

제 출 문

국토교통부장관 귀하

이 보고서를 "건축물 신속조형을 위한 3D 프린터 핵심부품 및 프린팅 알고리즘의 원천기술 개발"에 관한 연구과제의 보고서로 제출합니다.

2016. 10. 12

주관연구기관명 : 세종대학교

주관연구책임자 : 이재홍

연구원 : 김동현

연구원 : 이승혜

연구원 : 금윤지

연구원 : 김수민

연구원 : 김용겸

연구원 : 김지호

연구원 : 박상은

연구원 : 이경수

연구원 : 이보연

연구원 : 이호영

연구원 : 임시은

연구원 : 조민주

보 고 서 요 약 서

과제고유번호	14CTAP-C 077285-01- 000000	해 당 단 계 연 구 기 간	2015.07.11. - 2016.07.10	단 계 구 분	2차년도/ 2차년도
연구사업명	국 토 교 통 기 술 축 진 연 구 사 업				
연구과제명	최 상 위 과 제 명	건축물 신속조형을 위한 3D 프린터 핵심부품 및 프린팅 알고리즘의 원천기술 개발			
	단위과제명	-			
연구책임자	이재홍	총연구기간	2014.07.11. -2016.07.10	총연구비	정부 :400,000천원 기업 : 0천원 계 :400,000천원
		참 여 연구원수	총 : 19명 내부 : 19명 외부 : 0명		
연구기관명 및 소 속 부 서 명	세종대학교 건축공학과		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 상대국연구기관명 :				
● 연구개발 수행내용 - 3D 프린터 핵심부품 개발 - 건축화 신속조형을 위한 프린팅 알고리즘 개발과 건축부재용 3D 프린팅 재료의 성능평가 및 최적화 ● 연구개발 결과 - 국내 최초로 원활한 적층이 가능한 콘크리트 배합을 전제로 하여 콘크리트를 이용한 건축용 3D 프린팅이 성공적으로 진행됨				보고서 면수	64
색 인 어 (각 5개 이상)	한 글	신속조형; 3D 프린팅; 건설공정 시뮬레이션; 프린팅 알고리즘			
	영 어	Rapid Prototype; 3D Printing; Construction Simulation; Printing Algorithm			

요 약 문

I. 제목

- 건축물 신속조형을 위한 3D 프린터 핵심부품 및 프린팅 알고리즘의 원천기술 개발

II. 연구개발과제 개요

- 연구목표: 건축물 급속 3D프린팅 원천기술 확보를 통한 국가신성장동력 창출
 - 기술개발 목표: 건축물의 급속 3D프린팅에 적합한 건축구조, 건축재료, 프린팅시스템 기술구현을 통한 글로벌 건축 원천기술 달성, 이를 위한 미래지향 기술 패러다임을 제안
 - 기술상용화 목표: 산학연 협력연구 테크노파트너십 패러다임에 기반을 둔 실증 테스트베드를 적용한 건축물 3D 급속 프린팅 기술의 상용화 가치 확산과 국가 미래 건축 기술 혁신의 기반 구축
- 연구의 필요성
 - 본 기술개발이 성공적으로 이루어질 경우 기존 건축의 패러다임을 혁신적으로 전환할 수 있으며 개인주문생산시대에 걸맞은 기술적, 경제적 성과가 예상됨
 - 본 기술분야에서 아직까지는 선진국이 우위를 점하고 있지만 시장지배자가 없는 초기발전단계이므로 기술선점을 이룰 경우 막대한 경제적 가치의 창출이 예상됨

III. 연구개발 수행내용 및 결과(연구수행과정, 연구수행결과 등을 기술)

- 연구개발 수행내용
 - 3D 프린터 핵심부품 개발
 - 건축물 신속조형을 위한 프린팅 알고리즘 개발과 건축부재용 3D 프린팅 재료의 성능평가 및 최적화
- 연구개발 결과
 - 국내 최초로 원활한 적층이 가능한 콘크리트 배합을 전제로 하여 콘크리트를 이용한 건축용 3D 프린팅이 성공적으로 진행됨

IV. 최종 연구성과 및 적용실적

- 건축용 3D 프린터 시제품을 제작 함
- 4건의 프린팅 관련 특허등록과 3건의 관련 논문을 게재함

V. 연구목표 달성 및 효과

- 기술적 기대효과
 - 3D프린팅의 선제적 이용을 통한 건축물 생산방식 혁신을 창출하는 기술 패러다임
 - 센터 독자 원천기술 확보로 국내 건축기술의 대외 경쟁력 제고 및 기술우위 선점
- 사회경제적 기대효과
 - 산학연 협력 네트워크 구축으로 원천기술의 조기 실제화 및 상용화
 - 원천기술을 가진 사업아이템을 활용한 건설산업 고부가가치화, 경쟁우위 신규 사업영역 구축 및 확산, 건설 연계산업의 활성화

VI. 연구성과 활용계획

- 3D 프린팅된 건축부재를 이용하여 기존 건축생산시스템을 대체할 수 있는 공장제작-현장조립의 새로운 시스템의 도입에 활용
- 이형건축, 비정형건축에 필요한 사용자 주문형 건축부재의 제작에 활용
- 도면대신 쓰일 수 있는 3D 디지털파일의 의사소통방식에 활용
- 추후 로봇팔을 이용한 로봇틱스 건축제작 시스템에 활용
- 신속조형을 위한 알고리즘을 기반으로 건축분야에 적합한 새로운 장비운용 소프트웨어의 제작에 활용

S U M M A R Y

I. Project Title

- A Research on the Technology Development for Core Parts and Printing Algorithm of 3D Printer for Building Rapid Printing

II. Outline

- Research Goal : Securing a Source of Technology for 3D Building Rapid Printing and Creating New Growth Engines
 - Technology development goals : Building structure suitable for rapid 3D printing for architecture , building materials, building global source technology to achieve through the implementation of technical printing systems , offering a future-oriented technology paradigm for the above
 - Technology deployment goals : Building partnerships based on industry-university cooperative research paradigm buildings techno 3D printing, rapid diffusion and commercialization of valuable national future construction of a demonstration test bed technology is applied based on innovation - technology commercialization goals
- The Need for Research
 - With this technology successfully achieved, the paradigm of conventional construction is innovated dramatically and it is expected technical, economic performance commensurate with the age of mass customization
 - Enormous economic value can be created by securing this technology since it is initial stage of the technology without any dominant players in the market .

III. Contents and results of research and development performed

- Perform research and development information,
 - A development of key components for 3D printer
 - A performance evaluation and optimization of 3D printing materials for printing algorithm development and construction element for building fast prototyping
- Research and development results
 - Korea's first 3D printing using a concrete construction with a concrete mix into a smooth stackable material successfully

IV. The final results of research and application results

- Produced a 3D printer prototype construction
- 4 patent registrations for printing related topics and 3 papers on the technology

V. Achieving research objectives and effects

- Technical Benefits
 - Technical paradigm that creates an architectural production methods innovation through pre-emptive use of 3D printing
 - Obtaining center's core technologies, enhancing competitiveness of the domestic construction techniques and obtaining technology leadership
- Socio-economic Benefits
 - Early actualization and commercialization of proprietary technology by building industry-university cooperation network
 - Activation of the construction industry utilizing business items with high value-added core technology, competitive advantage and build new business areas spread , construction industry association

VI. Research and utilization plan

- Introducing new system of factory fabrication - site assembly replaycing the existing building production system using 3D printed construction member
- Utilizing for fabricating custom architectural parts used for free-form and non-linear architecture
- Leveraging the communicative style of 3D digital files that can be used instead of drawings
- subsequently used in robotics manufacturing system using a robot arm construction
- Equipment used in the production of a new operating software for the construction sector based on the algorithm for rapid prototyping

C O N T E N T S

Chapter 1 . Overview R & D projects	1 p
1. The need for research and development	1 p
2. The objectives of the research and development	9 p
3. Technology development status of domestic and international market of related field	17 p
 Chapter 2 . Contents and results of research and development performed	 29p
1. Core research	29 p
2. Research conducted courses and contents	30 p
 Chapter 3 . The final results of research and application performance	 51 p
1. The final results of research	51 p
2. Application Performance	54 p
 Chapter 4 . Research objectives and effects	 57 p
1. Research and Development The ultimate goal achievement	57 p
2. The effect of R & D performance analysis	58 p
 Chapter 5. Utilization of research results and the need for further study	 61 p
1. Research and Future Utilization	61 p
2. The need for further study	61 p
 Reference	 63 p

목 차

제1장. 연구개발과제 개요	1
1. 연구개발의 필요성	1
2. 연구개발 목표	9
3. 관련분야의 국내외 기술개발 현황	17
제2장. 연구개발 수행 내용 및 결과	29
1. 핵심연구성과	29
2. 연구수행 과정 및 내용	30
제3장. 최종 연구성과 및 적용실적	51
1. 최종연구성과	51
2. 적용 실적	54
제4장. 연구목표 달성 및 효과	57
1. 연구개발 최종목표 달성도	57
2. 연구개발 성과의 효과분석	58
제5장. 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성	61
1. 연구성과 향후 활용방안	61
2. 추가연구의 필요성	61
참고문헌	63

제1장. 연구개발과제 개요

1. 연구개발의 필요성

가. 연구개발의 배경

□ 본 연구는 사물의 조형과 제조에 차세대 발전방향을 제시하고 있는 3D 프린팅 기술을 건축이라는 새로운 분야에 도입하여 기존 건축의 패러다임을 바꿀 수 있는 핵심기술을 개발하고자 하는 것임

- 건축분야에 특화된 3D 프린팅 재료 및 프린터를 개발하여 실물스케일의 건축부재를 제조할 수 있는 방법을 연구함
- 건축부재의 3D프린팅 제작성을 크게 향상시키기 위한 최적의 프린팅 재료 및 프린팅 방식을 개발하고 제반 기술에 대해 연구함
- 3D 프린팅으로 생산된 건축부재가 기존의 건축설계에서 시공에 이르는 과정에 활용될 수 있도록 새로운 건축생산 프로세스를 개발하고 생산대체효과를 극대화함
- 각종 건축부재 별 목업제작을 위한 신속조형기술 및 3D프린팅 알고리즘을 개발하고 활용성 개발을 위한 시뮬레이션을 구현함

□ 3D 프린팅기술은 삼차원 물체를 프린팅방식으로 제조할 수 있는 기술임

- 3차원 인쇄로 해석되지만 인쇄보다는 제조에 근접한 개념
- 재료를 열로 가열한 상태에서 연속적으로 분사하여 층을 이루고 이 층이 연속적으로 적층되어 하나의 사물을 만드는 기술임
- 프린팅을 위해서는 프린팅 재료, 3D프린터 그리고 소프트웨어가 필요하며 소프트웨어에는 사물 형상제작용 소프트웨어 및 프린터 운용을 위한 프로그램이 필요함

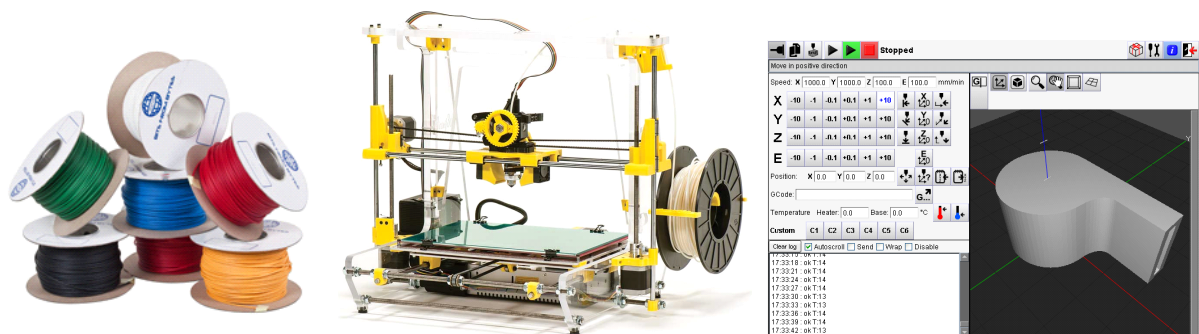


그림 1. 좌로부터 프린팅 재료(PLA), 3D 프린터, 프린팅 소프트웨어

□ 3D 프린팅기술은 최근 시작되어 현재 활발히 응용되고 연구되는 새로운 기술임

- 최초 산업디자인 및 제조업 분야 한정하여 활용되기 시작한 3D 프린팅기술은 현재 의류, 식품, 군사 등 그 범위와 한계를 넓혀가고 있는 단계임
- 많은 3D 프린터 제조회사가 생겨나고 있으며 관련 프린팅기술이 발전함과 동시에 프린팅에 쓰이는 재료에 대한 연구개발도 활발하게 진행됨
- 프린팅에 쓰이는 사물의 3차원 데이터는 생성, 교환의 사적인 차원에서 시작하여 현재는 상업적으로 거래하기 시작하는 등 공적인 영역으로 진입함



그림 2. 3D 프린터의 다양한 활용사례 - 좌로부터 인체보형물, 음식제조, 무기산업

□ 3D 프린팅기술은 여러 나라에서 차세대를 이끌 핵심기술로 인정받고 있으며 국가차원에서 적극적이고 경쟁적으로 지원하고 있는 실정임

- 2013년 3월 미국의 오바마 대통령은 연두 의회 연설에서 3D 프린팅 기술이 산업과 기술 부문의 혁신을 견인하면서, 미국의 제조업에 활기를 불어 넣을 것이라고 언급(Inc, 2013. 2. 14)
- 중국 과학기술부는 ‘국가 기술발전 연구계획 및 2014년 국가과학기술 제조 영역 프로젝트 지침’에 3D프린터를 포함함
- 3D 프린터가 내연기관과 컴퓨터에 이어 3차 산업 혁명을 이끌 기술 중 하나로 소개(영국의 The Economist지)

□ 국내에서는 해당산업 인프라 공급이 미진하고 해당제품을 소비하는 수요기반이 형성되지 않아 정부지원 연구개발사업이 이제 시작하는 단계에 불과함

- 3D프린팅 기술의 개발이 적극적으로 이루어지기 위해서는 재료, 부품, 유통 등의 관련 인프라가 절실히 필요하나 기반이 없는 실정이며 소비자층 및 유통기반도 전무해 아직 요원한 분야임
- 국가적 지원의 수준은 다른 나라와 비교하여 시작단계에 불과함
- 2013년 6월 미래창조과학부에서 3D 프린팅 활용기술을 기술영향평가 대상기술로 선정하고 이를 국가 연구개발사업의 연구기획에 반영하여 글로벌프론티어 과제로 지정예정임
- 산업통상자원부는 ‘3D 프린팅 산업발전 전략포럼’을 개최하고 정책수립 및 계획을 발표함

□ 하지만, 대표적인 국가기간산업 중 하나인 건축분야는 3D 프린팅기술 개발로드맵에 포함조차 되고 있지 못하여 논의와 지원이 전무한 실정이나 해외에서는 이미 3D프린터의 건축분야 응용에 대해 연구가 활성화 된 상황임

- 현재 세계적으로 몇몇 건축 관련 유명 연구기관에서 집중적인 연구를 진행하고 있어 조

만간 가시적인 성과가 예상됨

- 미국 USC 대학의 Behrokh Khoshnevis 교수는 200평 정도의 집 전체를 20시간 안에 프린팅할 수 있는 콘투어 크래프팅이라는 기술을 발표함
- 스위스 취리히 공대(ETH ZURICH)에서는 로봇을 활용하여 조적조 벽을 쌓을 수 있는 기술을 개발하고 이 기술을 통해 궁극적으로 조적프린팅을 구현할 수 있는 방법에 대해 발표함

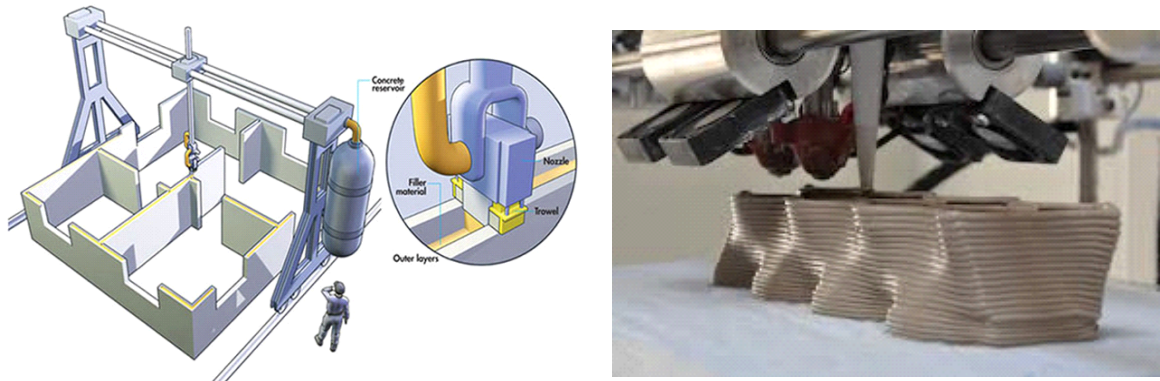


그림 3. 하루 만에 집을 만드는 Contour Crafting(좌)기술과 세라믹 조적 프린팅(우)기술

□ 3D 프린터 기술개발 지원에 건축분야가 포함되어야 하는 가장 중요한 이유는 기존 건축의 생산방식을 혁신할 경우 어떤 분야보다도 큰 파급효과가 있기 때문

- 건축프로세스의 단순화, 커뮤니케이션 오류의 근본적 제거로 많은 자본과 인력이 투입되는 건축산업의 각종 비효율성을 혁신적으로 개선
- 생산물을 낭비없이 프린팅할 수 있는 기술의 도입으로 심각한 문제 중 하나인 건축폐기물을 최소화하고 건축재료의 낭비를 방지하는 등 지속가능성(sustainability)개념을 건축분야로 확대
- 저에너지 공법인 3D 프린팅기술의 도입으로 대표적인 에너지소비산업인 건축의 생산방식을 개선하고 다양화
- 건축분야에 도입할 수 없었던 주문생산방식의 도입으로 대량사용자화시대(mass-customization)에 맞는 새로운 시장 창출

□ 새로운 생산방식의 핵심가치는 3D 프린팅 기술을 이용한 건축생산프로세스의 단순화임

- 기존의 생산프로세스는 기획-설계-엔지니어링-도면제작-허가-건축-입찰-제작-시공-감리 등 복잡하고도 다단계인 수많은 공정으로 이루어져 있어 원가상승, 부실시공, 건설크레임 등 많은 문제점이 발생하고 있음
- 업계 특성 상 수많은 사람들이 참여하여 협업해야 하기 때문에 각 단계의 사람들 사이의 의사소통이 제대로 이루어지지 않을 경우 책임소재의 불분명, 건설비리, 공기연장 등의 문제점이 고질적인 분야임
- 3D 프린팅 기술을 도입할 경우 설계-제작-조립과 같이 단순화되므로 이러한 문제를 사전에 예방하고 비효율성을 개선함으로써 원가절감을 이룰 수 있음

□ 3D 프린팅 기술은 도면을 대체할 수 있는 새로운 커뮤니케이션 수단임

- 전통적인 건축에서 커뮤니케이션이란 도면(drawing)을 매개로 이루어지는 다자간의 의사소통을 말함.
- 하지만 3차원 입체인 건물이 2차원 도면으로 분해되고 이것이 다시 건물로 복원되는 과정에서 만들어지는 모든 종류의 불일치(drawing discrepancy)는 커뮤니케이션상의 오류 중에서도 가장 심각한 부분임
- 도면 자체가 3D 데이터로 대체되고 이를 바탕으로 시공될 경우 오류를 혁신적으로 줄일 수 있으므로 각종 문제점을 사전에 예방할 수 있음

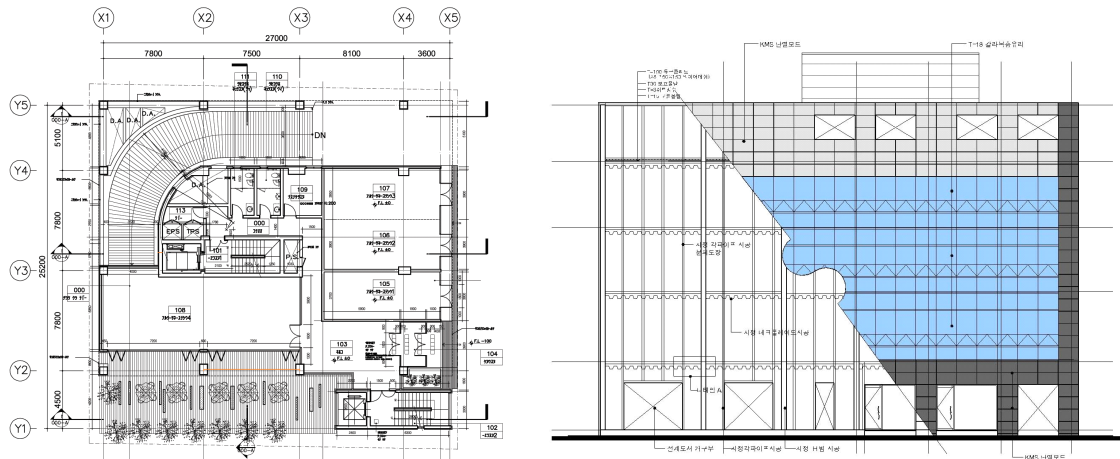


그림 4. 평면도 · 입면도 등 3차원 사물 각 부분의 수많은 절단면으로 의사소통해야하는 도면

□ 건축재료의 경제적 활용으로 지속가능한 건축과 저에너지 공법을 실현함

- 건축시공과정에서 발생하는 재료낭비는 건축폐기물로 사회문제화 되어가고 있음
- 이는 거푸집, 강관비계, 서포트 등 가설재료부터 건물에 필수적인 구조재, 마감재 등에 이르기까지 전 공정에서 발생하고 있음
- 필요한 형상과 부재를 낭비 없이 적재적소에 맞춤형 프린팅하는 기술을 도입함으로써 써보지도 못하고 버리는 원재료를 극적으로 줄일 수 있음.
- 뉴욕의 유명건축가그룹 SHOP은 Porter House라는 작품을 통해 기존의 설계도와 전혀 다른 방식의 전개도를 작성하여 공장의 CNC제작 머신에 직접 입력함으로써 값비싼 외장재인 티타늄의 미사용 조각을 획기적으로 줄이고 고가의 원자재를 저렴하게 공급하는 방법을 발표함.
- 건축은 대표적인 에너지 소비산업으로서, 재료의 생산 및 조립은 에너지를 대량으로 소비함
- 3D 프린팅 기술을 도입한다면 건축부재의 생산에 필요한 각종 과정이 생략됨으로 인해 조립과정 전반에 획기적으로 에너지를 절감할 수 있음

□ 3D 프린팅은 개인주문생산시대에 적합한 건축생산을 가능하게 함

- 대량생산시대의 대표적인 산물인 아파트는 획일성에 대한 거부감과 인구의 감소로 인해 점차적으로 지양되고 있으며 실제적으로 수요가 감소하고 있음
- 건축분야에 새로운 니즈가 생겨나고 있으며 이는 다양성의 가치가 강조된 비정형(Free Form) 및 이형(irregular) 건축을 수행하기에는 기존 방식에 문제가 많음

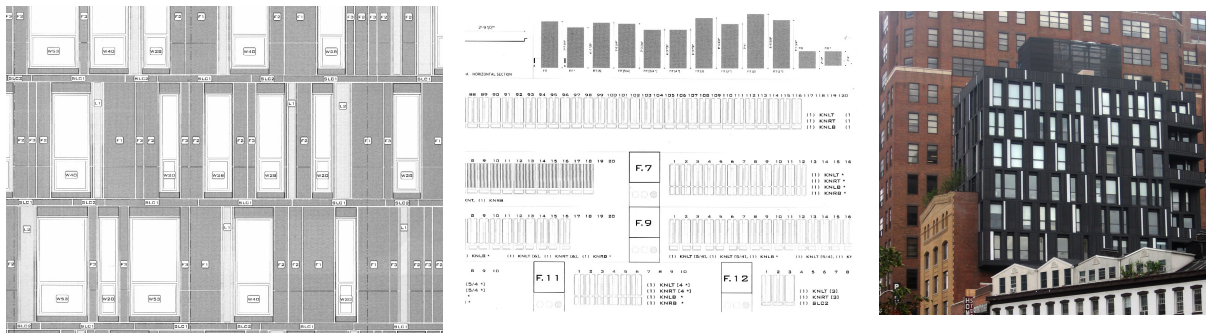


그림 5. 건축가 SHOP의 Porter House 프로젝트에 쓰인 기계제작도 방식의 도면,
Chelsea, 뉴욕

- 3D프린팅 기술은 기존 대량생산방식(Mass Production)과는 달리 대량주문생산시대(Mass Customization)에 가장 적합한 기술임



그림 6. 프리폼 건축(좌), 이형건축(중)과 기존 정형건축(우)의 비교

□ 이러한 장점에도 불구하고 3D 프린터의 활용범위에 건축분야가 포함되지 못하는 가장 큰 이유는 규모에 의한 제약조건과 복잡한 건설생산 프로세스에 있음

- 건축의 규모는 일반 산업생산품과 비교하지 못할 정도의 큰 규모이어서 건축물 전체를 한번에 프린팅할 수 있는 프린터의 제작이란 현실적으로 불가능함
- 건축에 가장 많이 쓰이고 있는 철근콘크리트 재료를 실용적으로 대체할 수 있는 재료는 아직까지 없으며 구조성능 측면에서 가능하다 할지라도 경제성까지 능가하기는 어려운 실정임
- 건축의 프로세스는 일반인들이 상상하는 것 이상으로 복잡다단하며 수많은 사람이 연관되어 있어 쉽게 한 분야의 혁신만으로는 쉽게 개선되기 힘든 구조이며 기술혁신에 대한 수용성도 낮은 분야임
- 또한 3D 프린팅 분야의 원천기술은 이미 특허만료된 오래된 기술이라는 측면에서 보면 기존 3D 프린터관련 연구는 원천기술이라기 보다는 응용기술 연구에 가깝지만 건축분야에서 만큼은 이제껏 시도된 바 없고 완전히 새로운 시장을 창출하는 것이기 때문에 사물프린팅과는 또 다른 영역의 새로운 원천기술개발의 의의를 가지고 있다고 여겨짐

□ 3D 프린팅을 건축에 도입하여 혁신하기 위해서는 언급한 제약조건을 완화, 개선시키는 핵심기술의 개발이 가장 시급한 선결조건이며 이를 위해 본 연구는 프린팅 알고리즘기술, 부재최적화기술, 프린팅 시뮬레이션기술 개발에 집중함

- 프린팅 알고리즘기술 : 건축물을 부분적으로 분리하여 프린팅하고 프린팅된 부재를 기존의 결합방식과는 다른 방식으로 결합함으로써 큰 규모의 건축물을 한꺼번에 프린팅하는 효과를 구현하는 알고리즘 기술
- 부재 최적화기술 : 3D프린터의 프린팅 순서(PATH), 속도, 온도를 최적화하는 부재개발로 기존 건축재료에 필적하는 마감과 물리적 성질을 갖도록 하는 기술
- 프린팅 시뮬레이션기술 : 건축생산의 핵심인 도면을 대체하는 새로운 의사소통방식과 생산된 건축부재의 활용성을 극대화하는 기술로써 복잡한 기존 건축생산 프로세스와 커뮤니케이션을 단순화함

□ 본 연구는 다음과 같은 측면에서 3D 프린팅 관련 기존 연구로 부터 차별화 됨

- 기술개발 목표의 차별성 : 기존 3D 프린팅 기술개발의 목표는 크기, 정밀도, 속도로 압축될 수 있으나 본 연구의 경우 산업생산품에 필요한 노즐 정밀도를 제외하는 대신 크기, 재료, 속도를 건축스케일에 부합하도록 재설정하고 여기에 새로운 건축 생산방식의 연구를 추가하여 차별화함
- 기술개발 대상의 차별성 : 기존 3D 프린팅 기술개발의 대상은 산업생산품 및 국방, 교통, 의료 등의 분야로 집중되고 있으나 아무도 시도하지 않은 건축분야의 연구로 차별화 됨
- 기술개발 방식의 차별성 : 기존 3D 프린팅 기술개발은 크기, 재료, 속도의 단위목표치를 개선하는 개별방식으로 접근하고 있으나 본 연구는 알고리즘, 부재구성, 데이터구성을 개선하는 복합적 방식으로 접근함

나. 연구개발의 중요성

□ 본 기술개발이 성공적으로 이루어질 경우 기존 건축의 패러다임을 혁신적으로 전환할 수 있으며 개인주문생산시대에 걸맞은 기술적, 경제적 성과가 예상됨

- 기존 건축기술개발은 완성단계에 정체되어 있어 부가가치의 창출이 힘든상황 이며 기술개발에 따른 이익창출효과가 적은 전형적인 레드오션의 상황임
- 본 기술은 자원 및 에너지 절약, 지속가능한 개발 등 미래적 가치실현을 목표로 하므로 기술개발의 동기는 충분하며 성공적으로 개발될 경우 국가 기간산업의 건축부문에서 미래 핵심성장동력으로서 성장가능한 분야임
- 3D 건축물 프린팅기술은 성공적으로 상업화되기 까지 수많은 기술개발 및 상용화실험이 필요하며 본 연구는 이를 위한 기초기술개발의 의미를 가짐
- 본 기술분야에서 아직까지는 선진국이 우위를 점하고 있지만 시장지배자가 없는 초기발전단계이므로 기술선점을 이룰 경우 막대한 경제적 가치의 창출이 예상됨

□ 3D 프린팅산업은 아직까지 상업화되기 힘든 기술적 난제를 많이 가지고 있어 기술 개발 및 연구를 위한 정부지원이 절실한 분야임

- 기술적인 난제들은 연구개발을 통해 개선 혹은 해결되어야 하나 상업성을 전제로 하는 민간분야에서는 3D 프린팅으로 거의 수익창출이 이루어지지 않으므로 R&D의 여력 및 동기부여가 이루어지지 않고 있음
- 고가의 실험장비와 장치 제작 등의 문제로 인해 개인연구자의 진입이 어려움
- 따라서, 본 기술의 미래가치를 감안한 정부차원의 과감한 기술개발지원을 통해 기초 연구를 수행하고 이를 산업계에 활용할 수 있도록 한다면 후속 연구 및 상용화모델 개발에 박차를 가할 수 있을 것임

2. 연구개발 목표

가. 연구개발 최종목표

- 본 연구의 궁극적인 최종목표는 최근 사물의 조형과 제조에 차세대 발전방향을 제시 하고 있는 3D 프린팅 기술을 건축분야에 도입하여 건축물을 프린팅할 수 있는 혁신적인 기술을 개발하는 것임
- 이에 대한 기초연구로서 본 연구에서는 구체적으로 ‘**건축물 신속조형을 가능하게 하는 3D 프린터 핵심부품 및 프린팅 알고리즘의 개발과 3D 프린팅 된 건축부재의 활용성 확보**’를 최종 목표로 하고 있음
- 연구 범위는 3D 프린터에 사용가능한 건축재료의 DB를 구축하고 그에 따른 핵심부품의 개발 및 Rapid prototype을 위한 알고리즘의 개발을 시작으로 최종적으로는 건축부재를 제작하여 특허 출원 및 기술상용화를 목표로 함
- 본 연구가 성공적으로 이루어질 경우 시간과 인력 등을 대폭 감축시켜 건축산업에 혁신을 가져올 건축물 신속조형(Building Rapid Printing)기술의 실현을 위한 가장 핵심적인 기술을 확보하는 것임
- 건축기술과 3D 프린터 기술의 융합은 중장기적으로 **1) 해당분야의 고부가가치기술로의 전환, 2) 신기술 유입에 따른 인력구조개선, 3) 신제품 개발, 신사업, 신시장 창출**이 가능한 고부가가치의 주조산업으로의 발전에 중요한 기술로 자리매김할 것임

나. 연차별 연구목표 및 내용

(1) 성과목표 및 성과지표

연차 (단계)	연차별 성과목표	성과지표	측정방법	목표치	가중치
1차 (1단계)	[A] 건축물 신속조형을 위한 알고리즘	① [2-1]특허출원 건수(국내/국외)	(특허 출원건수x1.0)	2건	30%
		② [2-8]소프트웨어 (S/W) 등록건수	(프로그램 출원 및 등록건수x1.0)	1건	25%
	[B] 3D 프린터 핵심부품	③ [1-1]학술지 게재 논문건수(국내/국외) [1-2]학술회의 발표 논문건수(국내/국외)	(국내 학술지게재 논문건수x0.7) +(국내 학술회의 발표 논문건수 x0.3)	2건	30%
		④ [2-1]특허출원 건수(국내/국외)	(특허 출원건수x1.0)	1건	15%
	소 계				100%

연차 (단계)	연차별 성과목표	성 과 지 표	측정방법	목표치	가중치
2차 (2단계)	[C] 3D 프린팅으로 제작된 건축부재	① [2-2]특허등록 건수(국내/국외)	(특허 등록건수x1.0)	2건	30%
		② [1-1]학술지 게재 논문건수(국내/국외) [1-2]학술회의 발표 논문건수(국내/국외)	(국내 학술지게재 논문건수x0.7) +(국내 학술회의 발표 논문건수 x0.3)	2건	25%
		③ [25-3]시제품 출시 건수	(시제품 출시 건수x1.0)	1건	30%
		④ [2-2]특허등록 건수(국내/국외)	(특허 등록건수x1.0)	1건	15%
	소 계				100%

(2) 연구목표 및 내용

연차	연구목표	주요연구내용
1차년도	건축 부재용 3D 프린팅 알고리즘 및 재료연구	- 프린팅 기술 유형 분류 및 자료조사 - 건축화 신속조형을 위한 프린팅 알고리즘개발 - 건축부재용 3D 프린팅 재료의 성능평가 및 최적화 3D 프린터 핵심부품 개발
2차년도	3D 프린팅 건축부재의 Mock-up 테스트 및 활용성 연구	3D 프린팅된 부재의 현장적용 자료조사 3D 프린팅된 건축부재의 활용성 기술개발 3D 프린팅된 건축부재의 구조실험 3D 프린팅 시스템의 건설공정 시뮬레이션

(3) 연구목표별 세부연구내용

(가) 1차년도

건축부재용 3D 프린팅 알고리즘 및 재료연구

- 프린팅 알고리즘 기술이란 건축물을 부분적으로 분리하여 프린팅하고 프린팅된 부재를 기존의 결합방식과는 다른 방식으로 결합함으로써 큰 규모의 건축물을 한꺼번에 프린팅하는 효과를 구현하는 알고리즘을 말함
- 3D 프린팅 재료최적화기술이란 3D프린팅 재료의 프린팅 순서 및 속도, 온도를 최적화하여 기존 건축재료에 필적하는 물성치와 마감을 갖도록 하는 기술을 말함

□ 주요연구내용 별 세부추진내용

주요연구내용	세부추진내용
3D 프린팅 기술관련 자료 조사	- 프린팅 기술 유형분류 및 자료조사 - 3D 프린팅의 산업 영역별 적용현황 분석 - 미래건축분야의 기술수요 분석
건축화 신속조형을 위한 프린팅 알고리즘개발	- 신속조형을 위한 프린팅 알고리즘의 주요 변수 도출 및 DB구축 - 프린팅 부재의 유형별/재료별/크기별 최적화 프린팅 알고리즘 개발 - 개발된 최적화 프린팅 알고리즘의 타당성 검토
건축부재용 3D 프린팅 재료의 성능평가 및 최적화	- 3D 프린터에 사용가능한 건축재료 선별 - 각 선별 재료의 물성치 DB화 - 건축부재용 3D 프린팅 재료의 타당성 분석
3D 프린터 핵심부품 개발	- 프린터의 내구성 및 사용성 향상을 위한 부품개발 - 프린팅의 정밀도 및 속도를 높이기 위한 부품개발 - 스케일효과에 따른 실무적 합성 및 3D프린팅 경제적 타당성 검토

□ 연구내용 별 세부수행 내용

- 3D 프린팅 기술관련 자료조사

프린팅 기술 유형 분류 및 자료조사

- 3D 프린팅 기술 유형 검색 및 분류
- 3D 프린터 제작 업체 및 제품 DB화

3D 프린팅의 산업 영역별 적용현황 분석

- 3D 프린팅 기술 유형 별 산업 적용현황 조사
- 3D 프린터가 적용된 산업의 특징과 기술 유형간의 상관관계 분석

미래건축분야의 기술수요 분석

- 건축분야에 적용 가능한 3D 프린팅 기술유형 분석
- 건설산업의 각 공정별 적용 가능한 단계 분석

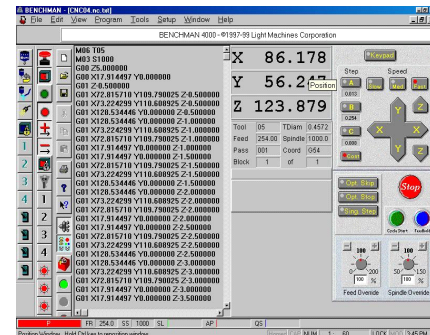


그림 7. 의학에 적용된 3D 프린터(좌), G코드와 프린팅 알고리즘(우)

- 건축화 신속조형을 위한 프린팅 알고리즘 연구

신속조형을 위한 프린팅 알고리즘의 주요변수 도출 및 DB구축

- 프린팅 알고리즘을 담당하는 STL파일 생성시간 단축기술 연구
- 프린팅 속도를 좌우하는 STL파일 및 HEAD PATH 최적화 알고리즘 연구
- 최적화 조건을 프린팅 재료 및 건축부재별로 실험하고 결과의 DB화

프린팅 부재의 유형별/재료별/크기별 최적화 프린팅 알고리즘 개발

- 내/외부, 내력/비내력 등 프린팅 부재 유형별 프린팅 알고리즘 개발
- 점성/비점성, 건식/습식 등 프린터 재료별 프린팅 알고리즘 개발
- 대/중/소, 현장조립/공장조립 등 프린팅 재료 및 부재 크기별 알고리즘 개발

개발된 최적화 프린팅 알고리즘의 타당성 검토

- STL파일의 G-CODE최적화 변환 기술 연구
- 실사 프린팅 결과물의 정밀도 및 곡률도 분석 및 하자개선방법 연구
- G-CODE 및 STL파일 생성시간 단축 및 정밀도향상을 위한 알고리즘 조합

- 건축부재용 3D 프린팅 재료의 성능평가 및 최적화

3D 프린팅에 사용 가능한 건축재료 선별

- 3D 프린팅에 사용되는 기술 유형 중 건축부재 프린팅에 적합한 기술 분류
- 건축부재 3D 프린팅에 사용되는 기술 유형별 사용 가능한 재료 분별
- 기술 유형별 사용 재료 물질과 특징 및 장점 등을 파악해서 건축재료 DB 구축

각 선별 재료의 물성치 DB화

- 선별된 재료의 물리적/화학적 특징에 따른 분류
- 기 분류된 사용재료의 적합한 사용처 선택
- 건축부재 3D 프린팅에 사용되는 재료의 물성치 등 정리 및 DB 구축

건축부재용 3D 프린팅 재료의 타당성 분석

- 건축부재 3D 프린팅의 경제성 분석을 위해서 프린팅 재료 및 프린터의 비용, 프린팅 공정의 비용 등을 종합적으로 검토
- 건축부재 3D 프린팅 재료의 경제성 분석
- 건축부재 3D 프린팅에 사용되는 프린터 및 프린팅 공정의 경제성 분석

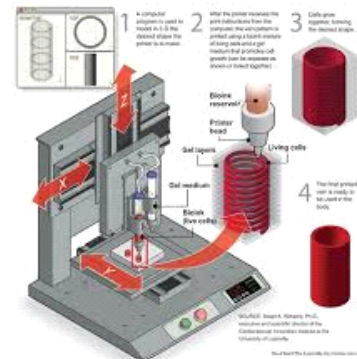
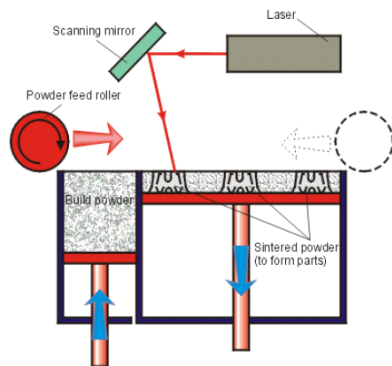


그림 8. 프린팅 재료의 성형방식과 최적화과정(좌), 노즐을 포함한 프린터 핵심부품의 설명(우)

- 3D 프린터 핵심부품 개발

프린터의 내구성 및 사용성 향상을 위한 부품 개발

- 점도있는 건축대체재료의 장시간 사용을 위한 최적 조건 연구
- ABNORMAL방향의 프린팅을 대비한 브리지 기술 활용연구
- 프린팅부재를 최대한 실사에 가깝게 보여주는 최적의 사용자 인터페이스 개발

프린팅의 정밀도 및 프린팅 속도를 높이기 위한 부품 개발

- 프린터의 정밀도 향상을 위한 노즐형상 및 재료민감도 분석
- 프린팅 속도향상을 위한 프린팅 베드온도 및 재료점도 분석
- 분석결과를 활용한 최적형상노즐 및 최적온도의 프린팅베드 부품 개발

스케일효과에 따른 실무적합성 및 3D 프린팅 경제적 타당성 검토

- 프린팅 결과물과 실제 건축부품과의 스케일효과 및 차이를 고려한 실무적합성
- 3D프린팅으로 생산된 건축부재의 생산성 및 업무활용도 분석
- 3D프린팅에 쓰이는 프린팅재료의 강도 및 단가를 고려한 경제적 타당성 검토

(나) 2차년도

3D 프린팅된 건축부재의 Mock-up test 및 활용성 연구

- 3D 프린팅된 건축부재의 경우 기존건축부재를 대체하기 위해서는 적절한 구조적 성능을 지녀야 하며 내구성 및 심미성 등 각종 건축재료로서의 물성을 가져야 하므로 이를 목적으로 테스트 함
- 3D 프린팅된 건축부재를 실제로 기존 건축공정 속에 활용하기 위해서는 각종 공정별 상황을 사전에 시뮬레이션 하여 문제점을 미리 파악하는 것이 중요함
- 3D 프린팅된 건축부재는 디지털 파일 형태로 존재하므로 도면으로 이어지는 기존 건물과는 달리 새로운 프로세스를 거쳐 건축현장에 적용되어야 하므로 이를 시뮬레이션 하여 공정을 고도화 함

□ 별 세부추진내용

주요연구내용	세부추진내용
3D 프린팅 된 건축부재의 현장적용 자료 조사	- 3D프린팅된 건축부재의 유형분류 및 자료조사 - 3D프린팅된 건축부재의 현장 적용현황 분석 - 기존 건축부재를 대체할 수 있는 3D프린팅 부재의 기술적 특성과 적용 시나리오 도출
3D 프린팅 된 건축부재의 활용성 기술개발	- 건축적 적용을 위한 부재별 Mock-up test 실시 - 건축재료의 경제적 활용성 - 개인주문생산 방식의 대응성 검토
3D 프린팅 된 건축부재의 구조실험	- 건축부재 구조실험에 필요한 재료별 변수 도출 - 3D 프린팅용 건축부재의 재료 성능평가 및 최적화를 바탕으로 제작된 재료별 건축부재의 구조실험 - 프린팅 알고리즘에 따른 건축부재의 구조실험
3D 프린팅 시스템의 건설공정 시뮬레이션	- 공정 간 커뮤니케이션 오류 최소화를 위한 건설공정 시뮬레이션 - 기존 공법 대비 3D 프린팅 시스템의 에너지저감 시뮬레이션 - 건설생산프로세스 단순화에 따른 경제적 타당성 검토

□ 연구내용 별 세부수행 내용

- 3D 프린팅된 부재의 현장적용 자료조사

3D 프린팅된 건축부재의 유형분류 및 자료조사

- 규모, 소재 등 특성 별 3D 프린팅 건축부재의 유형분류
- 실제거주 가능 여부 및 건축부재 적용에 대한 니즈조사

3D 프린팅된 건축부재의 현장 적용현황 분석

- 3D 프린팅 건축부재의 현장 적용 여부 및 사용 기기 분석
- 현장 적용후의 문제점 및 가능성 조사

기존 건축부재를 대체할 수 있는 3D 프린팅 부재의 기술적 특성과 적용 시나리오 도출

- 3D 프린팅된 대체 건축부재의 소요 기술적 특성 검토
- 규모 별 기존 건축부재 대체 적용 시나리오 도출

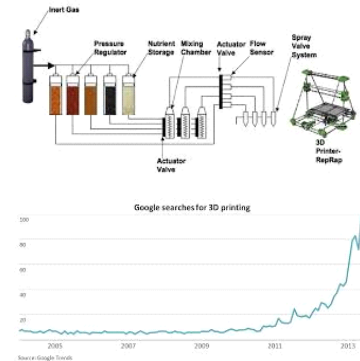
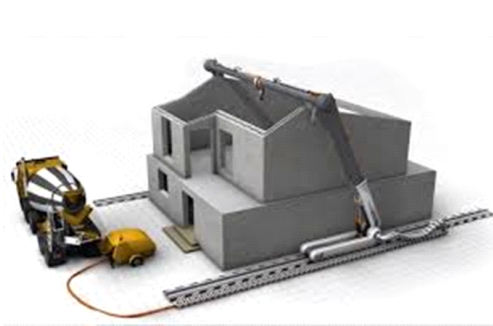


그림 9. 적용 시나리오 도출(좌), 프린팅 재료의 노즐형상에 따른 재료 민감도 분석(우)

- 3D 프린팅된 건축부재의 활용성 기술개발

건축적 적용을 위한 부재별 Mock-up test 실시

- 구조부재의 Mock-up test
- 비구조부재의 Mock-up test
- 건축부재별 Mock-up test를 실시하여 현장 적용가능성 검토

건축재료의 경제적 활용성

- 기존방식에 사용되는 가설재의 불필요성에 따른 경제성 검토
- 3D 프린팅 방식에 따른 재료절감 연구
- 3D 프린팅 재료선정에 따른 경제성 연구

개인주문생산 방식의 대응성 검토

- 모듈화 가능한 부재의 생산성 검토
- 모듈화가 불가능한 부재의 생산성 검토
- 곡면부재 등 free form건축에 대한 대응성 검토

- 3D 프린팅된 건축부재의 구조실험

건축부재 구조실험에 필요한 재료별 변수 도출

- 구축된 재료의 DB를 이용한 건축부재 구조실험에 사용될 변수도출
- 도출된 각 변수에 대해 연구기간 및 연구비 등을 고려하여 타당성 분석을 거쳐 최종 실험변수 도출

3D프린팅용 건축부재의 재료 DB를 바탕으로 제작된 재료별 건축부재의 구조실험

- 3D 프린팅용 건축부재의 재료 DB를 바탕으로 최종적으로 도출된 실험변수에 따라 제작된 재료별 건축부재의 구조실험 수행
- 변수별로 나타나는 구조적 특징이나 프린팅 시의 문제점 등을 고찰

프린팅 알고리즘에 따른 건축부재의 구조실험

- 1차년도에 개발된 최적화 프린팅 알고리즘에 따라 유형별/재료별/크기별로 건축부재를 제작하여 구조실험 수행
- 프린팅 알고리즘에 따른 건축부재의 구조적 특징 및 프린팅시의 문제점 고찰

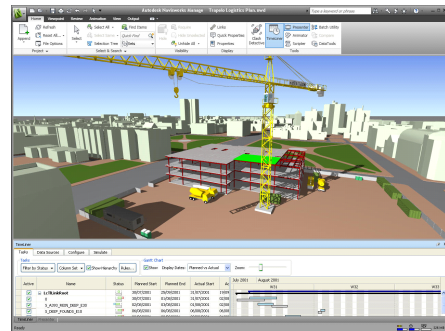
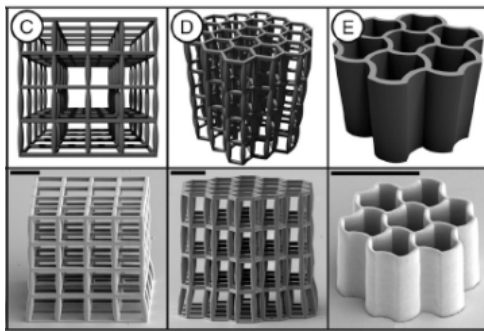


그림 10. 료별, 형상별 구조실험모듈샘플(좌), 내비스워크를 활용한 건설공정 시물레이션(우)

- 3D 프린팅 시스템의 건설공정 시물레이션

공정간 커뮤니케이션 오류 최소화를 위한 건설공정 시물레이션

- 공정간 발생하는 커뮤니케이션 오류 검토
- 3D 프린터 프로세스를 통한 건설공정의 축소
- 공정 축소를 통한 오류의 최소화

기존 공법 대비 3D 프린팅 시스템의 에너지저감 시물레이션

- 기존공법의 에너지소요량 검토
- 3D 프린팅 시스템의 에너지소요량 분석
- 에너지 저감률 비교, 분석

건설생산프로세스 단순화에 따른 경제적 타당성 검토

- 공정 축소로 인해 발생하는 공기단축에 의한 경제적 성과 검토
- 건설생산프로세스 단순화로 인해 발생하는 부가적인 경제적 이윤 검토

3. 관련분야의 국내외 기술개발 현황

가. 관련 분야의 국내외 연구동향 및 학술적 성과

(1) 국가 연구개발사업 유사연구 실적

(가) 연구개발과제의 중복방지를 위한 조사 및 검토결과

부처명	사업명	과제명	예산 (백만)	비 고
중소기업청	연구장비공동 활용지원사업	3D 프린터를 활용한 인형개발	-	산업디자인
중소기업청	연구장비공동 활용지원사업	3D 프린터를 이용한 폴오토폴리싱머신 제작 및 조립지그 형상 측정	1	산업디자인
지식경제부	산업기술거점 기관지원사업	치과모형 제작을 위한 정밀도 20 μ m급 Hybrid 타입의 데스크톱용 3D 프린터 기술 개발	180	의료분야
중소기업청	산학연협력 기술개발사업	단축식 스크류를 이용한 보급형 컬러 3D 프린터 노즐 개발	56	소재분야
중소기업청	창업성장 기술개발사업	융복합 3D 프린터 및 원료개발	171	소재분야
중소기업청	연구장비공동 활용지원사업	3D 프린팅을 이용 한 LED 오가닉 조명 디자인 개발	3	조명분야
중소기업청	창업성장 기술개발사업	3D 프린팅, 3D CNC 디자인 기술을 통한 스마트기기 케이스 및 액세서리 제작	49	산업디자인
미래부	일반연구자 지원사업	3D 분석 및 프린팅 시스템을 이용한 인간공학적 몰드 브라 설계기술 개발	40	산업디자인
미래부	리더연구자 지원사업	생체 조직 재생을 위한 쾌속조형 기반 3차원 세포 프린팅 기술 개발	671	의료분야
미래부	일반연구자 지원사업	생체 재료를 이용하는 3D 프린팅 기술 개발과 생분해성의 기능성 스캐폴드 제작	44	의료분야
미래부	중견연구자 지원사업	나노스케일 3차원 프린팅 시스템	512	소재분야
산자부	글로벌전문기술 개발사업	3차원 프린팅 기반의 디지털 설계 및 제조 환경 구축을 위한 융합 데이터 처리 및 모델링 원천기술 개발	360	산업디자인
중소기업청	산학연협력 기술개발사업	3D 프린팅 기술의 데이터베이스화를 지원하는 모바일 및 온라인 확장 시스템 구축	41	전산분야
교육과학 기술부	부품소재산업 경쟁력향상사업	스마트폰용 300dpi급 해상도를 갖는 무안경식 3D 프린터 엔진 개발	435	산업디자인

- 위 표와 같이 NTIS를 통해 3D프린터와 관련한 기 수행 혹은 수행중인 과제를 모두 조사하였으며 과제명, 내용, 목표 등의 정보로 중복성 여부를 검토함
- 그 결과 국토교통부 소관 연구개발사업 및 타 부처 연구개발사업으로 기 수행되었거나 수행 중인 유사과제는 전혀 없는 것으로 판명되었음
- 따라서 본 연구개발과제는 타 연구와 차별화된 연구이며 중복되지 않았음을 확인하였음

(나) 연구개발과제의 차별화 방안

- 본 과제는 3D 프린팅 기술을 건축이라는 새로운 분야에 도입하여 기존 건축의 패러다임을 바꿀 수 있는 핵심기술을 개발하고자 하는 것으로 기타 과제와는 차별화된 독창적인 제안임
- 또한 전 세계적으로 기능성 3D 프린팅 기술에 대한 연구 개발은 소규모, 초기 단계이며 본 사업을 통해 관련분야 원천 기술을 개발하여 우리나라가 3D 프린팅 건축물 관련 글로벌 시장을 선도할 수 있는 최적의 기회임

(2) 관련분야의 국내외 연구동향 및 학술적 흐름 분석

(가) 국내 기술개발 동향

- 2013년 9월 현재, RP(Rapid Prototyping) 및 AM(Additive Manufacturing) 등 3D 프린팅 기술과 관련된 국내 기술개발 현황은 미약한 실정임
- 우수기술연구센터(ATC)기술개발 사업을 통해 (주)쓰리디시스템즈코리아의 “3차원 프린팅 기반의 디지털 설계 및 제조환경 구축을 위한 융합 데이터처리 및 모델링 원천기술 개발” 연구과제가 진행되고 있음
- 미래창조과학부는 3D 프린팅 활용기술을 기술영향평가 대상기술로 선정하고, 기술영향평가위원회를 거쳐 2013년 12월 최종 평가결과를 발표하여 국가 연구개발사업의 연구기획에 반영할 계획임
- 산업통상자원부는 ‘3D 프린팅 산업 발전 전략 포럼’을 개최하고, ‘13년 3분기 내로 정책수립 계획을 발표(’13. 7)
 - 제도분과, 기술분과 및 산업응용·사업화 분과 위원회를 구성하여 산업 기반 조성 및 활성화방안 수립 예정
 - 현재 3D 프린팅 기술 관련 R&D 지원은 비교적 제한적임
- 미래창조과학부는 경제·윤리·사회·문화·과학기술·환경의 관점에서 ‘3D 프린팅 활용 기술’의 기술영향평가 진행 중(’13. 6~12)
 - 소재, 3D 스캐닝·모델링, 3D 프린팅 공정 및 활용 등에 한해 기술 영향평가를 수행하며, 단기(5년 내) 및 중장기(5년 후)로 나누어 분석
 - 기술영향평가 결과는 국가연구개발사업의 연구기획에 반영되거나, 기술 개발의 부정적 영향을 최소화하기 위한 대책 마련에 활용
- 미래창조과학부는 2014년도 글로벌프론티어사업(’14~’22)으로 ‘차세대 3D 프린팅 기술을 이용한 스마트 소재·소자 기술’을 선정할 예정
 - 10년에 걸쳐 약 1000억 수준의 연구투자가 진행될 예정
 - 3D 프린팅 기술 로드맵을 제시하면서 국방·항공, 자동차, 복지·건강, 소비자·도매, 일반 제조업, 공급망, 상업분야를 나열한 가운데, 이 중 건축분야에 대한 고려는 전무한 상황임

(나) 국외 기술개발 동향

① 미국

- USC(University of Southern California)에서는 국립과학재단(National Science Foundation)과 해군연구실(Office of Naval Research)의 지원을 바탕으로 로봇 건설 시스템(Robotic Construction system)인 'Contour Crafting'연구를 진행 중
- Contour Crafting 프로젝트(혹은 PRINT-A-HOUSE 프로젝트)는 3D 프린터와 동일한 방식을 사용하여 컴퓨터로 제어하는 기증기를 사용하여 콘크리트를 적층해 가며 건축물을 시공함
- 뉴욕타임즈 웹 버전에서는 본 연구에 대해 기술하면서 미래의 건축물 시공 자동화 기법에 의한 건설시장의 변화에 주목함

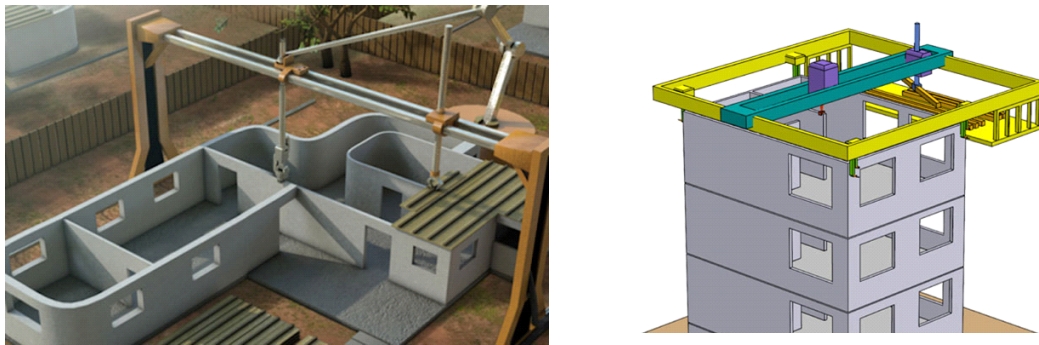


그림 11. Contour Crafting 연구의 최종목표(안)

- 미국 항공 우주국(NASA)에서는 3D 프린터 기술을 활용하여 달에 우주비행사 거주용 주택을 건설하는 프로젝트를 계획 중
- 이를 위해 USC(University of Southern California)의 Behrokh Khoshnevis 교수 연구실과 협업 중에 있음
- 3D 프린터 로봇을 사용하여 24시간 이내에 건축물을 완성한다는 점에 초점을 맞추고 있음

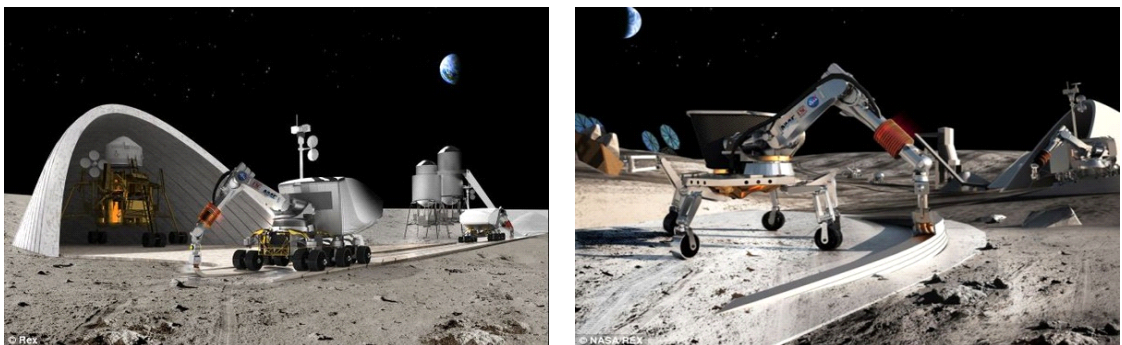


그림 12. NASA가 계획하는 3D 프린터를 사용한 우주 주택건설 조감도

② 유럽

- 유럽에서는 설계회사 및 대학 연구팀의 주도하에 3D 프린터를 건설시장에 활용하는 방안에 대한 연구가 진행 중
- 영국의 Huddersfield 대학교와 미국의 UCLA의 학생으로 구성된 공동연구팀은 건축가 Peter Ebner 교수의 지도하에 3D 프린터를 사용하여 제작한 초소형 건축물을 발표하였음
- 3D 프린터로 인쇄한 재료를 조립하는 방식으로 제작한 본 주택은 ‘저렴한 가격으로 효율적인 소형 주택을 제작’한다는 목적아래 진행되었으며 이동이 가능한 형태로 수도, 전기등을 제외한 기본 가구 등을 구비하고 있음



그림 13. 미-영 공동연구팀이 제작한 이동형 3D 프린팅 주택과 이미지 조감도

- 네덜란드의 건축설계업체 ‘더스(Dus)’는 암스테르담에 주택 한 채를 3D 프린터 (Kamermaker)로 건축하는 ‘3D 커널 하우스(3D Canal House)’ 프로젝트를 추진
- 공기단축과 맞춤형 주택에 초점을 맞추고 진행되는 본 프로젝트는 별집과 같은 구조물을 매주 하나씩 제작해 짓고 있으며 사이트와 제작 과정을 모두 공개하여 의견을 교환하는 장을 마련하였음.
- 전 세계적인 주택문제에 대한 해결책을 제공하는 방법을 연구 함

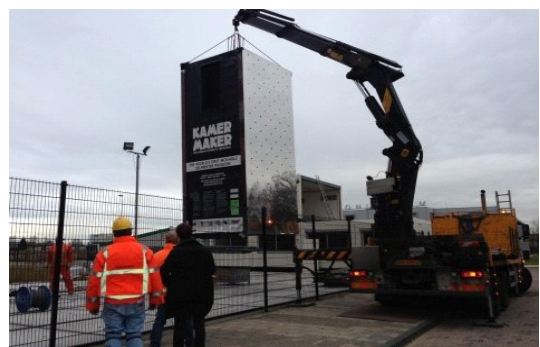


그림 14. 네덜란드 더스 社의 3D 프린팅 건축물 ‘Canal House’(좌) 및 3D 프린터(Kamermaker)(우)

- 스위스 취리히 공대(ETH ZURICH)에서는 로봇을 활용하여 조적조 벽을 쌓는 기술을 개발(Robotsinarchitecture)
- 이 기술을 통해 궁극적으로 조적프린팅을 구현할 수 있는 방법에 대해 발표 함

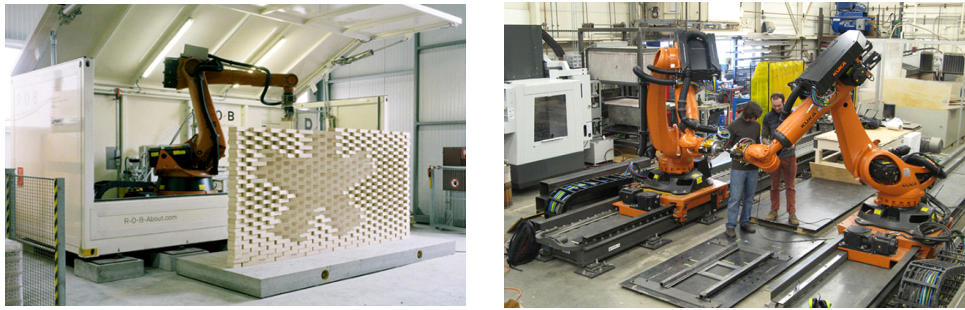


그림 15. 로봇팔을 이용한 건설 기술

- 이처럼 해외에서는 이미 3D 프린터를 건축분야에 도입하려는 연구가 진행되고 있으나 국내에서는 3D 프린팅 기술개발 로드맵에 건축분야가 포함조차 되고 있지 못하며 논의가 전무한 실정임

(다) 국내외 관련 기술 특허 동향

① 국내외 특허 동향 비교

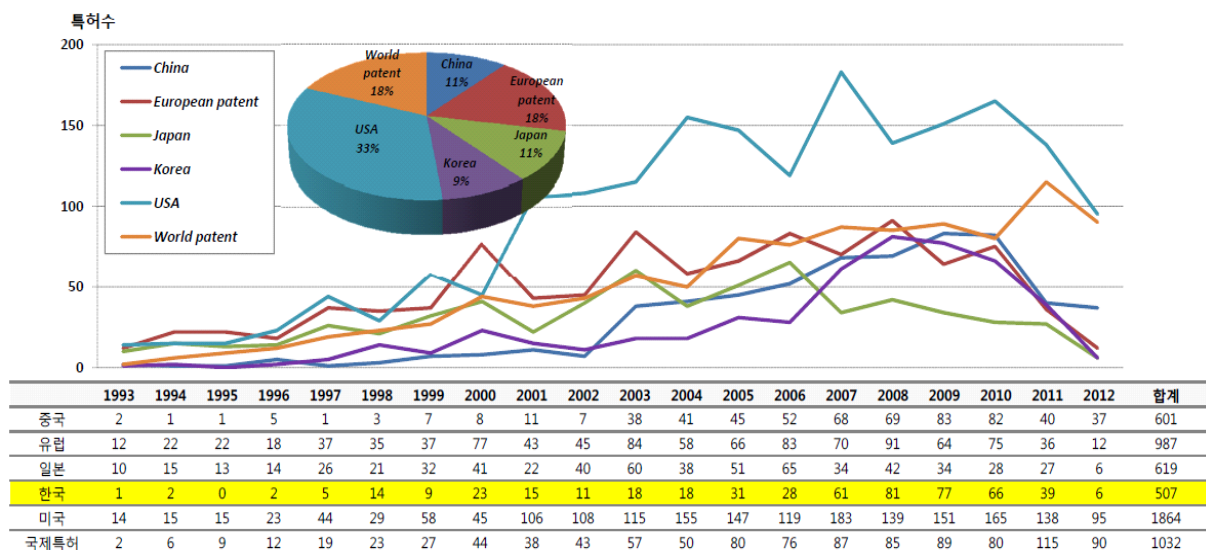


그림 16. 최근 20년간 국가별 특허 출원 건수

- 최근 10년간 3D 프린터 관련 특허는 꾸준한 증가추세에 있음. 최초 특허는 미국, 유럽, 일본 중심이었으나 2000년대 이후로 미국 특허가 빠른 속도로 성장하여 미국 중심으로 시장이 형성됨
- 3D 프린터 관련 특허들은 주로 제조 관련 기술이나 적층가공에 필요한 소재, 바이오센서, 나노전자공학 등에 활용 가능한 다양한 기능성을 가진 출력 소재에 집중되어 있음
- 경관분석(landscape analysis) 기법으로 특허를 분석해보면 3D 프린터 관련 분야에서 크게 15가지의 유형을 보임

- 또한 3D 프린터 분야는 이제 막 시장을 형성하고 있어 장기적으로 급격한 성장이 기대되고, 미래 제조 경쟁력을 좌우할 기술임에도 불구하고 국외 특허에서도 3D 프린터와 건축을 융합한 관련 특허는 희박한 실정이며, 국내도 전무한 현실임

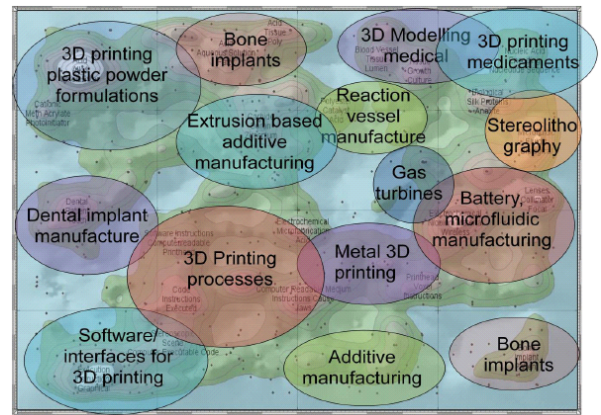


그림 17. 3D 프린터 관련 특허 중 연관분야 유형도

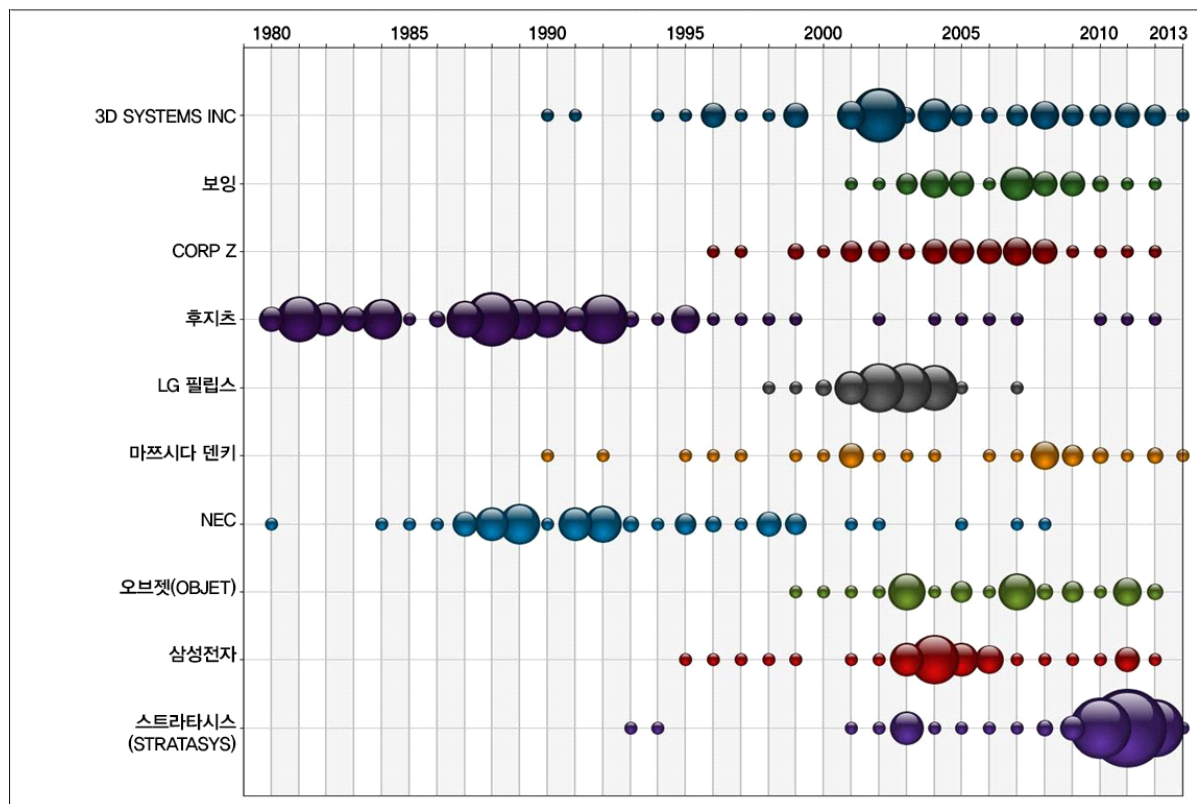


그림 18. 3D 프린터 관련 업계 별 특허출원 추이

- 1980년도부터 2013년까지의 전 세계 특허출원으로 인한 공개건수를 조사한 결과 총 9145의 공개건수 중 2012년 특허출원 건수가 최대를 보였으며, 최다 출원인은 James F. Bredt, 최다 특허 양수회사는 Fujitsu로 나타남
- 관련 회사들의 특허출원 경향을 보면 꾸준한 투자로 인해 최다 출원 건수를 보이고 있는 Fujitsu부터, 신생회사로 최근 급격한 성장을 보이고 있는 STRATASYS INC.까지 업계의 동향을 살펴볼 수 있음

② 국내외 관련 특허 세부사항

㉠ 국내 특허 세부사항

- 국내의 3D 프린터 관련 특허는 주로 기술적인 분야에 집중되어 있으며, 관련 특허 출원 중 등록된 특허는 아래와 같음 (KIPRIS 검색: 검색단어-3D 프린터/특허 등록 건), 이중 건축 관련 3D 프린터 특허는 전무함

표 1. 국내 3D 프린터 관련 특허

특허명	출원인	Pub. No.	요약
3D 프린터를 이용한 치아 교정기제조장치	윤형의	10-2013-0085893	환자의 스캔 데이터로부터 CAD를 이용하여 치아 교정기를 설계하고 3D프린터를 이용하여 치아 교정기를 제조하는 장치
멀티칼라 제품성형이 가능한 3D 프린터	이재식, 예콜 바이오텍(주)	10-2013-0124827	복수개의 열가소성 필라멘트를 이용하여 멀티칼라 제품성형이 가능한 3D 프린터
3D프린터의 다색 출력을 위한 방법 및 용기	김지현	10-2012-0154463	3D 프린터의 다색 출력을 위한 방법 및 용기에 관한 것으로, 보다 상세히는 빛에 의해 상이 변하는 상변화 물질을 이용하여 조사된 영역이 경화되는 원리를 이용해 3D 물체를 다색으로 출력하는 방법을 특징
마이크로 캡슐을 이용한 난연 및 내열 특성을 가지는 3D 프린터용 PLA 필라멘트제조방법 및 이에 의해 제조된 PLA 필라멘트	이재식, 예콜 바이오텍(주)	10-2013-0124881	본 발명은 코어를 감싸는 벽물질이 멜라민수지로 이루어진 멜라민 마이크로캡슐을 이용하여 PLA의 내열 및 난연특성을 향상시키고, 아울러 멜라민 마이크로캡슐에 사용된 코어물질의 기능성이 발현되는 3D 프린터용 PLA 필라멘트를 제조하는 방법 및 이에 의해 제조된 3D 프린터용 PLA 필라멘트에 대한 것
3D 프린터를 보수하기 위한 장치 및 방법	3D 시스템즈 인코퍼레이티드	10-2007-7008983 10-2007-7008984	본 발명은 3차원 대상을 생성하기 위한 장치 및 방법과, 전술한 장치 및 방법과 관련하여 사용되는 보조 시스템에 관한 것

㉡ 국외 특허 세부사항

- 3D 프린터와 관련한 국외 특허는 기하급수적으로 증가하는 추세임
- 영국 특허청은 3D 프린터 산업 관련 특허를 대상으로 산업동향 및 미래가치를 분석한 “3D Printing - A patent overview” 보고서를 발표함
- 본 보고서에 따르면 인용건수에 따라 더 유용한 특허를 검색할 수 있는 기법인 인용분석(citation analysis)법을 사용하여 국외특허 6개를 선정할 수 있음. 하지만 이 중 건축과 직접적인 관련 특허등록은 전무함

표 2. 국외 3D 프린터 관련 특허

특허명	발명인	Pub. No.	요약
Three-dimensional printing process to fabricate moulds and prototypes involving selectively applying binder to successively deposited powder layers	Brancazio D. Bredt J. et al.	US5204055	3D 프린팅을 사용한 출력물의 제조기술 (연속층 적층기술)
Appts. for prodn. of parts by selective sintering comprising a laser beam controllably directed onto a layer of powder	Deckard C.E. Dekard C.R.	US4863538	3D 프린팅 부품기술
Complex drug delivery systems and cell regeneration templates provided by computer aided design of solid free-form fabrication processes to form sequential polymeric layers	Cima L.G. Cima M.	US5518680	3D 프린팅을 사용한 출력물의 제조기술(연속층 적층기술)
Producing component by selectively bonding powder in deposited layers by applying bonding liquid employing 3-dimensional printing technique, based on ink jet printing and building up successive layers	Brancazio D. Bredt J. et al.	US5387380	3D 프린팅을 사용한 출력물의 제조기술(연속층 적층기술)
Three dimensional printing system for computer aided design models, cures 3D models build up in layers by dispersing photopolymer material, using UV or IR radiation optionally	Gothait H.	US6259962	3D 프린팅을 사용한 출력물의 제조기술(재료 분사 및 연속층 적층기술)
Formation of multilayer parts by sintering comprises depositing layers of powder mixt. materials and scanning each individual layer with a sintering radiation beam	BARLOW J.W. Beaman J.J. et al.	US944817	3D 프린팅을 사용한 출력물의 제조기술(재료 분사 및 연속층 적층기술, 층별 스캐닝 기술)

- 이탈리아 엔지니어 엔리코 다니(Enrico Dini)는 최근 건축물 시공을 위한 3D 프린터 ‘d-shape’를 개발하면서 2개의 특허를 출원함
- 이처럼 건축물 시공에 특화된 3D 프린터 제작에 수반하여 다수의 특허출원이 예상됨

표 3. 건축물 제작에 사용되는 3D 프린터 관련 국외특허

특허명	발명인	Pub. No.	요약
Method and device for building automatically conglomerate structures	Enrico Dini, Roberto Nannini, Moreno Chiarugi	CA2602071 A1	건축물 시공을 위한 3D 프린터 기계장치 및 방법에 관한 특허
Method for automatically producing a conglomerate structure and apparatus therefor	Enrico Dini	US8337736 B2	3D 프린터를 사용한 건축물 시공방법

나. 국내외 시장분석 및 산업동향

(1) 3D 프린터 관련 산업동향(건축물 제외)

(가) 업체동향

- 3D 프린터 업체는 산업용 프린터를 중심으로 성장하여 왔으나 최근 개인용 프린터 시장으로의 진출이 확산되고 있음
- Major 업체간 M&A를 통해 대형화 추세이며 산업용 1, 2위 업체인 Stratasys와 Objet의 합병 추진 중임
- 3D 프린팅 연계 서비스 업체는 CAD, Co-design툴, 스캐너 등으로 3D 프린팅을 인터넷과 모바일로 연계하는 다양한 형태의 파생 서비스가 창출되고 있음

(나) 시장동향

- 기존의 세계적 3D프린터 기업인 스트라타시스와 3D시스템 등이 보유하고 있었던 3D프린터의 기술특허들이 최근 만료되면서 5년 전 구입 가격이었던 1만 4천달러(약 1,500만원)에서 1,000달러(약110만원)로 떨어지는 등 3D 프린터 구매 장벽이 대폭 제거됨
- 구매가격하락에 따라 일반소비자들도 장비 구매 가능, 제품 제작비 절감과 DIY(Do-it-yourself) 소비문화 트렌드에 맞춰 주목받기 시작
- 대기업이 아닌 창업 소기업들이 3D프린터를 이용해 사업에 응용하기 시작함

(다) 시장규모추이

- 3D 프린팅 시장은 연평균 13.5%의 성장을 지속하여 2017년에는 3억 5,000만 달러로 성장할 것으로 예상됨
- 3D imaging, 3D modeling, 3D scanning, 3D rendering, layout and animation and image reconstruction 등 AM(After Market) 시장인 3D 데이터 분야는 연평균 26.7% 성장하여 2018년에는 9억 8,200만 달러에 이를 것으로 예상됨
- 3D 프린팅 글로벌 시장규모는 3D프린터 제조시장 및 3D프린팅 2차 서비스시장을 포함한 3D프린팅 제작 결과물을 활용하는 모든 가치시장 규모를 합하여 전망하면 2001년 110억 달러, 2011년 370억 달러에서 2019년에는 1,330억 달러의 최대 규모 시장이 형성될 것으로 추정됨

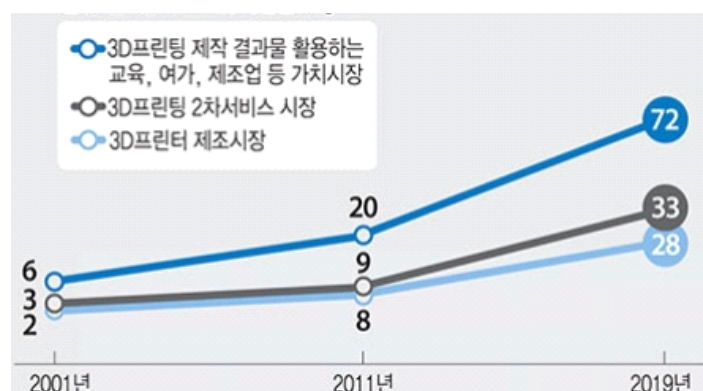


그림 19. 3D 프린팅 글로벌 시장규모(2019년은 추정)(단위: 십억 달러)

(2) 3D 프린터 장비 보급현황

- 1998년~2012년 세계 3D 프린터 장비 설치 대수(누적)는 56,856대이며, 미국·독일·일본·중국의 점유율이 세계시장의 60%를 상회
- 중국의 경우 2004년 설치 점유율이 7.2%에 불과하였으나, 2012년 세계 3위의 설치 대수를 기록하며 9%에 육박하는 점유율 달성
- 우리나라는 약 1,300여 대 설치 추정(점유율 2.3%)

표 4. 국가별 3D 프린터 장비 설치 점유율(누적)

국가	미국	독일	일본	중국	영국	이태리	프랑스	한국	캐나다	대만	러시아	기타
점유율	38.0%	9.4%	9.7%	8.7%	4.2%	3.8%	3.2%	2.3%	1.9%	1.5%	1.4%	15%

(3) 3D 프린팅 건축물 관련 산업동향

- 중국의 상하이 소재 설계회사인 상하이 원쑤장식설계엔지니어링은 3D 프린터를 이용해 세계 최초의 실 거주 건축물을 완성함
- 시멘트와 유리섬유를 혼합한 소재를 사용하여 200m² 크기의 주택 10가구를 건설했으며 24안에 작업을 마침
- 업체는 본 건축물을 전체 출력한 것이 아닌 부품을 출력해 조립한 방식이므로 최초의 수식어가 적합하지 않다고 주장함. 하지만 3D 프린터를 건설현장에 적용한 측면은 주목해야하며, 3D 프린터를 건축분야에 적용하는 사안은 건설 산업 및 파급효과 측면에서 시급한 과제임을 증명함



그림 20. 중국에서 제작된 3D 프린팅 건축물

- 네덜란드의 건축업체 ‘유니버스 아키텍처’는 피비우스의 띠처럼 생긴 건축물을 3D 프린터로 제작하는 프로젝트를 추진 중
- 이탈리아 엔지니어 엔리코 다니가 개발한 3D 프린터 ‘d-shape’ 제작업체인 ‘DINITECH’와 협업 후 진행 예정
- 이처럼 3D 프린터로 건축물을 제작하는 일이 현실로 다가옴
- 영국의 ‘소프트킬’ 업체 역시 3D 프린터 건축사업에 진출
- 외계인이 사는 주택의 개념을 도입한 ‘프로토허스(ProtoHouse)’ 건축프로젝트를 추진 중

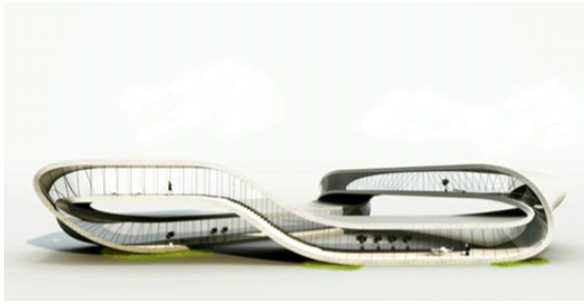


그림 21. 네덜란드 유니버스 아키텍처의 3D 프린팅 건축물



그림 22. 영국 소프트킬의 3D 프린팅 건축물 ‘프로토허하우스’ 이미지

- 이탈리아 엔지니어 엔리코 다니는 로봇팔과 에폭시수지를 사용하여 사방 6m의 건축물 시공을 위한 3D 프린터 ‘d-shape’를 제작 하면서 25년 안에 ‘3D 건설’이라는 새로운 과학분야가 생길 것으로 예상 함
- ‘d-shape’는 건축물 부지로의 이동을 위해 분해 및 조립이 가능함



그림 23. 엔리코 다니가 개발한 건축물을 위한 3D 프린터 ‘d-shape’

- 우리나라의 경우 3D 프린터를 건축산업에 적용하는 프로젝트를 진행하는 건축업체는 전무 함
- 이 사안은 공기단축, 주택공급, 친환경 건설방식, 창의경제 성과창출 등의 목표와 부합하여 최적이라 판단되며 해외업체의 연구개발 진행속도를 고려할 때 시급히 추진해야 한다고 사료됨

제2장. 연구개발 수행 내용 및 결과

1. 핵심연구성과

연 차	연구 내용	연구 결과
1차년도	▪ 프린팅 기술 유형 분류 및 자료조사	▪ 전 세계 선진 연구그룹의 건축용 3D 프린터 개발현황 및 요소기술을 확보 함
	▪ 건축화 신속조형을 위한 프린팅 알고리즘개발	▪ 건축용 3D 프린터 시제품을 제작 함
	▪ 건축부재용 3D 프린팅 재료의 성능평가 및 최적화	▪ 시제품을 구동하여 최적의 재료 배합 및 알고리즘 개발을 위한 요구 성능을 도출 함
	▪ 3D 프린터 핵심부품 개발	▪ 다수의 특허출원으로 건축용 3D 프린터의 핵심기술인 노즐에 대한 기술력을 확보함
2차년도	▪ 3D 프린팅된 부재의 현장적용 자료조사	▪ 관련 연구에 대한 논문을 게재 함
	▪ 3D 프린팅된 건축부재의 활용성 기술개발	▪ 관련 연구에 대한 논문을 게재 함
	▪ 3D 프린팅된 건축부재의 구조실험	▪ 건축용 3D 프린터를 사용하여 건축부재 시제품을 출력한 뒤 적층가능한지 여부에 대한 검토를 함
	▪ 3D 프린팅 시스템의 건설공정 시물레이션	▪ 3D 프린팅 시스템의 건설공정 시물레이션 적용시에 타당성 검토

- 건축물 3D프린팅 연구그룹 별 특징 및 한계점은 아래 표와 같음
- 미국, 유럽, 중국 등을 중심으로 한 현재까지의 3D프린팅 건축 기술은 단순 조립, 중소형 프로토타입 건축물 또는 건축시공자동화 정도의 수준에 머물고 있어 실용화와 거리가 있음

	명칭	대형부재 생산	자동 시스템	맞춤형 부재생산	보강재 사용
USC	Contour Crafting	△ (벽체, 슬래브)	○	△	○
Harvard	3D Printed Ceramics	X (차양, 타일)	○	○	△
Loughbough	Concrete Printing	△ (블록)	○	△	X
MIT	Design Computation	X (소형모형)	X	△	○
Winsun	Giant 3D Printer	○ (벽체, 슬래브)	X	△	○

- 과제를 통해 제작된 건축용 3D프린터는 국내 최초라 할 수 있으며 순수 국내기술로 완성한 측면에서 중요성이 있음
- 중국의 윈쑈 업체의 단순 원형노즐을 사용하는 방식과 비교하였을 때 본 과제에서 도출해낸 노즐관련 특허 4건을 추후 연구를 통해 제작한다면 충분히 선두연구그룹으로의 진입이 가능할 것임
- 하버드대학교 연구그룹이나 네덜란드의 더스社에서는 콘크리트기반의 재료가 아님
- 본 과제에서는 콘크리트 기반의 건축용 3D프린터 용 재료를 완성하였으며 적층상태가 가능한 배합비율을 도출하였음

2. 연구수행 과정 및 내용

가. 프린팅 기술 유형 분류 및 자료조사

- 전 세계 선진 연구그룹의 건축용 3D 프린터 개발현황 및 요소기술을 확보 함
- 현재 다수의 연구그룹에 의해 빌딩 프린팅에 대한 연구가 수행되고 있다. 각 프로젝트의 진행상황은 개념을 정립하는 수준부터 실제 콘크리트를 분사하여 구조물을 완성한 사례까지 다양하다. 본 논문에서는 빌딩 프린팅 프로젝트 중 자체 제작한 건설용 3D 프린터를 보유하고 직접 재료를 분사하여 가시화된 모델 혹은 구조물을 구현하고 최종 목표를 거주용 주택으로 하고 있는 프로젝트에 한정하여 총 네 그룹을 선정하였다.

(1) 중국: Giant 3D printer

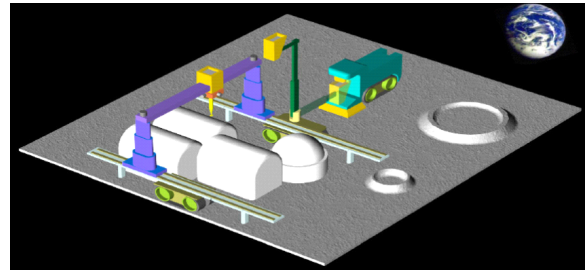
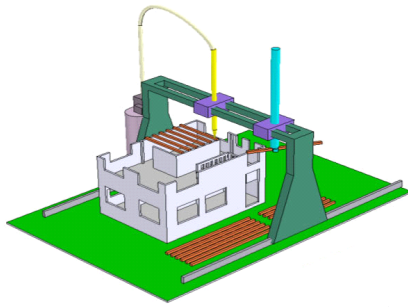
- 중국의 WINSUN 건설업체는 'Giant 3D printer'라 명명한 건설용 3D 프린터를 구축하고 실제 거주 가능한 주택을 완공함. WINSUN 업체는 10가구로 구성된 시험 단층주택 단지, 복층 빌라, 대규모 단층 빌라, 5층 아파트 총 4개의 프로젝트를 완료 혹은 진행 중임
- WINSUN은 모든 프로젝트에 벽체를 모듈화 하여 출력한 뒤 현장에서 조립하는 조립화 공법을 적용함. 이는 마치 공장제작한 대형판 프리캐스트 부재를 현장에서 조립하는 대형판 조립식 구조의 형식을 띄고 있음
- 공장에서 프리캐스트 벽체 모듈을 제작할 시에 대규모 3D 프린터를 사용함으로 기존의 공장제작 과정에서 필요한 형틀제작, 타설, 탈형, 양생과정을 생략하여 제작과정을 단순화 할 수 있음
- 또한 WINSUN은 벽체의 소요강도를 위해 벽체 내에 철근보강을 추가로 작업함. 대형판 조립식 구조와 마찬가지로 3D 프린터를 사용하여 제작한 부재를 현장에서 설치할 시에는 현장타설 철근콘크리트 내력벽 구조물에 비하여 접합부의 구조성능이 확연히 떨어질 수 있으므로 지진과 같은 횡력에 대한 저항요소를 확보해야 함

(2) 미국: Contour Crafting

- 미국의 서던캘리포니아대학교(USC: University of Southern California)의 Behrokh Khoshnevis 교수 연구팀은 로봇시공시스템(Robotic Construction System), 일명 컨투

어 크래프팅(CC: Contour Crafting) 프로젝트를 수행하고 있음

- 본 연구팀이 정의하는 Contour Crafting이란 로봇 팔과 압출 노즐을 사용하여 재료 적층 및 보강이 가능한 기술을 뜻함
- 본 연구팀이 제안하는 빌딩 프린팅 기술의 최종적인 목표는 3D 프린터를 이용하여 전체 구조물을 연속적으로 출력하는 시스템이며 이에 대한 개념도를 제시하고 있음. 또한 연구팀은 컨투어 크래프팅 시스템을 이용하여 달에 거주용 빌딩을 건설하는 계획이 담긴 연구논문을 발표함



(a) Construcdtion of singel residence using CC

(b) Lunar Contour Crafting system

그림 24. 미국의 Contour Crafting 개념도

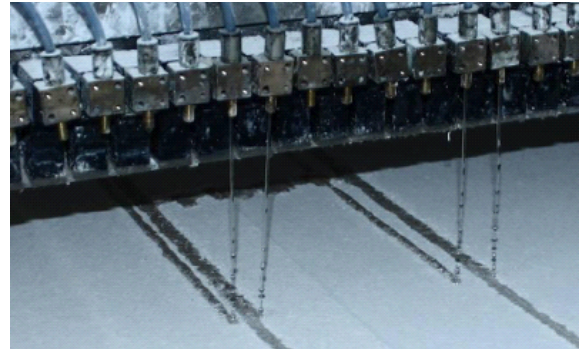
- 컨투어 크래프팅 시스템의 데모버전은 진흙, 석고, 콘크리트 재료를 대상으로 한 재료 압출기술과 노즐에 중점을 둠. 아래 그림과 같이 초기에는 세라믹 재료를 압출 · 성형 시 부재의 표면을 매끈하게 하는 가이드를 노즐 끝에 장착하는 형태로 제작하였으며, 시멘트 모르타르 재료 출력을 위한 몰드를 사용하기도 함
- 컨투어 크래프팅 연구진이 제안하는 바와 같이 전체 구조물을 연속적으로 출력하는 시스템을 구축하기 위해서는 해결해야 할 과제가 산재해 있으며, 이를 해결하기 위해 시공 전 과정에 대한 지속적인 연구가 수반되어야 할 것임

(3) 이탈리아: D-shape

- D-shape은 이탈리아 발명가 Enrico Dini가 개발함
- D-shape은 새로운 재료를 사용하여 또 다른 형태의 석조 건물을 완성하는 로봇틱 빌딩 시스템(Robotic building system)
- 본 시스템은 모래나 활석가루(stone powder)와 같은 과립물질(granular material)을 적층함과 동시에 바인더(binder) 재료 혹은 촉매제(catalyst)를 층과 층 사이에 분사하여 부재를 완성 방식이므로 모르타르와 같은 습윤 재료를 사용하는 다른 시스템과 다른 형식을 가짐
- 때문에 프린팅 속도가 비교적 느리며 표면이 거칠게 표현되는 대신 부재의 강도가 높고 Free Form 형태의 표현이 자유로움



(a) D · Shape system



(b) The sprayed binder

그림 25. 이탈리아의 D-shape system

- 오른쪽 그림은 D-shape 사용하여 완성한 시제품으로 거주용 주택 형태를 띠고 있으며 중국의 단층 주택 형태와 비슷하나 구조물 전체를 일체로 프린팅 했다는 측면에서 큰 차이를 보임



그림 26 A complete 3D printed house by using D-shape

(4) 영국: Concrete Printing

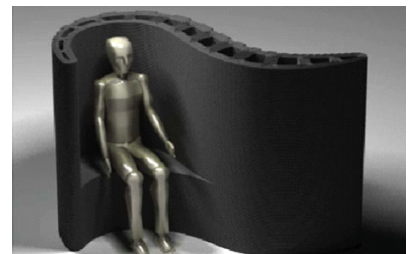
- 영국 러프버러대학교(Loughborough University)의 Richard Buswell 교수 연구팀은 건축 부재 제작을 위한 대형 3D 프린터를 개발하였으며 이를 사용하여 Concrete Printing 기술을 연구하고 있음
- Concrete Printing의 구동형식은 앞서 언급한 중국과 영국의 경우와 마찬가지로 시멘트 모르타르를 압출하여 적층하는 방식임. 이 방식은 시멘트 모르타르 출력 후 구조물 보강에 대한 후처리를 요함
- 본 프로젝트는 구조물을 출력하는데 앞서 고성능 프린팅 콘크리트를 위한 프린팅재료의 배합에 중점을 두었음. 여러 배합의 물성치 및 압출성능 등을 놓고 각 배합의 특성에 대한 비교분석을 수행함
- 결과로 얻은 배합으로 실제 사이즈의 콘크리트 벤치를 출력함



(a) Concrete Printing system



(b) The bench being printed



(c) The 3D model bench

그림 27. Concrete printing project

(5) 각 프로젝트의 특성 비교

- 앞서 서술한 모든 프로젝트는 프린터 크기에 따라 제작할 수 있는 부재 혹은 구조물의 크기가 제한됨. 또한 D-shape를 제외한 세 개의 프린터는 모두 습윤 재료를 압출하여 적층하는 형식을 가짐. 이는 출력 재료의 특성에 따라 앞서 제시한 요소기술의 네 가지 Pumpability, Printability, Buildability, Open time이 크게 좌우된다 할 수 있음
- D-shape를 제외 한 세 개의 프린터는 보강을 위한 후처리를 요함. 아직 현재 기술로는 시멘트 모르타르만 출력하여 구조물을 구성하는데 있어 횡력 저항 및 중력 저항에 무리가 있으며, 철근 혹은 보강 요소의 힘을 빌릴 수밖에 없음
- 중국 프로젝트의 경우 3D 프린터를 사용하여 부재를 제작한 뒤 현장에서 접합하는 조립식 방식을 채택함. D-shape 시스템은 일체화 출력을 지향하고 있으며 Contour Crafting 연구진 또한 아직은 개념도 제시 뿐이지만 일체화 출력을 목표로 하고 있음. Concrete Printing 시스템은 현재 재료배합 및 보강기술에 초점을 맞추고 있음. 각 프로젝트에 대한 비교를 아래 표에 나타냄

표 5. Comparison of 3D printing system which aim to build residential building

프로젝트	출력방식	바인더	재료	프린팅 대상 크기	보강
Giant 3D printer	압출	불필요	시멘트 모르타르	(부재) 한계 있음 (전체) 조립식이므로 한계 없음	필요
Contour Crafting	압출	불필요	세라믹 재료 시멘트 모르타르	한계 있음	필요
D-shape	분사	필요	과립물질	한계 있음	불필요
Concrete Printing	압출	불필요	시멘트 모르타르	한계 있음	필요

나. 건축용 3D 프린터 제작 기술

(1) 3D 프린터 제작 일반사항

- 본 사양서는 세종대학교의 “건축용 3D PRINTER” 제작에 관한 것으로써 본 사양서에 기재된 내용에 의거하여 설계 및 제작에 적용함
- 제작된 제품은 2절의 “제작목표 및 상세사양”에 명시된 제작목표 및 상세사양을 만족하며, 기 제작된 펌프부의 사양을 참고하여 전장제어부를 설계 및 제작한 것임
- 본 사양서에서 기술된 사항은 절대 비밀을 요하는 사항으로서 추후 기술개발의 핵심 사항이니 외부의 반출을 금하고 승인없이 복사, 배포할 경우 형사 고발 조치됨을 주의하여야 함
- 본 사양서에 기재된 각종 자료, 도면, 기술, 지식은 세종대학교 및 당해 연구팀이 소유하게 되며, 이는 다수의 특허로 보호받고 있는 기술임을 밝힘

- 설계 및 제작 과정에서 생성된 모든 중간 산출물 및 결과물은 세종대학교가 그 소유권을 갖음. 또한, 제작사가 설계, 조립, 설치 과정에서 얻는 일체의 자료 또는 정보는 외부(제3자)에 누설할 수 없음
- 제작사는 계약 수행을 통해 얻게 되는 모든 유·무형의 결과에 대해 세종대학교의 요청이 있을 경우 성실하게 관련 자료 또는 정보를 제출해야 함
- 설계 및 제작, 조립 과정에서 발생하는 변경사항 및 애로사항은 즉각 세종대학교에 보고하여야 함

(2) 제작 목표

- 일반적인 FDM방식의 3D 프린터와는 다르게 재료를 시멘트 계열의 열화가 진행되는 건축재료로 하고 이를 활용하여 건축부재를 제작 할 수 있도록 대형사이즈로 프린팅 하는 3D 프린터를 구현하는 것이 목표임
- 기본적인 구조는 직선 이송 3축(X,Y,Z)과 부가 2축 틸팅이 동시 제어되도록 전장제어부를 구성하여야 함
- 추가적으로 버핑 톨, 집진장치 및 커버류, 시험용 워크피스를 설계, 제작하고 기 제작된 기구부에 조립하여 완성된 전체 시스템을 구성 함
- 건축물 및 건축재료를 고려한 PATH GENERATION ALGORITHM을 GCODE로 변환할 수 있는 소프트웨어를 개발하여야 하며 이 소프트웨어는 일반적인 3D 프로그램의 조형결과물을 별도의 변환없이 받아들이는 기능을 장착하여야 함
- 일반 프린팅 PATH는 재료의 열화를 고려할 필요가 없으나 건축 3D 프린터는 사용재료상 이 기증이 중요하므로 이를 프린팅 과정에 계산하여 적층시 충분한 결합력이 나올 수 있게 하는 OPTIMAL PATH SEGMENTATION의 기능을 구현하여야 함
- 재료의 PREPARATION은 프린팅 못지 않게 중요한 기능으로서 대용량의 재료를 원활하게 공급하고 재료가 최상의 상태로 노즐을 통과하도록 하는 기능을 펌프부에서 제공할 수 있도록 해야 함

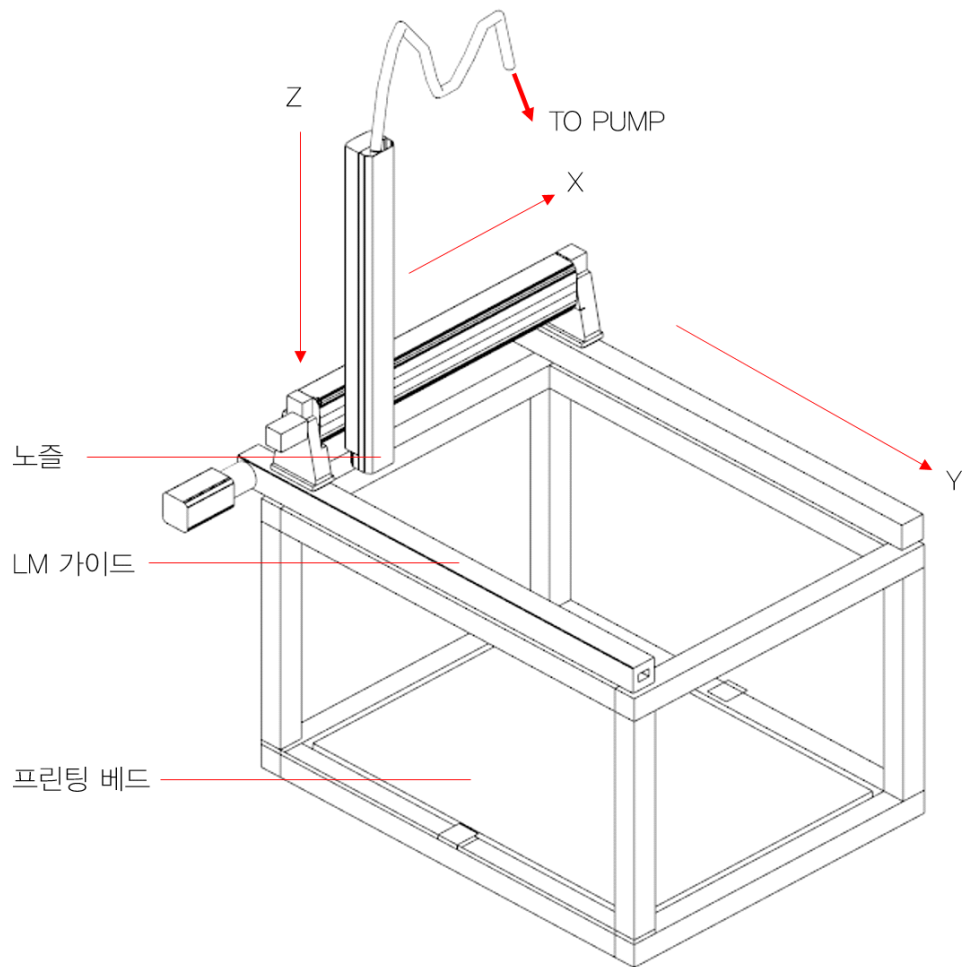


그림 28. 3D 프린팅 모델

(3) 가공대상물 및 가공공정

(가) 가공대상물

- 명칭 : 건축물의 일부분, 건축부재, 구조부재 등
- 소재 : 시멘트 페이스트(시멘트+모래+혼화재+인장재)
- 크기 : 2,500mm×1,200mm×1,500mm (길이×높이×두께)

(나) 가공공정

- 트리밍 : 노즐면 좌우측에 토출재료의 커팅을 할 수 있도록 하여 매끈한 면을 형성하는 가공공정
- 버핑 : 토출재료의 적층을 위해 적절한 접합면을 형성하는 가공공정
- 라우팅 : PATH의 진행방향에 직각이 되도록 노즐의 방향을 회전하여 항상 일정한 단면으로 프린팅되도록 하는 가공공정
- 스테킹 : 토출재료를 적절한 속도와 단면크기로 설계강도 이상의 성능을 가질 수 있도록 적층하는 가공공정

(4) 주요기구부 제작사양

(가) 모터

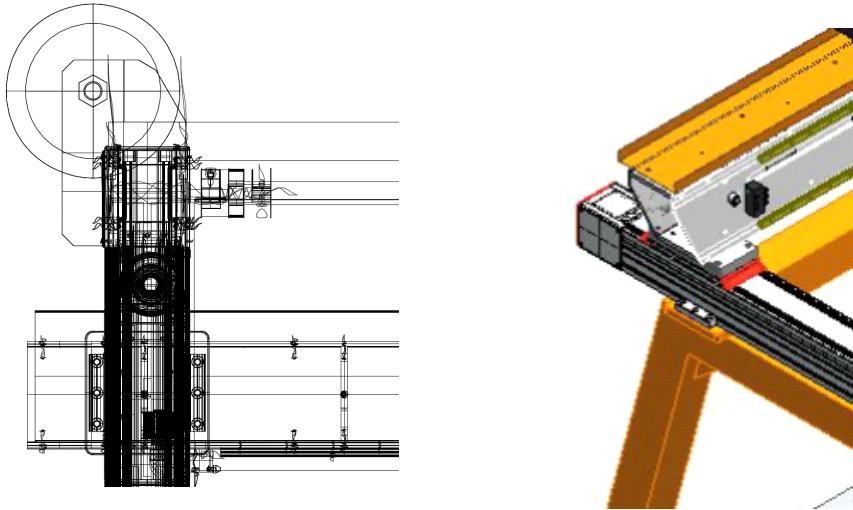


그림 29. 모터부 디테일(Plan)

- 최대허용/Holding Torque : 140 kgf.cm (14 N.m)
- Rotor inertia : 2700 g.cm²
- 정격전류 : 1.4 [A/Phase]
- 출력축기본 Step 각 : Full step 0.144도 / Half step 0.072도
- 허용속도 [rpm] : 0~360
- Back-Lash[min] : 15 (0.25도)
- 중량 : 약 4.4kg

(나) 3D 프린터 적용 Linear unit

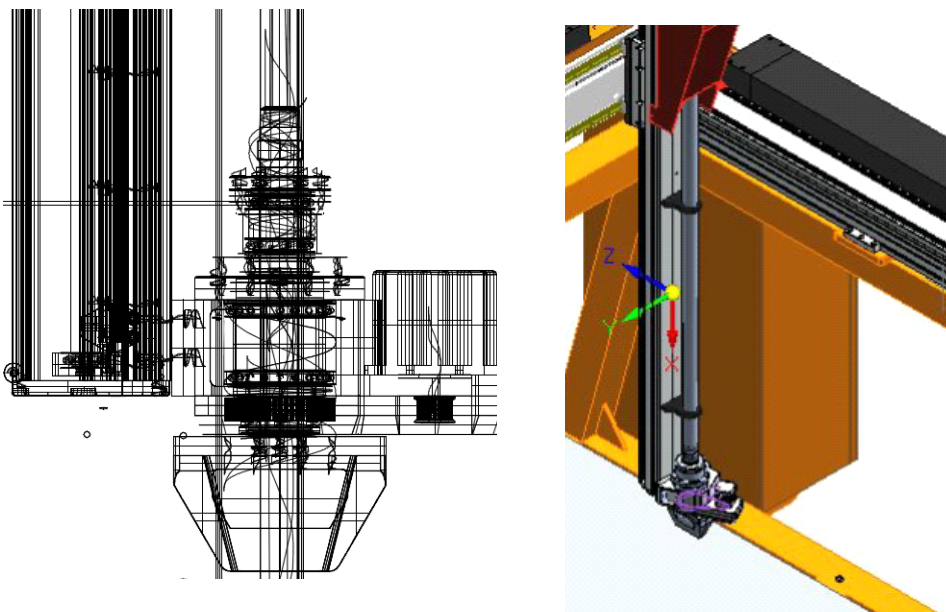


그림 30. Linear unit 디테일(Elev.)

- STROKE 1500 mm
- 권장속도 500 mm/s 이하 최대속도 750 mm/s ,
- 최대 work 하중 80 kg 이하

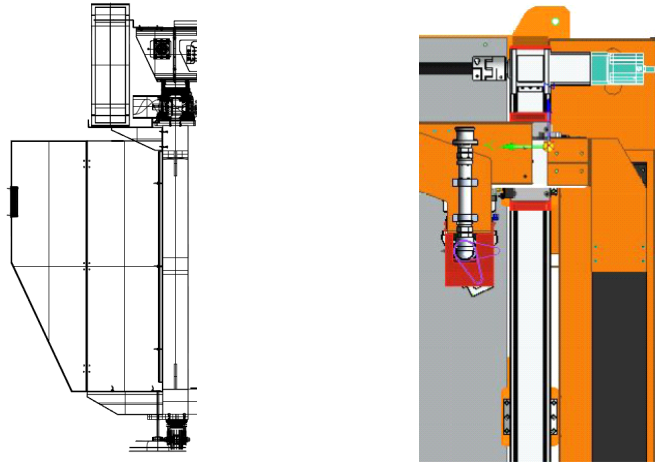


그림 31. 컨트롤러부 디테일(Elev.)

(다) 전장/모터 드라이브 사양

- 전원전압 : 100-220 VAC 50/60 Hz
- 구동전류 : 0.4~1.4 A/Phase
- 구동방식 : 바이폴라 정전류 펜타곤 드라이브
- 기본스텝각도 : 0.72 도 / phase
- 분해능 : 1, 2, 4, 5, 8, 10, 16, 20, 25, 40, 50, 80, 100, 125, 200, 250 분할
- 입력펄스특성 : 펄스폭 - 0.5 μ s 이상
- Duty Rate - 50% (CW ,CCW)
- 상승,하강시간 - 120 ns 미만 (CW , CCW)
- 20 μ s 미만 (HOLD OFF , DIVISION SELECTION , ZERO OUT)
- 최대입력펄스주파수 - 1MHz 이하 (CW , CCW)
- 25 kHz 이하 (HOLD OFF , DIVISION SELECTION , ZEROOUT)
- 펄스입력전압 - high 4.5~5.5 VDC , low 0~0.5 VDC
- 펄스입력전류 - 7.5~1.4mA (CW , CCW)
- 10~16mA (HOLD OFF , DIVISION SELECTION , ZEROOUT)
- 중량 : MD5-HF14 약 220 g
MD5-HF28 약 1 kg

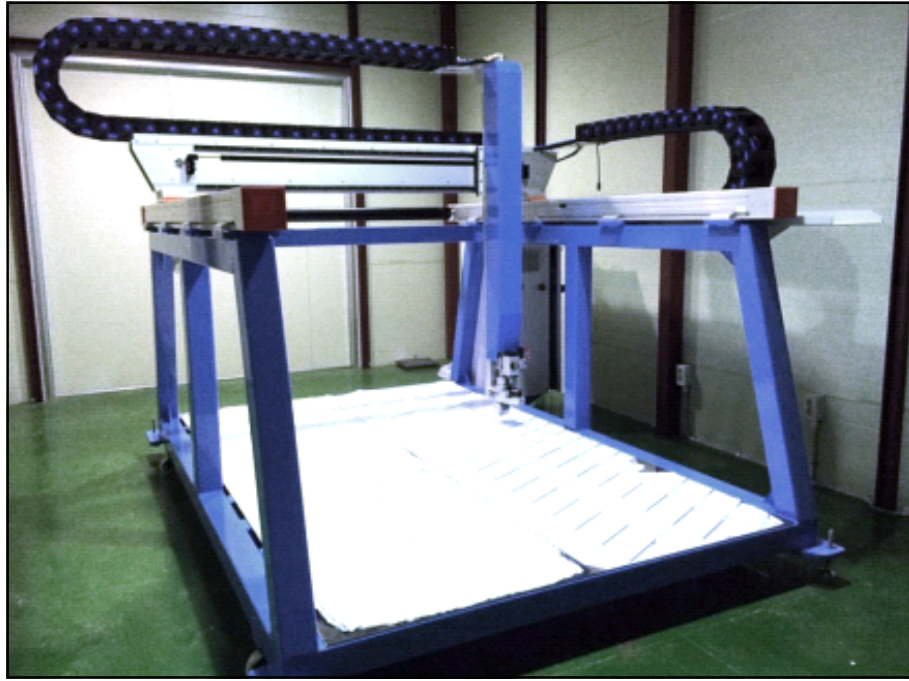
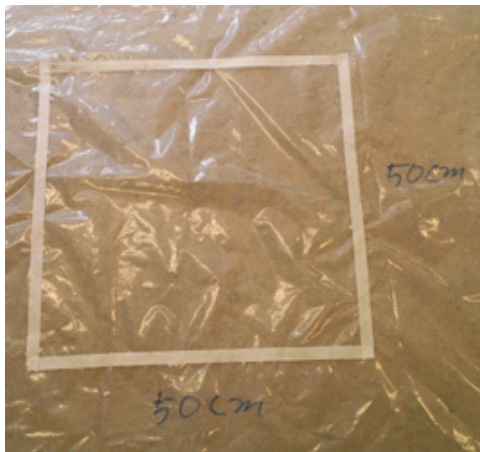


그림 32. 3D 프린터 제작완료사진

다. 건축용 3D 프린터를 사용한 건축부재 출력기술

(1) 콘크리트 재료 및 배합설계 (모의실험)

- 3D 프린터에 사용되는 콘크리트는 모양을 유지하기 위해 프린터에서 토출되는 즉시 강도를 가질 수 있어야 하며, 레이어 적층시 발생하는 자중에 의한 수축에 저항할 수 있어야 함
- 본격적인 실험에 앞서 3D 프린터에 사용될 최적의 콘크리트의 배합비를 찾아내기 위하여 모의실험을 수행함. 모의실험은 배합된 콘크리트의 적층 가능 여부만 판단하기 위해 펌프만을 이용하여 진행됨
- 콘크리트 배합은 빠르고 다양한 실험을 위해 40리터 용량의 믹서를 사용하였으며, 배합에 이용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트, 잔골재는 입도 0.5mm 이하의 모래를 사용하고 굵은 골재는 사용하지 않음. 펌프는 2마력이며 펌프속도(0~10) 1.5에서 실험함. 모의 실험체는 가로세로 50cm 길이의 정사각형 모양으로 제작됨
- 실험 도중 콘크리트의 적층은 잘 이뤄졌지만, 레이어가 높아질수록 콘크리트의 자중을 견디지 못해 쓰러지는 현상이 반복되어 적층된 콘크리트 표면에 급결제를 분사하는 방식으로 보강하여 실험을 재개함
- 결과적으로 시멘트와 잔골재의 이상적인 배합비(10 : 6)를 찾았으나, 펌프가 무리 없이 밀어낼 수 있는 콘크리트 점도를 찾기 위한 배합수의 양과 표면에 도포하는 급결제량의 정확한 수치를 알 수 없었음. 아래 그림에 모의실험 결과가 나타남



(a) 모의실험체 기준선



(b) 모의실험체의 적층 모습

그림 33. 재료 배합을 찾기 위한 모의실험 사진

(2) 콘크리트 재료 및 배합설계 (본 실험)

- 본 실험에서는 적층이 용이한 콘크리트 배합비를 보다 정확하게 찾기 위해 시멘트와 잔골재의 비율(10 : 6)은 고정하고, 배합수와 급결제량을 달리하여 7가지 서로 다른 모양의 실험체를 제작하였음
- 아래의 표 2는 각 실험체에 사용된 재료의 배합을 중량으로 나타낸 것이며 표 3은 배합비를 시멘트에 대한 중량비를 나타낸 것임

표 6. 콘크리트 배합비 및 총 무게(단위: kg)

실험체	1	2	3	4	5	6	7
시멘트	100	150	150	150	150	150	150
잔골재	60	90	90	90	90	90	90
물	45	55	55	55	55	55	55
급결제	0.5	0	1	1.5	1.5	2.5	3.5
총 무게	205.5	295	296	296.5	296.5	297.5	298.5
슬럼프 (mm)	220	172	172	172	172	172	172

표 7. 콘크리트 배합 중량비(시멘트 기준)(단위: %)

실험체	1	2	3	4	5	6	7
시멘트	1	1	1	1	1	1	1
잔골재	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
물	0.45	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37
급결제	0.005	0	0.007	0.010	0.010	0.017	0.023

- 모의 실험에서는 빠른 실험을 위해 2마력의 40리터 용량 믹서기를 사용하였으나, 본 실험에서는 더 많은 양의 콘크리트를 필요로 하는 3D 프린터를 이용하므로 3마력의 250리터 믹서기가 사용됨

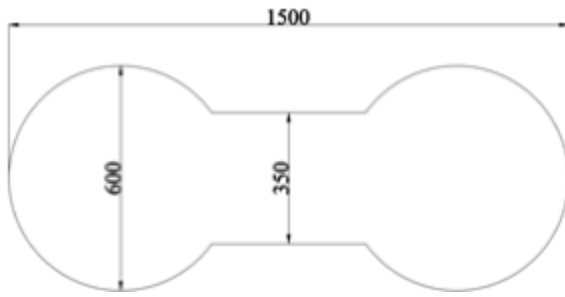


그림 34. 250 리터 콘크리트 믹서기

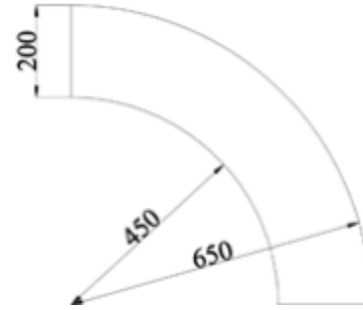
(3) 3D 프린팅 실험

(가) 실험체 계획

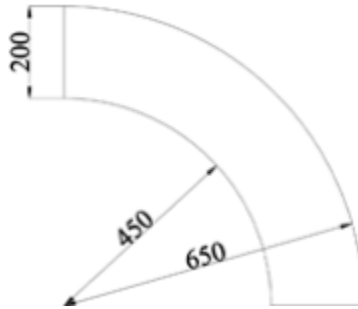
- 7개 실험체 각각의 평면도는 아래 그림에 나타남



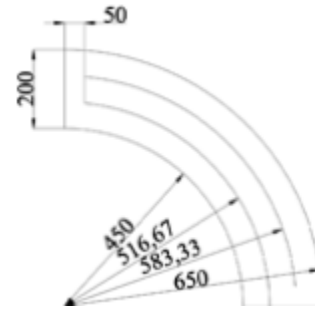
(a) 실험체 1 도면



(b) 실험체 2 도면



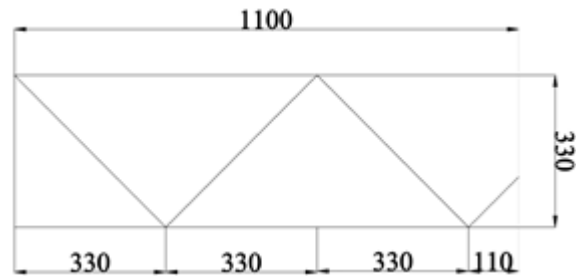
(c) 실험체 3 도면



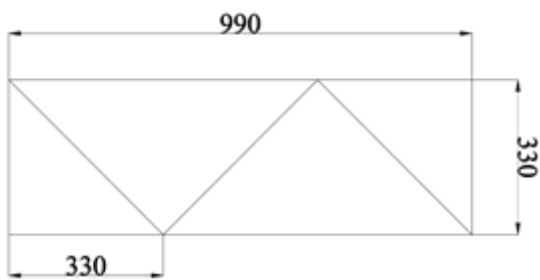
(d) 실험체 4 도면



(e) 실험체 5 도면



(f) 실험체 6 도면



(g) 실험체 7 도면

그림 35. 실험체 별 평면도

(나) 실험체 제작

① 실험체 1

- 실험체 1에 사용된 프린터의 기계적 설정은 z축 단위이동거리 9mm, x축 선 속도 80mm/s, y축 선 속도 80mm/s를 사용하였으며, 펌프속도는 1.2로 함
- 3D 프린터와 펌프를 연결하는 호스의 길이는 4800mm, 호스의 내경은 32mm, 호스 끝 토출부의 노즐 내경은 19φ가 사용됨
- 토출된 콘크리트의 강도를 확보하기 위해 콘크리트 토출 직후 급결제를 수동으로 분사함
- 실험 결과 첫 레이어가 붕괴되지 않고 마지막까지 성공적으로 적층됨. 재료를 전부 사용하기까지 총 35층의 레이어가 쌓였으며 한 레이어의 프린팅 길이는 3.848m 로, 총 프린팅 길이는 134.68m 임. 또한 작업이 완료되기까지는 14분 45초가 소요됨
- 실험체 1의 z축 단위이동거리에 대응하여 적층 후의 실험체 높이는 315mm가 되어야 하지만, 자중에 의한 수축이 발생하여 실제 프린팅된 실험체의 높이는 280mm로 총 11.11%의 처짐이 발생하였음
- 완성된 실험체는 아래의 그림에 나타남



(a) 실험체의 프린팅 모습



(b) 완성된 실험체의 모습

그림 36. 실험체 1 프린팅

- 위의 그림 (b) 에서 볼 수 있는 왼쪽 직선구간 함몰의 원인은 믹스된 콘크리트를 전부 소모한 펌프 내부로 유입된 공기에 의해 호스에 남은 콘크리트가 순간적으로 빠르게 밀려나옴에 있음

② 실험체 2

- 실험체 1에서 발생한 처짐량 11.11%가 많다고 판단되어 콘크리트 슬럼프값을 줄이기 위해 배합수의 양을 줄여 물시멘트비를 0.37로 조정하였고, 급결제의 효과를 알아보기 위해 급결제를 도포하지 않은 채로 적층 시험을 진행함
- 실험체 2는 Curve wall 형태로써, 이에 사용된 프린터의 기계적 설정은 z축 단위 이동거리 15mm, x축 선 속도 90mm/s, y축 선 속도 90mm/s 이며, 펌프속도는 1.2로 함

- 3D 프린터와 펌프를 연결하는 호스의 길이는 4800mm, 호스의 내경은 32mm, 호스 끝 토출부의 노즐 내경은 19φ가 사용됨
- 실험 결과 적층되는 레이어의 층수가 많아질수록 초반부 레이어의 처짐이 심각하게 발생함. 따라서 실험이 불가능하다고 판단되어 레이어 8층에서 실험을 중단함. 실험체 2의 각 레이어당 프린팅 길이는 2.128m 로, 총 프린팅 길이는 17.024m 이며, 총 프린팅 시간은 3분 9초 임
- 실험체 2의 z축 단위이동거리에 대응하여 적층 후의 실험체 높이는 120mm가 되어야 하지만, 수축이 발생한 후 실험체의 높이는 111mm로 총 7.5%의 처짐이 발생하였음



(a) 초반 레이어



(b) 중반 레이어



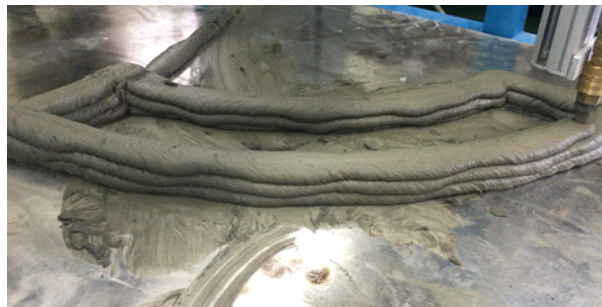
(c) 후반 레이어

그림 37. 실험체 2 프린팅

- 실험체 1의 경우, 총 레이어에 대한 처짐을 단위 레이어에 대한 처짐으로 나타낼 때 각 레이어 마다 0.32%가 처지는 반면에 실험체 2의 경우 각 레이어 마다 0.94%가 처지는 것으로 보아 비교적 심각한 처짐이 발생한다는 것을 알 수 있음
- 실험체 2 실험은 위의 그림에 나타나 있으며, 위의 그림 (a)는 초기 레이어의 모습을 보여주며 처짐이 없이 잘 적층 되고 있으나, (b)에서 보이는 바와 같이 직사각형 모양으로 적층되어야하는 정면 입면이 초기 레이어의 처짐(퍼짐)으로 인해 사다리꼴 형태가 됨

③ 실험체 3

- 실험체 3의 모든 실험 조건은(형상 및 프린터 설정) 실험체 2를 기본으로 하되 표면에 급결제를 도포하였음
- 그러나 초반 레이어에 대한 급결제 도포 실패로 인해 비교적 안정적으로 적층 되던 상위 레이어와는 반대로 초반 레이어의 퍼짐 현상이 또다시 발생하였음
- 결과적으로 쌓인 총 레이어의 수는 10층이었으며 총 레이어 프린팅 길이는 17.02m, 총 프린팅 시간은 5분 20초였음
- z축 단위이동거리에 대응하여 적층 후 실험체 높이는 150 mm가 되어야 하지만 실 프린팅 높이는 141mm로써 총 6%의 처짐이 발생하였고 단위 레이어 당 처짐량은 0.6%로 실험체 2의 레이어 당 처짐보다 1/3 가량 줄어든 것으로 나타났음
- 아래 그림은 실험체 3의 모습이며, 보이는 바와 같이 초반 레이어의 처짐으로 인해 레이어 10층에서 실험체가 붕괴되어 실험을 중단하였음



(a) 초반 레이어



(b) 붕괴 모습

그림 38. 실험체 3 프린팅

④ 실험체 4

- 실험체 4는 속이 꽉 찬 Curve wall 형태로써 실험체 2와 3의 초반 레이어 퍼짐 현상을 방지할 수 있는지 알아보기 위해 디자인되었음
- 프린터의 z축 단위이동거리는 15mm, x축 선 속도 90mm/s, y축 선 속도 90mm/s를 사용하였으며, 펌프 속도는 1.2가 사용됨
- 3D프린터와 펌프를 연결하는 호스 길이는 4800mm, 호스의 내경은 32mm, 호스 끝 토출부의 노즐은 내경 19φ가 사용됨
- 실험 결과 초반 레이어 부터 급결제를 도포하였으나 토출되는 콘크리트의 양을 조절하지 못하여 적층이 제대로 이루어지지 않아 레이어 3층에서 실험을 중단하였음
- 실험체 4의 레이어 당 프린팅 길이는 3.77m이며 총 프린팅 길이는 11.32m, 총 프린팅 시간은 2분 28초였으며, 적층된 실험체 모양은 그림 23에 나타나 있음



그림 39. 실험체 4 프린팅

⑤ 실험체 5

- 실험체 5는 실험체 2, 3과 형태는 같지만 축척만 증가시켜 최 외곽 반지름을 900mm에 맞추어 디자인됨
- 프린터의 z축 단위이동거리는 15mm, x축 선 속도 90mm/s, y축 선 속도 90mm/s를 사용하였으며, 펌프 속도는 1.2가 사용됨
- 3D프린터와 펌프를 연결하는 호스 길이는 4800mm, 호스의 내경은 32mm, 호스 끝 토출부의 노즐은 내경 19φ가 사용됨
- 실험 결과 초반 레이어부터 급결제를 도포하여 퍼짐현상 없이 안정적으로 잘 적층되었으나, 펌프의 맥동으로 인한 실험체 곡선 구간에 물결무늬가 발생함. 물결무늬에 의한 국부적 강도저하 때문에 결국 실험체는 붕괴됨
- 실험체가 붕괴되기까지 적층된 총 레이어의 층수는 14층이었으며 레이어당 프린팅 길이는 2.95m, 총 레이어 프린팅 길이는 41.24m, 총 프린팅 시간은 8분 2초임
- z축 단위이동거리에 대응하여 적층 후 실험체 높이는 210 mm가 되어야 하지만 실 프린팅 높이는 205mm로써 총 3.33%의 처짐이 발생하였고 단위 레이어 당 처짐량은 0.24%로 이전 실험들에 비해 좋은 결과를 보임
- 아래 그림에 실험체 5의 실험 모습이 나타나 있으며 (a)는 퍼짐 없이 적층이 잘 이루어지고 있는 초반 레이어 모습, (b)는 펌프의 맥동으로 인해 발생하는 곡선부의 물결무늬, (c)는 물결무늬에 의해 붕괴된 실험체의 모습이 나타나 있음



(a) 초반 레이어



(b) 곡선부 물결무늬



(c) 붕괴 모습

그림 40. 실험체 5 프린팅

⑥ 실험체 6

- 실험체 6은 내부가 트러스 형태로 보강되어 있는 직사각형의 벽체로, 실험체 5에서 발생한 펌프의 맥동문제를 고려하기 위해 디자인 됨
- 프린터의 z축 단위이동거리는 15mm로 하였으며 맥동에 의한 영향을 줄이기 위해 x축 선 속도 80mm/s, y축 선 속도 80mm/s, 펌프 속도는 0.8로 감소시켜 실험을 진행함
- 3D프린터와 펌프를 연결하는 호스 길이는 4800mm, 호스의 내경은 32mm가 사용됨. 많은 실험으로 인해 내경 19φ의 노즐이 막혀 내경 26φ의 노즐이 사용됨
- 실험 결과 실험체 5와 마찬가지로 레이어가 잘 적층됨을 확인하였으며 맥동에 의한 물결무늬도 내부의 트러스가 지지하여 전체적으로 안정적인 프린팅 모습을 보임. 그러나 디자인상의 문제로 프린팅 도중 모델의 모서리부분 뭉침으로 인해 레이어 8층에서 실험을 중단시키고, 뭉침이 없도록 디자인을 변경하여 다음 실험을 준비함

- 본 실험체의 레이어당 프린팅 길이는 4.42m, 총 레이어 프린팅 길이는 35.33m, 총 프린팅 시간은 7분이 소요됨
- z축 단위이동거리에 대응하여 적층 후 실험체 높이는 120 mm가 되어야 하지만 실 프린팅 높이는 118mm로써 총 1.67%의 처짐이 발생하였고 단위 레이어 당 처짐량은 0.21%로 이전 실험들에 비해 좋은 결과를 보임
- 아래 그림에 실험체 6의 실험 모습이 나타나 있으며 (a)는 초반 레이어 모습, (b)는 모서리 부분 콘크리트의 뭉침, (c)는 후반부 레이어의 모습이 나타나 있음



(a) 초반 레이어



(b) 모서리의 뭉침



(c) 후반 레이어

그림 41. 실험체 6 프린팅

⑦ 실험체 7

- 실험체 7은 실험체 6에서 언급되었다시피 모서리의 겹치는 부분을 제거하여 디자인 하였으며, 그 외 프린터 설정과 재료배합 등 모든 조건은 실험체 6과 동일하게 하여 실험을 재개함
- 실험 결과 기초 레이어가 붕괴되지 않고 준비된 재료를 전부 사용할 때까지 성공적으로 적층됨

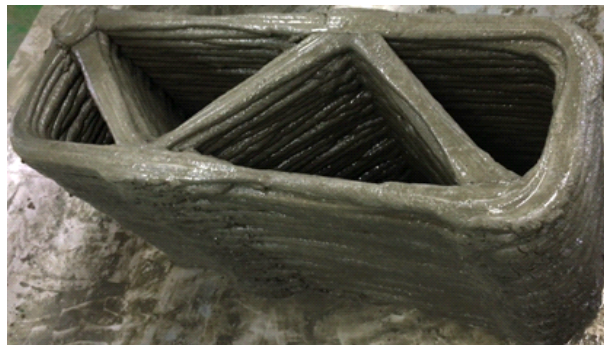
- 재료를 모두 사용하기까지 쌓인 레이어의 층수는 38층이었으며 한 레이어당 프린팅 길이는 4.04m, 총 레이어 프린팅 길이는 153.52m, 총 프린팅 시간은 30분 26초가 소요됨
- z축 단위이동거리에 대응하여 적층 후 실험체 높이는 570 mm가 되어야 하지만 실 프린팅 높이는 565mm로써 총 0.88%의 처짐이 발생하였고 단위 레이어 당 처짐량은 0.02%로 이전 실험들과 비교하여 가장 좋은 결과를 보임
- 그림 26에 실험체 7의 실험 모습이 나타남



(a) 초반 레이어



(b) 중반 레이어



(c) 후반 레이어

그림 42 실험체 7 프린팅

(다). 실험 결과 및 정리

표 8. 실험값 정리

측정항목			단위	모델						
				1	2	3	4	5	6	7
펌프	속도(0~10)		-	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	0.8	0.8
	양정		mm	300	350	350	350	350	400	400
호스	유효길이		mm	4800	4800	4800	4800	4800	4800	4800
	관경	호스	mm	32	32	32	32	32	32	32
		노즐	φ	19	19	19	19	19	26	26
프린터	z축 단위이동거리		mm	9	15	15	15	15	15	15
	x축 선속도		mm/s	80	90	90	90	90	80	80
	y축 선속도		mm/s	80	90	90	90	90	80	80
	레이어 프린팅 길이		m	3.85	2.13	2.13	3.77	2.95	4.42	4.04
	총 프린팅 길이		m	134.68	17.02	21.28	11.32	41.24	35.33	153.52
	총 프린팅 시간		-	14분 45초	3분 9초	5분 20초	2분 28초	8분 2초	7분	30분 26초
	레이어 개수		-	35	8	10	3	14	8	38
	프린팅 높이		mm	315	120	150	45	210	120	570
	실 프린팅 높이		mm	280	111	141	45	203	118	565
	처짐		mm	35	9	9	0	7	2	5
	총 처짐도		%	11.11	7.50	6.00	0	3.33	1.67	0.88
	레이어당 처짐도		%	0.32	0.94	0.60	0	0.24	0.21	0.02
재료	중량	시멘트	kg	100	150	150	150	150	150	150
		잔골재	kg	60	90	90	90	90	90	90
		물	kg	45	55	55	55	55	55	55
		급결제	kg	0.5	0	1	1.5	1.5	2.5	3.5
	총 중량		kg	205.5	295	296	296.5	296.5	297.5	298.5
	슬럼프		mm	220	172	172	172	172	172	172
	물시멘트비		-	0.45	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37

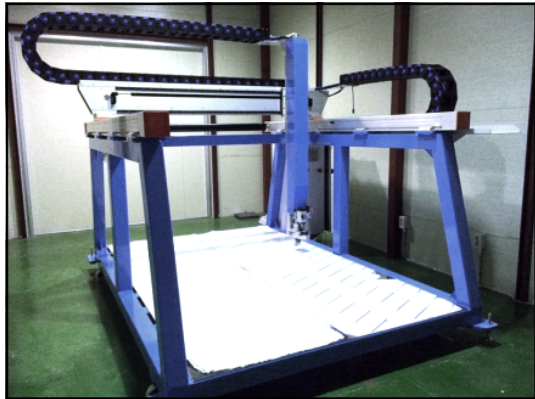
- 2장에서 조사된 모든 실험 데이터와 결과 등은 표 4에 정리되어 있으며 각 모델에 대한 간략한 정리는 다음과 같음
- 실험체 1: 재료를 전부 사용하기까지 레이어가 안정적으로 적층되었으나, 물시멘트비가 적절하지 못해 총 처짐이 11.11%로, 레이어 당 처짐이 0.32%로 많이 발생함
- 실험체 2: 실험체 1에서 발생한 처짐을 줄이기 위해 물시멘트비를 더 낮게 조절하였으며, 급결제의 효과를 알아보기 위해 실험체 2에서는 급결제를 사용하지 않음. 결과적으로 총 처짐량은 7.5%였으며 레이어 당 처짐량은 0.94%로 실험체 1보다 레이어 당 처짐이 큰 것을 확인 할 수 있음
- 실험체 3: 모든 조건을 실험체 2와 동일하게 하고 급결제를 도포하여 실험을 진행함. 결과적으로 총 6%의 처짐과 레이어당 0.6%의 처짐이 발생함. 물시멘트비를 낮췄음에도 불구하고 초반 레이어에 급결제를 제대로 도포하지 못했기 때문에 이러한 결과가 도출됨

- 실험체 4: 초반 레이어의 처짐을 방지하기 위해 내부를 채운 curve wall 형태로 디자인하여 실험함. 토출되는 콘크리트 양 조절의 실패로 적층을 중단함
- 실험체 5: 실험체 3과 모든 조건을 같게 하고 스케일만 증가시킨 형태로 디자인함. 초반 레이어 부터 급결제를 잘 도포하여 적층이 원활하게 이루어졌지만, 펌프의 맥동에 의하여 곡선부에 물결무늬가 생기고 결국 붕괴됨. 결과적으로 안정적인 적층을 위한 배합을 얻을 수 있었음
- 실험체 6: 실험체 5에서 얻은 배합을 그대로 하고 맥동에 의한 붕괴를 막기 위해 내부가 트러스로 보강된 벽체를 디자인하여 실험함. 그러나 디자인의 문제로 인한 모서리부분 콘크리트의 겹침으로 실험을 중단함
- 실험체 7: 실험체 6에서 문제가 있던 부분의 디자인을 수정하고 실험을 재개함. 모든 재료를 전부 소모할 때까지 원활한 적층이 이루어졌으며, 프린팅이 끝난 모델의 총 처짐 량이 0.88%로 실험체 1에 비하여 확연하게 처짐이 줄어듦
- 국내 최초로 원활한 적층이 가능한 콘크리트 배합을 전제로 하여 콘크리트를 이용한 건축용 3D 프린팅이 성공적으로 진행됨
- 프린터를 이용해 철근배근과 콘크리트 타설을 동시에 하는 기술이 현재까지는 개발되지 못하여 구조부재로써 자체적인 강도를 가질 수 있게 하는 배합기술의 연구가 요구됨
- 초고강도 시멘트와 실리카 등을 이용한 고강도 콘크리트를 이용할 경우 급결제를 사용하지 않아도 원활하게 적층이 되는 것을 실험을 통해 확인함

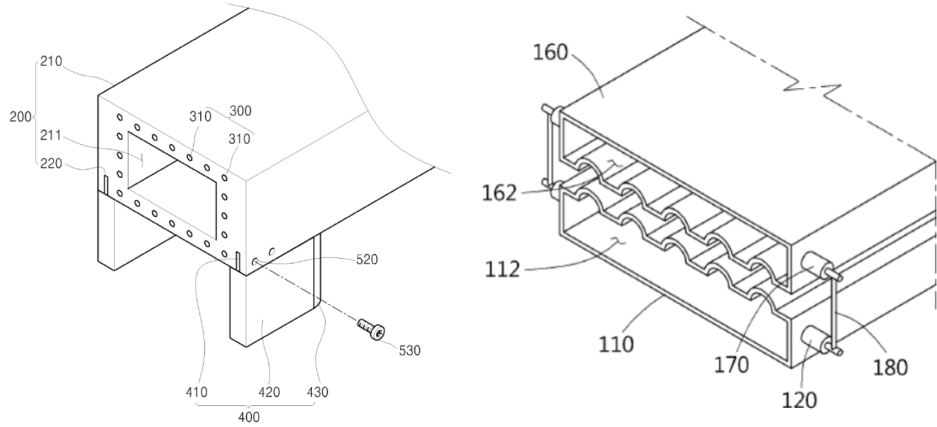
제3장. 최종 연구성과 및 적용실적

1. 최종연구성과

가. 핵심성과명 : 건축화신속조형을 위한 알고리즘

관련 그림 / 사진								
정의		건축화신속조형(Architectural rapid prottype)을 위한 알고리즘						
목적		3D 프린터를 사용하여 실제 건축물 조형 시 성형속도가 공사기간과 연관되므로 신속조형을 위한 알고리즘 개발이 필요함						
성능목표		(기존기술 수준) 프린팅 성형속도(주사속도) 20mm/s (개발기술 수준) 프린팅 성형속도(주사속도) 30mm/s						
성과달성 책임자 (소속기관)		이재홍(세종대학교)						
소요기간		‘14.07 ~ ’16.07 (2년0개월)						
핵심성과	달성 확인방 법	1차년도	논문 건수 / 프린팅 가능 여부					
		2차년도	논문 건수 / 프린팅 성형속도					
	양적성 과	1차년도	특허 출원	특허 등록	SCI 논문	비SCI논문	S/W	기타
						국내 1		
		2차년도	특허 출원	특허 등록	SCI 논문	비SCI논문	S/W	기타
						국내 2		
질적성 과	1차년도	건축물 신속조형을 위한 3D 프린터 제작						
	2차년도	프린팅 성형속도(주사속도) 급속향상 - 90mm/s 이상						
성과 활용계획		<활용방안> 1. 최종수요처 및 분야 : 건설사 / 건축용 3D 프린터 제작사 / 설계사 2. 활용시기 : 2018년 3. 방식 : 공동사업을 위한 기술이전						

나. 핵심성과명 : 3D 프린터 핵심부품

관련 그림 / 사진								
정의		건축부재 제작용 3D 프린터의 부품 개발						
목적		건축물을 프린팅 하기 위한 건축부재 제작용 3D 프린터의 부품 개발						
성능목표		(기존기술 수준) 노즐직경 : 3mm (개발기술 수준) 노즐직경 : 30mm						
성과달성 책임자 (소속기관)		이재홍(세종대학교)						
소요기간		'14.07 ~ '16.07 (2년0개월)						
핵심성과	달성 확인방 법	1차년도	특허출원건수 / 노즐제작 확인					
		2차년도	특허등록건수 / 노즐직경 확인					
	양적성 과	1차년도	특허 출원	특허 등록	SCI 논문	비SCI논문	S/W	기타
			국내 5					
		2차년도	특허 출원	특허 등록	SCI 논문	비SCI논문	S/W	기타
				국내 4				
질적성 과	1차년도	노즐제작						
	2차년도	건축부재 출력 가능한 노즐직경 확보 - 30mm						
성과 활용계획		<활용방안> 1. 최종수요처 및 분야 : 건설사 / 건축용 3D 프린터 제작사 / 설계사 2. 활용시기 : 2018년 3. 방식 : 공동사업을 위한 기술이전						

다. 핵심성과명 : 3D 프린팅으로 제작된 건축부재

관련 그림 / 사진								
정의		3D 프린팅으로 건축부재 시제품 제작						
목적		3D 프린팅 건축부재의 Mock-up 테스트 및 활용성 연구를 위한 시제품 제작						
성능목표		(기존기술 수준) 모형적용크기 : 국내최고수준 없음 (개발기술 수준) 모형적용크기 : 1,000 x 1,000 x 600						
성과달성 책임자 (소속기관)		이재홍(세종대학교)						
소요기간		'15.07 ~ '16.07 (1년0개월)						
핵심성과	달성 확인방 법	1차년도	-					
		2차년도	시제품 제작 건수					
	양적성 과	1차년도	특허 출원	특허 등록	SCI 논문	비SCI논문	S/W	기타
		2차년도	특허 출원	특허 등록	SCI 논문	비SCI논문	S/W	기타 시제품1
	질적성 과	1차년도	-					
		2차년도	건축용 3D프린터를 사용하여 건축부재를 출력 함 벽체를 목표로 1,000 x 330 x 600 크기의 SLIM한 형상 확보					
성과 활용계획		<활용방안> 1. 최종수요처 및 분야 : 건설사 / 건축용 3D 프린터 제작사 / 설계사 2. 활용시기 : 2018년 3. 방식 : 공동사업을 위한 기술이전						

2. 적용 실적

1. 특허등록

No.	요소기술 구분	특허명칭	등록번호	등록일 (결정일)	출원인 (등록권리자)
A-1	1-나	급결재 토출이 가능한 건축용 3차원 프린터의 노즐	발급중	(20160728)	세종대학교 산학협력단
A-2	1-나	레이어 접합력을 강화한 건축용 3차원 프린터의 노즐	발급중	(20160728)	세종대학교 산학협력단
A-3	1-나	마감부 형성이 가능한 건축용 3차원 프린터의 노즐	발급중	(20160728)	세종대학교 산학협력단
A-4	1-나	이중 재료의 토출이 가능한 건축용 3차원 프린터의 노즐	발급중	(20160728)	세종대학교 산학협력단

2. 학술지 게재

No.	요소기술 구분	SCI/ 일반	논문명	학술지명	ISBN ISSN	주저자명	Vol. (No)	시작 페이지	끝 페이지	게재 일자
B-1	1-가	일반	건축물 3D 프린팅을 위한 프린터 규모 및 프린팅 재료에 관한 연구	대한건축학회 학술발표대회 논문집	ISSN 2287-578 6	한나래	34(2)	43	44	2014.10
C-2	1-가	일반	건축물 신속조형을 위한 3D 프린터 기술 현황 및 개발방향	공간구조학회지	ISSN 1598-409 5	김동현	15(3)	61	68	2015.09
C-2	1-가	일반	건축용 3D 프린팅 기술	전산구조공학회 지	ISSN 1225-156 9	이승혜	25(3)	42	48	2015.09

3. 소프트웨어 등록

No.	요소기술 구분	SW명칭	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명

4. 신기술 지정

No.	요소기술 구분	명칭	출원일	고시일	보호기간	지정번호

5. 시제품 제작

No.	요소기술 구분	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야
C-3	1-다	3D 프린팅된 건축부재	20160705			

6. 현장시험*

No.	요소기술 구분	현장시험명	시험일	시험장소	주요내용

* 현장시험: 개발기술의 보완이나 검증을 위하여 실험현장에 최초로 시험·적용하는 행위

7. 표준/인증

No.	요소기술 구분	인증번호 (규격번호)	인증명	취득일	취득기관	관리기관

8. 정책채택

No.	요소기술 구분	구분	정책명	관련기관 (담당부서)	시행일시	채택내용

9. 법령반영

No.	요소기술 구분	구분	활용구분 (신규/개선)	명칭	해당조항	시행일시	관리부처	제정/개선내용

10. 설계기준, 시방서, 지침에 반영

No.	요소기술 구분	구 분 (설계기준/시방서/지침)	활용구분 (신규/개선)	설계기준/시방서/지침 명칭	반영일시	반영내용

11. 기술실시계약

No.	요소기술 구분	계약명	실시기업명	계약체결일	기술사용 시작일	기술사용 종료일	징수일자	징수금액 (천원)	계약 유형

12. 사업화/제품화

No.	요소기술 구분	사업화명	사업화내용	업체명	사업자 등록번호	매출액(천원)	매출발생년도	고용실적(명)

13. 현장적용(시공)**

No.	요소기술 구분	발주기관명	시공업체명	적용현장명	공사시작일	공사종료일	공사금액(천원)***

** 현장적용(시공): 사업화주체(기업)가 개발기술을 실제 공사현장(수주)에 적용하여 매출이 발생하는 경우

***공사금액: 당해 기술이 적용된 공사의 총공사금액

제4장. 연구목표 달성 및 효과

1. 연구개발 최종목표 달성도

가. 연구개발 수행 진도율

구 분 개발내용	연 구 개 발 기 간												진도(%)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
A-1-① 3D 프린팅 기술 유형, 적용현황, 기술수요 조사													100
A-1-① 프린팅 부재의 유형별/재료별/크기별 최적화 프린팅 알고리즘 개발													100
B-1-① 3D 프린터 사용가능 건축재료 선별 및 물성치 DB 화													100
B-2-① 내구성 및 사용성, 정밀도 및 속도를 높이기위한 부품개발													100
C-1-① 3D 프린팅된 건축부재의 유형 및 현장 적용현황 분석													100
C-2-① 부재별 Mock-up test 실시 및 경제적 활용성 검토													100
C-3-① 3D 프린팅된 건축부재의 구조실험													100
C-4-① 건설공정 및 에너지저장 시뮬레이션													100
총 진도율													100

..... 당초계획
————— 실적

나. 연구개발 목표의 달성도

번호	세 부 연 구 목 표	달 성 내 용	달성도(%)
1	건축부재용 3D 프린팅 알고리즘 및 재료연구	▪ 건축용 3D 프린터를 위한 사양을 분석하여 제작함 ▪ 건축용 3D 프린팅에 맞는 재료배합을 도출함 ▪ 핵심부품인 노즐에 대한 5건의 특허를 출원함	100
2	3D 프린팅 건축부재의 Mock-up 테스트 및 활용성 연구	▪ 3D 프린팅 된 부재의 현장적용 자료조사 ▪ 3D 프린팅된 건축부재의 활용성 기술개발 ▪ 3D 프린팅된 건축부재의 구조실험 ▪ 3D 프린팅 시스템의 건설공정 시뮬레이션	100

2. 연구개발 성과의 효과분석

가. 연구개발 성과의 기술적 효과분석

- 지금의 3D 프린터는 재료/속도/크기/경도/정밀도 등 기술적 측면에서 제한적인 성능을 보이고 있음. 그러나 신기술 개발, 재료물질의 발전 및 핵심 특허권 만료 등의 긍정적 요인들로 인해 수년 내 빠른 속도의 발전이 예상됨
- 건축분야에 적용할 시 시공 프로세스의 단순화, 도면대체, 건설재료의 혁신 등 기존 건설방식의 패러다임을 변경할 것으로 예상됨
- 3D 프린팅 건축물의 구현에 필요한 고부가가치 핵심 설계 및 엔지니어링 기술의 높은 해외 의존도 개선을 통한 국내 기술자립도 향상
- 최신 IT 기술 및 3D, 4D 가상건설 기술을 접목하여 건축물의 공간 배치, 수직 및 수평 동선에 대한 효과적인 설계, 평가, 및 검증 기술 확보
- 기술적 부가가치가 높은 3D 프린팅 건축분야에서 국제 경쟁력을 갖춘 기술 Provider가 될 수 있는 계기 마련

나. 연구개발 성과의 경제적 효과분석

(1) 산업규모 전망

- 3D 프린터 제조 시장 및 관련 서비스 시장은 2019년 61억 달러로 전망되며 3D 프린팅으로 제조된 제품의 가치를 더할 경우 133억 달러에 달할 것으로 추정되나 3D 프린팅 산업은 아직 초기단계로 시장전망치는 기관마다 다름

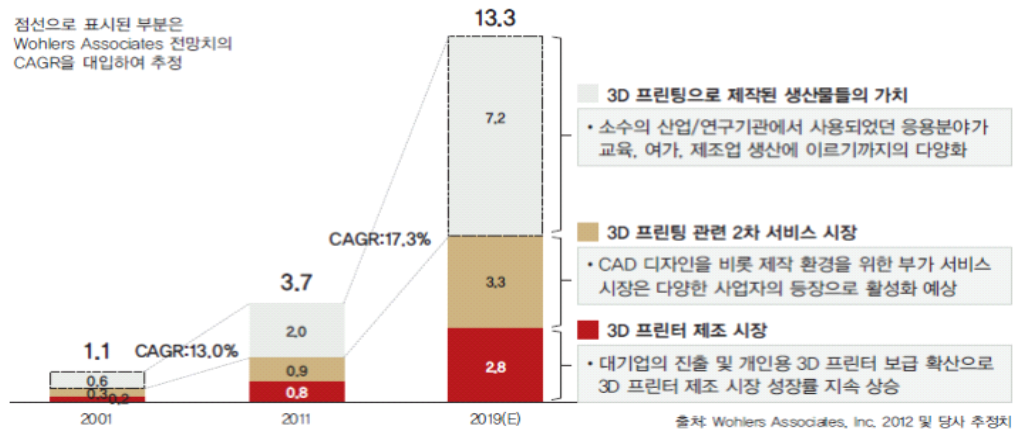


그림 43. 전 세계 3D 프린팅 및 관련 서비스 시장 규모 전망(단위: 십억 달러)

- 3D프린팅 및 관련시장은 매년 높은 성장세를 보이며 커갈 것으로 전망
- 3D프린팅 시장은 연평균 성장률(CAGR)이 29% 수준을 유지해나갈 것으로 전망(3D프린팅 전문 컨설팅 업체인 Wohlers Associates社)
- 2015년 전 세계 3D프린팅 시스템과 원료시장이 37억 달러에 달하고, 2019년에는 65억 달러를 넘어설 것으로 전망
- 전 세계 3D 프린팅 및 관련 서비스 시장규모 전망치는 2011년 이래 연평균 17.3%로 성장예측(KT 경제경영연구소, 2013)
- 3D프린터 장비, 프린트 잉크, 제품의 재활용과 폐기의 Life Cycle에서 발생하는 산업 사슬에 따른 일자리 창출, 유통부문의 경제 활성화 예상
- 향후 6년 동안(~2020년) 전 세계 건설시장은 7조2천억 달러(1달러 1,000원 기준, 한화 7200조원)에서 4조8천억 달러(한화 4800조원) 증가하여 총 12조 달러(한화 1경2000조원) 이상으로 성장할 것으로 전망('Global Construction Expected to Increase by \$4.8 Trillion by 2020', industry tap, 2013)
- 이 중 3D 프린팅 건축 시장 규모를 1%로 예상했을 때 약 120조원 시장이 형성되며 점차 천문학적인 규모의 시장이 형성될 것으로 예상 됨

(2) 가격 전망

- 3D 프린터의 가격은 일반 소비자가 구매할 수 있을 정도로 빠르게 하락하고 있음
- 프린터 가격 인하 외에 재료물질의 가격 인하 역시 3D 프린터 보급 확산의 관건이 될 전망이다
- 3D 프린팅 건축 시스템은 혁신적인 공기단축과 인건비 절감으로 인해 앞으로 가격경쟁력을 가질 예정
- 건축재료의 경제적인 활용으로 전 공정에 이르는 원재료 비용 절감을 유도하여 공사비용을 획기적으로 줄일 수 있음

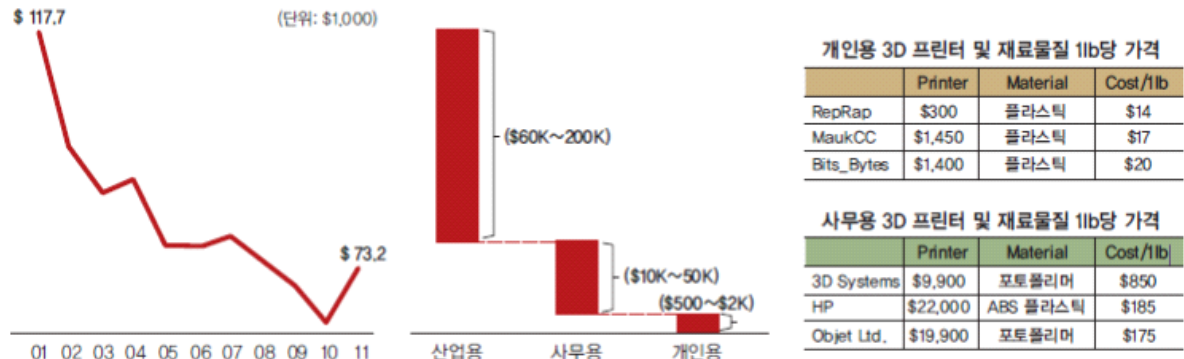


그림 44. 3D프린터 평균가격 추이(좌), 3D프린터 용도별가격추이(중), 재료물질 가격추이(우)

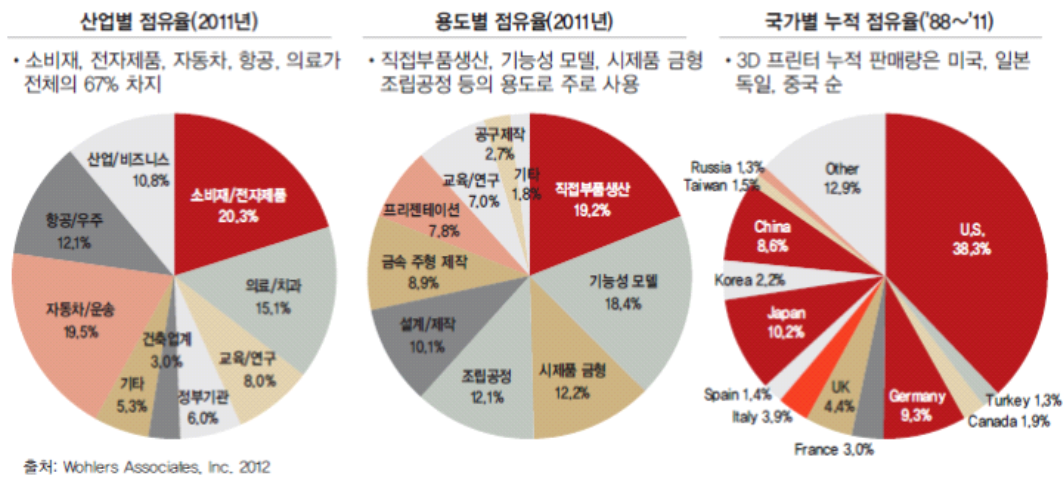


그림 45. 산업별/용도별/국가별 시장 점유율

(3) 경제적 효과

- 아직은 초기 시장형성 단계인 세계 3D 프린팅 건축물 분야에서 국내 업체들의 초기 시장 선점을 통한 기득권 확보 및 미래 신성장동력 마련
- 기존의 건축분야 뿐 아니라 IT 등 타 산업영역에 포함된 기술들과 신 융합기술에 익숙한 차세대 건설기술 인력을 배출

제5장. 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

1. 연구성과 향후 활용방안

가. 연구결과의 활용방안

- 3D 프린팅된 건축부재를 이용하여 기존 건축생산시스템을 대체할 수 있는 공장제작-현장조립의 새로운 시스템의 도입에 활용
- 이형건축, 비정형건축에 필요한 사용자 주문형 건축부재의 제작에 활용
- 도면대신 쓰일 수 있는 3D 디지털파일의 의사소통방식에 활용
- 추후 로봇팔을 이용한 로봇틱스 건축제작 시스템에 활용
- 신속조형을 위한 알고리즘을 기반으로 건축분야에 적합한 새로운 장비운용 소프트웨어의 제작에 활용

나. 기대성과 및 파급효과

- 3D 프린팅 건축물의 구현에 필요한 고부가가치 핵심 설계 및 엔지니어링 기술의 높은 해외 의존도 개선을 통한 국내 기술자립도 향상
- 3D 프린팅 건축물 프로세스의 자동화 및 일체화를 통한 설계, 엔지니어링 기간 단축 및 원가절감
- 최신 IT 기술 및 3D, 4D 가상건설 기술을 접목하여 건축물의 공간 배치, 수직 및 수평 동선에 대한 효과적인 설계, 평가, 및 검증 기술 확보
- 질 높은 SCI급 논문을 게재하고 관련기술의 특허등록으로 기술선점
- 기술적 부가가치가 높은 3D 프린팅 건축분야에서 국제 경쟁력을 갖춘 기술 Provider가 될 수 있는 계기 마련
- 아직은 초기 시장형성 단계인 세계 3D 프린팅 건축물 분야에서 국내 업체들의 초기 시장 선점을 통한 기득권 확보 및 미래 신성장동력 마련
- 기존의 건축분야 뿐 아니라 IT 등 타 산업영역에 포함된 기술들과 신 융합기술에 익숙한 차세대 건설기술 인력을 배출

2. 추가연구의 필요성

- 본 건축용 3D 프린터 시제품을 사용하여 건축재료 프린팅 기술에 맞춘 재료선정 및 배합기술의 차년도 연구가 꼭 필요하며, 해외 선진연구그룹의 연구개발 속도를 뛰어넘는 연구개발진행이 필요함
- 본 실험에서 사용된 시제품의 프레임과 배합기 및 펌프 등은 실제 건축부재를 설계할 만큼 기계의 성능이 충분하지 못하며 6크기 또한 작음. 실제 건축 부재를 프린팅 할 수 있는 크기의 프레임과 충분한 펌프 출력, 큰 용량의 배합기 등의 기계적 조건이 충족되어야 다양한 실험 및 연구가 수월하게 진행될 수 있음
- 프린팅된 건축부재의 충분한 강도확보와 매끄러운 표면마감, 일정한 토출량 등을 목표로 하는 추가적인 연구가 필요함

- 2016년 도시건축연구사업 “ 소형 건축물 및 비정형 부재 대상 3D 프린팅 설계, 재료 및 장비 개발” 연구단과제와 연계하여 다음단계 연구수행이 가능함
- 본 과제에서 수행한 결과를 통해 연구단 과제에서 목표로 하는 소형 건축물 및 비정형 부재제작의 완료 시기를 앞당길 수 있으며 테스트베드 적용으로의 시행착오를 현저히 줄일 수 있음

참고문헌

- [1] “3D Printing: What You Need to Know,” PCMag.com.Retrieved 2013. 10. 30.
- [2] A. Telea and A. Jalba, “Voxel-based assessment of printability of 3D shapes,” Proc. Mathematical Morphology Appl. image signal process., Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2011, pp. 393-404.
- [3] O. Stava et al., “Stress relief: improving structural strength of 3D printable objects,” ACM Trans. Graph., vol. 31 no. 4, July 2012, pp.1-11.
- [4] Q. Zhou, J. Panetta, and D. Zorin, “Worst-case structural analysis,” ACM Trans. Graph., vol. 32, no.4, July 2013.
- [5] R. Prévost et al., “Make it stand: balancing shapes for 3D fabrication,” ACM Trans. Graph., vol. 32 no. 4, July 2013.
- [6] M. Lau et al., “Converting 3D furniture models to fabricatable parts and connectors,” ACM Trans. Graph., vol. 30, no. 4, July 2011.
- [7] L. Luo et al., “Chopper: partitioning models into 3D printable parts,” ACM Trans. Graph., vol. 31, no. 6, Nov. 2012.
- [8] D. Panozzo, P. Block, and O. Sorkine-Hornung, “Designing unreinforced masonry models,” ACM Trans. Graph., vol. 32, no. 4, July 2013.
- [9] M. Bäcker et al., “Fabricating articulated characters from skinned meshes,” ACM Trans. Graph., vol. 31, no. 4, July 2012, pp.1-9.
- [10] J. Cali et al., “3D-printing of non-assembly, articulated models,” ACM Trans. Graph., vol. 31, no. 6, Nov. 2012.
- [11] L. Zhu et al., “Motion-guided mechanical toy modeling,” ACM Trans. Graph., vol. 31, no. 6, Nov. 2012.
- [12] S. Coros et al., “Computational design of mechanical characters,” ACM Trans. Graph., vol. 32, no. 4, July 2013.
- [13] D. Ceylan et al., “Designing and fabricating mechanical automata from mocap sequences,” ACM Trans. Graph., vol. 32, no. 6, Nov. 2013.
- [14] B. Bickel et al., “Design and fabrication of materials with desired deformation behavior,” ACM Trans. Graph., vol. 29, no. 4, July 2010.
- [15] M. Skouras et al., “Computational design of actuated deformable characters,” ACM Trans. Graph., vol. 32, no. 4, July 2013.
- [16] International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, ‘3D Printing,’ 2013. 3.
- [17] NIPA, ‘3D 프린터, 차세대 제조업 혁신 주도 전망’, 주간기술동향, 2013. 3. 20.
- [18] 전승수, ‘초연결 사회의 빅데이터 생태계 분석과 시사점’, ISSUE PAPER, 한국과학기술기획평가원, 2012. 10.

- [19] 박세환, ‘3D 프린팅 산업동향’, 주간기술동향 1613호, NIPA, 2013. 9. 11.
- [20] Gartner, ‘Gartner Says Early Adopters of 3D Printing Technology Could Gain an Innovation Advantage Over Rivals,’ 2013. 3. 26.
- [21] Wohlers Associates Inc., ‘Cumulative Industrial AM Systems installed by country from 1988 to 2012,’ 2012.
- [22] NIPA, ‘국내, 3D 프린터 시장 확대’, IT융합시스템 36호, 2013. 3.
- [23] 머니투데이, ‘3D 프린터로 만든 소총 격발 성공, 그 후엔...’, 2013. 7. 28.
- [24] IRS글로벌, ‘3D 프린팅시장, 기술 전망과 국내외 참여업체 사업전략’, 2013. 7.
- [25] SIMTech, ‘Opportunities and Applications
- [26] UK. Intellectual Property Office, “3D Printing - A patent overview”, 2013.

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 00000사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.