

달 지상환경 모사를 위한 지반 진공화 및 달먼지 거동에 대한 실험적 연구

정태일* · 안호상** · 유용호*** · 신휴성****

Chung, Taeil*, Ahn, Hosang**, Yoo, Yongho***, Shin, Hyu-Soung****

An Experimental Study on Air Evacuation from Lunar Soil Mass and Lunar Dust Behavior for Lunar Surface Environment Simulation

ABSTRACT

For sustainable lunar exploration, the most required resources should be procured on site because it takes tremendous cost to transfer the resources from the Earth to the Moon. The technologies required for use of lunar resources refers to In-Situ Resource Utilization (ISRU). As the ISRU technology cannot be verified in the Earth, a lunar surface environment simulator is necessary to be prepared in advance. The Moon has no atmosphere, and the average temperature of the lunar surface reaches to 107 °C during the daytime and -153 °C at night. The lunar surface is also covered with very fine soils with sharp particles that are electrostatically charged by solar radiation and solar wind. In this research, generation of vacuum environment with lunar soil mass in a chamber and simulation of electrostatically charged soils are taken into consideration. It was successful to make a vacuum environment of a chamber including lunar soils without soil disturbance by controlling evacuation rate of a vacuum chamber. And an experiment procedure for simulating the charged lunar soil was suggested by theoretical consideration in charging phenomena on lunar dust.

Key words : Lunar environment simulation, Vacuum, Lunar soil, Dust charging

초 록

달 탐사에 필요한 모든 자원을 지구에서 이송하는 것은 천문학적인 비용이 들기 때문에 지속가능한 달 탐사를 위해서는 현지에서 필요한 자원을 조달해야 한다. 이것을 가능하게 하는 기술이 현지자원활용 기술이다. 지구에서는 개발된 현지자원활용 기술을 검증할 수 없기 때문에 기술검증을 위한 달 표면 환경 모사 시설이 요구된다. 달 표면은 대기가 없으며, 표면의 평균온도는 낮에는 107°C, 밤에는 -153°C에 달한다. 또한 달 지표는 미세하고 거친 토양으로 덮여 있으며, 태양복사와 태양풍으로 인해 정전기적으로 대전되어 있다. 본 연구는 월면토를 포함한 고진공 환경과 정전기적으로 충전된 토양 모사에 대한 내용을 다루었다. 진공챔버의 감압속도 조절 실험을 통해서 지반 교란없이 토양을 포함한 진공환경을 성공적으로 구축하였고, 달 먼지의 대전 현상 이론 고찰을 통해 달 토양 대전 환경 구현을 위한 실험 방향을 제안하였다.

검색어 : 달 환경 모사, 진공, 달 토양, 먼지 대전

* 정회원 · 한국건설기술연구원 미래융합연구본부 전임연구원 (KICT · taeilchung@kict.re.kr)

** 한국건설기술연구원 국민생활연구본부 연구위원, 공학박사 (KICT · hahn@kict.re.kr)

*** 한국건설기술연구원 화재안전연구소 연구위원, 공학박사 (KICT · yhyoo@kict.re.kr)

**** 중신회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 미래융합연구본부 연구위원, 공학박사 (Corresponding Author · KICT · hyushin@kict.re.kr)

Received November 20, 2018/ revised January 31, 2019/ accepted February 7, 2019

1. 서론

1960년대 미국과 소련의 체제경쟁으로 달 탐사에 대한 엄청난 투자가 있었으나, 냉전시대 종식이후에 달 탐사는 쇠퇴의 길을 걸었다. 그러나 2000년대 이후 일본, 중국, 인도 등 우주신흥국의 등장과 함께 경제적, 과학적인 관점에서의 달 탐사가 재조명을 받고 있다. 따라서 많은 우주국들은 장기간의 달 탐사를 위한 현지자원활용(In-Situ Resource Utilization, ISRU) 기술 개발에 박차를 가하고 있다. NASA는 ISRU 기술을 6가지로 제시하고 있으며 이는 1) 자원의 탐사(resource assessment or prospecting), 2) 자원의 획득(resource aquisition), 3) 자원의 처리(resource processing or consumable production), 4) 현지에서의 제조(in-situ manufacturing), 5) 현지에서의 건설(in-situ construction), 6) 현지에서의 에너지 생산(in-situ energy)이다(Linne et al., 2017). 이러한 기술을 성공적으로 개발하기 위해서는 달과 유사한 환경에서 테스트하기 위한 시설이 필요한데, 여기에서 필요한 기술이 달 지상 환경 모사 기술이다.

달은 지구와 가장 가까운 천체로 달 표면은 대기가 매우 희박하며, 중력은 지구의 1/6 수준이다. 낮과 밤의 온도변화는 매우 커서 달 표면의 평균온도는 낮에는 107 °C, 밤에는 -153 °C에 달하며, 태양풍에 의한 풍화작용(weathering)으로 달 토양은 거칠고 미세한 흙으로 이루어져 있다(Heiken et al., 1991). 따라서 달 지상 환경 모사를 위해서는 진공, 온도, 중력, 태양복사, 태양풍, 달 토양 등의 모사가 필요하다.

우주환경모사에서 가장 일반적으로 사용되는 시설은 열진공챔버(thermal vacuum chamber)로 진공환경과 저온/고온 환경 조성이 가능하다. 국내외에 수많은 열진공챔버가 있으며, 국내에는 한국항공우주연구원의 대형열진공챔버가 대표적이다(Cho et al., 2007). 중력 환경을 모사하기 위한 장치로는 무작위 회전 장치(Random Positioning Machine, RPM), Centrifuge 등의 장치가 있다(Borst and van Loon, 2008; Kim et al., 2009). 또한 태양복사 모사를 위해 목적에 따라 다양한 종류의 램프를 사용할 수 있다(Tawfil et al., 2018). 달 토양에 대해서도 많은 연구가 이루어져 국내외에 여러 종류의 인공월면토가 존재하며 한국건설기술연구원은 인공월면토를 자체 개발하여 활용하고 있다(Ryu et al., 2015). 그러나 여기에서 제시된 모든 기술을 활용하여 지구에서 달 표면의 환경을 완벽하게 구현하는 것은 현실적으로 어려움이 많으며, 검증하고자 하는 주요 환경을 모사하여 장치와 기술을 테스트 하는 것이 현실적이다.

달에서의 ISRU 기술검증을 위한 환경모사에서 핵심적인 부분은 달 표면의 대부분을 덮고 있는 거칠고 미세한 달 토양과의 상호작용에 대한 검증이다. 관련연구로는 NASA Glenn Research Center에서 열진공챔버에 복제월면토를 넣어 진공환경을 조성한 사례가

있으며(Kleinhenz and Wilkinson, 2014), 또한 Kruzelecky et al.(2017)는 열진공챔버에 인공월면토를 넣어 대전현상과 태양복사를 모사하였다. 달 표면에서는 태양복사와 태양풍에 의해 달 표면이 정전기적 대전이 되는데, 달 표면에 사람이나 장비가 있을 때 먼지가 표면에 달라붙는 현상으로 여러 문제를 야기한다. 달 표면에서의 정전기적 대전 현상을 연구하고 모사하는 시도들이 있었다. Flanagan and Goree(2006)은 electron beam을 이용하여 플라즈마 환경에서 먼지 부유 현상을 모사하였으며, Abbas et al.(2007)은 자외선(UV)을 이용하여 월면토의 대전현상과 달라붙는 현상을 모사하였다.

이전의 연구는 실험실 수준의 달 환경에서의 현상 재현에 초점을 맞추었으나, 본 연구는 달에서의 ISRU 기술 검증 환경 구현을 위한 달 지상환경 모사기술에 초점을 맞추고 있다. 첫 번째 접근은 다량의 월면토를 포함한 진공환경 조성 기술에 관한 것으로 다량의 흙을 지반의 교란 없이 구현하는 것이고, 두 번째 접근은 진공환경에 포함된 지반에 대전 환경을 조성하는 것이다. 본 논문은 지반을 포함한 진공환경 조성에 대한 실험적인 결과와 달에서의 지반표면의 대전현상의 메커니즘에 대한 고찰 및 이를 구현하기 위한 실험계획에 대해 기술하였다.

2. 지반을 포함한 진공 환경 구현

2.1 지반을 포함한 진공환경 구현의 문제점

NASA Glenn Research Center에서는 직경 1.5 m, 높이 3.66 m의 열진공챔버에 0.64 m 깊이의 약 1톤의 복제월면토를 넣고 10^{-5} Torr의 진공도를 달성하였다. 여기서 흙을 진공챔버에 넣고 감압과정에서 나타나는 2가지 문제점에 대해서 언급을 했다. 첫 번째는 진공에 도달하는 과정에서 흙의 표면에 붙어 있는 수분이나 가스가 낮은 압력에서 방출되면서 흙이 교란되는 현상이고(Fig. 1), 두 번째는 이러한 탈가스(outgas)로 인해 진공도가 나빠지고, 목표로 하는 진공도에 도달하는데 걸리는 시간이 길어진다는 것이다(Kleinhenz and Wilkinson, 2014).

진공에 도달하는 과정에서 나타나는 지반 교란현상의 문제점은 테스트 하고자 하는 지반의 상태가 바뀐다는 것이다. 사전에 조성해 놓은 지반의 조건이 진공환경 조성과정에서 바뀌게 되면 테스트 조건이 달라지기 때문에 문제가 된다. 또한 지반 교란현상은 교란과정에서 비산되는 먼지로 인해 챔버의 펌프나 게이지에 오류를 일으킬 수 있으며, 테스트 장치에도 영향을 줄 가능성이 있다. 따라서 진공환경 조성과정중 지반의 교란이 없어야 한다. Kleinhenz and Wilkinson(2014)은 진공환경 조성 중 감압속도를 느리게 하면 지반의 교란이 발생하지 않는다는 것을 발견하였으나, 감압속도에 대한 가이드를 제시하지는 못하였다.

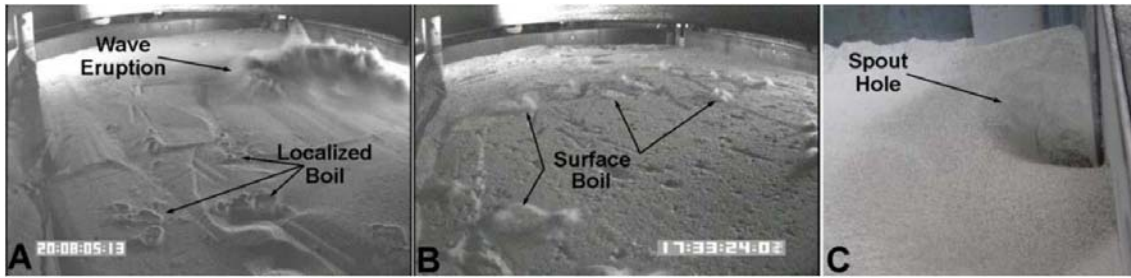


Fig. 1. Soil Disturbance During Evacuation (Kleinhenz and Wilkinson, 2014)



Fig. 2. Pilot Dusty Thermal Vacuum Chamber (DTVC)

흡에서 나오는 다량의 탈가스로 인해 진공도가 나빠지는 문제는 테스트의 효율성과 관련이 있다. Kleinhenz and Wilkinson(2014)의 실험에서 챔버에 흡이 없었을 때 10^5 Torr의 압력에 도달하는데 약 5시간 만에 도달한 반면, 1톤의 흡이 있었을 때는 9일의 시간이 걸렸다. 따라서 테스트 효율성을 높이기 위해서는 흡의 탈가스를 사전에 제거하는 전처리 과정이 요구됨을 알 수 있다.

2.2 지반을 포함한 진공환경 구현을 위한 실험 장치

지반을 포함한 진공환경 구현을 위해서 한국건설기술연구원은 2016년 내경 1.3 m, 길이 1.3 m의 파일럿 규모의 지반열진공챔버 (Pilot Dusty Thermal Vacuum Chamber, DTVC)를 개발하였다 (Fig. 2). 파일럿 지반열진공챔버는 흡을 포함한 진공환경 조성 연구를 위해 제작된 시설로 280 L의 흡을 담을 수 있는 지반 상자가 레일을 통해 챔버 안으로 들어갈 수 있도록 설계되었고, 감압율을 조정할 수 있도록 시스템이 구성되어 있다. 파일럿 지반열진공챔버는 대기압에서부터 낮은 압력으로 진행되면서 벤츄리 펌프 (venturi pump), 건식 진공 펌프(dry vacuum pump), 터보 분자 펌프(turbo molecular pump), 크라이오 펌프(cryogenic pump)를 차례로 사용하여 진공배기를 수행하며, 흡이 없는 경우 10^7 mbar 진공환경 조성이 가능하다.

2.3 지반을 포함한 진공환경 구현 실험 결과

파일럿 지반열진공챔버를 이용하여 무게 270 kg의 인공월면토 (KLS-1)을 넣고 일반적인 펌프 운영 조건에서 $10^{-1} \sim 10^{-2}$ mbar 영역의 저진공 영역까지 건식 드라이 펌프를 이용해 진공배기 실험을 수행하였다. Fig. 3은 챔버에 흡이 없는 경우와 흡을 포함한 경우의 압력곡선을 보여주고 있다. 흡이 없는 경우 펌프 가동 후 7시간 후에 3×10^{-2} mbar에 도달하였으나, 흡이 있는 경우에는 1 mbar로 도달 진공도가 좋지 않아졌다. 이는 흡에서 나오는 탈가스의 영향으로 진공도가 좋지 않아진 것으로 생각된다. 또한 Fig. 4는 진공배기 실험 전/후의 지반 표면 사진을 보여주고 있는데, 진공배기 후의 지반표면 사진을 보면, 작은 구멍과 지반 교란이 된 표면을 확인할 수 있었다.

앞의 사전 실험을 통해서 기존 연구 사례(Kleinhenz and Wilkinson, 2014)에 언급된 것과 같이 진공환경 조성과정 중에서 지반의 교란현상을 확인하였다. 따라서 우리는 지반의 교란 없는 진공환경을 조성하기 위해 감압속도를 느리게 하여 지반 교란 없이 진공환경을 조성하기 위한 실험을 하였다. 수차례 실험을 통해 0.3 mbar/s 이하로 감압을 하였을 때 지반의 교란이 발생하지 않음을 확인하였다(Figs. 5 and 6). 이 실험은 지반의 어떤 조건에 따라서 어떤 속도로 감압하였을 때 지반의 교란이 발생하지 않는가

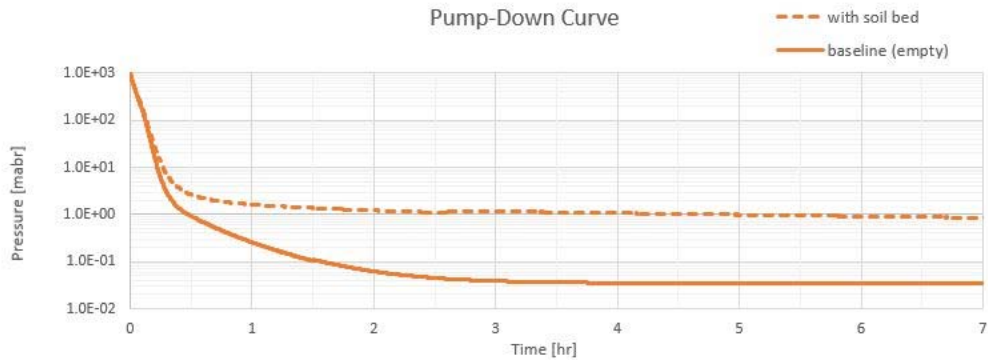


Fig. 3. Pumping Down Curve of the Pilot DTVC



(a) Before Pumping Down



(b) After Pumping Down

Fig. 4. Surface of the Soil Bed Before (a) and After (b) Pumping Down Test

에 대한 물음에는 답할 수는 없지만, 기존 연구 사례에 제시된 것처럼 진공환경 조성과정 중 감압속도가 지반의 교란에 영향을 미친다는 것을 다시 한 번 확인하였고, 실제로 챔버의 감압속도 제어를 구현함으로써 지반 교란 없는 진공환경 조성에 성공하였다. 향후 지반의 조건과 지반교란 없는 진공 챔버의 감압속도에 대한 이론적인 연구가 필요하다고 생각된다.

3. 달먼지 대전 현상 모사

3.1 달먼지의 대전 현상 모사의 필요성과 이론적인 배경

달 표면은 수백만년 기간 동안 운석충돌로 인해 생성된 수 마이크로미터 이하의 두꺼운 먼지 입자들로 덮여 있다. 이 입자들은 표면에

부유되어 있고 이동한다. 또한 달 표면은 태양 자외선(solar UV)과 태양풍(solar wind)에 의해 대전되어 있다(Colwell et al., 2007).

달 표면의 먼지 입자의 대전과 이동 현상은 아직 완벽히 설명되지는 않지만, 대전된 입자가 물체에 달라붙는 현상으로 인해 달 탐사 활동을 심각하게 저해하므로 이에 대한 규명과 해결을 위한 기술 개발이 필요하다. 따라서 지반을 포함한 진공환경 구현 이후에는 달 먼지의 대전 현상 모사가 필수적이며, 이를 통해 달 지상 환경에서 ISRU 기술 검증에 대한 목적을 달성할 수 있을 것이라 생각한다.

달 표면의 대전현상은 크게 3가지로 분류되는데 1) 달의 밤쪽(night side)에 전자나 이온의 충돌로 인한 대전현상으로 주로 100 eV 이하의 음극으로 대전되고, 달의 낮쪽(day side)은 태양풍의 고에너지 전자가 달 표면 입자의 2차 전자를 방출시켜 양극으로

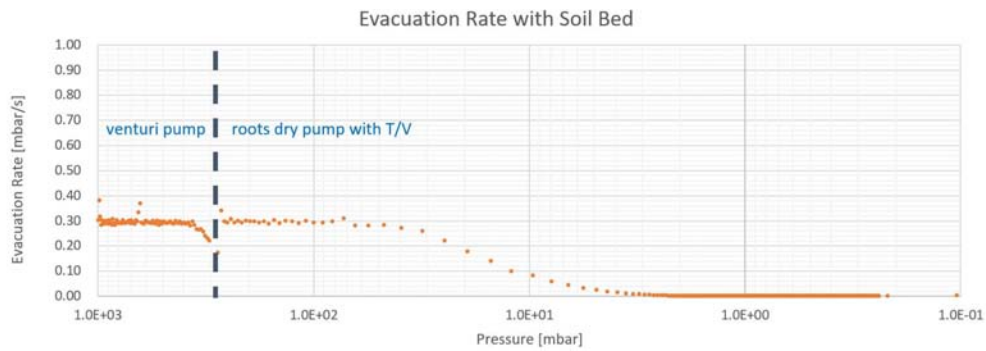


Fig. 5. Evacuation Rate of the Pilot DTVC with Soil Bed



(a) Before Pumping Down



(b) After Pumping Down

Fig. 6. Surface of the Soil Bed Before (a) and After (b) Pumping Down Test with Evacuation Rate Control

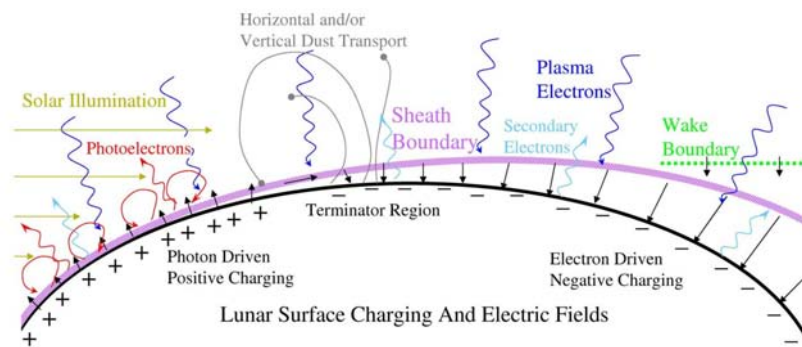


Fig. 7. Schematic of the Lunar Electrostatic Environment in the Solar Wind (Stubbs et al., 2005)

대전되는 현상, 2) 달 표면 입자의 일함수(work function) 보다 큰 에너지 광자로 인한 광전자 방출에 의한 대전 현상, 3) 달 표면 입자의 마찰에 의한 대전현상이다. 이러한 대전 현상에 의해 달 먼지 입자들은 표면위에 부유되어 있고, 수평/수직 방향으로

이동된다. 또한 튀어나온 광전자들이 달 표면에 외피(sheath)형태의 전자막(photoelectron sheath)으로 존재하게 된다(Fig. 7). 이러한 달 먼지의 대전과 이동에 관한 이론적인 모델은 합당하지만, 관찰된 현상을 모두 설명하지는 못한다(Abbas et al., 2007).

3.2 달먼지 대전의 실험적 모사 방법과 실험 설계

달 표면에서 달 먼지의 대전과 이동 현상에 대한 메커니즘은 복잡하고 아직 명확히 밝혀지지 않았지만, 대전된 달 표면의 상태를 유사하게 모사하고 그 환경에서 야기되는 문제점을 재현할 수 있다면 문제해결을 위한 기술개발에 많은 도움이 될 것이다. 앞 절에서 설명한 것처럼 태양풍에서 방사되는 고에너지 이온과 태양 자외선이 달 표면 대전 현상의 주요한 원인이다. 그중에서도 자외선에 의해 달 표면이 대전되는 원리는 자외선 영역의 빛에 의해 발생하는 광전자 방출현상(photoemission)에 의한 전류량이 먼지 입자의 고에너지 이온의 양보다 크므로 인해 표면에 양전하를 띄게 되는 것이다(Fig. 8). 따라서 본 연구는 달 표면의 대전 메커니즘 중에서 100~150 nm 파장 범위의 진공자외선으로 인한 양전하 대전 현상에 초점을 맞추어 현상을 모사하고자 한다.

달먼지 대전을 위한 실험적 준비에 있어 중요한 부분 중 하나는 복제토의 입경에 관한 것이다. 태양광의 역할을 하는 자외선 조사장치와 달먼지 대전현상이 주로 입자크기에 좌우되므로 10 μm 이하의 평균입경을 가진 복제토의 준비가 필요하다. 진공챔버를 이용하여 10³ mbar 이하의 진공환경 조성 후에 진공자외선(Vacuum Ultraviolet, VUV)을 10 μm 이하의 평균입경을 가진 복제 월면토에 조사할 예정이다. 이를 통해 달먼지를 띄우기(levitation) 위한 최소 광전류

를 도출하고, 표면이 양전자로 대전 된 현상을 확인할 것이다. 또한 550 nm 파장의 녹색 레이저와 초고속 카메라를 이용하여 직경 0.1 μm 까지의 입자 거동을 시각화 할 수 있다(Fig. 9).

제안된 실험 방법을 이용하여 진공자외선을 이용하여 달 토양의 정전기적 대전 현상 모사가 가능할 것으로 기대하며, 향후 이러한 방법을 이용하여 진공 챔버에 대전현상을 모사하는 실증 연구가 추가적으로 필요할 것으로 생각된다.

4. 결론 및 향후 계획

본 연구에서는 달 표면에서의 ISRU 기술 검증을 위한 달 표면환경 모사 기술에 대해서 다루었다. 달 표면 환경을 모두 모사하는 것은 많은 기술을 필요로 하고 현실적으로 구현하기 어려우므로 달 지반과의 상호작용에 초점을 맞추어 달 표면의 압력, 온도, 지반 및 표면 대전 현상 모사를 최종적인 목표로 설정하였다. 지반 교란 없는 진공환경 조성을 위해서는 진공챔버의 감압속도 조절이 중요함을 확인하였고, 감압속도를 낮게 유지함으로써 감압과정중 지반교란 없는 진공환경을 성공적으로 구현하였다. 또한 달 표면 환경의 대전 메커니즘에 대한 문헌 연구를 통해 실제적으로 진공챔버에 적용할 수 있는 방법을 제시하였다. 향후 지반 진공화에 대한 이론정립과 달 표면 대전 현상에 대한 실증적인 연구가 필요할 것으로 생각된다.

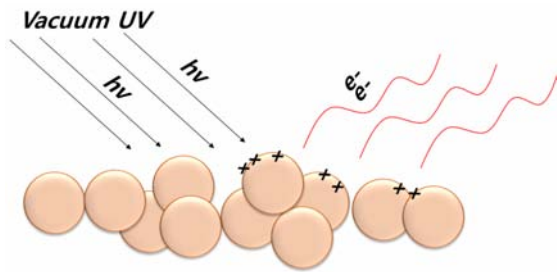


Fig. 8. Lunar Dust Charging Mechanism by VUV

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업 “극한건설 환경구현 인프라 및 TRL6 이상급 극한건설 핵심기술 개발”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

본 논문은 2018 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

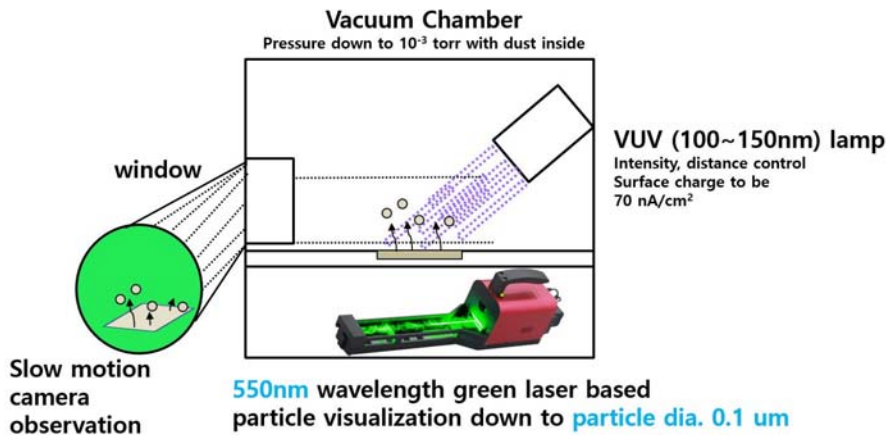


Fig. 9. Experiment Plan of Lunar Dust Charging

References

- Abbas, M. M., Tankosic, D., Craven, P. D., Spann, J. F., LeClair, A. and West, E. A. (2007). "Lunar dust charging by photoelectric emissions." *Planetary and Space Science*, Vol. 55, No. 7-8, pp. 953-965.
- Borst, A. G. and van Loon, Jack. J. W. A. (2008). "Technology and development for the random positioning machine, RPM." *Microgravity Sci. Technology*, Vol. 21, pp. 287-292.
- Cho, H. J., Moon, G. W., Seo, H. J., Lee, S. H. and Choi, S. W. (2007). "Domestic construction of a large vacuum chamber for space environment simulation." *Aerospace Engineering and Technology*, Vol. 6, No. 1, pp. 64-73.
- Colwell, J. E., Bastiste, S., Horányi, M., Robertson, S. and Sture, S. (2007). "Lunar surface: dust dynamics and regolith mechanism." *Reviews of Geophysics*, Vol. 45, RG2006, DOI:10.1029/2005RG000184.
- Flanagan, T. M. and Goree, J. (2006). "Dust release from surfaces exposed to plasma." *Physics of Plasmas*, Vol. 13, 123504, DOI: 10.1063/1.2401155.
- Heiken, G. H., Vaniman, D. T. and French, B. M. (1991). *Lunar Sourcebook*. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Kim, D. S., Cho, G. C. and Kim, N. R. (2009). "KOCED geotechnical centrifuge testing center." *J. Korean Soc. Civ. Eng.*, Vol. 57, No. 8, pp. 35-42.
- Kleinhenz, J. E. and Wilkinson, R. A. (2014). *Development and testing of an ISRU soil mechanics vacuum test facility*, NASA/TM-2014-218389, NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio.
- Kruzelecky, R. V., Lavoie, J., Murzionak, P., Heapy, J., Sinclair, I. and Jamroz, W. (2017). "DTVAC dusty planetary Thermo-VACuum simulator." *47th International Conference on Environmental Systems*, Charleston, South Carolina, 16-20 July 2017.
- Linne, D. L., Sanders, G. B., Starr, S. O., Eisenman, D. J., Suzuki, N. H., Anderson, M. S., O'Malley, T. F. and Araghi, K. R. (2017). "Overview of NASA technology development for in-situ resource utilization (ISRU)." *68th International Astronautical Congress (IAC)*, Adelaide, Australia, 25-29 September 2017.
- Ryu, B. H., Baek, Y., Kim, Y. S. and Chang, I. (2015). "Basic study for a Korean Lunar Simulant (KLS-1) development." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 31, No. 7, pp. 53-63 (in Korean).
- Stubbs, T. J., Halekas, J. S., Farrell, W. M. and Vondrak, R. R. (2005) "Lunar surface charging: a global perspective using lunar prospector data." *In Dust in Planetary Systems*, ESA SP-643.
- Tawfil, M., Tonnellier, X. and Samson, C. (2018). "Light source selection for a solar simulator for thermal applications: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 90, pp. 802-813.