

지중열교환기 수직 보어홀 및 수평 트렌치 뒤채움재로서 모래-물 혼합물의 열전도도 측정

손 병 후[†]

한국건설기술연구원 화재 및 설비연구센터

Thermal Conductivity Measurement of Sand-Water Mixtures Used for
Backfilling Materials of Vertical Boreholes or Horizontal Trenches

Byonghu Sohn[†]

Fire and Engineering Services Research Center, KICT, Hwaseong, 445-861, Korea

(Received March 6, 2008; revision received April 14, 2008)

ABSTRACT: This paper presents the results of a laboratory study on the thermal conductivity of sand (silica, quartzite, limestone and masonry sand)-water mixtures used in ground heat exchanger backfilling materials. Nearly 150 tests were performed in a thermal conductivity measuring system (TPSYS02) to characterize the relationships between the thermal conductivity of mixtures and the water content. The results show that the thermal conductivity of mixtures increases with increasing dry density and with increasing water content. The results also show that for constant water contents and a dry density value, the thermal conductivity of mixtures increases with increasing thermal conductivity of solid particles. The measurement results were also compared with the most widely used empirical prediction models for the thermal conductivity of soils.

Key words: Thermal conductivity(열전도도), Sand-water mixture(모래-물 혼합물), Ground heat exchanger(지중열교환기), Backfilling material(뒤채움재), Transient hot probe method (비정상 탐침법)

기호설명

c	: 식(4)에서 상수 1.78
k	: 열전도도 [W/mK]
k_r	: 무차원 열전도도, 식(9)와 식(10) [-]
q	: 열선의 단위 길이당 발열량 [W/m]
r	: 열선 반경 또는 반경방향으로 거리 [m]
S_r	: 포화도 [-]
T	: 온도 [°C, K]
ΔT	: 온도차 또는 열선의 온도 상승 [°C, K]

t	: 시간 [s]
w	: 수분함량 또는 함수비 [%]

그리스 문자

α	: 열확산계수 [m^2/s]
γ	: Euler 상수 0.5772
ϕ	: 간극률(porosity) [-]
ρ	: 밀도 [kg/m^3]

하첨자

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-369-0511; fax: +82-31-369-0540

E-mail address: byonghu@kict.re.kr

d : 건조상태(dry state)

- m* : 혼합물(mixture) 또는 매질(medium)
s : 고체 입자(solid particle)
sat : 포화상태(saturated state)

1. 서 론

지중 토양의 열·물리적 성질 중 열전도도는 도로·비행장·건축물·각종 배관 등의 시설뿐만 아니라 지중에 매설되는 동력 케이블·냉온수 수송관·가스 수송관 등을 설치하기 위한 설계 과정에서 중요한 입력 정보다. 예를 들면, 도로·비행장 등의 포장 설계나 건축물 기초를 비롯하여 각종 구조물의 기초를 설계할 때 동결심도(freezing depth)를 계산하는데 이때 지중 토양의 열전도도가 중요한 인자다. 또한 지중에 매설된 동력 케이블에서 열이 발생할 때, 이 열을 빨리 발산 시켜야 케이블이 과열되는 것을 방지할 수 있다. 반면, 온수 수송관인 경우에는 관 주변으로 열이 손실되는 것을 최대한 줄여야 한다. 이 경우에도 지중 토양의 열전도도는 매우 중요한 인자 중 하나다.

근래 들어 신·재생에너지 활용에 대한 관심 증가와 함께 냉난방 겸용 시스템인 지열원 열펌프 시스템(ground-source heat pump systems)도 많은 관심을 받고 있다. 이 시스템의 구성 요소 중, 지중열교환기(ground heat exchanger)는 전체 시스템의 성능과 초기 투자비를 결정하는 중요 기기로서 수직형(vertical type)과 수평형 방식(horizontal type)으로 구분된다. 두 방식은 모두 열교환기 순환유체와 열교환기 주위 토양간의 열전달이 원활할 때 최적 성능을 발휘할 수 있다. 이 경우에도 지중 열전도도는 매우 중요한 변수이며, 이 값에 따라 지중열교환기의 사양이 결정된다. 따라서 지중열교환기를 최적 설계하기 위해 지중 열전도도를 정확하게 산정한 후 이 값을 설계에 적용해야 한다.

지중 열전도도를 산정하기 위해 시공 과정에서 획득한 시료를 실험실에서 측정하거나 현장에서 직접 측정하는 방법을 적용할 수 있다. 수직형 지중열교환기인 경우, 수직으로 천공된 보어홀(borehole) 안에 주변 토양이나 암반에 비해 상대적으로 낮은 열전도도를 갖는 뒤채움재(주로 벤토나이트-모래-물 혼합물)를 주입하기 때문에 현장에서 직접 측정하는 방법을 주로 채택하고 있다.^{(1), (2)} 이러한 현

장 시험에 의한 지중 열전도도 산정⁽³⁻⁵⁾이나 뒤채움재(벤토나이트계열과 시멘트 계열) 자체의 열물성 측정⁽⁶⁻⁹⁾과 관련된 다양한 연구결과들이 국내외에서 발표되었다.

반면 모래-물 혼합물과 같은 천연재료의 열전도도 측정이나 수평형 지중열교환기의 성능분석에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 수준이다. 일반적으로, 수평형 지중열교환기는 1.5~3m 깊이로 굴착된 골(trench)에 파이프를 매설한 후, 흙이나 모래 등을 채워 시공된다. 따라서 토양 성분, 수분함량(water content), 다짐 정도(compaction) 등 다양한 인자들이 수평형 지중열교환기의 성능에 영향을 미친다. 특히 제주지방에 수직형 지중열교환기를 시공할 경우, 이 지역의 지반특성상 벤토나이트계열 뒤채움재를 사용할 수 없기 때문에 모래와 같은 천연재료를 물과 혼합하여 주입할 수밖에 없다.

본 연구에서는 수직형 지중열교환기 보어홀이나 수평형 지중열교환기 트렌치의 뒤채움재로 사용되는 모래-물 혼합물의 열전도도를 비정상 탐침법(transient hot probe method 또는 needle probe method)을 적용하여 측정하였다. 이때 시료를 건조상태(모래-공기)와 완전 포화상태(모래-물)의 2성분 혼합물과 모래-공기-물로 구성된 3성분 혼합물로 구분하였다. 2성분 혼합물인 경우 시료의 간극률이 그리고 3성분 혼합물인 경우 간극률·수분함량·입자의 열전도도가 각 혼합물의 열전도도에 미치는 영향을 고찰하였다. 아울러 3성분 혼합물 시료에 대해서는 측정 결과와 기존 상관식으로 계산한 결과를 비교하였다.

2. 측정 이론 : 비정상 탐침법

비정상 탐침법은 시료에 삽입된 탐침(열선)에 열량을 일정하게 공급할 때, 직선으로 나타나는 시간 대 열선의 온도상승 관계($\text{Int}-\Delta T$)에서 직선의 기울기와 공급 열량 등을 이용하여 열전도도를 구하는 방법이다. 이러한 탐침법은 무한 선형열원 이론(infinite line-source theory)⁽¹⁰⁾에 기초를 두고 있다. 즉, 초기온도가 균일한 매질(medium) 속의 열선으로부터 반경방향으로 전도에 의해서만 열이 전달되는 1차원 열전도 문제에서 출발하며 다음과 같이 표현된다.

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

이때 열선의 단위 길이당 발열량(공급 열량)이 q 일 때, 반경 방향의 임의 지점에서 온도분포를 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

식(2)에서 적분변수 $x_0(r^2/4\alpha t)$ 가 매우 작기 때문에 지수적분 항을 식(3)의 근사식으로 표현할 수 있으며, 다시 식(3)을 식(2)에 대입하여 정리하면 식(4)의 선형열원 모델을 얻을 수 있다.

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

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

여기서 시간의 자연로그 값($\ln t$)에 대하여 열선의 온도 상승을 도시할 경우, 식(4)는 직선 형태를 보인다. 따라서 식(4)의 기울기와 평균 열 공급량 등을 다음 식(5)에 대입하면 시료의 열전도도를 산정할 수 있다.

$$k_m = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{T_2 - T_1} \quad (5)$$

3. 측정 장비 및 방법

3.1 측정 장비

본 연구에서는 Fig. 1에 도시한 상용 측정 시스템(TPSYS02, Hukseflux)을 이용하여 혼합물 시료의 열전도도를 측정하였다. 측정 시스템은 제어기 역할을 하는 본체(MCU, Hukseflux), 열선(heating wire)과 열전대(K-type thermocouple)가 내장된 탐침(TP02, Hukseflux), 시료(samples) 그리고 데이터 저장용 컴퓨터 등으로 구성되어 있다. 측정 시스템의 열전도도 측정 범위는 0.1~6.0 W/mK이며, 정확도는 $\pm 3\%$ 이다. 여기에 열적 감도오차는 $\pm 0.02\%/\text{°C}$ 이다.

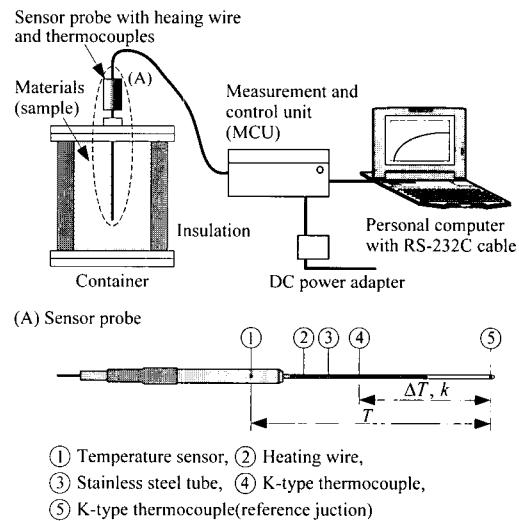


Fig. 1 Experimental apparatus and sensor probe for measuring thermal conductivity of sand-water mixtures.

Fig. 1의 탐침(sensor probe)에서 시료와 접촉하는 부분의 길이와 직경은 각각 150 mm와 1.5 mm이며, 재질은 스테인리스강이다. 이 탐침 안에 2개의 열전대 접점이 용접되어 있다. 두 열전대 중, 탐침 끝에 용접되어 있는 열전대(⑤)는 시료의 초기 온도를 그리고 열선(②)에 용접되어 있는 열전대(④)는 열선의 표면온도를 측정한다.

측정 중, 열선에 공급되는 열(q)은 열선 주변으로 전파되며, 이때 두 열전대 접점에서 온도를 측정한다. 최종적으로 시간 경과와 온도차 그리고 공급 열량을 식(5)에 대입하여 시료의 열전도도를 산정하게 된다.

시료를 담는 용기(container)의 직경과 높이는 각각 100 mm와 200 mm이며, 재질은 스테인리스강이다. 아울러 용기의 상판(upper plate)에 포트를 설치하여 탐침을 삽입할 수 있도록 하였다. 또한 실제 측정에서는 주변으로 열이 손실되는 것을 방지하기 위해, 용기 바깥 면을 충분히 단열처리 하였다.

본 측정에 앞서, 측정 시스템의 신뢰성과 측정 결과의 재현성을 확인하기 위해, Table 1의 기준 시료를 대상으로 상온에서 열전도도를 측정한 후 문현⁽¹¹⁾에 제시된 값과 비교하였다. 각 기준 시료의 열전도도는 7회 측정한 결과를 평균한 값이

Table 1 Thermal conductivity measurement results of standard reference materials

Reference materials	k [W/mK]		Error [%]
	Literature value ⁽¹¹⁾	Measured value	
Glycerin	0.286	0.281	±2.10
Water	0.600	0.608	±1.67

며, ±2.5% 내에서 문헌⁽¹¹⁾ 값과 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

3.2 시료 및 측정 방법

측정에 사용된 시료는 불연속체로 고체 입자와 입자 사이의 간극(pore)에 존재하는 물질에 따라 건조상태의 모래-공기 혼합물(이하 '건조 시료'), 완전 포화상태의 모래-물 혼합물(이하 '포화 시료') 그리고 모래-공기-물 성분이 모두 혼합된 3 성분 혼합물(이하 '불포화 시료')로 구분된다.

본 연구에서는 혼합물의 주재료인 모래로 천연 규사(silica sand), 인조규사(quartzite sand), 인조 석회사(limestone sand), 건축용 강모래(masonry sand)를 사용하였다. 각 모래의 입자크기는 0.02~

2 mm이며, 체분석을 통해 균등한 입자 크기를 갖는 모래를 주재료로 사용하였다. 체분석, 건조 시료의 밀도 측정, 포화 시료와 불포화 시료의 수분 함량 측정 등은 한국표준규격⁽¹²⁻¹⁵⁾을 따랐으며, 측정에 사용된 시료의 입자밀도와 열전도도(k_s), 건조밀도, 간극률(porosity), 수분함량(water content)의 범위 등을 Table 2에 정리하였다.

시료의 제조와 측정 순서는 다음과 같다. 먼저 일정한 다짐압력으로 압축한 시료를 105~110°C의 가열로(electric oven)에서 24시간 동안 가열한 후, 시료의 건조밀도(dry density)를 저울을 이용하여 결정하고 열전도도를 측정한다. 다음으로 시료 고체입자의 밀도와 건조밀도를 이용하여 간극률을 구한다. 이어서 시료가 완전 포화상태가 되도록 물을 혼합한 후, 열전도도를 측정한다. 마지막으로 부분적인 건조를 통해 불포화 상태의 시료를 제조한 후, 열전도도를 측정한다. 이 과정을 다짐압력을 달리하면서 반복한다.

실험 초기의 시료 온도(열선 온도), 열선에 공급되는 전류와 전압, 열선의 온도 상승 등을 1초 간격으로 90초 동안 측정하여 데이터 획득 시스템에 저장하였으며, 준비한 각 시료를 대상으로 7회 측정하였다. 또한 한 번의 측정을 완료한 후, 열선과 시료 내의 온도가 최초 측정 시의 온도까

Table 2 Mass-volume properties of the materials tested and conditions of the tests

Materials	ρ_s [kg/m ³]	k_s [W/mK]	ρ_d [kg/m ³]	ϕ [-]	Range of water content, w [%]	Number of tests
Silica sand	2650.0	6.95	1985.5	0.25	0~12.62	8
			1875.9	0.29	0~15.56	8
			1764.3	0.33	0~18.93	9
			1652.8	0.38	0~22.76	10
Quartzite sand	2650.0	5.38	1933.4	0.27	0~13.98	9
			1862.8	0.30	0~15.94	9
			1759.3	0.34	0~19.10	9
			1634.3	0.38	0~23.44	10
Limestone sand	2735.0	3.09	1993.7	0.27	0~13.59	9
			1878.5	0.31	0~16.66	8
			1763.4	0.36	0~20.14	9
			1678.7	0.39	0~22.99	10
Masonry sand	2650.0	5.01	1931.7	0.27	0~14.03	9
			1792.2	0.32	0~18.05	8
			1708.6	0.36	0~20.78	9
			1597.0	0.40	0~24.87	10

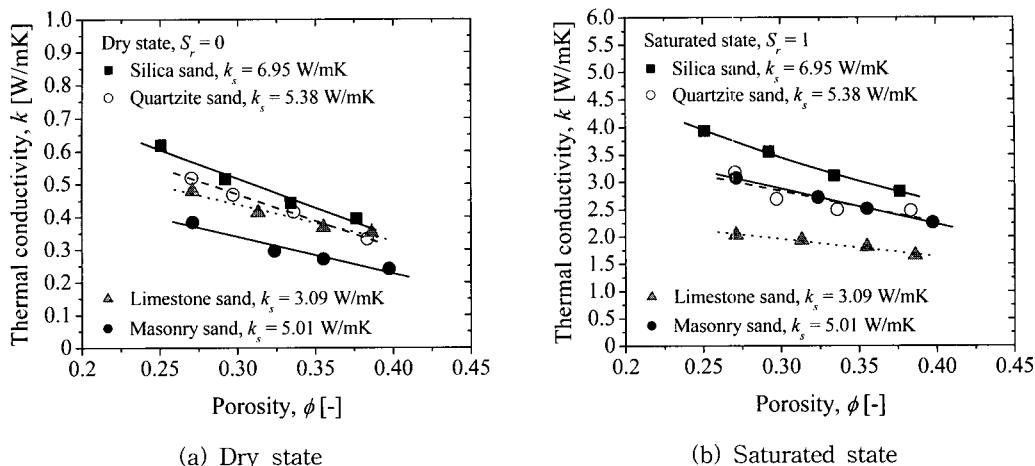


Fig. 2 Thermal conductivity of dry and saturated mixtures as a function of porosity.

지 회복될 수 있도록, 15~20분의 자연 시간을 두고 다음 측정을 수행하였다. 측정 결과의 오차를 최소화하기 위해 실내 온도를 20~22°C로 일정하게 유지하였다.

Kline⁽¹⁶⁾이 제안한 방법에 따라, 측정 결과에 영향을 미치는 데이터와 변수의 편차들을 조합하여 열전도도의 상대 불확실도(uncertainty)를 계산한 결과 ±3.03%였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 건조 시료와 포화 시료의 열전도도

Fig. 2는 건조 시료($S_r = 0$)와 포화 시료($S_r = 1$)의 열전도도를 간극률(ϕ)의 함수로 나타낸 것이다. 여기서 간극률은 시료의 전체 체적에 대한 간극 체적의 비로 정의되며, 다음 식으로 계산된다.

$$\phi = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (6)$$

Fig. 2에서 간극률이 증가할수록 즉, 입자와 입자 사이의 간극이 클수록 각 시료의 열전도도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 2성분 혼합물 시료의 간극 내 물질(공기와 물)은 고체 입자보다 상대적으로 작은 열전도도 값을 갖기 때문이다. 또한 건조 시료보다 포화 시료의 열전도도가 크게 나타났다. 아울러 간극률이 같을 때, 입자의 열전

도도(k_s)가 클수록 시료의 열전도도는 크게 나타났다. 이상으로부터 2성분 혼합물 시료의 열전도도는 간극의 크기와 함께, 간극 내 물질 그리고 입자 열전도도 등에 크게 좌우됨을 확인할 수 있다.

4.2 불포화 시료의 열전도도

Fig. 3은 3성분(모래-공기-물) 불포화 시료의 열전도도에 대한 전형적인 측정 결과를 수분함량(w)의 함수로 표현한 것이다. 여기서 수분함량은 함수비와 같은 의미이며, 불포화 시료의 간극에 존재하는 물의 질량을 건조 시료의 질량으로 나눈 값으로 백분율(%)로 나타낸다. 그림에서 수분

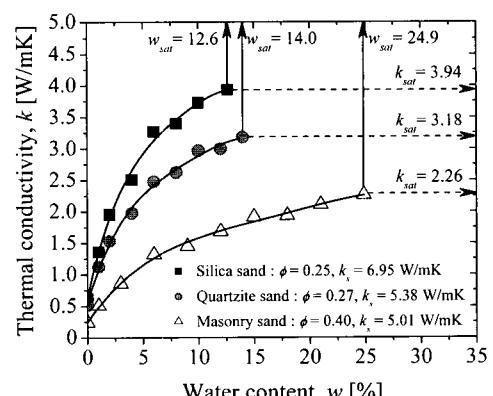


Fig. 3 Thermal conductivity of sand-water mixtures as a function of water content.

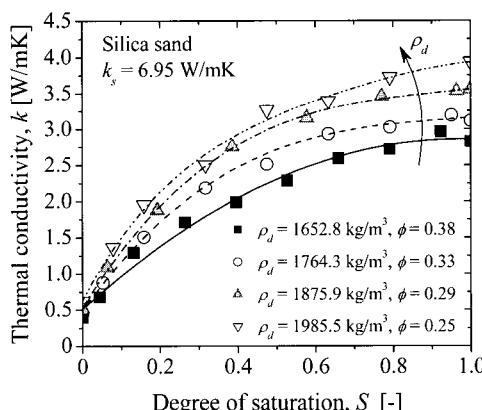
함량 값이 0인 경우는 완전 건조상태(건조 시료)를 의미하며, w_{sat} 은 완전 포화상태(포화 시료)의 수분함량 값을 의미한다. 전체적으로 불포화 시료의 열전도도는 건조 시료와 포화 시료의 열전도도 값 사이에 있음을 확인할 수 있다. 또한 앞의 2성분 시료와 마찬가지로, 간극률이 유사한 경우(silica 대 quartzite)에는 입자의 열전도도가 그리고 입자의 열전도도가 유사한 경우(quartzite 대 masonry)에는 간극률이 혼합물의 열전도도 변화에 큰 영향을 미침을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 불포화 시료의 열전도도 측정 결과를 포화도(degree of saturation, S_r)와 시료의 건조밀도를 함수로 하여 나타낸 것이다. 앞서 Fig. 3에서 보듯이, 시료의 간극률(또는 건조밀도)에 따

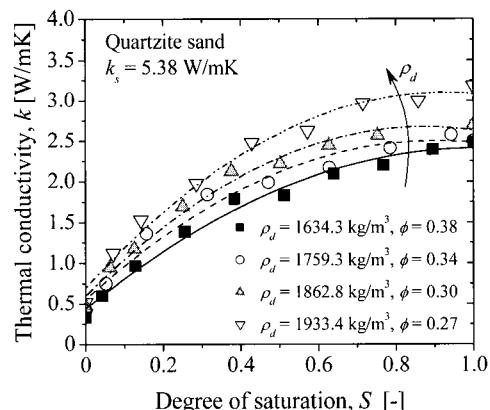
라 완전 포화상태의 수분함량 값은 다르게 나타난다. 따라서 모래 입자 사이의 간극 체적 중, 물이 차지하는 체적의 비율을 포화도라고 정의하고 이 값을 이용하여 비교하는 것이 편리하다. 여기서 포화도는 수분함량과 간극률 그리고 시료의 건조밀도와 물의 밀도를 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$S_r = \frac{w}{100} \frac{\rho_d}{\phi \rho_w} \quad (7)$$

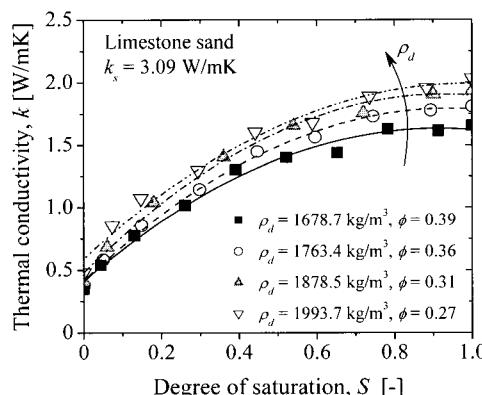
Fig. 4에서 각각의 불포화 시료의 열전도도는 포화도가 증가할수록, 즉 간극 내 수분함량이 증가할수록 증가하였다. 아울러 포화도가 같은 경



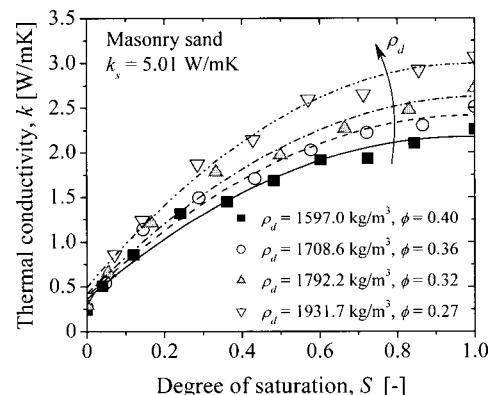
(a) Silica sand



(b) Quartzite sand



(c) Limestone sand



(d) Masonry sand

Fig. 4 Thermal conductivity of sand-water mixtures as a function of degree of saturation(S_r) and dry density(ρ_d).

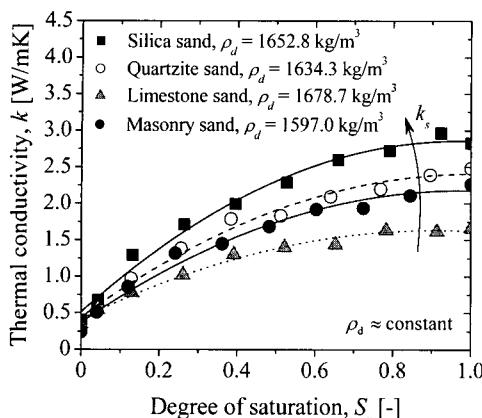


Fig. 5 Thermal conductivity of sand-water mixtures as a function of degree of saturation(S_r) and thermal conductivity of solid particles(k_s).

우 건조밀도가 증가할수록, 즉 간극률이 감소할수록 시료의 열전도도는 증가하였다.

Fig. 5는 불포화 시료의 열전도도 변화를 포화도와 고체 입자의 열전도도(k_s)의 함수로 표현한 것이다. 그림에서 포화도와 시료의 건조밀도가 동일할 경우, 불포화 시료의 열전도도는 모래 입자의 열전도도에 영향을 받는 것을 볼 수 있다. 따라서 각 시료의 열전도도 차이는 결국 주재료인 고체 입자의 열전도도와 밀접한 관련이 있음

을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 기존 상관식에 의한 열전도도 계산 결과와 측정 결과를 비교한 것이다. Kersten⁽¹⁷⁾은 여러 종류의 토양(soil)에 대해 동결 상태(frozen state)와 미동결 상태(unfrozen state)에서 수분함량을 달리하여 열전도도를 측정한 후 상관식을 도출하였다. 이때 크기가 0.05 mm 이하인 입자의 함유량이 50% 이상인 시료를 실트-점토질토(silt-clay soils)로, 50% 미만인 경우에는 사질토(sandy soil)로 구분하였다. 본 실험의 시료와 유사한 미동결 사질토(unfrozen sandy soil)에 대한 상관식은 다음과 같다.

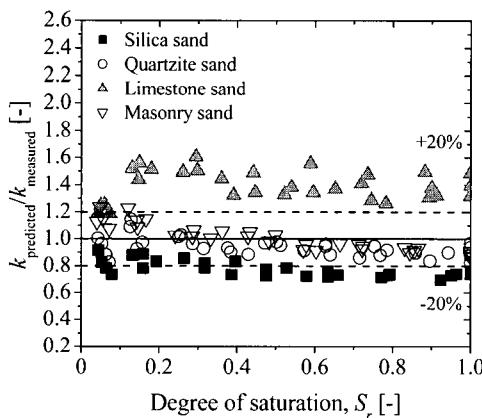
$$k = 0.1442 [0.7\log(w) + 0.4] \times 10^{0.6243\rho_d} \quad (8)$$

식(8)에서 건조밀도인 ρ_d 의 단위는 g/cm³이다. Johansen(18)은 동일한 건조밀도를 갖는 건조 토양과 포화 토양의 열전도도를 이용하여 불포화 토양의 열전도도(k)를 예측할 수 있는 상관식을 다음과 같이 제시하였다.

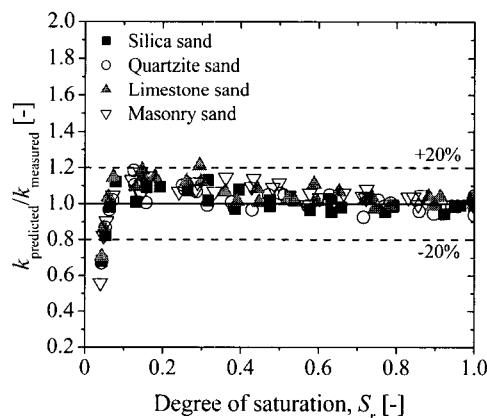
$$k_r = \frac{k - k_d}{k_{sat} - k_d} \quad (9)$$

$$k_r = 0.7\log(S_r) + 1 \quad (10)$$

식(10)에서 k_r 은 포화도의 함수로 주어지는 무차원 열전도도(normalized thermal conductivity)를



(a) Kersten model



(b) Johansen model

Fig. 6 Comparison between the measurement results and the existing correlations for the thermal conductivity of soils.

의미한다.

식(9)에서 건조상태의 인조토양(crushed rocks)의 열전도도는 식(11)로 그리고 건조상태의 천연토양(natural soils)의 열전도도는 식(12)로 각각 계산되며, 포화 토양의 열전도도는 식(13)으로 계산된다.

$$k_d = 0.039\phi^{-2.2} \pm 25\% \quad (11)$$

$$k_d = \frac{0.135\rho_d + 64.7}{2700 - 0.947\rho_d} \pm 20\% \quad (12)$$

$$k_{sat} = k_s^{(1-\phi)} k_w^\phi \quad (13)$$

식(13)에서 k_w 는 물의 열전도도(0.60 W/mK)이며, k_s 는 고체 입자(모래 입자)의 열전도도로서 석영(quartz) 함량에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$k_s = k_q^q \times 2.0^{(1-q)} \text{ for } q > 20\% \quad (14)$$

$$k_s = k_q^q \times 3.0^{(1-q)} \text{ for } q \leq 20\% \quad (15)$$

식(14)와 식(15)에서 k_q 는 석영의 열전도도이며, 값은 7.69 W/mK 이다.

Fig. 6에서 보듯이, Kersten모델에 의한 계산결과는 실험결과와 큰 차이를 보인 반면, Johansen모델은 상대적으로 잘 일치하였다. 하지만 포화도가 낮은 영역($S_r < 0.4$)에서 Johansen모델은 의한 계산결과도 실험결과와 다소 차이를 보였다. 이는 포화도가 낮은 영역, 즉 3성분 혼합물의 간극에 물보다 공기가 더 많은 혼합물이 열전도도에 민감하기 때문에 이와 같은 결과가 도출된 것으로 판단된다. 기존 모델에 대해 Farouki⁽¹⁹⁾는, 미동결사질토의 포화도가 0.2(20%) 이상일 때, Johansen모델이 Kersten모델보다 더 정확하며, 광범위하게 적용될 수 있다고 평가하였다. 이는 본 측정 결과와 유사한 결과라고 할 수 있다.

결론적으로 Johansen모델은 시료의 성질에 상관없이 Kersten모델보다 상대적으로 정확한 값을 예측할 수 있다. 하지만 고체 입자의 석영 함량 값을 알아야만 적용할 수 있으며, 아울러 포화도가 낮은 영역에서는 오차가 다소 크다는 단점도 있다. 따라서 다양한 종류의 시료를 대상으로 완전 건조상태와 포화도가 낮은 상태에서 열전도도를 측정한 후, 현장에서 쉽게 적용할 수 있는 상관식을 도출할 필요가 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 수직형 지중열교환기 보어홀이나 수평형 지중열교환기 트렌치의 뒤채움재로 사용되는 모래-물 혼합물의 열전도도를 비정상 탐침법을 적용하여 측정하였다. 이때 시료를 건조상태(모래-공기)와 완전 포화상태(모래-물)의 2성분 혼합물과 모래-공기-물로 구성된 3성분 혼합물로 구분하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 건조 시료와 포화 시료의 열전도도는 간극률(ϕ)이 증가할수록 즉, 입자와 입자 사이의 간극이 클수록 감소하였다.

(2) 모래-공기-물로 구성된 불포화 혼합물 시료의 열전도도는 포화도(S_r)가 증가할수록, 즉 간극 내 수분함량(w)이 증가할수록 증가하였다. 아울러 포화도가 같을 경우 건조밀도(ρ_d)가 증가할수록, 즉 간극률이 감소할수록 시료의 열전도도는 증가하였다.

(3) 포화도와 건조밀도가 동일할 경우, 3성분 혼합물을 구성하는 모래 입자의 열전도도(k_s)가 클수록 불포화 시료의 열전도도 값도 크게 나타났다.

(4) 기존 모델 중, Johansen모델은 Kersten모델보다 상대적으로 잘 일치하였다. 하지만 포화도가 낮은 영역($S_r < 0.4$) 영역에서는 본 실험결과와 다소 차이가 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부/에너지관리공단의 2006년 신·재생에너지 기술개발사업(2006-N-GE02-P-02)에 의해 수행되었습니다. 아울러, 본 논문의 일부 내용은 대한설비공학회 2007 하계학술발표대회에서 발표한 내용(07-S-043)입니다.

참고문현

- IGSHPA, 2000, Grouting for vertical geothermal heat pump systems : engineering design and field procedures manual, International Ground Source Heat Pump Association, Stillwater, Oklahoma.
- Salomone, L. A. and Marlowe, J. I., 1989, Soil and rock classification for the design of ground -coupled heat pump systems : field manual, Special Report(EPRI CU-6600), Electric Power

- Research Institute.
3. Sohn, B. H., Shin, H.-J. and Park, S. K., 2005, Evaluation of effective thermal conductivity and thermal resistance in ground heat exchanger boreholes, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 17, No. 8, pp. 695-703.
 4. Lee, S. K., Woo, J. S., Ro, J. D. and Kim, D. K., 2006, A study on the estimation of soil formation thermal conductivities and borehole resistances with one-dimensional numerical model and in-situ field tests, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 18, No. 10, pp. 783-790.
 5. Sohn, B., 2007, Evaluation of ground effective thermal conductivity and borehole effective thermal resistance from simple line-source method, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 19, No. 7, pp. 512-520.
 6. Zhang, Q. and Murphy, W. E., 2000, Measurement of thermal conductivity for three borehole fill materials used for GSHP, *ASHRAE Transactions*, Vol. 106, pp. 434-441.
 7. Kavanaugh, S. P. and Allan, M. A., 1999, Testing of thermally enhanced cement ground heat exchanger grouts, *ASHRAE Transactions*, Vol. 105, pp. 446-450.
 8. Lim, H. J., Kong, H. J., Song, Y. S. and Park, S. K., 2005, Thermal conductivity measurement of grouting materials for geothermal heat exchanger, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 17, No. 4, pp. 364-369.
 9. Sohn, B. H. and Shin, H.-J., 2006, Thermal conductivity measurement of grouting materials for ground heat exchanger borehole, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 18, No. 6, pp. 493-500.
 10. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, *Conduction of Heat in Solids*, 2nd ed., Oxford University Press.
 11. Rohsenow, W. M., 1973, *Handbook of Heat Transfer*, McGraw-Hill, New York.
 12. KSA, 2002, KS F 2302 : 2002 Test method for particle size distribution of soils, Korean Standards Association.
 13. KSA, 2000, KS F 2306 : 2000 Test method for water content of soils, Korean Standards Association.
 14. KSA, 2006, KS F 2308 : 2006 Test method for density of soil particles, Korean Standards Association.
 15. KSA, 2006, KS F 2324 : 2006 Method of classification of soils for engineering purposes, Korean Standards Association.
 16. Kline, S. J., 1985, The purpose of uncertainty analysis, *J. Fluids Engineering*, Vol. 107, pp. 153-160.
 17. Kersten, M. S., 1949, Laboratory research for the determination of the thermal properties of soils, *Research Laboratory Investigations, Engineering Experiment Station, Technical Report 23*, University of Minnesota, Minneapolis, MN, USA.
 18. Johansen, O., 1975, *Thermal Conductivity of Soils*, Ph.D. thesis, University of Trondheim, Trondheim, Norway. (CRREL Draft English Translation 637, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, USA.).
 19. Farouki, O. T., 1982, Evaluation of methods for calculating soil thermal conductivity, CRREL Report 82-8, US Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, NH, USA.