

< 논문 >

## 수직형 지열 열교환기(BHE)의 열성능 측정에 관한 실험적 연구

임경빈\* · 이창희† · 이상훈\* · 성낙원\*\*  
(2006년 2월 21일 접수, 2006년 6월 13일 심사완료)

### An Experimental Study on the Thermal Performance Measurement of Vertical Borehole Heat Exchanger(BHE)

Kyoungbin Lim, Changhee Lee, Sang-Hoon Lee and Nakwon Soung

**Key Words:** Borehole Heat Exchanger(지열교환기), Thermal Response Test(열응답테스트), Thermal Conductivity(열전도도), Thermal Resistance(열저항)

#### Abstract

Knowledge of ground thermal properties is most important for the proper design of large BHE(borehole heat exchanger) systems. Thermal response tests with mobile measurement devices were first introduced in Sweden and USA in 1995. Thermal response tests have so far been used primarily for in situ determination of design data for BHE systems, but also for evaluation of grout material, heat exchanger types and ground water effects. The main purpose has been to determine in situ values of effective ground thermal conductivity, including the effect of ground-water flow and natural convection in the boreholes. Test rig is set up on a small trailer, and contains a circulation pump, a heater, temperature sensors and a data logger for recording the temperature data. A constant heat power is injected into the borehole through the pipe system of test rig and the resulting temperature change in the borehole is recorded. The recorded temperature data are analysed with a line-source model, which gives the effective in situ values of rock thermal conductivity and borehole thermal resistance.

#### 기호설명

C : 비열[J/kg·K]  
H : 보어홀 열교환기의 길이[m]  
k : 온도변화 곡선의 기울기  
Q : 열주입 또는 추출율[W]  
R : 열저항[K/(W/m)]  
r : 보어홀 직경[m]

T : 온도  
t : 시간  
m : 일차원 fitting식의 온도절편

#### 그리스문자

$\alpha$  : 열확산계수 ( $\alpha = \lambda / \rho c_p$ )  
 $\lambda_{eff}$  : 유효 열전도도[W/(m·K)]

#### 하첨자

b : 보어홀(borehole)  
eff : 유효한(effective)  
f : 유체(fluid)  
r : 암반의 보어 홀  
sur : 표면

† 책임저자, 회원, 한양대학교 기계공학과  
E-mail : leemech@hanyang.ac.kr  
TEL : (031)418-9293 FAX : (031)406-5550

\* 한밭대학교 기계설계공학과

\*\* 한양대학교 대학원 기계공학과

## 1. 서 론

최근 대체에너지 활용에 붐이 일어난 듯, 고유가 고에너지 비용 때문에 지열을 이용하는 히트펌프 시스템에 많은 관심이 집중되고 있다. 각 연구단체의 활동이 두드러지게 활성화되고 있는 가운데 고효율 저가형 지열회수시스템 개발과 고성능 지열원 히트펌프유니트 개발 등 고급 연구개발과제가 대체에너지 보급화와 연관되어 진행되고 있다.

에너지를 사용하는 최종 소비자들은 다양한 에너지원의 개발과 확실한 에너지절약기술이 하루속히 나와 주기를 바라고 있다. 뿐만 아니라 원자력과 같은 반 환경적인 발전설비의 증설이 억제되고 있는 상황에서 앞으로의 에너지 가격은 계속 상승하게 될 것이 뻔하다. 따라서, 태양열과 지열 등 건물 에너지로서 그나마 유용성이 가장

높은 대체에너지 기술이 경제적인 잠재력을 가지고 에너지 시장에 넓게 퍼질 것으로 기대된다.

현재, 지열교환시스템(Borehole Heat Exchanger system)은 지열 히트펌프 시스템이 설치된 곳이라면, 반드시 설치되어 있기 때문에 전국적으로 약 40개소 이상에 설치 되어있다. 이미 설치된 지열교환시스템들은 한 개 내지 두세 개의 보어홀(시추공이라고도 함, borehole)로 구성된 것이 아니라 대부분 여러 개의 보어홀을 헤더에 연결한 대형 지열교환시스템들이다.

지열교환시스템은 구성 형태에 따라 여러 종류가 있지만 지하의 암반으로부터 히트펌프의 열원(건물의 난방 및 급탕)으로 열을 추출하여 지속적으로 공급해 주기 위해서는 암반에 고열전도도(high thermal conductivity)를 갖는 보어홀을 수직으로 깊게 뚫는 방법, 즉 수직형 지열교환기를 설치하는 것이 가장 바람직하다.

Table 1 Summary of experimental apparatus state of the art december (2001/12)<sup>(4)</sup>

Country	Canada	Germany	Netherlands	Norway	Sweden	Switzerland	Turkey	United Kingdom	U.S.A
references	Cruikshanks, et al.(2000)	Sanner (2001)	Witt, et al. (2001)	Helgesen (2002)	Gehlin and Hellstrom (2000)	Eugster (2002)	Paksoy (2000)	Curtis (2001)	Austin, et al. (2000)
configuration	Trailer	Trailer	Container	Trailer	Trailer	mobile	Trailer	Cart, 2-wheel	Trailer
Heat injection(kW)	3.2	1-6	0.05-4.5	3-12	3-11	3-9	3-12	3-6	0-4.5
Heat extraction(kW)	-	-	0.05-4.5	-	-	-	-	-	-
Power control	none	Manual, 6-levels	controlled $\Delta T$	Manual, 4-levels	Manual, 3-levels	semi-manual	Manual, 4-levels	Manual, 2-levels	Manual, continuously
Flow rate(L/s)	0.75	0.28	0.14-0.83	0.5-1.0	0.5-1.0	variable	0.5-1.0	0.25-1.0	0.2
Circulating fluid	water/P.G	water	water/glycol	water/P.G	water/P.G	water	water	water	water
Temperature sensors	Not reported	Pt100	Pt100	Thermocouples	Thermocouples	Pt100	Thermocouples	Thermistors	Thermistors
Responded accuracy	Not reported	Not reported	$\pm 0.07K$	$\pm 0.2K$	$\pm 0.2K$	0.1	$\pm 0.2K$	$\pm 0.1K$	$\pm 0.1K$
Power sensor	Not reported	Not reported	Not reported	Watt trans	Watt trans	Not reported	Watt trans	kWh meter	Watt trans
Reported accuracy	Not reported	Not reported	Not reported	$\pm 2\%$	$\pm 2\%$	Not reported	$\pm 2\%$	Not reported	$\pm 1.5\%$
Flow sensor		Not reported	MagMaster	Vol meter	none	Not reported	Vol meter	Electromagnetic	Vol meter
Reported accuracy	Not reported	Not reported	0.2-0.9%	3%	-	Not reported	$\pm 3\%$	Not reported	$\pm 2\%$

Table 2 Summary of measurements state of the art December (2001/12)<sup>(4)</sup>

Country	Canada	Germany	Netherlands	Norway	Sweden	Switzerland	Turkey	United Kingdom	U.S.A
First year of operation	2000	1999	1999	1998	1996	1998	2000	1999	1998
Number of test rig	1	3	1	1	1	2	1	1	>10
Total number of test	2	>35	20	50	35	7	2	6	>300
Measured ground type	Hard rock, slate	Sand, silt, Marl, shale	Clay, sand, peat, shale	Hard rock, shale	Hard rock, shale	Molasse sediment	sedimentary	Hard rock, shale, clay	sedimentary, clay, shale
Measured BHE backfill material	Ground-water	Grout, sand	Ground-water Bentonite	Ground-water	Ground-water, sand	Grout	Ground-water	High soild bentonite	Bentonite, enhanced grout
Measured BHE type	Single-U	Single-U, double-U Energy pile	Single-U, double-U, concentric	Single-U	Single-U, double-U, concentric	Double-U, energy pile	Single-U	Single-U, with geoclips	Single-U, double-U
Typical borehole depth	55-91m	26-117m (max 250m)	30-100m	120-200m	100-150m	150-300m	150m	50-70m	60-120m
typical borehole diameter	150-164mm	150-160mm	50-300mm	115-140mm	110-150mm	150-240mm (EP)	150-200mm	125-150mm	85-150mm

수직형 지열교환기는 순환유체의 사용종류 및 에너지의 교환형태에 따라 개방형, 밀폐형, U-loop형, 동심 이중관형이 있다.<sup>(1)</sup> 지금까지 우리나라에는 설치된 지열교환기의 약 90% 정도가 밀폐형의 보어홀 열교환기로 설치되었다. 밀폐형 지열교환기는 끝이 U자 모양으로 연결된 한 쌍 내지 두 쌍의 파이프를 깊이 100~150m의 보어홀에 집어넣고, 파이프와 보어홀 사이에 보통의 시멘트-벤토나이트 재료로 그라우팅(grouting)을 하여 만든다.

지하 암반에 열을 주입, 추출하기 위해서 지열교환 파이프 내부에 열매체(순환유체)를 통과시키는데, 순환유체는 한쪽 파이프를 타고 보어홀의 아래쪽까지 내려가서 다시 다른 쪽 파이프를 타고 되돌아오도록 되어 있다. 이 과정에서 순환유체는 보어홀 주변의 암반에 의해 가열되거나 냉각하게 된다. 순환유체로 이용되는 것에는 물, 에탄올/물, 메탄올/물, 에틸렌글리콜/물, 프로필렌글리콜/물 등이 있으며 사용용도와 조건에 따라 적절한 순환유체를 선정하고 있다.

지열교환시스템의 설치하는 데에는 암반을 뚫는 비용, 지열교환기를 제작, 설치하는 비용 및 파이프 배관(재료 및 시공)비용 등이 소요된다. 따라서 지열 히트펌프시스템 전체 설치 가격이

증가되는 것을 방지하기 위해서 지열교환시스템은 경제적으로 구성할 필요가 있게 된다. 이러한 목적을 달성하기 위해 지열교환시스템이 실제 현장에 설치를 마치고 전에 보어홀의 열적성능, 즉 열전도도(thermal conductivity)와 열저항(thermal resistance)을 미리 측정해서 설계에 반영해야 한다.<sup>(2-4)</sup> 이 두 파라메타는 열응답테스트(thermal response test)를 현장에서 직접 수행, 측정함으로써 결정할 수 있다.<sup>(3,4)</sup>

열응답테스트에 대한 이론은 Mogensen<sup>(5)</sup>에 의해 1980년대에 정립되었고, 이동식 장치로 실용화한 첫 테스트 장치는 1996년 스웨덴의 Eklöf et al.<sup>(2)</sup>에 의해 제작되었다. 이와 비슷한 장치를 미국의 Ausin<sup>(6)</sup>은 1998년에 제작, 실험하였다. 약간 다른 방식으로는 1999년 네덜란드의 Van Gelder et al.<sup>(7)</sup>에 의해 히트펌프를 사용하여 지하 암반을 냉각하는 방법이 처음으로 사용되었다. Table 1과 Table 2에서 보는 것처럼, 열응답테스트 장치는 세계적으로 스웨덴, 네덜란드, 노르웨이, 영국, 독일, 터키, 캐나다 및 미국 등에서 여러 가지의 개발된 형태로서 사용되고 있고, 최근에 프랑스, 스위스 및 일본에서도 채택하고 있다.

국내에서는 사용되는 열응답테스트 장치는 간단한 suit case 형태로 된 제품을 미국에서 수입하

여 사용하고 있다. 지열교환기의 체계적인 연구가 필요할 것으로 판단되어 스웨덴의 열응답테스트 장치 구성을 기본으로 하여 자체 제작하였으며, 이 장치를 이용하여 두 지역의 지열교환시스템에 대해서 열응답 테스트를 수행하고, 지열교환기의 열적성능을 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 열응답테스트의 평가

열응답테스트의 원리는 일정한 열량을 지열교환기로부터 추출하거나 지열교환기에 주입하는 동안에 지열교환기를 순환하는 순환유체의 온도변화를 측정하는 것이다. 측정된 온도 값은 측정시간에 대해서 지열교환기 입, 출구의 온도변화곡선으로 나타난다. 일반적으로 열을 주입하는 측정방식과 열을 추출하는 측정방식은 지하 암반의 열전도도에 대해서 같은 결과를 나타낸다고 보고되었다.<sup>(3)</sup>

열응답테스트의 온도 데이터는 라인소스 이론(line source theory)을 적용함으로써 쉽게 평가할 수 있다. 다음 식 (1)과 식 (2)는 Eklöf와 Gehlin<sup>(2)</sup>에 의해 제시된 식들이다.

$$k = \frac{Q}{4\pi H \lambda_{eff}} \quad (1)$$

k : Inclination of the curve of temperature versus logarithmic time

Q : Heat injection/extraction

H : Length of borehole heat exchanger

$\lambda_{eff}$  : Effective thermal conductivity (incl. influence of ground water flow, borehole grouting, etc)

열응답테스트의 최소 측정시간에 대하여 Skouby<sup>(8)</sup>와 Spitler at al.<sup>(9)</sup>은 최소 50시간을 측정할 것을 제시하였으나, Smith<sup>(10)</sup>은 12시간을 최소로 제시하였다. 한편, 독일의 테스트 결과에서 볼 때, 측정에 필요한 최소 소요시간은 Eklöf et al.<sup>(2)</sup>에 의해 제시된 식 (3)으로부터 구할 수 있고, 2% 이내의 오차를 확보하기 위해서는 식 (3)의 시간까지 측정해야 한다는 것이다.

$$t_{b1} = \frac{5r^2}{\alpha} \quad (2)$$

$$t_{b2} = \frac{50r^2}{\alpha} \quad (3)$$

여기서,  $t_{b1}$ ,  $t_{b2}$ 는 측정한계시간이고,  $r$ 은 보어홀의 직경,  $\alpha$ 는 암반의 열확산계수이며, 열확산계수는  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$ 로 계산된다.

### 2.2 온도에 대한 불확실도

본 연구에서 열유량을 측정을 위한 열 평형식은 다음과 같다.

$$q_{in} = \dot{V}C_p(T_{out} - T_{in}) \quad (4)$$

$q_{in}$ 은 측정된 열유량 값,  $\dot{V}$ 는 에틸렌 글리콜의 유량,  $C_p$ 는 프로브로부터 측정된 입출구의 온도에 대한 에틸렌 글리콜 수용액의 비열이다.

측정 프로브를 통해 얻은 온도의 불확실도는 0.01°C이며, 제어판넬의 불확실도는 0.03°C이다. 식 (5)는 온도에 대한 불확실도를 계산한 결과이다.

$$\Delta T = \sqrt{\frac{(\pm 0.01)_{in}^2 + (\pm 0.03)_{in}^2 + (\pm 0.01)_{out}^2 + (\pm 0.03)_{out}^2}{4}} \quad (5)$$

$$\approx 0.2515^\circ\text{C}$$

실험조건에 대한 온도의 편차는 약 5°C이며, 이때 측정된 온도차에 대한 불확실도는 식 (6)과 같이 계산될 수 있다.

$$ERROR = \frac{\pm 0.2515^\circ\text{C}}{5^\circ\text{C}} \approx \pm 5.03\% \quad (6)$$

또한, 두 지역에 대하여 식 (4)에 의해 계산된 평균 열전달량 및 트랜스듀서를 통해 얻어진 값의 차와 실제 전체 열전달의 비율을 Table 3과 같은 결과를 얻었다.

Table 3 Heat balance check

Location	Transducer reading (watt)	Average VCpΔT (watt)	difference (watt)	% of total Average power
D-Y	2513.1	2597.8	84.7	3.37
K-G	3199.0	3202.5	3.5	0.66

유량계를 통한 유량의 불확실도를 측정하기 위하여 실제유량과 보정유량의 오차를 Table 4에 나타내었습니다.

Table 4에서 얻은 유량 보정에 대한 실제 유량의 오차 중 가장 큰 오차는 ±3.3%이며, 열평형 방정식에 의한 전체 불확실도는 식 (7)과 같은 결과를 얻었다. 또한, 본 실험에서는 밀도와 비열에 대한 불확실도의 영향은 배제하였다. 그 이유는 온도에 변화에 대한 밀도 및 비열의 변화량이 작기 때문이다.

$$Total\ Error = \sqrt{(\pm 0.0503)^2 + (\pm 0.033)^2} \quad (7)$$

$$\approx 6.01\%$$

2.3 열응답 테스트 장치의 구성

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 열응답테스트 장치의 구성하여 제작하고, 트레일러 형태의 운반 방식을 갖추었다.(Fig. 2) 열응답테스트 장치의 제어판넬(electrical unit)에는 온도(내부, 외부, BHE 입, 출구 및 히터온도)를 기록할 수 있는 기록계(logger)와 전력분석기를 설치하고, on/off 스위치 및 안전장치(flow switch, timer 등)에 대한 회로를 구성하였다. 가열용 히터는 최대 9kW 용량을 갖는 인라인 히터를 설치하였고, 전체 또는 절반(4.5kW)의 열량을 사용할 수 있도록 2단으로 구성하였다. 또한, 지열교환기로 들어가는 순환유체의 온도는 제어판넬에서 항상 읽을 수 있도록 하였고, 인라인 히터를 보호하기 위해서 flow switch 및 thermistor를 설치하였다. 유량계(volumetric type)는 지열교환기 내부로 보내지는 순환유체의 양을 결정하고 확인하는데 사용된다.

2.4 측정과정

열응답테스트는 지열교환시스템을 구성하는 한 개의 지열교환기(보어홀)에 대해서 수행된다. 그러나, 규모가 큰 지열교환시스템인 경우에는 하나 이상의 보어홀에 대해서 수행되어야 한다.<sup>(4)</sup>

Table 4 Result from Flow meter calibration

Actual flow (LPM)	calibration flow (LPM)	error (%)
3.316	3.242	3.3
7.355	7.494	1.1
10.749	10.991	1.4
14.929	14.803	0.9

여러 개의 보어홀에 대해서 열응답테스트를 할 경우에 선택된 시험 보어홀들은 실제 지열교환시스템의 설계깊이, 사용재료, 파이프 구성방식 및 뒤채움재가 동일하게 적용되어야 한다.

열응답테스트 장치는 시험 보어홀에 가능한 한 가장 가까이에 설치하고, 지열교환파이프 내부를 청소한 다음 순환유체를 채운다. 지열교환기와 테스트 장치와 연결되는 모든 노출배관은 단열재로 감싸준다. 열응답테스트의 진행은, 제일먼저, 지하 암반(보어홀)의 초기온도를 측정하는 일로부터 시작된다. 이 과정은 펌프만을 가동하여 순환유체를 지열교환기에 보내서 보어홀 내부에서 올라오는 초기 온도를 측정하는 것이다. 이때, 펌프 가동시간은 약 20분 정도로 한정된다.<sup>(4)</sup> 그 후에 인라인 히터의 전원을 켜고, 측정한계시간이 될 때까지 지열교환기의 입·출구 온도변화를 기록한다.

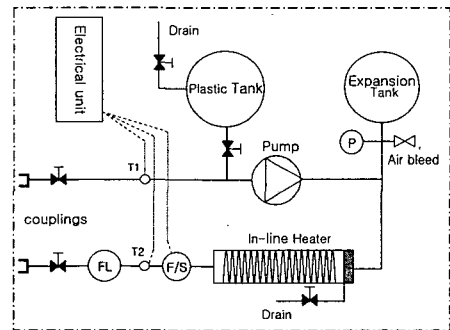


Fig. 1 Schematic diagram of thermal response test setup

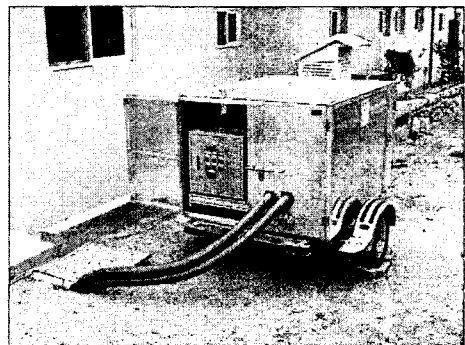


Fig. 2 Thermal response test apparatus (movement)

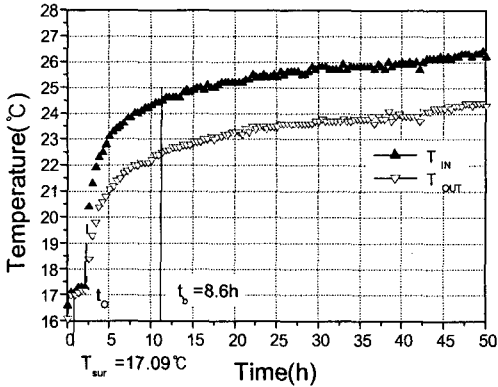


Fig. 3 Temperature distribution of inlet and outlet for borehole heat exchanger (D-Y region)

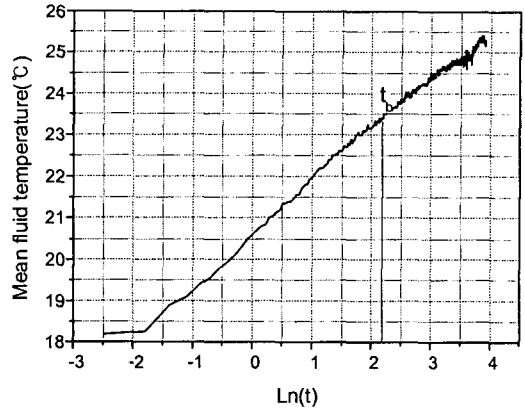


Fig. 4 Linear average temperature distribution (D-Y region)

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 열전도도의 계산

본 연구에서는 두 지역의 지열교환시스템에 대해 열응답테스트를 수행하여 지열교환기의 온도변화를 측정하였다. 열응답테스트의 순환유체는 25%E.G(에틸렌글리콜 수용액)을 사용하였고, 인라인 히터를 통한 열주입은 4.5kW를 사용하였다.

Fig. 3은 2003년 10월, D-Y지역에 설치한 직경 150mm, 32mm double-U type, 깊이 107m의 지열교환기에 대해서 4.5kW의 히터열량을 사용하여 열응답테스트를 수행한 온도데이터를 나타낸 것이다. Fig. 3에서  $t_0$ 는 보어홀의 초기온도를 측정하기 위해 펌프만을 구동할 때까지의 시간을 나타낸 것이며, 보어홀 초기온도를 측정한 결과 17.09°C로 나타났다. 한편,  $t_0$  시간 이후에 히터에 전원을 넣으면 순환유체의 온도가 급격히 상승한 후 점점 완만한 상승을 하고 있음을 알 수 있다. 여기서,  $t_b=8.6h(8h\ 36min)$ 는 상기 식 (3)에 의해 계산된 측정한계시간을 나타낸 것이다.

Fig. 4는 대수시간(logarithmic time)에 대한 평균 온도변화 곡선을 나타낸 것인데, 여기서  $t_b$ 까지의 온도곡선에 대한 식 (4)의 기울기를 구할 수 있다.

$$T_f = k \ln(t) + m \quad (8)$$

즉, 상기 식 (8)에서 기울기(slope)  $k$ 를 구하고, 식 (1)에 보어홀 주입열량  $Q$ , 보어홀의 깊이  $H$  및

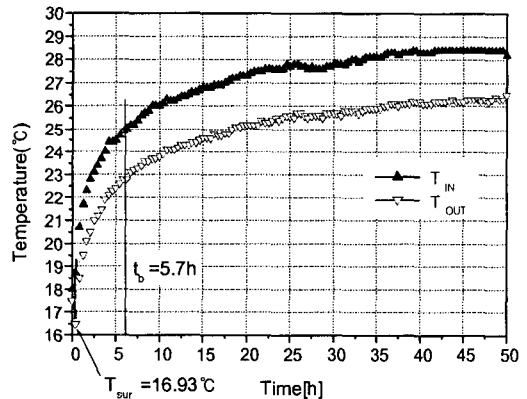


Fig. 5 Temperature distribution of inlet and outlet for borehole heat exchanger (K-G region)

$k$  값을 넣어서 유효열전도도를 계산할 수 있다. 식 (8)의  $T_f$ 는 순환유체의 온도 분포를 나타낸다.

Fig. 5는 2004년 4월, K-G지역에 설치한 직경 150mm, 32mm double-U type, 깊이 105m의 지열교환기에 대해서 4.5kW의 히터열량을 사용하여 열응답 테스트를 수행한 온도데이터를 나타낸 것이다. 측정한계시간은  $t_b=5.7h(5h\ 42min)$ 로 계산되었으며, 이에 대한 열전도도 값을 상기의 방법에 의해 계산하였다.

Fig. 6은 대수시간(logarithmic time)에 대한 평균 온도변화 곡선을 나타낸 것인데, 여기서  $t_b$ 까지의 온도곡선에 대한 식 (8)의 기울기 즉 열전도도를 구할 수 있다.

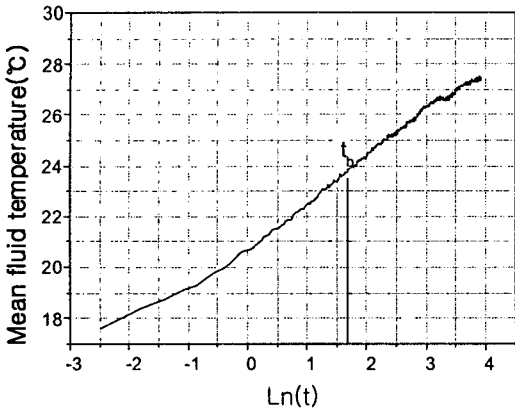


Fig. 6 Linear average temperature distribution (K-G region)

Table 5 Summary on the thermal response test results

Region	item $t_b$	k	$\lambda$ [W/(m·K)]	$R_b$ [K/(W/m)]
D-Y	8h36min	1.03	3.5	0.08
K-G	5h42min	1.59	2.23	0.09

3.2 열저항의 계산

열저항을 계산하는 방법은 일정한 열량이 보어홀에 주입된다는 가정 하에서, 과도현상(transient process)과 중첩파동(superposed pulsation)의 과정을 통해서 식 (9)과 같은 형태의 열전달 식을 얻을 수 있고,<sup>(4)</sup> 식 (8)의 일차원 식과 동일한 형태로 풀어쓰면, 열저항  $R_b$ 에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$R_b = \frac{H}{Q}(T_f - T_{sur}) - \frac{1}{4\pi\lambda} \left( \ln(t) + \ln \left[ \frac{4\alpha}{r_o^2} \right] - \gamma \right) \quad (9)$$

여기서,  $\gamma = 0.5772$ ,  $t \geq \frac{5r^2}{\alpha}$  이다.

본 연구에서는 이상과 같은 계산 절차를 거쳐서 두 지역에 설치된 지열교환기에 대해 열응답 테스트를 수행하여 열적성능을 측정한 결과를 Table 5와 Table 6과 같은 열전도도 및 열저항 값을 갖는 것을 알 수 있었다.

Table 6 Measured ground type

Region	ground type	conductivity [W/(m·K)]	Volumetric heat capacity [MJ/m <sup>3</sup> ·K]
D-Y	Granite	3.4 (2.1-4.07)	2.4 (2.05-2.96)
K-G	Granodiorite	3.3 (2.03-3.34)	2.6 (2.16-3.28)

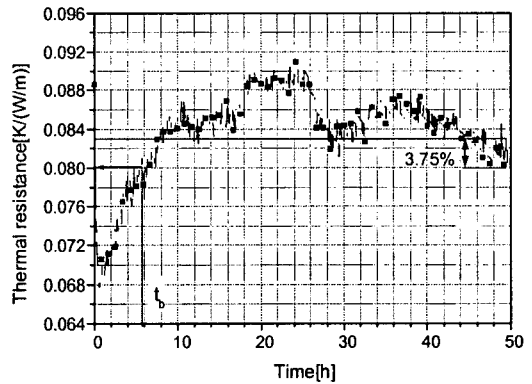


Fig. 7 The variation of the thermal resistance for measurement timing (K-G region)

3.3 측정한계시간에 대한 검토

한편, K-G지역에서 측정한 열응답테스트 결과 중에서 시간에 따른 보어홀 열저항의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 측정한계시간  $t_b = 5.7h$ 에서의 열저항 값은 0.08[K/(W/m)]의 값을 갖는 것으로 계산되었는데, 그림에서 보는 것처럼  $t_b$ 이후에 열저항 값은 계속 변화하고 있고 테스트를 끝내는 50h 부근에서의 열저항 값(0.083)과 약 3.75%의 오차를 보이고 있음을 알 수 있다.

이러한 결과로 미루어 볼 때, Eklöf et al.<sup>(2)</sup>이 제시한 측정한계시간( $tb_2 \geq 10tb_1$ )까지 열응답 테스트를 수행하여야 2%의 오차 이내에서 열저항 값을 얻을 수 있음을 알았다.

4. 결론

본 연구에서는 지열교환시스템에 대한 수직형 지열교환기에 대해서 열응답테스트를 수행하고, 지열교환기의 열적성능을 측정하였다.

D-Y지역에 설치된 지열교환기의 열전도도가 K-G지역에서 측정된 값보다 48.8%가 높게 나타

났으며, 열저항은 12.5% 더 낮게 나타났다.

두 실험지역의 암반 종류에 따른 물성치는 비슷하지만, 열전도도 및 열저항의 측정값이 서로 상이하게 나타난 이유는 지열교환기가 놓인 암반의 지하수 흐름의 상태, 보어홀의 깊이 차이, 측정기간 동안의 날씨 변화 및 시공 과정에서의 오차 등 어떠한 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 지열교환시스템에 대한 열응답테스트는 전체 시스템 설치와 관련하여 현장에서 반드시 이루어져야 하고, 측정된 값들은 지열교환기의 설계과정에 반영되어 시스템의 안정성 및 경제성을 확보하는데 이용되어야 할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- (1) Kavanaugh, S. P. and Rafferty, K., 1997, "Ground-source Heat Pumps ; Design of Geothermal Systems for Commercial and Industrial Buildings," ASHRE, USA.
- (2) Eklöf, C. and Gehlin, S., 1996, "TED ; A Mobile Equipment for Thermal Response Test," Master of Science Thesis, Luleå University of Technology, Sweden.
- (3) Mands, E. and Sanner, B., 2000, "In-Situ-determination of Underground Thermal Parameters," *Int. SUMMER SCHOOL on Direct Application of Geothermal Energy*, Giessen, Germany, pp. 1~10.
- (4) Gehlin, S., 2002, "Thermal Response Test – Method Development and Evaluation," Doctor thesis, Luleå University of Technology, Sweden.
- (5) Mogensen, P., 1983, "Fluid Duct Wall Heat Transfer in Duct System Heat Storage," *Proc. Int. Conf. On Subsurface Heat Storage in Theory and Practice*, Stockholm, Sweden, pp. 652~657.
- (6) Austin, W. A., 1998, "Development of an In-situ System for Measuring Ground Thermal Properties," Master of Science Thesis, Oklahoma State University, USA.
- (7) Witte, H., van Gelder, G.J. and Spitler, J.D., 2002, "In Situ Measurement of Ground Thermal Conductivity," *The Dutch Perspective. ASHRAE Transactions*, Vol. 108, No. 1, pp. 263~272.
- (8) Skouby, A., 1998, "Thermal Conductivity Testing - Proper Engineering + Thermally Enhanced Grout = GeoExchange Savings," *The Source*, Vol. 11, No. 6, p. 4,5.
- (9) Spitler, J., Rees, S. and Yavuzturk, C., 1999, "More Comments In-situ Bore Thermal Conductivity Testing," *The Source*, Vol. 3, No. 4, pp. 3~10.
- (10) Smith, M. D., 1999, "Comment on In-situ Borehole Thermal Conductivity Testing," *The Source, IGSHP Newsletter*, Vol. 12, No. 1, pp. 4~6.