

# 달 현지자원활용(In-Situ Resources Utilization)을 위한 채굴 기술의 현황

유병현

한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부

## Current Status of Mining Technology for Lunar In-Situ Resources Utilization

Byung Hyun Ryu

Department of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engineering and  
Building Technology (KICT)

**요약** 미국을 비롯한 세계 우주 개발 선진국은 달 뿐만 아니라 그 밖의 행성 탐사를 계획하고 있으며, 2020년 이후에는 유인 탐사를 전제로 한 달 탐사를 기획하고 있다. 이는 이전의 유인 달 탐사의 목적인 표면 탐사보다 궁극적으로 에너지 자원의 개발과 행성 탐사의 전초기지 역할을 하기 위한 장기적인 계획의 초석을 다지기 위함이다. 유인 달 탐사 활동과 우주개발을 촉진 시키기 위해서는 유인 탐사의 필요한 제반 사항의 요구에 적합한 인프라가 구축되어야 할 것이며, 이러한 기반 시설을 건설하기 위해서는 자동화 장비나 로봇을 이용한 무인 시공과 현지 자원 활용 개념(In-Situ Resource Utilization, 이하 ISRU)을 통한 경제적이고 안전한 방법이 필요하다. 유인 달 탐사에서 중요한 기반 시설 구축을 위한 자원 채굴 및 기지 건설을 위한 대규모 건설 방안이 연구되고 있으며, 저중력 및 극한의 우주 환경에서 사용하기 위한 건설장비의 필요성이 대두되고 있다. 본 논문에서는 달 현지에서 활용할 수 있는 건설장비 중 채굴 기술의 개발현황에 대하여 알아본다.

**Abstract** Advanced space-faring nations, including the United States, have ambitious plans for lunar and planetary exploration. Since 2020, there has been a shift in lunar exploration plans towards prioritizing crewed missions. This change in focus aims to lay the groundwork for long-term plans, extending beyond surface exploration to include energy resource development and the establishment of planetary exploration outposts. Therefore, establishing infrastructure facilities that align with the requirements of crewed missions is essential for promoting crewed lunar exploration activities and space development. Building such infrastructure requires cost-effective and safe methods, including unmanned construction using automation equipment and the concept of in-situ resource utilization (ISRU). Research is underway to develop large-scale construction methods for building critical infrastructure for crewed lunar exploration, such as resource mining and base construction. The need for construction equipment suitable for use in low gravity and extreme space environments is gaining prominence in these efforts.

**Keywords** : Lunar, In-Situ Resources Utilization, Mining, Construction, Space Environments

---

본 논문은 한국건설기술연구원 주요사업으로 지원을 받아 수행된 연구(유인 우주기지 건설 핵심기술 협력 개발)로 이에 감사합니다.

\*Corresponding Author : Byung-Hyun Ryu(Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

email: tnt306@kict.re.kr

Received October 30, 2023

Revised November 28, 2023

Accepted December 8, 2023

Published December 31, 2023

## 1. 서론

미국을 비롯한 세계 우주 개발 선진국에서는 지구에서 가까운 위성인 달 뿐만이 아니라 그 외의 행성 탐사를 목표로 하고 있으며 2020년 이후에는 유인 탐사를 기본적인 근간으로 달 탐사를 다시 계획하고 있다[1].

달에서 발견된 헬륨-3의 에너지 자원으로서의 확보와 지구의 1/6수준인 저중력을 활용하여 달 궤도에 진출하기 쉬운 이점을 통한 행성 탐사의 전초기지로서의 역할을 기대하고 있다. 이를 통해 달 이외의 환경에서 인류의 거주 가능성을 조사하고 다른 행성을 탐사하며 확장하는 것에 목표를 두고 있다.

2012년 8월 National Aeronautics and Space Administration(이하 NASA)에서 화성 탐사 계획으로 발사에 성공한 Mars Science Laboratory(이하 MSL, Curiosity호)는 화성 착륙에 성공하여 현재 탐사임무를 수행 중이며 약 899kg으로 지구에서 보낸 탐사 로버 중에서는 가장 큰 질량을 지니고 있다.

이러한 탐사 장비 질량의 증가와 지구 밖의 탐사 공간의 확장은, 우주 탐사에 대해 실질적으로 지구 밖의 대체 자원 확보와 인류가 진출할 수 있는 공간이 이루어질 수 있으며 인류의 미래가 단순히 지구만이 아닌 우주 공간의 개척을 통하여 보다 나은 삶을 영위할 수 있게 될 것이다. 로봇을 통한 무인 탐사 기술은 현재에도 지속적으로 발전되고 있으나, 가까운 위성인 달에서 기본적으로 인간의 거주에 필요한 기술은 달 환경을 고려하였을 때 여전히 한계점을 갖고 있다. 달에서의 기반시설의 확보를 위해 자동화 장비와 로봇을 통한 우주개발 연구가 진행되어야 한다.

## 2. 달 현지자원활용

### 2.1 달 환경의 고려사항

유인 달 탐사를 위해 달 환경에서 고려할 사항으로는 크게 진공 상태와 이로 인한 차이로 발생하는 부수적 요소인 극한의 온도, 방사선, 미소 운석 등이 있다. 진공, 방사선, 그리고 먼지에 대한 고려는 인간이 기본적으로 호흡과 활동에 직접적으로 영향을 받는 요소이므로 우선적인 반영이 되어야 한다. 또한 이러한 환경을 고려하여 이착륙장의 시공 및 거주시설의 계획 및 설계에도 적용되어야 한다.

달의 기압은 10-14torr로 대기가 매우 희박하기 때문

에 달 표면은 최저 -233℃에서 최고 123℃까지 356℃의 온도 차이를 보인다. 또한 방사선과 먼지 발생에서도 매질에 대한 저항이나 마찰이 없기 때문에 이론적인 수치에 가까운 효과를 예측할 수 있다. 따라서 달 환경에서 건설이 이루어질 경우, 이착륙에 의한 추진 기체의 압력으로 자갈 크기의 파편이 10m/s 이상의 속도로 주변 건물에 피해를 줄 수 있음을 고려해야 한다[2].

대기층이 없어 태양풍의 영향을 직접적으로 받는 달은 태양으로부터 인체에 유해한 방사선의 영향을 받음으로서 유인 탐사 시 거주시설은 방사선이 차단될 수 있도록 충분한 두께의 방호벽을 건설하여야 한다.

달의 표토에는 지속적인 운석의 충돌로 인해 75μm 이하의 미세입자가 50% 이상 존재한다[3]. NASA에서는 달의 환경 중, 유인 탐사 및 거주에 첫 번째 위험인자가 달 표면에 쌓여 있는 미세입자로서 아폴로 미션에 사용된 우주복에도 인체 깊숙이 침투하여 피부 및 호흡에 문제를 발생시킬 수 있음을 경고하였다[4].

또한 달 표토는 전자기적 특성 때문에 단순한 물리적인 공기압에 의한 제거가 어려우며 활동하는 장비에도 미세입자가 시야나 활동을 저지할 뿐만 아니라, 전자기기의 사용에도 문제가 발생한다.

### 2.2 달 현지자원활용 방안

NASA는 2005년에 In-situ resource utilization (ISRU) 프로그램을 시작하여, 달 탐사 지점에서 달의 자원을 추출하고 활용하는 기술을 개발하기로 하였다. ISRU 개념이 성공하면 향후 달 탐사선의 무게 및 비용을 줄일 수 있을 것으로 기대된다[5].

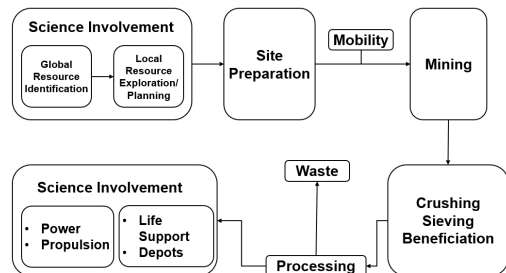


Fig. 1. ISRU mining cycle

ISRU 프로그램에서 주로 다루는 다섯 가지 주요 분야는 소모품 생산, 자원 특성 및 맵핑, 제조 또는 수리, 에너지 생성 및 활용, 그리고 건설 및 토목 작업이다(Fig. 1).

ISRU 초기 단계에서는 달 표면의 전초 기지 개발을 위해 토양 채굴이 필요하다. 전초 기지를 구축하는 처음 4년 동안 지구의 기준으로 총 3,378톤의 토양이 필요할 것으로 추정되며, 여기에는 케이블 트렌치, 도로, 착륙장 건설, 우주 방사능 방호막, 유인기지 그리고 토목 기초공사 등이 포함된다. 또한, 달에서의 과학적 탐사 활동을 위해 지표면 채굴과 지반 시추가 필요하다[6].

초기 전초 기지 개발 활동을 완료한 후, 산소 생산 및 물 처리 공장에 원료를 공급하기 위해 채굴 작업이 필요하다. 필요한 총 원료 용량은 지구의 기준으로 1년에 250톤의 건조 토양과 50톤의 얼음 토양으로 추정되며 채굴 속도는 100~1000 kg/h 이다[7]. 이러한 많은 토양을 채굴하기 위해서는 달 환경에 최적화된 채굴 방법을 선정하는 것이 중요하다.

### 3. 달 토양의 특성

달 토양의 물리적 특성은 주로 수십억 년에 걸쳐 지속적인 운석 충돌과 태양 및 우주 방사선의 충돌로 인한 기계적 풍화의 결과이다.

구체적으로 유성우 충돌에 의한 파편 생성과 높은 충돌 에너지로 인한 암석 증발-재결정화 과정을 통해 달 표토는 반복적인 풍화-생성을 통해 부분적으로 몇 cm에서 수 백 m 두께로 구성되어 있다[8].

달 표토 두께는 표면 노출 빈도에 비례하는 것으로 알려져 있어 우주 방사선의 노출이 오래된 부분일수록 표면에 더 두터운 토양층을 형성한다[9].

#### 3.1 입도분포

달 토양은 대부분 입경 1 cm 미만의 느슨한 쇄설질 입자들로 구성되어 있다. 이는 달 토양이 우주 유성체 충돌로 인한 파쇄, 충돌에너지 및 태양풍으로 인한 결합과 응집, 그리고 화산재 추가 및 우주공간에서의 풍화작용의 조합으로 생성되었기 때문이다[10].

달의 표토(Regolith)의 중량 분포는 크게 사장암(Anorthosite; 87%)과 현무암질(Basalt; 13%)로 구성되어 있으며, 주요 구성 요소는 1)  $\mu\text{m}$ , mm 단위의 단순 암석 파편; 2) 태양풍으로 인한 유리질결정 또는 파편; 3) 어글루티네이트(agglutinate); 4) nano-phase Fe(나노상태 철); 5) 수소(H-)와 헬륨(3-He) 등의 무기요소; 6) 태양 등 환경조건 등이다(McKay et al., 1994). 특히 나노상태 철(nano-phase Fe, 이하 np-Fe)는  $33 \mu\text{m}$  ~

3 mm 크기에 자성을 띠고 있는 달 토양만이 갖고 있는 특정 성분이다 [11].

#### 3.2 입자형태

NASA의 과학자들의 주도로 진행된 아폴로 프로젝트를 통해 수집된 약 380kg의 달 토양 샘플들은 분석되었으며, 그 결과 달 토양은 점착력, 진한 회색에서부터 밝은 회색의 빛깔, 매우 고운 입자, 느슨함, 현무암과 사장암의 기계적 풍화작용으로 인한 쇄설성의 물질의 특성을 보임을 알 수 있었다. 분석된 토양의 입자크기는 평균적으로  $40 \mu\text{m}$ 에서  $80 \mu\text{m}$  사이에 분포해 있으며 그 평균은 60에서  $80 \mu\text{m}$  사이이며, Fig. 2의 달 토양(lunar soil) 입자는 대부분 유리로 결합된 어글루티네이트 및 다양한 암석과 광물로 이루어져 있다[12].

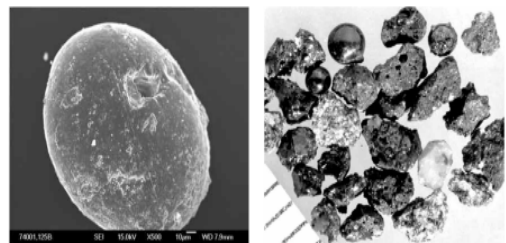


Fig. 2. Lunar Regolith[12]

달 토양의 구성요소는 각력암, 어글루티네이트, 유리알, 운석 파편 등이 있다[13]. 달 표토를 생성하는 가장 큰 요인 중 하나는 운석 충돌인데, 달 표면에서의 중력 가속도는  $1.62 \text{ m/sec}^2$ 으로 지구의 1/6이며 대기가 없기에 운석의 충돌 에너지가 기반암을 파편과 먼지로 부수게 된다. 또한 운석충돌 시 발생하는 열에 의해 지표면의 토양을 녹여 어글루티네이트를 형성한다.

달 표토는 광물학적으로 규산염인 사장석, 휘석, 감람석, 산화물인 티탄철석, 그리고 황화물과 어글루티네이트로 구성되어 있다. 이것은 달의 표면을 덮고 있으며, 그 두께가 수 미터에서 고지의 경우 수백 미터에 이른다.

#### 3.3 달 토양의 밀도 특성

달 토양의 비중은 2.3~3.2의 범위이며 일반적인 평균값은 3.1이다. 토양의 총 밀도는 깊이와 함께 증가하는 경향을 보이며, 평균적으로 겉보기 밀도는 표면에서 약  $1.30\text{g/cm}^3$ 이고 깊이 10cm에서  $1.52\text{g/cm}^3$ 로 급격하게 증가한 다음 깊이 100cm에서  $1.83\text{g/cm}^3$ 로 점진적으로

증가한다. 이는 다음과 같은 경험적 공식을 사용하여 나타낼 수 있다.

$$\rho = \frac{1.92(z + 12.2)}{(z + 18)} \quad (1)$$

여기서  $z$ 는 깊이이고  $\rho$ 는 총 밀도이다[14]. Fig. 3은 달 토양의 깊이 변화에 따른 밀도의 특성을 보여준다.

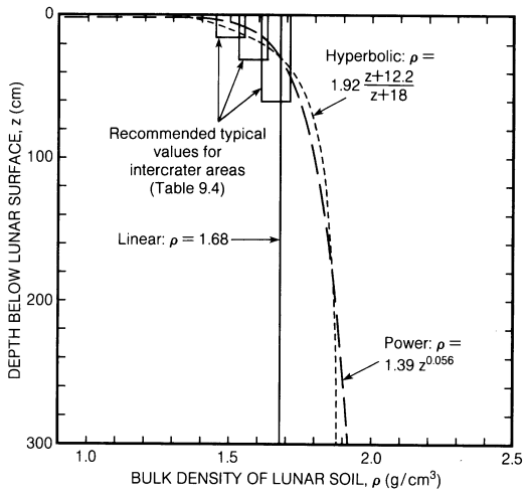


Fig. 3. Bulk density of lunar soil

달 토양의 경우 깊이와 지리적 위치에 따라 상대 밀도 식(2) ( $D_R$ )를 사용하여 밀도 변화를 해석할 수 있다.

$$D_R = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 \quad (2)$$

여기서  $e$ 는 토양의 간극비이며,  $e_{\max}$ 는 최대간극비(maximum void ratio),  $e_{\min}$ 는 최소간극비(minimum void ratio)이다.

Fig. 4에서 아폴로 착륙 지점인 달 크리에이터 지역에서는 상부 15cm에서 평균적으로 66%의 상대밀도 값을 가진다. 반면, 아폴로 16의 크리에이터 가장자리 착륙 지점에서는 62%의 약간 낮은 상대밀도 값이 확인되었다. 상대밀도는 깊이에 따라 급격하게 변동하여 30cm 이후에는 92%의 값을 나타내었다. 이 특성은 우주 행성 및 운석의 충격과 진동으로 하층 토양의 밀도가 높아지고 상단 토양이 느슨해지기 때문으로 설명할 수 있다.

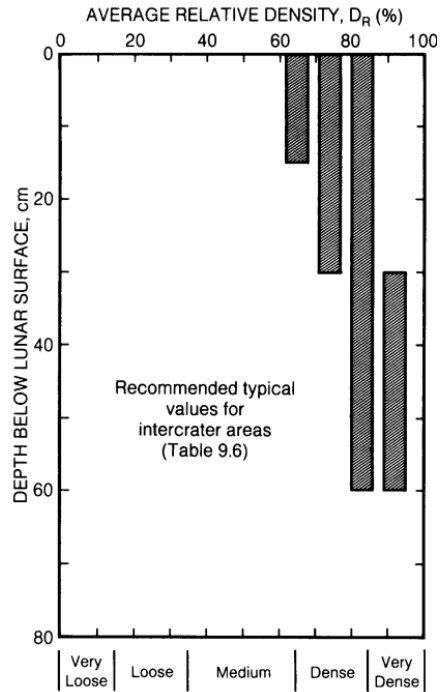


Fig. 4. Relative Density of lunar soil

### 3.4 전단강도

지반에 작용하는 응력이 흙의 강도를 초과하면 파괴가 발생하고, 이에 도달하지 못하면 안정한 상태가 된다. 달 토양의 전단 강도  $\tau$ 는 식 (3)과 같이 표현할 수 있다[15].

$$\tau = c + \sigma \tan(\theta) \quad (3)$$

여기서,  $\sigma$ 는 유효응력,  $c$ 는 점착력,  $\theta$ 는 내부 마찰각이다.

달 토양의 점착력은 아폴로 이전 데이터를 기반으로 0.07-15kPa의 범위이다[16]. 내부 마찰 각도 값은 10 ~ 55°이다. 달 토양의 전단 강도는 밀도에 크게 의존하며, 이를 반영하기 위하여 1984년 Carrier에 의해 Mohr-Coulomb 방정식을 대체하는 방법이 도입되었다. 유인 아폴로 미션에서 달 표면에서 직접 전단 강도 측정값은 이러한 새로운 방정식(4) ~ (6)으로 얻은 값과 일치한다[17].

$$\tan\theta = ab\sigma^{-b} \quad (4)$$

$$\tau = a\sigma^{-b} \quad (5)$$

$$c = a(1 - b)\sigma^{-b} \quad (6)$$

여기서, 상수  $a$ 와  $b$ 는 각각 1.83, 0.73이다. 평균적으로 점착력은 0.1에서 1 kPa 범위이며 내부 마찰각은 30°에서 50° 범위이다.

깊이에 따른 월면 토양의 지반공학적 특성은 Table 1과 같다. 점착력 평균 값은 깊이에 따라 0.52 kPa에서 3.0 kPa로 급격하게 증가하는데 이는 내부 마찰각도가 42°에서 54°로 증가하는 것에 기인하는 것으로, 토양의 전단 강도에 직접 영향을 미친다.

Table 1. Variation of the measured values of cohesion, angle of internal friction, median bulk density and the mean total porosity with the depth of lunar regolith.

Depth interval (cm)	Cohesion (kPa)		Angle of internal friction ( $\theta$ )		Median bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	Mean total porosity (%)
	Mean	Interval	Mean	Interval		
0~15	0.52	0.44~0.62	42	41~43	1.50±0.005	52±2
0~30	0.90	0.74~1.10	46	44~47	1.58±0.05	49±2
30~60	3.00	2.40~3.80	54	52~55	1.74±0.05	44±2
0~60	1.60	1.30~1.90	49	48~51	1.66±0.05	46±2

### 3.5 동결 지반

1998년 NASA는 달에 얼음이 있다는 사실을 발견하고, 2005년에는 달의 자원을 활용하는 현지자원활용(In-Situ Resource Utilization, ISRU)을 발표하였다[18]. 현지자원활용(ISRU) 개념의 핵심은 달에 존재하는 얼음을 이용하여 유인탐사에 필요한 산소와 물, 그리고 심우주 탐사에 필요한 추진체(로켓)의 연료를 생산하는데 있다[19]. 현재까지 조사된 자료에 따르면, 달 얼음은 달의 양 극지역에 존재하며, 영구음영지역(Permanent Shadowed Regions, PSRs) 내부 뿐 아니라 주변에도 존재하는 것으로 조사되었다[20-23].

달의 얼음이 어떤 상태로 존재하는지는 아직 명확히 밝혀지지 않았다. [24]의 가설에 따르면, 달의 얼음은 월면토-얼음이 물리적으로 혼합된 형태(discrete ice), 월면토-얼음이 물리적으로 결합된 형태(ice coating or ice-cemented regolith), 얼음 결정체가 포함된 각력암 형태(ice breccia)등 다양한 형태로 존재할 것으로 예상하고 있다(Fig. 5). 기존 연구에 따르면 달에 존재하는 얼음은 중량비로 약 5~10%(부피비로 약 30%)인 것으로 예상된다[25]. 달 지상에서 얼음을 추출할 경우, 얼음이 차지하고 있는 부피가 감소하게 되고 공극이 증가함에 따라 상부에서 작용하는 하중과 상부 토양의 무게(자중)로 인해 침하가 발생할 것으로 예상된다.

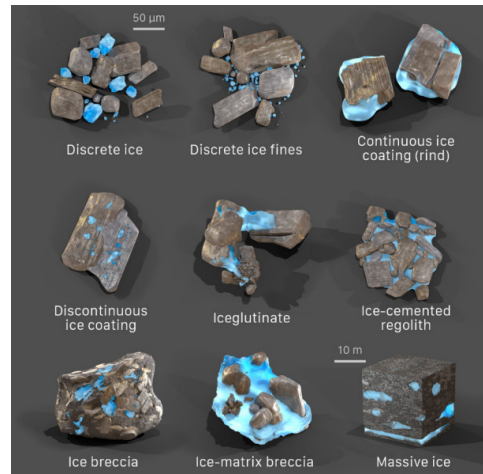


Fig. 5. Physical texture of ice-regolith mixtures that may exist in lunar cold traps[24]

## 4. 달 토양 채굴 장비

대표적인 월면토 및 화성토의 샘플 채취 방법에는 굴착법(excavating)과 시추법(drilling) 등이 있다. 시추법은 대상물의 강도가 높거나 깊은 심도의 대상물에 대한 샘플링이 필요한 경우 주로 사용된다. 그러나 이 방법은 샘플을 채취하는 범위가 제한적인 단점이 있다. 한편 굴착법은 원리가 간단하고 작업성 좋으며 많은 양의 샘플을 효율적으로 수집할 수 있는 장점이 있다. 이 방법은 깊이보다는 넓은 범위에서 많은 양의 샘플을 수집하거나, 월면토를 건설 재료로 활용하기 위한 토양 채굴에 적합하다[26].

현재까지 달 토양의 샘플링은 미국의 Surveyor, Apollo, 소련의 Lunar, 그리고 최근 중국의 Chang'e 등의 미션을 통해서 수행되었다. 이 중 Surveyor를 제외한 모든 미션에서 drilling 타입의 샘플링 방법을 채용하였으며 특히 아폴로 미션에서는 우주인이 직접 drilling을 하는 방식이 적용되었다. chang'e 미션에서는 암석을 grabbing 형태의 샘플링 방식이 채용되었다.

달 탐사 미션에서는 착륙선에서 직접 샘플링하는 방식이 적용되었고 아직까지 Rover를 통한 샘플링 방식이 적용된 예는 없다. 화성 토양의 샘플링의 경우는 로버와 착륙선 형태로 다양한 방식의 샘플링이 시도 되었는데 착륙선으로부터 직접 채굴하는 방식의 샘플링은 모두 실패하였다. 시추와 굴착을 통한 샘플링 방법을 비교하여 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Comparison between different sampling techniques

Method	Sampling techniques
Drilling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Can penetrate even the hardest rocks</li> <li>• High energy efficiency ratio, especially with a percussive mechanism</li> <li>• Good at maintaining sample bedding information</li> <li>• High expansibility for deep sampling</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Can easily reach a high reaction force in low-gravitational environments</li> <li>• Unsuitable for collection of large quantities</li> <li>• Jamming may occur by cuttings</li> </ul>
Excavating	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Useful in collecting loose regolith</li> <li>• Large sampling volume</li> <li>• Large sampling scope with a robotic arm</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difficulty in sampling hard rocks or highly compacted regolith without a percussive action</li> <li>• Unable to maintain sample bedding information</li> </ul>

#### 4.1 연속 채굴 방법

Fig. 6의 버킷 휠 굴착기(bucket wheel excavator, BWE)는 휠의 원주상에 10개 정도의 버킷을 단 휠을 본체 전방에 돌출한 붐에 지탱하여 휠의 회전과 붐의 선회 및 상승 하강 동작에 의해 연속적으로 굴착 하는 장비이다. 굴착된 토사는 휠 상부의 슈트 등을 거쳐 붐 위의 컨베이어로 인도되고, 특히 본체 중앙부의 슈트로부터 컨베이어로 이송되며 다른 운반 장치를 이용하여 배토 된다. 운반 장치를 연속식의 벨트컨베이어로 구성할 경우 굴착기가 능력을 최대한으로 발휘할 수 있다[27].

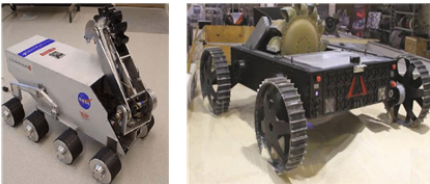


Fig. 6. Bucket wheel excavator



Fig. 7. Bucket drum Regolith Advanced Surface Systems Operations Robot (RASSOR)

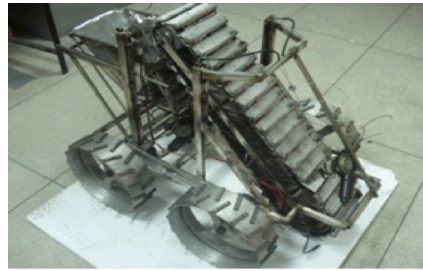


Fig. 8. Chandrobot lunar excavator

버킷 드럼 굴착기는 회전하는 드럼에 장착된 스킵을 사용하여 토양을 굴착, 저장 및 운반한다[28]. RASSOR (Fig. 7)는 양방향의 버킷 드럼 굴삭 방법을 적용한 굴착기로, 달 환경을 모사한 테스트 환경에서 실험 한 결과 고밀도 토양 및 얼음을 포함한 토양에서 충분한 작업 성능을 발현하였다[29].

Fig. 8의 버킷 래더 굴삭기는 연속적인 채굴 작업이 가능하다. Chandrobot-2 버킷 래더 굴삭기는 인공월면 토 채굴 실험에서 1분동안 8kg의 인공월면토 채굴하는데 성공했다[30].

#### 4.2 연속 채굴 방법 Pneumatic methods 공압 방식

오늘날 달과 같은 외행성계 탐사에 있어서 전초기지 건설을 위한 자재의 운반 및 자원 채취는 매우 중요하다. 지구상에서 한정된 자원만을 수송할 수 있다는 점을 고려할 때 이러한 전초기지의 건설을 위해서는 달 자원을 효율적이고 적극적으로 이용해야 한다. 그러나 지구와 다른 달의 환경을 고려하였을 때 자원 및 자재의 채굴과 운반을 위해서는 기존에 사용되는 방법과는 다른 접근법을 택해야 할 것이다.

현재 지구상에서 사용하는 대부분의 채굴방법은 채굴 장비의 중량을 이용하여 압축력 및 회전운동을 통한 힘을 이용하는 방식을 사용하고 있다. 하지만 이러한 방식들은 굴착 과정에서 마찰열이 발생하여 효율이 저감되기 때문에 윤활제의 공급 및 냉각을 필요로 한다. 또한 굴착 과정에서 발생하는 압축력을 버티기 위해서는 지면과 고정되어야 할 필요가 있다. 그러나 기본적으로 달과 같은 우주환경에서는 지구에 비해 중력이 낮고 토양이 느슨하기 때문에 지구와 같은 굴착 방식을 취하기에는 문제점이 있다. 또한 대기가 희박한 우주공간에서 시추 중에 발생하는 마찰열을 효율적으로 제어할 수 있는 방법이 없다.

따라서 우주환경에서 사용가능한 시추방법으로는 시추과정에서 마찰열이 발생하지 않으며 중력의 영향으로

부터 자유로운 방법을 채택해야 할 것이다. 현재 지구상에서 구현하고 있는 기술 중 위의 제한사항을 만족하는 시추장비는 없기에, 뉴매틱을 이용한 시추 시스템을 제안하고자 한다. 지구상에서 주로 입자상 물질을 이송하는데 주로 사용되는 뉴매틱 운송기술은 시추 대상인 달의 표토가 50% 이상이 미세입자로 이루어져 있기 때문에 가장 이상적인 기술이라 여겨진다.

달 기지에서 달 표토의 운송을 위한 뉴매틱 운송 시스템의 타당성 및 적합성에 대하여 연구하였다[31]. 저중력 환경에서의 뉴매틱 시스템에 대한 이론적인 조사를 하였으며 이를 통하여 저중력에서의 뉴매틱 시스템 운영의 중요 요소들을 도출하였고 이를 실험을 통하여 이론적인 값과 지구 중력에서의 거동과 비교하였다. 연구에서는 관내에서의  $150\mu\text{m}$  유리구슬 운송시 물체가 수평 관내에서의 수직한계 침강속도(Chock Velocity)와 수평관 내에서의 수평한계 침강속도(Saltation Velocity)에 초점을 맞추었다. 수직운송과 수평운송 모두 한계 침강속도가 중력에 영향을 받음을 이론적으로 증명하였으며 달 중력(0.16g), 화성 중력(0.38g), 지구 중력(1g)에 대한 각각의 한계 침강속도 값들이 도출되었다.

시험은 수직운송의 경우 2m 높이의 5.1cm 내径의 아크릴 파이프를 통해 이루어졌으며 수평운송의 경우 5.5m 길이의 5.1cm 내径의 아크릴 파이프를 통해 0.16g, 0.38g, 1g에서의 유리구슬 운송에 대해 총 6번의 시험이 수행되었다[32].

저중력 구현을 위해 NASA KC-135 비행선이 이용되었으며 25 ~ 40초의 짧은 시간 동안에 실험이 가능한 중력이 구현되기 때문에 시험을 수행하는데 어려움이 있으나 화성과 같은 낮은 중력상태에 대한 연구 디자인을 도출하는데 큰 기여를 하였으며, 해당 연구에 필요한 여러 인자들을 도출해 낼 수 있었다.

수직 운송 실험에서는 달 중력에서의  $150\mu\text{m}$  유리구슬의 종속 속도는 지구중력에서의 요구되는 속도의  $1/2 \sim 1/3$  수준으로 나타났으며, 압력강하는 지구중력과 큰 차이를 보이지 않았다. 화성 중력에서의 이동 속도와 압력강하 데이터는 간헐적으로 진행되는 시험환경 특성상 불확실하게 나타났다. 수평 운송 시험에서의 초기 속도 또한 불확실하게 관찰되었으나 이론값과 유사한 결과가 측정되었다.

### 4.3 먼지 발생, 마모 및 파손 완화

아폴로 임무 동안 우주인들은 달 먼지에 의해 발생되는 많은 문제들 (시아방해, 장비의 오작동, 정지마찰력의

상쇄, 먼지로 인한 오염, 재료의 마모, 온도 조절의 실패, 그리고 몸 내부 침투의 위험성)을 경험하였다[33].

먼지 발생을 줄이기 위해 작업 위치 선택 시 먼지 발생 가능성이 낮은 지역을 우선 고려해야 한다. 로봇을 활용하여 정밀한 채굴 작업을 수행하며, 발생한 먼지는 수집하고 처리하여 재활용하는 방법을 사용해야 한다.

우선, 박스형 구조로 설계된 구조물을 활용하여 외부 먼지의 내부 유입을 막을 수 있다. 또한 밀폐 시스템을 구축하여 작업 구역을 완벽히 밀폐하고, 채굴 장비 주변에는 먼지 수집 장치와 고급 필터링 시스템을 설치하여 먼지 발생을 최소화해야 한다.

달 토양에 발생하는 먼지의 심각한 영향을 받는 베어링 및 기구부의 윤활유가 없는 밀폐 구조여야 한다고 설명하고 있다[34].

### 4.4 견인 문제를 해결하기 위한 로버의 이동성 개선

달 탐사 미션에서 견인 문제를 극복하고 로버의 이동성을 향상시키기 위해서는 로버의 바퀴 디자인을 개선하여 달의 표면에서 더 효과적으로 움직일 수 있도록 해야 한다. 저항을 최소화하고 진동 및 충격을 줄이는 기술을 도입하여 로버의 안정성을 확보해야 한다. 자율 주행 능력을 강화하여 로버가 스스로 경로를 계획하고 장애물을 피할 수 있도록 설계해야 한다. 로버의 바퀴는 미끄러짐을 최소화하고 달 표면에서 무게 분산을 통해 로버의 안정성을 높여야 한다.

에너지 효율성을 개선하여 로버가 긴 거리를 이동하거나 작업을 수행할 때 필요한 에너지를 최소화해야 한다. 달 표면의 지형을 분석하고 맵핑하여 로버가 안전하게 이동할 수 있는 경로를 설정해야 하며, 로버와 지구 간의 통신을 개선하여 원격에서 로버를 효과적으로 모니터링하고 제어해야 한다[6].

## 5. 달 채굴 장비 요구사항 도출

달의 환경 및 자원 등을 탐사하고 채굴하는 기술은 행성탐사 전반에 걸쳐 사용되는 핵심 연구개발 기술 중 하나이다. 그렇기 때문에 달 탐사를 수행하기 위한 채굴 장비를 제작하기 위해서는 다양한 분야에 걸쳐 고려해야 할 것이다. 이러한 연구를 수행하기 위해서는 기 제작된 장비들을 통해서 연구개발을 위한 고려사항들을 도출해 내고 해결하는 방법으로 진행해야 한다. 현재까지 사용된 장비들은 그 목적이 주로 행성탐사에 초점이 맞추어

저 있으며 다양한 탐사장비를 탑재하여 비교적 그 수명이 짧음을 알 수 있다. 그러나 본 연구진의 궁극적인 목표라 할 수 있는 ISRU(In-Situ Resource Utilization)를 수행하기 위해서는 장기간에 걸친 임무 수행이 가능하여야 한다. 또한 주로 자원이 있을 것으로 예상되는 달 남극 지역은 대부분 크레이터 내부 및 그 주변에 있음을 생각할 때 해당 지역까지의 기동능력 및 탐지능력을 충분히 고려하여야 할 것이다.

Table 3. Requirements and rover system design impacts

Requirement	System impact
Lunar day mission duration	Platform type selection Power availability, landing period and time Navigation system
Limited stowage volume inside the lander	Mining and subsystems volume Subsystems stowage configurations
Launch capacity	Mounting and sensitive payload within lander structure as necessary, low mass
Multiple portable payload manipulation	Multiple end-effector to be carried
Payload portability	Manipulating arm load capacity End-effector exchangeability High dexterity, autonomy Power consumption

실제 로버가 우주 행성에서 건설을 하기 위해서는 자체를 운송해 줄 발사체 및 착륙선(Lander)등도 함께 고려하여야 하지만 현 단계에서는 순수하게 로버만을 위한 필수요소들만 선정하였다. 요구사항들을 크게 정리해 보면 주행장치 및 구조, 자율주행, 에너지원, 열제어방법, 통신, 제어 및 데이터 처리, 탑재체 등에 걸쳐서 고려해야 할 것이다. 또한 이러한 연구를 진행하기 위해서는 다양한 분야의 전문가의 협업을 필요로 한다. 본 연구에는 장비의 주행장치 및 구조에 초점을 채굴장비의 요구 사항을 Table 3과 같이 도출하였다.

## 6. 결론

최근 몇 년 동안 우주 개발 분야에서의 급속한 진보와

달 탐사 미션의 성공으로 달 자원의 활용이 더욱 현실적인 가능성을 갖추고 있다. 이에 따라 달에서의 자원 채굴 기술은 중요한 연구 주제 중 하나로 부상하고 있다. 이 논문에서는 달에서의 자원 활용을 위한 채굴 기술의 발전 동향과 미래 전망을 종합적으로 검토하였다.

우선, 다양한 광물과 원소를 보유한 달 표면은 우리에게 새로운 에너지원과 원료의 공급처로서의 역할을 할 것으로 기대되고 있다. 이를 위해서는 효율적이고 안전한 채굴 기술이 필수적이며, 현재의 기술 수준은 이러한 요구사항을 충족시킬 수 있을 정도로 진보하고 있다. 자동화된 로봇 기술과 원격 조종 기술의 발전은 달 표면에서의 채굴 활동을 효과적으로 수행할 수 있는 환경을 조성하고 있다.

달에 존재하는 얼음 층의 발견과 거대 우주 관측 시설의 눈부신 발전, 민간 자본의 참여로 달 탐사는 그 어느 때 보다는 현실로 다가오고 있다. 달에서 인간의 상주와 활동을 어렵게 하는 중력의 감소와 정전기 먼지, 태양풍, 은하우주선 등에 대한 정보의 증가는 ISRU의 가능성을 증대시키고 있다.

달의 현지자원을 활용하기 위한 행성 자원 채취는 세계 각국의 연구자에 의하여 기술의 놀라운 발전을 이루었다. 달 현지자원을 이용한 채굴 장비의 개발은 실제 우주행성으로 운송을 고려하여 경량, 고집적 형태로 제작되어야 하며, 우주 환경에서 운용을 고려하여 저전력, 고효율, 고성능 형태로 구현이 가능하며 우주의 극한 환경은 저중력과 급격한 온도변화를 극복하기 위한 조건을 만족하여야 한다.

또한, 채굴된 자원의 처리 및 운송에 대한 기술적인 개선이 필요하다. 달의 특수한 환경과 거리적인 문제로 인해 우수한 자원 채굴만으로는 부족하며, 이를 지구로 안전하게 운송하고 활용하기 위한 기술적 도전이 남아있다. 우주 로켓 및 운송 수단의 혁신과 업그레이드는 달에서 채굴된 자원을 지구로 안전하게 운반하는 핵심 요소로 부각되고 있다.

달에서의 자원 채굴 기술은 지구의 에너지와 원료 공급의 한 축으로 떠오르고 있다. 현재의 기술 발전과 미래의 기술 혁신을 통해 달 자원의 효과적이고 안전한 활용이 가능해질 것으로 기대된다. 다만, 이를 위해서는 국제적 협력과 규제 정립, 지속 가능한 기술 개발 등 다양한 측면에서의 노력이 필요하다. 앞으로의 연구와 개발이 이러한 도전에 대한 해답을 제시할 것으로 기대된다.



## References

- [1] ISECG (International Space Exploration Coordination Group) (2011), "The Global Exploration Roadmap."
- [2] Metzger P. T., Lane J. E., Immer C. D.,(2008), Modification of Roberts' Theory for Rocket Exhaust Plumes Eroding Lunar Soil, ASCE Earth and Space, American Society of Civil Engineers.
- [3] Heiken G.H., "Lunar Source book - a user's guide to the moon," (1991), Cambridge University Press.
- [4] NASA Ames Research Center (2007), "In-Situ Resource Utilization."
- [5] Sanders, G.B., Larson, W.E. (2013), "Progress made in Lunar in situ resource utilization under NASA's exploration technology and development program" J. Aerosp. Eng. 26 pp. 5~17.  
DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784412190.050>
- [6] Mueller, P., Van Susante (2011), "A review of Lunar regolith excavation robotic device prototypes", in: AIAA Sp. 2011 Conf. Expo., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, pp. 1~15.  
DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2011-7234>
- [7] Zacny, K., Craft, J., Hedlund, M., Wilson, J., Chu, P., Fink, P., Mueller, G., Galloway, M., Mungas, G. (2009), "Novel approaches to drilling and excavation on the moon," in: AIAA Sp. Conf. Expo., pp. 1~12.  
DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2009-6431>
- [8] Rasmussen, K. L. & Warren, P. H. (1985), "Mega regolith thickness, heat flow, and the bulk composition of the Moon," Nature 313(5998) pp.121~124.
- [9] Hockey, T. A. (1986), "The book of the moon : a lunar introduction to astronomy, geology, space physics, and space travel." 1st edn. New York, Prentice Hall Press.
- [10] Ryu, B. H., Wang, C. C., and Chang, I. (2018), "Development and Geotechnical Engineering Properties of KLS-1 Lunar Simulant", Journal of Aerospace Engineering, Vol.31, No.1, pp.1~11 (In Korean).
- [11] Taylor, L. & Cirlin, E.H. (1985), "A review of ESR studies on lunar samples," In Proceedings of ESR dating and dosimetry. IONICS, pp. 19~39.
- [12] McKay D.S., Heiken G. H., Basu A., Blanford G., Simon S., Redy R., French B. M., and Papike J. (1991), "The lunar regolith," The lunar sourcebook edited by Heiken G. H., Vaniman D. T., and French B. M. New York: Cambridge University Pres. p. 284~356.
- [13] Zheng, Y., Wang, S., Ouyang, Z., Zou, Y., Liu, J., Li, C., Li, X. & Feng, J. (2009), "CAS-1 lunar soil simulant," Advances in Space Research 43(3) pp. 448~454.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.07.006>
- [14] Carrier, W.D., Olhoeft, G.R., Mendell, W. (1991), "Physical properties of the lunar surface, in: Lunar Sourcebook. A User's Guid. to Moon, Cambridge Univeristy press, pp. 475~594.
- [15] Labuz, J.F., Zang, A.(2012),"Mohr-Coulomb failure criterion", Rock Mech. Rock Eng. 45 pp. 975~979.
- [16] Mitchell, J., Houston, W., Scott, R., Costes, N., Carrier, W.D., Bromwell, L.(1972),"Mechanical properties of lunar soil: Density, porosity, cohesion and angle of internal friction, Geochim". Cosmochim. Acta. 3 pp. 3232~3253.
- [17] Slyuta, E.N. (2014), "Physical and mechanical properties of the lunar soil (a review)," Sol. Syst. Res. 48 pp. 330~353.  
DOI: <https://doi.org/10.1134/S0038094614050050>
- [18] Jayathilake, B. A. C. S., Ilankoon, I. M. S. K., and Dushyantha, M. N. P. (2022), "Assessment of Significant Geotechnical Parameters for Lunar Regolith Excavations", Acta Astronautica, Vol.196, pp. 107~122.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2022.04.008>
- [19] Anand, M. (2010), "Lunar Water: a Brief Review", Earth MoonPlanet, Vol.107, No.1 pp.65-73.  
DOI: <https://doi.org/10.1007/s11038-010-9377-9>
- [20] Cocks, F. H., Klenk, P. A., Watkins, S. A., Simmons, W. N., Cocks, J. C., Cocks, E. E., and Sussingham, J. C. (2002), "Lunar Ice: Adsorbed Water on Subsurface Polar Dust", Icarus, Vol.160, No.2, pp.386-397  
DOI: <https://doi.org/10.1006/icar.2002.6972>
- [21] Duke, M. B. (2002), "Lunar Polar Ice Deposits: Science and Utilization Objectives of the Lunar Ice Discovery Mission Proposal", Acta Astronautica, Vol.50, No.6, pp.379-383.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0094-5765\(01\)00184-9](https://doi.org/10.1016/S0094-5765(01)00184-9)
- [22] Hodges Jr., R. R. (2002), "Ice in the Lunar Polar Regions Revisited", J. of Geophysical Res., Vol.107, No.E2, pp.1-7.
- [23] Cannon, K. M. and Britt, D. T. (2020), "A Geologic Model for Lunar Ice Deposits at Mining Scales", Icarus, Vol.347, No.1, pp.1-11  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113778>
- [24] Murnane, A., Jackson, B., Amos, C., Pazar, C., and King, I. (2002), Mars Water Ice Prospecting Mission Study, Colorado School of Mines, pp.7-8.
- [25] Thomson, B. J., Bussey, D. B. J., Neish, C. D., Cahill, J. T. S., Heggy, E., Kirk, R. L., Patterson, G. W., Raney, R. K., Spudis, P. D., Thompson, T. W., and Ustinov, E. A. (2012), "An Upper Limit for Ice in Shackleton Crater as Revealed by LRO Mini-RF Orbital Radar", Geophysical Research Letters, Vol.39, L14201, pp.1-4.  
DOI: <https://doi.org/10.1029/2012GL052119>
- [26] Ryu, B. H. (2023), "Research Trend and Engineering Approach on Extraterrestrial Soil Sampling Technology", Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol.23, No.7, pp.11~20 (In Korean).

- [27] Skonieczny, K., Moreland, S.J., Wettergreen, D.S., Whittaker, W.L.(2011), "Advantageous bucket wheel configuration for lightweight planetary excavators", in: 17th Int. Conf. Int. Soc. Terrain Veh. Syst. STVS, pp. 39-48.
- [28] Clark, D.L., Patterson, R.R., Wurts, D.W. (2009), "A novel approach to planetary regolith collection: The bucket drum soil excavator", in: AIAA Sp. 2009 Conf. Expo., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, pp. 1~4.  
DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2009-6430>
- [29] Dunbabin, M., Corke, P., Winstanley, G., Roberts, J.(2006), "Off-world robotic excavation for large scale habitat construction and resource extraction", in: AAAI Spring Symp. - Tech. Rep pp. 95-103
- [30] Lankenau, G.F.D., Skonieczny, K., Whittaker, W.L., Wettergreen, D.S. (2012), "Effect of bucket-wheel scale on excavation forces and soil motion," J. Terramechanics. Vol.49, pp.341~348.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.terra.2013.01.001>
- [31] Sullivan, T.A., Koenig, E., Knudsen, C.W., Gibson, M.A. (1994), "Pneumatic conveying of materials at partial gravity", J. Aerosp. Eng. pp. 199-208.  
DOI: <https://doi.org/10.2514/6.1992-1667>
- [32] Zacny, K., Paulsen, G., Chu, P., Craft, J., Mueller, J., Thornton, T. (2012), "Lunar prospecting rover utilizing a Lunar drill, Pneumatic Excavator, and Gas Jet Trencher," in: AIAA Sp. 2012 Conf. Expo., American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, Virginia, pp.1~6.  
DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2012-5166>
- [33] Gaier, J.R. (2009), "The need for high fidelity lunar regolith simulants," LUNAR AND PLANETARY SCIENCE AND EXPLORATION, ASCE.
- [34] Braccio, M. (2020), "Design of a robot for the 2019 NASA robotic mining competition", Proc. Wisconsin Sp. Conf. pp. 1~11.  
DOI: <https://doi.org/10.17307/wsc.v1i1.292>

유 병 현(Byung-Hyun Ryu)

[정회원]



- 2010년 2월 : 인천대학교 토목환경공학과 (지반공학석사)
- 2014년 2월 : 인천대학교 건설환경공학과 (지반공학박사)
- 2014년 2월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 전임연구원

<관심분야>

지반공학, 동토공학, 우주건설