

유한요소해석을 이용한 CF&GF Hybrid Prepreg 적층 패턴에 따른 Z-Spring의 구조해석

김정근*, 최선호*, 김영근**, 김홍건*,***, 곽이구*,***,#

*전주대학교 탄소융합공학과, ** (주)에스모터스, ***전주대학교 기계자동차공학과

Finite Element Method Based Structural Analysis of Z-Spring with CF&GF Hybrid Prepreg Lamination Patterns

Jeong-Keun Kim*, Sun-Ho Choi*, Young-Keun Kim**, Hong-Gun Kim*,***, Lee-Gu Kwac*,***,#

*Department of Carbon Convergence Engineering, JEONJU UNIV.,

**S-Motors Co., Ltd,

***Department of Mechanical and Automotive Engineering, JEONJU UNIV.

(Received 11 December 2020; received in revised form 22 December 2020; accepted 01 January 2021)

ABSTRACT

Recently, research attention has been focused on vibration-free vehicles to transport small numbers of expensive electronic products. Vibration-free vehicles can be used to transport expensive test equipment or semiconductors, mainly produced in the domestic IT industry, and can serve as a readily available transportation system for short driving distances due to the increased efficiency on narrow national highways. This study was aimed at developing a Z-Spring to minimize the vibration by installing an air spring instead of the plate spring applied to conventional freight cars and to prevent the damage of the loaded cargo from the shock occurring during movement. The mechanical properties (elastic modulus, tensile strength, and shear strength) of carbon fiber (CF) and glass fiber (GF) prepreg were derived, and ANSYS ACP PrepPost analyses were performed. It was observed that in the case of hybrid composites, the total deformation and equivalent stress are higher than that of CFRP; however, in terms of the unit cost, the hybrid Z-Spring is more inexpensive and durable compared to the GF.

Key Words : Hybrid Composites(하이브리드 복합소재), Total Deformation(총 변형량), Equivalent Stress(등가 응력), Lamination Pattern(적층 패턴), Finite Element Analysis(유한요소해석)

1. 서 론

최근 소량 고가 전자 제품 등을 운반하기 위한 무진동 차량에 이목이 집중되고 있다. 무진동 차량

은 국내 IT 산업에서 주로 생산되는 고가 시험 장비 혹은 반도체 등에 도움이 될 수 있으며 좁은 국내에서 효율성이 증가되어 짧은 운행거리에 따른 즉시 운반 체계를 확보할 수 있다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 인하여 대형 창고가 불필요해지고 뿐만 아니라 중국, 일본, 미국과 같은 국가에서의 거대 국내에서 대량 수출이 요구되지 않는 국내에

Corresponding Author : kwac29@jj.ac.kr

Tel: +82-63-220-3063, Fax: +82-63-220-3161

서 냉난방 시스템을 보유한 무진동 차량이 개발되면 식료품의 운송비 또한 절감될 수 있다. 이로 인하여 신선한 재료의 운송이 원활해져서 농어민들의 산업에도 기여할 수 있을 것으로 기대된다^[1-3]. 본 연구에서는 기존의 화물차에 적용되었던 판스프링을 대신하여 에어스프링(Air-Spring)을 장착하여 진동을 최소화하고 이동시 발생하는 충격으로부터 적재된 화물의 손상 및 파손을 막아주기 위한 Z-Spring을 개발하고자 하였다. 이러한 에어스프링을 지지해주는 부품을 기존의 강철 구조재가 하고 있었고 강철 구조재를 경량화하고 내구성까지 보유한 Hybrid Z-Spring에 대한 연구를 수행하고자 하였다. 본 연구에서 Hybrid Z-Spring이란 Carbon Fiber Prepreg와 Glass Fiber Prepreg로 혼합 적층하여 복합재료화한 Z-Spring을 의미한다^[4-8].

이러한 연구를 수행과정에서 CF(Carbon Fiber) 및 GF(Glass Fiber) Prepreg의 기계적 물성치(탄성계수, 인장강도, 전단강도)를 해당 Prepreg로 성형한 시편으로 물성을 확보하고 ANSYS ACP Pre&Post 해석을 진행하였다. 궁극적으로 Z-Spring에 기존의 강철 소재보다 더 경량화되고 내구성이 우수한 Hybrid 복합소재를 적용하고자 하였다^[9-11].

2. 설계 및 해석조건

Fig. 1은 Z-Spring의 유한요소해석 적용을 위하여 CATIA를 이용한 3차원의 모델을 나타내고 있다. 이를 기반으로 하여 CF 및 GF Prepreg의 물성치를 적층 패턴에 따라 입력하여 해석을 수행하였다. Fig. 2는 Z-Spring에 적용되는 구속조건을 나타내고 있으며 양쪽 끝단에 각각 2500 N씩 총 5000 N의 하중을 적용하였다. 또한 적층 면에 따른 각도에 대한 내구성 및 응력 집중을 확인하기 위하여 CF 및 GF Prepreg 각각의 적층 패턴을 적용하여 결과를 확인하고자 하였다. Fig. 3은 각각의 Prepreg에 대한 적층된 시편의 0°, 90°, 45°, -45° 패턴 부분에 대한 섬유방향을 나타낸 그림이다.

Table 1, 2는 구조 해석 수행을 위하여 진행되었던 물성 시험에 근거하여 데이터화한 CF 및 GF Prepreg의 물성표이다. 또한 인장 및 압축 물성에

대한 Stress와 Strain Limit 값을 산출하였고 이에 기반하여 ANSYS ACP Pre&Post 구조해석을 수행하였다.

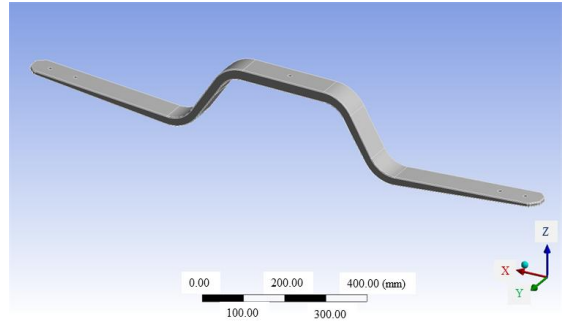


Fig. 1 3D modeling of z-spring by catia

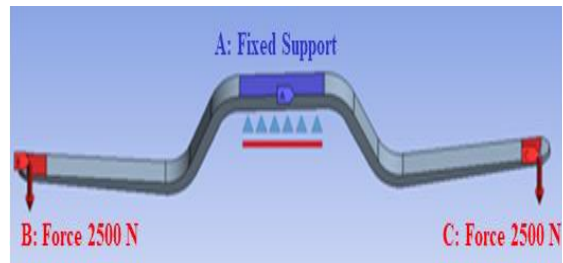


Fig. 2 Constraints applied to z-spring

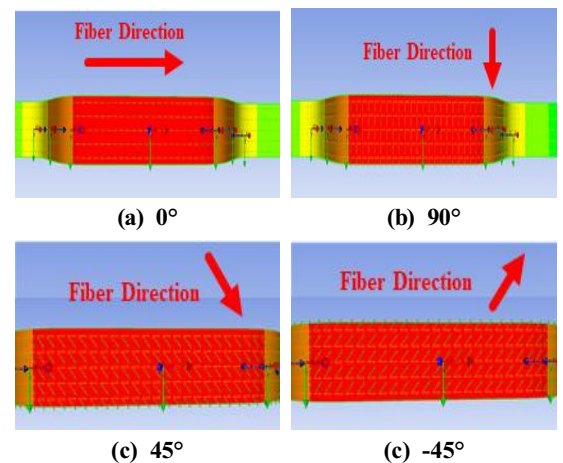


Fig. 3 Fiber directions of each layer with respect to each angle

Table 1 Properties of CF prepreg

| Types of Properties | | Value |
|-----------------------------------|-------------|----------|
| Density (kg/m ³) | | 1490 |
| Young's Modulus (GPa) | X direction | 69.76 |
| | Y direction | 6.2 |
| | Z direction | 6.2 |
| Poisson's Ratio | XY | 0.039 |
| | YZ | 0.339 |
| | XZ | 0.039 |
| Shear Modulus (GPa) | XY | 6.95 |
| | YZ | 5.66 |
| | XZ | 6.95 |
| Tensile Stress Limits (MPa) | X direction | 908.24 |
| | Y direction | 61.02 |
| | Z direction | 61.02 |
| Tensile Strain Limits (mm/mm) | X direction | 0.0361 |
| | Y direction | 0.01018 |
| | Z direction | 0.01018 |
| Compressive Stress Limits (MPa) | X direction | -675 |
| | Y direction | -100 |
| | Z direction | -100 |
| Compressive Strain Limits (mm/mm) | XY | -0.0108 |
| | YZ | -0.0192 |
| | XZ | -0.0192 |
| Shear Stress Limits (MPa) | XY | 62.332 |
| | YZ | 58.99325 |
| | XZ | 62.332 |
| Shear Strain Limits (mm/mm) | XY | 0.05006 |
| | YZ | 0.04872 |
| | XZ | 0.05006 |

Table 2 Properties of GF prepreg

| Types of Properties | | Value |
|-----------------------------------|-------------|----------|
| Density (kg/m ³) | | 2000 |
| Young's Modulus (GPa) | X direction | 45 |
| | Y direction | 10 |
| | Z direction | 10 |
| Poisson's Ratio | XY | 0.3 |
| | YZ | 0.4 |
| | XZ | 0.3 |
| Shear Modulus (GPa) | XY | 86.25 |
| | YZ | 74.47 |
| | XZ | 86.25 |
| Tensile Stress Limits (MPa) | X direction | 908.24 |
| | Y direction | 61.02 |
| | Z direction | 61.02 |
| Tensile Strain Limits (mm/mm) | X direction | 0.0361 |
| | Y direction | 0.01018 |
| | Z direction | 0.01018 |
| Compressive Stress Limits (MPa) | X direction | -675 |
| | Y direction | -100 |
| | Z direction | -100 |
| Compressive Strain Limits (mm/mm) | XY | -0.0108 |
| | YZ | -0.0192 |
| | XZ | -0.0192 |
| Shear Stress Limits (MPa) | XY | 62.332 |
| | YZ | 58.99325 |
| | XZ | 62.332 |
| Shear Strain Limits (mm/mm) | XY | 0.05006 |
| | YZ | 0.04872 |
| | XZ | 0.05006 |

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 총변형량 및 최대응력 분석

Fig. 4는 CF Prepreg의 0°_[70]/90°_[70] 적층 패턴에 따른 Z-Spring의 변형량 및 최대응력을 나타낸 그림이다. 그 결과 최대 변형량은 양 끝단에서 나타났으며 Fig. 4의 (a)에서 볼 수 있듯이 양 끝단에서 적색으로 표시되어 있다. 또한 최대응력의 경우 Fig. 4의 (b)에서와 같이 Z-Spring의 가운데 부분을 중심으로 하여 꺾이기 시작하는 부분에서 가장 크게 응력이 발생하는 것으로 나타났다.

Table 3 Total deformation and equivalent stress of CFRP with the laminated pattern

| Type | Stacking Pattern | Total Deformation (mm) | Equivalent Stress (MPa) |
|------|---|------------------------|-------------------------|
| 1 | CF(0° _[140]) | 27.57 | 156.01 |
| 2 | CF(0° _[70])/CF(90° _[70]) | 48.83 | 229.52 |
| 3 | CF(0° _[28])/CF(0° _[28])/CF(0° _[28])/CF(0° _[28])/CF(0° _[28]) | 48.23 | 268.52 |

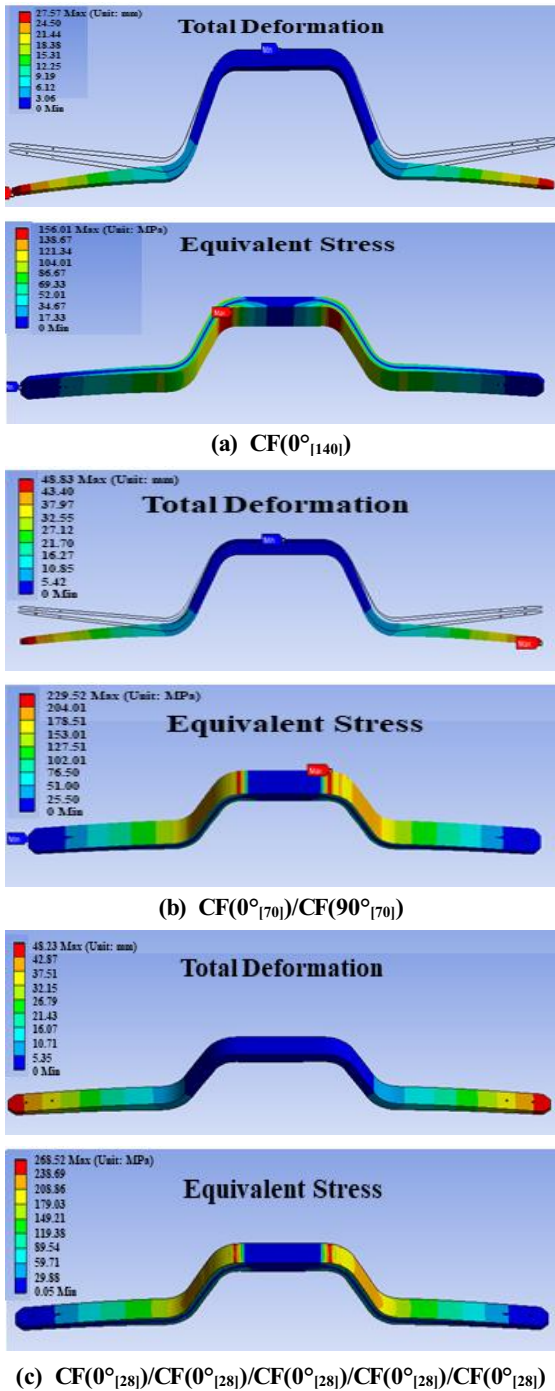
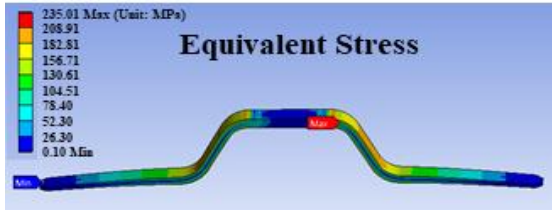
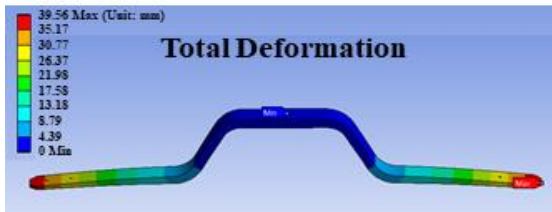


Fig. 4 Pictures of deformation and equivalent stress of CFRP with the laminated pattern

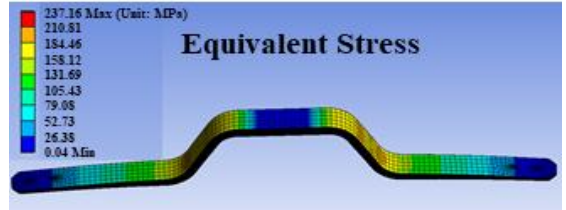
Fig. 5에서 볼 수 있듯이 CF Prepreg의 0°_[28]/45°_[28]/90°_[70]/-45°_[28]/0°_[28] 패턴으로 적층되어 있는 Z-Spring의 적층 패턴에 따른 섬유 방향을 나타낸 그림이다. Table 4는 해당 Z-Spring의 Hybrid 적층 패턴별 총 변형량과 최대응력을 나타내고 있으며 최대 변형과 최대응력 모두 CF(0°_[2])/GF(0°_[55])에서 나타났다. 이러한 결과를 토대로 적층 패턴에 따른 다양한 결과를 도출하여 최적의 Z-Spring 적층 패턴을 분석하고자 하였다. Fig. 5는 적층 패턴별 최대 변형량과 최대 응력에 대하여 나타낸 그림이다. 분석 결과 Table 4에서 Type 3의 경우가 총 변형량 28.11 mm, 최대 응력 166.40 MPa으로 가장 낮은 수치를 나타내었으며 Type 3 시편이 총 변형량이 낮을수록 Z-Spring의 진동이 감소하여 차체의 진동에 의한 적재물의 파손을 방지할 수 있는 최적의 시편이라고 판단된다. 또한 최대 응력이 낮아 특정 부위로 응력이 집중되는 현상을 방지하고 Z-Spring의 파손을 최대한 억제하고 제품의 수명을 연장시킬 수 있다. 그러나 CF Prepreg의 함량이 높아 단가 측면에서 불리할 수 있다고 판단되어 총 변형량과 최대응력 값이 각각 14.4 %, 9.4 %씩 증가한 Type 2의 시편이 CF에 비해 GF Prepreg의 함량이 높고 총 변형량과 최대 응력값이 비교적 크게 증가하지 않아 경제성과 기계적 물성 측면에서도 우수하다고 판단된다.

Table 4 Total deformation and equivalent stress of the laminated patterns

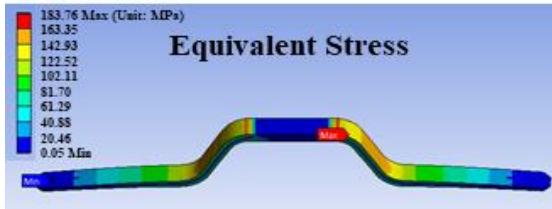
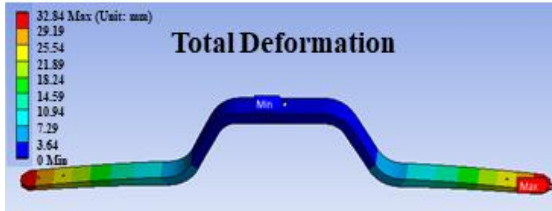
| Type | Stacking Pattern | Total Deformation (mm) | Equivalent Stress (MPa) |
|------|---|------------------------|-------------------------|
| 1 | GF(0° _[56]) | 39.56 | 234.82 |
| 2 | CF(0° _[31])/GF(0° _[31])/CF(0° _[31]) | 32.84 | 183.76 |
| 3 | GF(0° _[11])/CF(0° _[135])/GF(0° _[11]) | 28.11 | 162.43 |
| 4 | CF(0° _[2])/GF(0° _[55]) | 40.84 | 237.16 |
| 5 | GF(0° _[53])/CF(0° _[7]) | 39.73 | 261.22 |
| 6 | CF(0° _[18])/GF(0° _[18])/CF(0° _[18])/GF(0° _[18])/CF(0° _[18]) | 33.96 | 232.30 |



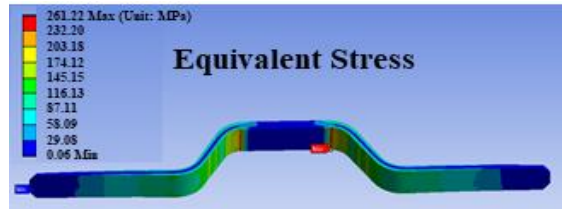
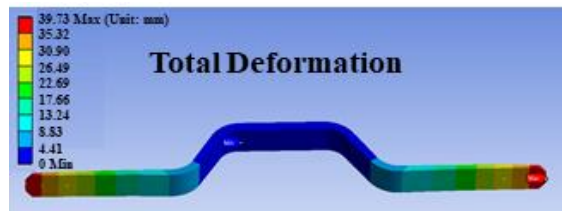
(a) GF(0°)_[56]



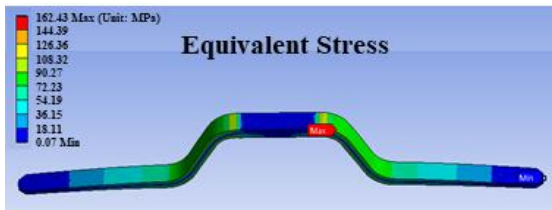
(d) CF(0°)_[2]/GF(0°)_[55]



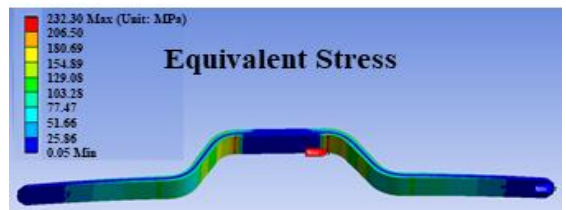
(b) CF(0°)_[31]/GF(0°)_[31]/CF(0°)_[31]



(e) GF(0°)_[53]/CF(0°)_[17]



(c) GF(0°)_[11]/CF(0°)_[135]/GF(0°)_[11]



(f) CF(0°)_[18]/GF(0°)_[18]/CF(0°)_[18]/GF(0°)_[18]/CF(0°)_[18]

Fig. 5 Pictures of deformation and equivalent stress hybrid with the laminated patterns

3.2 내구성 평가

Z-Spring의 내구성 평가는 미국 (주)MTS 사의 Multi-Channel Servo Hydraulic Testing System으로 진행되었으며 시험 조건은 변위 0~10 mm 범위 내에서 0.5 Hz로 20만 회까지 양쪽 끝단에 1250 N씩 적용하여 총 2500 N의 하중을 가하여 진행되었다. 해석 수행의 경우도 이와 동일한 조건으로 진행되었고 Fig. 6에서 볼 수 있듯이 실제 장비로

진행된 부분은 청색으로, 해석 수행된 부분은 적색으로 나타내었다.

분석 결과 해석으로 진행된 적색 그래프가 실제 장비로 측정된 청색 영역 내에 근접하게 도시된 것으로 확인되었다. 또한 Fig. 7에서 보듯이 20만 회의 진동을 적용한 이후의 내구성을 해석 결과를 통하여 확인한 결과 파손 등의 결함이 발생하지 않은 것으로 판단되며 결론적으로 안전성을 확보한 것으로 판단된다.

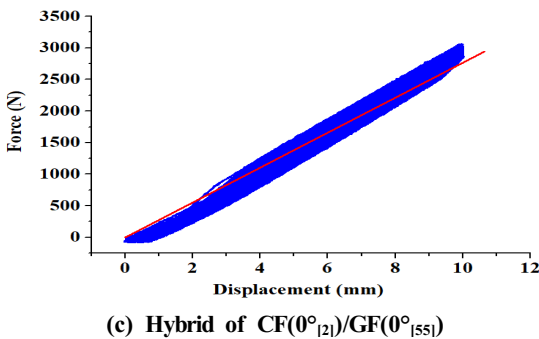
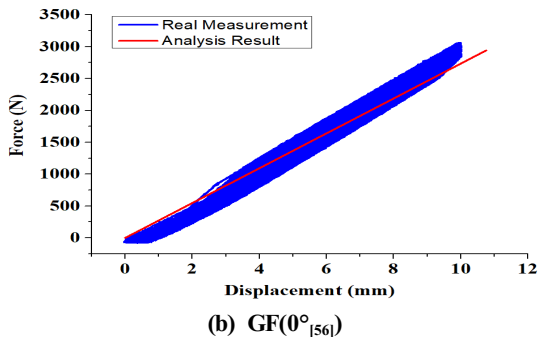
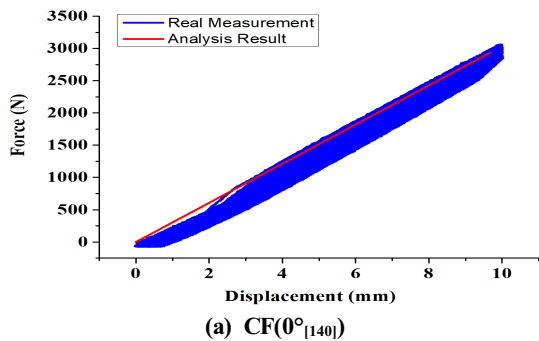


Fig. 6 Comparison graphs of real measurements and analysis results

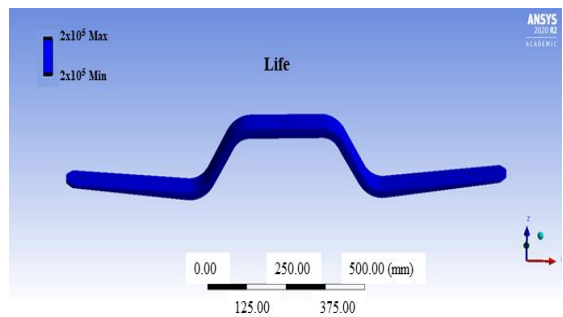
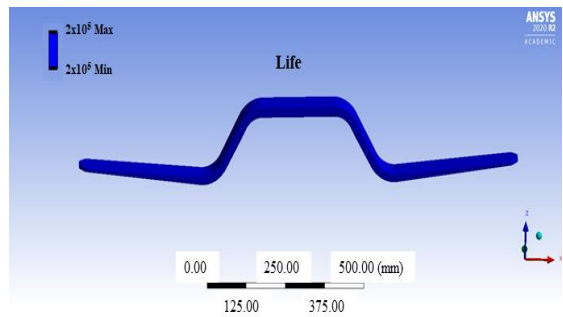
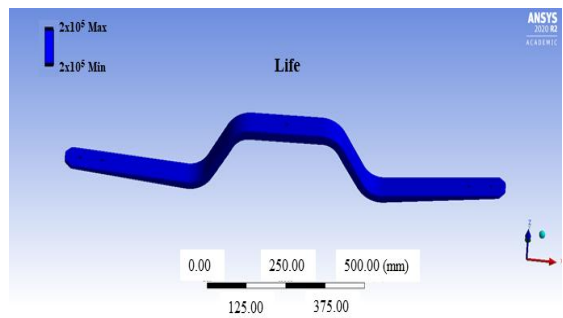


Fig. 7 Durability evaluation result of z-spring

4. 결 론

CFRP 및 GFRP를 각각의 Prepreg의 적층에 의한 성형으로 도출된 기계적 물성값(인장, 전단강도)을 기반으로 ANSYS ACP Pre&Post 모듈에 의한 해석을 수행하였으며 해당 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Z-Spring의 ANSYS ACP Pre&Post 해석 수행 결과 CFRP 중 $0^{\circ}_{[140]}$ 패턴의 경우 총변형량 27.57 mm, 최대응력 156.01 MPa의 가장 낮은 값을 나타냈다. 따라서 해당 수치가 다른 패턴에 비해 Z-Spring으로 제품화하였을 경우 변형이 적게 발생하고 응력에 의한 파손을 최대한 방지할 수 있다고 판단되어 Hybrid화 된 Z-Spring의 경우에도 0° 패턴을 적용하여 해석수행을 하고자 하였다.
- 2) Hybrid화 된 Z-Spring의 경우 해석이 수행된 총 6가지의 패턴에 대하여 데이터를 비교, 분석해본 결과 총변형량과 최대응력이 가장 낮은 $GF(0^{\circ}_{[11]})/CF(0^{\circ}_{[135]})/GF(0^{\circ}_{[11]})$ 패턴이 가장 우수했다. 그러나 CF Prepreg의 함량이 높아 생산 단가 면에서 경쟁력을 확보하기가 어렵다고 판단하였다. 한편, 해석이 수행된 $CF(0^{\circ}_{[31]})/GF(0^{\circ}_{[31]})/CF(0^{\circ}_{[31]})$ 가 그 다음으로 총변형량 및 최대응력이 낮았기 때문에 GF Prepreg가 다량 포함되어 있어서 CF Prepreg보다 경제성 있다고 판단되고 물성 또한 확보되었다고 판단하여 해당 소재에 대한 연구가 추가적으로 필요할 것으로 사료된다.
- 3) 또한 Z-Spring의 내구성에 대하여 ANSYS 해석 수행이 진행되었고 20만 회 이상의 진동에 대하여 안전하다는 평가를 내릴 수 있었다. 기존의 Z-Spring을 CF Prepreg만으로 제작하는 경우 생산 단가가 높아진다는 단점이 있었다. 그러나 이를 보완하여 내구성이 우수하고 생산단가도 저렴한 GF Prepreg 소재를 추가 적층한 Hybrid 소재를 이용한다면 미래의 Z-Spring 제품으로의 적용뿐만 아니라 기존의 강철 제품 혹은 생산단가가 높은 CFRP 제품에 대한 대체품으로써 주목 받을 것으로 기대된다.

후 기

“이 논문은 정부의 재원으로 2019년도 중소벤처 기업부(No. P0010022) 및 2016년도 한국연구재단(No. 2016R1A6A1A03012069)의 지원을 받아 수행된 결과임.”

REFERENCES

1. Kastensson, Å., “Developing Lightweight Concepts in The Automotive Industry: Taking on The Environmental Challenge with The Sänätt Project”, Journal of Cleaner Production, Vol. 66, pp. 337-346, 2014.
2. Sakundarini, N., Taha, Z., Abdul-Rashid, S. H., Ghazila, R. A. R., “Optimal Multi-Material Selection for Lightweight Design of Automotive Body Assembly Incorporating Recyclability”, Materials & Design, Vol. 50, pp. 846-857, 2013.
3. Hwang, J. J., Wang, D. Y., Shih, N. C., “Development of A Lightweight Fuel Cell Vehicle”, Journal of Power Sources, Vol. 141, Issue. 1, pp. 108-115, 2005.
4. Dohmann, F., Hartl, Ch., “Hydroforming - A Method to Manufacture Light-Weight Parts”, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 60, Issues. 1-4, pp. 669-676, 1996.
5. Zhang, J., Chaisombat, K., He, S., Wang, C. H., “Hybrid Composite Laminates Reinforced with Glass/Carbon Woven Fabrics for Lightweight Load Bearing Structures”, Materials & Design, Vol. 36, pp. 75-80, 2012.
6. Thwe, M. M., Liao, K., “Durability of Bamboo-Glass Fiber Reinforced Polymer Matrix Hybrid Composites”, Composites Science and Technology, Vol. 63, Issues 3-4, pp. 375-387, 2003.
7. Safri, S. N. A., Sultan, M. T. H., Jawaid, M., Jayakrishna, K., “Impact Behaviour of Hybrid Composites for Structural Applications: A

- Review”, Vol. 133, pp. 112-121, 2018.
8. Velmurugan, R., Manikandan, V., “Mechanical Properties of Palmyra/Glass Fiber Hybrid Composites”, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 38, Issue 10, pp. 2216-2226, 2007.
 9. Babuska, I., Szabo, B. A., Katz, I. N., “The p-Version of the Finite Element Method”, Journal on Numerical Analysis, Vol. 18, No. 3, pp. 515-545, 1981.
 10. Babuška, I., “The Finite Element Method with Penalty”, Mathematics of Computation, Vol. 27, pp. 221-228, 1973.
 11. Zhu, J. Z., Zienkiewicz, O. C., “Adaptive Techniques in The Finite Element Method”, Numerical Methods in Biomedical Engineering, Vol. 4, Issue 2, pp. 197-204, 1988.