

지중 열교환기 보어홀에서의 유효 열전도도 및 열저항 산정

손 병 후[†], 신 현 준, 박 성 구*

한국건설기술연구원 화재 및 설비 연구부, *(주) 지오테크

Evaluation of Effective Thermal Conductivity and Thermal Resistance in Ground Heat Exchanger Boreholes

Byong Hu Sohn[†], Hyun-Joon Shin, Seong-Koo Park*

Fire & Engineering Services Research Department, KICT, Goyang 411-712, Korea

*Geotech Inc., Sungnam 472-247, Korea

(Received March 2, 2005; revision received March 30, 2005)

ABSTRACT: The objective of this study is to determine the effective thermal conductivity and thermal resistance values in test boreholes with three different fill materials. To evaluate these heat transfer properties, in-situ tests on four vertical boreholes were conducted by adding a monitored amount of heat to water over various test lengths. Two parameter estimation models, line-source and numerical one-dimensional models, for evaluation of thermal response test data were compared when applied on the same four data sets. Results show that the average thermal conductivity deviation between measured data and these two models is in the range of 3.03% to 4.45%. The effect of increasing grout thermal conductivity from 1.34 to 1.82 W/m°C resulted in overall increases in effective formation thermal conductivity by 11.1% to 51.9% and reductions in borehole thermal resistance by 11.6% to 26.1%.

Key words: Effective thermal conductivity(유효 열전도도), Effective borehole thermal resistance(보어홀 유효 열저항), In-situ thermal response test(현장 열응답 시험), Parameter estimation model(변수 평가 모델), Formation(그라우트/토양 혼합층)

기 호 설 명

c_p : 비열 [J/kgK]
 k : 열전도도 [W/m°C]
 L : 보어홀 길이 [m]
 M : 데이터 개수 [-]
 m : 기울기, 식(5) [-]
 Q : 열전달량 또는 열입력량 [W]

q'' : 열유속 [W/m²]
 R : 열저항 [m°C/W]
 r : 반경 또는 반경 방향으로의 거리 [m]
 r_t : 유효 파이프의 반경 [m]
 T : 온도 [°C]
 t : 시간 [s]
 W : 순환유체의 질량유량 [kg/s]
 x : 보어홀 깊이 방향으로의 거리 [m]
 x_0 : 식(1)~(3)에서 변수(= $r^2/4\alpha t$)
 Y : 목적함수 [-]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0246; fax: +82-31-910-0381

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

그리스 문자

- α : 열확산계수 ($= k/\rho c_p$) [m^2/s]
 δ : 유효 파이프의 두께 [m]

하첨자

- avg* : 평균
b : 보어홀
c : 저온유체 또는 지중 열교환기 출구유체
calc : 계산
exp : 현장 시험
g : 그라우트
gs : 그라우트/토양 혼합층
h : 고온유체 또는 지중 열교환기 입구유체
meas : 측정
p : 파이프
s : 지중 토양 또는 암석
w : 지중 열교환기 순환유체

1. 서 론

근래에 신·재생 에너지 이용에 대한 관심과 요구가 늘면서 지열원 열펌프 시스템(ground source heat pump systems)에 대한 관심이 증가하고 있다. 이 시스템의 구성요소 중 지중 열교환기(ground heat exchanger)는 전체 시스템의 성능과 초기 설치비를 결정하는 중요 기기이다. 현재, 국내에서 주로 시공되는 수직형 지중 열교환기는 수직으로 천공된 보어홀(borehole)과 U자 형상의 파이프, 그리고 보어홀과 파이프 사이의 빈 공간을 채우는 그라우트(grout)로 구성된다.

수직형 지중 열교환기의 성능은 지중 열교환기 파이프 내를 순환하는 유체와 이 파이프 주위 복합매질(그라우트/토양 혼합층) 간의 열전달과 밀접한 관련이 있다. 따라서 지중 열교환기 설계나 성능 향상에 그라우트 자체의 열물성치, 보어홀 열저항, 그리고 복합매질의 유효 열전도도 등은 매우 중요한 변수이다. 이에 대한 기존의 연구로 Spilker,⁽¹⁾ Zhang and Murphy,⁽²⁾ Kavanaugh and Allan,⁽³⁾ Remund,⁽⁴⁾ Smith and Perry,⁽⁵⁾ 그리고 Shonder and Beck⁽⁶⁾ 등의 연구가 있다.

그라우트/토양 혼합층의 유효 열전도도를 산정하기 위해 현재 주로 적용되는 방법이 현장 열응답 시험⁽⁷⁾이다. 또한 현장 시험 데이터를 입력값으로 하여 해석적인 방법^(8,9)과 수치모델에 의한 방법으로 계산할 수 있다. 국내에서 Sohn et al.⁽¹⁰⁾은 실제 지열원 열펌프 시스템에 연결된 지중 열교환기를 대상으로 열응답 시험을 수행하고, 시험 데이터를 라인소스 모델과 수치모델에 적용하여 계산을 수행하였다.

열응답 시험에서 중요한 문제는 시험 수행시간이며, 이와 관련된 다양한 연구결과들⁽¹¹⁻¹³⁾이 제시되었다. 하지만 지중 특성이 외국과 상이한 국내 조건을 고려하면, 기존 연구결과를 여과 없이 수용하는 것은 다소 무리가 있다.

이에 본 연구는 Sohn et al.⁽¹⁰⁾의 연구의 연장선으로, 국내 세 지역(경기도 고양, 용인, 충청남도 천안)에 그라우트를 달리하여 시험용 지중 열교환기를 설치하고 열응답 시험을 수행하였으며, 시험결과와 계산결과를 비교하였다. 또한 그라우트 종류에 따른 혼합층의 유효 열전도도 및 보어홀 열저항 변화를 고찰하였다.

2. 실험장치 및 방법

수직 U자관 지중 열교환기와 현장 열응답 시험장치의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 그림과 같이 시험용 지중 열교환기, 열원부, 순환부, 계측부로 시험장치를 구성하였다. 열원부는 지중 열교환기 순환유체에 일정 열량을 가하는 전열기

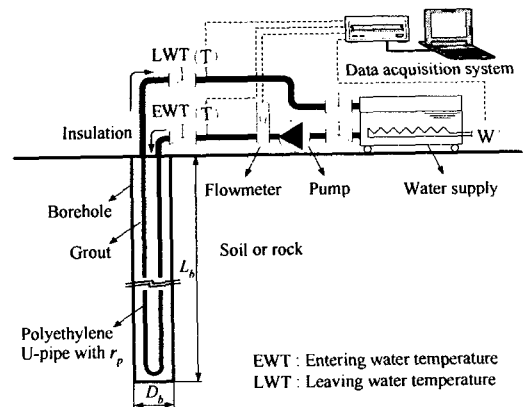


Fig. 1 Schematic of in-situ thermal response test apparatus.

Table 1 Summary of in-situ thermal response tests

	Notation	Site A (Goyang)	Site B (Goyang)	Site C (Yongin)	Site D (Cheonan)
Effective borehole depth, m	L_b	130	150	170	200
Borehole diameter, m	D_b	0.152	0.152	0.152	0.152
Rock type		Granite	Granite	Granite	Granite
Volumetric heat capacity of the ground,* $\text{kJ/m}^3\text{K}$	c_s	2,400	2,400	2,400	2,400
Borehole filling material**		A	B	C	C
Thermal conductivity of the borehole filling material,*** $\text{W/m}^\circ\text{C}$	k_g	1.82	1.64	1.35	1.34
Ground heat exchanger type		Single U-pipe	Single U-pipe	Single U-pipe	Single U-pipe
Pipe material		Polyethylene	Polyethylene	Polyethylene	Polyethylene
Pipe outside diameter, m	$D_{p,o}$	0.062	0.033	0.033	0.033
Pipe thermal conductivity, $\text{W/m}^\circ\text{C}$	k_p	0.42	0.42	0.42	0.42
Heat carrier fluid		Water	Water	Water	Water
Volumetric heat capacity of the heat carrier fluid, $\text{kJ/m}^3\text{K}$	c_w	4,182	4,182	4,182	4,182
Undisturbed ground temp.,**** $^\circ\text{C}$	T_{ug}	13.9	14.1	12.8	12.9
Power injection(mean), W	Q	4,515	2,210	2,350	2,140
Test length, hr		18.2	24.4	41.8	22.9

* Estimated values.⁽¹⁶⁾

** Thermally enhanced bentonite-silica sand grout. A: DY-100S (Dongyang Bentonite), B: DY-100 (Dongyang Bentonite), C: Enviroplug16 (Wyo-Ben).

*** Measured values in laboratory using thermal conductivity meter (QTM-500, Kyoto Electronics).

**** Measured undisturbed borehole average temperature.

및 수조로 구성되어 있고, 순환부는 순환펌프 및 배관 등으로 구성되어 있다. 또한 순환유체 유량, 지중 열교환기 입·출구 온도, 전열기 전력 소모량 등을 측정하기 위한 각종 계측기와 데이터 획득장치 등으로 계측부를 구성하였다.

Table 1에 각 사이트에 설치된 지중 열교환기 보어홀의 크기, 그라우트의 종류, 평균 열입력량 및 시험 수행시간 등 시험조건을 정리하였다. 사이트 A(경기도 고양)의 지중 열교환기는 Sohn et al.⁽¹⁰⁾의 시험에 사용된 것이며, 이 열교환기를 이용하여 열응답 시험을 다시 수행하였다. 그리고 사이트 A로부터 200 m 떨어진 장소에 사이트 B의 지중 열교환기를 시공하였다. 사이트 A, B, C의 보어홀에 각기 다른 종류의 그라우트를 주입하였으며, 사이트 D에 사용된 그라우트는 사이트 C의 그라우트와 동일하다. 보어홀 시추시 배출되는 암석 조각을 육안으로 검사하였으며, 모

든 사이트의 지하 6~10 m 지점부터 화강암층이 출현하는 것을 확인할 수 있었다.

시험 수행에 앞서, 지중 열교환기 파이프 내의 공기 또는 불순물 등을 물을 순환시켜 제거하였다. 다음으로 순환유체의 초기온도를 측정하고, 전열기를 가동하여 순환유체에 열을 가하면서 온도, 유량, 전력량 등을 1분 간격으로 측정하였다.

본 결과에 영향을 미치는 측정 데이터의 편차 등을 조합하여 시험결과의 상대 불확실도를 계산한 결과, 혼합층의 유효 열전도도는 $\pm 3.7\%$, 보어홀 유효 열저항은 $\pm 4.3\%$ 인 것으로 나타났다.

3. 유효 열전도도 산정

지중 열교환기 파이프 주위 그라우트/토양 혼합층의 유효 열전도도를 산정하기 위해, 본 연구에서는 현장 열응답 시험을 수행하였으며 또한

시험 데이터를 라인소스 모델과 1차원 수치모델의 입력값으로 하여 계산을 수행하였다. 계산 수행시, 열원의 수직축에서 반경 방향으로 전도에 의해서만 열이 전달되며, 보어홀 형상은 보어홀의 수직축을 중심으로 완전 대칭인 것으로 가정하였다. 라인소스 모델과 수치모델의 전개과정은 Sohn et al.⁽¹⁰⁾의 문헌에 상세히 제시되었기 때문에 결과 식들만 본 논문에 언급하였다.

3.1 라인소스 모델에 의한 유효 열전도도 산정

본 해석 대상과 같이 직선 열원 주위의 열전달 매체가 그라우트와 토양(또는 암석) 등으로 구성된 복합매질인 경우, 이 열원 주위의 열저항을 모두 고려해야 한다. 따라서, 직선 열원으로부터 이 복합매질의 반경 방향으로 열이 전달될 때 과도 열전도 방정식의 해는 다음과 같다.

$$\Delta T(r, t) = \frac{Q}{4\pi k_{gs} L} \int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du + \frac{QR_b}{L} \quad (1)$$

식(1)에서 보어홀 열저항 R_b 는 순환유체, 파이프, 그라우트 등의 열저항이 모두 포함된 총합열저항(overall thermal resistance)이다. 또한 변수 x_0 가 매우 작기 때문에, 지수적분 항을 다음과 같이 근사식으로 표현할 수 있다.⁽¹⁴⁾

$$\int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \approx -\gamma - \ln x_0 + Ax_0 - Bx_0^2 + Cx_0^3 - Dx_0^4 + Ex_0^5 \quad (2)$$

여기서, A, B, C, D, E 는 각각 0.99999193, 0.249 91055, 0.05519968, 0.00976004, 0.00107857이며, γ 는 Euler 상수로서 0.577이다.

열응답 시험 수행시간을 충분히 길게 하여 보어홀 열저항을 무시할 수 있다고 가정하면, 지수적분 항 식(2)와 식(1)을 각각 식(3)과 식(4)로 단 순화할 수 있다.

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

$$T_{avg} = \frac{Q}{4\pi k_{gs} L} \ln \left(\frac{4\alpha_s t}{\gamma_1 r_b^2} \right), \quad \gamma_1 = 1.78 \quad (4)$$

열응답 시험 데이터로 혼합층의 유효 열전도도를 산정할 때, 식(4)의 기술기, 평균 열입력량, 보어홀 길이 등을 다음의 식(5)에 대입한다.

$$k_{gs} = \frac{Q}{4\pi mL} \quad (5)$$

3.2 수치모델에 의한 유효 열전도도 산정

일정 유량의 유체가 수직 U자관 안을 유동하면서 지중으로 열을 전달하는 과정을 다음과 같이 정상상태 에너지 평형식으로 표현한다.

$$W_{C_b, w} [T_h(0, t) - T_c(0, t)] = \int_{x=0}^L [q_h''(x, t) - q_c''(x, t)] 2\pi r_b dx \quad (6)$$

식(6)의 경계조건을 보어홀 전체 길이에 대해 평균의 형태로 표현한 후, 열응답 시험에서 측정된 열 입력량과 온도를 입력값으로 이용하기 위해 이 경계조건을 다시 표현하면 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned} -k_t \frac{\partial \overline{T}_t(r_t, t)}{\partial r} &= \frac{q_{exp}''}{L} \\ &= \frac{W_{C_b, w}}{2\pi r_t L} [T_h(0, t) - T_c(0, t)] \end{aligned} \quad (7)$$

여기서, r_t 는 지중 열교환기 U자관을 하나의 파이프로 변환시킨 유효 파이프로 반경이다.

파이프 내를 유동하는 유체의 열은 파이프로 벽, 그라우트, 그리고 보어홀 벽을 거쳐 지중으로 전달되기 때문에 각각의 과도상태 열전도 방정식을 표현한다. 다시 이 열전도 방정식들을 보어홀 길이에 대해 평균 형태로 표현하면 식(8)~(10)과 같고, 평균 온도들은 식(11)~(13)과 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \overline{T}_t}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_t} \frac{\partial \overline{T}_t}{\partial t}, \quad r_t < r < r_t + \delta \quad (8)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \overline{T}_g}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_g} \frac{\partial \overline{T}_g}{\partial t}, \quad r_t + \delta < r < r_b \quad (9)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \overline{T}_s}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial \overline{T}_s}{\partial t}, \quad r_b < r < \infty \quad (10)$$

$$\overline{T}_i(r, t) = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L T_i(r, x, t) dx \quad (11)$$

$$\overline{T}_g(r, t) = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L T_g(r, x, t) dx \quad (12)$$

$$\overline{T}_s(r, t) = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L T_s(r, x, t) dx \quad (13)$$

해석을 위한 경계조건과 초기조건들을 이용하여 1차원 유한차분 모델로 계산하였으며, 비선형 최적화기법 중 하나인 simplex 알고리즘⁽¹⁵⁾을 적용하였다. 계산의 수렴조건은 다음과 같다.

$$Y = \sum_{t=1}^M [T_{avg}(t) - T_{calc}(t)]^2 \quad (14)$$

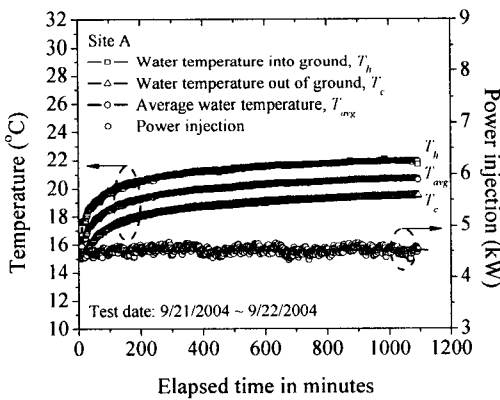
식(14)에서 T_{avg} 와 T_{calc} 는 열응답 시험에서 측

정된 입·출구 온도의 평균값과 계산에 의한 평균 온도를 각각 의미한다.

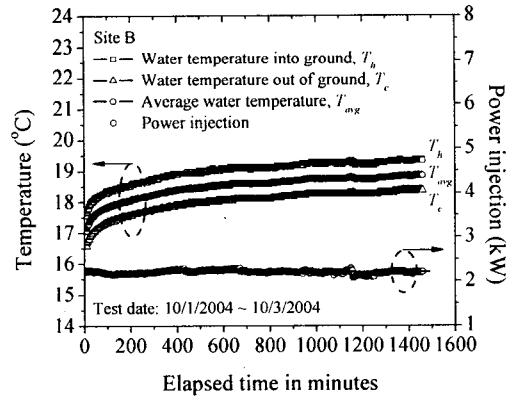
4. 결과 및 고찰

Fig. 2는 현장 열응답 시험에서 측정된 지중 열교환기 입구와 출구에서 순환유체의 온도, 그리고 이들의 평균 온도 및 열입력량 등을 사이트별로 나타낸 것이다. 각 사이트에서 19, 25, 42, 23 시간 동안 열응답 시험을 수행하였으며, 시험 중 순환유체에 가해지는 평균 열입력량은 Table 1에 주어져 있다.

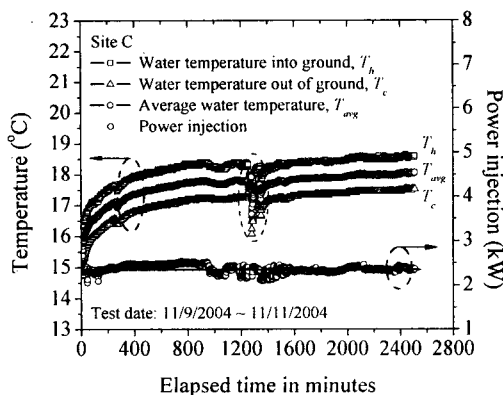
Fig. 2에서 보는 바와 같이 지중 열교환기 입구와 출구에서 순환유체의 온도차는 대략 390분을 전후로 한 시점부터 시험 종료까지 거의 일정한 값이 유지되었다. 특히 사이트 A의 지중 열교환기인 경우, 2003년 6월에 측정된 Sohn et al.⁽¹⁰⁾의



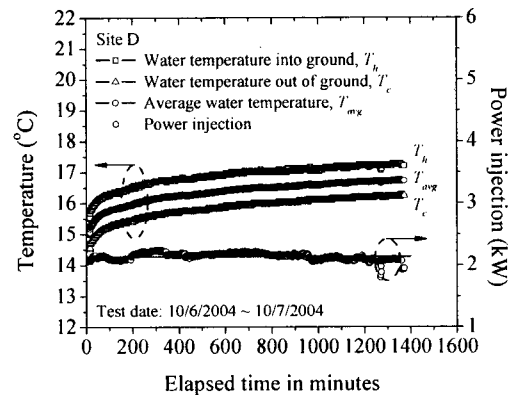
(a) Site A



(b) Site B



(c) Site C



(d) Site D

Fig. 2 Temperature response and power injection with respect to elapsed time.

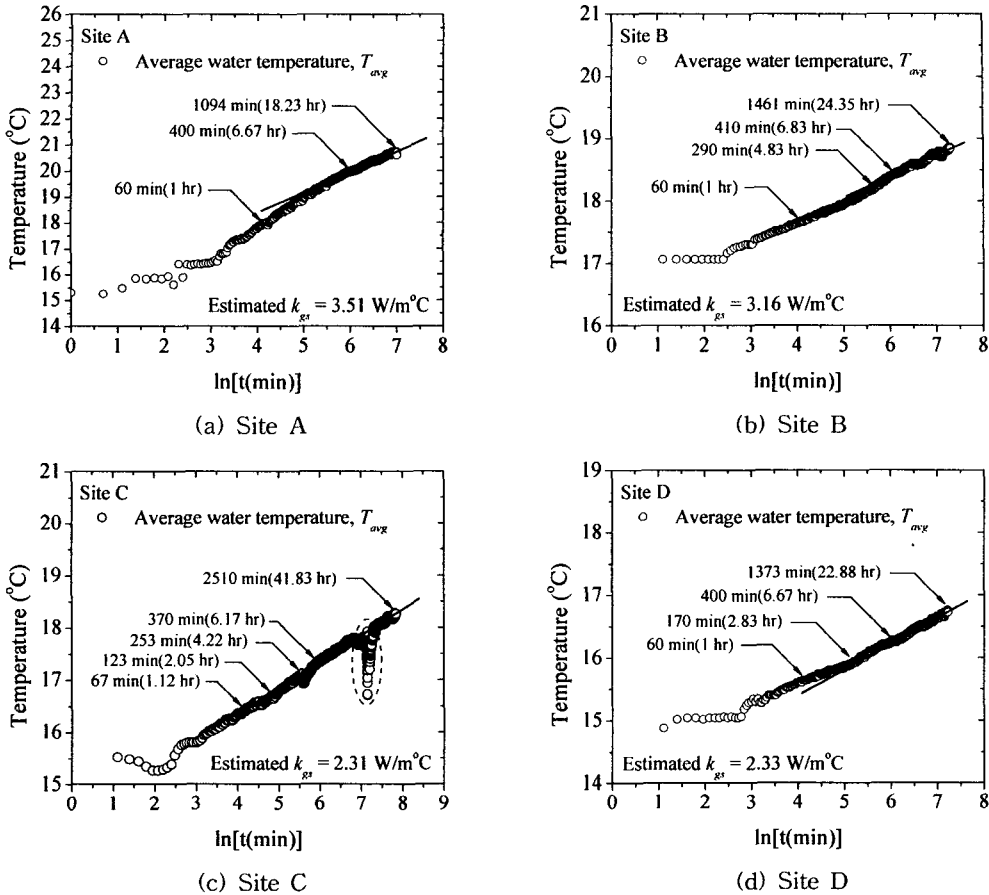


Fig. 3 Temperature response with respect to natural logarithm of elapsed time.

시험 데이터와 본 데이터가 유사한 결과를 보였다. 따라서, 이 지중 열교환기가 최초 설치 당시의 열교환 능력을 현재에도 유지하고 있음을 아울러 확인할 수 있었다. Fig. 2의 (c)에서 중간 부분의 시험 결과는 1,257~1,280분, 그리고 1,345~1,349분에 순환유체에 가해지는 열이 차단되어 나타난 결과이다. 그러나 순환유체에 열이 다시 공급되면서 열 차단 전의 상황으로 회복되었으며, 시험 종료까지 입·출구 온도차이는 일정하게 유지되었다.

Fig. 3은 로그값으로 변환된 열응답 시험 수행 시간(분)에 대해 순환유체의 평균 온도변화를 나타낸 것이다. 기울기가 변하는 시점과 시험 종료 시간을 각각의 그래프에 함께 표시하였다. 식(3)~(5)의 단순 라인소스 해석은 열응답 시험 데이터로부터 그라우트/토양 혼합층의 열전도도를 산정하는 데 쉽게 적용될 수 있지만, 그림에서와 같

이 기울기가 여러 개 나타날 수 있다. 즉, 60분 (ln t =4.09)부터의 결과를 보면, 사이트 A는 2개, 그리고 사이트 B, C, D는 3개의 기울기를 갖는 것으로 나타났다. 그러나 모든 사이트에서 390분을 전후로 한 시점부터 시험 종료까지 거의 일정한 값이 유지되는 것을 볼 수 있다.

현장 열응답 시험 데이터를 단순 라인소스 해석에 적용하기 위한 기준은 식(3)에 주어져 있다. 여기서, Salomone and Marlowe⁽¹⁶⁾가 제시한 화강암(granite)의 열확산계수와 보어홀의 반경 등을 이 기준에 대입하여 계산한 결과, 단순 라인소스 해석에 필요한 데이터는 평균 372분(6.2시간) 이후의 데이터인 것으로 나타났다. 따라서 계산에 의한 최소 기준시점과 각 사이트에서의 최소 기준시점(사이트 A 400분; B 410분; C 370분; D 400분) 사이에는 큰 차이가 없었다.

기준시점 이후부터 시험 종료까지의 데이터에

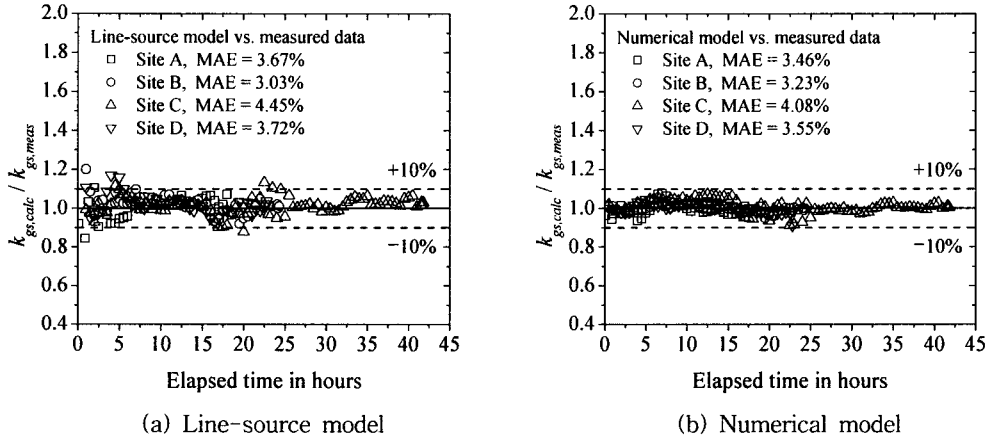


Fig. 4 Measured thermal conductivity values vs. calculations of models.

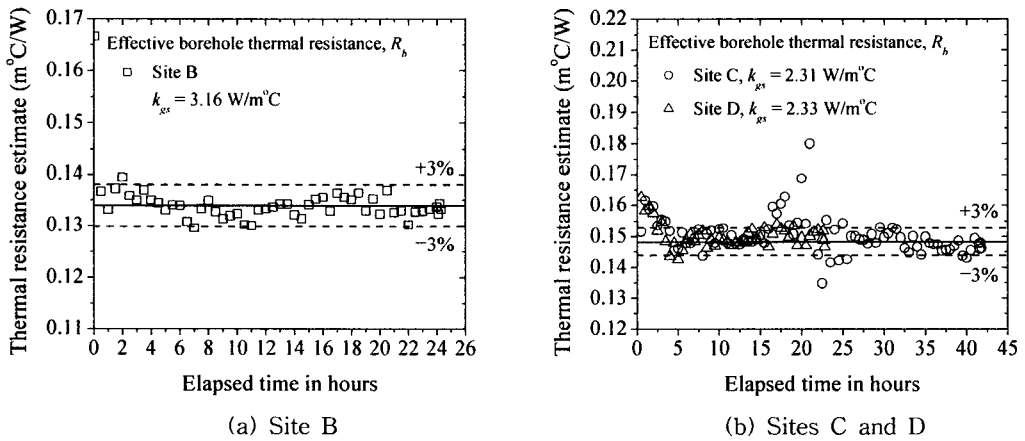


Fig. 5 Sequential estimates of effective borehole thermal resistance.

대한 접선의 기울기와 평균 열입력량, 보어홀 길이 등을 식(5)에 대입하여 그라우트/토양 혼합층의 유효 열전도도를 계산한 결과, 각각 3.51 W/m²C, 3.16 W/m²C, 2.31 W/m²C, 그리고 2.33 W/m²C이었다.

전체적으로 그라우트의 열전도도가 증가함에 따라 혼합층의 열전도도 역시 증가하였다. 또한 사이트 A와 B는 지중 조건이 거의 동일하기 때문에, 동일 지역에서 그라우트/토양 혼합층의 유효 열전도도에 영향을 미치는 주요 요인은 그라우트의 열전도도인 것을 알 수 있다. 반면 사이트 C와 D에서와 같이 사용된 그라우트가 동일하며 지중 조건이 유사한 경우, 혼합층의 유효 열전도도 역시 거의 같은 값을 보였다.

Fig. 4는 현장 열응답 시험에 의한 유효 열전도

도와 계산에 의한 열전도도를 비교한 것이며, 전체 결과 중 30분 간격의 결과만 선택하여 표시하였다. 열응답 시험 초반부의 오차가 상대적으로 크게 나타났지만, 기준시점 이후부터 안정적인 결과를 보이고 있다. 전체적으로 라인소스 모델과 수치모델에 의한 열전도도는 3.03~4.45% 절대편차 내에서 열응답 시험에 의한 열전도도와 일치하였다.

Fig. 5는 보어홀의 유효 열저항을 계산한 결과이다. 여기서 유체의 대류열전달계수로 순환유체의 열저항을 계산하고, Remund⁽⁴⁾가 제시한 방법으로 그라우트와 지중 열교환기 파이프의 열저항을 계산하였다. 또한, 값의 차이만 있을 뿐 사이트 A와 B의 전체적인 경향은 유사하기 때문에 사이트 B, C, D의 결과만 도시하였다.

Table 2 Summary of in-situ thermal response test and calculation results

	Test length, hour	Grout thermal conductivity, k_g (W/m $^{\circ}$ C)	Effective thermal conductivity of grout/soil formation, k_{gs} (W/m $^{\circ}$ C)			MAE**		Borehole thermal resistance, R_b (m $^{\circ}$ C/W)	
			In-situ test	Line-source	Numerical	Line-source	Numerical	In-situ test***	Line-source
Site A (Goyang)	18.2	1.82	3.51	3.56	3.54	3.67%	3.46%	0.1194	0.1175
Site B (Goyang)	24.4	1.64	3.16	3.14	3.19	3.03%	3.23%	0.1332	0.1317
Site C (Yongin)	41.8	1.35	2.31	2.36	2.34	4.45%	4.08%	0.1491	0.1509
Site D (Cheonan)	22.9	1.34	2.33	2.35	2.31	3.72%	3.55%	0.1505	0.1486

* Mean values

$$** \text{ Mean absolute error MAE} = \frac{1}{M} \sum \frac{|k_{gs, calc} - k_{gs, meas}|}{k_{gs, meas}} \times 100(\%)$$

$$*** R_b = R_w + R_p + R_g$$

전체적으로 그라우트의 열전도도가 증가함에 따라 보어홀 유효 열저항은 감소하였다. 사이트 C와 D의 조건들은 동일하기 때문에 유효 열저항 역시 거의 같은 값을 보였으며, 또한 열응답 시험 데이터의 기울기 변화와 마찬가지로, 시험 수행시간에 대한 영향은 없는 것으로 확인되었다.

사이트별로 최소 기준시점에서의 유효 열저항은 각각 0.1189 m $^{\circ}$ C/W, 0.1339 m $^{\circ}$ C/W, 0.1477 m $^{\circ}$ C/W, 0.1488 m $^{\circ}$ C/W이었다. 이 값들을 기준으로 하여 시험 종료까지의 열저항값들을 비교했을 때, 1.17~3.39% 절대편차 내에서 열저항값들이 변화하였다.

이상의 전체 결과를 Table 2에 정리하였다. 평균 보어홀 열저항(in-situ test)은 기준시점부터 시험 종료까지의 모든 열저항값을 평균한 것이다. 또한, 식(1)과 식(2)를 이용하여 역산된 열저항값들의 평균(line-source)도 함께 나타내었다. 이 평균 열저항값들은 2% 절대편차 내에서 일치하였다. 보어홀에 주입된 그라우트의 열전도도가 1.34 W/m $^{\circ}$ C에서 1.82 W/m $^{\circ}$ C로 증가할 때, 그라우트/토양 혼합층의 유효 열전도도는 11.1~51.9% 증가하였으며, 보어홀 유효 열저항은 11.6~26.1% 감소하였다.

된 지중 열교환기를 대상으로 현장 열응답 시험을 수행하고, 이 지중 열교환기 파이프 주위 그라우트/토양 혼합층의 유효 열전도도를 산정하였다. 또한 열응답 시험 데이터를 이용하여 계산을 수행하고, 시험으로부터 산정된 열전도도와 비교하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 사이트별 그라우트/토양 혼합층의 유효 열전도도는 3.51 W/m $^{\circ}$ C, 3.16 W/m $^{\circ}$ C, 2.31 W/m $^{\circ}$ C, 그리고 2.33 W/m $^{\circ}$ C이었다.

(2) 라인소스 모델과 수치모델에 의한 그라우트/토양 혼합층의 유효 열전도도는 3.03~4.45% 절대편차 내에서 열응답 시험에 의한 열전도도와 일치하였다.

(3) 기준시점부터 시험 종료까지의 보어홀 열저항값들은 1.17~3.39% 절대편차 내에서 변화하였다. 이로부터 열응답 시험 수행시간에 대한 영향은 없는 것으로 확인되었다.

(4) 보어홀에 주입된 그라우트의 열전도도가 1.34 W/m $^{\circ}$ C에서 1.82 W/m $^{\circ}$ C로 증가할 때, 그라우트/토양 혼합층의 유효 열전도도는 11.1~51.9% 증가하였으며, 보어홀 유효 열저항은 11.6~26.1% 감소하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 국내 세 지역(경기도 고양, 용인, 충청남도 천안)에 그라우트를 달리하여 설치

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단의 2004년 대체에너지 기술개발사업 및 시범보급사

업에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Spilker, E. H., 1998, Ground-coupled heat pump loop design using thermal conductivity testing and the effect of different backfill materials on vertical bore length, ASHRAE Transactions, Vol. 104, pp. 775-779.
2. 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.
3. Kavanaugh, S. P. and Allan, M. A., 1999, Testing of thermally enhanced cement ground heat exchanger grouts, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 446-450.
4. Remund, C. P., 1999, Borehole thermal resistance: laboratory and field studies, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 439-445.
5. Smith, M. D. and Perry, R. L., 1999, Borehole grouting: field studies and thermal performance testing, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 451-457.
6. Shonder, J. A. and Beck, J. V., 2000, Field test of a new method for determining soil formation thermal conductivity and borehole resistance, ASHRAE Transactions, Vol. 106, pp. 843-850.
7. Mogensen, P., 1983, Fluid to duct wall heat transfer in duct system storages, Proceedings of the International Conference on Sub-surface Heat Storage in Theory and Practice. Swedish Council for Building Research, June 6-8.
8. 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.
9. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, Conduction of Heat in Solids, Oxford, Clarendon Press.
10. Sohn, B. H., Shin, H. J. and An, H. J., 2005, Evaluation of thermal conductivity for grout/soil formation using thermal response test and parameter estimation models, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 173-182.
11. Martin, C. A. and Kavanaugh, S. P., 2002, Ground thermal conductivity testing control site analysis, ASHRAE Transactions, Vol. 108, pp. 945-952.
12. Beier, R. A. and Smith, M. D., 2003, Minimum duration of in-situ tests on vertical boreholes, ASHRAE Transactions, Vol. 109, pp. 475-486.
13. Bose, J. E., Smith, M. D. and Spitler, J. D., 2002, Advances in ground source heat pump systems; an international overview, Proceedings of the 7th IEA Heat Pump Conference, Vol. 1, pp. 313-324.
14. Abramowitz, M. and Stegun, I. A., 1964, Handbook of mathematical functions, national bureau of standards, Applied Mathematics Series 55, US Department of Commerce.
15. Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T. and Flannery, B. P., 1992, Numerical Recipes in Fortran: The Art of Scientific Computing, 2nd ed., Cambridge University Press.
16. 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.