

## 그라우팅 영역이 선형열원 해석에 미치는 영향에 관한 연구

이세균<sup>†</sup> · 우정선<sup>††</sup> · 노정근<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>충북대학교 기계공학부, <sup>††</sup>한국에너지기술연구원, <sup>†††</sup>충북대학교 기계공학부  
(2010년 8월 11일 접수, 2010년 8월 30일 수정, 2010년 9월 3일 채택)

## A Study of the Effect of Grouting Region on the Solution of Line Source Analysis

Se-Kyoun Lee<sup>†</sup>, Jung-Son Woo<sup>††</sup> and Jeong-Geun Ro<sup>†††</sup>

<sup>†</sup>*School of Mechanical Eng., Chungbuk National University*

<sup>††</sup>*Korea Institute of Energy Research*

<sup>†††</sup>*School of Mechanical Eng., Chungbuk National University*

(Received 11 August 2010, Revised 30 August 2010, Accepted 3 September 2010)

### 요 약

선형열원 해석은 열원 주위가 완전히 균일한 매질로 이루어져 있다는 가정 하에 성립되는 해석이나 실제 보어홀 시스템의 경우 그라우팅 영역은 주위토양과 매우 다른 열물성치를 가진 물질로 이루어져 있다. 본 연구에서는 이러한 그라우팅 영역이 선형열원 해석에 어떠한 영향을 미치는가를 연구하였다. 연구방법으로는 먼저 수치모델을 개발하고 이 수치모델에 의하여 시간에 따른 보어홀 유체온도를 생성한 후 이 유체온도를 선형열원법에 이용하여 지중열전도도와 보어홀 전열저항을 구하며 이렇게 구한 해를 수치모델의 입력조건과 비교함으로써 그 차이점을 규명한다. 이러한 해석결과 선형열원법의 해인 지중열전도도와 보어홀 전열저항은 수치모델 입력조건에 비해 대략, 86%와 91%의 수준으로 나타났다. 선형열원 해로부터 수치모델의 입력조건을 역산해 나가는 Chart법이 본 연구에서 개발되었으며 시험용 보어홀의 열응답시험 결과와 비교해 본 결과 이 Chart법은 신뢰성이 있는 것으로 나타났다. 그라우트 영역의 열물성치를 변화시켜가며 선형열원 해의 특성이 어떻게 변하는지도 검토하였다.

**주요어** : 선형열원법, 보어홀, 지중유효열전도도, 보어홀전열저항

**Abstract**—Line source method of borehole system assumes the entire surrounding medium is uniform. However, thermal properties of grouting region are considerably different from those of surrounding soil. In this study we investigate the effect of grouting materials on the solution of line source method with the aid of numerical analysis. This numerical model generates the temperature of borehole fluid with which line source solution can be obtained. Then this solution can be compared with input condition of numerical model. The results of this comparison show that thermal conductivity and borehole thermal resistance of line source solution are approximately 86% and 91% of the input condition of numerical model. Chart method is developed in this study to find the numerical input conditions (thermal conductivity and borehole thermal resistance) from the line source solution. Thermal response test of test borehole is conducted, the results of which are approximately consistent with the Chart method. Thermal property changes of grouting materials on the line source solution are also examined.

**Key words** : Line source method, Borehole, Effective soil thermal conductivity, Borehole thermal resistance

<sup>†</sup>To whom corresponding should be addressed.  
410 Sungbong-ro Heungduk-gu, Cheongju Chungbuk 361-763  
School of Mechanical Engineering, Chungbuk National Univ.  
E-mail : leesk@chungbuk.ac.kr

## 1. 서 론

지열원 열펌프 시스템은 비교적 얇은 지층 토양의 열에너지를 이용하는 시스템으로 지중열교환기를 통하여 열에너지를 취득하게 되며 따라서 지중열교환기의 적정설계는 이 시스템의 성능을 좌우하는 주요 요인이 된다. 지중열교환기에는 수평형과 수직형이 있으며 땅이 좁고 밀집지역이 많은 국내에서는 수직형이 주로 이용되고 점차 고심도화하여 현재 약 150m 깊이의 수직밀폐형 지중열교환기(borehole)가 일반적으로 사용된다.

지중열교환기 설계단계에서 가장 먼저 조사해야할 사항은 지중토양의 유효열전도도이다. 현재 국내에서는 에너지관리공단 신재생에너지센터 지침서에 열응답시험은 선형열원법(line source method)을 사용하여 지중 유효열전도도( $k$ )를 산출하도록 규정하고 있다. 선형열원법은 수직밀폐형 지중열교환기를 하나의 선형열원으로 근사화하여 해석하는 방법으로 이 해석법은 그 근원이 Kelvin의 열이론으로부터 시작된다. 그 후 Ingersoll과 Plass [1]가 이 모델을 지중에 매설된 열교환기에 적용하였고, Mogensen [2]은 이 방법을 더욱 발전시켜 지중토양의 열전도도 측정에 적용하기에 이르렀다. 이후 보어홀 전열저항 [3], 열응답시험결과의 초기제외시간의 개념 [4] 등이 제시되면서 선형열원법은 지중물성치 해석의 주요 방법으로 위치를 굳히게 되었다.

선형열원법은 열응답시험 해석 중 가장 단순한 방법으로 해석결과는 근사해로 이해하여야 할 것이다. 또한 이 방법은 보어홀 주위를 단일매질로 가정하는 해석방법이므로 지중토양과는 열물성치가 매우 다른 그라우팅 영역의 영향을 어느 정도 받을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 지중토양의 열물성치 해석을 위하여 본 연구의 저자들에 의하여 개발된 1차원 수치모델 [5,6]을 선형열원법과 접목하여 해석결과를 비교하므로써 선형열원법의 해가 갖는 근사도를 수치적으로 규명하고자 한다.

## 2. 선형열원법

수직밀폐형 지중열교환기(또는 보어홀)는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 반경  $r_b$ , 수직길이  $L$ , 그리고 U-관의 투입과 투입 된 관 내부를 흐르는 보어홀유체로 구성되어 있으며 여기에 일정열량  $Q$ 가 발생하는 전기히터를 연결하여 지중으로 열전달이 일어나게 하고 보어홀

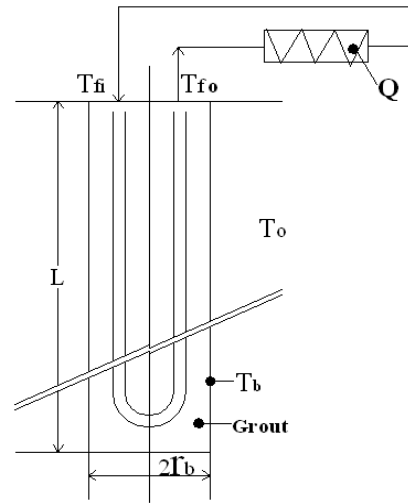


Fig. 1. Borehole with thermal response tester.

유체온도인  $T_f$ (Fig. 1의  $T_{fi}$ 와  $T_{fo}$ 의 평균온도)의 시간  $t$ 에 따른 변화를 측정하는 것이 열응답시험으로 시험시간은 48시간으로 규정되어 있다. 열응답시험의 결과는 선형열원법, 또는 수치해석으로 해석할 수 있다.

보어홀은 완벽한 1차원 형상은 아니지만 주위로 상당한 열전달이 이루어지고 나면 보어홀 주위는 점차 반경방향으로 대칭인 1차원적 열거동에 접근하므로 보어홀의 열거동해석에는 1차원해석이 많이 사용된다. 선형열원법에서는 열응답시험결과 나타나는  $T_f$ 를 다음과 같이 표현할 수 있다 [7].

$$T_f = \frac{Q/L}{4\pi k} \ln t + \frac{Q/L}{4\pi k} \left( \ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772 \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad (1)$$

식 (1)에서  $T_o$ 는 지중토양의 초기온도,  $\alpha$ 는  $k/\rho c$  ( $\rho c$ 는 지중토양의 체적비열)로 표현되는 지중토양의 열확산율이며  $R_b$ 는 보어홀의 전열저항으로 다음과 같이 정의되는 변수이다 [3].

$$R_b = \frac{T_f - T_b}{Q/L} \quad (2)$$

식 (2)에서  $T_b$ 는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 보어홀의 벽면온도이다.

$$\text{식 (1)은} \\ T_f = bx + c \quad (3)$$

의 1차원 식 형태이며 여기서

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

$$x = \ln t \quad (5)$$

$$c = b \left( \ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772 \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad (6)$$

가 된다. 따라서 열응답시험결과를  $T_f - \ln t$  좌표위에 나타내고 12시간의 초기제외시간의 적용과 선형최소자승법에 의하여 직선식을 얻은 후 이 직선식의 기울기  $b$ 를 구하면 식 (4)로부터 지중토양의 열전도도  $k$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k = \frac{Q/L}{4\pi b} \quad (7)$$

또한 이 직선식의 절편  $c$ 를 구한다면 식 (6)을 이용하여  $R_b$ 는 다음과 같이 구한다.

$$R_b = \frac{L}{Q} \left[ c - b \left( \ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772 \right) - T_o \right] \quad (8)$$

### 3. 1차원 수치모델

본 논문의 저자들이 제시한 1차원 수치모델 [5,6]은 Fig. 2와 더불어 다음에 제시된다. Fig. 2에서 보면 U-관을 유효반경  $r_{fe}$ 인 하나의 유효튜브로 근사화하고 이 유효튜브 내에서 열유속  $Q$ 가 균일하게 발생되며 주위는 그라우트 채움을 한 것으로 되어있다. 유

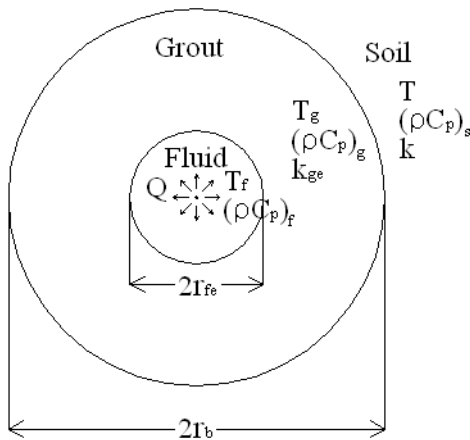


Fig. 2. One-dimensionally simplified cross section of borehole.

효튜브내의 유체의 양이 실제와 같도록 반경  $r_{fe}$ 를 정하고 유효튜브내의 유체는 열전도도가 무한히 커서 균일온도를 유지하는 것으로 가정한다.

그라우트 영역의 열전달은 실제로 그라우팅 물질의 열전도도 뿐 아니라 튜브의 위치, 이격거리, 접촉 저항 등 다양한 요인에 의하여 영향을 받으나 이 모델에서는 유효열전도도  $k_{ge}$ 에 의하여 처리되도록 하며 이  $k_{ge}$ 는 보어홀 전열저항  $R_b$ 와는 다음의 관계를 갖는다.

$$R_b = \frac{1}{2\pi k_{ge}} \ln \frac{r_b}{r_{fe}} \quad (9)$$

이 외에 Fig. 2의  $(\rho c_p)_f$ ,  $(\rho c_p)_g$  및  $(\rho c_p)_s$ 는 각각 보어홀 유체, 그라우트 및 주위토양의 체적비열이며  $k$ 는 주위토양의 열전도도,  $r_b$ 는 보어홀 반경이고  $T_f$ ,  $T_g$ ,  $T$ 는 각각 보어홀 유체온도, 그라우트 영역의 온도 및 주위 토양의 온도이다. 이 모델에 관한 열전도방정식은 다음과 같다.

그라우트에 관하여서는

$$\frac{k_{ge}}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T_g}{\partial r} \right) = (\rho c_p)_g \frac{\partial T_g}{\partial t} \quad r_{fe} < r < r_b \quad (10)$$

주위 토양에 관하여서는

$$\frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = (\rho c_p)_s \frac{\partial T}{\partial t} \quad r_b < r < \infty \quad (11)$$

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

$$\begin{aligned} & (\rho c_p)_f (\pi r_{fe}^2) \frac{dT_f(t)}{dt} \\ &= \frac{Q}{L} + k_{ge} (2\pi r_{fe}) \frac{\partial T_g(r_{fe}, t)}{\partial r} \end{aligned} \quad (12)$$

$$T_f(t) = T_g(r_{fe}, t) \quad (13)$$

그라우트와 토양사이의 접촉경계조건은

$$k_g \frac{\partial T_g(r_b, t)}{\partial r} = k \frac{\partial T(r_b, t)}{\partial r} \quad (14)$$

$$T_g(r_b, t) = T(r_b, t) \quad (15)$$

토양에서  $r = \infty$  의 경계조건은

$$T(\infty, t) = T_o \quad (16)$$

여기서  $T_o$  는 초기온도로 전체 시스템에 걸쳐 균일하다. 따라서

$$T_f(0) = T_g(r, 0) = T(r, 0) = T_o \quad (17)$$

식 (10) ~ (17)을 양적 유한차분법(explicit finite difference method)에 의하여 수치해석을 하였다. 토양 내에서의 차분식을 예로 들면 다음과 같다.

$$(\rho c_p)_s \pi (r_{n+1}^2 - r_n^2) \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{T_{n-1} - T_n}{Res_n} - \frac{T_n - T_{n+1}}{Res_{n+1}} \quad (18)$$

여기서

$$Res_n = \frac{1}{2\pi r_n} \left( \frac{r_{n+1} - r_{n-1}}{2k} \right) \quad (19)$$

그라우트에서의 식은 식 (18), (19)에  $T$ ,  $k$  대신  $T_g$ ,  $k_{ge}$  를 각각 대입하면 된다.

#### 4. 수치해를 이용한 선형열원 해석

주어진 지중조건과 보어홀 조건하에서 식 (10)~(17)을 통하여 시간  $t$ 에 따른 보어홀 유체온도  $T_f$ 를 생성할 수 있으며 이렇게 얻어진  $T_f$ 에 다시 선형열원 해석을 가하여 지중열전도도와 보어홀전열저항을 구할 수 있다. 그리고 이 값들을 수치모델에서 주어진  $k$ ,  $R_b$ 와 비교해 볼 수 있다. 본 연구에서는 이와 같이 선형열원법으로 구한 지중열전도도와 보어홀 전열저항을 각각  $k_\ell$ ,  $R_{b\ell}$ 로 표기하여 수치모델에서 주어진  $k$  및  $R_b$ 와 구별한다.

열응답시험은 48시간 지속되며 초기제외시간 12시간이 적용되므로  $t = 48hr$ 와  $t = 12hr$ 에서의  $T_f$ 를 각

각  $T_{f,48}$ ,  $T_{f,12}$  라 하면  $T_f - \ln t$  좌표상에서 직선식의 기울기  $b$ 는 다음과 같다.

$$b = \frac{T_{f,48} - T_{f,12}}{\ln(48/12)} \quad (20)$$

따라서  $k_\ell$ 은 다음식으로 구할 수 있다.

$$k_\ell = \frac{Q/L}{4\pi b} \quad (21)$$

직선식의 절편  $c$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$c = T_{f,48} - b[\ln(48 \times 3600)] \quad (22)$$

식 (22)에서 시간에 3600을 곱한 것은 시간을 초단위로 바꾼 것으로  $k$ 에 초단위를 사용하는 것과 단위가 통일되어야 하기 때문이다. 식 (21)에서 구한  $k_\ell$ 로부터 열확산율  $\alpha_\ell$ 은

$$\alpha_\ell = \frac{4k_\ell}{(\rho c)_s} \quad (23)$$

따라서 식 (8)에 의하여  $R_{b\ell}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$R_{b\ell} = \frac{L}{Q} [c - b(\ln \frac{4\alpha_\ell}{r_b^2} - 0.5772) - T_o] \quad (24)$$

본 연구에서는 식 (10)~(17)을 기반으로 작성한 수치해석 및 컴퓨터 프로그램을 통하여 Table 1의 조건하에  $k$ 와  $R_b$ 를 변화시켜가며  $T_f$ 를 생성하였으며 이 생성된  $T_f$ 와 식 (20)~(24)를 이용하여  $k_\ell$  및  $R_{b\ell}$ 을 계산하였다. Table 1의 값들은 일반적으로 많이 쓰이는 전형적인 값들이다. 여기서  $(\rho c)_g$ 의 값은 벤토나이트: 물=1:5 비율의 혼합물의 물성치이며  $(\rho c)_s$ 의 값 역시 지중토양의 평균 물성치로 볼 수 있다.

Table 1에 나타나지 않은 2개의 주요 변수는  $k$ 와  $R_b$ 이며 이 값들을 입력조건으로 하여  $k_\ell$ 과  $R_{b\ell}$ 을 계산한다. 여기서  $k$ 와  $k_\ell$ ,  $R_b$ 와  $R_{b\ell}$ 이 비슷한 값을 보인다면 별 문제가 없으나 상당히 다를 경우 이것은 그라

**Table 1.** Values of parameters used in the numerical model.

$T_o$ (°C)	$(\rho c_p)_g$ (MJ/m <sup>3</sup> · K)	$(\rho c_p)_s$ (MJ/m <sup>3</sup> · K)	$Q$ (kW)	$L$ (m)	$r_b$ (m)	$r_{fe}$ (m)
15	3.9	2.0	6.5	100	0.075	0.019

우팅 영역을 별도로 해석하지 못하는 선형열원법의 한계를 보이는 것으로 이해할 수 있다. 실제로 계산결과  $k=3\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,  $R_b=0.15\text{ m}\cdot\text{K/W}$ 로 주어졌을 경우  $k_\ell=2.59\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,  $R_{b\ell}=0.136\text{ m}\cdot\text{K/W}$ 로 계산되었다. 즉,  $k_\ell$ 은  $k$ 의 86%,  $R_{b\ell}$ 은  $R_b$ 의 91% 수준으로 나타난 것이다. 벤토나이트 그라우트가 갖는 낮은 열전도도 ( $\approx 0.7\text{ W/m}\cdot\text{K}$ )와 높은 체적비열 ( $\approx 3.9\text{ MJ/m}^3\cdot\text{K}$ )이 선형열원 해석에 영향을 미쳐 위와 같은 결과가 나왔다고 볼 수 있다. 여기서  $k\%$ 와  $R_b\%$ 를 각각 다음과 같이 정의하여 보자.

$$k\% = \frac{k_\ell}{k} \times 100 \tag{25}$$

$$R_b\% = \frac{R_{b\ell}}{R_b} \times 100 \tag{26}$$

그러면 위의 경우는  $k\% = 86\%$ ,  $R_b\% = 91\%$ 로 각각 표현할 수 있다.

선형열원법에서는 열전도도가 낮게 나타나므로 열전달이 약화되는 것 같이 보이거나 보어홀 전열저항 역시 낮게 나타나는데 이것은 열전달을 강화시키는 작용으로 이러한 보상작용으로 인하여 선형열원법의 신뢰도가 합리적 수준으로 향상되는 것이다.

### 5. Chart 법

Figs. 3, 4에서는  $R_b$ 와  $k$ 에 따라 계산된  $R_{b\ell}$ 과  $k_\ell$ 을 Chart로 나타내었다. Fig. 3에서는  $R_b$ 와  $k$ 에 따른  $R_{b\ell}$ 의 변화를, Fig. 4에서는  $R_b$ 와  $k$ 에 따른  $k_\ell$ 의 변화를 나타내고 있다.

열응답시험 결과를 수치해석에 의존하지 않고 선형열원법으로 해석했을 경우 Figs. 3, 4를 이용하면 수치해의 결과를 얻을 수 있다. 즉, 선형열원 해석에 의하여  $k_\ell$ 과  $R_{b\ell}$ 을 구했다고 하자. 이 경우 먼저  $k=3\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 가정한 후 Fig. 3을 이용하여  $R_b$ 를 구한다. 다시 Fig. 4로 이동하여  $R_b$ 와  $k_\ell$ 로부터 다시  $k$ 를 구할 수 있다. 이 때 새로 구한  $k$ 값이 위에서 가정한  $3\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 와 상당히 차이가 나면 다시 Fig. 3으로 이동하여 새로운  $k$ 값으로 위의 과정을 반복한다. Fig. 3에서 보면  $k$ 값에 따른 변화는  $k=3\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 를 중심으로 매우 적다. 따라서 차이가 적다고 판단되면 그대로 계산을

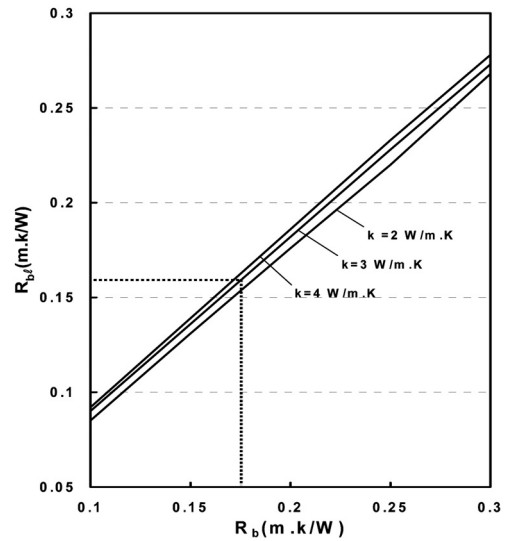


Fig. 3.  $R_{b\ell}$  as a function of  $R_b$  for a given value of  $k$ .

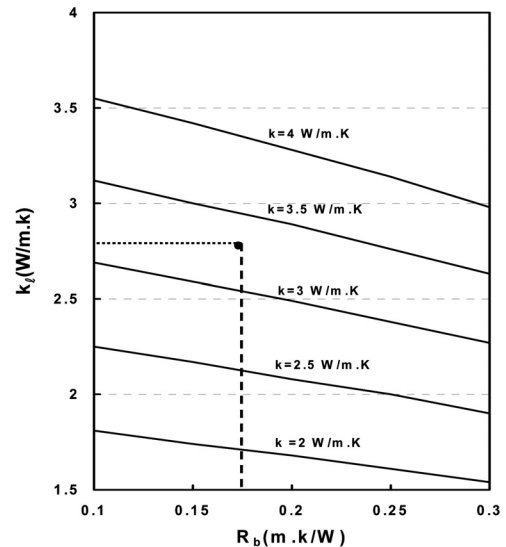


Fig. 4.  $k_\ell$  as a function of  $R_b$  for a given value of  $k$ .

종료하는 것이 바람직하다. 이 과정은 다음의 시험용 보어홀 열응답시험 결과를 통하여 다시 설명할 것이다.

### 6. 시험용 보어홀의 시험결과 해석

본 연구에서 사용한 시험용 보어홀은 비교적 열전도도가 높은 곳에 설치되어 있다. 시추과정에서 채취된 시료는 3종류(흑운모 화강암, 석영반암, 흑운모 편마암)로 실험실 측정결과 이들의 평균 열전도도 및 체적비열은 각각  $3.63\text{ W/m}\cdot\text{K}$ 와  $2.13\text{ MJ/m}^3\cdot\text{K}$ 로 측정되었다. 이 값들은 두께 등이 고려되지 않은 단순

한 건조시료의 평균값이며 실제 해석에 쓰이는 유효 평균값은 아니나 우선 참고용으로 사용할 수 있다. 그라우팅에는 벤토나이트(벤토나이트:물=1:5)를 사용하였으며 이 재료의 체적비열 및 열전도도는 각각  $3.9MJ/m^3 \cdot K$ ,  $0.7W/m \cdot K$ 이다. Pipe는 내경  $0.027m$ 의 PE pipe를 사용하였으며 이 외에 시험용 보어홀의 사양은 Table 2와 같다. 열응답시험은 48시간 수행하였으며 시험결과의 선형열원해석에 의하면  $k_p=2.8W/m \cdot K$ ,  $R_b=0.158m \cdot K/W$ 로 나타났다. 이 값들과 Figs. 3, 4를 이용하여 수치모델의 물성치인  $k$ 와  $R_b$ 를 얻기로 한다.

먼저  $k=3W/m \cdot K$ 로 가정하고 Fig. 3에서  $R_b=0.158m \cdot K/W$ 를 이용하여 점선과 같이 따라가면  $R_b=0.174m \cdot K/W$ 로 나타난다. 다음에 Fig. 4에서 점선과 같이  $R_b$ 와  $k_p$ 값을 만족하는 교점에서  $k$ 값을 추산해 보면  $k=3.3W/m \cdot K$ 로 구해진다. 이 값은 처음 가정한  $k=3W/m \cdot K$ 와 차이가 적으므로 반복계산을 하지 않고 그대로 최종값으로 확정한다. 즉, 위의 시험용 보어홀의  $R_b=0.174m \cdot K/W$ , 주위 토양의  $k=3.3W/m \cdot K$ 로 추정할 수 있다.

## 7. 계수추정법(parameter estimation)

식 (10)~(17)의 수치해석 결과 얻어진  $T_f$ 는 열응답 시험 결과와 함께 계수추정법에 의하여 해석되어질 수 있고 그 결과로  $k$ 와  $R_b$ 가 산출될 수 있다. 이 방법은 현지시험결과 얻어진 보어홀 유체온도(여기서는  $T_{fm}$ 으로 명명)와 수치해석 결과 얻어진  $T_f$ 와의 비교를 통하여 이루어지며 비교방법은 최소자승 오차의 개념을

**Table 2.** Specifications of test borehole.

$T_o$ (°C)	$r_b$ (m)	$L$ (m)	$Q$ (kW)	Pipe type
15.66	0.075	102	6.736	single-U

**Table 3.** Factors affecting the results of line source solution.

Case	$(\rho C_p)_g$ (MJ/m <sup>3</sup> .K)	$(\rho C_p)_s$ (MJ/m <sup>3</sup> .K)	$R_b$ (m.K/W)	$k_{ge}$ (W/m.K)	$k$ (W/m.K)	$k\%$ (%)	$R_b\%$ (%)
1	3.9	2.0	0.15	1.45	3	86	91
2	3.9	2.0	0.07	3	3	91	87
3	2.0	2.0	0.15	1.45	3	95	99
4	2.0	2.0	0.07	3	3	98	99

도입하여 다음과 같이 한다.

$$SSE = \sum_{i=1}^n (T_{fm,i} - T_{f,i})^2 \quad (27)$$

여기서  $i$ 는 시간에 따른 측정순번이며  $SSE$ 는 자승 오차의 합(sum of square error)이 된다. 수치모델에 주어진 조건인  $k$ 와  $R_b$ 에 따라서  $T_f$ 가 결정되므로  $SSE$  역시  $k$ 와  $R_b$ 의 함수가 되며  $SSE$ 가 최소가 되는 최적점에서의  $k$ 와  $R_b$ 값이 해가 된다. 최적점을 찾는 가장 쉬운 방법은 격자탐색으로  $k$ 와  $R_b$ 를 각각 최소값에서 최대값까지 변화시켜가며 각각의 점에서  $SSE$ 를 비교하므로써 최적점을 찾게 된다. 이 방법은 단순하기는 하나 많은 시간이 소요되는 단점이 있다. 최적점을 빨리 찾기 위하여 simplex algorithm [8]을 사용하기도 하나 이 역시 적지 않은 시간이 소용된다.

여기서 최종적으로 확인된  $k=3.2W/m \cdot K$ ,  $R_b=0.169m \cdot K/W$ 이다. 이 값들과 위의 Chart법으로 구한 값들과는 다소 차이를 보인다. 이 차이는 Table 1과 Table 2에서 보는 바와 같은 약간의 사양의 차이와 더불어 Chart법 해석에서 오는 다소의 오차에 기인되는 것으로 보인다. 그러나 계수추정법과 Chart법의 결과 차이는 크지 않으므로 Chart법은 신뢰성이 있다고 볼 수 있다.

## 8. 선형열원 해석에 영향을 주는 인자들

이와 같이 선형열원 해석의 결과가 수치해석 결과와 차이가 나는 것은 위에서 지적한 바와 같이 주로 그라우팅 영역과 관계되는 것으로 보인다. 여기서는 Table 1을 기준으로 하되 그라우팅 영역의 체적비열, 보어홀 전열저항(이에 따른  $k_{ge}$ ) 등을 변화시켜가며 선형열원해석결과의 변화를 검토하여 보았고 이에 따른  $k\%$ ,  $R_b\%$ 를 계산하여 Table 3에 정리하였다. Table 3의  $R_b$ 와  $k_{ge}$  사이에는 식 (9)의 관계가 있어 서로 독립

적으로는 변하지 않는다.

Table 3의 Case 1은 일반적으로 사용되는 벤토나이트 그라우트의 경우로  $k\% = 86\%$ ,  $R_b\% = 91\%$ 이다. 즉, 선형열원 해석에서는  $k$ 값은 약 14% 낮게,  $R_b$ 값은 약 9% 낮게 나타났다. Case 2는 그라우팅 영역의  $k_{ge}$ 를 주위 토양의  $k$ 값과 같게 조절하고 체적비열은 그대로 둔 경우로  $k\% = 91\%$ ,  $R_b\% = 87\%$ 로 나타났다. Case 3에서는 그라우팅 체적비열을 주위토양과 같게 조정하고  $k_{ge}$ 는 그대로 둔 경우로서  $k\% = 95\%$ ,  $R_b\% = 99\%$ 로 나타났다. 여기서 보면 그라우팅 영역의 체적비열이 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다. Case 4는 그라우팅영역과 주위토양의 열전도도 및 체적비열을 같게 한 경우로서  $k\% = 98\%$ ,  $R_b\% = 99\%$ 를 보이고 있다. 즉, 이 경우는 선형열원 해석결과가 수치모델 조건과 거의 유사하게 나타난 경우이다. 이 결과로부터 그라우팅 영역의 물성치가 선형열원 해석에 어떻게 영향을 주는 지를 추정해 볼 수 있으며 특히 Case 4의  $k\% = 98\%$ 로 2%의 오차는 완벽한 선형열원의 경우 직선식이 최대 2%의 오차를 갖는다는 연구결과 [9]와도 일치하여 관심을 갖게 된다.

### 9. 결 론

지중열 문제에 있어서는 지중토양이 갖는 유효물성치에 관하여 일반적으로 완전한 정답을 알고 있지 않으므로 현지시험에 의한 선형열원법의 결과가 어느 정도 오차를 갖는지는 추정이 쉽지 않다. 따라서 차선의 방법은 수치모델을 통하여 보어홀 유체온도를 생성하고 이 생성된 유체온도를 선형열원법과 접목하여 유효물성치를 구한 후 이 값과 수치모델의 입력조건을 비교하는 방법이다. 본 연구에서는 이와 같은 방법으로 선형열원법의 타당성을 검토하였으며, 일반적으로 사용되는 전형적인 보어홀의 경우 선형열원법의 결과가  $k$ 에 있어서는 약 14% 낮게,  $R_b$ 에 있어서는 약 9% 낮게 나타났다. 이렇게 되는 주 원인은 지중토양에 비하여 그라우팅 물질이 갖는 낮은 열전도도와 높은 체적비열 때문이며 특히 체적비열의 영향이 매우 큼을 알 수 있다.

수치해석과 계수추정법을 결합시키므로써  $k$  및  $R_b$ 를 산출할 수 있으나 계산에 많은 시간을 요하게 된다. 본 연구에서는 간단하게 이용할 수 있는 Chart법을 개발하여 선형열원 결과를 수치해의 결과로 전환시킬 수

있는 방법을 제시하였다. 또한 본 연구에서는 시험용 보어홀의 현지시험결과를 이용하여 본 연구의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

### 후 기

이 논문은 2010년도 충북대학교 학술연구 지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

### 기호설명

- $b$  기울기[ $^{\circ}C$ ]
- $c$  절편[ $^{\circ}C$ ]
- $c_p$  정압비열[J/kgK]
- $k$  토양의 열전도도[W/mK]
- $k_{ge}$  그라우팅영역의 유효열전도도[W/mK]
- $k_{\ell}$  선형열원법으로 구한 열전도도[W/mK]
- $k\%$   $k_{\ell}$ 의  $k$ 에 관한 백분율[%]
- $L$  보어홀 길이[m]
- $r$  반경방향 길이[m]
- $r_b$  보어홀 반경[m]
- $r_{fe}$  유체영역의 유효반경[m]
- $R_b$  보어홀 전열저항[mK/W]
- $R_{b\ell}$  선형열원법으로 구한 전열저항[mK/W]
- $R_b\%$   $R_{b\ell}$ 의  $R_b$ 에 관한 백분율[%]
- $t$  시간[s]
- $T$  토양온도[ $^{\circ}C$ ]
- $T_b$  보어홀 벽면온도[ $^{\circ}C$ ]
- $T_f$  보어홀 유체온도[ $^{\circ}C$ ]
- $T_{fi}$  보어홀 유체의 유입온도[ $^{\circ}C$ ]
- $T_{fm}$  보어홀 유체의 측정온도[ $^{\circ}C$ ]
- $T_{fo}$  보어홀 유체의 유출온도[ $^{\circ}C$ ]
- $T_g$  그라우팅 온도[ $^{\circ}C$ ]
- $x$  시간에 관한 대수함수
- $\alpha$  토양의 열확산율[m<sup>2</sup>/s]
- $\alpha_{\ell}$   $k_{\ell}$ 을 적용한 열확산율[m<sup>2</sup>/s]
- $\rho$  토양의 밀도[kg/m<sup>3</sup>]

### 참고문헌

1. Ingersoll, L. R. and Plass, H. J., "Theory of the Ground Pipe Heat Source for the Heat Pump", ASHVE Transactions,

- Vol. 47, pp. 119~122, (1948).
2. Mogensen, P. Fluid to Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storage, Proceedings of International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice, Swedish Council for Building Research, June 6-8, (1983).
  3. Eskilson, P., Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes, Dept. of Math. Physics, University of Lund, Sweden, (1987).
  4. Smith, Marvin, "Comments on in-situ borehole thermal conductivity testing", The Source 1-2/99, Stillwater, OK, (1999).
  5. 이세균, 김대기, 우정선, 박상일, "1차원 모델에 의한 지중열교환기의 열거동 해석", 한국태양에너지학회논문집, Vol. 25, No. 1, pp. 97~104, (2005).
  6. 이세균, 우정선, 노정근, 김대기, "1차원 수치모델과 현지 측정에 의한 지중열전도율 및 보어홀 전열저항 해석에 관한 연구", 설비공학 논문집, Vol. 18, No. 10, pp. 783~790, (2006).
  7. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Clarendon Press, Oxford, (1959).
  8. Nelder, J. A. and Mead, R., "A Simplex Method for Function Minimization", Computer Journal Vol. 7, Pt. 1, pp. 308~313, (1965).
  9. 이세균, 우정선, 김대기, "지중유효열전도율 해석에 사용되는 선형열원모델의 초기제외시간 결정에 관한 연구", 에너지공학, 제17권, 제3호, pp. 167~174, (2008).