

# 선형열원법에 의한 지중유효열전도도와 보어홀 전열저항 해석

이세균\*, 우정선\*\*, 노정근\*\*\*

\*충북대학교 기계공학부(leesk@chungbuk.ac.kr), \*\*한국에너지기술연구원(jswoo@kier.re.kr)  
\*\*\*충북대학교 기계공학부(jeonguen@chungbuk.ac.kr)

## Analysis of Effective Soil Thermal Conductivities and Borehole Thermal Resistances with a Line Source Method

Lee, Se-Kyoun\* Woo, Jung-Son\*\* Ro, Jeong-Geun\*\*\*

\*School of Mechanical Eng., Chungbuk National University(leesk@chungbuk.ac.kr)

\*\* Korea Institute of Energy Research(jswoo@kier.re.kr),

\*\*\*School of Mechanical Eng., Chungbuk National University(Jeonguen@chungbuk.ac.kr)

### Abstract

Investigation of the effective soil thermal conductivity( $k$ ) is the first step in designing the ground loop heat exchanger(borehole) of a geothermal heat pump system. The line source method is required by New and Renewable Energy Center of Korea Energy Management Corporation in analyzing data obtained from thermal response tests. Another important factor in designing the ground loop heat exchanger is the borehole thermal resistance( $R_b$ ). There are two methods to evaluate  $R_b$ : one is to use a line source method, and the other is to use a shape factor of the borehole. In this study, we demonstrated that the line source method produces better results than the shape factor method in evaluating  $R_b$ . This is because the borehole thermal resistance evaluated with the line source method characteristically reduces the temperature differences between an actual and a theoretical thermal behaviors of the borehole. Evaluation of  $R_b$  requires soil volumetric heat capacity. However, the effect of the soil volumetric heat capacity on the borehole thermal resistance is very small. Therefore, it is possible to use a generally accepted average value of soil volumetric heat capacity(= $2MJ/m^3 \cdot K$ ) in the analysis. In this work, it is also shown that an acceptable range of the initial ignoring time should be in the range of 8~16 hrs. Thus, a mean value of 12 hrs is recommended.

Keywords : 지열원 열펌프 시스템(Geothermal Heat Pump System), 선형열원법(Line Source Method), 수직밀폐형 지중열교환기(Borehole), 지중유효열전도도(Effective Soil Thermal Conductivity), 보어홀 전열저항(Borehole Thermal Resistance), 초기제외시간(Initial Ignoring Time)

투고일자 : 2010년 7월 5일, 심사일자 : 2010년 7월 15일, 게재확정일자 : 2010년 8월 12일  
교신저자 : 이세균(leesk@chungbuk.ac.kr)

## 1. 서 론

수직밀폐형 지중열 교환기(보어홀) 설치시 가장 먼저 조사해야할 사항은 지중유효열전도도( $k$ )이다. 현재 국내에서는 에너지관리공단 신재생에너지센터 지침서에 지중유효열전도도 측정에 관한 사항을 규정하고 있다. 이 지침서에 의하면 지중유효열전도도의 해석은 선형열원법으로 하도록 규정되어 있고 특히 2010년 부터는 보어홀 전열저항( $R_b$ ) 계산까지 추가하도록 규정하고 있다.

선형열원법은 수직밀폐형 지중열교환기를 하나의 선형열원으로 근사화하여 해석하는 방법으로 이 해석법은 그 근원이 Kelvin의 열이론으로부터 시작된다. 그 후 Ingersoll과 Plass<sup>1)</sup>가 이 모델을 지중에 매설된 열교환기에 적용하였고, Mogensen<sup>2)</sup>은 이 방법을 더욱 발전시켜 지중토양의 열전도도 측정에 적용하기에 이르렀다. 이후 보어홀 전열저항<sup>3)</sup>, 열응답시험결과의 초기제외시간의 개념<sup>4)</sup> 등이 제시되면서 선형열원법은 지중물성치 해석의 주요 방법으로 위치를 굳히게 되었다. 보어홀에 의한 지중열 이용 시스템이 국내에 도입되면서 가용면적이 좁은 우리의 현실상 이 시스템은 점차 고심도화 하여 현재 약 150m 수준의 심도가 일반화 되었으며 이에 따라 지중오염의 방지를 위하여 철저한 그라우팅이 요구 되었다. 이러한 국내 보어홀의 특성 등이 감안되어 이세균 등<sup>5)</sup>은 선형열원 해석결과의 정밀도를 높이기 위한 새로운 개념의 초기제외시간을 제시한 바 있고 우 등은 보고서<sup>6)</sup>에서 그라우트 영역의 물성치가 선형열원 해석 결과에 상당한 영향을 미친다는 연구결과도 제시한 바 있다.

선형열원법은 수직밀폐형 지중열 교환기의 열해석 중 가장 단순한 방법으로 실제 지중열 시스템에 이 방법을 적용하려면 몇가지 근사화 과정이 추가되어야 하므로 지중열 시스템 설계자는 이 방법에 의한 해의 특성을 이해할 필요가 있다. 또한 선형열원법에 의한 보어홀 전열저항  $R_b$ 는 어떻게 구해지며

이렇게 계산된  $R_b$ 값이 지중열전도율  $k$ 와 어떤 관계에 있는지도 규명할 필요가 있다.

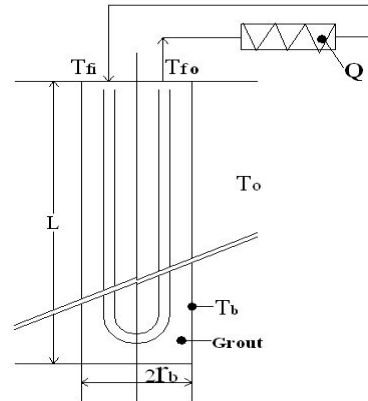


그림 1. 열응답 시험중인 보어홀

본 연구에서는 시험용 보어홀의 열응답 시험 결과로부터 선형열원법에 의한  $k$  및  $R_b$ 의 해석과정에서  $k$  및  $R_b$ 가 갖는 상호 보완성의 관계, 초기제외시간(initial ignoring time,  $IIT$ )의 역할, 지중토양의 체적용열량( $\rho c$ )의 영향 등을 전반적으로 검토하여 선형열원법에 의하여 도출된 해의 특성을 규명하고자 한다.

## 2. 선형열원법

보어홀은 그림 1에서 보이는 바와 같이 반경  $r_b$ 와 수직길이  $L$ , 그리고 보어홀 내부에 투입된 U-관으로 이루어지며 보어홀 내부 공간은 그라우팅 처리된다. 그림 1에서 보던 U-관 내부를 흐르는 보어홀 유체의 입, 출구 온도는 각각  $T_{fi}$ ,  $T_{fo}$ 로 표기하고 있으나 그 차이가 크질 않아 다음과 같이 평균온도  $T_f$ 를 정의하여 사용하며 이  $T_f$ 를 보어홀 유체온도라고 한다.

$$T_f = \frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} \quad (1)$$

지중열전도도 측정은 열응답시험을 통하여 수행되며 열응답시험은 그림 1에서 보이는 바와 같이 일정열량  $Q$ 가 발생되는 전기히터를 보어홀 유체에 연결하여 지중토양으로 열전달이 일어나게 하고 시간에 따른  $T_f$ 의 변화를 구하는 것으로 이루어지며 시험시간은 48시간으로 규정되어 있다.

선형열원 모델이란 무한히 길고 열유속이 일정한 선형열원(line source)이 초기온도  $T_o$ 로 균일한 무한매질 속에 매설되어 있는 경우 토양온도에 관하여 성립되는 모델로서 Carslaw와 Jaeger<sup>(7)</sup>에 의하여 다음과 같은 근사식으로 표현될 수 있다.

$$T_o - T(r,t) = \frac{Q/L}{4\pi k} \left( \ln \frac{4\alpha t}{r^2} - 0.5772 \right) \quad (2)$$

여기서  $T(r,t)$ 는 시간  $t$ 에서 열원으로부터 거리  $r$ 에 있는 매질의 온도이며  $\alpha (= k/\rho c)$ 는 매질의 열확산율이고  $\rho$ 와  $c$ 는 각각 매질의 밀도와 비열을 나타낸다. 식 (2)로부터  $r = r_b$ 인 보어홀 벽면온도  $T_b$ 를 구하면

$$T_b = T_o - \frac{Q/L}{4\pi k} \left( \ln \frac{4\alpha t}{r_b^2} - 0.5772 \right) \quad (3)$$

식 (3)의 벽면온도  $T_b$ 와 식 (1)에서 정의한 보어홀 유체온도  $T_f$ 사이에 다음과 같이 보어홀 전열저항  $R_b$ 를 정의한다.

$$R_b = \frac{T_f - T_b}{Q/L} \quad (4)$$

식 (3)과 식 (4)를 결합하면  $T_f$ 에 관하여 다음과 같은 식이 성립된다.

$$T_f = \frac{Q/L}{4\pi k} \ln t + \frac{Q/L}{4\pi k} \left( \ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772 \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad (5)$$

식 (5)는  $T_f$ 와  $\ln t$ 에 관한 1차식이므로

다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T_f = bx + c \quad (6)$$

식 (6)에서

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

$$x = \ln t \quad (8)$$

$$c = b \left( \ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772 \right) + \frac{Q}{L} R_b + T_o \quad (9)$$

식 (6)으로부터 기울기(slope)  $b$ 를 알면 지중열전도도  $k$ 는 식 (7)로부터 다음과 같이 구하게 된다.

$$k = \frac{Q/L}{4\pi b} \quad (10)$$

따라서 열응답시험을 통하여 시간에 따른  $T_f$ 를 측정하고 이 결과를  $T_f - \ln t$  좌표위에 나타내어 직선식을 얻으면 이 직선식에서 기울기  $b$ 를 구한후 식 (7)로부터  $k$ 를 결정할 수 있다. 따라서 이 방법을 일명 slope법이라고도 한다.

보어홀 전열저항  $R_b$ 의 산정에는 선형열원법에 의한 해석과 보어홀 형상에 따른 해석이 있다. 선형열원법에 의한 해석은 식 (9)를 이용하는 방법으로 식 (9)로부터 다음과 같은 표현이 가능하다.

$$R_b = \frac{L}{Q} \left[ c - b \left( \ln \frac{4\alpha}{r_b^2} - 0.5772 \right) - T_o \right] \quad (11)$$

식 (11)에서  $b$ 는  $T_f - \ln t$  좌표상에 나타낸 직선식의 기울기이며  $c$ 는 이 직선식의 절편이다. 식 (10)과 식(11)을 비교해 보면  $k$ 는 단순히 기울기만으로 구할 수 있으나  $R_b$ 는 기울기( $b$ )와 절편( $c$ )을 알아야 하며 동시에 초기온도( $T_o$ )와 지중토양의 열확산율( $\alpha = k/\rho c$ )을 알아야 구할 수 있다. 여기서  $b$ 와  $c$ ,  $T_o$ 의 값은 열응답시험 결과로부터 알 수 있으

나  $\alpha$ 의 값은 체적열용량  $\rho c$ 를 알아야 구할 수 있다. 실제로 보어홀 주위의 토양이 갖는 유효체적열용량을 구하기란 쉬운 일이 아니나 식 (11)에서 보듯이  $\alpha$ 의 값은 자연대수내에 포함되어 있어 체적열용량에 따른  $R_b$ 의 변화는 크지 않을것으로 사료된다. 지중토양의  $\rho c$  값은 일반적으로  $1.34 \sim 2.68 MJ/m^3 \cdot K$ 의 범위내에 있으며<sup>(8)</sup> 따라서 이 범위내의 평균값인  $2 MJ/m^3 \cdot K$ 를 식 (11)에 적용하여  $R_b$ 를 구할 수 있다. 실제  $\rho c$ 의 변화에 따른  $R_b$ 의 민감도는 다음 절에서 논한다.

보어홀 형상에 따른  $R_b$  산정은 보통 지중 열교환기의 상용 설계프로그램에서 많이 사용하는 방법으로 다음과 같이  $R_b$ 를 계산한다.

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

식 (12)에서  $R_f$ 는 관내 유체저항,  $R_p$ 는 관 두께에 따른 진도저항,  $R_g$ 는 그라우트 영역의 저항이며  $R_c$ 는 관과 그라우트 및 그라우트와 보어홀 벽면간의 접촉저항으로(이 접촉 저항의 산정에는 다소 주관적인 면이 있으며 그라우팅을 견실하게 하였다고 보면 영으로 간주할 수도 있다.) 각 저항요소에 관한 구체적인 설명은 관련 문헌으로 대신한다.<sup>(9)</sup>

선형열원법 해석인 식 (11)과 보어홀 형상에 의한 해석인 식 (12)를 비교해 보면 식 (11)은 slope법으로 구한  $k$ 와 관계성을 가지고 있으며 이에 반하여 보어홀 형상에 의한 해석에서는  $k$ 값과는 관계없이 보어홀 형상 및 유동조건으로만 결정됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 이상의 방법들을 서로 비교하여 타당한 방법을 규명하고자 한다.

### 3. 열응답 시험 및 해석

표 1은 본 연구에 사용된 시험용 보어홀의 사양이다. 이 표에서 보면 주위토양으로 3가

지 형태가 나타났으나 각각의 형태가 어떤 비율로 구성되어 있는지를 조사해 보지는 못하였다. 따라서 여기서 평균 열전도도, 평균 체적열용량이라고 한 것은 이 세가지 토양의 건조시료에 관한 물성치를 단순히 평균한 것으로 보어홀 설계에 필요한 유효물성치가 아님을 밝혀둔다. 그림 2에서는 이 시험용 보어홀에서 48시간동안 수행한 열응답시험 결과를 나타내었다.

표 1. 시험용 보어홀 사양

형식	단일 U-관식 U관: PE pipe (내경: 0.027 m, 외경 : 0.034 m)
보어홀 직경	0.15 m
보어홀 길이	102 m
그라우트	Bentonite : Water = 1: 5 체적 열용량 : $3.9 MJ/m^3 \cdot K$ 열전도도 : $0.7 W/m \cdot K$
주위 토양	흑운모 화강암, 석영반암, 흑운모 편마암 평균 체적 열용량 : $2.13 MJ/m^3 \cdot K$ 평균 열전도도 : $3.631 W/m \cdot K$
초기온도	15.66 °C
열방출율	6.736 kW
총 시험시간	48 hrs

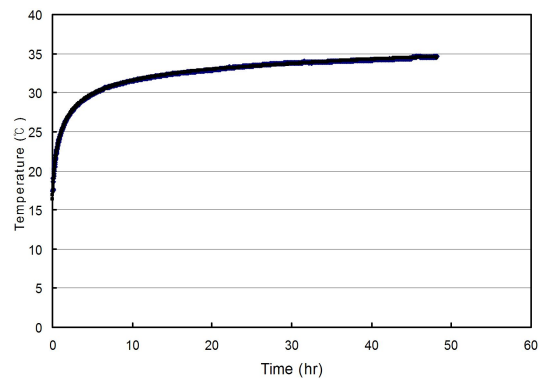


그림 2. 열응답시험 결과

선형열원 해석에서 초기제외시간(IIT)를 적용하여야 함은 잘 알려져 있는 사실이나 이 초기제외시간의 변화에 따른 해석결과에 관하

여서는 잘 알려져 있지 않다. 따라서 그림3에서는 그림 2의 시험결과에  $IIT = 0 \sim 30 \text{ hrs}$ 를 적용하여 각각의  $IIT$ 에 관한  $k$ 값을 계산하여 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 해석결과는  $IIT$ 에 따라 상당한 변화를 가져오며  $IIT$ 를 증가시키면  $k$ 값 또한 증가해 나감을 알 수 있다. 이와 같은  $k$ 값의 변화는 표 1에서 보는 바와 같이 주위토양과는 그 물성치가 매우 다른 그라우트 영역의 영향 때문이다.

즉, 선형열원 해석에서는 그라우트 영역을 별도로 해석할 수 있는 기능이 없으며 보어홀 주위 전체를 단일 매질로 보게 되므로 그라우트 영역이 갖는 낮은  $k$ 값과 높은  $\rho c$ 값의 영향이 해석결과에 영향을 미치게 되고 특히 이 영향은 가동 초기 시간에 매우 크므로 이 초기시간을 해석에서 제외하자는 것이  $IIT$ 의 기본개념이다. 선형열원 모델이 갖는 본질적 오차는  $IIT = 5\text{hrs}$ 에서 약 2%이다.<sup>(5)</sup> 그러나 실제 보어홀이 선형열원 모델과 다름으로 인하여(U-관 형상이 갖는 반경방향 비대칭성과 위에서 언급한 그라우트 영역 등) $IIT$ 는 더 증가시켜야 한다.

그림 3은  $IIT$ 에 따라 세 구간으로 나누어져 있다.(그래프의 모양으로 보아 구간의 경계를 정함에 다소의 임의적인 면이 있음.) 구간 A는  $IIT = 0 \sim 8\text{hrs}$  구간으로  $IIT$ 와 함께  $k$ 값은 급히 증가한다. 즉, 이 구간에서는 그라우트 영역의 물성치의 영향이 매우 큼을 알 수 있다. 구간 B( $IIT = 8 \sim 16\text{hrs}$ )에서도  $k$ 값은 다소 증가해 나가고 있으나 비교적 안정화 되어가는 모습이다. 구간 C( $IIT = 16\text{hrs}$  이상)로 가면  $k$ 값은 상당히 불안정한 변화를 보인다. 이것은  $IIT$ 가 지나치게 증가함에 따라 실제 해석에 필요한 자료가 적어 해의 불안정화 요인이 되기 때문이다.

이상의 결과로 볼 때 선형열원 해석에서는 구간 B에서 해를 구하는 것이 타당하며 구간 B에서도 중간값인  $IIT = 12\text{hrs}$ 의 경우(이 때  $k = 2.8 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ 로 나타남.)가 무난한 것으로 사료된다.

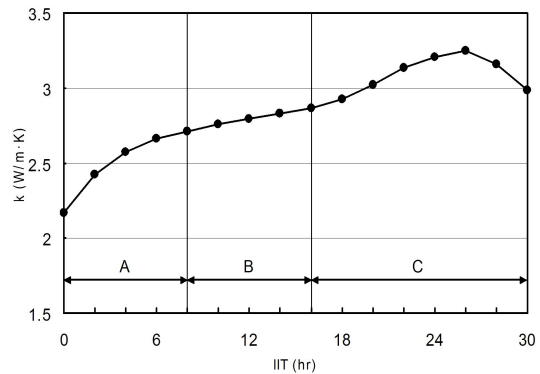


그림 3.  $IIT$ 에 따른  $k$  값의 변화

#### 4. 지중토양의 체적열용량과 보어홀 전열저항

식 (11)에는 지중토양의 열확산율  $\alpha (= \rho c / k)$ 가 포함되어 있으며 이  $\alpha$ 에서  $k$ 값은 식 (10)에서와 같이 slope법으로 구할 수 있으나  $\rho c$ 값은 별도로 산출 하여야 한다. 여기서  $\rho c$ 값도  $k$ 값과 같은 유효평균의 개념이므로 실제로 구하기가 쉽지 않으나 식 (11)에 의하면 이  $\rho c$ 값은 자연대수내에 포함되어 있어 실제로 그 영향은 적을 것으로 사료된다.

표 1에서 보면 시험용 보어홀 주위토양의 평균  $\rho c = 2.13 \text{ MJ/m}^3 \cdot \text{K}$ 로 나타나며(이 값도 단순히 채취된 건조시료의 평균값임.) 이 값을 식 (11)에 적용하면  $R_b = 0.158 \text{ m} \cdot \text{K/W}$ 로 계산된다. 그림 4에서는 식 (11)에 적용되는  $\rho c$ 값을 변화시켰을 때 나타나는  $R_b$ 값의 변화를 보여주며 위에서 예측한 바와 같이  $\rho c$ 에 따른  $R_b$ 의 변화는 매우 적은 것으로 나타나고 있다. 일반적으로 지중토양의  $\rho c$ 범위는  $1.34 \sim 2.68 \text{ MJ/m}^3 \cdot \text{K}$ 이며 그 평균값은  $2 \text{ MJ/m}^3 \cdot \text{K}$ 이다. 그림 4에서 보면  $\rho c$ 가  $1.34 \text{ MJ/m}^3 \cdot \text{K}$ 에서  $2.68 \text{ MJ/m}^3 \cdot \text{K}$ 로 100% 증가할 때  $R_b$ 의 증가는 약 13% 정도이다. 이러한 변화 범위는 정밀한 엄밀해를 요구하지 않을 경우 평균값 사용이 허용될 수 있는 수준이다. 더욱이 국내 지중열 시스템은 주로 암반지역에 설치

되며 암반의  $\rho c$  값은 대략  $2 \sim 2.5 \text{ MJ/m}^3 \cdot \text{K}$  정도이고 여기에 지표면 가까운 곳의 표면토, 자갈 등을 고려한다면  $\rho c$ 의 평균값으로  $2 \text{ MJ/m}^3 \cdot \text{K}$  를 적용함은 합리적으로 사료된다.

이 평균값 적용시  $R_b = 0.157 \text{ m} \cdot \text{K/W}$  값이 산출된다.

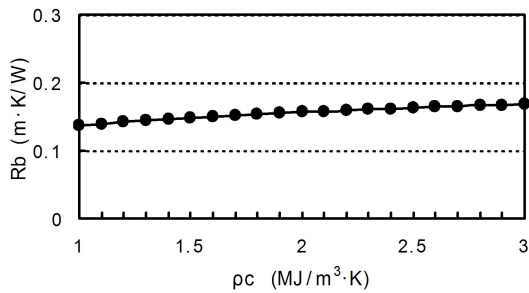


그림 4.  $\rho c$ 의 변화에 따라 계산된  $R_b$  값

### 5. 선형열원법에 의한 $k$ 및 $R_b$ 해석

선형열원법인 식 (10)에 의하여  $k$  값을 산출한 후에는 식 (11) 또는 식 (12)에 의하여  $R_b$ 를 산출할 수 있으나 여기서는 식 (10)과 그 근원이 같은 식 (11)이 바람직하다. 실제로 식 (10)은 식 (2), (3)으로부터 도출되었으며 식 (2), (3)은 완벽한 선형열원 모델에서 성립되는 식으로 그림 1과 같은 실제 보어홀에서는 단지 근사적으로 적용될 뿐이며 초기제외 시간도 이 근사도를 크게 줄여주지는 못하는 것으로 보인다. 그러나 보어홀 내의 실제 열거동과 선형열원법에 의한 차이는 식 (11)로 산출되는  $R_b$ 에 의하여 상당히 줄일 수 있다. 식 (11)을 주의 깊게 살펴보면  $R_b$ 와  $k$ 는 상호 보완의 관계에 있음을 알 수 있다. 즉,  $k$  값이 낮게 도출되면  $R_b$ 도 낮게,  $k$  값이 높게 도출되면  $R_b$  값도 높게 평가됨으로써 식 (5)로 표현되는  $T_f$ 는 시간경과에 따라 대략 유사해지는 특성을 보이게 된다. 이에 반하여 식(12)는 단지 보어홀의 형상에 의한 전열저항 해석으로  $k$ 값과는 관련이 없으며 따라서

$k$  값에 대한 보완성도 전무하다.

표 2는 그림 3의 구간 B( $k$ 값의 안정화구간)에서  $IIT$ 를 2시간씩 증가시켜가며 선형열원법인 식 (10)과 식 (11)에 의하여  $k$ 와  $R_b$ 를 산출하고( $\rho c = 2 \text{ MJ/m}^3 \cdot \text{K}$  적용) 각각의 물성치 그룹에 관하여 번호를 G2~G6로 명명하였다.

표 2. IIT 에 따라 산출한  $k$  및  $R_b$  값

IIT (hrs)	$k$ ( $\text{W/m} \cdot \text{K}$ )	$R_b$ ( $\text{m} \cdot \text{K/W}$ )	Group No.
2	2.426	0.1457	G1
8	2.715	0.1557	G2
10	2.759	0.1568	G3
12	2.798	0.1584	G4
14	2.831	0.1595	G5
16	2.866	0.1606	G6
22	3.136	0.1685	G7
12*	2.798	0.2090	G8*

★ IIT = 12 hrs 를 적용하여  $k$  값만 산출하고  $R_b$  는 EED 에 표1의 사양을 적용하여 산출한 경우임.

단, 비교를 위하여 구간 A( $k$ 값이 급격히 증가하는 구간)와 구간 C( $k$ 값이 불안정한 구간)에서도 각각 하나씩의 물성치 그룹(G1과 G7)을 선정하였다. 마지막 줄의 G8은  $IIT=12\text{hrs}$ 를 적용하여  $k$ 값만 산출하고  $R_b$ 는 지중열 설계프로그램인 EED(earth energy designer)<sup>(10)</sup>에 표 1의 보어홀 형상을 적용하여 산출한 경우로  $R_b$ 값이 상당히 높게 평가되어 있다. 국내에서는 지중열 설계시 선형열원법으로  $k$ 값만 구하고  $R_b$ 는 이와 같이 설계프로그램에 의존하는 경우가 많아 비교를 위하여 끝줄에 이 경우를 추가한 것이다.

### 6. 열응답시험 결과와의 비교

표 2의 그룹별 물성치들을 식 (5)에 적용하여  $T_f$ 를 계산하고 그림 2의 열응답시험 결과와 비교하여 보기로 한다. 비교기준으로는 다음

과 같이 정의된  $er\%$ 를 사용한다.

$$er\% = \frac{|T_{fm} - T_{fc}|}{T_{fm}} \times 100 \quad (13)$$

식 (13)의  $T_{fm}$ 은 보어홀 유체온도의 측정값이며  $T_{fc}$ 는 식 (11)에 의하여 계산된 보어홀 유체온도의 계산값이다.

표 3은 표 2의 그룹별  $k$ 와  $R_b$ 를 적용하여 식 (12)에 의하여 계산된  $er\%$ 를 비교해 본 결과이며 G8의 경우를 제외하면 전반적으로  $er\%$ 는 유사하게 나타나고 있다. 즉, 5시간 이하의 초기시간에는 상당한 오차가 나타나지만 시간 경과에 따라 오차는 급격히 감소되며 20시간 이상에서는 거의 오차가 소멸되고 있음을 볼 수 있다. 다만 G8의 경우는  $R_b$ 값이 선형열원법이 아닌 별도의 방법(EED 프로그램)으로 산출되었으며 이 경우 상당히 다른 열거동을 보임을 알 수 있다.

표 3의 G1과 G7은 각각 그림 3의 구간 A와 구간 C에서 취한 경우이며 구간 B의 G2~G6에 비하면 약간 더 큰 오차를 보인다. 따라서 그림 3의 구간 B( $k$ 값 안정화 구간)에서 선형열원법에 의한 물성치를 취하는 것

이 바람직하며 G8의 경우처럼  $R_b$ 값을 별도로 산출하면 상당한 오차가 발생됨을 알 수 있다.

표 3. 시간 경과에 따른 보어홀 유체 온도의  $er\%$

Group No. 시간(hrs)	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
1	6.80	9.90	10.24	10.71	11.04	11.36	13.67	24.25
2	3.30	5.54	5.78	6.14	6.38	6.62	8.32	18.53
3	1.69	3.50	3.68	3.98	4.18	4.38	5.78	15.81
5	0.20	1.52	1.64	1.88	20.3	2.18	3.24	13.10
10	0.57	0.18	0.22	0.39	0.49	0.58	1.23	11.00
20	0.22	0.00	0.02	0.10	0.13	0.17	0.46	10.24
30	0.23	0.29	0.35	0.28	0.26	0.25	0.15	9.61
48	0.42	0.05	0.05	0.02	0.03	0.05	0.17	9.65

이와 같이 동일한 선형열원법으로  $k$ 와  $R_b$ 를 구할 경우  $k$ 값이 다소 달라도 유사한 결과가 나타나며 따라서  $R_b$ 의  $k$ 값에 관한 보완의 관계도 확인할 수 있었다.

## 7. 지중열 설계프로그램에 의한 장기 해석결과의 비교

표 4. 지중열 시스템의 기본 변수들

● 지중 토양
$T_o = 15\text{ }^\circ\text{C}$
$\rho c = 2\text{ MJ}/\text{m}^3 \cdot \text{K}$
$k = 2.4 \sim 3.1\text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$
● 냉방기간 : 6, 7, 8, 9월 (120일)
● 난방기간 : 12, 1, 2, 3월 (120일)
● 지중부하 : 10 kW (냉, 난방 기간중 동일)
● 보어홀 유체 온도의 허용범위 : 3 ~ 27 °C
● 총가동 년수 : 20 년

이상의 결과는 단지 48시간 규모의 열응답시험 시간내에서 산출된 단기간의 결과이며 10~20년 규모의 지중열 가동을 고려할 때 보다 일반적인 장기간 검증이 필요하다. 본 연구에서는 EED를 이용하여 장기검증을 수행하고자 한다. EED는 설계프로그램이므로 지중조건, 부하조건 등을 구체적으로 명기하여야 작동이 가능하다. 표 4에서는 여기에 사용된 기본적 변수들을 나타내고 있다.

표 5는 표 4의 지중열 조건하에 각각의 그룹별 물성치를 EED 프로그램에 적용하여 보어홀 총길이를 계산한 결과이다. 여기서도 표 3과 유사한 결론이 도출됨을 볼 수 있다. 즉, G2~G6에서는 보어홀 총길이가 대략 비슷하게 산출되며 G1, G7에서는 다소 이탈되고 G8에서는 상당한 이탈을 보이고 있다.

표 5. 지중열 시스템의 기본 변수들

Group No.	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
보어홀 총길이(m)	353.9	341.7	340	338.9	337.9	337.0	330.4	379.8

이상의 결과로부터 선형열원법에 의한  $k$  값 해석에서  $IIT$ 는 그림 3의 구간 B가 적당하고  $R_b$  값 역시 선형열원법에 의한 식 (11)을 통하여 산출하는 것이 타당하다 하겠으며 G2~G6 중 평균치인 G4( $IIT=12hrs$ 의 경우)의 선택이 무난한 것으로 사료된다.

## 8. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- (1) 선형열원법에 의한  $k$  값 측정시  $R_b$ 도 식 (11)에 의한 선형열원 해석으로 구하는 것이 바람직 하다.
- (2) 선형열원법에 의한  $R_b$  값은 지중토양의 체적열용량의 함수이나 매우 약한 함수로 그 영향이 적어 일반적으로 인정되는 평균값( $\rho c = 2 \text{ MJ/m}^3 \cdot \text{K}$ )을 적용 할 수 있다.
- (3) 초기제외시간은  $k$  값이 안정화 되는 8~16시간 범위내에서 취하는 것이 바람직 하다.
- (4) 선형열원법으로 산출된  $R_b$  값은  $k$ 에 관하여 보완성의 관계에 있어  $IIT=8 \sim 16 \text{ hrs}$  범위내에서는 대략 비슷한 결과를 얻는 것으로 나타났다. 따라서 그 중간 값인  $IIT=12hrs$ 는 가장 무난한 선택으로 사료 된다.

## 후 기

이 논문은 2009년도 충북대학교 학술연구 지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

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, 우정선, 김대기, 지중유효열전도율 해석에 사용되는 선형열원모델의 초기제외시간 결정에 관한 연구, 에너지공학, 제 17권, 제3호, pp. 167-174, 2008.
6. 한국에너지기술연구원, 현지 지중열전도도 측정기술, 지식경제부, 2008.
7. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Clarendon Press, Oxford, 1959.
8. Kavanaugh, S.P., Investigation of Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Short-Term Fields Tests, ASHRAE 1118-TRP. 2000.
9. Remund, C. P., Borehole Thermal Resistance :Laboratory and Field Studies, ASHRAE Transactions : Symposia, CH-99-2-1, pp. 43~445, 1999.
10. Hellstrom G. and Sanner B., PC-programs for Borehole Heat Exchanger Design, Asterweg 2, D-35633, Lahnau, Germany, 2000.