

## 단순 선형열원 모델을 이용한 지중 유효 열전도도와 보어홀 유효 열저항 산정

손 병 후<sup>†</sup>

한국건설기술연구원 화재·설비 연구부

### Evaluation of Ground Effective Thermal Conductivity and Borehole Effective Thermal Resistance from Simple Line-Source Model

Byonghu Sohn<sup>†</sup>

*Fire & Engineering Services Research Department, KICT, Hwaseong 445-861, Korea*

*(Received April 23, 2007; revision received June 15, 2007)*

**ABSTRACT:** The design of a ground-source heat pump system includes specifications for a ground loop heat exchanger where the heat transfer rate depends on the effective thermal conductivity of the ground and the effective thermal resistance of the borehole. To evaluate these heat transfer properties, in-situ thermal response tests on four vertical test boreholes with different grouting materials were conducted by adding a monitored amount of heat to circulating water. The line-source method is applied to the temperature rise in an in-situ test and extended to also give an estimate of borehole effective thermal resistance. The effect of increasing thermal conductivity of the grouting materials from 0.818 to 1.104 W/m°C resulted in overall increases in effective thermal conductivity by 15.8 to 56.3% and reductions in effective thermal resistance by 13.0 to 31.1%.

**Key words:** Ground effective thermal conductivity(지중 유효 열전도도), Borehole effective thermal resistance(보어홀 유효 열저항), In-situ thermal response test(현장 열응답 시험), Line-source model(선형열원 모델), Grouting materials(그라우팅 재료)

#### 기 호 설 명

$c_p$  : 비열 [J/kgK]

$D_{p,i}$  : 파이프 내경 [m]

$D_{p,o}$  : 파이프 외경 [m]

$F_o$  : 푸리에수(Fourier number,  $=\alpha t/r^2$ ) [-]

$G$  :  $G$  함수( $G$ -function), 식(3)

$h$  : 대류열전달계수 [ $W/m^2\text{°C}$ ]

$J$  : 제 1종 베셀함수, 식(3)

$k$  : 열전도도 [ $W/m\text{°C}$ ]

$L$  : 보어홀 깊이 [m]

$m$  : 기울기, 식(7)

$Q$  : 열전달량 또는 열 입력량 [W]

$R$  : 열저항 [ $m\text{°C}/W$ ]

$r$  : 반경 또는 반경방향으로 거리 [m]

$S_b$  : 보어홀 형상계수, 식(15)

$T$  : 온도 [ $\text{°C}$ ]

$T_i$  : 초기 지중 온도 [ $\text{°C}$ ]

$t$  : 시간 [s] 또는 [hour]

$x_0$  : 적분 변수, 식(4)~식(5)

<sup>†</sup> Corresponding author

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

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

$Y$  : 제 2종 베셀함수, 식(3)  
 $z$  : 보어홀 깊이 방향으로 거리 [m]

### 그리스 문자

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

### 하첨자

$b$  : 보어홀  
 $f$  : 지중 열교환기 순환 유체  
 $g$  : 그라우팅 재료  
 $p$  : 파이프  
 $s$  : 지중 토양 또는 암석

## 1. 서 론

지열원 열펌프 시스템(ground-source heat pump systems)의 구성 요소 중, 지중 열교환기(ground loop heat exchanger)는 전체 시스템의 성능과 초기 투자비를 결정하는 중요 기기다. 현재 국내에서는 수직형 지중 열교환기를 주로 설치하고 있으며, 이 기기의 성능은 지중 열교환기 파이프 내를 순환하는 유체와 파이프 주위 지중 토양이나 암반층(이하 지중) 사이의 열전달과 밀접한 관련이 있다.

수직형 지중 열교환기를 최적 설계하기 위해 지중 유효 열전도도(이하 지중 열전도도)와 보어홀 유효 열저항(이하 보어홀 열저항)을 정확하게 산정한 후, 이 값들을 설계에 적용해야 한다. 지중 유효 열물성을 산정하기 위해 시추(천공) 과정에서 획득한 시료를 실험실에서 측정하거나 현장에서 직접 측정하는 방법을 적용할 수 있다. 시료를 실험실에서 측정할 경우, 실제 지중 열교환기가 설치된 상황과 많은 차이가 있기 때문에 이 값을 설계에 적용하는 것은 무리가 있다. 따라서 측정에 상당히 긴 시간이 필요하다는 단점에도 현장에서 직접 측정하는 방법을 주로 채택하고 있으며, 이를 현장 열응답 시험(in-situ thermal response test)이라고 한다.

이러한 열응답 시험에 대한 개념과 구체적인 방법을 Mogensen<sup>(1)</sup>이 처음 제안한 후, 현재까지 지중 열전도도를 산정하기 위해 주로 적용하고

있다. 그라우팅 재료나 열응답 시험 시간 등 다양한 인자들이 시험 결과와 지중 유효 열물성에 미치는 영향을 고찰한 연구결과들<sup>(2-7)</sup>이 발표되었다. 하지만 국내 지중 특성이 외국과 다르기 때문에 기존 결과를 여과 없이 수용하여 지중 열교환기를 설계하는 것은 다소 무리가 있을 것으로 판단된다.

국내에서도 일부 연구자들이 현장 시험을 통한 지중 유효 열물성 산정결과를 발표하였다. Lim et al.<sup>(8)</sup>은 그라우팅 재료를 달리하여 모의 지중 열교환기를 실험실 규모로 설치한 후, 유효 열전도도를 측정하였다. Lee et al.<sup>(9)</sup>은 2관식(single U-tube)과 4관식(double U-tube) 지중 열교환기를 이용하여 지중 열전도도를 측정하였으며, 1차원 수치모델 결과와 비교하였다. 아울러 초기제외시간(IIT: Initial Ignoring Time) 개념을 도입하여, 시험 시작부터 4~4.5시간까지 획득한 데이터를 제외한 후 열전도도를 산정할 것을 제안하였다. Sohn et al.<sup>(10,11)</sup>은 국내 세 지역에 설치된 지중 열교환기를 대상으로 열응답 시험을 수행하고 선형열원 모델(line-source model)과 수치모델에 의한 계산결과와 비교하였다. 각 모델 사이에 상대적 우수성이 없음을 확인하였으며, 대략 6.7시간부터 시험 종료까지 유효 열물성 값들이 거의 일정하게 유지되는 것을 확인하였다.

이상과 같이 현장 시험을 통해 지중 열전도도를 산정하고 해석모델이나 수치모델을 적용하여 보어홀 열저항을 계산할 수 있다. 이때 계산에 적용된 보어홀 형상과 실제 형상이 서로 다르기 때문에 열저항 값에 차이가 있을 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 열응답 시험 데이터를 이용하여 지중 열전도도를 결정한 후, 이 결과를 단순 선형열원 모델에 대입하여 보어홀 열저항을 산정하였다. 아울러 그라우팅 재료가 열전도도와 열저항에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

수직 U자관 지중 열교환기와 열응답 시험 장치의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 그림과 같이 시험용 지중 열교환기, 열원부, 순환부, 계측부로 시험 장치를 구성하였다. 열원부는 지중 열교환기 순환유체에 일정 열량을 가하는 전열기와 수조로 구성되어 있고, 순환부는 순환펌프와 배관

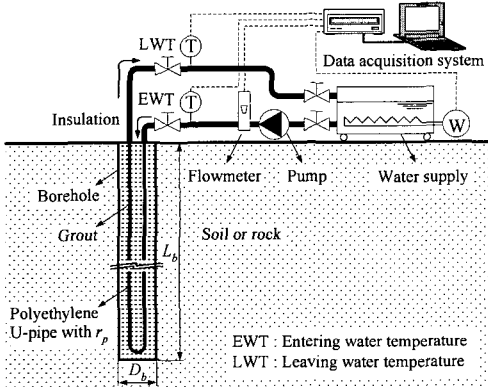


Fig. 1 Schematic of an in-situ thermal response test apparatus.

등으로 구성되어 있다. 또한 순환유체의 유량과 입·출구 온도, 전열기 전력 소모량을 측정하기 위한 각종 계측기와 데이터 획득장치로 계측부를 구성하였다.

Table 1은 각 시험용 지중 열교환기의 사양, 그라우팅 재료의 종류, 평균 열 입력량, 시험 수행 시간 등을 정리한 것이다. 본 연구의 목적 중 하나가 그라우팅 재료가 지중 열전도도와 보어홀 열저항 변화에 미치는 영향을 고찰하는 것이기 때문에, 같은 크기의 보어홀을 6m 간격으로 천공(drilling)한 후 각각 다른 그라우팅 재료를 주입하였다. 천공 시 배출되는 암석조각을 육안으로

검사하였으며, 지하 6~8m 지점부터 화강암층(granite)이 출현하는 것을 확인할 수 있었다.

열응답 시험장치를 지중 열교환기에 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 1분 간격으로 측정하였다.

Kline<sup>(12)</sup>이 제안한 방법에 따라 측정 결과에 영향을 미치는 데이터와 변수의 편차들을 조합하여 상대 불확실도(uncertainty)를 계산하였으며, 지중 열전도도와 보어홀 열저항의 불확실도는 각각  $\pm 3.42\%$ 와  $\pm 5.63\%$ 였다.

### 3. 유효 열전도도와 열저항 산정

#### 3.1 지중 유효 열전도도 산정

균질매질(homogeneous medium) 속의 수직 열원에서 반경방향으로 전도에 의해서만 열이 전달되는 1차원 열전도 문제는 식(1)과 같다.

$$\frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (1)$$

Table 1 Summary of in-situ thermal response tests

	Test borehole #1	Test borehole #2	Test borehole #3	Test borehole #4
Effective borehole depth, $L_b$ [m]	200	200	200	200
Borehole diameter, $D_b$ [m]	0.152	0.152	0.152	0.152
Pipe outside diameter, $D_{b,o}$ [m]	0.0254	0.0254	0.0254	0.0254
Ground type and volumetric heat capacity of the ground, $c_s$ [kJ/m <sup>3</sup> K]	Granite 2,400	Granite 2,400	Granite 2,400	Granite 2,400
Borehole filling material*	A	B	C	D
Thermal conductivity of the borehole filling material,** $k_g$ [W/m°C]	0.818	0.950	1.046	1.104
Initial ground temperature, $T_i$ [°C]	13.02	14.01	12.67	15.78
Mean power input, $Q$ [W]	4,750	4,967	4,912	4,939
Test length, $t$ [hour]	45	48	48	74

\* A: Silica sand and 1 wt. % of water, degree of saturation is 0.09.

B: 10% silica sand, 30% bentonite(Montigel F, Sude-Kemie Korea) and water.

C: Silica sand and 9 wt. % of water, degree of saturation is 0.40.

D: 20% silica sand, 30% bentonite(Montigel F, Sude-Kemie Korea) and water.

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

식(1)을 Fig. 1의 지중 열교환기에 적용하기 위해 열원 형상과 열전달 매질에 대하여 적절한 가정을 도입하면, 반경방향의 임의 지점에서 온도 분포  $[T(r, t)]$ 는 다음과 같다.

$$T(r, t) - T_i = \frac{Q}{L} \frac{G(p, Fo)}{k_s} \quad (2)$$

$$G(p, Fo) = \frac{1}{\pi^2} \int_0^\infty \left[ \frac{e^{-(z^2 Fo)} - 1}{z^2 \{J_1^2(z) + Y_1^2(z)\}} \times \{J_0(pz) Y_1(z) - J_1(z) Y_0(pz)\} \right] dz \quad (3)$$

식(2)는 일반적으로 원통열원 모델(cylinder-source model)<sup>(13)</sup>로 알려져 있다. 식(3)에서  $J$ 와  $Y$ 는 각각 제 1종 베셀함수와 제 2종 베셀함수며, 하첨자 0과 1은 각 베셀함수의 차수다. 또한  $p$ 는 반경방향 임의 지점 대 보어홀 반경의 비( $r/r_b$ )를 의미한다.

반면 원통열원 모델보다 단순한 모델로서 Kelvin의 무한 선형열원 이론(infinite line-source theory)에 기초를 둔 선형열원 모델<sup>(13,14)</sup>이 있다. 이 모델의 해는 다음과 같다.

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

식(4)에서 적분변수  $x_0(r^2/4at)$ 가 매우 작기 때문에 지수적분 항을 식(5)의 근사식으로 표현할 수 있다. 이 식(5)를 식(4)에 대입하여 정리하면 식(6)의 단순 선형열원 모델을 얻을 수 있다.

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

$$T(r, t) - T_i \approx \frac{Q}{4\pi k_s L} \ln \left( \frac{4\alpha_s t}{\gamma_1 r^2} \right), \quad \gamma_1 = 1.78 \quad (6)$$

여기서 시간의 자연로그 값( $\ln t$ )에 대하여 온도 변화를 도시할 경우, 식(6)은 직선 형태를 보인다. 따라서 식(6)의 기울기, 평균 열 입력량, 보어홀 길이 등을 다음 식(7)에 대입하면 지중 열전도도를 결정할 수 있다.

$$k_s = \frac{Q}{4\pi m L_b} \quad (7)$$

### 3.2 보어홀 유효 열저항 산정

Fig. 2는 지중 열교환기 파이프를 순환하는 유체로부터 지중으로 열이 전달될 때, 온도 변화와 열저항에 대한 개념을 간략히 나타낸 것이다. 그림에서 총 열저항은 보어홀 열저항( $R_b$ )과 지중 열저항( $R_s$ )의 합으로 표현되며 이 중에서 보어홀 열저항은 다음과 같다.

$$T_f - T_b = \frac{Q R_b}{L_b} \quad (8)$$

식(8)에서 보어홀 벽면의 온도( $T_b$ )를 현장에서 측정하는 것은 매우 힘들다. 따라서 실측한 순환 유체의 온도와 초기 지중 온도를 이용하여 식(8)의 왼쪽 항을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$T_f - T_i = (T_f - T_b) + (T_b - T_i) \quad (9)$$

다시, 식(9)의 오른쪽 항에 식(8)과 식(6)을 대입하면 식(10)으로 표현할 수 있고, 이를 식(11)과 같이 정리할 수 있다.

$$T_f - T_i = \frac{Q R_b}{L_b} + \frac{Q}{4\pi k_s L_b} \ln \left( \frac{4\alpha_s t}{\gamma_1 r_b^2} \right) \quad (10)$$

$$R_b = \frac{1}{4\pi k_s} \left[ \frac{T_f - T_i}{m} - \ln \left( \frac{4\alpha_s t}{\gamma_1 r_b^2} \right) \right] \quad (11)$$

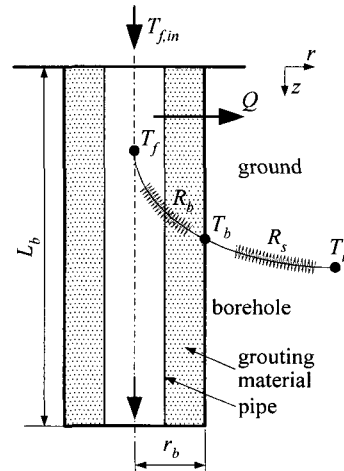


Fig. 2 Schematic representation of a borehole embedded in an infinite medium.

식(11)은 단순 선형열원 모델에 의한 결과와 온도만으로 보어홀 열저항을 산정할 수 있는 식이다. 반면, 지중 열교환기 상용 설계 프로그램<sup>(15, 16)</sup>은 유체 순환에 의한 열저항( $R_f$ ), 파이프의 열저항( $R_p$ ), 그라우팅 재료의 열저항( $R_g$ )이 모두 포함된 총합 열저항 개념을 적용하여 다음과 같이 보어홀 열저항을 계산한다.

$$R_b = R_f + R_p + R_g \quad (12)$$

식(12)에서 유체가 관내를 유동함에 따라 발생하는 열저항은 식(13)으로 계산되며, 파이프의 열저항은 문헌<sup>(17)</sup>에 제시된 값이 적용된다.

$$R_f = \frac{1}{2\pi D_p i h_f} \quad (13)$$

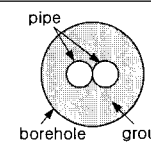

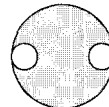
그라우팅 재료의 열저항은 보어홀 형상계수( $S_b$ )와 그라우팅 재료 자체의 열전도도( $k_g$ )를 이용하여 다음과 같이 계산된다.<sup>(18)</sup>

$$R_g = \frac{1}{S_b k_g} \quad (14)$$

$$S_b = \beta_0 \left( \frac{D_b}{D_{p,o}} \right)^{\beta_1} \quad (15)$$

식(15)에서  $\beta_0$ 와  $\beta_1$ 은 보어홀 형상에 따른 계수며 Table 2에 값이 주어져 있다.

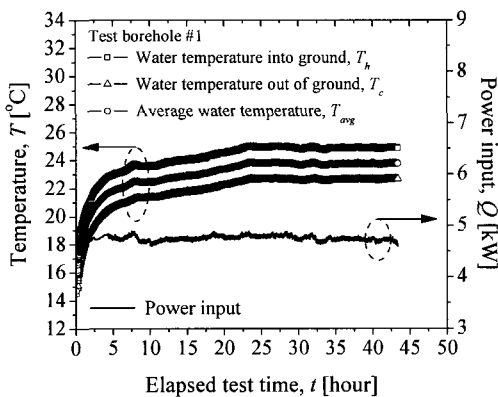
Table 2 Coefficients for the borehole shape factor correlation, eq.(15)<sup>(18)</sup>

U-tube Configurations	$\beta_0$	$\beta_1$
A: 	20.10	-0.9447
B: 	17.44	-0.6052
C: 	21.91	-0.3796

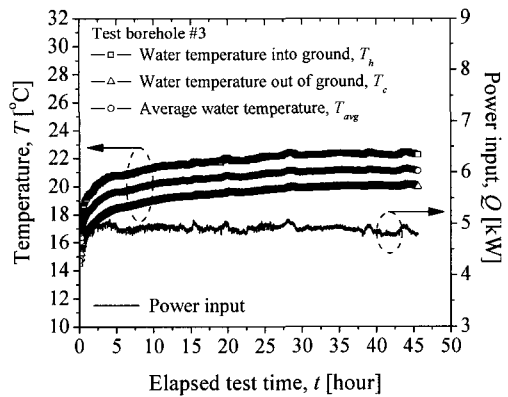
#### 4. 결과 및 고찰

Fig. 3은 시험용 보어홀 1번과 3번에 대하여 열응답 시험에서 획득한 순환유체의 입·출구 온도와 이들의 평균 온도 그리고 열 입력량에 대한 결과를 나타낸 것이다. 나머지 보어홀은 기존 연구결과<sup>(9-11)</sup>나 1번과 3번 보어홀의 결과와 동일한 경향을 보이기 때문에 생략하였다. 시험 중 순환 유체에 공급하는 열량을 최대한 일정하게 유지하였으며, 이때 지중 열교환기 입·출구에서 순환 유체의 온도차는 평균 2.32°C(#1: 2.30, #2: 2.28, #3: 2.36, #4: 2.33°C)였다.

Fig. 4는 시험 시간의 자연로그 값을  $x$ 축으로



(a) Test borehole #1



(b) Test borehole #3

Fig. 3 Temperature response and power input with respect to elapsed test time.

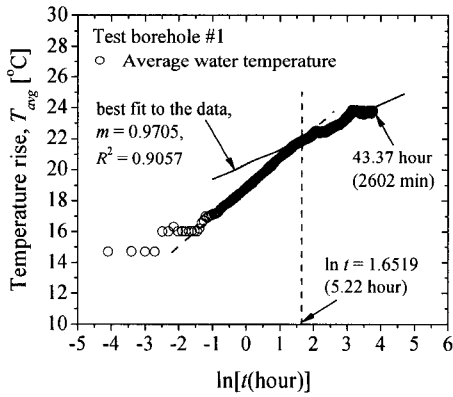
하여 순환유체의 평균 온도 변화를 나타낸 것이다. 단순 선형열원 모델을 적용하여 지중 열전도도를 산정할 때 경우에 따라서는 여러 개의 기울기가 나타날 수 있다. 본 시험에서는 4개의 보어홀 모두 2개의 기울기를 보였으며, 평균 5.6시간 (#1: 5.2, #2: 5.8, #3: 6.0, #4: 5.5시간) 후부터 시험 종료까지 거의 일정하였다. 따라서 5.6시간 후에 획득한 데이터의 접선 기울기  $m$  (#1: 0.9705, #2: 0.8769, #3: 0.7453, #4: 0.6458)과 평균 열 입력량 그리고 보어홀 길이를 식(7)에 대입하여 지중 열전도도를 계산한 결과 각각 1.947, 2.254, 2.622, 3.043 W/m°C였다.

여기서 식(5)의 기준에 화강암의 열확산계수<sup>(19)</sup>와 보어홀 반경을 대입하면, 평균 6.2시간 후의 데이터를 선형열원 모델에 적용할 수 있는 것으

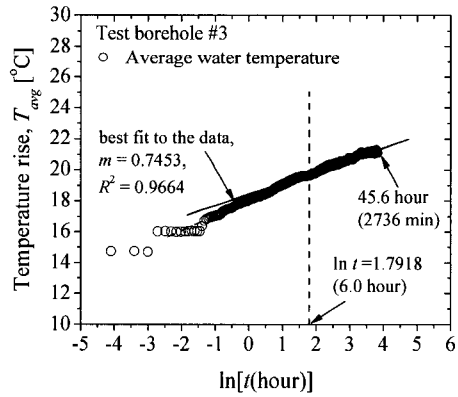
로 계산되었다. 이는 본 시험의 평균 기준시점인 5.6시간과 거의 일치하는 값이며, Sohn et al.<sup>(11)</sup>이 제시한 6.7시간과도 큰 차이가 없는 결과다.

Fig. 5는 실측한 순환유체의 평균 온도와 기존 모델로 계산한 결과를 비교한 것이다. 이때 기존 모델을 적용하여 보어홀 벽면과 초기 지중 온도 차이를 계산하고, 보어홀 형상계수를 적용하여 순환유체와 보어홀 벽면의 온도 차이를 계산하였다. 1번 보어홀의 차이가 상대적으로 컸으며, 전체적으로 기존 모델은 순환유체의 온도를 다소 낮게 예측하였다. 이는 계산에 적용된 보어홀 형상과 실제 보어홀 형상의 차이에서 오차가 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 6은 열응답 시험 중 지중 열전도도가 변하는 경향을 나타낸 것이다. 평균 기준시점인 5.6시

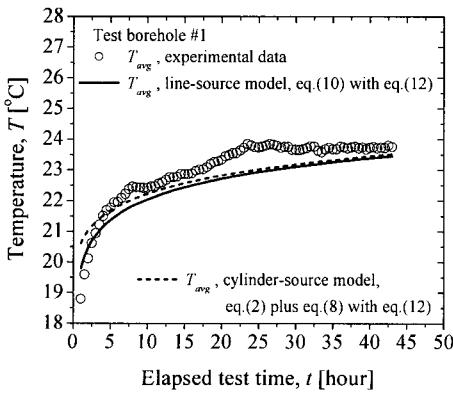


(a) Test borehole #1

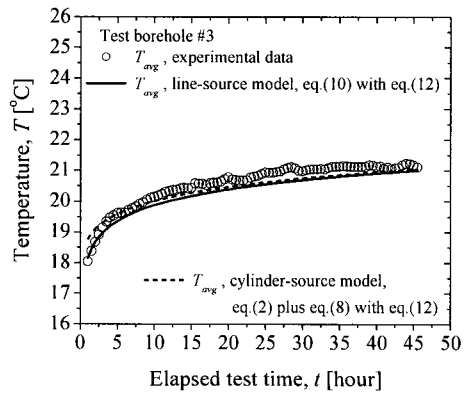


(b) Test borehole #3

Fig. 4 Average water temperature rise with respect to natural logarithm of elapsed test time.



(a) Test borehole #1



(b) Test borehole #3

Fig. 5 Comparison of average water temperatures.

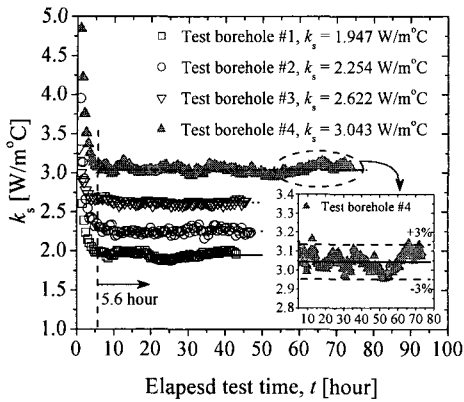


Fig. 6 Sequential variations of ground effective thermal conductivity.

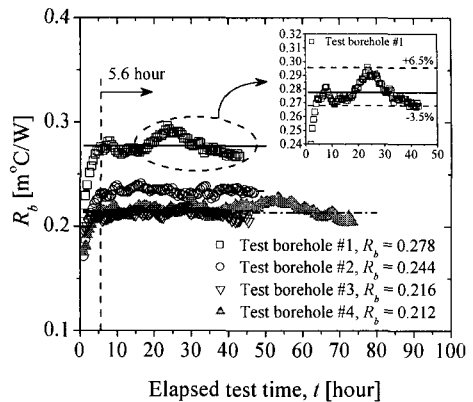


Fig. 7 Sequential variations of borehole effective thermal resistance.

간부터 시험 종료까지 열전도도는 0.77~1.57% 절대편차 내에서 일정한 값을 보였다. 또한 그라우팅 재료의 열전도도가 증가함에 따라 지중 열전도도 역시 증가하였다. 따라서 본 시험용 지중 열교환기들이 동일 지역에 시공되었기 때문에 지중 열전도도에 영향을 미치는 주된 요인은 그라우팅 재료의 열전도도인 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 식(11)의 단순 선형열원 모델로 보어홀 열저항을 계산한 결과를 나타낸 것이며, 각각 0.278, 0.244, 0.216, 0.212 m°C/W였다. 지중 열전도도와 비교했을 때 편차가 다소 있으나, 기준점부터 시험 종료까지 1.31~2.94% 절대편차 내에서 열저항 값들이 거의 일정함을 볼 수 있다. 또한 열전도도와 마찬가지로 지중 조건이 동일할 때, 보어홀 열저항에 영향을 미치는 주요 요인은 그라우팅 재료의 열전도도였다.

특히, 거의 모래(silica sand)만으로 채워진 1번 보어홀(포화도 9%)의 편차가, 포화도가 40%인 3번 보어홀이나 벤토나이트/모래 혼합물을 주입한 2, 4번 보어홀의 편차보다 상대적으로 컸다. 이는 모래 입자들 사이에 존재하는 공기가 열전달에 부정적인 영향을 미치기 때문이다. 만약 물(지하수)의 함량이 증가하여 공극을 완전히 채운다면 열전도도는 크게 증가할 것이다. 하지만 지하수량은 월별 강우량에 영향을 받기 때문에 지중 열교환기의 일정 전열성능 확보를 장담할 수 없다. 따라서 모래나 잔골재와 같은 천연재료를 그라우팅 재료로 사용할 경우 세심한 주의가 필요하다.

Fig. 8은 단순 선형열원 모델에 의한 보어홀 열저항 식(11)과 보어홀 형상계수를 이용한 계산

식(12) 결과를 비교한 것이다. 전체적으로 그라우팅 재료의 열전도도가 증가함에 따라 보어홀 열저항이 감소하는 경향은 일치하였다. 계산결과와 비교했을 때, 각각의 열저항 값은 평균 6.45%의 절대편차(#1: 9.02, #2: 7.96, #3: 3.35, #4: 5.47%)를 보였다. 이는 기구(clip)를 삽입하여 파이프 사이의 간격을 거의 일정하게 유지한 상태에서 측정된 Sohn et al.<sup>(11)</sup>의 결과(평균 절대편차 2.81%)에 비해 상대적으로 크다고 할 수 있다. 보어홀 형상계수 모델은 보어홀 내 파이프 간격이 이상적인 경우며, 실제 기구를 삽입하지 않고 이러한 간격을 유지하는 것은 매우 어렵다. 따라서 파이프 형상에 대한 정보가 불확실할 때, 현장 시험 데

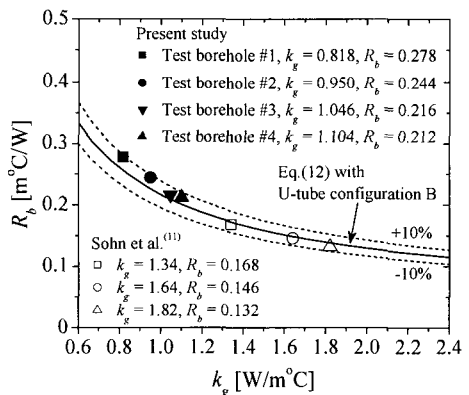


Fig. 8 Comparison between the experimental results and the borehole shape factor method for borehole effective thermal resistance.

Table 3 Summary of in-situ thermal response test and calculation results

	Test length, $t$ [hour]	Grout thermal conductivity, $k_g$ [W/m $^{\circ}$ C]	Effective thermal conductivity, $k_s$ [W/m $^{\circ}$ C]				Effective thermal resistance, $R_b$ [m $^{\circ}$ C/W]	
			In-situ test, eq.(7)	Line-source*, eq.(4)	Cylinder-source*, eq.(2)	IIT**	In-situ test*, eq.(11)	Shape factor, eq.(12)
Test borehole #1	45	0.818	1.947	1.950	1.776	1.951	0.278	0.255
Test borehole #2	48	0.950	2.254	2.255	2.233	2.258	0.244	0.226
Test borehole #3	48	1.046	2.622	2.623	2.476	2.625	0.216	0.209
Test borehole #4	74	1.104	3.043	3.047	2.950	3.048	0.212	0.201

\* Mean values, \*\* Initial Ignoring Time, proposed by Lee et al.<sup>(9)</sup>

이터를 식(11)에 적용하여 보어홀 열저항을 산정하면 더욱 정확한 값을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Table 3에 전체 결과를 정리하였다. 지중 열전도도에 대해서는 측정결과와 기존 모델로 계산한 결과들이 잘 일치하였다. 아울러 4.5시간 전의 데이터를 제외하고 계산했을 경우도 본 결과와 거의 일치하였다. 전체적으로 그라우팅 재료의 열전도도를 0.818 W/m $^{\circ}$ C에서 1.104 W/m $^{\circ}$ C로 증가시켰을 때, 지중 열전도도는 15.8~56.3% 증가하였으며 보어홀 열저항은 13.0~31.1% 감소하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 그라우팅 재료를 달리하여 4개의 시험용 지중 열교환기를 설치한 후 열응답 시험을 수행하였다. 시험에서 획득한 데이터를 단순 선형열원 모델에 적용하여 지중 열전도도와 보어홀 열저항을 산정하였다. 또한 그라우팅 재료가 열전도도와 열저항에 미치는 영향을 고찰하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 단순 선형열원 모델에 의한 지중 열전도도는 각각 1.947, 2.254, 2.622, 3.043 W/m $^{\circ}$ C였으며, 기준시점(5.6시간)부터 시험 종료까지 0.77~1.57% 절대편차 내에서 일정한 값을 보였다.

(2) 단순 선형열원 모델에 의한 지중 열전도도 값과 순환유체와 초기 지중 온도 등을 이용하여 보어홀 열저항을 산정할 수 있었으며, 각각 0.278, 0.244, 0.216, 0.212 m $^{\circ}$ C/W였다. 또한 열저항 값들

은 기준시점부터 시험 종료까지 1.31~2.94% 절대편차 내에서 일정하였다.

(3) 지중 조건이 거의 동일할 때, 지중 열전도도와 보어홀 열저항에 영향을 미치는 주된 요인은 그라우팅 재료의 열전도도였다. 즉, 그라우팅 재료를 달리하였을 때, 지중 열전도도는 15.8~56.3% 증가하였으며 보어홀 열저항은 13.0~31.1% 감소하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단의 2006년 신·재생에너지기술개발사업(2006-N-GE02-P-02)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Mogensen, P., 1983, Fluid to duct wall heat transfer in duct system storages, Proceedings of the International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice. Swedish Council for Building Research, June pp.6-8.
2. 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.
3. Zhang, Q. and Murphy, W. E., 2000, Measure-



- ment of thermal conductivity for three borehole fill materials used for GSHP, ASHRAE Transactions, Vol. 106, pp. 434-441.
4. Smith, M.D. and Perry, R.L., 1999, Borehole grouting: field studies and thermal performance testing, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 451-457.
  5. 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.
  6. Martin, C. A. and Kavanaugh, S. P., 2002, Ground thermal conductivity testing control site analysis, ASHRAE Transactions, Vol. 108, pp. 945-952.
  7. Beier, R. A. and Smith, M. D., 2003, Minimum duration of in-situ tests on vertical boreholes, ASHRAE Transactions, Vol. 109, pp. 475-486.
  8. 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.
  9. Lee, S. K., Woo, J. S., Ro, J. G. 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. 10, pp. 783-790.
  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. 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.
  12. Kline, S. J., 1985, The purpose of uncertainty analysis, Journal of Fluids Engineering, Vol. 107, pp. 153-160.
  13. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Oxford University Press.
  14. 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.
  15. Spitler, J. D., 1999, GLHEPRO 3.0 for Windows Users Guide, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Oklahoma State University.
  16. Gaia Geothermal, 2003, Ground Loop Design Version 2.7 for Windows, Gaia Geothermal.
  17. IGSHPA, 2000, Grouting for Vertical Geothermal Heat Pump Systems : Engineering Design and Field Procedures Manual, International Ground Source Heat Pump Association, Still water, Oklahoma.
  18. Remund, C. P., 1999, Borehole thermal resistance: laboratory and field studies, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 439-445.
  19. 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.