

최종보고서(일반과제용)							보안등급				
							일반[☒], 보안[☐]				
중앙행정기관명	국토교통부			사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업				
전문기관명	국토교통과학기술진흥원				내역사업명		국토교통기술혁신연구				
공고번호	공고-제05호			총괄연구개발 식별번호		20CTAP-C157949-01					
				연구개발과제번호		20CTAP-C157949-01					
국가과학기술 표준분류	EI0406		15%	EA0209		25%	EA0210		25%		
총괄연구개발명	국문	흡음·난연 특성을 동시 부여한 열전도율 0.051 W/m·K 이하 건축용 단열재를 위한 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동설계 시스템 기술									
	영문	3D Printing System based Multi-performance Thermal Insulator									
연구개발과제명	국문	흡음·난연 특성을 동시 부여한 열전도율 0.051 W/m·K 이하 건축용 단열재를 위한 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동설계 시스템 기술									
	영문	3D Printing System based Multi-performance Thermal Insulator									
주관연구기관	기관명	성균관대학교 산학협력단			사업자등록번호		101-82-12009				
	주소	(16419) 경기도 수원시 장안구 서부로 2066, 1층(천천동, 성균관대학교내)			법인등록번호		110171-0029501				
주관연구책임자	성명	김 윤 철			직위		교수				
	연락처	직장전화	031-299-4315			휴대전화		younckim@skku.edu			
		전자우편	010-6331-7949			국가연구자번호		10157814			
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(21개월)									
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31(9개월)									
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31. (12개월)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				자립자단체 기타()							
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	370,000	-	-	-	-	-	-	370,000	-	370,000	-
1년차	160,000	-	-	-	-	-	-	160,000	-	160,000	-
2년차	210,000	-	-	-	-	-	-	210,000	-	210,000	-
공동연구기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고					
						역할	기관유형				
공동연구기관	-	-	-	-	-	-	-				
	-	-	-	-	-	-	-				
위탁연구기관	-	-	-	-	-	-	-				
	-	-	-	-	-	-	-				
연구기관 외 기관	-	-	-	-	-	-	-				
연구개발담당자 실무담당자	성명	김민겸			직위		연구원				
	연락처	직장전화	031-299-4067			휴대전화		010-2483-2913			
		전자우편	minkyem.k@gmail.com			국가연구자번호		11819199			

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 01 월 14 일

주관연구책임자 : 김 윤 철 (직인)

주관연구기관의 장 : (성균관대학교 산학협력단) 박 선 규 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

본 서식은 「국가연구개발혁신법」 시행('21.01.01) 이전에 최종 협약하여 '21.01.01 이후에 최종평가를 시행하는 일반과제용 입니다.

< 요약 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성

사업명		국토교통기술축진연구사업				총괄연구개발 식별번호			20CTAP-C157949-01				
내역사업명		국토교통기술혁신연구				연구개발과제번호			20CTAP-C157949-01				
국가과학기술 표준분류		EI0406		15%	EA0209		25%	EA0210		25%			
총괄연구개발명		흡음·난연 특성을 동시 부여한 열전도를 0.051 W/m·K 이하 건축용 단열재를 위한 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동설계 시스템 기술											
연구개발과제명		흡음·난연 특성을 동시 부여한 열전도를 0.051 W/m·K 이하 건축용 단열재를 위한 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동설계 시스템 기술											
전체 연구개발기간		2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(21개월)											
총 연구개발비		총 370,000 천원 (정부지원연구개발비 : 370,000 천원, 기관부담연구개발비 : - 천원, 지방자치단체 : - 천원, 그 외 지원금 : - 천원)											
연구개발단계		기초[☒] 응용[] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]				기술성숙도		착수시점 기준(1) 종료시점 목표(4)					
연구개발과제 유형		지정공모 [☒] 자유공모 []											
연구개발과제 특성		실용화											
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	흡음·난연 특성을 동시 부여한 열전도를 0.051 W/m·K 이하 건축용 단열재를 위한 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동설계 시스템 원천기술 개발											
	전체 내용	3D 프린팅은 높은 형상 자유도, 공정 간소화 및 잉여재료 절감의 장점으로 건설 분야에서의 수요가 점차 증가하고 있음. 3D 프린팅은 소재·공정·구조 연동형 설계가 필수적이나, 국내외 해당 설계 원천기술의 부재로 인해 출력물의 결함 발생 및 소비자 맞춤 성능 구현에 한계가 있음. 따라서 본 연구에서는 3D 프린팅 연동형 설계 시스템을 구축하여 소비자 요구 성능에 최적화된 소재, 3D 프린팅 공정, 구조를 개발하고자 함. 그리고 이를 단열재 개발에 활용하여 기존에 부여하지 못한 단열·흡음·난연 특성을 One-step process 방식으로 원하는 형상에 맞게 동시에 구현하여, 기존의 단열재의 한계(Multi-step process, 단일 성능, 형상의 제약)를 극복하였음. 즉, 난연 및 흡음 특성이 있는 복합재료와 단열 특성이 있는 고분자 재료로 3D 프린팅으로 기존의 발포제로는 구현할 수 없는 다공성 구조를 설계하여 단열재의 단열·흡음·난연 특성을 동시에 제어하였음.											
	1년차	목표	단열·흡음·난연 특성을 동시에 지닌 단열재 제작을 위한 3D 프린팅 재료 및 공정 설계										
		내용	본 연구에서 구현하고자 하는 단열재의 구조는 단열 특성을 지닌 내부구조, 흡음·난연 특성을 지닌 외부구조로 나뉘어짐. 다공성 구조 구현을 위해 3D 프린팅 가능하며 흡음·난연 특성을 지닌 외부 구조용 TPU/MOSw와 단열 특성을 지닌 내부 구조용 HIPS 필라멘트를 개발함. 앞서 개발한 재료를 3D 프린팅 할 때는 결함이 발생하지 않도록 각 재료별 공정조건들(노즐 온도, 적층 속도, 베드 온도 등)을 고분자 유변학에 기반하여 최적화함.										
	2년차	목표	해석기반 단열·흡음 성능에 최적화된 다공성 구조 설계 및 3D 프린팅 시스템개발 및 구축										
		내용	단열 및 흡음 성능은 구조에 영향을 받으므로 역학에 기반하여 기존에 구현하지 못하였던 흡음 성능에 특화된 외부 구조, 단열 성능에 특화된 내부 구조를 설계함. 즉, 소음 해석에 기반한 최적화된 Open-cell 외부구조로 흡음 성능을 극대화하고, 열전달 해석에 기반한 최적화된 Closed-cell 내부구조로 단열 성능을 극대화함. 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동형 설계 시스템 기술을 검증하기 위해 개발된 단열재의 단열·흡음·난연 성능을 정량적으로 평가하였음.										
연구개발성과		<예상되는 연구개발성과 유형>											
		구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트웨 어	화합물	생명자원		신품종	
		예상성과 (N/Y)	Y	Y	Y	Y	N	N	N	N	N	정보	실물

연구개발성과 활용방안 및 기대효과	본 연구를 통해 개발될 3D 프린팅 시스템은 난연 성능에 사용하는 할로겐계 난연제와 기존 유기단열재의 단열 성능을 위해 사용한 프레온계 발포제를 사용하지 않고 난연 및 흡음 성능을 구현해 환경친화적 단열제 제조와 연소시 유독가스 발생을 줄일 수 있음. 또한, 기존 공법으로 구현 불가능한 구조 설계를 통한 단열재의 흡음 성능 향상은 현재 사회문제로 대두되고 있는 층간소음 문제를 해결하는데 기여할 수 있을 것으로 기대됨. 본 연구의 건축용 단열재 3D 프린팅 시스템에 대한 연구는 2027년 400억 달러로 전망되는 글로벌 3D 프린팅 건축 시장에서 비교적 후발주자인 대한민국의 국가 경쟁력을 높일 것으로 전망되며, 3D 프린팅 시스템 원천기술을 바탕으로 단열재뿐만 아니라 흡음재, 기포콘크리트 등 다양한 건축부재 제작에 적용하여 향후 건설지능화 및 건설자동화에 기여할 수 있을 것으로 기대됨.											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음											
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	7 (4 SCIE, 3 비 SCIE)	3	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
	-	-	-	-	-	-	-	-	-			
국문핵심어 (5개 이내)	3D 프린팅 시스템		다공성 구조		단열		흡음		난연			
영문핵심어 (5개 이내)	3D Printing System		Porous Structure		Thermal Insulation		Sound Absorption		Fire resistance			

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

별첨자료(참고문헌 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

- 흡음·난연 특성을 동시 부여한 열전도율 0.051 W/m·K 이하 건축용 단열재를 위한 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동설계 시스템 원천기술 개발
 - 단열 특성: 열전도율 0.051 W/m·K 이하 ('라' 등급 단열재 기준)
 - 흡음 특성: 흡음을 0.262 이하 (기존 폴리우레탄 흡음재의 평균 흡음 특성 기준)
 - 난연 특성: 총방출열량 8 MJ/m² 및 가스유해성 테스트 9 min (준불연 단열재 기준)

2) 연구개발과제의 연차별 목표

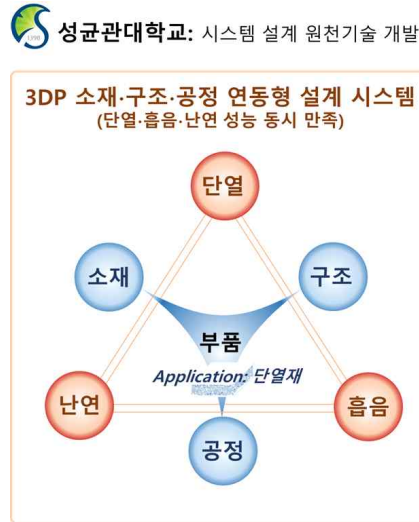
- 1차 년도: 단열 및 흡음, 난연 특성을 지닌 3D 프린팅 가능한 재료 및 3D 프린팅 공정 설계
 - 단열 특성을 지닌 고분자 필라멘트 제작 & 물성 DB 구축
 - 흡음·난연 특성을 지닌 복합재료 필라멘트 개발 및 제작 & 물성 DB 구축
 - 고분자의 유변학적 거동을 고려한 재료별 3D 프린팅 공정조건 최적화
- 2차 년도: 해석 기반 단열·흡음 성능에 최적화된 다공성 구조 설계 및 3D 프린팅 시스템 개발 및 구축
 - 다공성 구조의 단열 및 흡음 성능에 대한 역학적 수치분석
 - 단열 및 흡음의 역학적 분석에 기반한 다공성 구조의 열전달·소음 해석
 - 3DP 소재·구조·공정을 동시 최적화한 3D 프린팅 시스템 구축 및 검증

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	다공성 구조의 열전달 및 소음 해석을 위한 3D 프린팅 재료 물성 DB 구축	다공성 구조설계에 필요한 HIPS, ABS, ABS/MOSw의 인장, 점탄성, 열적 물성 DB 확보 완료	-	HIPS의 열적 물성 확보	다공성 구조해석을 위해 재료의 물성 DB가 필요함	5
		흡음재 설계를 위한 시간-온도 중첩원리를 활용한 저-고주파수대역의 점탄성 물성 개발완료	-	TPU/MOSw의 기계적, 동적 물성 확보		
		준불연급 유기복합소재의 물성DB를 추가로 확보 완료				
	흡음·난연 특성을 지닌 외부구조 구현을 위한 복합재료 개발 및 물성 DB 구축	난연제로서 무기수산화물(MOSw)확보	-	3D 프린팅 가능한 복합재료(TPU/MO Sw) 필라멘트 제작	건축 재료 준불연 기준에 따른 목표 설정 [규격: KS F ISO 5660-1(총열방출량 측정) KS F 2271 (가스유해성 평가)]	15
		V-0급 유기복합소재(Matrix: ABS, Filler: MOSw) 개발 및 난연 시험 및 성능 확인	8	총방출열량, 8 MJ/m ²		
		난연제 함량 조절과 기타 첨가제를 활용하여 준불연급 유기복합소재 개발완료	9	가스유해성 9 min		
	고분자의 유변학적 거동을 고려한 재료별 3D 프린팅 공정조건 최적화	개발된 재료별(결함률, 출력상태 등) 최적화된 공정 조건 설계	-	CAD 모델 대비 치수오차가 5% 미만인 형상 출력	-	15

		완료 요구 특성에 유효한 공정조건 인자 확보완료 미세공극 형성을 통한 HIPS 단열특성이 향상된 공정조건 개발완료 3D 스캐닝 활용 치수오차 정밀도가 0.1 um 이하인 역설계 기술 개발완료 개발된 역설계 기술 활용 3D 프린팅한 다공성 구조의 치수오차 검증완료(설계한 공정조건의 유효성 검증) 개발된 준불연급 유기복합소재의 흡음 특성을 고려한 최적공정조건 도출				
2년차 (2021)	단열 및 흡음 수치해석에 기반한 다공성 구조의 유한요소해석 모델 개발	단열 및 흡음 성능에 최적화된 다공성 구조 설계	-	실험값과 해석값 간의 오차율 10% 이하	-	17
	해석에 기반한 다공성 구조 최적설계	해석상 최적화된 단열 및 흡음 성능을 지닌 다공성 구조 구현	열전도율 0.032 W/m·K	열전도율 0.051 W/m·K 이하, 흡음율(NRC) 0.262 (30mm) 이상의 해석값	건설 3D 프린팅의 경우 외형을 이루는 콘크리트 재료를 이용한 연구가 대부분이며 기공을 설계하는 3D 프린팅 단열재에 대한 연구는 확인된 바 없음. 고분자 재료를 사용한 3D 프린팅으로 폼 형상을 구현하고 기계적 특성을 연구한 내용은 있으나 단열특성을 연구한 내용은 확인된 바 없음. [규격: KS L 9016 (열전도도 측정), KS F 2814-2(흡음계수 측정), KS F ISO 5660-1(총열방출량 측정) KS F 2271(가스유해성 평가)]	15
	3DP 소재·구조·공정을 동시 최적화한 3D 프린팅 시스템 구축 및 검증	우수한 단열, 흡음, 난연 특성을 지닌 최적화된 복합 단열재 출력(외부구조:PK/IFR/MOS w, 내부구조: HIPS) 및 성능평가	-	3D 프린팅된 출력물의 열전도율 0.051 W/m·K 이하, 흡음율(NRC) 0.262 (30mm) 이상, 총 방출열량 8 MJ/m2 이하, 가스유해성 테스트 9 min 이상		23

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

○ 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동형 설계 시스템



개요 그림. 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동형 설계 시스템 기반 다중특성을 지닌 단열재 개발

3D 프린팅은 기존 제조공법으로 구현하지 못한 형상이 구현 가능하여 이전에 설계 불가능한 부품 성능을 설계할 수 있다는 이점이 있지만, 현재 3D 프린팅 시스템(재료·구조·공정) 설계는 원천기술 부족으로 요구 성능에 최적화된 부품 구현에 한계가 있는 상황임.

본 연구진이 제안한 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동형 설계는 소재를 고려한 공정설계, 소재 및 공정을 고려한 구조설계 기법으로, 기존 제조방식으로 구현하지 못하였던 다중특성을 지닌 단열재를 개발하는 것을 응용방안으로 선정하였음.

○ 단열 특성을 지닌 3D 프린팅 가능한 3D 프린팅 공정/구조 설계 및 단열 평가

- 3D 프린팅 공정 및 구조설계 기반 Multiscale 다공성 구조설계

단열 특성을 지닌 다공성 개발을 위해 CAD model (Macroscale) 및 3D 프린팅 공정(Micro-mesoscale) 도중 기공이 구현된 Closed cell을 설계하였음. Microscale 설계의 경우 Printing temperature 및 speed를 설계인자로 설정하여 기공이 가장 많이 구현된 공정조건을 개발하였음. Mesoscale 설계의 경우 3D printing infill pattern (Tetrahedral, Concentric, Concentric 3D, Grid, Triangle, Cubic, Line, Cubic 3D) 및 Infill density를 설계인자로 설정하여, 밀도가 가장 낮고 Closed cell 구현이 가능한 공정조건을 선정하였음. 앞서 개발한 공정조건으로 3D 프린팅 가능한 구조 및 치수를 실험적으로 분석하였고, 이에 기반하여 Macroscale 다공성 구조를 시뮬레이션에 기반하여 설계하였음. 소재는 건축 단열재에 많이 쓰이는 High impact polystyrene (HIPS)를 활용하여 설계 및 제작하였음.

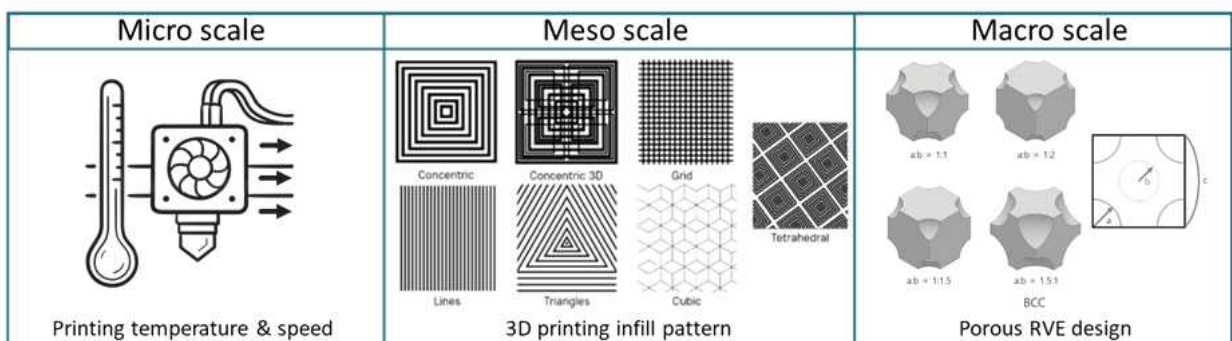


그림 1. Multiscale 다공성 구조설계

- 단열재 제작을 위해 활용한 Fused deposition method (FDM) 방식 3D 프린터 및 HIPS 필라멘트

본 연구에서 활용한 3D 프린터는 IEMA 사의 FDM 방식 듀얼노즐 3D 프린터를 활용하였으며, 프린팅 가능한 Build volume은 310x310x480 mm³, 0.4 mm 직경의 노즐 온도는 최대 450 °C, 베이스플레이트 온도는 최대 170 °C, 프린팅 속도는 최대 150 mm/s까지 설계 가능함. 사용한 HIPS filament의 설계 온도는 220-260 °C, Build plate 설계 온도는 90-110 °C이며 1.08 g/cc의 밀도를 기반으로 상대밀도/기공율을 평가하였음. 3D 프린팅 기반 Microscale의 다공성 구조 구현을 위해 프린팅 가능한 범위를 사전에 파악한 후 범위 내에서 3D 프린팅 공정 설계를 진행하였음.



그림 2. 듀얼노즐 3D 프린터(IEMA)



그림 3. HIPS 필라멘트

- 3D 프린팅 공정조건(노즐 온도, 프린팅 속도, Build plate 온도) 설계를 통한 Microscale 다공성 구조 개발

3D 프린팅 공정조건(노즐온도 및 프린팅 속도)를 앞서 언급한 범위 내에서 약 200여개의 공정조건으로 출력한 후 출력물의 밀도를 평가하였음. 각 공정조건과 출력물의 기공율의 상관관계를 분석한 결과, 그림 4.와 같이 노즐 온도가 높고 프린팅 속도가 낮을수록 프린팅 시 노즐에서의 압출이 불안정하여 출력물에 기공이 많이 구현되는 것을 확인하였음. 하지만 너무 높은 온도로 제작을 할 시 그림 5.와 같이 높은 노즐온도로 인해 펠라멘트가 누출되어 3D 프린팅 공정실패 현상이 발생하였음. 따라서 각 프린팅 가능 범위를 파악하고, 공정실패가 없는 범위 내에서 Microscale 기공을 최대한으로 구현 가능한 노즐 온도 및 프린팅 속도를 도출하였음.

또한, 프린팅 시 첫 레이어와 Build plate 사이의 박리를 예방하기 위해 접착성을 향상시킬 수 있도록 Build plate 온도를 표 1.과 같이 최적화하는 연구를 진행하였음. Build plate 온도와 Build plate condition을 제어하지 못할 경우, 그림 5.와 같은 박리현상이 발생하기에, 사전에 접착력을 높이기 위해 공정조건을 설계하였음.

수집한 데이터를 기반으로 PCA (Principle component analysis)를 통해 다양한 공정변수(고차원의 정보)들을 대표하는 축으로 정사영시켜 공정변수에 따른 밀도 예측을 진행했으며, 이를 기반으로 3D 프린팅 공정조건(노즐온도, 프린팅 속도, 및 Build plate 온도)를 설계한 결과, 220 °C의 노즐온도와 70 mm/s의 프린팅 속도, 115 °C의 Build plate 온도에서 프린팅 실패를 야기하는 박리 등의 문제가 발생하지 않았으며, 밀도는 0.963 g/cc로 10.84% 기공율을 지닌 Microscale 기공이 구현된 출력물을 출력하였음.

표 1. Build plate 온도에 따른 Printability 평가

Experiment	Nozzle Temperature (°C)	Build plate temperature (°C)	Adhesion
1	240	90	None
2		100	Poor
3		110-120	Well

표 2. 프린팅 속도에 따른 밀도 평가

Experiment	Nozzle temp (°C)	Print speed (mm/s)	Density (g/cm³)
1	240	50	0.993
2	240	70	0.985
3	220	50	0.983
4	220	70	0.963

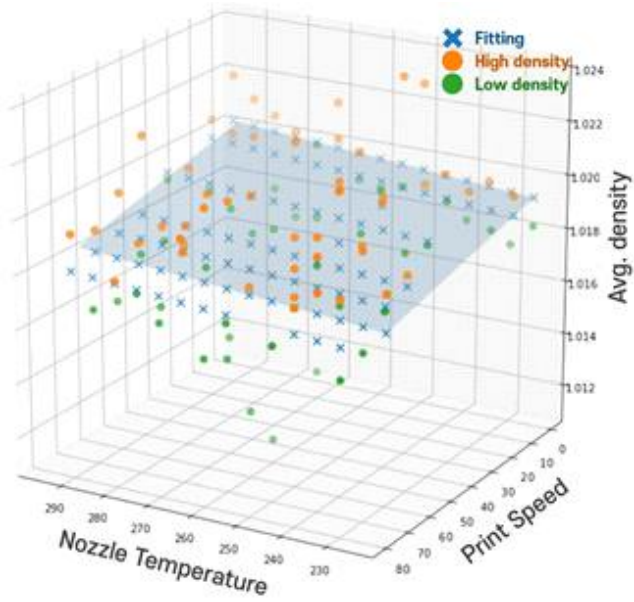


그림 4. 노즐온도 및 프린팅 속도에 따른 밀도평가

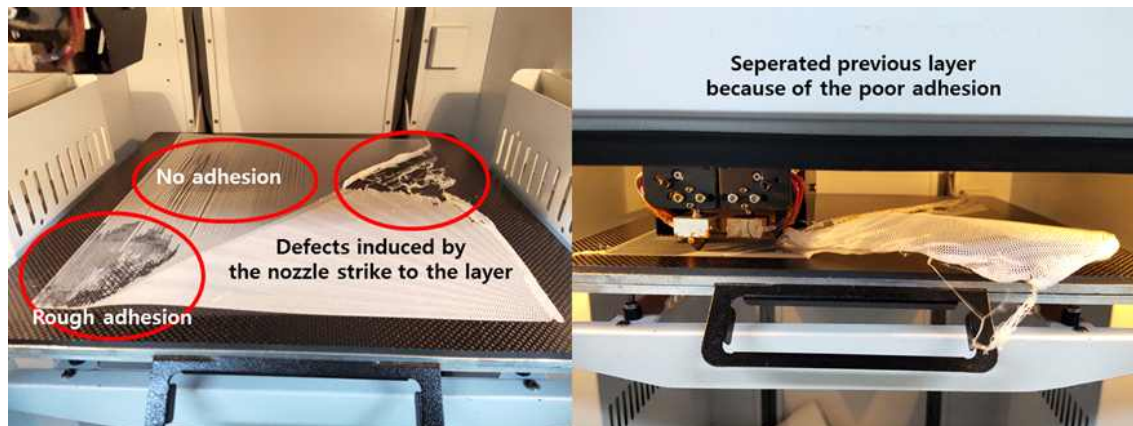
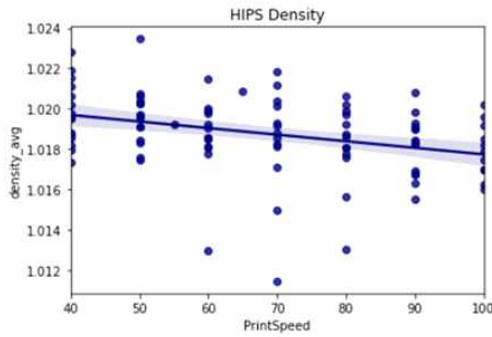


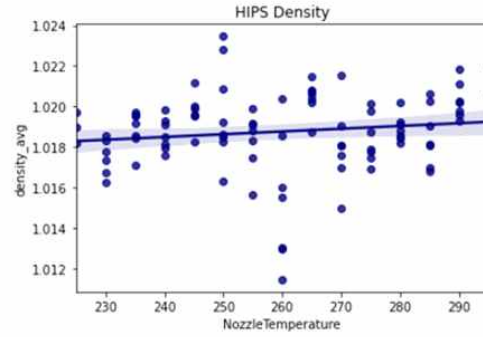
그림 5. 낮은 Build plate temperature로 인한 층간 박리현상



그림 6. 높은 노즐온도로 인한 고분자 필라멘트의 누출 및 Droplet 발생현상



프린팅 속도에 따른 밀도예측



노즐온도에 따른 밀도예측

그림 7. FDM 공정조건에 따른 HIPS의 밀도 DB 구축 및 예측

- 3D 프린팅 공정조건(Infill pattern, infill density) 설계를 통한 Mesoscale 다공성 구조 개발

앞서 선정한 3D 프린팅 공정조건으로 Mesoscale 기공 구현을 위해 Infill pattern 및 Infill density 설계를 진행하였음. FDM 방식 3D 프린팅에서 Infill pattern 및 density는 프린팅 시 출력하는 패턴과 그에 따른 밀도 구현이 가능하여 다양한 종류의 기공을 내부 구조에 구현할 수 있는 이점이 있음. 위 구조 형상 및 크기에 따라 Heat flux의 흐름도 달라져 구조의 열전도도가 달라지는 특징이 있음.

본 연구에서는 Infill pattern 중 Tetrahedral, Concentric, Concentric-3D, Grid, Triangle, Cubic, Line, Cubic-3D 등 약 8가지 종류의 Infill pattern을 선정하고 그에 따른 밀도들을 설계하여 단일 특성을 향상시키기 위한 Closed cell 생성 유무 및 밀도를 평가하였음.



그림 8. Infill pattern 종류 및 형상



그림 9. Infill density 종류 및 형상

Infill pattern (Tetrahedral, Concentric, Concentric-3D, Grid, Triangle, Cubic, Line, Cubic-3D) 별 Infill density를 설계하였을 때 출력물의 밀도와 Closed cell 생성 유무를 평가하였음. Closed cell은 단열재에 필수적으로 요하는 특성이기에, 각 Pattern의 Infill density를 최대한 낮추었을 때 Closed cell 구현이 가능한 임계점을 패턴별로 파악하였음. 또한 최소 밀도를 지닌 Pattern과 그에 따른 Infill density를 파악하였음.

그 결과 그림 10.과 같이 Tetrahedral의 경우 83%, Concentric의 경우 88%, Concentric-3D의 경우 91%, Grid의 경우 91%, Triangle의 경우 100%, Cubic의 경우 83%, Line의 경우 88%, Cubic-3D의 경우 81%의 Infill density가 Closed cell 구현이 가능한 임계점인 것을 파악하였음.

각 Pattern별 임계 밀도에서의 형상은 그림 11.과 같으며 각 형상에 따라 Heat flux의 흐름이 상이하기에 정량적인 열전도도 분석을 위해, 12x12x3 mm³의 시편을 제작하여 열확산도를 측정하였고, Differential scanning calorimeter (DSC) 분석을 통해 비열, Archimedes 방식에 기반하여 밀도를 측정하여 열전도도를 계산하였음.

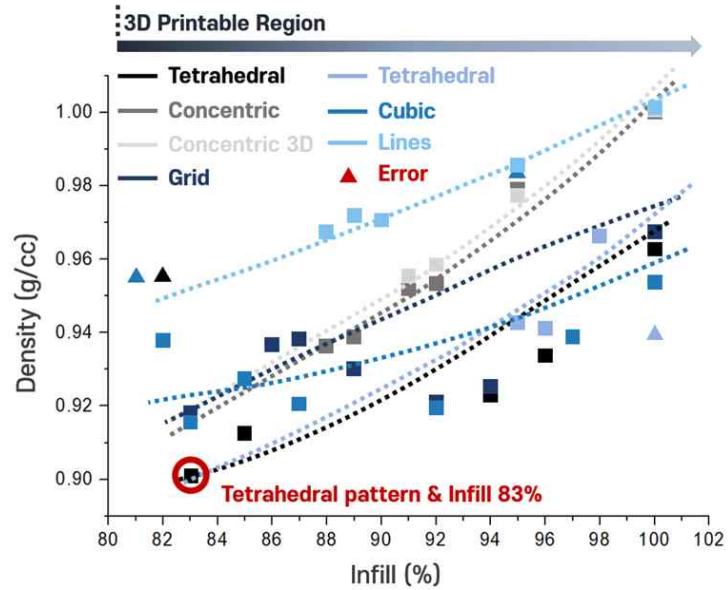


그림 10. Infill pattern별 Closed cell 구현이 가능한 Infill density에 따른 밀도 그래프

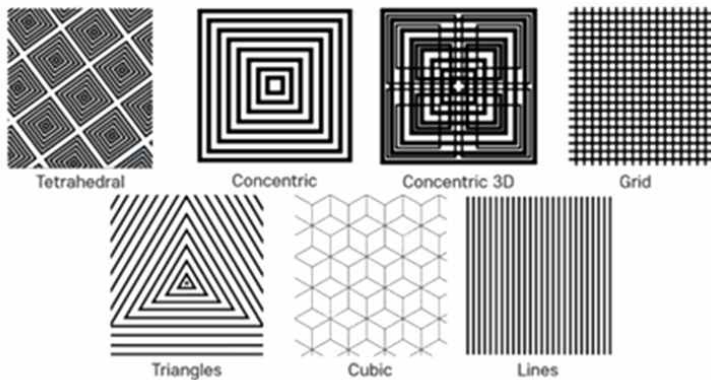


표 3. Infill pattern별 설계한 임계밀도 (Infill density) 및 밀도

	Infill parameter		Density* (g/cm ³)
	Pattern type	Density (%)	
1	Tetrahedral	83	0.824
2	Concentric	88	0.950
3	Concentric 3D	91	0.955
4	Grid	91	0.908
5	Triangle	100	0.954
6	Cubic	83	0.925
7	Line	88	0.862
8	Cubic 3D	81	0.896

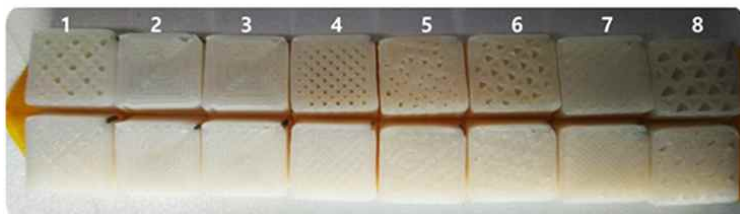


그림 11. Infill pattern별 임계밀도로 출력한 형상(표 3.에 번호 기입)

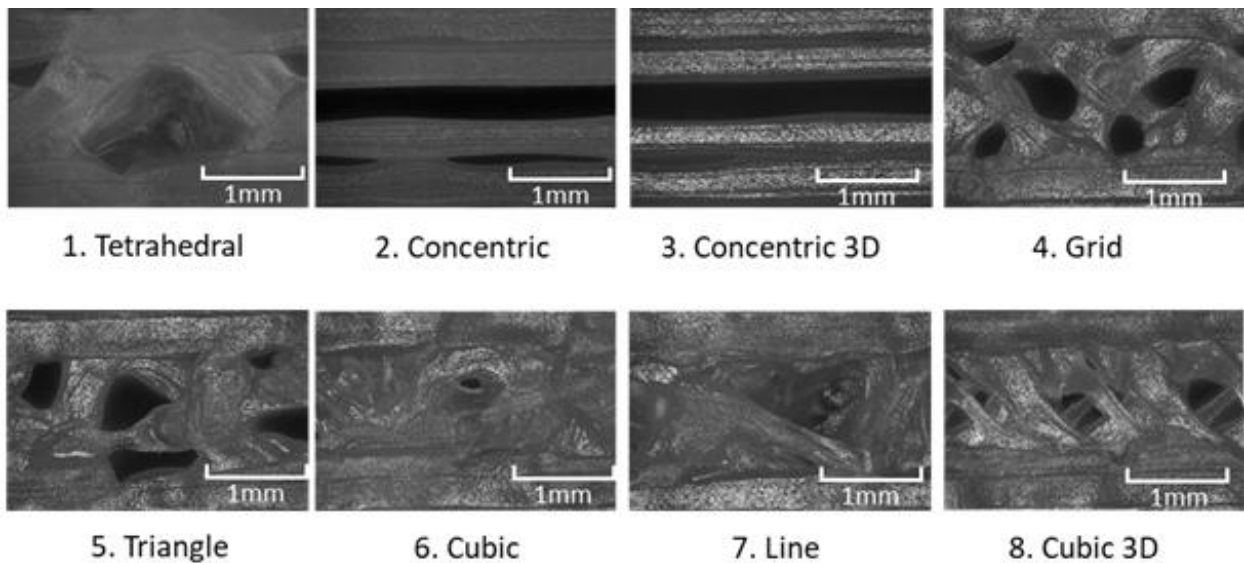


그림 12. Infill pattern별 임계 밀도에서의 출력물의 형상 분석 이미지(광학현미경 분석)

분석 결과 각 시편의 열전도도는 상기 표 4의 열적물성과 같이 나왔으며, 그 중 0.167 W/mK로 열전도도가 가장 낮은 Cubic 83%의 공정조건을 선정하여 Marcoscale의 구조를 설계하고자 함. 또한 프린팅 노즐의 크기를 고려하여 Infill pattern을 구현하지 않은 구조도 설계하여, Infill pattern 구현 유무에 따른 열전도도도 정량적으로 분석함.

표 4. Infill pattern별 임계밀도(Infill density)로 3D 프린팅한 출력물의 열적 물성 표

Specimen	Infill		Density	Thermal diffusivity*	Specific Heat capacity	Thermal conductivity
	Pattern	(%)	(g/cm^3)	(mm^2/s)	(J/gK)	(W/mK)
1	Tetrahedral	83	0.824	0.168	1.3068	0.181
2	Concentric	88	0.950	0.243		0.302
3	Concentric-3D	91	0.955	0.194		0.242
4	Grid	91	0.908	0.209		0.248
5	Triangle	100	0.954	0.169		0.211
6	Cubic	83	0.862	0.148		0.167
7	Line	88	0.925	0.147		0.178
8	Cubic-3D	81	0.896	0.169		0.198

- 3D 프린팅 공정조건 및 구조설계를 통한 Multiscale 다공성 구조 개발

본 연구에서 활용한 노즐의 직경은 0.4 mm로 앞서 설계한 공정조건으로 3D 프린팅할 시 그림 13.와 같이 0.3 mm가 최소 설계 가능한 두께인 것을 실험적으로 도출하였음. Infill pattern을 설계하였을 때 프린팅 가능한 최소두께 또한 도출하기 위해 그림 14.(b)와 같이 두께별 출력형상을 파악하였으며, 분석 결과 2 mm의 최소두께를 요하는 것을 파악하였음. 즉, Infill pattern을 적용하지 않을 경우 0.3 mm의 최소두께로 설계하였고, Infill pattern을 적용할 경우 2 mm의 최소두께를 설계하였음. 이에 기반하여 그림 14.(a)와 같이 Infill pattern을 적용한 Multiscale 다공성 구조설계와 Infill pattern을 적용하지 않은 Macroscale 다공성 구조설계를 분류하여 각각의 단열성능을 열전달 해석에 기반하여 평가하였음.

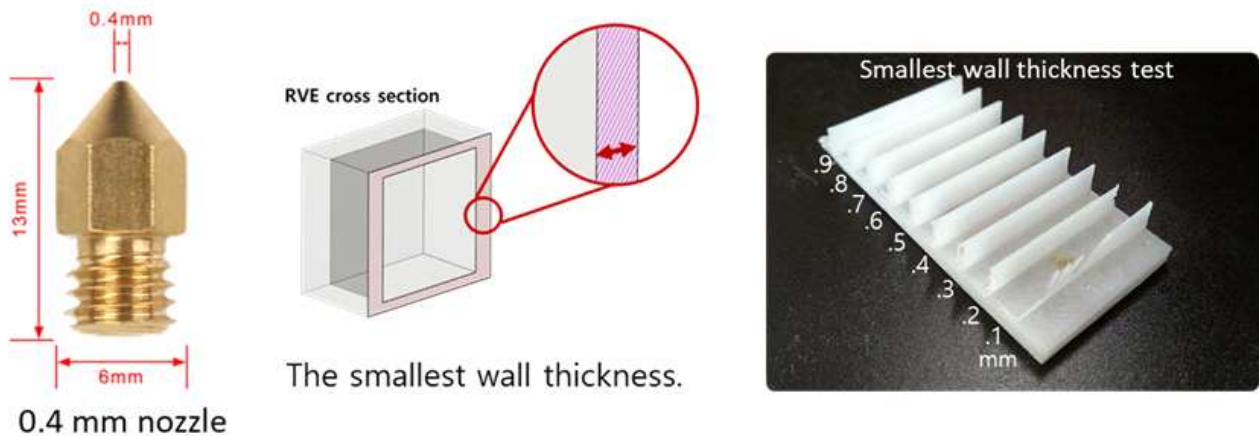


그림 13. 0.4 mm의 노즐 직경 기반 프린팅 가능한 최소 두께 분석

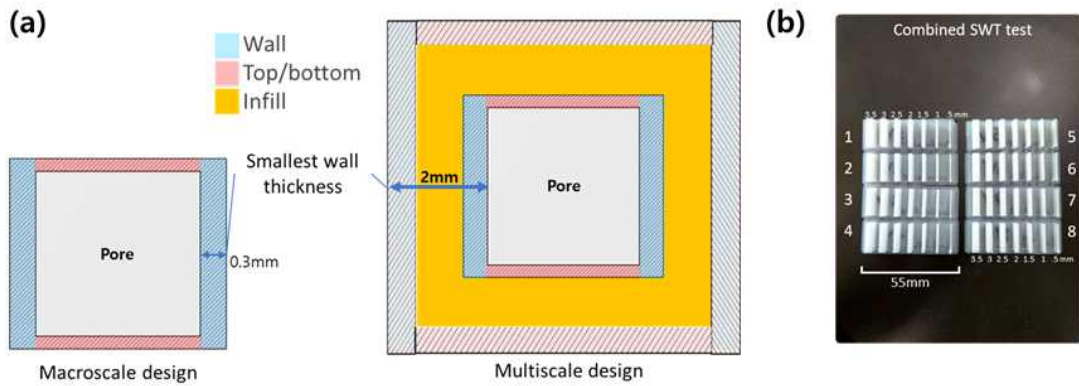


그림 14. (a) 프린팅 가능한 최소 두께 분석 기반 Macroscale 및 Multiscale 구조설계 방안. (b) Infill pattern별 임계밀도로 출력 시 프린팅 가능한 최소두께 분석(표 .에 번호 기입)

그림 15.와 같이 열전도도 RVE 해석모델을 구축하였으며, 0 °C와 50 °C를 Boundary condition으로 설정하고 측면에 단열 경계조건을 부여하여 RVE 모델의 형상 및 치수별 단열성능을 평가하였음. RVE 형상의 경우 구형과 정육면체를 나누어 설계하였으며, 각각의 Macroscale porosity를 변수로 구조해석을 진행하였음.

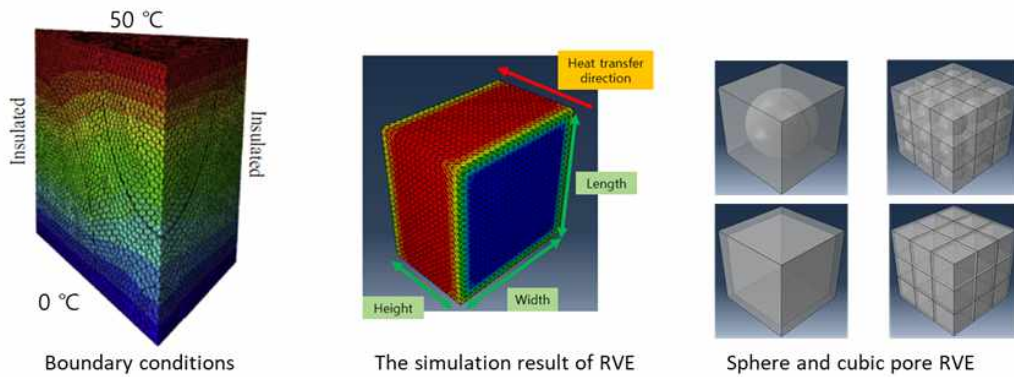


그림 15. 열전달 해석 대표단위 셀(Representative volume element, RVE) 모델 및 RVE 형상

그림 16.과 같이 구조해석에 기반한 RVE 모델의 단열해석 결과, 기공율이 커질수록 ETC가 선형적으로 감소하는 것을 확인하였음. 또한 구형 대비 Cubic이 Porosity 구현이 비교적 쉬워, 최소 열전도도가 약 50% 수준(0.07 W/mK)으로 단열성능을 약 200% 향상시킬 수 있는 것을 정량적으로 분석하였음. 따라서 타 형상 대비 단열 특성이 탁월한 직육면체 형상의 치수를 최적화하기 위해, 직육면체의 부피, 직육면체의 치수(너비, 길이, 높이)를 설계변수로 설정하고 프린팅 가능한 형상 및 두께를 제한조건으로 설정하여 열전달 해석을 진행하였음.

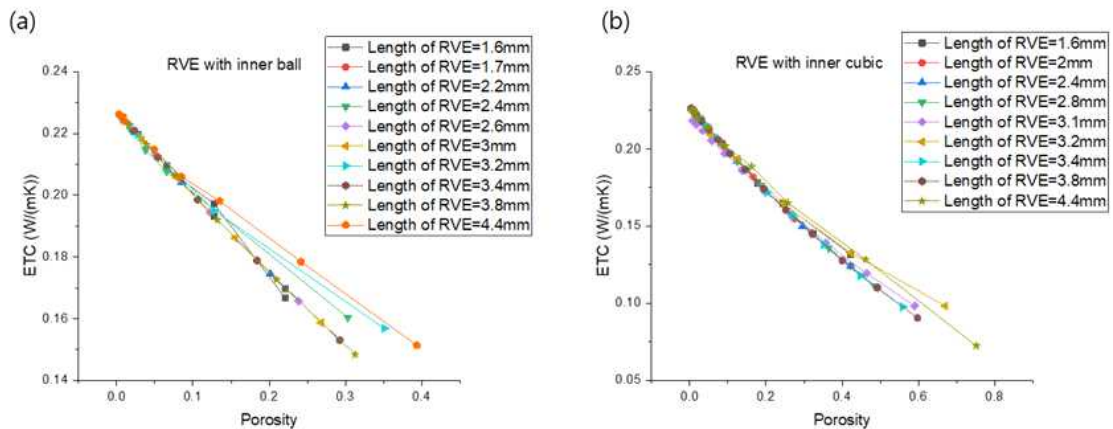


그림 16. 구조해석 기반 RVE 모델의 치수 및 Porosity에 따른 (a) 구형 및 (b) 정육면체의 열전도도(Equivalent thermal conductivity, ETC) 평가

본 연구진이 개발한 신뢰성 있는 열전달 해석모델(오차율 10% 이내) 기반 열전달 해석을 진행하여 그림 17.과 같이 직육면체 부피(27, 36, 48, 64 mm³) 및 치수(너비, 길이, 높이)별 열전도도(ETC)를 계산하였음. 데이터 분석 결과, 같은 직육면체 부피 하에서 너비/길이가 크고 높이가 작아질수록 열전도도가 감소하는 것을 파악하였음. 이는 열을 가하는 방향과 동일한 방향의 높이는 작고 열(Heat flux)이 흐르는 방향과 직각인 너비/길이가 클수록, 공기가 열을 방해하는 정도가 커져 열전도도를 감소시키고 이는 단열 성능을 향상시키는 것을 사료됨.

본 연구에서 표 5.와 같이 열전달 해석을 기반으로 각 직육면체의 부피별 최적의 길이/너비/높이를 도출하였고, 각 출력물의 출력 시간을 분석하였음. 출력 시간을 분석한 결과 300x300x15 mm³ 시편 기준 27 mm³의 RVE 부피를 지닌 단열재가 약 36시간으로 제일 많은 시간이 소요되었기에, 출력시간 단축을 위해 동일한 너비 및 길이로 RVE 모델을 설계하여 출력시간을 16시간으로 단축하였음. 해석 및 실험 분석 결과 최적화된 치수 대비 약 0.0605 W/mK의 열전도도로 약간의 단열성능이 저하되었으나, 약 44.44%의 출력시간을 단축하여 본 연구에서 개발한 치수로 단열재를 3D 프린팅 함.

- * 27 mm³ 부피를 지닌 Macroscale RVE 모델의 최종 너비/길이: 3.67 mm, 높이: 2 mm
- 64 mm³ 부피를 지닌 Macroscale RVE 모델의 최종 너비/길이: 5.66 mm, 높이: 2 mm
- 27 mm³ 부피를 지닌 Multiscale RVE 모델의 최종 너비/길이: 7.3/6.86 mm, 높이: 5.4 mm

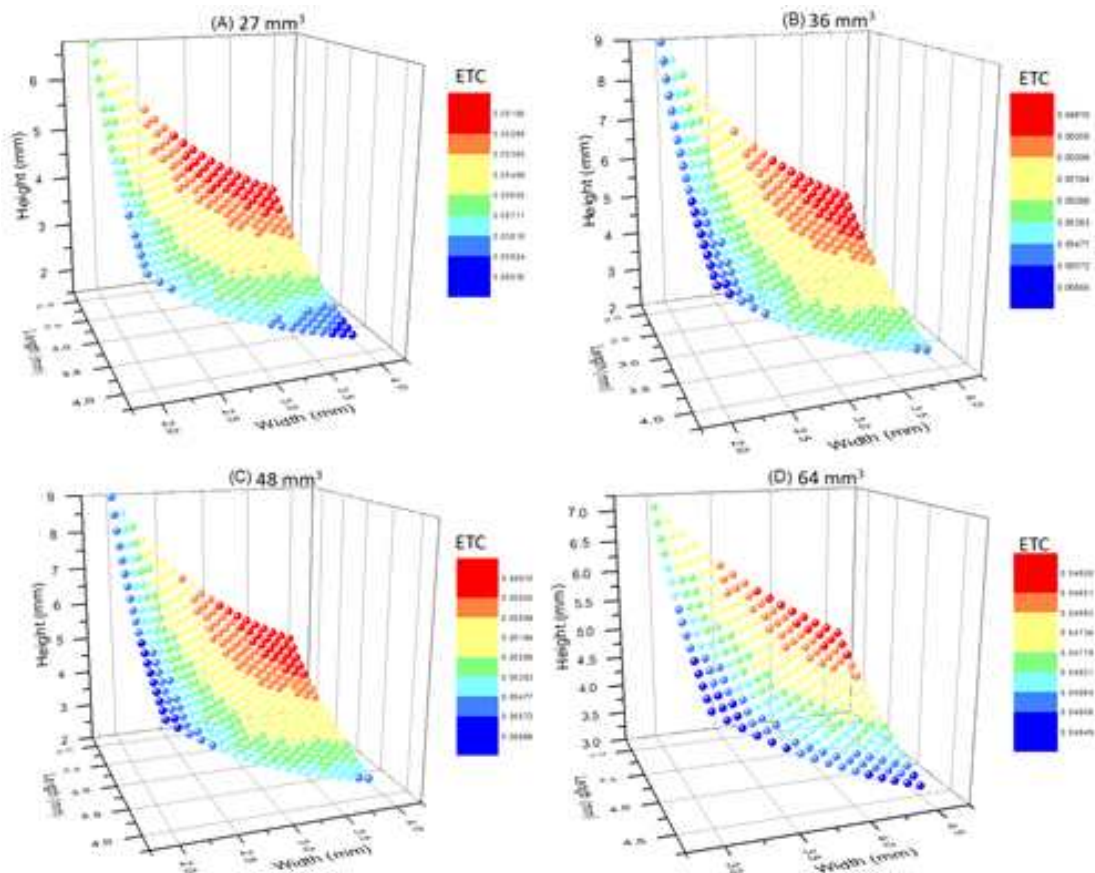


그림 17. 열전달 해석 기반 (a) 27, (b) 36, (c) 48, (d) 64 mm³ 직육면체의 부피에 따른 RVE 모델의 너비/길이/높이 설계 및 열전도도(ETC) 평가

- 3D 프린팅용 Multiscale 설계를 통한 HIPS 단열재 제작 및 단열 성능평가

앞서 설계된 단열재를 그림 18.과 같이 FDM 방식 3D 프린터로 출력한 후, 단열재 출력물들의 단열 성능을 한국고분자시험연구소에서 평가하였음. 표 5.와 같이 Macroscale 단열재의 RVE 모델의 부피가 증가할수록 기공율이 증가하여 단열성능이 향상되는 것을 확인하였음. Multiscale 단열재의 경우 Infill pattern이 구현된 벽의 두께가 2 mm로 Macroscale 단열재의 벽 두께(0.3 mm)에 대비해 두꺼워 단열 성

능이 Macroscale 단열재 대비 저하된 것을 확인하였음.

Macroscale design으로 27 mm³의 부피로 설계된 단열재 기준, 단열성능 지표인 열전도도는 목표 0.51 W/mK 대비 0.053 W/mK으로 정량적 목표에 약간 못 미치는 것을 확인하였음. 이는 FDM 방식 3D 프린팅 특성 상 노즐 크기 및 프린팅 가능한 최소두께에 제한이 있기에 보다 작은 RVE 모델링이 어려워, 기존의 HIPS foam 대비 단열 성능이 약간 못 미치는 것으로 사료됨. 또한 기존 단열재에 활용되는 프레온계 발포제를 활용하지 않고 공기층으로 단열층을 형성하였기에 기존 단열재의 단열성능은 못 미치나, 기존 단열재 대비 기계적 강도도 높고, 프레온 가스를 활용하지 않아 환경친화적이며 반영구적으로 활용 가능하다는 이점이 있음.

표 5. 해석 기반 직육면체 부피(27, 36, 48, 64 mm³)별 최적화된 치수(길이, 너비, 높이) 및 열전도도(ETC)

Unit	Volume mm ³	Height mm	Width mm	Length mm	Simulation-ETC W/mK	Experiment-ETC W/mK	Error %	Note
Macroscale model	27	2	3.9	3.46	0.0605			Optimization
	27	2	3.67	3.67	0.0605	0.0608	0.55	Improved printing time
	27	3	3	3	0.0655			
	36	2	3.9	4.62	0.0562			Optimization
	48	2	4.4	5.45	0.0530			Optimization
	64	3	4.5	4.74	0.0526			Optimization
	64	2	5.66	5.66	0.0496	0.0534	7.04	Improved printing time
Multiscale model	27	2	3.9	3.46	0.0765			Optimization
	27	2	3.67	3.67	0.0765	0.0765	0.10	Improved printing time
	27	3	3	3	0.0780			
	36	2	3.9	4.62	0.0740			Optimization
	48	2	4.4	5.45	0.0716			Optimization
	64	3	4.5	4.74	0.0700			Optimization
	64	2	5.66	5.66	0.0689			Improved printing time
	64	3	4.62	4.62	0.0698			

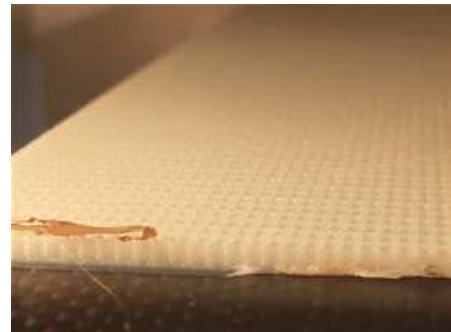


그림 18. 300x300x13 mm³ 치수로 Macroscale로 설계된 단열재의 3D 프린팅 공정

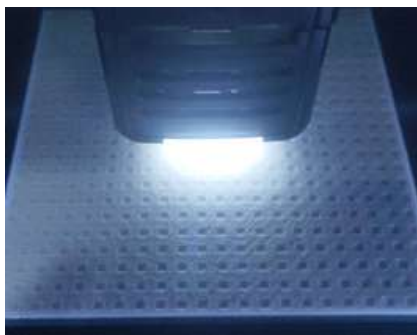


그림 19. 300x300x13 mm³ 치수로 Multiscale로 설계된 단열재의 3D 프린팅 공정

그림 20. 단열성능 평가를 위해 설계된 단열재 출력물들

표 6. 최종 선정된 64 mm³의 Macroscale RVE 부피를 지닌 단열재의 단열 성능평가

시료명	Run	두께 (cm)	측정온도 (°C)	온도차 (°C)	Thermal conductivity (W/(m·K))
Koptri- 21-08-19816-2	1	1.418	24.6	20.6	0.053 4
	2	1.418	24.5	20.6	0.053 5
	3	1.418	24.5	20.6	0.053 5
	SD	-	0.07	0.02	0.000 1
	CV (%)	-	0.28	0.07	0.14
	평균	1.418	24.5	20.6	0.053 5

SD : Standard deviation

CV : Coefficient of variation=(SD/average)x100

1차년도에 확보한 3D 스캐닝 활용 3D 프린팅한 시편의 품질평가 기술을 기반으로 시편의 변형 정도를 정량적으로 분석하였음. 본 연구진이 확보한 3D 스캐닝 기반 역설계 기술의 신뢰성은 그림 20.와 같이 다양한 치수를 지닌 블록과 3D 스캐닝한 모델의 치수를 비교분석한 결과 약 5% 이내의 오차율을 보였음. 본 3D 스캐닝 기술을 활용하여 그림 22.와 같이 제조한 단열재의 치수와 형상을 분석한 결과, 전 구간에서 1 mm 이하의 변형률을 보이는 것을 확인하였음. 이는 FDM 방식 노즐의 해상도를 고려해보았을 때 허용 가능한 공차로 사료됨.

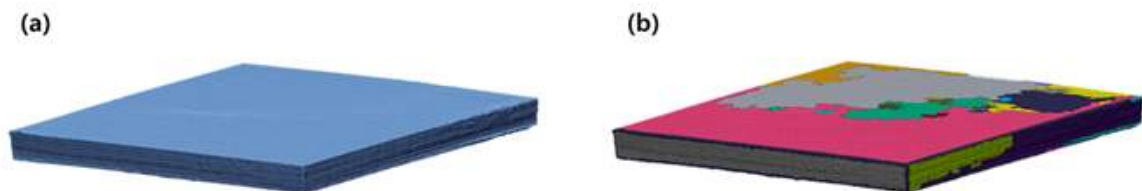


그림 22. 설계된 단열재의 (a) 3D 스캐닝한 모델 및 (b) 역설계 기반 변형 형상/변형량 평가

본 연구에서 설계한 3D 프린팅 공정 및 다공성 구조를 IEMA 프린터 장비에서 출력하였을 뿐만 아니라 다양한 FDM 방식 3D 프린터 장비를 활용하여 구현도를 검증하였으며, 검증 결과 동일한 노즐의 직경(0.4 mm)과 필라멘트를 사용한다면 모든 FDM 방식 장비에서 제조 가능한 것을 확인하였음.

* 본 연구에서 사용한 FDM 방식 3D 프린터 장비들

- Cubicon Style: 150x150x150 mm³
- Cubicon Single: 190x240x150 mm³
- Cubicon Dual Pro: 300x300x200 mm³
- IEMA: 310*310*480 mm³



그림 23. 본 연구에서 3D 프린팅 시스템 검증용으로 활용한 FDM 방식 3D 프린터 장비 리스트

○ 난연 특성을 지닌 3D 프린팅 가능한 준불연 복합소재 개발 및 난연성 평가

- 난연 특성을 지닌 무기수산화물(MOSw) 개발, 제조 및 물성 확보

복합소재 역학에 기반하여 복합소재의 기계적 강도를 예측하고 최적화하기 위해서는 복합소재의 구성 성분의 기초물성을 확보하는 것이 중요함. MOSw의 기초물성 확보를 위하여 SEM(Scanning Electron Microscope)을 활용하여 그림 24.와 같이 중형비를 비교 분석하였음. MOSw의 경우 중형비가 56:1로 긴 섬유형상 형태임을 확인함. MOSw 열중량 분석(RT-1200° C, 10° C/min) 결과, 세 차례의 질량감소 거동을 보였음. 첫 번째 질량감소는 MOSw의 결정수의 탈수반응으로 인한 감소를 나타내며, 두 번째 질량감소는 MOSw 표면의 OH기의 탈수반응으로 인한 감소이며, 마지막 세 번째 질량감소는 SiO_2 의 증발로 인한 감소를 의미함.

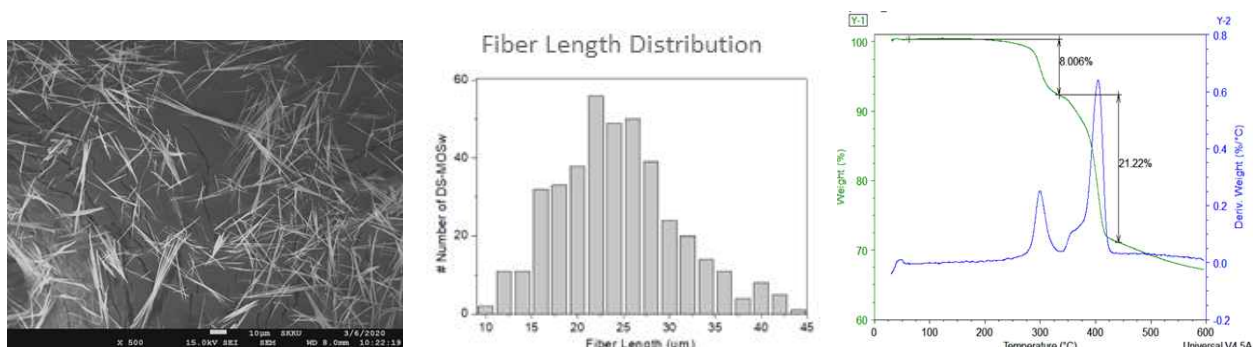


그림 24. (왼쪽) MOSw SEM 이미지 분석 (중간) MOSw 형태학적 분석 (오른쪽) MOSw 수분함유량 TGA 분석

- MOSw 활용 V-0급 유기복합소재 개발 및 난연 성능 확보

난연시험은 UL-94 시험 기준에 따라 진행하였음. 난연시험 시편에 불꽃을 10초간 점염 후, 불꽃이 소 화되기까지 걸리는 시간을 t_1 , t_2 를 측정하였음. 난연시험에서 소화되기까지 걸리는 시간이(t_1 , t_2) 짧을수록 난연성이 우수한 소재임. MOSw/ABS 복합소재 난연시험 시편을 제작하여 난연시험을 진행한 결과, 70wt% 함량에서 V-0등급 기준을 만족하였음.

- ABS 소재 적용 대비 PK 변경으로 인한 연구 결과 비교

복합소재의 연소거동을 분석할 수 있는 콘칼로리미터 시험을 시행하였음. 같은 난연제 필러 함량 (20wt%) 함침 결과, PK는 ABS 대비 최대열방출률(Peak Heat Release Rate, PHRR) 및 총방출열량(Total Heat Release, THR)의 수치가 월등히 낮음을 확인하였음.



그림 25. (상단) 현재 개발 중, (하단) 타 유기난연제 사용 V-0급 난연 복합소재의 수직난연시험

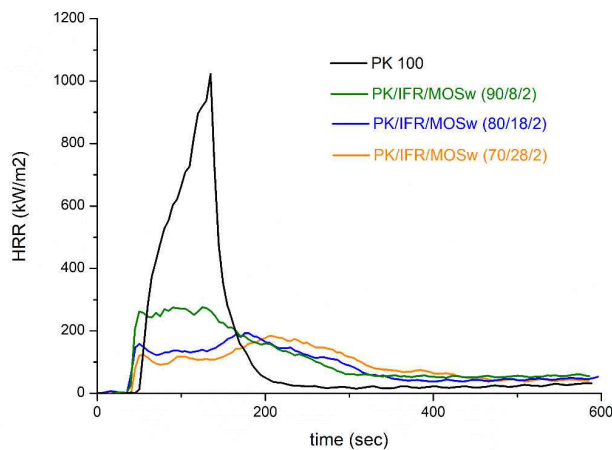


그림 26. PK composite 열방출률 curve

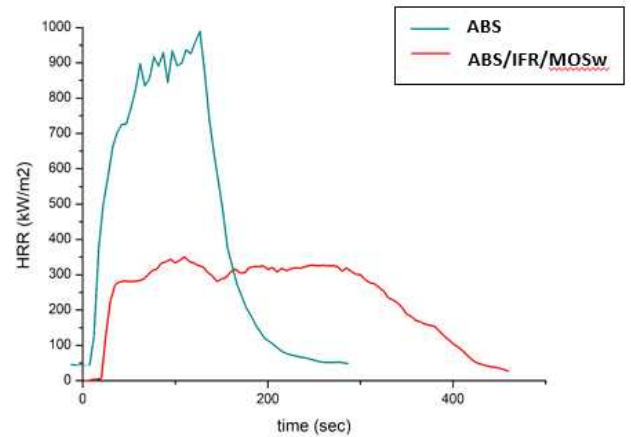


그림 27. ABS composite 열방출률 curve

폴리케톤(Polyketone, PK)의 경우 연소 시 케톤($C=O$)기와 수소가 반응하여 물이 생성되면서 Char를 형성하게 되고, 생성된 Char layer가 산소와 열을 차단하여 난연성을 부여함. 이에 본 연구진은 1차년도 때 달성 어려움이 있던 총방출열량 $8MJ/m^2$ 이하의 수치를 달성하기 위하여, 기존 ABS보다 난연성을 증대시킬 수 있는 PK로 수지를 변경하였음.

- PK/MPP/PER/MOSw 복합소재 개발

1차년도에서 개발한 친환경 무기계 난연제인 MOS whisker와 더불어, 난연성을 더욱 극대화시키기 위하여 IFR(Intumescent Flame Retardants) System을 이루는 MPP(Melamine Polyphosphate) 및 PER(Pentaerythritol)을 하이브리드 필러로 첨가하였음. IFR 하이브리드 난연제 첨가를 통해 연소 시 Char 형성을 촉진시키는 효과를 확인할 수 있었고, MOSw 첨가를 통해 연소 시 물 방출을 통해 자기소화성을 가지는 난연 효과를 확인하였음. MPP와 PER의 IFR system 메커니즘은 그림 28.과 같음.

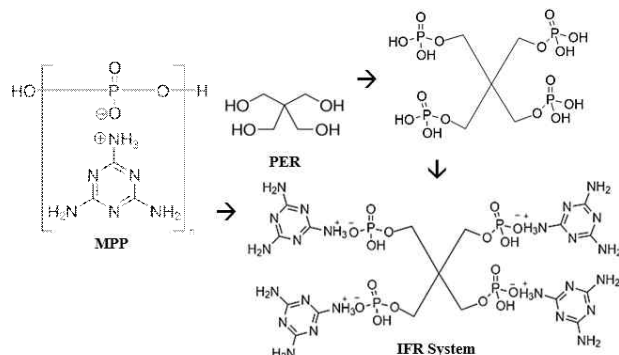
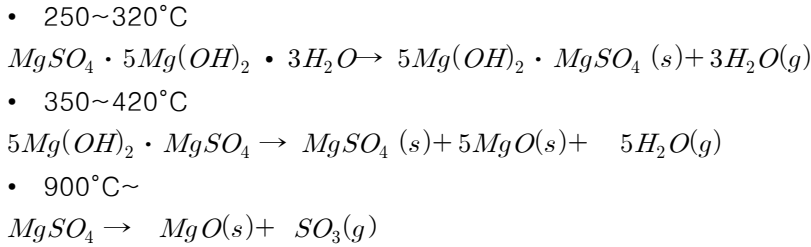


그림 28. MPP와 PER의 IFR system을 통한 Char 형성 메커니즘

MOSw의 난연 메커니즘은 식 (1)과 같음.



식 (1). MOSw 난연 메커니즘

본 연구에서는 Haake Rheometer을 사용하여 220°C, 10분동안 PK/MPP/PER/MOSw를 고르게 혼련한 뒤, Hot Press를 사용하여 210°C에서 100mm*100mm*3mm의 Cone Calorimeter Test(CCT) 시편을 제작하였음. 이때 MPP와 PER의 함량은 2:1로 고정하였음.

- 열분석 및 기계적 특성 분석

난연제 함량별 복합소재의 열적 거동 및 가열 후 남은 질량비를 분석하기 위하여 TGA 열분석을 수행하였고, 질소 분위기 하에 10min/°C의 승온속도로 진행하였음. 순수 Polyketone의 연소 후 질량비(21%)에 비해 난연제를 함침한 복합소재의 연소 후 질량비(44~46%)가 월등하게 높음을 확인하였음. 이는 Char layer 형성에 중요한 요소로써, 난연제를 첨가한 복합소재가 Char 형성을 촉진시킴을 확인할 수 있었음. 또한, 복합소재의 열분해 온도가 약 273°C임을 확인하였음.

해당 복합소재의 기계적 특성 및 3D 프린팅 가능성 확인을 위하여 만능 재료 시험(Universal Testing Machine, UTM) 분석을 진행하였음. 난연제를 첨가한 복합소재의 경우 순수 Polyketone에 비해 인장강도와 탄성계수가 증가함을 확인하였으나, 신율(7.10%)은 감소하는 것을 확인하였음. 그러나 범용 3D 프린팅 소재인 PLA 소재 기준 신율 6% 이상 수치를 확보하였기 때문에, 3D 프린팅이 가능하다고 판단하였음.

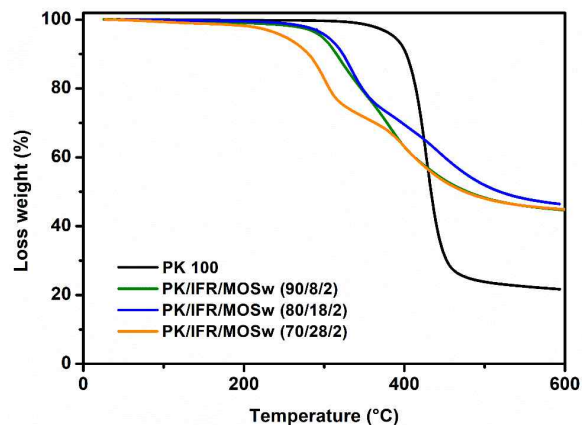


그림 29. PK/IFR/MOSw TGA curve

이에 흡음 및 난연 특성을 구현하기 위한 필러 함량 20wt%의 복합소재를 기반으로 3D 프린팅용 필라멘트를 제작하였음.

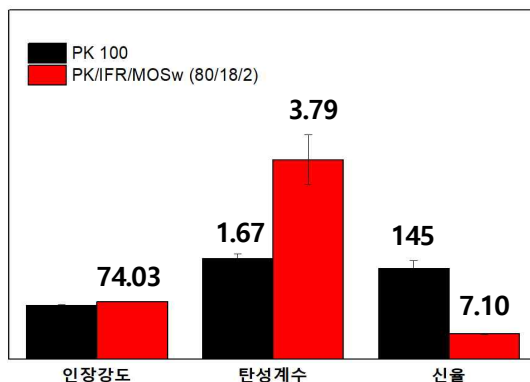


그림 30. PK/IFR/MOSw의 기계적 물성



그림 31. PK/IFR/MOSw 복합소재의 3D 프린팅용 필라멘트

- 준불연 성능 시험을 위한 총열방출량 분석

준불연 성능을 시험하기 위한 복사열 50kW/m² 조건에서의 Cone Calorimeter Test(CCT) 시험을 수행하였음. 실제 현업에서도 폴리머 표면 위에 알루미늄 판재를 사용(eg. LG 하우스시스 PF보드 단열재)하여 시험을 진행하기에, 본 연구진도 PK/IFR/MOSw 표면 위에 알루미늄 판재를 덮어 시험을 진행하였음. 시험 결과, 필러 함량 20wt% 이상부터 최대 열방출률(Peak Heat Release Rate, PHRR) 10초 이상, 200kW/m²을 초과하지 않는다는 준불연 기준을 달성하였음. 또한 KS F ISO 5660-1 규격에 의하여 총열방출량(Total Heat Release, THR) 8MJ/m² 이하의 수치를 달성할 수 있었음.

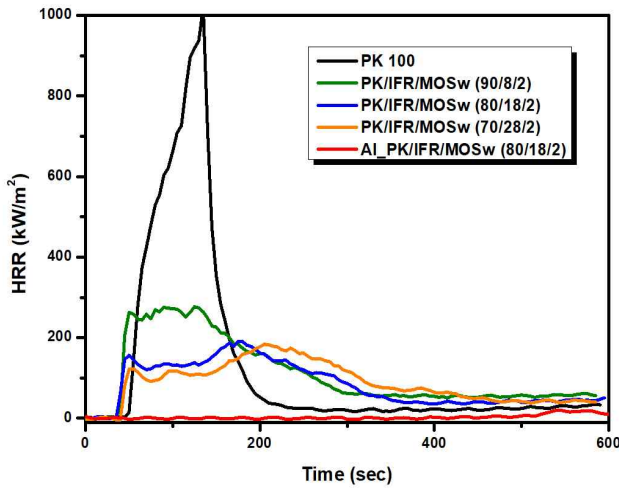


그림 32. PK/IFR/MOSw 열방출률 curve

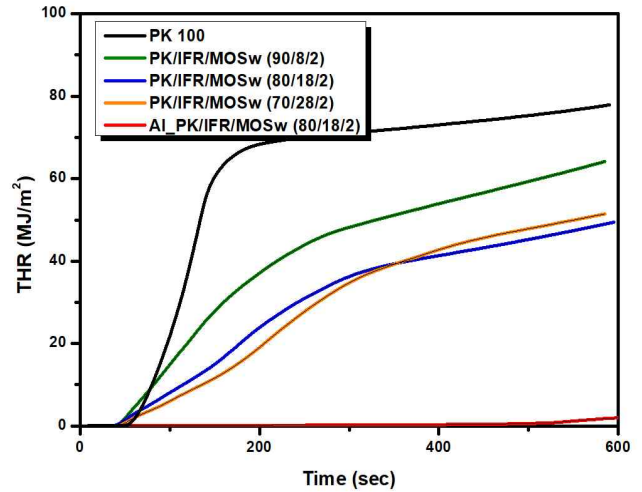


그림 33. PK/IFR/MOSw 총열방출량 curve

표 7. PK/IFR/MOSw 콘칼로리미터 시험 결과

Sample	PK (100)	PK/IFR/MOSw (90:8:2)	PK/IFR/MOSw (80:18:2)	PK/IFR/MOSw (70:28:2)	Al PK/IFR/MOSw (80:18:2)
Time to ignition (s)	51	42	41	44	553
PHRR (kW/m ²)	1022.56	276.95	190.26	183.88	19.93644
THR (MJ/m ²)	77.79	64.03	49.23	51.40	1.139399
Ave.HRR (kW/m ²)	144.68	117.50	88.56	94.80	16.85576

콘칼로리미터 시험 후 연소된 시편의 형상을 살펴보면, 순수 Polyketone은 Char 표면을 형성하지 못하고 용융현상이 발생하였음. 또한 난연 필러 함량이 높아질수록 차르 표면의 물성이 강화되는 것을 확인하였음.

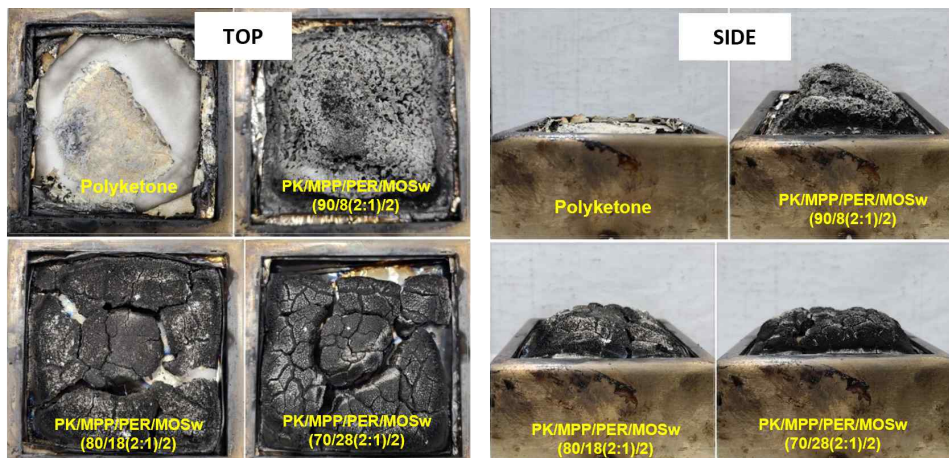


그림 34. 콘칼로리미터 연소시험 후 형성된 PK/IFR/MOSw 복합소재의 Char layer

Char 표면에 구멍이나 균열이 존재하면 가연성 증기나 산소가 투과하며 화재를 더 크게 전파시킴. 따라서 Porosity가 낮을수록 단단한 차르 표면을 형성할 수 있어 난연성이 증가함. 연소 후 Char 표면의 SEM 분석 결과, 필러 함량 10, 30wt%의 복합소재는 차르 표면에 pore가 발생하여 산소투과를 막지 못해 난연성이 감소하는 것을 확인할 수 있음. 이에 비해 필러 함량 20wt% 복합소재의 경우, 균일한 Char 표면이 형성되어 가연성 증기의 발생 및 전파를 억제하였음. 이에 본 연구진은 PK/MPP/PER/MOSw (80/18(2:1)/2)에서 최적의 난연성 및 준불연 성능을 확보하였음.

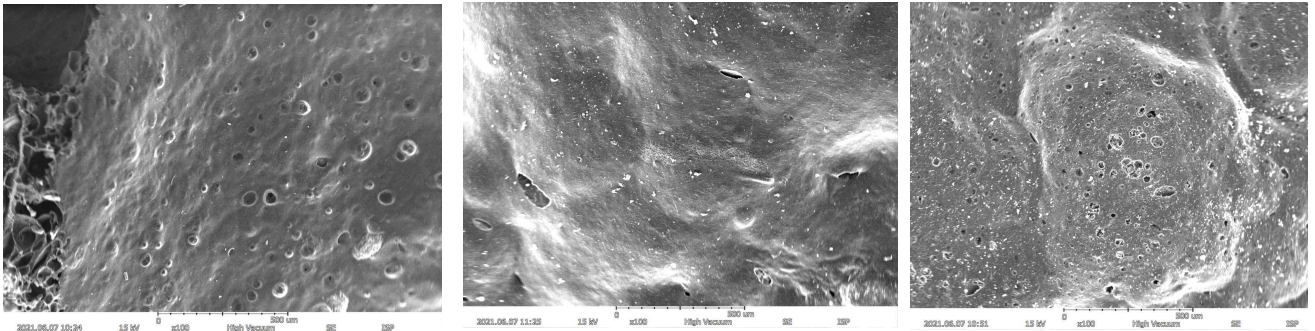


그림 35. (왼쪽부터) 필러 함량 10, 20, 30wt% PK/IFR/MOSw SEM image

- 준불연 성능 시험을 위한 가스유해성 분석

준불연 성능을 시험하기 위해 KS F 2271 규격의 가스유해성 시험을 진행하였음. 본 연구진은 함량 최적화된 PK/MPP/PER/MOSw (80/18(2:1)/2) 복합소재의 시험용 흰 쥐 평균 행동 정지시간을 시험하였고, 시험 결과, 1회 09분 08초, 2회 09분 05초로, 준불연 달성기준 9분 이상 수치를 확보하였음.

표 8. 가스유해성 시험결과 (시험체 1)

회전상자	정지시간
M1	08 min 37 s
M2	11 min 58 s
M3	10 min 36 s
M4	09 min 44 s
M5	09 min 56 s
M6	10 min 17 s
M7	09 min 19 s
M8	09 min 57 s
평균값	10 min 03 s
표준편차	00 min 55 s
평균행동정지시간	09 min 08 s

표 9. 가스유해성 시험결과 (시험체 2)

회전상자	정지시간
M1	09 min 04 s
M2	09 min 41 s
M3	09 min 34 s
M4	09 min 13 s
M5	09 min 05 s
M6	09 min 48 s
M7	10 min 15 s
M8	09 min 11 s
평균값	09 min 29 s
표준편차	00 min 24 s
평균행동정지시간	09 min 05 s

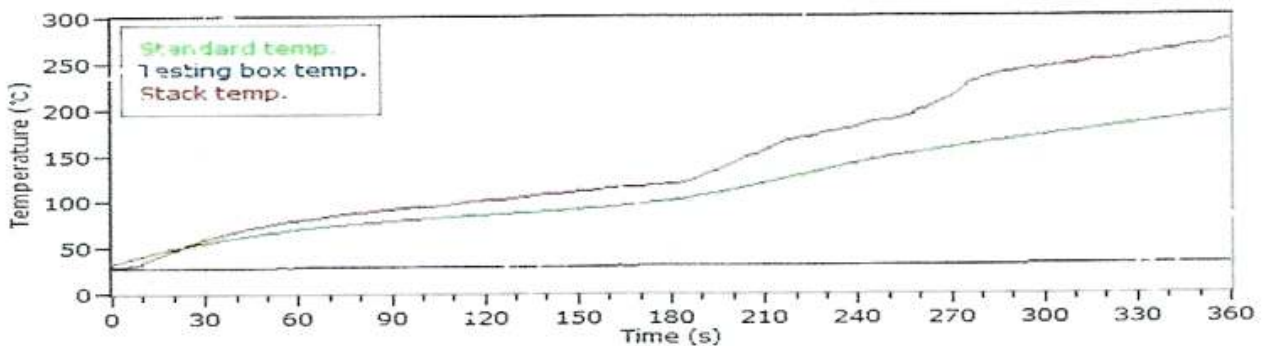


그림 36. 가스유해성 시험결과 (시험체 1)

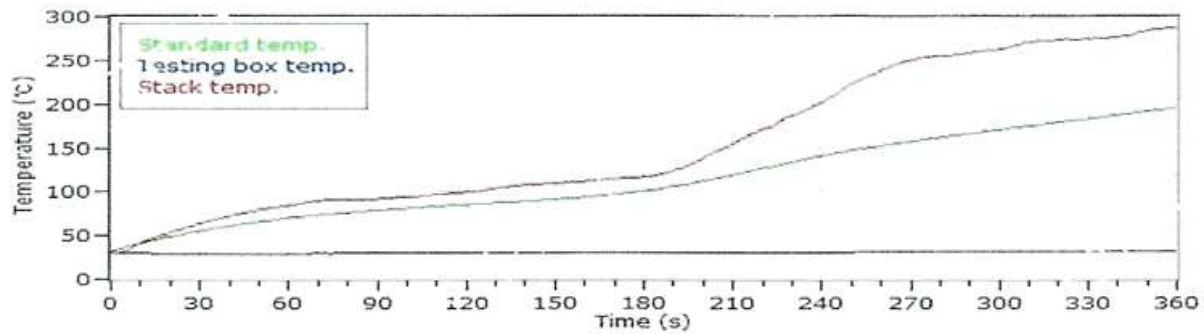


그림 37. 가스유해성 시험결과 (시험체 2)

○ 흡음 특성을 지닌 3D 프린팅 외부구조 설계 및 흡음 평가

- 흡음 특성을 지닌 외부구조 개발

본 연구에서는 흡음 특성에 탁월한 Open-cell 구조를 개발하기 위해 다양한 종류의 Open-cell 구조를 그림 38.과 같이 모델링하고 3D 프린팅 가능여부를 사전에 분석하였음. FDM 방식 3D 프린팅은 노즐에서 고온으로 필라멘트를 압출하여 적층하는 방식이기에, Overhang 구조가 발생할 시 Support 제작이 필수적이게 됨. 따라서 본 연구에서는 FDM 방식 3D 프린팅의 특성을 고려하여, Support가 필요 없는 Open-cell 구조를 그림 .와 같이 6가지 종류(SC+OR, SC8+DGR+BCC2, SC8+FCC+BCC, Cubic+octet truss, Poroelastic foam, Nevius)를 선정하였음.

본 연구진이 제안한 위 3가지 격자구조(SC+OR, SC8+DGR+BCC2, SC8+FCC+BCC)는 Simple cubic (SC) 구조에 기반하여 다양한 종류의 격자구조를 모델링하였음. 그 외의 3가지 격자구조(Cubic+octet truss, Poroelastic foam, Nevius)는 현재까지 보고된 자연모방 및 메타구조에 기반하여 모델링하였으며, 위 구조들은 동일한 30%의 부피비를 지니도록 설계하였음.

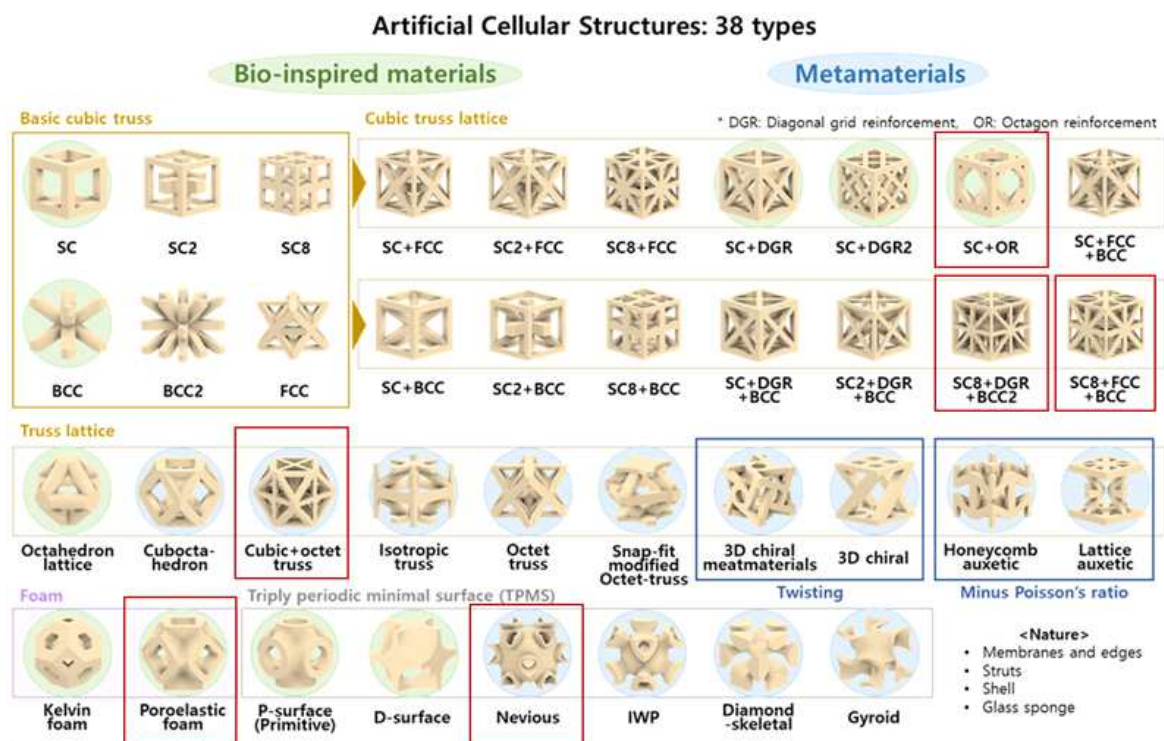


그림 38. 동일한 30% 부피비로 모델링한 자연모방 및 메타구조(빨간색: FDM 방식 3D 프린팅 가능한 구조)

흡음성능 평가를 위해 ISO 10534-1 & 2 규격에 기반하여 Impedance tube용 원통형 시편(직경 60 mm, 높이 30 mm)을 그림 39.와 같이 제작한 후 흡음성능 평가를 진행하였음. 각 구조별 주파수 대역(250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz)에서의 평균 흡음특성(The noise reduction coefficient, NRC)을 정량적으로 분석하기 위해, 그림 .와 같이 125~800 Hz 대역에서는 0번 2번에 마이크를 설치하고, 400~2500 Hz의 주파수 대역에서는 1번 2번에 마이크를 설치하여 흡음률을 계산 및 분석하였음.

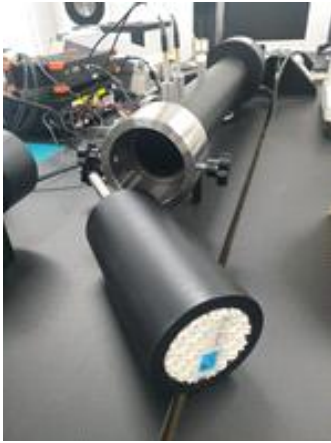
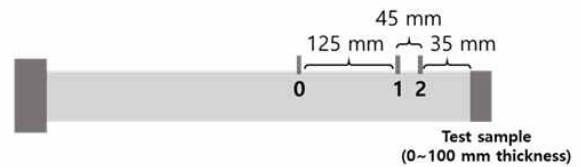


그림 39. 흡음 성능평가용 Impedance tube

Low frequency range (125~2500 Hz)
: 60 mm diameter tube



125~800 Hz ($s=0.165$ m, $L=0.035$ m, $d=0.06$ m)
Wide spacing medium tube: Mic0 & Mic2

400~2500 Hz ($s=0.045$ m, $L=0.035$ m, $d=0.06$ m)
Medium tube: Mic1 & Mic2

그림 40. Impedance tube 규격

각 구조의 흡음률 분석 결과 Cubic octet truss, SC8+FCC+BCC, SC+OR, Poroelastic foam, SC8+DGR+BCC2, Nevius 순으로 흡음이 잘 되는 것을 확인하였음. 그중 흡음률이 가장 뛰어난 Cubic octet truss는 0.334의 흡음률을 보이며 본 연구에서 외부구조의 흡음률 목표치로 설정한 0.262 이상을 달성하였음. Cubic octet truss의 경우 Band gap 현상이 발생하여 흡음을 특정 주파수대역에서 향상시킨 것을 확인할 수 있었음.

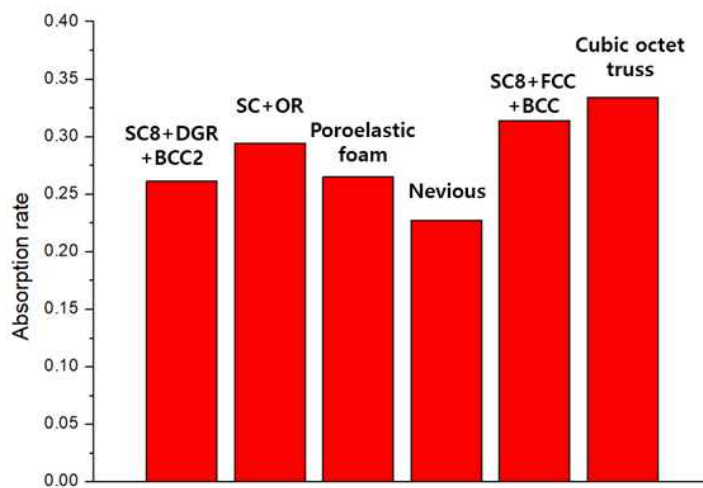


그림 41. 구조별 흡음률 비교

○ 연구계획 대비 추진율

[illegible]

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

○ 건축 '라' 등급의 단열 특성을 지닌 내부구조 개발

- 단열 특성을 지닌 고분자 필라멘트 제작 & 기계적/열적 물성 DB 구축
: HIPS의 밀도, 인장 물성, 점탄성 물성, 비열, 열확산도, 열전도도 구축 완료
- 고분자의 유변학적 거동을 고려한 HIPS 소재의 3D 프린팅 공정조건 최적화
: 낮은 열전도도를 지닌 HIPS 소재의 3D 프린팅 공정조건(220 °C의 노즐온도, 70 mm/s의 프린팅 속도, Cubic의 Infill pattern 및 83%의 Infill density) 개발
- 다공성 구조별 약 1,700 종류의 열전달 해석 및 해석 기반 단열재 설계/제작

○ 준불연급 난연 특성을 지닌 3D 프린팅 가능한 복합소재 및 흡음 특성을 지닌 외부구조 개발

- 무기수산화물인 MOS whisker 난연재의 물성 DB 확보
: 복합소재의 열적 특성 구축 완료
- 준불연급 복합소재 개발
: MOSw 활용 V-0급 난연 최고등급의 복합소재 개발
: 필러함량 40% 이하에서 난연성능 확보를 위해 기존 ABS 수지에서 PK 수지로 변경
: 기타 하이브리드 난연 첨가제 컴파운딩을 통한 준불연급 소재(PK/MPP/PER/MOSw (80/18(2:1)/2)) 개발
- 난연 복합재료 프린팅을 위한 FDM 방식 3D 프린팅 공정조건(205 °C의 노즐온도, 60 mm/s의 프린팅 속도, 130 °C의 Build plate 온도) 개발
- FDM 방식으로 3D 프린팅 가능한 외부구조(Lattice, Nevious, Cubic+octet truss, SC8+FCC+BCC, Poroelastic foam, SC+OR, SC8+DGR+BCC2) 선별 후, 3D 프린팅 및 흡음특성 평가 완료

○ 3DP 소재·구조·공정을 동시 최적화한 3D 프린팅 시스템 구축 및 검증

- 설계한 3D 프린팅 소재 및 구조의 요구성능(단열, 난연, 흡음) 평가 완료
-

(2) 정량적 연구개발성과

○ 0.051 W/mK 이하의 단열 특성을 지닌 내부구조 개발

- 3D 프린팅한 출력물의 정량적인 품질평가를 위해 치수오차 5% 이내의 역설계 기법 확보 및 출력물들의 품질평가 완료
- HIPS 소재용 3D 프린팅 공정조건 및 구조를 설계하여, 본 연구에서 제안한 0.051 W/mK의 단열성능에 준하는 0.053 W/mK의 단열성능 확보

○ 최대 열방출률 200 kW/m² 이하, 가스유해성 9 min 이상, 총 방출열량 8 MJ/m² 이하의 난연 특성을 지닌 복합소재 및 0.262 이상의 흡음 특성을 지닌 외부구조 개발

- 본 연구를 통해 AL/PK/MPP/PER/MOSw (80/18(2:1)/2) 복합소재의 콘칼로리미터 시험을 통해 총방출열량 8 MJ/m² 이하의 수치를 달성하여 준불연급의 난연 성능 확보
 - 본 연구를 통해 PK/MPP/PER/MOSw (80/18(2:1)/2) 복합소재의 가스유해성 시험을 통해 시험용 흰 쥐 평균 행동 정지시간 9분 이상의 수치를 달성하여 준불연급의 난연성능 확보
 - 본 연구에서 개발한 PK/MPP/PER/MOSw (80/18(2:1)/2) 복합소재의 최대열방출을 분석 결과, 190.26 kW/m²으로 200 kW/m² 이하의 수치를 달성하여 준불연급의 난연성능 확보
 - 본 연구에서 FDM 방식으로 3D 프린팅 가능한 구조 개발 및 0.262 이상(0.334)의 흡음특성 확보
-

○ 정량적 연구성과(논문/특허/학회 등) 초과달성

- 본 연구진이 목표한 3건의 SCI 논문 대비, 3건의 SCI 논문 게재 완료 및 예정, 1건의 SCI 논문 리뷰 중으로 목표 (초과)달성
- 본 연구진이 목표한 3건의 특허출원 대비, 2건의 특허출원 및 1건의 특허등록으로 목표 초과달성
- 본 연구진이 목표한 3명의 석사와 1명의 박사 인력양성 대비, 1명의 박사(Sun Yan)와 4명의 석사(조승현, 류경식, 유정욱, 김초원) 인력양성으로 목표 초과달성
- 정량적 목표에 없는 국내논문 3건을 Composities research에 게재 완료하여 목표 초과달성
- 정량적 목표에 없는 학회발표를 한국정밀공학회 및 한국복합재료학회에 8건의 구두 및 포스터 발표를 완료하여 목표 초과달성

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Layered Double Hydroxide Synthesis via Coprecipitation and Hydrothermal Reactions using MgO Precursor	nanomaterials	Byunggil Lim, Jinwoo Lee	-	-	MDPI	SCIE	- (게재 예정)	2079-4991	50
2	Particulate-reinforced iron-based metal matrix composites fabricated by selective laser melting: A systematic review	Journal of Manufacturing Processes	Yongjian Fang	74	-	ELSEVIER	SCIE	2022.01.06	1526-6125	33
3	Experimental and numerical investigation of 17-4PH stainless steel fabricated by laser powder bed fusion and hot isostatic pressing	Materials Research Express	Jaehoon Bae, Min-kyeom Kim	8	-	IOP Science	SCIE	2021.10.12.	2053-1591	33
4	Polyamide-Nylon 6 Particulate Polycarbonate Composites with Extraordinarily Outstanding Energy-Absorbing Properties	Polymer	Min-Kyeom Kim, Hyung-Ick Kim	-	-	ELSEVIER	SCIE	- (리뷰 중)	0032-3861	50
5	전기자동차 배터리 모듈 커버의 3D	Composite Research	Jeong-Wook Yoo,	34	-	한국복합재료 학회	비 SCIE	2021.07.23.	2288-2111	50

	프린팅 제작을 위한 GF/PC 복합소재 필라멘트 설계와 3D 프린팅 공정 및 구조 최적화		Jin-Woo Lee							
6	기계적 메타물질 설계 및 제조방안	Composite Research	Min-Kyeom Kim	34	-	한국복합재료 학회	비 SCIE	2021.09.03.	2288-2111	50
7	레이저로 적층 제조한 금속 기지재 복합재료의 설계 및 제조 연구동향	Composite Research	Min-Kyeom Kim, Taehwan Kim	34	-	한국복합재료 학회	비 SCIE	2021.09.03.	2288-2111	50

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2021년도 추계 한국정밀공학학회	고무 소재 메타물질을 활용한 샌드위치 복합재료 진동/소음 평가	정효균	2021.11.24.	온라인	-
2	2021년도 추계 한국정밀공학학회	공정 조건에 따른 금속 적층 제조된 시편의 열변형량 예측 연구	김태환	2021.11.24.	부산 BEXCO	-
3	2021년도 추계 한국정밀공학학회	적층 제조한 Closed-cell 단열소재의 Bayesian 최적설계 연구	위안 취안	2021.11.24.	부산 BEXCO	-
4	2021년도 추계 한국정밀공학학회	고무 소재 메타물질의 압축 시 에너지 흡수 특성 연구	윤재원	2021.11.24.	온라인	-
5	2021년도 춘계 한국복합재료학회	3D 프린팅용 단열재를 위한 난연 특성 연구	윤혜정	2021.06.24.	온라인	-
6	2020년도 추계 한국복합재료학회	메타재료 활용 환자 맞춤형 인솔 개발	김민겸	2020.11.05.	온라인	-
7	2020년도 추계 한국복합재료학회	FDM 방식 적층제조 기반 난연 특성을 지닌 단열재 개발	김태환	2020.11.05.	온라인	-
8	2020년도 한국정밀공학학회 통합학술대회	3D 프린팅 메타재료의 주파수별 에너지감쇠 특성 연구	김민겸	2020.09.16.	온라인	-

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	특허	3D 프린팅용 잉크의 제조 방법 및 3D 프린팅용 잉크를 이용한 반투명성 전자파 차폐 구조물의 제조 방법	-	-	-	성균관대학교산학협력단	2021.08.26.	10-2296429	33	-
2	특허	특허	3D프린팅용 폴리젯산-리그닌 복합 재료 및 이의 제조 방법	성균관대학교산학협력단	2021.03.03.	10-2021-0028221	-	-	-	33	-
3	특허	특허	플루오렌 유도체 화합물의 합성방법	성균관대학교산학협력단	2021.10.13.	10-2021-0135671	-	-	-	25	-

2) 목표 달성 수준

구분	년도	성과목표	세계최고수준 ^{주)} (보유국/ 보유기관)	연구전 국내수준 ^{주)}	목표치	가중치 (%)	평가기준	달성치
최종목표	2021	우수한 단열, 흡음, 난연 특성을 지닌 최적화된 복합 단열재 출력	-	-	단열 성능(열전도율 $0.051 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), 흡음 성능(흡음율(NRC) 0.262 (30mm) 이상), 난연 성능(총방출열량 8 MJ/m^2 , 가스유해성 테스트 9 min)	100	보고서 내 개발된 단열재의 특성평가 정보	95%
1차년도	2020	3D 프린팅 된 ABS/MOSw, HIPS 재료 물성 DB 구축	-	-	열적물성(2), 기계적물성(2), 점탄성 물성(2)	5	보고서 내 구축된 물성 정보	100%
		3D 프린팅이 가능하며 우수한 난연 성능을 보이는 복합소재(ABS/MOSw) 개발	8	총방출열량 8 MJ/m^2	총방출열량 8 MJ/m^2	12.5	KS F ISO 5660-1	100%
			9	가스유해성 테스트 9 min	가스유해성 테스트 9 min	12.5	KS F 2271	100%
		3D 프린팅 공정조건 최적화를 통한 단순 다공성 출력물 구현	-	-	CAD 모델 대비 치수오차가 5% 미만인 형상 출력	15	역설계 프로그램 활용 치수 오차 정량적 분석	100%
2차년도	2021	선정된 3D 프린팅 가능한 복합소재(PK/IFR/MOSw, HIPS)로 다공성구조 구현	8	총방출열량 8 MJ/m^2	총방출열량 8 MJ/m^2	12.5	KS F ISO 5660-1	100%
			9	가스유해성 테스트 9 min	가스유해성 테스트 9 min	12.5	KS F 2271	100%
		최적화된 다공성 구조를 3D 프린팅하여 우수한 단열·흡음·난연 성능을 가진 단열재 개발	열전도율 $0.032 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	열전도율 $0.051 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	열전도율 $0.051 \text{ W/m} \cdot \text{K}$	15	KS M 3809	95%
			-	흡음율(NRC) 0.262 (30 mm)*	흡음율(NRC) 0.262 (30 mm)	15	KS F 2814-2	100%

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도(%)
○ 3D 프린팅 복합소재 및 공정 설계 - 3D 프린팅 된 ABS/MOSw, HIPS 재료 물성 DB 구축 - 3D 프린팅이 가능하며 우수한 난연 성능을 보이는 복합소재 (ABS/MOSw) 개발 - 3D 프린팅 공정조건 최적화를 통한 단순 다공성 출력물 구현	○ 난연 특성을 지닌 PK/IFR/MOSw 복합소재 개발 완료 - AL_PK/MPP/PER/MOSw (80/18(2:1)/2) 복합소재의 총방출열량 8 MJ/m^2 이하의 수치를 달성 - PK/MPP/PER/MOSw (80/18(2:1)/2) 복합소재의 가스유해성 시험에서 9분 이상의 수치와 총 방출열량 200 kW/m^2 이하의 수치 달성 ○ 소재별 3D 프린팅 공정조건 설계 완료 - HIPS 소재: $220 \text{ }^{\circ}\text{C}$의 노즐온도, 70 mm/s의 프린팅 속도, $115 \text{ }^{\circ}\text{C}$의 Build plate 온도 - 난연 복합소재: $205 \text{ }^{\circ}\text{C}$의 노즐온도, 60 mm/s의 프린팅 속도, $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$의 Build plate 온도	100%
○ 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동형 설계를 통한 단열재 개발 및 평가 - 선정된 3D 프린팅 가능한 복합소재(PK/IFR/MOSw, HIPS)로 다공성구조 구현 - 최적화된 다공성 구조를 3D 프린팅하여 우수한 단열·흡음·난연 성능을 가진 단열재 개발	○ 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동형 설계 기반 단열·난연·흡음 특성을 지닌 단열재 개발 완료 - 정량적 목표 0.051 W/mK의 열전도도에 준하는 0.053 W/mK의 열전도도 달성(정량적 목표달성을 위해 출력시편을 보완하여 재측정 진행 중) - 0.262 흡음률 이상(0.334)의 흡음 특성 달성	95%

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- **[목표미달]** 본 연구에서 목표한 단열 성능인 0.051 W/mK 의 열전도도에 준하는 0.053 W/mK 의 열전도도를 달성하여 목표 미달이 발생함.
 - 본 시편은 해석으로 예측한 단열 대비 낮은 단열 특성을 보여, 시편 사이 이격이 발생하여 단열 성능이 저하된 것으로 판단하여 위 문제점을 개선한 시편을 22.01.13 일자 기준 재측정 진행 중임.
 - 본 연구에서 개발한 단열재는 기존의 유해가스가 발생하는 단열재와 달리 프레온 가스를 활용하지 않아 환경친화적이며 프레온 가스가 누출되어 단열성능이 저하되는 문제가 없기에 반영구적으로 활용 가능하고, 기계적 강도도 비교적 높은 이점이 있음.
 - 하지만, 프레온 가스가 아닌 공기층을 형성하여 열을 차단하고 FDM 방식 3D 프린팅의 특성 상 구현 가능한 벽의 두께에 한계가 있기에 상용 발포 단열재의 단열 성능에 못 미치는 한계점이 있음.
- **[연구내용 변경]** 본 연구에서 점탄성 물성을 활용하여 소음해석을 진행하고자 하였으나, 분석 결과 건축자재 특성 상 외부 가진에 의한 소음발생 및 저감 특성보다 외부 소음의 흡음/차음 특성에 영향을 많이 받기에, 해석이 아닌 시험에 기반한 흡음 성능평가를 진행하였음.
 - 외부 소음의 흡음 특성 해석은 본 연구진이 제안한 진동/소음 해석과 다른 해석이기에, 본 연구진이 1차년도에서 구축한 점탄성/인장 물성은 활용하지 않았음.

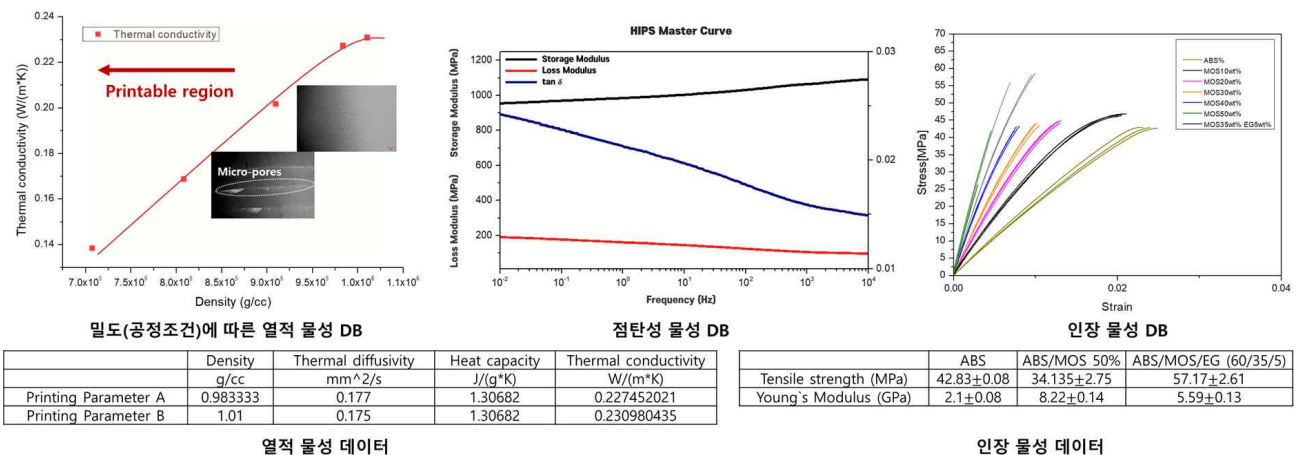
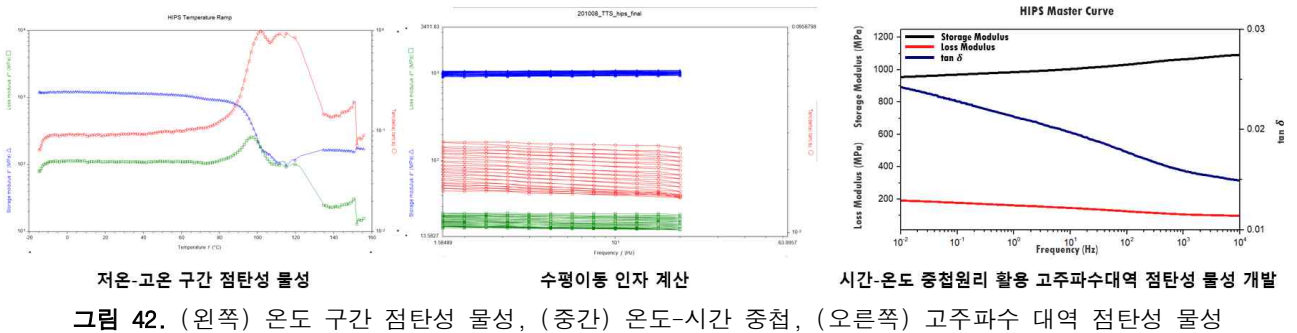


그림 43. (왼쪽) 열적물성 DB, (중간) 저-고주파수 대역의 점탄성물성 DB, (오른쪽) 인장물성 DB 대표 데이터

2) 자체 보완활동

- 앞서 언급하였듯이 본 시편은 시편 사이 이격이 발생하여 단열 성능이 저하된 것으로 판단하여 위 문제점을 개선한 시편을 22.01.13 일자 기준 재측정 진행 중임.
 - 해석이 아닌 시험에 기반하여 흡음 특성이 탁월한 Open-cell 외부구조 개발을 위해 여태까지 보고된 자연모방 혹은 메타구조를 모두 조사하였음. 또한 본 연구진이 제안한 구조도 포함하여 약 30여종을 FDM 방식 3D 프린팅성과 흡음 특성을 분석하였음.
-

3) 연구개발 과정의 성실성

- FDM 방식 3D 프린팅의 한계(낮은 해상도)를 극복하고자 연동형 설계를 적용하여 공정 및 구조로 최적화 작업을 진행함
 - 약 200여개의 공정조건별 시편 출력 및 물성/품질 테스트 후 최적의 공정 설계안 도출
 - 3D 프린팅 공정을 고려한 약 1700가지의 단열성능해석 진행 후 최적의 구조 설계안 도출
 - 30여종의 다양한 구조 모델링 및 FDM 방식 프린팅 가능성을 파악한 후, 프린팅 가능한 구조들의 흡음 성능 평가를 완료함.
-

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 기존의 유기단열재는 우수한 단열성능에도 불구하고 화재에 취약하다는 단점으로 인해 사용이 제한적이었음. 그러나 본 연구를 통해 단열특성이 향상된 Closed-cell 내부구조 및 흡음·난연 특성이 부여된 Open-cell 외부구조 구현으로 우수한 단열 특성을 지니면서 흡음, 난연 특성을 동시에 지닌 유기단열재 개발이 가능하였음.
 - 기존의 단열재는 발포·난연 특성 부여를 위한 시트 부착 등의 두 가지 이상의 공정을 거쳐야 하는 어려움이 있었는데, 본 연구진이 개발한 단열재는 3D 프린팅을 통한 한 가지 공정으로 단열재 형성이 가능하여 단가 절감 및 시간 단축의 효과를 도모할 수 있음.
 - 본 연구에서 제시한 연동형 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동형 설계기술은 건축용 단열재뿐만 아니라 다양한 건축자재 개발의 기반기술이 될 것으로 사료됨.
 - 본 연구성과를 통해 개발된 3D 프린팅 한 단열재는 할로겐계 난연제와 기존 유기단열재의 단열 성능을 위해 사용되고 있는 프레온계 발포제를 사용하지 않고, 난연 및 흡음 성능을 구현해 환경 친화적 단열제 제조와 연소 시 유독가스 발생을 줄일 수 있음.
 - 또한 발포제를 사용하지 않는 단열재 제작으로 단열이 반영구적으로 지속 가능하며, 향후 건축 자동화 시스템에서 건축 단열 설계의 자유도 제공(곡면 등 자유형상 적용) 뿐만 아니라, 이음매 없는 단열 시공을 통한 에너지 절감효과를 기대 가능함.
-

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

- 건축 3D 프린팅은 적층 방식을 사용하여 거푸집을 쓰지 않아 기존 공법에서 구현하기 어려웠던 비정형 건축물을 쉽고 빠르게 만들 수 있으며, 기존 절삭가공 방식에 비해 건축 폐기물이 나오지 않아 시공 단계에서 친환경적이고 경제적인 건축이 가능한 장점이 있음.
- 기존 발포형식으로 구현된 건축용 유기 단열재의 경우 연질품으로 강도가 필요한 곳에는 시공이 불가하거나 갈라짐 등의 문제가 발생하고, 무기 단열재의 경우 분진 발생 또는 습기나 자중에 의한 탈락 등의 성능 문제가 발생했었음. 그러나 본 연구진이 개발한 프린팅 소재·공정·구조 연동형 설계기술은 유기 단열재의 뛰어난 시공 용이성 및 무기 단열재의 준불연성의 장점을 모두 확보하였음.
- 본 연구기간 동안 HIPS 활용 3D 프린팅 단열폼 구조 및 준불연급 난연 특성이 부여된 3D 프린팅 소재 개발 및 DB 확보를 하였고, 이를 통해 흡음 및 단열 특성이 최적화된 폼 구조가 연구를 진행하였음. 향후 본 과제 연구 종료 후 산업에서 Scale-up 하여 향후 실제 건축 분야에서 활용 가능함.
- 본 연구에서 개발한 3D 프린팅 시스템 원천기술은 단열재 뿐만 아니라 흡음재, 기포콘크리트 등 다양한 건축부재 제작에 적용하여 향후 건설지능화 및 건설자동화에 기여 가능함.
- 하지만 현재 국내외 3D 프린팅 기술 수준을 고려해보았을 때, 제조 비용 및 시간의 한계가 존재하기에, 본 연구에서 개발한 단열재 및 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동형 설계기술이 산업체에 즉각 범용적으로 활용될 것으로 기대하기는 어려움. 그러나 향후 3D 프린팅 기술이 발전하고 건축 자동화 기술이 보급화 된다면 이에 맞추어 본 연구에서 개발한 다종특성을 지닌 단열재와 연동설계 기초기술(TRL 4)이 다양하게 활용 가능할 것으로 사료됨.
- 본 연구에서 개발한 성과물들(3D 프린팅용 난연 복합소재 및 연동형 단열재 설계기술)은 사업 종료 후 추가연구를 진행하여 수요기업 기술이전 의향서를 받은 (주)아이티캠, (주)쓰리디코리아, (주)성현산업에 소재, 장비/공정, 단열재 구조 등의 기초기술을 이전하고자 함.
- 본 연구를 통해 개발된 3DP 소재·구조·공정 연동형 설계 시스템을 실제 단열재 제작에 활용하기 위해, 건축용 3D 프린터에 삽입할 수 있는 형태로 연구개발된 난연 필라멘트 및 HIPS 소재의 가공이 필요하며 그림 44와 같이 소재에 대한 공정 최적화 및 흡음·단열 효과를 극대화하기 위한 구조 설계를 진행하여 산업 현장에 적용 가능할 것으로 사료됨.

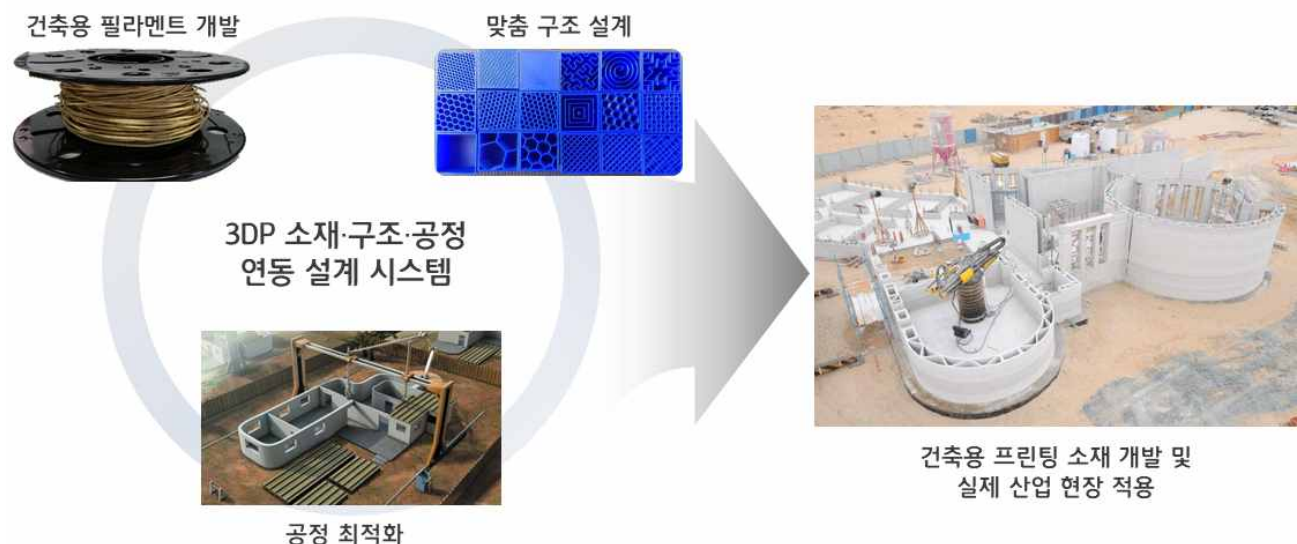


그림 44. 실제 산업 현장 적용을 위한 3DP 소재·구조·공정 연동 설계 시스템 개념도

< 별첨 >

별첨 자료

1. 참고문헌
2. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
3. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘흡음·난연 특성을 동시에 부여한 열전도율 $0.051\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 이하 건축용 단열재를 위한 3D 프린팅 소재·공정·구조 연동설계 시스템 기술 개발’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.