

수평형 지중열교환기 설계를 위한 토양 열전도도 예측 모델 평가

Evaluation of Conventional Prediction Model for Soil Thermal Conductivity to Design Horizontal Ground Heat Exchanger

손병후¹⁾, Byonghu Sohn, 위지혜²⁾, Jihae Wi, 한은선³⁾, Eunseon Han, 임지희⁴⁾, Jeehee Lim, 최항석⁵⁾, Hangseok Choi

- 1) 한국건설기술연구원 설비플랜트연구실 전임연구원, Associate researcher, Plant Research Division, Korea Institute of Construction Technology
- 2) 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
- 3) 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
- 4) 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정, Graduate student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University
- 5) 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수, Associate professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University (교신저자)

개요(SYNOPSIS) : Thermal conductivity of soils is one of the most important parameters to design horizontal ground heat exchangers. It is well known that the thermal conductivity of soil is strongly influenced by its density and water content because of soil's particulate structure. This paper reviewed and evaluated some of the commonly used prediction models for thermal conductivity of soils with the experimental data available in the literature. Semi-theoretical models for two-component materials were found inappropriate to estimate the thermal conductivity of dry state sands. It came out that the model developed by Cote and Konrad gave the best overall prediction for unsaturated sands available in the literature. Also, a parametric analysis is conducted to investigate the effect of thermal conductivity and water content, soil type on the horizontal ground heat exchanger design. The analysis shows that a required pipe length for the horizontal ground heat exchanger is reduced with the increase of soil thermal conductivity and water content. The calculation results also show that the dimension of the horizontal ground heat exchanger can be reduced to a certain extent by using backfilling material with a higher thermal conductivity of solid particles.

주요어(Key words) : Horizontal ground heat exchanger (수평형 지중열교환기), Thermal conductivity (열전도도), Backfill material (뒤채움재)

1. 서론

최근 많은 관심을 받고 있는 냉난방 겸용 시스템인 지열 히트펌프 시스템은 토양을 열원(heat source)과 히트싱크(heat sink)로 이용하며, 지중열교환기의 형상에 따라 수직형과 수평형으로 구분된다. 두 방식은 모두 열교환기 순환유체와 열교환기 주변 토양 사이의 열전달이 원활할 때, 즉 토양의 열전도도가 높을수록 최적의 성능을 발휘할 수 있으므로 토양의 열전도도가 중요한 인자로 작용한다. 여기서 수평형 지중열교환기는 수직형에 비해 시공비용이 적게 든다는 장점이 있으며, 수평형 지중열교환기의 길이를 결정하기 위해서는 트렌치 뒤채움재로 사용되는 토양의 열전도도뿐만 아니라 토양의 종류, 함수비 등 다양한 요소를 고려해야 한다.

토양의 열전도도를 예측하는 모델 중 많이 알려진 모델로는 Kersten 모델과 Johansen 모델이 있다. Kersten 모델은 정확성이 떨어지는데 비해 Johansen 모델은 낮은 함수비를 제외하면 비교적 정확성이 높은 것으로 나타났다. 대부분의 경험 모델은 Johansen 모델을 바탕으로 개선되었으며, 토양의 열전도도가 지중열교환기의 길이에 미치는 영향을 알아보기 위해 Johansen 모델을 개선한 Sohn의 경험식(Sohn, 2008)을 적용하여 열전도도를 산정하였다.

본 논문에서는 지열 히트펌프 시스템의 수직형 지중열교환기의 뒤채움재로 사용되는 토양의 열전도도를 측정 결과와 기존 예측 모델에 의한 결과를 비교 및 평가하였다. 또한, 토양의 열전도도와 종류, 함수비 등이 수직형 지중열교환기의 길이에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 기본개념

2.1 토양의 상태

토양은 흙 또는 모래와 같은 고체입자와 간극에 존재하는 공기 또는 물로 구성된 입상체 구조이다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 모래-공기(건조상태) 또는 모래-물(완전 포화상태)로 구성되는 2상 구조와 모래-공기-물(불포화상태)로 구성되는 3상 구조로 구분할 수 있다.

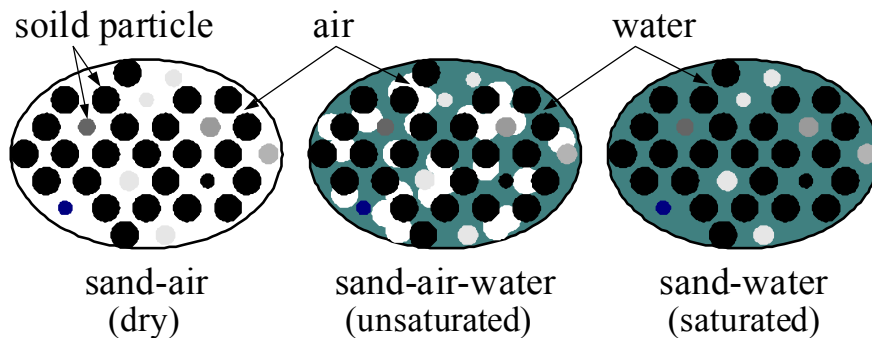


그림 1. 토양의 구성에 따른 상태

2상 또는 3상 혼합물로 표현되는 토양의 구성 상태에 따라 주로 사용되는 열전도도 예측 모델로 준이론 모델(semi-theoretical model)과 경험 모델(empirical model)이 있다. 수평형 지중열교환기의 성능을 분석할 때 이 두 개의 모델이 사용된다.

2.2 토양의 열전도도 영향인자 및 측정 방법

토양의 열전도도에 영향을 미치는 인자로는 건조밀도(dry density), 간극률(porosity), 함수비(water content), 입자의 형태 및 입상 자체의 열전도도, 간극수의 상태(물 또는 얼음), 온도 등이 있다. 건조밀

도가 일정할 때 함수비가 증가하면 열전도도는 증가하며, 함수비가 일정할 때 건조밀도의 증가 또한 열전도도의 증가로 이어진다. 이 증가율은 다른 일정 함수비에서도 유사하게 나타난다.

수평형 지중열교환기의 전열 성능 분석에서 함수비 변화에 따른 토양의 열전도도는 중요한 인자로 작용한다. 이는 외기 온도, 지표면 온도, 지중 온도 등의 영향으로 토양 내 함수비가 변하거나 간극에 존재하는 수분이 액체(물)에서 고체(얼음)로 변하기 때문이다.

토양의 열전도도의 측정 방법은 크게 직접법과 간접법으로 나뉘지며, 주로 적용되는 방법은 직접법 중 비정상 탐침법이다. 비정상 탐침법은 시료에 삽입된 탐침(열선)에 열량을 일정하게 공급할 때, 직선으로 나타나는 시간에 열선의 온도상승 관계($\ln t - \Delta T$)에서 직선의 기울기와 공급 열량 등을 이용하여 열전도도를 구하는 방법이다. 그림 2는 비정상 탐침법을 이용한 열전도도 측정 모식도이다. 이 탐침법은 무한 선형열원 이론(infinite line-source theory)에 기초를 두고 있으며 열전도도 산정식은 식 (1)과 같다.

$$k = \frac{q}{4\pi} \frac{\ln t_2 - \ln t_1}{T_2 - T_1} \quad (1)$$

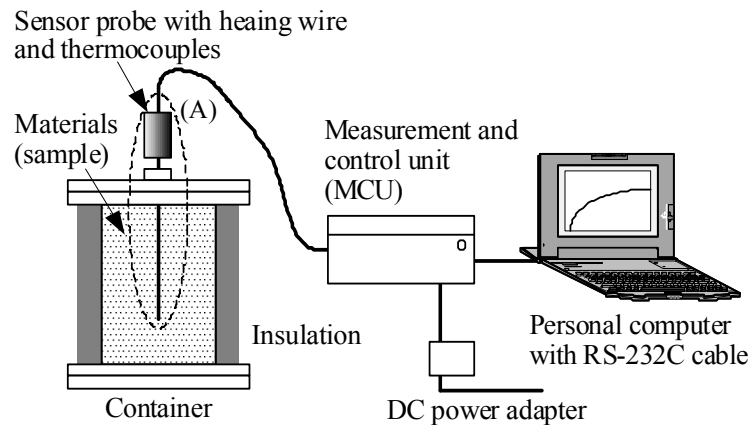


그림 2. 열전도도 측정 모식도

3. 예측 모델

$\Delta T, k$

3.1 건조토와 포화토에 대한 모델

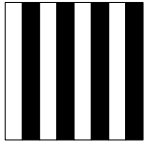
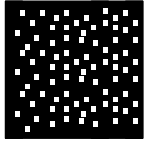
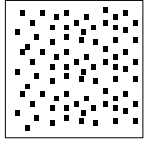
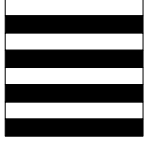
2상 구조 토양인 건조토와 포화토의 열전도도를 예측하기 위해서 준이론 모델을 사용한다. 준이론 모델은 각 성분의 열전도도와 체적 등을 이용하여 계산할 수 있으며 계산식은 식 (2)와 같다.

$$k = \frac{\sum_{i=1}^m k_i v_i \frac{d_i \tilde{k}}{(d_i - 1)\tilde{k} + k_i}}{\sum_{i=1}^m v_i \frac{d_i \tilde{k}}{(d_i - 1)\tilde{k} + k_i}} \quad (2)$$

여기서,

준이론 모델을 기본으로 표 1과 같이 여러 기본 모델을 유추할 수 있으며 이외에도 기하평균 모델과 2차 평행 모델이 2상 구조 토양의 열전도도를 예측하는데 사용된다. 본 논문에서는 건조토에 대해서만 언급하였다.

표 1. 2상 구조 토양의 준이론 모델

Model	Structure schematic	Effective thermal conductivity equation	Eq. (2) parameter values
Parallel model		$k = v_1 k_1 + v_2 k_2$	$d_i \rightarrow \infty$ or $\tilde{k} = k_i$
Maxwell-Eucken 1 (ME1) (k_1 = continuous phase, k_2 = dispersed phase)		$k = \frac{k_1 v_1 + k_2 v_2 \frac{3k_1}{2k_1 + k_2}}{v_1 + v_2 \frac{3k_1}{2k_1 + k_2}}$	$d_i = 3$ and $\tilde{k} = k_1$
Maxwell-Eucken 2 (ME2) (k_1 = dispersed phase, k_2 = continuous phase)		$k = \frac{k_2 v_2 + k_1 v_1 \frac{3k_2}{2k_2 + k_1}}{v_2 + v_1 \frac{3k_2}{2k_2 + k_1}}$	$d_i = 3$ and $\tilde{k} = k_2$
Series model		$k = \frac{1}{v_1/k_1 + v_2/k_2}$	$d_i = 1$ or $\tilde{k} \rightarrow 0$

3.2 불포화토에 대한 모델

3.2.1 Kersten 모델

Kersten 모델은 여러 종류의 흙을 대상으로 동결 상태와 미동결 상태에서 함수비를 달리하여 열전도도를 측정 후 경험식을 제시하였다. 여기서 입자 크기가 0.05 mm 이하의 함유량이 50% 이상인 시료를 실트-점토질토(silt-clay soils)로, 50% 미만인 경우에는 사질토(sandy soil)로 구분하였다. 본 논문에서는 미동결 상태의 실트-점토질토와 사질토에 대해 고려했으며 상관식은 다음과 같다. 식 (3)을 실트-점토질토, 식 (4)는 사질토에 대한 상관식이다.

$$k = 0.1442 [0.9 \log(w) - 0.2] \times 10^{0.6243 \rho_d} \quad (3)$$

$$k = 0.1442 [0.7 \log(w) + 0.4] \times 10^{0.6243 \rho_d} \quad (4)$$

여기서, ρ_d 는 건조밀도(g/cm^3), w 는 함수비이다.

3.2.2 Johansen 모델

Johansen 모델은 무차원 열전도도(k_n)의 개념을 도입하여 불포화토의 열전도도를 산정하였다. 식 (5)는 동일한 건조밀도를 갖는 건조토와 포화토의 열전도도를 이용하여 불포화토의 열전도도를 나타냈고, 식 (6)은 포화도(degree of saturation, S_r)의 함수로 나타낸 것이다.

$$k_n = \frac{k - k_{dry}}{k_{sat} - k_{dry}} \quad (5)$$

$$k_n = 0.7 \log(S_r) + 1 \quad (6)$$

식 (5)에서 건조 상태의 인조토(crushed rocks)와 자연토(natural soils)의 열전도도는 각각 식 (7)과 식 (8)로 계산되며, 포화토의 열전도도는 식 (9)으로 계산된다.

$$k_{dry} = 0.039n^{-2.2} \pm 25\% \quad (7)$$

$$k_{dry} = \frac{0.135\rho_d + 64.7}{2700 - 0.947\rho_d} \pm 20\% \quad (8)$$

$$k_{sat} = k_s^{(1-n)} k_w^n \quad (9)$$

식 (9)에서 n 은 흙 시료의 간극률(porosity)이며 k_w 는 물의 열전도도(0.60 W/mK)를, k_s 는 고체 입자(모래 입자)의 열전도도로서 석영(quartz) 함량에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$k_s = k_q^q \times 2.0^{(1-q)} \text{ for } q > 20\% \quad (10)$$

$$k_s = k_q^q \times 3.0^{(1-q)} \text{ for } q \leq 20\% \quad (11)$$

식 (10)과 식 (11)에서 k_q 는 석영의 열전도도로 값은 7.69 W/mK이며, q 는 석영 함량이다.

3.2.3 Cote and Konrad 모델

Johansen 모델을 기반으로 Cote and Konrad 모델은 다양한 종류의 토양에 대해 적용성을 개선하여 다음과 같은 경험식을 도출하였다.

$$k_n = \frac{\kappa S_r}{1 + (\kappa - 1) S_r} \quad (12)$$

식 (12)에서 사용한 상수 κ 는 경험계수로서 토양을 입자크기에 따라 조립토, 세립토, 실트-점토질토, 유기토로 나누고 각각 4.60, 3.55, 1.90, 0.60으로 제시하였다. 또한 건조토의 열전도도는 간극률의 함수로 표현되며, 포화토의 열전도도는 Johansen 모델과 동일한 식 (9)를 적용하여 계산한다.

$$k_{dry} = \chi 10^{-\eta n} \quad (13)$$

식 (13)에서 χ (W/mK)과 η 는 입자 형상의 영향에 의해 정해진다.

3.2.4 Lu et al. 모델

Lu et al. 모델 또한 Johansen 모델의 정확도를 향상시키기 위해 상온에서 열전도도를 측정하여 경험

식을 제시하였다. Johansen 모델의 식 (10)은 로그함수이기 때문에 포화도가 0인 건조토에 대해서는 적용할 수 없으며, Cote and Konrad 모델은 Johansen 모델의 정확도를 개선하였지만 세립토와 함수비가 낮은 영역의 열전도도에 대한 예측 능력이 떨어진다. Lu et al. 모델은 이 점에 주목하여 식 (14)와 같은 경험식을 제시하였다.

$$k_n = \exp\{\alpha[1 - S_r^{(\alpha-1.33)}]\} \quad (14)$$

식 (14)에서 상수 α 는 토양의 입자크기에 따라 조립토와 세립토로 구분하여 각각 0.96과 0.27로 제시되고, 1.33은 형상계수이다. Lu et al. 모델에서 건조토에 대한 열전도도 상관식은 다음과 같다.

$$k_{dry} = -0.56n + 0.51 \quad (15)$$

여기서, 0.56과 0.51은 경험계수이다.

4. 지중열교환기 길이 산정

지열 히트펌프 시스템이 장기간에 걸쳐 성능을 발휘하기 위해서는 대상 건물의 최대 냉난방부하와 월간 에너지부하를 담당할 수 있는 지중열교환기를 산정해야 한다. 본 논문에서는 표 2의 각종 설계 데이터와 히트펌프 성능계수(coefficient of performance, COP), 그리고 지중열교환기 순환수의 히트펌프 입구온도(entering fluid temperature, EFT) 등을 이용하여 수평형 지중열교환기의 길이를 산정하였다.

표 2. 대상 건물의 수평형 지중 열교환기의 설계인자

Parameters	Specifications
Building	
Conditioned area [m ²]	142
Peak cooling load [kW]	7.4
Peak heating load [kW]	21.6
Heat pump	
Total unit capacity [kW]	22.3
Heat pump cooling COP [-]	3.4
Heat pump heating COP [-]	3.0
System flow rate [lpm]	66.9
Design EFT for cooling [°C]	30.0
Design EFT for heating [°C]	5.0
Ground heat exchanger	
Configuration	2 pipes in trench
Circulating fluid	Water/ethanol
Pipe outer and inner diameter [mm]	26.7/21.8

지중열교환기의 길이 산정에 적용되는 열전도도는 Johansen 모델의 정확성을 개선한 Sohn의 경험식 (Sohn, 2008)을 이용하여 산정하였다. Sohn의 경험식은 Johansen 모델과 마찬가지로 무차원 열전도도로

식 (16)과 식 (17)과 같이 표현된다.

$$k_n = \frac{k - k_d}{k_{sat} - k_d} \quad (16)$$

$$k_n = \frac{3.52S_r}{1 + 2.52S_r} \quad (17)$$

건조 상태의 인조토과 자연토의 열전도도는 각각 식 (7)과 식 (8)에서 발전한 식 (18)과 식 (19)와 같은 상관식을 이용하여 계산한다. 또한 포화토의 열전도도는 식 (9)로 산정한다.

$$k_{dry} = 1.62 \times 10^{-1.76\phi} \quad (18)$$

$$k_{dry} = 0.65 \times 10^{-1.02\phi} \quad (19)$$

5. 결과 및 고찰

5.1 열전도도 예측 모델 결과

5.1.1 건조토의 열전도도

그림 3은 건조 상태($S_r = 0$)에서의 천연규사(Silica sand, 그림 3(a))와 천연모래(Masonry sand B, 그림 3(b))에 대하여 예측 모델에 의한 열전도도 예측값과 측정값을 간극률의 함수로 나타낸 것이다.

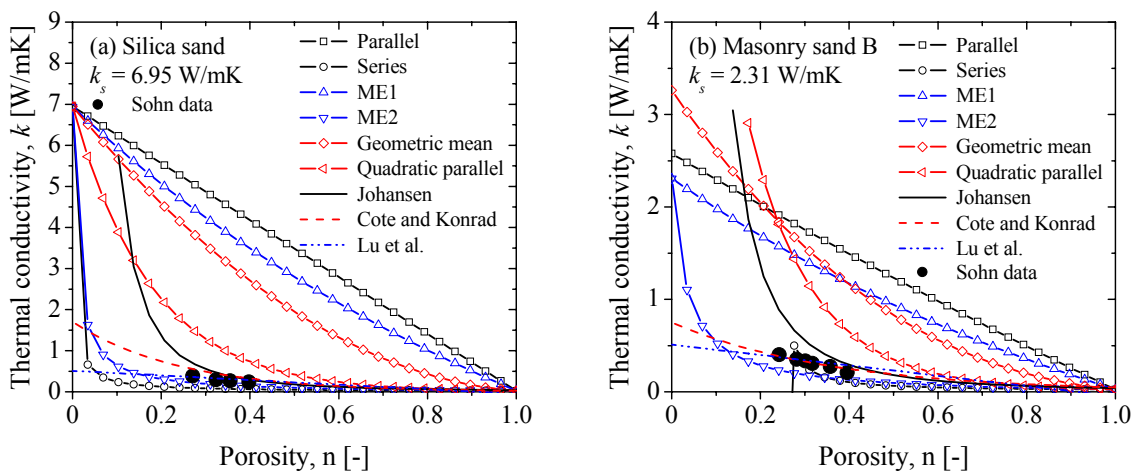


그림 3. 간극률에 따른 건조 모래의 열전도도

그림 3에서 천연규사의 경우 측정값과 Maxwell-Eucken 모델(ME2)에 의한 예측값은 비교적 잘 일치하지만, 천연모래를 포함한 나머지 Sohn의 측정값들에서는 오차가 매우 컸다. 반면 Conte and Konrad 나 Lu et al.의 건조 토양에 대한 열전도도 상관식은 측정값과 잘 일치하였다.

또한 그림 3에서 간극률이 증가할수록 건조 토양의 열전도도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 토양의 간극 내 물질인 공기는 고체 입자보다 상대적으로 작은 열전도도 값을 갖기 때문이다. 아울러 간극률이 같을 때, 입자의 열전도도가 큰 천연규사의 열전도도가 천연모래의 열전도도보다 크게 나타났다.

이러한 결과로부터 2상(포화토 또는 건조토) 혼합물 시료의 열전도도는 간극의 크기와 함께, 간극 내 물질과 입자의 열전도도 등에 크게 좌우됨을 확인할 수 있다.

5.1.2 불포화토의 열전도도

그림 4는 불포화 토양의 열전도도에 대한 각 모델별 예측 결과를 기존 측정 결과와 함께 포화도의 함수로 나타낸 것이다. 포화도의 함수로 나타낸 것은 토양의 간극률 또는 건조밀도에 따라 간극 내 존재하는 수분함량이 다르기 때문에 물이 차지하는 체적의 비율로 정의되는 포화도의 개념을 이용하여 비교하는 것이 편리하기 때문이다.

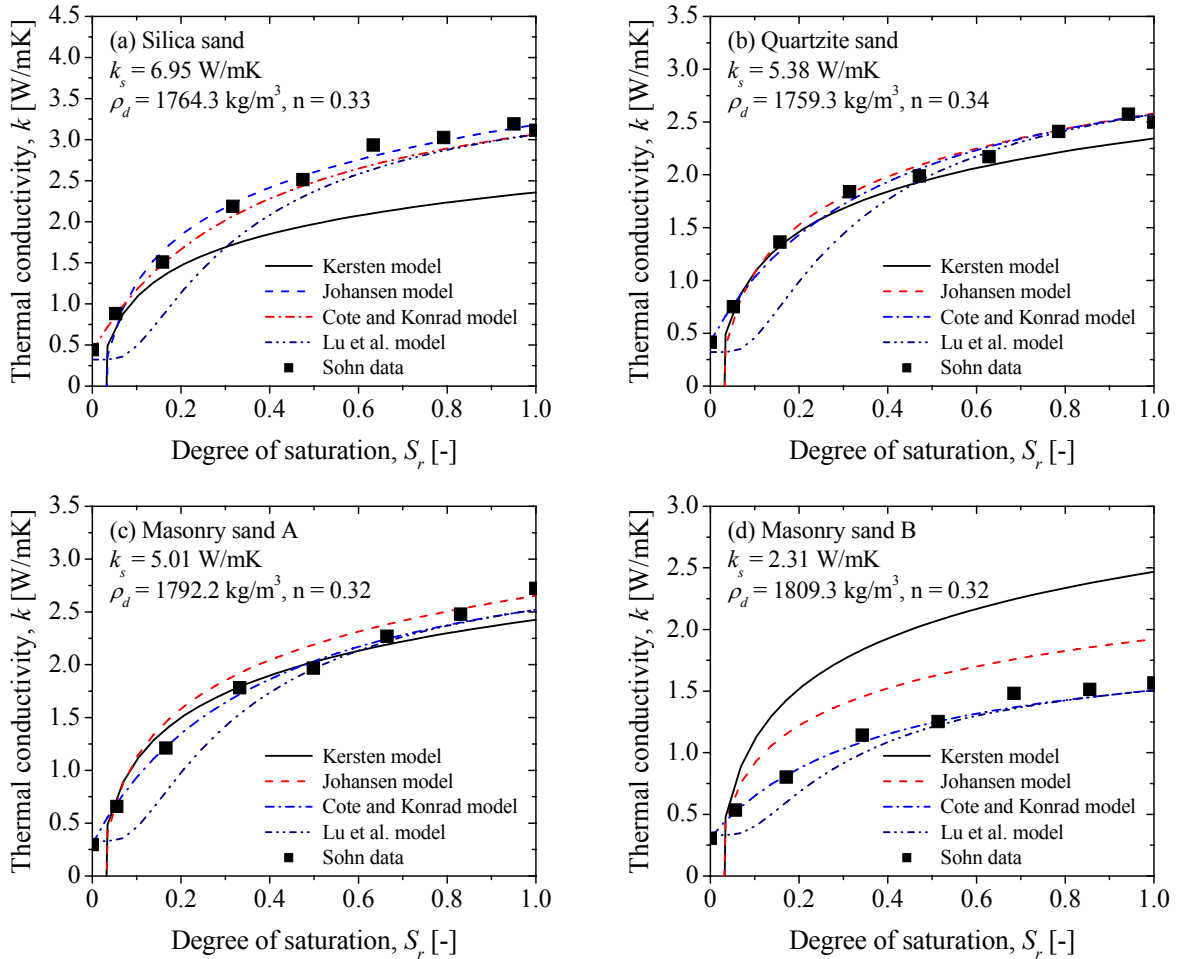


그림 4. 간극률과 포화도에 따른 토양-물 혼합물의 열전도도

그림 4에서 Cote and Konrad 모델이 다른 모델보다 상대적으로 정확하게 열전도도를 예측함을 볼 수 있다. 또한 Johansen 모델에 의한 예측 결과도 천연모래B를 제외하고는 측정 결과와 비교적 잘 일치하였다. 그러나 토양 내 석영 함량을 알아야만 적용이 가능하며, 아울러 포화도가 낮은 영역에서는 오차가 다소 크다는 단점도 있다. 반면 Kersten 모델은 예측 정확성에 일관성이 보이지 않았다. 아울러 Johansen 모델이 기본인 Lu et al. 모델도, 포화도가 대략 0.5 이상인 영역을 제외하면, 측정결과와 다소 차이가 있다. 그림 4에서 모든 모델에 대해 불포화 토양의 열전도도는 포화도가 증가할수록 증가하였다. 전체적으로 불포화 토양의 열전도도는 건조 토양과 포화 토양의 열전도도 값 사이에 있음을 확인할 수 있다.

그림 5는 모델에 의한 계산결과와 측정 결과 사이의 오차를 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 천연토양에 대해서는 Johansen 모델에 의한 계산결과도 데이터와 다소 차이를 보였다. 이는 포화도가 작은 영역에서 공기에 의한 영향이 큰 영역에서 물에 의한 영향보다 더 크기 때문인 것으로 판단된다. Cote and Konrad 모델은 전체 데이터에 대해 $\pm 15\%$ 범위에서 잘 일치하였다. 반면, Lu et al. 모델은 다른 모델에 비해 상대적으로 단순하지만 포화도가 작은 영역에 대한 개선이 필요한 것으로 판단된다.

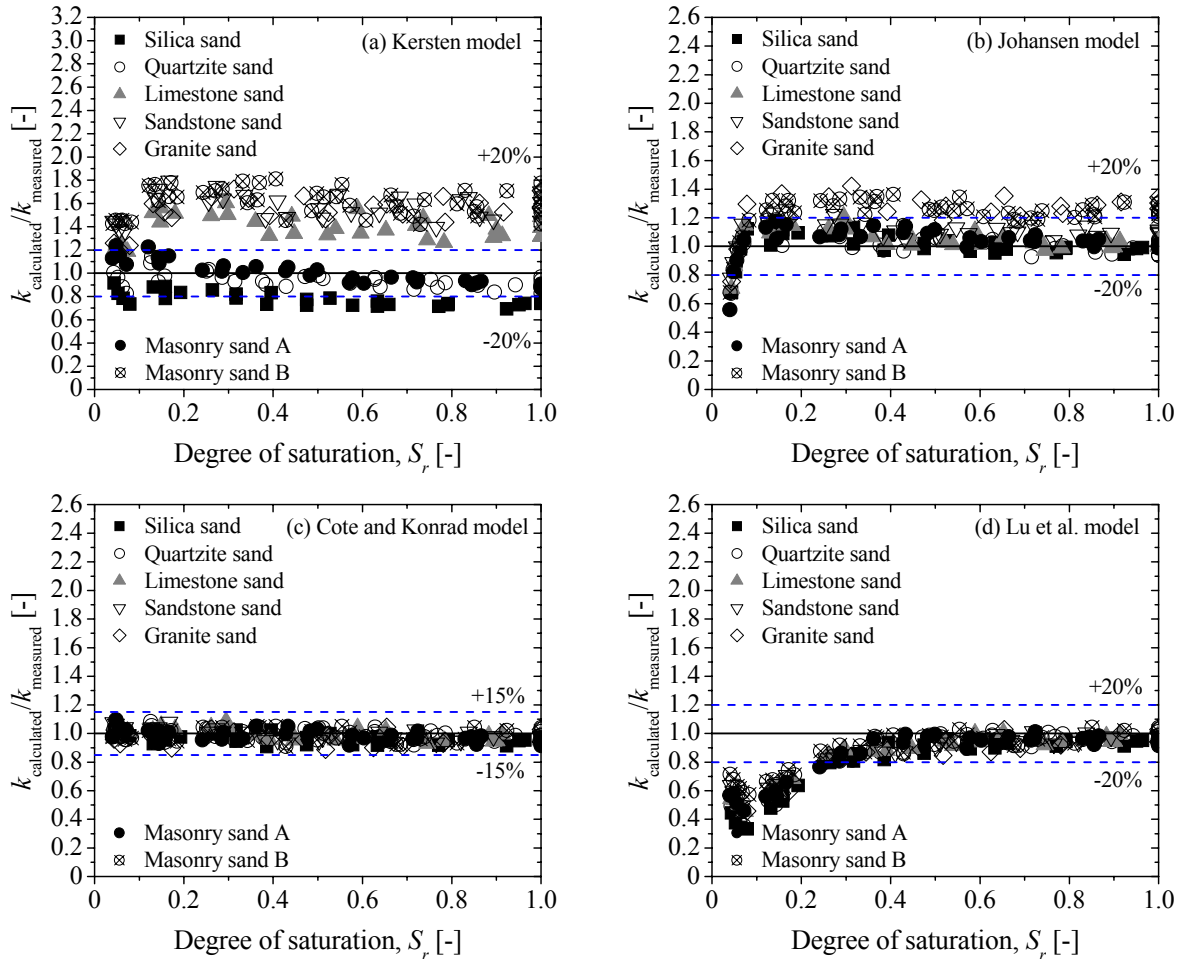


그림 5. 포화도에 따른 측정값과 예측값 비교

전체적으로 혼합물 토양의 열전도도를 예측할 수 있는 경험식 중, Cote and Konrad 모델과 Johansen 모델은 다른 모델보다 상대적으로 정확한 값을 예측하는 것으로 평가된다. 하지만 포화도가 작은 영역에서 오차가 다소 크게 나타났다. 기존 모델에 대해 Farouki는 미동결 사질토의 포화도가 0.2 이상일 때 Johansen 모델이 Kersten 모델보다 더 정확하며 광범위하게 적용될 수 있다고 평가하였다.

5.2 지중열교환기 길이 산정 결과

5.2.1 토양의 열전도도와 함수비의 영향

그림 6은 토양의 열전도도가 대상 건물의 냉난방에 필요한 수평형 지중열교환기의 총 길이 변화에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 본 연구에서는 뒤채움재로 천연규사·인조규사·건축용 강모래를 고려하였다. 전체적인 경향은 모두 유사하였기 때문에 천연규사에 대한 결과를 대표로 도시하였고, 각 뒤채움재의

건조밀도와 간극률 값을 Sohn의 데이터를 이용하였다.

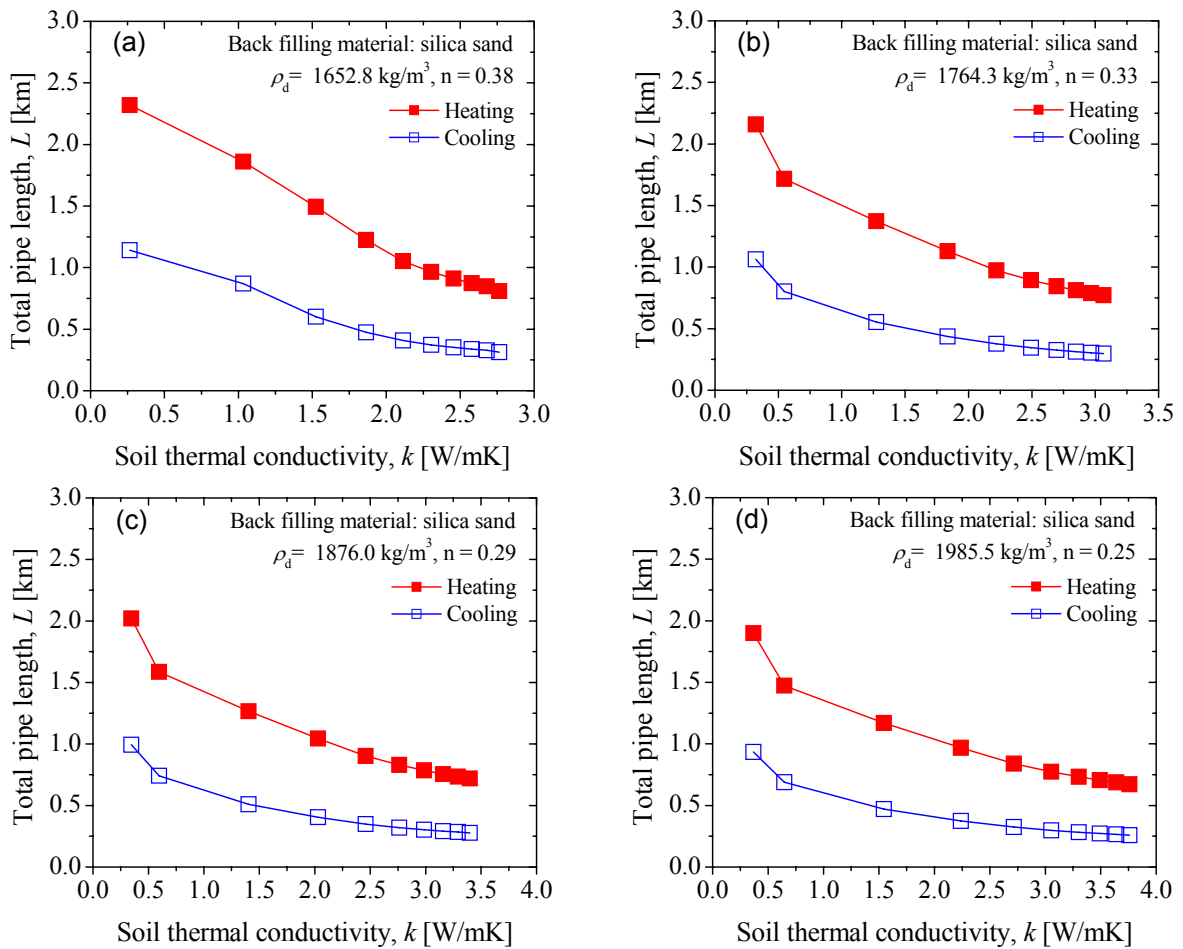


그림 6. 열전도도에 따른 지중열교환기 길이의 변화

그림 6은 트렌치 뒤채움재의 포화도가 지중열교환기 길이에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 본 대상 주택은 난방부하가 냉방부하보다 크기 때문에 그림 7과 같이 난방에 필요한 지중열교환기 길이가 더 길다. 따라서 그림 7에는 난방용 지중열교환기 길이만 도시하였다.

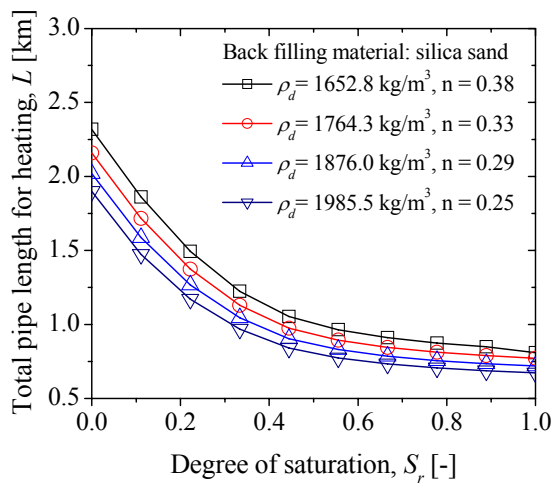


그림 7. 간극률에 따른 지중열교환기 길이의 변화

그림 6과 그림 7에서 보듯이, 트렌치 뒤채움재인 토양의 열전도도와 포화도가 증가할수록 지중열교환기 길이는 감소하였다. 포화도가 같을 경우 건조밀도가 증가할수록, 즉 간극률이 감소할수록 열전도도는 증가하기 때문에 이 영향이 지중열교환기 길이 변화에 반영되었다. 전체적으로 포화도가 0.44 이하인 영역의 감소율이 그 이상에서의 감소율보다 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

5.2.2 토양 종류의 영향

그림 8은 트렌치 뒤채움재의 종류가 난방에 필요한 지중열교환기의 길이에 미치는 영향을 도시한 것이다. 전체 건조밀도에 대한 경향은 유사하기 때문에 $\rho_d \approx 1.76 \text{ g/m}^3 (n \approx 0.33)$ 인 결과만 도시하였다.

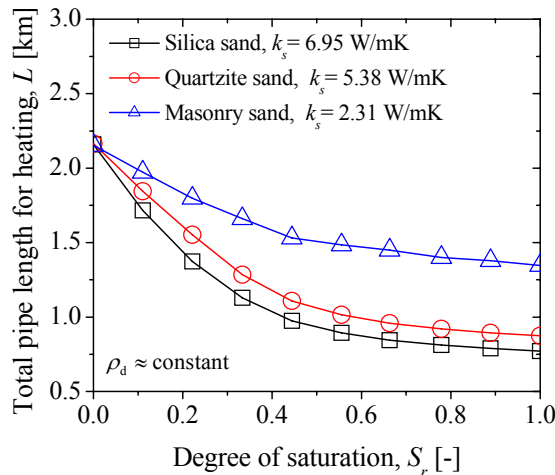


그림 8. 토양 종류에 따른 지중열교환기 길이의 변화

토양 종류를 달리하여 지중열교환기 길이를 산정하였을 경우, 토양입자의 열전도도(k_s)와 포화도가 증가할수록 지중열교환기 길이는 감소하였다. 또한 고체 입자의 열전도도가 상대적으로 큰 천연규사나 인조규사가 강모래보다 수분함량에 의한 영향을 크게 받았다.

6. 결론

본 논문에서는 지열 히트펌프 시스템의 수평형 지중열교환기의 뒤채움재인 토양의 열전도도를 측정 결과와 함께 예측 모델을 비교 및 평가하였으며, 토양의 열전도도와 종류, 함수비 등이 지중열교환기의 길이에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 예측 모델로 건조 토양의 열전도도를 계산할 경우, 오차가 크게 발생하는 반면, 경험식에 의한 계산 결과는 측정 결과와 잘 일치하였다.
- (2) 간극률이 증가함에 따라 건조토의 열전도도는 감소하였다. 아울러 건조토의 열전도도는 간극의 크기와 함께 간극 내 물질과 입자의 열전도도 등에 크게 좌우됨을 확인할 수 있었다.
- (3) 불포화토의 열전도도는 간극 내 수분함량이 증가할수록 증가하였다. 포화도가 동일할 경우, 간극률이 감소함에 따라 불포화토의 열전도도는 증가하였다.
- (4) 기존 모델 중, Cote and Konrad 모델은 토양 종류에 상관없이 다른 모델보다 상대적으로 정확하게 열전도도 값을 예측하였다. 또한 일부 경우를 제외하면, Johansen 모델에 의한 계산결과도 측정데이터와 비교적 잘 일치하였다. 반면 Kersten 모델은 예측 정확성에 일관성이 보이지 않았으며, Lu et al.

모델도 측정결과와 다소 차이가 있었다.

(5) 뒤채움재인 토양의 열전도도가 증가할수록 수평형 지중열교환기의 총 길이는 감소하였다. 또한, 토양의 포화도가 증가할수록 냉난방에 필요한 지중열교환기 길이는 감소하였으며, 포화도가 0.44 이하인 영역의 감소율이 그 이상에서의 감소율보다 크게 나타났다.

(7) 토양 종류를 달리하여 지중열교환기 길이를 산정하였을 경우, 토양 입자의 열전도도와 수분함량이 증가할수록 전체 지중열교환기 길이는 감소하였다.

참고문헌

1. Cote, J. and Konrad, J. M.(2005), "A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, pp. 443-458.
2. 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.
3. IGSHPA(2000), *Grouting for Vertical Geothermal Heat Pump Systems: Engineering Design and Field Procedures Manual*, International Ground Source Heat Pump Association, Stillwater, Oklahoma.
4. 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.)
5. 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.
6. Lu, S., Ren, T., Gong, Y. and Horton, R.(2007), "An improved model for predicting soil thermal conductivity from water content at room temperature", *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 71, No. 1, pp. 8-14.
7. Sohn, B.(2008), "Predicting the effective thermal conductivity of some sand-water mixtures used for backfilling materials of ground heat exchanger", *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 20, No. 9, pp. 614-623.