

열응답 시험과 변수 평가 모델을 이용한 그라우트/토양 혼합층의 열전도도 산정

손 병 후[†], 신 현 준, 안 형 준*

한국건설기술연구원 화재 및 설비 연구부, *(주) 코오롱건설

Evaluation of Thermal Conductivity for Grout/Soil Formation Using Thermal Response Test and Parameter Estimation Models

Byong Hu Sohn[†], Hyun-Jun Shin, Hyung-Jun An*

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

**Kolong Engineering & Construction Co., LTD., Yongin 449-797, Korea*

(Received October 14, 2004; revision received December 22, 2004)

ABSTRACT: The performance of U-tube ground heat exchanger for geothermal heat pump systems depends on the thermal properties of the soil, as well as grout or backfill materials in the borehole. In-situ tests provide a means of estimating some of these properties. In this study, in-situ thermal response tests were completed on two vertical boreholes, 130 m deep with 62 mm diameter high density polyethylene U-tubes. The tests were conducted by adding a monitored amount of heat to water over a 17~18 hour period for each vertical boreholes. By monitoring the water temperatures entering and exiting the loop and heat load, overall thermal conductivity values of grout/soil formation were determined. Two parameter estimation models for evaluation of thermal response test data were compared when applied on the same temperature response data. One model is based on line-source theory and the other is a numerical one-dimensional finite difference model. The average thermal conductivity deviation between measured data and these models is of the magnitude 1% to 5%.

Key words: Geothermal heat pump systems(지열원 열펌프 시스템), Ground heat exchanger(지중 열교환기), Grout/soil formation(그라우트/토양 혼합층), Thermal conductivity(열전도도), In-situ thermal response test(현장 열응답 시험)

기 호 설 명

c_p : 비열 [J/kgK]

$D_{p,in}$: 파이프 내경 [m]

h : 대류열전달계수 [W/m²K]

k : 열전도도 [W/mK]

L : 길이 [m]

\dot{m} : 질량유량 [kg/s]

Q : 열전달량 [W]

q'' : 열유속 [W/m²]

R : 열저항 [mK/W]

r : 반경 또는 반경방향으로의 거리 [m]

[†] Corresponding author

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

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

- S : 보어홀 형상계수(shape factor)
- T : 온도 [$^{\circ}\text{C}$]
- t : 시간 [s]
- x : 보어홀 깊이 방향으로의 거리 [m]
- x_0 : 식(3)과 식(4)에서 변수(= $r^2/4at$)
- Y : 목적함수 [-]

그리스 문자

- a : 열확산계수(= $k/\rho c_p$) [m^2/s]
- δ : 유효 파이프 두께 [m]
- γ : Euler 상수

하첨자

- avg* : 평균
- b* : 보어홀
- c* : 저온유체 또는 지중 열교환기 출구 유체
- exp* : 실험
- f* : 유체
- g* : 그라우트
- h* : 고온유체 또는 지중 열교환기 입구 유체
- i* : 시간 증분
- p* : 파이프
- s* : 토양
- t* : 유효 파이프

1. 서 론

지열원 열펌프 시스템(ground source heat pump systems)에서 지중 열교환기(ground heat exchanger)의 적정 설계는 전체 시스템의 성능 및 초기 설치비를 결정하는 중요한 과정이다. 또한 지중 열교환기의 설계과정은 시스템 적용대상 건물에 대한 정확한 냉·난방부하 계산은 물론, 지중 열교환기 매설지역 지층의 조성 및 연중 수분함량 변화, 보어홀(borehole)간의 간격 그리고 그라우트(grout)의 열 물성치 등과 같은 다양한 변수들을 고려해야 하는 복잡한 과정이다.

지중 열교환기는 지면에서 수직으로 천공된 보어홀 안으로 U자 관 파이프를 삽입한 후, 보어홀과 지중 열교환기 파이프 사이의 빈 공간을 그라우트로 완전히 채움으로써 시공된다(Fig. 1).⁽¹⁾ 이

러한 지중 열교환기의 성능은 결국, 지중 열교환기 파이프 내를 순환하는 유체와 이 파이프 주위의 복합매질(그라우트/토양)간의 열전달과 밀접한 관련이 있다. 따라서 지중 열교환기 파이프와 보어홀 벽면 사이의 간격 및 보어홀 열저항 그리고 그라우트/토양 혼합층의 열전도도 등은 지중 열교환기 설계에서 중요한 변수들이다.

실제 시공된 지중 열교환기 주위의 그라우트/토양 혼합층이 갖는 열전도도를 효과적으로 측정할 수 있는 방법이 현장 열응답 시험(in-situ thermal response test)이다. 이러한 열응답 시험에 대한 개념 및 구체적인 방법이 Mogensen⁽²⁾에 의해 제안된 후, 현재까지 복합매질의 열전도도를 산정하기 위한 방법으로 널리 적용되고 있다. 이에 대한 대표적인 연구로 Spilker⁽³⁾, Smith and Perry⁽⁴⁾, Martin and Kavanaugh⁽⁵⁾, Beier and Smith^(6,7), Zhang and Murphy⁽⁸⁾ 그리고 Shonder and Beck⁽⁹⁾ 등의 연구가 있다.

열응답 시험에서 제일 먼저 대두되는 문제는 시험 수행 시간이다. 지중 열교환기 파이프의 유한한 크기와 파이프나 그라우트의 열저항 등으로 야기되는, 시험 수행 초반부의 오차를 줄이기 위해 Martin and Kavanaugh⁽⁵⁾는 최소 48시간의 시험을 제안하였다. 그러나 열응답 시험 결과는 그라우트의 종류나 현장의 지층구조 등에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 따라서, 특정 시험 수행 시간을 규정하는 것은 다소 무리가 있을 것으로 판단된다. 이는 Beier and Smith⁽⁷⁾의 실험결과에서도 확인된다. 이에 대해 Bose et al.⁽¹⁰⁾은 조건에 따라 18시간에서 72시간의 범위 내에서 열응답 시험을 수행할 것을 제안하였다.

특히, Zhang and Murphy⁽⁸⁾는 순수 벤토나이트

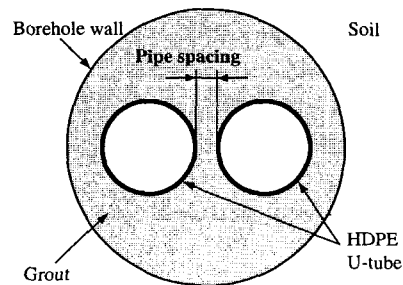


Fig. 1 Cross sectional view of a typical vertical ground heat exchanger.

(고체성분 20% 이상), 벤토나이트/규사 혼합물, 석회암 분말 등의 재료를 이용하여 열응답 시험을 수행하고 각각의 특성을 비교하였다.

국내의 경우, 최근 들어 신·재생 에너지 이용에 대한 관심이 증가하면서 지열원 열펌프 시스템에 대한 연구^(11,12)가 일부 수행되었다. 그러나 현장에서 지중 열교환기 파이프 주위 토양의 열전도도를 측정하는 연구는 거의 없다. 이에 본 연구에서는 실제 지열원 열펌프 시스템에 연결된 지중 열교환기를 대상으로 열응답 시험을 수행하여 그라우트/토양 혼합층의 열전도도를 산정하였다. 또한 라인소스 모델과 수치모델을 적용하여 계산을 수행하고, 이 결과를 열응답 시험에 의한 결과와 비교하였다.

2. 실험장치 및 방법

수직 U자 관 지중 열교환기의 현장 열응답 시험을 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 도시하였다. 실험장치는 크게 지중 열교환기, 열원부, 순환부 그리고 계측부로 구성되어 있다. 열원부는 지중 열교환기 순환유체에 일정한 열량을 가하는 2개의 전열기와 수조로 구성되어 있으며, 전열기는 각각 2.3 kW의 발열량을 가진다. 순환부는 순환유체가 지중 열교환기와 열원부를 순환하면서 지중으로 열을 전달할 수 있도록 순환펌프 및 배관 등으로 구성되어 있다. 계측부는 순환유체의 유량, 지중 열교환기 입·출구 온도 그리고 전열기의 전력 소모량 등을 측정하는 각종

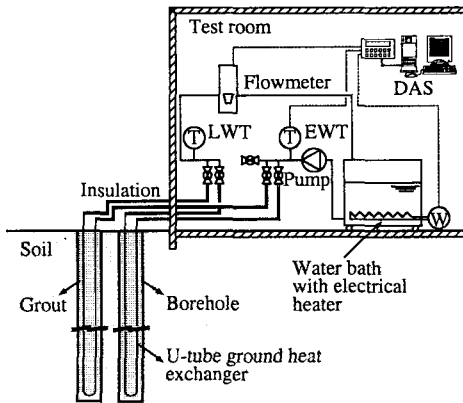


Fig. 2 Schematic of in-situ thermal response test apparatus.

Table 1 Nominal values and uncertainties of experimental parameters

Parameters	Nominal values		Uncertainty
	Test borehole #1	Test borehole #2	
Entering water temperature(°C)	21.7	23.6	±0.3°C
Leaving water temperature(°C)	19.2	21.1	±0.3°C
Power input(W)	4515.1	4572.0	±3.0%
Water flow rate(l/min)	25.9	26.1	±3.5%

계측기와 데이터 획득장치로 구성되어 있다.

지중 열교환기는 직경 150 mm, 깊이 130 m로 지면에서 보어홀을 천공한 후, 외경 62 mm, 길이 130 m의 고밀도 폴리에틸렌(high density polyethylene) U자 관을 보어홀에 삽입하고 그라우트(벤토나이트/규사/물 혼합물)를 채워 완성하였다. 본 연구에서는 이와 같은 시험용 지중 열교환기를 6 m 간격으로 2개 설치하였다.

현장 열응답 시험의 방법 및 순서는 다음과 같다. 먼저 지중 열교환기 파이프 내에 존재할 수 있는 공기 또는 불순물 등을 물을 순환시켜 제거한다. 다음으로 순환유체의 초기온도를 측정하고, 전열기를 가동하여 순환유체에 열을 가하면서 온도, 유량, 전력량 등을 데이터 획득 시스템을 이용하여 1분 간격으로 측정한다. 본 연구는 현장 열응답 시험을 17~18시간에 걸쳐 수행하였으며, Table 1에 각각의 시험용 보어홀에 대한 실험조건 및 이들 변수의 불확실도를 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 현장 열응답 시험 결과

Fig. 3은 현장 열응답 시험으로부터 측정된 지중 열교환기 입구와 출구에서 순환유체인 물의 온도 그리고 이들의 평균온도 및 열 입력량 등을 나타낸 것이다. 각각의 시험용 보어홀에 대해 18시간과 17.5시간 동안 시험을 수행하였다. 현장 열응답 시험을 수행하면서 지중 열교환기 입구와 출구에서 물의 온도차를 관측하였을 때, 대략 6시간 이후부터 시험 종료 시까지의 데이터는 거

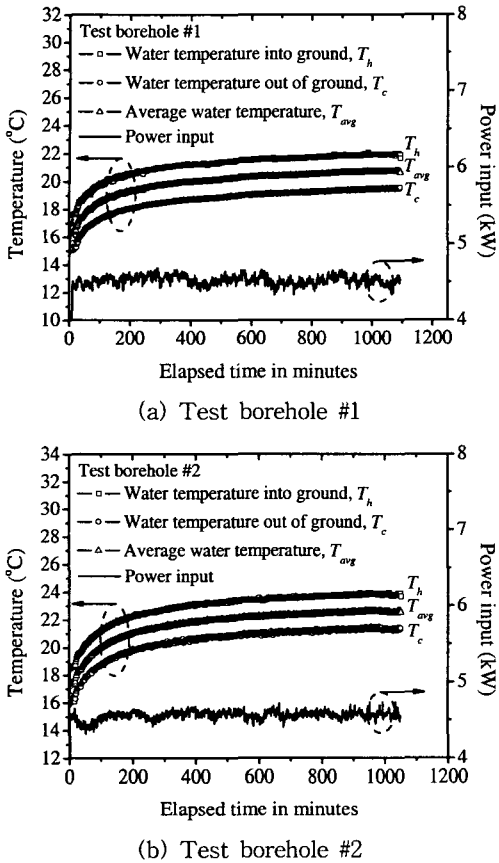


Fig. 3 Temperature response and power input with respect to elapsed time for the test boreholes.

의 일정한 값을 유지하였다. 따라서 현장 측정 결과와 기존의 연구결과들^(7,10)을 종합하여 시험 종료의 기준으로 삼았다.

Fig. 3과 Table 1에서 보는바와 같이, 평균 26.0 l/min의 유량으로 순환시키는 지중 열교환기 순환유체에 가해지는 열 입력량은 평균 4.5 kW 이었으며, 이 때 지중 열교환기 입구와 출구에서 물의 온도차는 평균 2.5°C이었다.

3.2 변수 평가 모델에 의한 열전도도 계산

현장 열응답 시험에 의한 데이터로부터 그라우트/토양 혼합층의 열전도도를 산정할 때, 해석적인 방법과 수치모델을 적용할 수 있다. 실제 보어홀에 설치된 지중 열교환기는 두 개의 파이프

를 가지며, 이러한 형상에 대한 열전도 해석 해는 존재하지 않는다. 따라서 두 개의 파이프를 하나의 무한 직선(line source)으로 가정^(2,13)하거나 또는 원통(cylinder source)으로 가정⁽¹⁴⁾하여 해석한다.

본 연구는 현장 열응답 시험 데이터를 해석하기 위해 위에서 언급한 방법들 중, 라인소스 모델과 정상상태 1차원 수치모델을 적용하였다. 본 해석을 위한 가정들은 다음과 같다.

- (1) 열원(파이프 내 순환유체)과 토양간의 열전달은 순수하게 전도에 의해서만 발생한다.
- (2) 열원의 수직 축을 중심으로 반경방향으로만 열이 전달된다.
- (3) 보어홀의 형상은 이 보어홀의 수직 축을 중심으로 완전 대칭이다.

3.2.1 라인소스 모델(Line-source model)

일반적으로 균질 매질(homogeneous medium) 속의 직선 열원으로부터 이 매질로 열이 전달될 때, 반경방향으로의 임의지점에서의 온도는 다음의 식(1)과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, 초기온도가 균일한 균질 고체매질로 직선열원에 의해 전달되는 열량이 Q 일 때 식(1)의 해는 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\Delta T(r, t) = \frac{Q}{4\pi kL} \int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (2)$$

그러나 직선열원 주위의 열전달 매체는 그라우트와 토양(또는 암석) 등으로 구성된 이질 매질(heterogeneous medium)이다. 따라서, 직선열원 주위의 보어홀과 토양 사이의 열저항 등을 고려하면 식(2)는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta T(r, t) = \frac{Q}{4\pi k_s L} \int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du + \frac{QR_b}{L} \quad (3)$$

식(3)에서 지수적분 항을 다음과 같이 근사식으로 표현할 수 있다.⁽¹⁵⁾

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

여기서, A, B, C, D, E 는 각각 0.99999193, 0.24991055, 0.05519968, 0.00976004, 0.00107857이며, γ 는 0.577의 값을 갖는다.

또한, 식(3)에서 보어홀의 열저항은 순환유체의 열저항(R_f), 파이프의 열저항(R_p), 그라우트의 열저항(R_g)등을 모두 포함한 총합 열저항(overall resistance)의 의미를 갖는다.

$$R_b = R_f + R_p + R_g \quad (5)$$

식(5)에서 파이프의 열저항 R_p 는 문헌에 제시된 값을 이용하여 구할 수 있다.⁽¹⁶⁾ 그라우트의 열저항은 보어홀의 형상계수와 그라우트의 열전도계수를 이용하여 계산되며⁽¹⁷⁾, 순환유체의 열저항은 유체의 관내 유동에 따른 대류열전달계수로부터 계산된다.

$$R_g = \frac{1}{S_b k_g} \quad (6)$$

$$R_f = \frac{1}{2\pi D_{p, in} h_f} \quad (7)$$

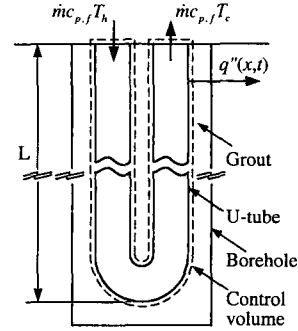
3.2.2 수치모델(Numerical model)

Fig. 4는 1차원 열전도 모델을 해석하기 위한 검사체적과 해석을 위해 2개의 파이프로 구성된 지중 열교환기를 하나의 파이프(유효 파이프)로 변환시킨 형상을 나타낸 것이다. 이 때, 유효 파이프의 반경은 다음과 같다.

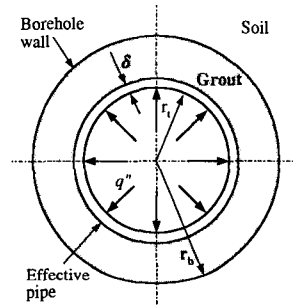
$$r_i = \sqrt{2} r_b \quad (8)$$

Fig. 4의 (a)에서 일정 유량의 유체가 파이프 내를 유동하면서 지중으로 열을 전달하는 과정은 정상상태 에너지 평형식으로 표현된다.

$$\dot{m} c_{p,f} [T_h(0, t) - T_c(0, t)] = \int_{x=0}^L [\dot{q}_h''(x, t) - \dot{q}_c''(x, t)] 2\pi r_p dx \quad (9)$$



(a) Control volume around U-tube



(b) Geometry with U-tube replaced by single pipe of effective radius r_i .

Fig. 4 Control volume and replaced single pipe for one-dimensional numerical model.

이 때, 유체의 열은 파이프 벽면과 그라우트를 거쳐 토양으로 전달된다. 따라서, 유체의 관점에서 본 에너지 평형식과 파이프, 그라우트 그리고 토양에 대한 각각의 열전도 방정식이 필요하며, 다음과 같다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_t}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_t} \frac{\partial T_t}{\partial t}, \quad r_i < r < r_i + \delta \quad (10)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_g} \frac{\partial T_g}{\partial t}, \quad r_i + \delta < r < r_b \quad (11)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha_s} \frac{\partial T_s}{\partial t}, \quad r_b < r < \infty \quad (12)$$

식(9)의 경계조건은 식(13)으로 표현되며, 이 조건을 길이 L 에 대해 평균하면 식(14)와 같다.

$$-k_t \frac{\partial T_t(r_i, x, t)}{\partial r} = \dot{q}_h''(x, t) + \dot{q}_c''(x, t) \quad (13)$$

$$-k_i \frac{\partial \overline{T}_i(r_i, t)}{\partial r} = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L [q_h''(x, t) + q_c''(x, t)] dx \quad (14)$$

또한, 열응답 시험에서 측정된 열 입력량과 온도를 입력값으로 이용할 때, 식(14)는 다음의 식(15)와 식(16)으로 각각 표현할 수 있다.

$$-k_i \frac{\partial \overline{T}_i(r_i, t)}{\partial r} = \frac{q_{exp}''}{L} \quad (15)$$

$$-k_i \frac{\partial \overline{T}_i(r_i, t)}{\partial r} = \frac{\dot{m}c_{p,f}}{2\pi r_i L} [T_h(0, t) - T_c(0, t)] \quad (16)$$

파이프, 그라우트 그리고 토양에 대한 각각의 열전도 방정식의 지중 열교환기 파이프 길이에 대한 평균의 형태는 식(17)~식(19)와 같고, 평균 온도들은 식(20)~식(22)로 표현된다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \overline{T}_i}{\partial r} \right) = \frac{1}{a_i} \frac{\partial \overline{T}_i}{\partial t}, \quad r_i < r < r_i + \delta \quad (17)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \overline{T}_g}{\partial r} \right) = \frac{1}{a_g} \frac{\partial \overline{T}_g}{\partial t}, \quad r_i + \delta < r < r_b \quad (18)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \overline{T}_s}{\partial r} \right) = \frac{1}{a_s} \frac{\partial \overline{T}_s}{\partial t}, \quad r_b < r < \infty \quad (19)$$

$$\overline{T}_i(r_i, t) = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L T_i(r_i, x, t) dx \quad (20)$$

$$\overline{T}_g(r, t) = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L T_g(r, x, t) dx \quad (21)$$

$$\overline{T}_s(r, t) = \frac{1}{L} \int_{x=0}^L T_s(r, x, t) dx \quad (22)$$

해석을 위한 경계조건과 초기조건들은 다음과 같다.

$$k_i \frac{\partial \overline{T}_i(r_i + \delta, t)}{\partial r} = k_g \frac{\partial \overline{T}_g(r_i + \delta, t)}{\partial r} \quad (23)$$

$$\overline{T}_i(r_i + \delta, t) = \overline{T}_g(r_i + \delta, t) \quad (24)$$

$$k_g \frac{\partial \overline{T}_g(r_b, t)}{\partial r} = k_s \frac{\partial \overline{T}_s(r_b, t)}{\partial r} \quad (25)$$

$$\overline{T}_g(r_b, t) = \overline{T}_s(r_b, t) \quad (26)$$

$$\overline{T}_s(\infty, t) = T_\infty \quad (27)$$

$$\overline{T}_i(r, 0) = T_\infty \quad (28)$$

$$\overline{T}_g(r, 0) = T_\infty \quad (29)$$

$$\overline{T}_s(r, 0) = T_\infty \quad (30)$$

이상의 조건들을 이용하여 유한차분법으로 계산을 수행하였다. 이 때, 고체 내에서의 온도 분포가 시간에 따라 포물선형으로 나타나는 열전도 문제 해석에 적합한 Crank-Nicolson 방법을 적용하였으며, 계산의 수렴조건은 다음과 같다.

$$Y = \sum_{i=1}^n (T_{aug,i} - \overline{T}_{t,i})^2 \quad (31)$$

식(31)에서 $T_{aug,i}$ 와 $\overline{T}_{t,i}$ 는 열응답 시험에 의해 측정된 입·출구 온도의 평균값과 계산에 의한 평균온도를 각각 의미한다. 식(31)로 표현되는 오차의 제곱합이 최소가 될 때까지 계산을 수행하였다. 이 때, 비선형 최적화 기법 중의 한 방법인 Nelder and Mead의 simplex 알고리즘을 적용하였으며, Y가 목적함수가 된다.⁽¹⁸⁾

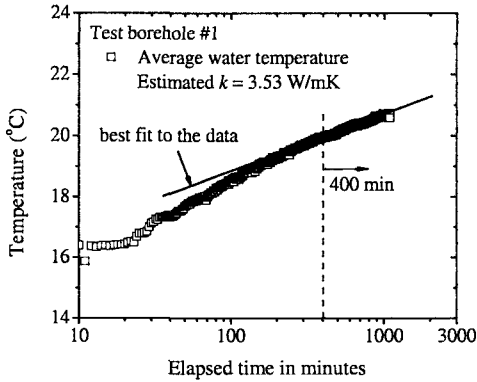
3.3 열응답 시험 결과와 계산결과의 비교

열응답 시험 수행 시간을 충분히 길게 하여 파이프나 그라우트의 열저항을 무시할 수 있게 되면, 라인소스 모델을 다음과 같이 더욱 단순화시킬 수 있다고 Mogensen⁽²⁾은 제안하였다.

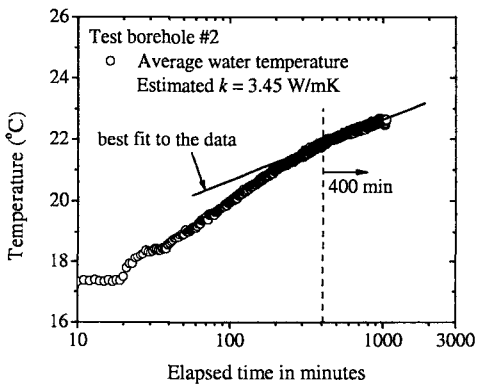
$$\int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \approx \ln \frac{1}{x_0} - \gamma \quad \text{for } \frac{a_s t}{r_0^2} \geq 5 \quad (32)$$

$$\Delta T(r, t) = \frac{Q}{4\pi k_s L} [\ln t - \gamma] \quad (33)$$

식(33)으로 표현되는 단순 라인소스 해석은, 식 자체가 1차 선형식이기 때문에 열전도도를 계산하는 데 쉽게 적용될 수 있다. 하지만 데이터의 선형성이 부족하여 여러 가지 기울기가 발생할 경우, 정확성이 감소할 수도 있다. 또한 열원의 온도가 필요하기 때문에 현장 열응답 시험에서 구한 입·출구 온도의 평균값을 이용한다. 열응답 시험 데이터를 식(33)에 적용하기 위한 기준



(a) Test borehole #1

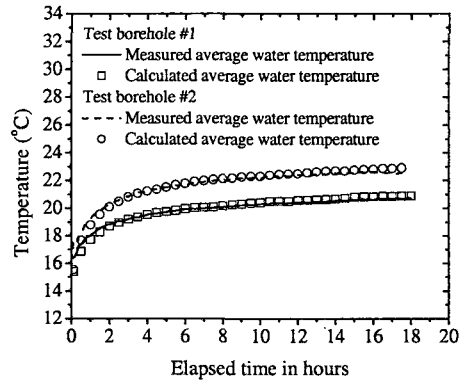


(b) Test borehole #2

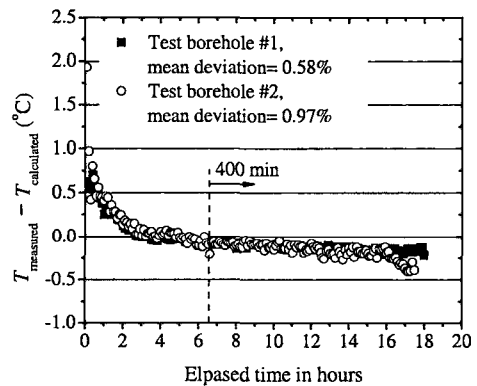
Fig. 5 Semi log plot of average water temperatures for the test boreholes.

은 식(32)에 주어진 $\alpha_s t / r_0^2 \geq 5$ 로써 시험 시간을 기준으로 한다.⁽²⁾

Fig. 5는 열응답 시험 수행 시간을 로그좌표로 하여 지중 열교환기 입·출구온도의 평균값을 나타낸 것이다. 열응답 시험 중, 지중 열교환기 입·출구온도의 변화추이와 식(32)에 주어진 기준 등을 고려하였을 때, 400분(6.7시간) 이후의 데이터가 선형성이 확보되기 때문에 이들을 이용하여 열전도도를 산정하였다. 즉, 400분 이후의 데이터에 대해 접선의 기울기를 구하고, 이 기울기를 이용하여 열전도도를 계산하였으며, 각각 3.53 W/mK과 3.45 W/mK의 열전도도를 산정할 수 있었다. 여기서, 본 연구를 위한 시험용 보어홀 천공 과정에서 지하 약 5 m 깊이부터 화강암층이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 따라서,



(a) Measured and calculated T_{avg}



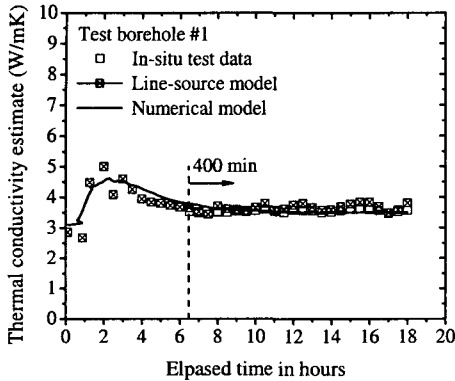
(b) Model error ($T_{measured} - T_{calculated}$)

Fig. 6 Measured and calculated average water temperatures for the test boreholes.

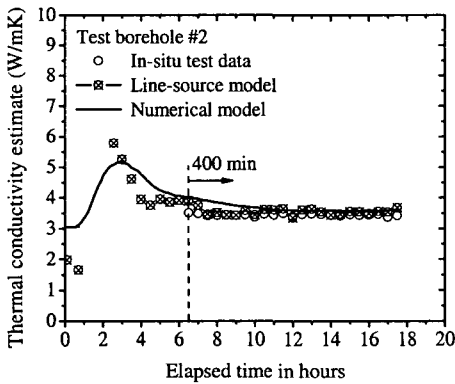
Salomone and Marlowe⁽¹⁹⁾가 제시한 화강암의 열 확산계수와 시공된 보어홀의 반경 등을 식(32)에 대입하면, 단순 라인소스 해석에 필요한 데이터는 6.2시간 이후의 데이터인 것으로 나타났다.

Fig. 6의 (a)는 지중 열교환기 입·출구온도의 평균값과 1차원 수치모델에 의한 계산 값을 비교한 것이다. 여기서, 계산결과와 시험결과의 명확한 구분을 위해 계산결과는 30분 간격의 데이터만 표시되었다. 전체적으로 두 시험용 보어홀에 대해, 시험결과와 수치모델에 의한 계산결과는 잘 일치하였다.

Fig. 6의 (b)는 이러한 두 온도의 차이를 전체 시험 수행 시간에 대해 나타낸 것이다. 시험결과에 대한 계산결과의 표준편차는 1번 시험용 보어홀인 경우 0.58% 그리고 2번 시험용 보어홀인 경



(a) Test borehole #1



(b) Test borehole #2

Fig. 7 Sequential estimates of grout/soil formation thermal conductivity using in-situ test, line-source model and numerical model.

우 0.97%로 나타났다. 물론, 시험 초반부의 온도차가 후반부의 온도차보다 상대적으로 크지만, 이 역시 평균 1%~5%의 표준편차를 보였다. 이는 1차원 수치모델이 열응답 시험 데이터를 이용하여 그라우트/토양 혼합층의 열전도도를 산정하는 데 효과적으로 적용될 수 있음을 의미한다.

Fig. 7은 현장 열응답 시험에 의한 열전도도와 모델에 의한 열전도도를 비교하여 도시한 것이다. 각 결과들의 명확한 구분을 위해, 라인소스 모델에 의한 계산결과와 400분 이후의 시험결과는 30분 간격으로 나타내었다. 현장 열응답 시험 데이터로부터 산정된 열전도도와 두 모델로 계산된 열전도도가 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

Table 2 Estimated thermal conductivity values[W/mK]

(*: mean deviation to the in-situ test results)

Categories	In-situ test	Line-source model		Numerical model	
	<i>k</i>	<i>k</i>	%*	<i>k</i>	%*
Borehole #1	3.53	3.63	2.83	3.55	0.57
Borehole #2	3.45	3.56	3.19	3.59	4.06

여기서, 해석을 위한 가정들과 지중 및 그라우트의 체적 열용량이 일정하다고 한 가정 등에 의해 수치모델로 계산한 결과가 나머지 두 결과보다 다소 안정적으로 보이고 있다. 이는 또한 지중 열교환기를 시공할 때, 보어홀 벽면과 파이프 사이의 간격이 일정하게 유지될 수 없는 즉, 지중 열교환기 시공과정에서 발생하는 오차도 원인으로 고려된다.

이상의 전체 결과를 Table 2에 정리하였다. 1번 시험용 보어홀의 측정결과에 대해 라인소스 모델은 2.83%, 수치모델은 0.57%의 편차를 보였다. 또한 2번 시험용 보어홀인 경우, 라인소스 모델과 수치모델에 의한 계산결과는 시험결과에 대해 각각 3.19%와 4.06%의 편차를 보였다.

두 시험용 보어홀에 대한 각각의 열전도도를 비교하였을 경우, 시험결과는 2.32%, 라인소스 모델에 의한 결과는 1.97% 그리고 수치모델에 의한 결과는 1.11%의 편차를 갖는 것으로 나타났다. 시험결과 간의 편차가 계산결과들 간의 편차보다 상대적으로 다소 크게 보이는 것은 시험수행 주기와 시험용 보어홀의 시공상태의 차이 등이 원인인 것으로 판단된다. 본 연구에서는 두 시험용 보어홀을 대상으로 각각의 현장 열응답 시험을 수행하는 데 3일의 간격을 두었다. 즉, 교란 받지 않은 지중온도나 지중의 수분함유량 등, 최초 지중 상태가 다소 상이하여 이와 같은 차이가 발생한 것으로 판단된다. 또한, 두 시험용 보어홀이 최대한 동일하도록 시공하였지만, 보어홀 크기, 그라우팅 재료의 주입량, 보어홀 벽면과 파이프 사이의 간격 등이 다소 상이한 것도 이와 같은 차이의 원인으로 고려된다.

또한 본 연구에 적용된 라인소스 모델과 수치

모델 간의 상대적 우수성은 발견되지 않았다. 이는 Martin and Kavanaugh⁽⁶⁾가 제시한 결과와 동일하며, 따라서 두 모델이 모두 시험결과를 해석하는 데 효과적으로 적용될 수 있을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 시험용 보어홀에 설치된 고밀도 폴리에틸렌 U자 관 지중 열교환기를 대상으로 현장 열응답 시험을 수행하고, 이 지중 열교환기 파이프 주위 그라우트/토양 혼합층의 열전도도를 산정하였다. 또한 열응답 시험 데이터를 이용하여 라인소스 모델과 수치모델로 계산을 수행하고, 시험으로부터 추정된 열전도도 값과 비교하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 두 시험용 보어홀을 대상으로 실시한 현장 열응답 시험으로부터 그라우트/토양 혼합층의 열전도도는 각각 3.53 W/mK과 3.45 W/mK이었다.

(2) 1차원 수치모델에 의한 계산은 열응답 시험에서 측정된 지중 열교환기 입·출구 평균온도를 1% 편차 이내에서 예측하였다.

(3) 라인소스 모델과 1차원 수치모델을 적용하여 그라우트/토양 혼합층의 열전도도를 계산하였을 때, 1번 시험용 보어홀은 각각 3.63 W/mK과 3.55 W/mK 그리고 2번 시험용 보어홀은 각각 3.56 W/mK과 3.59 W/mK이었다.

(4) 본 연구에 적용된 라인소스 모델과 1차원 수치모델 간의 상대적 우수성은 발견되지 않았다. 따라서, 두 모델이 모두 현장 열응답 시험 데이터를 이용하여 열전도도를 산정하는 데 효과적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 2003년도 산업자원부 산하 에너지관리공단의 대체에너지 실증 연구사업에 의하여 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. IGSHPA, 2000, Grouting for Vertical Geothermal Heat Pump Systems: Engineering Design and Field Procedures Manual, International Ground Source Heat Pump Association, Still-
2. 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 6-8.
3. 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.
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. Martin, C. A. and Kavanaugh, S. P., 2002, Ground thermal conductivity testing control site analysis, ASHRAE Transactions, Vol. 108, pp. 945-952.
6. Beier, R. A. and Smith, M. D., 2002, Borehole thermal resistance from line-source model of in-situ tests, ASHRAE Transactions, Vol. 108, pp. 212-219.
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. 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.
9. 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.
10. Bose, J. E., Smith, M. D., and Spilker, 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.
11. Sohn, B. H., Cho, C. S., Shin, H. J., and An, H. J., 2004, Cooling and heating performance evaluation of a ground source heat pump, Proceedings of the KSME 2004 Spring Annual

- Meeting, pp. 2117-2122.
12. Sohn, B. H., Shin, H. J., and Park, S. K., 2004, Comparative analysis of life-cycle costs of ground source heat pump and conventional HVAC system, *Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference*, pp. 1339-1344.
 13. 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.
 14. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, *Conduction of Heat in Solids*, Oxford, Clarendon Press.
 15. Abramowitz, M. and Stegun, I. A., 1964, *Handbook of Mathematical Functions*, National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series 55, US Department of Commerce.
 16. Kavanaugh, S. P. and Rafferty, K., 1997, *Ground-Source Heat Pumps: Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings*, ASHRAE, Atlanta.
 17. Remund, C. P., 1999, Borehole thermal resistance: laboratory and field studies, *ASHRAE Transactions*, Vol. 105, pp. 439-445.
 18. 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.
 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.