

20CTAP
-C1451
87-03

보안 과제(), 일반 과제(v) / 공개(v), 비공개() 발간등록번호(11-B552989-000318-01)

국토교통기술촉진연구 사업 제3차 연도 최종 보고서

R&D / 20CTAP-C145187-03

NASA 대회를 통한 달·화성 기지 기반 기술 검증 최종보고서

2020 . 8 . 13.

주관연구기관 / 한양대에리카 산학협력단
공동연구기관 / 네오그래프
공동연구기관 / XArc

2020

국토교통부
국토교통과학기술진흥원

N
A
S
A
대회를 통한 달·화성 기지 기반 기술 검증 최종보고서

국토교통과학기술진흥원
국토교통부

2. 제출문

제 출 문

국토교통과학기술원장 귀하

'국토교통기술촉진연구사업'(연구개발 기간 : 2018 . 4 . ~ 2020 . 6 .) 과제의 최종보고서 2부를 제출합니다.

2020 8 12

주관연구기관명 : 한양대학교 에리카산학협력단 대표자) 박태준
공동연구기관명 : 네오그래프 (대표자) 이현숙
공동연구기관명 : XArc (대표자) samuel ximenes



주관연구기관책임자: 이태식

공동연구기관책임자: 이현숙, samuel ximenes

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

3. 보고서 요약서

보고서 요약서

과제 고유 번호	20CTAP-C145 187-03	해당 단계 연구 기간	2020.01.01.~06.30	단계구분	(3단계)/ (3단계)
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구 사업			
	세부사업명	글로벌 기술협력사업			
연구과제명	대과제명	NASA 대회를 통한 달·화성기지 기반 기술 검증			
	세부과제명	재료가공 및 사출시스템 개발			
연구책임자	이태식	해당단계 참여연구원 수	총: 3명 내부: 3명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 70,000천원 민간: 24,000천원 정부외: 천원 상대국: 5,000천원 계: 99,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 4명 내부: 4명 외부: 명	총 연구비	정부: 550,000천원 민간: 184,000천원 정부외: 천원 상대국: 100,000천원 계: 834,000천원
연구기관명 및 소속 부서명	한양대 에리카 산학협력단			참여기업명 네오그래프	
국제공동연구	상대국명: 미국			상대국 연구기관명: XArc	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

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

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 · 장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기 탁 번호	V	V	V	V							

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호
한양 대학교	3D 갠트리	4.3*4.3*3 .5m	1	2019.03.2 7	36,300	뉴빌리티 (0104083 1885)	수리실험동	NFEC-20 19-05 -255773

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

보고서 면수

4. 국문 요약문

연구의 목적 및 내용	○ 미국항공우주국(이하 NASA)은 ‘백 년간의 도전’ 프로젝트의 일환으로, 더 먼 곳으로의 우주여행을 현실화하고 인간의 서식지를 넓혀가기 위해 3D 프린팅 기술과 우주 현지의 자원을 활용한 거주 공간에 대한 아이디어 공모전을 개최해왔음 ○ 과학자들이 앞으로 달이나 화성에 기지를 건설할 때 현지에서 구할 수 있는 재료를 사용해 3D 프린터로 인쇄(3DP)하는 기술 개발을 위한 이 대회의 이름은 ‘NASA 센티니얼 챌린지: 거주지 3D 출력 대회(3-D Printed Habitat Challenge 이하 CCP)’로, 목표는 2030년 미국의 유인화성탐사 계획에 따라 현무암과 비슷한 화성 현지 흙과 플라스틱을 활용해 대형 3D 프린터를 이용해 화성에서 우주인이 머물 거주지를 건설할 기초 기술을 확보하기 위해 화성 거주지 설계, 3D 프린팅 건축 소재 개발, 현지 거주지 제작 등 모두 세 단계로 진행되어왔음 ○ 본 연구과제는 NASA 대회 참여하여 달·화성기지 건설 기반 기술 검증을 위한 국제 협력 연구임 ○ 달 · 화성기지 건설 기반 기술은 재활용 가능한 자원과 현지자원 재료를 결합하거나 현지자원만을 활용하여 1) BIM 기반 거주지 설계 및 가상 시공 도구 활용과 2) 축소 설계된 거주지 자율 3D 프린팅 시공 경연으로 이루어짐 ○ 본 연구과제는 국내에서 구현하지 못한 기술(우주 거주지 설계 기술)을 국제협력을 통해 구현함과 동시에 NASA에서 주관하는 거주지 3D 출력 대회 3단계에 참가하여 기술 홍보 및 선도를 목적으로 하고 있음				
연구개발성과	○ 핵심연구 성과 1) NASA 대회에서 제시한 재료 가공 및 갠트리에 부착 가능한 기술 개발 - 우주 현지 자원 또는 재활용자원과 결합한 구조체 3D 프린팅 재료 가공 및 사출 장비 개발 2) 갠트리와 사출 제어 알고리즘 개발 - 우주뿐만 아니라 지구 환경에서도 적용 가능한 갠트리와 사출시스템의 연동 및 소프트웨어 제어 시스템 개발 3) 갠트리로 시공 가능한 디자인 개발 및 우주 현지에서 시공성 검증 - 구조물, 재료, 건설 공법을 통합한 엔드투엔드(end-to-end) 시스템 모델링 ○ 정량적 성과 목표 - 특허 출원: 1건, SCI(E) 급 논문: 2건, 국내 학술지: 2건				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 본 연구 과제에서 개발된 기술은 2018-19년 NASA 거주지 3D 출력대회 3단계 “3D 프린팅 기술을 이용한 실물 모형을 제작”에 참여하여 기술력을 검증하고, 국내외 우주 탐사 미션에 주도적으로 참여하고자 함 ○ 3D Printing 기법을 적용한 자동화 적층시공을 기반으로 하는 시공 방법은 달에서 뿐만 아니라 국내 건설 현장에도 적용 가능함. 현재 건설 패러다임은 콘크리트를 지속적으로 활용하고 있으며, 이는 시멘트 제작 시 발생하는 다량의 CO2 배출을 하고 있음에도 불구하고 저렴한 가격으로 사용되고 있음. 본 연구과제의 결과인 물과 시멘트를 사용하지 않는 적층 시공 공정은 공기단축, 비용 절감, 안전문제 등을 해결할 뿐만 아니라 시멘트가 비싸거나 지역적으로 확보하기 어려운 지역에서 상업화하여, 3D 프린터를 통한 초저가주택 건설(4인 거주, 1500만원 소요)이 가능함 ○ 이는 건설 수요자 측면에서 건설 상품의 가격 하락, 시공 시간 단축, 신속한 복구 등을 가능하게 하여 고부가가치 건설 상품을 실현시킬 수 있음				
핵심어 (5개 이내)	달 화성	건설기술	적층시공	NASA	기반시설

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	The ultimate goal of this research is to demonstrate fundamental Moon/Mars base construction technologies through NASA Centennial Challenge: 3D-Printed Habitat, Phase 3. The research aims to advance the technology of autonomous construction for building planetary habitats by developing (1) structural member material processing and extruder system using In-Situ resource utilization, (2) 3D printing technologies with gantry deployed to planetary surfaces, and (3) a virtual construction template for BIM based space Habitat design and 3d printing. NASA's 3D-Printed Habitat Challenge is a Centennial Challenge Program competition that seeks to develop and demonstrate capabilities to manufacture, with 3D-printing technologies, a Habitat on another planetary body using mission recycled materials and/or local indigenous materials. The vision includes autonomous construction machines deployed to planetary surfaces to build shelters for human habitation. The challenge is divided into three phases: Phase 1 of the challenge, a design competition. Phase 2, structural member competition and Phase 3, on-site Habitat competition. This research project is an international cooperation study to participate in a NASA 3D-Printed Habitat, Phase 3 competition to demonstrate the fundamental construction technologies of the Moon and Mars bases. The Phase 3 competition is structured with three Construction Levels which lead to future construction of a full-scale Habitat. In addition to the three Construction Levels, the competition contains two Virtual Construction Levels to develop Habitat design and to encourage integration of BIM data with autonomous 3D printing processes. This research will promote and lead 3D printing construction technology by participating in 3D Printing Competition (Phase 3) held by NASA while implementing technologies through an international collaborative effort.
Results	The key findings of this research project include (1) 3D printing machines with material processing and gantry attachment required for NASA competition, (2) interlock and software control technologies for gantry and extruder systems to autonomous additive construction required for both space and Earth application, and (3) Habitat design and verification of constructability using gantry in space environment
Expected Contribution	The technologies developed in this research project will serve to participate in Phase 3 of NASA's 3D Printing Competition in 2018-2019 in order to demonstrate capabilities and to lead the domestic & overseas space exploration mission. Autonomous additive construction methods using 3D printing technologies can also be applied to local construction site. As a result of this research, the additive construction processes that do not use water and cement are commercially available in areas where cement is either expensive or difficult to obtain locally, enabling ultra-low-cost housing construction (4 persons residence, \$ 12600 required), as well as reducing construction time and cost and resolving safety issues. It could realize high value added construction products by enabling the price to be lowered, the construction time to be reduced, and the rapid recovery to be enabled.
Keywords	Moon and Mars Construction Technology Additive Construction NASA Infrastructure

< 목 차 >

1. Research Outline	1
2. Current States of Affairs	5
3. Contents and Results of Research	9
4. Degree of Attainment and Contribution	38
5. Application Plan of Research	42
6. Information from overseas acquired during the R&D	44
7. Security Grade of R&D Performance	45
8. Research Facilities and Equipment Status registered the National Science and Technology Information System	45
9. Safety Measures Implementation Performance of Laboratory	45
10. Representative Research Performance	49
11. Others	50
12. References	50

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	5
3. 연구수행내용 및 성과	9
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	38
5. 연구개발성과의 활용 계획	42
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	44
7. 연구개발성과의 보안등급	45
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	45
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	45
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	49
11. 기타 사항	50
12. 참고 문헌	50

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

구분	내용
최종 목표	NASA 대회를 통한 달·화성기지 건설 기반 기술 검증
세부 목표	○ 우주 현지 자원 활용한 구조 부재 재료 가공 및 사출 시스템 개발 ○ 우주 현지 건설을 위한 3D 프린팅 출력 기술 개발 ○ 우주 거주지 BIM 설계 및 3D 출력을 위한 가상 건설 템플릿 개발

2. 연구개발의 필요성

가. 연구의 중요성 및 필요성

◦ 기술적 측면

- 우주 탐사를 위해서는 많은 재료와 자원의 활용이 필요한데, 달에 자재를 운송하기 위해서는 1kg당 약 12 억 원의 운송비가 드는 등 천문학적 비용이 소요됨에 따라(Lee et al., 2018), 우주 선진국들과 글로벌 기업들의 연구 패러다임도 발사체를 넘어 미래 유인 탐사와 달 개척에 필요한 자원을 찾으려는 현지 자원 활용(In Situ Utilization, 이하 ISRU)을 위한 연구로 구성되고 있음
- 달과 화성은 우주 방사선, 극심한 일교차, 진공 또는 저기압의 대기, 저 중력, 자원의 제약 등 인류가 생활하기에 최악의 환경임. 이러한 환경으로부터 제약적인 자원으로 우주인을 보호할 수 있는 시설물의 건설이 필요함. 지구와 다른 환경에서 시공이 가능한 행성 건설 기술은 행성 현지에서 구할 수 있는 재료와 적층 시공 건설 기술 개발을 요구하며, 이러한 ISRU 기술은 달/화성 유인 탐사를 위한 게임 체인저 기술임(Neal et al., 2014)
- 이에 따라 행성의 토양(regolith, 암석이 부서져 생긴 표토로 미세한 암석 조각)을 위주로 물을 사용하지 않으면서 형태와 강도를 지닐 수 있는 건설 재료에 대한 연구가 이루어지고 있음. 주재료인 행성 토양은 아폴로 달 샘플에 대한 연구가 수십 년 동안 활발히 이루어져 이를 모사한 달 복제토를 사용하고, 행성 토양에서 추출한 원소를 기반으로 한 화합물과 지구에서 가져온 탐사 장비 및 물품을 재활용한 재료들에 대한 연구 기술들이 개발되고 있음. 예를 들어 토양을 녹여서 소결하는 방법, 금속을 토양에 섞어 반응시키는 방법, 황을 결합재로 사용하는 방법, 폴리머를 결합재로 사용하는 방법 등이 있음(Mueller et al., 2016). 그러나 달과 같은 극한 환경에서 건설을 한다는 것은 기존의 지구상에서의 건설과는 개념 자체가 달라지기에 그동안은 개념 제안 정도 수준에 머물고 있음
- 본 연구진이 개발해온 3D 프린팅 건설 재료는 기존 건설에서 사용하던 시멘트 기반 폴리머 콘크리트와는 달리 친환경재료인 화산현무암과 재활용 가능한 폴리에틸렌을 바인더(결합재)로 사용하는 고유한 기술로 양생 없이 제작 즉시 구조체로서 기능을 발휘할 수 있음(폴리머 첨가물이 10%일 경우 압축강도가 11MPa 수준)
- 현재 연구진이 자체 개발하여 보유하고 있는 고정형 방식의 갠트리 시스템을 개발한 노하우를 기반으로 인간이 접근하기 어려운 극한 환경에서도 적용할 수 있도록 자동화 및 자율 시공에 대해서도 연구하여 이동성과 편리성을 향상시키고자 함
- 기존의 행성 기지 건설 연구들이 재료 또는 시공방법에 한정되어 있었다면 본 연구과제는 재료와 시공방법을 연계해서 연구를 수행하고자 하기 에 종합적인 해결책을 제시할 수 있을 것으로 기대됨

◦ 경제산업적 측면

- 이미 경쟁이 심화되고 있는 우주 상품 개발 시장에서 선진 민간 우주 기업들은 혁신적인 게임 체인저 기술을 개발하며 시장을 선도하고 있음. 2016년 9월 말 개최된 국제 우주대회(IAC)에서 우주 발사체 분야의 새로운 역사를 쓰고 있는 스페이스X의 엘론 머스크가 2030년 경 화성 정착지 계획을 발표하여 민간 부문도 2030년 대 행성 유인 탐사를 목표로 실질적인 예산 투자를 시작하였음. 2015년 11월 미국 우주기업 '블루 오리진'은 우주선 재사용에 성공함으로써 기존 비용을 10분의 1로 절감시킴. 일본 건설회사 오바야시구미는 2050년 목표로 총 연장 9만 6000km에 이르는 우주 엘리베이터 건설, 카지만 건설은 달(2030년)과 화성(2040년)에서 사용될 수 있는 자율 기계를 개발 계획을 발표함
- 민간 기업들이 우주 탐사에 열을 올리는 이유는 바로 우주 기술 개발을 통해 다양한 산업에서 기술 파급 효과를 내고 새로운 시장을 개척할 수 있기 때문임. 경제협력개발기구(OECD)는 우주기술의 경제적 파급효과가 투자비용의 8배에 달한다고 추산한 바 있음
- NASA의 3D 프린팅 기지 공모 (3DP) 과정은 민간의 아이디어를 경청하고 발굴하기 위해 모두에게

투명하게 공개되어 상호 피드백을 통해 이루어지고 있음. 공모전에서 우수한 기술 개념은 더 추가적인 연구를 통해서 달과 화성 등 미래 유인 기지에 건설에 사용될 3D 프린터로 개발될 것임. 이처럼 민간 참여를 통한 저비용·고효율 기술 개발은 탐사 미션의 임무 실패 시 발생하는 막대한 손실액을 저감할 수 있고 효율적인 연구개발 투자가 가능함. 이는 우주 탐사에 소요되는 천문학적 비용 대비 정부의 한정된 예산에 따른 문제를 해결할 수 있음

- 본 과제에서 개발하고자 하는 우주 현지 기술력 확보를 통해 지구의 어떠한 환경에서도 대규모 건축물을 보다 효율적으로 건설 가능하여 산업화 발전에 기여할 수 있음. 3D 프린팅 기법을 적용한 자동화 적층 시공을 기반으로 하는 폴리머 콘크리트 시공 방법은 달에서뿐만 아니라 국내 건설 현장에도 적용 가능하며 공기단축, 비용 절감, 안전 문제 등의 해결에 기여할 수 있음
- 또한 민간 기업 참여를 통해 저변을 확대하고 먹거리를 창출함으로써 장기화된 경기 침체로 인한 민간기업의 경제활동에 활력을 일으킬 수 있음. 달이나 행성 환경은 크게 남극과 북극 같은 혹은 지역과 심해저 환경, 사막 같은 혹서 지역으로 나눌 수 있으며 현재 인류가 거주하는 지역은 지표면의 10%도 되지 않음. 우주건설 기술은 지구의 나머지 90%를 거주 지역으로 건설 가능한 기술로, 스피드 오프를 통해 상용화 가능함

◦ 사회문화적 측면

- 미국은 1969년부터 1972년까지 4년 동안 6차례에 걸쳐 유인 우주선을 발사한 탐사 프로젝트인 '아폴로 계획' 이후 45년 만인 2017년 12월 달 유인 탐사 재개를 공식화함. NASA는 2024년에 달에 유인우주선을 착륙시키는 것을 목표로 아르테미스 미션을 수행하고 있음. 세부계획으로 2020년까지 아르테미스 1호를 발사하여 달 궤도 무인 비행을 시작하고 2022년에 아르테미스 2호가 우주인을 태우고 달 궤도 비행을 하며, 최종적으로 우주인을 달에 착륙하는 것을 목표로 하고 있음
- 중국·러시아·일본 등도 달 탐사를 넘어 유인 기지 건설을 목표로 국가 간 경쟁이 치열해지고 있음
- 달 탐사 연구가 중요한 이유는 최근 전 세계적으로 불고 있는 우주개발 협력 때문임. 과거 우주개발은 미국과 러시아에서 시작해 일본, 인도, 중국 등이 경쟁적으로 추진하는 형태로, 많은 돈이 소요되며 실패할 경우 큰 손해를 보는 만큼 국제적 협력 없이는 불가능함
- NASA 산하 달탐사분석그룹(LEAG)은 2020년까지 달에 로버를 착륙시키려는 각 국가들의 계획을 임무에 따라 조정하고 있음. 서로 다른 지역을 연구하는 것이 효율적이기 때문임
- 우리나라를 포함한 영국, 미국, 일본 등 전 세계 12개 우주개발 기관들이 모여 '국제우주탐사협력그룹(ISECG)'을 만들고 우주탐사 로드맵을 함께 작성 중임. 유인탐사는 ISECG의 국제탐사로드맵의 목표이며 이를 위해 각국의 우주국들은 그 로드맵에 맞춰 달과 화성 유인탐사를 체계적으로 준비하고 있음
- 우주개발 역사에서 지금까지 많은 협력이 이뤄지는 것은 기회이자 위기임. 현재 시기적으로 한국형 달 표면 탐사계획을 실현할 수 있는 골든타임으로 국제 협력 임무에서 한국의 위상을 높일 수 있음
- 우리나라의 우주탐사는 우주인 배출, 나로호 발사 성공이래, 우주개발에 대한 국민적 관심 재고되며 국가위상 제고 및 국가경제발전에 기여를 위한 독자적 우주개발 능력강화가 요구되고 있음
- 한국항공우주연구원(항우연)은 1989년 항공우주산업개발 촉진법 근거해 한국기계연구원 부설 '항공우주연구소'로 설립되었으며 이후 1996년 재단법인 '한국항공우주연구소'로 독립한 후 2016년 국가우주개발 전문기관으로 지정됨. 2019년 10월 창립 30주년을 기념하여 항공우주의 미래 30년의 계획을 담은 '미래비전 2050'을 발표함. 미래사회의 패러다임 변화에 대응하고 국가와 인류를 위한 성과 창출하기 위해 이동성 향상을 위한 생활 밀착형 비행체 개발, 친환경 항공운송 기술 개발, 우주수송기술 개발, 달에서의 활동 영역 확보, 우주자원 확보, 항법 주권 확보 등 19개의 전략목표를 수립함
- 본 연구 과제를 통해 개발될 달/화성에서의 주거지 건설 기술은 지금까지 없었던, 유인 우주탐사에 필요한 핵심 시스템을 발전시킬 수 있어 국내 우주 탐사 (건설 부문) 기술 수준을 세계적인 수준으로 높이는 데 기여할 수 있음

나. 국제협력 필요성

◦ 추진 배경

- 본 연구과제는 NASA 대회를 기반으로 달·화성기지 건설 기반 기술 검증하고, 해외 우수 및 우주전문기관과 협력을 통해 시너지 효과를 창출하고 세계적으로 우수한 기술력을 입증하기 위함임
- 향후 유인 달, 화성 탐사 시 필수적인 거주지 건설을 목적으로 NASA 경연 대회에서 우선적으로

요구했던 실제 거주지 1/3 규모의 출력물을 건설하기 위하여 설계, 시공 부분의 역할 분담과 상호 간의 강점을 활용한 전략이 필요하였음

◦ 성공 가능성

- 본 연구진은 달 환경 및 탐사 시 요구되는 인프라 시설물에 대한 이해, 행성 인프라 시설물에 대한 기술적 요구조건 도출, 달 토양을 활용한 건설재료에 대한 시험연구, 시공 성 및 구조 안정성을 고려한 달 착륙장(Landing Pad) 제안, 행성 인프라 시설물 건설 공법을 개발해왔음

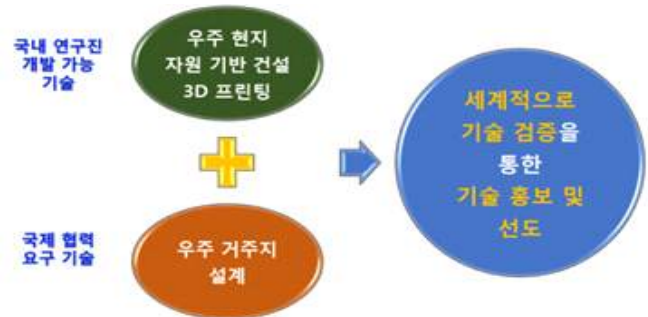
- 2016년 11월 시작된 NASA의 화성 거주지 건설 대회인 3D-Printed Habitat Challenge(이하 NASA CCP) Phase 2에 유일한 한국 팀으로 참가하여 2차 대회에서 전 세계 77개 팀 중 우승함. 우주 환경에서 사용 가능한 3D 프린터 개발 및 구조물 부재 출력을 통해 우주 건설의 현실성을 높였고, 대한민국의 우주 건설 기술력을 전 세계에 홍보했음



- 본 연구과제는 국내에서 구현하지 못한 기술(우주 기지 설계 기술)을 국제협력을 통해 구현함과 동시에 NASA 3D 프린팅 기지 공모전 Phase 3에서 최종 결과물인 1/3 크기의 거주지(10m²) 제작에 성공하여 국내외 기술 홍보 및 선도를 목적으로 하고 있음

- 첨단 기술을 보유한 연구기관과 우주개발 아이디어를 공동으로 기획하고 협력해 비용을 최대한 줄이며 우리가 원하는 기술을 경험하고 확보하여 개발 시간과 리스크를 저감시키고자 함

- 본 연구 과제를 통해 개발될 달/화성환경을 체험할 수 있는 실증단지의 1/3 규모의 거주지 건설 기술은 지금까지 없었던, 유인 우주탐사에 필요한 핵심 시스템을 발전시켜 지구에서 이동성과 태양광 에너지를 사용한 초경량 탑재체(5~10kg) 개발을 통해 궁극적으로 우주탐사를 현실화 시키고자 함



◦ 상대국의 공동연구기관 및 공동연구책임자의 실적·연구 능력

- 해외기관 XArc는 2007년부터 지속적인 우주 건축 디자인을 연구하고 제안한 기관으로, 우주 거주지 설계 부분의 강점을 보유하고 있음

연구 책임자	주요 역량	대표 실적		
Samuel Ximenes	WEX재단 이사장: NASA 교육 콘텐츠 연구사업 수행 우주 건축가: 우주공항, 오비터, 전초기지 등 설계 https://www.wexfoundation.org/about-us.html	NASA 3D프린팅 기지 공모전 Phase 1 참가 STEM(Science, Technology, Engineering and Mathematics) 교육 네트워크와 연계하여 우주 건설기술을 체험할 수 있는 교육 프로그램을 전 세계 학생들과 연구 인력에게 제공		
	Engineering Management Business management Business Development Project Management			

◦ 연구개발비, 연구개발 인력, 연구시설 등의 이용 및 분담 내용

- 주관기관 한양대학교에서 장비 및 부지를 제공 및 제작, 공동기관 네오그래프에서 소프트웨어 개발 및 운용, 해외기관 XArc에서 3D 프린팅으로 구현 가능한 화성 기지 설계 및 BIM(Building Information Modeling·건축정보모델링) 제시로 구분하여 각 기관별 특성과 역할을 분명하게 명시함

3. 연구개발 범위

가. 1차 연도

○ 개발 목표

- 주관연구기관(한양대학교) : 우주 현지 자원 활용한 구조 부재 일체형 출력
- 공동연구기관(네오그래프) : 사출제어 시스템 확립
- 공동연구기관(XArc) : 화성 환경에 적합한 우주 건축 디자인 확립

○ 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한양대학교): 사출 제어 하드웨어 설계 및 제작, 재료 후보군 선정 및 시공성 검토 후 20kg 중량 활용이 가능한 3D 프린팅 방식 선정
- 공동연구기관(네오그래프): 자체적 활용 소프트웨어와 적합한 사출제어 하드웨어 선정 및 소프트웨어 제작
- 공동연구기관(XArc): BIM을 활용한 우주거주지, 기계적 사출 구현이 가능한 구조 부재 및 접합부 상세 설계

나. 2차 연도

○ 개발 목표

- 주관연구기관(한양대학교): 재료 가공 및 사출 장비 보완 및 거주지 현장 1/3 규모 출력 경연 참가
- 공동연구기관(네오그래프): 사출시스템 및 3D 프린팅 시스템 알고리즘 개발
- 공동연구기관(XArc): 거주지 출력을 위한 최종 설계 확립

○ 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한양대학교): 갠트리시스템 가동성능 검증 및 사출시스템과 결합 후 출력 시험
- 공동연구기관(네오그래프): 실규모의 1/3 거주지(10m²) 현장 출력 후 피드백 시스템 개선
- 공동연구기관(XArc): BIM 상세설계, 가상 건설 템플릿 개발 및 거주지 출력 시나리오 개발

다. 3차 연도

○ 개발 목표

- 주관연구기관(한양대학교): 실거주 사이즈 파일럿 테스트 및 상용화 전략 수립
- 공동연구기관(네오그래프): 실거주 테스트 이후, 피드백 소프트웨어 개선
- 공동연구기관(XArc): BIM 라이브러리 상용화 전략 수립

○ 개발 내용 및 범위

- 주관연구기관(한양대학교) : 극한/험지 환경에서 무인 건설 기술 Field Test 전략 수립 및 국내외 건설기업과 사업화 협의
- 공동연구기관(네오그래프) : 극한/험지 환경에서 무인 건설 기술 소프트웨어 알고리즘 기술화 수립
- 공동연구기관(XArc) : 개발도상국을 위한 초저가 주택 (1500만원/4인) 비즈니스 양산 모델 개발 및 해외 사업화 검토

제2장. 국내외 기술 개발 현황

본 연구진이 개발한 기술들이 우주와 유사한 극한 환경 탐사 및 자원개발 경쟁에서 우위를 선점할 수 있는 차별화된 비즈니스 모델을 구축하고, 국내외 우주 탐사 미션에 주도적으로 참여하며 고급 연구인력 일자리 창출에 기여하고자 국내외 우주 정책의 변화와 산업화 활동에 대해 조사함

○ 우주 탐사의 새 시대의 도래(The new era)

- 미국 NASA는 2024년에 달에 유인우주선을 착륙시키는 것을 목표로 아르테미스 미션을 하고 있음. 세부계획으로 2020년까지 아르테미스 1호를 발사하여 달 궤도 무인 비행을 시작하고 2022년에 아르테미스 2호가 우주인을 태우고 달 궤도 비행을 하며, 최종적으로 우주인을 달에 착륙하는 것을 목표로 하고 있음
- 일본도 미국 유인 탐사 사업에 참여의사를 밝혔고, 러시아와 중국도 달 탐사에 속도를 내고 있어 우주는 이제 미래 선도국가들 경쟁의 바로미터로 인식되고 있음
- 우주 개발로 인한 경제적 효과가 입증됨에 따라 글로벌 경제위기에도 일본·중국·미국 등 세계 주요국은 우주개발 투자를 확대하여 우주 시장은 지속적으로 성장하고 있음

○ 민간 부문 저변 확대(New space)

- 최근 세계 우주 과학기술계의 화두는 '뉴 스페이스(New Space)'로, 우주과학과 탐사에 민간부문이 적극적으로 뛰어들면서 새로운 시대가 열리고 있다는 의미임
- 우주개발이 정부나 과학자들만의 전유물이 아니라 세계인 모두가 공감하여 우주를 꿈꾸고, 독일 브레멘에서 국제우주대회(IAC)가 개최되었음

- 개막식이 있던 대회 첫날, 유럽의 대표적 다국적 우주기업인 에어버스가 새로운 형태의 달 탐사 경연대회인 '문 레이스(Moon Race)'개시를 선언함



- 문레이스는 대기업만 참여할 수 있었던 달 탐사 사업이 중소기업 및 스타트업(신생 벤처기업)에까지 확대되는 계획으로, 에어버스사의 젊은 그룹들이 제안한 아이디어가 사내에서 채택돼 별도의 법인으로 만들어져 비영리 민간 기구를 설립해 이 대회를 진행할 계획임

- 앞서 미국의 구글이 진행한 '구글 루나 엑스프라이즈(Google Lunar XPrize)' 대회처럼 달에 탐사장비를 보내 임무를 수행하는 것이 목표임. 비록 구글이 막대한 상금(1등팀 2000만달러(약 227억원))에도 불구하고 착륙에 성공한 팀은 없었지만 무인 달탐사를 통한 달 표면의 과학탐재체 설치 등의 임무를 상업화하는 다수의 기업들을 발굴하는 성과를 남긴 바 있음
- 우승 상금은 구체적으로 밝히지 않았지만 수상 팀의 장비를 달까지 발사하는 경비를 모두 지원할 계획임. 에어버스는 현지 토양을 이용한 달 기지 건설과 작물 재배, 전력 생산, 우주인 생존과 우주선 연료에 필요한 물과 산소 생산 등 4가지 부문에서 수상자를 선정할 계획으로 구글 루나 엑스프라이즈가 달에 도착해 사진을 촬영하는 단순한 과제를 수행하도록 한 것에 비해 훨씬 구체적이고 실용적인 목표를 제시함. 이는 최근 달의 남극에서 얼음 상태의 물이 대량으로 발견되면서 유인(有人) 달 기지에 대한 관심이 급증한 것을 반영한 것임
- 유럽우주기구(ESA)와 멕시코 우주국, 미국 민간 우주기업 블루오리진 등이 이사회 일원으로 참여를 선언했고, 일본과 중국 등 주요 우주기관이 참여와 후원을 고려하고 있는 것으로 알려졌다. 우리나라에도 항우연에 이사진 참여를 요청하였음. 과학기술정보통신부(과기부) 거대 공공정책연구과 주관으로 건설기술연구원, 지질자원연구원, 한양대 국제우주탐사연구원 등 Moon Race 참가희망팀들이 "우리나라 참여방안 검토"라는 주제로 지질자원연구원에서 회의를 진행함(2019.08.08.)

○ 우주 산업 상품화

- 전자레인지, 정수기, CT 등 의료기기, 방송통신 등 인류의 삶의 질을 크게 향상시킨 기술 등 우주 기술들을 타 산업에서 활용하는 사례가 더욱 많아지고 있음
- NASA는 우주개발을 통한 스피노프 기술을 소개하는 책자를 발행하는데 그 분량이 매년 수백 페이지에 달하고 있음. 우주기술이 국민의 실생활에 직접적으로 연결되는 성장기반기술로 인식되며 경제성도 입증되어 왔음. 우주 분야의 경제성이 확인되면서 기업체들의 참여가 증가하며 자연스럽게

우주와 관련되는 새로운 산업 분야가 형성되고 있음

- 우주산업을 지원하는 비영리단체인 '스페이스 파운데이션' 조사에 따르면 2013년 세계 우주시장에서 민간이 차지하는 비율은 74% 수준임. 우주산업은 이제 군사와 안보를 위한 개발에서 국가와 기업의 새로운 성장 동력으로 발돋움하며, 기존 항공우주 기업들이 아닌 IT 기업들이 미국 정부의 후원 하에 두각을 보이고 있음
- 우주산업 생태계가 성숙한 미국을 중심으로 정부가 수행하던 전통적인 우주 개발 임무에 민간 기업체들의 진입이 활발해지며 참신한 아이디어들과 혁신적인 기술이 우주활동과 접목되면서 우주관광, 우주호텔, 소형위성 군집을 통한 전 지구 통신·인터넷 서비스, 달 및 천체에서의 우주자원 채굴, 우주에서의 인류 거주 등 다양한 아이디어가 산업화로 이어지고 있음

세계의 우주 벤처 기업

서비스	기업	창립년	국가
통신	SpaceX	2002	미국
	LuxSpace	2004	룩셈부르크
	Aprize Satellite	2004	미국
	Innovative Data Service	2006	미국
	Gom Space	2007	덴마크
	O3b Network	2007	네덜란드
	exactEarth	2009	캐나다
	Kymeta	2012	미국
	OneWeb	2012	영국
리모트센싱	Skybox Imaging	2009	미국
	Planet Labs	2010	영국
	Dauria Aerospace	2011	러시아
	Spire	2012	미국
	Omni Earth	2014	미국
발사서비스	Blue Origin	2000	미국
	Garvey Spacecraft	2001	미국
	SpaceX	2002	미국
	Masten Space Systems	2004	미국
	Rocket Lab	2007	미국
	Stratolaunch System	2011	NZ/미국
	Generation Orbit	2011	미국
	Swiss Space System	2012	스위스/미국
	Firefly Space System	2014	미국
우주여행 (궤도운송, 서브오비탈 등)	XOOR Aerospace	2000	미국
	Virgin Galactic	2004	미국
	Booster Space Industry	2006	벨기에
	SHIPinSPACE	2013	영국
	Shackleton Energy	2008	미국
혹성탐사	Astrobotic Technologies	2008	미국
	Moon Express	2010	미국
	Golden Spikes	2010	미국
	Planetary Resources	2010	미국
	Mars one	2011	네덜란드
	Deep Space Industries	2013	미국
	Inspiration Mars	2013	미국
	Geo Optics	2005	미국
기상	Geo met Watch	2008	미국
	PlanetiQ	2012	미국
ISS 이용	Nano Racks	2009	미국
	Urche Cast	2011	캐나다
	Zeri Gravities Solutions	2013	미국
	Orbital Outfitter	2006	미국
우주복	Final Frontier design	2010	미국
	Earth 2 Orbit	2008	인도
발사중개	Nova Nano	2009	프랑스
	Space Flight	2010	미국
	ECM Space Technologies	2010	독일

출처: 宇宙×ICTに関する懇談会(2017)에서 재인용

- 국내에서도 하이브리드 로켓을 이용한 소형위성발사체 개발과 위성발사 서비스를 전문으로 하는 벤처 “이노스페이스”은 3040 의 젊은 인력들이 주축으로 소형 발사체를 이용하여 우주로의 도전을 준비 중에 있음. 또한 대기업 한화는 삼성테크윈을 인수함에 따라 방산 개발 및 연구를 넘어 위성 센서와 위성통신 등 우주분야 진출을 진행 중에 있으며 달 탐사위성 탑재용 고해상도 카메라와

전원공급유닛을 등을 개발하였음

○ 유인 달/화성 기지 건설추진 가시화

- ESA는 2017년 달 기지인 문 빌리지(Moon Village) 건설 계획을 추진하고 있음. 단순한 달 탐사뿐 아니라 달 관광, 제조 등 모든 활동을 하나로 모으는 형태로 추진 중임. 문빌리지 프로젝트의 주요 로드맵은 오는 2040년까지 100여명 정도의 탐사대원들이 상주할 수 있는 건축물을 달 표면에 조성하는 것임. 달 기지 건설에 필요한 장비를 전적으로 3D 프린터에만 의지하여 건설용 3D 프린터를 달로 보낸 다음 현지 토양자원을 원료로 건축에 필요한 자재들을 제작하겠다는 계획임



ESA 3D 프린팅 달기지(출처:<https://phys.org/news/2017-09-moon-village-mars-esa.html>)

- 마이크 펜스 미국 부통령은 2018년 8월 NASA 존슨 우주센터를 방문한 자리에서 ‘달에 사람을 상주시킬 것’이라고 밝힘. ‘사람의 달 상주’란 달 궤도를 도는 플랫폼과 달 궤도를 도는 우주정거장 건설이 될 것으로, 공식명칭은 ‘루나 오비탈 플랫폼 게이트웨이’(LOP-G: Lunar Orbital Platform-Gateway)임. 미국 정부는 5억 달러(약 6000억원)를 투입하여 2022년 달 궤도 우주정거장 공사를 시작해 2033년까지 순차적으로 규모를 확대해 나갈 계획임
- 현재 NASA는 러시아 우주국 로스코스모스와 함께 달 표면에 인간이 상주할 수 있는 우주기지(moon base)를 건설하는 프로젝트도 공동 추진하고 있음

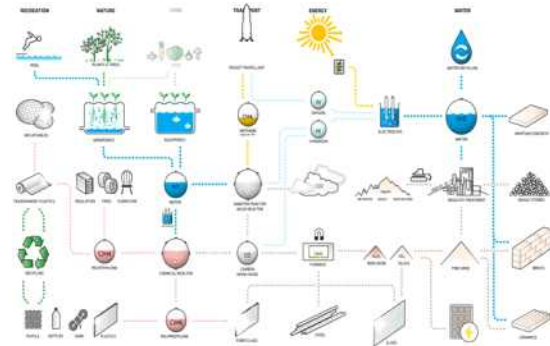
○ 달/화성 환경을 체험할 수 있는 실증단지 건설 계획

- 아랍에미리트(UAE)는 석유시대 이후 대비한 생존 전략을 위해 미래 도시 모델을 구축하기 위한 실험을 두바이에 투자하고 있음
- 7개 분야(인공지능, 로봇공학, 유전공학, 3D 프린팅, 블록체인, 생물 모방 및 생체 공학)의 신생 기술기업들을 두바이로 끌어들이는 1억 달러 프로젝트가 미래도시로 가는 촉매제역할로 다른 행성에서도 활용할 수 있는 미래지향적인 도시건설을 진행 중임



The UAE vision of Mars 2117 will drive technologies for space exploration such as energy, water and food security that will also benefit life on Earth.

- 100년 후(2117년) 화성 정착촌 건설을 목표로 \$1.4억을 투자하여 176,516㎡ (약 53,396평)의 화성과학도시(Mars Science City, 이하 MSC)를 조성해 화성과 같은 조건에서 1년 동안 거주하는 실험프로젝트를 수행할 계획이고, 이를 위해 2020년 두바이엑스포를 통해 '미래도시'로 확실하게 자리매김하고자 할 전략을 수립함
- 중동지역 최대의 우주기관인 MBRSC는 2017년 9월, UAE에서 MSC 설계를 위해 140M USD를 투자하여, 1.9M ft2(176,516 m2; 53396평)의 넓이로 조성한다고 발표함. 구체적인 계획으로 자체공급 및 생산이 가능한 체계를 구축하고 사막의 모래를 사용하는 3D 프린팅 기술을 활용해 박물관의 벽으로 제작 예정임. 또한, MSC 내 연구시설에서는 건설 시험을 화성의 열이나 방사선의 환경으로 조성하여 실행할 계획으로 다른 행성에서도 활용할 수 있는 미래지향적인 도시 건설을 진행 중임



화성과학도시 건설 계획(출처: <https://big.dk/#big-ideas>)

- 국제 민간조직인 인터내셔널 문베이스 얼라이언스(IMA)도 NASA와 함께 하와이제도 마우이섬에 400만㎡(약 120만 평) 규모의 달 기지 건설 실증단지(MoonBase Pototypes on Earth) 계획을 발표함
- 국내도 국제 공동연구를 통해 NASA의 달기지 실증단지 건설이 추진되고 있음

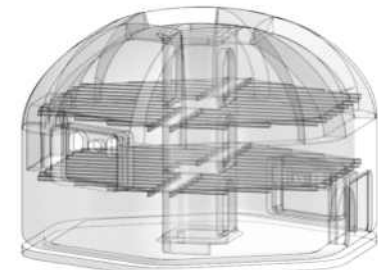
[많이 본 뉴스] <네트워크> 전남 'NASA 달 기지 모델' 건설 추진
최종희 기자 hyeonh@q1tv.co.kr 작성일: 2018년 10월 20일 조회수: 239



[영제]
우리나라 우주개발 초기지인 전남 고흥에 미 항공우주국 NASA의 달 기지 모델을 건설하는 방안이 검토되고 있습니다.
우주인이 실전처럼 훈련받는 것은 물론, 기지 건설을 위한 각종 시험 장소로 활용됩니다.



한국서 만든 달복제로 30% 축소판 달기지 만든다



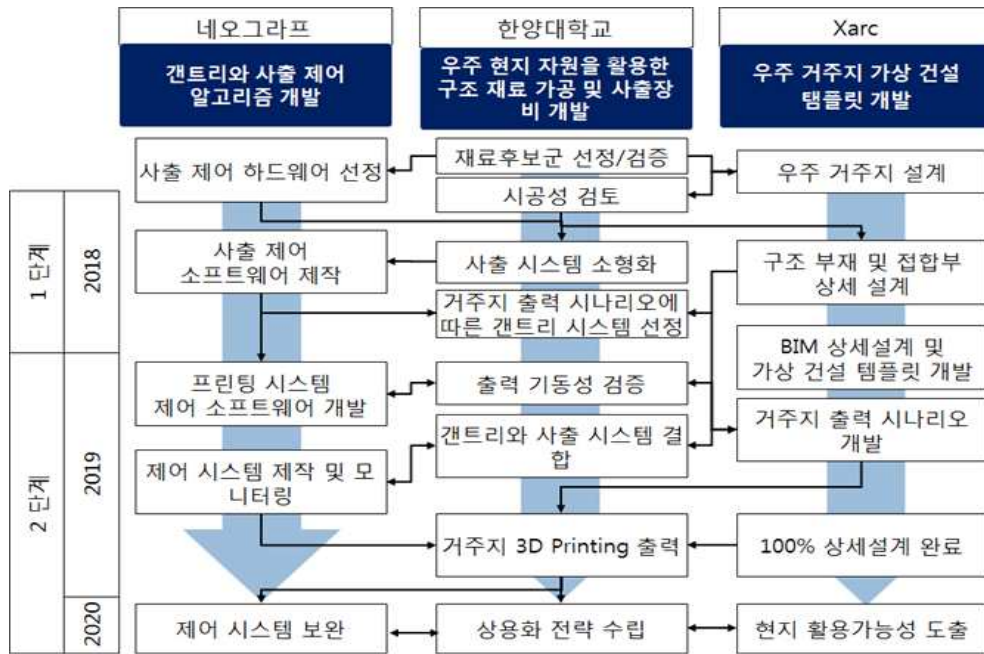
국내 달 실증단지 건설 계획 관련 기사

- 본 연구진과 NASA, IMA 등과 공동으로 추진하는 것으로, 연구진은 IMA, NASA와 함께 하와이제도 마우이섬에 400만㎡(약 120만 평) 규모의 달기지 건설 실증단지를 만드는데 주도적으로 참여할 계획임. 또한 국내 전남 고흥군과도 약 16만 6000㎡(약 5만평 규모) 면적의 체험용 달기지 건설 계획을 협의 중임
- 달/화성을 체험할 수 있는 실증단지 프로토타입 개발 기술은 지능화·고도화된 스마트 건설 기술 구현을 통해 기후 변화, 재난 피해, 환경 오염 문제를 전 세계적으로 해결하는데 기여할 수 있음
- 지구 환경에서 달/화성 가상현실 시뮬레이션을 위한 달/화성 사이버 피지컬 시스템(Cyber Physical System)은 지구에서 건설될 프로토타입(onsite)을 달/화성의 가상현실 환경(online)에서 체험할 수 있는 '스마트 실증단지'로 3D프린팅, 친환경, 블록체인 등 4차 산업의 핵심 기술들을 하나의 플랫폼으로 융·복합한 혁신 기술임
- 향후 우주와 유사한 극한 환경 탐사 및 자원개발 경쟁에서 우위를 선점할 수 있는 기술 사업화를 통해 4차 산업 혁명에 부응하는 건설 산업의 가치사슬 혁신을 선도하고 고급 연구인력 일자리 창출에 기여할 것으로 기대됨
- 미래사회를 위한 국내 우주 기술 비전
 - 항우연은 1989년 항공우주산업개발 촉진법 근거해 한국기계연구원 부설 '항공 우주연구소'로 설립되었으며 이후 1996년 재단법인 '한국항공우주연구소'로 독립한 후 2016년 국가우주개발 전문기관으로 지정됨
 - 2019년 10월 창립 30주년을 기념하여 항공우주의 미래 30년의 계획을 담은 '미래비전 2050'를 발표함. 미래사회의 패러다임 변화에 대응하고 국가와 인류를 위한 성과 창출하기 위해 이동성 향상을 위한 생활 밀착형 비행체 개발, 친환경 항공운송 기술 개발, 우주 수송기술 개발, 달에서의 활동 영역 확보, 우주자원 확보, 항법 주권 확보 등 19개의 전략목표를 수립함

제3장. 연구수행내용 및 성과

3-1. 연구개발 추진전략·방법

◦ 본 연구 과제를 수행하기 위한 연구개발 흐름도는 아래 그림과 같음



- 한양대학교를 중심으로 해외공동연구기관과 가상 건설 시나리오를 통해 출력된 구조물을 기반으로 시공 성 분석 및 구조부재를 제작해 NASA 대회에서 최종적으로 참가하였던 2개 팀의 테스트 결과물과 성능 비교 분석을 통해 본 연구진의 기술 우수성을 입증할 계획임
- NASA 대회에 참가하였던 두 팀과 차별화 전략을 수립하여 태양광 패널을 지붕에 적용시키고자 함
- 최적화 과정 진행 중인 대형 건설용 건축 3D 프린팅 소프트웨어 코드를 완성시켜 시스템을 보완 예정임
- 최종적으로 건설 회사와 상용화 전략 수립 및 저개발 국가로의 진출 가능성을 모색하고자 함

3-2. 연구개발 추진체계

연구개발과제		총 참여 연구원	
과제명	NASA 대회를 통한 달·화성기지 건설 기반 기술 검증		주관연구책임자 (이태식)외 8명
기 관 별 참 여 현 황			
구 분	기관수	인원수	총인원 수
산 업 계	2	5	9
대 학	1	4	
국공립(연)			
출 연 (연)			
주 관 연 구 기 관		(국제) 공 동 연 구 기 관	공 동 연 구 기 관
한양대학교		XArc	네오그래프
참 여 연 구 원		참 여 연 구 원	참 여 연 구 원
주관연구책임자 (이태식)외 3명		(국제) 공동연구책임자 (Smuel Xiemenes)외 1명	공동연구책임자 (이현숙)외 4명
책임급 2명, 선임급 1명, 원급 3명,		책임급 2명	책임급 1명, 선임급 1명, 원급 3명
담당연구개발내용		담당연구개발내용	담당연구개발내용
과제명	재료 가공 및 사출 시스템 개발	과제명	과제명
		Virtual Construction for feasibility building	갠트리와 사출 제어 알고리즘 개발
NASA 대회에서 제시한 재료 가공 및 갠트리에 부착가능 기술 개발		갠트리로 기반 화성기지에서 가능한 설계 디자인 도출	갠트리와 사출시스템의 캘리 브레이션 및 SW 제어 시스템개발
참여기업		네오그래프, XArc	

3-3. 추진 일정

구분	연구과제명 (연구수행기관)	관련 성과목표/지표		세부추진내용 (연구수행 Activity)	Activity별 산출물	소요 연구비 (백만원)	1차년도				2차년도				3차년도			
		핵심성과	단위성과	질적 성과지표			1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4	1/4	2/4	3/4	4/4
총괄	주관 NASA 대회에서 제시한 재료 가공 및 갠트리에 부착가능한 기술 개발 (한양대)	1	1-1	1-1-1	선행연구 사례 조사	연차보고서	20											
				1-1-2	목표성능 설정	연차보고서	20											
				1-1-3	가공된 재료 이송 및 건조보관 설비 구축	재료이송시스 템 제작	30											
				1-1-4	흙을 포함한 폴리에틸렌 사출 노즐 개발	사출노즐 제작	30											
				1-1-5	주요 구조 부재(기초) 및 접합부 출력 및 시공건전성 검증	논문내용 반영	15											
			1-2	1-2-1	재료 가공 및 사출 장비 보완 및 개선	장비제작	145											
				1-2-2	거주지 현장 출력 경연 참가	NASA대회 참여	100											
				1-2-3	재료 대량 생산 및 상용화 전략 수립	논문내용 반영	30											
			1-3	1-3-1	극한/협지 환경 테스트 베드 및 상용화 전략 수립	논문내용 반영	50											
				1-3-2	선행연구 사례 조사	연차보고서	40											
공동	공동 갠트리로 시공가능한 디자인 및 화성기지에 서 구현될 수 있는 설계 디자인 도출(네오 그래프) 갠트리와 사출시스템 의 칼리브레이 션 및 소프트웨어 제어 시스템개발 (XArc)	2	2-1	2-1-1	3D 프린팅 갠트리 설비 구축	연차보고서	45											
				2-1-2	3D 프린팅 갠트리 설비 보완 및 개선	알고리즘개발	95											
			2-2	2-2-1	거주지 현장 출력 경연 참가	NASA대회 참여	100											
				2-2-2	거주지 현장 출력 경연 참가	NASA대회 참여	100											
			2-3	2-3-1	극한/협지 환경 테스트 베드 전략 수립	논문내용반영	44											
				2-3-2	극한/협지 환경 테스트 베드 전략 수립	논문내용반영	44											
			3	3-1-1	우주 거주지 BIM 설계 (60%)	NASA대회 참여	35											
				3-1-2	주요 구조 부재 및 접합부 설계	BIM데이터확 보	10											
				3-2-1	우주 거주지 BIM 상세 설계 (100%) 및 가상 건설 템플릿 개발	NASA대회 참여	40											
				3-2-2	거주지 일체형 3D 프린팅 출력 시나리오 개발	최종설계안확 보	10											
			3-3		상용화 전략 수립	논문내용반영	5											

1) 우주 현지 자원을 활용한 구조 재료 가공 및 사출 장비(한양대학교)

단계(연차)		주요 연구활동		세부 연구내용	
1단계	1차년도 ('18.04 ~12)		■ 선행연구 사례조사	- 재료 배합, 적층, 강도 발현 기술 조사	
			■ 목표 성능 설정	- 친환경, 재활용 재료 사용으로 인한 에너지, 비용 절감 및 공기 단축 목표 선정	
			■ 가공된 재료 이송 및 건조 보관 설비 구축	- 화산현무암과 폴리머 배합	
			■ 흙을 포함한 폴리에틸렌 사출 노즐 개발	- 재료 점성 및 수축률 분석	
			■ 주요 구조 부재(기초) 및 접합부(기초,벽 등) 출력 및 시공 건전성 검증	- 부재 최적 적층 알고리즘 선정	
2단계	2차년도 ('19.01 ~12)		■ 재료 가공 및 사출 장비 보완 및 개선	- 재료 사출 전처리 보관 기술 개발	
			■ 거주지 현장 출력 경연 참가	- 재료 점성 및 수축률을 반영한 사출 속도 및 노즐 지름 최적화 구현	
			■ 재료 대량 생산 및 상용화 전략 수립	- 실제 규모 거주지(93m2) 1/3 크기의 현장 출력	
	3차년도 ('20.01 ~06)		■ 극한/협지 환경 테스트 베드 및 상용화 전략 수립	- 클라우드 소싱, 전문가 자문 등을 통한 상용화 시나리오 개발 및 재료 대량 생산 방식 체계 구축	
				- 국내외 건설기업과 사업화 협의	

2) 갠트리와 사출 제어 알고리즘 (네오그래프)

단계(연차)		주요 연구활동	세부 연구내용
1단계	1차년도 (’18.04 ~’12)	■ 선행연구 사례조사	- 부재 일체형 출력 알고리즘 조사
		■ 3D 프린팅 갠트리 설비 구축	- 공간적층에 대한 좌표인지 및 프린팅 알고리즘 개발 - 갠트리와 사출시스템 연동 및 소프트웨어 개발
2단계	2차년도 (’19.01 ~’12)	■ 3D 프린팅 갠트리 설비 보완 및 개선	- 3D 프린팅 갠트리 설비 구축 및 테스트
		■ 거주지 현장 출력 경연 참가	- 실제 규모 거주지(93m ²)의 1/3 크기 현장 출력
	3차년도 (’20.01 ~’06)	■ 극한/협지 환경 테스트 베드 전략 수립	- 극한/협지 환경에서 무인 건설 기술 Field Test 전략 수립

3) 우주 거주지 가상건설템플릿 (XArc)

단계(연차)		주요 연구활동	세부 연구내용
1단계	1차년도 (’18.04 ~’18.12)	■ 우주 거주지 BIM 설계 (60%)	- 구조체 BIM 속성 정보 도출 - 우주 거주지 내/외부 공간설계 (구조 모델: LOD 300, MEP & ECLSS: LOD 100)
		■ 주요 구조 부재 및 접합부 설계	- 일체형 출력을 위한 슬래브, 벽 연계, 개구부 설계 및 출력 시나리오 개발
2단계	2차년도 (’19.01 ~’19.12)	■ 우주 거주지 BIM 상세 설계 (100%) 및 가상 건설 템플릿 개발	- 우주 거주지 내/외부 공간 상세 설계 (구조 모델: LOD 300, MEP & ECLSS: LOD 200)
		■ 거주지 일체형 3D 프린팅 출력 시나리오 개발	- 가설공사, 3D 프린팅 장비 (갠트리) 등 포함한 구조물, 재료, 건설 공법의 end-to-end 시스템 설계의 가상 건설 모델링
	3차년도 (’20.01 ~’20.03)	■ 상용화 전략 수립	- 저개발국가를 위한 초저가 주택 (1500만원/4인) 양산 비즈니스 모델 개발

3-4. 연구개발성과

3-4-1. 국내·외 논문 게재 및 특허

번호	논문명 / 특허명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호*
1	달 화성 3D 프린팅 주거지 건설을 위한 재료 사출기능 최적화 연구	대한토목학회 국문논문집	이진영	2	대한민국	대한토목학회	비 SCI	2019. 4	통권 제 203호
2	Bottom-up heating method for producing polyethylene lunar concrete in lunar environment	Advances in Research	이재호	1	-	ELSEVIER	SCI	2018.6	62
3	Digital business opportunities driven by collaborative partnerships in the construction 3D printing industry	Journal of Construction Engineering and Management	이윤선			ASCE	SCI	투고 중	
4	행성탐사를 위한 거주지 건설 연구 : 현지자원 활용과 3D 프린팅 기술을 중심으로	대한토목학회 국문논문집	이진영	40	대한민국	대한토목학회	비 SCI	2020.6	
5	3D 프린터용 노즐장치		이태식		대한민국			2019.4.23. (출원일)	

3-4-2. 국내 학술 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	대한토목학회 학술대회	이재호	2019.10	알펜시아리조트	대한민국
2	대한토목학회 학술대회	이재호	2018.10.18	경주 화백컨벤션센터	대한민국

3-4-3. 국내외 심포지엄 및 workshop

1	Moon Village Association	이태식	2018.11.5	USC(LA)	미국
2	달마을 반사회	이태식	2018.11.12	국회	대한민국

3-5 연구 결과

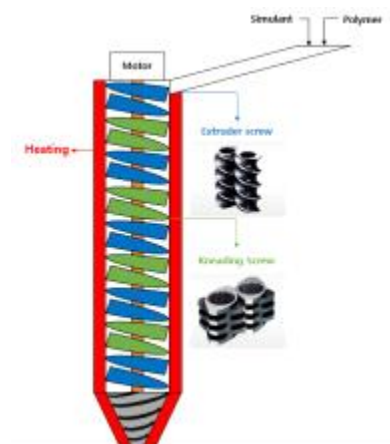
가. 기술적 성과

- 사출 시스템 개발 및 해외 달 기지 적층 기술
 - 적층공법 프로세스에 관한 평가요소를 분석하고 노즐 대안 검토

평가요소

노즐설계(안)

Technical characteristics	Unit	Description
Technology	-	Type of technology used in the machine's additive manufacturing
Printing materials	-	Materials supported by the part
Printing size	mm*mm*mm	Maximum dimensions of the part
Multicolored parts	Boolean	Prints or not multicolor parts
Resolution	DPI	Maximum printing resolution
Layer thickness	mm	Minimum printing layer thickness
Accuracy	mm	Minimum distance between 1 layer and another
Printing speed	mm/h	Maximum material addition speed
Power specs	V, A, W	Required operating voltage, current, and power
Size	mm*mm*Mm	Machine dimensions
Weight	kg	Machine weight
Price	US\$	Machine cost



Mançanares, C. G., Zancul, E. D. S., da Silva, J. C., & Miguel, P. A. C. (2015). Additive manufacturing process selection based on parts' selection criteria. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80(5-8), 1007-1014.

- 3D 프린팅 제작 프로세스를 재료이송, 혼합, 사출, 바인딩, 다짐 순으로 구분하여 각각의 기술특성과 이점을 구분하였음. 재료이송의 경우에는 중력을 이용하거나, Auger, 유압 운송 등이 있으며 중력의 방식을 이용하는 것이 경제성과 에너지 측면에서 유리하다고 판단하였음. 또한 혼합의 경우에는 기계의 단순화와 교반 율 향상을 위한 Auger 방식과 기계의 단순화를 위한 진동과 회전 날의 방식으로 구분 되며 사출은 자유낙하 방식을 바인딩은 신터링, 연소, 마이크로웨이브, 폴리머에 열을 가하는 방식이 있었음. 다짐의 경우 다짐을 하지 않거나 롤러, 정적다짐, 진동다짐 등이 있었음
- 적층 기술을 적용한 해외 달 기지 종류에는 Sinterhab, USC Lunar/Mars Contour Crafting 등이 있었음
- 재료 후보군 선정 및 시공성 검토
 - 재활용성이 가장 높은 폴리머를 활용하여 출력단계에서 수축이 발생하는 문제를 해결하기 위해 재활용성과 시공 성(수축률, 녹는점, 강도)를 고려하여 결합재 선정 함

재활용성(NASA 3DP 점수표)

시공성 (수축률, 녹는점, 강도)

Material Applicability	Earth Return	Mars Return
Approach	LE, MC, SI	SE, SR, CR
Polymers (Excluding Blends)	MA, WK, PT, EVCH, RU, ABS, I, PS, PC, PMMA, PET, PEG, PVA, PCL, PPF, PP, PE (HD, ANFUS)	
Additives	PP, AM, SC	A, E
Binders	PE, MA, SR	SET, MEC
3DP Factor	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10	

	PETG	PET	PMMA	PLA	PP	LDPE	HDPE
NASA 3DP 점수	6	6	6	7	9	10	10
수축률	0.002 0.01	0.002 0.03	0.002 0.008	0.003 0.005	0.010 0.030	0.015 0.035	0.015 0.030
녹는점 (°C)	220~290	250~260	160	150~160	160	110~120	126
인장 강도 (MPa)	35	55		50	26	32	10

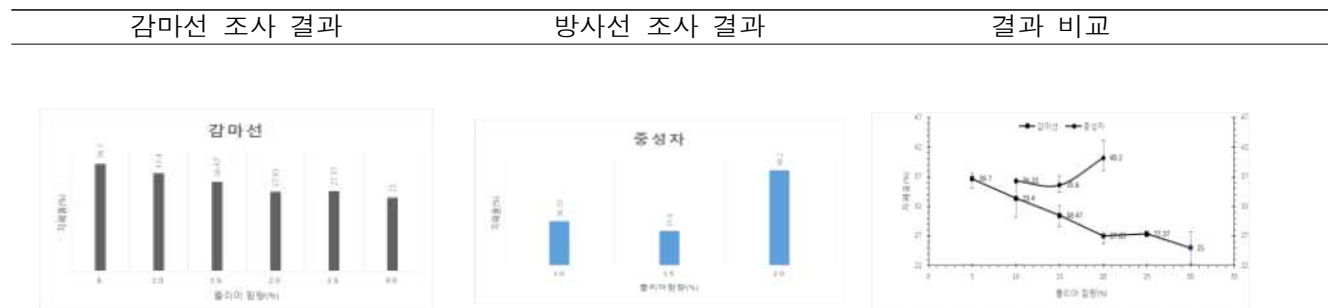
- NASA 3D-Printed Habitat Challenge Phase(이하 NASA CCP) 2, 3에서 권장하는 12가지 폴리머에 대한 조사를 바탕으로 수축률과 강도를 고려한 적합한 후보군(PETG, PLA, PE)를 선정하고 최종 PETG를 선정함
- 소결 : 3DP-Factor이 낮은 5~6 수준은 기본적으로 배제함. PMMA와 PC같은 경우는 온도차에 의한 열수축 영향이 적을 것으로 예상함. 3DP-Factor이 높은 8~10 수준에서는 열 수축 영향이 높음. 3DP-Factor이 7인 PVC와 PLA는 열수축이 양호함. 따라서, PC, PMMA, PVC, PLA 및 PE중에서 재료 시험을 추가 검토하였음

○ 우주환경을 고려한 방사선 차폐 시험을 통한 폴리머 재료의 타당성 확인

- 행성 토양을 모사한 화산 현무암과 탐재체로부터 재활용 가능한 폴리에틸렌을 결합한 재료 가공
- 감마선 조사에 이용된 선원은 Co-60(1.17, 1.33MeV)이며 중성자 조사에 이용된 선원은 cf-252(2.3MeV)임
한국원자력연구원 첨단방사선연구소와 한국원자력연구원에서 각각 실험하였으며, 시편 제작(감마선 조사 : 10*10cm, 중성자 조사: 20*20cm 이상)



- 방사선 종류의 따라 폴리에틸렌 함량에 대한 차폐 성능이 다름. 감마선은 폴리머 함량이 증가할수록 밀도 감소. 반면에 중성자 차폐는 폴리머 함량과 직접적인 관련이 있었음. 감마선과 중성자의 차폐율을 고려해서 그래프를 비교해보면 차폐율 차이가 가장 적은 비율은 폴리머 함량 10% 이었음



○ 사출 기능 최적화 과정을 통한 노즐 개념 설계안 도출

- 실험설계 및 노즐 사출기능 목표에 맞는 출력설계

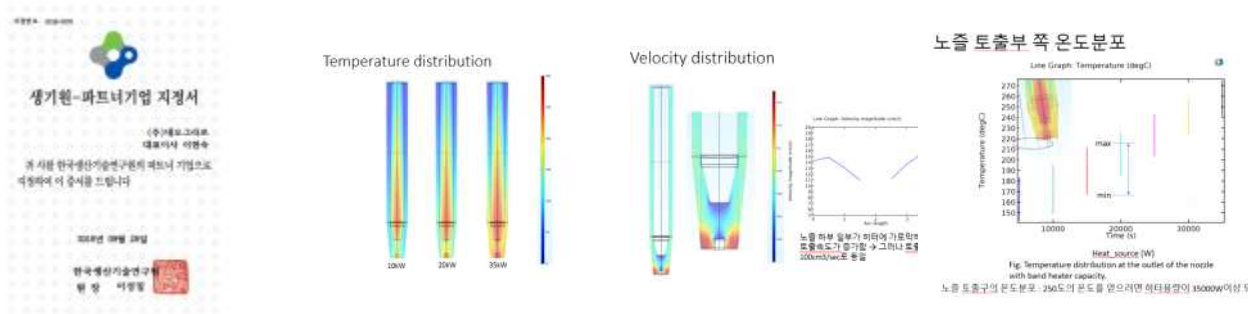
- ◆ 5 구역별 가열 온도 조절 (80 - 280℃)
- ◆ 사출 스크류 길이 약 1,000 mm
- ◆ 사출 지름 10 mm
- ◆ 출력물 제작 크기 1,500 mm * 1,500 mm * 650 mm



- ◆ 예상 사출 부피 = 약 3 m³
- ◆ 사출 속도 = 50 - 100 cm³/sec
- ◆ 지름 2cm 일 경우, 14cm/sec ~27cm/sec
- ◆ 출력 방식: 갠트리

○ 노즐 최적화 설계를 위한 생산기술연과 기술협력 체계구축, 열 해석 수치 실험

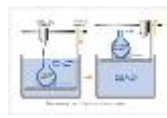
- 한국생산기술연구원(생기원)의 중소기업 지원 프로그램인 파트너 기업(네오그래프) 가입을 통해 기술 협력 체계 구축하여 노즐 최적화 진행
- 사출노즐(지름 10mm, 길이 95cm, 무게 60kg)을 총 중량 20kg이하의 3D 프린터에 부착하기 위한 노즐 최적화 설계(길이, 사출 지름, 사출 속도 등 개선)를 위해 기존 재료에 대한 열 해석 수치 실험을 아주대학교 공동기기 센터에 의뢰
- 열 해석결과를 토대로 노즐 최적화 설계를 위한 시뮬레이션 수행



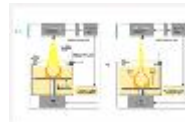
- 재료 사출방식과 특징은 아래와 같음



FDM
(Fused Deposition Modeling)



SLA
(Stereolithography Apparatus)



DLP
(Digital Light Processing)

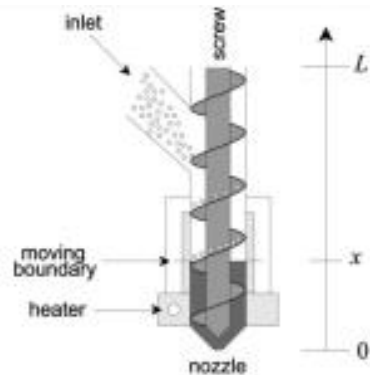


SLS
(Selective Laser Sintering)

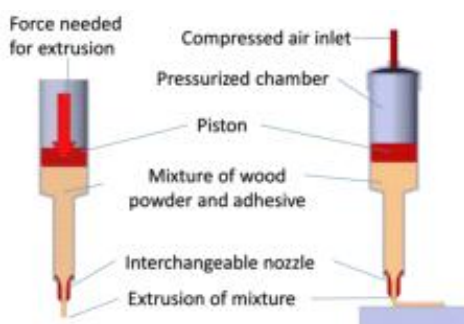
	표면 조도	정교성	치수 정밀도	재료 강도	후처리 편의성	대형 구조물
FDM	나쁨	나쁨	매우 우수	우수	매우 편함	매우 적합
SLA	우수	우수	우수	보통	보통	보통
DLP	매우 우수	매우 우수	보통	보통	보통	부적합
SLS	보통	보통	나쁨	매우 우수	보통	보통

- FDM 공정은 재료를 열에 의해 녹여 일정 압력으로 노즐을 통하여 압출해가며 적층 조형하는 방식임. 공급되는 재료의 형태는 필라멘트나 와이어모양으로 되어 있으며, 보호 카트리지나 신타래와 같은 롤(Roll)에 감겨져 지속적으로 공급됨. 이러한 고체의 재료들은 온도 조절이 가능한 용융압출헤드를 통과하면서 액상에 가까운 재질로 연화, 압출되어 융합 적층 과정을 거쳐 3차원 모델이 만들어지게 됨
- SLA 공정은 액형기반 래피드 프로토타이핑 시스템 공정으로 포토마스크 방법과 함께 가장 대표적인 방법 중의 하나로 빛에 반응하는 아크릴이나 에폭시 계열의 광경화성 수지가 들어있는 수조에 레이저빔을 주사하여 원하는 모델을 조형함. 이때 조형 파트들은 위아래로 움직이는 작업대 위에 만들어지게 되며, 한층 씩 두께가 만들어질 때마다 한 층 두께 (약 0.025~0.125 mm)만큼 밑으로 내려가면서 다시 레이저를 조사하게 됨. 이때 수지의 표면 평탄화와 재료 코팅은 리코터의 수평 날에 의해 이루어짐. 이러한 일련의 반복 작업이 파트가 완성될 때까지 계속됨

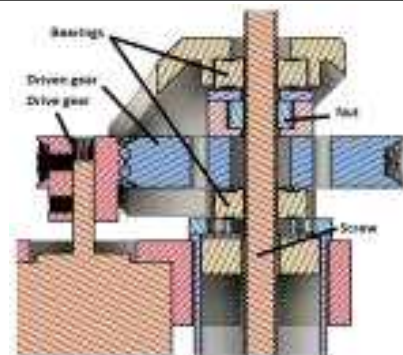
- DLP는 일반적으로 영화 상영이나 사무실의 프리젠테이션 사용시 DLP프로젝터(투영기)에 사용되는 기술과 거의 동일함. 3D CAD로 제작된 슬라이싱 데이터를 층별 각각의 그림데이터(Bitmap)로 전환하여 소프트웨어 상에서 디지털마스크를 생성 후 DLP Projection 장치에서 고해상도의 프로젝션 광으로 광경화수지에 마스크 투영하여 모델을 조형하는 원리임
- SLS 방식은 시스템 내부의 모델 조형공정은 간단함. 자동으로 제어되는 재료 공급 장치에서 재료가 조형판에 공급되면 재료 리코팅 롤러가 평탄 화를 시켜줌. 이후, 상단부에서 레이저가 주사되면서 각 층별 파트가 제작됨. 파트는 가장 밑바닥 부분부터 레이어 적층이 이루어지며, 공정은 파트가 완성될 때까지 계속됨. 완성된 파트는 쿨링타임과 후처리 과정이 필요 할 수 있음. (“3D프린터 종류” amkorea21.com, accessed Nov,15,2018, http://www.amkorea21.com/sub3_1.php.)
- 현재 제작 대상으로 고려하는 노즐은, 스크류 타입과 가압된 형태 구분되며 스크류 타입의 원리는 재료를 외부에 저장하고 입구를 통해 공급하고 펠릿을 스크류에 의해 노즐의 구멍으로 이동시킴. 노즐 근처에서 Barrel과 스크류를 가열하여 펠릿이 운송될 때 폴리머를 용해시킴. 모터 회전으로 폴리머를 압축하여 노즐의 구멍을 통과시킴. 압출기에서의 흐름은 부분적으로 채워진 구역과 완전히 채워진 구역으로 분리됨. 부분적으로 채워진 구역은 고체 펠릿을 운반하고, 기압에 노출되는 구역이며, 이 구역에서는 Auger의 회전은 펠릿의 운반에만 사용되는 반면, 완전히 채워진 영역은 용해 영역으로 오우거의 회전이 재료를 전달에 사용됨. 이 과정에서 노즐의 출력 온도, 압력을 조절하여 점성, 두께 및 균일성과 같은 원하는 특성을 가진 필라멘트를 빠르게 압출할 수 있어서 기존의 3D 프린터보다 정밀도가 높아지고 사출되는 속도도 빨라짐 (DTJ Drotman, et al. 2015)
- Pressurized type은 더욱 효율적인 제작을 위한 다양한 재료를 사용한 3d-프린팅 프로그램들이 개발 됨. 사출에 기반 한 3d-프린팅은 재료의 가용성이 뛰어나기 때문에 가장 널리 사용되는 방법 중 하나로 노즐을 통해 사출 재료를 선택적으로 분사하여 층별 방식으로 쌓아 올림. (Q Wang, et al. 2018) 공급 원료는 전기적으로 구동되는 피스톤에 의해 압출 노즐에서 폴리머를 뽑는 방법임. 노즐의 길이와 직경 비율이 압출 압력에 가장 큰 영향을 미침. 공급된 폴리머는 구동되는 피스톤을 사용하여 노즐을 통해 압입됨. (Catalin Gheorghe Amza, et al. 2017)



screw type



pressurized type

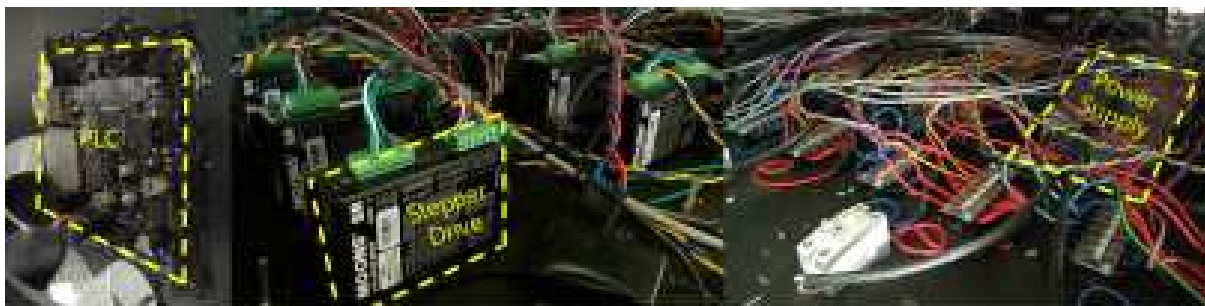


○ 3D 프린팅 설비 구축을 위한 적합한 사출제어 하드웨어 선정 및 소프트웨어 제작

- 기존의 로봇암은 20kg의 다양한 경로를 복합적으로 구현할 수 있는 6축 구동축을 가진 조건으로 상용화 제품을 구매하려 했으나, 노즐의 지름을 40 mm로 개념설계를 하면서 로봇암의 20kg 수준을 넘을 것으로 판단됨. 또한, 미국에서 바로 조립을 하여 대회 참가 및 현지 출력을 고려하여 UTSA와 갠트리 타입으로

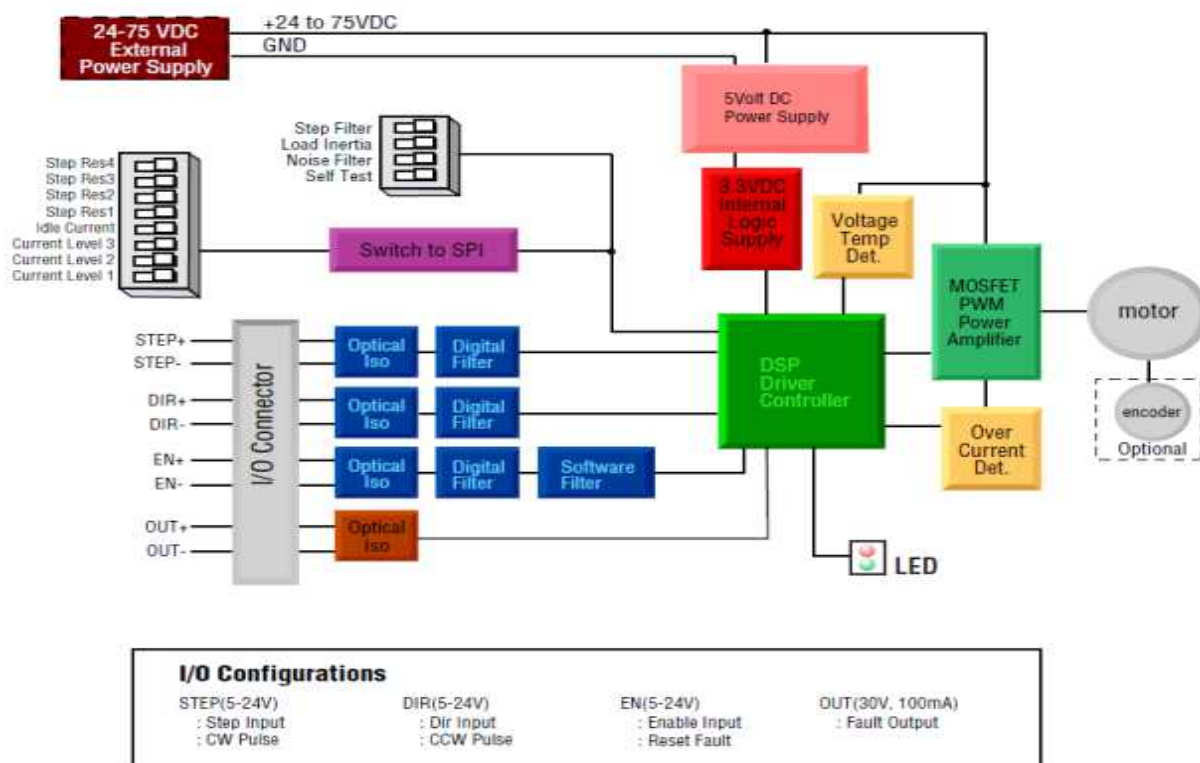
진행을 추진하였음

- 또한, 사출제어의 하드웨어 선정 및 소프트웨어의 구성은 하드웨어의 구성에 따라 하드웨어를 제공하는 업체에서 소스코드를 제공함에 따라 갠트리를 제작하는 University of Texas San Antonio(이하 UTSA)와의 협업을 진행하였음
- 제작 될 갠트리의 하드웨어 부품은 일반적인 산업 자동화 부품으로 구현을 할 계획이며 현재 구동하는 3D 프린터의 특 장점을 바탕으로 개선요소에 대한 회의를 진행하였음
- 현재 구성되어 있는 소프트웨어 및 하드웨어는 아두이노 기반의 단순한 모터구동 제어 방식으로 3D 프린팅을 구현하였음. 아두이노는 오픈소스 플랫폼을 가지고 있는 단일보드 마이크로 컨트롤러로 LED나 모터와 같은 외부 전자장치를 통제하는 임베디드 시스템임. 자체 실행코드와 어도비 플래시, 프로세싱, MAX/MSP와 같은 소프트웨어와 연동됨. 이러한 자체 프로그램을 가지고 있는 컨트롤러를 Programmable Logic Controller(PLC)라고 하며, 높은 내구성과 제조공정에서 제어하기 위한 컨트롤러임



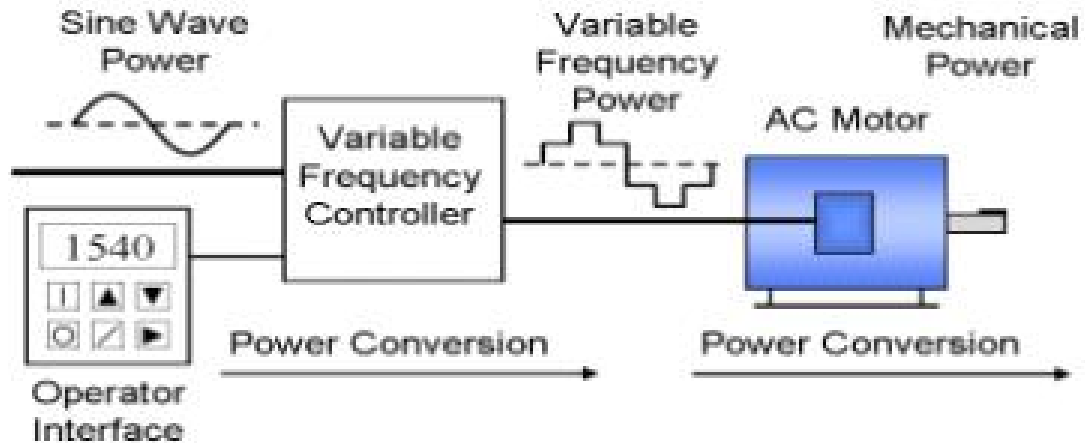
- 또한, X축에 1개, Y축에 2개, Z축에 2개, 그리고 사출 모터에 1개를 각각 조절하고 있음. 열 조절에 대해서도 총 6개의 히터와 컨트롤러로 구성되어 있으나, 소프트웨어의 통합은 기계적인 구동과 함께 호환성에 대해서도 구별함

Block Diagram



- 개선안으로 PLC와 Variable-Frequency Drive(VFD)를 연계하여 구현하는 것을 고려하고 있으며, PLC는 자동차 산업의 생산 공정에서 일반적으로 사용되는 컨트롤러로서 컴퓨터로 높은 내구성과 같은 제조 공정을 제어하도록 조립라인이나 로봇의 신뢰성 높은 제어 및 프로그래밍 용이성이 필요한 작업 프로세스를 하면서 유선 릴레이, 타이머 및 시퀀스를 대체할 수 있는 유연하고 견고하고 쉽게 프로그래밍을 할 수 있음.

- 또한 환경 내구성이 강하여 고 신뢰성 자동화 컨트롤러로 채택되어 있음. PLC는 제한된 시간 내에 입력 조건에 대한 응답으로 출력 결과를 생성해야하기 때문에 시간의 유동성이 적은 실시간 시스템의 예로 들 수 있음
- 구동되는 모터 컨트롤을 유연하게 조절할 수 있는 VFD방식은 소형 가전에서 대형 압축기에 이르기까지 다양한 애플리케이션에 사용됨. 세계 전기 에너지의 약 25 %는 산업용 어플리케이션에서 전기 모터에 의해 소비되며 VFD를 사용할 때 더 효율적 일 수 있음



- 현재의 전력 전자 기술은 VFD 비용 및 크기를 줄였으며 반도체 스위칭 장치, 드라이브 토폴로지, 시뮬레이션 및 제어 기술, 제어 하드웨어 및 소프트웨어의 발전을 통해 성능을 향상 시켜 현재는 많은 모터 구동장치에 적용되고 있음. VFD는 다양한 저전압 및 중 전압 AC-AC 및 DC-AC 토폴로지로 만들어지기 때문에 3상의 모터를 쓰는 것이 안정적임

○ NASA 3DP Phase 3 대회 최종 결과물 출력을 위한 로봇암에서 갠트리로의 전환

- 상용화 장비인 로봇암의 응용성은 매우 높으며 다양한 기계동작의 가능성을 확보할 수 있으나 건설과 같은 큰 규모의 범위는 20 kg을 들 수 있는 로봇암을 활용해도 불가능 할 것으로 판단됨
- 따라서, 대회 참가를 위한 운송비의 절감과 제작물에 대한 성능 확보를 위해 해외 공동연구기관 XArc와 함께 미국 내 3D 프린팅 기계 구현을 할 수 있는 팀을 확보하여 다양한 방식의 갠트리 혹은 조합에 대해서 논의하였음
- XArc의 HexHab 개념은 ISRU와 함께 기본 3D 인쇄 구성 기법을 사용하여 자율적으로 구축 된 화성 표면의 서식지 건설을 위한 종단 간 시스템 접근 방식을 활용함
- UTSA 팀과 논의 하였으며 제시한 갠트리 타입 으로는 총 3가지 설계 디자인에 대한 활용성에 대해서 국제회의를 진행함
- 크기, 비용, 자동화, 무게, 휴대성에 대한 가중치를 고려하여 Iron Giant는 0.445, R2D2는 0.705, Megatron은 0.540으로 종합적인 성능평가에서 No.2가 높은 것을 알 수 있음
- 결과적으로 R2D2에 대한 제작 진행을 계획에 로봇암에서 갠트리로 변경함과 동시에 구체적인 사항에 대해 진행을 시도하였음



Trade-off Study

Decision Criteria	Weight	1. Iron Giant (redesign)		2. R2D2 (prototype)		3. Megatron (new)	
		Raw Score	Weighted Score	Raw Score	Weighted Score	Raw Score	Weighted Score
Size	0.35	8.3	2.91	2.5	0.88	9.5	3.33
Cost	0.25	8.5	2.13	2.7	0.68	8.5	2.13
Automated	0.25	9.7	2.43	9.5	2.38	9.5	2.38
Mass	0.15	9.2	1.38	9.5	1.43	9.5	1.43
Flexibility	0.15	9.5	1.43	9.5	1.43	9.5	1.43
Total			10.35		6.82		10.81

Conclusion



- CPI-2.2
- SPI-0.16
- Task Overview/Risks
- Risk Matrix Conclusions: Megatron>Iron Giant>R2D2

- 본 연구과제 목표는 프린팅 시스템 경량화(20kg)와 미국 현지 대회 경연을 위한 이동 용이성 등으로 로봇 암을 기반으로 한 3D 프린팅 출력 시스템을 계획했음
- 그러나 3D 프린팅 시스템 사례조사를 통해 각 시스템의 장·단점을 도출하고, 수차례의 국내외 전문가들(생산기술연구원, 미국 텍사스주 남서연구소(Southwest Research Institute), UTSA와의 자문회의를 통해 NASA 현지 경연이나 실제 거주지 건설 시 시간 제약으로 인하여 속도와 경제성 측면에서 갠트리 방식이 오히려 더 효율적이라고 제안함

	갠트리(Gantry) 프린터	로봇 암/크레인 프린터		
개념	출력 헤드는 X, Y, Z 방향으로 이동. 시스템 경계내에서 출력	출력 중심에 플랫폼 위치. 노즐 로봇암/컴퓨터로 구동되는 크레인시스템에 고정		
장점	+ 안정적이고 안전한 구조 - 단순하고 저렴	+ 소형 기계시스템 + 이동 용이 - 가격과 안전성		
단점	유동성(Flexibility): 이동 어렵고, 많은 공간 요구	- 출력 영역/제한된 연구(이동 플랫폼에 장착되지 않은 경우)		
대표 사례	 ICON(미국)	 TU/e(네덜란드)	 Cybe Conc. (네덜란드)	 Cazza(미국)

- 특히, 현장 프린팅 시 가장 중요한 요소인 이동성을 개선하기 위해 갠트리시스템의 단점을 보완한 변형시스템들이 개발되고 있음.
- 미국육군공병단 연구센터(Engineer Research and Development Center)는 트럭이 3D 프린터로 변신하여 출력하는 시스템을 개발하였고, 이탈리아의 WASP(World's Advanced Saving Project)는 약 4m*3m 크기의 대형 Crane WASP를 개발했는데 무게는 150kg 정도로, 알루미늄으로 제작하면 충분히 경량화 가능함



RDC (미국)



WASP(이탈리아)

- NASA 3DP Phase 3 대회 “1/3 거주지 출력”을 위한 1) 모르타르 시편 제작을 통한 압축강도 확인, 2) 3D 프린팅 재료(펠릿) 대량 생산을 위한 시스템 확보, 3) 사출속도 개선을 위한 모터 개선, 4) 사출시스템 체계 구축 (온도, 노즐 이동속도, 재료, 공법) 및 5) 우주현지 자원을 활용한 구조 재료 가공 및 사출장비 등의 실증 실험 환경 조건 고려
- 사출 노즐 온도의 최적화 과정 현무암과 NASA 3DP에서 제시하였던 우주 현지에서 재활용 가능한 폴리머 중에서 발견된 수축의 문제점을 고려하여 폴리에틸렌을 포함한 다른 폴리머들을 이용하여 압축강도 실험을 진행하였음
- 실험 결과 최대 68 MPa를 나타내었으며 3D 프린팅 바인더로써 가능성을 보여주었음

	
시편	

◦ 폴리머 바인더 재료선정의 최적화 과정을 선행 작업

- 기존 연구에서 펠릿 가공 시 요구되었던 비용(1kg 당 15,000원)으로는 지름 3m, 높이 2m 의 구조물을 제작하기 위해서 그리고 양산용 장비로 펠릿 생산의 리스크가 존재하였음
- 폴리머의 건설 구조재료로써 적용 가능성을 검토하였으며 현무암(돌가루)과 폴리머 함량에 따라 연구용 장비로는 가능할 수 있으나 실제 양산 작업을 위해서는 돌가루와 기계를 마모 시킬 수 있는 가능성에 대하여 언급하며 폴리머의 함량을 본 연구진이 요구한 비율에 부적합하였음
- 또한 실험에 사용한 폴리머는 친환경재료이지만 생화학적성분이라 시간이 지날수록 마모가능성과 물성에 대한 우려를 언급하였으며 펠릿 제작이 원활하지 않아 더 이상 진행이 불가함



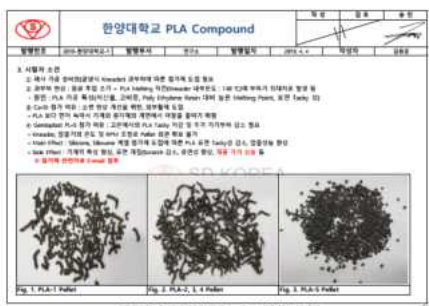
실험용 장비와 폴리머를 이용한 펠릿 제작 검증

- 이후 폴리머의 선정, 실험용 장비, 양산용 장비로의 실험을 진행하였으며 컴파운드의 효과가 있는 첨가제를 첨가하여 실험을 진행함. 양산 단가도 1kg 당 800원으로 가성비가 상대적으로 높음. 양산용 장비를 활용해서는 현무암의 성분과 입자크기 때문에 장비 사출부의 막힘 현상이 일어나면서 양산 작업이 불가능함



폴리머를 이용한 펠릿 제작 검증

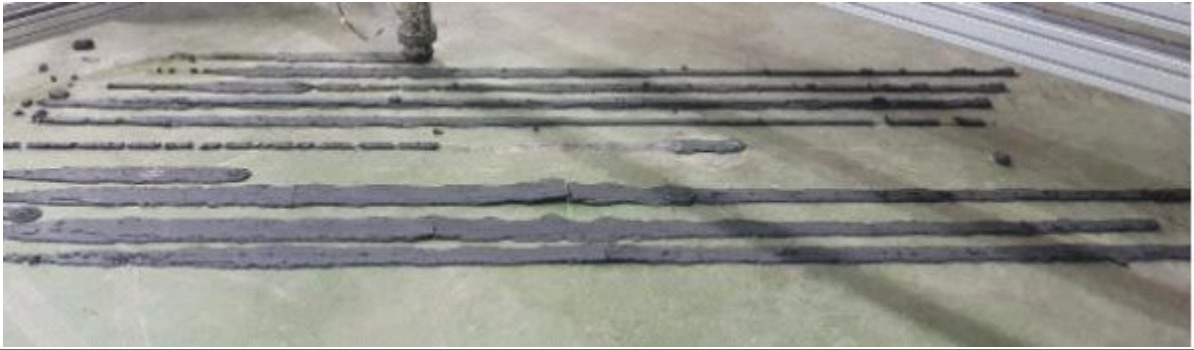
- 최초 실험용 장비로 연구진이 실험으로 검증한 현무암과 폴리머의 비율까지 펠릿 제작을 성공하였으나 양산용 장비를 활용 시 현무암의 입자크기와 물성 때문에 양산용 장비에서 사출구에서 혼합 재료 사출시 막힘 현상 발생으로 대량생산이 불가능함



폴리머 컴파운드 결과와 막힘 현상

- 폴리머를 이용한 펠릿 제작을 완료하여서 양산 작업이 들어가기 이전 그 이후 작업으로 3D 프린터에 적용하여 사출 시 수축을 확인하였음
- PE는 수축의 문제점과 휨 현상 발생으로 적합하지가 않았으며, PLA는 아래 그림처럼 균열현상이 발생하였음

- 또한 1m 이상의 사출 실험을 통해 균열 현상과 들뜸 현상이 발생하였음



사출 실험 및 수축을 확인 후 재료 배합에 대한 연구

- W1000*D1000*H2000mm인 대형 진공 챔버를 활용하여 진공상태에서 재료특성을 분석하였으며 내부의 진공도는 1torr 가능함

* lunar surface : 2×10^{-12} torr

◦ 사출시스템 체계 구축 과정

사출 노즐 시스템에는 독립적으로 조절하는 온도 제어가 장착되어 있으며 공급재료인 펠릿이 건조 장치에서 이송장치를 통해 사출시스템에 공급되면서 사출부에서 열을 가해 재료를 녹여 사출을 시작함 밴드히터의 온도는 각각의 폴리머 녹는점을 고려하여 변화를 가하면서 최적화를 위한 과정을 진행하였으며 초기에는 재료 투입구에서 발생하는 문제점으로 인하여 사출이 진행되지 않았음. 또한 모터의 변화를 주면서 토크를 증가시켜 재료 사출량을 일정하게 공급하게 진행하였음. 노즐 모터 개선 사항은 스테핑 모터에서 3상 모터로 교체함에 따라 토크를 증가시켰으며 프린터의 이동속도는 1.5cm/s이었음. 또한 바닥과 노즐사출 끝단 부분까지의 높이 변화를 가하면서 최적화를 위한 과정을 진행하였음



재료 투입구 막힘 사진 및 개선된 모터



사출최적화 진행 중

◦ 실제 거주지 1/3 크기(10m²) 프린팅을 통한 사출 시스템 확립

- 재활용 폴리머와 달 복제토의 사출 최적화를 통해 개발된 무인 자동화 사출 시스템은 우주 현지에서 활용할 수 있는 재료와 시공의 가능성을 입증하였음



본 연구과제 성과 관련 논문(KCI)



본 연구과제 결과물(지름 3m, 높이 2m)



본 연구과제 결과물(지름 3m, 높이 2m)

- 물과 시멘트를 3D 프린팅 재료로 사용하는 기존 연구들과 차별화된 기술이며, 국내 사업단 수준의 연구와 기업의 상용화 기술 개발 수준의 기술력 확보



건설기술연구원, 제이에이치 등 18개기관으로 구성된 '소형건축물 및 비정형부재 대상 3D 프린팅 설계, 재료 및 장비 개발 연구(2018-2020)' 시연 결과(2019.12)

코로나(현대BS&C가 인수, 하이시스로 변경)에서 제작한 3D 프린팅 경비실 (2019.10)

3D 프린터 노즐에서 토출/응고 메커니즘의 개요



향후 자체 에너지 해결방안 및 자재 재사용을 통한 자급 방안 필요





적층, 레벨링 사출 최적화 과정을 통한 구조물 제작 과정

- 3D 프린팅 출력 기술 개발에서 사출노즐에 밴드히터를 장착하여 재료의 녹는점 이상의 열을 가하고 축의 이동속와 사출속도를 변경하며 최적 값 도출을 위한 사출 모듈 효율성개선을 진행하였음



최적 값 도출을 위한 사출 실험

No.	축의 이동속도 (mm/s)	사출 속도 (mm ³ /s)	히터온도(℃)	문제점
1	20	1570	280	높은 온도로 인한 재료의 유동성 증가
↓히터 온도 감소↓				
2	20	1570	250	높은 온도로 인한 재료의 유동성 증가
↓히터 온도 감소↓				
3	20	1570	250	축의 이동 및 사출 속도가 빠름
↓축의 이동 속도와 사출 속도 감소↓				
4	15	1178	250	사출 속도 대비 이동 속도가 빠름
↓축의 이동 속도 감소↓				
5	12	1178	220	-
최적값 도출을 위한 사출 모듈의 효율성 개선				

- 구조물 제작을 위하여 사용된 개선 방안은 적층 높이 변화를 가하면서 총 10회 출력하여 거주지 제작을 위한 실험을 진행하였음. 재료가 사출되는 노즐 하단부터 적층되는 구조물 상단의 거리를 점차적으로 증가시켰을 경우 사출 적층되는 구조물 1층의 폭이 최소 61mm에서 최대 70mm의 분포를 나타내었으며 단계적으로 증가 시키면서 변화의 추이를 확인하였음



1) (최소, 최대)

2) (최소, 최대)



3) (최소, 최대)

4) (최소, 최대)

적층 높이의 변화에 따른 사출

- 또한, 적층 높이의 변화에 따른 사출뿐만 아니라 적층공법의 변화를 가하면서 최적화를 위한 과정을 진행하였음



(1) 5mm



(2) 5mm, 8mm(측면)



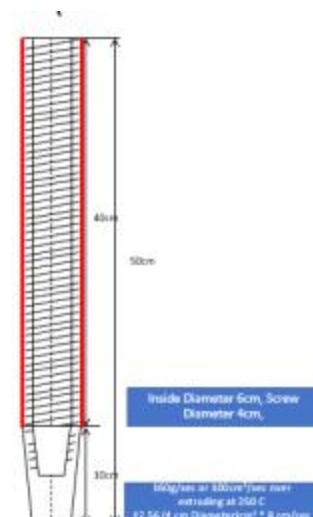
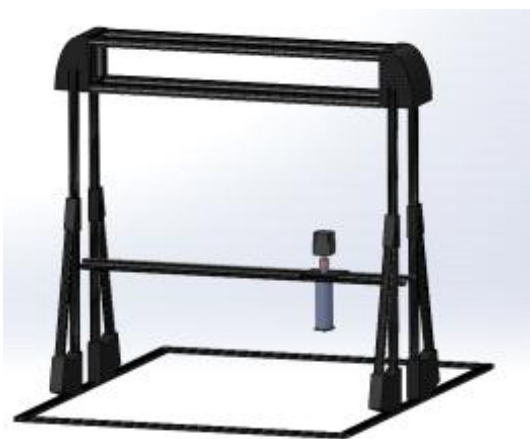
(3) 7mm일 때 윗면



(4) 7mm일 때 옆면

○ 기존 3D 프린팅 기술 재료 및 출력 기술 대비 차별성

- 본 연구진의 3D 프린팅 기술은 물과 시멘트를 사용하지 않는 특징을 가지고 있음. 물과 시멘트를 사용하지 않는다는 것은 이산화탄소를 발생시키지 않음
- 달 복제토와 폴리머를 결합재로 사용하는 기술은 양생이 필요하지 않아 일반적인 콘크리트 이상의 압축강도, 휨강도를 발현하며 지난 NASA CCP Phase 2를 통해 입증하였음
- 사출 노즐에 단계적으로 열을 공급하여 펠릿형태의 재료의 노즐 시스템과 재료 저장장치에서 고착 되서 막히는 현상을 해결하였음
- 폴리머 재료의 문제점인 수축의 문제점을 해결하기 위하여 공법의 변화를 통해 해결하고 최적화를 위한 실험을 진행해서 지름 3m, 높이2m의 NASA CCP Phase 3 최종 결과물을 완성하였으며 한국에서 달 복제토와 폴리머를 배합한 재료를 이용해서 3D 프린터로 제작한 첫 번째 사례임
- 또한, 재료의 수축을 해결하기 위하여 건조기를 이용하고 재료 자동이송장치를 통해 무인자동화 3D 프린팅 기술을 연구하였음
- 열가소성 폴리머 재료를 이용하여 사출된 결과물의 재활용이 가능하며 연구를 통해 페트병 등 플라스틱도 결합재로 사용 가능함. 이것은 지구 전반에 직면하고 있는 플라스틱 해양 쓰레기 문제를 해결할 수 있으며 4인 거주 1500만원 초저가 주택을 개발도상국을 위한 기술임



3D 프린터와 사출 노즐

- BIM을 활용한 우주 거주지 설계 및 3D 프린팅 출력 시나리오 개발 및 상세설계 내용
 - NASA CCP Phase 3에서 요구한 Habitat 의 크기는 약 92.9m²(1000 ft²)이며 우주비행사들을 위한 생활공간과 1년 동안 4명까지 거주할 수 있는 설계와 기계 및 전기, 해치, 배관 등이 요구되어짐.
 - Virtual Construction Level 1 – 60% Design 대회에서는 기계, 전기, 소방(Mechanical Electronic Plumbing) 등 건축물의 설비전체를 의하며 Environmental Control and Life Support System(이하 ECLSS)는 NASA의 유인우주비행 임무를 위해 생명유지장치로서 자신들의 시스템들을 설명할 때 사용하는 용어임. 특징으로는 선실 이산화탄소를 제거하여 산소를 공급하며, 재활용 된 물을 식수로 정화하는 기능 및 모듈사이에 실내 공기를 분배하는 기능 등이 있으며 Level 1에서는 Level of Design(이하 LOD) 100 개념 설계를 Level 2에서는 LOD 200 인 기본 설계를 요구하였음. LOD 100은 단순 외형의 모델링으로 수량산출 및 간섭체크 등을 하지 않는 수준의 모델링이었으며 LOD 200은 개략적인 수량을 산출할 정도의 모델링 수준임
 - 또한 구조물과 Pressure Retaining Walls/Components는 각각 LOD 300과 400을 요구하였음
 - HexHab은 육각형의 빌딩 블록으로 시작해서 우주에서 140미터 평방미터의 공간으로 설계 되었으며 이것은 압력과 가스를 고르게 분배하기 위한 돔 천장으로 밀봉 되어있음
 - ECLSS를 고려한 장비의 위치와 중앙샤프트를 통해 MEP 유틸리티 공급 장치로 구성되어 있음
 - 극한환경에서 장기간 거주 할 수 있도록 설계 되어진 3D 프린터 개념을 적용한 거주지이며 화성탐사 시 위험을 최소화하기 위하여 교반 타원형 외부 셀 형태로 제작하였고 지속적으로 위험을 최소화하기 위한 프로그램을 고려하였음
 - 최대 1년까지 거주 가능하게 설계 되었으며 Anti-lock braking system(이하 ABS)는 우주인들의 생활환경을 고려하고 피난 시 사용 가능하고 실내복장등 편의성을 고려하여 설계되었으며 디자인은 미적 정서(Aesthetics) 와 연구소로서 기능을 고려하였음. 또한, 1층은 장비들이 배치되고 개방형 레이아웃의 특징을 지니고 있으며 충분한 저장수용공간을 필요로하며 2층은 거실, 주방 및 삶의 필요한 공간으로 설계하였으며 3층은 우주인들이 휴식을 취하는 장소이며 엘리베이터를 이용하여 이동이 가능하게 설계되었음. 또한 에어로크와 soot poorts는 피난 시 사용 가능하게 적용 시켰음
 - 시공성을 고려한 현지 자원 활용으로 방법으로는 물은 얼음에서 획득하여 전기분해방식으로 산소와 수소를 생성함. 또한 대기 중의 이산화탄소는 탄소와 수소로 분해 가능함
 - 탄소와 수소가 결합되어 결합재로 폴리에틸렌이 생산 가능하며 산소는 LSS 및 로켓연료에서 추후 사용가능하게 저장 됨
 - 화성의 표토는 2 마이크론 크기의 입자로 해머 밑에서 분쇄된 후 폴리에틸렌이 첨가되어 3D 프린터 노즐로 이동시켜 열을 공급해 사출시킴
- XArc Habitat 개념
 - 거주지 건설을 위한 공급재료는 행성의 표면에서 굴착로봇과 현지토양(현무암)과 폴리머 중 폴리에틸렌과 갠트리 타입의 3D 프린터를 이용하여 거주지 건설을 계획하고 있음
 - 폴리에틸렌은 화성의 대기에서 95% 차지하고 있는 이산화탄소와 물을 활용해서 제조할 계획이며 거주지 내부에 조립식 형태로 구성하였음





- 국외 BIM 디지털 플랫폼 사례 조사 (Pavan et al., 2020)

INNOVance: 에너지 효율과 지속 가능한 개발을 위한 국가 차원(이탈리아)에서 전략적 비전과 수명주기 통합 건설 사슬 프로젝트로 건설업계 최초의 기술, 과학적, 경제적 법적 성격 등의 모든 정보를 포함하는 국가 데이터베이스 개발



- 국내 건설기업들의 디지털 플랫폼 개발 전략(롯데건설, 현대건설)과 BIM 라이브러리 공유 플랫폼(XCost, BIM팩토리 등)를 활용한 우주 거주지 디지털 플랫폼 개발 가능성 검토

◦ 저 개발 국가를 위한 초저가 주택 (목표: 1500만원/4인) 양산 비즈니스 모델 개발 및 사업화 계획

- 소요 물량

- 건물 1m² 기준, 기본 0.5B 적층, 75매 벽돌 투입하여 양쪽 벽 건설: 150매 소요
- 4인 가구 기준 공간(10m * 10m * 3m): 150 매(양쪽 벽) * 10m² * 4면 * 3 m = 18,000 매

- 주택 가격 (재료비)

- 현무암 벽돌(약 500원)으로 산정 시 : 18,000 * 500 = 900만원
 - * 현무암 가격 4톤 기준 1kg 당 130원이며 통관비용 341원
 - * 결합재인 폴리머는 재활용 PET Bottle을 이용, 추가비용이 발생하지 않으며 플라스틱 쓰레기 문제해결 및 탄소배출권 확보로 수익 창출 가능

- 100 가구(1단지) 건설 가격: 벽돌 180만매 소요

· 현무암 벽돌: 9억원

- 10 단지 건설 시, 현무암 벽돌 90억 원

- 비즈니스 모델 캔버스

Business Model Canvas

핵심파트너(KP)	핵심활동(KA)	가치제안(VP)	고객관계(CR)	고객(Cs)
- XCON - 네오그라프 - Eco-BHL	- Eco-friendly 사업 - 탄소배출권 - Exo-housing 사업	- 초저가 주택(4인 거주 /1500만원)	- ACCESS(아시아 토목공학 협회) - 유통채널(CH) - UNDP와의 협의중	- 인도 및 서남아시아 - 아프리카 및 개발 도상국
비용구조 - 인건비 - 제작비용 - 양산용 실험장비 구매 비용 - 재료비			수익원 - 탄소배출권, 벽돌판매, <u>에코하우스</u> 건설공급	

[illegible]

* 27일 양생과정 불필요



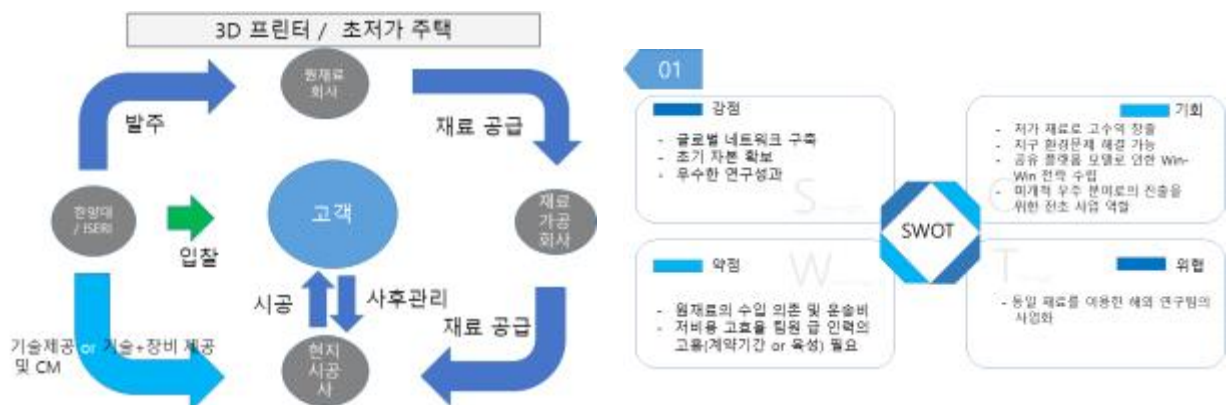
Eco-Mousing 서비스 장점	X-CON Housing 서비스 장점
• 설치 때문에 간편한 E-Block, 필 수-Block 자동 서비스 • 무인화한 건물 서비스 • 간편 H/W, G/W 공사 (국내 최대 크기 3m 구조물-중대 시공) X-CON의 다양한 구조물들을 활용한 3D 모델링 프로그램입니다.	✓ 일체형 부재 ✓ 빠른 복구 ✓ 간편한 시공 ✓ 손쉬운 확장 • 생활용, 공업용, 자원을 절약한 지름 3m의 국내 최대 크기 3D 구조물-구조물 구현 • 물여수역의 E-Block, 벽돌, 3D 모델링, 700개, 200개 등 • 원호벽돌은, 물방바닥으로, LHC/CC/CC, CMA, 콘크리트, 콘-Block, P-Block, 3D Printing, 기둥을 만들

- 수익성 분석(탄소배출권)

- 탄소배출권 : 지구온난화 유발 이를 가중시키는 온실가스를 배출 할 수 있는 권리이며, 배출권을 할당 받은 기업들은 의무적으로 할당 범위 내에서 온실가스를 사용해야 하며 남거나 부족한 배출권은 시장에서 거래할 수 있음
- 시장분석(방글라데시 연간 벽돌고장에서 15Mton의 탄소 배출)
- 벽돌공장에서 사용하는 석탄연료를 저감함으로 발생하는 탄소배출권을 전체의 1%로 예상
- 국내 현 시세로는 1톤에 28,400원으로, 5년 동안 1% 배출권 확보 시, 제품 판매 수익 외 40여억원 이상의 기대 수익 확보
- 탄소배출권 확보방안으로 CDM project 재추진



- 중장기 생산계획(공유 플랫폼) 및 SWOT 분석을 통한 강·약점 분석



o 3D 갠트리 시스템 차별성을 활용한 전략

- 기존 플라스틱을 사출할 때 사용되어지며, 수축을 제어하는 역할의 히팅 배드를 사용하지 않음
- 양생이 불필요하며 즉각적인 강도를 구현할 수 있음
- 재활용과 탄소배출권을 고려한 사출 노즐 개발 및 시스템 구축(플라스틱 20~40% 이용)
- 이산화탄소 미 발생

o 사업화 및 상호협력관계 구축

- 3D 프린터(4.3 x 4.3 x 3.5m)와 물과 시멘트를 사용하지 않고, 플라스틱 재활용을 고려한 폴리머 재료 및 달 복제토를 이용한 사출 노즐 시스템 최적화와 다양한 플라스틱을 활용한 재료 개발을 Memorandum of Understanding(MOU) 체결을 통해 연구를 추가 진행할 계획이며 특히 XCON과의 협업을 통해 사업 아이템을 공동 발굴하고 3D 갠트리 사출 노즐 시스템을 추가 연구하기로 하였음
- eco-BHL과의 추가 협업을 통해 Eco-housing 사업을 위해 소프트웨어 개선을 추가 진행하기로 하였음



◦ 달 화성 실증단지 건설을 위한 테스트 베드 전략 수립

- 달 화성을 목표로 하는 행성 건설의 국제 동향으로 유럽의 Moon Village Association과 미국의 International Moonbase Summit는 달 기지건설계획을 가지고 있음
- 본 연구내용으로 "달/화성을 체험할 수 있는 실증단지 프로토타입 구현"이라 제안하는 아이디어는 로봇을 이용하여 무시멘트, 친환경 / 재활용 건축 자재 및 무수 건식 건축법을 구현하여 자동화 / 자율적인 첨가물 시공 기술 개발임
- 화성에 가상현실 (VR) 시뮬레이션을 위한 온라인 사이버 물리 시스템을 구축하고, 우주만이 대상이 아닌, 지구에서 기후 변화, 재난 피해 및 환경오염을 해결할 수 있는 사이버 물리 시스템을 새로운 건축 자재 및 자동화 된 건설 방법으로 개발을 추진할 계획임
- 또한, 안산시나 잠실 MICE 프로젝트에 NASA 3D-printed Habitat Competition Phase 4(NASA Phase 4)에서 제시하는 실제 화성 거주지 크기(93m2)를 화성기지의 기능을 할 수 있는 건축물을 3D 프린팅 기술을 활용하여 한양대학교 수리 구조동에 시공할 계획이며 NASA 심사위원 방문 및 안산시 기술 협력 기회를 제공하여 지자체 브랜드 홍보 효과 극대화할 계획임

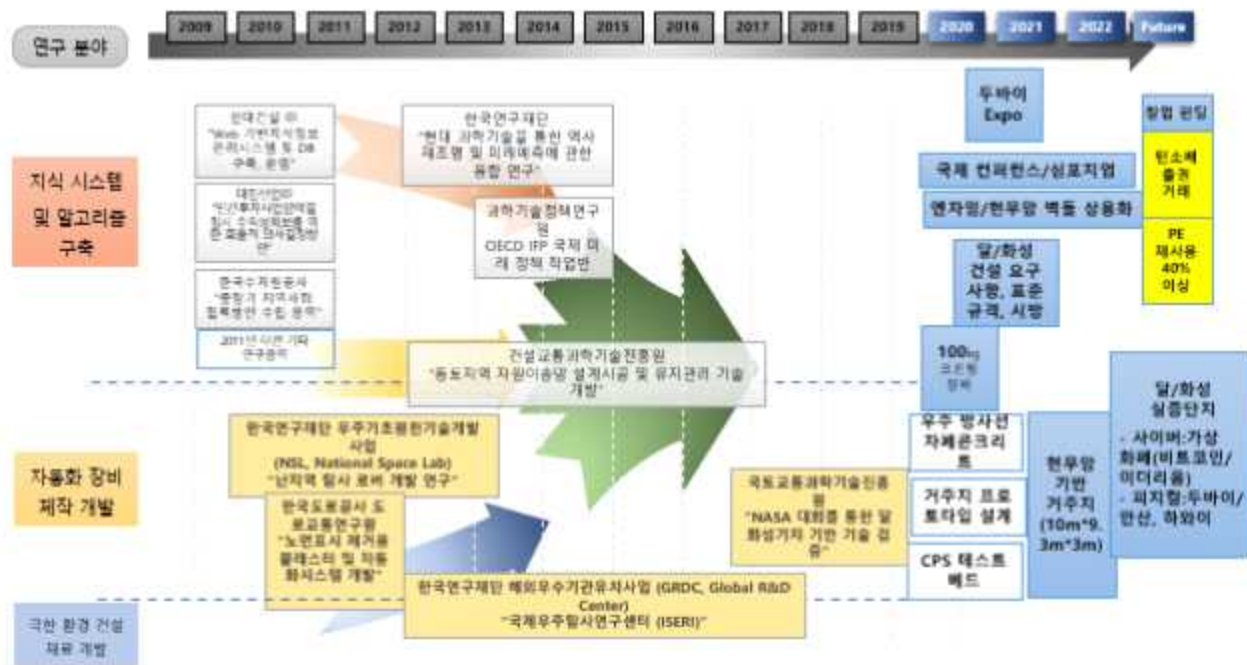
달 화성 기지 후보 - 두바이/하와이/안산시/잠실MICE



역할 분담

주요내용	한양대 국제우주탐사연구센터	XCON, 네오그라프, eco-BHL
고기능 3D 프린팅 요거 개발	우주방사선 차폐 요구 성능조사 및 목표 선정 고에너지 방사선 차폐 콘크리트 복합 및 성능 평가 차폐 콘크리트 생산체계 구축	달/화성 환경 분석 차폐 요구사항 도출 ISRU 용융을 위한 두바이 재료 시공방법 등의 공동연구 실험 자료 및 설계 우주방사선 차폐 콘크리트 적용 및 상용화
현우알 기반 거주지 개발	경제적·기술적 타당성 분석 거주지 생산 시나리오 제안 "거주지 3D 출력대회: 4차 대회" 참가 거주지 생산시스템 보완 및 경량화(100Kg) 달/화성 건설 핵심 전략 기술 격차 분석 CPS 구성 요소 도출 달/화성 거주지 CPS 개발 달/화성 실증단지 국내 건설 및 사업화 시나리오 개발 (관광, 랜드마크, 교육 및 체험 학습) 달/화성 실증단지 건설(안산)	현우알 기반 거주지 주요 구조물 개발 설계 출력 장비 상세 설계 거주지 프로토타입 생산 시스템 적용
CPS 테스트베드 구축		CPS 플랫폼 설계 달/화성 거주지(onsite)와 VR 모의실험(online) 통합 운영 달/화성 실증단지 건설(두바이) 달/화성 건설 핵심 기술 검증

중장기 추진 계획



나. 경제적 성과

• 사업화 전략 수립

– 탄소배출권 사업화 전략

- 세계는 지금(Hans Rosling et al., "Factfulness")에 따르면 소득에 따라 Level 1에서 Level 4로 구분됨. Level 1, 2의 국가 중, 벽돌 주택이 많은 국가들의 탄소 배출이 극심함. Level 3, 4의 국가 중 대형 이산화탄소 배출 국가는 미국, 러시아, 중국임
- 전 지구적 환경 파괴와 대기 오염에 따른 대안 마련이 시급하며 세계 기후협약 및 각국의 환경 대책 등 다양한 시도(ex 탄소배출권 거래제)를 통한 문제 해결을 시도하고 있음. 따라서 이산화탄소를 발생시키지 않고 벽돌을 생산하거나 주택을 제작하는 본 연구진의 기술을 사업화를 추진하고 있음
- 서남아시아 및 저개발 국가 진출 목표로 에코아이와의 공동사업 계약서를 체결하고 유엔개발계획(UNDP)의 연구시설 방문 등 사업화 전략을 수립함

- 사업화 세부 추진 계획 (2019년 - 2024년)

- 사업군을 리사이클링사업, 에코프렌들리사업, 에코하우징 사업으로 구분하여 연구 성과물을 기반으로 사업을 진출하고 제품의 장점과 성능 비교를 진행하였음
- 인력 운영계획 및 수익성 분석을 통해 사업 성공 타당성 검토
- UNDP 한양대학교 연구실 방문을 통해 사업 가능성 확인

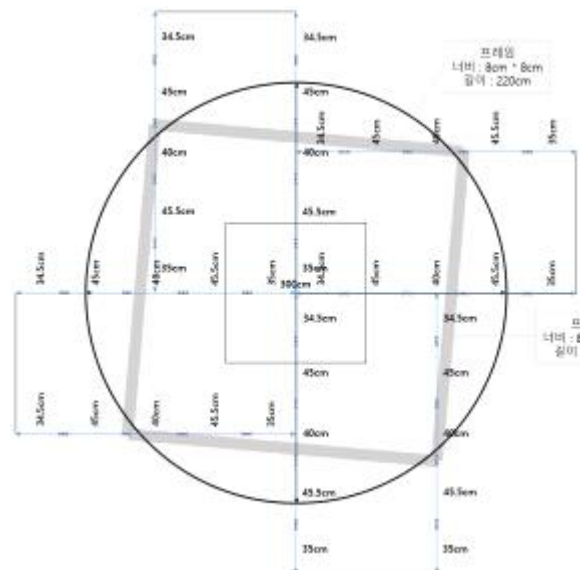


- 태양광 패널 제작을 통해 전력 공급계획 수립

- 산 · 학 협력을 통한 국내외 기업과 사업화 협의
- 향후 자체 에너지 해결 방안 및 우주에서 전력 수급 방안 검토



결과물 개념도



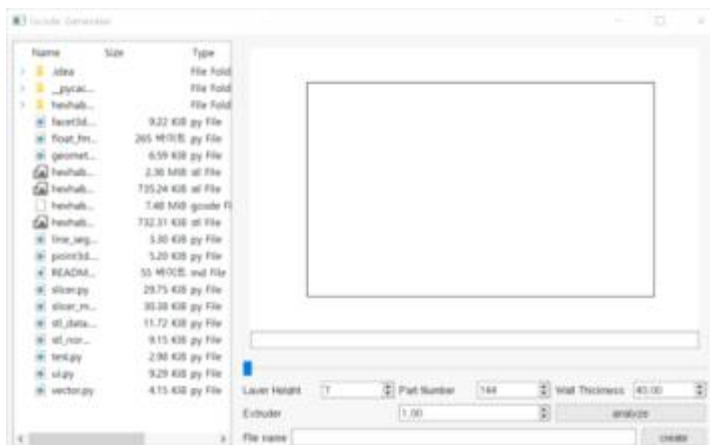
◦ 폴리머 Block 제작을 통한 사업화 검토

- 가공되어서 제품화 된 PET 펠렛을 구매하는 것보다 선별장에서 수집 되고 세척된 플레이크(조각)를 구매하는 것이 저렴하였으며 가격은 1kg에 500~1000원 정도로 1ton 구매 시 최대 100,000원 정도로 예상 됨
- 자원순환정보시스템 재활용 가능자원 가격조사에 따르면 PET(압축) 형태는 1kg 당 272원 정도 이며, PET bottle을 그대로 재활용 가능하다면 단가를 절감할 수 있음
- 페트병 재활용 방법은 1) 압축 bale제거하여 투입 2) Bale로부터 비PET(금속류, 일반플라스틱, 기타) 알루미늄 병 두껍 등 선별수거 3) 분쇄(분쇄 직경이 크고 작음과 분쇄 칼날 관리에 따라 수율영향) 4) 약품세척(비중이 큰 PET는 가라앉고, 비중이 작은 라벨과PE, PP재질의 병 두껍은 수면에 떠올라 제거) 5) 탈수기 6) 건조기(밀폐형 또는 개방형) 7) 제작된 플레이크 운반 8)출고 형식으로 구성되어 있음



◦ 사출 노즐시스템과 달 콘크리트 연동 소프트웨어 구축

- STL 파일을 분석하는 과정에 내벽 외벽의 중심선을 계산하는 코드를 추가
- 건물의 중심 (x, y 축의 최대, 최소 지점의 중간값) 으로부터 바깥으로 나아가는 직선과 벽면의 접점을 이용하였으며 내벽을 추가할 경우 출력 방식의 문제로 벽을 정확히 추측하기 어려운 부분이 있어 part number와 wall thickness 변수를 추가하여 보정함



다. 기타 성과

◦ 연구 실적 홍보

- 달 마을 반상회 추진
 - 우주건설 기술 홍보와 우주분야 전문가들과 좌담을 통한 기술교류
 - 향후 우주개발 기술의 발전 방향과 그에 따른 융합연구의 필요성 제기



- 부산과학축전 및 학술제 참가

- 달마와 국제우주탐사연구원이라는 주제로 기존 연구성과와 현재 연구 결과물에 대해 초등학생 포함 대중들에게 홍보
- 우주기술에 대한 성과물을 직접 체험하여 우주개발 및 우주과학에 대해 꿈과 이상을 제시하며 우주기술에 대한 관심 및 자긍심 고취



- 언론매체를 통한 연구 홍보

- 미래 우주기술의 방향과 성과물 홍보



제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

1-1. 총괄

구분	핵심성과물 (CTE)		단위 성과물	성과점검기준						양적성과 현황						
				질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	해당 기관	예산 (백만원)	목표치	달성치	가중치	
주관	A	우주 현지 자원 활용한 구조물 가공 및 사출 장비	A-1	행성 토양을 모사한 화산현무암과 탐재체로부터 재활용 가능한 골재를 혼합한 재료 가공 및 사출 장비 개발	①	SCI 논문	1	1	논문 게재	[중빙 1-1] 논문 실·적 중빙-표지	12	한양대	100	특허: 출원 0건 등록 0건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	특허: 출원 0건 등록 0건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	40
					②	TRL	TRL 7	<2020년> TRL 7 실제 환경 시작품 데모 단계 1) 유사환경에서의 Field Test 전략 수립 2) 국내외 건설기업과 사업화 협의 <2019년> TRL 6(유사환경 기술시험 단계, 시작품 단계) 1) NASA 대회에서 요구한 구조물 Prototype 제작 2) 연구 성과 우수성에 홍보 실적: TV/신문/전시 3) 국내 초청발표(2건) 및 해외 발표예정(1건) 4) NASA 대회를 통한 기술교류 <2018년> 'TRL 5 (유사환경 시험 단계) 1) 연구진 주도의 국제협력연구추진 실적 2) 대한토목학회 이미지개선 TF 프로그램('달마를 반상회') 선정 3) 연구 성과 우수성에 대한 홍보 실적: 신문/방송, 국제대회 초청 발표 4) 재료 이송 및 건조보관 설비 구축	<2020년> TRL 7 실제 환경 시작품 데모 단계 1) 국내외 우주전문가를 통한 검증 2) MOU, LOI, 등 공동사업계약서를 통한 사업화 추진 <2019년> 1) 지름 3m 높이 2m 프로토타입 제작 2, 3) 연구결과와 국내 홍보 4) 기술교류 및 정보소식을 통한 대회 기준 충족하는 구조물 제작 및 검증예정 <2018년> 1) 국제공동연구제안: NASA SSERM 1차 통과, 달 토양을 이용한 방사선차폐 테스트(TRL-B), (행성적충전시스템(PACS), 달화상실종단지 건설) 2) 달마를 반상회 3) 연구결과와 국내외 홍보 등 4) 재료 이송 및 건조보관 설비	40	한양대 X A r c 네오그라프	334				
공동	B	개트리와 사출제어 알고리즘 개발	B-1	우주 환경과 지구 환경에서 적용 가능한 무인공을 위한 개트리와 사출 시스템의 연동 및 소프트웨어 제어 시스템 개발	①	TRL	TRL 7	<2020년> TRL 7 실제 환경 시작품 데모 단계 1) 국한/현지 환경에서 무인 건설 기술 소프트웨어 알고리즘 기술화 수립 <2019년> TRL 6(유사환경 기술시험 단계, 시작품 단계) 1) 공동연구기관 및 뉴발리티와의 협력체계 2) 사출시스템 최적화 <2018년> TRL 5 (유사환경 시험 단계) 1) 생가연과 기술 협력 체계 2) 노즐 사출 실험	<2020년> NASA 경진대회에서 요구한 1/3 크기의 거주지 완성 <2019년> NASA 대회 기준을 충족하는 구조물 제작 1) 재료, 사출, 공법 시스템 최적화 중 2) 최적화, 진행 과정 국내 학술발표 <2018년> 1) 생가연 파트너 기업 가입 2) 재료 사출 가능 최적화 실험을 통해 노즐 개편 설계안 도출에 관련된 논문으로 국내학술발표	15	한양대 네오그라프	125				
					②	특허	1	-	특허출원		6	한양대 네오그라프	50	특허: 출원 1건 등록 0건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	특허: 출원 1건 등록 0건 논문: 1건 시제품: 1건 S/W: 1건	20
공동	C	우주 거주지 건설 템플릿	C-1	개트리로 시공 가능한 디자인 및 우주 현지에서 구현 될 수 있는 시공성 검증	①	TRL	TRL 5	<2020> - 개발도상국을 위한 초저가 주택 (1500평/4인) 비즈니스 양산 모델 개발 및 해외 사업화 검토 <2018~2019> TRL 5	<2020년> 국내외 우주전문가 및 MOU, LOI, 공동사업계약서등의 문서 <2018~2019> NASA 대회(1차: 2018.5, 2차: 2019.1)를 통한 검증: 최종순위(4위 달성)	15	X A r c 한양대	125			40	
					②	SCI 논문	1	-	논문 게재		12	한양대	100	특허: 출원 1건 등록 0건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건		특허: 출원 1건 등록 0건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건
계											100		834	특허: 출원 1건 등록 2건 논문: 2건 시제품: 2건 SW: 1건	특허: 출원 1건 등록 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	100

1-2. 3차연도

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준									양적성과 현황		
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	해당 기관	예산 (백만 원)	목표치	달성치	가중치
주관	A	우주현지 자원활용한 구조 재료 가공 및 사출장비	A-1	행성 토양을 모사한 화산현무암과 탐재체로부터 재활용 가능한 폴리에틸렌을 결합한 재료 가공 및 사출 장비 개발	①	SCIE 논문 게재	1	1	논문개제	[증빙 1-1] 논문 심사 결과표	12	한양대	12	특허: 출원 1건 등록: 0건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	특허: 출원 1건 등록: 0건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	
					②	TRL	TRL 7	<2020년> TRL 7 실제 환경 시작품 데모 단계 1) 유사환경에서의 Field Test 전략 수립 2) 국내외 건설기업과 사업화 협의	<2020년> TRL 7 실제 환경 시작품 데모 단계 1) 국내외 우주전문가를 통한 검증 2) MOU, LOI, 등 공동사업 계약서를 통한 사업화 추진	40	한양대	39			40	
공동	B	갠트리와 사출제어 알고리즘 개발	B-1	우주환경과 지구 환경에서 적용 가능한 무인시공을 위한 갠트리와 사출 시스템의 연동 및 소프트웨어 제어 시스템 개발	①	TRL	TRL 7	<2020년> TRL 7 실제 환경 시작품 데모 단계 1) 극한/험지 환경에서 무인 건설 기술 소프트웨어 알고리즘 개발	<2020년> 1) NASA 경전대회에서 요구한 1/3 크기의 거주지 완성	15	한양대 네이그라프	15				
					②	특허출원	1	-	특허출원	6	한양대 네이그라프	6	특허: 출원 1건 등록: 0건 논문: 2건 시제품: 1건 SW: 1건	특허: 출원 1건 등록: 0건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	20	
공동	C	우주 거주지 가상 건설 플랫폼	C-1	갠트리로 시공 가능한 디자인 및 우주 현지에서 구현 될 수 있는 시공성 검증	①	TRL	TRL5	<2020> 개발도상국을 위한 초저가 주택 (1500만원/4인) 비즈니스 양산 모델 개발 및 해외 사업화 검토 <2018~2019> TRL 5	<2020년> 국내외 우주전문가 및 MOU, LOI, 공동사업 계약서등의 문서 <2018~2019> NASA 대회 (1차: 2018.5, 2차 2019.1)를 통한 검증 : 최종순위 (4위 달성)	15	X A R C 한양대	15				40
					②	SCIE 논문 게재	1	-	논문개제	12	한양대	12	특허: 출원 1건 등록: 1건 논문: 2건 시제품: 1건 SW: 1건	특허: 출원 1건 등록: 0건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건		
계											100		99	특허: 출원 1건 등록: 1건 논문: 2건 시제품: 1건 SW: 1건	특허: 출원 1건 등록: 1건 논문: 1건 시제품: 1건 SW: 1건	100

2. 관련 분야 기여도

○ 핵심 연구성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과유형1)	연구기관	해당 연차	TRL
1	우주 현지 자원을 활용한 구조 재료 가공 및 사출 장비	시멘트, 물을 사용하지 않아 시멘트 접합과정에서의 에너지 줄이고, 양생 없는 구조 재료 가공 및 사출 장비 개발	②	한양대	3	7
2	갠트리와 사출 제어 알고리즘 개발	실제 규모의 주거지 출력이 가능한 실용화 수준의 자율 적층 시공 소프트웨어 시스템 구현	⑤	네오그래프	3	7
3	우주 거주지 가상 건설 템플릿	구조물, 재료, 건설 공법을 통합한 엔드투엔드(end-to-end) 시스템 모델링	③	XArc	3	5

성과유형	정 의	예 시
① 공법·기법	- 기존에 존재하였거나 활용되었던 장비, 장치, 재료, 자재 등으로 새로운 제작물이나 제작 및 시공 방법 등을 제시	시공방법, 설계기법 등
② 재료·자재	- 효율성, 경제성, 적합성 등으로 기존의 원료 및 재료를 대체할 수 있는 새로운 대안을 제시	강, 콘크리트 등
③ 소프트웨어	- 스프레드시트 템플릿, 워드프로세서 매크로, 그래픽/애니메이션 스크립트 등과 같이 특화된 요구를 충족시키는 s/w를 개발	설계프로그램, DB 등
④ 장비·장치	- 기존의 장비/장치, 설비, 도구 등을 대체하거나 발전시킬 수 있는 새로운 구조, 작동원리, 알고리즘 등을 적용한 대체물을 제시	기계, 로봇, 부품 등
⑤ 시스템	- 다양한 장치와 소프트웨어 등이 결합하여 일체로 활용되는 하나의 통일적 전체를 구성하는 대상들의 집합으로 운영되는 체계를 제시	공조, 제어 등 시스템
⑥ 정책·제도	- 각종 법령, 건설공사 기준, 지침, 제도개선 방안	법령, 지침, 시공기준 등
⑦ 기타	- 위의 6가지 유형에 해당하지 않는 경우로서 별도로 성과유형명 작성	-

○ 핵심 연구성과별 설명

핵심성과 1		
정의	NASA 대회에서 제시한 재료 가공 및 갠트리에 부착 가능한 기술 개발	
목적	우주 현지 자원 및 재활용 자원과 결합하여 제작되어진 3D 프린팅 재료 제작을 위해 행성 토양을 모사한 화산 현무암과 NASA 대회에서 제시한 플라스틱을 활용한 재료 가공 및 사출 장비 개발	
성능목표	(기존기술 수준) 3D 프린팅용 콘크리트는 포틀랜드 시멘트를 원재료로 사용 (개발기술 수준) TRL 7	
성과달성 책임자 (소속기관)	이태식 (한양대학교)	
소요기간	2018.04.01 ~ 2020. 03.31(2년, 3년차)	
성과달성 확인방법	- 기존 건설 재료 및 공정 대비 에너지, 비용 절감 및 공기 단축 성능 비교 - 3D 출력된 구조체의 내구성 및 강도 검증 - 재료 가공 및 사출 생산성 분석 (속도, 사출량 등) - 사출 노즐장치 개발의 특허출원을 통한 노즐 사출시스템 구축	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[(출원 : 3건, 등록 : 건]
	논문	[SCI(E) : 1건, 학술지 : 1건]
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

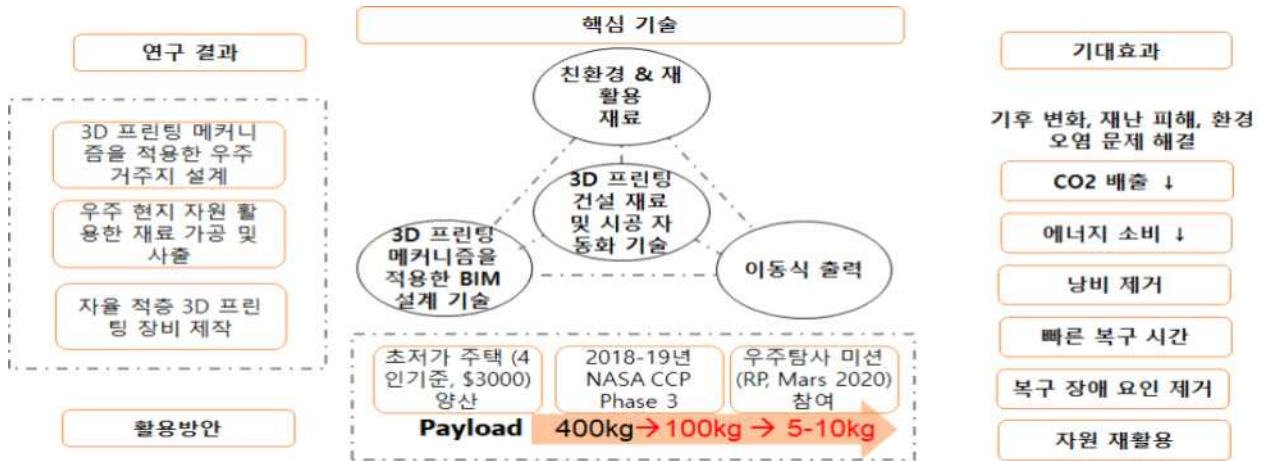
핵심성과 2		
정의	갠트리와 사출 제어 알고리즘 개발	
목적	우주 환경과 지구 환경에서도 적용가능한 무인 시공을 위한 갠트리와 사출시스템의 연동 및 소프트웨어 제어 시스템 개발	
성능목표	(기존기술 수준) 국내 건축물 출력을 위한 적층 시공 장비 개발 사례 없음 (개발기술 수준) TRL 7	
성과달성 책임자 (소속기관)	이현숙 (네오그래프)	
소요기간	2018.04.01 ~ 2020. 03.31(2년, 3년차)	
성과달성 확인방법	- 현장(On-site) 적층 시공 적정성 평가 - 출력시간, 장비 연동 성능 등 세부상세 평가 - 기존 콘크리트용 장비 대비 성능 분석	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[(출원 : 0건, 등록 : 0건]
	논문	[SCI(E) : 건, 학술지 : 0건]
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

핵심성과 3		
정의	우주 거주지 가상 건설 템플릿	
목적	갠트리로 시공 가능한 디자인 및 우주 현지에서 구현 될 수 있는 시공성 검증	
성능목표	(기존기술 수준) 3D 프린팅메커니즘을 적용한 건축물 상용화 수준이나 우주환경 적용은 개념단계 (개발기술 수준) TRL 5	
성과달성 책임자 (소속기관)	Sam Ximenes (XArc)	
소요기간	2018.04.01 ~ 2020. 03.31(2년, 3년차)	
성과달성 확인방법	- BIM 상세 수준(Level of Development; LOD) 검증 - 가설공사, 3D 프린팅 장비 (갠트리) 등 포함한 4D 시뮬레이션 - BIM 데이터 품질 및 활용가능성	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	[(출원 : 건, 등록 : 건]
	논문	[SCI(E) : 1건, 학술지 : 1건]
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

제5장. 연구개발성과의 활용계획

가. 연구개발성과의 활용방안

- 3D 프린팅 기법을 적용한 자동화 적층 시공을 기반으로 하는 재활용 폴리머와 현무암을 이용한 시공 방법은 달에서 뿐만 아니라 저개발 국가 및 국내 건설 현장에도 적용 가능함. 이는 건설 수요자 측면에서 건설 상품의 가격 하락, 시공 시간 단축, 신속한 복구 등을 가능하게 하여 고부가가치 건설 상품을 실현시킬 수 있음



○ 국제 탐사 임무 및 경진 대회 참여

- 본 연구진은 2018년 NASA의 3D 프린팅 거주지 공모전 Phase 3 대회에서 요구한 1/3 크기의 거주지를 건설하였던 기술력을 바탕으로 향후 시작될 국제 달 탐사 경진대회인 문레이스에 한국 팀으로 참여 하여 주도적인 역할을 할 수 있을 것으로 판단됨

○ 건설 현장에 활용

- 현재 건설 패러다임은 콘크리트를 지속적으로 활용하고 있으나. 이는 시멘트 제작 시 발생하는 다량의 CO2 배출을 하고 있음에도 불구하고 저렴한 가격으로 사용되고 있음. 2021년부터 시작 되는 탄소배출권 거래가 일반인들까지 참여가 확대될 예정이며 파리 기후 변화 협약에 따라 우리나라도 의무적으로 탄소배출을 저감해야 하는 상황임.
- 본 연구과제의 결과인 물과 시멘트를 사용하지 않는 적층 시공 공정은 공기단축, 비용 절감, 안전문제 등을 해결할 뿐만 아니라 시멘트가 비싸거나 지역적으로 확보하기 어려운 지역에서 상업화하여, 3D 프린팅 초저가주택 건설(4인 거주, 1500만원 소요)이 가능함
- 이를 위한 후속연구로 재난 및 극한 지역 복구에 참여하여 극한 환경에서의 건설 자재 인프라 시설물의 적합성 및 안전성 확보를 위한 새로운 건설 재료 및 시공 자동화 기술을 검증할 계획임

○ 고부가가치 건설상품 실현

- 달 콘크리트는 화산현무암을 사용하고 물과 시멘트를 하지 않으므로 이산화탄소를 방출하지 않은 장점을 가지고 있음. 따라서, 일반콘크리트를 대체하고 탄소배출권 확보를 위한 세 가지 전략을 제시하였으며 에코프랜들리, 리사이클링, 에코 하우스이라고 명명하였음.
- 특히 에코하우스 사업은 건설용 3D 프린터와 달 복제토를 활용하는 선진 기술로, 이 기술을 활용하여 아프리카나, 동남아시아, 국내 1~2인 별장 건설 사업에 활용할 수 있을 것으로 기대함



나. 기대효과

○ 기술적 측면

- 공동연구를 통해 각 기관이 보유하고 있는 기술의 장점을 서로 활용하여 세계적 우주 건설기술의 융합을 이루어내 새로운 극한 건설 시장을 주도 가능한 원천기술을 확보할 수 있음
- 본 연구 과제를 통해 개발될 달/화성에서의 거주지 건설 기술은 지금까지 없었던, 유인 우주탐사에 필요한 핵심 시스템을 발전시켜 지구에서 이동성과 태양광 에너지를 사용한 초경량 탑재체(5~10kg) 개발을 통해 궁극적으로 우주탐사를 현실화시키고자 함
- 건설 산업에서 시멘트에 대한 지속적인 활용은 장기적으로 탄소배출권과 관련되어 부각되고 있으며, 재료의 변환이나 친환경적인 가공이 요구됨. 그러나 새로운 재료에 대한 검증 및 시도는 안전성이나 시공 기술의 한계에 직면하고 있음. 이러한 한계를 3D 프린팅 기술을 통해 극복할 수 있음
- 본 연구에서 제안하는 폴리머 결합제재는 현존하는 폴리머를 선별하여 극한(남극, 북극, 우주환경) 지역에 요구되는 물성 및 환경 영향성을 파악하고 활용하는 방법으로 건설 가능함

○ 경제적·산업적 측면

- 물과 시멘트를 사용하지 않는 적층 시공 공정은 시멘트가 비싸거나 지역적으로 확보하기 어려운 지역에서 초저가주택(4인 거주, 1500만원 소요) 백만 채를 건설할 수 있는 새로운 건설 시장을 창출할 수 있음
- 이를 통해 현 정부 및 4차 산업혁명의 아이템으로 대두되고 있는 ‘3D 프린팅기술’을 건설 기반으로 국내 설계 회사 및 소규모 건설사가 해외로 진출할 수 있는 기반을 마련할 수 있음
- 친환경/재활용 건설 재료 및 시공 자동화 기술의 상품화(엔자임/현무암 벽돌 등)를 통해 2단계에서 탄소배출권 거래와 폴리머 재사용 등 사업화를 추진하고자 함
- 현재 시멘트에서 발생하는 9억 톤에 대한 탄소배출을 절감할 수 있어 1단계 이후(2020년)부터 안산시와 건설회사에 추가적인 탄소배출권을 공급하여 미래의 산업 인프라를 제공하는 데 기여할 수 있음(현재 한국 3만원/1톤, 미국 6만원/1톤의 비용으로 거래됨)

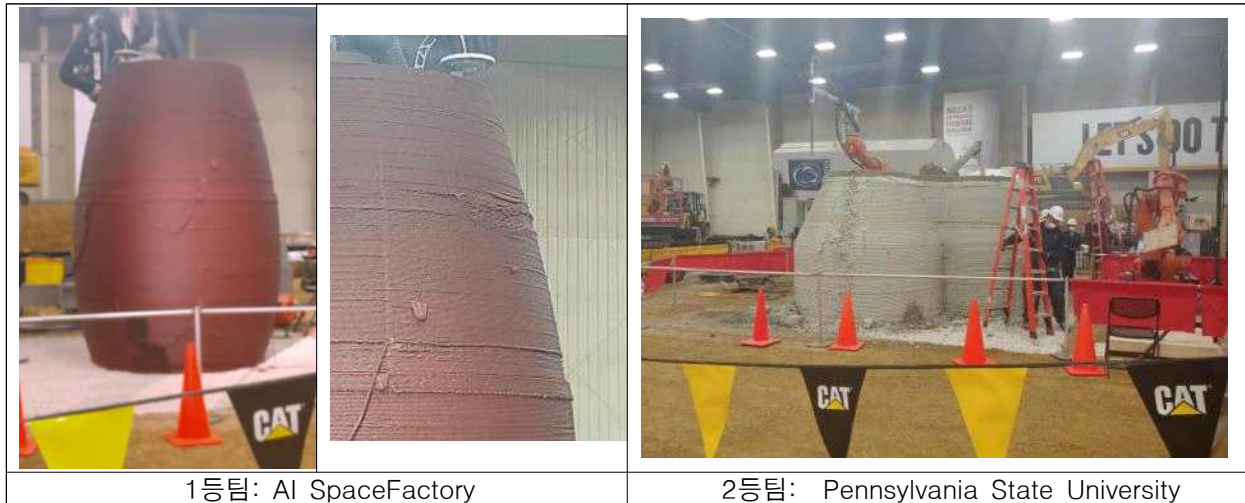
○ 사회적 측면

- 달이나 행성 환경은 크게 남극과 북극 같은 혹한지역과 심해저 환경, 사막 같은 혹서지역으로 나눌 수 있으며 현재 인류가 거주하는 지역은 지표면의 10%도 되지 않음
- 우주건설 기술은 지구의 나머지 90%를 거주 지역으로 건설 가능한 기술을 개발하는 것임
- 본 연구에서 개발하는 폴리에틸렌과 행성의 표토를 이용하여 달/화성 콘크리트 제작 기술은 최근 문제가 되고 있는 환경문제에도 크게 기여할 수 있으며 스핀온(Spin-on) 기술로도 활용 가능함

	As-is	Process	To-be
과학 기술 측면	4차 산업혁명 기술을 활용한 건설 기술의 지능화·고도화 요구 - 국내 건축물 수준 3D 프린팅 사례 없음	3D 프린팅 건설 재료 및 자율 시공 기술 개발 3D 프린팅 메커니즘을 적용한 우주 거주지 설계 기술 개발	- 선진국 의존도가 높은 3D 프린팅 건설 재료 분야 원천 기술력 확보로 6차 진흥 기본계획의 성공사례 구현 - 극한환경에서도 적용가능한 건설 패러다임 전환을 위한 효율적 연구개발 투자
경제 사회 측면	- 탐사 미션의 임무 실패 시 발생하는 막대한 손실에 대한 리스크 - 지진, 원자력 사고 등 구난 기술 수요 급증에도 실질적인 R&D 투자 부족	자율 시공 공정을 위한 이동형 적층 장비 개발 우주 현지 자원 활용한 재료 가공 및 사출	- 효율적인 연구개발 투자가 가능하고, 국제 협력 임무에서 한국의 위상을 높일 수 있음 - 가격 하락, 공기 단축, 신속한 복구 등을 가능한 고부가가치 건설 상품 실현

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

◦ NASA 3D 프린팅 거주지 현장 출력 경진 대회 참가 팀 분석 자료



- 3D Printer Z축 높이 4m로 NASA 3DP Phase 3 거주지 대회에서 요구한 10m²의 구조물 제작 가능성 검증
- 열전달, 원활한 재료공급 및 사출을 위해 사출노즐 확대가 필요함
- 기존 재료 polyethylene은 NASA 3DP Phase 2에서 가장 높은 점수를 부여하여 기존에 선택하였으나 재료의 특성상 수축성이 강하 수축을 제어하는 히팅 베드 없이는 수축의 문제점이 발생할 것이라 판단 됨. 따라서 부여되는 점수는 상대적으로 낮지만 수축성이 작은 기타 폴리머 재료(PP, PET, PETG, PLA)를 사용하거나 결합재인 폴리머의 함량을 줄이는 방향을 제안함
- 우승팀인 AI. SpaceFactory of New York 팀은 재료로 옥수수 전분을 베이스로 하는 PLA를 결합재로 사용하였으며, 화성의 분위기를 위해 붉은색 색소를 첨가하여 프린팅을 하였음. 또한 열 수축을 제어하기 위해 쿨링을 사용하였고 써큘레이터 2개가 부착되어 사출부에 열을 식혔으며, 높은 층고로 잠열이 지속적으로 발생하는 것을 주변 4개의 써큘레이터로 쿨링을 지속적으로 가동시킴
- 준 우승팀인 Pennsylvania State University 는 재료는 Geopolymer로 물을 이용한 적층하였으며, 구동은 AI와 동일한 로봇 암이지만, 지게차를 사용하지 않음.
- 결합재로 사용한 폴리머들의 압축 강도 성능을 분석하기 위하여 모르타르 시편 제작이 필수적이었음. 한양대 연구진이 제작 중 보일링 현상 및 시편 성형의 어려움 과정을 진공챔버와, 열 교환기의 정확한 사용법 및 가열시간, 가열온도 등의 정확한 정보 제공이 필요하였음

◦ CSM and ICON

- NASA 3DP 참가하였으나 최종단계 참여하지 못한 Colorado School of Mines(CSM) and ICON 팀과 기술교류를 하였음
- CSM and ICON 팀은 Team Leader인 Chris Dreyer를 주축으로 15명으로 구성되어 있었음.
- 3D-Printer은 본 연구진과 비슷한 갠트리 방식으로 제작해서 실험을 하고 있었으며 그들의 목표는 화성에서 서식지를 건설하는 자동화 프로세스를 개발시키는 것이었음
- 특히 재료로 Martian Concrete를 사용하고 있었는데 이 콘크리트는 Magnesium Oxide, Metakaolin, Boric Acid, Monopotassim 등과 Basaltic cinder 골재로 만들 었음
- 이 재료의 특징은 양생기간이 짧은 특징을 가지고 있었으며 슬럼프 테스트를 통해 최적의 함수비를 발견하였음

◦ 기타 NASA 대회 정보 습득 (NASA Co2 Conversion Challenge)

- 새롭게 습득한 다른 NASA 대회는 이산화탄소 배출 관련 대회였음
- 대회의 목적은 다양한 제품을 제조하는 데 사용할 수 있는 분자를 생성하는 유일한 탄소 공급원으로

이산화탄소를 사용하고, 이것을 이용해 새로운 합성 기술을 개발하고자함

- 또한 미래 인류가 거주할 화성은 자급자족이 필요하며 지구에서 가져온 물품을 재활용해야 되며 이산화탄소 같은 화성 현지자원을 활용해야 됨
- 이 대회는 Phase 1, Phase 2로 구성되어 있으며 각 팀은 탄소 기반의 분자 화합물의 생산성을 입증하기 위해 구축 할 수 있는 물리 화학적인 변환 시스템에 대한 예비 설계 및 설명을 제출해야 됨



◦ 기타 정보습득

- NASA는 미래 화성에서 사람이 거주하는 것을 목표로 하고 있음
- 재료 운송비는 약 1kg 당 약 12억의 비용이 발생하여 ISRU를 목표로 하고 있음
- 현지자원은 loose fine dirt(regolith), basalt, frozen water로 구성되어 있음
- 달 샘플(moon rock)은 우주비행사 Dave Scott에 의해서 수집 되었으며 Apollo 15 미션에서 수행되었음
- 원래 기존 암석의 파편인 달 샘플은 10 파운드 이상의 무게를 나타내었음
- NASA 3DP Phase 4 가 개최여부는 추후에 확인 가능함

제7장. 연구개발성과의 보안등급

해당 없음

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치장소)	NTIS장비 등록번호
한양대학교	3D 갠트리	4.3*4.3*3.5m	1	2019.03.27	36,300	뉴빌리티 (01040831885)	수리실험동	NFEC-2019-05-255773

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

연구 목적의 실현을 위해서 진행될 여러 가지 연구 및 실험에는 자동화 장비 주변의 위험요소들이 존재한다. 설계된 자동화 시스템 장비를 제작 시 사용하는 밴드 소우 혹은 벤치드릴과 같은 장비는 연구원의 부상에 대한 위험도가 잠재하기 때문에 참여연구원에게 실험실 안전수칙 및 보호 장비 착용에 대한 필요성을 인식시키는 것이 중요함

또한, 시스템 구축에 이용되는 재료 생산 시 사용되는 불밀기계는 돌을 가는 대형장비로써 실험재료의 저장 및 이동시의 안전뿐만 아니라 실험자의 주의가 요구되며 제작 과정에서 발생하는 많은 양의 먼지는 참여연구원들의 호흡기/기관지 질환에 치명적으로 작용할 가능성이 있기 때문에 적절한 보호 장비의 착용이 필수적이다. 또한 달 콘크리트 제작 시 고온의 열을 이용하기 때문에 화상에 대한 주의와 안전 보호구 착용이 필수적임

한양대학교 안전교육 홈페이지



따라서 실험 위주로 진행되는 이공계열 연구실을 대상으로 학교에서는 매 학기마다 한양대학교 안전정보망(<http://safeedu.hanyng.ac.kr>)을 통해 연구실 및 실험실 안전교육 및 안전점검을 시행하고 있음

교육 전 교육수강 설문조사 작성 (필수사항)



안전교육은 각 실험실의 특성마다 조금씩 차이가 있으므로 교육수강 이전에 개인별로 설문조사를 작성하여 연구실 분류 기준에 맞춰 교육을 진행하며, 온라인 교육의 특성상 제대로 이루어지지 않을 것을 대비하여 스크롤바 및 “NEXT”를 임의로 조작하지 못하도록 방지하였다. 또한, 교육 도중 퀴즈를 보도록 되어 있어 교육생들의 참여도를 높였으며, 교육 종료 후 평가시험을 실시하여 60점 이상의 점수를 받아야 안전교육 이수가 완료되도록 하였음

연구실 분류 기준

※ 연구실 분류 기준

- A : 고압 · 가연성 · 독성 · 부식성 · 혼합 가스 등을 주로 사용하는 실험실
- B : 화학물질(시약 등)을 주로 사용하는 실험실
- C : 미생물 및 동물, 유전자변형생물체를 주로 사용하는 실험실
- D : 방사성 동위원소물질을 주로 사용하는 실험실
- E : 공작기계(프레스, 절삭기기 등), 크레인, 고압반응기를 주로 사용하는 실험실
- F : 납땜, 회로시험, 전기기판 등 주로 전기 및 전기기기를 사용하는 실험실
- G : 설계, 제도, 시뮬레이션 등 주로 컴퓨터를 이용한 작업을 하는 실험실(실습PC실 포함)
- H : 기기실, 멸균실, 분석실 등(가스 미포함실)

※ 유의사항

위의 7가지 실험실분류 중 에서 중복 해당 될 경우, 사용비중이 높은 쪽을 선택

예) 고압가스(A)비중 30% + 화학물질(B)비중 50% + 미생물(C)비중 20% ⇒ 실험실분류 B

교육 종료 후 평가시험 실시



그리고 한양대 안전담당자들은 학기 말 안전교육 이수여부를 확인하며 실험/연구실 실사를 통해 안전교육결과가 제대로 시행되고 있는지를 검사하며 다음과 같은 양식에 작성하여 보관함

연구실/실험실 안전점검 양식

현장 연구실 안전교육결과			결 재	안전담당자	안전책임자
				(인)	(인)
교육일시			교육장소		
교육내용			교육시간	2시간(입, 복학자) 8시간(신규채용 연구원)	
연구실명			교육강사명		
NO	소 속	성 명		서 명	
1				(인)	
2				(인)	
3				(인)	
4				(인)	
5				(인)	
6				(인)	
7				(인)	
8				(인)	
9				(인)	
10				(인)	
11				(인)	
12				(인)	
13				(인)	
14				(인)	
15				(인)	
16				(인)	
17				(인)	
18				(인)	
19				(인)	
20				(인)	

※ 연구실 안전담당자(선임조교, 대학원생, 연구원), 연구실 안전책임자(지도교수, 센터장)

※ 현장 안전교육시간 : 2시간(입, 복학자), 8시간(신규채용 연구원)

※ 교육내용은 연구프로젝트 및 공정에 관련하여 위험성, 안전작업절차등을 교육

※ 교육강사는 연구실별 안전책임자가 실시

이와 같은 교육뿐만 아니라 실질적으로 실험/연구실에서 필요한 보호 장비를 제공한다. 우리가 진행하고 있는 실험실에서도 복제토 실험 시 필요한 실험복, 보안경, 귀마개, 마스크 및 콘크리트 제작 시 필요한 내열 장갑을 제공받아 실험하고 있으며, 상시 안전예방에 필요한 장비들은 교내 행정망을 통해 신청하면 공급받을 수 있도록 함

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Bottom-up heating method for producing polyethylene lunar concrete in lunar environment	한양대 학교	논문 게재	Advances in Research/ ELSEVIER	1.746	2018.07.01	단독사사	SCIE / 2회 인용
2	논문	달, 화성 3D 프린팅 주거지 건설을 위한 재료 사출기능 최적화 연구	한양대 학교	논문 게재	대한토목학 회	-	2019	단독사사	KCI
3	논문	행성탐사를 위한 거주지 건설 연구 : 현지자원 활용과 3D 프린팅 기술을 중심으로	한양대 학교	논문 게재	대한토목학 회	-	2020	단독사사	KCI
4	기타	1/3 크기의 거주지(10m ²) 출력 	한양대 학교	TRL 7					
5	기타	Phase 3, Virtual Construction 4위 입상	XArc	TRL 5					
6	특허	3D 프린터용 노즐 장치	한양대 학교	특허 출원	대한민국	-	2019.04	-	-

제12장. 참고 문헌

- 3DP + Construction (2017), "Six Teams Earn Honors, Prize Money in Second Construction Level of NASA Challenge to 3-D Print a HABITAT: 1st place: MoonXConstruction (Team Leader, Project Investor : Tai Sik Lee)" . 2017.07.10. https://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab/6-teams-earn-prize-money-in-second-level-of-challenge
- Ali, M. N., Xiong, J., Flynn, S., Tao, J., Gibson, Q. D., Schoop, L. M., ... & Cava, R. J. (2014). Large, non-saturating magnetoresistance in WTe₂. *Nature*, 514(7521), 205-208.
- Allen, C. C., Jager, K. M., Morris, R. V., Lindstrom, D. J., Lindstrom, M. M., & Lockwood, J. P. (1998). JSC Mars-1: a martian soil simulant. In *Space 98* (pp. 469-476). ASCE.
- Brunskill, C., Patel, N., Gouache, T. P., Scott, G. P., Saaj, C. M., Matthews, M., & Cui, L. (2011). Characterisation of martian soil simulants for the ExoMars rover testbed. *Journal of Terramechanics*, 48(6), 419-438.
- Bryson, J. F., Nichols, C. I., Herrero-Albillos, J., Kronast, F., Kasama, T., Alimadadi, H., ... & Harrison, R. J. (2015). Long-lived magnetism from solidification-driven convection on the pallasite parent body. *Nature*, 517(7535), 472-475.
- Chang, B. C., Lee, J. H., Choi, D. C., Lee, M. Y., & Lee, T. S. (2012). Pneumatic excavation for lunar ISRU (In-Situ Resource Utilization). *Gerontechnology*, 11(2), 365.
- Chang, B., Bernold, L., & Lee, T. S. (2010). Experimental study of lunar regolith anchoring forces. In *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction & Operations in Challenging Environments*, 1418-1422.
- Chang, B., Lee, S., Lee, T. S. (2012). Feasibility study on lunar concrete landing pad. In *Earth and Space 2012: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, 128-134.
- Cooper, B. L., Thaisen, K., Chang, B. C., Lee, T. S., & McKay, D. S. (2015). Disintegration of Apollo lunar soil. *Nature Geoscience*, 8(9), 657.
- Cooper, B. L., Thaisen, K., Chang, B. C., Lee, T. S., & McKay, D. S. (2016). Reply to 'Integrity of lunar soil samples'. *Nature Geoscience*, 9(2), 87.
- Emerging Objects Invents Earthquake-Proof 3D Printed Column, <https://www.archdaily.com/568838/architects-invent-earthquake-proof-3d-printed-column>
- Foster + Partners works with European Space Agency to 3D print structures on the moon". Foster + Partners. 31 January 2013. Retrieved 1 February 2013.
- http://www.sciencetimes.co.kr/?p=119693&cat=36&post_type=news&paged=460
- Kanamori, H., Udagawa, S., Yoshida, T., Matsumoto, S., & Takagi, K. (1998). Properties of lunar soil simulant manufactured in Japan. *Space*, 98, 462-468.
- Keating, S. J., Leland, J. C., Cai, L., & Oxman, N. (2017). Toward site-specific and self-sufficient robotic fabrication on architectural scales. *Science Robotics*, 2(5), eaam8986.
- Khoshnevis, B. Automated Construction by Contour Crafting: Related Robotics and Information Technologies. *Automat. Constr.* 2004, 13, 5-19
- Kim, K. J., Lee, J. H., Seo, H., Ju, G., Lee, S. R., Choi, G. H., Lee, T. S. (2014). An introduction to the lunar and planetary science activities in Korea. *Advances in Space Research*, 54(10), 2000-2006.

-
- Koh, S., Yoo, J., Bernold, L., & Lee, T. S. (2010). Experimental study of waterless concrete for lunar construction. In *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction & Operations in Challenging Environments*, 1098–1102.
- Labonnote, N., Rønquist, A., Manum, B., & Rüther, P. (2016). Additive construction: State-of-the-art, challenges and opportunities. *Automation in Construction*, 72, 347–366.
- Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *science*, 321(5887), 385–388.
- Lee, T. S., Lee, J., & Ann, K. Y. (2015). Manufacture of polymeric concrete on the Moon. *Acta Astronautica*, 114, 60–64.
- Lee, T.S., Chang, B., Lee, J., Kang, S., Seol, D., Lee, J., Xiemenes, S., Lee, Y (2016), Manufacturing for Planetary Construction using Polymeric Concrete, 7th Joint Space Resources Roundtable/PTMSS.
- Lee, T.S., Chang, B.C, Lee, Y., Lee, J., Kang, S., Lee, J., Seol D., & Lee, J. (2017), ISERI ISRU Construction Technology, 8th Joint Space Resources Roundtable/PTMSS.
- Lee, J., Ann, K. Y., Lee, T. S., & Mitikie, B. B. (2018). Bottom-up heating method for producing polyethylene lunar concrete in lunar environment. *Advances in Space Research*, 62(1), 164–173.
- Lu, B., Li, D., & Tian, X. (2015). Development Trends in Additive Manufacturing and 3D Printing. *Engineering*, 1(1), 085–089.
- MailOnline, (2014), “Send your DNA to the moon: Lunar Mission One plans to drill 100 METRES into the moon's south pole – and you could have your own time capsule buried there” , 2014.11.19.
- McKay, D. S., Cooper, B. L., Taylor, L. A., James, J. T., Thomas-Keprta, K., Pieters, C. M., ... & Lee, T. S. (2015). Physicochemical properties of respirable-size lunar dust. *Acta Astronautica*, 107, 163–176.
- McKay, David S. et al. (1994). "JSC-1: A NEW LUNAR SOIL SIMULANT". *Engineering, Construction, and Operations in Space IV*, American Society of Civil Engineers, pp. 857–866.
- Miller, D. W. (2015). NASA Technology Roadmaps. National Aeronautics and Space Administration (<http://www.nasa.gov>), Office of the Chief Technologist, (<http://www.nasa.gov/offices/oct/home/roadmaps/index.html>).
- Mueller, R. P., Howe, S., Kochmann, D., Ali, H., Andersen, C., Burgoyne, H., ... & Gerner, S. (2016, April). Automated additive construction (AAC) for Earth and space using In-Situ resources. In *Proceedings of the Fifteenth Biennial ASCE Aerospace Division International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments (Earth & Space 2016)*. American Society of Civil Engineers
- NASA's 3D Printed Habitat Challenge. <http://bradley.edu/challenge>. Accessed October 31 2016.
- Neal, C. R., Schmidt, G. K., Ehrenfreund, P., & Carpenter, J. D. (2014). Developing the global exploration roadmap: An example using the humans to the lunar surface theme. *Space Policy*, 30(3), 156–162.
- Nørnberg, P., Gunnlaugsson, H. P., Merrison, J. P., & Vendelboe, A. L. (2009). Salten Skov I: A Martian magnetic dust analogue. *Planetary and Space Science*, 57(5), 628–631.
- Pavan, A., Spagnolo, S. L., Caffi, V., Mirarchi, C., & Daniotti, B. (2020). National BIM Digital Platform for Construction (INNOVance Project). In *Digital Transformation of the Design, Construction and Management Processes of the Built Environment* (pp. 3–15). Springer, Cham.
- Peters, G. H., Abbey, W., Bearman, G. H., Mungas, G. S., Smith, J. A., Anderson, R. C., ... & Beegle, L. W. (2008). Mojave Mars simulant—characterization of a new geologic Mars analog. *Icarus*, 197(2), 470–479.
- PISCES Lunar Dust Flight Experiment MoonRIDERS
- Polit Casillas, R., & Howe, S. A. (2013). Virtual Construction of Space Habitats: Connecting Building
-

Information Models (BIM) and SysML. In AIAA Space 2013 Conference and Exposition (p. 5508).

STMD: Centennial Challenges – NASA's Centennial Challenges: 3D-Printed Habitat Challenge. NASA, 2015. [Online]. http://www.nasa.gov/directorates/spacetech/centennial_challenges/3DPHab/index.html. Accessed September 29 2016.

Tay, Y., Panda, B., Paul, S., Mohamed, N., Tan, M., & Leong, K. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: a review. *Virtual and Physical Prototyping*, 1-16.

Taylor, L. A., Pieters, C. M., & Britt, D. (2016). Evaluations of lunar regolith simulants. *Planetary and Space Science*, 126, 1-7.

Vickers, J. (2017). NASA's Additive Manufacturing Development Materials Science to Technology Infusion-Connecting the Digital Dots.

Weiblen, Paul W., Marian J. Murawa, and Kenneth J. Reid. (1990). "Preparation of simulants for lunar surface materials." *Engineering, Construction, and Operations in Space II*. ASCE.

Xia, M.; Sanjayan, J. Method of Formulating Geopolymer for 3D Printing for Construction Applications. *Mater. Des.* 2016, 110, 382-390

Zeng, X., Li, X., Wang, S., Li, S., Spring, N., Tang, H., ... & Feng, J. (2015). JMSS-1: a new Martian soil simulant. *Earth, Planets and Space*, 67(1), 1-10.

Zheng, Y., Wang, S., Ouyang, Z., Zou, Y., Liu, J., Li, C., ... & Feng, J. (2009). CAS-1 lunar soil simulant. *Advances in Space Research*, 43(3), 448-454.

Zheng, Yongchun, et al. "CAS-1 lunar soil simulant." *Advances in Space Research* 43.3 (2009): 448-454.

고성원, 장병철, 구자경, & 이태식. (2009). 한국형 달 복제토 개발을 위한 기초 연구. 대한토목학회 학술대회, 3598-3601.

미래창조과학부. (2013), 미래창조과학부 우주개발 중장기계획

유병현, 한진태, 장일한, 2015. 한국형 인공월면토 (KLS-1) 개발을 위한 기초 연구. JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY, 31(7), pp.53-63.

유석호, 김현덕, 임재혁, & 박정선. (2014). KAU 기계적 달 복제토 개발 및 달착륙선 착륙장치의 낙하시험. 한국항공우주학회지, 42(12), 1037-1044.

이재호, 이태식, 안기용, & 장병철. (2016). 달 거주를 위한 폴리머 콘크리트의 시공성 연구. 대한토목학회 학술대회, 우수논문상, 41-42.

이재호, 이태식, 안기용, & 장병철. (2017). 달 시설물을 위한 폴리머 콘크리트의 시공성 연구. 대한토목학회논문집, 37(2), 507-512

이태식, 이진영, 안기용, 이재호, 장병철 (2016), 달 콘크리트 방사선 차폐 성능 검증을 통한 시공 조건 도출, KSCE 2016 CONVENTION PROGRAM, 2016.10, 45-46

헬로디디 (2017), "건설연(이태식 건설연 원장)-한양대 컨소, NASA 우주건설기술 대회 2차전 우승", <http://hellodd.com/?md=news&mt=view&pid=62050>. 2017.07.09.

9. 뒷면지

주 의

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