

(옆면)

(앞면)

17CTA
P-C133
220-01

보안 과제(), 일반 과제(√) / 공개(√), 비공개() 발간등록번호(11-b350021-000056-21)
국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

R&D / 17CTAP-C133220-01

자연모사형 극한지
원천기술개발 극한지
건설구조재의
최종보고서

2019

국토교통부
한국과학기술원

자연모사형 극한지 건설구조재의 원천기술개발 최종보고서

2019 . 03. 29.

주관연구기관 / 한국과학기술원
협동연구기관 /

국토교통부
(전문기관) 한국과학기술원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원 귀하

‘자연모사형 극한지 건설구조재의 원천기술개발’(연구개발 기간 : 2017. 06. 30. ~ 2018. 12. 31.) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019. 03. 29.

주관연구기관명 :	한국과학기술원	(대표자) 신성철	(인)
협동연구기관명 :		(대표자)	(인)
참여기관명 :		(대표자)	(인)



주관연구기관책임자: 홍정욱

협동연구기관책임자:

참여기관책임자:

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	17CTAP-C133 220-01	해당 단계 연구 기간	2018.01.01.~2 018.12.31	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업			
	세부사업명	기초원천			
연구과제명	대과제명	-			
	세부과제명	자연모사형 극한지 건설구조재의 원천기술개발			
연구책임자	홍정욱	해당단계 참여연구원 수	총: 8 명 내부: 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 50,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 50,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 9 명 내부: 명 외부: 명	총 연구비	정부: 100,000천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 100,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한국과학기술원 건설 및 환경공학과			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반
-------------------------	----

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	10.1016/j.co mpositesb.20 19.02.008										

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

- 듀얼 노즐 3D 프린터를 이용한 이중재료의 진주층 모사 적층형 복합재 구조의 제작
- 힘 하중에 대한 역학적 에너지 흡수량이 25% 증가한 이중재료의 진주층 모사 적층형 구조의 수치해석 모델
- 힘 하중에 대한 역학적 에너지 흡수량이 25% 증가한 이중재료의 진주층 모사 적층형 복합재 구조의 시편

보고서 면수: 34

〈 요약 문 〉

연구의 목적 및 내용	본 연구의 최종목표는 극한지(極限地)건설구조물에 적용되는 다기능 적층형 복합재를 3D 프린터를 사용하여 구현하는 것이며, 이를 위해 제작에 필요한 각층에 적용되는 패턴과 층간의 인터페이스를 자연모사기술을 이용하여 개발하고자 한다. 적층형복합재를 구성하는 적합한 재료선정 및 패턴과 인터페이스의 적용을 통해 역학적 강도의 감소를 최소화하면서도 연성을 증대시켜 극한하중에 대한 역학적 에너지의 흡수량을 늘리고자 한다.				
연구개발성과	- 본 연구에서 확립한 3D 프린팅 기법으로 복잡한 구조의 고성능의 건설 재료를 기존보다 효율적으로 제작이 가능하므로 구조물의 안정성 및 효율성 확보 가능 - 진주층 모사 적층형 복합재 구조의 수치해석 모델로 다양한 건설재료의 개발을 통해 고성능의 건설재료가 적용된 구조물 개발 가능 - 본 연구에서 확립한 3D 프린팅 기법으로 이중재료의 복합재 구조를 효율적으로 제작하여 그 성능을 분석할 수 있음 - 본 연구에서 정확성이 검증된 진주층 모사 복합재료의 수치해석 모델로 다양한 유사구조의 성능을 검증할 수 있음 - 현재까지 수행되지 않은 자연모사 패턴의 최적화 관련 연구에 유용하게 사용될 수 있음 - 본 연구에서 확립한 3D 프린팅 기법을 통해 다양한 건설재료를 효율적으로 제작할 수 있기 때문에 경제적인 측면에서 유리함 - 본 연구에서 정확성이 검증된 진주층 모사 복합재료의 수치해석 모델로 다양한 유사구조의 성능을 효율적으로 검증할 수 있기 때문에 경제적인 측면에서 유리함				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	- 본 연구진에서 확립한 듀얼 노즐 3D 프린팅 기법으로 복잡한 구조의 이중 재료 건설재료를 다양하게 제작할 수 있고 그 성능을 평가할 수 있음 - 본 연구에서 개발한 정확성이 검증된 진주층 모사 복합재료의 수치해석 모델로 다양한 유사구조의 성능을 검증할 수 있음 - 본 연구에서 개발한 진주층 모사 복합재료와 듀얼 노즐 3D 프린팅 기법으로 현재까지 수행되지 않은 자연모사 패턴의 최적화 관련 연구에 유용하게 사용될 수 있음				
핵심어 (5개 이내)	자연모사기술	적층형복합재료	유한요소해석	3D 프린터	패턴

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	The ultimate goal of this study is to implement a multifunctional laminated composite material for structures in extreme environment using a 3D printer. To do this, we aim to develop patterns and interfaces applied between layers of the composite material using bio-inspired techniques. By applying the patterns and interfaces, and selecting proper materials, we aim to increase ductility as well as minimize the reduction of mechanical strength of the composite material. Ultimately, absorption of mechanical energy caused by extreme loads will be increased. Bivalve shells, fish scales, and exoskeleton of arthropods are stacked structures in which several layers formed of different materials are combined together by optimized patterns and interfaces. In this study, we aim to develop multi-functional laminated composites structures capable of maximizing absorption of mechanical energy by increasing ductility, as well as minimizing reduction of mechanical strength. Specifically, the patterns, and the materials applied between layers of the composite structure, as well as the interface connecting the layers are to be optimized. Through integrated behavior of the material composing the structure, patterns and interfaces constituting and connecting the layers, high-quality mechanical properties are to be manifested.				
Results	Development of patterns and interfaces constituting layers of the laminated composite structure with increased absorption of mechanical energy by minimizing reduction of mechanical strength while increasing ductility				
Expected Contribution	Development of a bio-inspired laminated composite material implemented by using a 3D printer on site for construction of extreme environments such as Antarctica, North Pole, Deep Sea or Space, as well as all construction structures to which existing laminated composite materials are applied.				
Keywords	Bio-inspired technology	Laminated composite material	Finite element analysis	3D printer	Pattern

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	
2. 국내외 기술 개발 현황	
3. 연구수행내용 및 성과	
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	
5. 연구개발성과의 활용 계획	
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	
7. 연구개발성과의 보안등급	
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	
11. 기타 사항	
12. 참고 문헌	

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

1-1. 최종목표

본 연구의 최종목표는 극한지(極限地)건설구조물에 적용되는 다기능 적층형복합재를 3D 프린터를 사용하여 구현하는 것이며, 이를 위해 제작에 필요한 각층에 적용되는 패턴과 층간의 인터페이스를 자연모사기술을 이용하여 개발하고자 한다. 적층형복합재를 구성하는 적합한 재료선정 및 패턴과 인터페이스의 적용을 통해 역학적 강도의 감소를 최소화하면서도 연성을 증대시켜 극한하중에 대한 역학적 에너지의 흡수량을 늘리고자 한다.

1-2. 세부 목표

1. 생물체 외피의 적층형복합재 구조를 형성하는 각층의 재료 및 패턴, 그리고 층간에 존재하는 특정 인터페이스의 분석 및 이론적 연구 수행.
2. 이론적 연구결과를 바탕으로 자연모사형 패턴과 인터페이스의 기술개발을 위한 기술 개념 정의.
3. 층간 인터페이스와 패턴이 적용된 적층형복합재 구조의 수치해석모델 개발
4. 수치적 연구를 통한 적층형복합재의 역학적 에너지 흡수량에 대한 성능 검증.
5. 3D 프린터를 이용하여 적층형복합재를 구현하고, 3점 굽힘실험을 통하여 역학적 성능을 분석. 수치해석 결과와 축소모형실험 결과의 비교를 통한 해석모델의 보완.

2. 연구개발의 필요성

(1) 국내·외 연구개발현황

최근 전 세계적으로 자연모사기술(nature-inspired technology)에 대한 관심이 급증하고 있고 선진 각국을 중심으로 관련 연구 활동이 활발해지는 추세이다. 자연모사기술이란 고효율 최적화 시스템인 자연의 생태계와 살아있는 생명체의 기본구조, 원리 및 메커니즘을 모사하여 공학적으로 응용하는 기술이다.

미국 국립연구회에서는 자연모사기술을 미래에 강력하게 추진 할 핵심과제로 선정하여 다양한 연구기관에서 자연모사기술 관련 연구를 수행하고 있고, 독일에서는 자연모사공학 관련 협회 BIONIK과 관련 국제 네트워크 BIONIK International을 설립하여 자연모사, 생체모방기술에 대한 연구를 집중적으로 수행하고 있다. 일본에서도 범정부차원에서 자연모사공학 관련 연구개발에 적극적인 지원을 하고 있고 관련 국제 심포지움을 개최하여 연구 활동을 하고 있다. 국내에서는 한국기계연구원의 주관으로 매년 자연모사기술 관련 국제 심포지움을 개최하여 연구 활동을 하고 있다.

대표적인 자연모사기술로서는 일본 JR-West 사의 저소음 고효율 신칸센 고속전철과 미국 Sharklet Technologies 사의 친환경 방오 필름이 있다. 신칸센 고속전철의 초기 모델은 터널을 빠져나갈 때 공기 압력 변화로 인해 음속폭음(sonic boom)이 발생하는 문제점이 있었다. 이를 해결하기 위해 물총새가 공기 중에서 물속으로 이동할 때 물방울이 잘 튀지 않는 점을 확인하여 고속전철의 앞부분의 디자인을 물총새의 부리를 모사하여 수정하였다. 그 결과 소음의 상당한 저감과 함께 15% 저감 된 전기로 10% 더 빨리 운행할 수 있게 되었다.



(2) 기초연구 및 원천기술 개발의 필요성

2011년 미국에서 개최된 SPIE 학술회에서는 자연모사공학 관련 기술발전으로 인해 2025년에는 약 1조 달러의 세계 GDP 상승과 미국의 3천억달러 부가가치와 160만개의 일자리 창출이 예측된다고 발표하였다. 또한, 컨설팅 전문기관인 FBEI (Fermanian Business&Economic Institute)는 기업 CEO 및 정책입안자, 투자자 등을 대상으로 자연모사기술의 중요성을 강조하기위해 Da Vinci Index를 발표하였는데 이 수치는 관련 연간 특허 및 논문 출원 건수, 정부지원과제 금액 및 건수를 바탕으로 산정된다. 지난 10년간 이 Da Vinci Index는 약 7배 증가하였으며, 자연모사기술 관련 논문 출원 건수는 미국, 중국, 독일 순으로 우리나라는 5위로 조사되었다.

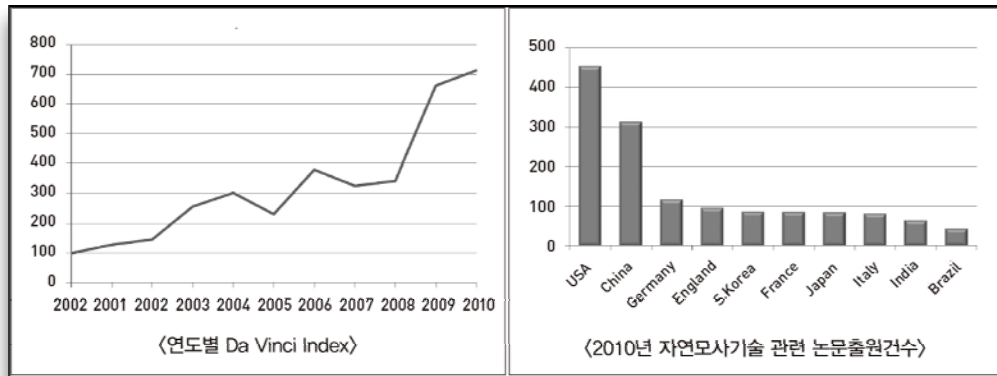


그림2. 다빈치 지수와 국가별 자연모사기술 관련 논문출원건수.

따라서 전 세계적으로 이 자연모사공학 관련 원천기술을 먼저 확보하고 응용제품을 개발하려는 노력이 활발히 진행 중이다. 또한, 섬유나 디스플레이 산업 또는 유체 공학 분야에서 자연모사기술이 강세를 보이는 것과 달리 건설 분야에서는 아직 자연모사공학 관련 기술개발이 미진한 실정이므로 건설 분야에 적용 될 수 있는 자연모사 원천기술을 확보하여 기술개발이 시급한 상황이다.

본 연구에서는 자연모사 기술을 이용하여 남극, 해저, 우주 등의 극한지(極限地, extreme environments)용 건설구조재의 원천기술을 개발한다. 극한지에서는 프리캐스트 콘크리트 등의 일반적인 건설 재료의 조달에 어려움이 있다. 또한, 극한지의 건설 현장에서는 인력의 투입에 상당한 어려움이 존재하므로 기존의 건설 시스템을 적용하기에는 한계가 있다. 3D 프린팅은 원재료의 조달만 원활하게 이루어지면 여러 재료로 이루어진 고성능의 복잡한 구조물을 인력의 투입과 별도의 작업 없이 효율적으로 제작할 수 있다. 따라서 본 연구진은 극한지에서 쓰일 수 있는 자연모사형 고성능의 건설 구조재의 원천기술을 3D 프린팅기술을 접목하여 개발하고자 한다.

3. 연구개발 범위

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형 ¹⁾	연구기관	해당 연차	TRL
1	3D 프린터를 이용하여 제작한 자연모사형 적층재료의 실험용 모델	3D 프린터를 이용하여 최적화된 자연모사형 층간 인터페이스와 패턴이 적용된 적층형복합재 구조의 시험용 축소샘플을 제작한다.	재료.자재 공법.기법	한국과학기술원	2	3&4
2	기존 대비 자연모사형 적층 재료 수치해석 모델의 휨 하중에서의 역할에 대한 역학적 에너지의 흡수량 25% 증가	휨 하중을 받을 때, 자연모사형 적층재료의 수치해석 모델이 기존의 단일부재와 비교하여 역학적 에너지의 흡수량이 25% 증가하도록 설정하고 수치해석 결과를 통해 확인한다.	재료.자재 공법.기법	한국과학기술원	2	3&4
3	기존 대비 자연모사형 적층 재료 실험용 모델의 휨 하중에서의 역할에 대한 역량이 25% 증가하도록 설정하고 이를 공인 시험기관에서 3점 굽힘 시험을 통해 검증한 흡수량 25% 증가	기존 대비 자연모사형 적층재료의 실험용 모델이 기존의 단일부재와 비교하여 역학적 에너지의 흡수량이 25% 증가하도록 설정하고 이를 공인 시험기관에서 3점 굽힘 시험을 통해 검증한다.	재료.자재 공법.기법	한국과학기술원	2	3&4

제2장. 국내외 기술 개발 현황

제2장. 국내외 기술 개발 현황

최근 전 세계적으로 자연모사기술(nature-inspired technology)에 대한 관심이 급증하고 있고 선진 각국을 중심으로 관련 연구 활동이 활발해지는 추세이다. 자연모사기술이란 고효율 최적화 시스템인 자연의 생태계와 살아있는 생명체의 기본구조, 원리 및 메커니즘을 모사하여 공학적으로 응용하는 기술이다.

1. 자연 모사 기술 개발을 위한 국내 · 외 연구기관의 동향

■ 국내 연구기관의 동향: 한국기계연구원의 주관으로 매년 자연모사기술 관련 국제 심포지움을 개최하여 연구 활동을 하고 있다.

■ 국외 연구기관의 동향: 미국 국립연구회에서는 자연모사기술을 미래에 강력하게 추진 할 핵심과제로 선정하여 다양한 연구기관에서 자연모사기술 관련 연구를 수행하고 있고, 독일에서는 자연모사공학 관련 협회 BIOKON과 관련 국제 네트워크 BIOKON International을 설립하여 자연모사, 생체모방기술에 대한 연구를 집중적으로 수행하고 있다. 일본에서도 범정부차원에서 자연모사공학 관련 연구개발에 적극적인 지원을 하고 있고 관련 국제 심포지움을 개최하여 연구 활동을 하고 있다.

2. 자연모사를 이용한 구조 제작 기술 현황

■ 다기능 적층 복합재 구조: 전복 적층 구조를 모사하여 시스템의 기계적 성질을 향상시키려는 연구가 이루어지고 있다. 이는 기계적 성질이 다른 두 물질을 사용하여 전복 적층 구조의 갈지자형 패턴을 모사하였으며 이를 통해 구조 부재의 강도와 연성을 향상시켰다.

■ 일본 JR-West 사의 저소음 고효율 신칸센 고속전철 : 신칸센 고속전철의 초기 모델은 터널을 빠져 나갈 때 공기 압력 변화로 인해 음속폭음(sonic boom)이 발생하는 문제점이 있었다. 이를 해결하기 위해 물총새가 공기 중에서 물속으로 이동할 때 물방울이 잘 튀지 않는 점을 확인하여 고속전철의 앞부분의 디자인을 물총새의 부리를 모사하여 수정하였다. 그 결과 소음의 상당한 저감과 함께 15% 저감 된 전기로 10% 더 빨리 운행할 수 있게 되었다.

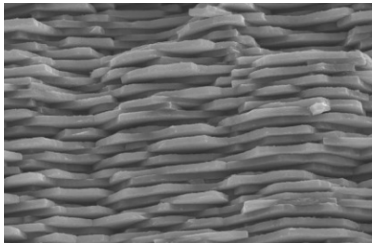


그림1. 전복 단면 구조



그림2. 물총새와 신칸센 고속열차.

3. 자연모사를 이용한 다기능 적층 복합재 구조 기술 개발의 한계

■ 층간박리(delamination): 기존의 적층 복합재료의 문제점으로써 서로 다른 두 물질을 접합시킬 경우, 층간 박리가 일어난다. 이를 해결하기 위해, 층간 사이에 삽입물을 넣는 등의 연구가 진행되고 있다.

■ 적층 복합재 구조의 최적화: 자연모사기술을 통해 제조되는 여러 가지 특수 기능을 지닌 적층 복합재 구조 층(layer)간에 적용되는 패턴(pattern)과 인터페이스(interface)의 최적화가 이루어지지 않았다.

1. 1차년도

단위성과 1-1: Vornoi diagram을 이용하여 전복의 진주층을 모사한 패턴(pattern)의 개발

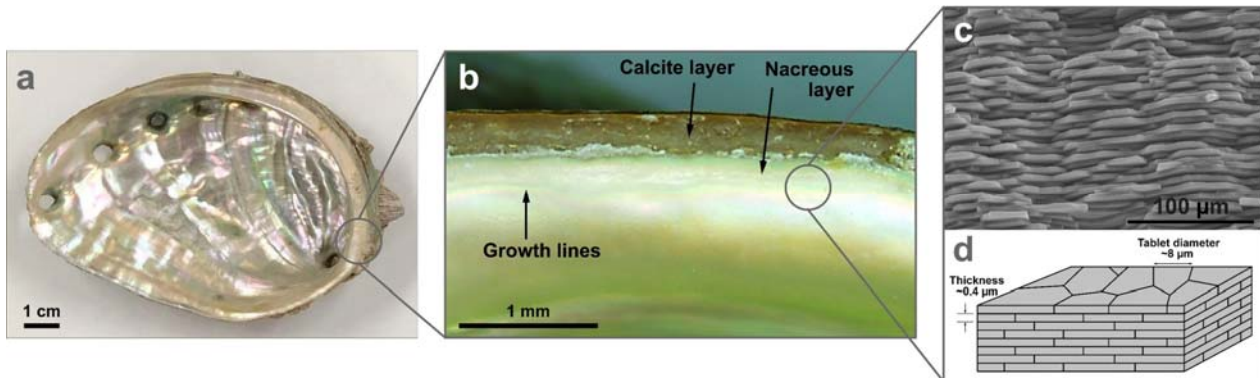


그림 1. 본 연구진에서 촬영한 전복의 진주층

전복의 진주층은 그 구조의 구성 재료에 비해 높은 파괴인성과 내충격성을 지녔다. 진주층은 brick and mortar 구조를 지니고 있고 aragonite platelet과 이를 둘러싸고 있는 유기 매트릭스로 이루어져 있다. aragonite platelet은 전체 구조의 95% - 97%를 차지하고 brick과 같이 단단하고 깨지기 쉬운 재료의 역할을 하고 전체 구조의 나머지는 높은 연성의 재료로 이루어진 platelet 사이의 유기 매트릭스가 차지하고 있다.

본 연구진은 전복의 진주층을 모사하여 높은 파괴인성과 내충격성을 가진 복합재를 개발하기 위한 연구를 진행하였다. 이번 1차년도에서는 전복의 진주층의 패턴을 구현하기 위해 Voronoi diagram을 적용했다. Voronoi diagram이란 평면을 분할하는 방식으로 특정 씨드들이 평면에 분포되어 있을 때, 각 씨드와 거리가 가장 가까운 점의 집합으로 평면을 분할한다. 씨드가 랜덤하게 분포되어 있을 경우 Voronoi diagram을 통해 얻은 Voronoi 셀들의 영역 분할 형태가 전복의 진주층 모습과 흡사한 것을 이용하여, 진주층 모사 패턴을 개발하였다. 패턴 개발 과정은 다음과 같다.

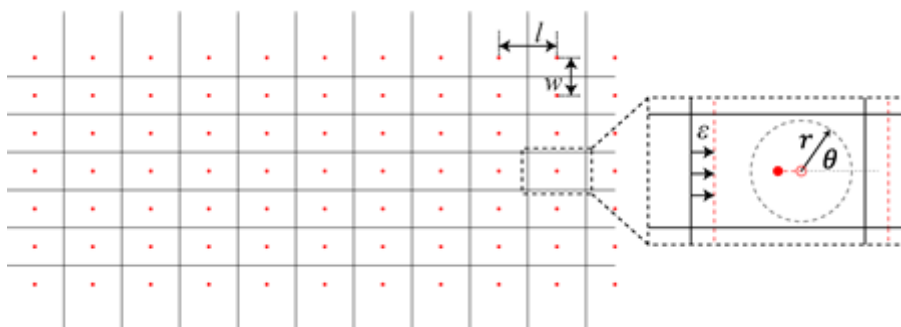


그림 2. 초기 단계의 Voronoi diagram

초기에 씨드들을 격자간격으로 규칙적으로 분포 시킨 후, 두 가지 변수인 반지름 r 과 각도 θ 를 이용하여 씨드를 랜덤하게 이동 시킨다.

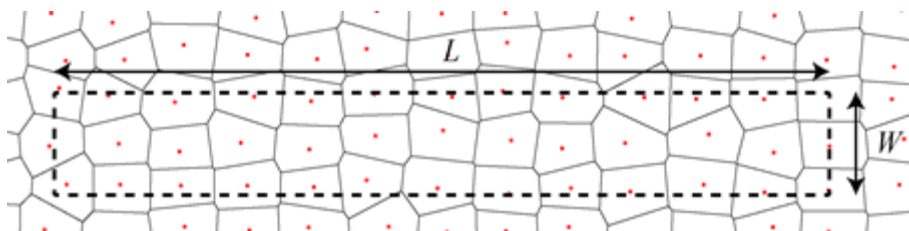


그림 3. 랜덤하게 이동되어진 씨드

변수 r 과 θ 를 이용하여 씨드를 랜덤하게 이동시키면 그림 2와 같이 Voronoi 셀들이 그림 3과 같이 불규칙적으로 변하게 된다.

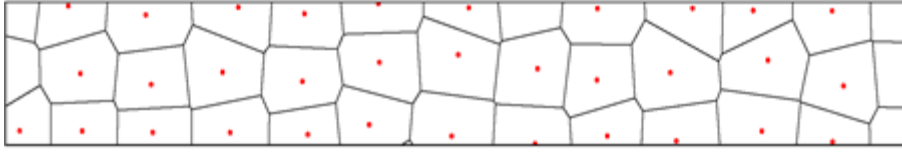


그림 4. 특정 부분의 분할

불규칙적으로 변한 Voronoi diagram에서 일정 부분을 그림 3과 같이 잘라내면 진주층과 유사한 패턴을 가진 복합재의 표면 형상 (그림 4)을 얻을 수 있다.

Voronoi 셀들에서 생기는 작은 변들은 3D 프린터 출력으로 제조할 때 정교하게 만드는데 한계가 있기에 수정이 필요하다. 작은 변들이 생기는 경우들에 대하여 다음과 같이 수정하였다.

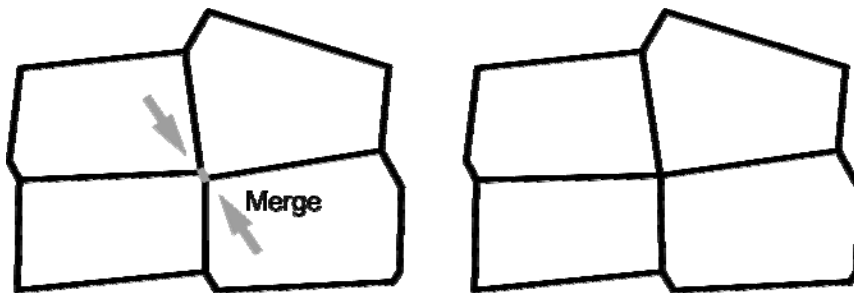


그림 5 작은 변이 생기는 경우 1

첫 번째는 복합재 경계선 내의 Voronoi 셀에 대하여 작은 변이 생기는 경우이다. 작은 변을 제거하고 이를 공유하는 셀들의 꼭지점들을 작은변의 중점으로 이동시킨다.

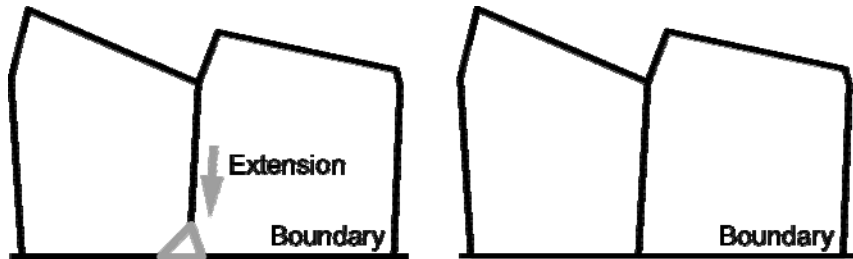


그림 6 작은 변이 생기는 경우 2

두 번째는 작은 변을 가진 삼각형의 한 변이 복합재 경계선에 놓일 경우이다. 이에 대하여는 삼각형을 제거하고, 경계선 안쪽에 존재하는 삼각형 꼭지점을 공유하는 변을 확장시켜 삼각형의 공간을 이웃 Voronoi 셀들이 나누어 갖는다.

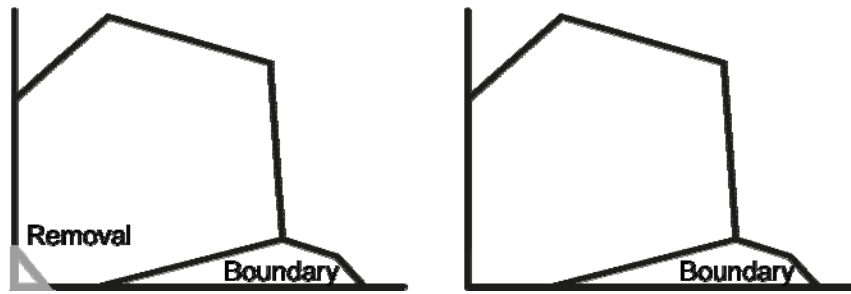


그림 7 작은 변이 생기는 경우 3

세 번째는 변이 작은 삼각형의 두 변이 경계선에 놓일 경우이다. 이 경우 삼각형을 제거한 후 삼각형과 접하는 이웃 Voronoi 셀의 영역을 확장시켜 삼각형의 공간을 가진다.

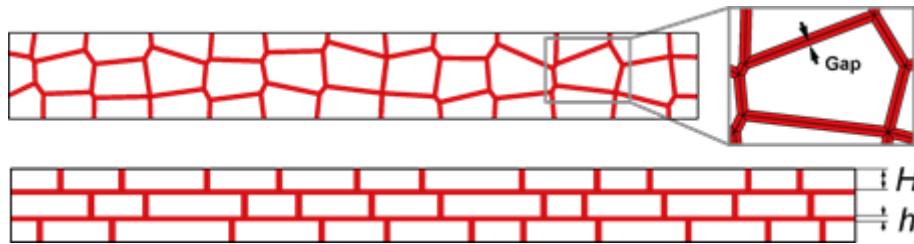


그림 8. Gap 및 높이 부여

짧은 변들에 대하여 수정한 후, 그림 8와 같이 Voronoi 셀 사이에 원하는 만큼의 갭을 부여하면 진주층 모사 패턴이 완성이 된다. 불규칙적으로 변한 셀은 진주층의 aragonite platelet을 나타내고 셀 사이의 빨간색 갭은 진주층의 유기 매트릭스를 나타낸다. 이렇게 완성된 패턴에 높이를 부여하고, 각 층을 엇갈리게 배치를 하면 진주층 모사 적층형 복합재 구조의 3D 모델이 완성된다.

단위성과 1-2: 두 가지 재료로 이루어진 적층형 복합재 구조 제작을 위한 듀얼 노즐 3D 프린터 출력 시스템 확립

Voronoi diagram을 이용하여 개발한 진주층 모사 적층형 복합재 구조의 3D 모델을 제작하기 위해 다음과 같이 이중사출 3D 프린터 출력 시스템을 확립하고 3D 모델을 출력하였다.

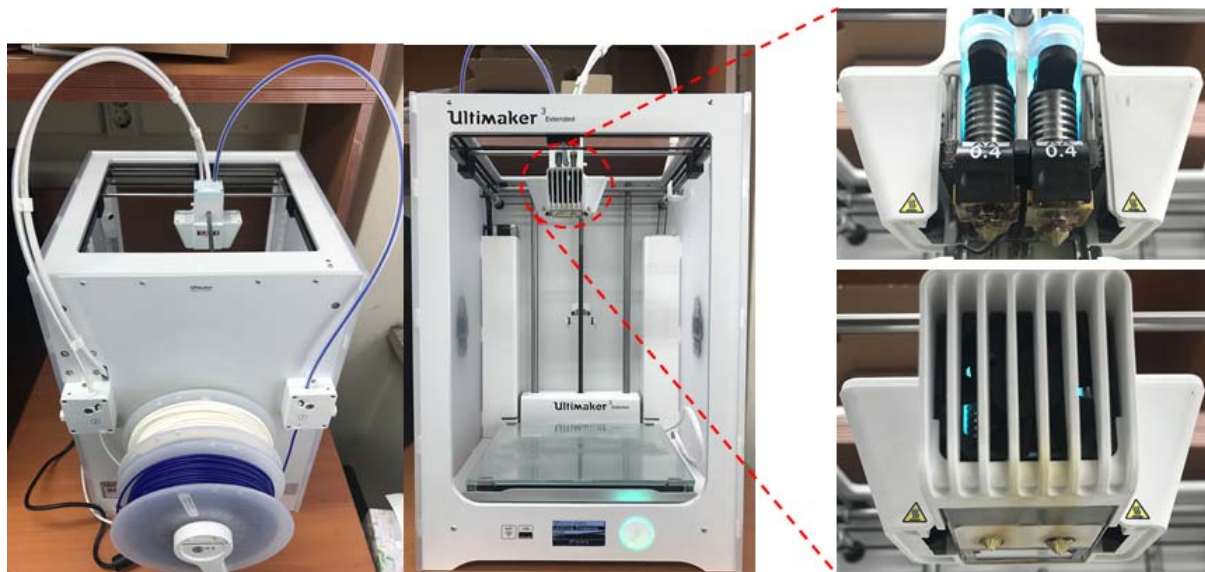


그림 9. 두 가지 재료로 이루어진 복합재료의 제작이 가능한 이중사출 3D 프린터

그림 9의 3D 프린터는 듀얼노즐 3D 프린터로 필라멘트 형태로 된 두 개의 재료를 장착하고 출력할 수 있는 프린터이다. 두 개의 노즐이 번갈아가면서 각각의 재료를 출력할 수 있으므로 별도의 작업 없이

한 번에 두 가지 재료로 이루어진 복합재료를 제작할 수 있다. 본 연구에서는 Polylactic acid (PLA) 과 Thermoplastic polyurethane (TPU)를 사용하였다. PLA는 단단하고 깨지기 쉬운 재료이고 TPU는 물렁하고 잘 늘어나는 재료이다. PLA는 aragonite platelet 파트를 이루고 있고 TPU는 그 사이의 유기 매트릭스를 이루고 있다.

본 연구진은 듀얼 노즐 3D 프린터로 복합재료를 제대로 출력할 때 필요한 기술적인 노하우를 상당량 확립하였다. 프린터 노즐의 온도, 출력속도, 프린팅 베드의 온도 등을 재료별 또는 시점별로 적절하게 설정해야만 출력하고자 하는 구조물을 제대로 제작할 수 있다. 적절한 3D 출력변수들을 확립하기 위해 상당한 시행착오를 겪었고 PLA와 TPU를 이용하여 진주층 모사 복합재료를 출력할 때의 3D 프린팅 변수는 다음과 같다.

	PLA	TPU
프린팅 노즐 온도	215 °C (초기온도) 210 °C	222 °C
출력속도	10 mm/s (초기속도), 20 mm/s	10 mm/s
프린팅 베드 온도	75 °C (초기온도), 60 °C	75 °C (초기온도), 60 °C

표 1. 진주층 모사 복합재료의 출력을 위한 3D 프린팅 변수

본 연구진에서 사용한 3D 프린터는 그림 7의 Fused deposition modeling (FDM) 방식을 이용하는데 layer-by-layer 방식으로 층을 연속적으로 적층시켜 모델을 완성시키는 방법이다.

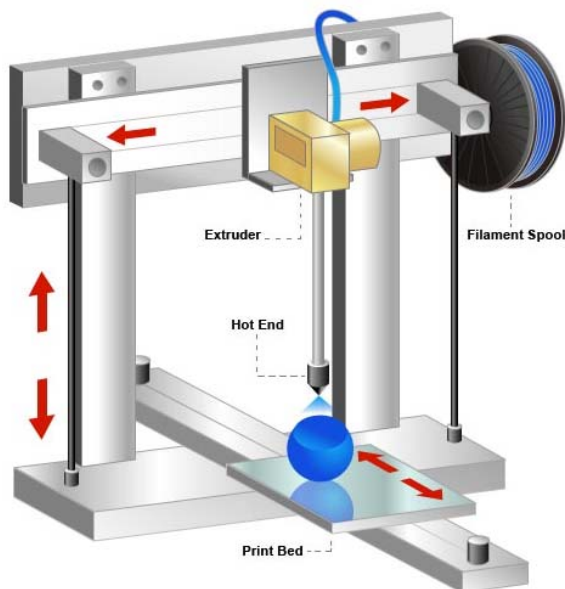


그림 10. FDM 방식의 3D 프린터

첫 번째 층을 출력할 때 노즐의 온도 등의 여러 3D 프린팅 변수를 기존에 설정된 변수와 다르게 설정할 수 있다. 표 1에서와 같이 PLA의 첫 층을 출력할 때 노즐온도를 215 °C로 설정하고 나머지 층들을 출력할 때는 210 °C로 설정할 수 있다. PLA의 첫 층을 출력할 때의 노즐 온도를 원래의 노즐 온도보다 5 °C 높게 설정한 이유는 출력물과 프린팅 베드 사이의 접착력을 향상시키기 위함이다. 출력물과 프린팅 베드 사이의 접착력은 전체적인 3D 프린팅 출력물의 질에 상당한 영향을 끼친다. 따라서 접착제의 질을 높이기 위해 PLA의 첫 layer를 출력할 때 노즐 온도와 프린팅 베드의 온도를 원래 온도보다 각각 5 °C, 15 °C 높게 설정하였다.

또한, PLA의 첫 층을 출력할 때 출력속도를 원래 속도보다 10 mm/s 낮게 설정을 하였다. 출력속도를 낮게 설정할수록 출력물의 질이 좋아지는 경향이 있으나 출력시간이 상당히 늘어나는 단점이 있기 때문에 접착력 향상을 목표로 첫 층의 출력속도를 낮게 설정하였다.

TPU는 전체 모델에서 차지하는 비중이 낮기 때문에 출력속도는 10 mm/s로 설정을 하였고 프린팅 베드만 15 °C 높게 설정을 하였다.

2. 2차년도

단위성과 2-1: 듀얼 노즐 3D 프린터 출력 시스템을 바탕으로 한 진주층 모사 적층형 복합재 구조의 제작

위의 내용을 포함한 본 연구진의 3D 프린팅 노하우로 여러 가지의 진주층 모사 적층형 복합재 구조를 다음과 같이 제작하였다. 본 연구에서는 적층형 복합재 구조의 성능을 휨 하중에 대한 역학적 에너지의 흡수량에 대해서 평가할 것이므로 3점 굽힘 시험에 알맞은 규격의 시편을 제작하였고 한밭대학교에서 실험을 수행하였다.



그림 11. PLA (고강도재료)로 제작한 단일부재 - 시편 1

그림 11의 시편은 PLA로만 제작된 단일 부재 시편이다. 진주층을 모사한 적층형 복합재 구조의 성능을 비교하기 위해 기존의 단일 부재를 제작하였다.



그림 12. Voronoi diagram의 적용 없이 개발한 진주층 모사 시편 - 시편 2

그림 12의 시편 2는 Voronoi diagram을 이용하지 않고 본 연구진에서 직관적으로 개발한 진주층 모사 패턴을 적용한 시편이다. 그림 1-(d)의 진주층을 도식화한 그림을 바탕으로 수직으로 형성되어있는 유기 매트릭스를 시편의 중앙을 기준으로 바깥쪽 대각선으로 변형시켜 제작을 하였다. 이로 인해 본 구조의 연성이 증가하는 것을 기대할 수 있다.

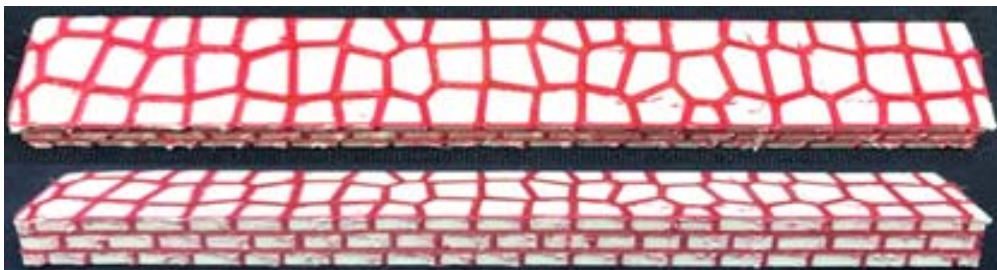


그림 13. 진주층 모사 적층형 복합재 구조 - 시편 3

그림 13의 시편은 Voronoi diagram으로 진주층 모사 패턴을 적용한 시편이다. 길이와 너비 방향으로 방향성이 존재하지 않는 패턴이다. 시편은 총 세 개의 주된 층으로 이루어져있고 본 층은 PLA의 platelet과 TPU의 유기 매트릭스로 이루어져있다. 본 층의 두께는 2 mm 이고 각 층에 0.8 mm 두께의 TPU 매트릭스가 PLA의 platelet을 감싸고 있다. 또한, 본 층의 사이사이에 TPU로 이루어진 0.5 mm 두께의 층이 삽입되어있다. 총 시편의 두께는 7 mm 이고 길이는 120 mm, 너비는 15 mm 이다.

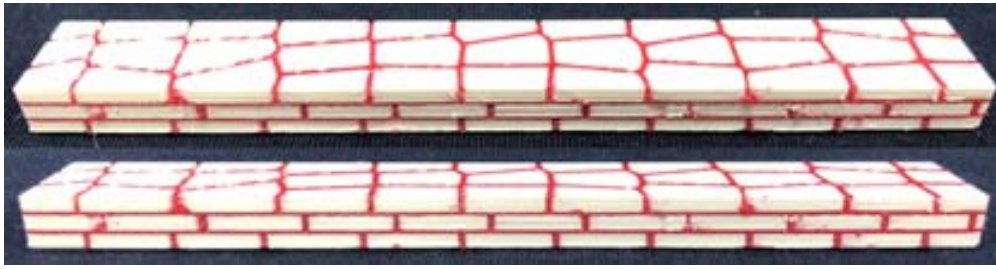


그림 14. Platelet의 길이를 두 배 늘린 적층형 복합재 구조 - 시편 4

그림 14의 시편은 그림 10의 시편에서 platelet의 길이를 두 배 늘린 구조이다. 두 배 늘린 이유는 PLA (고강도 재료)의 비중을 높여서 시편의 휨 하중에 대한 최대하중을 향상 시키고 휨 하중을 받을 때 발생하는 균열진전형상의 길이를 늘여서 에너지 흡수율을 증가시키기 위함이다.

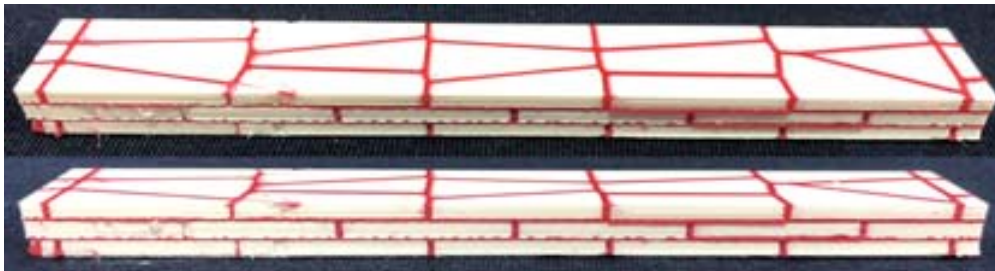


그림 15. Platelet의 길이를 네 배 늘린 적층형 복합재 구조 - 시편 5

그림 15의 시편은 그림 9의 시편에서 platelet의 길이를 네 배 늘린 구조이다. 그 이유는 위에서 설명한 그림 14의 시편의 이유와 같다.



그림 16. Platelet의 길이를 네 배 늘린 적층형 복합재 구조 - 시편 6

그림 16의 시편은 그림 11의 시편 아랫면에 TPU (저강도 재료)로 이루어진 0.5 mm 두께의 층을 적용한 시편이다. 윗면에 TPU 층을 적용한 이유는 듀얼 노즐 3D 프린터로 두 가지 재료로 이루어진 구조를 출력 시 두 재료간의 접착력이 절대적으로 약하다는 단점 때문이다. 이 문제는 현재의 3D 프린터 기술의 한계점이라고 할 수 있다. 따라서 본 구조에 약간의 하중만 주어져도 두 재료간의 분리가 일어나서 성능의 저하가 발생할 수 있다. 아랫면에 위와 같은 잘 늘어나는 얇은 막을 적용함으로써 휨 하중을 받을 때 발생하는 두 재료간의 분리를 방지할 수 있다.

단위성과 2-2: 듀얼 노즐 3D 프린터를 이용하여 제작한 진주층 모사 적층형 복합재 구조의 에너지 흡수율 25 % 이상 향상 (한밭대학교)

위에서 제작한 여러 가지 진주층 모사 적층형 복합재 구조의 시편에 대해서 아래 그림 17와 같이 3점 굽힘 시험을 수행하였다. 다음과 같은 실험을 통해 하중-변위 그래프를 얻을 수 있는데, 이 그래프의 넓이가 휨 하중 하에서의 시편의 에너지 흡수율이 된다. 본 연구에서는 시편 1의 휨 하중 하에서의 에너지 흡수율과 비교하여 개발한 적층형 복합재 구조의 에너지 흡수율이 25% 이상 증가함을 목표로 하였다.

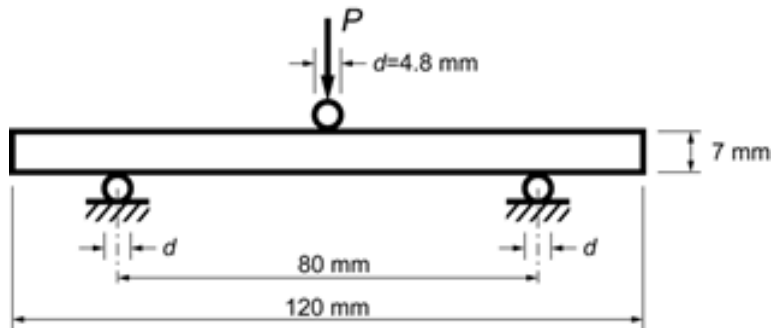


그림 17. 진주층 모사 시편의 3점 굽힘 시험 수행

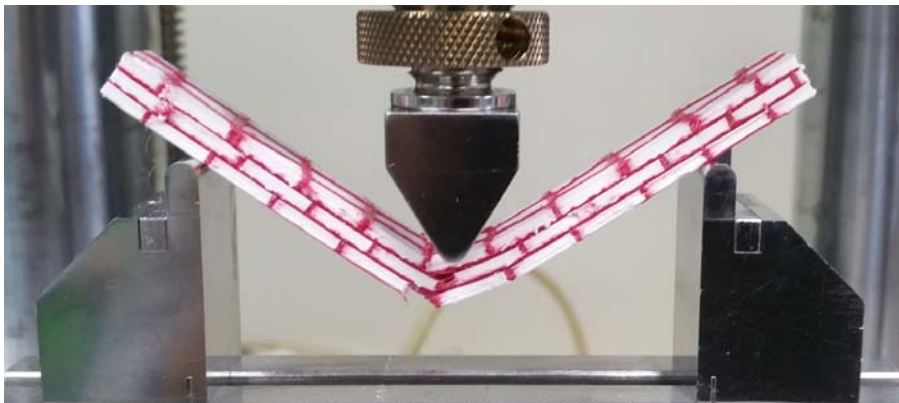
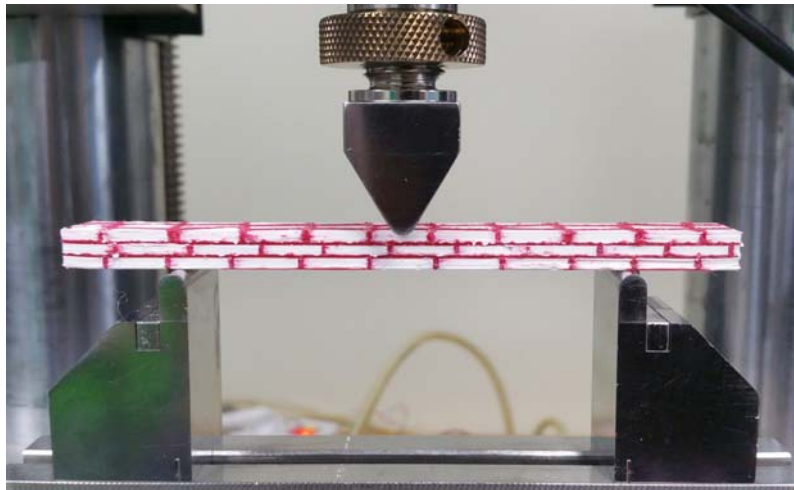


그림 18. 시편 4의 3점 굽힘 시험 수행(한밭대학교 장비사용)

그림 18에서는 시편 4에 대해서 3점 굽힘 시험을 수행하는 장면이다. 시편이 휨 하중을 받으면 그림 18의 두 번째 그림에서와 같이 시편의 아랫면에서 재료간의 분리가 쉽게 발생하여 시편의 성능을 저하시킨다. 따라서 시편 6과 같이 3D 프린터 제작 시편의 한계점인 재료 간 분리를 개선한 구조의 개발을 목표로 하여 연구를 수행하였다.

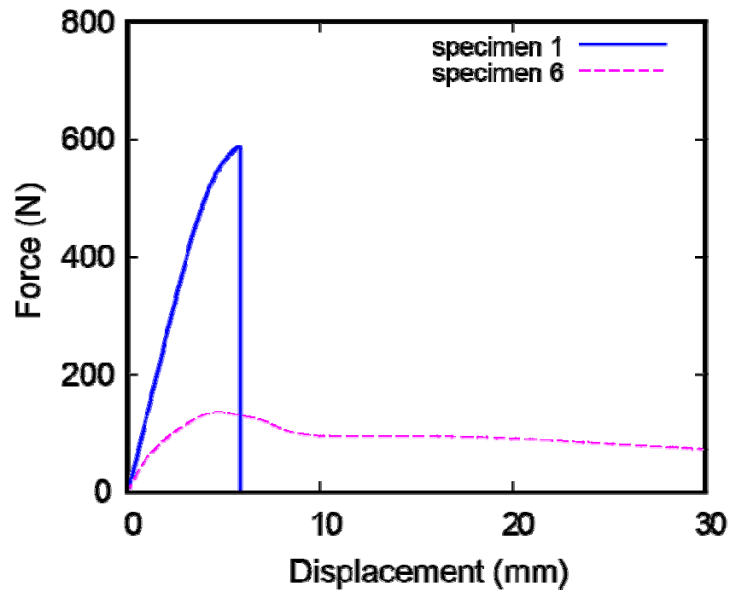


그림 19. 시편 1과 시편 6의 휨 하중 하에서의 에너지 흡수율 비교

	에너지 흡수율 (N·mm)	증가율 (%)
시편 1(고강도 재료의 단일부재)	2068	
시편 6	2794	35.11

표2. 시편 1과 시편 6의 휨 하중 하에서의 에너지 흡수율 비교

그림 19과 표 2에서는 시편 1과 시편 6의 휨 하중 하에서의 에너지 흡수율을 나타내고 시편 1을 기준으로 시편 6의 에너지 흡수율의 증가율을 나타낸다. PLA (고강도 재료)로만 제작한 단일부재는 최대 하중이 크고 연성이 매우 낮은 거동을 보여준다. 약 600 N까지 휨 하중을 버틴 후 약 6 mm까지 변형 후에 완전한 파괴가 발생한다. 반면에 시편 6은 시편 1에 비해 낮은 최대하중을 보이지만 매우 연성은 매우 향상 되었다. 그림 16에서 시편 6은 최대하중을 받고 나서도 강성이 그다지 감소하지 않는 것을 확인할 수 있고 따라서 시편 6의 에너지 흡수율이 시편 1보다 높을 수 있다.

단위성과 2-3: 진주층 모사 적층형 복합재 구조의 수치해석 모델 개발

본 연구진은 개발된 진주층 모사 패턴이 적용된 적층형 복합재 구조의 수치해석 모델을 개발하였다. 현재까지 진주층을 모사한 복합재료를 구성하는 여러 가지 요소 - 구성 재료, 패턴, 규격 등에 대한 최적화에 관한 연구는 이루어지지 않았다. 이러한 연구를 진행하려면 여러 가지 요소 - 구성 재료, 패턴, 규격 등을 다양하게 적용하여 분석해야하기 때문에 실험적인 연구방법으로는 효율성이 현저하게 감소한다. 따라서 그러한 연구를 효율적으로 수행할 수 있도록 수치해석 모델을 개발하여 해석적 연구를 통해 최적화 관련 연구를 진행하여야한다.

진주층 모사 적층형 복합재 구조의 전체적인 수치해석 모델을 개발하기 이전에, 본 연구진에서는 듀얼 노즐 3D 프린터로 두 가지 재료로 이루어진 구조를 제작했을 때 두 재료간의 adhesion을 파악하기 위해 듀얼 노즐 3D 프린터로 그림 20의 시편과 같이 간단한 이중재료 시편을 제작하였다.



그림 20. 두 재료간의 접착력을 분석하기 위한 인장 시편

하얀색 부분은 PLA (고강도 재료)로 이루어져있고 빨간색 부분은 TPU (저강도 재료)로 이루어져 있다. 시편의 규격은 길이 60 mm, 너비 15 mm, 높이 7 mm이고 각 재료는 전체 시편의 정확히 절반을 차지하고 있다.

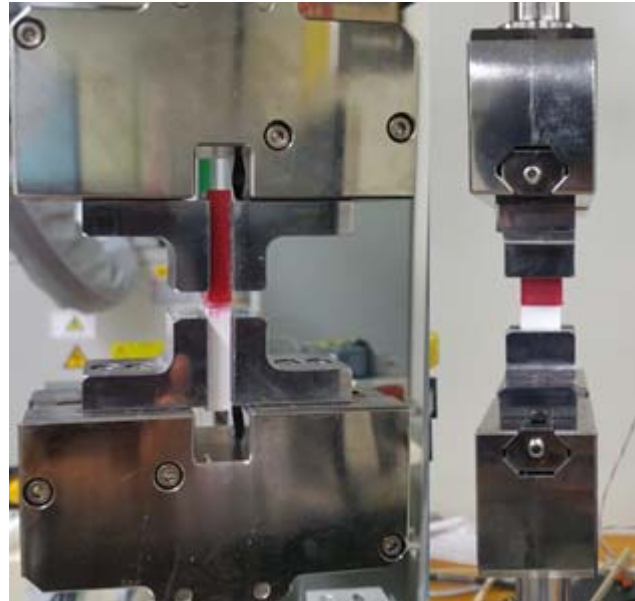


그림 21. 두 재료간의 접착력을 분석하기 위한 인장 실험 (한밭대학교 장비)

그림 21에서와 같이 듀얼 노즐 3D 프린터로 제작한 이중재료 인장 시편을 가지고 한밭대학교에서 인장 실험을 수행하였다. PLA 부분을 고정시키고 TPU 부분을 10 mm/min의 속도로 두 재료간의 분리가 완전히 발생할 때까지 위로 당기었다. 발생하는 인장력과 TPU 부분의 변위를 측정하였고 두 재료간의 접착력을 나타내는 변위-하중 그래프가 생성되었다.

인장실험으로 구해진 접착을 수치적으로 모델링하기 위해 본 연구진은 제작한 인장시편의 수치해석 모델을 만들고 인장실험의 수치해석을 수행하였다. 우선, 두 재료간의 접착을 수치적으로 모델링하기 위해 유한요소 상용 프로그램인 LS-Dyna에서 제공하는 surface to surface tiebreak contact 알고리즘을 이용하였다. 이 알고리즘은 재료 간의 분리 또는 박리를 수치적으로 모델링할 수 있다. 이 알고리즘의 옵션 중에서 5번째 옵션을 사용하였는데, 두 가지 요소 - damage function과 plastic yield stress가 거동을 결정 짓는다.

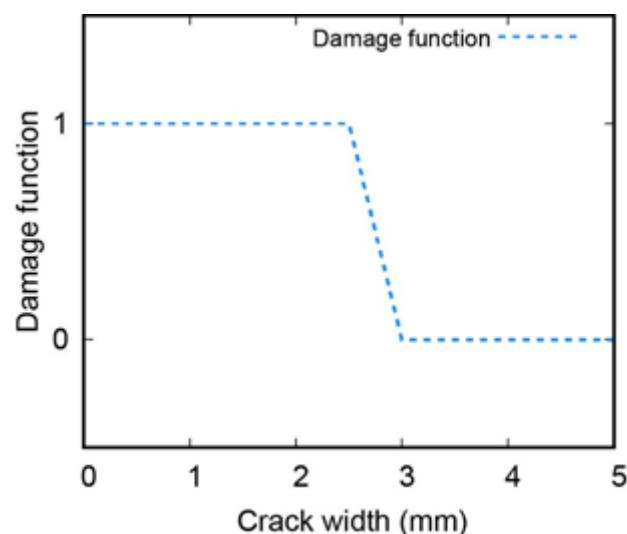


그림 22. 인장 실험의 수치해석에 사용된 damage function

그림 22는 본 인장실험의 수치해석에 사용된 damage function을 나타낸다. 그 외에, 해석의 효율성을

높이기 위해 PLA와 TPU 부분 모두 인장 실험 장비에 의해 고정되지 않은 부분만 모델링을 하고 나머지 부분은 경계조건을 이용하여 실제 실험과 유사하게 모델링을 수행하였다. 인장 실험과 같이 PLA 부분을 고정시키고 TPU 부분을 10 mm/min의 속도로 위로 당기도록 설정하였고 인장력과 TPU 부분의 변위를 측정하여 하중-변위 그래프를 생성하도록 하였다.

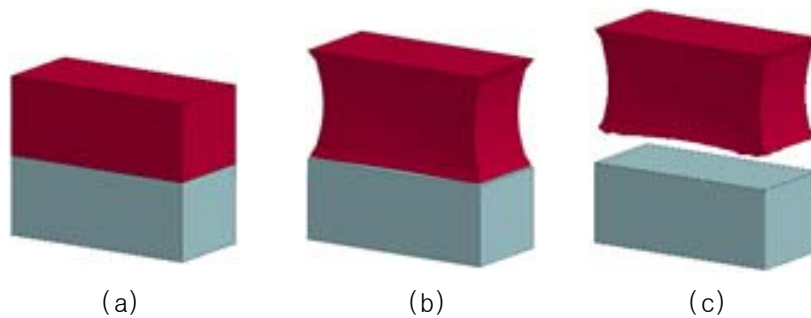


그림 23. 인장 실험의 수치해석 진행 모습: TPU는 위의 빨간색 부분, PLA는 아래의 에메랄드색 부분으로 모델링 되었으며 (a)는 인장력이 가해지기 이전, (b)는 두 재료 간의 분리가 일어나기 직전, (c)는 두 재료간의 분리가 일어난 후이다.

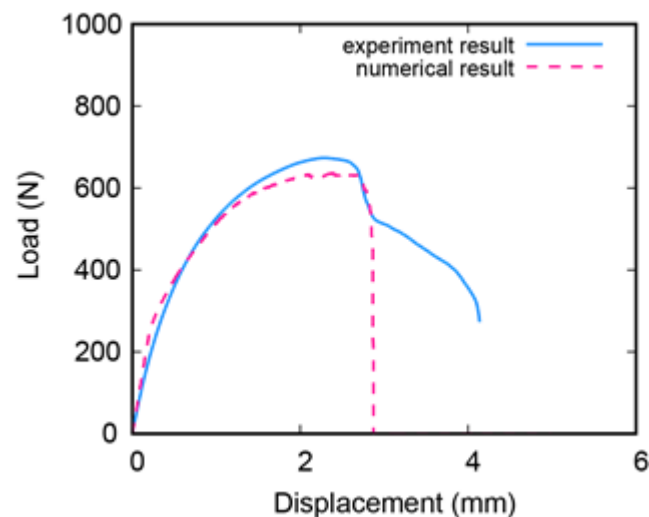


그림 24. 인장 실험의 결과와 수치해석 결과의 비교

그림 24의 그래프는 인장 실험과 그 수치해석에서 얻어진 하중-변위 그래프를 비교한 것이다. 그림 25에서 확인할 수 있듯이 두 하중-변위 그래프는 잘 일치하므로 실제 듀얼 노즐 3D 프린터로 이중재료의 구조를 출력했을 때 두 재료간의 접착력이 수치적으로 적절하게 모델링되었다고 볼 수 있다.

또한, 3D 프린팅에 사용된 PLA와 TPU의 재료 물성치를 파악하고 수치해석모델에 적용시키기 위해 각 재료에 대해서 인장 실험을 수행하였다.

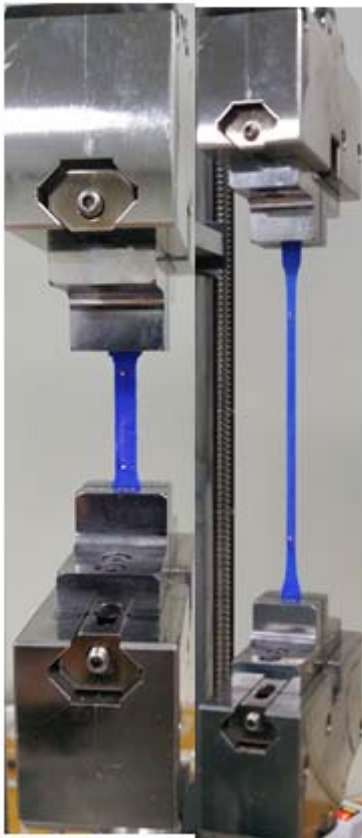


그림 25. TPU와 PLA의 인장시편과 인장실험의 수행 (한밭대학교)

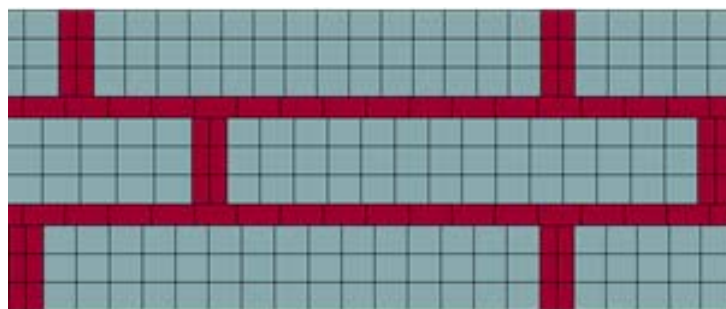
그림 25와 같이 3D 프린터로 TPU와 PLA로 인장시편을 출력하고 한밭대학교에서 제작한 인장시편에 대해서 인장실험을 수행하였다.

Material property (PLA plastic)	
Density, ρ (kg/m ³)	1,240
Young's modulus, E (MPa)	2,347
Poisson's ratio, ν	0.36
Yield stress, σ_Y (MPa)	49.5
Tangent modulus, E_T (MPa)	-205
Failure strain, ε_f	0.052
Material property (TPU plastic)	
Density, ρ (kg/m ³)	1,220
Young's modulus, E (MPa)	26
Poisson's ratio, ν	0.49
Yield stress, σ_Y (MPa)	8.6
Tangent modulus, E_T (MPa)	5.79
Failure strain, ε_f	5.8

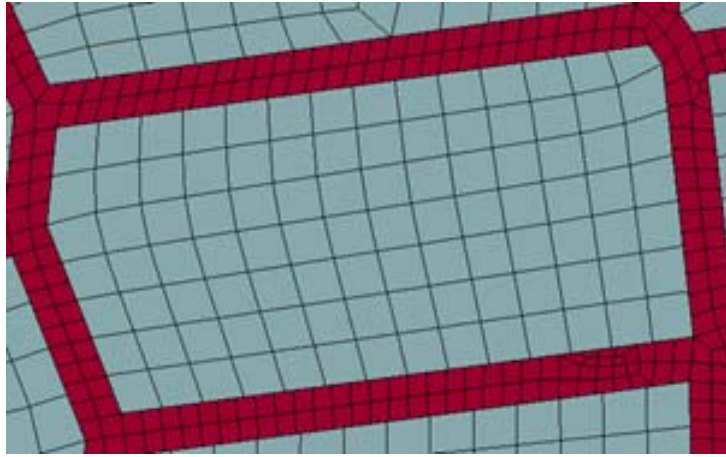
표 3. 인장실험을 통해 얻어진 PLA와 TPU의 재료 물성치

표 3은 각 재료의 인장실험을 통해 얻어진 구성 재료들의 물성치를 나타낸 표이다. PLA는 강도가 높고 연성이 낮은 재료의 거동을 보이고 TPU는 강도가 낮고 연성이 매우 큰 재료의 거동을 보였다. 위의 재료 물성치를 진주층 모사 적층형 복합재 구조의 수치해석 모델에 적용하였다.

본 연구진에서는 시편 4의 수치해석 모델을 우선적으로 개발하였다. 시편 4는 본 연구진이 초기에 개발하고자 했던 시편이므로 우선적으로 시편 4의 수치해석 모델을 개발하고 실험 결과와의 비교를 통해 본 모델의 정확성을 검증하는 것을 목표로 하였다. 시편 4의 수치해석 모델의 검증된 후, 구조 및 패턴에 약간의 변형을 적용하면 다른 시편의 수치해석이 개발될 수 있다. 시편 4의 수치해석 모델은 다음과 같이 개발되었다. 진주층 모사 복합재 구조의 3D 모델에 유한요소 전처리 프로그램인 하이퍼메쉬를 이용하여 그림 26과 같이 메쉬를 입혔다. 8개의 절점을 가지고 있는 육면체의 요소를 생성하였다.



(a) 모델의 옆면



(b) 모델의 윗면

그림 26. 하이퍼메쉬를 이용한 진주층 모사 구조의 3D 모델에 입힌 메쉬

힘 하중을 받을 때 구조의 파괴가 주로 TPU의 유기 매트릭스에서 발생하기 때문에 그림 23에서와 같이 유기 매트릭스 부분의 메쉬를 더 정교하게 입혔다. PLA platelet 부분에는 약 0.75 mm 크기의 요소를 생성했고 TPU 유기 매트릭스 부분에는 약 0.35 mm 크기의 요소를 생성했다.

PLA는 piecewise linear plasticity material model을 차용하여 모델링 하였고 TPU는 Mooney-Rivlin rubber material model을 차용하여 모델링 하였다.

실험 연구에서 시편 1을 기준으로 개발된 진주층 모사 시편의 성능을 분석했듯이 시편 1의 수치해석 모델 또한 개발되었다. 시편 1은 패턴이 적용되지 않은 기존의 단일부재이기 때문에 어려움 없이 개발 되었다. 시편 4와 마찬가지로 약 0.75 mm 크기의 8개의 절점을 가지고 있는 육면체의 요소를 생성 하였다.

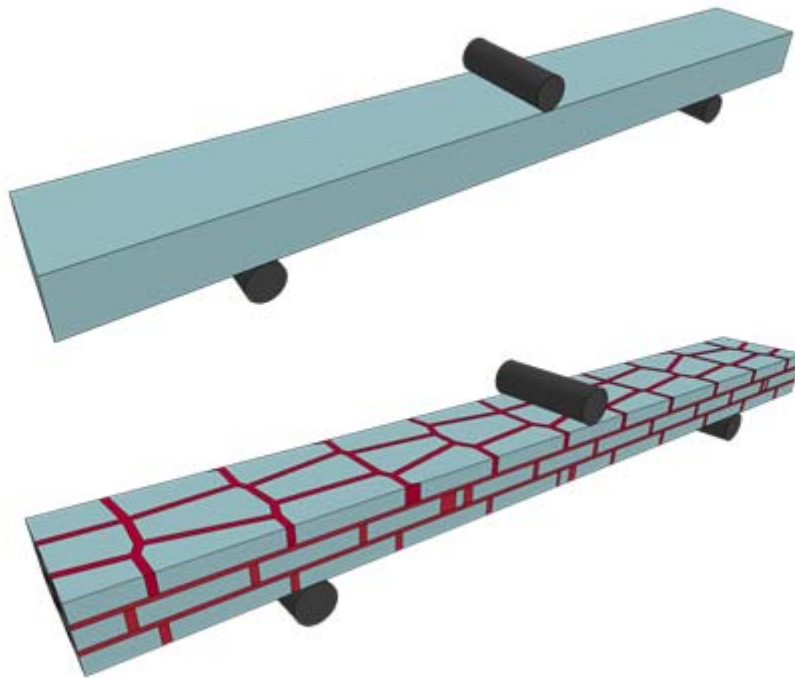


그림 27. 3점 굽힘 시험 수치해석을 위한 시편 1과 4의 수치해석 모델

그림 27과 같이 3점 굽힘 시험의 수치해석을 위해 시편 1과 4의 수치해석 모델을 개발하였다. 힘 하

중을 가하는 속도, 하중 팁과 지지대의 규격 등 3점 굽힘 시험의 조건은 실험에서 적용된 조건과 동일하게 설정되었다.

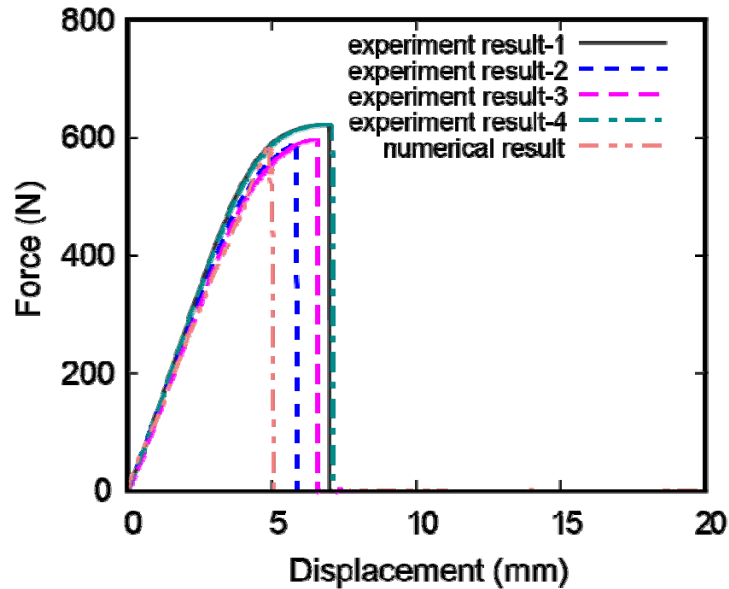


그림 28. 시편 1의 3점 굽힘 시험 결과와 수치해석 결과의 비교

그림 28은 시편 1 - PLA로만 이루어진 단일부재의 3점 굽힘 시험 결과와 수치해석 결과를 비교한 것이다. 시편 1의 실험결과와 유사하게 시편 1의 수치해석 모델은 약 600 N의 높은 최대하중을 견딘 후 약 5 mm의 변위에서 파괴가 일어난다. 최대하중은 실험결과와 약 600 N로 거의 동일하나 파괴가 일어날 때의 변위가 약간 차이가 있다.

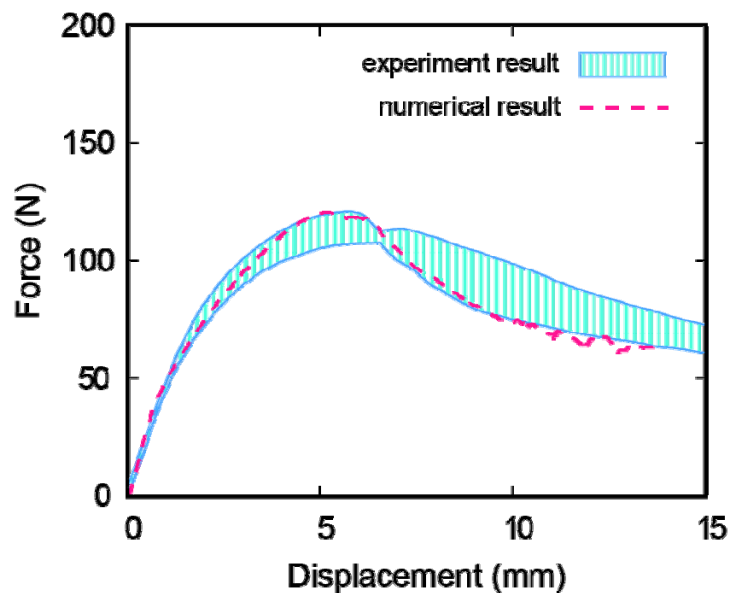


그림 29. 시편 4의 3점 굽힘 시험 결과와 수치해석 결과의 비교

그림 29는 시편 4의 3점 굽힘 시험 결과와 수치해석 결과를 비교한 것이다. 에메랄드 색 부분이 시편 4의 실험 결과를 나타낸 것이다. 듀얼 노즐 3D 프린터로 시편 4와 같이 두 가지 재료가 복잡하게 패턴을 이루는 구조를 출력할 때, 매번 정확하게 동일한 구조를 출력하는 것은 불가능하다. 3D 프린팅은 주변 온도나 습도, 또는 프린팅 베드의 레벨링 등 일정하게 유지될 수 없는 요소에 의해 상당한 영향을 받기 때문이다. 따라서 시편 4를 4개 출력한 후 실험을 수행하였고 그림 26과 같이 실험으로 얻어진 하중-변위 그래프의 최소, 최대값을 나타내었고 본 연구진은 시편 4의 수치해석 결과가 실험 결과로 이루어진 부분에 들어맞는다면 본 수치해석 모델의 정확성이 검증될 것이라 판단하였다. 그림

29에서 확인할 수 있듯이, 수치해석 결과가 실험결과와 최소, 최대값 안에 들어맞으므로 본 연구진이 개발한 시편 4에 수치해석 모델의 정확성이 검증되었다고 볼 수 있다. 시편 4의 수치해석 모델은 시편 4의 실험 결과와 마찬가지로 비교적 낮은 최대하중을 보였고 높은 연성을 보여준다. 따라서 본 진주층 모사 적층형 복합재 구조의 수치해석 모델은 다음과 같은 후속 연구에 활용될 수 있다. 현재까지 진주층 모사 패턴이 적용된 구조의 최적화에 관한 연구 - 구성 재료, 패턴, 규격 등에 대해서 최적화가 수행되어지지 않았다. 이러한 연구는 실험적 연구로는 비용과 시간이 불필요하게 많이 들기 때문에 적합하지 않고 수치적 연구를 통해 진행될 수 있다. 본 연구진이 개발한 것과 같은 정확성이 검증된 수치해석 모델을 가지고 수치적 연구를 통해 진주층 모사 구조의 최적화 연구를 진행할 수 있다.

연구개발성과 1

3D 프린터 관련 특허 출원 1건을 완료함

- 현재의 듀얼 노즐 3D 프린터를 이용하여 이중재료의 구조를 출력할 때, 두 재료 간의 접착력이 매우 약하다는 단점이 있다. 특히, 두 가지 재료의 물성치가 서로 대비될 때 이러한 현상이 더욱 심하다. 따라서 본 연구진은 이와 같은 문제를 해결하기 위해 새로운 3D 프린터를 고안해냈다. 두 개의 노즐 외에 접착제 분사용 노즐이 추가적으로 설치된 접착제 분사기능이 탑재된 듀얼 노즐 3D 프린터이다. 일반적인 듀얼 노즐 3D 프린터는 fused deposition modeling (FDM) 형식으로 두 개의 노즐이 각각의 재료의 번갈아가며 layer-by-layer 형식으로 출력을 한다. 첫 번째 노즐이 해당 재료의 첫 층(layer)을 출력하고 두 번째 노즐이 해당 재료의 첫 층을 출력한다. 그 다음으로 다시 첫 번째 노즐이 해당재료의 두 번째 층을 출력하고 두 번째 노즐이 두 번째 층을 출력한다. 이러한 작업을 구조물의 출력이 완료될 때까지 반복하게 된다. 본 연구진이 고안해낸 3D 프린터는 첫 번째 노즐과 두 번째 노즐의 출력 사이에 접착제용 노즐이 접착제를 분사 또는 도포하는 3D 프린터이다. 첫 번째 노즐이 해당 재료의 첫 층을 출력하면 접착제용 노즐이 접착제를 분사 또는 도포 하고 두 번째 노즐이 해당 재료의 첫 층을 출력한다. 이러한 작업으로 인해 두 재료 사이에는 접착제가 적용되고 접착력이 강해진다. 또한, 사용자가 접착제의 종류 및 분사나 도포 정도를 정할 수 있기 때문에 두 재료 사이에 원하는 만큼의 접착력을 설정할 수 있다. 따라서 본 연구진이 고안해낸 3D 프린터로 두 가지 재료로 진주층모사 구조를 출력할 때 그 성능을 월등히 향상시킬 수 있다.

출원번호통지서

출원일자 2018.08.02
특기사항 심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호 10-2018-0090505 (접수번호 1-1-2018-0767330-10)
출원인명칭 한국과학기술원(3-1998-098866-1)
대리인성명 손재용(9-2005-000806-5)
발명자성명 홍정욱 고권환 이상언
발명의명칭 접착제 도포 기능을 갖는 3D 프린터 및 그 구동 방법

특 허 청 장

출원연도: 2018년도

특허명: 접착제 도포기능을 갖는 3D 프린터 및 구동 방법

출원인: 한국과학기술원

출원국: 국내

출원번호: 10-2018-0090505

진주층 모사 적층형 복합재 구조 관련 SCI 논문 1건이 accept 되었음 (Inprint 상태)

- 전복의 진주층을 모사한 패턴을 Voronoi diagram을 이용하여 개발하고 본 패턴이 적용된 3D 실험용 샘플을 듀얼 노즐 3D 프린터를 사용하여 제작하였다. 3점 굽힘 시험을 통해 본 시편의 성능을 검증하고 기존의 단일 부재 시편과 비교하여 휨 하중 하에서의 에너지 흡수량이 증가한 것을 확인하였다. 또한, 제작한 진주층 모사 구조의 수치해석 모델을 개발하였고 3점 굽힘 시험의 수치해석을 수행하였다. 3점 굽힘 시험의 수치해석 결과와 실험결과가 일치하는 것을 확인하였다.

Composites Part B 165 (2019) 594–603



Contents lists available at ScienceDirect

Composites Part B

journal homepage: www.elsevier.com/locate/compositesb



Bio-inspired bimaterial composites patterned using three-dimensional printing



Kwonhwan Ko^a, Suyeong Jin^a, Sang Eon Lee^a, Ikjin Lee^{b,*}, Jung-Wuk Hong^{a,*}

^a Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34141, Republic of Korea

^b Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 291 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34141, Republic of Korea

ARTICLE INFO

Keywords:

Layered structures
Mechanical properties
Mechanical testing
Finite element analysis (FEA)

ABSTRACT

Multi-material composite structures exhibit highly enhanced mechanical properties by mimicking natural hierarchical materials such as nacre, crocodiles, armadillos, and turtles. Such composites have been reported to overcome the limitations of a single material. Numerous studies have developed bio-inspired composites with improved mechanical properties by using the patterns of natural materials. However, optimization of the patterns and configurations has not been studied comprehensively thus far. In this study, nacre-like laminated composites are designed, fabricated, and tested both experimentally and numerically to explore their energy absorption capacity. Nacre-like patterns are made by employing the Voronoi diagram, and produced into three-dimensional (3D) specimens of the structures by use of a dual extrusion 3D printer with two different plastic materials. Three-point bending tests are conducted to evaluate the energy absorption capacity of the specimen, which is found to be 11% larger than that of a single plastic specimen. The nacre-like structures are modeled reflecting the experimentally determined material properties, and the three-point bending tests are simulated by the finite element method. The experiment and numerical results of the tests are in good agreement. Multi-material composites with the natural hierarchical patterns are very promising to provide enhancement in mechanical properties. However, the adhesion between different materials in 3D printing still needs to be improved to fully harness the potential for further development.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

1-1. 정성적 연구목표 달성도

구분	핵심성과 (CTE)	단위성과	성과점검기준						양적 성과 건수
			질적 성과지표	목표 치	달성 치	측정방 법	검증방 법	기준 치	
주관	3D 프린터를 이용하여 제작한 자연모사형 적층재료의 실험용 모델	1 자연모사형 적층재료의 3D 프린터 제작모델	① 자연모사형 적층재료의 3D 프린터 제작모델	100 %	100 %	3D 프린터를 이용하여 제작한 실험용 모델 확인	실험용 모델의 3D 프린터를 이용한 제작 과정을 통한 검증	33.3	특허: 출원 1 건 등록: 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 S/W: 1 건
	기존 대비 자연모사형 적층재료 수치해석 모델의 휨 하중에 대한 역학적 에너지의 흡수량 25% 증가	2 복합재료의 수치해석 모델의 휨 하중에 대한 역학적 에너지의 흡수량 25% 증가	① 휨 하중에 대한 역학적 에너지의 흡수량 25% 증가	100 %	70%	수치해석 결과를 통한 확인	수치해석 수행 과정 및 그에 대한 결과보고를 통한 검증	33.3	특허: 출원 1 건 등록: 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 S/W: 1 건
	기존 대비 자연모사형 적층재료 실험용 모델의 휨 하중에 대한 역학적 에너지의 흡수량 25% 증가	3 복합재료의 실험용 모델의 휨 하중에 대한 역학적 에너지의 흡수량 25% 증가	① 휨 하중에 대한 역학적 에너지의 흡수량 25% 증가	100 %	70%	실험결과를 통한 확인	공인시험 기관에서의 3점 굽힘 시험을 통한 검증	33.3	특허: 출원 1 건 등록: 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 S/W: 1 건
계								100	특허: 출원 1 건 등록: 1 건 논문: 1 건 시제품: 1 건 S/W: 1 건

1-2. 정량적 연구목표 달성도

성과목표		목표	달성 (달성률)	비고
논문	SCI 급	2	1 (50%)	1. Composites: part B - 1건: Inprint 2. 제출 0.5 건 3. 제출 0.5 건
특허(출원/등록)		1	1 (100%)	1. 접착제 도포기능을 갖는 3D 프린터 및 구동 방법 (출원번호:10-2018-0090505)

2. 관련 분야 기여도

2-1. 현재 3D 프린터 기술 한계점 개선의 발판 마련

- 현재의 듀얼 노즐 3D 프린터를 이용하여 이중재료의 구조를 출력할 때, 두 재료 간의 접착력이 매우 약하다는 단점이 있다. 특히, 두 가지 재료의 물성치가 서로 대비될 때 이러한 현상이 더욱 심하다. 따라서 본 연구진은 이와 같은 문제를 해결하기 위해 새로운 3D 프린터를 고안해냈다. 두 개의 노즐 외에 접착제 분사용 노즐이 추가적으로 설치된 접착제 분사기능이 탑재된 듀얼 노즐 3D 프린터이다. 일반적인 듀얼 노즐 3D 프린터는 fused deposition modeling (FDM) 형식으로 두 개의 노즐이 각각의 재료의 번갈아가며 layer-by-layer 형식으로 출력을 한다. 첫 번째 노즐이 해당 재료의 첫 층(layer)을 출력하고 두 번째 노즐이 해당 재료의 첫 층을 출력한다. 그 다음으로 다시 첫 번째 노즐이 해당재료의 두 번째 층을 출력하고 두 번째 노즐이 두 번째 층을 출력한다. 이러한 작업을 구조물의 출력이 완료될 때까지 반복하게 된다. 본 연구진이 고안해낸 3D 프린터는 첫 번째 노즐과 두 번째 노즐의 출력 사이에 접착제용 노즐이 접착제를 분사 또는 도포하는 3D 프린터이다. 첫 번째 노즐이 해당 재료의 첫 층을 출력하면 접착제용 노즐이 접착제를 분사 또는 도포 하고 두 번째 노즐이 해당 재료의 첫 층을 출력한다. 이러한 작업으로 인해 두 재료 사이에는 접착제가 적용되고 접착력이 강해진다. 또한, 사용자가 접착제의 종류 및 분사나 도포 정도를 정할 수 있기 때문에 두 재료 사이에 원하는 만큼의 접착력을 설정할 수 있다. 따라서 본 연구진이 고안해낸 3D 프린터로 두 가지 재료로 진주층모사 구조를 출력할 때 그 성능을 월등히 향상시킬 수 있다.

2-2. 자연모사 패턴이 적용된 구조 최적화의 발판 마련 - 진주층 모사 적층형 복합재 구조의 수치해석 모델 개발

- 현재까지 진주층 모사 패턴이 적용된 구조의 최적화에 관한 연구 - 구성 재료, 패턴, 규격 등에 대해서 최적화가 수행되어지지 않았다. 이러한 연구는 실험적 연구로는 비용과 시간이 불필요하게 많이 들기 때문에 적합하지 않고 수치적 연구를 통해 진행될 수 있다. 본 연구진이 개발한 것과 같은 정확성이 검증된 수치해석 모델을 가지고 수치적 연구를 통해 진주층 모사 구조의 최적화 연구를 진행할 수 있다.

3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

3-1. 정성적 성과목표의 미달성 및 차후대책

본 연구진은 원래 목표로 했던 세 가지 핵심성과목표 - 1. 3D 프린터를 이용하여 제작한 자연모사형 적층재료의 실험용 모델, 2. 기존 대비 자연모사형 적층재료 수치해석모델의 휨 하중에 대한 역학적 에너지의 흡수량 25% 증가, 3. 기존 대비 자연모사형 적층재료 실험용 모델의 휨 하중에 대한 역학적 에너지의 흡수량 25% 증가를 모두 달성하였다. 3번째 항목은 공인인증기관 KCL과 한밭대학교에서 기존 대비 자연모사형 적층재료 실험용 모델의 휨 하중에 대한 역학적 에너지의 흡수량 25% 증가를 검증한 상태다. 따라서 정성적 성과에서 미달성 된 성과는 없다.

3-2. 정량적 성과목표의 미달성 및 차후대책

정량적 성과목표 중 SCI(E)급 논문 2건이 있는데 현재까지 본 연구진에서 달성한 성과는 1건이다.

Composites: Part B 저널에 Bio-inspired bimaternal composite patterned using three-dimensional printing의 제목의 논문 1건을 투고하였고 accept 되었다.

제출되어있는 논문은 Micro-crack detection with nonlinear wave modulation technique and its

application to loaded cracks의 제목의 논문을 NDT&E 저널에 0.5건으로 제출되어있고 Experimental and Numerical Investigations of High-Speed Projectile Impacts on 7075-T651 Aluminum Plates의 제목의 논문을 Thin-Walled structures 저널에 0.5건 제출할 예정이다. 따라서 총 1건의 논문이 차후에 성과로 추가될 예정이다.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

5-1. 현재 연구개발성과물의 활용 계획

1. 현재 3D 프린터 기술 한계점 개선의 발판 마련

- 현재의 듀얼 노즐 3D 프린터를 이용하여 이중재료의 구조를 출력할 때, 두 재료 간의 접착력이 매우 약하다는 단점이 있다. 특히, 두 가지 재료의 물성치가 서로 대비될 때 이러한 현상이 더욱 심하다. 따라서 본 연구진은 이와 같은 문제를 해결하기 위해 새로운 3D 프린터를 고안해냈다. 두 개의 노즐 외에 접착제 분사용 노즐이 추가적으로 설치된 접착제 분사기능이 탑재된 듀얼 노즐 3D 프린터이다. 일반적인 듀얼 노즐 3D 프린터는 fused deposition modeling (FDM) 형식으로 두 개의 노즐이 각각의 재료의 번갈아가며 layer-by-layer 형식으로 출력을 한다. 첫 번째 노즐이 해당 재료의 첫 층(layer)을 출력하고 두 번째 노즐이 해당 재료의 첫 층을 출력한다. 그 다음으로 다시 첫 번째 노즐이 해당재료의 두 번째 층을 출력하고 두 번째 노즐이 두 번째 층을 출력한다. 이러한 작업을 구조물의 출력이 완료될 때까지 반복하게 된다. 본 연구진이 고안해낸 3D 프린터는 첫 번째 노즐과 두 번째 노즐의 출력 사이에 접착제용 노즐이 접착제를 분사 또는 도포하는 3D 프린터이다. 첫 번째 노즐이 해당 재료의 첫 층을 출력하면 접착제용 노즐이 접착제를 분사 또는 도포 하고 두 번째 노즐이 해당 재료의 첫 층을 출력한다. 이러한 작업으로 인해 두 재료 사이에는 접착제가 적용되고 접착력이 강해진다. 또한, 사용자가 접착제의 종류 및 분사나 도포 정도를 정할 수 있기 때문에 두 재료 사이에 원하는 만큼의 접착력을 설정할 수 있다. 따라서 본 연구진이 고안해낸 3D 프린터로 두 가지 재료로 진주층모사 구조를 출력할 때 그 성능을 월등히 향상 시킬 수 있다.

2. 자연모사 패턴이 적용된 구조 최적화의 발판 마련 - 진주층 모사 적층형 복합재 구조의 수치해석 모델 개발

- 현재까지 진주층 모사 패턴이 적용된 구조의 최적화에 관한 연구 - 구성 재료, 패턴, 규격 등에 대해서 최적화가 수행되어지지 않았다. 이러한 연구는 실험적 연구로는 비용과 시간이 불필요하게 많이 들기 때문에 적합하지 않고 수치적 연구를 통해 진행될 수 있다. 본 연구진이 개발한 것과 같은 정확성이 검증된 수치해석 모델을 가지고 수치적 연구를 통해 진주층 모사 구조의 최적화 연구를 진행할 수 있다.

5-2. 본 연구의 최종성과물의 활용 계획

가. 최종성과물의 활용방안

본 연구의 자연모사형 적층 복합재 구조는 기존 적층 복합재료가 적용되는 모든 건설 구조물뿐만 아니라 남극이나 북극, 심해저 또는 우주 등 극한 환경용 구조물에도 적용이 가능하므로 기술 수요가 매우 높다. 특히 해저 도시나 해저 터널 같은 해저 구조물에는 햇빛의 투과가 필수적이기 때문에 투과도가 높은 건설 재료가 적용되어야 한다. 따라서 기존의 적층 복합재료의 층간박리(delamination)와 같은 고질적인 문제점이 개선됨과 동시에 투과도 까지 갖춘 본 연구과제의 자연모사형 적층 복합재 구조가 효율적으로 적용될 것이라고 예측된다. 기존 적층 복합재료가 건설사업 외에 항공 산업과 철도 산업에도 널리 적용되고 있으므로 이를 대체하여 다기능의 자연모사형 적층 복합재가 적용될 수 있다.



그림9. Mars Desert Research Station

자연모사형 적층 복합재 구조의 여러 가지 성능을 입증하고, 후속 연구를 통해 개발된 기술이 실제 현장에서 구현 될 수 있도록 최종 환경과 유사한 환경에서 테스트용 샘플의 성능을 검증하고 수정 및 보완 작업을 거쳐 성능을 향상시킨다. 이 테스트용 샘플의 검증 작업을 바탕으로 프로토타입 모델을 제작하고 제한된 실제 환경에서의 적용 및 사용이 가능한지 증명하고, 해당 기술을 완제품 형태로서 개발한다. 마지막으로 이 완제품이 여러가지 특정 조건하에서 제대로 성능을 발휘하는 지 입증한다. 후속연구를 진행하면서 시공비 절감과 제품의 유해성 등 경제성과 안정성을 분석한다.

나. 기대성과 및 파급효과

본 연구진이 자연모사기술과 3D 프린팅기술을 이용하여 개발한 고성능 적층 복합재 구조 기존의 복합 재료와는 차별화된 기술이다. 자연모사공학 관련 기술발전으로 2025년에는 약 1조 달러의 세계 GDP 상승과 미국에서 3천억 달러의 부가가치와 160만개의 일자리 창출이 예측되고 있다. 따라서 전 세계적으로 자연모사 관련 원천기술을 빠르게 확보하고 응용제품을 개발하려는 노력이 활발히 진행되고 있다. 건설 분야에서는 섬유나 디스플레이 산업 분야에 비해서 자연모사기술이 부족한 실정이다. 따라서 건설 분야에서 본 연구진이 개발한 것과 같은 자연모사기술 관련 원천기술을 먼저 확보하고 고도화 한다면 미래의 건설 산업 분야에서의 자연모사기술 관련 시장을 선점할 수 있고 본 기술의 높은 수출 점유율을 얻을 수 있을 것이라 예측된다.

또한, 3D 프린팅은 4차 산업 혁명과 관련하여 가장 주요한 핵심 기술 중 하나로 고려되고 있다. 전 세계적으로 3D 프린터 관련 시장은 2020년 177억 달러 규모로 연평균 66% 정도 성장할 것으로 전망되며, 3D 프린터의 총 보급량은 22만대에서 675만대로 급증할 것으로 전망된다. 하지만 현재 한국의 3D 프린팅 관련 원천기술의 점유율은 1.8%에 불과한 상황이다. 또한, 3D 프린팅 기술의 건설 관련 산업 점유율은 3% 정도로 매우 낮은 수준이다. 따라서 본 연구진이 3D 프린팅을 접목하여 개발한 자연모사형 건설 구조재 원천기술의 지속적인 개발 및 고도화를 통해 건설 산업 관련 3D 프린팅의 기술 점유율 및 관련 분야의 경쟁력을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 예측된다.

본 기술은 극한환경에서의 구조물뿐만 아니라 극한조건에서의 안정성 유지가 필수인 항공이나 철도 또는 선박산업에서도 적용될 수 있다. 그리고 복합재료가 적용된 지상의 건축 구조물에도 목적에 맞는 기능을 설정하여 적용될 수 있다. 이와 같이 다양한 종류의 구조물에 본 연구의 자연모사형 적층 복합재 구조를 적용함으로써 구조물의 안정성을 향상시킬 수 있다. 결과적으로 국토 전반에 걸쳐 이미 건설 되었거나 건설 예정인 구조물에 높은 안전성을 부여함으로써 사회적 안전성을 향상 시킬 수 있다.

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

해당없음

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		O
결정사유		

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

실험실 내 유해·위험 예방조치: 본 연구에서는 제안기술 개발위해 3D 프린터, 주파수 분석기 등의 장비를 활용하므로 여러 위험에 노출되어 있어 특히 유의할 필요가 있다. 이에 따라 참여 연구원의 안전을 확보하기 위해 다음과 같은 다양한 안전장비와 안전표시가 부착되어 있다. 이는 산업안전보건법 23조에서 명시한 바에 따른 것으로, 실험시설에 경고, 안내, 비상시 조치사항 등을 게시·부착하여 참여연구원의 안전의식을 환기하고 사고발생시 신속하게 대응하기 위함이다.

- 실험실 출입문에 주의 표지 부착
- 실험 중임을 용이하게 식별할 수 있도록 경고등 설치
- 안전지침 숙지를 위한 실험수칙(경고등, 보안경, 사고 시 행동요령 등) 게시

§ 안전교육 및 안전점검: 참여연구원에게 매월 1시간의 정기교육을 실시함으로써 연구실 내 위험요인과 예방대책을 숙지할 수 있도록 할 계획이며, 또한 지정된 안전 관리자에 의한 일상점검을 매일 1회 수행, 외부 전문가가 주관하는 정밀안전진단을 연 2회 실시하여 불필요한 위험요인을 제거하고 사고 발생을 미연에 방지한다.

§ 안전관리체계: 연구기간 동안 연구실 내 안전관리 감독자와 안전 관리자를 지정해 안전상 업무를 수행하고 과제 구성원의 안전사항을 점검·확인할 계획이다. 안전관리 감독자 및 안전관리자의 책무는 다음과 같다.

- 실험 관련 기구 또는 설비의 안전점검 및 이상 유무 확인
 - 보호구 구입 시 적격품 선정
 - 연구실 정리정돈 및 통로확보의 확인 및 감독
 - 관련 법령에 명시된 규정을 위반하는 연구 참여자에 대한 조치 및 교육
-

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	논문 게재지/ 특허 등록 국가	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	특허출원	접착제 도포 기능을 갖는 3D 프린터 및 그 구동 방법	한국과학기술 원	대한민국	2018.08.02.	단독	-
2	논문	Bio-inspired bimaterial composite patterned using three-dimensional printing	한국과학기술 원	Composites Part B	2019.05.15	단독	SCI, IF: 4.92

제11장. 기타 사항

해당없음

-
- [1] R. F. Gibson, *Principles of Composite Material Mechanics*, no. 205. 1994.
 - [2] F. Barthelat, "Nacre from mollusk shells: A model for high-performance structural materials," *Bioinspir. Biomim.*, vol. 5, no. 3, 2010.
 - [3] Q. Chen and N. M. Pugno, "Bio-mimetic mechanisms of natural hierarchical materials: A review," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 19, pp. 3-33, 2013.
 - [4] C. Guo, W. W. Song, and Z. D. Dai, "Structural design inspired by beetle elytra and its mechanical properties," *Chinese Sci. Bull.*, vol. 57, no. 8, pp. 941-947, 2012.
 - [5] R. K. Chintapalli, M. Mirkhalaf, A. K. Dastjerdi, and F. Barthelat, "Fabrication, testing and modeling of a new flexible armor inspired from natural fish scales and osteoderms," *Bioinspir. Biomim.*, vol. 9, no. 3, 2014.
 - [6] R. Martini and F. Barthelat, "Stability of hard plates on soft substrates and application to the design of bioinspired segmented armor," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 92, pp. 195-209, 2016.
 - [7] H. Huang, Y. Zhang, and L. Ren, "Particle erosion resistance of bionic samples inspired from skin structure of desert lizard, *Laudakin stoliczkana*," *J. Bionic Eng.*, vol. 9, no. 4, pp. 465-469, 2012.
 - [8] M. M. Porter, N. Ravikumar, F. Barthelat, and R. Martini, "3D-printing and mechanics of bio-inspired articulated and multi-material structures," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 73, no. June 2016, pp. 114-126, 2017.
 - [9] L. S. Dimas, G. H. Bratzel, I. Eylon, and M. J. Buehler, "Tough composites inspired by mineralized natural materials: Computation, 3D printing, and testing," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 23, no. 36, pp. 4629-4638, 2013.
 - [10] L. S. Dimas and M. J. Buehler, "Modeling and additive manufacturing of bio-inspired composites with tunable fracture mechanical properties," *Soft Matter*, vol. 10, no. 25, p. 4436, 2014.
 - [11] F. Libonati, C. Colombo, and L. Vergani, "Design and characterization of a biomimetic composite inspired to human bone," *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, vol. 37, no. 7, pp. 772-781, 2014.
 - [12] F. Libonati, G. X. Gu, Z. Qin, L. Vergani, and M. J. Buehler, "Bone-inspired materials by design: toughness amplification observed using 3D printing and testing," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 18, no. 8, pp. 1354-1363, 2016.
 - [13] J. J. Martin, B. E. Fiore, and R. M. Erb, "Designing bioinspired composite reinforcement architectures via 3D magnetic printing," *Nat. Commun.*, vol. 6, pp. 1-7, 2015.
 - [14] P. Liu, D. Zhu, Y. Yao, J. Wang, and T. Q. Bui, "Numerical simulation of ballistic impact behavior of bio-inspired scale-like protection system," *Mater. Des.*, vol. 99, pp. 201-210, 2016.
 - [15] S. Rudykh, C. Ortiz, and M. C. Boyce, "Flexibility and protection by design: imbricated hybrid microstructures of bio-inspired armor," *Soft Matter*, vol. 11, no. 13, pp. 2547-2554, 2015.
 - [16] S. Signetti and N. M. Pugno, "Evidence of optimal interfaces in bio-inspired ceramic-composite panels for superior ballistic protection," *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 34, no. 11, pp. 2823-2831, 2014.
 - [17] A. P. Jackson, J. F. V. Vincent, and R. M. Turner, "The mechanical design of nacre," *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.*, vol. 234, no. 1277, pp. 415-440, 1988.
 - [18] J. D. Currey, "Mechanical properties of mother of pearl in tension," *Proc. R. Soc.*
-

London. Ser. B, Biol. Sci., vol. 194, no. 1114, pp. 7-16, 2018.

[19] B. Ji and H. Gao, "Mechanical properties of nanostructure of biological materials," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 52, no. 9, pp. 1963-1990, 2004.

[20] P. Stempflé, O. Pantalé, M. Rousseau, E. Lopez, and X. Bourrat, "Mechanical properties of the elemental nanocomponents of nacre structure," *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 30, no. 5, pp. 715-721, 2010.

[21] X. Wei, M. Naraghi, and H. D. Espinosa, "Optimal length scales emerging from shear load transfer in natural materials: Application to carbon-based nanocomposite design," *ACS Nano*, vol. 6, no. 3, pp. 2333-2344, 2012.

[22] N. Sakhavand and R. Shahsavari, "Universal composition-structure-property maps for natural and biomimetic platelet-matrix composites and stacked heterostructures," *Nat. Commun.*, vol. 6, 2015.

[23] P. Zhang, M. A. Heyne, and A. C. To, "Biomimetic staggered composites with highly enhanced energy dissipation: Modeling, 3D printing, and testing," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 83, pp. 285-300, 2015.

[24] P. Tran, T. D. Ngo, A. Ghazlan, and D. Hui, "Bimaterial 3D printing and numerical analysis of bio-inspired composite structures under in-plane and transverse loadings," *Compos. Part B Eng.*, vol. 108, pp. 210-223, 2017.

[25] G. X. Gu, F. Libonati, S. D. Wettermark, and M. J. Buehler, "Printing nature: Unraveling the role of nacre's mineral bridges," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 76, no. May, pp. 135-144, 2017.

[26] M. A. Meyers, P.-Y. Chen, A. Y. M. Lin, and Y. Seki, "Biological materials: Structure and mechanical properties," *Prog. Mater. Sci.*, vol. 53, no. 1, pp. 1-206, 2008.

[27] Q. Chen and N. M. Pugno, "Bio-mimetic mechanisms of natural hierarchical materials: A review," *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.*, vol. 19, pp. 3-33, 2013.

[28] L. Addadi, D. Joester, F. Nudelman, and S. Weiner, "Mollusk shell formation: A source of new concepts for understanding biomineralization processes," *Chem. - A Eur. J.*, vol. 12, no. 4, pp. 980-987, 2006.

[29] F. Barthelat, "Biomimetics for next-generation materials," *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 365, no. 1861, pp. 2907-2919, 2007.

[30] W. J. Clegg, K. Kendall, N. M. N. Alford, T. W. Button, and J. D. Birchall, "A simple way to make tough ceramics," *Nature*, vol. 347, no. 6292, pp. 455-457, 1990.

[31] T. E. Schäffer *et al.*, "Does abalone nacre form by heteroepitaxial nucleation or by growth through mineral bridges?," *Chem. Mater.*, vol. 9, no. 8, pp. 1731-1740, 1997.

[32] F. Barthelat, H. Tang, P. D. Zavattieri, C. M. Li, and H. D. Espinosa, "On the mechanics of mother-of-pearl: A key feature in the material hierarchical structure," *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 55, no. 2, pp. 306-337, 2007.

[33] R. Sibson, "A vector identity for the Dirichlet tessellation," *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.*, vol. 87, no. 1, pp. 151-155, 1980.

[34] Ultimaker, "Ultimaker 3 Installation and user manual," 2016.

[35] ISO, "Plastics - Determination of flexural properties," 2013.

[36] ISO, "Plastics - Determination of tensile properties," 2009.

[37] J. O. Hallquist, "LS-DYNA Keyword User's Manual, vol. I," *Livermore Softw. Technol. Corp.*, vol. I, no. May, p. 2206, 2007.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.