

달 얼음-월면토 결합 형태에 따른 얼음 추출로 발생하는 침하량 평가

Experimental Evaluation of Ice-regolith Mixture Settlement Caused by Lunar Ice Extraction

이 장 근¹ Lee, Janguen 공 정² Gong, Zheng
진 현 우³ Jin, Hyunwoo 유 병 현⁴ Ryu, Byung Hyun

Abstract

Lunar ice is a resource available for future human exploration in deep space and long-term extraterrestrial habitat. However, the origin and nature of lunar ice remains unclear. In addition to remote sensing, international space agencies are competitively planning and conducting missions for lunar surface exploration to determine the existence and resource extent of lunar ice. If a sufficient amount of lunar ice is confirmed, its future in-situ resource utilization is expected to be greatly beneficial. However, due to ice extraction, settlement may occur, which should be taken into account from a geotechnical engineering perspective. Herein, experimental investigations of the potential settlement caused by lunar ice extraction were conducted and different textures of lunar ice were simulated. Consequently, it was confirmed that significant settlement occurs even at the initial water content of ~10% in lunar regolith simulant-ice-mixed soil.

요 지

달 얼음은 향후 인류의 심우주 탐사와 장기 체류를 위한 자원으로 활용될 수 있다. 달 얼음에 대한 기원 및 존재 유형은 여전히 가설로 남아 있다. 최근 세계 우주국에서는 달 얼음에 대한 원격탐사에서 지상탐사를 통해 정량적 매장량과 존재 유형을 밝히고자 경쟁적으로 미션을 계획하여 추진 중에 있다. 달 얼음의 매장량이 충분하다면 향후 얼음을 자원으로 활용하는 현지자원활용 개념이 각광받을 것으로 예상된다. 그러나 현재까지 얼음 추출에 따른 지반 공학적 관점에서 유의해야 하는 침하에 대한 검토는 전무한 실정이다. 본 연구에서는 인공월면토-얼음 존재 유형별로 얼음 추출로 인해 발생 가능한 침하량에 대한 실험적 연구결과를 제시하고 있다. 그 결과 초기 함수비 약 10%의 인공월면토-얼음 혼합토에서 상당한 침하가 발생하였다.

Keywords : Extraction, ISRU, Lunar ice, Settlement, Surface mission, Texture, Water content

- 1 정희원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 연구위원 (Member, Research Fellow, Department of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Tel: +82-31-910-0791, jlee@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)
- 2 비회원, 과학기술연합대학원대학교 박사과정 (Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Univ. of Science and Technology)
- 3 정희원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Department of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)
- 4 정희원, 한국건설기술연구원 미래스마트건설연구본부 전임연구원 (Member, Research Specialist, Department of Future & Smart Construction Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2023 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

1998년 NASA는 달에 얼음이 있다는 사실을 발견하고, 2005년에는 달의 자원을 활용하는 현지자원활용(In-Situ Resource Utilization, ISRU)을 발표하였다(Jayathilake et al., 2022). 현지자원활용(ISRU) 개념의 핵심은 달에 존재하는 얼음을 이용하여 유인탐사에 필요한 산소와 물, 그리고 심우주 탐사에 필요한 추진체(로켓)의 연료를 생산하는데 있다(Anand et al., 2012). 현재까지 조사된 자료에 따르면, 달 얼음은 달의 양극 지역에 존재하며, 영구음영지역(Permanent Shadowed Regions, PSRs) 내부뿐 아니라 주변에도 존재하는 것으로 조사되었다(Cocks et al., 2002; Duke, 2002; Hodges, 2002; Anand, 2010; Cannon and Britt, 2020).

달 얼음의 기원에 대해서는 (1) 탄소성 소행성을 통한 운반과 상대적으로 미미하지만 혜성을 통한 운반 (2) 달 내부에서의 화산 활동 (3) Solar/Earth wind의 영향과 미세운석 충돌이 결합하여 형성되었다는 가설이 지배적이다. 달 얼음은 3가지 가설 중 어느 하나에 지배되기 보다는 달의 기원부터 오랜 기간에 걸쳐 3가지 가설이 복합적으로 작용하며 형성되었다고 보고 있다(Anand, 2010). 달 얼음에 대한 관측은 주로 위성에 의한 원격 관측(remote sensing)에 의존하고 있어 아직 극지역 얼음 층적물의 직접적인 측정이 이루어지지 않아 얼음의 존재 상태를 구별하기에는 한계가 있다(Cocks et al., 2002). 세계 우주국에서는 이러한 달의 얼음 매장량과 존재 상태를 직접적으로 측정하고자 달 표면에서 샘플을 채취하고 얼음 또는 물 분자를 분석하는 임무를 계획하고 진행 중에 있다. 2017년 일본 우주국 JAXA(Japan Aerospace Exploration Agency)와 인도 우주 연구 기구 ISRO(Indian Space Research Organization)는 달 극지역의 영구음영지역(PSRs) 근처에 착륙하여 로버(rover)에 중성자, 분광 및 지하 레이더를 탑재하여 얼음의 존재를 관측한다는 계획을 발표하였다(Ogishima and Saiki, 2021). NASA와 유럽우주국 ESA(European Space Agency)에서도 달 얼음을 관측하고자 지상탐사 계획을 수립하고 추진 중에 있다(Feder, 2021; Heinike and Foing, 2021).

달의 얼음이 어떤 상태로 존재하는지는 여전히 의문이다. Murnane et al.(2022)의 가설에 따르면, 달의 얼음은 월면토-얼음이 물리적으로 혼합된 형태(discrete ice), 월면토-얼음이 물리적으로 결합된 형태(ice coating or ice-cemented regolith), 얼음 결정체가 포함된 각력암 형

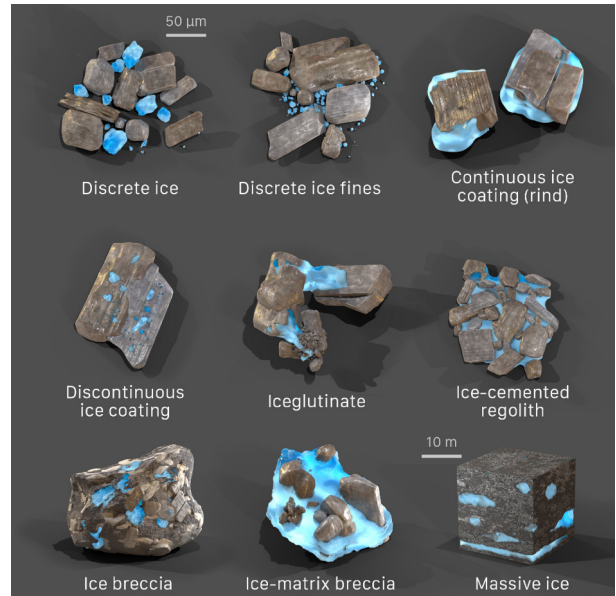


Fig. 1. Physical texture of ice-regolith mixtures that may exist in lunar cold traps (Murnane et al., 2022)

태(ice breccia)로 존재할 것으로 예상하고 있다(Fig. 1). 기존 연구에 따르면(Thomson et al., 2013), 달에 존재하는 얼음은 중량비로 약 5~10%(부피비로 약 30%)인 것으로 예상된다. 달 지상에서 얼음을 추출할 경우, 얼음이 차지하고 있는 부피가 감소하게 되고 공극이 증가함에 따라 상부에서 작용하는 하중과 상부 토양의 무게(자중)으로 인해 침하가 발생할 것으로 예상된다. 이러한 침하의 발생은 달 얼음 탐사용 로버 및 미래 현지자원활용(ISRU)에 필요한 플랜트 설비 등의 구조적 안전성에 문제를 야기할 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고, 얼음 추출에 따른 침하에 대한 고찰은 지금까지 전무한 실정이다. 본 연구에서는 월면토-얼음의 존재 유형에 따른 얼음 추출로 발생하는 침하량에 대한 실험적 결과를 제시하고 있다. 달 환경과 유사한 고진공의 환경에서 얼음을 추출하기에는 실험적으로 한계가 있어 얼음이 물로 상 변화하는 과정에서 발생하는 침하량에 대해 검토하였다. 본 연구를 통해 제시되는 얼음 존재 유형에 따른 용해침하의 향후 달 지상에서 얼음 추출 과정에서 발생하는 침하량의 최소 가이드로 활용가능 할 것으로 예상된다.

2. 실내실험

2.1 실험 재료

본 연구에서는 2015년 국내에서 개발한 한국형 인공

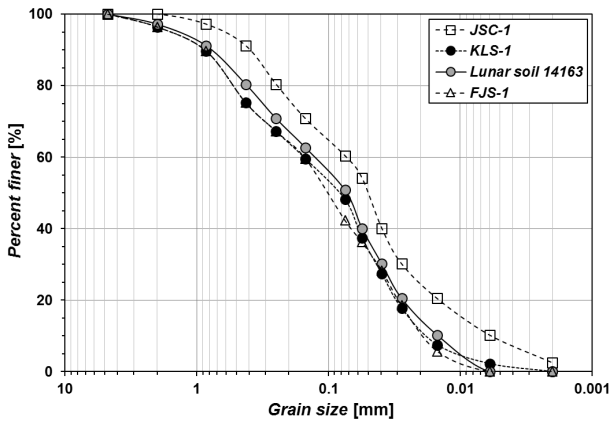


Fig. 2. Particle size distribution of real lunar regolith, lunar simulants (JSC-1 & FJS-1), and KLS-1 (Ryu et al., 2015)

월면토(Korean Lunar Simulant, KLS-1)를 사용하였다 (Ryu et al., 2015). KLS-1은 달 토양의 광물 및 화학 조성과 유사한 연천과 강원도 철원 지역에서 채취한 현무암을 분쇄하여 달 토양의 입도분포와 유사하게 재조성하였다. 일반 토양과 비교하여 현무암을 기반으로 한 토양의 비중(G_s)은 상대적으로 무거운 2.9이상으로 조사되었으며, KLS-1은 2.94로 측정되었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 KLS-1은 미국에서 생산한 인공월면토(Johnson Space Center, JSC-1), 일본에서 생산한 인공월면토(Fuji Japanese Simulant, FJS-1), 그리고 아폴로 미션에서 채취한 시료(Lunar soil 14163)와 입도분포가 유사하다. KLS-1은 물리화학적 조성 성분과 함께 역학적 특성도 기존 인공월면토들과 유사하다(Ryu et al., 2018).

2.2 실험장비

본 연구는 인공월면토 내부에 얼음이 존재하는 시료를 대상으로 얼음의 용해에 따른 침하량을 관측하는데 목적이 있다. 실험에 사용된 장비는 압밀실험 장비와 유사한 형태를 가지고 있으나 1) 온도 제어를 위한 주변부 단열 2) 시료 내부 온도 측정을 위한 온도센서 매립 3) 하부 온도 제어가 가능한 장치가 추가되어 있다(Fig. 3). 실험에 사용된 몰드는 두께 10mm의 비교적 열전도가 낮은 아크릴 소재를 이용하여 높이 200mm 및 내경 200mm로 제작하였고 주변부를 100mm 두께의 단열재(eXtruded Poly Styrene, XPS)로 단열시켰다. 몰드 벽면에는 하단부터 80mm 까지 높이별 온도분포 관측이 가능하도록 20mm 간격으로 5개씩 양 측면에 총 10개를 설치하여 온도를 측정하고 있다. 실험 중 발생하는 시료의 높이

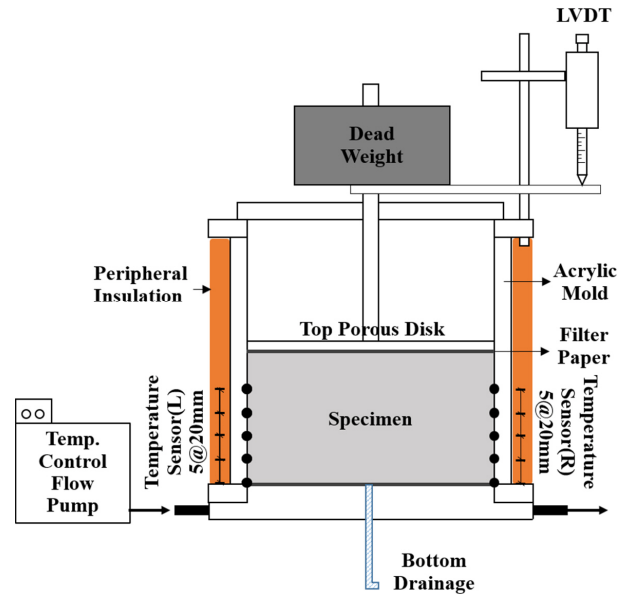


Fig. 3. Schematic diagram for ice extraction testing apparatus

변화를 관측하고자 정밀도 $\pm 0.0001\text{mm}$ 의 변위계(Linear Variable Displacement Transducer, LVDT)를 설치하였다. 변위는 시료의 압축(침하)이 발생할 경우 -값을, 용기가 발생할 경우 +값을 나타낸다. 하부 온도 조절은 별도의 냉각펌프를 연결하여 온도 제어가 가능하다. 시료 상부는 상시 배수 상태이며, 하부는 밸브를 활용해 배수 조절이 가능하다. 시료 준비 과정에서는 하부를 비배수 상태로 조성하고 얼음 용해 실험 중에는 배수상태로 밸브를 개방하여 용해된 얼음(물)이 배수되어 제거 가능하도록 하였다. 실험은 대형 냉동챔버에서 수행하였으며, 대형 냉동챔버가 온도를 1차로 제어하고 하부에서 온도조절을 통해 2차로 시료 내부의 온도를 정밀 제어하였다.

2.3 실험시료 준비 및 절차

실험에 사용된 인공월면토(KLS_1)는 110°C 로 가열하여 초기 수분을 제거하고 KLS_1-얼음 시료의 초기 함수비가 약 10%가 되도록 중량비에 맞추어 불포화 동결시료를 제작하였다. 본 연구에서는 달의 불포화 동결 토양을 재현하기 위해 3가지 방법으로 동결시료를 준비하였다(Table 1).

Case I과 II에 사용된 시료는 -10°C 로 유지되는 냉동 챔버에서 제작되었다. Case I의 경우, KLS_1-얼음이 물리적으로 혼합된 형태(Discrete Ice)를 조성하고자 얼음을 분쇄하여 입경 0.225mm 이하로 선별 후 혼합하여

Table 1. Specimen initial conditions

| | Overburden pressure (P, kPa) | Specimen weight (Wt, g) | Water content (wo, %) | Height (mm) | | Soil weight (Ws, g) | Water weight (Ww, g) | Unit dry weight (γ_d , kN/m ³) |
|----------|---------------------------------|----------------------------|--------------------------|-------------|-------|------------------------|-------------------------|---|
| | | | | Ho | Hi | | | |
| CASE I | 3.1 | 4927.3 | 11.3 | 120.7 | 119.1 | 4415.1 | 498.9 | 11.6 |
| CASE II | | 4350.0 | 10.6 | 115.3 | 114.2 | 3933.1 | 416.9 | 10.8 |
| | | 4288.3 | 10.6 | 118.7 | 116.1 | 3887.9 | 412.1 | 10.5 |
| CASE III | | 4941.5 | 10.0 | 111.0 | 110.7 | 4496.4 | 449.6 | 12.7 |

시료를 준비하였다. 이 때 사용된 얼음은 별도의 실험실에서 소형 냉동챔버를 이용하여 제작하였다. 소형 냉동챔버는 외기 온도의 영향을 최소화 하도록 주변부를 단열하고 하부에서 상부로 1차원 동결이 가능하다. 약 48 시간 동안 서서히 1차원 동결을 통해 물-얼음 상변화 과정에서 증류수 내부의 기포를 최대한 제거하여 얼음을 제작하였다(Jin et al., 2020). Case II는 KLS_1-얼음이 물리적으로 결합된 형태(Ice Coating or Ice-Cemented regolith)를 구현하고자 한다. 따라서 KLS_1과 증류수를 혼합하고 냉동챔버에서 1차 동결시킨 후, 다시 분쇄하여 입경 0.225mm 이하로 선별하여 시료를 준비하였다. Case III은 KLS_1-증류수로 혼합된 시료를 상온에서 준비하여 실험용 몰드(Fig. 3)에 채우고 실험장비 설치를 완료 후, 1차원 동결방식으로 동결을 진행하였다. 따라서 공극 내부의 간극수가 동결되며 얼음 결정체가 형성되고 이러한 과정에서 각력암 형태(Ice Breccia)로 동결 시료 준비가 가능하다.

Case I과 II의 준비된 불포화 인공월면토-얼음 혼합시료는 -10°C의 냉동챔버에서 하부가 비배수 상태의 실험용 몰드에 5kg의 상재하중으로 3번에 나누어 적정다짐을 통해 예비 높이(H₀)의 시료를 준비하였다. 시료준비가 완료된 후, 3.1kPa의 상재압력(P)을 재하하고 하부 온도조절 장치로 약 -5°C를 유지하여 압밀 중 시료 내부의 온도분포가 유사하게 조성하였다. 상재압력이 미미하고 불포화 시료인 관계로 상부 배수로 발생하는 압밀로 인한 침하량은 짧은 시간에 1.1~2.6mm 발생하였다. 시료 내부의 온도가 유사하고 압밀이 완료된 시료의 높

이(H_i)를 초기조건으로 설정하고 하부 온도조절 장치를 상온으로 상승시켜 시료 용해과정에서 발생하는 침하량을 관측하였다.

Case III은 냉동챔버의 온도를 상온으로 유지하고 KLS_1-증류수 혼합토를 Case I과 II와 동일한 방법으로 실험용 몰드에 시료를 준비한 후 상재압력(P)으로 압밀을 진행하였다. 압밀 침하는 상재하중 재하에 따른 순간적으로 미미하게 0.03mm가 발생(H_i = 110.7mm)하였으며, 압밀이 완료된 시점에서 냉동챔버의 온도를 -10°C로 낮추고 하부 온도조절 장치도 -10°C로 하부에서 상부로 동결되며 발생하는 동상을 관측하였다. 동상량은 0.14mm로 상당히 미미하게 관측되었다. 동상이 완료된 시점(시료 내부 온도가 0°C이하로 동결)에서 하부 온도조절 장치의 온도를 상승시켜 용해에 따른 침하량을 관측하였다.

시료 내부 온도가 안정화 되고 압밀이 완료된 초기 조건에서 얼음과 물리적으로 혼합(Case I) 또는 결합(Case II) 시료는 Case III과 비교하여 비교적 건조단위중량(γ_d)이 가볍게 측정되었다. 특히, Case II의 인공월면토-얼음이 결합된 형태(Ice Coating or Ice-Cemented regolith)로 2회에 걸친 반복 실험에서도 유사하게 가장 가벼운 건조단위중량을 보여주고 있다.

3. 결과분석

Fig. 4는 시료 준비과정에서 용해 침하까지 측정된 변위(displacement)와 시료 하부(0mm), 중부(40mm), 상단부(80mm)의 온도변화를 보여주고 있다. Table 2는 실험

Table 2. Measured initial and final results with estimated settlements

| | Water content (%) | | Specimen height (mm) | | Measured settlement (mm) | *Calculated settlement (mm) | γ_d (kN/m ³) | |
|----------|-------------------|-------|----------------------|-------|-----------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------|
| | w ₀ | Final | H _i | Final | | | Initial | Final |
| CASE I | 11.3 | 11.6 | 119.1 | 111.2 | 7.95 | 1.43 | 11.6 | 12.4 |
| CASE II | 10.6 | 10.6 | 114.2 | 101.6 | 12.6 | 1.19 | 10.8 | 12.1 |
| | 10.6 | 10.3 | 116.1 | 101.3 | 14.8 | 1.18 | 10.5 | 12.0 |
| CASE III | 10.0 | 9.9 | 110.7 | 110.7 | 0.17 | 1.29 | 12.7 | 12.7 |

*Calculated by Equation (1)

조건 및 결과를 각각 나타내고 있다. Case I과 II의 경우, 압밀곡선 변화가 미미한 시점을 압밀 완료 기준으로 간주하였으며, 비교적 짧은 시간에 압밀이 완료되었고 압밀과정에서 하부 설정온도인 약 -5°C 로 수렴하였다. Fig.

4에 보여주는 바와 같이 압밀이 진행되는 동안 시료 내부 온도가 상승하였음에도 불구하고, 지속적으로 영하의 온도가 유지되고 있어 압밀과정에서 얼음의 용해로 인한 침하는 발생하지 않은 것으로 판단된다. 압밀로 인한 침하가 더 이상 발생하지 않는 시점에 하부 온도조절 장치를 20°C 로 상승시키고 침하량을 관측한 결과, Case I은 7.95mm 의 침하량이 관측되었으며, 압밀 완료 후의 초기 높이(H_i) 대비 6.68% 의 변위비(displacement ratio)가 발생하였다. Case II는 2회에 걸친 실험에서 각각 12.6mm , 14.8mm 의 침하량이 관측되었으며, 변위비는 각각 11.03% , 12.75% 가 발생하였다. Case III은 KLS_1-중류수 혼합토로 압밀을 완료하고 하부 온도조절 장치를 -10°C 로 냉각하여 하부에서 상부로 시료를 동결시키며 발생하는 부피 팽창을 관측하였다. 간극수가 얼음으로 상변화(phase change)하는 과정에서 발생하는 부피팽창으로 인해 약 0.14mm 의 용기가 발생하였다. 시료 상부의 온도가 0°C 이하로 낮아지고 용기량의 변화가 미미한 시점에 다시 하부 온도조절 장치를 20°C 로 상승시켜 침하량을 관측한 결과, Case I과 II와 비교하여 상당히 미미한 0.17mm 의 침하가 발생하였다. 결국 Case III의 최종 높이는 용기와 침하를 거쳤음에도 불구하고 압밀이 완료된 시점의 초기 높이(H_i)와 거의 유사하게 관측되었으며, 이러한 결과는 실험 장비의 신뢰성을 검증하고 있다.

KLS_1-얼음이 물리적으로 결합된 Case II가 침하가 가장 많이 발생함을 알 수 있다. Case II는 Case I과 비교하여 비교적 낮은 초기 함수비(w_0)에도 불구하고 건조단위중량(γ_d)은 낮은 것으로 측정되었다. 이는 KLS_1-얼음으로 결합된 입자로 인해 발생한 것으로 판단된다. 즉, 물리적으로 결합된 형태의 입자는 동일한 무게에서 부피가 상대적으로 크기 때문에 건조단위중량이 낮다. 따라서 용해 과정에서 흙 입자를 둘러싼 얼음이 녹으며 상대적으로 많은 침하가 발생하며, 이는 최종 용해 침하가 완료된 시점에서 Case I과 II의 건조단위중량이 유사하게 관측된 결과로 증명될 수 있다. 흥미로운 사실은 용해 침하가 완료되어도 시료 내부의 함수비의 변화가 미미하다는 사실이다.

물 분자의 양극성으로 인해 얼음으로 상변화하며 발생하는 약 9% 의 부피변화(Lackner et al., 2005)를 고려해 식 (1)을 이용하여 초기 함수비를 기반으로 예측 침하량 계산이 가능하다.

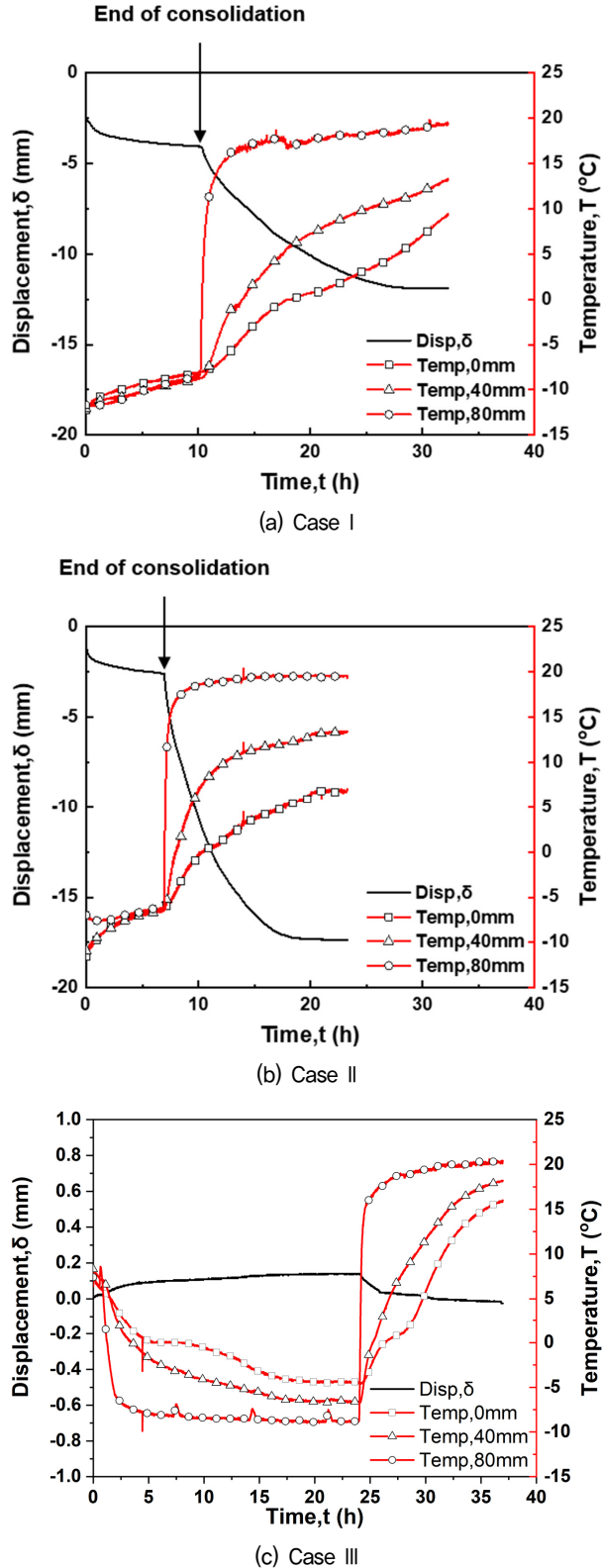


Fig. 4. Measured temperature and displacement

$$S_m = \frac{V_w}{A} \times 9\% \quad (1)$$

여기서, S_m 는 용해에 의한 침하량(mm), V_w 는 초기 함수비 조건에서 물의 부피(mm³), A 는 단면적(mm²)이다.

모든 경우에 대해 식 (1)을 통해 계산한 예측 침하량은 약 1.18mm~1.43mm다. 따라서 용해침하는 얼음이 녹아 물이 빠져 나가거나 상변화로 인해 발생한 침하가 아닌 흙의 골구조(soil structure)가 변화되며 발생한 것으로 판단된다. Case III은 증류수-얼음 상변화에 따른 용기도 미미하였으며, 용해과정에서 발생하는 침하량은 용기량과 유사하다. 이러한 현상은 불포화 상태의 시료 내부에서 간극수가 얼음으로 상변화 과정에서 발생하는 체적변화를 공극에서 수용하여 변위 발생이 미미한 것으로 예상된다. 따라서 용해 과정에서도 흙 입자의 골구조는 변화가 없고 오직 침하량은 용기량과 유사하게 발생하는 것으로 관측되었다. 이러한 현상은 건조단위중량에서 잘 보여주고 있다. 초기 건조단위중량은 동결 및 용해 과정을 거쳤음에도 불구하고 최종적으로 변화가 없기에 흙의 골구조는 그대로 유지되었다고 볼 수 있다.

4. 결론

달 얼음은 향후 인류의 심우주 탐사와 장기 체류를 위한 자원이다. 세계 우주국에서는 달 얼음에 대한 원격 탐사에서 벗어나 지상탐사를 통해 정량적 매장량과 존재 형태를 밝히고자 경쟁적으로 미션을 계획하고 추진 중에 있다. 충분한 매장량이 확인되면 달에 유인기지 건설은 가속화 될 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 얼음 추출에 따른 지반공학적 관점에서 유의해야 하는 침하에 대한 검토는 전무하다. 본 연구에서는 KLS_1-얼음의 존재 유형에 따른 얼음 추출로 발생 가능한 침하량에 대한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 본 연구에서는 기존의 가설을 토대로 달 얼음의 3가지 유형별 존재 상태를 재현하고 얼음 추출에 따른 침하량을 검토한 결과, 월면토와 얼음이 물리적으로 결합된 형태(ice coating or ice-cemented regolith)에서 가장 침하가 많이 발생할 것으로 예상된다. 이러한 현상은 물리적으로 결합된 형태의 월면토-얼음

입자는 동일한 무게에서 부피가 상대적으로 크기 때문에 건조단위중량은 낮아 용해 과정에서 흙 입자를 둘러싼 얼음이 녹으며 흙의 골격구조에 영향을 주게 되어 상대적으로 많은 침하가 발생한다. 얼음 결정체가 포함된 각력암 형태(ice breccia)로 존재할 경우, 얼음 추출로 인해 발생하는 침하량은 미미할 것으로 예상된다. 다만, 본 연구에서 월면토-얼음의 각력암 형태로 재현하기 위한 실험법이 실제 달 현장과 유사한지에 대해서는 여전히 한계가 있다.

(2) 월면토-얼음이 물리적으로 혼합(discrete ice)되거나 결합(ice coating or ice-cemented regolith)된 혼합토에서는 얼음 추출로 흙 골격구조가 변화되면서 침하가 발생한다. 본 연구결과에 따르면 비교적 가벼운 상재압력(3.1kPa)에서도 얼음 용해로 인해 6.68~12.75%의 변위비가 발생하였다. 따라서 초기 함수비 약 10%의 불포화 월면토-얼음 지반을 대상으로 얼음을 추출할 경우 침하에 대한 검토가 반드시 필요하다. 본 연구결과는 지구 환경에서도 동토지반을 대상으로 한 건설 중 불포화 동결지반의 용해 침하에 대한 고려가 반드시 필요함을 알 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).

참고문헌 (References)

1. Anand, M. (2010), "Lunar Water: a Brief Review", *Earth Moon Planet*, Vol.101, pp.65-73.
2. Anand, M., Crawford, I. A., Balat-Pichelin, M., Abanades, S., vanWestrenen, W., Pe'raudeau, G., Jaumann, R., and Seboldt, W. (2012), "A Brief Review of Chemical and Mineralogical Resources on the Moon and Likely Initial in Situ Resource Utilization (ISRU) applications", *Planetary and Space Science*, Vol.74, pp.42-48.
3. Cannon, K. M. and Britt, D. T. (2020), "A Geologic Model for Lunar Ice Deposits at Mining Scales", *Icarus*, Vol.347, pp.1-11
4. Cocks, F. H., Klenk, P. A., Watkins, S. A., Simmons, W. N., Cocks, J. C., Cocks, E. E., and Sussingham, J. C. (2002), "Lunar Ice: Adsorbed Water on Subsurface Polar Dust", *Icarus*, pp.386-397.
5. Duke, M. B. (2002), "Lunar Polar Ice Deposits: Science and Utilization Objectives of the Lunar Ice Discovery Mission Proposal", *Acta Astronautica*, Vol.50, No.6, pp.379-383.
6. Feder, J. (2021), "NASA Prepares To Drill for the "Oil of Space"",

- Journal of Petroleum Technology*, Vol.73, No.4, pp.24-28.
7. Heinicke, C. and Foing, B. (2021), "Human Habitats: Prospects for Infrastructure Supporting Astronomy from the Moon", *Phil. Trans. R. Soc.*, A379:20190568.
 8. Hodges Jr., R. R. (2002), "Ice in the Lunar Polar Regions Revisited", *J. of Geophysical Res.*, Vol.107, No.E2, pp.1-7.
 9. Jayathilake, B. A. C. S., Ilankoon, I. M. S. K., and Dushyantha, M. N. P. (2022), "Assessment of Significant Geotechnical Parameters for Lunar Regolith Excavations", *Acta Astronautica*, Vol.196, pp. 107-122.
 10. Jin, H., Lee, J., Zhung, L., and Ryu, B.H. (2020), "Laboratory Investigation of Unconfined Compression behavior of Ice and Frozen Soil Mixtures", *Geomech. Eng.*, Vo.22, No.3, pp.219-226.
 11. Lackner, R., Amon, A., and Lager, H. (2005), "Artificial Ground Freezing of Fully Saturated Soil", *J. Eng. Mech.*, Vol.131, No.2, pp.211-220.
 12. Murnane, A., Jackson, B., Amos, C., Pazar, C., and King, I. (2002), Mars Water Ice Prospecting Mission Study, Colorado School of Mines, pp.7-8.
 13. Ogishima, A. and Saiki, K. (2021), "Development of a Micro-ice Production Apparatus and NIR Spectral Measurements of Frosted Minerals for Future Lunar Ice Exploration Missions", *Icarus*, Vol. 357, pp.1-8.
 14. Ryu, B. H., Baek, Y., Kim, Y. S., and Chang, I. (2015), "Basic Study for a Korean Lunar Simulant (KLS-1) Development", *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.7, pp.53-63.
 15. 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, pp.1-11
 16. Thomson, B. J., Bussey, D. B. J., Neish, C. D., Cahill, J. T. S., Heggy, E., Kirk, R. L., Patterson, G. W., Raney, R. K., Spudis, P. D., Thompson, T. W., and Ustinov, E. A. (2012), "An Upper Limit for Ice in Shackleton Crater as Revealed by LRO Mini-RF Orbital Radar", *Geophysical Research Letters*, Vol.39, L14201, pp.1-4.

Received : May 19th, 2023

Revised : June 7th, 2023

Accepted : June 7th, 2023