

연구논문

달에서의 현지자원활용(ISRU)을 위한 정전선별기술 연구 동향

박승수^{1*} · 유병현¹ · 신휴성¹¹한국건설기술연구원

Current Status of Electrostatic Concentration Techniques for In-Situ Resource Utilization (ISRU) on the Moon

Seungsoo Park^{1*}, Byung-Hyun Ryu¹ and Hyu-Soung Shin¹¹Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

*Corresponding Author. Seungsoo Park, ssglenpark@kict.re.kr, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, Korea

Received

7 November 2023

Final version Received

9 December 2023

Accepted

27 December 2023

Abstract

For sustainable space development, it is vital that missions be able to apply In-Situ Resource Utilization (ISRU) methods. Among ISRU priorities is the production of oxygen from lunar regolith. Electrostatic separation as a pre-treatment for oxygen production from regolith, focusing on high-purity ilmenite extraction, is highly regarded for its adaptability to the Moon's extreme conditions of low gravity and high vacuum. This paper investigates the potential of electrostatic separation processes on the Moon, exploring lunar environmental characteristics, lunar regolith simulant concepts, and current development. It also highlights global research trends on electrostatic separation in lunar environments and suggests relevant research topics for South Korea.

Key words : moon, in-situ resources utilization, lunar regolith simulant, electrostatic separation, ilmenite

요약

지속 가능한 우주 개발을 위해서는 현지 자원 활용(ISRU) 개념이 포함된 미션 수행이 필수적이다. 달의 월면토에서 산소를 생산하는 기술은 ISRU의 매우 중요한 연구주제 중 하나이다. 월면토로부터 산소 생산을 위한 전처리 공정으로써의 정전선별은 티탄철석의 고순도화에 관련되어 주목받고 있으며, 달의 극한 환경인 저중력과 고진공에서 적용 가능성이 높은 기술로 평가되고 있다. 이 논문에서는 달에서의 정전선별 공정의 가능성을 살펴보기 위해 달의 환경 특성, 인공 월면토의 개념, 및 개발 사례를 조사하였다. 더불어 세계적으로 진행 중인 달 환경을 고려한 정전선별 연구 사례를 소개하였고, 우리나라의 연구 환경을 고려하여 관련 연구 주제를 제안하였다.

주요어 : 달, 현지자원활용, 인공월면토, 정전선별, 티탄철석

서론

달은 지구에서 가장 가까운 천체로, 지구와 비교하여 중력이 1/6 수준으로 낮아 로켓을 이용해 궤도를 벗어나기 용이하여 우주 개발의 거점으로 주목받고 있다. 우주 진출의

거점지로서 달을 지속적으로 활용하기 위하여 우주 미션의 패러다임도 단기 미션에서 중장기 미션으로 변화하고 있다. 이와 같이 지속가능한 우주 개발에 중요성이 점차 부각되고 있는 가운데 현지자원활용(ISRU; In-situ resources utilization)을 통한 우주개발이 주목받고 있다. ISRU는

‘달, 화성, 소행성 등 천체의 현지 자원을 수집, 가공, 저장 및 활용하는 활동’으로 정의할 수 있다. ISRU의 예로는 달 토양을 재료로 활용한 달 기지의 건설, 현지 미션 수행을 위한 달 토양으로부터 산소의 생산, 태양빛을 이용한 달 현지에서의 에너지의 생산 등을 들 수 있다. ISRU는 지구의 자원에 의존하지 않으므로써 우주 개발의 지속가능성을 부여하여 장시간 미션 수행을 가능하게 해준다.

달의 자원 중 가장 풍부하게 분포하고 있는 것은 달의 표면을 덮고 있는 월면토(Regolith)이다. 달의 표토층을 의미하는 월면토는 ISRU 연구의 가장 주목을 받는 자원이며, 현재는 달 현지에서 산소를 생산하기 위한 원료로써 연구가 활발히 진행되고 있다. 월면토를 이루는 광물 중 산소를 포함하고 있는 티탄철석(Ilmenite, $FeTiO_3$)은 지구에 비하여 품위가 높은 것으로 알려져 있다. 티탄철석으로부터 산소를 생산하기 위한 수소환원공정은 티탄철석을 물, 금속철, 이산화티탄 등으로 환원한 후 전기분해를 통해 물로부터 산소를 생산하는 공정이다. 각국에서는 인공월면토(Lunar soil simulant)라고 불리는 달의 토양과 비슷한 인공 토양을 만들어 산소 생산 연구에 활용 중이며 특히 2023년 달 모사토로부터 산소 추출에 성공한 미국항공우주국(NASA; National Aeronautics and Space Administration)의 CaRD(Carbothermal Reduction Demonstration)팀에서도 자체적으로 개발한 월면토를 사용하여 연구를 수행하기도 하였다.

한편 달은 지구와 달리 주변 환경이 극단적으로 변하여 지구에서의 기술을 곧바로 적용하는 것은 불가능하다. 대표적인 극한 환경으로는 $300^{\circ}C$ 가까이 차이 나는 낮/밤의 온도, 3×10^{-13} kPa의 높은 진공 환경, 지구의 1/6 수준의 저중력 환경 등이 있다. 이러한 환경에서는 지구에서의 습식 공정, 유체를 활용한 공정은 적용이 불가능하여 건식의 공정만이 고려되어야 한다. 건식의 선별기술 중 정전선별(electrostatic separation)은 이러한 극한 환경에서도 달에서 적용하기에 비교적 적합한 기술로써 알려져 있으며 이를 달 환경에서 적용하려는 연구가 활발히 진행되고 있다. 실제로 미국에서는 저중력 비행기(Reduced-gravity aircraft)에서의 실험을 통한 저중력 환경까지 고려한 연구가 수행되는 등 여러가지 흥미로운 연구가 진행되고 있다.

이 논문에서는 달에서 정전선별을 도입함에 있어서 고려하여야 할 달의 극한 환경에 대하여 간략히 설명하였다. 이어 달에서의 ISRU를 위하여 반드시 필요한 인공월면토의 개념에 대하여 설명하고 세계의 인공월면토 개발 사례에 대하여 소개하였다. 이어 정전선별의 종류에 따른 원리에 대하여 서술하였고, 달 환경에서 정전선별이 가질 수 있는 장점에 대하여 설명하였다. 또 현재 세계적으로 연구 중인 달 환경을 고려한 정전선별 연구 사례에 대하여 알아보았

다. 마지막으로 우리나라에서 수행할 수 있는 달에서의 정전선별 관련 연구 주제에 대하여 제안하였다.

달의 환경 및 물리적 선별의 어려움

달의 환경

달의 평균 반지름은 1,737.1 km로 지구의 약 0.2727배이며 질량은 7.347676×10^{22} kg으로 지구의 약 0.0123배이다. 이로 인하여 달은 지구 대비 약 1/6의 중력을 갖고 있으며 이에 따라 2.38 km/s의 탈출속도(Escape velocity, v_e)를 갖는다. 기체 분자는 맥스웰-볼츠만 속도 분포를 따라 다양한 속도로 공간을 이동한다. 속도 분포의 대푯값으로 속도의 제곱평균제곱근(root mean square, rms)인 v_{rms} 값을 사용하는데 달 환경(평균 온도)에서 산소의 v_{rms} 값은 0.549 km/s이다. 이 값은 달의 v_e 인 2.38 km/s의 약 1/4 수준으로 그 차이가 크지 않기 때문에, 다양한 속도로 운동하는 산소 분자는 순간적으로 연직 방향의 속도가 v_e 를 넘어서면서 달의 중력 영향권을 벗어날 수 있다(Fig. 1). 이러한 원리로 모든 기체분자들이 달을 빠져나가 수십억년이 지난 현재에는 달의 대기는 존재하지 않는다. 완전한 진공이 아닌 아주 희박한 수준의 대기압이 달에서 유지되는 이유는 달의 지각과 맨틀 내에서의 방사능 붕괴로 인해 라돈 및 헬륨이 아 웃가스 형태로 방출되기 때문이다. 또한 작은 운석이나 태양풍, 햇빛에 달 표면이 지속적으로 충돌하여 고상 입자가 방출되는 스퍼터링(sputtering) 현상도 희박한 수준의 대기압이 유지되는 원인으로 생각된다(Lucey *et al.*, 2006).

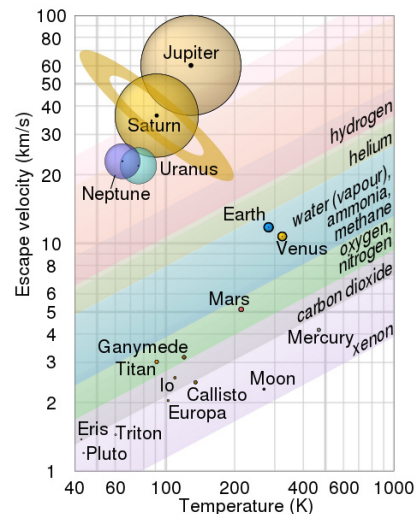


Fig. 1. Solar system escape velocity versus surface temperature (Atmosphere - Wikipedia, 2023).

거의 무시할만한 수준의 대기압으로 인하여 달의 온도는 노출된 환경에 따라 지속적으로 변한다. 문헌에 따라 차이가 있지만 달의 낮 시간에는 표면의 온도가 약 150°C까지 상승하며 달의 밤 시간에는 표면의 온도가 -140°C까지 떨어지는 것으로 알려져 있다. 대기의 부재는 X선, 태양 자외선 등 고에너지 전자기파가 달의 표면에 도달하는 요인이 된다. 또한 달의 표면은 지구와 같은 전체 활동 자기장이 존재하지 않는다. 그렇기 때문에 자기장에 의하여 태양풍으로부터 안전한 지구와는 달리 달은 태양풍에 완전히 노출된다. 이렇게 태양으로부터 전달되는 전자기파와 태양풍은 달의 표면을 전기적으로 충전시키는 요인이 된다. 태양 자외선이 달의 낮 시간에 달의 표면에 비추면 전자기파로부터 공급되는 광자(photon)가 달의 토양에 부딪치고 이를 통하여 토양의 전자가 방출되는 광전효과(photoelectric effect)가 일어난다. 이렇게 전자를 잃은 낮 시간의 달은 양으로 대전된다. 한편 달의 밤 시간에는 태양 빛의 영향 없이 오롯이 태양풍만의 영향권으로 들어오는데, 이 때 태양풍 내 고에너지의 전자들이 달의 토양을 음으로 대전시켜 밤 시간의 달 표면은 음전위를 띤다. 이와 같이 대기가 없는 달의 환경은 표면의 온도, 자외선 복사, 이에 따라 전기적으로 대전된 환경 등 여러가지 측면에서 지구와 상이한 특징을 갖는다.

전통적인 물리적 선별 적용의 문제점

달과 지구의 환경을 비교하고 그 환경이 선별 공정에 미치는 영향을 Table 1에 나타내었다. 매우 높은 진공도는 달의 환경 중에서도 가장 큰 특징 중 하나이다. 달의 대기압은 3×10^{-13} kPa 수준으로, 대부분의 유체의 증기압에 비하여 낮기 때문에 액체상의 물질이 존재하지 않는다. 만약 액체가 기체로 기화되었다고 하더라도 달의 낮은 중력에 의하여 지표면으로부터 탈출할 것이다. 그렇기 때문에 물을 사

용하는 습식의 공정이나 기체를 활용하는 분급 공정 등은 달의 환경에서 적용이 불가능하다. 달의 극단적인 온도 조건 또한 액체를 사용하는 데에 어려움을 준다. 낮의 온도와 밤의 온도는 각각 물의 끓는점과 어는점의 범위를 훨씬 넘어 서기 때문에 보온에 대한 대책이 없으면 물을 이용한 공정은 불가능하다.

인공월면토

인공월면토의 개념

달의 표토(Regolith)는 수십억 년의 작은 미소 운석 충돌(micro meteorite impacts)에 의해 잘게 뺏겨져서, 매우 고운 알갱이로 이루어진 표토층을 의미한다(Kim *et al.*, 2021a). 달 전역을 덮고 있는 이러한 표토층은 지상에서의 접근이 용이하며 그 양이 매우 풍부하기 때문에 현지에서 활용하기에 가장 적합한 자원이다. 인공월면토(Lunar regolith simulant)는 이러한 달 표토를 모사하기 위하여 구성 광물 및 입도 등을 조절하여 인공적으로 만들어진 토양을 말하며, 모사를 위한 토양이라는 의미로 ‘모사토’라고도 불린다.

달의 토양은 위치에 따라 구성 광물에 차이를 보인다. 예를 들어 달의 고산지대(Highland)의 토양은 규산염 광물의 함량이 많아 밝은 색을 띠고 바다(Mare)지역의 토양은 철이나 티타늄의 함량이 상대적으로 높아 어두운 빛을 띤다(Heiken *et al.*, 1991). 샘플링 위치에 따라 달 토양의 입도 또한 분포가 다양하게 나타난다. 따라서 모든 달 토양을 대표할 수 있는 하나의 인공월면토는 존재할 수 없어 사용 목적에 따라 다양한 형태의 모사토가 개발된다. 인공월면토는 개발 목적에 맞추어 달 토양의 기계적(mechanical) 특성 혹은 화학적(chemical) 특성을 모사한다. 기계적 모사토의 경우, 화학적 특성을 세밀히 고려하기보다는 실제 달 토양의 입도, 밀도 등 물리적 성질(physical properties)을 모사

Table 1. Effects of lunar versus terrestrial environments on processing (Gibson and Knudsen, 1985)

Feature	Comparison	Processing consequences
Gravity	Moon: 1/6 g Earth: 1 g	Major effects on fluidized beds, gas-solids transport systems, gravity flow of liquid and particulate solids
Surface temp. range	Moon: About 290°C (-140°C- +150°C) Earth: 30°C	Widely fluctuating as-mined feed-solids temperature
Atmosphere / Coolants	Moon: Air/Water absent Earth: Air/Water Abundant	Only closed-loop fluid systems usable; final heat rejection by radiation or heat pipe; unlimited hard vacuum available
Conventional fuels	Moon: Absent Earth: Plentiful	Process heating by electricity or direct solar; power generation by nuclear or solar
Human access	Moon: Difficult/Minimal Earth: Easy/Frequent	Extreme emphasis on minimum maintenance, modular replacement

하고 이를 대량 생산하는 데에 개발 목적이 있다. 이들 모사토는 ISRU를 위한 건설재료로서의 활용 방법 연구, 로버 주행 성능 평가 등을 위하여 사용된다. 반면 화학적 모사토의 경우 물리적 성질을 포함, 달의 지형에 따른 광물 조성비율을 정밀하게 모사하는 데에 초점을 맞추기 때문에 조금 더 실제 토양에 가깝지만 대량 생산이 어렵다. 이들 모사토는 ISRU를 위하여 달 토양으로부터 산소의 생산 등 공정을 개발하기 위한 연구에 활용된다.

인공월면토 개발 사례

NASA의 JSC(Johnson Space Center)에서 개발한 JSC-1은 입도와 구성 성분 등을 실제 달 토양과 비슷하게 제조한 최초의 현대적 의미의 인공월면토로 분류된다. 1994년 개발된 JSC-1은 현무암을 기초로 유리질 성분이 풍부한 인공월면토로 여러 연구에서 레퍼런스 시료로서 활용되었다(David *et al.*, 1994). 향후 이를 보완하여 평균 입도 27 μm 이하의 달 토양을 모사한 JSC-1AF, 최대 5 mm의 입도를

갖는 JSC-1AC, 그리고 JSC-1과 대부분의 물성을 공유하는 1 mm 이하 입도를 갖는 JSC-1A 등이 개발되었다. 미국의 University of Central Florida에서 개발한 LMS-1(Lunar

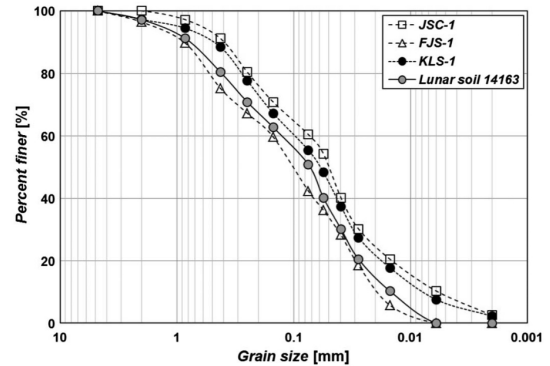


Fig. 2. Particle size distribution of lunar regolith and lunar simulants JSC-1, FJS-1, and KLS-1 (Ryu *et al.*, 2018).

Table 2. List of lunar simulants that are classified as currently available, in the alphabetical order according to countries and suppliers. The full list can be found at <http://knowledge.esric.lu/simulants/>

Country	Supplier	Name	Description
Germany	Technische Universität Braunschweig	TUBS-H	Low Ti Mare (general)
		TUBS-T	Highlands (general)
Italy	ESA	EAC-1a	Low Ti Mare (geotechnical), large volume
Japan	Shimizu Corporation	FJS-1	Average luna mare (general)
		FJS-1g	Average luna mare (general), enhanced glass
Poland	Polish Academy of Sciences	AGK-2010	Geotechnical
South Korea	KICT	KLS-1	large volume, mechanical
United Kingdom	The University of Manchester	KIGAM-L1	highland (general), small volume
		UOM-Black	large volume, mechanical
		UOM-White	large volume, mechanical
	NASA	GreenSpar	Average highland anorthosite, An 78-86 (general)
		JSC-1 and JSC-1A	Average mare (general)
		BP-1	Average mare (general)
		OPRL2NT	h-Ti mare, Apollo based (general) - 77% basaltic cinder, 8.6% anorthosite, 14.4% ilmenite
		OPRH3N	Average highlands, Apollo based (general) - 80% anorthosite, 20% basaltic cinder
		OPRH2N	Average highlands, Apollo based (general) - 70% anorthosite, 30% basaltic cinder
		OPRL2N	Average mare, Apollo based (general) - 90% basaltic cinder, 10% anorthosite
United States	OFF PLANET RESEARCH	OPR Agglutinate	Agglutinate component made out of any of the above simulants
		LMS-1	Average mare, moderate Ti (general)
United States	University of Central Florida	LHS-1	Average highlands, Apollo 16 based (general)

Mare Simulant)와 LHS-1(Lunar Highland Simulant)는 각각 달의 바다와 고산지대의 흙을 모사한 인공월면토로 여러 연구에서 활용되고 있다. 일본에서 개발한 FJS(Fuji Japanese Simulant)는 감람석, 티탄철석의 함량을 달리하여 FJS-1, FJS-2, FJS-3 등으로 개발되었으나 현무암만을 원료로 제작된 FJS-1을 활용한 연구가 가장 활발히 진행되고 있다. Fig. 2에는 실제 월면토 14163, 인공월면토 JSC-1, FJS-1, 그리고 KLS-1의 입도 분포를 비교한 것을 나타내었다.

국내에서 개발된 인공월면토에는 한국건설기술연구원(이하 ‘건설연’)에서 개발한 KLS-1(Korea Lunar Simulant), 한국지질자원연구원(이하 ‘지질자원연’)에서 개발한 KIGAM-L1, 무인탐사연구소(UEL)에서 개발한 KOHLS-1(Korea Hanyang Lunar Simulant), 한국항공대학교(이하 ‘항공대’)에서 개발한 KAUMLS(Korea Aerospace University Mechanical Lunar Simulant) 등이 있다. 건설연의 KLS-1의 경우 달 현지의 월면토를 건설 재료로써 활용하기 위한 연구 목적으로 개발되었다. 특히 KLS-1은 대량 생산을 목적으로 개발되어 하루 200 kg 이상을 생산할 수 있으며, 많은 물량을 확보할 수 있는 장점을 활용하여 건설연의 지반열진공챔버 내 10 t 규모의 토조에 탑재되어 지반이 포함된 진공, 극한 온도 조건의 달 환경을 모사하는 연구에 활용되고 있다. 최근에는 마이크로파를 이용한 인공월면토의 소결 기술 개발 등에 활용되고 있다(Chung *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2021b; Ryu *et al.*, 2018). 지질자원연의 KIGAM-L1은 달의 고원 지대의 표토를 모사하기 위하여 개발된 인공월면토로써 경남 산청군과 하동군의 회장암, 경기 평택시의 감람석 등을 토대로 개발된 화학적 모사토이다(Kang, 2021). 항공대에서 개발한 KAUMLS는 화학적 성분은 고려하지 않고 입자크기, 입도분포, 밀도 등 기계

적 성질을 만족하는 복제로토, 달착륙선 충격흡수장치의 낙하시험을 위한 목적으로 개발되었다(Yoo *et al.*, 2014). 무인탐사연구소의 KOHLS-1은 로버의 주행성능을 평가하기 위하여 개발되었다.

복제로토에 대한 데이터베이스는 European Space Resources Innovation Centre의 Regolith Simulants Directory 및 Colorado school of mines의 Planetary Simulant Database 등을 통하여 제공되고 있다(ESRIC KSP-Simulants, 2023; Planetary Simulant Database, 2023). Table 2에 ESRIC에서 제공하는 인공월면토 중 현재 사용가능한 상태로 분류되는 것들의 목록을 나열하였다.

정전선별의 원리

정전선별의 개념

정전선별은 대상 혼합물 간의 전기전도도(electrical conductivity) 차이를 이용하여 대상물을 선별하는 방법이다(Napier-Munn and Wills, 2011). 선별의 대상물질에 대하여 직간접적으로 전하의 이동을 유도한 후, 입자의 하전 상태와 주변 전기장에 의하여 정해지는 전기력(Electrical force, F_E) 혹은 쿨롱 힘, Coulomb force), 입자의 질량에 의한 중력(Gravity force, F_g), 회전전극의 전하에 따라 입자를 전극에 부착시키는 거울상 힘(Image force, F_i), 유체에 의한 부력(Drag force, F_d), 입자의 움직임에 의한 관성력(Inertial force, F_i), 입자가 놓인 면에 대한 수직항력(Normal force, F_n) 등 여러 가지 힘을 통하여 입자들의 이동 경로를 제어함으로써 물질을 선별하는 방법이다(Fig. 3). 본래 정전선별은 광물의 물리적 선별을 위하여 개발되었으며, 석탄의 품위 향상, 해사(beach sand) 내 티탄철석의

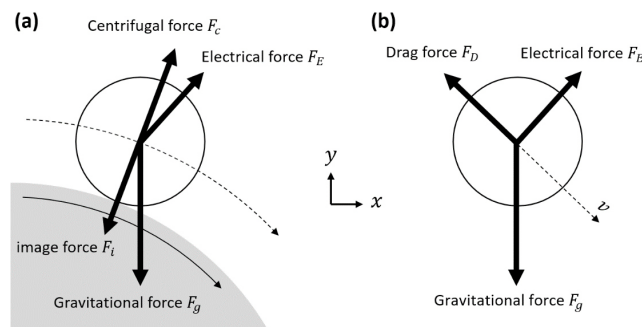


Fig. 3. Graphical representation of forces acting on a particle in an electrostatic separation process: (a) on rotating drum, (b) off rotating drum. The dashed line represents the direction of particle movement. The lengths of the arrows are not scaled. The relative positions of the two particles are not considered. The direction of electric field on two particles is considered to be same. Negligible forces such as drag force acting on particle on the drum, and friction force between particle and drum, are not represented.

선별 공정 등에 적용된 바 있다. 최근에는 리사이클링 분야에서 연구가 활발히 진행되고 있는데, 이는 리사이클링 공정에서 분리하고자 하는 대상 물질 간의 단체분리(liberation)가 매우 쉽고, 단체분리 된 상태에서의 분쇄물의 입도가 상대적으로 크며, 무엇보다 분쇄물 내 물질 간의 전기전도도 차이가 크기 때문이다. 대표적인 리사이클링 공정에의 활용 분야는 PE, ABS, PS 등 플라스틱의 재질 별 선별, 폐인쇄회로기판 분쇄물 내 구리 입자와 플라스틱 입자의 분리, 폐 전선 내 구리 선별 등이 있다.

전기전도도가 높은 물질을 전도체(Conductor), 낮은 물질을 절연체(Insulator)라고 한다. 절연체는 전도체와 대비된다는 뜻으로 부도체(Non-conductor), 혹은 전기장 안에서 극성을 띄어 정전기적 유도 작용을 매개한다는 뜻으로 유전체(Dielectric material)라고 불리기도 한다. 정전선별은 궁극적으로 이 둘을 분리하기 위한 물리적 선별 방법이지만 절대적인 전도체, 절연체가 있는 것이 아닌 상대적인 개념으로 이해되어야 한다.

정전선별은 다양한 운전 변수를 조절할 수 있어 분리가 어려운 입자들 간의 선별이 용이하다는 장점이 있다(Bada *et al.*, 2010). 또한 전극의 전압, 전극의 위치, 입자의 투입 속도, 회수부(collecting bin)의 위치 등의 운전 조건을 손쉽게 제어할 수 있으며, 회수부를 다단으로 배치함으로써 여러 종류의 입자를 동시에 회수하는 것이 가능하다. 정전선별의 또다른 장점은 작은 입도의 대상물질에 대하여 건식으로 선별(dry beneficiation)이 가능하다는 점이다. 건식 선별은 추후 slurry 상태의 회수 물질의 탈수 과정 및 광미(Tailing)의 처리에 대한 대책이 불필요하기 때문에 장소(operating site) 선정에 있어서 제약 사항이 적다.

정전선별은 운전 환경의 영향을 많이 받는 단점이 있다. 습도가 높은 환경에서는 물질의 표면이 대전되지 못하고 지속적으로 방전(discharge)이 일어나 전기력을 이용한 선

별이 어려워진다. 따라서 선별 효율을 높이기 위해서는 건조한 환경에서 정전선별을 수행하는 것이 중요하다. 또한 분쇄된 입자의 노출된 면에 따라 대전 형태가 달라질 수 있으므로 원료에 대하여 충분한 수준의 단체분리가 이루어져야 한다. 시료가 여러 층을 이루어 투입될 경우 위층과 아래층의 대전 상태가 달라 선별효율이 떨어질 수 있으므로 시료의 공급시에 이에 대한 주의도 필요하다.

정전선별의 종류

정전선별법은 입자의 하전 원리에 따라 정전기장형(static-field), 고출력형(high-tension), 그리고 마찰전기형(Triboelectric) 등으로 분류되며, 형태에 따라 회전형(또는 드럼형, drum, 롤러형, roller), 판형(plate, 또는 슬라이드형, slide), 벨트형(belt), 지그재그형(zig-zag) 등으로 분류된다. 각 공정은 장단점이 명확하기 때문에 적용하고자 하는 환경에 따라 적절한 방식이 선택된다(Higashiyama and Asano, 2007). Fig. 4에 각 정전선별 종류별 원리에 대하여 간단히 나타내었다(Kelly and Spottiswood, 1989).

정전기장형은 가장 간단한 형태의 정전선별의 형태로 유도대전형(induction charging)이라고도 불리며 판형, 벨트형의 형태가 많이 채택된다. 정전기장형 정전선별기는 접지 전극과 유도 전극으로 구성된다. 입자는 접지 전극을 통하여 미끄러지는 형태로 유도 전극을 통해 생성된 전기장 영역을 지나가는데, 이때 접지 전극의 표면은 유도 전극과 반대로 대전된다. 유도 전극이 음의 퍼텐셜을 가질 경우 전도체는 접지 전극과의 접촉면을 통하여 전하가 이동하여 접지 전극의 표면과 같이 양으로 대전되며, 부도체의 경우 전하의 이동이 없이 분극 현상이 일어나 유도전극 방향의 표면은 양으로, 접지전극 방향의 표면은 음으로 대전된다. 이 현상은 접지 전극의 접촉면을 경계로 가상의 유전체 입자가 반대 전하를 가진 채로 대전의 형태로 존재하는 것

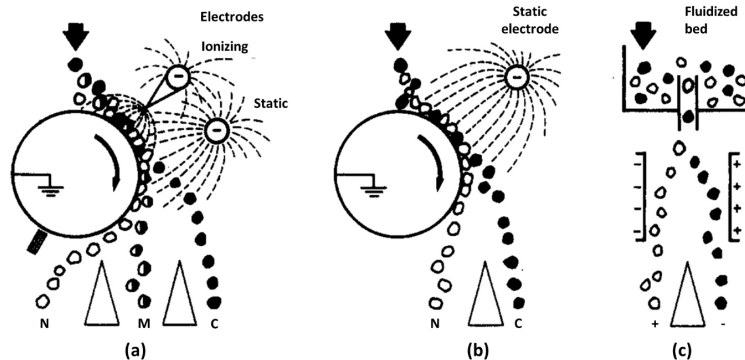


Fig. 4. Basic types of electrostatic separator: (a) high tension, (b) static field, and (c) triboseparator (C: conducting, N: non-conducting, M: middling) (Kelly and Spottiswood, 1989).

로 생각해볼 수 있다. 이러한 상태로 유전체를 접지 전극에 부착하고 있는 힘을 거울상 힘(Image force)이라고 한다. 이동을 계속하던 입자들은 전도체는 회전 전극의 원심력에 의하여 먼 거리로, 부도체의 경우 거울상 힘의 영향을 받아 상대적으로 가까운 거리로 포물선을 그리며 낙하한다.

고출력형은 흔히 코로나형(Corona) 또는 코로나 방전형(Corona discharge)으로 불린다. 코로나 방전형 정전선별기는 수십 kV의 퍼텐셜을 갖는 고전압의 코로나 전극, 유도 전극, 원통형(Drum)으로 회전하는 접지전극 등으로 구성된다. 코로나 방전형 정전선별의 원리는 다음과 같다: 좁은 표면적을 갖는 코로나 주변에 가파른 기울기의 전기장이 형성되며 이 전기장에 의하여 대기 중의 전자가 가속된다. 가속된 전자는 질소, 산소 등 공기 분자와 충돌하여 양이온, 음이온, 전자 등 하전 입자를 생성하며 생성된 전자는 또다시 가속하여 하전 입자를 만들게 되면서 공기가 전도성을 띠는 절연 파괴(electric discharge)가 일어난다. 한편 음의 퍼텐셜을 갖는 코로나 전극의 경우 코로나 전극 근처에는 양전하를 띠는 양이온이, 접지 전극 근처에는 음전하를 띠는 음이온 및 전자가 이끌리게 되며, 전기장의 기울기가 상대적으로 완만한 접지 전극 부근에는 음이온으로 구성된 쉬스(sheath)가 두껍게 형성된다. 쉬스 내 음이온은 접지 전극 위에 놓인 대상 물질과 충돌하여(ion bombardment) 대상 물질의 표면을 대전시키는데 이렇게 코로나 방전에 의하여 입자가 대전되는 현상을 코로나 대전(Corona charge)라고 한다. 전도체의 경우, 접지 전극과의 접촉면을 통하여 전하가 이동하여 전기적 중성이 유지된다. 유전체의 경우 입자와 전극간 전하의 이동이 없이 유전체 내부에서 분극(polarization)이 일어나 코로나 전극 방향 표면은 양으로, 접지 전극 방향 표면은 음으로 대전된다. 유전체 표면과 접촉하는 접지 전극 표면은 양으로 하전되고 거울상 힘에 의하여 유전체가 접지 전극에 부착되게 된다. 전도체, 유전체 입자는 회전하는 접지 전극에 놓인 상태로 접지 전극과 유도 전극 사이에 의해 발생한 전기장 영역을 지나게 된다. 유도전극의 퍼텐셜은 코로나 전극과 유사하지만 코로나 전극 대비 전극의 면적이 넓어 전기장의 기울기가 가파르지 않아 전극 주변의 공기를 이온화시키지 않는다. 전기적 중성을 유지하고 있는 전도체는 전기장의 영향을 무시하고 관성에 의하여 접지 전극으로부터 분리되어 포물선을 그리며 낙하하며 접지전극에 부착된 유전체는 전기장에 의하여 거울상 힘이 유지된 채 회전 드럼에 고정되어 회수된다.

마찰대전형 정전선별은 서로 다른 두 물질이 접촉을 통하여 다른 극성을 갖게 되는 성질을 이용하는 선별방법으로, 물질간의 일함수(Work function, ϕ)의 차이를 사용한다. 일함수는 진공 준위(Vacuum level, E_{Vac})와 페르미 준위(Fermi level, E_F)의 차이로 정의되는 물성이다. 진공 준

위는 최외각 전자(Valence electron)가 물질에서 완전히 벗어나기 위하여 필요한 에너지, 페르미 준위는 절대온도 0도 일때 최외각 전자가 갖는 에너지로 이해될 수 있다. 다시 말하여 이들 간의 차이값을 의미하는 일함수 만큼의 에너지가 어떠한 물질에 인가되면 표면의 최외각 전자가 진공 준위의 에너지를 갖게 되면서 물질을 벗어나게 된다. 일함수가 서로 다른 물질들이 서로 접촉하게 되면 일함수의 차에 의하여 물질간의 페르미 준위가 동등해질 수 있도록 전자의 교환이 일어나는데 이러한 현상을 마찰대전(Tribocharge) 또는 마찰대전이라고 부른다. 이렇게 서로 다른 극으로 대전된 두 물질은 전기장 영역을 지나면서 서로 다른 방향으로 이동하게 되면서 물질간의 분리가 일어난다. 한편, 유전체와 유전체 사이의 정전 현상은 이 일함수 개념으로는 완전히 설명하기 어렵다(Shin *et al.*, 2022). 따라서 각 재료의 상대적인 일함수 값을 나열한 마찰 대전 서열을 통해 물질 사이의 하전 경향을 비교하는 실용적인 방법을 사용하고 있다(Park, 2007).

달 토양에 대한 정전선별의 적용 가능성

달은 여러가지 조건에서 정전선별의 활용이 적합한 환경을 가지고 있다. 먼저, 달의 환경에서는 정전선별 효율을 떨어뜨리는 습도에 대한 영향을 무시할 수 있다. 또한 달 토양의 입도는 D50 기준 72 μm 이며 대부분이 45 - 100 μm 범위에서 분포하고 있을 정도로 매우 작다(Carrier, 2005; Heiken *et al.*, 1991). 달의 토양 내 광물의 결정이 지역에 따라 40 - 500 μm 정도로 존재하는 것을 고려할 때 대부분의 달의 토양은 각각의 광물이 단체분리 되었다고 예상할 수 있으며(Heiken *et al.*, 1991) 이에 따라 높은 선별 효율을 기대할 수 있다. 달의 중력이 지구에 비하여 매우 낮은 점 또한 달에서의 정전선별 활용 가능성을 높게 해주는 요인이다. 지구에서의 실험에서는 정전선별을 통하여 입자에 가해지는 알짜힘 중 입자의 자중에 의하여 발생하는 중력의 비중이 매우 크기 때문에 전기전도도의 차이가 크지 않은 입자 간의 선별에 대해서는 선별 효율을 향상시키기 쉽지 않다. 하지만 지구의 1/6 수준의 중력을 갖는 달에서는 전기력(F_e)의 비중이 커지고 대기가 존재하지 않기 때문에 공기에 대한 항력(F_d)도 무시할 수 있어 작은 전기전도도 차이를 갖는 물질들 간에 정밀한 정전선별이 가능하다(Trigwell *et al.*, 2009).

달의 토양 중 많은 비중을 차지하는 광석은 Olivine, Pyroxene, Plagioclase, Titanite, Anorthite 등이 있으며, 이 중 Titanite는 달의 토양으로부터 개발에 대한 관심을 가장 많이 받는 광물이다. 달의 표토에는 지구보다 훨씬 높은 품위의 Titanite가 존재한다

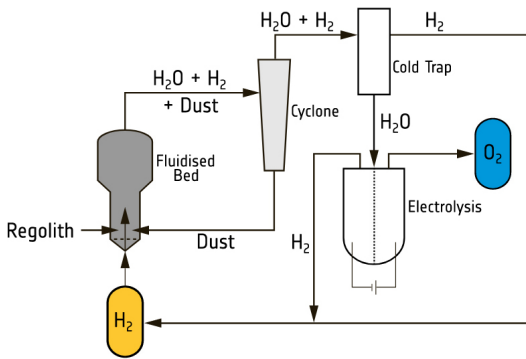


Fig. 5. Illustration of the hydrogen reduction process with a fluidized bed reactor (Schlüter, 2020).

(Van Baalen, 1993; Zhai, 2020). 티탄철석은 달에서의 지속가능한 미션 수행을 위한 가장 중요한 자원으로 인식되고 있는데 이는 산소를 생산하기 위한 원료로 사용할 수 있기 때문이다(Jamanca-Lino, 2021). 산소는 달에서의 인류 생존을 위해서 뿐만 아니라 향후 심우주로 가기 위한 로켓의 원료가 되는 중요한 자원이다. 달 현지에서 산소를 생산하기 위한 연구는 NASA, ESA를 중심으로 활발히 이루어지고 있다. 현지에서 산소를 생산하는 방법은 1) 얼음으로부터 물과 기타 휘발성 물질을 추출한 후 이로부터 산소를 생산하는 방법, 2) 수소, 메탄 등의 가스를 사용하는 산소 환원법, 3) 전기분해를 통한 환원법 등이 연구되고 있다 (Schlüter, 2020). 특히 티탄철석을 원료로 하여 수소환원법을 통해 산소를 추출하기 위한 연구는 이미 1960년대부터 진행되어왔다. 이 방법은 티탄철석에 수소를 공급하여 물, 철, TiO_2 를 얻은 후 여기서 얻어진 물을 전기분해하여 산소를 추출하는 방법이다. 부산물로 얻어진 수소 가스는 티탄철석의 환원을 위하여 재사용될 수 있다. 해당 공법의 개요도를 Fig. 5에 나타내었다. 본 공정을 통해 생산되는 산소의 품질을 높이기 위해서는 물리적 선별을 통하여 달의 표토로부터 티탄철석을 품위를 높이는 공정이 필수적이다. 지구에서의 티탄철석을 대상으로 마찰대전, 코로나 방전형 정전선별을 통한 품위 향상에 관한 연구가 이미 여러 차례 수행된 바 있으며 이러한 연구 결과가 달 환경에서의 정전선별을 수행함에 있어서 참고가 될 수 있을 것이다(Le et al., 2022; Yang et al., 2018).

달 환경 및 월면토에 대한 정전선별 연구사례

달 환경에서의 정전선별을 위하여 고려하여야 할 대표적인 변수에는 극단적으로 변하는 온도, 진공, 그리고 저중력 환경 등이 있다. Agosto는 두가지 광물의 혼합물을 대상으

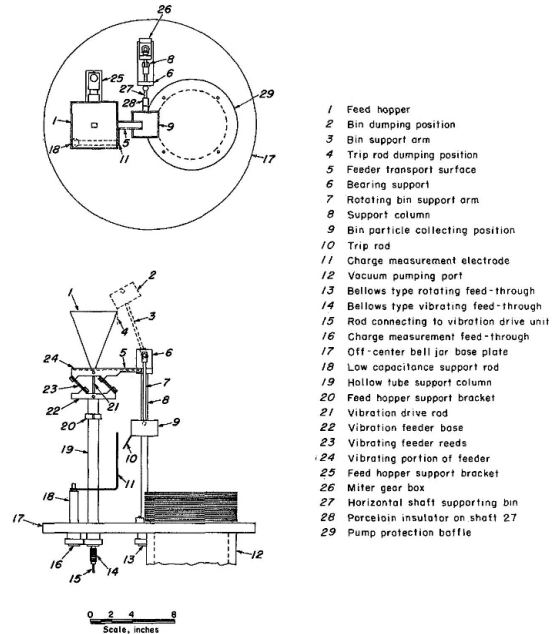


Fig. 6. Electrification measurement apparatus developed by United States Department of The Interior (1970).

로 하는 정전선별 실험에서 온도가 정전선별 효율에 미치는 영향을 평가하기 위하여 상온의 온도 조건, 달의 낮 온도 환경과 유사한 $180^{\circ}C$ 의 온도 조건에서 정전선별 실험을 실시하였다. 고온의 조건인 $180^{\circ}C$ 의 환경에서 품위와 회수율이 극적으로 상승하는 효과를 얻을 수 있는데, 이러한 결과는 고온의 환경에서 수분이 없어 대전 효과가 극대화되었기 때문으로 해석할 수 있다. Agosto는 이 결과를 바탕으로 향후 이어지는 실험에서는 모두 적외선 히터를 이용하여 $100 - 200^{\circ}C$ 환경을 유지하도록 하였다.

진공의 효과를 고려한 정전선별 실험은 일찍이 Fraas에 의해서 실시된 바 있다(Fig. 6)(United States Department of The Interior, 1970). 그는 10^{-8} torr의 고진공 환경에서의 실험을 통하여 정전선별과 자력선별이 원활히 수행될 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 진공에서는 상압의 환경에서와 달리 200 nm 이하의 파장을 갖는 자외선을 이용한 광전효과를 통하여 입자를 하전시키고 이를 정전선별에 활용할 수 있을 것이라고 제안하였다. Agosto는 상압의 공기, 1 torr의 질소, 10^{-5} torr의 진공 환경에서의 선별 실험을 수행하였다(Fig. 7). 각 대기 조건에서의 선별 실험 결과 공기의 환경에서 가장 선별 효율이 좋지 않았고, 질소와 진공 환경에서의 선별 효율은 유사하게 나타났다. 특히 그는 진공의 환경에서는 진동 피더의 사용이 어렵기 때문에 마찰대전, 유도대전 등의 효과를 높일 수 있는 방법을 찾아야 한다고

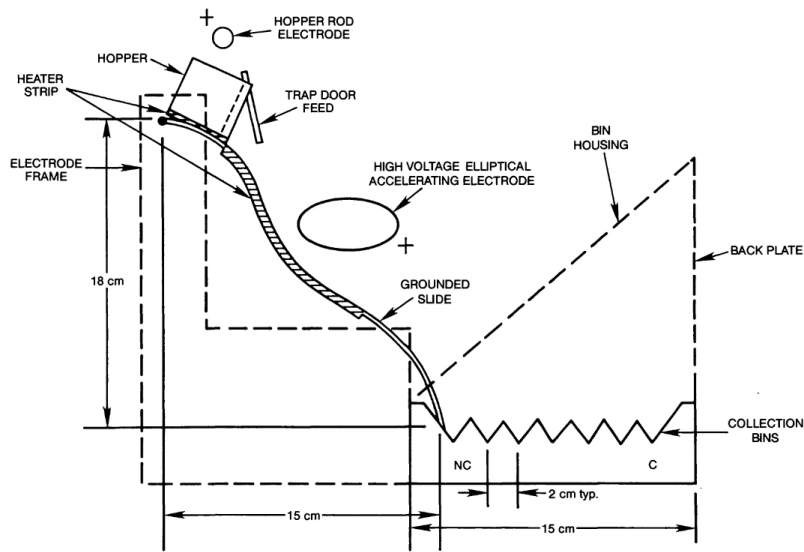


Fig. 7. Electrostatic separator for vacuum slide configuration designed by Agosto (1985).

주장하였고, 진공에서는 공기에 의한 항력의 영향을 받지 않기 때문에 이를 고려한 제품의 설계가 필요할 것이라고 제안하였다(Agosto, 1985). Captain 등은 8×10^{-6} torr의 진공과 상압의 환경에서 마찰하전 실험을 실시하였다(Captain *et al.*, 2007). 그는 금속인 알루미늄, 구리, 그리고 PTFE 재질의 지그재그형 마찰하전장치를 통한 인공월면토 JSC-1의 하전 실험 결과 진공 환경에서 하전장치를 지나간 입자들의 하전량이 상당히 증가하는 것을 확인하였다. 이는 진공 환경에서의 수분의 부재가 하전 효과를 상승시켰기 때문으로 해석되었다.

Quinn은 저중력 환경에서의 정전선별을 수행하였다(Fig. 8)(Quinn *et al.*, 2012). 저중력비행(RGF; Reduced gravity flight)을 통해 두 차례에 걸쳐 수행된 마찰하전 정전선별실험에서 부광비(Enrichment ratio) 각각 65%, 106%를 달성하였다. 하지만 제한된 저중력 환경 구현 시간에 따라 많은 데이터를 축적하는데에는 어려움이 있었고 저중력 환경에서의 선별이 지구에서의 실험에 비하여 나은지에 대한 비교는 어려우며, 다만 실험의 결과로부터 저중력 환경에서의 선별이 수행 가능할 것이라고 결론지었다.

이상에서 살펴본 바와 같이 달의 특징적인 환경인 온도 및 고진공 환경은 정전선별에 유리한 것으로 판단되었다. 두 환경에서 선별 효율이 상승하는 것은 수분의 부재로 인한 하전 효과 극대화가 공통된 원인으로 판단된다. 다만 저중력 환경에서의 선별은 Quinn의 연구를 제외하면 실험 사례가 많지 않기 때문에 추가적인 연구가 진행되어야 한다.

한편, Agosto는 실제 월면토에 대한 선별실험을 최초로

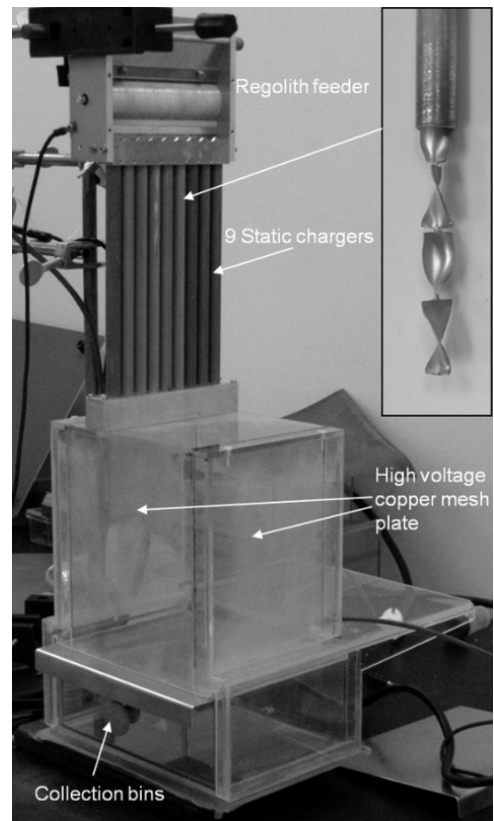


Fig. 8. Electrostatic separation apparatus for the Row Gravity Flight, developed by Quinn *et al.* (2012).

체계화하여 실시하였다(Fig. 9). 초기 연구에서 그는 자력 선별만을 이용한 선별 방법을 제안하였지만 자력선별과 함께 정전선별을 도입할 수 있을 것이라고 제안하였다(Agosto, 1981). 실제 월면토에 정전선별을 적용하기에 앞서 임의로 2종류의 광물을 혼합한 여러 종의 샘플을 만들어 유도대전형 정전선별을 실시하였다. 티탄철석과 감람석을 10:90으로 혼합한 샘플을 45 - 90, 90 - 150, 150 - 250, 250 - 500 μm 등 네 개 입도구간으로 나누어 실시한 실험을 통하여 250 μm 이하의 입도를 갖는 샘플은 한 회의 선별을 거쳐 90% 이상의 품위를 갖는 티탄철석을 회수할 수 있음을 확인하였다. 다만 회수율은 입도에 따라 30% 정도까지 낮아졌는데 이는 반복적인 실험을 통하여 극복할 수 있을 것으로 예상하였다(Agosto, 1983). 이어지는 실험에서 Agosto는 회장석, 티탄철석, 감람석, 휘석을 4:1:1:4 비율로 섞은 인공월면토 KSC-1과 아폴로미션을 통하여 얻은 실제 월면토 Apollo 10084,853을 이용하여 실험을 실시하였다. 여러 광물이 복합적으로 포함된 이들 샘플은 선별 효율이 높지 않았다. 예를 들어 샘플 내 포함된 휘석이 반도체 성격을 띠어 선별 효율이 낮아질 수 있으며 이를 극복하기 위해서는 전극의 극성을 바꾸어 선별 효율을 높일 수 있음을 제안하였다.

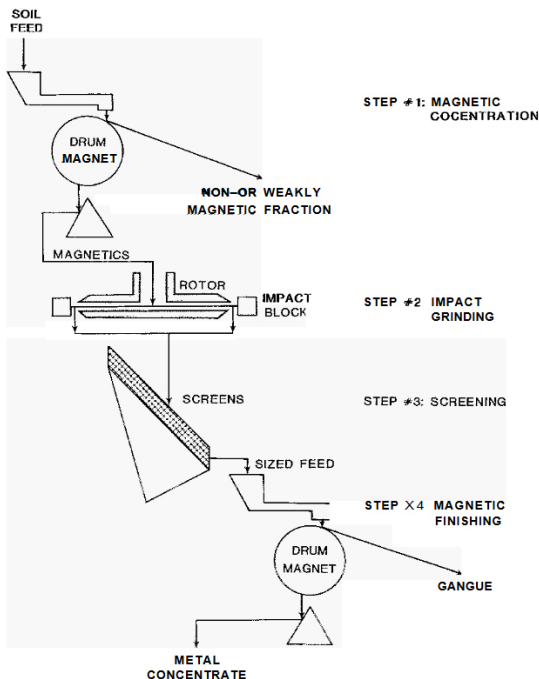


Fig. 9. Lunar soil beneficiation flow sheet developed by Agosto (1981).

Agosto 이후의 정전선별에 대한 연구는 NASA의 케네디 스페이스 센터(KSC) 소속의 Trigwell, Quinn, Captain 등의 연구진의 주도하에 이루어지고 있다. 대부분의 실험은 KSC-1 이외에 JSC-1, MLS-1, NU-LHT-2M을 이용하였으며 Apollo 14 14163, Apollo 17 70051 등의 실제 월면토를 이용하기도 하였다(Captain *et al.*, 2007; Trigwell *et al.*, 2006, 2007, 2009, 2012). 특히 Trigwell의 연구진은 2006년 개발하였던 프로토타입의 정전선별기를 개량하면서 앞서 소개한 진공환경에서의 정전선별, 저중력환경에서의 정전선별 등 도전적인 연구를 수행한 바 있다.

연구 제안

이상의 연구 사례에서 살펴본 바와 같이 인공월면토 혹은 실제 월면토를 사용한 정전선별 연구는 아직 초기단계에 불과하다. 특히 지구의 환경과 크게 다른 달의 환경, 실제 토양을 완전히 모사하지 못하는 월면토의 한계 등으로 연구 결과가 실제 상황에서 어느 정도 유사성을 가질지 판단하기 어렵다. 그럼에도 진공환경, 저중력환경에서의 실험 등 다양한 시도가 이루어지고 있는 점은 매우 고무적이다. 이와 더불어 우리나라의 연구환경을 고려할 때 다음과 같은 연구 주제를 제안한다.

적절한 인공월면토의 개발 필요

우리나라에서는 인공월면토의 개발 사례가 많지 않다. 대외적으로 건설연의 KLS-1이 우리나라의 대표적인 인공월면토로써 홍보되고 있다. KLS-1은 ISRU 중 월면토의 건설재료로의 활용하기 위한 연구를 주 목적으로 하여, 대량 생산을 초점에 두고 개발된 인공월면토이다. 월면토로부터 자원을 회수하는 기술을 개발하기 위해서는 이에 적합한 인공월면토의 개발이 필요하다. 적합한 인공월면토의 조건이란 입도 분포와 더불어 각 입도에 따른 광물 함량 조성비 등 다양한 물성을 포함한다. 미국에서는 NASA뿐 아니라 다양한 연구기관에서 자신들의 연구 목적에 맞는 인공월면토가 개발되고 있다. 인공월면토의 개발은 정전선별기술의 연구에서뿐만 아니라 달에서의 선광공정 전체를 연구하는 데 있어서 첫 출발점이 될 수 있다. 인공월면토 생산 기술은 분쇄/분급에 뿌리를 두고 있기 때문에 자원 처리 전공자들이 접근하기에 수월할 것으로 생각된다.

고 진공 환경을 모사할 수 있는 환경 구현

고진공 환경의 구현은 달의 환경을 모사하기 위하여 필수적이다. Trigwell의 연구팀은 실험을 위하여 약 8×10^{-7} torr 수준의 진공을 유지할 수 있는 진공 챔버를 활용하였고, 인공월면토로부터 산소를 추출하는 실험에 성공한

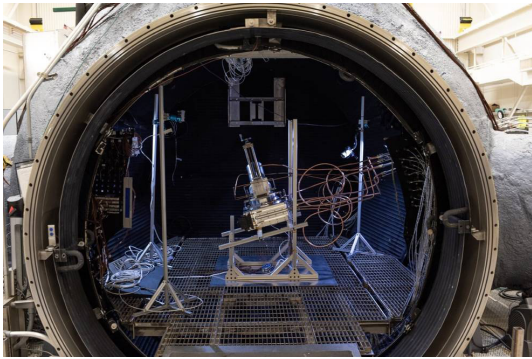


Fig. 10. A high-powered laser and carbothermal reactor located inside the testing chamber of NASA's Carbothermal Reduction Demonstration (CaRD) at NASA's Johnson Space Center (NASA Successfully Extracts Oxygen from Lunar Soil Simulant - NASA, 2023).

NASA의 JSC 연구팀도 지름 약 4.5 m의 진공 챔버를 연구에 활용하였다(Fig. 10). 진공 챔버의 구축은 챔버의 크기가 허용하는 범위 내에서 선별 장치의 설계 및 운전에 대한 유연성을 부여할 수 있다. 한편, 미세 입자가 포함된 상태에서는 입자로부터 가스가 방출하여(Out gassing) 진공 환경 조성에 많은 시간이 걸릴 수 있고 입자 분산으로 인한 펌프 등 기계 장치의 고장을 야기할 수 있어 이에 대한 대책이 요구된다.

우주 환경을 적용한 설계 방안

달의 환경에서는 지구에 비하여 다양한 설계의 선별 장치가 운용 가능할 것으로 생각된다. 특히 수직 방향으로의 중력, 그리고 대기에 의한 유체의 영향을 받지 않기 때문에 입자의 운동 방향을 자유롭게 유도할 수 있다. 또한 태양으로부터 조사되는 자외선은 입자의 표면을 하전시키기 위한 목적으로 사용될 수 있으며, 전기적으로 충전된 토양을 에너지 하베스팅(Energy Harvesting)에 이용하여 장비 운전, 선별 입자의 하전을 위한 전력원으로 사용될 수 있을 것이다. 대기가 존재하지 않는다는 점을 이용하여, 극미량의 유체를 공급함으로써 입자 거동을 제어할 수도 있다. 이상과 같은 많은 경우를 연구하기 위하여 달 환경을 고려한 DEM/CFD 커플링 모의 실험 또한 흥미로운 연구 주제가 될 수 있을 것이다.

정전선별 원리를 활용하는 다른 연구에의 적용

달에서 미션 수행에 가장 큰 문제가 되었던 것 중 하나는 달 먼지(lunar dust)이다. 정전기적으로 하전된 달 토양은 수십 cm, 높게는 수 m 이상의 부유하는 형태로 먼지층을 이

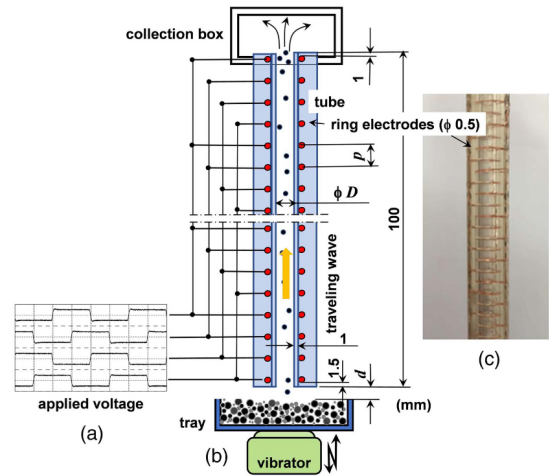


Fig. 11. Schematic drawing of vertical particle transport system utilizing electrodynamic traveling waves: (a) wave form of four phase rectangular voltages applied to ring electrodes, (b) total system, and (c) photograph of tube with ring electrodes (Kawamoto and Hata, 2021).

루고 있는데 이들은 자신의 극성과 반대 극으로 하전된 입자에 달라붙어 우주 미션의 큰 위협요소로 여겨지고 있다. 이들의 부착 메커니즘 및 제거 메커니즘은 정전선별의 원리와 매우 유사하다. 이미 관련하여 많은 연구가 진행되었으며 특히 전기를 활용한 입자 제어 기술은 일본 와세다 대학의 Kawamoto 연구진 등에 의하여 상당히 진행되고 있다(Fig. 11)(Kawamoto, 2020; Kawamoto *et al.*, 2021; Kawamoto and Shibata, 2015; Kawamoto and Hara, 2011). 단순히 먼지 입자의 제거기술 뿐 아니라 입자의 크기에 따른 질량 차이를 이용하여 입도 별 분류도 가능하다는 것이 실험적으로 증명되고 있으며 이러한 기술들은 달의 저중력 환경에서 체분리의 어려움을 극복하기 위한 후보 기술로 활용될 수 있을 것이다.

결론

본 논문에서는 달에서 정전선별 공정을 적용하기 위하여, 달의 환경에 대하여 간단히 살펴보고, 선별 공정 개발의 첫 단추라고 할 수 있는 인공월면토의 개념 및 개발사례에 대하여 살펴보았다. 정전선별의 원리에 대하여 알아보고 달 환경에서 정전선별의 적용 가능성에 대하여 검토하였으며, 현재 세계적으로 진행중인 달 환경을 고려한 정전선별 연구사례에 대하여 소개하였다. 끝으로 우리나라의 연구 환경을 고려하여 몇 가지 관련 연구 주제를 제안하였다.

정전선별은 저중력, 고진공의 달 환경에서 적용 가능성이 가장 높은 선별 기술로써 주목을 받고 있다. 특히 정전선별은 티탄철석을 고순도화 하고, 이로부터 후공정을 통하여 산소를 생산하기 위한 잠재성이 매우 큰 기술이다. 달 환경을 반영한 정전선별 실험이 전 세계적으로 행해지고 있음에도, 국내에서는 선광 공정 연구 목적의 모사토 부재, 실험 환경 구축의 어려움 등으로 인하여 크게 연구되지 않고 있다. 대한민국은 한국항공우주연구원을 통하여 2032년 달 착륙선을 발사할 예정이다. 이러한 상황에서 현지 중심의 미션을 수행하기 위해서는 현지자원을 활용할 수 있는 기술의 선점이 매우 중요하며 현지에서 적용 가능한 선광 공정의 개발은 성공적인 ISRU 를 위한 출발점이라고 할 수 있다. 향후 우주 미션의 성공을 위해서는 달 환경을 포함한 다양한 우주의 극한 환경에서의 선광 공정의 연구가 뒷받침되어야 할 것이다.

사 사

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

References

- Agosto, W.N., 1981. Beneficiation and Powder Metallurgical Processing of Lunar Soil Metal, *4th space manufacturing: proceedings of the fifth conference*, Princeton, NJ, p.365-370.
- Agosto, W.N., 1983. Electrostatic Separation of Binary Comminuted Mineral Mixtures, *Advances in the Astronautical Sciences*, 53, p.315-334.
- Agosto, W.N., 1985. Electrostatic concentration of lunar soil minerals, *Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century*, Houston, TX, p.453-464.
- Atmosphere - Wikipedia, 2023.07.25, <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Atmosphere&oldid=1167103479>.
- Bada, S.O., Falcon, R.M.S., and Falcon, L.M., 2010. The potential of electrostatic separation in the upgrading of South African fine coal prior to utilization - a review, *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 110(11), p.691-702.
- Captain, J., Trigwell, S., Arens, E., Biris, A., Captain, J., Quinn, J., and Calle, C., 2007. Tribocharging Lunar Simulant in Vacuum for Electrostatic Beneficiation. *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, Albuquerque, NM, p.951-956.
- Carrier, W.D., 2005. *The Four Things You Need to Know About the Geotechnical Properties of Lunar Soil*, Lunar Geotechnical Institute, Lakeland, FL, United States, p.23.
- Chung, T.I., Lim, J.Y., Kang, S., Yoo, Y., and Shin, H.S., 2018. Vacuum diagnosis and testing of a dirty thermal vacuum chamber, *Applied Science and Convergence Technology*, 27(6), p.120-125.
- David, S.M., James, L.C., Walter, W.B., Carlton, C.A., and Judith, H.A., 1994. JSC-1: A New Lunar Soil Simulant, *Abstracts of the 24th Lunar and Planetary Science Conference*, Houston, TX, p.963.
- ESRIC KSP - Simulants, 2023.12.01, <http://knowledge.esric.lu/simulants/>
- Gibson, M.A. and Knudsen, C.W., 1985. Lunar oxygen production from ilmenite, *Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century*, Houston, TX, p.543.
- Heiken, G.H., Vaniman, D.T., and French, B.M., 1991. *Lunar Sourcebook*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 778p.
- Higashiyama, Y. and Asano, K., 2007. Recent Progress in Electrostatic Separation Technology, *Particulate Science and Technology*, 16(1), p.77-90.
- Jamanca-Lino, G., 2021. Space resources engineering: ilmenite deposits for oxygen production on the moon, *Journal of Mining and Metallurgy Section B: Metallurgy*, 6(1), p.6-11.
- Kang, T.Y., 2021. *Development of Korean Lunar Highland Soil Simulant: KIGAM-L1*, MS Thesis, Chungnam National University, South Korea, 45p.
- Kawamoto, H. and Hara, N., 2011. Electrostatic cleaning system for removing lunar dust adhering to space suits, *Journal of Aerospace Engineering*, 24(4), p.442-444.
- Kawamoto, H. and Hata, K., 2021. Vertical transport of lunar regolith and ice particles using electrodynamic traveling wave, *Journal of Aerospace Engineering*, 34(4), p.04021042.
- Kawamoto, H. and Shibata, T., 2015. Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels, *Journal of Electrostatics*, 73, p.65-70.
- Kawamoto, H., 2020. Vibration transport of lunar regolith for in situ resource utilization using piezoelectric actuators with displacement-amplifying mechanism, *Journal of Aerospace Engineering*, 33(3), p.04020014.
- Kawamoto, H., Morooka, H., Nozaki, H., and Emeritus, R., 2021. Improved electrodynamic particle-size sorting system for lunar regolith, *Journal of Aerospace Engineering*, 35(1), p.04021115.
- Kelly, E.G. and Spottiswood, D.J., 1989. The Theory of Electrostatic Separations: A Review Part I. Fundamentals, *Minerals Engineering*, 2(1), p.33-46.
- Kim, Y. H., Choi, S. H., Yu, Y., and Kim, K. J., 2021a, Basic lunar topography and geology for space scientists, *Journal of*

- Space Technology and Applications*, 1(2), p.217-240.
- Kim, Y. J., Ryu, B. H., Jin, H., Lee, J., and Shin, H.S., 2021b, Microstructural, mechanical, and thermal properties of microwave-sintered KLS-1 lunar regolith simulant, *Ceramics International*, 47(19), p.26891-26897.
- Le, S.H., Karelina, N.V., Kieu, B.T., Karelin, V.A., and Zherin, I.I., 2022. Application of electrostatic and electromagnetic separation for beneficiation of ilmenite ores from Vietnam, *International Journal of Electronics and Communication Engineering (IJECE)*, 11(1), p.15-29.
- Lucey, P., Korotev, R.L., Gillis, J.J., Taylor, L.A., Lawrence, D., Campbell, B.A., Elphic, R., Feldman, B., Hood, L.L., Hunten, D., Mendillo, M., Noble, S., Papike, J.J., Reedy, R.C., Lawson, S., Prettyman, T., Gasnault, O., and Maurice, S., 2006. Understanding the lunar surface and space-moon interactions, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 60(1), p.83-219.
- Napier-Munn, T. and Wills, B.A., 2011. *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*, Butterworth-Heinemann, Oxford, United Kingdom, p.381-407
- NASA Successfully Extracts Oxygen from Lunar Soil Simulant - NASA, 2023.04.25, <https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/johnson/nasa-successfully-extracts-oxygen-from-lunar-soil-simulant/>
- Park, C.H., 2007. *A Study on Charging Properties and Separation Efficiency of Mixed Plastics by Triboelectrostatic Separation*, Ph.D. Thesis, Hanyang University, South Korea, 167p.
- Planetary Simulant Database, 2023.12.01, <https://simulantdatab.com/>
- Quinn, J.W., Captain, J.G., Weis, K., Santiago-Maldonado, E., Trigwell, S., and Engineer, E., 2012. Evaluation of Tribocharged Electrostatic Beneficiation of Lunar Simulant in Lunar Gravity, *Journal of Aerospace Engineering*, 26(1), p.37-42.
- Ryu, B.H., Wang, C.C., and Chang, I., 2018. Development and Geotechnical Engineering Properties of KLS-1 Lunar Simulant, *Journal of Aerospace Engineering*, 31(1), p.04017083.
- Schlüter, L., 2020. Review of techniques for In-Situ oxygen extraction on the moon, *Planetary and Space Science*, 181, p.104753.
- Shin, E.C., Ko, J.H., Lyeo, H.K., and Kim, Y.H., 2022. Derivation of a governing rule in triboelectric charging and series from thermoelectricity, *Physical Review Research*, 4(2), p.023131.
- Trigwell, S., Captain, J., Captain, J., Arens, E., Quinn, J., and Calle, C., 2006. Electrostatic Beneficiation of Lunar Simulant, *ESA/IEEE International Conference*, Berkeley, CA, 11p.
- Trigwell, S., Captain, J., Captain, J., Quinn, J., Arens, E., and Calle, C., 2007. Evaluating the use of tribocharging in electrostatic beneficiation of lunar simulant, *AIChE Annual Meeting, Conference Proceedings*, San Francisco, CA, 25p.
- Trigwell, S., Captain, J., Weis, K., and Quinn, J., 2012. Electrostatic Beneficiation of Lunar Regolith: Applications in In Situ Resource Utilization, *Journal of Aerospace Engineering*, 26(1), p.30-36.
- Trigwell, S., Captain, J.G., Arens, E.E., Quinn, J.W., and Calle, C.I., 2009. The use of tribocharging in the electrostatic beneficiation of lunar simulant, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 45(3), p.1060-1067
- United States Department of The Interior, Bureau of Mines, 1970. *Factors related to mineral separation in a vacuum*, N71-11569, Washington, United States, 37p.
- Van Baalen, M.R., 1993. Titanium mobility in metamorphic systems: a review, *Chemical Geology*, 110(1), p.233-249.
- Yang, X., Wang, H., Peng, Z., Hao, J., Zhang, G., Xie, W., and He, Y., 2018. Triboelectric properties of ilmenite and quartz minerals and investigation of triboelectric separation of ilmenite ore, *International Journal of Mining Science and Technology*, 28(2), p.223-230.
- Yoo, S.H., Kim, H.D., Lim, J.H., and Park, J., 2014. Development of KAU mechanical lunar simulants and drop test of lunar landing gears, *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 42(12), p.1037-1044.
- Zhai, J., 2020. A review of mineral processing of ilmenite by flotation, *Minerals Engineering*, 157, p.106558.



박 승 수

2019년 한양대학교 자원환경공학과 공학
박사

현재 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 박사후연구원
(E-mail; ssglenpark@kict.re.kr)



유 병 현

2014년 인천대학교대학원 건설환경공학
과 공학박사

현재 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 전임연구원
(E-mail; tnt306@kict.re.kr)



신 휴 성

2000년 University of Wales Swansea, 토
목공학과 공학박사

현재 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 선임연구위원
(E-mail; hyushin@kict.re.kr)
