

지중열교환기 뒤풀재로 사용되는 모래-물 혼합물의 열전도도 예측

손 병 후[†]

한국건설기술연구원 화재 및 설비연구센터

Predicting the Effective Thermal Conductivity of Some Sand-Water Mixtures Used for Backfilling Materials of Ground Heat Exchanger

Byonghu Sohn[†]

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

(Received July 28, 2008; revision received August 25, 2008)

ABSTRACT: This paper presents the results of a laboratory study on the thermal conductivity of sand(silica, quartzite, limestone, sandstone, granite and two masonry sands)-water mixtures used for ground heat exchanger backfilling materials. Nearly 260 tests were performed in a thermal conductivity measuring system to characterize the relationships between the thermal conductivity of mixtures and the water content. The experimental results show that the thermal conductivity of mixtures increases with increasing dry density and with increasing water content. The most widely used empirical prediction models for thermal conductivity of soils were found inappropriate to estimate the thermal conductivity of unsaturated sand-water mixtures. An improved model using an exponential relationship to compute the thermal conductivity of dry sands and empirical relationship to assess the normalized thermal conductivity of unsaturated sand-water mixtures is presented.

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

기 호 설 명

c : 식(4)에서 상수, 1.78
 k : 열전도도 [W/mK]
 k_n : 무차원 열전도도
 q : 열선의 단위 길이당 발열량 [W/m]
 r : 열선 반경 또는 반경방향으로 거리 [m]
 S_r : 포화도

T : 온도 [K]
 ΔT : 온도차 또는 열선의 온도 상승 [K]
 t : 시간 [s]
 w : 시료 내 수분함량 또는 함수비 [%]

그리스 문자

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

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-699-0511; fax: +82-31-369-0540

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

하첨자

| | |
|------------|--------------------------------|
| <i>d</i> | : 건조상태 [dry state] |
| <i>m</i> | : 혼합물 [mixture] 또는 매질 [medium] |
| <i>s</i> | : 고체 입자 [solid particle] |
| <i>sat</i> | : 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 포장이나 건축물 기초를 비롯하여 각종 구조물의 기초를 설계할 때 동결심도(freezing depth)를 계산하는데 이때 지중 토양의 열전도도가 중요한 인자다. 아울러 온수 수송관인 경우에는 관 주변으로 열이 손실되는 것을 최대한 줄여야 하며, 이 경우에도 토양의 열전도도는 매우 중요한 설계 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, 수직형과 수평형으로 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.

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 그라우팅재료(주로 벤토나이트-모래-물 혼합물)를 주입하기 때문에 현장에서 직접 측정하는 방법을 주로 채택하고 있다.⁽¹⁾ 현장 시험에 의한 지중 열전도도 산정⁽²⁻⁴⁾이나 그라우팅 재료(벤토나이트계열과 시멘트계열) 자체의 열물성 측정⁽⁵⁻⁷⁾과 관련된 다양한 연구결과들이 국내외에서 발표되었다.

반면 모래-물 혼합물과 같은 천연재료의 열전도도 측정이나 수평형 지중열교환기의 성능 분석과 관련된 연구는 상대적으로 미흡한 수준이다. Leong et al.⁽⁸⁾은 수평형 지중열교환기를 채택한 지열원 열펌프 시스템에서 지중열교환기 주변 토양의 종류와 수분함량이 시스템의 성능에 미치는 영향을 계산하였다. 이때 수분함량과 조성에 따른 토양 열전도도는 기존 상관식으로 계산한 결과를 이용하였다. Yari and Javani⁽⁹⁾는 수평형 지열원 열펌프 시스템의 냉방성능을 측정하였으며, 지중열교환기의 성능 분석에 필요한 토양의 열전도도는 기존 상관식을 이용하여 산정하였다. 국내에서 Sohn⁽¹⁰⁾은 천연구사를 포함하여 4종류의 모래를 건조시료, 포화시료, 불포화시료로 각각 구분한 후 열전도도를 측정하였으며, 기존 상관식으로 계산한 결과와 측정결과를 비교하였다.

본 연구는 Sohn⁽¹⁰⁾의 연구의 연장으로, 비정상 탐침법(transient hot probe method)을 적용하여 모래-물-공기 혼합물(시료)의 열전도도를 측정하였다. 시료를 완전 건조 상태(모래-공기), 완전 포화 상태(모래-물) 그리고 불포화 상태(모래-물-공기)로 구분하였으며, 간극률·수분함량·입자 열전도도 등이 혼합물의 열전도도에 미치는 영향을 고찰하였다. 아울러 불포화 시료에 대해서는 측정값과 기존 상관식에 의한 계산결과를 비교하였으며, 측정값을 이용하여 열전도도를 예측할 수 있는 상관식을 도출하였다.

2. 측정 이론 : 비정상 탐침법

비정상 탐침법은 시료에 삽입된 탐침(열선)에 열량을 일정하게 공급할 때, 직선으로 나타나는 시간 대 열선의 온도상승 관계($\ln t - \Delta T$)에서 직선의 기울기와 공급 열량 등을 이용하여 열전도도를 구하는 방법이다. 이러한 탐침법은 무한 선형열원 이론(infinite line-source theory)⁽¹¹⁾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, 반경방향 임의의 지점의 온도를 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.

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

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

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 장비 (TPSYS02, Hukseflux)을 이용하여 혼합물의 열전도도를 측정하였다. 측정 장비는 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. 장비의 열전도도 측정 범위는 0.1~6.0 W/mK이며, 정확도는 $\pm 3\%$ 이다. 여기에 열적 감도오차는 $\pm 0.02\%/^{\circ}\text{C}$ 이다.

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 초

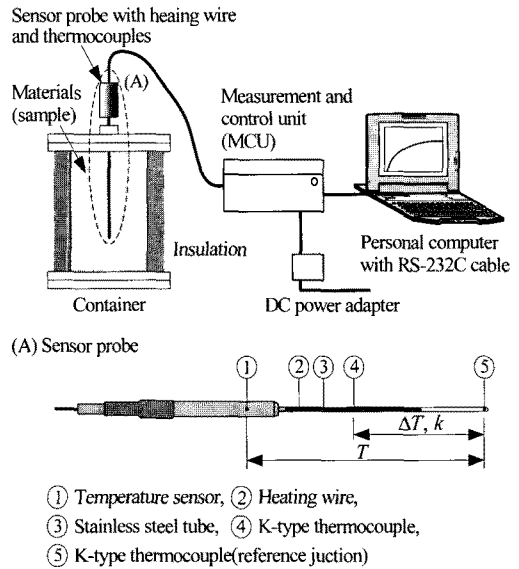


Fig. 1 Experimental apparatus and sensor probe for measuring thermal conductivity of sand-water mixtures.

기 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.

본 측정에 앞서 측정 장비의 신뢰성과 결과의 재현성을 확인하기 위해, Table 1의 기준 시료를 대상으로 상온에서 열전도도를 측정한 후 문헌⁽¹²⁾에 제시된 값과 비교하였다. 각 기준 시료의 열전도도는 7회 측정된 결과를 평균한 값이며, $\pm 2.5\%$ 내에서 문헌⁽¹²⁾ 값과 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

Table 1 Thermal conductivity measurement results of standard reference materials

| Reference materials | k [W/mK] | | Error [%] |
|---------------------|----------------------------------|----------------|------------|
| | Literature value ⁽¹²⁾ | Measured value | |
| Glycerin | 0.286 | 0.281 | ± 2.10 |
| Water | 0.600 | 0.608 | ± 1.67 |

3.2 시료 및 측정 방법

본 연구에서는 혼합물의 주재료인 모래로 천연 규사(silica sand), 인조규사(quartzite sand), 인조 석회사(limestone sand), 인조사암사(sandstone sand), 인조화강사(granite sand) 그리고 두 종류의 건축용 강모래(masonry sand)를 사용하였다. 아울러 체분석을 통해 가능한 한 균일한 크기(0.02~2mm)의 모래를 시료로 사용하였다.

체분석과 건조 시료의 밀도 측정 그리고 포화 시료와 불포화 시료의 수분함량 측정 등은 한국 표준규격⁽¹³⁻¹⁶⁾에 명시된 방법을 따랐다. Table 2는 각각의 시료에 대하여 모래 입자의 밀도(ρ_s)와 열전도도(k_s), 건조밀도(ρ_d), 간극률(ϕ), 수분함량(w)의 범위, 측정횟수 등을 정리한 것이다. 시료

제조 방법과 측정 순서 등은 Sohn⁽¹⁰⁾의 논문에 상세히 언급되었기 때문에 본 논문에서는 생략한다.

Kline⁽¹⁷⁾이 제안한 방법에 따라, 측정 결과에 영향을 미치는 데이터와 변수의 편차들을 조합하여 열전도도의 상대 불확실도(uncertainty)를 계산하였으며, 각각의 시료에 대한 열전도도도의 상대 불확실도는 $\pm 3.03\%$ 였다.

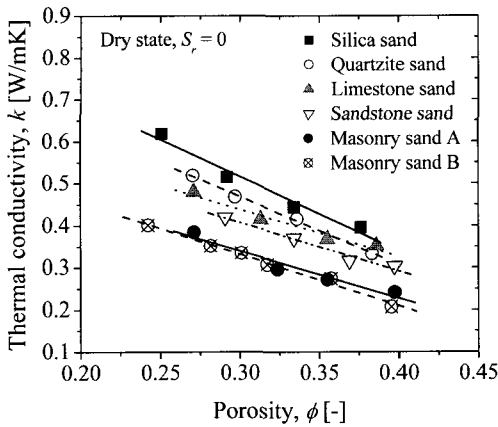
4. 결과 및 고찰

4.1 건조 시료와 포화 시료의 열전도도

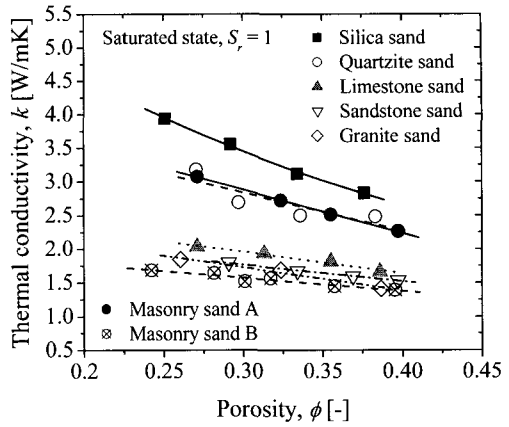
Fig. 2는 건조 시료($S_r = 0$)와 포화 시료($S_r = 1$)의 열전도도를 간극률의 함수로 나타낸 것이다. 여기서 간극률은 시료의 전체 체적에 대한 간극

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 ⁽¹⁰⁾ | 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 ⁽¹⁰⁾ | 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 ⁽¹⁰⁾ | 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 |
| Sandstone sand | 2803.0 | 2.72 | 1987.6 | 0.29 | 0~14.63 | 9 |
| | | | 1866.2 | 0.33 | 0~17.90 | 8 |
| | | | 1768.2 | 0.37 | 0~20.87 | 9 |
| | | | 1689.2 | 0.40 | 0~23.51 | 10 |
| Granite sand | 2750.0 | 2.53 | 2033.6 | 0.26 | 0~12.81 | 8 |
| | | | 1859.9 | 0.32 | 0~17.40 | 8 |
| | | | 1686.2 | 0.39 | 0~22.93 | 10 |
| Masonry sand A ⁽¹⁰⁾ | 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 |
| Masonry sand B | 2650.0 | 2.31 | 2008.2 | 0.24 | 0~12.05 | 8 |
| | | | 1903.8 | 0.28 | 0~14.78 | 9 |
| | | | 1852.3 | 0.30 | 0~16.24 | 8 |
| | | | 1809.3 | 0.32 | 0~17.53 | 8 |
| | | | 1702.4 | 0.36 | 0~21.00 | 9 |
| | | | 1601.9 | 0.40 | 0~24.68 | 10 |



(a) Dry state



(b) Saturated state

Fig. 2 Thermal conductivity of dry and saturated mixtures with respect to porosity.

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 열전도도(k_s)가 클수록 시료의 열전도도는 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 2성분 혼합물 시료의 열전도도는 간극의 크기와 함께, 간극 내 물질과 입자의 열전도도 등에 크게 좌우됨을 확인할 수 있다.

4.2 불포화 시료의 열전도도

Fig. 3은 모래-공기-물로 구성된 3성분 혼합물(불포화 시료)의 열전도도에 대한 전형적인 측정 결과를 수분함량의 함수로 표현한 것이다. 여기서 수분함량은 함수비와 같은 의미이며, 불포화 시료의 간극에 존재하는 물의 질량을 건조 시료의 질량으로 나눈 값으로 백분율(%)로 나타낸다. 그림에서 수분함량 값이 0인 경우는 완전 건조 상태(건조 시료)를 의미하며, w_{sat} 은 완전 포화 상

태(포화 시료)의 수분함량 값을 의미한다. 전체적으로 불포화 시료의 열전도도는 건조 시료와 포화 시료의 열전도도 값 사이에 있음을 확인할 수 있다. 또한 앞의 2성분 혼합물과 마찬가지로, 간극률이 유사한 경우(silica 대 quartzite)에는 모래 입자의 열전도도가 그리고 입자의 열전도도가 유사한 경우(quartzite 대 masonry A)에는 간극률이 불포화 시료의 열전도도 변화에 크게 영향을 미침을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 불포화 시료의 열전도도 측정결과를 포화도(degree of saturation, S_r)와 건조밀도(간극률)의 함수로 나타낸 것이다. 모든 시료가 유사

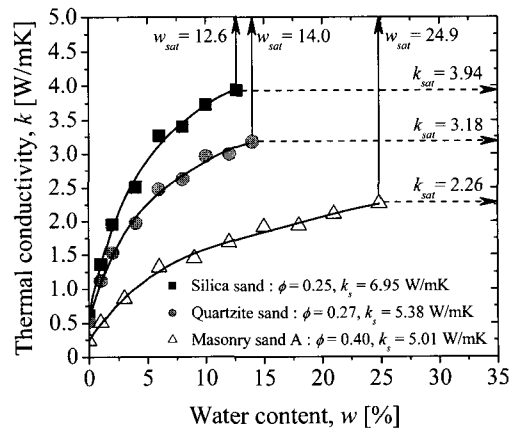


Fig. 3 Typical measurement results of thermal conductivity with respect to water content.

한 경향을 보였기 때문에 일부 결과만 도시하였다. 앞의 Fig. 3에서 보듯이, 간극물에 따라 완전 포화 상태의 수분함량 값은 다르게 나타난다. 따라서 전체 간극에서 물이 차지하는 체적의 비율을 포화도라고 정의하고, 이 값을 이용하여 비교하는 것이 편리하다. 여기서, 포화도는 다음과 같이 계산된다.

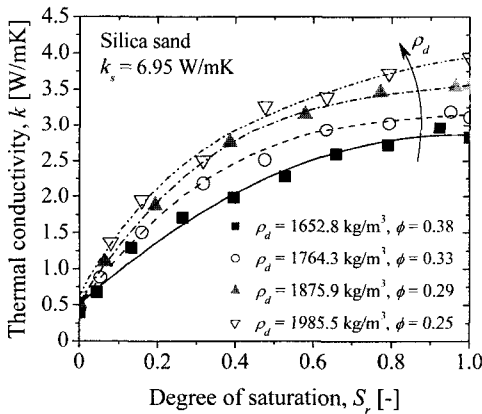
$$S_r = \frac{w}{100} \frac{\rho_d}{\phi \rho_w} \quad (7)$$

Fig. 4에서 보듯이, 불포화 시료의 열전도도는 포화도가 증가할수록, 즉 간극 내 수분함량이 증

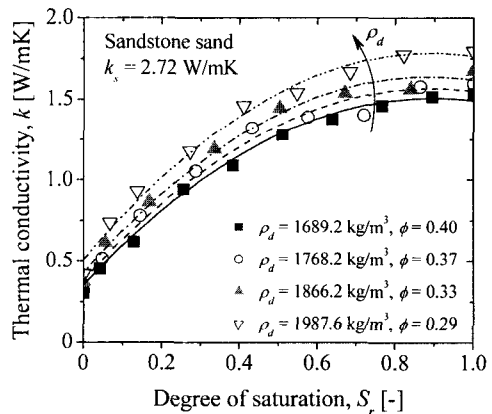
가할수록 증가하였다. 아울러 포화도가 같을 경우 건조밀도가 증가할수록, 즉 간극물이 감소할수록 열전도도는 증가하였다.

4.3 기존 상관식에 의한 열전도도 예측

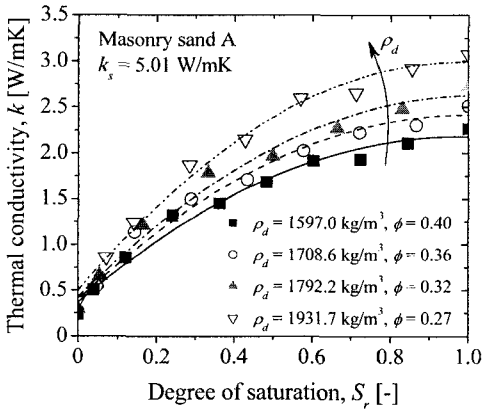
Kersten⁽¹⁸⁾은 수분함량을 달리 한 시료를 대상으로 동결 상태(frozen state)와 미동결 상태(un-frozen state)에서 열전도도를 측정 한 후, 상관식을 도출하였다. 이때 0.05 mm 크기의 입자가 50% 이상 포함된 시료를 실트-점토질토(silt-clay soil)로, 50% 미만인 경우에는 사질토(sandy soil)로 구분하였다. 본 연구의 불포화 시료와 유사한 미



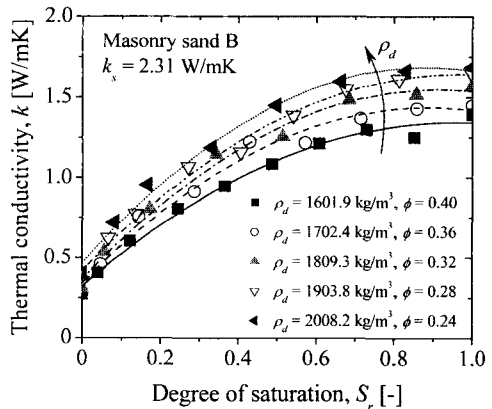
(a) Silica sand



(b) Sandstone sand



(c) Masonry sand A



(d) Masonry sand B

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

동결 사질토(unfrozen sandy soil)에 대한 상관식은 다음과 같다.

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

식(8)에 건조밀도 ρ_d 의 단위는 g/cm^3 이다.

현재 토양의 열전도도를 예측하는 데 주로 적용되는 모델이 Johansen⁽¹⁹⁾ 모델이다. Johansen은 식(9)의 형태로 표현되는 무차원 열전도도(k_n)와 식(10)과 같이 포화도의 함수로 나타낸 무차원 열전도도를 이용하여 불포화 시료(토양)의 열전도도(k_m)를 예측할 수 있는 상관식을 제시하였다.

$$k_n = \frac{k_m - k_d}{k_{sat} - k_d} \quad (9)$$

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

식(9)에서 건조 상태의 열전도도를 계산할 때, 분쇄시료(crushed rocks)인 경우에는 식(11)을 그리고 천연시료(natural mineral soils)인 경우에는 식(12)를 이용한다. 아울러 포화 시료의 열전도도 계산에는 비교적 단순한 식인 식(13)을 적용한다.

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

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

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

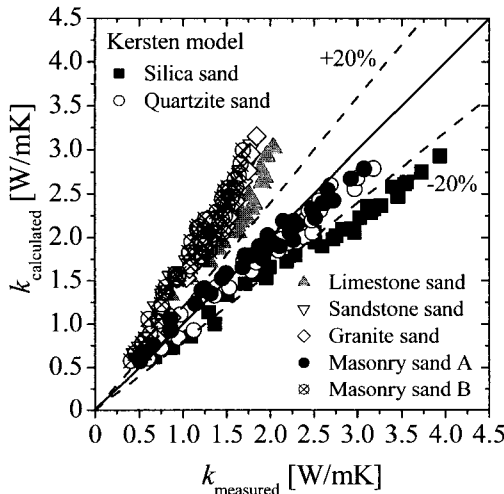
식(13)에서 k_w 는 물의 열전도도(0.60 W/mK)이며, k_s 는 고체 입자(모래 입자)의 열전도도로서 석영(quartz) 함량에 따라 다음과 같이 계산된다.

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

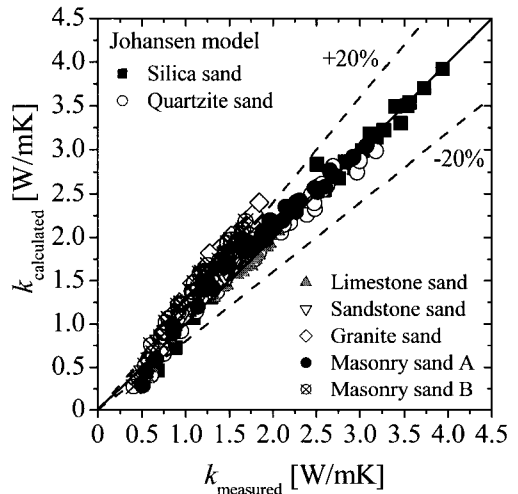
$$k_s = k_q^q \times 3.0^{(1-q)} \text{ for } q \leq 20\% \quad (15)$$

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

Fig. 5는 기존 상관식에 의한 열전도도 계산결과와 측정 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이, Kersten 모델에 의한 계산결과는 본 실험결과와 큰 차이를 보인 반면, Johansen 모델은 상대적으로 잘 일치하였다. 하지만 포화도가 낮은 영역($S_r < 0.4$)과 천연시료인 경우, Johansen 모델에 의한 계산결과도 본 측정 결과와 다소 차이를 보였다. 이는 포화도가 낮은 영역에서는 공기가 불포화 시료의 열전도도에 지배적인 영향을 미치는데, Johansen 모델은 이에 대한 영향을 제대로 반영하지 못한 결과로 볼 수 있다. 이러한 단점



(a) Kersten model



(b) Johansen model

Fig. 5 Comparison between the measurement results and the existing correlations for the thermal conductivity of soils.

에도 불구하고 Farouki⁽²⁰⁾는, 미동결 사질토의 포화도가 0.2이상 일 때, Johansen 모델이 Kersten 모델보다 더 정확하며 광범위하게 적용될 수 있다고 평가하였다.

4.4 불포화 시료에 대한 열전도도 상관식 도출

이상으로부터 Johansen 모델은, 시료의 성질에 상관없이, Kersten 모델보다 상대적으로 정확한 값을 예측할 수 있다. 하지만 포화도가 낮은 영역에서는 오차가 다소 크다는 단점도 있다. 따라서 본 연구에서는 다양한 종류의 시료를 대상으로 열전도도를 측정 한 후, 불포화 혼합물의 열전도도를 예측할 수 있는 상관식을 도출하였다.

먼저 불포화 시료의 열전도도에 대한 공기의 영향을 반영하기 위해, 본 측정 결과와 기존 문헌에 제시된 데이터를 이용하여 건조 시료의 열전도도를 예측할 수 있는 상관식을 도출하였다. Fig. 6은 이에 대한 결과를 나타낸 그래프다. 이때 시료를 분쇄 모래(crushed sand)와 천연 모래(natural sand, 강모래)로 구분하였으며, 각각에 대한 상관식은 식(16)과 식(17)에 주어져 있다.

$$k_d = 1.62 \times 10^{-1.76\phi} \quad (16)$$

$$k_d = 0.65 \times 10^{-1.02\phi} \quad (17)$$

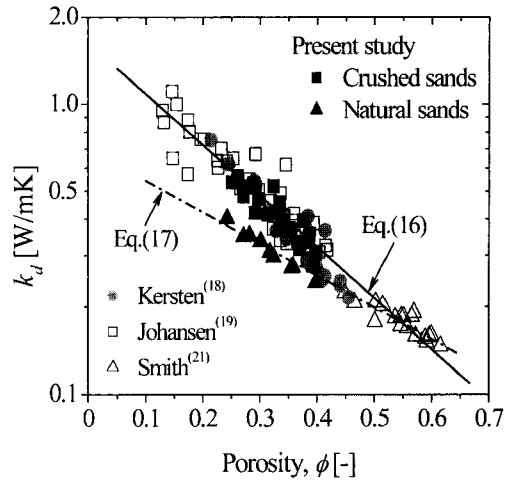
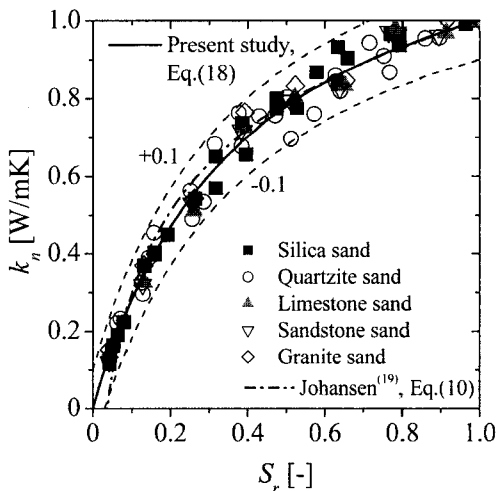
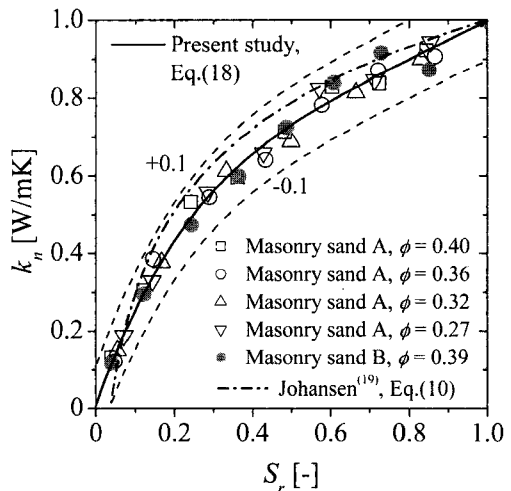


Fig. 6 Relationship between thermal conductivity and porosity for dry sands.

다음으로, 각각의 시료에 대하여 실험에서 측정 한 건조 시료와 포화 시료 그리고 불포화 시료의 열전도도 값을 식(9)에 대입하여 무차원 열전도도를 구하였다. 이 값을 Fig. 7에서 보는 바와 같이 포화도의 함수로 나타낸 후, 곡선맞춤(curve fitting)을 하여 식(18)로 주어지는 비교적 단순한 형태의 상관식을 도출하였다. 식(18)에서 상수 κ 는 3.52다.



(a) Crushed sands



(b) Natural sands

Fig. 7 Comparison between the measurement results and the existing correlations for the thermal conductivity of soils.

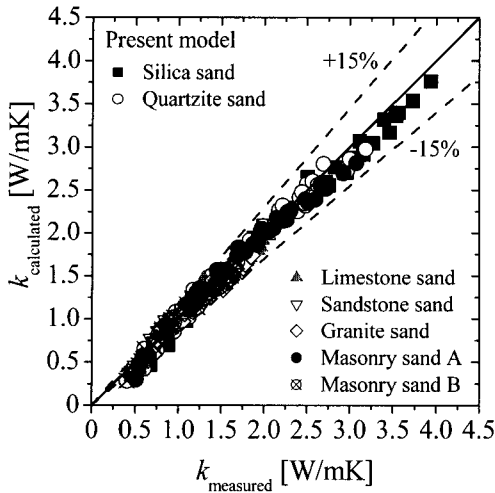


Fig. 8 Comparison between the measurement results and the calculated thermal conductivity values using the proposed correlation.

$$k_n = \frac{\kappa S_r}{1 + (\kappa - 1) S_r} \quad (18)$$

아울러 Fig. 7에서 보듯이, 포화도가 낮은 영역에서 본 연구의 상관식인 식(18)은 Johansen 모델보다 무차원 열전도도를 잘 예측하였다. 특히, 천연 모래에 대한 결과에서는 본 상관식의 일치도가 더욱 향상되었음을 확인할 수 있다. Fig. 8은 본 논문에서 제안한 상관식을 적용하여 계산한 열전도도와 측정값을 비교한 것으로, 계산 결과와 측정값은 $\pm 15\%$ 범위 내에서 잘 일치하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 수직형 지중열교환기의 보어홀이나 수평형 지중열교환기의 트렌치 뒤채움재로 사용되는 모래-물 혼합물을 대상으로 열전도도를 측정하였다. 아울러 기존 상관식에 의한 계산결과와 측정결과를 비교하였으며, 불포화 혼합물의 열전도도를 예측할 수 있는 상관식을 제안하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

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

(2) 모래-공기-물로 구성된 불포화 혼합물의 열전도도는 포화도가 증가할수록, 즉 간극 내 수분함량이 증가할수록 증가하였다. 아울러 포화도가 같을 경우 건조밀도가 증가할수록, 즉 간극률이 감소할수록 시료의 열전도도는 증가하였다.

(3) 포화도와 건조밀도가 동일할 경우, 3성분 혼합물을 구성하는 모래입자의 열전도도가 클수록 불포화 시료의 열전도도 값도 크게 나타났다.

(4) 기존 모델 중, Johansen 모델이 Kersten 모델보다 본 측정 결과와 상대적으로 잘 일치하였다. 하지만 포화도가 낮은 영역($S_r < 0.4$) 영역에서는 측정 결과와 다소 차이가 있었다.

(5) 건조 시료의 열전도도와 불포화 시료의 무차원 열전도도를 예측할 수 있는 상관식을 도출하였으며, 이 상관식들로 계산한 열전도도와 측정값은 $\pm 15\%$ 범위 내에서 잘 일치하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 2006년 신·재생에너지 기술개발사업(2006-N-GE02-P-02)에 의해 수행되었습니다. 아울러, 본 논문의 일부 내용은 대한설비공학회 2008 하계학술발표대회에서 발표한 내용(08-S-125)입니다.

참고문헌

- IGSHPA, 2000, Grouting for Vertical Geothermal Heat Pump Systems : Engineering Design and Field Procedures Manual, International Ground Source Heat Pump Association, Stillwater, Oklahoma.
- 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.
- 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. 1, pp. 1-10.

- tion Engineering, Vol. 18, No. 10, pp. 783-790.
4. Sohn, B. H., 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.
 5. 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.
 6. Kavanaugh, S. P. and Allan, M. A., 1999, Testing of thermally enhanced cement ground heat exchanger grouts, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 446-450.
 7. 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.
 8. Leong, W. H., Tarnawski, V. R. and Aittomaki, A., 1998, Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance, Int. J. Refrigeration, Vol. 21, No. 8, pp. 595-606.
 9. Yari, M. and Javani, N., 2007, Performance assessment of a horizontal-coil geothermal heat pump, Int. J. Energy Research, Vol. 31, pp. 288-299.
 10. Sohn, B. H., 2008, Thermal conductivity measurement of sand-water mixtures used for backfilling materials of vertical boreholes or horizontal trenches, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 5, pp. 342-350.
 11. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Oxford University Press.
 12. Rohsenow, W. M., 1973, Handbook of Heat Transfer, McGraw-Hill, New York.
 13. KSA, 2002, KS F 2302 : 2002 Test method for particle size distribution of soils, Korean Standards Association.
 14. KSA, 2000, KS F 2306 : 2000 Test method for water content of soils, Korean Standards Association.
 15. KSA, 2006, KS F 2308 : 2006 Test method for density of soil particles, Korean Standards Association.
 16. KSA, 2006, KS F 2324 : 2006 Method of classification of soils for engineering purposes, Korean Standards Association.
 17. Kline, S. J., 1985, The purpose of uncertainty analysis, J. Fluids Engineering, Vol. 107, pp. 153-160.
 18. 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.
 19. 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).
 20. 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.
 21. Smith, W. O., 1942, The thermal conductivity of dry soils, Soil Science, Vol. 53, pp. 425-459.