

# 한국형 인공월면토(KLS-1) 개발을 위한 기초 연구

## Basic Study for a Korean Lunar Simulant (KLS-1) Development

유 병 현<sup>1</sup> Ryu, Byung-Hyun

백 용<sup>2</sup> Baek, Yong

김 영 석<sup>2</sup> Kim, Young-Seok

장 일 한<sup>3</sup> Chang, Ilhan

### Abstract

For the success of future missions to the Moon and other similar cosmic environments, understanding and utilization of the lunar regolith has become essential. However, due to the scarcity and unaffordability of real lunar regolith on Earth, a number of lunar regolith simulants (e.g., JSC-1; NASA) have been developed for experimental purposes. However, Korea does not have its own lunar regolith, even though the country is planning to actively pursue lunar and space missions in the 2020s. Thus, this study has been conducted to develop a Korean lunar simulant prototype via basic feasibility attempts (e.g., raw material selection, particle size and chemical composition simulation). Finally, the first prototype of Korea's own lunar simulant has been obtained, and denominated as KLS-1.

### 요 지

최근 우주개발의 중요성이 다시 부각되면서 주요 우주개발국들은 달 토양과 물리적·화학적 특성이 유사한 인공월면토(lunar simulant)를 개발하여 각종 연구에 활용하고 있다. 달 토양은 지구 토양과 생성 매커니즘과 지반공학적 거동이 다르기 때문에 완벽하게 모사하는 것이 어렵고 제작비용이 많이 소모된다. 기존 인공월면토 중 국제적으로 가장 널리 사용되고 있는 재료는 미국항공우주국(NASA)에서 제작한 JSC-1A이며, 우리나라는 아직 국제적으로 공인된 인공월면토가 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내 지반재료를 이용한 한국형 인공월면토 개발을 위한 기초 연구를 수행하여 그 시제품으로 KLS-1(Korea lunar simulant - type 1)을 제시하였다. KLS-1은 기존 국외 인공월면토들과 비교하여 유사성과 경제성이 우수하여 향후 국내 우주개발 사업뿐만 아니라 각종 국제연구에 폭 넓게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

**Keywords :** Moon, Lunar regolith, Lunar simulant, Basalt, Particle size distribution, XRF, KLS-1

### 1. 서 론

최근 우주 개발의 필요성과 의의가 재조명(달에서의

물과 He-3 발견 등) 되면서 우주 선진국(미국, 러시아) 들 뿐만 아니라 신흥국(중국, 일본, 인도, 유럽) 들을 중심으로 우주와 달 탐사가 활발히 이루어지고 있다. 달은

1 비회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Post-doctoral Researcher, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)

2 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원 (Member, Research Fellow, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)

3 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology, Tel: +82-31-910-0273, Fax: +82-31-910-0561, ilhanchang@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

지구에서 가장 가까운 위성체로 그 생성 기원이 지구의 지질연대와 동일한 것으로 알려져 있다(Weill et al., 1971). 따라서 지구와 달은 지각의 화학적 구성(광물)은 상당 부분 일치하나 대기가 없고 물이 희박한 조건으로 인해 달 표토는 지난 60억년 동안 지구와 다른 형태로 형성되어 왔다. 따라서 달 탐사와 개척을 위한 핵심 우주 기술 개발 측면에서 달 표면, 특히 달 표토에 대한 과학적 이해가 선행되어야 한다. 하지만 지구상에 현존하고 있는 실제 달 토양은 1960년대 미국 아폴로(Apollo) 프로그램을 통해 채집해 온 380kg에 불과하여(Schnetzler and Nava, 1971), 대부분의 우주 개발 국가들은 달 토양과 물리적·화학적 특성이 유사한 인공월면토를 개발하여 달과 우주 관련 연구와 기술 개발에 폭 넓게 활용하고 있다(Morris, 1980).

현재 인공월면토를 자체 개발·활용하고 있는 국가는 4개국 정도(미국, 일본, 중국, 캐나다)에 불과하며, 그 중에서 실제 달 토양과 가장 유사하다고 공인된 인공월면토는 미국항공우주국(NASA)의 Johnson Space Center에서 제작한 JSC-1A이다(McKay et al., 1994). 인공월면토는 주로 달 탐사 장비 및 과학 탑재체들을 대상으로 실제 달 환경 조건 하에서 성능평가와 검증을 위해 주로 활용되고 있다. 국외의 인공월면토들은 대부분 분쇄현무암과 화산재를 바탕으로 제작되고, 철(Fe) 함량을 높이기 위해 화학적 합성법(chemical synthesis)들을 사용하여 그 비용이 매우 높아 범용성 측면에서 한계를 갖고 있다(예. 미국 JSC-1A = 19 USD/kg; 일본 FJS-1 = 4 USD/kg). 국내에서도 지난 2010년(KOHLAS-1; 한양대학교)과 2014년(KAUMLS; 한국항공대학교)에 인공월면토가 제시된 바 있으나(Kim et al., 2014; Yoo et al., 2014), 그 지반공학적인 성능 수준이 국제 공인기준을 만족시키지 못하는 한계를 지니고 있다.

따라서 본 연구에서는 한국형 달 탐사 사업과 그 외 여러 국내·외 우주관련 연구에서 사용할 수 있는 경제적이고 지반공학적인 신뢰성(실제 월면토와의 유사성)이 높은 한국형 인공월면토 개발을 위한 연구를 수행하였다. 이를 위해 달의 생성과 지질학적 특성에 대한 이해를 토대로 국내 현무암에 대한 현장 조사와 성분 분석 나아가 경제성 및 상용화 가능성 등을 종합적으로 고려하여 인공월면토 제작을 위한 원재료(raw material)를 선정하고, 이를 실제 달 토양(Apollo samples) 및 국외 인공월면토(JSC-1A & FJS-1) 데이터와 비교하여 신뢰성 높은 한국형 인공월면토 개발을 위한 기초연구를 진행하였다.

## 2. 달의 생성 기원 및 특성

### 2.1 시험 시료

달의 기원에 대한 여러 가설들이 있으나 아직 통일된 이론은 없는 실정이다. 달의 생성 기원이 중요한 이유는 그 생성기원을 토대로 구성광물이 유사한 지구상 지질 구조를 토대로 인공월면토 제작이 이루어지기 때문이다(Chua et al., 1994). 현재까지 충돌설이 가장 유력한 가설이나 그 외 여러 생성 기원에 관한 주장들이 제시되고 있다.

#### 2.1.1 충돌설(Giant Impact Theory)

비교적 최근에 제안된 충돌설은 45억 년 전 지구에 어떤 외부 천체가 지구와 충돌한 결과로 파편에 의해 달이 만들어졌다는 이론이다(Mackenzie, 2003). 지구가 형성된 후 화성 크기의 천체가 지구와 충돌했고, 충돌 후 충돌한 물체는 지구로 녹아 들었으며, 일부는 기체나 먼지가 되어 지구 주변으로 흩어졌다는 것이다. 이 때, 지구의 물질도 섞여 우주 공간으로 날아갔으며, 그 파편들이 모여 달이 되었다는 이론이다.

#### 2.1.2 분리설(Fission Hypothesis)

달의 기원에 관한 가장 오래된 학설은 1878년 조지 다윈(George Darwin)이 제시한 분리설(Fission Theory)이다(Binder, 1974). 조지 다윈은 달이 지구에서 멀어지고 있음을 연구한 최초의 학자로 달이 지구에서 멀어지는 속도를 통해 지구와 달이 한때 같은 덩어리였다고 밝혔다. 그는 이 용융 상태의 점성이 있는 구체가 당시에는 약 5시간 반을 주기로 빠르게 자전하고 있었다고 주장했다.

#### 2.1.3 동시 탄생설(Co-formation Theory)

동시 탄생설은 전에 원시지구를 돌고 있던 많은 미행성이 모여 다른 행성이 생기는 것과 동일한 과정을 거쳐 지구와 함께 달이 탄생했다는 이론이다(Stroud, 2009). 원시 지구에는 고리가 있었는데, 기체와 작은 운석들로 이루어져 있던 고리들이 하나의 큰 덩어리로 응집하여 달이 태어났다고 하는 이론이다. 하지만 이 이론은 지구-달 시스템의 각 운동량이 현재와 같을 수 없다는 점으로 문제점이 제시되었다. 또한, 초기 달의 마그마 대양 및 달의 철 성분이 부족한 이유에 대해서도 설명하지

못하는 등의 많은 단점이 있다. 지구와 달이 동시에 같이 태어나려면 내부성분도 비슷하여야 하는데, 달의 핵 부분에 함유되어 있는 철분은 지구의 핵에 비해 많이 부족하다는 점에서 신빙성이 떨어지는 가설로 인식되고 있다.

#### 2.1.4 포획설(Capture Theory)

태양계 밖에서 형성된 천체가 지구에 중력에 붙잡혀 지금까지 돌고 있는 것으로 보는 이론이다(Mitler, 1975). 포획설에 의하면 지구와 달의 화학적 성분이 다르더라도 문제가 되지 않으며, 철의 결핍 문제도 쉽게 해결될 것이라는 것이다. 이 이론을 지지하는 학자들은 달이 지구 근처에서 생겨났다면, 질량이 작아서 기체 분자가 도망가기 쉬우며 결과적으로 달의 비중이 지구보다 커야 하지만 실제로는 그 반대라는 사실을 증거로 든다. 이러한 현상을 뒷받침하기에는 포획설이 적합하다.

### 2.2 달의 물리적 특성 및 지형 특성

달은 주행성인 지구 직경의 약 1/4(3,476km)로 다른 태양계 내 위성들에 비해 큰 특징이 있다 (목성과 토성의 위성들의 크기는 주행성 직경의 1/100 수준). 달의 물리적·행성학적 특징들은 Table 1과 같다.

달에는 유성우 충돌이 극심했던 기간(38.5~41억년전)이 있었고, 그 후에도 지름이 107킬로미터나 되는 코페

르니쿠스(Copernicus) 크레이터가 불과 10억년 전에 생기는 등 현재까지 지속적으로 작은 충돌들이 일어나고 있는 것이 밝혀졌다(Pieters, 1982). 대충돌에 의해 생성된 달의 마그마 바다는 성분별로 분별냉각 되면서, 철분이 많은 감람석(Olivine), 휘석(Pyroxene) 등 무거운 무기물들은 심부에 가라앉고, 상대적으로 가벼운 사장석(plagioclase feldspar) 등은 표면 외부지각을 형성하게 되는데, 이 과정을 분별결정(fractional crystallization)의 지화학(geochemical) 과정이라고 한다(Nemchin et al., 2009). NASA는 달 지각, 맨틀 그리고 핵을 탐지하기 위하여 Apollo 임무 수행 중 많은 지진관측소를 달에 설치했고, 달에서는 지구에 비해 훨씬 적은 횡수와 약한 지진이 발생하는 것을 알게 되었다(Latham et al., 1972). 이러한 연구결과를 토대로 달의 지각은 대략 평균 70킬로미터 두께이며, 그 아래에 지구보다는 밀도가 낮은(철 함량이 낮은) 핵이 존재함을 확인하였다(Taylor, 1975).

### 3. 달 모양의 특성 및 인공월면토

#### 3.1 달 모양의 특성

달 모양은 달 표면을 덮고 있는 물질로서, 충돌·분쇄·재생·합성 과정 등을 통해 비교적 최근에 형성된 물질이다. 달 표면은 대기가 없는 특성으로 인해 끊임없는 미세유성우 충돌(최대속도 96,000km/hr) 및 고에너지

Table 1. Comparison of the Moon and the Earth with physical and chemical aspects

Property	Moon	Earth
Mass [kg]	$7.353 \times 10^{22}$	$5.976 \times 10^{24}$
Radius (spherical) [km]	1,738	6,371
Surface area [km <sup>2</sup> ]	$37.9 \times 10^6$	$510.1 \times 10^6$
Flattening	$5.0 \times 10^{-4}$	$3.4 \times 10^{-3}$
Mean density [g/cm <sup>3</sup> ]	3.34	5.52
Gravity at equator [m/sec <sup>2</sup> ]	1.62	9.81
Escape velocity at equator [km/sec]	2.38	11.2
Sidereal rotation time	27.322 days	23.9345 hours
Inclination of equator / orbit	6° 41'	23° 28'
Mean surface temperature [°C]	107 (day) ; -153 (night)	22
Temperature extremes (variation) [°C]	-233 ~ +123	-89 ~ +58
Atmosphere density [molecules / cm <sup>3</sup> ]	$\leq 10^4$ (day) ; $2 \times 10^6$ (night)	$2.5 \times 10^5$
Moment of inertia [1/MR <sup>2</sup> ]	0.395	0.332
Heat flow (average) [mW/m <sup>2</sup> ]	$\leq 29$	63
Seismic energy [J / year]	$2 \times 10^{10}$	$10^{17} \sim 10^{18}$
Magnetic field [A / m]	0 (small paleofield)	24 ~ 56

태양풍에 노출되어 있고, 광물 산화를 유발하는 산소와 유기물이 없기 때문에 달 토양은 지구 표토와 다른 특성을 지니고 있다. 구체적으로 유성우 충돌에 의한 결정질 파편 생성과 높은 충돌 에너지로 인한 암석 증발·재결정화 과정을 통해 달 표토는 반복적인 풍화·생성을 통해 부분적으로 몇 cm에서 수 백 m 두께로 축적된다 (Rasmussen and Warren, 1985).

달 표토에서의 활발한 지질학적 변동은 ‘달의 대재앙’(Lunar cataclysm; 38억5천만년~41억년전) 이후 점차로 줄어든 것으로 판단된다. 달 표토 두께는 표면노출 빈도에 비례하는 것으로 알려져 있어 오래된 부분일수록 표면에 더 두터운 토양층을 형성한다. 따라서 표면노출 빈도에 관한 개념은 유성우 충돌뿐만 아니라 미세 유성우 충돌구명들과 태양풍 이식 및 고에너지 우주선 등의 변화과정에 의한 영향들을 측정할 수 있게 개발되어 왔다(Hockey, 1986).

달 토양은 대부분 입경 1cm 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 생성되기 때문이다.

달의 표토(Regolith)는 크게 사장암(Anorthosite; 87%)과 현무암질(Basalt; 13%)로 구성되어 있으며, 주요 구성 요소는 1) nm, mm 단위의 단순 암석 파편; 2) 태양풍으로 인한 유리질결정 또는 파편; 3) 어글루티네이트(agglutinate); 4) nanophase 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 33nm~3mm 크기에 자성을 띠고 있는 달 토양만이 갖고 있는 특정 성분이다(Taylor and Cirlin, 1985).

### 3.2 기존 인공월면토 개발 현황

인공월면토는 미항공우주국(NASA)에 의해 “달 암석이나 토양의 물리적/화학적 특성들을 모사하기 위한 목적으로, 지구나 유성체로 부터 얻을 수 있는 자연적인 혹은 합성적인 물질로 만들어진 재료”로 정의되고 있다 (Sibille et al., 2005). 따라서 달 토양 모사(인공월면토 개발)는 지구상 재료를 선별하고 달 토양의 물리적·화학적 특성을 구현하기 위해 합성재료(유리질, 산화철 등)와 무기질 등을 첨가하는 것을 기본으로 하고 있다.

인공월면토는 그 사용 목적에 따라서 다양한 형태로 제시되고 있다. 예를 들어 달 자원 탐사(lunar resource prospectation and utilization) 분야에서는 소량이지만 높은 화학적·광물학적 유사성을 요구하며, 지질학 및 지반공학 분야에서는 물리적(압축성, 전단특성, 강도 등) 거동이 유사한 다량의 인공월면토를 필요로 한다. 또한 입경이 50 $\mu$ m 이하의 인공 달 먼지(lunar dust simulants)는 독물학(toxicology) 연구와 각종 전자·탐사장비의 먼지흡착 여부 및 성능 평가를 위해 꼭 필요한 요소이다 (Weill et al., 1971).

따라서 세계 주요 우주개발 선도 국가들은 우주분야 연구에서 수요가 높은 월면토의 자체 확보를 위해 Table 2와 같이 다양한 인공월면토 개발을 진행하고 있다(McKay et al., 1994; Weiblen et al., 1990; Kanamori et al., 1998) Z(Zheng et al., 2009; Battler and Spray, 2009). 국제적으로 표준 인공월면토(Standardized Lunar Regolith Simulant - SLRS)로 공인받기 위해서는 NASA Marshall Space Flight Center(MSFC)에서 규정한 주요 항목과 성능 수준(Fig. 1)을 충족해야 한다(Sibille et al., 2005).

현재까지 제시된 인공월면토 중 국제 표준 인공월면토(SLRS: Standard Lunar Regolith Simulant)로 널리 인정받고 있는 인공월면토는 미국의 JSC-1(Johnson Space Center lunar simulant No. 1)이다(Klosky et al., 2000; Sibille et al., 2005). JSC-1은 지구의 화산재와 현무암을 모암(raw material)로 사용하여 달 토양의 태양풍으로 인한 유리질 결정을 모사하기 위해 열용접 플라즈마(High temperature welding plasma) 기법을 사용하였다. 비록 열용접 플라즈마 처리로 인한 유리질 입자는 구형인 달 토양과 달리 날카로운 면모형태를 보이고 있으나, 모암에 사용된 분쇄 현무암이 달 바다(mare) 지역 토양과 화학적, 광물학적, 그리고 공학적 거동 유사한 장점을 지니고 있다(Zeng et al., 2009; Alshibli and Hasan, 2009). JSC-1은 대량 생산이 가능하고 비교적 경제성이 높아 달 관련 대규모/실대형 연구분야(장비 구동 성능 검증, 건설, 굴착, 농업 등)에 적합한 것으로 평가되고 있다.

JSC-1를 바탕으로 NASA는 다양한 파생 인공월면토를 개발했다. JSC-1A는 JSC-1에 추가로 미국 애리조나(Arizona) San Francisco volcanic field의 Merriam 분화구의 현무암질 화산낙하재(volcanic airfall ash)를 추가하여 만들었으며, 제분(製粉; mill)과 체질(體質; sieve) 이외에 화학적 처리는 하지 않았으며 입도는 모두 1mm 이하로 구성되어 있다(Carrier, 2003). 이러한 JSC-1A에 세

Table 2. Chemical composition of pre-existing lunar simulants (after McKay et al., 1994; Weiblen et al., 1990; Kanamori et al., 1998; Zheng et al., 2008; Battler and Spray, 2009)

Element	JSC-1	JSC-1A	MLS-1	MKS-1	FJS-1	NAO-1	CAS-1	OB-1	
Country (institution)	United States (NASA)		United States (Univ. Minnesota)	Japan (Shimzu Corporation)		China (Chinese Academy of Science)		Canada (NORCAT)	
Raw material	Volcanic ash		Basalt	Basaltic lavas		Gabbro		Anorthosite	
Chemical element	SiO <sub>2</sub>	47.71	46.67	47.3	52.69	49.14	43.83	49.24	46.6
	TiO <sub>2</sub>	1.59	1.71	1.6	1.01	1.91	0.77	1.91	0.115
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.02	15.79	17.8	15.91	16.23	25.79	15.8	21.55
	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.04	-	-	-	-	-	-	-
	FeO	7.35	8.17	10.5	12.28	8.30	3.52	11.47	5.08
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.44	12.50	-	-	4.77	2.62	-	1.24
	MnO	0.18	0.19	0.1	0.22	0.19	0.09	0.14	0.09
	MgO	9.01	9.39	9.6	5.41	3.84	4.93	8.72	9.5
	CaO	10.42	9.90	11.4	9.36	9.13	15.12	7.25	12.6
	Na <sub>2</sub> O	2.70	2.83	0.7	1.90	2.75	1.41	3.08	0.965
	K <sub>2</sub> O	0.82	0.78	0.6	0.58	1.01	0.47	1.03	0.12
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.66	0.71	-	0.14	0.44	0.08	0.51	0.07
	H <sub>2</sub> O	-	-	-	-	0.43	-	-	-
LOI <sup>1)</sup>	0.71	0.01	-	0.50	-	1.10	0.52	2.74	

1) LOI (Limit Oxygen Index)

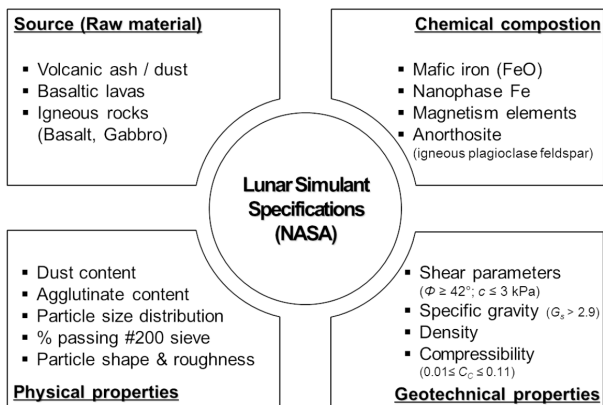


Fig. 1. Specifications and requirements for a lunar simulant to be authorized by NASA (after Sibille et al., 2005)

립질 함량을 높인(20 $\mu$ m 함량 50% 이상; D50 = 27 $\mu$ m) 인공월면토가 JSC-1AF(fines)이며, 반대로 거칠고 굵은 입자들을(1~5mm) 추가하면 JSC-1AC(coarse)가 된다 (Cesaretti et al., 2014).

일본도 세 종류(FJS-1, FJS-2, FJS-3)의 인공월면토를 개발하여 사용하고 있다(Ueda et al., 2010; Matsushima et al., 2009). FJS-1은 후지산 현무암 용암(basaltic lavas)에서 원료를 채취하였으며, 달 토양에 비해 낮은 MgO를 포함하고 있다. 따라서, FJS-2 및 FJS-3는 달 토양과의 유사성을 높이기 위해 각각 감람석(olivine)과 티탄철광(ilmenite)을 FJS-1에 추가 혼합하여 제작되었다(Kanamori

et al., 1998). FJS-series 인공월면토는 실제 달 토양과 화학성분이 다르고, 0.5%의 자연함수비를 지니고 있으며, JSC-1보다 낮은 마찰각과 높은 점착력(cohesion) 특성으로 인해 NASA의 국제인증을 받지 못했지만 일본, 대만을 비롯한 아시아권에서 연구 적용 사례가 많이(Nakashima et al., 2010, Nakashima et al., 2008, Bui et al., 2009) 본 연구에서는 미국의 JSC-1과 일본의 FJS-1을 비교분석 대상으로 선정하여 한국형 인공월면토 개발을 진행하였다.

#### 4. 한국형 인공월면토 개발을 위한 기초 연구

##### 4.1 국내 지반 재료 발굴

인공월면토 개발을 위한 첫 번째 단계는 아폴로 프로젝트를 통해 지구로 채취해온 실제 달 토양의 광물 및 화학 조성과의 유사한 지구상 재료를 확보하는 것이다. 국외 연구들에서는 고온의 마그마가 비교적 빨리 냉각된 화산현무암(basaltic lava) 또는 화산재(volcanic ash)를 이용하여 인공월면토를 개발하고 있으나, 국내의 경우 화산재 지반 조건이 희소하여 주요 현무암 지대에 대한 현장 조사를 우선 수행하였다. 달은 대기가 없기 때문에 산화철은 대부분 FeO 상태로 존재하며, 그 조성비 또한

매우 높은(10.5%) 반면 지구 토양은 대기 중 산소로 인해 광물 산화가 용이하여 FeO 함량보다는 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량이 높은 특징이 있다(Taylor et al., 2001).

따라서 본 연구에서는 국내 현무암을 토대로 전체 철(Fe) 함량(FeO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)을 실제 월면토와 비슷한 수준으로 맞추는 것에 초점을 맞췄다. 현무암에는 용암에서 빠져나온 가스 때문에 슬래그(slag)모양의 많은 기공이 형성되어 다공질구조(vesicular structure)가 잘 발달되어 있다. 현무암은 크게 관입(intrusive)현무암과 분출(effusive)현무암으로 분류되는데, 관입 현무암은 마그마가 지하의 기존 암석을 관입하여 굳어진 암석으로 땅속에서 서서히 냉각하여 고화되기 때문에 결정이 치밀하며 석영과 장석류를 주성분으로 하는 조립현무암(dolerite)이다. 분출 현무암은 지표에서 급한 냉각으로 인한 빠른 고화 때문에 결정 대신에 유리질을 이루는 경우도 있다. 현무암 중의 결정은 용암으로 분출하기 전에 마그마 중에서 이미 성장한 것이다. 이때 세립(fine grained) 내지 유리상(vitreous) 성분이 비교적 큰 결정상태로 함유된 형태를 반상조직(porphyrific texture)이라 한다(Kim et al., 2013).

국내 주요 현무암 분포 지역은 신생대 3기말에의 화산활동이 활발하였던 제주도, 신생대 제3기층의 경상북

도 포항, 신생대 제 4기에 일어난 화산작용으로 인한 경기도 연천, 강원도 철원의 현무암 지대 등으로(Fig. 2) 과거 활발한 화산활동으로 다양한 종류의 현무암질 지반이 분포하고 있다. 본 연구에는 경기도 연천(전곡읍 전곡리; N 38° 00' 55.57", E 127° 03' 59.10"), 강원도 철원(동송읍 장흥리 ; N 38° 11' 41.67", E 127° 15' 53.18"), 경북 포항(구룡포읍 구룡리 ; N 35° 59' 36.99", E 129° 34' 00.39"), 남구 장기면 모포리 ; N 35° 55' 57.60", E 129° 31' 00.26", 남구 연일읍 달전리 ; N 36° 02' 01.94", E 129° 17' 19.37"), 제주도 한림(한림읍 수원리 ; N 33° 25' 345.34", E 126° 15' 44.34") 지역에 대한 현장 조사와 현무암 시료 채취하였다.

암석의 채취 방법은 지반 조사 장비인 유압식 회전수세식(Rotary wash type) 시추기를 사용하여 NX 규격(공경 76mm, 코아직경 54.7mm)으로 한 지역에서 3공을 시추하여 신뢰도가 높은 신선한 현무암 모암을 확보하였다.

현무암의 화학적 조성비 분석을 위하여 암석절단기를 이용해 약 1cm<sup>3</sup> 정도 크기의 암편을 제작하였다. 또한 풍화와 변질의 영향을 최소화하기 위하여 가능한 큰 시료의 안쪽 부분을 이용하였다. 암편은 니켈 분쇄기(nickel mortar)와 체를 이용하여 분말화한 후 XRF(X-ray

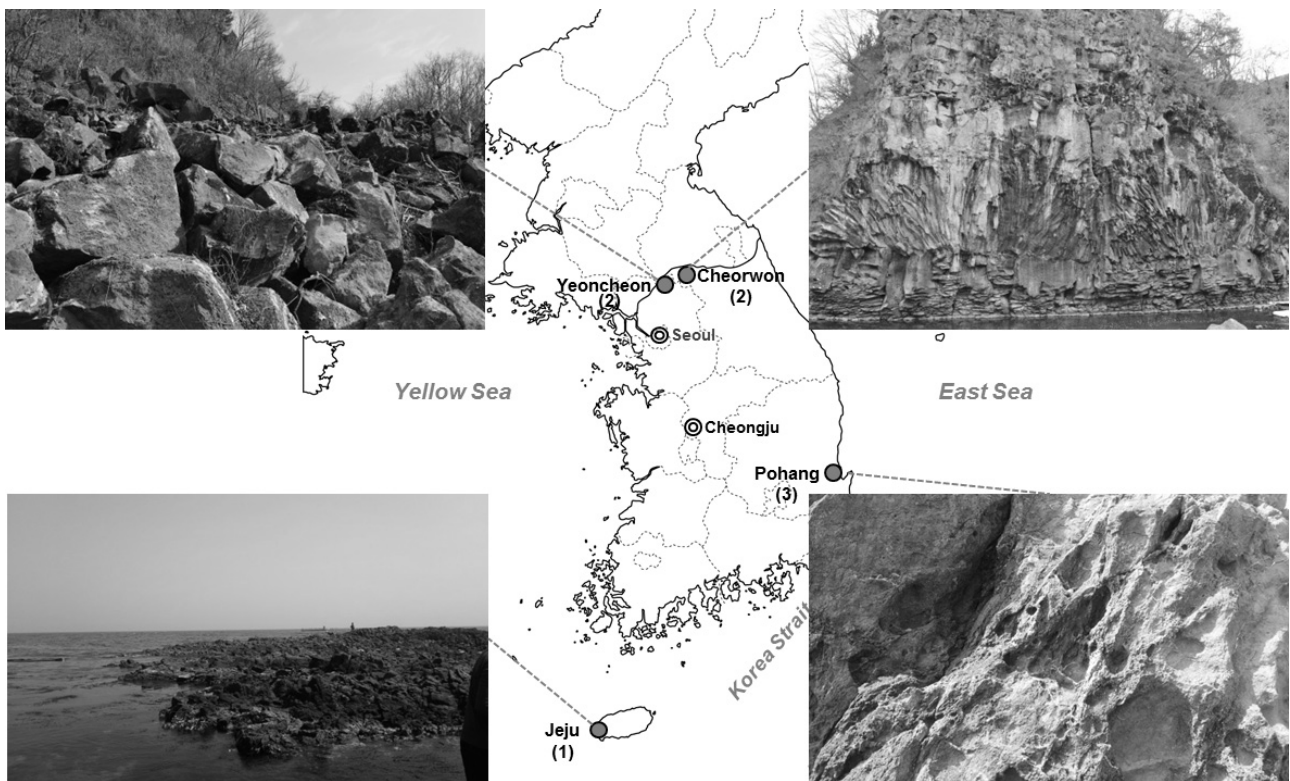


Fig. 2. Igneous basalt sites in Korea (raw material candidates for the Korean lunar simulant)

fluorescence) 장비(XRF-1800; Shimadzu Co.)를 이용하여 무기화학 성분 분석을 수행하였다(Table 3).

분석결과 경상북도 포항의 현무암의 주 성분 값은 SiO<sub>2</sub> 성분이 46.7-61.2%로 Lunar soil 14163(47.3%)보다 높으며, FeO 성분은 0.75-3.67%로 소량이며 원시료 채취 지역이 바다 근처라 다량의 염분을 포함하고 있어 인공 월면토의 모암으로 사용되기 부적합한 것으로 평가되었다. 제주도 한림읍 수월리에서 채취한 현무암은 SiO<sub>2</sub> 성분이 47.5%로 달 토양과 화학적 비율은 유사하고 FeO 성분 또한 8.47%로 화학적 함유량이 유사하다. 하지만 비록 CaO 성분이 9.20%로 실제 월면토의 함유량(11.4%)과 유사하나 다량의 Ca는 지구상에서 공기 중의 물과 이산화탄소를 흡수하여 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)과 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)으로 분해될 가능성이 높다. 아울러 제주도는 도내 현무암의 외부반출이 제한되어 있어 제주 지역 현무암은 인공월면토로의 상용화에 제약이 많다.

한반도 중부 지역의 경기도 연천과 강원도 철원 지역의 현무암은 전체적으로 Fe 함량이 높은 것으로 확인된

다. 관입 현무암은 분출 현무암에 비해 마그마 결정작용 시 감람석, 단사회석, 사장석 결정화와 무관한 MgO 함량이 증가하는 특징이 있다. 경기도 연천의 경우 관입 현무암의 FeO 함량이 8.83%로 다른 지역에 비해 월등히 높고, 전체 철 함량과 화학적 조성이 실제 달 토양과 가장 유사하나, 강원도 연천 전곡리 지역은 군사보호구역(민통선 인근)으로 인공월면토 제작을 위한 대규모 현무암 채굴이 어려운 문제가 있다. 이에 비해 강원도 철원 지역 관입 현무암의 FeO 함량(6.64%)은 경기도 연천보다 낮으나, 전체 철 함량(FeO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)은 11% 이상으로 인공월면토 사용하기에 적합하고, 채석 및 이용이 용이하여 한국형 인공월면토 개발을 위한 원재료(raw material)로 선정하였다.

#### 4.2 인공월면토 제작을 위한 입도 재조성

실제 달 토양과 유사한 입도분포를 조성하기 위해 원재료로 선정된 강원도 철원의 관입 현무암을 분쇄 후 입

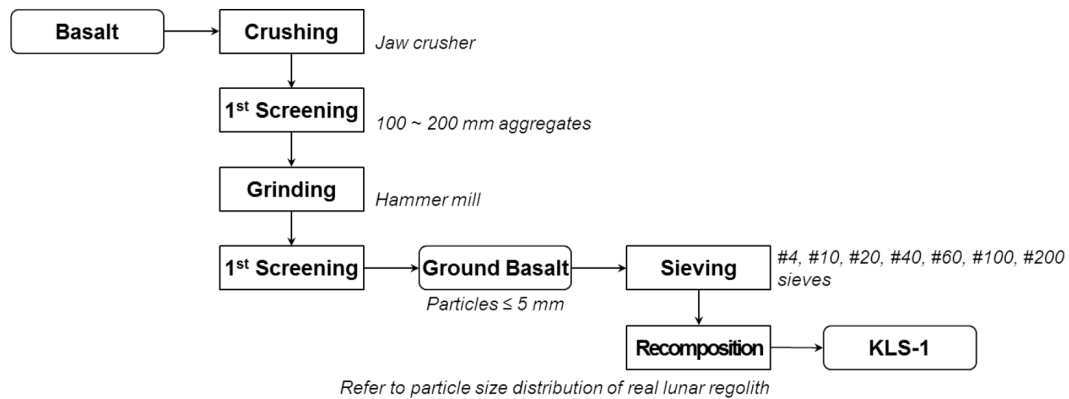


Fig. 3. Overall manufacture process to conduct a lunar simulant prototype using natural igneous basalt

Table 3. Chemical compositions of igneous rock sites in Korea

Element	Yeoncheon (Jeongok-ri)		Cheorwon		Pohang (Guryongpo)	Pohang (Daljeon-ri)	Pohang (Mopo-ri)	Jeju (Suwon-ri)
	Intrusive rock	Effusive rock	Intrusive rock	Effusive rock				
SiO <sub>2</sub>	47.6	48.1	48.0	48.1	57.7	46.7	61.2	47.5
TiO <sub>2</sub>	1.76	1.75	1.67	1.78	0.89	1.86	0.72	2.56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.3	15.3	15.3	15.8	16.6	17.8	17.9	14.1
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>								
FeO	8.83	7.89	6.64	6.13	1.21	3.67	0.75	8.47
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.22	3.17	4.75	3.78	6.15	3.91	4.95	3.29
MnO	0.18	0.18	0.17	0.16	0.20	0.13	0.14	0.16
MgO	9.79	9.65	9.64	7.53	2.15	5.88	1.63	8.67
CaO	8.26	8.45	8.38	8.40	5.31	4.88	5.12	9.20
Na <sub>2</sub> O	2.80	2.94	3.42	2.95	3.59	6.18	4.60	3.02
K <sub>2</sub> O	1.53	1.54	1.52	1.56	2.62	2.67	2.03	1.53
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.37	0.34	0.33	0.36	0.20	1.63	0.26	0.48

도별로 분류한 후 재입도(recomposition) 하는 과정을 수행하였다(Fig. 3). 1차 파쇄공정으로 현무암괴를 10-20cm 크기로 가공하고 토사 및 불순물을 제거하였다. 2차로 파쇄 후에는 #4, #10, #20, #40, #60, #100, #200 표준체로 분쇄 현무암을 제거를 하였다. 실제 달 토양(lunar soil 14163)의 입도분포 데이터(McKay et al., 1972)를 토대로 분쇄 현무암을 재입도하여 한국형 인공월면토 시제품(KLS-1; Korean Lunar Simulant-1)을 도출하였다.

재입도를 통해 조성된 한국형 인공월면토 시제품(KLS-1)의 입도분포는 다른 국외 인공월면토(JSC-1, 미국; FJS-1, 일본)들 보다 실제 달 토양(lunar soil 14163)의 입도분포에 가장 근접한 것으로 평가된다(Fig. 4). 특히 실제 월면토의 세립질(< 0.075mm) 함량(48.92%)과 입도분포와 KLS-1(세립질 함량 48.2%)가 가장 유사하게 조성됨을 확인할 수 있다. 다른 인공월면토들과 마찬가지로

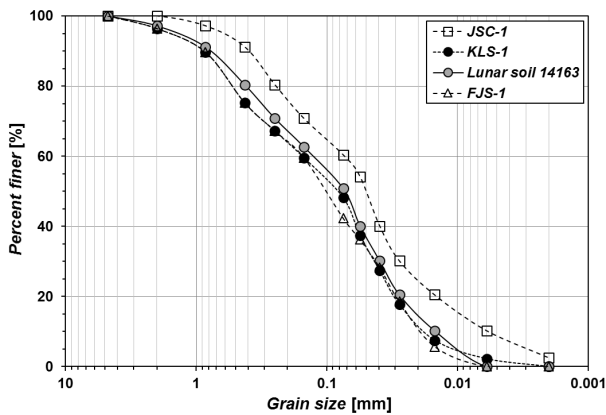


Fig. 4. Particle size distribution of real lunar regolith, lunar simulants (JSC-1 & FJS-1), and KLS-1

Table 4. Chemical compositions of KLS-1 and real lunar regolith (lunar soil 14163)

Element	KLS-1	Lunar Soil 14163	Difference
SiO <sub>2</sub>	48.00	47.30	+0.70
TiO <sub>2</sub>	1.67	1.60	+0.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.30	17.80	-2.50
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	-	-
FeO	6.64	10.50	-3.86
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.75	-	-4.75
MnO	0.17	0.14	+0.03
MgO	9.64	9.60	+0.04
CaO	8.38	11.40	-3.02
Na <sub>2</sub> O	3.42	0.70	+2.72
K <sub>2</sub> O	1.52	0.55	+0.97
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.33	-	-0.33
S	0.01	-	-0.01

KLS-1은 USCS 분류법에 의해 실트질모래(SM)으로 분류된다.

Table 4는 한국형 인공월면토 시제품(KLS-1)과 실제 월면토(lunar soil 14163)의 화학 조성을 비교한 결과이다. KLS-1은 실제 월면토에 비해 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, CaO 함량은 낮으나, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>O 함량이 높고, TiO<sub>2</sub>, MnO, MgO 함량은 거의 유사함을 확인할 수 있다. 특히 다른 국외 인공월면토들의 화학조성(Table 2)과 비교할 때 산화철 함유량을 제외하고는 대부분 유사함을 확인할 수 있다. KLS-1의 FeO 함량은 다른 인공월면토들과 비교할 때 낮은 편에 속하는데 이는 한국형 인공월면토 시제품이 화산재를 혼합하거나 철 함량을 높이기 위한 후처리(플라즈마 처리 등)를 하지 않았기 때문이다. 하지만 오히려 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 함량은 높은 편에 속해 미국의 JSC-1과 비슷한 화학적 조성을 이루고 있음을 확인할 수 있다.

실제 달 토양의 비중(Gs)은 2.9 이상의 값을 갖는 것으로 알려진다(Colwell et al., 2007). Apollo program 중 지구로 채집해온 lunar soil 14163의 비중은 3.1의 값을 보인다(Carrier, 2003). 따라서 입도분포, 화학적 조성 못지 않게 인공월면토의 비중 또한 인공월면토 개발에 있어 매우 중요한 위치를 차지한다(Sibille et al., 2005).

본 연구에서는 국외 인공월면토인 JSC-1, FJS-1와 한국형 인공월면토 시제품의 비중을 Table 5와 같이 구했다(ASTM D854-14 참조). 그 결과, JSC-1은 2.9, FJS-1은 2.94의 값을 보였으며, 한국형 인공월면토 KLS-1의 경우 2.94로 lunar soil 14163 보다는 낮으나 국제적으로 공인 받을 수 있는 인공월면토의 기본 조건을 충족시킴을 확인할 수 있다. KLS-1은 다른 재료 첨가 또는 화학적 처리 없이 오로지 분쇄현무암을 이용하여 조성하였음에도 2.9 이상의 비중 값을 보일 수 있는 데에는 일반적으로 비중 값이 2.7~3.0 사이에 분포하고 있는 국내 관입현무암의 특성(Yeon et al., 1999; Min and Jeon, 1999; Park et al., 2014; Nam et al., 2008)에서 기인한 것으로 판단된다.

### 4.3 전자주사현미경(SEM)을 이용한 입자특성 분석

본 연구에서 제시한 한국형 인공월면토 시제품(KLS-1)

Table 5. Specific gravity (G<sub>s</sub>) values of lunar regolith, JSC-1, FJS-1, and KLS-1 lunar simulants

Specimens	Lunar soil 14163	JSC-1	FJS-1	KLS-1
G <sub>s</sub>	3.10	2.90	2.94	2.94



과 기존 국외 인공월면토의 가장 큰 차이점은 인공월면토 개발에 이용된 원재료(raw material)이다. JSC-1는 화산재(Volcanic ash)를 사용하였고, FSJ-1도 급속고결 용암을 사용한 반면 KLS-1은 상대적으로 그 형성이 오래된 신생대 4기 관입현무암을 사용함으로써 입자특성(형상, 거칠기 등)이 다를 수 있기 때문에 전자주사현미경을 이용해 세 인공월면토에 대한 미시적 관찰을 수행하였다.

인공월면토는 분말형태로 탄소접착지(carbon adhesive sheet)에 얇게 살포된 후 진공상태에서 오스뮴(Os; osmium) 코팅(1 min)을 한 후 전자주사현미경(Magellan XHR 400L) 장비를 이용한 관찰을 수행하였다. 신호는 이차

전자(secondary electron mode)를 이용하여 획득하였고, 전자주사 레이저 전압은 5.0kV로 유지하였다.

Fig. 5는 500배 배율로 확대한 JSC-1, FJS-1, 그리고 KLS-1 인공월면토의 SEM 이미지를 보여준다. 대체적으로 세 인공월면토 모두 비슷한 입자크기와 분포를 보이나, KLS-1의 입자형상이 다른 두 인공월면토에 비해 각져 있음(more angular)을 확인할 수 있다. 반면, JSC-1와 FJS-1의 표면은 KLS-1보다 거칠다(rougher surface)는 것이 확인된다. 이는 인공월면토 제작을 위한 원재료 분쇄방법, 화산재의 유무, 그리고 후속처리(플라즈마 처리 등) 여부에 따른 것으로 판단된다. 따라서 향후 보다 정밀하고 신뢰성(유사성) 높은 한국형 인공월면토 개발을 위해서는 본 연구에서 제시된 KLS-1을 바탕으로 KLS-1의 표면 거칠기를 실제 달 토양과 유사하게 구현하기 위한 후속 연구의 필요성이 제기된다.

## 5. 결론

인공월면토는 지구상에서 달과 유사한 실증환경을 조성하고 앞으로 개발될 각종 우주 장비들의 검증을 위해 꼭 필요한 재료이다. 현존하는 인공월면토는 현실적으로 실제 달 토양을 100% 반영하지는 못하지만 우주 개발을 위한 달 환경에서 최적화된 건설기술과 현지자원개발에 사용될 새로운 인공월면토의 개발은 우주 강국 자립을 위한 첫걸음이라 할 수 있다.

본 연구에서는 본격적인 우주개발 시대의 개막에 대비하기 위한 국내 우주기술 자립화와 미래 우주관련 신시장 선점을 위해 한국형 인공월면토 개발을 수행하였다. 한국형 인공월면토를 제작하기 위해 실제 달 토양(Lunar Soil 14163)과 기존 국외 인공월면토(JSC-1, FJS-1)의 물리적·화학적 특성을 참고하여 한국형 인공월면토 개발을 위한 기초연구를 수행하였다.

우선 달 토양과 화학적 조성비, 특히 전체 철 함량( $FeO + Fe_2O_3$ )이 유사한 국내 현무암을 조사하여, 8개 현무암 중 중 강원도 철원의 신생대 4기 현무암을 한국형 인공월면토 제작을 위한 모암(raw material)로 선정하였다. 채택된 현무암은 공장과 실험실에서 분쇄 및 스케일링(scaling)한 후 실제 달 토양과 유사하게 재입도 성형하여 한국형 인공월면토 시제품을 도출하고, 이를 KLS-1(Korea Lunar Simulant - 1)이라 명명하였다. 본 연구를 통해 도출된 한국형 인공월면토 시제품(KLS-1)은 기존 국외 인공월면토들 보다 실제 달 토양의 입도분

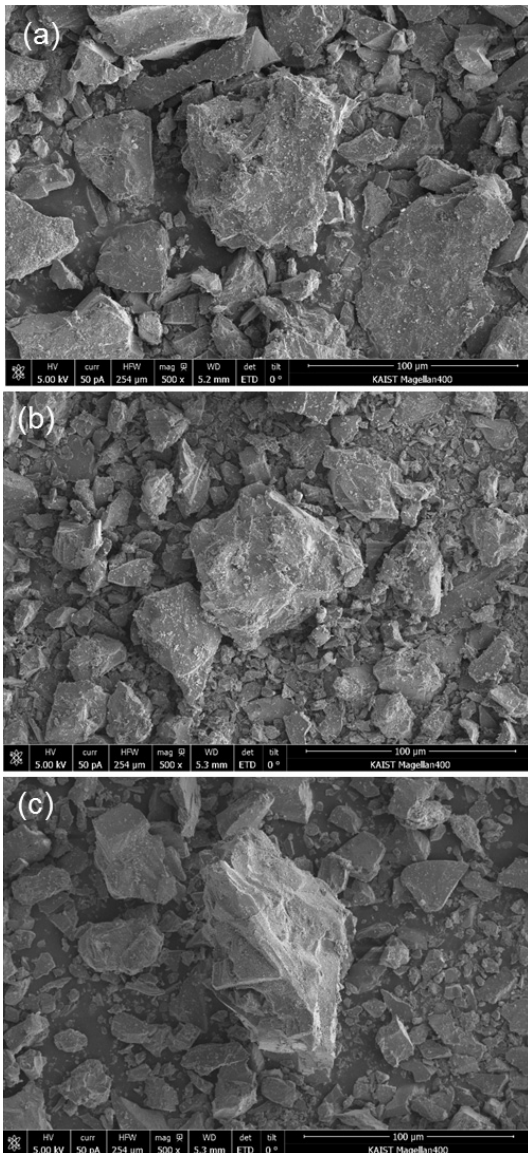


Fig. 5. SEM (Scanning electron microscope) images of (a) JSC-1, (b) FJS-1, and (c) KLS-1

포에 더 가깝고, 화학적 조성 또한 큰 차이가 없는 것으로 확인된다.

기존 국외 인공월면토 JSC-1과 FJS-1의 단가는 각각 17,180 USD/ton과 4,000 USD/ton으로 인공월면토의 높은 비중(2.9~3.0)을 고려하면 1m<sup>2</sup> 넓이의 실험시설에 34cm 가량 실증환경을 조성하는데 인공월면토 비용만 4,000~17,180 USD의 비용이 소요되는 실정이다. 본 연구에서 제시한 한국형 인공월면토의 경우 그 단가가 1,000 USD/ton 이하로 계상되어 기존 국외 인공월면토에 비해 매우 경제적인 장점이 있다.

본 연구는 한국형 인공월면토 개발을 위한 기초연구(입도 분포와 화학적 성분 모사 등)에 초점을 두고 진행하였다. 국내의 현무암을 이용하여 인공월면토의 생산 가능성을 확인하고 추가적으로 다양한 지반공학적 특성과 분석이 요구되며, 실제 월면토와의 유사성을 높이기 위해서는 플라즈마(plasma) 또는 유리결정(glass fragment bonding) 처리 등을 통한 어글루티네이트(agglutinate)와 미세먼지(lunar dust)를 추가하는 한국형 인공월면토의 고도화 연구가 필요하다. 고도화된 한국형 인공월면토(가칭 KLS-1A)의 비용은 2,500 USD/ton 이하를 목표로 개발이 추진될 예정이며, 후속 연구의 성공 시 우리나라는 세계에서 가장 신뢰성(유사성) 높고, 경제적인 인공월면토를 확보하게 되어 국내는 물론 전세계 우주산업 및 관련 연구에 이바지할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(15주요-달 환경에서의 안정적인 임무수행을 위한 월면지반 재현 및 실증환경 조성기술 개발)의 일환으로 진행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌 (References)

1. Alshibli, K. and Hasan, A. (2009), "Strength Properties of JSC-1A Lunar Regolith Simulant", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.135, No.5, pp.673-679.
2. Battler, M. M. and Spray, J. G. (2009), "The Shawmere Anorthosite and OB-1 as Lunar Highland Regolith Simulants", *Planetary and Space Science* 57, No.14-15, pp.2128-2131.
3. Binder, A. B. (1974), On the Origin of the Moon by Rotational Fission. *The moon*, Vol.11, No.1-2, pp.53-76.
4. Bui, H. H., Kobayashi, T., Fukagawa, R., and Wells, J. C. (2009), "Numerical and Experimental Studies of Gravity Effect on the

- Mechanism of Lunar Excavations", *Journal of Terramechanics*, Vol.46, No.3, pp.115-124.
5. Carrier, W. (2003), "Particle Size Distribution of Lunar Soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.29, No.10, pp. 956-959.
6. Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., and Pambaguian, L. (2014), "Building Components for an Outpost on the Lunar Soil by Means of a Novel 3D Printing Technology", *Acta Astronautica*, Vol.93, pp.430-450.
7. Chua, K. M., Pringle, S., and Johnson, S. W. (1994), "A Simple Method of Producing Lunar Soil Simulants for Engineering Studies", In *Engineering, construction, and operations in space IV*.) ASCE, Albuquerque, New Mexico, United States, pp.867-877.
8. Colwell, J. E., Batiste, S., Horányi, M., Robertson, S., and Sture, S. (2007), "Lunar Surface: Dust Dynamics and Regolith Mechanics", *Reviews of Geophysics*, Vol.45, No.2, pp.1-16.
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. Kanamori, H., Udagawa, S., Yoshida, T., Matsumoto, S., and Takagi, K. (1998), Properties of Lunar Soil Simulant Manufactured in Japan. In *Space 98*.) American Society of Civil Engineers, pp.462-468.
11. Kim, H. S., Kil, Y., and Lee, M. W. (2013), "Petrochemical Characteristics of the Duibaejae Volcanic Rocks from Goseong, Gangwon-do, Korea", *Journal of the Korean earth science society*, Vol.34, No.2, pp.109-119.
12. Kim, K. J., Lee, J.-H., Seo, H., Ju, G., Lee, S.-R., Choi, G.-H., Sim, E.-S., and Lee, T. S. (2014), "An Introduction to the Lunar and Planetary Science Activities in Korea", *Advances in Space Research*, Vol.54, No.10, pp.2000-2006.
13. Klosky, J., Sture, S., Ko, H., and Barnes, F. (2000), "Geotechnical Behavior of JSC-1 Lunar Soil Simulant", *Journal of Aerospace Engineering*, Vol.13, No.4, pp.133-138.
14. Latham, G., Ewing, M., Dorman, J., Lammlein, D., Press, F., Toksöz, N., Sutton, G., Duennebier, F., and Nakamura, Y. (1972), Moonquakes and lunar tectonism. *The moon*, Vol.4, No.3-4, pp. 373-382.
15. Mackenzie, D. (2003) *The big splat, or, How our moon came to be*. Hoboken, N.J., John Wiley & Sons.
16. Matsushima, T., Katagiri, J., Uesugi, K., Tsuchiyama, A., and Nakano, T. (2009), "3D Shape Characterization and Image-Based DEM Simulation of the Lunar Soil Simulant FJS-1", *Journal of Aerospace Engineering*, Vol.22, No.1, pp.15-23.
17. McKay, D. S., Carter, J. L., Boles, W. W., Allen, C. C., and Allton, J. H. (1994), "JSC-1: A New Lunar Soil Simulant", *Engineering, construction, and operations in space IV*, Vol.2, pp.857-866.
18. McKay, D. S., Heiken, G. H., Taylor, R. M., Clanton, U. S., Morrison, D. A., and Ladle, G. H. (1972), Apollo 14 soils: Size distribution and particle types In *Proceedings of Third Lunar Science Conference*, Vol.1, pp.983-994.
19. Min, K. W. and Jeon, H. I. (1999), "Characterization of Basalts Distributed in Cheolwon Area", *Journal of Advanced Mineral Aggregate Composites*, Vol.4, pp.255-262.
20. Mitler, H. E. (1975), Formation of an iron-poor Moon by partial capture, or: Yet another exotic theory of lunar origin. *Icarus*, Vol.24, No.2, pp.256-268.
21. Morris, R. V. (1980), "Origins and Size Distribution of Metallic Iron

- Particles in the Lunar Regolith”, In *The 11th Lunar and Planetary Science Conference.*) Pergamon Press, Houston, Vol.2, pp.1697-1712.
22. Nakashima, H., Fujii, H., Oida, A., Momozu, M., Kanamori, H., Aoki, S., Yokoyama, T., Shimizu, H., Miyasaka, J., and Ohdoi, K. (2010), “Discrete Element Method Analysis of Single Wheel Performance for a Small Lunar Rover on Sloped Terrain”, *Journal of Terramechanics*, Vol.47, No.5, pp.307-321.
  23. Nakashima, H., Shioji, Y., Tateyama, K., Aoki, S., Kanamori, H., and Yokoyama, T. (2008), “Specific Cutting Resistance of Lunar Regolith Simulant under Low Gravity Conditions”, *Journal of Space Engineering*, Vol.1, No.1, pp.58-68.
  24. Nam, J.-M., Yun, J.-M., Song, Y.-S., and Kim, J.-H. (2008), “Analysis of Engineering Properties to Basalt in Cheju Island”, *Journal of the Korean geosynthetic society*, Vol.7, No.1, pp.13-21.
  25. Nemchin, A., Timms, N., Pidgeon, R., Geisler, T., Reddy, S., and Meyer, C. (2009), “Timing of Crystallization of the Lunar Magma Ocean Constrained by the Oldest Zircon”, *Nature Geoscience*, Vol.2, No.2, pp.133-136.
  26. Park, Soo, J., Lee, Sung, E., and Choi Heebok (2014), “Application of Powdered Waste Glasses and Calcium Carbonate for Improving the Properties of Artificial Lightweight Aggregate Made of Recycled Basalt Powder Sludge”, *Journal of The Korean Institute of Building Construction*, Vol.14, No.3, pp.230-236.
  27. Rasmussen, K. L. and Warren, P. H. (1985), “Megaregolith Thickness, Heat Flow, and the Bulk Composition of the Moon”, *Nature*, Vol.313, No.5998, pp.121-124.
  28. Schnetzler, C. C. and Nava, D. F. (1971), “Chemical Composition of Apollo 14 Soils 14163 and 14259”, *Earth and Planetary Science Letters*, Vol.11, No.1-5, pp.345-350.
  29. Sibille, L., Carpenter, P., Schlagheck, R., and French, R. A. (2005), *Lunar regolith simulant materials: recommendations for standardization, production, and usage.* Marshall Space Flight Center.
  30. Stroud, R. (2009), *The book of the moon.* New York, Walker & Co.
  31. Taylor, L. and Cirlin, E.-H. (1985), A Review of ESR Studies on Lunar Samples In *Proceedings of ESR dating and dosimetry.* IONICS, pp.19-39.
  32. Taylor, L. A., Pieters, C. M., Keller, L. P., Morris, R. V., and McKay, D. S. (2001), “Lunar Mare Soils: Space Weathering and the Major Effects of Surface-correlated Nanophase Fe”, *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol.106, No.E11, pp.27985-27999.
  33. Taylor, S. R. (1975), *Lunar science: a post-Apollo view; scientific results and insights from the lunar samples.* New York, Pergamon Press.
  34. Ueda, T., Matsushima, T., and Yamada, Y. (2010), “Effect of Grain Size Distribution on Mechanical Properties of Lunar Soil”, In *Earth and Space 2010.* American Society of Civil Engineers, pp.49-56.
  35. Weiblen, P. W., Murawa, M. J., and Reid, K. J. (1990), “Preparation of simulants for lunar surface materials”, In *Engineering, Construction, and Operations in Space II.* (Johnson, S. W., and Wetzel, J. P. (eds)) ASCE, Albuquerque, New Mexico, United States, pp.98-106.
  36. Weill, D. F., Greive, R. A., Mccallum, I. S., and Bottinga, Y. (1971), “Mineralogy-petrology of Lunar Samples. Microprobe Studies of Samples 12021 and 12022; Viscosity of Melts of Selected Lunar Compositions”, In *The Second Lunar Science Conference.*) M.I.T. Press, Vol. 1, pp. 413-430.
  37. Yeon, G. S., Lee, Y. S., and Kim, C. Y. (1999), “Physical and Mechanical Properties of Polymer Concrete using Chulwon Basalt”, *Journal of Advanced Mineral Aggregate Composites*, Vol.4, pp. 245-254.
  38. Yoo, S. H., Kim, H. D., Lim, J. H., and Park, J. S. (2014), Development of KAU Mechanical Lunar Simulants and Drop Test of Lunar Landing Gears. *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.42, No.12, pp.1037-1044.
  39. Zeng, X., He, C., Oravec, H., Wilkinson, A., Agui, J., and Asnani, V. (2009), “Geotechnical Properties of JSC-1A Lunar Soil Simulant”, *Journal of Aerospace Engineering*, Vol.23, No.2, pp.111-116.
  40. Zheng, Y., Wang, S., Ouyang, Z., Zou, Y., Liu, J., Li, C., Li, X., and Feng, J. (2009), “CAS-1 Lunar Soil Simulant”, *Advances in Space Research*, Vol.43, No.3, pp.448-454.

Received : June 11<sup>th</sup>, 2015

Revised : June 26<sup>th</sup>, 2015

Accepted : June 29<sup>th</sup>, 2015