

달 지상 환경의 효과적 모사를 위한 인공월면토 전처리에 관한 연구

정태일* · 김영재** · 유병현*** · 신휴성****

Chung, Taeil* · Kim, Young-Jae** · Ryu, Byung-Hyun*** · Shin, Hyu-Soung****

A Study on Lunar Soil Simulant Pretreatment for Effective Simulation of Lunar Surface Environment

ABSTRACT

As interest in lunar exploration increases, studies on lunar surface environment simulation including a lunar soil simulant are being conducted. One of the problems when creating a vacuum environment with lunar soil is that it takes long time to reach high vacuum due to outgas from the soil. Most of the outgas is water, and the time to reach high vacuum can be significantly reduced by a pretreatment process that removes moisture adhering to the surface of the lunar soil before putting soil into a vacuum chamber. The existing soil drying methods were examined to determine how these methods were effective to remove moisture from the lunar simulant soil. Drying experiments of lunar soil samples were carried out using a dry oven, a microwave oven, direct heating method and a vacuum oven, and the results of the drying experiment were presented. Drying soil at 110°C using a dry oven and drying soil by a microwave oven were not enough to remove moisture, and vacuum oven drying method and direct heating drying method at more than 200°C were effective in water removal.

Key words : Lunar surface environment simulation, Lunar soil simulant, Soil drying, Moisture removal, Vacuum

초 록

달 탐사에 대한 관심이 늘어나면서 인공월면토를 포함한 달 지상 환경 모사에 대한 연구가 진행되고 있다. 인공월면토를 포함하여 진공환경을 조성할 때 발생하는 문제점 중의 하나는 토양에서 나오는 탈 가스로 인해 고진공에 도달하는 시간이 길어진다는 것이다. 이러한 탈 가스의 대부분은 수분이며, 진공챔버에 넣기 전 인공월면토의 표면에 붙어있는 수분을 제거하는 전처리 과정을 수행한다면 고진공에 도달하는 시간을 상당히 줄일 수 있다. 기존의 토양 건조 방법을 사용하여 각 방법이 인공월면토의 수분제거에 얼마나 효과적인지 확인하였다. 드라이 오븐을 이용한 방법, 마이크로웨이브 오븐을 이용한 방법, 직접가열 건조하는 방법과 진공 오븐을 이용한 방법을 이용하여 인공월면토 시료의 건조 실험을 수행하였으며, 건조 실험의 결과를 제시하였다. 실험결과 드라이 오븐에서 110°C로 건조하는 방법과 마이크로웨이브 오븐을 이용한 건조 방법은 수분제거 효과가 충분하지 않았으며, 200°C 이상에서 진공오븐을 이용한 방법과 직접 가열하는 방법은 수분제거 효과가 좋았다.

검색어 : 달 지상 환경 모사, 인공월면토, 토양 건조, 수분 제거, 진공

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

** 정회원 · 한국건설기술연구원 미래융합연구본부 수석연구원, 이학박사 (KICT · kimyoungjae@kict.re.kr)

*** 한국건설기술연구원 미래융합연구본부 전임연구원, 공학박사 (KICT · tmt306@kict.re.kr)

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

Received August 23, 2019/ revised September 25, 2019/ accepted December 3, 2019

1. 서론

이폴로 프로젝트 이후에 달에 대한 관심이 줄어들었다가 2000년 대 이후부터 다시 늘어나기 시작하였다. 이폴로 프로젝트에서는 사람을 달에 보내는 것에 많은 관심이 있었지만, 최근의 달 탐사 미션은 달을 경제적으로 이용하는 것에 많은 초점이 맞추어져 있다. 달 표면은 운석으로 인해 잘게 분쇄된 달 토양(월면토)이 많은 부분을 차지하고 있는데, 이러한 달 토양은 가치가 높다. 달 토양에는 발사체의 연료로 사용할 수 있는 수소, 산소, 헬륨 이외에도 철(Fe), 알루미늄(Al), 규소(Si), 티타늄(Ti) 등 금속성 원소도 다량 포함하고 있다(Taylor, 1992). 또한 최근 발표된 연구논문에는 달 극지에 물이 흡수되어 있는 얼음상태로 다량 존재할 것이라는 직접적인 증거도 제시되었다(Li et al., 2019). 따라서 향후 달 탐사 관련 연구에 있어서 월면토의 중요성이 매우 크다고 할 수 있다. 그러나 현재 인류가 가지고 있는 실제 월면토의 양은 약 360 kg으로 이를 직접적으로 연구에 활용하기에는 제한이 많아 월면토의 성질을 복제한 다양한 인공월면토가 개발되어 활용이 되고 있다. 가장 대표적인 인공월면토는 NASA Johnson Space Center에서 개발한 JSC-1 (Willman et al., 1995)으로 미국 샌프란시스코의 화산지대의 현무암과 화산재를 이용해 만들어졌으며, 달의 바다(mare) 지역의 월면토와 유사한 조성, 입도분포 및 물리적인 특성을 가지고 있다. 이후로 여러 나라에서 수십 가지의 다양한 인공월면토를 개발하여 사용하고 있지만, 실제 월면토를 완벽히 모사하는 인공월면토는 없으며 연구자들은 목적에 맞는 인공월면토를 선택하여 사용하고 있다(Taylor et al., 2016). 국내에서는 한국건설연구원에서 강원도 철원 지역의 현무암을 활용하여 한국형 인공월면토를 개발하였으며, 실제 월면토(lunar soil 14163)과 유사한 화학적 조성, 입도분포, 비중 등을 갖도록 개발되었다(Ryu et al., 2018).

달 환경과 달 토양에 대한 관심이 높아지면서 달 토양을 포함하여 진공환경을 조성하는 연구도 이루어지고 있다. NASA Glenn Research Center에서는 내경 1.5 m, 높이 3.66 m 크기의 중형 진공챔버에 0.64 m 깊이로 인공월면토 1톤을 챔버 내부에 넣어 10^{-5} Torr 진공환경을 조성하는데 성공하였다(Kleinhenz and Wilkinson, 2014). 인공월면토를 진공챔버에 넣고 진공환경을 조성하게 되면 크게 2가지의 문제가 발생하는데, 첫 번째는 진공과정 도중에 발생하는 흡의 비산문제로 시스템의 고장을 야기하거나 초기에 조성한 지반의 조건이 바뀌는 문제이고, 두 번째는 흡에서 나오는 탈가스로 인해서 목표 진공에 도달하는 시간이 매우 길어진다는 것이다. Kleinhenz and Wilkinson(2014)의 실험결과를 살펴보면 진공과정 중에서 흡이 교란하는 현상과 펌프의 고장문제에 대해 언급하고 있으며, 목표 진공에 도달하는데 걸리는 시간의 경우 흡이 없을 때는 약 5시간 후에 10^5 Torr 압력이하로 도달하였지만

1톤의 인공월면토를 포함하였을 때는 같은 압력에 도달하는데 약 10일이 소요되었다. Chung et al.(2019)은 진공챔버의 감압속도를 일정속도 이하로 제어하면 흡의 교란 없이 진공환경을 조성할 수 있음을 실험적으로 입증하였으나, 인공월면토를 포함하여 진공환경을 조성할 때 도달시간을 줄이는 연구에 대한 부분은 제시하지 못하였다.

인공월면토를 포함하여 진공환경을 조성하는 시간을 줄이기 위해서는 토양에서 나오는 탈가스를 줄여야 하며, 진공환경에서 인공월면토로부터 나오는 탈가스는 대부분 물 성분으로 잔류기체분석기(Residual Gas Analyzer, RGA)를 통해 확인되었다(Kleinhenz and Wilkinson, 2014). 인공월면토에서 나오는 수분은 매우 적은 양으로 일반적인 기준에서 볼 때 수분 함량 1% 이하의 일반적인 건조토라고 할 수 있다. 토양 표면에 부착되어 있는 미량의 수분은 대기에서는 그 영향이 거의 없지만, 공기 분자 수가 적은 고진공 환경에서는 토양 표면에서 방출되어 챔버 내부의 진공도에 상당한 영향을 미치게 된다. 따라서 목표 진공에 도달하는 시간을 줄이기 위한 인공월면토의 전처리 건조를 위해서는 일반적인 토양의 건조와는 다른 접근 방법이 요구된다. 인공월면토를 진공챔버에 넣고 진공환경을 만드는 연구가 국내에서는 처음 시도되고 있고 해외에서도 드물기 때문에, 진공 챔버에 들어가는 인공월면토의 전처리를 다루는 연구는 찾기 어려웠다. 따라서 기존에 알려진 토양의 건조 방법을 응용하여 인공월면토의 건조 전처리를 수행하고, 수분 제거 효과 분석을 통해 각 방법이 진공챔버에 들어가는 인공월면토의 건조 방법으로 적합한지를 검토해 보았다.

토양의 수분을 제거하기 위한 다양한 방법이 존재하지만 표준화된 건조 방법을 사용하기 위해서 American Society for Testing Materials (ASTM)을 참고하였다. 토양의 수분 제거 방법에 대한 표준은 폐기가 되었으나(ASTM D421-85, 2007), 흡의 수분량을 결정하는 방법에서 흡의 건조 방법을 간접적으로 참고할 수 있었다. 흡의 수분량을 결정하기 위해 ASTM에 제시된 흡의 건조 방법은 드라이 오븐(drying oven)을 이용하는 방법(ASTM D2216-19, 2019), 마이크로웨이브 오븐(microwave oven)을 이용한 방법(ASTM D4643-17, 2017), 용기에 담아 직접 가열하는 방법(ASTM D4959-16, 2016) 등이 있다. 또한 진공 분야에서 전통적으로 챔버 내부에 흡착된 가스 분자를 제거하기 위한 진공에서 굽기 방법과 비슷한 진공 오븐(vacuum oven)을 이용한 방법도 추가적으로 고려하였다.

본 연구에서는 진공 챔버에 넣을 인공월면토의 전처리 방식과 조건을 찾기 위해 드라이 오븐(drying oven)을 이용한 방법, 진공 오븐(vacuum oven)을 이용한 방법, 마이크로웨이브 오븐(microwave oven)을 이용한 방법, 용기에 담아 직접 가열하는 방법 등을 이용해 다양한 조건에서 인공월면토를 건조하였다. 테스트 조건은 일률적으로 적용하지 않고 각 건조 방법의 특성을 고려하여 설정하였으며,

실제적으로 적용가능한 건조방법과 조건을 찾기 위해서 짧은 시간 (1~2시간)에 효과적으로 건조가 가능한지를 검토하였다. 건조된 흙은 샘플 채취하여 수분 분석기를 이용해 건조된 인공월면토의 수분의 양을 측정하였으며, 측정된 결과를 통해 가장 효과적인 인공월면토의 건조 방법을 모색하고자 한다.

2. 인공월면토의 건조 실험

본 연구는 한국형 인공월면토(KSL-1)를 이용하여 건조실험을 진행하였다. KSL-1은 국내 철원지역의 연무암을 분쇄하여 #4, #10, #20, #40, #60, #100, #200 표준체로 체가름 하여 실제 달 토양(lunar soil 14163)의 입도 분포 데이터를 토대로 재입도하여 개발되었다. 한국형 인공월면토의 성분은 SiO₂가 절반정도 차지

하며 Al₂O₃, MgO, CaO 등의 성분을 가지고 있으며, 0.075 mm 이하의 작은 입자가 절반정도를 차지한다(Ryu et al., 2018).

인공월면토의 수분 제거를 위한 전처리 방법을 모색하기 위해 드라이 오븐(drying oven), 진공 오븐(vacuum oven), 마이크로웨이브 오븐(microwave oven)을 이용한 건조 방법을 사용하였다. 드라이 오븐을 이용한 토양의 건조 실험은 전통적인 방법인 110 °C에서 24시간 건조하는 방법을 따랐으며, 다른 건조 방법의 경우 1~2 시간 이내로 건조 가능한 조건을 찾기 위해서 진공 오븐에서는 설정된 온도에서 2시간을 건조하였고, 상대적으로 에너지가 큰 마이크로웨이브 오븐을 사용하는 방법과 직접가열 하는 방법은 1시간 건조를 수행하였다.

Table 1. Dry Oven Drying Test Condition

Quantity of specimen	KLS-1 10 kg
Drying temperature	110 °C
Drying time	24 hr
Pressure	Atmospheric Pressure



Fig. 1. Convention Dry Oven (Bumjin Engineering)



Fig. 2. Inside Convention Dry Oven

2.1 드라이 오븐(Drying Oven) 건조 실험

ASTM D2216-19(2019)에 사용되고 있는 방법은 드라이 오븐(drying oven)을 이용하여 110 ± 5 °C에서 하룻밤 정도 건조하는 방법으로 전통적으로 토양 건조에 사용하는 가장 일반적인 방법이다. 이러한 방법을 채용하여 자연 순환식 드라이오븐을 사용하여 약 10 kg의 인공월면토를 110 °C에서 24시간동안 건조하였다(Table 1). Figs. 1 and 2는 건조 장치의 외부와 내부 사진을 보여주고 있다.

2.2 진공 오븐(Vacuum Oven) 건조 실험

진공분야에서 챔버 내부의 흡착 가스를 제거하기 위해 사용되는 대표적인 방법은 진공상태에서 표면을 가열하는 방식으로 이 방법은 진공오븐에서 건조하는 방법과 유사하다. 보유하고 있는 진공오븐의 크기 제한으로 인해, 인공월면토를 약 15 g씩 6개의 용기로 나누어 담아 진공 오븐에 넣고 가열하였으며, 각각 110, 200, 300,

Table 2. Vacuum Oven Drying Test Condition

Quantity of specimen	KLS-1 15 g
Temperature rise speed	10 °C/min
Drying temperature	110, 200, 300, 400, 500, 600 °C
Drying time	2 hr
Pressure	under 0.01 mbar



Fig. 3. Vacuum Oven

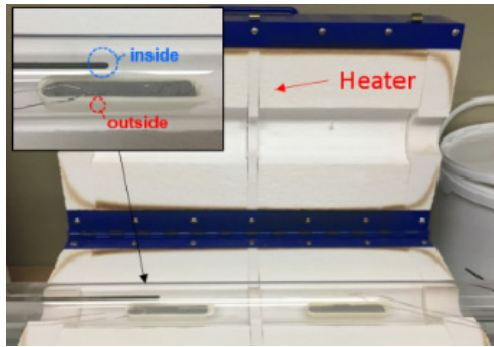


Fig. 4. Inside Vacuum Oven

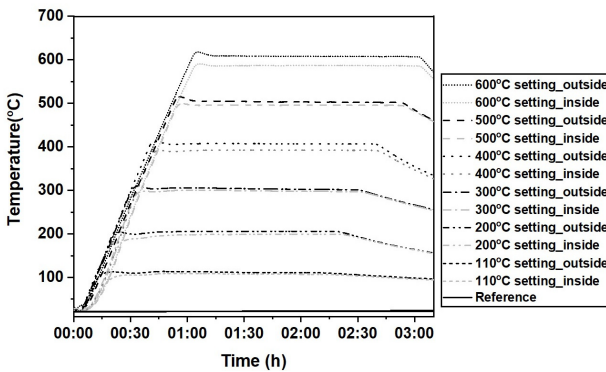


Fig. 5. Temperature Measurement During Vacuum Oven Drying

400, 500, 600 °C에서 2시간 동안 가열하였다(Table 2). Figs. 3 and 4에 진공 오븐의 모습을 도시하였고, 실험 중 가열로와 진공 내부 온도를 측정하였다(Fig. 5).

2.3 마이크로파 오븐(Microwave Oven) 건조 실험

마이크로파 오븐을 이용한 건조 실험을 위해 2.45 GHz 가정용 마이크로파 오븐(LG전자 MW25B, Fig. 6)를 사용하여 약 25 g의 인공월면토 건조 실험을 수행하였으며, 마이크로파 오븐의 출력은 1000 W로 설정하였다. ASTM 4643-17(2017)에 마이크로파 오븐을 이용한 흙의 건조 방법은 건조시간을 줄일 수 있으나 과열될 가능성이 있어 가열과 냉각을 반복하도록 되어 있다. 과열 방지를 위해서 가열도중 휘젓는 방법과 가열과 냉각을 반복하는 방법을 고려해 보았으나, 상용 마이크로 오븐 내에 시료를 휘젓는 장치를 적용하기에는 어려운 점이 있었고 표면 온도 측정결과와 온도 상승이 크지 않아 특별한 장치 없이 마이크로파 오븐에 일정 시간 건조하는 방법을 적용하였다. 또한 인공월면토는 일반 토양과는 달리 유기물을 포함하고 있지 않고, 높은 용융온도(1200~1500 °C, Taylor and Meek, 2005)를 가지고 있어 성분변화에 대한 위험은 상대적으로 적을 것으로 생각된다. 마이크로파 오븐을 이용한 인공월면토 건조 실험을 위해 시료를 2개의 용기로 나누어 담아 각각 30분,

Table 3. Microwave Oven Drying Test Condition

Quantity of specimen	KLS-1 25 g
Microwave oven specification	2.45 GHz, 1000 W
Drying time	30, 60 min



Fig. 6. Microwave Oven (LG MW25B)

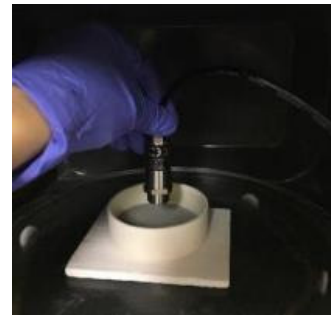


Fig. 7. Measuring of Lunar Simulant's Surface After Heating

Table 4. Surface Temperature of the Lunar Simulant After Microwave Oven Drying

Heating Time	30 min	60 min
Surface Temperature	90~110 °C	110~130 °C

60분 가열하였으며(Table 3), 가열 직후 가열된 인공월면토의 표면을 적외선 온도센서를 이용하여 측정하여 얼마나 온도 상승이 일어나는 지를 확인하였다(Fig. 7, Table 4).

2.4 직접 가열 건조 실험

ASTM D4959-16(2016)에서는 직접 가열하는 방법을 통해 흙을 건조시키기 위해서 부식에 강인하고, 반복적인 가열, 냉각, 세척에 문제가 없는 용기를 이용하여, 전기, 가스, 부탄, 기름 등의 열원을 이용하여 가열하도록 하고 있다. 또한 부분적으로 지나치게 가열되지 않도록 가열하는 동안 휘젓는 방법을 제시하고 있다.

ASTM에 제시된 방법을 참고하여 스테인리스 용기에 휴대용 가스레인지리를 이용하여 약 200 g의 월면토를 넣고 약 1시간 동안 가열하였다(Table 5, Fig. 8). 부분적으로 지나치게 가열되지 않도록 막대기를 이용하여 가열하는 동안 휘젓었다. 가스레인지리를 이용

Table 5. Direct Heating Test Condition

Quantity of specimen	KLS-1 200 g
Drying temperature	170~280 °C
Drying time	1 hr



Fig. 8. Direct Heating



Fig. 9. Temperature Measurement During Direct Heating

하였기 때문에 온도 조절이 어려웠으나, 가열시 토양의 온도는 170~280 °C 범위에서 측정되었다(Fig. 9).

3. 인공월면토 건조 시료 수분 측정 결과

건조된 인공월면토의 수분량을 측정하기 위해서 Kett사의 적외선 수분계(모델명 FD-720)를 사용하였다. 수분 측정을 위한 샘플 시료는 약 20 g을 사용하였고, 110 °C로 2시간 동안 가열하면서 무게 변화로 수분의 양을 측정하였다. 수분 측정기의 모습과 상세 사양을 Fig. 10과 Table 6에 제시하였다.

보통의 경우 건조된 시료를 데시케이트에 보관하지만 보관 시간에 따른 추가적인 수분 제거 효과가 있을 것을 염려해 밀폐용기를 포장하여 시료를 보관하였다. 수분 측정은 건조 실험 직후 수행하였으며, 측정이 다음날로 넘어가는 경우는 밀폐용기에 진공포장을 더하여 보관한 후 수분 측정을 수행하였다. 또한 건조 실험을 수행하는 시간과 날씨에 따라 시료의 상태가 달라질 수 있기 때문에 각 실험을 수행할 때마다 실험결과 비교를 위해 건조 하지 않은 시료도 함께 보관하였다.

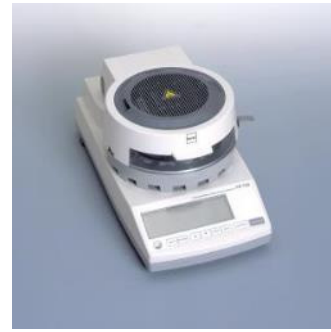


Fig. 10. Infrared Moisture Analyzer FD-720 (Kett, 2018)

Table 6. Specifications of FD-720 (Kett, 2018)

Measurement method	Heat drying and weight loss method
Sample weight	0.5 ~ 120 g
Minimum displayable unit	- Moisture content : 0.1 % or 0.01 % - Weight : 0.001 g
Reproducibility (Standard deviation)	- Samples with a weight of 5 g or higher : 0.05 % - Samples with a weight of 10 g or higher : 0.02 %
Measurement modes	- Automatic halting mode - Timed halting mode - High-speed drying mode - Low-speed drying mode - Stepped drying mode - Predictive (comparative) measuring mode
Heating Temperature	30 ~ 180 °C

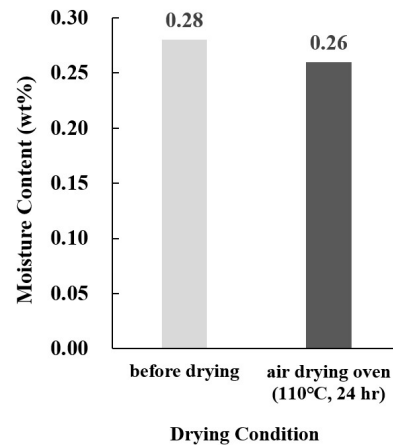


Fig. 11. Result of Dry Oven Drying Test

3.1 드라이 오븐 건조 결과

일반적인 토양의 건조를 위해 많이 사용되는 드라이 오븐을 이용하여 110 °C에서 24시간동안 건조 하였다. 건조 전후의 시료의

분석 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 건조 전의 수분의 양은 0.28 % 이었고, 드라이 오븐에서 건조 후에 수분의 양은 0.26 %였다. 드라이 오븐을 이용한 건조 방법은 이미 건조된 흙의 수분 함유량을 추가적으로 줄이는 데는 효과적이지 않음을 알 수 있었다.

3.2 진공 오븐(Vacuum Oven) 건조 결과

진공 오븐을 이용하여 건조된 시료의 수분 측정 결과 110 °C에서 가열한 경우를 제외하고 200 °C 이상에서 가열한 경우 수분 제거 효과가 있었으며, 온도가 높을수록 수분 제거 효과가 좋았다(Fig. 12).

3.3 마이크로웨이브 오븐(Microwave Oven) 건조 결과

마이크로웨이브 오븐을 이용한 건조 방법 후 표면의 온도는 90~130 °C였으며(Table 5), 1000 W로 60분 가열시 수분 함유량이 0.20 %에서 0.18 %로 줄어 수분 제거 효과가 크지 않았다(Fig. 13).

3.4 직접 가열 건조 결과

인공월면토를 스테인리스 스틸(Stainless Steel) 용기에 담아 가스레인지에서 약 1시간동안 가열하여 건조한 시료의 수분을 측정된 결과 수분의 함유량이 0.19 %에서 0.13 %로 줄어들었다(Fig. 14).

3.5 건조 실험 결과 비교

각각의 건조 실험에 대한 결과 비교를 Fig. 15와 Table 7에 나타내었다. 시간과 온도 조건이 비슷한 경우를 발췌하였으며, 진공 오븐의 경우 가장 높은 온도에서 가열한 결과인 600 °C에서 2시간동안 건조한 경우를 추가로 포함하였다.

건조 실험 결과 일반적으로 토양의 건조를 위해 사용하고 있는 110 °C에서 24시간동안 드라이 오븐에서 건조하는 방법은 이미 건조된 인공월면토의 수분 함유량을 더욱 줄이는 데는 부족함을 알 수 있었다. 진공오븐에서 600 °C로 2시간 가열한 경우 가장 효과가 좋았으며, 300 °C로 가열한 경우에도 효과가 좋았다. 마이크

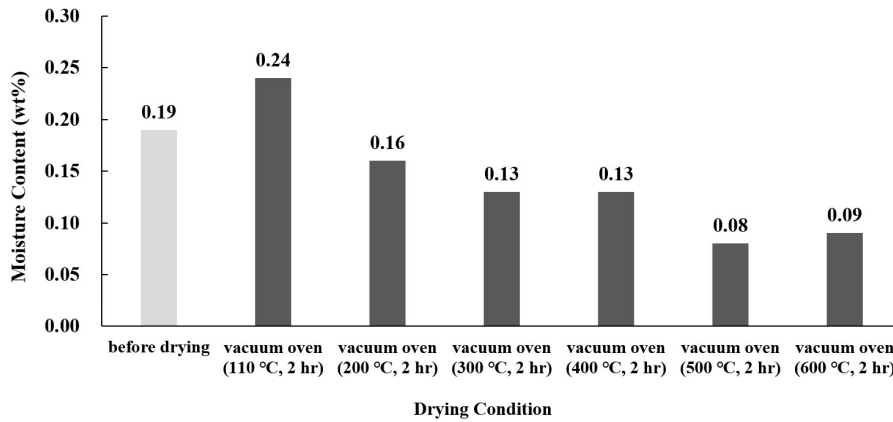


Fig. 12. Result of Vacuum Oven Drying Test

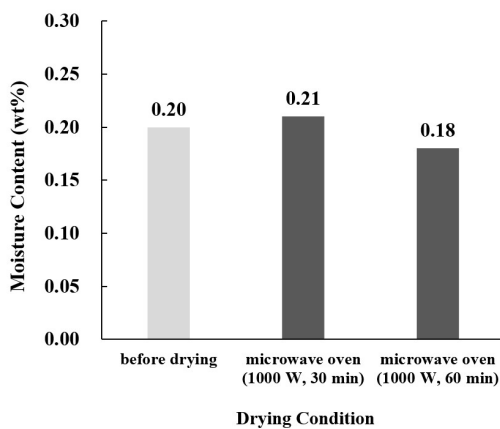


Fig. 13. Result of Microwave Oven Drying Test

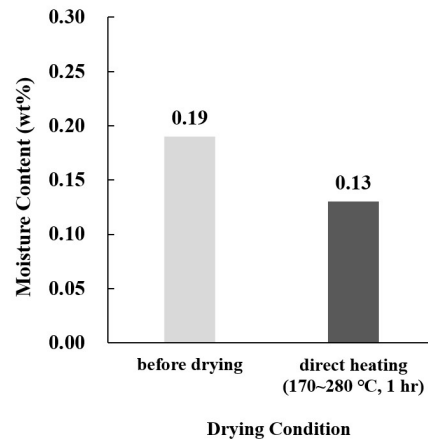


Fig. 14. Result of Direct Heating Drying Test

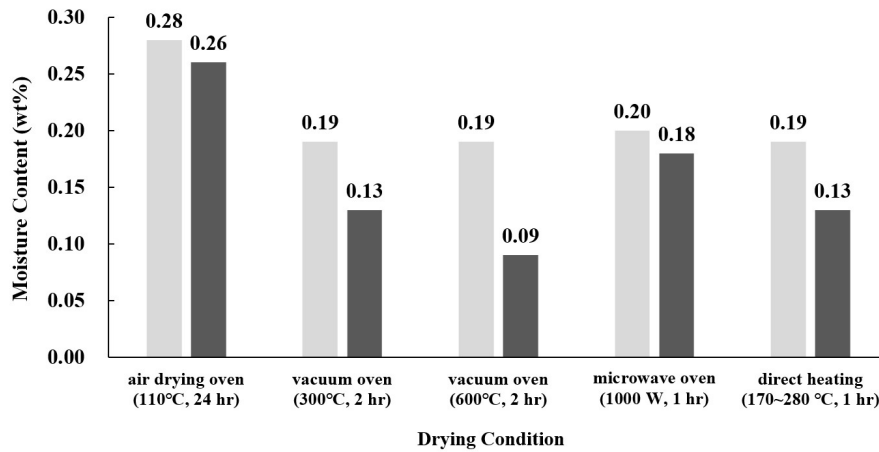


Fig. 15. Comparison of Drying Test Result

Table 7. Comparison of Drying Test Result

Drying condition	Moisture content (wt %) before drying	Moisture content (wt %) after drying	Moisture removal (wt %)	Moisture removal ratio (%)
Air drying oven (110 °C, 24 hr)	0.28	0.26	0.02	7.14
Vacuum oven (300 °C, 2 hr)	0.19	0.13	0.06	31.6
Vacuum oven (600 °C, 2 hr)	0.19	0.09	0.10	52.6
Microwave oven (1000 W, 1 hr)	0.20	0.18	0.02	10.0
Direct heating (170~280 °C, 1 hr)	0.19	0.13	0.06	31.6

로웨이브 오븐을 이용한 건조 실험 결과 수분 제거 효과는 크지 않았으며, 이는 인공월면토가 마이크로웨이브 오븐에서 쉽게 가열되지 않아 온도 상승(110~130 °C)이 크지 않은 결과 때문인 것으로 생각된다. 스테인리스 스틸 용기에서 170~280 °C로 1시간 직접 가열 건조한 결과 월면토의 수분의 함유량을 상당히 줄일 수 있었다. 직접 가열의 경우와 유사한 온도인 진공오븐에서 300 °C로 건조한 경우를 비교하면 수분 제거 효과가 유사하였고, 진공오븐 건조실험에서 온도가 높을수록 수분 건조 효과가 뛰어난 것으로 보아 직접 가열 건조 방법의 경우도 보다 높은 온도로 가열할 경우 수분 제거 효과가 높아질 것으로 예측된다.

드라이 오븐을 이용하는 방법과 마이크로웨이브 오븐을 사용하는 경우 토양의 온도 상승이 크지 않았으며, 보다 높은 온도에서 건조한 진공 오븐 건조 방법과 직접 가열 방법이 효과가 좋았다. 이를 통해 기존에 알려진 110 °C로 건조하는 방법은 건조된 인공월면토의 수분 함유량을 줄이기 위해서는 충분하지 않으며, 보다 높은 온도에서 가열이 필요함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 인공월면토의 수분제거 전처리를 위해 드라이 오븐, 진공 오븐, 마이크로웨이브 오븐, 직접 가열을 이용한 건조 실험을 진행하였다. 일반적으로 수분의 함유량이 1 % 이하이면 건조토(dry soil)라고 할 수 있지만, 본 연구에서는 토양을 진공챔버에 넣었을 때 토양에서 나오는 탈 가스의 양을 줄이기 위해 이미 건조된 토양의 수분함유량을 더 줄일 수 있는 건조 방법을 찾고자 했다.

건조 실험 결과 토양 건조를 위해 사용하고 있는 110 °C에서 24시간동안 드라이 오븐에서 건조하는 방법은 이미 건조된 인공월면토의 수분 함유량을 줄이는 데는 부족하며, 보다 높은 온도에서 가열이 필요함을 알 수 있었다. 그러나 지나치게 높은 온도에서의 가열은 흙의 조성의 변화를 야기할 수 있고 시스템 구현상의 문제, 안전 등의 문제가 발생할 수 있기 때문에 500-600 °C에서 가열하는 것이 적절할 것으로 생각된다.

본 연구 실험 결과를 바탕으로 수백 kg 단위의 대량의 인공월면토의 전처리 방법에 대한 후속 연구가 가능할 것으로 생각된다. 대량의 인공월면토의 전처리 방법에 대한 연구를 위해서는 본 연구에서 고려하였던 요소 이외에 대량 건조 가능성, 시스템 구현 용이성과 비용, 효율성, 경제성 등을 추가로 고려해서 진행해야 할 것으로 생각된다. 또한 건조된 대량의 토양을 수분의 유입을 최소화하여 효과적으로 보관할 수 있는 방법에 대한 연구도 필요할 것이다. 이러한 연구를 바탕으로 보다 효율적인 인공월면토를 포함한 진공 환경 조성이 가능할 것으로 생각된다.

감사의 글

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

References

- ASTM D2216-19 (2019). *Standard test methods for laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass*, ASTM International, West Conshohocken, PA, doi: 10.1520/D2216-19.
- ASTM D421-85 (2007). *Standard practice for dry preparation of soil samples for particle-size analysis and determination of soil constants (withdrawn 2016)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, doi: 10.1520/D0421-85R07.
- ASTM D4643-17 (2017). *Standard test method for determination of water content of soil and rock by microwave oven heating*, ASTM International, West Conshohocken, PA, doi: 10.1520/D4643-17.
- ASTM D4959-16 (2016). *Standard test method for determination of water content of soil by direct heating*, ASTM International, West Conshohocken, PA, doi: 10.1520/D4959-16.
- Chung, T., Ahn, H., Yoo, Y. and Shin, H. S. (2019). “An experimental study on air evacuation from lunar soil mass and lunar dust behavior for lunar surface environment simulation.” *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 39, No. 2, doi: 10.12652/Ksce.2019.39.2.0327 (in Korean).
- Kett (2018). *Infrared moisture determination balance FD-720: Operating Manual*, Tokyo.
- 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.
- Li, S., Luceya, P. G., Milliken, R. E., Hayne, P. O., Fisher, E., Williams, J. P., Hurley, D. M. and Elphic, R. C. (2019). “Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions.” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, doi: 10.1073/pnas.1802345115.
- Ryu, B. H., Wang C. C. and Chang, I. (2018). “Development and geotechnical engineering properties of KLS-1 lunar simulant.” *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 31, No. 1, p. 04017083.
- Taylor, L. A. (1992). “Resources for a lunar base_ rocks, minerals, and soil of the moon.” *The Second Conference on Lunar Bases and Space Activities of the 21st Century*, NASA, Johnson Space Center, Vol. 2, pp. 361-377.
- Taylor, L. A. and Meek, T. T. (2005). “Microwave sintering of lunar soil: Properties, theory, and practice.” *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 18, No. 3, pp. 188-196, doi: 10.1061/(ASCE)0893-1321(2005)18:3(188).
- Taylor, L. A., Pieters, C. M. and Britt, D. (2016). “Evaluations of lunar regolith simulants.” *Planetary and Space Science*, Vol. 126, pp. 1-7.
- Willman, B. M., Boles, W. W., McKay, D. S. and Allen, C. C. (1995). “Properties of lunar soil simulant JSC-1.” *Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 8, No. 2, doi: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0893-1321(1995)8:2(77).