

지중유효열전도율 해석에 사용되는 선형열원 모델의 초기제외시간 결정에 관한 연구

이세균[†] · 우정선* · 김대기**

충북대학교 기계공학부, *한국에너지기술연구원 지열에너지연구센터, **H&T 에너지 기술연구소
(2008년 10월 8일 접수, 2008년 12월 1일 수정, 2008년 12월 1일 채택)

A Study of Determining Initial Ignoring Time of Line Source Model used in Estimating the Effective Soil Formation Thermal Conductivities

Se-Kyoun Lee[†], Jung-Son Woo* and Dae-Ki Kim**

Dept. of Mechanical Eng., Chungbuk National University

*Geothermal Energy Research Center, Korea Institute of Energy Research

**H&T Energy Institute of Technology Research

(Received 8 October 2008, Revised 1 December 2008, Accepted 1 December 2008)

요 약

지중유효열전도율 측정에서는 선형열원 모델이 열응답 시험의 자료 해석에 주로 이용되고 있는 실정이다. 이 선형열원 모델의 응용에서는 해의 신뢰도를 높이기 위하여 일정시간의 초기자료를 폐기하여야 하며 이 일정시간을 본 연구에서는 초기제외시간으로 명명한다. 그런데 이 초기제외시간의 산정에 관하여 뚜렷한 기준이 마련되어 있지 않아 선형열원 모델을 이용한 자료해석에서는 초기제외시간 선정이 다소 주관적이 되는 경향이 있으며 따라서 이 모델의 응용에는 충분한 경험이 필요하다. 무차원 시간 $\tau=5$ 가 초기제외시간 선정에 한 기준으로 제시되기도 하였으나 이 역시 완전한 선형열원 모델에서 도출되는 매우 이론적인 결과이며 실제 시스템은 이 이론적인 선형열원과 다른 점이 많다. 본 연구에서는 초기제외시간을 선정하는 새로운 방법을 제시한다. 이 방법에서는 먼저 오차해석을 수행하고 그 결과를 토대로 초기제외시간을 결정하게 된다. 본 연구에서는 이 방법을 2개의 현지 시험결과에 적용하여 보았으며 위에 언급한 $\tau=5$ 에 의한 방법보다 훨씬 더 신뢰성 높은 결과를 도출할 수 있었다(Table 2 참조).

주요어 : 선형열원모델, 지중유효열전도율, 보어홀, 열응답시험, 초기제외시간

Abstract—Line source model is commonly used in analyzing the data obtained from thermal response test to estimate the effective soil formation thermal conductivity. In the application of line source model some part of initial data must be ignored in order to achieve more accurate result. The period of time for this initial data is called initial ignoring time (*IIT*) in this paper. However there has been no definite rule in determining this initial ignoring time. Therefore line source model requires experienced analyzer to select the useful data, which is somewhat subjective. One method often suggested is the calculation of *IIT* with non dimensional time $\tau=5$. However, this is a very theoretical result derived from a system of perfect line source model, which is somewhat different from the real system. A new method to determine *IIT* is presented in this study. This method requires error estimation first and *IIT* can be decided from the results of error estimation. This method

[†]To whom correspondence should be addressed

Dept. of Mechanical Eng., Chungbuk National Univ.

Tel : 043-261-2446

E-mail : leesk@chungbuk.ac.kr

is applied in the analysis of field test data and shows better result than the one obtained from the method using non dimensional time mentioned above as shown in Table 2.

Key words : Line source model, Effective thermal conductivity of soil formation, Borehole, Thermal response test, Initial ignoring time

1. 서 론

수직밀폐형 지중열 교환기인 보어홀(borehole)을 통하여 지중토양을 열원으로 이용할 경우 지중토양이 갖는 열전도율을 알아야 효과적인 보어홀의 설계가 가능하며 따라서 지중토양의 열전도율 측정은 지중열 시스템 계획 및 설계시 가장 먼저 수행해야 할 과정이 된다. Fig. 1에서는 이러한 보어홀의 개략도를 보이고 있다. 보어홀은 토양과의 열교환 뿐 아니라 열응답시험을 통한 지중 열전도율 측정에도 이용된다. 열응답시험은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 일정 열전달율 Q 가 발생하는 전기히터를 연결하여 수행한다.

열응답 시험결과와의 해석방법에는 선형열원법⁽¹⁾, 실린더 열원법⁽²⁾, 수치모델^(3,4) 등이 있으나 보통 이해하기 쉽고 해석이 간단한 선형열원법이 많이 이용된다. 그런데 이 선형열원법의 사용에는 초기제외시간(initial ignoring time, ITT)이란 개념을 올바르게 적용하여야 신뢰성 있는 해를 얻을 수 있으나 아직 여기에 관하여서 합리적인 기준이 마련되어 있지 않다. 이 분야에 관하여 광범위한 조사연구를 수행한 바 있는 Kavanaugh의 연구결과⁽⁵⁾에서도 이 ITT 로 0.08시간, 1시간, 5시간 등을 적용하여 그 결과를 서로 비교하였으나 이에 관한 확실한 결론을 내리지는 않고 있다. 초기제외시간 적용기준이 확실하지 않다보니 선형열원법에 의한 해석결과는 해석자의 주관에 영향을 받는 경우가 많게 되고 따라서 숙련된 해석자가 필요하게 된다.

본 연구에서는 열응답시험 결과의 선형성 접근도를 수치적으로 나타낼 수 있는 오차해석이란 새로운 개념을 적용함으로써 보다 합리적인 결과를 도출하고자 하며 이러한 방법에 의하므로써 해석결과가 해석자의 주관에 영향을 받는 부분을 상당히 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

2. 선형열원법

보어홀은 Fig. 1에 보이는 바와 같이 수직길이 L , 반경 r_b 로 이루어지며 내부에는 폴리에틸렌 U-관을 매설하고 그라우팅 처리하여 일체의 지중오염 등 공해가 발생되지 않도록 한다. 매설된 U-관 내로 보어홀 유체를 순환시켜 지중토양과 열교환을 하게 된다.

지중에 매설된 파이프와 토양사이의 열전달에 관한 이론해는 Kelvin의 열이론으로부터 구할 수 있다⁽¹⁾. 즉, 무한히 길고 열유속이 일정한 선형열원(line source)이 초기온도 T_o 로 균일한 무한 매질(여기서는 지중 토양)속에 매설되어 있는 경우 토양온도에 관하여 다음의 해가 성립한다.

$$T(r, t) - T_o = \frac{Q/L}{4\pi k} \int_x^\infty \frac{e^{-u} du}{u} \tag{1}$$

여기서

$$x = \frac{r^2}{4\alpha t} \tag{2}$$

식 (1)에서 $T(r, t)$ 는 열원으로 부터의 거리 r , 시간 t 에서의 온도이며 k 는 토양의 열전도율, Q/L 은 보어홀 단위 길이 당 열전달율이 된다. 여기서 Q 는 흡열의 경우 양의 값, 방열의 경우 음의 값을 갖는다. 식 (2)의 α 는 $k/\rho c$ 로 정의되는 토양의 열확산율(ρ 는 토양의 밀도, c 는 토양의 비열이며 따라서 ρc 는 토양의 체적비열)이다. 열원은 무한히 긴 것으로 가정하였으므로 모든 열의 흐름

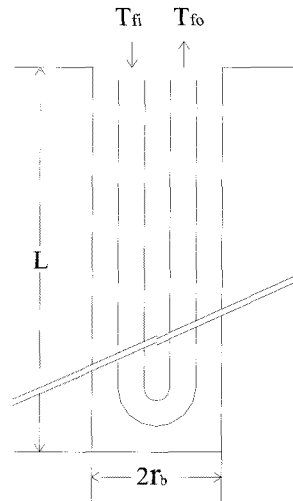


Fig. 1. Borehole system.

은 열원에 직각, 즉 반경방향으로 이루어진다. 식 (1)은 무한히 긴 선형열원에서 적용되는 완전해이지만 Fig. 1 과 같은 보어홀의 경우 $L=100m$, $r_b=0.075m$ 수준이므로 열원은 충분히 길고 열유속은 반경방향으로 이루어진다는 조건은 큰 오차 없이 적용될 수 있다.

Carslaw와 Jaeger⁽²⁾에 의하면 식 (1)은

$$\int_x^\infty \frac{e^{-u} du}{u} = \gamma - \ln x + \left(\frac{x}{1 \cdot 1!} - \frac{x^2}{2 \cdot 2!} + \frac{x^3}{3 \cdot 3!} \dots \right) \quad (3)$$

의 무한 급수가 되나 x 값이 작을 경우 처음 4항만으로 표현할 수 있으며 따라서 식 (1)은

$$T(r,t) - T_o = \frac{Q/L}{4\pi k} \left\{ \ln \frac{4\alpha t}{r^2} - \gamma + \frac{r^2}{4\alpha t} \left(1 - \frac{r^2}{16\alpha t} \right) \right\} \quad (4)$$

가 된다. 여기서 γ 는 Euler 상수로 0.5772의 값을 갖는다.

선형열원의 해를 보어홀에 적용할 때에는 $r \geq r_b$ 에서만 적용하고 보어홀 내부에서는 다음식과 같이 정의 되는 보어홀 전열저항 R_b 를 사용한다.

$$R_b = \frac{T_f - T_b}{Q/L} \quad (5)$$

식 (5)에서 T_f 는 보어홀 유체의 평균온도로 보어홀의 입, 출구 온도를 각각 T_{fi} , T_{fo} 라 하면 다음과 같이 표현된다.

$$T_f = \frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} \quad (6)$$

파이프내에서는 유동방향으로 온도구배가 존재하지만 상향류와 하향류 온도의 평균값은 깊이에 관계없이 대략 일정하며 이 값은 식(6)으로 표현되는 입, 출구 온도의 평균값과도 유사하다. 따라서 일정 열전달 Q라는 가정의 1차원 모델이 성립된다.

보어홀 벽면온도 T_b 는 식 (4)에 $r = r_b$ 를 대입하여 다음과 같이 표현된다.

$$T_b - T_o = \frac{Q/L}{4\pi k} \left\{ \ln \frac{4\alpha t}{r_b^2} - \gamma + \frac{r_b^2}{4\alpha t} \left(1 - \frac{r_b^2}{16\alpha t} \right) \right\} \quad (7)$$

식 (7)과 식 (5)를 결합한 후 T_f 에 관하여 풀면

$$T_f = \frac{Q/L}{4\pi k} \ln t + \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - \gamma \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o + \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\frac{r_b^2}{4\alpha t} \right) \left(1 - \frac{r_b^2}{16\alpha t} \right) \quad (8)$$

식 (8)에서 $r_b^2/\alpha t$ 이 매우 적으면(즉, $\alpha t/r_b^2$ 이 매우 크면) 우측 마지막 항이 무시될 수 있으며, 따라서

$$T_f = \frac{Q/L}{4\pi k} \ln t + \frac{Q/L}{4\pi k} \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - \gamma \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad (9)$$

식 (9)는 T_f 와 $\ln t$ 에 관하여 1차식이며 따라서 T_f 를 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$T_f = bx + c \quad (10)$$

여기서

$$b = \frac{Q/L}{4\pi k}, \quad x = \ln t, \quad \gamma = 0.5772 \text{ 이고}$$

$$c = b \left(\ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772 \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \text{ 이 된다.}$$

식 (10)에서 기울기(slope) b 를 알면 다음 식으로부터 열전도율 k 를 구할 수 있다.

$$k = \frac{Q/L}{4\pi b} \quad (11)$$

따라서 열응답시험을 통하여 시간에 따른 보어홀 유체온도를 측정하고 이 결과를 $T_f - \ln t$ 의 좌표위에 나타내어 직선식을 얻고 그 직선의 기울기 b 를 구한 후 식 (11)로부터 k 를 결정하게 된다. 이렇게 직선식의 기울기로부터 k 를 구하기 때문에 이 방법을 Slope법이라고도 한다.

3. 초기제외시간

선형열원 모델에서는 이와 같이 보어홀 유체의 온도 T_f 가 $\ln t$ 에 관하여 직선식이 되는 특성을 이용하여 k 를 구한다. 그런데 이와 같은 직선식은 근사화 과정을 통하여 이루어졌으며 근사화식인 식 (9)는 $r_b^2/\alpha t$ 이 매우 적다는 가정하에 이루어진 식이다. 그러면 시간이 얼마나 경

과하여야 r_b^2/ct 이 매우 작다는 가정이 가능한가? 이에 답하기 위하여 다음과 같이 무차원 시간 τ 를 정의한다.

$$\tau = \frac{ct}{r_b^2} \tag{12}$$

그러면 식 (7)은 이 무차원 시간과 식(10)의 계수 b 를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_b - T_o = b(\ln 4\tau - 0.5772) + \frac{b}{4\tau} \left(1 - \frac{1}{16\tau}\right) \tag{13}$$

식 (13)에서 우변 마지막 항 $\frac{b}{4\tau} \left(1 - \frac{1}{16\tau}\right)$ 이 소거되면 식 (9)의 직선식이 성립된다. 따라서 %error 를 다음과 같이 정의한다.

$$\%error = \frac{\frac{b}{4\tau} \left(1 - \frac{1}{16\tau}\right)}{b(\ln 4\tau - 0.5772) + \frac{b}{4\tau} \left(1 - \frac{1}{16\tau}\right)} \times 100 \tag{14}$$

이와 같이 정의 된 %error가 τ 에 따라 어떻게 변해나가는지를 Fig. 2에서 나타내었다. 이 그림에서 보면 τ 가 증가할 경우 초기에는 %error가 급격히 줄어드나 점차 그 감소세가 약화되며 $\tau=5$ 에서 약 2%의 오차를 보이고 여기서 부터는 %error의 감소가 급격히 적어짐을 알 수 있다. 즉, T_f 와 $\ln t$ 의 관계가 $\tau=5$ 또는 그 이상에서는 $bx+c$ 형태의 직선식으로 최대 2% 이하의 오차를 가지고 전환되어 나간다고 볼 수 있다. Gehlin⁽⁶⁾은 열응답 시험 결과의 해석시 $\tau=5$ 를 한 기준으로 제시하여 $\tau=5$ 까지의 data를 폐기하고 $\tau>5$ 에서의 data만으로 직선식을 구성할

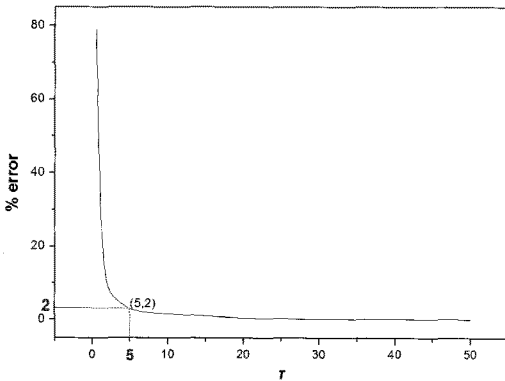


Fig. 2. %error vs. τ .

것을 제안하였다. 여기서 $\tau=5$ 에 해당하는 실제 시간은 어느 정도인가를 검토하여 보자. 국내에 흔한 화강암 지반의 경우 $k=3.37 W/m \cdot K$, $\rho c=2.4 MJ/m^3 \cdot K$ 가 평균값이므로 이 값과 더불어 $r_b=0.075m$ 를 적용한다면 식 (12)로부터 $t=5.6hrs$ 가 된다.

초기제외시간을 이렇게 정할 때 오차범위가 최대 2% 미만이라는 해석은 이와 같이 선형열원모델에서 도출되는 매우 이론적인 결과이며 실제 보어홀에서도 이러한 오차범위가 그대로 적용된다는 것은 아니다. 그러나 이와 같이 산출된 IIT 는 한 기준이 될 수 있으며 이 기준에서 변화시켜 봄으로써 보다 더 신뢰성 있는 결과도 기대해 볼 수 있다.

4. 오차해석을 통한 새로운 개념의 IIT 제안

U-관이 설치된 보어홀은 단지 근사적인 선형열원이므로 $\tau=5$ 를 기준으로 한 IIT 결정이 실제 보어홀의 열응답시험에서 그대로 적용된다고 보기는 어렵다. 실제 보어홀은 선형열원 모델과 다음과 같은 몇가지 차이점이 있다.

- U-관이 설치된 보어홀은 그 형태에 있어 선형열원과과는 다소 차이가 있으며 반경방향으로 완벽한 대칭도 이루어지지 않는다.
- 보어홀 내부의 U-관 주위로 지중토양과 열물성치가 매우 다른 그라우트 채움을 한다.
- 보어홀 상단부와 하단부의 주위토양에서는 무한히 긴 선형열원과과는 많이 다른 양단효과(ends effects)가 나타난다.

이러한 점들로 인하여 실제 보어홀 유체의 온도분포는 선형열원 모델과는 다소 다른 분포를 보이게 되며 이러한 차이는 특히 가동 초기에 심하게 나타난다.

본 연구에서는 T_f 와 $\ln t$ 의 관계식이 직선식으로부터 얼마나 이탈을 보이는가를 정량적으로 해석하고 그 해석 결과로부터 초기제외시간을 결정하는 방식을 통하여 선형열원해석의 신뢰성을 높이고자 한다. 이러한 해석방법을 본 연구에서는 오차해석이라고 명명하며 다음의 순으로 진행한다.

- (1) 열응답시험시간 $t_1 \sim t_2$ 사이에 Δt 간격으로 측정된 자료를 $T_f - \ln t$ 의 좌표상에 나타내고 선형최소자승법(linear least square method)을 이용하여 직선식을 구한다.
- (2) 측정된 온도와 동일한 시간에 직선식에서 계산된 온

도와의 차이를 자승한다.

- (3) 측정된 모든 점에서 위와 같이 온도차의 자승을 구하여 합한 후 이 총합을 총 측정개수로 나누어 이 값을 선형열원 방식의 평균자승오차 SE_{av} (average square error)로 정의한다.

총 측정개수가 n 개이고 각 점에서의 측정온도를 $T_{m,i}$ 동일 시간에 직선식에서의 온도를 $T_{l,i}$ 라고 하면 SE_{av} 는 다음과 같이 표현된다.

$$SE_{av} = \frac{\sum_{i=1}^n (T_{m,i} - T_{l,i})^2}{n} \quad (15)$$

이렇게 하여 구해진 SE_{av} 의 값은 t_2 를 고정시킨 상태에서 t_1 을 변화시키에 따라 그 값이 달라질 수 있다. 즉, SE_{av} 은 t_1 의 함수로 되며 따라서 원하는 초기제외시간을 t_1 으로 정하면 t_1 에 따라 SE_{av} 값의 변화 경향을 볼 수 있으며 이에 따라 초기제외시간 IIT 를 정할 수 있다.

본 연구에서는 두 개의 시험용 보어홀의 열응답 시험을 이용하여 식 (15)의 SE_{av} 개념을 적용하고 이로부터 IIT 가 도출되는 과정을 설명한다. 시험용 보어홀의 사양은 각각 다음과 같다.

보어홀 #1(단일 U-관식) :

$$L = 100m, r_b = 0.075m, Q = 4.43kW$$

그라우트 : 벤토나이트(체적열용량: $3900kJ/m^3 \cdot K$
열전도율: $0.7W/m \cdot K$)

주위토양 : 편마암(체적열용량: $2230kJ/m^3 \cdot K$
초기온도: $15.1^\circ C$)

보어홀 #2(단일 U-관식) :

$$L = 102m, r_b = 0.075m, Q = 6.736kW$$

그라우트 : 벤토나이트(체적열용량: $3900kJ/m^3 \cdot K$
열전도율: $0.7W/m \cdot K$),

주위토양 : 흑운모화강암+석영반암+흑운모편마암(체적열용량: $2130kJ/m^3 \cdot K$ 로 추정 초기온도: $15.66^\circ C$)

위와 같은 사양의 보어홀에서 식 (12)의 $\tau=5$ 를 기준으로 IIT 를 구하면 각각 다음과 같다.

$$IIT(\text{보어홀 \#1}) = 6.14\text{hrs} \approx 6\text{hrs} \quad (16)$$

$$IIT(\text{보어홀 \#2}) = 5.35\text{hrs} \approx 5\text{hrs} \quad (17)$$

4.1. 보어홀 #1의 시험결과 해석

Fig. 3은 보어홀 #1의 열응답시험 결과이며 Fig. 4는 이 결과를 $T_f - \ln t$ 좌표로 옮겨놓은 그림이다. Fig. 4에서 보면 $\ln t = 10$ 이후에 다소 선형성이 불안정하게 나타나 보이는데 이것은 열전달 Q 가 일정하게 유지되지 않고 다소 변화하고 있었다고 생각되는 현상이다. Fig. 5

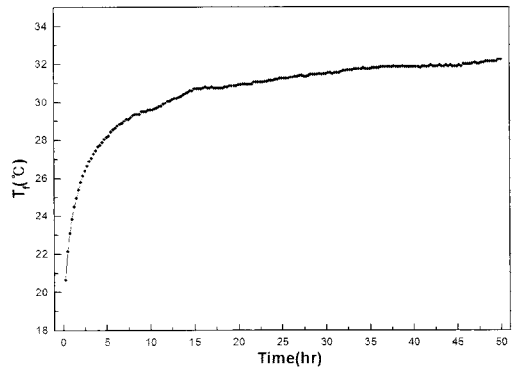


Fig. 3. T_f vs. Time(Borehole #1).

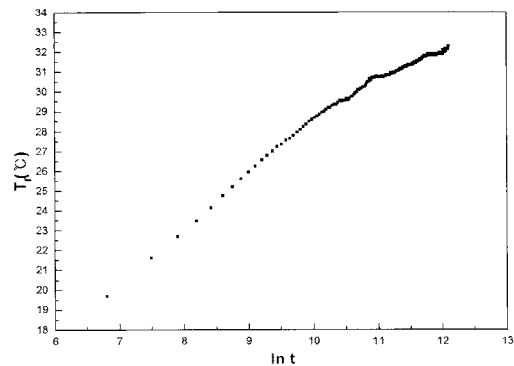


Fig. 4. T_f vs. $\ln t$ (Borehole #1).

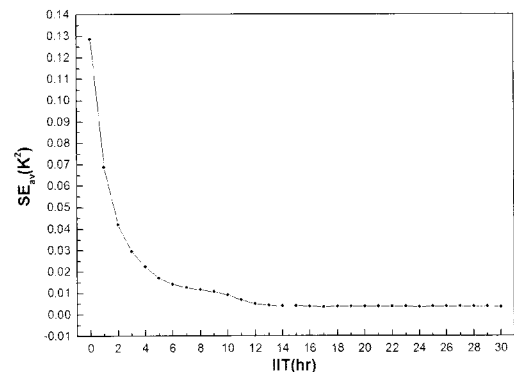


Fig. 5. SE_{av} vs. IIT (Borehole #1).

는 식 (15)에서 정의된 SE_{av} 값이 IIT에 따라 어떻게 변해 나가는지를 보여준다. 그림에서 보면 SE_{av} 값은 IIT를 증가시키기에 따라 급격히 감소해 나간다. 이것은 선형 최소자승법으로 형성된 직선식이 데이터 포인트에 어떻게 접근해 나가느냐를 정량적으로 보여주는 것으로 IIT=12hrs 이후부터는 $SE_{av} \approx 0.005K^2$ 이하로 비교적 안정된 모양을 보이고 있다.

따라서 이 경우 IIT=12hrs를 채택하는 것이 바람직하다고 볼 수 있다.

따라서 IIT=12hrs를 적용하여 Fig. 4의 12시간 이후의 데이터만으로 직선식을 형성한 후 그 기울기를 이용하여 식 (11)로 k 값을 구할 수 있으며 이 경우 $k = 2.57 W/m \cdot K$ 로 나타났다.

4.2. 보어홀 #2의 시험결과 해석

Fig. 6는 보어홀 #2의 열응답 시험결과이고 Fig. 7은 이 결과를 $T_f - \ln t$ 좌표에 옮겨놓은 그림이며 Fig. 8은 IIT에 따른 SE_{av} 의 변화를 보여준다. 여기서 SE_{av} 는 보어홀 #1의 경우(Fig. 5)와 유사한 변화형태를 보이고 있으나 단, 그 값이 보어홀 #1의 경우에 비하여 약 절반정도로 적으며 안정된 영역으로의 접근도 비교적 빨리 이루어지고 있다. 이것은 보어홀 #2가 보어홀 #1에 비하여 선형열원의 열거동에 빨리 접근되고 있음을 의미한다.

실제 보어홀은 U-관이 설치되고 그 주위로 그라우트 채움으로 이루어져 있어 이상적인 선형열원 개념과는 다소 차이가 있다. 특히 벤토나이트 그라우트는 지중토양과 열물성치가 매우 달라(일반적으로 지중 토양에 비하여 열전도율은 낮고 열용량은 높음. 위의 보어홀 사양 참조.) 이러한 요인들이 식 (5)로 정의되는 보어홀 전열저항 R_b 값에 영향을 줄 수 있다. 보어홀 전열저항은 그라우트 재료 뿐 아니라 그라우팅 작업의 숙련도와도 밀접한 관련이 있어 그라우트 재료의 혼합 및 그라우트를 주입하는 트레미 파이프의 인발속도 등을 규정대로 준수하여 보어홀 내부를 전실하게 충전할 때 R_b 값은 낮아지며 그렇지 못할 경우 R_b 값은 높아진다. 이와 같은 그라우트 영역의 영향 때문에 실제 보어홀의 열거동과 선형열원 모델의 경우는 차이가 생기게 된다. 아직 충분한 자료를 확보하지 못하여 결론을 짓기에는 다소 이른 감이 있으나 본 연구의 SE_{av} 의 값은 이러한 차이와도 관계되는 것으로 추정된다.

4.3. 수치해석 결과와의 비교

본 연구에서 제안한 초기제외시간의 타당성을 검증하기 위하여 수치해석 결과를 참고하기로 한다. 보어홀과 관련된 수치해석은 Shonder and Beck의 GPM (geothermal

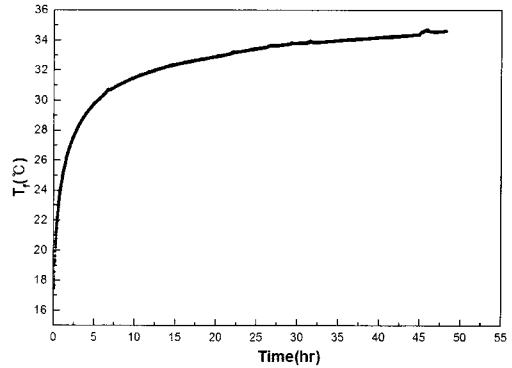


Fig. 6. T_f vs. Time (Borehole #2).

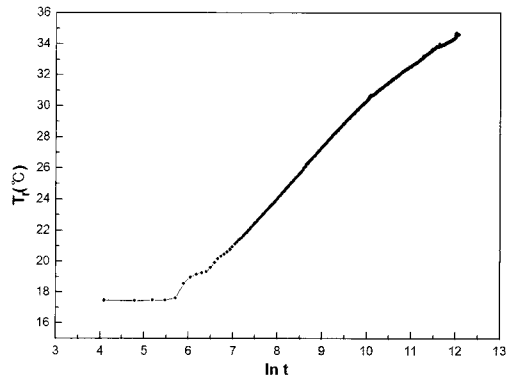


Fig. 7. T_f vs. $\ln t$ (Borehole #2).

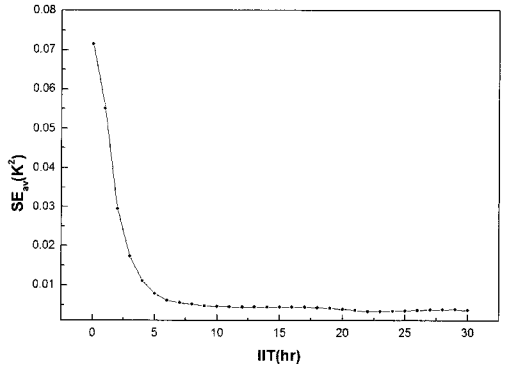


Fig. 8. SE_{av} vs. IIT (Borehole #2).

property measurements)⁽³⁾과 본 연구의 저자들이 발표한 SPAN (soil property analysis, numerical)⁽⁴⁾이 있으며 이 두 모델은 다 1차원 수치모델이다. 일반적으로 수치모델은 선형열원 모델에 비하여 그라우트의 열물성치를 별도로 고려할 수 있고 투입열량의 변화도 처리가 가능하여 선형열원 보다는 해의 신뢰가 높은 것으로 평가되고 있

다. 수치해석에서는 해의 도출과정에서 2계수 추정법(2-parameter estimation)을 사용하므로 k 값 뿐 아니라 R_b 값도 함께 추정된다.

약 50시간 정도의 규모를 갖는 열응답시험 해석에는 일반적으로 비교적 단순한 1차원 모델이 사용된다. Yavuzturk에 의하여 개발된 2차원 모델⁽⁷⁾이 있기는 하나 컴퓨터 해석 시간을 엄청나게 요구할 뿐 아니라 해석결과에서도 별다른 우월성이 보이지 않고 있다⁽⁵⁾. 보어홀 주위로 1차원적 열거동이 형성되기 위하여 열응답시험 시간은 약 48 ~ 50 시간을 일반적으로 추천한다.

Table 1에서는 보어홀 #1과 #2에 관한 GPM과 SPAN의 해석결과를 보여준다. Table 1에서 보면 2가지 수치 해석 결과가 약간 상이하여 평균값을 취하여 기준으로 삼고자 한다. 보어홀 전열저항은 위에서 추측한 바와 같이 보어홀 #1이 보어홀 #2보다 월등히 높았다.

Table 2는 $\tau=5$ 를 기준으로 식 (16)과 (17)에서 계산된 IIT를 적용한 k 값과 SE_{av} 개념을 통하여 구한 IIT를 적용한 k 값을 대비하고 있다. Table 1의 평균값을 기준으로 볼 때 $\tau=5$ 에 의한 IIT 적용의 경우보다 SE_{av} 에 의한 IIT 적용이 훨씬 더 Table 1의 평균값에 접근함을 알 수 있다. 즉, $\tau=5$ 기준에서는 k 값이 각각 Table 1의 평균값의 79% (보어홀 #1의 경우), 84% (보어홀 #2의 경우) 정도이나 SE_{av} 개념 적용의 경우 각각 91%(보어홀 #1의 경우), 87% (보어홀 #2의 경우)로 높은 접근성을 보였다.

선형열원 모델의 경우 SE_{av} 개념을 적용하여도 수치모델 결과의 87~91% 수준의 접근성 정도를 보이는 것은 지중토양과 비교하여 그라우트 재료인 벤토나이트가 갖는 낮은 열전도율과 높은 열용량 때문인 것으로 추측된다. 즉, 선형열원 모델은 동일한 무한매질내에서 성립되는 것으로 이 방법에는 그라우트 영역을 별도로 해석하는 장치가 없기 때문인 것이다. 벤토나이트를 쓰지 않고

굴착토양으로 되메움을 한다면 아마도 선형열원 해법은 수치해에 가까이 접근할 것이 예상된다. 단, 되메우기는 보어홀 심도가 20-30m 정도로 작을 경우이나 가능하며 국내에서와 같이 100-150m의 고심도 보어홀의 경우에는 효과적인 되메움이 불가능하다. 따라서 되메움 보어홀의 자료가 국내에서는 없으므로 단지 위와 같이 추정해볼 뿐이다.

5. 결 론

지중열전도도 해석에서는 일반적으로 선형열원 모델을 많이 사용하나 이 방법에서는 초기제외시간에 관한 확실한 기준이 없어 해석결과는 해석자의 경험과 주관에 많은 영향을 받는다. 무차원 시간인 $\tau=5$ 를 한 기준으로 채택하는 경우도 있으나 이 방법도 완벽한 선형열원에서나 유효한 것으로 실제 보어홀에서 그대로 적용하기에는 다소 무리가 따르는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 T_f 와 $\ln t$ 의 관계가 직선식으로부터 얼마나 이탈이 되는가를 정량적으로 해석하는 오차해석이라는 개념과 이에 따라 초기제외시간을 결정하는 새로운 방법을 제시하였다. 그리고 이 방법을 두 개의 시험용 보어홀에 적용하여 $\tau=5$ 를 기준한 결과보다 훨씬 더 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 이 방법도 선형열원 모델이 갖는 기본적인 한계(즉, 지중토양과 열물성치가 매우 다른 그라우트 영역을 별도로 고려하지 못하므로 발생하는 차이)를 극복하지 못하여 그 결과는 수치 해석 결과의 약 90% 수준에 머물고 있다(따라서 여기에 관해서는 계속적인 연구가 필요한 것으로 사료된다).

본 연구의 시험용 보어홀 해석에서 결정된 IIT는 각각 8시간, 12시간이었다. 이 방법의 결정과정을 보면 먼저 SE_{av} 를 구한 후 이에 따라 IIT를 결정하고 다시 k 값을 구하는 다소 번거로운 과정이었다. 그러나 IIT를 빨리 결정

Table 1. Results of numerical model.

Parameter	Borehole No.	Borehole #1			Borehole #2		
		GPM	SPAN	Average	GPM	SPAN	Average
k (W/m · K)		2.826	2.849	2.838	3.02	3.2	3.11
R_b (m · K/W)		0.261	0.256	0.259	0.203	0.169	0.186

Table 2. Thermal conductivity calculated from line source model.

Borehole No.	Method	Based on $\tau=5$	Based on $SE_{av} < 0.005K^2$
Borehole #1		k=2.244 W/m · K (IIT=6 hrs)	k=2.570 W/m · K (IIT=12 hrs)
borehole #2		k=2.627 W/m · K (IIT=5 hrs)	k=2.718 W/m · K (IIT=8 hrs)

하여야 할 경우 본 연구자들의 경험에 의하면 $IIT=12hrs$ 의 적용이 무난할 것으로 사료된다. 즉, 열응답시험시 주요 오차는 대략 초기 12시간내에 발생되며 또한 IIT 를 12시간 이상으로 한다면 전체 시험시간(약 50시간 정도) 중 유효자료가 부족하여 해가 불안정해 지고 그 신뢰도는 대폭 감소될 가능성이 있기 때문이다.

참고문헌

- Ingersoll, L.R.; Plass, H.J. "Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump", ASHVE Transactions, 1948, 47, 119.
- Carslaw, H.S.; Jaeger, J.C. Conduction of Heat in Solid, 2nd ed., Clarendon Press, Oxford, 1959.
- Shonder, J.A.; Beck, J.V. "Determining Effective Soil Formation Thermal Properties from Field Data using a Parameter Estimation Technique", ASHRAE Transactions, 1999, 105(1), 458.
- 이세균 외. "1차원 수치모델과 현지측정에 의한 지중열전도율 및 보어홀 전열저항 해석에 관한 연구", 설비공학 논문집, 2006, 18(10), 783.
- Kavanaugh, S.P., Investigation of Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Short-Term Fields Tests, ASHRAE 1118-TRP, 2000.
- Gehlin, S., Thermal Response Test (Method Development and Evaluation), Doctoral Thesis, Lulea Univ. of Tech., 2002.
- Yavuzturk, C., Modeling of Vertical Ground Loop Heat Exchangers for Ground Source Heat Pump System, Ph.D. Thesis, Oklahoma State University, Stillwater, OK, 1999.