지중 유효 열물성 산정 및 지중열교환기 성능에 대한 보어홀 열저항의 영향

손병후†
한국건설기술연구원 그린빌딩연구실

Evaluation of Ground Effective Thermal Properties and Effect of Borehole Thermal Resistance on Performance of Ground Heat Exchanger

Byonghu Sohn†
Green Building Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

Abstract

Geothermal heat pump(GHP) systems use vertical borehole heat exchangers to transfer heat to and from the surrounding ground via a heat carrier fluid that circulates between the borehole and the heat pump. An Important feature associated with design parameters and system performance is the local thermal resistances between the heat carrier flow channels in the borehole and the surrounding ground. This paper deals with the in-situ experimental determination of the effective thermal properties of the ground. The recorded thermal responses together with the line-source theory are used to determine the thermal conductivity and thermal diffusivity, and the steady-state borehole thermal resistance. In addition, this paper compares the experimental borehole resistance with the results from the different empirical and theoretical relations to evaluate this resistance. Further, the performance simulation of a GHP system with vertical borehole heat exchangers was conducted to analyze the effect of the borehole thermal resistance on the system performance.

Key words: Borehole thermal resistance(보어홀 열저항), Thermal diffusivity(열확산계수), Borehole heat exchanger(지중열교환기), Thermal response test(열응답 시험)

기 호 설 명

c_p : 비열 [J/kgK]
k : 열전도도 [W/mK]
L : 보어홀(borehole) 깊이 [m]
m : 기울기, 식(7)과 식(8) [-]
Q : 열 입력량 [W]
R : 열저항 [mK/W]
r : 반경 또는 반경방향으로 거리 [m]
S : 보어홀 사이의 간격 [m]
T : 온도 [℃]
T_i : 지중 초기 온도 [℃]
t : 시간 [s] 또는 [hour]

† Corresponding author
Tel.: +82-31-910-0495, Fax: +82-31-910-0246
E-mail: byonghu@kict.re.kr
접수일 : 2012년 10월 22일
심사일 : 2012년 10월 24일
채택일 : 2012년 11월 16일

그리스 문자

α : 열확산계수(=$k/\rho c_p$) [m^2/s]
γ : Euler 상수(=0.5772)

하첨자

b : 보어홀
f : 지중열교환기 순환 유체
g : 보어홀 그라우트(grout)
p : 지중열교환기 파이프
s : 지중열교환기 주변 토양(soil)

1. 서 론

지열 히트펌프 시스템(geothermal heat pump system)은 통상 지열 히트펌프(geothermal heat pump)와 지중열교환기(ground heat exchanger) 그리고 관련 부속 설비 등으로 구성된다. 지열 히트펌프 시스템의 열원(heat source, 난방)과 히트싱크(heat sink, 냉방)인 땅(ground)의 온도는 거의 일정하기 때문에, 시스템은 연중 안정적인 성능을 발휘한다. 특히 여름철 땅 속 온도는 외기온도보다 낮고 반대로 겨울에는 높기 때문에, 공기열원 히트펌프보다 성능이 우수한 것으로 알려져 있다. 이러한 장점 때문에 지열 시스템은 건물부문의 냉·난방(급탕) 에너지 소비를 줄일 수 있는 대안으로 많은 관심을 받고 있으며, 국내에서도 설치 사례가 꾸준히 증가하고 있다.

지열 히트펌프 시스템의 구성 요소 중, 지중열교환기는 전체 시스템의 성능과 초기 투자비를 결정하는 중요 기기다. 현재 국내에서는 수직형 지중 열교환기(또는 보어홀 열교환기)를 주로 설치하고 있다. 지중열교환기를 과하게 설치하거나 또는 부족하게 설치하는 것을 막고 아울러 장기간에 걸친 성능 확보를 위해, 지중 열전도도(ground thermal conductivity)와 보어홀 열저항(borehole thermal resistance) 그리고 지중 열확산계수(thermal diffusivity) 등을 정확하게 산정한 후, 이 값들을 설계에 적용해야 한다.[1]

지중 열전도도와 보어홀 열저항을 산정하기 위해, 현장 열응답 시험(in-situ thermal response test)을 주로 적용하고 있다. 열응답 시험은, Fig. 1에서 보듯이, 보어홀 열교환기가 보어홀 내 파이프, 파이프 주변 그라우트(grout) 그리고 보어홀 주변의 토양과 암반층 등 다양한 종류의 매질로 구성되기 때문에 유효 값(effective value)을 구하는 과정으로 볼 수 있다. 이때 건물에 적용하려는 지중열교환기와 같은 사양의 시험용 보어홀을 설치하고, 실제 지중 순환수 유량과 동일한 값으로 시험해야 한다.

시험 방법 개선과 관련한 연구를 포함하여 그라우팅 재료와 시험 시간 등 다양한 인자들이 지중 유효 열물성에 미치는 영향을 고찰한 연구결과들[2-6]이 발표되었다. Lamarch et al.[7]은 보어홀 열저항을 산정할 수 있는 다양한 방법과 수치해석 결과를 비교하였다. 또한 Sharqawy[8]는 현장 시험 결과를 이용하여 지중 열전도도와 열확산계수를 산정하였으며, 이 결과를 이용하여 보어홀 열저항을 계산하는 방법을 제시하였다.

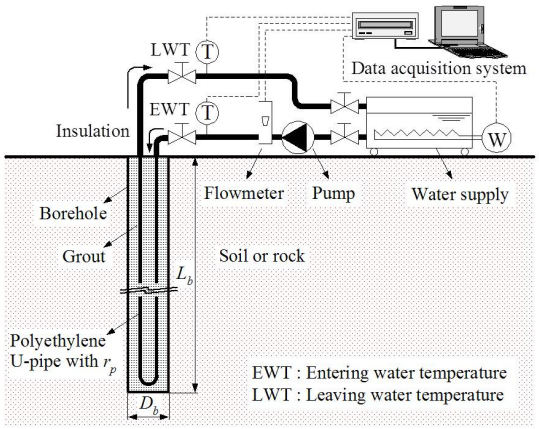


Fig. 1 Schematic diagram of in-situ thermal response test apparatus.[1]

현재 설치의무화사업과 지방보급사업 등 국가보급사업 수행 시, 열응답 시험을 수행하고 여기서 얻은 지중 열전도도 값을 공인 설계프로그램에 적용하여 시스템과 보어홀 열교환기를 설계하는 것으로 규정하고 있다.[9] 문제는 이 시공기준[9]이 보어홀 열저항과 지중 열확산계수의 산정 방법 그리고 시스템 설계 시 적용 지침 등을 명확하

게 규정하지 않고 있다는 것이다. 따라서 본 논문에서는 상대적으로 덜 알려진 보어홀 열저항과 지중 열확산계수 산정 방법 등을 정리하고, 실제 현장 시험 결과를 이용하여 이 값들을 산정하였다. 아울러 기존 보어홀 열저항 해석 모델에 의한 계산 결과와 시험 결과를 비교하였다. 마지막으로 보어홀 열저항이 지중열교환기 설계 길이와 지중 순환수의 온도 변화에 미치는 영향을 고찰하였다. 이때 열저항의 영향을 살피기 위해, 실제 건물의 냉난방부하[10]를 이용하였다.

2. 열응답 시험과 지중 유효 열물성

2.1 열응답 시험 결과 해석 방법

현장 열응답 시험 결과의 해석은 무한 선형열원(infinite line heat source)에서 반경 방향으로 전도에 의해서만 열이 전달되는 1차원 열전도 문제에서 출발한다. 여기서 선형열원 주변의 매질(medium)은 균질(homogeneous)하고 축 방향 열전달은 없는 것으로 가정한다. 열응답 시험 결과로부터 지중 유효 열물성을 산정하기 위해 무한 선형열원 이론[11,12]을 적용하며, 해석해는 식(1)과 같다.

$$T(r,t) = T_i + \frac{Q}{4\pi k_s L}\int_{x_0}^{\infty}\frac{e^{-u}}{u}du \qquad (1)$$

식(1)에서 적분변수 $x_0(r^2/4\alpha t)$가 매우 작기 때문에 지수적분 항을 식(2)의 근사식으로 표현할 수 있다. 이 식(2)를 식(1)에 대입하여 정리하면 식(3)의 단순 선형열원 모델을 얻을 수 있다.

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

$$T(r,t) \approx T_i + \frac{Q}{4\pi k_s L}\ln\left(\frac{4\alpha_s t}{\gamma_1 r^2}\right),\ \gamma_1 = 1.781 \qquad (3)$$

또한 Fig. 2에서 보듯이, 열원(순환유체의 입·출구 평균 온도)에서 주변 매질로 전달되는 열량(Q)을 온도와 보어홀 열저항(R_b)의 함수로 표현하면 다음과 같다.

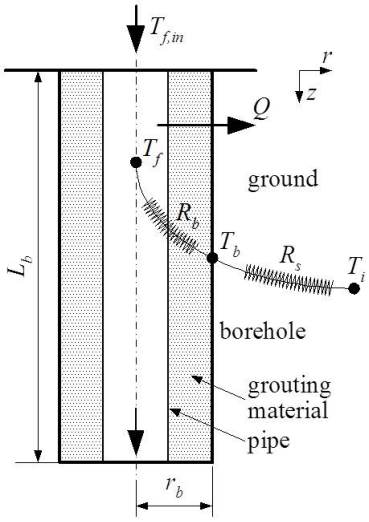


Fig. 2 Schematic representation of a borehole embedded in an infinite medium.[1]

$$\frac{Q}{L_b}(=q_l) = \frac{T_f - T_b}{R_b} \qquad (4)$$

식(4)에서 보어홀 벽면의 온도(T_b)를 현장에서 측정하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에, 순환유체의 온도와 지중 초기 온도(T_i)를 이용하여 식(4)의 오른쪽 항의 분자를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$T_f - T_i(=\Delta T) = (T_f - T_b) + (T_b - T_i) \qquad (5)$$

식(5)의 우변 첫 번째 항에 식(4)를 그리고 우변 두 번째 항에 식(3)을 대입하여 시간 경과에 따른 유체의 온도 변화를 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\Delta T &= \frac{QR_b}{L_b} + \frac{Q}{4\pi k_s L_b}\ln\left(\frac{4\alpha_s t}{\gamma_1 r_b^2}\right) \\ &= \frac{Q}{4\pi k_s L_b}\ln(\mathrm{t}) + \frac{Q}{L_b}\left[\frac{1}{4\pi k_s}\ln\left(\frac{4\alpha_s}{\gamma_1 r_b^2}\right) + R_b\right]\end{aligned} \qquad (6)$$

식(6)을 시간의 자연로그 값($\ln t$) 대 순환유체의 온도 변화(ΔT)로 도시하면, 기울기 m과 식(6)의 우변 두 번째 항을 y축 절편으로 하는 직선이 된다. 따라서 이 직선의 기울기를 이용하여 지중

Table 1 Methods for calculating borehole thermal resistance

Methods	Expressions in methods	Equation number
Borehole shape factor method in Remund[13]	$R_g = \frac{1}{\beta_0 (r_b/r_p)^{\beta_1} k_g}$, k_g : grout thermal conductivity $\beta_0 = 20.10$ and $\beta_1 = -0.9447$ for configuration 'A' $\beta_0 = 17.44$ and $\beta_1 = -0.6052$ for configuration 'B' $\beta_0 = 21.91$ and $\beta_1 = -0.3796$ for configuration 'C'	(11)
Line-source method by Hellstrom[14]	$R_g = \frac{1}{4\pi k_g}\left[\ln\left(\frac{r_b}{r_p}\right) + \ln\left(\frac{r_b}{2s_c}\right) + \sigma \ln\left\{\frac{(r_b/s_c)^4}{(r_b/s_c)^4 - 1}\right\}\right]$ s_c : half the center-to-center distance between the two legs of the U-tube $\sigma = \frac{k_g - k_s}{k_g + k_s}$	(12)
Multi-pole method by Bennet et al.[15]	$R_g = \frac{1}{4\pi k_g}\left[\ln\left\{\frac{\lambda_1 \lambda_2^{1+4\sigma}}{2(\lambda_2^4 - 1)^\sigma}\right\} - \frac{\lambda_3^2\{1-(4\sigma/(\lambda_2^4-1))\}^2}{1+\lambda_3^2\{1+(16\sigma/(\lambda_2^2 - 1/\lambda_2^2)^2)\}}\right]$ $\lambda_1 = \frac{r_b}{r_p}$, $\lambda_2 = \frac{r_b}{s_c}$, and $\lambda_3 = \frac{r_p}{2s_c}$	(13)

열전도도를 산정[식(7)]하며 또한 식(6)을 보어홀 열저항에 대하여 정리하면 식(8)과 같다.

$$k_s = \frac{Q}{4\pi m L_b} \quad \text{for } t \geq \frac{5r_b^2}{\alpha_s} \tag{7}$$

$$R_b = \frac{1}{4\pi k_s}\left[\frac{\Delta T}{m} - \ln\left(\frac{4\alpha_s t}{\gamma_1 r_b^2}\right)\right] \tag{8}$$

식(8)에서 보어홀 열저항에는 유체 유동 열저항(R_f), 파이프 열저항(R_p) 그리고 보어홀 내 그라우팅 재료의 열저항(R_g)이 모두 포함된 값이다.[1]

$$R_b = R_f + R_p + R_g \tag{9}$$

식(9)에서 그라우팅 재료의 열저항에 대한 기존 해석 방법들을 Table 1에 정리하였다.

또한 식(6)의 우변 두 번째 항을 y축 절편(b)을 이용하여 열확산계수에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$\alpha_s = \frac{k_s}{\rho_s c_{p,s}} = \exp\left(\frac{4\pi k_s b}{q_l} - 4\pi k_s R_b + \gamma\right) \times \frac{r_b^2}{4} \tag{10}$$

2.2 지중 유효 열물성 산정

Fig. 3은 현장(충남 서천) 열응답 시험에서 획득한 순환유체의 입·출구 온도와 이들의 평균 온도 그리고 평균 열 투입량과 순환유체 유량을 나

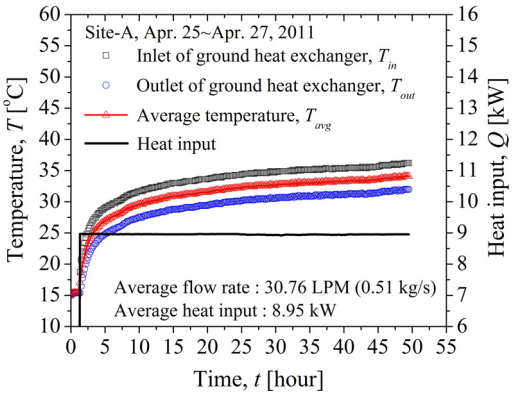


Fig. 3 In-situ thermal response test results with respect to elapsed test time.

타낸 것이다. 현장 열응답 시험을 위해 직경 150 mm와 깊이 150 m의 시험용 보어홀을 설치하였다. 여기에 32A(내경 34.5 mm, 외경 42.2 mm) HDPE 파이프를 U-관(U-tube)으로 성형하여 삽입한 후, 벤토나이트-모래-물($k_g = 1.12$ W/mK)을 혼합하여 채웠다. 다음으로 열응답 시험 장비를 시험용 보어홀에 연결한 후, 열을 공급하지 않은 상태에서 약 1시간 동안 물을 순환시키면서 초기 지중 온도를 측정하였다. 시험 수행에 앞서, 지중 열교환기 파이프 안의 공기나 불순물 등을 물을 순환시켜 제거하였다. 다음으로 전열기를 가동하여 순환유체인 물에 일정하게 열을 가하면서 온도, 유량, 전력량 등을 10분 간격으로 50시간 측정하였다. Kline[16]이 제안한 방법에 따라 측정 결과에 영향을 미치는 데이터와 변수의 편차들을 조합하여 불확실도(uncertainty)를 계산하였으며, 지중 열전도도와 보어홀 열저항의 불확실도는 각각 ±3.57%와 ±5.29%였다.

시험 중 평균 유량과 전력량은 각각 30.76 LPM(0.51 kg/s)과 8.95 kW였다. 또한 순환유체의 입·출구 온도차와 유량 등으로 열전달량을 계산한 결과 평균 8.90 kW였으며, 전력량과 비교했을 때 평균 0.57%의 차이를 보였다. 따라서 외부 노출배관에 의한 열손실은 무시할만한 수준이다. 순환유체의 입·출구 온도는 평균 4.2℃ 차이를 보였으며, 지중 초기 온도(T_i)는 15.4℃였다.

Fig. 4는 순환유체의 입·출구 평균 온도(T_{avg})와 지중 초기 온도의 차이를 시간의 함수로 나타낸 것이다. 국가 기준[9]에 따라 12시간 이후의 데이터를 이용하여 지중 유효 열전도도를 산정하였다. 그림에서 보듯이, 기울기(m)는 2.5622이며 이 값과 전력량 등을 식(7)에 대입하여 지중 열전도도를 계산한 결과 1.8532 W/mK이었다. 또한 y축 절편은 8.53℃이며 이 값을 식(10)에 대입하여 지중 열확산계수를 산정한 결과 9.0087×10^{-7} m^2/s (0.07784 m^2/day)였다.

식(3)의 계산 오차는 $t \geq 20r^2/\alpha$인 경우 2.5% 이하 그리고 $t \geq 5r^2/\alpha$인 경우 10% 이하인 것으로 알려져 있다. 열응답 시험에서는 통상 후자의 기준을 채택하고 있다.[2] 앞서 구한 열확산계수를 이용하여 계산한 결과, 각각 35.6시간(2.5%)과 8.9시간(10%)이었다. 따라서 본 현장의 전체 시험시간(50시간)과 12시간 이후의 데이터를 이용한 유효 열물성 산정은 타당한 것으로 판단된다. 참고로 8.9시간 이후의 데이터를 이용했을 경우, 지중 열전도도는 1.8533 W/mK이었으며, 열확산계수는 9.0054×10^{-7} m^2/s(0.07781 m^2/day)였다.

Fig. 5는 현장 시험 결과를 이용하여 보어홀 열저항을 산정한 결과다. 아울러 기존 해석모델에 의한 계산 결과도 함께 나타내었다. 현장 열응답

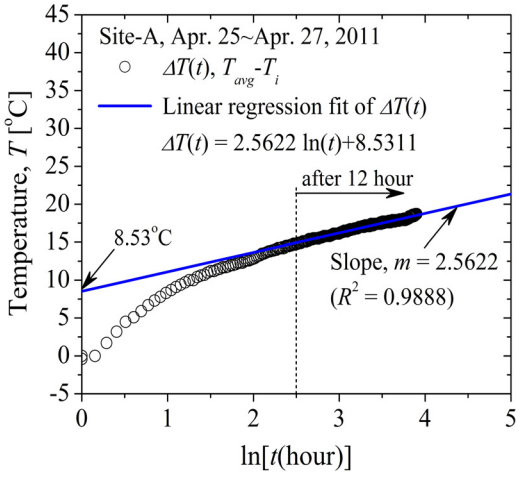


Fig. 4 Temperature difference(ΔT) variation and linear regression fit of ΔT with respect to elapsed test time.

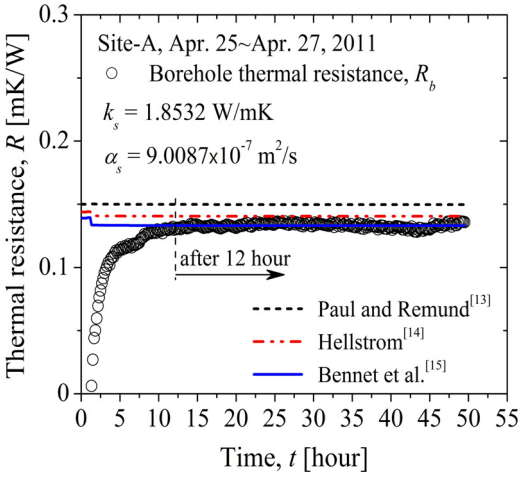


Fig. 5 Comparison of test results and different models for borehole thermal resistance values.

시험을 통한 보어홀 열저항은 앞서 구한 지중 열전도도와 열확산계수 그리고 Fig. 4의 기울기 등을 식(8)에 대입하여 계산한 것이다. 해석모델에 의한 계산은 식(9)에서 R_g를 Table 1의 해석 방법들을 적용하여 계산한 것이다.

열응답 시험 결과 중 12시간 이후의 데이터를 이용하여 계산한 보어홀 유효 열저항은 0.1298 mK/W였다. 반면 해석모델을 이용한 계산 결과는 각각 0.1497 mK/W(Paul and Remund[13]), 0.1404 mK/W(Hellstrom[14]), 0.1330 mK/W(Bennet et al.[15])였다. 결과에서 보듯이, Bennet et al.[15]이 제시한 방법은 시험 결과와 2.42% 차이를 보였으며, 시험 결과와 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 아울러 Hellstrom[14]의 방법도 시험 결과와 비교적 일치(5.55%)하였다. 반면, 국내에서 많이 사용되는 GLD[17]의 보어홀 형상계수 모델[13]은 다소 큰 차이(12.55%)를 보였다.

본 결과는 수치해석에 의한 보어홀 열저항 계산 결과나 기존 모델의 예측 성능을 비교한 연구 결과들[4,7,8]과도 일치한다. 물론 본 논문은 한 현장에 대한 결과다. 따라서 여러 현장의 시험 결과를 이용하여 해석방법에 따른 계산 결과들을 비교·분석한 후, 보어홀 열저항 산정 방법을 명확하게 제시할 필요가 있다. 아울러 GLD[17]를 이용하여 수직 밀폐형 지열 히트펌프 시스템을 설계할 경우, 프로그램 자체에서 계산한 열저항 값보다 열응답 시험에서 구한 값을 적용하는 것이 더 정확할 것으로 판단된다.

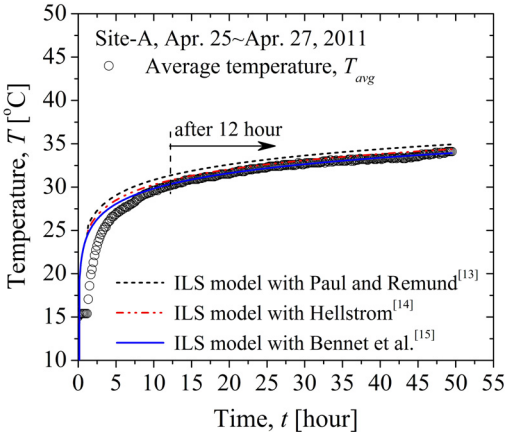


Fig. 6 Comparison of test results and different models for fluid temperature.

Fig. 6은 순환유체의 입·출구 평균 온도에 대하여 현장 측정 결과와 기존 해석 방법을 이용하여 계산한 결과를 비교한 것이다. 이때 Table 1의 기존 해석 모델을 식(9)와 식(6)에 순차적으로 대입하여 순환유체의 평균 온도를 계산하였다. 보어홀 열저항 결과와 마찬가지로 Bennet et al.[15]의 해석 방법을 적용하여 계산한 결과가 시험 결과와 가장 일치하였다.

3. 보어홀 열저항의 영향

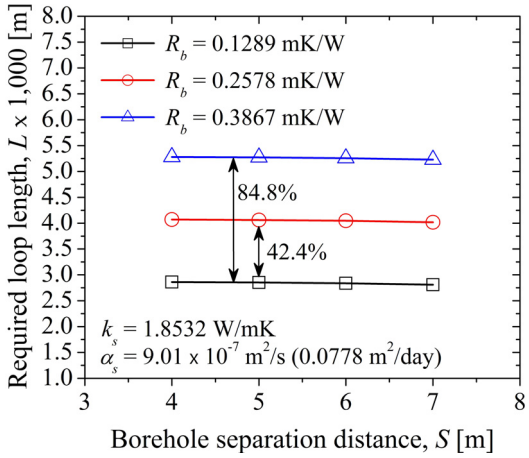
이상에서 구한 보어홀 열저항이 지중열교환기 설계 길이와 장기간에 걸친 EWT 변화에 미치는 영향을 고찰하였다. 이를 위해, 실제 건물에 수직 밀폐형 지중열교환기를 적용하는 것으로 가정한 후, 앞서 언급한 GLD[17]를 이용하여 시스템을 설계하였다. Table 2는 설계 시 입력한 데이터를 정리한 것이다.

Table 2 Design parameters or specifications in modelling of a vertical GHP system

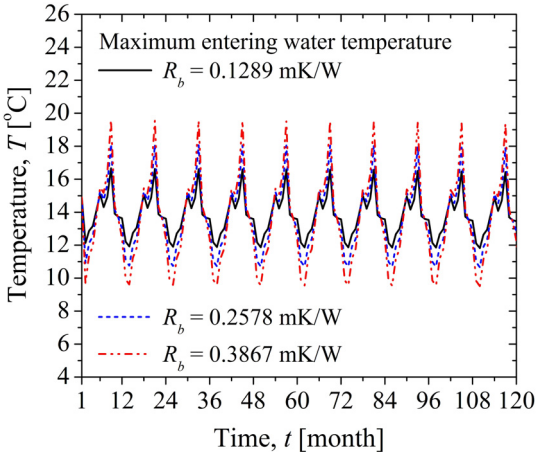
Parameters	Specifications
Building	
Conditioned area [m^2]	1,210
Peak cooling load [kW]	171.1
Peak heating load [kW]	126.5
Ground characteristics, mean values	
Initial ground temperature [℃]	15.4
Thermal conductivity [W/mK]	1.8532
Thermal diffusivity [m^2/day]	0.0778
Ground heat exchanger	
Pipe outer/inner diameter [mm]	33.4/27.3
Pipe resistance [mK/W]	0.061
U-tube configuration	Single
Radial pipe placement in borehole	Average
Borehole diameter [m]	0.152
Grout thermal conductivity [W/mK]	1.12
Borehole thermal resistance [mK/W]	0.1298
Working fluid	Methanol

건물은 지하 1층과 지상 3층 규모이며, 전체 공간에서 지상 1층(1,210 m^2)을 지열 시스템이 담당하는 것으로 가정하였다. 대상 건물의 최대 냉난방 부하 그리고 시간대별과 월별 에너지부하 등을 산정하기 위해 서울의 2009년 외기 온도를 적용하였다. 아울러 Table 2에서 지중 유효 열전도도(1.8532 W/mK)와 보어홀 유효 열저항(0.1289 mK/W) 등은 현장 시험을 통해 구한 값들이다. 대상 건물의 지중열교환기 설계와 관련하여 기타 자세한 내용은 기존 문헌[10]에 언급되었기 때문에 본 논문에서는 생략한다.

Fig. 7은 현장에서 구한 보어홀 열저항(0.1289 mK/W)과 보어홀 사이의 간격(S) 5 m인 경우를 기준으로 하였을 때, 열저항 값의 변화가 지중열교환기 설계 길이와 성능에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 보어홀 열저항이 증가할수록 지중열교환기 설계 길이는 증가하였다. 참고로 설계 길이는 냉방과 난방에 필요한 길이 중 큰 값으로, 본 건물에서는 냉방에 필요한 길이에 해당한다. 아울러 보어홀 간격의 영향은 열저항의 영향에 비해 상대적으로 적었다. 하지만 가용 부지와 지중 순환수 펌프의 소비동력 등을 모두 살펴야 하기 때문에, 간격을 넓히는 데에는 신중한 주의가 필요하다. 아울러 Fig. 7(b)에서 보어홀 열저항이 장기간의 EWT 변화에도 영향을 미침을 볼 수 있다.



(a) Required loop length



(b) Monthly maximum EWT variation

Fig. 7 Effect of borehole thermal resistance on design and long-term performance of borehole heat exchanger.

4. 결 론

본 논문에서는 상대적으로 덜 알려진 보어홀 열저항과 지중 열확산계수 산정 방법 등을 정리하였다. 또한 열응답 시험을 통해 이 값들을 산정하였으며, 보어홀 열저항에 대해서는 기존 해석 모델에 의한 계산 결과와 시험 결과를 비교하였다. 마지막으로 보어홀 열저항이 지중열교환기 설계 길이와 지중 순환수의 온도 변화에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 열응답 시험을 통해 지중 유효 열전도도와 열확산계수 그리고 보어홀 열저항을 산정하였으며, 각각 1.8532 W/mK, 9.0087×10^{-7} m^2/s, 0.1289 mK/W였다.

(2) 기존 해석 모델로 계산한 보어홀 열저항은 각각 0.1497 mK/W(Paul and Remund), 0.1404 mK/W(Hellstrom), 0.1330 mK/W(Bennet et al.)였다.

(3) 기존 열저항 해석 방법 중, Bennet et al.이 제시한 방법은 시험 결과와 2.42% 차이를 보였으며, 시험 결과와 잘 일치하였다. 아울러 Hellstrom의 방법도 시험 결과와 비교적 일치(5.55%)하였다. 반면, 국내에서 많이 사용되는 GLD의 보어홀 형상계수 모델은 상대적으로 큰 차이(12.55%)를 보였다.

(4) 보어홀 열저항이 증가할수록 지중열교환기 설계 길이는 증가하였다. 아울러 보어홀 열저항이 장기간의 EWT 변화에도 영향을 미침을 확인하였다. 마지막으로 보어홀 간격의 영향은 열저항의 영향에 비해 상대적으로 적었다.

후 기

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 20113030110010). 또한 본 논문의 일부 내용은 (사)한국지열에너지학회 2012년도 춘계학술발표대회에서 발표한 내용입니다.

참고문헌

1. Sohn, B., 2007, Evaluation of ground effective thermal conductivity and borehole thermal resistance from simple line-source model, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 19, No. 7, pp. 512-520.
2. Mattsson, N., Steinmann, G. and Laloui, L., 2008, Advanced compact device for the in situ determination of geothermal characteristics of soils, Energy and Buildings, Vol. 40, pp.1344-1352.
3. Beier, R. A., Smith, M. D. and Spitler, J. D., 2011, Reference data sets for vertical borehole ground heat exchanger models and thermal response test analysis, Geothermics, Vol. 40, pp.79-85.
4. Wagner, V., Bayer, P., Kubert, M. and Blum, P., 2012, Numerical sensitivity study of thermal response test, Renewable Energy, Vol. 41, pp.245-253.
5. Sohn, B., 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.
6. 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.
7. Lamarche, L., Kajl, S. and Beauchamp, B., 2010, A review of methods to evaluate borehole thermal resistances in geothermal heatpump systems, Geothermics, Vol. 39, pp. 187-200.
8. Sharqawy, M. H., Said, S. A., Mokheimer, E. M., Habib, M. A., Badr, H. M. and Al-Shayea, N. A., 2009, First in situ determination of the ground thermal conductivity for borehole heat exchanger application in Saudi Arabia, Renewable Energy, Vol. 34, pp. 2218-2223.
9. MKE and KNREC, 2012, Standard and guidelines for new and renewable energy systems, Official announcement and guidelines of Ministry of Knowledge Economy(MKE) and Korea New and Renewable Energy Center (KNREC).
10. Sohn, B., 2012, Performance prediction of geothermal heat pump system by line-source and modified DST models, Transactions of the Korea Society of Geothermal Energy Engineers, Vol. 8, No. 1, pp. 21-31.
11. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Oxford University Press.
12. Ingersoll, L. R. and Plass, H. J., 1948, Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, Heating, Piping & Air Conditioning, July, pp. 119-122.
13. Remund, C. P., 1999, Borehole thermal resistance: laboratory and field studies, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 439-445.
14. Hellstrom, G., 1991, Ground heat storage; thermal analysis of duct storage systems, Doctoral Thesis, University of Lund, Sweden.

15. Bennet, J., Calesson, J. and Hellstrom, G., 1987, Multipole method to compute the conductive heat transfer to and between pipes in a composite cylinder, Notes on Heat Transfer 3-1987, Lund Institute of Technology, Sweden.
16. Kline, S. J., 1985, The purpose of uncertainty analysis, Journal of Fluids Engineering, Vol. 107, pp. 153-160.
17. Gaia Geothermal, 2010, Ground Loop Design Version 7.1.37 for Windows, Gaia Geothermal.