성 나노 소재를 혼입한 자가 진단 시멘트 기술을 접목하여, 실시간으로 모니터링이 가능한 전도성 그라우트를 개발하고자 한다 [1, 2]. 본 연구에서는 지반을 모사 후 수분 침투 실험을 진행하여 전극 조건에 따른 저항 변화를 측정하여 자가 진단 성능을 평가하였다.

2.실험 재료 및 방법

2.1 전도성 그라우트 특성 평가

다양한 W/C 비율과 MWCNT 함량에 따라 전도성 그라우트의 유동성, 압축강도, 전기저항을 평가하였다. 이를 통해 나노소재가 전기적 경로 및 물리적 특성에 미치는 영향을 분석하고, 적정 배합비를 바탕으로 수분 감지 실험에 활용하였다.

2.2 챔버 실험을 통한 전기적 거동 분석

마이크로 시멘트, 물, MWCNTs, AE감수제를 사용하여 전도성 그라우트를 제조하였고, 포화된 주문진사를 모형 지반으로 활용하였다. 분산된 MWCNTs 현탁액을 고속 교반 후 공압 방식으로 챔버에 주입하였으며, 전극(구리판: 20×200×2T mm, 구리막대: Φ4×300 mm)을 설치하고 DAQ970A를 통해 실시간 저항을 측정하였다. 수분 침투 속도를 일정하게 유지한 상태에서 전극 간격(21 mm, 64 mm) 및 종류에 따른 저항 변화를 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 다양한 W/C 비율과 MWCNTs 함유량에 따른 전도성 그라우트의 전기저항 특성과 수분 감지 성능을 분석하였다. 일반 그라우트는 양생 과정에서 수분 손실로 인해 전기저항이 급격히 증가하였으나, MWCNTs가 혼입된 경우 전기적 경로가 형성되어 저항이 낮고 안정적으로 유지되었다. 수분 감지 실험에서는 전극의 종류와 간격이 저항 변화에 영향을 미쳤으며, 구리판 전극은 구리 막대보다 빠른 반응과 큰 저항 감소폭을 보였다. 전극 간격이 좁을수록 감지 속도와 민감도가 향상되었으며, 간격이 넓을수록 수분 포화 상태에서도 저항 값이 높게 유지되는 경향이 나타났다.



Fig. 1. 28-day resistivity of conductive grout by W/C ratio and MWCNT content



Fig. 2. Resistance change according to electrode type and spacing

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 전도성 나노소재가 혼입된 그라우트를 이용하여 수분 침투에 따른 전기적 거동을 분석하고, 자가 진단 기능의 가능성을 검토하였다. 실험 결과, MWCNTs의 함량과 전극 조건에 따라 저항 변화가 뚜렷하게 나타났으며, 이를 통해 수분 감지 성능을 정량적으로 평가할 수 있었다. 특히 전극 형상과 배치가 감지 민감도에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 향후에는 다양한 지반 조건과 미세 구조의 영향을 고려하여 자가 진단 시스템의 현장 적용성을 심화 분석할 예정이다.

참고문헌

[1] A. D'Alessandro et al. *Nanotechnology in cement-based construction. Jenny Stanford Publishing 2020.*

[2] B. Han et al. Intrinsic self-sensing concrete and structures: A review. *Measurement* 59: 110-128. 2015.

후기

본 연구는 한국철도기술연구원 기본사업(해저철도 시스템 안전 및 경제성 향상 기술 개발, PK2501A3)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

철도차량 복사 난방용 발열 바닥 상판 개발 및 실물시제 성능 평가 Fabrication and Performance Evaluation of a Carbon Fiber Heating Element-Embedded Composite Interior Panel for Railway Vehicles

*박주엽¹, 강동훈¹⁺ * J. Park¹, D. Kang¹⁺

¹ 한국철도기술연구원 철도안전연구센터 ⁺E-mail: dhkang@krri.re.kr

Keywords: Heating Floor, Radiant Heating, Railway Vehicle HVAC, Woven Carbon-Coated Heating Element,

1. 서론

철도차량에 주로 적용되는 대류식 난방 방식은 공기를 가열하여 강제 순환시키는 구조로, 실내를 건조하게 만들고 공기 중 오염물질의 이동을 유도하여 호흡기 질환의 위험성을 높이는 한계를 지닌다. 또한 히터의 위치에 따라 실내 온도가 불균일하게 분포되어 승객 발생한다. 이러하 쾌적성이 저하되는 문제도 문제점들을 해결하기 위해 최근 철도차량에 복사 난방 기술을 보조 난방 방식으로 적용하려는 시도가 활발히 진행되고 있으며, 해외에서는 이미 복사 난방 기능을 탑재한 철도차량의 상용화 사례가 늘고 있다. 그러나 국내에서는 복사 난방 기술에 대한 연구 및 개발이 부족한 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 국내 철도차량용 발열 바닥재 개발을 위해 발열 및 내구 성능을 고려한 적합 인자를 규명하고, 성능 실험을 통한 효용성 및 적용성을 입증하였다.

2. 실물 시제 발열 패널 제작 및 성능 평가

우선, 발열체로는 대면적에서 균일한 열 분포가 가능하고 얇으며 내구성이 우수한 직조형 탄소코팅 발열체를 선정하였다. 해당 발열체는 폴리에스터 섬유에 카본블랙을 코팅하여 제작되었으며, 발열 성능 실험을 통해 전력 인가에 따라 선형적으로 온도가 상승하고, 국부 과열 없이 균일한 발열이 이루어짐을 확인하였다. 이후, 철도차량 바닥 구조에 맞춘 시편을 제작하여 기존 바닥재 소재의 내열성 한계를 확인하고, 고온용 고무 매트 및 접착제를 적용한 개량형 구조로 발열 성능 실험을 진행하였다. 그 결과, 표면 전체에서 균일한 발열이 이루어진 것을 확인하였다.

또한, 열 유동 해석을 통해 바닥 난방이 기존 히터를 보조하며 실내 온도를 약 1.4℃ 상승시키는 효과를 확인하였다. 추가적으로, 실제 ITX-새마을 열차의 1:1 스케일 시제품을 제작해 현장 적용성을 검토하였고, 장기 내구성 평가를 통해 10년 사용을 가정한 온도 변화 및 반복 하중 조건에서도 발열 성능과 균일성이 유지됨을 정량적으로 입증하였다.



Fig. 1. Experimental setup for heating performance test.

3. 결론 및 향후과제

본 연구는 국내 철도차량의 실내 난방 방식 개선을 위한 복사 난방 기반 발열 바닥재의 개발 및 실증 연구로, 직조형 탄소코팅 발열체의 우수한 성능을 바탕으로 실제 차량에 적용 가능한 시제품을 제작하고 내구성과 성능을 체계적으로 평가하였다. 그 결과, 발열 바닥재는 기존 대류 난방을 보완하며 실내 쾌적성을 향상시킬 수 있는 효과적인 보조 난방 수단임을 확인하였다. 본 연구는 향후 국내 철도차량에 복사 난방 기술을 도입하고 상용화하는 데 있어 핵심적인 기초 자료로 활용될 수 있으며, 에너지 효율성과 승객 만족도를 동시에 높이는 새로운 난방 솔루션으로서의 가능성을 제시하였다.

참고문헌

 Tirachini, A. and Cats, O., 2020, "COVID-19 and public transportation: Current assessment, prospects, and research needs," Journal of Public Transportation. Vol. 22, No. 1, pp. 1~21.

후기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(철도차량용 리튬이온배터리 열폭주화재 대응기술 개발, PK2502A4)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

위상최적화를 이용한 인보드 대차프레임의 경량설계 방안연구 Study on Lightweight Design of Inboard Bogie Frame Using Optimization

*송치현¹, 한관희¹, 김창호¹, 최성훈², 신광복¹⁺ * C.H. Song¹, G.H. Han², C.H. Kim², S.H. Choi², K.B. Shin³⁺

¹ 국립한밭대학교 기계공학과, ² 한국철도기술연구원 ⁺Corresponding Author E-mail: shin955@hanbat.ac.kr

Keywords: Inboard bogie frame, Lightweight design, I-shape section, Optimization

1. 서론

현재 전 세계적으로 탄소배출 절감 규제에 따른 정책시행 및 연구를 수행하고 있다. 철도차량에서는 대차프레임을 포함한 하부구조의 중량이 전체 차량의 약 41%를 차지하여 대차 구조물의 경량화 연구가 필수적이다. 이에 본 연구에서는 기존 대차대비 부피가 작은 인보드 대차 프레임에 I-형상 단면의 사이드프레임 적용과 위상 최적화를 수행하여 경량 설계안을 제시하였으며 유한요소해석을 통해 경량설계에 대한 건전성을 확인하였다.

2. 인보드 대차프레임 경량설계

인보드 대차프레임 개념설계안의 기존 해석 결과를 바탕으로 경량 설계를 수행하였다. 해석 수행 결과 사이드 프레임의 경우 낮은 응력이 발생되어 I-형상 단면을 적용하여 경량화하였으며, 수직 방향 하중 보강 구조물을 통해 보강 설계를 하였다. 이에 따라 대차프레임의 중량이 기존 모델 대비 5.1% 감소됨을 확인하였다. 또한 추가적인 경량화를 위해 위상 최적화를 수행하였다. 이때 사용된 목적함수는 강성 컴플라이언스 그리고 구속조건은 구조물의 중량을 적용하였다. 이에 상대적으로 낮은 Von-Mises 응력이 발생한 구조물인 2차 스프링 체결 구조물, 모터 브라켓 그리고 주행 기어 브라켓의 경량 설계를 수행하여 기존 중량 대비 17.1%가 감소함을 확인하였다.



Fig. 1. Topology optimization Result

3. 경량설계 인보드 대차프레임 구조안전성 평가

경량설계가 수행된 인보드 대차프레임에 대해 유한요소 해석을 통하여 구조 안전성 평가를 수행하였다. 경계조건의 경우 경량 설계된 인보드 대차프레임의 재원을 고려하여 EN-13749 규격을 기반으로 부여하였다[1].



Fig. 2. Boundary conditions of inboard bogie frame

해석 수행 결과, 최대 Von-Mises 응력 286MPa로 소재의 항복강도 이내임을 확인하였으며, 피로 수명의 경우 Goodman 선도 이내에 위치함을 확인하여 경량설계의 건전성을 확인하였다.



Fig. 3. Result of Von-Mises stress

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 I-형상 단면이 적용된 인보드 대차프레임의 경량설계 및 유한요소 해석을 통해 경량설계의 건전성을 확인하였다. 추가로, 복합 소재를 적용한 소재 대체법을 이용해 보다 높은 수준의 경량화 연구를 진행 할 예정이다.

참고문헌

[1] European Committee for Standardization, "EN 13749. Railway applications – Methods of specifying structural requirements of bogie frames. 부

철도차량용 복합소재 내장재 패널의 발열 기능화를 위한 탄소섬유 발열체 적용 실물 시제 제작 및 성능 평가 Fabrication and Performance Evaluation of a Carbon Fiber Heating Element-Embedded Composite Interior Panel for Railway Vehicles

*박주엽¹, 강동훈¹⁺ * J. Park¹, D. Kang¹⁺

¹ 한국철도기술연구원 철도안전연구센터 ⁺E-mail: dhkang@krri.re.kr

Keywords: heating element, composite laminate panel, composite sandwich panel, railway vehicle

1. 서론

복합소재는 경량화에 유리한 특성으로 인해 교통 분야에서 점차 영향력을 확대하고 있으며. 철도차량분야에서는 차체 프레임 등의 부품에 복합소재를 적용하는 연구개발이 진행되고 있다[1]. 한편, 철도차량의 공조 난방 방식은 호흡기 건강 및 공기 질 저하 문제를 초래할 수 있다. 이에 본 연구에서는 철도차량의 난방 패러다임 전환을 목표로, 탄소섬유 발열체를 적용한 철도차량용 발열 복합소재를 개발하고, 실물 부품 제작 및 성능 평가를 통해 적용 가능성을 검토하였다.

2. 실물 시제 발열 패널 제작 및 성능 평가

2.1 실물 시제 제작

발열 복합소재에 사용되는 발열체는 탄소섬유 발열체를 선정하였다. 탄소섬유 발열체는 두께가 얇아(t=0.018mm) 내부 적용이 용이하며, 면상 발열이 가능하여 내구성 및 열 효율이 우수하다. 실물 시제 제작은 실제 철도차량 제작 공법인 진공 열성형 공법을 적용하였으며, 소재 및 적층 구조를 동일하게 제작하였다. 라미네이트 패널은 식(1)과 같은 소재 및 구조로 제작하였으며, 샌드위치 패널은 식(2)와 같이 제작하였다.

$[Y/R_3/Y/CF/Y/R_3/Y]_T$	(1)
$[R/C/R/CF/Y]_T$	(2)

여기서 Y는 얀 직물(yarn cloth, #823) R은 로빙 직물(roving cloth, #580), CF는 탄소섬유 발열체, C는 허니콤 코어(honeycomb core)를 의미한다.

2.2 발열 성능 평가

제작된 실물 부품에 대한 발열 성능 평가를 Fig.1과 같이 진행하였다. 표면 온도 측정을 위해 발열체가 적용된 표면 중앙에 열전대(k-type thermocouple)을 부착하여 온도 데이터를 수집하였으며, 온도가 준평형상태에 도달하였을 때 적외선 열화상 카메라 (TE-EV1, Thermal Expert Co.)를 이용해 열화상 이미지를 촬영하고 발열의 균일도를 확인하였다.



Fig. 1. Experimental setup for heating performance test.

3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 철도차량용 발열 복합소재 내장재 패널의 실물을 제작하여 발열 성능과 적용성을 확인하였으며, 본 연구 결과를 통해, 향후 철도차량 분야의 발열 복합소재 적용에 관한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

참고문헌

 Lee, S., Im, J., Shin, K., Kim, S., Jeong, W., 2019, "Study on laminate composite frame for lightweight rolling stock," Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 22, No. 6, pp. 456-466.

후기

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업(철도차량용 리튬이온배터리 열폭주화재 대응기술 개발, PK2502A4)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

하이퍼튜브 적용 대차프레임 경량설계 방안연구

Study on Lightweight Design Bogie Frame for Hypertube Train

*김창호 1, 송치현 1, 김정석 2, 이창영 2, 신광복 1+

* C.H. KIM¹, C.H. SONG¹, J.S. KIM², C.Y. LEE², K.B. SHIN¹⁺

국립한밭대학교 기계공학과, ² 한국철도기술연구원

⁺Corresponding Author E-mail: shin955@hanbat.ac.kr

Keywords: Hypertube, Composite Bogie Frame, Lightweight, Structural Integrity

1. 서론

하이퍼 튜브는 진공관 내에서 자기부상 기술을 활용한 초고속 운송시스템으로, 기존 열차에 비해 발생되는 공기저항이 낮고 직접적인 마찰이 발생되지 않는 장점을 가진 차세대 운송수단이다. 하지만, 자기부상을 하는 하이퍼튜브 특성 상 높은 속도로 이동하며 경량성 또한 요구되기 때문에 이에 따른 구조 안전성이 필수적으로 이루어 져야 한다. 이에 본 연구에서는 하이퍼튜브에 적용되는 복합재 대차 프레임의 경량화를 중점으로 개념 설계 및 구조 안전성 평가를 수행하였다.

하이퍼튜브에 적용되는 복합재 대차프레임 구조 안전성 평가

2.1 복합재 대차프레임 개념 설계

본 절에서는 하이퍼튜브에 적용되는 복합재 대차 프레임의 개념 설계를 수행하였다. 대차프레임의 경량화 및 강성확보를 위해 탄소섬유(CFRP) 복합재를 적용 하였으며, 체결부위의 경우 알루미늄6061 소재를 적용하였다. 여기서 사용된 복합재 중량의 경우 68.16kg, 알루미늄 177.3kg 그리고 고무53.29kg 으로 총 대차프레임의 중량은 295.1kg 이다.



Fig. 1. Composite Hypertube Bogie Frame.

2.2 유한요소 모델 생성 및 구조 안전성 평가

개념 설계가 수행된 복합재 대차프레임의 구조적 건전성 평가를 위해 유한요소 해석을 수행하였다. 유한요소모델 생성 및 해석의 경우 Altair 社의 Optistruct을 이용하였다. 하중 및 구속 조건의 경우 설계된 복합재 대차프레임의 중량을 고려 후 유럽 철도차량 규격인 EN-13749 규격에 의거해 산출 및 부여하였다[1].



Fig. 2. Boundary Conditions of Composite Bogie Frame.

3. 구조해석 결과

금속재의 경우 Von-Mises Stress, 복합재의 경우 Tsai-Wu 파손이론으로 파손평가를 수행하였다. 구조해석 수행결과, Von-Mises Stress는 항복강도 이내로 도출되었으며 Tsai-Wu Index의 경우 1 이내를 만족함을 확인하여 이에 복합재 대차프레임의 구조적 건전성을 확인하였다.



Fig. 3. Analysis Results of Composite Bogie Frame.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 하이퍼튜브에 적용되는 복합재 대차프레임의 개념 설계 및 유한요소 해석을 수행하여 복합재 대차프레임에 대한 구조적 건전성을 확인 및 검증하였다. 본 연구의 결과를 통해 향후 하이퍼튜브 상용화를 위한 복합재 대차프레임의 상세 설계를 위한 연구자료로 활용될 것이다.

참고문헌

[1] European Committee for Standardization, "EN 13749. Railway applications – Methods of specifying structural requirements of bogie frames.

후기

본 연구는 "하이퍼튜브 실용화를 위한 핵심장치 및 캡슐운영기술 개발" 연구과제 (PK2501A1)의 지원으로 수행되었습니다.



Analysis of intermediate phase effect on the organic-inorganic hybrid bonding by correlative microscopy study

Geun Sik Shin¹, Dae Young Kang¹, Jun Yeon Hwang¹

¹Institute of Advanced Composite Materials, Korea Institute of Science and Technology (KIST), Jeonbuk, 55324, Republic of Korea ⁺E-mail : junyeon.hwang@kist.re.kr

Keywords : Hybrid structure, Interface, Additive manufacturing process

1. Introduction

The development of advanced composite materials for weight reduction and structural reinforcement necessitates innovative bonding techniques, particularly for joining metals with plastic structures. While extensive research has been conducted on the adhesion of organic materials to inorganic substrates, the reverse process—bonding metals onto plastics—remains a significant challenge. This difficulty arises from the thermal damage induced during laser sintering, which carbonizes the plastic surface, leading to metal delamination and inhibiting proper adhesion.

2. Experimental

This study explores an intermediate layer consisting of a plastic-metal mixture, strategically positioned above the plastic substrate. The alloy powder (Ti-6Al4V) used in this study is spherical in shape and sized between 45-150 μ m through gas atomization. In this experiment, the laser 3D printing technique was employed, which involved spreading powder material with a recoater blade before sintering it layer-by-layer using a laser. Although a metal layer was formed among the optimal energy density group, the penetration of metal powder into the plastic surface created a damage area or led to pore formation, which prevents an ideal bonding between the two materials. Such results demonstrate that bonding metal on plastic for lamination is challenging due to the impact of high-energy from the fiber laser on the plastic surface.

3. Results and Discussion

The quality of heterogeneous bonding varies depending on the presence of the mixture condition(?), especially when high-temperature metal powder penetrates the plastic layer, affecting the surrounding plastic and causing voids. It is necessary to compare the amount of voids generated by laser sintering in the mixture to ensure that a stable layer is maintained during the bonding process.

As shown in Fig. 1, it was qualitatively confirmed that the presence of mixture interface leads to a reduction in voids within the boundary region of heterogeneous substances. The reduction in pore amount is due to the metal powders continuously penetrating the plastic during metal lamination, creating numerous pores between each metal powder and plastic. Especially, sintering metal with the mixture layer blocked the penetration of metal powders and minimized the amount of pore formations. This is largely attributed to the small amount of metal powders within the interface which acts as a buffer against the penetrative forces. Although EDS provides a quick visual of the porosity (Fig.1), it is worthwhile to measure the pore volume with a quantitative methodology. To obtain a more accurate analysis of the bonding area between the dissimilar materials, CT (Computed Tomography) was used to measure the porosity based on 3D data.



Fig. 1. Optical and SEM/EDS cross-sectional images of the interfaces without intermediate mixture between PETG-Ti6Al4V (upper layer), and with intermediate mixture case (lower layer).

4. Conclusions

X-ray microscopy analysis of the interface revealed that coating the PETG surface with a PVA intermediate mixed with Ti-6Al-4V metal powder effectively suppressed pore formation and restricted metal infiltration into the pure plastic region. Furthermore, the uniform distribution of pores at the interface facilitates a more precise prediction of crack propagation, demonstrating that the pre-mixed layer not only strengthens the bond between plastic and metal but also protects the interface from laser-induced degradation.

Acknowledgement

This work was supported by KIST internal program and National Research Foundation of Korea (NRF-2022M3H4A3046292) .

단탄소섬유의 배향을 통한 Mg/CF 금속복합소재 특성 변화 연구 Study on the Property Changes of Mg/CF Metal Matrix Composites Through the Orientation of Short Carbon Fibers

*이태호 ^{1, 2}, 신상민 ¹, 박현재 ^{1, 2}, 조승찬 ¹, 이상복 ¹, 이상관 ¹, 김양도 ², 김정환 ¹⁺ * T.H. Lee ^{1, 2}, S.M. Shin ¹, H.J. Park ^{1, 2}, S.C. Cho ¹, S.B. Lee ¹, S.K. Lee ¹, Y.D. Kim ², J.H. Kim ¹⁺

> ¹ 한국재료연구원, ² 부산대학교 재료공학부 ⁺E-mail:jhwankim@kims.re.kr

Keywords: Space satellite, Metal matrix composite, Thermal property

1. 서론

최근 우주산업에 대한 수요가 증가함에 따라 우주항공용 소재에 대해 많은 관심이 집중되고 있다. 인공위성용 구조물은 우주에서의 온도변화나 다른 환경요인에 의한 형상 변화가 없는, 치수 안정성을 유지 할 수 있는 경량의 고강도 재료를 필요로 한다. 특히 우주공간에서 반복적인 태양 노출에 의한 극심한 온도 차이(약 -200℃~100℃)로 인한 열변형을 최소화 하기 위해서는 적절한 재료의 선택과 설계 기술이 필요하다. 본 연구에서는 압출 공정을 이용하여 배향된 강화재를 가진 복합소재를 제조한 뒤 미세조직 관찰 및 특성을 평가하였다.

2. 실험방법

금속복합소재를 제조하기 위하여 pure Mg 분말과 Carbon Fiber(CF)를 planetary ball mill로 혼합하였다. Mg 분말과 CF의 효과적인 분산을 위해 CF를 따로 ball mill 하여 분쇄 후 pure Mg 분말과 혼합하였으며, 혼합된 분말을 알루미늄 파이프에 장입 후 인발 공정을 통해 분말의 packing density를 높이고 원하는 크기로 성형하였다. 성형된 인발재를 일정 간격으로 절단 후 인발재 다발을 AI로 케이싱 후 350℃에서 압출 공정을 통해 강화재가 일축 방향으로 배향된 금속복합소재를 제조하였다. 제조된 샘플들은 SEM 장비를 사용하여 미세조직을 관찰하였고, TMA, LFA 장비를 사용하여 열팽창계수, 열전도도를 측정하였다.

3. 결과 및 토의

Fig. 1. 은 인발된 Mg/CF 복합소재(코어)에 CF가 30 vol.% 포함된 압출재의 단면을 SEM으로 관찰한 미세조직 사진이다. CF가 둥근 형상으로 관찰된 것을 통해 압출 공정으로 CF의 배향이 성공적으로 됨을 확인하였으며 이러한 배향은 열특성 향상에 기여하게 된다[1]. 또한 인발로 제작한 코어를 다발로 압출을 진행하면 코어들이 압출과정에서 자연스럽게 Honeycomb pattern을 형성하며 코어 영역의 체적을 최적화 할 수 있으며 열팽창계수가 낮은 코어들이 주변 Al의 열팽창을 억제하여[2] 전체 복합소재의 열팽창계수를 낮추어 주는 역할을 하게 된다. 또한 길이 방향으로 연속적으로 연결된 Al기지와 코어 구조로 인해 강화재가 다량 첨가되었음에도 열전도도를 크게 감소시키지 않는 효과를 얻을 수 있다.



Fig. 1. Microstructure of Mg + CF 코어 composites.

4. 결론 및 향후과제

경량성과 비강도가 우수한 Mg과 열팽창계수가 낮으며 강성이 우수한 CF를 사용해 제조한 금속복합소재를 코어로, 열전도도 및 기계적특성이 우수한 Al을 인발 및 압출의 케이스로 사용하였다. 최종적으로 다중코어 구조를 가진 복합소재를 제조하여 기지재의 열전도도를 유지하면서도 열팽창계수를 감소시킨 금속복합소재를 제조할 수 있었다.

인발과 압출 공정을 통해 이방성 특성을 가진 CF를 효과적으로 배향하여 길이방향으로의 CF강화 효과를 극대화 하였으며, 이를 통해 길이방향으로의 고열전도도, 저열팽창 금속복합소재를 제조하였다.

향후과제로 우주 환경용 위성체에 적용하기 위한 요구조건인 고 비강도 특성 확인을 위한 기계적 특성 평가를 진행 할 예정이다.

참고문헌

 Xueni Zhao et al. Mater Chem and Phys. 306:128078, 2023.
 Rajendra U Vaidya et al. Compos Sci Technol. 50:13-22, 1994

후기

본 연구는 나노 및 소재기술개발사업(RS-2023-00281508), (RS-2024-00444649)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

고종횡비 TiC/Fe계 금속복합소재 개발을 통한 초고속 가공용 샤프트 적용 및 동적 안정성 향상 연구

Study on the Development of high aspect ratio TiC/Fe metal matrix composites for High speed machining shaft application and dynamic stability enhancement

*박현재 ^{1,2}, 신상민 ¹, 이태호 ^{1,2}, 조승찬 ¹, 이상복 ¹, 이상관 ¹, 김양도 ², 김정환 ¹⁺ * H.J. Park ^{1,2}, S.M Shin ¹, T.H Lee ^{1,2}, S.C Cho ¹, S.B Lee ¹, S.K Lee ¹, Y.D Kim ². J.H. Kim¹⁺

> ¹ 한국재료연구원 융복합재료연구본부,² 부산대학교 재료공학부 ⁺E-mail: <u>jhwankim@kims.re.kr</u>

Keywords: Metal Matrix Composites(MMC), Shaft, Natural frequency, Damping ratio

1. 서론

최근 공작기계 산업에서는 재료제거비율을 향상시킨 고속 가공과 마이크로 수준의 표면조도를 달성할 수 있는 초정밀 가공에 대한 수요가 증가하고 있다 [1]. 산업에서 요구되는 가공속도와 가공 정밀도 수준을 달성하기 위해서는 고속 회전 시 우수한 동적 안정성을 유지할 수 있는 주축 개발이 선행되어야 한다. 동적 안정성의 주요 결정인자로는 1차 고유진동수와 감쇠비가 있다[2]. 따라서 보 연구에서는 동적 안정성 극대화를 위해 다양한 조성의 금속기지를 사용하여 세라믹 입자강화 Fe 금속복합재를 제조 하였으며 기존 샤프트 소재로 사용되고 있는 SUS420J2를 포함한 다양한 합금의 1차 고유진동수 및 감쇠비를 측정하고 비교 분석하였다. 이를 통해 고속 가공용 주축 샤프트 소재로써 TiC/Fe 기지 복합재를 적용한다면 진동 저감을 통해 우수한 가공 성능을 확보할 수 있다는 것을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 용융가압함침 금속복합재 제조

TiC/Fe 복합재를 제조하기 위해 강화재 분율에 따라 TiC, SiC, Graphite 분말을 일축 가압 성형기로 가압 후 진공 소결하여 강화재 프리폼 을 제작하였다. 그 후 용융가압함침 장비를 활용하여 Fe기지를 1600 ℃로 용융하였으며, Ar가스를 사용하여 가압하고 노냉하여 TiC/Fe 복합재를 제조하였다.

2.2 미세조직 및 특성 평가

제조된 금속복합재는 주사전자현미경을 통해 미세조직 분석을 진행 하였으며 동적 안정성 평가를 위해 1차 고유진동수 및 감쇠능을 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig.1 은 다양한 합금 및 금속복합재의 표준 진동 특성 시험 결과이다. 금속복합재의 1차 고유진동수가 높은 것을 확인할 수 있으며 감쇠비 역시 우수한 것으로 확인되었다. 또한 샤프트 형상으로 가공한 TiC/Fe 복합재의 1차 고유진동수 및 감쇠비를 측정한 결과 SUS420J2 소재 대비 각각 25%, 30% 증가한 것이 확인되었다.



Fig. 1. Results standard vibration characteristics test.

 Table 1 Results of measurement of natural frequency and damping ratio of shaft.

시험 방법	수평 지지		법 수평지지		수직	지지
소재	SUS420J2	TIC/Fe	SUS420J2	TIC/Fe		
Tool 장착부	2510	3146	2478	3121		
	(-0.293)	(-0.3148)	(-0.4497)	(-0.852)		
축 자루부	2529	3162	2530	3157		
	(-0.1686)	(-0.212)	(-0.098)	(-0.136)		
모터 장착부	2439	3027	2358	3067		
	(-0.441)	(-2.11)	(-1.03)	(-1.52)		

4. 결론 및 향후과제

제조된 TiC/Fe 금속복합재는 현재 샤프트 소재로 사용되고 있는 SUS420J2를 포함한 다양한 합금과 비교하였을 때 높은 1차 고유진동 및 우수한 감쇠성능을 확인 하였다. 이는 고속 회전 시 우수한 동적 안정성을 가진다는 것을 의미하고 가공속도 와 가공정밀도를 향상 시킬 수 있다고 판단된다.

참고문헌

YC Lin et al. *applied sciences*. (2020).
 ISSN 1226-4873 (2023).

후기

본 연구는 중소기업혁신개발사업 '수출지향형 (Tech-Bridrge)' (RS-2024-00487614)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

cBN-Mg 금속복합재료의 강화재 입도에 따른 열기계적 특성 연구

Effect of cBN Particle Size on the Thermo-Mechanical Properties of cBN-Mg Metal

Matrix Composites

*정다운 ^{1,2}, 조은서 ^{1,2}, 김민수 ¹, 김정환 ¹, 이상복 ¹,이상관 ¹,김양도 ², 조승찬 ¹⁺ * D.W. Jung ^{1,2}, E.S. Cho ^{1,2}, M.S. Kim ¹, J.H. Kim ¹, S.B. Lee ¹, S.K Lee ¹, Y.D Kim ², S.C. Cho ¹⁺ ¹ 한국재료연구원 융·복합재료연구본부, ² 부산대학교 재료공학부

⁺E-mail: <u>sccho@kims.re.kr</u>

Keywords: Metal Matrix Composites(MMC), Magnesium, Cubic Boron nitride, Thermo-mechanical properties

1. 서론

반도체의 회로가 미세화되고, 고도화 됨에 따라 반도체에서 발생하는 발열 온도가 상승하였으며, 성능에 큰 영향을 미치고 있다. 따라서 이런 발열 을 제어하여 성능을 향상시키기 위해 우수한 방열 성능과 열안정성을 가지는 소재가 요구되고 있다. 하지만, 현재 반도체의 발전 속도에 비해 고방열과 저열변형 특성을 함께 보유한 소재에 대한 연구는 많이 진행되고 있지 않다.J Zhu.등은 반도체 칩의 냉각 및 에너지 공급 문제를 해결하였다고 보고하였으나, 아직 완벽한 열안정성을 얻지는 못하였다 [1].

본 연구에서는 고열전도도와 저열팽창의 열적 특성을 만족하는 방열 소재를 개발하기 위하여 금속복합재료(Metal Matrix Composites;MMCs)를 선정하였다. 가볍고 열전도도가 좋은 마그네슘을 기지로 사용하고, 치수 안정성이 우수하며 열전도도가 약 1300W/mK로 매우 높은 Cubic Boron nitride(cBN)를 강화재로 사용하여 cBN의 체적률이 약 60 vol.%인 Mg 복합재료를 개발하였다. 또한, cBN 입자 크기가 cBN-Mg 복합재료의 열적, 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험방법

연구에 사용된 MMCs는 액상가압공정으로 제조되었다. 강화재로 사용된 cBN은 입자크기의 드라마틱 한 차이를 보고자, 각각 15, 100, 300 µ m의 크기 차이가 큰 입자를 사용하였다. 제조된 MMCs는 전계 방사형 주사전자현미경(FE-SEM; JEOL, JAPAN) 를 통해 미세조직 및 상분석을 진행하였다. 아르키메데스 법을 활용하여 밀도를 측정하고, Laser Flash Analysis(LFA; LFA467 ,NETZSCH, Germany) 통하여 열전도도를 장비를 계산하였다. 또한 Thermomechanical Analyzer (TMA) 장비 및 항절 시험을 활용하여 열팽창계수 및 굽힘강도를 측정하였다.

3. 실험결과

Fig. 1.은 cBN-Mg 복합재료의 미세조직을 FE-SEM으로 관찰한 이미지이다. 15µm, 100µm, 300µm 입도의 cBN 강화재를 첨가한 cBN-Mg 복합재료는 60~70 vol.%의 cBN 함량을 가지는 것을 확인하였다. 입자 크기별 cBN-Mg 복합재료의 강화재 열전도도를 측정한 결과 강화재 입자 크기가 클수록 높은 열전도도를 가진다는 것을 확인하였다. 또한, 열팽창계수 및 굽힘강도를 측정한 결과 강화재의 입자 크기가 커질수록 열팽창계수는 증가하고, 굽힘강도가 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 결과들을 종합하였을 때 강화재 입자 크기가 증가하면 열전도도를 향상시키지만, 열팽창 및 기계적 특성은 저하되는 결과를 확인하였다.



Fig. 1. Microstructure and measured cBN volume fraction of cBN-Mg matrix composites.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 액상가압공정을 이용하여 고체적률의 cBN-Mg 복합재료를 개발하였다. cBN 입자크기가 증가할수록 복합재료의 열전도도 및 열팽창은 증가하였으며, 굽힘강도는 감소하였다. 이러한 결과를 통하여 강화재의 입도 및 계면 제어를 통하여 cBN-Mg 복합재료의 열기계적 특성을 제어할 수 있는 가능성을 확인하였다.

참고문헌

[1] J Zhu et al. Applied Thermal Engineering 261:125094, 2025.

후기 본 연구는 과학기술정보통신부 나노및소재기술개발 사업(RS-2024-00444649), (RS-2022-NR068258)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

Immobilizing Ru-Ni Alloys on Highly Porous Ti₃C₂T_x MXene for Efficient and Durable Hydrazine-Assisted Hydrogen Production

Thanh Hai Nguyen¹, Duy Thanh Tran¹, Deepanshu Malhotra¹, Nam Hoon Kim^{1*} and Joong Hee Lee^{1*}

¹ Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk National University

² Center for Carbon Composite Materials & Dept. of Polymer and Nano Science and Technology, Jeonbuk National University, Jeonju,

Jeonbuk 54896, Republic of Korea

*E-mail: nhk@jbnu.ac.kr and jhl@jbnu.ac.kr.

Keywords : Ru alloys, hydrazine, hydrogen production, MXene.

1. Introduction

Electrochemical water splitting is a highly promising technique for producing high-purity H₂ due to its environmental friendliness and zero-carbon emissions [1]. However, the sluggish anodic oxygen evolution reaction (OER), which involves a four-electron transfer, limits the overall kinetics and poses the risk of an explosive H₂/O₂ mixture during large-scale electrolysis. To overcome this challenge, the hydrazine oxidation reaction (HzOR) has emerged as a viable alternative due to its low oxidation potential (-0.33 V vs. RHE) and non-toxic product release [2]. It offers significant potential for reducing the voltage input when coupled with the cathodic hydrogen evolution reaction (HER). Given its similar lattice and electronic structure to Pt, Ru is also an ideal candidate for HER/HzOR catalysis. Herein, we present a strategy to immobilize RuNi alloys on highly porous Ti₃C₂ MXene (RuNi-MXene) via a simple chemical impregnation method. The resulting catalyst demonstrates exceptional performance in hydrazine-assisted water splitting by substantially lowering the required potentials, thereby opening new avenues for efficient hydrogen production.

2. Experimental

All chemicals and reagents were purchased from Sigma– Aldrich Co. (USA), as schematic for synthesis approach is shown in **Fig. 1**.



Fig. 1. Schematic synthesis of RuNi-MXene catalyst.

3. Results and Discussion

Fig. 2a reveals SEM images of RuNi-MXene catalyst, achieving highly porous as-prepared samples, thus expecting to expose much active sites. The TEM images (**Fig. 2b**) also verify the porous material of as-synthesized RuNi-MXene catalyst.



Fig. 2. (a) SEM and (b) TEM images of RuNi-MXene catalyst.

As shown in **Fig. 3a**, the constructed RuNi-MXene system exhibits the superior performance than that of pure system. **Fig. 3b** displays a comparing table between two systems, further confirming excellent performance of hydrazineassisted water splitting.



Fig. 3. (a) Catalytic performance of RuNi-MXene catalyst and (b) Comparison potential at different current densities

4. Conclusions

In summary, we have successfully designed RuNi alloys anchoring on porous Ti_3C_2 MXene as an efficient bifunctional electrocatalyst. This work has explored the potential of Ru-based catalyst for various applications.

References

Yin et al. Adv. Mater. 2024, 36, 2401694.
 Pei et al. Appl. Catal. B: Environ. 2023, 325, 122305.

Acknowledgement

This work was supported by the Basic Science Research Program (2022R1A2C2010339) and the Regional Leading Research Center Program (2019R1A5A8080326) through the National Research Foundation (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT of Republic of Korea.

Large-area Drop-on-demand Inkjet Printing for Grid-type Patterned Flexible Transparent Electrodes

Sambedan Jena¹, Duy Thanh Tran^{1*}, Nam Hoon Kim¹, Joong Hee Lee^{1,2*}

¹ Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk National University.

² Center for Carbon Composite Materials & Dept. of Polymer and Nano Science and Technology, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Republic of Korea.

*E-mail: jhl@jbnu.ac.kr and dttran@jbnu.ac.kr.

Keywords: Silver nanowires, Ti₃C₂T_x MXene nanodots, PEDOT:PSS, Inkjet printing, FTE.

1. Introduction

Pushing the development in the area of flexible and transparent electrodes (FTEs), the need for larger-area electrode fabrication is critical for innovating futuristic wearable smart electronics [1]. The proposed approach should provide sufficient flexibility in producing a wide range of silver nanowire patterns over a variety of flexible substrates [2]. In this work, we report an optimized dropon-demand protocol for inkjet printing of grid-type patterns that are size-independent [3]. A compatible ink slurry comprising of silver nanowires (Ag NWs) and $Ti_3C_2T_x$ MXene nanodots (NDs) encased with PEDOT:PSS is successfully used. The resulting electrodes (flexible PET substrate) offer comparable characteristics to other reported procedures at a faster rate.

2. Experimental

First, Ag NWs of narrow aspect ratio were prepared solvothermally. Then, a thin coating of PEDOT:PSS was applied on the Ag NWs. Finally, MXene NDs dispersion is added in optimized quantity to yield the final printing ink slurry (**Fig. 1**).



Fig. 1. A schematic illustration of the ink preparation.

3. Results and Discussion

The successful preparation of NDs and ink slurry can be confirmed via FE-SEM imaging (**Fig. 2**). The presence of PEDOT:PSS on the surface of Ag NWs allows the NDs to preferentially adsorb on the NWs surfaces.



Fig. 2. SEM images of (a) $Ti_3C_2T_x$ NDs and (b) PEDOT:PSS@Ag NWs + $Ti_3C_2T_x$ NDs.

During ink jetting parameters optimization, an optimum jetting voltage of 19 V with drop-on time of 1.47

 μ s and drop-off time of 0.67 μ s (**Fig. 3**). A 20 x 20 cm FTE is printed upon flexible PET sheet using the optimized 2 % PEDOT:PSS@Ag NWs + Ti₃C₂T_x NDs 2:1 composite ink and pattern type-3 grid.



Fig. 3. Schematic illustration of the drop-on-demand inkjet printing of FTEs.

During repeated 3 mm bending, the printed FTE is able to retain its sheet resistance at 12.4 $\Omega \cdot sq^{-1}$ after 10000 cycles. Also, it is able to retain the sheet transmittance at 80.1 % (0.88 T/To) as well (Fig. 4).



Fig. 4. (a) Optical photograph of 20x20 cm FTE with transparency demonstration (b). (c, d) Optical photographs showcasing the conductive nature of the FTE. (e, f) Photographs of 3 mm bending tests of the FTE.

4. Conclusions

We have successfully demonstrated the drop-ondemand inkjet printing of grid-patterned flexible transparent electrode for a large-area (20x20 cm) using a drop-on-demand printing protocol.

References

- [1] Jena et al. Mater. Today Nano, 27 (2024), 100505.
- [2] Han. Adv. Funct. Mater, 31 (2021), 2010155.
- [3] Kant et al. Small Methods. 8 (2024) 2300638.

Acknowledgement

This research was supported by the Basic Science Research Program (RS-2024–00349472), BRL (RS-2023–00207836), and the Regional Leading Research Center Program (2019R1A5A8080326) through the National Research Foundation funded by the Ministry of Science and ICT of the Republic of Korea.

Ultrafine Nanoalloy Encapsulated in Graphitic Carbon Shells as a Highly-active and Durable Electrocatalyst for AEM and PEM Water Splitting

Abhisek Majumdar¹, Duy Thanh Tran¹, Nam Hoon Kim^{1*}, Joong Hee Lee^{1,2*}

¹Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk National University.

²Center for Carbon Composite Materials & Dept. of Polymer and Nano Science and Technology, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Republic of Korea.

*E-mail: nhk@jbnu.ac.kr and jhl@jbnu.ac.kr.

Keywords: Hybrid-based carbon materials, Strain engineering, AEM & PEM water splitting.

1. Introduction

Hydrogen (H2) is a promising clean energy source, produced through electrochemical water splitting, with the hydrogen evolution reaction (HER) being a critical step [1]. While platinum (Pt) is an effective catalyst for HER, its high cost and scarcity limit its practical use [2]. As an alternative, 3d transition metals (TMs), such as cobalt (Co), nickel (Ni), and iron (Fe), offer a more affordable option but are prone to corrosion in harsh acidic conditions, reducing their effectiveness over time [3]. To address this, we designed a catalyst system using Ru-CoNi nanoparticles embedded in nitrogen-doped carbon nanotubes (NCNTs). The NCNTs serve a dual role by both protecting the metal nanoparticles from corrosion and facilitating efficient electron transfer. Additionally, ruthenium (Ru) is incorporated for its optimal hydrogen bond strength, while being more cost-effective than Pt. This Ru-Co2Ni@NCNT composite provides a durable, efficient, and economically viable solution for sustainable hydrogen production.

2. Experimental

The Ru-Co₂Ni@NCNT catalyst was synthesized through a three-step process (Fig. 1). First, a Co-Ni metalorganic framework (MOF) was prepared using a solvothermal method. This MOF was then coordinated with melamine and Ru^{3+} cations. Finally, the mixture underwent through high-temperature annealing to complete the catalyst preparation.



Fig. 1. A schematic illustration of the synthesis of Ru-Co₂Ni@NCNT material.

3. Results and Discussion

The Ru-Co₂Ni@NCNT catalyst shows robust CNT growth with diameters ranging from 18 to 25 nm on the carbonized MOFs (**Fig. 2a**), with Ru-Co₂Ni nanoalloys encapsulated within the carbon nanotube matrix (**Fig. 2b**). Due to this core-shell structure, substrantial strain has been generated over the the core Ru-Co₂Ni. To understand the status of Ru in the structure, HAADF-STEM has been done which shows the single atomic nature of the Ru in Ru-Co₂Ni structure (**Fig. 2c**).



Fig. 2. (a) SEM (b) TEM and (c) HAADF-STEM images of Ru-Co₂Ni@NCNT.

In both 0.5 M H₂SO₄ and 1.0 M KOH electrolytes, the catalyst achieved a current density of 10 mA cm⁻² at overpotentials of just 57 and 35 mV, respectively, significantly outperforming Ru-Co2Ni@C and Co₃Ni@NCNT 3). Additionally, (Fig. the Ru-Co₂Ni@NCNT catalyst exhibited remarkable durability, maintaining high current density of 0.5 A cm⁻² for over 500 hours of operation in AEMWE with negligible degradation of 51 mV, highlighting its potential for longterm applications in hydrogen production.



Fig. 3. (a) LSV curves for HER of different catalysts. (b) AEMWE stability.

4. Conclusions

The Ru-Co₂Ni@NCNT catalyst demonstrates excellent HER activity in both acidic and alkaline environments, maintaining its stability over prolonged use. This innovative design opens new pathways for developing long-lasting, high-performance catalysts for water splitting across a wide range of pH conditions.

References

- [1] S. Yin Tee et al., Adv. Sci., 2017, 4, 1600337
- [2] J. N. Hansen et al., ACS Energy Lett., 2021, 6, 1175
- [3] Z. Chen et al., J. Mater. Chem. A, 2019,7, 14971-15005

Acknowledgement

This work was supported by the Basic Science Research Program (2022R1A2C2010339) and the Regional Leading Research Center Program (2019R1A5A8080326) through the National Research Foundation (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT of Republic of Korea.

포

Iron oxide/graphene anchored carbon nanofiber based hybrid electrode for supercapacitor application

*Ok-Kyung Park¹, Nam Hoon Kim¹ and Joong Hee Lee^{1,2+}

¹ Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, ² Carbon Composite Research Center, Department of Polymer-Nano Science and Technology, Jeonbuk National University

⁺E-mail: jhl@jbnu.ac.kr

Keywords : Graphene, Iron oxide, Carbon nanofiber, Supercapacitor

1. Introduction

With the increasing demand for efficient renewable energy systems to balance energy consumption and utilization, the development of high-performance supercapacitors with long-term stability has become a key focus in the energy sector. To enhance electrode performance and durability, several synthesis methods have been developed recently for affixing iron oxide (IO) NPs directly onto the surfaces of carbon materials using heteroatom doped graphitic carbon thin layers without organic/inorganic binders [1,2]. Despite considerable progress, challenges remain in achieving scalable and cost-effective production of electrode materials suitable for industrial applications. To address these issues, this study introduces а straightforward and scalable method for manufacturing high-performance carbon nanofiber (CNF)-based energy storage electrodes, with enhanced durability through improved electrical properties and structural stability.

2. Experiment

2.1 Preparation of nitrogen doped carbon layer encapsulated Fe₃O₄/graphene anchored carbon nanofibers (NG@IO-G/CNF): 50 mg of Fe₃(NO₃)₃·9H₂O and 5.7 mL of poly(diallyl dimethyl ammonium chloride) (PDDA) were dissolved in 40 mL of DI-water and stirred. Next, 10 mL of a graphene oxide (GO) solution (prepared via Hummer's method, conc: 0.5 mg/mL in DI water) was added to the mixture and stirred at 40°C for 24 h. Subsequently, the carbon nanofiber (CNF) was immersed in the Fe₃(NO₃)₃/GO solution and maintained at 40°C for 24 h. Finally, to form a nitrogen-doped carbon encapsulation layer (NG) on the surface of the IO-G attached CNF, the PDDA@FeOOH-GO/CNF was annealed under an argon atmosphere at 400°C for 2 h, with a heating rate of 2°C/min.

3. Results and Discussion

The NG encapsulation layer on the surface of CNF and the intercalated iron oxide (IO) nanoparticles (NPs) between the NG layer and CNF were characterized using FE-SEM. As shown in Fig. 1(a), NG@IO-G/CNF displays an intercalated structure of IO NPs and graphene between the NG layer and CNF. To evaluate the influence of the IO and graphene composition, as well as the encapsulated NG

layer, on the performance of NG@IO-G/CNF, the electrochemical behavior of H-CNF and NG@IO-G/CNF were compared through GCD analysis. As a result, NG@IO-G/CNF demonstrated a specific capacitance approximately 3.7 times greater than that of H-CNF at a current density of 1.0 A g^{-1} . Furthermore, NG@IO-G/CNF exhibited exceptional cyclic stability, retaining 100% of its initial specific capacitance after 35,000 charge-discharge cycles. These findings confirm that the encapsulated structure provided by the NG layer significantly enhances the electrochemical properties and durability of the fabricated NG@IO-G/CNF electrode.



Fig. 1. (a) FE-SEM image of NG@IO-G/CNF, (b) GCD curves of bare CNF and NG@IO-G/CNF, and (c) cycling stability of NG@IO-G/CNF (at 3.0 A g⁻¹).

Table 1 Specific capacitance (Current density: 1.0 A g⁻¹)

Sample	Specific capacitance (F g ⁻¹)
Bare CNF	88.17
NG@IO-G/CNF	324.67

4. Conclusions

This study presents a simple and scalable method for synthesizing high-performance CNF-based electrodes with enhanced durability for supercapacitor applications. As a result, the NG@IO-G/CNF demonstrated a specific capacitance 3.7 times higher than that of CNF, along with excellent cycling stability, thanks to the encapsulating NG layer. These findings confirm that NG@IO-G/CNF holds great potential as an electrode material for high-performance supercapacitors.

References

Li Wang et al. J Colloid Interface Sci. 679:588-599, 2025.
 Q Wu et al. Langmuir. 37:785-792, 2021.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (2021R1C1C2014469).

항공기 에어덕트용 고온 적용이 가능한 실리콘 고무 컴파운딩 연구(II) Research on Silicone Rubber Compounding with High-Temperature application for

Aircraft Air-Ducts(II)

*이재호 ¹⁺, 윤주영 ², 도성열 ³ * J.H. Lee ¹⁺, J.Y. Yoon², S.Y. Do³

¹ DYETEC연구원, ² 우양신소재 ⁺E-mail: hojae7304@dyetec.or.kr

Keywords: Silicone Hose, Compound, Surface Treatment, Coupling Agent

1. 서론

최근 미래 모빌리티산업을 비롯한 다양한 산업에서 씰링, 가스켓, 호스 등에 적용 되는 고무 소재의 내열성, 고온 내구성 등의 안전성과 신뢰성을 향상시키는 연구는 필수적인 요소이다.

실리콘 고무는 놀라운 내열성과 내한성을 보유하고 있다. 고온 환경(최대 200°C 이상)은 물론, 극저온 환경(-60°C 이하)에서도 그 유연성과 탄성을 잃지 않아, 일반 고무 호스가 쉽게 경화되거나 균열이 발생하는 환경에서도 안정적인 성능확보가 가능한 소재이나 기본 물성이 낮아 이를 보완하기 위하여 다양한 보강재로 보강하여 사용하고 있다.

본 연구에서는 기존 실리콘 고무의 유연성 향상을 위해 실리콘 고무에 기타 첨가제를 첨가하여 고무 배합기술을 개발하고 보강직물의 표면처리를 통해 항공기 APU에 적용 가능한 실리콘 고무 복합소재 개발하기 위한 연구를 진행하였다.

2. 실험

2.1 실리콘 고무 첨가제

본 실험에서는 기존 실리콘 고무 대비 함량별 고무 특성을 파악하기 위해 경화제(2,5-Dimethyl-2,5di-(tert-butylperoxy)-hexane), 가교제, 분산제, 안료는 첨가제 배합 비율대로 적용하여 컴파운딩을 실시하였으며, 내구성 및 고온안정성 확보를 위하여 금속산화물로 산화아연을 첨가하고 유연성 향상을 위하여 무기계 오일을 적용하였다.

2.2 실리콘 고무 컴파운딩 공정

실리콘 고무 컴파운딩은 1차로 니더기를 이용하여 믹싱(Mixing)하였으며, 2차로 실리콘 고무의 균일한 배합을 위해 3롤밀을 이용해 반복적인 압력을 가함으로써 균일한 배합이 가능하도록 진행하였다.



Fig. 1. Rubber compounding using 3-roll-mill.

2.3 아라미드 직물의 표면처리

본 실험에서 사용된 아라미드는 Nomex[®](Dupont Co.) 평직을 사용하였다. 직물 제조 과정에서 발생한 오염물질을 제거한 뒤 실란계 커플링제 조액에 망글을 이용해 표면처리 한뒤 200°C에서 5분간 건조하였다.

2.4 고무 컴파운드의 특성분석

인장강도는 무기계오일이 증가함에 따라 소폭 증가하다가 10wt% 이상 증가할수록 감소하고 신율은 상승하는 경향을 나타내었다. 오일이 증가함에 따라 실리콘 고무 내 고분자 사슬간 오일이 침투하면서 유연성을 대폭 향상 시켰기 때문으로 보이며, 경도 또한 낮아지는 경향을 보였다.

실리콘고무와 아라미드 직물과의 접착력 역시 실리콘 오일이 증가함에 따라 소폭 증가하고 서서히 감소하는 경향을 나타내었으나, 오일이 없는 시편대비 높은 접착력을 가짐을 확인하였다.





4. 결과 및 고찰

실리콘 고무의 유연성 향상을 위하여 무기계오일을 적용하였다. 오일 함량에 따른 실리콘 고무의 강도는 감소하였으나, 신율과 보강섬유와의 접착력이 크게 상승하는 것을 확인하였다.

후기

본 논문은 중소벤처기업부 구매조건부 사업 'XF-X APU Air-duct용 고내열성 고기밀성 실리콘 호스 개발' (No. S3348941)의 지원을 받아 연구된 논문입니다. 관계자 여러분께 감사 드립니다.

Multi-Strategy Engineering of Earth-Abundant Electrocatalysts for Efficient Anion **Exchange Membrane Water Electrolysis**

Hoang Tuan Nguyen¹, Abhisek Majumdar¹, Duy Thanh Tran^{1*}, Nam Hoon Kim¹, Joong Hee Lee^{1,2*}

¹Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk National University. ²Center for Carbon Composite Materials & Dept. of Polymer and Nano Science and Technology, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Republic of Korea.

*E-mail: dttran@jbnu.ac.kr and jhl@jbnu.ac.kr.

Keywords: Heterostructure, coordination engineering, oxygen vacancy, water splitting, AEM water electrolysis.

1. Introduction

Anion exchange membrane (AEM) water electrolysis is a promising approach for sustainable hydrogen production [1]. However, noble metal-based catalysts are not viable due to their high cost, necessitating the development of transition metal-based alternatives [2]. While earth-abundant transition metals offer a costeffective solution, their catalytic activity remains insufficient. To address this, strategies such as heterostructure formation, coordination engineering, morphology control, and defect engineering have been explored. Yet, single-strategy approaches often fail to achieve high performance [3]. Herein, we integrate multiple strategies, including morphology control, interface engineering, coordination tuning, and defect engineering, to design a needle-like heterostructure catalyst with optimized charge transfer and enhanced resulting catalvtic activity. The NiMn-OPSe electrocatalyst demonstrates exceptional hydrogen and oxygen evolution reaction (HER/OER) performance, achieving ultralow overpotentials of 69 mV (HER) and 269 mV (OER) at 10 mA cm⁻² in 1.0 M KOH. This catalyst surpasses many non-noble metal-based alternatives, exhibiting activity comparable to noble metals, offering a viable solution for scalable hydrogen production.

2. Experimental

We utilized a straightforward two-stage synthesis approach. Initially, a hydrothermal method was employed to fabricate a MnCO₃/NiOOH mixed-phase needle-like structure with optimized morphology. In the second stage, a controlled phospho-selenization process was carried out to modify the coordination environment of metal sites and establish an interface between MnCO3 and Ni8P3/NiSe (Fig. 1).



Fig. 1. A schematic illustration of the synthesis of NiMn-OPSe catalyst.

3. Results and Discussion

SEM image shows NiMn-O uniformly distributed over NF, exhibiting a smooth nano-needle structure. After phospho-selenization, the surface becomes rough while retaining the nano-needle morphology (~40 nm diameter) (Fig. 2).



Fig. 2. SEM images of NiMn-O and NiMn-OPSe materials.

The NiMn-OPSe achieves outstanding activity with ultralow overpotentials of 69 mV (HER) and 269 mV (OER) at 10 mA cm⁻², significantly outperforming NiMn-O (180 mV, 320 mV), NiMn-OP (75 mV, 280 mV), and NiMn-OSe (108 mV, 310 mV). In AEMWE at 70°C, NiMn-OPSe delivers low cell voltages and also exhibits remarkable stability for 500 hours in 1.0 M KOH, with an exceptionally low degradation rate of 120 μ V/h (Fig. 3).



Fig. 3. (a) LSVs for HER & OER of different catalysts. (b) AEMWE stability for NiMn-OPSe||NiMn-OPSe.

4. Conclusions

We successfully synthesized the NiMn-OPSe heterostructure with exceptional HER and OER activity due to its rational design integrating multiple strategies. The catalyst demonstrates excellent AEMWE stability, highlighting its potential for cost-effective industrial hydrogen production.

References

- [1] R. Abbasi et al., Adv. Mater. 2019, 31, 1805876.
- [2] A. Majumdar et al., Small 2022, 18, 2200622.
- [3] L. Ge et al., Adv. Funct. Mater. 2025, 35, 2413072.

Acknowledgement

This research was supported by the Basic Science Research Program (RS-2024-00349472), BRL (RS-2023-00207836), and the Regional Leading Research Center Program (2019R1A5A8080326) through the National Research Foundation funded by the Ministry of Science and ICT of the Republic of Korea.

Rational Design of High-Performance Electrocatalyst Derived from Pt-doped NiMoSe₂-supported Co₂P for Overall Water Splitting

Thokchom Anjali Devi¹, Duy Thanh Tran¹, Manoj Bollu, Nam Hoon Kim^{1*}, Joong Hee Lee^{1,2*}

¹Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk National University, ²Center for Carbon Composite Materials & Dept. of Polymer and Nano Science and Technology, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Republic of Korea

*E-mail: jhl@jbnu.ac.kr and nhk@jbnu.ac.kr

Keywords: Heterointerfaces, Transition metal selenides, Bifunctional catalysts.

1. Introduction

The adoption of carbon-free hydrogen offers a sustainable alternative to fossil fuels, addressing energy and environmental challenges. Water splitting is the most promising approach among various production methods, enabling efficient and clean hydrogen generation for a decarbonized future [1]. Significant efforts have been focus on developing cost-effective electrocatalysts with tailored properties to enhance both hydrogen and oxygen evolution reactions (HER and OER) for efficient water splitting [2]. Metal senenides, with abundant catalytic sites, can enhance water splitting by optimizing Hadsorption/desorption The energy. senenides-based heterostructure materials integrating multifunctional components, with hydrogenase-like functionality, further offer strong catalytic performance of overall water splitting [3]. In this study, we engineered a novel Pt-MiMoSe₂/Co₂P hybrid catalyst supported on nickel foam. This catalyst demonstrates superior catalytic efficiency for both HER and OER, surpassing the performance of commercial Pt/C and RuO₂ catalysts.

2. Experimental

Fig. 1 presents a schematic illustration detailing the straightforward fabrication process of the Pt-NiMoSe₂-supported Co_2P catalyst, providing clear insight into the procedure.



Fig. 1. A schematic illustration of the synthesis of Pt-MiMoSe₂/Co₂P catalyst.

3. Results and Discussion

Fig. 2 illustrates the morphological features of the synthesized Pt-NiMoSe₂/Co₂P catalyst, as analyzed by SEM tecnique at different magnifications. The achieved image depicts the uniform structure of a wavy nanowire-based architecture with high roughness grown on surface

F substrate as a result of the specific selenidization process.



Fig. 2. (a-b) FE-SEM images of the Pt-NiMoSe₂/Co₂P catalyst.

Fig. 3 illustrates that the Pt-NiMoSe₂/Co₂P hybrid catalyst achieves an overpotential of 81 mV for the HER and 242 mV for the OER at 10 mA cm⁻² in 1.0 M KOH medium, outperforming other catalysts and even commercial materials.



Fig. 3 Electrochemical LSV response from different prepared catalyst materials for (a) HER and (b) OER in 1.0 M KOH.

4. Conclusions

We have successfully synthesized Pt-NiMoSe₂/Co₂P heterostructured arrays as a highly efficient catalyst for HER and OER, and then overall water splitting. The Pt-NiMoSe₂/Co₂P enhance catalytic activity and selectivity, attributed to increased active sites and synergistic interactions among the material components.

References

- [1] K. D. Tran et al. ACS. nano. (2024), 18, 25,, 16222-16235.
- [2] N.T.A. Duong et al. Chem.Eng. J. 498 (2024), 155287.
- [3] G. Bandari et al. small. 20 (2024) 2405952.

Acknowledgement

This work was supported by the Basic Science Research Program (2022R1A2C2010339) and the Regional Leading Research Center Program (2019R1A5A8080326) through the National Research Foundation (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT of Republic of Korea.

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

마스터배치 컴파운드 설계를 통한 섬유강화 열가소성 복합재료의 가공성 및 기계적 물성 향상 연구

Masterbatch Compound Design for Enhanced Processability and Mechanical Properties of Thermoplastic Fiber Reinforced Composite

*이진우 ¹, 이재영 ¹, 이지은 ¹⁺ * J.W. Lee ¹, J.Y. Lee ¹, J.E. Lee ¹⁺

> ¹ 한국소재융합연구원 ⁺E-mail: jelee@kimco.ac.kr

Keywords: Polyamide 6, recycled carbon fiber, blending, processability, Masterbatch

1. 서론

최근 열경화성 복합재료의 폐기물 관리 문제가 대두됨에 따라 부품의 사용수명 이후 재활용에 대한 관심이 높아지고 있다 [1][2]. 재활용 탄소 섬유의 경우 재활용 과정에서 분쇄가 되기 때문에 단섬유 형태로 열가소성 수지와 함께 많이 사용되며 그 중 Polyamide 6 (PA6)의 경우 높은 기계적 강도를 가지기 때문에 많은 관심을 받고 있다. 하지만 다른 플라스틱 제품과 비교하여 낮은 충격 특성으로 인해 공정에 어려움을 겪는 경우가 종종 있기에 다른 열가소성 수지 및 첨가제와 함께 블렌딩을 하여 가공성 및 기계적 물성을 개선하고자 하는 연구들이 많이 진행되고 있다. 본 연구에서는 PA6 수지의 물성을 개선할 것으로

예상되는 열가소성 수지와 첨가제를 혼합하여 기계적 물성에 어떠한 영향을 미치는지 분석하고자 한다.

2. 재료 및 실험 방법

PA6 수지의 기계적 물성 향상을 위해 나노 및 마이크로 크기의 입자를 이축 압출기에서 혼합하여 1차 마스터배치 컴파운드를 제작하였다. 제작된 컴파운드를 PA6 및 재활용 탄소섬유(rCF)와 함께 물리적으로 혼합하여 사출기를 통해 복합재료 시편을 제작하였다. 이 때 PA6/rCF의 함량은 95 %, 90 % 총 2가지 함량에 대한 변량 실험을 진행하였으며, PA6/rCF의 섬유 체적률 또한 30 %와 40 % 총 2가지 체적률에 대해 변량하여 제작하였다. 복합재료의 기본적인 물성을 평가하기 위해 ASTM D638에 의거하여 인장 시험을 진행하였으며, ASTM D790에 의거하여 굽힘 시험을 진행하였다. 또한 PA6/rCF 복합재료의 비중을 확인하기 위해 ASTM D 792에 의거하여 시험을 진행하였으며, 경도를 평가하기 위해 ASTM D2240에 의거하여 시험을 진행하였으며, PA6 란 엔지니어링 플라스틱 소재 기반 복합재료이기 때문에 Shore D type으로 경도 측정을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

가공성 개선을 위해 충격 특성을 향상시킬 수 있는 폴리머와 복합재료 블렌딩 시 기계적 물성 변화에 대해 평가하였다. 먼저 섬유 체적률이 높아짐에 따라 더 높은 인장 특성 및 굽힘 특성을 보였으며, 이는 섬유가 많아짐에 따라 비중이 향상됨으로 인해 더 높은 기계적 물성을 보인 것으로 보인다. 또한 충격특성을 개선하기 위한 마스터배치가 들어감에 따라 재료의 굽힘 강도 및 굽힘 탄성률 등 재료의 강도 측면에서는 감소를 보였지만 displacement 가 증가함을 보였다. 이는 재료의 충격 강도가 향상됨에 따라 연성거동이 증가한 것을 확인할 수 있었다. 다른 폴리머와 블렌딩을 통해 재료의 연성 거동을 향상시키는 것을 통해 추후 충격 특성이 낮은 폴리머 기반 섬유 강화 복합재료의 충격 특성을 높여주면서 가공성을 더욱 향상시키는 데 있어 기여할 수 있을 것이라 판단된다.



4. 향후과제

나노 및 마이크로 입자를 첨가하기 전에 PA6 수지와 재활용 탄소섬유에 대한 변량시험을 진행하여 기본적인 기계적 물성을 평가하였다. 이를 바탕으로 강화 입자를 첨가하고 입자에 의한 가공성 저하 등을 개선하기 위한 컴파운드 배합에 대한 변량을 진행할 예정이며 인장강도, 충격강도 등의 기계적 물성을 비롯하여 차폐, 유전율 등의 특성도 함께 평가할 예정이다.

참고문헌

- [1] Kim K-S et al. Elastomers and Composites
 - 2012;47:65-74.

[2] Holmes M. Reinforced Plastics 2018;62:148–53.

후기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부의 양산성능평가지원 (RS-2025-01002968)에 의한 연구임.

Engineering human-machine interfaces for multi-functional sensing

*Zhaoyang Sun¹, and Il-Kwon Oh¹⁺

¹ Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Republic of Korea ⁺E-mail: ikoh@kaist.ac.kr

Keywords : conductivity hydrogel, human interfaces, stain sensing **1. Introduction**

Multifunctional soft and stretchable electronics. particularly wearable and skin-like devices, play a crucial role in the IoT era across various applications, including physiological signal sensing, sports monitoring, and human-machine interfaces [1-4]. These devices require active materials that are highly soft, stretchable, and conductive. Here, we present a strategy to simultaneously enhance the mechanical toughness and conductivity of hydrogels by treating them with different anions and cations. The resulting hydrogel can detect subtle strains for physiological signal monitoring and integrate with wireless sensing systems to provide real-time alerts for accidental warnings. This versatile approach, offering broad tunability in mechanics and conductivity, unlocks new possibilities for applications ranging from bioelectronics to soft robotics.

2. Experiment section

The human interface was realized by a stretchable and conductivity hydrogel. Selective anion and cation treatments to achieve systematic regulation and optimization of the mechanical and electrical properties of the composite hydrogel. In the first stage, the mechanical properties were modulated by leveraging the interactions between polymer chains and various anions. These interactions influence the hydration structure of the polymer, as different anions exhibit distinct effects on the polymer chain and its associated hydration water molecules. In the second stage, the electrical conductivity was enhanced by reorganizing the domains of doping conductive polymer, induced by phase separation during exposure to specific cations (Figure 1d, e). This process facilitated an optimized conductive network within the hydrogel matrix. The resulting composite hydrogel exhibited a remarkable conductivity

3. Results and Discussion

The optimized hydrogel, fabricated by mechanically regulating anions and electrically modulating cations, exhibits a wide range of potential applications, particularly in human motion detection (Fig.1 a).

The composite hydrogel can effectively distinguish varying strain states in the human body based on resistance signal waveforms. For instance, as depicted in Fig. 1b, the hydrogel accurately detects singnals of finger bending when adhered to the skin. This also indicate the potential of strain responses across diverse motion states, including walking, jumping, squatting, and standing jumps.

Besides, the system offers advanced functionalities, such as horizontal strain detection and vertical pressure sensing. As a practical demonstration, the hydrogel's vertical electrodes were configured into a sandwich structure to detect pressure signals, as shown in Fig. 1c, press hydrogel also can got a signal response, indicating potential use in pressure sensing.



Fig. 1. a. Diagram of various human motion detenction. b. Demostrate of finger bending for stain sensing. c. Demonstrate of pressure sensing with a finger press.

4. Conclusions

In summary, we reported a dual-stage soaking strategy to systematically optimize the mechanical and electrical properties of composite hydrogels through selective anion and cation treatments. Mechanical properties were adjusted via interactions between polymer chains and specific anions, with salting-out and salting-in effects enabling precise tunability. Electrical conductivity was enhanced through conductive polymer domain area reorganization, induced by cation-mediated phase separation. The optimized hydrogel, demonstrating high sensitivity across various strain ranges, enables precise detection of physiological signals.

References

- [1] K Hou et al. Adv. Funct. Mater. 31: 2107006, 2025.
- [2] FY Liao et al. Nat. Electron. 5:84-91, 2022.
- [3] W Zhang et al. Chem. Soc. Rev, 49:433-464, 2020.
- [4] X. Ji et al. Adv. Mater. 33:2100949, 2021.

Acknowledgment

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00345241).
2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

탄소섬유실란처리 두께에 따른계면 특성 분석 Investigation of Interfacial Characterization Depends on Thickness of Silane Treatment on Carbon Fibers

*이동현 ', 지형진 ', 권동준 '+

* Donghyeon Lee¹, Jong-Hyun Kim², Seong Baek Yang², Dong-Jun Kwon^{1,2,+}

Department of Materials Science and Convergence technology¹, Gyeongsang National University + E-mail: djkwon@gnu.ac.kr

Keywords: Sealant, Oil resistance, polymer composition

1. Introduction

In composite materials, the interfacial characteristics between the reinforcement and the matrix material are as critical as their intrinsic properties. While interlaminar shear strength (ILSS) measurement is widely employed for interfacial characterization, this method is influenced by multiple extraneous variables beyond the interface itself. To mitigate these confounding factors, micromechanical testing methodologies have been developed and implemented for more precise interfacial analysis. In this study, silane treatment was applied to enhance interfacial properties, and a microdroplet test was conducted to evaluate interfacial characteristics. Furthermore, a statistical approach based on the Weibull distribution was employed to the microdroplet test results to establish a more rigorous and reliable interfacial analysis methodology [1].

2. Experimental

In this study, interfacial modification was conducted by controlling the thickness of the silane layer through varying the number of silane treatment cycles. The interfacial characteristics were evaluated using the microdroplet test, which enables direct measurement of the interfacial shear strength between the reinforcement and the matrix. Following the interfacial analysis, a statistical assessment was performed based on the Weibull distribution to ensure the reliability and accuracy of the measured interfacial properties. This approach allowed for a comprehensive evaluation of the influence of silane layer thickness on interfacial performance.

3. Results and discussion

The thickness of the silane layer exhibited variation depending on the number of silane treatment cycles. As the silane layer increased in thickness, partial agglomeration and wave-like patterns were observed on the fiber surface, indicating the formation of surface irregularities. When the silane layer was insufficiently thin, inadequate adhesion between the fiber and the matrix resulted in a low interfacial shear strength (IFSS). Conversely, when the silane layer was excessively thick, a distinct silane-rich layer was formed rather than an effective interfacial bonding structure, leading to a similarly reduced IFSS. These findings highlight the critical importance of optimizing the silane layer thickness to achieve enhanced interfacial properties. Furthermore, the application of the Weibull distribution for IFSS evaluation demonstrated a lower standard deviation, indicating improved reliability and statistical robustness in interfacial strength analysis.

4. Conclusion

This study demonstrated that optimizing the silane layer thickness is crucial for improving interfacial properties in composite materials. Both excessively thin and thick silane layers resulted in reduced interfacial shear strength (IFSS) due to poor adhesion and the formation of a silane-rich layer, respectively. The application of the Weibull distribution provided reliable statistical analysis, ensuring accurate evaluation of interfacial performance. These findings highlight the importance of silane layer optimization for enhanced composite material performance.

Reference

[1] D. H. Lee et al. Polymer Testing. 141:108631, 2024.

후기

This results was surpported by the Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education and the Ministry of Science and ICT (2020R1A6A1A03038697, RS-2023- 00211944, Glocal University(Gyeongnam Aerospace and Defense Institute of Science and Technology (GADIST)) project).

포

Gallol-Modified Chitosan/Hyaluronic Acid Hydrogel Patches for Enhanced Wound Sealing and Healing

*Da Han Hyun^{1,2}, Hyun Ho Shin³ and Jun Seok Park^{1,2+}, Ji Hyun Ryu^{3,4+}

¹ Department of Biomedical Science, Kyungpook National University, ² Colorectal Cancer Center, Kyungpook National University Chilgok Hospital, School of Medicine, Kyungpook National University, Daegu 41404, Republic of Korea ³. Department of Biomedical Materials Science, Wonkwang University, ⁴. Department of Carbon Convergence Engineering, Wonkwang University ⁺E-mail: parkjs0802@knu.ac.kr, jhryu4816@wku.ac.kr

Keywords : Gallol-chitosan, Hydrogel patch, Wound healing, Tissue adhesive

1. Introduction

Postoperative wound complications such as anastomotic leakage and infections critically affect patient recovery and healthcare costs [1,2]. To address these challenges, tissueadhesive hydrogels based on natural polymers like chitosan have been developed [3]. Gallol-conjugated chitosan (CHI-G) offers strong wet adhesion but is limited by poor mechanical strength and potential immunogenicity [4]. Thus, we engineered CHI-G/hyaluronic acid/calcium ion (CHC) hydrogel patches to overcome these limitations and enhance wound sealing efficacy.

2. Materials and Methods

CHI-G was synthesized via carbodiimide-mediated conjugation of gallic acid to chitosan [5]. Hydrogel patches were prepared by mixing CHI-G (2 wt%) with HA (0.125 wt%) and Ca²⁺ ions (0.01 mM), followed by lyophilization. Their morphology, swelling behavior, and mechanical strength were characterized using SEM, PBS-based swelling assays, and rheometry. Tissue adhesive performance was assessed using porcine intestine bursting pressure tests, and wound healing efficacy was verified in rat skin excisional wound models.

3. Results and Discussion

CHC hydrogel patches showed superior mechanical strength (G' = 809.4 ± 181.7 Pa) and bursting pressure (78.2 ± 3.5 mmHg) compared to CHI-G and HA controls [4]. Their porous structure supported tissue integration, and MTT assays confirmed >80% cell viability. In vitro scratch assays indicated enhanced cell migration with CHC, attributed to the bioactivity of HA and Ca²⁺ [6].

In vivo, CHC-treated wounds showed >90% closure by day 14, outperforming the control (~76%) and matching commercial dressings. Histology and IHC revealed improved granulation, reduced IL-1 β , and moderated CD3⁺ T-cell presence, confirming CHC' s regenerative and anti-inflammatory effects [7].



Fig. 1. Wound size changes on days 7, 10 and 14 (*P < 0.05, **P < 0.01, ***P < 0.001, and ns: not significant)...

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

The CHC hydrogel patch, with improved mechanical strength and biocompatibility, effectively seals wounds and enhances healing in wet environments. These findings support its potential as a clinical wound sealing and dressing material.

References

[1]Zhao Y et al., Technol. Cancer Res. Treat. 2022;21:15330338221118983.

[2]Degiuli M et al., Colorectal Dis. 2022;24(3):264–276.
[3]Ryu JH et al., Adv. Funct. Mater. 2019;29(29):1900495.
[4] Ryu JH et al., Acta Biomater. 2015;27:101–115.
[5] Hu Q, Luo Y. Carbohydr. Polym. 2016;151:624–639.
[6] Shin J et al., Adv. Funct. Mater. 2015;25(25):3814–3824.

[7] This study, Int. J. Biol. Macromol. 2025;306:141115.

Acknowledgement

This work was supported by the Korean Fund for Regenerative Medicine (KFRM) grant funded by the Korea government (Ministry of Science and ICT and Ministry of Health & Welfare) (22A0103L1, JHR). This research was also supported by a grant of the Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), funded by the Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea (HR22C1832, JSP).

건물 통합 태양광 시스템 적용을 위한 탄화 커피박 기반 친환경 단열 복합재료 Eco-friendly carbonized spent coffee ground-based thermal insulation composite for building-integrated photovoltaic systems

*김성진 ¹, 장우석 ¹, 배정원 ², 김성륜^{°1, 2+}

^{*} G.D. Hong ¹, G.S. Hong ², B.J. Hangook³⁺

1전북대학교 탄소융복합재료공학과

² 전북대학교 유기소재섬유공학과

+ E-mail: sykim82@jbnu.ac.kr

Keywords: spent coffee ground, Thermal insulation material, Builiding-integrated photovoltaic system

1. 서론

건물 통합 태양광 시스템(BIPV)은 전력을 생산하면서 동시에 건물 외피 역할을 수행한다 [1]. 그러나 태양광 모듈에서 발생하는 열로 인해 건물 내부 온도가 상승하는 문제가 발생한다 [2]. 이를 해결하기 위해 BIPV 시스템 후면에 단열재를 적용하는 것이 요구된다. 현재 사용되는 석유 기반 단열재는 단열 성능이 우수하지만, 폐기 시 환경오염을 유발하는 문제가 있다 [1,2]. 본 연구에서는 탄화 커피박 기반 친환경 단열 복합재료를 제작하고, 축소형 BIPV 시스템을 이용하여 단열 효과를 검증하였다.

2. 실험

2.1 탄화 커피박

커피박의 탄화는 제한된 대기 환경에서 수행되었으며, 5℃/min의 속도로 700℃까지 승온한 후 1시간 동안 유지하여 탄화가 진행되었다.

2.2 탄화 커피박 기반 단열 복합재료

탄화 커피박의 기공을 보존하면서 단열 복합재료를 제작하기 위해, 필러 1g당 2g의 프로필렌 글리콜 용매를 탄화 커피박에 미리 혼합하였다. 이후, 에틸셀룰로오스와 용매가 포함된 탄화 커피박을 200 rpm으로 혼합하였다. 그 후, 150°C, 15 MPa에서 10분 동안 핫프레스(ARE 310, Thinky Co., Tokyo, Japan)를 이용하여 열압착을 수행하였다. 마지막으로, 잔류 용매를 제거하기 위해 진공 오븐에서 80°C로 1시간 동안 건조하여 탄화 커피박 기반 단열 복합재료를 제작하였다.

2.3 특성화

탄화 커피박 기반 단열 복합재료의 열전도도는 TCI 열전도도 분석기(TCI Thermal Conductivity Analyzer, C-Therm Technologies Ltd., Fredericton, NB, Canada)를 이용하여 측정하였다.

2.4 축소형 BIPV 시스템 제작 및 단열 성능 평가 태양전지 후면에 단열재를 부착한 후 챔버에 적용하여 챔버 내부의 온도 변화를 측정함으로써 단열 성능을 평가하였다. 단열 성능 평가는 적외선 열화상 카메라(FLIR E54, Teledyne FLIR LLC, Wilsonville, OR, USA)를 이용하여 수행하였다. 단열재 미적용, 폴리우레탄 폼 적용, 탄화 커피박 기반 단열 복합재료 적용의 세 가지 조건을 설정하여 단열 성능을 비교 분석하였다.



Fig. 1. 축소형 BIPV 시스템 구성

3. 결과 및 고찰

제작된 탄화 커피박 기반 단열 복합재료는 0.04 W/mK의 낮은 열전도도를 나타내었으며, 상용 폴리우레탄과 유사한 수준의 단열 특성을 보였다. 또한, 축소형 BIPV 시스템에서 발생하는 열에 대해 우수한 단열 효과를 제공하여 내부 챔버의 온도 상승을 억제하였으며, 폴리우레탄 폼과 비교했을 때 유사한 수준의 단열 효과를 나타내었다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서 제작된 탄화 커피박 기반 단열 복합재료는 상용 폴리우레탄 폼과 비교하여 우수한 단열 특성을 보였다. 축소형 BIPV 시스템에서 태양전지에서 발생한 열을 효과적으로 차단하여 챔버 내부의 온도 상승을 억제하는 역할을 수행하였으며, 이를 바탕으로 BIPV 시스템뿐만 아니라 다양한 분야에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

Boafo FE et al. *Energy Build*. 277:112574, 2022.
 Singh D et al. *Mater Today: Proc.*, 52:888-892

후기

이 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2021-KI002492, 2025년 산업혁신인재성장지원사업)

Ionic Liquid-Embedded Soft Composites for Enhanced Shockwave Dissipation

*Joonwoo Park¹ and Jaejun Lee¹⁺

¹ Department of Polymer Science and Engineering, Pusan National University ⁺E-mail: jlee-pse@pusan.ac.kr

Keywords: Soft composites, Shockwave, Ionic liquids, PDMS

1. Introduction

Shockwaves pose severe risks in aerospace, defense, and biomedical applications, yet conventional rigid materials sacrifice flexibility and fail to dissipate energy efficiently. Ionic liquids (ILs) offer a breakthrough solution, leveraging nanoscale phase separation and shock-induced ordering to convert destructive shock energy into less harmful forms. However, their liquid nature limits direct use in protective materials. We propose that embedding ILs in soft composites overcomes this challenge, enabling exceptional shockwave attenuation while maintaining mechanical robustness.

2. Experimental Methods

2.1 Composite Fabrication

ILs (3.3, 6.6, 10 wt%) were homogenized with PDMS precursors (thiol-branched siloxane, alkene-terminated siloxane, photoinitiator) using an HZ1 homogenizer (1000 rpm, 25°C) in a 2 L water bath to prevent overheating. The degassed mixture was drop-cast onto a glass substrate and UV-cured (365 nm, 20 min).

For shockwave testing, 20 mg of the uncured composite was sandwiched between two glass substrates with a 50 μ m polyimide spacer under 70 kPa pressure and UV-cured. A 200-nm-thick Al layer was deposited via electron beam deposition, followed by spin-coating a Na₂SiO₃ layer (3000 rpm, 45 s) before testing.

2.2 Characterization and Testing

The mechanical properties of the composites were analyzed using dynamic mechanical analysis (DMA). Shockwave dissipation efficiency was evaluated through laser-induced shockwave experiments, measuring transmitted pressure reductions.

3. Results and Discussion

The integration of ILs within the PDMS matrix led to a significant enhancement in shockwave dissipation through key mechanisms, wave scattering at the IL-PDMS interfaces and energy absorption via molecular interactions. Due to the acoustic impedance mismatch between the IL droplets and the PDMS matrix, shockwaves undergo multiple internal reflections, effectively breaking down high-energy waves into smaller, less destructive secondary waves.[1] As illustrated in Fig 1, the IL inclusions act as scattering centers that redirect and attenuate incoming shockwaves, leading to a reduction in transmitted pressure.

Experimental results indicate that composites containing 10 wt% IL exhibit a 3.7% greater dissipation efficiency compared to pure PDMS, particularly under high-intensity shockwave conditions. Furthermore, variations in IL droplet dispersion and size distribution influence the overall dissipation behavior. Homogeneous dispersion ensures consistent attenuation, while larger droplets create localized stress, altering dissipation dynamics. These findings suggest that fine-tuning IL content and dispersion parameters can optimize the composite's performance for specific engineering applications.

In addition to energy dissipation, ILs contribute to the mechanical reinforcement of the composite. Hydrogen bonding between ILs and thiol groups within the PDMS network enhances stiffness without compromising elasticity, ensuring that the material remains adaptable under dynamic loading conditions.[2] This balance between flexibility and mechanical stability makes IL-PDMS composites an option for impact-resistant applications.



Fig. 1. Shockwave dissipation in IL-PDMS composite.

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

IL-based soft composites provide a novel and efficient approach to shockwave mitigation, combining flexibility with improved mechanical stability. These findings open new possibilities for lightweight, adaptable materials in aerospace, defense, and high-impact applications. The synergy between ILs and PDMS not only enhances energy dissipation but also contributes to material durability, further reinforcing the potential of this composite system for practical applications.

References

- [1] Tsai, L. et al. Int. J. Solids Struct. 42(2), 727-750, 2005.
- [2] K. Baranowska et al. New J. Chem. 36, 1574-1582, 2012.

포

人

터

1

Lewis-Acid Etching-Derived Defect-Rich MoB MBene for Efficient Alkaline Hydrogen Evolution

Tan Dat Nguyen¹, Thanh Hai Nguyen¹, Duy Thanh Tran¹, Nam Hoon Kim^{1*}, Joong Hee Lee^{1,2*}

¹Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk National University,

²Center for Carbon Composite Materials & Dept. of Polymer and Nano Science and Technology, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Republic of Korea

*E-mail: nhk@jbnu.ac.kr and jhl@jbnu.ac.kr.

Keywords : Hydrogen evolution reaction, 2D MBene materials, MoB, Lewis-acid etching.

1. Introduction

The reliance on noble metals like platinum significantly increases the cost of hydrogen production due to their limited availability and high demand in catalytic applications. As a result, cost reduction has become a key focus [1]. MBenes, a novel class of two-dimensional transition metal borides, have shown great potential in various fields due to their high electrical conductivity, abundant active sites, and tunable surface chemistry [2]. However, the complete removal of aluminum from the MoAlB MAB phase and the successful delamination of few-layered MBenes remain significant challenges, limiting their broader application [3]. Here, we introduce a Lewis-acid etching method to synthesize defect-rich. aluminum-free MBene, demonstrating its effectiveness as an electrocatalyst for the alkaline hydrogen evolution reaction (HER).

2. Experimental

Initially, MoAlB is dissolved in TMAOH with H_2O_2 added, hydrothermally treated, and then freeze-dried to obtain MoAl_{1-x}B powder. Next, MoAl_{1-x}B and molten salts (CuCl₂, NaCl, and KCl) were mixed and heated to 700°C for 5 hours under flow of Ar gas. Finally, MBene powder was obtained after washing with deionized water and APS solution, as depicted in **Fig. 1**.



Fig. 1. A schematic illustration of the synthesis of MBene.

3. Results and Discussion

As shown in **Fig. 2**, the as-prepared MBene possesses accordion-like, 2D nanosheet structures. The layered structures can substantially expand the specific surface area, creating more active sites for ion insertion and removal.



Fig. 2. SEM images of Mo_xB_y MBene material.

The XPS spectrum confirms the presence of key elements in structure of each material (**Fig. 3a**). According to **Fig. 3b**, defect-rich Mo_xB_y MBene exhibits exceptional HER activity by requiring 376.8 mV (vs. RHE) to reach 10 mA cm⁻².



Fig. 3. (a) XPS survey spectra of MBene and (b) LSV polarization curves of different catalysts.

4. Conclusions

We have successfully synthesized Mo_xB_y MBene comprising of accordion-like, 2D nanosheet structures. The findings offers an effective and alternative approach to design high-performance MBene-based materials for electrochemical purposes.

References

- [1] C. D. S. L. F. Z et al., Mater. Res. Lett., 2023, 11, 571–577.
- [2] T. Xu, et al. Nanomicro. Lett., 2022, 15, 6.
- [3] J. Mou et al. J. Adv. Ceram., 2023, 12, 943–953.

Acknowledgement

Rational Design of Pt-based Alloys Anchoring on MBenes as Efficient Electrocatalyst for pH-universal Hydrogen Evolution Reaction

Penghao Zhu¹, Jinhai Yang¹, Thanh Hai Nguyen¹, Duy Thanh Tran¹, Nam Hoon Kim^{1} and Joong Hee Lee^{1,2*} ¹ Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University,

²Center for Carbon Composite Materials, Department of Polymer & Nano Science and Technology, Jeonbuk National University,

Jeonju, Jeonbuk, 54896, Republic of Korea.

*E-mail: nhk@jbnu.ac.kr and jhl@jbnu.ac.kr

Keywords : d-band center, Pt active sites, MoB2 MBene, green hydrogen production.

1. Introduction

Electrochemical water splitting is the most sustainable and efficient way to produce green hydrogen [1]. It is essential that high activity electrocatalysts with low overpotential are used as part of the electrochemical water splitting process. Platinum-based catalysts remain the preferred choice for catalyzing the hydrogen evolution reaction (HER). However, their scarcity, high cost, limited stability, and suboptimal performance significantly hinder the large-scale commercial deployment of HER in terawatt-scale applications [2]. In this work, we developed a robust strategy to fabricate ultrafine and homogeneously dispersed PtCu on MoB₂ MBene nanosheets (PtCu@MBene), which function as highly efficient electrocatalysts for the hydrogen evolution reaction (HER) across a wide pH range. This catalyst reveals the remarkable HER activity with low overpotentials of 33 and 22 mV to reach 10 mA cm⁻² in 0.5 M H₂SO₄ and 1.0 M KOH, respectively.

2. Synthesis Materials

2.1 Synthesis MoB₂ MBene. Initially, Al layer was etched by HF solution, dissolved in water and TBAOH added, freeze-dried to obtain MBene powder, and then ultrasonicated to avoid large particles and obtain multilayer MBene.

2.2 Synthesis PtCu@MBene. The CuCl₂%2H₂O and H₂PtCl₆·6H₂O are mixed with MBene powder, through ultrasound and stirring, to obtain PtCu@MBene solution, and finally through freeze-drying, get the powder PtCu@MBene, as schematically illustrated in Fig. 1.



Fig. 1 Diagram of the synthesis process of PtCu@MBene.

3. Results and Discussion

The exfoliated MBene exhibited a clearly distinguishable layered-by-layered structure. As shown in **Fig. 2**, SEM image indicates the formation of PtCu on the MBene surface at an atomic scale.



Fig. 2. SEM images of the PtCu@Cu-MoB₂ material.

The PtCu@MBene shows outstanding performance towards hydrogen evolution reaction (HER), with overpotential of 33 mV and 22 mV at a current density 10 mA cm⁻² in 0.5 M H₂SO₄ and 1.0 M KOH, respectively (**Figs. 3a-b**).



Fig. 3. Electrochemical LSV curves from different prepared catalyst materials in (a) 0.5 M H₂SO₄ and (b) 1.0 M KOH.

4. Conclusions

In summary, we successfully developed a highly efficient and durable PtCu@MBene electrocatalyst for water electrolysis. This work not only presents a novel material system for enhancing HER but also offers valuable insights into the design of advanced electrocatalysts based on emerging MBene nanosheets.

References

[1] X. He et al., *Appl Catal B: Environ.*, **2023**, 331, 122683.
[2] Q. P. Ngo et al., *Adv. Energy Mater.*, **2023**, 13, 2301841.

Acknowledgement

Pt Single Atoms-Modified Ni₂P/WS₂ Heterojunction Catalyst for Overall Efficient Water Splitting

Jinhai Yang¹, Penghao Zhu¹, Thanh Hai Nguyen¹, Duy Thanh Tran¹, Nam Hoon Kim^{1*}, Joong Hee Lee^{1,2*}

¹ Dept. of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeollabuk 54896, Republic of Korea. ² Carbon Composite Research Center, Dept. of Polymer Nano Science and Technology, Jeonbuk National University, Jeonju,

Jeonbuk 54896, Republic of Korea.

*E-mail: <u>nhk@jbnu.ac.kr</u> and <u>jhl@jbnu.ac.kr</u>.

Keywords : Pt single-atom, Heterostructure, Electrodeposition, Overall water splitting.

1. Introduction

Water electrolysis has immense potential for energy transition and green hydrogen production. At present, the extensive use of noble metals, such as Pt-based and Ru/Irbased catalysts, for water splitting has significantly hindered its practical application due to their high cost and scarcity [1,2]. Pt single-atomic catalysts (SACs) are regarded as the most promising candidates for significantly enhancing the Pt atoms utilization efficiency [3]. However, Pt SACs still face many challenges when used in the hydrogen evolution process. A major issue is the poor stability of Pt single atoms, as they are prone to agglomeration or leaching leading to a loss of catalytic activity. Herein, we proposed a strategy to immobilize phosphide/tungsten construct nickel disulfide heterostructure anchoring platinum single atoms (Ni₂P/WS₂-Pt_{SA}) as efficient electrocatalyst for overall water splitting in alkaline medium, by requiring low overpotentials.

2. Experiment

Figure 1 illustrates the straightforward fabrication process for synthesizing Ni_2P/WS_2-Pt_{SA} , This involves first obtaining Ni_2P nanowires through hydrothermal and phosphorization reactions, followed by a secondary electrodeposition and wet impregnation to form a WS_2 shell structure with Pt single atoms.



 Ni_2P/WS_2-Pt_{SA} catalysts.

3. Results and Discussion

The microstructure of the Ni_2P/WS_2-Pt_{SA} catalyst is shown in **Figs. 2(a-b)**. The FE-SEM images clearly reveal the microstructure of the catalyst, which consists of nanorods supporting nanosheets. It might beneficial for electrocatalytic performance.



Fig. 2. FE-SEM (a) low- and (b) high-magnification of Ni₂P/WS₂-Pt_{SA} catalyst.

Figs. 3(a-b) demonstrates the excellent catalytic performance of the catalyst. The as-synthesized Ni₂P/WS₂-Pt_{SA} catalyst could promote hydrogen evolution reaction (HER) and oxygen evolution reaction by requiring low overpotentials of 37 and 271 mV (vs. RHE) to reach a current density of 10 mA cm⁻² in an alkaline medium.



Fig. 3. LSV responses of different developed materials toward (a) HER and (b) OER in alkaline medium.

4. Conclusions

We have successfully synthesized nickel phosphide/tungsten disulfide anchoring platinum single atoms (Ni_2P/WS_2-Pt_{SA}) on nickel foam for efficient overall water splitting, thus opening a new pathway to reach sustainable and large-scale hydrogen production.

References

- [1] Tran K D et al., ACS Nano, 2024, 18, 16222.
- [2] Shao S et al. Chem. Eng. J., 2021, 413, 127416.
- [3] Huo J M et al. Small, 2023, 19, 2207044.

Acknowledgement

Synergetic Modulation of Electronic Properties of Core-Shell Structured Nickel Sulfide via "Ru" Single Atom for Efficient Overall Water Splitting

Naresh Raut¹, Abhisek Majumdar¹, Duy Thanh Tran¹, Nam Hoon Kim^{1*}, Joong Hee Lee^{1,2*}

¹Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk National University. ²Center for Carbon Composite Materials & Dept. of Polymer and Nano Science and Technology, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Republic of Korea.

*E-mail: jhl@jbnu.ac.kr and nhk@jbnu.ac.kr

Keywords: Water splitting, Core-shell material, Ru-doping, Electrocatalysis.

1. Introduction

Hydrogen, as a zero-emission energy carrier, has gained prominence as an ideal solution in addressing the pressing energy crisis and environmental issues. Developing efficient electrocatalysts for water splitting is key to sustainable energy conversion. In recent decades, composite catalysts made from oxides, hydroxides, phosphides, nitrides, and chalcogenides have been developed to create open frameworks for hydrogen production [1]. Heterogeneous interface engineering by hybridizing NiS could be an effective way to regulate electronic structure, enhance mass and charge transfer, optimize energy barriers, and accelerate water splitting kinetics through synergistic activation [2]. Doping the Ru atoms enhances the active sites, leading to improved intrinsic activity [3]. Here, we tackle the limitations and knowledge gaps related to the aforementioned factors by fabricating a hierarchical heterogeneous material (Ru@LDH-NiS/NF) based electrocatalyst for water splitting.

2. Experimental

The required chemicals during fabrication were purchased from Sigma–Aldrich Co. (USA). Scheme 1 illustrated the synthetic route of Ru@LDH-NiS/NF electrocatalyst on nickel foam.



Scheme 1. A schematic synthesis routes of Ru@LDH-NiS/NF catalyst.

3. Results and Discussion

The morphological characteristics of the Ru@LDH-NiS/NF electrocatalyst was illustrated in **Figs. 1(a - b)**. The FE-SEM image revealed the uniform nano rod/sheet heterostructure vertically layered onto the open porous skeleton structure of Ni foam. This distinctive structural morphology motif enhances rapid electrolyte access and augments the density of active sites by exposing additional crystalline edges.



Fig. 1 (a-b) FE-SEM images of Ru@LDH-NiS/NF at different magnifications.

Fig. 2(a-b) illustrate the iR-compensated LSV curves for oxygen evolution reaction (OER) and hydrogen evolution reaction (HER). Among them the target catalyst Ru@LDH-NiS/NF demonstrates strong electrocatalytic performance with a required overpotentials of only 200 mV and 66 mV to achieve the current density of 10 mA cm^{-2} for the oxygen evolution reaction and hydrogen evolution reaction, respectively.



Fig. 2(a & b). Polarization curves of different catalysts for (a) OER and (b) HER

4. Conclusions

In this study, we have successfully synthesized a hierarchical heterogenous Ru@LDH-NiS/NF with coexistence of two hetero interface, which provides a highly efficient and cost-effective bifunctional electrocatalyst for comprehensive water splitting.

References

- [1] Y. Xia and *et al., Appl. Catal. B-Environ. Energy* **2024**, 351 123995.
- [2] H. Yang and et al., Adv. Funct. Mater. 2025, 2419978
- [3] Y. Li, and et al., Adv. Mater. 2023, 35, 2206351.

Acknowledgement

High-Entropy Intermetallics on Graphene Oxides as A Bifunctional Efficient Catalysts for Overall Water Splitting

Phan Khanh Linh Tran¹, Duy Thanh Tran^{1*}, Nguyen Tram Anh Duong¹, Nam Hoon Kim¹, Joong Hee Lee^{1,2*}

¹Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University.

²Center for Carbon Composite Materials & Dept. of Polymer and Nano Science and Technology, Jeonbuk National University. <u>+E-mail: jhl@jbnu.ac.kr, dttran@jbnu.ac.kr</u>

Keywords: High entropy intermetallics, GO, HER, OER, overall water splitting.

1. Introduction

As modern society progresses, the large dependence on fossil fuels has led to large-scale depletion, raising concerns about energy resources and environmental health [1]. Hydrogen energy has considered the attention as a sustainable alternative due to its clean and high-efficiency potential. One of method to hydrogen production is water electrolysis, which involves two crucial reactions: the hydrogen evolution reaction (HER) and the oxygen evolution reaction (OER) [2,3]. However, these reactions are hindered by high activation energy and sluggish kinetics. To address these challenges, a novel electrocatalysts is developed to improve efficiency via the synthesis high entropy intermetallic (HEMs) nanoparticles anchored on graphene oxides, acting as a bifunctional catalyst for both HER and OER.

2. Experiment

Figure 1 illustrates the synthesis process of highentropy nanoparticles of intermetallic PtCoFeNiCu anchored on graphene oxide nanosheets (PCFNC/Gr).



Figure 1. Schematic demonstration for the synthesis of PCFNC/Gr material.

3. Results and Discussion

FE-SEM analysis was conducted to examine the morphology of PCFNC/Gr catalysts. The FE-SEM image reveals that PCFNC nanoparticles are uniformly dispersed on the graphene oxide surface (**Figure 2a**). Additionally, the crystal structure of graphene oxide-supported PCFNC/Gr nanocrystals was analysed using XRD. The XRD spectra of PCFNC/Gr exhibit characteristic peaks at (001) at 24.1° and (110) at 33°, confirming the formation of high entropy material on graphene (**Figure 2b**).



Figure 2. (a) FE-SEM image-, (b) XRD spectra of the PCFNC/Gr hybrid material.

The PCFNC/Gr electrocatalyst achieves a current density of 10 mA cm⁻² with a low overpotential of 52.1 mV for HER and 280 mV for OER. Its durability was evaluated over 50 hours at 10 mA cm⁻² in a 1.0 M KOH electrolyte, demonstrating excellent stability (**Figure 3**).



Figure 3. LSV curves of PCFNC/Gr for (a) HER and (b) OER. (c) Long-term stability for HER and OER at J of 10 mA cm⁻².

4. Conclusions

Based on the achieved results, our study found that the PCFNC/Gr material is a promising candidate for large-scale electrochemical water-splitting applications.

References

- 1. Yingxia, Z., et al. Adv. Energy Mater. 2023, 13, 2203595
- 2. Xureu, Z., et al. J. Am. Chem. Soc. 2024, 146, 3010-3022
- 3. Sanda, L., et al. ACS Nano 2022, 16, 18873-18885

Acknowledgement

This research was supported by the Basic Science Research Program (RS-2024–00349472), BRL (RS-2023–00207836), and the Regional Leading Research Center Program (2019R1A5A8080326) through the National Research Foundation funded by the Ministry of Science and ICT of the Republic of Korea. 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

Ruthenium and Manganese-Doped Cobalt Telluride Porous Nanosheet for Enhanced Bifunctional Catalysis in Alkaline Medium

Keshav Raj Chapagain¹, Abhisek Majumdar¹, Duy Thanh Tran¹, Nam Hoon Kim^{1*}, and Joong Hee Lee^{1,2*}

¹Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk National University.

²Center for Carbon Composite Materials & Dept. of Polymer and Nano Science and Technology, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Republic of Korea.

*E-mail: jhl@jbnu.ac.kr and nhk@jbnu.ac.kr.

Keywords: Cobalt telluride nanosheet, Dual-metal doping, Bifunctional material, Overall water splitting.

1. Introduction

We must investigate clean and sustainable energy sources to address the environmental issues caused by excessive fossil fuel consumption. Due to its lack of carbon emissions and significant energy capacity. hydrogen is a leading candidate for sustainable energy production [1]. While platinum and iridium remain the best catalysts for water splitting, their high cost and limited availability hinder widespread use. Transition metal dichalcogenides (TMDCs) present a promising alternative due to their stability, abundance, electronic properties, and catalytic performance [2]. Cobalt telluride is a promising cobalt-based material for water electrolysis because its increased metallic character leads to higher electronic conductivity compared to other non-radioactive elements in its group [3]. Inspired by aforementioned consideration, we have designed Ru and Mn co-doped CoTe2 porous nanosheets (Ru, Mn-CoTe₂). The dual-metal doping approach effectively modified the electronic structure, leading to improved water dissociation and optimized adsorption of reaction intermediates, ultimately resulting in enhanced bifunctional catalytic activity via a facile synthesis approach.

2. Experimental

Ru-Mn-CoTe₂ has been prepared in 3-step process, where first hydrothermally CoMnMo-LDH was prepared which was then converted to Mn-CoTe₂ in a second hydrothermal process. Finally, Ru has been decorated over Mn-CoTe₂ with a simple impregnation process to form Ru-Mn-CoTe₂. (**Fig. 1**).



Fig. 1. A schematic illustration of the synthesis of Ru,Mn-CoTe₂ material.

3. Results and Discussion

The morphology of the synthesized materials was analyzed using scanning electron microscopy (SEM) as shown in **Figure 2**. The CoMnMo-LDH exhibited a smooth, porous nanosheet-like structure. However, after tellurization and Ru doping, the surface became rougher, likely introducing more active sites for enhanced catalytic performance.



Fig. 2. SEM images of (a) CoMnMo-LDH and (b) Ru, Mn-CoTe₂.

The catalytic performance for both the HER and OER was evaluated using LSV. The results demonstrated excellent activity of Ru-Mn-CoTe₂ for both HER and OER, requiring only 39 and 220 mV to achieve a current density of 10 mA cm⁻², respectively (**Figure 3**).



prepared catalysts.

4. Conclusions

This report outlines a promising approach for tuning the electronic structure of LDH materials through tellurization and Ru doping (Ru-Mn-CoTe₂), resulting in highly efficient bifunctional catalysts, providing a new strategy to prepare and regulate metal-based tellurides for catalysis and beyond.

References

- [1] Abhisek Majumdar et al. Adv. Funct. Mater. 2025, 2420517.
- [2] I. Pathak et al., J. Mater. Chem. A, 2024, 12, 17544–17556.
- [3] Xiaoxiao Jing et al. Inorg. Chem. 2024, 63, 12764–12773.

Acknowledgement

V₂CT_x MXenes Coupling with Pt-TCCP as Molecular Catalysts for Efficient Hydrogen Evolution Reaction

Hyeonkyeong Back¹, Deepanshu Malhotra¹, Thanh Hai Nguyen¹, Duy Thanh Tran¹, Nam Hoon Kim^{1*}, Joong Hee Lee^{1,2*} ¹ Dept. of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University.

² Center for Carbon Composite Materials & Dept. of Polymer and Nano Science and Technology, Jeonbuk National University. *E-mail: nhk@jbnu.ac.kr and jhl@jbnu.ac.kr.

Keywords: V2CTx MXene, TCPP, Molecular catalysts, 2D materials, Hydrogen evolution.

1. Introduction

Hydrogen is increasingly recognized as a future energy resource due to its high energy density and environmentally friendly behavior, offering a promising alternative to traditional fossil fuels [1]. Electrocatalytic water splitting has emerged as an efficient method for hydrogen production [2]. Numerous efforts have been devoted to developing cost-effective hydrogen evolution reaction (HER) catalysts in acidic conditions to replace traditional materials like Pt/C. Herein, we propose that integrating the synergistic effects of multiple components, such as platinum(II) meso-tetra (4-carboxyphenyl) porphine (Pt-TCPP) grown on V₂CT_x MXene substrates (Pt-TCPP@MX), is a promising strategy to optimize HER catalytic performance. This approach offers a new pathway for constructing multiscale structures with complementary advantages, synergistically enhancing electrocatalytic performance.

2. Experiment

Fig. 1 illustrates the synthesis of Pt-TCPP@MX. Initially, V_2CT_x MXene layers were obtained through etching and exfoliation steps. These layers were then combined with H₂PtCl₆. xH₂O and TCPP molecules under heated at 85 °C for 18 hours conditions. Subsequently, the mixture was centrifuged and washed several times before being freeze-dried. The final product, a black powder, is designated as Pt-TCPP@MX.



Fig. 1. Scheme exhibits the syntheses of Pt-TCPP@MX material.

3. Results and Discussion

Fig. 2 illustrates morphological transformation from multi-layered V_2CT_x MXene to smaller Pt-TCPP@MX nanosheets, expecting much higher active sites and thus enhancing electrocatalytic activity.



Fig. 2. FE-SEM images of (a) multi-layered V_2CT_x MXene and (b) Pt-TCPP@MX material.

The Pt-TCPP@MX exhibits superior HER compared to T@MX, requiring overpotentials of 261.0 mV and 393.0 mV to achieve current densities of 10 and 50 mA cm⁻², respectively (**Fig. 3**).



Fig. 3. (a) LSV curves and (b) Comparation overpotential at 10 and 50 mA cm⁻² between Pt-TCPP@MX and TCPP@MX materials.

4. Conclusions

These results suggest a new strategy for the production of hydrogen energy, simultaneously introducing a catalytic material of Pt-TCPP@MX for HER under acid conditions. Moreover, the Pt-TCPP@MX also demonstrates promise candidate for industrial electrochemical water-splitting.

References

[1] J Rong et al. J. Chem. Eng. 412, 2021, 127556
[2] H Cheng et al. Small. 18, 2022, 2200857

Acknowledgement

This work was supported by the Basic Science Research Program (2022R1A2C2010339) and the Regional Leading Research Center Program (2019R1A5A8080326) through the National Research Foundation (NRF) funded by the Ministry of Science and ICT of Republic of Korea.

포

Enhanced Stability of Sodium Battery via a Novel Polyanionic Carbonophosphate-Based Cathode

Hanbit Kim¹, Sambedan Jena¹, Duy Thanh Tran¹, Nam Hoon Kim^{1*}, Joong Hee Lee^{1,2*} ¹ Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju-si, Jeonbuk, 54896, Republic of Korea. ² Carbon Composite Research Center, Jeonbuk National University, Jeonju-si, Jeonbuk, 54896, Republic of Korea. ^{*}E-mail: nhk@jbnu.ac.kr and jhl@jbnu.ac.kr.

Keywords : sodium ion batteries, polyanionic, sodium nickel carbonophosphate

1. Introduction

Sodium-ion batteries (SIBs) have emerged as a promising alternative to lithium-ion batteries (LIBs). The growing interest in SIBs is primarily driven by their potential to offer a more sustainable and cost-efficient energy storage solution [1]. However, conventional SIBs utilizing liquid electrolytes suffer from safety hazards and long-term stability issues, limiting their practical application. All-solid-state sodium batteries (ASSBs) have attracted considerable interest as a safer and more durable energy storage solution. In the present day, due to good ionic conductivity, NASICON-type solid electrolytes have emerged as a promising alternative to various other solidstate electrolytes [2]. In this study, we focus on the development of a sodium nickel carbonophosphate (Na₃Ni(PO₄)(CO₃)) to achieve high-performance ASSBs. Compared to conventional cathode materials, Na₃Ni(PO₄)(CO₃) offers enhanced structural stability. This study aims to evaluate the electrochemical performance and compatibility of this cathode-electrolyte system, contributing to the advancement of next-generation ASSBs.

2. Experimental

Fig. 1 illustrates the synthesis of Na₃Ni(PO₄)(CO₃). First, nickel nitrate hexahydrate is uniformly mixed with ammonium phosphate dibasic and sodium carbonate. After hydrothermal process, the yellow powder is obtained.



Fig. 1. Schematic representation of the synthesis of sodium nickel carbonophosphate.

3. Results and Discussion

Fig. 2 illustrates the morphological structure and EDS mapping of Na₃Ni(PO₄)(CO₃) examined through FE-SEM.



Fig. 2 FE-SEM image (a) and EDS mapping (b) of sodium nickel carbonophosphate.

Fig. 3 illustrates the XRD pattern of the synthesized Na₃Ni(PO₄)(CO₃). The sharp peaks indicate high crystallinity, which is beneficial for stable electrochemical performance.



Fig. 3. (a) XRD pattern of NaNi carbonophosphate and (b) GCD curve of a Na₃Ni(PO₄)(CO₃)//Na half cell.

4. Conclusion

In this study, sodium nickel carbonophosphate was successfully synthesized and evaluated as a cathode material for ASSBs. The ASSBs based Na₃Ni(PO₄)(CO₃) cathode exhibited excellent electrochemical performance with a long cycle life, making it a promising candidate for next-generation ASSBs.

References

- [1] S. Jena et al. Adv. Funct. Mater. 2024, 34, 2314147.
- [2] B. Pandit et al. Chem. Eng. J., 2023, 472: 144509.

Acknowledgement

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

Vanadium-doped Co₂C/Mo₂C Heterostructure for Acidic Hydrogen Evolution Reaction

Ganesh Bhandari¹, Abhisek Majumdar¹, Duy Thanh Tran¹, Nam Hoon Kim^{1*}, Joong Hee Lee^{1,2,*}

¹Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, Jeonbuk National University. ²Center for Carbon Composite Materials & Dept. of Polymer and Nano Science and Technology, Jeonbuk National University, Jeonju, Jeonbuk 54896, Republic of Korea.

*E-mail: jhl@jbnu.ac.kr and nhk@jbnu.ac.kr

Keywords: Heterostructure, Electrocatalysis, Doping effect, Hydrogen evolution reaction.

1. Introduction

Water electrolysis is a sustainable method for producing green hydrogen, a promising alternative to fossil fuels. Continuous production of hydrogen in industrial scale requires highly active electrocatalyst to accelerates reaction kinetics [1]. Researchers have explored various electrocatalysts, including carbides, sulfides, phosphides, oxides, selenides etc. to facilitate hydrogen production. Among these, transition metal carbidess (TMCs) such as W₂C, V₂C, Co₂C, Mo₂C etc. have emerged as effective electrocatalysts [2,3]. To further improve water-splitting efficiency, heterostructure generation and heteroatom doping can be an excellent strategies [3]. It has been studied that incorporating vanadium atoms refines active sites, boosting intrinsic activity of the base catalyst [4]. Herein, we have designed vanadium doped Co₂C/Mo₂C heterostructure а which $(V@Co_2C/Mo_2C)$ electrocatalyst displays outstanding HER in acidic medium at 61 mV ro reach 10 mA cm⁻² current density.

2. Experimental

The V@Co₂C/Mo₂C catalyst was synthesized through a sequential hydrothermal process followed by hightemperature annealing, during which PDA was converted into a carbide structure, forming V@Co2C/Mo2C (Scheme 1).



Scheme 1. A schematic illustration of the synthesis of V@Co₂C/Mo₂C electrocatalyst.

3. Results and Discussion

Low resolution FE-SEM image of V@Co2C/Mo2C shows that two-dimensional (2D) nanosheets are uniformly grown on CC (Figs. 1a-b) with perfect stacked to each other. Moreover, high-resolution FESEM analysis reveals that the nanosheets contain fully porous holes, which form during the annealing process in the synthesis stage.



Fig. 1. FE-SEM images of V_{SA}@Co₂CMo₂C at different magnifications.

HER performance of electrocatalysts was assessed with a three-electrode system in 0.5 M H₂SO₄ solution. The HER polarization curves in Fig. 2a show an overpotential of 61, 90, and 32 mV (vs. RHE) at 10 mA cm⁻² for V@Co₂C/Mo₂C, Co₂C/Mo₂C and Pt/C, respectively. Additionally, V_{SA} (@Co₂CMo₂C display a Tafel slope (67.36 mV dec⁻¹) that is comparable to that of commercial Pt/C (57.69 mV dec⁻¹) but markedly lower than Co₂C/Mo₂C (157.77 mV dec⁻¹) (Fig. 2b).



Fig. 2. (a) LSV polarization curves of different catalysts and (b) Tafel slopes.

4. Conclusions

We have successfully synthesized a V@Co2C/Mo2C porous nanosheet structure, which shows high efficiency and stability toward HER in acidic media.

References

- [1] W. Xu et al. Appl. Catal. B-Environ. 2025, 361, 124626.
- [2] P. Sun et al. J. Am. Chem. Soc., 2024, 146, 15515.
- [3] S. Zaman et al. ACS Energy Lett., 2024, 9, 2922.
- [4] K. D. Tran et al. ACS Nano, 2024, 18, 16222.

Acknowledgement

Facile Synthesis of Pt-loaded NiCoFe Phosphide Nanoarchitecture for Enhancing Hydrogen and Oxygen Evolution Reactions

Deepanshu Malhotra¹, Duy Thanh Tran^{1*}, Nam Hoon Kim¹, and Joong Hee Lee^{1,2*}

¹Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University. ²Center for Carbon Composite Materials & Dept. of Polymer and Nano Science and Technology, Jeonbuk National University. *E-mail: dttran@jbnu.ac.kr and jhl@jbnu.ac.kr.

Keywords: Transition metal phosphides, Pt loading, hydrogen evolution reaction, oxygen evolution reaction.

1. Introduction

Recently, electrochemical water splitting is considered as an attractive route to sustainably produce green hydrogen gas via two half-cell reactions occurring at cathode with hydrogen evolution reactions (HER) and anode with oxygen evolution reactions (OER) [1]. The transition metal phosphides are considered an attractive option due to their long-time stability and superior catalytic performance in alkaline/acid condition because of "ensemble effect" wherein, Metal acts as "hydride acceptor" and P acts as "proton acceptor" [2]. Moreover, the change in electronic property of metal sites via Pt doping is an effective strategy to speed up the Volmer step in alkaline electrolyte. In this work, we developed an electrocatalyst based on NiCoFe (NCF) phosphide nanocubes with low Pt loading. The objective of current research is to accelerate the HER and OER performance at lower overpotential with long-term stability.

2. Experimental

The schematic representation for facile synthesis of Pt-NCFP NCs is shown in Figure 1.



Figure 1. Schematic depiction for the synthesis of Pt-NCFP NCs electrocatalysts.

3. Results and Discussion

The morphology for the as-prepared Pt_{5mg}-NCFP NCs, and Pt7.5mg-NCFP NCs were analyzed via FE-SEM technique, as shown in Figure 2. Indeed, Pt-doped trimetallic phosphides exhibit a broken nanocube architecture with rough surface and defects, favorable for accelerating the mass transfer efficiency and providing a greater number of active sites.



Figure 2. FE-SEM images of the developed (a) Pt_{5mg}-NCF NCs, and (b) Pt_{5mg}-NCFP NCs

The electrochemical tests in a three-electrode setup in Figure 3 show the Pt5mg-NCFP NCs unveils a low overpotential of 194 and 290 mV to reach 50 mA cm⁻², for HER and OER, respectively.



4. Conclusions

In this study, we have successfully reported the strategy to design inexpensive electrocatalyst by fine regulations of chemical compositions of multi-metallic precursor elements. The work provides a promising strategy for efficient electrocatalytic HER and OER.

References

[1]. K.D. Tran et al. ACS Nano, 2024, 18, 25, 16222-16235.

[2]. D. Malhotra et al. Small 2024, 2309122.

Acknowledgement

This research was supported by the Basic Science Research Program (RS-2024-00349472), BRL (RS-2023-00207836), and the Regional Leading Research Center Program (2019R1A5A8080326) through the National Research Foundation funded by the Ministry of Science and ICT of the Republic of Korea.

Improving the mechanical performance of thermal interface materials based on steel slag and bottom ash via a silane coupling agent

*Joo Han Kang, Soon Oh So, Seong Yun Kim+

Department of JBNU-KIST Industry-Academia Convergence Research, Jeonbuk National University ⁺E-mail: <u>sykim82@jbnu.ac.kr</u>

Keywords : Steel slag, Bottom ash, Thermal interface materials, Coupling agents

1. Introduction

Steel slag and bottom ash are byproducts generated from industrial processes, primarily utilized as construction materials such as cement and concrete. However, recent research has been actively conducted to explore their application in high-value sectors [1]. This study evaluates the potential of utilizing steel slag and bottom ash in composite materials as electrically insulating and heatdissipating thermal interface materials (TIMs). Current TIMs exhibit fragility due to excessive filler content and random dispersion, highlighting the need for strategies to enhance the interfacial bonding between polypropylene and fillers. Therefore, this study aims to incorporate a silane coupling agent to improve the mechanical performance of TIMs while evaluating their thermal stability and durability against water exposure.

2. Experimental

2.1 Materials

The matrix for the TIMs was composed of polypropylene pellets (Y-120A, Lotte Chemical, Daejeon, Korea). Bottom ash was provided by the Jeonju solid waste treatment plant, and steel slag was supplied by the Gwangyang Steelworks. Calcium oxide (CaO powder, Duksan Science, Seoul, Korea) was used to investigate its effects on the TIMs. The coupling agent used was a silane coupling agent ((3-Aminopropyl) triethoxysilane, Sigma-Aldrich, St. Louis, USA).

2.2 Characterization

The flexural strength was measured according to ASTM D790 by preparing samples with dimensions of 127 mm in length, 12.7 mm in width, and 3.2 mm in thickness using a Universal Testing Machine (LD10, LLOYD Instruments, Fareham, United Kingdom). The contact angle of water and the composite material was measured using a contact angle goniometer (L2004A1, Ossila Ltd., Sheffield, UK) with 5 μ L of water. The thermal cycle test was conducted by varying the temperature from -20 °C to 90 °C using a rapid-rate thermal cycle chamber (TCC-151W, ESPEC, Yokohama, Japan).

3. Results and Discussion

The experimental results indicate that the addition of calcium oxide has a minimal effect on the mechanical strength and durability of the composites. Contact angle measurements showed that as the proportions of polypropylene, bottom ash, and steel slag increased, the contact angle also increased, suggesting an improvement in the waterproof performance of the composites. Conversely, the addition of calcium oxide decreased the contact angle; however, when the proportions of bottom ash and steel slag were maintained above a certain level, the composites exhibited hydrophobicity similar to that of polypropylene. Flexural strength measurements revealed that the mechanical strength of the composites was comparable to that of graphene-based TIMs [2], confirming the effectiveness of the silane coupling agent in enhancing the interfacial bonding between the filler and the matrix. Additionally, thermal shock tests demonstrated that the composites maintained structural stability even under extreme temperature changes, indicating excellent thermal durability.

4. Future Works

Future research should focus on exploring additives or alternative materials to further enhance the mechanical performance of the composites. Furthermore, evaluating the environmental impact of composites utilizing steel slag and bottom ash, as well as analyzing their recyclability at the end of their life cycle, will be essential to maximize sustainability. Through such research, it is anticipated that the practical applicability of TIMs can be further expanded.

References

- [1] JH Kang et al. Adv Energ Sust Res. 6:2400291, 2025.
- [2] N Song et al. Compos Part A Appl Sci Manuf. 135:105912, 2020.

Acknowledgement

This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Out comes (COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT) (RS-2023-00304743)

Theoretical analysis of piezoelectric potential in composite-based piezoelectric nanogenerators with various nanostructures of zinc oxide

*Min Gyeong Kang¹, Ye Been Seong² and Seong Yun Kim^{1,2+}

¹ Department of JBUN-KIST Industry-Academia Convergence Research, Jeonbuk National University, ² Department of Organic Materials and Textile Engineering, Jeonbuk National University

⁺E-mail: sykim82@jbnu.ac.kr

Keywords : Piezoelectric nanogenerators, Composites, Zinc oxide, Nanostructures

1. Introduction

Recently, piezoelectric nanogenerators (PNGs), which convert mechanical energy from daily activities into electrical energy, have attracted significant attention [1]. PNGs have shown potential for powering portable electronic devices because they generate power based on the polarization of materials without spatial constraints. To enhance the performance of PNGs for portable electronic applications, a strategy for controlling the nanostructure of piezoelectric fillers is proposed. Zinc oxide (ZnO), a widely used piezoelectric material in PNGs, has been reported in various nanostructures such as nanowire (NW), nanoplate (NP), and nanoflower (NF) due to its facile synthesis process [2]. However, further investigation is required to compare the piezoelectric performance of nanostructures with various dimensions. In this study, the piezoelectric potential of ZnO NW-, NP-, and NF-based PNGs was analyzed using finite element analysis.

2. Theoretical simulation

2.1 Governing equations: The piezoelectric effect is based on the principle of electro-mechanical coupling [3]. The dynamics of the PNG are determined from Newton's second law.

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla_x \boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{f}_{\boldsymbol{V}} \tag{1}$$

where ρ is the density, **u** is the structural displacement, t is the time, σ is the Cauchy stress tensor, and f_V is an external volume force. The stress in elastically deformed PNG is expressed by the strain rate and the elastic properties of the materials.

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{c}_{K}: \boldsymbol{S}_{el} - \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{e} \tag{2}$$

where σ is the stress tensor, c_K is the elasticity tensor, S_{el} is the elastic strain tensor, **E** is the electric field, and **e** is the dielectric constant. Therefore, the PNGs are modeled by the piezoelectric constitutive equations in stress-charge form [4].

$$T = c_K S - e^T E$$

$$D = eS + \varepsilon_0 \varepsilon_{rS} E$$
(3)
(4)

where **T** is the stress, **e** is the piezoelectric coupling constant, **D** is the electric displacement field, ε_0 is the permittivity of free space, and ε_{rs} is the relative permittivity.

2.2 Geometry and boundary conditions: Theoretical simulations were conducted using COMSOL Multiphysics® (COMSOL, Inc., Burlington, MA, USA). The ZnO geometries designed according to the nanostructures were randomly distributed in the matrix with a content of 50 wt%. A fixed mechanical constraint and electrical ground condition were applied at the bottom boundary of the PNG geometry, while a vertical compressive load in the z-direction was applied at the top boundary.

3. Results and Discussion

The stress and piezoelectric potential distributions in composites incorporating ZnO with various nanostructures were analyzed using COMSOL Multiphysics software. The piezoelectric potential according to the nanostructure was the highest for the ZnO NF-based composite. The larger surface area of ZnO NFs, which are threedimensional structures composed of multiple petals, contributes to greater stress concentration in the piezoelectric filler.

4. Conclusions

Finite element analysis revealed that the composite with ZnO NFs, which have the largest surface area, exhibited the highest piezoelectric potential. It was confirmed that the high surface area of ZnO NFs improved stress transfer efficiency. This result indicates that optimizing the nanostructure of the piezoelectric filler can enhance the performance of PNGs.

References

- [1] Q Xu, J Wen, Y Qin. Nano Energy. 86:106080, 2021.
- [2] J Kaur, H Singh. Ceram. Int. 46:19401-7, 2020.
- [3] J Zhang, C Wang, C Bowen. Nanoscale. 6:13314-27, 2014.
- [4] R Lerch. IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control. 37:233-47, 1990.

Acknowledgement

This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT) (RS-2023-00304743)

Enhancement of electrical and mechanical properties of polyamide 6 composites with metal-coated carbon fibers and multi-walled carbon nanotubes

*Min Su Kim¹, Gyeong Eun Bae² and Seong Yun Kim³⁺

¹ Department of JBNU-KIST Industry-Academia Convergence Research, ² Department of Organic Materials and Textile Engineering, ³ Department of Organic Materials and Textile Engineering

Jeonbuk National University

⁺E-mail: sykim82@jbnu.ac.kr

Keywords : Carbon fiber, Metal coated carbon fiber, Carbon nanotube, Composites

1. Introduction

Electromagnetic interference (EMI) disrupts wireless communication and degrades the performance of electronic devices [1], increasing the demand for effective EMI shielding materials. Metal-coated carbon fiber (MCF), which combines the high electrical conductivity of metals with the excellent mechanical properties of carbon fiber [2], is a promising EMI shielding material. However, its high cost necessitates strategies to reduce the MCF content while maintaining composite performance. In this study, a hybrid composite was prepared by incorporating multiwalled carbon nanotubes (MWCNTs) and MCFs as conductive fillers. The optimized filler composition exhibited excellent electrical and mechanical properties, demonstrating the effectiveness of this approach.

2. Experimental

2.1 Materials

Polyamide 6 (PA6) was used as the matrix for the composite. MCF with nickel plating on the carbon fiber and MWCNT were used as fillers. MCF was incorporated into PA6 to be used as a long fiber thermoplastic (LFT) for improved processability and handleability.

2.2 Hybrid composite fabrication

PA6, LFT, and MWCNT were weighed according to the target composition. The weighed materials were mixed at 260°C using an internal mixer to prepare the hybrid composite.

2.3 Characterization

The surface and cross-sectional images of the composites were observed using a field emission scanning electron microscope (FE-SEM). The EMI shielding effectiveness (SE) of the composite was measured using a network analyzer in accordance with ASTM D4935. The tensile strength of the composite was evaluated using a polymer universal testing machine in accordance with ASTM D638.

3. Results and Discussion

According to FE-SEM images of the MCF, uniform deposition of nickel on the MCF surface was confirmed. Additionally, FE-SEM images of the hybrid composite showed that both MCFs and MWCNTs were uniformly dispersed in the composite. As the MWCNT content increased, the MWCNTs penetrated between the MCFs to form a continuous conductive network. This improved the electrical conductivity, thereby enhancing the EMI SE of the composite. Furthermore, the incorporation of MWCNTs enhanced both tensile strength and modulus. This enhancement was attributed to the uniform dispersion of MWCNTs, which facilitated efficient stress transfer and increased resistance to external forces.

4. Conclusions

In this study, hybrid composites with excellent electrical and mechanical properties were prepared by optimizing the ratio of MCFs and MWCNTs. The simultaneous incorporation of MCFs and MWCNTs was identified as an effective strategy to minimize the MCF content, reducing cost and improving performance due to their synergistic effect.

References

 [1] Ashish Kumar Singh et al. Compos. Pt. B-Eng. 149: 188-197, 2018
 [2] Sebeom Jung et al. Compos. Pt. B-Eng. 187: 107861, 2020

Acknowledgement

This reserach was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Out comes (COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT) (RS-2023-00304743).

Optimizing the synergistic effect of boron nitride hybrid fillers for enhanced thermal conductivity in thermal interface materials (TIMs)

*Seung Yeon Jang, *Ki Hoon Kim and Seong Yun Kim⁺ Department of Carbon Composites Convergence Materials Engineering, Jeonbuk National University +E-mail: sykim82@jbnu.ac.kr

Keywords : Thermal conductivity, Boron nitride, Filler hybrid, Synergistic enhancement

1. Introduction

The thermal conductivity of polymer composites incorporated with thermally conductive fillers is known to be influenced by factors such as the type, shape, size, and amount of fillers [1]. Numerous studies have shown that the adoption of filler hybridization strategies can significantly improve the thermal conductivity of composites [2]. As high electrical conductivity can lead to electrical interference between electronic components within integrated circuits, the advances in thermal interface materials (TIMs) that exhibit improved heat dissipation properties along with electrical insulation are required [3]. Accordingly, boron nitride, with its high thermal conductivity, electrical insulation, mechanical stiffness, and chemical stability has attracted attention as a suitable filler for these TIMs [4].

2. Methods

2.1 Materials

-Epoxy resin (STYCAST 2651, LOCTITE, Düsseldorf, Germany)

-Hardener (CAT 9M, LOCTITE, Düsseldorf, Germany)

-h-BN (MK-h-BN-N70, MK Impex Co., Mississauga, Canada)

-BNNT (NanoBorNT-80, NAiEEL Technology Co., Daejeon, Korea)

2.2 Composite Fabrication

The hardener and epoxy resin were premixed in a weight ratio of 9:100 using a Thinky mixer (ARE-310, Thinky Co., Tokyo, Japan) at 2000 rpm for 2 min. The raw or surface treated h-BN and BNNT powders dried at 80 °C for 24 h were added to the premix, and mixed at 2000 rpm for an additional 2 min using the same equipment to ensure uniform dispersion of the fillers. The mixture was poured into a metal mold ($25 \times 25 \times 2 \text{ mm}^3$) and pressed at 80 °C and 15 MPa for 1h using a heating press (D3P-20J, Dae Heung Science Co., Incheon, Korea).

2.3 Characterization

- -Fourier transform infrared spectra (FT-IR)
- -X-ray photoelectron spectroscopy (XPS)
- -Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)
- -Transmission Electron Microscope (Cs-TEM)
- -Non-destructive micro-computed tomography (µ-CT)

3. Results and Discussion

In this study, polymer composites with one-dimensional (BNNT) and two-dimensional (h-BN) boron nitride hybrid fillers were fabricated, and the thermal conductivity enhancement behavior with the fraction of secondary filler (BNNT) was investigated systematically to derive the optimal ratio of hybrid fillers. The composite with 48.90 vol% of h-BN and 0.63 vol% of BNNT achieved the highest thermal conductivity of 10.93 W/m·K, which was attributed to the formation of three-dimensional networks due to the direct contact of fillers. To determine the effect of surface functionalization on the connected filler network, h-BN was heat treated at 1000 °C for 2 h to activate -OH and treated with a silane coupling agent (APTES, 3-Aminopropyl triethoxysilane) to functionalize the surface as -O-Si-NH₂. The thermal conductivity of the composites increased when surface-functionalized h-BN was incorporated as a single filler, while the thermal conductivity tended to decrease for hybrid composites with functionalized fillers. These results were attributed to an increase in interfacial thermal resistance (ITR) due to the occurrence of interactions between the functionalized groups on the filler surface and the matrix.

4. Conclusion

In this work, the optimal composition of one-dimensional (BNNT) and two-dimensional (h-BN) boron nitride hybrid fillers was investigated systematically. Furthermore, the electrical insulation and heat dissipation performances of the fabricated composites were evaluated and determined that the composites exhibited appropriate properties for use as thermal interface materials (TIMs).

References

- [1] S Jasmee et al. Polymer Composites. 42:2629-2652, 2021.
- [2] X He et al. Adv. Compos. Hybrid Mater. 5:21-38, 2022.
- [3] C Zhao et al. Adv. Compos. Hybrid Mater. 6:27, 2023.
- [4] S Roy et al. Advanced Materials. 33:2101589, 2021.

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (RS-2024-00356448), and by the "HRD Program for Industrial Innovation (Carbon Composite Professional Human Resources Training Program)" grant funded by the Korea Government (MOTIE). (RS-2021-KI002492)

사축 압출 공정을 통해 최적화된 탄소섬유 강화 열가소성 복합재의 단열 성능

Thermal Insulation Performance of Optimized Carbon Fiber Reinforced Thermoplastic Composites via Quad-Screw Extrusion

*최우성 ¹, 유균영 ¹, 김성륜 ^{1,2+} * W.S. Choi ¹, G.Y. Yoo ¹, S.Y. Kim ^{1,2+}

¹ 전북대학교 탄소융복합재료공학과,² 전북대학교 유기소재섬유공학과

⁺E-mail: <u>sykim82@jbnu.ac.kr</u>

 Keywords: silica aerogel, carbon fiber-reinforced thermoplastic, pore-preservation, thermal insulation

 1. 서론
 2.3 특성화

법아을 세계 각국에서 탄소배출을 감축하는 발행함에 따라 내연기관차의 생산을 제한하고, 전기자동차 및 수소 연료전지 자동차 등 친환경 자동차의 도입에 대한 요구가 증가하고 있다 [1]. 그러나. 친환경 자동차는 기존 내연기관차에 비해 낮은 사용자 안정성이 문제점으로 언급되고 있으며, 그 중, 배터리 오용 조건 및 사고로 인해 발생하는 배터리 열폭주 현상은 제어할 수 없는 배터리 온도 및 팩 내부 압력 증가의 연쇄반응으로 가스 누출, 화재 및 폭발이 발생된다 [2]. 이러한 배터리 열폭주 현상을 지연시키기 위해, 단열 특성을 나타내는 경량 구조 소재의 개발이 요구되고 있다 [3]. 본 연구에서는 우수한 단열 특성을 나타내는 실리카 에어로겔(SA)이 혼입된 열가소성 탄소 섬유 강화 플라스틱(CFRTP)를 제조하였다. SA의 기공 보존 및 탄소섬유(CF) 직물 내 기지재의 함침을 제어하기 위한 방법으로 사축 압출(Quad-screw extrusion, QSE) 공정을 적용하였고, QSE 공정 조건을 통해 제조된 CFRTP의 SA 기공 보존 및 CF-기지재 계면 간의 함침 여부가 결정되었다.

2. 실험

2.1 재료

CF기반의 평직원단은 CFRTP의 보강재로 사용되었다. SA는 CFRTP의 단열 특성을 향상시키기 위한 2차 보강재로, 각각 0, 10, 20wt% 함량에 맞춰 사용되었다. 폴리프로필렌(PP)는 CFRTP의 기지재로써 사용되었다. PP는 사축압출기를 이용하여 230 ℃에서 1000 및 2500 rpm의 속도로 사슬 절단되었다.

2.2 복합재료 제조

PP와 SA를 정해진 함량에 따라 기계적 교반기를 통해 2000 rpm에서 2분동안 혼합하였다. 이후 PP/SA 혼합물은 핫프레스를 이용하여 200 ℃ 및 15 MPa 조건에서 10분 간 열 압착하여 PP/SA 필름을 제조하였다. CF 직물 사이에 PP/SA 필름을 혼합 적층하여 200 ℃ 및 15 MPa의 조건에서 10 분간 열 압착하여 CFRTP를 제조하였다. CFRTP의 내부 구조를 확인하기 위하여 전계방출주사현미경(Field emission scanning electron microscope, FE-SEM) 읔 이용하여 CFRTP의 파단면을 관찰하였다. CFRTP의 열전도도는 열전도도 분석기(TPS 2500 S, Hot Disk AB, Gothenburg, Sweden)을 이용하여 측정되었다. 이후 측정된 열저항은 소프트웨어를 사용하여 푸리에 방정식에 대입되어 복합재료의 열전도도가 결정되었다.

3. 결과 및 고찰

FE-SEM 이미지 분석 결과, 사축 압출기의 rpm 속도가 증가함에 따라 CF 직물 내 PP/SA 필름 및 SA 기공의 함침이 촉진되는 경향을 보였다. 특히, 1000 rpm으로 제조된 CFRTP에서는 SA 기공이 보존되면서도 CF-PP 계면에 기공이 거의 없이 우수한 함침 특성이 관찰되었다. 또한, 제조된 CFRTP의 열전도도 분석 결과, 동일한 SA 함량에서 1000 rpm으로 제조된 CFRTP가 가장 낮은 열전도도를 나타냈다. 이는 SA의 기공 보존 및 CF-PP 계면에서의 우수한 함침 특성이 CFRTP의 단열 성능에 영향을 미친 것으로 판단된다.

4. 결론 및 향후과제

사축압출공정을 통해 PP 사슬 길이를 제어하였으며, 1000 rpm에서 제조된 CFRTP는 SA 기공이 보존되면서도 CF-PP 계면에 기공 없이 우수한 함침 특성을 나타냈다. 또한, 해당 CFRTP는 뛰어난 단열 성능을 보였다. 향후 기계적 물성 평가 및 가공 변수 최적화 연구를 진행할 예정이다.

참고문헌

Hossain et al. J. Adv. Transp.2022(1):3868388,2022
 Zhou et al. J. Energy Storage.86:111070,2024
 Weng et al. Appl. Therm. Eng.195:117147,2021

후기

이 연구는 2025 년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2021-KI002492, 2025 년 산업혁신인재성장지원사업)

Preparation of Nanocellulose from Non-Wood and Its CNF/PAA/PANI Composite Multilayer Films

Jeong-woo Kim¹, Seung Min Yu³, Oh Hun Kwon⁴, Seung Geun Kim⁵ and Byoung-Suhk Kim^{1,2,3+}

¹ Department of Carbon Composites Convergence Materials Engineering, ² Department of Organic Materials & Textile Engineering, ³ Department of JBNU-KIST Industry-Academia Convergence Research, Jeonbuk National University, 567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si 54896, , ⁴ Korea Institute of Convergence Textile, 594 Seodong-ro, Iksan-si 54588, ⁵ Jirisan Hanji, 26 Gwangchisaneop 2-gil, Namwon-si 55727, Jeollabuk-do, Republic of Korea

+E-mail: kbsuhk@jbnu.ac.kr

Keywords : Non-wood, Cellulose nanofiber, Polyaniline, Polyacrylic acid

1. Introduction

Cellulose nanofibers (CNFs) are gaining attention for their excellent mechanical properties and eco-friendly nature. However, the reliance on wood sources is limited by resource scarcity, making non-wood sources, such as bamboo and mulberry, attractive due to their abundance and fast regeneration. These non-wood sources pose challenges in extraction due to longer fiber lengths and high crystallinity [1].

In this study, bamboo and mulberry fibers were converted into nanocellulose through chemical and physical treatments. Polyacrylic acid (PAA) and polyaniline (PANI) adsorption steps were repeated to build (PAA/PANI)_n multilayers onto the nanocellulose film via a layer-bylayer (LbL) self-assembly method [2]. The resulting multilayered (PAA/PANI)_n composite film was analyzed for its chemical and electrochemical properties.

2. Experimental

2.1 Preparation of nanocellulose and layer-by-layer (LbL) PAA/PANI films

The bamboo and mulberry fibers were hydrothermal pretreated and then treated with NaOH and H₂O₂ to remove lignin and hemicellulose. Nano-fibrillation was carried out using a homogenizer and ball milling. The multilayers of PAA and PANI were constructed on the nanocellulose films, utilizing electrostatic interaction.

2.2 Surface morphologies and electrical properties of LbL PAA/PANI films

FE-SEM and AFM were used to identify the surface morphologies and diameter distribution of cellulose nanofiber from bamboo and mulberry fibers. UV-vis was conducted to evaluate the transparency of CNF films as ball-milling time and absorbance of CNF films after LbL buildup. A sheet resistance of composite films was carried out using a 4-point probe.

3. Results and Discussion

The change of surface morphologies and diameter of the cellulose nanofibers from bamboo and mulberry fibers was investigated as ball-milling time increased, as seen in Fig. 1. The micro-sized fibers disappeared as ball-milling

progressed. Fig. 2 shows that the absorbance of LbL films increased before and after buildup PAA/PANI multilayers, indicating successful LbL deposition of PAA and PANI.



Fig. 1. FE-SEM images of cellulose nanofiber as ballmilling time.



Fig. 2. The UV-Vis spectra of PANI/PAA multilayer on BO-BM2 films.

4. Conclusions

The surface structure of CNF as ball-milling was studied and multilayer functional films were explored before and after buildup PAA/PANI multilayers. These results demonstrated that the non-wood materials were successfully converted into nanocellulose and also used to fabricate conductive multilayer films.

References

- [1] J. Pennells et al. Cellulose. 27, 575-593 (2020).
- [2] D. Li. et al. Polymer. 40.25: 7065-7070 (1999). .

Acknowledgement

This research was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (No. 2022M3C1C5A02094313).

Effect of Sizing Removal and Retreatment on the Mechanical and Interfacial Properties of Glass Micro Fibers

*Seungmin Yu¹, Jeong Woo Kim² and Byoung-Suhk Kim^{1,2+}

¹ Department of JBNU-KIST Industry-Academia Convergence Research,

² Department of Carbon Composites Convergence Materials Engineering Jeonbuk National University,

567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

⁺E-mail: kbsuhk@jbnu.ac.kr

Keywords : Glass Fiber, Surface Sizing, Tensile Strength, Thermal Treatment

1. Introduction

Glass fibers are widely used in composite materials due to their excellent mechanical properties. However, their performance is significantly influenced by surface sizing, which enhances fiber-matrix adhesion and protects the fibers from damage. In this study, we investigated the effect of sizing removal and retreatment on the tensile properties of ultrafine 3-µm filament glass fibers. The goal was to evaluate the intrinsic strength of the fibers after sizing removal and determine whether retreatment could restore their mechanical performance.

2. Experiment

 $3\mu m$ glass fibers, provided by KCC, were subjected to thermal treatment at 500°C for 30 minutes to remove the sizing layer. The removal of sizing was confirmed through surface analysis. Tensile tests were conducted to evaluate the mechanical properties before and after sizing removal. Subsequently, a retreatment process was applied to reintroduce sizing, and tensile strength was measured again to assess recovery.

3. Results and Discussion

The tensile strength of the glass fibers decreased by approximately 50% after the removal of sizing, indicating the significant role of surface treatment in mechanical performance. SEM analysis revealed changes in the fiber surface morphology, supporting the observed reduction in strength. The reapplication of sizing partially restored tensile strength, suggesting that the fiber's inherent mechanical properties are strongly influenced by the presence of the sizing agent. The degree of recovery depended on the retreatment process parameters, which will be further optimized in future studies.



Fig 1. Tensile strength variation of ultrafine glass fibers subjected to heat treatment at 500 $^{\rm o}{\rm C}$

4. Conclusions

This study demonstrates that surface sizing plays a critical role in maintaining the mechanical integrity of ultrafine glass fibers. The removal of sizing significantly reduces tensile strength, while appropriate retreatment can partially recover fiber performance. These findings provide insights into optimizing surface treatments for improving the reliability and durability of glass fiberbased composites.

Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (1415173575, Development of ultrafine glass fiber manufacturing technology of 3 microns or less) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea).

Hierarchically Controlled Porous Electrode Materials with Ultra-Long Cycle Stability Derived from Alkali-Treated Cellulose for High-Performance Supercapacitor Applications

^{*}Kye-yeol Lee^{1,}, Keonho Kong¹, Il-Yeong Jeong¹, Byoung-Suhk Kim^{1,2+} ¹ Department of Carbon Composites Convergence Materials Engineering. ²Department of Organic Materials and Textile Engineering, Jeonbuk National University, 567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 54896, Republic of Korea

⁺E-mail: <u>kbsuhk@jbnu.ac.kr</u>

Keywords : supercapacitor, activated carbon, biomass

1. Introduction

Biomass-based Activated carbons (ACs) faces challenges due to its compositional heterogeneity and structural complexity. Biomass consists of lignin, hemicellulose, and cellulose, which can lead to uneven activation reactions and difficulties in controlling the pore structure. In particular, cellulose exists in both amorphous and highly crystalline forms. Although the crystalline form provides high mechanical strength and thermal stability through strong hydrogen bonding, it also results in low wettability and high energy barriers. These factors limit the penetration of activating agents and hinder the selective etching of carbon domains and pore formation reactions. In this study, we aim to achieve a highly developed pore structure by enhancing activation efficiency bv amorphization of cellulose structures.

.2. Materials and Methods

2.1 Materials

Kenaf Stem (KS) was kindly provided by the Jeonbuk Agricultural Research & Extension Services, Republic of Korea, and was used as received. Potassium hydroxide (KOH, 95%) was purchased from Sigma Aldrich (USA). The CR2032 coin cells were purchased from SinoproMRX (Korea). The separator (TF4035) was obtained from NKK Co., Ltd. (Japan). The binders (Na-CMC and SBR) and 1M DMPBF4 in acetonitrile electrolyte were kindly provided by VinaTech (Korea). Super-P was acquired from TIMCAL Ltd. (Switzerland). Deionized water (DI, Elga DI water system, ~18.2M Ω) was used for all experiments. **2.2 Carbon domain etching**

After alkaline pretreatment, the dried pKS and KS samples were transferred into tubular alumina boats and loaded into a laboratory tube furnace. Nitrogen gas was introduced at a flow rate of 100 mL/min for 30 minutes to establish an inert atmosphere. Then, the temperature was raised to the target temperature (700°C) at a heating rate of 5.0°C/min and maintained for 1 hour to carry out KOH etching. The obatained carbon was dried at 80°C for 24 hours and designated as X-pKS-etched.

2.3 Steam activation

The obtained hydrothermal purified samples used as starting precursor for synthesis of activated carbon by steam activation method. Initially, the samples are carbonized at temperature 900 $^{\circ}$ C in nitrogen (heating rate

of 5.0 °C /min) for 1 h, followed by steam activation performed (steam activation time: 30 min and steam flow: 0.15 cc/min). The as-derived steam activated carbons were denoted as X-pSACs For comparison of the differences in activation efficiency and pore formation between samples with and without ultrasonic pretreatment, the samples that were not subjected to ultrasonic treatment were designated as X-SACs.

3. Results and Discussion

Alkaline pretreatment significantly lowered the energy barrier of the precursor, which increases activation efficiency, and promotes the formation of mesopores with relatively large pore diameters. Ultimately, the produced high-purity activated carbon exhibited a hierarchical structure with a mesopore fraction of 30% and demonstrated 85% cycle stability over 100 million cycles.



Fig.1 Nitrogen adsorption isotherm of ACs (A),Cycle stability of 2-pSACs at different cell Voltage (B).

4. Conclusion and Future Works

In this study, we aim to achieve a highly developed pore structure by exploiting the dual role of KOH as both a swelling/bleaching agent and a carbon domain etching agent. After pretreatment, selectively etched the defective portions of the carbon domains and resulted in the formation of well-developed, slit-type mesopores. Additional micropore formation was achieved through steam activation, ultimately producing high-purity activated carbon with a hierarchical pore structure for one million cycle stability in supercapacitor applications.

Acknowledgement

This research was supported by the Technology Innovation Program (20016795, Development of manufacturing technology independence of advanced activated carbons and application for high performance supercapacitors) funded by the Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE, Korea).

3-D 레이저 스캔 장비를 활용한 복합재 열변형 분석 Analysis of thermal deformation of composite using 3-D laser scan

*이홍준¹, 김우섭^{1,2}, 이정완¹⁺ * H.J. Lee¹, W.S. Kim^{1,2}, J.W. Lee¹⁺

¹ 한국재료연구원,² 부산대학교 ⁺E-mail: <u>jwlee@kims.re,kr</u>

Keywords: Composite, Thermal deformation, Laser Scan.

1. 서론

탄소섬유강화 복합재료를 성형 공정 시 섬유와 수지의 물성차이, 수지의 화학수축 및 열팽창에 의해 열 잔류응력이 발생하고, 최종 제품에 뒤틀림, 스프링인과 같은 열변형을 발생시켜 몰드 제작 및 공정의 반복을 유발한다.

본 연구에서는 3-D 레이저 스캔장비를 활용하여 복합재 열변형 패턴을 관찰하고 분석하였다.

2. 장비 셋업

2.1 3-D 스캔 장비 사양 및 설정

스캔 장비는 Shining 3D FreeScan Combo+를 사용하였다. 50개의 레이저 라인을 사용하여 스캔속도 최대 3,600,000 point/s로 고속 데이터를 수집 가능하며, 최대 0.02mm로 높은 정밀도를 제공한다. 본 연구에서는 Laser scan mode를 사용하였다.

2.2 스캔 스프레이 셋업

스캔 스프레이를 충분히 분사하지 않고 스캔을 진행할 경우 Figure. 1.과 같이 수지층이 투과되어 섬유패턴이 나타나는 문제점이 있다.

이를 위해. 전처리 과정에서 기화식 스프레이(AESUB Orange) 분사량을 최적화하여 표면을 준비하였다. 스프레이 복합재 분사 횟수(1~20회)에 따라 복합재의 표면 스캔 품질을 비교한 결과, 분사량이 많을수록 섬유 패턴이 감소하는 경향을 보였다. 그러나 과도한 분사는 변형패턴에 영향을 미쳐 왜곡 가능성이 확인되었다.



Fig. 1. Scan result without spraying.

3. 스캔 결과

후처리 과정에서 Geomagic Control X를 사용하여 형상 비교 분석을 수행하였으며, MATLAB을 통해 데이터 보간 및 좌표 추출 작업을 진행하였다.

사용한 소재의 직조형태는 5H satin woven fabric이며, 패널(250mm×250mm) 적층 패턴은 Table 1과 같다. 스캔 결과, Fig. 2.와 같이 대체적으로 Saddle 형상의 뒤틀림이 나타났다.

Table 1 Stacking sequence of panels



Fig. 2. Scan result of panel.

4. 결론 및 향후과제

탄소 복합재는 성형공정 후 열변형으로 인해 최종 제품의 치수 오차가 발생하고 이를 확인하기 위해 본 연구는 복합재의 뒤틀림 및 곡률 방향을 정밀하게 측정할 수 있는 3D 레이저 스캔 기술을 활용하였다. 스프레이 분사 조건을 최적화하고 데이터 처리 기법을 활용하여 복합재 열변형 분석을 하였다.

향후 연구에서는 L 형상 복합재 열변형을 측정하고, 직조형태, 적충 패턴 및 냉각속도에 따른 열가소성 수지의 결정화 영향 등과 같은 주요 원인을 분석하여 유한요소해석을 활용한 열변형 예측 연구를 진행할 것이다.

압축 성형된 CF/Epoxy SMC 부품의 리브 구조에 대한 조사 및 성형 해석 Investigation and simulation of rib structure in compression-molded CF/Epoxy SMC

*홍채영 ¹⁺, 윤상재 ¹ * C.Y. Hong ¹⁺, S.J. Yoon ¹

¹ ㈜ 현대자동차 전산재료과학연구팀 ⁺E-mail: <u>hchyoung@hyundai.com</u>

Keywords: Sheet molding compound, X-ray CT, Fiber flow analysis

1. 연구 배경

얇은 판형 구조물은 구조 강성을 보강하기 위한 리브 구조를 가지고 있다 [1]. 두께 대비 길이가 긴 형상의 리브 구조 성형에는 흐름성이 높은 열가소성 수지 기반의 단섬유 복합재를 사용해왔다. 반면에, 연속 섬유 복합재는 성형 과정에서 발생할 수 있는 섬유 결함을 피하기 위해서 리브 구조를 별도로 제작하여 접합하는 방식이 일반적이다. 본 연구에서는 중섬유 복합재 중 하나인 SMC (Sheet molding compound) 소재로 압축 성형된 리브 구조를 조사하였다. 서로 다른 비율의 리브를 여러 개 가지고 있는 부품을 압축 성형하였다. 비파괴 분석을 활용하여 리브 내 섬유 배향, 기공, 섬유 충진 형상을 조사하였다. 그리고 이를 수치적으로 모사한 결과와 비교하였다.

2. 부품 성형

2.1 소재 및 부품 형상

SMC는 탄소섬유 Tape와 에폭시 수지로 구성된다. Tape는 Toray 사의 T700 12K 소재가 길이 1인치, 너비 5 mm 간격으로 절단된 것이다. 에폭시 수지는 무작위 방향성을 가지는 Tape들을 시트 형태로 고정하는 바인더 역할을 한다. 여러 장 쌓은 SMC 시트를 오븐에서 예열한 후 금형에서 압축 성형하였다. 성형 과정은 Fig. 1과 같다. 모자 모양의 부품은 서로 다른 비율의 5개의 리브를 가진다. 리브 깊이는 20 mm ~ 50 mm이며, 50 mm 깊이의 리브는 두께가 2 mm와 3 mm이다.

2.2 비파괴 분석

X-ray CT를 활용하여 리브의 구조를 분석하였다. Fig. 2에서 흰색 영역은 리브에 흘러 들어간 탄소 섬유를 보여준다. 리브의 가장 깊은 곳은 섬유 충진률이 낮고, 기공과 수지 비율이 높게 관측되었다. 이러한 거동은 리브의 형상마다 상이하다.

3. 성형 해석

CF/Epoxy SMC에 대해서 8가지 성형 해석 물성 측정이 수행된 후 해석 물성 카드로 제작되었다. 압축 성형은 3D-Timon CompositePress를 활용하였으며, Euluer 법으로 계산하였다. DFS (Direct fiber simulation)기능을 활용하여 무작위 배향을 가진 섬유를 생성하고 유동 해석 결과를 기반으로 섬유의 충진 거동을 예측하였다.



Fig. 1. Compression molding process.



Fig. 2. Fiber flow pattern in a third rib.

4. 결론 및 향후과제

압축 성형된 SMC 부품의 리브 형상에 따른 성형성을 조사하고 모사하였다. 비파괴 분석을 활용하여 리브 내에 섬유 배향과 결함을 관측하였다. 깊이 40 mm 이상의 리브에서는 섬유 미충진과 기공으로 인한 물성 저하가 예상되었다. 성형 해석 결과는 리브 내 섬유 배향과 미충진 거동을 정성적으로 보여준다. 하지만 성형 해석은 국소적인 섬유 밀도에 따른 흐름 거동을 섬세하게 예측하지 못하는 한계가 있었다. 이는 해석 모델이 균질화된 점도 물성을 사용하는 것과 유동해석 결과를 기반으로 섬유의 흐름을 예측하는 방법의 한계인 것으로 파악된다.

참고문헌

[1] M Lee et al. Korean Soc. of Mec. Tec. 14:59-65, 2012.

Effect of Optimized Curing Condition of Epoxy Resin on the Thermal and Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Plastics

*Seung In Kang^{1,2}, Kyun bae Lee¹, Dong Gi Seong^{2,3+}

¹Composites and Convergence Materials Research Division, Korea Institute of Materials Science,

² School of Chemical Engineering, Pusan National University, ³ Department of Polymer Science and Engineering

⁺E-mail: dgseong@pusan.ac.kr

Keywords: Epoxy, Glass Fiber Reinforced Plastic, Cure cycle, Polymer Composite Engineering

1. Introduction

Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) is a widely used composite material due to its lightweight characteristics, excellent mechanical properties, and cost-effectiveness [1]. It is particularly utilized in the fabrication of large-scale structures such as automobiles, wind energy systems, and small- to medium-sized vessels, with most manufacturing processes employing room-temperature curing. However, the mechanical and thermal properties of GFRP are significantly influenced by the curing conditions of the epoxy resin used. If the curing degree is insufficient, deterioration in mechanical and thermal performance may occur.

In this study, the curing temperature conditions of the epoxy resin used in GFRP were adjusted to analyze the effects of optimized curing conditions on the thermal and mechanical properties of GFRP. Unlike conventional approaches that involve additive incorporation or chemical modification [2, 3], this study focused solely on optimizing the curing conditions without additional modifications. Epoxy resin-cured specimens and GFRP composites were fabricated under different curing conditions, and their property variations were analyzed. Dynamic Mechanical Analysis (DMA) was employed to measure Heat Distortion Temperature (HDT), Glass Transition Temperature (Tg), and cross-linking density. Additionally, the tensile strength and hardness of GFRP were evaluated. Based on the obtained results, the effects of curing condition optimization on epoxy resin properties and subsequent improvements in GFRP performance were quantitatively analyzed.

This study demonstrates that optimizing the curing conditions of epoxy resin can effectively enhance the thermal and mechanical properties of GFRP. These findings are expected to contribute to the development of high-quality and durable GFRP products, meeting the demands of various industrial applications.

2. Experiment

2.1 Materials: The epoxy resins used in this study were Resoltech 1050 and 1800 systems, which have glass transition temperatures (Tg) of 75 °C and 120 °C, respectively. Both resins are suitable for vacuum-assisted resin transfer molding and exhibit the capability for room-temperature curing. As the fiber reinforcement, a plain-

woven glass fabric WR570 with an areal density of 570 g/m^2 was purchased from JMC Co. Ltd. and utilized.

2.2 Curing Condition Evaluation: A Differential Scanning Calorimeter (DSC 250, TA Instruments) was employed to perform dynamic scanning and isothermal scanning on each epoxy resin. The results were used to determine the curing temperature range and optimal curing conditions, followed by an evaluation of the degree of curing (Fig. 1).



Fig 1. Result of DSC measurement for utilized epoxy system: Dynamic scan of each epoxy ersin

2.3 Thermal and Mechanical Property Evaluation: The HDT, Tg, and cross-linking density of the cured epoxy resin were measured using DMA. A double cantilever test was conducted, wherein the temperature was increased from 30 to 200 °C at a rate of 2 °C/min, with a frequency of 1 Hz and a strain of 0.15% to monitor changes in storage modulus. The temperature at which the storage modulus reached 1 GPa was regarded as the HDT [4], while tan δ and values in the rubbery plateau region were used to determine the cross-linking density.

Furthermore, to verify the influence of epoxy resin properties on the mechanical performance of GFRP, tensile strength and hardness measurements were conducted on the fabricated GFRP specimens. The Universal Testing Machine (UTM) and Shore A-type durometer were used for these evaluations, and comparisons were made to analyze the impact of curing conditions on the material properties.

3. Results and Discussion

For the Resoltech 1050 system, as the curing temperature increased from 25 °C to 100 °C, the HDT increased from 41 °C to 69 °C. After post-curing, an additional increase to 81 °C was observed. Similarly, for the Resoltech 1800 system, the HDT increased from 50 °C to 97 °C with an increase in curing temperature, and post-curing led to an average HDT rise to 116 °C (Fig. 2). These trends also influenced Tg and cross-linking density, indicating that variations in curing conditions resulted in an overall enhancement of epoxy resin properties.



Figure 2. The result of heat distortion temperature (HDT) measurement: (a) results of neat and post-cured 1050resin system, (b) results of neat and post-cured 1800resin system

The mechanical properties of GFRP exhibited a similar tendency. As the curing temperature increased from 25 °C to 100 °C, the tensile strength of GFRP increased from 461.2 MPa to 524.4 MPa for the Resoltech 1050 system and from 469.3 MPa to 558.5 MPa for the Resoltech 1800 system. Additional improvements were confirmed after post-curing. Notably, the tensile strength of GFRP showed a stronger correlation with improvements in the thermal properties of the epoxy resin rather than with cross-linking density.

The hardness measurements also indicated an enhancement in material properties with increasing curing temperature. However, due to the nature of the measurement method, which evaluates the outermost surface of GFRP, the hardness was found to be more closely related to changes in cross-linking density rather than to improvements in thermal properties.

4. Conclusions

This study proposed a method to improve the performance of epoxy resin and GFRP through the optimization of curing conditions, without the need for additional additives or chemical modifications. DSC analysis was conducted to establish suitable curing conditions, and the subsequent changes in epoxy resin properties were assessed to determine their impact on the mechanical performance of GFRP.

The results revealed that epoxy resin cured at an optimal temperature exhibited enhanced thermal properties, while GFRP demonstrated increased tensile strength and hardness, with further improvements achievable through post-curing. Specifically, tensile strength was strongly correlated with HDT and Tg, whereas hardness exhibited a stronger relationship with cross-linking density.

The findings of this study provide a valuable approach to enhancing the properties of epoxy resin and GFRP through curing condition optimization, thereby overcoming the limitations of conventional additive-based improvement methods. This method is expected to facilitate the efficient fabrication of high-performance, high-quality GFRP, which can be widely applied in various industrial sectors [5].

References

- [1] T Kulhan et al. Funct. Compos. Struct. 4(2):22001, 2022
- [2] B Li et al. Polym. Polym. Compos. 27(9):582-586, 2019
- [3] Y Sehn et al. Comps. B. Eng. 272:111209, 2024.
- [4] MI Faraz et al. Compos.B.Eng. 56:9-14, 2014
- [5] SI Kang et al. Funct. Compos. Struct. 7(1):015007, 2025

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (RS-2024-00412289)

기능화된 탄소나노튜브섬유와 폴리아닐린 기반의 고강도 섬유형 슈퍼커패시터 High-strength supercapacitor based on functionalized CNTF and polyaniline

*송기수¹, 이균배¹, 정연수¹, 양승재²⁺⁺, 김태훈¹⁺ * K. Song¹, K. Lee¹, Y. Jung¹, S. Yang², T. Kim¹⁺

> ¹ 한국재료연구원, ² 인하대화학공학과 ⁺E-mail: tkim67@kims.re.kr ⁺⁺E-mail: sjyang@inha.ac.kr

Keywords: CNT fiber, Polyaniline, Supercapacitor, composites

1. 서론

최근 옷이나 시계, 안경과 같이 몸에 착용할 수 있 는 웨어러블 장치(Wearable device)가 스마트워치, VR 기기 등을 시작으로 새로운 시장으로 크게 주목받고 있다. 그에 따라, 에너지 저장 소재 또한 플렉서블한 특성을 요구 받았고 현재까지 많은 연구가 시행되어 왔지만, 개발된 소재들은 그 자체의 낮은 정전용량 및 높은 비용, 직물화하기 부족한 강도 등이 큰 문제로 거 론된다.

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 탄소 나노튜브(CNT) 섬유 집전체로 사용하였으며, 2단계 의 표면처리를 통해 물성 향상 후 폴리아널린(PANI) 를 활물질로 사용해 복합화하여 낮은 비용으로 고용 량·고강도를 가지는 섬유형 슈퍼커패시터를 제조하 였다. 우수한 기계적, 화학적 및 전기적 특성을 가지 고 있으며 높은 유연성을 보유한 탄소나노튜브(CNT) 는 섬유형 슈퍼커패시터에서 집전체 및 골격체로 사 용하기에 가장 적합하였다. 또한 탄소나노튜브 섬유 내부 기공 감소를 완화한 2단계의 비파괴적 표면처리 후 다공성 폴리아닐린을 복합화하여 정전용량의 비 약적 상승이 가능했다.

2. 실험과정

CNTF의 경우 본 연구팀이 기존에 사용하던 direct spinning을 통해 합성하였으며, 합성된 CNT를 집속화 하여 섬유로 만든 후 densification을 거치지 않은 젖어 있는 상태에서 HCl, 4-aminobenzoic acid, Sodium nitrite, Jeffamine ed-2003을 이용하여 표면처리를 진행 하였다. 최종적으로 HCl, Aniline, Ammonium persulfate, Sodium chloride 등을 이용하여 PANI를 합 성한 뒤 물로 워싱하였다.

3. 결과 및 분석

표면처리된 탄소나노튜브 섬유에 Saturated sodium chloride solution을 이용한 templating 방법으로 폴리아닐린을 합성한 결과 Figl.과 같이 CNT 번들 간의 빈 공간을 활용한 다공성의 폴리아 닐린@탄소나노튜브 섬유 복합소재를 합성하였다. 그 결과 500F/g을 상회하는 높은 에너지 저장 능 력과 복합화 후에도 강도가 떨어지지 않는 특성을 보였다.



Figl. 폴리아닐린@탄소나노튜브의 SEM image

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 폴리아닐린과 탄소나노튜브 섬유 의 복합화로 저비용, 고강도, 고성능의 섬유형 슈퍼커 패시터를 제작하였으며, 이는 향후 다양한 웨어러블 디바이스에 적용되어 환경/에너지 뿐이 아닌 의료/헬 스/차량 등에도 활용 할 수 있을 것으로 기대한다.

참고문헌

[1] Huanhuan Wang et al. Journal of Science: Advanced Materials and Devicess. 1:225-255, 2016

후기

본 연구는 한국재료연구원 주요사업 (PNKA610) 지원으로 수행되었습니다.

AFP(Automated Fiber Placement)적층 조건에 따른 CFRP 성형성에 관한 연구 Study on the formability of CFRP according to AFP(Automated Fiber Placement) lamination conditions

*김정수¹, 강나루¹, 김미정¹, 육상수¹, 유명한¹, 강창수¹⁺ * J. S. Kim¹, N. R. Kang¹, M. J. Kim¹, S. S. Yuk¹, M. H. Yoo¹, C. S, Kang¹⁺

> ¹ 한국탄소산업진흥원 ⁺E-mail: <u>bluesky@kcarborn.or.kr</u>

Keywords: AFP(Automated Fiber Placement), CFRP(Carbon Fiber Reinforced Plastic), Lamination, Formability, NDI

1. 서론

항공우주 및 자동차 산업에서 탄소 섬유 복합 재료의 자동화 섬유 적층(AFP)공정은 빠른 재료 증착, 폐기물 감소, 향상된 신뢰성으로 복잡하고 대규모 복합 구조물을 제조하는 데 있어 놀라운 진전을 이루었으며, 이는 기존 제조 방법보다 우수함[1-2]. 본 연구에서는 적층 조건(멜팅온도, 적층속도, 압축력, 몰드온도 등)에 따른 열 가소성 CFRP 적층의 최적조건을 찾고 최종적으로 성형성에 대한 평가를 진행하였음.

2. 실험

2.1 실험 장비



Fig. 1. A view of AFP Equipment

2.2 적층 조건

Table 1 AFP Lamination condition	ons[3]
----------------------------------	--------

Lamination velocity (mm/s)	Compaction force (N)	Mold temperature (℃)	Melting temperature (°C)
			300
		340	
160	1,000	160(T _g)	380
			400
			450

3. 실험결과

Table2와 같이 맬팅온도 340℃, 적층속도 160mm/s 에서 균일하게 적층이 되었고, 이를 바탕으로 최적의 적층조건은 멜팅온도 : 340℃, 적층속도 160mm/s, 압축력 1,000N, 몰드온도 160℃로 도출함.

Table 2 Photograph of Specimen by Melting temperature

6 1	
Melting temperature $(^{\circ}\mathbb{C})$	Specimen
300	
340	
380	
400	
450	

4. 결론 및 향후과제

실험결과로 도출 된 최적조건(멜팅온도 : 340℃)에서 적층시편의 비파괴검사(NDT) 중 초음파 탐상검사(UT)를 실시한 결과 에코 진폭(Echo Amplitude)값이 가장 고르게 분포 되어 결함, 불균일이 가장 적게 나타남을 확인함. 추후 제작된 프리폼을 Press forming을 실시하여 고품질의 제품을 성형할 계획임.

참고문헌

- Zacherl L, Fontes A, Shadmehri F. Three-dimensional heat transfer analysis of Hot Gas Torch (HGT)-assisted Automated Fiber Placement (AFP) for thermoplastic composites. Compos Struct 2024;118256.
- [2] Fereidouni M, Hoa SV. In-situ consolidation of thermoplastic composites by automated fiber placement: Characterization of defects. J Thermoplast Compos Mater 2024;08927057241251837.
- [3] Processing guidelines for Cetex® TC1225 LMPAEK composites, Toray Advanced Composites, 27.10.2023

후기

본 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발사업 "항공기 화물용 2.5m급 도어 복합재 구조물 일체화 기술 개발"의 지원으로 수행되었음.(과제번호 : RS-2024-00431591)

Development of solid-state hybrid capacitor using carbon nanotube film as current collector

*Young Jin Park¹, Dong Uk Woo^{1, 2} and Jae Young Cheon¹, Kyunbae Lee¹, Yeonsu Jung¹, Patrick Juhyun Kim²⁺ and Taehoon Kim¹⁺

¹ Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, ² Department of Applied Chemistry, Kyungpook National

University,

E-mail: pjkim@knu.ac.kr and tkim67@kims.re.kr

Keywords : CNT film, hybrid capacitor, solid polymer electrolyte, structural energy-storage device

1. Introduction

In this study, we developed a lightweight solid-state hybrid capacitor with excellent strength and a high energy density using CNT film (CNTF) as a current collector. We fabricated a hybrid capacitor composed of activated carbon (AC) and lithium titanium oxide (LTO), which exhibited a higher energy density compared with AC-AC EDLCs. Further, we investigated the feasibility of a hybrid capacitor with structural characteristics by using a solid polymer electrolyte (SPE).

2. Experimental method

2.1 Synthesis of CNTF

CNTF was synthesized via direct spinning at 1200 $^{\circ}$ C in a vertical furnace. We used ferrocene, thiophene, methane, and hydrogen gas as the catalyst, promoter, carbon source, and carrier gas, respectively. Before synthesis, the vertical furnace was purged with highly pure Ar for 10 min, followed by the addition of hydrogen. Then, the methane, ferrocene, and thiophene were added to the vertical furnace to produce CNT aerogel, which was deposited at the bottom of the reactor. The CNT aerogel passed through reactor at a constant rate and was collected using a take-up machine to form the CNTF.

2.2 Preparation of electrode

The slurries of the cathode (mixing 80 wt% AC, 10 wt% carbon black (CB), and 10 wt% polyvinylidene fluoride (PVDF) in N-methyl-2-pyrrolidone (NMP)) and anode (mixing 80 wt% LTO, 10 wt% CB, and 10 wt% PVDF in NMP) were coated on Al foil and CNTF using a doctor blade and dried overnight in a vacuum oven at 120 $^{\circ}$ C.

2.3 Fabrication of hybrid capacitors

To prepare the pouch cells, the anode and cathode were each cut into squares of 16 cm^2 , and the Al tab and electrode were connected using a conducting paste (10 wt% PVDF and 10 wt% CB in NMP). The SPE was then plastered on the electrodes, and the cell was assembled by inserting a cellulose separator between the electrodes. Thereafter, a 5 N force was applied on the assembly, and it was kept it in a vacuum for 4 h. This cell was placed inside a glove box and packaged with the exterior material of the pouch to create the pouch cells. The specific capacities of these pouch cells were calculated based on the loading mass of AC.

3. Results and Discussion

The specific strength of the CNTF current collector was 757 MPa/(g·cm⁻³), while that of the Al device was only 55 MPa/(g·cm⁻³) (Fig. 1a). This indicates that for a current collector of a given weight, CNTF can withstand about 14 times the load that Al can. Moreover, the areal density of the CNTF was 2.15 g/cm², which is lower than that of Al (5.32 g/cm²). The specific strength of the AC on the CNTF (251 MPa/(g·cm⁻³)) remained higher than that of the AC on the Al foil (33 MPa/(g·cm⁻³)).



Fig. 1. (a) Specific strength and areal density of CNTF and Al foil (b) Pouch cell of AC-LTO hybrid capacitor using CNTF with SPE.

We fabricated a AC-LTO pouch cell using CNTF and the SPE and evaluated its performance. The capacity of the pouch cell was found to be 54 mAh/g (Fig. 1b). The fabrication of a coin cell involves the application of pressure, which is normally absent during the fabrication of a pouch cell; this leads to weak contact and consequent poorer performance of a pouch cell. Considering this, we assembled another pouch cell while applying a pressure of 5 N during the fabrication process. Thus, the capacity of this pouch cell increased to 74.1 mAh/g (Fig. 1b).

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

We succeeded in fabricating an energy-storage system composed of CNTF and an SPE, which achieves similar performance to a coin cell. This potentially enables the development of a structural energy-storage device in the future.

Acknowledgement

This research was supported by the Fundamental Research Program (PNK9730) of the Korea Institute of Materials Science (KIMS).

Investigation of Synergistic Effects on Thermal Conductivity in 2D GO/BN Hybrid Films via Optothermal Micro-Raman Technique

*Songmi Kim, Jieun Lee, and Sangha Hwang⁺

Institute for Advanced Engineering Co., Industrial Convergence Engineering Group, Materials Science and Chemical Eng. Centre. +E-mail: smkim@iae.re.kr

Keywords : Graphene Oxide(GO), Boron Nitride(hBN), Thermal Conductivity, Optothermal micro-Raman Technique

1. Introduction

The high integration of electronic devices has raised concerns about reduced lifespan and reliability. Accordingly, research on thermal interface materials (TIMs) that can efficiently dissipate heat has gained significant attention, and efforts to maximize the thermal conductivity of materials by combining two or more thermally conductive fillers have been expanding. However, the increasing structural complexity is limiting the identification of the interaction mechanism between fillers. In this study, we aims to fabricate a 2D hybrid film composed of Graphene Oxide (GO) and Boron Nitride (BN) and investigate the synergistic effect of these fillers on thermal conductivity using optothermal micro-raman technique.

2. Materials and Methods

2.1 Preparation of 2D nano fillers

Graphene oxide from Sigma-Aldrich was dispersed in distilled water by sonication at 1 mg/mL. h-BN from Denka Co. was prepared into BN nanosheet (BNNS), with and without OH functionalization. For BNNS-OH, NaOH solution and hBN powder were milled for 24 hours. The slurry was then filtered, neutralized, dried, and finally dispersed in IPA at 0.5 mg/mL. Non-functionalized BNNS was similarly prepared, using distilled water instead of NaOH.

2.2 Thermal Conductivity Measurement

Samples for thermal conductivity measurement were prepared utilizing a spin coater to produce uniform coatings. Spin coating was conducted at 3,000 rpm by securing a slide glass on the spin coater. Subsequently, 1 ml of the prepared GO, BNNS-OH, and BNNS dispersion solutions were deposited onto the center of the substrate. This process was repeated multiple times, and films of varying thicknesses were created by adjusting the loading amount.

Thermal conductivity was measured using a non-contact method involving a laser as both the heat source and temperature sensor. A laser with a radius of 17.8 μ m was directed at the sample surface at a wavelength of 488 nm, and the Raman peak shift corresponding to temperature changes was analyzed to determine the thermal conductivity (K).

3. Results and Discussion

A hybrid film with a BNNS to GO mass ratio of 8:2 exhibited higher thermal conductivity compared to a single GO film. This result is attributed to the relatively strong interfacial bonding and the reinforced interconnectivity between BN particles, which is facilitated by GO particles with a broad lateral area.



Fig. 1. Scheme of the micro-Raman technique process



Fig. 2. FE-SEM images of the (a)GO (b)OH-BNNS

4. Conclusions

This study verified the thermal conductivity synergy effect of 2D hybrid fillers by measuring temperature changes through film thickness using optothermal Raman spectroscopy, and calculating thermal conductivity via data extrapolation. This method could be used to study the complex thermal conductivity behavior of hybrid filler systems in advanced thermal interface materials (TIMs) in the future.

References

- [1] Yimin Yao et al. Chem. Mater. 1049-1057, 28, 2016.
- [2] Minh Canh Vu et al. Appl. Mater. Interfaces. 26413, 12, 2020
- [3] Fengmei Guo et al. Adv. Func. Mater. 1910826, 2020

Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program funded By the Ministry of Trade Industry & Energy(MOTIE, Korea) (RS-2023-00269589) 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

복합 난연제 배합에 따른 BFRP 특성 연구 Study on the Properties of BFRP Depending on Composite Flame Retardant Formulation *유다현, 문소윤* * D.H. Yu, S.Y. Mun⁺

한국세라믹기술원 우주항공융복합소재센터, ⁺E-mail: msy@kicet.re.kr

Keywords: Basalt Fiber, Epoxy composite, Magnesium hydroxide, Expandable Graphite

1. 서론

복합재료(FRP, Fiber Reinforced Plastic)는 높은 기계적 강도와 내구성 덕분에 항공, 자동차, 건설 등 다양한 산업에서 활용되고 있다. 그러나 에폭시 기반 FRP는 난연성이 부족하여 화재 안전성을 확보하기 위한 난연 처리 기술이 필수적이다. 기존의 할로겐계 난연제는 환경적 문제로 인해 사용이 제한되면서, 수산화마그네슘(Mg(OH)₂)과 팽창흑연(Expandable Graphite, EG)과 같은 친환경 난연제에 대한 연구가 주목받고 있다. [1-3] Mg(OH)2는 연소 시 수증기를 방출하여 산소를 희석하고 열을 흡수해 연소 속도를 늦추지만, 높은 충전량이 요구되어 기계적 강도가 저하될 수 있다. EG는 가열 시 팽창하여 다공성 탄화 보호층을 형성함으로써 열전달과 가연성 가스의 확산을 억제한다. 따라서 Mg(OH)2와 EG를 복합 적용하면 상호 보완적인 난연 효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 복합 난연제의 배합에 따른 난연성과 기계적 특성 변화를 분석하고 적합한 조성을 탐색하고자 한다.

2.실험

2.1 복합재 제작

평직의 현무암섬유에 bisphenol-A 타입 기반의 에폭시 수지를 hand lay-up 방식으로 함침하여 프리프레그를 제조하였다. 제조된 프리프레그를 12겹 적층하여 hot pressing으로 복합재를 제조하였으며, 복합재의 R/C는 20-25% 범위로 고정하였다. 난연제의 조성은 Mg(OH)² 단독30% (M30) EG 단독 30% (E30), 그리고 Mg(OH)²:EG를 각각 25:5 (M25E5)와 27:3 (M27E3)의 비율로 혼합한 총 네 가지 조합을 설정하였다. 두 혼합 난연제의 배합비는 FRP 적용 전, 다양한 조합으로 에폭시에 첨가해 단독으로 경화한 후 사전 난연 평가를 통해 결정되었다. 이 후 4가지 조성에 대해 기계적 강도인 인장강도를 측정하고, 난연 성능 평가를 위해 LOI및 UL94 수직연소 시험(Vtest)을 실시하였다.

2.2 결과

UL-94 난연성 테스트 결과, M30은 난연제 미첨가(Ep100)시와 동일한 Fail, M27E3는 V1, M25E5와 E30은 V0 등급을 획득하였다. 또한, LOI 시험에서는 M25E5및 E30에서 가장 우수한 난연 성능을 나타냈다.



Fig 1. Tensile Strength According to Flame Retardant Composition Ratio

인장강도 시험 결과, 복합 난연제 및 Mg(OH)₂ 단독 적용시 기존 FRP와 유사한 수준을 나타나는 것을 확인하였으나 EG 단독 적용시에는 현저히 감소함을 확인하였다. 이를 통해 EG 단독 사용 시 난연 효과는 기대할 수 있으나, 기계적 강도의 저하가 동반됨을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 난연 메커니즘이 다른 2종의 난연제가 배합된 난연수지를 현무암섬유에 적용하여 복합재를 제작하고, 그에 대한 효과를 확인하였다.

이를 통해 복합 난연제의 난연 시너지 효과를 확인하였으며, 이를 적용한 FRP가 난연성과 기계적 물성을 동시에 만족시킬 수 있는 가능성을 확인하였다

참고문헌

- [1] Chen, X., Wu, H., Luo, Z., Yang, B., Guo, S., & Yu, J. (2007). Synergistic effects of expandable graphite with magnesium hydroxide on the flame retardancy and thermal properties of polypropylene. *Polymer Engineering and Science*, 47, 1756–1760
- [2] Jang, B. N., & Choi, J. H. (2009). Flame retardants and flameretardant resin research trends. *Polymer Science and Technology*, 29(1), February
- [3] Chen, H., Wang, T., Wen, Y., Wen, X., Gao, D., Yu, R., Mijowska, E., & Tang, T. (2019). Expanded graphite assistant construction of gradient-structured char layer in PBS/Mg(OH)₂ composites for improving flame retardancy, thermal stability and mechanical properties. *Composites Part B*, 177, 107402

Ultrasound-induced reactive wetting of Field's Metal onto Iron plates

*Se Jun Wang¹, Hyeong woo Kang¹, Youngseok Oh² and Sang Yup Kim¹⁺ ¹ Department of Mechanical Engineering, Sogang University,

² Korea Institute of Materials Science

⁺E-mail: <u>sangyupkim@sogang.ac.kr</u>

Keywords : Metals, Metallic coating, sonochemistry

1. Introduction

Low-melting-point alloys such as Field's Metal (Bi-In-Sn) exhibit poor wetting behavior on high-melting-point metals such as iron [1]. The large contact angle and surface oxides hinder the wettability of Field's Metal. Conventional methods to improve wetting often require high temperatures or chemical treatments, involving complex processes and high cost. In this study, we introduce ultrasound-induced reactive wetting to achieve a facile process to realize metallic coating of iron substrates. Despite Field's Metal's inherent poor wettability, sonochemical effects enable effective coating on the iron plate. This approach offers a potential strategy to overcome wetting limitations in metal joining and coating processes.

2. Materials and experimental methods

2.1 Material

A 50mm \times 50mm 99.9% iron plate is prepared for the coating test. Field's Metal, of which melting point is 62°C, is prepared for the coating material. Sonication bath with a frequency of 20kHz and an intensity of 100W is prepared.

2.2 Experimental methods

Ultrasound-induced reactive wetting is conducted in 1% HCl solution. The Field's metal droplet is placed on the iron surface with and without polishing to remove oxide layer. Scanning electron microscopy (SEM) and an energy dispersive X-ray spectroscopy (JSM-7600F, Jeol) are used to evaluate interfacial microstructure.

3. Results and Discussion



Fig. 1. Image of iron substrate coated with Field's metal by sonication induced reactive wetting

Fig. 1 shows iron substrates coated with Field's Metal by Ultrasound-induced reactive wetting process. When the liquid-state Field's Metal droplet is on the iron surface, contact angle is about 135°, indicating poor wettability between iron and Field's Metal droplet. However, despite the poor wettability, the Field's Metal successfully cover the entire iron surface through sonication. Additionally, a comparison of iron substrates with and without the polishing process (oxide layer removal) reveal no significant difference in wettability. This indicates that the presence of an oxide layer does not significantly influence wetting behavior, suggesting that interfacial wetting is primarily dominated by ultrasound-induced effect.

The ultrasonic treatment activates naturally unfavorable coating through non-equilibrium mechanisms although high interfacial energy difference. In specific, the highspeed impact and forced wetting induced by ultrasonic waves may have contributed to overcoming the poor wettability, enabling uniform coating. Moreover, the local pressure fluctuations induced by ultrasound may induce temporal enhancement of contact between the liquid metal and the iron substrate.

4. Conclusions

In this study, an iron (Fe, 99.9%) substrate is successfully coated with a liquid metal despite its poor wettability, as indicated by a high contact angle of about 135°. This suggests that sonication treatment can activate metal coating by overcoming wetting limitations.

The ultrasound-induced reactive wetting enable to coat non-wetting materials, challenging conventional coating constraints. Further analysis of the interfacial characteristics is needed to clarify the underlying mechanisms. Overall, this study demonstrates that ultrasonic treatment is an effective strategy for achieving metal coatings in non-wetting systems, broadening its applications in surface engineering.

References

[1] Zamora et al (2021)., *Materials*, 14(23), 7392. Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute of Materials Science (Grant #: PNKA100)

Enhanced Resin Impregnation in CNT film-Based Composites via Ultrasonication-Assisted De-bundling

*<u>Hyeok Je Kwon</u>¹, Tae Kyeom Kim¹ and Dong Gi Seong^{1,2+}
 ¹ School of Chemical Engineering, Pusan National University,
 ² Department of Polymer Science and Engineering, Pusan National University
 *E-mail: dgseong@pusan.ac.kr

Keywords : Carbon nanotube film, Ultrasonication, CNT composite

1. Introduction

Carbon nanotubes (CNTs) with their high aspect ratio, tensile strength, and Young's modulus are recognized as promising reinforcements for lightweight and highstrength composites. Recent studies have focused on using macroscopic CNT assemblies, such as CNT fibers and films, to fabricate composites due to their high volume fraction and enhanced alignment of CNTs. However, CNT films, composed of densely packed bundles held together by van der Waals forces, exhibit low permeability, hindering resin impregnation and often causing uneven resin distribution. To address these challenges and improve the overall performance of CNT film-based composites, effective de-bundling of CNT is essential, allowing for better resin impregnation and more uniform resin distribution throughout the structure. In this study, ultrasonication was employed to effectively separate the CNT bundles via the cavitation effect, thereby enhancing resin impregnation into the CNT film. The separated CNT bundles were then processed into composites using the vacuum bag only (VBO) process, and their mechanical properties were evaluated [1-3].

2. Experimental

2.1 Materials

CNT film was purchased from JEIO Co., Ltd., Korea. Epoxy resin (KFR-120V) and curing agent (KFH-163) were supplied by KUKDO Chemical Co., Ltd., Korea. Acetone was purchased from Samchun Pure Chemical Co., Ltd., Korea.

2.2 Fabrication of CNT film-based composites by introduced ultrasonication processs

CNT film was treated according to the dissolved resin concentration and ultrasonication power density to optimize the ultrasonication process. The CNT films were immersed in various solutions, and the ultrasonication process was performed for 5 minutes at various ultrasonication power densities. The VBO process was carried out, and the curing process was then conducted at 120 °C for 2 hours to fabricate the CNT film-based composite.

3. Results and Discussion

The surface and cross-section of the ultrasonicationtreated CNT film-based composites were investigated via SEM imaging. As the resin concentration of the solution increased from 15 wt% to 45 wt%, SEM micrographs revealed a visually apparent increase in resin presence throughout the composite. The resin content of the CNT film-based composites was evaluated through TGA. An increase in ultrasonication power density and resin concentration of the solution resulted in a decrease in the residual weight of CNT film-based composites, demonstrating enhanced resin impregnation. The tensile strength of the CNT filmbased composites was evaluated, showing an overall increase compared to the untreated sample. Notably, the sample treated under conditions of 30 wt% and 0.3 W/cm³ exhibited a 76.7% improvement in tensile strength compared to the untreated sample.

4. Conclusions

In this study, CNT film-based composites were successfully fabricated by introducing ultrasonication to improve resin impregnation. Ultrasonication-induced cavitation effectively enhanced resin impregnation through CNT de-bundling. Furthermore, optimizing the ultrasonication parameters further improved the resin impregnation process, resulting in more uniform resin distribution and enhanced mechanical properties. The proposed method presents a novel approach to overcoming the challenges in the fabrication of CNT film-based composites.

References

- D. Zhang et al., *Composites Part B.* 159:327-335, 2019.
 X. Liu et al., *Composites Part A.* 130:105728, 2020.
- [3] X. Zhang et al., *CST*. 221:109136, 2022.

Acknowledgement

This work was supported by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (RS-2024-00412289) 포

스

머신 비전을 이용한 면내 투과성계수 측정 장비의 유동 선단 측정 자동화 Automation of flow front measurement of measuring apparatus for in-plane permeability using machine vision

*이현용 ^{1, 2}, 김정수 ¹, 김우섭 ^{1, 2}, 엄문광 ¹, 이정완 ¹⁺ *H.Y. Lee^{1,2}, J.S.Kim ¹, W.S.Kim^{1,2}, M.K.Um¹, J.W.Lee¹⁺ ¹ 한국재료연구원 ² 부산대학교 항공우주공학과

+E-mail: jwlee0626@kims.re.kr

Keywords: Machin vision, Automation, Flow front, Permeability, Dry fabric

1. 서론

복합재료의 투과성계수는 함침 해석을 통해 성형성을 검토하는 중요한 물성이다. 본 연구는 섬유 직물의 면내 투과성계수 측정 장비의 디지털화를 통해 측정의 효율성과 최적화를 목표로 하였다. 기존의 측정 방법은 유동선단 측정 시 작업자의 판단에 의존해 정확도에 한계가 있었고, 일관되지 않은 결과가 도출되었다. 이에 머신 비전을 이용하여 유동 선단 측정 자동화를 통해 실시간 데이터 획득과 일관성 있는 데이터 확보가 가능하도록 시스템을 구축하였다.

2. 2차원 유동에서의 다르시 법칙

다공성 매질에서의 수지 유동에 관한 운동량 방정식은 다르시 법칙(Darcy's law)로 정의할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = -\frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} k_{11} & 0 \\ 0 & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial x} \\ \frac{\partial P}{\partial y} \end{bmatrix} : \text{Darcy's law in 2D} \quad (1)$$

 $\nabla \cdot \overline{U} = 0$: Incompressible flow (2)

식 (2)에 식 (1) 대입

$$k_{11} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + k_{22} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0$$
 : Governing equation (3)

P = P₀ at x² + y² = R₀, P = Pf at R_f(x,y,t) (4) 면내 투과성계수의 유동선단 흐름은 2차원에서 식 (1)을 따른다. 위 식을 통해 유체의 흐름을 모델링 할 수 있으며, 이를 바탕으로 면내 투과성계수를 측정할 수 있다.

3. 장비 디지털화

3.1 시스템 구축

기존에는 작업자의 시각적 판단에 의존해 정확도와 신뢰성이 낮았다. 또한 카메라와 압력 및 유량 센서 간 측정 시간이 동기화되어 있지 않았다. 이를 개선하기 위해 유동선단 좌표 데이터를 실시간으로 측정하고 저장할 수 있는 시스템을 구축하였다. 머신 비전을 통해 유동 선단 라인을 추출하고, 추출된 라인은 시간, x좌표, y좌표 데이터로 저장하였다. 이 데이터는 시계열 유동 선단 이미지에 대해 반복적으로 처리되며, 각 시점에서 추출된 데이터는 Array 형태로 통합되어 저장된다. 또한, 이 시스템은 이미지, 압력 센서, 유량 센서에서 측정한 데이터를 시간 동기화하여 통합 저장할 수 있도록 설계되었다. 이를 통해 데이터의 정확도와 신뢰성이 크게 향상되었으며, 전체 데이터를 일관되게 측정할 수 있는 시스템을 구축할 수 있었다.



Fig. Schematic of digitalized mesauring apparatus for inplane permability

3.2 면내 투과성계수 측정

시스템 구축 후, 투과성계수 측정은 섬유 적층 및 오일 주입 후 시간에 따른 유동선단 좌표 데이터를 실시간으로 측정하고 저장하는 방식으로 이뤄진다. 측정된 데이터는 시간이 경과함에 따라 변화하는 유동선단, 압력, 유량 값이다. 이를 바탕으로 복합재의 주축 회전각을 측정하여 오일의 흐름을 분석하였고, 면내 투과성계수를 계산하였다.



Fig. 2 Measured results of flow rate, inlet pressure, flow fronts with respect to time

4. 결과 및 고찰

개선된 장비는 기존 수작업 기반의 측정 방식과 자동화가 가능해짐으로써, 정확도와 신뢰성이 크게 향상되었으며, 데이터 측정이 신속하고 일관되게 이루어질 수 있었다. 이를 통해 면내 투과성계수 측정의 효율성을 크게 향상시켰다.

참고문헌

- [1] H.I. Kwon et al. KSPE. PP285, 2016.
- [2] M.J.Buntain et al. Composites: Part A 34, 2003, 445~447.

[3] Radial penetration of a viscous liquid into a planar anisotropic porous medium, K. L. ADAMS, W.B. RUSSEL, and L.REBENFELD, Int. J. Multiphase Flow (1988)

포

MXene/CNT hybrid film for electromagnetic interference shielding film

*Minseouk Choi^{1,2}, Yeonsu Jung¹, Taehoon Kim¹⁺

¹ Composite Materials Research Centers, Korea Institute of Materials Science

² Department of Materials Science and Engineering, College of Engineering, Seoul National University

⁺E-mail: <u>tkim67@kims.re.kr</u>

Keywords : MXene, CNT fiber, Electrical conductivity, EMI shielding

1. Introduction

With the miniaturization of electronic devices, electromagnetic interference (EMI) shielding has become essential to prevent malfunctions. Since EMI shielding effectiveness (EMI SE) is closely related to electrical conductivity, highly conductive materials are preferred.

MXene, a two-dimensional transition metal carbide/nitride, exhibits exceptionally high electrical conductivity (~20,000 S cm⁻¹), making it a strong candidate for EMI shielding. However, its poor structural stability limits practical applications. To address this, a hybrid material is needed to enhance mechanical stability without compromising conductivity.

Carbon nanotubes (CNTs), known for their excellent mechanical properties and high electrical conductivity, are ideal for hybridization with MXene [1]. While most MXene/CNT hybrid films are fabricated via vacuum filtration, this method lacks scalability and fails to control CNT alignment, which is crucial for optimal performance. In this study, we present MXene/CNT hybrid films via MXene coated CNT fiber assembly process, ensuring a high degree of CNT alignment due to fibrous nature. CNT fibers were functionalized with amine group for better hybridization with MXene, leading to denser and more uniform coatings. As a result, the hybrid films achieved an EMI SE of 81 dB with a thickness of 32 μ m. This scalable and effective approach offers a promising route for next-generation EMI shielding materials.

2. Experimental

2.1 Functionalization of amine group on CNTF

Amine functionalization of CNT fibers was performed via the diazotization reaction of 4-aminobenzylamine (ABzA). A 0.01 M ABzA solution and a sodium nitrite solution were reacted in 1M HCl. CNT fibers were immersed in the mixture and heated at 90 °C for 24 h.

2.2 Fabrication of MXene/CNT hybrid film

For MXene coating, CNT fibers were immersed in MXene solutions of either 0.5, 1, or 1.5 wt% for 5 minutes. The coated fibers were then assembled onto a Teflon frame to form a film structure and dried overnight in a vacuum oven at room temperature. The dried MXene/CNT fibers were mechanically compressed at 50 bar to enhance integration. The resulting MXene/CNT hybrid films were labeled as MACF (using amine-functionalized CNT fibers) and MCF (using as-prepared CNT fibers).

3. Results and Discussion

Figure 1a presents the Scanning Electron Microscopy (SEM) images of MACF and MCF. MACF exhibits a denser and more ordered MXene coating. Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) images further confirm this behavior, indicating coating that amine functionalization effectively enhances MXene hybridization with CNT fibers. As shown in Figures 1b and 1c, both the electrical conductivity and EMI SET of MACF and MCF increase with higher MXene solution concentrations. Due to the enhanced MXene hybridization in MACF, its electrical conductivity increases more sharply compared to MCF. To better illustrate the relationship between EMI SE_T and electrical conductivity, Figure 1d presents EMI SE_T as a function of electrical conductivity. Consistent with previous reports, EMI SE increases proportionally with electrical conductivity [2].



Fig.1 a) SEM image of i) w-MACF, ii) w-MCF. b) Electrical conductivity, c) EMI SE_T of MACF and MCF against MXene solution concentration. d) EMI SE_T of the MACF and MCF in relation to electrical conductivity.

4. Conclusions

In this study, we proposed MXene/CNT hybrid films fabricated via a MXene-coated CNT fiber assembly process. Amine functionalization enhanced MXene coating on CNT fibers, leading to a significant improvement in electrical conductivity and EMI SE_T. This study demonstrates a scalable approach for developing EMI shielding materials using MXene and CNTs.

References

Jin et al., Functional Composites and Structures, 6, 2, 2024
 Yun et al., Adv. Mater., 32, 1906769, 2020

연속성형공정이 적용가능한 열가소성복합재 성형요소 연구

Study on Forming Elements of Thermoplastic Composites: Applicable to Continuous Molding

Process

김지민^{*1,2}, 임경서¹, 엄문광¹, 김진수⁺¹ J.M.Kim, G.Slim, M.K.Um, J. Kim

¹ 한국재료연구원, ² 영남대학교 파이버시스템공학과 ⁺E-mail: jinsu@kims.re.kr

Keywords: PEKK- Prepreg, CCM(Compression Composite Molding), Thermoplastic composite, Forming process

1. 서론

일반적인 열가소성 복합재는 낮은 기공률 및 성형 시 제품 품질을 위하여 진공 성형을 활용하여 성형되다. 이런 기존의 방식은 우수한 기계적 물성을 확보할 수 있지만, 성형 과정에서 진공을 형성하는 과정이 필수적이므로 공정 속도가 느리다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 진공없이 성형 가능한 CCM공정을 적용하기 위한 성형온도/가압하중 조건을 조사하고, 단면 관찰 및 밀도 측정을 통해 기공률을 분석하여 제조된 열가소성복합재의 성형성을 검토하였다.

2.1 실험개요

본 연구에서는 Continuos Compression Molding(CCM)공정에 적용가능한 다양한 공정조건을 조사하고, 제작된 복합재의 건전성을 평가하여 성형공정의 적합성을 분석하였다 [1].

이를 위해 PEKK-Prepreg (Toray, TC1320)를 사용하여 다양한 온도 및 압착하중 조건에서 성형실험을 설계하고 성형 과정에서의 압착 거동과 복합재의 내부 구조 및 기공률을 분석하였다.

2.2 실험 방법

실험은 열가소성복합재의 융점(310℃) 이상의 온도 조건에서 진행되었으며 350℃,360℃,370℃에서 Cross head speed를 0.25, 0.5 1.0 ,1.5mm/min으로 설정하여 압축 성형을 수행하였다.

압착 과정에서의 거동을 평가하기 위해 온도 및 성형 속도에 따른 압착 하중 변화를 측정 하였으며 하중 변화를 시간에 따라 분석하여 압착 거동과 기공률을 평가하였다.

3. 압착 거동 분석

3.1 온도변화에 따른 두께

온도와 가압하중에 따른 압착거동을 분석한 결과, 온도가 증가 할수록 복합재 수지의 점도가 감소하여 최종 성형된 복합재의 두께는 줄어드는 경향을 확인 하였다.(Table 1)

3.2 속도에 따른 압력 변화

가압하중이 증가할수록 복합재 성형 시, 하중 변화가 커지는 경향을 확인 하였다(Fig. 1). 복합재의 하중변화가 커짐에 따라 최종 성형된 복합재의 두께 역시 감소하는 경향을 확인하였다.

3.2 복합재 특성 평가

성형된 복합재의 건정성 평가는 광학현미경(OM)을 활용하여 진행하였다. 각 온도 및 가압하중에 따라 다르게 제작된 복합재의 단면을 50배, 200배를 통해 관찰하였으며, 이미지 분석을 통해 기공률을 측정하였다. 기공률 측정을 통해 제작된 복합재의 면간 수지의 함침 정도를 평가했다.(Table 2), (Fig. 2)

온도	mm/min							
	가압직후두께(mm)			최종	성형 뒤	₣께(mi	n)	
°C	0.25	0.25	0.5	0.5	1.0	1.0	1.5	1.5
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
350	2.04	2.35	2.24	2.31	2.48	2.29	2.15	2.28
360	2.13	2.37	2.39	2.39	2.26	2.05	2.14	2.29
370	2.17	2.12	2.2	2.2	2.25	2.18	2.13	2.26
Table.	1 가입	하중	및 완	노에	따른	복합	재의	두께
측정곁]과							



Fig. 1 380℃에서 속도에 따른 두께 측정결과

	360	370	
기공률(%)	2.95	2.28	

Table. 2 복합재 제작 후 기공률 측정 결과
2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials



Fig. 2 360℃, 370℃ 단면 측정 결과

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 CCM공정에 적용가능한 다양한 공정조건을 조사하고, 제작된 복합재의 건전성을 평가하여 성형공정의 적합성을 분석하였다

온도가 증가할수록 압착이 용이해졌으며 성형속도에 따라 기공률과 수지함침 상태가 변화하는 경향을 확인하였다.

향후 연구에서는 대량 생산 공정의 재현성과 경향성을분석하고, 내부기공률 및 물성 데이터를 확보하며 산업 적용 가능성을 검토할 예정이다.

참고문헌

[1] Piott et al. Increasing the performance of continuous compression moulding 2021, VOL. 7, NO. 1, 1–14

에틸 시아노아크릴레이트의 경화에 의한 표면 구조화 및 초소수성 특성 연구 A Study on Surface Structuring and Superhydrophobic Characteristics Induced by Curing of Ethyl Cyanoacrylate

최헌주 ¹, 조한동 ¹⁺ ^{} Heon-Ju Choi ¹, Handong Cho ¹⁺

¹ 국립목포대학교 기계조선해양공학부 ⁺E-mail: hdcho@mnu.ac.kr

Keywords: Superhydrophobic coatings, Ethyl cyanoacrylate, Wrinkled structures, wear-resistant

1. 서론

초소수성 표면은 물 접촉각이 150° 이상으로, 연 잎 효과를 모방하여 물방울이 쉽게 떨어지고 구르 는 특성을 가진다[1]. 이러한 표면은 마이크로/나 노 스케일의 계층적 구조와 낮은 표면 에너지 물질 의 조합으로 만들어지며, 자가세정, 방식, 유수 분 리 등 다양한 산업 분야에 활용된다. 그러나 기존 초소수성 표면은 물리적 충격과 마찰에 취약하여 기능이 저하되고, 특정 재료나 형태에만 제한적으 로 적용되는 한계가 있다[2]. 이를 해결하기 위해 에틸 시아노아크릴레이트(ECA)를 활용한 연구가 주 목받고 있지만, 기존 ECA 기반 초소수성 표면 제작 법은 수분과의 높은 반응성에 의한 불활성 환경의 필요, 나노입자의 균일한 분산의 어려움 등의 문제 점이 있었다. 본 연구에서는 ECA 표면에 프라이머 를 분사하여 주름 형상의 표면구조의 제작방법을 개발하였으며, 플라즈마 처리와 소수성 물질의 코 팅을 통해 초소수성을 구현하였다. 또한, 이 표면 에 대해 기계적 안정성과 내구성을 평가하였다.

2. 연구방법 및 내용

본 연구에서는 ECA 기반 초소수성 표면 제작을 위 해 Loctite 495 접착제와 SF770 프라이머를 사용했 다. 유리 슬라이드에 ECA를 도포한 후 프라이머를 분사해 주름 구조를 형성하고, 이 후 경화된 표면 을 플라즈마 처리하여 화학 작용기를 도입했다. 그 리고 이것을 소수성의 옥타데실트리클로로실란(OTS) 용액에 담근 후 건조하여 소수성 층을 형성했다. 표면 형상은 전자현미경과 3D 레이저측정현미경으 로 분석했으며, 롤러 마모 시험 후 젖음 특성을 평 가했다. 또한 나노인텐터와 마이크로스크래치 시험 을 통해 기계적 특성과 접착 강도를 측정했다.

3. 결과 및 고찰

ECA에 프라이머를 도포하면 표면에서 내부보다 빠른 중합반응이 진행되어 불균형한 수축력이 발생하고, 이로 인해 대규모 주름 구조가 형성된다. 이 주름 구조 표면은 플라즈마 처리 후 OTS 코팅을 통해 접촉각이 크게 증가하여 성공적으로 초소수성 특성을 구현할 수 있었다. 내구성 평가 결과, 초기 슬라이딩 각도는 10도 이내로 매우 낮았으나 다수의 마모 시험 후 점차 증가하였다. 마찬가지로 샘플 표면에 떨어뜨린 물방울을 후 다시 튀어오르는 반발 높이도 마모 사이클이 진행됨에 따라 점차 감소하는 경향을 보였다. 그러나, 광범위한 마모 후에도 물방울은 표면에 부착되지 않았으며, 공초점 현미경 분석을 통해 주름 구조가 상당 부분 보존되어 있음을 확인할 수 있었다. 기계적 특성 평가에서 ECA 기반 초소수성 표면은 상용 초소수성 코팅재보다 우수한 성능을 보였다. ECA 기반 초소수성 표면은 상용 초소수성 코팅 제품보다 높은 기계적 특성을 보였으며, 스크래치 시험에서도 우수한 접착 강도와 내구성을 입증했다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 ECA 와 프라이머의 경화 속도 차이로 주름 구조를 형성하고, ECA 의 우수한 기계적 특성을 기반으로 내구성이 뛰어난 초소수성 표면을 구현했다. 마모 시험 후에도 주름 구조가 상당 부분 보존되어 소수성이 유지되었으며, 기계적 특성 평가에서 상용 제품보다 현저히 우수한 결과를 보였다. 이 기술의 단순한 공정과 뛰어난 내구성은 다양한 산업 분야에 적용 가능성을 제시한다.

참고문헌

[1] L. Wang. Soft Matter, 19:1058-1075, 2023

[2] S. Wang et al. ACS Appl. Mater. Interfaces, 12: 35502–35512, 2020.

후기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2022H1D8A3038671)

Enhanced thermal conductivity and electrical insulation of polyetherimidebased composites

^{*}Jin Woo Song ¹ and Sang Yup Kim¹⁺ ^{1,1+} Department of Mechanical Engineering, Sogang University ⁺E-mail: <u>sangyupkim@sogang.ac.kr</u>

Keywords : Polyetherimide composites, Thermal conductivity, Electrical insulation

1. Introduction

The increasing demand for high-performance semiconductor devices has driven the development of advanced semiconductor packaging. To ensure consistent performance and lifespan of these packages which consist of homogeneous components exhibiting different physical properties and failure rates, burn-in is required. Burn-in is a widely used engineering method to eliminate weak items from a standard population [1]. Since package-level burnin involves exposing packages to high temperatures and electrical stress, burn-in sockets onto which the packages are mounted require high thermal conductivity and electrical insulation. Polymers have lightweight nature, cost-effectiveness, excellent processing performance, and electrical insulation properties, although they have poor thermal conductivity. To overcome this limitation, thermally conductive fillers will be incorporated into the polyetherimide matrix.

2. Materials and Experimental Methods

2.1 Materials : Polyetherimide (PEI), Ultem 1000®, and PEI-based composites, SF2255®, are obtained from Saudi Basic Industries Corporation (SABIC). 1-Methyl-2-pyrrolidone (NMP) is purchased from Sejin CI Co., Ltd (Seoul, Korea).

2.2 Specimen Preparation : A single screw extruder is used to compound matrix polymers or composites with conductive fillers and to pelletize the mixtures for easier injection molding (Fig. 1). For SF2255®, the temperature in zone 1 is 330°C, and that in zone 2 is 345°C. The resulting material is then fed into a vertical injection molding machine to fabricate specimens (Fig. 2a).

3. Results and Discussion

Three types of specimens are prepared for SEM/EDS, tensile test, and thermal conductivity test, respectively. SEM/EDS specimens are hot pressed at 340°C, 1MPa and also solvent casted with NMP to identify fillers in the composites. Tensile test specimens are injection-molded at 330°C, 0.2MPa (ASTM D638 Type V, Fig. 2b). Thermal conductivity specimens are hot pressed at 340°C, 5MPa and laser cutted (ASTM D5470 standards). The measurements of each specimen are being explored, with efforts aimed at developing composites that enhance

thermal conductivity while maintaining electrical insulation and processability.



Fig. 1. Single screw extruder machine



Fig. 2. (a) Vertical injection molding machine (b) ASTM D638 Type V specimen

4. Conclusions and Future Works

This study is focused on characterizing the properties of existing materials and analyzing their fillers, with the goal of developing new materials by incorporating additional fillers. The objective is to achieve enhanced heat dissipation while preserving electrical insulation and ease of processing. Future work will focus on the incorporation of thermally conductive fillers such as alumina, boron nitride nanosheets (BNNS), or silane-treated particles. Comparative analyses between these novel composites and existing materials will be conducted to assess their effectiveness in burn-in socket applications.

References

 Block, H. W., & Savits, T. H. (1997). Burn-In. Statistical Science, 12(1), 1–19.

Acknowledgement

This research was supported by the Micro Contact Solution Co., LTD.

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

탄소나노튜브 섬유 기반 흑연 음극 배터리 제조 Preparation of Carbon Nanotube Fiber-based Graphite Anode Battery

* 박주현^{1,2} , 최송규² , 이균배² , 장진호² , 정연수² , 성동기¹ , 김태훈²⁺ * J.H. Park^{1,2} , S.G. Choi² , K.Lee² , J.H. Jang² , Y. Jung¹ , D.G. Seong¹ , T. kim²

> ¹ 부산대학교 고분자공학과, ² 한국재료연구원 융복합재료연구본부 ⁺ E-mail: tkim67@kims.re.kr

Keywords: Graphite Anode battery, CNT film, electrolyte, Electrode

1. 서론

전기자동차의 주요 개발 이슈는 주행 거리와 수명 안정성 등으로 에너지 밀도와 밀접한 관련이 있다. 통상의 전기자동차에 사용되는 이차전지의 Cu 및 Al 전류 집전체는 20 wt% 나 차지하기 때문에 이를 경량화 할 수 있으면 높은 에너지 밀도를 달성할 수 있다. 본 연구에서는 음극에 CNT film을 전류 집전체로 활용하여 음극의 경량화를 통해 에너지 밀도를 높이고자 하였다. 경량이면서도 고강도와 고전도성을 지니고, 직접방사법을 통해 연속 생산 이 가능한 CNT film을 음극재의 전류 집전체로 활용 하여 새로운 전극 소재의 가능성을 확인하고, 안정 적인 구동 특성을 가진 음극 배터리를 제안하였다.

2. 실험 방법

2.1 전극 제조

인조흑연 배터리 전극으로 사용되는 CNT film의 직접방사방법으로 제작이 되었으며[1], 제작된 CNT film 위에 음극물질로 Graphite를 Dr. blade로 캐스팅하여 전극을 제조하였다.

2.2 배터리 Cell 제조

CNT film 기반 전극 위에 Graphite, Carbon black, SBR CMC 또는 PVDF 바인더를 혼합하여 음극 slurry 를 제작 및 코팅하였다. 이후 60°C 진공 오븐에 24시간 건조하여 펀칭 후 전극을 제작하였으며 cellulose 분리막과 EC:DEC = 3 : 7 _LiPF6_fec 5 wt%로 구성된 전해질을 활용하여 half cell을 제작하였다.

3. 실험 결과

Figure 1은 기존의 Cu foil과 CNT film 집전체 기반 전극을 이용하여 제작된 음극 배터리의 0.1 C-rate 3 cycle 데이터이며 연구 초기의 Cu foil 기반의 전류 집전체를 사용한 경우 338.713 mAh/g의 용량을 보였고 쿨롱 효율은 93 %를 도달했다. 이의 보완으로 초기 Lithiation 단계에서의 안정성 및 초기 가역용량 확보를 위해 EC:DEC LiTFSi 전해질 과 CNT film을 활용해 제작한 cell은 346.441 mAh/g의 용량과 평균 90.23 %의 쿨롱효율을 보이고 있다. 이를 통해 EC:DEC = 3 : 7 _LiPF6_fec 5 wt% 전해질의 성능 확인과 CNT film의 경량 집전체 로서의 가능성을 확인 할 수 있었다



Fig. 1. Cu foil-based vs CNT film -based structure battery 0.1C, 3 cycles.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서 CNTF film을 사용하여 배터리 음극의 경량화 가능성 및 수명 안정성을 확인할 수 있었다. 향후 CNTF film의 도핑을 통한 전기전도도 향상, CNTF film 내부 다공성도 제어에 대한 연구를 진행하여 고성능·초경량 배터리 개발이 가능할 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] T Kim et al. Comp Part. A 140:106182, 2021

후기

본 연구는 재료연구원 주요사업(PNKA610)의 지원으로 수행되었습니다.

Influence of CNT Fiber Stacking Structures on the Electrical and Mechanical Performance of CFRP

*<u>Su Jeong Heo¹</u> Jueun Shin¹ and Dong Gi Seong^{1,2+}
 ¹ School of Chemical Engineering, Pusan National University,
 ² Department of Polymer Science and Engineering, Pusan National University
 *E-mail: dgseong@pusan.ac.kr

Keywords : Carbon nanotube fiber, Stacking structures, Electrical conductivity, ILSS

1. Introduction

Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP) is demanded as an aircraft exterior material due to its lightweight and excellent mechanical properties [1]. However, its low electrical conductivity poses limitations in lightning strike protection (LSP) and electromagnetic interference (EMI) shielding [1-3]. To address this, studies have been reported to enhance the electrical conductivity of CFRP by incorporating carbon nanotube (CNT) fibers [1].

This study aims to propose an optimized stacking structure by incorporating CNT fibers into CFRP to simultaneously improve LSP, EMI shielding performance, and mechanical properties. The study will focus on analyzing the effects of various stacking structures and revealing the mechanisms.

2. Experiment

2.1 Materials: Unidirectional carbon fiber (SK-N300, T-700 grade, SK Co., Ltd.) was used as the fiber reinforcement material. The epoxy resin (KFR-120V) and hardener (KFH-163) were used from Kukdo Chemical Co., Ltd. CNT fiber with a thickness of 5 μ m was obtained from the Korea Institute of Materials Science.

2.2 Stacking structures: CNT fibers and carbon fibers were laminated in various stacking structures to analyze the influence of CNT fiber placement on the properties of CFRP. The fabricated CFRP were designed with CNT fibers placed only on the top layer, inserted between carbon fiber layers, or alternately stacked.



Fig. 1. Stacking structures of CNT fibers and carbon fibers

2.3 Fabrication: Vacuum assisted-resin transfer molding (VA-RTM) process was performed by laminating CNT fibers and carbon fibers. Epoxy was injected to completely

impregnate the fibers and then cured in an oven at 160 °C for 2 h.

3. Results and Discussion

To evaluate the LSP performance, a current pulse-based Joule heating method was employed. The results showed that CFRP formed hot spots and concentrated damage due to its low electrical conductivity. However, CFRP with CNT fibers effectively dispersed the current due to its high electrical conductivity, reducing thermal concentration.

EMI shielding performance was evaluated. CFRP with CNT fibers exhibited superior EMI shielding compared to conventional CFRP. Notably, depending on the stacking structure, CNT fibers effectively absorbed electromagnetic waves, enhancing the overall shielding performance.

The mechanical properties were evaluated by measuring the interlaminar shear strength (ILSS). The ILSS improved with an increase in the interface between CNT fibers and carbon fibers. This improvement was attributed to an increase in interfacial bond strength due to the fiber bridging effect.

4. Conclusions

This study analyzed the effects of CNT fibers stacking structures on electrical conductivity, mechanical strength, focusing on the mechanisms. By evaluating the influence of different stacking sequences, the study proposes an approach to simultaneously enhance these properties. These findings demonstrate a practical solution for enhancing the safety and durability of aircraft exterior materials.

References

- [1] Zhang, Jikui, et al. Composites Part B: Engineering, 2019, 168: 342-352.
- [2] Jang, Woo-Hyeok, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025, 190: 108660.
- [3] Zhu, Huixin, et al. Composites Part B: Engineering, 2024, 279: 111448.

Acknowledgement

This work was supported by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (RS-2024-00412289) 포

人

Improved Epoxy Impregnation into CNT Film via Ionic Liquid-Assisted Process with Electrical System

*Sumin Heo¹, Tae Kyeom Kim¹ and Dong Gi Seong^{1,2+}
 ¹ School of Chemical Engineering, Pusan National University,
 ² Department of Polymer Science and Engineering, Pusan National University
 *E-mail: dgseong@pusan.ac.kr

Keywords : CNT film, Ionic liquid, Electrical system

1. Introduction

Carbon nanotubes (CNTs) are materials with excellent electrical, mechanical, and thermal properties. Many studies have been conducted on composites with CNT assemblies such as fibers and films, enabling the fabrication of composites containing high content CNT. However, the dense network structure of CNT films prevents impregnation of polymer resins, making it difficult to fabricate CNT films-based composite. In this study, an ionic liquid-assisted impregnation method using electrical system was introduced to solve this challenge. The ionic liquid simultaneously served as an electrolyte, curing agent, and swelling agent in the fabrication of CNT film-based composites. The electrical system assisted with uniform impregnation of matrix into the CNT film. We investigated the effects of ionic liquid and electrical system on CNT film and proposed a method to overcome the impregnation challenge of CNT film [1-2].

2. Experimental

2.1 Materials

Acetone (Samchun Pure Chemical Co., Ltd., Korea) was used as a solvent, epoxy resin KFR-120 (Kukdo Chemical Co., Ltd., Korea) and ionic liquid 1-ethyl-3methylimidazolium dicyanamide (EMIM-DCA, Sigma-Aldrich, USA) were used as a matrix. CNT film (JEIO Co., Ltd., Korea) functioned as a reinforcement.

2.2.1 Preparation of EMIM-DCA/CNT film

CNT film impregnated with only EMIM-DCA was prepared to investigate the effect of the ionic liquid on the network structure of the CNT film. CNT film (cathode) and stainless-steel plate (anode) were immersed in a solution of acetone with dissolved EMIM-DCA, and then voltage was applied. Subsequently, the EMIM-DCA/CNT film obtained was dried at room temperature to evaporate acetone.

2.2.2 Preparation of Epoxy/EMIM-DCA/CNT film composite by introduction of electrical system

A solution which dissolved epoxy and EMIM-DCA in acetone was prepared by magnetically stirring for 10 min at 200 rpm. The process of applying the electrical system and drying of impregnated CNT film was the same as on 2.2.1. After Epoxy/EMIM-DCA/CNT film was obtained,

vacuum-bag-only (VBO) process was performed and then cured at 180°C for 2 hours.

To investigate the effect of the introduced electrical system, a voltage-untreated sample was prepared at the same composition condition, immersion time, curing temperature and time.

3. Results and Discussion

The curing reaction of EMIM-DCA as curing agent with epoxy was confirmed by DSC dynamic scan. Curing temperature (180°C) and time (2 hours) was determined by DSC isothermal scan. FT-IR analysis was conducted to identify the components of the CNT film surface. The impregnation level was evaluated through SEM analysis and tensile strength measurement. SEM images showed that the EMIM-DCA loosened dense structure of the CNT film by wrapping CNT bundles. It was also observed that the epoxy impregnation between CNT bundles of the voltage-treated sample was higher and more uniform, while the voltage-untreated sample was only covered on the surface. In the tensile strength, the voltage-treated sample showed an increase of more than 1.5 times compared to the voltage-untreated samples. The voltagetreated sample prevented stress concentrations due to the uniform impregnation, resulting in no premature failure.

4. Conclusions

Ionic liquid (EMIM-DCA)-assisted process with electrical system improved the impregnation of epoxy resin into CNT film. When EMIMs, cations produced by the electrical system, migrated to the CNT film, EMIMs were able to attenuate the van der Waals interaction between CNT bundles, resulting in a swelling effect. The ionic liquid then acted as curing agent to efficiently fabricate the CNT film-based composite.

References

[1] JW Kim et al. *Composites Part B.* 275: 2024, 111329.
[2] H Maka et al. *Ind. Eng. Chem. Res.* 51, 14: 2012, 5197-5206.

Acknowledgement

This work was supported by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (RS-2024-00412289).

Development of Self-Healing Nanofiber-Reinforced green Composites for Enhanced Damage Recovery

*Xusheng Liu¹, M.N. Prabhakar², Dong-Woo Lee² and Jung-Il Song²⁺

¹ Department of Mechanical Engineering, Changwon National University, ² Research Institute of Mechatronics, Changwon National

University

⁺E-mail: jisong@changwon.ac.kr

Keywords : PAN, Coaxial Electrospinning, Core-shell nanofiber, Self-healing, Composite

1. Introduction

Since the pioneering work by White et al. on self-healing polymer composites [1].Self-healing materials have gained significant attention due to their ability to autonomously repair physical damage. But conventional fabrication approaches process is not only cumbersome but also prone to defects such as fiber misalignment, nonuniform distribution of healing agents, and reduced mechanical integrity [2]. To overcome these challenges, this study proposed a novel dual-nozzle electrospinning technique for the continuous and simultaneous fabrication of PAN-based self-healing nanofibers loaded with epoxy resin and hardener. This not only reduces material handling and potential damage, but also increases the interfacial contact between the epoxy resin layer and the hardener layer, thereby accelerating the cross-linking reaction during the self-healing process [3].

2. Experimental

2.1 Fabrication of nanofibers: PAN NFs were fabricated by electrospinning technology from 6-10% PAN solution. Then, the optimal concentration was 6% through SEM and other characterization analysis. This concentration was used as the shell solution, epoxy resin and hardener were used as the core solution to fabricate core-shell nanofibers through coaxial electrospinning.

2.2 Fabrication of self-healing composites: The two core-shell nanofibers were deposited directly onto abaca fibers by electrospinning. The self-healing composites was fabricated by VARTM process. The composites consisted of 6 layers of abaca fibers and nanofibers attached to the abaca fibers. Followed by curing at room temperature for 48 hours and an additional 8 hours at 60°C to yield the final self-healing nanofiber composite.

3. Results and Discussion

Figure 1 displays the tensile strength and Young's modulus of AFC and APNFC. APNFC exhibits a 4.98% higher tensile strength than AFC, due to PAN nanofibers filling gaps between abaca fibers, enhancing the interface and stress distribution. However, APNFC's Young's modulus is 9.84% lower than AFC, a result of the nanofibers' liquid core, which provides flexibility

beneficial for self-healing by enabling microcrack formation and early damage repair. And the self-healing behavior of AFC and APNFC was tested under controlled tensile strains. Results in Fig. 2 show that APNFC retained more tensile strength after self-healing, with decreases of 7.56%, 2.04%, and 1.56% at 0.3%, 0.5%, and 0.7% strains, respectively, compared to AFC's reductions of 23.84%, 7.45%, and 2.61%. The superior performance of APNFC is due to the self-healing nanofibers that fill and cross-link microcracks.



Fig. 2. S-S response of composites over multiple cycles **4. Conclusions**

This study effectively created self-healing PAN nanofibers via coaxial electrospinning, showing enhanced mechanical properties and healing in composites. Tensile tests confirmed the nanofibers' reinforcement and healing benefits.

References

- [1] White, S. R.et al. Nature. 409:794-797,2001
- [2] Sinawang et al. Chemical Communications. 56:4381– 4395,2020
- [3] Thakur et al. Polymer, 69:369-383,2015

Acknowledgement

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education and Ministry of Science and ICT(No. 2018R1A6A1A03024509 and 2023R1A2C1006234)

기계적 특성 향상을 위한 탄소나노튜브 섬유 표면 개질 Carbon nanotube fiber surface modification to improve mechanical properties

*장진호 ^{1, 2}, 박경태 ¹, 이균배 ¹, 정연수 ^{1,} 이제인 ², 김태훈 ¹⁺ * J.Jang¹, K.Park¹, K.Lee¹, Y.Jung¹, J.Lee², T.Kim ¹

¹ 한국재료연구원 융·복합재료연구본부, ² 부산대학교 재료공학과 ⁺E-mail: tkim67@kims.re.kr

Keywords: CNT fiber, Surface modification, Cross-linking, CNT Alignment

1. 서론

Carbon nanotube(CNT) fibers는 우수한 기계적, 전기적, 열적 특성과 경량특성을 동시에 보유한 소재이나, 아직은 Individual CNT보다는 현저하게 낮은 물성을 보이고 있다. 본 연구에서는 CSA와 같은 초강산을 사용하지 않고 CNT의 배열 조절 및 가교결합을 통해 경량성은 유지하면서 기계적 특성을 향상시켰다.

2. 실험 과정

2.1 CNT 섬유 제조

본 연구에 사용된 CNT fiber는 1200°C 수직로 상부에Ar, H₂, CH₄, Ferrocene, Thiophene 을 주입하여 형성된 CNT Aerogels을 수조 내에서 다양한 권취 속도로 winding하여 fiber형태로 제조되었다.

2.2 Cross-linking

DI water,NaNO2와 4-Aminobenzoic acid(ABA)를 섞은 혼합 용액에 CNTF를 반응시켜 카르복실기를 부착시키고 이후 Jeffamine ED 2003과 DI water를 섞은 용액에 반응시켜 amide bonding을 유도하였다. 이후 N,N-Dimethylformamide(DMF)와 Acetone으로 몇 차례 Washing하였다

3. 실험 결과

Fig 1에서는 Draw Ratio가 증가할수록 비강도 역시 선형적으로 상승하였고 시너지 효과가 있음을 보여준다. 편광 라만 분석을 통해 CNTF의 정렬도를 측정한 결과 1에서 15로 Draw Ratio가 상승함에 따라 G peak의 세기가 강해진다는 점을 통해 와인당 축 방향으로 평행하게 배열된 CNT가 많을수록 원섬유의 강도뿐 아니라 표면개질 효과 역시 비례하여 증가한 것으로 판단된다. Fig 2는 G' down shift에 의한 인장 하중 전달 효율을 확인하였다.Prisitne CNTF의 경우 -22.5cm⁻¹/로 측정된 반면 Crosslinked CNTF의 경우 -26.3cm⁻¹ ¹/%으로 가교 결합에 의해 CNT bundle이 효과적으로 하중을 전달한다고 보여진다.





4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통하여 Draw Ratio 조절을 통해 CNT 배열을 조절하여 우수한 CNTF를 합성하였고, 가교결합을 통해 추가적인 기계적 특성 향상을 통해 시너지 효과를 확인하였다. 향상된 특성을 기반으로 고강도 복합소재 및 엑추에이터 등 여러 분야에 사용될 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] YS Jung et al. Nano Lett. 8:3128-3136, 2023.

후기

본 연구는 한국재료연구원 기본사업(PNKA610)의 지원으로 수행되었습니다.

촉매가 포함된 탄소나노튜브 집전체를 활용한 리튬황 전지 Lithium-Sulfur Batteries Utilizing Carbon Nanotube Current Collectors

*김현우¹, 이균배¹, 박영진¹, 정연수¹, 김주현², 김태훈¹ * H. Kim¹, K Lee², Y. Park², Y. Jung², J. Kim², T. Kim¹

> ¹ 한국재료연구원, ² 경북대학교 ⁺E-mail: gusdn2707@kims.re.kr

Keywords: Li-S batteries, Carbon nanotube

1. 서론

리튬황 배터리는 높은 이론 용량, 가격 경쟁력, 그리고 친환경성으로 차세대 배터리로 주목받고 있습니다. 그러나 낮은 전기전도도와 셔틀 효과라는 문제를 극복하기 위한 연구가 수십 년간 지속되어 왔습니다. 본 연구에서는 전도성과 비표면적이 높은 CNT 필름을 집전체로 사용하여 기존 알루미늄 포일(Al foil)의 한계를 극복하고 촉매를 사용하여 높은 고율에서도 충방전이 가능한 Li-S 배터리를 제조합니다.

2. 실험 방법

실험에 사용된 CNTF film은 기존 연구에서 사용된 직접방사법에 따라 생산되었다[1]. 전기화학적 수행 능력을 평가하기 위해 Sulfur 양극재를 코팅하여 half cell을 제작하였으며 작동전압은 1.7 ~ 2.8 V로 설정하여 진행하였다.

3. 실험결과

CNT의 전자 전달이 원활히 이루어지고 있는 것을 보여주고, 높은 고율 특성에서도 원활히 충방전이 되는 것을 보여준다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 기존 Al foil을 대체하는 집전체인 CNT Film을 사용했다. CNT Film은 기존Al foil에 비해 높은 수명 특성을 보여주고 있다. 촉매를 사용했을 때 1C에서 보다 더 높은 수명특성을 보여준다. 촉매의 종류를 다양화해 다른 시도도 해 볼 것이다.

실리콘/탄소나노튜브섬유(CNTF) 기반 고에너지밀도·경량 전류 집전체 개발 Preparation of a Silicon-embedded CNTF current collector for Lightweight and High-

Energy Density Batteries

*오은재^{1,2}, 정연수¹, 이균배¹, 채한기², 김태훈¹⁺ *E.J. Oh^{1,2}, Y. Jung¹, K. Lee¹, H.G. Chae², T. Kim¹⁺

¹ 한국재료연구원 융복합재료연구본부 ² 울산과학기술원 고분자 나노복합재료 및 탄소소재 연구실

+ E-mail: tkim67@kims.re.kr

Keywords: Current collector, CNTF, Energy devices, Silicon, Surface modification

1. 서론

전류 집전체(Current Collector)는 배터리의 구성 요소 중 가장 큰 질량을 차지하고 있다. 이를 탄소 기반의 경량 소재로 대체하면 단위 질량당 용량을 향상시켜 전기 자동차나 항공 우주와 같은 모빌리티 분야에서 주행거리를 연장하는 데 기여할 수 있다.

그러나 기존 탄소계 음극 소재는 낮은 에너지 밀도로 인해 성능 한계가 있어, 높은 비용량을 갖는 음극 소재의 개발이 필요하다.

본 연구에서는 기존의 전류 집전체의 한계를 극복하기 위해 고용량 소재인 실리콘을 첨가한 CNTF(CNT Fiber) 기반의 전류 집전체를 개발하여 전기차 및 항공우주용 배터리의 경량화 및 에너지 밀도의 향상을 도모하였다.

2. 실험 방법

2.1 전극 제조

본 실험에 사용된 CNT는 direct spinning 방식으로 제작이 되었으며^[1], 제작된 CNTF를 DMF(N,N-Dimethylformamide)에 일정 시간 처리 후 DI Water에 워싱하였다. 처리된 CNTF를 이후 DI Water와 실리콘 나노입자(Si NP)를 50 : 1 비율로 혼합한 용액에 함침하였다.

2.2 Coin Cell 제조

전극의 성능을 평가하기 위해 1M LiPF₆ in EC:DEC FEC 5wt% 의 전해질을 사용하여 half cell을 제조하였다.

3. 실험 결과

직접 방사법으로 합성된 CNTF의 초기 비용량은 171 mAh/g이었다. CNTF의 에너지 밀도를 높이기 위해 소량의 Si NP를 첨가하여, Si이 포함된 CNTF(Si/CNTF)의 초기 비용량이 기존 대비 344 % 향상되어 589 mAh/g에 도달했다. Figure.1은 CNTF 와 Si/CNTF의 초기 충방전 그래프이다. 이를 통해 Si NP 함침이 CNTF의 용량 향상에 효과적임을 확인할 수 있었다.



Fig. 1. Voltage-Capacity Profile for CNTF and Si/CNTF.

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 Si NP 함침을 통한 CNTF의 용량 향상 가능성을 확인하였다. 앞으로 장기 사이클 안정성 및 전극 구조 최적화 연구를 진행함으로써, 고성능·초경량 배터리 개발이 기대된다.

참고문헌

[1] T Kim et al. Comp Part. A 140:106182, 2021

후기

본 연구는 재료연구원 주요사업(PNKA610)의 지원으로 수행되었습니다.

Fabrication of high-performance CNT film-based composite by inducing nondestructive expansion using electrolysis

*<u>Tae Kyeom Kim¹</u> and Dong Gi Seong^{1,2+}
 ¹ School of Chemical Engineering, Pusan National University,
 ² Department of Polymer Science and Engineering, Pusan National University
 *E-mail: dgseong@pusan.ac.kr

Keywords : CNT film, Electrolysis, Mechanical properties

1. Introduction

Carbon nanotubes (CNTs) are expected to be the optimal reinforcement for high-performance and lightweight composites due to their excellent electrical, thermal, and mechanical properties [1]. Recnetly, various studies have been conducted to fabricate CNT composites with high CNT content using macroscopic CNT assemblies such as CNT fibers and CNT films [2]. However, the highly dense structure of CNT films limits resin flow and impregnation, necessitating a suitable composite fabrication process [3]. In this study, CNT bundles were effectively separated by inducing nondestructive expansion through the generation hydrogen bubbles on the CNT bundle surface using electrolysis. The CNT film with separated CNT bundles was effectively impregnated through a dipping process, successfully fabricating the CNT film-based composite.

2. Experimental

2.1 Materials : CNT film was purchased from JEIO Co., Ltd., Korea. Epoxy (KFR-120V) and curing agent (KFH-163) were supplied by KUKDO Chemical Co., Ltd., Korea. Potassium hydroxide(KOH), which was used as an electrolyte in the electrolysis process, was purchased from Sigma-Aldrich Co., Ltd., Korea.

2.2 Composite processing : CNT film was immersed in a solution of KOH dissovled in deionized water. A sus plate was used as the anode, and the CNT film was used as the cathode. Electoylsis was carried out under various conditions such as electrolyte concentration, current density and electrolysis process time to examine the effect of expansion due to hydrogen generation. The expanded CNT film was dried in an oven at 100°C overnight. Even after drying, the CNT film maintained its expanded structure and was immersed in epoxy resin mixed with curing agent in a vaccum oven at 60 °C for 30 min. The resin-impregnated CNT film was then subjected to a rolling process in a VBO process to remove the excess resin at 60 °C for 30min and was cured in an oven at 80 °C for 2h. The optimal conditions for the electrolysis process were determineed by comparing the properties of composites(E-CNTFRP) fabricated under different conditions.

3. Results and Discussion

The expansion effect induced by electrolysis was investigated through impregnation of CNT films. The surface and cross-section of E-CNTFRP fabricated using electrolysis, where the resin was effectively impregnated due to expansion, were confirmed using SEM. Due to the expansion between CNT bundles, resin impregnation at composite with electrolysis process is higher and more uniform than untreated CNTFRP. Tensile testing was performed in accordance with ASTM D3822. Under optimal electrolysis conditions, E-CNTFRP had a tensile strength of approximately 401MPa, which was 80% higher compared to untreated CNTFRP. In particular, the modulus of E-CNTFRP was significantly improved as the strain decreased sharply from 20% to less than 5%. TGA revealed that the CNT weight ratio of the E-CNTFRP was 1.5 time as high as that of untreated CNTFRP.

4. Conclusions

In this study, a CNT film-based composite was successfully fabricated by electrolysis process. The results of this study comprehensively showed that the proposed process not only improved the resin impregnation inside CNT film, but also facilitated resin flow, resulting in uniform resin distribution. This process is considered that it will contribute as a key technology for fabricating CNT film based composite in the future.

References

[1] O Tanaike et al. Debundling of SWCNTs through a simple intercalation technique. Electrochem. Commun 11 (2009) 1441-1444.

[2] J. Zhao et al. High energy-capacity and multi responsive phase change fibers via in situ polymer composition with expanded carbon nanotube networks. Chem. Eng. J 481(2024) 148262

[3] Q. Lu et al. Zhang. Expansion-based impregnation of poly(vinyl alcohol) into carbon nanotube networks toward high-strength nanocomposites. Compos. Commun. 33 (2022) 101198.

Acknowledgement

This work was supported by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (RS-2024-00412289).

Study on the Characteristics of Ceramic-Coated Separator for LIBs using Fine Boehmite powder

*Jin-Ae Kim^{1,2}, Ji-Hui Oh^{1,2}, Dong-Won Lee¹, Won-Ho Shin² and Jong-Min Oh²

¹ Material Technology Center, Korea Testing Laboratory, ² Department of Electronic Materials Engineering, Kwangwoon University ⁺E-mail: jmOH@kw.ac.kr

Keywords : Boehmite, ceramic-coated separator, fine powder, Lithium-ion battery

1. Introduction

The separator, an essential component of lithium-ion batteries, plays a crucial role in physically separating the anode and cathode while minimizing its thickness to enhance energy density[1]. One way to reduce the thickness of the separator is by refining the size of the coating powder. Traditionally, ceramic powders of 0.5–0.7 μ m were used to produce ceramic-coated separators. However, recent studies have focused on using powders with a size of less than 500 nm to reduce the coating layer thickness while achieving both lightweight and thermal stability. In this study, a ceramic-coated separator with a thickness of less than 2 μ m was manufactured using fine boehmite powders in the range of 200–300 nm to form a thin yet heat-resistant coating layer, and the properties of the powders and separators were evaluated.

2. Powder Characterization

To examine the morphology and size of the boehmite powders synthesized by the sol-gel method, SEM (Scanning Electron Microscopy) and PSA (Particle Size Analysis) were performed. Additionally, the physical properties of the powders were assessed through measurements of specific surface area and true density.



Fig. 1. SEM images and Particle size distribution of the AlOOH-coated separators; (a,c) 0.2 µm, (b,d) 0.3 µm

3. Separator Characterization

The physical properties of the fabricated separator, such as thickness, porosity, roughness, air permeability, contact angle, electrolyte wettability, and thermal stability, were compared and analyzed. Additionally, electrochemical properties were evaluated by comparing ion conductivity and C-rate performance.







Fig. 3. Contact angle between water and separators.

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

A study was conducted to control the thickness of the separator using two types of fine boehmite powders with different sizes. The correlation between the ceramic size, coating thickness, and the physical properties of the coated separator was examined. Research was carried out on thinner ceramic-coated separators that can be applied to lithium-ion batteries, and it is expected that this could serve as a practical alternative to improve the energy density of lithium-ion batteries in the future.

References

[1] Y. Feng et al. J. Mater 8(6), 1184–1190, 2022.

Acknowledgement

This research was conducted with the support of the Materials and Components Technology Development Program(**RS-2024-0044-9873**) of the Ministry of Trade, Industry, and Energy.

산화물계 소재에 따른 리튬이온배터리용 세라믹 코팅 분리막의 성능 평가 Performance evaluation of ceramic-coated separators for LIBs based on oxide materials

*오지희 ^{1,2}, 김진애 ^{1,2}, 이동원 ¹, 신원호 ², 오종민 ²⁺ * J.-H. Oh ^{1,2}, J.-A. Kim ^{1,2}, D.-W. Lee¹, W.H. Shin ², J.-M. Oh ²⁺,

¹ 한국산업기술시험원 재료기술센터, ² 광운대학교 전자재료공학과 ⁺E-mail: <u>jmOh@kw.ac.kr</u>

Keywords: Flow properties, Cohesive characteristics, Ceramic powder.

1. 서론

리튬이온배터리의 구성요소 중 분리막은 주로 폴리올레핀계 물질이 재료로 사용되나, 낮은 열 안정 및 젖음 특성을 개선하기 위해 표면에 무기물을 코팅하는 방식이 주로 적용되고 있다[1]. 이러한 공정에 대표적으로 사용되는 무기물은 알루미나, 보헤마이트 등이 있으며 최근에는 그 외 다양한 소재들이 연구되고 있다[2]. 본 연구에서는 대표적인 산화물계 소재인 Al2O3, BaTiO3, TiO2 을 사용하여 세라믹 코팅 분리막을 제조하여 분리막 및 배터리의 성능을 평가하였다.

2. 분말의 특성 분석

서브마이크론의 크기를 가지는 Al2O3, BaTiO3, TiO2 의 분말을 준비하였으며, 각 분말의 입도 분포, 형상, 결정상, 비표면적 등의 특성 분석을 진행하였다.

3. 분리막의 제조 및 성능 평가

준비된 3종의 산화물계 분말을 사용하여 Bar coating 방식으로 코팅 분리막을 제조하였다. 제조한 분리막의 두께, 거칠기, 젖음 특성 및 열 안정성을 측정하여 코팅 물질에 따른 분리막의 물성을 비교하였다. 또한, 하프셀을 조립하여 각 분리막의 이온전도도 및 배터리의 성능 평가를 진행하였다.



Fig. 1. Wettability of oxide materials-coated separators Thermal shrinkage at 140-150 $^{\circ}$ C







4. 결론 및 향후과제

보편적으로 세라믹 코팅 분리막에 적용되고 있는 소재인 Al2O3 외에 BaTiO3, TiO2 소재를 적용한 코팅 분리막을 제조하고 성능 평가를 진행하였다. 특히, BaTiO3의 경우 우수한 이온 전도도를 보였다. 이 후 해당 분리막을 적용한 하프셀 테스트를 통해 배터리 성능 및 안정성을 테스트할 예정이다. 또한, 본 연구를 기반으로 기능성 복합 물질을 적용한 코팅 분리막에 대해 연구하고자 한다.

참고문헌

X. Wei et al. *Solid State Ion*, vol. 366-367, p. 115652, 2021.
 D. Parikh et al. *J Power Sources*, vol. 427, p. 271-2822, 2019.

후기

본 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발사업(RS-2024-0044-9873)의 지원을 받아 수행된 연구임

입자 크기에 따른 흐름 및 응집 특성 분석 방법의 최적화 연구 A Study on the Optimization of Flow and Aggregation Characteristics by Particle size

*오지희 ^{1,2}, 김진애 ^{1,2}, 이동원 ¹⁺

* J.-H. Oh ^{1,2}, J.-A. Kim ^{1,2}, D.-W. Lee¹⁺

¹ 한국산업기술시험원 재료기술센터, ² 광운대학교 전자재료공학과

+ E-mail: <u>dwlee@ktl.re.kr</u>

Keywords: Flow properties, Cohesive characteristics, Ceramic powder.

1. 서론

세라믹 분말은 높은 경도와 열 안정성, 높은 내구성 등의 특성으로 인해 다양한 첨단 산업분야에서 핵심적으로 활용되고 있다[1]. 이러한 분말의 특성은 공정 및 최종 제품에 영향을 미치므로 매우 중요하게 관리되고 있다. 하지만 표준화된 분석 방법이 적립된 입도, 형상 등과 달리 분말의 흐름 특성 및 응집력에 대한 표준화된 분석방법은 미비한 실정이다. 본 연구에서는 고전적인 유동성 측정 방식, 1축 가압 방법, 전단 응력 방법 등의 방법으로 입자 크기에 따른 적절한 흐름 및 응집 특성 분석 방법을 제안하고자 한다.

2. 분체의 응집 특성 분석 방법

2.1 분체의 응집 특성을 분석하는 장비 및 그 원리 분체의 응집 및 흐름 특성을 분석하기 위해 다양한 분석 방법들이 사용되고 있다. 대표적으로 고전적인 방법으로 Funnel 장치를 사용하는 방법이 있으며, 정적 경사각 측정 방식, 동적 흐름성 측정 방식, 1축 가압 방식, 전단 응력 방법이 있다. 본 연구에서는 5가지 분석 방법의 원리에 대해 조사하였다.

2.2 입자크기에 따른 적절한 분석 장비 제안

수십 나노부터 수백 마이크로미터까지 다양한 입자 분포를 가지는 분말을 준비하였으며, 각각의 분말에 대해 다양한 장비를 사용하여 응집 특성을 측정하였다. 측정 중 발생하는 문제점, 각 장비간의 측정 결과들을 바탕으로 입자 크기를 기준으로 응집 특성을 분석하기 위한 적합한 분석 방법 및 장비를 제안하였다.

3. 표면 거칠기에 따른 분말의 유동성 차이

입도의 크기 및 분포, 종횡비와 원형도가 유사하지만 표면 거칠기가 상이한 2종류의 분말을 비교 분석하였다. 분말의 기본 특성이 유사하더라도 흐름 및 응집 특성이 상이할 수 있기 때문에 이와 같은 분석결과는 중요한 의미를 가진다.



Fig. 1. Particle size and SEM image: (a) Rough surface powder, (b) Smooth surface powder



Fig. 2. Powder flow properties measured by rotating drum: (a) Avalanche energy, (b) Avalanche angle

4. 결론 및 향후과제

분말을 사용하는 공정에서 분말의 특성은 공정 중 다양한 변수로 작용할 수 있으며, 최종 제품의 품질에 영향을 미치므로 매우 중요하다. 본 연구에서는 5가지의 다양한 원리의 분석 방법을 적용하여 분말의 응집 및 흐름 특성을 분석하였으며, 입자 크기에 따라 적절한 방법을 제안하였다.

참고문헌

[1] F. Adamyan et al. NIM-A. 551:285-289, 2005.

후기

본 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발사업(RS-2024-00432123)의 지원을 받아 수행된 연구임

수소・전기차 전장 모듈용 3W/Mk 이상급 고방열 갭 필러 개발에 대한 실험 및 해석적 연구 A Study on the Development of High Thermal Conductive Gap Filler (≥3W/mK) for

FCEV Electrical Modules

*나승찬 ¹, 송선자 ², 황태원 ² 노상호 ¹⁺

* S.C. Na¹, S.J. Song ², T.W. Hwang², S.H. Noh ¹⁺

¹ 한국자동차연구원, ² ㈜ 대한솔루션, ⁺E-mail: na101925@katech.re.kr

Keywords: Fuel cell vehicle, Electric module, Thermal interface material(TIM), High thermal conductive.

1. 서론

수소전기차에 대한 사회적 관심의 증가에 따라 화석연료 대체 및 보완 가능성에 있는 수소 전기차에 대한 수요가 증가하고 있다[1]. 현재의 연료전지는 스택 형태로 구성되어 있으며, 에너지 출력 과정에서 40% 이상의 에너지가 열로 손실 문제 해결하기 위해, 열 손실을 최소화할 수 있는 신소재의 개발이 필요하다[2].

본 연구에서 고분자 방열 필러 개발을 통한 실험 및 해석적 연구를 진행하였다.

2. 방열 갭 필러 제작 공정 및 소재특성분석

2.1 방열 갭 필러 제작 공정

폴리머와 세라믹 필러를 일정한 비율로 재료를 준비한 후, 행성형 믹서(Planetary Mixer)를 이용해 혼합한다. 내부에서는 45도 기울어진 상태에서 공전(Revolution)과 자전(Rotation)이 동시에 일어나 재료들이 균일하게 분산하게 되며, 이 과정을 통해 세라믹 필러가 폴리머 매트릭스 내에 고르게 분산된 갭 필러가 제작된다.

2.2 방열 갭 필러 소재특성분석

갭 필러 소재의 시물레이션을 측정하기 위해 아래와 같은 특성들을 분석하였다. 열전도도 측정 결과, 필러 함량 증가에 따라 열전도도가 선형적으로 향상되며 최대 3.51 W/m·K의 값을 나타냈다. DSC 분석에서는 유리전이온도(Tg) 및 열적 안정성이 평가되었다. 또한, TGA 분석 결과 고온에서도 잔존율이 높아 열분해에 대한 내성이 우수한 것으로 확인되었으며, 이를 통해 해당 소재가 고온 환경에서도 안정적으로 사용할 수 있는 방열 재료임을 입증하였다.

3. 방열 해석 경계조건 및 결과

갭 필러의 방열 특성을 해석하기 위해 경계 조건 및 물성 조건을 아래와 같이 정리하였다. Table 1 Gap filler Properties & Boundary Condition

Gap filler Properties		
Density		1.89 g/cm3
Thermal Conductivity		3.51 W/mK
Specific Heat		1.156 J/g · ℃
Gap filler Boundary Condition		
External Convection	External Convection	3e-5 W/mm ² ℃
Heating element	Initial	22 °C
	Heating	90 ℃

Table 2 Experiment Results Data



		Oap miei	
갭필러	실험	해석	오차
3mm	60.8 4 ℃	59.8 °C	1.7%
6mm	55.92 °C	59.9 °C	7%

4. 결론

3mm 방열 갭 필러 : 열이 표면까지 빠르게 전달되어 비교적 균일한 열 분포를 보임.

6mm 방열 갭 필러 : 열 전달 경로가 길어져 열 축적 현상이 발생하나, 높은 열전도도 특성이 열 축적과 분포의 차이를 최소화함.

참고문헌

[1] Sinigaglia et al. World Patent Information. 102152, 2022. [2]이횡래, et al. 고분자 과학과 기술 24.1. 30-37. 2013

후기

본 연구는 산업통상자원부/한국산업기술진흥원의 지원으로 수행되었음.(과제번호 : P0025888). 2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

분말 조성 기반 B₄C-SiC 복합재의 기계적 특성 Mechanical Properties of B₄C-SiC Composites Based on Powder Composition

*이훈^{1,2}, 구범모^{1,2}, 노원균^{1,2}, 정영근¹, 신동근²⁺

* Hun Lee^{1, 2}, Bum-Mo Koo^{1, 2}, Won-Gyun Noh^{1, 2}, Young-Keun Jeong¹, Dong-Geun Shin²⁺,

부산대학교 융합학부, ² 한국세라믹기술원

+ E-mail: dgshin73@kicet.re.kr

Keywords: B4C, SiC, Pressureless Sintering, Composites

1. 서론

SiC는 뛰어난 강도/경도와 열적 안정성을 가지고 있어 방탄소재 등 군수분야에서 관심을 받고 있으며, 현재 양산성이 확보되어 개인 방탄판 소재로 적용되고 있다. 그러나, 개인 방탄판은 군 장병이 직접 착용하고 작전을 수행하기 때문에 개인 전투 하중을 더욱 감소시켜 전투력을 향상시키기 위한 소재 성능 향상 요구가 높아지고 있다. B4C는 SiC 보다 가볍고 반면 탄성계수가 경도가 높아 고성능 방탄소재로 적합하지만단일 소재로는 소결이 매우 어렵고 고가의 소재를 분류되어 상업적용에 제한을 받고 있다. 따라서, 본 연구에서는 SiC와 B4C를 복합화 하여 방탄성능이 우수하면서 보다 가벼운 방탄판을 제조하고자 하며, 이를 위해 다양한 소재 조성에 따른 소결 특성을 평가하고자 하였다.



Fig 1. Application Example of Personal Ballistic Plate

2. 실험방법

2.1 B₄C-SiC 복합체 제조

B4C 분말과 SiC 분말을 IPA(Isopropanol)와 SiC ball로 혼합하였다. 회수된 분말은 용매건조 이후 1차로 일축가압성형을 진행하였고, 2차로 CIP(Cold Isostatic Pressing)을 진행하였다. 제조된 성형체는 불활성 분위기의 graphite furnace에서 2000 ~2200℃에서 상압소결을 진행하였다.

2.2 기계적 물성 평가

소결이 완료된 시험편은 조성비에 따라 결정성 변화를 확인하기 위해 XRD 분석을 진행하였으며, 표준시험방법에 따라 3점 굽힘 강도 및 탄성률, 경도를 측정하였다. 또한, piston on three ball 시험을 병행하여 파괴 시 균열의 전과 거동을 관찰하였다. 경도는 KS L ISO14705에 따라 Vickers 경도 시험을 실시하였다. 시험이 완료된 시험편은 FE-SEM을 이용하여 미세구조를 분석하였다.

3. 결과

상압소결을 통해 제조된 분말 조성비에 따른 밀도변화와 소결/치밀화 특성을 비교평가 하였으며 확인하였다. 치밀한 소결체를 얻기 위해 소결 온도를 2000~2200℃의 온도구간에서 조절하였으며 이때 결정립 성장과 복합체의 강도 및 경도 변화를 비교하여 B₄C-SiC 경량화 세라믹복합체 제조를 위한 최적 공정조건을 도출하였다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 B₄C 분말과 SiC 분말을 일축 가압성형 및 CIP로 성형 후 소결하여 복합체를 제조하였으며, 경량화를 위한 세라믹 강도, 탄성계수, 경도, 밀도를 평가하였다.

본 연구에서는 B₄C 및 SiC의 조성비에 따른 경량화 거동과 기계적 물성과의 상관관계를 확인하였으며, 이를 기반으로 복합체의 성능 최적화를 위한 소결체 밀도 개선 및 최종 방탄특성 평가를 통해 차세대 개인 방탄용 고성능 세라믹복합체를 제조할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] Sung Min So et al. Ceramics Int (2019)

[2] Y. Kim et al. J. Eur. Ceram. Soc. 42 (2022) 6827-6835
[3] Y. Kim et al. J. Eur. Ceram. Soc. 43 (2023) 3941-3949
[4] I. Lee, Y.W. Kim et al. J. Mater. Sci. 39 (2024) 3801-3803

HfC-SiC 나노복합섬유의 소결 거동 및 미세구조 변화 Sintering Behavior and Microstructural Change of HfC-SiC Nanocomposite Fibers

*구범모^{1, 2}, 이훈^{1, 2}, 노원균^{1, 2}, 정영근², 신동근¹⁺ * Bum-Mo Koo^{1, 2}, Hun Lee^{1, 2}, Won-Gyun Noh^{1, 2}, Young-Keun Jeong², Dong-Geun Shin¹⁺

> ¹ 한국세라믹기술원, ² 부산대학교 융합학부 ⁺E-mail: dgshin73@kicet.re.kr

Keywords: Hafnium Carbide, Silicon Carbide, Dry spinning, Nanocomposite fiber

1. 서론

실리콘 카바이드(SiC) 섬유는 우수한 고온 특성으로 인해 주로 세라믹 매트릭스 복합재 (CMC)의 강화재로 사용된다. 하지만 SiC 섬유의 최대 사용온도는 약 1500℃로 우주항공분야의 초고온 극한환경에서의 사용에는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 탄화 하프늄(HfC) 등 열 안정성이 뛰어난 초고온 세라믹(UHTC)으로 강화된 SiC 섬유 관련 연구가 진행되고 있다. 보 연구에서는 SiC 섬유내 HfC의 함량을 HfC-SiC 나노복합섬유를 제조하였으며, 이때 HfC 함량 증가에 따른 소결특성 및 다양한 소결 조건에서의 미세구조 변화를 평가하였다.



Fig. 1. High-Temperature strengthening mecahanism of HfC in HfC-SiC Nanocomposite fibers

2. 실험 방법

2.1 HfC-SiC 나노복합섬유 제조

섬유의 전구체 원료인 Hf 도핑 카보실란 복합 세라믹전구체(Hf-PCS)는 한국세라믹기술원에서 자체 합성한 폴리카보실란과 Hf계 전구체의 고온 오토클레이브 반응을 통해 합성하였다. 합성된 Hf-PCS는 Cyclohexane 용매와 혼합하여 방사 용액을 제조한 후, Syringe pump를 이용하여 건식방사 를 진행했으며, 이로부터 얻어진 Green fiber는 이후 섬유 형상을 안정적으로 유지하기 위해 200℃에서 산화 안정화를 진행하였다.

2.2 HfC-SiC 나노복합섬유 소결

세라믹전구체로부터 제조된 섬유는 열처리 온도 다양한 1400~1800℃에서 열처리 분위기 및 소결스케쥴을 조절하며 열처리시 잔류 탄소와 산소가 소결에 미치는 영향을 확인하였다. 이 과정에서 내부 잔류 탄소를 제거한 후 다시 2000℃ 고온 열처리를 거쳐 소결을 완료하였으며,

중간공정을 거치지 않은 섬유와 미세구조 및 기계적 특성을 비교, 평가하였다.

3. 결과

HfC-SiC 나노복합섬유를 제조한 후 FE-SEM을 사용하여 미세구조를 분석하였으며, 섬유 표면 및 단면에 과잉 탄소가 존재하는 것을 확인하였다. 과잉 탄소 제어를 위한 온도 조건은 TGA를 이용하여 확인하였으며 700℃에서 중간 산화 열처리를 진행하여 과잉 탄소를 제어하였다.

과잉 탄소 제어를 한 HfC-SiC 나노복합섬유는 최종적으로 1800℃, 1900℃, 2000℃에서 소결을 진행하였으며, 그에 따른 소결거동 및 미세구조 변화를 확인하였다.

4. 결론 및 향후과제

연구에서는 합성한 본 Hf-PCS를 이용하여 건식방사 공정을 통해 HfC-SiC 섬유를 제조하였으며, 과잉 탄소 조절을 위한산화 열처리 불활성 및 열처리의 영향을 평가하였다. 분석 결과, 산화 열처리를 통해 섬유 내 과잉 탄소를 효과적으로 제거할 수 있었으며, 이는 소결성 및 미세구조의 밀도 향상에 기여하는 것으로 나타났다. 향후 연구에서는 열처리 조건 최적화 및 기계적 특성 평가를 통해 추가적인 분석이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Yoonjoo Lee et al. Compos Res. 30.2.102, (2017)
- [2] Dong-Geun Shin et al. J. Korean Ceram. Soc (2007)
- [3] Seong-Gun Bae et al. Ceramics Int (2022)
- [4] Seong-Gun Bae et al . J. European Ceram. SoC (2023)

흄드실리카 함양이 메타카올린 기반 지오폴리머 복합재의 미세구조 및 기계적 물성에 미치는 영향

Effect of Fumed Silica Content on the Microstructural and Mechanical Properties of Metakaolin-Based Geopolymer Composites

*이상훈 ^{1,2}, 고현석 ¹⁺

* S.H. Lee¹, H. Ko¹⁺

¹ 한국세라믹기술원 수소 디지털융복합센터, ² 부산대학교 재료공학부 ⁺E-mail: hko@kicet.re.kr

Keywords: Metakaolin, Fumed Silica, Geopolymer Composites, Microstructure, Mechanical Properties

1. 서론

Geopolymer(GP)는 알칼리 활성제를 이용한 알칼리 반응을 통해 형성되는 비정질 무기 중합체로, 우수한 기계적 성질 및 고온 안정성으로 인해 최근 복합재 형태로 활발히 연구되고 있다[1][2]. Meta kaolin 기반 GP는 높은 반응성과 우수한 기계적 특성을 지니지만, 초기 건조 수축이 크고 인성이 낮아 균열이 발생하기 쉽다는 단점이 있다[3]. 이에 본 연구에서는 나노 사이즈의 Funed silica를 햠양을 다르게 첨가하여 미세구조와 기계적 물성 간의 상관관계를 규명하고자 한다. 본 연구 결과는 Funed silica를 활용한 GP 복합재 개발에 필요한 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. Materials and Methods

2.1 Materials and Preparation of the Composites

Kaolin을 800 ℃에서 4시간 동안 하소하여 Meta kaolin으로 전환한 후, 알루미노실리케이트 공급원 으로 사용하였다. 이때 메타카올린의 평균 입자 크 기는 약 5.7 µm로 측정되었다. 알칼리 활성제로는 10 M KOH 수용액을 제조해 사용하였으며, 여기에 K₂ SiO₃ 를 첨가하여 알칼리 활성제를 구성하였다. Fumed silica의 함량은 KOH 수용액 질량 대비 0~50 wt% 범위로 조절하였다. 복합재의 보강재로는 상대 적으로 높은 온도에서도 우수한 강도, 내구성 및 열적 특성을 유지하는 저비용 불활성 섬유인 현무 암 섬유를 사용하였다. 오토클레이브 공정은 7 bar, 100 ℃에서 12시간 동안 수행하였고, 후처리 과정 으로 200 ℃에서 2시간 동안 열처리를 진행하였다.

2.2 Analysis Methods

Metakaolin의 조성과 결정구조를 확인하기 위 해 X-ray Fluorescence(XRF) 및 X-ray Diffrac tion(XRD) 분석을 수행하였다. 복합재의 기계적 물성(압축,인장,굴곡강도)은 만능재료시험기(UTM) 를 이용하여 측정하였다. 규격은 ASTM 기반으로 물성 테스트 진행하였다. 미세구조 관찰은 주사전 자현미경(SEM)으로 진행하였으며, 고온 안정성평가 를 위해 열중량분석(TGA)을 통해 10 ℃/min 로 1,000 ℃ 의 고온에서의 질량 감소율을 측정하였다.

3. Conclusion

본 연구에서는 Metakaolin 기반 GP 매트릭스에 현무암 섬유를 보강하여 복합재를 제조하고, Fumed silica 함량 변화가 기계적 물성과 미세구조에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다. 압축, 인장, 굴곡 강도 시험 결과, Fumed silica 함량이 증가함 에 따라 최대 강도가 최대 108%까지 향상되는 경향 확인하였다. 또한 열중량분석(TGA) 결과, 을 1,000 ℃ 에서 질량 감소율이 1% 미만으로 나타나 우수한 고온 안정성을 보였다. 주사전자현미경(SEM) 관찰에서는 Fumed silica 함량이 증가함에 따라 매트릭스 내부가 치밀하고 균질하게 형성되어 기계적 물성 향상에 기여함을 확인하였다. 이러한 결과를 종합해 볼 때, 본 연구에서 제시한 Meta kaolin 기반 GP 복합재는 고온 환경에서의 구조용 소재로 활용할 수 있는 능력를 평가와 성능을 확인하였다.

참고문헌

- [1]Davidovits, Joseph. "Geopolymers: inorganic polymeric new materials.(1991): 1633-1656.
- [2]Davidovits, J. J. J. C. S. T. "Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers." (2017): 335-350.
- [3]Duxson, Peter, et al. "Understanding the relat ionship between geopolymer composition, microst ructure and mechanical properties. 269.1-3

후기

본 연구는 산업통상자원부의 "세라믹소재 분야 디지털전환을 위한 시뮬레이션 AI 기반 가상공학 플랫폼 구축"(과제번호: P0022336)의 지원 받아 수행되었다.

CFRP 및 알루미늄 휠의 진동 특성 분석에 대한 연구 Study on vibration characteristics of CFRP and aluminum wheels

*민윤상 ⁺, 김도현, 김연길 * Y.S. Min⁺, D.H. Kim, Y.G. Kim

한국자동차연구원 ⁺E-mail: ysmin@katech.re.kr

Keywords: Modal Testing, CFRP, Wheel, NVH

1. 서론

최근 자동차 부품 산업에서는 기존 금속 소재를 대체하기 위해 CFRP 소재의 활용이 활발하게 연구되고 있다. 본 연구에서는 CFRP 휠과 알루미늄 휠을 대상으로 부품 Modal 시험과 롤러 주행 시험을 수행하여 각각의 진동 특성을 평가한다. 이를 통해 두 소재의 휠이 주행 중 어떠한 진동 특성을 보이는지 비교하고, CFRP휠이 NVH성능 측면에서의 특징을 분석하고자 한다.

2. 시험

2.1 시험 개요

본 연구에서는 Braiding 기술을 적용한 CFRP 휠과 알루미늄 휠을 대상으로 NVH 시험을 통한 진동 특성을 분석한다. 각 휠은 진동 특성 분석을 위하여 Table 1 과 같은 조건에서 수행된다.

Parameter	Types
Wheel	9J×20
Tire	235/35R20
Pressure	35 psi
Frequency Band	$170\sim 250 \ Hz$
Speed	60 kph
Load	100 kgf

Table 1 Test Condition

2.2 Impact Test

부품단위 진동 특성 시험에서 각 휠은 free-free 상태에서 3개의 가속도계를 부착한다. 가진기는 Impact Hammer를 활용하며 휠의 중앙부를 기준으로 가진하며 각 축방향 가진 결과를 활용하여 각 휠의 공진주과수를 분석한다.

2.3 롤러 주행 Test

각 휠은 1/4 Car Module이 장착된 롤러벤치를 활용하여 시험을 수행한다. 롤러 벤치는 Table 1의 시험 조건을 기준으로 회전하며, 부착된 cleat이 휠을 가진함으로써 가속도계를 통한 진동 성능을 파악한다. 시험 결과, 가속도계에서 측정된 진동 데이터를 활용하여 진동 데이터를 분석한다.

3. 시험 결과

본 연구에서 CFRP 휠과 알루미늄 휠의 동적 특성을 비교한 결과, CFRP 휠은 알루미늄 휠 대비 높은 고유진동수를 가지며 유사수준의 높은 강성으 수준을 가진다.



Fig. 1. Modal Test and Cleat Impact Test.

Table 2 Modal Test Result

Sample	Peak Frequency [Hz]	Peak Level [dB]
CFRP	221	108
OE 1	192	102
OE 2	233	106
OE 3	217	107

4. 결론 및 향후과제

향후 연구에서는 다양한 주행 환경에서의 동적 응답을 추가로 분석하고, CFRP 휠 감쇠 특성을 향상시키기 위한 설계 최적화 연구가 필요하다.

후기

본 연구는 2024년도 산업통상자원부의 자동차산업기술개발(20018827, 원가절감형 전기차량용 CFRP 2-Piece 휠 제조 기술 개발)의 지원을 받아 수행되었습니다.

일체형 탄소섬유 휠의 복합 하중 조건 응력 분석 연구 Study on Stress Analysis of Bi-Axial Loads on Carbon Fiber Wheel

*박영균 ¹⁺, 심경석 ¹, 이준용 ¹ * Y.G. Park ¹⁺, K.S. Sim¹, J.Y. Lee¹

¹ 한국자동차연구원

⁺E-mail: ygpark@katech.re.kr

Keywords: Carbon Fiber Wheel, Stress Analysis, Bi-Axial Loads, Reliability Evaluation.

1. 서론

친환경 자동차 산업의 주요 요소로서 고경량 고강도 특성을 지니면서 탄소 배출량이 낮은 CFRP 섬유의 활용이 많아지고 있다. 자동차 휠은 전체 무게를 지지하고 차량의 구동력을 노면에 전달하는 부품으로서 차부품 중 높은 무게를 차지하는 부품이다. 이는 충분한 강도와 탄성을 지님과 동시에 연비 상승을 위한 낮은 무게 및 승차감을 위한 높은 진동 감쇠 특성을 지녀야 함을 의미한다. 하지만 탄소 휠은 높은 가격과 제작 난이도로 인해 관련 연구 및 제품 개발에 어려움이 있다.

2. 일체형 휠의 복합 하중 시험

2.1 일체형 휠 정보

본 논문은 친환경 소재를 활용한 탄소 복합재 휠의 강성 확보 및 수명 분석을 위해 복합 하중 조건에서의 응력을 분석한다. 본 연구에서 응력을 분석할 휠은 stitching 공정을 이용한 탄소섬유 프리프레그 일체형 휠 spoke 구조를 형성할 수 있도록 제작되었으며, 관련 정보는 아래의 Table 1과 같이 나타난다.

Table 1 Carbon Wheel Specifications

Types	Value	
Size	7.5J 19 inch +54.5 mm	
Tire	235/55 R19	
Max. Load	560 kg	

응력 분석을 위하여 일체형 휠의 주요 위치에 스트레인 게이지를 부착하였으며 부착 위치에 대한 세부 내용은 아래의 Table 2와 같다.

Number	Attachment Points
1	Lower Section of Rim
2	Middle Section of Rim
3	Upper Section of Rim
4	Spoke Center
5	Disc Section

2.2 시험 장비 및 시험 조건

본 연구에서 탄소 복합재 휠의 응력을 분석하기 위한 복합축 내구 시험 장비는 아래의 Fig. 1과 같다. 탄소 복합재 휠은 복합축 내구 시험 장비 내에서 시험 규격의 시험을 수행한 후 국부 응력을 평가한다. 시험 규격은 차량의 실제 주행 상황을 고려한 AK-LH 08 시험 규격을 활용한다.



Fig. 1. Bi-Axial Load Wheel Testing Equipment.

3. 결과 고찰

본 논문에서 복합축 휠 시험을 활용하여 탄소 휠의 각 부위별 응력을 분석하였다. 응력 분석 결과는 차량 주행 조건에서 탄소 소재 적용 휠의 응력 집중 부위 점검 및 해당 부위에 대한 강도 분석이 가능하며, 나아가 응력 분석 결과를 기반으로 탄소 휠 개발품에 대한 손상도 분석 및 수명 예측이 가능하다.

후기

본 논문은 산업통상자원부 소재부품기술개발사업의 'Tow Prepreg 소재가 적용된 일체형 브레이드 프리폼 제조기술을 이용한 초경량 19인치 탄소 복합재 휠 개발' (P20021913) 과제 지원으로 수행되었습니다.

Facile Fabrication of Mechanically Robust and High Filler Loading Graphite-Polystyrene Composite for Electromagnetic Interference Shielding

Md Monir Hossain^a, Hyun Oh Jeong^a, Se Gyu Jang^{a,*}

^a Functional Composite Materials Research Center, Institute of Advanced Composite Materials, Korea Institute of Science and Technology, 92 Chudong-ro, Bongdong-eup, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55324, Republic of Korea E-mail: segyu.jang@kist.re.kr

Keywords: Graphite, Polymer composite, Precipitation, Electromagnetic interference shielding

1. Introduction:

order to achieve optimal physico-chemical In characteristics in polymer composites, it is often advantageous to maximize the concentration of fillers [1]. However, excessively high filler levels can induce discontinuities within the polymer matrix, ultimately leading to a decrement in mechanical properties [2]. To mitigate this challenge, we propose a robust methodology aimed at significantly enhancing the mechanical strength of the composite, even at elevated concentrations of microscale fillers, such as graphite flakes at 95 wt%. To bolster mechanical strength, we have developed a hybrid filler adorned with polymer nanoparticles. During hotthese decorated polymer nanoparticles pressing, seamlessly integrate into the matrix, functioning analogously to mortar between bricks.

2. Experimental

2.1 Preparation of the hybrid filler

To prepare the hybrid filler, polystyrene (PS) powder was first dissolved in chloroform using mechanical agitation. Once fully dissolved, graphite flakes (GFs) were incorporated and mixed through ultrasonication for 30 minutes. The resulting PS and GFs mixture was then slowly added dropwise into methanol while maintaining strong agitation. The precipitated black powders were collected using vacuum filtration and left to dry under vacuum for one day.

2.2 Preparation of the composites

The composites of the hybrid fillers were prepared by hot pressing in a stainless steel (SUS) mold at 150°C for 25 minutes under a pressure of 20 MPa. A control sample was also created by grinding PS and GFs using a mortar and pestle, following the same compression conditions.

3. Results and Discussion

PS-based glass fiber (GF) composites show excellent mechanical and electromagnetic interference (EMI) shielding properties. Figure 4a illustrates the flexural strength of the PSGF composites prepared using various concentrations of PS solutions: 0.1 wt% (PS_{0.1}GF), 0.2 wt%

(PS0.2GF), 0.4 wt% (PS0.4GF), and 0.6 wt% (PS0.6GF) composites. The deformation of PS particles into a thin film improves interfacial adhesion and distribution between GF layers, leading to a flexural strength of about 17 MPa, which is four times greater than the PSgrGF control composite. The PS0.1GF composite, particularly at 0.5 mm thick, achieves a shielding effectiveness (SE) of approximately 60 dB, which increases to over 80 dB at 1.5 mm due to its absorption-dominant characteristics. These composites outperform previously reported values for similar materials, highlighting their potential for advanced mechanical and EMI shielding applications.



Figure 01: (a) Flexural stress of the composites prepared with the PS0.1GF (A), PS0.2GF (B), PS0.4GF (C), and PS0.6GF, (b) EMI shielding properties of the composites.

4. Conclusion

Polymeric composites with impressive mechanical strength were created using a nanoscale brick-and-mortar technique, achieving high graphite concentrations of 95 wt%. This method increased flexural strength fivefold, from 3.4 MPa to 17.2 MPa, and the composite exhibited excellent electromagnetic interference (EMI) shielding with an effectiveness of approximately 85 dB in the X-band. These attributes highlight its potential for future applications.

References

[1] Song, Wei-Li, et al. Carbon 66 (2014): 67-76.

[2] Kinloch, Ian A., et al. *Science* 362.6414 (2018): 547-553.

Enhancing Fire Retardant properties of Cotton via Layer-by-Layer Deposition **Using Halloysite Nano clay**

*Zeeshan Ur Rehman¹, Hamid Hassan², and Bon Heun-Koo³⁺

¹ College of Mechatronics Engineering, Changwon National University, ³ Department of Materials Science and Engineering, Changwon National University, ³ School of Materials Science and Engineering, Changwon National University

⁺E-mail: bhkoo@changwon.ac.kr

Keywords: Cotton, Eco-Friendly, TGA,

1. Introduction

The present development is related to the development of advanced fire-retardant coating materials that have been developed using the Layerby-Layer deposition process include halloysite nano clay which is a naturally occurring clay mineral and utilized as base material for coating cotton as substrate materials. Our main goal is to deposit fire retardant coating on cotton. It is the natural fiber textile that is widely used at the moment, and it is extensively employed in a variety of disciplines, including automotive decorating, home products, and apparel fabric, among other areas. It is resource that is renewable nature and there are no other options that are comparable to it because of their unmatched characteristic, and is used extensively [1]. However, despite these advantages cotton fiber has significant drawback on the other hand in term of flammability and ignite readily without experiencing any melting or shrinkage when exposed to flame [2].

2. Material and Methods

2.1 Specimen Preparation and Tests: LBL deposition technique was used to deposited a thin film of fireretardant materials on cotton surface. All the LBL solutions were prepared using DI water. For anionic Halloysite clay (HSN) solution (2%, 200ml) For cationic, separated solutions (2%) of Lignin was prepared in DI water and stirred overnight, 2% Branched polyethyleneimine Both the chitosan and BPEI solution were than mixed and used for cationic deposition as a hybrid species.

3. Results and Discussion

Both the pre-coated and post coated states of the substrate were visually examined. however, there were no alterations were observed in terms of color, softness, breathability, and other characteristics. We obtained data on the characteristic of each simple, including char residue, thermal degradation rates and degradation temperature. The char residue is increased with the number of layers, indicating enhancement in thermal stability and resistance to degradation at high temperature. The Highest char residue value was obtained for 30 layers which is 21.46% as can be observed in fig.1.hich indicating substantial improvement in cellulose char formation as compare to uncoated which was 8.60%.



Fig. 3. (a) TGA analysis of coated and un coated samples. (b). DTGA analysis of uncoated and coated samples

4. Conclusions

The most important work to be protected through this invention is the

- 1. The use of uncomplicated and eco-friendly method to produce fire retarding coating on cotton fabric.
- The use of economical and non-toxic chemical to 2 manufactured fire retardant materials for cotton fabric.
- The overcoming of environmental effect by using of 3. sustainable materials and process.
- 4. The ability to maintain the properties of cotton while enhancing its fire resistance.

References

[1] Xu F, Zhong L, Xu Y, Zhang C, Zhang F, Zhang G (2019), Cellulose 26:4225-4240

[2] Wakelyn, P. J., Bertoniere, N. R., French, A. D., & Thibodeaux, D. (2007). CRC Press (Taylor and Francis Group). Acknowledgment

The Korea National Research Foundation grant funded by Korean government endorsed this work (No.2018R1A6A1A03024509 and 2021R1I1A1A0105510 212).

Synthesis and Characterization of Thermoplastic Polyurethane (TPU) from Bio-based Polyester Polyol

* Daesin Kim¹, Bo Hyeon Cho¹, Ji Won Cheon¹ and Dong Jin Lee¹⁺ ¹ Korea Institute of Materials Convergence Technology ⁺E-mail: dongilee@kimco.re.kr

Keywords : Biomass, Thermoplastic Polyurethane, TPU, Bio-based thermoplastic polyurethane

1. Introduction

Efforts to replace petrochemical-based polymers with biomass-derived polyols have been widely pursued across various industries.[1-5] This study focuses on the synthesis of thermoplastic polyurethane (TPU) by substituting petrochemical-based polyols with bio-based polyester polyols and investigates the resulting material's physical properties. The incorporation of bio-based polvols contributes to low-carbon technology within the context of TPU production. In this work, TPU synthesized with biobased polyols demonstrated comparable physical properties to those formulated with petrochemical-derived polyols. The study also examined the influence of biopolyol content on the mechanical and thermal properties of TPU. Mechanical properties, including hardness, tensile strength, and elongation, were evaluated, while thermal characteristics were analyzed using thermogravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC). The findings indicate that TPU synthesized from bio-based polyols exhibits similar performance to conventional petrochemical-based TPU, with variations in properties depending on the bio-polyol content. This study highlights the potential of bio-based polyols in TPU synthesis, advancing the development of low-carbon technology.

2. Experiment details

2.1 Synthesis of Bio-based Thermoelastic Polyurethane

Polyurethane was synthesized using a two-step method. In the first step, a prepolymer was prepared by reacting PTMG and bio-polyol with 4,4'-MDI. The polyurethane synthesis was conducted by varying the weight ratio of PTMG and bio-polyol. The ratios used were 100:0, 80:20, 60:40, 40:60, 20:80, and 0:100 (PTMG : bio-polyol). The polyols were introduced into a dry, nitrogen-purged fourneck round-botto. The mixture was heated to 80°C under continuous stirring. 4,4'-MDI was then added dropwise while maintaining the temperature at 80°C. The reaction was continued for 1 hour. The resulting prepolymer was cooled to RT.

In the second step, the chain extension reaction was carried out. The prepolymer was mixed with 1,4-BDO at RT. If necessary, a small amount of DBTDL catalyst was added to accelerate the reaction. The final mixture was cast onto a substrate and cured at ambient conditions for 24 hours. Post-curing was conducted at 80°C for 12 hours to ensure complete curing.



Scheme 1. Two-step method of bio-based thermoplastic polyurethane synthesis.

2.2 Characterizations

The synthesized polyurethane was characterized by determining its NCO content, Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) spectra, mechanical properties (including tensile strength, elongation, and hardness), and thermal properties using thermogravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC). This procedure ensured the formation of a high-quality polyurethane with well-controlled structural properties and minimized residual isocyanate content.

3. Results and Discussion

The physical and thermal properties of the synthesized TPU were analyzed. The influence of bio-polyol content on the properties of TPU was systematically investigated. Mechanical properties such as tensile strength, elongation at break, and hardness were measured to assess the material's performance. Additionally, thermal stability and transitions were examined using TGA and DSC analyses. The results provided insights into the correlation between bio content and the overall performance of TPU, analyzing the influence of bio-based polyester polyol content on the material's mechanical and thermal properties.

4. Future Works

Future research will focus on developing synthesis methods to enhance both the physical properties and functional characteristics of TPU, including the incorporation of functional additives.

References

- [1] Godlewska, J et al. Moleculs 2024, 29 (15), 3585. .
- [2] Kasprzyk, P. et al. Polmer 2019, 160 (3), 1-10.
- [3] Głowińska, E. et al. J. Polym. Environ. 2021, 29 (7), 2140-2149.
- [4] Charlon, M. et al. Eur. Polym. J. 2014, 61, 197-205.
- [5] Wang, X. et al. Compos. B Eng. 2021, 224, 109206.

투명한 우주 방사선 차폐 필름 제조를 위한 폴리아미노보레인 합성 연구 Polyaminoborane Synthesis study for the production of transparent space radiation shielding films

*임익재 ^{1,2}, 최시영², 장세규 ¹⁺ * I-J. Lim ^{1,2}, S.Q. Choi ², S.G. Jang¹⁺

¹ 한국과학기술연구원, ² 한국과학기술원 ⁺E-mail: <u>segyu.jang@kist.re.kr</u>

Keywords: polyaminoborane,, neutron shielding, transparent

1. 서론

최근 기술의 발전으로 항공 우주 분야에 대한 기대와 관심이 증가하고 있다.[1] 하지만 우주로 나아가기 위해선 해결해야 할 핵심 과제 중 하나는 바로 우주 방사선 차폐이다. 우주 방사선은 우주 장비 뿐만 아니라 우주 비행사에게도 큰 영향을 미치기에 그동안 우주여행은 제한되어왔다.[2] 우주 방사선 차폐에 가장 유리한 소재는 수소로 알려져 있으나 우주 방사선에 의해 생성되는 n차 방사선(중성자 등)의 영향도 매우 크다. 효율적인 우주 방사선 차폐를 위해선 중성자 흡수율이 높은 붕소를 기반으로 한 소재 개발이 필요하다. 본 발표에서는 붕소와 질소를 주쇄로 가지며 수소를 다량 함유한 polyaminoborane을 합성하고, NMR과 XRD 분석을 기반으로 공중합하여 polyaminoborane의 결정성 조절을 통해 투명한 필름을 제작하였다.

2. 본론

2.1 붕소를 다량 함유한 polyaminoborane 합성

2차 중성자 차폐 효율을 높이기 위해선 붕소를 포함해야 하며, 붕소의 함량이 높을수록 중성자 차폐 성능도 증가한다. 대표적인 재료로는 BNNT와 h-BN이 있다. 하지만 B와 N의 물리 화학적 특성으로 인해 서로 응집되어 균일하게 분산시키는데 한계가 있다. 따라서 붕소를 함유한 BN 폴리머를 합성하여 매트릭스 자체로 사용하는 전략을 세웠다. BN 폴리머 중 하나인 polyaminoborane은 붕소와 질소를 백본으로 가지고 있으며, 높은 열 안정성과 우주항공 방사선 환경에 적합하다.[4] 그러나 BN 상호작용에 의해 합성된 폴리머는 세미 크리스탈 형태로 가공에 한계가 있다. 따라서 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 공중합을 진행하였다.

2.2 polyaminoborane의 결정성 조절

합성된 폴리머는 파우더 형태로 가공하여 사용하기 에는 한계가 있으므로 다른 아민과 공중합을 진행하여 고분자의 결정성을 조절하였다. 이를 통해 파우더 형태가 아닌 용액상의 폴리머를 합성하였고, 필름 코팅을 진행하여 투명한 수지를 제조하는데 성공하였다. 합성된 폴리머는 NMR을 통해 잘 합성되었음을 확인하였고, 제작된 필름의 투명도와 차폐 특성은 UV-Vis와 OLTALIS 측정을 통해 잘 제작됨을 확인하였다.

3. 결론

본 연구에서는 우주 방사선에 의한 2차 중성자 차폐를 위해 수소와 붕소를 함유한 투명한 경량 필름을 개발하였다. 제작된 필름은 추후 다양한 필러와의 복합화도 가능하며 미래 우주 시대에 활용 가능한 우주 관측 창, 우주 반도체 내방사화 등 다양한 우주 응용 분야에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] 윤용식; 임종민; 은희광. 세계 달· 화성 탐사 계획 현황. *항공우주산업기술동향* 2024, 22 (1), 22-31.
[2] Ghazizadeh, M.; Estevez, J. E.; Kelkar, A. D. Boron nitride nanotubes for space radiation shielding. *Int. J. Nano Stud. Technol* 2015, 4, 1-2.
[3] Thibeault, S. A.; Kang, J. H.; Sauti, G.; Park, C.; Fay, C. C.; King, G. C. Nanomaterials for radiation shielding. *Mrs Bulletin* 2015, 40 (10), 836-

841.
[4] Jaska, C. A.; Temple, K.; Lough, A. J.; Manners,
I. Transition metal-catalyzed formation of boronnitrogen bonds: catalytic dehydrocoupling of amineborane adducts to form aminoboranes and borazines. J Am Chem Soc 2003, 125 (31), 9424-9434

전기방사를 통한 폴리비닐 알코올/질화붕소나노튜브 섬유 합성 연구

Study on the synthesis of polyvinyl alcohol/boron nitride nanotube fibers via electrospinning

*주용비 ^{1,2}, 김명종², 장세규 ¹⁺

* Y-B. Joo ^{1,2}, M.J. Kim ², S.G. Jang¹⁺

¹ 한국과학기술연구원, ² 가천대학교 ⁺E-mail: segyu.jang@kist.re.kr

Keywords: Boron nitride nanotube composites, electrospinning, surfactant, array

1. 서론

질화붕소 나노튜브(BNNT)는 우수한 기계적 강도, 높은 열전도성, 전기 절연성, 그리고 뛰어난 화학 적 안정성을 갖춘 물질로, 극한 환경에서도 안정 적인 성능을 유지할 수 있다.[1] 또한, BNNT는 우 주 방사선 차폐 기능과 내산화성이 뛰어나 항공우 주 및 방위 산업에서도 주목받고 있다. 이러한 뛰 어난 물성을 나노복합체에 적용하기 위해 BNNT를 균일하게 분산시키고 정렬된 구조를 형성하는 것 이 중요하다.[2-3]

2. 본론

2.1 BNNT의 균일한 분산

BNNT의 균일한 분산을 위해 고분자 분산제 및 음이온 계면활성제를 사용하였다. 음이온성 계면 활성제는 BNNT 표면에 π-π 스태킹을 통해 물리 적으로 흡착하여 통해 수용액상에서 높은 분산을 제공한다.[4] 이를 통해 BNNT가 수용액에서 안정 적으로 분산되며, 용액 내에서 균일한 상태를 유 지할 수 있도록 돕는다.

BNNT는 전기방사 공정에서도 균일한 분포를 유지 하여 복합체 형성에 유리한 환경을 제공한다. 특 히, 전기방사 시 PVA 매트릭스 내에서 BNNT가 효 과적으로 분산되며, 균일한 섬유 구조를 유지하는 데 기여한다. 이러한 균일한 분산과 배열은 최종 복합재의 성능 향상에 중요한 역할을 한다.

2.2 전기방사를 통한 복합체 제조

전기방사는 미세하고 균일한 나노섬유를 연속적 으로 제조할 수 있는 효과적인 공정이다. 용액 기 반의 공정으로 간편하게 적용할 수 있으며, 다양 한 고분자 및 나노소재와의 혼합이 가능하다. 이 러한 특성 덕분에 전기방사는 고성능 나노복합재 료 제조에 적합한 기술로 주목받고 있다. 이 과정 에서 수용성 고분자인 polyvinyl alcohol(PVA)를 고분자 매트릭스로 사용하여 균일한 섬유 형태로 방사했다. PVA/BNNT 복합 매트는 전기방사 공정을 통해 제작되었으며, BNNT 첨가가 PVA의 점도를 증 가시켜 균일한 섬유 형성을 유도하는 역할을 한다. 낮은 PVA 농도에서는 전기방사 시 비드(bead)가 형성되지만, BNNT가 포함될 경우 용액의 점도가 증가하여 비드 없는 균일한 섬유가 형성된다. 이 를 통해 높은 BNNT 함량을 가진 복합 매트를 제작 할 수 있으며, 이는 복합소재의 기능적 특성을 향 상시키는 데 중요한 역할을 한다.

또한, 전기방사 공정에서 BNNT가 섬유 내부에서 정렬되는 현상이 관찰된다. 이러한 정렬은 복합 매트의 물성을 향상시킨다.

3. 결론

본 연구에서는 전기방사 공정을 이용하여 높은 분율의 BNNT를 포함한 PVA 복합 매트를 제작하였 다. 이와 같은 높은 BNNT 분율과 배열도을 가지는 복합 매트는 우수한 물성을 제공할 것으로 기대된 다. 특히, 우주 방사선 차폐 및 내산화성이 요구 되는 극한 환경에서의 활용 가능성이 높으며, 장 기적인 안정성을 보장할 수 있다. 더 나아가, 전 자소재 및 구조용 복합재료뿐만 아니라, 고강도· 고내열성이 요구되는 첨단 엔지니어링 응용에서도 효과적으로 활용될 수 있다.

참고문헌

[1] Ghazizadeh, M.; Estevez, J. E.; Kelkar, A. D. *Boron nitride nanotubes for space radiation shielding*. Int. J. Nano Stud. Technol. 2015, 4, 1-2.

[2] Golberg, D.; Bando, Y.; Huang, Y.; Terao, T.; Mitome, M.; Tang, C.; Zhi, C. *Boron Nitride Nanotubes and Nanosheets*. ACS Nano 2010, 4, 2979-2993.

[3] Chen, Y.; Zou, J.; Campbell, S. J.; Caer, G. L. *Boron Nitride Nanotubes: Pronounced Resistance to Oxidation*. Appl. Phys. Lett. 2004, 84, 2430-2432.

[4] McWilliams, Ashleigh D. Smith, et al. "Surfactant-assisted individualization and dispersion of boron nitride nanotubes." *Nanoscale Advances* 1.3 (2019): 1096-1103.

재활용을 위한 열경화성 수지 분해의 가속화 방안 연구 Strategies for accelerating the decomposition of recyclable Thermosetting resins

*임경서¹, 김지민¹, 이진우¹, 엄문광¹, 김진수¹⁺ * Gyeongseo Im¹, Ji-min Kim¹, Jin-woo Yi¹, Moon-kwang Um¹, Jinsu Kim¹⁺

¹ 한국재료연구원 융·복합재료연구본부

⁺E-mail: Jinsu@kims.re.kr

Keywords: Thermoset Composites, Chemical recycling, Hydrolysis, Glycolysis reaction

1. 서론

열가소성 수지를 활용한 복합재에 비해, 열경화성 수지를 활용한 복합재는 높은 강도와 내열성 덕분에 항공, 자동차 등 뛰어난 물성을 요구하는 곳에 많이 활용 된다. 열에 의해 재가공이 가능한 열가소성 수지와 달리 열경화성 수지는 경화 후 열에 의해 형상을 변경할 수 없어 재활용에 어려움이 있다.

따라서 본 연구는 수용액과 유기용매를 활용하여 화학분해 가능한 에폭시 수지의 분해율을 분석하였다.

2. 시험 방법

2.1 재료 : 연구에 사용된 수지 시편은 금호피앤비 화학에서 생산된 화학분해 가능한 에폭시 수지이다. 수지는 경화 후 20 mm×20 mm ×3 mm의 크기로 잘라서 사용하였다.

2.2 촉매제를 포함한 수용액에서의 수지 시편 분해 수지 분해 실험은 Hot Plate위에 환류용 응축기와 온도 센서가 부착된 2 L 3구 플라스크에 진행하였다. 수지 시편은 분해 용액에 영향을 받지 않는 PE 망과 테프론 플라스틱 틀로 고정하였다. 증류수와 유기용매(1,4-Butanediol)를 섞은 용액 1.5 L에 촉매제를 넣은 수용액을 3구 플라스크에 넣고, Magnetic bar로 교반하며 분해온도인 100 ℃가열한다. 이후 고정된 수지 시편을 넣고 분해 실험을 진행하였다.

수용액에서 분해를 진행한 수지 시편을 1시간 간격으로 꺼내어 80 ℃ 진공 오븐에서 6시간 동안 건조 후 무게를 측정하여 분해율을 계산하였다.

3. 실험 결과

수지 분해 실험의 결과는 아래의 그림 1 과 같고, 분해율은 식(1)과 같이 계산되었다.

분해율(%) =
$$\frac{w_0 - w}{w_0} \times 100$$
 (1)

Fig 1. Decomposition rate according to the ratio of distilled water to solvent



그림 1에서 보이는 바와 같이, 유기용매의 비율이 증류수의 비율보다 높아질수록 분해율이 감소하는 경향을 보였다. 이는 수지 분해에서 증류수보다 유기용매의 비율이 낮거나 같은 것이 더 효과적임을 알 수 있다. 또한, 수용액만 존재할 경우 분해율이 현저히 낮아지는 것을 보아, 1,4-But anediol 이 수지에 침투하고 팽창함으로써 표면적이 증가하여 분해율이 높아지는 현상을 실험적으로 확인하였다.

4. 결론 및 향후과제

본 실험을 통해 화학분해 가능한 에폭시 수지는 수용액의 비율에 따라 수지 분해율이 유의미하게 달라짐을 알 수 있다.

본 연구결과를 활용하여 수지 분해율의 모델링을 통해 유기 용매의 최적 비율을 찾고, 물성 시험을 통해 재활용된 복합재의 활용 가능성을 검토할 예정이다.

테일러-쿠테 유동 및 수중대향충돌 기반 분쇄공정을 통한 멍게 유래 셀룰로스 나노섬유 제조

Fabrication of nanofibers from cellulose extracted from tunicates via Taylor-Couette flow and Aqueous counter collision based pulverization process

김서이 ¹, 진정호 ²⁺ S.I. Kim ¹, J.H. Jin²⁺

¹ 울산대학교 신소재반도체융합학부 ⁺E-mail: jinuine@ulsan.ac.kr

Keywords: Taylor-Couette flow, Aqueous counter collision, Tunicate, cellulose

1. 서론

생분해성 플라스틱인 polylactic acid(PLA), polyhydroxyalkanoate (PHA) 등은 취성이 높거나, 기계적 물성이 합성플라스틱에 비해 낮다. 이때 나노섬유를 복합하면 기계적물성이 개선된다. 이 연구는 상향식 나노섬유화 기술인 수성 역충돌(ACC) 및 테일러-쿠에트 유동(TCF) 공정을 사용하여 튜니케이트에서 추출한 셀룰로오스의 나노섬유를 제조하는 공정을 다뤘다.

2. 실험 과정

2.1 Tunicate에서의 셀룰로오스 추출

셀룰로오스를 추출하기 위하여 Tunicate 껍질을 활용하였다. 황산가수분해 및 탈단백화, Bleach 작업 이후 cryomilling을 진행하여 순수 셀룰로오스를 얻을 수 있다. 이 후, 단백질 함량 측정을 통하여 Tunicate에서 순수 셀룰로오스만 추출된 것을 확인할 수 있다.

2.2 TCF와 ACC의 나노섬유화 공정

TCF와 ACC 복합공정 진행과 ACC 단독 사용한 Tunicate cellulose를 비교하였다. TCF는 두개의 동심원 통 사이의 틈에서 발생하며 천연고분자 분산액이 Taylor-couette flow을 따라 유동하고 동심원통의 그라인더에 부딪히면서 나노섬유화를 유도하는 방식이다. ACC는 두 노즐에서 분산된 분산액을 대향충돌시켜 충돌에너지에 의해 천연고분자의 물리적 나노섬유화를 유도하는 공정이다.

3. TCF, ACC 단일공정 및 복합공정에 따른 농도, 섬유직경, 기계적 물성 및 투과도

ACC 단일 공정의 농도는 0.1 w/v%대비 TCF 및 ACC 복합 공정으로 생산된 셀룰로오스 나노섬유의 농도가 0.3 w/v%로 증가함을 확인할 수 있다. SEM 분석결과의 경우 단일공정, 복합공정이 모두 유사한 섬유 직경을 가지는 것을 확인할 수 있다. 기계적 물성과 투과도의 경우 거의 유사하나 복합 처리한 공정이 조금 더 기계적 물성이 우수하고 투과도가 높은 것을 확인할 수 있다.







Table 2 A TCNF/ TA TCNF stress \$ Transmittance

4. 결론 및 향후과제

TCF와 ACC 복합공정이 투과도 및 섬유직경은 유사하나 농도가 증대되고 기계적 물성이 좋아짐을 확인할 수 있었다. 향후, Tunicate에서 직접 셀룰로오스를 추출하여 나노섬유화를 진행하여 PLA와 같은 생분해성 플라스틱에 복합하여 최적의 기계적 물성을 찾고 실생활에 적용시키길 기대한다. **참고문헌**

 Dunlop, M. J. Isolation of nanocrystalline cellulose from tunicates. 4408-4412. 2018

후기

나노섬유화를 통하여 생분해성 플라스틱과 나노섬유를 복합하여 최적의 기계적 물성을 찾아 실생활의 적용을 기대한다.

Engineering Cellulose Nanoparticles with High Ice-Nucleating Efficiency for Enhanced Cloud Seeding

*Hongkyun Woo¹⁺, Hyemi Lee¹, Jeonggyu Kim², Sungmin Park², Junshik Um² and Jaejun Lee¹

¹ Department of Polymer Science and Engineering, Pusan National University, ² Department of Atmospheric Sciences, Pusan National

University

⁺E-mail: <u>jlee-pse@pusan.ac.kr</u>

Keywords : Cellulose, Sustainable polymer, Cloud seeding, Ice crystals

1. Introduction

Artificial precipitation facilitates rainfall by promoting the nucleation of ice crystals through the injection of seeding materials into clouds. With the intensifying global climate crisis, eco-friendly and highly efficient seeding materials are demanded. Although cellulose is regarded as a promising seeding material, limited studies have investigated its ice nucleation ability (INA). Furthermore, key material parameters affecting INA remain unclear [1, 2]. In this study, we aim to examine the impact of cellulose particle size on INA.

2. Experimental Methods

2.1 The control of cellulose size via mechanical sieving and hydrolysis : Microcrystalline cellulose (MCC) was prepared by the hydrolysis method in 66 wt% sulfuric acid at 45 °C for various hydrolysis periods. The hydrolyzed celluloses were purified through NaOH titration, dialysis, and freeze-drying to obtain cellulose particles. The particle was dispersed into a 0.5 wt% aqueous solution and spin-coated onto a wafer. Using scanning electron microscopy (SEM), 50 images of cellulose particle were obtained for each hydrolysis time. The average size was characterized based on the major axis of Feret diameters. The average size and size distribution of the cellulose particles were compared to evaluate the effect of mechanical sieving and hydrolysis times.

2.2 Droplet Freezing Method : To evaluate their INA, we implemented the droplet freezing method using a Peltier-type cooling chamber, which operates in a controlled environment at temperature as low as - 40 °C. A 0.03 wt% cellulose particle solution was deposited as a 0.5 μ L droplet onto a PDMS-coated substrate. The droplets were cooled at a rate of 1 °C/min, and the freezing process was recorded using an optical microscope to analyze their nucleation behavior.

3. Size-controlled cellulose and its impact on INA

MCC was sieved using specific mesh sizes with 25D (< 25 μ m), 25U (25 – 32 μ m), and 53U (53 – 63 μ m). Sieved and pristine MCC (Non-sieve) were hydrolyzed. In Fig 1 showing the average size of hydrolyzed samples, 25D and 25U exhibited more uniform size distribution than Non-

sieve, whereas 53U showed a similar distribution to Non-sieve.



1

Fig. 1. The average size of Hydrolyzed MCC at 10 min.

4. Cellulose as a seeding material

Our results highlight the potential of cellulose as a seeding material and provide a systematic approach for INA assessment in a laboratory setting. Using droplet freezing method, we investigated the effects of size of cellulose on INA. Our research aims to develop eco-friendly and highly efficient cellulose seeding materials and establish a quantitative technique for INA assessment.

References

- [1] Hiranuma N et al. Nature Geosci. 8(4), 2015.
- [2] Hiranuma N et al. Atmos. Chem. and Phys. 19(7), 2019.

Acknowledgement

This work is financially supported by the National Institute of Meteorological Research (NIMS) and Pusan National University (PNU).

천연자원 기반 화학적 재활용이 가능한 에폭시 수지 개발 및 CFRP 적용

*홍영기 ¹, 고문주 ¹⁺ * Y. Hong ¹, M. Goh ¹⁺

¹ 건국대학교 대학원 화학공학과 ⁺E-mail: <u>mgoh@konkuk.ac.kr</u>

Keywords: L-proline, retro-aldol reaction, chemical degradable epoxy, high mechanical property, CFRP

1. 서론

Bisphenol A(BPA) 기반 에폭시 수지는 우수한 기계적 물성과 내화학성으로 인해 다양한 산업 분야에서 널리 사용되고 있다. 그러나 BPA의 독성과 분해하기 어려운 특성으로 인해 친환경적이며 분해 가능한 대체 소재 개발이 필요하다. 이에 본 연구에서는 천연 유래 원료를 활용한 화학적 재활용이 가능한 에폭시 수지를 개발하였다.

화학적 분해가 가능한 천연 유래 에폭시 수지 합성 및 경화

2.1. Aldol condensation 반응을 통한 천연 유래 에폭시 수지 합성

천연 유래 에폭시 수지를 합성하기 위한 전구체를 바닐린과 라즈베리 케톤을 L-proline 촉매 하에서 aldol condensation 반응을 통해서 1-(4-hydroxy-3methoxyphenyl)-5-(4-hydroxyphenyl)pent-1-en-3-one (VR)을 합성하였다. 이후 합성된 VR을 염기 조건 하에서 TBAB 촉매를 사용하여 에피클로로히드린과 반응시켜 1-{3-methoxy-4-(oxiran-2-ylmethoxy)phenyl}-5-{4-(oxiran-2-ylmethoxy)phenyl}pent-1-en-3-one (VREP)을 합성하였다.



Scheme 1. Synthetic route of VR and VREP

2.2. 경화된 천연 유래 에폭시 수지 제조

믹서를 통해 합성된 에폭시 수지 VREP와 4,4diamino diphenyl sulfone (DDS)를 혼합한 뒤 금형에 넣고 유압 프레스기를 통해 일정 압력과 온도를 가해주어 경화된 천연 유래 에폭시 수지를 제조했다.



Scheme 2. Synthetic route of VREP

천연 유래 에폭시 수지의 기계적 물성 및 화학적 분해

경화된 천연 유래 에폭시 수지의 기계적 물성을 확인하기 위해 인장 및 굴곡 시험을 진행했다. 시험 결과 BPA 타입의 에폭시 수지와 비교하여 유사한 인장 강도를 보였고, 더 높은 굴곡 강도를 보였기 때문에 BPA 타입의 에폭시 수지보다 우수한 기계적 강도를 갖는 것을 확인하였다. 또한 경화된 천연 유래 에폭시 수지를 산화시킨 후 화학적 분해를 진행했을 때 완전히 분해되며, 산화 과정이 분해 과정에서 필수적이라는 것을 FT-IR을 통해 확인할 수 있었다.



Fig. 1. Mechanical properties of VREP/DDS system.

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials



Fig. 2. Chemical decomposition of VREP/DDS system.

4. 결론 및 향후과제

VREP은 바닐린과 라즈베리 케톤을 이용한 친환경 합성법으로 개발되었으며, DSC 및 레오미터 분석을 통해 최적 경화 조건을 결정하여 VREP/DDS를 제조 및 평가하였다. DMA 분석 결과, VREP/DDS는 높은 가교 밀도를 나타내어 BPA 기반 에폭시 수지와 유사하거나 우수한 기계적 및 열적 특성을 보였으며, SEM 및 XRM 분석에서 기공 부피 비율이 0.36%로 낮아 CFRP 제조에 적합함을 확인하였다. 또한, VREP/DDS-CFRP는 DGEBA/DDS-CFRP 대비 20배 빠른 분해 속도를 보이며 완전한 화학적 분해가 가능하였고, 분해 후 회수된 탄소섬유는 기존 대비 13% 감소된 인장 강도를 보여 재사용 가능성을 보였다. 따라서 VREP은 BPA 기반 에폭시 수지를 대체할 수 있는 친환경 소재로서 산업적 응용 가능성이 크며, 특히 CFRP 제조에 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] B.M. Trost, C.S. Brindle Chem. Soc. Rev. 39 (5) (2010) 1600

[2] J.W. Yu et el. *Polym. Chem.* 7 (1) (2016) 36-43
[3] M. Singh et el. *J. Catal.* 260 (2) (2008) 371-379

후기

이 연구는 2022년도 과학기술정보통신부의 원천기술 개발 사업의 재원으로 한국 연구 재단 (NRF)의 지원을 받음 (Grant No. 2021M3H4A1A03039591).

Ascorbic acid 기반 바이오 에폭시 수지 시스템 Ascorbic Acid-Based Bio-Epoxy Resin Systems

조영지, 고문주 * Y. Cho, M. Goh ^{*}

¹ 건국대학교 화학공학부, ² 건국대학교 대학원 화학공학과 ⁺E-mail: mgoh@konkuk.ac.kr

Keywords: Epoxy, Ascorbic acid, Sustainability, Bio-based epoxy, Thermoset

1. 서론

이 연구는 주로 Bisphenol-A로 제조되는 전통적인 에폭시 수지의 환경 문제를 해결하기 위해 바이오 acid(Vitamin-C)를 기반 ascorbic 사용하여 친환경적인 에폭시 수지를 개발하는 것을 목표로 한다. 에폭시 화합물은 ascorbic acid의 수산화기를 epichlorohydrin과 반응하여 합성되었다. Differential Scanning Calorimetry(DSC)를 사용하여 isophrone diamine(IPDA)과 최적의 경화 조건을 결정했다. 최적의 경화 조건에서 경화된 에폭시 수지는 7.5 MPa의 인장 강도와 6%의 신장률을 보였다. 이러한 결과는 ascorbic acid를 사용하여 상업적으로 실현 가능한 친환경 에폭시 수지를 합성할 수 있음을 보여주며, BPA와 관련된 문제를 해결하고 지속 가능한 재료 개발에 기여할 수 있다.

2. Ascorbic acid 기반 에폭시 합성

바이오 기반 에폭시를 만들기 위해 4개의 hydroxyl group을 가지고 있는 ascorbic acid를 원료로 선정하고, ascorbic acid의 hydroxyl group을 epichlorohydrin의 반응을 통해 ascorbic-based epoxy(AAEP)를 합성하였다.



Scheme.1 Synthetic route of AAEP

3. Ascorbic acid 기반 에폭시를 활용한 경화물 제조 및 기계적 특성

앞서 합성한 ascorbic-based epoxy(AAEP)를 이용하여 제작한 경화물의 물리적 특성을 확인하기 위하여 상업적으로 많이 활용되는 에폭시 경화제인 IPDA(Isophorone diamine) 경화제를 사용하여 경화를 진행하였다. DSC 분석 결과에 따라 가장 높은 엔탈피 값을 보인 100 ℃에서 경화를 진행했다. 경화 후 UTM 장비를 이용하여 인장강도를 측정하였다. 측정 결과 최대인장강도 7.5 MPa, 최대신장률 6 %의 결과를 보였다.



Fig.1. (a) DSC first heating and cooling curves of the AAEP and IPDA mixture under a nitrogen atmosphere at a heating rate of 10 °C/min. (b) DSC curves of the AAEP/IPDA mixture at isothermal scanning conditions at different temperatures for 1 h. The table inside indicates the values of enthalpy change at certain temperature,

respectively.



Fig.2 Tensile stress-strain curve and corresponding Young's modulus of the AAEP/IPDA cured material.

4. 결론 및 향후과제

AAEP는 전통적인 에폭시 수지의 대안으로서의 가능성을 보여주며, Bisphenol-A(BPA)와 관련된 문제를 해결하고 지속 가능한 고분자 물질 개발에 기여한다. 그러나 강도와 합성의 편리성에서 제한점이 있으며, 이를 극복하기 위해 경화 과정에서 고강도용 경화제를 도입하는 등의 방법이 필요하다. 본 연구는 지속 가능한 대안의 창출과 비용 효율적인 대량 생산의 중요성을 강조하며,

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

환경 친화적인 고분자 물질 분야의 발전에 기여한다.

참고문헌

- [1] Pham, H. Q.; Marks, M. J. Epoxy Resins. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley October 15, 2005.
 - $https://doi.org/10.1002/14356007.a09_547.pub2.$
- [2] Rochester, J. R. Bisphenol A and Human Health: A Review of the Literature. *Reprod. Toxicol.* 2013, 42, 132–155. https://doi.org/10.1016/j.reprotox.2013.08.008.3.
- Kumar, S.; Samal, S. K.; Mohanty, S.; Nayak, S. K. Recent Development of Biobased Epoxy Resins: A Review. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 2018, *57* (3), 133–155.
 - https://doi.org/10.1080/03602559.2016.1253742.
- [4] Nikafshar, S.; Zabihi, O.; Hamidi, S.; Moradi, Y.; Barzegar, S.; Ahmadi, M.; Naebe, M. A Renewable Bio-Based Epoxy Resin with Improved Mechanical Performance That Can Compete with DGEBA. *RSC Adv.* 2017, 7 (14), 8694–8701. https://doi.org/10.1039/c6ra27283e.
- [5] Jeong, J.; Goh, M. Chemically Decomposable Iminebased Thermoset Using Oxidized Sugar. J. Appl. Polym. Sci. 2024, 141 (7). https://doi.org/10.1002/app.54935.
- [6] Liu, J.; Zhang, L.; Shun, W.; Dai, J.; Peng, Y.; Liu, X. Recent Development on Bio-based Thermosetting Resins. *J. Polym. Sci.* **2021**, *59* (14), 1474–1490. https://doi.org/10.1002/pol.20210328.
- [7] Wan, X.; Demir, B.; An, M.; Walsh, T. R.; Yang, N. Thermal Conductivities and Mechanical Properties of Epoxy Resin as a Function of the Degree of Cross-Linking. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2021, *180* (121821), 121821. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.1218 21.
- [8] Baroncini, E. A.; Kumar Yadav, S.; Palmese, G. R.; Stanzione, J. F., III. Recent Advances in Bio-based Epoxy Resins and Bio-based Epoxy Curing Agents. J. Appl. Polym. Sci. 2016, 133 (45). https://doi.org/10.1002/app.44103.
- [9] Zhang, J.; Dang, L.; Zhang, F.; Zhang, K.; Kong, Q.; Gu, J. Effect of the Structure of Epoxy Monomers and Curing Agents: Toward Making Intrinsically Highly Thermally Conductive and Low-Dielectric Epoxy Resins. *JACS Au* 2023, *3* (12), 3424–3435. https://doi.org/10.1021/jacsau.3c00582.
- [10] Hong, Y.; Jeong, J.; Oh, D.; Kim, M.; Lee, M. W.;
 Goh, M. On-Demand and Fast Recyclable Bio-Epoxy.
 J. Ind. Eng. Chem. 2023, 117, 490–499.
 https://doi.org/10.1016/j.jiec.2022.10.036.
- [11] Youn, H.; Hong, Y.; Yu, A.; Jeong, J.; Goh, M. Synthesis of Oxime Ester-based Epoxy Resin with Chemical Recyclability. J. Appl. Polym. Sci. 2023, 140 (29). https://doi.org/10.1002/app.54212.

- [12] Arrigoni, O.; De Tullio, M. C. Ascorbic Acid: Much More than Just an Antioxidant. *Biochim. Biophys. Acta Gen. Subj.* 2002, *1569* (1–3), 1–9. https://doi.org/10.1016/s0304-4165(01)00235-5.
- [13] Park, S.-J.; Jin, F.-L.; Lee, J.-R. Thermal and Mechanical Properties of Tetrafunctional Epoxy Resin Toughened with Epoxidized Soybean Oil. *Mater. Sci. Eng. A Struct. Mater.* **2004**, *374* (1–2), 109–114. https://doi.org/10.1016/j.msea.2004.01.002.
- [14] Frias, C. F.; Serra, A. C.; Ramalho, A.; Coelho, J. F. J.; Fonseca, A. C. Preparation of Fully Biobased Epoxy Resins from Soybean Oil Based Amine Hardeners. *Ind. Crops Prod.* 2017, *109*, 434–444. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.08.041.
- [15] Hu, Z.; Song, C.; Shao, Q.; Li, J.; Huang, Y. One-Step Functionalization of Graphene by Cycloaddition of Diarylcarbene and Its Application as Reinforcement in Epoxy Composites. *Compos. Sci. Technol.* 2016, 135, 21–27. https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2016.09.008.
- [16] Shalmashi, A.; Eliassi, A. Solubility of L-(+)-Ascorbic Acid in Water, Ethanol, Methanol, Propan 2-Ol, Acetone, Acetonitrile, Ethyl Acetate, and Tetrahydrofuran from (293 to 323) K. J. Chem. Eng. Data 2008, 53 (6), 1332–1334. https://doi.org/10.1021/je800056h.
- [17] Ernault, E.; Richaud, E.; Fayolle, B. Thermal Oxidation of Epoxies: Influence of Diamine Hardener. *Polym. Degrad. Stab.* 2016, *134*, 76–86. https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.09.03 0.
- [18] Lee, J. Y.; Choi, H. K.; Shim, M. J.; Kim, S. W. Kinetic Studies of an Epoxy Cure Reaction by Isothermal DSC Analysis. *Thermochim. Acta* 2000, *343* (1–2), 111–117. https://doi.org/10.1016/s0040-6031(99)00303-2.
- [19] Jeong, J.; Kim, W. S.; Lee, M. W.; Goh, M. Liquefaction of Lignin Using Chemical Decomposition and Its Application to Polyurethane Foam. ACS Omega 2021, 6 (16), 10745–10751. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c00285.
- [20] Garcia, F. G.; Soares, B. G.; Pita, V. J. R. R.; Sánchez, R.; Rieumont, J. Mechanical Properties of Epoxy Networks Based on DGEBA and Aliphatic Amines. J. Appl. Polym. Sci. 2007, 106 (3), 2047– 2055. https://doi.org/10.1002/app.24895.
- [21] Kadam, A.; Pawar, M.; Yemul, O.; Thamke, V.; Kodam, K. Biodegradable Biobased Epoxy Resin from Karanja Oil. *Polymer (Guildf.)* 2015, *72*, 82–92. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2015.07.002.

포

人

터

1

화학적 분해 가능성이 있는 재활용 가능한 커큐민 기반 바이오 에폭시 수지의 합성 Synthesis of curcumin-based bio-epoxy resin with recyclability and chemical cleavability

주연하¹,정지수¹, 전광우¹,고문주¹⁺ Y. Ju¹, J. Jeng¹, G. Jeon¹, M. Goh¹⁺

> ¹ 건국대학교 대학원 화학공학과 ⁺E-mail: mgoh@konkuk.ac.kr

Keywords: epoxy resin, thermoset plastic, bio-based material

1. 서론

비스페놀 A를 대체할 수 있는 바이오 물질 기반 에폭시 수지를 개발하기 위해 커큐민을 이용해 에폭시를 합성하고, FT-IR과 NMR을 사용하여 분석했다. 최적의 경화 조건을 찾기 위해 아민 기반 경화제를 사용하여 DSC와 isothermal 분석을 수행한 후 실제 경화 과정을 진행했다. 또한, 에폭시 수지에 포함된 불포화 케톤이 산화 반응을 통해 하이드록시 케톤으로 변환되고, 이후 알데히드와 케톤으로 분해되어 에폭시 수지의 친환경성과 재활용 가능성을 높일 수 있다는 점을 확인했다.

2. 커큐민 기반 에폭시의 특성 분석

2.1 커큐민 기반 에폭시의 합성

커큐민 기반 에폭시의 합성을 NMR과 FT-IR을 사용하여 화학 구조를 확인했다. NMR에서 방향족 구조와 에폭시 구조 피크가 나타났고, FT-IR에서는 옥시란 피크가 확인되었으며, 페놀 구조 피크가 사라져 에폭시 수지가 성공적으로 합성되었음을 확인했다.

 $\underset{\substack{\text{NSC}} (x_{i-1})_{i-1} (x_{i-1})_{i-1}$

Scheme.1 Synthetic route of curcumin based epoxy

2.2 커큐민 기반 에폭시의 경화 mechanism

경화 과정은 0 MPa 조건에서 80°C에서 0.5시간 동안 초기 경화를 수행한 후, 90°C에서 0.5시간 동안 경화를 진행했다. 그 후, 10 MPa 조건에서 94°C에서 2시간 동안 경화를 진행하고, 마지막으로 10 MPa 조건에서 140°C에서 2시간 동안 경화를 완료했다.



Scheme.2 Curing mechanism of the curcumin epoxy and IPDA

3. 커큐민 기반 에폭시의 기계적 특성

커큐민 기반 에폭시 수지는 15-33 MPa의 인장 강도와 1.3~1.8 GPa의 영률을 나타냈다. 커큐민 에폭시 수지가 NaOH와 반응하여 추가로 48시간 처리된 후, DSC와 DMA를 사용하여 측정한 결과, 유리 전이 온도(Tg)는 84°C와 86°C로 나타났다.



Fig.1 Dynamic mechanical analysis data and Tensile strength of the curcumin epoxy resin

4. 결론 및 향후과제

커큐민을 0 연구는 사용하여 친환경적인 열경화성 에폭시 수지를 합성하고, NMR과 FT-IR 분석을 통해 에폭시 그룹의 존재를 확인했다. 최적의 경화제로 IPDA를 선택해 경화 과정을 진행했으며, 경화가 FT-IR 분석을 통해 확인되었다. NaOH와 48시간 반응한 커큐민 에폭시 수지가 가장 높은 인장 강도를 보였고, Tg는 84°C와 86°C로 측정되었다. 또한, 분해 반응 속도 상수는 기존 에폭시 수지보다 9배 높은 값이었다. 이 연구는 커큐민을 이용한 친환경 에폭시 수지의 합성과 분해 가능성을 보여주었다.

참고문헌

Macromolecules 2016, 49, 8397–8406.
 Prog. Polym. Sci. 2016, 62, 126–179

후기

이 연구는 산업통상자원부의 기술혁신프로그램(No. 20012817)과 알케미스트 프로젝트(No. 20025647)의 지원을 받았으며, 또한 이 작업은 산업통상자원부의 한국에너지기술평가원(KETEP) 인재개발프로그램(No. RS-2023-00237035)의 지원을 받음.

폴리아닐린 필러의 도핑상태가 에폭시 수지의 열전도도에 미치는 영향 Effect of doping state of polyaniline fillers on the thermal conductivity of epoxy resin

*우예원 ,차영우 ,고문주 ⁺ * Y. Woo, Y. Cha , M. Goh ⁺

건국대학교 대학원 화학공학과 ⁺E-mail: mgoh@konkuk.ac.kr

Keywords: Polyaniline, Composite, Epoxy, Thermal conductivity, Thermal conductivity filler, Doped polyaniline

1. 서론

에폭시 수지는 우수한 기계적 및 열적 특성으로 인해 복합재료 분야에서 널리 사용되고 있다. 특히 에폭시 복합재의 열전도도를 향상시키기 위해 다양한 열전도성 필러가 연구되고 있다. 본 연구 에서는 폴리아닐린을 열전도성 필러로 활용하여 에폭시 복합재의 열전도도를 개선하는 가능성을 탐색하였다. 폴리아닐린은 기존의 열전도성 필러 보다 합성이 간단하고 경제적이라는 장점을 가진다. 본 연구에서는 폴리아닐린의 도핑 상태에 따른 열전도도 차이를 분석하였다.

2. 폴리아닐린 필러 합성

본 연구에서는 두 가지 폴리아닐린 필러를 사용하였다. 하나는 양성자로 도핑된 에메랄딘 염 (ES)이고, 다른 하나는 도핑이 제거된 중성 에메랄딘 염기(EB)이다.



Scheme.1 Synthetic scheme of emeraldine salt (ES) and emeraldine base (EB)

이 두 필러를 상업적으로 사용되는 비스페놀 A 디글리시딜 에터(DGEBA) 에폭시 수지에 혼합하여 복합재를 제조하였다. 경화제로는 비교적 분자 구조가 간단한 HMDA를 선택하였다.

3. 결과 및 고찰

실험 결과, 양성자로 도핑된 ES 필러를 포함한 에폭시 복합재가 중성 EB 필러를 포함한 복합재 보다 높은 열전도도를 나타내는 것으로 확인되었다. 이러한 열전도도 향상은 폴리아닐린과 에폭시 수지 간의 수소 결합과 π - π 상호작용에 의해 계면 열저항이 감소한 결과로 해석된다. 또한, 일반적으로 복합재 내 필러의 고유 열전도도가 높을수록 전체 복합재의 열전도도가 향상되며, 폴리아닐린의 도핑 정도에 따른 열전도도 변화 분석을 통해 양성자로 도핑된 폴리아닐린(ES)이 중성 폴리아닐린(EB)보다 높은 열전도도를 나타내는 것이 확인되었다.



Fig.1 Photograph of the cured specimen and thermal conductivity

4. 결론 및 향후 연구

본 연구를 통해 폴리아닐린 필러의 도핑 상태가 에폭시 복합재의 열전도도에 큰 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 향후 연구에서는 필러의 함량 변화 및 다른 도핑제를 적용하여 열전도도 향상을 위한 최적 조건을 탐색할 예정이다.

참고문헌

 J. Li, C. Ren, Z. Sun, Y. Ren, H. Lee, K.-S. Moon, C.-P. Wong, Melt processable novolac cyanate ester/biphenyl epoxy copolymer series with ultrahigh glass-transition temperature. ACS Appl. Mater. Interfaces 13(13), 15551–15562 (2021)
 Y. Hong, J. Jeong, D. Oh, M. Kim, M.W. Lee, M. Goh, Ondemand and fast recyclable bio-epoxy. J. Ind. Eng. Chem. 117, 490–499 (2023)

후기

본 연구는 한국 정부(MSIT)의 재원으로 수행된 한국 연구재단(NRF)의 지원(No. 2023R1A2C1003435), 산업통상 자원부의 재원으로 수행된 한국에너지기술평가원 (KETEP)의 인적자원개발사업(No. RS-2023-00237035), 그리고 한국 정부(MOE, MOTIE)의 재원으로 수행된 한국 CCUS협회(K-CCUS)의 지원(KCCUS20220001, 온실가스 감축을 위한 인적자원개발사업)으로 수행되었습니다.

Oxime ester 결합 기반 화학적 재활용 가능한 신규 epoxy 수지 Synthesis of oxime ester-based epoxy resin with chemical recyclability

*이주영¹, 홍영기¹, 고문주¹⁺ *J.Lee¹, Y.Hong¹, M.Goh⁺ 건국대학교 화학공학과¹ *E-mail: mgoh@konkuk.ac.kr

Keywords: oxime ester, epoxy resin, recyclability

1. 서론

Epoxy 수지는 전세계적으로 우수한 기계적 강도, 내열성, 내화학성으로 인해 산업계에 많이 활용되고 있는 물질이다. 하지만 에폭시 수지 제품의 높은 가교 밀도와 분해되지 않는 결합으로 인해 재활용이 어렵다는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 분해 가능한 epoxy 수지를 개발하는 것이 지향되어야 한다. 본 연구에서는 Quinone Oxime 기반의 물질을 활용하여 oxime ester 결합을 가지고 있는 분해 가능하고 재활용 가능한 에폭시 수지를 만들고 특성을 평가한다.

2. 실험

2.1 Benzoquinone oxime epoxy 합성

3구 플라스크를 reflux condenser, Stirring bar를 넣은 후, 아르곤을 이용하여 플라스크 내부의 산소를 차단한다. 1,4-Benzoquinone dioxime 10g(0.07 mol)와 NaH 4.34g(0.18 mol)을 Dimethylformamide 200 mL를 넣은 혼합물을 0 °C에서 1시간 동안 반응시킨다. 반응 후 Epichlorohydrin 13.4g(0.14 mol)을 넣어 50 °C 에서 24시간 반응한다. 반응이 끝난 혼합 물질을 Ethyl acetate (EA)를 이용하여 유기물질을 추출한다. 유기 층을 모아 Brine로 2회 세척한 후 Na₂SO₄(Sodium sulfate)를 이용하여 남아있는 수분을 제거한다. 그 다음, 물질 정제를 위해 Silica gel chromatography를 전개액을 사용하여 (Chloroform : EA = 4:1)로 정제한다. 용매를 증발시킨 후 상온 건조하여 노란색 고체 (4.3 g, 24 % Yield) 의 목표 화합물을 얻었다[1].

2.2 Benzoquinone oxime epoxy와 amine계열 경화제를 이용한 경화물 제조

3 g의 Oxime epoxy resin와 0.7 g의 1,6-hexanediamine (HMDA) (에폭시 와 아민계열 당량비 1:1) 를 몰드에 넣고 50 °C에서 녹인다. 그 후, 혼합물을 압력을 가해 5 MPa로 누르면서 열압력 성형을 90분 간격으로 10 °C 씩 상승시켜 100 °C 까지 상승시켜 경화물을 제조한다. [2].

3. 결과 및 고찰

3.1 Benzoquinone oxime epoxy 합성

1,4-Benzoquinone dioxime와 Epichlorohydrin을 반응시켜 만든 Benzoquinone oxime epoxy 합성 여부를 확인 하기 위하여, FT-IR와 NMR을 통하여 분석하였다. 먼저 FT-IR에서의 합성된 결과물의 IR data에서 1560 cm⁻¹ C=N 결합과 1250 cm⁻¹ C-O 결합을 확인한 결과, Oxime 구조가 유지되고 있는 것을 확인 하였다. 또, 915 cm⁻¹인 epoxy peak가 나타났고 원료 물질의 3200 cm⁻¹ OH group peak가 사라진 것을 확인하였다. 그 다음으로 Oxime epoxy의 NMR에서 Quinone 부분의 peak인 7~7.5 ppm와 6.5~6.8 ppm 을 각각 확인할 수 있었다. Epoxy 고리 부분의 peak인 3.2~3.5 ppm, 2.8~3 ppm, 2.5~2.7 ppm 을 각각 확인할 수 있었다.



Fig. 1. FT-IR (up) and ¹H NMR (down) spectra of Oxime epoxy.

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

4. 결론 및 향후과제

재활용이 가능한 에폭시 수지를 합성하기 위해서 Benzoquinone oxime 기반의 oxime ester를 가지고 있는 에폭시를 합성하였고, amine과의 경화 반응을 통해 경화물을 제조하였다. Oxime epoxy 수지와 경화물의 복합체 적용성을 확인하기 위해서, DSC, DMA, 인장강도 등 물성테스트를 진행할 예정이며 재활용 가능성을 평가해볼 예정이다.

참고문헌

Silvia Schenone et al. *Il Farmaco*. 55:495-498, 2000.
 Y Hong et al. *Adv. Mater. Interfaces*. 9:2200027, 2022.

후기

이 연구는 산업통상자원부(MOTIE, Korea)가 지원하는 기술혁신사업(No. 20012817)의 지원을 받았으며, 이 연구는 또한 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원 (KIAT)의 국제협력연구개발사업(No. P0019184)을 통해 재정 지원을 받음.
자동차 복합재료용 탄소섬유 부직포 중간재의 물성분석 Material Properties analysis of carbon fiber nonwoven intermediate for automotive composite materials

*권오훈¹⁺, 강진균¹, 강건웅¹, 이건희¹, 김승근², 김강재³, 박재형⁴ * O.H. Kwon¹⁺, J.K. Kang¹, G.W. Kang¹, G.H. Lee¹, S.G. Kim², K.J. Kim³, J.H. Park⁴

¹ ECO융합섬유연구원, ² 지리산한지(유), ³ 경북대학교 산림과학조경학부, ⁴ 경북대학교 바이오섬유소재학과 ⁺E-mail: <u>simulation@kictex.re.kr</u>

Keywords: Carbon paper, Nonwoven, Automotive

1. 서론

탄소섬유는 항공·우주·스포츠·레저산업 부터 토목· 건설 산업에 이르기까지 거의 모든 산업분야에서 사용되고 있다. 특히 탄소섬유를 보강재로한 탄소섬유강화플라스틱(CFRP)은 비강도, 비강성, 경량성 등의 특장점으로 우수한 특성을 살린다양한 용도에 따라 철. 알루미늄 틋 금속소재를 대체하는 범용소재로써 성장하고 있다. 고가소재로 인한 가격경쟁력이 떨어지는 문제를 해결하고자 재활용 탄소섬유 부직포 중간재의 복합재료로의 사용가능성에 대한 분석을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰



Fig. 3. Mold dyeing recipe

4. 결론

본 연구에서는 모빌리티 부품 제조를 위한 생산조건이 개선된 재생탄소섬유 wet-laid 부직포의 기초 물성분석을 통하여 탄소신재 제품과의 물성비교가 가능하였다.

5. 사사

본연구는 산업부 소재부품기술개발사업 "저비용 탄소섬유기반 친환경 소재적용 모빌리티용 경량부품 중간재 제조기술개발 (RS-2024-00431544) 사업으로 수행되었음

2. 재료 및 방법

2.1 공시재료

본 연구에 사용된 재생 탄소부직포는 지리산한지(유)에서 바인더 섬유(15%)와 혼합하여 제조하였다.



Fig. 1. Manufactured recycled carbon fiber nonwoven sample

2.2 탈수촉진 고해공정

Wet-laid Pilot plant 초지설비를 이용하여 시트 제조 후 Calendering roll을 이용하여 중간재 부직포를 압착 건조를 진행하였다.



Fig. 2. Paper Manufacturing process for wet-laid carbon fiber intermediate materials

Heating Air Mold System을 활용한 열가소성 탄소복합재 성형 공정 개선 Improvement of thermoplastic carbon fiber composite forming process using Heating Air Mold System

*김미정¹, 육상수², 유명한³,강창수⁴⁺ * M.J. Kim¹, S.S. Yuk², M.H. Yoo³, C.S. Kang⁴⁺

> 한국탄소산업진흥원 ⁺E-mail: bluesky@kcarbon.or.kr

Keywords: Thermoplastic composite, Uniform pressure molding, Heating air mold system, Thermoplastic CFRP forming

1. 서론

열가소성 탄소복합재(Thermoplastic CFRP)는 높은 강도와 내열성을 가지며, 항공우주, 자동차, 방산 산업 등에서 경량 구조재로 널리 사용되고 있다. 기존의 프레스 성형 방식은 원형의 실린더를 이용하여 가압하는 구조로, 복잡한 형상의 부품을 성형할 때 압력이 균일하게 전달되지 않아 품질 저하 및 결함 발생의 문제가 있다. 특히, 항공기 부품과 같이 곡면이나 복잡한 형상을 요구하는 구조에서는 기존 방식의 한계가 더욱 뚜렷하게 나타난다[1-3].

위와 같은 문제의 해결방안으로 본 연구에서는 기존의 열가소성 탄소복합재 프레스 성형방식을 개선하여 금형 내부에서 상부 몰드의 공기압력으로 소재 전체에 균일한 압력을 가하는 구조의 Heating Air Mold System 공정을 제안하였고, 해당 공정을 이용해 성형 된 시편을 NDI, DT검사를 통해 평가 하였다.

2. 실험

2.1 Heating Air Mold 기본 개념

본 연구에서 제안하는 열가소성 탄소복합재 성형방식인 Heating Air Mold System은 Fig.1.에 보이는 것과 같이 세라믹 인으로 단열처리를 한 하부 몰드와 유연한 가압면으로 압력을 형성하는 상부 몰드로 구성되어 있다. 에어라인을 통해 상부의 유연한 가압면을 팽창시킴으로써 일정한 압력이 소재 전반에 균일하게 압력을 전달할 수 있도록 설계되었다.



Fig.1. Diagram of Heating Air Mold System.

2.2 실험재료 및 실험

공정 검증에 사용된 소재로는 높은 기계적 강도와 내열성을 갖추고 있어 항공우주 산업에서 널리 사용되는 열가소성 탄소복합재 소재인 LM -PAEK(Toray 社) 를 사용하였다.

성형 공정 온도는 LM-PAEK의 녹는 온도(305℃)를 고려하여 하부 몰드 온도를 300°C, 히팅 패드 온도를 320°C로 설정하였고, 압력은 승온 시부터 냉각 및 탈형 전까지 4 bar 를 유지하였다.

2.3 실험 결과

성형한 시편에 대한 비파괴 검사(NDI, Non-Destructive Inspection) 를 수행한 결과, 몇몇 영역에서 결함으로 보이는 부분(빨간선 으로 표시한 부분)이 발견되어 해당 부분을 대상으로 파괴 검사(DT, Destructive Testing)를 추가로 진행 하였고 Fig.2.에 나타나 있다. 결함으로 보였던 부분이 실제 결함이나 기공(void)이 아님이 확인되었다.

이러한 결과는 Heating Air Mold System을 적용한 성형 공정이 균일한 압력을 제공하여 결함 발생을 최소화할 수 있음을 확인 하였다



Fig. 2. NID & DT Inspection Results.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 Heating Air Mold System을 활용한 열가소성 탄소복합재 성형 공정을 적용하고, 성형 품질을 평가하였다. NDI 검사에서 감지된 신호가 DT

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

검사 결과 실제 결함이 아님을 확인함으로써 성형 안정성을 입증하였다.

향후 연구에서는 단순 평판 성형 뿐만 아니라 항공기 부품과 같은 복잡한 형상의 부품에도 적용할 예정이며, 이를 위한 금형 설계 및 공정 최적화 연구를 진행할 계획이다. 또한, 기존 프레스 성형 방식과의 기계적 물성 비교를 통해 신뢰성을 확보할 예정이다.

참고문헌

[1] 탄소복합재 성형공정기술 개발 보고서, 산업부, 2017

- J. Doe et al. Development of Air-assisted Molding for Thermoplastic Composites. J. Thermoplastic Compos Mater. 34 (2): 215-230, 2021
- [3] 열가소성 탄소복합재 성형 및 응용 기술 연구, 항공 우주 연구소,2022

후기

이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원 (KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임. (00431591,항공기 화물용 2.5m급 도어복합재 구조물 일체화 기술 개발)

Effect of Atmospheric Plasma Surface Treatment on the Mechanical Properties of Recycled Carbon Fiber Reinforced Thermoset Plastic

* Seong-Hyun Kang^{1,2}, Woong Han¹, Min-Kyeong Kim^{1,2}, Byung-Joo Kim³ and Kwan-Woo Kim¹⁺

¹Korea Carbon Industry Promotion Agency, Industrialization Division, ²Department of Carbon Materials & Fiber Engineering, Jeonbuk

National University, ³Department of Advanced Materials and Chemical Engineering, Jeonju University

⁺E-mail: kkw1988@kcarbon.or.kr

Keywords : Recycled carbon fiber, Atmospheric plasma, Surface treatment, Thermoset plastic

1. Introduction

Carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) is utilized in various industries such as aerospace and automobiles due to its high strength and light weight. However, most CFRP are manufactured with thermosetting resins, making them difficult to recycle, which causes environmental pollution problems. To solve this problem, research is actively being conducted to recycle CFRP [1,2]. One of the key elements in the recycling process is how to recover expensive carbon fibers from CFRP waste. However, recycled carbon fiber (rCF) are recovered in the form of single fibers, and the chemical composition of the surface changes during the recycling process, which causes a decrease in the interfacial bonding strength. To improve this, various surface modification technologies such as electrochemical treatment, heat treatment, and introduction of surface functional groups are being studied, and among them, plasma treatment is attracting attention as an environmentally friendly and simple method. In this study, atmospheric plasma treatment, which can be massproduced, was applied to evaluate the effects on the surface properties of rCF and the mechanical properties of rCF/epoxy composites.

2. Experiment Details

2.1 Materials

The reinforcement used was rCF (Gen 2 Carbon, England), and the thermosetting resin used as the matrix was epoxy (YD-128, Kukdo Chemical, Korea). The rCF nonwoven fabric, produced through the carding process, was plasmatreated for varying durations using the AP-4500 (AETP Co., Korea), followed by prepreg fabrication and hot press molding at 180°C.

2.2 Analysis method

The surface characteristics of the fibers and composites, both before and after plasma treatment, were analyzed using field emission scanning electron microscopy (FE-SEM), contact angle measurement, and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The mechanical properties were evaluated using a universal testing machine (UTM).

3. Results and Discussion

As a result of Table 1, the O_{1s}/C_{1s} ratio of rCF was 0.15, but it increased the most to 0.39 in rCF-P1 after plasma treatment, and rCF-P3 (0.30), rCF-P5 (0.31), and rCF-P10 (0.27) also showed increased values compared to rCF. In addition, the O_{1s}/C_{1s} ratio showed a tendency to decrease as the treatment time increased after rapidly increasing in rCF-P1. It is thought that this is because the oxygen functional groups were formed up to rCF-P3 due to plasma treatment, and increased, but the oxygen functional groups on the rCF surface were decomposed and decreased due to long-term surface treatment.

Table 1 Effect of Plasma Treatment on the Surface
Elemental Composition of rCF

		Atomic	percent	
Sample	C_{1s}	N_{1s}	O _{1s}	O _{1s} /C _{1s} ratio
rCF	82.89	4.55	12.56	0.15
rCF-P1	70.74	1.56	27.70	0.39
rCF-P3	76.06	0.78	23.16	0.30
rCF-P5	74.38	2.53	23.09	0.31
rCF-P10	78.90	0	21.10	0.27

4. Conclusions

In this study, the effect of atmospheric plasma treatment during fabrication on the mechanical strength of rCFRP was analyzed. Plasma treatment increased the oxygen functional groups on the rCF surface, which improved the mechanical properties of rCFRP.

References

[1] Zhang J et al. Compos Part B: Eng. 193:108053, 2020.

[2] Jeantet L et al. Compos Part B: Eng. 269:111100, 2024.

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

개발 극세 유리섬유 및 원단의 물성 연구 Study on Mechanical Properties of Fine Glass Fibers and Fabrics

*백영민 ¹⁺, 김영운¹, 김정수 ¹, 장우리 ¹, 신평수¹, 황예은 ¹ * Baek Yeong-Min¹, Kim Young-Un¹, Kim Jung-Soo¹, Jang Woo-Ree¹, Pyeong-Su Shin¹, Hwang Ye-Eun¹

> ¹ ECO융합섬유연구원 ⁺E-mail: bym@kictex.re.kr

Keywords: Fine Glass Fiber, Fine Glass Fabric, Composites, 1. 서론

최근 건설, 자동차, 항공우주, 재생에너지 분야의 시장확대로 인한 유리섬유의 수요가 높아지는 추세임. 고강도 및 경량화에 대한 관심이 높아지면서 마이크론급 극세 유리섬유가 여러 산업분야에서 주목받고 있음. 본 연구에서는 3µm급 극세 유리섬유를 제직하여 광학적 특성과 고강도가 요구되는 복합재 제작에 필요한 보강용 섬유를 개발하고자 함.

2. 실험

2.1 시료 개발 극세 유리섬유(KCC)

2.2 분석

SEM(S-3000N, Hitachi)을 통한 개발 극세 유리섬유의 원사 표면을 분석하였고, 실물영상현미경(zims, Sometech)을 이용하여 개발 그겟 유리섬유 원단의 표면을 관찰하였음. 또한, 두께측정기(BO-930, Bluebird)를 통한 원단의 두께 측정하였음.

만능재료시험기(5567, instron)를 통해 원사 및 원단의 기계적 물성을 측정하고 Weibull 분석을 통해 극세 개발 유리섬유의 특성을 통계적으로 연구하였음[1].

3. 결과



Fig 1. SEM photos of Fine glass fiber and fabric: (a) fiber; and (b) Fabrie



Fig 2. Mechanical properties of Fine glass fiber and fabric: (a) tensile test; and (b) Weibull distribution

4. 결론 및 향후과제

마이크론 이하의 3 직경을 가지는 극세 유리섬유를 개발하여 극세 개발 유리섬유의 원사와 표면을 관찰하였고, 기계적 원단의 특성을 평가하였음, 통계적 분석을 이용하여 내외부 결함 특성을 연구하여 향상된 특성을 가지는 원단을 직조하기 위하여 공정에 적용할 예정임. 추후, 개발 극세 유리섬유를 이용하여 복합재를 이용하여 계면 특성 및 함침성 연구를 진행할 예정임

참고문헌

 Park, J. M. et al. Composites Science and Technology, 122:59-66, 2016.

후기

본 연구는 산업통산자원부 소재부품기술개발사업(20015884)을 통해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

배터리 팩케이스용 난연/단열 복합재료 개발 Development of Flame-Retardant and Thermal-Insulating Composite Materials for

Battery Pack Cases

*황예은¹, 김영운¹, 김정수¹, 장우리¹, 신평수¹, 백영민¹ * Hwang YeEun¹, Kim Young-Un¹, Kim Jung-Soo¹, Jang Woo-Ree¹, Pyeong-Su Shin¹, Baek Yeong-Min¹

> ¹ 1ECO융합섬유연구원 ⁺E-mail: dpdms@kictex.re.kr

Keywords: Carbon Nonwoven, Carbon Composite, Battery Housing **1. 서론**

최근 전기자동차를 비롯한 전기에너지를 구동 동력원으로 사용하는 수송기기에서 화재 발생 시, 열폭주 및 화염 확산 방지와 화재 진압 시간을 확보하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있음. 본 연구에서는 전기자동차 배터리 모듈의 상부 하우징의 경량화 및 난연성을 향상시켜, 화재 차단 및 열폭주 등의 발생을 지연시키기 위한 고성능 난연 섬유 EP 복합 소재(LOI 30)를 개발하고자 함.

2. 실험

2.1 시료

탄화섬유 부직포(㈜케이지에프),수지(주식회사 코솔러스)를 이용하여 복합재를 제조하였음.

2.2 분석

복합재의 기초 물성 분석은 FTIR(Spectrum 3, Perkin Elmer), TGA(Q500, TA Instrument), DSC(Q-100, TA Instrument)를 사용하여 수행하였음. 난연성 평가를 위해 난연성시험기(214, Yasuda Seiki Seisakusho) 및 콘 칼로리미터(FFT0402, Fire Testing Technology)를 사용하였으며, 추가적으로 만능재료시험기(5567, instron)와 충격에너지평가시스템(Magnus 1300, Coesfeld)을 이용하여 물성을 확인하였음.

3. 결과



Fig. Analysis of Composite Cone Calorimeter Heat Release Rate



Fig. Analysis of Composite FTIR and Thermal Analysis (TGA, DSC



Fig. Analysis of Composite Tensile Strength



Fig. Analysis of Composite Impact Absorption

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 탄화섬유 부직포를 이용하여 난연/단열 복합재료를 개발하였음. 난연 탄화섬유 복합재의 LOI 값(30) 및 UL94 분석을 통한 난연성 평가뿐만 아니라, 인장강도 및 충격흡수 특성 평가를 통해 우수한 기계적 성질을 확보하였음. 이러한 난연 성능 및 물성 평가 결과를 통해 개발된 복합재료는 전기자동차 배터리 팩 적용가능성을 확인하였음

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

레이온계 활성탄소섬유의 금속촉매 첨착이 유해가스 흡착 특성 및 항균·항바이러스 특성에 미치는 영향

Effect of metal catalyst impregnation on the harmful gas adsorption and antibacterial/antiviral properties of rayon-based activated carbon fiber

*강진균¹, 박용완, 권오훈, 김도환, 강건웅, 이건희 * J.K. Kang¹, Y.W. Park, O.H. Kwon, D.H Kim, G.W.Kang, G.H.Lee

> ¹ ECO융합섬유연구원 ⁺E-mail: kjk@kictex.re.kr

Keywords: Activated Carbon Fibers, Physical Activation, Specific Surface Area, Adsorption Performance, Metal Catalyst.

1. 서론

고성능 환기 필터 소재에 대한 수요 증가에 따라 활성탄소섬유(ACF)는 미세먼지 및 유해 가스를 효과적으로 제거하는 능력으로 주목받고 있음. 특히, 공공 및 주거용 공기청정기는 0.1 µm 크기의 초미세먼지, 박테리아, 바이러스 등을 제거하는데 중요한 역할을 함

COVID 19 팬데믹 이후, 실내 공기 질 개선에 대한 관심이 더욱 강조되고 있으며, 이에 따라 공기청정기 및 환기시설 필터 기술개발이 활발해지고 있음.

본 연구에서는 물리적 활성화를 이용한 셀룰로오스 기반 활성탄소섬유 제조 및 금속 촉매 첨착을 통한 유해가스 흡착, 항균항바이러스 성능 개선을 연구하였음

2. 실험

2.1 소재



- 전구체 : Cu(NO₃)₂3H2O, Mn(NO₃)₂6H2O, A1(NO₃)₃9H2O - 침전제 : K₂CO₃

2.2 실험방법

- 침전제와 비율을 달리한 전구체를 각각 충 분한 물에 녹임
- ② 침전제를 교반하며 천천히 전구체를 주입
- ③ 용액 온도를 70℃로 유지하며 ACF를 함침
- ④ PH가 중성이 될 때까지 세척하고, 110℃ 2개 건조

2.3 분석

- Micromeritics, 3Flex, BET 분석
- Agilent Technologies, 7890A, GC-MS
- FE-SEM, EDS



Fig. 1. Gas Chromatography and Harmful Gas Analysis Schematic

3. 결과



Fig. 2. Surface Analysis of Impregnated Activated Carbon Fiber Using FE-SEM and EDS

평가 항목	ACF	첩착 1	첨착2
BET 비표면적 (m ² /g)	1393.4	1281.3	1277.3
BET 총 기공 부피 (cm³/g)	0.5896	0.5224	0.5220
BJH 기공 부피 (cm³/g)	0.09663	0.065258	0.068221
BJH 비표면적 (m ² /g)	159.64	107.5	111.16
NLDFT 기공 부피 (cm³/g)	0.7971	0.7348	0.7265

Table 1. Pore Structure Variation Depending on Metal Catalyst Ratio

4. 결론

본 연구에서는 물리적 활성화 및 금속 촉매 첨착을 통해 ACF를 제조하고, 그결과 비표면적, 유해가스 흡착 성능, 향균 ·항바이러스 효과의 개선을 확인하였음.

연구 결과, 고기능성 공기 정화용 필터 소재로서 ACF의 적용 가능성이 높음을 확인하였으며, 추후 촉매 조성의 초적화 및 안정성에 대한 추가 연구가 필요함

전기자동차 전장부품용 엔프라 소재 기반 복합재료의 기계적 및 열적 특성 연구 Study on the mechanical and thermal properties of composite materials based on enpla for electric vehicle electrical components

임재욱 ¹, 최상윤 ¹, 박재형 ², 이지은 ², <u>박현주</u> ^{2,3†}, 이진홍 ³ ^{} J.W. Lim¹, S.Y. Choi¹, J.H.Park², J.E.Lee², <u>H.J.Park^{2,3}</u>, J.H.Lee³

¹럭키엔프라, ²한국소재융합연구원, ³부산대학교 응용화학공학부 ⁺E-mail: hjpark@kimco.re.kr

Keywords: PA66, Carbon additives, Enpla, Composites

1. 서론

최근

전기/수소차 등 미래 모빌리티용 탄소복합재 시장의 고성장성에 따른 미래차 전환 촉진을 위한 소재부품 개발 및 협력 생태계 조성이 요구되고 있다. 모빌리티 부품의 고도화 및 집적화로 방열, 경량화 요구 증대와 전장 부품 증가에 의한 다기능 복합소재의 개발 필요성이 증가되고 있는 추세이다.

탄소계 복합재료는 전자파 차폐 및 방열, 난연성을 동시에 요구하며, 특히 다양한 전장부품과 함께 사용하는 경우 복합소재의 열관리 및 전자파 차단 기술이 필수적이다. 복합소재의 열관리 및 전자파 차폐를 위한 기술로 폴리머에 방열 및 난연 특성이 우수한 유/무기 필러를 첨가하거나, 차폐 특성을 향상시키기 위해 탄소계 첨가제를 사용하는 연구가 진행되어 오고 있다. 본 연구에서는 전자파 차폐용 방열 복합소재 제조를 위해 카본계 첨가제를 종류 및 함량에 따라 사용하였으며, 기계적, 전자파 차폐 및 열적 특성을 평가하였다.

2. 엔프라 소재 기반 복합소재의 기계적 특성

2.1 탄소계 첨가제를 포함하는 복합소재 제조 공정

슈퍼 엔프라용 압출기를 사용하여 탄소계 첨가제를 포함하는 복합소재를 제조하였으며 분산성 및 부품 신뢰성 확보를 위해 사이드 피더를 도입하였다.



Figure 1 Preparation and process of composite materials

2.2 PA66를 엔프라 소재로 사용한 복합소재의 탄소계 첨가제 종류 및 함량에 따른 특성

Table 1 Mechanical properties of polycarbonate

No.	P-1	P-2	P-3
PA66	70	72	75
r-CF	30	8	10
PA6-CNT	-	-	10
СВ	-	15	5
SIC	-	5	-
IR-1010	0.2	0.2	0.2
Specific gravity	1.322	1.304	1.190
Tensile strength (MPa)	1536	674	591
HDT (18.6kg)	250	260	265
MI	12.8	16.5	14.6

3. 결론

본연구에서는 엔프라소재를 PA66로 사용하여 카본계 복합소재를 제조하였으며, 탄소계 첨가제로 r-CF, graphite 등을 사용하여 엔프라 기반 복합소재를 제조하였다. 탄소계 첨가제의 종류 및 조성에 따라 변화되는 특성을 확인하기 위하여 비중, 인장강도, 열변형온도 및 MI지수 등을 확인하였다. 첨가제 함량이 증가함에 따라 기계적 강도는 감소하였으나, 열변형 온도는 증가하였다. Melt index는 r-CF 함량이 증가하면 감소하였으며, 실제 압출/사출 가공성 및 성형성을 고려하여 최적 배합을 확보하고자 하였다. PA66에 r-CF를 30% 사용한 수지의 전자파 차폐 특성은 10~20 dB 수준을 나타내었다.

감사의글

본 연구는 탄소산업진흥원의 탄소융복합소재부품 실증 사업 (과제번호: RS-2024-00436616)의 지원을 받아 수행 되었습니다. 포

리카딩 아라미드 복합방적사를 이용한 UAM 시트용 원단 개발 및 적용가능성에 대한 연구 A study on the development and applicability of fabric for UAM sheets using Ricarding aramid composite spun yarn

*강건웅¹, 권오훈, 강진균, 이건희, 박용완³⁺ *G.W. Kang¹, O.H. Kwon, J.K.Kang, G.H.Lee, Y.W. Park³⁺

> ¹ ECO융합섬유연구원 ⁺E-mail: max6567@kictex.re.kr

Keywords: Recarding Aramid, UAM, Sheet, Composite yarn, Interior materials.

1. 서론

전 세계 대도시의 극심한 교통 문제를 해결할 대안으로 UAM(Urban Air Mobility)이 제안되었으며, 정부 및 전 세계적으로 환경문제에 대한 사회적 관심이 더욱 높아지고 그에 대한 환경법규들이 강화되면서 새로운 친환경 소재의 개발 및 적용에 대한 요구가 높아지고 있음. 이에따라, 리카딩 아라미드 25%이상 혼용된 복합방적사를 이용한 UAM 시트용 원단 개발 및 적용가능성에 대한 연구를 진행함

2. 실험

2.1 소재

- FR RAYON/REC-ARA/M-ARA/ANTI 30s
- FR RAYON/REC-ARA/LINEN/ANTI 30s

2.2 실험 및 분석장비

- 실험장비: 시편직기, 제직기
- 분석장비:만능인장강도시험기, 공기투과도, 실물영상현미경, 신뢰성평가 시스템

3. 결과

Table 1. Tensile strength and elongation analysis of development knitted fabrics.

112		2202	8연미경	토기도
	~~ ~	X40	X100	공기포
Kait	FR RAYON/REC-ARA/M-ARA/ANTI			134.9㎝³/s
Khit	FR RAYON/REC-ARA/LINEN/ANTI			145.9cm³/s

Table 2. Tensile strength and elongation analysis of development weave fabrics.

	N		통기도	
		X40	X100	
	2/2 Twill FR RAYON/REC-ARA/M-ARA/ANTI			52.02cm²/s
Twill	3/1 Twill FR RAYON/REC-ARA/MARA/ANTI			63.9cm³/s
Weav	2/2 Twil FR RAYON/REC-ARA/UNEN/ANTI			49.84cm³/s
	3/1 Twill FR RAYON/REC-ARA/UNEN/ANTI			51.22cm³/s

Table 3. Dyeing conditions for developed weave fabrics.

구분	내용		
Color	Dark Gray		
Dye type	Reactive dye		
Dye process	Dye Temp 60°C, Liquor ratio 1:10		
Dye combination	Yellow 3R 0.96%, RED 3B 0.84%, NAVYBLUE SB 1.3%		
Dyeing agent	Na2SO4/Na2CO2 = 60/20 g/l		

<좌: FR RAYON/REC-ARA/LINEN/ANTI, 우: FR RAYON/REC-ARA/M-ARA/ANTI>

Table 4. Analysis of specimen properties after accelerated aging.



4. 결론 및 향후과제

리카딩 아라미드가 25% 이상 혼용된 섬도 30's로 개발한 복합방적사를 활용하여 UAM 시트용 편직, 제직, 염색 최적조건을 확립하였으며, 신뢰성평가 시스템을 통한 촉진 내후성 평가 결과, 원단의 일광 노화 방지를 위해 향후 염색시 일광 견뢰 증진제를 활용한 염색과 기계적 물성 향상을 위한 보완연구를 통해 UAM 시트로서의 적용이 가능할 것으로 판단됨

PSA 공정용 첨착활성탄소 제조 및 가스 흡착 성능 연구

A Study on the Production and Gas Adsorption Capability of Impregnation Activated Carbon for Pressure Swing Adsorption(PSA)

*이건희 ¹⁺, 권오훈 ¹, 강진균 ¹, 강건웅 ¹, 박용환 ¹,

*Geon-Hee Lee¹, Oh-Hoon Kwon¹, Jin-Kyun Kang¹, Gun-Woong Kang¹ and Yong-Wan Park¹,

¹ ECO융합섬유연구원

+ E-mail: geonhui@kictex.re.kr

Keywords: Activated carbon, PSA, Carbon, Pitch, Impregnation, Gas adsorption

1. 서론

수소 경제 전환이 가속화되고 있는 가운데 고순도 수소를 생산하기 위한 연구가 지속되고 있으며, 여러 혼합가스에서 수소를 분리하는 PSA(Pressure Swing Adsorption) 방식은에너지 변환 효율이 높아 수소 생산 방식 중에서도 주목받고 있음. PSA 공정용 흡착제로는 활성탄소를 활용한 CMS(Carbon Molecular Sieve)가 주로 사용되고 있으나 현재 CMS는 수입에 의존하고 있으며 국산화 및 제품 개발이 필요한 실정임. 본 연구에서는 PSA 공정에 적합한 기공 구조과 특정 가스에 대해 높은 가스 흡착 성능을 갖는 원료가 피치계인 CMS를 제조하고자 함.

2. 실험

2.1 활성탄소 제조 조건

Table 1. Conditions of Activated Carbon Production

	Temperature(*C)	Time(h)	Atmosphere
Oxidation	340	2	Oxygen
Carbonization	700	1	Nitrogen
Activation	900	2.5	Nitrogen



Fig 1. Activation Process by Rotary Kiln

2.2 첨착 활성탄소 제조 조건

Table 2. Conditions of Impregnate Activate Carbo Production

Activated Carbon(g)	15g
Impregnation Material	CuO, Mn2O3, ZnO, Mn2O3ZnO
Impregnation Ratio	10, 15, 20wt%/ AC(g)
Amount of D.W.	20ml/ AC(g)
Impregnation Time	1hr
Impregnation Temperature	25°C
Device Condition	1. Aspirator Filtering
Drying Condition	2. Drying oven: 24hr, 100°C





Fig 2. Siloxane/H₂S Gas Adsorption Analysis System

2.4 조립 활성탄소 제조



Fig 3. Pelletized Activated Carbon Prodution Sytem

Carbon Production

Hardness

3. 결과

solution

3.1 제조 활성탄소의 기공 특성

물리적 활성화 조건에 따라 제조된 활성탄소의 기공 특성

Table 3. BET results according to activation time & Injection amount of steam(Continuous Process, Oxidation Temp.: 340 °C, Carbonization Temp.: 700°C, Activation Temp.: 900 °C)

Table 3. BET results according to activation time & Injection amount of steam(Continuous Process, Oxidation Temp.: 340 °C, Carbonization Temp.: 700°C Activation Temp.: 900 °C)

Activation Time(h)	1	.5		2.5	
Injection Amount of Steam(cc/min)	1	2	1.5	2	2.5
BET Surface Area(m ² /g)	1145.7	1402.07	1327.6	1617.7	1620.9
Total Pore Volume(cm ³ /g)	0.4775	0.6141	0.5954	0.8216	0.8638
Micro-pore Volume(cm ³ /g)	0.4620	0.5871	0.5794	0.7976	0.8298
Meso-Pore Volume(cm ² /g)	0.0697	0.1433	0.2972	0.6628	0.7238
Meso-porosity(%)	14.6	23.3	49.9	80.7	83.8
Average Pore Size(Å)	16.7	17.5	17.9	20.3	21.3

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

3.2 제조 첨착활성탄소의 기공 특성

Table 4. BET results of Impregnated AC(Amount of AC: 10g, Impregnation Ration: 10wt%/AC(g))

Impregnation Material	Cu0	Mn2O3	Mn203/Zn0
Impregnation Ratio(wt%/AC(g))	10	10	10
BET Surface Area(m²/g)	1067.2	1269.7	1217.9
Total Pore Volume(cm³/g)	0.5347	0.6492	0.6230
Micro-pore Volume(cm ³ /g)	0.5075	0.5989	0.5837
Meso-Pore Volume(cm ³ /g)	0.3471	0.4741	0.4593
Meso-porosity(%)	64.9	73.0	73.7
Average Pore Size(Å)	20.0	20.5	20.5

3.3 제조 첨착활성탄소의 가스 흡착 성능 평가

3가지 금속 산화물을 단일/복합 첨착한 활성탄소의 가스 흡착 성능 평가한 결과를 제시함

Table 5. Gas Adsorption Performance Evaluation Results of Impregnated Activated Carbon

Impregnation Material	Impregnation Ratio(wt%/AC(g))	H2S Concentration after 30 minutes(ppm)
-	0	43.58
	10	43.20
CuO	15	43.35
	20	42.50
	10	39.18
Mn2O2	15	38.43
	20	38.17
	10	41.76
ZnO	15	39.88
	20	39.62
Mn203/ZnO	10/10	16.99

3.4 첨착활성탄소 특성 분석

SEM Image, EDAX

4. 결론 및 향후과제

연속식 공정을 통해 활성탄소를 제조했을 때 공정 시간 대비 높은 비표면적을 갖는 활성탄소를 제조할 수 있었으며, 특히 물리적 활성화 시 스팀 분사량과 활성화 시간 조건을 조절하여 PSA 공정에 적합한 CMS를 만들 수 있었음. 또한 황화수소 및 실록산 가스로 가스 흡착 실험 결과 다른 종류의 금속을 첨착한 첨착활성탄소의 가스 흡착 성능이 향상되었음. 현재 복합처리된 첨착활성탄소를 조립 활성탄소로 제조하는 연구를 진행하고 있으며, 현재까지 얻은 결과를 보여주고자 함

참고문헌

[1] H Cui et al. Catalysis Today. 4:274-279, 2009.

후기

진행하고 있는 연구의 진척도와 보완점 분석 및 추가적인 실험 로드맵을 작성할 수 있었음

Cycloaddition Functionalization of Carbon Nanotube Fibers for Improved Electrical Conductivity

*Seungho Ha¹, Kyung Tae Park¹, Kyunbae Lee¹, Yeonsu Jung¹, Taehoon Kim¹⁺ ¹ Composite Materials Research Centers, Korea Institute of Materials Science ⁺E-mail: tkim67@kims.re.kr

Keywords : CNT fiber, functionalization, cycloaddition

1. Introduction

Carbon nanotubes (CNTs) are among the most promising nanomaterials due to their exceptional mechanical, electrical, and thermal properties, which have driven extensive research in fields such as electronics, energy storage, and composite materials.

Handling CNTs individually can be challenging, whereas carbon nanotube fibers (CNTFs) can be mass-produced and scaled for industrial applications. However, CNTFs exhibit a limitation in their reduced electrical conductivity compared to individual CNTs. To address this issue, efficient functionalization methods are required. The doping method, which involves the physical adsorption of acid or metal ions onto CNTFs, is prone to desorption under harsh external conditions such as high temperatures, solvent changes, or electrochemical reactions.

This study explores the cycloaddition reaction as a powerful method for functionalizing CNTs, enhancing their chemical reactivity while minimizing structural damage. The cycloaddition of CNTFs minimizes defect sites, thereby reducing structural degradation compared to oxidation-based functionalization methods such as strong acid treatments, while facilitating surface functionalization. The enhancement of electrical conductivity and structural stability of CNTFs through cycloaddition contributes to their development as key materials for next-generation applications, including energy storage, EMI shielding, and sensors.

2. Experimental

CNTFs were functionalized via a cycloaddition reaction using a dry method through dipping. Maleic anhydride and other reagents were dissolved in 70 mL of dimethyl sulfoxide (DMSO) at a concentration of 80 mM. The CNTF was then dipped into the solution for 10 minutes, followed by annealing at 180°C for 24 hours. Subsequently, the CNTF was washed twice with dimethylformamide (DMF) and acetone and dried at room temperature overnight.

3. Results and Discussion

Fig. 1a illustrates the cycloaddition reaction mechanism of 4-aminophenyl sulfone (APS) and other reagents with CNTFs. The electrical conductivity of CNTFs functionalized with 4-aminophenyl sulfone, sulfanilic acid, 4-nitroaniline, and N,N-dimethyl-p-phenylenediamine (designated as APS-CNTF, SNA-CNTF, NA-CNTF, and DPPD-CNTF, respectively) increased after annealing at 180°C, in contrast to pristine CNTFs.

Notably, APS-CNTF and SNA-CNTF exhibited the highest conductivity enhancements, with increase of 24.7% and 24.3%, respectively. This improvement is attributed to the presence of the sulfonyl group, which differentiates them from other ligands. The strong S=O double bonds and high thermal decomposition temperature of the sulfonyl group, along with the imide group, contribute to enhanced thermal stability at high temperatures. These findings demonstrate the doping efficiency and thermal stability of CNTFs functionalized with a sulfonyl-based structure.



Fig. 1. a) Schematic representation of the cycloaddition reaction of APS-CNTF, PPD-CNTF, and NBAE-CNTF. b) Electrical conductivity enhancement rate of APS-CNTF and other functionalized CNTFs via cycloaddition.

4. Conclusions

In this study, we proposed the cycloaddition reaction of CNTFs with various functional groups. Due to the high thermal stability provided by the sulfonyl-based structure, APS-CNTF and SNA-CNTF exhibited the most significant improvement in electrical conductivity. This study provides a foundation for functionalization research by comparing the electrical conductivity of CNTFs modified through cycloaddition reactions with different reagents.

References

[1] Soni et al., Mater. Today Commun. 25 (2020): 101546.

[2] CHOI et al., Funct. Compos. Struct, 2024, 6.3: 035011.

포

화염차단용 연속성형 복합재료 특성연구

Study on Characteristics of Continuous Composite for Flame-retardant *강지만¹, 김만성¹, 김현지¹ * J.M. Kang¹, M.S. Kim¹, H.J. Kim¹,

¹ 한국섬유개발연구원 ⁺E-mail: jmkang@textile.or.kr

Keywords: Composite, thermal runway, CCM, battery

1. 서론

일반적으로 전기자동차의 구동 에너지원으로 사용되고 있는 리튬배터리는 기계적 충격, 전기적 오작동 또는 외부 화재에 의해서 화재가 발생하게 된다. 이는 리튬이온배터리를 구성하는 재료의 특성상 다량의 배터리 셀이 집합된 형태에서 최초 발화된 배터리와 인접한 다른 배터리 셀이 전도열 복사열에 또는 의해 열적 손상을 받아 열폭주(thermal runway)로 이어지게 된다.



Fig. 1. Electric vehicle battery module

본 연구에서는 전기자동차 리튬배터리를 구성하는 단위 모듈 하우징의 기존 금속소재를 대체하기 위해 무기계열 섬유소재를 사용한 복합재료를 적용하고자 난연수지 필름을 적용한 복합재료의 성형성 파악 및 물성을 살펴보았다.

2. 본론

2.1 재료

수지는 난연 Polypropylene Master Batch와 Virgin Polypropylene을 혼합하여 사용하였다.

직물은 Glass Weave(Plain) 600tex, 1,200tex, 2,400tex를 사용하였다.

2.2 테스트

수지 필름 테스트로 열가소성 수지 Sheet 성형기를 활용하여 난연재를 첨가한 Polypropylene Master Batch와 Virgin chip을 1:1로 투입하여 성형하였다.

- Case 1 : 난연 PP Master Batch Chip

- Case 2 : 난연 PP Chip + PP Chip (M.I. 11) - Case 3 : 난연 PP Chip + PP Chip (M.I. 0.5)

CCM(Continuous Compression Molding) 공정을 이용하여 난연 PP 수지 필름 종류 및 적층 두께에 따른 화염차단 시트(GFRP) 성형성을 평가하였다.

Table 1 CCM Temperature Conditions

Heating	Main-	Cooling	Cooling
Plate	heating	Zone	Zone
Temp.	Zone	#1	#2
	280°C	80 °C	40 °C

유리섬유 직물 베이스 직물을 활용하여 수지 필름과 직물의 적층 설계 레이어를 구성하고 CCM 성형장비를 통한 복합재료의 성형성을 평가하였으며, 이렇게 성형된 시료들의 두께 및 물성들을 살펴보기 위해 시료에 Strain Gauge를 부착, Chamber 형태의 만능인장시험기를 활용하여 물성시험을 실시하였다.

3. 결과

난연물질이 적용된 난연 Polypropylene chip의 Sheet 성형 시, 수지의 점도가 낮고 유동성이 높아 필름 성형성은 떨어지며 일정 점도 상승 후, Sheet 성형이 양호하였으나, 난연재의 작용으로 Sheet 상의 천공이 발생하는 현상을 보였다. 유리섬유 직물의 수지 필름 적층 성형성에서는 같은 적층 수에서 M.I. 값이 낮은 필름 적용 시, 전체 직물의 두께는 증가하였으며, 같은 조건에서 태섬도 직물 대비 저점도 직물에서 성형성이 좋았으며, 인장시험 시, 60℃의 저온 조건에서 보다 90℃, 120℃의 고온에서의 인장강도 및 탄성계수는 저하하였다.

후기

본 연구는 우수기술연구센터(ATC+, 과제번호 20017974)의 재원으로 수행하였습니다.

Scalable Roll-to-Roll Fabrication of Lightweight and High-Durability

Copper/Carbon Fiber Wire for Electromagnetic Shielding

* Gi-Hwan Kang¹, Joo-Young Ahn² and Won-Seok Kim³⁺

R&BD Group 1, Industrialization Division, Korea Carbon Industry Promotion Agency, Jeollabuk-do 54852 *E-mail: gyan@kcarbon.or.kr, kimws1210@kcarbon.or.kr

Keywords : Carbon fiber, Electrical conductivity, Thermal conductivity, Electromagnetic shielding effectiveness

1. Introduction

The high-conductivity material-coated carbon fibers face significant challenges, including production costs and consistency in performance. The application of such coatings significantly increases production costs and involves complex manufacturing processes [1-5]. Furthermore, maintaining consistent thickness and uniformity of the high-conductivity material coating is challenging, leading to variability in electrical properties and reduced product reliability [6, 7]. These challenges, coupled with the high production costs, hinder the industrial application of these materials.

Cables used in industries such as aviation, mobility, and robotics demand highly reliable electromagnetic shielding materials capable of effectively blocking electromagnetic waves that interfere with normal operations [8-10]. Typically, these cables require at least 40 dB of electromagnetic shielding effectiveness in the low-frequency range of 10 kHz to 1 GHz. At frequencies below 1 GHz, electromagnetic shielding through reflection is crucial, making metals with reflective properties a straightforward choice. However, metals pose their own challenges: their weight undermines efforts to achieve carbon neutrality and economic feasibility. Moreover, metals like copper exhibit low fatigue resistance under repeated bending, limiting the durability of cables in such applications.

In this study, we present a scalable roll-to-roll production method for durable, continuous slitting-Cu/carbon fiber wire (S-C/CW) designed for electromagnetic shielding applications.

2. Results and Discussion

All samples showed higher SEA than SER. In other words, 70.48% (5.3dB) of the waves in carbon fibers, 99.33% (21.8dB) in Cu film, 99.32% (21.7dB) in C/C film were reflected before being absorbed. This implies a reflection-dominant shielding mechanism in the Cu film and C/C film. The mechanical properties of C/C film are essential for practical applications. As shown in Figure 5(c), the tensile strength of the carbon fiber reached 2.53 GPa, the tensile strength of the Cu film reached 0.17 GPa, and the tensile strength of the C/C film reached 1.72 GPa. These results show that C/C films have 3.9 times higher electromagnetic shielding effect than carbon fibers and 10 times higher tensile strength than Cu films, which can complement the

shortcomings of the two materials and combine their advantages.





4. Conclusions, Significance and/or Future Works

In this study, slitting-Cu/carbon fiber wire (S-C/CW) was fabricated by spreading carbon fibers from roll to roll. The S-C/CW exhibited a tensile strength of 1.72 GPa, which is close to that of carbon fibers. In addition, it exhibited an electromagnetic shielding effect of 63 dB, which is close to that of copper films. These results demonstrate that the C/C film has an electromagnetic shielding effect that is 3.9 times higher than that of carbon fibers and 10 times higher than that of Cu films, which can complement the shortcomings of the two materials and combine the advantages. These carbon fiber/metal composites have been proposed as promising shielding materials for foldable and wearable electronic devices, aircraft, and spacecraft due to their ease of production, high flexibility, excellent conductivity, and superior EMI shielding performance.

References

[1] S. Bard, F. Schonl, Copper and Nickel Coating of Carbon Fiber for Thermally and Electrically Conductive Fiber Reinforced Composites, Polymers 2019, 11(5), 823; https://doi.org/10.3390/polym11050823

[2] W. L. Song, C. Gong, H. Li, X. D. Cheng, M. Chen, X. Yuan, H. Chen, Y. Yang and D. Fang, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2017, 9, 36119-36129

[3] Y. N. Wang, X. D. Cheng, W. L. Song, C. J. Ma, X. M. Bian and M. J. Chen, Chem. Eng. J., 2018, 344, 342-352

[4] D. X. Yan, H. Pang, B. Li, R. Vajtai, L. Xu, P.-G. Ren, J.-H. Wang and Z.-M. Li, Adv. Funct. Mater., 2015, 25, 559-566.

[5] B. Zhao, C. X. Zhao, R. S. Li, S. M. Hamidinejad and C. B. Park, ACS Appl. Mater. Interfaces, 2017, 9, 20873-20884.

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

[6] S. Jain et al., "The effect of coating thickness on the electrical performance of novel isotropic conductive adhesives prepared using metallised polymer micro-spheres," 2013 IEEE 63rd Electronic Components and Technology Conference, Las Vegas, NV, USA, 2013, pp. 796-802, doi: 10.1109/ECTC.2013.6575664.
[7] M. Spoerk, C. Savandaiah, Optimization of mechanical properties of glass-spheres-filled polypropylene composites for extrusion-based additive manufacturing, polymer composites 40 (2019) 638-651 https://doi.org/10.1002/pc.24701

[8] D. Tan, C. Jiang, Development and current situation of flexible and transparent EM shielding material, Journal of Materials Science: Materials in Electronics 32 (2021) 25603-25630 https://doi.org/10.1007/s10854-021-05409-4

[9] S. Y. Kim, T. H. Kim, Analysis of Indirect Lightning Impact on Aircraft Shielded Cable Structure in accordance with RTCA DO-160G Sec. 22, International Journal of Aerospace System Engineering 17 (2023) 35-45

https://dx.doi.org/10.20910/jase.2023.17.6.35

[10] JY. Yoon, HY. Hwang, Requirement Analysis of Efficiency, Reliability, Safety, Noise, Emission, Performance and Certification Necessary for the Application of Urban Air Mobility (UAM), Journal of Advanced navigation technology 24 (2020) 329-342

https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.5.329

PBO 고분자를 이용한 습식방사 기반 다중벽 탄소나노튜브 섬유(MWCNTFs) 제조 Fabrication of wet spinning-based multi-walled carbon nanotube fibers using PBO polymers

*백수현¹, 구본철¹, 김서균¹⁺ * S.H. Baek¹, B.C. Ku¹, S.G. Kim¹⁺

> ¹ 한국과학기술연구원 ⁺E-mail: <u>seogyun.kim@kist.re.kr</u>

Keywords: MWCNT, Poly (p-phenylene benzobisoxazole), CNT Fibers, Wet Spinning

1. 서론

단일벽 탄소나노튜브(SWCNT)는 강산(chlorosulfonic acid, CSA)에서 액정 특성을 나타내며 습식 방사를 통 한 섬유화가 가능하다 [1,2,3]. 그러나 다중벽 탄소나노 튜브(MWCNT)는 낮은 결정성 및 다층구조로 인해 분 산 및 정렬이 어렵고 액정 특성을 나타내지 않으며, 약 한 기계적 특성으로 연속 섬유화가 되기 어렵다 [4,5]. MWCNT의 섬유화를 위해 본 연구에서는 폴리(p-페닐 렌 벤조비스옥사졸) (PBO) 고분자를 복합화하여 MWCNT 기반 섬유제조가 가능하도록 하였다.

2. 실험방법

MWCNT 분말과 PBO 고분자는 각각 5:5, 8:2, 9:1, 9.5:1의 wt% 비율로 혼합된 후 CSA 용매에 분산시켜 도프 용액을 준비하였다. 습식 방사 동안에 응고 용매 로는 아세톤을 이용하였다. 습식 방사에 의해 섬유화 된 시료는 카본 시트에 샘플링하여 열처리하기 이전과 이후의 기계적 강도의 값을 비교하였다. 열처리는 1400 ℃와 2700 ℃ 불활성 분위기에서 각각 진행하여 탄화된 시료를 준비하였다. 시료명은 도프 용액의 혼 합 조성에 의해 *aMbP* (*a* wt% MWCNT + *b* wt% PBO) 로 명명되었다.

3. 결과 및 고찰

습식 방사에 의한 MWCNT의 섬유화에 대한 이미지 를 Fig. 1에 나타낸다. PBO의 첨가 없이 MWCNT만으 로 준비한 도프 용액은 습식 방사하는 동안 섬유화가 진행되지 않고 계속 끊어지는 것을 확인하였다 (Fig. 1(a)). 반면, MWCNT에 PBO를 첨가하게 되면 끊어지 지 않고 연속적인 방사가 가능하였으며 섬유화가 진행 된 것을 확인하였다 (Fig. 1(b)). 이는 많은 벤젠 고리를 포함하고 있는 rigid 한 PBO가 MWCNT와 상호작용을 통해 bridge 역할을 함으로서 정렬을 촉진하여 습식 방 사에 의한 MWCNT의 섬유화가 가능한 것으로 판단된 다. 또한, 단단하고 막대 모양의 PBO 고분자 사슬은 분 자 방향을 전달하여 섬유 축을 따라 MWCNT를 정렬 하는 데 도움이 될 수 있다. 이러한 정렬은 최종 섬유에 서 이방 특성을 달성하여 기계적 강도, 열전도도 그리 고 전기전도도를 향상시킬 수 있다.



Fig. 1. Fiberization of MWCNT by wet spinning: (a) 100M0P and (b) 80M20P.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서의 PBO 고분자를 이용한 MWCNT에 대 한 습식 방사의 성공적인 섬유화는 고성능 섬유 응용 분야에 대한 기초연구가 될 것으로 전망된다. 많은 벤 젠 고리를 포함하는 PBO 고분자는 MWCNT의 분산 및 정렬을 개선하는데 중요한 역할을 하며, 습식 방사를 통한 섬유화가 가능하다는 것을 시사한다. 이를 통해 MWCNT 분말과 PBO 고분자의 비율에 따른 섬유화된 시료의 기계적 강도 값을 측정할 수 있었다. 이에 따른 복합재, 전자 장치 및 구조적 보강재에서의 잠재적인 용도가 전망된다. 향후 연구로는 고분자-CNT의 상호 작용 최적화, 액정 유도 등 산업 응용 분야를 위한 공정 에 대해 연구가 필요하다.

참고문헌

- [1] X Jiang et al. Carbon. 169:17-24, 2020.
- [2] SG Kim et al. Adv Sci. 9:2203008, 2022.
- [3] SG Kim et al. Carbon. 196:59-69, 2022.
- [4] SMZ Mehdi et al. Ceram Int. 49:4668-4676, 2023.
- [5] J Im et al. Carbon. 216:118532, 2024.

- 402 -

부유선별 무연탄을 이용한 열플라즈마 응용 탄소소재 개발 Development of thermal plasma application carbon material using flotation separated anthracite coal

*경규홍¹, 연정미², 신효준¹, 엄민주¹, 이용현¹⁺ *K.H. Kyung¹, J.M. Yeon², H.J. Shin¹, M.J. Eum¹, Y.h. Lee¹⁺

¹ 재단법인 영월산업진흥원, ² 재단법인 철원플라즈마기술연구원 ⁺E-mail: yhlee@yipa.or.kr

Keywords: Flotation separation, Thermal plasma, carbon, domestic, anthracite coal, Graphitization.

1. 서론

미래 첨단 산업의 혁신을 위해서는 나노기술의 적용이 필요하며, 무연탄의 경우 이 첨단 산업에 적용하기 위해 인공 흑연, 그래핀 등 고부가가치 소재로의 전환이 요구되고 있다. 하지만 기술과 인프라가 부족하고 발전하기 어렵기 때문에 현실적이지 않다. 경제성 부족을 구실로 버려지고 있는 강원도 무연탄 산업을 활성화하기 위해서는 기존 전통산업에서 사용되던 원료로서의 활용과 더불어 고부가가치 소재로의 전환이 시급히 필요하다. 본 연구는 자원 내재화를 위해 열 플라즈마 방법을 이용한 무연탄 탄소 소재 전환 연구를 수행하였다.

2. 실험방법

광산에서 채취한 2등급 국내 무연탄은 효과적인 탄소소재화를 위하여 입도선별 후 회분 함량이 높기 때문에 부유선별과 내부의 수분을 제거하기 위한 여과와 건조 공정을 통해 정제하였다. 이 정제 무연탄을 오수나 폐수가 없는 친환경 공정인 건식공정에서 10,000K 이상의 초고온 플라즈마 처리[1]를 통하여 무연탄의 흑연화를 진행하였다. 기존의 흑연화 공정에 비하여 단기간에 대량의 흑연화가 가능하며, 공정 실패 시 손실이 적게 통해 발생한다. 실험을 제조한 흑연은 X선 회절분석기, Raman분석기와 X선 현광분석기를 사용하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

무연탄의 효과적인 부유선별과 흑연화를 위하여 150mesh이하 입도선별을 실시한 결과 입도선별 전·후 누적백분율이 90%에서의 D90이 648.063um에서 128.879um로 입도선별 되었다. 부유선별을 통해 회분함량이 35.26%에서 6.93%로 감소하였다(fig.1). 플라즈마 처리 회수가 증가할수록 불순물과 회분 함량이 감소하여 회분 약 30%의 국내 무연탄 원료를 건식 플라즈마 공법을 이용하여 제조한 흑연은 회분 5% 수준으로 감소하였으며 주된 불순물인 Fe, Si의 감소를 확인하였다(fig. 2).



Fig. 1. Changes in ash content according to flotation separation step.



Fig. 2. Oxide content of anthracite coal raw and refined anthracite coal(XRF).

4. 결론 및 향후과제

수입에 의존하고 있는 탄소소재를 국산 무연탄의 정제와 흑연화를 통한 자원 내재화하는 것에 큰 의의가 있다. 국내산 무연탄은 흑연 결정성(27.3%)이 외국산 무연탄에 비해 높아 흑연화 공정을 통한 탄소 소재 제조가 용이하며 플라즈마 방식을 이용한 건식 공정에서의 흑연화는 단기 열처리를 통해 탄소 소재를 생산할 수 있다.

향후 국내 무연탄의 흑연화를 위한 공정 조건 및 장비 개발을 위한 연구가 더욱 필요하다.

참고문헌

[1] SJ Lee et al. Korea J. Mater. Res. 33:No. 6, 2023.

Inspiring Photocatalytic Cr(VI) Reduction in Ti₃C₂T_x MXene-modified ZIF-67/gC₃N₄ via S-Scheme and Ohmic Junctions

Lekha Paramanik¹, Lagnamayee Mohapatra², Seung Hwa Yoo ^{1,2+}

¹Department of Quantum System Engineering, Jeonbuk National University, Republic of Korea, ²JIANT-IT Human Resource Development Center, Division of Electronics and Information Engineering, Graduate School, Jeonbuk National University, Republic of Korea

⁺E-mail: <u>seunghwayoo@jbnu.ac.kr</u>

Keywords : Photocatalyst, S-Scheme, Ohmic junction, Cr (VI) reduction

1. Introduction

Heterojunction construction with diverse band structures suppress electron-hole recombination rate and promotes charge carrier separation[1,2].The present study introduces a combination of ZIF-67, g-C₃N₄, and Ti₃C₂T_x MXene. This structure features an S-scheme junction between ZIF-67 and g-C₃N₄, alongside an Ohmic junction with MXene. The resulting dual internal electric field is significantly enhancing photocatalytic hexavalent Cr (VI) reduction due to strong redox capabilities and high electron transfer efficiency..

2. Experimental Section

2.1 Fabrication of MXene-modified ZIF-67/gC₃N₄

 $MX ene-modified \quad ZIF-67/gC_3N_4 \quad photocatalysts \quad were \\ synthesized \ by \ simple \ coprecipitation \ method.$



Fig. 1. Schematic diagram of $Ti_3C_2T_x$ MXene modified ZIF-67 (Co) /g-C₃N₄ heterojunction synthesis

2.2 Characterization of Materials

XRD was conducted by Bruker D8 ADVANCE diffractometer. FETEM was analyzed by JEM-2100F HR, JEOL Ltd., Japan; installed at the Center for University-wide Research Facilities (CURF) at Jeonbuk National University.

2.3 Evaluation of Photocatalytic Activity

The photocatalytic Cr(VI) reduction was carried out in a sealed quartz reactor for 20 ppm of Cr(VI) aqueous solution and exposed to simulated solar light (100 mW·cm⁻²). The Cr(VI) concentration was quantified by using 1,5-diphenylcarbazide (DPC) method using UV–Vis spectrophotometer.

3. Results and Discussion

The XRD analysis confirmed the successful synthesis of the ZIF-67/g-C₃N₄ (ZCN) composite with characteristic peaks of g-C₃N₄ (13.1°, 27.4°) and ZIF-67 (7.3°-29.5°) (Fig. 2(a)). The parent ZIF-67 displayed a regular dodecahedron structure while g-C₃N₄, and MXene were well wrapped over ZIF-67, Fig. 2(b). UV-vis DRS spectroscopy revealed that ZCNM shows a red shift in absorption edge, enhancing light-harvesting capabilities, crucial for photocatalytic applications, Fig. 2(c). The decrease of charge recombination rate was indicated by lower PL intensity, Fig. 2(d). Fig. 2(e, f) showed that the highest photocatalytic Cr (VI) reduction was achieved by ZCNM-5 with long term photostability for four consecutive cycles.



Fig. 2. (a) XRD, (b) FETEM-EDAX, (c)UV-vis DRS, (d) PL, (e) Cr (VI) reduction of all prepared catalysts and (f) stability test of ZCNM-5

4. Conclusions

The Mxene-modified ZIF- $67(Co)/g-C_3N_4$ photocatalyst presents an enhanced charge separation through S-scheme and Ohmic dynamics.

References

- [1] Yan Li et al. New J. Chem. 45:6611-6617, 2021.
- [2] Xiaolie Lui et al. Int. J. Hydrog. Energy 47:18738-18737, 2022.

Acknowledgment

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) (NRF-2022R111A3064533, RS-2023-00221529, and 2009-0082580) and project BK21 FOUR.

CFRP-CP 내부 콘크리트의 배합에 관한 연구 A Study on the Mix Proportions of Filled Concrete for CFRP-CP

*김정회 ¹⁺, 정원식 ¹ * J.H. Kim ¹⁺, W.S. Jung ¹

¹ 아이에스동서(주) 기술연구소 ⁺E-mail: special9373@isdongseo.co.kr

Keywords: CFRP tube composite concrete pile, Carbon fiber reinforced plastic tube, Concrete pile

1. 서론

CFRP Tube 합성 콘크리트 파일(Carbon Fiber Reinforced Plastic Tube composite Concrete Pile, 이하 CFRP-CP)은 복합재로 만들어진 튜브 내부를 콘크리트로 채우고, 원심성형 공정을 통해 콘크리트를 물리적으로 밀실하게 만들어 고강도화 한 파일을 말한다.

1.1 CFRP-CP 제작방법

Fig 1(a)와 같이 Pull-Winding 제작방법을 통해 CFRP Tube를 제작한다. 여기서 Pull 공정에서 FRP 의 길이방향 적용량을 통해 Tube에 내력을 확보하 는 단계를 둔다. 여기서 제작된 CFRP Tube는 Fig 1(b)와 같이 Tube 내 콘크리트를 수평으로 투입한 후 원심성형 공정을 통해 이종 부재의 합성효과를 통해 내력을 증대시킨 CFRP-CP가 제작된다.



(a) Pull-Winding (b) Concrete horizontal input Fig. 1. CFRP-CP Manufacturing Method

2. 실험

2.1 실험 방법

CFRP-CP의 콘크리트 배합은 2성분계로 분말도가 높은 시멘트와 고로슬래그(GGBF) 또는 페로니켈슬 래그(FNS)를 혼합재로 사용하였다. 본 연구에 사용 된 혼화제는 콘크리트의 굳지 않은 특성을 확보하 기 위해 분산제, 유지제, 첨가제 등의 성분비를 변 수로 실험을 수행하였다. 실험은 원심성형 공시체 제작 방법인 KS F 2454에 공시체 제작 후, 1일, 7 일 압축강도 시험을 실시하고 결과를 평가하였다.

2.2 콘크리트 물성 결과 및 고찰

Fig. 2.와 같이 190mm이상의 고슬럼프이면서 재료분리는 나타나지 않았으며, 내공 내부 형상, 크기와 단부 미충진 등의 미비 현상 없이 양호한 배합을 도출하였다.



Fig. 2. CFRP-CP Specimen

Table 1.과 같이 고슬럼프를 확보하면서 목표강도 78.5 MPa 보다 약 3 MPa 이상 높은 압축강도를 확보하였다.

Table 1. Test Results

No.	Slump	Compressive Strength(MPa)		
110.	(mm)	1 day	7 days	
1	192	77.64	81.83	
2	216	65.31	88.50	

3. 결론

CFRP Tube 속채움 콘크리트의 슬럼프와 압축강도는 정량적 목표를 모두 만족하는 결과를 도출하였다. 추후 CFRP-CP의 현장 적용성 검토 후 최적 배합비를 도출할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2024년 산업통상자원부 K-Carbon 플래그 십기술개발사업 '강관 파일 대체용 200톤급 CFRP 튜 브 합성 콘크리트 파일 개발'(RS-2024-00417713)을 통해 수행된 연구입니다. 연구지원에 감사합니다.

AFP 적층용 탄소 UD Tape 복합재료 Veil 소재 연구 Research on Carbon UD Tape Composite Veil Material for AFP(Automated Fiber Placement)

*김현지¹, 강지만¹, 김정철², 정종민² * H.J Kim¹, J.M Kang¹, J.C Kim², J.M Jung²

> ¹ 한국섬유개발연구원, ² ㈜한국카본 ⁺E-mail: khj9403@textile.or.kr

Keywords: Carbon UD Tape, Veil, AFP

1. 서론

전 세계적으로 탄소 배출로 인한 온난화 문제로 환경규제가 강화되고 있어 무게 절감, 연료 효율 개선을 위해 항공기 구조 부품에 대한 고강도, 고경량 복합재료 적용이 급격히 증가함에 따라 국산 탄소 복합재료의 항공우주분야 진출 확대가 시급한 상황이다.

글로벌 항공 OEM社는 차세대 항공기를 개발할 예정으로 우리나라는 이에 대비하여 선제적인 복합재 개발 및 복합재 부품의 대량생산 체계 구축이 절실히 필요하다.

2. 본론

2.1 항공기용 복합재

항공기 구조에 사용되는 복합재의 대표적인 자동 적층 방법으로는 FW법, ATL법, AFP법을 들 수 있다. AFP법은 프리프레그를 섬유방향으로 테이프 모양을 절단한 슬릿 테이프 프리프레그를 여러 개 나란히 적층하는 기법으로, 3차원 곡면을 가진 부품에서도 적층할 수 있다. 따라서, 항공기 동체 등 비교적 곡면이 많은 부품을 제작하는 데 적합하다.

또한, 프리폼 과정에서 시간을 단축하기 위해서 테이프 프리프레그를 여러 개 나란히 적층할 수 있는 자동 섬유 적층(AFP) 장비를 이용할 수 있는 탄소섬유 일방향 테이프 형태의 중간재를 개발하고, 이 방법을 이용하면 3차원 곡면을 가진 부품에서도 적층이 가능하다.

이러한 장점으로 인해 항공기용 복합재의 경우, 구조의 적용 범위 확대와 수요 증가에 따른 생산 증가에 대응하기 위한 연구와 제조비용 절감을 목적으로 탈오토클레이브 성형법인 RTM에 Dry 소재의 프리폼 제작에 자동 적층 장비를 적용한다.

2.2 Veil 소재

현재, 자동 섬유 적층용으로 사용되고 있는 RTM용 Dry 소재는 미국 H社의 제품이 있으며, AFP, ATL용으로 만들어진 제품으로 열가소성 Veil이 Co-Bonding 되어 있는 구조이다. Veil 소재는 탄소섬유와 동일하게 보강재 역할을 하면서 재료들이 가지는 성능을 향상하는 기능을 하고, 일방향의 테이프가 제조되는 동안 취성이 높은 탄소섬유에 지지대와 같은 역할을 하여 일정한 폭의 생산이 가능하게 하며 적층 시 소재 간의 적층 형상을 유지하도록 하는 역할도 수행한다.

또한, 수지 주입 공정 시 기포를 제거하고 수지 분포가 균일하게 될 수 있도록 유도함과 아울러 에폭시 수지 시스템과 높은 호환성을 제공하여 Toughness 물성을 향상하는 역할을 한다.

3. 실험

구조 및 재질을 확인하기 위하여 FT-IR 분석을 진행하였다.

또한, 탄소 UD Tape을 구성하는 탄소섬유와 Veil 소재의 계면 접착형태를 확인하기 위하여 SEM 이미지 분석을 진행하였다.



Fig. 1.Veil material applied to Carbon UD Tape.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 현재 수입 제품으로 사용되고 있는 항공용 Veil 선진제품을 수급하여 다양한 물성 분석을 진행하였다. 향후 선진 수입 제품의 동등 그 이상 성능을 가진 국산화 연구를 진행할 것이다.

후기

본 연구는 산업통상자원부 소재부품기술개발사업[6차]의 지원을 받아 수행되었습니다(과제번호 RS-2024-00466698). 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

열플라즈미법을 활용한 폐음극재 재생기술 개발

Development of waste cathode material regeneration technology using thermal plasma methode

*연정미¹, 서인규², 김승민², 민경용², 임형섭², 강윤지²,최선용³⁺

*Jeong-Mi Yeon¹, In-Gyu Seo², Seung-Min Kim², Gyeong-Yong Min², Hyung-Sub Lim², Yun-ji Kang², Sun-Yong Choi³⁺

> ^{1,2,3} (재)철원플라즈마산업기술연구원 나노소재사업본부 ⁺E-mail: sychoi@cpri.re.kr

Keywords: waste athode, regenerateion, flotation, thermal plasma



국내 배터리 재활용 기술은 주로 삼원계 양극소재의 유가금속 회수에 주력하고 있으며, 음극소재 기술은 실험실 수준에 머물러 있어, 음극 재활용 기술의 개발과 실증화를 통한 경쟁력 확보 필요함. [전처리 공정 중 유해가스 발생] 기존 사용 후 배터리 전처리 공정은 양극재와 음극재 중심의 기술 개발이 이루어졌으며, 분리막은 열처리를 통해 대부분 환경정화시설을 거친 후 대기로 배출하는 과정을 거쳐 처리함, 이 과정에서 다양한 유해가스가 발생하며 작업자 환경 안전에 대한 심각한 문제를 발생함.

[폐기되는 음극재] 기존 사용 후 배터리 재활용은 건식 제련과 습식 제련을 통해 이루어지는데, 두 제련법 모두 양극재 위주의 재활용 공정이며, 건식 제련에서 음극재는 고정탄소로 남아있거나 산화되어 온실가스를 발생하고 습식 제련에서는 침출 슬러지로 폐기 처분됨.

2. 실험

2.1 부유선별법

공정 불량 및 사용 후 폐배터리로부터 분리막과 전해액을 제거한 블랙파우더를 원료로 하였다. 실험에 활용한 부유선별 장비(철원플라즈마산업기술연구원 보유)는 15L의 3cell 구조를 갖으며, 컨디셔너에 원료와 광액을 비율별로 혼합하여 정제를 수행하였다. 이후 여과기를 활용하여 물과 소재를 분리 후 오븐에서 2일 건조하였다.

2.2 플라즈마 공법

10,000K 이상의 고온 플라즈마를 이용한 친환경 건식법으로 건식 공정에서 고온 열처리를 통해 흑연을 재생화하였다. 고온 플라즈마는 하수나 폐수가 없는 친환경, 건식의 one-step 공정이며, high melting point의 불순물을 추가 제거하는 것이 가능하다. 특히 부유 정제된 음극재를 플라즈마 공법으로 고품질 흑연으로의 개질 개선을 위한 연구를 수행하였다.

Table	1	플리	즈미	·공정	조건	

조건		플라즈마 공정 #1	가 공정 #1 플라즈마 공정 #2 플라즈마 공정 #		
Power Kw		30	45	45	
Total gas Lpm		127	147	147	
H2 Lpm		5	5	5	
Pressure Torr		350	500	500	
비고		-	전처리	플라즈마 공정 #2(원료) 재처리	

3. 결과

3.1 탄소함량 변화

블랙파우더 원료의 무게를 측정 후 850°C의 세라믹 전기로에 투입하여 6시간 방치한 탄화소재의 무게를 측정하는 방식의 중량분석법을 활용하여 블랙파우더(원료) 및 블랙매스(정제)의 탄소함량을 분석하였다. 블랙파우더의 탄소함량은 45.4%로 대부분이 양극재임을 확인할 수 있었으며, 부유선별법으로 1차 정제한 블랙매스의 탄소함량은 84.1%, 2차 정제 블랙매스의 탄소함량은 90.2%로 정제가 매우 잘됨을 확인할 수 있었다.

2.2 재생 후 원소 및 결정 변화

10,000K 이상의 고온 플라즈마를 이용한 블랙매스 열처리를 3가지 조건으로 수행한 결과이다. Fig.1과 같이 플라즈마 공정 후. 원소 함량 변화는 공정 조건에 관계없이 탄소함량이 100%임을 확인하였다. 또한 블랙매스의 결정성 변화를 보면 Power가 증가한 조건으로 2회 처리한 플라즈마 공정 #3의 소재가 매우 높은 결정성을 보이는 것으로 확인하였다. 특히 Raman 분석 결과, R-value(ID/IG) 값이 원료인 블랙파우더 대비 약 80.51% 감소함을 알 수 있었다.



4. 결론 및 향후과제

전기차 등의 산업 변화에 따라 고용량 배터리의 사용이 급격하게 증가하고 있으며, 현재 국내에서 생산하는 배터리에 사용하는 흑연의 80% 이상을 중국에서 수입하고 있는 것이 현실이다. 미국의 인플레이션 감축법(IRA) 시행 등 전 세계의 자국산업 보호 강화 움직임이 확산되고 있다. 중국이 전기차 배터리 음극재의 핵심 소재인 흑연의 수출을 통제하고 있으며, 국내에는 미적용 중이나 수입이 어려운 상황이 도래할 수 있다. 이에, 양극재만 재활용하던 폐배터리의 음극재를 정제하여 재활용하는 것이 필요하다고 판단하였으며, 본 연구원이 기 보유하고 있는 부유선별 장비를 활용하여 음극재(흑연)을 분리하는 연구를 수행하여 90% 정제에 성공하였다. 또한 정제한 블랙매스 음극재를 원료로 친환경 고온 플라즈마를 활용하여 고품질화 하는 연구를 수행하였으며, 이는 환경적, 경제적으로 매우 우수한 공법이라 할 수 있다. 이러한 연구를 바탕으로 블랙매스를 원료로 플라즈마 공법을 적용한 탄소소재 제조 연구를 추후 지속적으로 수행하고자 한다.

POSS를 도입한 PBO 나노복합체 섬유의 기계적 특성

Mechanical properties of poly(p-phenylene benzobisoxazole) nanocomposite fiber with polyhedral oligomeric silsesquioxane

*장용원 ¹⁺, 차태민 ² * Y.W. Jang ¹, T.M. Cha ²

^{1,2} 포항소재산업진흥원 경영지원실 ⁺E-mail: jjangstone@pomia.or.kr

Keywords: PBO, POSS, fiber, polymerization, spinning

1. 서론

극한의 환경속에서도 고성능을 발휘하여 대표적인 슈퍼섬유 Poly(p-phenylene benzobisoxazole)(PBO) 섬유는 높은 기계적 특성과 열적 특성을 갖는 장점에 비해 상대적으로 낮은 압축강도와 UV 안전성으로 인하여 고강도 섬유재료로서 제한을 받고 있다.

PBO의 압축강도와 UV 안정성을 향상시키기 위하여 polyhedral oligomeric silsesquioxane(POSS)라는 물질을 도입하였다. POSS를 PBO 중합할 때 같이 첨가하여 PBO/POSS 나노복합체 섬유를 제조하였고, POSS를 개질시킨 후 PBO와 공중합을 시킨 PBO/m-POSS 공중합체 섬유를 제작하였다. 이렇게 제조된 PBO/POSS 나노복합체 섬유와 PBO/m-POSS 공중합체 섬유의 액정상, 모폴로지, 물리적 특성 측정하여 비교하였다.



Fig. 1. PBO/POSS copolymer fiber

2. 본론

2.1 POSS 개질

본 연구에서 사용된 Trisilanolisobutyl POSS는 PBO 중합 반응에 직접 참여할 수 없기 때문에 4fomylbenzoic acid와의 합성을 통해 POSS를 개질시켰다.



Fig. 2. Modification of trisilanolisobutyl POSS

2.2 PBO 및 PBO/POSS, PBO/m-POSS 나노복합체 중합 PBO/POSS 나노복합체는 PBO 중합의 탈염화단계가 끝난 직후 POSS를 첨가하여 제조하였다. PBO/m-POSS 공중합체의 중합은 trisilanolisobutyl POSS와 4-formylbenzoic acid의 합성을 통하여 얻어진 m-POSS를 사용하였으며 순수한 PBO 중합의 기본 진행과정과 같은 순서로 진행하였다. PBO/m-POSS에서 개질시킨 POSS의 함량을 0.5 mol%, 1.0 mol%, 1.5 mol% 2.0 mol%로 맞춰서 첨가하였다.



Fig. 3. Preparation PBO/m-POSS nanocomposite

3. 결론 및 향후과제

POSS를 도입한 PBO 섬유의 압축강도는 최대 약 54 % 향상되었고 UV에 16시간동안 노출시켰을 때의 인장강도 보존율이 최대 약 16 % 증가하였다. 향후 열처리를 통한 PBO/POSS 나노복합체 섬유, PBO/m-POSS 공중합체 섬유의 물성 변화를 측정하고 분석하려 한다.

Forward osmosis-based ion recovery from spent lithium-ion batteries

using a nanoporous graphene oxide membrane.

*Jeong Pil Kim¹, Hyeonsu Jeong¹, and Dae woo Kim²⁺
 ¹ Carbon Composite Materials Research Center, KIST
 ² Department of Chemical & Biomolecular Engineering, YONSEI University
 *E-mail: audw1105@yonsei.ac.kr

Keywords: lithium-ion battery, metal recovery, nanopore, graphene membrane

1. Introduction

With the growing demand for lithium-ion batteries (LIBs), extracting metal ions from seawater or spent batteries is becoming increasingly important. Various techniques, including electrochemical deposition, chemical precipitation, and solvent extraction, are available for ion extraction. However, these methods often require significant energy, high costs, and additional processes for ion separation. In contrast, separation membranes offer a more cost-effective and energy-efficient alternative by enabling ion separation through controlled d-spacing, pore size, and surface charge.

2. Key Idea

Graphene oxide liquid crystal (GOLC) can be coated on various supports due to its viscoelastic properties, making it a versatile material for membrane applications.[1] By adjusting the hot-pressing time, the pore size and d-spacing of GO membranes can be finely tuned, which enhances their stability in ion solutions. Since GO membranes naturally act as barriers, introducing nanopores is essential to increasing ion permeance while maintaining structural integrity.

3. Results and Discussion



Fig. 1. Characterization of GO membrane depending on hot-press time

As the hot-press time increases, the C–O peak intensity decreases. Simultaneously, the oxygen atomic ratio is reduced, suggesting the partial removal of oxygen functional groups. This process prevents excessive interlayer spacing expansion in water, improving membrane stability and selectivity.



Fig. 2. Ion separation performance of GO membrane

As the hot-press time increased, the interlayer spacing of GO became smaller. Even with pore formation, ion permeation decreased. Selectivity trends varied between single and mixed solutions. Ion selectivity varied depending on ionic strength and concentration, influencing transport behavior. At low ionic strength, divalent ions were more selectively transported due to strong electrostatic interactions with oxygen functional groups. As ionic strength increased, monovalent ions permeated more easily due to weakened electrostatic effect.[2] At high concentrations, ion transport was mainly controlled by size exclusion through interlayer spacing and adsorption within nanopores, enhancing monovalent ion permeation.

4. Conclusions

In this study, the optimized hot-pressing time for the GO membrane was determined to achieve optimal ion permeance and selectivity by precisely tuning its pore size and d-spacing. The results revealed that ion selectivity exhibited different trends in single-ion and mixed-ion solutions, highlighting the influence of pore structure and interlayer spacing on the ion transport. These findings demonstrate the potential of GO membranes for selective ion separation, offering a promising approach for metal ion recovery from waste batteries.

References

- [1] D.W. Kim et al. Carbon, 148, 28-35, 2019
- [2] X. Tong et al. ACS Appl. Mater. Interfaces, 13, 26904-26914, 2021

다양한 형태의 폐 CFRP 스크랩으로부터 탄소섬유를 회수하기 위한 화학반응 실험방법론 적용 사례

Application of Chemical Reaction Experimental Methodology for Carbon Fiber Recovery from Various Types of Waste CFRP Scrap

*김나현 ¹, 하재현 ², 김준영 ³⁺ * N.H. Kim¹, J.H. Ha², J.Y. Kim³⁺

^{1,2,3} ㈜ 카텍에이치 기술연구소 ⁺E-mail: nahyun.kim@catackh.com

Keywords: Waste CFRP Scrap, Solvolysis, rCF, Oxidation reaction

1. 서론

탄소섬유 강화 복합재(Carbon Fiber Reinforced Plastic, CFRP)는 높은 강도와 내구성을 요구하는 다양한 산업용 부품에 널리 사용되고 있다. 그러나 수명이 다한 (End-of-Life, EoL) 혹은 공정 부산물(byproduct)의 폐 CFRP는 구성되어 있는 열경화성 수지와 탄소섬유가 가지는 그 고유의 특성상 처분이 어렵다. 현재는 매립을 통한 처분이나 열분해 방식 (Pyrolysis)으로 탄소섬유를 회수하기는 하지만, 이는 토양 및 대기 환경 오염 문제를 야기한다. 이에 많은 연구자들이 강산 또는 염기성 용매를 활용한 화학적 처리 방법을 적용하여 탄소섬유를 회수하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.^{1,2)}

본 연구에서는 화학 용매의 교차반응을 통하여 다양한 형태의 폐 탄소 복합재 스크랩으로부터 탄소섬유를 회수하는 일련의 실험을 수행하고 그 결과를 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 폐 CFRP 스크랩의 종류 및 실험 대상

본 연구에서는 수소 압력용기, 자동차 내·외장재, 프리프레그(Prepreg), 항공기 부품 등 다양한 분야에서 발생한 폐 CFRP 스크랩을 수거하여 실험에 활용하였다.

2.2 화학 용매를 활용한 탄소섬유 회수 실험 방법

실험은 산화 반응을 기반으로 서로 다른 두 가지 용매를 교차 반응시키는 방식으로 진행하였다. 반응이 완료된 후 회수된 탄소섬유에 대해 물성을 측정하고 표면 상태를 관찰하여 품질을 평가하였다.

3. 결과

3.1 회수된 탄소섬유의 형태 관찰 및 물성측정

서로 다른 산업 분야에서 사용된 폐 CFRP 스크랩의 화학반응 후 회수된 탄소섬유의 이미지를 Fig. 1과 TGA 값을 Table 1에 각각 나타냈다. 샘플 A부터 순차적으로 차 내장재, 항공기 부품, 프리프레그, 자전거 부품에 사용된 스크랩이다. A 샘플은 스티치로 인해 분해가 잘 되지 않은것으로 사료된다. B, C, D 샘플은 레진 잔유율이 0에 근접하거나 0으로 측정되어 완전히 분해되었음을 확인하였다.

Fig. 1. r-CF image recovered after Chemical reaction.

	Table 1. TGA residual content					
	Before (%)	After (%)				
А	55.58	13.61				
В	23.78	0.61				
С	23.63	0				
D	22.91	0				

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 다양한 폐 CFRP 스크랩으로부터 화학적 방법을 이용하여 탄소섬유를 회수하는 사례연구를 진행하였다. 그 결과 화학적 방법의 효율성이 높음을 확인하였으나, 수거된 스크랩에 사용된 열경화성 수지 및 표면 첨가제등에 대한 정보 부족은 화학적 산화 메커니즘을 해석하는데 있어서 한계점을 나타내었다. 다만, 본 실험방법론으로 실제 폐 탄소복합재 스크랩으로부터 탄소섬유 회수가 가능한 것을 확인하였기에, 차후 다양한 고성능 분석기(FT-IR, NMR, AFM, XPS 등)를 활용하여 폐 탄소복합재를 구성하는 원소들에 대한 추가정보 들을 습득하여 화학용매의 비선택적 반응 메커니즘 해석을 수행할 예정이다.

참고문헌

- Kim Y N, Kim Y-O, Kim S Y, et al. Efficient reclamation of carbon fiers from epoxy composite waste through catalytic pyrolysis in molten ZnCl₂. *Composites Science and Technology*. 173:66-72, 2019.
- [2] Keith M J, Roman-Ramirez L A, Leeke G, et al. *Polymer Degradation and Stability*. 161:225-234, 2019.

후기 (사사)

본 연구는 한국산업기술기획평가원의 소재부품기술개발 사업 (그린 SMC용 저온(130℃) 속경화급 (경화시간 2 분 이내) 친환경 수지, 중간재 및 이를 활용한 미래 모빌리티용 부품 개발연구 (과제번호: 20024956)의 지원을 받아 수행되었습니다.

Characterization of PES-Based Carbon Fiber Composites

for 3D Printed Molds in VARTM Process

^{*}Y.J. Shim¹, J.H. Park¹, H.K. Choi², T.C. Seo², H.D. Roh³ and S.H. Hwang¹⁺ ¹ Materials Science and Chemical Engineering Center, Institute for Advanced Engineering (IAE)

² R&D Center, 3D FACTORY Co. ltd

³ Department of Mechanical Engineering, Hanyang University ERICA

⁺E-mail: <u>hwang113@iae.re.kr</u>

Keywords : PES, Additive Manufacturing, VARTM, Composite Tooling

1. Introduction

ORNL[1] has utilized 3D printing technology for making molds, particularly BAAM(Big Area Additive Manufacturing), to reduce costs, improve production speed, and minimize material waste. Carbon fiber(CF)-reinforced composites enhance mechanical strength and thermal stability, making them suitable for VARTM molds. This study evaluates the feasibility of replacing conventional metal molds with 3D-printed PES-based CF composite molds in the VARTM process.

2. Experimental

2.1 Materials & Process : Polyethersulfone(PES) granules(Ultrason® E2010, BASF, Germany) and short carbon fibers(SCFs, PAN-based) were used. The process was categorized into three steps: i) Fabrication of PES-based CF composites using a twin-screw extruder, ii) 3D printing of PES-based mold element, iii) VARTM processing test to verify the feasibility and limitations.

2.2 Characterization: The PES-SCF composites were analyzed for their mechanical(tensile, bending, Izod impact) and thermal(TGA, DSC, HDT, MFR, CTE) properties. Additionally, FE-SEM was used to evaluate the morphology of composite fracture surface.

3. Results and Discussion

In this study, the thermal and mechanical properties of neat PES and PES-SCF composites for VARTM mold were investigated. The properties of neat PES are summarized in Table 1. PES is an amorphous thermoplastic resin with good high-temperature thermos-mechanical properties make them ideal materials for various composite tooling applications [2].

Table 1 Prop	perties	of neat	PES	polymer
--------------	---------	---------	-----	---------

Properties	Neat PES
Tensile Modulus (GPa)	2.6
Flexural Strength (MPa)	86
Heat Deflection Temperature @0.45 MPa (°C)	1.37
Coefficient of Thermal Expansion $x10^{-6}$ (/°C), ppm	52
Thermal Conductivity (W/m·k)	0.18
Glass Transition Temperature (°C)	225

The thermal properties of PES-SCF composites with various SCF content were analyzed and compared with PESU 1810 3DP reference material (PES-SCF25%, TechmerPM, US). Figure 1 show DSC and TGA thermograms. The glass transition temperature(Tg) of neat PES was 225°C, and decreased significantly with SCF content. The decomposition onset temperature(5% weight loss) was measured at 501.5°C for neat PES and also decreased with SCF content. Compared to the PESU 1810, the PES-SCF composites exhibited lower thermal resistance likely due to their lower molecular weight as well as weak interfacial interaction, therefore needed further modification using nanofillers (MWCNT, graphene) and/or post processing such as e-beam treatment in near future.



Fig. 1. Thermal properties of PES-based CF composites.

4. Conclusions

This study explored the potential of using PES-SCF composites as 3D-printed molds for VARTM process. Although the materials demonstrated excellent thermal and mechanical properties, weak interfacial adhesion between PES and carbon fiber as well as lower molecular weight compared to the reference material limited its overall thermomechanical properties. With further optimized PESbased composites, expected to be a practical alternative to metal molds in VARTM applications thereby increase the efficiency and productivity of composite parts.

References

[1] Post, Brian K., et al. SAMPE 2017 Conference. May 2017.

[2] Lecouvet, Benoît, et al. *Polymer degradation and stability*. 98(10):1993-2004, 2013

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning(KETEP) and the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE) of the Republic of Korea(RS-2024-00449355)

염소함량 증가에 따른 폴리염화비닐 섬유의 탄화경향 분석 Analysis on the carbonisation behaviour of polyvinyl chloride fibers with increasing chlorine content

*장영진¹, 홍성화 ²⁺ * Y.J. Jang^{1*}, S.H. Hong^{2†}

^{1,2} 한국섬유기계융합연구원 ⁺E-mail: yjjang@kotmi.re.kr

Keywords: low cost, carbon fiber, composite, chlorinated polyvinylchloride

1. 서론

탄소섬유는 자동차, 항공, 선박, 풍력, 구조용 재료 등 높은 기계적 성능을 필요로 하는 다양한 산업 분야에 사용되고 있습니다. 탄소섬유는 시장확대로 인하여 가격이 낮아졌지만 여전히 비싼 가격대를 형성하고 있습니다. 탄소섬유 제조는 전구체, 방적, 산화 안정화, 탄화, 표면처리, 사이징 등 많은 공정을 필요로하고 범위가 광범위 합니다. 그 중 산화 안정화 공정은 많은 비용을 필요로 합니다.

2. 염소함량에 따른 PVC 섬유 탄화경향 분석

한화솔루션에서 양산중인 HC-17(CPVC) 상용품을 기초연구에 사용하였습니다. 이 제품의 중합도(DP)는 1,000이며 염소함량은 67.3% 입니다. 이 제품의 기초물성은 Table 1과 같습니다.

\mathbf{T}	Table 1	Hanwha	Solutions	CPVC Basic	Properties
--------------	---------	--------	-----------	-------------------	------------

Property	Unit	Typical Value	Test Method
중합도(DP)	-	1,000 ± 50	JIS 6721
중합도(K-Value)	-	66 ± 2	DIN 53726
염소 함량	wt%	67.3 ± 0.5	Oxygen Flask
유리전이온도 (Tg)	°C	136	ASTM E 1356
VicatSoftening Temp.	°C	115 ± 3	ASTM D 1525

탄소섬유의 인장강도 증가를 위해서는 연신 공정에서 분자량을 키워 분자배향을 증가시키는게 유리합니다. 분자량이 과하면 방사 공정에서 용매의 용해도가 떨어지므로 문제가 발생할 수 있습니다. 문제가 생기지 않는 범위에서 분자배향을 증가시키는 것이 탄소섬유의 인장강도 증가를 위해서 중요합니다.

원사의 탄화공정을 확인하기 위하여 열중량 분석법을 사용했습니다. CPVC는 열경화성 수지로 공기에 의한 안정화 공정이 불필요한 고상탄화 메커니즘을 가지고 있습니다. 이를 PVC 열가소성 수지와 비교 분석하였습니다.



Fig. 1. Thermogravimetric analysis TGA results.

PVC는 250℃까지 열정적으로 안정되며, 250℃부터 열분해를 통한 감량이 나타났습니다. 250℃-330℃ 온도 범위에서 탈염소화 및 폴리엔 유형 분자의 형성이 발생했습니다. PVC의 질량 손실은 얀 56wt%였습니다. PVC의 이론적 염소 함유량은 56.8wt%입니다. 330℃까지 열처리시 SP3형태의 염소가 99%이상 제거됨을 확인했습니다. 330℃-450℃ 온도 범위에서 폴리엔 유형 분자가 축합 방향족 탄화수소로 전화되고, 최종적으로 액상 탄화를 통한 불용성 코크스로 전환됨을 확인했습니다. CPVC는 PVC보다 20℃ 높은 270℃까지 열적으로

안정했습니다. 330℃까지 급격한 탈염소화가 진행되었고, 590℃까지 천천히 탈염소화가 진행되었습니다. CPVC 폴리엔 유형 분자는 축합

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

방향족 분자로 전환 후, 고상탄화를 통해 코크스화 되었습니다. 최종적으로 900℃에서 30분 동안 열처리한 후 26wt%의 고정탄소 수율을 보였습니다.

4. 결과 고찰

CPVC는 PVC와 다른 열분해 거동을 보였습니다. CPVC의 고상탄화 메커니즘을 이용한다면 산화 안정화 공정을 생략할 수 있으므로 저비용 탄소섬유 생산이 가능할 것입니다.

후기

본 연구는 2024년도 산업통상자원부 소재부품기술개발 (R&D)사업(00431543)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

그래핀 구조체를 이용한 열-전기변환 전지의 안정성 향상 Enhancing the stability of thermoelectric cells using graphene structures

한정민¹, 신민기¹, 김태우^{1+*} J. Han¹, M. Shin¹, T. Kim¹⁺

¹ 인천대학교 기계공학과 ⁺E-mail: <u>taewoo.kim@inu.ac.kr</u>

Keywords: Heat-to-electricity conversion, Graphene, Cycle stability

1. 서론

온도에 따른 전극의 전위변화에 기반해, 낮은 전압에서 충전하고 높은 전압에서 방전함으로써 열을 전기로 변환할 수 있다. 전극의 단위온도당 전위변화를 제어하기 위하여 전극에 상변화물질을 사용하였으나, 사이클 구동 시 전극의 탈락현상으로 인해 불안정한 충방전 특성을 나타내었다. 본 연구에서는 환원된 산화그래핀 구조체에 의한 사이클 안정성 변화를 분석하였다.

2. 실험

2.1 3차원 다공성 그래핀 구조체 제작

Hummer's method를 이용하여 흑연 파우더로부터 산화그래핀을 제작하고, 이를 탈이온수에 분산해 산화그래핀(graphene oxide, GO) 용액을 제조하였다. 수열합성법(hydrothermal process)을 이용해 환원된 산화그래핀(reduced graphene oxide, rGO) 구조체를 제작하고, 이를 동결건조하여 3차원 다공성 rGO 구조체를 형성하였다. GO 용액의 농도, 수열합성 온도, 공정 시간에 따라 rGO 구조체의 밀도가 변화하였으며, 본 연구에서는 2 mg/ml GO 용액을 200 ℃에서 12시간 동안 수열합성한 rGO 구조체를 전극 제작공정에 활용하였다.

2.2 그래핀/상변화물질/활물질 혼합 전극 제작

공침반응을 이용해 제작한 copper hexacynoferrate (CuHCF)를 활물질로 사용하였으며, PVDF 바인더와 Super P 도전재를 이용하여 슬러리를 제작하였다. 상변화물질로 37-40 ℃의 용융온도를 가지는 폴리에틸렌글리콜-1000 (PEG-1000)을 사용하였으며, CuHCF 질량의 10-100%에 해당하는 PEG-1000을 추가하였다. rGO가 효율적으로 상변화물질과 접촉할 수 있도록, 먼저 rGO 구조체에 용융된 PEG-1000을 흡수시켜 rGO/PEG-1000 복합체를 제작한 후, 이를 슬러리 제작 시 추가하였다. 제작한 슬러리를 카본페이퍼에 코팅한 후 진공건조하여 전극을 제작하였다.

3. 결과 및 논의

CuHCF 질량과 동일한 양의 PEG-1000을 추가한 CuHCF 전극의 경우, 사이클의 온도 범위가 PEG-1000의 용융온도가 낮은 경우에도 불안한 전위 변화를 보였으며, 이는 PEG-1000의 낮은 전기전도성에 의해 PEG-1000과 카본페이퍼 사이의 저항이 증가한 결과로 해석된다. PEG-1000만 추가한 전극은 PEG-1000의 함량이 20% 이하인 경우에만, 안정적으로 구동하였다. rGO/PEG-1000 복합체를 추가한 전극은 PEG-1000을 100% 추가한 경우에도 안정적인 10-40 ℃ 사이클을 1) 사이클 나타내었다.(그림 간 열전계수와 발전효율이 동일하게 유지되었으며, 100시간 연속 구동 시에도 전극이 파손되지 않고 안정적으로 작동하였다. rGO 구조체에 의해 사이클 구동 시 PEG-1000과 활물질의 탈락 현상이 성공적으로 억제되었음을 확인할 수 있다.





4. 결론 및 향후과제

그래핀 구조체에 의해 상변화물질이 포함된 전극의 사이클 안정성이 향상됨을 확인하였다. 향후 그래핀 비율에 따른 열-전기변환 성능과 안정성을 평가할 계획이다.

후기

본 연구는 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 연구되었음(NRF-2022R1F1A1074287).

전자빔 조사가 단일벽탄소나노튜브(SWCNT) 내 촉매 제거에 미치는 영향 분석 Analysis of the Effect of Electron Beam Irradiation on Catalyst Removal in Single-Walled Carbon Nanotubes(SWCNT)

*김지현 ¹, 유승화 ²⁺ * J.H. Kim ¹, S.H. Yoo³⁺

¹ 전북대학교 탄소융복합재료공학과, ² 전북대학교 양자시스템공학과 ⁺E-mail: <u>seunghwayoo@jbnu.ac.kr</u>

Keywords: SWCNT, Buckypaper, Dispersion, Electrical conductivity

1. 서론

단일벽탄소나노튜브(SWCNT)는 높은 전기전도도, 기계적 강도, 열 안정성을 지닌 나노소재로 다양한 분야에 활용되고 있다. 그러나 합성 과정에서 잔류하는 촉매 입자가 특성을 저하시킬 수 있어 효과적인 제거 방법이 필요하다.

본 연구에서는 전자빔을 조사한 SWCNT/DMF 분산액을 이용하여 버키페이퍼를 제작하고 4 point probe, TGA, ICP-OES로 특성을 분석하여 전자빔 조사가 SWCNT의 촉매 제거에 영향을 미치는지 알아보고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 전자빔 조사된 분산액으로 제작한 버키페이퍼

DMF 80 ml에 SWCNT 0.04 g을 넣은 후 Tip sonication 2분과 Bath sonication 30분을 진행한다. 10 MeV 장비를 이용하여 0, 100, 150 kGy로 용액에 전자빔을 조사한 후 Bath sonication 30분을 진행하여 분산액을 만든다. 해당 분산액을 멤브레인 필터에 진공여과 방식을 이용하여 버키페이퍼를 제작한 후 진공오븐에 250°C에 24시간 건조를 진행하여 완성하였다.

2.2 4 point probe, TGA, ICP-OES 데이터 분석

버키페이퍼, 여과 후 잔여물을 4 point probe를 이용하여 전기전도도를 측정한다. TGA(열중량 분석) 측정을 통해 용매의 잔류 여부를 확인하였다. ICP-OES(유도 결합 플라즈마 광방출 분광법)를 이용하여 시료 내 포함된 원소 성분을 정량 분석하였다. 이를 통해 특정 원소들의 농도를 확인하고 촉매가 효과적으로 제거되었는지 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

4 point probe 분석을 통해 면저항 값으로 전기전도도를 계산하였다. TGA 분석을 통해 버키페이퍼와 여과 후 잔여물에 용매가 잔류하는지 확인하였다. ICP-OES 분석을 통해 특정 원소들의 농도를 확인하고 촉매가 제거되었는지를 평가하였다.



Fig. 1. a) 버키페이퍼 4 point probe 결과

b) 머키페이퍼 IGA 결과 c) 여과 우 산여눌 IGA 결과						
		Fe	Fe RSD	Al	Al RSD	
		(ppm)	(%)	(ppm)	(%)	
	BP 0 kGy	72446	0.2	190	24	
	BP 100 kGy	68484	1.7	221	13.6	
	BP 150 kGy	67093	1.4	236	29.1	
	Filter 0 kGy	95	33.2	167	22.5	
	Filter 100 kGy	2188	2.2	916	5.3	
	Filter 150 kGy	2002	0.4	928	4.4	
1		레시코 서	기 중 기시		ר לכ חר	

Fig. 2. 버키페이퍼, 여과 후 잔여물 ICP-OES 결과

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서 전자빔 조사가 SWCNT의 촉매를 제거에 영향을 미치는지 알아보고자 했다, 4 point probe 결과 전기전도도의 변화는 관찰되었으나 유의미한 향상은 확인되지 않았다. TGA 결과에서 버키페이퍼 내 용매의 잔류량은 미미한 것으로 확인할 수 있었다. ICP-OES 분석 결과 촉매원소의 농도 변화가 크지 않아 전자빔 조사만으로는 촉매 제거 효과가 미미함을 확인하였다. 향후 연구를 통해 전자빔 조사 조건과 다른 후처리 공정을 병행하여 촉매제거 효과를 극대화 하는 방안을 모색할 필요가 있다.

참고문헌

R. Brukh et al. Chemical Physics Letters 459, 149-152, 2008
 J.-W.Jang et al. Current Applied Physics 13, 1069-1074, 2013

후기

이 연구는 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임.(RS-2021--KI002492, 2025년 산업혁신인재성장지원사업)

High-Efficiency Carbon Fiber Recovery Method and Characterization of Carbon

Fiber-Reinforced Epoxy/4,4'-Diaminodiphenyl Sulfone Composites

*Yong-Min Lee¹, Min-Kyeong Kim¹, Woong Han¹, Byung-Joo Kim², and Kwan-Woo Kim¹⁺ ¹ R&BD Group 1, Korea Carbon Industry Promotion Agency ² Department of Materials Science and Chemical Engineering, Jeonju University

⁺E-mail: kkw1988@kcarbon.or.kr

Keywords : Carbon fiber-reinforced plastic (CFRP), recycling, steam pyrolysis, mechanical properties

1. Introduction

Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) is a highperformance composite material composed of carbon fibers and a thermosetting or thermoplastic polymer matrix [1]. As the production and demand for CFRP increase, the amount of waste also rises annually [2]. Currently, the European Union mandates the reuse and recovery of CFRP waste [3]. Accordingly, the fundamental principle of the guidelines prioritizes reuse and recycling. Recycling methods for CFRP include mechanical, chemical, and thermal recycling [4]. Traditional thermal recycling is a simple and continuous process that recovers carbon fibers (CF) by decomposing the matrix material at high temperatures above approximately 500°C in a N2 or air atmosphere. However, this method consumes significant energy, and undecomposed impurities generated during the process adhere to the CF surface, leaving residues. Additionally, thermal decomposition can produce CO and CO₂, causing environmental problems. To address these shortcomings, superheated steam has been employed. Superheated steam applies uniform heat to CFRP and can quickly decompose the matrix material by penetrating it. Moreover, unlike other thermal decomposition methods, it can be recovered in the form of tar, resulting in lower CO₂ emissions.

2. Materials

For the CFRPs used in this study, polyacrylonitrile-based unidirectional carbon fiber was used as a reinforcing material, and 4,4'-diaminodiphenyl sulfone (DDS) and a bifunctional epoxy resin were mixed in an equivalent ratio and then impregnated using the hand lay-up method. At this time, the impregnated EP was 35 ± 2 wt.%. Curing was performed at 190°C (10 °C/min) for 1 h.

3. Results and Discussion

Figure 1 shows the SEM images of the r-CF. Thermal decomposition using only steam at 500-600°C did not completely decompose the EP in CFRP. Subsequently, air thermal decomposition at 550-600°C completely removed the EP from the CF surface within a short time. Air thermal decomposition at 550°C completely removed the EP char from the r-CF surface with minimal surface etching. In contrast, while air thermal decomposition at 600°C also

completely removed the EP char, it resulted in excessive surface etching. Figure 2 shows the tensile strength of the r-CF. The tensile strength of r-CF decreased as the thermal decomposition temperature increased. This suggests that short-term air thermal decomposition at temperatures above 550°C leads to oxidation and etching of the r-CF surface, thereby reducing the tensile strength.



Fig. 1. Scanning electron microscopy images of the as-received and recycled carbon fibers under varying pyrolysis conditions.



Fig. 2. Tensile strength of the as-received and recycled carbon fibers under varying pyrolysis conditions.

4. Conclusions

This study investigated the recovery of r-CF from EP/DDS-based CFRP using steam and air pyrolysis. Results showed that air post-treatment effectively removed residual EP char, yielding clean r-CF. While tensile strength decreased by up to 64.88% compared to Ar-CF due to oxidation, IFSS increased by 9.18% due to enhanced oxygen functional groups. Thus, short-duration air post-treatment following steam pyrolysis provides a method for recovering r-CF with improved interfacial bonding, advantageous for high-quality CFRP production.

References

- [1] TPA Hernandes et al. Copos. Struct. 261:113289, 2021.
- [2] KW Kim et.al. J. Environ. Manag. 203:872-879, 2017.
- [3] W Liu et.al. Compos. B Eng. 215:108808, 2021.
- [4] YF Khalil et.al. Waste Manag. 76:767-778, 2018.

포

人

터

2

Multi-scale Modeling and Numerical Simulation of Fatigue Damage in Woven Composite Materials

*Bowen Zheng ¹, Taeri Kim¹ and Gun Jin Yun¹⁺ ¹ Department of Aerospace Engineering, Seoul National University ⁺E-mail: gunjin.yun@snu.ac.kr

Keywords: Woven Composite, Multi-scale Analysis, Damage Modeling

1. Introduction

This study proposed a micro-meso-macro multi-scale analysis approach to investigate the mechanical behavior of knitted composite materials under fatigue loading. CT scan technology was utilized to analyze the distribution of fibers and matrix at the microscale. At the same time, an idealized unit cell was employed to model the damage mechanisms at the mesoscale. A macroscopic finite element analysis incorporating a UMAT subroutine was conducted to simulate fatigue damage evolution and predict fatigue life. The results of this study demonstrated high consistency with experimentally obtained S-N curves and failure patterns, confirming its potential contribution to the fatigue life assessment and design of highperformance composite materials.

2. Methodology

2.1 Multi-scale Modeling: This study proposes a micromeso-macro multi-scale analysis approach to elucidate the damage evolution mechanisms of knitted composite materials under fatigue loading, as shown in Fig.1. Through this approach, a more comprehensive analysis of the fatigue failure mechanisms of knitted composites is achieved.

At the microscale, high-resolution CT scanning captures the distribution and morphology of fibers and matrix. Based on this, a microscale representative volume element (RVE) is constructed, as shown in Fig.2, to incorporate the local material characteristics.

An idealized unit-cell model is established at the mesoscale to differentiate between fibers and the matrix. Fibers are modeled using a local coordinate system as either equivalent orthotropic or transversely isotropic materials. It enables a more precise representation of fiber orientation and stress transfer mechanisms within knitted composite materials.

Finally, the homogenized properties obtained from the mesoscale analysis at the macroscale are incorporated into a finite element model to simulate fatigue damage evolution and predict fatigue life.



Fig.1 Micro-Meso-Macro Multi-scale Analysis Process

2.2 FE simulation: In the simulation process, a userdefined material subroutine (UMAT) was developed and integrated with the ABAQUS finite element solver to simulate the material degradation process under fatigue loading.

As fatigue cycles progressively accumulate, the fibers and matrix experience gradual performance degradation, which manifests as a progressive reduction in stiffness and strength with increasing cycles. Once the stress-strain evolution meets a predefined damage criterion, the model triggers rapid degradation in certain elements, leading to a significant local loss in load-bearing capacity.



Fig. 2. RVE Construction Using CT Scanning

3. Results and Discussion

Applying the proposed methodology, the S-N curves of knitted composite materials at various stress levels were accurately predicted. Furthermore, the final failure patterns and damage locations obtained from the simulations were compared with experimental fatigue test data, as shown in Fig.3, demonstrating a high degree of agreement.



Fig. 3. Comparison of Experimental and Simulation Data

The proposed multi-scale analysis method effectively captures the damage evolution of knitted composites under fatigue loading, showing agreement with experimental results.

4. Conclusions

The micro-meso-macro multi-scale analysis approach proposed in this study effectively captures the damage evolution occurring during the fatigue process of knitted composite materials, demonstrating a high level of agreement with experimental results. It provides a reliable analytical method for predicting the fatigue life and analyzing the damage mechanisms of high-performance composite materials.

References

- [1] Zhang, Chao, J. L. Curiel-Sosa, and Tinh Quoc Bui. "Mesoscale progressive damage modeling and life prediction of 3D braided composites under fatigue tension loading." Composite Structures 201 (2018): 62-71.
- [2] Mahmood, Ansar, Xinwei Wang, and Chuwei Zhou. "Generic stiffness model for 3D woven orthogonal hybrid composites." Aerospace Science and Technology 31.1 (2013): 42-52.

BTO-P(VDF-TrFE) 기반 PENG 소자 내 탄소나노튜브 마이크로스캐폴드 통합을 통한 압전발전 성능 향상

Integration of CNT micro-scaffolds in the BTO-P(VDF-TrFE)-based PENG device for enhanced piezoelectric energy conversion

박종원 ¹, 김광준 ¹, 김민욱 ¹, 옥종걸 ¹⁺ ^{} J. Park ¹, K. Kim ¹, M. Kim ¹, J. G. OK³⁺

¹ 서울과학기술대학교 기계자동차공학과 ⁺E-mail: jgok@seoultech.ac.kr

Keywords: Carbon nanotube, Energy harvesting, Piezoelectric nanogenerator, P(VDF-TrFE), BTO

1. 서론

근래의 PENG (Piezo Electric Nanogenerator) 소자는 압전 재료 본연의 낮은 전기전도성으로 인해 시스템 내에서 비효율적 분극 형성을 야기하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 높은 전기전도성을 가진 CNT (Carbon Nanotube)를 압전 재료간의 scaffold로 도입해, 압전 재료로부터 형성된 분극 특성을 효율적으로 출력할 수 있는 소자 시스템을 개발하였다 [1].

2. CNT-BTO-P(VDF-TrFE) 압전 소자 소개 2.1 압전 재료간 화학적 상호작용

CNT는 압전 소자 내 BTO(BaTiO₃) 나노입자의 균일한 분포를 촉진하며, 동시에 P(VDF-TrFE) (polyvinylidene fluoride-trifluoroethylene) 내의 F (Fluorine) 와 공유결합을 함으로써 소자의 압전 특성을 결정짓는 β상 형성에 기여한다[1]. [Fig. 1]



Fig. 1. Favorable bondings with chemical attaraction **2.2 CNT-BTO-P(VDF-TrFE)** 소자 제작 공정

P(VDF-TrFE)와 BTO를 혼합해 BTO-P(VDF-TrFE) 솔루션을 제조했다. 이후 CVD로 성장된 CNT microscaffold와 통합되는데, 이는 CNT microscaffold의 나노다공성에 따른 모세관힘을 원동력으로 한다. 이후 건조된 CNT-BTO-P(VDF-TrFE)는 기판으로부터 peeled off 되어 위아래 전도성 테이프를 부착 후 PI tape로 패키징된다.

3. 압전소자 성능 특성평가

CNT-BTO-P(VDF-TrFE)의 결합 상태 및 β상 형성 비율 분석을 위한 XRD, FT-IR 분석하였다 나아가 P(VDF-TrFE)와 BTO의 솔루션 혼합 비율에 따른 압전 성능 분석을 통해 CNT microscaffold의 영향력을 정량·정석적으로 제시한다 [Fig. 2].



Fig. 2. XRD, FT-IR and piezoelectric performance 4. 결론 및 향후과제

본 연구 개발은 CNT microscaffold를 도입시킴에 따른 소자 내부 분극 형성 극대화 및 비약적인 출력 향상을 이루었으며, 이는 웨어러블 센서와 같은 다양한 소자를 위한 차세대 전력원으로써 활용될 수 있다.

참고문헌

[1] JW Li et al., *Polymers*, *12*(12), 2999, 2020
[2] PC Ma et al., *Composes: Part A*. 41:1345-1367, 2010.

후기

이 연구는 정부(과학기술정보통신부) 재원 한국연구재단 나노및소재기술개발사업(NRF-2021M3H4A3A02099204, RS-2024-00449882), STEAM연구사업(NRF-2022M3C1A308 1178) 및 글로벌기초연구실(RS-2024-00413607) 과제 및 정부 (교육부) 재원 한국연구재단 보호연구(NRF-2022R111A 2073224) 과제의 지원으로 수행됨..

반응 가스 유동 제어를 통한 다층 그래핀 합성 Synthesis of few-layer graphene by controlling reaction gas flows

*박광수 ^{1,2}, 석지원 ^{3,4,5+} * G.S. Park ^{1,2}, J.W. Suk^{3,4,5+}

¹ 성균관대학교 반도체디스플레이공학과, ² 삼성전자공과대학교, ³ 성균관대학교 기계공학과, ⁴ 성균관대학교 지능형팹테크융합전공, ⁵ 성균관대학교 성균나노과학기술원 ⁺E-mail: jwsuk@skku.edu

Keywords: Few-layer graphene, Gas flow, Boundary layer

1. 서론

그래핀은 뛰어난 기계적 강도, 높은 전자 이동도, 그리고 우수한 빛 투과율을 갖춘 2D 물질로, 다양한 산업 분야에서 주목받고 있다[1]. 특히, 이중층 그래핀은 단층 그래핀과 달리 조절 가능한 밴드갭을 형성할 수 있어 반도체 산업에서 활용될 잠재력이 크다[2]. 본 논문에서는 구리 기판 위에서 반응 가스의 유동 속도를 조절하여 다층 그래핀을 합성하는 방법을 연구하였다.

2. 실험 방법

2.1 구리 호일 준비

그래핀 합성을 위해 두께 25 µm의 구리 호일을 2 cm × 2.5 cm 크기로 절단하였다. 이후, 표면 거칠기를 감소시키기 위해 구리 호일을 빙초산에 12시간 동안 담갔다. 이어서, 15% HCl 용액에서 15분간 처리하여 산화된 구리막을 제거하였다. 마지막으로, 초순수 증류수(DIW)와 IPA에서 각각 세 차례 세척한 후 질소 가스를 이용해 건조하였다.

2.2 그래핀 합성

그래핀의 성장에 미치는 반응 가스 유동 형태의 영향을 연구하기 위해 두 가지 구조를 설계하였다. 첫 번째 구조는 구리 호일 주변의 가스 유동 형태가 동일하게끔 설계하였다. 반면, 두 번째 구조에서는 구리 호일 주변에서 가스 유동 형태에 차이를 유도하였다. 각 구조에 맞게 구리 호일을 배치한 후, 유리관 내부 압력을 1.0 × 10⁻⁴ Torr까지 낮추었다. 이후, 10 sccm의 수소를 주입한 상태에서 온도를 1030 ℃까지 상승시킨 뒤, 1시간 동안 구리 표면을 (100) 면 방향으로 재결정화 하였다. 이어서, 30 sccm의 메테인을 공급하여 그래핀을 합성하였다. 공정이 완료된 후, 구리 호일을 신속하게 상온까지 냉각시켜 불필요한 탄소 반응을 최소화하였다. 마지막으로, 합성된 그래핀을 습식 전사를 통해 산화 실리콘(SiO2) 기판으로 이동시키고, 후속 분석을 위한 시료를 준비하였다.

3. 실험 결과

습식 전사를 통해 SiO₂ 기판 위로 이동된 그래핀의 광학 현미경 분석 결과를 Fig. 1에 제시하였다. 구조 1에서는 구리 호일 주변의 가스 유동 형태가 균일하여 self-limiting 효과로 단층 그래핀이 성장하였다[2]. 반면, 구조 2에서는 가스 유동 형태에 차이가 발생하면서 그래핀 성장 속도에 차이가 생겼고, 이에 따라 카본 원자의 구리 확산이 촉진되어 구리 윗면에서 다층 그래핀이 성장하였다[3].



Fig. 1. Optical images of CVD grown graphene.

4. 결론

본 연구에서는 구리 호일 주변의 반응 가스 유동 형태를 조절하여 다층 그래핀의 합성 특성을 분석하였다. 가스 유동 형태가 동일한 경우, selflimiting 효과에 의해 단층 그래핀이 성장하는 것을 확인하였다. 반면, 유동 형태에 차이가 발생하면 구리 호일 양면에서 그래핀 성장 속도가 달라지고, 이에 따른 카본의 구리 확산으로 다층 그래핀이 형성됨을 관찰하였다.

참고문헌

- [1] Li et al. science. 324.5932: 1312-1314, 2009.
- [2] Fang et al. ACS nano. 8.6: 6491-6499, 2014.
- [3] Hao et al. Nature nanotechnology. 11.5: 426-431, 2016.

후기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 제원으로 한국연 구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2022R1A2B5B02 002413).

Development of polycyclooctene carbon fiber

*Byeong Woo Im¹, Junghwan Kim¹, Jiyeon Kim¹,Bon-Cheol Ku¹ and Seo Gyun Kim¹⁺ ¹ Institute of Advanced Composite Materials, Korea Institute of Science and Technology (KIST) ⁺E-mail: <u>seogyun.kim@kist.re.kr</u>

Keywords : Carbon fiber, Wet-spinning, Tensile strength

1. Introduction: Carbon fibers are widely used due to their high strength, low weight, and thermal stability. Conventional precursors like polyacrylonitrile (PAN) are costly and require complex processing, driving interest in alternative materials. Polycyclooctene (PCOE), synthesized via ring-opening metathesis polymerization (ROMP), is a promising candidate but requires modification to improve char yield. In this study, PCOE fibers were wet-spun, sulfonated, stabilized, and carbonized. The effects of sulfonation and stabilization on char yield and mechanical properties were analyzed. This study demonstrates the potential of PCOE as a precursor for high-performance carbon fibers.

2. Experiment

2.1 Polymer synthesis & wet-spinning : In this study, polycyclooctene (PCOE) was synthesized via ring-opening metathesis polymerization (ROMP) of cyclooctene using Grubbs catalyst. The synthesized PCOE was dissolved in toluene and subsequently wet-spun into fibers using acetone as a coagulation bath.

2.2 Sulfonation & Carbonization : The wet-spun PCOE fibers were then subjected to sulfonation using chlorosulfonic acid, followed by thermal stabilization.

Finally, the stabilized fibers were carbonized in a hightemperature furnace to obtain polyethylene-based carbon fibers. The structural and morphological evolution of the fibers throughout each processing stage was analyzed to evaluate their feasibility as carbon fiber precursors.

3. Results and Discussion

3.1 Thermogravimetric result : The result of TGA curves of sulfonated PCOE showed that 10 sec sulfonated PCOE is not sulfonated enough and 5 min sulfonated PCOE is overreacted causing decomposition in high temperature. And 1 min sulfonated PCOE had the highest char yield

showing least decomposition weight change.

The result of TGA curves show that desulfonation occured around 200 $^{\circ}$ C, and decomposition of polycyclooctene occured around 400 $^{\circ}$ C. So, the stabilization temperature was chosen from 180 $^{\circ}$ C to 240 $^{\circ}$ C for various time.

The TGA result of stabilization process showed that 200 °C, 1 h stabilized PCOE had the highest char yield which is 57.72 % when heat treated to 900 °C.

3.2 Mechanical strength result : The wet-spun PCOE fiber, sulfonated PCOE fiber, stabilized PCOE fiber and carbonized PCOE fiber was analyzed by FAVIMAT.

Specific tensile strength of PCOE fiber showed 0.073 N/tex showing 142.7 % elongation. After sulfonation using chlorosulfonic acid, the strength of sulfonated PCOE showed sharp increase upon desulfonation from 0.073 to 0.44 N/tex. The mechanical properties was significantly improved after carbonization at 900 °C showing 0.44 to 1.0 N/tex.



Fig. 1. TGA curves of sulfonated PCOE in N₂

4. Conclusions, Significance and/or Future Works In this study, polyethylene-based carbon fibers were successfully developed through the synthesis, wetspinning, sulfonation and carbonization of polycycloctene. The TGA analysis result indicated that the optimal sulfoantion and stabilization conditions were crucial for achieving high char yield which is 1 min sulfonation and 200 °C stabilization for 1 h yielding the best results.

Mechanical strength deconstrated a significant improvement in fiber properties after each processing step, with the tensile strength increasing from 0.073 N/tex for as spun fibers to 1.0 N/tex after carbonization. These study suggests that PCOE fibers have potential as precursors for high-performance carbon fibers, offering a tunable processing approach to optimize their thermomechanical properties.

References

- [1] A. Beste et al. J. Am. Chem. Soc 135:6130-6141, 2013.
- [2] M. Bernius et al. Carbon 94:465-471, 2015.
- [3] T. Gries et al. Appl. Res. 1:e202100013, 2022.
Defect Engineering through electron beam irradiation on TiO₂/MXene to enhance photocatalytic hydrogen evolution

Subhashree Sabnam¹, Lagnamayee Mohapatra², Lekha Paramanik² and Seung Hwa Yoo^{1, 2,3*}

¹ Department of Applied Plasma & Quantum Beam Engineering, Jeonbuk National University, Republic of Korea

² Department of Quantum System Engineering, Jeonbuk National University, Republic of Korea

³Division of Electronics and Information Engineering, Graduate School, Jeonbuk National University, Republic of Korea

⁺E-mail: <u>seunghwayoo@jbnu.ac.kr</u>

Keywords : Photocatalysis, defect engineering, electrostatic self-assembly

1. Introduction

Photocatalysis is a process that utilizes light energy to drive chemical reaction in the presence of a photocatalyst. It is regarded as an eco-friendly and sustainable technology for generating clean energy, addressing the growing energy demand and environmental concerns associated with depletion of fossil fuels. Electron beam induced defect engineering has emerged as a powerful strategy to enhance photocatalytic property. By introducing defects, such as dopant sites and vacancies, the electronic structure, charge carrier dynamics can be modified. This defect engineering promotes charge separation, light absorption, reducing recombination rate and boosting photocatalytic hydrogen evolution efficiency. This approach offers a promising pathway to optimize photocatalysts for sustainable hydrogen production. addressing key challenges in renewable energy conversion.

2. Experimental

2.1 Preparation of TiO₂/MXene:

The chemicals used in this work were of reagent grade and used without any further purification. 2D MXene nanosheets were synthesized by HF etching by reacting Ti_3AlC_2 MAX phase with HF for 24hrs, followed by centrifugation and washing with water until neutral pH was attained. The final MXene 2D nanosheets were obtained by drying in vacuum oven at 40 °C.

TiO₂/MXene was synthesized via electrostatic selfassembly method with different weight percentage (1, 3, 5%) loading of MXene as a co-catalyst. After the composite was formed, it was treated under electron beam irradiation with various doses (100, 300, 500kGy).

2.2 Evaluation of photocatalytic activity

Phtocatalytic hydrogen evolution reaction was conducted at normal temperature (25 °C) under the Xe lamp irradiation (100 mW cm⁻²). Methanol was used as a scavenger.

2.3 Characterization:

Field emission scanning electron microscopy (FESEM) images were taken using Carl Zeiss (Gemini 500) model. X-ray powder diffraction (XRD) patterns were obtained by using BRUKER (D8 ADVANCE) model.

3. Results and Discussion

 TiO_2/MX ene was synthesized and subjected to electron beam irradiation. The synthesis of the composite was confirmed by XRD and Raman spectroscopy. While other characterizations are underway, the photocatalytic hydrogen evolution experiments were conducted. The results show that before irradiation, 1 wt% gives the highest rate of hydrogen gas, whereas after the material was exposed to electron beam irradiation, the rate of gas evolution increases by almost 2-3 folds in case of 3 and 5 wt% loading of MXene, shown in Fig.1. This enhancement could be due to the defects created via e-beam irradiation leading surface functionalization of the co-catalyst. Further characterization of the material will prove the catalytic property change [1,2].



포

人

터

2

Fig. 1. Rate of hydrogen evolution under different weight percent loading of MXene on TiO₂ with different doses of electron beam irradiation.

4. Conclusion, Significance and Future Works

We have synthesized TiO_2/MX ene by electrostatic selfassembly. The composite was treated under electron beam irradiadiation to create defects. The preliminary results show the defect engineering leads to enhancement in photoocatalytic activity. For future work, further characterization of the material will be done using TEM, FESEM, TGA, FT-IR, BET spectroscopies etc. for before and after irradiation of the composite.

References

 Xiangyi Zhang et al. J Mater Sci: Mater Electron. 34:1362, 2023

[2] Sanjay S Latthe et al. J. Mater. Chem. A. 1:13567, 2010

Acknowledgement

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2022-00144435, 2022R111A3064533, RS-2023-00244348).

복합소재 FDM 출력물의 굽힘 거동 분석을 위한 AM-공정 연계 구조해석 AM-Structures Coupled Analysis to Predict Bending behavior of FDM-Printed Composite Structures

*설영훈¹, 이긍현¹, 김정민¹, 윤민호², 한장우³⁺ * Y.H. Seol¹, G.H. Lee¹, J.M. Kim¹, M.H. Yoon², J.W. Han³⁺

¹ 국립금오공과대학교 기계공학과, ² 서울시립대학교 기계정보공학과, ³ 국립금오공과대학교 기계시스템공학과 ⁺E-mail:uddan@kumoh.ac.kr

Keywords: 3D Printing, Composite, AM-Structrue Coupled Analysis 1. 서론

최근 친환경에 대한 높은 관심과 환경규제로 인해 자동차, 항공우주 등 다양한 산업 분야에서 복합소재가 주목받고 있다. 복합소재의 생산 방식 중 높은 형상 자유도와 제작비용에서 이점을 가진 3D Printing 방식 중 FDM 방식을 사용한 복합소재 제작이 확대되고 있다. 다만 FDM 방식을 사용하는 3D Printing 구조물은 출력 방향에 따라 필라멘트 결합력에 의해 이방성 물성을 가진다. 이에 본 연구에서는 노즐 경로에 따른 필라멘트 배향 정보를 유한요소 모델에 반영하여 굽힘 특성을 보다 정확히 확인하려고 한다.

2. 굽힘 해석

2.1 유한요소 모델

ASTM D790 규격에 부합되게 굽힘 해석 시편 모델을 가정하였다. 시편의 크기는 127mm*12.7mm *3.2mm로 가정하여 모델링하였다. 가정된 시편에 실험 규격과 동일한 Support Span Ratio 16을 적용하여 Support Span을 51.2mm로 설정하였다. 또한 시편의 대변형 거동이 예상되어 이를 효과적으로 고려할 수 있는 비선형 해석을 진행하였으며, 이산화 과정에서 해석의 신뢰성 및 정확성을 위해 굽힘 방향을 기준으로 5개 이상의 층을 만들었다. 해당 모델을 생성 후 상용 유한요소해석 S/W인 Abaqus를 통해 해석을 진행하였다.

2.2 AM-구조 연계해석

AM-구조 연계해석을 위해 해석한 유한요소 모델을 Digimat S/W로 연계해 해석을 진행하였다. 해당 해석에서의 물성은 Markforged社에서 제작한 나일론 소재에 탄소섬유가 보강된 Onyx 소재를 사용하였으며, 해당 소재는 탄소섬유의 배향이 출력 방향에 따라 결정되어 이방 물성을 더욱 뚜렷하게 나타낸다. 해당 물성을 Digimat-MAP기능을 통해 3D Printing 출력물의 노즐 경로에 따른 이방 물성을 유한요소 모델에 매핑하여 출력물의 노즐 경로 조건이 반영된 해석을 진행하려 하였다. 본 연구에서는 노즐 경로에 대한 이방성 특성을 뚜렷하게 나타낼 수 있는 0°와 90°의 적층 방향을 가정하여 해석을 진행하였으며, Digimat S/W상에서 필라멘트 배향 정보의 타당성을 확보하였다.

3. 수치결과

ASTM D790 규격에 따른 3점 굽힘 시험에서의 굽힘 강도식은 (1)과 같다.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \tag{1}$$

식 (1)에 굽힘 강도를 확인하기 위해 해석 데이터에서 반력 결과를 추출해 굽힘 강도를 분석하였다. 분석 결과 0°일 경우 90°에 비하여 높은 반력 데이터를 확인했으며, 이는 곧 0°의 경우가 굽힘 강도가 높다는 것을 의미한다.



Fig. 1. 3-Point Bending Analysis Result.

4. 결론

본 연구를 통해 3D Printing 출력물의 노즐 경로가 해당 구조물의 굽힘 특성에 영향을 미친다는 것을 확인하였다. 추후 연구에서는 실험을 통해 해석의 신뢰성 확보와 실제 거동 양상을 확인하고자 한다.

참고문헌

YG Kang et al. *KSMPE*. 16(2):94-101, 2017.
 ASTM D790-10 standard,2010.

후기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2022-NR072163, RS-2024-00356107). 또한, 이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0024166, 2022년 지역혁신클러스터육성사업).

고전 적층 판 이론 및 성형-구조 연계 해석 방안을 활용한 단섬유 강화 복합소재 구조물의 기계적 거동 비교

Comparison of Mechanical behavior of short-fiber reinforced composite structure using

classical laminated plate theory and molding-structure coupled analysis

*김정민¹, 이긍현¹, 설영훈¹, 곽윤기², 한장우²⁺ * J.M. Kim¹, G.H. Lee¹, Y.H. Seol¹, Y.K. KWAK², J.W. Han²⁺

¹ 국립금오공과대학교 기계공학과, ² 국립금오공과대학교 기계시스템공학부 ⁺E-mail:uddan@kumoh.ac.kr

Keywords: CAE, Composite, Injection-Molding, FSDT

1. 서론

최근 다양한 산업분야에서 고강도 제품 설계 및 부품 경량화를 위한 노력이 지속되면서 복합소재에 대한 관심이 증가하고 있다. 그 중 사출 성형으로 제작된 단섬유 강화 복합소재 구조물은 높은 생산성과 품질 확보의 측면에서 주목받고 있다. 또한, 단섬유 강화 복합 소재 구조물은 사출 성형 과정에서 강화재의 배향 특성이 결정되며, 두께 방향으로 스킨-코어-스킨(Skin-Core-Skin)구조를 형성하여 면내/두께별 기계적 거동이 달라진다 [1]. 이에 따라 본 연구에서는 단섬유 강화재의 배향 특성을 고려한 해석 방안으로 사출 성형-구조 연성 해석과 고전 판이론을 적용한 해석의 효율성 및 정확성을 검증하고자 한다.

2. 본론

2.1 사출 성형 해석

사출 성형 공정으로 인한 단섬유 강화 복합소재 구조물의 면내/두께별 배향성을 분석하기 위해, Moldex 3D S/W를 이용한 사출 성형 해석을 진행하였다. 해석에 사용된 소재는 PA6와 유리섬유 30wt(%)로 이루어진 단섬유 강화 복합소재를 사용하였으며, 500[mm]* 200[mm]*3[mm] 크기의 평판으로 사출 성형 해석을 수행하였다. 추가적으로, 요소는 3BLM-Layer을 이용하여 두께 방향에 대한 강화재의 배향 특성을 보다 정확하게 고려하고자 하였다.

2.2 사출 성형 해석을 고려한 구조 연성 해석

사출 성형-구조 연성 해석을 위해, Moldex 3D, Digimat, Abaqus S/W를 유기적으로 연계하여 해석을 진행하였다. Digimat S/W를 이용해 Abaqus 구조해석 요소에 배향 특성에 따른 부위별 이방 물성을 맵핑하여 배향 특성이 고려된 해석을 진행하였다. 구조 해석시, mesh size는 0.5mm로 설정하여 두께 방향에 대한 응력 분포를 명확하게 고려하고자 하였다.

2.3.적층 판 해석 기법

사출 성형 공정으로 인한 두께 방향 (스킨-코어-스킨)구조의 강화재 배향을 고려하기 위해, 두께별 배향 특성에 대한 평균 배향을 도출하였다. 도출된 평균 배향을 (스킨/코어/스킨)구조의 적층 판으로 가정하여 판 해석을 진행하였으며, 요소 크기는 1mm로 설정하였다.

3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 단섬유 강화 배향 특성을 고려한 복합소재 구조물 해석 방안들의 신뢰성 및 정확성을 확인하기 위한 수치 예제로 시편에 대한 인장/굽힘 거동 해석을 수행하였다. 사출 성형-구조 연성 해석의 경우 사출 성형 해석 과정을 직접적으로 고려함으로 높은 정확성의 솔루션을 제공하지만 여러 S/W를 사용해야하는 측면에서 효율성이 떨어진다. 적층 판 해석의 경우, 평균 배향 각도를 도출하여 해석한다는 점에서 정확성은 떨어지지만, 2D로 가정하여 해석을 진행함으로써 효율성이 높다. 향후 위의 기법들을 이용한 다양한 수치 예제를 비교/분석하여 사출 성형 구조물의 제작 조건에 따른 유효한 해석 방안을 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] YM Kim et al. J.comput.Struct. 32:349-357, 2019.

후기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2022-NR072163,RS-2024-00356107). 또한, 이 논문은 2022년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0024166, 2022년 지역혁신클러스터육성사업).

다기능성 MWCNT/GNP Hybrid Buckypaper: 전자파 차폐 및 줄 가열 응용 Multifunctional MWCNT/GNP Hybrid Buckypaper: EMI Shielding and Joule Heating Applications

*우가현 ^{1,2,3}, 김재후 ¹, 박종혁¹, 한태희 ⁵, 이해석 ³, 이웅 ^{2,3+}, 김재우 ^{1,4+} *G.H. Woo ^{1,2,3}, J.H. Kim ¹, J.H. Park ¹, T.H. Han ⁵, H.S. Lee ³, U. Lee ^{2,3+}, J.W. Kim^{1,4+}

¹ 한국과학기술연구원 전자파솔루션융합연구단, ² 한국과학기술연구원 청정에너지연구센터, ³ KU-KIST 에너지환경대학원, ⁴ 한국과학기술연구원 구조용복합소재 연구센터, ⁵ 한양대학교 유기나노공학과 ⁺E-mail: jaewoo96@kist.re.kr

Keywords: multi-walled carbon nanotube, graphene nanoplatelet, electromagnetic interference shielding, Joule heating

1. 서론

CNT hybrid Buckypaper (BP)는 얇고 유연하며 가 벼운 특성과 우수한 전기·열 전도도로 전자 소재 분야에서 활용도가 높다 [1]. 특히, electromagnetic interference (EMI) 차폐 및 열 관리 분야에서 연구가 활발하지만, 전반적인 성능 평가와 응용 가능성에 대한 연구는 부족하다 [2]. 본 연구에서는 MWCNT/GNP hybrid BP를 제조하여 물 리적 특성과 EMI 차폐 및 Joule heating 성능을 분 석하고, 고주파 통신 및 차세대 열관리 시스템에서 의 활용 가능성을 평가하였다.

2. MWCNT/GNP hybrid BP의 제조 및 분석

MWCNT/GNP hybrid BP는 vacuum filtration을 통해 제조되었으며, GNP 함량을 0, 25, 50, 75, 95 wt%로 조절하였다. 제조된 BP의 전기·열 전도도는 4-probe resistivity meter와 laser flash 통해, 기계적 물성은 analyzer를 universal testing machine을 이용해 분석하였으며, EMI 차폐 성능은 vector network analyzer를, Joule heating 성능은 infrared camera를 사용하여 평가되었다.

3. MWCNT/GNP hybrid BP의 물성 및 성능

Hybrid BP의 전기·열 전도도는 GNP 함량의 증가에 따라 향상되었으며, 75 wt%일 때, 최대값 (전기전도도 244 S/cm, 열전도도 50 W/m·K) 을 기록했다. 한편, 기계적 물성은 GNP 함량 증가에 따라 지속적으로 감소했으나, 유연성은 유지되어 굽힘 조건에서 안정적인 성능을 보였다.



Fig. 1. Properties of MWCNT/GNP hybrid BP.

Hybrid BP는 75 wt% GNP에서 최대 44 dB의 EMI SE를 기록했으며, 이는 GNP 함량이 0 wt%일 때 대비 126% 증가한 결과이다. (Fig.2a) Joule heating 성능은 1.75 V에서 136° C까지 도달하고, ±4.8% 이내의 변동만을 보이며 시간에 따른 안정성을 입증하였다. 또한, 모든 전압에서 시편 내 균일한 온도 분포를 보였다. (Fig.2b).



Fig. 2. Performances of MWCNT/GNP hybrid BP.

4. 결론

본 연구에서는 vacuum filtration을 통해 MWCNT/GNP hybrid BP를 제조하고, GNP 함량 변화에 따른 물성 및 성능을 평가하였다. 그 결과, GNP 함량이 75 wt%일 때 MWCNT-GNP hybrid BP는 multidimensional conductive networks 형성과 함께 전기·열 전도도가 GNP-0 대비 각각 683%, 190% 향상되었다. 또한, EMI 차폐 및 Joule heating 성능 역시 각각 126%, 203% 향상된 성능을 보였다. 이러한 성능 향상은 다양한 분야에서의 응용 가능성을 높이는 중요한 요인으로 작용할 것으로 기대된다.

참고문헌

Zhu Kunlei et al, *Nano Resarch 14*, 2301-2308, 2021.
 Yu Yiyao et al, *Carbon 288*, 119420, 2024.

후기

이 연구는 아래의 지원을 받아 수행된 연구임. (CRC22031-000, RS-2023-00219559, C220003).

Strategy for Enhancing the Electrical Performance of Carbon Nanotube Fibers

*Min Ji Kim^{1,2}, Jeong-gil Kim¹, Min Seob Kim^{1,2}, Min Woo Kim^{1,2}, Hong Bum Kim^{1,3}, Balaji Ravichandran¹ and Nam Dong Kim¹⁺

¹ Functional Composite Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology, ² Department of Materials Science & Engineering, Gwangju Institute of Science & Technology, ³ Department of Applied Bioengineering, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University

⁺E-mail: ndkim@kist.re.kr

Keywords : Carbon nanotube(CNT), Carbon nanotube Fiber(CNTF), CNT-Cu composite Fiber

1. Introduction

CNTF, a next-generation conductive material, has an electrical conductivity lower than the theoretical value due to contact resistance between CNTs when fiberized. As a result, CNTF conductivity remains inferior to traditional copper. Enhancing the electrical performance of CNTF represents a critical challenge for researchers. Previous approaches attempted to combine CNTs' lightweight nature and superior current-carrying capacity with metals' high conductivity. Most of the methods involved depositing copper on a pre-manufactured CNTF surface. The weak interfacial interactions between these materials limited conductivity improvements. This study presents an innovative strategy for stable CNT-copper hybridization to produce highly conductive composite fibers.

2. Experimental Section

2.1 Preparation of Cu-CNT

CNTs were first purified using microwave treatment. They were then immersed in a CuCl2 metal salt solution and freeze-dried to adsorb metal onto the CNT surface. Additional ammonia heat treatment was performed to enable copper incorporation as single atoms between the CNT lattice.

2.2 Preparation of Cu-CNTF

A liquid crystal wet-spinning method was used to produce highly dense and aligned CNTFs. Cu-CNT was dispersed in chlorosulfonic acid to prepare a liquid crystalline spinning dope. The dope solution was extruded using a syringe pump, passed through an acetone coagulation bath, and then wound onto a bobbin to complete the fiber fabrication.

3. Results and Discussion

CNTs purified through microwave treatment not only had impurities removed but also gained oxygen functional groups on their surface. These introduced oxygen functional groups created conditions that enhanced copper adsorption. Copper atoms successfully attached to CNTs through a simple method. XPS and EXAFS analyses confirmed the copper maintained its single-atom form without clustering. After preparing the spinning dope for fiber fabrication, liquid crystal formation was confirmed using polarized optical microscopy. Despite the incorporation of copper atoms, the liquid crystalline properties were well maintained, and similar birefringent patterns were observed across all samples.



Fig. 1. (a) XPS spectra demonstrating copper atom incorporation into CNT (b) POM images showing liquid crystalline phases of spinning dopes

All samples were stably and continuously formed into fibers. The strength values showed minimal variation between samples. While copper addition did not significantly improve electrical conductivity, coppercontaining fibers exhibited less reduction in conductivity after heat treatment at 200°C. This demonstrates enhanced electrical and thermal stability.

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

This research presents a strategy to enhance the electrical performance of CNTFs by incorporating metal single atoms within the fiber structure. These internal metal atoms serve as electrical bridges, improving both structural stability and electrical properties. Future work will analyze the electrical conduction mechanism to investigate how metals influence the internal fiber structure

References

C Kevin et al. J. Phys. Chem. C. 126:17266-17274, 2022.
 EY. Li et al. ACS Nano. 5(12):9726-9736, 2011

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Institute of Science and Technology (KIST) K-Lab Program.

폴리아크릴로니트릴(PAN) 공중합체 합성 및 CNT 복합섬유 방사 연구 Synthesis of PAN Copolymers and Spinning of CNT Composite Fibers

*최원정^{1, 2}, 김중환¹, 김서균¹, 유승화^{2, 3+}, 구본철¹⁺ * Wonjung Choi^{1, 2}, Junghwan Kim¹, Seung Hwa Yoo^{2, 3}, Bon-Cheol Ku¹⁺

¹ 한국과학기술연구원 전북 탄소융합소재연구센터, ² 전북대학교 BNHKIST산학연융합학과, ³ 전북대학교 양자시스템공학과 ⁺E-mail: seunghwayoo@jbnu.ac.kr and cnt@kist.re.kr

Keywords: PAN copolymer, CNT composite fiber

1. 서론

탄소섬유(CF)는 90% 이상 탄소로 이루어진 고강도·고탄성· 경량 소재로, 주로 폴리아크릴로나이트릴(PAN) 전구체를 이용해 제 조되며, 시장의 약 96%를 차지한다. 한편, 탄소나노튜브(CNT)는 우 수한 기계적·전기적·열적 특성을 지닌 1차원 나노소재로, 이 를 기반으로 한 탄소나노튜브 섬유(CNTF)는 CF보다 뛰어난 성능 을 보인다. 그러나 CNT의 높은 원가로 인해 상용화에 어려움이 있 다.

본 연구에서는 CNT와 PAN 공중합체를 습식 방사를 통해 복합 화하여 고강도·고탄성 CNT 복합섬유를 개발하고자 한다. 이를 통 해 기존 CF 대비 우수한 물성을 확보하고, 실용화를 위한 기반을 마 련하는 것이 목표이다.

2. 실험 방법

2.1 재료

Dimethyl sulfoxide(DMSO, 99.8%, SAMCHUN chemicals)를 용매 로 사용하였으며, 단량체 acrylonitrile(AN, ≥99%, Sigma-Aldrich), methyl acrylate(MA, 99%, Sigma-Aldrich), itaconic acid(IA, 99%, Alfa Aesar) 및 개시제 2,2'-Azobisisobutyronitrile(AIBN, 98.0%, SAMCHUN chemicals)는 정제 후 사용하였다.

2.2 P(AN-co-MA-co-IA) 중합

2-neck 플라스크에 DMSO를 용매로 하여 단량체의 비율이 총 25 wt%인 용액을 조제한 후, 단량체 대비 1 wt%의 AIBN을 첨가하였다. 용액을 밀봉한 뒤 질소 치환을 수행하고, 30분간 질소 버블링을 진행하였다. 이후 55℃에서 18시간 반응시킨 후, 생성물을 탈이온수와 에탄을에 침전·세척한 후, 50 ℃에서 진공 건조하였다. 2.3 PAN 습식 방사

CNT와 PAN을 5-40 wt%로 혼합한 후, 8 mg/mL의 농도로 Chlorosulfonic acid(CSA)에 하루 이상 교반하여 도프를 준비하였다. 도프는 25G 니들로 연신비 2.0 이상으로 방사되었으며, 응고 및 수세는 아세톤에서 진행되었다. 이후 내부 CSA를 제거하기 위해 추가 수세 후 170℃에서 진공 건조하였다. 이후 CNT-PAN 복합섬유는 1.800℃에서 탄화되었다.

3. 결과 및 토의

자세한 실험 조건은 다음 Table 1과 같다. Table 1 P(AN-co-MA-co-IA) feeding and conversion rate

Sample	Feeding ratio (mol%)			Conversion rate	
1	AN	MA	IA	88.0%	
	95	4	1		

중합된 생성물의 조성을 확인하기 위해 ^IH NMR을 수행하였다. PAN의 주요 피크는 (1) 1.95-2.2 ppm에서 관찰되는 -CH₂- 및 (2) 3.02-3.23 ppm에서 나타나는 -CH-다. 한편, 본 실험에서 중합된 P(AN-co-IAA-co-IA)의 경우, (3) 3.6-3.7 ppm에서 MA의 -OCH₃ 피크가, (4) 11.9-12.0 ppm에서는 IA의 -OH 피크가 나타났다.



Fig. 1. ¹H NMR spectra of PAN and P(AN-co-MA-co-IA).

CNT-PAN 복합섬유와 탄화섬유의 비강도를 FAVIMAT으로 측 정하였다. 두 섬유 모두 높은 비강도를 보였으나, PAN 함량이 일정 PAN 수준을 초과하면 감소하는 경향을 나타냈다. 특히 탄화섬유는 30 wt%를 초과 시 강도 저하가 두드러졌다.



Fig. 2. Specific tensile strength of CNT-PAN composite fibers.

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 P(AN-co-IA)의 성공적인 중합을 확인하였으며, PAN을 CNT 도프에 복합화하여 방사할 경우 일정 함량까지 강도가 증가함을 확인하였다. 향후 연구에서는 중합된 P(AN-co-IA)를 활용하여 CNT 복합섬유를 방사하고, 기계적 물성을 최적화함으로써 CNT 실용화에 기여하고자 한다.

5. 감사

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 과학기술사업화진흥원 의 지원을 받아 수행된 연구임. (2023년 학연협력플랫폼구축 시범사업)

Efficient Hydrogen/Deuterium Exchange of hydrocarbons in D₂O using Electron beam Irradiation.

*Ithape Chetan Sharad¹, Lekha Paramanik² and Seung Hwa Yoo^{1,2+}
¹ JNBU-KIST Industry-Academia Convergence Research, Jeonbuk National University
²Department of Quantum System Engineering, Jeonbuk National University
⁺E-mail: seunghwayoo@jbnu.ac.kr

Keywords : H/D Exchange, E-Beam Irradiation, Hydrocarbons, D2O.

1. Introduction

Deuterium, a stable isotope of hydrogen, contains one proton, one neutron, and one electron, differing from protium. It occurs naturally as heavy water (D₂O) and is used in its gaseous form (D₂) for nuclear fusion, semiconductor manufacturing, and OLED production. While previous research focused on deuteration of hydrocarbons via electron beam irradiation in gas and liquid phases—examining reaction kinetics, G-values, and activation energy—this study expands to solid hydrocarbons.¹ Our study marks a novel step in electron beam-driven deuteration research.

2.1 Experimental Section

A 5 ml glass ampoule containing 4-iodoanisole in CD_3CN/D_2O and Poly(1-Decene) in $DMSO/D_2O$ was sealed and heated to 90°C. The ampoules were irradiated with an electron beam (2.5 MeV, 1 mA) at KAERI, with doses ranging from 200 to 2000 kGy through multiple passes. Control experiments with similar samples were conducted under identical conditions.

2.2 Characterization

¹H NMR was performed using a 500 MHz JEOL (JNM-ECZ500R) spectrometer, while ¹³C NMR was conducted with a 600 MHz JEOL (JNM-ECZ600R) spectrometer. ATR analysis was carried out using a Perkin Elmer (Frontier). GC/LC-MS analysis was performed with a WATERS (XEVO TQ-S) instrument. All analyses were conducted at the CURF facility center of Jeonbuk National University. This comprehensive characterization ensured accurate evaluation of the reaction outcomes.

3. Results and Discussion

Deuteration of 4-iodoanisole and polydecene was studied using CD₃CN/D₂O or D₂O/DMSO as solvents, with absorbed doses from 200 to 2000 kGy. Significant deuteration occurred at higher doses (800–1000 kGy) for both compounds.^{1,2} NMR analysis showed reduced aromatic proton peaks and new peaks, confirming deuterium incorporation. The deuteration percentage for both 4-iodoanisole and polydecene was quantified through spectral peak analysis, confirming successful deuteration.



Figure 1- Reaction Mechanism

Table 1- Deuteration exchange ratio-

Compound	Dose (kGy)	H-D Ratio (%)
4-Iodoanisole	200	26.66
4-Iodoanisole	400	-
4-Iodoanisole	800	78
4-Iodoanisole	1000	82.8
4-Iodoanisole	2000	100
Polydecene (D ₂ O)	200	42.31
Polydecene (D ₂ O)	400	77.62
Polydecene (D ₂ O)	800	80.32
Polydecene (D ₂ O)	1000	60.37
Polydecene (D ₂ O)	2000	-
Polydecene (D ₂ O/DMSO)	200	61.29
Polydecene (D ₂ O/DMSO)	400	35.48
Polydecene (D ₂ O/DMSO)	800	81.80
Polydecene (D ₂ O/DMSO)	1000	87.54

4. Conclusions-

This study expands electron beam-induced deuteration of hydrocarbons, demonstrating effective deuterium incorporation at higher absorbed doses (800–1000 kGy). NMR analysis confirmed deuteration through diminished aromatic proton peaks. These findings pave the way for further research into solid-phase deuteration and its applications in isotope labeling.

References-

[1] Dyne, P. J., et al. *Canadian Journal of Chemistry* 39.4: 933-939, 1961.

[2] T Luo.et al. Angew. Chem., Int. Ed. 62:e202306267, 2023.

[3] M.A Klenner et al. Polym. Chem 11: 4986-4994,2020

Acknowledgement-

This work was supported by the Commercialization Promotion Agency for R&D Outcomes (COMPA) grant funded by the Korean Government (Ministry of Science and ICT, 2023) (RS-2023-00304743) and National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2023-00221529, NRF-2022R111A3064533).

N-Deficient Conjugated Polymers via Electron Beam Irradiation for Superior

Photocatalytic Hydrogen Production

Lagnamayee Mohapatra¹, Lekha Paramanik², Sung-je Lee³, Seung Hwa Yoo ^{1,2,3*}

¹JIANT-IT Human Resource Development Center, Division of Electronics and Information Engineering, Graduate School, Jeonbuk National University, Republic of Korea

²Department of Quantum System Engineering, Jeonbuk National University, Republic of Korea

³Division of Electronics and Information Engineering, Graduate School, Jeonbuk National University, Republic of Korea

⁺E-mail: <u>seunghwayoo@jbnu.ac.kr</u>

Keywords: Electron-Beam Irradiation, Photocatalysts, Nitrogen Defects, Hydrogen evolution

1. Introduction

Solar-driven photocatalysis is a promising strategy for sustainable H₂ production. Conjugated polymers, also known as $g-C_3N_4$, have gained interest due to their tunable electronic structures and visible-light absorption[1-2]. However, their efficiency is hindered by rapid charge recombination. Here, we show that electron-beam (EB) irradiation effectively introduces defects, enhancing charge separation and light absorption. At an optimized dose (300 kGy), EB-irradiated $g-C_3N_4(gCN-300)$ exhibited improved H₂ evolution. This study highlights EB irradiation as a strategy for developing an efficient catalyst.

2. Experimental Section

2.1 Synthesis of g-C₃N₄ photocatalysts and EB irradiation

g-C₃N₄ was synthesized by heating melamine at 550 $^{\circ}$ C for 2 h in an N₂ atmosphere. For EB irradiation, 300 mg of g-C₃N₄ was placed in a polyethylene bag and uniformly spread (1-2 mm thick). EB irradiation was conducted at 2.5 MeV and 1 mA under ambient conditions, with absorbed doses ranging from 0 to 500 kGy. Samples were labeled gCN-0 to gCN-500 based on dose levels.

2.2 Characterization of Materials

XRD was performed $(2\theta = 5-60^{\circ})$ using a Bruker D8 Advance with Cu K α radiation (λ = 1.54 Å, 40 kV, 40 mA). FTIR spectra (4000–400 cm⁻¹) were recorded using a PerkinElmer Frontier. ESR was measured with a Bruker EMXplus (X-band, 9.64 GHz). UV-vis DRS (240–1000 nm) was analyzed using a Shimadzu SolidSpec-3700.

2.3 Evaluation of Photocatalytic Activity

Photocatalytic H_2 evolution was conducted in a sealed quartz-window reactor. A 20 mg photocatalyst was ultrasonically dispersed in 20 mL of 10 vol% methanol solution, Ar-purged for 30 min, and illuminated with a 100 mW cm⁻² Xe lamp (AM 1.5G) and Stirred (500 rpm). H_2 was analyzed via GC (YOUNG IN Chromass 6500, TCD, Ar carrier gas, 30 mL/min).

3. Results and Discussion

The g-C₃N₄ crystal structure showed peaks at $2\theta = 27.5^{\circ}$ (002) and 12.7° (100). EB irradiation caused slight decreases in interplanar distance for gCN-100, gCN-400, and gCN-500, while gCN-200 and gCN-300 showed slight

increases, due to nitrogen-vacancy defects [3]. FTIR showed key bands at 805 cm⁻¹ (triazine breathing), 1200–1700 cm⁻¹ (C-N stretching), and 3000–3400 cm⁻¹ (N-H/O-H stretching), indicating C-NH-C bridging, trigonal motifs, and uncondensed amino groups. ESR revealed enhanced paramagnetic signals at g = 2.003 for gCN-300, indicating increased unpaired electrons and nitrogen vacancies due to EB irradiation. UV-vis DRS showed a slight red-shift in the absorption edge of irradiated catalyst to 478 nm, indicating a narrower band gap due to nitrogen vacancies,



Figure 1. (a) Schematic of preparation process of nitrogenvacated g-C3N4 using EB irradiation(b)XRD and (c) FTIR spectra (d)ESR spectra, (e)UV-vis DRS (f)The photocatalytic H2 evolution rate, of all samples, and (g) gCN-300 for three repeated tests.

4. Conclusions

The optimized gCN-300 photocatalyst achieved impressive H2 generation of 750.57 μ mol g⁻¹h⁻¹, attributed to abundant surface active sites and defect-induced electron trapping. This performance was further supported by excellent photostability and effective charge-carrier separation.

References

X. Li et al. Chem Catalysis, 2, 1315-1345,2022.
 T. Muhmood et al. Mater today sustain. 25, 100633 2024.
 H. Li et al. J. Chem. Eng. 369 (2019) 263-271.

Acknowledgement

This work was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) (NRF-2022R111A3064533, RS-2023-00221529, and 2009-0082580) and project BK21 FOUR

Green Synthesis of Graphene Oxide-Carbon Nanotube Hybrid Spherical Carbon Fillers via Novolac Phenolic Resin

*Jinuk Hwang ^{1,2}, Woo Seong Tak ^{1,2}, Kyoungwon Kim ^{1,2}, Yongjun Jo², Young-Keun Jeong ¹ and Woo Sik Kim ²⁺

¹ Graduated School of Convergence Science, Pusan National University, Pusan 46241, Republic of Korea

² Convergence Transport Materials Center, Korea Institute of Ceramic Engineering and Technology, Jinju 52851, Republic of Korea +E-mail: wskim@kicet.re.kr

Keywords : Carbon filler, Graphene oxide, Carbon nanotube, Electrical conductivity, Hybrid

1. Introduction

The fabrication of composite materials with enhanced electrical conductivity is increasingly crucial for improving performance across diverse applications, including energy storage, catalysis, and sensing. Carbon materials are pivotal in boosting composite conductivity due to their high electrical conductivity, exceptional chemical stability, and robust mechanical properties. Novolac phenolic resin (NPR), known for its high carbon yield, is widely used in carbon coating and additive synthesis. To further elevate the conductivity of NPRderived carbon additives, we present an eco-friendly particles. synthesis of spherical NPR/GO/CNT incorporating graphene oxide (GO) and carbon nanotubes (CNT). These particles were subsequently converted into vield spherical hybrid carbon fillers. The resulting additives exhibit a spherical morphology, encapsulating reduced graphene oxide (RGO) and CNT formed through thermal treatment. Notably, this synthesis employs distilled water as a solvent, eliminating the use of toxic organic solvents, thus offering a simplified and environmentally benign process. The developed spherical hybrid carbon additives hold promise for applications in energy storage devices, electrochemical catalysts, and high-performance composites. This work anticipates contributing to the advancement of next-generation functional carbon materials by providing a sustainable and efficient synthesis approach.

2. Experiment

NPR was magnetically stirred in distilled water (DI) until completely dissolved, followed by the addition of GO and oxidized CNT solutions. The NPR/GO/CNT aqueous solution was mixed twice for 30 seconds each at 2,000 rpm using a paste mixer. To ensure complete removal of DI, the mixture was placed in a 90°C drying oven overnight. The dried NPR/GO/CNT was then pulverized using mechanical milling. The resulting powder was placed in a tube furnace filled with Ar and pyrolyzed at 900°C for 2 hours to produce spherical hybrid fillers.

3. Results and Discussion

Low molecular weight NPR dissolved in DI formed spherical particles through electrostatic interactions with the functional groups of GO and oxidized CNT in the solution. After mechanical milling, it was confirmed that most particles exhibited a spherical structure surrounded by GO and CNT. These hybrid spherical particles maintained their shape even during the carbonization process after heat treatment. This suggests that spherical hybrid carbon additives can be successfully fabricated by mixing low molecular weight NPR with functional nanocarbons without using organic solvents.



Fig. 1. The surface morphology of NPR/GO/CNT synthesized with DI as a solvent.

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials



Fig. 2. The SEM image of spherical hybrid pyrolytic carbon fillers

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

This study presents an environmentally friendly method for synthesizing spherical hybrid carbon additives based on NPR, GO, and CNT, using distilled water as a solvent without toxic organic solvents. Spherical particles were formed through electrostatic interactions between low molecular weight NPR and GO/CNT, and hybrid additives with uniformly dispersed RGO and CNT were fabricated through mechanical milling and pyrolysis. This contributes to the application of high-performance carbon materials in energy storage, catalysis, and other fields, and presents new possibilities for the development of sustainable carbon materials.

Rapid and Universal Electrochemical Enhancement of Carbon Nanotube Fibers for Energy Storage

*Sungju Lee ^{1,2}, Min Gook Han¹, Hyewon Jung¹, Dayeon Cheon¹, Hee-Tae Jung²⁺ and Hyeon Su Jeong¹⁺

¹ Carbon Composite Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST)

² Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) ⁺E-mail: jeonghs98@kist.re.kr

Keywords : Industrial carbon nanotube fiber, Composite, Supercapacitor

1. Introduction

Carbon nanotube fibers (CNTFs) are promising for fibershaped energy storage due to their mechanical strength, flexibility, and conductivity. However, their low intrinsic electrochemical activity necessitates active material integration. Here we introduce a modified chlorosulfonic acid (CSA) densification method utilizing a double diffusion mechanism to efficiently incorporate polyaniline (PANI), nickel oxide (NiO), and activated carbon (AC) into CNTFs. This approach enables the rapid incorporation of various active materials while enhancing mechanical and electrochemical performance.

2. Processing Method

CNTFs are first swelled in CSA, which protonates the CNT surface and causes fiber expansion by increasing electrostatic repulsion between CNT bundles [1]. The fibers are then immersed in an acetone bath containing dispersed active materials, inducing a double diffusion effect where CSA diffuses out while active materials infiltrate the fiber structure. This simultaneous solvent exchange and material infusion enable rapid incorporation of active materials, ensuring strong adhesion between CNTs and active materials while enhancing fiber densification [2].

3. Results and Discussion

The modified CSA densification process enhances the mechanical strength of all composite fibers while reducing their resistance. Compared to pristine CNTFs, the composites exhibit increased tensile load values, with PANI@CNTF showing the highest improvement due to strong interfacial interactions. This enhancement results from effective active material infiltration, which reinforces the CNT network without compromising flexibility. Additionally, all samples demonstrate reduced electrical resistance, attributed to improved fiber densification and enhanced charge transport.

Electrochemical tests confirm that AC@CNTF retains double-layer capacitance, while PANI@CNTF and NiO@CNTF exhibit pseudocapacitive behavior. PANI@CNTF shows a 17-fold capacitance increase over pristine CNTFs, with lower resistance and stable cycling performance, demonstrating its potential for energy storage applications.



Fig. 1. (a) Schematic diagram of the process, (b) SEM images, (c) linear density, (d) tensile load, (e) internal resistance, and (f) cyclic voltammetry plots of all CNTF composite samples.

4. Conclusions

This modified CSA densification approach, utilizing a double diffusion mechanism, enables rapid integration of various active materials into CNTFs, significantly improving both structural and electrochemical properties. Its simplicity makes it a promising method for developing next-generation fiber-shaped electrodes. Additionally, this streamlined process, which enhances material integration, further expands the potential applications of CNTFs, with opportunities for future scalability through process optimization.

References

[1] J Lee et al. *Nat. Commun.* 10.1:2962, 2019. [2] S Lee et al. *Small Methods* 2401478, 2024.

Acknowledgement

This research was supported by National Research Foundation of Korea (NRF) and the Korea Institute of Science and Technology (KIST).

곡관형 수소 저장용기 성형 공법에 따른 기계적 물성 및 성형성 검증 Mechanical Properties and Formability of curved Hydrogen Storage Vessel

*윤언수¹, 김경태¹, 최현종¹, 한재영¹, 신대용¹ 천진성², 최순호³ 이준석¹⁺

* E.S. Yun ¹, G.T. Kim ¹, H.J. Choi ¹, J.Y. Han ¹, D.Y. Shin ¹, J.S. Cheon ², S.H. Choi ³, J.S. Lee ¹⁺

¹ 영남대학교 파이버시스템공학과, ² ㈜ 티포엘, ³ 다이텍연구원 ⁺E-mail: <u>leejs@ynu.ac.kr</u>

Keywords: CFRP, hydrogen storage vessel, mechanical properties, fabricating process

1. 서론

Type 4 저장 용기는 Type 3 저장 용기에 비해 강철 라이너 대신 고분자 라이너를 사용해 무게를 줄일 수 있다. 또한 Type 4 다중 쉘 또는 비정형 저장 용기는 설치 시 하나의 큰 용기보다 공간 효율성을 극대화할 수 있다. 여러 개의 셀을 연결하면 하나의 대형 용기보다 저장능력도 높일 수 있다는 장점이 있다.[1] 저장용기의 외부 섬유강화복합재는 내부 하중을 견디는 보호 쉘로 사용된다. 수소 저장 용기는 수소 충전 시 발생하는 높은 압력을 견딜 수 있는 우수한 기계적 물성을 갖추어야 한다. 따라서 최적의 기계적 물성 및 최소한의 기공률을 갖는 성형 공법을 도출해 내야한다.



Fig. 1. Curved hydrogen storage vessel.

2. 소재 및 실험

2.1 소재

본 연구에서는 강화재로 도레이의 T-700 12K 탄소 섬유 원사를 사용하여 48축 브레이딩 장비로 60도 각도로 브레이딩하여 프리폼을 제작하였다. 에폭시 수지로는 국도화학의 YD-128을 사용하였으며, 경화제로는 국도화학의 H-4065를 사용하였다. 에폭시와 경화제는 8:1 비율로 혼합하여 매트릭스로 사용하였다. 또한, T-700 12K 토우 프리프레그를 48축 브레이딩 장비를 사용하여 60도 각도로 브레이딩하여 성형을 진행하였다.

2.2 기계적 물성 및 X- ray CT 측정

연구에서는 두 가지 조건으로 본 시편을 성형하였다. 첫 번째 조건에서는 carbon fiber 브레이딩 프리폼을 인퓨전 성형 방식으로 사용하여 시편을 제작하였고, 두 번째 조건에서는 토우 프리프레그 브레이딩 프리폼을 진공 백 성형 방식으로 시편을 제작하였다. 기계적 물성은 인장 강도, 굽힘 강도, 그리고 ILSS를 측정하였으며, 각각의 측정은 ASTM D3039, ASTM D790, ASTM D2344 규격에 따라 만능재료 시험기를 사용하여 수행하였다. 또한, 제작된 시편의 성형성 및 기공률을 확인하기 위해 각 시편을 X-ray CT로 분석하였다.

3. 결과 및 토론

인퓨전 성형으로 제작된 쿠폰 시편과 토우 프리프레그를 사용한 진공 백 성형 쿠폰 시편의 기계적 물성은 거의 동일한 수준을 보였다. 그러나 성형성 측면에서는 토우 프리프레그를 사용한 경우 성형 속도가 훨씬 빠르기 때문에 유리한 것으로 나타났다. 반면에, X-ray CT 분석 결과, 기공률은 인퓨전 성형으로 제작된 시편이 훨씬 낮게 나타났다.



Fig. 2. X-ray micro-CT analysis of coupon specimens.

4. 결론

수소 압력 용기는 수소 충전 시 높은 압력을 견디고 수소 투과율이 낮아야 한다. 따라서, 이러한 용기는

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

높은 기계적 물성과 낮은 기공률을 가져야 한다. 인퓨전 성형과 토우 프리프레그 진공 백 성형 모두 높은 기계적 물성을 제공하지만, 인퓨전 성형으로 제작된 시편은 기공률이 낮은 반면 성형 속도가 느리다는 단점이 있다. 반면, 토우 프리프레그 진공 백 성형 시편은 성형 속도가 빠르지만 기공률이 상대적으로 높다. 따라서, 성형성이 우수하면서도 기공률이 낮은 수소 압력 용기를 제작하기 위해서는 적절한 공법을 개발하는 것이 필요하다.

참고문헌

[1] Tapeinos et al. *International Journal of Hydrogen Energy*. 41.5:3676-3688, 2016.

후기

본 연구는 산업통상자원부의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 20011899)

파크골프 클럽용 계층적 구조 탄소섬유 복합재의 감쇠 성능 연구

Damping Behavior of Hierarchical Carbon Fiber Composite for Park Golf Club Faces *신민혁¹, 배서연¹, 신준섭^{1,2}, 김문수^{1,2}, 나원진^{1,2+}

* M.H. Shin¹, S.Y. Bae¹, J.S. Shin^{1,2}, M.S. Kim^{1,2}, W.J. Na^{1,2+}

¹ 한국과학기술연구원 복합소재기술연구소 ¹ 전북대학교 JBNU-KIST 산학연융합학과 ⁺E-mail: <u>namossi@kist.re.kr</u>

 Keywords: Carbon fiber composite, Nanofillers, Coefficient of Restitution, Vibration damping

 1. 서론
 3. 결과 및 논의

파크골프는 2000년 국내에 첫 도입 된 스포츠로, 높은 접근성, 간단한 준비 과정, 짧은 경기 시간 덕분에 특히 노령층에서 인기가 높은 대중 레저활동이다. 하지만 공을 휘두를 때 예상치 못한 움직임이 발생할 경우 건염(내측상과염, 골프 엘보 발생)과 같은 부상의 위험이 있다 [1]. 따라서 진동 감쇠 성능을 개선하고 반발력을 높이는 것이 필요하다. 본 연구는 기존 CFRP 페이스에 나노필러(CNT, GO)를 적용하여 반발계수와 진동 감쇠 성능을 향상시키는 것을 목표로 한다.

2. 시편 제조

2.1 CFRP 성형

Toray T-300 탄소섬유를 보강재로, YD-115 에폭시 수지 및 D-230 경화제를 매트릭스로 사용하였다. 나노필러로는 CNT와 GO (Graphene oxide) 를 적용하였으며, GO는 Hummer's method로 합성하였다. Neat, CNT (5 w t% 미만), GO (0.1 wt % 미만) 샘플을 제작하여 비교하였으며, 3-roll-mill 혼합 후 핸드레이업 및 진공백 성형(70 ℃, 4시간)으로 제작하였다.

또한, 최적 조성을 적용한 진동 감쇠 성능 우수 CFRP 프리프레그를 제작하였으며, 단방향(UD) 및 평직(Woven) 형태로 Neat/Nanofiller 포함 4가지 시편을 준비하였다. YD-128 에폭시, DICY 경화제, DCMU 촉진제를 사용하여 수지 함량 33 %로 조절하였으며, 0.7 MPa 압력의 오토클레이브 공정(80°C 30분 + 125°C 2시간 경화)을 거쳐 최종 제작되었다.

2.2 물성평가

DMA(손실 계수) 및 PLB 테스트(ASTM E976, H-N 소스 및 AE 센서 활용)를 통해 진동 감쇠 성능을 평가하고, 인장 테스트(ASTM D3039)로 기계적 성능을 분석하였다. 또한, 8 mm 페이스의 파크골프 클럽 프로토타입을 제작하여, 아마추어 10명을 대상으로 블라인드 테스트(타구음, 타구감, 비거리, 진동 감쇠) 진행하여 1~5 점 척도로 평가하였다. CFRP 기반 파크골프 클럽 페이스를 개발하고, 반발 성능(CoR) 및 진동 감쇠 성능을 평가하였다. CNT 첨가 시 CoR 최대 0.832까지 증가하였고, GO 첨가 시 진동 감쇠가 최대 0.2156 dBAE/mm 향상을 확인하였으며, 0.025 wt % GO 첨가로 진동 및 음향 감쇠 성능이 1033 % 증가하는 결과를 도출하였다. 실제 제품 평가에서도 산업적 적용 가능성이 검증되었으며, 나노소재 형태와 복합재 매트릭스의 상호작용이 진동 감쇠 성능에 중요한 영향을 미침을 확인하였다.



Fig. 1. The damping ratio of CFRPs with CNT and GO nanofillers.

4. 결론 및 향후과제

충격 저항성과 진동 감쇠 간의 균형을 맞추는 오랜 난제를 해결하며, 나노소재 강화 복합재 설계에 대한 새로운 통찰을 제공한다. 개발된 소재는 헬리콥터, 도시 항공 모빌리티(UAM) 시스템 등 지속적인 저진동 환경에 노출되는 응용 분야에서도 활용 가능성이 높음을 보여준다.

참고문헌

 Murray A., Daines L., Archibald, D., Hawkes, R., Schiphorst, C., Kelly, P., Grant, L., Mutrie, N., The relationships between golf and health: A scoping review., Br. J. Sports Med., 2016, 51, 1–11.

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

HVOF 화염 유동 환경에서의 열 유속 조건에 따른 티타늄 합금 (Ti-6AI-4V)의 열 보호 특성 평가

Evaluation of thermal protection properties of Titanium alloy (Ti-6Al-4V) according to heat flux conditions in HVOF flame flow environment

박운용 ¹, 김대영 ²,최기혁 ², 홍성민 ¹⁺ ^{} W.Y. Park ¹, D.Y. Kim ², S.M. Hong¹⁺

¹ 전북대학교 고온플라즈마응용연구센터, ² 한국항공우주연구원 ⁺E-mail: smhong@jbnu.ac.kr

Keywords: Ti-6Al-4V (Ti64), HVOF (High velocity Oxygen Fuel) Torch

1. 서론

국초음속 비행체는 빠른 비행으로 인해 공기의 마찰, 단열 압축으로 비행체 표면이 가열되는 공력 가열 (Aerodynamic heating) 현상이 발생한다. 이러한 공력 가열이 지속되면 구조물의 급격한 온도 상승을 초래하여 기체 내외부에 심각한 손상을 초래한다. 이러한 극한의 초음속 환경으로부터 비행체 구조물 및 표면을 보호하기 위해 열 보호 시스템 (Thermal Protection System, TPS)을 필수적으로 장착해야 한다^[1-3].

본 연구에서는 전북대학교 고온플라즈마 응용연구센터의 HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) Torch를 활용하여 열유속 조건에 따른 티타늄 합금인 Ti-6A1-4V (Ti64)의 열 보호 특성 변화를 확인하여 티타늄 합금의 열 보호 시스템에 적용이 가능한지 검토하고, 초음속 고온 화염 유동에서의 항공우주용 복합소재 및 부품의 고온 내열특성 평가가 가능한지 확인하고자 한다.

2. HVOF Torch를 활용한 Ti-6AI-4V 합금 시편 고온 특성 평가

2.1 HVOF Torch 실험 결과

Ti-6A1-4V 합금의 열 보호 특성을 확인하기 위해 HVOF torch를 활용하여 열유속 조건이 각각 2.5, 3.25 MW/m²에서 90 s 동안 시편을 노출 시켰다. 각 열유속 조건에서 표면 온도는 약 1,000, 1,200 ℃로 형성되었으며, 내부 온도 (시편 표면으로부터 5 mm) 는 약 950, 1,100 ℃로 형성되었다. (Figure 1)





flow (Camcorder image), (b, c) Surface temperature change, (d, e) Temperature change inside the specimen according to HVOF flame heat flux conditions ((b), (d) : 2.5 MW/m^2 , (c), (e) : 3.25 MW/m^2)

2.2 Ti-6AI-4V 합금 시편의 표면 및 내부 조직 변화 HVOF 실험 전/후 Ti64 시편의 표면 변화를 확인하기 위해 XRD 및 FE-SEM을 확인한 결과, 다량의 Rutile phase의 TiO₂, 소량의 TiVO₄, Al₂O₃ 등이 확인되었으며, 산화층은 각 열유속 조건 형성되는 것을 별로 약 5, 14 um로 확인하였다(Figure 2 (a)). Ti-6A1-4V 합금 내부 조직을 확인하기 위해, 부식 후 표면부터 5, 10, 15, 20 mm까지 Optical microscopy 분석을 진행하였다. 두 열유속 조건 모두 알파 케이스 (a case)가 형성되었으며 (Figure 2 (b)). 내부 조직은 2.5 ₩V/m²의 경우, 최대 5 mm까지 층상 구조가 형성되었으며, 3.25 ₩V/m²의 경우, 최대 15 mm까지 층상 구조가 형성되었다.



Figure 2. (a) Cross-sectional morphology of oxide scale (b) Cross-sectional microstructure of Ti-6Al-4V after HVOF test (Top : 2.5 MW/m², Down : 3.25 MW/m²)

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 티타늄 합금의 극초음속 비행체의 열 보호 시스템 소재로서의 가능성을 확인하고자 하였다. HVOF Torch test를 통해 열유속 2.5, 3.25

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

MW/m²에서 각각 표면 온도 약 1,000, 1,200 ℃를 형성하는 것을 확인하였으며, 다성분의 산화층이 형성되는 것을 확인하였다. 금속 내부 관찰 결과, 각각 열유속 조건에서 최대 5, 15 mm 까지 미세조직의 급격한 변화가 이루어진 것으로 보아 본 연구에서 채택한 티타늄 합금이 2.5 MW/m²에서 최대 1,000 ℃까지 버틸 수 있을 것으로 전망한다. 또한 HVOF System은 초음속 고온 화염유동을 발생시킬 수 있어 다양한 열유속 환경에서의 항공우주용 복합소재 및 부품의 고온 내열특성 평가에 활용이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- V. T. Le et al. Composites Bart B, 226, 109301, 2021.
- [2] M. L. Blosser et al. Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 41, pp.195-206, 2004.
- [3] V. T. Le et al. Journal of Spacecraft and Rockets 58.4, pp 1043-1060, 2021.

변형률 속도에 따른 탄소 섬유 복합재와 유리 섬유 복합재의 기계적 거동 분석 Rate-dependent mechanical behavior of carbon fiber-reinforced and glass fiberreinforced composites

최태성 ¹, 김정섭 ¹,지우석 ¹⁺ ^{} T. Choi ¹, J. Kim ¹, W. Ji ¹⁺

¹ 울산과학기술원 기계공학과 ⁺E-mail: <u>wsji@unist.ac.kr</u>

Keywords: Rate dependency, carbon fiber reinforced polymer composite, glass fiber reinforced polymer composite, SHTB

1. 서론

변형률 속도에 따라 변하는 복합재료의 기계적 거동은 동적 환경에서 충격 저항 구조물의 성능을 예측하는 데 중요한 요소이다. 정적 환경에서 탄소 섬유 강화 복합재(carbon fiber-reinforced plastic, CFRP)와 유리 섬유 강화 복합재(glass fiber-reinforced plastic, GFRP)의 기계적 거동은 잘 알려져 있지만, 동적 환경에서의 비교 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 변형률 속도에 따른 두 복합재의 기계적 특성 변화를 분석하고, 이를 통해 속도 의존적 거동을 정량적으로 평가하고자 한다.

2. 재료 및 실험 방법

본 연구에서는 CFRP와 GFRP 시편을 VARTM(Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) 공정을 이용하여 제작하였다. 탄소 섬유는 JMC사의 1321P plain weave fabric을, 유리 섬유는 한국신소재사의 G118-1 plain weave fabric을 사용하였다. 에폭시 수지는 Proset사의 INF114/INF211을 사용하였다.

변형률 속도가 1/s 미만인 경우, INSTRON 5982 만능인장시험기를 사용하여 실험을 수행하였다. 변형률 속도가 1/s 이상인 경우, 1차원 파동 전파 이론을 활용하여 Split Hopkinson Tension Bar(SHTB)로 실험을 진행하였다. SHTB 실험에서, 시편의 변형률과 응력은 식 (1)과 (2)를 이용하여 계산하였다 [1].

$$\varepsilon = -\frac{2C_B}{L_s} \int_0^t \varepsilon_R \, dt \tag{1}$$

$$\sigma = \frac{A_B}{A_S} E_B \varepsilon_T \tag{2}$$

3. 실험 결과 및 토의

그림 1은 CFRP와 GFRP의 변형률 속도에 따른 인장 거동의 변화를 보여준다. CFRP와 GFRP 모두 변형률 속도 증가에 따라 강도가 변화하는 경향을 보였다. 그림 1에서 CFRP의 경우 변형률 속도가 증가함에 따라 강성 변화는 크지 않았으나, 강도가 564 MPa에서 426 MPa로 약 24% 감소하였다. 반면, GFRP는 변형률 속도 증가에 따라 강도가 300 MPa에서 424 MPa로 약 41% 증가하는 결과를 보였다.

변형률 속도가 증가함에 따라 탄소 섬유의 강도는 거의 변화하지 않지만, 유리 섬유의 강도는 증가하는 것으로 알려져 있다 [2]. 또한, 변형률 속도가 증가할수록 에폭시의 강도는 감소하는 경향을 보인다 [3]. 이러한 거동에 따라 CFRP의 강도는 기지재의 속도 의존적 거동을 따라 감소하였으며, GFRP의 강도는 유리 섬유의 속도 의존적 거동을 따라 증가하였다.



Fig. 1. The representative tensile stress-strain curve at various strain rates (a) CFRP (b) GFRP

4. 결론

본 연구를 통해 CFRP와 GFRP의 변형률 속도 의존적 거동을 정량적으로 분석하였다. CFRP는 기지재의 속도 의존성을 따라 높은 변형률 속도에서 취성 거동이 두드러지며 강도가 감소하는 반면, GFRP는 섬유의 속도 의존성을 따라 연성 거동이 증가하면서 강도가 향상됨을 확인하였다.

참고문헌

Kolsky, H et al. *Proc. Phys. Soc. B*. 62:676, 1949.
 Y Zhou et al. *Mater. Lett.*. 64:246-248, 2010.

[3] Choi, T et al, J. Compos. Sci., 9:29, 2025.

후기

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원 (KEIT) 기계장비산업기술개발사업 (20018217)과 과학기술 정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원 (No.: 2017R1D1A1B03035011)을 받아 수행되었습니다.

제작 공정별 CFRP 섬유부피분율 및 기공율 분석에 관한 연구 Study on Analysis of CFRP Fiber Volume Fraction and Void Content by Manufacturing Process

*백중택¹, 최수정¹, 이준숭¹, 문지훈¹, 박종관², 주성욱¹⁺ * J.T. Back¹, S.J. Choi¹, J.S. Lee¹, J.H. Mun¹, J.K. Park², S.W. Joo¹⁺

¹ 경북테크노파크 하이브리드부품연구소, ² ㈜태성에스엔이 ⁺E-mail: <u>jsw@gbtp.or.kr</u>

Keywords: Fiber Volume Fraction, Void ratio, Image Automated Quantitative Analysis, MIPAR

1. 서론

탄소섬유복합재료(CFRP)는 제작공정에 따라 섬유 및 기공의 부피분율 차이가 발생한다[1-2]. 이는 CFRP의 기계적 물성에 영향을 끼치며, 이를 정확하게 측정 하여 분석하는 것은 CFRP 설계에 중요한 지표로 작용한다. 본 연구에서는 고온연소법 및 이미지 분석법을 활용하여 각 제작공정별 CFRP의 섬유 부피 분율과 기공율을 측정해보았다.

2. 실험

2.1 CFRP 분석 시료 제작

섬유부피분율과 기공율 측정을 위해 CFRP 패널은 오토클레이브 공정, 핫 프레스 공정, 진공백 오븐 성형 공정으로 제작하였다. 시료는 공정별로 3개씩 채취 하였으며, 시료에 대한 정보는 Table 1에 정리하였다.

Table 1 Information of Analysis Specimens

Process	Material	Thickness	Specimen ID
Autoclave	USN200	t=2.31mm	#A
Hotpress	USN200	t=2.52mm	#P
Oven	EZ-Preg-S-700T	t=0.96mm	#O

2.2 CFRP 섬유부피분율 및 기공율 분석

분석은 ASTM D 3171-22 규격에 따라 고온연소법을 실시하였으며, 추가적으로 AI기반 이미지분석도 진행 하여 상호비교 하였다. 고온연소법은 연소 전 시료의 무게 및 밀도 측정 이후 전기머플로에서 480℃, 4시간 가열해 수지를 제거한다. 연소 후 시료의 무게 측정과 규격에 제시된 수식을 통해 섬유부피분율 및 기공율을 산출한다. AI기반 이미지분석의 경우 분석 시료의 SEM 단면 이미지를 MIPAR v5.0.1 S/W에 적용시켜 섬유부피분율과 기공율을 측정하였다. 기존 이미지 분석법은 작업자에 따라 섬유 및 기공 영역 판단에 대한 편차가 있어 정확하게 분석하기 어렵다는 단점이 있었으나 AI기반 이미지분석은 S/W를 활용하여 SEM이미지에 대한 딥러닝 학습을 통해 보다 명확하게 섬유 및 기공 영역을 판단하고, 분석할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 1에 AI기반 이미지분석에 대한 절차 를 나타내었다.



Fig. 1. MIPAR image analysis procedure.

3. 결과

섬유부피분율 측정결과는 Fig. 2에 나타내었으며, 고온연소법의 경우 #A, #P, #O 순으로 53%, 50%, 61%로 측정되었으며, AI기반 이미지 분석법의 경우 60%, 56%, 72%로 측정되었다.



Fig. 2. Fiber Volume Fraction(Burn-out vs Image analysis).

4. 결론

탄소섬유 미세구조 단면분석을 통해 AI기반 이미지 분석법의 신뢰성을 확인하였으며, 동일 분석법을 활용하여 기공율 분석도 진행할 예정이다.

참고문헌

SH Kwak et al. *Compos Res.* 34:88-95, 2021.
 HS Yoon et al. *Compos Res.* 32:199-205, 2019.

후기

본 연구는 산업통상자원부가 지원하는 연구과제(0040836 8)로 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

MAT_4A_MICROMEC모델을 활용한 섬유강화 복합소재의 거동 특성 분석 Analysis of the Behavior Characteristics of Fiber-Reinforced Composites Using the MAT_4A_MICROMEC Model

*배덕근 ¹, 황문영¹, 강우종²⁺ * D.G. Bea¹, M.Y. Hwang¹⁺

¹ 한국자동차연구원 소재융합연구센터 ² 경일대학교 기계전기융합학부 ⁺E-mail: myhwang@katech.re.kr

Keywords: LS-DYNA, Composite, FEM, Strain Rate Effect **1. 서론**

최근 자동차 산업이 친환경·전동화로 전황됨에 따라 차량의 효율 향상을 높은 경량화 효율을 가지고 있는 복합소재가 다양한 자동차 부품에 적용되고 있다. 본 연구에서는 LS-DYNA의 MAT_4A_MICROMEC을 활용하여, 복합소재와 Matrix 물성을 각각 정의하고 Strain Rate Effect 및 Matrix 소재의 하중경로에 따른 파단 특성을 고려한 거동 분석을 수행했다.

2. 실험

2.1 소재 및 시편

본 연구에 사용된 소재는 PP GF30 복합소재 이며, 인장, 전단, 노치 및 평판 충격 시편을 제작했다. Matrix 소재인 Polypropylene의 Fracture Locus 데이터를 확보하기 위해 하중 경로별 시편을 제작했다.

2.2 시험방법

PP GF30 및 Matrix 소재의 Strain Rate Effect를 확인하기 위해 0.01 /s ~ 100 /s 범위에서 인장시험을 수행했고, Matrix 소재의 Fracture Locus 데이터를 확보하기 위해 하중경로별 시험을 각하중경로에 대해 0.01 /s ~ 100 /s 범위에서 시험을 수행했다. 상관성 분석을 위한 시험은 낙하충격 시험기를 활용하여 4 m/s Dart Impact 조건으로 수행했다.

3. 유한요소해석(Finite Element Method)

3.1 MAT_4A_MICROMEC in LS-DYNA

LS-DYNA의 MAT_4A_MICROMEC 모델은 섬유 배향, 섬유 분율, Raw Matrix 및 Composite의 Strain Rate Effect, Fracture Locus 등을 정의하여 복합소재의 변형 및 손상을 모사할 수 있는 물성 모델이다.

본 연구에서는 Damage Evolution Parameter를 제외한 조건만 고려하였으며, 섬유 소재의 물성은 E-Glass Fiber의 물성을 적용했다.

3.2 유한요소해석

시편해석 및 평판 충격 시험 해석의 수행을 위해 쉘 요소로 시편 및 Jig를 모델링 했다.



Fig. 1 Finite element analysis results along the load path

해석상의 Jig는 Rigid Body로 모델링 했다. 시편해석 결과 시험의 유사성을 확인했으며, 평판 충격 시험과 해석의 상관성 분석 결과 평판의 거동 특성이 일치함을 확인했다.

4. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 복합소재의 인장시험을 통해 Strain Rate Effect를 했다. MAT_4A_MICROMEC 물성모델을 활용하여 Fiber, Matrix의 물성을 구분하여 정의하고 Matrix 소재의 Fracture Locus를 유한요소해석에서 활용했다. 복합소재와 Matrix 소재의 경우 변형률 속도에 따라 강도가

작업소재와 Matrix 소재의 경우 변영률 독도에 따라 경도가 증가하는 것을 시험과 시뮬레이션 모두에서 확인했다. 복합소재의 경우 인장, 전단 및 복합 하중 경로에 따른 거동은 MAT_4A_MICROMEC 모델을 이용한 분석이 가능한 것으로 분석했다. 복합소재 시편해석 해석 결과가 실험과 유사하게 나타났으며, 복합소재의 Strain Rate Effect 데이터와 Matrix 소재의 Fracture Locus 데이터의 활용을 통해 상관성 분석 해석의 정확도를 향상시켰다. 따라서 본 연구의 복합소재의 고유 특성을 반영한 물성 모델 구성이 복합소재 특성을 FEM 시뮬레이션에서 반영될 수 있음을 확인했다. 이는 향후 복합소재의 손상 과정 모사 유사성을 향상시킬 수 있는 연구에 활용 예정이다.

참고문헌

[1] Barral, M. et al. International Journal of Plasticity. 127:102632, 2020.

후기

본 연구를 위한 한국자동차연구원의 지원에 진심으로 감사드립니다.

단일 노치 인장 시험을 통한 고탄성 탄소섬유 복합재의 면내 균열 양상 비교 Comparative analysis of intralaminar fracture processes in high-modulus fiberreinforced composites through SENT tests

*김원창¹, 이만영², 배수빈², 지우석¹⁺ * W.C. Kim¹, M.Y. Lee², S.B. Bae², W.S. Ji¹⁺

¹ 울산과학기술원 기계공학과 ² 국방과학연구소 국방첨단과학기술연구원 소재에너지기술센터 ⁺E-mail:wsji@unist.ac.kr

Keywords: High modulus carbon fiber, Single edge notched tension(SENT), Intralaminar

1. 서론

섬유 강화 복합소재는 섬유와 수지의 물성 차이로 인해 상대적으로 약한 수지 내에서 발생하는 균열 에 취약하다. 본 연구에서는 섬유에 따른 수지 균열 양상을 확인하기 위하여 동일한 수지를 사용한 서로 다른 두 탄소섬유 복합재의 면내 균열 양상을 비교하고 분석하였다.

2. 재료 및 시험 설정

본 연구에서는 면내 균열 양상을 비교하기 위해 0° 단일 노치 인장(Single edge notched tension, SENT) 시험을 수행하였다. 시편은 [0₁₆] 적층 순서로 제작되었으며, H사와 T사의 탄소섬유, 동일한 수지 A로 구성된 총 두 종류의 프리프레그를 사용하였다. 시험 설정 및 시편 형상은 Fig. 1에 나타내었다.



Fig. 1. SENT test set-up and specimen dimension.

0°단일 노치 인장 시험 결과 3.1 파단면 비교

두 복합소재의 파단면 분석을 위해 주사전자현미경 (SEM)을 사용하여 시편을 촬영하였다. Fig. 2와 같이 T사의 섬유는 H사의 섬유보다 표면이 더 거칠게 나타났으나, 두 섬유 표면의 수지 잔류량은 유사하였다. 이는 두 소재의 전반적인 섬유/수지 결합력에는 큰 차이가 없음을 시사한다.



Fig. 2. Fracture surface images of (a) H company and (b) T company.

3.2 균열 발생 임계 하중 비교

노치에서 균열 발생 시점을 확인하고 해당 시점의 하중을 측정하기 위해 시편에 흰색 락카를 도포한 후 동시에 이미지 촬영을 진행하였다. 시험 결과 Fig. 3과 같이 H사 시편의 균열 임계 하중은 6473 N, T사 시편의 임계 하중은 5392 N으로 H사의 시편이 T사 시편에 비해 약 1.2배 높은 하중에서 균열이 발생하는 것을 확인하였다.



Fig. 3. P-delta curves of (a) H company and (b) T company.

4. 결론

본 연구에서는 두 고탄성 탄소섬유 복합재의 0° 단일 노치 인장 시험을 수행하였다. 시험 결과 동일한 수지를 사용함에도 불구하고 두 복합소재 간 균열 발생 임계 하중에 차이가 나타났으며 이는 탄소섬유의 물성이 복합재의 균열 양상에 영향을 미친 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 대한민국 정부(사업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력사업 의 연구비 재원으로 수행되었습니다.(과제번호: 22-CM-19)

흡습에 따른 Epoxy Molding Compound의 기계적 물성 변화 Effect of Moisture Absorption on the Mechanical Properties of Epoxy Molding Compound

기동석 ¹, 지우석 ¹⁺ ^{}D.S.Gi ¹, W.S. Ji¹⁺

¹ 울산과학기술원 기계공학과 ⁺E-mail: <u>wsji@unist.ac.kr</u>

Keywords: Epoxy molding compound, Compression molding, Material properties

1. 서론

반도체 패키지의 인캡슐레이션 공정은 반도체 칩을 외부 환경(습기, 충격 등)으로부터 보호하기 위해 epoxy molding compound (EMC)를 봉합재로 사용하는 과정이다. 기존 연구에서는 주로 EMC의 warpage와 흡습 팽창이 반도체 모듈에 끼치는 영향을 다루어 왔다 [1, 2]. 그러나 흡습에 의한 EMC 소재의 물성 변화에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 EMC를 제작하고, 흡습 조건에 따른 기계적 물성 변화를 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 시편 제작

본 연구의 시편은 KCC 사의 EMC 파우더를 사용하여 제작하였다. Fig. 1과 같이 hot press 공정(175 ℃, 20 bar, 10분) 적용 후, cold press 공정(20 bar, 20 분)을 통해 냉각하였다. 최종적으로 220 mm × 220 mm × 2 mm 크기의 평판을 제작한 뒤, 인장 시험을 위해 4 mm × 38 mm × 2 mm 크기로 시편을 가공하였다.



Fig. 1. (a) Hot press for EMC manufacturing, (b) EMC in powder form (c) Manufactured EMC specimen

2.2 흡습 조건 설정

실험은 세 가지 흡습 조건으로 수행하였다. 흡습 그룹 1은 70 °C 에서 96 시간 동안 물에 담가 흡습을 유도하였으며, 흡습 그룹 2는 동일한 조건에서 흡습한 후 추가로 60 시간 동안 상온의 물에 담가 추가 흡습을 진행하였다. 그룹 3은 상온 건조 상태를 유지하였다. 흡습 여부는 시편의 무게 변화율(Eq.1)을 이용하여 확인하였으며, 결과를 Table 1에 제시하였다.

M obtaine Absorption Rate (%) = $\frac{w_0 - w_f}{w_0}$ (1)

흡습 그룹	번호	흡습 전[g]	흡습 후[g]	변화율[%]
그룹 1	# 1	0.3855	0.3857	0.05
	# 2	0.3789	0.3793	0.11
	# 3	0.3748	0.3752	0.11
그룹 2	# 1	0.3638	0.3646	0.22
	# 2	0.3838	0.3846	0.21

2.3 기계적 물성 측정

기계적 물성은 5 kN DEBEN 인장 시험기를 사용하여 측정하였다. 하중 속도는 0.2 mm/min로 설정하였으며, 각 그룹에서 선별된 3개의 시편에 대해 인장 시험을 수행하여 Fig. 2와 같은 결과를 얻었다.



Fig. 2. Load-displacement curves of each group

3. 결론

본 연구에서는 EMC를 직접 제작하여 흡습 조건에 따른 기계적 물성 변화를 분석하였다. 흡습된 EMC 시편은 강성이 감소하고 파단 변위가 증가하였다. 그 중 흡습률이 약 2 배 높은 흡습 그룹 2는 최대 하중이 더 낮고, 파단 변위가 증가함을 확인하였다.

참고문헌

JM Kim et al. *Polymer Testing*. Volume 125, 108140, 2023.
 Zhiwen Chen et al. *Micromachines*. 13(10): 1704, 2022

후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2023-00240918).

이미지 분석 기법을 활용한 스티칭 된 탄소섬유강화 복합소재의 두께에 따른 박리 특성 연구

Effect of thickness on delamination properties of stitched CFRPs using digital image correlation (DIC) technique

*이부건 ^{1,2}, *배곽진 ¹, 김한규 ³, 유재상 ^{1,2+} ^{*} B.G. Lee ¹,^{*} K.J. Bae ¹, H.G. Kim ², J.S. Yu ²⁺

¹ 한국과학기술연구원,² 전북대학교,³ 미시시피주립대학교

+ E-mail: jamesyu@kist.re.kr

Keywords: CFRP, stitching, delamination, thickness effect

1. 서론

탄소섬유강화 복합소재 (CFRP)는 높은 비강도 및 비강성으로 다양한 산업 분야에 활용되고 있다 [1]. 그러나 층간 결합력이 약해 박리현상이 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 스티칭과 같은 3D 강화 기술이 도입되었으나, 두께 변화에 대한 연구는 상대적으로 부족하다 [2]. 본 연구에서는 mode II test와 Digital Image Correlation (DIC) 기법을 활용하여 CFRP 두께 변화에 따른 스티칭 효과와 균열 전파 양상을 분석하고자 한다 [3].

2. 제작 및 실험준비

2.1 시편 제작

본 연구에서 제작한 CFRP는 강화재 및 기지재로 noncrimp carbon fiber fabric과 epoxy를 사용하고, 1200D의 vectran filament 원사를 사용하여 스티칭 공정을 진행하였다. 성형의 경우 VARTM 방식을 이용하였다. 시편은 스티칭 유무에 따라 3가지 두께로 제작되었으며, Mode II 시험을 위한 예비균열을 위해 Teflon film을 이용하였다. 추가적으로, DIC 기법을 적용하기 위해 시편 표면에 흰색 페인트를 도포한 후, 검정 스프레이를 분사하여 무작위 패턴을 생성하였다 (Fig. 1).



Fig. 1. (a) Specimen preparation for DIC, (b) DIC image.

2.2 실험

CFRP 시편의 박리 특성을 관찰하기 위해 ASTM D7905 규격에 따라 Mode II test를 수행하였다. 두께에 대한 영향을 확인하기 위해 2mm, 4mm, 8mm 시편을 대상으로 실험을 진행하였으며, 모든 실험은 25℃에서 수행되었다. 고해상도 카메라를 활용하여 시험 중

무작위 패턴 변형에 대한 연속 이미지를 계산해 박리 진행 과정을 실시간으로 분석하며 실험하였다. 이를 통해 시편의 층간 균열 전파 및 변형 거동을 정량적으로 평가하였다.

3. 결과

Mode II test 통해 CFRP 복합소재의 스티칭 유무와 두께에 따른 하중-변위 곡선을 나타내었다 (Fig. 2). 스티칭 유무에 따라 박리 거동에 차이가 있었음을 확인할 수 있으며, 두께에 따라서도 다른 경향을 보임을 확인할 수 있었다.



Fig. 2. Results of mode II fracture toughness test.

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해서 CFRP의 두께에 따른 박리특성을 DIC 장비와 mode II test를 이용하여 연구하였다. 향후 극한 환경에서의 부품 적용을 위해 고온에서의 박리 특성 또한 관찰할 예정이다.

참고문헌

- [1] AM Pawlak et al. Metals. 12:1470, 2022.
- [2] K Dransfield et al. Compos Sci Technol. 50:305-317, 1994.
- [3] M Tekieli et al. Compos Struct. 160:670-688, 2017.

후기

본 연구는 한국과학기술연구원 주요사업 (2Z07231)과 산업통산자원부 (No. 20021913, 00433057) 에 지원을 받아 수행되었습니다.

CFRP 복합재 구조의 공정 유도 변형을 고려한 형상 보정 설계 Shape compensation design for CFRP composite structures considering process-induced deformation

*김동협¹, 김상우^{1,2,3+}, 이수용³ * D.H. Kim¹, S.W. Kim^{1,2,3+}, S.Y. Lee³

¹ 한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과, ² 한국항공대학교 항공우주공학과, ³ 한국항공대학교 항공우주산업기술연구소 ⁺E-mail: swkim@kau.ac.kr

Keywords: Carbon fiber reinforced polymer (CFRP), Process-induced deformation (PID) compensation, Finite element method

1. 서론

CFRP 복합재는 제조 과정에서 경화 변형이 발생하며, 이는 형상 정밀도를 저해할 뿐만 아니라 구조 성능의 변화를 초래하여 제품의 신뢰성을 낮추고, 개발 기간 과 비용을 증가시킨다. 따라서 경화 변형을 정밀하게 예측하고 이를 보정함으로써 복합재 구조물의 형상 정 밀도를 유지하고, 최적의 구조 성능을 확보하는 것이 중요하다.

본 연구에서는 유한요소법을 기반으로 CFRP 복합재 구조물의 공정 유도 변형을 예측하고, 이에 대한 보정 기법을 제안한다.

2. 공정 유도 변형 예측

본 연구에서는 CFRP 복합재 평판을 대상으로 공정 유 도 변형을 예측하였고, 이에 따른 형상 보정을 수행하 였다. 상용 유한요소 해석 소프트웨어인 ABAQUS와 사용자 정의 부프로그램인 UMAT을 연동하여 경화 모 델을 반영한 해석을 수행하였으며, 이를 통해 경화 공 정에 따른 최종 구조물의 형상 변형을 도출하였다. 에폭시 수지의 경화도 계산에는 Halley 등 [1]이 제안 한 경화 동역학 모델을 적용하였다. 또한, Johnston [2]

이 제안한 수정된 CHILE 모델을 통해 경화도 변화에 따른 수지의 탄성계수를 산출하였다. 이후, 섬유의 물 성과 함께 미시역학적 모델을 활용하여 복합재의 유효 물성을 도출하였고, 이를 경화 해석에 적용하였다.

3. 공정 유도 변형 보정

공정 유도 변형의 보정은 비선형 문제로, 변형된 형상 을 기준으로 초기 형상을 단순히 역변형하는 방식만으 로는 정확한 보정이 어렵다 [3]. 특히, 두께가 얇은 복 합재는 면내 이방성 변형률의 영향을 크게 받는다. 이에 본 연구에서는 CFRP 복합재의 경화 공정 중 발생 하는 형상 변화를 최소화하기 위해 경화 시 발생하는 주요 영향 인자를 고려한 보정 설계를 수행하였으며, 반복적인 수치 해석을 통해 최적 초기 형상을 도출하 였다.

4. 결과 및 결론

그림 1에 나타낸 바와 같이, 200 mm × 200 mm × 1.5 mm 크기의 복합재 평판에서 약 17.7 mm의 굽힘 변형이 발 생하였다. 제안한 보정 설계를 적용하여 경화 해석을 수행한 결과, 목표 형상에 대해 최대 변형은 0.6 mm 이 내로 감소하였으며, 경화 공정 중 발생하는 형상 변화 문제를 효과적으로 억제할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 경화 변형 보정 기법은 CFRP 복합 재의 경화 공정 중 발생하는 비선형 형상 변형을 효과 적으로 억제할 수 있으며, 정밀한 형상 품질 확보와 구 조적 성능 향상에 크게 기여할 것이다.



Fig. 1. Shape compensation results on process-induced deformation in CFRP composite plate.

참고문헌

[1] PJ Halley et al. Polym Eng Sci. 36:593-609, 1996.

- [2] AA Johnston. UBC. PhD Thesis, 1997.[2] E Kappel. Compos Struct. 192:67-71, 2018.
- [2] E Kappel. Compos Struct. 192.07-71, 2010

후기

본 연구는 2025년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2022R1A6A1A0 3056784). 또한 산업통상자원부 및 한국산업기술기획평가 원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(No.RS20240 0433049).

복각 조절형 리베팅 시스템 자동화를 위한 작업자 중심 설계 및 편의성 분석 Worker-centered design and convenience analysis for automation of

multi-angle adjustable riveting systems

*채석민¹, 차재호¹, 김철규²,박기진¹⁺ * S.M. Chae¹, J.H. Cha¹, C.G. Kim², K.J. Park¹⁺

¹ 대구기계부품연구원, ² ㈜ 케이디엠테크 ⁺E-mail: <u>kjpark@dmi.re.kr</u>

Keywords: Human simulation, Automation, riveting systems, Worker-centered design

1. 서론

본 연구는 금속 및 복합재 조립 공정에서 사용 되는 리베팅 공정 자동화와 작업 편의성을 개선 하는 데 초점을 두었다. 이를 위해 다양한 판넬형 제품에 적용 가능한 복각 조절형 시스템을 개발 하고[1], 휴먼 시뮬레이션을 통해 작업자의 자세를 분석하고 작업 환경 개선 및 인체 공학적 설계 방안을 제시하였다.

2. 모델링 및 분석 방법

2.1 대상모델 정의

작업 편의성 분석을 위해 개발된 리베팅 통합 시스템의 형상을 Fig.1과 같이 정의하였다. 편의성 분석에는 DELMIA V5 HUMAN을 사용하였으며, 통합 시스템의 제어기판 및 모니터링 장치에 대한 작업자세를 시뮬레이션하였다. 분석에 사용된 작업자 모델은 20세~49세 한국인 남성 평균 키 (174.3cm)를 적용하였다.



Fig. 1. Worker and pulley riveting system.

2.2 편의성 분석 방법

자세 분석은 RULA (Rapid Upper Limb Assessment) 기법을 적용하여 팔, 목, 어깨 등 상체의 각도와 부하를 점수화하여 위험도를 도출하였고 분석 결과는 종합 점수를 바탕으로 자세 위험도를 비교하였다. 작업 자세는 시스템 제어를 위해 기판을 응시하며 사용하는 자세와 작업 대상물이 안착되는 지점을 응시하며 모듈을 지그에 장착하는 자세로 구분하였다.

3. 해석 결과

Fig.2는 작업자가 리베팅 통합 시스템에 대상물인 판넬을 안착 지그에 장착하는 작업에 대한 작업자의 작업자세 분석결과를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과 대상물을 지그에 장착하는 도중 작업자의 시야와 상체 관절 각도 모두 안정적으로 나타났다.



Fig. 2. Analysis results of worker posture when worker settles the object

4. 결론

본 연구에서는 리베팅 시스템의 작업자 중심 설계를 위해 작업 자세 기반으로 종합적인 RULA 분석을 수행하였다. 연구 결과 평균 신장에 대해 현재의 제어 기판의 위치(1450mm~1690mm)와 도어 모듈 판넬 안착 지그 높이는 적정할 것으로 판단되며, 작업자의 조작 작업자세 및 도어 모듈의 안착 작업자세 모두 안정적일 것으로 예상된다.

참고문헌

[1] KJ Park et al. Proc. ICMTE. 254-254, 2023.

후기

이 논문은 2023년도 중소벤처기업부의 '중소기업기술개발 지원사업'의 지원을 받아 연구되었음 (과제번호 S3348862)

Helical Liquid Crystalline MoS₂ Fibers for Versatile Wearable Sensors

^{*}Jun Hyun Park ¹, and Bong Hoon Kim¹⁺ ¹ Department of Robotics and Mechatronics Engineering, DGIST ⁺E-mail: bonghoonkim@dgist.ac.kr

Keywords Wearable devics, Textile sensors, IoT Devices, Molybdenum Disulfide

1. Introduction

We arable devices demand fiber-based materials that combine mechanical flexibility with multifunctionality. Two-dimensional (2D) materials, such as ${\rm MoS}_2$, offer high surface area, tunable semiconducting properties, and liquid crystalline (LC) behavior-making them ideal candidates for advanced sensing fibers. However, forming structurally stable, functional fibers from 2D flakes remains a significant challenge due to poor dispersibility and processability.

2. Manuscript Format

2.1 LC-Assisted Fiber Fabrication

We report the fabrication of semiconductive MoS_2 fibers via a liquid crystalline (LC)-assisted wet-spinning process using PLA-MoS₂ dispersions. MoS_2 flakes were exfoliated by THAB intercalation and dispersed in DMF, and PLA was introduced to modulate viscosity for stable fiber spinning. At an optimized total concentration of 10 wt%, continuous spinning was achieved while preserving the LC phase, as confirmed by POM and WAXS analysis. Notably, spontaneous formation of 3D chiral helical structures occurred during spinning, driven by flowinduced alignment and interfacial shear. The helical pitch and curvature could be tuned by adjusting spinning parameters, providing a strategy for shape-controlled fiber architectures.

2.2 Structure-Property Relationships

The LC-induced alignment of MoS₂ flakes resulted in improved tensile strength and toughness compared to non-LC fibers, which was further supported by finite element simulations. The fibers maintained direct-bandgap semiconducting properties and exhibited multifunctional sensing capabilities. They responded sensitively to variations in light intensity, pH, and toxic gases such as ammonia, leveraging MoS2 's optoelectronic and surface-reactive characteristics. In addition, the helical geometry and PLA matrix contributed to durable and stable strain sensing under multidirectional deformation. Even after embedding in soft PDMS substrates, the electrical performance was retained, indicating suitability for integration into wearable and soft electronic systems. These combined properties position the fibers as a versatile platform for next-generation smart sensing technologies.

3. Results and Discussion

The helical MoS_2 fibers exhibited multifunctional sensing capabilities, including light, pH, and gas detection. LC-phase fibers showed superior optoelectronic responses due to enhanced alignment of MoS_2 flakes. The fibers also demonstrated sensitive, reversible responses to NH_3 and VOCs, as well as excellent mechanical durability under 3D deformation, enabling potential use in wearable sensing platforms.



Fig. 1. Multi-functional wearable MoS₂ fiber sensors

4. Conclusions

We developed shape-controllable semiconductive MoS_2 fibers via LC-assisted wet spinning. The fibers spontaneously formed chiral 3D helices with tunable curvature and exhibited excellent mechanical robustness and optoelectronic properties. They demonstrated multifunctional sensing capabilities, including photodetection, pH and gas sensing, and stable strain sensing under 3D deformation. These chiral MoS_2 fibers show strong potential for future IoT and intelligent actuator applications.

References

- [1] Zeng W et al. Adv Mater. 26;5310, 2014.
- [2] Xu Z et al. Mater Today. 18:480, 2015.
- [3] Eom W et al. Nat Commun. 11:2825, 2020.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (Nos. RS-2024-00406240, and RS-2024-00407155).

Bio-Inspired and Wearable Sensors for Camouflage in Aquatic-Environment

Bong Hoon Kim[†]

DGIST, Department of Robotics and Mechatronics Engineering [†]bonghoonkim@gmail.com

Abstract

Achieving optimal camouflage in an aquatic environment necessitates the ability to modulate transmittance in response to the surrounding obscurity and potential threats. This adaptation involves a dynamic transition from transparency to a deep-blue color, especially in low-light or dark situations. Such a strategy promotes a seamless assimilation with the surroundings, enabling the absorption of searchlights and, subsequently, diminishing the risk of detection by predators. Therefore, presence the of sophisticated mechanisms that facilitates stable and efficient control of transmittance is imperative, enabling smooth transition between transparent and deepblue hues within the aquatic environment. This nature-inspired study presents programmable camouflage system that integrates an electrochromic display as the primary transmittance change element and a wireless base module for power and data transmission. Such technology offers a robust and flexible construction, ensuring stable operation as demonstrated through mechanical-fatigue experiments and quantitative simulation. A custom circuit and a power-control software package enable active control of multiple electrochromic displays while submerged in water.

Keywords: Flexible sensors, Wearable sensors, Optical sensors



Fig. 1. Camouflage characteristics of the squid and the design of a biomimetic device that can change color according to the environment.

Sputtering-Based Interfacial Control and Artificial SEI layer Formation in Lithium Metal Batteries

*Saac Lee¹⁺, Jun-seob Park¹, Hyunyoung Kim², Hee Han¹, Hongseok Jo¹, Chi Won Ahn¹ and Su-Ho Cho¹⁺

¹ National Nanofab center, Daehak-ro 291, Yuseong-gu, Daejeon Republic of Korea

Graduate School of Energy Science and Technology(GEST) Chungnam National University(CNU), Daejeon, Republic of Korea +E-mail:leeisaac803@nnfc.re.kr, csh0160@nnfc.re.kr

Keywords : Anode, Lithium metal battery, Artificial SEI layer, Interface Engineering

1. Introduction

The advancement of electric vehicles and electronic devices has led to an increasing demand for high-energydensity secondary batteries [1]. Lithium metal is a promising anode material with high capacity; however, safety issues arise due to lithium dendrite formation on the anode surface and volume expansion [2]. To address these challenges, this study proposes a solution utilizing sputtering-based interfacial control and artificial SEI layer formation.

2. Experimental method

2.1 Preparation of anode thin film

To control the interface of Li metal using an artificial SEI layer, lithium compounds, metal oxides, and metal thinfilm materials were deposited onto Li foil. The deposition process was carried out in an amorphous state under an airfree environment by integrating a sputtering system with a glove box, preventing exposure to ambient conditions. The process was conducted under a vacuum pressure of 10^{-7} Torr. The artificial SEI layer was deposited via sputtering. The deposition process was conducted at 10^{-7} Torr using power, process pressure, and Ar flow rate optimized for each SEI deposition condition.

2.2 Characterization of anode thin film

The surface and cross-section of the sputter-deposited material were analyzed using SEM. To evaluate the electrochemical properties of the artificial SEI-coated Li foil, type 2032 coin cells were assembled inside a glove box (H₂O < 1 ppm, O₂ < 1 ppm). The coin cell tests were then conducted at room temperature.

3. Results and Discussion

3.1 Morphological and Structural Analysis

SEM analysis confirmed that the sputter-deposited artificial SEI layer had a uniform, dense morphology, ensuring effective coverage of the Li metal. Crosssectional images (Figure 1) showed a well-adhered interface, reducing delamination risks. Unlike bare Li metal with a rough surface from uncontrolled lithium plating, the coated Li foil exhibited a smoother surface, indicating enhanced stability.

3.2 Electrochemical Performance

Coin cell testing showed improved electrochemical stability in the artificial SEI-coated Li anode. Reduced voltage hysteresis indicated lower interfacial resistance, and high Coulombic efficiency was maintained over extended cycles. In contrast, the bare Li anode exhibited rapid efficiency decline due to continuous SEI formation and dendrite growth. The artificial SEI layer effectively suppressed dendrites, enhancing cycle stability and battery lifespan.



Fig. 1. Lithium metal thin film deposited by evaporation.

4. Conclusions

In this study, the process optimization of the artificially engineered SEI layer fabricated via sputtering was conducted, determining an appropriate thickness for effective performance. The optimized SEI layer successfully suppressed volume expansion and dendrite formation during battery operation with a Li metal anode. Furthermore, compared to conventional Li metal anodes, the samples with the artificial SEI layer demonstrated superior electrochemical performance, highlighting the effectiveness of the proposed approach.

References

[1] Jia, Z et al. *eTransportation*. 100390, 2025.
[2] Liu, Haoyu, et al. *Nature Materials* (2025): 1-8.

Acknowledgement

This research was supported by by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (no. RS-2024-00450477). This work was supported by Semiconductor-Secondary Battery Interfacing Platform Technology Development Project of NNFC in 2025.

Shape Memory Alloy-Based Tensile Activated Kirigami with Enhanced In-plane Deformation for Robotic Applications

*Yeongjae Park¹, and Hugo Rodrigue^{1,2+}

¹ School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, ² Department of Intelligent Robotics, Sungkyunkwan University ⁺E-mail: rodrigue@skku.edu

Keywords : Shape Memory Alloy Plate, Shape Memory Alloy Actuator, Tensile Activated Kirigami, In-plane Deformation

1. Introduction

Tension activated kirigami (TAK) structures deform flat patterned materials into complex shapes under tension, with the single transverse slit pattern commonly used in applications like grippers [1], crawling robot [2], and solar trackers [3].

This paper presents a novel kirigami pattern with two slot hinges for fabricating a SMA-based TAK actuator with significant in-plane deformation.

2. Manufacturing and Principle

2.1 Manufacturing



Fig. 1. SMA-based tensile activated Kirigami actuator.

A 0.2 mm thick SMA plate was cut using a 50W fiber laser. The proposed SMA-based TAK actuator features a rectangular shape with a transverse slot, additional longitudinal slots symmetrically added at both ends of the transverse slot, and four external slots located near the central attachment points.

2.2 Principle of TAK SMA Actuator

The actuator has a thickness t, with rounded cuts designed to have a minimum thickness t_h that results in in in-plane deformation if t_h is smaller than t. Although other manufacturing methods could also be used to achieve a similar geometry, laser cutting facilitates the adjustment of the dimensions of the pattern.

3. TAK Crawling Robot

Due to its scalable deformation and low profile, the proposed TAK-based SMA actuator was implemented into a small crawling robot with a turtle-inspired locomotion.

The performance evaluation showed that a shorter cooling duration initially enabled faster operation for the crawling robot but reduced speed and stride length due to residual heat, emphasizing the need to optimize cooling time for effective navigation in confined spaces.





Fig. 2. Crawling robot using SMA-based TAK actuators.

4. Conclusions

This paper presents a new kirigami pattern with two slot hinges in an SMA-based TAK actuator, enabling large inplane displacements and up to 155% deformation for small scale crawling robots. A noted limitation is the cooling speed, which could be improved by scaling down the device or using surface patterning techniques, while the design may also enable untethered operation with concentrated heating sources like lasers.

References

- [1] Y Hong et al. Nat. Commun. 13: 530, 2022.
- [2] A Rafsanjani et al. Sci. Robot. 3: eaar 7555, 2018.
- [3] A Lamoureux et al. Nat. Commun. 6: 8092, 2015.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT). (RS-2023-00207772, RS-2024-00457555), and Ministry of Trade, Industry and Energy (Project No. 20022884)

Synthesis of nano Prussian Blue and its magnetic derivatives

*Van Hiep Nguyen¹, and Il-Kwon Oh¹⁺

¹ Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

⁺E-mail: <u>ikoh@kaist.ac.kr</u>

Keywords : Prussian Blue, MOFs, Magnetic materials

1. Introduction

Prussian blue is a metal organic framework (MOF) composed of iron and cyanide ligands. Its general chemical formula is $K_{4x}Fe^{II}_4[Fe^{II}(CN)_6]_{(3+x)}S_{(1-x)}\cdot yH_2O$ with x ranging from 0 to 1. Conventional synthesis for this material often results in imprecise chemical formulas and poorly defined crystal structure [1,2]. Additionally, the presence of potassium cations negatively impacts the magnetic properties of its derivatives. In this study, we present a novel synthesis of potassium-free nano Prussian blue and its derived magnetic materials, offering improved structural and magnetic characteristics.

2. Synthesis

Figure 1 illustrates the synthesis of potassium-free nano Prussian Blue and its derived magnetic materials. By substituting the potassium ions (K⁺) with protons (H⁺), the precursor H₄[Fe^{II}(CN)₆] was obtained and used to prepare the nano Prussian Blue. This product was pyrolyzed under various conditions, resulting in several derivatives with tunable magnetic properties.



Fig. 1. Synthesis of nano Prussian Blue and its derivatives.

3. Results and Discussion

The nano Prussian blue was characterized using TEM and DLS, while the magnetic derivatives were analyzed for magnetization, as shown in Fig. 2. As can be seen in the Figure, varying pyrolysis conditions, such as temperature, led to materials with distinct magnetization properties and different levels of hysteresis.



Fig. 2. Typical magnetic properties.

4. Conclusion

The potassium-free Nano Prussian blue and its derived magnetic materials were successfully synthesized. The data indicate that these magnetic derivatives exhibit a wide range of properties, which can potentially be tailored for specific applications, such as magnetic robots in biomedicine.

References

- [1] A. Simonov et al. *Nature* 578:256-260, 2020.
- [2] M. Shokouhimehr et al. *Inorg. Chem. Commun.*13:58-61, 2010.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00345241).

포

스

터

2

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

Biopolymer based multi-vapor responsive soft actuators

*Vipin Kumar and Il-Kwon Oh+

Department of Mechanical Engineering

Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Republic of Korea

+E-mail: ikoh@kaist.ac.kr

Keywords : soft actuators, biopolymers, vapor responsive, starch

1. Introduction

Soft actuators are paving the way for a new era in robotics and automation, especially in fields like medical technology and human-robot interaction. Their ability to actuate quickly and reversibly, maintain biocompatibility, and offer precise control over movement makes them ideal for seamless integration into advanced technologies. However, the widespread use of synthetic polymers and nanomaterials in their design faces significant challenges, including high costs, environmental concerns due to poor biodegradability, and complex manufacturing processes. Overcoming these hurdles is key to unlocking their full potential in real-world applications. Here, we introduce a biopolymer-based, biocompatible, single-layer soft actuator that responds to multiple vapors. This innovative actuator demonstrates rapid, reversible, and repeatable actuation for over 1500 cycles. Notably, it exhibits distinct responses to water and ethanol vapors. By strategically patterning the actuator surface, we achieve precise control over both the magnitude and direction of actuation. Furthermore, this surface patterning enables a remarkable transition from random locomotion to controlled linear motion, enhancing its potential for advanced applications. We also demonstrate, promising applications of biopolymer-based soft actuator in ethanol-vapor sensing, intelligent curtains, automated lifts, and bio-mimetic systems.

2. Experimental methods

A cassava starch-based actuator was made using a simple solution-casting technique. A 2 wt% starch solution was prepared by dissolving 2 g of cassava starch in 98 g of ultrapure water, stirred at 400 rpm for 30 min at 90 °C. The solution gelatinized under 60% RH. The solution poured into a polypropylene petri dish, dried at 30 ± 1 °C and 55–60% RH, and the resulting film was peeled off and stored in a desiccator.

3. Results and Discussion

The record the vapor responsive actuation of the starch based soft actuator , the one end of the starch film was clamped between glass slides and other end is free to move. The film is in flat state before exposure to the water vapor and bend instantaneously upon exposure to the water vapor from the bottom side. Interestingly, the film retains its original flat state after removal of vapor exposure (Fig. 1(a)). We note that, the starch actuators can actuate in response the tiny amount of the water molecules coming from bare human palm (Fig 1 (b)). Because human palm has very tiny pores which always keep evaporating water molecules. We also checked the repeatability and stability of the actuator for more than 1500 continuous actuation cycles (Fig. 1(c)). The actuator can hold the actuated state

for 60 minutes upon continuously exposure to the vapor source (Fig. 1(d)).

The actuation is quite stable and repeatable for more than 1500 actuation cycles. These actuator shows distinct actuation upon exposure to the alcohol vapors. For instance, the actuator bends upward upon exposure to the water vapor and bend downward in response to the ethanol vapors.



Figure 1. (a) Snapshots of the actuation of starch actuator upon exposure to the water vapor. (b) The wiggling of the starch actuator on the bare human palm.

4. Conclusions

In summary, we developed a biopolymer based soft actuator, which shows fast and reversible actuation in response to multiple vapor including water vapor. The actuator is bio-compatible, bio-degradable and cost effective. Actuation performance is stable and repeatable for more than 1500 actuation cycles. For the proof of concepts, we demonstrated the potential of these actuators in bio-mimicry, vapor detectors, crawlers, soft lifts, complex shapes etc. Which will be shown during the presentation.

References

V. Kumar et al. ACS Appl. Mater. Interfaces 2024, 16, 3966-3977

Acknowledgement

Supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea Government (MSIT) (RS-2023-00302525, RS-2024-00345241, and NRF 2021M3H4A1A03047333).

베이지안 최적화 기반의 고용량 Na₃V₂(PO₄)₂F₃ 양극 소재 설계 Bayesian optimization based on element mapping to design high-capacity Na₃V₂(PO₄)₂F₃ cathode of sodium-ion batteries

*박상현^{1, 2}, 심윤수³, 허준표¹, 지상현¹, 전동민², 이찬우², 육종민¹⁺

* Sanghyeon Park^{1, 2}, Yoonsu Shim³, Junpyo Hur¹, Sanghyeon Ji¹, Dongmin Jeon², Chan-Woo Lee² and Jong Min Vuk¹⁺

> ¹ 한국과학기술원 신소재공학과, ² 한국에너지기술연구원, ³ LG에너지솔루션 ⁺E-mail: jongmin.yuk@kaist.ac.kr

Keywords: Data-driven materials design, Bayesian optimization, Sodium-ion battery

1. 서론

소듐 이온 배터리(SIB)는 풍부한 소듐 자원으로 리튬 이온 배터리를 대체할 유망한 대안으로 떠오르고 있다. 본 연구에서는 소재 유망한 SIB의 양극 물질중 하나인 Na3V2(PO4)2F3 (NVPF) 의 소듐 과잉 상을 열역학적으로 안정화 시켜 높은 용량을 갖는 양극 소재를 설계하고자 한다.

2. 베이지안 최적화 기반 알고리즘 설계

2.1 소듐 과잉 상 안정화 전략 수립

NVPF의 소듐 과잉상을 안정화 시키기 위해 NVPF내의 바나듐을 대체할 수 있는 전이 금속 원소 조합을 탐색한다. 다양한 원소 조합 중 최적 원소 조합을 효율적으로 탐색하기 위해 베이지안 최적화 알고리즘을 사용한다.

2.2 원소 매핑을 통한 알고리즘 설계

베이지안 최적화의 대리모델인 Gaussian process는 불연속 적인 입력 값을 받을 수 없기 때문에, 원소를 대변할 수 있는 숫자를 원소에 할당한다 (Element mapping). 이를 통해 원소를 연속적인 공간에 나타내고, 연속적인 탐색 공간을 형성한다. 치환된 NVPF의 소듐 과잉상 안정성 확인하기 위해 밀도 범함수 이론 (Density functional theory, DFT) 기반의 제1원리 계산을 진행한다. 계산 결과와 네른스트 식 기반의 이론 작동전압을 평가하는 평가 함수를 정의한다.



Fig. 1. Schematic diagram of algorithm.

3. 알고리즘 기반의 최적 원소 조합 탐색

35개의 후보 원소로 이루어진 2차원 탐색 공간내에서 설계된 베이지안 최적화 알고리즘을 통해 최적 원소 조합을 탐색했다.



Fig. 2. The predicted search spaces and uncertainty.

반복 횟수가 진행 될 수록 탐색 공간의 불확실성은 줄어들고, 최적 원소 조합을 발견한다. 50번의 반복 결과, 총 16개의 최적 원소 조합을 발견했다 (Os-Pb, Pd, Hf-Pd, Mo-Pd, Pd-V, Mn-V, Pd-Re, Mo-Pd, Ag-Ru, Pd-W, Co-Ir, Pb-Pd, Co-V and Pd-Ta).

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 원소를 연속된 값으로 변환하는 Element mapping 기법을 통해 베이지안 최적화에 적합한 연속적인 탐색 공간을 구성하고, 적은 관측만으로도 효율적인 소재 탐색이 가능한 알고리즘을 제안한다. 이를 통해 NVPF의 소듐 과잉 상을 안정화 할 수 있는 고용량 나트륨 이온 배터리 양극 소재 조성을 성공적으로 설계했다.

Guided Nanopattern Formation in Block Copolymer Films Using Temporary Thickness Gradients

*Janghun Ko¹, Jang Hwan Kim², Hyeong Min Jin³ and Bong Hoon Kim¹⁺

¹ Department of Robotics and Mechatronics Engineering, DGIST, ² Department of Advaced Materials Science and Engineering, Ajou University, ³ Department of Organic Materials Engineering, Chungnam National University

⁺E-mail:, <u>hyeongmin@cnu.ac.kr</u>, <u>bonghoonkim@dgist.ac.kr</u>

Keywords : Block copolymer, Self-assembly, Nanopatterning

1. Introduction

Block copolymers (BCPs) can self-assemble into nanoscale patterns, making them useful for advanced devices. However, achieving long-range alignment across large areas is difficult and usually requires complex, costly techniques. This study introduces a simple, low-cost method to direct BCP self-assembly using a temporary thickness gradient. Through two-step thermal annealing, nanodomains are first aligned via geometric anchoring, then enhanced by thermal reflow. This enables the formation of highly ordered lamellar structures with uniform thickness across millimeter-scale areas. The approach avoids complex lithography, offering a scalable solution for large-area nanopatterning.

2. Manuscript Format

2.1 First Part Block copolymers (BCPs) offer great potential for forming nanoscale patterns through self-assembly. These nanostructures are valuable in applications like sensors, electronics, and lithography. However, directing their alignment across large areas remains challenging. Conventional methods often rely on costly and complex fabrication techniques, limiting practical scalability. Recent studies suggest that thickness gradients can influence BCP alignment via geometric anchoring. Yet, non-uniform film thickness hinders further processing. To overcome this, the study explores a novel two-step thermal approach using temporary thickness gradients. This strategy aims to achieve highly ordered patterns with uniform thickness in a cost-effective and scalable manner.

2.2 Main Part The researchers employed thermal imprinting to create temporary thickness gradients on BCP thin films. Using a nickel mold with micro-scale curvature, the BCP films were patterned to form height-modulated surfaces. A two-step thermal annealing followed: first at 160°C to induce latent nanodomain alignment via geometric anchoring, and then at 250°C to trigger thermal reflow. This reflow flattens the film and applies shear stress that enhances alignment. Samples with both low and high curvature were tested to observe the impact of curvature and annealing path. Microscopy and scattering techniques were used to characterize structural changes.

3. Results and Discussion

The results showed that BCP thin films with higher curvature (350 nm) produced well-aligned lamellar patterns after two-step annealing. Low-curvature patterns (200 nm) led to partial alignment limited to the gradient regions. The two-step process effectively combined geometric anchoring and thermal reflow to align nanostructures over a large area while maintaining uniform thickness. SEM and GISAXS confirmed the enhancement in domain size and long-range order. The presence of shear stress during reflow contributed significantly to grain enlargement and defect reduction. This approach demonstrated a clear advantage over singlestep annealing in terms of both alignment quality and scalability.

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

This study presents a simple yet powerful method for directing BCP self-assembly using momentary thickness gradients and two-step thermal annealing. The process enables the formation of highly aligned nanostructures over millimeter-scale areas without requiring complex lithography. The combined effects of geometric anchoring and thermal reflow contribute to uniform, defectminimized lamellar patterns. Future research may explore the method's applicability to other BCP morphologies, such as cylindrical or spherical domains. Additionally, optimizing mold design and thermal parameters could further improve pattern quality and scalability, paving the practical integration way for into advanced nanofabrication workflows.

- References
- [1] L. N. Green et al. Nat. Chem. 11, 510. 2019.
- [2] S.-J. Jeong et al. Nano. Lett. 9, 2300, 2009.
- [3] G. S. Doerk et al, ACS Nano, 7, 276, 2013.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation

of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT)

(grant Nos. 2022M3H4A1A02046445, RS-2024-00347619, RS-2024-00406240, and RS-2024-00407155).

Laser-Directed Orientation of High- χ Block Copolymers for Precision Nanopatterning on Silicon

* Jimin Lee¹⁾, Hyeong Min Jin²⁾ and Bong Hoon Kim^{1),†}

¹⁾ Department of Robotics and Mechatronics Engineering, DGIST, Daegu, Republic of Korea

²⁾ Department of Organic Materials Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Republic of Korea

[†] bonghoonkim@dgist.ac.kr

Keywords : self-assembly, block copolymer, photothermal effect

1. Introduction

We present a photothermal strategy based on near-infrared (NIR) laser irradiation that markedly accelerates the ordering kinetics of these materials. This approach facilitates the generation of well-defined nanoscale morphologies on silicon substrates. By optimizing the molecular weight of the high-y PS-b-P2VP copolymer, we achieve efficient nanodomain alignment along the laser scanning path through a single-step laser-induced thermal process. Furthermore, incorporating annealing а straightforward metal ion infusion step enables the selective transformation of P2VP cylinders into uniformly aligned metallic nanowires. Importantly, this method eliminates the need for an additional photo-absorbing layer by utilizing unmodified silicon substrates, underscoring its compatibility conventional semiconductor with manufacturing workflows.

2. Results and Discussion

2.1 Cylinder-forming BCPs

Figure 1 illustrates a schematic of how a cylinder-forming PS-b-P2VP block copolymer aligns through a laser writing technique. In the experiment, 2 cm \times 2 cm silicon wafers were used as substrates for photothermal conversion, without applying any additional photothermal conversion coating. The block copolymer (SV33, PS-b-P2VP, with number-average molecular weights of 23 and 10 kg/mol for PS and P2VP, respectively) was deposited as a thin film via spin-coating onto silicon wafers that had been treated with a polystyrene (PS) brush. The film thickness was approximately one domain spacing (L₀ \approx 30 nm), promoting the formation of a monolayer of in-plane aligned cylindrical structures. A quasi-static near-infrared laser (ytterbium pulsed fiber laser, wavelength = 1064 nm, pulse frequency = 300 kHz, pulse width = 200 ns) was

employed during the laser writing to prevent the polymer from undergoing photodegradation.



Fig. 1. Laser writing of PS-b-P2VP in-plane cylinders

2.2 Pattern Alignment

The alignment quality of patterns during the laser writing process is strongly influenced by the laser power density. To evaluate how varying power densities affect the orientation of PS-b-P2VP cylindrical structures, laser writing experiments were performed using a constant scanning speed of 100 nm/s while adjusting the laser power density. Consequently, when the temperature is sufficient to induce HZA, the in-plane cylindrical domains are likely to orient themselves along the direction of the laser scanning path.

Scan velocity (v) is another critical parameter influencing the laser-directed assembly. The laser power density was held constant at 2.76×10^4 W/µm²—an optimal condition for effective self-assembly of PS-b-P2VP—while the scan speed was varied throughout the experiment. At a scan speed of 100 nm/s, the in-plane cylinders align well along the laser scanning trajectory. However, increasing the scan speed to 500 nm/s results in a noticeable reduction in the degree of unidirectional alignment. At an even higher velocity of 1000 nm/s, the order of the pattern degrades substantially, though some directional relationship between the cylinders and scan path still appears. When the scan speed is further raised to 10 μ m/s, the grain size of the PS-b-P2VP structures becomes markedly smaller, and the influence of laser writing on directional alignment seems to be negligible.

3. Conclusion

This study demonstrated that laser writing can effectively direct the pattern formation of high- χ block copolymers (BCPs), such as PS-b-P2VP, by carefully controlling molecular weight and film geometry to reduce segregation strength. This one-step process is compatible with scalable manufacturing methods like roll-to-roll processing. Additionally, P2VP domains can be loaded with ion precursors to create sub-10-nm aligned nanostructures with tunable functions. Looking forward, nanoscale areaselective laser patterning—potentially using techniques like two-photon absorption—offers promising applications in photonics, electronics, and sensing.

References

[1] H. M. Jin, S. E. Lee, S. Kim, J. Y. Kim, Y.-S. Han, and B. H. Kim, "Directed high-χ block copolymer self-assembly by laser writing on silicon substrate", *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol. 139, No. 23, 52291, 2022.

[2] S. E. Lee, S. Kim, J. H. Park, H. J. Jin, H. S. Kim, J. H. Kim, H. M. Jin, and B. H. Kim, "Direct Self-assembly of Block Copolymer Thin Films via Momentary Thickness Gradient" *J. Polym. Sci.*, Vol. 61, No. 22, pp. 2758-2768, 2023.

Acknowledgments

This work was supported by the Creative Materials Discovery Program through the National Research Foundation of Korea (NRF), funded by the Ministry of Science and ICT (Grant No. NRF-2018M3D1A1058972). Additional funding was provided by the NRF under the Korean government (MSIT) through grants No. 2021M2E8A104482 and 2020R1C1C1014980.

Dynamic Aquatic Camouflage System Inspired by Reef Squid Transparency

*Junseok Choe¹, Bong Hoon Kim¹⁺, Seung Ho Han² and Sang Min Won³

¹ DGIST, Daegu, Korea (the Republic of), ²Sungkyunkwan University, Seoul, Korea (the Republic of), ³ Korea Electronics Technology

Institute

⁺E-mail: B@dgist.ac.kr

Keywords : Camouflage, Aquatic adaptation, Wireless modulation

1. Introduction

Camouflage is a vital survival strategy across animal species. Terrestrial animals often use disruptive coloration to obscure outlines, while aquatic organisms favor optical transparency to reduce visibility. For example, Sepioteuthis lessoniana adjusts chromatophore size to control body translucency, effectively avoiding detection from bioluminescent predators or artificial light. This strategy is especially useful in open water where light scattering and UV exposure must be minimized.

2. Design and Operation of Bioinspired Camouflage System

2.1 System Overview :

We developed a bioinspired aquatic camouflage system replicating squid-like transmittance modulation. It integrates an electrochromic display (ECD) and a wireless control system (WCS) within a flexible structure. The ECD consists of a WO₃ working electrode, a NiO counter electrode, and a lithium-based polymer electrolyte, enabling reversible changes between transparent and deepblue states in response to electrical input.

2.2 Electrochromic Display Mechanism :

The ECD switches between states via redox reactions and lithium-ion migration, with response times of 14.2 s (bleaching) and 35.2 s (coloration) under ± 2.0 V. It maintained 35% transmittance modulation over 100 cycles, with minor degradation after 1000 bending cycles (r = 20.3 mm) due to electrolyte adhesion loss. Immersion in phosphate-buffered saline at 60°C for 200 hours confirmed thermal and chemical stability.

2.3 Wireless Modulation and Aquatic Compatibility :

The WCS, using Bluetooth and NFC protocols, allows wireless ECD control in water. Fabricated on a PDMS substrate, the system functioned reliably at 7 cm depth with negligible latency (0.1 s) and high signal-to-noise ratio (126.98). Finite element analysis confirmed mechanical integrity with strain under 0.54% at a 6 mm bend, and PDMS encapsulation ensured waterproofing and flexibility.

3. Results and Discussion

Wireless control allowed seamless underwater operation of the ECD with stable performance. Mechanical flexibility and PDMS encapsulation preserved structural integrity. Simulations confirmed strain remained within safe limits, and long-term immersion tests verified durability. These results demonstrate reliable underwater camouflage functionality in dynamic environments.



Fig. 1. Analysis of adaptable Electrochromic Devices (ECDs).

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

This study presents a flexible, wirelessly controlled aquatic camouflage system inspired by reef squid. Its fast optical response, mechanical resilience, and underwater operability suggest strong potential for marine exploration, wearable robotics, and adaptive camouflage. Future work will target enhanced switching speed, durability, and multifunctional integration.

References

- [1] Silberglied et al. Science 209: 617-619, 1980.
- [2] Merilaita et al. Biol. Sci. 265: 1059-1064, 1998.
- [3] Jia et al. Clust. Comput. 22: 9293–9301, 2019.
- [4] Johnsen, S. Hidden in plain sight: the ecology and physiology of organismal transparency. Biol. Bull. 201, 301–318 (2001).
- [5] Johnsen et al. Annu. Rev. Mar. Sci. 6: 369–392, 2014

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (grant Nos. 2022M3H4A1A02046445, RS-2024-00347619, RS-2024-00406240, and RS-2024-00407155).

Extending the working range of a conductive ink-based textile Sensor

*Eun Seong Jeon¹, Beom Soo Kim¹ and Sang Yup Kim¹⁺

¹ Department of Mechanical Engineering, Sogang University ⁺E-mail: sangyupkim@sogang.ac.kr

Keywords : textile sensor, piezoresistive, working range, conductive ink

1. Introduction

In the case of existing wearable/clothing sensors, additional wires are used in the wearable sensor to transmit the sensor signal, which limits the user's movement performance[1]. To compensate for this, research on fabricating textile sensors is being conducted[2]. However, existing piezoresistive textile sensors currently used in these applications have significant limitations, mainly due to double solutions.

In a piezoresistive textile sensor, two main factors determine the overall resistance: the intrinsic resistance of the yarn and the contact resistance between the yarns. However, when these two types of resistance overlap, a dual solution phenomenon can occur, where one resistance corresponds to two different input values. As a result, the operating range (or working range) of these sensors is usually monotonic and therefore limited to ensure reliable responses.

To overcome these limitations and significantly extend the operating range, we propose to split the relative resistance change ($\Delta R/R_0$) induced by deformation into two distinct stages. Stage 1 is characterized by an increase in resistance with increasing strain, whereas stage 2 shows a decrease in resistance despite further increasing strain.

By systematically distinguishing these two response stages, we significantly improve the operational range of the sensor, broadening the spectrum of measurable strain and ultimately enabling more comprehensive and reliable biomechanical monitoring in wearable conductive inkbased textile sensors.

2. Results and Discussion

To create a textile conductive line, an ink using Mxene as a conductive nanoparticle was coated on the fabric. An aqueous acrylic binder was used as a solvent to ensure the human compatibility of the sensor. The effectiveness of the printed sensor and conductive line was verified through connection with readout electronics.



Fig. 1 Fractional resistance change (ΔR/R₀) of Mxene-based conductors with strain

The fractional change in resistance was analyzed by increasing the strain up to 100% for response stage measurement [Fig. 1].



Fig. 2. Repetitive response of the sensor on a knee joint

By analyzing the nonlinear relationship between the joint angle and resistance, an average model was derived, and it was proven that the angle can be estimated through the measured resistance [Fig.2(a)]. The result of tracking the knee joint angle from the derived average model was analyzed [Fig.2(b)].

In this experiment, the average absolute error of the sensor was 4.5°, and the standard deviation for the error was 6.4°. It was proven that the conductive ink-based textile sensor in Phase 2 secured accuracy and reliability even at high deformations beyond the existing working range.

3. Conclusions

In this study, by systematically separating the response stages according to strain, we significantly improved the operating range of the sensor, broadened the spectrum of measurable strain, and ultimately enabled more comprehensive and reliable biomechanical monitoring in wearable conductive ink-based textile sensors.

References

[1] Kim, Jinsoo, et al. "Reducing the energy cost of walking with low assistance levels through optimized hip flexion assistance from a soft exosuit." Scientific reports 12.1 (2022): 11004.

[2] Ma, Yulong, et al. "Flexible all-textile dual tactile-tension sensors for monitoring athletic motion during taekwondo." Nano Energy 85 (2021): 105941.

Acknowledgement

This work was supported by National Research Foundation of Korea(RS-2023-00218379)
다공성 탄소질 구형체 기반 로봇 개발 Development of Robot Based on Porous Carbonaceous Sphere

* D.H. Yun¹, A.K. Taseer¹, I.K. Oh¹⁺

¹ 한국과학기술원 기계공학과 ⁺E-mail: <u>ikoh@kaist.ac.kr</u>, ehdgur4281@kaist.ac.kr

Keywords: Metal-Organic Framework, Porous carbonaceous spheres, Magnetic field

1. 서론

개발된 다공성 탄소질 구형체는 넓은 표면적과 강한 자성을 가진 재료이다.[1] 이를 이용하여 로봇은 넓은 표면적을 이용해 많은 양의 물질을 저장할 수 있고, 강한 자성 덕분에 자기장 제어 시스템으로 정밀 제어가 가능하다. 본 연구에서 다공성 탄소질 구형체로 코팅된 나선형 로봇을 소개한다. 해당 로봇은 회전 자기장 내에서 corkscrew 운동을 하며 전진한다.

2. 설계

2.1 다공성 탄소질 구형체

Cobalt nitrate hexahydrate와 benzophenone-3,3',4,4'-tetracarboxylic di-anhydride (BTDA)를 N,N-dimethylformamide (DMF)에 용해시킨 후 섭씨 110도에서 용매열 합성하여 코발트 MOF를 만든다. 그 뒤 코발트 MOF를 300도로 10분간 산화분해 시킨 후 질소 내에서 5분간 섭씨 700도로 하소 시킨다. 이렇게 만들어진 다공성 탄소질 구형체는 넓은 표면적과 함께 soft ferromagnetic 특성을 가진다.

2.2 나선형 구조

로봇의 나선형 구조는 형상기억합금을 통해 제작했다. 형상기억합금은 가열 시 상변화에 의해 형상이 변형하는 특성을 가진 재료로 만들어진 로봇은 외부에서 열을 가했을 때 원래 형상으로 되돌아 간다. 로봇이 작동 중 변형되어 본래 성능을 내지 못하는 상황에서도 열을 가해 본래 형상으로 되돌아가 정상 작업을 할 수 있다.

3. 로봇의 corkscrew locomotion

만들어진 다공성 탄소질 구형체는 나선형 구조에 부착된 머리 부분에 코팅되어 구조에 자성을 부여한다. 나선형 구조에 회전 자기장을 인가하면 나선형 구조가 회전하며 corkscrew 운동한다. 회전 자기장의 주파수를 증가시켜 구조를 0.1Hz, 0.6Hz, 0.9Hz로 회전 시키며 회전 속도에 따른 전진을 확인했다.



Fig. 1. Locomotion according to angular velocities.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 다공성 탄소질 구형체와 나선형 구조로 로봇을 제작했다. 제작된 로봇은 회전 자기장을 가했을 때 회전하며 전진하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 다공성 탄소질 구형체의 로봇 제작 가능성을 확인했으며, 이를 기반으로 표면 저장 능력이 향상된 로봇 개발이 기대된다.

참고문헌

[1] AK Taseer et al. Adv Mater. 36:1-13, 2024.

후기

이 연구는 한국 정부(MSIT)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 연구임.(RS-2024-00345241)

맞춤형 2D 오그제틱 구조 기반 프로그래머블 구동 특성 연구 Programmable actuation characteristics through customizable 2D Auxetic structures

*공현우¹, 장예원¹, 김재환¹⁺ * Hyeonwoo Kong¹, Yewon Jang¹, Jaehwan Kim¹⁺

> ¹ 국립금오공과대학교 기계공학부 ⁺E-mail: kimjh8729@kumoh.ac.kr

 Keywords: Auxetic, Modular Structure, Re-entrant Structure, 3D Printing

 1. 서론
 열

최근 음의 푸아송 비를 갖는 오그제틱(auxetic) 구조가 메타물질로서 각광받고 있다. 이러한 오그제틱 구조는 뛰어난 에너지 흡수 성능과 더불어 셀 크기에 따라 음향 제어가 가능한 특성 덕분에 많은 연구가 진행되고 있다. 하지만 기존의 연구는 대부분 3D 프린팅 된 몰드를 이용한 일체형 구조물의 특성 분석에 초점이 맞추어져 있어, 제작 후 유지보수의 어려움이나 몰드 출력 품질의 영향을 많이 받는 한계가 존재한다. 따라서 본 연구에서는 재진입(reentrant) 구조를 기반으로 한 조립형 소프트 오그제틱 PDMS 구조를 제작하고, 다양한 조립 형태에 따른 기계적 물성과 변형 거동을 확인하고자 한다.

2. 조립형 소프트 오그제틱 구조 설계 및 제작과정

2.1 오그제틱 구조 설계

음의 푸아송비를 갖는 구조의 반복 단위는 총 가로 및 세로 길이가 40mm가 되도록 설정하였으며, 기하학적 계산을 통해 주요 설계 변수인 I 및 h의 값을 도출하였다. 또한, 구조의 두께는 체결 부위의 안정성을 확보할 수 있는 최소한의 두께인 4mm로 설정하였으며, 중간부는 60°의 기울기를 갖도록 형상 최적화를 수행하였다.



Fig. 1. Design schematic of modular soft auxetic structure.

2.2 제작과정

수용성 필라멘트를 이용하여 3D 프린팅된 몰드를 제작한 후, PDMS 기반의 소프트 오그제틱 구조체를 제조하였다. PDMS와 경화제를 10:1의 비율로 혼합한 용액을 준비하여 몰드에 주입한 뒤, 균일한 표면 형성을 위해 평탄화 과정을 거쳤다. 이후, 60°C에서 열경화를 진행하여 구조체의 안정성을 확보하였다. 최종적으로, 물에 용해되는 몰드를 제거함으로써 소프트 오그제틱 구조체를 획득하였다.

3. 오그제틱 구조의 물성평가

본 연구에서는 제작된 조립형 소프트 오그제틱 구조의 기계적 특성을 평가하기 위해 인장 및 압축 시험을 수행하였다. 체결 부위 형상이 서로 다른 여러 개의 샘플을 제작하여 비교 실험을 진행하였으며, 이를 통해 조립 방식이 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, 체결 부위의 설계 방식에 따라 인장 강도 및 연신율에서 유의미한 차이가 발생하는 것이 확인되었다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 3D 프린팅 기술을 활용하여 조립형 2차원 오그제틱 구조를 제작하고, 연결부 형태의 변화가 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하였다. 기존의 일체형 구조물은 제작 시간이 길고, 복잡한 몰드 설계가 필요하지만, 본 연구에서 제안한 조립형 구조물은 단순화된 개별 부품을 조립하는 방식으로 제작 난이도를 낮추고. 재사용이 가능하여 보다 효율적인 연구 진행이 가능하다. 또한, 자성을 지닌 재료와 결합하면 외부 자기장에 의해 구조물의 변형을 능동적으로 조절할 수 있다. 통해 기존 구조물보다 정밀한 제어가 이를 가능하며, 특히 에너지 흡수 및 충격 완화 소재, 우주 및 항공 소재 개발 분야에서 높은 활용 가능성이 기대된다.

참고문헌

[1] Z.Wang et al. Adv. Eng. Mater. 22:2000312, 2020

후기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2024-00456368)

NdFeB-PDMS가 패턴된 이온성 고분자 기반 전기-자기 반응형 액추에이터 Electromagnetically Responsive Actuators Based on NdFeB-PDMS-Patterned Ionic

Polymers

*원다민¹, 김재환¹⁺ * D. Won¹, J. Kim¹⁺

¹ 국립금오공과대학교 기계공학부 ⁺E-mail: <u>kimjh8729@kumoh.ac.kr</u>

Keywords: Electro-Magneto-Responsiveness, Actuator, IPMC

1. 서론

최근 소프트 로보틱스 분야에서는 곤충이나 동물의 행동을 모사하는 생체모사 기술이 주목받고 있다. 기존의 장체 로봇과 달리 소프트 로봇은 재료적 유연성과 우수한 적응성으로 인해 복잡한 환경에서 자유도가 높은 움직임을 자연스럽게 구현할 수 있다. 특히 곤충이나 동물의 정밀한 움직임을 재현하기 위해서는 전기 및 자기와 같은 외부 자극에 동시에 반응 가능한 소프트 액추에이터 개발이 필수적이다.[1] 본 연구에서는 NdFeB와 PDMS 혼합을 통해 산화 문제를 완화하고, Doctor Blade 기법과 laser cutting 기반의 패터닝 공정을 통해 얇은 박막 구조를 제작하였다. 또한, Nafion 도포 및 PEDOT:PSS 코팅으로 전기 및 자기적 자극에 동시 반응하는 소프트 액추에이터의 새로운 제작 접근법을 제시한다.

2. 본론

2.1 구조 및 작동 원리

본 연구에서 제작한 액추에이터는 IPMC 액추에이터를 기반으로, 그 안에 다양한 각도로 패터닝된 NdFeB-PDMS 복합재를 삽입하여 전기적 및 자기적 자극에 동시에 반응할 수 있는 특성을 지닌다. IPMC 액추에이터는 전기적 자극을 통해 이온 이동을 유도하여 굽힘 변형을 발생시키는 특성을 가지고 있으며, 패터닝된 NdFeB-PDMS 복합재는 강자성체인 NdFeB의 반응을 통해 자기적 자극에 의한 추가적인 굽힘 변형을 유도한다.

2.2 제작 방법

본 연구에서는 NdFeB 분말과 PDMS 주제 및 경화제를 혼합한다. 이후, 해당 혼합물을 Teflon sheet 위에 도포한 후 Doctor Blade 기법을 적용하여 균일한 두께의 박막을 제조하고, 60℃ 오븐에서 9시간 이상 건조하여 경화를 완료한다. 경화된 박막은 laser cutting을 통해 패트리 디쉬의 지름에 맞게 원형으로 절단한 후, 패트리 디쉬 상에 이송되어 각각 총 4개의 각도(0°, 30°, 45°, 60°)의 직사각형 패턴으로 추가 가공하여 불필요한 영역을 제거한다. 이후 Nafion 용액을 도포한 후 90℃ 오븐에서 6시간 이상 건조하여 안정적인 Nafion 고분자 층을 형성하여, 최종적으로 원하는 형태로 laser cutting 한 후 PEDOT:PSS를 도포함으로써 전기-자기 이중 자극에 반응하는 액추에이터를 완성한다.



Fig. 1 Fabrication Process of Patterned actuator

3. 결론

본 연구에서 제작한 NdFeB-PDMS 기반 액추에이터는 전기적 및 자기적 자극에 동시 반응하는 특성을 보인다. 다양한 각도로 패턴을 제작함으로써 액추에이터의 굽힘 특성을 제어할 수 있을 것으로 보이며, 패턴 각도에 따라 자기적 반응에 따른 굽힘 방향이나 정도가 달라질 것으로 예상된다.

참고문헌

 Mahato, M., Hwang, W., Tabassian, R., Oh, S., Nguyen, V. H., Nam, S., Kim, J., Yoo, H., Taseer, A. K., Lee, M., Zhang, H., Song, T. and Oh, I., 2022, "A Dual-Responsive Magnetoactive and Electro-Ionic Soft Actuator Derived from a Nickel-Based Metal-Organic Framework," Advanced Materials, Vol. 34, No. 35, pp. 2203613

후기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2024-00456368)

포

人

Lithiophilic interfacial layer for evaporated Lithium metal anode

*Hyunyoung Kim¹⁺, Youngsil Kim², Jun-Seob Park², Hee Han², Hongseok Jo², Chi Won Ahn² and Su-Ho Cho²⁺

¹ Graduate School of Energy Science and Technology(GEST) Chungnam National University(CNU), Daejeon, Republic of Korea

² National Nanofab center, Daehak-ro 291, Yuseong-gu, Daejeon Republic of Korea

⁺E-mail: gusddud18@naver.com, csh0160@nnfc.re.kr

Keywords : Li metal battery, Thermal evaporation, Thin Li Anode, Interface Engineering

1. Introduction

Li-metal batteries utilize Li as the anode, offering a high theoretical specific capacity, low density, and a low negative potential [1]. However, challenges such as volume expansion and dendrite formation hinder their practical commercialization by degrading battery performance [2]. To address these issues, research has focused on introducing a Ag underlayer to stabilize the Li surface through lithiophilic interactions, thereby enhancing battery performance.

2. Experimental Section

2.1 Preparation of Lithiophilic interfacial layer

To control the interface of Li metal, a lithiophilic silver (Ag) underlayer was deposited with varying thicknesses. The Ag layer was deposited with thicknesses ranging from 0 to 100 nm. Subsequently, Li metal was deposited to a thickness of 1.0 μ m. All deposition processes were conducted using a thermal evaporator under a high vacuum pressure of 10^{-7} Torr. To ensure an air-free environment, the entire process was carried out inside a glove box.

2.2 Characterization of evaporated Li metal anode

The evaporated Li metal anode was characterized using various analytical techniques. An atmosphere-free scanning electron microscope (SEM) was employed for surface and cross-sectional analysis, while an atomic force microscope (AFM) was used to measure surface roughness. To evaluate the electrochemical properties of Li with the introduced lithiophilic metal, Li/Li symmetric cells were fabricated. 2032-type coin cells were assembled inside a glove box, and all fabrication and testing processes were conducted at room temperature.

3. Results and Discussion

With the introduction of the lithiophilic interfacial layer, the Li surface exhibits a denser grain structure. As shown in the AFM image in Figure 1, bare Li metal has relatively large grain sizes and significant surface roughness. However, when an Ag underlayer is introduced, it forms a solid solution with Li and grows in an alloy-like structure, resulting in a Li surface with reduced roughness. Additionally, the Ag underlayer enhances adhesion to the Cu foil, which serves as the current collector. Furthermore, to evaluate the electrochemical properties of Li with the lithiophilic metal, a Li/Li symmetric cell was fabricated. The cell incorporating the optimal Ag underlayer thickness demonstrated improved performance compared to the coin cell utilizing bare Li.



Fig. 1. AFM images of Li surfaces with and without Ag underlayer deposition

4. Conclusions

With This study demonstrated that introducing a lithiophilic Ag underlayer improves the interfacial properties of Li metal anodes. The Ag layer promotes alloy-like growth with Li, resulting in a denser grain structure, reduced surface roughness, and enhanced adhesion to the Cu current collector. Electrochemical evaluations of Li/Li symmetric cells confirmed that the optimal Ag underlayer thickness significantly improves battery performance compared to bare Li anodes. These results highlight the potential of interfacial engineering to address key challenges in Li-metal batteries and enhance their commercialization prospects.

References

- [1] Zhao, Yining, et al. "Vacuum evaporation plating enabling≤ 10 µm ultrathin lithium foils for lithium metal batteries." Small 20, 34 (2024): 2312129
- [2] Jin, Song, et al. "Solid–solution-based metal alloy phase for highly reversible lithium metal anode." *Journal of the American Chemical Society* 142,19 (2020): 8818-8826

Acknowledgement

This research was supported by by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (no. RS-2024-00450477). This work was supported by Semiconductor-Secondary Battery Interfacing Platform Technology Development Project of NNFC in 2025.

가변 강성 SMP 기반 모션 적응형 접착 전환 테셀레이션 피부 패치 Motion-Adaptive and Adhesion-Switchable Tessellated Skin Patch Based on Variable-

Stiffness SMP

*홍소윤¹, 최건준¹, 김재일¹, 이희진¹, 장혜진¹, 정훈의¹⁺ * S. Y. Hong¹, G. J. Choi¹, J. E. Kim¹, H. J. Lee¹, H. J. Jang¹, H. E. Jeong¹⁺

> 울산과학기술원 기계공학과 ⁺E-mail: <u>hoonejeong@unist.ac.kr</u>

Keywords: Wearable electronics, Shape memory polymers, Tessellated structure, Switchable adhesion

1. 서론

웨어러블 전자기기는 피부와 직접 접촉하여 생체 신호를 감지하지만, 기존 패치는 접착력, 유연성, 대형 부품 통합, 피부 자극 없는 제거를 동시에 구현하기 어렵다. [1, 2] 본 연구에서는 형상기억고분자(SMPs)를 이용한 테셀레이션 구조를 적용하여, 강한 접착력과 높은 유연성을 동시에 갖춘 패치를 개발하였다.



Fig. 1. Schematic of a tessellated patch

2. 패치 설계 및 성능 구현

2.1 형상기억고분자 기반 테셀레이션 구조 : 형상기억고분자(SMPs)로 구성된 테셀레이션 구조를 적용하여, 강한 접착력과 유연성을 갖춘 피부 접착형 패치를 개발하였다. 경질 SMP는 구조적 안정성을 제공하고, 연질 SMP는 신체 모션에 따라 유연하게 변형되며, 온도 변화에 따라 가변 접착 특성이 조절되어 반복 사용이 가능하다.

2.2 고분자 복합재료 및 전자 부품 통합 : 패치는 SA-LMA 기반 SMP 복합재에 실리카 나노입자(SNPs)를 포함해 기계적 강도와 형상 회복 성능을 향상시켰다. 또한, 은 나노와이어(AgNWs) 전극을 적용해 높은 전도성과 유연성을 확보하고, 신체 움직임 중에도 안정적인 생체 신호 측정이 가능하다.

SMP nanocomposites



Fig. 2. Chemical structure of SMP/SNP nanocomposites.

3. 성능 평가 및 검증

패치는 1070.2 kPa의 인장 접착력과 200.9 N/m의 박리 접착력을 가지며, 500회 반복 사용 후에도 성능이 유지되었다. 온도 변화를 통해 접착력 조절이 가능하여 손쉽게 탈착할 수 있다. 또한, 최대 219.6% 신장률과 3420° 비틀림 각도를 기록하며, 피부와 유사한 탄성 계수(218.8 kPa)를 보였다. AgNWs 기반 전극을 활용해 22.5 dB의 SNR을 유지하며 ECG 등 생체 신호를 안정적으로 감지하였다.

4. 결론 및 향후과제

개발된 패치는 온도 변화에 따라 접착력을 조절할 수 있으며, 반복 사용이 가능하고 대형 전자 부품과 쉽게 통합될 수 있음을 입증하였다. 또한, 우수한 기계적 안정성과 다양한 환경에서의 신뢰성을 바탕으로 웨어러블 전자기기의 발전에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

K. R. Jinkins et al., *Sci. Adv.* 2022, *8*, eabo0537.
 I. Hwang et al., *Adv. Healthcare Mater.* 2018, *7*, 1800275.

후기

본 연구는 한국연구재단(NRF-2021R1A2C3006297)과 과학기술정보통신부(RS-2024-00432685)의 지원을 받아 수행되었습니다.

가변 강성 SMP 복합소재 기반 자기 구동 소프트 인공근육 개발 Magnetically Actuated Soft Artificial Muscles with Variable-Stiffness SMP Composites

*김소미¹, 권혁주¹, 이상우¹, 강동관¹, 김재일¹, 정훈의¹⁺ * S. M. Kim¹, H. J. Kwon¹, S. W. Lee¹, D. K. Kang¹, J. E. Kim¹, H. E. Jeong¹⁺

> ¹ 울산과학기술원 기계공학과 ⁺E-mail: <u>hoonejeong@unist.ac.kr</u>

Keywords: Magnetic composite, Stiffness tunable, Artificial muscle, Shape memory polymer

1. 서론

소프트 액츄에이터는 유연한 적응력으로 웨어러블 및 바이오 디바이스 등 다양한 분야에서 주목받고 있으며, 특히 자기장을 이용한 방식은 원격 제어와 빠른 반응 속도로 소프트 로봇에 유망하다[1, 2]. 하지만 기존 자성 소프트 로봇은 기계적 성능이 제한적이며, 이를 개선하기 위해 가변 강성 형상 기억 고분자와 마이크로 자성 입자를 활용한 소프트 인공근육을 개발하였다.



Fig. 1. Overview and performance of artificial muscle.

2. 복합소재 기반 인공근육 개발

2.1 단상 복합소재 설계: 큰 강성변화율을 가지는 자성 소프트 인공 근육을 설계하기 위해 열감응형 형상 기억 폴리머와 네오디뮴 자성 입자를 결합한 복합재를 개발하였다. 표면이 개질된 마이크로 크기의 자성 입자는 긴 알킬 체인을 가진 형상 기억 폴리머와 물리적 얽힘을 형성하여 기계적 물성을 강화시킨다. 개발된 열감응형 자성 복합소재 기반 인공근육은 레이저 조사에 의해 온도를 변화시켜 강성을 조절할 수 있다.

2.2 이상 복합소재 설계: 개발된 단상 소프트 인공근육은 높은 자기 반응성을 갖지만, 자기장에 대한 빠른 응답 속도로 인해 흔들림이 발생할 수 있다. 소프트 인공근육의 정밀한 위치 제어를 위해, 단상 복합소재에 하이드로젤을 섞어 에너지 소산 기능을 부여함으로써 정밀 제어가 가능하도록 설계하였다.



Fig. 2. Monophasic and biphasic configurations.

3. 이중층 구조 인공근육 개발

3.1 이중층 구조 설계: 단상 복합소재의 빠른 자기 반응성과 이상 복합소재의 에너지 소산 기능을 결합하여 정밀 제어가 가능한 자기 구동 인공근육을 개발하기 위해 이중층 구조를 설계하였다.

3.2 이중층 인공근육 성능: 개발된 이중층 구조의 인공근육은 고온에서 유연한 상태가 되어 우수한 신축성을 가지며, 상온에서는 단단한 상태가 되어 높은 하중 지지 능력을 보여준다. 또한, 프로그래밍이 가능하여 외부 자기장에 의해 다양한 움직임을 정밀하게 구현할 수 있다.

3. 결론 및 향후과제

자성 복합재를 이용하여 소프트 인공 근육을 제작한 후, 다양한 기계적·액츄에이팅 성능을 측정하였다. 본 소프트 인공근육은 높은 강성변화율(2.7×10³), 우수한 탄성계수(2.4 GPa), 인장률(815%), 감쇠비(1.348), 작동 변형률(63.8% s⁻¹), 작업 밀도(129.5 kJ m⁻³), 에너지 효율(90.9%)을 가지며, 생체 근육보다 우수한 성능을 나타내는 것으로 확인되었다.

참고문헌

H. Lee et al. *Sci Robot.* Vol 5, eaay9024, 2020.
 M. Kang et al. Adv. Mater. 35, 2200185, 2022.

후기

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음. (NRF-2021R1A2C3006297)

High-Performance Bistable Soft Actuator Enabled by Elastic Instability

and Shape Memory Alloy Activation

*Yang Yang, Wonhee Ji, Jaewoo Roh and Il-Kwon Oh+

Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) +E-mail: ikoh@kaist.ac.kr

Keywords : Shape Memory Alloy (SMA), Snap-through Behavior, Composite Structure.

1. Introduction

Soft actuators with high efficiency, rapid response, and substantial power output are essential for applications in soft robotics[1], biomedical engineering[2], and deployable structures[3]. Traditional soft actuators face challenges in achieving both energy efficiency and high force output. To address this, we present a bistable composite soft actuator that leverages elastic instability and shape memory alloy (SMA) activation for highpowered energy release.

2. Manuscript Format

2.1 First Part: The actuator is designed with NiTi SMA wires embedded in a PDMS (polydimethylsiloxane) silicone matrix(Fig. 1), supported by a 3D-printed PLA (polylactic acid) frame. The PDMS matrix functions as an elastic energy storage element and deformation guide, while the SMA wires provide active actuation, and the PLA frame establishes structural constraints for bistability.



Fig. 2. Jumping performance

2.2 Main Part: At room temperature, the actuator can be manually deformed into a stable buckled state without consuming energy. Upon electrical heating, the SMA wires activate the shape memory effect, restoring the actuator to its original shape with high-speed motion. This results in a powerful energy release, propelling the actuator to a height of 80 mm(Fig. 2), which is eight times its own height. To further understand the underlying mechanisms, finite element analysis (FEA) was employed to model the

thermal response and elastic instability. Additionally, experimental tests were conducted, including static forcedisplacement measurements(Fig. 3.), dynamic response analysis, and transition time evaluations under different thermal conditions.



Fig. 3. Static testing and finite element simulation at different temperatures.

3. Results and Discussion

The results demonstrate that the proposed actuator achieves superior energy efficiency and power density by utilizing controlled elastic instability. The force output and transition speed significantly exceed those of conventional soft actuators. The experimental findings validate the FEA predictions, confirming the feasibility of bistable actuation for high-speed and forceful motion applications.

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

This study introduces a high-performance soft actuator that integrates bistability with SMA-driven rapid deformation, offering a new approach for designing energy-efficient and powerful soft actuators. The findings contribute to the advancement of soft robotics, deployable structures, and medical devices. Future work will focus on optimizing the actuation control strategy and exploring additional applications requiring rapid mechanical response and high-force output.

References

- [1] Zhao et al. Nat. Mater. 24.1 (2025): 116-124.
- [2] Oh S et al. Adv. Mater. 35(47): 2304442, 2023.
- [3] Yan W et al. Nat. Commun. 14.1 (2023): 1553.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00345241).

Nafion 필름의 레이저 각인을 통한 패턴된 IPMC actuator의 성능향상 Performance Improvement of Patterned IPMC Actuators through Laser Engraving of Nafion Films

*김정운¹, 조성준¹, 김재환¹⁺ * Jeongun Kim¹, SeoungJun Jo¹, Jaehwan Kim¹⁺

> ¹ 국립금오공과대학교, 기계공학부 ⁺E-mail: <u>kimjh8729@kumoh.ac.kr</u>

Keywords: laser engraving, patterned, IPMC actuator, Nafion

1. 연구배경

이 연구는 이온성 고분자-금속 복합체(IPMC) 액추에이터의 성능을 향상시키고 구동 방향을 제어하는 새로운 방법을 제시한다. IPMC는 전기적 자극에 반응하여 굽힘 운동을 생성하는 소프트 액추에이터로, 소프트 로봇, 인공 근육, 생체 모방 기술 등에서 유망한 응용 분야를 가지고 있다. [1],[2]. 본 연구에서는 IPMC의 전해질 고분자로 사용되는 Nafion의 표면을 패턴화하여, 이를 통해 움직임을 액추에이터의 향상시키는 방법을 제시한다. Nafion 표면에 CO₂ 레이저 각인기를 이용해 패턴을 적용함으로써 비대칭적인 굽힘 운동을 발생시키는 성능 개선을 보였다.

2. 패턴 형성 방법

2.1 레이저 각인기를 이용한 Nation 필름 표면 패턴

Nafion 표면을 패턴화 하는 방법은 레이저 각인기를 사용해 Nafion 필름 표면에 조사하여 Nafion 필름을 열분해 하는 것으로, 해당 방법으로 Nafion 필름에 패턴을 생성시켰다.

2.2 레이저 각인기 속도 결정

Nafion 표면 패턴 시, 레이저의 출력 값을 결정하기 위해 Nafion 단면을 현미경을 이용하여 시료의 세부 구조를 확인했다. 6.4W출력에서, 레이저 각인기의 스캔 속도가 빠를수록 더 얕게 파지는 것을 볼 수 있었다. IPMC 액추에이터의 성능 향상을 위해 필름이 파손되지 않는 선에서 스캔 속도를 결정했다. Imm/s~3mm/s 까지는 Nafion 필름의 손상이 일어났다. Nafion 필름의 두께를 고려하여 4mm/s로 레이저 각인기의 최종 출력 값을 결정했다.

3. Patterned IPMC Actuator

IPMC의 성능 향상을 확인하기 위해 패턴이 그려진 엑추에이터를 제작했다.



Fig. 1. Actuation performance of the patterned actuators.

레이저 각인의 피치는 2mm로 하였고, 6.4W의 출력과 4mm/s의 속도이다.

4. 결론 및 향후과제

레이저를 통한 열분해로 Nafion 필름의 표면을 미세 가공하여 패턴을 형성하여 성능이 향상된 IPMC actuator를 제작할 수 있었다. Nafion 필름이 찢어지지 않고 IPMC actuator의 성능이 최대가 되도록 레이저의 출력값과 각인 속도를 결정했다. 본 연구를 통한 IPMC actuator의 성능 향상은 인공근육, 소프트 로봇, 의료 기기 등의 분야에서 IPMC actuator의 향상된 성능으로 인한 많은 활용이 기대된다.

참고문헌

C Jo et al. *Prog. Polym. Sci.* 38:1037-1066, 2013.
 VH Nguyen et al. *Adv. Funct. Mater.* 30:1909504, 2020.

후기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2024-00456368)

자기 복합재 기반 3차원 오그제틱 구조체의 설계 및 기계적 특성 분석

Design and Mechanical Property Analysis of 3D Auxetic Structures Based on Magnetic Composites

* Yunho Lee¹, Jaehwan Kim¹⁺

¹국립금오공과대학교 기계공학부 ⁺E-mail: kimjh8729@kumoh.ac.kr

Keywords: Auxetic, Magnetic composite, Mechanical property

1. 서론

오그제틱 구조체는 외부 힘에 의해 부피가 증가하는 특성을 가지며, 충격 흡수와 에너지 저장 등의 기능으로 다양한 산업에서 활용 가능성이 높다[1][2]. 보 연구에서는 네오디뮴-철-붕소(NdFeB)와 복합재를 디메틸실록산(PDMS) 이용해 3차원 기계적 오그제틱 구조체를 제작하고 특성을 평가하고자 한다. NdFeB는 강도와 자기적 성질을, PDMS는 유연성과 내구성을 제공하여 구조체의 성능을 극대화할 것으로 기대된다.

2. NdFeB-PDMS 복합재 오그제틱 구조 제작

본 연구에 사용된 음의 푸아송 비를 갖는 오그제틱 구조는 아래 Fig. 1과 같이 설계했다. 3D 프린팅 기술을 활용하여 PVA 필라멘트로 몰드를 제작한 후, 몰드에 NdFeB-PDMS 복합재를 부어 굳혔다. 마 지막으로, PVA 필라멘트를 물에 녹여 몰드를 제거하고, 최종구조를 완성했다.



Fig. 1. Schematics of auxetic structures.

3. NdFeB-PDMS 비율에 따른 물성치 평가

Table 1 NdFeB-PDMS Ratio			
NdFeB	PDMS+경화제(10:1)		
0%	100%		
12.5%	87.5%		
25%	75%		
37.5%	62.5%		
50%	50%		

본 연구에서는 Table 1에 제시된 NdFeB-PDMS의 비율에 다라 물성치를 평가하기 위해 Dogbone

Psalms를 이용한 실험을 실시하였으며,이를 통해 비율에 다른 인장강도(Tensile Strength)를 확인했다.

3.1 NdFeB-PDMS 오그제틱 구조 압축 실험

본 연구에서는 오그제틱 구조의 특징인 유연성, 에너지 흡수 능력을 테스트하고자 한다. 본 실험에서 는 Table 1에 제시된 NdFeB-PDMS의 율에 따라 압축 실험을 통해 응력 변형률 및 Young's modulus 그래프를 확인했다.



Fig. 2 Compression test of auxetic structure

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 NdFeB와 PDMS 기반의 복합재를 이용하여 3차원 오그제틱 구조체를 제작하고, 그 기계적 물성을 평가했다. 향후 실험에서는 오그제틱 구조체가 자기장이 형성된 환경에서 압축 실험을 진행하여 구조체의 변화를 분석할 예정이다. 이를 통해 오그제틱 구조체의 유연성과 에너지 흡수 능력을 평가할 계획이다. 추가 연구를 통해 더욱 발전된 복합재 개발이 기대된다.

참고문헌

M. Mir et al. *Adv Mater Sci Eng.* 2014;2014:753496.
 M. Balan et al. *Mater Today Commun.* 2023;34:105285.

후기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2024-00456368)

3D 프린팅을 위한 액체 금속 복합 잉크의 전기-자기적 특성 분석 Electro-magnetic Characterization of Liquid Metal Composite Ink for 3D Printing

*장예원¹, 김덕원¹, 김재환¹⁺ * Yewon Jang¹, Deokwon Kim, Jaehwan Kim¹⁺

> ¹ 국립 금오공과대학교 기계공학부 ⁺E-mail: kimjh8729@kumoh.ac.kr

Keywords: 3D Printing ,liquid metal, composite, Electro-magnetic

1. 서론

의료 및 웨어러블 산업의 빠른 성장에 따라 생체 부착형유연소자에 대한관심이지속적으로 증가하고 있다. 그러나기존 연구들은 DIW(Direct Ink Writing)을 이용해서 주로 단순한 2차원 구조로 제작되어 왔고, 다양한 기능성 재료를 조합하여 복잡한 3차원 형상을 구현하는 데 한계가 있었다. [1],[2] 본 연구에서는 상온에서 상전이를 나타내는 액체금속(liquid metal)중 액상 갈륨(Ga, 99.99%, Sigma Aldrich)에 MXene과 NdFeB를 혼합하여 전기적 전도성, 자기적 응답성, 기계적 유연성을 동시에 갖춘 생체친화적 잉크를 개발하고자 한다. 이를 위해 높은 설계 유연성을 제공하는 직접 잉크 쓰기 프린팅 기술을 활용하여 최적의 잉크 배합과 공정 조건을 도출하고자 한다.

2. 잉크 합성 및 프린팅 공정



Fig. 1. Ink synthesis and printing process.

본 연구에서의 잉크제작과정은 다음과 같다. 먼저 Ga를 60℃의 진공 환경에서 녹인 후, MXene 1 wt%와 NdFeB powder를 10wt%, 20wt%, 30wt%, 40wt%의 비율로 첨가하여 약7분간 균일하게 혼합하였다. 이후 혼합된 재료는 표면에 형성된 산화물을 제거하기 위해 묽은 HCl 용액에 담가 처리하였다. 최종적으로 혼합 재료를 주사기에 넣고 펌프를 통해 일정한 압력을 가하며 직접 잉크 쓰기 공정에 적용하였다.

3. 잉크의 물성평가

3.1 유동학적 특성평가

본 연구에서는 liquid metal에 MXene과 NdFeB powder를 혼합한 잉크의 프린팅 적합 점도를 rheometer를 통해 분석하고자 한다. 특히 NdFeB의 함량에 따라 점도가 증가하여, 노즐 출력 시 막힘 또는 원치 않은 유동이 발생할 수 있으므로, rheometer를 통해 최적의 유동학적 특성을 확인하고자 한다.

3.2 기계적 특성 평가

본 연구에서는 liquid metal에 MXene과 NdFeB powder를 혼합한 잉크의 rigid mode와 soft mode에 따른 연신율 및 파괴 한도를 테스트하고자 한다. 본 실험에서는 주변 온도 변화로 인해 상변화가 발생한 잉크를 인장시켜 특성을 분석하며, 특히 soft mode에서 높은 연성을 보여 신체 활용 센서로의 응용 가능성을 시사한다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 liquid metal 기반 잉크의 유동학적 및 기계적 특성을 분석하고, NdFeB 함량에 따른 점도 변화를 확인하였다. 실험 결과, 적절한 점도를 통해 3D 적층이 가능함을 확인하였으며, 이를 활용하면 복잡한 구조의 정밀 패터닝이 가능하다. 이는 기능이 향상된 센서 및 스마트 전자기기의 개발에 기여할 수 있으며, 특히 생체 인터페이스 및 웨어러블 전자 분야에서의 응용 가능성을 제시한다.

참고문헌

H. Kim et al. *Adv. Funct. Mater.* 33:2210385, 2023.
 D. A. Kwon et al. *Sci. Adv.* 10:eadn1186, 2024.

후기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2024-00456368) 포

ㅅ

양력 제어를 위한 구조적 패터닝된 단풍씨앗 생체 모사 소프트 액추에이터 Structurally Patterned Maple-Seed-Inspired Soft Actuators for Lift Control

*조성준 ¹, 김재환 ¹⁺ *S.J. Jo¹, J. Kim¹⁺

¹ 국립금오공과대학교 기계공학부 ⁺E-mail: <u>kimjh8729@kumoh.ac.kr</u>

 Keywords:
 Nafion, Ionic Polymer-metal composites(IPMC), Bioinspired, Maple seed

 1. 연구배경
 Fig. 2에서 볼

IPMC는 이온성 고분자(Nafion) 양면에 전도성 고분자가 결합된 삼중층 구조를 갖추고 있으며, 이에 따라 이온의 이동에 기인한 단순하고, 대칭적인 굽힘 운동만을 구현할 수 있다[1]. 그러나 대부분의 생체 조직에서의 기계적 움직임은 단순한 굽힘을 넘어 비틀림, 회전, 비대칭적 굽힘 등의 복잡한 형태로 구현된다. 이러한 차이는 IPMC 기반의 기존 액추에이터가 생체 운동을 정밀하게 모사하는 데 있어 근본적인 한계가 있음을 시사한다.

따라서, 본 연구에서는 IPMC의 구조적 형상을 변형하여 비틀림 및 비대칭 굽힘이 가능한 IPMC를 제작하였다. 이를 활용해 단풍나무 씨앗의 공기역학적 비행 메커니즘을 모사하고[2], IPMC가 양력제어에 활용할 수 있음을 보여주었다.



 Fig.1 Performance of Structurally modified IPMC

 평행한 선형 무늬(Fig.1(a))로 제작된 IPMC

 액추에이터는 ±1V의 낮은 전기적 신호에서 비대칭

 굽힘 운동을 나타냈다. 선형 무늬를 비스듬히

 배열하여 제작한 IPMC 액추에이터는 비대칭적인

 굽힘 운동과 함께 비틀림 운동을 동반하였다(Fig.1(b)).

 3. 단풍씨앗 생체 모사 IPMC

Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 본 연구에서 제작한 IPMC은 단풍나무 씨앗의 공기역학적 메커니즘을 모방하여 양력을 제어할 수 있었다. 특히, 비틀림과 굽힘 운동이 동시에 발생하는 구조에서 더욱 높은 양력이 생성되었다.



Fig.2 Maple seed-inspired IPMC

4. 결론

본 연구에서는 IPMC의 구조적 설계를 변형하여 비틀릮 및 비대칭 굽힘이 가능한 IPMC를 단풍나무 씨앗의 제작하였다. 이를 활용해 공기역학적 비행 메커니즘을 모사하고, 양력 제어 전략을 제시하였다. 이러한 연구 결과는 기존 IPMC 액추에이터의 운동 범위를 확장하며, 생체 모방 기술의 응용 가능성을 한층 더 높이는 데 기여할 것으로 기대된다. 또한, 본 연구에서 IPMC의 새로운 운동 메커니즘은 제시됨 향후 다양한 분야에서 더욱 정밀하고 다채로운 생체 모사 시스템 개발에 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

[1] IK Oh et al. *Science Robotics*. 4(33), eaaw7797. 2019

[2] MH Dickinson. Science. 324(5933), 1438-1440. 2009

후기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2024-00456368)

Optimized Electrodeposited Black Nickel Coatings for Enhanced Solar Thermal Collector Performance

*Akash Deo and Il-Kwon Oh+

Department of Mechanical Engineering

Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Republic of Korea

+E-mail: ikoh@kaist.ac.kr

Keywords : Electrodeposition, Black nickel coatings, Solar thermal collectors, Optical characterization, Thermal efficiency

1. Introduction

The efficiency of solar thermal collectors (STCs) depends on the optical and thermal properties of their absorber coatings. Conventional black paint coatings suffer from high emissivity, causing significant heat loss. Black nickel coatings, produced via electrodeposition, offer a costeffective and durable alternative with high solar absorptance and low thermal emittance. This study optimizes black nickel coatings by varying electrodeposition parameters and evaluates their optical, structural, and thermal properties for STC applications [1-2].

2. Materials and Methods

Black nickel coatings were electrodeposited on copper substrates using a bath of nickel sulfate hexahydrate, ammonium sulfate, sodium thiocyanate, and zinc sulfate hexahydrate. Optimization was performed by varying pH (4–6), bath temperature (20–30°C), current density (2–10 mA/cm²), and deposition time (5–13 min). Coatings were heat-treated at 200°C to enhance stability.



(d): pH = 3.1 (e): pH = 2.6 (f): pH = 2.1

Figure 1. Image of black Ni films electrodeposited at 6 different pH value of electrochemical bath

Characterization:Optical reflectance was measured using UV-Vis-NIR spectrophotometry and FTIR. Structural properties were analyzed via XRD, and SEM was used for surface morphology analysis. The coatings' thermal performance was evaluated through water heating experiments using a prototype flat-plate solar water heating system (FP-SWHS).



Figure 3. (a) SEM images of low temperature plasma cleaned Cu substrate, (b) bright nickel undercoat layer, and (c-f) optimized nanostructured black Ni coatings (pH = 6.0, temp. = 24° C

3. Results and Discussion

Optimized coatings were achieved at pH \approx 5.8, bath temperature 20-25°C, current density 2-6 mA/cm², and deposition time 5-7 min. These coatings exhibited high solar absorptance ($\alpha \approx 0.85$) and low thermal emittance (ϵ \approx 0.1–0.2), significantly outperforming black paint coatings ($\epsilon \approx 0.45$). Structural and Morphological Analysis:XRD confirmed polycrystalline coatings with (111) and (200) orientations. SEM showed a uniform, porous morphology, with coatings on tubes displaying smaller crystallite sizes (~60 nm) than those on flat plates (~3 µm). Thermal Performance:Black nickel-coated STCs demonstrated 20-30% higher efficiencythan black paintbased collectors. The maximum STC surface temperature reached 103°C, compared to 80°Cfor black paint. Water heating experiments showed a 29% efficiency improvement.



Figure 4. (a) Measured reflectance as a function of radiation wavelength.

4. Conclusions

Optimized black nickel coatings enhance STC performance by improving solar absorptance and reducing thermal emittance. Field testing confirmed a 20–30% efficiency increase, highlighting their potential for solar water heating applications. Future research will focus on enhancing durability with protective overcoats such as graphene or TiNOx.

References

B.P. Kafle et al.," Solar Energy, 234, 262–274, 2022.
 Lira-Cantú, M., et al., 87, 1-4, 685–694, 2005.

Acknowledgement

Supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea Government (MSIT) (RS-2023-00302525, RS-2024-00345241, and NRF 2021M3H4A1A03047333).

글로브타입 오그제틱 구조 형상기억합금 기반 착용형 햅틱 인터페이스 Glove-type Auxetic-architectured SMA-based Wearable Haptic Interface

오세웅³, 장재형², *지원희¹, Yang Yang¹, Mannan Khan¹, Carmel Majidi⁴, 유지환³, 오일권¹⁺ S. Oh¹, * W. Ji¹, J. Jang², Y. Yang¹, M. Khan¹, C. Majidi³, J.-H. Ryu¹, I.-K. Oh¹⁺

¹ 한국과학기술원 기계공학과, ² 한국과학기술원 건설및환경공학과, ³ 조지아 공과대학 기계공학과, ⁴ 카네기멜론 대학교 기계공학과

+ E-mail: ikoh@kaist.ac.kr

Keywords: Auxetic, Wearable Haptic Interface, SMA(Shape Memory Alloy), Glove-Type

1. 서론

사람들은 신체 접촉, 특히 손의 촉감을 통해 사물을 파악한다[1-2]. 이러한 촉각상호작용이 원격제어, 인간-기계 상호작용, 증강현실 등 많은 기술에서 구현되게끔 장갑형 인터페이스가 개발되고 있다[3]. 그러나 움직임과 신체별 차이를 고려하지 못하며, 손가락 끝에 국한된 촉각 자극을 주므로[4], 이에 마디별로 복합 촉감을 줄 수 있는 '장갑형 오그제틱 웨어러블 햅틱(GAWH)' 인터페이스를 제안한다.

2. 장갑형 오그제틱 웨어러블 햅틱

GAWH는 손가락 마디별로 오그제틱 메타구조를 적용하여 편리하고 자연스럽게 착용하며 동시에 손가락 형태와 움직임에 알맞게 피팅이 가능한 구조임을 Figure 1(a)에서 보여준다. Figure 1(b)는 메타 구조형 형상기억합금(meta-structured SMA, mSMA) 와이어를 동일 모양의 엘라스토머 프레임 내에 합하여 구성되고, 전류 공급을 통한 줄 가열로 손가락 마디 단면 내외에, 정적 압력, 동적 진동, 가변 강성과 같은 복합적인 촉각 피드백을 만들어내는 인터페이스를 보여준다.



Fig. 1. Auxetic-structured GAWH for haptic feedbacks

3. 멀티모달 촉감 피드백 응용

GAWH에 적용된 mSMA는 독립적으로 구동한다. 지속적인 접촉감을 주는 정적 압력, 탭핑 감각의 동적 진동, 그리고 손가락 관절에 저항감을 주는 강성 변화를 줄 수 있다. 해당 피드백을 활용하여 가상현실 및 원격 로봇 조작에 응용할 수 있다. Figure 2 (a), (b)에서 보듯이, 가상환경에서 사물을 잡을 때 물체에 따라 사람이 손가락으로 파지하는 방식이 달라지는데, 이때 각기 다르게 느끼는 손가락 마디 별 피드백을 통해 접촉감을 재현한다. Figure 2 (c), (d)는 로봇이 물체를 잡았을 때 파지방식에 따라 다르게 촉감을 느끼도록 손가락 마디에 압력을 주어 직관적으로 원격 로봇 조작이 이루어지는 것을 보여준다.



Fig. 2 GAWH for VR grip and Robotic teleoperation.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서 제안한 글로브타입의 착용형 햅틱 인터페이스는 손가락의 움직임과 구조적 차이를 효과적으로 수용가능한 오그제틱 메타구조를 가져, 손가락 관절 둘레와 개인별 손가락 크기 차이에 적응하는 기계적 지능을 갖추는 동시에 mSMA 기반 개별 제어 유닛을 활용하여 손가락에 촉각, 진동, 운동감각 햅틱피드백을 만들어낸다. 그러나 mSMA 의 한계로 인한 제한된 구동 주파수 대역폭이 나타나며, 이를 개선하기 위해 능동 냉각 요소, 고분자 매트릭스를 활용하고자 한다. 여기에 실시간 페루프 제어, 정교한 메타 디자인과 손가락 세분화를 적용해 몰입감 있고 정교한 촉각 경험을 만드는 혁신적인 웨어러블 햅틱 인터페이스의 발전을 바라본다.

참고문헌

- [1] S. Sundaram, Science 370, 768, 2020.
- [2] J. B. F. van Erp, A. Toet, Front. Digit. Humanit. 2, 00002, 2015.
- [3] J. Yin, R. Hinchet, H. Shea, C. Majidi, Adv. Funct. Mater. 31, 2021.
- [4] H. A. Sonar, A. P. Gerratt, S. P. Lacour, J. Paik, Soft Robot., 7, 22, 2020.

후기

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00345241)

Vacuum-driven Class-2 Tensegrity-based Mechanism for Quadrupedal Robot Motion

*Juoh Lee¹ and Hugo Rodrigue^{1,2+}

¹ Department of Intelligent Robotics, Sungkyunkwan University, ² School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University ⁺E-mail: <u>rodrigue@skku.edu</u>

Keywords : Class 2 Tensegrity, Tensegrity Robot, Quadrupedal Robot, Soft Robotics.

1. Introduction

This study introduces a quadrupedal robot using a class-2 tensegrity D-bar structure with vacuum-based Pneumatic artificial muscles (PAMs), achieving 2 DOF motion and supporting up to 10 kg payload. PAMs, which resemble biological muscles, have been studied in various forms but have not been easily integrated into existing robotic leg designs [1]. By combining this with a tensegrity structure, a quadrupedal mechanism was developed [2].

2. Design and Manufacturing

The robotic leg uses OV-PAM actuators with over 85% contraction capability. It features a Class-2 D-bar tensegrity structure with four 198 mm-long actuators and eight 167 mm-long bars. The rhombus structure extends to 39 cm and contracts to 17 cm. The total extended leg length is 51.5 cm, and a weight is 1.65 kg. Two 330 mm-long OV-PAMs generate bidirectional torque for hip joint rotation. Passive supporters of 70 mm assist in force transmission. The actuators maintain forces exceeding 100 N throughout most of their contraction range. The structure is primarily 3D-printed using White PLA filament.

3. Results and Discussion

3.1 Force and Torque: The blocked force was measured using a tensile testing machine at contraction ratios of 10%, 30%, and 50% with pressures from 10 to 40 kPa. The force increased linearly with pressure and was higher at lower contraction ratios. The isobaric force was measured at 2.5 mm/s over a 0-54% contraction ratio, showing a general decrease in force as contraction increased. A bump at 25–30% contraction was observed due to lateral actuator rotation (Fig. 1). The hip joint torque was measured at angles from -45° to +45° (extended) and -30° to +30° (contracted) with pressures from 10 to 40 kPa. Torque increased with positive angles but decreased at negative angles. And the torque remained positive throughout the motion range (Fig. 2).

3.2 Quadrupedal Robot: A quadrupedal robot with four tensegrity-based legs was built with dimensions of 80 cm \times 60 cm \times 47 cm and a total weight of 11 kg. Opposite legs were synchronized using shared fluidic input lines. The robot achieved a stride length of 39 cm, 48.75% body length(BL), and an average speed of 3.23 cm/s (2.42 BL/m) over 2 m in 62 s. With a 10 kg payload, the stride decreased

to 0.35 BL, and the speed dropped to 2.05 cm/s (1.54 BL/m) (Fig. 3).





Fig. 2. Torque measurements



Fig. 3. The quadrupedal robot design and experiment.

4. Conclusions

This paper introduces a vacuum-based pneumatic artificial muscle-driven tensegrity mechanism for quadrupedal robots, ensuring efficient locomotion even with added payloads. Future work aims to reduce weight, enable untethered operation, and integrate ultra-stretchable sensors for better control.

References

- Calisti M et al. 2017 Fundamentals of soft robot locomotion. J. R. Soc. Interface 14: 20170101.
- [2] M. C. Oliveira and R. E. Skelton, *Tensegrity Systems*. New York: Springer, 2009.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT). (RS-2023-00207772, RS-2024-00457555), and Ministry of Trade, Industry and Energy (Project No. 20022884)

넓은 압력 범위와 장기 안정성을 갖춘 초고감도 피라미드 하이드로젤 압력 센서 Ultrasensitive Pyramid Hydrogel Pressure Sensor with a Wide Pressure Range and Long-Term Stability

*강병수¹, 문승언², 김정훈²⁺, 강성민¹⁺ * B.S. Kang¹, S.E. Moon², J.H. Kim²⁺, S.M. Kang¹⁺

¹ 서강대학교 기계공학과, ² 한국전자통신연구원 ⁺E-mail: jeonghun@etri.re.kr (김정훈), smkang@sogang.ac.kr (강성민)

Keywords: Hydrogel sensor, Pyramid pattern, crosslinking, Long-term stability.

1. 서론

하이드로젤의 표면적 변화를 극대화하여 감도를 향상시키기위해,우리는하이드로젤을더욱유연하게 조절하였다. 최소량의 가교제를 사용하면서도 높은 결합력을 유지할 수 있도록 설계된 고성능 센서를 개발하여, 하이드로젤의 부드러움을 보존하였다. 또한, glycerol을 첨가함으로써 수분 증발을 효과적으로 억제하고,성능과 안정성을 동시에 확보할 수 있는 최적의 조성법을 구현하였다.

2. 하이드로젤 압력 센서 측정 원리 및 결과

그림 la는 설계된 하이드로젤 압력 센서의 전기용량 검출 원리를 설명한다. 하이드로젤 표면에 피라미드 구조를 도입하여 전극과의 접촉 면적 변화를 극대화하였다. 압력이 가해지면, 점 접촉이 표면 접촉으로 전환되어 접촉 면적이 크게 증가한다. 이때, EDL (Electric double laver)이 발생한다. EDL은 전극과 전해질의 경계에서 발생하는 두 개의 전기적으로 충전된 층으로 전기적 감지 역할을 한다. 우리는 비구조적 하이드로젤을 사용하여 서로 다른 가교제(MBAA) 비율에 따른 압력 변화에 대한 전기용량 변화를 비교하였다(그림 1b). 가장 큰 전기용량 변화를 보인 하이드로젤은 MBAA 0.5 mol%였다. 해당 샘플의 평균 감도는 저압 범위에서 10.9 kPa⁻¹로 나타났고 다른 하이드로젤은 상대적으로 낮은 감도를 보였다. 이는 가교제 비율이 증가함에 따라 폴리머의 탄성 및 연성이 증가하여 하이드로젤이 더욱 단단한 기계적 특성을 갖기 때문이다. 보다 단단한 하이드로젤은 압력이 가해질 때 표면적과 두께 변화가 제한되며, 이로 인해 전기용량 변화 역시 감소하게 된다. 그림 lc는 피라미드 구조를 갖는 하이드로젤에서 서로 다른 MBAA 비율에 따른 압력 변화에 대한 전기용량 변화를 나타낸다. MBAA 비율이 증가할수록 전기용량 변화는 감소하는 경향을 보였다. 가장 큰 전기용량 변화를 보인 샘플은 MBAA 0.5 mol%로, 저압 범위에서 평균 감도는 48.7 kPa⁻¹로 측정되었다. 가교제 비율을 낮춰 하이드로젤의 부드러움을 증가시키면, 하이드로젤의 구조와 패턴이 최소한의 압력에도 더욱 민감하게 반응하게 된다. 이는 센서의 변형에 따른 접촉 면적 증가를 촉진하여 하이드로젤 압력 센서의 감도를 효과적으로 향상시키는 결과를 가져온다.

3. 장기 안정성

하이드로젤 센서를 지정된 온도의 무게와 감도를 다시 측정하였다 (그림 1d). 60°C에서는 무게와 감도의 감소가 약 5%로 제한되었다. 하이드로젤의 무게 손실은 온도가 상승함에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 체온과 유사한 온도에서는 하이드로젤이 안정적인 특성을 유지하였으며, 인체에 적용될 경우에도 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다.



Fig. 1. Caption in 1 line English only w/ a period.

4. 결론 및 향후과제

가교를 통해 하이드로젤의 구조적 안정성을 강화하여 압력이 가해져도 형태를 회복할 수 있도록 하였다. 가교제의 비율을 최적화함으로써 높은 감도를 확보하였으며, 특히 저압과 작은 힘에 대한 우수한 센서 성능을 입증하였다. Glycerol을 첨가함으로써 하이드로젤의 수분을 유지하여 센서의 수명을 연장하였으며, 높은 반복성을 입증하였다.

후기

본 연구는 한국전자통신연구원 신개념선행연구사업 (24YB1900)의 지원으로 수행되었습니다.

기하학적 모델을 통한 삼축 브레이드 복합재의 기계적 물성 분석 Analysis of the Mechanical Properties of Triaxial Braided Composites Based on its Geometrical model

*김원기¹, 김원빈¹, 임수현¹, 이준호¹, 박종인¹, 김성수¹⁺ * W. Kim¹, W. Kim¹, S.H. Lim¹, J. Lee¹, J. Park¹, S.S. Kim¹⁺

> ¹ 한국과학기술원 기계공학과 ⁺E-mail: seongsukim@kaist.ac.kr

Keywords: Composite, Braiding, Analytical method

1. 서론

섬유를 땋으면서 제작하는 방식인 브레이딩은 빠른 제작 속도와 다양한 구조에 활용할 수 있는 방식으로 스포츠 및 항공 분야에서 관심을 받고 있다. 브레이딩 패턴에는 Fig. 1과 같이 Biaxial braided pattern과 Triaxial braid pattern (TB)로 분류된다. 삼축 브레이드 패턴은 축 방향 섬유로 인해 섬유 사이의 거리에 따라 Basic pattern과 Deformed pattern이 형성된다 [1]. 패턴에 따라 브레이딩 복합재의 물성은 크게 달라지며 각 패턴에 대한 기하학적 모델 정립과 분석이 진행되어 왔다 [2]. 본 연구에서는 TB-D pattern에 대해 기하학적 모델을 제안하고 이를 기반으로 탄성 계수를 예측 및 실험 결과와 비교하였다.



Fig. 1 (a) Biaxial braided pattern, (b) TB– Basic(TB-B) and (c) TB– Deformed(TB-D)

2. 이론적 분석
 2.1 기하학적 모델



Fig. 2 (a) TB-D pattern with A-A' and B-B' line path and undulation path of (b) axial tow (A-A' line) and (c) braided tow (B-B' line)

Fig. 2 는 TB-D pattern 의 기하학적 모델에 대한 그림이다. 그림에서 N은 섬유의 수, D는 사용된 맨드럴의 지름 그리고 β는 브레이딩 각도이다. 축 방향 섬유는 Fig. 2 의 (b)와 같이 브레이드 방향 섬유로 인해 직선형과 삼각파형이 반복되어 나타나게 되며, 브레이드 방향 섬유는 (c)와 같이 축 방향과 브레이드 방향 섬유의 위치에 따라 휘어진 형태가 가지게 된다.

2.2 수식적 접근

기하학적 모델을 기반한 Analytical model을 이용하여 브레이드 복합재의 물성을 예측하였다.

3. 결과

예측과 실험 결과를 Fig. 3에나타냈다. 비교를 위해 TB-B pattern을 기반으로 한 Byun's model과 함께 비교하였다 [2]. TB-D pattern에 대한 기하학적 모델을 기반으로 하였을 때 더 정확한 결과를 예측할 수 있었다.



Fig. 3 Predicted mechanical properties and experimental data

4. 결론 및 향후과제

브레이드 복합재 패턴에 맞는 기하학적 모델을 통해 더 정확한 물성 예측을 진행할 수 있었다. 해당 결과를 이용하여 통합된 물성 예측 모델을 구성할 수 있을 것이다.

참고문헌

- Kim, Wonki, et al. "Effects of yarn interlacement in diamond triaxial braid on its patterns and tensile properties." Composites Science and Technology 254 (2024): 110678.
- [2] Byun J-H, 2000, The analytical characterization of 2-D braided textile composites, Composites Science and Technology,60:705-16.

후기

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-나노 및 소재기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 RS-2024-00450477). 포

스

고성능 재료의 극한 충돌 시험 및 분석 Hypervelocity Impact Test and Analysis of Advanced Materials

*박제희, 김윤호⁺ * J.H. Park, Y.H. Kim⁺

서울대학교 항공우주공학과 극한환경 및 충돌 연구실 ⁺E-mail: <u>spaceyhk@snu.ac.kr</u>

Keywords: High strain rate, Combustion Light Gas Gun, Kolsky Bar Test

1. 서론

고변형률(High strain rate) 상태는 변형률 속도가 10³s⁻¹ 이상일 때를 의미하며, 이 경우 에너지가 물체 내부에서 비선형적으로 전달되어 비탄성 거동을 보인다. 따라서 정적 물성과는 다른 기계적 특성을 보이기 때문에, 고변형률 범위에서의 올바른 실험적 분석 및 연구를 통해 극한 환경에서 재료의 성능을 파악할 필요가 있다.

10³ s⁻¹의 변형률 속도 수준에서는 홉킨슨 바(SHPB 또는 Kolsky bar)를 활용하여 재료의 응력-변형률 관계를 확인할 수 있으며, 10³ s⁻¹ ~ 10⁶ s⁻¹의 변형률 속도에서 손상 메커니즘을 파악하기 위해서는 고속 충돌 실험을 진행해야 한다.

본 연구에서는 고변형률 상태에서의 동적 거동 특성 실험 및 결과 분석을 소개하고자 한다.

2. 고속 충돌 실험(Canonical Experiment)

고속 충돌 실험에서는 가스건을 사용하여 재료의 충격 저항성, 에너지 흡수율 등 고속 환경에서 재료의 성능을 평가할 수 있다.

특히 본 연구실에서는 수소-산소 연소로 생성된 고온·고압 가스로 발사 속도를 향상한 새로운 형태의 연소 가스건을 개발했으며 1.26km/s 속도의 발사에 성공하여 실험에 활용 중이다. 복합재료의 경우, Fiber orientation에 따른 충격 보호 성능을 확인하기 위해 3D 프린터(Markforged Mark Two)로 다양한 적층 각도의 Kevlar 시편을 제작했고, SUS 304 6mm ball 과 충돌시킨 바 있다.

충돌 순간은 60,000fps(Photron FASTCAM NOVA S2)로 촬영했으며, 이후 Micro-CT를 통해 손상 부위를 분석하고 시뮬레이션(Ls-dyna) 결과와 비교하여 모델 정확도를 검증했다. 본 시스템을 활용하면 다양한 재료의 손상 메커니즘(손상 깊이, 내부 손상 형태, Ejecta 형태, Fracture 특성 등)을 분석할 수 있다.



Fig. 1. Lab-developed Combustion Light Gas Gun.



Fig. 2. High velocity impact onto 3D printed Kevlar.

3.홉킨슨 바 실험(SHPB, Kolsky Bar Test)

홉킨슨 바 실험에서는 고속 하중 조건에서 재료의 응력-변형률 거동을 측정해 동적 물성을 평가한다. Striker bar를 통해 생성된 충격파를 시편에 전달하고, 이를 Incident bar와 Transmitter bar에 부착된 Strain gage로 측정하여 재료의 응답을 해석하는 방식이다. 수집된 데이터는 정적 물성과의 비교 분석과 수치해석 모델의 물성 입력 및 검증 자료로 활용된다.



Fig. 3. Experiments with Gas Guns and Kolsky Bar.

4. 결론

서울대학교 극한환경 및 충돌 연구실에서는 고속 충돌 시험(Ball/Plate Impact Test) 및 홉킨슨 바 실험을 통해 고변형률 조건에서의 재료 동적 거동을 평가할 수 있으며, 초고속 카메라(SHIMADZU HPV-X2), Micro-CT, SEM(Scanning Electron Microscope), X-ray 분석과 레이저 측정 기기를 활용하여 재료의 응답 특성을 정밀하게 관측하고 해석할 수 있다. 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

고온 소재 평가 방법 개발 현황 Recent Advances in High Temperature Materials Evaluation Methods

*강태웅¹, 최병우¹, 배경훈¹, 이종광¹⁺ * T.W. Kang¹, B.W. Choi¹, K.H. Bae¹, J.K. Lee¹⁺

> ¹ 한밭대학교 기계공학과 ⁺E-mail: <u>jongkwang@hanbat.ac.kr</u>

Keywords: High Temperature Material, Arc Plasma, Induction Heating

1. 서론

항공우주 및 군수체계 분야에서 고온 환경에 적용 가능한 소재의 개발 및 필수적이다. 특히, 극 초음속 비행체 등 무기체계의 발전에 따라, 고온 환경에서의 기계적, 열적, 전자기적 특성 평가 기술이 더욱 중요해지고 있다[1]. 이를 위해 신뢰성 높은 고온 환경 구현 기술이 요구되며, 다양한 가열 시스템이 연구되고 있다. 현재 국립 한밭대학교에서는 효율적인 고온 환경 구현을 위해 아크 플라즈마 기반의 가열 시스템과 유도 가열기반의 가열 시스템을 개발하였다.

이 연구에서는 두 시스템의 가열 특성을 비교 및 분석하여, 다양한 소재의 요구 조건에 적합한 고온 가열 평가 방법을 제안하고자 한다.

2. 고온 환경 구현 장치 개발

2.1 아크 플라즈마를 활용한 고온 모사 장치

초고온 환경 구현을 위해 아크 방전을 활용한 플라즈마 반응기 시스템을 구축하였다. 이 시스템은 전극 간 생성된 아크와 방전 기체를 이용하여 고에너지 플라즈마를 형성하며, 단시간 내에 초고온 환경을 구현한다. 또한, 질소(N₂)를 방전 기체로 사용하여 전자 충돌을 통한 진동 에너지 저장 및 방출 과정을 유도함으로써 가스 온도를 효과적으로 상승시킬 수 있다[2]. 이러한 가열 방식은 기존의 가스 토치 방식보다 유해 가스 배출이 적고 폭발 위험성이 낮아 안전성이 우수한 장점이 있다.

개발된 시스템은 반응기와 가열 대상 간 거리, 입력 전류, 방전 기체의 유량 및 조성을 조절하여 다양한 가열 조건을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2 유도 가열을 활용한 고온 모사 장치

가열 시편의 물리적 손상을 최소화하면서 균일한 가열을 구현하기 위해 유도 가열이 적용된 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 전자기 유도를 이용한 비접촉식 가열 원리를 기반으로 하며, 유도 코일에 전류를 흘려 히스테리시스 손실(hysteresis loss)과 유도 전류로 인한 와전류(eddy current)를 통해 가열 대상 내부에서 주울(joule) 열을 발생시켜 고온 환경을 구현한다[3].

개발된 시스템은 지속적인 전력 공급을 통해 장시간 일정한 온도로 균일하게 가열할 수 있으며, 입력 전류 조절 및 코일의 형상 설계 변경을 통해 가열 속도, 최대 온도 및 가열 면적을 제어할 수 있을 것이라 판단된다.

3. 고온 환경 구현 장치의 가열 특성 비교

고온 환경 구현 장치의 가열 특성을 비교하기 위해, 170×170×8 mm 크기의 SUS304 시편을 이용하여 가열 평가를 수행하였다. 실험 결과, 아크 플라즈마 시스템은 약 500 ℃/min의 빠른 승온 속도로 초고온 환경을 구현하였으며, 가열 시작 2분만에 약1100 ℃이상의 온도가 측정되었다. 유도 가열 시스템은 약 81.3 ℃/min의 승온 속도로 시편에 지속적으로 열을 공급하여 약 700 ℃의 고온 환경을 15분 이상 유지하였다. 아크 플라즈마 시스템에 비해 가열 온도는 낮지만, 시편의 온도 분포가 상대적으로 균일하게 가열 되었다.

4. 결론 및 향후과제

이 연구에서는 고온 환경 구현을 위해 아크 플라즈마와 유도 가열을 이용하여 가열 시스템을 개발하고, 두 장치의 가열 특성을 비교 및 분석하였다. 아크 플라즈마 시스템은 급속 초고온 가열이 필요한 연구에 적합하다고 판단하였으며, 유도 가열 시스템은 장시간 온도를 유지 및 균일한 가열이 요구되는 연구에 적합할 것으로 판단하였다.

향후 연구에서는 실험적 검증을 바탕으로 최적화된 고온 소재 평가 시스템을 구축할 계획이다.

참고문헌

- 항공우주 소재산업의 기술동향과 전망, 항공산업연구, 2004.
- [2] Smith, R.W. et al. Thermal plasma materials processing—Applications and opportunities. 9(Suppl 1):135S–165S, 1989.
- [3] ISBN 978-1-315-11748-5

포

스

터

3

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

Debonding Diagnosis of Co-Cured CFRP/PVC Foam Core Sandwich Composites by UT A-Scan

*Won Jong Jeong¹, Woo Cheol Jang¹, Hyung Doh Roh⁺

¹ Department of Mechanical Engineering and BK21 Four ERICA-ACE Center

+E-mail: rhd1213@hanyang.ac.kr

Keywords: Sandwich composites, ultrasonic test, non-destructive test

1. Introduction

Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) offers a high strength-to-weight ratio, and its properties are enhanced in a sandwich structure with a low-density core [1]. The manufacturing reliability of such CFRP can be evaluated through non-destructive testing (NDT). The key challenge lies in assessing reliability without causing damage after fabrication [2].

2. Experimental program

2.1 Material properties

The materials used are carbon prepreg unidirectional (UD), 3K, 6K, and 12K, with a PVC core, as shown in Table 1.

Table 1. Material properties

Property	CORE	UD	3K	6K	12K
Density	80g/m ³	150 g/m ²	210 g/m ²	416 g/m ²	450 g/m ²
Pattern	Plain	UD	2x2 Twill	2x2 Twill	2x2 Twill
thickness	5mm	0.15 mm	0.25 mm	0.45 mm	0.45 mm
Resin	-	37 %	42 %	38 %	38 %

2.2 Preliminary Tensile Test

The tensile test confirmed that the core and face sheet were fully bonded in the 3K and 12K specimens, while incomplete bonding was observed in the UD and 6K specimens.

2.3 Test

The manufactured sandwich panels were measured five times each using ultrasonic testing (UT) A-scan inspection according to the ASTM E2580 standard [3]. A standard model was created and analyzed based on the average values of the measured waveforms, considering the presence or absence of the adhesive film.

3. Results and discussion



Fig. 1. Core Failure Group.



Fig. 2. Adhesive Failure Group.

From the preliminary tensile test results, UT A-scan inspection was performed on the 3K and 12K groups, which exhibited core failure. The peak voltage variation in waveforms, with or without adhesive film, remained within $\pm 5\%$, showing no significant difference (Fig. 1). In contrast, the 6K and UD groups, which showed adhesive failure in tensile tests, exhibited a sharp increase in peak voltage (200–300%) when the adhesive film was not applied (Fig. 2). This increase is likely due to higher porosity caused by resin deficiency [4]. Additionally, fast fourier transfrom analysis did not show a linear correlation with the tensile test results.

4. Conclusions and Future Works

These findings suggest that during the co-curing process of sandwich composites, the bonding condition can be effectively assessed by monitoring the increase in peak voltage in UT A-scan waveforms. In future research, the resin distribution will be analyzed based on the variation rate of UT A-scan waveforms.

References

- V. Birman, G. A. Kardomateas, Composites Part B: Eng. 142:221-240, 2018.
- [2] B. Wang, P. He, Y. Kang, J. Jia, X. Liu, and N. Li, Journal of Sensors. <u>10.1155/2022/5462237</u>,2022.
- [3] ASTM E2580, ASTM Int. Standard Practice for Ultrasonic Testing of Flat panel Composites and sandwich Core Materials Used in Aerospace Applications,2024.
- [4] B. Yilmaz, A. Asokkumar, E. Jasiūnienė, and R. J. Kažys, *Applied Sciences*,10(19):6757, 2020. DOI: 10.3390/app10196757.

Acknowledgement

This research was supported by Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korea Government(MOTIE) (RS-2024-00409639, HRD Program for Industrial Innovation). 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

주기 패턴이 적용된 유리섬유강화플라스틱 시편 제작

*배경훈¹, 강태웅¹, 백상민² 이종광¹⁺ K.H. Bae¹, T.W. Kang¹, S.M. Baek², J.K. Lee¹⁺

¹ 한밭대학교 기계공학과, ² 국방과학연구소 ⁺E-mail: jongkwang@hanbat.ac.kr

Keywords: Radar Cross Section, Radar Absorbing Structure, Glass Fiber Reinforced Polymer

1. 서론

저피탐 기술이란 레이더 포착 면적(Radar Cross Section, RCS)을 최소화하는 기술로써, 아군 생존성 향상과 작전 수행 효율성 증가를 위해 실제 전장환경에서 필수적인 기술 중 하나로 주목받고 있다[1].

이 연구에서는 하중 지지의 역할 및 전파 흡수 성능 부여를 위해 주기 패턴이 적용된 유리섬유강화 플라스틱(Glass Fiber Reinforced Polymer, GFRP) 기반의 전파흡수구조 (Radar Absorbing Structure, RAS) 제작 및 온도에 따른 전파 흡수 성능 평가를 진행하였다.

2. 온도에 따른 전자기 성능 평가

2.1 실험 방법

Fig. 1.과 Fig. 2.는 온도에 따른 전자기 성능을 평가하기 위해 유리섬유강화플라스틱에 면상 발열체와 주기 패턴 시트를 삽입하여 제작된 시편의 개략도와 시편이다.

시편의 목표 온도 달성을 위한 전원공급장치의 설정 조건은 0.86 A, 28 V으로 설정하였으며, 시편의 온도는 적외선 카메라를 통해 측정되었다. 시편의 전과 흡수 성능 측정은 가열 전 상온, 80 ℃, 가열 후 상온 조건에서 진행되었다.

2.2 실험 결과

Fig. 3.은 시편의 시간에 따른 온도 변화 그래프이다. 약 15 min 가열한 결과, 시편의 최대 온도는 약 83.96 ℃ 였으며, 평균 온도 및 최소 온도는 각각 82.68 ℃, 81.14 ℃ 로 균일하게 가열되었다.

시편의 가열 전 및 가열 후 측정한 전파 흡수 성능은 목표 주파수 대역에서 약 -15.18 dB 의 반사 손실이 측정되었다. 이를 통해 목표 주파수 대역에서 우수한 전파 흡수체 제작이 이루어졌다고 판단하였다.

3. 결론 및 향후과제

이 연구에서는 주기 패턴이 적용된 유리섬유강화 플라스틱 기반의 전파흡수구조 시편을 제작하였으며,



Fig. 1. GFRP-Square Heat Paste Specimen schematic



Fig. 2. GFRP-Square Heat Paste Specimen



Fig. 3. Temperature of the specimen according to time

면상 발열체를 통해 목표 온도까지 가열을 진행하였다. 제작된 시편은 상온에서 약 -15.18 dB 의 반사 손실 성능이 측정되었다. 향후 다른 복합 재료나 패턴 구조 등을 활용하여 전파 흡수 성능을 향상시킬 수 있을 것이라 판단된다.

참고문헌

- [1] SM Baek et al. KSAS. pp. 1291~1294, 2015.
- [2] SM Baek et al KSAS. pp. 132~134, 2016.
- [3] SM Baek et al KSAS pp. 771~772, 2019.

유도가열 시뮬레이션 정확도 개선을 위한 복합재료 물성 분석 연구 Analysis of Composite Material Properties for Improving Accuracy of Induction Heating Simulation

*백인석¹, 김나영¹, 김진수¹, 엄문광¹, 오영석¹⁺ * I.S. Baek¹, N.Y. Kim¹, J. S Kim¹, M.K. Um¹, Y.S. Oh¹⁺

> ¹ 한국재료연구원 융·복합재료연구본부 ⁺E-mail: <u>youngsoh@kims.re.kr</u>

Keywords: Induction heating, Composite material, Simulation Accuracy, Material properties

1. 서론

본 연구는 탄소섬유로 강화된 열가소성 복합재료의 유도가열 공정과 이에 대한 시뮬레이션에서 나타나는 한계점을 분석하고, 시뮬레이션 정확도를 개선하기 위해 주요 물성 정보를 고려한 새로운 접근법을 제시하고자 한다. 기존 유도가열 관련 연구는 주로 복합재 내부에서 생성되는 와전류에 의한 열 발생 현상을 기반으로 복합재의 용접 과정을 모델링하거나 예측하는 데 중점을 두었지만, 정확한 물성 정보가 충분히 반영되지 않아 시뮬레이션 결과가 실제 실험 결과와 차이를 보이는 한계가 존재했다[1]. 특히 탄소섬유의 전기적 특성 및 열적 특성이 유도가열 공정 중 어떤 영향을 미치는지에 대한 분석이 부족하여 실제 복합재 용접 과정에서 발생하는 복잡한 열 전달 현상과 열 분포를 정밀하게 설명하지 못했다. 복합재 유도가열 시뮬레이션에서 정확한 예측을 위해서는 전기적 특성인 비저항과 전기전도도, 그리고 열적 특성인 열전도도와 비열이 매우 중요하다. 그러나 탄소섬유 강화 복합재는 섬유와 수지라는 이질적 재료로 구성된 구조적 특성상 정밀한 물성 정보를 확보하는 것이 어렵다. 이에 본 연구에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 유도가열 과정 중 핵심적인 물성 정보를 체계적으로 분석하고 이를 효과적으로 시뮬레이션에 반영할 수 있는 방안을 특히 탄소섬유의 전기전도도와 모색하였다. 열전도도가 복합재의 열적 거동과 와전류 발생 패턴에 어떠한 영향을 미치는지 중점적으로 분석하여, 보다 신뢰성 높은 시뮬레이션 결과를 확보할 수 있도록 하였다. 이 접근법을 적용함으로써 복합재 내부의 열적 거동과 가열 균일성 등을 더욱 정밀하게 예측할 수 있었다. 또한 실험을 통해 얻은 데이터를 바탕으로 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증하고, 실험과 시뮬레이션 사이의 차이를 면밀히 비교 분석하였다. 이를 통해 전류의 주파수, 유도가열 코일의 위치, 가열 시간과 같은 주요 인자들이 복합재의 가열 패턴에 미치는 영향을 자세히 평가하였으며, 실제 실험과 일치하는 신뢰도 높은 시뮬레이션 결과를 얻기

위해서는 정확한 물성 정보가 필수적임을 입증하였다[2-4].

결론적으로 본 연구는 탄소섬유 강화 복합재의 유도가열 시뮬레이션이 가진 기존의 한계점을 분석하고, 실험적 접근을 통해 물성 정보의 중요성을 규명하였다. 본 연구에서 도출된 결과는 향후 유도가열을 이용한 복합재 용접 공정의 최적화를 위한 핵심 기초자료로 활용될 수 있을 것이며, 더욱 신뢰성 높은 시뮬레이션 모델 개발에 기여할 것으로 기대된다.

참고문헌

[1] Martin, R. G et al. Composites Part B: Engineering. 284, 2021

[2] Lundström, F., et al. *Composites Part B: Engineering* 140: 204-213, 2018.

[3] de Wit. A. J. et al. *Frontiers in Materials*. Volume 10. 2023[4] Li, M., et al. *Polymer Testing* 130, 2024

자기강화 PET 복합재의 기계적 특성에 대한 수 환경의 영향성 평가 The Effect of Moisture Exposure on the Tensile Properties of srPET Composites

*김세윤¹, 이교문², AMUTHESAN MANIKKAVEL², 김윤해²⁺ * S.Y. Kim¹, K.M. Lee², AMUTHESAN MANIKKAVEL², Y.H. Kim²⁺

> ¹(주) 컴퍼지트솔루션즈,² 국립한국해양대학교 ⁺Co-corespondence E-mail: yunheak@kmou.ac.kr

Keywords: Recycled PET, srPET, Moisture absorption, Mechanical properties, Failure behavior

1. 서론

SrPET(self-reinforced poly(ethylene terephthalate)는 강화재와 기지재가 동일한 자기강화 복합재로, 서로 다른 융점을 활용하여 제작된다. 이러한 특성 덕분에 우수한 재활용성이 확보되어 친환경적이며, 경량 구조물에 적용할 경우 높은 기계적 강도와 내충격성을 제공할 수 있다[1]. 그러나 srPET 복합재는 습윤 환경에서 수분 흡수로 인한 기계적 성능 저하가 발생할 수 있으며, 고온·고습 조건에서는 열화가 가속화될 가능성이 있다[2,3]. 특히, 해양 및 수중 환경에서의 장기 사용 시 내구성 유지가 중요한 문제로 떠오른다[4]. 이를 해결하기 위해 보 연구에서는 다양한 환경 조건에서 SrPET 복합재의 기계적 성능 변화를 평가하였다. 핫 플레이트 압축 성형법을 활용하여 시편을 제작한 후, 실온 침지(RT), 고온 침지(HT), 해수 침지(SEA), 건조(HT-Dry), 냉동(HT-Frozen) 등의 환경에 노출시켰다. 이후 인장 시험을 수행하여 기계적 강도를 분석하고, 파손 광학 현미경(OM) 및 주사 메커니즘을 전자 현미경(SEM)으로 조사하였다. 본 연구를 통해 SrPET 복합재의 수분 흡수 영향과 내구성 향상을 위한 개선 방향을 제시하고, 이를 항공, 자동차, 해양 구조물과 같은 다양한 산업 분야에 적용할 가능성을 검토하고자 한다.

2. 재료 및 실험 방법

본 연구에서는 트윌 직물 형태의 srPET (Composites Solutions Co., Ltd) 섬유를 사용하였으며, 핫 플레이트 압축 성형법을 통해 시험편을 제작하였다. 제작된 시험편의 경우, HT, RT, SEA의 수 환경에서 120시간동안 침지 되었다. HT DRY, HT FROZEN의 경우, 각각 80℃에서 24시간 및 -20℃에서 24시간동안 건조 및 냉각되었다. 이후, 기계적 특성 평가를 진행하여 해양 및 수중 환경에서의 내구성을 평가하였다. 기계적시험후, 광학 현미경(OM) 및 주사 전자 현미경(SEM)을 통해 파손 매커니즘을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

srPET 복합재의 인장 강도는 환경 조건에 따라 변했다. 실온 및 해수 침지(RT, SEA) 시편은 강도 감소율이 3~6%로 비교적 수 환경에 대해 낮은 민감도를 나타내었지만, 고온 침지(HT) 시편은 매트릭스의 열화로 인해 15~20% 정도로 인장강도가 감소하며 가장 큰 강도저하를 보였다. 건조(HT-Dry) 및 냉동(HT-Frozen) 처리는 강도를 일부 회복시켰으나, 매트릭스의 열화에 의해 완전한 강도 복구는 어려운 것으로 판단된다. SEM 분석 결과, 수분과 온도 노출이 계면 박리 및 층간 분리를 유발하며 복합재의 기계적 성능 저하의 주요 원인임을 확인하였다.



Fig. 1 Tensile stress Vs Displacement curve. (a) NEAT, RT, HT and SEA samples, and (b) NEAT, HT, HT DRY and HT Frozen samples

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 핫 플레이트 압축 성형법을 이용하여 제작된 srPET 시험편을 통해, 다양한 환경(온도 및 습기)에서의 노출 실험을 통해 복합재의 기계적 성능 변화를 분석하였다. 인장 시험 및 파손 분석 결과 환경 요인이 복합재의 성능에 영향을 미침을 확인하였다. 본 연구는 경량·고성능·친환경 srPET 복합재 개발에 기여하며, 항공, 자동차, 해양 산업 등 다양한 분야에서의 활용 가능성을 제시한다.

참고문헌

- [1] C. Schneider et al. Polymer Testing 2013;32:221–230.
- [2] Qi, Xiao et al. Journal of Materials Research and Technology 2023; 27, 1017-1045.
- [3] Korkees, Feras et al. Polymer-Plastics Technology and Materials 2023;62:1789–1822.
- [4] Tsenoglou et al. Composites science and technology 2006; 66.15:2855–2864.

후기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2024-BS-RD-0050).

천연섬유 부산물 활용 다공질 부직포 반발 탄성 특성 분석 Analysis of Rebound Resilience Characteristics of Porous Nonwovens Made by Natural Fiber By-Products

*황희윤 ¹⁺, 정현민 ², 남시완 ² * H.Y. Hwang ¹⁺, H.M. Jeong ², S.W. Nam²

¹ 국립경국대학교 전자기계공학부, ² 국립경국대학교 기계설계공학과 ⁺E-mail: <u>hyhwang@gknu.ac.kr</u>

Keywords: Natural fibers, By-Product, Hemp, Rebound Resilience

1. 서론

유럽연합 등 글로벌 국가들의 환경에 대한 규제 강화로 인해 친환경 소재, 친환경 공정 및 순환 경제는 산업에서 매우 중요한 키워드가 되었다. 생산과 폐기 관점에서 가장 친환경적인 소재가 천연 소재이며, 마 기반 천연 섬유도 그 중 하나이다. 천연 섬유는 생산 과정에서 약 90% 정도의 부산물이 단섬유 혹은 속대 형태로 발생한다.

본 연구에서는 천연섬유 생산 과정에서 발생하는 부산물 중 하나인 단섬유를 이용하여 다공질 펄프 및 부직포를 제작하고, 충격 흡수용 소재화하기 위한 반발 탄성 특성을 분석하였다.

2. 재료 및 제조 방법

2.1 재료 및 기기: 본 연구에서 사용한 천연섬유 부산물은 대마 인피섬유 제조 과정에서 발생한 단섬유이며, 다이텍 연구원 한국친환경융합소재에서 제공받아 사용하였다.

펄프 및 부직포 제작을 위한 기계적 처리에는 일반 분쇄기(Michelangelo, mcube-3400)와 연구용 분쇄기 (Single blasde type RT-02)를 사용하였다. 초음파 세척기 (KSC-300와 건조용 오븐 (Kalstein Oven)을 이용하여, 소재 세척 및 건조를 진행하였다.

다공질 부직포 제작에는 자체 제작 발틀과 동결건조기 (FD8512, 일신바이오베이스)가 사용되었다.

2.2 다공질 부직포 제조 제작 방법: 빗질을 통해 단섬유에 남아있는 속대 등을 제거하고 단섬유를 정렬한 후 초음파 세척을 수행하였다. 100℃에서 10시간 동안 가열하여 열처리를 진행하였는데, 친환경 공정을 위한 물로만 열처리를 진행한 경우와 가성소다(NaOH)를 이용한 대조군을 각각 제작하였다. 이후 일반 분쇄기를 이용한 습식 분쇄 4~8회, 연구용 분쇄기를 이용한 건식 분쇄 2회의 기계적 처리를 통해 천연섬유 부산물을 펄프화 하였다. 천연섬유 부산물 펄프는 3차 증류수와 혼합한 후 쌍발뜨기를 통해 다공질 레이어를 제작하고, 냉동시킨 후 동결건조를 통해 다공성 부직포를 제작하였다.

3. 반발 탄성 특성 분석

제작된 다공질 부직포의 충격 흡수 특성은 ISO-8307의 공 반발 시험을 통해 분석하였다. 다공성 부직포를 두께 50mm 이상이 되도록 쌓은 후, 원래 두께의 80%가 될 때 까지 사전 압축을 한다. 이 후, 16.8g 무게의 강철구를 떨어뜨려 튀어 오른 높이를 측정하였다.



Fig. 1. Porous nonwovens (Left: Water treated, Right: NaOH treated).

Specime	en	Rebound Height (mm)	
		Average	Standard Deviation
Water	4	4.86	0.10
Treated	8	4.76	0.58
NaOH	4	5.2	1.07
treated	8	5.44	0.78

4. 결론 및 향후과제

천연섬유 부산물 활용 다공질 부직포의 반발 탄성은 물로 처리한 경우보다 가성소다 처리한 경우 큰 값을 가졌으며, 처리 회수가 증가하면 감소하였다.

후기

본 연구성과물은 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. RS-2024-00466197).

포

ㅅ

터

3

Preparation and Characterization of Hydrogel Ophthalmic Lenses Using MXene/Silver Nano Composite

Hye-Won Nam¹ and A-Young Sung²

Dept. of Optometry and Vision Science, Daegu Catholic University, Student, Daegu 38430, Korea¹

Dept. of Optometry and Vision Science, Daegu Catholic University, Professor, Daegu 38430, Korea² ⁺E-mail: say123sg@naver.com

Keywords : MXene, Tensile strength, Silver nanoparticle, Antibacterial properties, Hydrogel ophthalmic lenses

1. Introduction

The combination of metal nanoparticles with the MXene nanosheet has the advantage of improving electrochemical performance and increasing the surface area and improving biocompatibility at the same time, so research on the combination of MXene and nanoparticles is being actively conducted. Tensile strength is one of the important physical properties of hydrogel lenses. This is because the contact lenses may be easily deformed or damaged by external forces such as wearing and removing contact lenses, eye movement, and the like.[1-4] In this study, a contact lens containing MXene and silver nanoparticles was manufactured to give functions such as electromagnetic wave shielding, antibacterial properties.

2. Materials and Methods

2.1 Manufacture of MXene

To manufacture MXene, 10% hydrofluoric acid (HF) was added to Ti_3AlC_2 (Titanium aluminum carbide 312, Sigma-Aldrich) and stirred at room temperature for 24 hours, and centrifugation was performed to remove impurities after washing using deionized water. Thereafter, it was dried in a vacuum oven for 48 hours to obtain MXene. As a result of analyzing the SEM image of the prepared MXene, it was confirmed that it did not show a layered structure in the case of the MAX phase, but it was confirmed that the interlayer was peeled off to form MXene through an etching process.

2.2 Manufacture of hydrogel lenses

2-Hydroxyethyl methacrylate (HEMA), 2-Hydroxy-2methylpropiophenone (2H2M), a photoinitiator, and Ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA), a cross-linker, were used to prepare a hydrogel lens by adding MX-S to the prepared solution in a ratio of 0.01 to 0.5%. Hydrogel contact lenses without additives were named Ref, and lenses containing MX-S were named MX-S01, MX-S05, MX-S1, and MX-S5, respectively. (Table 1)

Table 1 Percent compositions of MXene

	HEMA	MX-S	2H2M	EGDMA	Total
Ref	98.50	-	0.50	1.00	100
MX-S01	98.49	0.01	0.50	1.00	100
MX-S05	98.45	0.05	0.50	1.00	100
MX-S1	98.40	0.10	0.50	1.00	100
MX-S5	98.00	0.50	0.50	1.00	100

3. Results

As a result of measuring the refractive index and the water content of the manufactured contact lens. Ref was 1.4275and 36.21%. In the case of the sample containing MX-S by ratio, MX-S01 was 1.4321 and 35.40%, and MX-S05 was 1.4365 and 34.77%. MX-S1 was 1.4388 and 33.65%, and MX-S5 was 1.4421 and 32.21%. As the ratio of MX-S increased, the refractive index of the contact lens increased and the water content tended to decrease. As a result of measuring the tensile strength of the prepared contact lens, Ref was 0.08355 kgf/ mm²,. In the case of the sample to which MX-S is added by ratio, MX-S01 was 0.10611 kgf/mm², and MX-S05 was 0.13425 kgf/mm². MX-S1 was found to be 0.13986 kgf/mm², and MX-S5 was found to be 0.17311 kgf/mm². As the addition ratio of MX-S increases, the tensile strength of the contact lens tends to increase. To evaluate the antibacterial properties of the manufactured lenses against Staphylococcus aureus, each 1 mL of the prepared sample solution was smeared on a dry film and cultured at 36±1°C for 24 hours. Compared with S Ref (control group) which is a basic sample to which MX-S is not added, the antimicrobial property of the sample (experimental group) to which MX-S is added was excellent, and the number of bacteria generated decreased as the addition rate increased.

4. Conclusions

In this study, MX-S nanocomposite material was added to hydrogel contact lens mixture. The refractive index increased and the water content decreased. MX-S contact lenses had antibacterial properties and excellent polymerization stability. Through the manufacture of MX-S nanocomposite materials, durability of hydrogel contact lenses may be significantly improved. Therefore, it is judged that MX-S nanocomposite material may be used in various ways as a functional hydrogel lens material.

References

- Bansal, S. A., Kumar, V., Karimi, J., Singh, A. P., & Kumar, S., Nanoscale Advances, 2(9), 3764-3787 (2020).
- [2] Dykman, L., & Khlebtsov, N., Chemical Society Reviews, 41(6), 2256-2282 (2012).
- [3] Cabuzu, D., Cirja, A., Puiu, R., & Mihai Grumezescu, A., Current topics in medicinal chemistry, 15(16), 1605-1613 (2015).
- [4] Salih, A. E., Elsherif, M., Alam, F., Yetisen, A. K., & Butt, H., ACS nano, 15(3), 4870-4880 (2021).

Optimization and Analysis of TRIS-based Silicone Hydrogel Lens Materials

Jin-Wook Kim1 and A-Young Sung 2

Dept. of Optometry and Vision Science, Daegu Catholic University, Student, Daegu 38430, Korea¹ Dept. of Optometry and Vision Science, Daegu Catholic University, Professor, Daegu 38430, Korea² ⁺E-mail: davr9010@naver.com

Keywords : 3-[Tris(trimethylsilyloxy)silyl]propyl Methacrylate, silicone hydrogel lenses, oxygen permeability

1. Introduction

Contact lenses are widely used for vision correction and cosmetic purposes, but prolonged wear causes dry eyes and reduced oxygen permeability. While siliconecontaining materials can address these issues, further material improvements are needed.[1,2] In this study, we developed a new material by adding 3-[Tris(trimethylsilyloxy)silyl]propyl Methacrylate (TRIS)

to enhance contact lens performance.

2. Materials and Methods

2.1 Reagents and Materials

N,N-Dimethylacrylamide (DMA) and 1-Vinyl-2pyrrolidinone (NVP) were used as the base materials for the hydrogel contact lenses. 2,2'-Azobis(2methylpropionitrile) (AIBN), a thermal initiator, and ethylene glycol dimethacrylate (EGDMA), a cross-linking agent, were also used. For the silicone hydrogel lenses, 3-[Tris(trimethylsilyloxy)silyl]propyl Methacrylate was added. All reagents were purchased from Sigma-Aldrich (USA).

2.2 Manufacture of Silicone Hydrogel Lenses Containing TRIS

Ref was prepared using a base combination of DMA, NVP, AIBN, and EGDMA. 3-[Tris(trimethylsilyloxy)silyl]propyl Methacrylate was added at ratios of 5%, 10%, 20%, and 30%, which were then designated as 120-5, 120-10, 120-20, and 120-30 respectively. After fabricating the lenses at each ratio, the physical properties of the manufactured lenses were examined. All lenses were fabricated using the cast mold method. For polymer polymerization, the mixed solution was stirred for 1 hour using a Vortex mixer and dispersed for 6 hours using an ultrasonic device, then injected into contact lens molds and thermally polymerized at 130°C for 2 hours. The manufactured contact lenses were hydrated in 0.9% sodium chloride (NaCl) physiological saline for 24 hours. Subsequently, physical properties such as light transmittance, refractive index, water content, and contact angle were evaluated.

3. Results

The manufactured lenses appeared transparent with a slight whitish tint, which became more pronounced as the amount of TRIS added increased. All lenses, including Ref, exhibited spectral transmittance of over 90%(Fig. 1.),

indicating that the TRIS-added silicone hydrogel meets the optical requirements for contact lenses. The refractive index was observed to increase with the increasing amount of TRIS, while the water content showed the opposite trend.(Fig. 2.)



Fig. 1. Spectral transmittance of samples.



Fig. 2. Comparison of refractive index and water content of samples

4. Conclusions

Through this study, it was confirmed that the TRIS-added silicone hydrogel meets the engineering and physical conditions for a contact lens. However, the limitations of this study are also clear. The inability to confirm characteristics such as oxygen permeability, tensile strength, and elution is a limitation. Therefore, in future studies, it is considered important to supplement the research in these areas.

References

- SHARMA, Asmita, et al. Structure-property correlation of silicone hydrogels based on 3-[tris (trimethylsilyloxy) silyl] propyl methacrylate monomer. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137.27: 49198.
- [2] YU, Xuecheng, et al. Preparation and characterization of tris (trimethylsiloxy) silyl modified polyurethane acrylates and their application in textile treatment. *Polymers*, 2020, 12.8: 1629.

WBG 전력반도체 접합용 저온소결 은 나노페이스트 Low-temperature sinterable Ag nanopaste for die-attachment of WBG power electronics

*김윤아¹, 윤호연², 김민수³, 유민주³, 김현국⁴, 박동환⁴, 임병권¹⁺ * Y.A. Kim¹, H. Yun², M.-S. Kim³, M.J. Yu³, H.K. Kim⁴, D.H. Park⁴, B. Lim¹⁺

¹ 성균관대학교 신소재공학과, ² 성균관대학교 화학공학과, ³ 한국생산기술연구원, ⁴ ㈜에이치엘옵틱스 ⁺E-mail: <u>blim@skku.edu</u>

Keywords: Silver nanoparticles, Silver paste, WBG power electronics, Die-attachment

1. 서론

친환경 자동차 등 분야에서 기존의 실리콘 기반 반도체보다 우수한 특성을 보이는 Wide bandgap (WBG) 전력반도체가 각광받음에 따라 WBG 전력반도체 접합소재 개발도 필수적이다[1]. 기존의 솔더 합금 등을 대체하여 WBG 전력반도체의 높은 구동온도에 대응 가능한 실버 기반 die-attachment 소재 개발이 요구되고 있다 [2,3].

2. 은 나노입자 특성 분석

2.1 은 나노입자 형상 분석: Size effect에 의하면 금속 입자 직경이 줄어듦에 따라 녹는점이 낮아진다 [4]. 본 연구에서 사용한 은 나노입자는 SEM 및 TEM 분석 결과 약 50 nm의 평균 직경을 보여 우수한 저온소결 특성을 보일 것으로 예상한다.

2.2 은 나노입자 열적 거동 분석: 은 나노입자 표면 유기 리간드의 열분해 특성을 확인하였다. DSC 분석 결과, 141도에서 나타나는 흡열 peak로 인해 리간드가 141도 부근에서 분해된다는 것을 알 수 있다. TGA 결과를 통해 표면 유기 리간드 함량이 2% 이하로 매우 적음을 알 수 있다. 이러한 특성으로 저온 소결 시에도 유기물이 은 나노입자간의 소결을 방해하지 않으며 분해되어 치밀한 Ag joint를 형성할 수 있다.

3. Die-attachment 특성 분석

약 50nm의 은 나노입자를 용매에 70 wt%로 분산하여 은 나노페이스트를 제조하였다. 이를 Ag coated Cu 기판 상 스크린프린팅 하고 dummy chip을 위치하여 180도 및 250도, 8 MPa 압력 하에서 150초간 저온소결을 진행하였다. 접합강도 측정 결과 180도 소결에서는 55.5MPa, 250도 소결 시 66.1MPa로 매우 우수한 접합강도를 보인다. 또한 Ag joint의 단면분석 결과 온도에 관계없이 6% 이하의 공극률을 보여 치밀도가 매우 우수한 Ag joint를 형성하여 접합강도에 밀접한 연관이 있음을 알 수 있다.



Fig. 1. Low-temperature sintered Ag joint in this work



Fig. 2. Thermal behaviors of Ag nanoparticles

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 초미립 은 나노입자를 이용하여 저온 환경 하에서도 우수한 접합 특성을 보이는 은 나노페이스트를 제조하고 우수한 공정성을 보이는 다이어태치 소재로 적용 가능함을 확인하였다. 본 접합소재가 치밀한 미세구조를 보임에 따라 방열특성 등도 우수할 것으로 예상하여, 추후에는 전력반도체 접합소재에 요구되는 다양한 특성들을 확인해보고자 한다.

참고문헌

- [1] MS Kim et al. J Microelectron Packag Soc. 30:1-16, 2023.
- [2] M Won et al. Energies. 16:5419, 2023.
- [3] HQ Zhang et al. Acta Metall Sin (Engl Lett). 33:1543-1555, 2022.
- [4] L Ma et al. J Electron Mater. 53:228-237, 2024.

후기

본 연구는 과학기술정보통신부 한국연구재단-나노·소재기 술개발사업(RS-2022-NR06831) 및 산업통상자원부 국제공 동기술개발사업(P0019792)의 지원을 받아 수행된 연구임

무기고분자를 기지재로하는 내열 구조용 탄소섬유 강화 복합재료 개발 Development of Carbon fiber reinforced Geopolymer matrix composite

*오창빈⁺, 최두현, 김병주, 이만영 * C.B. Oh⁺, D.H. Choi, B.J. Kim, M.Y. Lee

국방과학연구소

+ E-mail: easybearstew@gmail.com

Keywords: Geopolymer, Heat resistant composite, Carbon fiber composite, Preprag

1. 서론

Poly-siloxonate/sialate라고도 불리는 geopolymer를 기 지재로하는 복합재료는 1000℃급의 내열 성능을 목 적으로 하는 경량 구조복합재이다.(이하 GMC; Geopolymer matrix composite) GMC는 액상 슬러리를 섬유에 함침시킨 후 적층 및 성형 그리고 열처리를 통 해 제작하게 되는데, 낮은 성형온도 덕분에 PMC(polymer matrix composite) 공정을 그대로 이용하 여 제작될 수 있다는 장점이 있다. 또한 별도의 치구 없이 800℃ 내외의 비교적 낮은 온도에서 짧은 시 간 열처리를 요하므로 CMC(Ceramic Matrix Composite) 소재에 비하여 경제적이다. 따라서, 최 근 무기체계의 새로운 전략으로 떠오르고 있는 저 가/대량생산-군집운용 개념에 적합한 내열 구조재 료로서 GMC가 활용될 수 있을 것으로 여겨진다. 하 지만 fabric laminated 복합재에 대한 선행 연구는 극 히 드문 상황이기 때문에 본 연구에서는 2D-woven carbon fiber 를 이용하여 복합재를 제작 한 후 상온 및 고온 특성 평가를 진행하였고, 향후 개발 방향에 대한 의견을 제시하였다.

2. 실험 및 분석

2.1 복합재료 및 레진 시편 제조

강화섬유는 AKSACA A-38 3K Plain weave 직물을 thermal desizing 하여 사용하였다. 기지재는 콜로이달 실리카, 나노 실리카, 수산화칼륨을 이용하여 제조하 였으며, 그 조성을 Table 1에 나타내었다. 제조 된 레진 을 직물에 함침하여 프리프레그를 제조하였고, 총 11 장의 프리프레그를 적층하여 Vaccum vagging 및 Hydraulic press 이용하여 120℃ 에서 성형체를 제조하 였다. 기지재 시편은 몰드에 레진을 부어 성형하였다. 이어서 복합재 및 기지재 시편을 Argon 분위기, 850℃ 에서 1시간 동안 열처리를 수행하였다. 제조 된 복합재 및 레진 시편의 사진을 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1 Composition of Poly-siloxonate matrix resin

Species	mol	Mass (g)
SiO2	1.124	67.53
K2O	0.014	1.32
H2O	1.296	23.35



Fig. 1. Fabricated composite and resin sample

2.2 분석

제조된 복합재에 대한 기계적 물성을 평가하였다. 상 온에서의 3점 굴곡 강도를 측정하였고, 500℃ 까지의 동적 물성 평가를 수행하였다. 밀도와 기공율을 측 정하였으며, 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 미세구 조및 파괴모드에 대한 분석을 진행하였다. 레진 시편을 이용하여 기지재의 800℃ 열중량감소, 밀도, 결정성, 열팽창계수를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

복합재 및 기지재 시편을 제조하여 분석한 결과, 기지 재는 결정질의 glass-ceramic 구조를 가지며 800℃에 서 우수한 내열 안정성을 보여주었다. 복합재는 101.06Mpa의 굴곡강도와 함께, 500℃ 고온에서 기계 적 물성을 유지함을 보여주었으며 주요 파괴모드는 압축면의 micro buckling이다. 분석 결과 기지재 및 섬 유 계면 결합 강도 증가, 그리고 기공률의 감소가 주요 개발 방향임을 확인하였다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통하여 2D-woven carbon fiber reinforced GMC의 기본 물성들을 확인하였다. 향후에는 기지재 원재료 및 조성에 따른 물성 변화, 공정 변수들에 따른 복합재 특성 변화에 대한 연구를 진행 할 예정이다.

3D Woven 복합재 L-조인트의 Pull-off 강도 특성 Pull-off strength of 3D woven composites L-joint

*차준우¹, 곽재원¹, 김제준¹, 이정홍¹, 배수빈², 조용윤², 박종규², 이만영², 변준형¹⁺ * JW. Cha¹, JW. Kwak¹, JJ. Kim¹, JH. Lee¹, SB. Bae², YY. Cho², JK. Park², MY. Lee², JH. Byun¹⁺

¹ 송월테크놀로지㈜ 기술연구소, ² 국방과학연구소 ⁺E-mail: <u>bjh1673@songwoltech.com</u>

Keywords: 3D woven preform, L-joint, Pull-off strength

1. 서론

항공기 구조물에 사용되는 스킨과 스티프너는 주로 접합에 의해 결합되기 때문에 층간분리로 인한 구조적 취약성을 가진다. 3D woven 직조 기술은 이 두 구조의 결합이 섬유의 끊어짐이 없이 연속성이 확보되는 3차원 섬유배열을 가지기 때문에 층간 결합력이 획기적으로 향상되는 기술이다. 본 연구에서는 L 조인트의 층간 결합력을 검증하기 위해 부재 간의 2D 단순결합, 2D 스티칭 결합, 3D 일체 결합 구조의 조인트에 대한 pull-off 시험을 통하여 이 세가지 결합 방법을 비교하였다.

2. 일체형 3D 직조 프리폼 설계 및 제조

2.1 3D 직조 프리폼: 3D 직조 프리폼의 기본적인 구조는 그림 1과 같으며 다층 구조를 가지는 층간결속(LTL, layer-to-layer) 패턴의 섬유 배열을 보여주고 있다.



Fig. 1. Fiber architecture of 3D woven preform.

2.2 복합재 L 조인트 : 조인트의 pull-off 특성을 비교하기 위한 세 종류 시편의 형상을 그림 2에 나타 내었다. 즉, 스킨과 스티프너가 (a) 단순히 결합된 구조 (2D); (b) 스티칭에 의해 결합된 구조 (Stitched); (c) 3D woven 일체화 구조 (3D) 이다.



3. L 조인트 Pull-off 시험

결합특성 평가를 위해 Pull-off 시험을 수행하였다. 그림 3은 세 종류 시편에 대한 인장하중-변위 곡선을 보인 것이다. 파손이 일어나는 최대하중의 크기는 3D 시편, Stitched 시편, 2D 시편의 순서를 보였다. 3D 시편의 경우 최대하중에서 하중 감소가 일어나지만 바로 분리가 일어나지 않고 두께 방향 섬유의 pull out에 의해 지속적으로 변위가 일어났다. 세 종류의 시편에 대한 파손하중 및 접합 강도는 표 1에 나타내었다.



Fig. 3. Load-displacement curve of three types of joints. Table 1 Comparison of pull-off load and strength

Specimen Type	2D	Stitched	3D
Max. Load (N)	1726	2794	4387
Pull-off Strength (MPa)	1.379	2.25	3.51

4. 결론

3D 직조 복합재의 층간 결합력을 검증하기 위한 pull-off 시험 결과 3D 직조에 의한 조인트의 강도 는 2D 단순 결합 시편에 비해 155%의 증가를 보였 으며 스티칭 결합 시편에 비해 56% 증가하였다. 3D 복합재가 층간 결합력 증대를 위해 매우 효과적임을 알 수 있다.

후기

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술 기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구(RS-2024-00466699)와 함께 국방과학연구소의 일반용역과제로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다. 포

Optimization of High-Toughness Epoxy Resin System for Mass-Produced Composites

*김병주⁺, 원종성, 이형익, 이만영 B.J. Kim⁺, J.S. Won, H.I. Lee, M.Y. Lee

국방과학연구소 3연구원 6부 ⁺E-mail: dhfldhs727@naver.com

Keywords: High-toughness, Aerospace composites, Mass production

Abstract

The development of high-toughness composites is essential for military unmanned aerial vehicles (UAVs) operating in extreme environments. This optimizes composition study the of а polyethersulfone (PES)-modifed epoxy-resin system to enhance toughness while ensuring suitability for production. Coarse-grained mass molecular dynamics simulations were employed to predict phase transitions, reducing experimental costs and time.



Fig. 1. Schematic of phase transition in the high-toughness resin system and the fabrication process for resin paper and prepreg

The optimized resin system, containing 17 wt.% PES, exhibited a co-continuous phase structure, significantly improving fracture toughness and impact resistance. Prepergs were manufactured via a hot-melt process, and high-toughness carbon fiberreinforced plastics (CFRPs) were fabricated and evaluated. Compared to conventionally toughened CFRPs, the mass-produced composites demonstrated improvements of 246% in compression-after-impact strength, 728% in Mode-I interlaminar fracture toughness (ILFT), and over 480% in Mode-II ILFT. Structural applicability was validated through static load testing of UAV tail fins, confirming the potential for aerospace integration. This study establishes a robust foundation for the large-scale production of high-roughness CFRPs in advanced aircraft structures.



Fig. 2. Fracture surfaces of the epoxy resin system and Photographs of the UAV tail-fin

Acknowledgments

This research was financially supported by the Institute of Civil Military Technology Cooperation funded by the Defense Acquisition Program Administration and Ministry of Trade, Industry and Energy of Korean government under grant No. 22-CM-19.

Study on Surface Modification of Ultra High Modulus Carbon Fibers through UV-ozone Treatment

*Mi Na Kim¹, Jong Sung Won¹, Eun Hye Lee¹, Ji Eun Lee¹, and Man Young Lee¹⁺ ¹ Agency for Defense Development (ADD) ⁺E-mail: manyounglee@add.re.kr

Keywords : High Modulus Carbon fiber, Interfacial Modification, UV-ozone treatment

1. Introduction

Carbon fiber reinforced composites (CFRC) are used in various industries such as aerospace and automobiles due to their lightweight and high specific strength [1]. However, the smooth and chemically inert surface of ultrahigh-modulus carbon fibers (UHMCF) results in weak interfacial bonding with the matrix, leading to poor load transfer efficiency. This weak adhesion at the fiber-matrix interface causes interfacial debonding and fiber pull-out under mechanical stress, consequently reducing the mechanical properties of CFRC [2]. Therefore, various surface modification technologies such as chemical and electrochemical methods have been actively studied to improve the interfacial adhesion between carbon fiber and matrix. In particular, ozone treatment is a promising technology for chemical dry surface modification as it is an environmentally friendly and simple process [3]. In this study, the interfacial properties of UHMCF are improved by applying the UV-Ozone surface modification method and in the future composites will be manufactured to evaluate the possibility of mechanical performance improvement.

2. Experimental

2.1 Ozone treated UHMCF manufacturing

In order to effectively introduce oxygen functional groups to the UHMCF surface, the sizing agent was removed through heat treatment at 600 $^{\circ}$ C for 1 hour under an Ar atmosphere. Afterwards, the oxidation treatment of the UHMCF surface was performed for various times (10, 20, 30, 40, 50 and 60 min) using a UV-Ozone generator.



Fig. 1. Thermal and UV-ozone treatment process of UHMCF

2.2 Characterization

The chemical composition of the UV-ozone treated UHMCF surfaces was analyzed by in-situ X-ray

photoelectron spectroscopy(XPS, Nexsa G2, Thermo Scientific, UK). A field emission scanning electron microscope (FE-SEM, GeminiSEM 500, Zeiss, Oberkrochen, Germany) was used to observe the surface morphology of UHMCF.

3. Results and Discussion

XPS analysis shows that UV-ozone treatment increased the oxidation content on the UHMCF surface compared to untreated CF. The functional groups corresponding to C-C (284.7 eV), C-O (286.1 eV) and O-C=O (288.9 eV) were identified, confirming that the oxidation treatment using UV-ozone was effectively performed on the UHMCF surface [3].

FE-SEM images show the difference in surface morphology between untreated UHMCF and UV-ozone treated UHMCF. The untreated UHMCF exhibits a relatively smooth surface, whereas the UV-ozone treated UHMCF shows increased surface roughness.

4. Conclusions and Future Works

In this study, it was confirmed that the surface oxidation of UHMCF was effectively achieved through UV-ozone treatment following heat treatment. XPS and FE-SEM analyses revealed an increase in oxygen content and surface roughness, suggesting improved interfacial adhesion. In the future work, composites will be fabricated using the UV-ozone treated UHMCF, and mechanical property evaluations will be conducted to assess the effects of surface modification on composites performance.

References

- [1] H. Zheng et al., Compos. B Eng, 233:109639, 2022.
- [2] L. Liu et al., Compos. Sci. Technol, 121:56-72, 2015.
- [3] S.J. Park et al., Compos. -A: Appl. Sci. Manuf. 137:105937, 2020.

Acknowledgement

This research was financially supported by the Institute of Civil Military Technology Cooperation funded by the Defense Acquisition Program Administration and Ministry of Trade, Industry and Energy of Korean government under grant No. 22-CM-CO-19.

Synthesis of High Heat-Resistant Resin with Enhanced Thermal Properties

*Gyeongbeom Kim¹, Jong Sung Won¹, Yongyoon Cho¹, Eun Hye Lee¹, Yusong Choi¹, and Man Young Lee¹⁺

¹ Agency for Defense Development (ADD)

⁺E-mail: manyounglee@add.re.kr

Keywords : Thermosetting Polymer, Polymerization, Char yield, Thermal properties, Thermogravimetric analysis (TGA)

1. Introduction

High heat-resistant resins are used in many industries such as aerospace, electronics and defense [1]. Generally phenol resin is used in these applications, but it pollutes the environment during the curing process. To address this environmental issue, this study focused on the synthesis of high heat-resistant resin (HRR) and high heat-resistant resin with a nitrile functional group (HRRN) that features an eco-friendly curing process as a replacement for phenol. Additionally, this study analyzes the chemical structure of the synthesized resins, the polymerization process and demonstrates industrial applicability through their thermal properties.

2. Methodology

2.1 Preparation: HRR and HRRN were synthesized using bisphenol-a (97%), paraformaldehyde, and aniline or 2-aminobenzonitrile. To maintain stable state during the experiment, toluene, acetone and chloroform were used in the synthesizing process.

2.2 Synthesis: To ensure a direct chemical reaction between the materials, the reaction was continued at 120 $^{\circ}$ C for 6 hours under a reflux system. After the reaction, the solvent was eliminated using a rotary evaporator. The products were rinsed with deionized (DI) water to remove byproducts and cleanly purify the synthesized resins.

3. Results and Discussion

HRR and HRRN were cured at 213.3 °C and 227.7 °C respectively, which are on the higher end of thermosetting resins. Since the glass transition (T_g) value is generally higher than the curing temperature, an improvement in heat resistance and mechanical strength can be expected. Furthermore, the semi-cured HRR and HRRN specimens had a char yield value of 33.48 % and 38.54 % respectively. This indicates that there is room for improvement, but higher char yield values are expected after full curing. As shown by Shuai Zhang, et al. [2], the 947 on $^{-1}$ and 1233 on⁻¹ peaks of Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR) indicate the presence of O-C-N and C-O-C stretching, respectively, which undergo ring-opening polymerization during the curing process and lead to the formation of Mannich bridges. Thus, it can be inferred that HRR and HRRN were successfully synthesized, as





Table 1 TGA Data of High Temperature Resistant Resins

Sample	<i>T</i> _{<i>d</i>5} (°C)	Char Yield (%)
HRR	303.34	33.48
HRRN	261.79	38.54

4. Conclusion

This study synthesized high heat-resistant resins capable of replacing phenol resin with an eco-friendly curing process. The industrial applicability of HRR and HRRN was confirmed through thermal property analysis. Future work aims to further improve thermal stability to match that of phenol resin.

References

- [1] Yuqi Liu et al. Journal of Polymer Science 61. 13:1279-1288, 2023.
- [2] Shuai Zhang, et al. Journal of Materials Science. 56:2748-2762, 2021.

Acknowledgement

This research was financially supported by the Institute of Civil Military Technology Cooperation funded by the Defense Acquisition Program Administration and Ministry of Trade, Industry and Energy of Korean government under grant No. 22-CM-CO-19.

포

<u>۸</u>

터

3

Molecular Dynamics-Driven Insights into Pyrolytic Carbon Interfaces:

Bridging Theory and Experiment in C/SiC Composites

*Jungmin Lee¹⁺, *Jiwon Jung², Yeontae Kim¹, Teageon Kil¹, Jongsung Won¹, Gyeongbeom Kim¹, Man Young Lee¹, Hyung Ik Lee¹, Yongyoon Cho¹, Ji Eun Lee¹, Sung Tae Youn³, Hyang Joo Kwo³, Tae Min Park³, and Gun Jin Yoon²

¹Agency for Defense Development, ²School of Aerospace Engineering Seoul National University, ³DACC Carbon Co., Ltd,

⁺E-mail: jungmn.lee@gmail.com

*Jungmin Lee and *Jiwon Jung are equally contributed to this work

Keywords : C/SiC, PyC, MD, CVD

1. Introduction

C/SiC is a composite material consisting of carbon (C) and silicon carbide (SiC) elements, showcasing advantageous characteristics in various applications. Pyrolytic carbon (PyC) interface is integrated into C/SiC composites to enhance their high-temperature stability and mechanical properties by enhancing interfacial reactions. It is very complex and difficult to conclude which thickness is best for the mechanical properties of C/SiC composite[1,4]. According to the previous research, we can conclude that too thick is bad, too thin is bad, and there seems to be an optimum range. The main objective of this study was to investigate how the interphase type and thickness influences the specific tensile strength at a temperature of 2,000°C, as well as the compression at room temperature of Cf/SiC needle punched composites.

2. Experimentals

2.1 NP Prefom : The preforms were prepared by OxyPAN and carbon fiber as a starting materials. In a fixed needle punching process, the total volume fraction depends on fiber plain density and web plain density. As it expected the volume fraction increase as the input fiber plain density increase, But it decreases as the web plain density increase, this is due to the fact that the low plain density (50 g/m²) web is thinner than that of the high plain density (80 g/m²) web.

2.2 PyC coating : For thin pyrolytic carbon deposition, the needle punched preform was cut to a dimension of $150 \ge 150 \ge 55 \ge 120(t)$ mm then was loaded to CVD chamber. Before flowing hydrogen and methane gas, vacuum chamber was purged with Ar gas for several times. The chamber was heated with graphite resistive heater to 1,200°C and stabilized for the reaction. Being temperature stabilized, then hydrogen of 500 sccm and methane of 1,000 sccm, total of 1.5 L/min gas flowed to vacuum chamber. The chamber pressure of 20 Torr was hold constantly during the reaction. Reacting time is 4 \sim 5hours for PyC deposition.

3. Results and Discussion

The current study focuses on fabricating C/SiC composites with single-layered thin (\sim 0.1 micron) interfaces and thick (\sim 5 micron) ones, comparing the mechanical properties of

each. In the thin and thick cases, CH4/H2 and CH4/N2 gases were applied, respectively. Raman spectroscopic analysis showed that the PyC layer produced by CH4/H2 exhibited a higher G/D band intensity ratio and a sharper 2D peak compared to that produced by CH4/N2. Molecular dynamic (MD) simulation with the Reax-FF in the CH4/N2 case showed that a higher graphite structure was formed, which then deposited into a graphene substrate, resulting in a less dense structure than that of CH4/H2. These trends were matched with SEM analysis, confirming that the interface structure of PyC produced by CH4/N2 showed less compacted layers. From the thick to thin layered interface, the specific compression strength at room temperature and tensile strength at 2,000°C both are dramatically increased from 86 to 125 MPa*cm3/g and from 22 to 59 MPa*cm³/g, respectively.



Fig. PyC interfaces low textured (LT) and high textured (HT)

4. Conclusions

Composites with an HT interface exhibit nearly three times the mechanical properties of those with an LT interface. Molecular dynamics (MD) simulations confirm that HT pyrocarbon forms a denser, graphene-like structure, whereas LT pyrocarbon has a lower-density structure. These structural differences significantly influence the mechanical performance of C/SiC composites.

References

- Ma, X, et al. (2019). <u>Journal of the European Ceramic</u> <u>Society</u> **39**(5): 1766-1774.
- [2] Cao, X, et al. (2015). <u>Ceramics International</u> **41**(1): 1695-1700.
- [3] He, Q., et al. (2021). <u>Journal of Materials Science &</u> <u>Technology</u> 71: 55-66.
- [4] Yan, C., et al. (2016). <u>Ceramics International</u> 42(11): 12756-12762.

Acknowledgement

This research was supported by the Core Technology Project conducted by the Agency for Defense Development (ADD)

효율적인 화학작용제 차단을 위한 산화 그래핀과 고분자를 이용한 멤브레인 제조

*김형준¹, 김민서¹, 진영호¹ H.J. Kim¹, M.S. Kim¹, Youngho Jin¹

¹ 중앙대학교 대학원 첨단소재부품학과 ⁺E-mail: <u>gudwns5787@cau.ac.kr</u>

Keywords: membrane, GO@EDA@PEI, composite, filter

1. 서론

전세계적으로 군사분쟁이 지속되는 현재, 화학 무기에 대한 위험성을 배재할 수 없습니다[1]. 이러한 상황 속에 사람들을 보호하기 위해 보호복과 방독면과 같은 개인 보호 장비(PPE)의 중요성이 부각되고 있습니다. 일반적으로 사용되는 보호복은 황화물 고무로 만들어져 불침투성으로 화학무기 차단에 효과적이지만 착용자의 움직임과 체온 조절을 제한합니다. 이러한 단점을 보완하기 위해 멤브레인을 이용한 연구를 진행하였으며, 독특한 구조와 물리화학적 특성으로 높은 잠재력을 지닌 그래핀 산화물(GO)과 고분자의 복합화를 통해 경량성과 통기성을 가지면서도 높은 CWAs 차단률을 갖춘 멤브레인을 제작하였습니다.

2. 실험

2.1 GO 합성

기존 Hummer's Method에서 사전 산화 과정이 추가된 Modified Hummer's Method를 사용하여 GO 그라파이트 파우더를 합성[2]. 황산에 넣고. 투여하여 산화제인 K₂S₂O₈과 P₂O₅를 적절하게 5시간 교반을 80°C에서 하여 1단계 산화를 진행한다. 사전 산화 결과물을 완전히 건조 시킨 후 2단계 산화를 진행한다. 건조한 파우더를 넣고. 황산에 강산화제인 KMnO4를 첨가하여 50℃에서 4시간 진행한다. 교반이 완료되면 증류수를 첨가하여 반응을 종결시키고 H2O2를 첨가하여 추가적인 산화반응을 진행한다. HC1 용액으로 세척하고 원심분리를 통해 pH를 6.0으로 맞춘다.

2.2 멤브레인 제작

내약품성과 안정성이 뛰어난 PTFE membrane을 선정하여 사용하였으며 진공 여과 방법을 통해 멤브레인에 GO/EDA/PEI 복합층을 형성하였다. EDA는 GO 지지체의 구조적 안정성과 조밀한 층간 거리 조절을 위해, GO와 EDA를 1:0.5 ~ 1:1 비율로 용액을 제조하여 PTFE membrane 위에 복합층을 형성 시킨다[3]. PEI는 EDA와 비슷한 비율로 용액을 제조하여 GO/EDA 복합층 위에 여과하여 선택적 투과층을 제조한다.

3. 성능 평가

제조한 membrane은 XPS, FT-IR 등의 분석을 통해 GO/EDA/PEI 복합체가 잘 형성되었음을 확인하였고 XRD와 AFM을 통한 층간 거리와 복합층의 높이를 측정하였다. 화학무기에 대한 필터효과는 upright cup method를 사용하여 유사작용제인 DMMP와 2CEES 그리고 물의 투과도를 측정하였다. 각각 EDA와 PEI를 따로 GO와 복합화하여 사용했을 때보다 EDA와 PEI를 함께 복합화하여 membrane을 제조하였을 때 DMMP와 2CEES 모두에서 향상됝 선택성을 보였으며, 더 낮은 층 높이에서도 복합화의 유무에 따라 높은 투과도 차이를 확인하였다.

4. 결론 및 향후과제

산화 그래핀 기반 멤브레인에 고분자를 이용하여 다양한 작용기를 추가함으로써 다양한 작용제에 대한 흡착능과 차단성을 향상 시킬 수 있었으며, 추후 UIO-66-NH2 같은 MOF나 PDA 같은 여러 종류의 고분자를 복합화하여 폭 넓은 성능의 멤브레인 제작이 가능할 것으로 예상됩니다.

참고문헌

- [1] R. Stone. Science. 359(6382):1314-1315, 2018. [2] C. Peng et al. ACS. 12(9):11094-11103, 2020.
- [3] Y. Kim et al. J Hazard Mater. 427:127884, 2022

후기

국민의 안전에 기여할 수 있는 연구를 할 수 있어 매우 유익한 시간이었고, 더 나은 보호복 제조를 위한 경험을 쌓을 수 있어서 연구자로써 좀 더 성장하는 계기가 되었던 것 같다. 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

산화 그래핀(GO)과의 복합화를 통한 금속-유기 골격체의 물성 변화와 제독능의 비교

방종혁¹, 김도희¹, 이유빈², 진영호¹⁺ ^{} Jonghyeok Bang¹, Dohui Kim¹, Yubeen Lee², Youngho Jin¹⁺

¹ 중앙대학교 대학원 첨단소재부품학과, ² 중앙대학교 첨단소재공학과 ⁺E-mail: <u>hyki119@cau.ac.kr</u>

Keywords: UiO-66-NH2, UiO-66-NH2@GO, Synthesis, Decontamination

1. 서론

현대 전쟁에서 화학작용제(CWAs)의 위험성은 증가하고 있다. 이에 대응하기 위해 Zr 기반의 금속-유기 골격체(MOFs)를 사용한 연구가 꾸준히 이루어졌으며[1], 본 연구에서는 UiO-66-NH₂의 성능 향상을 위해 산화 그래핀(GO)를 첨가하여 UiO-66-NH₂@GO를 합성하였다. 합성된 복합체는 물성 분석 및 제독 반응이 진행되었으며, 기존 물질과 비교가 이루어졌다.

2. 물질의 합성 및 분석

2.1 물질 합성법:

UiO-66-NH₂의 경우 ZrCl₄ 0.191g(0.8mmol)과 2aminoterephthalic acid 0.199g(0.8mmol)을 20ml DMF에 용해시키고, 아세트산을 Modulator로서 9.6g(8.88ml) 투입한다. 용액을 용기에 담아 Microwave 합성장비를 이용하여 150℃에서 각 30분, 45분 합성하여 반응시간에 따른 두 종류의 MOF 샘플을 제작한다. [2]

UiO-66-NH2@GO 복합체의 경우 합성용액 제조 과정에서 GO를 0.0195g(5wt%) 추가로 첨가하여 위의 과정을 진행하여 수득한다. [3]

2.2 합성 물질의 물성 분석:



Fig. 1. Compare of UiO-66-NH₂ and UiO-66-NH₂@GO with SEM.

왼쪽은 UiO-66-NH₂, 오른쪽은 합성 시 GO를 첨가한 복합체의 SEM 사진이다. 위 사진을 통해 GO를 첨가하여도 이들이 UiO-66-NH₂의 기본적인 골격 생성 및 결정 형태의 유지에 부정적인 영향을 끼치지 않는다는 것을 알 수 있다.



Fig. 2 FT- IR transmittance graph of UiO-66-NH₂ with 2 different reaction time

FT-IR 촬영을 통해 물질의 정성적인 분석을 진행하였다. 특히, 해당 분석을 통해 다른 Zr-기반의 금속-유기 골격체와 달리 아민기를 가지는 UiO-66-NH₂가 합성시 N-H bond가 잘 위치하는지 도움을 준다. 이 외에도 XRD, BET등의 분석이 진행되었다.

3. 제독성능 비교

제독 테스트의 경우 실작용제를 사용하는 것은 굉장히 위험하다. 그렇기에 실작용제와 구조가 비슷한 유사작용제를 본 실험에서는 사용하였다.

실험의 과정은 유사 작용제에 합성한 나노 물질 및 복합체를 직접적으로 뿌려 분해 반응을 확인하는 건식 제독을 진행하였다. 각각의 물질마다 최대 240분까지의 제독률을 UV-vis를 통하여 측정하였고, 그 결과를 각각의 입자들과 비교하였다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 화학작용제의 제독에 좋은 모습을 보이는 물질을 복합화를 하는 방법으로 그 성능을 강화하는 데 목적을 가지고 있다. 본 연구의 결과에서 착안하여 추가적인 보완점을 연구하여 다른 물질과의 복합화 혹은 이들의 활성도를 높이는 방안에 대한 연구가 더 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- [1] DW Ka et al. *Materials Letters* 285 : 129105, 2021.
- [2] Huang et al. *Materials Research Bulletin* 98: 308-313, 2018.
- [3] Cao et al. Materials 11.4 : 589, 2018.

후기

좋은 기회에 연구를 진행할 수 있었음에 감사를 표합니다.

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

탄소나노튜브를 이용한 에폭시 매트릭스 복합체의 기계적 특성 및 방탄성능 효과

Mechanical properties and ballistics performance effects of epoxy matrix composites

using carbon nanotube

*김민서 ^{1,} *진영호 ¹ * Min. Seo. Kim ^{1*} Young .Ho. Jin ¹

¹ 중앙대학교 첨단소재부품학과 ⁺E-mail: yy15379@cau.ac.kr

Keywords: CNT, Aramid fiber, Epoxy matrix, CNT dispersion

1. 서론

탄소나노튜브(CNT)는 뛰어난 기계적, 전기적, 열적 특성 등으로 인해 다양한 분야에서 활용되고 있으며, 특히 복합재료의 강화재로서 큰 관심을 받고 있다. 방탄 소재에서 CNT의 역할은 매우 중요하다. CNT는 높은 인장 강도와 에너지 흡수 능력을 가지고 있어 충격을 효과적으로 분산시킬 수 있다. 특히, CNT가 균일하게 분산된 복합재는 충격 에너지를 흡수하는 특성이 뛰어나기 때문에 방탄 재료로 적절하다.

2. CNT/Epoxy 복합화

2.1 CNT 산처리

CNT는 매우 큰 소수성을 띄기 때문에 낮은 소수성을 가지는 매트릭스와의 계면에 대한 친화도가 떨어져 분산도의 문제가 발생한다. 때문에 CNT에 산처리를 통해 표면에 기능기를 붙인다. 산처리 과정에서 카르복실기(-COOH)등이 형성된다. 산처리된 CNT는 친수성을 띠며 N-디메틸포름아마이드(DMF)같은 극성 용매에서 비교적 잘 분산된다.

2.2 CNT/Epoxy 복합체 제조

산처리된 CNT는 DMF용매를 활용하여 Epoxy매트릭스에 균일하게 분산되도록 하였다. 혼합물을 Ultra sonication을 이용하여 최적의 분산 상태를 확보한 후, 몰드에 주입하여 ISO 527 몰드에 주입하여 복합체의 시편을 제작하였다. 이후 UTM을 활용하여 기계적 특성을 확인하였다. 또한, 아라미드 섬유에 적층하여 방탄 샘플을 제작하였다.

3. 샘플 특성 평가

FT-IR 분석을 통해서 CNT 표면의 기능기를 확인하였다. 또한, UV-Vis 분석을 통해 분산 상태를 정량적으로 비교하였다.CNT 각 중량별 0.1wt%, 0.5wt%, 1wt%로 분산하여 만든 시편으로 기계적 특성은 UTM을 이용한 인장 시험을 통해 분석하였으며 CNT의 함량에 따른 물성 변화를 비교하였다.



Fig. 1. Acid functionalization of CNT FT-IR.

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 CNT의 산처리가 분산도를 향상시키고, 에폭시 매트릭스 복합체의 기계적 성질 및 방탄 성능을 개선하는 데 기여함을 확인하였다. 향후 연구에서는 다양한 CNT함량과 분산 방법을 적용하여 최적의 복합체 설계를 모색하고 CNT와 GO를 사용하여 하이브리드 강화재로 연구하고 실제 방탄 소재로의 응용 가능성을 평가할 예정이다.

참고문헌

- [1] S. Najafshad et al. Archives of Civil and Mechanical Engineering (2020) 20:57.
- [2] Zdenko Špitalsky et al. a Foundation of Research and Technology Hellas, Institute of Chemical Engineering and High Temperature Processes, Stadiou str. Platani, P.O. Box 1414, Patras GR-265 04, Greece

후기

의미있는 연구를 깊이 진행하고 앞으로 더 좋은 연구를 진행할 수 있는 발판이 되었다. 포

배관의 진원도 확보를 위한 보정 장치 적용 및 구조해석 연구 Study on the Application of Correction Devices and Structural Analysis for Ensuring Pipe Roundness

*윤성원 ¹, 박창욱 ¹⁺ * S.W. Yoon ¹⁺, C.W. Park ¹

¹⁺ 중소조선연구원 미래핵심기술연구본부 ⁺E-mail: <u>cwpark@rims.re.kr</u>

Keywords: Ovality Compensation, Pipe Spool, Automated Production Process.

1. 서론

배출가스 선박 배관 스풀 가공 공정에서 배관의 진원도를 유지하는 것은 후속 공정의 정밀도와 전체 공정의 효율성을 높이기 위한 핵심 요소로, 배관의 품질과 더불어 선박의 안전성에 중요한 영향을 미친다. 배관의 진원도 유지에 실패할 경우, 가공 후 발생하는 변형과 오차가 용접 및 조립 공정의 품질 저하로 이어져 전체적인 구조적 안정성을 저하시킬 수 있다. 현재 배관 스풀 가공 공정에서 사용되는 배관 클램핑 장비는 작업자의 숙련도에 따라 품질의 편차가 발생하는데, 이는 작업의 표준화를 어렵게 하며 공정의 자동화에 큰 걸림돌로 작용한다. [1,2].

2. 실험 방법 및 결과

2.1 실험 방법

구조해석 절차에 따라 배관 진원도 확보를 위한 구조해석을 수행하였으며, 배관 진원도 보정 장치의 압력 조건 도출을 위해 배관의 소재 및 변형 정도 대비 보정 장치의 구동에 따른 상관관계를 검토하였다. 해석조건은 배관 직경 600mm를 기준으로 탄소강 (20mm) 및 스테인리스합금(12mm) 등 총 2종류의 배관을 선정하였다.



Fig. 1. Geometry analysis of pipes



3. 결론 및 향후과제

배관 진원도 보정 장치 작동 적정 압력을 구하기 위해 Step에 따른 변위 대비 하중 및 반력을 측정하고자 수행하였으며, 명확한 측정은 배관의 진원률에 따라 달라질 수 밖에 없으나 본 연구결과에서 도출된 Step에 따른 변위에 대한 반력결과는 진원도 보정 장치의 적정 압력 설정이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

H.H. Kim et al. KWJS, Vol. 26, No. 5, 2008.
 J.D. Kim et al. JAMET, Vol. 41, No. 9, 2017.

후기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획 평가원의 연구비 지원에 의한 연구임 (20024907, 배관스풀 용접 자동화 적용을 위한 배관 용접면 정밀가공 자동화 시스템 개발)
액화수소 이송용 이중진공배관 설계 건전성 분석 Design optimization analysis of double vacuum piping for liquefied hydrogen transport

*윤성원¹⁺, 박창욱¹, 김태엽¹ * S.W. Yoon¹⁺, C.W. Park¹, T.Y. Kim¹

¹ 중소조선연구원 미래핵심기술연구본부 ⁺E-mail: <u>swyoon@rims.re.kr</u>

Keywords: Double Vacuum Pipe, Liquid Hydrogen, Transport, Insulation, Flexible Support

1. 서론

국제해사기구(IMO)에서 발효한 온실가스 배출규제로 인해 주요국의 온실가스 배출 규제지역이 확대되는 등 해운업계로의 친환경 선박의 운항 요구가 증가하고 있어, 수소추진 및 운송선박과 같은 환경 친화적이고 에너지 절감이 가능한 선박 보급의 필요성이 증대되고 있다. 수소선박의 경우 액화수소의 초저온 조건으로 인해 기존 선박에서 활용되는 이송배관과는 다른 단열 효과를 극대화 시킨 이중진공배관을 채택하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 액화수소 환경에 적합한 이중 진공배관의 최적화 설계에 대한 열전달 해석을 통해 건전성 분석을 수행하고자 한다.

2. 물성 정의 및 열전달 해석

2.1 소재 물성 데이터 정의

일반적으로 금속소재는 온도 변화에 따라 고유의 기계적 물성이 달라지는 특성을 가진다.[1-2] 특히 20K 이하의 액화수소 환경에서 내구성을 보이는 이중진공 배관을 설계하기 위해서는 적용소재의 물성을 명확히 정의하는 것이 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 이중진공배관의 최적화 설계를 위한 각각의 부품 적용 소재에 대한 물성을 아래 표에 정의하였다.

(a) Thermai properties				
Title	Specific heat (J/kg·K)	Thermal conductivity (W/mK)	Thermal expansion (10 ⁻⁶ /K)	
Pipe	500	15.3	16.5	
MLI Film	800	0.000135	23	
Vacuum(Air)	1,005	0.025	3,400	
PEEK	1,260	0.25	47	
(b) Mechanical properties				
Title	Density (kg/m3)	Elastic modulus (MPa)	Yield strength (MPa)	
Pipe	7,900	197,000	230	
PEEK	1,300	3,600	100	

Table 1 Definition of material property data

2.2 이중진공배관 열전달 해석

본 연구에서는 상용 해석 프로그램을 사용하여 과도 열전달해석을 진행하였다. 열전달 해석결과 Type 1과 Type 2 배관 내부에서 Heat sink와 Support 연결부에 일부 온도가 낮아지는 현상을 관찰할 수 있었으며, 외부 배관은 초기와 같이 상온을 그대로 유지함을 확인하였다. 보다 정확한 검토를 위해 일부 온도가 낮아지는 구간의 단면도를 확인한 결과 이중진공배관 내부에서 단열재(MLI film)에 의해 단열이 잘 이루어 지고 있음을 확인하였다.



(b) Type 2 structural analysis results Fig. 1. Analysis of temperature distribution in piping

3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 이중진공배관의 최적화 설계 건전성을 분석하였으며, 직관 및 곡관에서 단열성능을 확인하기 위해 열전달 해석을 수행하였다. 그 결과 우수한 단열 효과를 확인하여 설계의 건전성을 확인할 수 있었다.

참고문헌

[1] H. Tummescheit. et al. *The Modelica Associ*. March 3-4, 2008. [2] 선박 대체연료 설비의 금속소재 선정가이드, KR, 2021.

후기

본 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기획 평가원의 연구비 지원에 의한 연구임 (RS-2024-00507853, 액체수소운반선용 극저온 배관 개발 및 실증)

압축성형공정을 고려한 CFRP 제품의 구조강도 해석에 관한 연구 A Study on Structural Analysis of CFRP Parts considering Compression Molding Process

^{*}이정민 ¹⁺, 박홍기 ¹, 조준호 ¹ ^{*} J.M. Lee ¹⁺, H.G. Park ¹, J.H. Jo ¹

¹ 현대자동차 버추얼선행생기팀 ⁺E-mail: jmlee84@kia.com

Keywords: Prepreg compression molding, CFRP, Coupled method, Finite element method, forming-structural analysis.

1. 서론

OOA(Out-Of-Autoclave)공법 중 대표적인 공법으로 알려진 프리프레그 압축 성형(Prepreg Compression Molding, PCM)공법은 탄소섬유에 레진이 미리 함침 된 중간재를 사용하여 핫스템핑(Hot stamping)과 동일한 생산방식을 통해 생산성과 기계적 강도를 동시에 만족시키는 차세대 성형 기술이다. 먼저 적층 된 프리프레그를 예비 가열하고, 가열된 적층체를 금형으로 이송 후 금형을 활용하여 제품을 성형 및 경화 시키는 공정으로 구성되어 있다.

일반적으로 PCM공정은 섬유소재의 특성상 주름(Wrinkling) 혹은 접힘(Folding) 발생을 방지하기 위해 드로우 타입(Draw type) 금형을 통해 성형된다. 이러한 경우, 성형 공정 중에 소재와 금형의 마찰로 의해 인한 전단력에 CFPR의 씨실(Weft)과 날실(Warp)이 뒤틀려 섬유 면내에 전단각도(Shear angle)가 발생하게 된다. 이러한 전단각도는 직교 이방성(Orthotropic)을 가지는 직물 소재의 방향 별 기계적 물성을 변화시켜 CFPR 제품의 설계를 어렵게 만드는 원인이 된다.

따라서, 본 논문에서는 성형공정에서 발생하는 면내 전단각도가 구조강도에 미치는 영향을 분석하고, 성형공정을 고려한 성형-구조 연계해석 방법을 제안하였다.

2. 모자이크 모델 활용 CFRP 물성 이원화

본 논문에서는 성형공정에서 발생하는 면내 전단각도가 구조강도에 미치는 영향을 분석하고, 성형공정을 고려한 성형-구조 연계해석 방법을 제안하였다. 먼저, 면내 전단각도를 구조해석에 적용하기 위해 모자이크(Mosaic)모델을 활용하여 기계적 물성 이원화를 수행하였다. 이 모델을 활용하여 직물 소재가 가진 반복 패턴을 2 층(Layer)의 단방향(Unidirectional, UD) CFRP 소재로 단순화 후, 고전 적층판 이론(Classical Lamination Theory, CLT)을 활용하여 비교 및 검증을 수행하였다. 제안된 방법을 검증하기 위해 면내 전단각도가 발생한 시험편을 제작하고, 3점 굽힘 해석과 시험 결과를 비교함으로써



Fig. 1. Bending test model of S-rail.

연계해석의 필요성을 입증하였다.

3. PCM 공정이 고려된 성형-구조 연계해석

실제 제품 적용 가능성을 판단하기 위해 다양한 전단각도가 발생하는 S-Rail 모델에 연계해석 방안을 적용하였다. 각 위치 별 발생한 전단각도를 추출하여 구조해석에 맵핑(Mapping)을 통해 성형-구조 연계해석을 수행하였다. 마지막으로 동일한 조건하에 제작된 S-rail 시험편을 활용하여 연계해석의 유효성을 검증하였다.

4. 결론 및 향후계획

전단각도를 고려하기 위한 방법으로 복합재료를 등가 UD로 이원화를 진행하여 CLT를 통해 이를 수식적으로 검증하였다. 또한, 다양한 전단각도를 가지는 S-rail 형상에 적용하여 성형-구조 연계해석의 유효성을 검증하였다. 해당 연구는 향후 고성능 스포츠 세단 등 당사 브랜드 이미지 향상을 위한 헤일로 모델 개발이 증가함에 따라 CFRP파트의 적용이 확대될 것으로 예상된다. 이에 본 기술은 성형공정의 전단 변형이 고려된 보다 정밀한 구조해석을 수행함으로써 CFRP파트의 비강도 및 비강성 효과를 극대화할 수 있는 솔루션을 제시할 예정이다.

CFRP 자동차 외장 부품의 외관 품질 결함을 해결하기 위한 저수축 에폭시 퍼티 개발

Development of Low-Shrink Epoxy Putty to Solve Appearance-Quality Defects of Carbon-Fiber-Reinforced Plastic Automotive Exterior Parts

*안민수 ¹, 윤만석 ² * M.S. Ahn ¹, M.S. Yoon ²

^{1, 2} 현대제철

⁺E-mail: ¹Minsuahn11@hyundai-steel.com, ²millionstone@hyundai-steel.com

Keywords: composites; putty; epoxy; unsaturated polyester resin

1. 서론

외부 패널은 표면 결함 보완을 위해 퍼티가 사용되는데, 자동차 외장 패널용 CFRP의 경우 결함률 감소를 위해 투명하고 침투율이 높으며, 수축률이 낮고 접착력이 강한 퍼티가 필요하다. 본 연구에서는 자동차 부품 제작에 사용되는 탄소섬유강화플라 스틱(CFRP)의 구조적 빈 공간을 채우기 위한 새로운 조성의 에폭시 퍼티(epoxy putty)를 개발하였다

2. 소재 준비 및 시편 제작

2.1 소재 준비

대칭적으로 적충된 보강재로는 프리프레그 탄소 섬유(SK Chemicals, Seongnam, Republic of Korea)를 사용하였다. 최외곽충(1층 및 4층)은 Toray T700 탄소 섬유(3K, 섬유 면적 중량(FAW): 200 g/m²)로 직조되었으며, 방향은 0°/90°이다. 또한, 내부층(2층 및 3층)은 Zoltek(50K, FAW: 240 g/m²) Non-crimp 직물로 직조되었으며, 방향은 +45°/-45°이다.

2.2 시편 제작

프리프레그는 3bar의 압력에서 140°C까지 가열되며 5시간 동안 오토클레이브에서 경화된 후, 자연 냉각되 었다. 제작된 시편은 아세톤으로 세척 후 사포로 연마 되었으며, 퍼티를 2-3bar의 공기압으로 분사해 30-50µm 두께의 필름을 형성한 뒤 60°C에서 1시간 경화되었다. 이후 프라이머를 50-60µm 두께로 분사, 연마 후 60°C에서 1시간 경화하였다. 클리어 코팅에 서도 1차로 프라이머와 동일 작업 후, 2차로로 다시 동일한 두께로 분사해 75°C에서 2시간 경화하였다.

3. 시험 결과

H-4 샘플과 UPR 에폭시 퍼티의 열 노출 후 물리적 특성 변화를 접착력 및 색 차이 테스트(Table 1) 를 통해 확인하였다. H-4 샘플(64.9μm 두께)의 접착 등급은 M-1.0으로 나타났으며, 유사한 두께 (62.6μm)의 UPR 퍼티는 M-1.5로 평가되었다. 또한, 열 노출 후 H-4 샘플의 색 차이는 47.8-78.9µm 두께 범위에서 0.67-0.89 dE로 낮았으나, UPR 처리된 CFRP는 31.7-62.6µm 두께에서 1.1-1.63 dE로 더 뚜렷한 색 차이를 보였다.이 결과는 상용 UPR 퍼티를 사용한 CFRP보다 본 연구에서 합성한 에폭시 퍼티가 열 충격에 대해 더 높은 접착력과 낮은 색 차이를 나타냄을 시사한다

Thickness of Putty (µm)	Adhesion Property after Curing	Color Difference after Curing (dE)
47.8	Class 0	0.67
54.0	Class 0	0.71
64.0	Class 0	0.75
78.9	Class 0.5	0.89
87.2	Class 00.5	0.91

Table 1 Adhesion property and color differences

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서 개발된 H-4 에폭시 퍼티는 기존 UPR 퍼티보다 수축률이 60.6% 낮고, 접착력과 내열성이 우수하였다. 접착력 테스트에서 H-4는 M-1.0, UPR 퍼티는 M-1.5를 기록했으며, 색 차이도 H-4(0.75 dE)가 UPR(1.63 dE)보다 작았다. 이를 통해 H-4 조성물이 기존 UPR 퍼티보다 수축이 적고, 접착력과 색 안정성이 뛰어남을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] Liu, D.F.; Tang, Y.; Cong, W.L. Compos. Struct. 94, 1265– 1279, 2012.
- [2] Soutis, C. Prog. Aerosp. Sci. 41, 143-151, 2005.
- [3] Fuertes, T.A.S.; Kruse, T.; Körwien, T.; Geistbeck, M. Compos. Interfaces 22, 795–808, 2015.
- [4] Galvez, P.; Quesada, A.; Martinez, M.A.; Abenojar, J.; Boada, M.J.L.; Diaz, V. Compos. Part B Eng. 129, 41–46, 2017.

변성 폴리우레탄을 활용한 유리섬유 SMC 중간재 제조 공정 및 물성 개선 연구 A Study on the Manufacturing Process and Material Improvement of Glass Fiber SMC Intermediate Materials Using Modified Polyurethane

*최순호 ¹, 서대경 ¹⁺ * S.H. Choi ¹, D.K. Suh ¹⁺

¹ 다이텍연구원 산업소재연구본부 ⁺E-mail: <u>daekyungseo@dyetec.or.kr</u>

Keywords: : Sheet Molding Compound, Modified Polyurethane, Lightweight, Mechanical properties

1. 서론

유리섬유 SMC(Sheet Molding Compound) 중간재는 자 동차, 항공우주 외 건설, 전자, 스포츠 등 다양한 산업 분야에서 활용되며 관심도가 높아지고 있는 소재이다. 최근 친환경 모빌리티의 트랜드에 따라 친환경 소재의 활용에 대한 관심도가 높아지고 있으며 기존의 합성 수지 기반 중간재는 환경 부담을 증가시키는 문제를 안고 있어 이를 해결하기 위하여 폴리우레탄의 친환경 화가 주목받고 있다. 따라서 본 연구에서는 변성 폴리 우레탄을 친환경으로 개선하기 위한 연구를 진행하고 있으며, 변성 폴리우레탄을 활용하여 유리섬유 SMC 중간재를 유리섬유 섬유함량에 따라 제작하였으며, 각 함량별로 제작된 SMC 중간재를 기계적 특성 분석을 통하여 최적 물성조건을 도출하는 연구를 진행하였다.

2. 실험방법 및 결과

변성 폴리우레탄을 활용한 유리섬유 SMC 중간재는 커 팅부 및 와인딩 부 장력 제어, 섬유 함유량, 촙퍼 회전 속도, 수지 도포량, 함침부 롤러 압력 등 다양한 공정 조건에 따라 제작하였으며, 각 공정조건별 제작된 중 간재를 프레스 성형을 통하여 물성분석용 판재시편을 제작하였다.



Fig. 1 Preparation of GF/PU SMC Physical Properties Evaluation Specimen



Fig. 2 Physical Properties Evaluation of GF/PU SMC Specimens Manufactured by Process

각 공정별 제작된 SMC 시편은 인장강도(ASTM 3039), 굴곡강도(ASTM D790), 충격강도(ASTM D256), 섬유 함량(ASTM D3529)을 분석하였으며, 기존제품과 각 공정별 제작된 시제품의 물성 비교 분석을 통하여 공 정개선 및 최적조건을 도출하였다.

3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 공정조건에 따른 SMC 시편 물성분석 을 완료하였으며, 현재 목표로 하는 물성 목표값을 달 성할 수 있었다. 추후 변성 폴리우레탄을 친환경 폴리 우레탄으로 개선하고, 추가 물성 보강을 위하여 섬유 함량을 증가시킬 예정이다. 함침성, 기공, 표면품질 등 의 문제가 발생할 것으로 예측됨으로, 각 공정별 시편 의 NDT 시험 등을 통하여 문제점을 개선할 예정이다.

후기

본 연구는 한국산업기술기획평가원의 소재부품기술개발 사업-패키지형(20024956, 과제명: 그린 SMC용 저온 (130℃) 속경화급(경화시간 2분 이내) 친환경 수지, 중 간재 및 이를 활용한 미래 모빌리티용 부품 개발)의 지 원을 받아 수행하였음.

Designing Hybrid structure on Carbon Framework Promoting Active Sites and higher

current density Hydrogen Evolution

*Balaji Ravichandran¹, Min Woo Kim^{1,3}, Hongbum Kim^{1,2}, Jeong-gil Kim¹, Min Seob Kim^{1,3}, Min Ji Kim^{1,3} and Nam Dong Kim¹⁺

¹ Functional Composite Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST), ² Department of Applied Bioengineering, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University, ³ Department of Materials Science & Engineering, Gwangju Institute of Science & Technology (GIST) ⁺E-mail: <u>ndkim@kist.re.kr</u>

Keywords : single atom catalyst, carbon nanohorns, Cu nanoclusters, hybrid catalyst

1. Introduction

Development of efficient electrocatalysts for hydrogen evolution reaction (HER) remains critical for advancing renewable energy technologies [1, 2]. Hybrid structures integrating isolated atoms with nanoclusters demonstrate enhanced catalytic performance through synergistic interactions, leveraging both maximized atomic exposure and optimized electronic properties. Nevertheless, achieving precise atomic arrangement in these hybrid systems presents significant synthetic challenges using traditional preparation techniques. This work provides crucial insights for designing next-generation nonprecious metal electrocatalysts with tailored atomic structures for sustainable energy applications.

2. Experimental

The synthesis of Fe single atom (SA) integrated Cu nanoclusters (NC) on carbon nanohorns via bottom-up synthesis protocol. The mixture of metal precursor and carbon source were disperse in ethanol and rotary dried. Next, the mixture underwent Arc-plasma discharge under inert atmosphere. The as-obtained catalyst were subjected to thermal annealing at 700°C N₂. Finally, the FeCu-CNH catalyst synthesized and other comparative's prepared with similar protocol.



Fig. 1. Schematic representation of synthesis of FeCu-CNH via Arc-discharge.

3. Results and Discussion

The proposed unique strategy to infuse the metal and subsequently tailoring nitrogen coordination on carbon support, which leads to create a strong interaction between metal and support. Integrating metal SA/NC on carbon which manipulate the electronic structure, increasing active site and enhance electron transportation. Moreover, anchoring nitrogen on both Fe SA and Cu NC were expected to enhance the activity and stability. In previous report, the Cu NC does not alter the rate-determining step, but instead optimization the electronic structure of Fe-N-C and significantly promotes the rate-determining step [3].



Fig. 2. Caption within 1 line. English only with a period.

The electrochemical activity of FeCu CNH calatyst displays better HER performance then Fe CNH and Cu CNH. Moreover, the FeCu CNH delivers higher current density of 200 mA cm⁻², which displays in LSV graph (Fig.2). The stability of FeCu-CNH were evaluated using Choronopotentiometry at 50 mA cm⁻² for 44 h with 17mV changes between initial and final voltage.

4. Conclusions

Here, we report the synthesis of single atom/nanocluster hybrid catalysts through a unique bottom-up approach with controlled nitrogen atom integration. These hybrid structures demonstrate increased active site density, and strong metal-support interaction, facilitating the formation of key intermediates and maximizes the catalyst's utilization efficiency, leads to higher current densities and improved overall performance.

References

- [1] Zhang, Qingtong, et al.. Adv.funct. mater, 2024, 2416071.
- [2] Quílez-Bermejo, Javier, et al. Adv.funct. mater, 33, 2023, 2300405.
- [3] Liang, Chen, et al. Adv. Energy mater, 14, 2024, 2303935.

포

Mechanically robust and recyclable CO₂-derived poly(carbonate) vitrimers

Jin Young Seo^{1,2,*}, Hyeonyeol Jeon¹ and Jongbeom Na^{2,*}

¹ Research Center for Bio-Based Chemistry, Korea Research Institute of Chemical Technology,

² Materials Architecturing Research Center, Korea Institute of Science Technology,

* E-mail: jyseo@krict.re.kr

Keywords : carbon dioxide, poly(carbonate), vitrimers, recyclable polymers

1. Introduction

Global warming has become an urgent crisis, with its effects now being felt across the world through abnormal climate patterns, demanding immediate action to reduce greenhouse gas concentration. In response, extensive research efforts have focused on reducing CO_2 levels through carbon capture and storage. However, the amount of CO_2 required to reduce greenhouse gas concentrations is tremendous, which means that the traditional CO_2 storage strategy alone may be insufficient. Therefore, alternative strategies capable of storing substantial amounts of CO_2 are urgently needed to combat global warming effectively.

2. Experimental section

2.1. General synthesis of poly(carbonate)s

Poly(carbonate)s from CO₂ were synthesized by the ringopening polymerization of epoxide monomers using a Salen(Co(III)) catalyst. In a stainless-steel liner, Co-DNP (0.020 g, 0.025 mmol, 1 equiv.) and PPNCl (0.014g, 0.025mmol, 1 equiv.) were dissolved in PO (3.5 mL, 25mmol, 1000 equiv.). Thereafter, the reaction mixture was stirred for 15 min at room temperature and then transferred to a stainless autoclave. Polymerization was conducted under a CO₂ atmosphere (12 MPa) for 2 h at room temperature. After the reaction, the mixture was diluted with chloroform and precipitated using methanol. The prepared poly(propylene carbonate) (PPC) was collected by centrifugation and dried under vacuum.

3. Results and Discussion

In this study, we propose mechanically robust CO₂-based poly(carbonate)s with enhanced recyclability using a vitrimer strategy. Vitrimers represent a relatively new class of polymers that combine the reprocessability of thermoplastics with the durability of thermosets. These materials possess dynamic covalent bonds, which allow a crosslinked network that offers superior mechanical properties and recyclability due to its reversible nature. In this work, we strategically designed CO2-derived poly(carbonate)s containing a hydroxyl group and a CO₂derived crosslinker to synthesize poly(carbonate) vitrimers (PCVs) (Figure 1). These PCVs can store up to 6.6 mmol g⁻¹ of CO₂ and offer both physical and chemical recyclability, making them suitable for industrial applications. The mechanical and rheological properties of the PCVs vary depending on crosslinking density.

Moreover, the dynamic covalent bonds allow for physical recycling, expanding the lifespan of the polymer. At the end of their lifecycle, these polymers can be chemically degraded back into their monomeric state, demonstrating their full recyclability potential.

CO₂-derived Poly(carbonate) Vitrimers



Fig. 1 Schematic illustration of CO₂-derived poly(carbonate) vitrimers with a physical and chemical recyclable nature.

4. Conclusions

This study demonstrated the feasibility of CO₂-derived poly(carbonate)s (PCVs) with high CO₂ conversions (6.6 mmol g⁻¹ CO₂), establishing them as promising candidates for sustainable polymer production. The fabricated PCVs not only achieve significant CO₂ utilization but also possess tunable mechanical properties, with adjustable crosslinking densities enabling a broad range of elastic moduli and elongations at the break. Rheological tests confirmed the dynamic nature of the crosslinked bonds, allowing for stress relaxation and physical recycling via thermal treatment. Furthermore, end-of-life PCVs can be chemically recycled into their monomer components, promoting a circular lifecycle approach. These findings highlight PCVs as versatile, sustainable polymers with customizable physical performance, advancing CO2 utilization and recyclable polymer technology.

Acknowledgment

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) through research project (RS-2023-00259920), Korea Institute of Science and Technology (KIST) institutional program (2E33241), and Korea Research Institute of Chemical Technology (KRICT) institutional program (KS2442-10).

탄소 자원화(CCU) 기술기반 모빌리티내장재 직물코팅 연구 Research on fabric coatings for mobility interior materials based on Carbon Capture Utilization(CCU) Technology

*손경태 , 박수경 * K.T. Son, S.K. Park

㈜부성티에프시 ⁺E-mail: <u>kt son@busungtfc.com</u>

Keywords: Carbon Capture Utilization, Recycle, Fabric Coating, Mobility

1. 서론

미래 모빌리티는 이동수단 개념에서 멀티룸, 오토캠핑 등 다양한 활동을 병행할 수 있는 복합공간으로 활용되면서 내장재의 요구 성능이 높아지고 있다. 내마모성, 유해물질 대응, 폐차시 차량 중량의 85% Recycle, 95% 이상 재생(Recovery) 등 ELV(End-of Life-Vehicle Direction) 조건을 충족해야 한다. 본 연구는 친환경 모빌리티 내장재 요구 충족을 위해 탄소 자원화(CCU) 기반 섬유소재 및 수지, 특수 가공 기술을 통해 지속 가능한 미래 모빌리티 내장재 상업화에 기여하고자 한다.

2. 본론

2.1 포집CO2 기반 폴리에스터 직물 및 PU 코팅

1) 포집 CO2 PET + re-PET 소재 적용한 표피재 직물 : PET 기반의 유니소재 직물형태로 포집 CO2 PET, re-PET 원사를 사용하여 Plain, Twill, Dobby 응용 조직을 적용하였다.

표. 포집 CO2 기반 PET 직물 스펙					
경사/위사	밀도 중량(GSM)		비고		
CCU75 R/S 3*3 (re-P/DTY75/72 + CCU P/DTY 75/72)	143*117	135			

2) 포집 CO2 재활용 폴리올이 적용된 폴리카보네이트계 PU 수지 합성 : 카르복시산과 같은 저분자량 부산물을 제거하여 폴리올 반응성을 개선하기 위해 진공증류 및 용매 세척을 진행하여 폴리올의 물성 및 반응성 비교를 실시하였다.

3) 포집 CO2 기반 PET 직물에 포집 CO2 기반 PU 수지를 0.1mm 도포(코팅) 후 온도 160~180℃, 열처리 시간 1~2분 조건으로 각각 테스트 하였다.

2.2 내장재 물성 발현을 위한 코팅공정 도출

1) 경화 온도 변화에 따른 코팅 성능 분석

표. 포집	CO2 기반 PET	직물/포집	CO2 기반 PU 수	=지의 코팅 조건1

구 분	조 건	사용 수지	사용 장비
사용 원단	포집 CO ₂ 기반 PET 소재		
세팅 조건	120°C / 30 s		
코팅 수지	포집 CO2 기반 PU 수지		
수지 점도	10,000 cps (Solvent : Toluene)		
코팅 Gap	0.1mm	표진 이야기바	Lob Plada
경화 온도	®160℃ ⓑ170℃ ©180℃	우민 수지	Coater
경화 시간	1 min		

표. 포집 CO2 기반 PET 직물/포집 CO2 기반 PU 수지의 코팅 결과1							
경호	타 온도	160℃		170℃		180℃	
		표면 (코팅부)	이면	표면 (코팅부)	이면	표면 (코팅부)	이면
코팅	병원단			TWAN -		2	
내마모성(급)		2	4	2	4		4
Benzene		N	/D	N/D		N/D	
VOCs μg/m³)	Toluene	316		281		241	
	Xylene	N/D		N/D		N/D	

* N/D : Not Detected(검출한계 : 10µg/m' 미만)

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

2) 경화 시간 변화에 따른 코팅 성능 분석

표. 포집 CO2 기반 PET 직물/포집 CO2 기반 PU 수지의 코팅 조건2

구 분	조 건	사용 수지	사용 장비
사용 원단 포집 CO2 기반			
세팅 조건	120°C / 30 s		
코팅 수지	포집 CO ₂ 기반 PU 수지		-
수지 점도	10,000 cps (Solvent : Toluene)		
코팅 Gap	0.1mm	포집 CO ₂ 기반 PU 수지	Lab. Blade
경화 온도	®160℃		Coaler
경화 시간	ⓐ1 min ⓑ2 min		

표. 포집 CO2 기반 PET 직물/포집 CO2 기반 PU 수지의 코팅 결과2

경회	+ 시간	1 min		2 min	
		표면 (코팅부)	이면	표면 (코팅부)	이면
코팅	원단				
내마모성(급)		4		2	1
VOCs	Benzene	N/D		N	/D
(<i>µ</i> g/m³)	Toluene	316		230	
Xylene		N/D		N/D	

* N/D : Not Detected(검출한계 : 10µg/m' 미만)

3. 결론 및 향후과제

경화 온도 변화에서 처리 온도가 높아질수록 텍스쳐가 뻣뻣한 경향이 나타났으며, 온도가 180℃로 높아질수록, 처리시간이 길어질수록 VOCs 측정 시 Toluene이 미미하게 줄어 들었으나 Benzene과 Xylene은 각각 검출한계 10µg/m 미만으로 측정이 되지 않았다. 기계적 물성 역시 처리조건 160℃ 기준에서 열처리 온도 향상과 시간 증가에도 특별한 변화가 발견되지 않았다. 에너지 소비, 탄소 배출량을 종합적으로 고려할 때 경화 온도는 160℃, 열처리 시간은 1분의 조건으로 가공하는 것이 바람직하며, 경화 온도 및 열처리 시간 설정에 있어서 코팅 Gap 등 작업 요소에 따라 세부 조건 도출이 필요하다.

본 연구에서 포집 CO2 기반의 PET 직물에 포집 CO2 기반 PU를 코팅한 경우, 일반 PU 코팅과 비교 시 작업성이 양호하였으며, 기본적인 물성 또한 일반 PU 코팅 대비 크게 떨어지지 않음을 확인하였다. 추가적인 실험을 통하여 일반 PU 대비 CCU 기반 수지를 적용한 섬유내장재의 모빌리티 사용환경에 대한 상용성을 비교 분석하고 상업화 가능성을 평가하고자 한다.

후기

이 연구는 2024년도 중소벤처기업부의 "지역특화산업육성 사업" 연구비 지원(S3400463)으로 연구되었습니다.

Separation of Overlapping Terahertz Waves for PE Separator Thickness Measurement

<u>류현석</u>¹, 양민혁¹, 한대현¹⁺ * <u>H.-S. Ru¹, M.Y. Yang¹, D.-H. Han ¹⁺</u>

> ¹ 원광대학교 탄소융합공학과 ⁺E-mail: <u>dhhan85@wku.ac.kr</u>

Keywords: Deconvolution, Lithium-ion, Membrane, Terahertz, Thickness, Separator

1. 서론

테라헤르츠(THz)파는 광파와 전파의 성질을 동시에 가지며, 높은 투과성과 비파괴적 특성으로 다양한 분야에서 주목받고 있다. 특히, 다층 박막 구조의 두께를 측정하는 비접촉식 분석 기법으로 각광받고 있으며, 이는 반도체, 나노소재, 바이오 산업 등에서 소재의 품질과 성능을 확보하는 데 필수적이다.

그러나 다층 박막인 경우 각 계면에서 반사된 신호가 중첩되어 개별 신호 구분이 어려워 두께 측정의 정확도가 저하되는 문제가 발생한다. 이러한 한계를 극복하기 위해 다양한 신호처리 기법이 시도되고 있다[1].

본 연구에서는 디컨볼루션(Deconvolution)기법이 중첩된 테라헤르츠파 신호를 분리할 수 있는지 그 가능성을 검토하고, 다층 박막 구조의 개별 두께를 측정하는 방법을 제안하고자 한다. 이는 박막 관련 산업분야에서의 활용성을 확대하는 데기여할 것으로 기대된다.

2. 실험 셋업

중첩신호 생성 및 분리는 MATLAB 시뮬레이션을 통해 수행되었다. 중첩신호 시뮬레이션을 위해 PE 분리막(10 μm), 공기층(5 μm), 금속판으로 구성된 다층 구조를 모델링했다. THz 파는 가우시안 함수를 활용하여 생성하였고, 초기 진폭은 1, 펄스 중심 시간은 10.6 ps, 펄스 지속 시간은 0.3 ps, 중심 주파수는 1.2 THz, 총 신호 길이는 50 ps로 설정하였다. 각 계면에서 반사된 신호의 중첩된 형태는 Fig. 1과 같다.

3. 실험 결과

디컨볼루션 기법을 이용한 두께 측정 결과는 Fig. 2와 같다. 10 μm PE 분리막 필름과 5 μm 공기층은 각각 9.993 μm와 5.246 μm로 측정되었다. PE 분리막 두께 오차는 0.07%, 공기층 두께 오차는 4.92%로 나타났다. 디컨볼루션 기법은 박막과 공기층에서 높은 정확도를 보였으며, 중첩된 신호에서도 개별 신호 구분이 성공적으로 분리되었다.



Fig. 1. Overlapping THz Wave w/ multi-layer structure



Fig. 2. Deconvolution result showing the extraction of individual signal components

4. 결론

본 연구는 중첩된 THz파에서 다층 박막 두께 측정을 위해 디컨볼루션 기법을 검토한 결과 PE 분리막과 공기층 각 각의 두께를 정확하게 측정할 수 있었다. 향후 연구에서는 실험적 검증과 다양한 소재에 대한 적용을 통해 산업 현장에서 활용 가능한 측정 기술로 발전시키고자 한다.

참고문헌

[1] Park, J.; Kim, J.-A.; Ahn, H.; Bae, J.; Jin, J. A review of thickness measurements of thick transparent layers using optical interferometry. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* **2019**, *20*, 463-477.

후기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00335345).

MoS₂-Encapsulated SiO₂ Nanoparticles for Enhanced Humidity-Resistant Triboelectric Nanogenerators in Self-Powered Gas Sensing

*Do-Heon Kim¹, and Jeong Min Baik¹⁺

¹ School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University (SKKU)

⁺E-mail: jbaik97@skku.edu

Keywords : Triboelectric nanogenerator (TENG), Humidity resistance, Trapped charge, Self-powered system

1. Introduction

With the coming of the 4th industrial revolution, the energy supply is a major obstacle to its flexible and integrated application. Energy harvesting is a method of generating electrical energy from normally unused energy sources available in the surrounding such as vibration, thermal, and light, etc. [1-3] Among the energy sources, TENG (triboelectric nanogenerator), it occurs when two materials with different polarity based on triboelectric series are brought into contact and transfers tribo-charges on two material's surfaces called as triboelectrification. [4] As a way to effectively enhance humidity-driven charge decay of tribo-charge, we synthesized SiO₂@MoS₂ coreshell nano particles that is each used as charge trap layer and charge accept layer.

2. Experimental section

2.1 Synthesis of SiO₂@MoS₂ Core-Shell Nanoparticles: The SiO₂@MoS₂ core-shell nanoparticles were synthesized via a one-step hydrothermal method. SiO₂ NPs were dispersed in a 1:1 EtOH/DI water solution containing ammonium molybdate tetrahydrate and L-cysteine, followed by 30 min of ultrasonication. The mixture was transferred to a Teflon-lined autoclave and heated at 180 °C for 24 h. The product was washed with EtOH and centrifuged, then calcined at 600 °C for 2 h to remove residual organics, yielding the final SiO₂@MoS₂ core-shell structure (Fig. 1).



Fig. 1. Schematic representation of humidity-resistive SiO₂@MoS₂ core-shell NPs and synthesis process.

3. Results and Discussion

The core-shell structure, featuring a thin MoS_2 layer uniformly grown on SiO₂, addresses common humidityinduced performance degradation. The growth mechanism involves the decomposition and sulfidation of molybdenum species, with MoS_2 selectively nucleating on SiO₂ to form a stable, hydrophobic shell. As shown in Fig. 2a, the distinct interface reveals a well-defined boundary between the MoS_2 shell and the SiO_2 core, indicating the successful formation of the core-shell structure.





This MoS₂ layer effectively shields the SiO₂ interface from water molecule penetration, thus stabilizing charge density and significantly reducing charge decay, even under high humidity conditions. As shown in Fig. 2b, TENGs constructed with these core-shell NPs exhibit high triboelectric charge density and exceptional durability, retaining more than 70% output over 25 h at 99% relative humidity (RH). This implies that interface-trapped charge is maintained with minimal sensitivity to humidity.

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

In conclusion, the development of SiO₂@MoS₂ core-shell NPs represents a major advancement in the performance and stability of TENGs under high humidity conditions. This structure enhances charge transfer efficiency and minimizes charge decay under high humidity by isolating the SiO₂ interface from water molecules. These findings highlight the potential of SiO₂@MoS₂-based TENGs as robust power sources for self-powered sensing applications and wearable devices, particularly in high-humidity or challenging conditions.

References

- [1] J He et al. Appl. Therm. Eng. 236:121813, 2024.
- [2] L Wei et al. Sens. Actuators A: Phys. 361:114577, 2023.
- [3] Y Qin et al. *Nature* 451:809, 2008.
- [4] T. Cheng et al. Nat. Rev. Methods Primers 3:39, 2023.

Acknowledgement

This work was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant, funded by the Korean government Ministry of Science and ICT (MSIT) (No. RS-2024-00448865 and RS-2023-00256847).

Esterification-Mediated Synthesis of High-Density Cu Single-Atom Catalysts for Selective CO₂ Electroreduction to C₂₊ product

*Geon Choi¹, and Jeong Min Baik¹⁺

¹ School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University (SKKU) ⁺E-mail: jbaik97@skku.edu

Keywords : CO2RR, Single atom catalyst, CH4/C2+ selectivity, Microwave-assisted hydrothermal method

1. Introduction

Electrochemical CO₂ reduction to value-added multicarbon (C₂₊) products is a key technology for addressing climate change and enabling sustainable chemical production. Cu-based catalysts are attractive for promoting C-C coupling, but their selectivity needs improvement. Cu-N-C moieties enhance performance via maximized atom utilization[1,2]. However, isolated Cu single-atom catalysts (Cu-SACs) often exhibit limited C₂₊ selectivity due to large distances between active sites, hindering C-C coupling. Increasing Cu-SAC density is a promising strategy. This study demonstrates enhanced C₂₊ product selectivity using high-density Cu-SACs on a modified carbon support.

2. Experimental

Cu-SACs with varying Cu loadings were synthesized via esterification and microwave-assisted hydrothermal method. A Cu-dopamine complex (predetermined CuCl₂·2H₂O and 0.5 g dopamine in 35 mL DI water, 24 h stirring) was mixed with a gallic acid solution (0.54 g in 35 mL DI water). 0.7 mL HCl was added, and the mixture stirred for 48 h for esterification, anchoring the complex to gallic acid. Microwave irradiation (160°C, 15 min) induced hydrothermal carbonization of gallic acid/Cu-dopamine, forming Cu single atoms. The product was centrifuged (removing large particles), dialyzed (24 h, DI water), yielding a colloidal Cu-SACs solution



Fig. 1. Schematic illustration of the Cu-SACs/GDE synthesis process.

3. Results and Discussion

The formation of the Cu-dopamine complex was confirmed by UV-Vis spectroscopy. A characteristic peak at 305 nm was observed, indicating the presence of the complex. This peak was maintained before and after the microwave-assisted hydrothermal treatment, suggesting that the Cu-N bonds within the Cu-dopamine complex remained intact during the synthesis. Linear sweep voltammetry (LSV) measurements showed that the catalyst with higher Cu loading (400mg CuCl₂) exhibited significantly higher catalytic activity for CO2 reduction compared to the catalyst with lower Cu loading (20mg CuCl₂). Gas chromatography (GC) analysis of the gaseous products revealed that the selectivity for ethylene increased from 3% to 12% with increasing Cu loading.



Fig. 2. (a) LSV curves and (b) Faradaic efficiency for Cu-SACs catalysts with 20 mg and 400 mg CuCl₂.

4. Conclusions and Future Works

This study demonstrates that increasing the copper loading, and thus the density of Cu single atoms, on a gallic acidmodified carbon support enhances the production of C2+ products during electrochemical CO₂ reduction. However, further structural characterization is needed to fully understand the relationship between Cu density and catalytic performance. Recent research has focused on utilizing interfaces in heterostructures to tune the selectivity between CH₄ and C₂₊ products[3]. In future work, we will investigate the integration of our Cu-SACs with other catalyst structures to create heterostructures, aiming to further enhance the selectivity towards C₂₊ products.

References

- [1] S. Nitopi et al. Chem. Rev. 119:7610-7672, 2019.
- [2] R. Purbia et al. Appl. Catal. B: Environ. Energy. 345:123694, 2024.
- [3] L. Xiong et al. Adv. Funct. Mater. 34:2420161, 2024.

Acknowledgement

This work was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant, funded by the Korean government (MSIT) (No. RS-2023–00256847)

Robust output performance of Moisture Electricity Generator via asymmetric water absorption regulatoin

*Hojun Yoo¹, and Jeong Min Baik¹⁺

¹ School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University (SKKU) ⁺E-mail: jbaik97@skku.edu

Keywords : Moisture Electricity Generation (MEG), Hydrogel, Ion Gradient, Crosslinking Density

1. Introduction

Recent advancements in the Internet of Things (IoT) and sensor technologies have significantly increased the demand for self-powered systems that can generate energy without requiring an external power source. [1]

Moisture electricity generation (MEG) is a type of energy harvester that converts the chemical energy of moisture into electricity, and unlike other harvesters, it is easy to manufacture and miniaturise. [2]

In this study, hydrogels were synthesized via free radical polymerization using acrylic acid as the base monomer and methylene bisacylamide (BIS) as the crosslinking agent. The hygroscopicity of the hydrogel, the formation of pores depending on the cross-linking density and the ion gradient resulted in a performance of 1.2 mA/cm^2 .

2. Experimental section

Hydrogels were prepared using acrylic acid as the base monomer. To remove MEHQ (monomethyl ether hydroquinone), a polymerization inhibitor present in acrylic acid, the acrylic acid was stirred with alumina at medium speed for 20 minutes. After stirring, the mixture was filtered to obtain pure acrylic acid with MEHQ removed.

The cross-linking agent methylene bisacrylamide (BIS) and the MEHQ-depleted acrylic acid were dissolved in 24 mL of deionized water (DI water) to prepare a solution with a concentration of 3.47 M. This step is an important process that determines the cross-linking density and physical properties of the hydrogel and requires precise control of the ratio of monomer to cross-linking agent.

The prepared solution was stirred at 45°C for 24 hours to ensure uniform mixing of the components in the solution. This process ensures that the monomers and crosslinkers are evenly distributed in the solution, which contributes to the formation of a homogeneous hydrogel structure in the subsequent polymerization reaction.

Once the initiator had been added to the stirred solution, it was poured into a mold and polymerized at 45°C for 24 hours to produce the hydrogel.

3. Results and Discussion

In this study, hydrogels were successfully synthesized using 6.5 mol% crosslinker. The hydrophilic functional groups on the surface can form hydrogen bonds with water molecules and release ions through strong dipole-dipole interactions with water molecules in the atmosphere.

The moisture distribution formed during the moisture absorption process played an important role in the formation of the ionic gradient.

At 99% humidity, hydrophilic functional groups on the hydrogel surface strongly interacted with water molecules to promote ion release, which induced current flow. Experimental results showed that under these conditions, the hydrogel-based MEG system achieved a current density of 1.2 mA/cm^2 .



포

Fig. 1. Schematic representation of MEG Fig. 2. Current Density of MEG

4. Conclusions, Significance and/or Future Works

In conclusion, the asymmetric water adsorption capacity of the hydrophilic functional groups of the hydrogel induced an ionic gradient that enabled energy generation.

The Moisture Electricity Generation (MEG) system achieved a current density of 1.2 mA/cm² under 99% humidity conditions at a crosslinker ratio of 6.5 mol%.

However, there were limitations in keeping the power stable over a long period of time. Therefore, future research should explore ways to improve the long-term stability of MEGs by reselecting the ratio and type of crosslinker and optimizing the pore structure. **References**

- [1] FK Shaikh, S Zeadally. *Renew Sustain Energy Rev.* 55:1041-1054, 2016.
- [2] D Shen, WW Duley, P Peng, M Xiao, J Feng, L Liu, G Zou, YN Zhou. Adv Mater. 35:2202636, 2023.

Acknowledgement

This work was supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant, funded by the Korean government Ministry of Science and ICT (MSIT) (No. RS-2023–00256847).

Advanced Dielectric Properties of BaTiO₃@Additives@SiO₂ Core-double Shell Structure via Co-precipitation Method for Multi-Layer Ceramic Capacitor (MLCC)

*Ji Young Park¹ and Jeong Min Baik¹⁺

¹ School of Advanced Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University (SKKU)

⁺E-mail: jbaik97@skku.edu

Keywords : Multi-Layer Ceramic Capacitor, core-shell, ferroelectric

1. Introduction

Multi-layer ceramic capacitors (MLCCs) are essential in modern electronics due to their high capacitance and stable power supply. Barium titanate (BaTiO₃, BT) ceramics are widely used for their excellent dielectric properties, but challenges in the sintering process affect MLCC performance.[1,2] In particular, the two-stage sintering process causes nickel (Ni) agglomeration, reducing electrode connectivity.[3,4]

To address this, we propose a co-precipitation-based gelation method to coat Dy, Mg, Mn additives and SiO₂ sintering aid onto BT powder, forming a uniform coreshell structure. This approach eliminates the first sintering step, preventing Ni agglomeration while enhancing dielectric layer dispersion and density, ultimately improving reliability and stability of MLCCs.

2. Results and Discussion

2.1 BT@Addtives Core-shell: The 70nm-BT powder and additives (Dy, Mg, Mn nitrates) were dispersed in ethanol/toluene(5:5) to form a uniform slurry. NH4OH solution was added to raise the pH above 9, triggering coprecipitation. The precipitate was washed, dried, and calcined at 600 °C for 2 hours to obtain BT@Additives core-shell powders. BT and the additives were mixed in a 97.5:2.5 mol% ratio, which is the maximum amount of additives without secondary phase formation, as confirmed by SEM-EDS, TEM, and XRD analysis. A well-formed core-shell structure was observed at this composition, and when the Mg content increased, the peak of T_c decreased and TCC was increased, which means that the Mg roles importantly in dielectric properties in BT based ceramic, forming the relaxor ferroelectrics.

2.2 BT@Additives@SiO₂ Core-double shell: The presynthesized BT@additives nanoparticles were dispersed in an EtOH/Toluene(5:5) solution. TEOS was dispersed in ethanol, followed by DI water to induce hydrolysis, and then added to the solution, with NH₄OH adjusting the pH to promote precipitation. Cleaning and drying formed a core-double shell structure. The SiO₂ sintering aid content was decreased 12, 4, 2, and 1 mol%. As shown in Figure 1a, XRD analyses showed that the amount of secondary phases decreased as the SiO₂ content decreased, indicating that excessive SiO₂ addition leads to Si doping and an increase in shell thickness. Powders were fabricated into ceramic pellets for analysis of dielectric properties and density. The highest density was observed at 2 mol% SiO₂, while excessive SiO₂ (4 mol%) caused lower density due to grain overgrowth, and low SiO₂ (1 mol%) led to ineffective sintering.(Figure 1b) The dielectric properties were optimal at 2 mol% SiO₂, with a room-temperature dielectric constant of 1610, likely related to density and grain size.(Figure 1c)



Fig. 1. Material properties of BT@Additives@SiO2

4. Conclusions

This study developed BT ceramics with enhanced dielectric properties using a novel co-precipitation-based gelation method. By coating Dy, Mg, Mn additives and SiO₂ sintering aid onto BT powder, a uniform core-shell and core-double shell structure was synthesized, improving sintering behavior and dielectric stability. The results show that Mg influences dielectric properties by inducing relaxor ferroelectric characteristics, while the optimal SiO₂ content (2 mol%) achieves the highest density and dielectric constant ($\varepsilon_r = 1610$). Excessive (4 mol%) and insufficient (1 mol%) SiO₂ content led to grain overgrowth and ineffective sintering, respectively.

This approach eliminates the first sintering step in MLCC fabrication, preventing Ni agglomeration and enhancing dielectric layer dispersion. These findings contribute to improving MLCC performance and reliability, with potential industrial applications.

References

- [1] S Chen et al. J. Mater. Sci. Mater. Electron. 36:77, 2025.
- [2] Z Ma et al. J. Mater. Chem. A. 11:7184-7192, 2023.
- [3] Z Li et al. Ceram. Int. 49:17766-17775, 2023.

Acknowledgement

This work was supported a project funded by Samsung Research Funding Center of Samsung Electronics, Republic of Korea.

Self-Adaptive Bidirectional DC Triboelectric Nanogenerator with Integrated Mechanical Switching for Reliable Reciprocating Motion Energy Harvesting

*Joonmin Chae¹, Donghan Lee¹, Sumin Cho¹ and Dongwhi Choi¹⁺ ¹ Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University ⁺E-mail: <u>dongwhi.choi@khu.ac.kr</u>

Keywords : direct-current triboelectric nanogenerator, self-adaptive mechanical design, harvesting reciprocation motion **1. Introduction**.

Amid rising energy demands and environmental concerns, Triboelectric Nanogenerators (TENGs) especially DC TENGs using mechanical rectification are gaining attention. However, maintaining stable DC output during reciprocating motion remains a challenge for conventional DC TENGs. This study proposes the BiR TENG(Bidirectional Rotating TENG), which mechanically rectifies AC into direction-dependent DC, ensuring consistent output regardless of motion direction.

2. Result and Discussion

2.1 Mechanism of BiR-TENG using self-adaptive structure: The BiR-TENG, through its energy generation part and mechanical rectification part, converts the AC output into rotation-dependent DC output. In addition It can convert the rotational direction-dependent DC output into a unidirectional DC output by using a mechanical switching part based on a self-adaptive structure.



Fig. 1. Schematic of BiR-TENG



Fig. 2. Mechanical switching mechanism

2.2 Optimized Design of BiR-TENG Components: To further enhance the overall performance, system-level optimizations were implemented. These optimizations focus on refining both the mechanical rectification and switching mechanisms. The BiR-TENG enhances the DC output performance and improves the stability of AC-to-DC rectification.

2.3. Application of the BiR-TENG: The BiR-TENG demonstrated effective energy harvesting from real-world reciprocating motions. Specifically, it harvested swing energy from a door to successfully operate a wireless alarm system, and captured wave energy to power a temperature-humidity sensor. These demonstrations validate the BiR-TENG's ability to convert bidirectional or reciprocating mechanical motions into a stable unidirectional DC output, enabling its practical use in autonomous devices. Overall, the BiR-TENG proves its potential as a viable solution for harvesting reciprocating motion energy present in surrounding environments, such as buildings and coastal areas.



Fig. 3. Application of BiR-TENG

3. Conclusions

This study introduces a novel energy harvesting solution—the Bidirectional Rotating DC TENG—that addresses the limitations of existing mechanical rectifierbased TENGs. By incorporating a self-adaptive mechanical structure and a mechanical switching mechanism, BiR-TENG achieves stable unidirectional DC output from variable motion directions. The successful optimization and demonstration in practical scenarios underscore its promise for efficient, adaptable, and stable DC energy harvesting, paving the way for broader deployment in next-generation self-powered systems.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2024-00344920)

Electret Film-Induced Charging and Electrostatic Manipulation of Droplets

*Donghan Lee, Jeongseok Oh, and Dongwhi Choi⁺ Department of Mechanical Engineering, Kyung Hee University, Korea ⁺E-mail: dongwhi.choi@khu.ac.kr

Keywords : Droplet manipulation, Electret, Charged Droplet

1. Introduction

Droplet manipulation technologies play a pivotal role in various fields such as biosensing, and microreactors [1]. While conventional electrowetting on dielectric (EWOD) techniques enable precise control of droplets, they suffer from limitations, including requirement of external power sources and complex electrode configurations.

In this study, we present an electrostatic droplet manipulation method based on electret films. Electrets are dielectric materials capable of retaining surface charges, allowing for the continuous induction and manipulation of charged droplets. This work proposes a self-powered electrostatic actuation platform using electret films.

2. Generation of Charged Droplet

The electret is fabricated by subjecting a dielectric film to a corona charging process. Subsequently, the electret, which generates a strong quasi-permanent electrostatic field, is placed near the aluminum tip of a syringe, as illustrated in Fig. 1.



Fig. 1. Schematic of droplet charging system.

A droplet forming at the syringe tip is exposed to the strong electrostatic field, resulting in a significant amount of induced charge on its surface. Consequently, the droplet detached from the tip while retaining a large quantity of electrostatically induced charges.

3. Results and Discussion

3.1 Electrical Analysis of Charged Droplet

The amount of charge on the droplets is directly influenced by the field strength. Fig. 2 presents the amount of charge depending on the surface potential of the electret and the type of liquid.



Fig. 2. Charge according to surface potential and liquid type.

The results show that the polarity of the droplet charge is opposite to that of the electret's surface potential, and the magnitude of the charge is proportional to the potential level. Furthermore, when using an electret with a surface potential of 2 kV, droplets from different solutions exhibited nearly identical charge magnitudes. These results demonstrate that the charge of droplet can be easily controlled by adjusting the surface potential of the electret.

3.2 Electrostatic Manipulation of Charged Droplet



Fig. 3. Droplet manipulation using electret.

A strong electrostatic attractive force acts on the charged droplet when it is exposed to an electret surface with an opposite polarity. As shown in Fig. 3, the position of the droplet can be easily manipulated by moving the electret.

4. Conclusions

Charged droplet generation and manipulation via electretinduced electrostatic fields can be precisely controlled without external power or complex electrodes, offering inherent simplicity and broad applicability. This study demonstrates the high potential of this approach through systematic electrical analyses and applications.

References

[1] C Yang et al. Adv. Colloid Interface Sci. 306, 2022.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIT) (RS-2024-00344920)

Enhancing Hydrogen Evolution Reaction Performance through Vacancy-Engineered Transition Metal Oxide Composites

* Byunggon Song ¹, Benzhi Wang ^{1,3}, Hyung Mo Jeong ^{1,2+}
 ¹ School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University
 ² Department of Smart Fab. Technology, Sungkyunkwan University
 ³ Institute of Advanced Machinery and Technology, Sungkyunkwan University
 *E-mail: hmjeong@skku.edu

Keywords : Heterostructure, Vacancy engineering, transition metal oxide, hydrogen evolution reaction

1. Introduction

Hydrogen energy is a promising eco-friendly source, and the electrochemical hydrogen evolution reaction (HER) is key to efficient hydrogen production.[1] Noble metals like platinum (Pt) are the most effective HER catalysts, but their limited availability and high cost hinder large-scale applications.[2] Therefore, alternative materials that are both cost-effective and highly active are needed. Transition metal oxides, sulfides, and nitrides have been studied as substitutes for noble metals in HER, but transition metal oxides alone show limitations in catalytic activity.[3] To address this, we designed a composite material with vacancy engineering, which enhances HER performance by optimizing the electronic structure, increasing active sites, and improving electron transfer properties. This approach allows us to overcome the limitations of transition metal oxides and create a highly efficient, non-noble metal-based HER catalyst.

2. Vacancy engineering on heterostructure transition metal oxide composites

Electrodeposition was used to deposit cobalt oxide and nickel oxide onto a carbon cloth substrate. A metal precursor solution dissolved in an electrolyte was applied to the pre-treated carbon cloth, and subsequent heat treatment was performed to obtain the heterostructure metal oxides. Finally, electrochemical reduction reactions were used to precisely control the defects in the heterostructure metal oxides.

3. Results and Discussion

The successful growth of two different types of transition metal oxides on the carbon cloth substrate via electrodeposition was confirmed through XRD analysis. The formed material consisted of a heterostructure of Co_3O_4 and NiO, and subsequently, oxygen defects were appropriately controlled using electrochemical reduction reactions, forming a structure suitable for HER. The formation of the heterostructure material and oxygen defect control were verified through XRD and XPS analysis. The optimized material exhibited enhanced HER performance compared to single-phase Co_3O_4 , NiO, and pristine Co_3O_4 -NiO heterostructures. Additionally, it showed the smallest Tafel slope and charge transfer

resistance, confirming its efficiency as an HER catalyst material.

Furthermore, the electrochemical surface area of the catalyst was approximately 17 times greater than that of the mother material, confirming that a structure more suitable for electrochemical reactions was formed.



Fig. 1. XPS, XRD and Electrochemical analysis of Pristine and optimized samples

4. Conclusions and Future Works

Using electrodeposition and electrochemical reduction reactions, which are electrochemical reaction-based synthesis and material control methods, heterostructure Co and Ni oxides were created, inducing a structure suitable for HER. This resulted in significantly enhanced electrochemical H_2 production performance compared to the blank one. The causes and mechanisms behind the improved performance will be analyzed in detail in future studies based on real-time analysis.

References

- [1] S. J. Davis et al, Science 360, eaas9793(2018)
- [2] J. Verma et al, International Journal of Hydrogen Energy, 47, 92, 38964-38982(2022)

[3] Z. Chen et al, J. Mater. Chem. A, 7, 14971-15005(2019) Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (20013794, Center for Composite Materials and Concurrent Design) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE, Korea) ,the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by Ministry of Science and ICT(RS-2024-00444574)

ZIF-8-Derived Nickel Catalysts for Efficient Polysulfide Immobilization and Conversion in Li-sulfur Batteries

*Jixin Lu¹, Hyeong Jun Choi¹, Zhao Qing¹, Tae Hyung Kim²⁺, and Seung Hee Lee^{1,2,3+}

¹ Department of JBNU-KIST Industry-Academy Convergence Research, Jeonbuk National University, ² Department of Nano Convergence Engineering, Jeonbuk National University, ³ Department of Polymer-Nano Science and Technology, Jeonbuk National

University

⁺E-mail: <u>kth1127@jbnu.ac.kr</u> and lsh1@jbnu.ac.kr

Keywords : Lithium-sulfur battery, Shuttle effect, Polysulfide

1. Introduction

Lithium-sulfur(Li-S) batteries have the advantages of high energy density and low cost, but they have problems such as low conductivity, volume expansion, and polysulfide shuttle effect. To solve these problems, porous carbon and heteroatom doping have been studied, but there are limitations in polysulfide binding capacity and conductivity. Recently, MOF-based materials have attracted attention due to their high conductivity and polysulfide adsorption capacity. A nitrogen-rich carbon structure was created using a ZIF-based Ni catalyst in this study. It was shown to have high sulfur loading, convert polysulfide quickly, and have excellent electrochemical performance[1-3].

2. Results and Discussion

The SEM and TEM analyses were used to confirm that the Ni-CN was successfully synthesized. Various electrochemical tests of Li-S coin cells with Ni-CN as the cathode were also conducted to verify the inhibition of the shuttle effect, the mechanical stability, the Li-ion transfer rates, and the redox reaction of LiPSs in Li-S batteries. The product following high-temperature cleavage still has a somewhat regular rhombic polyhedral structure, according to the FE-SEM images of the Ni-CN material displayed in Fig. 1a. The diameter of the Ni-CN particles is roughly 400 nm. Furthermore, as illustrated in Fig. 1b, Ni nanoparticles with a diameter of roughly 10 nm are evenly dispersed across the carbon material's surface and display a desirable crystalline state. Figure 1c displays the line profile and Inverse Fast Fourier Transform (IFFT) of d-spacing with 0.203 nm of Ni nanoparticles. To evaluate the electrode redox reaction rates of S@Ni-CN, CV tests were performed at different scan rates. The oxidation peak current and reduction peak current are shown in Fig. 1d. As the scan rate increased, the peak currents of the two electrodes also tended to increase. In particular, S@Ni-CN showed a higher peak current than S@CN, confirming that the Ni catalyst enhanced the electrode reaction rate. To evaluate the practical feasibility of S@Ni-CN, long-term cycle life was tested at a high current density of 2 C as shown in Fig. 1e. After 400 GCD cycles, the capacity of S@Ni-CN was maintained at 433.4 mAh/g, and the average capacity decay per cycle was 0.07%, which was

superior to that of S@CN (0.2%). This finding demonstrates the high sulfur utilization efficiency and excellent cycling stability of S@Ni-CN.



Fig. 1. (a) FE-SEM images of Ni, (b) HR-TEM images of Ni-CN, (c) the IFFT pattern with line profile of d-spacing, (d) CV curves of S@Ni-CN at 0.1-0.4 mV/s, and (e) Cycle performance of the S@CN and S@Ni-CN at 2 C-rate.

3. Conclusions

In this study, metal Ni was introduced into MOF to synthesize Ni-CN, and an electrode material with high conductivity and porosity was fabricated by hightemperature carbonization. Ni-CN promoted electron transfer and rapidly induced polysulfide conversion, thereby suppressing the shuttle effect, and the Ni catalyst lowered the reaction activation energy to enhance the electrochemical reaction rate. The introduction of Ni nanoparticles improved the polysulfide adsorption capacity and redox reaction rate compared to conventional porous carbon, suggesting new possibilities for the design of lithium-sulfur battery cathodes.

References

- [1] H. Zhang et al. J. Mater. Chem. A. 75:9195-9201, 2019.
- [2] Z.Q.Li et al. Nano Energy 23:15-26, 2016.
- [3] J. Park et al, J. Energy Chem. 61:561-573, 2021

Acknowledgement

Development of 350kgbatch lithium salt (LiFSI) manufacturing process and ecofriendly treatment technology, [20022529] funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy (MOTIE, Korea)

Lithium-Ion Transport Regulation Using 2D Transition Metal Oxide Nanosheets for a Dendrite-Free Lithium Metal Anode

*Donghyoung Kim¹, Hee Jung Park²⁺, and Hyung Mo Jeong¹⁺

¹ School of Mechanical Engineering and Department of Smart Fab. Technology, Sungkyunkwan University, 2066, Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon-si, Gyeonggi-do, 16419, Republic of Korea, ² Department of Materials Science and Engineering, Dankook University, Dandae-

ro 119, Cheonan, 31116, Republic of Korea

⁺E-mail: Hyung Mo Jeong: <u>hmjeong@skku.edu, Hee Jung Park: parkjang@dankook.ac.kr</u>

Keywords : Li+ flux engineering, Li+ affinity sites, anodeless battery, lithium metal batteries

1. Introduction

The growing demand for high-energy-density rechargeable batteries is driving the exploration of advanced anode materials. Lithium metal batteries (LMBs) are particularly promising due to their high theoretical capacity and low electrochemical potential. However, their cycling stability is hindered by the formation of lithium dendrites, caused by uneven Li+ flux. This study presents a strategy utilizing exfoliated two-dimensional titanium oxide (2DTiOx) nanosheets as uniform Li+ flux regulators to improve the performance of anodeless LMBs. These nanosheets, derived from layered titanium oxide, maximize the exposure of Ti sites, which function as atomic-scale regulators to facilitate uniform lithium deposition and suppress dendrite formation.

2. Results and discussions

2.1 First Part

Anodeless lithium metal batteries (LMBs) offer high density but face challenges related energy to inhomogeneous lithium-ion (Li⁺) flux, leading to dendrite formation and capacity fading. In this study, we introduce exfoliated two-dimensional titanium oxide (2DTiOx) nanosheets as atomic-scale Li+ flux regulators to achieve uniform lithium deposition. The fully exposed Ti sites in 2DTiOx exhibit strong Li⁺ affinity, effectively guiding Li⁺ transport and suppressing dendrite growth. As a result, the Li|2DTiOx|Cu half-cell demonstrates stable cycling for over 900 cycles with a Coulombic efficiency exceeding 99%, while a symmetric cell with a limited lithium source operates for over 1500 hours. Furthermore, full cells incorporating NCM811 and LFP cathodes exhibit excellent cycling stability, sustaining over 400 cycles.

Electrochemical and structural analyses, including SEM and XPS, confirm that the 2DTiOx layer facilitates homogeneous Li⁺ flux and densely packed lithium deposition, leading to enhanced cycling stability and efficiency. This work highlights the potential of 2D transition metal oxide nanosheets as effective interfacial regulators, providing a promising strategy for developing next-generation anodeless LMBs with prolonged cycle life and improved safety.



Fig. 1. Concept of Li growth control by 2DTiOx layer.

3. Conclusion

In this study, transition metal oxide was successfully exfoliated into a nanosheet morphology with a lateral size of several micrometers, maximizing the exposure of transition metal atom sites. These exposed sites exhibited high lithium ion affinity, effectively condensing lithium ions uniformly across the nanosheet surface. As a result, homogeneous lithium ion flux was achieved, leading to densely packed lithium deposition, as confirmed by SEM analysis. The half-cell incorporating the nanosheet demonstrated excellent cycling stability, sustaining over 200 cycles at a high current density of 3.0 mAh cm⁻² with a capacity of 1.0 mAh cm⁻², verifying its enhanced lithium plating/stripping behavior. Furthermore, the full-cell configuration with a limited lithium source exhibited exceptional longevity, maintaining stable cycling for 400 cycles at 1.0C with the transition metal oxide nanosheet layer. These findings highlight the effectiveness of the proposed strategy in improving lithium metal battery performance and stability.

Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (20013794, Center for Composite Materials and Concurrent Design) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE, Korea)

나노셀룰로오스 기반 벌크 구조의 제조 및 물성 분석 Fabrication of Nanocellulose-Based Bulk Materials and its Mechanical Property Analysis

*장효정¹, 김현찬²⁺ * H.J. Jang¹, H.C. Kim²⁺

¹ 국립금오공과대학교 기계시스템공학과, ² 국립금오공과대학교 기계시스템공학과 ⁺E-mail: hyunckim@kumoh.ac.kr

Keywords: Nanocellulose, Sterilization, Bulk Material, Mechanical Properties

1. 서론

현대 사회에서 이상 기후 현상과 같은 환경적 문제가 대두됨에 따라, 온난화 가스 발생량을 줄이고 기존 인 공 소재를 대체할 수 있는 지속 가능한 고성능 소재에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1]. 그 중 나노셀 룰로오스(Nanocellulose)는 자연에서 얻을 수 있는 친 환경 고분자 소재로, 높은 기계적 물성과 생분해성을 갖춘 친환경 소재로 많은 관심을 받고 있다[2]. 본 연구 에서는 나노셀룰로오스 소재의 다양한 산업에서의 응 용을 위해 벌크 재료로 제조하고, 물성 분석을 통해 최 적의 제조 공정 조건을 도출하고자 한다.

2. 본론

나노셀룰로오스 벌크 재료 제조 공정은 물을 기반으 로 한다. 하지만 이로 인해 나노셀룰로오스의 낮은 분 산성, 곰팡이 발생, 그리고 건조 중에 발생하는 내부 기공과 같은 구조내 결함 형성 문제가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 멸균 처리기를 벌 크 재료 제조 공정내에 도입하여 앞서 발생한 다양한 문제점을 해결하고 기계 물성 분석을 통해 공정 요인 을 최적화 하였다.

2.1 벌크 재료 제조 공정

멸균 처리의 경우 고온과 고압을 사용하기에 고분자 소재인 나노셀룰로오스 구조 자체에 영향을 끼칠 수 있다. 따라서 분자 내구 구조에는 영향을 끼치지 않으 면서 공정의 특성만 변화 시키도록 멸균 처리 요인들 을 제어하며 실험을 수행하였다. 그 결과 분산 특성만 을 향상시키는 공정을 설계하게 되었다. 이로 인해 나 노셀룰로오스 현탁액의 고체 농도를 높이는 것이 가능 하게 되었고 이는 건조 중에 발생하는 구조의 수축을 줄이고 내부의 기공 형성 또한 억제하는데 기여하였다.

2.2 물성 분석

다양한 공정 요인을 평가하기 위해 달라진 공정 요인 에 따라 ASTM D638 규격에 맞는 몰딩 캐스팅을 수행 하였으며, 성형된 시편에 후 가공을 적용하여 인장 실 험에 적합한 형태로 제작하였다. 그 결과 약 1.3 GPa 탄 성계수, 20 MPa의 인장 강도 값을 보였다. 또한 XRD, FTIR 분석을 통해 멸균 공정이 나노셀룰로오스의 결 정 구조 및 화학 조성에 미치는 영향을 평가하였으며, 소재 자체의 구조에는 변화가 없음을 확인하였다.

3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 나노셀룰로오스 별크 재료의 제조 공 정에 고압 멸균 처리를 도입하여, 기존 공정에서 발생 했던 문제점을 해결하고자 하였다. 멸균 처리를 통해 곰팡이 발생을 방지하고, 고농도화를 통해 균일한 벌 크 재료 제조가 가능함을 확인하였다. 또한, 기계적 물 성 평가를 통해 최적의 물성을 가질 수 있는 조건을 탐 색하였다. 향후 보다 다양한 공정 요인들을 발굴하여 나노셀룰로오스의 벌크화 공정을 안정화 시키며 다양 한 산업 분야로의 응용 가능성을 확장시키고자 한다.



Fig. 1. Tensile Test Process

참고문헌

- IChakrabarty, A.; Teramoto, Y. Recent Advances in Nanocellulose Composites with Polymers: A Guide for Choosing Partners and How to Incorporate Them. Polymers 2018, 10, 517.
- [2] Alain Dufresne, Nanocellulose: a new ageless bionanomaterial, Materials Today, Volume 16, Issue 6, 2013, Pages 220-227

후기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구 재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00353023).

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

금속-유기 골격체 특성 기반 에너지 하베스터 Metal-Organic Framework properties based energy harvester

*김경환 ¹, 홍주혁 ¹, 황희재 ¹, 정지훈 ¹⁺ * K.H. Kim ¹, J.H. Ju ¹, H.J. Hwang ¹, J.H. Chung¹⁺

¹ 국립금오공과대학교 기계공학부 기계시스템전공 + E-mail: aprzlsej123@kumoh.ac.kr

Keywords: Triboelectric Nanogenerator, Energy Harvesting, Metal-Organic Framework, Blade Coating

1. 서론

마찰대전 발전소자(Triboelectric Nanogenerator, TENG)는 마찰대전 효과와 정전 유도 현상을 기반으로 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환 시키는 기술이다.[1] micro~nano size의 입자성을 가진 금속-유기 골격체(metal-organic framework, MOF)의 전기, 화학적 특징을 활용해 TENG 성능 향상에 연구 되고 있으나 MOF만을 활용해 출력을 검증하는 연구는 부족한 상황이며 본 연구에서는 이를 검증하고자 한다.

2. 방법

2.1 MOF 합성





Fig. 1. XRD Characterization of MOF

MOF의 스펙트럼 피크 위치가 선진 연구된 자료와 일치함을 보였으며 이는 MOF의 합성이 성공적으로 이루어 졌음을 시사한다.[2-6]

2.2 TENG 제작

TENG의 각 재료를 고정하기 위해 상하부 기판은 아크릴을 활용했으며 상부 전극을 덮는 마찰대전 층은 (+), (-)로 대전되기 쉬운 나일론과 polytetrafluoroethlene(PTFE)로 각각 구성되어있으며 하부 전극은 블레이드 코팅을 통해 MOF가 도포되어 있다. 제작된 TENG의 마찰대전 층과 코팅된 MOF층을 수직 접촉/분리를 모델을 이용하여 전기적 출력을 확인 했다.

3. 전기적 출력

Fig. 2a는 마찰대전 층을 나일론으로 했을 경우 생성된 출력 전압이며 Cu-BTC가 가장 높게 측정 되었다. Fig. 3b는 마찰대전 층을 PTFE로 했을 경우 확인 된 출력이며 ZIF-67이 가장 높게 측정 되었다.



Fig. 2 Electrical output of MOF-TENG a) nylon b) PTFE

4. 결론 및 향후과제

MOF 종류마다 복합적인 요인으로 인해 효과적으로 상호작용을 하는 마찰대전 층이 존재하며 TENG의 성능 향상을 위해 MOF를 하나의 재료로써 제안한다..

참고문헌

- [1] Wang, S., Lin, L., & Wang, Z. L. Nano Lett. 12(12): 6339-6346, 2012.
- [2] Ostad, M. I., Niknam Shahrak, M., & Galli, F. Microporous Mesoporous Mater. 326: 111363, 2021.
- [3] Qian, J., Sun, F., & Qin, L. Mater. Lett. 82: 220 -223, 2012.
- [4] Zhuang, J. L., et al. Adv. Funct. Mater. 21(8): 1442-1447, 2011.
- [5] Liu, D., et al. Dalton Trans. 44(37): 16421-16429, 2015.
- [6] Mounfield III, W. P., & Walton, K. S. J. Colloid Interface Sci. 447: 33-39, 2015.

후기

이 성과는 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00210363)

Three-dimensional structured fiber shaped advanced hybrid electrode materials for Supercapacitors

* Min Seob Kim^{1,2}, Jeong-Gil Kim¹, Min Ji Kim^{1,2}, Min Woo Kim^{1,2}, and Nam Dong Kim¹⁺

¹Institute of Advanced Composite Materials, Korea Institute of Science and Technology (KIST), ²School of Materials Science and Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology (GIST)

⁺E-mail: ndkim@kist.re.kr

Keywords : Carbon nanotube fiber, Three-dimentional composite, Ni-Co LDH

1. Introduction

Carbon nanotube fibers (CNTFs) are one of the best next-generation core material that can be applied in numerous fields due to their excellent properties such as high specific strength, flexibility, and excellent electrical and thermal conductivity. However, it is difficult to apply them directly to the electrochemical field due to the low surface area and low functional group characteristics caused by high crystallinity [1]. Therefore, to overcome the above mentioned disadvantages, the carbon nanotubes (CNTs) were then grown and covalently bonded to the surface of CNTF through chemical vapor deposition (CVD). In order to improve the electrochemical performance of the 3D structured material, layered double hydroxides (LDH) are suitable active materials for composites because they have high energy density among various materials.

In particular, nickel-cobalt layered double hydroxide (Ni-Co LDH) has a high theoretical capacity of about 3000 F/g and excellent redox activity, making it one of the most promising electrode materials [2]. However, layered double hydroxide materials have low conductivity and agglomeration problems, which limits the charge/discharge speed and output performance, and thus their use in supercapacitors is restricted. To overcome these shortcomings, layered double hydroxides are mainly synthesized and used as composites with the conductive carbon based core material.

2. 3D structured hybrid electrode material

2.1 Fabrication of the electrode material

CNTs were grown by CVD method on a highly densified CNTF to form a three-dimensional structure and used as a core fiber. After that, nickel and cobalt with high electrochemical properties were deposited through an electrochemical deposition method to synthesize a highperformance electrode material.

3. Characteristic of the as-prepared electrode

The three-dimensionally structured key material has a high surface area and excellent electrochemical performance compared to the pristine carbon nanotube fibers. Additionally, the grown carbon nanotubes, which are covalently bonded to the surface of the carbon nanotube fibers, are expected to further improve the mechanical and electrical properties without deteriorating them. Compared to the conventional carbon nanotube fibers, the three-dimensionally structured material has a higher surface area, which provides sufficient surface area and high conductivity for complexing layered double hydroxide (Ni-Co LDH).

As a result, the synthesized fibrous electrode material exhibited an advanced electrochemical performance of about 1741 F/g at a current density of 1 A/g and a retention rate of about 87.24% at a current density of 10 A/g. This performance is superior to that of the conventional Ni-Co LDH@CNTF composite (1093 F/g, 77.01%).



Fig. 1. Electrochemical performance of the electrode

4. Conclusions

In this study, we fabricated a three-dimensional composite fiber electrode using electrochemical deposition of nickel and cobalt on carbon nanotube fibers and confirmed that it exhibited excellent electrochemical performance. Therefore, this study introduces the excellent core materials that can be applied to next-generation energy storage fields.

References

- [1] Jinyong Tian et al. J.Mater. Chem. A. 2021, 9, 20635-20644.
- [2] Yangyang Liu, J.Mater. Chem. A. 2017, 5, 24407-24415.

Synthesis of Carbon Nanohorn and its Application in Carbon-Metal Composite Catalyst for Water Splitting

*Hongbum Kim^{1,2}, Min Woo Kim^{1,3}, Balaji Ravichandran¹, Jeong-gil Kim^{1,4}, Min Seob Kim^{1,3}, Min Ji Kim^{1,3}, and Nam Dong Kim¹⁺

 ¹ Functional Composite Materials Research Center, Korea Institute of Science and Technology (KIST), ² Department of Applied Bioengineering, Graduate School of Convergence Science and Technology, Seoul National University,
 ³Department of Materials Science & Engineering, Gwangju Institute of Science & Technology (GIST), ⁴ Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST)

⁺E-mail: <u>ndkim@kist.re.kr</u>

Keywords : Arc-Discharge, Carbon Nanohorn, Catalyst, Oxygen Evolution Reaction, Hydrogen Evolution Reaction

1. Introduction

Due to high carbon emissions, the need for a cleaner source of energy is dire. One of the alternative is electrochemically synthesized hydrogen, but implementation of it is proving difficult due to the sluggish kinetics and harsh reaction conditions. Arc-discharge, which is an in-situ synthesis method, creates highly crystalline carbon nanohorns (CNH) with nanoparticles embedded in the structure leading to higher performance and stable metal structure. The following results demonstrate a possibility of CNH being used as a carbon support for water splitting.

2. Carbon Nanohorns as Water Splitting Catalyst

2.1 Synthesis of Carbon Nanohorns

Hollow carbon rods are filled with Ru and TM (Co, Ni, V) metal precursors. The filled rods are then applied high power for arc discharge, which ionizes the rods and diffuses the vapor towards the wall of the chamber. In the reaction, nitrogen atmosphere participates in the reaction creating curvature in the carbon structure, which forms the distinct CNH shape [1]. The resulting CNH is then heat treated in various gasses and is named CNH-Ru/TM, dependent on the transition metal used in the precursor.

2.2 Electrochemical Performance of CNH-Ru/M

The treated carbons are mixed with IPA, DI water, and Nafion to make a catalyst ink, and applied to the rotating disk electrode (RDE). In saturated N_2 0.5M H₂SO₄, the resulting HER and OER LSV polarization curves were taken.

3. Results and Discussion

The CNH is highly crystalline and the interstitial pore and nano channel development in the heat treatment allows the material to be utilized as a catalyst [2]. An abundance of both micro and mesopores make CNH a prime carbon support. Bimetallic catalysts synthesized with CNH show high kinetics, especially in the high current density region. In HER, compared to the reference Pt/C, the bimetallic samples show lower overpotential at 10 mA/cm⁻², but eclipses the reference at 100 mA/cm⁻². CNH-Ru/V is shown to be the best at HER reaction, with only 71mV overpotential at 10 mA/cm⁻². In OER reaction, CNH-Ru/Co is the best, needing only 306 mV of overpotential to reach 10 mA/cm⁻². The Ruthenium which should act as the main catalytic site, is modulated by transition metals and show different performances accordingly. Mass activity of the noble metals were also confirmed, with bimetallic catalysts showing higher values than Pt/C or mono-metallic noble metal catalysts synthesized with similar methods.



Fig. 1. HER and OER LSV polarization curves of CNH-Ru/TM bimetallic catalyst

4. Conclusion

In summary, we have succesfully synthesized CNH with doped Ru/TM, and demonstrated a way to use them as capable bifunctional catalyst for HER and OER. The CNH structure provides high crystallinity with a hierarchical porous structure, which allows it to be used as a capable carbon support for various utilizations. The obtained electrochemical results show that the catalyst has potential in future energy conversion technologies.

References

- [1] Jung, et al. Small Methods (2021), 5, 2100239
- [2] Jung, et al. Nano Energy 97 (2022) 107206

포

아크 방전을 통한 이종원소 도핑된 결정성 탄소 물질의 합성 및 응용 Synthesis and Application of Heteroelement Doped Crystalline Carbon Materials via Arc Discharge Method

*김민우^{1,2}, 김정길¹, 김민섭^{1,2}, 김민지^{1,2}, 김홍범^{1,3}, 김남동¹⁺ *M.W. Kim^{1,2}, J.G. Kim¹, M.S. Kim^{1,2}, M.J. Kim^{1,2}, H.B. Kim^{1,3}, N.D. Kim¹⁺

¹ 한국과학기술연구원, ² 광주과학기술원 신소재공학부, ³ 서울대학교 융합과학기술대학원 ⁺E-mail: <u>ndkim@kist.re.kr</u>

Keywords: Arc discharge synthesis, Crystalline carbon, Heteroelement-doping, Oxygen reduction reaction.

1. 서론

이종원소 도핑 탄소는 다양한 에너지 전극 소재로 주목받고 있다 [1]. 그러나 기존 도핑 방법은 탄소 소재의 결정성 저하로 안정성과 전도도가 저하되는 문제가 있다 [2,3]. 본 연구에서는 아크 방전법을 통해 이종원소가 도핑된 고결정성 탄소 나노혼을 합성하였고, 탄소 소재의 물리적·화학적 특성을 비교하였다. 또한, 이를 산소환원반응에 적용하여 성능을 평가하였다.

2. 이종원소 도핑 나노탄소의 아크 방전 합성

2.1 고결정성 나노탄소의 합성 및 구조 분석

상향식 아크 방전법을 통해 이종원소(N, S, P)가 도핑된 탄소 나노혼(CNH)을 합성하였다. 주사전자현미경과 투과전자현미경 분석 결과 NS-CNH와 NSP-CNH 모두 균일한 구형 나노입자 형태를 보였으며, 잘 발달된 단일벽 나노혼 구조가 관찰되었다. X선 회절 분석과 BET 기공 분석을 통해 이종원소 도입에도 불구하고 높은 결정 특성과 유사한 기공 구조를 갖음이 확인되었다.

2.2 도핑된 이종원소의 화학적 상태 분석

X선 광전자 분광법을 통해 도핑된 이종원소들의 화학적 상태를 호가인하였다. 질소 원소의 경우 주로 *Pyridinic-N, Pyrrolic-N, Quaternary-*N과 같이 탄소 격자 내부에 존재하는 화학종으로 존재하였다 [4]. 또한 S2p와 P2p 스팩트럼 분석을 통해 황과 인 원소 또한 탄소 격자 내부에 성공적으로 도입되었음을 확인하였다 [4]. 이를 통해 이종원소들이 단순한 표면 기능기가 아닌 격자 내 치환기로 존재한다는 것을 증명하였다.

이종원소 도핑 나노탄소의 전기화학적 성능 평가

회전 링-디스크 전극 (RRDE) 테스트를 통해 산소환원반응 (ORR)과 H₂O₂ 선택성을 평가한 결과, NS-CNH는 향상된 ORR 활성과 선택성을 보였으며, 특히 추가적으로 도입된 인은 활성 부위로 작용하여 높은 H₂O₂ 선택성을 유지하면서도 ORR 활성을 향상시켰다 [5]. 이러한 결과는 이종원소 도핑이 전기화학적 활성 부위를 생성하여 ORR 활성과 선택성을 모두 향상시킬 수 있음을 보여준다.



Fig. 1. ORR activity & H₂O₂ selectivity.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 아크 방전법을 통해 고결정성을 유지하면서 N, S, P 등 이종원소가 도핑된 탄소 나노혼을 성공적으로 합성하였다. 다양한 분석을 통해 이종원소의 탄소 격자 내 도입되었음에도 구조적 특성을 잘 유지하는 것을 확인하였다. RRDE 테스트 결과 향상된 ORR 활성과 H₂O₂ 선택성을 보였다. 후속 연구를 통해 도핑 원소 간 시너지 효과 규명과 다른 이종원소에 따른 탄소 소재의 특성 변화를 밝혀낼 예정이다. 또한, is-situ 분석 기법을 통한 전기화학 반응 메커니즘 연구도 중요한 과제로 남아있다.

참고문헌

- [1] HB kim, et al. J. Phys. Chem. C 125.10 (2021): 5793-5801.
- [2] Ruru Li, et al. ACS Appl. Mater. Interfaaces 12.40 (2020): 44578-44587.
- [3] WS Cha, et al. ACS Appl. Mater. Interfaaces 11.30 (2019): 27192-27199.
- [4] Xia, Y, eT al. Nat. Commun. 12.1 (2021):4225.
- [5] CH Choi, et al. J. Mater. Chem. 22.24 (2012):12107-12115.

- 517 -

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

소수화 처리된 CNF를 컴파운딩한 Poly(lactic acid)복합재의 향상된 열적 및 기계적 물성

Enhanced Thermal and Mechanical Properties of Poly(lactic acid) Composites Compounded with Hydrophobized CNF

*신영은 ^{1,2}, 이아정 ¹, 고영상 ¹, 전정담 ^{1,3}, 박주영 ¹, 채한기 ², 박태훈 ¹⁺ * Y.E. Shin ^{1,2}, A.J. Lee ¹, Y.S. Ko ¹, J.D. Jeon ^{1,3}, J.Y. Park ¹, H.G. Chae ², T.H. Park ¹⁺

¹ 한국재료연구원 융·복합재료연구본부, ² 울산과학기술원 신소재공학부, ³ 부산대학교 고분자복합재료연구실 ⁺E-mail: <u>thpark@kims.re.kr</u>

Keywords: Cellulose nanofiber, Poly(lactic acid), Nanocomposite, Fatty acid

1. 서론

환경 문제의 심화로 인해 지속 가능한 소재에 대한 관심이 증가함에 따라, 생분해성 고분자인 Poly(lactic acid) (PLA)가 주목받고 있다. PLA는 우수한 생분해성과 기계적 특성을 갖추고 있지만, 낮은 결정성으로 인해 열적 안정성이 부족하다. 이를 개선하기 위해 Cellulose nanofiber (CNF)가 보강재로 활용되지만, 친수성 성질로 인한 PLA와의 상용성이 저하된다. 본 연구에서는 Fatty Acid (FA)로 CNF를 소수화처리하여 PLA 복합재 내에서의 분산성을 개선하고, 열적 · 기계적 물성을 향상시키고자 하였다. 이를 통해 친환경 고성능 복합재 개발 가능성을 제시한다.

2. 실험 방법

2.1 필러 제조 및 복합재 제조 : CNF 분산액은 1 wt% 셀룰로오스 용액을 고압 균질화하여 제조한 후 오븐에서 건조하여 Oven dried CNF (ODCNF) 필름을 얻었다. FA 코팅을 위해 CNF 분산액을 70-75°C에서 교반하면서 FA를 첨가하고, 농축 및 건조 과정을 거쳐 FA coated CNF (FACNF) 필름을 제조한 후 분말로 분쇄하였다. 건조된 PLA 펠렛을 ODCNF 및 FACNF 분말과 혼합하여 압출 및 사출 성형을 통해 최종 복합재 (neat PLA, ODCNF/PLA, FACNF 1-5 wt%/PLA)를 제조하였다.

2.2 물성 분석 : 필러의 물성 변화를 확인하기 위해 FTIR, XRD 측정을 진행하였고, 복합재의 물성 분석을 위해 SEM, POM, DSC, DMA 측정을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 FACNF의 개질된 정도를 확인하기 위해 FTIR, XRD 측정을 진행하여 CNF에 FA가 성공적으로 코팅되어 있는 것을 확인하였다. Neat PLA, ODCNF/PLA, FACNF/PLA의 형태학적 물성을 비교하기 위한 SEM 측정에서는 FACNF/PLA의 단면에서 Neat PLA, ODCNF/PLA 샘플보다 필러의

분산성이 향상된 것을 확인하였다. DSC 분석에서는 필러 첨가 시 필러의 핵제 역할로 인하여 결정화도가 증가하는 경향을 보였고, FACNF 5 wt%/PLA는 Neat PLA보다 약 16.4% 높은 결정성을 가진다. 이를 뒷받침하기 위하여 POM 측정이 이루어졌다. Neat PLA와 비교하여 FACNF -5 wt%/PLA의 결정 구정이 더 많고 빠르게 형성되는 것을 확인하여 결정성 증가를 증명할 수 있었다. 다음으로 기계적 물성을 측정을 위해 DMA 분석이 이루어졌다. FA로 인해 60℃부근에서 약간의 탄성률 감소를 보였지만, 필러의 함량을 높일수록 CNF간 네트워크 구조의 지지역할로 인해 탄성률 값이 증가하였다. 마지막으로 생분해도 테스트를 실행하였다. FACNF/PLA는 Neat PLA 에 비해 결정성이 증가했음에도 불구하고, 필러의 친수성 및 고유한 생분해성에 의해 20% 더 높은 생분해도를 가져 친환경 복합재에 적합한 것을 증명하였다.



Fig. 1. DMA curves of Neat PLA, CNF/PLA, FACNF 1-5 wt%/PLA

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 FACNF를 제조하고 PLA와 압출 및 사출을 통해 복합화하여 시편을 제작하여 열적, 기계적 물성이 증가된 친환경 고성능 복합재를 제조할 수 있었다. 향후에는 친환경적으로 개질된 CNF를 다양한 복합재에 적용시키는 것을 목표로 한다.

Ĩ

ılus

Storage

수직 접촉 분리 모드 마찰 대전 발전 소자에 대한 통합된 이론 모델 An unified theoretical model for vertical contact-separation mode triboelectric nanogenerators

*김석진 ¹, 한장우 ², 정지훈 ²⁺ * S.J. Kim ¹, J.W. Han ², J.H. Chung²⁺

¹ 국립금오공과대학교 기계공학과, ² 국립금오공과대학교 기계공학부 ⁺E-mail: <u>jihoon@kumoh.ac.kr</u>

Keywords: Energy Harvesting, Triboelectric Nanogenerator, Theoretical model

1. 마찰 대전 발전 소자에 관한 이론적 연구

마찰 대전 발전 소자는 친환경적이고 범용성을 갖는 에너지 수확 기술로서, 그것의 성능을 입증하기 위한 실험적 연구와 더불어 성능을 분석하기 위한 이론적 연구 역시 병행되고 있다. 그러나 기존에 도출된 이론적 모델들은 그들 각각의 이론적 한계를 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 이들을 통합함으로써 이전의 한계를 극복하고, 시스템 특성에 대해 보다 정확한 출력을 예측하려는 시도가 이루어졌다.

2. 수학적 모델 유도

2.1 기존 모델의 검토

마찰 대전 발전 소자 (TENG) 는 다양한 모드로 작동 가능하며, 이 중에서 수직 분리 접촉 모드 TENG의 구조가 가장 단순하여 분석하기 용이하므로, 이에 대해서만 살펴보았다. TENG는 일반적으로 두 개의 전극을 구조 상에 포함하며, 이 둘 간의 전위 차를 구하는 공식에 따라 모델이 구분된다. 실제로, 다음과 같은 모델들이 개발되었다: Capacitive (CA) model [1], Distance-dependent electric field (DDEF) model [2], Quasi electrostatic three dimensional charge (QETD) model [3], and Enhanced distance-dependent electric field (EDDEF) model [4].

2.2 새 모델의 유도

기존의 모델들을 통합하여, 전위 차를 계산하는 새 공식이 유도되었다. 또한 계산 비용을 줄이기 위한 수치 해석 기법이 도입되었다.



3. 모델의 검증

새 모델과 기존 모델로부터 계산한 출력, 그리고 실험적으로 측정된 출력이 비교되었다.



Fig. 1. Comparison of different models.

4. 결론 및 향후과제

새 모델로부터 계산된 출력 특성은 기존의 것들과 유사한 경향성을 보였다. 또한 실험 및 모델 간의 비교에서, 제안된 모델이 실험적 관찰에 가장 근접함을 확인하였다.

참고문헌

- [1] S. Niu et al. EES. 6 (2013) 3576–3583.
- [2] R.D.J.G. Dharmasena et al. *EES*. 10 (2017) 1801–1811.
- [3] X. Chen et al. Nano Energy. 111 (2023) 108435.
- [4] A.A. Ahmed et al. Nano Energy. 117 (2023) 108836.

후기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-00210363)

Ultrathin Biocompatible Multifunctional Polymeric Films for TENG Energy Harvesting and Flame-Retardant Coatings via Automated LbL Coating Process

*Nebiyou Tadesse Debele, Alemtsehay Tesfay Reda, and Yong Tae Park⁺ Department of Mechanical Engineering, Myongji University ⁺E-mail: ytpark@mju.ac.kr

Keywords : triboelectric nanogenerators, layer-by-layer assembly, flame-retardant coating

1. Introduction

The growing need for sustainable energy and fire-safe materials has led to the development of ultrathin multifunctional polymeric films that integrate energy harvesting and flame retardancy [1]. Polymethyl methacrylate (PMMA), a flexible polymer with excellent dielectric properties, and phytic acid (PA), a phosphorusrich flame retardant, form a promising combination for these applications. PMMA's high electronegativity enhances TENG performance, while PA promotes thermal stability by forming protective char layers (Figure 1). The LbL technique enables controlled film thickness and composition, ensuring lightweight, multifunctional coatings with potential applications in smart surfaces, and fire protection [2].



[PMMA/PA], TENG

PUF/[PMMA/PA]_n

Fig. 1 Graphical abstract for TENG energy harvesting and flame retardant coatings.

2. Methodology

In this study, ultrathin multifunctional polymeric films of PMMA and PA were deposited onto graphene-based electrodes (PVA/GNP-PSS) using an automated LbL self-assembly process (Figure 2). To fabricate PMMA/PA multilayer films, electrode-coated substrates were alternately immersed in a PMMA-stabilized suspension for 5 minutes, followed by immersion in a PA solution for another 5 minutes. Each deposition cycle included three water rinsing steps and 20 seconds of drying between layers. Additionally, PMMA/PA coatings were applied to polyurethane foam using the LbL method to evaluate their flame-retardant properties, further exploring their multifunctional potential in energy harvesting and fire protection.



Fig. 2 Schematic illustration of LbL coating process.

3. Results and Discussion

The PMMA/PA films are expected to exhibit a uniform and well-structured surface, as analyzed by Scanning Electron Microscopy and Atomic Force Microscopy. Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) will confirm successful chemical interactions between PMMA and PA. Triboelectric measurements are anticipated to show enhanced voltage, current, and power density, attributed to PMMA's high electronegativity and PA's charge density. Thermal stability and flame resistance will be evaluated using TGA and cone calorimetry, along with horizontal and vertical flame tests. Preliminary results suggest the formation of protective char layers, leading to reduced heat release rates and improved flame retardancy

4. Conclusions

This research aims to develop multifunctional PMMA and phytic acid coatings using the LbL assembly process, addressing the dual needs of energy harvesting and flame retardancy. By leveraging the unique properties of these materials this study could pave the way for innovative, scalable, and sustainable solutions.

References

[1] Debele N.T ACS Applied Materials & Interfaces **2025** 17 (1), 1311-1321

[2] Menge H.G. et al; *ACS Energy Letters* 6.7 (2021): 2451-2459. Acknowledgement

The author would like to thank the National Research Foundation (NRF) grant funded by the Korean government (RS-2025-00518552) for the financial support of this research.

포

Enhancing Antibacterial Activity through Electrical Stimulation from Triboelectric Nanogenerator Using Hydrogel

* Hai Anh Thi Le¹, Abebaw Tinsae Messay¹, Yong Tae Park¹⁺ ¹Department of Mechanical Engineering, Myongji University, ⁺E-mail: ytpark@mju.ac.kr

Keywords: Triboelectric nanogenerator, electrical stimulation, antibacterial.

1. Introduction

In recent years, with the emergence of triboelectric nanogenerators (TENGs), there has been a surge of research into small, flexible, wearable, and self-powered energy harvesting [1,2]. In addition, TENG-based electrical stimulation has also shown potential in improving antibacterial efficacy. In this paper, we present a hydrogel with optimized structure and mechanical properties and output performance of TENG. The combination of the inherent antibacterial properties of the hydrogel and the electrical stimulation generated from the TENG has significantly improved the antibacterial efficacy on the hydrogel electrode surface. These findings pave the way for innovative approaches to effectively control bacterial growth and enhance the application of TENG-based devices as advanced wearable antimicrobial systems

2. Methodology

2.1. Fabrication of the Hydrogel PCZ: Prepare a 10% PVA solution by dissolving 10g of PVA in 100ml of distilled water at 90°C, continuously stirring for 30 minutes to obtain a homogeneous solution. A 2% CHI solution is prepared by dissolving 2g of CHI into 100ml of 1% CH3COOH solution. The PVA and CHI solutions are then mixed in a weight ratio of 1:2, and the mixture is stirred for 30 minutes. Next, 1% ZnO by weight of the polymer is added to the mixture, and it is stirred for an additional 30 minutes to ensure uniform dispersion of the ZnO in the solution. The resulting mixture is then poured into a Petri mold and kept at -20°C for 22 hours. The frozen gel is then placed at room temperature for 2 hours. The synthesis process is completed with one freeze-thaw cycle, and the resulting hydrogel is referred to as the original sample (PCZ-O).

2.2. Fabrication of the Z-TENG: Z-TENG is a clamped structure with VHB, and two layers of VHB are present on the top and bottom. A smaller hydrogel layer was encapsulated inside the two VHB layers, and a conductive copper wire was attached to the hydrogel as the

outer electrode. Because the hydrogel is smaller than the two VHB layers, the two VHB layers are connected around the hydrogel layer, which helps to limit water loss in the hydrogel. After manufacturing, the Z-TENG was used to measure the electric power output.

3. Results and Discussion

The structure of the hydrogel is through the physical crosslinking between PVA chains and the cross-linking between PVA and CHI, and the addition of ZnO, a substance with high piezoelectric properties, aims to increase the output performance of Z-TENG (Figure 1).

The hydrogel structure is optimized through the combination of 1 F-T cycle and 1 D-R cycle. The results show that the PCZ-R1 hydrogel sample has a tight structure with the formation of more physical cross-links and PVA crystal domains than the PCZ-F5 sample. The tensile strain of ~480% is much better than the original PCZ-O hydrogel sample of 200%. The output performance of the 4 hydrogel samples also shows that the PCZ-R1 sample has a better voltage and current value than the other 3 samples (Figure 2).

The combination of the inherent antibacterial properties of the hydrogel and the electrical stimulation generated by the Z-TENG was investigated. The results showed that after 5 minutes of electrical stimulation, nearly 100% of the antimicrobials on the electrode surface were destroyed (Figure 3).



Fig. 1. Schematic illustration of the as-synthesized hydrogel networks.

포

<u>ㅅ</u>

터

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials



Fig. 2. Stress-strain curve of 4 samples measured at 25°C , Output voltages of Z-TENGs.



Fig. 3. The performance of TENG after self-healing. The performance of TENG under high temperature conditions. Schematic illustration of the electrical stimulation activation of the Z-TENG device based on finger tapping, Bacterial response of *E. coli* and *S. aureus* studied via disk diffusion

4. Conclusions

We have reported a simple hydrogel with superior properties along with outstanding TENG output performance. In addition, the antibacterial results based on electrical stimulation of the Z-TENG device have shown the potential to become a breakthrough solution in infection control, ensuring the safety of personal and community health.

References

[1] Z. Wang et al. Acs Nano.16: 1661, 2022.

[2] R. Y. Zhang et al. Nano Energy. 100, 2022.

Acknowledgment

The author would like to thank the National Research Foundation (NRF) grant funded by the Korean government (MSIP) (No. RS-2025-00518552) for the financial support of this research.

교차 센서 기반 실시간 위치 감지 시스템 Cross-Sensor based Real-time Localization system

*김도형 ¹, 최경후 ¹⁺ * D.H. Kim ¹, K. Choi ¹⁺

¹ 성균관대학교 기계공학부 ⁺E-mail: kw.choi@skku.edu

Keywords: Triboelectric nanogenerator, Localization, Convolutional Neural Network

1. 서론

기존 위치 감지 센서는 한 위치를 감지하기 위해서 위치마다 센서의 신호를 계측장비에 전달할 배선이 필요하다. 이로 인해, 감지하고자 하는 면적과 해상도에 비례해 센서와 계측장비 간의 배선의 수가 매우 증가하며 센서 설치와 유지보수의 어려움을 증가시킨다. 본 연구에서는 행과 열로 이루어진 전극들의 교차를 통해 위치를 특정하여 배선의 수를 획기적으로 줄이는 시스템을 제작하였다.

2. 본론1 위치추정 방식

2.1 교차 센서 기반 위치추정

교차 센서 기반 위치추정은 행, 열, 대각 방향으로 긴 센서를 배치하여 이들의 교차점에 있는 각 센서의 ON/OFF 여부를 종합해 위치를 추정해내는 방식이다. 기존의 위치 감지 방식에 필요한 N²개의 센서를 6N개의 센서 구성으로 바꾸어 배선 공간 확보와 센서 수를 감소시켰다.

2.2 Convolutional Neural Network

Convolutional Neural Network(CNN)은 합성곱 신경망으로, 인간의 시신경을 모방한 이미지 인식의 딥러닝 기본 모델이다. 직접 데이터를 학습하고 이미지의 특징을 추출해내 이미지를 분류하는 특성을 가져 자율주행자동차, 얼굴인식과 같은 분야에 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 교차 센서 기반 위치추정 시스템에서의 거짓 위치정보를 색출해내기 위해 사용하였다.

3. 본론2 시스템 구성

교차 센서 기반 위치추정은 추정대상의 크기가 커지거나 동시다발적인 위치추정이 필요할 경우 필연적으로 교차점에서 거짓 위치정보를 생성하게 되는 문제점이 발생한다. 이를 제거하고 정확한 위치추정을 하기 위하여 가상의 보행자 위치 데이터와 그에 따른 각 센서의 활성데이터를 확보 하고 CNN 모델을 이용하여 기계학습을 진행하였다. 그림 1에는 가상의 보행자 위치 정보를 바탕으로 테스트한 센서 활성 데이터와 학습한 CNN 모델로 추정해낸 위치 데이터의 샘플이 나타나 있다.



Fig. 1. Cross-sensor based localization Sample

4. 결론 및 향후과제

교차 센서 기반 위치추정 시스템을 통해 필요한 센서의 수를 줄이고 부족한 위치추정 정확도를 CNN 모델의 기계학습을 바탕으로 수정하여 보다 발전한 위치 감지 시스템을 구현하였다. TENG 기반 센서를 이용하여 보행자의 위치추정이 가능한 매트를 제작하고, 이를 통해 실제 보행자의 연속적인 위치를 추정하는 시스템을 후속 연구할 계획이다.

후기

이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술기획 평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (20013794).

TPU-CNT 복합 열전 필라멘트 기반 3D 프린팅 EMI 차폐 필름 제작 3D Printing Based on TPU-CNT Composite Thermoelectric Filament EMI Shielding Film Fabrication

*이지훈¹, 최경후^{2+,} 최덕현^{2,3+} *J.H. LEE¹, K. Choi²⁺, D.H. Choi^{2,3+}

¹ 성균관대학교 기계공학과, ² 성균관대학교 기계공학부, ³ 성균관대학교 미래에너지공학과 ⁺E-mail: kw.choi@skku.edu, bred96@skku.edu

Keywords: 3D Printing, Thermoelectric Filament, Electromagnetic Interference, Multi-walled Carbon nanotube

1. 서론

전자기 간섭(EMI)은 전자 기기의 고밀도화와 무선 통신 기술 발전으로 인해 심각한 문제로 대두되고 있으며, 특히 의료, 항공, 군사 및 통신 산업에서 신뢰성을 확보하기 위해 효과적인 차폐 기술이 필수적이다. 현재 EMI 차폐에는 금속 소재와 전도성 폴리머가 사용되지만, 무게, 부식, 기계적 강도 등의 한계가 존재한다.

본 연구에서는 열가소성 폴리우레탄(TPU)과 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT)를 혼합하여 열전 성능을 갖춘 필라멘트를 제작하고, 이를 3D 프린팅하여 EMI 차폐 필름을 제조하는 방안을 제시한다. TPU의 유연성과 강도, MWCNT의 높은 전도성과 전자파 흡수 특성을 결합하여 차폐 성능을 극대화할 수 있으며, 3D 프린팅을 활용하면 기존 EMI 차폐 소재의 가공 한계를 극복하고, 맞춤형 차폐 설계가 가능하다.

2. 실험재료 및 3D 샘플 제작

2.1 실험재료:

3D프린팅 필러로 유연성과 기계적 강도를 동시에 갖춘 열가소성 폴리우레탄(TPU)을 사용하고, 전기적 성능을 부여하기위해 전도성 필러로 다중벽 탄소나노튜브(MWCNT)를 사용하였다.

고분자 매트릭스 내에 필러를 효과적으로 분산시키기 위해 인터널 믹서에서 220℃, 310 rpm의 조건으로 용융 혼합 하여 열전 성능을 갖춘 필라멘트를 제작하였으며, 같은 조건에서 MWCNT 함량에 따른 특성을 분석하기 위해 5~20wt%의 4가지 케이스를 제작하였다.

2.2 3D 샘플 제작

용융 혼합된 TPU/MWCNT를 펠렛화 한 후, ARTME3D Extruder 장비를 활용하여 3D 프린팅에 최적화된 필라멘트 제작을 위해 균일한 직경의 1.65mm의 필라멘트를 제작하였다.



Fig. 1. TPU/MWCNT Filament (상)5wt%, (하)10wt%

제작된 열전 필라멘트를 Bambu Lab X1C 3D 프린터 장비를 사용하여 50*20*1mm의 3d 샘플을 제작하였다.



Fig. 2. Bambu Lab X1C 3D Printer(FDM)

3. 결론 및 향후과제

3.1 결론:

MWCNT를 20wt% 혼합한 열전 필라멘트 에서 최대 595 S/cm 의 전기적 특성을 보였으며, 3D 프린팅 샘플은 MWCNT 10wt% 함량에서 60 S/cm 의 전기적 특성을 보였다.



Fig. 3. Honeycomb EMI Shielding Schematic

3.2 향후과제:

CNT 첨가로 전기 특성을 부여한 필라멘트를 활용하여 Honeycomb 구조의 Flexible EMI FILM을 제작하고, X-대역에서의 EMI effect 60dB 달성을 목표로 함.

후기

[1] 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00338055).

[2] 이 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 산업기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (20013794).

자동차 축의 회전력을 이용한 자가적응형 TENG/EMG 시스템 Self-Adaptable TENG/EMG System Utilizing the Rotational Force of a Vehicle Axle

^{*}나성민 ¹, 최경후 ²⁺, 최덕현 ^{2,3+} ^{*} S.M. Na ¹, K. Choi ²⁺, D.H. Choi^{2,3+}

¹ 성균관대학교 기계공학과, ² 성균관대학교 기계공학부, ³ 성균관대학교 미래에너지공학과 ⁺E-mail: kw.choi@skku.edu, bred96@skku.edu

Keywords: Triboelectric nanogenerator, Electromagnetic generator, Tire nanoparticle, Tire Collective

1. 서론

전기자동차는 배터리 팩의 무게로 인해 내연기관 자동차보다 무거워 타이어가 빠르게 마모되고 이로 인해 미세플라스틱이 다량 발생하는 문제를 갖고 있다. 이를 해결하기 위해 미세플라스틱을 수집하는 전극에 대한 연구가 다수 진행되고 있으며 본 연구에서는 자동차 축의 회전력을 이용해 이를 작동시키는 전력원으로 가변형 TENG/EMG을 이용하는 시스템을 제작했다.

2. 본론1 에너지 하베스팅

2.1 Triboelectric Nanogenerator

Triboelectric Nanogenerator(TENG)란 대전열상 다른 위치에 있는 두 물질의 접촉, 분리 또는 마찰로 인해 발생하는 전위 차를 이용해 전력을 생산하는 에너지 하베스팅 기술이다 [1]. TENG는 작은 진동과 외력으로도 높은 출력을 얻을 수 있으며 저주파 대역에서 다른 발전 방식에 비해 높은 출력을 보인다.

2.2 Electromagnetic Generator

Electromagnetic Generator(EMG)는 자석과 코일 간 전자기 유도현상에 의해 전력이 발생하는 발전 방식이다. EMG의 출력은 주파수의 제곱에 비례해 다른 발전 방식에 비해 고주파 대역에서 높은 효율을 보인다. 따라서 저주파에서는 TENG, 고주파에서는 EMG의 출력을 이용하는 가변형 시스템을 구성하면 넓은 주파수 대역에서 효율적인 에너지 하베스팅 시스템을 구성할 수 있다 [2].

3. 본론2 실험 구성

약 5Hz(약 60km/h 의 속력)에서 발전 방식이 TENG에서 EMG로 변환되는 가변형 에너지 하베스팅 시스템을 구성하기 위해 그림 1처럼 실험을 구성하였다. TENG는 Stator와 Rotor에 Al, FEP를 규칙적으로 배열해 구성했으며 EMG는 Stator와 Rotor를 각각 코일과 자석으로 구성하였다. TENG 디스크와 EMG 디스크를 모터와 연결된 축에 장착해 모터에 의해 TENG와 EMG의 Rotor가 회전한다. 회전속도가 증가함에 따라 원심력에 의해 디스크와 스프링으로 연결된 자석이 바깥 방향으로 밀려나고 이에 의해 발전 모드가 TENG에서 EMG로 변환되는 구조를 제작했다. 이를 통해 5Hz 미만인 저주파 대역에서는 TENG를 통해 회전에너지를 효과적으로 전기로 변환하고 5Hz 이상인 고주파에서는 EMG를 통해 효과적으로 전기를 변환했다.



Fig. 1. Experimental setup

4. 결론 및 향후과제

원심력을 이용해 약 5Hz를 기준으로 저주파 대역에선 TENG, 고주파 대역에서는 EMG로 전력을 생산하는 가변형 에너지 하베스팅 시스템을 제작했다. 본 연구의 목표 출력인 80km/h 기준 4mW/cm²을 달성했으며 향후 이 시스템을 타이어 미세플라스틱 수집 전극의 작동 전원으로 활용하는 시스템을 구성할 것이며 이를 위해 하베스팅 시스템의 최적화, 미세플라스틱 수집 전극 물질에 대한 후속 연구를 진행할 계획이다.

참고문헌

[1] D Choi et al. ACS Nano. 17:11087-11219, 2023
[2] Y Zi et al. ACS Nano. 10:4797-4805, 2016.

후기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연 구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00338055). 이 연구는 2025년도 산업통상자원부 및 산업기술기획 평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (20013794).

2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회 2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

친환경 제독제 제독성능향상을 위한 MOF와 건식 첨가물의 복합화

조해찬^{1,†}, 오승현 ¹, 진영호^{1,}

* Hae Chan Cho¹, Seung Hyeon Oh¹, Young Ho Jin^{1,*}

¹ 중앙대학교 대학원 첨단소재부품학과, ⁺E-mail: gocks9570@cau.ac.kr

Keywords: UiO-66-NH2, UiO-66-NH2@CNT, Synthesis, Decontamination, CWAs

1. 서론

현재 전세계적으로 화학무기에 대한 위협이 증가하고 있으며 이에 따른 제독제 개발이 중요해지고 있으며 현재 군에서 사용중인 제독제의 경우 장비 부식, 환경오염등 문제점을 가지고 있어 이를 보완하기위해 친환경적인 제독제를 만들기위해 연구하였으며 제독제에 부가적인 특성을 부여함과 동시에 제독 성능을 향상시키기 위해 건식 첨가물들을 첨가하는 연구를 하였습니다.

2. 실험

2.1 재료

ZrCl4, NH2BDC, DMF, Acetic acid, Aceton, pNPDPP, Malathion, GD(Soman), HD(mustard gas), VX(?) Hexane, TBP, Decontaminants composition(Carbonate, H2O2

2.2 MOF와 첨가물 선정 이유

Zr 기반 MOFs는 매우 높은 표면적과 우수한 기계적, 열적, 가수분해 안정성 덕분에 CWAs의 촉매 분해에서 각광받고 있기 때문에 본 연구에서는 Zr based MOF 들 중 UIO-66-NH2 MOF를 선정하였으며 부가적인 특성을 부여하기 위해 CNT와 TiO2를 복합화 하였으며 CNT의 경우 촉매향상 효과와 Photo-thermal effect를 통해 제독을 촉진하고자 복합화하였으며 Photothermal, Photo-catalytic effect를 선정하였으며 UIO의 자체 제독능력과 함께 광부가특성을 통해 제독성능을 향상시키고자 하여 선정되었습니다.

두번째로 TiO2의 경우 촉매향상 효과와 Photo-catalytic effect를 통해 제독을 촉진하고자 첨가하였으며 UIO와 복합화하여 UIO제독능력을 향상시키는 촉매향상제 로써 TiO2가 복합화 하였으며 유사작용제와 실작용제 를 통해 제독성능을 검증하였습니다.

2.3 제독성능 평가법

제독성능을 평가하기위해 유사작용제를 사용하였으 며 유사작용제로는 G계열의 유사작용제로 DMMP, pNPDPP 등을 사용하였으며, H계열의 경우 2-CEPS, 2-CEES를 사용하였고, V계열의 경우 Malathion을 사용하였습니다.

결과는 GC-FID 를 통해 측정 되었습니다.

3. 결과

MOF의 결정성 확인을 위해 SEM, TGA, XRD를 측정하였으며 전반적으로 CNT의 표면에 UIO인 MOF가 성장이 되어 CNT와 복합화하였을 때 더욱 좋은 분산도를 가집니다.



Fig. 1) SEM(Scanning electron microscopy) images UIO-66-NH2, 2) UIO-66-NH₂@CNT

Number	Types
1	SEM about UIO-66-NH ₂
2	SEM about UIO-66-NH ₂ @CNT

4. 결론 및 향후과제

UIO-66-NH₂ 자체적으로 제독 성능이 있으며 친환경적이며 CNT와 TiO2와 복합화하여 부가적인 Photo-thermal, Photo-catalytic effect를 이용하여 제독 성능 향상에 도움을 주었으며 추후 다른 물질인 MoS2, Cellulose 또는 수산화기가 많은 물질과 복합화하여 사용할 수 있을 것으로 예상됨.

참고문헌

- Zhong-Zhen Yu. Photothermal graphene/UIO. 12p, 2020. Hazardous Materials
- [2] Sam Gon Ryu. Availability of Zr-Based MOFs. Volume 274, 15 .2019, Microporous and Mesoporous Materials
- [3] Kyung-Youl Baek. Robust Nanocellulose/Metal–Organic Framework Aerogel Composites. ACS Appl. Mater. Interfaces 2021, 13, 33516–33523

후기

추후에도 화생방 무기에 대응하는 좋은 제독제를 만들수 있는 발판이 되며 친환경적인 제독제도 이정도의 성능을 만들수 있으며, 다양한 부가 특성을 통해 앞으로도 다양한 특성의 제독제를 개발할수 있는 좋은 기회를 널리 알려줄 수 있으며, 포스터를 발표하며 더욱 성장할 수 있는 기회라 생각합니다.

이소시아네이트 개질 된 CNF 필러가 경질 폴리우레탄 폼의 압축 강도에 미치는 영향

Effect of Isocyanate-Modified CNF Fillers on the Compressive Strength of Rigid Polyurethane Foams

*전정담^{1, 3}, 이아정¹, 고영상¹, 신영은¹, 박주영¹, 권구민², 김정훈², 성동기³, 박태훈¹⁺ * J.D. Jung¹, A.J. Lee¹, Y.S. Ko¹, Y.E. Shin¹, J.Y. Park¹, G.M. Kwon², J.H. Kim², D.G. Sung³, T.H. Park¹⁺

¹ 한국재료연구원 융·복합재료연구본부 ² 연세대학교 유·무기합성반응연구실, ³ 부산대학교 고분자복합재료연구실 ⁺E-mail: thpark@kims.re.kr

Keywords: Polyurethane foam, Cellulose nanofiber, Composites

1. 서론

폴리우레탄 폼(PUF)는 단열재, 충격 흡수재 및 구조재 등 다양한 산업 분야에서 널리 사용되며, 기계적 성질 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다[1,-2]. 그러나 현재까지 개발된 상업용 PUF는 물성 향상에 한계가 있으며, 이를 극복하기 위해 나노 필러를 활용한 나노복합재 개발이 중요한 연구 방향으로 주목받고 있다. 특히, 친환경적이고 경량화 된 소재로의 전환이 요구됨에 따라. 바이오 기반 강화제 및 기능성 나노필러의 도입이 폴리우레탄 복합재의 물성 개선을 위한 핵심 전략으로 부각되고 있다. 셀룰로오스 기반 소재는 우수한 기계적 강도로 인해 PUF의 강화제로 활용될 수 있으며[3], 폴리우레탄의 물성을 결정하는 중요한 요소이다. 본 최종 연구에서는 셀룰로오스 나노 섬유(CNF)의 OH 그룹을 toluene diisocyanate (TDI) 또는 hexamethylene diisocyanate (HDI)와 반응시켜 개질 된 CNF-Isocyanate 필러를 제조하여 PUF에 첨가하였다. CNF-Isocyanate 합성 반응 시간과 이소시아네이트 종류에 따른 물성 차이를 평가하였으며, thermogravimetric analysis (TGA), Fourier transform infrared (FTIR)를 측정하여 PUF의 기계적 성질에 미치는 영향을 분석하고, 그 상관관계를 명확하게 규명하는 것을 목표로 한다.

2. 실험 방법

2.1 첨가제 제조

셀룰로오스 원 소재를 증류수에 분산 시켜 고압 균질화 한분산액을 각각 TDI (2,4-toluene diisocyanate), HDI (Hexamethylene diisocyanate)와 반응 시켜 CNF-TDI, CNF-HDI 파우더를 얻었다.

2.2 우레탄 폼 제조

물리적 발포제가 첨가되어 있는 폴리올에 함량 별로 필러를 첨가한 후 사슬 연장제, 정포제, 촉매를 첨가하여 1400 rpm 에서 5분 동안 섞은 뒤, 동일한 rpm으로 3분간 탈포 과정을 거친다. 마지막으로 polymeric methylene diisocyanate (pMDI)를 첨가한 뒤 교반기를 이용하여 10 초간 5000 rpm으로 빠르게 섞은 후 종이 몰드 (11x11x2.5 cm³)에 발포 시켰다. 발포는 약 10초 후에 시작되어 전체 과정은 100초 이내에 종료 되었다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 이소시아네이트 종류 및 반응 시간에 따른 이소시아네이트 개질 된 CNF를 폴리우레탄폼에 첨가하여 비압축강도를 통해 이소시아네이의 화학 구조와 반응성이 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과, CNF-HDI가 첨가된 우레탄 폼은 Neat 대비 높은 압축 강도를 보였으며, 반응 시간이 증가할수록 강도가 증가하였다. 이는 CNF와 HDI와 합성할 때 장시간 반응 시 urea, biuret, allophanate 등의 부가 반응이 촉진되어 추가적인 가교 결합이 형성되었기 때문이다[3].

일반적으로 TDI는 방향족 구조로 인해 높은 강도를 나타내지만, 본 연구에서는 HDI 기반 우레탄 폼에서 반응 시간이 증가함에 따라 부가 반응이 활성화되면서 최종적으로 더 높은 비압축강도를 나타냈다.





2025년 한국복합재료학회 춘계학술대회

2025 Spring Conference of the Korean Society for Composite Materials

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 이소시아네이트로 개질 된 필러를 활용하여 이소시아네이트 종류 및 반응시간이 경질 우레탄 폼의 비압축강도에 미치는 영향을 평가하였다. 실험 결과, HDI 기반 PUF는 반응 시간이 증가할수록 비압축강도가 향상되었으며, 특히 HDI 24시간 조건에서 가장 우수한 기계적 성질을 나타냈다. 이는 HDI의 장시간 반응이 추가적인 가교 형성을 촉진했기 때문으로 판단된다. 추후 부가 반응(urea, biuret, allophanate) 정도를 증명하기 위해 potentiometric titration 분석을 수행 할 예정이며, 이를 통해 이소시아네이트 구조와 반응 시간이 PUF의 기계·화학적 특성에 미치는 영향을 종합적으로 입증하고자 한다.

참고문헌

- [1] Septevani et al. *Ind. Crops rod.* 10.1016/j.indcrop. 2019.01.034,2019
- [2] Zhou et al., Polym. Chem. 10.3390/polym16152119, 2024
- [3] Li et al. Front. Chem. 10.3389/fchem.2019.00562, 2019
- [4] Ju et al. *Polymers*, 10.3390/polym15061499, 2023

후기

본 연구는 한국재료연구원 주요사업(PNKA320)의 지원 으로 수행되었습니다.

실란 증착을 통한 고정밀 금 나노입자 수소/이산화탄소 분리막 Precise H₂/CO₂ Gas Sieving using Gold Nanoparticle Membrane by Silane Deposition

*김기표¹, 임준상¹, 전재환¹, 이민기¹, 임병권¹⁺ * G. Kim¹, J. Lim¹, J. Jeon¹, M. Lee¹, B. Lim¹⁺

> ¹ 성균관대학교 신소재공학과 ⁺E-mail: blim@skku.edu

Keywords: Gas separation, Nanoparticle Membrane, Post-synthesis functionalization

1. 서론

기체 분리막은 에너지를 많이 소모하는 기존의 분리 공정을 대체할 수 있는 유망한 소재이다. 그러나 기존의 분리막은 유사한 크기를 가진 기체에 대해 낮은 분리 선택성을 보인다. 본 연구에서는 소형 기체의 정밀한 분리가 가능한 금 나노입자 분리막을 소개한다. 실란 분자 증착을 통해 금 나노입자 분리막에 기체 분리 특성을 부여하였으며 서브옹스트롬 수준의 선택성을 지닌다.

2. 실험 방법

2.1 금 나노입자 분리막 합성 및 실란 기상 증착

Tetrachloroauric acid 와 amino octanoic acid를 증류수에 녹인 후, 상온에서 1시간 반응하여 금 나노입자 분리막을 합성하였다. Polycarbonate 기판으로 옮긴 후 상온 건조하여 분리막을 획득하였다.

Vacuum chamber에 건조된 금 나노입자 분리막 및 trichloro(3,3,3-trifluoropropyl)silane 0.1 ml 를 넣은 후 진공 상태로 만들고 60℃에서 10분 반응하여 기상 증착을 진행하였다.



Fig. 1. 금 나노입자 분리막 의 a) 합성 과정, b) 실란 기상 증착 실험. c) 실란 증착 매커니즘

3. 실험 결과

실험 결과, 수면 위에서 투명한 금 나노입자 분리막이 형성되었다. TEM 관측 결과 수많은 금 나노입자들이 분리막을 구성하였고, 입자들 사이로 나노미터 크기의 공간이 존재하였다. FTIR 분석을 진행하였으며, C-F, Si-O 피크를 통해 실란이 성공적으로 증착 되었음을 확인하였다.



Fig. 2. 금 나노입자 분리막 의 a) 사진, b) TEM 사진. c) 실란이 증착된 금 나노입자 분리막의 FTIR 그래프

금 나노입자 분리막의 기체 투과도 실험 결과, knudsen diffusion에 따라 기체의 분자량 증가시 투과도가 감소하는 결과를 얻었다. 실란 증착 시 이산화탄소가 거의 투과되지 않았으며, 이는 실란 증착으로 인해 분리막의 기공 크기가 감소하여 투과도가 감소한 것을 보인다. 또한 투과 압력이 증가함에도 불구하고, 수소 및 이산화탄소의 투과도는 크게 변하지 않았으며, 20이 넘는 높은 선택성을 보였다.



Fig. 3. 금 나노입자 분리막의 실란 증착 전후 기체 투과도 그래프

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 높은 선택성을 갖춘 새로운 유형의 기체 분리막으로서의 잠재력을 입증하였다.

참고문헌

[1] N. Kwon et al. Nanolett, 25:1870-1875, 2025.

후기

본 연구는 한국연구재단 (RS-2022-NR070167)의 지원으로 진행되었습니다.

Multifunctional Interface Engineering for Large-Area Vacuum-Deposited

Perovskite Solar Cells with Air Annealing

*Shimiao Su¹, Zhiliang Chen², Liman Hao³, Xingze Xu⁴, Tae kyu Ahn¹⁺, and Yun Yang⁴⁺

¹ Department of Energy Science, Sungkyunkwan University, Suwon, ² Information Materials and Intelligent Sensing Laboratory of Anhui Province Anhui University, ³ School of Medicine, Zhejiang University, ⁴School of cyber science and engineering Ningbo University of Technology

⁺E-mail: yunyoung@nbut.edu.cn

Keywords : air-based fabrication, interface defects, multifunctional modifier, perovskite solar cells,

1. Introduction

Vacuum deposition and air annealing are key for scalable perovskite solar cells (PSCs), ensuring control and reproducibility[1]. The large-area devices we fabricated using sequentially deposited perovskite on modified substrates achieved a power conversion efficiency of 18.76%. Stability tests showed that the modules retained 93.3% of their initial efficiency after 1200 hours.

2. Method of approach

2.1 Materials: lead iodide (PbI₂, 99.999%), Formamidinium iodide (FAI, 99.9%), Lead chloride (PbCl₂, 99.999%), and Caesium chloride (CsCl, 99.995%)

2.2 Methods: The FTO glass was soaked into the $SnCl_2 \cdot 2H_2O$ solution in a drying oven at 90 °C for 4 hours. The substrate was sequentially washed four times with deionized water and ethanol, then dried using a gas gun. Subsequently, it was annealed at 160 °C for 60 minutes.

Each material was deposited separately. During perovskite deposition, the chamber pressure was maintained at ~4 × 10^{-4} Pa. When the target thickness was reached, the evaporation source shutters were closed, and the heating current was turned off. The deposition rates were 0.8 Å/s for PbI₂, 0.7 Å/s for CsI, and 0.8 Å/s for PbCl₂. After depositing the lead halide layer, the substrate was transferred to a separate vacuum chamber, where 600 mg of FAI was deposited at 0.5 Å/s. The final film thickness was ~650 nm. The samples were then exposed to ambient air (30% RH) and annealed at 170°C for 15 min.

3. Results and Discussion



Fig. 1. Schematic illustration of the ETL modification.



Fig. 2. Characterization of the modified ETL.



Fig. 3. Perovskite module fabrication and performance.

4. Conclusions

This study highlights the potential of the modified molecule for enhancing the performance and stability of vacuum-deposited perovskite solar cells, driving the commercialization process.

References

[1] A. Paliwal et al. Matter, 2023, 6:3499-3508.

Acknowledgement

National Natural Science Foundation of China (62405004)
Design of a Protective Layer to Mitigate Self-Corrosion in Aluminum Anodes for Aluminum-Air Batteries

Yen Linh Nguyen¹, Sunhyeong Kwon² and Hyung Mo Jeong^{1,2}

¹Department of Smart Fab. Technology, Sungkyunkwan University, 2066 Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon, 16419, Republic of Korea ²School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, 2066 Seobu-ro, Jangan-gu, Suwon, 16419, Republic of Korea *E-mail: hmjeong@skku.edu (Prof. Hyung Mo Jeong)

Keywords : Aluminum-air batteries, Aluminum anode corrosion, Protective layer

1. Introduction

Aluminum-air batteries (AABs) are promising energy storage and conversion systems due to their high theoretical energy density, cost-effectiveness and abundant reserves.[1, 2] However, their practical application is hindered by severe self-corrosion and passivation of the aluminum anode in alkaline electrolytes, which reduce efficiency and shorten battery lifespan. [3] To overcome this challenge, a protective coating layer has been introduced to modify the aluminum anode surface, mitigating unwanted side reactions while preserving efficient electrochemical activity. This study presents a novel approach to mitigating anode degradation and improving battery performance by engineering a functional protective layer through a simple fabrication process.

2. Surface Engineering for Enhanced Anode Stability

A controlled surface engineering approach is used to optimize the electrochemical properties of the aluminum anode. A protective layer is formed through a typical coating technique to ensure a homogeneous and porous structure. This layer reduces self-corrosion by reducing the formation of passive by-products that hinder battery performance. The effectiveness of this engineered surface is evaluated through structural characterization and electrochemical testing.

3. Results and Discussion

The electrochemical performance evaluation demonstrated the significant impact of the protective coating on the aluminum anode. As seen in the open circuit voltage, the coated aluminum maintained a higher and more stable voltage over time, while the bare aluminum exhibited a rapid voltage drop due to severe passivation and selfcorrosion. The electrochemical impedance spectrum showed a larger charge transfer resistance for the coated anode, indicating better parasitic reaction inhibition and improved ion transport regulation. In addition, the polarization analysis in the 3-electrode system showed a positive shift in the corrosion potential and a lower corrosion current density, confirming the enhanced corrosion resistance. When measuring the durability at 50 mA cm⁻², the coated sample could operate for up to nearly 10 hours while the bare sample died after about 4 hours of operation. Morphological characterization further supports these findings, with SEM images of the coated sample after 10 hours of operation showing that the porous structure retains its original structure, facilitating stable ion diffusion. Together, these improvements contribute to superior discharge performance, long-term operational stability, and enhanced performance for high-power aluminum-air battery applications.



Fig. 1. Electrochemical performance of AABs protective layer.

4. Conclusions

The implementation of a protective layer for the aluminum anode in aluminum-air batteries effectively reduces selfcorrosion and enhances the electrochemical performance. By using surface engineering techniques, the modified anode achieves superior stability and performance, paving the way for the development of high-performance AABs suitable for energy storage applications. The findings of this study provide a strategic framework for optimizing anode materials in metal-air batteries.

References

- [1] E Faegh et al. Nat Energy 6: 21–29, 2021.
- [2] B Rani et al. RSC Advances 14: 17628, 2024
- [3] AP Sinha et al. Energy Storage Materials. 63: 102988, 2023.

Acknowledgement

This work was supported by the Technology Innovation Program (20013794, Center for Composite Materials and Concurrent Design) funded By the Ministry of Trade, Industry & Energy(MOTIE, Korea).



남들과 비교할 수 없는 단 하나의 혁신. 산업을 연결하여 밝은 미래를 만들어 갑니다.

가볍고 견고한 복합소재는 혹독한 우주 환경으로부터 기술을 보호하며 우주 개척의 무한한 가능성을 제시합니다.

복합기능을 구현하는 <mark>소재</mark> 혁신. 세계를 넘어 우주로 나아갑니다.

www.hcarbon.com

Link to a Lighter Future

E)

R



대한민국의 하늘, 대한항공이 책임집니다.



┃ 저피탐 무인편대기 비행시제 1호기 출고식 ('25.2.25)





탄소소재 및 복합재 기초 이론에서부터 탄소복합재 설계, 해석, 성형 공정실습까지 무료로 가능합니다.





GV60 TAKE YOUR WONDER FURTHER



GV60 RWD 19인치:복합5.1km/kWh(도심5.6km/kWh, 고속도로4.6km/kWh) | CO: 배출량:0g/km | 1회 충전 주행거리:복합431km | 측전기 정격전입/용량:697V/120.6Ah | 공차중량:2,020kg | 2등급 GV60 4WD 19인치:복합4.6km/kWh(도심5.6km/kWh, 고속도로4.2km/kWh) | CO: 배출량:0g/km | 1회 충전 주행거리:복합437km | 측전기 정격전입/용량: 697V/120.6Ah | 공차중량:2,130kg | 3등급 GV60 4WD 20인치:복합 4.4km/kWh(도심4.7km/kWh, 고속도로4.1km/kWh) | CO: 배출량:0g/km | 1회 충전 주행거리:복합415km | 측전기 정격전입/용량: 697V/120.6Ah | 공차중량:2,140kg | 3등급 GV60 4WD 21인치:복합 4.4km/kWh(도심4.7km/kWh, 고속도로4.1km/kWh) | CO: 배출량:0g/km | 1회 충전 주행거리:복합382km | 측전기 정격전입/용량: 697V/120.6Ah | 공차중량:2,140kg | 3등급 GV60 성능형 4WD 21인치:복합 4km/kWh(도심4.3km/kWh, 고속도로3.6km/kWh) | CO: 배출량:0g/km | 1회 충전 주행거리:복합382km | 측진기 정격전입/용량: 697V/120.6Ah | 공차중량:2,190kg | 4등급

더 자세한 정보는 제네시스닷컴에서 확인해 보세요.

※ 위 연비는 표준모드에 의한 연비로서 도로상태.운전방법,처랑적제,정비상태에 및 외기온도에 따라 실주행연비의 차이가 있습니다. ※ 해당 처랑은 고용량 바테리가 탑재되는 전기차의 특성상 내연기관 모델 대비 중량이 증가하므로, 국내 기계식 주차장 규격 고려 시 기계식 주차장 주차가 불가할 수 있습니다.

제네시스는 지점/대리점의 카마스터를 통해서만 판매하며, 전국 어느곳에서나 같은 제품 같은 가격으로 바른 거래를 실천하고 있습니다 | 구입문의 및 고객센터 080-700-6000



자율주행 자동차

4차 산업학명을 상징하는 또다른 가슴 자율주행 자동차업시다 인전한 자율주행을 위해서는 해킹이나 주면 전재미상의 흔등을 받지 해야 합니다. 전지미 간섭을 방지하는 치뷰(Blocking)가술에도 여폭시 시스템이 작용됩니다.



KUKDO 1 2 3 4 5 6 7 8

KUKDO
1 2 3 4 5 6 7 8

자동차 부품

1 2 3 4 5 6 7 8

🛞 KUKDO

자세히보면 일상기까이에있습니다. 오래보면 산업을바꾸는혁신소재죠 국도제품이 그렇습니다.



바이오 소재 역사 국도화력이 끊었값이 개발 중인 소재입니다. 원료를 바이오 물질로 대북하는 바이오 예목시는 지속 가능 성장을 추구하는 국도화학의 꿈을 현실로 앞당기고 있습니다.



🏶 KUKDO



4차 산업혁명, 에폭시가 준비하는 미래

Vision 2050! Clobal Top 7 달성을 위한 KAI의 도전은 계속됩니다.



www.kotiti-global.com

Best way to find solution

KOTITI시험연구원은 60년이 넘는 세월의 기술과 노하우를 통해 기업의 든든한 동반자로서 함께 해왔습니다. 빠르게 변화하는 산업에 발맞춰 앞으로도 고객의 가치 창출을 위해 최선을 다하겠습니다



- 저온 및 고온 상태에서의 기계적 성질 평가 (온도 챔버)





CONTACT US

경기도 과천시 과천대로7나길 48 KOTITI Aurora Square I Tel. 02-3451-7000 I Fax. 02-3451-7170

경기도 평택시 청북읍 드림산단로 122 KOTITI E-MOBILITY CENTER | Tel. 02-3451-7000 | Fax. 02-3451-7127



- Tel. 031-366-4602
- Fax. 031-366-1513
- E-mail: master@elimdmp.com
- Homepage: www.elimdmp.com
- 화성 본사: 경기도 화성시 장안면 석포로 348-18
- 송도 지사: 인천광역시 연수구 송도미래로 30, 송도스마트밸리 A동 801호



SPECIALTY POLYMERS

TORLON[®] PAI **KETASPIRE[®] PEEK** RADEL[®] PPSU HALAR[®] ECTFE

COMPOSITE MATERIALS

MTM SOLVALITE®

СҮСОМ **EVOLITE**[®]

MX APC

BONDING TECHNOLOGIES

AEROPASTE[®] SURFACE MASTER

FM **FUSEPLY**[®]





미래로 세계로 우주로 한국화이바가 SPACEPRO로 재도약 합니다

앞서간 50년을 미래의 100년으로. 스페이스프로 www.spacepro.co.kr



제8회 한국도레이 과학기술상 및 펠로십 공모

2025.4.1(화) - 6.30(월)

한국 과학기술의 미래를 이끌어 갈 **인재**를 모십니다!

www.koreatoraysf.org

홈페이지 응모서류 다운로드 및 이메일 접수 시상 2025년 10월 예정 문의 사무국 02-3279-1032, 1100



한국도레이 과학기술상

- 대상 대한민국 국적으로(이중국적자 제외) 국내 대학, 연구기관 등에 소속된 분으로
 - 세계적 수준의 연구업적, 현저한 발견, 기술의 진보를 주로 국내에서 이룩한 과학자/공학자로
 - 소속된 기관에서 전일제(Full-time job)로 근무하는 분
- 분야 화학 및 재료 기초분야 1명 • 화학 및 재료 응용분야 1명 [}]종 2명
- 포상 •각 분야별 상금 1억원 및 상패

한국도레이 펠로십

- 대상 대한민국 국적으로(이중국적자 제외) 국내 대학, 연구기관 등에 소속된 분으로
 - 화학 및 재료 분야에 종사하는 과학자/공학자로 모집공고일 기준 관련분야 박사학위 취득 후 10년 미만인 분(2015년 7월 1일 이후 취득자)
 - 해당 과제의 타 기관 지원 이력이 없는 분으로 (중복지원 불가)
 - 소속된 기관에서 전일제(Full-time job)로 근무하는 분
- 분야 화학 및 재료 기초분야 2~3명 • 화학 및 재료 응용분야 2~3명 * 5명(또는 팀)
- 지원 과제별 최대 5천만원/년, 최대 3년 지원



공익법인 한국도레이과학진흥재단은 과학의 발전과 인재 육성을 위해 노력하고 있습니다.



본 사업은 기획재정부의 복권기금 및 과학기술정보통신부의 과학기술진흥기금으로 추진되어 사회적 가치 실현과 국가 과학기술 발전에 기여합니다.