
제5발표장

사출압축 성형 공정을 통한 고분자 재료의 휨 변형 감소 분석 A Study on Warpage Reduction of Polymer by Injection-Compression Molding

김동욱¹, 심윤보², 이다훈¹, Bjoern Beck³, Frank Henning³, 박영빈^{1}
* D. Kim¹, Y.-B Shim², D. Lee¹, B. Beck³, F. Henning³, Y.-B Park^{1*}

¹ 울산과학기술원 기계공학과, ² 한국 자동차연구원, ³ Fraunhofer Institute for Chemical Technology (ICT)
*E-mail: ypark@unist.ac.kr

Keywords: Injection-compression molding, Warpage

1. 서론

고분자 사출 성형 공정은 많은 고분자 제품 제조에 사용되며, 오랜 기간 연구 및 개발된 공법이다. 하지만, 대면적의 부품을 제작할 때의 휨 변형은 오랜 기간 사출 성형의 큰 문제로 자리잡아왔다. 여러 연구들이 휨 변형을 줄이려는 노력을 하고 있으며, 사출 압축 공정 또한 휨 변형 감소에 도움이 되는 것으로 알려져 있다.[1] 하지만, 현재 휨 변형 개선의 근거를 분석한 연구는 부족하다. 이 발표 논문에서는 사출 성형 공정에 비해 사출압축 공정에서 감소된 휨 변형을 관찰하고 실험적, 해석적인 방법으로 이를 검증한다.

2. 공정 및 재료

2.1 공정 및 재료

사출압축 공정과 사출 공정으로 제작된 시편의 특징들을 비교하기 위해 폴리프로필렌 (J-170H grade, 롯데케미칼)을 사용하여 수직형 저압 사출 성형기를 통해 두 공정을 진행하였다. 시편은 180mm * 55mm 크기로, 3mm의 두께로 제작되었다.

2.2 재료 분석 및 해석

성형 완료된 시편을 3차원 좌표 측정기를 통해 휨 변형을 비교하였다. 시편 표면의 (x, y, z) 좌표를 측정하여 2차원 그래프로 표현하여 비교하였다.

Moldex 소프트웨어를 활용해 실제 실험과 같은 공정 조건으로 공정 시뮬레이션을 진행하여 결과를 직접 측정된 휨 변형 결과와 비교하였다.

시편의 결정 구조의 두께방향 층상 구조를 확인하기 위해 두께 방향 단면을 30 μ m 두께로 잘라내어 편광 빛으로 조사하였다. 관찰 결과에 따라 시편의 층을 나누어 2차원 광학 X선 산란 측정을 통해 결정의 배향도를 비교하였다. 배향도 계산에는 Herman's orientation factor를 활용하였다.

3. 결과

휨 변형 분석 결과 두 공정에서 휨 변형의 모양은 유사했으나, 사출 공정에 비해 사출압축 공정으로 제작한 시편의 휨 변형이 58% 감소한 것으로

나타났다. 이는 시뮬레이션 결과와 일치하였다. 실험 결과 휨 변형은 그림 1과 같다.

결정 구조 분석 결과 층상 구조 중 가장 바깥 층에서 사출압축 공정으로 제작된 시편의 결정 배향도가 낮은 것으로 관찰되었다. 이는 사출압축 공정 중 압력이 몰드 전반에 고르게 분산되며 결정의 배향도를 낮추기 때문이다.[2] Herman's orientation factor는 그림 2와 같이 나타났다.

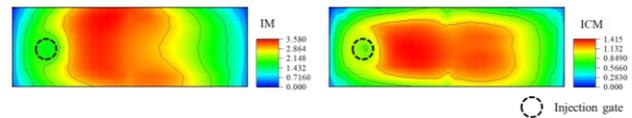


Fig. 1. Warpage profile drawn by coordinate measuring machine.

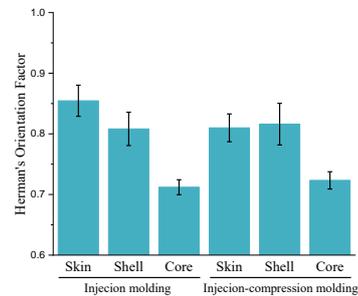


Fig. 2. Herman's orientation factor of each layers

4. 결론 및 향후과제

사출 성형의 고질적인 문제인 휨 변형을 사출압축 성형 공법을 활용하여 개선하였다. 사출압축 성형 공법에서 감소된 압력 분포가 결정 배향도를 낮추며 휨 변형을 줄였다.

참고문헌

- [1] YI Kown et al. *Curr. Appl. Phys.* 18(11): 1451-1457, 2018.
- [2] JY Ho et al. *Polym. Eng. Sci.* 52(4): 901-911, 2012.

후기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국산업 기술평가관리원을 통해 지원하는 소재부품기술개발 사업(20017442)으로 수행된 연구결과입니다

Investigation of the thermal expansion coefficient of CF/CNTF hybrid composites

*Mijoung Joung¹, Yeonsu Jung², Kyunbae Lee², Taehoon Kim²⁺, Sangwoo Lim¹⁺

¹Yonsei University, Department of Chemical Engineering, 50 Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Republic of Korea, ²Korea Institute of Materials Science, Composites Research Division, 797 Changwon-daero, Seongsan-gu, Changwon-si, Gyeongsangnam-do, 51508, Republic of Korea ⁺E-mail: swlim@yonsei.ac.kr, ⁺E-mail: tkim67@kims.re.kr

Keywords : Hybrid composite, CNT fiber, CTE

1. Introduction

Carbon-based composites, especially carbon fiber reinforcement polymer (CFRP) are widely used in aerospace fields, such as in the structures of aircraft and turbine engines [1-2]. Materials intended for use in space environments must not only possess the physical properties required for structural integrity but also exhibit minimal changes in structural stability due to extreme temperature fluctuations. Traditional metal and metal alloys as structural materials used for aircraft have a higher coefficient of thermal expansion CTE, Duralumin ($22-24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), Ti ($8.6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), SUS 304 ($17.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) than required in space environment which is under $5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ and are heavy, which limits improvements in fuel efficiency. The carbon composite materials, specifically by incorporating CNT (carbon nanotubes) films with a negative CTE at room temperature [3] can overcome the limitation. In this study, the coefficient of thermal expansion of CF/CNTF hybrid composite will be investigated into the influence of temperature, configuration and thickness of CNT films.

2. Experimental

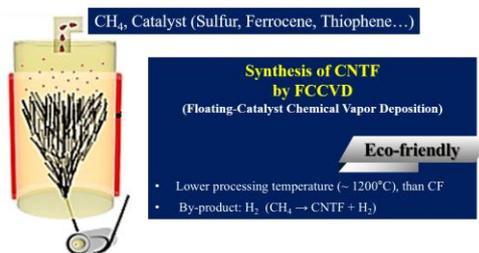


Figure 1. Diagram of FCCVD for CNTFs

Carbon fibers were used in prepreg which supported by Hankuk Carbon, CNT fibers and films are produced by FCCVD (Floating Catalyst Chemical Vapor Deposition) method in aluminum furnace.

The configuration will be CNTF/CF/CNTF/CF/CNTF due to their mechanical and electrical properties. The direction of CNTFs will be difference with each other. The

hybrid composite will be cured in an oven with sealed sample in vacuum.



Figure 2. Sample with vacuum before curing in oven

Coefficient of thermal expansion of the composite will be measured by Thermomechanical Analyzer (TMA).

3. Summary and further work

Currently, only the mechanical and electrical properties are checked for basic configuration of the CF/CNTF hybrid composite. The investigation of the coefficient of thermal expansion of this composite material will be carried out with the factors as below.

- Temperature : Room temperature to 150 °C
- Configuration of CNTFs : Paller and Orthogonal
- Thickness of CNTFs : 1 – 30 μm

References

- [1] I. Yu. Tsukanov et al., Russian Engineering Research, 2024, Vol.44, No.5, 654-658
- [2] Zhang Y. Ch et al., IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., 2018, Vol.382, No.2, 022044
- [3] Keiichi Shirasu et al., Carbon 95, 2015, 904-909

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Institute of Materials Science (KIMS) and the Ministry of Trade, Industry, and Energy (MOTIE) (1415185159) and Korea Semiconductor Research Consortium (KSRC) (20020276). The authors thank Hankuk Carbon for supplying carbon fiber prepreg.

Modification of rheological properties of In Bi Sn alloy by particle additives

Se Jun Wang¹, Hyeongwoo Kang¹, Youngseok Oh² and Sang Yup Kim^{1}

¹ Department of Mechanical Engineering, Sogang University,

² Korea Institute of Materials Science

^{*}E-mail: sangyupkim@sogang.ac.kr

Keywords : Additive manufacturing, Eutectic alloy, Smart material

1. Introduction

Low melting point In⁵¹ Bi^{32.5} Sn^{16.5} ternary alloy, which is called as Field's Metal (FM, melting point: 62 °C), have garnered interest for use as a printing material due to its versatility [1]. However, direct ink writing (DIW) of metals remains as challenge due to the high surface tension of metals in their liquid state. We modify rheological properties of FM by embedding Sn particles with the assist of sonication treatment. Moreover, we endow ferromagnetic property to the FM by embedding iron magnetic particle with the same method.

2. Materials and experimental methods

2.1 Specimen preparation

Sn particle embedded FM (Sn-FM) and iron particle embedded FM (Fe-FM) are fabricated by sonication process of bulk FM with particles in the HCl solution (1 wt.%, 62 °C). the sonication treatment of mixture is applied for the 5 minutes.

2.2 Material characterization

The rheological properties of Sn-FM is conducted with hybrid rheometer (DHR-2, TA instrument). Scanning electron microscopy (SEM) and an energy dispersive X-ray spectroscopy (JSM-7600F, Jeol) are used to evaluate microstructure of the alloy specimens.

3. Results and Discussion

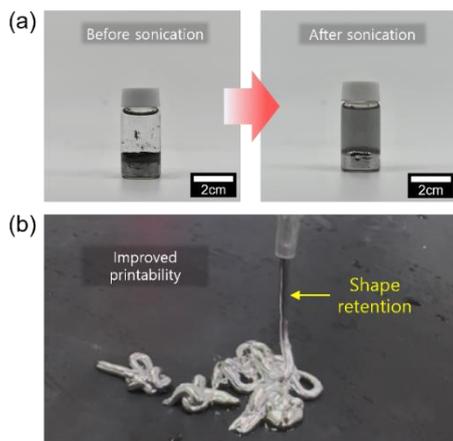


Fig. 1. Sn-FM with modified rheological properties. (a) Sn-FM before and after the sonication treatment. (b)

Shape retention of molten Sn-FM alloy due to the modification of rheology

Fig. 1. showcases the fabrication process and modified rheological characteristic of Sn-FM. Sn particles are successfully embedded into the bulk FM by after a sonication treatment. The fabricated Sn-FM exhibits improved shape retention allowing for printing processes, which enables the alloy to behave like paste.

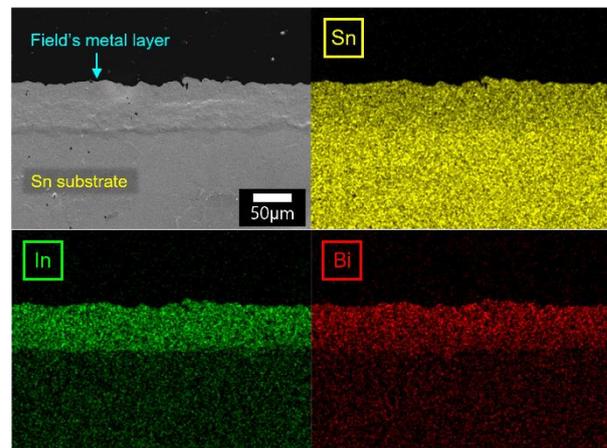


Fig. 2. SEM microscopic images and EDS analysis of FM layer casted on a Sn substrate

Fig. 2. shows SEM and EDS analysis of FM layer casted on the Sn substrate. FM integrates seamlessly with the Sn substrate creating thin, uniform layer (~50 µm). This indicates that sonication induced wetting is promising approach to incorporate particles into the alloy attributed to the enhanced wetting.

4. Conclusions

Sonication-induced approach for modifying rheological properties of eutectic alloy is proposed. The modification of rheological property of FM is achieved by embedding Sn particles.

References

[1] M Saadi et al., *Adv. Mater.*, 2022.

Acknowledgement

This work was supported by the Korea Institute of Materials Science (Grant #: PNKA100)

작동 범위를 조절 가능한 맥신 기반 직물 센서 MXene-based textile sensor with tunable working range

장지환¹, 김태안², 김상엽^{1}
* J.H. Jang¹, T.A. Kim², S.Y. Kim^{1*}

¹ 서강대학교 기계공학과, ² 한국과학기술연구원
¹ E-mail: sangyupkim@sogang.ac.kr

Keywords: MXene, textile, working range, print strain

1. 서론

근래에 생체역학 등의 분야에서 동작 센싱을 위한 직물 센서의 연구가 활발히 진행 중이다. Strain 정도를 센싱하기 위한 직물 센서 중에는 전도성 물질을 활용한 직물 센서 연구가 주요하게 연구가 진행되고 있다. 다양한 전도성 물질이 있지만, 그 중 최근에 주목을 받고 있는 맥신은 차세대 물질로써 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 맥신의 우수한 전도성 성질을 활용하여 strain 변화를 감지할 수 있는 맥신 기반 직물 센서를 제작한다. 그리고 반복 인장 테스트를 통해 해당 센서의 성능을 분석 및 평가하고 신체 부위에 적용하여 실질적인 활용성을 증명한다.

2. 맥신 기반 직물 센서 제작

2.1 맥신 잉크 제작

Textile 위에 프린팅 하기 위한 전도성 잉크를 제작한다. 맥신 dispersion과 고분자 binder를 300rpm의 physical mixing을 통해 맥신 기반 잉크를 제작한다. 맥신 입자의 양은 10wt%로 맞추어 제작한다.

2.2 직물 센서 제작

동작 센싱을 위한 직물 센서를 제작한다. 직물 위에 전도성 잉크를 프린팅 할 면적을 표시하고 브러시를 통해 직접 프린팅을 진행한다. 도포된 면적은 30X10mm 이다. 도포 되는 잉크 양은 균일하게 조절하며 프린팅을 진행한다. 프린팅 후 잉크의 건조를 위해 35도 조건에서 18시간 열풍 건조를 진행한다. 건조 후 센서의 양 끝에 은 에폭시를 사용하여 접퍼선을 부착한다.

3. 실험 과정

제작한 직물 센서를 마이크로 인장기를 사용하여 반복 인장 테스트를 진행한다. 반복 인장 테스트를 통해 직물 센서의 sensitivity, working strain 등의 성능 분석을 진행한다. 그리고 의복으로 사용하여 관찰에 센서를 위치시킨 후 여러 동작을 반복 테스트를 진행하여 직물 센서의 활용성을 증명한다.



Fig. 1. (a) 맥신 기반 직물 센서 사진
(b) 직물에 코팅된 맥신 기반 잉크 사진

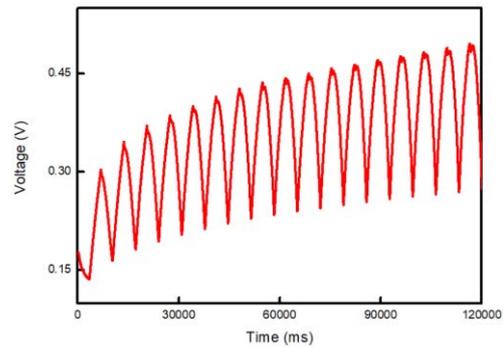


Fig. 2. 맥신 기반 직물 센서 반복 인장 테스트 결과

4. 결론 및 향후 과제

직물 센서의 활용성에 직결되는 working strain의 원리를 분석하고, 이를 통해 working strain을 조절하여 어떠한 큰 동작 조건에서도 사용이 가능한 활용성을 검증할 것이다.

참고문헌

- [1] Jin, C., & Bai, Z. (2022). MXene-based textile sensors for wearable applications. ACS sensors, 7(4), 929-950.
- [2] Kim, S. Y. (2020). Sustainable manufacturing of sensors onto soft systems using self-coagulating conductive Pickering emulsions. Science robotics, 5(39), eaay3604.

후기 본 연구는 한국연구재단(RS-2023-00218379)의 지원으로 진행되었습니다.

Deployable and Foldable Hybrid Fiber-Reinforced Polymer fabricated using Multi-Resin Dispensing

*Seungwoo Jung¹, Seung Mo Son¹, Moonsuk Jang¹, Dong Gi Seong^{1,2+}

¹ School of Chemical Engineering, Pusan National University,

² Department of Polymer Science and Engineering, Pusan National University

⁺E-mail: dgseong@pusan.ac.kr

Keywords : hybrid FRP, origami, deployable structure, multi-resin dispensing process

1. Introduction

Deployable structures have garnered significant attention across various industries and academia, including aerospace, architecture, and medical fields. This is due to their ability to be efficiently stored and transported in a compact form, and subsequently deployed to occupy a larger volume at a desired location.[1] Representative foldable materials include paper, polymers, and ultra-thin glass, but most lack the necessary mechanical properties to be employed as load-bearing structural materials.

Recently, some researches have been conducted to achieve “foldable-yet-stiff” materials with extraordinary mechanical reliability and lightweight properties by using fiber-reinforced polymer (FRP).[2] Nevertheless, there is still a lack of research concerning the accuracy and processability of the fabrication process of FRP with complex structures.[3]

In this study, a novel Multi-Resin Dispensing (MRD) process was developed to enable the use of FRP in deployable structures. The process involved programming the dispensing of various resins in specific patterns at designated positions along the vertical axis. To meet the mechanical requirements of deployable structures, the FRP was designed with both rigid and flexible regions: the rigid regions were composed of carbon fibers (CFs) impregnated with a rigid epoxy, while aramid fibers (AFs) impregnated with a flexible epoxy formed flexible regions.

2. Experimental

2.1 Materials

KFR-120V (rigid epoxy, Kukdo, Korea) and KFH-163 (hardner, Kukdo, Korea), 12K plain weave WSN 3KY (208 g m⁻², CF, Hyundai Fiber, Korea) composed rigid region. YD-171 (flexible epoxy, Kukdo, Korea) and G 640 (hardner, Kukdo, Korea), plain weave TW 150 (180 g m⁻², AF, Taekwang, Korea) formed flexible region.

2.2 Fabrication

After applying the release agent to the mold, a preform was prepared by stacking CFs and AFs. The foldable region was fabricated by impregnating 1 ply of AF with a flexible epoxy. In comparison, the rigid FRP region was produced by impregnating 1 ply of AF and 2 plies of CF with rigid epoxy. Rigid epoxy, and dimer acid-modified epoxy (flexible epoxy) were mixed with their respective hardners

in ratios of 100:30 and 100:26. Subsequently, the mixed resins underwent a degassing process in a vacuum oven at 60 °C for 20 min. Each resin was filled into a dispenser syringe and dispensed onto the fiber preform according to the programmed position. The upper mold was then covered, and the FRP was cured in a 160 °C, 5 MPa hot press for 30 min to obtain FRP with deployable triangulated cylindrical origami (TCO) structure.

3. Results and Discussion

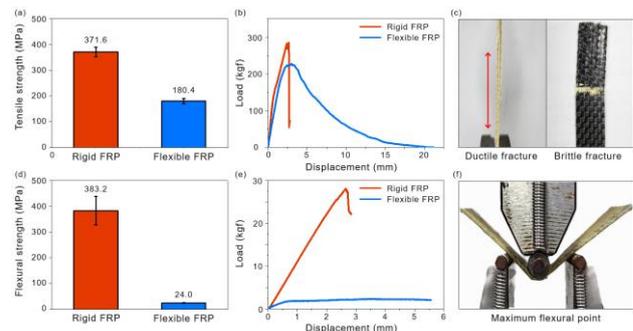


Fig. 1. Tensile/flexural properties of rigid and flexural FRP

Tensile and flexural tests were performed to analyze the mechanical properties of the FRP produced using the MRD process. The results were demonstrated on Fig. 1. The resulting tensile strength and flexural strength values of rigid FRP measured were 371.6 MPa and 383.2 MPa, respectively. In contrast, flexible FRP exhibited tensile and flexural strengths of 180.4 and 24.0 MPa.

Flexible FRP demonstrated ductile failure rather than brittle failure during tensile test, and it was folded to about 90 °, but no fracture occurred while flexural test.

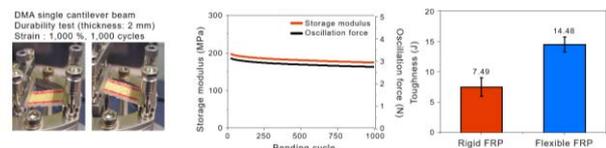


Fig. 2. Durability test results of flexural FRP and toughness of two FRPs

A durability test was performed on the flexible FRP using the single cantilever mode by DMA and the results were exhibited on Fig. 2. Despite being 2 mm thick due to the inclusion of 8 plies of AF, it retained 89.5% of its initial

properties after undergoing a rigorous test involving 1,000 cycles at a strain of 1,000%.

The toughness, calculated from the area under the stress-strain curve from tensile tests, was 7.49 J for the rigid FRP but significantly higher at 14.48 J for the flexible FRP, marking a 93% enhancement.

Those results confirmed that the flexible FRP is effective in load-bearing, demonstrating its suitability as “foldable-yet-stiff” material.

4. Conclusions

A hybrid FRP that capable of deployment and folding was fabricated using a novel MRD process. The new hybrid FRP was “foldable-yet-stiff”, which was confirmed through various measurement and analyses. These results suggest that FRP will have broader applicability and utility in industries such as aerospace, construction, and wearable devices.

References

- [1] S. D. Guest, S. Pellegrino, *Acta Astronaut.* 1996, 38, 103-113.
- [2] H. Yasuda, C. Chong, E. G. Charalampidis, P. G. Kevrekidis, J. Yang, *Phys. Rev. E* 2016, 93, 043004.
- [3] J. O’Neil, M. Salviato, J. Yang, *Compos. Struct.* 2023, 304, 116376.

Acknowledgement

This work was supported by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (RS-2024-00412289).

Thermomechanical Optimization of PDMS-Based Composites with Polydopamine-Coated Boron Nitride Nanosheets and Aramid Nanofibers

*Shin Woo Ryu¹ and Dong Gi Seong^{1,2+}

¹ School of Chemical Engineering, Pusan National University,

² Department of Polymer Science and Engineering, Pusan National University

⁺E-mail: dgseong@pusan.ac.kr

Keywords : Thermal interface material, Aramid nanofiber, Boron nitride nanosheet, Ice template

1. Introduction

Efficient thermal management and vibration-dampening properties are critical for wearable electronics and high-performance devices [1]. Polydimethylsiloxane (PDMS) has excellent damping properties with good viscoelasticity, but its low thermal conductivity makes it difficult to apply in advanced systems [2]. To address this issue, we propose a method to improve the thermal and mechanical properties of PDMS-based composites by incorporating boron nitride nanosheets (BNNS) and aramid nanofibers (ANFs). This study demonstrates the fabrication of PDMS composites with improved heat dissipation and structural integrity for electronic and wearable applications using bidirectional freezing, which induces the vertical orientation of particles.

2. Experimental

2.1 Materials : Hexagonal boron nitride (h-BN) powder (MGP, Denka Co., Ltd, Japan) with a lateral size of ~10 μm was used as a thermally conductive filler. ANFs, derived from bulk aramid fibers (Taekwang Industrial Co., Ltd., Korea), were used as structural reinforcement. Dopamine hydrochloride (Sigma-Aldrich) was used for polydopamine (PDA) coating on BNNS, while Sylgard 184 PDMS resin (Dow Chemical Company) served as the matrix material.

2.2 Fabrication of Composites : PDA-coated BNNS (P-BNNS) were synthesized by exfoliating h-BN powder through sonication for 5 hours, followed by dopamine polymerization. To prepare the ANF solution, KOH was dissolved in deionized water, followed by the addition of DMSO and aramid fibers stirring for 26 minutes. The P-BNNS and ANF solutions were mixed and sonicated to form a homogeneous dispersion. This dispersion was transferred to a silicone mold and placed on a 15-degree inclined copper block for bidirectional freezing, then freeze-dried to create a P-BNNS/ANF (PBA) scaffold. The PBA composite was fabricated by vacuum-impregnating PDMS into the PBA scaffold and curing it.

3. Results and Discussion

The integration of P-BNNS and ANFs significantly improved the thermal conductivity and mechanical

properties of the PBA composite. The thermal conductivity of the PBA composite with the highest P-BNNS content was 4.09 W/m·K, 23 times higher than that of neat PDMS. The vertical alignment of P-BNNS allowed the generation of continuous thermal pathways, greatly enhancing heat dissipation. Thermogravimetric analysis (TGA) revealed improved thermal stability, with the decomposition onset temperature for PBA composite at 444.5 °C, compared to 378.1 °C for neat PDMS.

Compressive testing demonstrated a significant increase in mechanical strength, with PBA composite exhibiting a compressive modulus of 1.92 MPa compared to 0.42 MPa for neat PDMS. The elastic recovery of the PBA composite against repeated loads was confirmed by cyclic compression, resulting in stable mechanical properties and thermal conductivity.

The PBA composite also exhibited superior damping properties. The increase in P-BNNS content led to a higher loss factor ($\tan\delta$), which can be attributed to enhanced energy dissipation at the P-BNNS and PDMS interface.

4. Conclusions

This study successfully developed PDMS-based composites incorporating P-BNNS and ANFs, resulting in significant enhancements in both thermal and mechanical properties. The vertical alignment of P-BNNS and the incorporation of ANFs provided excellent mechanical reinforcement, ensuring durability under repeated mechanical stress. The PBA composite exhibited superior thermal conductivity, compressive strength, and damping capabilities, demonstrating its potential as an advanced TIM for applications in electronics and wearable devices.

References

- [1] Bashir, A., et al. *Small Methods*. 2301788, 2024.
- [2] Cao, K., et al. *Advanced Functional Materials*. 306(6): 2100046, 2021.

Acknowledgement

This research was supported by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by Ministry of Science and ICT(RS-2024-00450610)

내장 빔-육면체 요소를 이용한 UD CFRP 판재의 펀칭 해석 Finite Element Analysis of Punching of UD CFRP Plate Using Embedded Beam-Solid Element

허용찬¹, 김래형², 김성구², 김영철³, 김지훈^{1}
* Y.C. Hur¹, R.H. Kim², S.G. Kim², Y.C. Kim³, J.H. Kim^{1*}

¹ 부산대학교 기계공학부, ² (주) 성우하이텍, ³ 한국재료연구원
* E-mail: kimjh@pusan.ac.kr

Keywords: UD CFRP, Embedded element, FEM, Punching

1. 서론

현재 전기자동차의 생산이 본격화되면서 자동차 차체의 경량화 문제는 더 크게 강조된다. 현재 차체의 무게를 혁신적으로 줄이기 위해 경량 금속 소재와 복합소재를 사용한 부품이 많이 적용되고 있다. 본 연구에서는 복합소재 부품을 다른 부품과 접합하기 위해서 복합소재에 구멍을 가공하는 펀칭 공정을 수치적으로 분석하였다. 특히, 일축 탄소섬유복합소재 (UD-CFRP)의 펀칭 공정을 내장 빔-육면체 요소 (embedded beam-solid element)를 이용해 수치적으로 모사하고자 한다.

2. 기계적 물성 모델링

2.1 복합소재의 기계적 물성

본 연구에는 인발 공정으로 제작된 1.5 mm 두께의 UD CFRP 소재를 사용하였다. 수치해석을 위해 방향에 따른 물성을 측정하였다.

2.2 기계적 물성의 수치적 모델링

펀칭 공정은 파단이 일어나는 공정이기 때문에 파단에 대한 물성 모델링이 필요하다. 방향에 따라 다른 경향을 보이는 UD CFRP의 파단을 모사하기 위해 Hashin[1] 파단 모델을 사용하였다.

3. 펀칭 공정 유한요소 모델

펀칭 공정의 수치적 모델을 만들기 위해서 CAE 상용 프로그램인 Abaqus/Explicit을 사용했다. UD CFRP를 모사하기 위해서 육면체 요소에 빔 요소를 내장한 요소를 사용하였다. 여기서 빔 요소는 탄소섬유의 방향으로 배향되며, 탄소섬유의 기계적 물성을 대표한다. 육면체 요소는 기지재를 대표한다.

펀칭 공정은 40 mm × 40 mm 크기의 판재 시편을 사용하였으며 펀치의 지름은 4.8 mm이다. 지름은 소재의 결함을 위해서 만드는 리벳이나 나사의 크기를 참조하여 결정하였다.

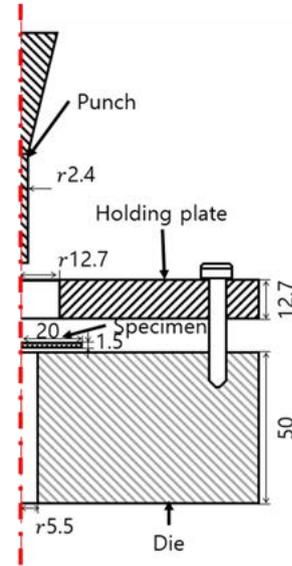


Fig. 1. Dimensions of the punching process

4. 결과 및 결론

기존의 육면체 요소만 사용한 결과와 비교하여 내장 빔-육면체 요소를 사용한 펀칭 공정 해석결과는 하중, 파단의 양상 등이 실험 결과와 유사하였다. 개발된 내장 요소를 이용한 해석 방법은 일축 섬유복합재료의 파단 현상을 모사하는데 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Hashin, Z. *ASME J. Appl. Mech.* 47(2), 329-334, 1980.
- [2] ISBN 9781420005981.

후기

본 연구는 한국산업기술기획평가원(No. 20017478)과 국가과학기술연구회(CRC23011-203)의 지원을 받아 수행되었습니다.

CNT-탄소 섬유 간 커플링에 의한 CF/CNT/PES 복합재의 향상된 EMI 특성 Enhanced EMI properties of carbon fiber/CNT/PES composites via coupled CNT onto carbon fiber

고민정^{1, 2}, 김윤상¹, 김상우¹, 성동기², 김정철³, 이진우^{1}
* M.J.Ko^{1,2}, Y.S.Kim¹, S.W. Kim¹, D.G.Seong², J.C. Kim³, J.W.Yi^{1*}

¹ 한국재료연구원 융·복합재료연구본부 ² 부산대학교 고분자복합재료연구실 ³ (주)한국카본
*E-mail: yjw0628@kims.re.kr

Keywords: injection molding, EMI shielding effectiveness, composites,

1. 서론

전자기기와 자동차 산업의 발전에 따라, 전자파 간섭(EMI) 문제는 더욱 심각해지고 있으며, 이를 해결하기 위해 경량화된 고성능 차폐재의 필요성이 대두되고 있다[1, -2]. 특히, 전도성 복합재는 금속 기반 차폐재의 무거운 단점을 극복하고, 우수한 전기적 및 기계적 성능을 제공하여 차세대 EMI 차폐재로 주목받고 있다. 본 연구는 전도성이 거의 없는 PES(Polyethersulfone) 기지재에 탄소 섬유와 CNT를 첨가하고, 이들 간의 커플링을 유도하여 복합재의 전기적 성능과 EMI 차폐 성능을 극대화하는 것을 목표로 한다.

2. 실험 방법

2.1 복합재 제조 : 압출 및 사출 공정을 통하여 복합재 시편을 제조하였다. 먼저 필러로 사용된 short carbon fiber(sCF)는 어떤 처리도 하지 않고 사용하였고, CNT는 master batch(MB)를 사용하였다. PES pellet은 진공 조건에서 온도를 주어 건조한 뒤 hand-mixing하여 압출을 진행하였다. 사출을 통해 인장/굽곡/충격 시편을 제작하였으며, 해당 시편을 가공하여 여러 물성을 측정하였다.

2.2 복합재 분석 : 필러의 부피 분율에 따라 시편을 제조하였고, 필러의 함량에 따른 기계적 특성, 내열성 등을 분석하기 위하여 인장강도, DMA 및 전기전도도 측정 등을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서 커플링 처리된 sCF/CNT/PES 복합재는 전도 경로 형성 및 필러 간 결합의 향상으로 인해 기계적 및 전기적 성능에서 탁월한 성능을 보였다. 또 sCF의 함량이 증가할수록 인장 강도와 영모듈러스 모두 증가하는 것을 확인하였다. 따라서 탄성율이 높은 필러를 사용하면서 sCF의 함량이 증가할수록 시편이 brittle한 형상을 보였다. CNT MB

를 첨가하면 인장강도와 Young's modulus 모두 증가하는 것을 확인하였다.

다음으로 전기전도도 측정 결과, sCF 필러의 함량이 증가할수록 어느정도 증가하다가 급격하게 증가하는 형상을 보였다. 이는 분산된 sCF가 함량이 적을 때에는 네트워크를 이루지 못해 낮은 전기전도도를 보였지만, 함량이 증가하면서 네트워크를 이루면서 전기전도도의 향상에 영향을 미쳤기 때문이다. CNT를 첨가한 경우, 탄소섬유 간 네트워크를 형성해줌으로써 더욱 우수한 전기전도도를 보였다.

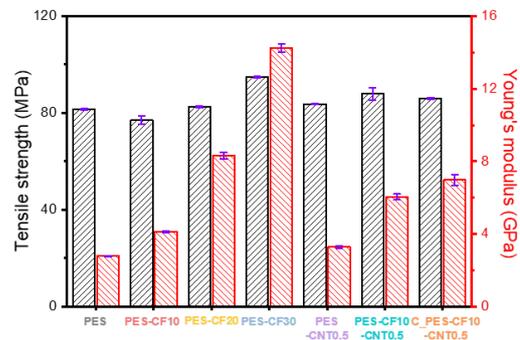


Fig. 1 Tensile strength and young's modulus of the sCF/(CNT)/PES composites with different contents.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 sCF의 분율을 달리하고 CNT를 첨가하여 압출 및 사출 공정으로 시편을 제작하여 커플링에 의한 영향을 평가하였다.

향후에는 섬유 길이를 길게 하고자 PAN계 탄소 섬유를 이용하여 실험을 진행하여 섬유 길이와 전기전도도에 대한 영향에 대해 살펴볼 것이다.

참고문헌

[1] L.W.Shacklette et al. *Journal of vinyl technology*. Vol. 14:118-122, 1992
[2] Ashraf.M et al. *Synthetic Metals*. Vol. 294:117305, 2023

폴리도파민 사이징제가 적용된 CFRP의 계면 특성 및 파단 모드에 대한 분자동역학 해석

Molecular Dynamics Analysis of Interfacial Properties and Failure Modes in CFRP with Polydopamine Sizing Agent

김사랑¹, 박형범^{1}
* S. Kim¹, H. Park^{1*}

¹ 인천대학교 기계공학과
*E-mail: gamamle@inu.ac.kr.

Keywords: Carbon fiber-reinforced plastic, Interface, Sizing agent, Polydopamine, Failure mode

1. 서론

탄소섬유 강화 복합소재(CFRP)에서 혼합 단백질을 기반으로 한 폴리도파민(PDA) 사이징제는 계면 물성 향상을 목적으로 다양한 복합재에 적용되고 있다.[1] 사이징제는 계면 물성을 결정하는 중요한 설계 요소이나, 해석적 측면에서 이를 고려하지 않는 경우가 많다. 본 연구는 대표적인 열가소성 고분자 수지인 Polyamide 66(PA66)과 PDA 사이징제를 통해 개질한 CFRP의 계면 특성 및 파단 메커니즘을 분자동역학 시뮬레이션을 통해 분석하고자 한다.

2. 시뮬레이션 방법론

2.1 PDA 사이징제 기반 분자동역학 모델 구축

PDA에 따른 계면 에너지 변화를 평가하기 위해 Unsized 모델과 다양한 구조의 PDA 사이징제를 적용한 모델을 각각 설계하였다.[2] 설계된 모델은 구조적 안정화를 충분히 거친 후, NVT ensemble에서 2ns 동안 계면과 수직인 Z축 방향으로 압력과 온도를 제어하여 계면을 형성하는 시뮬레이션을 수행하였다. 이후, NVT ensemble 300K 조건에서 4ns 동안 안정화 시뮬레이션을 진행하였다. 계면 에너지는 다음 식을 통해 계산되었다.

$$E_{\text{inter}} = E_{\text{system}} - (E_{\text{PDA-CF}} + E_{\text{PA66}}) \quad (1)$$

2.1 변형 시뮬레이션 방법론

본 연구에서는 온도 및 압력과 같은 공정 조건에 따른 CFRP의 기계적 특성을 평가하기 위한 변형 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 과정에서 PA66 셀의 1/4과 그래핀 시트 1장을 고정된 상태에서, Z축 방향으로 0.025Å/ps의 변형 속도를 적용하였으며, 300K NVT ensemble 조건 하에서 총 4000ps 동안 시뮬레이션을 진행하였다.

3. 결과 및 토의

Fig.1에서, PDA 사이징이 적용된 모델은 사이징제가 없는 모델에 비해 계면 에너지가 최대 373.1kcal/mol 증가한 것을 확인할 수 있었으며, 이는 PDA 사이징이 도입될 경우 높은 계면 결합력을 유지하여 복합재의

물성을 향상시킬 수 있음을 나타낸다. 또한 계면 에너지는 공정 조건에 따라 차이가 발생하며, 변형 시 모델의 인성과 관련이 있음을 확인하였다. 또한 변형 시뮬레이션 결과, CFRP의 계면 물성이 공정 조건에 의해 상이하며, CFRP의 파단 모드에 따라 기계적 성능이 크게 좌우될 수 있으며, 이는 CFRP 제작 시 탄소 섬유 적용 방식이 물성에 중요한 영향을 미칠 수 있음을 시사한다.

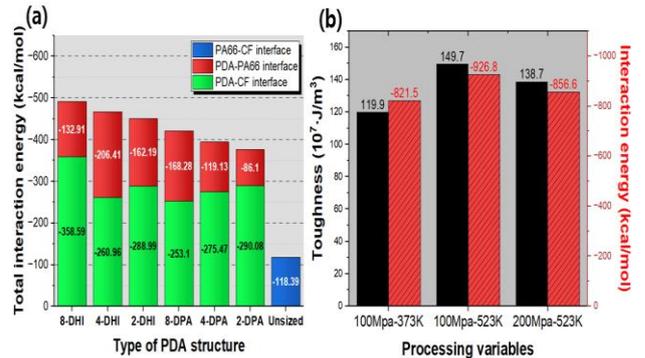


Fig. 1. Interaction energy by (a): PDA sizing (b) : processing variable

4. 결론 및 향후과제

PDA 사이징제가 적용된 CFRP에서는 적절한 공정 조건에 따라 계면 결합 에너지가 향상될 수 있음을 확인하였고, 이 에너지가 CFRP의 인성과 밀접한 관련이 있음을 관측하였다. 또한 변형 시뮬레이션을 통해 CFRP의 공정 조건과 파단 모드에 따른 복합재의 기계적 물성이 달라지는 현상을 분석하였다.

참고문헌

- [1] W. Han et al. *Composites Part A*. 107: 626-632, 2018.
- [2] Jiang B et al. *Polymers*. 12(6):1270, 2020

후기

본 연구는 2024 국가과학기술연구회, CRC23011-000, 재활용 가능한 미래 에어모빌리티 구조용 소재 부품 경량화 플랫폼 기술 개발, 50%, 2023.07.01 - 2029.06.30 과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1F1A1073774).

고체수소저장용 탄소나노튜브 소재의 Tight binding method를 통한 분자스케일 설계 Molecular-scale design of carbon nanotube materials for solid hydrogen storage through tight binding method

*박진우¹, 박형범¹⁺

* J. Park¹, H. Park¹⁺

¹ 인천대학교 기계공학과

+E-mail: gamamle@inu.ac.kr

Keywords Molecular dynamics(MD), Solid-state hydrogen storage. Density Functional based Tight Binding(DFTB).

1. 서론

환경보호를 위한 친환경 에너지인 수소를 저장하기 위해, 안정적이며 에너지 밀도가 높은 방식인 물리 흡착을 통한 고체수소상의 저장방식이 연구되고 있다[1]. 본 연구는 탄소나노튜브(CNT)를 통한 다양한 설계변수에 따른 저장양상의 변화와 흡/탈착 조건에서의 메커니즘을 규명하고자 Density Functional based Tight Binding(DFTB)를 도입하였다. 최종적으로, 실제로 사용가능한 흡, 탈착 과정에서의 가역적인 수소의 중량밀도를 규명하였다.

2. 시뮬레이션 방법론

본 연구는 Materials studio 2024 프로그램의 DFTB+ 패키지를 통해 진행하였다. 모든 Tight binding 계산은 LJ dispersion method를 적용하여 진행 하였으며, 금속 도핑시의 상이한 파티클 종류에 따라 3ob, tiorg, LIB 2019의 functional 적용하여 진행하였다[2].

시뮬레이션은 주기경계조건이 적용된 45Å *45Å *9.8Å 크기의 단위 셀에서 77K,0.01GPa의 저장조건, 300K, 0.001GPa의 탈착조건을 상정하여 4가지의 반지름과 3가지의 금속을 0.02-0.002g/cc의 밀도 감소모델을 도입하여 흡/탈착 메커니즘을 규명하고자 하였다.

3. 결과 및 토의

시뮬레이션결과, CNT의 반지름이 증가할수록 표면적이 증가함에 따라 물리 흡착된 수소의 개수는 증가하였으나, 중량밀도 저장량을 산출하는 식 (1)에서 CNT 무게 증가로 인해 저장 wt%는 감소하게 되었다(Fig.1). 금속 파티클의 종류를 달리하여 도핑을 진행한 CNT 모델의 경우,Ti, Li파티클 도핑을 진행한 모델에서 Pristine 모델보다 34~40%가량의 저장량 증가를 관찰하였으며, 이는 수소와 시스템 간의 높은 Binding energy에서 기인하는 것을 확인하였다.

또한, 흡/탈착을 반복하며 사용가능한 수소의 양인 “유효수소저장량” 을 단위 셀의 수소 밀도를 낮추며 탐색한 결과, 0.005-0.002g/cc 수준의 수소 밀도에서 단위 셀 내의 부피증가로 인한 운동에너지 상승으로, 대부분의 수소가 탈착되어 유효수소저장량이 저장 조건에서의 저장량에 수렴하는 것을 확인하였다.

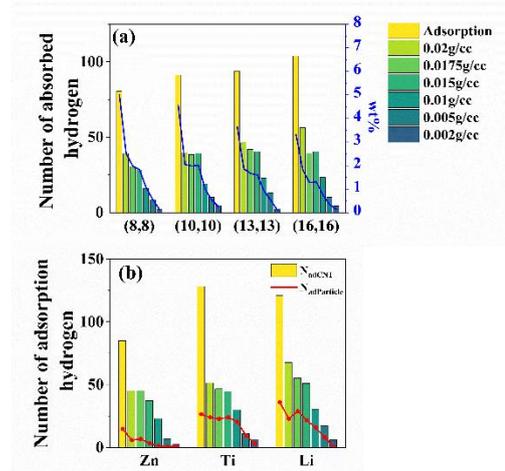


Fig. 1. Graph of physical adsorption of hydrogen according to conditions (a) : Graph of hydrogen storage capacity according to CNT radius (b) : Hydrogen storage graph according to doping particles

$$wt\% = \frac{W_{adH}}{W_{CNT} + W_{adH}} * 100 \quad (1)$$

4. 결론

CNT의 반지름이 증가함에 따라, CNT 중량증가로 인한 수소의 저장 중량밀도 감소를 확인하였고, 단위 셀 내의 수소의 밀도가 감소함에 따라 수소의 활동 부피 증가로 인한 운동에너지 증가는 수소와 CNT간의 binding energy 감소로 이어짐을 확인하였다.

참고문헌

[1] Lyu, Jinzhe et al. An overview of the recent progress in modifications of carbon nanotubes for hydrogen adsorption. *Nanomaterials*, 10-2, 255,2020

[2] Santos, Elizabeth, and Wolfgang Schmickler. "Hydrogen adsorption on doped graphene investigated by a DFT-based tight-binding method." *Journal of Physics: Condensed Matter* 33.50: 504001. 2021

후기

본 연구는 2024, 국가과학기술연구회, CRC23011-000, 재활용 가능한 미래 에어모빌리티 구조용 소재 부품 경량화 플랫폼 기술 개발, 50%, 2023.07.01 - 2029.06.30 과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1F1A1073774).

Effect of fiber surface roughness on interfacial adhesion of carbon fiber reinforced polymer composites – A finite element study

*Quang Ninh Hoang¹, and Hyungbum Park¹⁺

¹ Department of Mechanical Engineering, Incheon National University

⁺E-mail: gamamle@inu.ac.kr

Keywords : Finite element method, Roughness, Interfacial adhesion, Carbon fiber reinforced polymer

1. Introduction

In carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites, the fiber/matrix interface plays a significant role in strengthening materials where load is transferred between fiber and matrix. One key mechanism for improving interfacial bonding is mechanical interlocking, which occurs between the matrix and the rough surface of the fiber[1]. The objective of this investigation is access the effect of roughness on the surfaces of carbon fibers in adjusting interfacial interaction in CFRP composites by using the 3D finite element method.

2. Methodology

2.1 Finite element modeling: Three distinct fiber surface roughness profiles, obtained from AFM images with a scan area of 500 nm x 500 nm, were acquired to develop FE models. The detailed surface roughness characteristics of carbon fibers are summarized in Table 1. The interface between the fiber and matrix is modeled as a bilayer model, where the height ratio of the fiber to the matrix is 1:1 with perfect match at contact surface. For the analysis, a boundary condition with zero displacement was defined at all nodes of top surface of matrix. A displacement control was applied to the bottom surface of carbon fiber in various directions to study interfacial behaviors.

2.2 Constitutive modeling: All materials were assumed to be linear-elastic and to have homogeneous isotropic mechanical properties. In FE simulation, surface-based cohesive contact is used to describe the bonding between the fiber and matrix by introducing traction-separation cohesive behavior. For normal behavior, compressive interactions between the contact surfaces are governed by “hard” contact preventing penetration. Additionally, it is assumed that the contact surfaces slide freely without friction.

3. Results and Discussion

The model’s response under normal loading is presented in Fig. 1, where the traction was calculated by dividing the resulting nodal forces in the loading direction of the top surface by the area. As shown in Fig. 1, the peak stresses of the T7CF, T7CF27, and T7CF27P30 were found to be 87.95, 90.94, 97.30 MPa, respectively. As expected, the rougher surfaces led to an increase in interfacial adhesion, because increased roughness can supply larger contact area between carbon fiber and matrix[2]. However, mechanical interlocking was not

observed in the normal loading direction, as no “hard” contact occurred. In contrast, during transverse and longitudinal loading, enhanced surface roughness significantly improved interfacial behavior through strong mechanical interlocking.

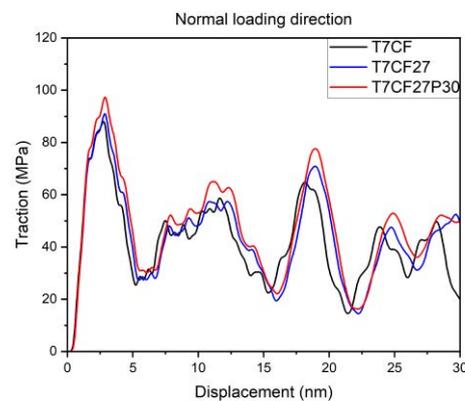


Fig. 1. Traction on top surface under normal loading

Table 1: Detailed surface roughness of CF surface

Roughness	Rq (nm)	
	x	y
T7CF	4.11	1.48
T7CF27	4.14	2.13
T7CF27P30	5.59	3.59

4. Conclusions, and Future Works

This study investigates the influence of fiber surface roughness on the interfacial adhesion of CFRP composites. The results confirm that increasing surface roughness enhances interfacial performance under various loading directions. Future work will focus on incorporating plasticity and damage behavior into the materials to better understand failure mechanisms at the interface.

References

- [1] Xiaomin et al. *Applied Surface Science*. 996-1005, 2018.
- [2] Wei et al. *Applied Surface Science*. 4069-4074, 2011.

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Council of Science & Technology (NST) grant by the Korea government (MSIT) (CRC23011-000) and the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean government (MSIP) (No. 2022R1F1A1073774).

분자동역학 및 실험적 검증 기반 에폭시 분자구조에 따른 비대칭적 항복 표면과 분자 메커니즘 해석

Analysis of asymmetric yield surface and molecular mechanism according to molecular structure of epoxy polymer based on molecular dynamics and experiments

김진영¹, 박형범^{1}
* J. Kim¹, H. Park^{1*}

¹ 인천대학교 기계공학과
* E-mail: gamamle@inu.ac.kr

Keywords: Epoxy resin functionality, Molecular dynamics simulations, Bi-axial deformation, Yield surface

1. 서론

최근 첨단 산업 분야에서 고성능의 에폭시 고분자를 개발하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 특히 고분자 소재의 분자 구조에 따른 기계적 물성에 미치는 영향을 규명하려는 연구가 활발히 수행되고 있다[1,2]. 또한 소재를 더욱 깊이 이해하기 위해, 다축 하중 조건에서의 기계적 물성 및 항복 표면을 조사하는 것은 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 분자동역학 해석과 실험적 검증을 통해 에폭시 폴리머의 분자 구조가 기계적 거동과 항복 표면에 미치는 영향을 평가하고, 비대칭적 항복 표면의 원인을 규명하기 위한 분자 메커니즘을 확인한다.

2. 방법론

2.1 분자동역학 해석 모델 구축 및 시편 제작

선정된 에폭시 수지 단량체는 EPON 862, TGAP, TGDDM이며, 경화제 단량체는 DETDA를 선정하여 에폭시 단위 셀을 형성하였다. 이후 500K의 NVT ensemble을 통해 가교결합 환경을 조성하여 동적가교결합[3]을 수행하였다. 이후 300K-1atm의 NVT ensemble 및 NPT ensemble을 총 6ns 수행하여 최종적으로 에폭시 고분자 시스템을 형성하였다.

에폭시 수지와 경화제 섞인 혼합물을 2000 rpm에서 5분 동안 교반한 뒤, 탈기 작업을 30분 동안 수행하여 몰드에 부었다. 이후 몰드를 강제 대류 오븐에 넣어 경화시켰다.

2.2 변형 시뮬레이션 및 실험 수행

평면 응력($\sigma_3 = 0$) 조건 하의 다축 변형 해석을 수행하였으며, 적용된 등가변형률 속도는 $10^9 / s$ 이며, 등가변형률은 하중 방향에 따라 상이하다.

단축 인장 시험은 ASTM D-638 규격을 준수하였으며, 이축 압축은 평면 변형률($\epsilon_3 = 0$) 조건의 압축 시험을 수행하였다.

3. 결과 및 토의

에폭시 functionality에 따른 항복 표면을 Fig. 1과 같이 도시하였다. 에폭시 functionality의 개수가

증가할수록 항복 표면의 형상이 모든 하중 방향으로 확장되었으며, 특히 등이축 압축 영역으로의 팽창이 더욱 두드러졌다. 이러한 항복 표면의 비대칭성을 $|\sigma_{cc} / \sigma_t|$ 과 $|\sigma_{psc} / \sigma_t|$ 를 통해 정량적으로 제시한 결과, 에폭시 functionality 개수가 증가함에 따라 항복 표면의 비대칭성이 심화되었음을 확인하였다.

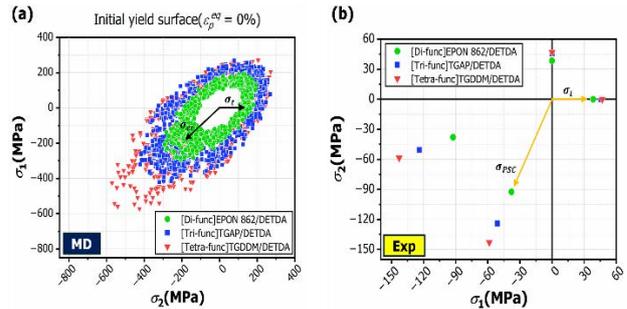


Fig. 1. Yield surface evolution as a function of epoxy functionality: (a) molecular dynamics simulations, (b) experiment.

4. 결론 및 향후과제

에폭시 수지의 functionality 개수에 따른 항복 표면의 상이함을 분자동역학 해석과 실험을 통해 조사하였다. 특히, 에폭시 작용기의 개수가 증가할수록 등이축 압축 방향으로 항복 표면의 확장이 더욱 가속화되는 비대칭성이 심화되었으며, 이를 통해 에폭시 폴리머의 분자구조가 항복 표면에 미치는 영향성을 평가할 수 있다.

참고문헌

- [1] M.S. Radue et al. *J Polym Sci Pt B-Polym Phys.* 56.3: 255-264, 2018.
- [2] H. Park et al. *Polymer.* 136: 128-142, 2018.
- [3] A. Bandyopadhyay et al. *Polymer.* 52.11: 2445-2452, 2011

후기

본 연구는 2024, 국가과학기술연구회, CRC23011-000, 재활용 가능한 미래 에어모빌리티 구조용 소재 부품 경량화 플랫폼 기술 개발, 50%, 2023.07.01 - 2029.06.30과 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1F1A1073774).

DAQ를 활용한스티칭 된 복합소재의 구조 강화 및 비파괴 박리 감지 분석 Structural reinforcement and non-destructive delamination detection of stitched carbon fiber reinforced plastics using DAQ techniques

소용준¹, 배곽진¹, 유재상^{1}
 * Y. So¹, K.J. Bae¹, J. Yu^{1*}

¹ 한국과학기술연구원
 * E-mail: jamesyu@kist.re.kr

Keywords: CFRP, Stitching, Delamination, Data acquisition

1. 서론

탄소섬유강화 복합소재 (CFRP)는 우수한 비강도 비강성의 특성을 지녀 모빌리티 및 스포츠 분야에서 채택되는 소재 중 하나이다 [1-2]. 그러나 CFRP는 층간 구조로 이루어져 박리가 쉽게 발생할 수 있다는 단점이 존재한다 [3-4]. 따라서 본 연구에서는 mode I test를 진행하며 박리 저항성을 높이기 위해 스티칭 기법을 CFRP에 적용하고, 동시에 스트레인 게이지와 data acquisition (DAQ)를 접목해 비파괴 박리 감지 분석을 가능하게 하는 방식으로 활용하였다.

2. 제작 및 실험 준비

2.1 시편 제작

CFRP 제작은 woven preperg를 사용하였다. mode I test를 위해 직물 중앙에 PI film을 삽입하여 예비균열을 형성하며 적용하였다. 이후 스티칭 장비로 스티칭 공정을 진행하였으며 스티칭에는 530D와 1500D의 아라미드 원사를 사용하였다. 총 3 구간에 스티칭 하였으며, DAQ 활용을 위해 총 4개의 스트레인 게이지를 부착하였다. 제작한 프리폼을 hot press를 통해 시편을 제작하였다(Fig. 1).

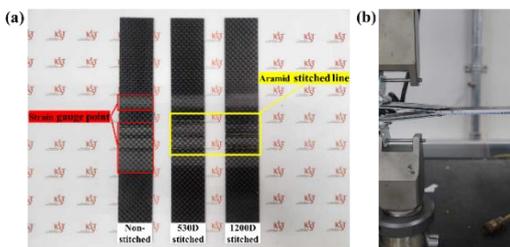


Fig. 1. (a) CFRP samples, (b) mode I test image.

2.2 실험

CFRP의 박리 특성을 관찰하기 위해서 mode I test를 ASTM D5528 규격에 따라 진행하였다. 스티칭 유무와 사용된 스티칭 원사의 굵기에 따른 차이를 관찰하고자 530D 및 1500D 스티칭, 비스티칭 총 3가지 시편에 대해 시험하였다.

3. 시험 결과

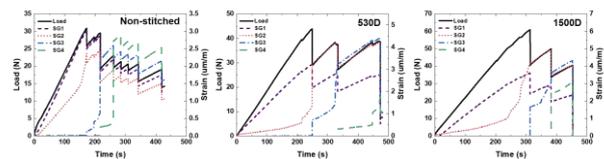


Fig. 2. Load and strain-time curve of CFRP samples.

시험 결과를 비교하면, 스티칭 된 시편이 비스티칭 시편 대비 높은 최대 하중 값을 가졌다. 또한, 박리의 성장이 스트레인 게이지 라인에 도달하면 strain-time이 load-time 커브와 유사한 거동을 보이는 것을 확인하였으며, 이를 통해 박리의 위치를 탐지할 수 있다. 스티칭 된 시편의 경우 박리가 성장하면서 하중 감소가 발생하기 전 strain-time 커브가 불규칙적으로 나타났는데, 이를 통해 박리의 사전 탐지 기능의 활용 가능성을 확인하였다(Fig. 2).

4. 결론 및 향후과제

본 연구를 통해 스티칭 된 CFRP의 박리 저항성에 대한 효과와 DAQ를 통한 비파괴 박리 탐지 역할을 확인하였다. 향후 다양한 실험 조건에서 스티칭과 DAQ 활용 가능성을 관찰할 예정이다.

참고문헌

- [1] S Hegde et al. *Mater Today Proc.* 19:658-662, 2019.
- [2] Behnam A et al. *Compos. A.* 43:1267-1297, 2012.
- [3] MDK Wood et al. *J Compos Mater.* 41.14:743-1772, 2007.
- [4] AB Pereira et al. *Compos Sci Technol.* 64.10-11:1653-1659, 2004.

후기

본 연구는 한국과학기술연구원 기관고유 연구 과제 (2Z07041)와 산업통상자원부에서 (No. 20021913, 00433057) 지원하는 연구 과제로 수행 되었습니다. 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

Development of high-performance carbon felt composite electrode for vanadium redox flow battery

*Gurpreet singh¹, Jun Woo Lim²⁺

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

²Graduate school of Flexible and Printable Electronics & LANL-CBNU Engineering Institute Korea and Department of Mechatronics Engineering, Jeonbuk National University, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, 54896, Republic of Korea

⁺E-mail: jul170@jbnu.ac.kr

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

1. Introduction

Progress in sustainable development is resulting in heightened use of clean and renewable energy sources in place of fossil fuels. Nevertheless, renewable energy sources like solar and wind power require extensive energy storage systems to stabilize production and effectively utilize them in practical applications [1-6]. The vanadium redox flow battery (VRFB) is crucial in energy storage systems due to its benefits, including limitless storage capacity, reliable performance, prolonged lifespan, and design versatility. The VRFB comprises critical components such as bipolar plates, electrodes, membranes, and electrolytes. The energy efficiency of the VRFB mostly depends on the interaction between vanadium ions and the electrode [8]. Carbon-based materials such as carbon felt (CF) and graphite felt are frequently employed as electrode materials due to their affordability, chemical stability, porous structure facilitating electrolyte flow, and excellent electrical conductivity. The main drawbacks of carbon-based electrodes are their insufficient electrochemical activity and low wettability.

This research developed a composite electrode of MXene reduced graphene oxide (MXene-rGO-CF), and carbon felt for application in the vanadium redox flow battery (VRFB). MXene-rGO-CF composite is designed to increase the kinetics of redox couples.

2. Experimental section

2.1 Fabrication of the composite electrode: Firstly, graphene oxide (GO) was first used to create reduce graphene oxide (rGO) by heating it at 150°C for 6 hours. Afterwards, four distinct temperatures 130°C, 150°C, 170°C and 180°C for 8 hours were used to make MXene-rGO composites.

2.2 Characterization: Experimental methods are utilized to investigate the electrocatalytic performance and mass transport properties of the resultant electrode. Electrochemical impedance spectroscopy (EIS), X-ray diffraction (XRD), Raman spectroscopy, cyclic voltammetry (CV), and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) were employed to thoroughly analyze the materials.

3. Results and Discussion

The CV profiles for bare CF and specimens fabricated at different temperature regarding the vanadium redox process at 5 mV/s in a electrolyte are depicted in Fig. 1. It signifies that carbon felt functions as an inert electrode demonstrating low electrochemical activity for the redox reaction. The composite samples are ordered according to their peak currents as follows: MXene-rGO -CF-150°C > MXene-rGO -CF-180°C > MXene-rGO-CF-170°C > MXene-rGO-CF-130°C > Bare CF is relevant to both reduction and oxidation reactions. The decrease in electrochemical polarization of the bare CF electrode can be attributed to the active sites on the surface of carbon fibers.

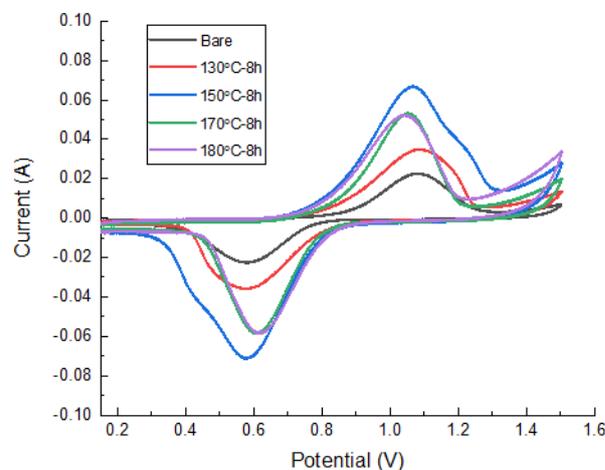


Fig. 1. CV profiles of bare CF and MXene-rGO-CF at different temperatures.

4. Conclusions

This study proposes a pathway for the development of high-performance electrodes that could significantly enhance the comprehensive efficiency and durability of VRFB systems. Our research indicates that the composite synthesized by initially synthesized rGO at 150°C for 6 hours, followed by the MXene-rGO composite at 150°C for 8 hours, exhibited substantial performance. This electrode demonstrates exceptional performance over 120 battery cycles. Stability with a coulombic efficiency of 96.5%, a voltage efficiency

of 86%, and an energy efficiency of 85% respectively, at a current density of 100 mA/cm². The enhanced efficiency and stability be attributed to the improved synthesis conditions, which augment the synergy between MXene with reduced graphene oxide (rGO) yield enhanced electrochemical properties. The research examines the importance of temperature optimization in hydrothermal synthesis.

References

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

Acknowledgement

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

Development of electrode for vanadium redox flow battery with enhanced performance using a carbon felt composite

*Amanpreet Kaur¹, Jun Woo Lim²⁺

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

²Graduate school of Flexible and Printable Electronics & LANL-CBNU Engineering Institute Korea and Department of Mechatronics Engineering, Jeonbuk National University, 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, 54896, Republic of Korea

⁺E-mail: jul170@jbnu.ac.kr

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

1. Introduction

Advancements in sustainable development are leading to increased utilization of clean and renewable energy sources over fossil fuels. However, renewable energy sources such as solar and wind power necessitate the use of comprehensive energy storage systems to stabilize energy production and efficiently harness them in real-world situations [1-6]. The vanadium redox flow battery (VRFB) is significant in energy storage systems because of its advantages such as infinite storage capacity, consistent performance, extended lifespan, and design adaptability [7]. The VRFB has essential components like bipolar plates, electrodes, membrane, and electrolytes. The energy efficiency of the VRFB mostly relies on the interaction between vanadium ions and the electrode [8]. Carbon-based materials like carbon felt (CF) and graphite felt are commonly utilized as electrode materials because of their cost-effectiveness, chemical stability, porous structure for electrolyte flow, and high electrical conductivity. The primary disadvantages of carbon-based electrodes are their inadequate electrochemical activity and poor wettability.

This study created a borophene and carbon felt composite electrode for use in the VRFB. Borophene, a two-dimensional nanosheet, has been recognized as a promising electrode material for high-performance vanadium redox flow batteries (VRFB). A morphological and structural analysis has been conducted to determine the growth of borophene on the surface of carbon fibers in carbon felt.

2. Experimental section

2.1 Fabrication of the composite electrode: Borophene was manufactured using ultrasonication in an atmosphere of nitrogen. The borophene carbon felt composite electrode (B-CF) has been produced using the hydrothermal reduction of an aqueous borophene dispersion. A Teflon-lined autoclave had been used with 130 mL aqueous dispersion of borophene at a concentration of 2 mg/mL at 120°C. The autoclave was operated at an respective temperature for 14 hours. Subsequently, the specimen underwent the carbonization procedure at 900°C. Subsequently, the B-CF was rinsed with deionized water.

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

3. Results and Discussion

The CV profiles for bare CF, PANi-rGO-CF-1,2,& 3 CF towards $\text{VO}_2^+/\text{VO}_2^{2+}$ redox reaction at 5 mV/s in 0.5M $\text{VO}_2^+ + 3.0 \text{ mol/L H}_2\text{SO}_4$ electrolyte is shown in Fig.1 . It indicates that carbon felt serves as an inert electrode exhibiting minimal electrochemical activity for the $\text{VO}_2^+/\text{VO}_2^{2+}$ redox process. The peak currents for the composite samples are ranked as follows: B-CF-120°C > B-CF-150°C > B-CF-90°C > Bare CF, applicable to both reduction and oxidation processes. The reduction in electrochemical polarization of the electrode can be ascribed to the active sites on the surface on carbon fibers.

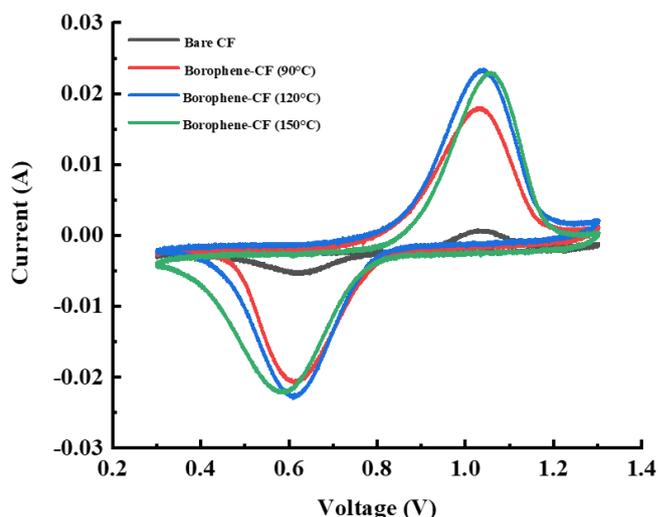


Fig. 1. CV profiles of bare CF and borophene-CF at different temperatures.

4. Conclusions

This study successfully produced a borophene carbon felt composite electrode for vanadium redox flow batteries (VRFB). The electrochemical activity of the redox reaction was enhanced in the composite reaction relative to the bare carbon felt. The study illustrates that borophene enhances the electrocatalytic activity of carbon felt. The borophene promotes fast charge transport and homogeneous dispersion of electrons and ions within the electrode. The active sites with heteroatoms enhances the remarkable electrocatalytic efficacy in vanadium redox reactions. The VRFB exhibits significantly superior performance overall.

References

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

Acknowledgement

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

탄소섬유 토우 미세구조 모델 구축 및 탄소섬유 토우/에폭시 복합재료 인장 강도에 미치는 영향에 대한 연구

Study on microstructure model construction of carbon fiber tow and their effect on tensile strength of carbon fiber tow/epoxy composites

임수현¹, 김원빈¹, 이지은¹, 이준호¹, Nils Maximilian Demski², Holger Seidlitz², 김성수^{1}
S.H. Lim¹, W.V. Kim¹, J.E. Lee¹, J.H. Lee¹, N.M. Demski², H. Seidlitz², S.S. Kim^{1}

¹ 한국과학기술원 기계공학과, ² Fraunhofer IAP PYCO center
*E-mail: seongsukim@kaist.ac.kr

Keywords: Carbon fiber tow, Microstructure, Fiber distribution, Fiber interlacing, Tensile strength

1. 서론

탄소섬유 강화 복합재료는 높은 기계적 물성을 바탕으로 다양한 첨단 분야에 적용되고 있으나, 탄소섬유 토우 내의 불규칙한 미세구조로 인해 복합재료의 기계적 물성을 정확히 예측하기 어려운 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 마이크로 컴퓨터 단층촬영과 같은 3차원 분석이 활용되고 있으나 작은 측정 부피로 인해 데이터 대표성이 부족하고 비용이 높은 문제점이 있다. 따라서 기존 2차원 분석을 활용하거나 보다 높은 접근성을 가지는 실험법을 개발하여 탄소섬유 토우 내 섬유 배열을 분류 및 정량적 평가할 필요성이 있으며, 이를 기반으로 미세구조 모델을 구축하며 탄소섬유 강화 복합재료의 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하는 체계적인 연구 수행이 필요하다.

본 연구에서는 T700급 탄소섬유 토우의 미세구조를 섬유 분포 균일도·섬유 기울어짐 정도·섬유 꼬임 정도에 따라 정량화 하였다. 이를 위해 2차원 현미경 분석 기반 이미지 프로세싱을 수행하였으며, 3차원 공간에서의 탄소섬유 간 꼬임을 평가하고자 2-Roll-mill 시험법을 개발하였다. 정량화 결과를 바탕으로 탄소섬유 토우 미세구조 모델을 제시하고, 탄소섬유 및 탄소섬유 토우/에폭시 복합재료 인장 강도 측정 결과와의 상관 관계를 분석하였다.

2. 실험

2.1 탄소섬유 분포 균일도 및 기울어짐 정도 평가

탄소섬유 토우 단면의 전자주사현미경 (Scanning electron microscope) 분석을 수행하고, 이미지 프로세싱을 통해 탄소섬유 부피분율 및 섬유 평균 이심률을 정량적으로 도출하였다.

2.2 탄소섬유 꼬임 정도 평가

탄소섬유 꼬임 정도를 정량적으로 평가하기 위해 2-Roll-mill 시험법을 개발하였다. 섬유 간 꼬임에 의해 점접촉이 발생하므로, 토우 두께 방향으로

압축력을 가하는 경우에 꼬임이 존재하는 접점에서 사절 (Fiber breakage)이 발생한다고 가정하였다. 이를 기반으로 일정한 속도로 이동하는 토우가 두 개의 롤러 사이를 지나면서 수직 방향의 압축력을 받도록 하고, 초기 토우 질량 대비 사절된 섬유 질량 비율을 산출하여 섬유 꼬임 정도를 간접 평가하였다.

2.3 탄소섬유 및 탄소섬유 토우/에폭시 복합재료의 인장 시험

ASTM D3379-75 시험법과 ASTM D4018-99 시험법을 기반으로 각각 탄소섬유 및 탄소섬유 토우/에폭시 복합재료의 인장 강도를 측정하였다.

3. 결론

탄소섬유 토우 미세구조의 정량 평가를 기반으로 Uniform distribution model과 Core-shell model을 제시하였다 [1]. 균일한 섬유 분포, 낮은 기울어짐 및 높은 꼬임 정도를 가지는 Uniform distribution model이 탄소섬유 토우/에폭시 복합재료의 높은 인장 강도에 기여함을 실험적으로 확인하였다.

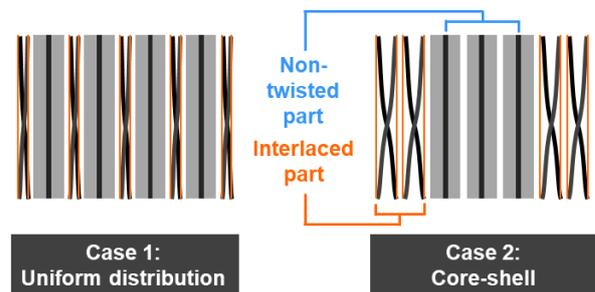


Fig. 1. CF arrangement model

참고문헌

[1] SH Lim, et al. *Compos Sci Technol.* 256:110786, 2024.

후기

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원이 지원한 산업혁신인재양성지원사업 (해외연계)(P0017307)으로 수행된 연구결과임.

Cross-ply 탄소섬유/에폭시 복합재료의 압밀 시 유체 압력과 섬유 부피 분율 변화 측정을 통한 구토스키 식 적용 가능성에 관한 연구

Study on the Applicability of Gutoski Equation through Measurement of Fluid Pressure and Fiber Volume Fraction Change during Consolidation of Cross-ply Carbon Fiber/Epoxy Composites

배상윤¹, 조재영¹, 키야라누 푸트라 파카르티완¹, 김원기¹, 김성수^{1}
* S. Bae¹, J. Jo¹, K. P. Pakartiwan¹, W. Kim¹, S. S. Kim^{1*}

¹ 한국과학기술원(KAIST) 기계공학과
* E-mail: seongsukim@kaist.ac.kr

Keywords: Consolidation, Thermosetting polymer, Resin pressure, Laminate thickness

1. 서론

섬유 강화 복합재료는 높은 비강성, 비강도, 피로강도를 가지며 내식성이 뛰어나 다양한 분야에서 높은 활용도를 보인다. 그러나 제작 공정에서 필연적으로 발생하는 내부 결함은 제품의 신뢰성을 저하하고 안전 계수를 증가시킨다. 내부 결함을 최소화하기 위해 경화 중 열과 압력에 의해 발생하는 수지 유동 양상을 기반으로 한 공정 최적화는 필수적이다. 본 연구에서는 Cross-ply 탄소섬유/에폭시 복합재료의 경화 중 내부 유체 압력과 섬유 부피 분율을 실시간으로 모니터링 하였다. 이를 통해 기존 이론식의 오류 및 개선 방안을 제시하였다..

2. 본론

2.1 실험 설계

수지 압력과 복합재료 두께 측정을 위해 Microtube와 Digital Image Correlation (DIC) 장비를 활용하여 유체 압력과 복합재료 두께 측정 실험을 설계하였다. 압밀 현상을 모사하기 위해 Hot-press로 온도와 압력 조건을 적용하였다.

Microtube 내부에 열 안정성이 높은 실리콘 오일을 채워 복합재료 내부에 삽입하여 압밀 중 실시간으로 유체 압력을 기록하였다. DIC를 통해 몰드 상하부의 거리 변화를 측정하였고, 몰드의 영향을 소거하여 복합재료만의 두께를 측정하였다. 압밀 중 두께 방향 수지 유동이 지배적인 경우를 모사하기 위해 실리콘 몰드를 활용하여 in-plane 방향 유동을 방지하였다.

2.2 경화 사이클 설계

본 연구에서는 프리프레그를 적층하여 복합재료 시편으로 활용하였다. 상온에서 프리프레그 내부 수지의 점도는 유동을 발생시키기에 충분히 낮지 않아 복합재료를 특정 온도까지 가열하여 유동이 활발히 발생할 수 있게 하였다. 또한, 유동이 충분히 발생 하더라도 복합재료 내부에 수지가 골고루 위치하지

않으면 Microtube를 통해 압력이 전달되지 않는다. 따라서 시행착오를 통해 유동이 원활히 발생하며 압력을 측정할 수 있는 경화 사이클을 설계하였다.

3. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 Microtube를 통해 압밀 중 복합재료 내부의 유체 압력을 실시간으로 모니터링 하였고, 복합재료 두께 측정을 통해 압밀 중 섬유 부피 분율을 실시간으로 추적하였다. 이를 통해 두꺼운 복합재료에서 구토스키 식의 적용 가능성을 확인하였다.

기존 구토스키 식은 복합재료의 탄성 계수 A_s 상수로 취급하였고, 특정 복합재료의 특징으로 해석하였다. 하지만 본 연구를 통해 Fig. 1 과 같이 Cross-ply 복합재료에서 탄성계수를 상수로 적용하는 것에 오류가 있음을 확인하였고, 부피 분율에 따른 함수로 취급해야 함을 확인하였다.

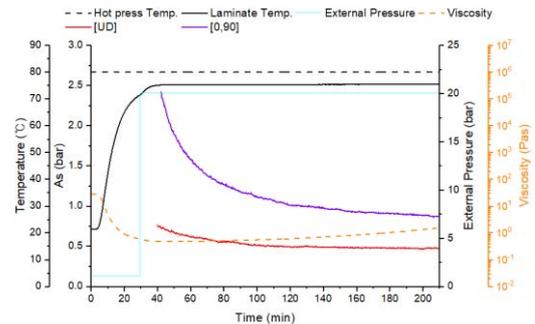


Fig. 1

참고문헌

[1] Gutowski, Timothy G., Tadahiko Morigaki, and Zhong Cai. "The consolidation of laminate composites." Journal of Composite Materials 21.2 (1987): 172-188.

후기

This research was supported by Korea Institute for Advancement of Technology (KIAT) grant funded by the Korea Government (MOTIE) (P0017006, 2023 The Competency Development Program for Industry Specialist)

친환경 소재 개발을 위한 천연섬유 부산물의 활용 Utilization of Natural Fiber by-products for the Development of Eco-Friendly Materials

남시완¹, 정현민¹, 김진훈¹, 최동혁¹, 황희윤^{2}
* S.W. Nam¹, H.M. Jeong¹, J.H. Kim¹, D.H. Choi¹, H.Y. Hwang^{2*}

¹ 국립안동대학교 기계설계공학과, ² 국립안동대학교 로봇공학과
*E-mail: hyhwang@andong.ac.kr

Keywords: Natural Fiber, Bast Fiber, By-Product, Hemp

1. 서론

친환경 소재에 대한 개발이 최근 환경 규제가 환경 오염 문제의 심각성으로 인해 강화되고 있어 많은 관심과 연구가 이루어지고 있다 [1]. 따라서 본 연구에서는 지속가능한 친환경 소재를 개발하기 위해 섬유 펄프화 과정 및 펄프 레이어 제작 과정을 천연섬유 제조 과정에서 발생하는 부산물을 활용하여 진행하였다.

2. 재료 및 제작 방법

2.1 재료 :

본 연구에서는 친환경 소재 개발을 위해 천연섬유 제조 과정에서 부산물로 발생한 대마 인피섬유를 사용하였다. 기계적 처리를 위해 일반 분쇄기 Michelangelo 모델 mcube-3400 과 연구용 분쇄기 Single blade type model RT-02 를 사용하였다. 건조를 위해 Kalstein Oven을 사용하였다. 다공질 펄프 레이어를 제작하기 위해 3차 증류수와 초음파 세척기 KSC-300모델과 자체 제작 발틀(330 mesh)을 사용하였다. 다공질 펄프 레이어를 다공성 구조로 제작하기 위해 일신 바이오베이스 FD8512를 사용하여 동결건조를 진행하였다.

2.2 제작 방법 :

전 처리 과정으로 불순물을 제거하기 위해 빗질을 통해 섬유를 정렬하고 세척한다. 열처리 과정으로 섬유를 100℃에서 10시간 동안 가열한다. 기계적 처리를 위한 습식 분쇄 과정으로 인피섬유와 물을 혼합 후 10초에 걸쳐 총 3회 일반 분쇄기로 분쇄한다. 오븐에서 60℃로 3시간 동안 건조한다. 연구용 분쇄기로 20초 2회 분쇄하여 다공질 펄프를 형성하였다. 다공질 펄프와 3차 증류수를 초음파 세척기에 넣고 자체 제작한 발틀로 쌍발 뜨기를 통해 다공질 펄프 레이어를 제작한다. 이후 동결건조를 진행하여 다공성 구조를 형성한 펄프를 제작한다.

3. 제작 결과

Fig. 1는 제작한 다공질 펄프 레이어의 모습과 5X 현미경으로 관찰한 모습이다. 레이어 평균 두께는 448.9 μm이며, 레이어의 밀도는 110.27g/m²으로 확인되었다.

Fig. 2는 동결 건조를 통해 다공성 구조의 형태로 제작되었음을 확인 할 수 있다.

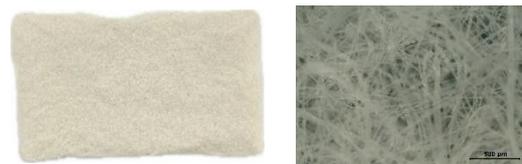


Fig. 1. Porous Pulped layer and 5X Microscope Observation.



Fig. 2. Freeze-dried Porous pulp.

4. 결론 및 향후과제

본 연구는 천연섬유를 제조하는 과정에서 발생하는 부산물에 기계적 처리만을 진행하여 다공질 펄프를 얻었다. 이후 충격 흡수 실험 및 복원력 실험을 진행하여 내장재 사용을 위한 소재로 개발 및 연구를 진행할 것이다.

참고문헌

- [1] SK Lee et al. *Fiber Technology and Industry*. 8:378-397, 2004.
- [2] PC Lee et al. *Polym. Korea*. 45:922-926, 2021.

후기

본 연구는 국립안동대학교 3단계 산학협력 선도대학 육성 사업 (LINC3.0) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Analyzing Dome Geometry Effects on Stress Distribution in Type-III Hydrogen Pressure Vessel Composite Layers

*Syed Zargham Abbas Hamdani¹, Jia-le Che¹ and Seung-Hwan Chang¹

¹ School of Mechanical Engineering, Chung-Ang University

*E-mail: phigs4@cau.ac.kr

Keywords : Filament winding; Pressure vessels; Finite element analysis

1. Introduction

Fossil fuel use in transportation has significantly impacted Earth's climate, prompting the search for eco-friendly energy alternatives. Hydrogen has appeared as a sustainable energy source [1, 2] and that resulted in the investment in hydrogen technology around the globe. Hydrogen is typically stored in a Type-III pressure vessel consisting of a metallic liner and composite overwrap. The dome geometry plays a crucial role in the design and performance of pressure vessels, significantly influencing stress distribution [3] and safety management. Various dome shapes, including hemispherical, Isotensoid, paraboloid, and ellipsoid configurations, each impart distinct stress patterns [4-6] and affect the vessel's bursting pressure. The choice of dome shape not only impacts the vessel's ability to withstand internal pressures but also influences material efficiency, weight distribution, and manufacturing complexity. Engineers must carefully consider these factors to optimize the vessel's structural integrity, safety margins, and overall performance. By selecting the most appropriate dome geometry, designers can enhance the vessel's resistance to failure.

2. Modeling of Type-III pressure Vessel

2.1 Generation of Finite Element Model:

Dome shape was generated following the parabolic pattern, different slopes were assigned for different shapes. Using Eq. (1) different dome geometries are generated in order to find the interlaminar stresses generated, these dome geometries are given in Fig.1. Each dome accurately replicated the vessel's geometry and filament winding pattern, including winding angles and layer thickness. This detailed approach allowed for precise analysis of the vessel's structural behavior under various conditions. A finite element model was developed in ABAQUS (6.20, SIMULIA, France) to analyze stress variations in hydrogen pressure vessels with different dome shapes.

2.2 Calculating thickness and angle change in Dome part:

Node data of the elements was used to calculate the element's slope and determine the helical layer angle at that point using Eq. (2). Also with the changing geometry the thickness also changes in the dome part and is measured following the winding pattern.

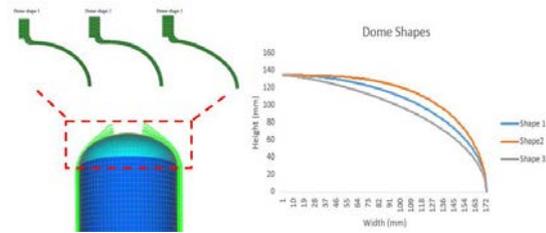


Fig. 1. Different dome shapes

3. Results and Discussion

As the geometric structural changes and it changes the winding angle of the layers the angles increase as we move towards the port part. Also for accurate modeling of the pressure vessel accurate thickness prediction in the dome part is very curtail, the layer thickness also increases with the dome part. In this study we studied different dome shapes of the pressure vessel to see the effect of dome shape on the interlaminar stresses generated and from that data decide a suitable dome shape for the pressure vessel.

$$y = \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^m} \times b \quad (1)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{rif'(ri) - f(ri)}{\sqrt{1 + [f'(ri)]^2} \sqrt{ri^2 \cot^2 \omega - [f(ri)]^2}} \quad (2)$$

4. Significance and Future Works

This study can help select an appropriate dome shape for the pressure vessel. After an appropriate shape of the dome part the authors would like to find an optimized winding pattern for the vessel to further improve the stresses levels and reduce the weight and cost of the pressure vessel.

References

- [1] Awad, et al. International Journal of Hydrogen Energy 9(5): p. 355-366. 1984.
- [2] Pareek, A., et al. Materials Science for Energy Technologies, 3: p. 319-327. 2020
- [3] .Sharma, P., et al. composite structures. 293: p. 115732. 2022
- [4] .Zhang, J., et al. Marine Structures. 74: p. 102819. 2020
- [5] Van Hien, D., et al. composite structures. 254: p. 112854. 2020
- [6] .Sharma, P., et al. International Journal of Hydrogen Energy. 45(46): p. 25386-25397. 2020

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MSIT) (RS-2023-00208286).

생분해 복합재료 시편의 생분해 거동에 대한 해석적 연구 Simulation of biodegradable behavior of biodegradable composites specimens

차가락¹, 이호석¹, 장승환^{1}
* J.L. Che¹, H.S. Lee¹, S.H. Chang^{1*}
¹ 중앙대학교 기계공학부
* E-mail: phigs4@cau.ac.kr

Keywords: Biodegradable composite, Degradation process, Simulation.

1. 서론

골절치료를 위해 통상적으로 사용되는 고정판은 스테인리스 강이나 티타늄 합금 등 금속으로 제작된다. 이는 인골과의 강성차이가 매우 크기 때문에 응력 방패 현상을 유발하여 골다공증을 발생시킬 수 있으며, 동시에 낮은 피로 특성으로 반복 하중에 따른 파괴가 발생할 수 있다[1]. 이런 문제 해결하기 위해 마그네슘이나 Polylactic acid (PLA) 등의 다양한 생분해 복합재료는 인체 적합성과 설계성으로 고정판을 만드는데 널리 사용되고 있다 [2]. 이전 연구자들은 치료시간의 경과에 따라 고정판의 기계적 성능 변화가 골절치료 초기에 영향을 미친다는 것을 확인하였다 [3]. 이전 연구에서 Mg wire/PLA 복합재료 시편을 체액을 모사한 환경에서 분해실험을 수행하였다. 시편의 PBS 흡수율, 질량 및 pH 변화를 확인하고, 시편의 기계적 성능이 감소되는 것을 확인하였다 [4]. 또한 Mg wire/PLA 시편의 기계적 성능이 감소하는 원인을 확인하기 위해서 마그네슘과 PLA 시편의 변화를 통해 마그네슘과 PLA 인체 환경에 분해과정을 확인하였다 [5,6]. 분해실험 결과를 보면 온도, pH 등의 환경조건의 변화는 마그네슘과 PLA의 분해 속도에 영향을 주었다. 따라서 Mg wire과 PLA가 함께 분해하면 시편 물성이 감소하는 것이 판단될 수 있다. 본 연구는 마그네슘과 PLA의 분해실험 결과에 의하여 분해 시뮬레이션을 수행해서 Mg wire/PLA 시편 인체 환경에서 분해과정 및 기계적 성능 변화를 확인하였다.

2. 복합재료 시편 분해 시뮬레이션

2.1 재료 및 시편

본 연구에서 사용된 생분해 복합재료는 직경이 0.3mm인 마그네슘 합금(AZ31) 와이어 (Mg wire)이며, PLA는 필름형태로 성형한 후 사용하였다. ASTM-D2344 표준에 따라 시편 (50mm × 12mm × 2mm)을 제작하였다. 제작한 시편의 Mg wire의 부피분율은 50%이다.

2.2 분해 시뮬레이션

본 연구에서는 확산 방정식 모델을 사용하여 생체 환경 내에서 Mg wire/PLA 시편의 재료 분해 과정을 시뮬레이션 하였다. 마그네슘과 PLA의 분해 실험 결과에 따라 유한 요소에 흡수된 수분 농도가 일정 수준에 도달하면 유한 요소가 변화 및 삭제하였다 (Fig.

1 참조). 이를 통해 시편의 질량 및 기계적 성능의 변화를 얻은 후 실험값과 비교하는 방식으로 시뮬레이션 모델을 보정하였다.

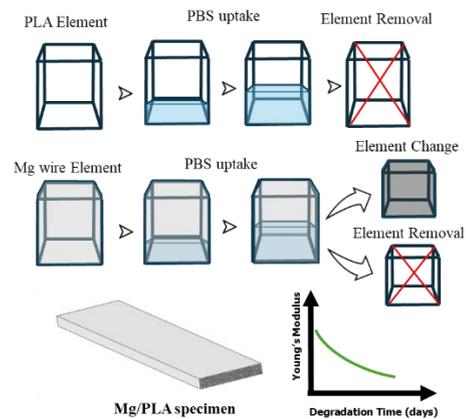


Fig. 1. Mechanism of element degradation process in simulation.

3. 결론

마그네슘과 PLA 인체 환경에서 분해과정을 고려한 시뮬레이션을 통해 Mg wire/PLA 시편의 인체 환경에서의 분해 과정 및 기계적 성능 변화과정을 모사하기 위한 시도를 하였다. 해석결과, Mg wire과 PLA가 많이 분해되면 28일에 시편의 기계적 물성이 78% 저하되었다. 향후, 좀 더 세밀한 해석방법 개발을 통해 생분해 복합재료 보철구에 대한 정밀한 재료거동을 예측하는 것이 필요하며, 이를 통해 생분해 보철구의 설계에 활용하고자 한다.

참고문헌

- [1] HK Uhthoff et al. *Journal of bone and joint surgery*. 64.1:66-71, 1983.
- [2] Ruben et al. *Polymers*: 15(24):4667, 2023.
- [3] Abdal et al. *Composites Part B: Engineering*. 197:108158, 2020.
- [4] Wahaai Ali et al. *Composites structures*: 210 :P914-921, 2019.
- [5] Nur- Azzah et al. *Pplymer bulletin*. 80: P1179-1213, 2023.
- [6] Dong et al. *Journal of Alloys and Compounds*. 908:164600, 2022.

후기

본 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00208286).

Quantum annealing을 통한 hybrid composite 적층 순서에 따른 충격 특성 분석 Analysis of impact characteristics according to hybrid composite stacking sequence through quantum annealing

조성욱¹, 지승민¹, 권승호¹, 전성식^{1}
 S.W. Cho¹, S.M. Ji¹, S.H. Kwon¹, S.S. Cheon^{1}

¹ 공주대학교 기계공학과

* E-mail: sscheon@kongju.ac.kr

Keywords: Quantum annealing, Charpy test, Hybrid composite, Stacking sequence, Binary quadratic model

1. 서론

Fiber reinforced plastic(FRP)은 높은 비강도, 비강성 특성으로 인해 고성능 제조 응용 분야(예: 항공우주, 자동차, 스포츠 장비)에서 점점 더 많이 사용되고 있다 [1]. 이러한 FRP는 섬유 보강재와 polymer resin이 기지로 구성된다. 섬유 보강재의 경우 일반적으로 탄소나 유리 섬유가 적용되며, 기지는 섬유를 연결하고 섬유 사이의 응력을 전달하는 역할을 하게 된다. FRP는 일련의 단일 방향 섬유를 쌓아서 제조되며, 이러한 적층 순서는 FRP 복합재의 기계적 특성을 결정하는 데 필수적이라 할 수 있다[2]. FRP의 적층 순서 최적화를 위한 접근 방식에는 다양한 방식이 존재하며 여전히 지역 최적해에 대해서만 보장한다는 한계를 갖고 있다[3]. 현재 상용화되어 사용 중인 양자 어닐링 기술은 이러한 지역 최적해에 갇히지 않으면서 빠르고 성공적인 전역 최적해 수렴을 보장한다[4]. 따라서 hybrid composite의 경우 다양한 재료 가지 수에 따른 기하급수적인 조합의 증가를 양자 어닐링을 통해 효율적으로 도출할 수 있다. 본 연구에서는 효율적인 전역 최적해를 보장하기 위해 양자 어닐링을 통한 각 재료의 적층 순서 도출과 도출된 조합의 결과는 charpy해석을 통해 충격 특성 분석이 이루어졌다.

2. Material properties & Charpy analysis

Hybrid composite에 적용될 재료 후보는 열가소성 수지 기반의 탄소 섬유, 유리 섬유, 아라미드 섬유가 채택되었다. 각 복합재의 적층 순서에 따른 충격 특성은 Fig. 1과 같이 charpy해석을 통해 도출되었다.

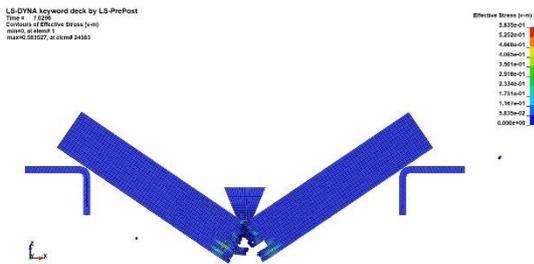


Fig. 1. Hybrid composite thermal cond. analysis

3. Quantum annealing을 통한 조합 최적화

Hybrid composite의 충격 특성 향상을 위한 최적의 적층 순서는 조합 최적화 방식으로 접근하여 수행되었다. 이를 위해 밀도, 중방향 영률, 횡방향 영률, 플라이 수가 변수로 적용되며, charpy해석을 통한 각 섬유들로만 구성된 FRP의 충격 특성이 가중치로 입력되게 된다. 충격 특성으로는 stacking angle에 따른 충격 에너지 흡수량이 선정되었으며 전체 조합에서의 충격 에너지 흡수량이 최대가 되며, 경량화를 만족하도록 목적함수와 제약조건이 설정되게 된다. 이러한 조합 최적화는 비결정론적 알고리즘을 통해 다항시간 안에 최적해를 도출할 수 있는 문제이기 보다는 지수시간이 필요한 Nondeterministic polynomial(NP) complete로 취급할 수 있다. 이는 최적해 도출까지 소요되는 시간이 입력 변수의 크기에 따라 기하급수적으로 증가하는 것을 의미한다. 하지만 양자 어닐링을 적용하면 양자 특성 중 하나인 양자 터널링 효과를 통해 병렬 계산 효과를 기대할 수 있으며 이를 통해 μs 안에 전역해를 도출할 수 있다. 본 연구에서는 식(1)과 같은 Binary quadratic model(BQM)형식의 문제를 hybrid composite의 적층 순서 조합에 맞게 재정의 하여 적용되었다.

$$f(x) = \sum_i a_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + c \quad (1)$$

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 hybrid composite에 적용될 각 재료의 적층 순서에 따른 충격 특성을 charpy해석을 통해 도출하였다. 도출된 각 재료의 충격 특성은 각 재료의 기계적 특성과 플라이 수와 함께 변수로 적용되어 충격 에너지 흡수량이 최대이며 경량화를 만족하는 적층 순서 조합을 양자 어닐링을 통해 도출하였다. 양자 어닐링의 수행은 정의된 BQM형식의 문제로 적용되었으며 도출된 각 조합의 충격 특성은 charpy해석을 통해 비교 분석이 이루어졌다. 향후 양자 어닐링을 통해 도출된 조합 특성은 다른 최적화

알고리즘과의 결과 분석을 통한 성능비교가 요구
되어질 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Van de Werken, et al. Additive Manufacturing 31 (2020): 100962.
- [2] Jones, Robert M. Mechanics of composite materials. CRC press, 2018.
- [3] Wang, et al. Composite Structures 233 (2020): 111739.
- [4] Abel, et al. Physical Review A 106.4 (2022): 042607.

후기

이 연구는 2022 년도 산업통상자원부 및 한국산업
기술기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임
(‘20017947’) 또한 이 논문은 2023 년도 정부(과학기술
정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 양자정보과학
연구개발생태계 조성사업의 지원을 받아 수행된
연구임(2020M3H3A1110365).

An Investigation on the Validity of Isothermal and Dynamic Differential Scanning Calorimetry Tests in Modeling the Curing Kinetics of Epoxy/Alumina Composites

Kiyaranu Putra Pakartiwan¹, Sangyoon Bae¹, Jaeyoung Jo¹, Wonvin Kim¹, Seong Su Kim^{1†}
¹Department of Mechanical Engineering, KAIST
[†]E-mail: seongsukim@kaist.ac.kr

Key Words: Cure Kinetics, Epoxy/Alumina Composites, Differential Scanning Calorimetry (DSC)

1. Introduction

Epoxy/alumina composites are emerging as attractive materials due to their high thermal conductivity and electrical insulation properties, making them ideal for applications requiring efficient heat dissipation [1]. Despite their increased use, the curing kinetics of high alumina content epoxy composites remain understudied in isothermal conditions. Most research relies on dynamic DSC tests, citing the epoxy's low reactivity, the method's simplicity and speed. However, since real-world curing is largely isothermal, validation under these conditions is essential. [2]. This study investigates the validity of isothermal and dynamic DSC tests for modeling the curing kinetics of epoxy/alumina composites, aiming to provide more accurate insights into their behavior during the curing process.

2. Experimental

2.1 Materials

The Epoxy/Alumina composites used in this study consists of Araldite® B 41 CI unmodified Bisphenol A resin, Aradur® HT 903 CI anhydride hardener from Huntsman Corporation (USA). Alumina are then mixed to form the composite to study the influence of alumina filler on the curing behavior.

1.2 Determination of Curing Behavior

The isothermal temperature in the DSC test ranges from 140°C to 220°C (Q20, TA Instruments, USA) wherein the samples are held until the heat flow curve reaches convergence. The results of the isothermal tests are fitted to the Kamal-Sourour (KS) cure kinetics model in MATLAB (R2023b, MathWorks, USA) [3]. For the dynamic DSC tests, multiple different temperature ramp rates ranging from 1°C/min to 15°C/min are used. The results of the analysis are used to fit the modified Sestak-Berggren (SB) equation with the reaction rate determined via the Kissinger method [4].

3. Results

As shown in figure 1 (left), the KS model exhibited a better agreement with isothermal experimental results at various temperatures compared to the SB model. This is potentially due to the lower apparent activation energy of the KS model. However, the results also showcase the superiority of the SB model when modeling the curing behavior at the dynamic regime.

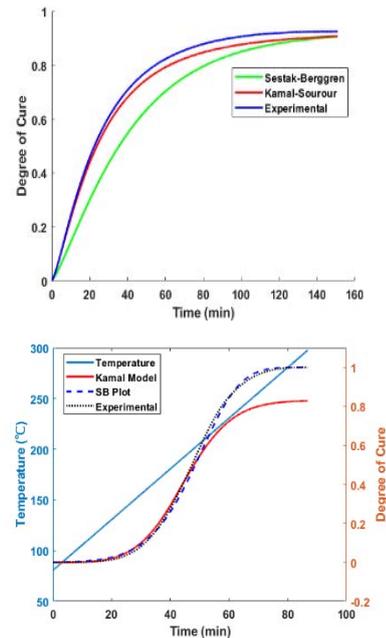


Figure 1 Model Comparison during Isothermal Cure at 170°C (left) and Dynamic Cure at 2.5°C/min (right) for 70 wt% Alumina/Epoxy Composite

The result also showcases a good agreement between the KS model and the dynamic test results until the temperature reaches around 200°C, indicating the validity of the model at lower temperatures. Beyond this temperature, the KS model underestimates the degree of cure of the composite due to the heat generation loss at the initial part of the isothermal DSC experiments which can be attributed to the thermal lag induced by the high heat capacity of the alumina filler.

4. Conclusion and Future Work

A comparative analysis of the KS model from isothermal DSC and the SB model from dynamic DSC was conducted. The KS model showcased good agreement with experimental data obtained under constant temperatures. However, the model showcased discrepancies at elevated temperatures in the dynamic regime.

Future work will explore the impact of varying alumina content on cure kinetics and establish guidelines for selecting dynamic or isothermal DSC based on alumina content and curing conditions.

References

- [1] Chen, C. et al. *Composites Part A*, 118, 67-74.
- [2] Bi, Q. et al. *Thermochimica Acta*, 678, 178302.
- [3] Garschke et al. *Polymer Testing*, 32(1), 150-157.
- [4] Li, L. et al. *Thermochimica Acta*, 597, 93-100.

Acknowledgements

This research was supported by the Nano & Material Technology Development Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by Ministry of Science and ICT (No. RS-2024-00450477).

직물 배열 데이터 이진화를 통한 CFRP 기계적 물성 예측 Prediction of CFRP Mechanical Properties Using Binarization of Textile Arrangement Data

권승호¹, 지승민¹, 조성욱¹, 전성식^{1}
* S.H. Kwon¹, S.M. Ji¹, S.W. Cho¹, S.S. Cheon^{1*}

¹ 공주대학교 기계공학과

* E-mail: sscheon@kongju.ac.kr

Keywords: CFRP, Woven, Weaving structure, FE Analysis

1. 서론

현재 Carbon fiber reinforced plastic(CFRP)은 우수한 강도와 내구성을 제공하며, 경량화를 위해 항공우주, 자동차 등 다양한 분야에서 사용되고 있다[1]. 특히 UD CFRP에 비해 직물 CFRP는 종, 횡 방향 모두 우수한 성질을 가지고 있고, 섬유 배열 방향에 따른 기계적 특성을 정밀하게 조절할 수 있다. 이러한 특성으로 복합재의 설계 유연성을 높여주며, 특정 응용 분야에서 최적화된 성능을 발휘할 수 있게 한다. 항공기 날개의 경우 공기역학적 성능과 구조적 강도를 동시에 충족해야 하므로, 직물 CFRP의 종, 횡 방향 강화 섬유 배열이 큰 장점을 제공한다. 이러한 이유로 직물 CFRP 복합재의 RVE model을 통해 구조적 강성을 예측 및 분석하는 연구가 진행되고 있다[2]. 본 연구에서는 다양한 직조 구조가 직물 복합재의 물성에 미치는 영향 분석 및 예측이 진행되었다.

2. FE model

다양한 직조 구조의 Meso scale geometry model을 생성하였고, Fig. 1과 같이 나타난다. CFRP의 내부 직물을 PA6로 구성된 Matrix 소켓이 감싸고 있는 형태이다. 내부 직물은 4×4 규모로 Plain, Twill, Satin의 기본 구조와 랜덤으로 생성된 직조 구조를 포함하여 1,000개의 형상모델이 구축되었다.

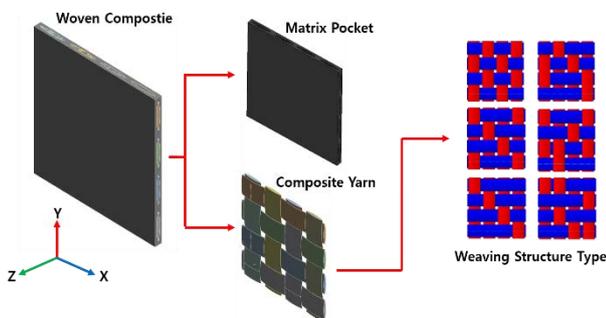


Fig. 1. Meso scale FE model of weaving patterns

3. 구조해석

본 연구에서는 Texgen이 이용되어 다양한 패턴을 갖는 직조 패턴이 생성되었고, Ansys를 통해 1000개의 형상 모델에 대한 구조해석이 진행되었다. Fig. 2는 각각 Plain Type CFRP의 인장 FE Analysis을 나타낸다.

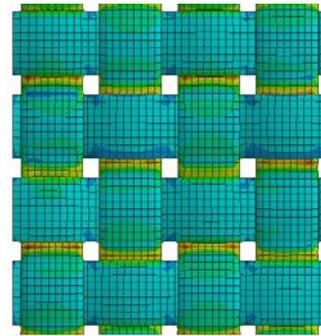


Fig. 2. Tensile FEA of Plain type woven composite .

4. 결과 고찰

본 연구에서는 다양한 직조에 인장, 압축 및 전단 외력이 작용되었을 때 내부 응력분포 및 Stress-Strain Curve 차이가 비교 및 분석 되었다. 직조 패턴에 따라 하중 저항 특성 변함이 확인되었고, Database(DB)가 구축되었다. 위 DB를 바탕으로 Machine learning model에 학습이 진행되었고 직조 형상에 따른 하중 저항 특성이 우수한 정확도로 예측되었다.

참고문헌

- [1] George Marsh et al. Reinforced Plastics. 56.6: 32-35, 2012
- [2] HS Kim et al. Compos Res. , 32(5), 206-210.

후기

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 한국산업기술 기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 ('20017947')

혼합 열경화성 수지의 경화도 예측 및 지배 방정식 도출을 위한 경화 동역학 모델 비교 및 개선에 관한 연구

A Study on the Comparison and Modification of Cure Kinetic Models for Predicting the Degree of Cure and Deriving Governing Equations of Blended Thermosetting Resin

조재영¹, 배상윤¹, Kiyaranu Putra Pakartiwan¹, 조동현¹, 이민근¹, 김성수^{1}

* J.Y Jo¹, S.Y. Bae¹, K.P Pakartiwan¹, D.H Cho¹, M.G Lee¹, S.S. Kim^{1*}

¹ 한국과학기술원 기계공학과

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

Keywords: Cure kinetics, Blended thermosetting resin, Differential scanning calorimetry(DSC), Parameter fitting

1. 서론

복합 재료의 기계적 물성은 수지 경화 품질에 의존한다. 특히 혼합 수지에서는 수지간 상호작용으로 인해 동시에 발생하는 상이한 자가촉매 반응과 1·2차 아민 반응을 반영한 경화 동역학 분석이 필수적이다. Kamal-Sourour 모델은 단일 수지의 경화도 예측에 적합하지만[1], 혼합 수지의 경우 그 정확도가 검증된 바 없다. 본 연구에서는 기존 경화 동역학 모델의 혼합 수지 적용 가능성을 판단하고 새로운 경화 동역학 모델의 필요성을 제안하였다.

2. 본론

2.1 시차주사열량계(DSC) 실험

혼합된 아민계 수지의 경화 거동을 관찰하기 위해 시차주사열량계(DSC Q20, TA Instruments, USA)를 통해 60°C부터 90°C 까지 10°C 간격으로 등온 조건에서, 0.5°C/min, 0.75°C/min, 1°C/min, 2°C/min로 비등온 조건에서 진행하였다. 시간에 따른 경화 반응열을 기반으로 경화도를 도출하였다. 재현성 확보를 위해 각 조건에서 세 번의 반복 실험을 수행하였으며, 평균 값을 이용하여 경화 동역학 모델의 매개변수를 도출하였다.

2.2 경화 동역학 모델 도출 및 비교

등온 실험 결과를 기반으로 식(1)의 Sestak-Berggren 모델에 항을 추가한 SB-JK[2] 모델과 식(2)의 Kamal-Sourour 모델 도출 후, 지배방정식을 비등온 조건으로 변환하였다. 비등온 실험 결과를 두 개의 발열 피크로 분리하여 각각 Sestak-Berggren 모델에 적용하였다. 비등온 실험 결과를 기반으로 식(3, 4)의 경화 동역학 모델을 도출하였다. 식 도출을 위해 Python (Python 3.126, Python Software Foundation, USA)을 이용하여 비선형 최소 제곱법이 적용되었다.

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_1\alpha^m(1 - \alpha^n) + k_2\alpha^p(1 - \alpha^q) \quad (1)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = (k_1 + k_2\alpha^m)(1 - \alpha^n) \quad (2)$$

$$\ln \frac{\beta}{T_p} = \ln \frac{AR}{E_a} - \frac{E_a}{RT_p} \quad (3)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = k_1\alpha^m(1 - \alpha^n) \quad (4)$$

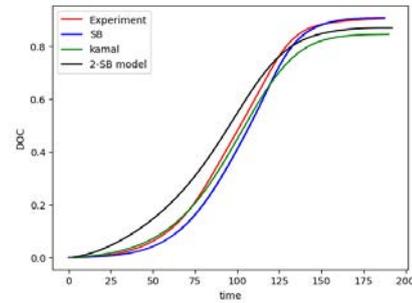


Fig. 1. Degree of cure between experimental values and models.

3. 결론 및 향후과제

본 연구는 다양한 경화 동역학 모델을 평가하고 혼합 열경화성 수지에 적합한 모델을 선정하기 위해 Kamal-Sourour, Sestak-Berggren, SB-JK 모델을 비교하였다. Fig. 1 같이 비등온 조건에서 Sestak-Berggren 모델이 가장 높은 적합도를 보였다. 다양한 반응을 고려하여 매개변수를 추가한 SB-JK 모델은 복잡한 반응 메커니즘을 반영할 수 있지만 파라미터 범위를 직접 설정해야 하는 한계로 인해 비교적 낮은 적합도를 보였다. 이는 SB-JK 모델에 유전 알고리즘 적용으로 개선 가능할 것으로 판단된다. 추후 보완된 모델로 반응 메커니즘을 반영함과 동시에 높은 적합도를 가지는 수정된 SB-JK 모델을 제시하고자 한다.

참고문헌

- [1] Garschke et al. *Polymer Testing*, 32(1), 150-157
- [2] Montserrat, S. et al. *Thermochemica Acta*, 269, 213-229.

후기

이 연구는 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원에 지원을 받아 수행된 연구임 (P0017006, 2024년, 산업혁신인재성장지원사업)
 This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. 2020R1A2C201096512).

단방향 탄소섬유강화 복합재의 전단 특성 평가를 위한 수정된 전단 시험법 개발 Development of the Modified Shear Test for Determining the Shear Properties of Uni-Directional Carbon Fiber Reinforced Plastics

김영우¹, 김규원¹, 노현지¹, 김외태², 김동휘², 김학성^{1,3}
 * Y.W. Kim¹, G.W. Kim¹, H.J. Rho¹, W.T. Kim², D.H. Kim², H.S. Kim^{1,3*}

¹ 한양대학교 융합기계공학과, ² 현대자동차 기초소재연구센터, ³ 한양대학교 첨단반도체패키징연구센터
 *E-mail: kima@hanyang.ac.kr

Keywords: Carbon fiber reinforced plastics; Finite element analysis; ASTM D7078 Shear test;

1. 서론

탄소섬유강화 복합재의 전단 거동은 구조 설계에 중요한 요소로, 신뢰성 높은 전단 물성 확보가 필수적이다. 기존 ASTM 전단 시험법은 복합적인 응력 발생으로 신뢰성 있는 전단 물성 획득에 한계가 있다. 본 연구에서는 이를 보완한 새로운 전단 시험 장치를 고안하여 복합재 시편의 순수 전단 거동을 유도하는 시험 기법이 개발되었다. 또한 해당 시험 기법을 모사한 구조해석 모델을 통해 복합재의 기계적 거동을 분석하였다.

2. 복합재 물성 평가 시험

본 연구에서는 기존 ASTM D7078 시험 장치의 한계를 보완한 새로운 전단 시험 장치를 개발하였다. 기존 장치는 시편 고정 압력 부족으로 인해 slip 및 in-plane rotation, 시험 지그의 align 뒤틀림으로 인한 out-of-plane rotation이 발생할 수 있다. 이에 따라 클램핑 장치의 형상을 수정하고, guiding cylinder를 추가하여 새로운 전단 시험 장치를 제작하였다 [2]. Fig.1 과 같은 새로운 시험 장치로 실험을 진행하고 DIC 장비를 통해 시편 상 strain distribution을 분석하였다. 시편은 단방향 탄소섬유에 에폭시 수지를 함침시킨 프리프레그를 사용하여 제작되었다.

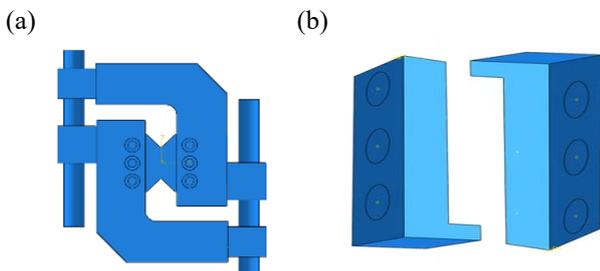


Fig. 1. (a) Modified ASTM D7078 test fixture and (b) clamping devices

3. 유한 요소 해석

개발된 전단 시험 해석 모델은 ABAQUS를 통해 제작되었으며, 시편은 ASTM D7078 규격에 따라 3D shell element로 구성되었다. Fig. 2 와 같이 수정된

클램핑 장치를 포함하여 시편 고정 압력 및 guiding cylinder에 따른 하중/경계 조건을 적용하여 해석을 진행하였다. 해석 결과는 실험값과 비교되어 정합성이 검토되었다.

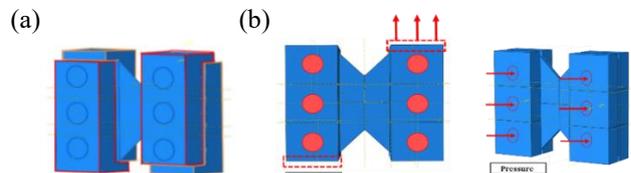


Fig. 2. (a) Schematic view of simulation model and (b) boundary condition of simulation model

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 기존 ASTM 전단 시험 장치의 한계점을 분석하고 개선된 순수 전단 시험 장치를 개발하였다. 이를 통해 Fig.3 과 같이 복합재 시편의 순수 전단 거동과 균일한 전단 변형률 분포를 확인하였고, 해석에서는 시편의 gage section 에서의 순수 전단 응력 상태가 검토되었다. 새로운 시험 장치를 통해 복합재의 신뢰성 높은 전단 물성 도출이 가능할 것으로 사료된다.

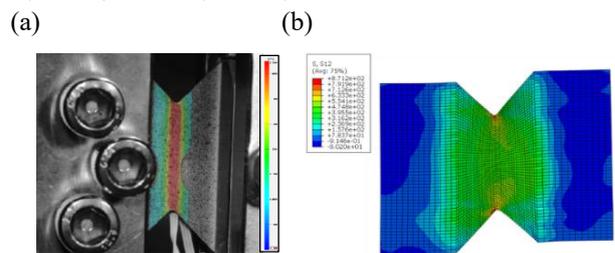


Fig. 3. (a) Strain distribution on shear test specimen derived through DIC and (b) stress contour of simulation result

참고문헌

- [1] Ullah H et al. *Composite structures*.101-144, 2013
- [2] Stamopoulos, A. *GManufacturing Review*,7: 10, 2020

후기

본 연구는 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20212020800090, 정온물류 운송 및 물류센터 에너지 효율화 기술 개발 및 실증). 본 연구는 현대자동차 그룹의 지원을 받아 수행된 연구임.

단방향 섬유 강화 복합재의 섬유 정렬 및 수지 결함에 따른 강도 변화 분석 Analysis of strength according to fiber alignment and matrix defects in unidirectional fiber-reinforced composites

지승민¹, 조성욱¹, 권승호¹, 전성식^{1}
 S.M. Ji¹, S.W. Cho², S.H. Kwon², S.S. Cheon^{1}

¹ 공주대학교 기계공학과

*E-mail: sscheon@kongju.ac.kr

Keywords: Representative volume element, Fiber distribution, Fiber misalignment, Finite element

1. 서론

섬유 강화 복합재는 낮은 밀도, 높은 비강성 및 강도와 같은 뛰어난 기계적 특성으로 인해 많은 산업 분야에서 광범위하게 사용되고 있다 [1]. 이러한 복합재의 수요가 증가함에 따라, 기계적 거동을 예측하기 위한 효율적인 방법으로 representative volume element(RVE) 모델을 이용한 유한요소 분석이 주목 받고 있다 [2]. RVE 모델은 섬유 분포의 영향을 크게 받아 기계적 거동 변화가 크다. 따라서 본 연구에서는 길이 방향으로 정렬되지 않은 섬유 분포 및 수지 결함에 의한 RVE 모델의 기계적 거동 분석이 진행되었다.

2. 복합재료 모델

2.1 Fiber misalignment

RVE 모델을 활용한 단방향 섬유 강화 복합재에 대한 많은 연구가 수행되었지만, 대부분 섬유 분포를 정의하는데 중점을 둔 2차원 RVE 모델 생성을 다루었다. 3차원 RVE 모델 생성 시 일반적으로 섬유방향으로 2차원 RVE 모델을 간단히 압출하여 생성되며, 이는 정렬된 섬유가 분포된 RVE 모델이다. 하지만 섬유 강화 복합재는 제조 공정 중 열 응력으로 인해 초기 설정된 섬유 방향에서 벗어나는 현상이 발생한다. 따라서 아래 Fig. 1과 같이 섬유 정렬이 고려된 RVE 모델에 대해 기계적 거동 분석이 필요하다. 본 연구에서는 random sequential expansion (RSE) 알고리즘을 이용해 2D RVE 모델이 생성되었고 그 방식은 Fig. 2와 같다.



Fig. 1. RVE model considering fiber misalignment.

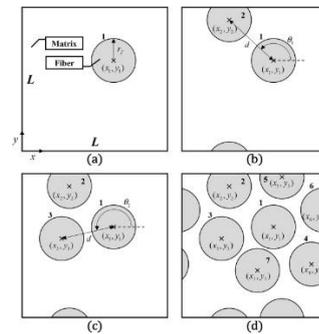


Fig. 2. Schematic illustration of random fiber generation by the RSE algorithm.

2.2 Matrix defects

앞선 2.1 절에서 제조 공정에서 발생한 열 응력이 섬유 정렬 오류의 원인이 될 수 있다고 한 것과 같이 잔류 열 응력은 수지의 미세 공극이 생성되게 한다. 특히, 수지에 발생한 미세 공극은 복합재의 횡방향 인장, 압축 거동과 전단 거동에 영향을 미친다. 따라서, Fig. 1에 나타난 RVE 모델에 미세 공극이 생성되어 인장, 압축 그리고 전단 하중에 따른 RVE 모델의 기계적 거동에 미치는 영향이 분석되었다.

3. 결과 고찰

섬유 강화 복합재의 섬유 오정렬 및 수지 미세 공극을 고려한 RVE 모델 생성 및 섬유 방향 하중 변화에 따른 기계적 거동 분석이 진행되었다. 섬유 오정렬로 인해 섬유방향 압축 시 좌굴이 발생하여 강도 및 강성이 하락되는 것이 확인되었다.

참고문헌

- [1] J Ye et al. Compos Struc. 279:114856, 2022.
- [2] W Bai et al. Compos Sci. Tech.. 234:109946, 2023.

후기

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 한국산업기술 기획평가원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 ('20017947').

폐자동차로부터 재생한 폴리프로필렌 복합재의 3D 프린팅 활용 3D printing using recycled polypropylene composite from End-of-Life (ELV) vehicle

*윤현섭¹⁺, 이주열¹⁺, 김옥배²⁺
* H.S. Yoon¹⁺, J.Y. Lee¹⁺, W.B. Kim²⁺

¹ 한국공학대 학교 대학원 기계설계공학과, ² 한국공학대 학교 기계설계공학부
+ E-mail: wkim@tukorea.ac.kr

Keywords: 3D printing, End-of-Life Vehicle, Polypropylene composite, Warpage.

1. 서론

기후위기의 심화에 따라 자동차 산업에서는 ELV 규제가 전세계적으로 강화되어, 유럽의 새 지침에 의하면 폐차에서 플라스틱의 최소 30%를 재활용이 필요하다[1]. 폴리프로필렌(polypropylene, PP)은 자동차 재료의 순환성 향상에 핵심 재료이며, 특히 3D 프린팅 응용은 산업경쟁력에도 영향이 크다. 그러나 PP는 결정성(crystalline) 소재로서 높은 수축률로 3D프린팅이 쉽지 않았다. 본 연구에서는 폐차 범퍼 등으로부터 유래한 유리섬유(glass fiber, GF) 강화 재생 폴리프로필렌(GF-rPP) 펠렛을 스크류 압출 방식의 3D프린팅에 직접 활용하고 그 특성을 분석하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 재료 및 분석방법: 본 연구에서는 30wt%의 유리섬유를 함유하고 15g/10min의 흐름지수를 갖는 GF-rPP를 사용하였다. 비교를 위해 탄소섬유(carbon fiber, CF)가 30 wt% 첨가된 호모 폴리프로필렌 (CF-hPP) 신재를 함께 적용하였다. 재료의 용융점과 결정화도를 파악하기 위해 시차주사열량계(DSC) 분석을 실시하였다. 또한 3D프린팅 소재로서의 유연학적 특성 분석을 위해 회전형 레오미터를 이용한 주파수 분석을 실시하고 보편적 프린팅 소재와 비교하였다.

폴리프로필렌이 빌드플레이트와 접합력이 낮으므로 이를 개선하기 위해 알루미늄 합금을 에칭처리하고 표면에너지를 분석하였다.

2.2 3D 프린팅 장치와 방법: 3D프린터는 싱글 스크류 압출기를 갠트리방식의 3축 스테이지에 장착한 시스템으로 최대 체적 350×350×250 mm³의 프린팅이 가능하다. 압출 노즐은 직경 2 mm를 사용하였다. 프린팅 공정에서는 압출온도 등 주요 부위 온도조건을 핵심인자로 설정하였다. 수축률 평가를 위해 대각선이 있는 4각형의 시편을 출력하였다. 180×180×180 mm³, 두께 3mm의 단일 벽 (single wall)의 상자구조를 출력하고 방향별 시편을 절단하여 인장, 굽힘 시험을 실시하였다. 시편의 파단면을 주사전자현미경(SEM) 분석하였다.

3. 실험결과

재생 폴리프로필렌 복합재 GF-rPP는 165도의 PP 용융점외에도 독립적인 피크를 보였으며 각 피크의 용융엔탈피는 hPP의 그것보다 낮았다. 0.1% 변형율과 210 °C에서 측정한 레오미터 결과는 측정주파수 영역 대부분에서 점탄성 고체거동을 보였다. 실제 3D 프린팅 출력시 GF-rPP는 표면처리된 빌드플레이트로부터 박리되지 않았으며, 비교대상의 PP소재들보다 현저히 낮은 뒤틀림 변형을 보였다. 낮은 수축에 대해 유리섬유 강화효과를 파악할 수 있었다. GF-rPP는 균일한 비드가 형성되었으며, 비드간 접합이 양호하였다. 인장강도는 약 49 MPa (평균 연신율 1.7%), 굽힘강도는 약 63 MPa로 나타났다. 파단면에서는 미크론 규모의 섬유형태 (fibrous)의 연신된 조직이 관측되었으며, 이는 호모 폴리머의 파단면과는 다른 특성이다.

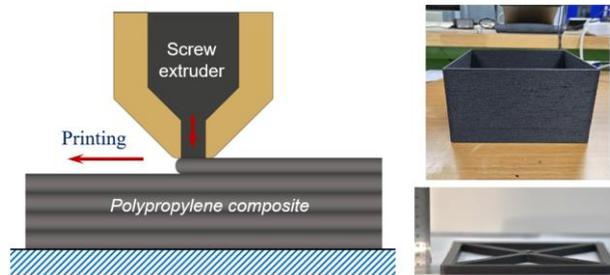


Fig. 1. 3D printing schematic and printed parts of GF-rPP

4. 결론 및 향후과제

PP 소재는 3D프린팅에 꾸준히 시도되고 있으며, 본 연구에서는 리사이클링 복합 PP소재가 기존의 호모폴리머와 달리 수축이 억제되고 비드간 접합성이 우수하여 3D프린팅에 적절한 특성을 보임을 확인하였다.

참고문헌

[1] J Minde et al. *Additive manufacturing*. 33:101101, 2020.

후기

경기도지역협력연구센터 사업으로 수행하였음. [GRRC 한국공대2020-B01, 자동차용 고강도, 경량, 내열, 발열 부품의 고속 적층가공기술 개발]

수중운동체 항력 저감 및 내충격 기능 향상을 위한 분리가능한 다기능 통합 구조에 대한 연구

A Study on Separable Multifunctional Integrated Structures for Drag Reduction and Enhanced Impact Resistance of Underwater Vehicles

노현지¹, 엄희진¹, 신지환², 김민재², 김학성^{1,3}

Hyun-Ji Rho¹, Hui-Jin Um¹, Ji-Hwan Shin², Min-Jae Kim², Hak-Sung Kim^{3}

¹ 한양대학교 융합기계공학과, ² 국방과학연구소, ³ 한양대학교 첨단반도체패키징연구센터

* E-mail: rhj333221@gmail.com

Keywords: Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites, multifunctional system, drop weight test, energy efficiency

1. 서론

수중운동체의 에너지 효율 향상을 위해 선체 표면에 공기층(plastron)을 형성하여 항력을 저감하는 연구가 활발히 수행되고 있다 [1]. 이러한 공기층 형성에 필요한 추가 에너지는 다기능성 복합재료 구조를 통해 효율적으로 공급될 수 있다 [2, 3]. 본 연구에서는 plastron 형성의 효율 증대를 위해 Pulse width modulation (PWM) 제어를 적용하고 효율을 평가하였다. 또한 에너지원 유지 및 보수가 가능하도록 설계한 다기능성 복합재료 구조에 대하여 충격 저항 특성을 확인하였다.

2. 실험 방법

2.1 PWM 버블 생성 제어 시스템

리튬이온폴리머(LiPo) 배터리 팩에 MOSFET과 아두이노를 구성하여 PWM 제어 시스템을 구성하였다. 양극 알루미늄, 음극 구리를 사용한 전극 시편을 NaCl 수용액에 노출, 전압 펄스를 인가하여 버블 생성을 진행하였다. 컨트롤러의 출력 신호 주기 대비 전압을 인가하는 시간의 비율인 듀티 사이클을 조절하며 버블 생성 양상을 확인하고 에너지 소모를 측정하였다.

2.2 내충격 시험

다기능성 복합재료 구조의 충격 저항을 평가하기 위하여 낙구시험을 진행하였다. CFRP로 제작한 스킨과 코어로 corrugated core 형상의 샌드위치 구조를 제작하였다. 또한 스킨과 코어는 기계적 체결과 접촉의 두 가지 방식으로 분리 가능하도록 하였다. 구조의 코어 내부 빈 공간에 LiPo 배터리를 위치시킨 후 코어가 지지하는 중앙 부분에 중량 6.048kg, 직경 16mm의 반구형 팁으로 충격을 가하였다.

3. 실험 결과

듀티 사이클 증가에 따라 생성되는 버블의 양과 전압 강하가 더 크게 발생하였다. 또한 측정된 전압을

정전압 방식으로 인가하였을 때보다 PWM 제어에서 더 많은 양의 버블이 발생하였다. 내충격시험 결과 기계적으로 체결된 시편이 접촉 방식에 비하여 더 큰 최대 하중 값과 더 작은 손상 영역을 나타냈다.

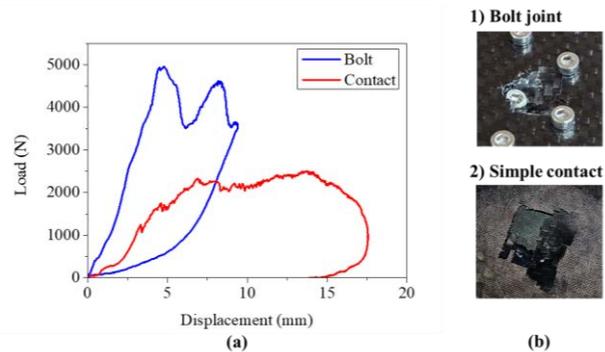


Fig. 1. Results of drop weight test (a) L-D curve (b) damaged area.

4. 결론 및 향후과제

PWM 방식을 통해 버블 생성을 제어 가능하며 전압 대비 효율이 정전압 인가 방식보다 우수하였다. 또한, 기계적 체결된 샌드위치 구조가 접촉 방식 대비 내충격 특성이 우수하였다. 향후 과제에서는 PWM 방식의 정전압 인가 방식 대비 실 전력 소모 효율 측정을 진행하고자 한다.

참고문헌

- [1] MCHALE, Glen, et al. *Appl Phys Lett*, 2009, 94.6.
- [2] THOMAS, J. P., et al. *J Compos Mater*, 2013, 47.1: 5-26.
- [3] UM, Hui-Jin, et al. *Adv Compos Hybrid Mater*, 2023, 6.5: 182.

후기

이 논문은 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UD230502DD)

물결 모양 코어를 가진 원통형 샌드위치 구조의 정수압 좌굴 분석 Hydro-pressure buckling analysis of sandwich structure with corrugated core

전나현¹, 엄희진¹, 신지환², 김민재², 김학성^{1,3}

Na-Hyun Jeon¹, Hui-Jin Um¹, Ji-Hwan Shin², Min-Jae Kim², Hak-Sung Kim^{1,3}

¹ 한양대학교 융합기계공학과, ² 국방과학연구소, ³ 한양대학교 첨단반도체패키징연구센터

*E-mail: nahyun.j11@gmail.com

Keywords: Buckling, Carbon Fiber Reinforced Plastic Composites, Corrugated core, Sandwich structure

1. 서론

탄소섬유 강화 복합재료는 낮은 무게와 우수한 강도와 강성, 높은 부식 저항성의 장점을 가지고 있어 많은 산업 분야에 적용되고 있다. 특히 해양 구조 설계의 적용이 늘어나고 있는 추세이지만 복합재료를 적용한 내압용기에 대한 연구는 미비한 실정이다 [1]. 따라서 본 연구에서는 원통형의 물결 코어 샌드위치 구조를 설계 하였고, 유한요소 해석을 통해 정수압 하중 하에서의 좌굴 거동에 대해 분석하였다.

2. 본론

2.1 샌드위치 구조 내압용기 모델

설계한 원통형 물결 코어 샌드위치 구조와 크기는 그림 1에 나타나 있다. 단위 길이 구조에 들어가는 코어는 길이 및 개수에 따라 길이방향으로 분할 배치 되었으며 코어 길이가 짧을수록 더 많은 수로 분할된 코어를 회전시켜 번갈아 배치하였다.

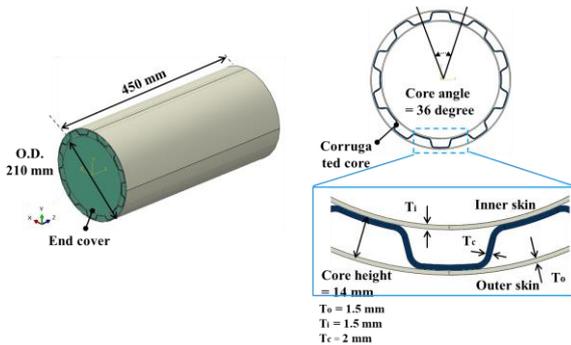


Fig. 1. Model geometry of sandwich structure with corrugated core.

샌드위치 구조의 스킨부는 탄소섬유 능직 fabric 물성을 사용하였으며 (CPF3327, Toray, Japan), 격자 코어는 마크포지드 사의 연속탄소섬유 물성 (CCF, Markforged, USA)을 적용하였다

2.2 선형 좌굴 해석

스킨부와 코어부는 모두 쉘 요소인 SC8R (continuum shell element) 가 적용되었고 Open-closed 실험 조건에

따라 한 끝단은 고정지지, 다른 한쪽 끝단은 축방향의 변위만을 허용하는 경계조건을 부여하였다. 또한 구조체가 정수압을 받는 조건을 모사하기 위해 외부 스킨부와 끝단 end cover 에 1 MPa 를 가하였다.

3. 결과

코어 길이와 배치에 따른 샌드위치 구조의 선형 좌굴 거동 비교하였다. 길이가 짧은 코어가 엇갈려 배치될수록 좌굴 하중이 증가하는 경향이 나타났다. 이는 샌드위치 구조의 코어가 스킨을 지지하는 면적이 코어 개수가 증가할수록 면적이 좁아지기 때문에 하중 지지 성능이 향상된 것으로 하나의 코어로 구성된 샌드위치 구조보다 9개의 코어가 번갈아 배치된 샌드위치 구조에서 선형 강도가 1.4배 이상 증가하였다. 따라서 코어 크기 및 배치 등에 따라서 동일 무게임에도 좌굴 강도를 크게 향상 시킬 수 있다.

4. 결론 및 향후과제

샌드위치 구조의 코어 배치에 따라 동일 부피 혹은 동일 무게를 가지는 선체에도 좌굴 강도를 크게 향상 시킬 수 있다. 하지만 구조의 실제 항복은 이보다 낮은 강도에서 발생하며 이는 제작 과정에서의 결함으로 인한 물성 저하나 기하적 초기 부정에서 기인한다 [2]. 따라서 실제 파손 강도를 예측하기 위해서는 구조의 비선형성이 고려되어야 하며 향후 실제 제작 및 실험을 통해 비선형 특성을 고려한 좌굴 해석 모델 기법을 구축할 예정이다.

참고문헌

- [1] S.H Hur et al., *Compos Struct.* 86: 114-124, 2008
- [2] N.G. Tsouvas et al., *Compos B.* 34: 217-226, 2004

후기

이 논문은 2024년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (UD230502DD).

우주 환경을 모사한 열피로 하중이 고강성 섬유강화 복합소재의 전단 물성에 끼치는 영향

Effects of thermal fatigue loading imitating space environment on the shear response of high-modulus fiber-reinforced composite materials

* 김원창¹, 이만영², 길태건², 채한기³, 지우석^{1*}
 * W.C. Kim¹, M.Y. Lee², T.G. Kil², H.G. Chae³, W.S. Ji^{1*}

¹ 울산과학기술원 기계공학과, ² 국방과학연구소 국방첨단과학기술연구원 소재에너지기술센터,
³ 울산과학기술원 신소재공학과
 * E-mail: wsji@unist.ac.kr

Keywords: Thermal fatigue, In-plane shear strength, Laminate composite

1. 서론

인공 위성과 같은 우주 임무용 비행체에 적용되는 복합소재는 태양에 노출되는 위치에 따라 극한 온도 차이를 겪는다. 이에 따른 열피로 응력은 복합소재 내부 수지에서 미세한 균열을 발생시키고, 결국 복합소재 전체의 기계적 물성을 저하시킨다 [1]. 본 연구에서는 주기적인 열응력을 모사하여 열피로 하중이 적층식 복합소재에 끼치는 영향을 분석하였다.

2. 열피로 하중 실험

2.1 시편 설정

본 연구에서는 H사와 T사의 탄소섬유, 수지 A로 구성된 총 두 종류의 프리프레그를 사용하였다. 시편은 [+45/-45]_s로 제작되었으며, Fig. 1(a)와 같이 피로물성 측정용 시편(35 mm x 3 mm)과 피로균열 CT 촬영용 시편(5 mm x 5 mm)으로 가공하였다.

2.2 열피로 하중 실험

열피로 하중 실험은 Fig. 1(b)와 같이 연구용 오븐(SH-DO-360FG, 삼흥)을 사용하여 최대 195 °C까지 가열한 후 상온에서 35 °C까지 냉각하였다. 위와 같은 과정을 최대 1000회 반복하였으며, 각 200회 마다 기계적 물성과 시편 내부 수지 균열을 측정하였다.

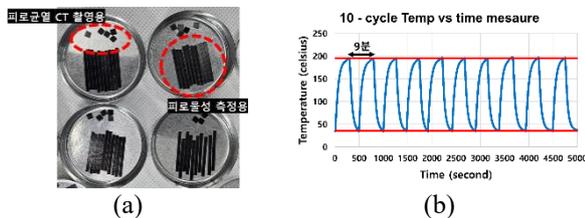


Fig. 1. (a) Thermal fatigue loading test specimens (b) 10 cycle Temp vs time measure graph.

3. 면내 전단강도 시험

횡방향 수지 균열이 기계적 물성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 복합소재 물성에서 수지의 영향이

극대화되는 면내 전단강도를 측정하였다[2]. 시험은 ASTM D3518을 참고하여 시편의 표점 거리는 17 mm, 시험 속도는 0.1 mm/min로 설정하였다. 시험은 각 시편당 5회 수행하였으며 시험결과를 Fig. 2와 Table 1에 나타내었다. 두 복합소재 모두 인장방향 강도 및 파단 변형률은 반복횟수가 증가할수록 초기 값에 비해 최대 40%까지 감소하는 경향을 보였으나 인장방향 강성은 반복횟수가 증가하여도 오차범위 7% 이내의 유사한 강성 값을 가지는 것을 확인하였다.

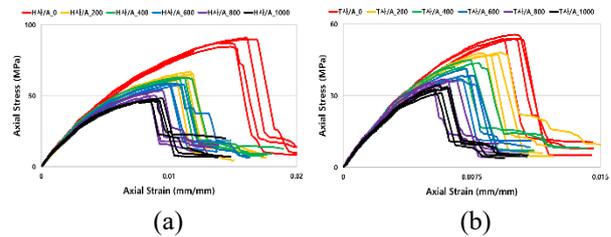


Fig. 2. Stress-Strain curve of (a) Hs/A, (b) Ts/A

Table 1 Normalized In-plane shear test results

Specimen	Hs/A					
	Cycles	0	200	400	600	800
Peak Stress	1.00	0.73	0.71	0.66	0.57	0.53
Failure Strain	1.00	0.74	0.71	0.67	0.57	0.58
Axial Stiffness	1.00	0.95	0.96	0.93	0.95	0.94
Specimen	Ts/A					
	Cycles	0	200	400	600	800
Peak Stress	1.00	0.88	0.79	0.71	0.66	0.61
Failure Strain	1.00	0.90	0.79	0.72	0.59	0.58
Axial Stiffness	1.00	0.98	1.00	0.95	0.99	0.99

4. 결론 및 향후계획

두 종류의 탄소섬유 복합소재가 열피로 하중에 의해 면내 전단강도 값은 저하되었으나 전단강성은 일정한 값을 유지하는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Satoshi Kobayashi et al. *Composites Part B:Engineering*. 34:753-759, 2003.
- [2] CY Hong et al. *Composites Part A:Applied Science and Manufacturing*. 117:123-133, 2019.

후기

본 연구는 대한민국 정부(사업통상자원부 및 방위사업청) 재원으로 민군협력진흥원에서 수행하는 민군기술협력 사업의 연구비 재원으로 수행되었습니다. (과제번호 22-CM-19)

스택 구조 설계를 통한 연료전지 성능 향상 Enhancing fuel cell performance through stack structure design

이원준¹, 유웅열^{1}
* W.J. Lee¹, W.R. Yu^{1*}

¹ 서울대학교 재료공학부,
*E-mail: woongryu@snu.ac.kr

Keywords: Fuel cell, Bipolar plate, simulation,

1. 서론

연료전지는 여러 단일 셀을 직렬로 연결한 스택 구조를 통해 성능을 높이지만, 양극판(bipolar plate)의 두께로 인해 스택의 부피가 증가하는 문제가 발생한다. 스택 부피의 증가는 전력 밀도 저하와 시스템의 효율성 감소로 이어지며, 연료전지의 전반적인 성능 향상에 제약이 된다. 이를 해결하기 위해서는 양극판의 두께를 줄이거나 통합하는 설계가 필요하다[1]. 본 연구는 저온 연료전지(low-temperature fuel cell)에서 양극판을 통합하여 스택의 부피를 줄이는 설계 방안을 제안한다. 이를 통해 스택의 부피를 최소화하면서 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 탐구하고자 한다. 이를 위해 설계 방안 고안 및 COMSOL Multiphysics 시뮬레이션을 활용하여 설계한 구조의 성능을 분석하였다.

2. 단일 셀 연료전지의 양극판 구조 선정

단일 셀 연료전지는 MEA, GDL, 그리고 양극판으로 구성되며, 스택 구조에서 여러 셀이 직렬로 연결된다. 이때 각 단일 셀의 양극판이 맞닿아 스택의 부피가 증가하게 되며, 이는 연료전지의 전력 밀도를 저하시키는 주요 원인 중 하나다. 본 연구에서는 이러한 부피 문제를 해결하기 위해 양극판을 하나로 통합하는 설계를 제안하였다. 통합된 양극판은 두 셀 사이에서 각 셀의 독립적인 기능을 유지하면서, 스택의 두께를 줄여 부피 문제를 해결한다.

또한, open cathode 구조를 적용하여 산소 공급과 냉각 기능을 통합하고, anode에는 수소를 공급하며 폐쇄형 구조를 채택해 연료 혼합을 방지하였다. 이러한 설계는 복잡한 냉각 시스템을 단순화할 수 있고, 스택의 부피를 줄일 수 있는 장점을 가진다. 이후, COMSOL Multiphysics 시뮬레이션을 통해 양극판 통합 설계를 분석하였으며, 고안한 방식의 성능과 활용 가능성을 평가하였다.

3. 단일 셀 단위 시뮬레이션

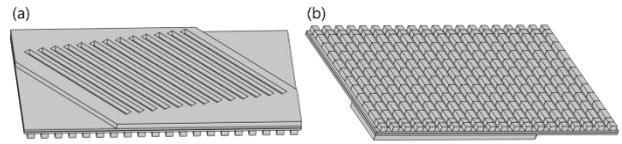


Fig. 1. (a) Anode and (b) Cathode flow field modeling

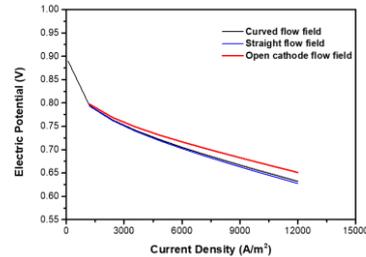
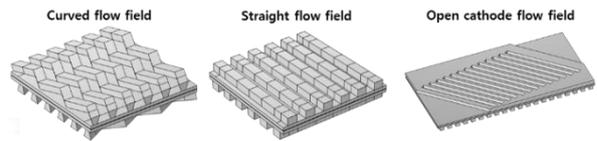


Fig. 2. Singel cell simulation results

각 단일 셀의 치수와 시뮬레이션 조건을 동일하게 유지한 상태에서, anode와 cathode의 유로가 동일한 경우와 새로 설계한 양극판 구조를 적용한 경우를 비교하여 시뮬레이션을 진행하였다. 계산 결과, 새로 설계한 양극판 구조가 더 좋은 성능을 보임을 확인하였다.

4. 결론 및 향후과제

시뮬레이션 결과를 통해 연료전지 성능의 개선 가능성을 확인하였다. 그러나 양극판 통합을 위한 실험이 동반되어야 하며, 이 과정에서 가스 누출 방지, 전기전도성 등 조건을 충족해야 한다. 금속 재료에 부식 방지 코팅과 같은 추가적인 공정 및 두께 개선이 필요한 점을 고려할 때, 복합재 재료를 사용한 일체형 제조 방식이 더 적합할 것으로 판단되며, 이를 바탕으로 향후 실험을 진행할 예정이다.

참고문헌

[1] Nature 595, 361–369 (2021)

복합재료 압력용기의 안전성 향상을 위한 충격 해석 모델 및 내충격 구조 기술 개발

Development of analytical model and impact-resistance structural technology for improving the safety of composite overwrapped pressure vessels

박경민¹, 김은호², 유재상^{1}
* K. Park¹, E. Kim², J. Yu^{1*}

¹ 한국과학기술연구원 ² 전북대학교 기계시스템공학부
* E-mail: jamesyu@kist.re.kr

Keywords: Composite overwrapped pressure vessel, Low-velocity impact, Finite element method, Residual burst pressure

1. 서론

전 세계적인 탄소중립 실현과 신재생 및 수소 에너지로의 전환 가속화로 인해 친환경 연료의 이송, 저장, 사용을 위한 탄소섬유 복합재료(CFRP) 압력용기의 수요가 증가하고 있다 [1]. 하지만 CFRP는 낮은 파괴인성으로 인해 충격 하중에 취약하며, 이방성 적층 구조로 인해 복합적인 손상이 발생해 안전성이 저하될 수 있다 [2]. 이에 따라 충격에 의한 성능 저하를 방지하기 위한 연구가 필요하다.

2. 압력용기 내충격 구조 기술 개발

2.1 압력용기 해석모델 구성

본 연구에서는 유한요소해석을 활용해 압력용기 해석모델을 구성하였다. 층내 손상을 연속체 손상역학 기반의 손상모델(VUMAT)로, 층간 분리 손상은 cohesive element로 구현하였다. 모델 검증은 위해 파괴압력 및 충격 실험 데이터를 활용하였으며 모델 최적화를 진행하였다 [3].

2.2 압력용기 적층 순서 변화

기존 모델에서 적층 순서를 변경해 hoop층 위치에 따른 6가지 모델을 제작하였다. 이들 모델에 대해 충격 해석 및 잔류 파괴압력 해석을 수행하여, 적층 순서가 압력용기에 미치는 영향도를 분석하였다.

2.3 압력용기 보호층 설계

기존 모델을 포함한 7가지 압력용기 버전에 GFRP로 감싼 보호층을 추가 설계하였다. 각 모델에 대해 보호층이 압력용기의 안전성에 미치는 영향을 분석하여, 보호층 설계가 충격 저항성과 전반적인 안전성 향상에 어떻게 기여하는지 평가하였다.

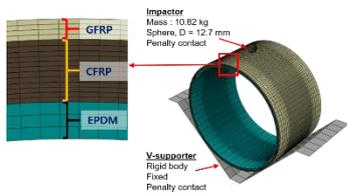


Fig. 1. Modelling detail of pressure vessel.

3. 분석 결과

각 모델에 대한 충격 해석과 잔류 파괴압력 해석 결과, hoop 층과 helical 층이 교차 적층된 경우 적절한 하중 분산이 이루어져 hoop 층의 충격 손상이 감소함을 확인하였다. 또한, 보호층이 추가된 모델에서는 파괴압력을 견디는 hoop 층의 충격 손상을 효과적으로 방지함으로써, 압력용기의 전반적인 안전성이 향상됨을 확인할 수 있었다.

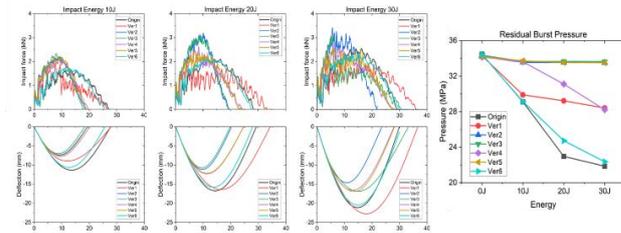


Fig. 2. Results of impact response and residual burst pressure.

4. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 압력용기 해석모델을 활용해 적층 순서 변화 및 보호층에 따른 압력용기의 내충격성 향상을 위한 구조 기술에 대해 연구하였다. 이를 활용해 향후 충격 안정성을 고려한 신뢰도 높은 압력용기 설계 기술 개발을 위한 추가 연구를 진행할 계획이다.

참고문헌

- [1] Air, Alexander et al. Compos B Eng. 253, 110573, 2023.
- [2] Kim, Eun-Ho, et al. Compos Struct. 95: 123-134, 2013
- [3] Kim, Eun-Ho, et al. AIAA J. 50.10:2180-2193, 2012

후기

본 연구는 한국과학기술연구원의 기관고유 연구 과제 (2Z07041)와 산업통상자원부에서 (No. 20021913, 00433057) 지원하는 연구 과제로 수행 되었습니다. 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.