

달기지 건설을 위한 달 현지 자원 활용 기술

글 신휴성 / 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 선임연구위원
전화 02-910-0651 E-mail hyushin@kict.re.kr



01 서론

산업화가 시작된 이래로 인류는 더 많은 자원을 필요로 하고 있으며, 이는 문명이 고도화될수록 심화되고 있다. 그러나 지구의 자원 매장량에는 한계가 있고, 지속적인 자원활용은 향후 자원고갈을 야기할 수 있으며, 희토류와 같이 최첨단 산업분야에서 필수적으로 활용되지만 한정된 지역에서 채취되는 자원의 경우, 이를 타국이 무기화 할 수 있다. 더불어 희토류 및 몇몇 자원들은 채굴과정에서 주변 환경을 심각하게 오염시키기도 한다. 이에 여러 대체 자원을 개발하고는 있지만, 대체 자원도 고갈 문제에서 자유로울 수 없다. 하지만 우주 전체에는 무한한 자원이 존재하고 이를 채굴하고 활용할 수 있다면, 자원고갈 및 분쟁 문제의 근본적인 해결점을 찾을 수 있다.

지구에서 가장 가까운 천체인 달에는 헬륨-3, 희토류, 금속 등의 자원이 풍부하게 발견된다. 헬륨-3는 핵융합, 초유체 극저온, 의료 목적 영상기기 등에 활용되며 미래자원으로서 각광받고 있다. 희토류는 원자번호 57번 La부터 71번 Lu와 Sc, Y 등을 의미하며 다양한 분야에서 활발하게 사용 중이다. 이에 월면토 및 월석으로부터 금속자원을 추출하기 위한 연구도 진행되고 있다. 또한, 달은 지구와 거리가 약 384,400 km으로 비교적 가까우며 대기가 거의 없고 중력은 지구의 1/6 수준으로 발사체가 이륙하기에 매우 유리하다. 따라서, 향후 화성, 소행성 등 태양계 내 여러 천체를 개발하기 위한 전초기지로 알맞다.

이러한 달의 자원을 채굴하고 다시 지구로 반환하기 위해서는 장비 관리 및 운용을 위해 상주하는 인류가 필요하다. 하지만 달의 환경은 초극한 환경으로 대기가 없어 호흡에 필요한 산소와 대기압이 거의 존재하지 않고, 태양으로부터 오는 방사선 및 자외선을 막아줄 자기장도 존재하지 않는 등 인류활동에 제약이 있다. 따라서 달에서 거주하는 우주인이 생활할 수 있는 거주공간 건설이 필수적이며, 방사선 및 운석 충돌을 방호해줄 방호시설이 필요하다. 더불어 상주하는 인류가 필요로 하는 자원을 공급하여야 한다. 예를 들어 인류가 생존하기 위해서는 물과 공기가 필요하고, 식량을 지속적으로 공급받아야 한다. 또한, 인류의 활동에는 문명을 존속시키기 위한 금속 등의 자원을 필요로 한다. 하지만 지구에서 달로 물자를 운송하는 것은 많은 비용을 소모하여 실행에는 어려움이 있다.

따라서, 지속적인 달 탐사 및 자원 채굴 활동을 지원하기 위해서는 달 현지에서 필요한 자원을 조달할 필요가 있다. 이를 현지자원활용(In-Situ Resources Utilization, ISRU) 기술이라고 한다. 달 현지자원활용 기술은 달 탐사 및 자원 채굴뿐만 아니라 향후 우주 식민지를 건설하기 위한 초석이다. 따라서 향후 진행될 화성 탐사 및 인류 이주를 위해서도 연구되고 있다. 특히, 건설재료는 매우 무거워 반드시 현지자원활용 기술이 필요하다.

인류의 문명이 태동할 당시부터 흙은 유용한 건설재료였으며, 이로부터 건설기술이 발달해왔다. 달에도 당연하게도 월면토가 매우 풍부하게 존재하고, 따라서 이를 건설재료로 활용하고자 하는 연구가 활발하

게 진행되고 있다. 또한, 자원을 추출하여 활용하는 기술도 연구되고 있다. 인류는 지속적인 달 탐사 미션을 통하여 달 극지방에 물의 존재를 확인하였다. 물의 존재는 현지에서 인류 활동을 위하여 지속적으로 물 뿐만 아니라 산소와 연료에 필요한 수소를 추출할 수 있음을 의미한다. 이에 2021년 국제 우주 탐사 조정 그룹(International Space Exploration Coordination Group, ISECG)에서는 ISRU Gap assessment report 발간하여 달 탐사를 위한 각 국가 및 기관별 현지자원활용 기술현황을 소개하고 기술발전을 독려하였다. 본 논문에서는 이러한 달 현지자원활용 기술 현황 및 향후 과제에 대하여 서술하였다.

또한, 행성 현지자료 활용 인프라 건설 기술은 우주에서 건축물 및 인프라를 건설할 때 필요한 원자재를 현지에서 채취 및 가공하여 우주기지 건설에 활용하는 기술로, 가용한 에너지와 환경조건 하에서 저전력 마이크로웨이브를 블록형태의 건설재료를 소결해 내는 기술을 개발하고 있다. 행성 지상 건설공간 정보화 기술을 통해서는 우주에서 건축물을 건설할 때 필요한 지상의 지형정보를 실시간으로 모델링하고, 무인 무반려 시추장비 개발을 통해 달 지하의 지반특성을 정보화 하는 기술 개발도 진행하고 있다. 본 글에서는 상기한 기술개발 내용에 대해 구체적으로 소개해 보고자 한다.

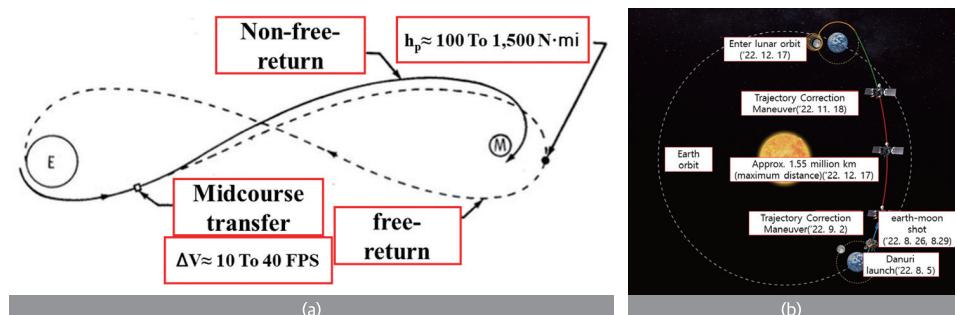
02 달 지반 성분

2.1 달 환경 조건

달은 지구와 거리가 약 384,400 km로 비교적 가깝다. 따라서, 가장 빠른 거리로 갈 경우 2-3일 정도 걸려서 달에 도달할 수 있으며, 실제로 Apollo 미션들이 해당 경로로 미션을 수행하였다[그림 1(a)]. 그러나 해당 경로는 많은 에너지를 필요로 한다. 반면 다누리의 경우, L1 라그랑주 점을 통하여 달 궤도에 진입할 예정이며, 해당 궤적은 연료 소모를 최소화하여 다누리의 임무기간을 늘려줄 것으로 예상되지만 달에 도달하기까지 무려 4.5개월이 걸린다[그림 1(b)].

달의 중력은 지구의 1/6 수준으로 낮고 대기압이 강한 지구와는 다르게 고진공 환경으로 기압이 0.3 nPa에 불과하여 인류의 필수 생존조건인 대기가 거의 존재하지 않는다. 또한, 대기가 거의 존재하지 않으므로 대부분의 운석이 대기진입 중에 소멸하는 지구환경과 달리 달에서는 미세한 운석도 막지 못해 지표면에 강하게 충돌한다. 대기와 더불어 자기장이 없으므로, 태양으로부터 오는 방사능 물질 및 방사선에 그대로 행성 표면이 노출된다. 또한, 대기의 부재로 인해 태양열을 순환시킬 수 없어 달 표면의 일교차는 200°C 이상으로 매우 크고, 운석충돌에 의해 부서진 월면토는 풍화작용이 없어 달의 먼지는 매우 미세하고 날카로우며 태양풍에 의해 월면토가 대전되어 정전기를 띠기 때문에 쉽게 운용장비에 달라붙을 수 있다. 이런 달의 가혹한 조건은 달에서 활용하는 장비 및 우주인에게 피해를 줄 수 있다. 따라서, 인류가 달

[그림 1] The trajectories of (a) Apollo 11 and (b) Korean pathfinder lunar orbiter



에서 장기거주 및 자원채굴을 수행하기 위해서는 달의 극한환경으로부터 우주인과 장비를 보호해줄 방호벽과 지구 환경을 모사한 거주공간이 필요하다.

2.2 달 지반 특성

달의 표면은 월면토 불리는 행성표토(Regolith)로 덮여있다. 여기서 행성표토란 행성표면의 부드러운 토양을 의미하며, 달의 경우 미세운석 충돌로 인해 잘게 부수어져 표토가 생성되었으며, 지구와 달리 물리적 풍화현상을 겪지 않아 매우 날카로운 입자 형상을 유지하고 있다. 더불어 태양풍이 대기의 방해 없이 달 표면에 도달하여 월면토를 대전시키고 이로 인해 탐사장비에 월면토가 접착되어 장비를 마모시키고 열화시킬 수 있다.

[그림 2] The grain size distribution of sample 15290 returned by Apollo 15 mission

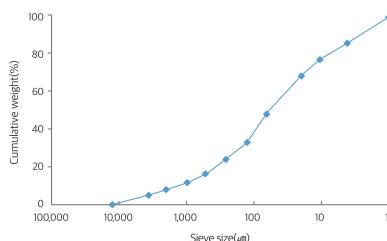


그림 2는 Apollo 15 미션에서 해들리 열구로부터 가져온 15290 월면토 샘플에 대한 입경분포이다. 월면토는 미세한 운석충돌로 인해 잘게 쪼개진 형태로 존재하며, 평균 입경이 $50\sim160 \mu\text{m}$ 로 매우 곱고 입경이 작다. 월면토의 성분은 그 기원이 달의 저지대(Mare)와 고원지대(Highland)에 따라 다르고, 저지대의 표토는 다시 티타늄의 함량에 따라 High-Ti Mare와 Low-Ti Mare로 나뉜다. 표 1은 이 세 구분에 따른 월면토의 성분비를 나타냈

다(National Aeronautics and Space Administration, 2012). 저지대와 고원지대의 지반성분의 가장 큰 차이점은 사장석(Anorthite, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)으로 인한 Al_2O_3 의 성분량이다. 따라서 Al_2O_3 의 함량이 월면토의 기원 지표로서 제안되었다. 또한, 고원지대의 표토 성분은 저지대에 비해 철의 함량이 적다.

[표 1] The main compositions of lunar regolith(NASA, 2012)

	Missions	Chemical Compositions (wt. %)									
		SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5
Low-Ti Mare	Apollo 12	41.0	2.6	16.0	16.0	0.23	11.0	11.5	0.54	0.39	-
Highland	Apollo 16	44.7	0.54	27.1	5.1	0.06	5.9	16.0	0.45	0.13	0.1
High-Ti Mare	Apollo 15	41.5	7.58	13.2	15.8	0.2	7.8	12.1	0.4	0.1	0.1

03 달 현지 자원 활용 기술 및 향후 과제

3.1 자원 추출

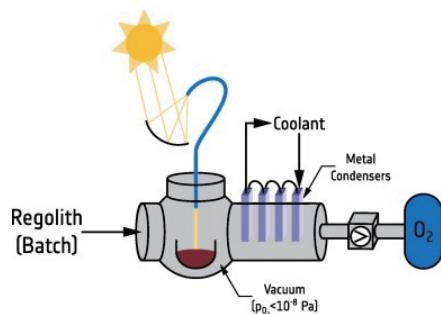
물과 산소는 인류가 생존하는데 필수적이며 수소는 추진체의 연료로 사용 가능하다. 그렇기 때문에 이들을 확보하는 것은 매우 중요하다. 현재 달 기지 건설에 최우선시 되는 후보 장소는 달의 극지방과 영구 음영지역이다. 이곳에는 물이 얼음 및 수산화기($-\text{OH}$)형태로 풍부하게 존재하여 우주인들의 활동지원에 큰 이점이 있다. 현재 달에서 물을 추출하는 방법으로는 물이 포함된 광석을 가열하여 기화된 물을 포집하는 방법과 산화금속에 수소를 가해 물을 화학적으로 제조하는 방법이 논의되고 있다. 가열법은 얼음을 포집하기 위한 온도가 150°C 정도이지만, 수산화기 형태로 분자에 결합된 물을 포집하기 위해서는 약 250°C 가 필요하다. 이 과정에서 많은 불순물들이 발생하기 때문에 이에 대한 정제가 필요하다.

산소 및 수소는 물로부터 전기분해를 통해 쉽게 추출할 수 있다. 이를 활용하여 산소 및 수소를 얻는데 필

요한 에너지는 6.0 ~ 9.0 kWh/kg으로 예상된다. 이 방법은 쉽고 편리하지만 채굴 및 처리과정이 복잡한 단점이 있다. 반응성 가스(수소, 메탄, 황산 등)를 활용하여 환원 및 치환을 통해 산소를 추출하는 방법이 있다. 특히, 일메나이트(FeTiO_3)에 수소를 기하여 물을 얻고 이를 전기분해 하는 방법이 많은 연구가 이루어지고 있다. 수소 환원법은 금속(Fe, TiO_2)을 동시에 얻을 수 있다는 장점이 있지만 효율이 일메나이트 함량에 따라 크게 좌우되고 원자료에 황이 존재할 경우 황화수소로 용출되어 정제과정이 추가로 필요하다는 단점이 존재한다. 탄소환원법은 메탄을 활용하여 각종 광석에서 산화규소 및 산화철 등을 환원시켜 산소를 추출하는 방법으로 대부분의 월석 및 월면토로부터 산소와 수소를 추출할 수 있지만, 약 1,625°C의 높은 온도를 필요로 한다. 황산환원법은 일메나이트에 뜨거운 황산을 반응시키고 이를 물로 희석시킨 후 여과하고 전기 분해하여 철과 산소를 얻을 수 있으나, 공정이 매우 복잡하고 산소 수율이 낮다. 마지막으로 증기상 열분해법이 있다[그림 3]. 이 기술은 진공에서 표토를 매우 높은 온도로 가열(약 2,500°C)하여 기화와 동시에 산화금속에서 산소가 분리되는 현상을 이용한 방법이다. 이 기술은 산소를 얻기 위해 오로지 에너지와 월면토만 필요하고 동시에 금속을 생산할 수 있는 장점이 있지만, 산소를 생산하기 위한 에너지가 약 40.0 kWh/kg으로 높다는 단점이 있다.

달에서 산소를 추출하는 기술은 많이 진보되어, 2021년 미항공우주국에서 태양열을 활용하여 연간 약

[그림 3] Schematics of the vapor phase pyrolysis from lunar regolith



7 tons 이상을 생산할 수 있는 구체적인 방안이 제시된 바 있다. 하지만 지속가능한 탐사를 위해서는 연간 10 tons의 산소가 필요하며, 제시된 방안은 이상적인 상황을 가정하였기에 목표에는 도달하지 못했다. 이 외에도 현재 필요 자원에 대한 다양한 추출 및 생산공정이 연구되고 있으나, 아직 필요한 효율에는 도달하지 못하였으며, 계속해서 다양한 방안이 제시되고 있다. 또한, 환원법의 경우 공정에 필요한 원소들의 조달방법에 대한 구체적인 방안이 필요하다.

3.2 건설 재료

앞에서 소개한 현지자원활용 기술을 구현하는 것만이 아니라 향후 달의 자원을 채굴하여 지구로 반환하기 위해서는 장비들을 보호해줄 방호벽이 존재해야 하고 운용하기 위한 인원이 거주할 수 있는 공간이 필요하다. 따라서, 이를 위한 전초기지 건설이 필요하다. 달로 지구의 물질을 수송하기 위해서는 많은 비용이 소모된다. 건설을 위한 자재들은 매우 무겁기 때문에 지구에서 건설자재를 옮겨 달에 설치하는 것은 불가능에 가깝다. 따라서, 현지자원을 활용하여 달 기지를 건설하는 기술이 필요하다.

칼슘과 알루미늄은 월석 및 월면토에도 풍부하다. 따라서 월석 및 월면토를 활용하여 시멘트 조정물을 추출하고 콘크리트를 제조하는 아이디어 이미 오래 전부터 제시되어 왔다. 해당 방법은 현재 지구에서 사용 중인 콘크리트와 비슷하여 강도가 높지만 물의 증발을 막기 위한 가압 챔버가 필요하고 높은 에너지를 필요로 한다는 단점이 있다.

낮은 황의 녹는점을 활용하여 황 콘크리트를 제조하는 방법이 제안되어져 현재까지도 연구가 이루어지고 있다. 이는 월면토와 황을 섞고 가열하여 황이 녹도록 유도한 후, 이를 바인더로 활용하는 방법이다.

그러나 황 콘크리트 역시 진공에서 제조가 불가능하므로 가압 챔버가 별도로 필요하다. 그리고 제조된 황 콘크리트는 진공에 노출되면 시간이 지날수록 황이 기화되어 빠져나가며 질량손실 및 기공생성의 문제가 발생한다.

고분자 폴리머를 바인더로 월면토와 섞어 제조하는 고분자 콘크리트도 지속적인 연구가 이루어지고 있다. 이는 제조가 간단하고 방사선 차폐능이 뛰어나며 인장강도가 높다. 그러나 달 현지에서 폴리머를 제조하는 것은 불가능하므로 지구에서 달로 폴리머를 수송해야 하는 문제가 발생한다.

하지만 이런 다양한 달 현지자원활용 건설기술에도 불구하고 대부분의 기술들이 물질의 승화를 막기 위해 가압챔버가 필요하거나 일부 물질은 지구로부터 옮겨야 하는 단점이 있어, 달에서 바로 적용하기 힘들다. 이에 대한 대안으로 월면토를 소결하여 건설재료를 제조하는 방법이 있다. 소결은 진공에서는 액상의 물질이 존재하기 극히 어렵기 때문에 고체상을 유지하며 재료를 고형화 시키는 방안이다. 따라서, 물질의 승화를 방지할 수 있어 가압챔버가 필요 없으며 월면토만을 활용하기 때문에 지구로부터 건설재료를 수송할 필요가 없다. 이 소결기술 구현을 위해 다양한 방법이 제시되고 있는데, 방사열/태양열/스파크 플라즈마/레이저/마이크로파 소결 기술 등이 연구되고 있다.

방사열을 활용한 소결(Conventional Sintering)은 방사열로(Furnace)에서 소결체를 제작하는 방법으로 온도 변화 속도 조절이 쉽고 공정이 간단한 장점이 있는 반면 많은 에너지를 필요로 한다. 태양열 소결은 태양열을 모아 그 에너지로 월면토를 소결하는 기술로 3D 프린팅 방식을 활용한다. 이 기술은 형상제조가 자유롭고 플랫폼이 충분할 경우 대규모 건설에도 쉽게 활용이 가능하지만, 현재 이 기술로 제조된 블록의 강도가 약하다.

[표 2] Lunar development technology comparison

Nations	Technologies	TRL Class	Notes	Details
USA	Lunar explorer	TRL 9	Apollo/Artemis Missions	Lunar manned exploration
	Resources extraction	TRL 5~6	Sanders, 2018; Schlüter and Cowley, 2020; Linne et al., 2021.	Production of 10 tons of oxygen per year Demonstration of ISRU with 6 m diameter chamber for Mars
	Construction material	TRL 5	Clinton Jr, 2022	Demonstration of construction material from lunar soil in a zero-gravity environment at ISS
China	Lunar explorer	TRL 9	Chang'E Missions	Robor exploration Lunar soil return
	Resources extraction	TRL 5	Shi et al., 2022	Extraction of oxygen from lunar soil through melt electrolysis of CaCl ₂ in an electrolytic bath
	Construction material	TRL 3	Ding et al., 2018	Laser sintering with 3D printer
Europe	Lunar explorer	-	-	-
	Resources extraction	TRL 4	ISECG, 2021	Research is in progress to extract oxygen and metals from lunar soil
	Construction material	TRL 5	Fateri et al., 2019	Solar sintering with 3D-printer
Korea	Lunar explorer	-	Danuri Mission	Lunar orbital exploration
	Resources extraction	TRL 2	김정수 등, 2013	Research on methane/oxygen binary liquid propellants
	Construction material	TRL 4	Kim et al., 2021	Microwave sintering
Russia	Lunar explorer	TRL 9	LUNA Missions	Lunar exploration
	Resources extraction	-	-	-
	Construction material	-	-	-

04 기술 현황

스파크 플라즈마 소결 기술은 강력한 전력을 바탕으로 월면토에 스파크 플라즈마를 발생시켜 소결체를 얻는 방식이다. 이 기술은 높은 강도의 소결체를 얻을 수 있지만, 아직 소결체의 크기가 매우 작고 크기를 키우기가 어려워 보다 많은 연구가 필요하다. 레이저 소결은 태양열 소결과 비슷하게 3D 프린팅 방식으로 건설재료를 제조하지만, 에너지원이 레이저인 기술이다. 마이크로파 소결 기술은 마이크로파를 활용하여 소결체를 얻는 기술로 제조된 소결체의 강도가 높고 제조가 간편하다는 장점이 있지만, 소결체의 특정 지점에서 온도가 급상승하여 균질성을 저해하는 열폭주(Thermal runaway)를 제어할 필요가 있다.

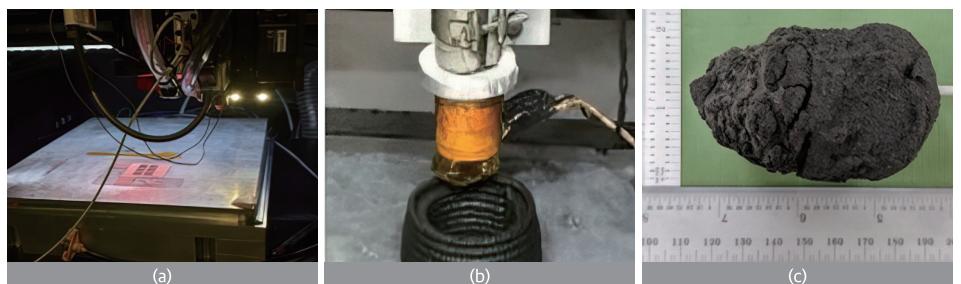
다른 한편으로, 이러한 건설재료의 경우, 지구에서 활용하는 것처럼 강도를 중점적으로 평가하는 것보다 방사능 차폐, 운석충돌 보호 등 다양한 평가지표를 통해 연구가 수행되어야 한다.

4.1 국제 현황

표 2는 현재 각 선진국의 우주개발 및 ISRU 현황을 나타냈다. 미항공우주국은 향후 인류를 달에 거주시키고 달에 대한 개발을 실시하고자 현재 아르테미스 계획을 활발히 추진 중이다. 이를 위해 1990년대에 화성에서 사용할 현지자원활용 산소생산 기술을 지구에서 시연하였으며, 2010년대에 수소 및 메탄을 활용한 환원법을 통해 산소 현지 생산 기술이 TRL 5에 도달하였다.

물과 수소를 생산할 수 있는 시스템도 이미 2018년에 TRL 5에 도달한 것으로 평가되었으며, 연간 10톤 분량의 산소와 물을 생산할 수 있는 월면 공장에 대한 구상을 내놓아 현재는 TRL 6에 도달한 것으로 판단된다. 또한, 직경 6 m의 화성 환경 모사 챔버를 제작하여 현지자원활용 기술을 실증하고 있다.

[그림 4] (a) Lase sintering machine, (b) Regolith/Polymer 3D printer, and (c) Block synthesized by microwave sintering



건설기술에 있어서는 이미 국제우주정거장(International Space Station; ISS)에서 인공월면토를 활용하여 각종 소결기술을 통한 건설재료제조 기술과 폴리머 바인더와 월면토를 섞어 건설재료를 제조하는 기술을 활발히 연구 중이다[그림 4(a,b)]. 특히, 소결 기술을 활발히 연구 중이며, 마이크로파 소결을 통해 건설재료를 생산하는 기술을 적극적으로 연구 중이며[그림 4(c)], 충분히 건설재료로 활용 가능한 큰 사이즈의 소결체를 제조하기 위하여 노력 중이다. 이와 별개로 NASA는 인류의 거주공간 및 장비 격납고/창고를 건설하기 위한 개념설계 방안을 지속적으로 연구 중에 있으며, 시공방안에 대해서도 고민 중에 있다 [그림 5(a)].

중국은 2004년 Chang'E 프로젝트를 발족하여 2030년까지 달에 기지를 건설할 예정이다(Hong and Shin, 2018). 이에 레이저 소결기술을 활용한 3D 프린팅 방식이 연구되고 있으며, 제조된 건설블록을 계획대로 로봇팔이 달에서 적조하는 기술을 활발하게 연구 중에 있다. 더불어 Chang'E-5 미션에서 CaCl_2

[그림 5] Construction method on the moon (a) using laser sintering technology and (b) with sintered blocks



를 전해조에서 용융 전기분해법을 통해 월면토로부터 산소를 직접 분리해내는데 성공하였다. Chang'E-5에서 시행된 산소추출법은 CaCl_2 전해조에서 월면토를 용융 전기분해하여 CO_2 를 생산한 뒤, 이를 다시 전기분해하여 산소를 얻었다. 또한, 차후 미션

을 통해 달의 극지에 착륙하여 극지 월면토 샘플의 구성성분을 분석할 예정이다.

유럽에서는 2016년에 달과 화성에 기지를 세우고 우주개발을 위한 중간기지로서 활용할 예정이며, 유럽 우주국의 PROSPECT 프로젝트를 통해 달 극지에서 월면토를 채취하고 분석할 예정이며 이를 통해 극지 자원을 확인할 것이다. 동시에 수소 환원 반응을 실증할 예정이다. 더불어 ISRU-DM 프로젝트를 통해 월면토로부터 산소 및 금속을 추출하기 위한 연구가 진행되고 있다. 인류가 거주할 수 있는 기지를 건설하기 위해 태양열 소결 기술을 활용한 건설재료제조 기술을 활발하게 연구 중이며, 240 mm×120 mm×50 mm 크기의 블록제조에 성공하였으며 그 외에도 다양한 형상의 블록을 제조하는데 성공하는 고무적인 성과를 냈다. 또한, 만들어진 월면토 소결블록을 활용하여 달 기지를 짓기 위한 공법 연구도 진행 중이다[그림 5(b)].

또 하나의 전통적인 우주기술 강국인 러시아도 LUNA 프로젝트를 통해 착륙선과 궤도선을 달에 보내고 여러 탐사 기술을 실증할 예정이다. 더불어 유럽우주국의 PROSPECT 프로젝트와 연계하여 LUNA 27호를 달 극지에 보내 향후 인류 거주를 위한 자원탐사를 시행할 계획이다.

4.2 국내 현황

2022년 나로호 발사가 성공하고, 달 탐사 궤도선 다누리를 달로 쏘아 보냈다. 이 다누리에는 달 착륙지 후보 탐색을 위한 고해상도 카메라, 우주인터넷 시험장비, 달 표면 자원 탐사를 위한 감마선 분광기, 달의 생성 원인 연구를 위한 자기장 측정기 등 다양한 측정장비가 장착되어 있다. 하지만 여전히 우리나라는 우주개발경쟁의 후발주자로서 많은 우주 관련 기술 연구 및 그 기반이 부족하다. 또한, 현재 대부분의 연구 인력은 우주 발사체 및 달 탐사선 개발에 치우쳐 있다. 특히 산업계에서는 아직 이익 창출이 어려운, 달 자원 활용 투자에 소극적이다. 하지만 최근 한화 에어로스페이스가 6개의 국내 정부출연연구원과 협약을 맺고 현지자원활용을 위한 플랜트 구축을 위한 현지자원활용 기술에 대한 연구를 수행 중이다.

학계에서도 ISRU에 대한 연구가 진행되고 있다. 한양대학교에서는 폴리머 바인더에 월면토를 혼입한 건설재료를 이용하여 3D 프린팅 기술로 달 기지 건설에 관한 연구를 진행하고 있다. 부경대학교에서는 ISRU로 생산 가능한 메탄/산소 이원액체추진제에 관한 연구를 수행 중이다.

한국지질자원연구원은 우주자원개발센터를 신설하여 NASA와 협력을 하고 있으며, 2022년 발사한 달 궤도선 다누리에는 한국지질자원연구원에서 개발한 감마선 분광기(KPLO Gamma-Ray Spectrometer)가 장비되어 있다. 감마선 분광기는 달의 원소 및 자원 분포를 확인하는 임무를 갖고 있다. 이는 달 탐사의 1차 목표가 자원 채굴이므로, 다누리로부터 얻은 정보는 달 착륙지 선정, 달 개발 우선순위 등에 유용하게 활용 가능하다. 더불어 지오페이지를 활용한 달 건설재료에 대한 연구도 진행하고 있다. 또한, 한국항공

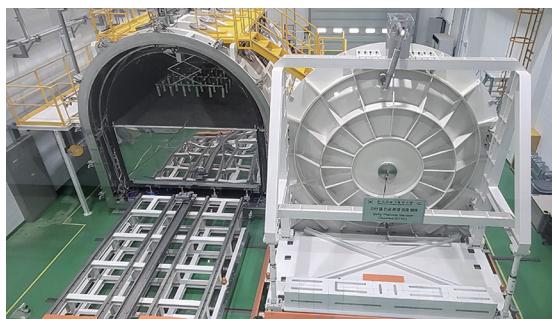
우주연구원에서 개발한 고해상도 카메라 LUTI(Lunar Terrain Imager)가 다누리에 장착되어 착륙 후보지 를 촬영할 예정이며, 수전해 산소발생기, 플라즈마 공기정화 장치 등, 우주인의 생명 유지장치에 관한 기 초적인 연구를 수행하고 있다.

한국건설기술연구원에서는 달 탐사를 위한 전초기지 건설을 위해 지반탐사 및 건설에 관한 연구가 진행 중이다. 특히, 지반탐사 미션을 수행하기 위하여 대량생산 가능한 인공월면토인 KLS-1[그림 6(a)]을 개발하여 공학적 목적으로 활용하고 있고, 50m³ 크기로 세계최대 크기이며 유일하게 월면토와 같은 미세 입자를 넣고 가동할 수 있어 달과 유사한 환경을 모사할 수 있도록 설계된 대형 진공챔버(Dirty Thermal Vacuum Chamber)를 구축하여 운용 중이다[그림 7]. 지반탐사는 자원의 분포를 확인하고 채굴하는데 매우 중요한 정보를 제공한다. 또한, 한국건설기술연구원은 KLS-1을 이용하여 월면토와 마이크로파 소결

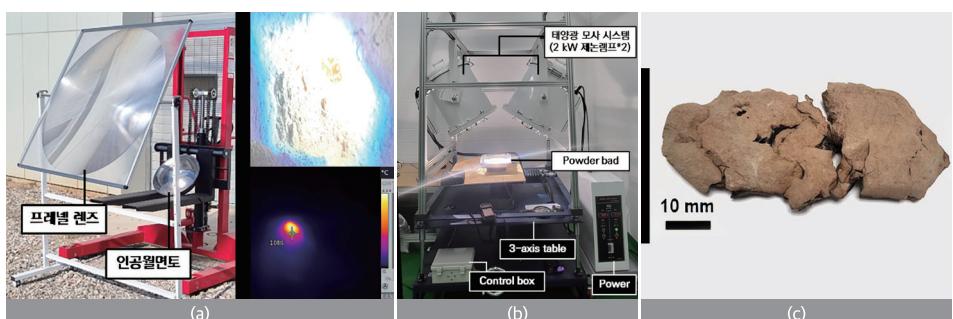
[그림 6] (a) KLS-1(Ryu et al., 2018) and (b) Blocks synthesized by microwave sintering from KLS-1



[그림 7] Dirty thermal vacuum chamber in Korea institute of civil and building technology



[그림 8] (a) Solar sintering with the Solar light, (b) The artificial sunlight sintering machine, and (c) Sintered material from KLS-1 by Solar sintering



기술을 활용한 건설재료 제조기술을 개발 중에 있다[그림 6(b)]. 더불어 태양열 소결기술 기반의 소결체 제작에 관한 연구도 진행 중이다[그림 8]. 한국건설기술연구원에서 개발 중인 시추장비는 모든 지반을 한 종의 비트로 채굴 가능하도록 제조되었으며, 저반력으로 채굴이 가능하도록 하여 달 지반탐사에 적합하게 개발되고 있다. 마이크로파를 활용한 건설재료 제조 기술은 현재 일반 콘크리트 강도(약 24 MPa 이상)를 확보하였으며, 기존에 국제적으로 연구되어 온 마이크로파로 제조한 소결체 중 가장 균질하게 최대크기로 제조할 수 있는 기술을 갖추었다. 태양열 소결 기술에서 자연광을 활용한 소결체 획득에 성공하였으

나, 대기현상으로 인해 균일한 에너지 조사가 어려워 인공태양광 시스템 및 3D 프린터를 구축하여 실험을 진행하고 있다. 또한, 한국건설기술연구원과 한국과학기술원이 협력하여 달에 거주공간을 구축하기 위한 연구가 진행 중에 있다.

본 고에서는 달에서 인류활동을 지원하기 위한 현지자원활용 기술에 대하여 서술하였다. 달에는 물을 포함한 많은 자원이 존재하여 현지자원활용 기술을 통해 인류를 상주시키는 것이 가능하다. 또한, 현재까지 기술적 진보를 통하여 현지자원활용 기술의 기초적인 기반을 갖추었다. 물, 산소, 수소, 금속 등을 달 지반에서 추출하기 위한 기술들이 제시되고 실험에 성공하였으며, 건설 기술 역시 막대한 자재를 지구로부터 수송하지 않고 달 기지를 건설하기 위한 방법이 제안되었다. 동시에 미세중력 하에서 식물 재배에도 성공했다. 하지만 자원 추출기술은 여전히 목표하는 효율에 도달하지 못하였고, 건설 기술 역시 대규모로 건설 자재를 만들어내지는 못하고 있다. 따라서 향후 자원 추출기술의 효율을 높이고 건설자재를 대규모로 제작하거나 건설 자체를 3D 프린팅 기술을 통해 수행하는 방법이 연구될 것으로 보인다.

또한, 현지자원활용 기술은 달에서뿐 아니라 향후 개발하게 될 화성 등의 다양한 행성에서도 유용하게 활용될 기술이다. 따라서, 향후 달 기지를 전초기지로 하여 시작될 우주개발 경쟁에 있어 필수적으로 선점해야 할 기술이므로, 정부 차원에서도 활발한 지원이 필요할 것으로 보인다.

※ 참고문헌

01. Hong, S. and Shin, H.S. (2018), Trend Analysis of Lunar Exploration Missions for Lunar Base Construction, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 19, No. 7, pp. 144-152.
02. ISECG (2021), In-Situ Resource Utilization Gap Assessment Report, research report, USA, pp. 1-124.
03. Ju, G. (2016), Development Status of Domestic & Overseas Space Exploration & Associated Technology, Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 44, No. 8, pp. 741-757.
04. Kim, J.S., Jung, H., and Kim, J.H. (2013), State of the Art in the Development of Methane/Oxygen Liquid-bipropellant Rocket Engine, Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 17, No. 6, pp. 120-130.
05. Leonard David (2016), Moon village' planned by European Space Agency, Space.com.
06. Li, C., Wang, C., Wei, Y., and Lin, Y. (2019), China's present and future lunar exploration program, Science, Vol. 365, No. 6450, pp. 238-239.
07. Linne, D.L., Sanders, G.B., Starr, S.O., Eisenman, D.J., Suzuki, N.H., Anderson, M.S., O'Malley, T.F., and Araghi, K.R. (2017), Overview of NASA technology development for In-Situ resource utilization (ISRU), Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC, pp. 10372-10381.
08. National Aeronautics and Space Administration (2012), The Lunar Sample Compendium, National Aeronautics and Space Administration, Available at: <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/lsc/>.
09. NASA Public Affairs Office. (1969), Apollo 11 Press Kit.
10. Ryu, B.H. (2022b), Research Trend and Engineering Approach on Extraterrestrial Soil Sampling Technology, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 23, No. 7, pp. 11-20.
11. Sanders, G.B. (2018), Overview of past lunar in situ resource utilization (ISRU) development by NASA, in European Space Agency (ESA) Workshop: Towards the Use of Lunar Resources.
12. Schlüter, L. and Cowley, A. (2020), Review of techniques for In-Situ oxygen extraction on the moon, Planetary and Space Science, Vol. 181, No. April 2019, pp. 104753.
13. 한국건설기술연구원 (2021), 극한건설 환경구현 인프라 및 TRL6 이상급 극한건설 핵심기술 개발 (VI), 건기연 21-074, 연구보고서.