

다양한 실험조건을 고려한 동결 사질토의 열전도도 산정에 대한 연구

Study on the Thermal Conductivity of Frozen Soil Considering Various Experimental Conditions

김 희 원¹ Kim, Hee-Won

고 규 현² Go, Gyu-Hyun

Abstract

In analyzing geotechnical structures, the analysis fields are becoming increasingly diversified. In particular, the need for predicting the thermal behavior of ground materials has become important in fields related to soil freezing. To ensure a reliable assessment of the freezing behavior of the ground, considering the variation in the effective thermal conductivity of soil specimens under various conditions is crucial. In this study, probe experiments were conducted by varying the porosity, initial degree of saturation, and read time settings of the meter. Next, the factors influencing the effective thermal conductivity of the frozen sandy soil were evaluated. The experimental results conducted under different porosity conditions showed a tendency for the effective thermal conductivity of frozen soil to increase as the specimen's porosity decreased. However, as the degree of saturation of the specimen increased, the effective thermal conductivity also increased. The sensitivity of the meter's read time setting to the measurement of effective thermal conductivity was observed. When the read time was set to 1 min, the measured values were in a range similar to that obtained in previous studies conducted in Korea with the same soil specimen.

요 지

지반구조물의 해석에 있어서 해석의 고려 대상과 분야가 점점 다변화되고 있으며, 특히 지반동결과 관련된 분야에서 지반재료의 열적거동 특성에 대한 예측의 필요성이 중요해지고 있다. 신뢰성 있는 지반의 동결거동 평가를 위해서는 다양한 조건에서의 시료의 유효 열전도도 변화에 대한 고려가 필요하다. 본 논문에서는 시료의 간극률, 초기 포화도, Read time 설정을 달리하여 탐침 실험을 수행하였고, 이를 통해 동결 사질토의 유효 열전도도에 영향을 미치는 인자들을 평가하였다. 서로 다른 간극률 조건에서 실험을 수행한 결과, 시료의 간극률이 작을수록 동결토의 유효 열전도도는 증가하는 경향이 나타났다. 반면, 시료의 포화도가 증가할수록 동결토의 유효 열전도도는 증가하였다. 유효 열전도도 측정에 대한 계측기 Read time 설정의 민감도가 존재하였는데, Read time을 1분으로 설정하여 측정하였을 때 측정값의 범위가 국내의 선행연구결과와 유사하게 나타났다.

Keywords : Freezing chamber, Frozen sandy soil, Influencing factor, Probe test, Thermal conductivity

1 비회원, 금오공과대학교 토목공학과 석사과정 (Master Student, Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology)

2 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology, Tel: +82-54-478-7620, gyuhungo@kumoh.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2024년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 지반구조물 해석의 고려 대상 분야가 다양화되고 다변화됨에 따라 열과 관련된 분야에서 지반재료의 열적 거동에 대한 관심이 증가하고 있다. 특히, 계절 동토지역에 속하는 국내의 경우 지반 동결에 의해 철도 노반, 옹벽구조물, 매설관 등의 토목구조물이 손상되거나 기능이 저하되는 문제가 발생하고 있는데, 이러한 문제는 대부분 지반의 온도변화에 기인하는 경우가 많다. 따라서, 동결토의 열적 거동에 대한 신뢰성 있는 예측을 위해서는 다양한 조건에서 동결토의 물성과 관련된 기초 실험연구가 필요하다.

국외에서는 흙의 유효 열전도도를 산정하기 위해 여러 이론식과 경험식이 제시되었는데(Kersten, 1949; Andersland and Anderson, 1978; Johansen, 1977; de Vries, 1963; Mickley, 1951; Penner, 1970; Tian et al., 2016; Côté and Konrad, 2005; Wright et al., 2005, Yoon et al., 2018; Yoon et al., 2020), Kersten(1949)은 함수비와 건조 단위중량을 이용하여 동결토와 비동결토의 열전도도에 대한 비선형 회귀 모델을 각각 제안하였고, Andersland and Anderson(1979)은 Kersten(1949)이 제시한 식을 사용하여 함수비와 건조 단위중량을 이용해 열전도도를 구할 수 있는 표를 제시하였다. Penner(1970)는 실토질 점토에 대해 비정상 방법을 이용하여 열전도도를 측정하였으며 상변화 구간에서의 열전도도 측정에 어려움이 있다는 것을 실험적으로 확인하였다. 이외에도 실험적 연구로 시료의 동결-융해 시 열전도도 변화를 측정하여, 초기 함수비와 초기 건조 밀도의 영향을 살펴본 연구(Zhang et al., 2018), 함수비가 다른 점토 시료의 열전도도 통계적 특성을 분석한 연구(Li et al., 2019)가 수행되었으며, 중국의 영구동토 지역의 silty clay 시료를 채취하여 동결 상태와 비동결 상태에서 열전도도를 측정하고 시그모이드 함수 기반 열전도도 추정 모델을 만들어 실험값과 비교 검증한 연구도 수행되었다(Xin et al., 2022). 최근에는 어느점 근처에서 동결토의 열전도도 측정이 가능하도록 비정상 방법과 정상 방법을 결합한 모델 개발 연구도 보고되었다(Zhao et al., 2019). 국내의 동결토 관련 연구는 동상 현상과 동결토의 강도 평가 위주로 진행되어 왔으며(Kim et al., 2008; Kang et al., 2013; Kim et al., 2016), 동결토의 열전도도 측정 관련 연구로는 해저 지반에서의 인공동결공법 설계를 위한 동결토의 열적 특성 파악을 위해 간극수의 염도를 조절하여 동결과

정과 염분에 따른 유효 열전도도를 측정하는 연구 사례가 있다(Oh et al., 2016).

기존에 수행된 연구들로 인하여 동결토의 열전도도 연구에 대한 상당한 진전이 있었지만 대체로 제한된 종류의 시료에 초점을 맞춘 연구들이 주를 이루는 경향이 있고, 특히 다양한 초기 실험조건을 고려하여 동결에 따른 유효 열전도도 변화를 모니터링한 사례는 미진한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 국내 사질토 시료를 대상으로 동결에 따른 유효 열전도도 변화를 평가하였고, 동결토의 열전도도에 영향을 미치는 실험적 영향인자들에 대해 분석하였다. 시료의 동결 팽창을 제어하는 몰드 고정장치를 특수 제작하였으며, 동결 챔버 속에 비치된 시료 몰드에 탐침장비를 연결하여 연속적인 온도하강에 따른 시료의 유효 열전도도 변화를 관찰하였다. 이후 매개변수연구를 통해 동결사질토의 유효 열전도도 변화에 영향을 미치는 주요 인자들에 대해 분석하였다.

2. 방법론

2.1 비정상 탐침법

본 연구에서는 비정상 탐침법(non-steady-state probe method)을 이용하여 시료의 유효 열전도도를 측정하였다. 비정상 탐침법은 무한 선형 열원 이론(infinite line-source theory)에 기반한 측정 방식으로서, 시료에 삽입된 탐침(열선)에 열량을 일정하게 공급할 때, 선형적으로 나타나는 로그 시간-온도 변화($\ln t - \Delta T$) 관계에서 직선의 기울기와 공급 열량 등을 통해 간접적으로 유효 열전도도를 산정한다(Mickley, 1951). 초기 온도가 균일한 매질에서 열선으로부터 반경 방향으로 1차원적으로 열이 전달되는 과정은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\alpha_m} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (1)$$

이때, 열선의 단위 길이 당 공급 열량이 q 로 표현될 때, 임의 지점의 온도는 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{4\pi k} \int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2)$$

식 (2)의 적분 변수인 $x_0 = r^2/4\alpha t$ 가 매우 작기 때문에 우변의 지수적분 항을 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 식 (3)을 식 (2)에 대입한 후 정리하면 식 (4)와 같은 선형 열원 모델을 얻을 수 있다.

$$\int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \approx \ln \frac{1}{x_0} - \gamma \quad \text{for } \frac{\alpha_m t}{r^2} \geq 5 \quad (3)$$

$$\Delta T(r,t) = \frac{q}{4\pi k} \ln \left(\frac{4\alpha_m t}{cr^2} \right), \quad c = e^\gamma = 1.78 \quad (4)$$

여기서, 로그 시간($\ln t$)에 대하여 온도 변화 관계는 1차식으로 표현되며, 식 (4)는 직선 형태를 보인다. 따라서 식 (4)에서 도출된 기울기와 평균 열 공급량을 이용하면 식 (5)와 같이 시료의 유효 열전도도를 산정할 수 있다.

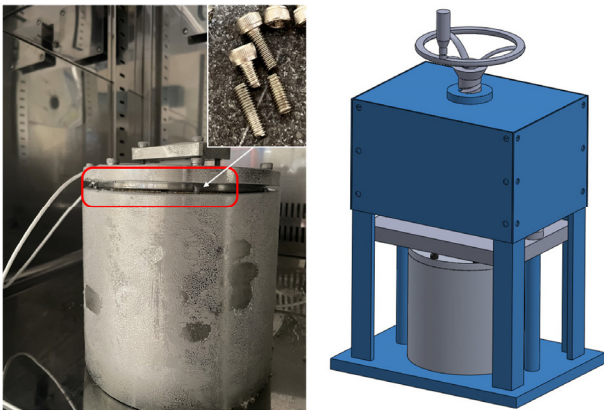


Fig. 1. Problems in the existing mold cap and a new design of the sample holder

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

2.2 실험 장비 및 실험 방법

사용된 동결 챔버는 폭(W) 500mm × 깊이(D) 500mm × 높이(H) 600mm 규격으로서 내부 공기 온도를 -90°C ~ 60°C의 범위에서 제어가 가능하다. 초기 실험 진행 시 간극수의 동결 팽창압에 의해 몰드 캡의 볼트가 부러지면서 시료의 파괴 제어가 이루어지지 않는 문제가 발생하였다. 이러한 문제를 보완하고자 새로운 시료 고정 장치를 설계·제작하였다(Fig. 1). 시료 고정 장치를 적용한 예비 해석을 수행한 결과, Fig. 2와 같이 볼트 내부에 작용하는 응력이 현저히 작아짐을 확인하였다. 시료 몰드는 2가지 규격의 몰드(몰드 1: 직경(D) 5cm × 높이(H) 11.9cm, 몰드 2: 직경(D) 14cm × 높이(H) 13cm)를 사용하였다. 또한 열전도도 측정 시험은 METER group사의 열전도계(TEMPOS, KD2-Pro)를 이용하였다. ASTM D5334-14 (ASTM D5334-14, 2014)에 의거하여 측정하였다(Fig. 3).

3. 열전도도 측정 시험

3.1 센서 정밀도 검증

실험 전 측정 센서의 정밀도를 확인하기 위해 상온에서 기준시료(실리콘 에폭시)의 열전도도를 측정 후 문헌에 제시된 값과 비교·검증하였다(Table 1 참조). 각 기준시료의 열전도도는 5회 측정된 결과를 평균한 값이며, 오차 범위 ±1% 내에서 문헌 값과 일치하는 것을 확인하였다.

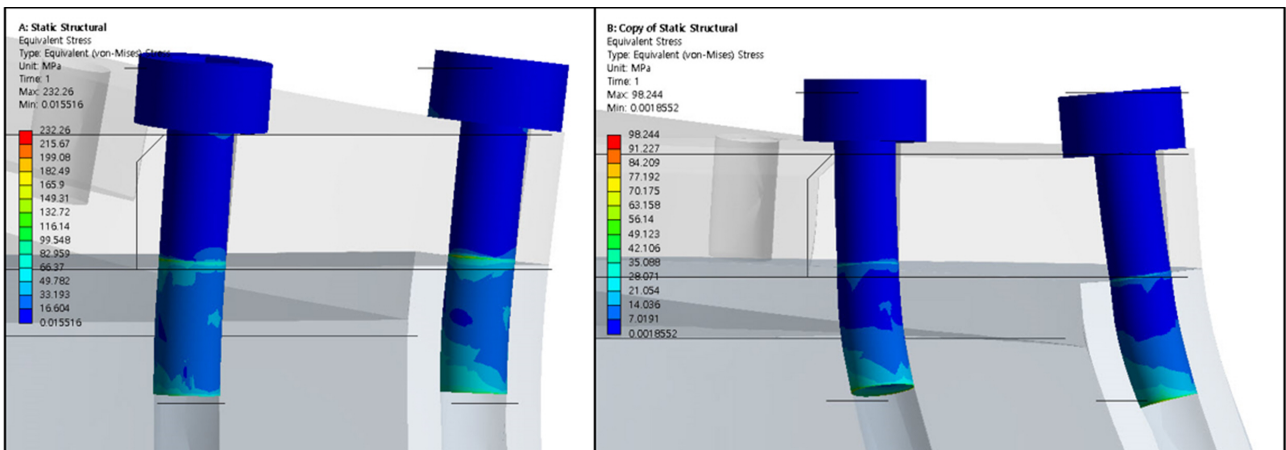


Fig. 2. Simulation results of stress distribution in bolts with/without sample holder

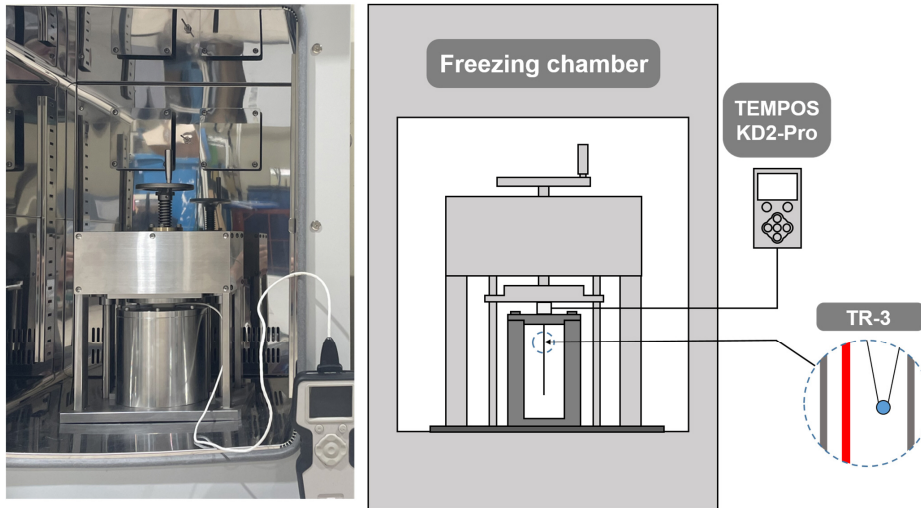


Fig. 3. Experiment setup for measuring the thermal conductivity

Table 1. Thermal conductivity measurement result of standard reference material

Reference material	Thermal conductivity (W/m/K)		Error (%)	Note
	Reference	Measurement		
silicon epoxy	1.042	1.0424	0.04%	KD2-Pro
	1.042	1.036	0.58%	TEMPOS

3.2 모래시료에 대한 열전도도 실험 검증

실험에 사용된 사질토는 주문진 표준사이며, 증류수로 포화시킨 후 동결에 따른 유효 열전도도 변화를 측정하였다. Fig. 4와 같이 일정한 시간 간격을 두고 시료의 온도 변화 및 유효 열전도도 변화를 측정하였다. 시편의 초기 온도와 몰드 크기에 따라 동결 시간에 차이가 있음에도 불구하고 전체적인 양상은 비슷하게 나타났다. 시간-온도 그래프와 시간-열전도도 그래프를 통해 온도-열전도도 그래프를 도출해 낼 수 있었으며, 대부분의 관측 데이터들이 기존 선행연구(Wright et al., 2005; Oh et al., 2016)에서 보고된 측정 데이터와 유사함을 확인하였다(Fig. 5). 동결이 진행됨에 따라 시료의 유효 열전도도가 큰 폭으로 상승하였는데, 이는 포화사질토의 간극수가 얼음으로 상(phase)이 변하면서 유효 열전도도에 지배적인 영향을 준 것으로 분석된다. 또한, 간극수 상변화가 일어나는 구간(0°C ~ -5°C)에서는 관측 데이터의 이상치(outlier)가 집중적으로 발생하였다(Fig. 4). Penner(1970)는 상변화 구간에서의 에너지 방출로 인해 시료에 온도구배가 형성되지 못하기 때문에 관측 이상치가 발생할 수 있음을 언급한 바 있다.

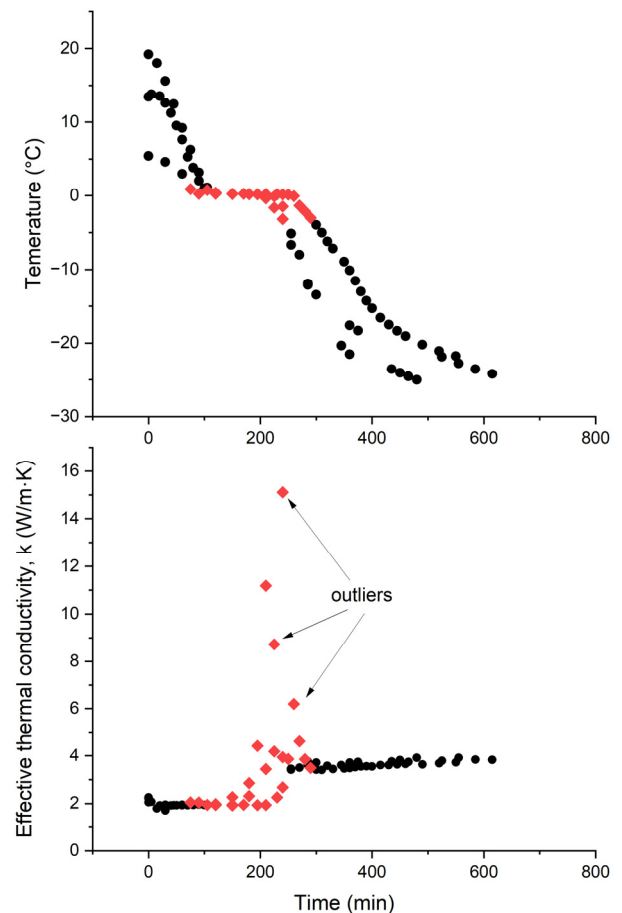


Fig. 4. Thermal conductivity measurement result of Jumujin sand during freezing

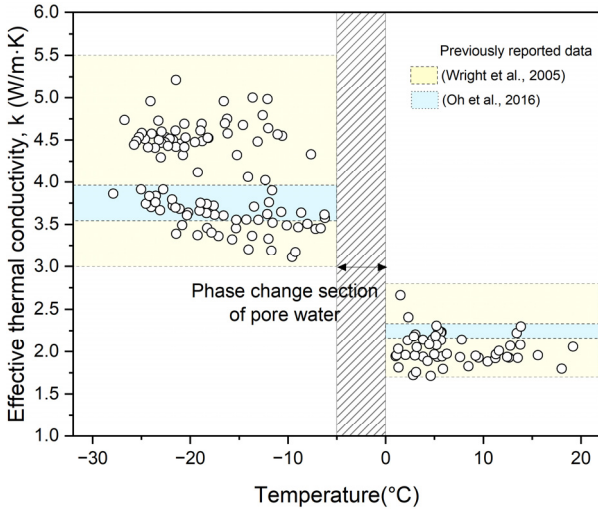


Fig. 5. Effective thermal conductivity change during soil freezing

4. 매개변수 연구

본 연구에서는 다양한 초기 실험 조건에 따른 동결 사질토의 유효 열전도도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 매개변수 연구를 수행하였다. 이를 위해 총 3가지의 매개변수(간극률, 포화도, Read time 설정)를 선정하여 각 변수별 영향 정도를 평가하였다.

4.1 간극비의 영향

총 3가지 간극률 조건($n=0.39$, $n=0.43$, $n=0.45$)으로 시료를 조성하여 열전도도를 측정하였고 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 이때, 간극률 이외의 변수들은 통제하였다. 측정 결과, 간극률이 작을수록 동결토의 유효 열전도도는 증가하는 경향이 나타났으며, 간극률이 커질수록 열전도도는 감소하였다. 간극률이 감소하여 흙이 조밀해질수록 열전도도가 상대적으로 높은 흙 입자끼리의 접촉 면적이 증가하면서 열전도도가 더 높게 나타난 것으로 분석되며, 이러한 양상은 선행 연구결과(Yun and Santamarina, 2008; Xin et al., 2022)와 유사한 경향이라 할 수 있다.

4.2 포화도의 영향

시료의 포화도 차이에 따른 유효 열전도도 변화를 분석하기 위하여 서로 다른 3가지 포화도 조건($S=0.75$, $S=0.85$, $S=0.97$)에서 열전도도 실험을 수행하였으며, 실험 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 포화도 이외의 변수들은 통제

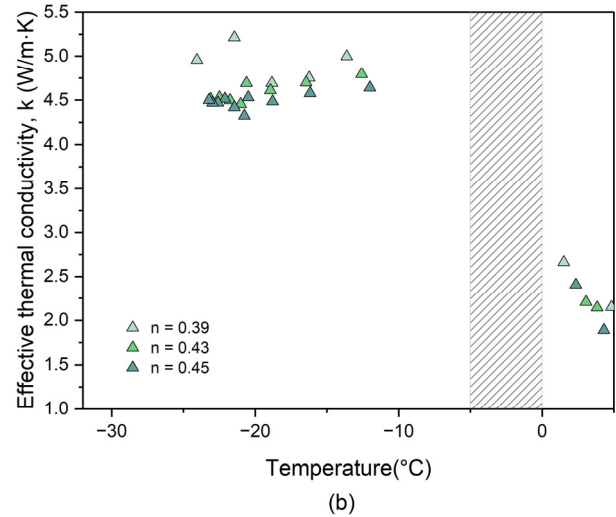
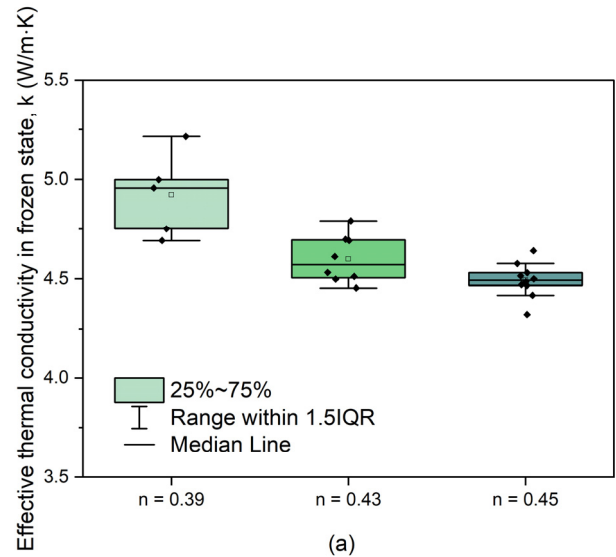


Fig. 6. Effect of porosity on the effective thermal conductivity

하였다. 포화도가 증가할수록 동결토의 유효 열전도도는 증가하는 경향이 나타났으며, 비동결토의 경우, 포화도 차이에 대한 열전도도 변화의 영향이 상대적으로 적은 것으로 확인되었다. 이러한 현상은 포화도가 커질수록 시료 내 간극수가 차지하는 비율이 높아지고 동결 시 얼음 열전도도가 시료의 유효 열전도도에 반영되는 효과 또한 커지는 것에 기인한다.

4.3 Read time의 영향

각 제조사 별로 Read time에 대한 가이드를 제시하고 있으나 실험 조건에 따라 연구자의 판단에 의존하여 Read time을 달리 설정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 계측기 (TEMPOS, KD2-Pro)의 Read time 설정이 열전도도 측

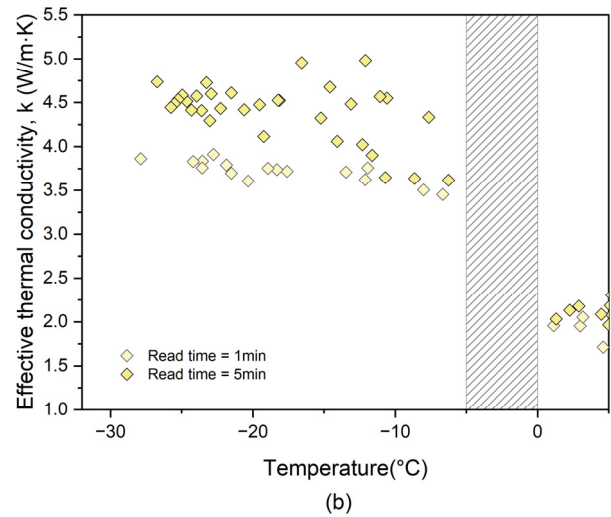
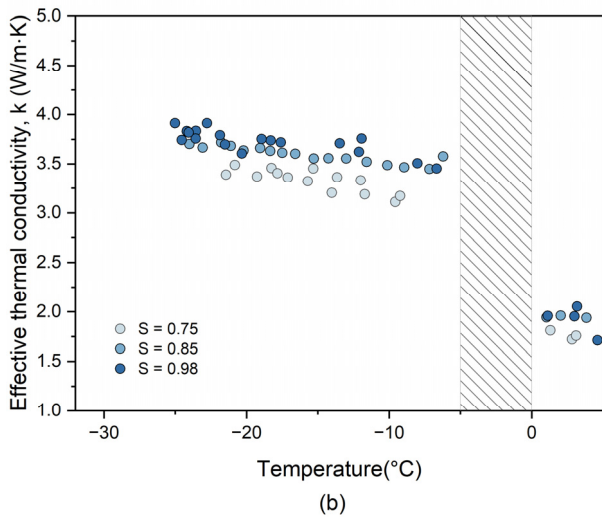
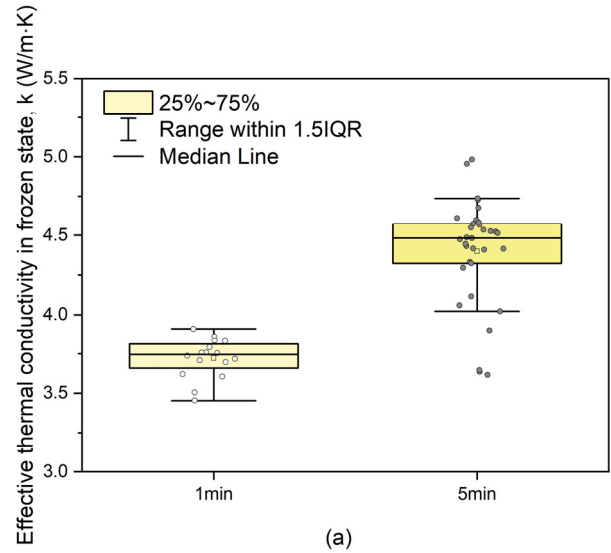
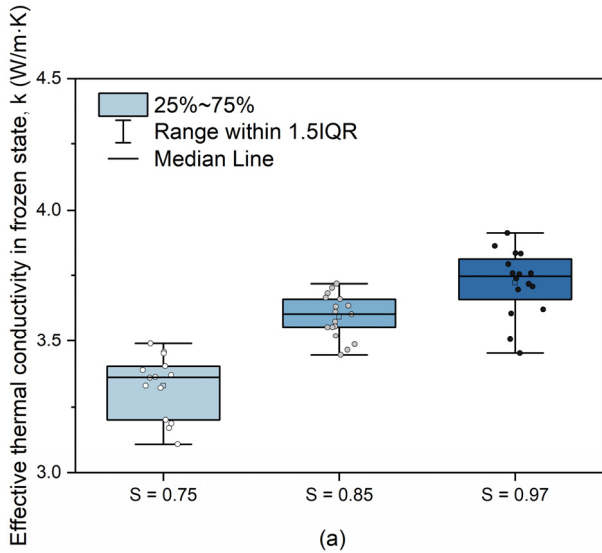


Fig. 7. Effect of saturation on the effective thermal conductivity

Fig. 8. Effect of read time setting on the effective thermal conductivity

정에 미치는 영향에 대해 살펴보았다. Read time을 1분으로 설정한 경우와 5분으로 설정한 경우에서, 모든 관측 데이터들이 국내의 선행 연구들(Wright et al., 2005; Oh et al., 2016)에서 보고된 범위 안에 들어오는 것을 확인하였다. 하지만, Read time을 1분으로 설정하면 계측 값들의 편차가 더 적게 나타났고 본 연구와 동일 시료를 사용한 국내 선행연구(Oh et al., 2016)의 결과와 거의 유사함을 확인하였다. 반면, read time 설정이 5분일 경우 국내 선행연구(Oh et al., 2016)의 관측 범위를 벗어나는 경향이 있으며 데이터도 다소 분산되어 나타났다. 열전도도의 측정은 대상 시료의 온도를 기반으로 이루어지는데, read time이 길어지면 탐침에서 주입되는 열량에 의해 탐침 주변의 동결된 간극수가 일시적으로 녹는 현상이 일어나기 때문에 측정값의 편차가 더 크게

나타난 것으로 분석된다(He et al., 2015). 비정상 탐침법은 동적 프로세스(dynamic process)를 겪는 재료의 열전도도를 측정하는데 유용한 방식이긴 하나, 본 연구의 동결시험과 같이 급격한 동적 프로세스를 겪는 경우에는 Read time을 짧게 설정할수록 보다 안정적인 측정 결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 다양한 조건에서의 동결 사질토의 유효 열전도도를 평가하기 위해 실내탐침실험을 수행하였으며, 유효 열전도도 변화에 영향을 미치는 주요 인자들에 대해 분석하였다. 이를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 사질토 시료의 동결 시 약 0°C ~ -5°C 온도 구간에서 간극수의 상변화에 의해 열전도도 값의 이상치가 나타났는데 이는 열전도도 측정을 위해 가하는 소량의 열량이 상변화에 의해 간섭을 받기 때문이다.
- (2) 다양한 간극률 조건에서 열전도도 실험을 수행한 결과, 간극률이 작을수록 동결토의 유효 열전도도는 증가하는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 간극률이 작을수록 흙 입자들의 접촉 면적이 증가하면서 입자 간 열전도가 용이해진 것에 기인한다.
- (3) 서로 다른 포화도 조건에서 열전도도 실험을 수행한 결과, 포화도가 증가할수록 동결토의 열전도도는 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 시료의 초기 포화도 차이에 따라 공극 내 얼음이 차지하는 비율이 달라져 동결토의 유효 열전도도가 달라질 수 있음을 시사한다.
- (4) 계측기의 Read time을 1분으로 설정한 경우와 5분으로 설정한 경우에서, 모든 관측 데이터들이 국내외 선행 연구에서 보고된 범위 안에 들어오는 것을 확인하였다. 하지만, Read time을 1분으로 설정하면 계측 값들의 편차가 더 적게 나타났고 본 연구와 동일 시료를 사용한 국내 선행연구의 결과와 유사함을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 금오공과대학교 대학 연구과제비로 지원되었음(2021).

참고문헌 (References)

1. Andersland, O. and Anderson, D. (1978), Geotechnical Engineering for Cold Regions.
2. ASTM D5334-14, Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure, 2014.
3. Côté, J. and Konrad, J. M. (2005), "A Generalized Thermal Conductivity Model for Soils and Construction Materials", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42, No.2, pp.443-458.
4. De Vries, D. A. (1963), Thermal Properties of Soils. In Physics of Plant Environment. North-Holland Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands.
5. He, H., Dyck, M., Wang, J., and Lv, J. (2015), "Evaluation of TDR for Quantifying Heat-pulse-method-induced Ice Melting in Frozen Soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.79, No.5, pp.1275-1288.
6. Johansen, O. (1977), Thermal Conductivity of Soils. Cold Regions Research and Engineering Lab Hanover NH.
7. Kang, J. M., Lee, J. G., Lee, J., and Kim, Y. (2013), "Analysis of the Relationship between Unconfined Compression Strength and Shear Strength of Frozen Soils", *J. Korean Geosynth. Soc.*, Vol.12, No.3, pp.23-29.
8. Kersten, M. S. (1949), Thermal properties of soils.
9. Kim, S. Y., Hong, W. T., Hong, S. S., Baek, Y., and Lee, J. S. (2016), "Unfrozen Water Content and Unconfined Compressive Strength of Frozen Soils According to Degree of Saturations and Silt Fractions", *J. Korean Geotech. Soc.*, Vol.32, No.12, pp.59-67.
10. Kim, Y. C., Shin, J. W., and Kim, H. K. (2008), "Engineering Characteristics of Antarctic and Siberian Frozen Soils", In Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference (pp.894-904). Korean Geotechnical Society.
11. Li, S., Wang, C., Shi, L., and Yin, N. (2019), "Statistical Characteristics of the Thermal Conductivity of Frozen Clay at Different Water Contents", *Results in Physics*, Vol.13, pp.102179.
12. Mickley, A.S. (1951), "The Thermal Conductivity of Moist Soil", *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, Vol.70, No.2, pp.1789-1797.
13. Oh, M., Lee, D., Son, Y. J., Lee, I. M., and Choi, H. (2016), "Effect of Pore-water Salinity on Freezing Rate in Application of Rapid Artificial Ground Freezing to Deep Subsea Tunnel: Concentration of Laboratory Freezing Chamber Test", *J. of Korean Tunn Undergr Sp.Assoc.*, Vol.18, No.5, pp.401-412.
14. Penner, E. (1970), "Thermal Conductivity of Frozen Soils", *CaJES*, Vol.7, No.3, pp.982-987.
15. Tian, Z., Lu, Y., Horton, R., and Ren, T. (2016), "A Simplified de Vries-based Model to Estimate Thermal Conductivity of Unfrozen and Frozen Soil", *Eur. J. Soil Sci.*, Vol.67, No.5, pp.564-572.
16. Wright, J.F. Nixon, F.M., Dallimore, S.R., Hennings, J., and Cote M.M. (2005), "Thermal Conductivity of Sediments Within the Gas-hydrate-bearing Interval at the JAPEX/JNOC/GSC et al.Mallik 5L-38 Gas Hydrate Production Research Well", Geological Survey of Canada, Bulletin 585, pp.10.
17. Xin, Q., Yang, T., She, X., Gao, Y., and Cao, Y. (2022), "Experimental and Modeling Investigation of Thermal Conductivity of Shenyang Silty Clay under Unfrozen and Frozen States by Hot Disk Method", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol.132, pp.105882.
18. Yoon, S., Cho, W., Lee, C., and Kim, G. Y. (2018), "Thermal Thermal Conductivity of Korean Compacted Bentonite Buffer Materials for a Nuclear Waste Repository", *Energies*, Vol.11, No.9, pp.2269.
19. Yoon, S., Park, S., Kim, M. S., Kim, G. Y., and Lee, S. R. (2020), "Thermal Conductivity Evaluation of Compacted Bentonite Buffers Considering Temperature Variations", *J. Nucl. Fuel Cycle Waste Technol.*, Vol.18, No.1, pp.43-49.
20. Yun, T. S. and Santamarina, J. C. (2008), "Fundamental Study of Thermal Conduction in Dry Soils", *Granular matter*, Vol.10, pp.197-207.
21. Zhang, M., Lu, J., Lai, Y., and Zhang, X. (2018), "Variation of the Thermal Conductivity of a Silty Clay during a Freezing-thawing Process", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.124, pp.1059-1067.
22. Zhao, X., Zhou, G., and Jiang, X. (2019), "Measurement of Thermal Conductivity for Frozen Soil at Temperatures Close to 0°C", *Measurement*, Vol.140, pp.504-510.

Received : June 15th, 2023

Revised : July 5th, 2023

Accepted : July 6th, 2023