

진공압에 따른 한국형 인공월면토(KLS-1)의 열전도도 평가

Vacuum Pressure Effect on Thermal Conductivity of KLS-1

진 현 우 ¹	Jin, Hyunwoo	이 장 근 ²	Lee, Jangguen
류 병 현 ³	Ryu, Byung Hyun	신 휴 성 ⁴	Shin, Hyu-Soung
정 태 일 ⁵	Chung, Taeil		

Abstract

South Korea, as the 10th country to join the Artemis program led by NASA, is actively supporting various researches related to the lunar exploration. In particular, the utilization of water as a resource in the Moon has been focused since it was discovered that ice exists at the lunar pole as a form of frozen soil. Information on the thermal conductivity of lunar regolith can be used to estimate the existence for ice water extraction by thermal mining. In this study, the vacuum pressure effect on thermal conductivity of KLS-1 was investigated with a DTVC (Dusty Thermal Vacuum Chamber). The reliability of KLS-1 was reconfirmed through comparison with thermal conductivity of known standard lunar regolith simulants such as JSC-1A. An empirical equation to assess thermal conductivity considering dry unit weight and vacuum pressure was proposed. The results from this study can be implemented to simulate lunar cryogenic environment using the DTVC.

요 지

최근 우리나라는 미국항공우주국이 주도하는 유인 달 탐사 프로젝트인 아르테미스 프로그램에 10번째 국가로 참여하게 되면서 다방면에서 유관연구를 수행하고 있다. 특히, 달의 극지방에는 동결토 형태로 다량의 물이 존재하는 것으로 밝혀지면서 이를 자원으로 활용하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다. 달 표면에 자리 잡고 있는 월면토의 열전도도에 관한 정보는 얼음 존재 추정 및 취득을 위한 열 채굴 기술 등에 활용될 수 있다. 본 연구에서는 지반열진공 챔버를 활용하여 진공압에 따른 한국형 인공월면토(KLS-1)의 열전도도를 측정하였다. 기존 연구에서 밝혀진 인공월면토(JSC-1A)와 비교분석을 통해 한국형 인공월면토의 유효성을 재확인하였으며, 건조단위중량 및 진공압에 따른 열전도도 추정이 가능한 경험적 예측모델을 제안하였다. 본 연구에서 도출된 결과는 진공 챔버를 이용한 달 행성의 극저온 환경 구현 시 활용이 가능할 것으로 판단된다.

Keywords : Dry unit weight, DTVC, Empirical equation, KLS-1, Thermal conductivity, Vacuum pressure

- 1 정회원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 박사후연구원 (Member, Postdoctoral Researcher, Dept. of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)
- 2 정회원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Dept. of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)
- 3 정회원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 전임연구원 (Member, Research Specialist, Dept. of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)
- 4 정회원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 선임연구위원 / 본부장 (Member, Senior Research Fellow / Head of Dept., Department of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology)
- 5 비회원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 전임연구원 (Research Specialist, Dept. of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engrg. and Building Technology, Tel: +82-31-910-0498, taeilchung@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2022년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2021 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

우리나라는 미국항공우주국(NASA, National Aeronautics and Space Administration)에서 추진 중인 2번째 유인 달 탐사 프로젝트인 아르테미스(Artemis) 프로그램에 일본, 영국, 이탈리아, 호주, 캐나다, 룩셈부르크, 아랍에미리트, 우크라이나에 이어 10번째 국가로 참여하게 되었다(Park, 2021). 한국건설기술연구원에서는 달 탐사 및 검증 기술과 관련하여 한국형 인공월면토 KLS-1(Korean Lunar Simulant)의 개발 및 대량 생산 시스템을 구축하고(Ryu et al., 2015; 2018; Jin et al., 2020), 달 행성의 지상 환경 조성을 위한 연구(Chung et al., 2018; 2019; 2020) 및 현지자원활용(ISRU, *In-situ* Resource Utilization) 건설재료 생산 기술에 관한 연구(Jin et al., 2021; Kim et al., 2021) 등 다방면에서 아르테미스 프로그램에 기여하기 위한 기초연구를 수행하고 있다. 한국항공우주연구원에서는 6종의 탑재체(payload)를 실은 한국형 달 궤도선(KPLO, Korea Pathfinder Lunar Orbiter)을 2022년 8월 발사를 목표로 개발하고 있으며(Ju et al., 2013; Kim et al., 2018), 탑재체 중 하나인 NASA의 새도캠(ShadowCam)은 아르테미스 프로그램의 착륙 후보지 탐색을 위한 달 남극 지역의 영구음영지역(PSR, Permanent Shadow Regions) 촬영을 목표로 하고 있다. 달의 극지방에는 상당한 양의 물이 얼음형태로 존재함이 밝혀졌다(Nozette et al., 1996; 2001; Li et al., 2018). 물은 식수로 사용될 수 있을 뿐만 아니라 전기 분해하여 추진체 연료로 사용이 가능한 수소와 산소를 생산할 수 있어 우주 탐사가 새로운 전기를 맞고 있다. 이처럼 물을 활용해 로켓 추진 연료 생산이 가능하고 달의 중력은 지구의 1/6밖에 되지 않기 때문에, 달은 심우주로 나가기 위한 전초기지로서 매우 유리한 위치에 있다(David et al., 2019).

월면토의 열전도도는 달 지반의 온도분포를 제어하는 매우 중요한 인자다. 열전도도는 밀도, 포화도와 같은 영향인자에 의해 달라지는데 이는 얼음의 존재를 추정하는 데 사용될 수 있을 뿐 아니라, 행성 현지에서 동결토를 가열하여 산소와 수소 기체를 추출하는 열 채굴(thermal mining) 기술에도 활용될 수 있다(David et al., 2019). 또한, 열전도도에 관한 정보는 연구목적으로 실험실에서 달 표면의 극저온 환경을 구현하기 위한 중요한 인자로 활용될 수 있다. 그러나 진공 조건에서 월면토 및 인공월면토의 열전도도는 매우 낮기 때문에

(Cremers and Birkebak, 1971; Cremers, 1972; 1975; Langseth et al., 1976; Nagihara et al., 2014; Sakatani et al., 2017; 2018; Wasilewski et al., 2021), 달 토양을 포함한 극저온 환경을 구현하기 위해서는 수십일 이상의 오랜 시간이 필요하다. 따라서 보다 효율적인 지표면 냉각 기술이 필요한데 현재 국내에서 개발되어 사용되고 있는 KLS-1의 열 특성에 대한 평가는 전무한 실정이다.

본 연구에서는 KLS-1의 열 특성을 파악하기 위해 1m³ 규모의 지반열진공챔버(DTVC, Dusty Thermal Vacuum Chamber)를 이용해 진공압에 따른 열전도도 측정 시스템을 구축하였다. 본 시스템을 이용해 KLS-1의 건조단위중량과 진공압에 따른 열전도도를 측정하고, 이를 통해 KLS-1의 건조단위중량과 진공압에 따른 열전도도 추정이 가능한 경험적 예측모델을 제안하였다. 또한, 가장 널리 사용되는 인공월면토인 JSC-1 및 JSC-1A와 KLS-1의 진공압에 따른 열전도도를 비교하여 KLS-1의 유효성을 확인하였다. 본 연구에서 제안하는 KLS-1 열전도도의 경험적 예측모델은 향후 국내에서 보유하고 있는 우주환경 재현용 지반열진공챔버의 지반냉각에 가장 효과적인 시나리오를 수립하기 위해 실험적, 수치해석적으로 활용도가 높을 것으로 판단된다.

2. 지반의 열전도도

지반 내에서의 열전달은 지반공학 분야에서 중요하게 다루고 있는 현상 중 하나이다(Lu and Likos, 2004; Mitchell and Soga, 2005; Lu and Dong, 2015). 최근 건설기술이 고도화되면서 지하수 자원 탐사(Lu and Ge, 1996), 방사성 폐기물 처리(Zhang et al., 1994; Yoon et al., 2017), 지중 열 교환기(Preene and Powrie, 2009; Yoon et al., 2012; Park et al., 2012; Sohn et al., 2013), 지반인공동결 공법(Alzoubi et al., 2020; Jin et al., 2020) 등 다양한 분야에서 열전달을 중요하게 다루고 있다. 지반에서 발생하는 열전달 메커니즘은 온도구배로 인해 발생하는 전도에 의한 열전달과 유체의 흐름으로 인해 발생하는 대류에 의한 열전달로 분류된다. 수리적 특성에 의해 둘 중 하나 또는 둘 모두 지반의 열전달에 중요할 수 있다(De Vries, 1987; Noborio et al., 1996; Lipiec et al., 2007). 달은 대기가 없는 진공환경이므로 월면토의 열전달은 전도가 지배적일 것으로 판단되며, 이는 식(1)에 나타난 바와 같이 Fourier's law를 따른다(Carlsaw and Jaeger, 1986).

$$q_t = -\lambda \nabla T \quad (1)$$

여기서 q_t 는 단위시간에 단위면적을 통해 흐르는 열량(heat flux, Wm^{-2}), λ 는 열전도도($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$), ∇T 는 온도구배(Km^{-1})다.

지반은 흙 입자, 지하수, 공기의 3상 구조로 각각의 상별로 상이한 열전도도를 가지는 것이 특징이다. 그러나 지반 전체의 열전도 측면에서는 이러한 다상의 물질을 하나의 매개체(bulk media)로 인식하는 유효 열전도도(effective thermal conductivity) 개념을 주로 활용하고 있으며(Lu and Dong, 2015), 본 논문에서는 편의를 위해 이 값을 열전도도(thermal conductivity)로 사용하고 있다. 지반의 열전도도는 온도구배 뿐 아니라 광물특성(종류, 형태, 입자 크기 등), 건조단위중량, 함수비(포화도), 동결여부, 하중조건, 입도분포 등에 영향을 받는다(Johansen, 1975; Lee et al., 2011; He et al., 2021). 이러한 영향인자를 고려해 다양한 지반 열전도도 예측모델이 제안되고 있는데(Cote and Konrad, 2005; Lu et al., 2007), 이는 현재까지도 하나로 통합된 열전도도 예측모델이 제안되지 않았음을 시사한다.

3. 실험장비 및 조건

3.1 실험장비

본 연구에서는 진공압 조절을 위해 부피 약 1m^3 (직경 1m, 길이 1.3m)의 소형 지반열전공챔버(DTVC)를 이용하였다(Fig. 1). DTVC는 인공월면토를 포함한 달 표면 환경 모사가 가능한 시설로 내부에 약 0.281m^3 인공월면토를 담을 수 있는 토조를 포함하고 있으며, 인공월면토를 포함하여 최대 $1 \times 10^{-2}\text{Pa}$ (흙이 없는 조건에서는 최대 $1 \times 10^{-5}\text{Pa}$)의 진공환경 조성이 가능하다(Chung et al., 2019). 또한 액체 질소에 의한 냉각 쉬라우드(cooling shroud)를 이용해 약 -190°C 의 극저온 환경 조성이 가능하며, 할로겐 램프 가열을 통해 최대 150°C 의 고온 환경 조성이 가능하다. DTVC는 벤츄리 펌프(venturi pump), 건식 진공 펌프(dry vacuum pump), 터보 분자 펌프(turbo molecular pump), 크라이오 펌프(cryogenic pump) 등 총 4 종류의 진공 펌프를 가지고 있으나, 본 실험에서는 건식 진공 펌프만을 이용하여 대기압(약 $101,325\text{Pa}$)에서부터 $1 \times 10^2\text{Pa}$ 까지 감압하며 열전도도를 측정하였다.

진공압에 따른 인공월면토의 열전도도 측정을 위해 KEM(Kyoto Electronics Manufacturing CO., LTD.)의 쾌속 열전도도 측정 장비인 QTM-500(Quick Thermal Conductivity Meter)을 사용하였다. QTM-500은 직선구간의 열선이나 열원의 온도 증가를 측정하는 방식인 열선법(hot wire method)을 이용해 열전도도를 측정한다. 따라서 열전도도를 한 번 측정된 뒤 다시 열적으로 안정돼야 추가적인 열전도도 측정이 가능하기 때문에 열전도도 측정조건에 따라 적게는 수 분에서 최대 수십 분의 시간이 소요된다. QTM-500 장비에서는 열전도도 측정이 가능하면서도 열적 정상상태에 도달해 재현성 및 절대 정도가 보장되는 FINE 모드(약 25°C 의 실온)에서 열전도도 측정을 진행하였으며, 열전도도는 식 (2)와 같이 계산된다(Sarslaw and Jaeger, 1986).

$$\lambda = q \frac{\ln(t_2/t_1)}{4\pi(T_2 - T_1)} \quad (2)$$

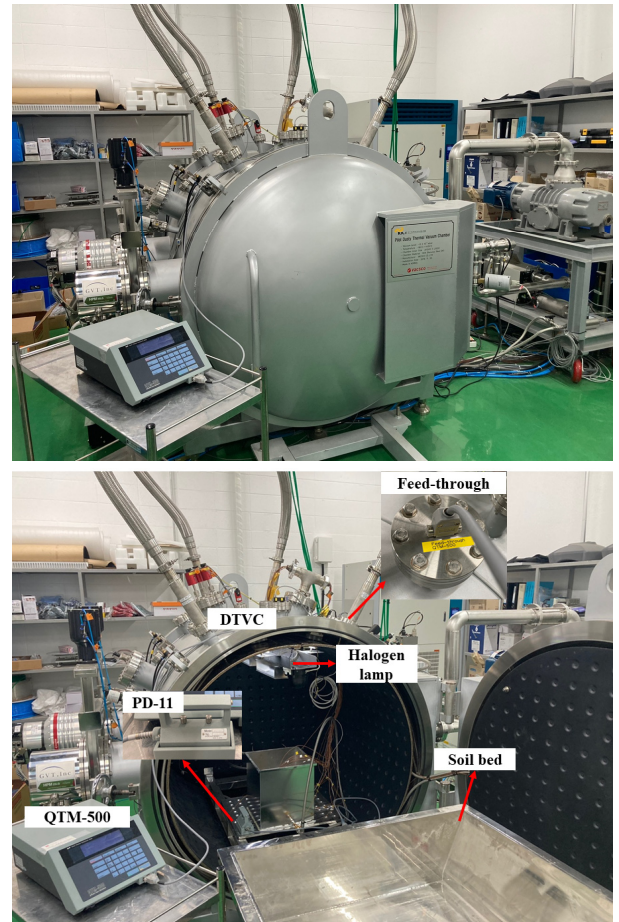


Fig. 1. Testing apparatus for thermal conductivity measurement under vacuum pressure

여기서 q 는 히터의 단위시간 및 단위길이 당 발열량 (W), t_1, t_2 는 측정시간(s), T_1, T_2 는 시간 t_1, t_2 에서의 온도 (K)다.

시료의 열전도도 측정을 위한 프로브는 분말형태의 열전도도 측정에 적합할 것으로 판단되는 PD-11 타입 (측정범위 0.023~11.63W/mk, 정밀도 $\pm 5\%$, 측정온도 -10~200°C, 측정시간 60초)을 사용하였다. PD-11의 경우 정확한 열전도도 측정을 위해 $100 \times 50 \times 20 \text{mm}^3$ 이상의 시료크기를 요구하고 있어, 본 실험에서는 $115 \times 55 \times 20 \text{mm}^3$ 인 직육면체 모형으로 시료를 조성하여 열전도도 측정 실험을 진행하였다. 또한, 챔버 내부에 있는 프로브(PD-11)와 챔버 밖에 있는 측정장치(QTM-500) 연결을 위해 피드스루(feed-through)를 사용하였으며, 이를 활용해 챔버 내부 진공압 변화에 따른 열전도도 측정 실험을 진행하였다.

3.2 실험조건

본 연구에서는 약 24°C로 유지되는 항온실험실에서 Table 1에 나타낸 바와 같이 신뢰성 검증을 위한 실험과 건조단위중량이 열전도도에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 신뢰성 검증을 위해 유관연구 수행자들로부터 표준 인공월면토로 널리 사용되고 있는 NASA의 Johnson Space Center에서 개발한 인공월면토인 JSC-1(Mckay et al., 1994)과 한국형 인공월면토인 KLS-1(Ryu et al., 2015; 2018)을 이용하였다. JSC-1 및 KLS-1의 초기 함수비는 각각 0.11%, 0.36%로 측정되었으며, 건조단위중량은 모두 약 1.82g/cm^3 으로 조성하였다. 신뢰성 검증을 위한 비교대상으로는 JSC-1의 대체 품으로서 연구목적으로 널리 활용되고 있는 JSC-1A의 진공압에 따른 열전도도 측정결과(Nagihara et al., 2014)를 이용하였다. JSC-1A는 JSC-1이 연구목적으로 모두 소진되어감에 따라 NASA가 JSC-1의 조성 및 입도분포를 맞추는 것을 주목적으로 ORBITEC(Orbital Technologies

Corporation)에 위탁생산을 맡긴 인공월면토이다. 체분석, 다짐, 삼축, 압밀, 전단강도 등 지반공학적 특성 분석을 위한 실내실험을 통해 JSC-1A는 JSC-1 및 Lunar regolith와의 유사성이 확인되어 인공월면토로서 활용될 수 있음이 확인되었다(Alshibli and Hasan, 2009; Zeng et al., 2010).

건조단위중량에 따른 열전도도 변화를 분석하기 위해 KLS-1을 사용해 실험을 수행하였다. 대량 생산 시스템을 통해 생산된 KLS-1(Jin et al., 2020)은 1% 미만의 (약 0.36%) 매우 낮은 함수비를 가지는 것으로 나타나 본 연구에서는 함수비에 대한 영향은 무시하였으며, 3가지 건조단위중량($1.70, 1.82, 1.94 \text{g/cm}^3$)으로 시료를 조성하였다. 건조단위중량이 증가할수록 지반에 존재하는 공극이 줄어들어 공극비 및 공극률은 감소하는 경향을 나타낸다. 본 연구에서 수행한 모든 열전도도 측정 실험은 한 번 감압 시 각 진공압 조건에 따라 2-3번씩 측정하여 측정값의 일관성을 확인하였으며, 동일한 과정으로 감압실험을 한 번 더 반복하여 그 평균값을 사용하였다. 대기압(약 $101,325 \text{Pa}$) 부터 $7 \times 10^4, 4 \times 10^4, 1 \times 10^4, 7 \times 10^3, 4 \times 10^3, 1 \times 10^3, 7 \times 10^2, 4 \times 10^2, 1 \times 10^2 \text{Pa}$ 로 감압하며 총 10 단계의 진공압 조건에서 열전도도를 측정하였다.

4. 실험결과

4.1 실험장비 검증

본 장에서는 DTVC에 피드스루 포트를 통해 연결한 QTM-500이 측정하는 진공압 변화에 따른 열전도도 측정결과의 신뢰성 평가를 수행하였다. 따라서 JSC-1 및 KLS-1의 진공압에 따른 열전도도를 측정하고 JSC-1A의 열전도도 측정결과(Nagihara et al., 2014)와 비교하였다. 그 결과 Fig. 2와 같이 약 1.94g/cm^3 의 건조단위중량으로 조성된 JSC-1A의 경우 시료조성 및 전처리 과정 등에 대해서 명확하게 밝히고 있지 않음에도 불구하고, 약 1.82g/cm^3 로 조성된 JSC-1 및 약 1.94g/cm^3 로 조

Table 1. Testing condition and program

Soils	G_s	Dry unit weight (g/cm^3)	Water content (%)	Void ratio (e)	Porosity (%)	Room temp. ($^{\circ}\text{C}$)	Note
JSC-1	2.9	1.82	0.11	0.56	36.09	24	Reliability verification
KLS-1	2.94	1.82	0.36	0.59	36.96		
		1.70		0.70	41.07		
		1.94		0.49	32.85		
							Dry unit weight effect

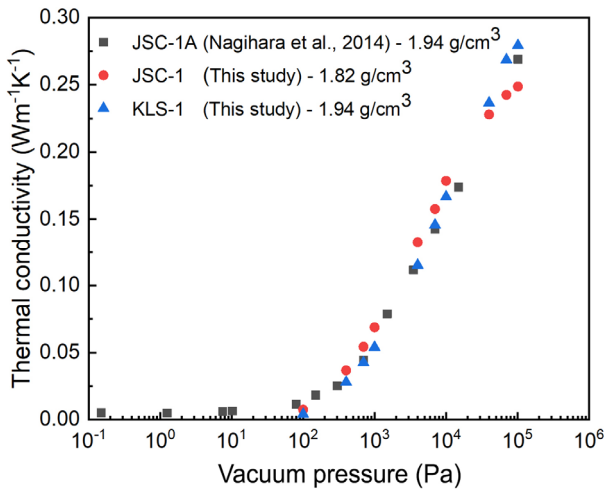


Fig. 2. Thermal conductivity of JSC-1A, JSC-1, and KLS-1 under vacuum pressure

성된 KLS-1와 진공압에 따른 열전도도 변화가 매우 유사하게 관측되었다. 따라서 유사한 광물조성 및 물리적, 지반공학적 특성을 지닌 인공월면토들 간 진공압에 따른 열전도도 오차는 미미한 것으로 판단되며, 이를 통해 본 연구에서 구축한 실험장비의 신뢰성을 검증할 수 있었다.

진공압 1×10^2 Pa 이하에서 측정되는 열전도도는 매우 작아 본 연구에서 사용한 QTM-500의 측정범위를 벗어나 정확한 측정이 불가하였다. JSC-1A의 진공압에 따른 열전도도 측정 결과를 보면 본 연구에서 측정한 최소 진공압 조건인 1×10^2 Pa 이하부터는 열전도도의 변동이 매우 미미하다. 따라서 진공압 1×10^2 Pa 미만에서의 JSC-1 및 KLS-1의 열전도도 변화는 미미할 것으로 예상된다.

4.2 건조단위중량에 따른 KLS-1 열전도도

열전도도에 미치는 건조단위중량의 영향을 분석하고자 약 1.70, 1.82, 1.94 g/cm³의 3가지 건조단위중량으로 KLS-1을 조성하고 각 건조단위중량 별로 진공압에 따른 열전도도 변화를 측정하였다. 그 결과 Fig. 3에 나타난 바와 같이 대기압(약 101,325 Pa)에서 건조단위중량이 증가할수록 열전도도가 각각 약 0.2363, 0.2554, 0.2793 Wm⁻¹K⁻¹로 증가하는 경향이 나타났다. 건조단위중량이 증가하면 지반에 존재하는 공극(공기)이 상대적으로 열전도도가 높은 흙 입자로 대체되기 때문에 열전도도가 증가하는 경향을 나타내는 것으로 사료된다. 이후 모든 조건의 실험에서 진공압이 감소함에 따라 열전도도가 급격하게 감소하였으며, 이로 인해 낮은 진공압 조건 하

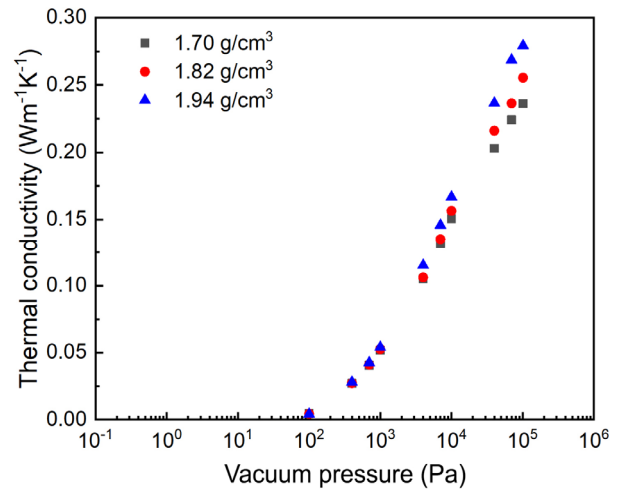


Fig. 3. Dry unit weight effect on thermal conductivity under vacuum pressure

에서는 건조단위중량에 따른 열전도도의 상대적 차이가 매우 근소하게 나타났다. 특히, 진공압 1×10^3 Pa 이하부터는 열전도도가 매우 낮아 건조단위중량에 의한 열전도도 변화가 미미하였다.

진공압에 따른 열전도도의 변화를 보다 면밀하게 분석하기 위해 대기압에서 측정된 열전도도를 기준으로 진공압에 따른 열전도도를 정규화(normalization)하여 Fig. 4에 나타냈다. 그 결과 감압 시 대기압(약 101,325 Pa)과 가장 가까운 진공압 조건인 7×10^4 Pa인 경우를 제외하고 건조단위중량이 높을수록 진공압이 낮아짐에 따라 정규화 값이 작게 나타났다. 이러한 결과는 진공압이 낮아짐에 따라 건조단위중량에 따른 열전도도 차이가 매우 작게 발생하기 때문에 나타나는 것으로 사료된다. 이러한 이유로 인해 정규화된 열전도도 및 진공압 조건(대

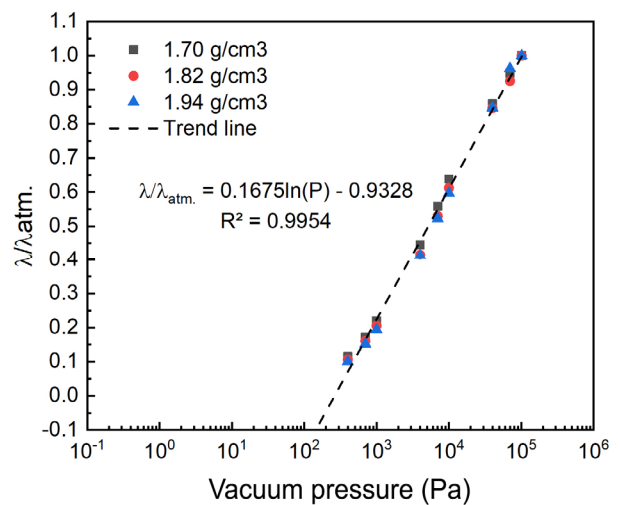


Fig. 4. Regression analysis of normalized thermal conductivity

기압- 4×10^2 Pa) 간 상관관계를 정의할 수 있게 되었으며, 회귀분석법을 통해 분석한 결과, 식 (3)에 나타난 바와 같이 결정계수(R^2)가 0.99인 선형관계가 나타났다.

$$\frac{\lambda}{\lambda_{atm.}} = 0.1675 \cdot \ln(P) - 0.9328 \quad R^2 = 0.99 \quad (3)$$

여기서 $\lambda_{atm.}$ 은 대기압에서의 열전도도($Wm^{-1}K^{-1}$), P 는 진공압(Pa)이다.

이를 종합하여 건조단위중량 및 진공압 조건에 따른 열전도도를 하나의 수식으로 예측할 수 있는 경험적 예측모델을 제안하고자 하였다. 따라서 식 (3)에서 $\lambda_{atm.}$ 을 정의하기 위해 대기압 조건에서 측정된 건조단위중량에 따른 열전도도를 Fig. 5와 같이 나타낸 뒤, 회귀분석법을 통해 R^2 가 0.99인 선형관계의 식 (4)를 도출하였고, 식 (3)에 대입하여 최종적으로 식 (5)에 나타난 바와 같이 건조단위중량(범위 약 $1.70 \sim 1.94 g/cm^3$) 및 진공압 조건(범위 대기압~약 4×10^2 Pa)에 따른 열전도도 예측모델을 제안하였다.

$$\lambda_{atm.} = 0.1793 \cdot \gamma_d - 0.0693 \quad R^2 = 0.99 \quad (4)$$

$$\lambda = 0.0300 \ln \cdot (P) \cdot \gamma_d - 0.0116 \cdot \ln(P) - 0.1673 \cdot \gamma_d + 0.0646 \quad (5)$$

여기서 γ_d 는 건조단위중량(g/cm^3)이다.

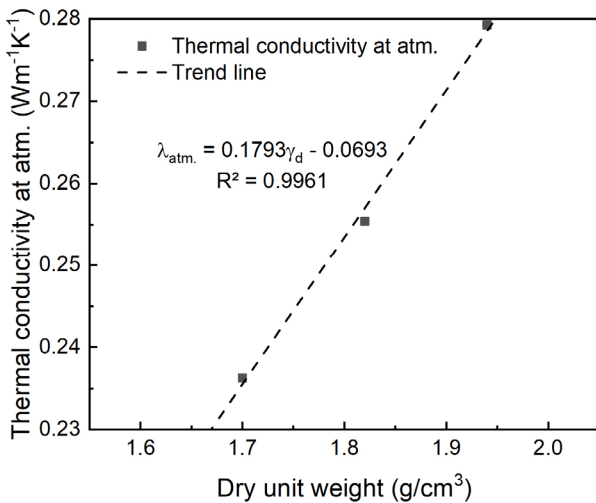


Fig. 5. Regression analysis of measured thermal conductivity according to dry unit weights at atmospheric pressure

제안된 예측모델을 검증하기 위해 식 (5)를 이용해 건조단위중량과 진공압에 따른 계산된 열전도도와 측정값을 비교해 Fig. 6에 나타냈다. Fig. 6에서 계산값과 측정값이 동일할 경우 기울기가 1이 된다. Fig. 6에 나타난 바와 같이 계산값과 측정값의 오차는 $\pm 5\%$ 내외(기울기 0.95~1.05)로 나타나 본 연구에서 제시하고 있는 경험적 예측모델이 KLS-1의 건조단위중량 및 진공압에 따른 열전도도를 대체적으로 잘 예측하는 것으로 확인되었다.

본 연구에서 도출한 건조단위중량 및 진공압에 따른 KLS-1의 열전도도는 현재까지 제시된 사례가 없었던 KLS-1의 열적 특성을 제시했다는 점에서 의미가 있다. 특히, 본 연구에서 제안한 경험적 예측모델은 향후 지반 열진공챔버(DTVC) 내부의 지반 냉각 시 활용도가 높을 것으로 예상된다. 챔버 내부의 극저온 환경 조성을 위해서는 감압 후 냉각을 진행하는데, 이는 높은 진공압에서(대기압에 가까울수록) 냉각 시 공기 중의 수분이 서리 형태로 챔버 내부 및 측정 장치를 오염시킬 뿐 아니라 냉각효과를 방해하는 문제를 야기한다. 또한 챔버에 존재하는 공기가 열전도 매체로 작용하여 챔버 본체 외부와 내부의 온도차로 인한 변형으로 구조적 문제가 발생할 우려가 있다. 이를 방지하고자 진공상태에서 냉각을 실시할 경우, 지반을 구성하는 월면토의 열전도도가 급격히 낮아지기 때문에 월면토의 냉각에는 많은 시간과 액화질소 소모에 따른 막대한 비용이 소요될 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서 도출한 연구결과를 활용하여 다양한 진공압 조건에서 지반 냉각 및 챔버 냉각에 대한 영향을 사전

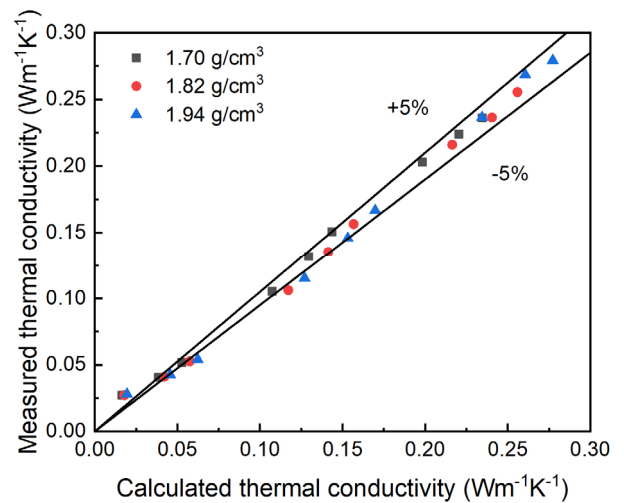


Fig. 6. Comparison between measured and calculated thermal conductivity

에 평가할 수 있다면, 보다 효과적이고 효율적인 지반 냉각 방법의 제시가 가능할 것으로 예상된다.

5. 결론

월면토의 지반 열전도도에 대한 정보는 동결토 형태로 물이 존재하는 것으로 밝혀진 달 극지방의 자원채취 및 장비 개발 등에 다양하게 활용될 수 있는 매우 중요한 정보이다. 본 연구에서는 KLS-1의 열전도도 측정을 위해 달 환경 모사를 위해 사용하고 있는 지반열진공챔버(DTVC) 내부에 측정 프로브(PD-11)와 열전도도 측정 장비(QTM-500)를 이용하여 진공압 변화에 따른 열전도도 측정 시스템을 구축하였다. 이를 통해 DTVC 내부의 진공압과 지반의 건조단위중량에 따른 열전도도를 측정하였으며, 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) 진공압에 따른 KLS-1의 열전도도는 국제적으로 인공월면토로 널리 사용되고 있는 JSC-1과 유사하게 나타났으며, 이를 통해 KLS-1은 JSC-1과 물리적·지반공학적 특성 뿐 아니라 열전도도도 유사하여 인공월면토로서의 유효성을 재확인하였다.
- (2) 건조단위중량 및 진공압에 따른 KLS-1의 열전도도 측정결과를 활용해 건조단위중량 약 1.70~1.94g/cm³, 진공압 조건 4×10²~101,325Pa(대기압)의 범위 내에서 활용 가능한 경험적 열전도도 예측모델을 제시하였으며, 오차범위는 10% 내외(±5%)로 산정되었다.
- (3) KLS-1의 경험적 열전도도 예측모델은 다양한 진공압 조건에서 지반냉각에 대한 사전검토 시 활용도가 높을 것으로 예상되며, 향후 지반열진공챔버 내에서 지반 냉각에 대한 효율적인 방법 제시가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “극한 건설 환경 구현 인프라 및 TRL6 이상급 극한건설 핵심 기술 개발(20210190-001)” 과제의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Alshibli, K.A. and Hasan, A. (2009), “Strength Properties of JSC-1A Lunar Regolith Simulant”, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, Vol. 135, No.5, pp.673-379.

2. Alzoubi, M.A., Xu, M., Hassani, F.P., Poncet, S., and Sasmito, A.P. (2020), “Artificial Ground Freezing: A Review of Thermal and Hydraulic Aspects”, *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, Vol.104, pp. 103534-1-18.

3. Carslaw, H.S. and Jaeger, J.C. (1986), “Conduction of Heat in Solids”, 2nd Edition, Oxford Univ. Press, Oxford, UK.

4. Chung, T., Lim, J.Y., Kang, S., Yoo, Y., and Shin, H.S. (2018), “Vacuum Diagnosis and Testing of a Dirty Thermal Vacuum Chamber”, *Appl. Sci. Conver. Technol.*, Vol.27, No.6, pp.120-125.

5. 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”, *KSCE J. Civ. Eng.*, Vol.39, No.2, pp.51-58.

6. Chung, T., Kim, Y.J., Ryu, B.H., and Shin, H.S. (2020), “A Study on Lunar Soil Simulant Pretreatment for Effective Simulation of Lunar Surface Environment”, *KSCE J. Civ. Eng.*, Vol.40, No.1, pp.51-58.

7. Cremers, C.J. and Birkebak, R.C. (1971), “Thermal Conductivity of Fines from Apollo 12”, *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 2nd, USA, Vol.3, pp.2311-2315.

8. Cremers, C.J. (1972), “Thermal Conductivity of Apollo 14”, *Proc. Lunar Sci. Conf.*, 3rd, USA, Vol.3, pp.2611-2617.

9. Cremers, C.J. (1975), “Thermophysical Properties of Apollo 14 Fines”, *J. Geophys. Res.*, Vol.80, No.32, pp.4466-4470.

10. Cote, J. and Konrad, J.-M. (2005), “A Generalized Thermal Conductivity Model for Soils and Construction Materials”, *Can. Geotech. J.*, Vol.42, No.2, pp.443-458.

11. David, K., Angel, A.M., Jared, A., Jonathan, B., Cary, B., Dallas, B., Brad, B., Vanessa, C., Justin, C., Blair, D., Chris, D., Barry, F., Jonathan, G., Koki, H., Laura, K., Jim, K., Bernard, K., Phillip, M., Laura, M., Phillip, M., Clive, N., Erica, O., Gordon, R., Jim, S., Brandon, S., George, S., Paul, S., Mark, S., Kris, Z., and Guangdong, Z. (2019), “Commercial Lunar Propellant Architecture: A Collaborative Study of Lunar Propellant Production”, *REACH*, Vol.13, pp.100026-1-77.

12. De Vries, D.A. (1987), “The Theory of Heat and Moisture Transfer in Porous Media Revisited”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol.30, No.7, pp.1343-1350.

13. He, H., Flerchinger, G.N., Kojima, Y., Dyck, M., and Lv, J. (2021), “A Review and Evaluation of 39 Thermal Conductivity Models for Frozen Soils”, *Geoderma*, Vol.382, pp.114694-1-19.

14. Jin, H., Kim, Y., Ryu, B.H., and Lee, J. (2020), “Experimental Assessment of Manufacturing System Efficiency and Hydrogen Reduction Reaction for Fe(0) Simulation for KLS-1”, *J. Korean Geotech. Soc.*, Vol.36, No.8, pp.17-25.

15. Jin, H., Lee, J., Ryu, B.H., and Go, G.H. (2020), “Experimental and Numerical Study on Hydro-thermal behaviour of Artificial Freezing System with Water flow”, *J. Korean Geotech. Soc.*, Vol. 36, No.12, pp.17-25.

16. Jin, H., Lee, J., Ryu, B.H., Shin, H.S., and Kim, Y.J. (2021), “The Experimental Assessment of Influence Factors on KLS-1 Microwave Sintering”, *J. Korean Geotech. Soc.*, Vol.37, No.2, pp.5-17.

17. Johansen, O. (1975), “Thermal conductivity of soils”, Ph.D. thesis, University of Trondheim, Norway.

18. Ju, G., Bae, J., Choi, S.J., Lee, W.B., and Lee, C.J. (2013), “New Korean lunar exploration program (KLEP): an introduction to the

- objectives, approach, architecture, and analytical results”, *64th Int. Astronaut. Congress*, Beijing, China.
19. Kim, Y.J., Ryu, B.H., Jin H., Lee, J., and Shin, H.S. (2021), “Microstructural, mechanical, and thermal properties of microwave-sintered KLS-1 lunar regolith simulant”, *Ceram. Int.*, Available online, 17 June 2021, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.098>.
 20. Kim, Y.R., Song, Y.J., Bae, J., and Choi, S.W. (2018), “Observational Arc-length Effect on Orbit Determination for KPLO using a Sequential Estimation Technique”, *J. Astron. Space Sci.*, Vol.35, No.4, pp.295-308.
 21. Langseth, M.G., Keihm, S.J., and Peters, K. (1976), “Revised Lunar Heat-flow Values”, *Proc. Lunar Sci. Conf., 7th*, USA, pp.3143-3171.
 22. Lee, J.H., Choo, J., Yun, T.S., Lee, J., and Kim, Y.S. (2011), “Loading Effects on Thermal Conductivity of Soils: Particle-scale Study”, *J. Korean Geotech. Soc.*, Vol.27, No.9, pp.77-86.
 23. Lipiec, J., Usowicz, B., and Ferrero, A. (2007), “Impact of Soil Compaction and Wetness on Thermal Properties of Sloping Vineyard Soil”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol.50, No.19-20, pp. 3837-3847.
 24. Li, S., Lucey, P.G., Milliken, R.E., Hayne, P.O., Fisher, E., Williams, J.P., Hurley, D.M., and Elphic, R.C. (2018), “Direct Evidence of Surface Exposed Water Ice in the Lunar Polar Regions”, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, USA.
 25. Lu, N. and Dong, Y. (2015), “Closed-form Equation for Thermal Conductivity of Unsaturated Soils at Room Temperature”, *J. Geotech. Geoenviron.*, Vol.141, No.6, pp.04015016-1-12.
 26. Lu, N. and Ge, S. (1996), “Effect of Horizontal Heat and Fluid Flow on the Vertical Temperature Distribution in a Semiconfining Layer”, *Water Resour. Res.*, Vol.32, No.5, pp.1449-1453.
 27. Lu, N. and Likos, J.W. (2004), “Unsaturated soil mechanics”, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
 28. Lu, S., Ren, T., Gong, Y., and Horton, R. (2007), “An Improved Model for Predicting Soil Thermal Conductivity from Water Content at Room Temperature”, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.71, No.1, pp. 8-14.
 29. McKay, D.S., Carter, J.L., Boles, W.W., Allen, C.C., and Allton, J.H. (1994), “JSC-1: A New Lunar Soil Simulant”, *Proc. Eng. Constr. Oper. Space IV, ASCE*, Albuquerque, New Mexico, USA, pp.857-866.
 30. Mitchell, J.K. and Soga, K. (2005), “Fundamentals of soil behaviour”, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
 31. Nagihara, S., Hedlund, M., Zaczny, K., and Taylor, P.T. (2014), “Improved Data Reduction Algorithm for the Needle Probe Method Applied to in-situ Thermal Conductivity Measurements of Lunar and Planetary Regoliths”, *Planet. Space Sci.*, Vol.92, pp.49-56.
 32. Noborio, K., McInnes, K., and Heilman, J. (1996), “Two-dimensional Model for Water, Heat, and Solute Transport in Furrow-irrigated Soil: I. Theory.”, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol.60, No.4, pp.1001-1009.
 33. Nozette, S., Lichtenberg, C.L., Spudis, P., Bonner, R., Ort, W., Malaret, E., Robinson, M., and Shoemaker, E.M. (1996), “The Clementine Bistatic Radar Experiment”, *Sci.*, Vol.274, No.5292, pp.1495-1498.
 34. Nozette, S., Spudis, P.D., Robinson, M.S., Bussey, D.B.J., Lichtenberg, C., and Bonner, R. (2001), “Integration of Lunar Polar Remote-sensing Data Sets: Evidence for Ice at the Lunar South Pole”, *J. Geophys. Res.-Planet*, Vol.106, No.E10, pp.23253-23266.
 35. Park, H., Park, H., Lee, S.R., and Go, G. (2012), “Estimation of Thermal Conductivity of Weathered Granite Soils”, *KSCE J. Civ. Eng.*, Vol.32, No.2C, pp.69-77.
 36. Park, S.S. (2021), “South Korea to join NASA’s Artemis project reports”, SPACENEWS, <https://spacenews.com/south-korea-to-join-nasas-artemis-project-reports/>
 37. Preene, M. and Powrie, W. (2009), “Ground Energy System: From Analysis to Geotechnical Design”, *Geotechnique*, Vol.59, No.3, pp.261-271.
 38. Ryu, B.H., Baek, Y., Kim, Y.S., and Chang, I. (2015), “Basic Study for a Korean Lunar Simulant (KLS-1) Development”, *J. Korean Geotech. Soc.*, Vol.31, No.7, pp.53-63.
 39. Ryu, B.H., Wang, C.C., and Chang, I. (2018), “Development and Geotechnical Engineering Properties of KLS-1 Lunar Simulant”, *J. Aerosp. Eng.*, Vol.31, No.1, pp.0417083-1-11.
 40. Sakatani, N., Ogawa, K., Iijima, Y., Arakawa, M., Honda, R., and Tanaka, S. (2017), “Thermal Conductivity Model for Powdered Materials under Vacuum based on Experimental Studies”, *AIP Adv.*, Vol.7, pp.015310-1-23.
 41. Sakatani, N., Ogawa, K., Arakawa, M., and Tanaka, S. (2018), “Thermal Conductivity of Lunar Regolith Simulant JSC-1A under Vacuum”, *ICARUS*, Vol.309, pp.13-24.
 42. Sohn, B., Wi, J., Park, S., Lim, J., and Choi, H. (2013), “Evaluation of Conventional Prediction Models for Soil Thermal Conductivity to Design Horizontal Ground Heat Exchangers”, *J. Korean Geotech. Soc.*, Vol.29, No.2, pp.5-14.
 43. Wasilewski, T.G., Barcinski, T., and Barchewka, M. (2021), “Experimental Investigations of Thermal Properties of Icy Lunar Regolith and their Influence on Phase Change Interface Movement”, *Planet. Space Sci.*, Vol.200, pp.105197-1-19.
 44. Yoon, S., Lee, M.S., Kim, G.Y., Lee, S.R., and Kim, M.J. (2017), “A Prediction of Thermal Conductivity for Compacted Bentonite Buffer in the High-level Radioactive Waste Repository”, *J. Korean Geotech. Soc.*, Vol.33, No.7, pp.55-64.
 45. Yoon, S., Lee, S.R., Park, H., and Park, S. (2012), “Thermal Conductivity Estimation of Soils using Coil Shaped Ground Heat Exchanger”, *KSCE J. Civ. Eng.*, Vol.32, No.5C, pp.177-183.
 46. Zhang, Y.Q., Lu, N., and Ross, B. (1994), “Convective Instability of Moist Gas in a Porous Medium”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol.37, No.1, pp.129-138.
 47. Zeng, X., He, C., Oravec, H., Wilkinson, A., Agui, J., and Asnani, V. (2010), “Geotechnical Properties of JSC-1A Lunar Soil Simulant”, *J. Aerosp. Eng.*, Vol.23, No.2, pp.111-116.

Received : July 27th, 2021

Revised : August 3rd, 2021

Accepted : August 3rd, 2021