

달 기지건설을 위한 첫 단계 - 달 복제토 연구



이 태 식
한양대학교
건설환경공학과 교수
(cmts@hanyang.ac.kr)

달 기지 건설

사례 1 텍사스 크기의 행성이 시속 22,000마일의 속도로 지구를 향해 돌진하고 있다. NASA는 이 행성에 800피트의 구멍을 뚫어 핵폭탄을 삽입하여 행성을 둘로 쪼개 경로를 지구로부터 벗어나게 하기 위해 세계 최고의 유정 굴착 전문가인 해리 스탬퍼에게 소행성의 중앙에 구멍을 뚫고 오도록 작전을 부탁한다. 그러나 이들은 최고의 전문가임에도 불구하고 이제껏 한 번도 경험하지 못한 미지의 환경, 물질, 무중력 등을 경험하며 굴착에 어려움을 겪고 희생을 감수한다. 이는 영화 “아마겟돈”의 한 장면이다. 공상과학의 내용 같지만 실제로 지구는 이러한 소행성의 위협을 받고 있으며 인류의 발전을 위해 선진 우주 개발 국가들은 미지의 환경, 특히 달을 개발하기 위해 이러한 굴착 기술 등을 연구하고 있다.

사례 2 머지않은 미래 “SARANG-사랑”이라는 이름의 공간에서 수염이 덩수룩한 사람이 로봇이 지켜보는 가

운데 런닝머신을 달리고 있다. 그는 3년 계약으로 고용되어 달의 헬륨-3를 채취해 지구로 보내는 임무를 맡고 있으며 휴머노이드 로봇과 함께 최첨단 시설이 갖춰진 달 기지에서 거주하고 있다. 이는 작년에 개봉하였던 영화 “더 문(The Moon)”의 한 장면이다. 감독의 상상력으로 창조된 공상과학 영화이나 내용 자체는 꽤 설득력이 있으며 현재 많은 국가들이 목표로 하고 있는 유인달탐사 시나리오와 흡사하다.

사례 3 무한 청정에너지의 공급은 인류의 꿈이다. 무한 청정에너지의 한 대안으로 태양광 우주발전 (Space Solar Power; SSP)이 있다. 태양광 손실이 적은 우주상에 거대한 태양광 집열판을 설치하여 전기에너지를 발전하여 지구상으로 송신하는 방법이다. SSP는 현재까지 기술상의 여러가지 제약이 있으나 환경오염이 없고 활용 가능한 에너지양이 무한대이며 사용요금이 무료이기에 화석 연료의 대체제로 가장 주목을 받고 있는 방법 중 하나이다. 일본의 한 건설회사에서는 SSP 발전소를 달에 건

설하여 무한청정에너지원을 사용하고자 연구를 진행하고 있다. 달의 태양을 마주보는 면의 적도에 태양집열판을 설치하고 지구를 바라보는 면에는 모아진 에너지를 극초단파와 레이저로 변환하여 지구상의 에너지 저장고로 전송하는 발전소를 건설하고 지구상에는 이를 취합하는 시설물을 건설하는 것이다. 이렇게 취득된 무공해 태양에너지는 지구상의 자연과 인류의 삶을 풍요롭게 할 것이다. 이 프로젝트는 일본의 한 건설회사의 미래 프로젝트 중 하나로써 제안되었다. 창의적인 아이디어와 고도의 우주 기술이 조합된다면 인류와 우주의 미래를 위해 꼭 성공해야할 프로젝트다.

위의 사례들은 우리와 관계없을 수백 년 후에나 이루어질 공상과학의 한 장면 같지만 관심을 갖고 보다 구체적으로 들여다보면 꽤 설득력이 있으며 인류의 번영을 위해 필수적인 활동들이다.

특이한 것은 위의 사례들이 우주공학자, 기계공학자, 물리학자, 천체물리학자 등이 중심이 되어야 할 것 같지만 토목공학자, 특히 지반공학의 역할이 매우 중요하다는 점이다. 사례 1, 2, 3의 경우 미지의 토양에서 굴착, 채굴, 시설물의 건설이 이루어져야 한다. 이 경우 지구상의 환경과 전혀 다른 곳이기때 토양 물성치 조사 및 이에 걸맞는 시공법이 개발되어야 하며 시험을 통해 표준을 개발하

여야 한다. 현재까지 우주탐사란 항공우주 및 물리학자들의 역할이 컸지만 다른 행성에 인류가 발을 디디기 시작하면 이를 탐사하고 분석 및 시공할 수 있는 토목, 특히 지반공학자들의 역할이 클 수밖에 없다.

이번 원고를 통해 달 탐사 및 달 기지건설 연구에서 가장 기본이 되며 토목공학자의 참여가 필요한 달 복제토에 대해 소개하고자 한다.

In Situ Resource Utilization (ISRU)

현재 여러 선진 국가들에서 달, 화성, 그리고 더 깊은 우주를 탐사하기 위해 여러 계획을 활발하게 추진하고 있으며 유인탐사를 위한 달 기지건설이 이러한 계획들의 최종목표이다. 그러나 우주선으로 1kg의 자원 및 장비를 달로 보내기 위해서는 약 1억 원의 비용이 발생하기에 달의 현지자원을 활용(In Situ Resource Utilization; ISRU)하여 달에서 사용할 에너지, 자재, 물, 산소 등을 개발하는 연구가 필수적이다. 척박한 달에서 가장 풍부하게 발견할 수 있는 자원으로서는 달의 표토(regolith)가 있으며 이는 집, 도로, 다리 등을 건설하는데 쓸 수 있고 보유 원소에 따라 다양한 자원을 추출 및 가공할 수 있기에 현재 ISRU 연구의 핵심이다.

그러나 달 표토가 유용하기만 한 것은 아니다. 아폴로호의 우주인들은 달 표토에 대해 예상치 못한 어려움을 경

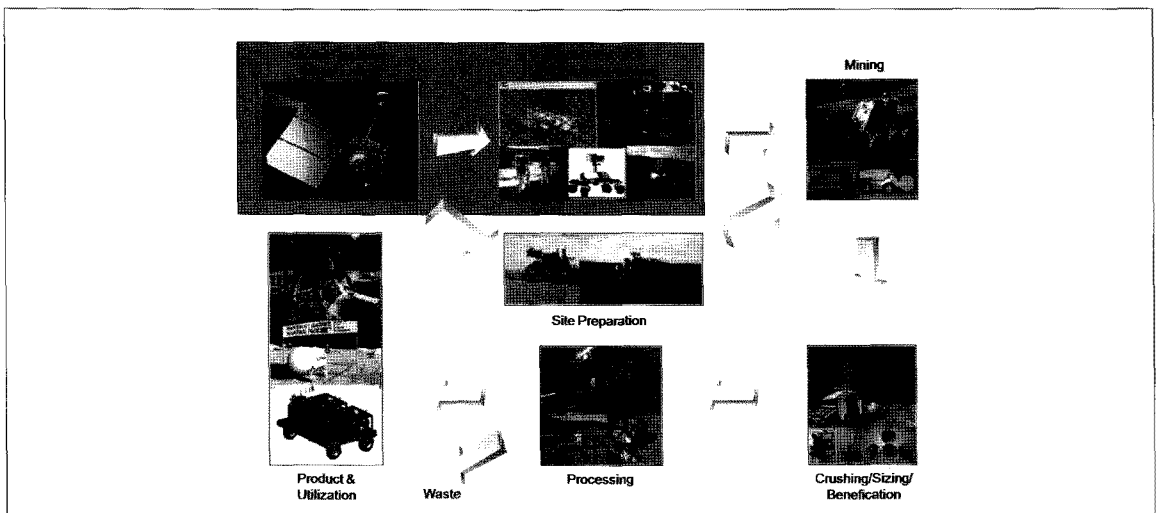


그림 1. NASA의 ISRU 프로세스

협했다. 미세입자로 구성되어 있는 달 표토는 어느 곳에서도 먼지를 발생하였으며 입자가 매우 작기에 장비의 엔진 및 여러 부품에 침투하여 고장의 원인이 되었다. 이렇듯 달의 표토는 유인달탐사를 위한 중요 자원이지만 지구상의 그것과는 다르기에 성공적인 달 기지건설을 위해서는 달 표토뿐만이 아닌 달의 극한적인 환경에서 장기간 제 기능을 발휘할 수 있는 특수한 건설장비 및 시스템이 요구된다. 달 표면에서 로버의 이동, 시추, 굴착, 파쇄, 자원의 수송 등은 달 토양을 경험하지 못했기에 예상치 못한 많은 어려움에 직면하게 될 것이다. 특히, 이러한 기술적인 문제들은 1/6g, 진공상태, 폭넓은 일교차(-230~120 °C), 길고 긴 낮과 밤과 같은 극한적인 환경에 의해 더욱 더 다루기 어려울 것이다.

달 표토 (Lunar Regolith)

달 표토라고 불리는 달의 토양은 수백만 년 동안 우주의 풍화작용(태양 에너지 노출로 인한 화학적 변형, 운석 충돌로 인한 물리적 변형)을 거친 돌, 미네랄, 그리고 유리파편들의 혼합물이다. 달 표토는 달의 표면을 수 센티미터에서부터 경우에 따라 수백 미터 깊이까지 구성한다. 달의 지질학적 특성에 따라 위치에 따른 차이는 있으나 많은 부분 일정한 물성치를 보인다. NASA의 보고에 따르면, 아폴로 유인 탐사시 다음과 같은 도전적인 문제들에 부딪혔다.

- 달 표토에서 로버의 미끄러짐
- 달 표토의 특성을 고려하지 않은 시추 장비의 한계
- 장비 내 먼지 침투로 인한 고장 및 마모
- 우주복 내 먼지 침투, 이음새에 먼지 침투로 인한 재조합의 어려움
- 우주인의 달 먼지 노출로 인한 신체적 오염

달에서의 탐사와 건설시 발생할 수 있는 대재앙적인 상황을 피하기 위해서는 달과는 환경이 다른 지구에서 모든 장비들을 시험해야 한다. 이를 위해서는 달의 환경과 유사한 특징을 가진 모의 시험 환경을 만들어 다양한 시험을 선행하여야 한다. 1/6g, 진공 등의 다양한 환경의 모사도 중요하나 ISRU 시험의 가장 핵심이 되는 달 표토의 모사가 가장 중요하다. NASA와 중국은 달 토양과 유사한

특성을 가진 달 복제토를 시험에 사용하기 위해 이에 적합한 지구상의 토양을 찾기 위해 상당한 노력을 기울였으며 이를 바탕으로 달 토양과 물리적, 화학적으로 유사한 특성을 나타내는 달 복제토를 만들고자 노력을 기울였다. 달 표토는 물이 없고 운석의 충돌로 인해 생성되었으나 지구상의 토양은 산소와 물이 많은 환경에서 풍화작용에 의해 생성되었기에 지구상의 토양으로 달 복제토를 만들기에 해결해야 할 여러과제들과 직면하게 된다.

달 복제토

2005년 NASA는 달 복제토 워크숍을 개최했다. 워크숍의 목적은 달 탐사 연구와 기술개발에 필요한 달 복제토의 요구조건을 정의하기 위해서다. 다양한 달 복제토 이용자들의 반복적인 시험에도 비교가능한 시험 값을 보장하기 위해 달 복제토 표준화, 특성의 정의, 그리고 시험 목적에 따른 요구조건 도출 등이 필요하였다. 예를 들어, 달 토양을 가공하여 자원을 추출하는 장비를 연구하는 연구자들은 달 토양과 화학적, 광물학적으로 매우 유사한 달 복제토를 필요로 하였으며 지반공학 연구자들의 경우 달 토양과 역학적 물성치가 유사한 대량의 달 복제토를 필요로 하였다. 또한 달 먼지의 인간 유해성, 장비의 마모, 먼지의 흡착 등에 대한 연구 수행자들은 달 먼지의 입자크기와 유사한 복제토를 위해 특수한 가공절차를 요하는 미세 크기

표 1. NASA 워크샵 참석자들에 의해 선정된 달 복제토 10가지 중요특성(Sibille et. al, 2006)

우선순위	달 복제토 특성	중요성
1	물성치/입자 크기	14
2	입도 분포	14
3	입자의 밀도	10
4	화학적 특성/유리성분	10
5	상대밀도	10
6	광물량비	9
7	입자 모양	9
8	화학적 세기성질	8
9	자성	8
10	압축강도	8

표 2. 현재 개발되어 있는 달 복제토

명칭	개발자	샘플 채취 지역
JSC-1	NASA Johnson Space Center	Mare
MLS-1	University of Minnesota	Mare
CAS-1	Chinese Academy of Science	Mare
MKS-1, FJS-1	Shimizu Corporation 외	Mare
KOHLs-1	Hanyang University	Mare

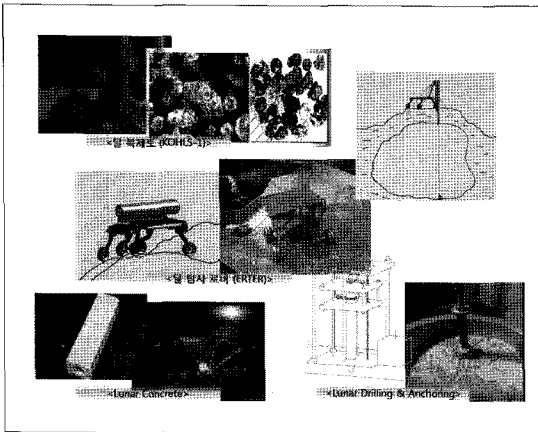


그림 2. 달 탐사 연구 현황

의 달 먼지 복제토를 요구하였다(인체 유해성 연구를 위해서는 $20\mu\text{m}$ 그리고 장비 시험을 위해서는 $50\mu\text{m}$).

워크숍을 진행하며 참가자들은 위의 표와 같이 달 복제토의 가장 중요한 특성들에 대해 도출하였으며 이외에도 마찰계수, 간극률, 화학적 반응, 정전하 특성, 표면적, 전단강도, 안식각에 대해서도 언급하였다.

달 복제토는 아폴로가 달 토양을 채취해온 이후 선진 우주개발 국가들에서 지속적인 연구개발이 이루어지고 있다. 현재 널리 인증받은 달 복제토는 약 10개로 미국, 일본, 중국, 캐나다 4개국에서 개발되었다. 최근에 본 연구진이 개발한 KOHLs-1도 해외 연구진들로부터 주목받고 있다. 이 중 미국 NASA에서 개발된 JSC-1이 가장 널리 사용된다. 표 2는 이들에 대한 간략한 소개이다.

연구현황

현재 달 복제토 KOHLs-1을 경주-포항지역의 현무암을 채취하여 개발하였다. 물리적인 특성이 달 토양과

유사한지 검증하기 위해 복제토의 내부마찰각, 점착력, 밀도 등을 측정하였고 물성치가 달 토양과 상당히 유사하게 나타났다. KOHLs-1 보다 먼저 개발된 달 복제토는 상당수 존재하지만 달 복제토를 개발한 5번째 국가라는 점과 한국의 토양을 이용하여 개발하였다는 점에서 해외 전문가들로부터 주목받고 있다.

달 복제토를 바탕으로 달과 유사한 토양환경을 모사하였으며 앵커 관입 깊이 및 앵커 직경에 따른 인발력을 측정하는 시험을 진행 중에 있다. 흥미로운 점은 연구 초기에 참고 하였던 지구상의 앵커 거동과는 다른 모습을 보인다는 점이며 이에 대한 모델링을 하고자 한다. 이는 현재 국과과제로 수행하고 있는 난지역 탐사 로버의 일환으로 로버를 통한 달탐사시 샘플 채취를 위한 시추, 용암굴 조사를 위한 탐사 장비 설치, 크레이터 내부 탐사 등에 여러모로 적용될 수 있다. 또한 달 복제토와 바인더를 혼합 가열하여 달 콘크리트를 개발하였으며 이를 바탕으로 우주선 착륙장, 달 탐사를 위한 도로, 달 기지 건설 등에 응용하는 연구를 하고 있다.

발사체 개발에 전력을 기울이고 있는 한국에서 토목공학자로 달 건설을 연구한다는 것에 많은 어려움이 있었으나 2004년부터 기울여 온 노력들이 작년년부터 결실을 맺기 시작하였다. 교육과학기술부의 National Space Laboratory의 과제 등을 연구하고 있으며, 달 기지 건설에 가장 앞선 연구를 하고 있는 NASA와 캐나다 ISRU 팀의 2010년 하와이 Field Test에 미래 협력자로 초대받아 국제적인 네트워크를 구축하여 한국의 토목기술자들이 참여할 수 있는 길을 마련하였다. 그리고 지난 3월 14일에 있었던 ISRU 관련하여 가장 큰 행사인 2010 ASCE Earth & Space Conference에서 한양대 장병철 박사과정 학생이 논문 "달 앵커링 시스템"을 발표하여 최우수 발표상을 Blaine D. Leonard 미국토목학회(ASCE) 회장에게 받았다.

이렇듯 달기지 건설은 우주에 대한 관심과 창의성 그리고 이를 실현하고자 하는 노력과 예상이 있다면 우리의 기술로 이뤄질 수 있다.

대한토목학회에는 극한우주건설위원회, 철도학회에는 우주철도위원회, 공학기술단체연합회에서도 우주탐사위원회를 설치하였으니 관심 있는 분들의 많은 참여를 바란다.