

압력하중 하에서 섬유배열방향과 적층판의 적층순서에 따른 생체모방 복합재의 파괴 거동에 관한 연구

Effects of Fiber Alignment Direction and Stacking Sequence of Laminates on Fracture Behavior of Biomimetic Composites under Pressure Loading

김명수*

Myungsoo Kim*

〈Abstract〉

Recently, fiber-reinforced composites have been widely used in various industrial fields. In this study, the mechanical behavior, especially fracture behavior, of biomimetic fiber-reinforced composites subjected to pressure loading was analyzed using finite element analysis (FEA). The fiber alignments in the biomimetic composites formed a helicoidal structure, wherein a stacking sequence involved a gradual rotation of each ply in the multi-layered laminated composites. For comparison, cross-ply composite samples with fibers arranged at 0° and 90° were prepared and analyzed. In addition, the mechanical behavior was analyzed based on combinations of the stacking sequence of carbon-fiber composites and glass-fiber composites. The FEA results showed that, when compared with the cross-ply samples, the mechanical properties of the biomimetic composites were considerably improved under pressure loading, which was applied to one side of the composites. Thus, the biomimetic helicoidal structure significantly improved the mechanical properties of the composites. Placing materials having high elasticity and strength in the outermost layers (the layer of the side on which pressure was applied and the opposite side layer) of the composites also significantly contributed to improving the mechanical properties of the composites.

Keywords : Biomimetic Composites, Fiber-reinforced Composites, Mechanical Property

* 정회원, 교신저자, 영산대학교 기계·자동차공학과
E-mail: mskim@ysu.ac.kr

* Department of Mechanical and Automotive Engineering,
Yeungsan University

1. 서론

섬유강화 복합재료는 높은 비강성(high specific modulus)과 비강도(high specific strength) 특성을 보유하고 있고, 이를 통해 구조체의 경량화를 실현할 수 있고 에너지 효율을 높일 수 있다. 이 때문에 자동차, 건설, 스포츠 등 다양한 분야에서 그 활용이 지속적으로 확대되고 있다. 항공우주산업과 방위산업에서도 예외가 아니며 섬유강화 복합재의 사용이 확대되고 있는데, 이러한 산업들에 사용되는 복합재 시스템들은 재난과 사고에 대한 안전의 보장이 매우 중요하다. [1-5]

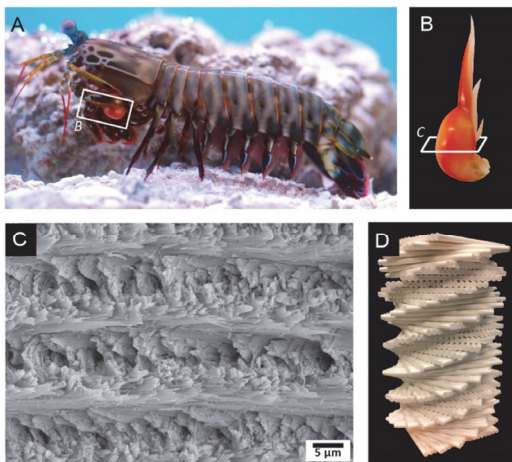


Fig. 1 Overview of the laminated fibrous helicoidal architecture within the mantis shrimp dactyl club. (A) Image of the peacock mantis shrimp (*O. scyllarus*). (B) Image of the dactyl club. Region denoted in (A). (C) High magnification SEM micrograph of the helicoidal fibrous architecture found within the periodic region of the dactyl club. Plane of fracture denoted in (B). (D) Model of the Bouligand structure showing stacked and rotating unidirectional fiber layers. Reprinted from Rivera et al., *JMR&T*, 2020;9(6): 14619-14629 [9]

자연계의 생체재료들은 아주 이질적이고 복잡한 재료시스템인데, 그 이유는 외부 환경에서 주어지는 하중을 견디기 위해 다양한 화학적 구성과 다양한 형태의 구조로 이루어져 있기 때문이다[6,7]. 자연환경에서 살아남은 생명체들(곤충, 어류 등)의 신체구조와 생체재료는 신체보호와 기동성을 함께 보유하기 위해 가볍고 유연하며 뛰어난 파괴인성을 보유하는 방향으로 진화하였다[8].

갑각류 생물체들의 독특한 신체조직 중의 하나는 섬유가 나선형으로 정렬된 구조(Helicoidal structure or Bouligand structure)이다(Fig. 1 참조). Fig. 1은 사마귀 새우의 dactyl club 내에서 섬유가 나선형으로 배열된 형상을 보여준다. 이 구조는 내충격성과 손상내성이 우수하고, 효과적으로 파괴에너지를 분산시키는 것으로 알려져 있다[9-11]. 또한 나선형 섬유배열 구조는 기계적 물성 즉 굽힘물성과 전단강도가 크게 향상되는 것으로 보고되었다[12,13]. 이러한 성질로 인해 섬유의 나선형 배열구조는 충격하중과 압력하중 하에서 섬유강화 복합재의 물성 향상을 위한 활용에 적합한 구조로 판단된다.

본 연구에서는 섬유가 나선형으로 배열된 생체 모방 복합재를 구성하고, 압력하중 하에서 섬유의 나선형 배열이 복합재의 파괴 거동에 미치는 영향을 연구하였다. 또한, 나선형배열 섬유강화 복합재에서 탄소섬유층과 유리섬유층의 다양한 적층 형상이 압력하중에 하에서의 복합재의 파괴 거동에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 본 연구는 유한요소해석(ANSYS 사용)을 바탕으로 진행되었다.

2. 유한요소해석

2.1 구성 재료

본 연구에서는 두 가지 복합소재가 사용되었는

Table 1. Material properties of unidirectional carbon fiber/epoxy composites and unidirectional glass fiber/epoxy composites

	Epoxy Carbon UD	Epoxy E-Glass UD
E_{11} (GPa)	121	45
$E_{22} = E_{33}$ (GPa)	8.6	10
$\nu_{12} = \nu_{13}$	0.27	0.3
ν_{23}	0.4	0.4
$G_{12} = G_{13}$ (GPa)	4.7	5
G_{23} (GPa)	3.1	3.8
X_{1t} (MPa)	2,321	1,100
$X_{2t} = X_{3t}$ (MPa)	29	35
X_{1c} (MPa)	-1,082	-675
$X_{2c} = X_{3c}$ (MPa)	-100	-120
$S_{12} = S_{13}$ (MPa)	60	80
S_{23} (MPa)	32	46.2

데, 탄소섬유-에폭시 복합재와 유리섬유-에폭시 복합재가 사용되었다. 이 복합재들은 ANSYS의 재료 데이터베이스(Engineering Data)에서 제공되는 Epoxy Carbon UD (230GPa) Prepreg와 Epoxy E-Glass UD를 사용하였다. 상기 단방향 섬유 복합재들의 물성은 Table 1에 제시되었다. 탄소섬유 복합재가 유리섬유복합재보다 탄성계수(E_{11}), 인장강도(X_{1t})와 압축강도(X_{1c})가 크다는 것을 제시된 물성을 통해 알 수 있다.

2.2 복합재 샘플 적층구조

본 논문에서는 혼동을 피하기 위해 단층의 복합재는 플라이(ply)라 하고 복층의 복합재 적층판을 라미네이트(laminate)라는 용어를 사용하기로 한다 [14]. 즉 플라이 여러 층이 적층되어 1개의 라미네이트 적층판이 형성되는데 여기서는 6개 층의 플라이가 1개의 라미네이트를 구성한다. 그리고 4개의 라미네이트 적층판들이 1개의 복합재

Table 2. Schematic of sample structures

	Sample			
	CGGC	GCCG	GCGC	CGCG
4 th laminate	CF-E	GF-E	GF-E	CF-E
3 rd laminate	GF-E	CF-E	CF-E	GF-E
2 nd laminate	GF-E	CF-E	GF-E	CF-E
1 st laminate	CF-E	GF-E	CF-E	GF-E

* 1st laminate: The bottom laminate (맨 아래 적층판)
 4th laminate: The top laminate (맨 위 적층판)
 CF-E: carbon fiber-epoxy composites
 GF-E: glass fiber-epoxy composites

샘플을 구성한다.

본 연구에서 폭발하중 거동분석을 위한 복합재는 4종류의 샘플(CGGC, GCCG, GCGC, CGCG)로 구성된다(Table 2 참조).

Table 2에서 CF-E와 GF-E는 각각 탄소섬유-에폭시 복합재와 유리섬유-에폭시 복합재를 의미한다. 예를 들어, CGGC는 위에서 아래로 탄소섬유-에폭시 라미네이트, 유리섬유-에폭시 라미네이트, 유리섬유-에폭시 라미네이트, 탄소섬유-에폭시 라미네이트가 배치된다. 탄소섬유-에폭시 라미네이트를 구성하는 모든 플라이들은 탄소섬유-에폭시 플라이가 되고, 유리섬유-에폭시 라미네이트를 구성하는 모든 플라이들은 유리섬유-에폭시 플라이가 된다. 위와 같이 4 종류 형태의 샘플을 구성한 이유는 탄소섬유 라미네이트와 유리섬유 라미네이트의 배열 형태에 따른 기계적 거동을 분석하기 위함이다.

앞에서 언급하였듯이 1st, 2nd, 3rd, 4th 라미네이트 적층판들은 복합재 플라이들로 구성되는데, 각 라미네이트마다 6개의 플라이 층으로 구성된다 (Table 3 참조). 즉 모든 샘플들은 24개(=4×6)의 단방향 섬유-에폭시층(플라이, ply)으로 구성된다. 각 라미네이트 내의 6개 단방향 섬유 복합재 플라이들은 섬유의 방향이 특정한 방향으로 정렬된다. Table 3과 Fig. 2(a)의 개요도에 보이는 바와

같이 생체구조를 모사하여 제일 아래층(1st 플라이)의 섬유방향은 0°이고 위로 갈수록 반시계 방향으로 30°씩 증가하여 전체적으로 Fig. 1(D)에 보이는 것처럼 나선형 형태의 배열을 이룬다.

나선형 배열 섬유강화 생체모방 복합재의 결과와 비교 및 분석하기 위해 섬유가 0°와 90°로 정렬된 크로스-플라이(cross-ply) 복합재 샘플이 설정되었는데 섬유의 방향은 Table 3과 Fig. 2(b)의

Table 3. Fiber orientation of 6 layers of unidirectional composites in each laminate (CF-E or GF-E), 1st ply: the bottom layer, 6th ply: the top layer

ply	Biomimetic composites	Cross-ply composites
6 th ply	150°	90°
5 th ply	120°	0°
4 th ply	90°	90°
3 rd ply	60°	0°
2 nd ply	30°	90°
1 st ply	0°	0°

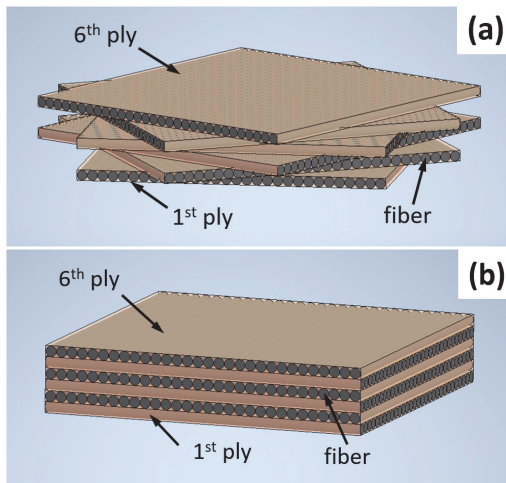


Fig. 2 Schematic of six layers of unidirectional composites in a laminate, (a) biomimetic composites, (b) cross-ply composites

개요도에 보인다.

요약하면, Table 2에 보인 4 종류의 샘플은 생체모방 복합재 샘플 4 종류와 크로스-플라이 복합재 샘플 4 종류로 구성되므로 총 샘플의 개수는 8개가 된다. 그리고 모든 샘플은 앞에서 언급하였듯이 24개의 단방향 섬유 복합재 층(플라이)으로 구성되었다. 여기서 1st 플라이는 전체 복합재의 최하층 그리고 24th 플라이는 최상층을 의미한다.

2.3 복합재의 형상 및 하중 조건

유한요소 해석에서 생체모방복합재와 크로스-플라이 복합재는 Fig. 3에 보이는 것처럼 지름 30 cm의 원판형태로 구현되었다. 그리고 샘플의 바깥쪽 가장자리는 고정되었다. 원판 복합재의 내부구조는, 2.2에 언급하였듯이, Table 2와 3의 조합으로 이루어진다. 즉 생체모방 복합재와 크로스-플라이 복합재 내에서 탄소섬유-에폭시 라미네이트와 유리섬유-에폭시 라미네이트의 배치는 Table 2를 따른다. 그리고 각 라미네이트 내의 복합재 플라이 층들의 형상은 Fig. 2(a)와 (b)의 개요도에 보이는 형태로 배열된다.

하중은 원판의 윗면에 수직방향으로 작용한다 (Fig. 3(a) 참조). 그러므로 압력하중은 24th 플라이(최상층)의 윗면에 가해진다. 각 층을 형성하는 단방향 복합재 플라이의 두께는 0.2 cm로 설정되

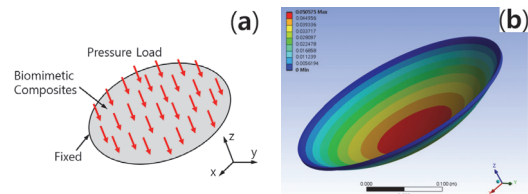


Fig. 3 Composite structure and pressure load, (a) Schematic of composite samples under pressure load, (b) Total Deformation of a biomimetic composite (CGCG, 30MPa)

었는데 이는 실제 제작되는 복합재들의 일반적인 두께를 감안하여 선정되었다. 그러므로 생체모방 섬유복합재와 크로스-플라이 복합재의 총 두께는 4.8 cm (=0.2×6×4)가 된다.

유한요소해석은 ANSYS Workbench의 Static Structural을 이용하였다. 복합재의 구조설계는 ACP Pre 그리고 결과해석은 Static Structural의 결과와 ACP Post를 이용하였다. 유한요소해석에서 설정된 복합재 원판 샘플의 노드(node)와 엘리먼트(element)의 개수는 각각 20,702개와 20,525개이다.

3. 결과 및 토론

3.1 굽힘변형과 파괴거동

Table 4는 압력하중과 Total deformation의 관계를 보여준다. Total deformation은 굽힘에 의해 발생하는 처짐의 양을 나타낸다고 볼 수 있다. 그러므로 maximum deformation은 최대 처짐의 양을 나타내는데 이는 원판의 중심위치에서의 변형이라고 보면 되겠다. Table 4의 결과에서 알 수 있듯이 압력이 증가하면 deformation의 크기도 증가한다.

Fig. 4는 CGGC 샘플의 10 MPa 압력하중에서의 Fiber Tensile Failure Criterion(FTFC)의 결과를 보여준다. FTFC는 섬유의 파괴정도를 나타내

는 수치로 1 이상이면 파괴가 일어난 것으로 간주된다. 섬유의 파괴는 섬유가 정렬된 방향(섬유방향)으로 일어난다. 그림의 왼쪽 아래에 해당 플라이의 섬유방향이 표시되어있어 쉽게 비교가 가능하다. Fig. 4(a)는 17번째 플라이의 FTFC의 결과를 보여준다. 17번째 플라이는 3rd 라미네이트의 5번째 플라이인데 섬유의 정렬방향이 120°(x축과 이루는 각도)이다(Table 3 참조). Fig. 4(b)와 (c) 각각 9번째와 1번째 플라이의 FTFC의 결과를 보여준다. 샘플의 밑에서부터 9번째 플라이는 2nd 라미네이트의 3번째 플라이를 나타내므로 섬유의

Table 4. Maximum deformation (unit: m)

	Biomimetic Comp.		Cross-ply Comp.	
	3 MPa	30 MPa	3 MPa	5 MPa
CGGC	0.0138	0.0505	0.0139	0.0172
GCCG	0.0141	0.0506	0.0141	0.0172
GCGC	0.0140	0.0506	0.0140	0.0173
CGCG	0.0141	0.0506	0.0141	0.0173

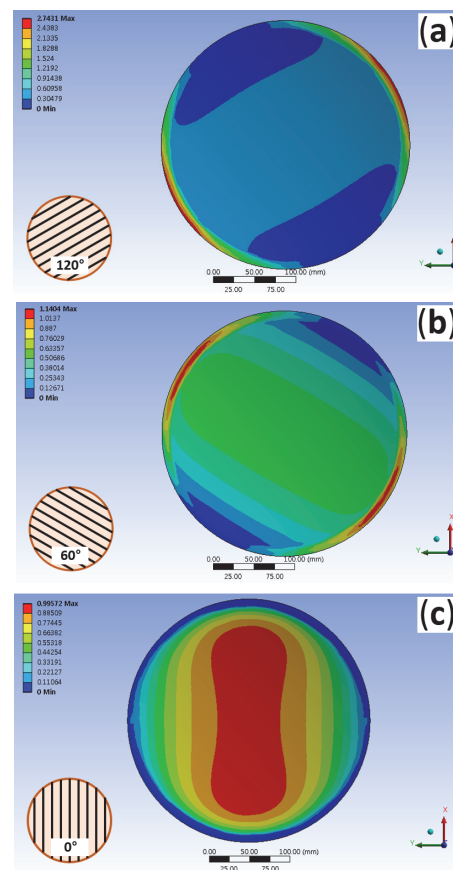


Fig. 4 Results of fiber tensile failure criterion, Biomimetic composites, CGGC, 10MPa, (a) 17th ply, (b) 9th ply, (c) 1st ply (the lowest ply)

각도가 60°이다. 1번째 플라이는 1st 라미네이트의 1st 플라이 즉 섬유 방향이 0°(x축 방향)인 것이다.

Fig. 4에서 중심부의 색깔을 (a), (b), (c) 순서로 보면 하늘색에서 녹색을 거쳐 붉은색으로 변하고 있다. 이는 해당 수치가 커지고 있다는 것을 의미한다. 그림에서 원판의 왼쪽에 있는 scale에서 해당 수치를 살펴보면 (a)에서 (c)로 갈수록 해당 수치가 커지는 것을 볼 수 있다. 이는 복합재에서 위층에서 아래층으로 내려갈수록 섬유의 파괴가 심해지는 것을 나타낸다고 볼 수 있다. Fig. 3(b)에서 알 수 있듯이 압력하중 하에서 복합재는 굽어지게 된다. 즉 복합재의 가장자리가 고정되어 있는 상황에서 압력하중을 받는 면(윗면, 24th 플라이)보다 반대편의 면(아랫면, 1st 플라이)이 더 큰 인장이 일어난다. 그래서 복합재의 최하층에서 섬유와 모재의 파괴가 크게 일어나는 것으로 볼 수 있다. 그러므로 압력이 가해지는 방향의 반대편 즉 최하층(1st 플라이)의 기계적 거동을 살펴보는 것이 중요하다.

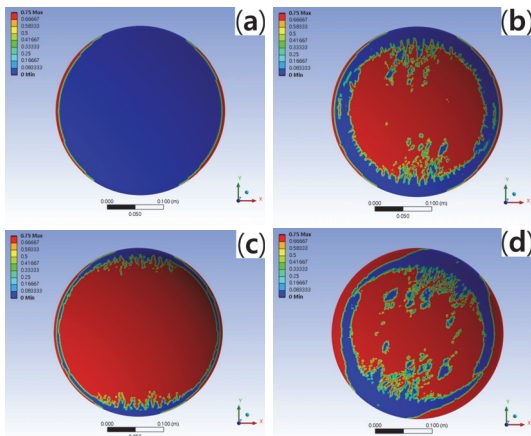


Fig. 5 Results of fiber tensile damage variable, Biomimetic composites, CGCG, (a) 10MPa, 1st ply, (b) 20MPa 1st ply, (c) 30MPa, 1st ply, (d) 20MPa, 24th ply

Fig. 5에서는 CGCG 생체모방복합재 샘플의 여러 하중 하에서의 파괴거동을 보여준다. 그림들은 Fiber Tensile Damage Variable (FTDV)의 결과를 보여주는데, 수치 0.75이상은 섬유가 완전히 파괴된 것으로 간주한다. 그러므로 그림에서 빨간색 영역은 섬유의 파괴가 일어나기 직전이거나 혹은 파괴가 일어났다고 볼 수 있다. Fig. 5(a), (b), 그리고 (c)에서 보듯이 하중이 증가할수록 섬유의 파괴범위가 커지는 것을 볼 수 있다. Fig. 5(b)와 (d)를 비교해볼 때 플라이의 중간부분(원의 중심부분)은 1st 플라이(최하층)가 24th 플라이(최상층)보다 파괴가 더 심하다고 볼 수 있다. 샘플의 가장자리는 최상층과 최하층 양쪽 모두 섬유의 파괴가 발견되나, 최상층에서 가장자리의 파괴범위가 더 큰 것으로 나타났다.

3.2 최대압력하중

본 연구에서 복합재가 견딜 수 있는 최대압력을 조사하였다. 여기서 최대압력이란 유한요소해석에서 수렴(convergence)에러를 일으키지 않는 최대압력으로 정하였다. 그 이유는 분석결과에 의하면 수치해석상의 수렴에러는 변형(deformation)이 크게 일어났을 때 나타나는 것으로 분석되었기 때문이다. 즉 변형이 유한요소해석을 가능하게 하는 범위의 변형을 벗어났을 때 에러가 나타난 것으로 판단된다. 변형이 허용범위를 벗어났다는 것은 복합재가 완전히 파괴되었다고 볼 수 있다. 이

Table 5. Maximum pressure and maximum deformation of biomimetic composites

	CGGC	GCCG	GCGC	CGCG
Max Pressure (MPa)	103.9	60.6	95.1	68.4
Max Deformation (m)	0.0844	0.0668	0.0811	0.0703

런 이유로 인해 유한요소해석에서 수렴에러를 유발하지 않는 최대압력을 복합재가 견딜 수 있는 최대압력으로 간주하였고 이를 바탕으로 복합재의 기계적 거동을 분석하였다. 그 결과는 Table 5와 6, 그리고 Fig. 6에 나타나 있다.

나선형으로 배열된 섬유의 생체모방 복합재의 결과는 Table 5에 제시되어 있는데, 최대압력이 60.6~103.9MPa로 나타났다. 반면 크로스-플라이 샘플의 경우 6.1~7.8 MPa로 생체모방 복합재에 비하여 현저하게 낮은 것으로 나타났다 (Table 6). 즉 섬유방향을 나선형으로 배열함으로 인해 압력 혹은 폭발 하중에서 견디는 능력이 현저히 증가되는 것으로 나타났다. 이는 섬유정렬의 방향 때문인 것으로 판단된다. Fig. 7(a)에 보이는 것처럼 생체모방 복합재의 경우 섬유가 여러 방향으로 정렬된다. 하지만 크로스-플라이 샘플(Fig. 7(b))의 경우 섬유가 0°와 90° 두 개의 방향으로만 섬유가 정렬된다. 섬유강화 복합재에 압력하중이 가해질 경우 하중은 섬유방향으로 전달된다. 즉 섬유가 여러 방향으로 정렬될 경우 압력하중이 복합재 내에서 여러 방향으로 전달되고, 이것은 섬유가 정렬되지 않은 특정방향으로의 취약성이 줄어든다는 것을 의미한다. 그러므로 생체모방 복합재가 크로스-플라이 복합재보다 다양한 방향으로 에너

지를 분산시킬 수 있고 이것이 압력하중 하에서의 생체모방 복합재의 강도가 크게 향상된 원인으로 판단된다[13].

앞에서도 언급하였듯이 압력하중 하에서 여러 층으로 구성된 복합재의 거동에서 최상층(24th 플라이)과 최하층(1st 플라이)의 거동에 대한 분석이 중요하다. 그 이유는 최상층은 최소 인장이 일어나고 최하층은 최대 인장이 일어난다. 최상층의 경우는 압력하중이 적을 경우 압축이 일어날 수도 있다. 앞에서도 언급하였듯이 최하층의 거동이 더욱 중요한데 파괴가 최하층에서 가장 많이 일어나기 때문이다. 그러한 관점에서 볼 때 생체모방 섬유강화 복합재의 경우 CGGC 샘플이 제일 큰 하중을 견뎠다. 그 이유는 탄성물성과 인장강도가 큰 탄소섬유가 최상층과 최하층에 배치되어 있어 더욱 잘 견디는 것으로 판단된다. 두 번째로 큰 하중을 견딘 샘플은 역시 GCGC 샘플이다. 이 역시 최하층에 탄소섬유 층이 배열되었기 때문으로 판단된다. 세 번째는 CGCG이고 제일 적은 하중

Table 6. Maximum pressure and maximum deformation of cross-ply composites

	CGGC	GCCG	GCGC	CGCG
Max Pressure (MPa)	7.5	6.3	7.8	6.1
Max Deformation (m)	0.0202	0.0189	0.0204	0.0186

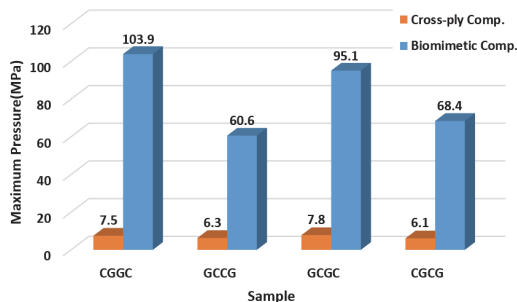


Fig. 6 The results of maximum pressure of biomimetic composites and cross-ply composites

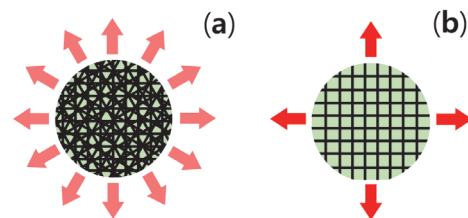


Fig. 7 Schematic of load carrying directions of (a) biomimetic composites and (b) cross-ply composites

을 견딘 샘플은 GCCG이다. GCCG의 경우 탄성과 강도가 약한 유리섬유 복합재가 최상층과 최하층에 배치되어 큰 하중을 견디기 어려웠을 것으로 사료된다. CGCG 샘플은 최상층에 탄소섬유 복합재가 배열되어 GCCG 샘플보다 좀 더 큰 하중을 견딘 것으로 사료된다. 요약하면 평판에 수직으로 압력하중을 받는 구조체의 경우 하중이 가해지는 면의 반대편 층에 강한 탄성과 강도의 재료를 위치시키고, 그 다음에 하중을 받는 쪽에 강한 탄성과 강도의 재료를 위치시킬 필요가 있다. CGGC 샘플이 제일 큰 하중을 견딘 것이 이 설명을 뒷받침하고 있다. 이는 I형보나 샌드위치구조 복합재가 굽힘하중에 우수한 물성을 나타내는 것을 생각해봐도 쉽게 이해가 된다.

Table 6의 크로스-플라이 샘플에서도 유사한 거동을 보이고 있는데 탄소섬유 복합재가 최하층에 위치한 경우(CGGC와 GCGC)가 더 큰 하중을 견뎠다. 하지만 결과 값들 사이에 차이가 크지 않으므로 더 상세한 분석은 큰 의미가 없을 것으로 판단된다.

한편 Table 5와 6, 그리고 Fig. 6에서 CGGC와 GCCG 사이의 결과 값의 차이 또는 GCGC와 CGCG 사이의 결과 값의 차이를, 혹은 다른 조합의 결과 값들의 차이를 생각해볼 때 생체모방섬유 강화 복합재에서의 차이가 현저히 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 CGGC/GCCG는 171%(=103.9 MPa/60.6 MPa, 생체모방복합재)와 119% (=7.5 MPa/6.3 MPa, 크로스-플라이 복합재)이다. 또한 GCGC/CGCG는 139% (=95.1 MPa/68.4 MPa, 생체모방복합재)와 127% (=7.8 MPa/6.1 MPa, 크로스-플라이 복합재)이다. 다시 말해 섬유가 나선형으로 배열된 생체모방구조가 섬유강화 복합재의 경우 상기에 기술된 최외각 층들(최하층과 최상층)이 복합재의 강도 향상에 기여하는 현상을 더욱 증폭시키는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 유한요소해석을 이용하여 압력하중을 받는 생체모방섬유강화 복합재(Biomimetic fiber-reinforced composites)의 파괴 거동을 분석하였다. 생체모방 복합재는 나선형 배열 적층구조를 형성하였다. 이 구조는 각 층의 섬유방향이 일정 간격으로 점진적으로 변하는 구조이다. 비교 대상으로 섬유가 0°와 90°로 배열된 크로스-플라이(Cross-ply) 샘플이 설정되었다. 또한 탄소섬유 복합재 적층판과 유리섬유복합재 적층판의 적층형태에 따른 파괴 거동도 분석하였다.

연구결과에서 섬유가 나선형으로 배열된 생체모방 적층구조가 압력하중 하에서의 복합재의 기계적 물성(파괴물성)을 현저히 증가시키는 것으로 나타났다. 또한 복합재의 최외각 층(최하층과 최상층)에 탄성과 강도가 강한 재료를 배치하는 것이 복합재의 기계적 물성향상에 크게 기여하는 것으로 나타났다. 특히 압력하중의 반대면(본 논문에서는 최하층)에 탄성과 강도가 큰 재료를 배치시키는 것이 기계적 물성을 향상시키는데 크게 기여하는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: 2021R1F1A1051836).

참고문헌

- [1] A. K. Samanta, "Fibre Reinforced Composites: Multiplicity of Application," Latest Trends in

- Textile and Fashion Designing, pp. 51-53 (2018). DOI: 10.32474/LTTFD.2018.01.000112
- [2] 윤병일, 김정일, “방탄 복합재료의 기술발전 현황과 이를 이용한 방탄복 개발방안 (1),” *국방과 기술*, vol. 415, pp. 84-953, (2013).
- [3] 윤병일, 김정일, 방탄 “복합재료의 기술발전 현황과 이를 이용한 방탄복 개발방안 (2),” *국방과 기술*, vol. 416, pp. 142-153, (2013).
- [4] M. Sadighi, R. C. Alderliesten, R. Benedictus. “Impact resistance of fiber-metal laminates: A review,” *International Journal of Impact Engineering*, vol. 49, pp. 77-90, (2012).
- [5] A. Vlot. “Low velocity impact loading on fiber reinforced aluminium laminates (Arall and Glare) and other aircraft sheet materials.” Rept. LR-718. Delft, The Netherlands: Delft Univ. Of Technology, (1993).
- [6] A. R. Studart, “Towards High-Performance Bioinspired Composites,” *Advanced Materials*, vol. 24, pp. 5025-5044, (2013).
- [7] P. Tran, T. D. Ngo, P. Mendis, “Bio-inspired composite structures subjected to underwater impulsive loading,” *Computational Materials Science*, vol. 82, pp. 134-139, (2014).
- [8] P. Liu, D. Zhu, Y. Yao, J. Wang, T. Q. Bui, “Numerical simulation of ballistic impact behavior of bio-inspired scale-like protection system,” *Materials and Design*, vol. 99, pp. 201-210, (2016) .
- [9] J. Rivera, N. A. Yaraghi, W. Huang, D. Gray, D. Kisailus, “Modulation of impact energy dissipation in biomimetic helicoidal composites,” *Journal of materials research and technology*, 9(6), pp. 14619-14629, (2020).
- [10] F. Yang, W. Xie, S. Meng, “Impact and blast performance enhancement in bio-inspired helicoidal structures: A numerical study,” *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, vol. 142, 104025, (2020).
- [11] L.K. Grunenfelder, N. Suksangpanya, C. Salinas, G. Milliron, N. Yaraghi, S. Herrera, K. Evans-Lutterodt, S.R. Nutt, P. Zavattieri, and D. Kisailus, “Bio-inspired Impact-resistant Composites,” *Acta Biomaterialia*, Vol. 10, pp. 3997-4008, (2014).
- [12] L. Cheng, A. Thomas, J.L. Glancey, and A. Karlsson, “Mechanical Behavior of Bio-inspired Laminated Composites,” *Composites: Part A*, Vol. 42, pp. 211-220, (2011).
- [13] 이진호, 조현석, 김명수, “압력하중 하에서 생체모방 섬유강화 복합재의 기계적 거동 연구,” *Composites Research*, Vol. 32, No. 1, pp. 50-55, (2019).
- [14] 이대길, 정명영, 최진호, 전성식, 장승환, 오제훈, “복합재료,” *홍릉출판사*, (2007).