

CASE STUDY

탐사로버의 주행성능 검토를 위한 인공 화성 토양 개발관련 연구 동향

유병현^{1*}, 박승수², 신휴성³

¹한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 전임연구원, ²한국건설기술연구원 미래스마트연구본부 박사후연구원,

³한국건설기술연구원 미래스마트연구본부 선임연구위원

Research Trends in the Development of Martian Soil Simulants for the Evaluation of Rover Mobility Performance

Byung-Hyun Ryu^{1*}, Seung-Soo Park², and Hyu-Soung Shin³

¹Senior Researcher, Department of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Postdoctoral Researcher, Department of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

³Senior Research Fellow, Department of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

*Corresponding author: tnt306@kict.re.kr

Received: September 11, 2023

Revised: October 5, 2023

Accepted: October 6, 2023

ABSTRACT

Scientific exploration of extraterrestrial planets has gripped human imagination since the advent of space travel. Human missions to Mars could produce insight into the essential questions of how, when and where life began on Earth. Such missions would only be feasible using local space resources materials, a concept called in situ-resource utilization (ISRU). The purpose of this paper is to provide a thorough review of the currently available Mars soil simulants and to determine those with geotechnical properties most appropriate for vehicle mobility studies. Sourcing and processing are considered since full-scale studies require bulk quantities of material on the order of tens of tons. This review identifies the simulants with the highest fidelity to Mars wind drift soils. In addition, recommendation guide for mars soil simulant development made.

Keywords: Planet exploration, In-Situ resource utilization, Mars, Soil simulant

초록

우주 여행이 시작된 이래로 우주 행성에 대한 과학적 탐사는 인간의 상상력을 높이고 있다. 화성에 대한 임무는 지구에서 생명체가 언제, 어디서, 어떻게 시작되었는지에 대한 중요한 질문에 답을 제공할 수 있으며, 이 임무는 현지 우주 자원 활용(ISRU) 개념을 통해서만 실행 가능하다. 이 논문에서는 현재 우주 강국들을 중심으로 진행 중인 화성 탐사를 다루며, 인공 화성토양 조사와 탐사 로버의 이동성 연구를 중점으로 다루고 있다. 화성의 실제 지상 환경을 모사하기 위해서는 수십 톤의 토양이 필요하므로 원료 확보와 처리 과정도 고려되어야 한다. 이를 위해 화성 표면 토양과 유사한 특성을 가진 인공 토양을 선별하고, 인공 화성토양 개발을 위한 필요 사항을 제시한다. 이 연구를 통해 화성 탐사 임무에서 로버의 이동성을 평가하는 데 필요한 적절한 화성 토양을 개발하는 데 도움이 될 것으로 기대된다.

핵심어: 행성탐사, 현지자원활용, 화성, 인공 화성토양



1. 서론

우주 연구의 오랜 관심사는 인간을 달과 그 이상의 행성에 보내는 것이다. 화성은 태양계 내의 행성 중에서 지구와 가장 비슷한 특징을 갖고 있고, 생명체의 존재 가능성이 매우 커서 과학적 연구목적 뿐만 아니라 인류의 새로운 거주지인 제2의 지구로서 뜨거운 관심을 받고 있다. 미국 항공우주국 NASA (National Aeronautics and Space Administration)는 아르테미스(Artemis) 프로그램을 통해 달 기지를 건설하고 우주인을 달에 정착시킴으로써 향후 달을 화성탐사의 전초기지로 활용할 계획을 갖고 있다. 미국의 민간 우주기업인 Space-X는 아르테미스 프로그램에 적극 참여하고 있고 이를 통해 기술과 경험을 축적하여 스타쉽(Starship) 우주선 개발을 통해 인류를 화성으로 이주시키는 화성 식민지화 프로젝트를 진행하고 있다.

NASA는 2024년까지 달로, 2030년까지 화성으로 인간을 보내는 목표를 달성하기 위한 지속 가능한 탐사 계획을 수립해 왔다. 이 계획은 아르테미스와 루나 게이트웨이(Lunar Gateway) 같은 달 프로그램에 의존하며, 달을 화성의 거점기지로 활용하는 것을 목표로 하고 있다.

또한, 화성 탐사의 목표 중 하나인 화성 표본 샘플 반환 프로젝트(MSR: Mars sample-return mission)는 화성에서의 미션이 로봇 중심에서 인간 중심으로 전환되는 데에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 이 프로젝트에서는 화성 표면에 로버를 착륙시켜 로버에 탑재된 코어 드릴을 사용하여 토양과 암석 샘플을 수집하고, 이러한 샘플을 지구로 반환할 예정이다. 이렇게 반환된 샘플은 과학자들이 화성의 지형을 연구하고 토양과 암석의 화학적, 기계적, 및 공학적 특성을 결정하는 데 도움이 되며, 궁극적으로 화성에 생명체가 존재했는지에 대한 오랜 질문에 대한 답을 찾는 데 기여할 것으로 예상된다. 더불어, 이렇게 얻은 토양과 암석 샘플의 특성은 미래 행성 탐사 로버의 성공적인 설계와 개발에 필수적이다(NASA, 2019).

이러한 선행 임무는 로버 디자인의 개선과 샘플링 기능의 테스트를 포함하여 이전에 탐사되지 않은 지역을 탐험하는 데 도움이 될 수 있다. 어떤 임무나 위치에서든지 지표면 탐사 로버의 설계와 성능을 비행 전에 철저히 검증하는 것은 매우 중요하다. 이를 위해서는 행성의 지형을 본 판 모의 지형에서의 테스트가 필요하다. 이러한 모의 지형은 탐사 로버가 만날 수 있는 토양 유형을 대표할 수 있어야 하며, 시뮬레이션에 필요한 매개 변수를 개발하고 구성 요소 수준 및 탐사로버의 이동성을 검증할 수 있도록 설계되어야 한다. 달의 경우, 이미 표면에 대한 많은 정보가 알려져 있으며, 우주 비행사들의 탐사를 통하여 지형 샘플이 지구로 반환된 바 있다. 이렇게 반환된 샘플로부터 얻은 정보를 활용하여 다양한 종류의 인공 월면토가 지형-기계 상호 작용을 평가하기 위한 목적으로 개발되었다(Oravec et al., 2010, Chunmei et al., 2013). 반면 화성 토양의 경우 화성에 인간이 아직 발을 딛지 못하여 월면토에 비하여 알려진 정보가 많지 않다. 특히 아직까지 실제 화성 토양의 샘플은 지구로 반환된 것이 없어 화성에 대한 원격 탐사로부터 얻은 데이터를 기반으로 화성 인공토양 개발이 진행되고 있다(NASA, 2019). 인공 화성토는 제품에 따라 각각 화학적, 물리적 특성이 다르기 때문에, 화성 표면의 이동성 또는 지형-기계 상호 작용의 지상 테스트 등에 적합한 최적의 모사체를 결정하는 것은 복잡한 과제이다.

이 논문의 목표는 현재 사용 가능한 화성 토양 모사체를 철저히 검토하고, 지반-차량 상호 작용 또는 이동성 연구에 가장 적합한 공학적 특성을 결정하는 것이다. 이 과정에서 물리적 및 기계적 특성뿐만 아니라 원료 확보 및 처리에 대한 내용도 고려하고자 한다. 특히 입도분포, 입자 모양, 밀도, 강도, 내부 마찰각과 같이 전체 지반강도를 제어하고 차량 주행 성능에 영향을 미치는 토양 특성도 분석하였다. 화성 토양의 성질을 분석하고 현재까지 제작된 해외 인공 화성토의 사례를 연구함으로써 한국형 인공 화성토 개발의 기반을 마련하고자 한다.

2. 화성의 물리적 성질

2.1 화성의 물리적 성질

화성의 지표부근의 대기압은 약 0.006기압으로 지구의 약 0.75%에 불과하다. 이렇게 희박한 대기는 화성의 중력이 작은 데서 비롯된 결과이다. 화성은 태양으로부터 약 1.5AU 떨어져 있으며, 공전주기와 자전주기는 각각 686.971일, 24시간 37분 2초이다. 화성의 자전축은 지구와 거의 비슷하게 25.19도만큼 기울어져 있어 지구와 마찬가지로 계절변화가 나타난다. 화성의 지름은, 부피, 질량은 지구 대비 각각 1/2, 1/6, 1/10 수준이다. 그 외 지구와 화성의 물리 화학적 특성을 비교하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Comparison of physical / chemical aspects of the Earth and Mars

Properties	Earth	Mars
Mass	5.9×10^{24} kg	6.4×10^{23} kg
Radius	6,378 km	3,400 km
Mean density	5,513 kg/m ³	3,930 kg/m ³
Rotation cycle	24 hrs	24 hrs 37 mins
Extreme temperature	-89°C ~ +58°C	-87°C ~ -5°C
Axial tilt	23.4°	25°
Atmospheric pressure	1 atm	0.006 atm
Composition of atmosphere	N ₂ (78%), O ₂ (21%), etc.	CO ₂ (95%), H ₂ (3%), Ar (1.6%), etc.

화성 대기의 구성은 이산화탄소가 약 95%, 질소가 약 3%, 아르곤이 약 1.6%이고, 다른 미량의 산소와 수증기 등을 포함하며, 이는 금성의 대기 구성과 매우 비슷하다(Zeng et al., 2015). 2003년 지구에서 망원경에 의한 관측으로 화성의 대기 중 메탄이 존재할 가능성이 제기되었고, 2004년에 마스 익스프레스 탐사선(Mars Express)의 조사에 의해 메탄의 존재가 사실상 확인되었다. 화성에 메탄이 존재한다는 것은 매우 흥미로운 사실인데, 이는 화성의 환경에서는 메탄이 빠르게 소멸될 수밖에 없음에도 불구하고, 화성 어딘가에서 메탄이 끊임없이 생성되고 있을(또는 적어도 최근 100년 이내 생성되었을) 가능성을 암시하는 것이기 때문이다.

화성의 대기는 계절에 따라 크게 변동하기도 한다. 겨울 몇 개월간 극지방에서 밤이 계속되면 지표의 온도는 매우 낮아지고 대기 전체의 약 25%가 얼게 되면서 대기압이 낮아진다. 이후 극에 다시 햇빛이 비추는 여름이 되면 얼었던 이산화탄소가 승화(고체에서 기체로 변함)하면서 기압이 높아져 극지방에 강한 바람을 일으킨다. 이렇게 생성된 강한 바람은 화성의 먼지 등을 이동시키는데 이 현상을 먼지폭풍이라 한다. 지구에서 바라보는 화성의 모습은 이러한 먼지폭풍에 의해 관측 시점에 따라 변하게 된다(Moore et al., 1999).

화성 표면의 온도는 약 -140°C~20°C 정도로 평균 온도는 약 -80°C이다. 이렇게 낮은 온도는 화성의 대기가 희박하여 열을 유지할 수 없기 때문으로 알려져 있다. 화성의 극지방에 존재하는 빙관 또한 이렇게 낮은 온도로 인해 유지될 수 있다.

2.2 화성의 지형 특성

화성의 지형은 북반구와 남반구로 구분지어 살펴볼 수 있다. 북반구는 용암류의 응결 혹은 대량의 물에 의한 암반층의 침식으로 형성된 평원으로, 남반구는 운석충돌에 의한 움푹 패인 지형이나 크레이터가 존재하는 고지로 특징지어진다. 이에 따라 지구에서

본 화성은 적도 지역을 경계로 구분되어 보이며 양쪽의 밝기가 다르다. 밝게 보이는 평원 지역은 산화철을 많이 포함한 붉은 흙과 모래로 덮여 있으며, 아라비아 대륙이나 아마조니스 평원 등으로 불린다. 반면 어두운 곳은 에리트레아 해(Mare Erythraeum라틴어로 홍해를 뜻함), 세이렌의 바다(Mare Sirenum), 오로라 만(Aurorae Sinus) 등의 이름으로 알려져 있다(Moore et al., 1989).

화성의 표면은 주로 현무암과 안산암으로 구성된다. 이들은 마그마가 지표 근처에서 굳어 생기는 암석으로, 암석 내 포함된 이산화규소의 양에 따라 구별된다. 화성의 대부분의 지역은 미세한 흙이 수 m 혹은 그 이상의 두께로 덮여있다. 이 먼지들은 대부분 산화철로 구성되어 있어 화성은 전체적으로 붉은 색을 띠고 있다(Golombek et al., 1999).

화성의 극지방에는 물과 이산화탄소의 얼음으로 이루어진 극관이 있으며 화성의 계절에 따라 그 크기가 변화한다. 이산화탄소 얼음은 여름에는 승화하여 암석으로 된 표면이 나타나고 겨울에는 다시 얼음이 된다. 그리고 물의 얼음은 여름에도 계속해서 극관에 얼어 있다.

화성의 올림푸스 산(Olympus Mons)은 높이가 약 25 km이며, 태양계 행성 중에 가장 높은 산이다. 이 산에는 타르시스 고지라고 불리는 넓은 고지에 있다. 화성에는 태양계 최대의 협곡인 마리네리스(Valles Marineris) 협곡이 존재하는데 이 협곡은 길이가 약 3,000 km, 깊이는 약 8 km, 그리고 부분적인 폭이 500 km에 달한다. 화성에서는 많은 크레이터도 발견되는데 그 중 가장 크기가 큰 크레이터는 헬라스 분지(Hellas impact basin)로 밝은 적색의 모래로 덮여있다(Arvidson et al., 2004).

Fig. 1에서 처럼 화성의 지표면에 존재하는 다양한 토양과 암석의 종류, 그리고 지형의 특성은 탐사 로버의 움직임과 성능에 큰 영향을 미친다. 이러한 특성들은 향후 화성 탐사 미션에서 로버가 이동하고 임무를 수행할 때 고려해야 할 중요한 정보로서, 로버의 경로 결정과 임무 성공 여부에 큰 역할을 한다.



Fig. 1. First photograph ever taken from the surface of Mars

미국 항공우주국(NASA)에서 화성의 생명체 존재 여부를 확인하기 위해 발사한 바이킹 랜더 미션(Viking lander mission)을 기반으로 화성의 적도 지역의 토양을 (1) Drift, (2) Crusty to cloddy, (3) Blocky, (4) Rock 등 4가지 그룹으로 분류하였다. Viking Lander I Mission을 포함한 각각의 화성 탐사 미션에서 얻어진 토양의 특성을 Table 2에 나열하였다.

Table 2. Typical mechanical properties of Martian terrain from various missions

Mission	Material Type	Particle Size	Bulk Density	Cohesion	Angle of Friction
		(μm)	(g/cc)	(kPa)	($^{\circ}$)
Viking Lander I	Drift	0.1-10	1.0-1.3	0-3.7	15.6-20.4
	Blocky	0.1-1500	1.2-2.0	2.2-10.6	28.4-33.2
	Rocks	35 k-240 k	2600	1000-10 k	40-60
Viking Lander II	Crusty/Cloddy	0.1-10	1.2-1.6	0-3.2	29.8-39.2
	Rocks	35 k-450 k	2600	1000-10 k	40-60
Pathfinder/Sojourner	Soil-like	<40	1.29-1.52	0.21 avg	34.3 avg
	deposits			0-0.42	30-40
	Crusty/Cloddy	--	1.5	0-3.6	33.6-39.8
MER - Spirit	Drift	--	1.2-1.5	1-15	20-25
MER - Opportunity	Surface Soil	--	1.3	1-5	20

지표 표면에 부유하고 있는 drift material은 지표면으로부터 약 23 cm 깊이까지 덮고 있다. 일반적으로 drift material은 부드러운 미립자로 구성되어있으며 응집력이 낮고 강도가 매우 약하며 다공성이다(Moore and Jankosky, 1989). crusty-to-cloddy materials 또한 미립자로 이루어진 재료로, 중간 밀도 토양과 유사한 특성을 나타내며(Christeinsen et al., 1992) 대략적으로 14 cm 깊이까지 표면을 덮고 있다. 한편 교란된 지역에서는 파쇄된 암석 물질의 조각이 미립자와 섞여 있음이 관찰되었다. 이 crusty-to-cloddy materials은 암석의 표면에서 층을 이루고 있는 형태로 관찰되는데, 표면에서 시멘트화 되었을 것으로 생각된다(Allen et al., 1998).

Blocky Soil은 강도가 크고 높은 응집력 값을 갖는데, 이는 시멘트화로 인한 것으로 보인다. Viking의 착륙 중에 고도의 침식을 겪었음에도 표면이 침식되지 않은 것은, 이 물질이 높은 응집력을 갖고 있음을 시사한다. 마지막으로, 지름이 3.5 cm에서 45 cm까지 다양한 밀도의 Rock materials가 Viking I와 II 착륙 지점 모두 근처에서 관찰되었으며 Christeinsen and Moore(1992)는 이러한 암석이 기반암에서부터 다공질의 성질을 가지고 있다고 설명했다.

Ares Vallis 근처의 Pathfinder 착륙 지점은 밀도가 높은 crusty-to-cloddy materials 물질로 덮여 있는 것으로 확인되었다. 이 물질은 먼지, 모래 입자, 흙덩어리, 자갈, 작은 바위 파편으로 구성되었다. 또한, 매우 미세한 입자로 구성된 drift materials이 발견되었으며, 3 cm 이상의 자갈이 희박하게 분포되어 있는 것으로 확인되었다. drift materials이 crusty-to-cloddy materials을 층층이 덮고 있고, 각 층이 다른 과정에서 유래되었음을 나타내는 증거도 발견되었는데, drift materials은 황사를 기원으로 형성되었을 가능성이 있고, crusty-to-cloddy materials은 운석 충돌에 의해 생성된 크레이터로부터 유래되었을 가능성이 있다.

Spirit MER의 착륙 지점인 Gusev 크레이터 근처에서 수집된 고해상도 이미지 및 실험 데이터를 통해 해당 지역의 지표는 크기 2 mm에서 16 mm까지 다양한 암석으로 덮여 있는 것으로 나타났다. Drift materials와 Crusty-to-cloddy materials은 주로 1 mm 미만의 입자로 이루어져 있으며, 이 위에 얇은 먼지 층이 존재하는 것으로 확인되었다. 한편, Pathfinder 착륙 지점과 유사하게 drift materials가 덮여 있는 것으로 나타났으며 이 위치에서 굴삭 실험 결과, 토양은 대략 65° 정도의 굴림 벽을 유지할 수 있는 낮은 수준의 응집력을 가지고 있었다. 또한, Arvidson et al.(2004)은 바퀴 침수 관측에서 베어링 강도, 응집 강도 및 내부 마찰각과 같은 역학 특성의 추정치를 제공했는데, 이러한 값은 위치에 따라 각각 5-200 kPa, 1-15 kPa 및 20~25°로 다양하게 나타났다.

이상에서 살펴본 바와 같이 이러한 연구에서 알 수 있듯이, 화성의 지형은 여러 가지 측면에서 지구와 유사하다. 공학자들은 화성 탐사지역을 바탕으로 지구의 여러 지역에서 화성 토양과 유사한 특성을 지닌 토양을 찾고 있다. 하와이의 화산 석류 지대와 Mars 토

양과 유사한 특성을 가지는 Pu'u Nene의 Cinder Cone (Gouache et al., 2011), 마르틴 고원에 유사한 지형적 흉내를 낸 캘리포니아의 모하비 사막, 그리고 호주의 바위 평원 등이 그 예로, 이러한 지역의 토양은 인공 화성토의 원료로 사용되고 있다(Marlow et al., 2008).

3. 인공 화성토양

3.1 인공 화성토양의 물성 결정

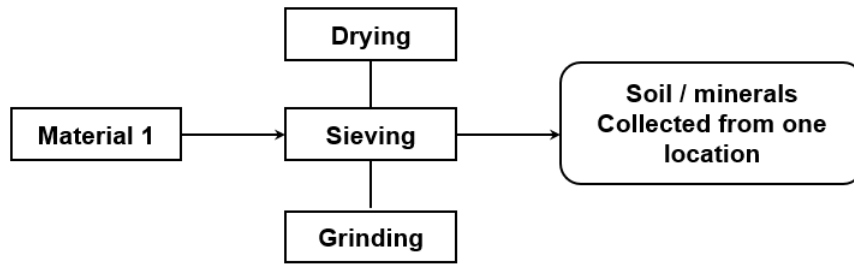
궤도선, 착륙선, 탐사선의 현지 및 원격 탐사를 통하여 화성 및 화성 토양에 대한 물성이 지속적으로 연구되어 왔으며 이러한 물성들이 인공 화성토양 개발에 반영되고 있다. 인공 화성토양은 현지자원 활용(ISRU) 연구 및 광범위한 우주 탐사 미션 수행의 검증에 사용될 수 있으며 특히 인공 화성 월면토를 이용한 화성 모의 지형 환경 테스트베드를 개발하면 로버의 미션 수행 시 겪게 될 어려움을 미리 구현해볼 수 있다. 인공 토양을 개발하기 위해 필요한 화성에서 채취한 시료가 없는 실정에서 간접적인 자료를 통해 인공 화성토의 물리적/화학적 특성을 도출해낼 수 있다.

물리적 특성은 입도 분포, 단위 중량, 마찰각, 점착력 등이 포함되는데, 이들 중 입도 분포 및 단위 중량은 광물 조성과 같은 화학적 특성을 분석함으로써 2차적으로 계산될 수 있다. Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM)라 불리는 분석 장비는 NASA의 Mars Reconnaissance Orbiter에 탑재되어 화성의 광물 분포 지도를 완성하는데에 많은 기여를 했으며 이로부터 화성 토양의 물성을 간접적으로 확인할 수 있었다. Curiosity호는 CheMin이라 불리는 X-선 회절, 형광분석이 가능한 장비를 탑재하였다. 특히 Curiosity 호에 탑재된 드릴을 통해 단단한 암석으로부터 고온 입자형상의 샘플을 채취한 후 채취된 샘플에 대하여 X-선 회절 분석을 실시함으로써 입자의 결정구조 등을 파악할 수 있도록 설계되었다. 이 장비를 통하여 2012년 10월에 첫 번째 X-선 회절 분석 결과를 얻었으며 이로부터 장석, 휘석, 감람석의 존재를 확인하였다. 특히 CheMin은 X-선 회절 곡선 데이터로부터 얻어진 피크의 위치와 강도로부터 입도 분포를 간접적으로 측정하는데 활용되었다. Perseverance호는 PIXL (Planetary Instrument for X-Ray Lithochemistry)이라고 불리는 X-선 형광분석 장비를 탑재하여 화성 표면 샘플을 원소단위로 분석할 수 있는 장비를 갖추고 있다. 광물 조성에 대한 데이터를 얻게 되면 이들로부터 각 광물의 조성비 및 각 광물의 단위 중량으로부터 이들의 조합으로 이루어진 화성 토양의 단위 중량을 얻을 수 있다.

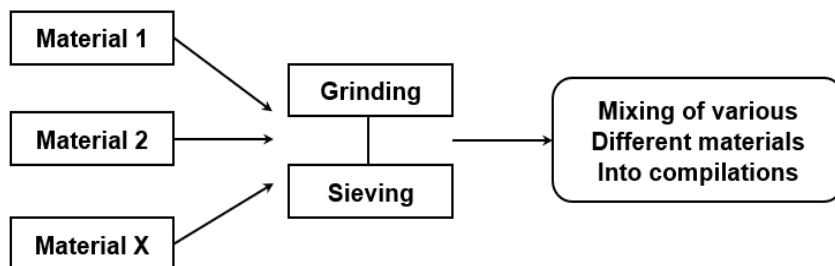
3.2 인공 화성토양의 세대별 분류

인공 화성토양의 개발은 수십 년에 걸쳐 눈에 띄게 변화하여 더욱 복잡해지고 정교해지고 있다. 화성토양은 그 개발 공정에 따라서 세대를 분류할 수 있다(Fig. 2). 1세대 화성토는 한 종류의 물질을 사용하여 분쇄 및 입경 분리 후 혼합하여 제작된다. 이 개념을 사용한 최초의 인공 화성토양은 하와이의 JSC Mars-1이다(Perko et al., 2006). 2세대의 인공 화성토양은 다양한 광물을 포함한 모암과 화성 토양의 화학적 구성을 모사하여 혼합한 원료를 사용하여 물리적으로 혼합하여 만들어졌다. 3세대는 2세대 혼합 개념을 따르고 추가적으로 바인더를 사용하여 다양한 재료의 입자를 융합함으로써 물리적 특성인 질감, 입자 크기 분포 등을 더욱 향상시킨 인공토양이다.

First-generation simulants (single source)



Second-generation simulants (multiple source)



Third-generation simulants (multiple, source and grain fusion)

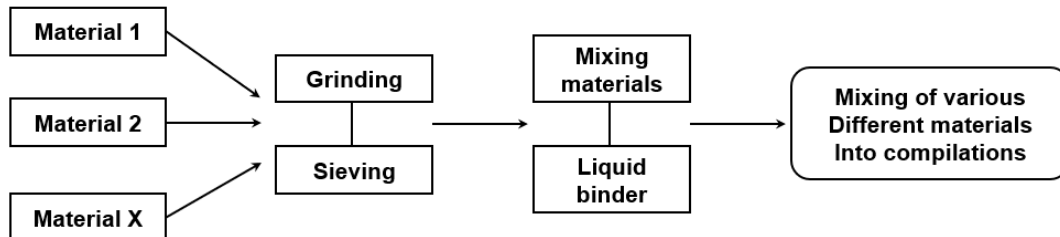


Fig.2. Mars Regolith simulant generational concept proposed in this work

3.3 인공 화성토양의 개발 현황 분석

세계적으로 다양한 화성의 지형의 특성을 고려한 화학적, 광물학적, 물리 및 기계적 특성을 가지고 있는 인공 화성토 개발 연구를 진행하고 있다(Table 3). JSC Mars-1은 1세대 인공화성토로 분류되며 초기에 개발된 대표적인 인공 화성토양으로, 1997년 Allen 등이 하와이의 Mauna Kea에 위치한 Pu'u Nene Cinder Cone에서 수집된 토양을 건조와 입경 혼합을 통하여 제작하였다. JSC Mars-1의 습기 흡수 능력을 극복하기 위해 처음으로 개발된 인공 화성토양은 2008년에 Peters 등에 의해 개발된 MMS (Mojave Mars Simulant)이다. JSC Mars-1과 같이 MMS는 서부 모하비 사막에서 채굴된 현무암을 사용하여 제작되었으며, Viking, Pathfinder 및 MER 미션 및 궤도 데이터를 기반으로 개발된 인공 토양이다(Table 4.).

Table 3. Comprehensive overview of Mars simulants and a selection of analog sites and rover testbeds

First-generation simulant	Second-generation simulant	Third-generation simulant
JSC Mars-1 (Johnson Space Center Mars-1) Allen et al., 1998. Columbia river basalt - Baker et al., 2000.	JMSS-1 (Jining Martian Soil Simulant) Zeng et al., 2015.	MGS-1 (Mars Global Simulant 1) Cannon et al., 2019.
JSC Mars-1A (Johnson Space Center Mars- 1A) Orbitec data sh. 2008.	UC Mars1 (Uni. of Canterbury Mars Simulant) Scott et al., 2017.	MGS-1C (MGS Clay ISRU) Exolith Lab data sheet Nov. 2018.
MMS (Mojave Mars Simulant) Peters et al., 2008.	MMS-2 (Enhanced Mars Regolith Simulant) The Martian Garden 2019b.	MGS-1S (MGS Sulfate ISRU) Exolith Lab data sheet Jan. 2021.
MMS-1 (Mojave Mars Simulant) The Martian Garden, 2019a.		
ES-1/2/3/4 (Engineering Soil simulants) Brunskill et al., 2011 and Oravec et al., 2021.		

Table 4. Physical and mechanical soil properties of Mars simulants

Simulant	Particle Shape	Particle Size	Bulk Density	Cohesion	Angle of Internal Friction
		(μm)	(g/cc)	(kPa)	($^{\circ}$)
JSC Mars-1	--	<1 mm	0.85 – 0.89	0.06 – 0.09	40.8 – 41.4
ES-1	Angular	<3-30	0.54 – 1.21	1.3 – 3.9	29.5 – 32.3
ES-2	Angular to sub-angular	60-250	1.24 – 1.44	Negligibly low	38.2 – 41.4
ES-3	Sub-rounded to rounded	300-800	1.46 – 1.64	0.3 – 1.4	34.3 – 35.8
ES-4	--	--	1.82-2.2	0-4	38-44
JMSS-1	Angular to sub-angular	<1 (mm) 300 (median) 250 (mean)	1.45 (mean)	0.33	40.6
MGS-1	--	122 (mean)	1.29	--	--
MMS sand	Angular	--	1.38 1.34	0.81 1.96	38 39
MMS dust	Angular	--	1.08 0.91	0.38 0.53	31
UC Mass 1	Angular to Sub-angular	--	2.7	--	35

3.3.1 JSC Mars-1 (United States)

JSC Mars-1은 Johnson Space Center에서 개발된 인공 화성토양으로, 많은 해 동안 주목을 받았다. Fig. 3의 JSC Mars-은 하와이의 Pu'u Nene Cinder Cone에서 토양으로, 입자 크기는 0.1 mm에서 1 mm까지 다양하며 토양에 최대 6%의 실트가 포함되어 있다. Allen et al.(1998)에 따르면, 이 인공 화성토양은 미국 Johnson Space Center을 통해 무료로 제공되었지만 JSC Mars-1이 고갈된 현재는 공급이 종료되었으며, JSC Mars-1을 대체하기 위한 JSC Mars-1A가 Orbitec를 통해 생산되고 있다.



Fig. 3. Photograph of JSC Mars-1

3.3.2 ES-X (Europe)

ES-X 또는 Engineering Soil Simulants는 유럽 우주국(European Space Agency)에서 ExoMars 프로그램 중에 사용하기 위해 개발된 인공 화성토양이다(Brunskill et al., 2011). ES-1은 화성 토양의 미세 먼지 부분을 모사하기 위해 개발되었다(Fig. 4). ES-2는 화성의 바람이 부는 지역과 흙 잔물결에서 발견되는 매우 미세한 모래 토양을 모사하였다. ES-3은 주로 산등성이 부근에서 발견되는 거친 모래를, ES-4는 자갈이 포함된 압축성 실트 모래를 사용하였다. ES-4는 주로 화성에서 쉽게 이동 가능한 지역을 나타내는 단단한 지형의 유형의 토양에 사용된다. ES-1부터 ES-3는 Sibelco UK Ltd에서 제작되었으며, ES-2는 후속 처리의 어려움으로 인해 제한적으로 생산되고 있다. ES-2는 Red Hill 110 실리카 모래를 사용하여 생성되었지만, 이 물질의 입자 크기 분포가 처리가 용이하지 않는 단점이 있다(Gouache et al., 2011). 한편 ES-3은 Leighton Buzzard DA30 실리카 모래를 사용하였다. Table 5는 유럽 우주국 ESA에서 개발된 인공화성토의 광물 특성이다.

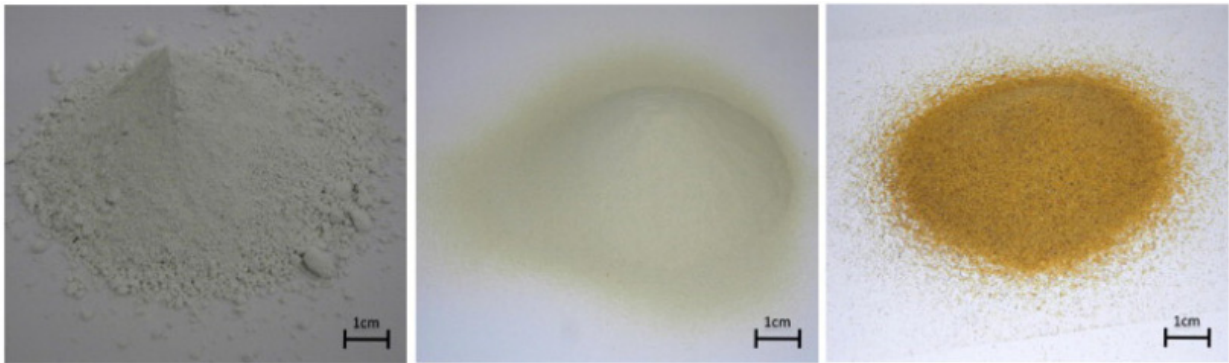


Fig. 4. Photographs of (from left to right) ES-1, ES-2 and ES-3, modified from Brunskill et al., 2011

Table 5. Mineralogy of ES-X

Simulant variety	Material
ES-1	Stjernoy Nepheline Syenite S7
ES-2	Esd Hill 110 Silica Sand
ES-3	Leighton Buzzard DA30 Silica Sand

3.3.3 JMSS-1 (China)

Jining Martian Soil Simulant 또는 JMSS-1은 중국에서 개발된 인공 화성토양이다(Zeng et al., 2015). 화성 암석의 화학 및 광물학적 특성을 고려하여 개발되었으며, 인공 화성토의 원재료를 대량으로 쉽게 얻을 목적으로 개발되었다. 이에 따라 내몽골 내부의 화산성 암석을 선택하였으며, 원하는 입자 크기 분포를 충족시키기 위해 후속 처리가 수행되었는데 특별히 화성의 충격 환경에서 발생하는 날씨 형성 과정을 모사하는 기계적 파쇄가 포함되었다. 이 입자들은 추가 광물(Basalt-93%, Magnetite-5%, Hematite-2%)과 혼합되었고, 최종 크기 분포를 조성하기 위한 체 선별이 수행되었다(Fig. 5).

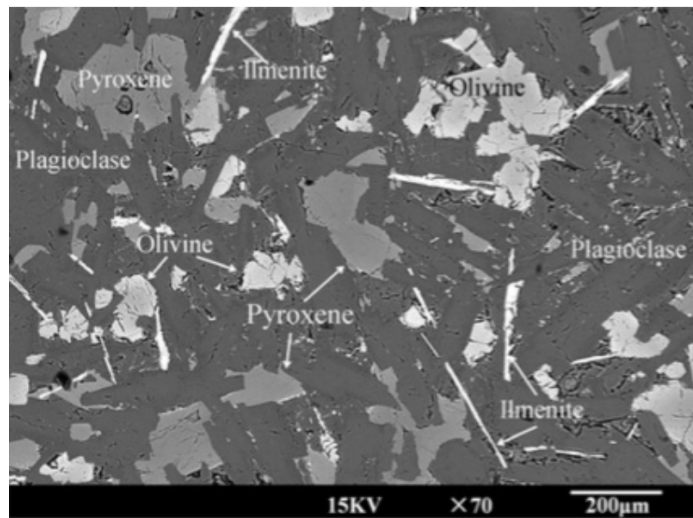


Fig. 5. Backscatter SEM image of the Jining basalt used to make JMSS-1, from Zeng et al., 2015

3.3.4 MGS-1 (United States)

Mars Global Simulant인 MGS-1은 표준 인공 화성토양의 제작을 목표로 개발되었다(Cannon et al., 2019). MGS-1을 만들기 위해 다양한 광물의 암석을 기계적으로 파쇄하여 입자로 만들었다. 이러한 절차를 사용한 이유는 화성에서 발생하는 모래의 자연적 형성과 유사한 토양 형성을 달성하기 위함이었다(충격 분쇄 및 파쇄, 바람, 물, 용암에 의한 침식, 화학적 날씨 형성). 입자들을 다른 광물과 최종적으로 혼합하고 1 mm 미만의 입자 크기로 체 선별하여 혼합하여 제작하였다(Fig. 6)



Fig. 6. Processing MGS-1 primary phases, (a) Mixed primary phases, including plagioclase, basaltic glass, pyroxene, olivine and magnetite, (b) Paste formed from primary phases, water, and sodium metasilicate, (c) Resulting solid cobble formed after the paste is dried and solidified

3.3.5 MMS (United States)

Mojave Mars Simulant의 약자인 MMS는 캘리포니아의 제트 추진 연구소(JPL)에서 2000년대 초반에 개발한 인공 화성토양으로 모하비 사막의 Saddleback 의 모래와 바위를 원료로 사용하여 제작 되었다(Fig. 7). 원재료를 기계적으로 파쇄한 후 원하는 입도 분포를 충족시키기 위해 체를 이용하여 입경을 조성하였다(Peters et al., 2008). JPL은 지속적으로 MMS의 다양한 화성의 토양 특성을 모사하는 인공 화성토양을 연구 중이며 현재는 NASA 외부에서는 사용할 수 없다.

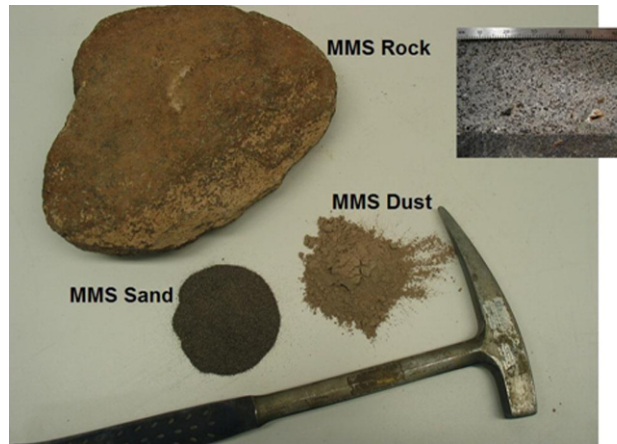


Fig. 7. Photograph of the various MMS varieties, from Peters et al., 2008

3.3.6 UC Mars1 (Australia)

UC Mars1은 UC (University of Canterbury)에서 화성 토양의 건설 재료로의 적합성을 연구하기 위해 개발되었다(Scott et al., 2017). 이 인공 화성토양은 광물의 다양성을 반영하기 위하여 화성의 Gusev 크레이터의 Columbia Hills 지역 근처의 화성 토양을 기준으로 제작되었다. UC Mars1의 재료는 뉴질랜드 남섬의 Banks Peninsula에서 수집되었으며 현무암과 화산 유리가 주재료로 구성된다. 수집된 샘플은 오염 물질을 제거하기 위한 세척 및 기계적 파분쇄를 거친 후 일부 먼지 제거를 위해 다시 세척 및 건조 과정을 거친다. 현재 이러한 생산 방법으로 UC에서는 시간당 30 kg의 UC Mars1을 생산하고 있다. Fig. 8은 UC Mars1 화성 인공토양의 입경을 SEM촬영한 그림이다.

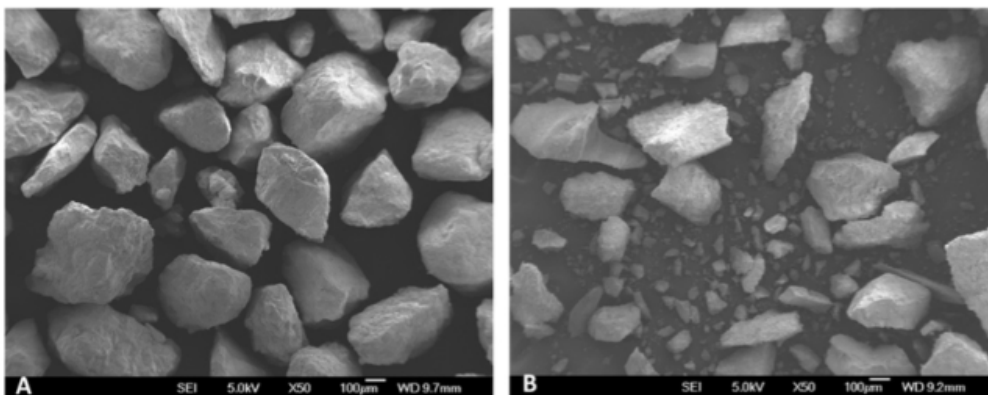


Fig. 8. SEM images of the UC Mars1 simulant, from Scott et al.(2017)

4. 인공 화성토양의 개발의 검토사항

현재까지 연구 개발된 인공 화성토양의 검토한 결과 세 가지 문제점을 확인하였다. 첫째, 인공 화성토양은 화성의 토양 샘플을 기반으로 하지 않고 있으며, 탐사 로버의 이동성 시험을 위한 목적으로 개발되지 않았다. 둘째, 인공 화성토를 비교하기 위한 기존의 화성 지반 데이터가 충분하지 않다. 셋째, 화성 토양과 유사한 입자 크기 분포와 입자 모양을 얻기 위하여 인공 토양의 생산에 상당한 시간과 비용이 소모된다. 다양한 화성 모사토를 직접 비교하고 탐사 로버의 이동성 연구에 필요한 중점 사항들을 정리하였다.

4.1 Particle Shape - 입자 모양

토양의 입자 모양은 응집력에 영향을 미치는 인자이다. 둥근 입자로 구성된 토양은 응집력이 약하며, 반대로 각진 입자로 구성된 토양은 응집력이 강한 경향을 보인다. 탐사 로버의 이동성 측면에서 인공 화성토는 다양한 입자 모양을 가지고 있어야 한다. 화성의 토양 입자 모양은 위치에 따라 둥근 것에서 각진 것까지 매우 다양하다. 이러한 입자 모양과 가장 일치하는 인공 화성토 모사체는 ES-3이다. ES-2, JMSS-1 및 UC Mars1도 다양한 모양의 각진 입자를 가지고 있다.

4.2 Particle Size Distribution

입자의 크기가 다양하면 큰 입자들 사이의 공간을 작은 입자가 채워 견고한 구조를 만들어 지반강도가 커지는 특징이 있다. 풍화된 토양은 일반적으로 다양한 입자 크기를 가지고 있어 지반 강도가 크며 풍화되지 않은 입자는 상대적으로 느슨하다. 지반강도는 로버의 이동에 영향을 미치는 인자로 느슨한 지반에서는 로버의 이동이 어려울 수 있다. 인공 화성토의 입경은 대부분 10에서 1000 μm 사이에 분포하고 있으며 화성의 입도 분포를 모사한 인공 화성토는 JSC Mars-1, ES-1, ES-2, ES-3, MMS Sand, JMSS-1 등이 있다.

4.3 Bulk Density 단위 중량

화성 토양의 현지 단위 중량 추정치는 1.0에서 2.0 g/cc의 범위에 걸쳐 있으며, 보고된 대부분의 값은 1.2에서 1.5 g/cc의 범위에 있다. 토양의 단위 중량은 토양의 압축량과 토양 구조의 공극을 통해 예측할 수 있다. 화성 현지의 단위중량 추정치를 가장 잘 모사한 인공 화성토는 ES-2, MGS-1, MMS sand 이다. 한편 JSC Mars-1, ES-1 및 MMS dust는 비교적 밀도가 낮으며, ES-3, ES-4, UC Mars1는 비교적 밀도가 높다.

4.4 Angle of Internal Friction-내부마찰각

내부마찰각은 탐사로버의 주행성 시험에 있어 추진력에 영향을 미치는 인자이다. 내부마찰각이 높은 토양은 높은 추진력을 필요로 한다. Fig. 9는 인공 화성토양과 실제 화성 토양의 내부마찰각을 비교한 것이다. 먼저 각각의 내부마찰각을 살펴보면, 실제 토양인 MER spirit 샘플과 Viking I Drift 샘플을 모사하는 인공 토양은 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다. Viking I Blocky, Viking II Clods 및 Pathfinder drift의 화성 토양은 ES-X의 기준으로 제작되었다. MMS 및 UC Mars 1의 인공 화성토는 실제 화성토양의 마찰각 범위 내에 있지만 좁은 범위의 내부마찰각 값을 가진다. ES-4, JSC Mars-1, JMSS-1 및 MGS-1은 화성 토양보다 높은 마찰각 값을 가지고 있다.

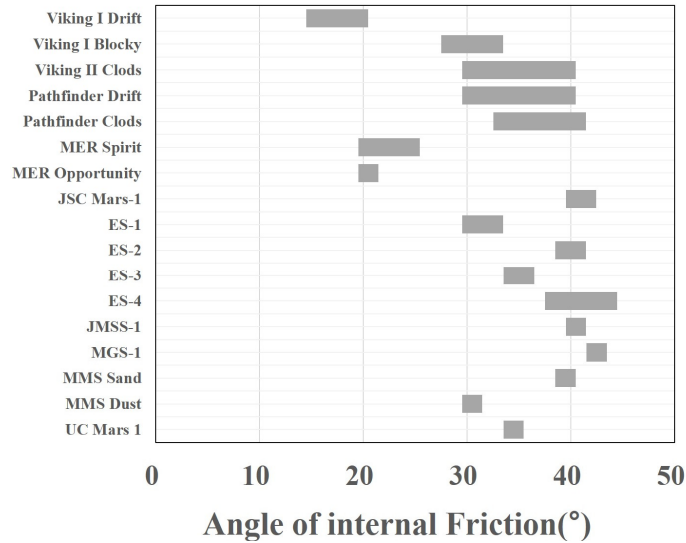


Fig. 9. Angle of internal friction for Mars soil and Mars simulants

4.5 Cohesion-응집력

응집력은 탐사 로버의 추진력에 영향을 미치는 인자로 응집력이 높을수록 탐사 로버의 높은 추진력을 필요로 한다. 화성 표면 입자들의 응집력에는 어느 정도의 변동이 있다. 실제 화성토는 1 kPa 미만의 무시할 수준에서부터 최대 15 kPa까지 중간 수준의 응집력을 가지고 있다. 따라서 보수적으로는 응집력이 낮은 토양에서 시험을 진행하여야 한다. 대부분의 인공 화성토는 3 kPa 미만의 응집력 값을 가지고 있는데, 특히 JSC Mars-1, ES-2, JMSS-1, MMS Dust의 응집력은 모두 1 kPa 미만으로 매우 낮으며 이는 Pathfinder Drift 화성 토양의 응집력과 일치한다. ES-3 및 ES-4는 응집력이 1.5 ~ 4 kPa의 값을 가지며 이는 Viking Lander 위치의 토양과 일치한다. ES-1, MMS Sand는 응집력이 중간 수준 범위를 포함하며 MER 토양 및 Viking 토양과 유사하다.

4.6 인공 화성토양 모암 조달 및 가공

인공 화성토양의 생산은 원재료인 모암과 대량 생산을 위한 방법이 용이하여야 한다. JSC Mars-1과 MMS, 두 가지 인공 화성토양은 현재 생산을 하지 않고 있으며, ES-2를 제외한 ES-X는 공급 업체를 통하여 구입이 가능하다. 한편 ES-2는 입도를 조절하기 위한 공정이 복잡하여 대량 생산에 적합하지 않으며 JMSS-1의 경우는 대량 생산이 가능하나 가공 설비가 복잡하다. MGS-1은 복잡한 가공 방법이 포함되어 있으며 대량 생산하기에 비용이 많이 든다.

5. 결론

본 연구에서는 최근 우주 연구 동향에 따라 인공 화성토양 제작의 기반을 마련하기 위해 현재까지 제작된 인공 화성토양 현황을 조사하였고 차후 인공 화성토 제작을 위한 사항을 검토하였다. 현재까지 세계적으로 7종 이상의 인공 화성토양이 제작되었으며, 한국형 인공 화성토양의 제작은 화성 토양의 성질 분석을 통해 국내에서 채취 가능한 토양 및 암석을 바탕으로 물리, 화학적 성질을 분석하여 진행될 계획이다. 본 연구를 통하여 내린 결론을 요약하면 아래와 같다.

1. 화성은 지구에서 가까운 중 하나이며 화성의 표면은 주로 현무암과 안산암의 암석으로 되어있다. 화성의 토양은 주로 적갈색의 산화철 미립자가 구성되어 있다. 화성의 표면에서는 지구보다 훨씬 강한 우주 방사선에 노출된다. 화성 탐사 미션에 있어 탐사 로버의 방사선 차폐가 중요한 과제이다. 화성의 지각에는 크레이터, 화산, 고원, 그리고 마르스 밸리즈 같은 독특한 지형 특징이 있다. 화성에는 지구와는 다른 지형 조건과 지하 활동이 있을 가능성이 있다.
2. 화성 복제토 제작을 위해서는 화성 토양의 광물분석, 물리, 화학적 성질 등의 분석이 요구된다. 화성의 표토(regolith)는 대부분 휘석과 장석, 감람석, 철, 티탄 산화물 등이 포함된 현무암으로 구성되어 있다. 화성토의 제작은 화성의 토양과 광물 및 화학 조성이 유사한 화산 현무암 및 화산재를 이용하여 인공 화성토를 개발하고 있다. 향후 연구에서는 전체 철(Fe) 함량($FeO + Fe_2O_3$)이 유사한 국내의 주요 현무암 분포(제주, 포항, 경주, 연천, 철원) 지역을 현장 조사 발굴하여 화성토 모암으로 사용 하고자 한다.
3. 인공 화성토는 지구상에서 화성과 유사한 실증환경을 조성하고 앞으로 개발될 각종 우주 장비들의 검증을 위해 꼭 필요한 재료이다. 현존하는 인공 화성토는 현실적으로 실제 화성 토양을 100% 반영하지는 못하지만 우주개발을 위한 화성 환경에서 최적화된 건설기술과 현지자원개발에 사용될 새로운 인공 화성토의 개발은 우주 강국 자립을 위한 첫걸음이라 할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 한국건설기술연구원 연구운영비지원(주요사업)사업으로 수행되었습니다(과제번호 20230081-001, 극한건설 환경 구현 인프라 및 TRL6 이상급 극한건설 핵심기술 개발).

REFERENCES

- Allen, C.C., Morris, R.V., Jager, K.M., Golden, D.C., Lindstrom, D.J., Lindstrom, M.M., and Lockwood, J.P., 1998, Martian soil simulant available for scientific, educational study, *Eos Trans.*, 79(34), 405-409.
- Arvidson, R., Anderson, P., Bartlett, P., Christensen, P., Chu, K., Davis, B., Ehlmann, M., Golombek, S., Gorevan, E., Guinness, A., Haldemann, K., Herenhoff, G., Landis, R., Li, D., Ming, T., Myrick, T., Parker, L., Richter, F., Seelos, and Soderblom, L., 2004, Localization and Physical Properties Experiments Conducted by Opportunity at Meridiani Planum, *Science*, 306(5702), 1730-1733.
- Baker, L.L., Agenboard, D.J., and Wood, S.A., 2000, Experimental hydrothermal alteration of a martian analog basalt: implications for martian meteorites, *Meteoritics Planet Sci.*, 35(1), 31-38.
- Brunskill, C., Patel, N., Gouache, T.P., Scott, G.P., Saaj, C.M., Matthews, M., and Cui, L., 2011, Characterisation of martian soil simulants for the ExoMars rover testbed, *J. Terramechanics*, 48(6), 419-438.
- Cannon, K.M., Britt, D.T., Smith, T.M., Fritsche, R.F., and Batchelder, D., 2019, Mars global simulant MGS-1: a Rocknest-based open standard for basaltic martian regolith simulants, *Icarus*, 317, 470-478.
- Christensen, P. and Moore, H., 1992, The Martian Surface Layer, in *Mars*, University of Arizona Press, 686-729.
- Chunmei, H., Zeng, X., and Wilkinson, A., 2013, Geotechnical Properties of GRC-3 Lunar Simulant, *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, 26(3), 528-534.

- CLASS Exolith Lab, 2018, in: Kevin M. Cannon, Mike Conroy, Daniel T. Britt (Eds.), Datsheet for MGS-1C clay ISRU, University of Central Florida, USA, November.
- Golombek, M.P., 1999. Overview of the Mars Pathfinder Mission: Launch through landing, surface operations, data sets, and science results, *Journal of Geophysical Research*, 104(E4), 8523-8553.
- Gouache, T.N., Patel, C., Brunskill, G., Scott, C., Matthews, S.M., and Cui, L., 2011, Soil Simulant Sourcing for the ExoMars Rover Testbed, *Pleantary and Space Sciences*, 59(8), 779-787.
- Marlow, J., Martins, Z., and Sephton, M., 2008, Mars on Earth: Soil Analogues for Future Mars Missions, *Astronomy & Geophysics*, 49(2), 2.20-2.23.
- Moore, H. and Jakosky, B.H., 1989, Viking Landing Sites, Remote-Sensing Observations, and Physical Properties of Martian Surface Materials, *ICARUS*, 81(1), 164-184.
- Moore, H., Bickler, D., Crisp, J., Eisen, H., Gensler, J., Haldemann, A., Majevic, T., Reid, L., and Pavlics, F., 1999, Soil-like deposits observed by Sojourner, the Pathfinder Rover, *Journal of Geophysical Research Planets*, 104(E4), 8729-8746.
- NASA, 2019, NASA Science: Mars Exploration Program: Missions, [Online], Available: <https://mars.nasa.gov/#missions>.
- Oravec, H.A., Asnani, V.M., Creage, C.M., Moreland, S.J., 2021, Geotechnical review of existing Mars soil simulants for surface mobility, in: *Earth and Space*, 157-170.
- Oravec, H.A., Zeng, X., and Asnani, V.M., 2010, Design and characterization of GRC-1: A soil for lunar terramechanics testing in Earth-ambient conditions, *Journal of Terramechanics*, 47(6), 361-377.
- Perko, H., Nelson J., and Green, J., 2006, Mars Soil Mechanical Properties and Suitability of Mars Soil Simulants, *ASCE Journal of Aerospace Engineering*, 19(3), 169-176.
- Peters, G., Abbery, W., Bearman, G., Mungas, G., Smith, J., Anderson, R., Douglas S., and Beegle, L., 2008, Mojave Mars Simulant - Characterization of a new Geologic Mars Analog, *Icarus*, 197(2), 470-479.
- Scott, A.Oze, C., Tang Y., and O'Loughlin, A., 2017, Development of Martian Regolith Simulant for In-Situ Resource Utilization Testing, *Acta Astronautica*, 131, 45-49.
- The Martian Garden, 2019a, Safety data sheet: MMS-1, revised, <https://www.themartiangarden.com/s/SDS-MMS-1-Mars-Regolith-Simulant.pdf>.
- The Martian Garden, 2019b, Safety data sheet: MMS-2, revised, <https://www.themartiangarden.com/s/MMS-2-SDS.pdf>.
- Zeng, X., and Wilkinson, A., 2013, Geotechnical Properties of GRC-3 Lunar Simulant, *Journal of Aerospace Engineering*, 26(3), 528-534.
- Zeng, X., Li, W., Wang, N., Pring, S., Tang, H., Li, Y., and Feng, J., 2015, JMSS-1: A New Martian Soil Simulant, *Earth, Planets and Space*, 67(1), 1-10.