
제7 발표장

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: bs.kwak@gnu.ac.kr

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 pitch-based 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.

$$TC = \alpha \cdot \rho \cdot Cp \quad (1)$$

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 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 효과가 뚜렷하게 나타났다. 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 글로벌 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 Composite의 열적 · 기계적 특성 평가 Evaluation of the Thermal and Mechanical Properties of Cu-Coated Carbon Fiber/Epoxy Composite with Stitching Process

이민주¹, 심소휘¹, 곽병수^{1}

* M.J. Lee¹, S.H. Sim¹, B.S. Kwak^{1*}

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, Cu-coated 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

Type	Specimen ID	Stacking sequence
Cu-coated CFRP	0%	[CF] ₈
	50%_1	[CF ₂ /CCF ₂] ₈
	50%_2	[CCF ₂ /CF ₂] ₈
	100%	[CCF] ₈

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.

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 섬유 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 증가할수록 인장강도가 감소하였다. 이는 Stitching으로 발생한 Composite laminate의 기계적 파손이 인장강도를 저하시킨 것으로 분석하였다.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 PAN-based carbon fiber에 고열전도도 소재인 구리를 코팅하고, pitch-based carbon fiber를 두께 방향으로 삽입한 고열전도도 복합재를 제안하였다. Cu-coated CFRP의 적층 비율 및 stitching density의 증가에 따라 열적 물성은 상승하고, 기계적 물성이 저하되는 경향을 확인하였다. 향후 위성 적용을 고려하여 열진공 챔버를 이용한 Stitching된 Cu-coated CFRP의 우주 환경 적합성 평가를 수행할 예정이다.

참고문헌

- [1] Yanko et al. *Transactions on Aerospace Research*. 1-10, 2021.
- [2] AbubakarGamboMuhammadl. MelikasihUniversity, 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

이우주¹, 유재현¹, 지성하², 주현우², 곽병수^{1}

* W.J. Lee¹, J.H. Yoo¹, S.H. Ji², H.W. Ju², B.S. Kawk^{1*}

¹ 경상국립대학교 기계항공우주공학부, ² 한국항공우주산업 주

* E-mail: bs.kwak@gnu.ac.kr

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 $\pm 8\%$ 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 영역에서는 주름이 발생하지 않았으며, 결함을 정확히 예측함으로써 유한요소해석의 타당성을 확인하였다.

참고문헌

- [1] BE Lee et al. *Mater Trans.* 27:60-65, 2018.
[2] 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 경상국립대학교 글로벌대학 30사업에 의하여 수행된 연구입니다.

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

*강윤주¹, 지성하², 주현우², 곽병수¹⁺

* Y.J. Kang¹, B.S. Kwak¹⁺

¹ 경상국립대학교 기계항공우주공학 ² 한국항공우주산업(주)

⁺ 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.

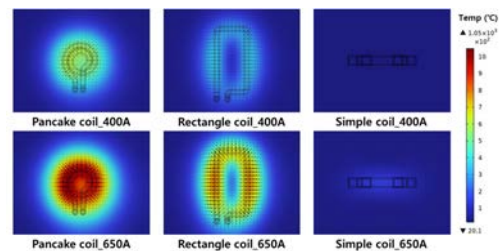


Fig. 1. Simulated heating behavior of CF/PPS

3. 결과 및 분석

발열 거동 평가 결과, Pancake coil이 가장 균일한 발열 분포를 보였으며, 동시에 가장 높은 온도에도달하였다. 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.

후기

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(RS-2024-00397400) 과 2025년도 경상국립대학교 글로벌대학30 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 기체 확산층 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 기반 (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 연구에서는 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.

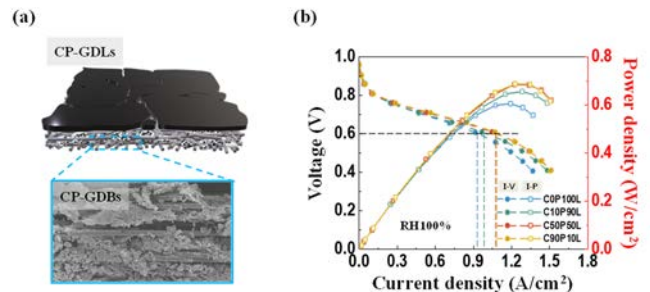


Fig. 1. (a) Structure and schematic of CP-GDLs, (b) performance evaluation of PEMFC using CP-GDLs as cathode GDL

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

- [1] X.Z. Yuan et al. *J. Power Sources*. 491:229540, 2021.
- [2] 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 (주)ANH Structure

³ (주)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 (주)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°C에서 120분, 압력은 3.1bar를 가하였다.

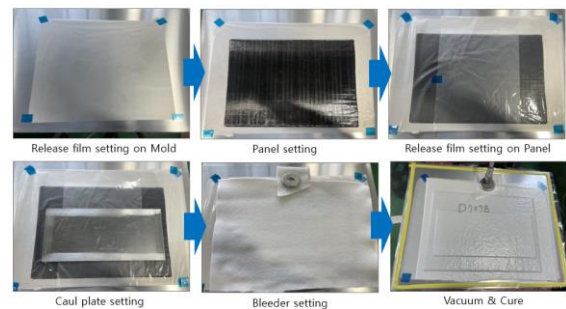


Fig. 2. Process of Panel Cure.

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 이형지와 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

- [1] 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: ypark@unist.ac.kr

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.

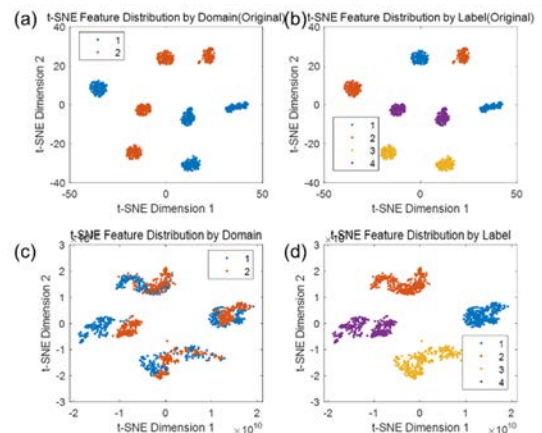


Fig. 2. t-sne feature distribution by original features classified by (a) domain and (b) label and by after domain adaptation classified by (c) domain and (d) label

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 Suhr^{1}

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.

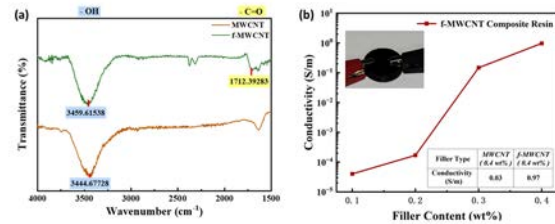


Fig. 1 . (a) FT-IR spectra of the fillers; (b) Electrical conductivity at different f-MWCNT contents.

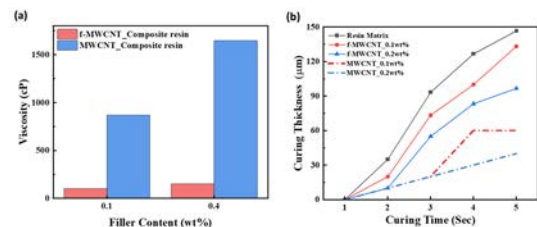


Fig. 2 . (a) Viscosity of different contents and types of filler at a shear rate of 1 s^{-1} ; (b) Curing thickness of composite resins with different time.

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, 서종환^{1}
* S. Kim¹, M.-K. Kim¹, J. Kim¹, T. Kim¹, K.H. Shin², J. Suhr^{1*}

¹ 성균관대학교 기계공학과, ² (주)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]. 그림부 파손을 방지하기 위해 시편 양끝에 알루미늄 탭을 부착한 뒤에 시험하였다.

3. 시험 결과 분석

고속 인장 시험 시 동적 응력-변형률 상태에 도달했는지 확인하기 위해, 1차원 응력-변형률 이론을 적용하였다.

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = 3.464 \text{ m}/\mu\text{s} \quad (1)$$



Fig. 1. Test setup (Courtesy KCarbon).

응력파가 표점 거리를 왕복하는데 약 $20\mu\text{s}$ 가 걸리며 파단까지 최소 10회 이상 왕복했으므로, 파단 전에 동적평형 상태에 도달했다고 볼 수 있다[2,3].

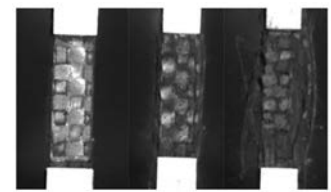


Fig. 2. Image result.

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

- [1] Brown, K.A. et al. *Compos Sci Technol*, 70:272-283, 2010.
- [2] Zhang, X. et al. *Compos. Part B: Eng*, 164:524-536, 2019.
- [3] 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: jimin9909@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

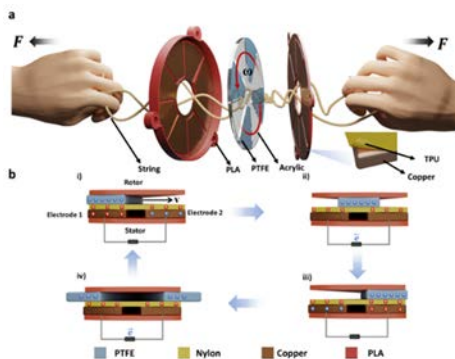


Fig. 1. (a) The schematic image of SD-TENG (b) The mechanism of SD-TENG.

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

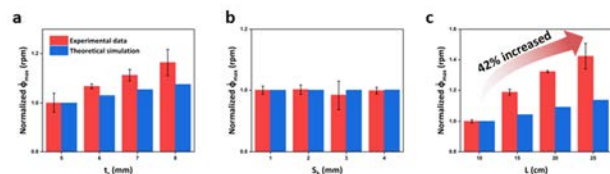


Fig. 2. The comparison between theoretical and experimental analysis with respect to (a) string radius, (b) spacing between holes, and (c) string length

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

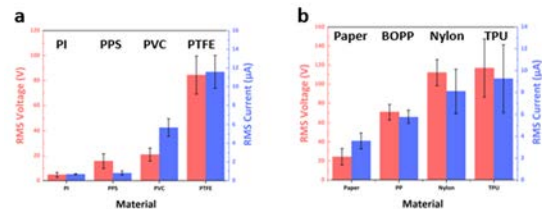


Fig. 3. The RMS output comparison by (a) positive materials and (b) negative materials

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: kw.choi@skku.edu, bred96@skku.edu

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 cost-effectiveness. 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 μm 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

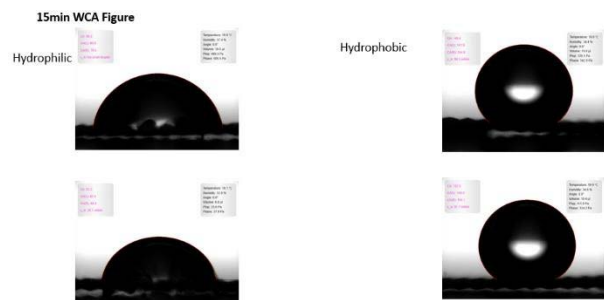


Fig. 1. After HDFs, stainless mesh became more superhydrophobic and contact angle improved significantly.

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	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 %

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

Table 2. Tensile test failure mode results

Specimen	Film	Failure Mode (EA)
UD	X	Skin failure and core failure (3) Core failure and adhesive failure (7)
3K	X	Core failure (10)
6K	X	Core failure and adhesive failure (10)
12K	X	Core failure (10)
UD	O	Core failure (10)
3K	O	Core failure (10)
6K	O	Core failure (10)
12K	O	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.

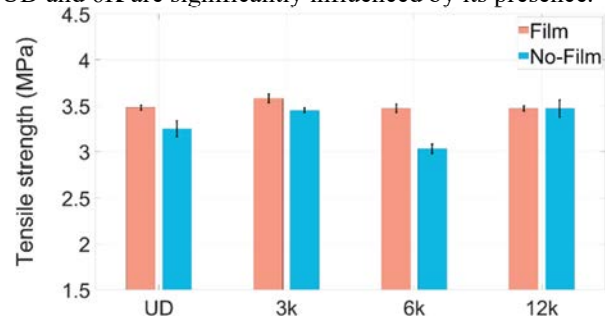


Fig. 1. Tensile test strength results.

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

- [1] 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: rhdl213@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.

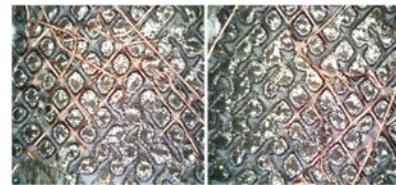


Fig.1. Photographs of the interface after failure

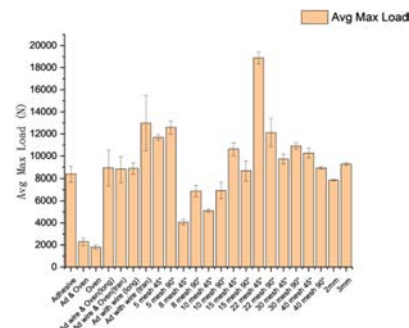


Fig.2. Maximum load during single-lap shear testing

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 fiber-reinforced 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 propose 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

2.1 Design and mechanism

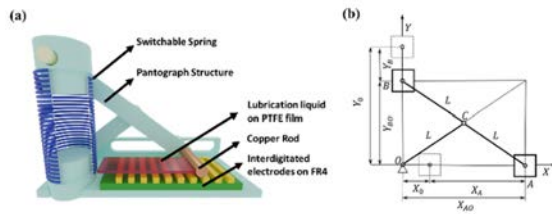


Figure 1. (a) Schematic image of MR-TENG (b) kinematics of MR-TENG

MR-TENG has two main parts: force conversion and signal generation. The force conversion part uses a four-link 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

$$x = Y_0 + \sqrt{Y_0^2 - 2X_0X_A - X_A^2} \quad (1)$$

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.

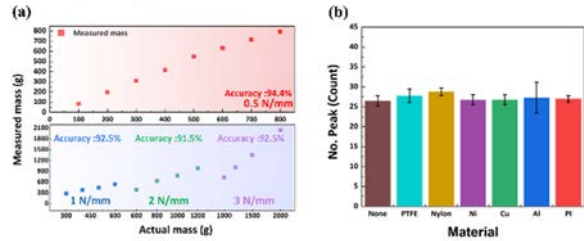


Figure 2. (a) Measured force by MR-TENG and accuracy (b) Number of peaks difference by contacting Materials

2.3 Tactile sensing

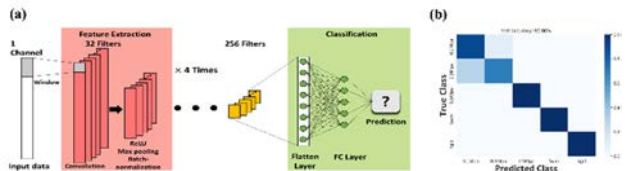


Figure 3. (a) Architecture of 1D-CNN (b) Confusion matrix of Tactile recognition

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 material-resistance. 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

손기영¹, 정지훈^{2}
G.Y. Son¹, J.H. Chung^{2}

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 0.87 μ A의 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 0.87 μ A에 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.

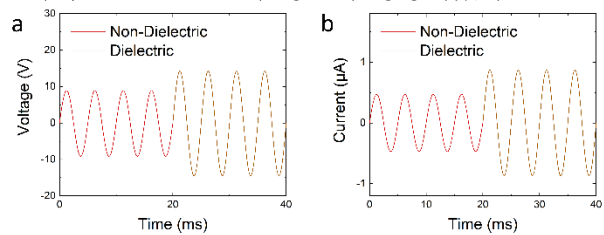


Fig 1 Compare voltage (Fig 1a) and current (Fig 1b) in CS-TENG.

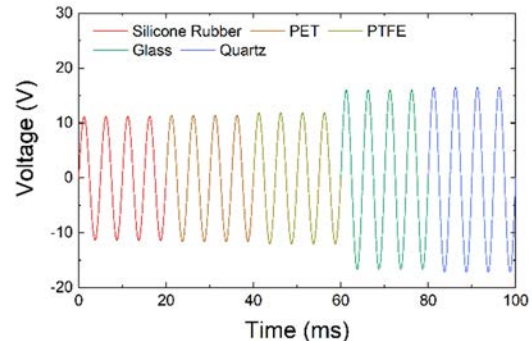


Fig 2 Comparison of the voltage of CS-TENG by dielectric materials.

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: suhr@skku.edu

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.

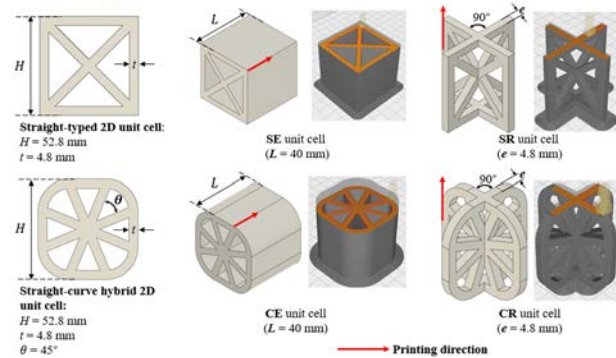


Fig. 1. 4 types of representative unit cells for simulation.

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, 최경후^{1}, 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°C로 알려져 있다. 그러나 50°C를 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°C, 40°C 및 44°C이다. 이러한 PCM들을 선택한 이유는, 리튬 이온 배터리가 열 폭주 현상에 돌입하는 임계 온도인 50°C에 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.

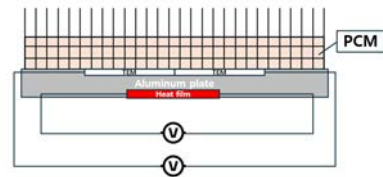


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

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°C에 도달하는 데 걸리는 시간을 측정하고 비교하였다. 실험 조건은 다음과 같이 설정하였다. 첫 번째는 추가적인 열 관리 요소 없이 진행한 Only Fin 실험, 두 번째는 열전소자만을 적용한 Only TEM 실험, 세 번째는 상변화물질만을 사용한 Only PCM 실험, 마지막으로 상변화물질과 열전소자를 함께 적용한 PCM + TEM 실험이다.

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, Daep 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 그 구조적 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(층간 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 $128.48 \text{ mAh g}^{-1}$ 이었다. 반면, 열처리 온도가 높은 샘플의 sloping 영역 용량은 68.45 mAh g^{-1} , plateau 영역 용량은 $206.79 \text{ mAh g}^{-1}$ 으로 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 ($\sim 10^{-11}$ 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 10^{15} – 10^{16} 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 layer 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 wave-absorbing 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 ($\sim 10^{-6}$ Torr), thermal cycling (-80 to 150 °C, 90-minute cycles), ultraviolet radiation (280–420 nm), and an AO flux of 1.35×10^{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].

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 oxide/oxide ceramic matrix composites, 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).

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, 최수영^{1}, 오새롬¹, 이주형¹
* S.H. Mun¹, S.Y. Choi^{1*}, S.R. Oh¹, J.H. Lee¹

¹ (주)에이엔에이치스트럭처
* 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 금속재 대비 약 30 % 이상의 경량화와 -182 °C 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.

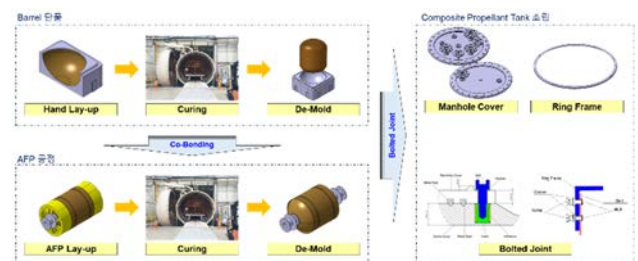


Fig. 3. Manufacturing Process

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 비행 하중 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 (주)에이엔에이치스트럭처
+ 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 활성화되며 소형위성 발사 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 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 °C 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.

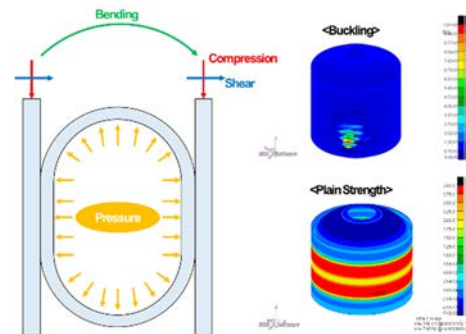


Fig. 2. Static and Buckling Analysis Result.

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% 충전하고 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.

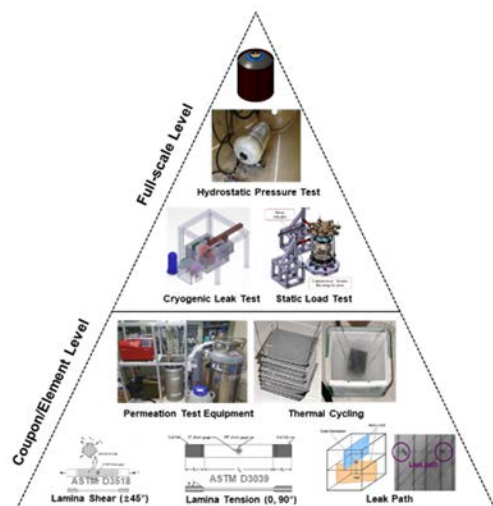


Fig. 3. Test Matrix.

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

신재성^{1}, 이진우², 송문원³
* J.S. Shin^{1*}, J.Y. Lee², M.W. Song³

¹ 한국항공우주연구원 소형발사체연구부, ² 한국재료연구원, 융·복합재료연구본부 ³ 전북대학교 고온플라즈마센터
* E-mail: jsshin@kari.ac.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 페놀레진을 활용한다. 페놀레진은 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/페놀 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 남은길이를 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

ΔL [mm]	Recession Rate [mm/s]
5.24 (=22.9 - 17.66)	0.524

4. 결 론

PICA를 목표로 하는 경량형 삭마재를 제작하였고 평가를 하였다. 본 시작품의 밀도가 PICA(0.28 g/cc)대비 더 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.

Ag powder를 활용한 전도성 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

*주민수¹, 하지환¹, 광병수¹⁺
* M.S. Joo¹, J.H. Ha¹, B.S. Kwak¹⁺

¹ 경상국립대학교 기계항공우주공학부
+ E-mail: bs.kwak@gnu.ac.kr

Keywords: Induction welding, Thermoplastic composite, Susceptor, Thermal and mechanical properties

1. 서론

최근 비접촉식 공정으로 복합재 손상을 최소화할 수 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 피작체는 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 서셉터의 발열 성능 검증을 위해 Ag/PEEK 전도성 서셉터의 발열 거동을 측정하였다. 측정 결과, 시뮬레이션 결과와 같이 Ag 함량이 증가할수록 발열 성능이 향상되는 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.

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 미래우주교육센터(RS-2022-NR067079)의 지원을 받아 수행된 연구임과 이 연구는 2025년도 경상국립대학교 글로벌대학30사업에 의하여 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: selee@inha.ac.kr

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 plate에 부착되어 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 통계 평균값은 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.

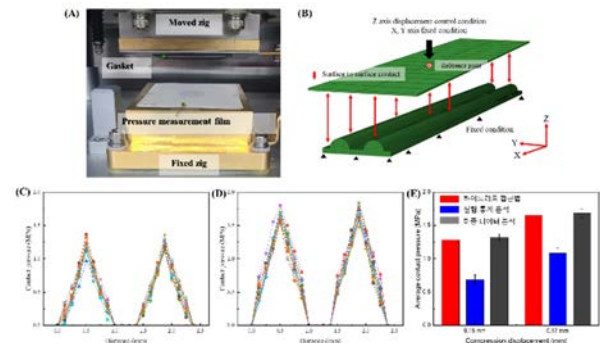


Fig. 1. (A) Actual test configuration, (B) FEA model, (C, D) Experimental statistical analysis results: 0.15 mm and 0.17 mm and (D) average contact pressure results.

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, 전흥재^{3}
* S.J. Kim¹, K.S. Kim², H.J. Chun^{3*}

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 로드웨어링이 미치는 영향을 확인하기 위해 One hole일 때와 Two hole인 경우에 대한 실험을 각각 수행하였다. 사용된 재료는 금속 시편 SS400과 SK케미칼 사의, USN125 단방향 Prepreg(Carbon/epoxy)이며 적층각은 $[\pm 45^\circ]_{55}$ 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.

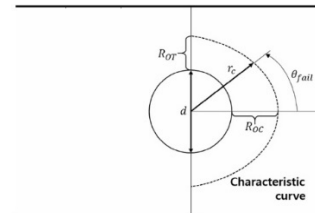


Fig. 1. Characteristic curve.

θ_{fat} 는 파단 위치에 따라 달라지며, R_{OT} 는 인장특성길이, R_{OC} 는 압축특성길이, d 는 원공의 직경, r_c 는 원공 중앙에서 특성곡선까지의 거리를 나타낸다.

이러한 특성곡선은 다음 식을 통해 얻을 수 있다.

$$r_c(\theta) = d/2 + R_{OT} + (R_{OC} - R_{OT})\cos\theta \quad (1)$$

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 로드웨어링이 특성길이에 어떠한 영향을 미치는지 알아보기 위해 One hole일 때와 Two hole일 때 조인트의 특성곡선을 각각 도출하였다. 특성곡선을 사용하여 유한요소해석으로 예측한 파단강도와 실험을 통해 얻은 파단강도를 비교하였으며, 오차율을 10% 미만임을 확인하였다.

One hole일 때의 특성곡선은 Two hole일 때의 특성곡선과는 달랐다. 볼트의 개수에 따라 로드 셰어링으로 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. Ji^{1*}

¹ 울산과학기술원 기계공학과

* E-mail: wsji@unist.ac.kr

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 필수적이나 기존 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 면대칭 경계조건을 적용하여 모델링 범위를 축소하고 계산 시간을 단축하였다. 가압 실험 조건을 반영해 경계조건으로 밸브 체결 부위의 반경 방향(U_R) 및 각방향(U_θ) 자유도를 고정하였다. 하중으로 최소 파열압 기준인 157.5 MPa를 부가하였다.

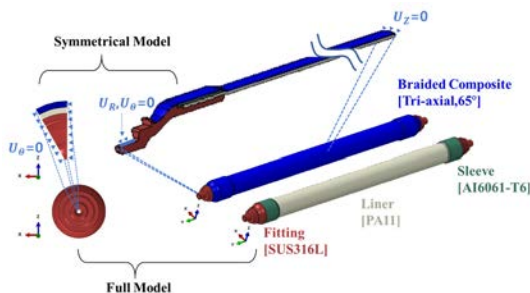


Fig. 1. Materials and Boundary conditions

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.

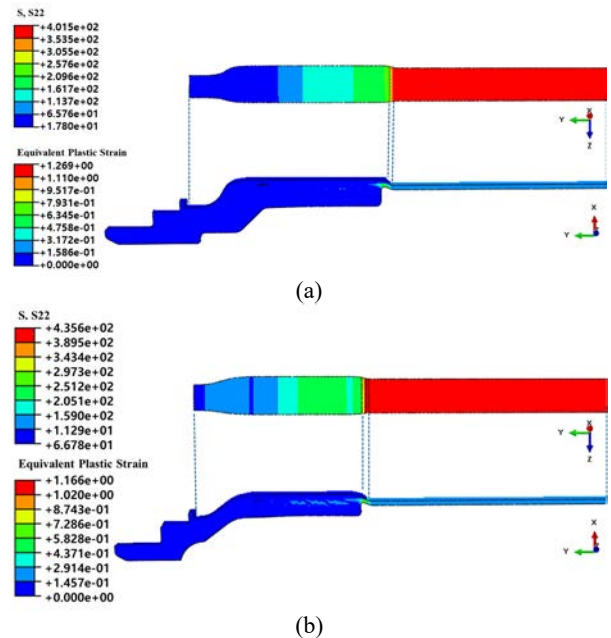


Fig. 2. Simulation Results: (a) Type A, (b) Type B

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) 기계장비산업기술개발 사업 (20018217)에 의해 수행되었으며, 지원에 대해 감사드립니다.’

결정화도 및 결정의 크기가 열가소성 복합재의 파괴 인성에 끼치는 영향 Effect of crystallinity and crystalline size on fracture toughness of thermoplastic composite

박민수¹, 지우석^{1}

* M.S. Park¹, 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.

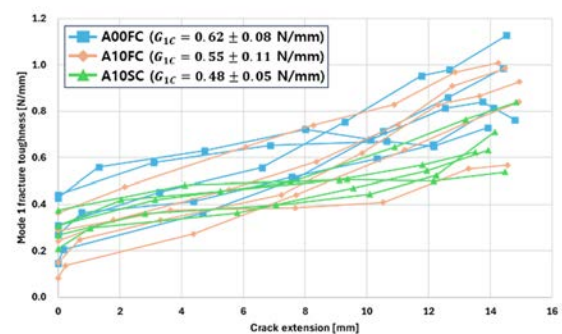


Fig. 1. Result of compact tension test.

4. 결론

본 연구에서는 결정화도는 비슷하나 결정 크기가 다른 복합재를 제작하였다. Compact tension 시험을 통해 결정화도 뿐 아니라 결정의 크기도 파괴 인성에 영향을 끼치는 것을 확인하였다.

후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(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, 곽병수^{1}
* J.I.Bae¹, K.W.Park¹, B.S.Kwak^{1*}

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 전자기파 흡수 대역을 조절할 수 없는 수동형과 조절 가능한 능동형으로 나뉜다. 수동형 RAS는 다층 구조를 통해 우수한 기계적 물성을 확보할 수 있으나, 이에 따른 두께 및 무게 증가가 주요 한계점으로 작용한다. 이러한 문제를 극복하기 위해 능동형 RAS에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. [2-3].

본 연구에서는 플루티드 코어 기반 샌드위치 복합재로 능동형 RAS를 설계하여 광대역 (4-18 GHz)에서 90% 이상의 전자기파 흡수를 구현하고, 시뮬레이션을 통해 성능을 분석하였다.

2. 본론

2.1 능동형 레이더 흡수 구조 설계

본 연구에서는 Salisbury screen 흡수체 원리를 적용한 샌드위치 복합재 구조를 설계하였다. 본 구조의 코어는 내부 구조의 활용성이 높은 플루티드 코어를 채택하였다. Cell Size는 25×25 mm 크기로 설계하였다. 코어 내부에는 구리 테이프가 부착된 Cu-plate를 포함하여 설계하였고, 최외각 표면에는 저항 시트를 부착하였다. 저항 시트의 면저항은 무반사 조건을 만족하는 $377 \Omega/\text{sq}$ 을 선정하였고, 전자기적 물성은 유리섬유/에폭시 복합재의 유전율을 사용하였다.

전자기파 흡수 대역을 조절하기 위해 Cu-plate와 코어 내부 상단 사이의 간격 (GAP) 조절, Cu-plate의 중심과 양 끝 Web 사이의 각도 조절 ('V' 및 'Λ' 형상), 그리고 Cu-plate ('V' 및 'Λ' 형상)의 반복적 다중 배열을 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 보였으며, 반대로 간격이 감소하면 고주파로 이동하

며 전자기파 흡수 범위가 확대되었다. 각도 조절 시, 'V' 형상의 경우 각도가 증가할수록 공진 주파수가 저주파로, 'Λ' 형상은 고주파로 이동하였다. 반복적 다중 배열을 적용한 경우 Cu-plate의 배열 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 조합한 경우, 한 가지의 변수만을 적용한 경우에 비해 광대역에서의 우수한 전자기파 흡수 성능을 보인다는 사실을 확인하였다.

3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 Cu-plate의 이동 및 형상의 배열 변화를 통해 전자기파 흡수 대역을 가변 가능한 능동형 RAS를 설계하고, 간격 조절과 각도 조절, 반복적 다중 배열을 변수로 적용하여 광대역에서 최적의 전자기파 흡수 성능을 분석하였다. 분석 결과, 간격 조절과 각도 조절 및 반복적 다중 배열을 조합한 경우, 최소한의 가변으로 광대역에서의 우수한 전자기파 흡수 성능을 나타내었다. 향후 본 연구에서 제안한 구조를 실제 제작하고 실험을 통해 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 글로벌 대학 30 프로젝트 재원의 지원을 받아 수행된 연구입니다.

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, 곽병수^{1}

* 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 PAN-based 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 보였다. 이는 hBN 입자량이 많을수록 인접한 입자간의 직접적인 열전달 경로를 형성하여 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.

가장 효과적인 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, 층간 전단강도는 pristine 대비 60% 감소하였다. 이는 스티칭으로 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 CFRP를 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.

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, 최진호^{1}
* S.H. Kim¹, M.S. Hwang¹, J.G. Kim¹, B.H. Min¹, J.H. Choi^{1*}

¹ 경상국립대학교 기계항공공학부

* E-mail: choi@gnu.ac.kr

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.

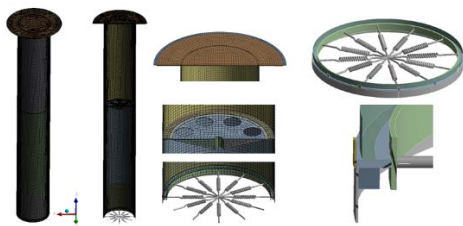


Fig. 1. Composite Rotor Sail Modeling.

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 하중조건인 경우 미래하이테크, KOMERI(한국조선해양 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.

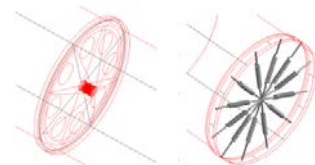


Fig. 2. Boundary Condition of Rotor Sail

3. 안전성 평가

Rotor Sail의 구조적 안전성 평가를 위해 해석결과를 기반으로 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 기반으로 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. 경량화 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 BSN社의 Epsilon W50 3D 프린터를 이용하였고, 재료는 3D 프린팅, 포장재, 의료용 임플란트 등 다양한 용도로 널리 사용되고 있는 PLA(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.

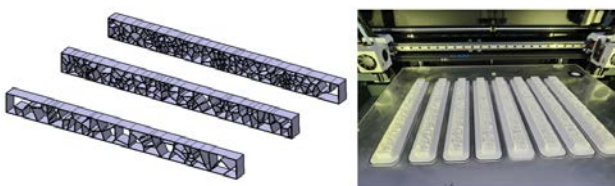


Fig. 1. Specimen manufacturing geometry.

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 것으로 판단된다.

Table 1 Test results and specific strength

시편조건	굽힘 강도 (MPa)	무게 (g)	부피 (cm ³)	밀도 (g/cm ³)	비강도 (MPa·cm ³ /g)
50 points	1.36	5.62	30	0.19	7.26
	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
	4.11	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 : RS-2024-00468472)의 지원을 받아 수행한 연구임.

고온(300 °C) 환경에서 운용 가능한 고성능 유리섬유/비스말레이미드 코르게이티드 샌드위치 광대역 스텔스 복합재 구조 설계 Design of a high temperature (300 °C) 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 레진과 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 및 내열성을 갖는 고온용 열경화성 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

본 연구에서는 Corrugated 코어를 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 분당 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 matrix 복합재의 레이돔 구조 설계 Design and analysis of periodic pattern radome using Quartz fiber-Oxide ceramic matrix composites

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

¹ 한국항공대학교 일반대학원 항공우주 및 기계공학과, ² 대한항공 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 fiber는 Saint-Gobain사의 5H SATIN, 80tex 제품을 사용하였다. 유전 상수는 OO, 손실 탄젠트는 OO으로 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 변형시킨 구조로 제작하였다. 제작된 Quartz fiber/oxide ceramic matrix 유전체 기판의 유전율은 OO~jOO @OO GHz으로, 손실 탄젠트 값은 OO이다. 또한, 주기패턴을 구현한 전도성 코팅층의 전기전도도는 2×10^6 S/m이며, 두께는 5~15 μ m 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 $\lambda = \text{OO} \sim \text{OO}$ 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 ceramic 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).

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: ywnam@kau.ac.kr

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 위한 초소수성(superhydrophobic) 코팅이 제안되었는데, 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 표면을 구현하기 위해 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.

최재혁¹, 윤동환², 황민성², 최진호^{3}
* J.H.Choi¹, D.H.Yoon², M.S.Hwang², J.H.Choi^{3*}

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 향상시키는 효과를 정량적으로 분석하고, FEM 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 접착조건을 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

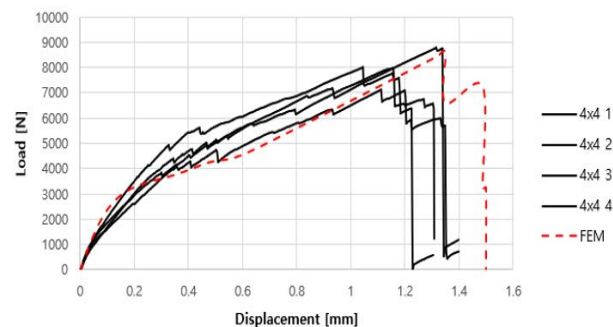


Fig. 1. Interpretation of Co-Cu_4 Experimental Results and FEM Simulation Results

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 섬유에 Mode I 파손 하중 평가 및 해석, 국내석사학위논문, 경상대학교 대학원