

1차원 수치모델과 현지측정에 의한 지중열전도율 및 보어홀 전열저항 해석에 관한 연구

이 세 균[†], 우 정 선^{*}, 노 정 근^{**}, 김 대 기^{***}

충북대학교 기계공학부, ^{*}한국에너지기술연구원, ^{**}충북대학교, ^{***}충북대학교 기계공학과 대학원

A Study on the Estimation of Soil Formation Thermal Conductivities and Borehole Resistances with One-Dimensional Numerical Model and In-Situ Field Tests

Se-Kyoun Lee[†], Joung-Son Woo^{*}, Jeong-Geun Ro^{**}, Dae-Ki Kim^{***}

Department of Mechanical Engineering, Chungbuk National Univ., Cheongju 361-763, Korea

^{*}Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Korea

^{**}Chungbuk National Univ., Cheongju 361-763, Korea

^{***}Department of Mechanical Engineering Graduate School, Chungbuk National Univ., Cheongju 361-763, Korea

(Received May 4, 2006; revision received August 29, 2006)

ABSTRACT: A one-dimensional numerical model coupled with parameter estimation is used to predict the effective thermal conductivities of soil formations and borehole resistances from in situ field test data. In this application a new method of using initial ignoring time (IIT) obtained from error estimation is tried and turned out to be successful in determining soil thermal conductivities. This method is used for single-U and double-U borehole system. The results of this method are compared and agreed well with those of existing software (GPM) in the analysis of single-U borehole data. In the analysis of double-U borehole data this method seems to be better in predicting soil and borehole properties.

Key words: Borehole heat exchanger(보어홀 열교환기), 1-Dimensional model(1차원 모델), Thermal conductivities of soil formations(지중열전도율), Borehole resistances(보어홀 저항)

기 호 설 명

C_p : 비열 [J/kg·K]
 D_i : 내경 [m]
 D_o : 외경 [m]
 IIT : 초기제외시간

k_{fe} : 유체영역의 유효 열전도율 [W/m·K]
 k_{ge} : 그라우트영역의 유효 열전도율 [W/m·K]
 k_s : 지중토양의 열전도율 [W/m·K]
 L : 보어홀 길이 [m]
 Q : 열전달률 [W]
 r : 반경 [m]
 R_b : 보어홀 전열저항 [K·m/W]
 r_b : 보어홀 반경 [m]
 r_{fe} : 유효튜브 반경 [m]
 T : 온도 [°C]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-43-261-2446; fax: +82-43-261-2446

E-mail address: leesk@chungbuk.ac.kr

t : 시간 [sec or hour]

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m^3]

ρC_p : 체적열용량 [$\text{J}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$]

하첨자

b : 보어홀

e : 유효

f : 유체

g : 그라우트

i : 시간간격에 따른 순번

m : 측정

o : 초기

s : 지중토양

1. 서 론

지중열원 열펌프는 지표면으로부터 약 200 m 이내의 깊이에서 연중 13~15°C로 대략 일정한 온도를 유지하는 지중 토양층을 열원 또는 히트싱크로 사용하는 시스템으로 지중열교환기는 이 시스템에서 가장 기본이 되는 필수장비이다.

Fig. 1에서는 지중열교환기 중 가장 많이 사용

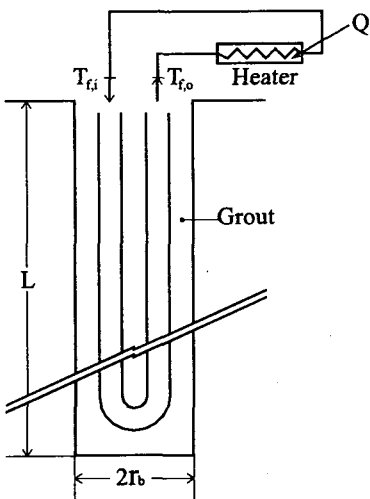
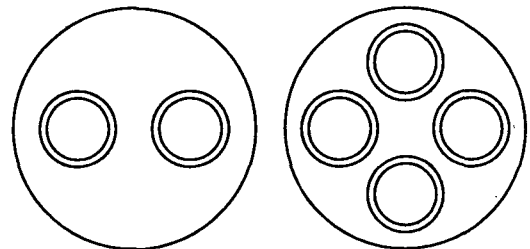


Fig. 1 Vertical borehole with thermal response tester.

되는 수직형 보어홀을 보이고 있으며, Fig. 2에서 보는 바와 같이 단일 U관을 사용한 2관식, 또는 2중 U관을 사용한 4관식이 주로 사용된다. 이러한 시스템은 지중토양과의 열교환뿐만 아니라 지중토양의 열전도율 측정에도 이용된다. 열전도율 측정을 위해서는 열응답 시험을 하게 되며, 열응답 시험은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 일정 열전달률 Q 가 발생하는 전기히터를 연결하여 수행한다.

열응답 시험을 위한 지중열거동 해석에는 선형 열원 근사법,⁽¹⁾ 실린더 열원 모델⁽²⁾과 같은 이론 모델과 수치모델로는 1차원 모델인 Shonder and Beck⁽³⁾의 GPM 소프트웨어, Yavuzturk⁽⁴⁾의 2차원 모델 등이 있다. 최근에 Lee et al.⁽⁵⁾은 GPM 소프트웨어와는 다소 다른 개념의 1차원 모델을 개발하고 이 모델의 해에 계수추정법(parameter estimation)을 접목하여 주위매질의 열전도율을 추정하는 방법을 개발하고 실험실 모델을 통하여 해석결과를 검증한 바 있다.

1차원 모델은 열유동을 반경방향으로만 가정하므로 여기서는 보어홀 양끝부분에서 주로 발생되는 2차원 또는 3차원 열거동 효과가 무시되며 이렇게 무시되는 양단 효과가 수년 또는 수십년간 누적될 경우 1차원 모델의 해에서는 다소의 오차가 발생할 수 있다. 따라서 20~30년 정도의 장기간 열거동 현상을 고려해야 하는 보어홀 설계 문제에서는 단순 1차원 개념만으로는 충분한 모델이 되기에 부적절하다. 그러나 50시간 정도의 시간규모를 갖는 열응답 시험에서는 이러한 효과가 문제되지 않으며 더욱이 보어홀 깊이(50~100 m)와 보어홀 직경(0.1~0.15 m) 등을 고려할 때 1차원 모델은 적절한 근사화임을 알 수 있다. 실제로 2차원 모델로 개발된 Yavuzturk의 방법은 열응답 해석에서 별로 이용되지 않고 있다. 다만



(a) Single-U type (b) Double-U type

Fig. 2 Cross sections of borehole.

보어홀 단면은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 정확한 1차원 형상은 아니며 이러한 경우 시간이 경과되어 보어홀로부터 충분한 열전달이 이루어지면 보어홀 주위는 점차 반경 방향으로 대칭인 1차원적 열거동에 접근해 나간다. 따라서 열응답 시험에서 1차원 모델을 적용할 경우 초기 몇 시간 사이에 비교적 큰 오차가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 Lee et al.⁽⁵⁾의 방법을 현지측정 결과에 적용하고자 하며 이 과정에서 오차해석을 통하여 초기제외시간(initial ignoring time, IIT)을 결정하는 새로운 방법을 사용하여 해의 정밀도를 높이고자 한다. 초기제외시간은 선형열원 근사법에서는 많이 사용되고 있는 방법이나 수치모델에서는 본 연구에서 처음 시도되는 개념이다.

2. 1차원 모델 및 계수추정법

Fig. 1의 열응답 시험장치에서는 전기히터에 의하여 일정열량 Q 를 보어홀 유체에 가하여 온도를 $T_{f,i}$ 로 승온시키는 과정을 보여준다. 승온된 유체는 보어홀로 유입되며 순환과정에서 이 열량은 지중으로 확산되고 유체의 온도는 $T_{f,o}$ 가 되어 지상으로 유출된다. 보어홀 유체는 보어홀을 따라 유동하면서 그 온도가 변화되나 그 변화량은 매우 적어 3~5°C 수준이 일반적이다. 더욱이 지중온도 변화를 보면 지표면에 가까운 약 10m까지는 지상온도 변화의 영향을 받지만 그 이하로 내려가면 100~150m까지 대략 일정하다. 따라서 보어홀을 흐르는 상향류와 하향류의 평균값은 깊이에 관계없이 일정하다는 가정은 보어홀 모델링에서 채택되는 근사화 방법 중의 하나이다.⁽⁶⁾

실제로 측정 가능한 평균값은 보어홀 입, 출구의 온도인 $T_{f,i}$ 와 $T_{f,o}$ 밖에 없으므로 보어홀 유체온도 T_f 를 $T_f = (T_{f,i} + T_{f,o})/2$ 로 정의하여 깊이에 관계없이 일정값으로 가정한다. 이와 같은 보어홀의 열거동 특성은 보어홀 전열해석에서 상향류와 하향류를 합하여 온도 T_f 인 하나의 유효튜브로 근사화하는 1차원 모델 설정을 가능케 한다.

Lee et al.⁽⁵⁾의 1차원 모델은 Fig. 3의 단면형상과 함께 다음과 같다. Fig. 3은 Fig. 2에서 보이는 2관 또는 4관을 그림과 같이 유효반경 r_{fe} 인 하나의 유효튜브로 근사화하고 이 유효튜브 내에서 열유속 Q 가 균일하게 발생하며 주위는 그라우트 채움을 한 것으로 되어 있다. 여기서 유효튜브 내

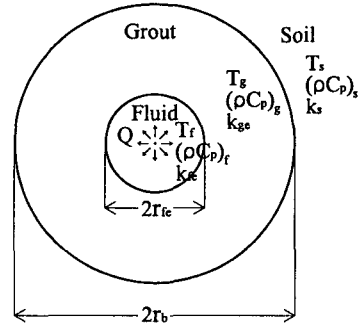


Fig. 3 One-dimensionally simplified cross section of borehole.

의 유체의 양이 실제와 같도록 유효튜브 직경을 U관 내경의 $\sqrt{2}$ 배(2관식의 경우) 또는 2배(4관식의 경우)로 한다.

이 모델에 관하여서는 이상에 언급된 내용을 기반으로 하여 다음의 가정을 적용한다.

(1) 보어홀은 수직방향으로 무한히 길고 유효튜브 내의 온도는 균일하며 모든 열의 흐름은 반경방향이다.

(2) 유효튜브 내의 열전달은 열전도율이 무한히 큰 물질($k_{fe} = \infty$)의 열전도에 의하여 이루어지며 이 물질 내에서 열유속 Q 가 균일하게 발생된다.

(3) 그라우트 영역에서의 열전도는 유효열전도율 k_{ge} 에 의하여 이루어진다.

(4) 주위 토양의 열물성치는 일정하다.

위의 가정(2)는 U관 내의 대류열전달을 전도열전달 효과로 대체한 것으로 실제 관내의 흐름은 열전달이 활발한 난류영역이 되며 따라서 온도분포 역시 거의 균일하게 나타나게 될 것이므로 열전도율이 무한히 큰 물질에 의한 전도열전달 현상과 유사하다고 볼 수 있다. 그러나 관 내벽의 대류에 의한 전열저항, 관의 두께에 의한 전열저항, 관과 그라우트 간의 접촉전열저항 등이 고려되어야 하나 이 모델에서는 이들을 따로 고려하지 않고 가정(3)에 의하여 그라우트의 유효 열전도율 k_{ge} 에 의한 전도저항에 포함되는 것으로 하였다.

이외에 Fig. 3의 $(\rho C_p)_f$, $(\rho C_p)_g$ 및 $(\rho C_p)_s$ 는 각각 보어홀 유체, 그라우트 및 주위 토양의 체적열용량이며, k_s 는 주위 토양의 열전도율, r_b 는 보어홀 반경이다.

이 모델에 따른 열전도 방정식은 다음과 같다.

그라우트에 관하여서는

$$\frac{k_{ge}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) = (\rho C_p)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} \quad (1)$$

$$r_{fe} < r < r_b$$

주위 토양에 관하여서는

$$\frac{k_s}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_s}{\partial r} \right) = (\rho C_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad (2)$$

$$r_b < r < \infty$$

내부 유체의 온도변화 방정식 및 $r = r_{fe}$ 에서의 접촉경계조건은

$$(\rho C_p)_f (\pi r_{fe}^2) \frac{dT_f(t)}{dt} = \frac{Q}{L} + k_{ge} (2\pi r_{fe}) \frac{\partial T_g(r_{fe}, t)}{\partial r} \quad (3)$$

$$T_f(t) = T_g(r_{fe}, t) \quad (4)$$

그라우트와 토양 사이의 접촉경계조건은

$$k_g \frac{\partial T_g(r_b, t)}{\partial r} = k_s \frac{\partial T_s(r_b, t)}{\partial r} \quad (5)$$

$$T_g(r_b, t) = T_s(r_b, t) \quad (6)$$

토양에서 $r = \infty$ 의 경계조건은

$$T_s(\infty, t) = T_o \quad (7)$$

전 시스템에서의 초기조건은 T_o 로 균일하며, 따라서

$$T_f(0) = T_g(r, 0) = T_s(r, 0) = T_o \quad (8)$$

본 연구에서는 식(1)~(8)을 양적 유한차분법(explicit finite difference method)에 의하여 수치 해석을 하고 그 해를 다음과 같은 계수추정법에 적용하여 k_s 와 k_{ge} 를 구한다.

계수추정법은 현지 시험 결과 측정된 U-튜브의 입, 출구 유체온도의 평균값 $T_{f,m}$ 과 수치해석 결과 얻어진 T_f 와의 비교를 통하여 이루어지며,

비교방법은 최소자승 오차의 개념을 도입하여 다음과 같이 한다.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (T_{f,m,i} - T_{f,i})^2 \quad (9)$$

여기서 i 는 시간에 따른 측정순번이며, SSE는 자승오차의 합(sum of square error)이 된다. 따라서 SSE는 k_{ge} 와 k_s 에 따른 함수가 되며, 최적값은 주어진 범위의 k_{ge} 와 k_s 에 관한 격자탐색(grid search)을 통하여 얻게 된다. 수치해석 프로그램에서 k_{ge} 를 최소값에서 최대값까지 input으로 준 후 10등분하여 증가시키며 각각의 k_{ge} 값에 대하여 k_s 또한 최소값에서 최대값까지 input으로 준 후 10등분하여 증가시켜 나간다. 각각의 k_{ge} , k_s 값에 대한 SSE를 계산하고 비교해 가며 SSE가 최소가 되는 점을 찾는다. 이리하여 최적점의 윤곽이 파악되면 그 점을 중심으로 다시 한번 더 좁은 범위로 k_{ge} 와 k_s 의 최대, 최소값을 input시킨 후 격자탐색을 되풀이한다. 이렇게 2~3회 반복 실시함으로써 신뢰할 만한 최적점을 찾을 수 있다.

그라우트의 유효열전도율 k_{ge} 가 정해지면 보어홀 전열저항은 다음 식으로 계산된다.

$$R_b = \frac{1}{2\pi k_{ge}} \ln \left(\frac{r_b}{r_{fe}} \right) \quad (10)$$

3. 현지측정 및 오차해석

본 연구에서는 현지측정용 지중열교환기로 2관식(borehole #1)과 4관식(borehole #2) 각 1개씩을 선정하여 현지 열응답시험을 수행하였으며 borehole의 사양은 Table 1과 같다.

또한 식(1)~(8)을 적용함에 있어 적용된 물성치의 값들 및 초기온도는 각각 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Borehole \#1: } & (\rho C_p)_f = 4200 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K} \\ & (\rho C_p)_g = 3900 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K} \\ & (\rho C_p)_s = 2230 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K} \\ & T_o = 15.1^\circ \text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Borehole \#2: } & (\rho C_p)_f = 4200 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K} \\ & (\rho C_p)_g = 3400 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K} \\ & (\rho C_p)_s = 2382 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K} \\ & T_o = 15.31^\circ \text{C} \end{aligned}$$

Table 1 Parameters of two test boreholes

Parameters	Borehole No.	
	Borehole #1 (Single-U type)	Borehole #2 (Double-U type)
Bolehole diameter (m)	0.15	0.15
Bolehole depth (m)	100	101.8
Grout	Bentonite	Bentonite-silica sand
Average power (Q)	4.432 kW	7.970 kW
U-pipe (PE pipe)	$D_i=0.0254$ m, $D_o=0.0339$ m	

위에서 물 및 그라우트의 체적열용량인 $(\rho C_p)_f$ 와 $(\rho C_p)_g$ 는 EED⁽⁷⁾ 자료에 의한 값이며, 지중토 양의 체적열용량인 $(\rho C_p)_s$ 는 보어홀 시추시 채취된 시료의 실험실 측정 결과이고, 초기온도 T_o 는 보어홀에 10 m 간격으로 설치된 온도센서를 통하여 취득된 평균값이다.

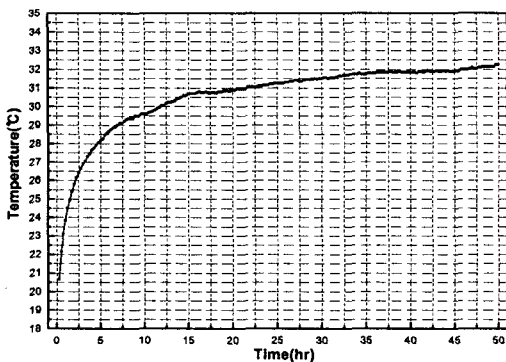
오차해석에서는 식(1)~(8) 및 식(9)의 계수추정법을 통하여 확정된 k_s 와 k_{ge} 를 식(1)~(8)에 다시 대입하여 T_f 를 계산하고 이 T_f 와 현지측정은도인 $T_{f,m}$ 의 차이를 자승오차의 관점에서 이해하기 위하여 자승오차 SE(square error)를 다음과 같이 정의한다.

$$SE = (T_f - T_{f,m})^2 \quad (11)$$

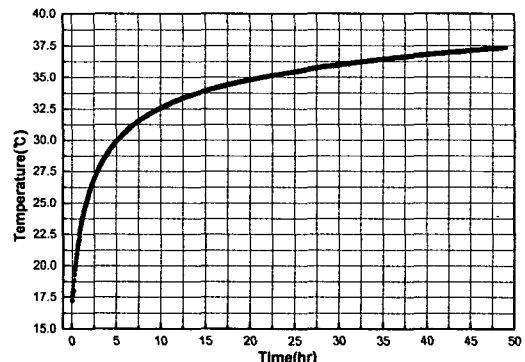
Fig. 4는 borehole #1과 #2에 관하여 열응답 시험시 측정된 시간에 따른 현지측정온도의 변화를 보이고 있으며, Fig. 5는 borehole #1과 #2의 SE가 각각 측정시간에 따라 어떻게 변해 나가는지를 보여준다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 자승오

차는 가동 초기에 크게 나타나며 시간경과와 더불어 급격히 감소되어 간다. 이것은 실제 보어홀 시스템 가동시 초기 몇 시간 사이에는 아직 시스템의 온도분포가 1차원적 열거동에 접근되지 않고 있음을 의미한다. 따라서 오차가 많은 시간대의 자료를 계수추정 해석에서 제외함으로써 해의 정밀도가 향상될 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 borehole #1에서 4.25시간, borehole #2에서 4.2시간을 각각 초기제외시간으로 정하였다. 단, Fig. 5의 오차특성을 보면 borehole #2(4관식)보다 borehole #1(2관식)에서 훨씬 큰 초기오차가 나타났다. 즉, 4관식은 일반적으로 2관식보다 전열저항이 적으므로 초기오차도 적고 이에 따라 초기제외시간의 효과도 크지 않음을 예측할 수 있다.

초기제외시간이 확정되면 주어진 범위의 k_s 와 k_{ge} 에 관하여 식(1)~(8)의 수치해석 및 식(9)의 계수추정과정을 다시 한번 되풀이한다. 단, 이번에는 확정된 초기제외시간 내의 자료를 제외하고 나머지 자료만으로 식(9)의 계수추정법을 수행하

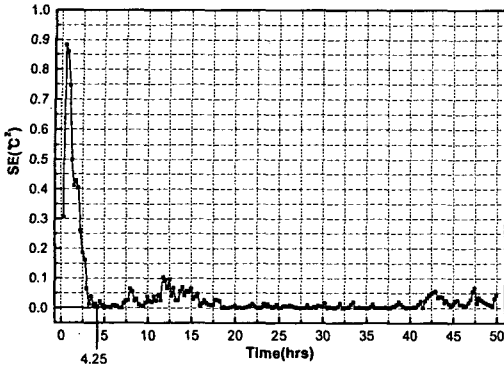


(a) Borehole #1

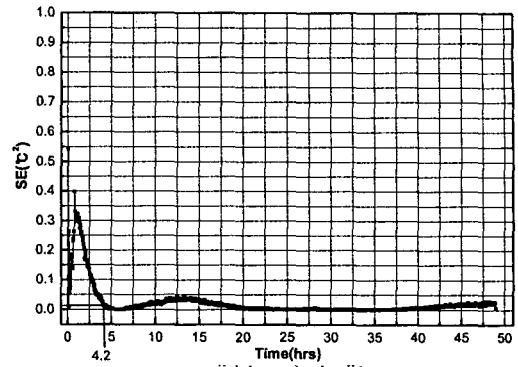


(b) Borehole #2

Fig. 4 Temperature response with time.



(a) Borehole #1



(b) Borehole #2

Fig. 5 SE vs. time.

여 SSE가 최소화되는 k_s 와 k_{ge} 의 값을 찾아 이 값을 해로 확정한다.

4. 열응답 시험 결과

지중토양의 유효열전도를 측정은 지중조건 그대로의 상태에서 측정되는 현지측정이어야 하며 정확한 해를 알 수 없는 난해한 문제이기도 하다. 정확한 해를 알 수 없기에 여러 가지 방법을 사용하고 방법에 따라 결과가 다를 경우 평균값으로 해를 근사화하는 것이 일반적으로 가장 바람직한 방법으로 알려져 있다.⁽⁸⁾ 특히 두 가지 다른 방법에 의한 해가 합리적인 범위 내에서 상당한 접근도를 보인다면 해의 신뢰도는 더욱 높아진다.

Table 2에서는 borehole #1과 #2에 관한 현지 측정 해석결과를 총괄하였다. 여기서는 오차해석

을 통한 초기제외시간 IIT의 효과를 보기 위하여 IIT=0 hr인 경우와 2관식(borehole #1)의 IIT=4.25 hrs, 4관식(borehole #2)의 IIT=4.2 hrs인 경우의 해석결과를 수록하였고 이 결과들의 신뢰성 비교를 위하여 GPM 소프트웨어⁽²⁾와 선형열원 근사법의 해석결과를 함께 수록하였다. GPM에서는 본 연구와 같이 1차원 모델을 채택하고 있으나, 여기서는 유효튜브 주위로 가상적인 얇은 막 영역을 추가로 설정하여 보어홀 유체와 U관의 열용량을 모두 이 막 영역에서 처리하도록 하고 있다. 또한 이 모델은 2관식을 기준으로 하고 있어 4관식과 같은 다중관 보어홀의 열응답 시험에서는 그 적용성이 다소 제한될 것으로 예상된다. 선형열원 근사법은 사용이 간편하여 지열업계에서 일반적으로 많이 사용하고 있는 방법이나 해석결과가 사용자의 주관과 경험 등에 많이 좌우되는 등 객관성이 다소 결여된 방법이라고 할 수

Table 2 Estimated thermal conductivities and borehole resistances

Borehole No.		k_s (W/m·K)	R_b (K·m/W)
Borehole #1 (Single-U type)	IIT=0 hr	3.134	0.263
	IIT=4.25 hrs	2.847	0.256
	GPM	2.830	0.262
	Line source (IIT=12 hrs)	2.570	0.248
	Average	2.845	0.257
Borehole #2 (Double-U type)	IIT=0 hr	2.267	0.123
	IIT=4.2 hrs	2.363	0.127
	GPM	2.063	0.169
	Line source (IIT=10 hrs)	2.216	0.119
	Average (excluding GPM)	2.282	0.123

있다. 이 방법에서는 초기제외시간이 매우 중요하며 보통 5시간에서 12시간까지 다양한 초기제외시간을 적용하고 있는 실정이다. Table 2의 선형열원법에서는 borehole #1에서 12시간, borehole #2에서 10시간의 초기제외시간을 적용하였으며 선형열원법의 초기제외시간에 관한 설명은 관련 문헌으로 미룬다.⁽⁹⁾

Table 2의 borehole #1에서는 k_s 해석의 경우 초기제외시간 적용의 유효성을 확인할 수 있다. 표에서 보는 바와 같이 4가지 방법의 평균값이 $IIT=4.25$ hrs의 결과와 가장 잘 일치한다. 또한 $IIT=4.25$ hrs의 결과는 GPM의 결과와 k_s 해석에서 매우 근접하고 있어 해의 신뢰도를 더욱 높여 준다. 전열저항의 경우 방법에 따른 해석결과의 변화가 크질 않고 초기제외시간에 따른 민감도 역시 적은 것으로 나타나고 있어 어느 방법을 적용하여도 별 문제는 없는 것으로 보인다. 따라서 본 연구의 수치모델에 초기제외시간을 적용하는 것은 k_s 와 R_b 두 가지 해석에서 모두 적절한 방법으로 사료된다.

보어홀 단면에 유체영역이 많은 4관식은 2관식에 비하여 일반적으로 전열저항이 대폭 감소되는 것으로 알려져 있으며, Table 2를 보면 4관식의 전열저항은 2관식에 비하여 약 50% 수준임을 알 수 있다. 그러나 전열저항은 관의 형태뿐 아니라 그라우트 재료, 그라우트 주입 기술 등에도 상당한 영향을 받고 있어 보어홀 설치시마다 현지 열응답 시험을 통하여 측정하는 것이 가장 신뢰할 만한 저항산정방법이다. Table 2의 4관식의 경우는 4가지 방법 중 GPM의 결과가 다소 이탈되어 있으며, 그외에 3가지 방법의 결과는 매우 근접하고 있다. 이것은 위에서 지적한 대로 GPM은 2관식을 기준으로 구성한 모델이기 때문이며, 초기제외시간의 효과가 뚜렷이 나타나지 않는 것은 위에서 Fig.5(b)와 관련하여 지적한 바와 같이 borehole #2의 초기오차가 적은 것과 관계있는 것으로 보인다. 따라서 4관식의 경우에는 GPM 적용은 적절치 않은 것으로 보이며, 본 연구의 수치모델은 초기제외시간에 관계없이 적용될 수 있는 것으로 사료된다.

5. 결 론

지중열 기술이 국내에 보급된 지는 아직 수년

밖에 되지 않으며 따라서 신뢰성 있는 열응답 시험결과 또한 충분히 확보되지 못한 상태이다. 본 연구에서는 저자들이 개발한 1차원 수치모델과 초기제외시간을 적용한 계수추정법을 접목하여 2관식과 4관식 각각에 관한 열응답 시험결과를 해석하였다. 이 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

(1) 수직형 보어홀에 의한 지중토양의 유효열전도율 산정에 있어 1차원 모델과 오차해석에 의한 초기제외시간 적용의 유효성을 확인할 수 있었다(단, 이 초기제외시간의 유효성은 보어홀 전열저항이 높을 경우 더욱 유효하다).

(2) 초기제외시간의 산정은 경우별로 다소 다를 수 있으나 본 논문의 연구범위 내에서 보면 대략 4~4.5시간의 적용이 무난함을 알 수 있다.

(3) 본 연구에서 4관식 보어홀의 전열저항은 2관식에 비하여 약 50% 정도 감소하는 것으로 나타났다(일반적으로 4관식의 전열저항은 2관식의 약 60% 정도로 알려져 있으나,⁽⁷⁾ 본 연구의 4관식에서는 열전도율이 다소 높은 그라우트 재료를 사용하였고 그라우팅 작업 또한 매우 견실하게 수행되어 이와 같은 결과가 나타난 것으로 판단된다).

(4) 4관식 보어홀의 경우 본 연구에서 개발된 방법이 2관식을 기준으로 개발된 GPM 해석보다 다소 높은 신뢰성을 보여주는 것으로 추정된다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산하 에너지관리공단의 2006년도 대체에너지 연구사업에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Ingersoll, L. R. and Plass, H. J., 1948, Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, ASHVE Transactions, Vol. 47, pp. 119-121.
2. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1959, Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Clarendon Press, Oxford.
3. Shonder, J. A. and Beck, J. V., 1999, Determining effective soil formation thermal pro-

- properties from field data using a parameter estimation technique, ASHRAE Transactions, Vol. 105, Pt. 1, pp. 458-466.
4. Yavuzturk, C., 1999, Modeling of Vertical Ground Loop Heat Exchanger for Ground Source Heat Pump Systems, Ph.D. Thesis, Oklahoma State University, Stillwater, OK.
5. Lee, S. K., Kim, D. K., Woo, J. S. and Park, S. I., 2005, A study on the thermal behavior of vertical borehole heat exchanger with 1-dimensional model, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 25, No. 1, pp. 97-104.
6. Claesson, J. and Eskilson, P., 1988, Conductive heat extraction to a deep borehole: Thermal analyses and dimensioning rules, Energy, Vol. 13, No. 6, pp. 509-527.
7. Hellstrom, G. and Sanner, B., 2000, PC-programs for borehole heat exchanger design, Asterweg 2, D-35633, Lahnau, Germany.
8. Kavanaugh, S. P., 2000, Investigation of Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Short-Term Field Tests, ASHRAE 1118-TRP.
9. Woo, J. S. and Lee, S. K., 2005, A Study on the In-Situ Geothermal Conductivity Testing and Analysis, Final Report to Ministry of Commerce, Industry and Energy, Report No. 2002-N-GE08-P-01.