수평형 지중열교환기 설계를 위한 토양 열전도도 예측 모델 평가

Evaluation of Conventional Prediction Models for Soil Thermal Conductivity to Design Horizontal Ground Heat Exchangers

손 병 후¹ Sohn, Byonghu위 지 혜² Wi, Jihae박 상 우³ Park, Sangwoo임 지 희⁴ Lim, Jeehee최 항 석⁵ Choi, Hangseok

Abstract

Among the various thermal properties, thermal conductivity of soils is one of the most important parameters to design a horizontal ground heat exchanger for ground-coupled heat pump systems. It is well known that the thermal conductivity of soil is strongly influenced by its density and water content because of its particulate structure. This paper evaluates some of the well-known prediction models for the thermal conductivity of particulate media such as soils along with the experimental results. The semi-theoretical models for two-component materials were found inappropriate to estimate the thermal conductivity of dry soils. It comes out that the model developed by Cote and Konrad provides the best overall prediction for unsaturated sands available in the literature. Also, a parametric analysis is conducted to investigate the effect of thermal conductivity, water content and soil type on the horizontal ground heat exchanger design. The results show that a design pipe length for the horizontal ground heat exchanger can be reduced with an increase in soil thermal conductivity. The current research concludes that the dimension of the horizontal ground heat exchanger can be reduced to a certain extent by backfilling materials with a higher thermal conductivity of solid particles.

요 지

지중 토양의 열·물리적 성질 중 열전도도(thermal conductivity)는 지열 히트펌프 시스템(ground-coupled heat pump systems)의 지중열교환기 설계 과정에서 매우 중요한 변수다. 토양의 열전도도는 3상 구조로 인해 함수비와 건조밀도의 영향을 많이 받는다. 본 논문에서는 수평형 지중열교환기의 트렌치 뒤채움재로 사용되는 9종류의 토양(모래-물 혼합물)을 대상으로 열전도도 측정결과와 기존 상관식에 의한 계산결과를 비교하였다. 건조토인 경우, 2상 구조의 열전도도 예측모델인 준이론 모델에 의한 열전도도 계산 결과는 측정 결과와 큰 차이를 보였다. 불포화토인 경우, 기존 모델 중 Cote와 Konrad가 제시한 모델에 의한 계산 결과가 측정 결과와 가장 잘 일치하였다. 또한 토양의 열전도도와 함수비, 종류 등이 수평형 지중열교환기의 설계 길이에 미치는 영향을 고찰하였다. 뒤채움재로 사용되는 토양의 열전도도가 증가할수록 수평형 지중열 교환기의 설계 길이는 감소하였다.

Keywords : Ground-coupled heat pump system, Horizontal ground heat exchanger, Soil thermal conductivity, Water content, Prediction model

1 정회원, 한국건설기술연구원 그린빌딩연구실 수석연구원 (Member, Principal Research Engineer, Green Building Research Division, Korea Institute of Construction Technology)
2 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 석사졸업 (Former Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)
3 비회원 고려대학교 건축사회환경공학부 석박사통합과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)
4 비회원, (미)퍼듀대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate Student, School of Civil Engrg., Purdue Univ.)
5 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel. +82-2-3290-3326, Fax. +82-2-928-7656, hchoi2@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 신·재생에너지 이용과 기술개발에 대한 관심이 늘면서 지열에너지(geothermal energy)를 활용하는 지열 히트펌프 시스템(geothermal heat pump system)도 많은 관심을 받고 있다. 다양한 형식의 지열 시스템 중 토양의 난방을 위한 히트소스(heat source)와 냉방을 위한 히트싱크(heat sink)로 활용하는 토양열원 히트펌프(ground source heat pump or ground-coupled heat pump) 시스템은 지중열교환기 형상에 따라 수직형(vertical)과 수평형(horizontal)으로 구분된다. 두 방식은 모두 열교환기 순환유체와 열교환기 주변 토양 사이의 열전달이 원활할 때 최적 성능을 발휘할 수 있다. 이때 지중 토양의 열·물리적 성질 중 열전도도(thermal conductivity)는 매우 중요한 변수이며, 이 열전도도에 따라 지중열교환기의 사양과 규모가 결정된다.

지중열교환기 설치부지가 충분할 경우, 수평형 시스템은 수직형에 비해 상대적으로 적은 비용으로 설치할 수 있기 때문에 경제적인 시스템이다(Fig. 1). 지중열교환기 파이프가 지면에서 1.5~3m 깊이로 굴착된 트렌치(trench)에 매설되기 때문에, 열교환 효율은 수직형보다 다소 낮지만 타 열원을 연계할 경우 충분히 극복할 수 있다(Kavanaugh와 Rafferty, 1997). 지열 히트펌프 시스템에 대한 관심 증가와 함께 수직형 지중열교환기의 성능 향상과 지중 유효 열전도도 산정을 위한 연구는 국내에서도 활발히 진행되었다(Gil et al., 2006; Park et al., 2010; Sohn, 2007; Choi et al., 2008). 하지만 수평형 지중열교환기의 성능 분석이나 설계 데이터 구축, 트렌치 뒤채움재(토양 또는 모래-물 혼합물)의 열전도도 측정 등에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 수준이다.

수평형 지중열교환기의 성능은 토양의 열전도도 및 함수비(water content) 변화, 연간 지중온도 변화, 파이프 매설 깊이 등 다양한 인자에 의해 영향을 받는다. Benli와 Durmus(2009)는 수평형 지중열교환기를 채택한 시설원예용 지열 히트펌프 시스템의 성능을 분석하였다. 또한 Esen et al.(2007)은 수평형 지중열교환기 매설 깊이가 시스템의 성능 변화에 미치는 영향을 실험을 통해 규명하였다. Tarnawski et al.(2009)은 Johansen(1975)가 제시한 토양 열전도도 예측모델을 이용하여 단독주택에 설치된 수평형 지중열교환기의 연간 성능변화를 평가하였다.

지중열교환기 설계 시, 지중 유효 열전도도(수직형)와 트렌치 뒤채움재의 열전도도(수평형) 값이 필요하다. 수직형인 경우 현장 열응답 시험(in-situ thermal response test)을 적용하며(Park et al., 2010; Sohn, 2007), 수평형인 경우에는 현장에서 탐침법으로 측정하거나 시료를 채취하여 실험실에서 측정한다. Sohn(2008)은 천연규사(silica sand)를 포함하여 7종류의 모래를 대상으로 건조 상태·포화 상태 그리고 불포화 상태의 혼합물 시료의 열전도도를 측정하였다. 비정상 탐침법을 적용하였으며, 간극률과 함수비, 그리고 입자 열전도도가 시료의 열전도도에 미치는 영향을 고찰하였다.

토양(soil)의 열전도도를 예측할 수 있는 모델로 Kersten 모델(Kersten, 1949)과 Johansen 모델(Johansen, 1975)이 있다. 여러 연구자들에 의해 Kersten 모델은 상대적으로 정확도가 떨어지는 것으로 밝혀졌다. 반면 Johansen 모델은, 수분함량이 적은 영역을 제외하면, 비교적 정확한 것으로 규명되었다(Farouki, 1982). 현재 대부분의 경험 모델(Conte and Konrad, 2005; Lu et al., 2007)들은 Johansen 모델을 기초로 예측 정밀도를 향상시키는데 데 초점이

Fig. 1. Schematic of ground source heat pump system with horizontal ground heat exchanger

Fig. 2. Three phases relation of soil

맞추어져 있다.

본 논문에서는 수평형 지중열교환기의 뒤채움재인 모래-물 혼합물(이하 ‘토양’)의 열전도도 측정 결과와 기존 예측 모델에 의한 결과를 비교하였다. 즉, Sohn (2008)이 발표한 수평형 지중열교환기용 뒤채움재로서 적용할 수 있는 6종의 모래에 대한 열전도도 시험결과를 토양의 열전도도 예측을 위해 이미 제안된 이론모델과 경험모델을 비교함으로써 기존 예측모델들의 예측정밀도와 적용성을 평가하였다. 아울러 토양의 열전도도와 종류, 함수비 등이 수평형 지중열교환기의 설계 길이에 미치는 영향을 고찰하였다. 이를 위해 가상 건물의 최대 냉난방부하와 월간 에너지부하를 계산하였으며, 기존 경험식에 의한 토양 열전도도 값을 적용하여 지중열교환기 길이를 산정하였다.

2. 기본 개념

2.1 토양 상태 및 측정 시료

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

본 논문에서는 토양 시료의 주재료인 모래로 천연규사(silica sand), 인조규사(quartzite sand), 인조석회사(limestone sand), 인조사암사(sandstone sand), 인조화강사(granite sand) 그리고 두 종류의 건축용 강모래(masonry sand)를 사용하였다. 각 모래의 입자 크기는 0.02~2mm이며, 체분석을 통해 균등한 입자 크기를 갖는 모래를 사용하였다. 모래 입자의 밀도(ρ_s)와 열전도도(k_s), 혼합물 시료의 건조밀도(ρ_d)와 간극률(n), 함수비(w) 범위 등은 기

Fig. 3. Experimental apparatus for measuring thermal conductivity of soils

존 문헌에 언급되어 있다(Sohn, 2008).

2.2 토양의 열전도도 영향 인자 및 측정 방법

토양의 열전도도에 영향을 미치는 인자로는 건조밀도, 간극률, 함수비, 입자의 형태 및 입자 자체의 열전도도, 간극수의 상태(물 또는 얼음), 온도 등이 있다. 일반적으로 건조밀도가 일정할 때 함수비가 증가하면 열전도도는 증가하며, 함수비가 일정할 때 건조밀도의 증가 또한 열전도도의 증가를 야기한다. 특히 수평형 지중열교환기의 열전달 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 수분의 상이 변하기 때문이다.

토양의 열전도도는 다양한 방법으로 측정할 수 있지만 현재 비정상 탐침법(transient needle probe method)이 주로 적용된다. 비정상 탐침법(Fig. 3)은 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. 탐침법에 의한 열전도도 산정식은 식

(1)과 같다.

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

여기서 k 는 시료의 열전도도(W/mK), q' 은 열선의 단위 길이 당 발열량(W/m), t_1 과 t_2 는 시간(sec), T_1 과 T_2 는 각각 온도(K)를 의미한다.

3. 토양 열전도도 예측 모델

3.1 건조토와 포화토에 대한 준이론 모델

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. 2상 구조인 건조토와 포화토의 열전도도를 예측하기 위해서 준이론 모델을 사용한다. 준이론 모델은 각 성분의 열전도도와 체적구성비 등을 이용하여 산정할 수 있으며 준이론 모델의 근간이 되는 계산식은 다음과 같다(Wang et al., 2006).

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

여기서, d 는 형상계수(shape factor), k_i 는 각 성분의 열전도도, v_i 는 각 성분의 체적구성비를 의미한다.

준이론 모델의 기본식 (2)로부터 Table 1과 같이 여러 종류의 2상 구조체에 대한 준이론 모델을 유추할 수 있다. 이외에도 기하평균(geometric mean) 모델 등을 적용하여 2상 구조를 갖는 건조토와 포화토의 열전도도를 예측하는데 적용할 수 있으며, 본 논문에서는 건조토에 대해서만 언급하였다.

3.2 불포화토에 대한 모델

3.2.1 Kersten 모델

Kersten(1949)은 여러 종류의 토양을 대상으로 동결 상태와 미동결 상태에서 함수비를 달리하여 열전도도를 측정 후 경험식을 도출하였다(이하 Kersten 모델). 모델에서 크기가 0.05mm 이하인 입자의 함유량이 50% 이상일 경우 실트-점토질토(silt-clay soils)로, 50% 미만인 경우에는 사질토(sandy soil)로 구분하였다. 본 논문에서는 미동결 상태의 실트-점토질토와 사질토를 대상으로 했으며, 상관식은 각각 다음과 같다. 식 (3)과 식 (4)에서 건조밀도(ρ_d)의 단위는 g/cm^3 이다.

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

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

Table 1. Semi-theoretical models for two-phased soil medium

Semi-theoretical model	Particle configuration	Expected thermal conductivity	Parametric conditions for Eq. (2)
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 $\tilde{k} \rightarrow 0$

3.2.2 Johansen 모델

Johansen(1975)은 무차원 열전도도 개념을 도입하여 불포화토의 열전도도를 예측할 수 있는 경험식을 제시하였다(이하 Johansen 모델). 즉, 동일한 건조밀도를 갖는 건조토와 포화토의 열전도도 값을 이용하여 무차원 형태의 식 (5)와 포화도(S)의 함수로 나타낸 무차원 열전도도를 적용하였다.

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

$$k_n = 0.71 \log(S) + 1 \quad (6)$$

여기서 k_n 은 Johansen이 제시한 무차원 열전도도, k_d 는 건조 상태 열전도도, 그리고 k_{sat} 는 포화 상태 열전도도를 의미한다. 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)로 계산된다.

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

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

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

식 (9)에서 n 은 시료의 간극률이며, k_w 와 k_s 는 각각 물의 열전도도(0.60W/mK)와 고체 입자(모래 입자)의 열전도도를 의미한다. 이때 모래 입자의 열전도도는 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 열전도도 값(7.69 W/mK)이며, q 는 전체 시료 중 석영의 함량이다.

3.2.3 Cote and Konrad 모델

Cote와 Konrad(2005)는 다양한 종류의 토양을 대상으로 실험한 후, Johansen 모델을 기반으로 미동결 토양

에 대해 다음과 같은 경험식을 도출하였다(이하 Cote and Konrad 모델).

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

식 (12)에서 상수 κ 는 실험을 통해 얻은 상수이며, 토양의 입자 크기에 따라 조립토(coarse sands), 세립토(medium and fine sands), 실트-점토질토(silty and clay soils), 유기토(peat)로 나누고 각각 4.60, 3.55, 1.90, 0.60으로 제시하였다. 또한 건조토의 열전도도는 간극률의 함수로 표현되는 식 (13)으로 계산하며, 포화토의 열전도도는 Johansen 모델과 동일한 식 (9)를 적용하여 계산한다.

$$k_d = \chi 10^{-\eta} \quad (13)$$

식 (13)에서 χ 와 η 는 입자 형상에 따른 상수이며, 파쇄토(rocks and gravels)인 경우 1.70과 1.80, 자연토(natural mineral soils)인 경우 0.75와 1.20 그리고 유기토(peat)인 경우 0.30과 0.87로 제시되었다.

3.2.4 Lu et al. 모델

Lu et al.(2007)도 Johansen 모델의 정확도를 향상시키기 위해 상온에서 9 종류의 토양을 대상으로 열전도도를 측정 후 경험식을 제시하였다(이하 Lu et al. 모델). Johansen 모델의 식 (6)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.(2007)은 이 점에 주목하여 식 (14)와 같은 경험식을 제시하였다.

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

식 (14)에서 상수 α 는 토양의 입자크기에 따라 조립토와 세립토로 구분하고 각각 0.96과 0.27이며, 1.33은 형상계수다. Lu et al. 모델에서 간극률의 함수로 표현되는 건조토의 열전도도 상관식은 다음과 같다.

$$k_d = -0.56n + 0.51 \quad (15)$$

4. 지중열교환기 길이 산정

지열 히트펌프 시스템이 장기간에 걸쳐 성능을 발휘하기 위해서는 대상 건물의 최대 냉난방부하와 월간 에너지부하를 감당할 수 있는 지중열교환기를 설치해야 한다. 본 논문에서는 수평형 지중열교환기의 뒤채움재인 토양이 지중열교환기 설계 길이에 미치는 영향을 고찰하였다. 이를 위해 지열 히트펌프 시스템의 상용 설계 프로그램인 GLD 2009(ground loop design)를 이용하였다. Table 2에서는 히트펌프 성능계수(coefficient of performance, COP)와 지중열교환기 순환수의 히트펌프 입구온도(entering water temperature, EWT) 등 수평형 지중열교환기의 길

Table 2. Design factors of horizontal ground heat exchanger for virtual building

Factors	Input value
Building	
Area [m ²]	142
Max. cooling load [kW]	7.4
Max. heating load [kW]	21.6
Heat pump	
Total capacity [kW]	22.3
COP _c [-]	3.4
COP _h [-]	3.0
Flow rate [lpm]	66.9
Design EWT _c [°C]	30.0
Design EWT _h [°C]	5.0
Horizontal ground heat exchanger	
Shape	Two loops in trench
Working fluid	Water/Ethanol
HDPE pipe D _o /D _i [mm]	26.7/21.8

이 산정에 필요한 입력 변수를 정리하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 토양 열전도도 예측 모델 평가

5.1.1 건조토의 열전도도

Fig. 4는 건조상태($S=0$)에서의 천연구사(Silica sand, Fig. 4(a))와 건축용 강모래 B(Masonry sand B, Fig. 4(b))를 대상으로 기존 모델에 의한 열전도도 값과 측정값을 간극률의 함수로 나타낸 것이다.

Fig. 4에서 천연구사의 경우, 측정값과 준이론 모델의 하나인 Maxwell-Eucken 모델(ME2)에 의한 예측 값은 비교적 잘 일치하지만, 건축용 강모래인 경우에는 측정값과 준이론 모델에 의한 예측 값의 오차가 크게 나타났다. 반면 Conte and Konrad 모델이나 Lu et al 모델 중 건조 토양에 대한 열전도도 경험식은 측정값과 비교적 잘 일치하였다.

또한 Fig. 4에서 간극률이 증가할수록 건조 토양의 열전도도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 토양의 간극 내 물질인 공기는 고체 입자보다 상대적으로 작은 열전도도를 갖기 때문이다. 아울러 간극률이 같을 때, 입자의 열전도도가 큰 천연구사의 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.

Fig. 4. Effect of porosity on thermal conductivity (dry condition)

5.1.2 불포화토의 열전도도

Fig. 5는 불포화토의 열전도도에 대한 각 모델별 예측 결과와 측정결과를 포화도의 함수로 나타낸 것이다. 일반적으로 토양 입자 사이의 간극 크기에 따라 간극 내 존재하는 수분함량 값은 다르게 나타난다. 따라서 각 토양의 상대적 비교를 위해, 입자 사이의 간극 체적에서

물이 차지하는 체적의 비율로 정의되는 포화도의 개념을 적용하였다. 그림에서 보듯이, 전체적으로 불포화토의 열전도도는 포화도가 증가할수록 증가하였으며, 건조토($S=0$)와 포화토($S=1$)의 열전도도 값 사이에 있음을 알 수 있다.

Fig. 5에서 Cote and Konrad 모델은 토양의 종류에 상관

Fig. 5. Effect of degree of saturation on thermal conductivity of unsaturated soils

Fig. 6. Comparison between measured and calculated thermal conductivity

없이 다른 모델보다 상대적으로 정확하게 열전도도를 예측하였다. 또한 천연모래B인 경우를 제외하면, Johansen 모델에 의한 예측 결과도 측정 결과와 비교적 잘 일치하였다. 하지만 Johansen 모델은 토양 시료 내 석영 함량 값을 알아야만 적용할 수 있으며, 아울러 포화도가 낮은 영역에서는 오차가 다소 크다는 단점도 있다. 반면, Kersten 모델은 예측 정확성에 일관성이 적었다. 아울러 Johansen 모델이 기본인 Lu et al. 모델도, 포화도가 대략 0.5(50%) 이하인 영역에서는 본 측정 결과와 차이를 보였다.

Fig. 6은 예측 모델로 계산한 결과와 측정 결과 사이의 오차를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이, Kersten 모델에 의한 계산결과는 본 실험결과와 큰 차이를 보인 반면, Johansen 모델에 의한 예측결과는 상대적으로 적은 오차를 보였다. 하지만 포화도가 낮은 영역($S < 40\%$)과 천연토사에 대해서는 Johansen 모델에 의한 계산결과도 측정 결과와 다소 차이를 보였다. 즉 포화도가 낮은 영역에서는 공기에 의한 영향 때문에 Johansen 모델의 적용성이 감소함을 알 수 있다. Cote and Konrad 모

델은 전체 측정결과에 대해 $\pm 15\%$ 범위에서 일치하였다. 반면 Lu et al. 모델은 다른 모델에 비해 상대적으로 단순하지만, 포화도가 낮은 영역에 대한 개선이 필요한 것으로 판단된다.

전반적으로 본 논문에서 고려한 기존 경험식 중, Cote and Konrad 모델과 Johansen 모델은 다른 모델보다 상대적으로 정확한 값을 예측하는 것으로 평가된다. 하지만 포화도가 낮은 영역에서 오차가 다소 크게 나타났다. Farouki(1982)는 포화도가 20% 이상일 때 Johansen 모델이 Kersten 모델보다 정확하며 광범위하게 적용될 수 있다고 평가하였으며, 이는 본 논문의 결과와도 일치한다.

5.2 뒤채움재 토양이 수평형 지중열교환기 설계 길이에 미치는 영향

5.2.1 토양 열전도도와 함수비의 영향

Fig. 7은 수평형 지중열교환기의 트렌치 뒤채움재인 토양의 열전도도와 각극률이 지중열교환기의 길이에

Fig. 7. Effect of thermal conductivity of silica sand on total pipe length of horizontal ground heat exchanger

Fig. 8. Effect of degree of saturation on total pipe length of horizontal ground heat exchanger

미치는 영향을 나타낸 것이다. 이때 토양의 건조밀도와 간극률은 앞서 언급한 측정 결과를 적용하였다. 천연규사, 인조규사, 건축용 강모래 등을 포함하여 앞서 언급한 재료들이 수평형 지중열교환기 뒤채움재로 사용된다. 각 재료들이 지중열교환기 길이 변화에 미치는 전체적인 경향은 유사하였기 때문에, 천연규사에 대한 결과를 대표로 도시하였다. 그림에서 토양의 열전도도가 증가할수록 대상 건물에 필요한 지중열교환기 길이도 감소함을 볼 수 있다. 아울러 본 대상 건물은 난방부하가 냉방부하보다 크기 때문에 난방에 필요한 지중열교환기가 더 길게 선정되었다.

Fig. 8은 토양의 포화도가 수평형 지중열교환기의 설계 길이에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 앞에서 언급한 것처럼, 본 대상건물에 대한 실제 설계 값은 난방 길이가 된다. 따라서 그림 8에는 난방용 지중열교환기 길이만 도시하였다. 그림에서 보듯이, 포화도가 증가할수록 지중열교환기 길이는 감소하였다. 또한 포화도가 같을 경우, 건조밀도가 증가할수록 즉 간극률이 감소할수록 지중열교환기 길이는 감소하였다. 아울러 포화도가 0.44(44%) 이하인 영역의 감소율이 그 이상에서의 감소율보다 크게 나타나는 것도 확인할 수 있다.

5.2.2 토양 종류의 영향

Fig. 9는 트렌치 뒤채움재의 종류가 난방에 필요한 지중열교환기 길이에 미치는 영향을 도시한 것이다. 전반적인 경향은 유사하였기 때문에, 간극률이 대략 0.33 ($\rho_d \approx 1760 \text{ kg/m}^3$)인 결과만 도시하였다. 토양 종류를 달리하여 지중열교환기 길이를 산정했을 경우, 토양 입자

Fig. 9. Total pipe length of horizontal ground heat exchanger for various backfill materials

의 열전도도(k_s)와 포화도가 증가할수록 지중열교환기 길이는 감소하였다. 또한 토양 입자의 열전도도가 상대적으로 큰 천연규사나 인조규사가 건축용 강모래보다 수분함량에 의한 영향을 크게 받는 것을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 지열 히트펌프 시스템의 수평형 지중열교환기의 뒤채움재인 토양의 열전도도 측정 결과와 기존 예측 모델에 의한 결과를 비교하였다. 이를 근거로 토양의 열전도도와 종류, 함수비 등이 수평형 지중열교환기의 설계 길이에 미치는 영향을 고찰하였다. 이를 위해 가상 건물을 대상으로 기존 경험식에 의한 토양 열전도도 값을 적용하여 지중열교환기 길이를 산정하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 건조토의 열전도도인 경우, 2상 구조를 갖는 혼합물의 열전도도를 예측하는 준이론 모델로 계산할 때 오차가 크게 발생하는 반면, Cote and Konrad 모델이나 Lu et al 모델과 같은 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. 불포화토의 열전도도는 간극 내 수분함량이 증가할수록 증가하였다. 포화도가 동일할 경우, 간극률이 감소함에 따라 불포화토의 열전도도는 증가하였다.

- (3) 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 측정 결과와 비교적 잘 일치하였다. 반면 Kersten 모델은 예측 정확성에 일관성이 보이지 않았으며, Lu et al. 모델도 측정 결과와 다소 차이가 있었다.
- (4) 예상할 수 있듯이 뒤택움재의 열전도도가 증가할수록 수평형 지중열교환기의 설계 길이는 감소하였다. 또한 뒤택움재의 포화도가 증가할수록 냉난방에 필요한 지중열교환기 길이는 감소하였으며, 뒤택움재가 건조 상태에 있을 경우 습윤 상태에 비하여 필요한 지중열교환기 길이가 약 2.8배 더 길고, 포화도가 약 45%인 경우는 습윤 상태에 비하여 지중열교환기 길이가 약 1.2배 더 필요하다. 이는 포화도가 45% 이하 영역에서의 필요한 지중열교환기 증가율이 그 이상에서의 증가율보다 크게 나타났다.
- (5) 뒤택움용 토양 종류를 달리하여 지중열교환기 길이를 산정하였을 경우, 토양 입자의 열전도도가 상대적으로 큰 천연규사나 인조규사가 건축용 강모래보다 수분함량에 의한 영향을 크게 받는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 뒤택움재의 수분함량이 냉난방 가동 중 일정 수준 이상으로 유지될 수 있다면, 천연규사나 인조규사를 뒤택움재로 적용함으로써 설계 지중열교환기 파이프 길이를 감소시켜 시공비를 절감할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(20093020110010-11-1)입니다.

참 고 문 헌

1. Gil, H., Lee, K., Lee, C., and Choi, H. (2009), "Numerical Evaluation on Thermal Performance and Sectional Efficiency of Closed-loop Vertical Ground Heat Exchanger", Journal of Korean Geotechnical Society (KGS), Vol.25, No.3, pp.57-64.
2. Park, M., Wi, j., Lee, C., Choi, H., and Kang, S-H (2010), "Study

- on Cement-based Grout for Closed-loop Vertical Ground Heat Exchanger", Journal of Korean Geotechnical Society (KGS), Vol.26, No.7, pp.107-115.
3. Sohn, B. (2007), "Evaluation of Ground Effective Thermal Conductivity and Borehole Effective Thermal Resistance from Simple Line-Source Model", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol.19, No.7, pp.512-520.
4. Sohn, B. (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.
5. Choi, H., Lee, C., Choi, H-B., and Woo, S-B (2008), "A Study on the Physical Characteristics of Grout Material for Backfilling Ground Heat Exchanger", Journal of Korean Geotechnical Society (KGS), Vol.24, No.1, pp.37-49.
6. Benli, H. and Durmus, A. (2009), "Evaluation of ground-source heat pump combined latent heat storage system performance in greenhouse heating", Energy and Buildings, Vol.41, pp.220-228.
7. 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.
8. Esen, H., Inalli, M., Esen, M., and Pihitli, K. (2007), "Energy and exergy analysis of a ground-coupled heat pump systems with two horizontal ground heat exchanger", Building and Environment, Vol.42, pp.3606-3615.
9. 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.
10. 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, US)
11. Kavanaugh, S. P. and Rafferty, K. (1997), Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers (ASHRAE), Atlanta, US.
12. Kersten, M. S. (1949), Laboratory research for the determination of the thermal properties of soil, Research Laboratory Investigations, Engineering Experiment Station, Technical Report 23, University of Minnesota, Minneapolis, US.
13. 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, pp.8-14.
14. Tarnawski, V. R., Leong, W. H., Momose, T., and Hamada, Y. (2009), "Analysis of ground source heat pumps with horizontal ground heat exchangers for northern Japan", Renewable Energy, Vol.34, pp.127-134.
15. Wang, J., Carson, J. K., North, M. K., and Cleland, D. J. (2006), "A new approach to modelling the effective thermal conductivity of heterogeneous materials", International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.49, pp.3075-3083.

(접수일자 2011. 12. 16, 심사완료일 2012. 12. 15)