

압력하중 하에서 생체모방 섬유강화 복합재의 기계적 거동 연구

이진호* · 조현석** · 김명수***†

A Study on the Mechanical Behavior of Biomimetic Fiber-Reinforced Composites under Pressure Loads

Jinho Lee*, Hyun-Seok Jo**, Myungsoo Kim***†

ABSTRACT: In this study, we investigated the effect of fiber alignment in helicoidal structure on the mechanical properties of biomimetic fiber-reinforced composites. Using finite element analysis, circular biomimetic fiber composites were designed and studied. Various amounts of pressure loads were applied to a surface of the composites, and then bending and failure behaviors of the composites were analyzed. The results showed various failure morphologies according to the orientation of the fibers, and it turned out that the fiber alignment in helicoidal structure significantly improved the bending strength of the composite under pressure loading. This was because the fiber alignment in various directions for each layer dispersed effectively the fracture energy from the external load into multiple directions.

초 록: 본 연구에서는 생체모방 섬유강화 복합재에서 섬유의 나선형 구조의 배열이 복합재의 기계적 물성에 미치는 영향을 연구하였다. 유한요소해석을 이용해 원형의 생체모방 섬유강화 복합재를 구성하였고, 다양한 크기의 압력하중을 복합재 면에 적용시켜 굽힘과 파괴 거동의 결과를 분석하였다. 섬유의 정렬 방향에 따라 파괴 형상이 다르게 나타났고, 복합재에서 섬유의 나선형 구조 배열이 압력하중하에서 복합재의 굽힘 파괴강도를 크게 향상시키는 것으로 나타났다. 이는 섬유가 각 층별로 여러 방향으로 정렬되어 외부하중에 의한 파괴에너지가 여러방향으로 분산되는 것에서 기인한다.

Key Words: 생체모방 복합재(Biomimetic composites), 섬유강화 복합재(Fiber-reinforced composites), 나선형구조(Helicoidal structure), 기계적 물성(Mechanical property)

1. 서 론

자연의 생체재료는 오랜 시간동안 진화 발전되어 온 최적화 및 고효율화된 고도의 기능 시스템이다. 복합재료 분야에서도 생체모방 재료에 관한 연구가 다양하게 진행되고 있는데, 생체모방 복합소재 기술은 자연계의 생체재료의 구조를 모방하여 고경량 및 고강도의 특성을 갖는 복합

체를 제조하는 신소재 기술이다.

복합재료 분야에서 생체모방 기술을 응용한 것 중 하나가 조개껍질의 구조를 모방한 것이다. 진주층 조개의 껍질은 부서지기 쉬운 생체세라믹으로 구성되어 있으나, 그 구성물들의 독특한 구조적인 조합(여러 개의 판들이 물결모양으로 연결된 구조)으로 인하여 매우 뛰어난 강도(strength)와 파괴인성(toughness)을 지닌다. 문헌[1-3]에서는 이러한

Received 27 December 2018, received in revised form 8 February 2019, accepted 20 February 2019

*The Research Institute of Natural Science and Department of Physics Education, Gyeongsang National University

**Department of Mechanical Design Engineering, Youngsan University

***School of Automotive Engineering, Youngsan University, Corresponding author (E-mail: mskim@ysu.ac.kr)

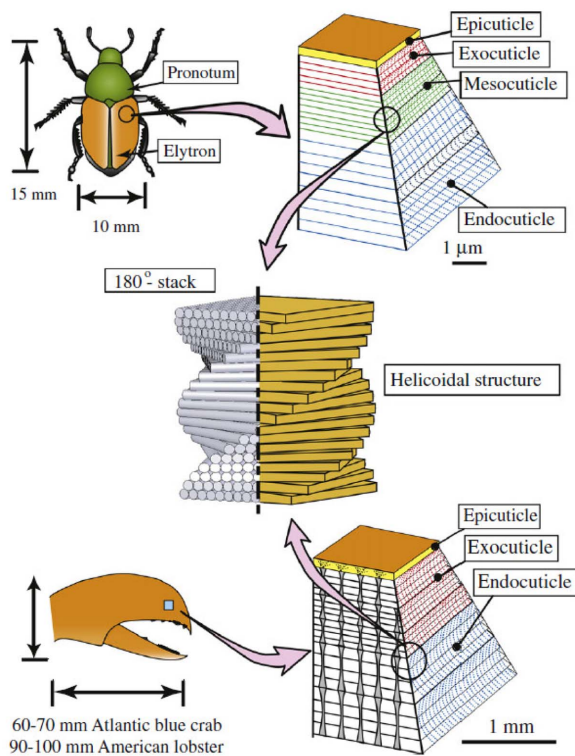


Fig. 1. The hierarchical structures of the exoskeletons from *Homarus americanus*, *Callinectes sapidus* and *Popillia japonica*. Helicoidal structural pattern is observed in different regions of all the exoskeletons. Reprinted from Cheng et al., *Composites: Part A*, Vol. 42, 2011, pp. 211-220 with permission from Elsevier [5]

구조적인 형상을 모방하여 복합체를 구성한 후 충돌해석과 폭발광풍 하중에 의한 거동 해석을 진행한 결과 충돌저항과 폭발저항 성능이 크게 상승하는 것으로 나타났다.

갑각류 생물체들의 독특한 신체조직 중의 하나가 섬유가 나선형으로 정렬된 구조(Helicoidal structure or Bouligand structure)인데, Fig. 1에 그 형상을 볼 수 있다. Grunenfelder와 그의 동료들[4]은 탄소섬유의 방향을 나선형으로 정렬한 탄소섬유-에폭시 복합체를 설계하여 충돌하중 하에서의 거동을 연구하였다. 연구결과 나선형의 구조가 두께방향으로의 손상 혹은 파괴의 전파를 줄이는 것으로 나타났으며 그로 인해 파괴인성(toughness)이 향상되는 것으로 나타났다. Cheng과 그의 동료들[5]은 나선형으로 정렬된 섬유강화 복합체를 제조하여 굽힘물성과 전단강도에 대한 물성을 평가하였는데, 기계적 물성이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 그리고 문헌[6]에서는 나선형으로 정렬된 섬유가 층간 전단저항을 높이는 것으로 보고되었다.

본 연구에서는 섬유강화 복합체에서 섬유의 나선형 구조 배열이 복합체의 물성에 미치는 영향을 연구하고자 하였다. 유한요소해석을 이용해 생체모방 섬유강화 복합체를 구성하였고, 다양한 크기의 압력하중을 복합체 면에 적용

시켜 굽힘과 파괴 거동을 평가하였다. 그런 다음 나선형 배열과 복합체의 물성 사이의 상관관계를 분석하였다.

2. 유한요소해석을 위한 모델 구성

2.1 구성물질

유한요소해석은 ANSYS Workbench 19.1의 Static Structural과 ACP를 사용하여 진행하였다[7,8]. 생체모방 섬유강화 복합체를 구성하기 위해 단방향 탄소섬유-에폭시 복합체가 사용되었다. 구성재료는 ANSYS에서 제공하는 복합재료(Epoxy Carbon UD (230 GPa) Wet)를 사용하였고 기계적 물성은 Table 1과 같다. Table에서 첨자 1, 2, 3은 각각 x, y, z 축의 방향을 의미한다. ANSYS의 Engineering Data에서 구성재료의 변수 중 Damage Initiation Criteria는 Maximum Stress를 사용하였다. Damage Evolution Law에서는 Material Property Degradation을 사용하였으며 이와 관련된 섬유와 모재의 인장과 압축의 강성감소(stiffness reduction) 계수들은 '0.75'로 설정하였다. Damage Initiation Criteria는 주어진 하중 하에서의 재료손상(material damage)의 시작을 결정하는데 사용된다. 재료손상기준(여기서는 재료의 Maximum Stress)에 이르면 Damage Evolution Law를 이용하여 손상의 정도를 계산한다. 계산된 값이 0이면 손상(damage)이 일어나지 않았다는 것을 의미하고 1이면 완전한 손상(complete damage)이 일어났다는 것을 의미한다. 강성감소계수를 0.75로 설정하였다면 계산된 손상계수(damage variable)는 0과 0.75 사이의 수치를 나타내게 된다[7-11]. 본 연구에서는 강성감소계수들을 0.75로 설정하였으므로 섬유 또는 모재의 손상정도가 최고(완전한 파괴(failure))에 이르렀을 때 손상계수가

Table 1. Elastic and strength properties of uni-directional carbon fiber/epoxy composites

Young's Modulus (E_{11})	123,340 MPa
Young's Modulus ($E_{22}=E_{33}$)	7,780 MPa
Shear Modulus ($G_{12}=G_{13}$)	5,000 MPa
Shear Modulus (G_{23})	3,080 MPa
Poisson's ratio ($\nu_{12}=\nu_{13}$)	0.27
Poisson's ratio (ν_{23})	0.42
Tensile Strength, X direction	1,632 MPa
Tensile Strength, Y direction	34 MPa
Tensile Strength, Z direction	34 MPa
Compressive Strength, X direction	-704 MPa
Compressive Strength, Y direction	-68 MPa
Compressive Strength, Z direction	-68 MPa
Shear Strength XY	80 MPa
Shear Strength YZ	55 MPa
Shear Strength XZ	80 MPa

0.75가 된다는 것을 의미한다. 이는 재료의 파괴가 일어났다고 하더라도 사실상 재료 자체가 완전히 사라지는 것은 아니므로 이 계수로 정하였다.

2.2 생체모방 섬유강화 복합재 구조

생체모방 섬유강화복합재의 샘플은 총 5종류로 설정하였는데, 각도 변화의 크기를 기준으로 정하였다. 샘플의 명칭표기는 Table 2와 같고, 이하 이 표기들을 따른다.

각 샘플은 Table 3에 보이는 것처럼 총 12층으로 구성되며, 1층은 최하위층(the bottom layer) 그리고 12층은 최상위층(the top layer)을 나타낸다. 각 층의 섬유의 방향은 Fig. 2에 보이는 것처럼 나선형 구조의 방향으로 정렬된다. 그림

Table 2. Five samples and fiber orientation changes

Sample Name	S0	S90	S45	S30	S15
Orientation Change	0°	90°	45°	30°	15°

Table 3. Fiber orientation for each layer in the composite samples

layer	S0	S90	S45	S30	S15
12	0°	90°	135°	150°	165°
11	0°	90°	135°	150°	150°
10	0°	90°	135°	120°	135°
9	0°	90°	90°	120°	120°
8	0°	90°	90°	90°	105°
7	0°	90°	90°	90°	90°
6	0°	0°	45°	60°	75°
5	0°	0°	45°	60°	60°
4	0°	0°	45°	30°	45°
3	0°	0°	0°	30°	30°
2	0°	0°	0°	0°	15°
1	0°	0°	0°	0°	0°

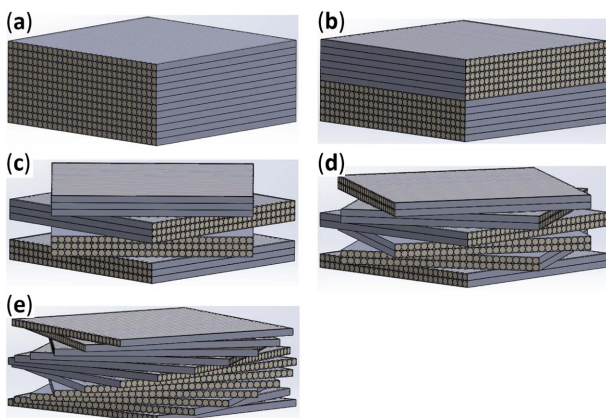


Fig. 2. Fiber orientations in the designed samples: (a) S0, (b) S90, (c) S45, (d) S30, (e) S15

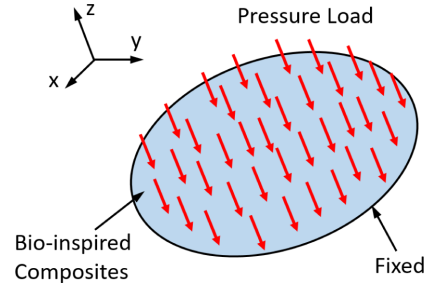


Fig. 3. Shape of the composites, boundary condition, and pressure load

에서 각 층의 복합재를 사각형으로 표현한 것은 나선형의 형상을 쉽게 알아보기 위해 함이다. Table 3의 각 샘플의 섬유 방향을 참조하면, S0은 전 층의 섬유의 방향이 0° 즉 x 축 방향으로 정렬되어 있다. S90은 상부 6개층은 90°(y 축)이고 하부 6개층은 0°로 구성되어 있다. S45는 섬유의 방향이 3개층 단위로 반시계방향으로 변하고, S30은 2개층 단위로 변한다. S15는 각 층의 섬유가 다른 방향으로 정렬되어 있고, 15°씩 반시계방향으로 변한다. S0과 S90은 사실상 나선형 구조라고 보기는 어려우나 다른 샘플과의 비교를 위하여 분석되었다.

2.3 복합재 형상, 경계조건 및 하중 조건

Fig. 3은 복합재 구조물의 형상, 경계조건, 그리고 하중조건을 보여준다. 복합재는 원형으로 지름은 30 cm이고 두께는 2.4 mm(각 층의 두께 0.2 mm)이며 3D solid로 구성하였다. 다각형의 샘플의 경우 각진 부분에서 응력의 집중이 일어나므로 이를 방지하기 위해 원형을 샘플을 구성하였다. 복합재의 가장자리 경계는 고정되어 있는 것으로 설정하였고, 압력하중이 복합재의 상부면에 -z 방향으로 적용된다. 본 연구에서는 섬유강화 복합재의 굽힘물성을 개선하고자 하는 것이 목적이므로 하중조건으로 압력하중을 복합재의 한 면에 가하는 것으로 설정하였다. 하중은 1 MPa부터 점차 증가시켜 완전히 파괴가 일어날 때까지 진행하여, 복합재가 수용할 수 있는 최고 하중을 구하였다.

3. 결과 및 토의

유한요소 해석에서 element size는 2 mm로 설정하였고, node와 element의 개수는 각각 20,849와 20,676이다. 결과 분석에서 모재와 섬유의 파괴거동은 각각 ‘Matrix Tensile Damage Variable’과 ‘Fiber Tensile Damage Variable’ 기능들을 이용하여 분석되었다(Figs. 5-7, 9).

3.1 굽힘변형과 파괴거동

Fig. 4는 S15 샘플이 14.7 MPa 압력하중하에서 굽힘 변형이 일어난 형상을 보여준다. 가장자리가 고정되어 있어 변

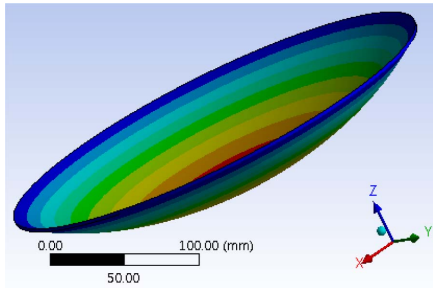


Fig. 4. Total deformation of S15 under the pressure of 14.7 MPa

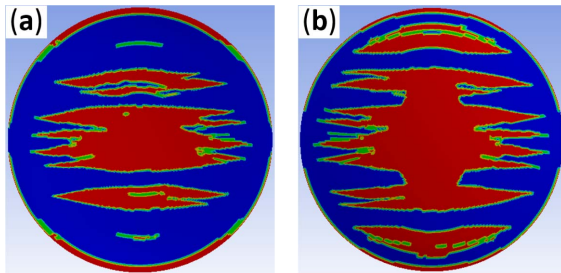


Fig. 5. Matrix failure of S0 under the pressure load 1.7 MPa, horizontal axis – x axis and vertical axis – y axis, (a) the top layer (b) the bottom layer

위가 0 mm이고 중간부분에 큰 변위가 발생하는 것을 볼 수 있다. Fig. 3에 보이는 것처럼 하중이 z 축 방향으로 위에서 아래로 가해져, 복합재의 굽힘변형도 z 축의 음의 방향으로 나타난다.

Fig. 5는 S0의 1.7 MPa 압력하중에서의 고분자 모재의 파괴영역을 보여준다. 빨간색으로 표시된 영역(복합재의 중앙부분)이 파괴가 일어난 영역이다. Fig. 5(b)의 하부층의 파괴영역의 사이즈가 Fig. 5(a)의 상부층의 파괴영역의 사이즈보다 큰 것을 볼 수 있다. 이는 Fig. 4에 보이듯이 하부층이 상부층보다 변형량이 더 커서 나타나는 현상으로 판단된다. Fig. 5(a)에서 가장자리의 파괴 영역(그림에서 위쪽과 아래쪽 가장자리)이 Fig. 5(b)의 가장자리 파괴영역보다 큰 것으로 나타나는 데 이는 하부층의 경우 복합재의 중심부근에서 많은 파괴가 일어나 상대적으로 가장자리의 파괴영역이 적은 것으로 생각된다.

모재의 파괴는 국부적으로는 섬유 방향에 따라 파괴가 일어나고, 전체적으로는 국부적 파괴가 연결되어 섬유의 수직방향으로 파괴가 일어난다. Fig. 5(b)를 보면 국부적으로는 섬유방향(수평, x 축)으로 파괴가 일어난 것을 볼 수 있고, 전체적으로는 섬유방향의 국부적인 파괴가 연결되어 섬유 수직방향(y 축)으로 파괴된 형상을 보여준다.

3.2 섬유의 방향에 따른 파괴형상

Fig. 6은 2 MPa의 최상층(12층)의 모재 파괴형상을 보여준다. Table 3에 보이는 것처럼 최상층에서 강화 섬유의 방

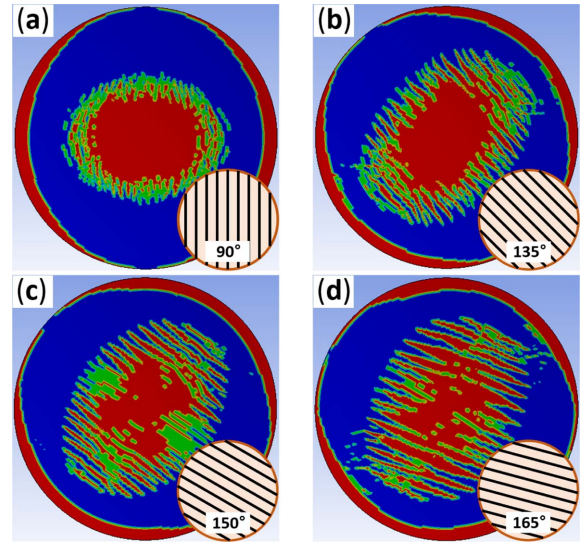


Fig. 6. Matrix failure behavior of the top layer according to the fiber orientations, 2 MPa, horizontal axis – x axis and vertical axis – y axis, (a) S90, (b) S45, (c) S30, (d) S15

향은 샘플에 따라 각각 방향이 다르다. 3.1절의 설명처럼 국부적으로는 섬유의 방향으로 파괴가 일어난다. 즉 Fig. 6(a) S90은 Table 2에 보이는 것처럼 최상층에서 섬유가 90°방향(수직방향, y 축 방향)으로 정렬되어 있다. Fig. 6(b), (c), (d)에 섬유가 각각 135°, 150°, 165°로 정렬되어 파괴도 같은 방향으로 일어나는 것을 보여준다. 전체적으로는 국부적인 파괴의 중간부분이 연결되어 섬유방향에 수직으로 파괴가 확산되어 타원형의 파괴형상을 보여준다. Fig. 6의 파괴영역을 비교해보면 중앙부분에서 완전히 파괴가 일어난 영역(빨간색 영역)이 모양과 크기에서 차이를 보이는데, 이는 섬유가 나선형의 여러방향으로의 정렬도(Fig. 2 참조)의 차이에서 기인하는 것으로 여겨지며 이에 대한 상세한 분석은 3.4절에서 다루어진다.

3.3 하중크기에 따른 파괴거동

Fig. 7은 1, 5, 10 MPa 압력하중하에서 S15 샘플의 상부층에서의 모재와 섬유의 파괴형상을 보여주고 있다. 압력하중이 낮을 경우는 주로 모재의 파괴가 일어나고, 높은 압력에서는 모재와 섬유 모두 파괴가 일어난 것을 볼 수 있다. Fig. 7(c)와 (d)를 볼 때 모재는 5 MPa 압력하중하에서 대부분의 영역에서 파괴가 일어나지만(c), 섬유는 파괴영역(빨간색 영역)의 크기가 아주 적다(d). 하지만 10 MPa 하중의 경우는 섬유의 파괴도 넓은 영역에서 일어난 것을 볼 수 있다(Fig. 7(f)).

3.4 최대하중과 섬유방향

2.3절에서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 수치해석이 가능한 최대하중을 복합재가 수용할 수 있는 최대하중으

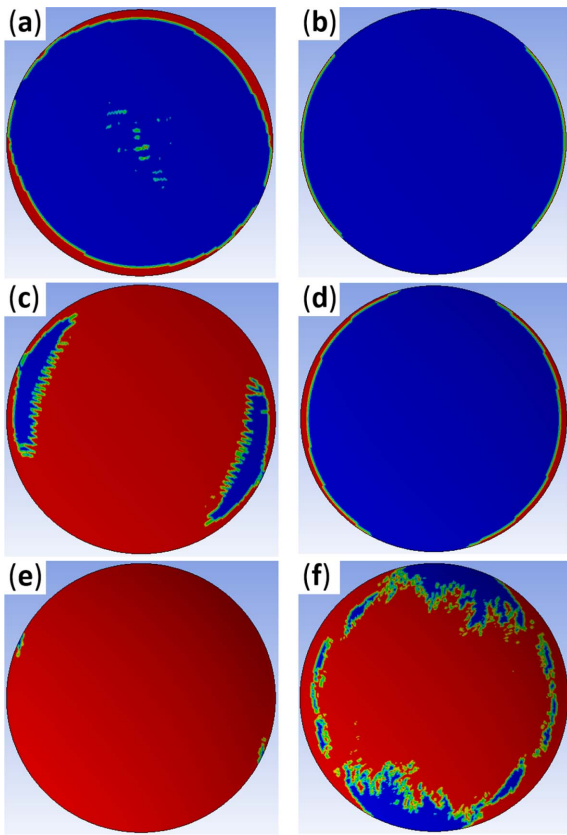


Fig. 7. Failure behavior of the top layer of S15, (a) matrix failure, 1 MPa, (b) fiber failure, 1 MPa, (c) matrix failure, 5 MPa, (d) fiber failure, 5 MPa, (e) matrix failure, 10 MPa, (f) fiber failure, 10 MPa

Table 4. Maximum pressure loads to withstand and deformations of the composites

Sample	Maximum load (MPa)	Total Deformation	
		Maximum (mm)	Average (mm)
S0	1.7	12.952	6.390
S90	3.0	16.276	8.053
S45	13.5	45.850	21.131
S30	14.1	43.593	21.598
S15	14.7	44.295	22.092

로 정의하였다. 최대하중 이상의 하중을 복합재에 적용시킬 경우 에러가 유발되고 정상적인 수치해석이 진행되지 않았다. 분석결과 이 에러는 섬유 또는 모재의 파괴로 인해 복합재의 변형이 허용한계를 넘어서 크게 일어나는 것에서 기인되는 것으로 판단된다. Table 4는 복합재료에서 섬유의 방향과 최대하중과의 관계를 보여주고 있다. S0에서 S90, S45, S30, S15 샘플로 갈수록 최대 하중이 증가하는 것으로 나타났다. 즉 섬유의 방향이 나선형으로 여러 방향으

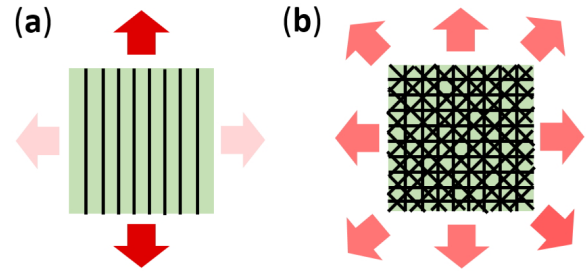


Fig. 8. Load carrying directions, (a) a unidirectional fiber composite, (b) a multi-directional fiber composite

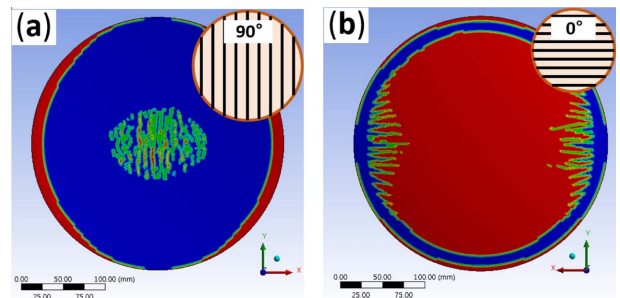


Fig. 9. Matrix failure orientation of S90 under the pressure load 1.5 MPa, horizontal axis – x axis and vertical axis – y axis, (a) the top layer, (b) the bottom layer

로 정렬 될 수록 수용할 수 있는 하중이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 섬유가 다양한 방향으로 정렬될 경우 압력하중으로부터의 에너지가 여러방향으로 분산되기 때문인 것으로 여겨진다. 예를 들어 Fig. 8(a)의 단방향 섬유 복합재의 경우 하중 전달이 섬유 방향으로 이루어지고 섬유의 수직방향은 취약하다. 그러므로 낮은 압력하중에도 파괴가 일어난다. 하지만 섬유가 여러방향으로 정렬될 경우 특정방향으로의 취약성이 줄어들게 된다(Fig. 8(b)). 그리고 Fig. 2에 보이는 것처럼 각층의 섬유의 방향이 다를 경우 외부 하중에 의한 균열이 있을 때 균열의 진행방향에 변화를 주어 두께방향으로의 심각한 파괴를 방지하게 된다[4,12]. Fig. 9는 1.5 MPa 압력하중 하에서 S90의 고분자모재의 파괴거동을 보여준다. Fig. 9(a)의 최상층의 모재파괴형상은 섬유방향인 수직(90°)으로 길게 되어있고, Fig. 9(b)의 최하층에서는 파괴형상이 섬유방향인 수평(0°)으로 정렬되어 있다. 이는 층별로 섬유의 방향이 변할 때 균열의 진행방향도 변화가 일어난다는 것을 증명한다고 볼 수 있다.

나선형 구조에서 또한 섬유방향의 변화(Fig. 2(e) 참조)가 점진적인 일어나므로 평면 내의 강성변화가 점진적으로 일어나게 되고 그로 인해 층간분리(delamination)의 주 원인인 층간 전단응력(interlaminar shear stresses)이 감소하게 된다 [4]. Table 4의 결과에서 한가지 특이한 점은 S45의 최고 수용하중(13.5 MPa)이 S90의 수용하중(3.0 MPa)에 비하여 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이에 대해서는 추가적인

후속 연구가 필요한 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 섬유강화 복합재에서 섬유의 나선형 구조 배열이 복합재의 물성에 미치는 영향을 연구하였다. 유한요소해석을 이용해 생체모방 섬유강화 복합재를 구성하였고, 다양한 크기의 압력하중을 복합재 면에 적용시켜 굽힘과 파괴 거동을 평가 및 분석하였다.

복합재의 굽힘변형이 압력하중에 대응하여 일어났고, 하부층의 인장변형량이 상부층 보다 커서 상부층보다 하부층의 파괴가 큰 영역에서 일어났다. 섬유의 방향에 따라 파괴의 형상도 다양하게 나타났는데, 2 MPa 압력하중하에서 국부적인 파괴는 섬유의 방향으로 나타났지만 전체적인 파괴형상은 국부적인 파괴가 연결되어 타원형의 형상으로 나타났다. 하중 크기별 파괴에 있어서 낮은 압력하중에서는 주로 모재가 파괴되는 것으로 나타났고, 높은 압력하중에서는 모재와 섬유 모두 파괴가 일어나는 것으로 나타났다. 나선형의 여러방향으로의 섬유의 정렬도가 높아질수록 견딜 수 있는 최고 압력하중은 증가하였는데, 이는 에너지의 분산이 여러방향으로 일어나고 층간 섬유방향이 달라 외부하중에 의한 균열의 진행이 여러방향으로 변화를 일으킨 것에서 기인하는 것으로 여겨진다. 결론적으로 섬유강화 복합재에서 섬유를 나선형으로 정렬시킨 구조가 압력하중하에서의 복합재의 기계적 물성 특히 굽힘물성을 크게 향상시키는 것으로 나타났다.

후 기

이 논문은 2016~2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: NRF-2016R1C1B1011533)으로 지원에 대해 진심으로 감사 드립니다.

REFERENCES

1. Jo, S.U., and Beom, H.G., "Analysis of Low Velocity Impact on Biomimetic Composites Mimicking Nacre," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 4, 2010, pp. 1-6.
2. Tran, P., Ngo, T.D., and Mendis, P., "Bio-inspired Composite Structures Subjected to Underwater Impulsive Loading," *Computational Materials Science*, Vol. 82, 2014, pp. 134-139.
3. Flores-Johnson, E.A., Shen, L., Guimatsia I., and Nguyen, G.D., "Numerical Investigation of the Impact Behaviour of Bio-inspired Nacre-like Aluminium Composite Plates," *Composites Science and Technology*, Vol. 96, 2014, pp. 13-22.
4. Grunenfelder, L.K., Suksangpanya, N., Salinas, C., Milliron, G., Yaraghi, N., Herrera, S., Evans-Lutterodt, K., Nutt, S.R., Zavatieri, P., and Kisailus, D., "Bio-inspired Impact-resistant Composites," *Acta Biomaterialia*, Vol. 10, 2014, pp. 3997-4008.
5. Cheng, L., Thomas, A., Glancey, J.L., and Karlsson, A., "Mechanical Behavior of Bio-inspired Laminated Composites," *Composites: Part A*, Vol. 42, 2011, pp. 211-220.
6. Ribbans, B., Li, Y., and Tan, T., "A Bioinspired Study on the Interlaminar Shear Resistance of Helicoidal Fiber Structures," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, Vol. 56, 2016, pp. 57-67.
7. ANSYS Mechanical User's Guide, ANSYS Inc., USA.
8. ANSYS Composite PrePost User's Guide, ANSYS Inc., USA.
9. Barbero, E.J., and Shahbazi, M., "Determination of Material Properties for ANSYS Progressive Damage Analysis of Laminated Composites," *Composite Structures*, Vol. 176 2017, pp. 768-779.
10. Ferreira, L.M., Graciani, E., and Paris, F., "Progressive Damage Study of NCF Composites under Compressive Loading," *Proceeding of ECCM16 - 16th European Conference on Composite Materials*, Seville, Spain, 22-26 June 2014.
11. El-Sisi, A.E.A., El-Emam, H.M., Salim, H.A., and Sallam, H.E.M., "Efficient 3D Modeling of Damage in Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 49, No. 7, 2014, pp. 817-828.
12. Meyers, M.A., McKittrick, J., and Chen, P.-Y., "Structural Biological Materials: Critical Mechanics-Materials Connections," *Science*, Vol. 339, 2013, pp. 773-779.