

## 표준압밀시험 및 일정변형을 압밀시험 결과를 이용한 포화된 혼합 점성토의 열전도계수 측정에 관한 실험적 연구

김학승<sup>1</sup> · 권형석<sup>1</sup> · 이장근<sup>2\*</sup> · 조남준<sup>1</sup> · 김현기<sup>1</sup>

<sup>1</sup>국민대학교 건설시스템공학부, <sup>2</sup>한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실

## Thermal Conductivity Measurement of Saturated Clayey Mixtures using Oedometer Consolidation and Constant Rate of Strain Consolidation Tests

HakSeung Kim<sup>1</sup>, HyungSeok Kwon<sup>1</sup>, Janguen Lee<sup>2\*</sup>, Nam Jun Cho<sup>1</sup>, and Hyun-Ki Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University

<sup>2</sup>Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Korea Institute of Construction Technology

지반 내 열전도 현상은 지구온난화에 따른 지반거동 변화 예측, 극한지 기반시설 건설, 지열 냉난방 시스템의 부하 계산 등 다양한 건설 및 환경 분야에서 중요한 고려사항이다. 열전달 해석에서 가장 중요한 변수인 열전도계수를 산정하는 방법으로 이를 정량적으로 정확하게 예측, 평가할 수 있는 기법의 필요성이 제기되고 있다. 최근 들어서는 세립토를 대상으로 열전도계수에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그러나 기존 연구자들은 세립토의 열전도계수를 정확히 측정하는데 어려움으로 인해 신뢰성 있는 데이터가 부족하다는 문제점들이 제기되고 있다. 본 연구에서는 포화된 카올리나이트와 실리카 혼합점성토를 대상으로 건조밀도 변화에 따른 열전도계수 측정 실내실험을 수행하였다. 표준압밀시험의 단점을 보완한 일정변형을 압밀시험 자동화 장비를 이용하여 건조밀도의 변화에 따른 열전도계수를 연속적으로 측정하고 실내실험 결과의 신뢰성을 분석하였다. 또한, 기존 경험식과의 비교를 통해 최적의 세립토 열전도계수 예측 방법을 제시하고자 한다.

**주요어** : 열전도계수, 일정변형을 압밀, 세립토, 카올리나이트, 실리카

Thermal distribution in soils must be considered in engineering designs and constructions, including estimates of frost heave and thaw settlement, infrastructure in cold regions, and geothermal systems. Because thermal conductivity is a key parameter for evaluation of thermal distribution in soils, it must be accurately estimated. The thermal conductivity of fine-grained soils has been widely studied in recent years; however, few studies have reported a reliable method for experimental measurement. The present study presents the results of an experimental investigation of the thermal conductivity of a saturated kaolinite-silica mixture with respect to the variation of dry density. Thermal conductivities were measured in Constant Rate of Strain (CRS) consolidation tests, and the experimental data were analyzed to evaluate the accuracy of the new measurement system. In addition, we present an evaluation method for predicting thermal conductivity in fine-grained soils.

**Key words** : thermal conductivity, constant rate of strain consolidation, fine-grained soils, kaolinite, silica

### 서 론

지반 내 열전도 현상은 지구온난화에 따른 지반거동 변화 예측, 극한지 기반시설 건설, 지열 냉난방 시스템의 부하 계산 등 다양한 건설 및 환경 분야에서 중요한

고려사항이다(Andersland and Ladanyi, 2004). 열전달 해석에서 가장 중요한 변수인 열전도계수를 산정하는 방법으로 이론과 경험을 바탕으로 한 예측모델이 개발되었으며, 불포화 조립토를 대상으로 지반의 열전도계수를 지배하는 중요한 인자로는 건조밀도, 함수비, 동결상태,

\*Corresponding author: jlee@kict.re.kr

**Table 1.** Physical properties of the sample.

#200 Pass efficiency (%)	Specific Gravity (G <sub>s</sub> )	Liquid Limit (%)	Plastic Limit (%)	Unified Soil Classification System (USCS)
100	2.65	44.36	27.9	CL

포화도, 입자의 크기, 그리고 흙의 구성성분에 의존한다고 밝혀졌다(Kersten, 1949; de Vries, 1952; Woodside and Messmer, 1961; Johansen, 1975). 최근 들어서는 세립토를 대상으로 열전도계수에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 핵폐기물 매립에 사용되는 점토벽체의 열전도계수가 안정성 평가에 중요한 요인이 되기 때문에 이를 정량적으로 정확하게 예측, 평가할 수 있는 기법의 필요성이 제기되고 있다(Gera et al., 1996; Tien et al., 2004; Cortes et al., 2009). 이밖에도 지열 냉난방 시스템에서는 냉난방 부하를 계산하기 위해 고소성 불교란 점토의 열전도계수에 관한 연구가 수행되었다(Baek and An, 2004).

세립토의 열전도계수에 관한 기존 연구에 의하면 열전도계수 측정 장비의 단점으로 인해서 신뢰성 있는 열전도계수 측정 데이터가 부족하다는 문제점들이 제기되고 있다. Abuel-Naga et al. (2008)은 포화된 점토(Bangkok clay)시료를 대상으로 압밀시험을 수행하여 건조밀도의 변화에 따른 열전도계수를 측정하였다. 열전도계수 측정 시 시료의 상단과 하단을 일정온도로 유지하고 시료내부의 온도가 일정하게 유지되는 열평형 상태에서 열전도계수를 측정하였다. 실험결과에 따르면 상단과 하단의 온도구배가 증가할수록 측정된 열전도계수는 증가하는 문제가 있었다. 이러한 배경에는 세립토의 열전도계수를 측정할 때 측정 장치의 장기 발열로 인해 함수비 구배가 발생하여 측정 오차가 발생하기 때문이다(Penner, 1962). Kim et al. (2011)은 포화된 카올리나이트를 대상으로 압밀에 따른 다양한 건조밀도에서 열전도계수를 측정하였다. 기존 열전도계수 측정 장치의 문제점(장기 발열에 따른 함수비 구배)을 보완하기 위해 열전도계수 측정 시 발열시간과 범위를 최소화하는 니들프로브를 사용하고 주변 온도간섭을 최소화하는 아크릴몰드를 사용하여 실험을 진행하였다. 그러나 건조밀도의 변화에 필요한 상재하중 재하장치의 한계로 비교적 낮은 건조밀도(최대건조밀도 1.19 g/cm<sup>3</sup>)에서만 실험이 진행되었고 각 단계별 상재하중이 종료된 시점에서만 열전도계수를 측정하였기 때문에 지속적인 열전도계수의 변화를 확인하기가 어려웠다.

본 연구에서는 기존 연구에서 제시된 열전도계수 측

**Table 2.** XRD test results for kaolinite and silica.

Sample	Mass Fraction (%)		
	Quartz	Kaolin	Muscovite
Silica	100	-	-
Kaolinite	2.6	79.0	18.3

정 장치의 장기 발열에 따른 오차, 상대적으로 낮은 건조밀도로 인한 현장 적용의 한계성, 단계별 하중에 따른 측정치의 불연속성을 극복한 열전도계수 측정 자동화 장비를 개발하였다. 새로운 장비를 활용하여 측정된 열전도계수는 기존 연구에서 검증된 장비를 이용한 열전도계수 측정값과 비교하여 신뢰성을 검토하고, 나아가 경험식과의 비교를 통해 최적의 세립토 열전도계수 예측 방법을 제시하고자 한다.

## 시험 대상 시료

본 연구에서는 카올리나이트와 실리카분말을 1:1(중량기준)로 혼합하여 시료를 제작하였다. 혼합점성토의 비중은 2.65이며, 액소성 시험 결과를 토대로 통일분류법에 따라 CL로 분류되었다(Table 1). X선 회절시험(X-ray Diffraction test, XRD)을 이용하여 각각의 구성광물의 중량백분율을 측정하였다. 분석결과(Table 2)에 따르면 카올리나이트의 경우 석영의 함유량이 2.6%, 카올린 79%, 백운모 18.3%로 구성되어 있으며, 실리카분말의 경우 석영의 함유량이 100%로 측정되었다.

## 시험 장치 및 방법

본 연구에서 사용된 자동화 장비를 활용한 실내시험을 수행하기에 앞서 기존 연구(Kim et al., 2011)에서 사용된 단계별 상재하중에 따른 표준압밀시험을 실시하였다. 두 차례 수행된 시험(Standard#1, Standard#2)의 시료는 카올리나이트-실리카분말을 중량백분율 1:1로 혼합, 증류수를 이용하여 초기 함수비 100% 슬러지 상태의 혼합점성토를 사용하였다. 시험에 사용된 장비와 방법은 기존연구(Kim et al., 2011)를 토대로 하였으며 요약하면 다음과 같다. 시험에서 사용된 몰드는 직경

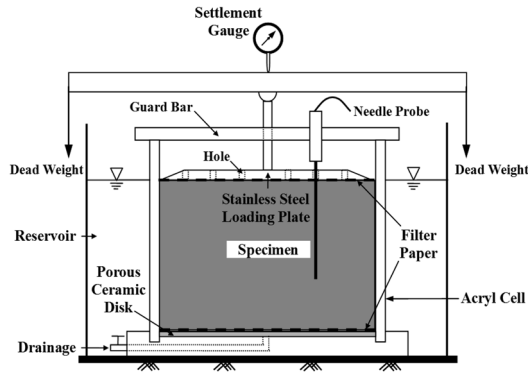


Fig. 1. Apparatus for measuring consolidation and thermal conductivity (Kim et al., 2011).

10 cm, 높이 20 cm이며 1 cm 두께의 투명 아크릴로 제작되었다(Fig. 1). 슬러지 상태의 시료를 몰드에 주입 후 상부가압판을 조심스럽게 올렸다. 24개의 구멍이 뚫려 있는 상부가압판은 열전도계수 측정 시 니들프로브를 수직으로 삽입하는데 필요하고 배수에도 용이하게 사용되었다. 상부가압판은 가드바(Guard bar)를 이용하여 수평을 유지하였다. 배수조건은 수조를 이용하여 시료의 높이와 동일하게 물을 채운 후, 바닥밸브를 열어 양면 배수 상태로 시험을 진행하였다. 표준압밀시험에서는 단계별 하중에 따른 압밀을 확인하고 압밀완료 시점에 열전도계수를 측정하였다. 열전도계수 측정 장비는 상용 측정장비(Quickline-30, ANTER)와 니들프로브이며, 측정범위는 0.0015-6.0 W/mK, 정확도는  $\pm 3\%$ 이다. 길이 120 mm, 지름 3 mm의 니들프로브는 시료의 교란을 최소화하기 위해 하중을 재하하기 전에 수직으로 삽입하였고 압밀에 따른 침하가 진행되는 동안 시료와 함께 움직인다.

열전도계수 측정에 사용된 니들프로브법에서 발생할 수 있는 오차에는 크게 프로브 열전도계수 측정 시 몰드 간섭에 의한 오차와 프로브 자체의 열흐름에서 발생하는 오차로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 열전도계수를 측정하는 평균시간이 720초 정도 소요되므로 니들프로브를 사용하여 열전도계수를 측정함에 있어, 몰드의 간섭(시료 크기의 유한성) 때문에 생기는 영향은 무시하여도 된다. 또한, 본 실험에서 사용되었던 니들프로브의 길이와 직경의 비는 40배 이므로, 프로브의 길이 때문에 발생하는 오차는 크지 않은 것으로 판단된다(Kim et al., 2011).

Fig. 2는 자동화 장비를 보여주고 있다. 압밀시험의



Fig. 2. Constant Rate of Strain (CRS) consolidation apparatus.

경우, 일정변형율(Constant Rate of Strain, CRS) 압밀 시험으로 ASTM D4186-06 (2006)에 준하여 혼합점성토 슬러지를 대상으로 시험을 진행하였다. 우선 시료 준비가 완료되면 상부가압판 위에 기존 표준압밀시험에 사용하는 추를 이용하여 상재하중(seating load) 3.9 kPa를 재하하였다. 이는 장비시료 경계면의 완전한 접촉을 위해 필요하고 일반적으로 사용되는 상재하중(seating load)은 ASTM (2006)에서 5 kPa로 정의하고 있으나, 본 시험에 사용되는 혼합점성토는 초기 슬러지 상태로 5 kPa에서는 많은 침하가 발생하여 비교적 낮은 3.9 kPa를 적용하였다. 변형속도는 ASTM (2006)에서 CL타입 시료의 경우 1%/hr 이하로 제시하고 있으며, 본 시험에서는 0.02 mm/min (0.925%/hr)을 설정하고 프로그램을 이용하여 상재하중을 60초 간격으로 측정하였다. 일정 변형율 압밀시험이 자동적으로 진행되는 동안 열전도계수도 40분 간격으로 연속적으로 측정하였다.

### 포화된 혼합세립토의 유효 열전도계수 산정

Kim et al. (2011)은 지금까지 제시된 열전도계수 산정식을 이용한 예측 결과와 포화된 카올리나이트의 열전도계수 측정값과 비교하여 신뢰성을 분석하였다. 그 결과 De Vries (1952)와 Woodside and Messmer (1961), 그리고 Johansen (1975)의 경험식이 세립토의 열전도계수를 비교적 정확히 예측하였다.

De Vries (1952)의 경험식을 정리하면 다음과 같다.

**Table 3.** Thermal conductivity of minerals (Horai, 1971; Maky and Ramadan, 2010).

Component	(Quartz)	(Kaoline)	(Muscovite)
Thermal Conductivity of Mineral ( $k_m$ , W/mK)	7.7	2.8	2.5

$$k_{eff} = \frac{x_w k_w + F x_s k_s}{x_w + F x_s} \quad (1)$$

$$F = \frac{1}{3} \sum_{a,b,c} \left[ 1 + \left( \frac{k_s}{k_w} - 1 \right) g_a \right]^{-1}, \quad g_a + g_b + g_c = 1 \quad (2)$$

여기서,  $k_{eff}$ 는 유효 열전도계수(W/mK),  $k_w$ 는 간극수의 열전도계수(W/mK),  $k_s$ 는 흙 입자의 열전도계수(W/mK),  $x$ 는 흙의 단위체적에서의 체적비,  $g_a, g_b, g_c$ 는 형상계수이다. De Vries (1952)는 포화도에 대해서는  $g_a = g_b = 0.125$ 라고 제시하였다.

Woodside and Messmer (1961)는 흙을 구성하는 공기, 흙입자, 그리고 간극수의 열전도율을 배분하고 체적 비율에 따른 평균을 통해 열전도계수를 계산하였다. 열의 이동경로는 흙입자가 직접 접촉되어 있는 부분, 액체로 이루어진 부분, 그리고 흙입자와 액체로 이루어진 부분으로 총 3가지 경우로 가정하였으며 포화도에 적용하면 다음과 같다.

$$k_{eff} = (n - 0.03)k_w + (1 - n + 0.03) \times \left[ \frac{1 - n}{1 - n + 0.03} \left( \frac{1}{k_s} \right) + \frac{0.03}{1 - n + 0.03} \left( \frac{1}{k_w} \right) \right]^{-1} \quad (3)$$

여기서,  $n$ 은 간극률을 나타낸다.

Johansen (1975)의 열전도계수 경험식은 흙의 구성요소와 각각의 부피율을 기초로 한 기하평균식을 사용하였고 포화도의 열전도계수 예측모델은 아래 식 (4)와 같다.

$$k_{eff} = k_s^{1-n} k_w^n \quad (4)$$

앞에서 열거한 경험식들을 이용하여 흙의 열전도계수 ( $k_{eff}$ )를 예측하기 위해서는 흙을 구성하는 입자의 열전도계수( $k_s$ )와 간극수의 열전도계수( $k_w$ )를 필요로 한다. 실험에 사용된 간극수의 열전도계수는 상온에서 물의 열전도계수 0.57 W/mK를 사용하였다(Andersland and Ladanyi, 2004). 기존 연구결과에 따르면 흙속에 포함된 미네랄이 열전도계수 결정에 중요한 영향을 미치고 있으며, 특히 석영(quartz)이 다른 미네랄에 비해 열전도계수가 높다는 것을 밝혔다. Johansen (1975)은 석영의 열전도계수만을 다른 미네랄과 구분하여 흙 입자의 열전도계수를 추정하는 식을 제시하고 있다. 그러나 Cote and Konrad (2005)의 연구결과에 따르면 흙을 구성하는

각각의 미네랄 열전도계수의 기하평균(geometric mean)으로 결정하는 방법이 신뢰성이 높다고 제시하고 있다.

$$k_s (W/mK) = \prod_j k_{m_j}^{x_j} \quad \text{with} \quad \sum_j x_j = 1 \quad (5)$$

여기서,  $k_m$ 는 미네랄의 열전도계수,  $j$ 는 입자를 구성하는 미네랄, 그리고  $x_j$ 는 미네랄의 체적백분율이다. 기존 연구에 의하면 체적백분율과 중량백분율은 유사하며, 중량백분율은 X선 회절시험(XRD)을 이용하여 상당히 정확하게 흙 시료의 구성 비율을 결정할 수 있다고 명시하고 있다(Hardy, 1992; Cote and Konrad, 2005). 본 연구에 사용된 시료의 경우, 카올리나이트와 실리카를 1:1로 혼합하여 사용하였으므로 X선 회절시험 결과와 Table 3에서 제시한 미네랄별 열전도계수를 기하평균으로 계산한 4.66 W/mK를 혼합 점성토 입자의 열전도계수( $k_s$ )로 사용하였다(Horai, 1971; Maky and Ramadan, 2010).

$$k_s = 7.7(W/mK)^{0.513} \times 2.8(W/mK)^{0.395} \times 2.5(W/mK)^{0.092} = 4.66 W/mK \quad (6)$$

## 시험 결과 분석

### 시료 조건

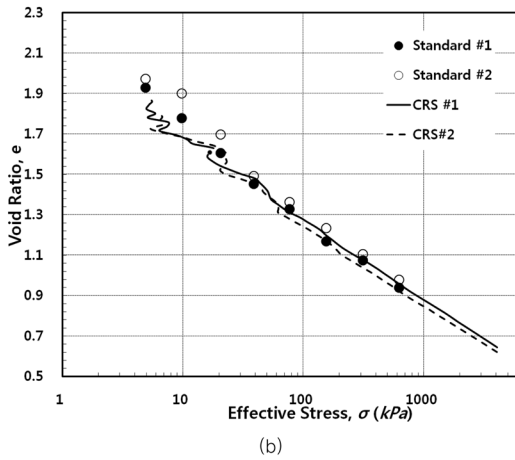
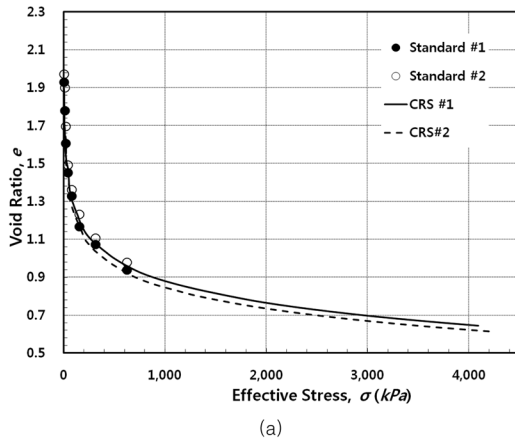
실험의 일관성을 확인하기 위해 각각 두 번(표준압밀 시험: Standard #1, #2와 일정변형을 압밀시험: CRS #1, #2)의 과정을 거쳐서 진행하였다. Table 4에 정리된 바와 같이 표준압밀시험의 측정된 초기 함수비는 108%, 109%의 슬러지 상태로 진행하였으며 최종함수비는 34%, 35%이다. 다양한 건조밀도에서 열전도계수를 측정하기 위해 일정변형을 압밀시험의 경우에는 초기함수비 88%, 89%로 시료를 제작하였고 시험이 완료된 후 최종함수비는 23%, 24%로 측정되었다.

### 압밀시험결과 분석

Fig. 3은 표준압밀시험과 일정변형을 압밀시험을 통해 측정된 압밀곡선을 나타내었다. 두 번의 표준압밀시험(Standard #1, Standard #2)과 두 번의 일정변형을 압밀시험(CRS #1, CRS #2)을 통해 다양한 간극비에서 열전도계수를 측정할 수 있었다. Standard #1, Standard

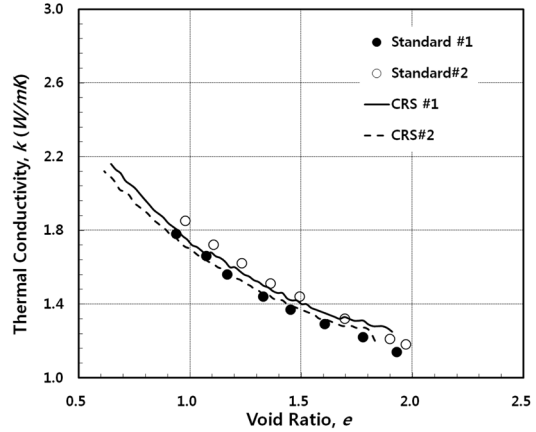
**Table 4.** Summary of consolidation results for saturated unfrozen kaolinite and silica.

	Initial Height (cm)	Final Height (cm)	Initial Water Contents (%)	Final Water Contents (%)
Standard#1	13	6.6	108	35
Standard#2	13	6.8	109	34
CRS#1	16	7.7	89	24
CRS#2	16	7.9	88	23



**Fig. 3.** Consolidation test results, showing consolidation curves with (a) an arithmetic scale, and (b) a semilog scale.

#2 그리고 CRS #1, CRS #2 모두 유사한 압밀곡선을 나타낸 것을 확인할 수 있으며, 이를 토대로 일정변형을 압밀시험에는 문제가 없는 것으로 판단된다. 표준압밀시험을 통해서만 최대 625 kPa의 상재하중을 재하하였지만 일정변형을 압밀시험은 표준압밀시험의 상재하중보다 약 6배 정도 높은 4000 kPa의 상재하중을 재하하였다. 따라서, 최종적으로 표준압밀시험에서 측정 가능한 건조밀도보다 높은 건조밀도까지 열전도계수를 측정할



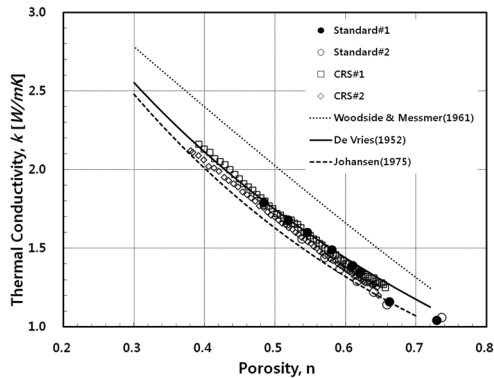
**Fig. 4.** Measured thermal conductivity vs. void ratio curves derived from consolidation tests.

수 있었다. Table 4에 최종 함수비에서도 일정변형을 압밀시험의 시료가 표준압밀시험과 비교하여 약 10% 낮게 나타나 높은 건조밀도를 반영하고 있다. Fig. 3(b)는 압밀곡선을 일반적으로 사용하는 반대수용지에 나타내었다. 초기 상재하중 측정값이 불규칙적인 경향을 나타내고 있으며, 이는 높은 초기 함수비의 슬러지 상태에서 작용하는 상재하중이 미미하여 로드셀에서 측정값 오차가 발생한 것으로 판단된다.

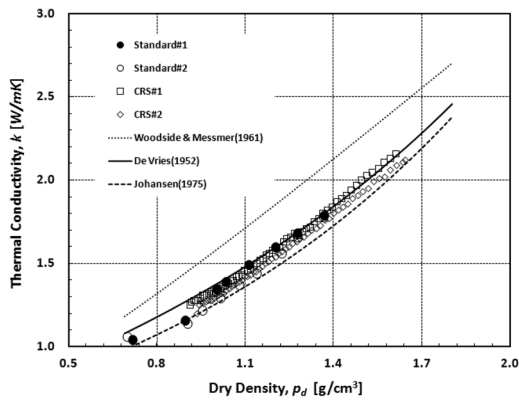
#### 열전도계수 측정 결과 분석

Fig. 4는 압밀시험간 측정된 열전도계수와 간극비의 관계를 보여주고 있다. 단계별 하중에 따른 표준압밀시험 Standard #1과 #2의 결과는 유사하게 나타났으며, 간극비의 감소에 따라 열전도계수가 증가하는 경향을 볼 수 있었다. CRS #1과 #2의 열전도계수 결과도 표준압밀시험에서 측정된 열전도계수와 상당히 유사한 측정값을 볼 수 있었다. 따라서 압밀시험과 열전도계수 측정 결과를 토대로 본 연구에서 개발된 자동화 장비를 활용한 열전도계수 측정의 신뢰성을 확보하였다.

Fig. 5는 압밀시험을 통해 측정된 열전도계수를 보여주고 있다. Fig. 5(a)는 경험식에서 사용되는 변수인 간극률에 따른 열전도계수의 변화를 보여주고 있다. 간극



(a) Porosity versus thermal conductivity



(b) Dry density versus thermal conductivity

**Fig. 5.** Measured and calculated thermal conductivities.

률이 증가할수록 열전도계수는 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 포화된 공극을 차지하고 있는 간극수의 열전도계수(0.57 W/mK)가 흙 입자의 열전도계수(4.66 W/mK)보다 낮기 때문에 공극이 증가할수록(간극률이 증가할수록) 열전도계수는 감소한다. 반면에 Fig. 5(b)에서 보는 바와 같이 건조밀도가 증가할수록 열전도계수는 증가한다. 표준압밀시험에서는 최대건조밀도가 비교적 낮은 1.37 g/cm<sup>3</sup>까지 불연속적으로 열전도계수가 측정되지만, 일정변형을 압밀시험을 이용하면 최대건조밀도 1.64 g/cm<sup>3</sup>까지 연속적으로 열전도계수를 측정 가능하다.

경험식을 이용하여 계산된 열전도계수도 Fig. 5에서 보여주고 있다. Woodside and Messmer의 경험식은 열전도계수를 과대평가하고 있는 반면에 De Vries 경험식은 실험값과 상당히 유사한 결과를 나타내었다. Johansen의 기하평균식은 De Vries 경험식과 비교하여 최대 9% 차이가 있다. 현장에서 열전도계수 예측값이

측정값과 최대 25% 오차 범위에서 허용 가능하다는 기존 연구결과(Farouki, 1986)를 바탕으로 De Vries와 Johansen의 경험식을 이용하여 세립토의 열전도계수를 산정하면 현장에서 사용 가능하다고 판단된다. 또한, 본 연구의 결과는 Sass et al. (1971)이 밝힌 흙을 구성하는 성분들의 열전도계수가 10배 이상 차이가 나지 않을 때에는 다른 경험식들과 비교하여 상대적으로 간편한 열전도계수의 기하평균만으로도 비교적 정확히 예측가능하다는 연구결과를 뒷받침하고 있다.

## 결 론

일정변형을 압밀시험을 통해 건조밀도의 변화에 따른 포화된 세립토의 열전도계수를 측정하였다. 압밀시험에 필요한 상재하중 재하와 열전도계수 측정은 자동화 장비를 이용하여 편의성을 높이고 연속적인 측정을 통해 시험 간 발생할 수 있는 오차 확인이 가능하다는 장점을 확보하였다. 측정된 열전도계수를 토대로 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 표준압밀시험 결과와 일정변형을 압밀시험을 활용한 열전도계수 측정 결과의 비교를 통해 본 연구에서 사용된 자동화 장비의 신뢰성을 확보하였다. 또한 최대 건조밀도 1.64 g/cm<sup>3</sup> 이상에서도 열전도계수 측정이 가능하여 현장과 유사한 조건에서 세립토의 열전도계수 평가에 활용 가능하다.

2) De Vries의 경험식과 Johansen의 경험식은 흙의 구성성분이 차지하는 체적분율에 따른 열전도계수의 평균값으로 비교적 정확하게 포화된 세립토의 열전도계수를 예측하고 있다. 기존 연구에서 명시된 바와 같이 흙을 구성하는 성분들의 열전도계수가 10배 이상 차이가 나지 않을 때에는 다른 경험식들과 비교하였을 때, 상대적으로 간편한 열전도계수의 기하평균만으로도 정확한 예측이 가능하다.

## 사 사

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(극한지 지반 안정화 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Abuel-Naga, H.M., Bergado, D.T. and Bouazza, A., 2008, Thermal Conductivity Evolution of Saturated Clay under Consolidation Process, International Journal

of Geomechanics, 8(2), 114-122.

Andersland, O.B. and Ladanyi, B., 2004, Frozen ground engineering, John Wiley & Sons, Inc., 2nd Ed., Hoboken, New Jersey, 1-55.

ASTM, 2006, Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils Using Controlled-Strain Loading, ASTM D4186-06.

Baek, S.K. and An, H.J., 2004, A Study on Thermal Conductivity of High Plasticity Clay, KSCE Journal of Civil Engineering, 24(5C), 267-272.

Cortes, D.D., Martin, A.L., Yun, T.S., Francisca, F.M., Santamarina, J.C. and Ruppel, C., 2009, Thermal conductivity of hydrate-bearing sediments, Journal of Geophysical Research, 114, B11103, doi:10.1029/2008JB006235.

Cote, J. and Konrad, J.M., 2005, A Generalized Thermal Conductivity Model for Soils and Construction Materials, Canadian Geotechnical Journal, 42(2), 443-458.

De Vries, D.A., 1952, The thermal conductivity of soils, Mededelingen van de Landbouwhogeschool te Wageningen, 52(1), 1-73.

Farouki, O.T., 1986, Thermal Properties of Soils, Series on Rock and Soil Mechanics, Trans Tech, Germany, 11, 102-124.

Gera, F., Hueckel, T. and Peano, A., 1996, Critical Issues in Modelling of the Long-Term Hydro-Thermal Performance of Natural Clay Barriers, Engineering Geology, 41, 17-33.

Hardy, M., 1992, X-ray Diffraction Measurement of the Quartz Content of Clay and Silt Fraction in Soils, Clay Minerals, 27(1), 45-55.

Horai, K., 1971, Thermal Conductivity of Rock-Forming Minerals, Journal of Geophysical Research, 76(5), 1278-1308.

Johansen, O., 1975, Thermal Conductivity of Soils, Ph. D. dissertation, Trondheim, Norway. U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory(CRREL) Draft Translation 637, Hanover, N.H., 1977, 248-253.

Kersten, M.S., 1949, Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils, ACFEL Technical Report 23, 153-182.

Kim, H.S., Lee, J., Kang, J.M., Kim, Y.S. and Hong, S.S., 2011, Thermal Conductivity of Saturated Unfrozen Kaolinite during Consolidation, KSEG The Journal of Engineering Geology, 21(2), 157-162.

Maky, A.F. and Ramadan, A.M., 2010, Thermal Conductivity, Radiogenic Heat Production and Heat Flow of Some Upper Cretaceous Rock Units, North Western Desert, Egypt, Journal of Applied Sciences Research, 6(5), 483-510.

Penner, E., 1962, Thermal Conductivity of Saturated Leda Clay, Geotechnique, 12(2), 168-175.

Sass, J.H., Lachenbruch, A. H. and Munroe, R.J., 1971, Thermal conductivity of rocks from measurements on fragments and its application to heat-flow determination. Journal of Geophysical Research, 76(14), 3391-3401.

Tien, Y.M., Wu, P.L., Chuang, W.S. and Wu, L.H., 2004, Micromechanical Model for Compaction Characteristics of Bentonite-Sand Mixtures, Applied Clay Science, 26, 489-498.

Woodside, W. and Messmer, J.M., 1961, Thermal conductivity of porous media, Journal of Applied Physics, 32(9), 1688-1706.

---

원고접수일 : 2012년 7월 18일

수정본채택 : 2012년 8월 10일

게재확정일 : 2012년 8월 13일

#### 김학승

국민대학교 건설시스템공학부 지반연구실  
136-702, 서울특별시 성북구 정릉로77  
Tel: 02-910-5054  
E-mail: zeckimhs@kict.re.kr

#### 권형석

국민대학교 건설시스템공학부 지반연구실  
136-702, 서울특별시 성북구 정릉로77  
Tel: 031-910-5054  
E-mail: khs4129@hanmail.net

#### 이장근

한국건설기술연구원 Geo 인프라연구실  
411-712, 경기도 고양시 일산서구 시민대로 1190  
Tel: 031-910-0791  
Fax: 031-910-0211  
E-mail: jlee@kict.re.kr

#### 조남준

국민대학교 건설시스템공학부  
136-702, 서울특별시 성북구 정릉로77  
Tel: 02-910-4699  
E-mail: njcho@kookmin.ac.kr

#### 김현기

국민대학교 건설시스템공학부  
136-702, 서울특별시 성북구 정릉로77  
Tel: 02-910-4692  
E-mail: geotech@kookmin.ac.kr