

최종보고서(일반과제용)										보안등급	
										일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부				사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업			
전문기관명	국토교통과학기술진흥원					내역사업명		국토교통기술혁신연구 (기반연구 유형)			
공고번호	공고-제05호				연구개발과제번호			21CTAP-C157265-02			
국가과학기술 표준분류	(EI0406)건설구조재료	50%	(EB0101)구조재료			30%	(EB0202)시멘트/콘크리트 /내화물		20%		
연구주제	(대분류) 융합기술을 통한 건설 지능화 실현			(중분류)건설 자동화			(소분류)3D 프린팅 건축· 건설 시스템				
연구개발과제명	국문	3D 프린터를 이용한 밀도제어형 인공경량골재 제조기술 개발									
	영문	Variable-density Artificial Aggregate Exhibiting 3D Printer									
주관연구개발기관	기관명	(재)한국건설생활환경시험연구원				사업자등록번호		317-82-03895			
	주소	(08503) 서울특별시 금천구 가산디지털1로199				법인등록번호		254322-0013138			
연구책임자	성명		박광민			직위		책임연구원			
	연락처	직장전화	02-2102-2751			휴대전화		010-8595-4538			
		전자우편	kmpark@kcl.re.kr			국가연구자번호		1100 7167			
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년9개월)									
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31(1년9개월)									
	2년차	2021. 01. 01 - 2020. 12. 31(1년)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그외기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
				지방자치단체 기타()							
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	370,000	5,350	48,150	-	-	-	-	375,350	48,150	423,500	-
1년차	160,000	5,350	48,150	-	-	-	-	165,350	48,150	213,500	-
2년차	210,000	-	-	-	-	-	-	210,000	-	210,000	-
공동연구개발기관 등	기관명		책임자	직위	휴대전화			전자우편		비고	
										역할	기관유형
	공동연구개발기관										
	위탁연구개발기관										
	연구개발기관 외 기관										
연구개발담당자 실무담당자	성명		박광민				직위		책임연구원		
	연락처	직장전화	02-2102-2751				휴대전화		010-8595-4538		
		전자우편	kmpark@kcl.re.kr				국가연구자번호		1100 7167		

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

2022 년 3 월 29 일

주관연구책임자 : 박광민 (인)

주관연구기관의 장 : (재)한국건설생활환경시험연구원 조영태 (직인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하

최종보고서(일반과제용)										보안등급	
										일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부			사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업				
전문기관명	국토교통과학기술진흥원				내역사업명		국토교통기술혁신연구 (기반연구 유형)				
공고번호	공고-제05호			연구개발과제번호		21CTAP-C157265-02					
국가과학기술 표준분류	(EI0406)건설구조재료	50%	(EB0101)구조재료	30%	(EB0202)시멘트/콘크리트 /내화물	20%					
연구주제	(대분류) 융합기술을 통한 건설 지능화 실현		(중분류)건설 자동화			(소분류)3D 프린팅 건축·건설 시스템					
연구개발과제명	국문	3D 프린터를 이용한 밀도제어형 인공경량골재 제조기술 개발									
	영문	Variable-density Artificial Aggregate Exhibiting 3D Printer									
주관연구개발기관	기관명	(재)한국건설생활환경시험연구원			사업자등록번호		317-82-03895				
	주소	(08503) 서울특별시 금천구 가산디지털1로199			법인등록번호		254322-0013138				
연구책임자	성명	박광민			직위		책임연구원				
	연락처	직장전화	02-2102-2751			휴대전화		010-8595-4538			
		전자우편	kmpark@kcl.re.kr			국가연구자번호		1100 7167			
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년9개월)									
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31(1년9개월)									
	2년차	2021. 01. 01 - 2020. 12. 31(1년)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계			연구개발비 외 지원금
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	
총계	370,000	5,350	48,150	-	-	-	-	375,350	48,150	423,500	-
1년차	160,000	5,350	48,150	-	-	-	-	165,350	48,150	213,500	-
2년차	210,000	-	-	-	-	-	-	210,000	-	210,000	-
공동연구개발기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고			
								역할		기관유형	
	공동연구개발기관										
	위탁연구개발기관										
연구개발기관 외 기관											
연구개발담당자 실무담당자	성명	박광민			직위		책임연구원				
	연락처	직장전화	02-2102-2751			휴대전화		010-8595-4538			
		전자우편	kmpark@kcl.re.kr			국가연구자번호		1100 7167			

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

2022 년 3 월 29 일

주관연구책임자 : 박광민 (인)

주관연구기관의 장 : (재)한국건설생활환경시험연구원 조영태 (인)

국토교통과학기술진흥원장 귀하



< 요약 문 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업		연구개발과제번호		21CTAP-C157265-02	
내역사업명		국토교통기술혁신연구					
국가과학기술표준분류		(EI0406)건설구조재료	50%	(EB0101)구조재료	30%	(EB0202)시멘트/콘크리트/내화물	20%
연구주제		(대분류) 융합기술을 통한 건설 지능화 실현		(중분류)건설 자동화		(소분류)3D 프린팅 건축·건설 시스템	
연구개발과제명		3D 프린터를 이용한 밀도제어형 인공경량골재 제조기술 개발					
전체 연구개발기간		2020. 04. 13 - 2021. 12. 31(1년9개월)					
총 연구개발비		총 423,500 천원 (정부지원연구개발비 : 370,000 천원, 기관부담연구개발비 : 53,500 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		기반연구					
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표		SLM 3D Printing을 이용한 밀도제어형 격자구조체 설계/제조 기술 개발 및 이를 활용한 인공경량골재 제조와 경량콘크리트 제조기술 개발				
	전체 내용		○ [핵심기술1] 밀도제어형 단위셀 설계기술 - 단위셀 형상에 따른 물리적 성능 검토 및 최종 설계(안) 도출 - 설계프로세스 정립 - 적용 소재 다각화(플라스틱 소재 추가 검토)를 통한 경제성 확보 검토 - 고부가가치 활용용도 제안(골재 이외의 고부가 가치 활용방안 도출) ○ [핵심기술2] SLM 3DP 출력 최적화 - 적용 소재 도출 - 출력 조건 최적화 ○ [핵심기술3] 공극포화 및 표면 코팅 기술 - 채움재 소재 도출 및 채움 방법 검토 - 고분자 화합물을 적용한 공극 포화 최적화 및 물성 검토 ○ [핵심기술4] SLM 3DP 인공경량골재 활용 콘크리트 배합 - 경량 고강도 콘크리트용 인공경량골재 개발 - 경량 고강도 콘크리트 물성 평가 - 설계 및 출력 조건에 따른 경제성 분석 및 대안책 제시 - 일반 경량골재를 사용한 콘크리트와의 성능비교				
	1년차	목표	3DP Printing을 이용한 밀도제어형 격자구조체 설계/제조 기초 기술 확보				
		내용	○ [핵심기술1] 밀도제어형 단위셀 설계기술 - 단위셀 형상에 따른 물리적 성능 검토 및 최종 설계(안) 도출 ○ [핵심기술2] SLM 3DP 출력 최적화 - 적용 소재 도출 ○ [핵심기술3] 공극포화 및 표면 코팅 기술 - 채움재 소재 도출 - 채움 방법 검토(겔화점 조절)				
	2년차	목표	SLM 3DP Printing을 이용한 밀도제어형 격자구조체 설계/제조 기술 개발 및 이를 활용한 인공경량골재 제조와 경량콘크리트 제조기술 개발				
		내용	○ [핵심기술1] 밀도제어형 단위셀 설계기술 - 단위셀 형상에 따른 물리적 성능 검토 및 최종 설계(안) 도출 - 설계프로세스 정립 - 적용 소재 다각화(플라스틱 소재 추가 검토)를 통한 경제성 확보 검토 - 고부가가치 활용용도 제안(골재 이외의 고부가 가치 활용방안 도출) ○ [핵심기술2] SLM 3DP 출력 최적화				

		- 적용 소재 도출 - 출력 조건 최적화 ○ [핵심기술3] 공극포화 및 표면 코팅 기술 - 채움재 소재 도출 및 채움 방법 검토 - 고분자 화합물을 적용한 공극 포화 최적화 및 물성 검토 ○ [핵심기술4] SLM 3DP 인공경량골재 활용 콘크리트 배합 - 경량 고강도 콘크리트용 인공경량골재 개발 - 경량 고강도 콘크리트 물성 평가 - 설계 및 출력 조건에 따른 경제성 분석 및 대책 제시 - 일반 경량골재를 사용한 콘크리트와의 성능비교
연구개발성과		(1)양적성과 현황 ○ SCI 1건, 비SCI 4건 - [SCI] Design Optimization of Lattice Structures under Compression:Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements, Materials, Vol.15(1), 2022 - [비SCI] 금속 적층 제조 격자 구조체의 공극 충전용 부착력 증진 반응성 아크릴 화합물에 대한 실험적 연구, 한국구조물진단유지관리공학회, Vol.24, No.5, pp.143-149, 2020 - [비SCI] 상대 밀도에 따른 금속 적층 제조 격자 구조체의 기계적 특성, 한국산학기술학회, Vol.22, No.6, pp.19-26, 2021 - [비SCI;ESCI] Mechanical properties of additive manufactured variable-density Kelvin lattice structures: a novel design method for Kelvin unit cells, Journal of Structural Integrity and Maintenance, Vol.7(1), pp.34-45, 2022 - [비SCI] 3D 프린팅 출력 인공 경량 골재를 사용한 압축강도 45 MPa급 경량콘크리트 개발, 한국산학기술학회, 2022, 게재예정 ○ 국내특허 출원 2건, 등록 1건 - [출원] 10-2020-0138693, 금속 적층 제조 격자 구조체의 공극 충전용 반응성 아크릴 화합물 및 이를 구비하는 금속 적층 제조 격자 구조체 - [출원] 10-2021-0192013, 격자구조 경량골재를 구비하는 콘크리트 및 이의 제조방법 - [등록] 10-2232737, 금속 적층 제조 격자 구조체의 공극 충전용 반응성 아크릴 화합물 및 이를 구비하는 금속 적층 제조 격자 구조체 (2)질적성과 현황 ○ [핵심기술1] 밀도제어형 단위셀 설계기술 - 문헌조사 1부 - 격자구조별 data sheet 1부 - 설계프로세스 1건 달성 ○ [핵심기술2] SLM 3DP 출력 최적화 - 출력 소재 최적화 1건 - 출력 영향인자 최적화 1건 달성 ○ [핵심기술3] 공극포화 및 표면 코팅 기술 - 채움재 구성 및 제조기술 최적 달성 ○ [핵심기술4] SLM 3DP 인공경량골재 활용 콘크리트 배합 - (골재) 밀도제어 1.0~2.1 g/cm³, 흡수율 0.2% 이하 달성 - (골재) KS F 2541 골재파쇄값 3% 이하 달성 - (콘크리트) 최적배합설계 선정 - (콘크리트) 경량콘크리트 단위용적질량 1.6 t/m³ 및 압축강도 47.7 MPa 달성
연구개발성과 활용방안 및 기대효과		[활용방안] ○ 기반기술 : 밀도제어형 경량구조체 ○ 기본활용 : 경량 고강도 인공경량골재 및 이를 활용한 경량콘크리트 (밀도 1.0~1.5 g/cm³, 흡수율 0.2% 이하, 골재파쇄값 3% 이하) ○ 활용확대 : 경량·고강도·충격흡수 다기능성 비선형 구조체에 적용 (예시. 비선형 결합구, 충격흡수재 등)

	[기대효과] ○ 상대밀도 제어가 가능한 격자구조체 설계/제조 원천 기술 확보 및 이를 활용한 경량 · 고강도 · 충격흡수 등 복합기능성 부재 개발기술 마련 ○ 격자구조체 + 기능성 내부 채움재의 복합재료를 통한 신시장 창출 ○ 건설 구조물 적용 범위 확대를 통한 해당 기술 고도화 (비선형 보강재 등)											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음											
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	SCI(1) 비SCI(4)	출원(2) 등록(1)	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)	적층제조		3D프린팅		선택적 레이저용융		밀도제어		인공골재			
영문핵심어 (5개 이내)	Additive Manufacturing		3D Printing		Selective Laser Melting		Variable-density		Artificial Aggregate			

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	01
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	03
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	137
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	147
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	148
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	149
7. 참고 문헌	151

별첨자료(성과 증빙자료 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

구분	내용
최종 목표	☑ SLM 3D Printing를 이용한 금속소재(플라스틱 추가 검토*) 밀도제어형 격자구조체 설계/제조 기술 개발 및 ☑ 이를 활용한 고성능 인공경량골재 제조와 경량콘크리트 제조기술 개발
세부 목표	① [설계] 격자구조(lattice cell) 설계를 통한 맞춤형 밀도제어 (bulk density 1.0 ~ 1.5 g/cm³) ② [제조] 격자구조 내부 포화 및 표면 코팅을 통한 골재 물성 상향 (흡수율 5 % 이하) ③ [응용] 경량 고성능 콘크리트 실용화 기술 (1.6 t/m³, 45 MPa 급) *설정근거* 국가건설기준코드 및 2020년 기획과제 목표값을 고려하여 도출함 - KCS 14 20 20 : 2016 '경량골재 콘크리트' 적용범위값 (1.4~2.0 t/m³, ~24 MPa) - 국토교통부 2020년 '나노기술을 활용한 다기능경량 하이퍼 콘크리트 기술개발사업' 목표값 (1.6 t/m³, 압축강도 80 MPa) / '20.04~'23.12, 45개월, 129억

* 검토소재 다각화를 추가하였으며, 그 외 1, 2차년도 계획서와 동일

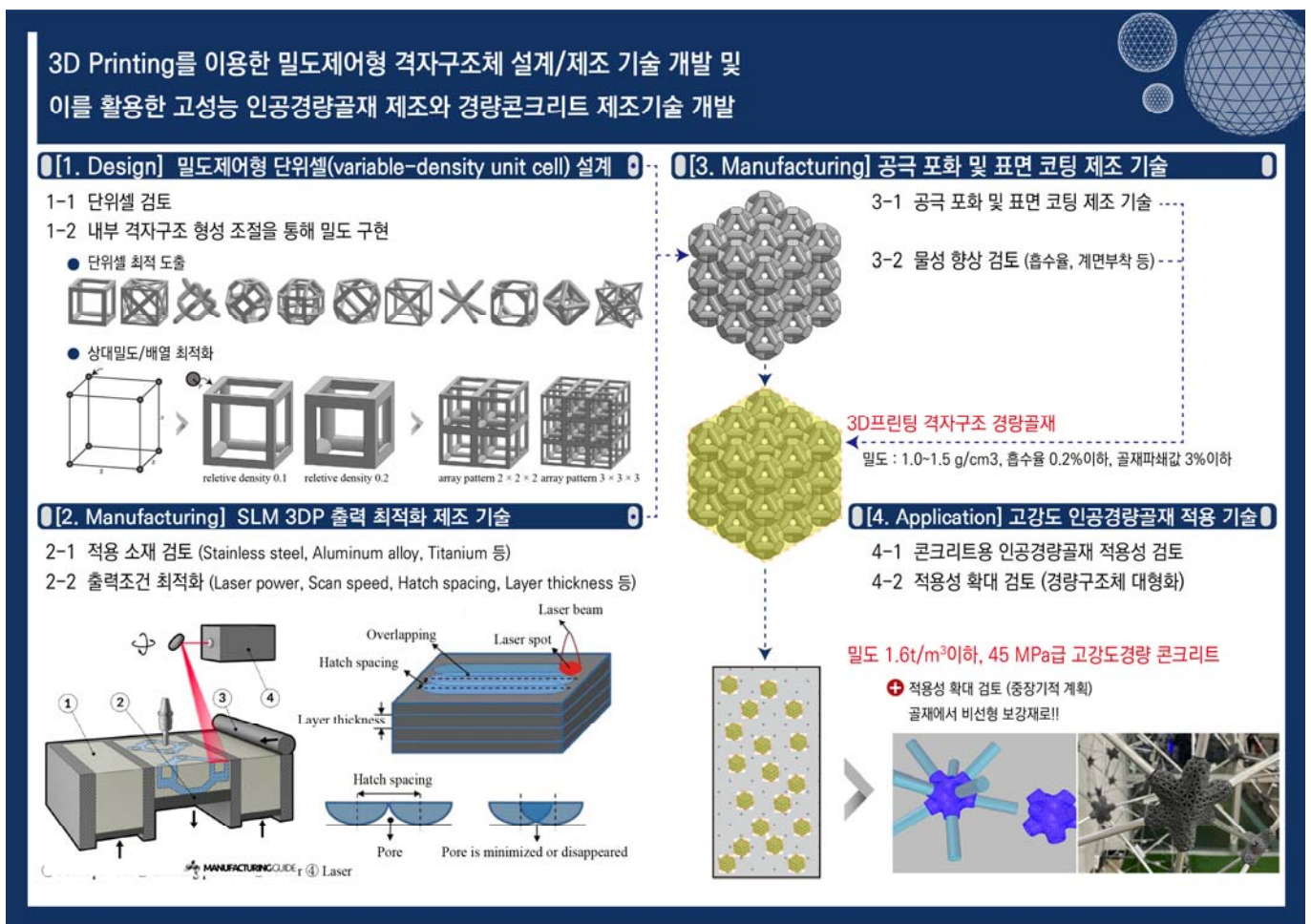


그림 1. 연구 개발 개요

2) 연구개발과제의 연차별 목표

표 1. 연차별 목표

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	밀도제어형 단위셀 설계	문헌조사 작성	밀도제어 단위셀 설계를 위한 open data 및 프로세스 전무	조사보고서 1건	(정성) 국내외 사전조 사 수행 필수	5
		격자구조별 Data sheet 작성		Data Sheet 1부, 논문(비SCI) 1건	(정성) 기반기술 구축	5
	SLM 3DP 출력최적화	출력 소재 최적화	-	출력소재매뉴얼 작성 1 건	(정성) 기반기술 구축	5
	SLM 3DP 경량골재	밀도제어 (1.0~1.5 g/cm ³)	관련기술 전무	KS D 0033공인성적서, 특허 출원 1건, 논문(비SCI) 1건	(정량) 공인성적서, 특 허, 논문	30
	격자구조체 공극포화	채움재 구성	관련기술 전무	채움재 보고서 1건	(정성) 기반기술 구축	5
2년차 (2021)	밀도제어형 단위셀 설계	설계 프로세스	밀도제어 단위셀 설계를 위한 open data 및 프로세스 전무	설계프로세스 수립 (전문가검토의견서)	(정성) 1차년도결과를 토대로 프로세 스정립	5
	SLM 3DP 출력최적화	출력 영향인자 최적화	-	출력영향인자매뉴얼 작 성	(정성) 기반기술 구축	5
	SLM 3DP 경량골재	흡수율 5% 이하	관련기술 전무	흡수율 5% 이하 특허 등록 1건, 논문(SCI) 1건	(정량) 공인성적서, KS F 2503준합, 특허, 논문	5
		경량골재 강도 (KS F 2541 파쇄값 30% 이하)	관련기술 전무	파쇄값 30% 이하	(정량) 공인성적서, KS F 2541준합	5
	격자구조체 공극포화	제조기술최적	관련기술 전무	보고서, 논문(비SCI)1건	(정성) 기반기술 구축 (정량) 논문	5
	SLM 3DP 인공경량골재 /고강도경량콘크리트	최적 배합 설계 도출	관련기술 전무	배합선택정보보고서 1건	(정성) 기반기술 구축	5
		단위용적질량 1.6 t/m ³ 이 하	관련기술 전무	단위용적질량 1.6 t/m ³ 이하 (공인성적서)	(정성) 기반기술 구축 (정량) 공인성적서	10
		압축강도 45MPa 이상	관련기술 전무	압축강도 45MPa 이상 (공인성적서) 특허 출원 1건, 논문(비SCI) 1건	(정성) 기반기술 구축 (정량) 공인성적서, 특 허, 논문	5
		일반경량골재사용 경량콘 크리트의 비교분석보고서	관련기술 전무	보고서 1건 (전문가검토의견서)	(정성) 기반기술 구축	5
	합			특허출원 2건, 등록 1건 논문(SCI)1건, 논문(비SCI)4건		100

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 연구개발과제 추진 체계(핵심기술별 체계)

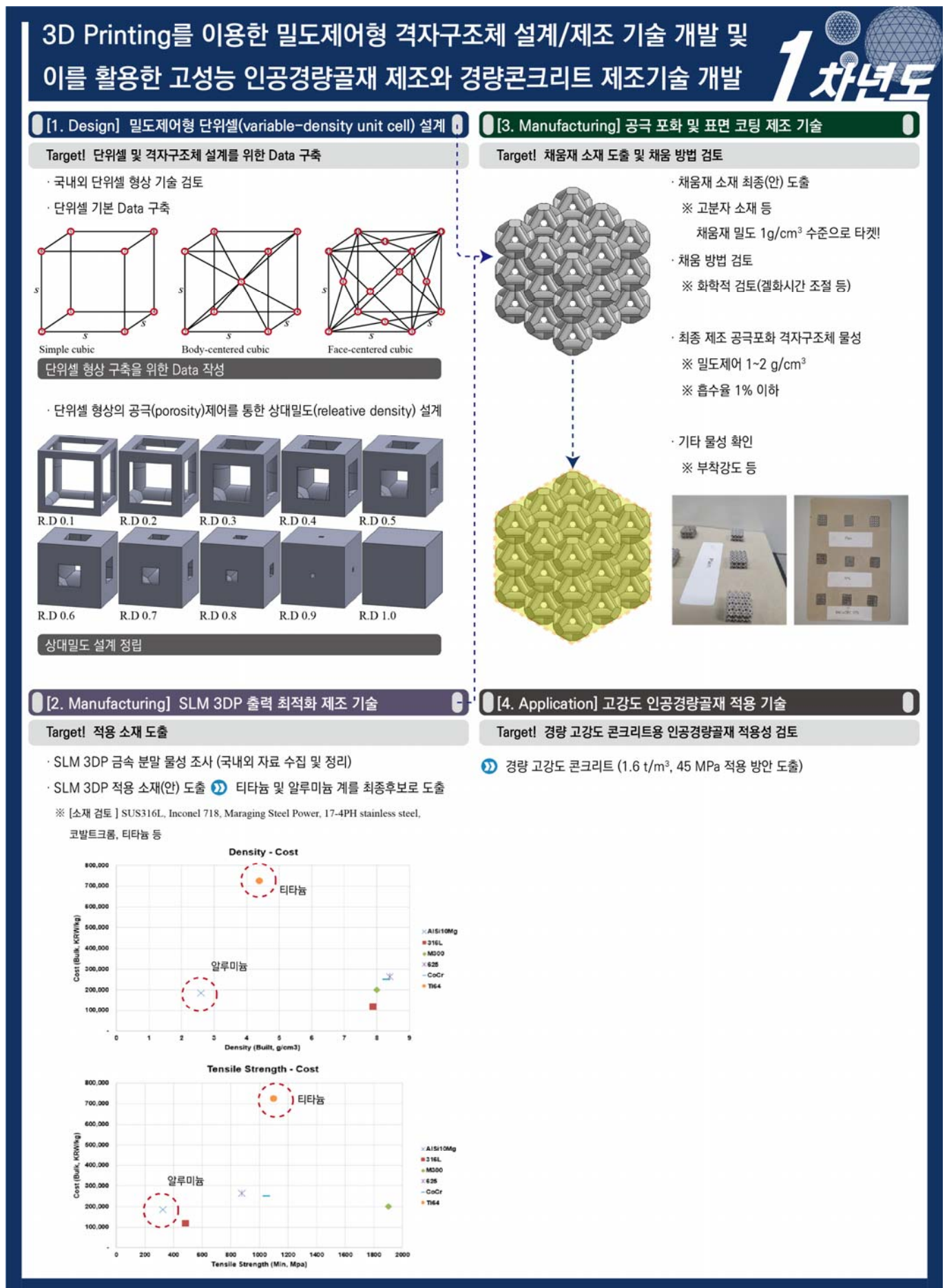


그림 2. 연구 개발 추진체계(1차년도)

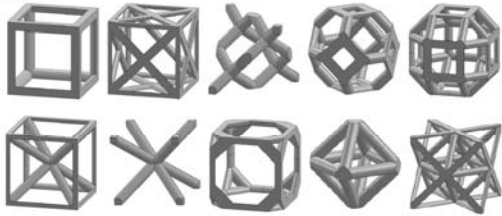
3D Printing를 이용한 밀도제어형 격자구조체 설계/제조 기술 개발 및 이를 활용한 고성능 인공경량골재 제조와 경량콘크리트 제조기술 개발

2차년도

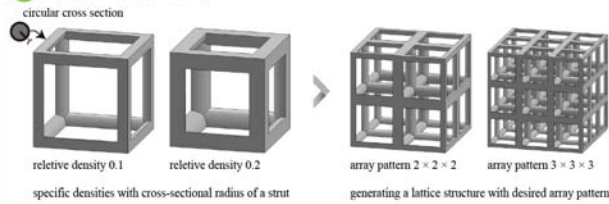
[1. Design] 밀도제어형 단위셀(variable-density unit cell) 설계

Target! 단위셀 및 격자구조체 설계를 위한 Data 구축

✓ 단위셀 설계 기술 확보 (설계 변수에 따른 상대밀도 제어 구현)

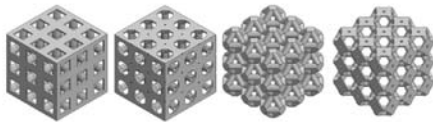


✓ 격자구조체 설계 기술 확보

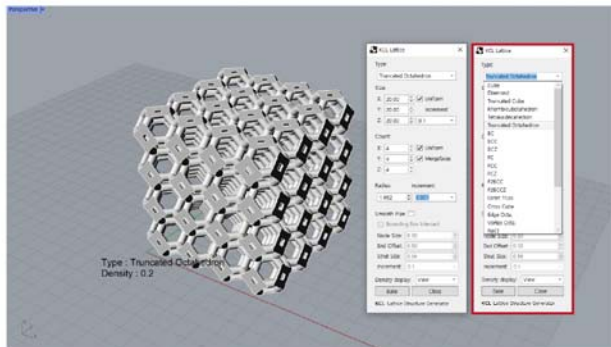


✓ 격자구조체 특성 검토

(20mm³ 크기, 압축저항성 우수 형상)



✓ 단위셀 및 격자구조체 설계용 툴 개발 (Rhino3D add-in 형태 설계툴)



[2. Manufacturing] SLM 3DP 출력 최적화 제조 기술

Target! 출력 영향인자 최적화

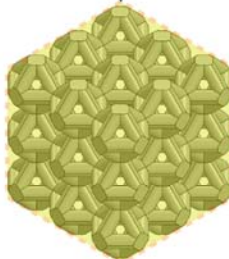
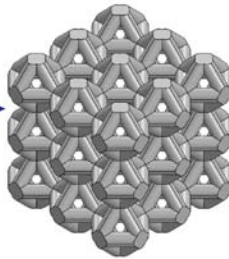
· 금속계(티타늄 및 알루미늄 계) 및 플라스틱계(PA12) 검토

티타늄 소재	최적화도	370	370	370
레이저파워(W)	200	370	370	370
스캐닝스피드(mm/s)	1200	1200	800	400
레이저스피팅(mm)	0.14	0.14	0.14	0.14
레이저두께(mm)	0.03	0.12	0.12	0.12
에너지밀도(J/mm³)	55.56	18.35	27.53	55.06
표면거칠기(μm)	16	28	23	23
밀도(g/cm³)	4.4	2.3	2.8	4.4
인장강도(MPa)	1132	544	791	1039

[3. Manufacturing] 공극 포화 및 표면 코팅 제조 기술

Target! 채움재 소재 도출 및 채움 방법 검토

- 채움재 소재 최종(안) 도출
 - ※ 고분자 소재 등
 - 채움재 밀도 1g/cm³ 수준으로 타겟!
- 채움 방법 검토
 - ※ 화학적 검토(겔화시간 조절 등)
- 최종 제조 공극포화 격자구조체 물성
 - ※ 밀도제어 1~2 g/cm³
 - ※ 흡수율 1% 이하



[4. Application] 고강도 인공경량골재 적용 기술

Target! 경량 고강도 콘크리트 제조

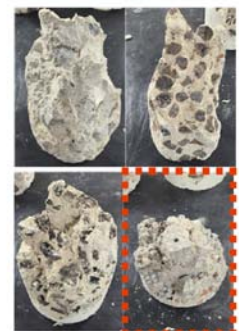
② 경량 고강도 콘크리트 (1.6 t/m³, 45 MPa 제조)

✓ 3D경량골재

밀도제어 1.0~2.1 g/cm³,
흡수율 0.2% 이하 달성
KS F 2541 골재파쇄값 3% 이하 달성

✓ 3D경량골재 활용

경량 고강도 콘크리트
Density : 1.6 t/m³
Strength : 45 MPa



⊕ 적용성 확대 검토 (중장기적 계획)

골재에서 비선형 보강재로!!

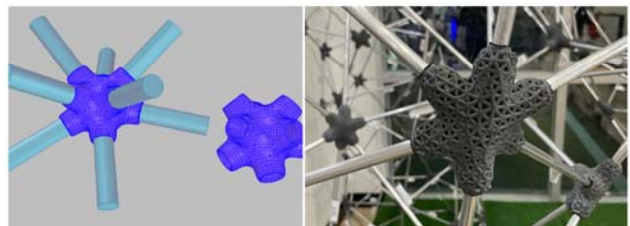


그림 3. 연구 개발 추진체계(2차년도)

2) 연구개발과제 수행 내용 및 결과

○ [핵심기술1] 밀도제어형 단위셀 설계기술

(1) 연구의 필요성 및 목적

(1.1) 연구의 필요성

(1.1.1) 단위셀(unit cell) 및 격자구조체(lattice structure) 개요

- 아래는 다공성구조체 분류를 나타낸다. 여기서, 격자구조는 불규칙적 다공구조나 체적소재에 비해 비강도 및 비강성이 우수하여, 항공기, 자동차, 선박 등 수송기기류의 초경량 구조재료로서의 적용뿐만 아니라 외부 충격하중을 내부구조가 흡수하는 충격에너지 흡수능이 우수하여 방탄방폭 재료로서의 잠재적인 가능성을 가지고 있다.
- 또한, 개방형태의 격자구조는 표면적이 넓고, 내부유동이 균일하여 전열 특성 우수함에 따라 열교환기, 히트싱크 등 다양한 열에너지 관리 장치에 활용이 가능한 이점이 있다.
- 강철 및 플라스틱과 밀실 재료는 일반적으로 산업 구조에 사용한다. 밀실 재료가 구조적 설계 요구 사항을 충족하더라도 생산 중 재료 낭비, 큰 구조 볼륨과 같은 많은 단점이 존재한다. 현재 산업 구조 설계는 주로 제품의 무게를 줄이고 고성능을 달성하는 데 중점을 두고 있다. 예를 들어, 항공 우주 응용 분야에서 구조 설계는 경량 재료를 사용하여 우수한 기계적 특성을 달성하는 것을 목표로 하며, 이를 통해 구조를 높은 성능으로 낮은 비용으로 구축할 수 있다. 격자구조의 사용은 경량화 및 고강도 구조의 생산을 용이하게 한다.
- 격자구조체의 경량성, 에너지흡수능, 전열특성은 복합적으로 적용 가능하여 경량구조체이면서 에너지흡수체, 구조체이면서 열관리 장치 등의 다기능성을 보일 수 있어 향후, 다양한 미래 산업용 소재부품으로의 잠재성을 지니고 있다.

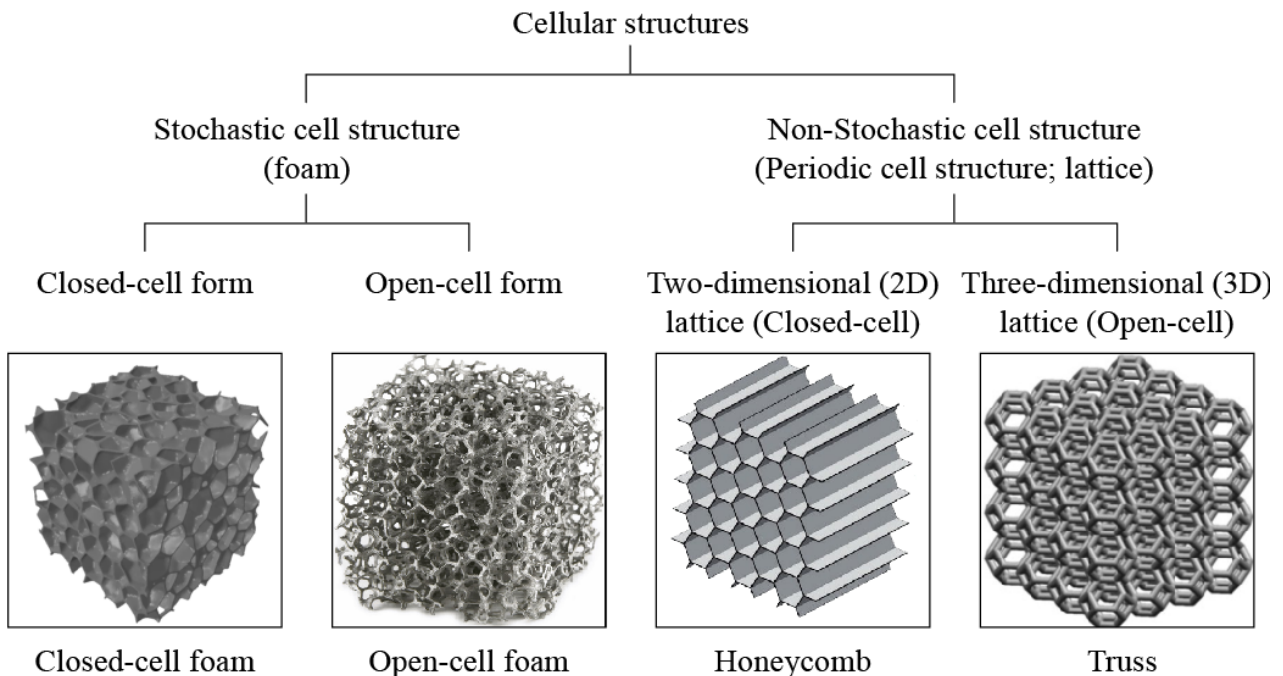


그림 4. 다공성 구조 분류

(1.1.2) 적층 제조(Additive Manufacturing) 및 선택적 레이저 용융(Selective Laser Melting)

- 상기에서 언급한 격자구조체의 다양한 이점에도 불구하고, 미국, 영국 등 일부 기술선진국에서조차 방위산업분야를 제외한, 민간분야에서 산업화가 이루어지지 않고 있는 가장 큰 원인으로서는 복잡한 내부형상으로 인한 제조공정비용의 증가 및 현 제조공정의 한계로 인한 설계형상의 제약이다.
- 적층 제조(Additive Manufacturing, AM) 기술은 설계 자유도 때문에 격자구조에 적합한 제조 방법으로 부상하고 있다. AM 공정은 CAD(Computer-Aided Design) 모델을 사용하여 재료를 층별로 제조하며, 이를 통해 기존 제조 공정으로는 달성할 수 없는 복잡한 형상의 부품을 제작할 수 있다.
- ASTM F 2792-12[9]에 따르면 AM 공정은 binder jetting (BJ), direct energy deposition (DED), material extrusion (ME), material jetting (MJ), powder bed fusion (PBF), sheet lamination (SL), and vat photopolymerization (VP)로 구분한다. Metal AM은 PBF와 DED가 대표적이다.
- PBF는 베드 파우더 재료를 융합하기 위해 레이저나 전자빔 열원을 사용하는 반면 DED는 가변 열원을 사용하여 고체 재료를 표면에 직접 증착한다. 두 가지 방법 중 PBF는 금속 격자 구조와 같은 복잡한 형상을 고정밀도로 제작할 수 있는 장점이 있다.
- PBF는 전원 유형에 따라 레이저 빔 용융(PBF-LB)과 전자 빔 용융(PBF-EB)의 두 가지로 더 분류할 수 있습니다. 대표적인 PBF-LB 공법은 SLS(Selective Laser Sintering), SLM(Selective Laser Melting), DMLS(Direct Metal Laser Sintering) 등이 있으며 대표적인 PBF-EB 공법은 EBM(Electronic Beam Melting)입니다. EBM과 SLM은 경량, 고강성, 미세 및 복잡한 격자 구조의 제작을 가능하게 합니다. PBF에 일반적으로 사용되는 분말 재료는 스테인리스강 (예:316L SS), 티타늄 합금 (예:Ti-6Al-4V), 알루미늄 합금 (예: AlSi10Mg) 등이 있다.

표 2. 3D프린팅 분류

명칭	대표기술	설명	재료
접착제분사 방식 Binder Jetting	3DO(CJP), Ink-jetting 등	파우더 형태 재료를 접착제를 분사시켜 결합하여 물체 형성	금속, 폴리머, 세라믹
재료분사 방식 Material Jetting	Polyjet, Ink-jetting, Thermojet, MJM	액상 재료를 프린팅 노즐을 통해 분사시켜 자외선으로 경화하여 물체를 형성	폴리머, 왁스
재료 압축 방식 Material Extrusion	FDM(FFF)	고체 재료를 열을 이용하여 노즐을 통해 분사시켜 물체를 형성	폴리머, 나무 등
고에너지 직접 조사 방식 Direct Energy Deposition	Direct Metal Deposition, Laser Deposition, Laser Consolidation, 등	레이저나 전자빔으로 재료를 직접 증착 또는 녹여 물체를 형성	금속(파우더), 와이어
분말 적층 용융 방식 Powder Bed Fusion	SLM, EBM, SLS등	파우더 재료를 베드 위에 놓고 레이저나 전자빔을 조사하여 선택적으로 소결, 녹여 물체를 형성	금속, 폴리머, 세라믹
광중합 방식 Photo Polymerisation	SLA, DLP	광, 레이저 조사로 액상재료를 경화하여 물체를 형성	폴리머, 세라믹
시트 적층 방식 Sheet Lamination	LOM	얇은 필름 형태의 재료를 칼이나 레이저로 가공하여 접착제 등으로 붙여 물체를 형성	Hybrids, Metallic, 세라믹

(1.2) 연구의 목적

- 격자구조체(lattice structure)는 일반적으로 특정 공간에 단위셀을 반복하여 구성한다. 따라서 격자구조체 설계에는 단위셀(unit cell) 설계 및 패턴 설계가 중요하다.
- 단위셀은 전체 격자 구조를 형성하고 특성화하는 가장 작은 요소이다. 재료 및 상대밀도가 동일할 때 격자구조체의 기계적 특성은 단위셀 구조에 따라 달라진다. 따라서 우수한 기계적 특성(강성/강도, 중량 효율 최대)을 확보할 수 있는 최적의 단위셀 최적화(unit cell topology)를 도출하는 것이 필요하다.
- 상대밀도 및 단위셀에 따른 격자구조체의 기계적 특성을 확인하고, 본 연구를 통해 축적한 결과물을 활용하여 제품 설계에 유용하게 활용하고자 하는 것이 목표이다. 전체적인 연구프로세스는 그림 2와 같다.
- 그 예로, 축 방향 압축 하중 조건에서 단위셀 종류 및 배열을 최적화하고 SLM으로 생성된 금속 시편에 대해 유한요소해석(finite element analysis, FEA) 및 실험 테스트를 수행한다.

[세부 목표]

- 격자구조체 최적화를 위한 설계프로세스 개발을 목표로 한다. 격자구조체 관련 국내외 현황은 아직까지도 적절한 단위셀 토폴로지를 설계하거나 선택하기 위한 데이터베이스가 없다. 본 연구에서는 단위셀 설계를 위한 단위셀 토폴로지 최적화 설계프로세스를 제안한다. 이를 위해, 단위셀 및 격자구조체 설계방법을 제공하고, 특정 단위셀을 설계하기 위한 단위셀별 데이터베이스를 구축하여 제공하고자 합니다.
- 단위셀 배열 최적화를 목표로 했습니다. $1 \times 1 \times 1$, $2 \times 2 \times 2$, $3 \times 3 \times 3$ 및 $4 \times 4 \times 4$ 등으로 단위셀을 패턴화하여, 단위셀 패턴이 항복강도에 미치는 영향을 확인한다.
- 최종적으로 압축 하중 조건에서 20 mm $\times$ 20 mm $\times$ 20 mm 크기의 격자구조체의 최적화를 위해 최적 단위셀을 도출하고, 기계적 특성을 확인하고자 한다.

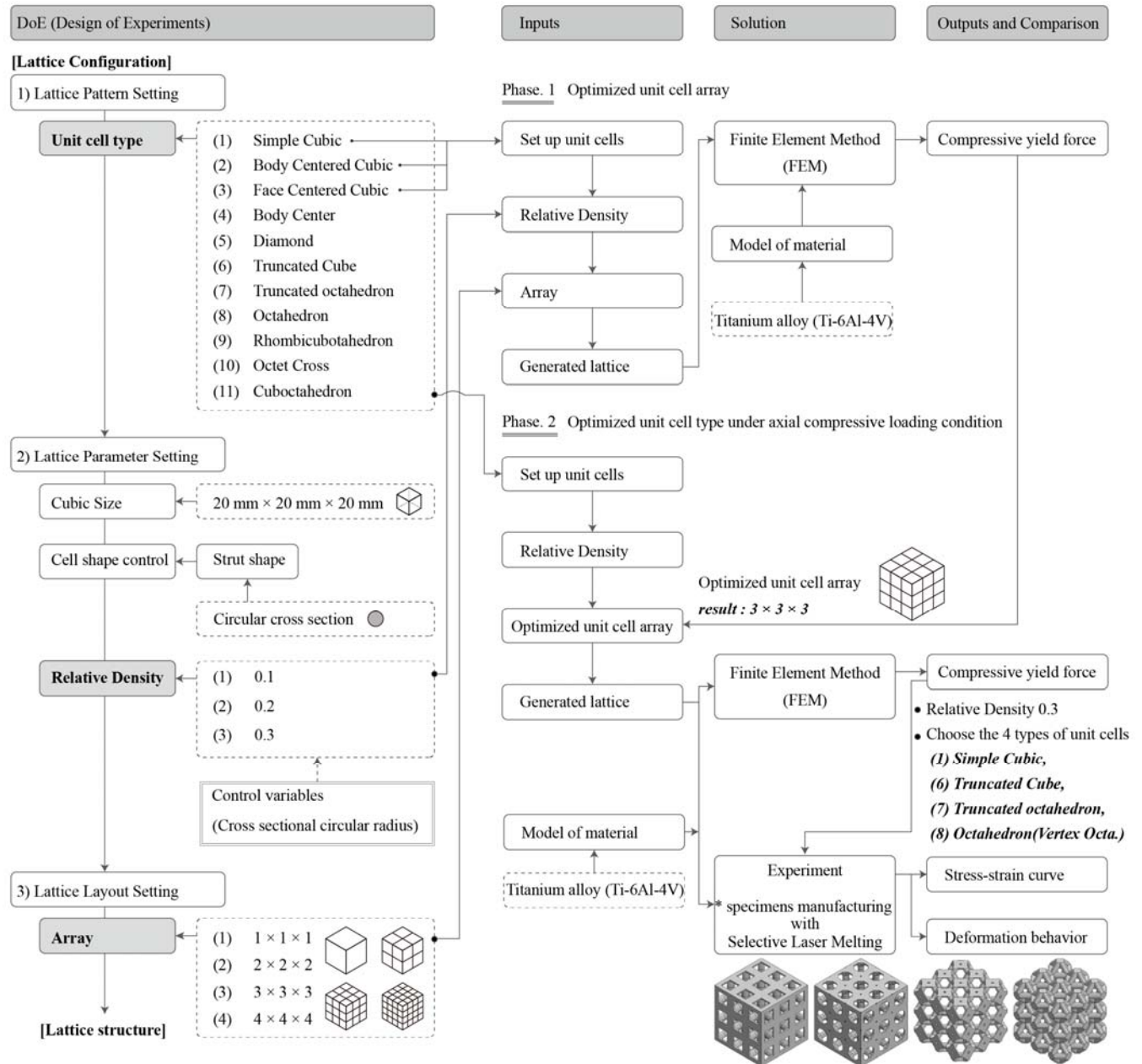


그림 5. 연구 프로세스

(2.) 연구 범위 및 방법

(2.1) 연구 범위 및 대상

□ 연구의 목적을 달성하기 위해서 다음과 같은 연구 내용을 설정했음.

(1) 단위셀 및 격자구조체 형상 제어를 위한 최종 설계 프로세스 대상을 수립한다.

- 국내외 격자구조체 활용 현황 조사
- 국내외 단위셀 및 격자구조체 설계 프로세스 현황 조사 및 시사점 도출

(2) 단위셀 형상 최종 설계 프로세스 대상을 수립한다.

- 격자구조체 설계프로세스 단계별 요구조건 수립
- 단계별 요구조건에 따른 Rhinoceros add-on 모델링툴 제작
- 단위셀 후보군 제시
- 단위셀 별 밀도제어 데이터베이스 제공

(3) 적용 소재 다각화를 통해 활용성 확대를 검토한다.

- 플라스틱 기반 소재 물성값 제공
- 금속 기반 소재 물성값 제공

(4) FEA (Finite element analysis, 유한요소해석)를 통한 격자구조체의 기계적 특성을 확인한다.

- 밀도에 따른 출력물 기계적 특성 분석
- 단위셀에 따른 출력물 기계적 특성 분석
- 격자구조체에 따른 출력물 기계적 특성 분석

(5) 3D프린팅으로 출력한 격자구조체의 기계적 특성을 확인한다.

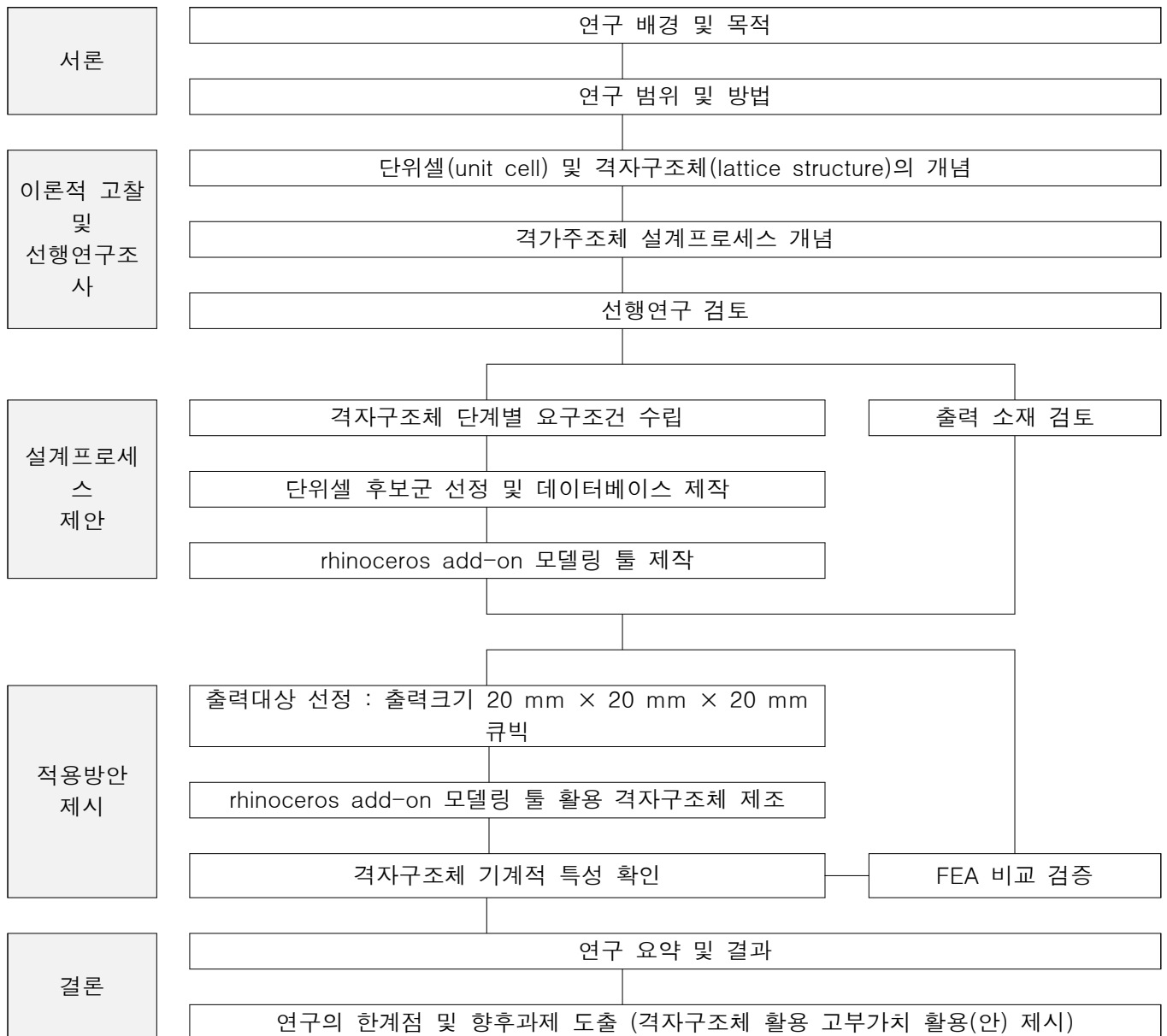
- 소재별 출력물 기계적 특성 확인
- 밀도에 따른 소재별 출력물 기계적 특성 확인
- 단위셀 및 배열을 변수로 설계한 격자구조체의 기계적 특성 확인
- 압축강도 조건에서의 격자구조체 최적형상 제시

(6) 향후 활용성 확대를 위한 고부가가치 활용(안)을 제안한다.

- 격자구조체를 활용한 고부가가치 활용(안) 제안
- 고부가가치 활용(안)1-경량골재 시작품 제시
- 고부가가치 활용(안)2-비선형조인트 시작품 제시

2.2 연구 진행 과정

□ 다음과 같이 연구 진행을 수행했음.



3. 연구 결과

3.1 단위셀 및 격자구조체 형상- 단위셀 및 격자구조체 형상 제어를 위한 최종 설계 프로세스 대상을 수립한다.

3.1.1 국내외 격자구조체 활용 현황 조사

- SLM(Selective Laser Melting), EBM(Electron Beam Melting)등 금속분말을 사용하는 3D프린팅 기술은 전세계적으로 정부차원에서의 관련 산업의 활성화를 위해 연구개발이 활발히 진행되고 있으나, 기존 제품의 생산공정을 대체하기에는 비용, 효율, 품질 경쟁력 등 해결 과제가 남아 있다.
- 격자구조를 구성하는 최소 형상단위인 단위셀은 주로 3차원 배열이 용이한 대칭형상의 정다면체 구조나 트러스 구조를 기본으로 하여 요구특성에 맞게 구조를 재설계하여 사용된다. 수mm이내의 단위셀 형상을 정밀하게 구현하기 위해서는 금속 분말을 한층씩 도포하고 레이저 혹은 전자빔 등의 열원을 이용하여 선택적으로 가열하는 PBF(Power Bed Fusion)방식의 SLS, SLM, EBM 장비가 주로 사용된다.
- 금속 다공성 구조체의 경우, 단위셀의 형상이 복잡하고 미세하므로 분말소재의 종류 및 크기에 따른 열원의 출력, 레이어 두께, 스캐닝 속도 및 방향 등의 공정변수뿐만 아니라 최소 제작 가능한 요소의 두께, 단면형상, 오버행, 적층각도 등 형상과 관련된 설계인자에 대한 복합적인 검토가 요구된다.
- [우주항공분야] 3D 프린팅에 의해 자유로운 형상설계가 가능해짐에 따라 산업용 금속제품의 설계 개념이 변화될 것으로 예측된다. Airbus, Boeing 등 항공기 제작사에서는 위상최적기법을 적용한 최적설계기반의 3D프린팅 부품을 적용한 설계를 발표하고 있으며, 향후, 자동차를 비롯한 일반 제조업 분야에서도 확대되어 적용될 것으로 전망된다. 3D 프린팅에 의한 격자구조체는 기계적 특성뿐만 아니라 열적, 생물학적 맞춤형 설계가 가능함에 따라 솔리드형상 기반의 기존 부품설계의 개념을 탈피하고 격자구조 기반의 신개념 설계기법에 대한 개발이 요구된다. 격자구조체는 항공기 날개와 같은 유연구조물 및 자동차 새시등의 내부 보강재로 적용가능하며, 응력분포, 강도, 제작 용이성 등을 복합적으로 고려하여 단위셀의 소재, 형상, 크기, 방향을 설계하여야 한다.



(a) airbus 사 항공기 부품



(b) Thales Alenia Space사 인공위성 부품



(c) ETH Zurich team 개념도모식도

그림 6. 3D프린팅 격자구조체 활용 - 우주항공

- [인체의료] 의료용 임플란트의 경우, 인체적합성, 내부식성이 우수한 코발트합금(CoCrMo), 타이타늄합금(Ti6Al4V) 소재가 주로 사용되고 있으나, 솔리드 형태의 임플란트는 탄성계수가 210GPa, 110GPa로 인체의 뼈(피질골 3-30GPa, 해면골 0.02-2MPa)와의 강성차이가 매우 커 결합부위는 부하의 전달을 차단하게 됨으로써 파손 등의 문제를 야기할 수 있다. 따라서, 응력차단을 제거하기 위한 가장 효율적인 방법으로 금속 임플란트 내부에 기공을 형성시켜 인체뼈와의 상대적인 강성 차이를 최소화하고 있는데, 격자구조로 구성된 임플란트가 유용하게 사용되고 있다. 또한, 임플란트 표면을 격자구조로 형성시킴으로써 인체와의 결합을 견고히 하기 위한 용도로 사용하고 있다



(a) 티타늄 임플란트

(b) 고관절치환 격자구조체

그림 7. 3D프린팅 격자구조체 활용 - 인체의료

- 3차원 격자구조는 내부형상의 설계에 따라 사용목적에 최적화된 구조 및 기능 소재로 활용 가능한 이점이 있어, 향후 다양한 산업분야에 잠재적인 적용가능성을 가지고 있다. 이러한 이점에도 불구하고 과거에는 복잡한 내부형상의 구현이 불가능하여 금속재료의 활용이 어려웠으나, 최근 형상자유도가 우수한 금속 3D 프린팅 기술의 발전과 함께 다양한 형상의 3차원 격자구조를 금속소재로 제작 가능하게 되었다.
- 3D 프린팅 격자구조기술은 자동차, 항공, 조선, 전자, 건축, 에너지 플랜트 등 금속부품 제조 산업 분야에서 부품설계와 제조방법의 패러다임을 전환할 수 있는 계기가 될 것으로 전망된다

(3.1.2) 국내외 단위셀 및 격자구조체 설계 프로세스 현황 조사 및 시사점 도출

1) 단위셀 설계 기술 현황

- CAD 환경에서 설계된 제품의 수치 모델을 STL 파일 형식으로 변환 한 후 AM 기계로 보내 설계한다. 이러한 기술은 현재 플라스틱, 금속, 세라믹, 조직 등과 같은 다양한 재료를 사용하여 다양한 산업 공학 및 의료 응용 분야에서 사용되고 있다.
- 자원과 에너지 절약이 시대에 가장 우려되는 문제 중 하나이기 때문에 생산에 사용되는 재료 구조 연구에 새로운 추세는 필요하다. 그대로 제품 설계에 격자 구조를 통합하면 제품 제작에 필요한 재료의 양을 줄일 수 있다. 그러나 CAD (Computer Aided Design) 환경에서 격자 구조 모델을 생성하는 것은 현재 상용 CAD 소프트웨어를 사용하는 데 많은 어려움이 있다.
- CAD 환경에서 자동으로 격자 구조를 생성하는 기능이 국내외적으로 없다. 격자 구조를 생성하는 현재 방법의 한계는 제품 설계자가 격자 구조를 생성하는 데 도움이 되는 자동 모듈이 없기 때문에 생성 프로세스에 많은 시간이 소요된다. 따라서 다음과 같은 과학적 문제에 대한 완전한 답이 필요하다.
 - 다양한 유형의 기본 단위셀 라이브러리 생성
 - 격자 구조 자동 생성
 - 단위셀 및 격자 구조의 매개 변수를 쉽게 변경

2) 단위셀 설계 방법론 조사

- 격자 구조를 생성하기 위해 문헌 조사 결과 다음의 단계로 진행하는 것을 확인했다.
 - 1 단계. 단위셀의 라이브러리 생성
 - 2 단계. 단위셀 레이어 생성
 - 3 단계. 격자 구조의 볼륨 생성
 - 4 단계. 제품의 디자인 공간에 따라 격자 구조의 부피 수정

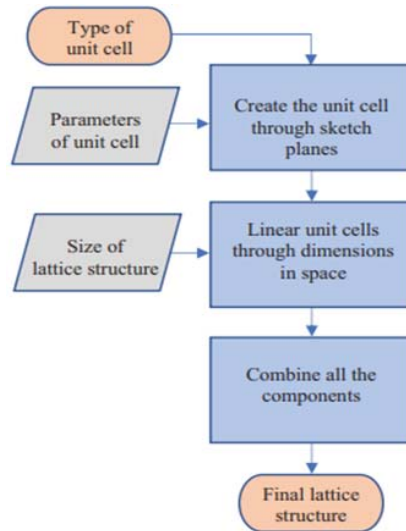


그림 8. 국외 일반적인 설계 프로세스

- 라이브러리에서 단위셀 유형을 선택하는 인터페이스 생성
 - 라이브러리에서 다양한 유형의 단위셀이 개발되었다. 이후 디자인 공간에서 격자 구조를 생성하기 위해서는 격자 구조의 기본 셀인 단위셀을 선택한다. 트러스 지름, 단위셀 치수와 같은 일부 입력 매개 변수가 필요하다. 마지막으로 SolidWorks의 API 기능을 기반으로 단위셀이 자동으로 생성된다.
- 격자 구조의 기본 매개 변수를 수집하는 인터페이스 생성
 - X, Y, Z 방향을 따른 단위셀의 수로서 격자 구조의 입력 매개 변수를 알아야한다. X, Y 방향에 따라 한 행에서 레이어로 셀 수가 생성된다. 그러면 Z 방향으로 단위셀 레이어의 레이어가 생성된다.
- 디자인 공간에서 격자 구조의 부피를 다듬기위한 인터페이스 생성
 - 설계 공간에서 생성 된 격자 구조의 부피를 맞추기 위해서는 설계 공간 외부의 격자 구조의 트러스를 제거해야한다.
- 이러한 매개 변수에는 트러스의 직경, X, Y, Z 방향의 단위셀 수가 포함된다. X 방향을 따라 단위셀 열이 생성 된 다음 단위셀의 패턴 행 집합에 의해 단위셀 레이어가 생성된다. 마지막으로, 모든 층에 의해 대량의 격자 구조를 만든다.
- 인터페이스에 의해 생성 된 격자 구조 모델의 제조 가능성을 확인하기 위해 FDM (Fused Deposition Modeling) 기술을 사용하여 3D 프린터로 격자 구조 볼륨의 몇 가지 예를 만들고 제조한다. 프로그램의 안정성과 성능을 검증하기 위해 다양한 유형의 단위셀을 가진 여러 격자 구조가 생성된다. 계산은 다음과 같은 컴퓨터에서 수행되었다.

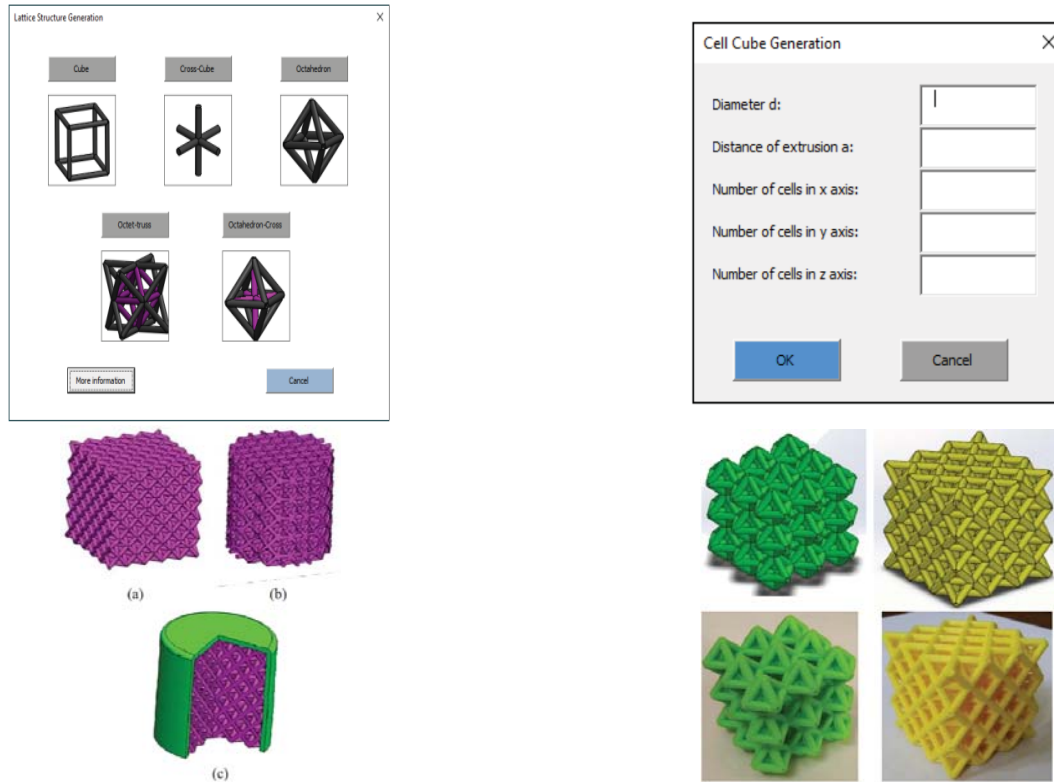


그림 9. 단위셀 설계 인터페이스 (사례조사)

3) 단위셀 및 격자구조체 설계 방법론 조사

- 또한 격자 구조의 단위셀의 반경 값과 종류가 고정되어있어 기계적 물성 및 반경의 계수를 설정하기가 매우 어렵다. 국외 선진 연구기관에서는 주기적 격자 구조의 다양한 구성에 대한 내구성과 기계적 특성을 조사하고 격자 구조에서 기계적 특성 요인과 철근의 반경 사이의 관계를 찾는 새로운 방법을 제시하고 있다.

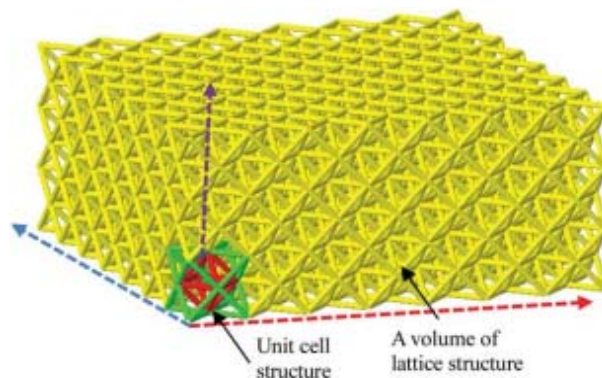


그림 10. 단위셀이 세 방향으로 반복되는 주기적인 격자 구조의 부피

- 주기적 격자 구조의 기계적 특성을 연구하는 데 초점을 맞춘 방법을 제안한다. 주기적 격자 구조의 기하학적 모델은 일련의 단위셀 구조로 구성된다. 단위셀 구조는 서로 연결되는 막대를 포함한다. 단위셀 구조는 좌표계에 따라 세 방향으로 반복된다.
- CAD 환경에서 생성 된 주기적 격자 구조의 기하학적 모델은 유한 요소 방법을 사용하여 기계적 특성을 고려하는 데 사용된다. 이러한 접근 방식은 요소의 크기와 수 때문에 메싱 단계에 큰 제한이 있다. 각 단위셀 구조에는 다른 것과 연결되는 막대가 많이 있다. 단위셀의 크기는 격자 구조의 부피에 비해 매우 작다. 격자 구조의 부피에서 단위셀 구조의 수는 매우 크다.
- CAD에서 격자 구조의 기하학적 모델을 사용하면 요소 수가 증가한다. 따라서 요소 수를 줄이기 위해 새로운 접근 방식이 논문에서 언급되고 계산 시간이 단축된다. 또한 이 접근 방식을 사용하면 격자

구조의 부피에서 각 막대의 반경을 변경할 수 있다. 결과적으로 기계적 특성 요소 간의 관계가 성립될 수 있다.

- 격자 구조는 다른 단위 구조 요소의 계층 구조로 간주 될 수 있다. 주기적 격자 구조의 기하학적 모델을 생성하기 위한 연구가 언급되어 있다. 그러나 이러한 제안된 방법은 단위셀 구조 요소의 다른 구성에서 주기적 격자 구조의 기하학적인 3D 모델을 생성하는 것이다. 이 모델은 유한 요소법을 사용하여 격자의 내구성과 기계적 특성을 분석 할 때 많은 제한이 있다. 따라서 본 논문에서는 단위셀 구조의 추상 모델을 기반으로 주기적 격자 구조의 기하학적 모델을 생성하는 새로운 접근 방식을 제안한다.
- 단위셀의 3D 기하학적 모델은 그림 3과 같이 서로 연결된 막대 세트를 포함한다. 단위셀에 있는 막대의 기하학적 단면은 원형, 직사각형, 삼각형 또는 모든 모양이 될 수 있다. 이 단면은 선이나 곡선을 따라 돌출되어 단위셀 구조에 막대를 만든다. 따라서 두 가지 기본 기하학적 요소를 기반으로 한 단위셀 구조의 추상 모델은 점과 선이다.
- 추상 모델로 모델링 된 여러 단위셀의 구성은 그림 4에 나와 있다. 단위셀 구조의 추상 모델은 두 지점을 연결하는 점과 선으로만 구성된다. 결과적으로, 주기적 격자 구조의 볼륨에 대한 추상 모델은 단위셀 구조의 추상 모델에 의해 생성된다. 주기적 격자 구조의 볼륨은 다음 단계에 의해 작성된다.

4) 단위셀 생성 프로세스

- 1 단계: 단위셀 행 생성
 - 기본 단위셀이라고 하는 단위셀 구조의 구성을 선택한 후 기본 단위셀을 한 방향으로 이동하여 단위셀 행의 추상 모델을 생성한다. octet-truss 단위셀 행의 추상 모델이 인접한 두 단위셀 사이에 겹치는 점과 선이 있다. 뒤에 있는 단위셀의 이 점과 선은 앞의 점과 선으로 대체됩니다.
- 2 단계 : 단위셀의 레이어 생성
 - 단위셀 행의 추상 모델은 방향을 따라 행을 이동하여 단위셀 레이어를 생성하는 데 사용된다. octet-truss 단위셀 레이어의 추상 모델은 두 개의 인접한 행 사이에 겹치는 점과 선이 분명히 있다. 뒤 행의 이 점과 선은 각각 앞 행의 점과 선으로 대체된다.
- 3 단계 : 단위셀의 부피 생성
 - 단위셀 레이어의 추상 모델은 레이어를 방향을 따라 이동하여 단위셀 부피를 만드는 데 사용된다. octet-truss 단위셀 부피의 추상 모델이 그림 7에 나와 있다. 인접한 두 레이어 사이에 겹치는 점과 선도 있다. 뒤에 있는 레이어의 이 포인트와 라인은 각각 앞 레이어의 포인트와 라인으로 대체된다.
- 4 단계 : 디자인 공간에서 격자 구조 생성
 - 주기적 격자 구조의 볼륨 모델은 3단계에서 cube 공간으로 작성된다. 제품 공간 내부에 주기적 격자 구조를 생성하기 위해서는 디자인 공간 외부의 체적을 제거하여 주기적 격자 구조의 체적을 제품의 디자인 공간에 매립해야한다.
 - Python 프로그래밍 언어를 사용하여 상용 소프트웨어 Abaqus에서 개발 된 프로그램은 압축, 전단, 비틀림 및 굽힘 테스트와 같은 다양한 기계적 특성 테스트에서 유한 요소 시뮬레이션을 자동으로 생성하는 것이다. 강성, 최대 응력 및 철근 반경 또는 격자 구조의 밀도 사이의 관계가 설정된다.

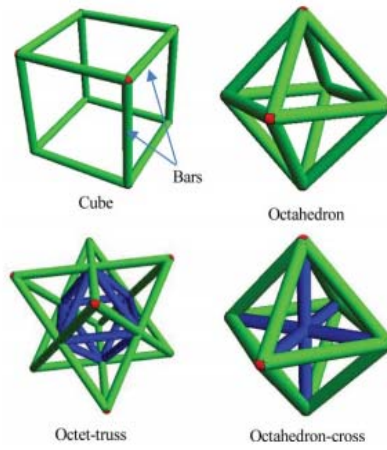


그림 11. 단위셀 구조의 3D 모델 구성

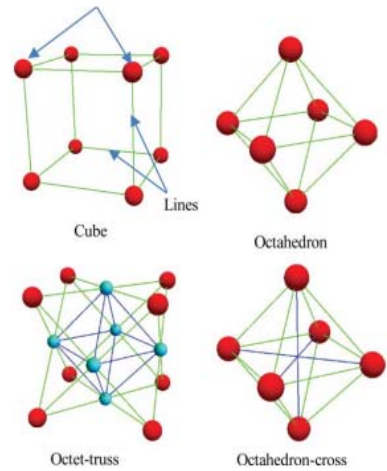


그림 12. 단위셀 구조의 추상 모델 구성

- 이 모델은 유한 요소법을 사용하여 격자의 내구성과 기계적 특성을 분석 할 때 많은 제한이 있다. 단위셀 구조의 추상 모델을 기반으로 주기적 격자 구조의 기하학적 모델을 생성하는 새로운 접근 방식을 제안한다.
- 단위셀의 3D 기하학적 모델은 단위셀에 있는 막대의 기하학적 단면은 원형, 직사각형, 삼각형 또는 모든 모양이 될 수 있다. 이 단면은 선이나 곡선을 따라 돌출되어 단위셀 구조에 막대를 만든다. 따라서 두 가지 기본 기하학적 요소를 기반으로 한 단위셀 구조의 추상 모델은 점과 선이다.
- 단위셀 구조의 추상 모델은 두 지점을 연결하는 점과 선으로만 구성된다. 결과적으로, 주기적 격자 구조의 볼륨에 대한 추상 모델은 단위셀 구조의 추상 모델에 의해 생성된다. 주기적 격자 구조의 볼륨은 다음 단계에 의해 작성된다.

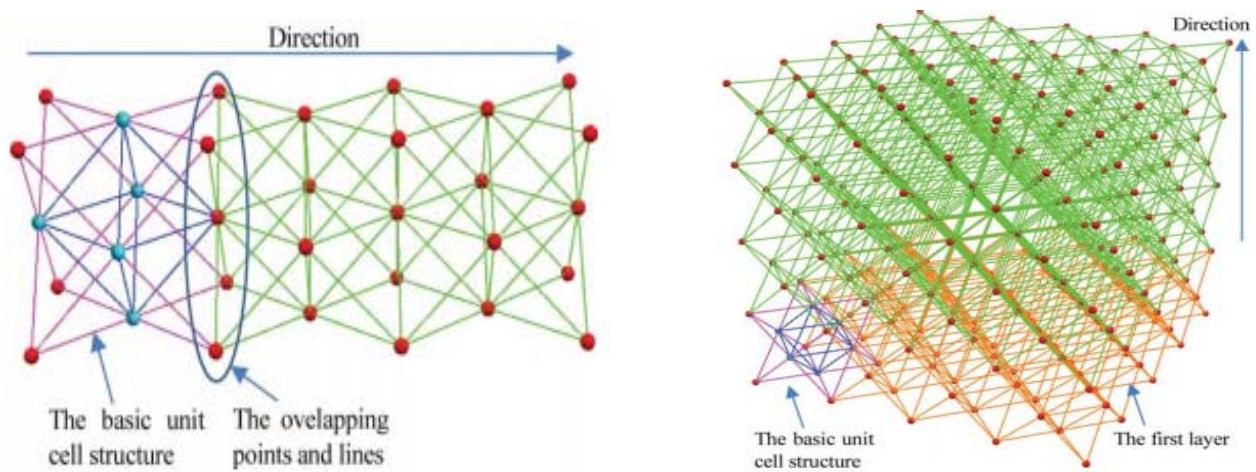


그림 13. octet-truss 단위셀의 행

□ 격자구조 최적화와 관련하여 다음과 같은 연구가 진행되고 있다.

- 격자 구조 특성화에 필요한 모든 기계적 특성 정보를 제공하는 논문에서 데이터를 수집했다. 테스트된 단위셀 토폴로지의 부피 비율은 다른 소스의 데이터를 비교하는 데 필요하다.
- ※ 데이터는 SLM 방식에 한해서 자료 수집

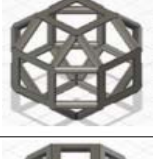
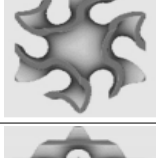
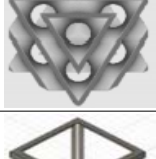
표 4. 단위셀 관련 국외 연구 사례

Author	Unit Cell Topology	Property	Data Type	Material
Ahmadi	Diamond	EC, YS, PR, BS, PS	A, E, F	Ti-6Al-4V
Ahmadi	Cubic, Diamond, Truncated Cube, Truncated Cuboctahedron, Rhombic Dodecahedron, Rhombicuboctahedron	EC, YS, PS	E	Ti-6Al-4V
Arabnejad	Octet-Truss	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
Ataee	TPMS Gyroid	EC, YS, PS	E	CP-Ti
Beyer	BCC	YS	E	AlSi10Mg
Bobbert	TPMS Gyroid, TPMS Diamond	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
Borleffs	Cubic, Diamond, Rhombic Dodecahedron, Truncated Octahedron	EC, PR	A, F	Ti-6Al-4V
Campanelli	FCCZ	YS, PS	E	Ti-6Al-4V
Cheng	Rhombic Dodecahedron	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
Choy	Cubic	EC, PS	E	Ti-6Al-4V
de Formanoir	Octet-Truss	EC	E	Ti-6Al-4V
Deshpande	Octet-Truss	EC, YS	A	n/a
Gümrük	BCC	EC, YS	E, F	SS 316 L
Gümrük	BCC, BCCZ, F2BCC	EC, YS	E	SS 316 L
Han	Cubic, BCC	EC, YS	E, F	Co-Cr
Harrysson	Rhombic Dodecahedron	EC, YS	E, F	Ti-6Al-4V
Hasib	Octahedron, Rhombic Dodecahedron	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
He	Octet-Truss	EC, YS	A	n/a
Hedayati	Cubic, Truncated Octahedron, Rhombic Dodecahedron, Diamond	EC, YS, PR	F	Ti-6Al-4V
Hedayati	Rhombicuboctahedron	EC, YS, PR	A, E, F	Ti-6Al-4V
Hedayati	Truncated Cube	EC, YS, PR, BS	A, E, F	Ti-6Al-4V
Hedayati	Cubic, Rhombic Dodecahedron, Diamond, Truncated Octahedron	EC, YS, PR	A, F	Ti-6Al-4V
Hedayati	Truncated Cuboctahedron	EC, YS, PR	A, F	Ti-6Al-4V
Hedayati	Octahedron	EC, PR	A, F	Ti-6Al-4V
Heinl	Diamond	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
Heinl	Diamond	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
Helou	TPMS Gyroid, TPMS Diamond	EC	E, F	SS GP1
Hussein	TPMS Gyroid, TPMS Diamond	EC, YS	E	Ti-6Al-4 V, AlSi10Mg, SS316 L
Leary	BCC, BCCZ, FCC, FCCZ, F2BCC	EC, YS	E	AlSi12Mg
Leary	BCC, BCCZ, FCC, FCCZ	EC, YS	E	Inconel 625
Lei	BCC, BCCZ	EC, YS	E, F	AlSi10Mg
Li	BCCZ	EC	A	AlSi10Mg
Li	Cubic, Rhombic Dodecahedron,	EC, PS	E	Ti-6Al-4V

	G7			
Liu	Rhombic Dodecahedron	EC	E	Ti2448
Liu	Rhombic Dodecahedron	EC	E	Ti2448
Mazur	BCC, FCC, F2BCCZ	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
McKown	BCC, BCCZ	EC, YS, PR	E	SS 316 L
Mines	BCC	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
Mullen	BCC	YS	E	CP-Ti
Murr	Rhombic Dodecahedron	EC	E	Co-Cr
Murr	Cubic, Rhombic Dodecahedron, G7	EC	E	Ti-6Al-4V
Murr	Rhombic Dodecahedron	EC	E	Inconel 625
Ozdemir	Diamond	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
Parthasarathy	Cubic	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
Ptochos	BCC	EC, PR	A	n/a
Rehme	FCC, FCCZ, BCC, BCCZ, F2BCC, F2BCCZ	YS	E	SS 316 L
Sallica-Leva	Cubic	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
Shen	BCC, BCCZ	YS	E	SS 316 L
Smith	BCC, BCCZ	EC, YS, PS	E, F	SS 316 L
Suard	Octet-Truss	EC	E, F	Ti-6Al-4V
Tancogne-Dejean	Octet-Truss	EC, PR	F	SS 316 L
Tsopanos	BCC	EC, YS	E	SS 316 L
Ushijima	BCC	EC, PR	A, F	SS 316 L
Ushijima	BCC	EC, PR, YS	A	SS 316 L
Van Grunsven	Diamond	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
Wauthle	Diamond	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
Xiao	Rhombic Dodecahedron	EC, YS, PS	E	Ti-6Al-4V
Yan	TPMS Gyroid	YS	E	AlSi10Mg
Yan	TPMS Diamond	EC, YS	E	AlSi10Mg
Yan	TPMS Gyroid	EC, YS	E	SS 316 L
Yan	TPMS Gyroid	EC, YS	E	SS 316 L
Yan	TPMS Gyroid, TPMS Diamond	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
Yanez	TPMS Gyroid	EC, YS	E, F	Ti-6Al-4V
Yang	TPMS Gyroid	EC	E, F	Ti-6Al-4V
Zadpoor	Cubic, Diamond, Truncated Cube, Truncated Cuboctahedron, Rhombic Dodecahedron, Rhombicuboctahedron, Truncated Octahedron, Octahedron, BCC, FCC	EC, PR, YS, BS	A	n/a
Zaharin	Cubic, TPMS Gyroid	EC, YS	E, F	Ti-6Al-4V
Zhao	Cubic, Rhombic Dodecahedron, G7	EC, PS	E	Ti-6Al-4V
Zhao	BCC	EC, YS	E	Ti-6Al-4V
Zhu	Truncated Octahedron	PR	A	n/a

※ A;분석데이터 유형, AM;첨가제 제조, BS;고형의 항복 응력에 의해 정규화 된 격자 구조의 좌굴 응력, E;실험 데이터 유형, EC;고형 재료 계수로 정규화된 격자 구조 압축 탄성 계수, F;유한 요소 분석 데이터 유형, FEA; 유한 요소 분석, PR;격자 구조의 포아송의 비율, PS;고형의 항복 응력에 의해 정규화 된 격자 구조의 고원 응력, YS;고형의 항복 응력에 의해 정규화 된 격자 구조 항복 응력

표 5. 단위셀 형상 수집

Unit Cell Topology	Image	Unit Cell Topology	Image
Cubic		BCC	
Diamond		BCCZ	
Truncated Cube		FCC	
Truncated Cuboctahedron		FCCZ	
Rhombic Dodecahedron		F2BCC	
Rhombicuboctahedron		F2BCCZ	
Truncated Octahedron		TPMS Gyroid	
Octahedron		TPMS Diamond	
Octet-Truss		G7	

[설계 프로세스 현황]

□ 격자구조체(lattice structure)는 일반적으로 특정 공간에 단위셀을 반복하여 구성한다. 따라서 격자구조체 설계에는 단위셀(unit cell) 설계 및 패턴 설계가 중요하다. 그러나, 단위셀 설계자동화 및 오픈라이브러리 등은 전무한 실정이다. 또한, 각 단위셀의 특징점에 대한 기존 문헌또한 전무한 실정이며 현재 연구 초기단계로 분석할 수 있다.

[설계 프로세스 시사점]

- 단위셀 라이브러리 제공 및 설계자동화가 필요하며, 오픈소스 개념의 데이터 제공이 필요하다. 따라서, 대표적인 프로그램(rhinoceros) 등의 add-on 형태의 자동화 프로그램이 필요하다고 판단된다.
- 단위셀 형상에 따른 상대밀도 제어가 필요하다. 격자구조체의 성능에 큰 영향을 미치는 요소는 상대밀도이며, 따라서 격자구조체 상대밀도를 결정할 수 있도록 최소단위인 단위셀의 상대밀도 조정 자동화가 필요하다고 판단된다.
- 특정공간에 단위셀을 반복함으로써 격자구조체 제조를 하고 있다. 단위셀의 바운더리크기를 조정하고, X, Y, 및 Z축 방향의 반복패턴을 설정함으로써 격자구조체 제조가 가능할 것으로 판단된다.
- 결과적으로, 본 연구 수행을 통해 단위셀 형상제어 및 물리적 특성에 대한 DB를 지속적으로 보유함으로써, 향후 금속 프린터를 활용한 격자구조체 설계/제조 분야에서 유효한 자료로써 활용될 수 있다고 판단된다.

(3.2) 단위셀 형상 설계 프로세스 수립 : 단위셀 형상 최종 설계 프로세스 대상을 수립한다.

(3.2.1) 격자구조체 설계프로세스 단계별 요구조건 수립

- ☐ 본 장에서는 격자구조체 설계를 가능하게 하기 위하여 단계별 설계 프로세스를 제시하는 것이 목적이다.
- 다음과 같이 단계별 요구수준 형식을 제안한다.

표 6. 설계프로세스 단계별 요구조건 수립 (input 값 설정)

lattice pattern setting (단위셀 형상 구현)	
단위셀 종류 unit cell type	● 단위셀 구현 : 3차원 좌표데이터 구축 (함수값 도출)
lattice parameter setting (단위셀 형상 제어)	
대상체 크기	● 대상체 크기 조절 : X, Y, 및 Z 3차원 공간 크기 조절 (0.01mm~무한대)
단위셀 элемент 형상 제어	● 단위셀 элемент(elements) 단면 형상 제어 : 본 연구에서는 원형으로 한정함 → 단면적 제어를 통해 단위셀 상대밀도 구현
단위셀 상대밀도 구현	● 단위셀별 상대밀도 DB 확보 : 0.01~0.90 구현을 위한 각 단위셀별 단면적(원형단면의 반지름) 도출 : 대상체 크기의 한번 및 원형단면 반지름 비(r/s) 데이터 구축
lattice layout setting (단위셀 배열을 통한 격자구조체 설계)	
배열	● X,Y, 및 Z 축 방향 배열 : X,Y, 및 Z 축 방향 배열값 (1~무한대 설정)

- ☐ 단위셀 및 격자구조체 설계 편의성/범용성을 고려하여 rhinoceros add-on 형태로 제작했으며, 단계별 input값을 도출했다.

(3.2.2) 단계별 요구조건에 따른 Rhinoceros add-on 모델링툴 제작

- 설계프로세스 단계별 요구조건을 반영한 rhinoceros add-on 모델링 툴을 아래와 같이 제작했다.
- 범용성을 고려하여 rhinoceros add-on 형태의 별도 툴 제작

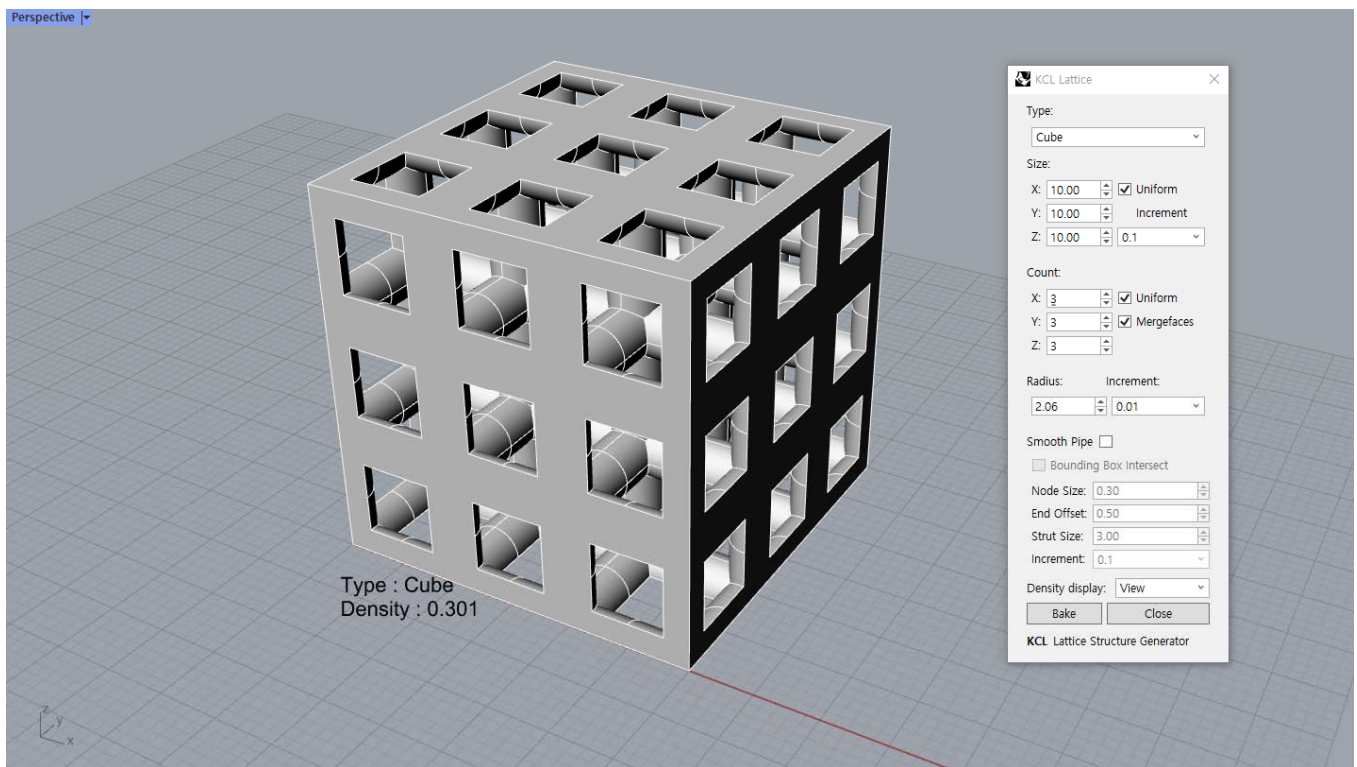


그림 14. 격자구조체 설계툴 전경

KCL Lattice

Type:

Cube

Size:
 X:

10.00

☒ Uniform
 Y:

10.00

 Increment
 Z:

10.00

0.1

Count:
 X:

1

☒ Uniform
 Y:

1

☒ Mergefaces
 Z:

1

Radius:
 Increment:

2.06

0.01

Smooth Pipe ☐
☐ Bounding Box Intersect
 Node Size:

0.30

 End Offset:

0.50

 Strut Size:

3.00

 Increment:

0.1

Density display:

View

Bake

Close

KCL Lattice Structure Generator

[기능 구현]

- 1) Type : cube 외 20종 구현 완료
- 2) Size : 단위셀 크기 제어
 X,Y,Z : 0.01mm~ 크기 입력
 Uniform : X=Y=Z 정육면체 형태 시 선택
 Increment : 0.1, 0.01 단위로 크기 조정
- 3) Count : 배열 제어
 X,Y,Z : 1~ 배열수 입력
 Uniform : X=Y=Z 정육면체 형태 시 선택
 Mergefaces : 경계면 처리 조건 (merge 선택 시 union 처리함)
- 4) Radius : 엘레먼트 단면 반지름 입력
 Increment : 0.1, 0.01 단위로 크기 조정
- 5) Smooth pipe (현재 계속 업데이트 중)

 Node Size : 꼭지점 반경
 End Offset : 꼭지점기준에서 offset 간격 조정
 Strut Size : 엘레먼트 단면 반지름 조정
 Increment : 0.1, 0.01 단위로 크기 조정
- 6) Density display : 화면상 상대밀도 값 표기

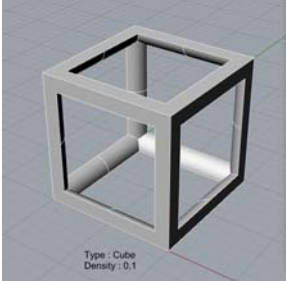
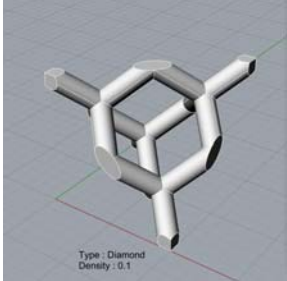
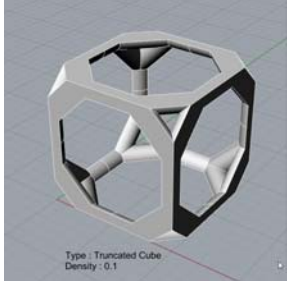
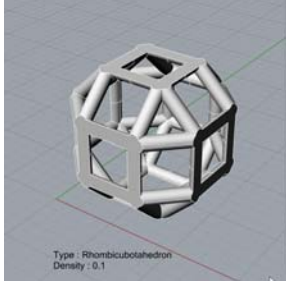
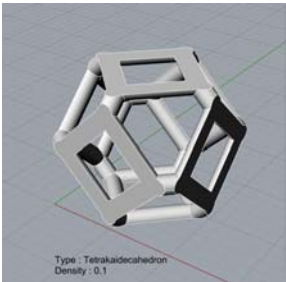
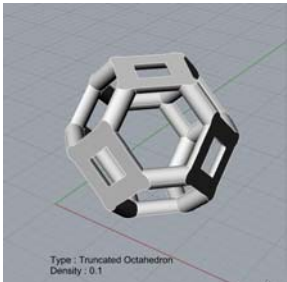
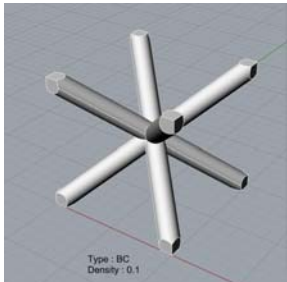
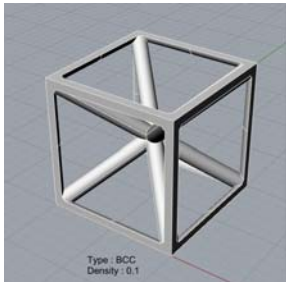
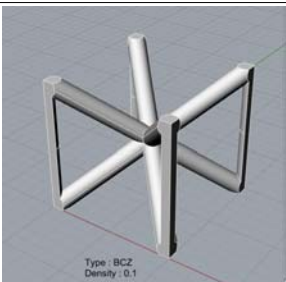
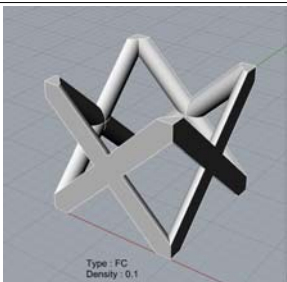
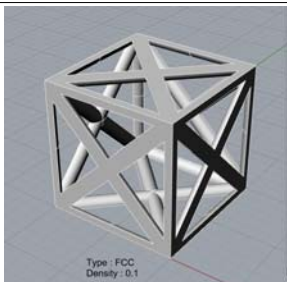
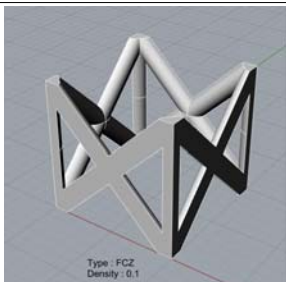
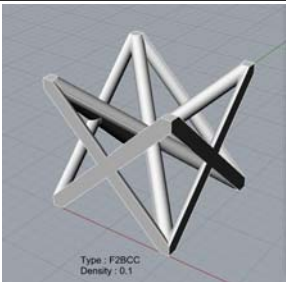
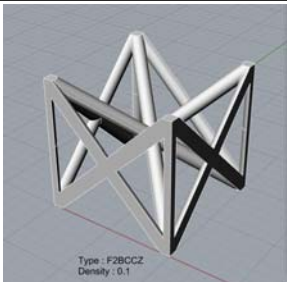
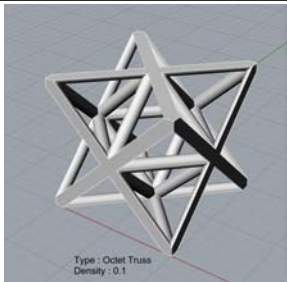
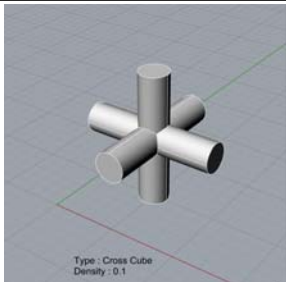
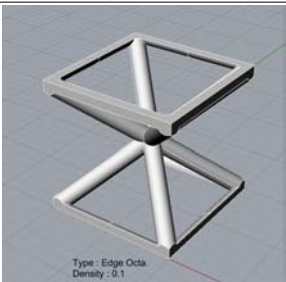
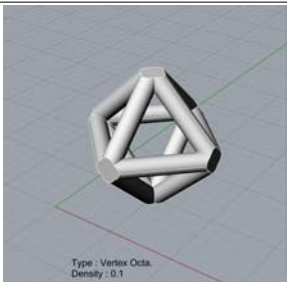
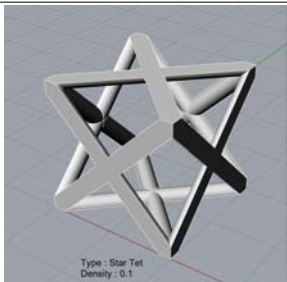
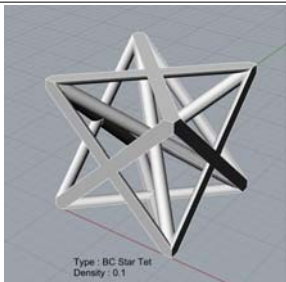
그림 15. 격자구조체 설계툴 기능 설명

1) Type : simple cube 외 20종 구현

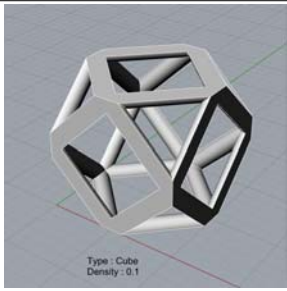
□ simple cubic 외 20종에 대해서 단위셀 입력 가능

※ 표는 상대밀도 0.1의 형상을 나열했음.

표 7. 단위셀 형상 입력

Unit Cell Topology			
			
simple cubic (cube)	diamond	truncated cube	rhombicuboctahedron
			
tetrikaidecadron	truncated octahedron	body center	body centered cubic
			
body-centred parallelepiped with struts in z-axis (BCZ)	face center	face centered cubic	face-centred parallelepiped with struts in z-axis(FCZ)
			
two face-centered cubic with BCC combined (F2BCC)	two face-centered cubic with BCC combined in z-axis (F2BCCZ)	octet truss	cross cube
			
edge octa	vertex octa	star tet	BC star tet

Unit Cell Topology



cuboctahedron

—

—

—

2) Size : 단위셀 크기 입력

- ☐ X,Y,Z : 0.01mm~ 크기 입력
- ☐ Uniform : X=Y=Z 정육면체 형태 시 선택
- ☐ Increment : 0.1, 0.01 단위로 크기 조정

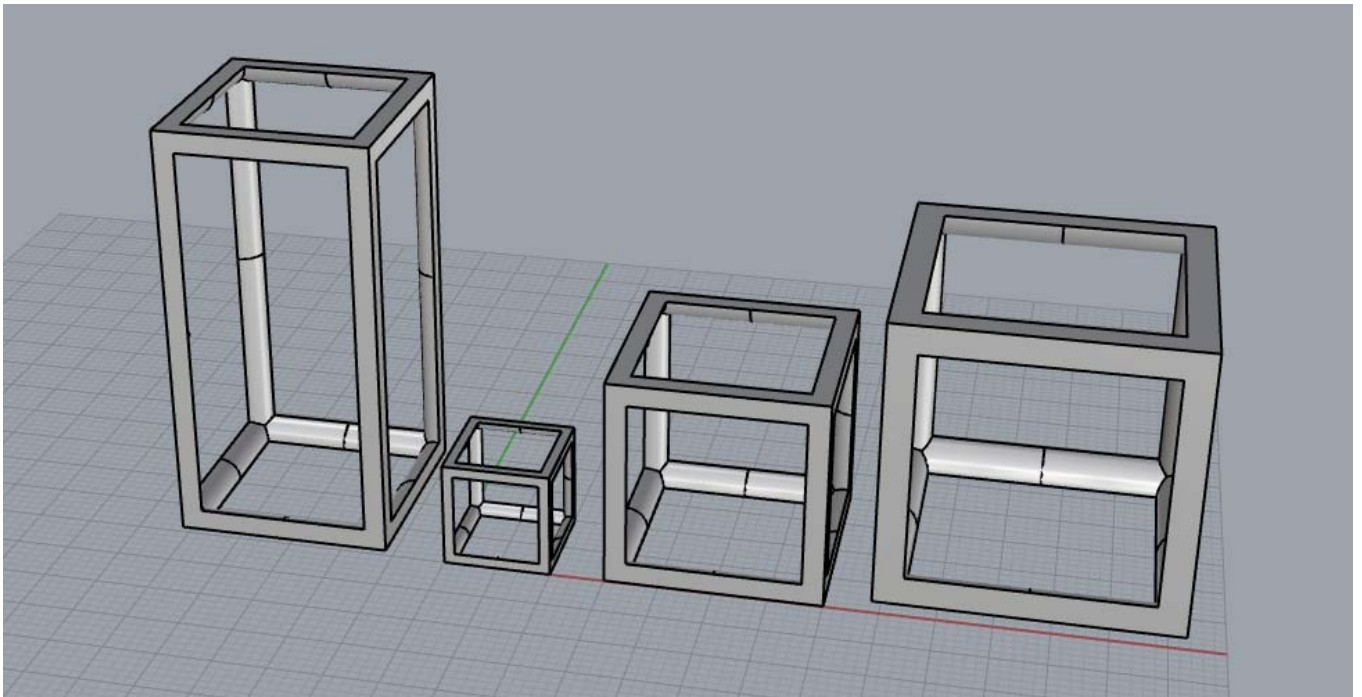


그림 3-16. 단위셀 크기 입력

3) Count : 배열 제어

- ☐ X,Y,Z : 1~ 배열수 입력
- ☐ Uniform : $X=Y=Z$ 정육면체 형태 시 선택
- ☐ Mergefaces : 경계면 처리 조건 (merge 선택 시 union 처리함)

4) Radius : 엘레먼트 단면 반지름 입력

- ☐ 단면 반지름으로 상대밀도 조정

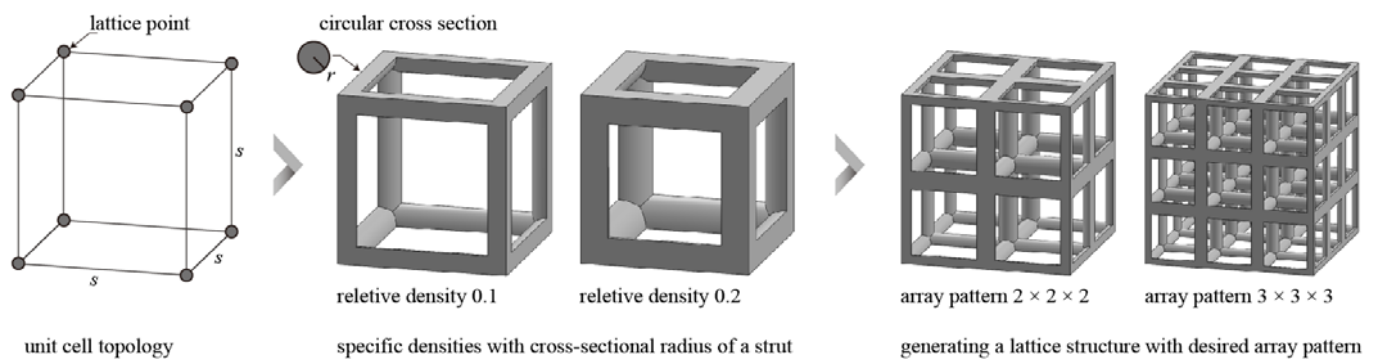


그림 17. 단위셀 배열 및 단면반지름 입력

- ☐ 단계별 요구조건 input 값을 반영하여, rhinoceros add-on 모델링툴 제작
 - 단위셀 형상 DB의 계속적 축적 및 r/s 값에 따른 각 단위셀별 상대밀도 DB 축적을 계속적으로 진행.
- ☐ 모델은 step 확장자로 출력가능하여, 유한요소해석(FEA) 진행에 수월하게 했음.
- ☐ 또한, stl 확장자로 출력가능하여, 범용적 3D프린팅 장비로 출력할 때 수월하게 했음.

(3.2.3) 단위셀 후보군 제시

□ 단위셀의 생성방법은 다음과 같은 프로세스로 진행했다.

- 기존 연구에서는 기하학적 구성 방법을 적용하여 단위셀 및 격자구조체를 구현하고 있으며, 단위셀의 바운더리 박스(boundary box) 크기 및 스트럿 반경에 따른 상대밀도의 관계식에 대해서는 보고하고 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 단위셀 형성을 위하여 3차원 좌표 방법을 제안하고자 한다. 단위셀의 노드(꼭지점, node)를 3차원 좌표값으로 제시하고 해당 노드를 연결하여 스트럿을 생성하는 방법으로 3D 모델링 및 데이터 관리 편의성을 확보하고자 한다.
- simple cubic, body-centered cubic 및 face-centered cubic을 예시로 3차원 좌표 방법의 데이터를 표기했다. 여기서 s 는 바운더리 박스 한 변 길이를 의미한다. 예를 들어 simple cubic의 경우 노드.1~8까지 생성하고, 노드.1-2 및 1-4를 연결하여 스트럿 요소를 생성했다.

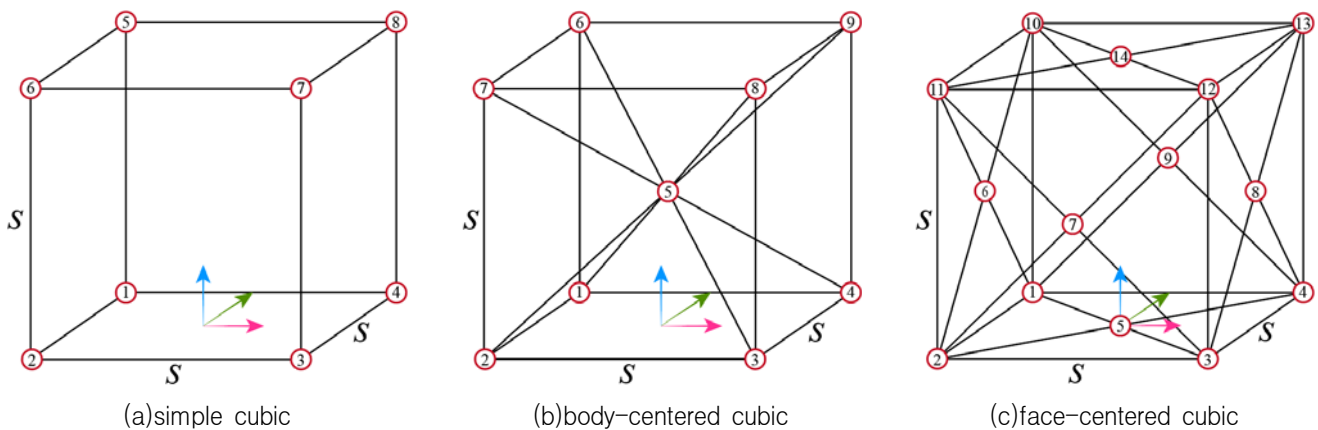


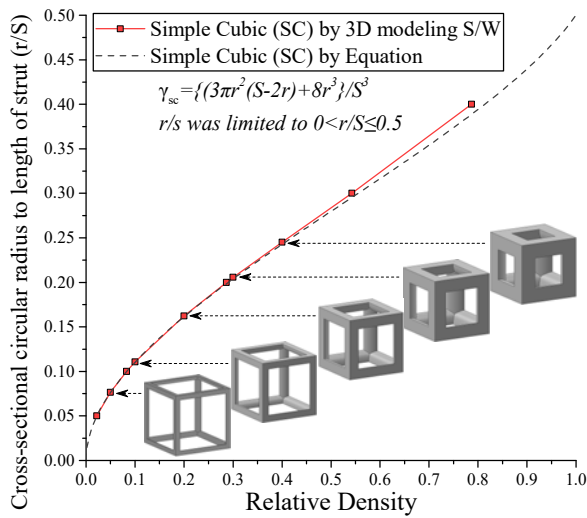
그림 18. 단위셀 좌표값 (예시)

표 8. 단위셀 좌표값 및 스트럿 연결 (예시)

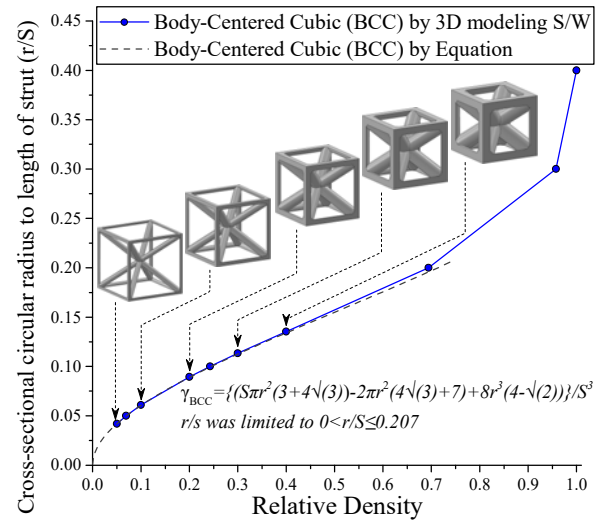
simple Cubic				Body-Centered Cubic				Face-Centered Cubic			
node	X	Y	Z	node	X	Y	Z	node	X	Y	Z
1	$-S/2$	$S/2$	0	1	$-S/2$	$S/2$	0	1	$-S/2$	$S/2$	0
2	$-S/2$	$-S/2$	0	2	$-S/2$	$-S/2$	0	2	$-S/2$	$-S/2$	0
3	$S/2$	$-S/2$	0	3	$S/2$	$-S/2$	0	3	$S/2$	$-S/2$	0
4	$S/2$	$S/2$	0	4	$S/2$	$S/2$	0	4	$S/2$	$S/2$	0
5	$-S/2$	$S/2$	S	5	0	0	$S/2$	5	0	0	0
6	$-S/2$	$-S/2$	S	6	$-S/2$	$S/2$	S	6	$-S/2$	0	$S/2$
7	$S/2$	$-S/2$	S	7	$-S/2$	$-S/2$	S	7	0	$-S/2$	$S/2$
8	$S/2$	$S/2$	S	8	$S/2$	$-S/2$	S	8	$S/2$	0	$S/2$
-	-	-	-	9	$S/2$	$S/2$	S	9	0	$S/2$	$S/2$
				-	-	-	-	10	$-S/2$	$S/2$	S
								11	$-S/2$	$-S/2$	S
								12	$S/2$	$-S/2$	S
								13	$S/2$	$S/2$	S
								14	0	0	S

- 스트럿 원형단면 반경을 제어함으로써 단위셀 상대밀도를 조정했다. 스트럿 단면 반경과 바운더리 박스 한변의 길이 비율(cross-sectional circular radius to boundary box, r/s) 데이터를 축적했다. 단위셀 별 상대밀도는 수학적 도출 및 rhinoceros add-on 설계툴을 통한 s/w 값을 도출하여 비교했다.
- 단위셀의 상대밀도(γ)는 V_s/V 로 계산했다. 여기서 V_s 는 단위 셀의 체적이고 V 는 바운더리 박스의 총 체적이다. 각 단위 셀의 체적을 수학적으로 도출하기 위해, 교차하지 않는 스트럿 체적을 도출한 후 교차점 체적을 추가했다. 스트럿 체적은 일반적으로 원기둥 체적을 구하는 식을 바탕으로 했고 각

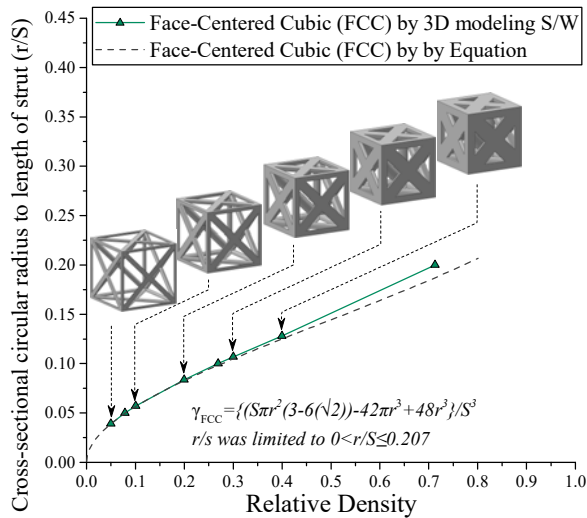
교차점의 중복된 체적은 수식적으로 계산하는데 제약이 따르기 때문에 한 변이 2r인 정육면체로 가정했다.



(a)simple cubic



(b)body-centered cubic



(c)face-centered cubic

그림 19. 단위셀 상대밀도 제어 (예시)

□ 최종적으로 각 단위셀에 따른 좌표값 및 상대밀도 DB를 3.2.4 챕터에 기재한다.

- 다음의 단위셀에 대하여 DB를 제공한다.

- 단위셀 노드를 3차원 좌표값으로 제시하고 해당 노드를 연결하여 스트럿을 생성하는 방법으로 3D 모델링 및 데이터 관리 편의성을 확보하고자 한다.
- 스트럿 원형단면 반경을 제어함으로써 단위셀 상대밀도를 조정했다. 스트럿 단면 반경과 바운더리 박스 한변의 길이 비율(cross-sectional circular radius to boundary box, r/s) 데이터를 축적했다.
- 최종적으로 각 단위셀에 따른 좌표값 및 상대밀도를 구현하기 위한 r/s 데이터를 제공함으로써, 단위셀 설계 분야의 기초자료로 활용됨을 기대한다.

(3.2.4) 단위셀 별 밀도제어 데이터베이스 제공

- 단위셀 별 정의, 구성요소, 좌표값 및 산술적 상대밀도식으로 DB를 구성했다.

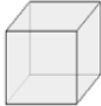
Simple Cubic

1정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)

단위셀을 구성하는 기본벡터들의 크기가 서로 같고 직각을 이룬 가장 단순한 형태의 결정 구조

형상(Figure)



2구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	8
2	Element	선	12
3	Face	면	6
4	Angle	각	90°

3각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	-S/2	S/2	0
2	-S/2	-S/2	0
3	S/2	-S/2	0
4	S/2	S/2	0
5	-S/2	S/2	S
6	-S/2	-S/2	S
7	S/2	-S/2	S
8	S/2	S/2	S

비고(Remark)

1. Node(1,2,3,4)로 이루어진 사각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정

2. R은 root 값을 의미

4관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)		결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	Max(z)-Min(z)	S
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	Max(x)-Min(x)	S
		Max(y)-Min(y)	
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 ± 중복된 부피	$((12 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (S-2r))/4 + (8 \cdot (2r)^3)/8)$

비고(Remark)

1. 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사

2. 단위 형상에 대한 부피

- $((12 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (S-2r))/4)$ -> 꼭지점을 제외한 strut 부피의 총합

- $(8 \cdot (2r)^3)/8$ -> 꼭지점에 대한 부피의 총합

- 반지름의 길이가 증가해도 겹치는 부분이 존재하지 않음.

5상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1	0.05	0.76	0.0497
2	0.1	1.11	0.1013
3	0.2	1.62	0.2012
4	0.3	2.06	0.3051
5	0.4	2.45	0.4062

0.9934

1.0128

1.0061

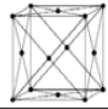
1.017033

1.015425

그림 20. 단위셀 DB (simple cubic)

Face centered cubic

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
입방체의 각 모서리 이외에 각 면의 중심에 1개씩 원자가 들어 있는 구조	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	14
2	Element	선	36
3	Face	면	6
4	Angle	각	90°

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	-S/2	S/2	0
2	-S/2	-S/2	0
3	S/2	-S/2	0
4	S/2	S/2	0
5	0	0	0
6	-S/2	0	S/2
7	0	-S/2	S/2
8	S/2	0	S/2
9	0	S/2	S/2
10	-S/2	S/2	S
11	-S/2	-S/2	S
12	S/2	-S/2	S
13	S/2	S/2	S
14	0	0	S

비고(Remark)

- Node(1,2,3,4)로 이루어진 사각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정
- R은 root 값을 의미

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)	결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	$\text{Max}(z) - \text{Min}(z)$ S
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	$\text{Max}(x) - \text{Min}(x)$ $\text{Max}(y) - \text{Min}(y)$ S
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 ± 중복된 부피 $\frac{(12\pi r^2(S-2r))/4 + 12r^2\pi((R(2)S-2r)/2-2r) + 3(2r)^3 + 3(2r)^3}{}$

비고(Remark)

- 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한번을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사
- 단위 형상에 대한 부피
 - $(12\pi r^2(S-2r))/4 \rightarrow$ Simple Cubic과 같이 꼭지점을 제외한 strut 부피의 총합
 - $12r^2\pi((R(2)S-2r)/2-2r) \rightarrow$ 각 면을 이루는 strut의 교점을 제외한 부피의 총합
 - $3(2r)^3 \rightarrow$ 각 면을 이루는 strut 교점 부피의 총합
 - $8\pi((2r)^3)/8 \rightarrow$ 각 꼭지점에 대한 부피의 총합
 - 반지름의 길이가 증가하면 각 면에서 겹치는 부분이 존재하기 때문에 strut radius의 범위 설정 $((1+R(2))r < 5) \rightarrow (r < 2.07)$

5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1	0.05	0.392	0.050
2	0.1	0.570	0.102
3	0.2	0.838	0.205
4	0.3	1.068	0.310
5	0.4	1.280	0.415

0.99800
1.01680
1.02420
1.03423
1.03780

그림 21. 단위셀 DB (face centered cubic)

face center (FC)

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
입방체의 각 모서리 이외에 각 면의 중심에 1개씩 원자가 들어 있는 구조	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	12
2	Element	선	16
3	Face	면	4
4	Angle	각	90°

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	-S/2	S/2	0
2	-S/2	-S/2	0
3	S/2	-S/2	0
4	S/2	S/2	0
5	-S/2	0	S/2
6	0	-S/2	S/2
7	S/2	0	S/2
8	0	S/2	S/2
9	-S/2	S/2	S
10	-S/2	-S/2	S
11	S/2	-S/2	S
12	S/2	S/2	S

비고(Remark)

- Node(1,2,3,4)로 이루어진 사각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정
- R은 root 값을 의미

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)		결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	Max(z)-Min(z)	S
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	Max(x)-Min(x) Max(y)-Min(y)	S
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 ± 중복된 부피	$(8 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot ((R(2) \cdot S - 2 \cdot r)/2 - 2 \cdot r) + 2 \cdot (2 \cdot r)^3 + 3 \cdot (2 \cdot r)^3)$

비고(Remark)

- 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사
- 단위 형상에 대한 부피
 - $8 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot ((R(2) \cdot S - 2 \cdot r)/2 - 2 \cdot r)$ -> 각 면을 이루는 strut의 교점을 제외한 부피의 총합
 - $2 \cdot (2 \cdot r)^3$ -> 각 면을 이루는 strut 교점 부피의 총합
 - $8 \cdot 3 \cdot (((2 \cdot r)^3)/8)$ -> 각 꼭지점에 대한 부피의 총합

5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)	
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)		
1	0.05	0.560	0.050	1.00000
2	0.1	0.810	0.098	0.98000
3	0.2	1.195	0.193	0.96500
4	0.3	1.517	0.285	0.95000
5	0.4	1.820	0.375	0.93750

그림 22. 단위셀 DB (face centered)

face-centred parallelepiped with struts in z-axis(FCZ)

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
입방체의 각 모서리 이외에 각 면의 중심에 1개씩 원자가 들어 있는 구조	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	12
2	Element	선	20
3	Face	면	4
4	Angle	각	90°

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	-S/2	S/2	0
2	-S/2	-S/2	0
3	S/2	-S/2	0
4	S/2	S/2	0
5	-S/2	0	S/2
6	0	-S/2	S/2
7	S/2	0	S/2
8	0	S/2	S/2
9	-S/2	S/2	S
10	-S/2	-S/2	S
11	S/2	-S/2	S
12	S/2	S/2	S

비고(Remark)

- Node(1,2,3,4)로 이루어진 사각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정
- R은 root 값을 의미

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)	결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	Max(z)-Min(z) S
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	Max(x)-Min(x) Max(y)-Min(y) S
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Struts의 부피 ± 중복된 부피 $\frac{(4\pi r^2(S-2r))/4 + 8\pi r^2((R(2)S-2r)/2 - 2r) + 2(2r)^3 + 3(2r)^3}{8}$

비고(Remark)

- 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한번을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사
- 단위 형상에 대한 부피
 - $(4\pi r^2(S-2r))/4$ -> Simple Cubic과 같이 꼭지점을 제외한 strut 부피의 총합
 - $8\pi r^2((R(2)S-2r)/2 - 2r)$ -> 각 면을 이루는 strut의 교점을 제외한 부피의 총합
 - $2(2r)^3$ -> 각 면을 이루는 strut 교점 부피의 총합
 - $8\pi r^3/8$ -> 각 꼭지점에 대한 부피의 총합

5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1	0.05	0.545	0.055
2	0.1	0.752	0.101
3	0.2	1.115	0.202
4	0.3	1.430	0.306
5	0.4	1.729	0.410

1.10000
1.01000
1.01000
1.02000
1.02500

그림 23. 단위셀 DB (FCZ)

two face-centered cubic with BCC combined (F2BCC)

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
입방체의 각 모서리 이외에 각 면의 중심에 1개씩 원자가 들어 있는 구조	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	13
2	Element	선	24
3	Face	면	4
4	Angle	각	90°

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	-S/2	S/2	0
2	-S/2	-S/2	0
3	S/2	-S/2	0
4	S/2	S/2	0
5	-S/2	0	S/2
6	0	-S/2	S/2
7	S/2	0	S/2
8	0	S/2	S/2
9	0	0	S/2
10	-S/2	S/2	S
11	-S/2	-S/2	S
12	S/2	-S/2	S
13	S/2	S/2	S

비고(Remark)

- Node(1,2,3,4)로 이루어진 사각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정
- R은 root 값을 의미

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)	결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	$\text{Max}(z) - \text{Min}(z)$ S
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	$\text{Max}(x) - \text{Min}(x)$ $\text{Max}(y) - \text{Min}(y)$ S
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 ± 중복된 부피 $(8 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot ((R(2) \cdot S - 2 \cdot r)/2 - 2 \cdot r) + 2 \cdot (2 \cdot r)^3 + 8 \cdot 3 \cdot ((2 \cdot r)^3)/8) + 8 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot ((R(3) \cdot S - 2 \cdot r)/2 - R(3) \cdot r) + 8 \cdot (2 - R(2)) \cdot r^3$

비고(Remark)

- 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사
- 단위 형상에 대한 부피
 - $8 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot ((R(2) \cdot S - 2 \cdot r)/2 - 2 \cdot r)$ -> 각 면을 이루는 strut의 교점을 제외한 부피의 총합
 - $2 \cdot (2 \cdot r)^3$ -> 각 면을 이루는 strut 교점 부피의 총합
 - $8 \cdot 3 \cdot ((2 \cdot r)^3)/8$ -> 각 꼭지점에 대한 부피의 총합
 - $8 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot ((R(3) \cdot S - 2 \cdot r)/2 - R(3) \cdot r)$ -> 대각선을 이루는 strut의 교점을 제외한 부피의 총합
 - $8 \cdot (2 - R(2)) \cdot r^3$ -> 대각선 strut 교점에 대한 부피의 총합(세개의 원기둥이 직교할 때 공통부분의 부피)

5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)	
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)		
1	0.05	0.373	0.050	1.00000
2	0.1	0.541	0.100	1.00000
3	0.2	0.799	0.202	1.01000
4	0.3	1.015	0.303	1.01000
5	0.4	1.215	0.405	1.01250

그림 24. 단위셀 DB (F2BCC)

two face-centered cubic with BCC combined in z-axis (F2BCCZ)

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
입방체의 각 모서리 이외에 각 면의 중심에 1개씩 원자가 들어 있는 구조	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	12
2	Element	선	16
3	Face	면	4
4	Angle	각	90°

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	-S/2	S/2	0
2	-S/2	-S/2	0
3	S/2	-S/2	0
4	S/2	S/2	0
5	-S/2	0	S/2
6	0	-S/2	S/2
7	S/2	0	S/2
8	0	S/2	S/2
9	-S/2	S/2	S
10	-S/2	-S/2	S
11	S/2	-S/2	S
12	S/2	S/2	S

비고(Remark)

- Node(1,2,3,4)로 이루어진 사각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정
- R은 root 값을 의미

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)	결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	$\text{Max}(z)-\text{Min}(z)$ S
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	$\text{Max}(x)-\text{Min}(x)$ $\text{Max}(y)-\text{Min}(y)$ S
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 $\pm$ 중복된 부피 $\frac{(8\pi r^2(S-2r))/4 + 8r^2\pi((R(2)S-2r)/2-2r) + 2^*(2r)^3 + 8^*3*((2r)^3)/8}{8r^2\pi((R(3)S-2r)/2-R(3)r) + 8^*(2-R(2))^*r^3}$

비고(Remark)

- 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사
- 단위 형상에 대한 부피
 - $(8\pi r^2(S-2r))/4$ -> Simple Cubic과 같이 꼭지점을 제외한 strut 부피의 총합
 - $8r^2\pi((R(2)S-2r)/2-2r)$ -> 각 면을 이루는 strut의 교점을 제외한 부피의 총합
 - $2^*(2r)^3$ -> 각 면을 이루는 strut 교점 부피의 총합
 - $8^*3*((2r)^3)/8$ -> 각 꼭지점에 대한 부피의 총합
 - $8r^2\pi((R(3)S-2r)/2-R(3)r)$ -> 대각선을 이루는 strut의 교점을 제외한 부피의 총합
 - $8^*(2-R(2))^*r^3$ -> 대각선 strut 교점에 대한 부피의 총합(세개의 원기둥이 직교할 때 공통부분의 부피)

5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1	0.05	0.360	0.054
2	0.1	0.523	0.109
3	0.2	0.769	0.220
4	0.3	0.975	0.332
5	0.4	1.169	0.447

1.08000
1.09000
1.10000
1.10667
1.11750

그림 25. 단위셀 DB (F2BCCZ)

Truncated cube

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
cube 모서리 부 모따기 형상	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	24
2	Element	선	36
3	Face	면	14
4	Angle	각	60°, 120°

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	-S/2	(S/2)*tan67.5°	0
2	-(S/2)*tan67.5°	S/2	0
3	-(S/2)*tan67.5°	-S/2	0
4	-S/2	-(S/2)*tan67.5°	0
5	S/2	-(S/2)*tan67.5°	0
6	(S/2)*tan67.5°	-S/2	0
7	(S/2)*tan67.5°	S/2	0
8	S/2	(S/2)*tan67.5°	0
9	-(S/2)*tan67.5°	(S/2)*tan67.5°	(S/2)*tan67.5°-(S/2)
10	-(S/2)*tan67.5°	-(S/2)*tan67.5°	(S/2)*tan67.5°-(S/2)
11	(S/2)*tan67.5°	-(S/2)*tan67.5°	(S/2)*tan67.5°-(S/2)
12	(S/2)*tan67.5°	(S/2)*tan67.5°	(S/2)*tan67.5°-(S/2)
13	-(S/2)*tan67.5°	(S/2)*tan67.5°	(S/2)*tan67.5°+(S/2)
14	-(S/2)*tan67.5°	-(S/2)*tan67.5°	(S/2)*tan67.5°+(S/2)
15	(S/2)*tan67.5°	-(S/2)*tan67.5°	(S/2)*tan67.5°+(S/2)
16	(S/2)*tan67.5°	(S/2)*tan67.5°	(S/2)*tan67.5°+(S/2)
17	-S/2	(S/2)*tan67.5°	S*tan67.5°
18	-(S/2)*tan67.5°	S/2	S*tan67.5°
19	-(S/2)*tan67.5°	-S/2	S*tan67.5°
20	-S/2	-(S/2)*tan67.5°	S*tan67.5°
21	S/2	-(S/2)*tan67.5°	S*tan67.5°
22	(S/2)*tan67.5°	-S/2	S*tan67.5°
23	(S/2)*tan67.5°	S/2	S*tan67.5°
24	S/2	(S/2)*tan67.5°	S*tan67.5°

비고(Remark)

1. Node(1,2,3,4,5,6,7,8)로 이루어진 팔각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)		결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	Max(z)-Min(z)	S*tan67.5°
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	Max(x)-Min(x)	S*tan67.5°
		Max(y)-Min(y)	
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 ± 중복된 부피	

비고(Remark)

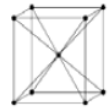
5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1	0.05	0.555	0.00000
2	0.1	0.830	1.09000
3	0.2	1.305	1.10000
4	0.3	1.760	1.10667
5	0.4	2.192	1.11750

그림 26. 단위셀 DB (truncated cube)

Body centered cubic

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
Body centered cubic 형상	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	9
2	Element	선	20
3	Face	면	6
4	Angle	각	90°

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	-S/2	S/2	0
2	-S/2	-S/2	0
3	S/2	-S/2	0
4	S/2	S/2	0
5	0	0	S/2
6	-S/2	S/2	S
7	-S/2	-S/2	S
8	S/2	-S/2	S
9	S/2	S/2	S

비고(Remark)

1. Node(1,2,3,4)로 이루어진 사각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)		결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	$\text{Max}(z) - \text{Min}(z)$	S
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	$\text{Max}(x) - \text{Min}(x)$ $\text{Max}(y) - \text{Min}(y)$	S
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 ± 중복된 부피	$(12\pi r^2 (S-2r))/4 + 8r^2 \pi ((R(3)S-2r)/2 - R(3)r) + 2(2r)^3 + 8(2-R(2))r^3$

비고(Remark)

- 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사
- 단위 형상에 대한 부피
 - $(12\pi r^2 (S-2r))/4 \rightarrow$ Simple Cubic과 같이 꼭지점을 제외한 strut 부피의 총합
 - $8r^2 \pi ((R(3)S-2r)/2 - R(3)r) \rightarrow$ 대각선을 이루는 strut의 교점을 제외한 부피의 총합
 - $2(2r)^3 \rightarrow$ 각 꼭지점에 대한 부피의 총합
 - $8(2-R(2))r^3 \rightarrow$ 대각선 strut 교점에 대한 부피의 총합(세개의 원기둥이 직교할 때 공통부분의 부피)
 - 반지름의 길이가 증가하면 겹치는 부분이 존재하기 때문에 strut radius의 범위 설정 $((1+R(2))r < 5) \rightarrow (r < 2.07)$

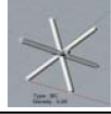
5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)	
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)		
1	0.05	0.421	0.050	1.00000
2	0.1	0.609	0.100	1.00000
3	0.2	0.895	0.200	0.99950
4	0.3	1.134	0.302	1.00600
5	0.4	1.354	0.404	1.01000

그림 27. 단위셀 DB (body centered cubic)

Body centered

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
Body centered 형상	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)	개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점 9
2	Element	선 8
3	Face	면 -
4	Angle	각 90°

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	-S/2	S/2	0
2	-S/2	-S/2	0
3	S/2	-S/2	0
4	S/2	S/2	0
5	0	0	S/2
6	-S/2	S/2	S
7	-S/2	-S/2	S
8	S/2	-S/2	S
9	S/2	S/2	S

비고(Remark)

1. Node(1,2,3,4)로 이루어진 사각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)	결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	$\text{Max}(z)-\text{Min}(z)$ S
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	$\text{Max}(x)-\text{Min}(x)$ $\text{Max}(y)-\text{Min}(y)$ S
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 $\pm$ 중복된 부피 $8 \cdot r^2 \cdot \pi \cdot ((R(3) \cdot S - 2 \cdot r)/2 - R(3) \cdot r) + 2 \cdot (2 \cdot r)^3 + 8 \cdot (2 - R(2)) \cdot r^3$

비고(Remark)

- 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사
- 단위 형상에 대한 부피
 $- (8 \cdot ((R(3) \cdot S - 2 \cdot r)/2) \cdot r^2 \cdot \pi) \rightarrow$ 대각선을 이루는 strut의 교점을 제외한 부피의 총합
 $- 8 \cdot (2 - R(2)) \cdot r^3 \rightarrow$ 대각선 strut 교점에 대한 부피의 총합(세개의 원기둥이 직교할 때 공통부분의 부피)

5 상대밀도(Relative density)

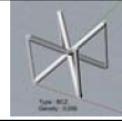
NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	(Relative density by Equation)
1	0.05	0.500	0.052
2	0.1	0.726	0.107
3	0.2	1.067	0.223
4	0.3	1.350	0.346
5	0.4	1.608	0.478

1.04000
1.07000
1.11500
1.15333
1.19500

그림 28. 단위셀 DB (body centered)

body-centred parallelepiped with struts in z-axis (BCZ)

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
Body centered cubic 형상	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	9
2	Element	선	20
3	Face	면	0
4	Angle	각	90°

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	-S/2	S/2	0
2	-S/2	-S/2	0
3	S/2	-S/2	0
4	S/2	S/2	0
5	0	0	S/2
6	-S/2	S/2	S
7	-S/2	-S/2	S
8	S/2	-S/2	S
9	S/2	S/2	S

비고(Remark)

1. Node(1,2,3,4)로 이루어진 사각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)		결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	$\text{Max}(z) - \text{Min}(z)$	S
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	$\text{Max}(x) - \text{Min}(x)$ $\text{Max}(y) - \text{Min}(y)$	S
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 $\pm$ 중복된 부피	$(4\pi r^2(S-2r))/4 + 8r^2\pi((R(3)S-2r)/2 - R(3)r) + 2(2r)^3 + 8(2-R(2))r^3$

비고(Remark)

- 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사
- 단위 형상에 대한 부피
 - $(4\pi r^2(S-2r))/4 \rightarrow$ Simple Cubic과 같이 꼭지점 및 8개의 선을 제외한 strut 부피의 총합
 - $8r^2\pi((R(3)S-2r)/2 - R(3)r) \rightarrow$ 대각선을 이루는 strut의 교점을 제외한 부피의 총합
 - $2(2r)^3 \rightarrow$ 각 꼭지점에 대한 부피의 총합
 - $8(2-R(2))r^3 \rightarrow$ 대각선 strut 교점에 대한 부피의 총합(세개의 원기둥이 직교할 때 공통부분의 부피)

5 상대밀도(Relative density)

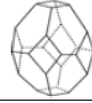
NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1	0.05	0.470	0.049
2	0.1	0.682	0.099
3	0.2	1.000	0.195
4	0.3	1.268	0.290
5	0.4	1.513	0.382

0.98000
0.99000
0.97500
0.96667
0.95500

그림 29. 단위셀 DB (BCZ)

truncated octahedron(a.k.a. Kelvin)

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
6개의 사각형과 8개의 육각형으로 이루어진 다면체	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)	개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점
2	Element	선
3	Face	면
4	Angle	각

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	$-S/R(2)$	0	0
2	0	$-S/R(2)$	0
3	$S/R(2)$	0	0
4	0	$S/R(2)$	0
5	$(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	0	$R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
6	0	$(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	$R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
7	$-(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	0	$R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
8	0	$-(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	$R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
9	$(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	$-S/R(2)$	$2*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
10	$-S/R(2)$	$(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	$2*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
11	$S/R(2)$	$(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	$2*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
12	$-(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	$-S/R(2)$	$2*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
13	$-(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	$S/R(2)$	$2*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
14	$S/R(2)$	$-(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	$2*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
15	$-S/R(2)$	$-(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	$2*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
16	$(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	$S/R(2)$	$2*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
17	$(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	0	$3*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
18	0	$(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	$3*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
19	$-(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	0	$3*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
20	0	$-(R(2)*(S^2-2*S*(\sin(\theta/2))^2))/(2*S)$	$3*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
21	$-S/R(2)$	0	$4*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
22	0	$-S/R(2)$	$4*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
23	$S/R(2)$	0	$4*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
24	0	$S/R(2)$	$4*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$

비고(Remark)

- Node(1,2,3,4)도 미주어진 자석형의 중심은 (0,0,0)으로 설정
- R은 root 값을 의미
- $(\sin(\theta/2))^2 = X$ 로 치환($80^\circ X^2 - 72^\circ X + 9 = 0$)
- $X = (-b + R(b^2 - 4*a*c))/2*a$
- $(\sin(\theta/2))^2 = (1 - \cos(\theta))/2$
- 두 점 사이의 거리($\sqrt{(X1-X2)^2 + (Y1-Y2)^2}$)

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)	결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	$4*R(S^2-(S-2*S*(\sin(\theta/2))^2)^2-(2*S*(\sin(\theta/2))^2-S)^2)$
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	$(ABS(S-4*S*(\sin(\theta/2))^2)/R(2))$
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	$(24*S*Pi*r^2-16*4*r^3*(\tan(180-\theta)/2)-8*4*r^3*\tan(\theta-90))$

비고(Remark)

- 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로 하는 정육면체의 부피에 근사
- 본 형상의 중복된 부피는 계산하는 과정에서 수식적 제약으로 인해 원기둥의 지름을 한변으로 하는 정육면체 부피에 근사하다고 판단

5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1	0.008	0.00802	0.5
2	0.03065	0.03087	1
3	0.11194	0.11369	2
4	0.22789	0.23376	3
5	0.36246	0.37638	4

그림 30. 단위셀 DB (truncated octahedron)

Octahedron

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
8개의 삼각형으로 이루어진 다면체	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	6
2	Element	선	12
3	Face	면	8
4	Angle	각	$0^\circ < \theta < 90^\circ$

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	0	0	0
2	-S/2	S/2	$S \cdot \sin\theta$
3	-S/2	-S/2	$S \cdot \sin\theta$
4	S/2	-S/2	$S \cdot \sin\theta$
5	S/2	S/2	$S \cdot \sin\theta$
6	0	0	$2 \cdot S \cdot \sin\theta$

비고(Remark)

- Node 1을 (0,0,0)으로 설정
- R은 root 값을 의미

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)		결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	$\text{Max}(z) - \text{Min}(z)$	$2 \cdot S \cdot \sin\theta$
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	$\text{Max}(x) - \text{Min}(x)$ $\text{Max}(y) - \text{Min}(y)$	S
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 $\pm$ 중복된 부피	$(8 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (S - 2r) + ((4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (S - 2r)) / 2 + (4 \cdot (2r)^3) / 4 + (2 \cdot (2r)^3) / 2)$

비고(Remark)

- 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사
- 본 형상의 부피는 프로그램을 통해 얻은 데이터를 통해 추세식을 도출하여 계산
- 추세식: $88.704 \cdot r^3 - 269.22 \cdot r^2 + 630 \cdot r - 179.99$

5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1			
2			
3			
4			
5			

그림 31. 단위셀 DB (octahedron)

rhombicubotahedron(Square Gyrobicupola)

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
8개의 삼각형과 10개의 정사각형으로 이루어진 다면체	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	24
2	Element	선	48
3	Face	면	26
4	Angle	각	$0^\circ < \theta < 90^\circ$

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	$-S/2$	$S/2$	0
2	$-S/2$	$-S/2$	0
3	$S/2$	$-S/2$	0
4	$S/2$	$S/2$	0
5	$-S/2-S*\cos\theta$	$S/2$	$S*\sin\theta$
6	$-S/2-S*\cos\theta$	$-S/2$	$S*\sin\theta$
7	$-S/2$	$-S/2-S*\cos\theta$	$S*\sin\theta$
8	$S/2$	$-S/2-S*\cos\theta$	$S*\sin\theta$
9	$S/2+S*\cos\theta$	$S/2$	$S*\sin\theta$
10	$S/2+S*\cos\theta$	$-S/2$	$S*\sin\theta$
11	$-S/2$	$S/2+S*\cos\theta$	$S*\sin\theta$
12	$S/2$	$S/2+S*\cos\theta$	$S*\sin\theta$
13	$-S/2-S*\cos\theta$	$S/2$	$S*\sin\theta+S$
14	$-S/2-S*\cos\theta$	$-S/2$	$S*\sin\theta+S$
15	$-S/2$	$-S/2-S*\cos\theta$	$S*\sin\theta+S$
16	$S/2$	$-S/2-S*\cos\theta$	$S*\sin\theta+S$
17	$S/2+S*\cos\theta$	$S/2$	$S*\sin\theta+S$
18	$S/2+S*\cos\theta$	$-S/2$	$S*\sin\theta+S$
19	$-S/2$	$S/2+S*\cos\theta$	$S*\sin\theta+S$
20	$S/2$	$S/2+S*\cos\theta$	$S*\sin\theta+S$
21	$-S/R(2)$	0	$2*S*\sin\theta+S$
22	0	$-S/R(2)$	$2*S*\sin\theta+S$
23	$S/R(2)$	0	$2*S*\sin\theta+S$
24	0	$S/R(2)$	$2*S*\sin\theta+S$

비고(Remark)

1. Node(1,2,3,4)도 이루어진 자각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정
2. R은 root 값을 의미
3. $(\sin\theta)^2 + (\cos\theta)^2 = 1$
4. $(\sin\theta)^2 + \sin\theta - 1 = 0$
5. $\sin\theta = X$ 로 치환 후 근의 공식을 이용하여 각 도출

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)		결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	$\text{Max}(z) - \text{Min}(z)$	$2*S*\tan\theta + S$
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	$\text{Max}(x) - \text{Min}(x)$ $\text{Max}(y) - \text{Min}(y)$	$2*S*\tan\theta + S$
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 $\pm$ 중복된 부피	$((24*\pi*r^2*(S-2r))/2 + (24*\pi*r^2*(S-2r) + (24*(2r)^3)/2$

비고(Remark)

1. 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사
2. 본 형상의 부피는 프로그램을 통해 얻은 데이터를 통해 추세를 도출하여 계산

- 추세식: $88.704*r^3 - 269.22*r^2 + 630*r - 179.99$

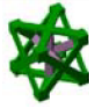
5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1			
2			
3			
4			
5			

그림 32. 단위셀 DB (rhombicubotahedron)

Octet-Cross

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
Octet-cross 형상	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	15
2	Element	선	34
3	Face	면	-
4	Angle	각	$0^\circ < \theta < 90^\circ$

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	-S/2	S/2	0
2	-S/2	-S/2	0
3	S/2	-S/2	0
4	S/2	S/2	0
5	0	0	0
6	0	S/2	(S/2)tan θ
7	-S/2	0	(S/2)tan θ
8	0	-S/2	(S/2)tan θ
9	S/2	0	(S/2)tan θ
10	0	0	(S/2)tan θ
11	-S/2	S/2	S*tan θ
12	-S/2	-S/2	S*tan θ
13	S/2	-S/2	S*tan θ
14	S/2	S/2	S*tan θ
15	0	0	S*tan θ

비고(Remark)

- Node 5를 (0,0,0)으로 설정
- Node 10을 (0,0,(S/2)*tan θ)로 설정

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)	결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	Max(z)-Min(z) S*tan θ
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	Max(x)-Min(x) Max(y)-Min(y) S
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 $\pm$ 중복된 부피 $\frac{((8\pi r^2((R(2)-4r)/2))/(2+(16\pi r^2((S/\cos\theta-4r)/2))/2+((S/2)\tan\theta-2r)^2+(S/2-2r)^4+(8(2r)^3)/4+(6(2r)^3)/2+(2r)^3))}{2+(16\pi r^2((S/\cos\theta-4r)/2))/2+((S/2)\tan\theta-2r)^2+(S/2-2r)^4+(8(2r)^3)/4+(6(2r)^3)/2+(2r)^3}$

비고(Remark)

- 값치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사
- 본 형상의 부피는 프로그램을 통해 얻은 데이터를 통해 추세식을 도출하여 계산
- 추세식: $88.704r^3-269.22r^2+630r-179.99$

5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1			
2			
3			
4			
5			

그림 33. 단위셀 DB (octet-cross)

Dodecahedron

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
12개의 오각형으로 이루어진 다면체	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	20
2	Element	선	30
3	Face	면	12
4	Angle	각	$0^\circ < \theta < 90^\circ$

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	0	$S/(2 \cos 54^\circ)$	0
2	$-S/2 \cdot S^* \cos 72^\circ$	$S^* \sin 18^\circ$	0
3	$-S/2$	$(-S/2) \cdot \tan 54^\circ$	0
4	$S/2$	$(-S/2) \cdot \tan 54^\circ$	0
5	$S/2 + S^* \cos 72^\circ$	$S^* \sin 18^\circ$	0
6	0	$S/(2 \cos 54^\circ) + S^* \cos \theta$	$S^* \sin \theta$
7	$-S/2 - S^* \cos 72^\circ - S^* \cos \theta \cos 72^\circ$	$S^* \sin 18^\circ + S^* \cos \theta \sin 72^\circ$	$S^* \sin \theta$
8	$-S/2 - S^* \cos \theta \cos 72^\circ$	$(-S/2) \cdot \tan 54^\circ - S^* \cos \theta \sin 72^\circ$	$S^* \sin \theta$
9	$S/2 + S^* \cos \theta \cos 72^\circ$	$(-S/2) \cdot \tan 54^\circ - S^* \cos \theta \sin 72^\circ$	$S^* \sin \theta$
10	$S/2 + S^* \cos 72^\circ + S^* \cos \theta \cos 72^\circ$	$S^* \sin 18^\circ + S^* \cos \theta \sin 72^\circ$	$S^* \sin \theta$
11	$-S/2 - S^* \cos \theta \cos 72^\circ$	$(S/2) \cdot \tan 54^\circ + S^* \cos \theta \sin 72^\circ$	$S^* \sin \theta + (\sin \theta (S^* \cos 18^\circ + S^* \cos 54^\circ)) / \cos 18^\circ$
12	$-S/2 - S^* \cos 72^\circ - S^* \cos \theta \cos 72^\circ$	$-S^* \sin 18^\circ - S^* \cos \theta \sin 72^\circ$	$S^* \sin \theta + (\sin \theta (S^* \cos 18^\circ + S^* \cos 54^\circ)) / \cos 18^\circ$
13	0	$-S/(2 \cos 54^\circ) - S^* \cos \theta$	$S^* \sin \theta + (\sin \theta (S^* \cos 18^\circ + S^* \cos 54^\circ)) / \cos 18^\circ$
14	$S/2 + S^* \cos 72^\circ + S^* \cos \theta \cos 72^\circ$	$-S^* \sin 18^\circ - S^* \cos \theta \sin 72^\circ$	$S^* \sin \theta + (\sin \theta (S^* \cos 18^\circ + S^* \cos 54^\circ)) / \cos 18^\circ$
15	$S/2 + S^* \cos \theta \cos 72^\circ$	$(S/2) \cdot \tan 54^\circ + S^* \cos \theta \sin 72^\circ$	$S^* \sin \theta + (\sin \theta (S^* \cos 18^\circ + S^* \cos 54^\circ)) / \cos 18^\circ$
16	0	$-S/(2 \cos 54^\circ)$	$2S^* \sin \theta + (\sin \theta (S^* \cos 18^\circ + S^* \cos 54^\circ)) / \cos 18^\circ$
17	$S/2 + S^* \cos 72^\circ$	$-S^* \sin 18^\circ$	$2S^* \sin \theta + (\sin \theta (S^* \cos 18^\circ + S^* \cos 54^\circ)) / \cos 18^\circ$
18	$S/2$	$(S/2) \cdot \tan 54^\circ$	$2S^* \sin \theta + (\sin \theta (S^* \cos 18^\circ + S^* \cos 54^\circ)) / \cos 18^\circ$
19	$-S/2$	$(S/2) \cdot \tan 54^\circ$	$2S^* \sin \theta + (\sin \theta (S^* \cos 18^\circ + S^* \cos 54^\circ)) / \cos 18^\circ$
20	$-S/2 - S^* \cos 72^\circ$	$-S^* \sin 18^\circ$	$2S^* \sin \theta + (\sin \theta (S^* \cos 18^\circ + S^* \cos 54^\circ)) / \cos 18^\circ$

비고(Remark)

1. Node (1,2,3,4,5)의 중심을 (0,0,0)으로 설정

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)		결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	$\text{Max}(z) - \text{Min}(z)$	$S^* \sin \theta$
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	$\text{Max}(x) - \text{Min}(x)$ $\text{Max}(y) - \text{Min}(y)$	S
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 $\pm$ 중복된 부피	$((10 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (S - 2r)) / 2) + (20 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot (S - 2r)) + (10 \cdot (2r)^3) / 2 + 10 \cdot (2r)^3$

비고(Remark)

1. 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사

2. 본 형상의 부피는 프로그램을 통해 얻은 데이터를 통해 추세를 도출하여 계산

- 추세식: $88.704 \cdot r^3 - 269.22 \cdot r^2 + 630 \cdot r - 179.99$

5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1			
2			
3			
4			
5			

그림 34. 단위셀 DB (dodecahedron)

Octahedron-Cross

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
Octahedron-Cross 형상	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	7
2	Element	선	18
3	Face	면	8
4	Angle	각	$0^\circ < \theta < 90^\circ$

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	0	0	0
2	-S/2	S/2	Ssinθ
3	-S/2	-S/2	Ssinθ
4	S/2	-S/2	Ssinθ
5	S/2	S/2	Ssinθ
6	0	0	Ssinθ
7	0	0	2Ssinθ

비고(Remark)

1. Node 1을 (0,0,0)으로 설정

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)		결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	$\text{Max}(z) - \text{Min}(z)$	$2S \cdot \sin\theta$
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	$\text{Max}(x) - \text{Min}(x)$ $\text{Max}(y) - \text{Min}(y)$	S
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 ± 중복된 부피	$(8\pi r^2(S-2r) + (4\pi r^2(S-2r))/2 + ((2S \sin\theta - 4r)/2)^2 + ((R(2)S - 4r)/2)^4 + (4(2r)^3)/4 + (2(2r)^3)/2 + (2r)^3$

비고(Remark)

1. 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사

2. 본 형상의 부피는 프로그램을 통해 얻은 데이터를 통해 추세식을 도출하여 계산

- 추세식: $88.704r^3 - 269.22r^2 + 630r - 179.99$

5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1			
2			
3			
4			
5			

그림 35. 단위셀 DB (octahedron-cross)

Cuboctahedron

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
8개의 삼각형과 6개의 사각형으로 이루어진 다면체	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	12
2	Element	선	24
3	Face	면	14
4	Angle	각	

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	$-S/R(2)$	0	0
2	0	$-S/R(2)$	0
3	$S/R(2)$	0	0
4	0	$S/R(2)$	0
5	$-S/R(2)$	$-S/R(2)$	$(S^*R(\tan\theta^2-1))/2$
6	$S/R(2)$	$-S/R(2)$	$(S^*R(\tan\theta^2-1))/2$
7	$S/R(2)$	$S/R(2)$	$(S^*R(\tan\theta^2-1))/2$
8	$-S/R(2)$	$S/R(2)$	$(S^*R(\tan\theta^2-1))/2$
9	$-S/R(2)$	0	$S^*R(\tan\theta^2-1)$
10	0	$-S/R(2)$	$S^*R(\tan\theta^2-1)$
11	$S/R(2)$	0	$S^*R(\tan\theta^2-1)$
12	0	$S/R(2)$	$S^*R(\tan\theta^2-1)$
비고(Remark)			
1. Node(1,2,3,4)로 이루어진 사각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정			
2. R은 root 값을 의미			

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)		결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	$\text{Max}(z)-\text{Min}(z)$	$S^*R(\tan\theta^2-1)$
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	$\text{Max}(x)-\text{Min}(x)$	$2^*S/R(2)$
		$\text{Max}(y)-\text{Min}(y)$	
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Struts의 부피 ± 중복된 부피	$((24^*Pi^*r^2^*(S-2r))/2+(12^*(2r)^3)/4)$
비고(Remark)			
1. 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사			
2. 본 형상의 부피는 프로그램을 통해 얻은 데이터를 통해 추세식을 도출하여 계산			
- 추세식: $88.704^*r^3-269.22^*r^2+630^*r-179.99$			

5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1			
2			
3			
4			
5			

그림 36. 단위셀 DB (octahedron-cross)

Cuboctahedron

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
8개의 삼각형과 6개의 사각형으로 이루어진 다면체	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	12
2	Element	선	24
3	Face	면	14
4	Angle	각	

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	$-S/R(2)$	0	0
2	0	$-S/R(2)$	0
3	$S/R(2)$	0	0
4	0	$S/R(2)$	0
5	$-S/R(2)$	$-S/R(2)$	$(S^*R(\tan\theta^2-1))/2$
6	$S/R(2)$	$-S/R(2)$	$(S^*R(\tan\theta^2-1))/2$
7	$S/R(2)$	$S/R(2)$	$(S^*R(\tan\theta^2-1))/2$
8	$-S/R(2)$	$S/R(2)$	$(S^*R(\tan\theta^2-1))/2$
9	$-S/R(2)$	0	$S^*R(\tan\theta^2-1)$
10	0	$-S/R(2)$	$S^*R(\tan\theta^2-1)$
11	$S/R(2)$	0	$S^*R(\tan\theta^2-1)$
12	0	$S/R(2)$	$S^*R(\tan\theta^2-1)$

비고(Remark)

1. Nod(1,2,3,4)로 이루어진 사각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정
2. R은 root 값을 의미

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)		결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	$\text{Max}(z)-\text{Min}(z)$	$S^*R(\tan\theta^2-1)$
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	$\text{Max}(x)-\text{Min}(x)$	$2^*S/R(2)$
		$\text{Max}(y)-\text{Min}(y)$	
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Struts의 부피 ± 중복된 부피	$((24^*Pi^*r^2^*(S-2r))/2+(12^*(2r)^3)/4$

비고(Remark)

1. 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사
2. 본 형상의 부피는 프로그램을 통해 얻은 데이터를 통해 추세식을 도출하여 계산
- 추세식: $88.704^*r^3-269.22^*r^2+630^*r-179.99$

5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1			
2			
3			
4			
5			

그림 37. 단위셀 DB (cubotahedron)

Octet truss

1 정의 및 카테고리(Introduction and Strut type)

정의(Introduction)	형상(Figure)
Octet truss 형상	

2 구성 요소(Components of the unit cell)

No	요소별 명칭(Components)		개수(Quantity) 및 범위(Range)
1	Node	점	14
2	Element	선	36
3	Face	면	-
4	Angle	각	$0^\circ < \theta < 90^\circ$

3 각 Node 별 좌표값(Coordinate for the each node)

No	X 좌표(X-coordinate)	Y 좌표(Y-coordinate)	Z 좌표(Z-coordinate)
1	-S/2	S/2	0
2	-S/2	-S/2	0
3	S/2	-S/2	0
4	S/2	S/2	0
5	0	0	0
6	0	S/2	(S/2)*tanθ
7	-S/2	0	(S/2)*tanθ
8	0	-S/2	(S/2)*tanθ
9	S/2	0	(S/2)*tanθ
10	-S/2	S/2	S*tanθ
11	-S/2	-S/2	S*tanθ
12	S/2	-S/2	S*tanθ
13	S/2	S/2	S*tanθ
14	0	0	S*tanθ

비고(Remark)

1. Nod(1,2,3,4)로 이루어진 사각형의 중심은 (0,0,0)으로 설정
2. R은 root 값을 의미

4 관련식(Equation)

NO	관련식(Equation)		결과값(Result)
1	단위 형상에 대한 높이 (Height of the unit cell)	Max(z)-Min(z)	S*tanθ
2	단위 형상에 대한 너비 (Width of the unit cell)	Max(x)-Min(x) Max(y)-Min(y)	S
3	단위 형상에 대한 부피 (Volume of the unit cell)	모든 Strut의 부피 ± 중복된 부피	$((8\pi r^2((R/2)-4r)/2)+(16\pi r^2((S/\cos\theta-4r)/2))/2+(8\pi r^2(S/(2\cos\theta)-2r)+(4\pi r^2(S/R(2)-2r)))+(8*(2r)^3)/4+(6*(2r)^3)/2$

비고(Remark)

1. 겹치는 원기둥의 개수가 늘어날수록 부피는 한변을 원기둥의 지름으로하는 정육면체의 부피에 근사
2. 본 형상의 부피는 프로그램을 통해 얻은 데이터를 통해 추세식을 도출하여 계산
- 추세식: $88.704r^3-269.22r^2+630r-179.99$

5 상대밀도(Relative density)

NO	3D		비고: 방정식에 대한 상대밀도 (Relative density by Equation)
	(Relative density by 3D model)	(Strut's radius by 3D model)	
1			
2			
3			
4			
5			

그림 38. 단위셀 DB (octet truss)

- rhinoceros 모델틀에 입력한 단위셀 중에서 11가지 타입에 대해서 r/s값을 나열한다. 축 방향성의 차이가 없는 단위셀을 선정하여 DB를 나열했다. 본 11가지 타입에 대해서 심도있는 검토를 진행한다.
- 각 단위셀 별 상대밀도 제어 DB (상대밀도 범위 0.005~0.900)는 다음과 같다. r/s를 변수로 설정하여 단위셀의 상대밀도를 제어했다. 동일한 상대밀도를 가진 단위셀의 경우 simple cubic의 r/s가 가장 큰 결과가 나타났다. 상대밀도 0.3에서 simple cubic의 r/s 값 0.206으로 가장 높았고, octet-cross가 0.087로 가장 낮았다.

표 9. 단위셀 별 밀도제어 데이터베이스

Relative density	r/s values										
	Simple cubic	Body-centered cubic	Face-centered cubic	Body center	Diamond	Truncated cube	Truncated octahedron	Octahedron	Rhombooctahedron	Octet-cross	Cuboctahedron
0.005	0.024	0.013	0.012	0.015	0.015	0.016	0.014	0.014	0.010	0.010	0.015
0.010	0.034	0.018	0.017	0.022	0.022	0.023	0.020	0.020	0.015	0.014	0.020
0.025	0.053	0.030	0.028	0.035	0.035	0.038	0.032	0.032	0.024	0.022	0.032
0.050	0.077	0.042	0.039	0.050	0.051	0.056	0.046	0.046	0.035	0.032	0.046
0.100	0.111	0.061	0.057	0.073	0.074	0.083	0.067	0.067	0.050	0.047	0.067
0.150	0.138	0.076	0.071	0.091	0.093	0.107	0.083	0.084	0.063	0.058	0.084
0.200	0.162	0.090	0.084	0.107	0.110	0.131	0.098	0.099	0.075	0.068	0.099
0.250	0.185	0.102	0.096	0.121	0.125	0.154	0.112	0.113	0.085	0.078	0.113
0.300	0.206	0.113	0.107	0.135	0.140	0.176	0.125	0.126	0.095	0.087	0.126
0.350	0.226	0.125	0.118	0.148	0.155	0.198	0.138	0.139	0.105	0.095	0.139
0.400	0.245	0.135	0.128	0.161	0.170	0.219	0.151	0.152	0.115	0.104	0.152
0.450	0.265	0.146	0.139	0.173	0.185	0.240	0.164	0.166	0.125	0.112	0.165
0.500	0.284	0.157	0.149	0.186	0.200	0.261	0.177	0.179	0.135	0.120	0.179
0.550	0.303	0.168	0.160	0.198	0.216	0.282	0.190	0.193	0.146	0.128	0.193
0.600	0.322	0.179	0.171	0.211	0.234	0.303	0.204	N/A	0.157	0.137	N/A
0.650	0.342	0.190	0.183	0.224	0.252	0.325	0.219	N/A	0.168	0.145	N/A
0.700	0.363	0.201	0.196	0.237	0.272	0.347	0.234	N/A	0.181	0.154	N/A
0.750	0.384	0.214	N/A	0.251	0.293	0.370	0.250	N/A	0.195	0.164	N/A
0.800	0.408	0.228	N/A	0.265	0.318	0.395	0.269	N/A	N/A	0.174	N/A
0.850	0.434	0.243	N/A	0.281	0.347	0.424	0.290	N/A	N/A	0.186	N/A
0.900	0.465	0.264	N/A	0.300	0.388	0.456	N/A	N/A	N/A	0.201	N/A

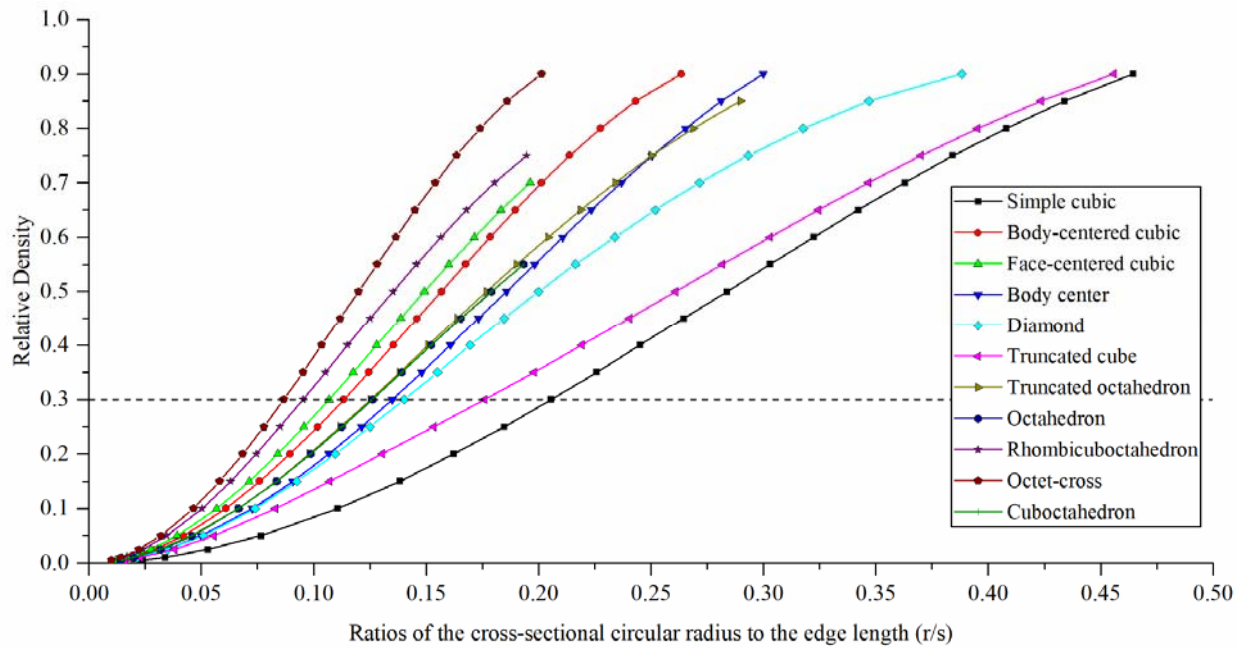


그림 39. 단위셀 별 밀도제어(r/s) 비교

- ☐ 단위셀의 DB를 구축했으며, 3차원 좌표값을 제시함으로써, 향후 관련 연구자에게 모델링 편의성을 제공할 수 있을 것으로 기대한다.
- ☐ 단위셀 상대밀도를 조정하는 방법으로는, 스트럿 원형단면 반경을 제어하는 방법을 채택했다. 스트럿 단면 반경과 바운더리 박스 한변의 길이 비율(cross-sectional circular radius to boundary box, r/s) 데이터를 축적했다.

(3.3) 적용 소재 검토 : 적용 소재 다각화를 통해 활용성 확대를 검토한다.

(3.3.1) 플라스틱 기반 소재 물성값 제공

- 플라스틱 기반 소재는 대표적으로 PA11, PA12, PA12 Glass beads 및 PP 등이 대표적으로 적용하고 있으며, 본 연구에서는 소재 기계적 특성, density 및 가격경제성을 고려하여 PA12를 선정했다.

표 10. 플라스틱 기반 소재 물성

	PA11		PA12		PA12 Glass Beads		PP	
	Average (XY)	Average (Z)	Average (XY)	Average (Z)	Average (XY)	Average (Z)	Average (XY)	Average (Z)
Tensile strength (MPa)	54	54	50	50	31	30	29	29
Tensile modulus (MPa)	1700	1800	1900	1900	2900	3000	1600	1600
Elongation at yield (%)	25	20	10	8	8	4	9.5	9.5
Elongation at break (%)	40	25	17	9	9	5	20	14
Impact strength (kJ/m²)	7	4.5	4.2	3.8	3	3	3.5	3
particle size (μm)	54		60		58		62	
Melting Point (°C)	202		187		186		138	
Density (g/cm³)	0.48		0.425		0.48		0.34	
Price (원/kg)	100,000		90,000		-		-	

- PA11 (polyamide powder 11)
 - 튼튼한 기능성 연질 부품 생산
 - 최적의 기계적 물성을 제공하는 열가소성 수지 소재
 - 우수한 내화학성 및 향상된 파단 연신율 제공
 - 의치 등 인공 삽입물, 신발 안창, 스포츠 용품, 스냅핏 등의 결합장치, 힌지 등에 필요한 내충격성 및 유연성
 - 생체 적합성 — USP(미국 약전) Class I-VI 및 US FDA Guidance for Intact Skin Surface Devices(미 FDA 피부표면 손상 없이 부착 가능한 장치용 지침) 충족
 - 다양한 업계의 기능성 파트 및 최종 부품 생산에 적합하도록 설계
 - 성능과 재사용성 간 최적 균형을 제공
 - 용이한 소재 가공으로 생산성 증가 및 폐기물 감소
 - 정교한 디테일과 치수 정확도로 시제품 및 최종 부품을 안정적으로 생산
 - 재생 가능한 원재료를 사용하여 폐기물 최소화
 - 식물성 피마자유에서 얻은 재생 가능한 원재료(환경 영향 감소)
 - 폐기물 최소화 — 생산할 때마다 나오는 잉여 파우더를 재사용하여 낭비 없이 기능성 부품 제작 가능
 - 일관된 성능을 확보하고 잉여 파우더의 재사용률을 최대 70% 실현
 - 비용 및 부품 품질 최적화 — 잉여 파우더의 재사용률이 업계 최고 수준인 경제적인 소재

- PA 12 (polyamide powder 12)
 - 낮은 원료가격으로 고강도의 고품질 부품을 생산하기에 적합 (고강도 정밀한 기능성 복합 부품 생산)
 - 조직이 탄탄한 열가소성 수지를 사용하여 균형 잡힌 특성과 튼튼한 구조를 가진 고밀도 부품을 생산할 수 있음

- 오일, 윤활유, 지방족탄화수소, 알칼리에 견딜 수 있는 우수한 내화학성 제공
- 복잡한 조립품, 하우징, 인클로저 및 방수성 제작물에 적합
- 생체 적합성 — USP(미국 약전) Class I-VI 및 US FDA Guidance for Intact Skin Surface Devices(미 FDA 피부표면 손상 없이 부착 가능한 장치용 지침) 충족
- **낮은 부품당 비용으로 우수한 품질 제공 (부품당 비용을 낮추고 총 유지 비용을 절감)**
- 폐기물 최소화 — 생산할 때마다 나오는 잉여 파우더를 재사용하여 낭비 없이 기능성 부품 제작 가능²
- 일관된 성능을 확보하고 잉여 파우더의 재사용률을 최대 80% 실현
- 비용 및 부품 품질 최적화 — 잉여 파우더의 재사용률이 업계 최고 수준인 경제적인 소재
- 다양한 업계의 기능성 부품 생산에 적합하도록 설계
- 성능과 재사용성 간 최적 균형을 제공
- 추가적인 후처리 없이 방수 기능 구현
- 정교한 디테일과 치수 정확도로 기능성 시제품 및 최종 부품을 생산할 수 있도록 개발

☐ PA12 Glass Beads

- 치수 안정성과 품질이 우수한 경질 부품 생산에 적합(기능성 경질 부품 생산)
- 최적의 기계적 물성 및 높은 사용성을 갖추고 글래스 비드가 40% 포함된 열가소성 수지 소재
- 치수 안정성과 반복 재현성 제공
- 인클로저, 하우징, 고정 장치, 공구 등, 경도가 높아야 하는 제작물에 적합
- 폐기물 감소 — 생산할 때마다 나오는 잉여 파우더를 재사용하여 낭비 없이 기능성 부품을 생산
- 일관된 성능을 확보하고 잉여 파우더의 재사용률을 최대 70% 실현
- 비용 및 부품 품질 최적화 — 잉여 파우더의 재사용률이 높은 경제적인 소재
- 다양한 업계의 기능성 부품 생산에 적합하도록 설계
- 성능과 재사용성 간 최적 균형을 제공
- 정교한 디테일과 치수 정확도로 일반 글래스 비드 제작물을 생산할 수 있도록 개발

☐ PP

- 우수한 내화학성 및 용접력, 낮은 수분 흡수율의 기능성 부품에 적합
- 순수 PP 소재의 기능성 부품 : 순수 폴리프로필렌(PP) 소재로 일반적으로 사용되는 다양한 PP 소재와 동일한 특성 확보 , 시제품 제작 시 최종 부품과 동일한 소재를 사용하여 제품 개발 프로세스 진행 속도 향상
- 우수한 내화학성 및 낮은 수분 흡수율 : 내화학성이 탁월하고 수분 흡수율이 낮아 파이프 또는 유체 시스템 및 용기 제작에 적합사출 성형과 같은 기존 방식으로 생산한 다른 PP 부품과의 용접력 우수 자동차 부품, 산업재, 소비재 등, 광범위한 적용 분야에 적합한 다목적 소재
- 일관된 성능을 제공하고 잉여 파우더 재사용률이 최대 100%에 이르는 가장 경제적인 HP 3D 소재
- 성능과 비용 간 최적 균형 제공
- 용이한 소재 가공으로 생산성 증가 및 폐기물 감소

(3.3.2) 금속 기반 소재 물성값 제공

- ☐ 금속분말 소재 가격조사 결과, 316L < AlSi10Mg < M300 < CoCr < 625 < Ti64 의 순서로 가격이 정렬되었다. 대부분의 산업분야에서 보편적으로 사용되는 스테인리스 합금계열인 316L 및 AlSi10Mg 소재가 가장 저렴한 것으로 조사되었다.
- ☐ 또한 소재 밀도는, AlSi10Mg < Ti64 < 316L < M300 < CoCr < 625 순서로 정렬되었다.

현재까지의 소재의 물성과 소재 가격에 대한 조사연구 결과 고성능 인공경량골재 개발을 위한 후보소재는 AlSi10Mg로 한정하는 것으로 수립했다.

- 단, Ti64 소재가 국외 선진 기업에서의 사용빈도가 높고 고부가가치 산업에서 주로 활용되는 점을 고려하여, 본 연구는 Ti64 및 AlSi10Mg 소재를 선택하여 출력을 진행했다.

표 11 금속분말소재의 물리적 특성과 소재 가격

Category	Tensile Strength (Min, MPa)	Elongation (Min, %)	Density (Built, g/cm ³)	Cost (Bulk, KRW/kg)
AlSi10Mg	325	5	2.6	186,000
316L	485	25	7.9	117,000
M300	1900	2	8	200,000
625	875	30	8.4	265,000
CoCr	1050	11	8.3	250,000
Ti64	1100	5	4.4	723,000

- 금속 기반 3D 프린팅은 소재가격 및 밀도를 고려하여 AlSi10Mg를 선정했다. 단, 국외 연구 추이를 고려하여 Ti64 및 AlSi10Mg 2가지 소재에 대해서 격자구조체 출력을 진행한다. 그러나, 생산경제성을 고려하여, 촉진연구 기반 구축을 위한 실험용도로 출력을 진행한다.
- 반면, 플라스틱 소재(PA12)를 사용하여 출력경제성 향상을 도모하는 것으로, 최종적으로 본 연구에서 제시하는 3D인공경량골재의 최종 소재로 선정했다.

(3.4) FEA 활용 기계적 특성 검토 : FEA (Finite element analysis, 유한요소해석)를 통한 격자구조체의 기계적 특성을 확인한다.

(3.4.1) FEA 방법론 수립

1) 설계 조건

- ☐ 본 연구에서는 축방향 압축 조건에서의 기계적 특성을 파악하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 격자구조체 크기를 20mm × 20mm × 20mm로 설정하고, 단위셀 종류 및 최적배열에 대한 FEA를 수행한다.
 - 상대밀도는 경량성을 고려하여 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 등으로 설계하여 검토한다.
 - 단위셀을 1×1×1, 2×2×2, 3×3×3, 4×4×4 배열로 설계하고 항복응력을 검토한다.
- ☐ 격자구조체는 일반적으로 특정 공간을 단위셀로 반복하여 구성한다. 따라서 격자구조체 설계는 단위셀 종류 및 배열설계가 중요하다. 단위셀은 전체 격자구조체를 형성하고 특성화를 결정하는 가장 작은 요소이다. 제품 소재 및 상대밀도가 동일할 때 격자구조체의 기계적 성질은 단위셀에 의존한다 [24,25].
- ☐ 단위셀 배열 및 단위 셀 유형을 최적화하고 금속 및 플라스틱 소재 적층제조 시험편을 고려하여 유한요소해석(FEA)을 수행한다.

2) 시뮬레이션 솔버

- ☐ 해석을 수행하기 위해 범용 시뮬레이션 소프트웨어를 사용했고, FFEPlus(Fourier finite-element plus) 반복 솔버를 적용했다. FFEPlus는 근사치인 고급 행렬 재정렬 기술을 사용하며 각 반복에서 솔루션이 가정되고 오류가 허용될 때까지 반복이 계속됩니다. 솔버는 최대 반복 횟수 또는 중지 임계값을 사용하여 연속 반복 간의 수렴을 결정한다. 본 연구에서는 각각 1,000,000 및 0.0001의 최대 반복 및 임계값을 사용했다.
- ☐ 본 연구에서는 선형 및 비선형 분석을 수행했다. 해석 편리성 및 응력집중도를 파악하기 위하여 1차적으로 선형 해석을 수행했다. 최대 압축력은 von Mises 응력이 재료의 항복응력과 만나는 지점에서 비교했다. 또한, 특정 구조체에 한해서 비선형 해석을 수행했으며, 주응력이 재료의 항복응력과 만나는 지점에서 최대 압축력을 검토했다. 모든 응력 값은 요소 평균값으로 계산했다.

3) 메쉬 조건

- ☐ 격자구조체는 각각 불규칙한 모양을 가지고 있다. 따라서, 2차 사면체 요소를 사용하여 자유 메쉬를 적용했다. 여기서, 메쉬 요소 크기는 0.6705 mm 설정했다. 격자구조체 유형에 따라 메쉬 총 개수는 다르며, 예시로 상대 밀도 0.3 및 3×3×3 배열의 격자구조체 메쉬 정보는 다음표와 같다.

표 12. 단위셀 별 메쉬정보

	Simple cubic	Body-centered cubic	Face-centered cubic	Body center	Diamond	Truncated cube	Truncated octahedron	Octahedron	Rhombicuboctahedron	Octet-cross	Cuboctahedron
Total nodes	97 644	136 270	137 365	105 205	131 167	155 709	145 548	159 411	166 543	179 549	119 672
Total elements	57 512	77 665	77 719	60 962	78 211	96 331	83 908	98 685	93 887	100 727	68 796

4) 경계 조건

- 격자구조체 상단면에 직교 방향으로 압축력을 가했고, 구조물의 바닥 표면을 고정했다.

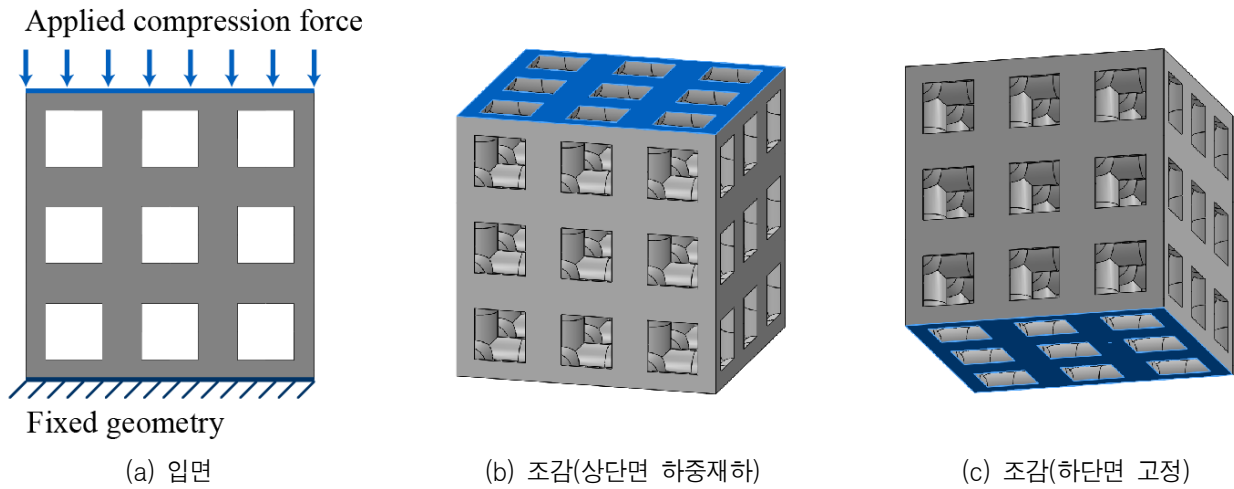


그림 40. 경계조건

5) 재료 조건

- 금속소재는 알루미늄(AlSi10Mg), 티타늄(Ti-6Al-4V)을 사용했고, 플라스틱 소재는 PA12를 사용했다. 그 재료물성값은 다음과 같다.

표 3-13 FEA 입력 재료 조건

	Density (g/cm ³)	Elastic modulus (GPa)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
AlSi10Mg	2.59	70.0	295.0	350.0	26
Ti-6Al-4V	4.41	119.0	1125.0	1200.0	8
PA12	1.01	1.935	53	53	20

(3.4.2) 상대밀도에 따른 출력물 기계적 특성 분석

- **[실험 개요]** 상대밀도에 따른 기계적 특성을 확인하는 것을 목표로, FEA 해석을 수행했으며 조건은 다음과 같다. 단위셀은 Simple cubic을 대상으로 분석했으며, 구조체 크기는 제한적으로 20 mm × 20 mm × 20 mm로 설정했다. 본 챕터에는 상대밀도를 0.1~1.0까지 0.1간격으로 모델링하여 선형FEA를 통해 경향을 확인했다.

표 14 상대밀도에 따른 분석

Factor	Level
Unit cell type	Simple cubic
Boundary size	20 mm × 20 mm × 20 mm
Lattice array	1×1×1
Materials	Ti-6Al-4V
FEA, Load type	static analysis in compression
Relative density	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0

□ [분석 대상] 상대밀도 0.1~1.0의 격자구조체 형상은 다음과 같다.

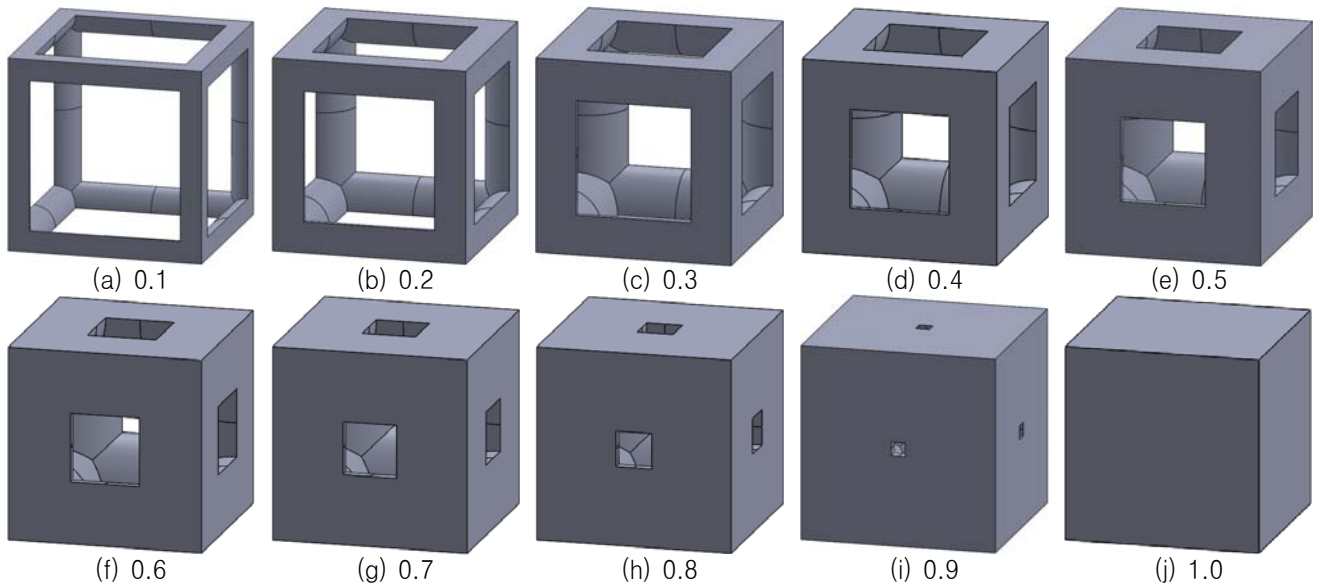


그림 41. 상대밀도에 따른 Simple cubic 형상

□ [해석결과] 상대밀도가 커짐에 따라 항복하중이 급격히 증가하는 경향이 나타났다. 구조체의 목표강성을 만족하는 범위에서 격자구조체를 통한 질량감소가 가능할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 경량성을 목적으로 하고 있으므로, 상대밀도 0.1~0.4에 대해서 단위셀 배열 등을 검토하도록 한다.

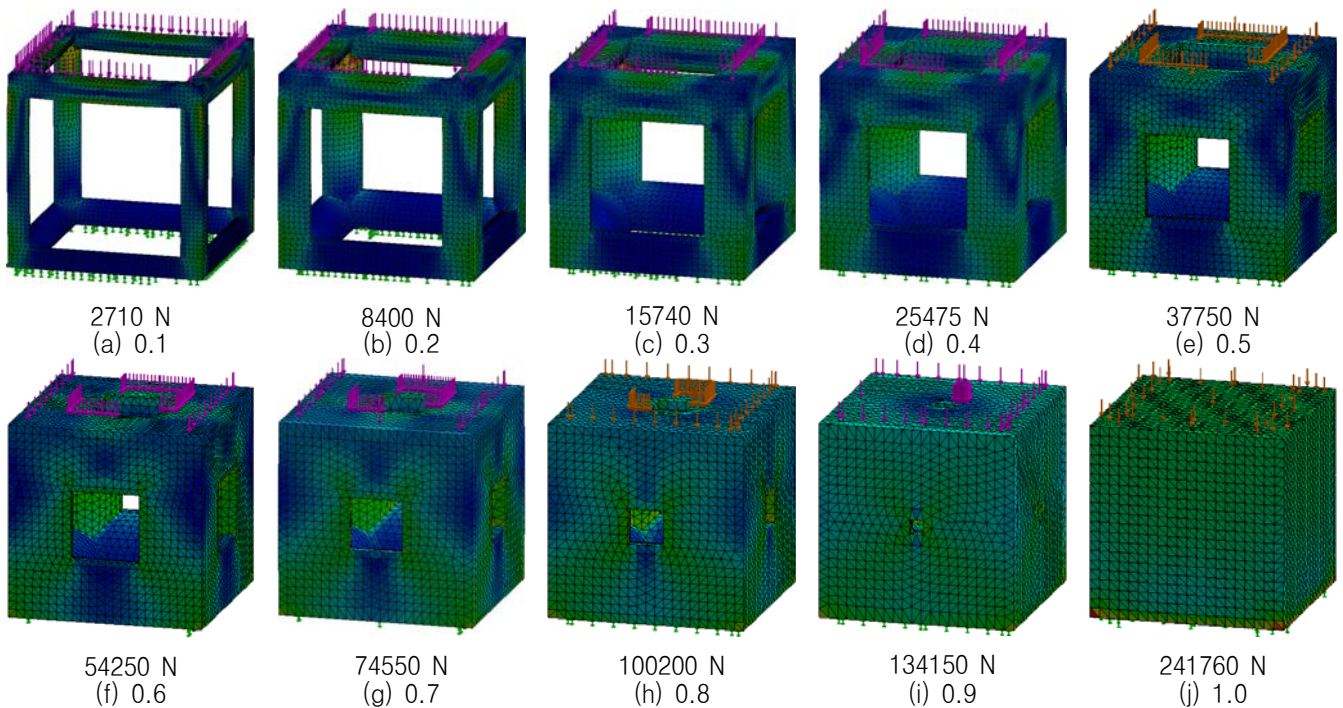


그림 42. 상대밀도에 따른 항복하중분석을 위한 FEA 결과

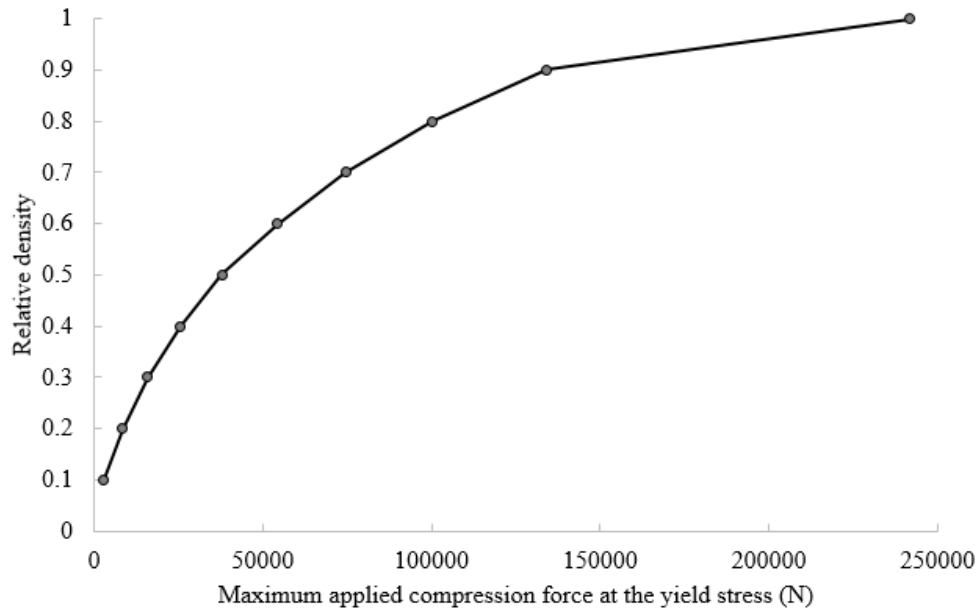


그림 43. 상대밀도에 따른 항복하중 관계

- 상대밀도에 따라 항복하중이 급격히 증가한다. 따라서 구조체 강성을 확보하는 범위에서 격자구조체를 통한 경량화 검토가 가능하다고 판단된다.

(3.4.3) 상대밀도 및 격자배열에 따른 출력물 기계적 특성 분석

1) 격자배열 검토 ① - 3가지 대표 단위셀

- **[실험 개요]** 격자 구조체는 일반적으로 단위 셀을 반복하여 구성한다. 따라서 격자 구조체 설계에는 단위 셀은 전체 격자 구조를 구성하고 특성화하는 가장 작은 요소이다. 따라서 본 연구에서는 가장 기초적인 단위 셀로써 Simple cubic(SC), Body-centered cubic(BCC) 및 Face-centered cubic(FCC)를 선정하여 연구를 진행했다. 격자배열에 따른 특성을 FEA를 통해 확인하는 것을 목표로 했다.
- **[실험 조건]** 여기서는, 스트럿 형상은 원으로 제한하여 진행했다. 또한 격자 구조체는 향후 적층 제조 제작성을 고려하여 바운더리 박스의 한 변을 20 mm로 설계했다. 단위 셀을 3축 방향으로 1×1×1, 2×2×2, 3×3×3 및 4×4×4 배열로 단위 셀을 구성하여 격자 구조체를 생성했다. 여기서 적층 제조의 특성을 반영하여 단위 셀의 접합 경계면이 생성하지 않도록 배열 완료 후 병합(merge)하여 설계했다. 최종 생성된 격자 구조체 바운더리 박스는 한 변의 길이를 20 mm로 동일하게 축소하여 설계했다.

표 15 격자배열에 따른 분석

Factor	Level
Unit cell type	SC, BCC, and FCC
Relative Density	0.05, 0.1, 0.2, 0.3, and 0.4
Lattice array	1×1×1, 2×2×2, 3×3×3, and 4×4×4
Lattice structure dimension	20×20×20 mm
Test method	FEA
Material	Ti6Al4V (titanium)
Load type	Static analysis in compression

- **[실험 결과]** 상대 밀도(0.05, 0.1, 0.2, 0.3 및 0.4), 단위 셀 배열($1\times1\times1$, $2\times2\times2$, $3\times3\times3$ 및 $4\times4\times4$)에 따른 격자 구조체의 항복 하중을 나타냈다. 동일한 셀 배열 조건에서는 상대 밀도가 커짐에 따라 항복 하중이 커지는 결과가 나타났다. $1\times1\times1$ SC 격자 구조체의 경우, 상대 밀도에 따라 594 N, 1966 N, 5546 N, 9845 N 및 16865 N으로 항복 하중이 증대하는 결과가 나타났다. Fig. 4.(a)에 상대 밀도 0.2, Fig. 4.(b)에 상대 밀도 0.3의 결과를 표기했다. 일부 오차는 존재하나, 동일 배열 조건에서는 SC, BCC, FCC 순으로 압축 항복 하중이 작아지는 결과가 나타났다.
- 상대 밀도 0.2에서 단위 셀 배열이 $1\times1\times1$, $2\times2\times2$, $3\times3\times3$ 및 $4\times4\times4$ 로 증가함에 따라 SC 격자 구조체의 항복 하중은 5546 N, 8339 N, 9223 N 및 8736 N, BCC 격자 구조체의 항복 하중은 1751 N, 2020 N, 2717 N 및 1645 N, FCC 격자 구조체의 항복 하중은 2128 N, 2927 N, 2698 N 및 2815 N로 나타났다. 결과적으로 $3\times3\times3$ 배열 격자 구조체에서 항복 하중이 수렴하는 경향이 나타났다. 상대 밀도 0.3도 동일한 경향이 나타났다. 단, 본 논문에서는 20 mm $\times$ 20 mm $\times$ 20 mm 로 제한된 구조체에 한해서 검토를 진행했다. 향후 구조체 크기 및 배열이 항복 하중에 미치는 영향에 대해서 지속적인 연구가 필요하다.
- 본 연구에서 제시하고 있는 20 mm $\times$ 20 mm $\times$ 20 mm 크기의 구조체는 $3\times3\times3$ 배열로 단위 셀을 구성하는 것이 구조적 최적화가 가능한 것으로 판단된다. 또한 압축 하중만을 고려할 경우 SC 격자 구조체가 가장 우수한 특성을 가진 것으로 판단된다. 향후, 다양한 단위 셀 형상을 대상으로 압축 하중 뿐만 아니라 인장, 굽힘 등 복합 하중에서의 항복 하중을 검토하여 구조적 안정성을 검토할 계획이다.

표 16 격자배열에 따른 출력물 기계적 특성 분석

Relative Density	Simple Cubic				Body-Centered Cubic				Face-Centered Cubic			
	$1\times1\times1$	$2\times2\times2$	$3\times3\times3$	$4\times4\times4$	$1\times1\times1$	$2\times2\times2$	$3\times3\times3$	$4\times4\times4$	$1\times1\times1$	$2\times2\times2$	$3\times3\times3$	$4\times4\times4$
0.05	594	710	914	883	199	211	142	102	162	185	190	172
0.1	1966	2356	2803	2787	393	516	560	466	571	676	629	650
0.2	5546	8339	9223	8736	1751	2020	2717	1645	2128	2927	2698	2815
0.3	9845	13210	16685	17319	3135	3618	4603	5420	4644	6572	7870	5125
0.4	16865	23850	27165	28990	6846	9938	11030	11640	11830	15320	16450	12125

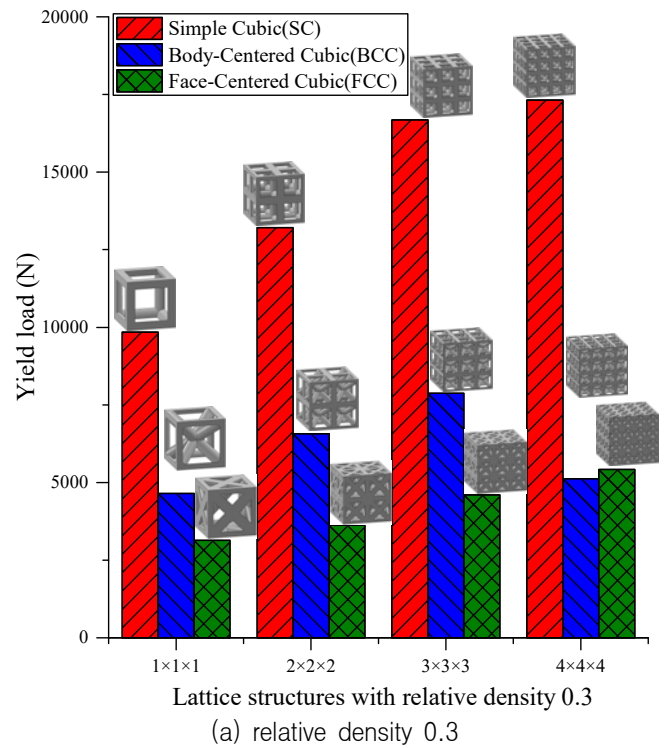
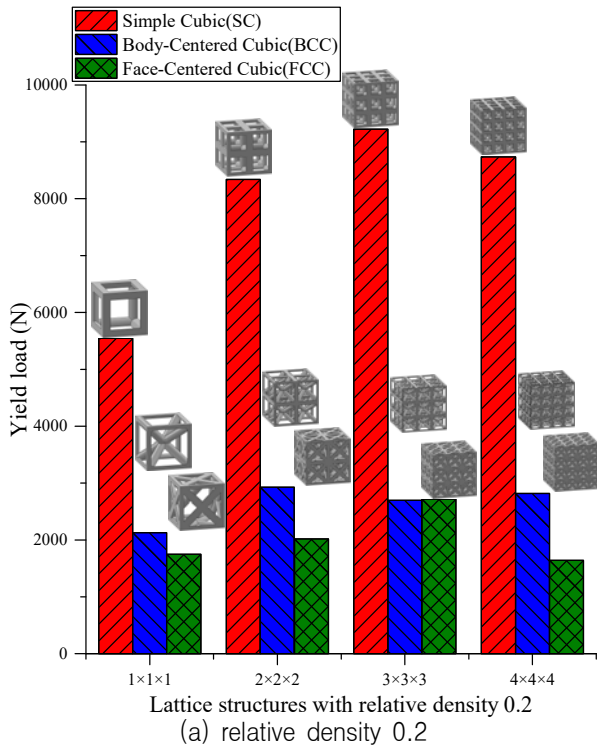
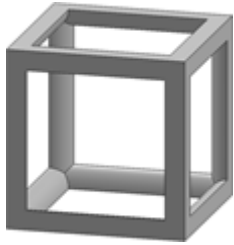


그림 3-44. 상대밀도 및 격자배열에 따른 항복하중

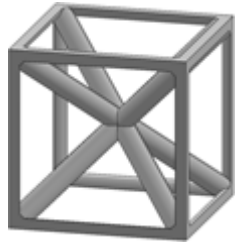
- 동일한 상대밀도의 경우 SC, BCC, FCC 순으로 압축 항복 저항성이 우수했다.
- 20 mm × 20 mm × 20 mm 크기 격자구조체의 축방향하중에 대한 저항을 고려할 경우, 3×3×3 및 4×4×4 가 최적 배열로 도출했다.

(3.4.4) 단위셀에 따른 출력물 기계적 특성 분석

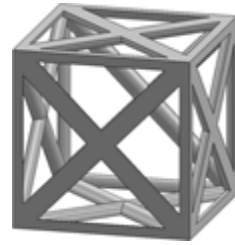
- **[실험 개요]** 격자 구조체는 일반적으로 단위 셀을 반복하여 구성한다. 따라서 격자 구조체 설에는 단위 셀은 전체 격자 구조를 구성하고 특성화하는 가장 작은 요소이다. 본 연구에서는 20×20×20 mm 크기의 격자구조체 조건에서 축방향 하중이 가장 우수한 형상을 도출하는 것을 목표로 한다.
- **[실험 조건]** 본 챕터에서는 simple cubic, body-centered cubic, face-centered cubic, body center, diamond, truncated cube, truncated octahedron (a.k.a. Kelvin), octahedron, rhombicuboctahedron, octet-cross (a.k.a. octet-truss), and cuboctahedron의 11가지 유형의 단위 셀을 선정하여 검토를 진행했다.
- **[실험 조건]** 11가지 단위셀은 선행연구에 따라 상대밀도 0.3으로 설정하고, 격자구조는 3×3×3 배열로 설계했다. 아래와 같이 생성한 격자구조체를 축방향하중을 가해서 축방향하중이 우수한 형상을 도출하는 것을 목표로 했다.
- FEA는 축 방향 압축 하중에 대한 격자 구조의 최적 배열을 결정하기 위해 SolidWorks 2018(Dassault Systems, Paris, France)을 사용하여 수행했다. 본 분석에 사용된 티타늄 합금(Ti-6Al-4V)의 물성값은 실험적으로 도출했다. 그 결과, 탄성계수 119.0 GPa, 항복강도 1,125.0 MPa, 인장강도 1,200.0 MPa, 푸아송비 0.34를 달성했다. 기계적 특성은 ASTM B988-18 표준(항복 강도 ≥ 828 MPa 및 극한 인장 강도 ≥ 895 MPa)을 충족했다.



(a) Simple cubic



(b) Body-centered cubic



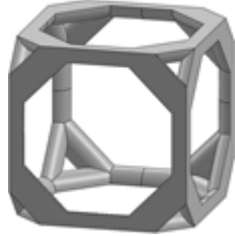
(c) Face-centered cubic



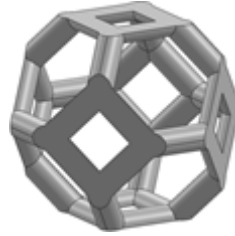
(d) Body center



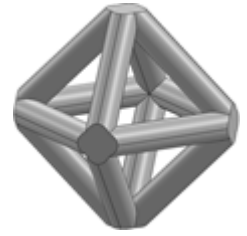
(e) Diamond



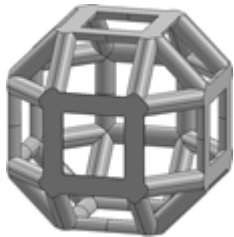
(f) Truncated cube



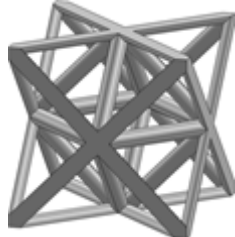
(g) Truncated octahedron



(h) Octahedron



(i) Rhombicuboctahedron

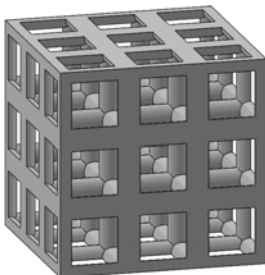


(j) Octet-cross

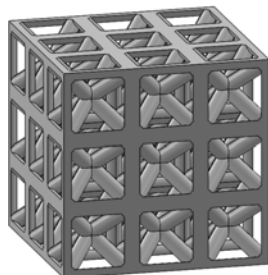


(k) Cuboctahedron

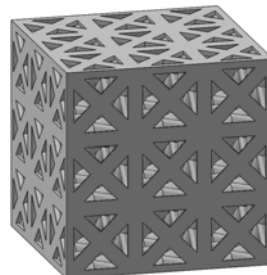
그림 45. 단위셀 형상 후보



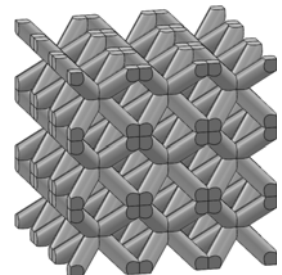
(a) Simple cubic



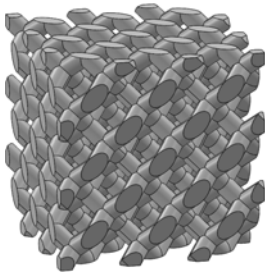
(b) Body-centered cubic



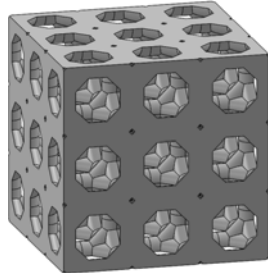
(c) Face-centered cubic



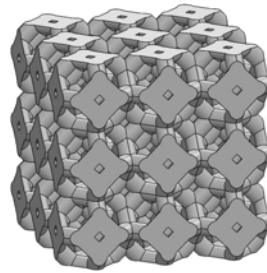
(d) Body center



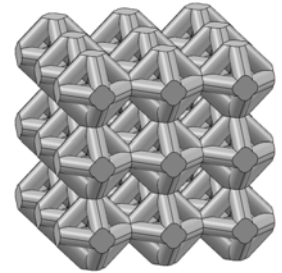
(e) Diamond



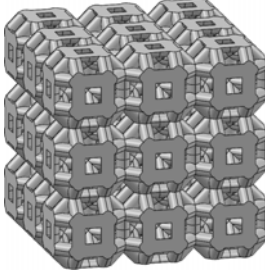
(f) Truncated cube



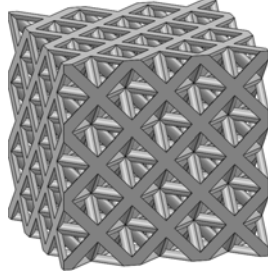
(g) Truncated octahedron



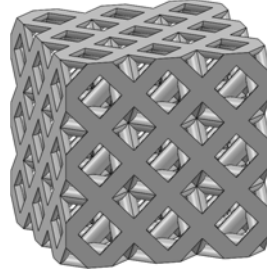
(h) Octahedron



(i) Rhombicuboctahedron



(j) Octet-cross



(k) Cuboctahedron

그림 46. 격자구조체 설계 (상대밀도 0.3, 격자배열 3×3×3)

- [실험 결과] static linear FEA 결과, 축 방향 압축 조건에서 성능이 우수한 상위 4가지 유형은 simple cubic, octahedron, truncated cube, and truncated octahedron로 도출됐다.

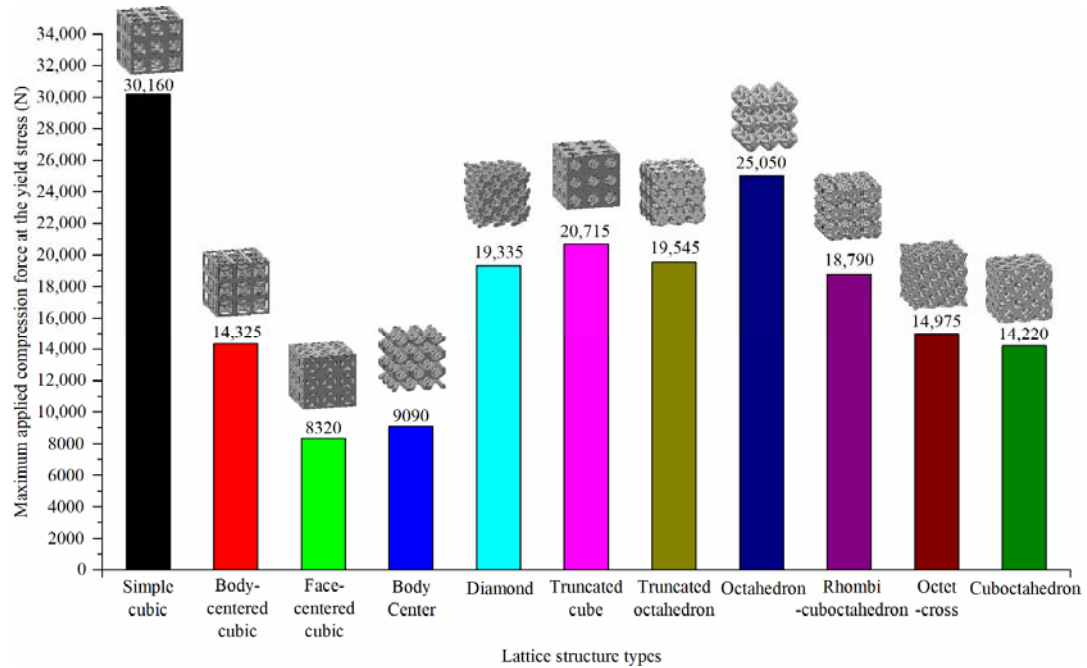


그림 47. 격자구조체에 따른 FEA 결과 비교

- 선형 정적 FEA의 결과로 4개의 격자 구조의 응력 집중을 확인했다. 모든 격자 구조는 요소 가장자리 영역에서 응력 집중을 유발할 것으로 추측할 수 있다.

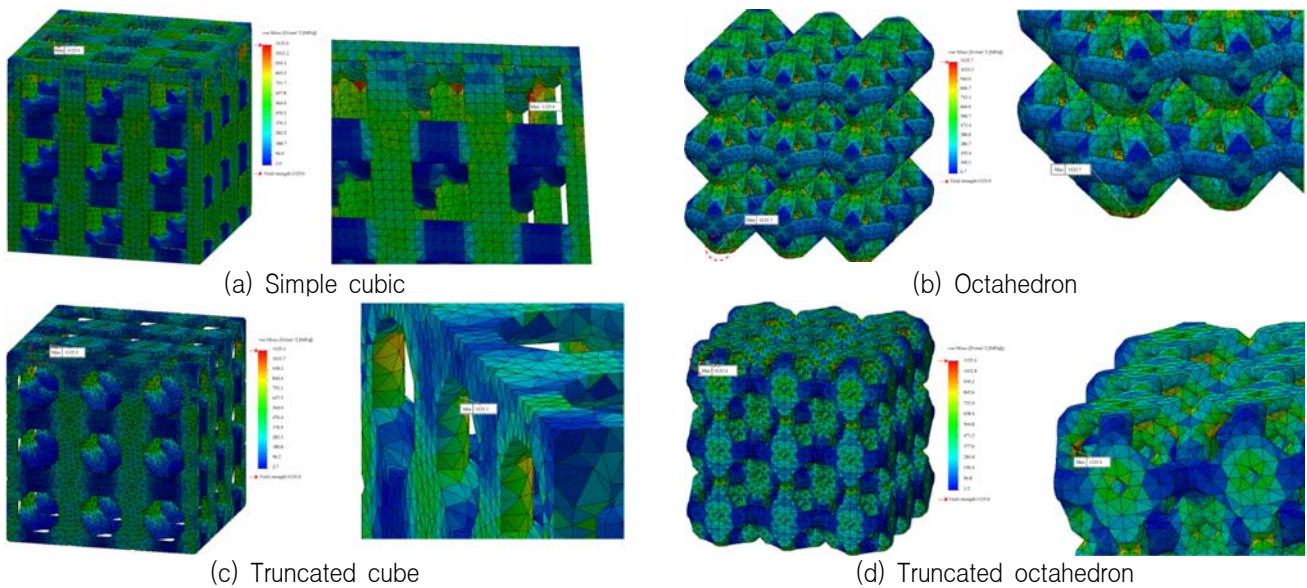


그림 48. 격자구조체에 따른 FEA 결과 - 응력집중포인트

- 축 방향 압축 조건에서 성능이 우수한 상위 4가지 유형은 simple cubic, octahedron, truncated cube, and truncated octahedron로 도출됐다. 이중 simple cubic 및 octahedron이 가장 우수한 결과였다.

(3.5) 실제 압축강도시험을 통한 3D 프린팅 출력 격자구조체 특성 확인 : 3D프린팅으로 출력한 격자구조체의 기계적 특성을 확인한다.

(3.5.1) 소재별 출력물 기계적 특성 확인

- **[실험 개요]** FEA해석을 통해 축방향 압축하중 저항성이 우수한 격자구조체 4종을 도출하고, 소재별로 출력하여 기계적 특성을 확인하는 것을 목표로 한다.
- **[실험 조건]** 격자구조체는 FEA해석을 통해 상대밀도 0.3, 격자배열 3×3×3으로 최종 선정했다.
- **[출력 조건]** 격자구조체 출력소재에 따라 장비를 선정했다. PA12의 경우 H사의 MJF 프린팅을 사용했다. 금속소재(Ti-6Al-4V Grade 5 티타늄 분말 및 AlSi10Mg 분말)은 M사의 금속프린팅 장비를 이용해서 제작했다. 출력 시 조건은 다음과 같다.
- **[시험 방법]** 출력물 질량을 측정하여 상대밀도 0.3을 확인했다. 여기서, PA12, Ti-6Al-4V 및 AlSi10Mg의 밀도는 각각 1.01 g/cm³, 4.4 g/cm³ 및 2.6 g/cm³이다.
- 압축강도를 확인하기 위해서 ISO 13314 Mechanical testing of metals — Ductility testing — Compression test for porous and cellular metals에 따라 압축강도를 수행했다. 만능시험기(UTM, Instron Universal Testing Machine, Massachusetts, USA)는 최대하중은 100kN를 사용해서, 재하속도 0.01mm/s로 힘을 가하고 수직방향으로 측정했다. 항복응력에 도달한 후 하중을 제거했다. 재하방향은 출력방향에 직각방향으로 고정했다. 시편은 3개 평균을 도출했다.

표 17 출력소재에 따른 기계적 특성

Factor	Level
Unit cell type	simple cubic, truncated cube, octahedron, and truncated octahedron
Relative Density	0.3
Lattice array	3×3×3
Lattice structure dimension	20×20×20 mm
Test method	Real compression test
Material	PA12, Ti6Al4V, AlSi10Mg

표 18 PA 12 소재 출력조건 및 표준시편 기계적 특성

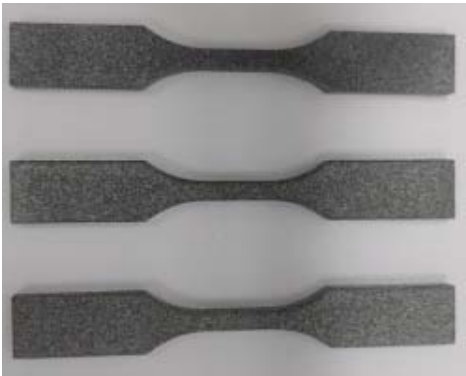
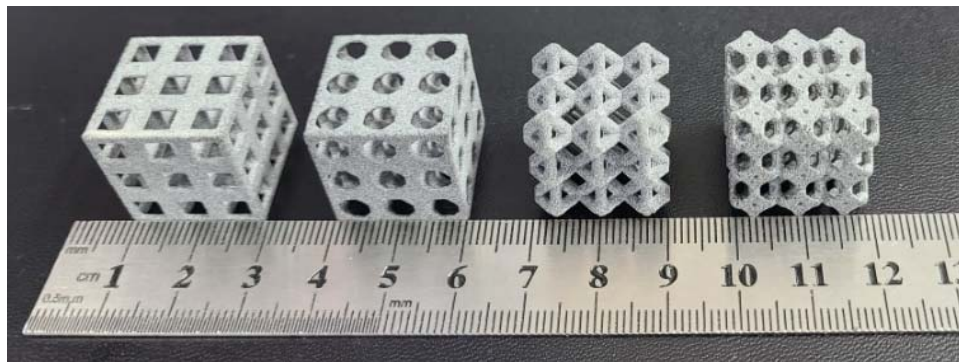
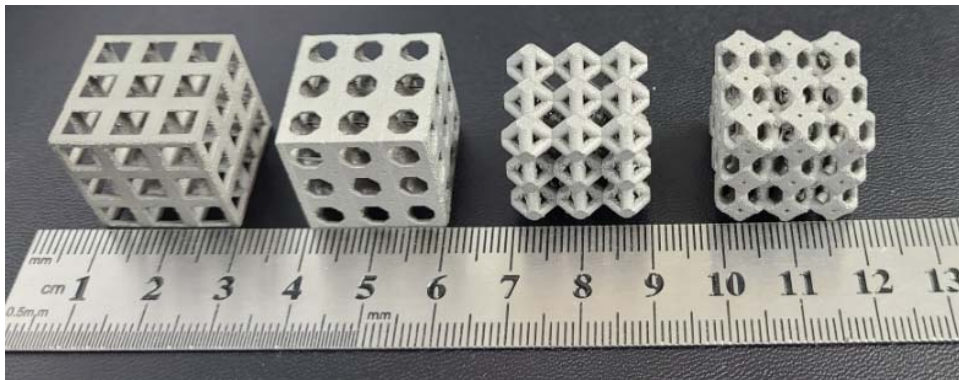
	PA12	
	출력조건	
프린터해상도	1200 dpi	
레이어두께(mm)	0.08 mm	
	시편시험결과	
인장강도	49 MPa (PA12 소재 데이터 48 MPa) /ASTM D638/	

표 19 금속 소재 출력조건 및 표준시험 결과

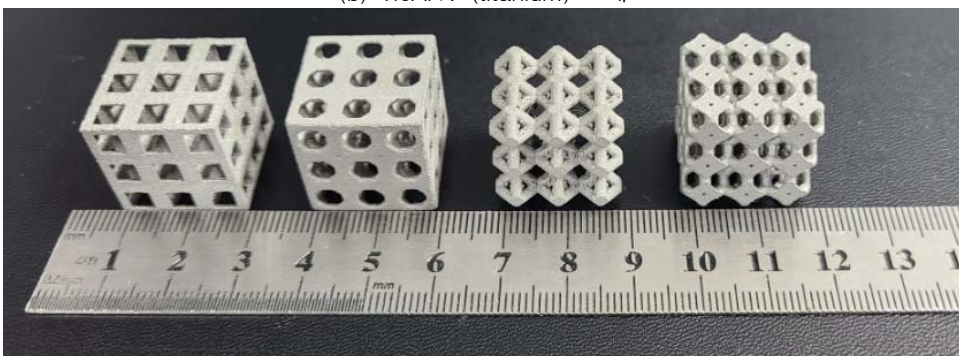
	Ti-6Al-4V	AlSi10Mg
출력조건		
레이저 출력	185 W	290 W
스캔 속도	1100 mm/s	750 mm/s
해칭거리	90 μ m	140 μ m
레이어두께	0.02 mm	0.03 mm
시험시험결과		
인장강도	1200 MPa	295 MPa
항복강도	1125 MPa	350 MPa
연신율	8 %	26 %



(a) PA12 소재



(b) Ti6Al4V (titanium) 소재



(a) AlSi10Mg (aluminium) 소재

그림 49. 소재별 격자구조체 출력물 형상 (왼쪽부터, simple cubic, truncated cube, octahedron, truncated octahedron)

- [시험 결과] 출력한 격자구조체의 소재별 질량과 밀도를 측정했다. 각 소재의 고유밀도 및 격자구조체의 상대밀도를 고려했을 때, 허용가능한 측정값이라고 판단된다.

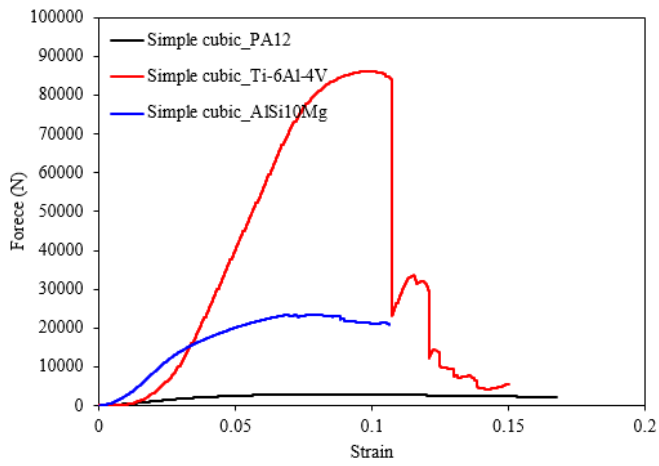
표 20 출력물 기본물성

		PA12 1.01 g/cm ³		Ti-6Al-4V 4.4 g/cm ³		AlSi10Mg 2.6 g/cm ³	
		each.	avg.	each.	avg.	each.	avg.
질량(g)	simple cubic	2.58	2.54	11.31	11.41	6.20	6.17
		2.55		11.36		6.21	
		2.49		11.55		6.11	
	truncated cube	2.41	2.43	11.31	11.33	6.23	6.24
		2.44		11.35		6.25	
		2.44		11.32		6.25	
	octahedron	2.38	2.38	11.58	11.57	6.05	6.07
		2.39		11.55		6.09	
		2.38		11.57		6.06	
	truncated octahedron	2.4	2.39	11.55	11.59	6.03	6.13
		2.39		11.6		6.16	
		2.38		11.61		6.21	
밀도(g/cm ³)	simple cubic	1.001	1.00	4.41	4.42	2.555	2.55
		1.002		4.43		2.527	
		0.984		4.41		2.557	
	truncated cube	0.993	0.99	4.41	4.42	2.611	2.55
		0.993		4.43		2.493	
		0.991		4.42		2.543	
	octahedron	0.992	0.99	4.43	4.42	2.559	2.56
		0.996		4.41		2.560	
		0.992		4.42		2.549	
	truncated octahedron	1.000	1.00	4.41	4.43	2.599	2.55
		0.996		4.43		2.548	
		0.992		4.44		2.506	

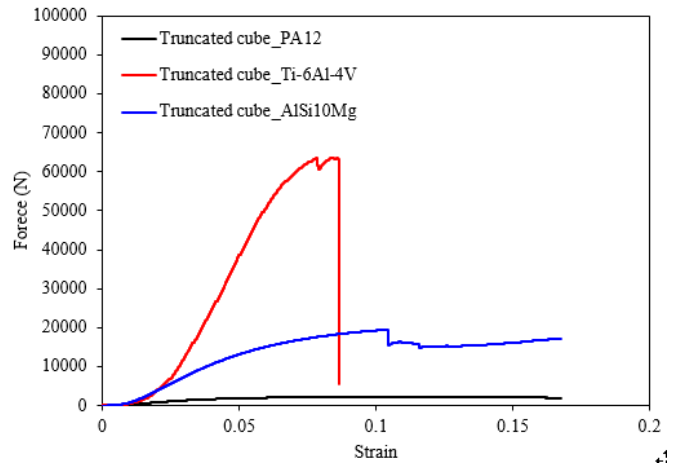
- [시험 결과] 소재별/단위셀 형상에 따른 실제 압축강도 시험 결과, simple cubic 및 octahedron 형상에서 우수한 축방향하중 저항성을 확인했다. 이는 선형정적FEA 해석과 동일한 패턴의 결과이다. 소재별 값을 분석할 경우, PA12소재는 티타늄(Ti-6Al-4V)소재대비 약 3~4%수준의 압축강도가 나타났고, 알루미늄(AlSi10Mg)은 약 23~30% 수준의 압축강도가 나타났다.

표 21 소재/단위셀형상에 따른 격자구조체 최대항복하중

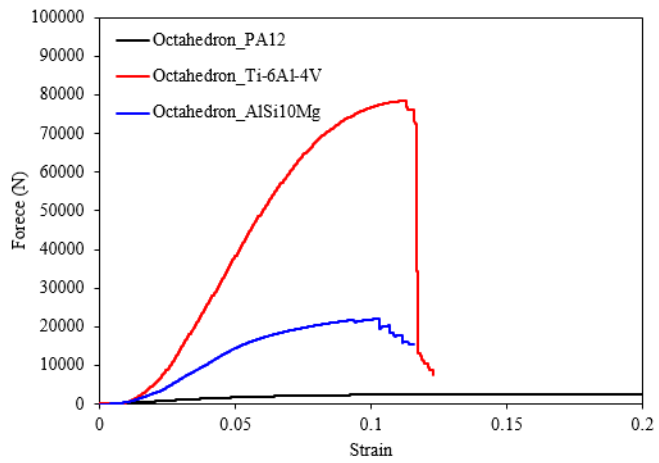
		Applied force (N)		
		PA12	Ti-6Al-4V	AlSi10Mg
Applied force(N)	simple cubic	3,000	86,870	23,560
	truncated cube	2,330	63,680	19,510
	octahedron	2,680	78,470	20,290
	truncated octahedron	2,120	63,230	14,640



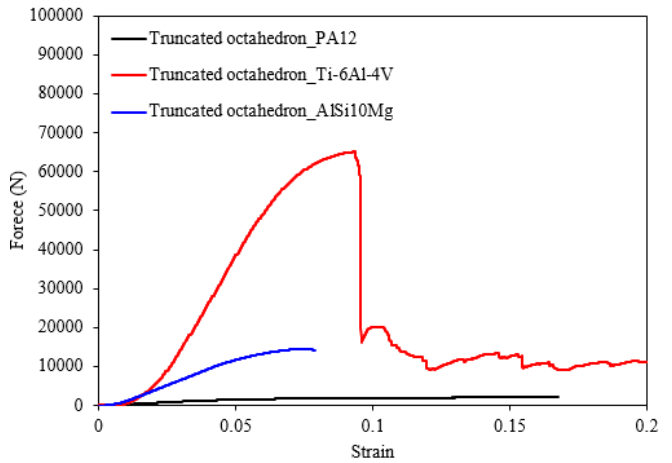
(a) Simple cubic



(b) Truncated cube



(c) Octahedron



(d) Truncated octahedron

그림 50. 소재별/단위셀 별 항복하중

- 소재별 값을 분석할 경우, PA12소재는 티타늄(Ti-6Al-4V)소재대비 약 3~4%수준의 압축강도가 나타났고, 알루미늄(AlSi10Mg)은 약 23~30% 수준의 압축강도가 나타났다.

(3.5.2) 단위셀에 따른 격자구조체의 기계적 특성 확인

- **[실험 개요]** 격자구조체 압축강도 특성을 확인하기 위하여 선형FEA, 비선형FEA 및 실하중재하 시험을 진행했다. 각 시험방법을 비교 검토함으로써 각 방법의 적합성을 확인하고자 한다.
- **[실험 조건]** 격자구조체는 FEA해석을 통해 상대밀도 0.3, 격자배열 3×3×3으로 최종 선정했다.

표 22 단위셀에 따른 특성

Factor	Level
Unit cell type	simple cubic, truncated cube, octahedron, and truncated octahedron
Relative Density	0.3
Lattice array	3×3×3
Lattice structure dimension	20×20×20 mm
Test method	static FEA, nonlinear FEA, and Real compression test
Material	Ti6Al4V

- simple cubic 및 truncated cube 의 파괴양상을 보면 (붕괴 전 노란색 점선 원) 상단 절점 가장자리에서 초기 파괴가 발생했다, 이는 선형 FEA의 응력집중 포인트에 해당한다. truncated octahedron도 FEA 응력집중 포인트에서 균열이 발생했고, 격자구조 상부의 수직부재가 대각선으로 전단파괴했다. octahedron도 FEA 응력집중과 동일 위치에서 초기 균열이 발생했고, 격자 구조 하단의 대각선 부재가 파괴됐다.
- 결과적으로, 격자구조체의 압축변형 및 파괴 메커니즘은 단위셀에 크게 의존한다. 또한, 초기 변형위치는 선형 FEA를 통해 예측할 수 있습니다.
- 선형 정적 FEA 결과값은 실제 실험값 대비 30.0~34.9% 수준의 항복값으로 나타났고, 비선형 FEA 항복값은 실제 실험 항복값 대비 72.4~78.1 % 수준으로 나타났다. 결과적으로 비선형 FEA가 선형 정적 FEA보다 상대적으로 높은 신뢰도를 나타낸다. 선형 정적 FEA는 응력집중도 및 파괴예측을 하기에 충분한 결과였다.

표 23 FEA 및 실하중시험 비교

	Simple Cubic	Truncated Cube	Truncated Octahedron	Octahedron
Yield force by experimental test (N)	86,300	63,680	65,120	78,470
Yield force by linear static FEA (N)	30,160	20,715	19,545	25,050
Linear static FEA/experimental test (%)	34.9	32.5	30.0	31.9
Yield force by nonlinear FEA (N)	65,250	49,750	47,350	56,800
Nonlinear FEA/experimental test (%)	<u>75.6</u>	<u>78.1</u>	<u>72.7</u>	<u>72.4</u>

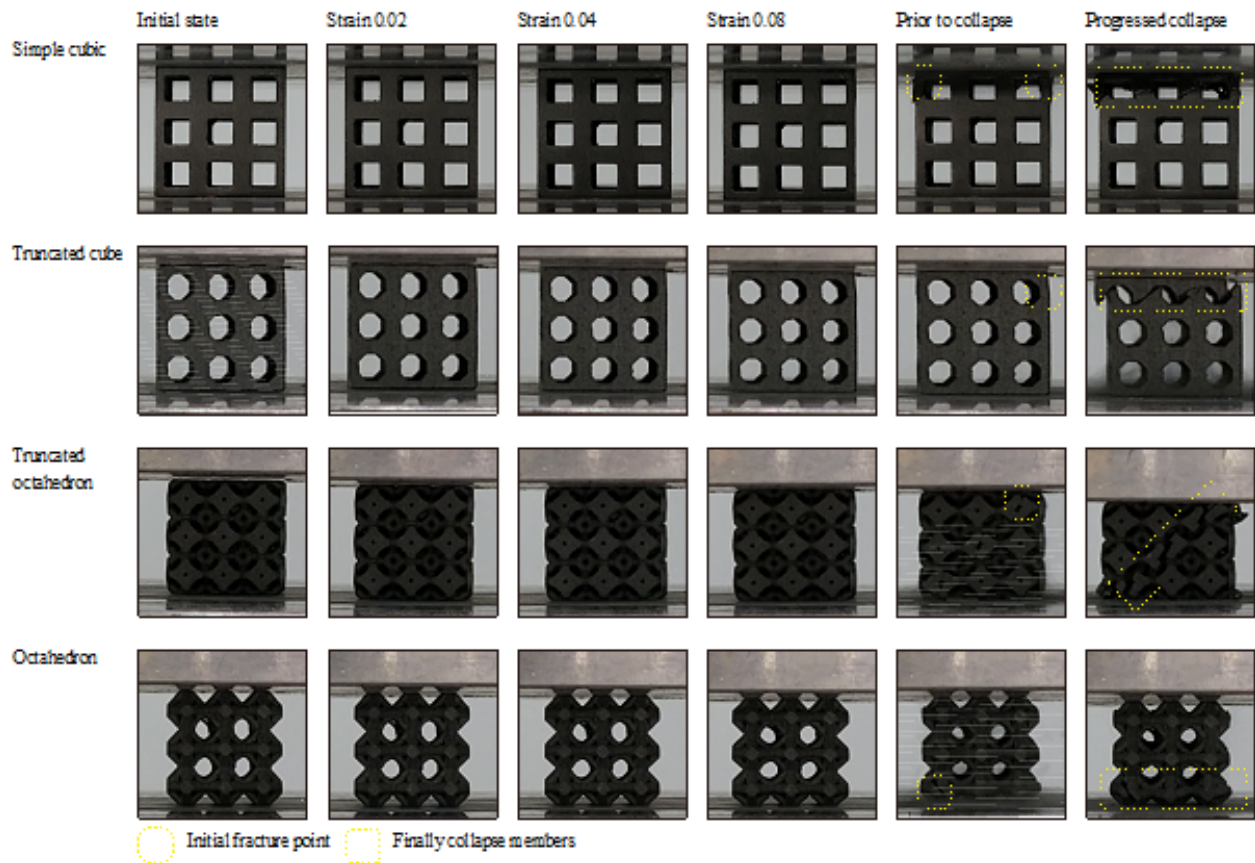


그림 51. 격자구조체에 따른 압축강도 - 파괴형상

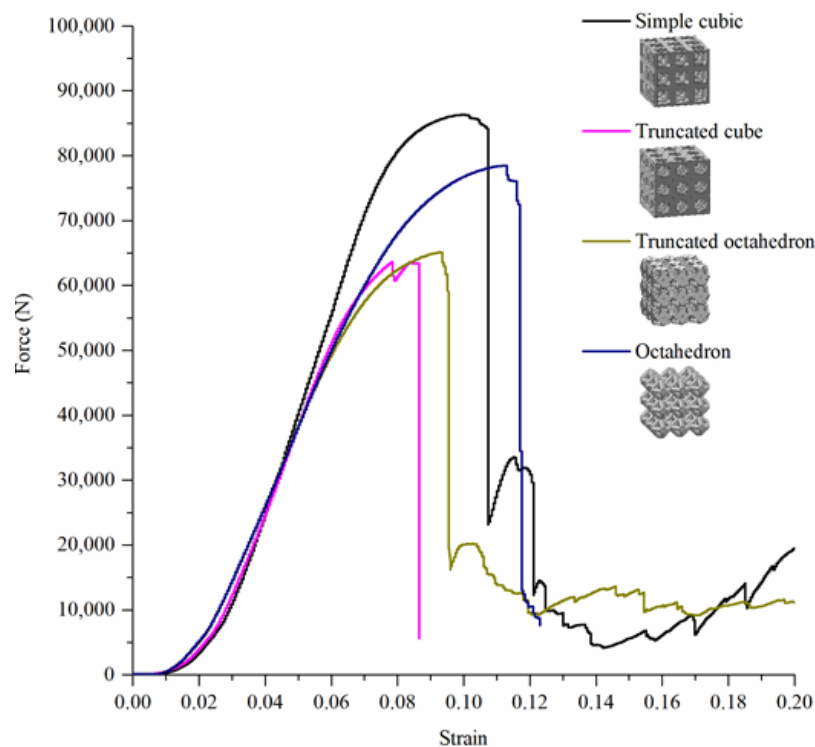


그림 52. 격자구조체에 따른 압축강도 관계

□ □ 선형 정적 FEA 결과값은 실제 실험값 대비 30.0~34.9% 수준의 항복값으로 나타났고, 비선형 FEA 항복값은 실제 실험 항복값 대비 72.4~78.1 % 수준으로 나타났다. 결과적으로 비선형 FEA가 선형 정적 FEA보다 상대적으로 높은 신뢰도를 나타낸다. 선형 정적 FEA는 응력집중도 및 파괴예측을 하기에 충분한 결과였다.

(3.5.3) 단위셀 배열에 따른 격자구조체의 기계적 특성 확인

- **[실험 개요]** 본 챕터에서는 격자구조체의 단위셀 배열에 따른 압축강도 특성을 실험을 통해 확인하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 20×20×20 mm 구조체의 최적 배열수를 도출하고자 한다.
- **[실험 조건]** 상대밀도 0.2의 Simple cubic 단위셀을 대상으로 선정했으며, 단위셀 배열을 1×1×1 ~ 10×10×10까지 설계·출력했다. 출력조건은 3.5.1과 동일하다. 출력재료는 Ti6Al4V (titanium)로 선택했다.
- **[실험 결과]** 1×1×1에서 3×3×3 배열로 배열이 증가함에 따라, 최대하중은 급격하게 상승했다. 3×3×3 배열부터 수렴하여 7×7×7배열까지 동급수준의 강도가 나타났다. 그러나, 8×8×8배열부터 강도가 증가하는 결과가 나타났다. 2차수렴에 대해서는 추후 추가연구가 필요하다.

표 24 격자배열에 따른 분석

Factor	Level
Unit cell type	Simple cubic
Relative Density	0.2
Lattice array	1×1×1, 2×2×2, 3×3×3, 4×4×4, 5×5×5, 6×6×6, 7×7×7
Lattice structure dimension	20×20×20 mm
Test method	Real compression test
Material	Ti6Al4V (titanium)

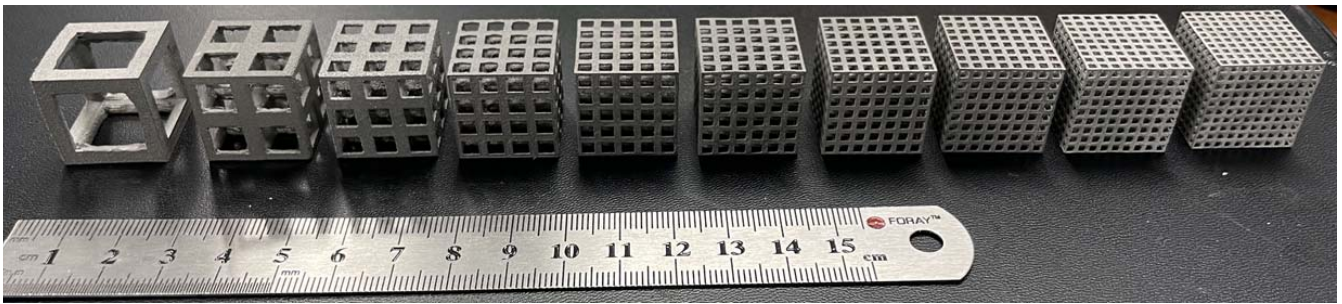


그림 53. 격자배열에 격자구조체 출력물 형상

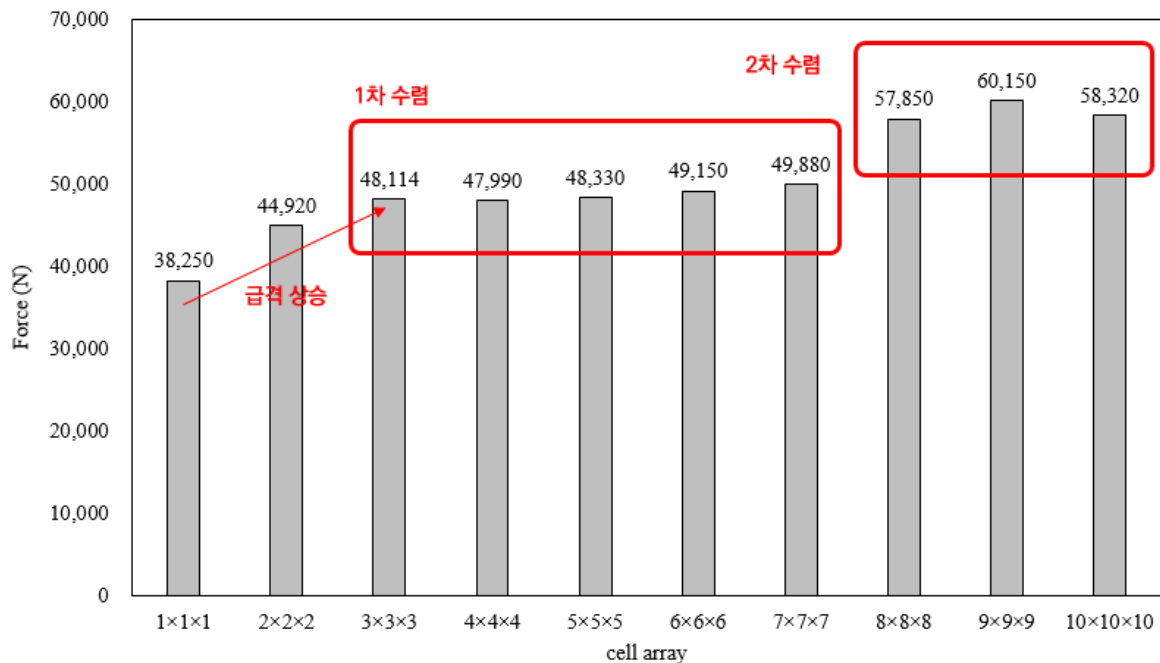


그림 54. 격자배열에 격자구조체 최대항복하중

(3.6) 격자구조체 고부가가치(안) 검토

(3.6.1) 격자구조체를 활용한 활용방안(안)

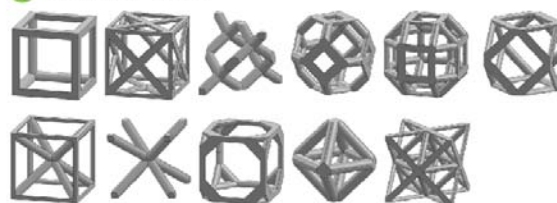
- 3D 프린팅을 활용하여 격자구조체를 설계/제조하고, 내부 공극을 경량성 채움재로 포화시킴으로써 경량기능성 격자구조체 제조를 위한 기반을 확보했다.
- 격자구조체는 3D 프린터 가용성 증가와 재료 비용 절감으로 첨단 항공우주 응용 분야에서 일반적인 소비자 제품으로 이동하고 있다. 향후 일반 소비자 제품 및 건설용 부재의 격자구조체 적용에 활용 계획이다.
- 격자구조체 장점 : 격자 구조체는 경량성, 에너지흡수능, 열관리능을 갖는 다기능성 소재로 미래 잠재적인 수요가 기대되고 있으며, 산업부품의 새로운 패러다임을 이끌어낼 수 있을 것으로 판단된다.
 - 부품 비용 절감(Reduced part cost) : 격자구조체는 재료 손실이 적다는 것을 의미한다. 또한, 최적 격자구조체 도입을 통해 구조적 결함을 야기하지 않고 부품생산비용을 줄일 수 있다. 특히, 항공우주 산업에서 흔히 사용하는 티타늄 또는 인코넬과 같은 재료의 경우 그 효과는 극대적이다.
 - 중량 대비 강도 우수(Improved strength-to-weight ratio) : DFAM(Design for Additive Manufacturing) 원칙에 따라 설계된 격자구조체는 중량 대비 강도가 우수하다. 따라서 질량을 최소화하는 것이 중요한 자동차 및 항공우주 산업에 이상적이며, 향후 일반 소비자 제품 및 건설용 부재에도 확대될 것이다.
 - 충격 흡수(Shock absorption) : 격자구조체는 구조체가 유연하고 에너지를 분산하는 장점이 있다.
 - 표면적 증가(Increased surface area) : 동일 체적에서 비표면이 증가하기 때문에 열전달 혹은 화학반응에 유리하다.
- 본 연구성과 활용
 - [기반기술] 밀도제어형 격자구조체 설계/제조 기술 확보
 - [기본활용-본연구] 경량 고강도 인공경량골재 및 이를 활용한 경량고강도콘크리트(1.6 t/m³, 45 MPa)
 - [활용 확대]
 - ※ 비선형 결합구(joint), 비선형 건축 구조체 등으로 스케일업
 - ※ 특정 영역 에너지흡수, 열관리, 진동 흡수 등이 가능한 맞춤형 기능성 소재 개발

(3.6.2) 활용방안1-경량골재 시제품 제시

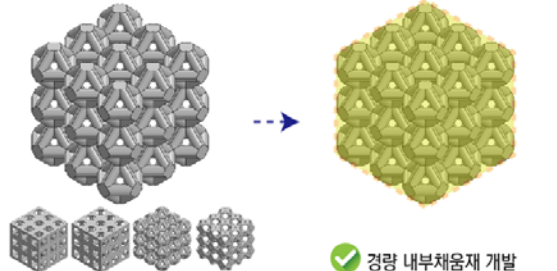
- 3D 프린팅 격자구조체를 경량골재로서 적용하는 것을 목표로 함
- 1.6 t/m³ 및 압축강도 45 MPa급 경량콘크리트 제조를 목표로 함

기반기술확보 (단위셀 및 격자구조체 설계/제조)

✓ 단위셀 설계 기술 확보



✓ 격자구조체 설계 기술 확보 : 본 연구는 압축 거동이 우수한 형상을 도출함



✓ 경량 내부채움재 개발

경량고강도콘크리트

✓ 3D경량골재

밀도제어 1.0~2.1 g/cm³,
흡수율 0.2% 이하 달성
KS F 2541 골재파쇄값 3% 이하 달성



일반골재 인공경량골재

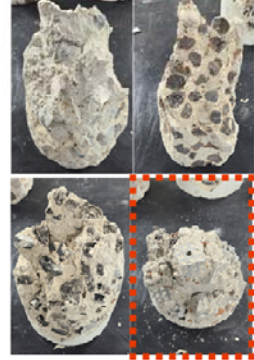


바탕애시골재 3D골재

3D골재 제조 및 적용성 검토

✓ 3D경량골재 활용

경량 고강도 콘크리트
Density : 1.6 t/m³
Strength : 45 MPa



골재 파손이 없어서 고강도에 유리함

그림 3-55. 활용방안1-격자구조 인공경량골재

(3.6.3) 활용방안2-비선형조인트 시제품 제시

- 최근 3D프린팅을 건축물 외장재(비정형 커튼월 등)에 적용하는 사례가 늘고 있다. 대표적으로 국내 갤러리아백화점 외장재와 같이 3D프린팅 기술을 적용하여 건축부재를 제조하는 사례가 보고되고 있다.
- 비정형 곡면디자인을 구현할 수 있는 다양한 노드 커넥션들이 현재 제품화 되어 있다. 국내는 2018년 준공한 인천공항 2단계의 천창을 시작으로 비정형 단층 그리드 셸(비정형 커튼월) 사례들이 차츰 증가하고 있다.
- 비정형 외장재를 구축하기 위해서는 다각도의 파이프를 체결할 수 있는 비정형조인트가 필수적이다. 이와 같은 비정형조인트 제조를 위해 3D프린팅 기술을 활용하는 사례가 보고되고 있다. 대표적으로 MX3D, Nematox, 및 N-AM_LI3 제품이 가장 대표적이다. 이와 같은 비정형조인트에 격자구조체를 적용함으로써 경량화 및 비용절감 등이 가능할 것으로 예측할 수 있다.
 - 다각형 조인트는 소량다품종으로 적층제조(=3D프린팅 기술)를 적용하기에 적합
 - 다각형 조인트를 경량화함으로써 구조물전체 경량화 및 재료절감이 가능하다고 판단됨 (약 40~50% 부피 절감 달성 가능하다고 판단)



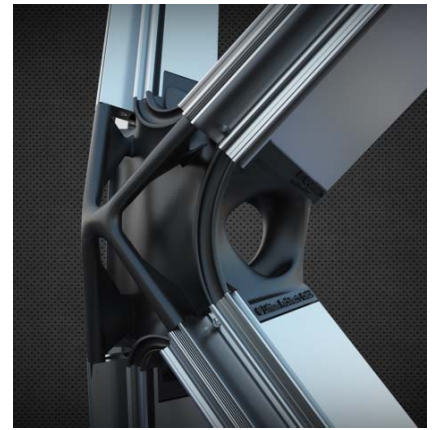
그림 56. 비정형 외장재 적용사례 (왼쪽부터, british museum UK, my zeil Germany, 인천공항, 광고갤러리아백화점)



MX3D



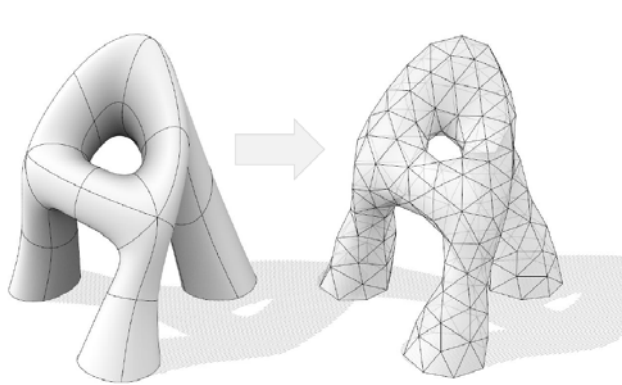
Nematox



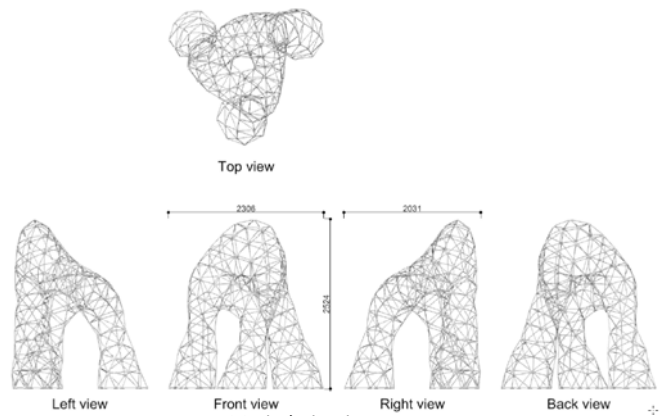
N-AM_LI3

그림 57. 3D프린팅 출력 비정형 외장재 노드

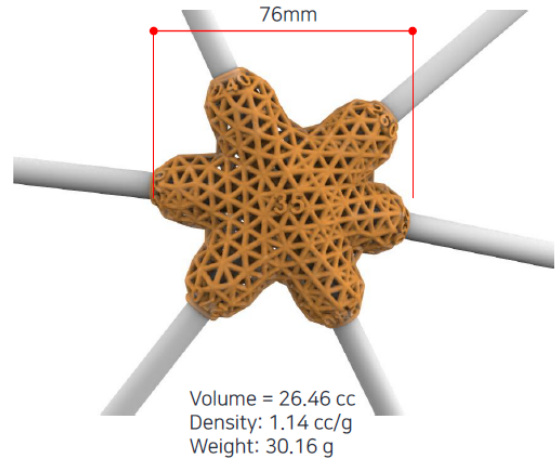
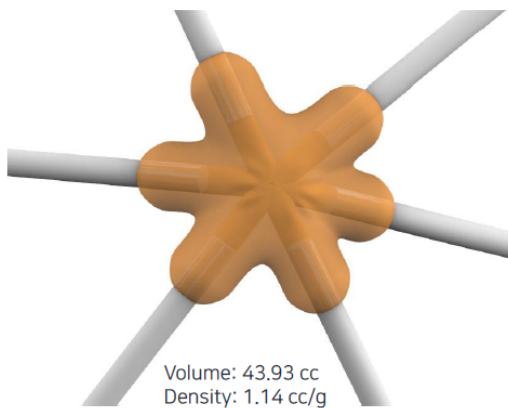
□ 격자구조 비정형 외장재 노드 200개로 비선형 곡면 구조체를 설계했고, 격자구조체의 적용성에 대해서 검토했다.



전체 구도

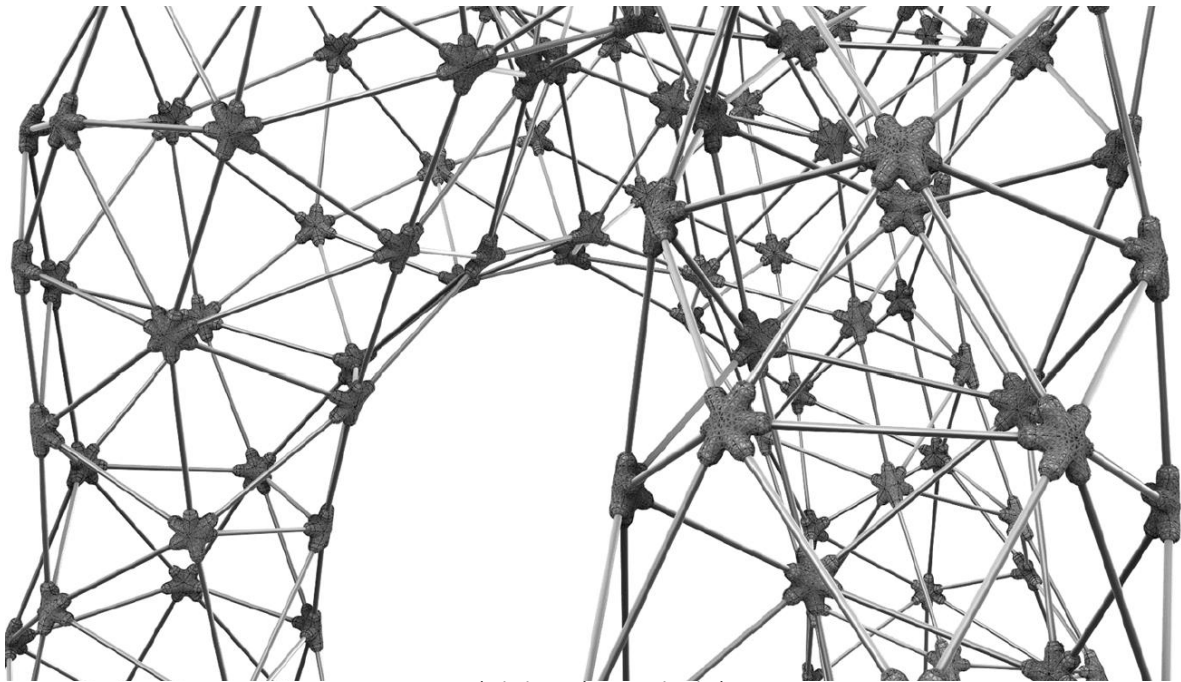


뷰위치에 따른 구도

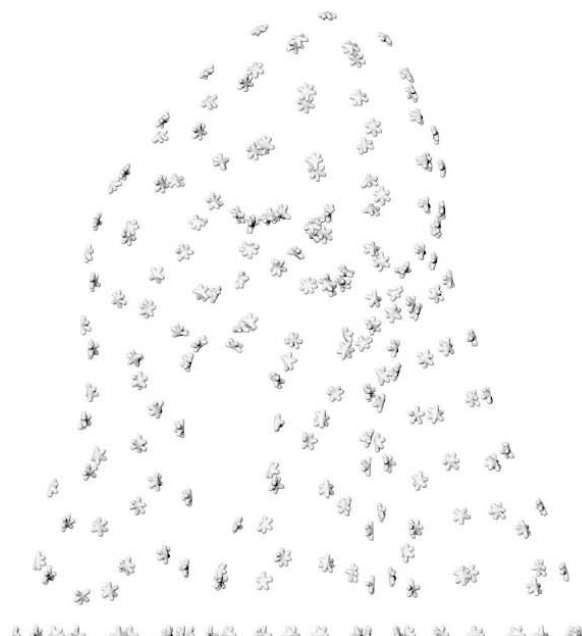
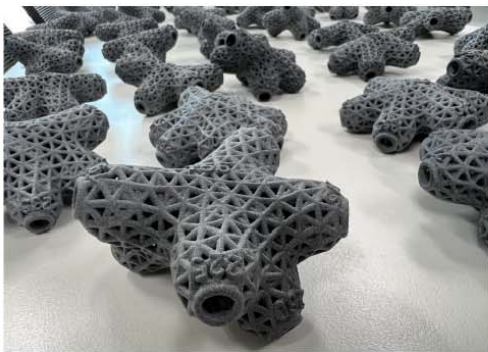


격자구조체 적용에 따른 재료절감 (40~50% 재료절감 및 경량화)

다모양 조인트 생성 200개 상호 상이함

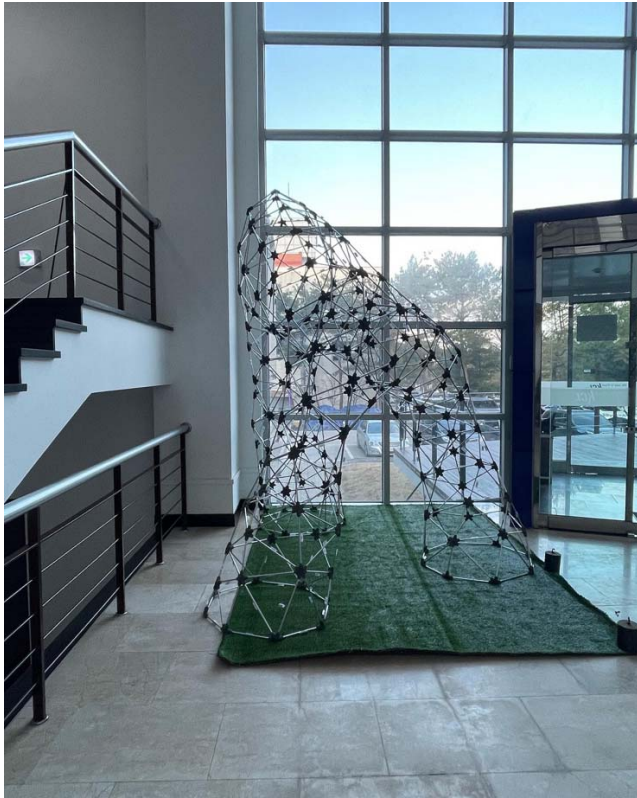


다각형 조인트 조립 형상

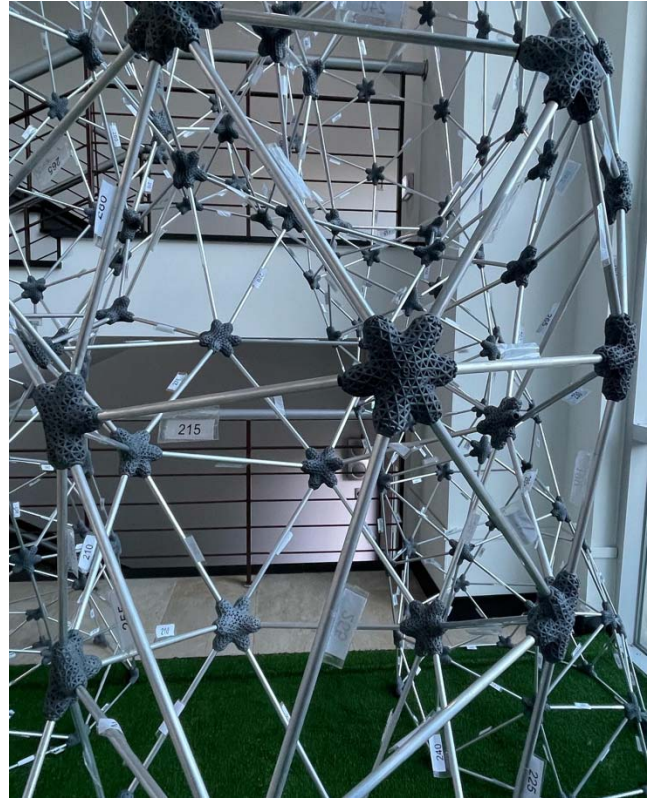


0~199번
→ 총 200개

조인트 출력물



구조체 설치 형상



구조체 설치 형상

그림 58. 3D프린팅 출력 비정형 외장재 노드 시작품 과정

- 격자구조체의 고부가가치 활용방안으로 비정형외장재 노드를 격자구조체로 적용하는 것을 제안하였고, 실제 출력을 수행했다.

○ [핵심기술2] SLM3DP 출력최적화

(1.) 연구 개요

1차년도 연구내용

[출력 소재 도출 및 최적화]

- 세부목표 #1: SLM 3D 프린팅 금속분말 물성 조사(국내외 자료 수집 및 정리)
- 세부목표 #2: SLM 3D 프린팅 적용 소재(안) 도출

2차년도 연구내용

[출력 최적화 제조 기술 최적화]

- 세부목표 #1: 적용 소재 도출 및 출력조건 최적화 정립

• [연구의 목적]

본 연구는 고강도 인공경량골재 개발을 위하여 SLM 3D 프린팅 장비에서 사용 가능한 금속 3D 프린팅 파우더 소재를 주원료 타입별로 구분하여 물성 및 중량당 판매단가를 조사함으로써, 용도 목적에 부합하는 인공경량골재에 대한 후보 소재군을 도출하는데 그 목적이 있다. 또한 고강도 인공경량골재 개발을 위하여 SLM 3D 프린팅 장비의 영향인자를 검토하고, 주요 출력조건에 대한 검토를 통해 최적화를 달성하는데 목표가 있다.

• [필요성]

장기적인 관점에서 본 연구의 목표인 고강도 인공경량골재를 SLM 3D 프린팅화 하기 위해서는 반드시 금속분말 소재에 대한 경제성(예를 들어 중량당 단가, 원/kg)에 대한 검토가 선행되어야 한다. 더하여, 경량 고강도 콘크리트를 구현하기 위하여 요구되는 SLM 3D 프린팅 격자구조(Lattice) 형상 및 밀도를 도출하는 과정에서 반드시 금속분말 소재에 대한 화학적 조성(Chemical Composition)과, 물리적 특성(Mechanical Properties)에 대한 심도 있는 검토가 필요하다. 또한, SLM 3D 프린팅 장비는 다양한 출력 영향인자에 따라 출력물의 품질, 생산시간, 가격이 결정된다. 특히 요구되는 SLM 3D 프린팅 격자구조(Lattice) 형상을 구현하는 과정에서 출력 품질에 영향을 주는 주요 출력조건에 대하여 최적화를 달성하는 것이 필요하다.

• [현황]

일반적으로 SLM 3D 프린팅 소재는 기존의 금속 분말소재에 비하여 3D 프린팅이 가능하도록 적절한 화학적 조성과 특정화된 입도분포를 가지고 있다. 현재까지 다양한 SLM 3D 프린팅 소재가 개발되어오고 있지만, 수요가 적고, 분말소재 공급사(대표적으로 Carpenter Additives, 구 LPW)의 수가 적음에 따라 이들 가격이 매우 높게 형성되어 있다.

더욱이 금속 분말소재는 SLM 3D 프린팅 장비사(EOS, Concept Laser, SLM, RENISHAW 등)의 요구조건에 맞추어 생산되기 때문에 동일 소재라고 할지라도 소재의 화학적 조성 및 입도분포에 미세한 차이가 존재한다. 이에 따라 본 연구에서는 현재 자사가 보유한 SLM 3D 프린팅 장비(독일 EOS사의 M290, M400-4) 장비에서 활용가능한 금속분말(Carpenter Additives) 소재에 대한 기술데이터 수집을 진행했다.

* SLM 3D 프린팅 장비의 특성상, 장비사에서 인정하지 않는 소재를 사용할 경우, 출력물의 품질 및 장비 운영에 큰 영향을 줄 수 있음을 경고하고 있다.

(2.) SLM 3D 프린팅 금속분말 물성 조사

(2.1) SLM 3D 프린팅용 분말의 주 계열

• [알루미늄 베이스]

거의 모든 산업분야에서 보편적으로 사용될 수 있는 금속 계열로 평가되며, 출력 상태가 ‘가공 그대로’의 상태로 간주될 수준의 인장 특성을 보인다. 특히 전장, 항공 및 전자산업 등 우수한 열특성과 경량화를 동시에 요구하는 산업군에서 광범위하게 사용되고 있다.

• [철 베이스]

기존 스테인리스 스틸의 계열과 유사한 물리적/내식 특성을 갖춘 금속분말로 구성되어 있으며, 내부식성을 향상하며, 레이저 용융과정에서 열응력에 대한 민감도를 낮춘 SUS316L 소재나 고강도, 공구강, 머레이징강 등의 특성을 갖는 분말소재군으로 이루어져 있다.

• [니켈 베이스]

석출경화가 가능한 금속 분말로 광범위한 사용온도와 탁월한 내식성, 기계적 특성을 갖춘 금속분말군이다. 특히 높은 온도에서 높은 수준을 요구하는 산업군에 적합하며, 내식성, 산화방지력, 응력부식균열(Stress-corrosion Cracking)에 대한 저항력이 우수하다. 일반적으로 우주, 항공, 발전, 원자력 등의 분야에서 주로 활용되고 있다.

• [코발트-크롬 베이스]

우수한 내마모성, 내식성과 생체적합성을 갖춘 금속분말군이다. 용점(Melting-point)이 높은 코발트-크롬의 특성으로 고온에서 안정적이며, 우수한 생체적합성을 갖춘 소재다. 주로 의료용/치과용 임플란트 산업에 이상적인 소재이며, 높은 내열특성을 요구하는 항공산업에도 주로 적용되고 있는 소재이다.

• [티타늄 베이스]

가공이 어려운 티타늄을 주요 합금소재로 한 금속분말군이다. 매우 우수한 내식성과 낮은 비중량을 지니며, 기계적 특성이 매우 우수한 소재이다. 주로 의료용 임플란트, 수술용 도구, 가스터빈 엔진 등에 주로 활용된다.

표 25. SLM 3D 프린팅 소재의 금속계열별 적용분야 조사표

제품 분류	제품명	적용분야
알루미늄 Aluminum	CT-PowderRange-AlSi10Mg	AM제조를 위해 개발 된 알루미늄합금 분말로 대중적으로 쓰이고 있음. "가공 그대로의"의 실온 상태에서, 가공 알루미늄 합금에 간주될 정도의 인장 특성을 보임. 전장, 항공 및 전자산업 등 우수한 열 특성과 경량화를 동시에 요구하는 다양한 산업군에 광범위하게 적용됨.
	CT-PowderRange-316L 시리즈	SUS316L(AISI 316L)에 상응하는 금속분말. 기존 316제품보다 낮은 탄소 함유량으로 미세균열로부터 발생하는 열응력에 대한 민감도를 낮추어 레이저 소결방식의 PBF에 적합하도록 개발하였으며, AISi316L보다는 상위의 수준의 크롬과 니켈 사용으로 내부식성을 강화함. 전장/바이오/항공우주 등 부품의 내식성이 요구되는 경우에 전 산업에 걸쳐 주로 사용 됨.
	CT-PowderRange-174 시리즈	SUS17-4-PH에 상응하는 금속분말. 장비 운영 소스에 따라 특화 개발된 분말로 질소분무 파우더 또는 아르곤분무 파우더로 선택 가능. 항공, 석유 화학 및 식품 가공을 포함한 다양한 산업에 걸쳐 상온에서 고강도와 내식성이 요구되는 경우 주로 사용 됨. 가공 물질에 석출경화 열처리가 필요한 경우, 174AR 제품 사용이 권고 됨 *질소 분무 파우더 제품은 파우더 내 높은 질소 함유량이 석출 경화 과정에서 마르텐사이트 단계 형성을 억제할 수 있음
철 Iron	CT-PowderRange-155-F	SUS 15-5 PH에 상응하는 금속분말. Argon atomization이 필요 없으나 Powder Range 174계열과 유사한 특성을 요하는 경우의 대체 금속분말임. 석출경화가 가능하며, 이 경우 174에 비하여 우수한 인장강도와 경도를 가지나 연성은 낮아짐. 항공,석유화학 및 식품 가공을 포함한 다양한 산업에 걸쳐 상온에서 고강도와 내식성이 요구되는 경우 주로 사용 됨

	CT-PowderRange-H13-F	SUS H-13 공구강에 상응하는 금속분말. 사용 장비, 제품의 기하학적 구조 및 3D 프린팅 파라미터에 따라 미세균열이 발생할 수 있음에 주의.
	CT-PowderRange-304시리즈	SUS 304에 상응하는 금속분말.
	CT-PowderRange-M300시리즈	머레이징 스틸 1.2709 에 상응하는 금속분말. 석출경화가 가능한 마르텐 사이트계 공구강으로 기계적 특성 중 인장 강도와 경도가 매우 우수함. 열처리가 용이하며, 경화 후 우수한 기계적 특성을 가짐. 우수한 인장 강도와 경도를 바탕으로 인젝션 몰딩과 다이캐스팅의 인서트 툴(Insert tool) 등 기능 부품제작에 주로 사용 됨.
니켈 Nickel	CT-PowderRange-718시리즈	니켈초내열합금 인코넬 718에 상응하는 금속분말. 석출경화가 가능한 금속 분말로 넓은 범위의 사용 온도와 탁월한 내식성의 우수한 기계적 특성을 가지며, 해당 기계적 특성을 704℃까지 유지함. 니켈합금은 항공, 원자력에서와 같이 높은 온도 범위에서 고차원적인 기계적 특성이 요구되는 산업군에 적합함.
	CT-PowderRange-625시리즈	니켈합금 인코넬 625에 상응하는 금속분말. Powder Range 718이 최대 한의 기계적 특성을 얻기 위해 별도의 열처리 공정을 필요로 하는 것과는 달리, Powder Range 625는 레이저 PBF를 이용한 "가공한상태(as processed)" 그대로도 우수한 특성을 가짐. 항공, 전장 및 해양 산업에서 다양하여 적용되고 있으며, 고온에서 내식성과 산화 방지력을 요구하는 다양한 산업군에서 활용 됨
	CT-PowderRange-XLC-F	특수합금강 하스텔로이 엑스(Hastelloy X)에 상응하는 금속분말. Powder Range XLC는 하스텔로이 엑스보다 현저히 낮은 균열감수성을 나타내며, 실온 및 상승온도에서 고강도를 보유하고 산화 및 응력부식 균열(stress-corrosion cracking) 저항력이 우수함. 상승 온도에서의 특성으로 말미암아 우주항공, 정유 등의 다양한 산업군에서 사용됨. 우주항공의 경우 가스터빈엔진의 연소 구역, 화학공업의 경우 Furnace Baffle과 Flash Direr 부품으로 사용 됨.
	CT-PowderRange-247LC-F	니켈계의 초내열합금 CM247LC에 상응하는 금속분말
코발트 크롬 Cobaltchrome	CT-PowderRange-CoCr-Cobalt-Chrome-F	수술용 임플란트를 위한 CoCrMo 캐스팅 합금의 표준인 ASTM F75 표준을 부합하는 금속 분말. 우수한 내마모성, 내식성과 생체적합성을 특징으로 하며, 용점(Melting point)이 높은 CoCr의 특성으로 고온에서도 안정하며, 우수한 생체적합성과 함께 내부식성과 내마모성을 겸비함. 의료용과 치과용 임플란트 산업에 이상적인 소재이며, 높은 열특성으로 항공 산업에도 적용 가능한 소재임.
티타늄 Titanium	CT-PowderRange-Ti64시리즈	티타늄 합금 ASTM B348(Ti-6Al-4V)에 상응하는 금속분말. Powder Range Ti6-4(티타늄6%, 알루미늄4%, 바니듐, Ti-6Al-4V)는 고성능의 티타늄으로 우수한 내식성과 낮은 비중량을 지니며 기계적 특성이 우수함. ASTM Grade5와 Grade 23에 상응하는 2가지 버전의 금속 분말을 제

		공하며, 고순도인 Grade23은 낮은 산소, 탄소와 질소 포화도를 가지며, Grade5 보다 증가된 연성과 파괴인성을 보임으로 인해 조직간 간극 (Interstitial)을 줄이며, 우수한 생체적합성을 구현할 수 있음. 의료용 임플란트, 수술용 도구와 가스터빈 엔진 부품 등에 주로 사용되며, Ti64 Grade23은 주로 항공, 의료 및 전장용 제품에 사용 됨.
--	--	--

- 시중에 판매되고 있는 SLM 3D 프린팅용 분말의 금속계열별 적용분야를 조사한 결과, 현 수준에서 가장 보편적으로 사용되고 있는 알루미늄 계열 AlSi10Mg, 철 계열 SUS316L, M300, 니켈 계열 인코넬 625, 코발트 크롬 계열, 티타늄 계열 Ti64 분말소재를 선정했다. 상기 소재에 대한 물성 분석은 2.2 SLM 3D 프린팅용 분말의 물성에서 상세히 소개했다.

(2.2) SLM 3D 프린팅용 분말의 물성

- SLM 3D 프린팅용 분말은 SLM 계열의 출력 방식에 따라, 세가지 적합소재의 타입(E, F, S)으로 생산되어오고 있다. 먼저 E타입은 SLM 출력방식중 일렉트론빔(Electron Beam)을 이용한 용융방식을 사용한 3D 프린팅 방식에 사용되는 소재이다. F타입은 대부분의 SLM 출력방식에 범용적으로 적용할 수 있는 타입이고, S 계열은 레이저 PBF(Powder Bed Fusion) 타입에 적합한 소재이다. 본 연구에서는 범용성이 높은 F 타입을 대상으로 SLM 3D 프린팅용 분말의 물성을 조사하고자 한다.
- [AlSi10Mg]

표 26. AlSi10Mg 소재의 화학적 조성

Element		Minimum wt%	Maximum wt%
Al	Aluminum	Balance	
Cu	Copper		0.05
Fe	Iron		0.25
Mg	Magnesium	0.25	0.45
Mn	Manganese		0.10
N	Nitrogen		0.20
Ni	Nickel		0.05
O	Oxygen		0.20
Pb	Lead		0.02
Si	Silicon	9.00	11.00
Ti	Titanium		0.15
Zn	Zinc		0.1
Others	Others		0.05
All Others	All Others		0.15

표 27. AlSi10Mg 소재의 물리적 특성

Property		Stress Relieved
Tensile Strength	Horizontal Direction (XY)	325 - 350 MPa 47 - 51 Ksi
	Vertical Direction (Z)	330 - 360 MPa 48 - 52 Ksi
Yield Strength	Horizontal Direction (XY)	210 - 245 MPa 30 - 36 Ksi
	Vertical Direction (Z)	175 - 225 MPa 25 - 33 Ksi
Young's Modulus	Horizontal Direction (XY)	67 - 77 GPa
	Vertical Direction (Z)	62 - 72 GPa
Elongation	Horizontal Direction (XY)	9 - 14 %
	Vertical Direction (Z)	5 - 12 %
Hardness		114 - 124 HBW
Coefficient of Thermal Expansion		20 - 21 x 10 ⁻⁶ m/mK
Thermal Conductivity		130 - 190 W/mK
Density		2.6 g/cm ³

- [316L - Stainless Steel]

표 28. 316L 소재의 화학적 조성

Element		Minimum wt%	Maximum wt%
C	Carbon		0.03
Cr	Chromium	17.00	18.00
Cu	Copper		0.75
Fe	Iron	Balance	
Mn	Manganese		2.00
Mo	Molybdenum	2.00	2.50
N	Nitrogen		0.10
Ni	Nickel	12.00	13.00
O	Oxygen		0.10
P	Phosphorus		0.03
S	Sulfur		0.02
Si	Silicon		0.75

표 29. 316L 소재의 물리적 특성

Property		Stress Relieved
Tensile Strength	Horizontal Direction (XY)	590 - 690 MPa 86-100 ksi
	Vertical Direction (Z)	485 - 595 MPa 70-86 ksi
Yield Strength	Horizontal Direction (XY)	470 - 590 MPa 68-86 ksi
	Vertical Direction (Z)	380 - 560 MPa 55-81 ksi
Young's Modulus	Horizontal Direction (XY)	159 - 175 GPa
	Vertical Direction (Z)	117 - 151 GPa
Elongation	Horizontal Direction (XY)	25 - 55 %
	Vertical Direction (Z)	30 - 70 %
Hardness	Horizontal Direction (XY)	210 - 214 HV0.5
	Vertical Direction (Z)	114 - 226 HV0.5
Coefficient of Thermal Expansion	$16 \times 10^{-6} \text{ m/mK}$	
Thermal Conductivity	15.6 W/mK	
Density	7.9g/cm ³	

- [M300]

표 30. M300 소재의 화학적 조성

Element		Minimum wt%	Minimum wt%
Al	Aluminum		0.10
C	Carbon		0.03
Cr	Chromium		0.25
Co	Cobalt	8.50	10.00
Fe	Iron	Balance	
Mn	Manganese		0.15
Mo	Molybdenum	4.50	5.20
Ni	Nickel	17.00	19.00
N	Nitrogen		0.10
O	Oxygen		0.10
p	Phosphorus		0.01
Si	Silicon		0.10
S	Sulfur		0.01
Ti	Titanium	0.80	1.20

표 31. M300 소재의 물리적 특성

Property		After Heat Treatment
Tensile Strength	Horizontal Direction (XY)	1900 - 2100 MPa 275.6- 304.6 ksi
	Vertical Direction (Z)	1900 - 2100 MPa 275.6- 304.6 ksi
Yield Strength	Horizontal Direction (XY)	1850 - 2050 MPa 268.3- 297.3 ksi
	Vertical Direction (Z)	1850 - 2050 MPa 268.3- 297.3 ksi
Young's Modulus	Horizontal Direction (XY)	160 - 200 GPa 23.2- 29 Msi
	Vertical Direction (Z)	160 - 200 GPa 23.2- 29 Msi
Elongation	Horizontal Direction (XY)	2 - 4 %
	Vertical Direction (Z)	2 - 4 %
Hardness	-	50 - 60 HRC
Coefficient of Thermal Expansion	10 - 11 × 10 ⁻⁶ m/mK	
Thermal Conductivity	15 - 20 W/mk	
Density	8.0 g/cm ³	

- [625 - Nickel Chromium Alloy]

표 32. 625 소재의 화학적 조성

Element		Minimum wt%	Maximum wt%
Al	Aluminum		0.400
C	Carbon		0.100
Co	Cobalt		1.000
Cr	Chromium	20.000	23.000
Cu	Copper		0.500
Fe	Iron		5.000
Mn	Manganese		0.500
Mo	Molybdenum	8.000	10.000
N	Nitrogen		0.020
Nb+Ta	Niobium + Tantalum	3.150	4.150
Ni	Nickel	Balance	
O	Oxygen		0.030
P	Phosphorus		0.015
S	Sulfur		0.015
Si	Silicon		0.500
Ti	Titanium		0.400

표 33. 625 소재의 물리적 특성

Property		After Heat Treatment
Tensile Strength	Horizontal Direction (XY)	950 - 1050 MPa 138-152 ksi
	Vertical Direction (Z)	875 - 950 MPa 127-138 ksi
Yield Strength	Horizontal Direction (XY)	700 - 750 MPa 102-109 ksi
	Vertical Direction (Z)	135 - 155 GPa 20-22 msi
Young's Modulus	Horizontal Direction (XY)	165 -185 GPa 24-27 msi
	Vertical Direction (Z)	160 - 200 GPa 23.2- 29 Msi
Elongation	Horizontal Direction (XY)	30 - 35 %
	Vertical Direction (Z)	35 - 45 %
Hardness		300 - 330 HV0.5
Coefficient of Thermal Expansion	$12.8 \times 10^{-6} \text{ m/mK}$	
Thermal Conductivity	9 - 10.5 W/mk	
Density	8.4 g/cm ³	

- [CoCr]

표 34. CoCr 소재의 화학적 조성

Element		Minimum wt%	Maximum wt%
Al	Aluminum		0.10
B	Boron		0.01
C	Carbon		0.16
Co	Cobalt	Balance	
Cr	Chromium	27.00	30.00
Fe	Iron		0.75
Mn	Manganese		1.00
Mo	Molybdenum	5.00	7.00
N	Nitrogen		0.25
Ni	Nickel		0.50
O	Oxygen		0.10
P	Phosphorus		0.02
S	Sulfur		0.01
Si	Silicon		1.00
Ti	Titanium		0.10
W	Tungsten		0.20

표 35. CoCr 소재의 물리적 특성

Property		As Built
Tensile Strength	Horizontal Direction (XY)	1100 - 1350 MPa 161- 196 ksi
	Vertical Direction (Z)	1050 - 1250 MPa 152-181 ksi
Yield Strength	Horizontal Direction (XY)	700 - 1000 MPa 102-145 ksi
	Vertical Direction (Z)	600 - 800 MPa 87-116 ksi
Young's Modulus	Horizontal Direction (XY)	200 - 220 GPa 29-32 msi
	Vertical Direction (Z)	190 - 220 GPa 28-32 msi
Elongation	Horizontal Direction (XY)	11 - 17 %
	Vertical Direction (Z)	20 - 25 %
Hardness		390 - 420 HV0.5
Coefficient of Thermal Expansion	13×10^{-6} m/mK	
Thermal Conductivity	13 - 15 W/mk	
Density	8.3 g/cm ³	

- [Ti64]

표 36. Ti64 소재의 화학적 조성

Element		Minimum wt%	Maximum wt%
Al	Aluminum	5.500	6.500
C	Carbon		0.080
H	Hydrogen		0.012
Fe	Iron		0.250
N	Nitrogen		0.050
O	Oxygen		0.130
Ti	Titanium	Balance	
V	Vanadium	3.500	4.500

표 37. Ti64 소재의 물리적 특성

Property		As Built
Tensile Strength	Horizontal Direction (XY)	1130 - 1250 MPa 163.9- 181.3 ksi
	Vertical Direction (Z)	1100 - 1250 MPa 159.5- 181.3 ksi
Yield Strength	Horizontal Direction (XY)	1050 - 1150 MPa 152.3- 166.8 ksi
	Vertical Direction (Z)	1000 - 1125 MPa 145- 163.2 ksi
Young's Modulus	Horizontal Direction (XY)	105 - 115 GPa 15.2- 16.7 Msi
	Vertical Direction (Z)	110 - 115 GPa 16- 16.7 Msi
Elongation	Horizontal Direction (XY)	5 - 10 %
	Vertical Direction (Z)	5 - 10 %
Hardness		385 - 405 HV0.5
		395 - 405 HV0.5
Coefficient of Thermal Expansion	$8 - 9 \times 10^{-6} \text{ m/mK}$	
Thermal Conductivity	6 - 8 W/mk	
Density	4.4 g/cm3	

- 각 금속 계열별로 대표성을 갖는 SLM 3D 프린팅용 소재에 대한 물성은 아래 인장강도와 연신률, 인장강도와 밀도의 X-Y 플롯으로 표현할 수 있다. 이와 같은 결과는 추후 고강도 인공경량골재 개발 중 골재의 목표 중량과 물리적 성능을 선택하는데 활용된다.

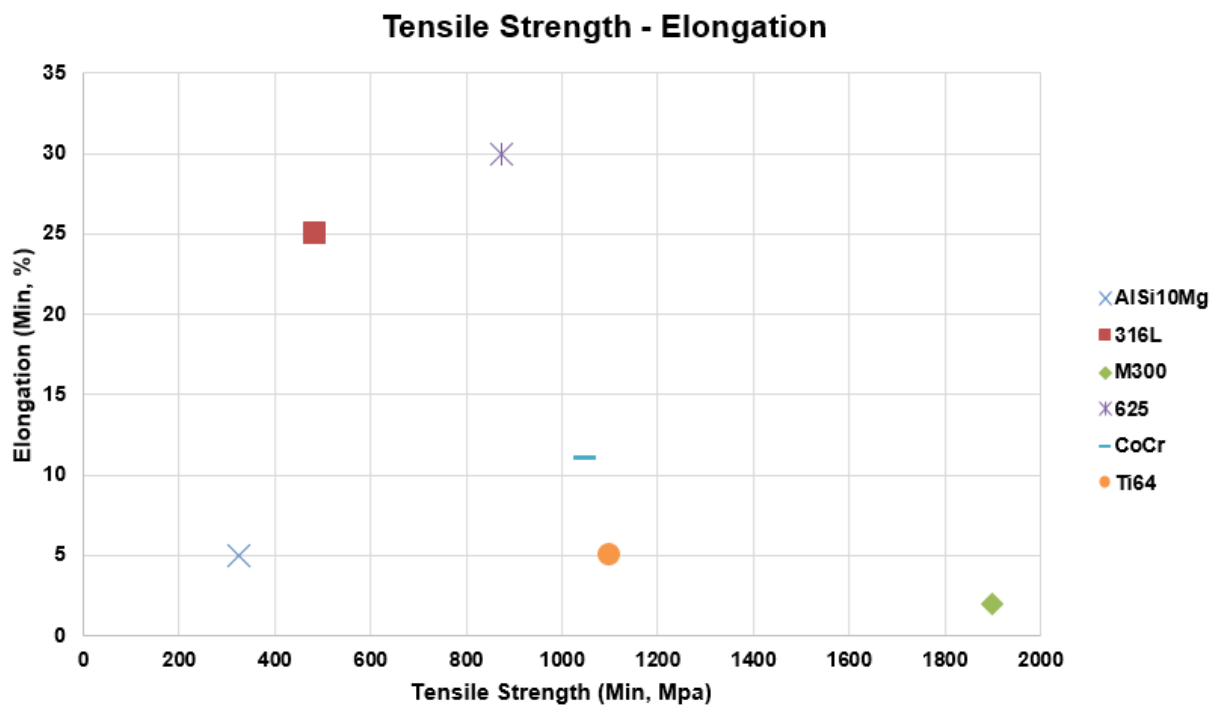


그림 59. 소재별 인장강도와 연신률의 관계

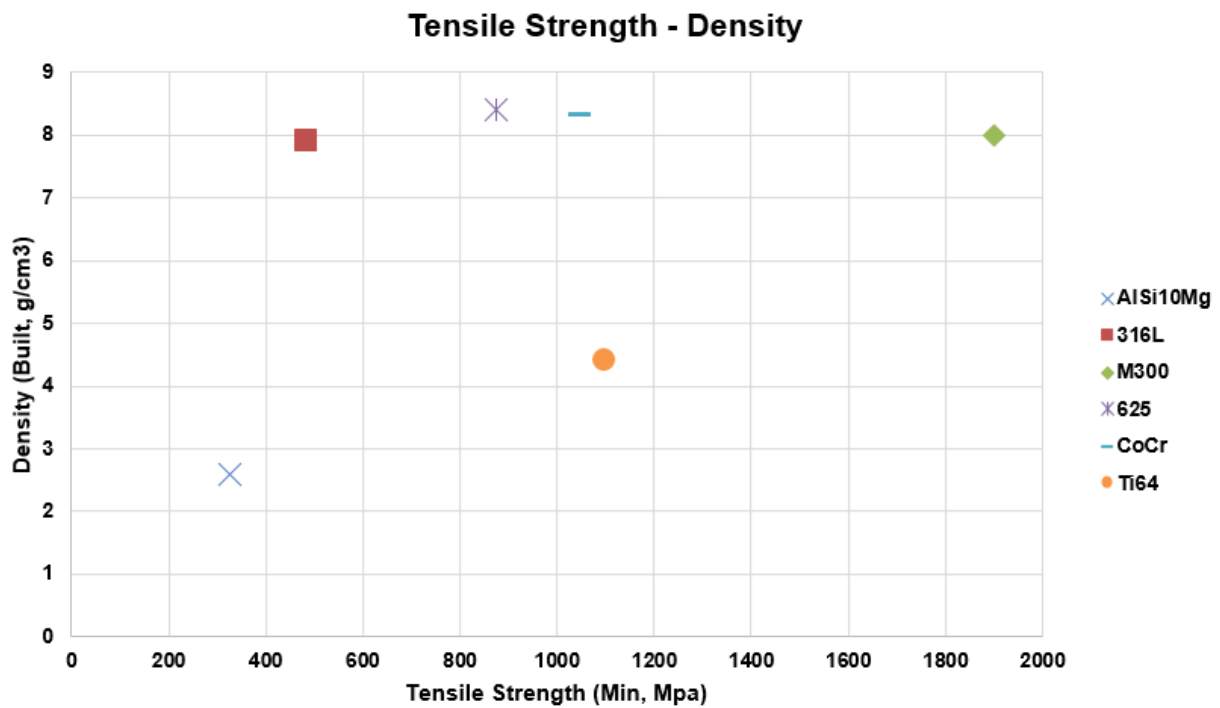


그림 60. 소재별 인장강도와 밀도의 관계

(3.) SLM 3D 프린팅용 분말 소재 가격 조사

- 금속분말 소재 가격조사 결과, 표 15와 같이, 316L < AlSi10Mg < M300 < CoCr < 625 < Ti64 의 순서로 가격이 정렬되었다. 대부분의 산업분야에서 보편적으로 사용되는 스테인리스 합금계열인 316L 소재가 가장 저렴한 것으로 조사되었다.

표 38. 금속분말소재의 물리적 특성과 소재 가격

Category	Tensile Strength (Min, Mpa)	Elongation (Min, %)	Density (Built, g/cm3)	Cost (Bulk, KRW/kg)
AlSi10Mg	325	5	2.6	186,000
316L	485	25	7.9	117,000
M300	1900	2	8	200,000
625	875	30	8.4	265,000
CoCr	1050	11	8.3	250,000
Ti64	1100	5	4.4	723,000

(4.) 연구 결과 및 고찰

- 각 소재의 물리적 특성(인장강도, 밀도)과 단위중량당 가격을 비교하면 다음과 같다.

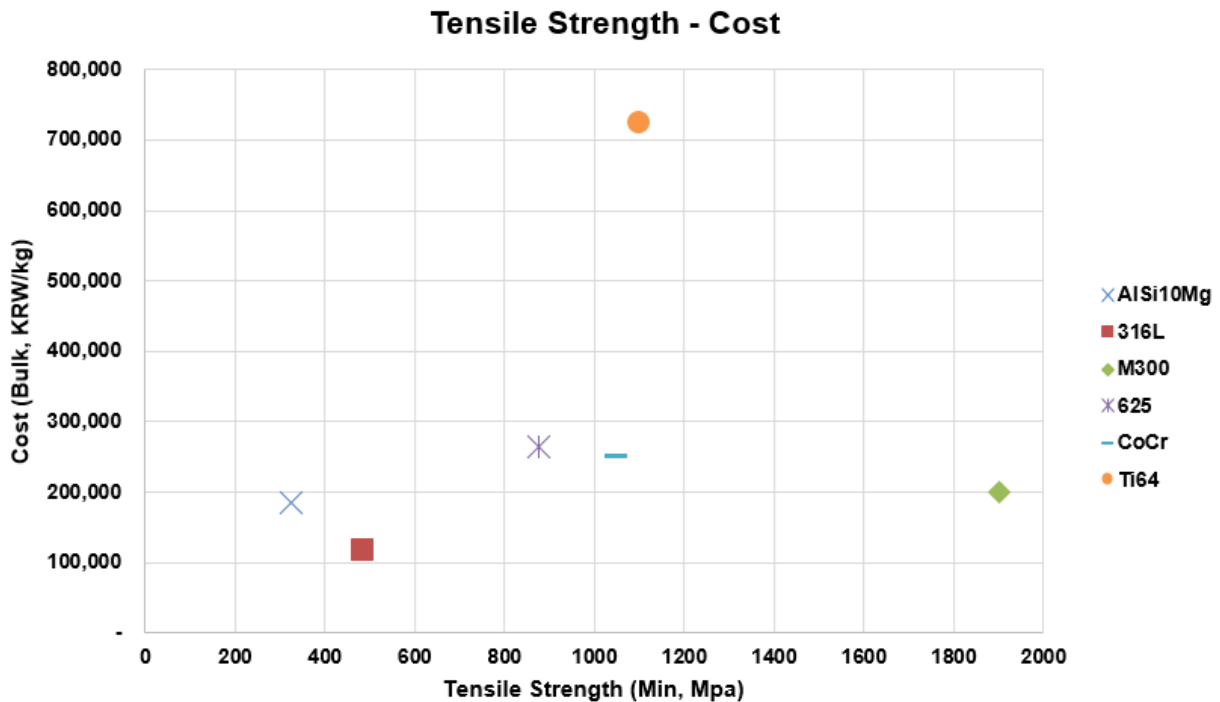


그림 61. 소재의 인장강도와 단위중량당 가격

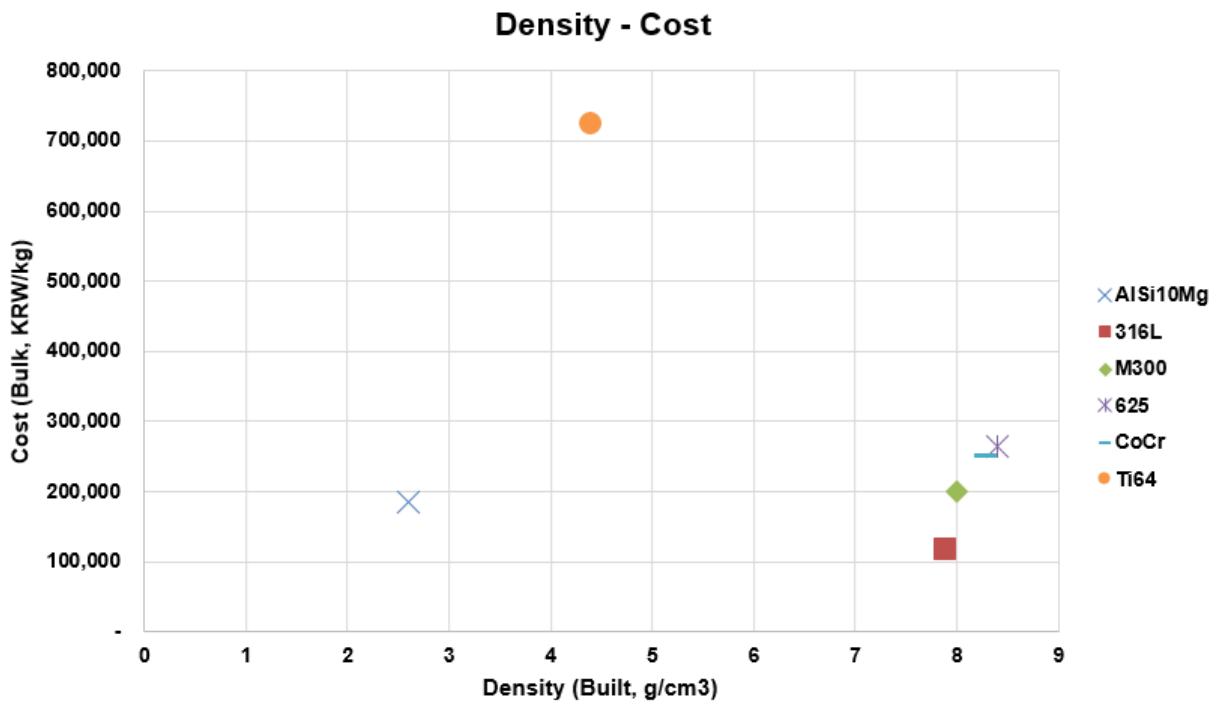


그림 62. 소재의 밀도와 단위중량당 가격

- 현재까지의 소재의 물성과 소재가격에 대한 조사연구 결과 고성능 인공경량골재 개발을 위한 후보소재는 크게 AlSi10Mg와 316L로 범위를 한정해야할 것으로 판단된다.
- 소재의 경제성 확보 차원에서는 스테인리스 합금인 316L을 사용하는 것이 가격적으로 우세하고 AlSi10Mg에 비해 상대적으로 강도도 높다. 단, 인공경량골재화의 목표를 달성시키기 위해서는 경량골재로서 요구되는 응력을 견뎌내며 경량화 할 수 있는 유닛셀에 대한 설계 개발이 필수적이다.

- AlSi10Mg 소재의 경우 앞서 언급한 소재 밀도 이슈에서 상대적으로 자유로운 편이나, 소재의 가격차이가 상당하고, 최대 인장강도의 차이도 316L에 비하여 낮은 수준이다.
- 결과적으로 경량화와 경제성을 모두 만족시키면서, 경량골재로서의 적정강도를 발현시킬 수 있는 기하학적 래티스(Lattice) 설계 및 출력 및 실험을 통한 검증이 필요하다고 볼 수 있다.

(5.) SLM 3D 프린팅 영향인자 고찰

- SLM 3D 프린팅 프로세스는 3D 모델링(3D Modeling), 데이터 준비(Data Preparation), 출력 조건설정 단계 및 출력(Manufacturing on AM Machine), 후공정(Post Process)로 나뉜다. 본 연구에서는 각 단계에서의 영향인자를 고찰하고자 한다. 단, 출력 후 처리 과정은 출력에 관여하는 영향인자로 볼 수 없으므로 고찰 범위에서 제외했다.

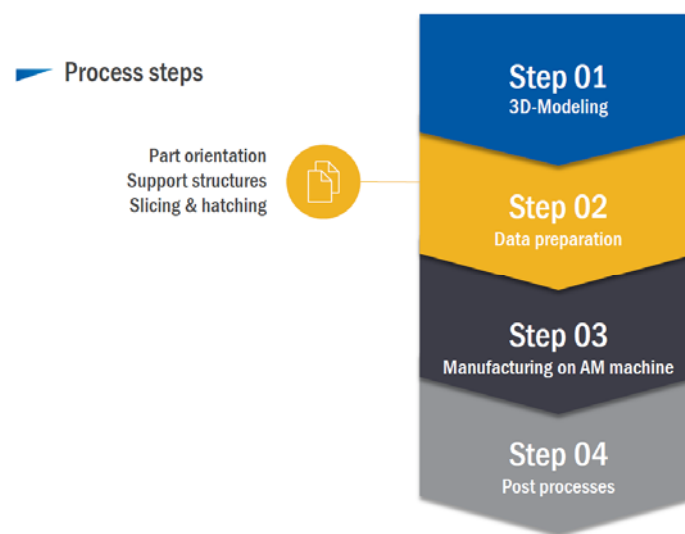


그림 63. SLM 3D 프린팅 프로세스

- 일반적으로 SLM 3D 프린팅 장비는 적층된 분말소재를 레이저 소결함으로써 객체를 생성하므로 가장 주요한 파라미터는 레이저와 관련되어있다고 볼 수 있다. 장비 구동에 420여개의 파라미터가 존재하더라도 실제 출력물에 막대한 영향을 주는 인자는 소수에 불과하다.
- SLM 방식은 레이저나 일렉트론빔(Electron Beam)을 이용하여 분말소재의 선택부위에 순간적으로 멜트풀(Melt Pool)을 형성시킨다. 이러한 멜트풀은 생성에서 유지기간이 1밀리초에 불과하며, 600~1600℃까지 온도가 상승한다(소재에 따라 다름). 멜트풀의 운용은 제품의 품질과 표면조도를 결정함에 따라 가장 중요한 영향인자로 평가할 수 있다.
특히 용융된 금속의 특성상 용융 후 냉각과정에서 수축하고, 이로 인해 마이크로한 부위에서 잔류응력(Residual Stress)을 발생시킨다. 더 나아가 적층 레이어간의 소결 면적 차이는 열로 인한 수축/팽창의 차이로 이어지므로 거시적인 변형을 야기한다. 이로 인해 출력 중단에서부터 출력물의 파손까지도 이어질 수 있다.
- 멜트풀과 관련된 영향인자를 더 세분화하면, 레이저 파워(Laser Power), 조사직경(Beam Diameter), 조사속도(Scan Speed), 분말소재 적층 두께(Layer Thickness), 해칭 간격(Hatching Distance) 등이 있다. 이와 관련된 상세한 고찰결과는 출력조건 설정단계 및 출력 단계에서 상세히 다루었다.

(5.1) 모델링 및 데이터 준비 단계

- 사용자의 요구에 적합한 출력물을 출력하기 위해서는 사용되는 장비의 조형한계를 기반으로 3D 모델링을 진행하여야 한다. 만약 출력객체가 조형한계를 벗어나는 경우, 출력물의 품질이

하락하거나, 출력이 이루어지지 않게 된다. SLM (또는 DMLS) 장비의 조형 가이드라인은 다음과 같다.

- 데이터 준비 단계는 3D 모델링을 출력장비에 입력하기 전에 거쳐야 하는 단계로, 모델링에 대한 결함 수정(Fixing), 출력물의 방향 및 배치(Orientation), 파트 재설계(Part Redesign), 서포트 생성(Support Generation), 추출(Export) 단계로 세분화된다.
- 결함 수정 단계에서는 3D 모델링을 출력에 필요한 확장자(STL)로 변환하는 과정(매쉬화)에서 발생한 노이즈를 삭제하거나, 손상된 매쉬를 수정하는 과정을 거치게 된다. 주로 매쉬의 면이 반전되어 있거나, 경계선이 겹치거나, 외곽선이 이어지지 않는 부분 등이 있다.
- 이후 출력물의 방향 및 배치를 조정하는 단계로 이어진다. 출력물의 적층 방향은 주로 표면 조도나, 서포트의 설계, 다양한 출력물의 평면상 배치, 출력시간과 서로 상관되어 있다.
- 그리고 출력과정에서 조형성 및 가공성을 향상시키기 위해 국소적인 재설계를 진행한다.

조형 가이드라인	수직으로 지지된 벽	수직으로 지지되지 않은 벽	언더컷	양각 및 음각 디테일	브릿지
설명	벽이 2개 이상의 면에 연결/지지되어 조형 가능한 최소 벽 두께	벽이 1개의 수평면에 연결/지지되어 조형 가능한 최소 벽 두께	지지대(서포트)구조 없이 조형 가능한 최소 각도	양각 또는 음각 표면의 조형 가능한 최소 길이 (폭 & 높이)	지지대 구조 없이 조형 가능한 브릿지의 최대 간격
개념도					
DMLS	0.4 mm	0.5 mm	45 °	0.1 mm	2 mm
MJF	1 mm	1 mm	-	1.0 mm	-

조형 가이드라인	구멍 (홀)	소재 반출구 (홀)	최소 각형 디테일	최소 원형 디테일	최소 공차
설명	조형가능한 최소 구멍	속이 빈 공간 형성을 위해 소결/정착되지 않은 프린팅 파우더 제거를 위한 최소 구멍 직경	조형 가능한 최소 각형 길이	조형 가능한 최소 원형 직경	발생 가능한 최소 3D 프린팅 공차 (파트 사이즈 / 형상에 따라 다름)
개념도					
DMLS	Ø 1.5 mm	5 mm	0.5 mm	Ø 1 mm	± 0.1 mm
MJF	Ø 1 mm	5 mm	1 mm	Ø 1 mm	± 0.2 mm

그림 65. SLM(또는 DMLS) 3D 프린팅 조형 가이드라인

- 이후 출력물에 대한 서포트를 설계하게 된다. 서포트는 다양한 역할을 수행하는데 출력물에 누적된 열을 방출(Heat Dissipation)하여 공정을 안정화하거나, 출력물의 변형이나, 리코터(장비 내 분말 도포 및 평탄화 기구)와의 충돌 위험 저감한다.
- 서포트는 크게 솔리드(Solid) 타입과 논솔리드(Non-solid) 타입으로 구분된다. 주로 두가지 타입으로 서포트를 구성하며, 세부적인 형상은 다음 표와 같다.
- 기본적으로 출력물은 지지대의 설계 및 제거가 용이한 구조로 설계되어야 한다는 점도 주요 제약조건 중 하나이다.

표 39. 서포트 종류

타입	명칭	형상	내용
솔리드	콘(Cone)		- 국부적으로 열을 전달하거나 앵커링(Anchoring) 목적으로 사용 - 파트 모서리를 피해 제거시 파트 파손 예방 - 콘: 빌드 플레이트(Build Plate)에 가까운 영역에 사용 - 트리: 빌드 플레이트에 떨어진 영역에 사용
	트리(Tree)		
논솔리드	블록(Block)		- 블록/포인트 서포트는 파트를 지지하는 역할 수행 - 제거하기 쉽도록 퍼포레이션 및 조각화를 진행해야함
	포인트(Point)		

(5.2) 출력 조건 설정 및 출력 단계

- 출력 조건 설정 및 출력단계는 SLM 3D 프린팅 장비 내에서 이루어지는 출력물의 배치와, 레이저 및 분말소재 도포 파라미터 조절을 다룬다. 본 절에서는 레이저와 관련된 파라미터를 주요하게 고찰하고자 한다.
- 레이저 파라미터와 분말소재 도포 파라미터는 조형성과 직접적인 관계가 있다. 특히 레이저를 통해 분말표면에 에너지를 공급하고, 소결하고자 하는 지점 또는 면적을 빠르게 조사하는 과정에서 분말소재의 적정한 도포 두께는 출력물의 품질을 결정하는 가장 중요한 부분이다.
- 위와 같은 관계는 에너지 밀도(Energy Density)라고 하며, SLM 3D 프린팅의 핵심인 레이저 노출 파라미터(Laser Exposure Parameter)라고 한다. 에너지 밀도를 구하는 방법은 아래 식과 같다.

$$\text{Energy Density} \left(\frac{\text{J}}{\text{mm}^3} \right) = \frac{\text{Laser Power (W)}}{\text{Scanning Speed}(\text{mm/s}) \times \text{Hatch Spacing (mm)} \times \text{Layer Thickness (mm)}}$$

여기서, Laser Power는 레이저의 세기를 의미한다, Scanning Speed는 레이저의 이동속도를 의미한다, Hatch Spacing은 출력면을 형성할 때 Hatch간의 거리를 의미한다. Layer Thickness는 도포되는 분말소재의 두께를 의미한다.

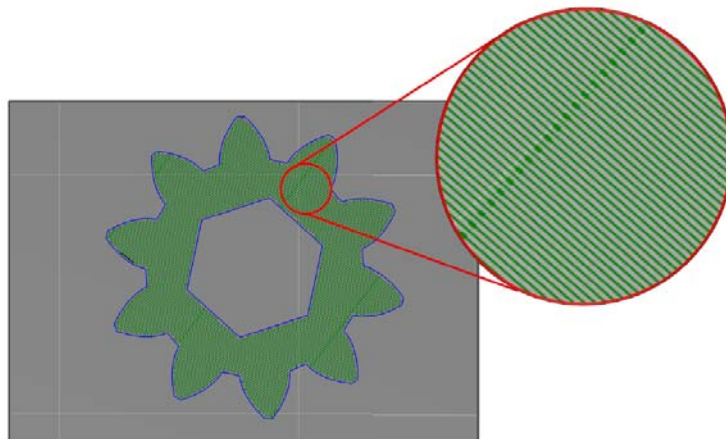


그림 72. Hatch Spacing (녹색라인의 간격)

에너지 밀도의 구성요소는 사용되는 소재에 따라 기존 장비 제조사에서 제공하는 기본 설정값이 존재한다. 단, 신규개발 소재나 제품의 요구물성이 다를 경우 각각의 파라미터를 조절할 수 있으며, 출력물의 결과를 기반으로 별도의 조정작업이 수반된다.

- 따라서 본 연구에서는 기존에 개발된 분말소재에 대응하고, 제조사를 통해 표준화된 출력조건을 기본으로 하여 일반적인 래티스(Lattice) 타입에 대한 샘플 출력을 진행했다. 테스트 조건에 대한 상세정보는 다음장에서 상세히 설명했다.

(6.) 샘플테스트

- 본 연구에서 제시된 출력조건 최적화를 위하여 샘플테스트를 2회에 걸쳐 진행했다. 1차 테스트는 단일 디자인의 출력물을 대상으로 소재별-출력파라미터별 소형 테스트를 수행했다. 1차 테스트 결과를 기반으로 도출된 출력 파라미터를 기반으로 2차 샘플테스트를 진행했다.

(6.1) 샘플테스트 조건

- [테스트 장비]
본 연구에서는 산업현장에서 광범위하게 사용되고 있고 있는 독일 EOS사의 M290 장비를 활용하여 샘플테스트를 진행했다.
- [소재]
1차 샘플테스트 실험에서는 인공경량골재 후보로 지정된 알루미늄 분말소재(AlSi10Mg), 티타늄 분말소재(Ti64ELI), 스테인리스 분말소재(SUS316L)를 활용했다. 각각 소재에 대한 화학적 조성과 물리적 특성은 다음과 같다. 2차 샘플테스트에서는 티타늄 분말소재를 사용했다.

표 40. AlSi10Mg 소재의 화학적 조성

Element		Minimum wt%	Maximum wt%
Al	Aluminum	Balance	
Cu	Copper		0.05
Fe	Iron		0.25
Mg	Magnesium	0.25	0.45
Mn	Manganese		0.10
N	Nitrogen		0.20
Ni	Nickel		0.05
O	Oxygen		0.20
Pb	Lead		0.02
Si	Silicon	9.00	11.00
Ti	Titanium		0.15
Zn	Zinc		0.1
Others	Others		0.05
All Others	All Others		0.15

표 41. AlSi10Mg 소재의 물리적 특성

Property		Stress Relieved
Tensile Strength	Horizontal Direction (XY)	325 - 350 MPa 47 - 51 Ksi
	Vertical Direction (Z)	330 - 360 MPa 48 - 52 Ksi
Yield Strength	Horizontal Direction (XY)	210 - 245 MPa 30 - 36 Ksi
	Vertical Direction (Z)	175 - 225 MPa 25 - 33 Ksi
Young's Modulus	Horizontal Direction (XY)	67 - 77 GPa
	Vertical Direction (Z)	62 - 72 GPa
Elongation	Horizontal Direction (XY)	9 - 14 %
	Vertical Direction (Z)	5 - 12 %
Hardness		114 - 124 HBW
Coefficient of Thermal Expansion		20 - 21 x 10 ⁻⁶ m/mK
Thermal Conductivity		130 - 190 W/mK
Density		2.6 g/cm ³

표 42. Ti64 소재의 화학적 조성

Element		Minimum wt%	Maximum wt%
Al	Aluminum	5.500	6.500
C	Carbon		0.080
H	Hydrogen		0.012
Fe	Iron		0.250
N	Nitrogen		0.050
O	Oxygen		0.130
Ti	Titanium	Balance	
V	Vanadium	3.500	4.500

표 43. Ti64 소재의 물리적 특성

Property		As Built
Tensile Strength	Horizontal Direction (XY)	1130 - 1250 MPa 163.9 - 181.3 ksi
	Vertical Direction (Z)	1100 - 1250 MPa 159.5 - 181.3 ksi
Yield Strength	Horizontal Direction (XY)	1050 - 1150 MPa 152.3 - 166.8 ksi
	Vertical Direction (Z)	1000 - 1125 MPa 145 - 163.2 ksi
Young's Modulus	Horizontal Direction (XY)	105 - 115 GPa 15.2 - 16.7 Msi
	Vertical Direction (Z)	110 - 115 GPa 16 - 16.7 Msi
Elongation	Horizontal Direction (XY)	5 - 10 %
	Vertical Direction (Z)	5 - 10 %
Hardness		385 - 405 HV0.5 395 - 405 HV0.5
Coefficient of Thermal Expansion	8 - 9 × 10 ⁻⁶ m/mK	
Thermal Conductivity	6 - 8 W/mk	
Density	4.4 g/cm ³	

표 44. 316L 소재의 화학적 조성

Element		Minimum wt%	Maximum wt%
C	Carbon		0.03
Cr	Chromium	17.00	18.00
Cu	Copper		0.75
Fe	Iron	Balance	
Mn	Manganese		2.00
Mo	Molybdenum	2.00	2.50
N	Nitrogen		0.10
Ni	Nickel	12.00	13.00
O	Oxygen		0.10
P	Phosphorus		0.03
S	Sulfur		0.02
Si	Silicon		0.75

표 45. 316L 소재의 물리적 특성

Property		Stress Relieved
Tensile Strength	Horizontal Direction (XY)	590 - 690 MPa 86-100 ksi
	Vertical Direction (Z)	485 - 595 MPa 70-86 ksi
Yield Strength	Horizontal Direction (XY)	470 - 590 MPa 68-86 ksi
	Vertical Direction (Z)	380 - 560 MPa 55-81 ksi
Young's Modulus	Horizontal Direction (XY)	159 - 175 GPa
	Vertical Direction (Z)	117 - 151 GPa
Elongation	Horizontal Direction (XY)	25 - 55 %
	Vertical Direction (Z)	30 - 70 %
Hardness	Horizontal Direction (XY)	210 - 214 HV0.5
	Vertical Direction (Z)	114 - 226 HV0.5
Coefficient of Thermal Expansion	$16 \times 10^{-6} \text{ m/mK}$	
Thermal Conductivity	15.6 W/mK	
Density	7.9g/cm ³	

• [1차 샘플테스트 모델링]

1차 샘플테스트에서는 상용 디자인 제품을 기준모델링으로 선정했다.



그림 73. 1차 샘플 모델(좌: 모델 앞뒤, 우: 비교대상 면)

• [1차 샘플테스트 출력조건]

각 소재(AlSi10Mg, Ti64ELI, SUS316L)별 주요 출력조건은 다음과 같다.

표 46. AlSi10Mg 출력 파라미터

No.	아이템명	레이저 파워(W)	스캐닝 스피드(mm/s)	해치 스페이싱(mm)	레이어 두께(mm)	에너지 밀도(J/mm ³)
장비 기본값		370	1300	0.19	0.03	49.93
1	Test-1	370	1300	0.19	0.03	49.93
2	Test-2	370	330	0.19	0.12	49.18
3	Test-3	370	650	0.19	0.12	24.97
4	Test-4	370	1300	0.19	0.12	12.48
6	Test-5	370	1500	0.19	0.12	10.82
7	Test-6	370	1800	0.19	0.12	9.02

- AlSi10Mg의 주요 출력조건은 장비 기본값을 기준으로 레이저 파워를 고정하고 스캐닝 스피드와

레이어 두께에 변화를 주었다. 그 이유는 이 두 요인이 출력의 속도와 제품 품질에 가장 큰 영향을 주는 요인이기 때문이다. 출력속도는 곧 경량골재에 대한 생산량 및 가격에 영향을 주고, 레이어의 두께는 곧 제품 표면 품질에 영향을 준다.

표 47. Ti64ELI 출력 파라미터

No.	아이템명	레이저 파워(W)	스캐닝 스피드(mm/s)	해치 스페이싱(mm)	레이어 두께(mm)	에너지 밀도(J/mm3)
	장비 기본값	280	1200	0.14	0.03	55.56
1	Test-7	280	1200	0.14	0.03	55.56
2	Test-8	370	1200	0.14	0.12	18.35
3	Test-9	370	800	0.14	0.12	27.53
4	Test-10	370	400	0.14	0.12	55.06

- Ti64ELI의 주요 출력조건은 장비 기본값을 기준으로 하되, 레이저 파워를 상향하고, 스캐닝 스피드를 낮추는 방향으로 변화를 주었다. 여기에서도 AlSi10Mg와 같이 레이어의 두께를 상향시켰다. 위와 같은 조건을 구성함으로써, 레이저 파워와 출력물 품질에 대한 영향관계를 파악할 수 있다.

표 48. SUS316L 출력 파라미터

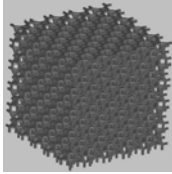
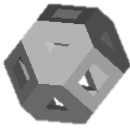
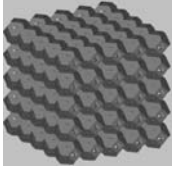
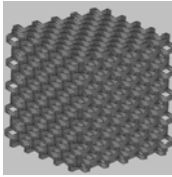
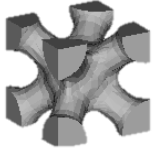
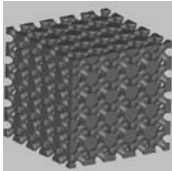
No.	아이템명	레이저 파워(W)	스캐닝 스피드(mm/s)	해치 스페이싱(mm)	레이어 두께(mm)	에너지 밀도(J/mm3)
	장비 기본값	214.2	928.1	0.1	0.04	57.7
1	Test-11	214.2	928.1	0.1	0.04	57.7
2	Test-12	370	928.1	0.1	0.12	33.22
3	Test-13	370	550	0.1	0.12	56.06
4	Test-14	370	1500	0.1	0.12	20.56

- SUS317L의 주요 출력조건은 장비 기본값을 기준으로 하되 레이저 파워를 상향하고 스캐닝 스피드를 낮추거나 높이는 방향으로 변화를 주었다. 레이어의 두께도 상향하여 출력을 진행했다. 위와 같은 조건을 구성함으로써 레이저 파워와 출력물 품질에 대한 영향관계를 파악할 수 있다.

• [2차 샘플테스트 모델링]

2차 샘플테스트에서는 조형성, 단위면적당 부피, 공극률을 기반으로 래티스 타입(Rhombi Octa-Dense, Truncated Octa-Light, Dode-Thick, Diagonal)을 선정했다. 단위면적당 부피가 작다는 것은 출력에 투입되는 소재의 양이 적다는 것을 의미하며, 공극률은 채움재 및 골재 침투가 용이함을 의미한다. 래티스 타입에 대한 유닛형상과 부피, 충전률, 공극률은 다음과 같다. 래티스 큐브의 규격은 변의 길이가 20mm인 정육면체로 구성했다.

표 49. 샘플 래티스 유닛형상과 속성

유닛형상	유닛명	단위면적당 부피	출력물 형상	충진률	공극률
	Rhombi Octa-Dense	0.134/mm ³		13%	87%
	Trunc_Octa-Light	0.204/mm ³		20%	80%
	Dode - Thick	0.246/mm ³		25%	75%
	Diagonal	0.444/mm ³		44%	56%

• [출력조건]

파트 오리엔테이션과 서포트의 구조는 그림 7과 같으며, 주요 출력 파라미터는 다음과 같다.

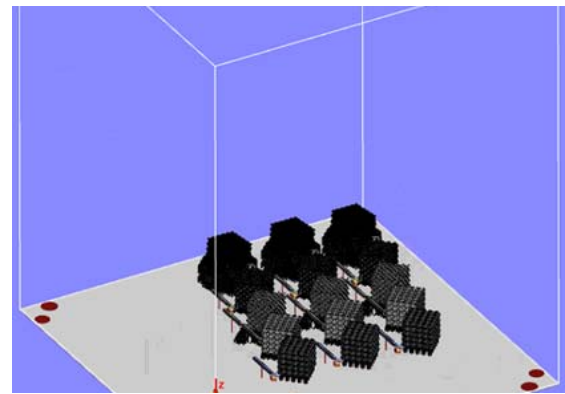
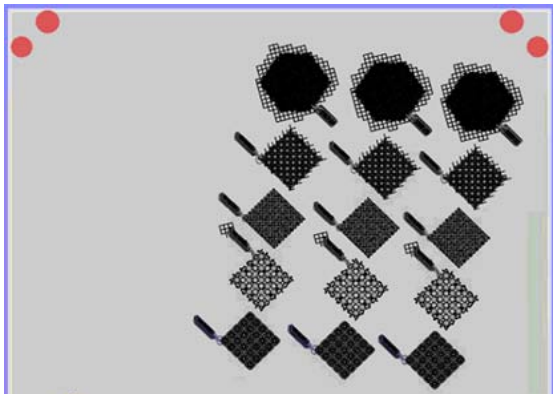


그림 74. 파트 오리엔테이션 및 서포트 구조

표 50. 래티스 큐브 출력 파라미터

No.	아이템명	레이저 파워	스캐닝 스피드	해치 스페이싱	레이어 두께	에너지 밀도
1	Rhombi Octa-Dense	280W	1200mm/s	0.14mm	0.03mm	55.56J/mm ³
2	Trunc_Octa-Light	280W	1200mm/s	0.14mm	0.03mm	55.56J/mm ³
3	Dode - Thick	280W	1200mm/s	0.14mm	0.03mm	55.56J/mm ³
4	Diagonal	280W	1200mm/s	0.14mm	0.03mm	55.56J/mm ³

(6.2) 샘플테스트 결과

- [1차 샘플테스트 결과 - AlSi10Mg]

AlSi10Mg 소재의 샘플테스트 결과는 표 51과 같다. 장비 기본 파라미터를 적용한 샘플의 품질이 가장 우수하게 도출되었으며 레이저 스캐닝 속도가 느릴수록 에너지 밀도가 높아지므로 표면의 조도가 향상되는 경향이 있다. 반면 스캐닝 속도가 빨라지는 경우 분말소재의 소결이 불완전한 경향을 보인다.

표 51. AlSi10Mg 출력 파라미터

No.	아이템명	레이저 파워 (W)	스캐닝 스피드 (mm/s)	해치 스페이싱 (mm)	레이어 두께 (mm)	에너지 밀도 (J/mm3)	출력결과
장비	기본값	370	1300	0.19	0.03	49.93	
1	Test-1	370	1300	0.19	0.03	49.93	
2	Test-2	370	330	0.19	0.12	49.18	
3	Test-3	370	650	0.19	0.12	24.97	
4	Test-4	370	1300	0.19	0.12	12.48	

5	Test-5	370	1500	0.19	0.12	10.82	
6	Test-6	370	1800	0.19	0.12	9.02	

• [1차 샘플테스트 결과 - Ti64ELI]

Ti64ELI 소재의 샘플테스트 결과는 표 52와 같다. 장비 기본 파라미터를 적용한 샘플의 품질이 가장 우수하게 도출되었다. 레이저 파워를 높이고, 레이어 두께를 상향한 상황에서 레이저 스캐닝 속도가 느릴수록 에너지 밀도가 높아지므로 표면의 조도가 향상되는 경향이 있다. 레이어 두께 차이로 인해 표면조도에 차이가 존재한다.

표 52. Ti64ELI 출력 파라미터

No.	아이템명	레이저 파워 (W)	스캐닝 스피드 (mm/s)	해치 스페이싱 (mm)	레이어 두께 (mm)	에너지 밀도 (J/mm3)	출력결과
	장비 기본값	280	1200	0.14	0.03	55.56	
1	Test-1	280	1200	0.14	0.03	55.56	
	표면거칠기(Ra)	16	밀도 (g/cm3)	4.4	인장강도 (MPa)	1132	
2	Test-2	370	1200	0.14	0.12	18.35	
	표면거칠기(Ra)	28	밀도 (g/cm3)	2.3	인장강도 (MPa)	544	

3	Test-3	370	800	0.14	0.12	27.53	
	표면거칠기(Ra)	23	밀도(g/cm3)	2.8	인장강도(MPa)	791	
4	Test-4	370	400	0.14	0.12	55.06	
	표면거칠기(Ra)	23	밀도(g/cm3)	4.4	인장강도(MPa)	1039	

• [1차 샘플테스트 결과 - SUS316L]

SUS316L 소재의 샘플테스트 결과는 표 53과 같다. 장비 기본 파라미터를 적용한 샘플의 품질이 가장 우수하게 도출되었다. 레이저 파워를 높이고, 레이어 두께를 상향한 상황에서 레이저 스캐닝 속도가 느릴수록 에너지 밀도가 높아지므로 표면의 조도가 향상되는 경향이 있다. 레이어 두께 차이로 인해 표면조도에 차이가 존재한다. Test-3 시편에서는 에너지밀도가 기본값보다 낮더라도, 레이저의 낮은 속도로 인해 소재의 변성이 관측되었다.

표 53. SUS316L 출력 파라미터

No.	아이템명	레이저 파워 (W)	스캐닝 스피드 (mm/s)	해치 스페이싱 (mm)	레이어 두께 (mm)	에너지 밀도 (J/mm3)	출력결과
	장비 기본값	214.2	928.1	0.1	0.04	57.7	
1	Test-1	214.2	928.1	0.1	0.04	57.7	
	표면거칠기(Ra)	16	밀도(g/cm3)	7.9	인장강도(MPa)	488	

2	Test-2	370	928.1	0.1	0.12	33.22	
	표면거칠기(Ra)	28	밀도(g/cm3)	4.8	인장강도(MPa)	251	
3	Test-3	370	550	0.1	0.12	56.06	
	표면거칠기(Ra)	23	밀도(g/cm3)	7.9	인장강도(MPa)	430	
4	Test-4	370	1500	0.1	0.12	20.56	
	표면거칠기(Ra)	30	밀도(g/cm3)	4.2	인장강도(MPa)	213	

• [1차 샘플테스트 결과 - 종합]

다양한 분말소재에 대하여 주요 출력파라미터를 조정해본 결과, 출력물의 품질과 양산성을 위해서는 장비의 기본값을 사용하는 것이 적절할 것으로 판단되었다.

• [2차 샘플테스트 결과]

1차 샘플테스트 결과를 기반으로 Ti64ELI 소재에 대해 기본 출력파라미터를 적용하여 2차 샘플테스트를 진행했다. 최종 2차 샘플테스트의 출력결과물은 그림 8과 같다. 출력물에 대한 확대이미지는 다음과 같다. 출력 결과는 정상이며, 총 15시간 01분이 소요되었고, 출력높이는 27.290mm다.

- 샘플 테스트 결과 선정된 래티스 큐브는 출력 규격 및 조형에 문제없이 출력되었다. 특히 래티스 스트럿(Lattice Strut)의 직경이 가장 작은(0.3mm) Rhombi Octa-Dense 모델에서도 래티스의 손상 및 문제는 발생하지 않았다.

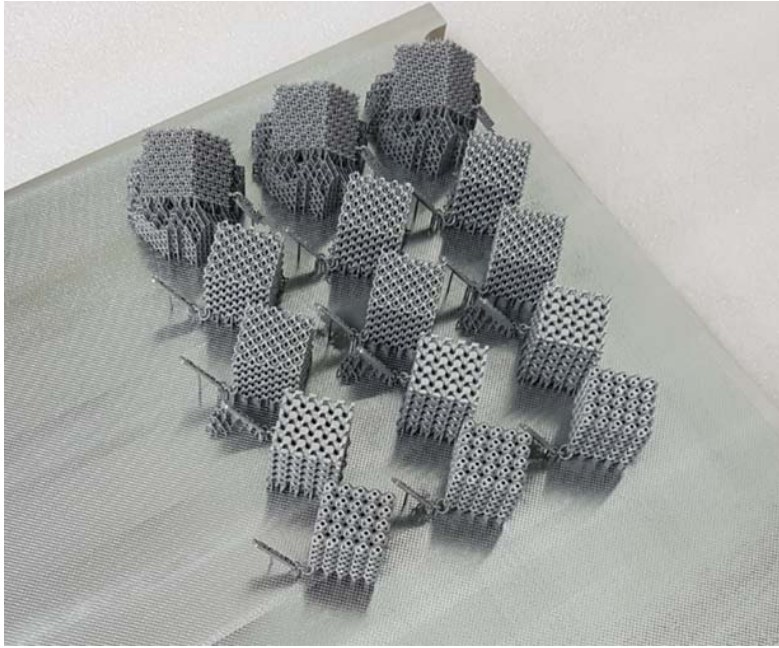


그림 75. 잔여 파우더 제거 후 출력물 이미지

○ [핵심기술3] 격자구조체 공극포화

(1.) 연구 개요

□ 연구 목표 : 적층 제조 격자 구조체 내부 공극 포화를 위한 최적 설계

- 적층 제조 격자 구조체 소재 : 폴리아미드 12 (Polyamide 12; PA12) 및 AlSi12Mg (aluminium alloy)
 - ※ 폴리아미드 12 (Polyamide 12; PA12)는 가장 높은 빈도로 사용되는 3D프린팅용 엔지니어링 플라스틱 소재 중 하나이며, 주로 PBF 방식 중 멀티젯퓨전(Multi Jet Fusion; MJF)방식과 선택적레이저소결(Selective Laser Sintering; SLS)방식의 3D 프린팅 메커니즘을 활용하여 제품화한다.
 - ※ AlSi12Mg (aluminium alloy) : 1차년도 출력소재 검토 결과, 출력물 및 단가를 고려한 경량골재 대응용 소재로 선정함. 출력물 2.6 g/cm³, 단가 186 천원/kg
- 3D프린팅 격자 구조체 내부 침투하기 위한 적정 점도의 용액 제조를 제안하며, 흡수율이 없고, 내화학성이 우수하고 저점도인 우레탄 화합물을 제안함.
- 저점도 우레탄 화합물 물성 확인 및 PA12 및 AlSi12Mg 3D 격자 구조체 공극 추진이 완료된 최종 복합 구조체의 물성 확인을 진행하였다.

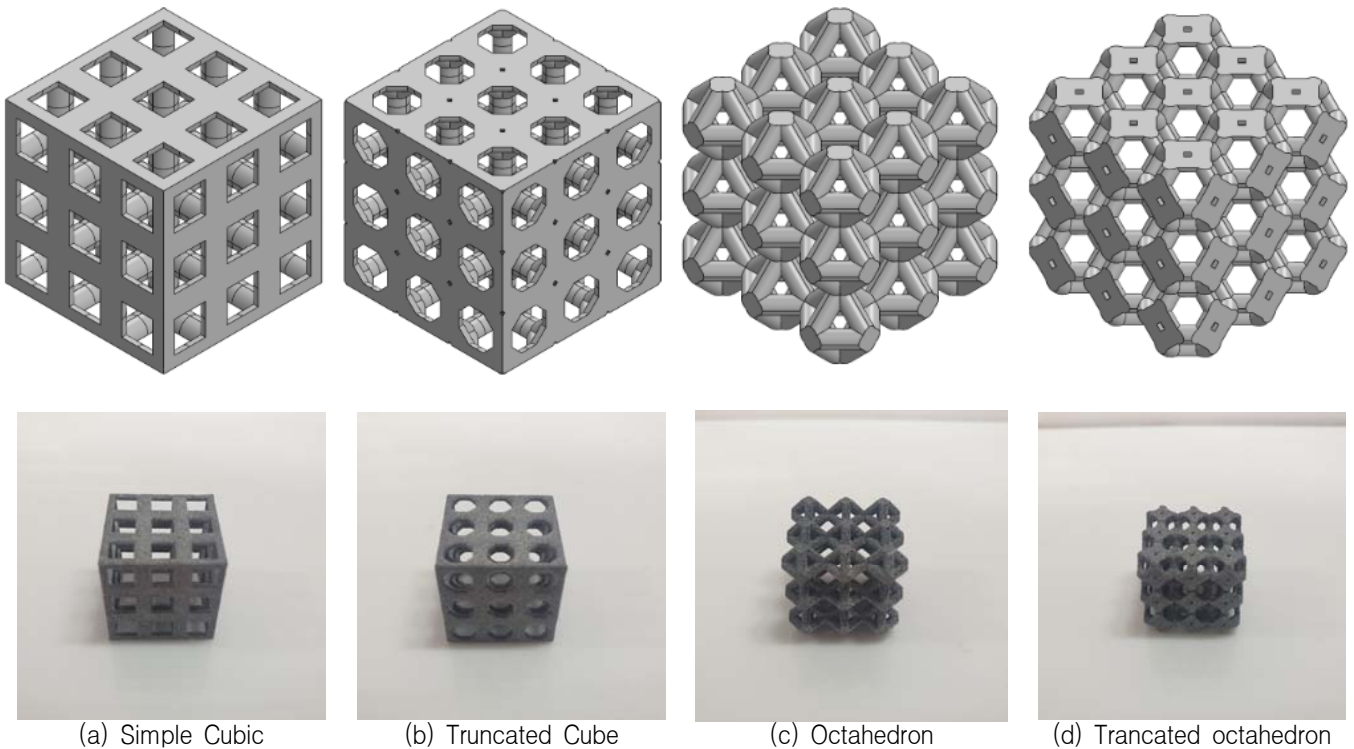


그림 76. 적층 제조 격자 구조체 개요

□ 적층 제조는 보고서 번호(A-1-①)에서 압축강도 기계적 특성이 우수한 4종에 대해서 출력하였음.

- Simple Cubic, Truncated Cube, Octahedron 및 Truncated octahedron
- 출력 소재 : PA12 및 AlSi12Mg
- 상대 밀도 : 0.3 (4종 동일)

(2.) 실험 계획

(2.1) 저점도 우레탄 화합물 설계 및 물성 평가 항목

- ☐ 상온 경화형 저점도 아크릴 화합물은 2액형으로 적층 제조 격자 구조체에 충전 될 수 있도록 **저점도(1000cps 이하) 및 100분 내외 gel time을 목표로 설계하였다.** 이것의 기초 물성은 다음과 같은 항목으로 평가하였다.
 - 가) 저점도 우레탄 화합물의 점도
 - ※ 2액형으로 혼합하였을 때의 점도
 - 나) 저점도 우레탄 화합물의 gel time
 - ※ 2액형으로 2가지 화합물이 혼합되어 급격히 점도가 상승하며 플라스틱상으로 변하는 시점을 gel time으로 하였다.
 - 다) 경화된 저점도 우레탄 화합물의 겔보기 출력물
 - ※ 경화된 저점도 우레탄 화합물의 출력물

(2.2) 저점도 우레탄 화합물 주입 후 물성 측정

- ☐ 저점도 우레탄 화합물을 3D프린팅 출력물에 주입 후 아래와 같은 물성을 측정하였다.
 - 가) 적층 제조 격자 구조체에 주입된 저점도 우레탄 화합물의 겔보기 출력물
 - 나) 적층 제조 격자 구조체에 주입된 저점도 우레탄 화합물 흡수율
 - ※ 경화된 저점도 우레탄 화합물이 주입된 3D프린팅 출력물을 기준으로 무게비 측정

(3.) 실험 방법

(3.1) 저점도 우레탄 화합물의 제조

- ☐ 저점도 우레탄 화합물의 구성은 주제와 경화제 구성으로 아래 표와 같은 물성을 갖는 재료를 사용하였다.
- ☐ 혼합점도, 출력물 및 경화조건을 고려하여 최종적으로 주제:경화제=100:400을 최종 배합으로 선정하였다.

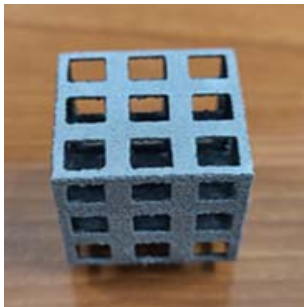
표 54. 저점도 우레탄 화합물의 조성물 구성

구분		배합비 및 측정값			비고
배합비율(무게비)		100 : 400 (주제 : 경화제)	250 : 250 (주제 : 경화제)	400 : 100 (주제 : 경화제)	
점도(cps)	주제	500	500	500	Brookfield (DV-I Prime #63, 50rpm) cps at 20℃
	경화제	400	400	400	
혼합점도(cps)		410	450	485	
출력물	주제	1.09	1.09	1.09	출력물컵
	경화제	1.48	1.48	1.48	
혼합출력물		1.39	1.42	1.44	
가사시간 at 25℃		1시간	30분	15분	겔타임 측정
경화조건	25℃	16시간	8시간	4시간	
	60℃	2시간	10분	5분	
경도 (shore A)		68	74	85	48시간 경화 후 측정

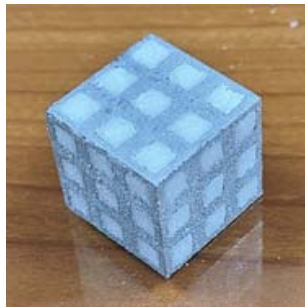
□ 저점도 우레탄 화합물의 주제 및 경화제 구성은 다음과 같다.

표 55. 저점도 우레탄 조성물 구성

구분	화합물	첨가량(%)	비고
주제	MEG (에틸렌 글리콜, MONO ETHYLENE GLYCOL)	12.0	—
	Castro Oil	28.0	—
	Diocetylphthalate	12.5	—
	CaCO ₃	45.0	—
	Polyamine	2.5	—
경화제	PPG-TDI Prepolymer	60.0	—
	Diocetylphthalate	40.0	—



(a) Simple Cubic



(b) Truncated Cube



(c) Octahedron



(d) Truncated octahedron

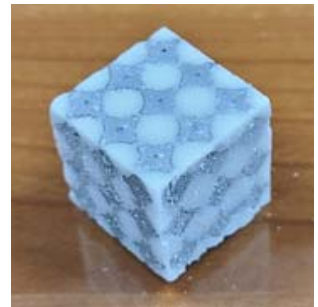
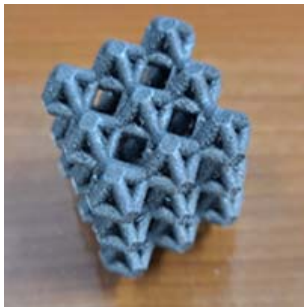
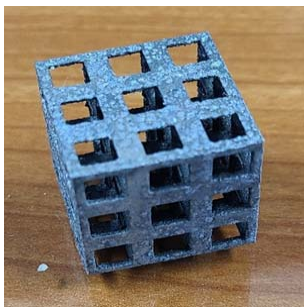
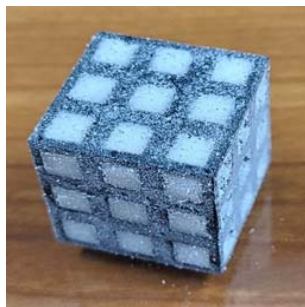


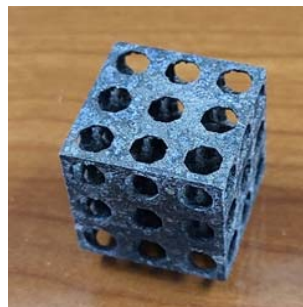
그림 77. 각 타입별 PA12 3D프린팅 출력물에 저점도 우레탄 주입 전후



(a) Simple Cubic



(b) Truncated Cube



(c) Octahedron



(d) Truncated octahedron

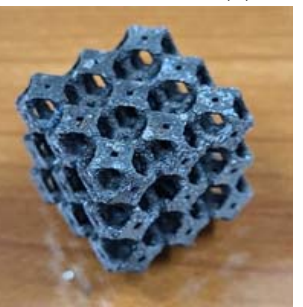
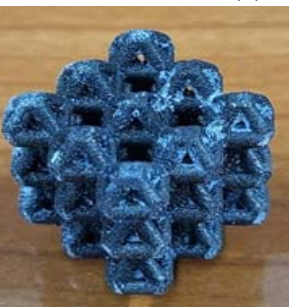


그림 78. 각 타입별 AlSi12Mg 3D프린팅 출력물에 저점도 우레탄 주입 전후

- 아래와 같이 대형 거푸집에 3D출력물을 배열한 후, 가사시간 1시간 뒤에 커팅함으로써 생산효율을 제고하였다.



그림 79. 저점도 우레탄 화합물 주입 과정 전경

(3.2) 저점도 우레탄 화합물의 기초 물성

- ① 저점도 우레탄 화합물의 점도 측정
- 제조된 저점도 우레탄 화합물을 Brookfield Viscometer LV로 Spindle #63을 이용해 상대 점도를 측정하였다.



그림 80. Brookfield Viscometer LV를 활용한 점도 측정 전경

- ② 저점도 우레탄 화합물의 Gel Time 측정
- 저점도 우레탄 화합물은 상온 경화시스템으로 상온에서 반응을 일어난다. 반응이 시작되어 점도가 상승되어 움직이지 않는 점을 Gel time으로 결정하였다.
 - 실험 장치는 외기 온도에 의한 영향을 줄이기 위해 항온을 할 수 있는 hot-plate, 500ml 비이커, Test tube 17×108 mm 및 스틸재질의 긴 약수저를 사용하였다.



그림 81. 저점도 우레탄 화합물의 Gel Time 측정 전경

□ ③ 저점도 우레탄 화합물의 출력물 측정

- 제조된 저점도 우레탄 화합물을 이용해 각 주제 용액 및 경화제 용액의 출력물을 측정하였다. 실험은 ASTM D1475 "Standard Test Method for Density of Liquid Coatings, Inks, and Related Products" 에 준하여 진행하였다.



그림 82. 출력물컵을 이용한 출력물 측정 (ASTM D1475)

□ ④ 저점도 우레탄 화합물의 흡수율 측정

- 제조된 저점도 우레탄 화합물을 이용해 적층 제조 격자 구조체에 넣어 경화시킨 후 투입되지 않은 시편을 얻었다.
- 이후 콘크리트에서 생성될 수 있는 pH 범위의 용액을 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 용액으로 제조하여 pH가 13~15 범위의 용액을 제조하였다.
- 용액에 시편이 완전히 담긴 후 24 시간 이후 무게와 용액에 담기 전의 무게를 비교해 흡수율을 평가하였다.

$$\text{흡수율}(\%) = \frac{\text{용액에 침지한 시편의 무게}}{\text{용액에 침지전 시편의 무게}} \times 100$$

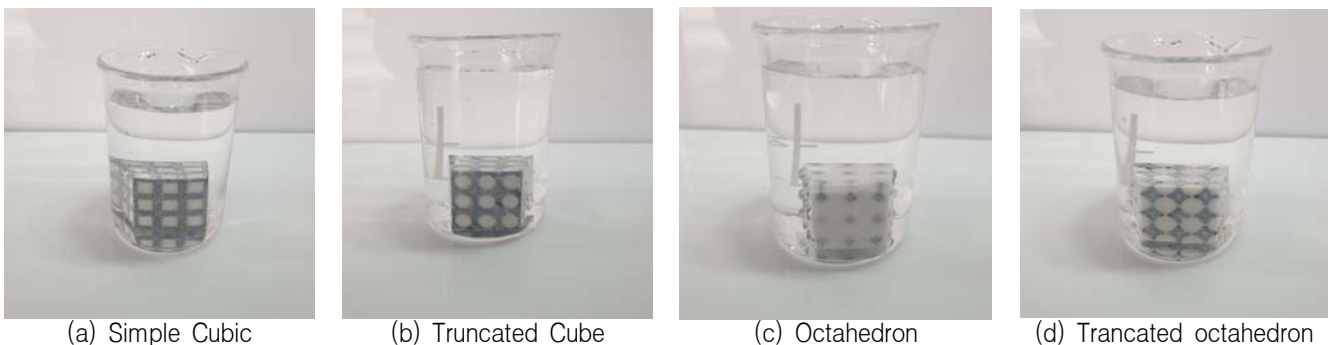


그림 83. 흡수율 평가 전경

(4.) 실험 결과 및 고찰

(4.1) 저점도 우레탄 화합물의 점도

- ☐ 제조된 저점도 우레탄 화합물을 Brookfield Viscometer LV로 Spindle #63을 이용해 상대 점도를 측정하였다.
- ☐ 시험은 촉매를 첨가하면 반응시간이 급격히 짧아져 굳는 현상이 발생하므로 촉매를 제거한 상태에서 이뤄졌다. 각 실험은 주제와 경화제를 섞은 후 10초 이후에 측정하였다.

표 56. 저점도 우레탄 화합물 점도

구분	점도 (cps)	비고
저점도 우레탄 화합물	387 cps	Spindle #63 at 20°C

(4.2) 저점도 우레탄 화합물의 Gel Time

- ☐ 저점도 우레탄 화합물은 상온 경화시스템으로 상온에서 반응을 일어난다. 반응이 시작되어 점도가 상승되어 움직이지 않는 점을 Gel time으로 결정하였다. 저점도 우레탄 화합물은 원액은 95분의 겔 타임을 나타내었다. 원하는 겔 타임을 얻기 위해 우레탄 화합물의 촉매량을 조절할 필요가 있다.

표 57. 저점도 우레탄 화합물의 겔 타임 측정 결과

구분	겔 타임 (min)	비고
저점도 우레탄 화합물	95	



그림 84. 저점도 우레탄 화합물의 겔 타임 측정 시편

(4.3) 저점도 우레탄 화합물의 출력물

- ☐ 저점도 우레탄 화합물을 이용해 각 주제 용액 및 경화제 용액의 출력물을 측정하였다. 또한 PA12 및 AlSi12Mg 3D프린팅 출력물에 주입된 저점도 우레탄 화합물을 포함한 전체 출력물을 구하였다.

표 58. 저점도 우레탄 화합물 충전 후의 PA12 3D프린팅 출력물 출력물의 밀도

구분	저점도 우레탄 화합물 충진 전 (g/cm ³)	저점도 우레탄 화합물 충진 후 (g/cm ³)	비고
(a) Simple Cubic	1.00	1.14	
(b) Truncated Cube	0.99	1.26	
(c) Octahedron	0.98	1.16	
(d) Truncated octahedron	0.96	1.22	

표 59. 저점도 우레탄 화합물 충전 후의 AlSi12Mg 3D프린팅 출력물 출력물의 밀도

구분	저점도 우레탄 화합물 충진 전 (g/cm ³)	저점도 우레탄 화합물 충진 후 (g/cm ³)	비고
(a) Simple Cubic	2.55	1.67	
(b) Truncated Cube	2.55	1.67	
(c) Octahedron	2.47	1.66	
(d) Truncated octahedron	2.51	1.67	

(4.4) 저점도 우레탄 화합물의 흡수율

- ☐ 콘크리트에서 생성될 수 있는 pH 범위의 용액을 Ca(OH)₂ 용액으로 제조하여 pH가 13~15 범위의 용액을 제조하였다. 용액에 시편이 완전히 담긴 후 24 시간 이후 무게와 용액에 담기 전의 무게를 비교해 흡수율을 평가하였다.
- ☐ 저점도 우레탄 화합물은 기본적으로 소수성 화합물, Ca(OH)₂로 알카리 용액을 제조한 뒤에도 흡수율 0.00 % ~ 0.18 %로 매우 낮게 관찰되었다

표 60. 저점도 우레탄 화합물을 주입한 PA12 3D프린팅 출력물 흡수율 측정 결과

구분	용액 침지 전 시편의 무게 g	용액 침지 후 시편의 무게 g	흡수율(%)	비고
(a) Simple Cubic	9.11	9.12	0.11	
(b) Truncated Cube	10.55	10.55	0.00	
(c) Octahedron	7.64	7.65	0.13	
(d) Truncated octahedron	10.12	10.13	0.10	

표 61. 저점도 우레탄 화합물을 주입한 AlSi12Mg 3D프린팅 출력물 흡수율 측정 결과

구분	용액 침지 전 시편의 무게 g	용액 침지 후 시편의 무게 g	흡수율(%)	비고
(a) Simple Cubic	13.10	13.12	0.18	
(b) Truncated Cube	13.74	13.74	0.00	
(c) Octahedron	13.22	13.24	0.16	
(d) Truncated octahedron	13.16	13.18	0.16	

(5.) 최종 채움재

- ☐ 혼합점도, 출력물 및 경화조건을 고려하여 최종적으로 주재:경화제=100:400을 최종 배합으로 선정하였다.

표 62. 저점도 우레탄 화합물의 조성물 구성

구분		배합비 및 측정값	비고
배합비율(무게비)		100 : 400 (주재 : 경화제)	
점도(cps)	주재	500	Brookfield (DV-I Prime #63, 50rpm) cps at 20℃
	경화제	400	
혼합점도(cps)		410	
출력물	주재	1.09	출력물컵
	경화제	1.48	
혼합출력물		1.39	
가사시간 at 25℃		1시간	겔타임 측정
경화조건	25℃	16시간	
	60℃	2시간	
경도 (shore A)		68	48시간 경화 후 측정

- ☐ 저점도 우레탄 화합물의 주재 및 경화제 구성은 다음과 같다.

표 63. 저점도 우레탄 조성물 구성

구분	화합물	첨가량 (%)	비고
주재	MEG (에틸렌글리콜, MONO ETHYLENE GLYCOL)	12.0	—
	Castro Oil	28.0	—
	Diethylphthalate	12.5	—
	CaCO ₃	45.0	—
	Polyamine	2.5	—
경화제	PPG-TDI Prepolymer	60.0	—
	Diethylphthalate	40.0	—

○ [핵심기술4] SLM 3DP 인공경량골재 활용 콘크리트 배합

(1.) 연구의 필요성 및 목적

(1.1) 연구의 필요성

- 골재는 콘크리트 구성 재료로 모래, 자갈 및 쇄석 등의 입상재료를 의미하며 콘크리트 체적의 약 70%를 차지하는 매우 중요한 자재임. 또한 골재의 물리적 특성에 따라 제조되는 콘크리트의 역학적 성능에 큰 영향을 미침. 하지만, 골재의 수급 불안정이 갈수록 심해지고 있고 천연골재 대체 재료로 순환골재, 인공골재 등 추가적인 골재 자원의 확보가 필요하다. 최근 인공경량골재에 대한 연구개발 노력이 점차 가속화되고 있음.
- 건축구조물의 초고층화, 대형화 교량의 장스팬화등으로 구조물의 자중을 줄일수 있는 방법으로 경량화가 절실히 요구되고 있음. 이에 따라 콘크리트를 고강도, 고성능화 시키면서 자중을 경감시킬 방안으로 골재를 경량골재로 대체 사용하는 방안이 필요함. 또한 콘크리트의 중량을 낮추기 위해 경량골재를 사용하여 제조하는 경량골재 콘크리트는 경량화가 가능하다는 이점이 큼으로 앞으로의 경량콘크리트 수요는 지속적으로 증가할 전망이다.
- 하지만, 경량골재, 경량 콘크리트 ,경량 구조물의 장점에 대한 인식 및 홍보 부족으로 경량골재 제조업체의 도산 및 부재, 비싼 외국산 경량골재의 수입에 의한 경량골재의 경제적 이미지, 경량골재 및 경량 콘크리트에 대한 연구개발 부족등 경량골재 관련 시방서, 규격이 없어 최근까지 제조 및 실용화 단계가 미약함.
- 인공경량골재의 경우 품질이 일정하지 않은 문제점이 발생하고 있음. 또한 인공경량골재의 입자크기를 13 mm 이상의 굵은골재로 적용하는 경우 다공성 및 높은 흡수율로 인해 콘크리트의 유동성과 압축강도를 감소시키는 요인으로 지적되기도 함.
- 따라서, 콘크리트의 품질에 큰 영향을 미치는 요인 자재인 골재의 안정적인 공급과 품질 확보방안이 필요로 함. 이에 본 연구에서는 3D 프린팅으로 출력하고 격자구조 인공 경량골재의 활용 가능성을 검토하고자함.

- 인공경량골재는 다종 원료를 혼입하여 소성 제조하기 때문에 골재의 품질(입도, 흡수율)이 일정하지 않고 내부가 다공성으로 구성되므로 제품에 따라 콘크리트 품질에 큰 영향을 줌.
- 안정적인 품질관리를 위해 3D 프린팅으로 출력된 인공격자 경량골재의 활용 가능성을 검토하는 것을 본 연구의 목표로 함.

(1.2) 연구의 목적

□ 미래시장 선점을 위한 원천기술 개발

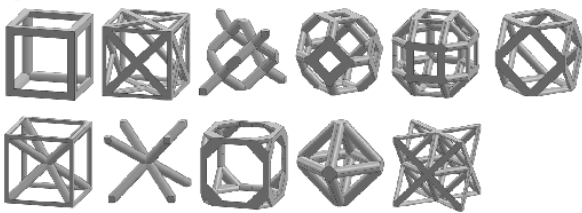
- 천연골재 수급 문제를 대체 하고 미래 건설시장을 선점 할 수 있는 3D 프린팅 밀도제어형 고성능 인공경량골재 제조기술 개발
- 3D 프린터로 출력된 밀도제어형 단위셀(Variable-density unit cell) 검토 및 내부 격자구조 형상 조절을 통해 밀도 구현($1.0 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$).
- Selective Laser Melting(선택적 레이저 용융, 이하 SLM) 3DP 출력 최적화 제조 기술을 활용하여 적용소재(Stainless steel, Aluminum alloy, Titanium, Plastic 등)의 다양성을 확대시켜 사용성 및 경제성에 적합한 밀도제어형 경량골재 제조
- 금속소재 이외에 플라스틱 소재(PA12)로 추가 검토하여, 경제성 확보를 목표로 함.

□ 3D 경량골재 활용 콘크리트 배합 개발

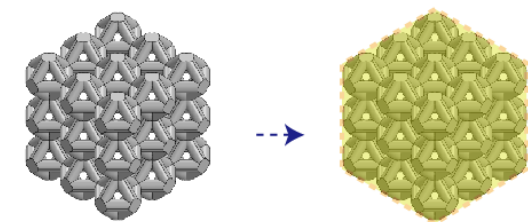
- 본 연구 개발과제 최종목표는 “SLM 3DP를 이용한 금속소재 밀도제어형 구조체 설계/제조 기술 개발 및 이를 활용한 고성능 인공경량골재 제조기술 개발”로 이를 활용하기 위한 목표는 다음과 같음.
 ※ 경량 고성능 콘크리트 개발 목표강도 45 MPa, 콘크리트 밀도 1.6 t/m^3 .
 ※ 흡수율 저감으로 건조수축 저감

기반기술확보 (단위셀 및 격자구조체 설계/제조)

✓ 단위셀 설계 기술 확보



✓ 격자구조체 설계 기술 확보 : 본 연구는 압축 거동이 우수한 형상을 도출함



✓ 경량 내부채움재 개발

경량고강도콘크리트

✓ 3D경량골재

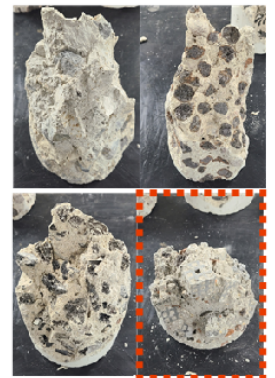
밀도제어 $1.0 \sim 2.1 \text{ g/cm}^3$,
 흡수율 0.2% 이하 달성
 KS F 2541 골재파쇄값 3% 이하 달성



3D골재 제조 및 적용성 검토

✓ 3D경량골재 활용

경량 고강도 콘크리트
 Density : 1.6 t/m^3
 Strangth : 45 MPa



골재 파손이 없어서 고강도에 유리함

그림 85. 연구 개요 및 목적

(2.) 연구 범위 및 방법

- ☐ 3DP 인공경량골재 활용 콘크리트의 제조 및 추진 일정은 아래 표와 같으며 전체 연구과제 일정은 골재의 물리적 성능평가와 경량골재 활용 배합설계로 구분됨.

표 64. 연구과제 수행 일정

연구 범위		시험 수행 일정 (월)											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
문헌조사													
골재 관련	3D 프린팅 격자구조 인공경량골재 제조 및 경량골재 수급												
	물성 평가 (밀도, 흡수율, 파쇄율)												
콘크리 트 관련	경량콘크리트 기준배합 (Series 1)												
	경량굵은골재 배합 (Series 2)												
	경량잔골재 배합 (Series 3)												

(2.1) 이론적 배경

(2.1.1) 경량골재

- ☐ 경량골재
- 경량골재란 기존의 건축물에 사용되는 굵은골재보다 가벼워 건축물의 하중감소를 위해 사용될 수 있는 건축자재를 칭하는 용어임. 표준시방서에 따르면 경량골재는 팽창성 혈암, 팽창성점토, 플라이애시 등을 주원료로 소성과정을 거쳐 생산됨.
 - 경량골재의 제조는 원료를 고온(1 100 - 1 200 ℃)에서 소성하여 제조된 절건밀도 1.8 g/cm³ 이하의 것을 말하며, 이를 용도별로 구분하면 건축구조물에 이용되는 구조용과 단열, 방습 및 방음에 활용되는 비구조용이 있음. 이것을 생산과정별로 구분하면 인공 경량골재, 부산물 경량골재 및 천연경량골재로 나누어 짐.
 - 구조용 경량골재의 종류는 표 2에 정리하여 나타냈으며, 경량골재는 생산방식에 따라 천연경량골재, 부산경량골재, 인공경량골재로 분류했음. 천연 경량골재는 화산암을 크러셔를 통해 파쇄한 후 골재의 입도를 조정 한 뒤 가공하여 만든 경량골재로서 개방형의 다공질 공극구조와 모난 입형이 일반적이어서 콘크리트용 골재로서는 부적합함. 아래 표는 경량골재의 종류와 정의를 나타냈음.
 - 인공경량골재는 자연원료인 혈암이나 점토 등을 사용하거나 산업부산물인 팽창슬래그, 석탄재 등을

사용하는 것으로 분류됨. 자연원료를 파쇄하여 고온에서 소성한후 파쇄한 파쇄형 골재 또는 파쇄한 원료를 슬러리 화하여 압출성형이나 펠리타이저에 의해서 조립화한 조립형 경량골재로 나뉘어 있음.

- 부산산업부산물을 사용하는 부산경량골재의 경우 자원 재활용에 관한 사회적 관심이 커짐에 따라 최근 중점적으로 연구되었으며, 석탄재, 플라이애쉬 등을 활용하여 입도 조정해 콘크리트용 골재로 사용한 것임.

표 65. 경량골재 관련 분류 및 정의(KS F 2523, KS F 2534)

분류		정의
경량골재		콘크리트의 질량을 경감시킬 목적으로 사용하는 보통의 암석보다 밀도가 낮은 골재
순환골재		콘크리트를 크러셔 등으로 분쇄하여 인공적으로 만든 골재로서 입도에 따라 잔골재와 굵은 골재로 나누어짐
인공 경량 골재	굵은 골재	고로슬래그, 점토, 규조토암, 석탄회, 점판암과 같은 것을 팽창, 소성, 소괴하여 생산되는 골재
	잔골재	
천연 경량골재	굵은 골재	경석, 화산암, 응회암과 같은 천연골재를 가공한 골재
	잔골재	
바텀 애시 경량 골재	잔골재	화력발전소에서 부산되는 바텀애시를 가공한 골재

표 66. 구조용 경량골재 종류(대한건축공사 표준시방서)

분류	종류	주요 원료	제법	형상	골재의 범위
인공 경량 골재	비조립형	팽창혈암, 팽창점토	분쇄-소성-분류	하천 모래형	굵은골재, 잔골재
	조립형	팽창혈암, 팽창점토	미분쇄-조립-건조-소성-분류	구형	굵은골재
	성형형	팽창혈암, 팽창점토	분쇄-성형-건조-소성-분류	고치형	잔골재
	파쇄형	팽창혈암, 팽창점토	분쇄-소결-분쇄-분류	쇄석형	굵은골재, 잔골재
부산 경량 골재	소성 플라이애시	플라이애시 점토	분쇄-조립-건조-소성-분류	구형	굵은골재
	팽창 슬래그	제철 슬래그	수쇄-폭기팽창-분류	쇄석형	굵은골재
	팽창 석탄	석탄, 팽창점토	분류-조립-건조-소성-분류	구형	굵은골재
	가공 석탄재	석탄재	분류-시멘트페이스트 피복가공	쇄석형	굵은골재
천연 경량 골재	화산력	화산력	굴삭-분쇄-분류	쇄석형	굵은골재
	가공 화산력	화산력	화산력-시멘트페이스트 피복가공	쇄석형	굵은골재

☐ 입도

- 경량골재의 입도는 KS F 2534의 규정에 의해 골재의 최대치수는 공사시방에 따르며 정한 바가 없을 시 골재 최대 치수는 20 mm로 한다고 표준시방서에 정의되어 있음. 경량골재는 입경에 따라 골재의 밀도가 다르며 일반적으로 입경이 작을수록 밀도값이 증가함.

☐ 입형 및 표면구조

- 경량골재의 입형은 제조 공정에 의하여 정육면체부터 둥근 모양까지 생성되고 표면구조는 매끄러운 정도부터 울퉁불퉁한 정도까지 다양하게 생산되어짐. 이와 같이 다양한 입형과 표면구조는 콘크리트 배합시 워커빌리티, 잔골재/ 굵은골재 비율, 단위시멘트량 및 단위수량에 영향을 미침.

☐ 밀도

- 경량골재의 경우 내부가 다공성이기 때문에 일반골재에 비해 밀도가 낮은편임. 일반적으로 경량골재의 겉보기 밀도는 진밀도보다 낮은 값으로 측정됨. 또한 경량골재의 밀도는 경량골재콘크리트의 중량에 직접적인 영향을 미치므로 적절한 배합설계가 필요함.

☐ 단위용적질량

- 인공경량골재의 단위용적질량은 골재의 겉보기 비중, 형상 및 입자의 조성, 함수율 등에 따라 달라지며 동일한 등급과 입자의 형태에서 골재의 단위용적질량은 밀도에 비례함.

☐ 함수율

- 경량골재의 내부는 다공성구조로 되어있기 때문에 함수율이 일반골재에 대비 매우 큰편임. 골재의 함수율이 크면 콘크리트의 품질관리에 어려움이 있음. 따라서, 콘크리트 배합시 사전침수(Pre-wetting)과정이 필요로 함.

☐ 강도

- 경량골재의 강도는 내부가 다공질이기 때문에 일반골재보다 낮은 편임. 경량골재의 강도를 증진시키기 위해서는 경량골재의 표면을 코팅하여 골재 자체의 강도를 증진시키는 방법이 있음.

☐ 경량골재관련 국내·외 시방현황

- 인공경량골재의 경우 물리적 특성에 대해 절건밀도와 입도분포의 범위를 규정하고 있으며, 골재 내 유해물 함량에 대해서도 제한하고 있음. 콘크리트표준시방서에서는 경량골재의 입도분포에 대해 별도로 구분하지 않았으며 입도의 범위에 따라 표준체를 통과하는 질량의 백분율로 정의함.
- ACI 213에서는 ASTM C 330 기준에 만족하는 골재를 경량골재로 정의하고 있으며, JASS 5에서는 경량골재가 JIS A 5002에 만족하도록 하고 있음.

표 67. 경량골재의 범위 규정

시방서	입도분포	단위용적질량 (kg/m ³)	화학적 조성
KCS	골재 종류 및 골재 최대 사이즈에 따라 입도분포 범위 제시	경량잔골재 : 1,100 이하 경량굵은골재 : 900 이하 혼합골재 : 1050 이하	점토 : 2 % 이하 얼룩 : Fe ₂ O ₃ 함량 1.5mg 이하 유기불순물 : 표준색 이하 부립률 : 10 % 이하 강열감량 : 5 % 이하
ACI 213	ASTM C 330에 만족하는 골재		점토 : 2 % 이하 얼룩 : Fe ₂ O ₃ 함량 1.5mg/200 g 이하 강열감량 : 5% 이하
JASS 5	JIS A 5002에 만족하는 골재	경량잔골재 : 1,300 ~ 2,300 경량굵은골재 : 1000 ~ 2000	점토 : 2 % 이하 강열감량 : 5 % 이하 CaO : 50 % 이하 NaCl : 0.01 % 이하 유기불순물 : 표준색 이하 안정성 : 20 % 이하 미분량 : 10% 이하

□ 경량골재의 경우 구조물의 자중을 감소시킬 목적으로 활용되지만 원재료 및 제조방식에 따라 활용이 상이함. 또한 구조물에 활용되는 경량골재의 물리적 특성은 KS 표준 및 국·내외 시방서에 기준이 제시되어 있음.

(2.1.2) 경량골재 콘크리트

- 경량골재 콘크리트는 KS F 1004 “콘크리트용어”에 따르면 “경량골재를 사용하거나 많은 기포를 함유시켜 질량을 가볍게 한 콘크리트”로 정의되며 콘크리트표준시방서 (2016)에 제시된 기준으로 “설계기준강도 15 MPa 이상 24 MPa 이하, 기건 단위용적질량이 1,400 ~ 2,000 kg/m³의 범위”에 들어가는 것을 경량콘크리트라 정의했다. 고강도 경량골재 콘크리트의 경우에는 27 MPa 이상으로 한다고 정의하고 있음.
- 일본건축학회 JASS 5(2015)에서 제시한 경량골재 콘크리트의 규정에 의하면, “경량골재를 골재 전체 또는 일부를 치환하여 단위용적질량 1,700 ~ 2,100 kg/m³ 및 압축강도 36 MPa 이하” 일 때 경량골재 콘크리트 1종 “단위용적질량 1,400 ~ 1,700 kg/m³ 및 압축강도 27 MPa 이하” 일 때 경량골재 콘크리트 2종으로 분류하고 있음.
- 고강도 경량골재 콘크리트는 ALA No.5(2002)에 따르면 압축강도 36 MPa 이상으로 정의되고 있음. 미국의 ASTM C330(2015)에서는 “경량골재 콘크리트는 설계기준 압축강도 17 MPa 이상 및 단위용적 질량 1,120 ~ 1,920 kg/m³ 범위를 만족하는 콘크리트” 라고 정의하고있으며 압축강도 40 MPa 이상을 고강도경량골재 콘크리트로 분류하고 있음. 아래 표에 국가별 경량골재 콘크리트의 규정을 나타냄.

표 68. 국가별 경량콘크리트 규정

규정 (국가)	콘크리트 종류		설계기준 압축강도 (MPa)	단위용적질량 (kg/m ³)
콘크리트 표준시방서 (한국)	일반강도	1종	18~24	1,700 ~ 2,000
		2종	15~21	1,400 ~ 1,700
	고강도		27 이상	-
JASS 5 (일본)	일반강도	1종	36 이하	1,700 ~ 2,100
		2종	27 이하	1,400 ~ 1,700
ALA No.5 (일본)	고강도		36 이상	-
ASTM C 330 (미국)	일반강도		17 이상	1,120 ~ 1,920
	고강도		40 이상	

- 경량골재를 활용한 콘크리트의 국가별 기준은 대표적으로 콘크리트 표준시방서(한국), JASS 5(일본), ALA No.5(일본), ASTM C 330(미국)이 있지만 국가마다 설계기준은 상이함.

(2.1.3) 경량골재 및 경량콘크리트 관련 국내·외 동향

□ 국외 연구동향

- 콘크리트의 경량화는 시멘트가 개발된 후 80년이 지난 다음 영국에서 시작된 것으로서 석탄재를 사용한 것이 시초로 미국에서는 1925년 팽창점토를 원료로 한 인공경량골재가 제조되어 실용화되기 시작했으나 본격적인 인공경량골재는 미국에서 회전로에 의해 점토를 팽창시켜 얻은 하이다이트 제조기술을 발견한 1917년 이후로 하이다이트의 제조 특허를 발판으로 현재까지 구조용 경량골재가 공급되고 있음.
- 1928년에는 팽창 슬래그를 사용한 인공경량골재, 1940년경에는 분말 석탄재를 소성한 인공경량골재가 생산 및 공급되고 있다. 또한 제 2차 세계대전이후에는 경량골재 콘크리트의 본격적인 기술개발과 대량 사용 및 실용화가 이루어져 초고층 빌딩, 교량, 해안 구조물 등에 많이 사용되어 왔으며 현재는 약 250여개 공장에서 연간 약 1,600만 m³가 생산되는 것으로 추정되고 있음.
- 유럽에서는 유명한 고급 경량골재인 Leca가 덴마크에서 개발되어 영국, 독일을 비롯하여 유럽 각 지역에 보급됨. 1950년 중반부터는 팽창점토 KEPAM3NTO가 러시아(구 소련)에서 생산되기 시작했고 폴란드, 헝가리, 체코 등 동구권 국가에서도 널리 생산·공급되고 있음.
- 국외의 경우 약 50년 전부터 구조용으로 활용할 수 있는 경량골재에 관한 품질개선 및 각종실험을 통하여 재료 및 구조적 특성을 연구했고 실제 구조물에 적용했다. 다음은 경량콘크리트에 관한 각국의 연구동향 및 사용현황을 정리했음.

• 미국

- 선진 각국에서는 2차대전 이전부터 구조용으로 활용하기 위한 경량콘크리트의 개발에 많은 관심을 기울여 왔으며, 미국의 경우는 1차 대전 당시에 바지선 제작에 팽창혈암을 이용한 배합강도 35MPa, 단위용적질량 1,760kg/m³을 목표로 한 최초의 구조용으로 활용할 수 있는 경량콘크리트가 사용되었으며 이후 건축구조물, 교량 상판 및 프리캐스트 구조물에 본격적으로 적용되기 시작했음.
- 1920년대 후반 경량골재의 상용화가 이루어져 St. Louis의 Park Plaza Hotel의 골조공사에 경량콘크리트를 사용한 후 많은 고층 구조물과 대형 구조물에 경량콘크리트를 사용하게 되었음. 또한, Holm 등은 “경량콘크리트로 건설된 교량의 사용성”에 관한 고찰에서 1968년에 측정된 부재의 처짐 및 스트레인 등에 대한 값과 1992년에 측정한 값을 비교하여 강성의 저하 없이 양호한 상태를 보여주고 있다고 판단했음.

• 영국

- 영국에서의 경량골재의 제조는 1930년대 중반에 시작되었으나 실제로 사용된 것은 제2차 세계대전중의 1943년이 고 1915년경에 팽창점토를 이용한 경량골재를 개발하여 세계 1차 대전 중에 약 2,000 ton의 배를 만든 실적이 있음 (J. A. Hanson 1964). 또한, Osborne는 “해수에서 10년간 침지한 경량콘크리트의 내구성에 관한 연구”에서 경량콘크리트의 탄산화, 압축강도, 화학적 침식, 염분침투 및 동결융해저항성 등에 관한 내구성능을 동일한 배합의 일반콘크리트와 비교검토 했음
- Swamy 등은 “구조용 경량골재콘크리트의 고성능화를 위한 혼화재료에 관한 연구”에서 실리카흙, 고로슬래그 미분말 및 플라이애시를 혼입하여 압축강도, 공극구조 및 투과성 등의 특성을 분석 고찰했으며(R. N. Swamy and W. Lixian 1995). 영국에서의 경량콘크리트는 천연재료의 가공품 또는 공업폐기물을 인공적으로 제조하여 만든골재를 사용함.
- 경량골재에 관한 규격으로는 BS 3797의 규정에 따라 기본재료나 제조방법에는 상관없이 대부분 동일한 화학조성과 구조로 되어 있음. 1970년 초경까지 경량골재의 선택폭도 상당히 넓게 되었고 천연골재의 가공품 중에는 Leca(팽창점토-구상), Aglite(팽창혈암-부정형), Solite(팽창점판암 대부분 구형)와 같은 골재 제품들이 제조되었음. 1970년 중반에는 경량골재의 종류는 감소하기 시작했으며 Solite(팽창점판암 대부분 구형)는 환경규제로 인하여Ag-lite(팽창혈암-부정형)는 경제성 때문에 제조가 중지되었고 개량된 골재인 Pelite(구상팽창 고로슬래그, 중·고강도콘크리트, 콘크리트 비중 1,700-2,000 kg/m³이 생산되게 되었음. 1980년대에는 공장건설의 붐이 일어 특별한 내화피복을 하지 않아도 고내화성을 부여할수 있는 경량콘크리트가 보통콘크리트보다 선호되게 되어 1988년부터 1989년까지 걸쳐 1년

간 200,000 m³의 경량콘크리트가 사용되었음.

- 캐나다

캐나다에서는 1930년대에 경석과 고로슬래그를 이용하여 경량골재를 제조하기 위한 연구를 수행하여 세계 2차 대전 후에 급격히 발전하여 구조용으로 활용할 수 있는 경량골재를 개발하여 적용하기 시작했음. 또한 Wilson 등은 해안의 콘크리트 해양 플랫폼에 사용될 고강도 경량콘크리트의 역학 및 내구 특성에 관한 연구를 수행했으며, 이 연구에서는 압축강도 (60 ~ 65)MPa를 설정하여, 강도특성, 탄성계수, 건조수축, 동결융해 저항성, 탄산화시험 및 염소이온 침투성 등의 실험을 수행했음. 그 결과 경량콘크리트 제조시 동일배합에 사용된 경량골재의 흡수율은 경량콘크리트의 역학 및 내구 특성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단했음.

- 노르웨이

- 노르웨이에서의 경량골재(LWA)의 건설분야의 이용은 약 50년 전에 시작되었음. 노르웨이에서의 경량콘크리트의 제조는 1954년에는 1개의 킬른에서만 연간 100,000m³의 제조능력을 가지고 있었으나 1995년경에는 4개의 킬른에서 100만m³의 제조능력을 지니게 됨. 50년 전 제조가 시작되어 최근까지 1800만 m³의 LWA블록이 제조 판매함.

- 노르웨이에서의 고강도 경량골재 콘크리트는 1980년대 초부터 실용화되어 최근까지 많은 양이 주로 장대교 및 플랫폼에 적용되었다. 노르웨이에서의 경량골재콘크리트의 해양구조물에의 이용은 이미 80년 이상의 역사가 있고 고성능 경량골재콘크리트도 1987년 28일 재령에서 75 MPa(입방체 시험체) 및 비중 1, 920 kg/m³의 특성을 지닌 25m³의 경량골재콘크리트가 작은 교량에 실시공 되었다. 최근에는 1995년에 북해에 건설된 2개의 프리텐션 플랫폼에 사용된 단위용적질량 2,250kg/m³, 28일 재령 압축강도 75 MPa의 고강도 경량콘크리트가 적용됨.

- 최근 35년간 고성능 경량콘크리트에 관한 연구는 관심이 높게 계속하여 행해져 왔다. SINTEF, NTH(노르웨이 공과대학), Norwegian Constructor, Norcem, Elkem materials, Leca, Selmer, Public Norwegian Road Administration 및 북해의 석유회사가 경량콘크리트의 개발에 참여함.

- 일본

- 일본에서는 제2차 세계대전 이후에 천연의 경량골재가 주로 건축구조용 콘크리트로서 사용되어 오다가 1960년대에 비로서 고품질의 구조용 경량콘크리트를 만들기 위한 인공경량골재의 연구개발 노력이 활발히 진행되어 1964년 미국과 기술제휴를 통해 골재소성용 회전로를 설치하고 팽창 혈암을 원료로 한 구조용 경량골재를 생산하여 처음으로 인공경량 골재의 제조 판매가 이루어졌음.

- 토목분야에 있어서 인공경량골재 및 콘크리트의 연구 및 시공실적은 1950년대 후반부터 있었으며 일본 토목학회에서는 1966년에 “인공경량골재 콘크리트 설계지침”을 제정했고 일본 국영 철도에서는 1964년에 인공경량골재 콘크리트 설계시공 기준을 제정했다. 최근에는 경량콘크리트의 특성에 관한 연구에 한정되지 않고 보다 우수한 품질의 경량골재 개발을 통하여 경량콘크리트의 품질을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행 중임.

- 일본에서는 석탄재를 사용한 경량골재 콘크리트 실험이 1907년에 처음으로 실행되었으며 석탄재를 포함한 경량골재개발 특허가 1947년에 출원된 후, 전국적으로 경량골재가 많이 보급되었음. 또한 1950년경부터 천연경석을 경량콘크리트 건축물에 사용하기 시작했으며, 1953년 초경량 인공경량골재인 펄라이트가 개발, 시판되었다. 일본건축학회는 JIS A 5002(구조용 인공경량 콘크리트 골재)를 1955년에 제작하여 인공경량골재에 대한 기준을 마련했음. 1964년에는 미쓰비시 금속광업이 미국의 베스프토르크사에서 기술을 도입하여 제조한 구조용 인공경량골재가 판매되기 시작함.

- 현재 일본에서는 하수구 침전물, 도시 쓰레기잔류물, 석재가공 공장의 잔류물(암석분말), 석탄재 등 산업폐기물을 이용한 인공경량골재가 개발되어 환경문제 해결과 함께 자원재활용의 효과를 올리고 있음. 일본에서의 경량골재콘크리트의 구조물의 이용은 1950년대에 시작되었고 1960년대에는 인공경량골재의 제조가 개시되어 판매되었다. 콘크리트가 경량인 특성을 활용하여 건축구조물만이 아니라 토목구조물에도 사용되었고 1964년에는 토목구조물로는 최초로 고속도로의 바닥데크에 경량골재콘크리트가 적용됨.

□ 국내 연구동향

- 국내의 인공경량골재에 관한 연구는 주로 점토질 원료를 이용한 것으로서 1960년대 후반부터 시작되었으며 석탄 폐석, 플라이애시 등을 이용한 인공경량골재가 연구되어 지고 있음.
- 국내의 경우 구조용 경량콘크리트에 관한 연구 및 적용은 기초적인 단계로 그 내용을 살펴보면 다음과 같다. 신성우 등은 고강도 경량콘크리트의 개발, 구조특성 및 실용화의 연구에서 압축강도 27MPa 이상을 갖는 구조용으로 활용할 수 있는 고강도 경량콘크리트를 개발하고 이를 실용화하기 위해 배합실험을 통해 레미콘 생산에 필요한 배합비를 선정하고 이를 기초로 하여 기존의 레미콘생산설비를 이용하여 대량생산을 시도했음.
- 김태형 등은 경량골재를 사용한 콘크리트의 역학적 특성을 규명하고 구조용 재료로서의 사용가능성을 파악하고자 팽창점토를 굵은 골재로 사용한 경량콘크리트를 제조하여 굳지 않은 상태 및 경화상태의 특성을 비교 분석했음. 그 결과 혼합률 75% 이상일 경우 단위용적질량 2,000kg/m³의 경량콘크리트 규준을 만족하며 압축강도 또한 25~31MPa 범위로 발현되어 구조용으로 사용이 가능함을 나타냈음.
- 서치호 등은 1990년대 초반부터 팽창점토를 이용한 20MPa 이내의 보통강도의 경량콘크리트에 관한 연구를 통하여 강도측면 보다는 밀도가 낮은 인공경량골재를 이용하여 콘크리트의 성능을 개선시키고 보완하는 것을 중점으로 연구를 수행 했으며 그 후에 고강도 경량콘크리트에 관한 연구를 실리카흙 및 기타 혼화재를 이용하여 연구를 수행했다(서치호 1998; 임유목, 서치호 1991). 그리고 최근에 들어 경량골재를 활용한 기존의 자기충전콘크리트 배합설계 방법을 적용한 압축강도 25~38MPa 발현되는 콘크리트에 관한 연구가 몇몇 연구자들에 의해 시도되고 있음.
- 국내의 경우는 비교적 천연골재의 풍부함 등으로 인하여 인공경량골재 생산의 필요성을 인식하지 못한 영향으로 1990년경부터 인공경량골재의 생산이 시작되었음. 따라서 이를 이용한 경량콘크리트에 관한 연구실적 및 적용사례가 매우 적은 실정임. 그러나 1990년 중반부터 구조용 경량콘크리트를 생산하는 업체가 등장하면서 기존 건물의 증축 및 개축, 또는 신축하는 건물에 간혹 적용하는 사례가 있으며, 연구 목적의 시험시공 등도 이루어지고 있음.
- 최근에는 자원의 재활용 및 환경오염 등의 인식으로 산업폐기물 등을 이용한 인공경량골재 개발에 관한 연구가 진행 중에 있음. 그러나 그 동안의 많은 연구와 개발에도 불구하고 인공경량골재의 생산과 수요가 극히 저조한 이유는 국내 인공경량골재 부존자원의 양과 질이 떨어지는 것과 현재 천연골재 자원의 생산비에 비해 인공경량골재의 생산비가 커서 본격적인 생산에 들어갈 수 없는 점을 들 수 있음. 또한 인공경량골재의 생산비를 낮출 수 있는 연구와 방법이 개발되지 못한 점이 중요원인이라 할 수 있음.
- 최근 산업 폐기물의 종류는 매우 다양하고 양은 날로 증대되고 있는 실정인데 비해 국내 산업 폐기물은 선진국에 비해 재활용율이 매우 낮고 처리에 있어서 대부분 매립에 의존하고 있으므로 환경오염의 방지를 위해서라도 산업폐기물을 이용한 인공경량골재의 개발은 매우 시급한 과제라 할 수 있음.

□ 국외에서는 약 1920년부터 1950년 정도까지 경량골재의 제조 및 활용에 대한 연구가 이루어 졌으며, 약 1960년부터 경량골재를 생산 및 판매를 시도함. 이후 경량골재에 대한 규정을 적립하고 있으며 경량골재를 콘크리트 구조물에 활용하기 위한 연구를 현재까지도 진행중임.

□ 국내의 경우 약 1960년 후반부터 경량골재에 대한 연구를 진행했으며 석탄 폐석, 플라이애시등을 활용해 경량골재를 생산하는 연구를 시작함. 이후 최근에는 자원의 재활용 및 환경오염 등의 인식으로 산업폐기물 등을 활용한 인공경량골재 개발에 관한 연구가 진행되고 있음.

□ 국내외 연구 개발에도 불구하고 인공경량골재의 생산과 수요가 극히 저조한 이유는 국내 인공경량골재 부존자원의 양과 질이 떨어져서 실제 적용사례가 많지 않음.

(3.) 3D 경량골재 활용 콘크리트 제조 및 실험 방법

(3.1) 사용재료

(3.1.1) 결합재

- ☐ 본 실험에 사용된 결합재는 시멘트(Ordinary Portland Cement, 이하 OPC)와 플라이애쉬(Fly Ash, 이하 FA) 두 가지 결합재를 사용했으며, 실험 배합에 사용된 결합재의 조성은 시멘트를 단독으로 사용거나 결합재의 단위중량을 감소시키기 위해 플라이애시를 혼합한 2성분계 결합재를 사용했음.
- ☐ 사용된 결합재의 밀도는 시멘트 3.15 g/cm^3 인 1종 보통포틀랜드시멘트, 밀도 2.20 g/cm^3 인 플라이애시를 사용했음. 실험 배합에 사용된 결합재의 원재료 화학적 조성비율은 아래 표에 나타냈음.

표 69. 결합재의 원재료 조성비율

Type of binder	composition of Binder (%)	
	OPC	FA
Series 1	100	–
Series 2, 3	80	20

표 70. 사용 결합재의 물리적 성능

Type	Density (g/cm^3)	Blaine fineness (cm^2/g)
OPC	3.15	3320
FA	2.35	3550

표 71. 사용 결합재의 화학 조성비율

Type	Chemical composition of Binder (%)									Total
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ig.loss	
OPC	19.30	4.71	2.96	61.80	3.74	0.44	1.63	2.53	2.89	100
FA	54.6	19.8	7.91	7.07	2.29	2.43	1.01	1.02	1.89	100

- ☐ 본 연구에서는 일반포틀랜드시멘트(OPC) 및 플라이애시(FA)를 주요 결합재로 선정했음.

(3.1.2) 잔골재

- ☐ 본 연구에서 사용된 잔골재는 부순잔골재와 경량잔골재로 총 2가지 잔골재를 사용했음. 또한 사용된 잔골재의 물리적 성능은 아래 표에 나타냈고, 잔골재의 입도 곡선은 다음과 같음.
- ☐ 부순잔골재(쇄사)의 경우 콘크리트 배합 Series 1 및 Series 2에 활용되었으며, 준설토 및 바텀애시로 제작된 경량잔골재의 경우 콘크리트의 단위중량을 감소시킬 목적으로 Series 3 배합에 사용되었음.

□ 본 연구에 사용된 경량 잔골재는 바텀애시 및 준설토 기반 인공경량골재를 분쇄하여 5 mm 이하의 것을 사용하였음.

표 72. 잔골재의 물리적 성능

Type	Density (g/cm ³)	Fineness modulus	absorption ratio of aggregate (%)	비고
부순잔골재	2.60	2.35	1.9	Series 1.2
경량잔골재	1.60	2.48	10.5	Series 3

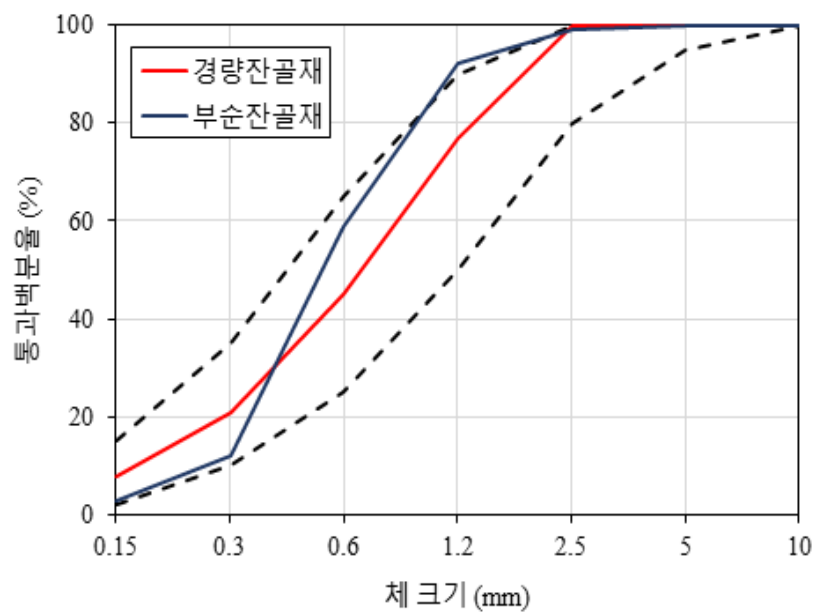


그림 86. 잔골재의 입도분포도

□ 본 연구에서는 부순잔골재(쇄사) 및 바텀애시 및 준설토기반 경량잔골재를 사용했음.

(3.1.3) 굵은골재

- 본 연구에서 사용된 굵은골재는 일반부순골재(Natural crushed aggregate, NCA), 바텀애시 및 준설토 기반 인공 경량골재(Artificial lightweight aggregates, ALA), 저회경량굵은골재(Bottom ash aggregate, BAA), 금속 3D 프린팅 격자구조 경량골재(Steel 3D printed lattice lightweight aggregate, S3DLLA), 플라스틱 3D 프린팅 격자구조 경량골재(plastic 3D printed lattice lightweight aggregate, P3DLLA) 총 5종류를 사용했음.
- 3D 프린팅 격자구조 경량골재의 경우 제외한 3가지 골재는 13 mm ~ 20 mm 의 입도를 갖는 것으로 분류하여 사용했으며, 아래 표는 굵은골재의 물리적 성능을 나타냈음.



그림 87. 배합에 사용된 굵은골재 종류

표 73. 굵은골재의 물리적 성능

Type	Density (g/cm ³)	Fineness modulus	absorption ratio of aggregate (%)
NCA	2.65	6.78	0.9
ALA	1.65	7.11	9.1
BAA	1.60	7.23	10.1
S3DLLA	1.60	—	0.1
P3DLLA	1.18	—	0.1

(3.1.4) 화학혼화제

- 본 연구에서 사용된 화학혼화제는 콘크리트의 슬럼프를 조절하기 위해 국내 D사의 Polycarboxylate 계열의 고성능 감수제(Super Plasticizers, 이하 SP제)를 고형분 14% 로 희석하여 결합재량 대비 1.0 % ~ 1.5% 이내로 사용했음. 아래 표는 화학혼화제의 종류 및 특징을 나타냈음.

표 74. 화학혼화제 종류 및 특징

혼화제 종류	색상	고형분 (%)	제조사
Polycarboxylate	암갈색	45	동남기업

(3.2) 배합설계

□ 콘크리트 배합설계

- 본 연구에서는 45MPa 급 고강도 콘크리트 배합설계에 5종의 굵은 골재를 변수로 사용했음.
- 배합 목표로는 3D 경량골재를 활용해 콘크리트를 제조했을 시 일반골재(Plain 배합)를 사용한 콘크리트와 동등한 성능을 갖고 일반 콘크리트 대비 단위중량 감소를 목표로 했음.
- 각각의 골재를 혼입한 콘크리트의 압축강도 및 단위중량을 평가하기 위해 콘크리트를 제조했다. 콘크리트 배합은 단위수량 180 kg/m³, 단위 결합재량 450 kg/m³, 물-결합재비 40 %, 잔골재율 45 %, 공기량 4.5 %로 설계했음.
- 또한, 콘크리트 배합은 총 3가지 Series로 구분했으며, Series 1에서는 경량콘크리트의 기준배합을 설계하기 위해 45MPa급 일반콘크리트에 경량골재, 저회경량골재를 사용하여 제조했음.
- Series 2에서는 5종의 굵은골재를 활용한 배합을 진행했으며, 콘크리트의 단위중량 감소를 목표로하여 Fly ash를 결합재의 20%를 치환했음.
- Series 3에서는 Series 2와 같은 배합에 잔골재에 의한 단위중량을 감소시키기 위해 잔골재(쇄사)에서 경량잔골재로 변경하여 콘크리트를 제조했으며, 일반콘크리트(Plain) 및 경량콘크리트(LW)를 제외한 3가지 배합으로만 진행했음.
- 콘크리트 배합에 사용되는 모든 골재는 표면 건조포화상태로 진행했음. 경량골재의 경우 내부가 다공성이기 때문에 배합전 약 24시간 동안 사전침수(Pre-wetting)을 진행한 후 경량골재의 표면을 마른수건으로 닦아 표면건조 포화상태로 배합 했음.

표 75. 경량콘크리트 제조를 위한 배합표

Mix		W/B (%)	Unit weight (kg/m³)							S.P *1 (B×%)
			Water	Binder		Fine aggregat e	Light weight fine aggregat e	Coarse aggregat e	Light weight coarse aggregat e	
				Ceme nt	Fly ash					
Serie s 1	S1–Plain	40	180	450	–	740	–	911	–	1.2
	S1–LW*2						–	–	574	
	S1–BA*3						–	–	556	
Serie s 2	S2–Plain			360	90	725	–	886	–	
	S2–LW						–	–	563	
	S2–BA						–	–	545	
	S2–3DLS *4						–	–	563	
	S2–3DLP *5						–	–	402	
Serie s 3	S3–BA			360	90	–	446	–	545	
	S3–3DLS						446	–	563	
	S3–3DLP						446	–	402	

*1 : superplasticizers (polycarboxylate 고형분 14%, *2 : Lightweight,coares aggregate *3 : Bottom ash coares aggregate

*4 3D printing light weight casres aggregate steel *5 : 3D printing light weight casres aggregate plastic

- 본 연구에서는 기준배합 45 MPa, 콘크리트 밀도 1.6 t/m³을 목표로 3가지 Series 배합을 설계했음. (Series 1 - 기준배합, Series 2 - 플라이애시 및 경량굵은골재 5종, Series 3 - 플라이애시 + 경량잔골재 및 경량굵은골재 5종)

(3.3) 실험방법

(3.3.1) 골재의 물리적 성능평가 방법

□ 골재의 물성 평가

- 본 연구에서 사용된 골재는 굵은골재 및 잔골재로 나뉘어짐. 잔골재의 경우 부순잔골재(쇄사)와 경량잔골재 2종을 사용했으며, 굵은골재는 쇄석, 경량골재, 저회경량골재, 3DP 경량골재(금속), 3DP 경량골재(플라스틱) 5종 사용했음.
- 골재의 물리적 성능평가는 범용으로 사용하는 일반 하천골재 또는 부순골재의 물리적 성능을 각 종류별 경량골재 4종 경량골재, 저회경량골재, 3DP 경량골재(금속, 플라스틱)와 비교하여 콘크리트 골재로서의 품질관리를 목적으로 했음.
- 잔골재의 경우 KS F 2504 (잔골재), KS F 2529 (경량잔골재)에 의해 밀도 및 흡수율 시험을 진행했음.
- 굵은골재의 경우 KS F 2503 (굵은 골재), KS F 2533 (경량 굵은골재)에 의해 밀도 및 흡수율 시험을 진행했으며 KS F 2541에 따라 파쇄값 (aggregate crushing value, ACV)과 10 % 파쇄하중 (ten percent fines value, TFV)을 측정했음.



그림 88. 굵은골재의 파쇄시험 전경

(3.3.2) 콘크리트의 물리적 성능평가 방법

□ 워커빌리티(슬럼프 시험)

- 굳지 않은 콘크리트의 유동성 및 성형성, 재료분리 여부의 가능성을 알아보기 위하여 슬럼프를 측정했음. 슬럼프 시험은 배합직후 KS F 2402 “콘크리트의 슬럼프 시험방법”에 준하여 측정했음.



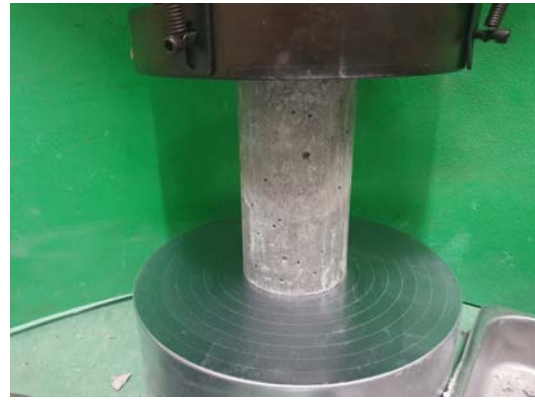
그림 89. 콘크리트 슬럼프 시험 전경

□ 압축강도

- 콘크리트의 압축강도 시험은 시험용 공시체 ($\phi 100 \times 200$ mm)를 제작하여 $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 양생수조에서 수중양생을 진행하고 각 재령 7일, 28일에 콘크리트의 압축강도를 측정했음. 콘크리트의 압축강도는 KS F 2405 “콘크리트의 압축강도 시험방법”에 준하여 측정했으며 만능 재료 시험기(U.T.M)를 활용했음.



(a) 만능재료시험기 (UTM)



(b) 압축강도 측정

그림 90. 콘크리트 압축강도 시험 전경

□ 콘크리트의 단위용적 질량

- 콘크리트의 단위용적 질량은 KS F 2409 “굳지 않은 콘크리트의 단위용적 질량 및 공기량 시험방법(질량방법)”에 의하여 측정했음.

$$M = \frac{W}{V}$$

(식 1)

여기서, M : 콘크리트의 단위용적 질량 (kg/m^3), W : 용기 중의 시료의 질량 (kg), V : 용기의 용적(m^3)



그림 91. 콘크리트의 단위 용적 질량 시험 전경

(4.) 실험결과

(4.1) 3D 골재의 물리적 성능평가

(4.1.1) 굵은골재의 파쇄실험 결과

- 굵은 골재의 파쇄값은 KS F 2541에 따라 골재 파쇄 값(Aggregate crushing Value , ACV), 10% 파쇄하중(Ten percent fines Value, TFV)으로 표 13에 나타냈으며, 파쇄 값 측정후 모습을 아래 그림에 나타냈음.
- 굵은골재의 파쇄율을 측정하기 위해 최대하중 400 KN를 가했을 때 일반부순골재(Natural crushed aggregate, 이하 NCA), 바텀애시 및 준설토 기반 인공경량골재(Artificial lightweight aggregates , 이하 ALA), 저회경량골재(Bottom ash aggregate, 이하 BAA), 금속-3D 프린팅 격자구조 경량골재(Steel-3D Printed lattice lightweight aggregate), 이하 S3DLLA), 금속-3D 프린팅 격자구조 경량골재(Plastic-3D Printed lattice lightweight aggregate), 이하 P3DLLA)의 파쇄값은 각각 16.1 %, 39.3 %, 43.1 %, 2.9 %, 1 % 로 나타남.
- NCA, S3DLLA, P3DLLA를 제외한 ALA, BAA에서는 KS F 2541에서 규정된 파쇄율 30% 보다 높게 측정되어 TFV 재시험을 진행했음. TFV 실험결과 ALA, BA의 10 % 최대하중은 182.0 KN, 115.2 KN으로 측정되었음.
- 그림 92, 93을 보았을 때 (a), (b), (c) 의 경우 하중에 하중에 의하여 골재가 파쇄되는 반면 3D 프린터를 활용해 출력된 골재 (d), (e)에서는 골재가 하중 에너지를 흡수하여 파쇄되지 않는 현상이 관찰되었음.



(a) NCA

(b) ALA



(c) BAA

(d) S3DLLA

(e) P3DLLA

그림 92. 굵은골재 파쇄율 실험 후 모습

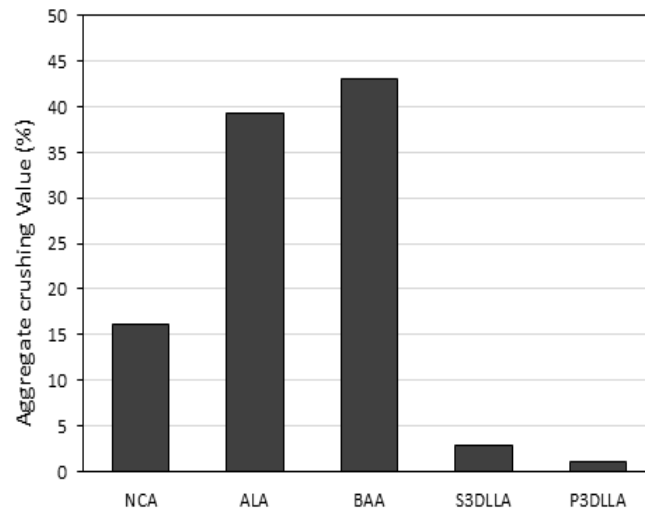


그림 93. 굵은골재 파쇄값 (최대하중 400 kN)

표 76. 굵은골재의 파쇄율 측정 결과

구분	표준시험		파쇄율 30% 이상시 재측정 ^{*1}
	최대하중 (kN)	Aggregate crushing Value , ACV (%)	10% 잔골재 분리 하중 (kN)
NCA	400.6	16.1	—
ALA	400.2	39.3	182.0
BAA	400.3	43.1	115.2
S3DLLA	400.6	2.9	—
P3DLLA	400.1	1.0	—

^{*1} 다공성 KS F 2541 6절 f)에서 다공질 골재인 경우 24mm로 하중을 가한다. (재하 깊이 24mm의 하중임)

□ KS F 2541에 준하여 굵은골재의 파쇄율 실험결과 NCA, ALA, BAA의 경우 최대하중 400kN을 가했을 때 파쇄된 골재량(2.36 mm 이하)에 따라 ACV가 각각 16.1 %, 39.3 %, 43.1 % 측정되었지만 S3DLLA, P3DLLA의 경우 NCA, ALA, BAA 대비 매우 낮은 파쇄율이 발생함.

(4.2) 경량콘크리트의 물리적 성능평가

(4.2.1) 슬럼프 시험

- 제조된 콘크리트의 작업성을 평가하기 위해 슬럼프 시험을 실시했다. 슬럼프 시험 평가는 배합직후 측정되었으며 배합마다 측정했으며, 결과값은 표 77과 나타냈음.
- Series 1에서 S1-Plain 배합을 기준으로 슬럼프는 180 mm로 측정되었으며 경량골재를 사용한 S1-LW배합 및 S1-BA 배합에서도 Plain 배합과 동등한 수준인 180 mm ~ 185 mm 수준으로 측정되었음.
- Series 2 배합은 S1 배합에 플라이애시를 20% 치환한 배합으로 S2-Plain, S2-LW, S2-BA 배합에서 초기 슬럼프 값이 약간 증가하는 경향을 보였으나 3D 경량굵은골재(금속 및 플라스틱)를 사용했을 때 약 60%의 슬럼프가 감소하는 것으로 나타남. 3D 경량 굵은골재의 경우 정사각형의 각진 입형을 갖기 때문으로 사료됨.
- Ssries 3 배합의 경우 3D 경량 굵은골재를 사용했을 때 기준배합(BA 배합) 보다 슬럼프가 약 80 mm 감소해(약 66%) Series 2와 같은 경향을 나타냈음.

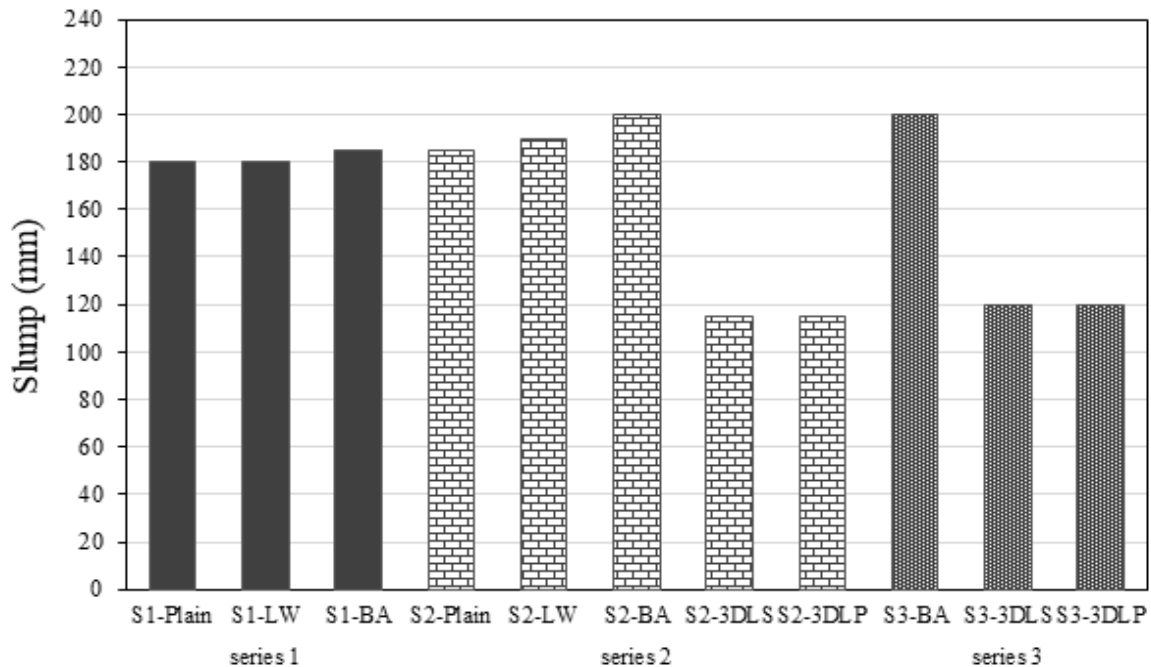


그림 94. 슬럼프 실험 결과

- 콘크리트의 슬럼프 실험결과 흡수율이 높은 경량골재를 사용한 LW 및 BA 배합의 경우 사전 침수(Pre-wetting)를 거치고 표면을 닦아 냈지만 남아있던 표면수가 배합에 영향을 미쳐 슬럼프가 약 5 mm ~ 10 mm 증가한 것으로 판단됨.
- 반면 3D 경량골재를 활용한 배합에서는 흡수율이 없는 골재를 사용했지만 골재의 입형이 각진 정육면체로 되어 있기 때문에 콘크리트의 슬럼프가 감소한 것으로 사료됨.



(a) S1-Plain



(b) S1-LW



(c) S1-BA

그림 95. Series 1 슬럼프 실험 결과



(a) S2-Plain



(b) S2-LW



(c) S2-BA



(d) S2-3DLS



(e) S2-3DLP

그림 96. Series 2 슬럼프 실험 결과



(a) S3-Plain



(b) S3-3DLS



(c) S3-3DLP

그림 97. Series 3 슬럼프 실험 결과

표 77. 굳지않은 콘크리트의 슬럼프 실험 결과

구분		Slump (mm)
Series 1	S1-Plain	180
	S1-LW	180
	S1-BA	185
Series 2	S2-Plain	185
	S2-LW	190
	S2-BA	200
	S2-3DLS	115
	S2-3DLP	115
Series 3	S3-BA	200
	S3-3DLS	120
	S3-3DLP	120

(4.2.2) 압축강도

- 일반골재 및 경량골재, 저회경량골재 치환에 따른 콘크리트 압축강도 시험 결과임. 본 연구를 진행하기전 목표강도를 재령 28일 기준 45 MPa로 설정했음. 굵은골재를 변수로한 (Series 1) 압축강도는 재령 7일에서 S1-Plain이 35.9 MPa의 압축강도가 측정되었으며, S1-LW가 8.2% 감소한 33.0 MPa, S2-BA가 10.7% 감소한 32.1 MPa 의 압축강도가 발현됨.
- 이후 재령 28일에서 각각 47.4 MPa, 40.7 MPa, 37.3MPa로 경량골재가 치환되었을 때 S1-Plain 대비 14.0 %(S1-LW), 21.2%(S1-BA) 감소한 결과가 나타남. 본 연구의 목표 강도가 45 MPa 일 때 목표치에 도달한 배합은 S1-Plain 배합임.

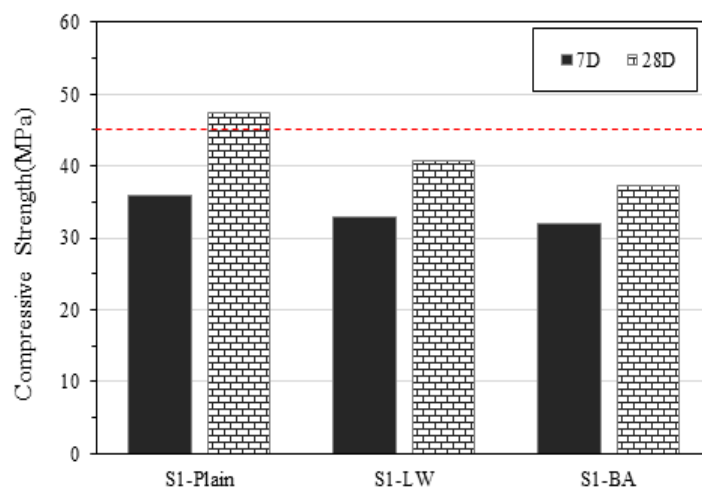


그림 98. Series 1 압축강도 실험 결과

- 콘크리트의 단위중량을 감소시키기 위해 Fly ash를 20% 치환한 배합임(Series 2). Series 1에서 기준 강도를 설정하고 3D 프린터를 활용해 출력한 인공 경량골재 2종류(금속, 플라스틱)를 추가한 배합을 진행했음. 압축강도 실험결과 재령 7일에서 플라이애시를 20% 치환한 S2-Plain의 압축강도는 34.62

MPa로 측정되었으며 S2-LW 및 S2-BA는 S2-Plain 보다 5.7%, 12.2% 하회한 33.87 MPa, 31.53 MPa로 측정됨. 하지만 3D 프린터로 출력한 인공경량골재의 경우 S2-Plain의 압축강도보다 1.9%, 0.4% 상회한 35.23 MPa, 35.76MPa의 압축강도가 측정되었음.

- 이후 재령 28일의 압축강도의 경향도 재령 7일과 동일했음. Series 2에서 압축강도시험 결과값을 보았을 때 본 연구에서 설정한 목표 압축강도 45MPa를 상회한 배합은 기준배합을 제외한 S2-3DLS, S2-3DLP로 나타났음.

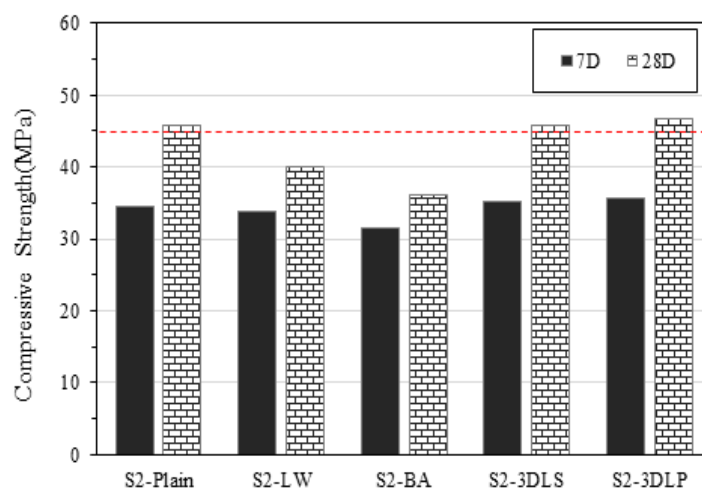


그림 99. Series 2 압축강도 실험 결과

- 배합당 단위중량의 감소를 목적으로 사용된 잔골재(쇄사)를 경량잔골재로 치환한 압축강도 시험결과임. 재령 7일 압축강도 실험결과 저회경량골재를 치환한 S3-BA에서 S2-BA보다 약 14.4% 감소한 27.5 MPa의 압축강도가 측정되었으나 S3-3DLS, S3-3DLP의 경우 Series 2와 동등한 압축강도가 측정됨. 이후 재령 28일에서는 S3-3DLS, S3-3DLP에서 목표 압축강도 45MPa를 상회한 47.7 MPa, 45.2 MPa가 측정되었음.

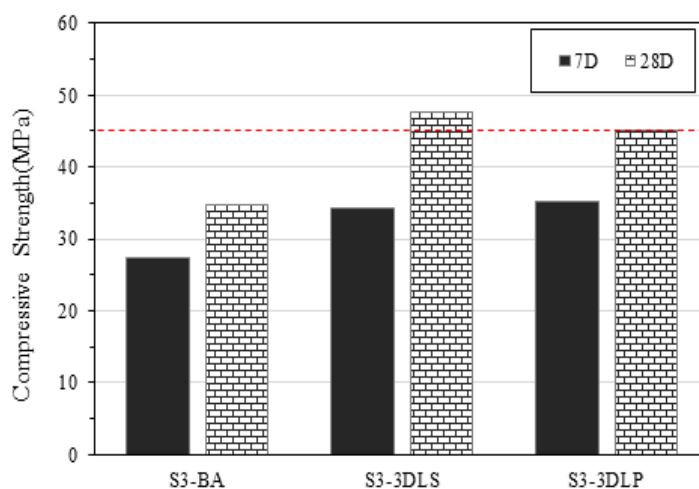


그림 100. Series 3 압축강도 실험 결과

- Series 2 및 Series 3의 BA, 3DLS, 3DLP 배합의 재령 28일 압축강도를 비교하였을 때 Series 2 대비 각각 -3.5%, +4.1%, -3.2 %의 차이가 발생함으로 바텀애시 및 준설토기반 경량잔골재를 사용하였을 때 압축강도에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 사료됨.

- 따라서, Series 1~3의 압축강도 시험결과를 종합했을 때 일반 소성공정을 거친 경량골재, 저회 경량골재의 경우 압축강도가 감소하는 결과가 나타났으나, 3D 프린터로 제작된 3D 인공경량골재의 경우 Plain 배합과 동등한 압축강도를 갖는 것으로 확인됨.
- 그림 101은 5가지 경량굵은골재를 사용하고 압축강도 측정이후 파괴된 모습을 나타냈다. (a) 쇄석, (b) 일반경량골재, (c) 저회경량골재를 사용한 콘크리트의 경우 콘크리트에 파괴하중을 제하했을 때 골재가 파괴되는 형상을 보이는 반면 (d) 3D 경량골재-금속, (e) 3D 경량골재-플라스틱을 사용한 배합에서는 골재가 파괴되지 않는 현상이 발생했음.

표 78 압축강도 측정 결과

구분		압축강도 (MPa)							
		재령 7일				재령 28일			
		1	2	3	평균	1	2	3	평균
Series 1	S1-Plain	36.25	35.81	35.65	35.90	47.28	47.11	47.68	47.36
	S1-LW	34.43	33.69	30.80	32.97	40.33	41.30	40.58	40.74
	S1-BA	31.31	32.37	32.55	32.08	36.83	37.42	37.66	37.30
Series 2	S2-Plain	34.80	34.91	34.15	34.62	46.52	45.72	45.44	45.89
	S2-LW	34.20	34.20	33.20	33.87	40.42	39.77	39.68	39.96
	S2-BA	31.90	31.30	31.40	31.53	36.76	35.57	35.72	36.02
	S2-3DLP	35.12	35.39	35.17	35.23	45.65	46.05	45.39	45.70
	S2-3DLS	35.08	36.90	35.30	35.76	46.29	46.73	47.05	46.69
Series 3	S3-BA	27.56	27.11	27.70	27.46	35.34	34.97	34.05	34.79
	S3-3DLS	31.65	35.82	35.60	34.36	47.69	49.77	45.62	47.69
	S3-3DLP	36.18	33.63	35.72	35.18	45.64	44.94	45.08	45.22



(a) Plain(NCA)

(b) LW(ALA)



(c) BA(BAA)

(d) 3DLS(S3DLLA)



(e) 3DLS(P3DLLA)

그림 101. 경량골재 5종 압축강도 측정후 내부 굵은골재의 파괴 양상

- 바텀애시 및 준설토기반 경량골재 콘크리트(LW), 바텀애시 경량골재 콘크리트(BA)를 기준배합(Plain, 45 MPa 급) 과 재령 28일 압축강도를 비교했을 때 각각 -12.9 %, -21.5% 감소한 결과가 측정되어 목표강도에 도달하지 못함.
- 3D 프린팅 격자구조 인공경량골재(금속, 플라스틱) 콘크리트를 비교한 결과 3DLS(금속)에 약 3.9% 상회한 47.69 MPa,, 3DLP(플라스틱)에서 약 -1.5% 감소한 45.22 MPa 의 압축강도가 발현되어 목표강도 45 MPa를 상회함.

(4.2.3) 콘크리트 밀도

- 아래는 Series 1 & 2 & 3 배합마다 콘크리트 밀도 측정 결과값을 그래프로 표현한 것임. 본 연구의 목표 밀도는 1.60 t/m^3 이며 Series 1 배합 S1-Plain, S1-LW, S1-BA의 콘크리트 단위중량은 2.235 t/m^3 , 1.834 t/m^3 , 1.981 t/m^3 로 측정되었음.
- 콘크리트의 밀도를 감소시키기 위해 전체 결합재량에서 플라이애시 20%를 치환해 Series 2 배합을 진행했으며, Series 2의 콘크리트 밀도를 측정했을 때 S2-Plain, S2-LW, S2-BA, S2-3DLS, S2-3DLP에서 각각 2.204 t/m^3 , 1.790 t/m^3 , 1.809 t/m^3 , 1.949 t/m^3 , 1.726 t/m^3 의 콘크리트 밀도가 측정되었음.
- Series 2에서 플라이애시를 치환하여 콘크리트의 밀도 값을 감소시켰지만 목표했던 콘크리트 밀도 1.6 t/m^3 를 확보하지 못해 부순잔골재(쇄사)를 경량 잔골재로 전량 치환하여 콘크리트를 제조했음(Series 3). 재령 28일 콘크리트의 밀도 측정결과 S3-BA, S3-3DLS, S3-3DLP에서 각각 1.732 t/m^3 , 1.796 t/m^3 , 1.605 t/m^3 으로 측정되었음.
- 따라서, 3D 인공경량골재를 활용한 콘크리트를 제조했을 때 일반골재, 준설토 및 바텀애시 기반 경량골재, 바텀애시경량골재 대비 콘크리트의 밀도 감소가 용이하다는 것을 확인할 수 있었음.

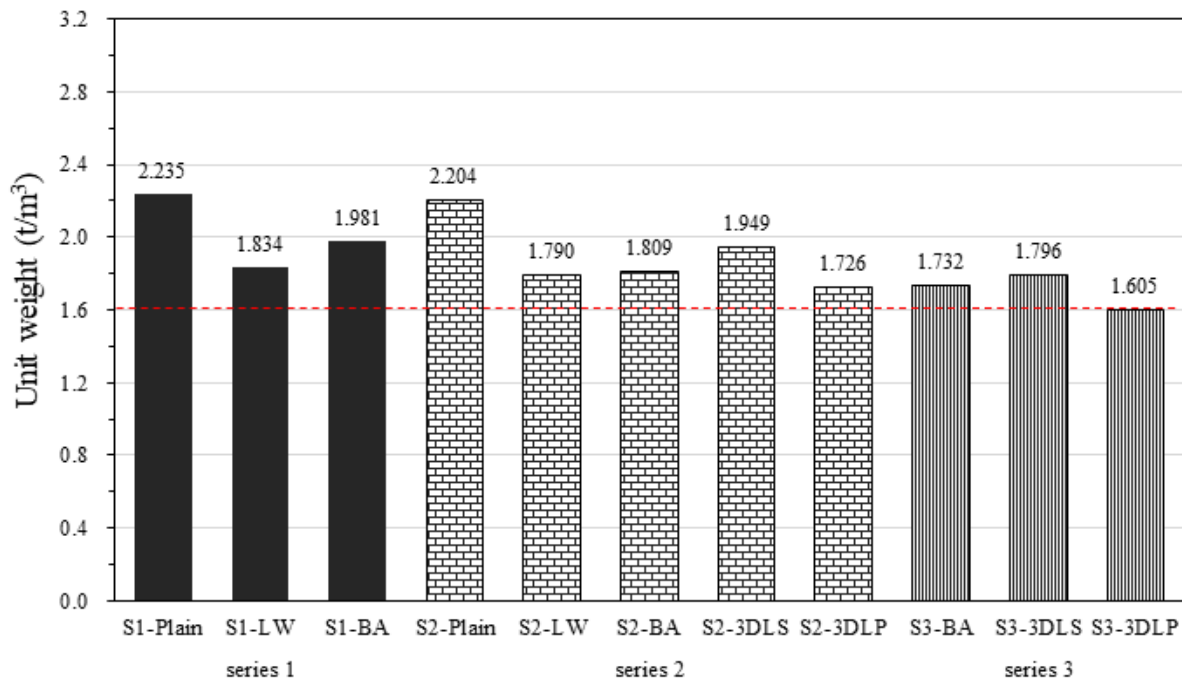


그림 102. 콘크리트의 밀도 측정결과

- 기준배합(Plain) 대비 단위중량을 감소시키기 위해 4종류의 경량골재를 사용한 결과 3D 프린팅 격자구조 경량골재(플라스틱)를 사용했을 때 콘크리트의 단위중량 감소가 큰 것으로 나타남.
- LW, BA, 3DLS배합에 사용된 경량골재의 밀도가 약 $(1.60 \sim 1.65) \text{ g/cm}^3$ 인 것에 비해 3DLP 배합에 사용된 경량골재의 밀도는 약 1.18 g/cm^3 으로 콘크리트 단위중량 감소에 큰 기여를 한 것으로 판단됨.

(5.) 결론

1) 3D 경량골재 제조

- 3D 프린터로 출력된 격자구조 인공경량골재(3DLLA, 금속 및 플라스틱)를 제조하고 일반골재(NCA) 바텀애시 및 준설토 기반 경량골재(ALA), 바텀애시 경량골재(BAA)와 밀도, 흡수율, 파쇄율을 비교했을 때 다음과 같은 결론을 얻음.
- 3D 격자구조 인공경량골재의 밀도는 플라스틱의 경우 1.18g/cm^3 금속의 경우 1.65 g/cm^3 으로 일반골재(NCA)보다 상당히 낮은 밀도를 갖는 것으로 나타남. 따라서 콘크리트에 3DLLA를 적용했을 때 단위중량을 크게 감소시킬수 있을것으로 기대됨.
- 3DLLA를 일반골재 외 경량골재 2종과 흡수율을 비교했을 때 3DLLA에서는 약 0.1 % 의 흡수율을 갖기 때문에 골재 흡수율에 의한 유동성 및 압축강도에 미치는 영향이 없어 콘크리트 품질관리에 용이할것으로 기대됨.
- 또한 골재 자체 파쇄율을 측정했을 때 3D 격자구조 인공경량골재의 경우 NCA, ALA, BAA 대비 파쇄율이 매우 낮기 때문에 외력에 의한 에너지 흡수율이 높아 콘크리트를 제조했을 시 콘크리트 배합에서 기준배합과 압축강도가 동일하거나 상회할것으로 추측됨.

표 79. 사용된 경량골재 성능표

Type	Aggregate Crushing Value (%)	Density (g/cm^3)	Fineness modulus	absorption ratio of aggregate (%)
NCA	16.1	2.65	6.78	0.9
ALA	39.3	1.65	7.11	9.1
BAA	43.1	1.60	7.23	10.1
S3DLLA	2.9	1.60	—	0.1
P3DLLA	1.0	1.18	—	0.1

2) 3D 경량골재 콘크리트 제조

- 본 연구에서는 45MPa 급 일반콘크리트에서 3D 프린터로 출력된 격자구조 인공경량골재를 사용했을 때 강도 저하없이 밀도 1.6t/m^3 의 콘크리트 제조를 목표로 했음.
- 3D 격자구조 인공경량골재(금속 및 플라스틱)을 사용하여 콘크리트 배합을 진행했을 때 일반콘크리트(Plain)배합 및 바텀애시 및 준설토 기반 경량골재 콘크리트(LW), 바텀애시 경량골재 콘크리트(BA) 대비 콘크리트 밀도가 감소하여 단위중량 감소에 효과적으로 판단됨.
 - P3DLLA 골재, 경량잔골재, 결합재량 조절(FA 20% 치환) 했을 때 콘크리트의 밀도는 1.605 t/m^3 수준으로 목표했던 콘크리트 밀도 1.6 t/m^3 에 도달하였음.
 - P3DLLA, S3DLLA 골재를 사용했을 때 Plain 배합과 동일하거나 소폭 하회한 압축강도가 발현되었으나 목표 압축강도 45 MPa를 상회하여 목표 수준에 도달했음.
 - 따라서 3D 프린터로 출력된 격자구조 경량골재를 사용했을 때 일반콘크리트 대비 압축강도 감소 없이 상대적으로 낮은 단위중량을 갖는 콘크리트를 제조할 수 있음.

표 80. 제조된 콘크리트의 성능표

구분		Compressive strength 28days (MPa)	Density (t/m^3)	Slump (mm)
Series 1	S1-Plain	47.36	2.235	180
	S1-LW	40.74	1.834	180
	S1-BA	37.30	1.981	185
Series 2	S2-Plain	45.89	2.204	185
	S2-LW	39.96	1.790	190
	S2-BA	36.02	1.809	200
	S2-3DLS	45.70	1.949	115
	S2-3DLP	46.69	1.726	115
Series 3	S3-BA	34.79	1.732	200
	S3-3DLS	47.69	1.796	120
	S3-3DLP	45.22	1.605	120

3) 3D 격자구조 인공경량골재 및 일반 경량콘크리트 비교분석

- 3D 프린팅 격자구조 인공경량골재(3D printed lattice lightweight aggregate, 3DLLA) 콘크리트와 바텀애시 및 준설토기반 경량골재, 바텀애시 경량골재를 활용한 콘크리트의 물리적 성능과 경제성을 비교했음.
- 바텀애시 및 준설토기반 경량골재 콘크리트(LW), 바텀애시 경량골재 콘크리트(BA)를 기준배합(Plain, 45 MPa 급) 과 재령 28일 압축강도를 비교했을 때 각각 -12.9 %, -21.5% 감소한 결과가 나타났음, 하지만 3DLLA(금속, 플라스틱) 콘크리트를 비교한 결과 3DLS(금속)에 약 3.9% 상회한 47.69 MPa, 3DLP(플라스틱)에서 약 -1.5% 감소한 45.22 MPa 의 압축강도가 발현되었음.
 - 기준배합(Plain) 대비 단위중량을 감소시키기 위해 4종류의 경량골재를 사용한 결과 3DLLA(플라스틱)를 사용했을 때 콘크리트의 단위중량 감소가 큰 것으로 나타남. LW, BA, 3DLS배합에 사용된 경량골재의 밀도가 약 (1.60 ~ 1.65) g/cm³인 것에 비해 3DLP 배합에 사용된 경량골재의 밀도는 약 1.18 g/cm³ 으로 콘크리트 단위중량 감소에 큰 기여를 한 것으로 판단됨.
 - 콘크리트의 슬럼프 실험결과 흡수율이 높은 경량골재를 사용한 LW 및 BA 배합의 경우 사전 침수(Pre-wetting)를 거치고 표면을 닦아 냈지만 남아있던 표면수가 배합에 영향을 미쳐 슬럼프가 약 5 mm ~ 10 mm 증가한 것으로 판단됨. 반면 3DLLA를 활용한 배합은 흡수율이 없는 골재를 사용했지만 골재의 입형이 각진 정육면체로 되어 있기 때문에 콘크리트의 슬럼프가 감소한 것으로 사료됨.
 - 5종류의 굵은 골재로 콘크리트를 제조했을시 공시체 1개당 가격은 표 16에 나타냈음. 산출된 가격은 2020년 기준 원재료 가격을 기준으로 제시했음.

표 81. 경량골재 활용 콘크리트 성능 비교표

구분			3D 격자구조 인공경량골재 활용 콘크리트 VS 일반경량콘크리트 성능비교				
배합비			W : 180 kg/m ³ , Binder : 450 kg/m ³ , S/a : 45 % Air : 4.5 %				
			Plain (Series 2)	LW (Series 2)	BA (Series 3)	3DLS (Series 3)	3DLP (Series 3)
물리적 성능	품질 성능	압축강도 (MPa)	45.89	39.96	36.02	47.69	45.22
		Plain 대비 (%)	-	-12.9	-21.5	+3.9	-1.5
	밀도	단위중량 (t/m ³)	2.204	1.790	1.732	1.796	1.605
		Plain 대비 (t/m ³)	-	-0.41	-0.39	-0.40	-0.59
		굵은골재 밀도 (g/cm ³)	2.60	1.65	1.60	1.60	1.18
	작업 성	슬럼프 (mm)	185	190	200	120	120
		Plain 대비 (mm)	-	+5	+15	-65	-65
경제 성	(Φ 100 × 200 mm, 1ea 원)		94.69	175.23	155.30	97,292	48,689

4) 상용화 가능성 검토

- 향후, 격자구조체 및 3D경량골재 상용화를 위하여 다음과 같이 검토함

표 82 상용화 방안 제시

	상용화 방안
[상용화 대안1] 3D 인공경량 골재	[3D프린팅 기술동향 분석을 통한 상용화 가능성 검증] • 금속 3D프린팅 시장동향 분석 : 금속 3D프린팅 특허만료 및 소재가격의 지속적 하락으로, 첨단 항공우주 응용 분야에서 일반적인 소비자 제품으로 기술 적용이 진행될 것으로 예상함. 건설 부재/소재 분야에서도 3D프린팅 기술적용을 위한 연구가 계속될 것으로 예측됨. : Roland Berger, 2019에 따르면 금속 분말 소재 가격이 2023년에는 2013년을 기준으로 1/3 정도로 떨어질 것으로 예상하고 있으며, 소재 가격의 하락이 메탈 3D프린팅 산업의 규모를 크게 확대시키는 데 기여할 것으로 전망하고 있음 (2013년 90 eur/kg → 2023년 30 eur/kg) : 독일의 프라운호퍼(Fraunhofer) 연구소가 보유하고 있는 금속 3D프린팅 기술이 2016년 12월로 특허가 만료됨. 이에 따라 가격경쟁력을 갖춘 금속 3D프린터가 급속히 보급될 것으로 보이며, 시제품 생산 수준에 머물렀던 금속 3D프린터는 향후 자동차와 항공기, 선박, 의료용 부품 등 제조업 전반으로 빠르게 확산될 것으로 전망함. • 3D프린팅 기반 격자구조체 설계/제조 기술동향 분석 : 격자구조체는 국내외 초기연구단계로서, 본 연구에서는 격자구조체 설계를 위한 DB, 자동화S/W 개발 등 상용화를 위한 원천기술을 달성함. 향후 격자구조체 설계/제조 분야에서 유효한 자료로써 활용될 것으로 판단됨. : 격자구조체는 일반적으로 특정 공간에 단위셀을 반복하여 구성함으로 단위셀 설계가 중요하지만, 단위셀 설계자동화 및 오픈라이브러리 등은 국내 전무한 실정임. • 종합의견 : 본 연구에서는 금속, 플라스틱 소재 기반의 격자구조체를 건설 부재/소재에 적용하기 위한 기반연구를 수행했음. 지속적인 연구 및 상용제품 도출(고강도경량 콘크리트, 고강도 경량 비정형 조인트 부재 등) 등을 통해 상용화가 가능할 것으로 판단됨. : 본 연구에서는 격자구조체를 경량인공골재 및 이를 활용한 경량고강도 콘크리트(1.6 t/m³, 45 MPa)에 적용했음. 기술적 가능성을 확인했으며, 아래와 같이 경제성 보완 등을 통해서 상용화에 근접할 것으로 사료됨
	[기존경량골재 대비 3D 인공경량골재의 경제성 보완을 통한 상용화 가능성 검증] • 압축강도 45 MPa급 배합에서 강도저하없이 밀도를 1.7 t/m³로 저감할 수 있었다. 이는 3D 프린팅 격자구조 경량골재가 경량콘크리트용 골재로 사용할 수 있는 가능성을 시사함. • 특히, 대량생산 체계를 갖출 경우 궁극적으로 굵은 골재의 안정적 수급과 표준적인 품질 확보라는 건설업계의 당면 과제 해결에도 일조할 수 있을 것으로 사료됨. • 그러나, 본 연구는 연구실 단위로 공시체를 제조했으며, 생산단가는 Con_NCA, LWC_ALA, LWC_BA 및 LWC_3DLLA가 95 원, 175 원, 155 원 및 48,700 원이 소요됐다. 따라서, 단, 안정적 수급을 위한 대량 생산 및 경제성 검토가 반드시 필요함. • 추가적으로, 본 연구에서 수행한 binder jetting 방식 외에 FDM(Fused deposition modeling) 방식 등의 다변화를 통해 생산 단가 절감 등이 가능할 것으로 사료됨. : FDM 방식 + PLA 소재의 경우, 소재단가를 1/10 수준으로 저감할 수 있음. 그러나, 형상구현성이 한계가 있기 때문에, 격자구조를 대체할 수 있는 설계검토가 필요함. • 건물을 시공하는 과정에서 보통콘크리트 부재를 경량콘크리트 부재로 대체했을 때 공사비는 절감되며, 건물의 규모가 크면 클수록 절감 액수는 더욱더 증가함. 또한, 3D 프린터를 사용한 대량 생산체계를 갖출 경우, 굵은 골재의 생산비용은 지금보다 절감될 수 있음. 따라서 3D 프린터로 제작한 굵은 골재의 경제성은 향후 실증적 차원에서 심도 있는 분석이 필요함.

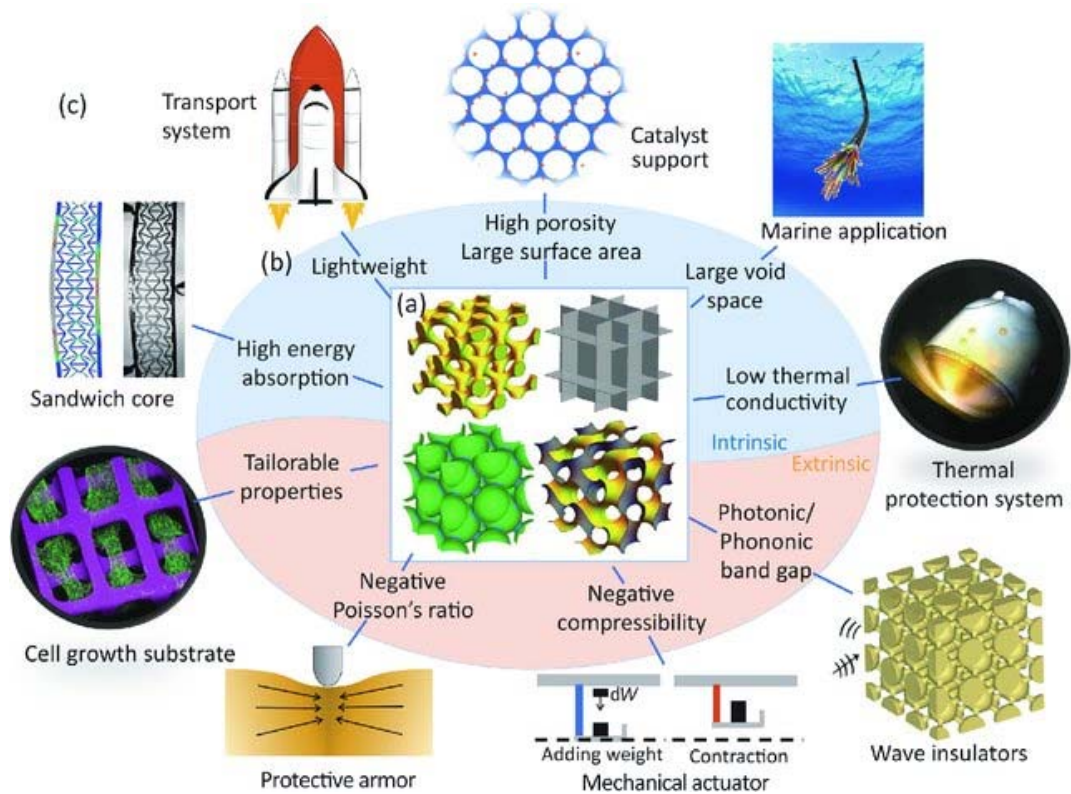
[3D프린팅 기술동향 분석을 통한 상용화 가능성 검증]

- 본 연구는 격자구조체 설계/제조(아래 그림(a)) 및 격자구조체 특성검토(아래 그림(b))에 해당하는 기반연구임.

: 격자구조체는 경량성, 에너지흡수능, 열관리능을 갖는 다기능성 소재로 미래 잠재적인 수요가 기대되고 있으며, 산업부품의 새로운 패러다임을 이끌어낼 수 있을 것으로 판단됨.

- 격자구조체 활용방안으로 본 연구에서는 3D인공경량골재 적용성을 검토하였음. 향후, 격자구조체 특성 및 활용방안 제시 등의 지속적 연구를 통해 '격자구조체 상용화' 달성이 필요함.

[상용화
대안2]
격자구조
체 고도화



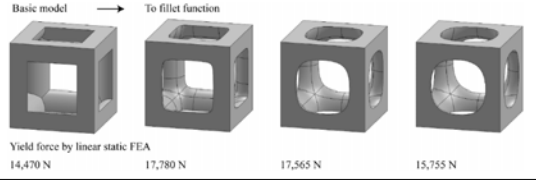
(a) structures, (b) properties, and (c) applications

permission from Kolewe et al., Adv. Mater. 25, 4459 (2013). Copyright 2013 Wiley

5) 연구 활성화를 위한 보완 사항

- 본 과제 관련 기술의 연속성 확보 및 성과물 활성화를 위한 연구 한계성 분석 및 보완 사항은 다음과 같음. 다음 보완 사항은 계속 연구를 진행할 계획임.

표 83 한계성 및 보완사항

	본 연구 한계성	향후 보완사항
[핵심1] 밀도제어형 단위셀 설계기술	- 단위셀 모서리부 최적화 : 격자구조체 집중하중은 단위셀 모서리부에서 발생하는 것을 확인함. - 따라서, 모서리부 형상최적화를 통해 구조체의 기계적 특성 고도화가 가능할 것으로 예상됨.	- 단위셀 모서리부 형상 최적화에 따른 축방향 저항성 향상 메카니즘 수립 - S/W 업데이트 필요 
[핵심2] SLM 3DP 출력 최적화	특정 장비에 한해서 출력조건 최적화 수립(독일 EOS사의 M290 장비)	대표적 출력장비에 따른 출력조건 최적화 DB구축 및 공유
[핵심3] 공극포화 및 표면 코팅 기술	기능성 부여 필요	기능성 내부충진재 개발 확대 검토
[핵심4] SLM 3DP 인공경량골재 활용 콘크리트 배합	- 골재 물리적 특성 - 골재크기 : 10×10×10 mm 및 20×20×20 mm 정육면체 형상 제조 - 골재입도(조립률) : 10×10×10 mm 및 20×20×20 mm 정육면체 형상에 한정하여 입도분포 확보에 한계	- 골재 물리적 특성 - 골재크기 : 재료분리, 작업성(워커빌리티) 확보를 위해 구형(球形) 설계·제조가 필요함. 추후, boolean 기능 자동화 및 형상최적화 검토 - 골재입도(조립률) : 3D프린팅 인공경량골재 입도 다각화를 통해 안정적인 조립률 확보 검토 - 생산비용 절감 방안 강구 - 출력방식/소재 다각화 검토를 통해 생산비용 절감 강구 (FDM방식/PLA소재 등)
	3D골재 혼입 경량콘크리트 - 비중 1.7 t/m³, 압축강도 45 MPa 급 달성에 한정됨	3D골재 혼입 경량콘크리트 - 압축강도 45 MPa 초과 초고강도경량콘크리트 적용성 검토 필요
종합	격자구조체 활용방안(3D경량골재, 비정형부재 연결조인트) 제시	- 격자구조체를 활용한 다기능성 소재/부재 개발로의 연구확대 필요 - 국외 선진 동향 계속 관찰 필요 - 격자구조체 기반 사용자 맞춤형 건축물 내외장재, 경량고강도 모빌리티 구체 등으로 활용방안 모색 필요

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

○ [핵심기술1] 밀도제어형 단위셀 설계기술

성과목표	목표치	달성치	검증방법
A-1-① 단위셀 및 격자구조체 설계 문헌조사	1건	1건	보고서유무
A-1-② 격자구조별 Data Sheet	1건	1건	Data Sheet 유무
A-1-③ 단위셀 및 격자구조 설계프로세스정립	1건	1건	전문가검토의견서

○ [핵심기술2] SLM 3DP 출력 최적화

성과목표	목표치	달성치	검증방법
A-2-① SLM 3DP 출력 최적화 - 소재	1건	1건	보고서 유무
A-2-② SLM 3DP 출력 최적화 - 영향인자	1건	1건	보고서 유무

○ [핵심기술3] 공극포화 및 표면 코팅 기술

성과목표	목표치	달성치	검증방법
A-3-① SLM 3DP 경량골재 밀도제어	1.0-1.5 g/cm ³ (±5%)	1.0-2.1 g/cm ³ (±5%)	공인성적서 (KS D 0033 준)
A-3-② SLM 3DP 경량골재 흡수율	5% 이하	0.2% 이하	공인성적서 (KS D 2503 준)
A-3-③ SLM 3DP 경량골재 파쇄값(%)	30%이하	3%이하	공인성적서 (KS D 2541 준)
B-1-① 격자구조체 공극포화 채움재 구성	1건	1건	보고서유무
B-2-① 격자구조체 공극포화 채움재 제조 기술 최적	1건	1건	보고서유무

○ [핵심기술4] SLM 3DP 인공경량골재 활용 콘크리트 배합

성과목표	목표치	달성치	검증방법
B-2-① 경량콘크리트 최적 배합 설계	1건	1건	배합 선정 보고서
B-2-② 단위용적질량 (t/m ³)	1.6 t/m ³ 이하	1.6 t/m ³	공인성적서
B-2-③ 압축강도 (MPa)	45 MPa 이상	47.7 MPa	공인성적서
B-2-④ 일반경량골재 사용 경량콘크리트 비교분석 보고서	1건	1건	보고서유무/ 전문가검토의견서

(2) 정량적 연구개발성과

○ SCI 1건, 비SCI 4건

- [SCI] Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements, Materials, Vol.15(1), 2022
- [비SCI] 금속 적층 제조 격자 구조체의 공극 충전용 부착력 증진 반응성 아크릴 화합물에 대한 실험적 연구, 한국구조물진단유지관리공학회, Vol.24, No.5, pp.143-149, 2020
- [비SCI] 상대 밀도에 따른 금속 적층 제조 격자 구조체의 기계적 특성, 한국산학기술학회, Vol.22, No.6, pp.19-26, 2021
- [비SCI;ESCI] Mechanical properties of additive manufactured variable-density Kelvin lattice structures: a novel design method for Kelvin unit cells, Journal of Structural Integrity and Maintenance, Vol.7(1), pp.34-45, 2022
- [비SCI] 3D 프린팅 출력 인공 경량 골재를 사용한 압축강도 45 MPa급 경량콘크리트 개발, 한국산학기술학회, 2022, 게재예정

○ 국내특허 출원 2건, 등록 1건

- [출원] 10-2020-0138693, 금속 적층 제조 격자 구조체의 공극 충전용 반응성 아크릴 화합물 및 이를 구비하는 금속 적층 제조 격자 구조체
- [출원] 10-2021-0192013, 격자구조 경량골재를 구비하는 콘크리트 및 이의 제조방법
- [등록] 10-2232737, 금속 적층 제조 격자 구조체의 공극 충전용 반응성 아크릴 화합물 및 이를 구비하는 금속 적층 제조 격자 구조체

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

☐ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

○ SCI 1건, 비SCI 4건 (국내 비SCI급 논문 1건 심사중)

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements	Materials	박광민 (Kwang-Min, Park)	15(1)	스위스	MDPI	SCIE	2022.12.23	1996-1944	100%
2	금속 적층 제조 격자 구조체의 공극 충전용 부착력 증진 반응성 아크릴 화합물에 대한 실험적 연구	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	박광민	24(5)	한국	한국구조물진단유지관리공학회	비SCIE	2020.10	2234-6937	100%
3	상대 밀도에 따른 금속 적층 제조 격자 구조체의 기계적 특성	한국산학기술학회논문집	박광민	22(6)	한국	한국산학기술학회	비SCIE	2021.06	1975-4701	100%
4	Mechanical properties of additive manufactured variable-density Kelvin lattice structures: a novel design method for Kelvin unit cells	Journal of Structural Integrity and Maintenance	박광민 (Kwang-Min, Park)	7(1)	한국	Journal of Structural Integrity and Maintenance	비SCIE (ESCI등급)	2022.01.03	2470-5314	100%
5	3D 프린팅 출력 인공 경량 골재를 사용한 압축강도 45 MPa급 경량콘크리트 개발	한국산학기술학회논문집	박광민	게재예정	한국	한국구조물진단유지관리공학회	비SCIE	게재예정	2234-6937	100%

☐ 국내 및 국제 학술회의 발표 - 해당사항없음

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명

☐ 기술 요약 정보 - 해당사항없음

번호	연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용 여부	허용방식

☐ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호
1	2022	최종보고서	2021.01.14	-

☐ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 - 해당사항없음

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

☐ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

○ 국내특허 출원 2건, 등록 1건

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	출원	금속 적층 제조 격자 구조체의 공극 충진용 반응성 아크릴 화합물 및 이를 구비하는 금속 적층 제조 격자 구조체	한국	(재)한국건 설생활환 경시험연 구원	2020.10.2 3	10-2020- 0138693	-	-	-	1/1	-
2	출원	격자구조 경량골재를 구비하는 콘크리트 및 이의 제조방법	한국	(재)한국건 설생활환 경시험연 구원	2021.12.3 1	10-2021- 0192013	-	-	-	1/1	-
3	등록	금속 적층 제조 격자 구조체의 공극 충진용 반응성 아크릴 화합물 및 이를 구비하는 금속 적층 제조 격자 구조체	한국	-	-	-	(재)한국건 설생활환 경시험연 구원	2021.03.2 2	10-22327 37	1/1	-

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타

☐ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율

☐ 신기술 지정

번호	명칭	고시일	보호기간	지정번호

☐ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		

☐ 표준화

○ 국내표준

번호	인증구분	인증여부	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류	제안/인증일자

○ 국제표준

번호	표준화단계 구분	표준명	표준기구명	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식	제안자	표준화 번호	제안일자

[경제적 성과]

☐ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

☐ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)

☐ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)

☐ 사업화 투자실적

번호	연도	투자 자금 성격*	추가 연구개발 투자(천원)	설비 투자(천원)	기타 투자(천원)	합계(천원)

☐ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

☐ 매출 실적(누적)

번호	사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
			국내(천원)	국외(달러)		
합계						

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
		국외			
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획					
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)		현재	3년 후	5년 후
	수 출				

☐ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)		합계(명)
			yyyy년	yyyy년	
합계					

☐ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

☐ 비용 절감(누적)

번호	사업화명	발생 연도	산정방법	비용 절감액(천원)
합계				

☐ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수, 명)	기타
해당 연도							
기대 목표							

☐ 산업 지원(기술지도)

번호	내용	기간	참석 대상	장소	인원(명)

☐ 기술 무역

(단위 : 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	총 계약액	기 징수액	해당 연도	징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

☐ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

☐ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

☐ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

☐ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)

☐ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타

☐ 산업 기술 인력 양성

번호	연도	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

☐ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	연도	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비(천원)

☐ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

☐ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

☐ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

번호	구축 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

[그 밖의 성과](해당 시 작성)

○ 해당사항없음

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성)

○ 해당사항없음

2) 목표 달성 수준

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도(%)
○ A-1-① 단위셀 및 격자구조체 설계 문헌조사	○ 단위셀 및 격자구조체 설계 국외 문헌조사 완료 (1차년도)	100
○ A-1-② 격자구조별 Data Sheet	○ 단위셀(격자구조체) 설계를 위한 Data Sheet 1부 작성 (1차년도) - 20종 단위셀에 대해서 point 좌표값 및 상대밀도 산출 수식 도출	100
○ A-1-③ 단위셀 및 격자구조 설계프로세스정립	○ 단위셀 및 격자구조체 설계프로세스 정립(2차년도) - 설계편의성 및 성과확대를 위한 rhinoceros add-in 설계툴 개발 - 설계툴에 20개 단위셀 라이브러리 탑재 및 제공 - 전문가검토의견서 첨부	100
○ A-2-① SLM 3DP 출력 최적화 - 소재	○ 출력소재 도출 보고서 (1, 2차년도) - 금속계 : SLM 3D 프린팅 금속분말 물성 조사(국내외 자료 수집 및 정리) 및 SLM 3D 프린팅 적용 소재(안) 도출 - 플라스틱계 : MJF 3D 프린팅 플라스틱분말(PA12, PA12 등) 물성 조사 및 적용 소재(안) 도출	100
○ A-2-② SLM 3DP 출력 최적화 - 영향인자	○ 적용 소재 도출 및 출력조건 최적화 정립 보고서 (2차년도)	100
○ A-3-① SLM 3DP 경량골재 밀도제어	○ 출력물 밀도값 제어 (1, 2차년도) - 단위셀 상대밀도 조정에 따른 출력물 밀도제어 정립화 - 플라스틱(PA12) : 약 1.15 g/cm ³ 설계 - 금속계(AlSi10Mg) : 약 1.67 g/cm ³ 설계 - 공인성적서 제출	100
○ A-3-② SLM 3DP 경량골재 흡수율	○ 출력물 흡수율 목표값 달성 (1, 2차년도) - 흡수율 0.2% 이하 제조 - 공인성적서 제출	100
○ A-3-③ SLM 3DP 경량골재 파쇄값	○ 경량골재 적용을 위한 KS F 2541 골재파쇄값 목표 달성 - 2% 이하 (강성 확보 검증) - 공인성적서 제출	100
○ B-1-① 격자구조체 공극포화 채움재 구성	○ 격자구조체 채움재 도출 (1, 2차년도) - 밀도 1.0 g/cm ³ 급 - 고분자 화합물(반응성 아크릴 화합물 및 저점도 우레탄 화합물) 원료 배합 도출 - 시멘트계 첨가에 따른 부착향상 검토	100

○ B-2-① 격자구조체 공극포화 채움재 및 제조 기술 최적	○ 채움재 및 제조 기술 최적 (1, 2차년도) - 겔화시간 조정으로 채움방법 제안 완료	100
○ B-2-① 경량콘크리트 최적 배합 설계	○ 3D프린팅 경량골재 사용 경량콘크리트 배합 도출 1.6 t/m ³ , 45 MPa급 배합 설계 보고서 (2차년도)	100
○ B-2-② 단위용적질량 (t/m ³)	○ 목표값 1.6 t/m ³ 달성 (2차년도) - 1.6 t/m ³ 달성, 공인성적서 제출	100
○ B-2-③ 압축강도 (MPa)	○ 목표값 45 MPa 달성 (2차년도) - 47.7 MPa 달성, 공인성적서 제출	100
○ B-2-④ 일반경량골재 사용 경량콘크리트 비교분석 보고서	○ 일반경량골재 2종과 비교분석 (2차년도) - 보고서 및 전문가 검토의견서 첨부 - 일반경량골재 2종과 동일배합에서의 밀도/압축강도 비 교함.	100

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 비SCI 논문 1건 게재예정(22년 4월)

2) 자체 보완활동

- 해당사항없음

3) 연구개발 과정의 성실성

- 해당사항없음

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

○ 단위셀 및 격자구조체 설계/제조 분야

- **[격자구조체 정의]** 격자구조체(Lattice structures)는 단위 셀(Unit cell)이라고 하는 3차원 개방 셀(Open-celled Unit)을 설계 공간 안에서 반복적으로 배열하고, 단위 셀간의 조인트(joint)를 스트럿(strut)으로 연결하여 생성한 구조체를 말한다.
- **[국내외 격자구조체 설계/제조 기술 현황]** 격자구조체는 강도 및 강성, 초경량 및 에너지 흡수 능력 등의 우수성을 가지고 있어서 전방위 산업에서 주목을 받고 있다. 그러나 격자 구조체의 다양한 장점에도 불구하고 복잡한 형상을 설계/제조하는 어려움으로 상용화 및 사용이 제한되고 있다. 국내외 단위셀 및 격자구조체 설계를 위한 오픈 데이터소스 및 자료가 전무하다.
- **[본 연구개발 기여 정도]** 본 연구에서는 격자구조체 설계/제조를 위한 기반연구로서, 단위셀 및 격자구조체 상용화를 위한 Data Sheet 및 설계프로세스 수립을 완료했다. 또한, 압축 거동이 우수한 격자구조체를 도출하기 위한 방법론을 제안했고, 그 결과 4가지 단위셀(simple cubic, truncated cube, truncated octahedron, and octahedron) 및 최적 배열을 제시했다.
- **[본 연구개발 기여 정도]** 본 연구를 통해서 격자구조체 압축 거동을 이용하여 다양한 기계적 특성을 가지는 형태로 설계가 가능할 것으로 사료된다.
- **[종합의견]** 단위셀 및 격자구조체 설계/제조 관련 기술은 국내외 도입기에 해당되며, 국내의 경우 설계를 위한 오픈 데이터소스 및 자료가 전무하다. 이러한 시점에서, 본 촉진연구를 통해 해당분야 원천기술 확보에 기여했다.

○ 3D 프린팅 고강도 경량골재 및 이를 활용한 경량콘크리트 분야

- **[경량콘크리트 적용 가능성 확인]** 콘크리트표준시방서(2016)에 따르면 경량골재 콘크리트의 설계기준 압축강도는 15 MPa 이상, 24 MPa 이하이다. 본 연구는 이를 상회하는 설계기준 압축강도 45 MPa급 콘크리트 배합에 3D 프린팅 굵은경량골재 적용을 시도했다. 그 결과 3D프린팅 굵은경량골재 혼입에 따른 압축강도 저하는 나타나지 않았으며 밀도 1.6 t/m^3 , 압축강도 47.7 MPa 결과를 얻었다.
- **[경량콘크리트 적용 가능성 확인]** 이는 3D 프린팅 굵은경량골재가 경량콘크리트의 굵은골재로 사용할 수 있다는 것을 시사한다. 특히, 대량생산 체계를 갖출 경우 궁극적으로 굵은골재의 안정적 수급과 표준적인 품질 확보라는 건설업계의 당면 과제 해결에도 일조할 수 있다.

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ 활용 계획

- 3D 프린팅을 활용하여 격자구조체를 설계/제조하고, 내부 공극을 경량성 채움재로 포화시킴으로써 경량기
능성 격자구조체 제조를 위한 기반을 확보했다.
- 격자구조체는 3D 프린터 가용성 증가와 재료 비용 절감으로 첨단 항공우주 응용 분야에서 일반적인 소비
자 제품으로 이동하고 있다. 향후 일반 소비자 제품 및 건설용 부재의 격자구조체 적용에 활용 계획이다.
- 격자구조체 장점 : 격자 구조체는 경량성, 에너지흡수능, 열관리능을 갖는 다기능성 소재로 미래 잠재적
인 수요가 기대되고 있으며, 산업부품의 새로운 패러다임을 이끌어나갈 수 있을 것으로 판단된다.
 - 부품 비용 절감(Reduced part cost) : 격자구조체는 재료 손실이 적다는 것을 의미한다. 또한, 최적 격
자구조체 도입을 통해 구조적 결함을 야기하지 않고 부품생산비용을 줄일 수 있다. 특히, 항공 우주 산
업에서 흔히 사용하는 티타늄 또는 인코넬과 같은 재료의 경우 그 효과는 극대적이다.
 - 중량 대비 강도 우수(Improved strength-to-weight ratio) : DFAM(Design for Additive Manufacturing)
원칙에 따라 설계된 격자구조체는 중량 대비 강도가 우수하다. 따라서 질량을 최소화하는 것이 중요한
자동차 및 항공우주 산업에 이상적이며, 향후 일반 소비자 제품 및 건설용 부재에도 확대될 것이다.
 - 충격 흡수(Shock absorption) : 격자구조체는 구조체가 유연하고 에너지를 분산하는 장점이 있다.
 - 표면적 증가(Increased surface area) : 동일 체적에서 비표면적이 증가하기 때문에 열전달 혹은 화학반
응에 유리하다.
- 본 연구성과 활용
 - [기반기술] 밀도제어형 격자구조체 설계/제조 기술 확보
 - [기본활용-본연구] 경량 고강도 인공경량골재 및 이를 활용한 경량고강도콘크리트(1.6 t/m^3 , 45 MPa)
 - [활용 확대]
 - : 비선형 결합구(joint), 비선형 건축 구조체 등으로 스케일업
 - : 특정 영역 에너지흡수, 열관리, 진동 흡수 등이 가능한 맞춤형 기능성 소재 개발



그림 105. 활용 방안

○ 기대효과

1) 기술적 측면

- 금속 소재 밀도제어형 경량구조체 설계/제조 기술 개발
- 3D프린팅 기술 기반 밀도제어형 경량 격자구조체구조체 제조기술은 국외에서도 초기 연구단계 수준으로 본 연구개발을 통하여 밀도제어형 경량구조체 분야와 관련된 시장 개척 가능
- “격자구조체 + 기능성 채움재” 등의 기술 융합을 통한 신시장 창출
- 경량, 고강도 및 충격흡수 등의 다기능성 건설 재료&부재 개발의 기반 확립
- 본 연구과제를 거쳐 관련 기술 고도화 R&D 등의 활성화 가능

2) 경제적·산업적 측면

- 건설 구조물 적용 범위 및 사용 확대
- 경량, 고강도 및 충격흡수 등의 다기능성 건설 재료로 확대 적용
- 골재 ▶ 비선형 결합구 & 비선형 철근 ▶ 비선형 구조체 등으로 scale-up

3) 사회적 측면

- 경량, 고강도 및 충격흡수 등의 다기능성 건설 재료를 적용함으로써 새로운 경제기반 구축

○ 관리 계획 (추가연구 필요성 등)

- 경제성 문제: 본 연구에서 압축강도 공시체 1개 제작을 위하여 PA12 재료비는 약 45,000~50,000 원이 소비됐다(90,000 원/kg). 이것은 천연 굽은골재 및 기존의 경량골재와 비교하면 비싼 비용이다.
- 그러나 건물을 시공하는 과정에서 보통콘크리트 부재를 경량콘크리트 부재로 대체했을 때 공사비는 절감되며, 건물의 규모가 크면 클수록 절감 액수는 더욱더 증가한다. 또한, 3D 프린터를 사용한 대량 생산체계를 갖출 경우, 굽은 골재의 생산비용은 지금보다 더 절감될 수 있다. 따라서 3D 프린터로 제작한 굽은 골재의 경제성은 향후 실증적 차원에서 심도 있는 분석이 필요하다.

7. 참고 문헌

1. Gibson, L.J.; Ashby, M.F.; Brendan, A.H. *Cellular Materials in Nature and Medicine*, 1st ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2010.
2. Ma, Q.; Rejab, M.; Siregar, J.; Guan, Z. A Review of the Recent Trends on Core Structures and Impact Response of Sandwich Panels. *J. Compos. Mater.* 2021, 55, 2513-2555, doi:10.1177/0021998321990734.
3. Jin, F.L.; Zhao, M.; Park, M.; Park, S.J. Recent Trends of Foaming in Polymer Processing: A Review. *Polymers* 2019, 11, 953, doi:10.3390/polym11060953.
4. Tarlochan, F. Sandwich Structures for Energy Absorption Applications: A Review. *Materials* 2021, 14, 4731, doi:10.3390/ma14164731.
5. Gibson, L.; Ashby, M. *Cellular Solids: Structure and Properties*, 2nd ed.; Cambridge Solid State Science Series; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1997; doi:10.1017/CB09781139878326.
6. Dossi, M.; Brennan, M.; Moesen, M. A Multi-Physics Study of the Wave Propagation Problem in Open Cell Polyurethane Foams. In *Proceedings of the COMSOL International Conference*, Rotterdam, The Netherlands, 18-20 October 2017.
7. Lehmhus, D.; Vesenjak, M.; Schampheleire, S.D.; Fiedler, T. From Stochastic Foam to Designed Structure: Balancing Cost and Performance of Cellular Metals. *Met. Mater.* 2017, 10, 922, doi:10.3390/ma10080922.
8. Pan, C.; Han, Y.; Lu, J. Design and Optimization of Lattice Structures: A Review. *Appl. Sci.* 2020, 10, 6374, doi:10.3390/app10186374.
9. Mazur, M.; Leary, M.; McMillan, M.; Sun, S.; Shidid, D.; Brandt, D. Mechanical Properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg Lattice Structures Manufactured by Selective Laser Melting (SLM). In *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials; Laser Additive Manufacturing*; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2017; Volume 5, pp. 119-161, doi:10.1016/B978-0-08-100433-3.00005-1.
10. Cao, X.; Duan, S.; Liang, J.; Wen, W.; Fang, D. Mechanical Properties of an Improved 3D-Printed Rhombic Dodecahedron Stainless Steel Lattice Structure of Variable Cross Section. *Int. J. Mech. Sci.* 2018, 145, 53-63, doi:10.1016/j.ijmecsci.2018.07.006.
11. Xiao, D.; Dong, Z.; Li, Y.; Wu, W.; Fang, D. Compression Behavior of the Graded Metallic Auxetic Reentrant Honeycomb: Experiment and Finite Element Analysis. *Mater. Sci. Eng. A* 2019, 758, 163-171, doi:10.1016/j.msea.2019.04.116.
12. Barynin, V.A.; Bunakov, V.A.; Rasin, A.F.; Vasiliev, V.V. Aerospace Composite Lattice Structures. In *Proceedings of the 120th International Conference on Composite Materials*, Paris, France, 5-9 July 1999.
13. Vasiliev, V.V.; Razin, A.F. Anisogrid Composite Lattice Structures for Spacecraft and Aircraft Applications. *Compos. Struct.* 2006, 76, 182-189, doi:10.1016/j.compstruct.2006.06.025.
14. Deshpande, V.S.; Ashby, M.F.; Fleck, N.A. Foam Topology: Bending Versus Stretching Dominated Architectures. *Acta Mater.* 2001, 49, 1035-1040, doi:10.1016/S1359-6454(00)00379-7.
15. Queheillalt, D.T.; Murty, Y.; Wadley, H.N.G. Mechanical Properties of an Extruded Pyramidal Lattice Truss Sandwich Structure. *Scr. Mater.* 2008, 58, 76-79, doi:10.1016/j.scriptamat.2007.08.041.
16. ASTM F2792-12. *Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. Pennsylvania, United States, 2012.
17. Alsalla, H.; Hao, L.; Smith, C. Fracture Toughness and Tensile Strength of 316L Stainless Steel Cellular Lattice Structures Manufactured Using the Selective Laser Melting Technique. *Mater. Sci. Eng. A* 2016, 669, 1-6, doi:10.1016/j.msea.2016.05.075.
18. Yan, C.; Hao, L.; Hussein, A.; Young, P. Ti-6Al-4V Triply Periodic Minimal Surface Structures for Bone Implants Fabricated via Selective Laser Melting. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2015, 51, 61-73, doi:10.1016/j.jmbbm.2015.06.024.
19. Gong, H.; Rafi, K.; Gu, H.; Janaki Ram, G.D.J.; Starr, T.; Stucker, B. Influence of Defects on Mechanical Properties of Ti-6Al-4 V Components Produced by Selective Laser Melting and Electron Beam Melting. *Mater. Des.* 2015, 86, 545-554, doi:10.1016/j.matdes.2015.07.147.
20. Sterling, A.J.; Torries, B.; Shamsaei, N.; Thompson, S.M.; Seely, D.W. Fatigue Behavior and Failure Mechanisms of Direct Laser Deposited Ti-6Al-4V. *Mater. Sci. Eng. A* 2016, 655, 100-112, doi:10.1016/j.msea.2015.12.026.
21. Yan, C.; Hao, L.; Hussein, A.; Bubb, S.L.; Young, P.; Raymont, D. Evaluation of Light-Weight AlSi10Mg Periodic Cellular Lattice Structures Fabricated via Direct Metal Laser Sintering. *J. Mater. Process. Technol.* 2014, 214, 856-864, doi:10.1016/j.jmatprotec.2013.12.004.
22. Yan, C.; Hao, L.; Hussein, A.; Young, P.; Huang, J.; Zhu, W. Microstructure and Mechanical Properties of Aluminium Alloy Cellular Lattice Structures Manufactured by Direct Metal Laser Sintering. *Mater. Sci. Eng. A* 2015, 628, 238-246, doi:10.1016/j.msea.2015.01.063.
23. Brandt, M. (Ed.). *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications*; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2016; doi:10.1016/C2014-0-03891-9.
24. Belardi, V.G.; Fanelli, P.; Trupiano, S.; Vivio, F. Multiscale Analysis and Mechanical Characterization of Open-cell Foams by Simplified FE Modeling. *Eur. J. Mech. A/Solids* 2021, 89, 104291,

doi:10.1016/j.euromechsol.2021.104291.

25. Dumas, M.; Terriault, P.; Brailovski, V. Modelling and Characterization of a Porosity Graded Lattice Structure for Additively Manufactured Biomaterials. *Mater. Des.* 2017, 121, 383-392, doi:10.1016/j.matdes.2017.02.021.
26. de Aquino, D.A.; Maskery, I.; Longhitano, G.A.; Jardini, A.L.; del Conte, E.G. Investigation of Load Direction on the Compressive Strength of Additively Manufactured Triply Periodic Minimal Surface Scaffolds. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2020, 109, 771-779, doi:10.1007/s00170-020-05706-y.
27. Cutolo, A.; Engelen, B.; Desmet, W.; Van Hooreweder, B. Mechanical Properties of Diamond Lattice Ti-6Al-4V Structures Produced by Laser Powder Bed Fusion: On the Effect of the Load Direction. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2020, 104, 103656, doi:10.1016/j.jmbbm.2020.103656.
28. Liu, L.; Kamm, P.; Garcia-Moreno, F.; Banhart, J.; Pasini, D. Elastic and Failure Response of Imperfect Three-Dimensional Metallic Lattices: The Role of Geometric Defects Induced by Selective Laser Melting. *J. Mech. Phys. Solids* 2017, 107, 160-184, doi:10.1016/j.jmps.2017.07.003.
29. Ahmadi, S.M.; Yavari, S.A.; Wauthle, R.; Pouran, B.; Schrooten, J.; Weinans, H.; Zadpoor, A.A. Additively Manufactured Open-Cell Porous Biomaterials Made from Six Different Space-Filling Unit Cells: The Mechanical and Morphological Properties. *Materials* 2015, 8, 1871-1896, doi:10.3390/ma8041871.
30. Borleffs, M.S. Finite Element Modeling to Predict Bulk Mechanical Properties of 3D Printed Metal Foams; TU: Delft, The Netherlands, 2012. Available online: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:551dee76-2301-4f77-ba6e-230d32e8c58f> (accessed on 17 December 2021).
31. Choy, S.Y.; Sun, C.-N.; Leong, K.F.; Wei, J. Compressive Properties of Ti-6Al-4V Lattice Structures Fabricated by Selective Laser Melting: Design, Orientation and Density. *Addit. Manuf.* 2017, 16, 213-224, doi:10.1016/j.addma.2017.06.012.
32. Han, C.; Yan, C.; Wen, S.; Xu, T.; Li, S.; Liu, J.; Wei, Q.; Shi, Y. Effects of the Unit Cell Topology on the Compression Properties of Porous Co-Cr Scaffolds Fabricated via Selective Laser Melting. *Rapid Prototyp. J.* 2017, 23, 16-27, doi:10.1108/RPJ-08-2015-0114.
33. Hedayati, R.; Sadighi, M.; Mohammadi-Aghdam, M.; Hosseini-Toudeshky, H. Comparison of Elastic Properties of Open-Cell Metallic Biomaterials with Different Unit Cell Types. *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.* 2018, 106, 386-398, doi:10.1002/jbm.b.33854.
34. Hedayati, R.; Sadighi, M.; Mohammadi-Aghdam, M.; Zadpoor, A.A. Effect of Mass Multiple Counting on the Elastic Properties of Open-Cell Regular Porous Biomaterials. *Mater. Des.* 2016, 89, 9-20, doi:10.1016/j.matdes.2015.09.052.
35. Li, S.J.; Xu, Q.S.; Wang, Z.; Hou, W.T.; Hao, Y.L.; Yang, R.; Murr, L.E. Influence of Cell Shape on Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Meshes Fabricated by Electron Beam Melting Method. *Acta Biomater.* 2014, 10, 4537-4547, doi:10.1016/j.actbio.2014.06.010.
36. Murr, L.E.; Gaytan, S.M.; Medina, F.; Lopez, H.; Martinez, E.; Machado, B.I.; Hernandez, D.H.; Martinez, L.; Lopez, M.I.; Wicker, R.B.; et al. Next-Generation Biomedical Implants Using Additive Manufacturing of Complex, Cellular and Functional Mesh Arrays. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A* 2010, 368, 1999-2032, doi:10.1098/rsta.2010.0010.
37. Parthasarathy, J.; Starly, B.; Raman, S.; Christensen, A. Mechanical Evaluation of Porous Titanium (Ti6Al4V) Structures with Electron Beam Melting (EBM). *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2010, 3, 249-259, doi:10.1016/j.jmbbm.2009.10.006.
38. Zaharin, H.A.; Abdul Rani, A.M.; Azam, F.I.; Ginta, T.L.; Sallih, N.; Ahmad, A.; Yunus, N.A.; Zulkifli, T.Z.A. Effect of Unit Cell Type and Pore Size on Porosity and Mechanical Behavior of Additively Manufactured Ti6Al4V Scaffolds. *Materials* 2018, 11, 2402, doi:10.3390/ma11122402.
39. Zhao, S.; Li, S.J.; Hou, W.T.; Hao, Y.L.; Yang, R.; Misra, R.D.K. The Influence of Cell Morphology on the Compressive Fatigue Behavior of Ti-6Al-4V Meshes Fabricated by Electron Beam Melting. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2016, 59, 251-264, doi:10.1016/j.jmbbm.2016.01.034.
40. Egan, P.F.; Gonella, V.C.; Engensperger, M.; Ferguson, S.J.; Shea, K. Computationally Designed Lattices with Tuned Properties for Tissue Engineering Using 3D Printing. *PLoS ONE* 2017, 12, e0182902, doi:10.1371/journal.pone.0182902.
41. Boniotti, L.; Foletti, S.; Beretta, S.; Patriarca, L. Analysis of Strain and Stress Concentrations in Micro-Lattice Structures Manufactured by SLM. *Rapid Prototyp. J.* 2019, 26, 370-380, doi:10.1108/RPJ-10-2018-0270.
42. Egan, P.; Wang, X.; Greutert, H.; Shea, K.; Wuertz-Kozak, K.; Ferguson, S. Mechanical and Biological Characterization of 3D Printed Lattices. *3D Print. Addit. Manuf.* 2019, 6, 73-81, doi:10.1089/3dp.2018.0125.
43. Leary, M.; Mazur, M.; Elambasseril, J.; McMillan, M.; Chirent, T.; Sun, Y.; Qian, M.; Easton, M.; Brandt, M. Selective Laser Melting (SLM) of AlSi12Mg Lattice Structures. *Mater. Des.* 2016, 98, 344-357, doi:10.1016/j.matdes.2016.02.127.
44. Leary, M.; Mazur, M.; Williams, H.; Yang, E.; Alghamdi, A.; Lozanovski, B.; Zhang, X.; Shidid, D.; Farahbod-Sternahl, L.; Witt, G.; et al. Inconel 625 Lattice Structures Manufactured by Selective Laser Melting (SLM): Mechanical Properties, Deformation and Failure Modes. *Mater. Des.* 2018, 157, 179-199,

doi:10.1016/j.matdes.2018.06.010.

45. Rehme, O.; Emmelmann, C. Rapid Manufacturing of Lattice Structures with Selective Laser Melting. In *Laser-Based Micropackaging, Proceeding of the Lasers and Applications in Science and Engineering*, San Jose, California, United States, 23 February 2006; p. 61070K; doi:10.1117/12.645848.
46. Gumruk, R.; Mines, R.A.W. Compressive Behaviour of Stainless Steel Micro-Lattice Structures. *Int. J. Mech. Sci.* 2013, 68, 125-139, doi:10.1016/j.ijmecsci.2013.01.006.
47. Gumruk, R.; Mines, R.A.W.; Karadeniz, S. Static Mechanical Behaviours of Stainless Steel Micro-Lattice Structures under Different Loading Conditions. *Mater. Sci. Eng. A* 2013, 586, 392-406, doi:10.1016/j.msea.2013.07.070.
48. Lei, H.; Li, C.; Meng, J.; Zhou, H.; Liu, Y.; Zhang, X.; Wang, P.; Fang, D. Evaluation of Compressive Properties of SLM-Fabricated Multi-Layer Lattice Structures by Experimental Test and μ -CT-Based Finite Element Analysis. *Mater. Des.* 2019, 169, 107685, doi:10.1016/j.matdes.2019.107685, 107685.
49. Mazur, M.; Leary, M.; Sun, S.; Vcelka, M.; Shidid, D.; Brandt, M. Deformation and Failure Behaviour of Ti-6Al-4V Lattice Structures Manufactured by Selective Laser Melting (SLM). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2016, 84, 1391-1411, doi:10.1007/s00170-015-7655-4.
50. McKown, S.; Shen, Y.; Brookes, W.K.; Sutcliffe, C.J.; Cantwell, W.J.; Langdon, G.S.; Nurick, G.N.; Theobald, M.D. The quasi-Static and Blast Loading Response of Lattice Structures. *Int. J. Impact Eng.* 2008, 35, 795-810, doi:10.1016/j.ijimpeng.2007.10.005.
51. Mines, R.A.W.; Tsopanos, S.; Shen, Y.; Hasan, R.; McKown, S.T. Drop Weight Impact Behaviour of Sandwich Panels with Metallic Micro Lattice Cores. *Int. J. Impact Eng.* 2013, 60, 120-132, doi:10.1016/j.ijimpeng.2013.04.007.
52. Mullen, L.; Stamp, R.C.; Brooks, W.K.; Jones, E.; Sutcliffe, C.J. Selective Laser Melting: A Regular Unit Cell Approach for the Manufacture of Porous, Titanium, Bone in-Growth Constructs, Suitable for Orthopedic Applications. *J. Biomed. Mater. Res. B* 2009, 89, 325-334, doi:10.1002/jbm.b.31219.
53. Ptochos, E.; Labeas, G. Elastic Modulus and Poisson's Ratio Determination of Micro-Lattice Cellular Structures by Analytical, Numerical and Homogenisation Methods. *J. Sandw. Struct. Mater.* 2012, 14, 597-626, doi:10.1177/1099636212444285.
54. Shen, Y.; McKown, S.; Tsopanos, S.; Sutcliffe, C.J.; Mines, R.A.W.; Cantwell, W.J. The Mechanical Properties of Sandwich Structures Based on Metal Lattice Architectures. *J. Sandw. Struct. Mater.* 2010, 12, 159-180, doi:10.1177/1099636209104536.
55. Smith, M.; Guan, Z.; Cantwell, W.J. Finite Element Modelling of the Compressive Response of Lattice Structures Manufactured Using the Selective Laser Melting Technique. *Int. J. Mech. Sci.* 2013, 67, 28-41, doi:10.1016/j.ijmecsci.2012.12.004.
56. Tsopanos, S.; Mines, R.A.W.; McKown, S.; Shen, Y.; Cantwell, W.J.; Brooks, W.; Sutcliffe, C.J. The Influence of Processing Parameters on the Mechanical Properties of Selectively Laser Melted Stainless Steel Microlattice Structures. *J. Manuf. Sci. Eng.* 2010, 132, 4, doi:10.1115/1.4001743.
57. Ushijima, K.; Cantwell, W.J.; Chen, D.H. Prediction of the Mechanical Properties of Micro-Lattice Structures Subjected to Multi-Axial Loading. *Int. J. Mech. Sci.* 2013, 68, 47-55, doi:10.1016/j.ijmecsci.2012.12.017.
58. Ushijima, K.; Cantwell, W.; Mines, R.; Tsopanos, S.; Smith, M. An Investigation into the Compressive Properties of Stainless Steel Micro-Lattice Structures. *J. Sandw. Struct. Mater.* 2011, 13, 303-329, doi:10.1177/1099636210380997.
59. Zhao, M.; Liu, F.; Fu, G.; Zhang, D.Z.; Zhang, T.; Zhou, H. Improved Mechanical Properties and Energy Absorption of BCC Lattice Structures with Triply Periodic Minimal Surfaces Fabricated by SLM. *Materials* 2018, 11, 2411, doi:10.3390/ma11122411.
60. Heinl, P.; Muller, L.; Korner, C.; Singer, R.F.; Muller, F.A. Cellular Ti-6Al-4V Structures with Interconnected Macro Porosity for Bone Implants Fabricated by Selective Electron Beam Melting. *Acta Biomater.* 2008, 4, 1536-1544, doi:10.1016/j.actbio.2008.03.013.
61. Heinl, P.; Korner, C.; Singer, R.F. Selective Electron Beam Melting of Cellular Titanium: Mechanical Properties. *Adv. Eng. Mater.* 2008, 10, 882-888, doi:10.1002/adem.200800137.
62. Ozdemir, Z.; Hernandez-Nava, E.; Tyas, A.; Warren, J.A.; Fay, S.D.; Goodall, R.; Todd, I.; Askes, H. Energy Absorption in Lattice Structures in Dynamics: Experiments. *Int. J. Impact Eng.* 2016, 89, 49-61, doi:10.1016/j.ijimpeng.2015.10.007.
63. Van Grunsven, W.; Hernandez-Nava, E.; Reilly, G.C.; Goodall, R. Fabrication and Mechanical Characterisation of Titanium Lattices with Graded Porosity. *Metals* 2014, 4, 401-409, doi:10.3390/met4030401.
64. Wauthle, R.; Vrancken, B.; Beynaerts, B.; Jorissen, K.; Schrooten, J.; Kruth, J.P.; Van Humbeeck, J. Effects of Build Orientation and Heat Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of Selective Laser Melted Ti6Al4V Lattice Structures. *Addit. Manuf.* 2015, 5, 77-84, doi:10.1016/j.addma.2014.12.008.
65. Zadpoor, A.A.; Hedayati, R. Analytical Relationships for Prediction of the Mechanical Properties of Additively Manufactured Porous Biomaterials. *J. Biomed. Mater. Res. A* 2016, 104, 3164-3174, doi:10.1002/jbm.a.35855.
66. Zhu, H.X.; Knott, J.F.; Mills, N.J. Analysis of the Elastic Properties of Open-Cell Foams with

- Tetrakaidecahedral Cells. *J. Mech. Phys. Solids* 1997, 45, 319-343, doi:10.1016/S0022-5096(96)00090-7.
67. Hedayati, R.; Sadighi, M.; Mohammadi-Aghdam, M.; Zadpoor, A.A. Analytical Relationships for the Mechanical Properties of Additively Manufactured Porous Biomaterials Based on Octahedral Unit Cells. *Appl. Math. Modell.* 2017, 46, 408-422, doi:10.1016/j.apm.2017.01.076.
 68. Hedayati, R.; Sadighi, M.; Mohammadi-Aghdam, M.; Zadpoor, A.A. Mechanics of Additively Manufactured Porous Biomaterials Based on the Rhombicuboctahedron Unit Cell. *J. Mech. Behav. Biomed. Mater.* 2016, 53, 272-294, doi:10.1016/j.jmbbm.2015.07.013.
 69. Arabnejad, S.; Burnett Johnston, R.; Pura, J.A.; Singh, B.; Tanzer, M.; Pasini, D. High-Strength Porous Biomaterials for Bone Replacement: A Strategy to Assess the Interplay between Cell Morphology, Mechanical Properties, Bone Ingrowth and Manufacturing Constraints. *Acta Biomater.* 2016, 30, 345-356, doi:10.1016/j.actbio.2015.10.048.
 70. de Formanoir, C.; Suard, M.; Dendievel, R.; Martin, G.; Godet, S. Improving the Mechanical Efficiency of Electron Beam Melted Titanium Lattice Structures by Chemical Etching. *Addit. Manuf.* 2016, 11, 71-76, doi:10.1016/j.addma.2016.05.001.
 71. Deshpande, V.S.; Fleck, N.A.; Ashby, M.F. Effective Properties of the Octet-Truss Lattice Material. *J. Mech. Phys. Solids* 2001, 49, 1747-1769, doi:10.1016/S0022-5096(01)00010-2.
 72. He, Z.Z.; Wang, F.C.; Zhu, Y.B.; Wu, H.A.; Park, H.S. Mechanical Properties of Copper Octet-Truss Nanolattices. *J. Mech. Phys. Solids* 2017, 101, 133-149, doi:10.1016/j.jmps.2017.01.019.
 73. Tancogne-Dejean, T.; Spierings, A.B.; Mohr, D. Additively Manufactured Metallic Micro-Lattice Materials for High Specific Energy Absorption under Static and Dynamic Loading. *Acta Mater.* 2016, 116, 14-28, doi:10.1016/j.actamat.2016.05.054.
 74. ISO 13314:2011. Mechanical Testing of Metals-Ductility Testing-Compression Test for Porous and Cellular Metals. Geneva, Switzerland, 2011
 75. Červinek, O.; Werner, B.; Koutny, D.; Vaverka, O.; Pantělejev, L.; Paloušek, D. Computational Approaches of Quasi-Static Compression Loading of SS316L Lattice Structures Made by Selective Laser Melting. *Materials* 2021, 14, 2462, doi:10.3390/ma14092462.
 76. Amani, Y.; Dancette, S.; Delroisse, P.; Simar, A.; Maire, E. Compression Behavior of Lattice Structures Produced by Selective Laser Melting: X-ray Tomography Based Experimental and Finite Element Approaches. *Acta Mater.* 2018, 159, 395-407, doi:10.1016/j.actamat.2018.08.030.
 77. Bai, L.; Gong, C.; Chen, X.; Zheng, J.; Yang, J.; Li, K.; Sun, Y. Heterogeneous Compressive Responses of Additively Manufactured Ti-6Al-4V Lattice Structures by Varying Geometric Parameters of Cells. *Int. J. Mech. Sci.* 2022, 214, 106922, doi:10.1016/j.ijmecsci.2021.106922.
 78. ASTM B988-18. Standard Specification for Powder Metallurgy (PM) Titanium and Titanium Alloy Structural Components. Pennsylvania, United States, 2018
 79. ASTM F2924-14. Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion. Pennsylvania, United States, 2014
 80. Ashby, M.F. The Properties of Foams and Lattices. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A* 2006, 364, 15-30, doi:10.1098/rsta.2005.1678.
 81. Maskery, I.; Aboulkhair, N.T.; Aremu, A.O.; Tuck, C.J.; Ashcroft, I.A. Compressive Failure Modes and Energy Absorption in Additively Manufactured Double Gyroid Lattices. *Addit. Manuf.* 2017, 16, 24-29, doi:10.1016/j.addma.2017.04.003.
 82. 김성철, 박기찬, 최형욱. (2011). 인공경량골재의 입도에 따른 고강도 경량콘크리트의 강도변화에 대한 실험적 연구. 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 15(5), 209-217.
 83. 문종욱, 원종필, 전현규(2006), 경량콘크리트의 적용 및 사례, 한국콘크리트학회 전문위원회 연구발표집: 224-239 (사)한국콘크리트학회.
 84. 박대오, 사순현, 김상현, 지식원, 최수경, 서치호. (2009). 현재 골재의 공적구조와 특성에 대한 탁월한 효과. 대한건축학회 논문집-돌계, 25 (3), 85-92.
 85. 박성무. (1998). 경량콘크리트의 역학적 특성. 콘크리트학회지, 10(4), 38-45.
 86. 박조범, 김용혁, 전유빈, 김재홍, 류득현. (2021). 경량골재 콘크리트와 천연골재 콘크리트의 내구성에 관한 연구. Journal of the Korea Concrete Institute, 33(3), 227-234.
 87. 서치호, 최기봉, 송현수. (2006). 경량골재콘크리트의 특성 및 활용. 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, 201-213.
 88. 서치호. (1998). 경량콘크리트의 재료적 특성. 콘크리트학회지 제, 10(4).
 89. 신재경, 한민철. (2012). 인공경량골재 입도 및 형상에 따른 경량골재 콘크리트의 물리적 특성 및 내구성. 대한건축학회 논문집-구조계, 28(10), 105-112.
 90. 양근혁, 문주현. (2021). 바텀애시 골재와 기포를 이용한 경량 콘크리트 ET-판넬의 휨 및 전단거동 평가. Journal of the Korea Concrete Institute, 33(3), 245-251.
 91. 조병완, 권오혁, 박승국(2004), 비소성 Fly-ash 인공경량골재의 개발 및 콘크리트 적용에 관한 실험적 연구, 대한토목학회논문집 A 24.2A, 대한토목학회
 92. 지구배, 문주현, & 양근혁. (2019). 바텀애시 골재와 기포를 이용한 경량 콘크리트의 역학적 특성 평가. 콘크리트학회 논문집, 31(4), 375-384.
 93. AASHTO, AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 8th ed, American Association of State Highway and

- Transportation Officials, Washington DC, 2012, pp. 5-78~5-80
94. ACI Committee 213, Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete(ACI 213R-14), American Concrete Institute, MI, Farmington Hills, 2014, 53 p
 95. Kan, A., Demirboğa, R. (2009). A novel material for lightweight concrete production. *Cement and Concrete Composites*, 31(7), 489-495.
 96. KDS 41 10. (2016). Korean building code, Korea Construction Standard Center
 97. Kim, Yong-Hyok. "Manufacture of Lightweight Aggregates Using Bottom Ash." *Magazine of RCR* Vol 11 No.2, 2016
 98. KIM, Yoo-Taek; JANG, Chang-Sub. Production technology, property and application of artificial lightweight aggregates. *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol 23, No.4 pp.14-17, 2011
 99. L. Cheng, P. Zhang, E. Biyikli, J. Bai, "Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: Theory and experimental validation", *Rapid Prototyping Journal*, Vol.23. No.4, pp.660-677, June 2017.
 100. Lee, K. H., Yang, K. H., and Yoon, H. S., "Shrinkage Strains of Lightweight Aggregate Concrete using Expanded Bottom Ash and Dredged Soil Granules," *Construction and Building Materials*, Vol. 188, 2018, pp. 934 ~945.
 101. Lee, Kyung-Ho, Keun-Hyeok Yang. "Mechanical Properties of Lightweight Aggregate Concrete Using Expanded Bottom Ash and Dredged Soil Granules." *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol 37, No.2, pp.189-196, 2021
 102. M. Mazur, M. Leary, M. McMillan, S.Sun, D. Shidid, M. Brandt. "Mechanical properties of Ti6Al4V and AlSi12Mg lattice structures manufactured by Selective Laser Melting (SLM), *Laser Additive Manufacturing*", Woodhead Publishing, 2017, pp.119-161.
 103. Neville, A. M, *Properties of concrete*. Edition 5, New York, N.Y: Pearson, 2011, pp.846.
 104. Newman, J., Owens, P. (2003). *Properties of lightweight concrete*. *Advanced concrete technology*, 3, 1-29.
 105. O. Al-Ketan, R. Rowshan, R.K. Al-Rub, "Topology-mechanical property relationship of 3D printed strut, skeletal, and sheet based periodic metallic cellular materials", *Additive Manufacturing*, Vol.19, pp.167-183, Jan 2018.
 106. Park, K.-M.; Min, K.-S.; Roh, Y.-S. "Design Optimization of Lattice Structures under Compression: Study of Unit Cell Types and Cell Arrangements", *Materials*, 15, 97, 2022,
 107. Sim, J., Yang, K., "Influence of specimen geometries on the compressive strength of lightweight aggregate concrete", *Journal of the Concrete Institute*, Vol.24. No.3, pp.333-340, 2012
 108. Thienel, K. C., Haller, T., & Beuntner, N. (2020). *Lightweight concrete—From basics to innovations*. *Materials*, 13(5), 1120.
 109. X. Cao, S. Duan, J. Liang, W. Wen, D. Fang, "Mechanical properties of an improved 3D-printed rhombic dodecahedron stainless steel lattice structure of variable cross section", *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.145, pp.53-63, Sep 2018.
 110. X.Z. Zhang, M. Leary, H.P. Tang, T. Song, M. Qian, "Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges", *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, Vol.22, No.3, pp.75-99, June 2018.
 111. Zhang, M. H., Gjovrv, O. E. (1991). Mechanical properties of high-strength lightweight concrete. *Materials Journal*, 88(3), 240-247.

< 별첨 : 별도 제본 >

별첨 자료

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

[뒷면지]

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘국토교통기술촉진연구사업’ 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.