

지하융복합개발 기술위원회

Annual Technical Report

- 1. 융복합기술로서의 건축내진기초 온라인관리시스템**
- 2. 다학제적 융복합사례로서의 우주건설 연구**

2022

**터 널 지 하 공 간 학 회
지 하 융 복 합 개 발 위 원 회**

■ 목 차 ■

1. 융복합기술로서의 건물 내진기초 온라인 관리시스템.....	1
1.1 융복합기술로서의 건물 내진기초.....	1
1.2 플랫폼을 이용한 온라인 내진말뚝 관리시스템.....	4
2. 다학제적 융복합사례로서의 우주건설 연구.....	6
2.1 국내·외 우주건설 연구동향.....	6
2.2 우주건설 연구 패러다임의 변화.....	10
2.3 달 탐사와 건설기술.....	11

1. 융복합기술로서의 건물 내진기초 온라인 관리시스템

1.1 융복합기술로서의 건물 내진기초

가. 건축학적 관점에서 건물 내진기초 [1]

오랫동안 한반도는 지진에 대한 걱정이 없었다. 그러다가 진도 5.8과 5.4의 지진들이 경주(2016년 9월)와 포항(2017년 11월)의 건물들에 큰 피해를 주면서 지진에 대한 공포와 함께 건축에서 법제적인 대책들이 수립되었다.

마크 트웨인은 인간이 궁지에 빠지는 것은 무엇을 몰라서라기보다 잘못된 확신으로 인한 것이 더 크다고 기술한 바 있는데, 우리나라 건축기술 분야에서도 잘못된 확신이 관행으로 이어지는 사례의 문제가 제기되고 있다.

‘지진이 일어날 때, 땅속에 묻혀있는 건물의 지하 부분에 옆에서 미는 힘, 즉 지진으로 인한 수평력이 작용하는가?’ 라는 질문에 대해 건축전문가들은 관행적으로 주요하게 고려할 만한 큰 힘이 건축구조에 작용하지 않는 것으로 판단한다. 이는 지하구조물이 주변 지반과 동일하게 움직인다는 확신에서 나온 것이다. 그런데, 지반은 대부분이 흙, 그리고 아주 드물게 암반과 물로 구성되고 건물 하부는 철근콘크리트가 자리잡고 있어 지진이 발생했을 때 서로 다른 여러 가지 매질들이 동일하게 거동한다는 관행적 확신은 의심되어야만 한다.

‘건축물의 구조기준 등에 관한 규칙’은 건물의 구조안전에 필요한 사항을 규정하고 있는 법이다. 이 규칙은 건축물의 구조내력에 주요한 부분을 구조부재로 정의하고 기초 또한 구조부재에 포함하고 있다. 전문가는 당연히 구조부재가 축방향력, 휨모멘트, 전단력, 비틀림 등의 외부 힘 들에 충분히 버티도록 조치를 취해야 한다. 그러나, 지진 시 기초, 특히 말뚝 부분에 외부 힘들이 전달될 수 밖에 없는데도 잘못된 확신에 근거한 관행적 판단으로 인해 법에 정해진 지진시의 구조내력을 확보하지 못한 건물들이 생겨났다.

건물 지하구조에 대한 건축 전문가들의 관행적 판단은 지진의 시대에 이르러 다음의 두 가지 지반-구조물 상호작용 특성을 고려하여 개선하게 됨이 불가피해졌다.

첫째, 건물의 흔들림이 전단력으로 작용

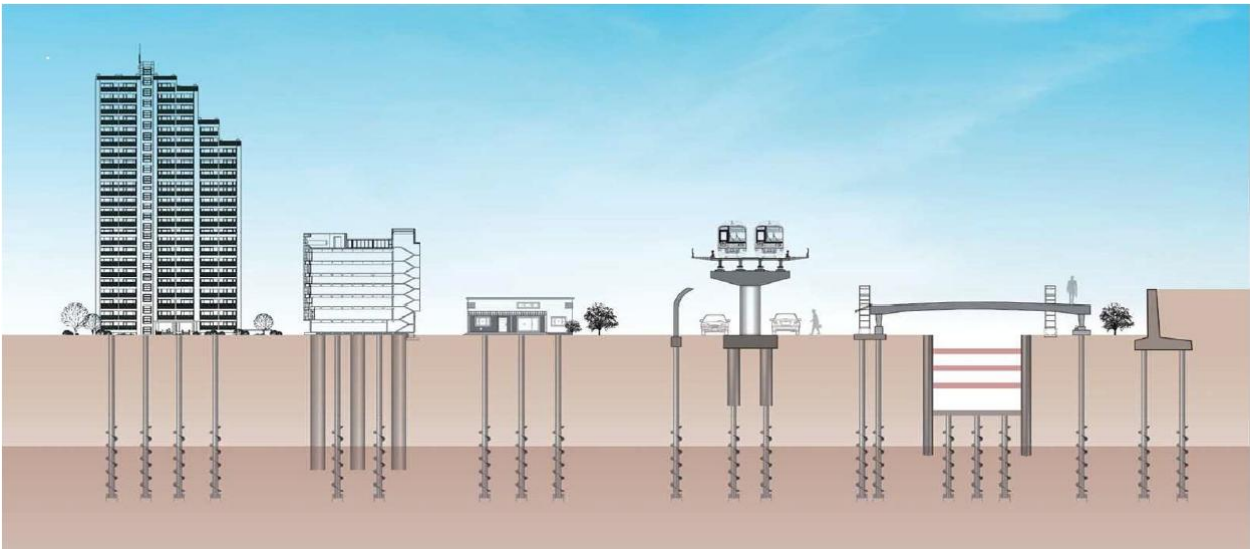
일본건축학회는 지진이 발생하여 건물이 흔들리면 건물의 밑면 전단력이 말뚝에 수평력으로 전달된다고 명확하게 설명한다. 그래서, 그 대응방안으로 건물과 말뚝을 일체화하여 계산, 건물과 말뚝을 분리하여 계산, 말뚝 숫자로 하중을 나누어 하나의 말뚝만 계산, 이론식의 활용 등과 같은 방식들을 제시하고 있다.

둘째, 지반의 움직임이 지진토압으로 작용

우리나라는 대단위 아파트 단지의 건설이 빈번하게 이루어진다. 넓은 면적으로 기초가 설치될 수 밖에 없는 경우, 지진이 오면 지상 건물의 흔들림보다 지반의 움직임으로 발생하는 토압이 더 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 지진으로 인한 땅의 압력을 말뚝에 적용해야 한다.

나. 삼축내진말뚝[2]

국내 건축물 기초는 다양한 말뚝형식이 적용되고 있는데 대부분 상부 구조물의 자중을 지지층에 전달하는 기능에 국한하여 연직저항 말뚝이 채택되어 왔다. 그러나, 최근 강화된 내진 설계기준(KDS 41 17 00, 국토교통부, 2019)에 의하면 지진발생시 말뚝머리에 전달되는 수평방향 하중인 전단력에도 저항할 수 있어야 하므로 대규모 건축물에는 휨강도가 큰 구경의 강관을 적용하거나, 복합(강관+PHC)말뚝, PHC에 전단 및 모멘트 철근을 보강한 합성 말뚝을 적용해야 하는 상황이다.



[그림 1.1] 다양한 건물의 말뚝기초

연직방향 저항능력만을 고려하여 설계·시공된 대부분의 기존 말뚝은 지진시 발생하는 수평력에 저항하는 능력이 부족하며, 내진성능을 확보하는 연직말뚝을 적용하는 경우에도 소형주택이나 기초지반의 연약층 심도가 5~15m인 건축물 조건에서는 경제성이 현저히 저하되는 문제가 있다.

그림 1.2는 기존 건물기초로 적용되어오던 연직말뚝과 그러한 기초형식의 문제점을 개선하기 위해 적용되기 시작한 삼축내진말뚝의 적용현황을 비교한 것이다.



(a) 기존 연직말뚝



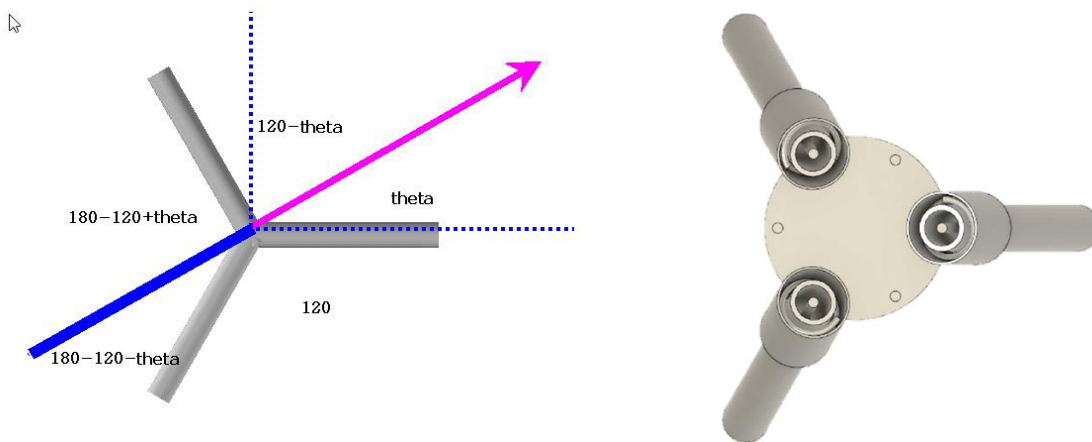
(b) 삼축내진말뚝

[그림 1.2] 연직말뚝과 삼축내진말뚝

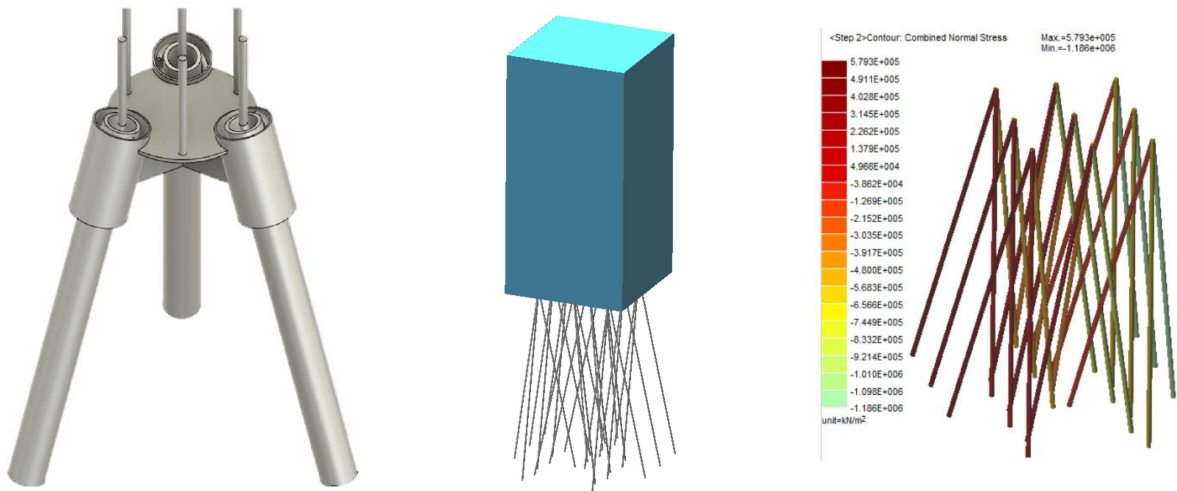
지진하중은 지진동 발원 및 전파의 불규칙성을 고려할 때, 상시 하중과 같이 하중에 저항하는 주축방향을 특정할 수 없다. 삼축내진말뚝은 그러한 점을 고려하기 위해, 아래 그림에서와 같이 모든 방향에서 동일하게 수평방향 하중에 저항하는 성능을 확보할 수 있도록 3축 방향 구조를 도입한 말뚝형식이다.

지진시 지표면 가속도에 반응하는 가속도가 건축물에 적용되는 경우 구조물 밀면 전단력은 (건물 총하중×수평가속도계수)로 산정될 수 있으며, 이러한 수평력이 말뚝 머리에 작용하게 되면 모멘트 및 전단력의 증대, 두부 휨파괴 등이 발생할 수 있다.

삼축내진말뚝은 연직방향 저항능력만 고려하던 기존 건축물 말뚝기초의 단점을 개선하여 모든 방향에 대한 수평력에 대해 균질·균등한 저항능력을 확보하기 위해 시도되고 있는 새로운 말뚝구조이다.



[그림 1.3] 삼축내진말뚝 개념도



[그림 1.4] 삼축내진말뚝 적용 개요도

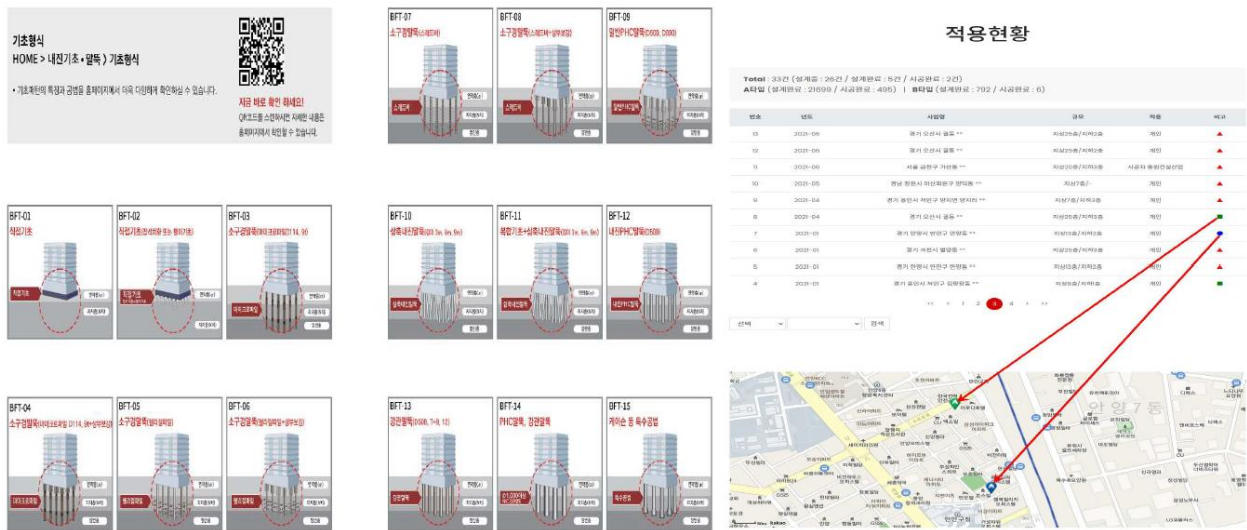
또한, 삼축내진말뚝은 앵커 시공용 소규모 장비를 이용하여 소규모 건축현장에서도 시공이 가능하기 때문에, 기존의 대형·대규모 내진말뚝이 적용이 불가능한 건축물에서도 내진성능 확보가 가능하며, 기존 건축물 지하실의 협소한 공간에서도 시공할 수 있어 다양한 용도의 건축물에 대한 내진성능확보 사업에 활용성이 우수한 것으로 평가되고 있다.

1.2 플랫폼을 이용한 온라인 내진말뚝 관리시스템

삼축내진말뚝은 고강도 강관을 재료로 사용하므로 강제 제작단계에서 시리얼 번호를 부여하여 스마트 기술인 RFID 기술을 적용함으로써, 말뚝 정보관리 시스템을 구축할 수 있다. 또한, 축적된 정보를 이용하여 빅데이터 기반의 건축물 내진기초 선정 알고리즘이 구축된 온라인 플랫폼 상 말뚝관리 DB서버를 운영함으로써, 실시간 말뚝 정보 추적 시스템 및 건축물 기초 내진능력이 가시화된 안전지도 서비스를 일반인에게 제공하려는 시도가 이루어지고 있다.

설계중, 설계완료, 시공완료에 대한 정보를 플랫폼에 지도정보서비스를 하게되어 건축물의 구조부재중 하나인 기초에 대한 정보를 설계, 시공 및 유지관리 단계에 걸쳐 민간 소비자에게 직접 제공하려는 것이다.

이러한 시도는 건물의 내진능력을 온라인 상에 가시화함으로써, 민간 수요자가 관심 건물의 내진능력 확보여부를 확인한 후 매수하는 용도로 활용할 수도 있고, 건물 사용자가 지진재해 발생시 탈출 또는 대피하는데 도움이 되도록 할 수도 있다.



[그림 1.5] 삼축내진말뚝 정보관리 플랫폼

초연결, 초지능의 ICT 융합기술을 활용한 플랫폼 영역의 발전은 건축 시장을 공급자 중심에서 거주자 중심으로 급격하게 바꾸어 갈 것이다. 지진이 발생시 건물 기초의 안정성 확보여부는 거주자들이 가장 민감하게 반응할 수 있는 정보이다. 건축법 또한 건축물대장에 내진능력을 표기하도록 규정하고 있다. 향후, 건축물을 소비하는 거주자들은 건물 기초로 시공된 말뚝정보를 확인하고 더 나아가 건물기초의 내진성능 확보를 요구할 것이다. 그동안, 건축전문가들이 완공 후 보이지 않는 구조부재로서 소홀하게 취급해 온 말뚝을 건물명, 말뚝 및 건물의 내진성능, 좌표값 등으로 정리하고 관리하여 이러한 거주자들의 요구에 응답해야 하는 것은 이제 필연적 현실이라 할만하다.

교량 등 구조물 설계 및 시공시 수평방향 저항력을 고려한 기초형식을 적용하는 것은 토목분야 건설업역에서 오랫동안 발전되어온 기술이다. 이러한 토목분야의 지반공학기술이 반영된 삼축내진말뚝 공법이, 그간 지상구조에 관심이 집중되어 건물의 지하층인 지중에서 발생하는 지반-구조물 상호거동 개념도입으로 발전되지 못했던 건축분야에 적용됨으로써 토목-건축간 융복합기술로서의 혁신적 역할을 수행할 수 있기를 기대하는 바이다.

참고문헌

- [1] 도시의 최전선, 열린 도시 지하공간, 2022, 이강주
- [2] 스마트플랫폼을 활용한 건물내진말뚝 제품 고도화와 현장 적용성 향상을 위한 시제품 제작, 시공 및 검증평가, 2021, 한국건설기술연구원

2. 다학제적 융복합사례로서의 우주건설 연구

2.1 국내·외 우주건설 연구동향

최근 들어, 전 세계적으로 우주탐사에 대한 관심과 경쟁이 뜨거워지고 있다. 2020년 12월에는 일본의 하야부사 2호가 소행성 토양을 채취하여 지구로 귀환했고, 중국의 창어 5호도 구소련의 루나 24호 이후 45년만에 처음으로 월석을 가지고 지구로 귀환하였다. 미국의 경우에도, NASA는 아폴로 계획 이후 50년 만에 신규 유인 달탐사 프로그램인 ‘아르테미스’를 진행 중이고, Space-X도 유인화성 탐사를 위해 재사용 우주선인 ‘스타쉽’을 개발 중에 있다. 비단 우주선진국들 뿐만 아니라, 우리나라에서 위성제작을 배운 UAE조차도 지난해 화성탐사선을 발사하면서 우주탐사 대열에 합류한 상황이다.



[그림 2.1] Conceptual Lunar Base [1]

가. 우리나라

우리나라는 2007년 6월 1차 우주개발진흥 기본계획을 수립하였고, 11월에는 우주개발사업 세부 실천 로드맵을 작성하여 달 탐사 중심의 우주탐사 계획을 발표하

였다. 2011년 제2차 우주개발진흥 기본계획 이후 달 탐사 계획은 수차례 수정되었으나, 최근 제3차 우주개발진흥 기본계획을 수립하여 2020년 시험용 달 궤도선, 2030년 달 착륙선 발사로 수정하였다[2]. 현재 시험용 달 궤도선은 탑재체 6종(국내 5종, NASA

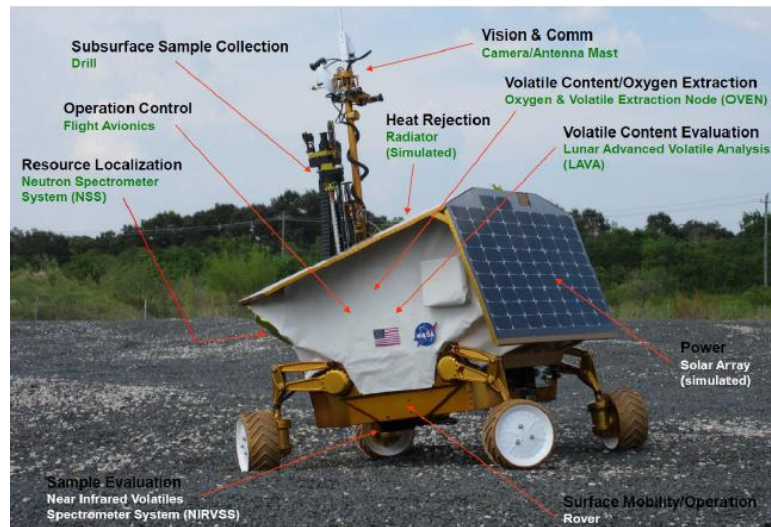
1종)을 장착하고, 미국 우주 기업인 SpaceX의 발사체에 실려 발사될 예정이다[3]. 국내에서 달 자원 탐사 및 달 기지건설 관련 연구는 한국우주항공연구원(KARI)외에 한국건설기술연구원(KICT), 한국지질자원연구원(KIGAM), 한양대 등을 중심으로 진행 중이다. 이중 KICT에서는 달 표면과 유사한 환경을 구현할 수 있는 실험용 지반열진공 챔버를 제작하고 있으며(그림 2.2), 달 현지 측량, 달 지반 조사, 달 기지 건설을 위한 다양한 연구들을 진행하고 있다.



[그림 2.2] DTVC (Dirty Thermal Vacuum Chamber) in KICT[4]

나. 미국

2017년 12월 미국 트럼프 행정부는 1972년 이후 중단되었던 유인 달 탐사의 재추진을 선언하였다. 미국의 유인 달 탐사 계획은 2018년 연방의회에서의 예산 승인 이후 구체화 될 것으로 예상된다. 현재 NASA가 추진 중인 달 탐사 사업은 Resource Prospector와 Deep Space Gateway 등이 있다. 이중 Resource Prospector는 2022년 다양한 관측장비와 시추 장비를 탑재한 로버를 달 극지역에 보내 영구음영지역의 얼음 자원과 휘발성 물질을 조사할 예정이다[5] (그림 2.3). 한편 미국은 달의 상업적 활용을 위해 Lunar CATALYST와 같은 민-관 협력 프로그램을 강화 중이다. 향후 미국의 달 탐사는 기술적 위험성이 높은 임무는 NASA가 수행하고, 달 화물 운송과 달 자원 개발 등은 민간우주 기업에게 개방하여, 달 탐사의 효율성과 경제성을 극대화할 것으로 예상된다.



[그림 2.3] Resource Prospector Rover[5]

다. 러시아

러시아우주국(ROSMOS)은 1997년 달 탐사 계획인 Luna Glob를 발표하였지만 재정상황 악화로 진행하지 못하다가, 2009년 미국의 달 궤도선인 LRO 발사를 계기로 달 탐사 사업을 재개하고 있다. 현재 ROSMOS는 2020년 Lunar 25호(달 착륙선)를 달 전면부에 보내 무인 탐사를 위한 기술을 실증할 예정이다. 2022년에는 달 궤도선을 보내고 2023년에는 유럽우주국(ESA)의 시추장비를 탑재한 Lunar 27호(달 착륙선)를 극지역에 보내 자원탐사를 진행할 계획이다. 이외에도 2025년 이후에는 달 토양 표본 채취 및 귀환 임무를 수행하기 위해 Lunar 28호(달 착륙선)를 발사할 예정이다[6].

라. 유럽연합

ESA는 2016년 달 영구 기지를 국제협력으로 건설하여 과학적 목적뿐 아니라 달 자원 발굴 및 활용, 우주여행, 그리고 화성 탐사의 전초기지로 활용하자는 계획을 발표하였다[7]. 현재 ESA는 국제협력과 민간참여를 통한 달 탐사를 계획 중이다. 대표적으로 PROSPECT와 HERACLES가 있다[8]. PROSPECT는 달 극지역에 착륙선을 보내 착륙지 주변의 토양을 채취 및 분석하여 달 현지 자원을 평가하기 위한 달 탐사 사업으로, 러시아의 Lunar 27호와 연계하여 개발 중이며 2022년 발사할 계획이다. Lunar 27호는 1.2m 깊이의 시추가 가능한 드릴장비를 탑재하여 지표면 밑의 토양을 채취하고 달 극지

역의 얼음 매장량과 휘발성 자원의 화학적 성분 분석을 수행할 계획이다. HERACLES는 유럽연합 외에 일본, 캐나다와 국제공동으로 추진하는 달 탐사 사업으로, 원격 조정 가능한 달 탐사 로버를 이용하여 달 토양을 채취하고 지구로 귀환하는 임무를 포함한다.

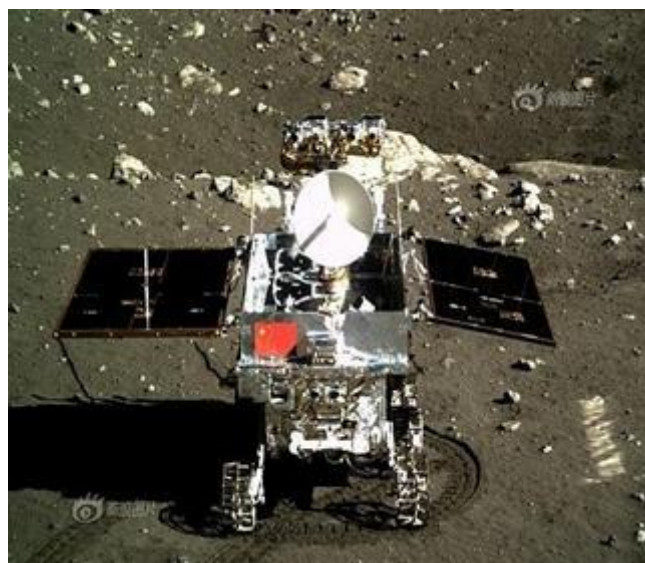
마. 일본

일본은 2015년 1월 신 우주 기본계획을 수립하여 군사, 안보 분야의 우주활동을 강화시키고, 실리형 우주 개발로 정책을 전환하고 있다. 이에 달 착륙선인 SELENE-2는 정부의 승인을 받지 못해 중단되었다. 대신 일본우주국(JAXA)은 소형 달 착륙 시험선인 SLIM을 2020년에 발사하여 달 착륙선의 정밀착륙기술을 실증할 계획이다.

SLIM은 총 100kg 중량의 달 착륙선으로 100m 이내의 정확도를 가진 정밀착륙기술을 시연할 계획이나, 아직 탑재체 종류와 달 착륙지는 결정되지 않은 상태이다[9]. 또한 JAXA는 SELENE-R(달 착륙선 및 로버)을 인도우주국(ISRO)과 공동으로 개발 중이며, 2022년 달에 보내 자원탐사를 수행할 계획이다.

바. 중국

중국국가항천국(CNSA)의 달 탐사계획은 달 궤도선인 Chang' E 1, 2호와 달 착륙선인 Chang' E 3호까지 진행되었다. 이중 Chang' E 3호의 로버인 Yutu는 1976년 구소련의 Luna-24 이후 처음으로 달 표면에 안착하였고, 달 표토의 성분 분석과 달 지반 구조 조사임무를 수행하였다[7]. 현재 CNSA는 2018년 달 후면부의 자원탐사를 위해 Chang' E 4호(통신 중계 궤도선, 달 착륙선 및 로버)를 발사할 계획이며, 2019년에는 달 전면부에 Chang' E 4호(달 착륙선)를 발사할 예정이다. 또한 2020년부터 2030년까지 2번의 달 극지역 자원탐사 사업을 준비하고 있으며, 2030년 까지 달 표면에 연구기지를 달에 건설할 예정이다[10].



[그림 2.4] Chang'E-3 Rover[11]

사. 인도

ISRO는 2008년에 달 탐사 궤도선인 Chandrayaan 1호를 보냈으며, 별도로 제작한 Moon Impact Probe를 달 남극에 충돌시켜 얼음 형태의 물 존재를 전 세계 최초로 확인하였다[12]. Chandrayaan 1호는 312일 간 달 궤도에서 얼음, 헬륨-3를 포함한 달 자원 조사 등의 임무를 수행한 후 교신이 중단 되었다. 인도는 Chandrayaan 1호에 이어 달 궤도선, 달 착륙선 및 로버로 구성된 Chandrayaan 2호를 개발 중이며 2018년 달 앞면에 착륙시킬 계획을 수립하여 진행 중이다[6].

2.2 우주건설 연구 패러다임의 변화

전 세계적으로 우주탐사의 열기가 높아지고 있는 이유에 대해, 우리도 심도있게 살펴볼 필요가 있다. 우선, 우리가 살고 있는 우주 탄생의 신비에 대한 호기심, 우주라는 극한 환경을 통해 미래 대응기술을 확보할 수 있는 등의 과학적 필요성을 생각해 볼 수 있다. 또한, 최근에는 달·화성·소행성 등에 매장된 우주광물의 개발을 통해, 지구 자원고갈을 대비하고 경제성도 확보할 수 있다고 평가되고 있다. 이러한 중요성들을 고려할 때, 이제는 우리나라도 미래 우주탐사 방향에 대해서 진지한 고민이 필요한 시점이다.

현재 국제적으로 진행되고 있는 달탐사 사업 추진 경향은 과거와 비교하여 다음과 같은 패러다임의 변화를 보이고 있다.

첫 번째로, 기존에는 공통된 도전목표에 대해 ‘기술우위’를 점하려는 경쟁구도에서, 극지 자원채취, 소행성 탐사 등과 같이 목표가 다양화 되고 특화되고 있다는 점이다. 두 번째는, 우리가 ‘먼저’, 우리가 ‘더 멀리’라는 자국의 패권을 과시하고 국민의 감성을 자극하는 측면에서, ‘왜’, ‘무엇을’이라는 질문과 함께 과학적, 경제적 가치를 집요하게 따지는 사업추진 경향이다. 세 번째로, 자국 독자추진체계 중심에서, 국제우주탐사협의체(ISECG)를 중심으로 각국의 미션이 실시간 공유되고, 국제협력 체계하에 추진되는 경향이다. 각국의 달탐사 미션 제안과 상호 참여제안을 통해, 국가간 역할 및 예산을 분담하여 추진되고 있다. 따라서, 우리도 기존 발사체, 위성에 집중된 우주사업 추진에서, 달탐사 등 우주사업 추진분야의 다변화를 꾀할 때가 되었으며, 과학적/기술적/경제적 가치가 있는 특화된 달탐사 사업 아이템을 여러 방면으로 발굴하고 모색해야 할 것으로 보인다. 또한, 활발히 진행되고 있는 국제 달탐사 사업에 적시 참여하여 기술적/경제적 가치가 있는 주요 역할을 선점하고, 적은 예산으로 조기에 우주개발 성과를 달성코자 하는 시도가 이루어져야 할 것이다. 이를 효과적으로 시행하기 위해서, 25개

과학/기술 출연연구기관들의 연구 인프라와 연구 성과물들 중, 달탐사 사업에 연계 가능한 것들을 잘 모아, 활용하는 방안을 모색할 필요가 있다. 이를 추진할 수 있는 컨트롤타워가 필요하고, 출연 연구기관의 가용 역량과 연구 성과물들이 반영된 ‘달탐사 사업 추진 로드맵’이 필요하다.

기술적 관점에서도 달탐사 사업 추진경향을 살펴볼 필요가 있다. 기존 달탐사 미션은 단기, 단타로 진행되었으나, NASA의 ARTEMIS, GATEWAY 미션 등, 근래의 달탐사 미션들은 반복적이고 중장기적인 관점에서 계획되어 진행되고 있다. 이러한 맥락에서, 기존에는 크게 고려치 않았지만, 앞으로는 심도깊게 검토되어야 할 새로운 위협인자들이 생겨난다. 정전기가 충전되어 강하게 달라붙는 월면 흙먼지 같은 것들이 그것이다. 이들은 다양한 탐사장비들의 운용성 및 가시 성능을 급감시킬 수 있다, 또한, 기존처럼 달환경 조건에서 가장 양호한 시점과 시기를 정해 잠시 다녀오는 것이 아닌, 영하 190도까지 떨어지는 14일간의 달의 밤시간과 영상 150도까지 높아지는 14일간의 달의 낮시간을 탐사장비와 우주인들이 견뎌내야 한다. 태양으로부터 오는 강한 우주 방사능과 총알의 속도로 떨어지는 크고 작은 운석들로부터도 버텨내야 한다. 따라서, 중장기적인 달 지상에서의 탐사활동과 자원개발 작업을 진행하기 위해서는 이착륙공항(landing pads) 및 도로와 같은 기반시설을 비롯하여 외부 위협요인으로부터 장비와 우주인을 보호하는 보호시설물이 필수적이다. 과거와 달리, 다변화되고 중장기적으로 추진되고 있는 달탐사 수요와 더불어 우주건설의 중요성이 대두되고 있는 이유이다.

2.3 달탐사와 건설기술

가. 국내외 달탐사 전망

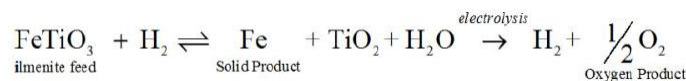
우주 강대국들은 달 탐사를 경쟁적으로 추진하고 있으며, 달 전 지역에 궤도선과 착륙선 및 로버를 보내 자원 및 지형 관측, 토양 표본 채취 및 귀환 등 다양한 탐사 활동을 수행할 계획을 수립하고 있다[6]. 달 탐사 후보지역 중, 달 남북극의 영구음영지역은 달 궤도선을 통해 얼음 형태의 물이 다량 존재하는 것이 발견되어, 전 세계적인 주목을 받고 있다[13]. 달 극지역 탐사를 준비중인 국가는 우리나라를 포함하여 미국, 유럽연합, 중국, 일본 등이 있다. 우리나라 KARI는 2020년 시험용 달 탐사 궤도선을 발사할 예정이다. 시험용 달 탐사 궤도선에 탑재될 NASA의 ShadowCam은 태양빛이 없는 영구음영지역의 지형을 촬영할 수 있도록 설계되었다[14]. 100km 고도에서 1.7m 공간 해상도의 지형 이미지 촬영이 가능하므로, 달 극지역 착륙 후보지 선정과 영구음영지역 탐사 경로 수립에 유용한 정보를 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 우리나라에 이어 미국과 유럽연합은 각각

2022년과 2023년 로버와 착륙선 중심의 달 극지역 탐사를 추진 중이다. 이들 로버와 착륙선은 관측장비 외에 시추장비를 탑재하여 달 표면뿐만 아니라 지표면 아래의 얼음 매장량과 분포, 그리고 달 토양 샘플의 화학적 분석을 수행할 예정이다[5, 8]. 달 착륙선과 로버는 달의 극한환경과 험한 지형조건에서 활동하는데 제약이 많다. 하지만 달 착륙선과 로버에서 측정된 현지 지형 및 자원 정보는 달 궤도선 데이터의 낮은 공간 해상도를 보완하고, 달 환경 및 자원 분포 모델을 검증할 수 있는 보정 데이터로 활용이 가능하다. 현재 우리나라의 달 착륙선 발사 계획은 2030년으로 연기되었다. 향후 국제적인 달 탐사계획에 부합된 달 탐사 후보지 및 임무선정을 위해서는 지속적인 동향 파악 및 분석과 함께, 국제협력을 바탕으로 한 달 탐사계획 수립이 중요하다.

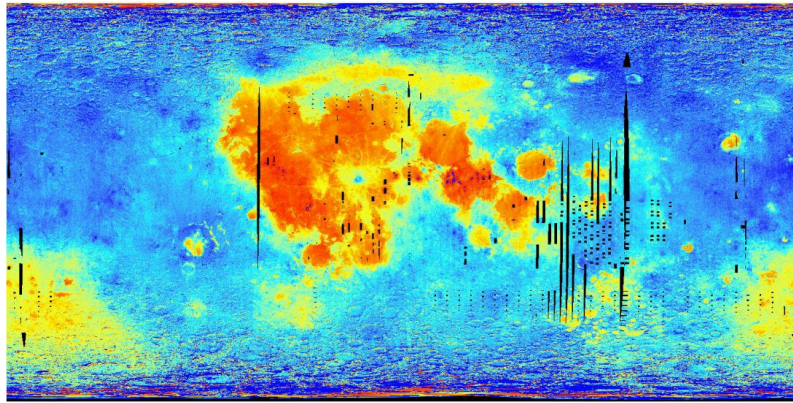
나. 달 현지 자원을 활용한 유인기지 건설기술

① 달 현지 자원을 활용한 물·산소 생산

달 현지자원활용 기술은 달에 존재하는 자원을 이용하여 우주인의 생명유지를 위한 물, 산소, 우주선 연료, 건축재료 등을 생산하여 장기간의 유인탐사를 가능하게 하는 기술이다[15]. 달 극지역에는 유인탐사에 필수적인 물이 얼음형태로 존재하는 것이 밝혀졌다. 얼음은 우주인의 식수로 직접 활용되지만, 산소와 수소로 분해될 수 있다. 산소는 물과 함께 유인탐사를 위해 사용될 수 있고 수소는 달 추진체의 연료로 사용되어 우주인의 지구귀환과 자원수송에 활용될 수 있다. 또한 달 저위도에서 채굴 가능한 티탄철을 이용하여 물과 산소를 생산하는 기술도 제시되었다. 아래 화학식은 티탄철을 이용하여 물과 산소를 생산하는 과정을 보여준다.



과거 아폴로 임무를 통해 수집된 달 토양의 분석을 통해, 달 저위도 지역의 지질 및 자원 분포와 자원 간의 상관성에 대한 연구가 활발히 수행되었다. 달에서 수소는 주로 태양풍과 달 토양이 화학적으로 결합된 형태로 존재하고, 티탄철의 함량이 높을수록 달 토양의 수소 함량 또한 높은 것으로 보고되고 있다. 그림 2.5는 달 표면에서 티탄철의 분포와 매장량을 보여준다. 달에서 티탄철의 화학적 구성성분은 FeTiO₃로 900℃ 이상으로 가열하고 수소가스에 노출시킴으로써, 철, 산화 티타늄, 물을 생산할 수 있다. 생산된 물은 다시 전기 분해함으로써 수소와 산소를 생산할 수 있다. 이중 수소는 다시 티탄철에 적용함으로써 재활용이 가능하다[16].



[그림 2.5] Iron Distribution Map of Moon¹⁷⁾

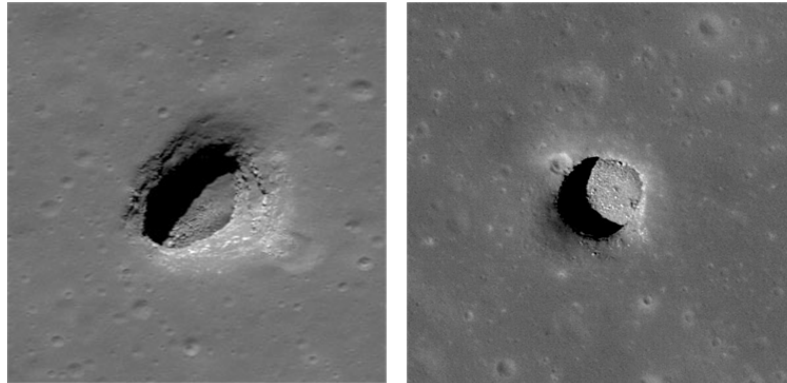
② 달 현지 자원을 활용한 물·산소 생산

달 남북극을 포함한 극지역에서의 기지 건설은 두 가지 측면에서 유리하다. 첫째, 극지방의 일부 음영 지역에는 얼음이 존재하므로, 유인 탐사에 필요한 물과 산소, 발사체 연료인 수소를 효율적으로 생산 할 수 있다. 둘째, 달의 자전축은 황도면과 거의 수직에 가깝기 때문에 달의 극지역의 태양열 발전소는 햇빛에 항상 노출되도록 배치할 수 있다. 태양 에너지는 월식 기간 동안에는 이용할 수 없다. 하지만, 극지역에서의 월식은 상대적으로 짧으며 예측 가능하다. 달은 자전주기와 공전주기가 같아 늘 같은 면이 지구를 보며 돈다. 때문에 달에서의 하루는 지구에서의 한 달과 비슷하다. 따라서 반대 방향을 가진 두개의 태양 전지를 이용하면 거의 연속적으로 전력을 생산할 수 있다. 달 극지역 크레이터 내부의 낮은 온도는 적외선 장비 운영에 적합하고, 지구로부터의 광범위한 전파 노출에 안전하다. 따라서 달 극지역의 크레이터는 천문학적 관측을 위한 최적의 장소 중 하나이다.

달 기지 건설 시 문제되는 것은 태양풍, 우주 방사선, 대형 운석 문제이다. 달에는 대기로 인한 마찰이 없기 때문에 미세운석의 충돌도 전초기지에 충격을 줄 수 있다. 이러한 극한환경 조건을 고려할 때, 전초기지를 지하 수 미터 아래에 건설하는 것이 효과적일 수 있다. 일부 시설물을 반 지하 구조로 건설할 수도 있을 것이다. 특히 전초기지에 중·단기 체류해야 하는 우주인들을 고려할 때, 전초기지의 인간 생활공간은 지하에 있는 것이 바람직하다. 최근 달 탐사 궤도선으로 인해 달 전역에 함몰 지형(Lunar Pit)이 존재함이 밝혀졌다. 이중 200여개의 함몰 지형이 용암동굴(Lava Tube) 입구로 추정되고 있다(그림 2.6). 용암동굴은 달 초기의 화산활동으로 분출한 용암이 땅속으로 흘러가면서 생긴 지형이다. 달 함몰 지형은 용암동굴이 부분적으로 붕괴되면서 생성됐다고 추정된다.

최근 세계 주요 우주국들은 달 기지 건설을 위한 대표적인 후보지로 달 용암동굴을

주목하고 있다. 달 용암동굴은 잦은 운석 충돌, 고 에너지의 자외선 복사, 미세먼지, 높은 온도 편차와 같은 달 표면의 극한환경으로부터 보호소 역할을 할 수 있다. 예를 들어, 달 표면의 평균 기온은 약 -5°C 이다. 하지만, 낮 시간의(약 354 시간) 평균 온도는 123°C 이고 123°C 까지 상승한다. 밤 기간 동안(354 시간) 평균 온도는 -153°C 이다. 용암 동굴은 두 기간 동안 약 -23°C 의 온도를 유지할 수 있을 것으로 예상된다.



[그림 2.6] Iron Distribution Map of Moon¹⁸⁾

다. 국가별 달 건설기술

달 현지 자원탐사는 달 기지 건설과 밀접한 연관이 있다. 달 현지 자원을 활용한 건설기술은 전 세계적으로 개발 초기 단계로 우리나라를 포함한 미국, 유럽연합, 중국 등에서 개발되고 있다. 달 기지 건설을 위해서는 달 모사토 제작, 달 표면 모의 환경 구현, 달 건설재료, 달 건설로봇 등의 기술이 필요하다. 달 모사토 제작 기술은 달 토양과 물리적·화학적 구성성분이 유사한 토양을 인공적으로 제작하는 기술이다. 직접 채취 및 수송이 어려운 달 토양을 인공적으로 생산함으로써, 달 탐사 로버 설계 및 성능 평가, 달 현지자원활용 기술 개발 등에 이용될 수 있다. 달 복제토는 과거 아폴로 미션을 통해 채집된 달 토양 표본을 보유하고 있는 미국의 복제토가 달 토양과 가장 유사하다. 우리나라를 포함한 달 탐사 관련국가 역시 미국의 복제토를 참조하여 제작하고 있다[19]. 달 표면 모의 환경 구현기술은 달 모사토가 포함된 진공 챔버를 이용하여 대기가 없는 달 표면의 고진공, 극고온 및 극저온 환경을 구현하는 기술이다. 우리나라는 $10^{-2}\sim 10^{-4}$ Torr의 진공도와 $-190\sim 150^{\circ}\text{C}$ 의 온도 구현이 가능한 50m^3 급 규모의 지반열진공챔버(Dirty ThermalVacumm Chamber)를 세계 최초로 구축 중이다[20]. 지반열진공챔버는 달 지표면 환경과 유사한 환경을 지구에서 미리 구현함으로써 개발된 달 건설기술의 성능을 검증하는데 활용될 수 있다.

달 건설재료 기술은 달 현지 토양을 녹여 벽돌이나 블록을 빠르게 주조하는 소결 및 테르미트 반응 기법과 시멘트와 유사한 성질을 지닌 유기재료를 달 토양과 배합하는 적층기법으로 구분되며, 미국과 유럽연합을 중심으로 건설 로봇기반의 시공 기법과 연계되어 개발되고 있다[21]. 우리나라도 열경화성 수지인 폴리에틸렌을 한국형 복제토인 KOHLS-1과 배합하고 블록을 제조하여 달에서의 시공 가능성을 확인하였다[22]. 달 건설재료 및 시공 기술은 각국에서 다양한 형태로 개발되고 있으나, 고진공, 극고온 및 극저온으로 대표되는 달 극한환경에서 실험한 결과는 존재하지 않는다. 따라서 향후 성능 개선을 위해서는 달 환경모사가 가능한 챔버에서의 검증과 개선이 필요하다. 이외에도 미국은 달 토양 굴삭, 수송,보관, 시공 등을 위한 프로토타입의 무인 건설로봇을 개발하였고, 달 유사지형에서 성능 검증을 함으로써 달 건설로봇 기술을 선도하고 있다[15]. 향후 달 탐사 및 달기지 건설은 많은 비용과 시간이 소요되므로 국제협력을 기반으로 진행될 것으로 예상된다. 우리나라의 달 건설기술 개발은 우주 강대국 보다 늦게 시작하였지만, 달 표면 모의 환경구현 기술에서 빠르게 투자가 이루어지고 있으며, 달 모사토 제작 및 건설재료 분야에서도 우주 강대국과의 기술격차를 줄이기 위한 노력이 이뤄지고 있다. 향후 국제적인 추세에 부합된 달 현지 건설기술을 개발하기 위해서는 지속적 동향 파악과 함께 개발된 달 건설기술의 연계를 위한 국제협력 및 교류가 중요하다.

라. 우주건설기술과 건설산업

전술한 달탐사 동향 및 관련 건설기술에 관한 내용을 바탕으로 건설 패러다임을 우주분야로까지 확장해 바라볼 필요가 있다. 역사적으로 인류의 흥망성쇠는 건설로부터 시작이 되었다. 과거 원시시대부터 국가의 성립, 전쟁 전후복구 등 일련의 과정에서 새로운 문명의 개척과 발굴은 건설을 통해 이루어졌다. 대한민국 역시 건설의 발전과 궤를 같이하며 발전하였다. 1965년 525만불 가량의 태국 고속도로공사를 시작으로 해외건설에 진출하였고, 1970년대 경부고속도로의 개통, 1983년 리비아 대수로 수주 및 건설, 1989년 1기 신도시 계획, 2003년 시화호 조력발전소 기공을 통한 신재생에너지 발전 등 시대별 주요 인프라건설을 통해 국가발전의 초석을 마련하였다. 그럼에도 불구하고 현재의 건설산업은 국내에서는 성장한계에 따른 위축과 밖으로는 해외건설업체와의 경쟁력 선점우위 실패에 따른 고전을 면치 못하고 있는 실정이다. 이렇듯 정체된 건설산업의 새로운 활로를 마련하고 새로운 국가발전의 신성장 동력으로 활용하기 위해 광활한 우주를 미래 개척분야로 설정하고 국토계획의 주된 내용 중 하나로 준비할 필요가 있다.

우리나라의 미래운명을 대비하여 우주탐사가 아니라 우주 개척을 위한 노력을

건설분야에서 앞장서 추진할 필요가 있으며, 대한민국 달기지 건설을 목표로 국가적인 차원에서 미래설계를 해나가야 할 때가 왔다.

참고문헌

- [1] NASA “Entering human presence into the solar system” Available from <https://www.nasa.gov/exploration/multimedia/jfa18833.html> accessed December, 10. 2017.
- [2] Ministry of Science and ICT, “3rd Basic Space Development Plan, 2018.
- [3] KARI “Korean Lunar Exploration Program” Available from https://www.kari.re.kr/kor/sub03_04_01.do accessed February, 02. 2018.
- [4] 홍성철, 신휴성, 달 기지 건설을 대비한 국내외 달 탐사 동향 분석, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 19, No. 7 pp. 144`152, 2018
- [5] A. Colapreta, R. Elphic, D. Andrews, J. Trimble, B. Bluethmann, J. Quinn, G. Chavers, “ Resource Prospector: Evaluating the ISRU Potential of the Lunar Poles,” Proc. of LEAG Workshop, Abstract #5025, November, 2016.
- [6] ISECG MCD Meeting, “International Lunar Robotic Exploration Mission Timeline,” Tele-conference, November, 2017.
- [7] G. Ju "Development Status of Domestic & Overseas Space Exploration & Associated Technology," Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences, vol. 44, no. 8, pp. 741-757, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.8.741>
- [8] J. Carpenter, “Lunar Missions in ESA’ s Reference Exploration Roadmap,” Proc. of Lunar Science for Landed Missions Workshop, SSERVI ID: LLW2018-71 January 2018.
- [9] J. Haruyama, “Lunar Landing Site Candidates Discussed In The Japan’ s Science Community,” Lunar Science for Landed Missions Workshop, SSERVI ID: LLW2018-51, January 2018.
- [10] Q. Wang, L. Xiao, “China's Lunar Exploration Programme,” Proc. of LEAG Workshop, Abstract no. 2041, November, 2016.
- [11] E. Lakdawalla, “Chang’ e 3 data: Lander Terrain Camera(TCAM)” ,

Available from <http://planetary.s3.amazonaws.com/data/change3/tcam.html> accessed May, 3, 2018.

[12] R. Sridharan, S. M. Ahmed, T. P. Das, P. Sreekatga, P. Pradeepkumar, N. Naik, G. Supriya, “Direct’ evidence for water (H₂O) in the sunlit lunar ambience from CHACE on MIP of Chandrayaan I,” *Planetary and Space Science*, vol. 58, pp. 947–950, 2010.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2010.02.013>

[13] NASA “NASA Radar Finds Ice Deposits at Moon’ s North Pole” Available from https://www.nasa.gov/mission_pages/Mini-RF/multi-media/feature_ice_like_deposits.html. accessed June, 20, 2017.

[14] G. Ju, “Korean Pathfinder Lunar Orbiter (KPLLO) Status Update,” Available from <https://www.hou.usra.edu/meetings/leag2017/presentations/tuesday/ju.pdf> accessed April, 30, 2018.

[15] G. B. Sanders, W. E. Larson, “Integration of in-situ resource utilization into lunar/Mars exploration through field analogs,” *Advances in Space Research*, vol. 47, pp.20–29, 2011.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.08.020>

[16] M. Anand, I. A. Crawford, M. Balat-Pichelin, S. Abanades. W. Y. Westrenen, G. Pöraudea, R. Jaumann, and W. Seboldt, “A brief review of chemical and mineralogical resources on the Moon and likely initial In Situ Resource Utilization (ISRU) applications,” *Planetary and Space Science*, vol. 74, pp. 42–48, 2012.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.08.012>

[17] USGS, “U.S.G.S. Planetary GIS Web Server” , Available from <https://webgis.wr.usgs.gov/index.html> accessed April, 30, 2018.

[18] NASA, “Lunar Pits Could Shelter Astronauts, Reveal Details of How 'Man in the Moon' Formed” Available from <https://www.nasa.gov/content/goddard/lunar-pits-could-shelter-astronauts-reveal-details-of-how-man-in-the-moon-formed> accessed May, 4, 2018.

[19] B. Ryu, C. Wang, I. Chang, “Development and Geotechnical Engineering

Properties of KLS-1 Lunar Simulant” , Journal of Aerospace Engineering, vol 31, no.1, pp. 04017083, 2018.

DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AS.1943-5525.0000798](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AS.1943-5525.0000798)

[20] KICT, “Development of environmental simulator and advanced construction technologies over TRL6 in extreme conditions(II)” , KICT Research Report, KICT 2017-169, 2017.

[21] S. Wilhelm, M. Curbach “Review of possible mineral materials and production techniques for a building material on the moon. Structural Concrete” , vol. 15, no. 3, pp. 419-428, 2014.

DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201300088>

[22] J. Lee, T. Lee, K. Ahn, B. Chang “Workability of Polymeric Concrete for Lunar Infrastructure," Journal of the Korean Society of Civil Engineers, vol. 37, no. 2, pp. 507-512, 2017.

DOI: <https://doi.org/10.12652/Ksce.2017.37.2.0507>