

생체 모사 구조를 이용한 재료 압출방식 3D 프린팅 적층 시편의 동적 충격 거동

최재웅 · 류민영[†]

서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

(2025년 11월 3일 접수, 2025년 12월 24일 수정, 2025년 12월 24일 채택)

Dynamic Impact Behavior of Bioinspired Structures Fabricated by Material Extrusion-based 3D Printing

Jae Woong Choi and Min-Young Lyu[†]

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea

(Received November 3, 2025; Revised December 24, 2025; Accepted December 24, 2025)

초록: 재료 압출 방식 3D 프린팅 적층물은 기계적 강도가 낮아 외부 충격에 약하다. 본 연구에서는 충격강도 향상을 위해, 자연계 생물에서 우수한 파괴 저항성을 보이는 Bouligand 구조를 모사하고 적층 경로의 비틀림 각도(staggered angle)에 따른 충격 거동을 관찰하였다. 9°, 18°, 36°, 45°, 90°의 비틀림 각도를 적용한 적층 시편을 제작하였다. 또한 사출성형으로도 시편을 제작하여 적층 시편과의 충격 거동을 비교하였다. 충격 거동은 낙추 충격에 의한 최대 하중과 파단 시까지의 흡수 에너지를 통해 분석하였다. 비틀림 각도가 작을수록 적층 시편에 가해지는 최대 충격 하중이 증가하였으며, 비틀림 각도 18°에서는 관통부 주변의 균열 패턴이 복잡해지며 가장 높은 에너지 흡수를 보였다. 일부 비틀림 각도에서는 사출 시편보다 높은 흡수 에너지를 보였다. 본 연구를 통해 생체 구조를 모사한 Bouligand 구조 3D 적층물에서 적절한 비틀림 각도의 설계가 적층 시편의 충격 저항성 향상에 효과적임을 확인하였다.

Abstract: Material extrusion-based 3D-printed structures generally exhibit low mechanical strength and poor resistance to external impact. In this study, a bioinspired Bouligand structure—known for its excellent fracture resistance in nature—was mimicked to enhance the impact strength of 3D-printed specimens. The effect of the staggered angle of the deposition path on dynamic impact behavior was investigated using specimens fabricated with twisting angles of 9°, 18°, 36°, 45°, and 90°. For comparison, injection-molded specimens were also prepared. The impact behavior was analyzed in terms of the maximum load and absorbed energy obtained from drop-weight impact tests. Results showed that smaller staggered angles led to higher maximum impact loads, and the specimen with an 18° angle exhibited the most complex crack propagation pattern and the highest energy absorption. In certain staggered angles, the absorbed energy of the 3D-printed specimens exceeded that of the injection-molded ones. These findings demonstrate that an appropriately designed staggered angle in Bouligand-type bioinspired structures can significantly improve the impact resistance of 3D-printed materials.

Keywords: material extrusion-based 3D printing, bioinspired structure, bouligand architecture, staggered angle, dynamic impact behavior.

서 론

3D 프린팅 기술은 재료를 적층하여 물리적 형상을 제작하는 기술로 제조 방식에 따라 재료 압출(material extrusion, ME) 방식, 재료 분사(material jetting, MJ) 방식, 접착제 분사(binder jetting, BJ) 방식, 광중합(photo polymerization, PP) 방식 등으로 분류된다.¹

이중 재료 압출 방식은 필라멘트 형태의 수지를 녹여 층층이 쌓아 올리는 방법으로, 구조가 복잡한 부품 제작이 가능하고 다양한 플라스틱 소재에 적용이 가능하여 여러 산업 분야에서 활용되고 있다. 그러나 재료 압출 방식 3D 프린팅은 낮은 압력으로 재료를 적층하기 때문에 이미 적층되어 냉각된 층과 완벽히 융합되지 않아 층간 접합력과 적층물의 밀도가 낮다.² 이로 인해 기계적 강도가 기존 사출 성형 제품에 비해 낮고, 특히 외부 충격 하중이 가해질 경우 파손과 층간 분리가 쉽게 발생하게 된다.³ 3D 프린팅 기술이 단순히 형상을 확인하는 단계를 넘어 산업에 활용되기 위해서는 충격 저항성 향상이 필요하다.

[†]To whom correspondence should be addressed.
mylyu@seoultech.ac.kr, ORCID 0000-0001-7554-2072
©2026 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

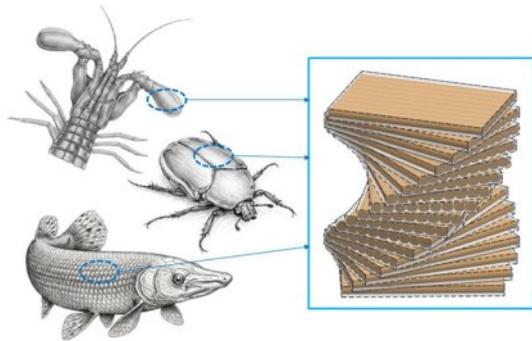


Figure 1. Schematic representation of a biomimetic Bouligand structure.

한편, 자연계에서는 외부 충격이나 반복적인 하중을 견디기 위해 고도로 진화된 구조들이 존재한다. Bouligand 구조는 물고기의 비늘, 딱정벌레의 외골격, 새우의 곤봉 등 생물학적 방어 구조에서 흔히 발견되며, 나선형으로 배열된 층들이 일정한 각도로 교차하며 적층된 구조이다.^{4,5} Figure 1에 Bouligand 구조에 대한 설명이 도식적으로 나타나 있다. 배열 방향이 층마다 회전하면서 배치되어 있어 하중이 작용하면, 균열이 단일 방향으로 직진하지 못하고 층간 배열 방향의 변화에 따라 균열이 편향(crack tilting)과 가교(crack bridging) 되어 균열 전파를 억제하는 특성을 가진다. 결과적으로 Bouligand 구조는 외부의 충격에 대해 에너지 흡수율과 파괴 저항성을 향상시킨다.^{6,9} Bouligand 구조에 관한 연구는 주로 생체 유래 소재, 고분자 복합재 등의 재료를 중심으로 진행되어 왔다.¹⁰⁻¹⁴ 그리고 자연계의 나선형 계층 구조를 모사하여 배열 방향과 층간 회전각을 제어한 실험 및 수치적 연구들이 있다. 이러한 연구는 Bouligand 구조가 다양한 하중 조건에서 파괴 저항성을 효과적으로 향상시킨다는 사실을 입증하였다. 또한 Bouligand 구조의 성능을 극대화할 수 있는 최적의 회전각을 규명하고자 하였다.¹⁵

재료 압출 방식 3D 프린팅 분야에서는 적층 경로의 설계를 통해 인장 및 충격 강도와 같은 기계적 특성뿐만 아니라, 열 전달, 표면거칠기, 적층강도 등 다양한 물리적 성질에도 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.¹⁶⁻²¹ 이는 ME 방식에서 적층 경로를 핵심 설계 변수로 활용할 수 있음을 시사한다. 그러나 이러한 경로 설계가 Bouligand 구조의 핵심 원리인 층간 회전 적층 형태로까지 확장된 연구는 찾아보기 어렵다. 재료 압출 방식의 3D 프린팅 기술은 노즐에서 압출된 필라멘트가 가는 가닥 형태로 적층되며, 각 가닥이 일정한 방향성을 가지고 배열되어 마치 섬유처럼 작용하는 구조를 형성한다. 이러한 적층 방식은 Bouligand 구조의 원리를 구현하기에 적합하다.

본 연구에서는 3D 프린팅 시 한 층에서 다음 층으로 올라갈 때 적층 방향의 회전 각도를 의미하는 비틀림 각도(staggered angle)를 변수로 설정하여 시편을 제작하였다. 그리고 제작한 적층 시편으로 동적 충격 시험을 수행하였다. 비틀림 각도에 따른 동적 충격 강도 변화를 평가하고, 각 시편의 관통 및 파

괴된 양상을 관찰하였다. 또한, 사출 성형으로 제작한 시편으로 동적 충격 시험을 하여 벌크(bulk) 소재의 동적 충격 강도를 적층 시편의 동적 충격 강도와 비교하였다.

실 험

재료 및 필라멘트. 본 연구에서 사용한 재료는 polycarbonate (PC)와 acrylonitrile butadiene styrene(ABS)를 50:50 중량비로 혼합한 PC/ABS 엘로이(alloy)이다. PC 수지는 삼양사(S. Korea)의 TRIREX 3022PJ 및 3030PJ이며 ABS 수지는 LG화학(S. Korea)의 SH610A이다. PC/ABS 엘로이는 직경 32 mm의 동방향 이축 압출기(L/D = 40:1, 토출량 20–60 kg/h)를 통해 압출온도 250–260 °C로 펠렛 형태로 제조하였다. PC/ABS 엘로이 펠렛을 직경 55 mm 단축 압출기를 이용하여 압출온도 220–230 °C로 지름 1.75 mm의 필라멘트를 제작하였다. 이렇게 제작한 필라멘트를 재료 압출 방식 3D 프린팅 공정에 사용하였다.

연구 모델. 3D 프린팅 및 동적 충격 시험을 위한 시편이 Figure 2에 나타나 있다. 시편 형상은 지름 108 mm의 원형 평판으로 두께는 2.5 mm 및 3.2 mm이다. 이 시편의 형상은 플라스틱의 동적 충격 거동을 측정하는 ISO 6603-2 규격에 해당된다.

적층 시편 제작. 3D 프린팅을 통한 적층 시편 제작에는 Lincsolution(S. Korea)의 LINK EP-300 모델 3D 프린터를 사용하였다. 이 장비는 fused filament fabrication(FFF) 방식이며, 적층 체적(build volume)은 300×300×300 mm, 노즐의 최대 온도는 510 °C, 챔버의 최대 온도는 250 °C이다. 본 연구에서는 직경 0.4 mm의 노즐을 사용하였고, 노즐 온도는 270 °C, 베드 온도는 120 °C로 설정하였다. 안정적인 초기 적층을 위해 첫 번째 층의 적층 속도는 30 mm/s로 낮게 설정하였으며, 이후 적층부터는 제작 시간을 고려하여 속도를 120 mm/s로 증가시켰다. 적층 조건이 Table 1에 나타나 있다.

실험에 사용된 시편은 두께 2.5 mm 및 3.2 mm의 두 가지이고 모두 20개 층으로 구성되었다. 이에 따라 두께 2.5 mm와 3.2 mm에서 한 층의 두께는 각각 0.125 mm, 0.16 mm이다. 모든 시편은 동일한 외형과 치수를 가지며, 적층 경로(tool path)만 다르게 적용하였다. 적층 변수는 비틀림 각도이며, 각 시편은 9°, 18°, 36°, 45°, 90°의 다섯 가지 비틀림 각도로 따라 적층 하였다. 적층 방식을 Figure 3에 도식화하였다. 모든 시편은 총 20개 층으로 구성되어 있는데 각층의 적층 경로가 똑 같지 않고 이전 층의 적층 경로에서 상대적으로 일정한 각도로 비틀어져 적층 되어 있다. Figure 3에 표시된 ‘staggered angle’은



Figure 2. Geometry of Specimen (ISO 6603-2) for dynamic impact test.

Table 1. Building Condition of Specimen in ME type 3D Printing

Nozzle diameter	0.4 mm
Nozzle temperature	270 °C
Nozzle speed	120 mm/s (1 st layer: 30 mm/s)
Chamber temperature	92 °C
Bed temperature	120 °C

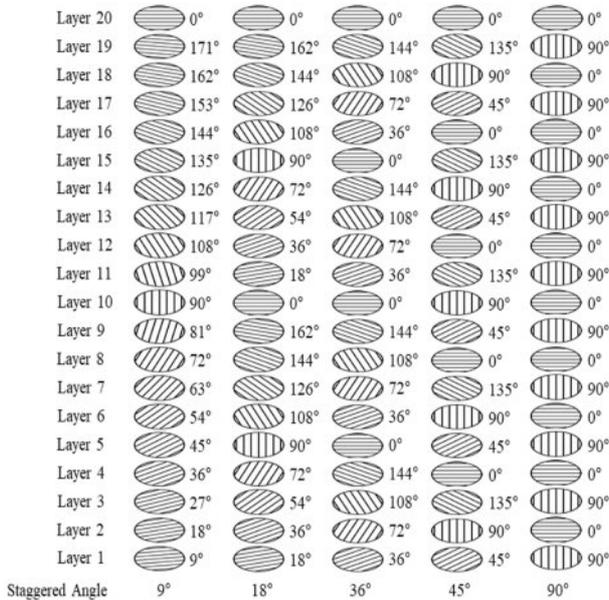


Figure 3. Tool path with staggered angle in each layer for Bouligand structure in ME type 3D Printing.

각 층이 인접한 층과 이루는 적층 경로 차이 각도를 나타낸다. 두 층이 그 각도만큼 서로 비틀어져 있는 것이다. 그리고 ‘Layer 1’, ‘Layer 2’ 등에서 나타난 각도는 수평방향을 기준으로 각 층의 적층 경로, 누적 각도를 의미한다. 인접한 층간 비틀림 각도에 따른 점진적인 회전으로 Bouligand 구조의 원리를 구현한 것이다. 슬라이싱 소프트웨어인 Ultimaker Cura 5.7.1을 사용하여 적층 조건과 변수에 따라 적층 경로를 설계하였다. 이를 3D 프린터 작동을 위해 G-code로 변환하여 시편을 적층하였다. 각 적층 경로 즉 각 비틀림 각도에서 다섯 개씩 시편을 제작하여 충격 실험에 사용하였다.

사출 시편 제작. 벌크 물성 즉 원소재가 갖는 물성과 적층 시편의 물성을 비교하기 위해 사출 성형으로 시편을 제작하였다. 사용한 소재는 PC/ABS 열로이로 3D 프린팅을 위해 제작한 필라멘트와 같다.

사용한 사출기는 Woojin Plaimm(S. Korea)의 TE110 모델이며, 사출기의 형체력은 110 ton, 스크류 직경은 32 mm이다. 사출온도는 3D 프린팅 적층 시 노즐의 온도와 동일하게 270 °C로 설정하였다. 금형 온도는 60 °C, 보압크기는 60 MPa, 보압 시간은 4초로 적용하였다. 사출 성형 조건이 Figure 4에 나타

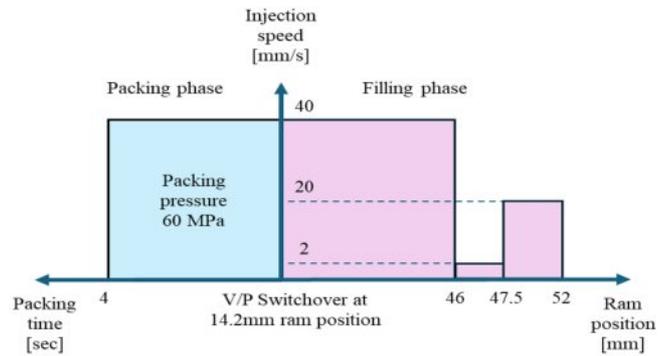


Figure 4. Injection molding condition for the fabrication of specimen.



Figure 5. Dynamic impact test equipment with falling dart.

나 있다. 시편 형상은 적층 시편과 동일하게 지름 108 mm의 원형 평판 형태이며, 두께는 2.5 mm 및 3.2 mm로 제작하였다.

동적 충격 시험. 동적 충격 시험은 Instron(USA)사의 CEAST 9350 장비를 사용하였고, Figure 5에 나타나 있다. 시험은 ISO 6603-2 규격에 따라 시편 중심에 하중을 가하는 낙추 충격 방식으로 진행하였다. 질량 20 kg의 무게추에 직경 10 mm의 반구형 스트라이커가 장착된 장치를 이용하고 충돌 속도는 4.37 m/s로 설정하였다. Figure 5에 낙추의 형상이 나타나 있다. 시편은 내경 75.7 mm의 원형 개구부를 가진 고정부(clamping fixture)에 고정하였다. 비틀림 각도에 따라 다섯 개의 시편을 반복 시험으로 동적 충격 거동을 관찰하였다. 동적 충격 시험을 통해 시편이 낙추에 관통될 때의 최대 충격 하중과 충격 에너지를 측정하였다.

결과 및 토론

최대 충격 하중. Figure 6은 두께 2.5 mm와 3.2 mm의 시편에서 층간 비틀림 각도에 따른 동적 충격 시험의 하중-변위 곡선이다. 이 곡선은 각 비틀림 각도에서 실시한 다섯 개 시편의 평균값이다. 하중-변위 곡선을 관찰해보면 충돌하는 추가 시편에 접촉하면서 하중이 측정되고 하중은 시편의 변형에 따라 증가한다. 그리고 시편이 파손되기 직전에 최대 하중(peak force)을 보이고 파손 후에는 하중이 감소한다. 하중의

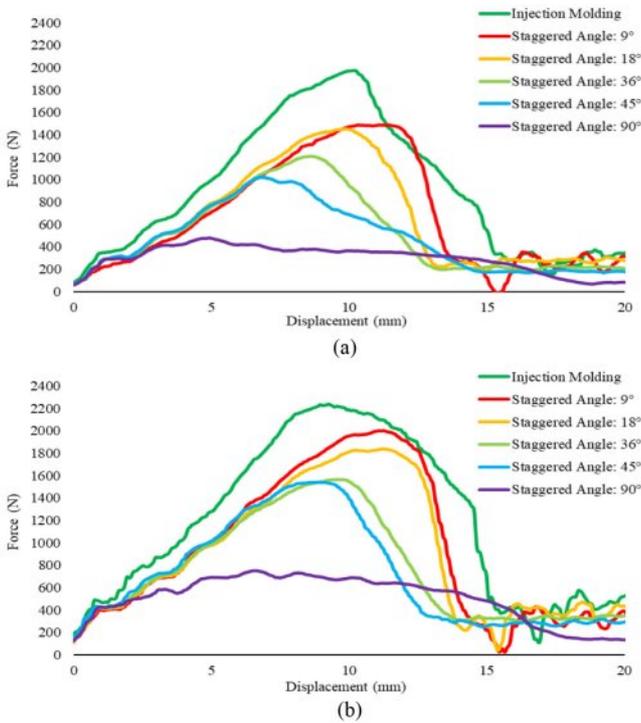


Figure 6. Force–displacement curve of specimens under impact loading: (a) thickness 2.5 mm; (b) thickness 3.2 mm

크기 분포는 접촉 초기 변형 보다는 변형이 어느정도 진행한 후에 최대 하중을 보이고 있으며 2.5 mm 시편보다 3.2 mm 시편에서 높은 최대 하중을 보이고 있다. 두 가지 두께에서 모두 사출 시편이 가장 큰 하중 곡선을 보이고 있고 비틀림 각도 90°에서는 가장 작은 하중 곡선을 보였다. 사출 시편은 비교적 작은 변위 영역에서 최대 하중에 도달하는 반면, 적층 시편은 변형이 어느 정도 진행한 뒤 최대 하중을 보인다. 최대 하중이 클수록 더 큰 변위에서 이 최대 하중을 보이고 있다. 각 시편에서 보이는 최대 하중을 Figure 7에 나타내었다. Figure 7의 (a)는 두께 2.5 mm 시편, Figure 7의 (b)는 3.2 mm 시편에 대해 서로 다른 비틀림 각도에 따른 적층 시편의 최대 충격 하중의 평균값을 보여준다. 시편 두께 2.5 mm와 3.2 mm에서 사출 시편의 최대 하중이 각각 2185.993 N과 2371.018 N으로 각 두께에서 가장 높은 값을 나타냈다. 비틀림 각도에 따른 최대 하중을 보면 비틀림 각도가 증가할수록 최대 하중은 감소하였다. 비틀림 각도가 작을수록 파손될 때 보이는 최대 하중이 높아지는 경향이 두 가지 두께에서 관찰되었다. 비틀림 각도 90° 시편에서는 2.5 mm와 3.2 mm에서 각각 526.876 N, 805.841 N으로 가장 작은 값을 보였다. 두께 증가에 따른 최대 하중 증가율은 비틀림 각도 9°, 18°, 36°, 45°, 90° 시편에서 각각 32.8, 25.6, 28.6, 44.7, 52.9%로 나타났으며, 사출 시편은 약 8.5% 증가했다. 이는 사출 시편보다 적층 시편에서의 동적 하중의 저항 능력이 두께 증가에 따라 더 민감하게 향상됨을

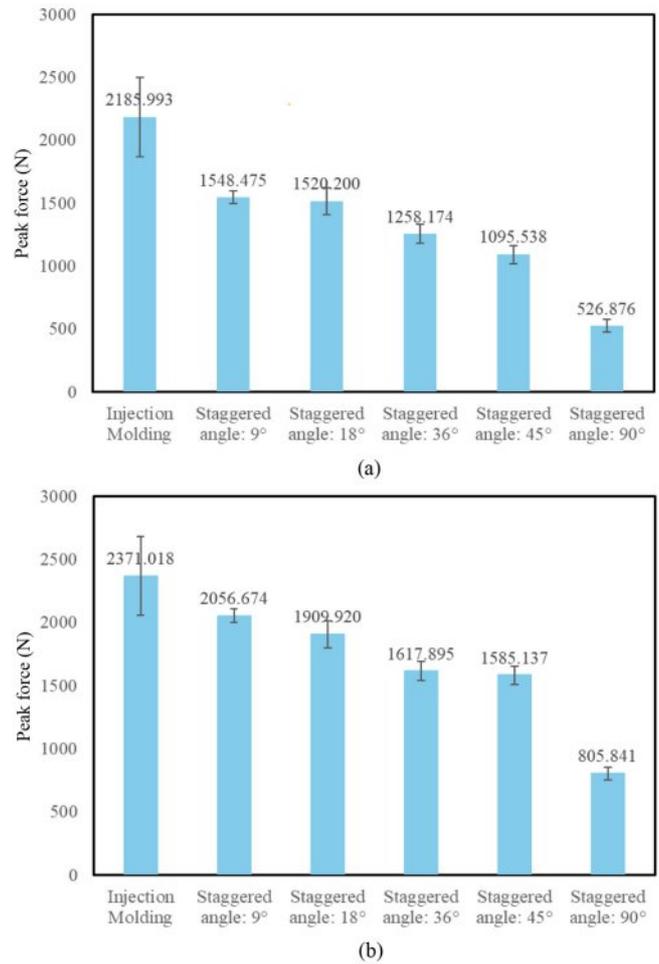


Figure 7. Peak force of specimen according to staggered angle: (a) thickness 2.5 mm; (b) thickness 3.2 mm

보여준다. 비틀림 각도가 작을수록 인접한 적층 층 간의 필라멘트 경로가 유사한 방향으로 정렬된다. 즉 조밀한 방향성을 보인다. 이러한 정렬은 외부 충격 하중이 필라멘트를 따라 연속적으로 전달될 수 있는 구조를 형성한다. 이러한 경로의 균일성은 하중이 특정 지점에 집중되지 않고 전체 구조에 균일하게 분산되도록 작용되어 응력 집중 현상을 완화시킨다. 또한 상·하 층 간의 필라멘트 배열이 구조적으로 연속되면 하중 전달이 두 층 간에 유사하게 이루어지고 하부 층이 하중을 함께 지지하게 된다. 하부 층이 상부 층을 구조적으로 지지하는 층간 보강 효과가 발생하여 충격 하중이 증가하는데 기여한다고 판단된다. 반대로 비틀림 각도가 커질수록 방향성은 감소하고, 층간 필라멘트의 방향이 교차되면서 충격 전달 경로가 불연속적으로 형성된다. 이러한 구조는 응력 집중을 유발하거나 층간 보강 효과가 적어 낮은 최대 하중을 보인다. 사출 시편은 층간 접합이 없는 단일 구조이다. 고온 및 고압의 급형 내 충전 과정을 통한 높은 재료 밀도와 결합 강도에 의해 초기 강성이 우수하게 나타나며 최대하중도 높다. 사출 시편은

내부조직이 등방성이어서 하중 전달 경로가 방향성이 없고 불균일하여 적층 시편보다 파단이 일찍 발생하였다. 또한 그로 인해 시험 시편 간 표준편차가 크게 나타났다. 사출 시편 두께가 2.5 mm와 3.2 mm에서 최대 하중의 표준편차가 각각 312.87 N, 404.423 N으로 나타났다. 반면 적층 시편은 시편 두께와 비틀림 각도에 따라 다르지만 49.93 N-105.82 N으로 사출 시편보다 작게 분포한다. 적층 시편은 구조의 방향성 및 반복성과 예측 가능한 하중 전달로 인해 결과의 일관성이 높았다고 판단된다.

충격 에너지. Figure 8은 시편이 파손될 때까지 흡수한 에너지를 보여주고 있다. Figure 8(a)는 두께 2.5 mm 시편, Figure 8(b)는 3.2 mm 시편에서 비틀림 각도를 달리 적층한 시편들의 충격 흡수 에너지를 나타낸다. 이는 시편이 동적 하중을 받아 변형되고 최종적으로 파손될 때까지 받은 에너지이다. 사출 성형으로 제작된 시편의 에너지도 함께 비교하였다. 동적 충격 시험의 하중-변위 데이터를 실시간으로 기록하고, 이를 이용하여 총 에너지를 계산하였다. 2.5 mm 시편

에서는 비틀림 각도 9°에서 가장 높은 에너지가 측정되었고, 다음으로 비틀림 각도 18°, 36°, 45°, 90° 순으로 차례로 에너지가 감소하는 경향을 보인다. 3.2 mm 시편에서는 비틀림 각도 18°에서 가장 큰 에너지가 측정되었고, 이어서 비틀림 각도 9°, 36°, 45°, 90° 순으로 에너지가 낮아졌다. 두께 3.2 mm 시편의 비틀림 각도 18°는 모든 실험 조건 중 가장 큰 에너지를 보였으며, 동일 두께의 사출 시편 보다 약 18.8% 높은 값을 보였다. 적층 시편과 사출 시편을 비교하면, 두께 2.5 mm 시편에서는 적층 시편의 비틀림 각도가 9°나 18°인 경우 사출 시편보다 다소 큰 에너지 값을 나타냈다. 두께 3.2 mm 시편에서는 적층 시편의 비틀림 각도가 9°, 18°, 36°인 경우에 사출 시편보다 높은 에너지를 보였다. 이러한 결과는 적층 시편이 사출 시편보다 우수한 충격 흡수 성능을 구현할 수 있음을 보여준다. 두께가 2.5 mm에서 3.2 mm로 증가할 때 에너지 증가율은 비틀림 각도가 9°, 18°, 36°, 45°, 90°인 시편에서 각각 49.5, 58.0, 73.2, 66.1, 94.5%로 나타났다. 사출 시편에서 두께가 2.5 mm에서 3.2 mm로 증가할 때 에너지가 약 34.9% 증가했다. 이러한 결과는 최대 충격 하중의 결과와 마찬가지로 사출 시편보다 적층 시편에서의 두께 증가에 따른 충격 성능이 더욱 효과적으로 향상됨을 보여준다. 각 시편에서 보이는 에너지 값은 시편이 외부 충격에서 파손될 때까지 버티며 흡수한 에너지를 나타낸다. 비틀림 각도가 너무 작을 경우 하중 전달 경로가 특정 방향으로 집중되고, 반대로 너무 큰 경우에는 하중 전달 경로가 불연속적으로 형성되어 분산된다. 따라서 일정 수준의 비틀림각을 적용하여 적층하면 충격 에너지를 여러 경로로 분산시켜 전체적인 충격에너지를 흡수하는데 유리하다고 판단된다. 두께 2.5 mm 시편에서는 비틀림 각도 9°와 18°의 두 시편에서 사출 시편보다 다소 큰 에너지가 측정되었다. 시편 두께가 얇아 비틀림각 변화에 따른 구조적 차이가 제한적으로 작용하여 각도에 따른 차이가 상대적으로 작게 나타났다. 반면, 두께 3.2 mm 시편은 두께 2.5 mm에 비해 적층 두께가 증가함에 따라 각 층의 강성이 향상되어 비틀림각 변화의 영향이 보다 뚜렷하게 반영된 것으로 보인다. 이로 인해 두께 3.2 mm 시편에서는 비틀림 각도 9°, 18°, 36°에서 사출 시편보다 더 큰 에너지 흡수 성능을 보였으며, 이들 비틀림각 범위 내에서 구조 내 하중 분산이 효과적으로 이루어진 결과로 분석된다. 특히 두께 3.2 mm 시편에서 비틀림 각도 18°는 본 연구에서 시도한 비틀림 각도에서 충격 에너지를 가장 효과적으로 분산하는 최적 조건으로 나타났다.

관통 형상 관찰. Figure 9는 두께 2.5 mm 시편의 충격 시험 후 관통 형상을 보여준다. Figure 9의 (a), (b), (c)는 각각 관통 시편의 상측, 하측 그리고 측면을 보여주고 있다. 하측은 상측의 수평 중심축을 180° 아래 방향으로 회전하여 촬영하였다. 충격시험은 시편을 지름 75.7 mm의 홀이 있는 지그에 고정하고 충격 추가 낙하하여 시편을 관통한다. 관통 시험 후

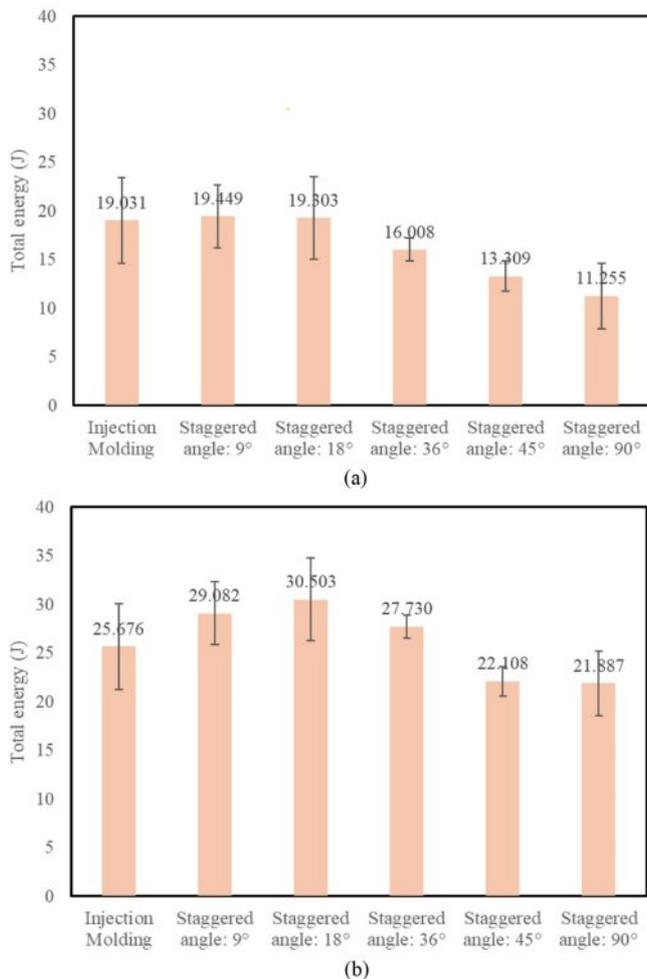


Figure 8. Total energy of specimen according to staggered angle: (a) thickness 2.5 mm; (b) thickness 3.2 mm.

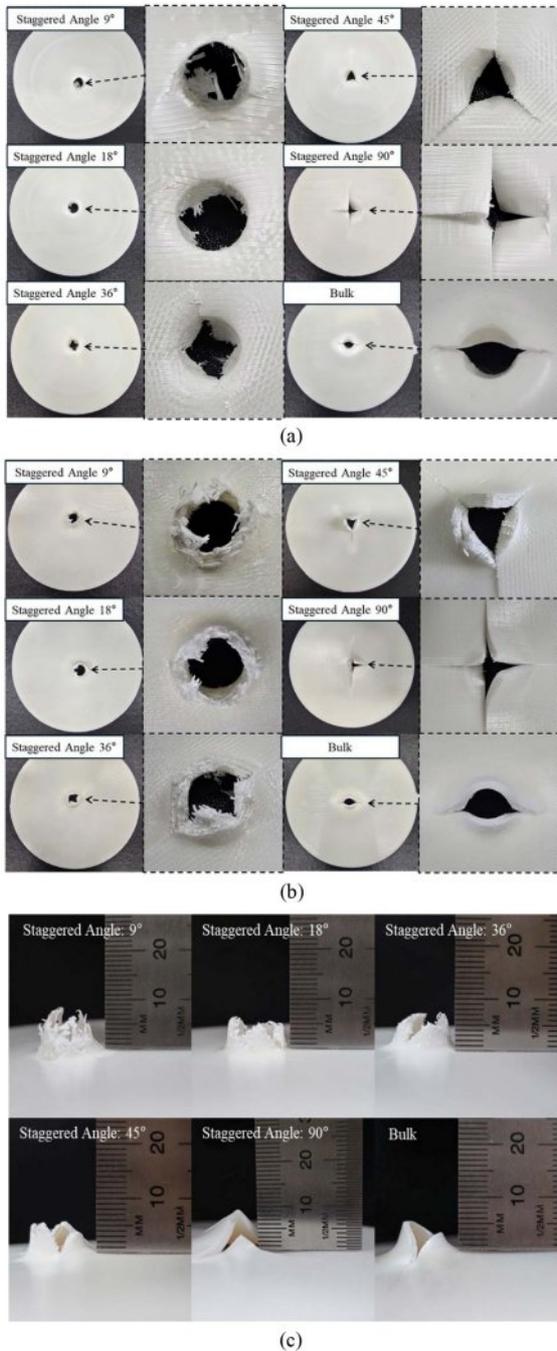
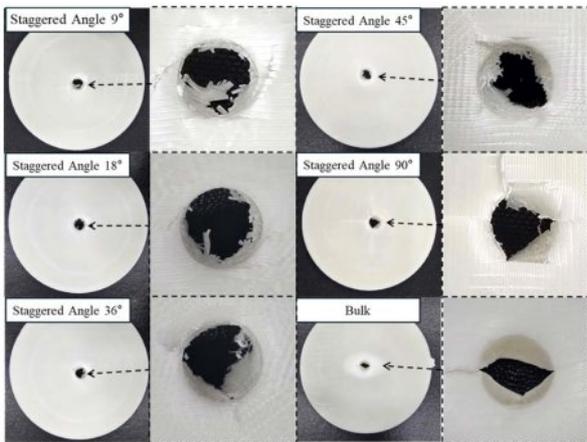


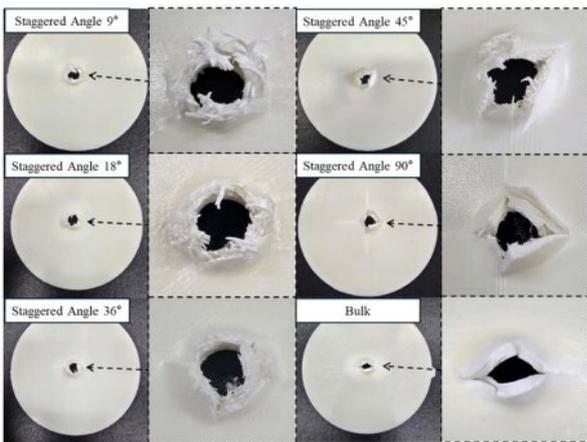
Figure 9. Picture of punctured specimen for 2.5 mm: (a) top view; (b) bottom view; (c) side view.

모든 시편에서 고정부의 내경 접촉 위치인 지름 75.7 mm 원주 주위에 백화 현상(stress whitening)이 공통적으로 관찰되었다. 이는 지그 홀의 고정부 경계면에서 소성 변형이 일어났기 때문으로 판단된다. 적층 시 비틀림 각도에 따라 파손 상태와 균열 양상에는 뚜렷한 차이가 나타났다. 비틀림 각도 9° 시편은 관통부 주변에 섬유 형태가 나타났고, 짧고 얇은 방사형 균열과 찢어짐이 불규칙하게 분포하였다. 관통부 주

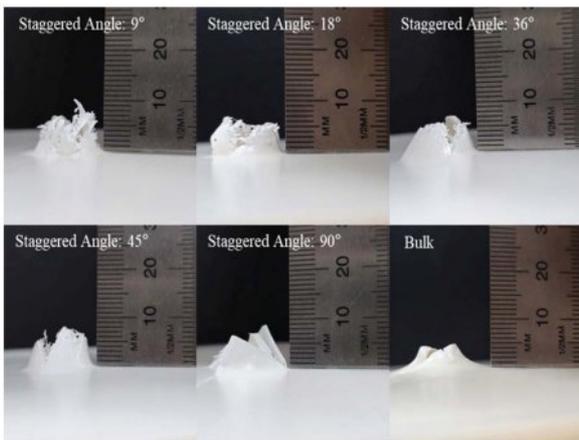
변에는 백화 현상이 연하게 나타났다. 비틀림 각도 18° 시편은 원형 관통부의 원주 방향으로 길이 10 mm 내외의 균열이 촘촘히 발생한 것이 관찰되었다. 이러한 특징은 충격 하중이 특정 방향에 집중되지 않고, 시편의 여러 방향으로, 즉 방사 방향으로 고르게 분산되었음을 시사한다. 반면 비틀림 각도 36°, 45°, 90°에서는 관통부 원주의 특정 위치에서 찢어지는 파손이 나타났다. 이 파손 양상은 Figure 3에서 볼 수 있는 각 층의 적층 경로를 따라 나타난다. 비틀림 각도 36° 시편은 관통부 주변 네 곳(36°, 72°, 108°, 144°)에서 찢어진 형태의 균열이 관찰되었다. 따라서 관통 형상은 전반적으로 원형에 가까우나, 가장자리 네 곳이 벌어지거나 갈라지는 경향을 보인다. 백화 현상은 비틀림 각도 9°와 18°보다 약하게 나타났다. 이러한 파손 양상은 적층 구조의 영향을 받아 내부에 국부적으로 응력 집중이 발생하며 파손이 이루어졌음을 보여준다. 비틀림 각도 45°와 90° 시편에서는 길고 뚜렷한 균열이 적층 경로와 유사한 방향으로 형성되었다. 비틀림 각도 45° 시편에서는 세 곳(45°, 90°, 135°)에 응력이 집중되어 찢어지는 양상을 보였다. 비틀림 각도 90° 시편에서는 네 곳(좌, 우, 상, 하)에서 찢어지는 양상을 보였다. 또한 이 두 시편에서는 관통부 단면에서 층간 박리가 동반된 흔적이 관찰되어, 적층 구조의 층간 결합이 충격 하중에 취약하게 작용했음을 보여준다. 이러한 파손 양상은 비틀림 각이 커질수록 적층 구조 내 층간 접합력이 감소하고, 충격 하중에 의한 응력 분포가 연속적이지 않고 끊겨서 특정 위치에서 응력이 집중되어 일어난 것으로 분석된다. 사출 시편은 높은 재료 응집력과 층간 경계가 없는 단일 재료의 특성으로 파단면이 거스러미가 없이 비교적 깨끗하게 관찰되었다. 관통부의 측면 형상에서 보이는 버(burr)의 길이는 비틀림각도에 따라 뚜렷한 차이는 나타나지 않았고 사출 시편은 적층 시편에 비해 다소 짧게 관찰되었다. 비틀림 각도 9°에서는 필라멘트의 가닥이 외부로 길게 노출되는 양상을 보였다. 비틀림 각도 90°에서는 파손이 적층 경로를 따라 길게 찢어지면서 층돌 반대면으로 돌출된 형상을 보였다. Figure 10은 두께 3.2 mm 시편의 충격 시험 후 파단 형상을 보여준다. 적층 시편 중 비틀림 각도 9°, 18°, 36°에서는 두께 2.5 mm 시편과 유사한 파손 패턴이 관찰되었다. 이 세 비틀림 각도에서 두 두께 모두 비틀림 각도에 따른 Bouligand 구조의 효과가 유사하게 나타난 것으로 보인다. 비틀림 각도 45°와 90°에서는 2.5 mm에서 보였던 적층 방향을 따라 나타나는 길고 뚜렷한 균열이 완화되고 관통부가 보다 원형에 가까운 형상으로 나타났다. 두께 3.2 mm 시편에서의 층간 박리는 두께 2.5 mm에서 보이는 양상과 유사하게 나타났다. 두께 3.2 mm 사출 시편의 파단 양상은 두께 2.5 mm 시편과 유사하며 깨끗한 파단면이 나타났다. 두께 3.2 mm 시편에서 보이는 파단면 측면에서 버의 길이는 두께 2.5 mm 보다 짧았다. 두께가 두꺼워 강성이 커서 변형이 다소 적게 일어난 현상이라 판단된다.



(a)



(b)



(c)

Figure 10. Picture of punctured specimen for 3.2 mm: (a) top view; (b) bottom view; (c) side view.

Staggered Angle에 따른 동적 충격 거동. 본 연구에서는 ME 타입 3D 프린팅에서 비틀림 각도를 9°, 18°, 36°, 45°, 90°로 설정하여 비틀림 각도에 따른 적층 구조의 동적 충격 거동 및 파손 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과,

비틀림 각도의 변화는 하중 전달 경로, 충격 저항 성능, 에너지 흡수 능력, 파손 형태에 모두 영향을 미쳤다. 전체적으로 비틀림 각도가 커질수록 최대 하중이 감소하였으나 작은 비틀림 각도 영역에서는 감소량이 작았다. 충격 흡수 에너지는 비틀림 각도가 작은 영역 즉 9°-36°에서 최대치를 보였고, 비틀림 각도가 클수록 에너지는 감소하였다. 비틀림 각도 9°와 18°는 최대하중과 에너지 흡수 측면에서 가장 우수한 충격 저항 성능을 보였다. 두께 2.5 mm 시편에서는 이 두 비틀림 각도에서 최대 충격 하중과 흡수 에너지 모두 가장 큰 값을 나타냈다. 3.2 mm 시편에서는 비틀림 각도 9°에서 가장 큰 최대 충격 하중, 비틀림 각도 18°에서 가장 큰 흡수 에너지를 보였다. 비틀림 각도가 작을수록 층간 필라멘트 정렬성이 높아져 외부 충격 하중이 연속적이며 일관된 경로를 통해 전파된다. 비틀림 각도 9°에서는 이러한 경향이 두드러져 충격 하중을 효과적으로 여러 방향으로 분산시키는 경향을 보였다. 이러한 결과로 충격에 의한 파손에서 가장 큰 하중을 보였다. 비틀림 각도 18°에서는 흡수 에너지가 가장 크게 나타났는데 이는 충격 하중의 전달 경로가 보다 넓게 형성되면서 충격 에너지가 구조 전반에 고르게 분산되었기 때문으로 판단된다. 이에 따라 에너지 흡수가 극대화되었고, 파손 면에서도 균일한 균열 분포와 매끄러운 절단면이 관찰되었다. 비틀림 각도가 36°와 45°로 증가함에 따라 하중 전달 경로의 연속성이 약화되고, 응력 집중이 발생하여 최대 충격 하중 및 흡수 에너지가 감소하는 경향을 보였다. 특히 비틀림 각도 45°에서는 균열이 적층 경로를 따라 길게 형성되며 비대칭적인 파손 양상이 확인되었다. 비틀림 각이 가장 큰 90° 조건에서는 각 층의 필라멘트 방향이 수직으로 교차되면서 구조적 연속성이 현저히 약화되었다. 이로 인해 충격 하중이 효과적으로 분산되지 못하고, 최대 충격 하중과 흡수 에너지 모두 실험 조건 중 가장 작은 수치를 기록하였다. 그리고 파손 양상은 뚜렷한 층간 박리와 긴 균열의 형태로 나타나 작은 충격 저항 거동을 보였다. 이러한 결과는 비틀림 각도가 적층 구조물의 충격 거동과 파괴 양상에 큰 영향을 미치는 중요한 요소임을 보여준다.

결론

본 연구에서는 자연계 생물의 외골격에서 보이는 Bouligand 구조를 모사한 재료 압출 방식 3D 프린팅 시편을 제작하고, 충격에 대한 거동을 관찰하였다. 실험은 다섯 가지 비틀림 각도(9°, 18°, 36°, 45°, 90°)와 두 가지 두께(2.5, 3.2 mm)로 수행되었으며, 동일 형상의 사출 성형 시편과의 비교를 통해 적층 구조의 성능을 평가하였다.

실험 결과, 비틀림 각도가 작을수록 층간 필라멘트의 정렬성이 향상되어 하중 전달 경로가 연속적으로 형성되었고, 이에 따라 최대 충격 하중이 늦게 나타났다. 시편의 두께에 관

계없이 비틀림 각도 9°에서 가장 높은 최대 충격 하중이 측정되었으며, 이는 응력 집중 완화 및 층간 보강 효과에 기인한 것으로 해석된다. 한편, 충격 에너지 흡수 성능을 나타내는 흡수 에너지는 단순한 필라멘트 정렬성보다는 충격 하중이 구조 전체로 얼마나 효과적으로 분산되는지와 밀접한 관련을 보였다. 두께 2.5 mm에서는 비틀림 각도 9°에서 두께 3.2 mm에서는 비틀림 각도 18°에서 가장 큰 흡수 에너지를 보였다. 일정 수준의 비틀림각이 충격 에너지 분산에 효과적으로 작용함을 확인할 수 있었다. 일부 적층 조건에서는 사출 시편보다 높은 에너지 흡수 성능을 나타냈으며, 이는 Bouligand 구조에서 비틀림 각도 조절을 통해 충격 하중에 대한 구조적 안정성을 효과적으로 제공할 수 있음을 보여준다. 적층 시편에서 두께 증가에 따른 충격 저항 성능이 뚜렷하게 향상되었다. 결론적으로 Bouligand 기반 적층 구조는 재료 압출 방식 3D 프린팅에서 동적 충격 저항성 향상에 크게 기여할 수 있으며, 비틀림 각도는 3D 적층물의 구조 최적화를 위한 핵심 요소이다.

감사의 글: 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참고문헌

- International Organization for Standardization. ISO/ASTM 52900:2021, *Additive Manufacturing-General Principles-Fundamentals and Vocabulary*; Geneva, Switzerland, 2021.
- Perez, D. B.; Celik, E.; Karkkainen, R. L. Investigation of Interlayer Interface Strength and Print Morphology Effects in Fused Deposition Modeling 3D-Printed PLA. *3D Print. Addit. Manuf.* **2021**, *8*, 23-32.
- Lay, M.; Thajudin, N. L. N.; Abdul Hamid, Z. A.; Rusli, A.; Abdullah, M. K.; Shuib, R. K. Comparison of Physical and Mechanical Properties of PLA, ABS and Nylon 6 Fabricated Using Fused Deposition Modeling and Injection Molding. *Composite Part B: Eng.* **2019**, *176*, 107341.
- Sherman, V. R.; Quan, H.; Yang, W.; Ritchie, R. O.; Meyers, M. A. A Comparative Study of Piscine Defense: The Scales of *Arapaima gigas*, *Latimeria chalumnae* and *Atractosteus spatula*. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* **2017**, *73*, 1-16.
- Sharma, A.; Shukla, N. K.; Belarbi, M.-O.; Abbas, M.; Garg, A.; Li, L.; Bhutto, J.; Bhatia, A. Bio-Inspired Nacre and Helicoidal Composites: From Structure to Mechanical Applications. *Thin-Walled Struct.* **2023**, *192*, 111146.
- Song, Z.; Ni, Y.; Cai, S. Fracture Modes and Hybrid Toughening Mechanisms in Oscillated/Twisted Plywood Structure. *Acta Biomater.* **2019**, *91*, 284-293.
- Yang, F.; Xie, W.; Meng, S. Crack-Driving Force and Toughening Mechanism in Crustacean-Inspired Helicoidal Structures. *Int. J. Solids Struct.* **2021**, *208-209*, 107-118.
- Wu, K.; Song, Z.; Zhang, S.; Ni, Y.; Cai, S.; Gong, X.; He, L.; Yu, S.-H. Discontinuous Fibrous Bouligand Architecture Enabling Formidable Fracture Resistance with Crack Orientation Insensitivity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **2020**, *117*, 15465-15472.
- Mencattelli, L.; Pinho, S. T. Realising Bio-Inspired Impact Damage-Tolerant Thin-Ply CFRP Bouligand Structures via Promoting Diffused Sub-Critical Helicoidal Damage. *Compos. Sci. Technol.* **2019**, *182*, 107684.
- Yang, W.; Sherman, V. R.; Gludovatz, B.; Mackey, M.; Zimmernann, E. A.; Chang, E. H.; Schaible, E.; Qin, Z.; Buehler, M. J.; Ritchie, R. O.; Meyers, M. A. Protective Role of *Arapaima gigas* Fish Scales: Structure and Mechanical Behavior. *Acta Biomaterialia* **2014**, *10*, 3599-3614.
- Yin, S.; Yang, W.; Kwon, J.; Wat, A.; Meyers, M. A.; Ritchie, R. O. Hyperelastic Phase-Field Fracture Mechanics Modeling of the Toughening Induced by Bouligand Structures in Natural Materials. *J. Mech. Phys. Solids* **2019**, *131*, 204-220.
- Liu, J. L.; Lee, H. P.; Tan, V. B. C. Effects of Inter-Ply Angles on the Failure Mechanisms in Bioinspired Helicoidal Laminates. *Compos. Sci. Technol.* **2018**, *165*, 282-289.
- Grunenfelder, L. K.; Suksangpanya, N.; Salinas, C.; Milliron, G.; Yaraghi, N.; Herrera, S.; Evans-Lutterodt, K.; Nutt, S. R.; Zavattieri, P.; Kisailus, D. Bio-Inspired Impact-Resistant Composites. *Acta Biomater.* **2014**, *10*, 3997-4008.
- Ma, J.; Luan, Y.; Liu, C.; Li, Z.; Guo, Z.; Li, Y. Global Optimization of Failure Behavior and Strength-Toughness Performances of Fiber Reinforced Bionic Bouligand Structural Composite with Isotropic Stainless Steel Ultra-Thin Strips. *Compos. Sci. Technol.* **2025**, *261*, 111040.
- Xu, Y.; Feng, D. Enhancing Impact Resistance of Fiber-Reinforced Polymer Composites through Bio-Inspired Helicoidal Structures: A Review. *Polym. Compos.* **2024**, *46*, 5823-5856.
- Woo, I. Y.; Lyu, M.-Y. Variations in the Tensile Strength in Material Extrusion-Type 3D Printed Specimens for Various Tool Paths. *Polym. Korea* **2020**, *44*, 769-775.
- Woo, I. Y.; Lyu, M.-Y. Variations in the Impact Strength of Material Extrusion-Type 3D Printed Specimens Depending on Tool Path and Building Direction. *Polym. Korea* **2020**, *44*, 471-478.
- Woo, I. Y.; Lyu, M.-Y. Improvement of Tensile Strength through Asymmetric Tool Path in Material Extrusion-Type 3D Printing. *Polym. Korea* **2021**, *45*, 649-653.
- Dreifus, G. Analysis of Tool Path Optimization in Large Scale Additive Manufacturing. Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2020.
- Golhin, A. P.; Tonello, R.; Frisvad, J. R.; Grammatikos, S.; Strandlie, A. Surface Roughness of As-Printed Polymers: A Comprehensive Review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2023**, *127*, 987-1043.
- Park, S. J.; Park, J. H.; Lee, K. H.; Lyu, M.-Y. Deposition Strength of Specimens Manufactured Using Fused Deposition Modeling Type 3D Printer. *Polym. Korea* **2016**, *40*, 846-851.

출판자 공지사항: 한국고분자학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.