

## 그라우트 재료별 열응답 특성 및 열교환기 운전온도 변화

김갑득, 이성주<sup>\*†</sup>, 윤여상  
 제이비에너텍 기술연구소

### Thermal Response Property of Grout Materials from In-situ Test and Temperature Variation of Ground Heat Exchanger

Kap-Duk Kim, Soung-Ju Lee<sup>\*†</sup>, Yeo-Sang Yun  
 JB Enertek Institute of Technology

**ABSTRACT:** The objective of this report is to determine the difference of thermal response that grouted two different materials, and compare the simulation result of the length of total ground heat exchanger length that using the ground thermal conductivity. And also to know heat exchange variation of ground heat exchanger temperature that measured with various test depth. The result shows that the test hole grouted with water permeable material got better thermal response than grouted with water impermeable material. However, with consideration of ignore for the initial 12 hour data, the test hole grouted with impermeable material has larger thermal conductivity than the other. By former thermal conductivity, simulated data by engineering program shows only 3.4% difference or less. This result shows that ground thermal conductivity is not the main variables for the design program of ground heat exchanger. At the cooling or heating mode, base on the depth of -150m, the ground heat exchanger has best temperature at -90~-60m and than getting worse because of entering water heat exchanged with leaving water in the same hole.

**Key words:** GSHP System(지열히트펌프 시스템), Grouting Material(그라우팅 재료), Thermal Response Test(열응답 시험), Ground Heat Exchanger(지중 열교환기), Ground Thermal conductivity(지중 열전도도)

#### 기 호 설 명

$k$  : 열전도도 [W/m°C]  
 $Q$  : 측정공에 투입한 열량 [W]  
 $L$  : 측정공 심도 [m]  
 Slope : 대수 변환한 온도-시간 그래프 기울기

<sup>†</sup> Corresponding author  
 Tel.: +82-41-568-0551; fax: +82-41-568-0551  
 E-mail address: sjlee@jbenertek.com

국내에 신·재생 에너지의 적용 증가와 더불어 지열원 열펌프 시스템(ground source heat pump system)에 대한 적용도 급격히 증가하고 있다. 특히 최근에는 건물 전체의 냉,난방에 적용하는 등 대형화, 공통 지열원에 개별실내기를 적용하는 등의 다양화가 이루어지고 있다.

사업 초기 보급이 미미하던 지열원 열펌프 시스템은 2004년 대체에너지개발 및 이용·보급촉진법이 발효된 이후 관공서의 의무화 적용개소 및 보급보조사업 등 정부 주도의 시장을 중심으로 급속히 성장하고 있으며, 시공기술 또한 표준기준<sup>(1)</sup>을 통하여 소비자의 신뢰를 확보해 가고 있다.

#### 1. 서 론

지열원 열펌프 시스템의 주요 구성인자 중 지중 열교환기는 히트펌프의 열원을 공급하는 인자로서 난방 시는 열원(heat source)으로, 냉방 시는 히트싱크(heat sink)의 역할을 수행한다. 설치비용 면에서는 보편적으로 적용되고 있는 폐회로(closed loop)를 이용한 시공법에서는 암반 보어링, 열교환 파이프 설치 및 배관, 열교환기 그라우팅 비용으로 시스템 시공비의 약 40% 이상<sup>(2)</sup>을 차지한다. 지열원 열펌프 시스템의 민간보급 및 지속적인 활성화를 위해서는 전체 시공비에 미치는 영향이 가장 큰 지중 열교환기의 설치를 보다 합리적으로 구성하기 위하여 지열 교환 홀에 대하여 지열열응답시험(thermal response test)을 수행하여 열전도도(thermal conductivity)를 산정하여 지열 열교환기 설계 시 반영하고 있다.

본 연구에서는 지중 열교환기의 열전도도에 영향을 미치는<sup>(3)</sup> 그라우팅 재료를 달리한 2개의 시험공에 대하여 열응답시험(thermal response test)을 수행하여 열전도도를 산정하였으며, 열전도도의 산정은 단순 라인소스 해석에 필요한 평균 제외시간을 각각 12시간<sup>(1)</sup>과 6<sup>(4)(5)</sup>시간으로 달리하여 비교하였다. 또한 상기 열전도도를 변수로 적용하여 실제 사용되는 지열 열교환기 설계 프로그램 상에서 설계된 열교환기 필요길이를 비교 하였다. 실험 중 그라우팅 재료별로 달라지는 열응답 시험 결과와 실제 지열 열전도도를 이용하여 산정된 지열 열교환기 길이의 상관관계를 비교함으로써 지열원 열펌프 시스템 설계 시 열전도도 적용으로 인한 변화에 대하여 검토하였다.

지열 열교환기는 난방시에는 열원으로, 냉방시에는 히트싱크로 이용된다. 마지막으로 실제 운전 중인 지열원 열펌프 시스템에 대하여 지중 열교환기 벽면의 온도를 모니터링 함으로서 열원과 순환수의 열교환 특성을 고찰하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 지열 열응답 실험장치

그라우팅 재료를 달리한 지열 회수공 2개에 대하여 각각 열응답을 측정하기 위하여 Fig. 1에 도시한 바와 같이 지열 측정공-1은 150 m 천공한 후 40 A의 PE 열교환기를 삽입한 후 전체에 대하여 벤토나이트 그라우팅을 실시하였다. 측정공

-2는 천공, 열교환기 삽입 후 천공 하부로부터 100 m를 투수성 그라우트 재료인 10 mm 크기의 콩자갈을 채운 후 상부 50 m는 비 투수성 재료인 벤토나이트 그라우팅을 수행하였다. 열전달 특성이 다른 두 재료를 동일한 조건의 시험부위에 설치하고 열응답 실험을 수행하여 결과를 비교할 것이다. 측정공간 열간섭을 배제하기 위하여 측정공 간의 거리는 18 m로 하였다. 측정공-2의 상부 50 m를 벤토나이트 그라우팅 한 이유는 지상의 오염물질이 지하수로 혼입되는 것을 방지하고, 시공 시 지하수위는 약 지하 12 m 였으나, 추후 수위저하 시에도 안정적인 열전달을 확보하기 위함이다.

열응답 실험에 적용되는 장치에 대하여 Fig. 2에 도시하였다. 시험장치의 구성은 그라우트를 달리한 지열 측정공, 열교환수 가열장치, 열교환수 순환장치 및 데이터 측정장치로 구성되어 있다. 열교환수 가열장치는 10 kW 전기히터를 사용하였으며 순환장치는 펌프를 적용하였다. 데이터 측정장치는 지열 공급, 환수온도를 감지할 수 있는 측온저항체 2개, 유량을 측정할 수 있는 터빈유량계, 가열용량을 측정할 수 있는 전력량계 및 데이터 로거로 구성하였다.

### 2.2 실험방법

실험은 그라우팅 재질에 따른 차이를 확인하기 위함이므로 천공 시 측정공의 지하수 토출량을 검토하였으나 시험공 간의 차이는 미미 하였으며 천공 시 토출암석의 구성 또한 같게 나타났다. 각 측정공은 그라우팅 완료후 5일 이상을 방치하여 천공, 그라우팅 시 발생할 수 있는 열변형이 회복된 후에 측정하였다. 열응답 측정기를 시험공에 연결한 후 측정유량과 동일한 유량으로 2시간 이상 무부하 운전을 실시하여 측정공 상부 표토층의 계절적인 온도상승으로 인한 데이터 변형을 방지하고 공내의 혼입공기를 배제하였다. 이 때 지중의 초기 온도는 16.0℃로 나타났다. 측정공의 지상부는 가교발포 보온재 12t 이상으로 보온하고 측정기의 외부 또한 보온을 하여 외기의 영향을 가급적 배제하였다. 순환 유량은 인버터 펌프를 사용하고, 유량 제어부에서 유량을 읽은 후 설정값과 순시값을 비교하여 자동 제어되도록 운전하였으며 유량의 편차는 평균유량 40.7lpm대비 변동

폭은 1.2%, 실험 시간은 표준기준<sup>(1)</sup>에 부합한 48 시간이었으며 데이터 취득간격은 2분이었다.

### 3. 기울기 및 열전도도 산정

#### 3.1 온도변화 기울기의 산정

가열장치에 전기를 투입하면 지열 히트펌프 시스템의 냉방운전과 같이 지열 순환수를 가열하게 되며 가열된 순환수는 다시 지열 열교환기 내부로 순환하며 지중과 열교환 하여 시험 장치로 환수되게 된다. 이 때 가열되어 지중으로 토출되는 온도를 LWT(Leaving water temperature)로, 지중에서 인입되는 온도를 EWT(Entering water temperature)라 한다. 이를 측온 저항체를 이용하여 측정된 후 측정값을 데이터 저장장치에 저장하게 된다. 이 때 가열 전력량 및 순환유량을 동시에 측정하여 각 데이터를 그래프에 나타낸다.

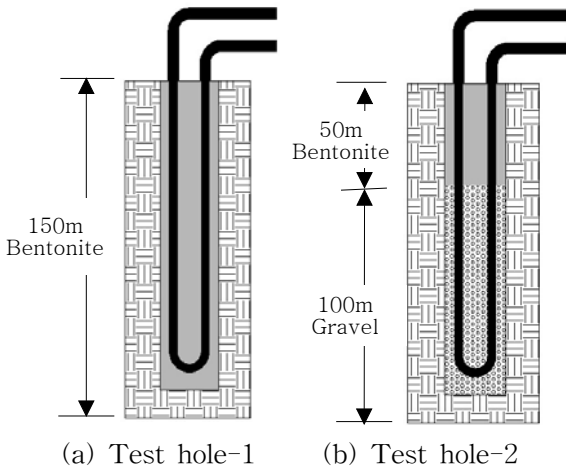


Fig. 1 Geo thermal test hole-1, hole-2.

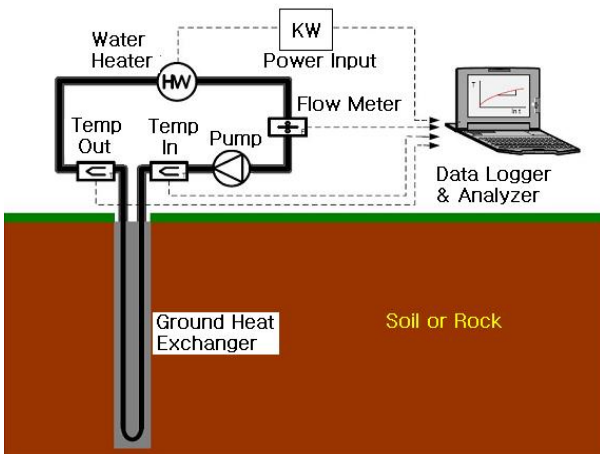


Fig. 2 Schematic of in-situ thermal response test equipment.

Fig. 3의 그래프는 온도값, 유량값, 전력량의 순시값을 시간에 대하여 나타내었으며 온도는 2차 함수 형태를, 유량 및 전력량은 직선 값을 나타낸다. 온도변화 기울기를 산정하기 위해서는 온도에 대한 순시평균값을 구하여 측정 시간에 대한 로그 값으로 변경하면 온도곡선은 직선에 가까운 1차 함수 형태를 나타내게 된다. Fig. 4는 기울기 산정을 위한 온도의 유효값 범위를 표준기준<sup>(1)</sup>에 의하여 12시간 이후부터 시험 종료시점인 48시간 까지에 대한 기울기 식으로 나타내었다. 그러나 Fig. 5에서는 유효값 범위를 Son et al.<sup>(4)</sup>, ASHRAE<sup>(5)</sup>의 기준에 의하여 6시간 이후부터 48시간까지 범위에서 기울기를 산정하여 추세선 식으로 나타내었다. Table 1에 나타낸 값들은 시험공-1 및 시험공-2에 대하여 유효온도 범위를 달리 하여 기울기를 구한 값을 나타낸다.

#### 3.2 지중 열전도도의 산정

지중 열전도도의 산정은 국내에서 일반적으로 적용하고 있는 선형열원 모델(line source model) 이론을 적용한 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{Q}{4\pi L \times Slope} \quad (1)$$

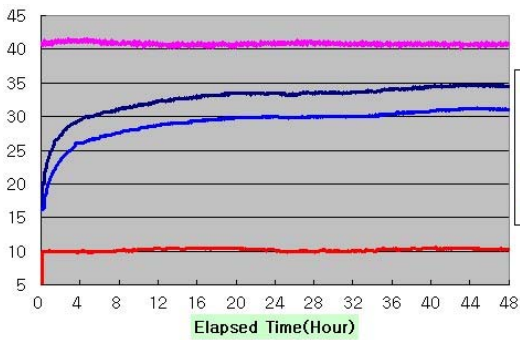
이 때 수식의 값들은 모두 실험 값 및 시공 값을 적용하고 온도변화의 기울기 값은 각각의 실험값에 대하여 12~48시간값과 6~48시간값을 모두 구하여 Table 1에서와 같이 지중 열전도도는 각각 다른 4개의 값으로 나타난다.

#### 3.3 지열 열교환기의 설계

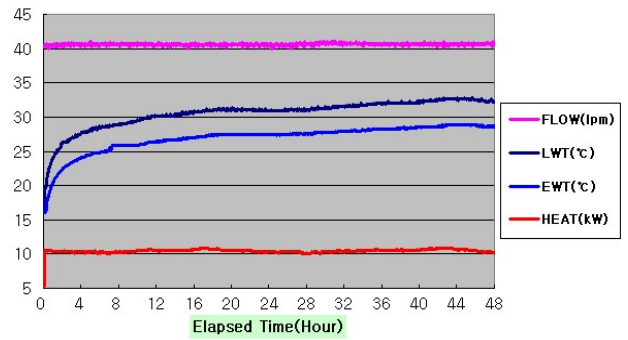
실험에서 나타난 지중 열전도도를 유일한 변수로 입력하고 나머지 값들은 모두 동일하게 입력한 상태에서 임의의 부하를 기준하여 통용되는 지열 열교환기 설계프로그램(GLD)<sup>(6)</sup>을 사용하여 열교환기 필요 길이를 산정하였다. 이는 재료별, 유효온도별로 각각 다른 지열 열전도도가 지열 열교환기 설계의 변수로 작용하여 미치는 영향에 대하여 검토하고자 한 것이며 설계된 총 길이보다 설계길이별 총 길이의 차이를 비교하는데 의미가 있다.

Table 1 Summary of in-situ thermal response tests.

	Test hole-1	Test hole-2
Test hole filling material	Bentonite slurry - 150m	Bentonite slurry - 50m Gravel 10mm - 100m
Test hour(h)	48.0	48.0
Initial ground temperature(°C)	16.1	16.0
Mean flow rate(lpm)	40.83	40.62
Mean power input(kW)	10.18	10.46
Total heat input(Mcal)	420.23	432.79
Mean Temperature difference(°C)	3.54	3.63
EWT of 12 h later(°C)	28.7	26.4
EWT of 24 h later(°C)	30.0	27.4
EWT of 36 h later(°C)	30.3	28.3
EWT of 48 h later(°C)	31.0	28.6
Line Slope	12h ~ 48h data	1.576
	6h ~ 48h data	1.832
Thermal conductivity	12h ~ 48h data	3.428
	6h ~ 48h data	2.949
Designed total length by GLD(m)	12h ~ 48h data	6,609
	6h ~ 48h data	6,833

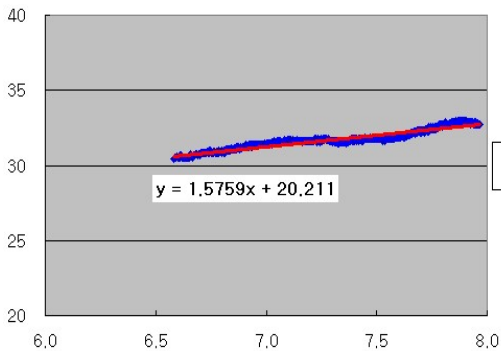


(a) Test graph of hole-1

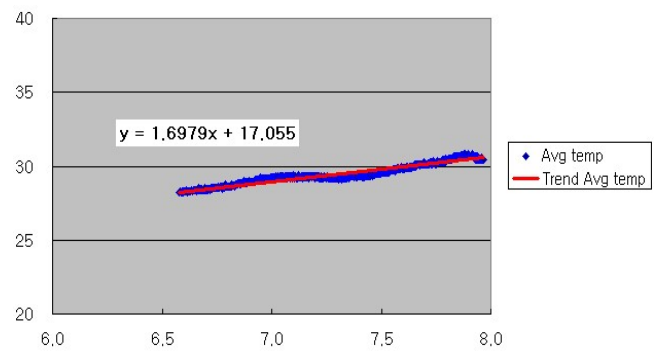


(b) Test graph of hole-2

Fig. 4 Test result graph of temperature and power input, flow rate at time

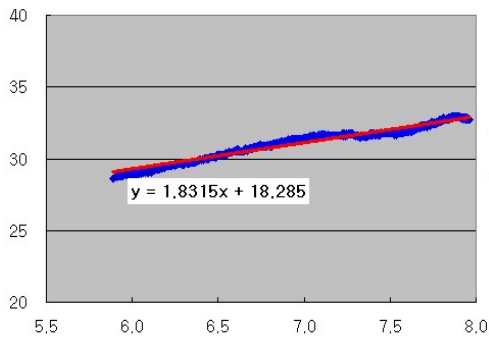


(a) Line slope of hole-1

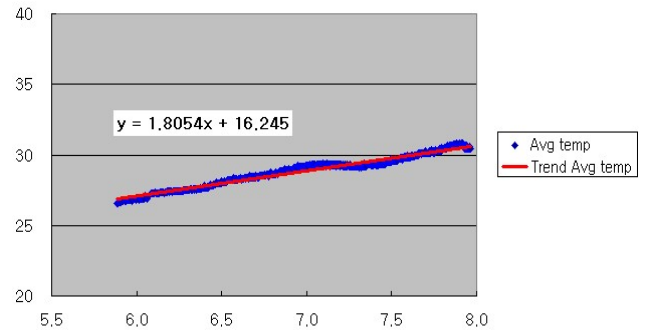


(b) Line slope of hole-2

Fig. 5 Line slope of average temperature at Ln time (from 12h ~ 48h)

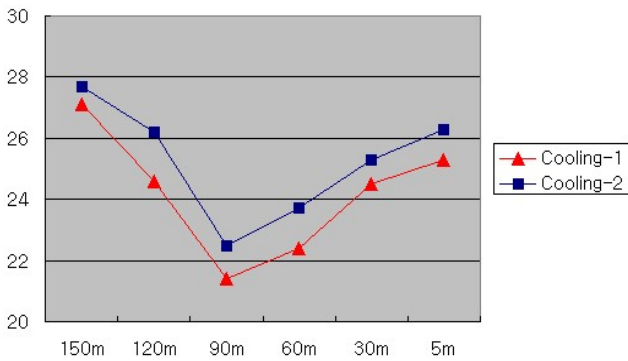


(a) Line slope of hole-1

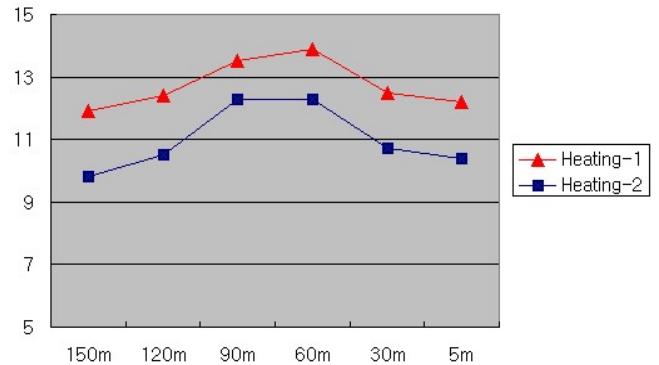


(b) Line slope of hole-2

Fig. 6 Line slope of average temperature at Ln time (from 6h ~ 48h)



(a) Cooling temperature



(b) Heating temperature

Fig. 7 Ground heat exchanger outside temperature of EWT side at cooling and heating

#### 4. 냉,난방운전 중 지열 열교환기 온도변화

냉,난방 운전 중 지중 열교환기의 심도별 온도 변화를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 열교환기 최하단의 U-band를 기준으로 히트펌프로 인입되는 PE열교환기 표면에 온도측정기 6개를 부착하여 운전중인 지열히트펌프 시스템의 지중 열교환기의 심도별 온도를 측정하였다.

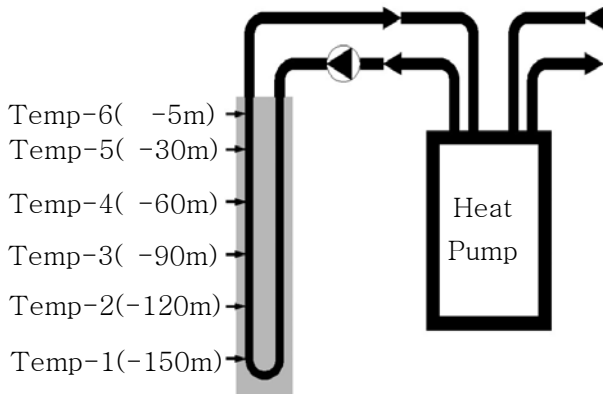


Fig. 3 Temperature sensor attach on ground source heat exchanger

온도센서는 측온저항체로 30 m마다 설치하였으며 지표면 가까이에서는 5.0 m에 설치하여 외기온도로부터 직접적인 영향을 받지 않도록 하였다.

#### 5. 실험결과 및 고찰

##### 5.1 지열 열응답 실험결과 및 비교

그라우트 재료를 달리한 2개의 실험공에 대한 열응답 테스트의 결과값을 Table 1에 정리하였다. 실험 시간은 동일한 48시간이며 초기 온도는 16.0 °C 정도였다. 가열 열량은 본 연구소의 한전 인입 전력을 직결 하였으므로 약 3% 정도의 차이가 발생하였다. Table 1에서 EWT를 12시간별로 기입하였다. Fig. 4에서도 알 수 있듯이 실험공-1의 온도 상승 변화가 실험공-2에 비하여 급격하며 고온에서 순환되고 있다는 것을 알 수 있다. 실험 종료시점인 48시간 후에는 실험공-2에 대한 가열

량이 실험공-1에 비하여 3% 많음에도 불구하고 온도는 2.4℃ 낮다는 것을 알 수 있다. 지중의 온도를 초기값인 16.0℃로 가만했을 때 EWT와 지중간의 온도차이는 각각 15℃와 12.6℃였다. 이는 투과성 그라우트를 하부에서부터 100m를 시공한 실험공-2의 열응답 특성이 실험공-1에 비하여 우수하다는 것을 나타낸다.

표준기준<sup>(1)</sup>을 적용한 12시간~48시의 데이터를 기준으로 한 온도변화 기울기 및 열전도 값은 실험공-1에 대하여 1.576 및 3.428W/m℃, 실험공-2에 대하여 1.698 및 3.268W/m℃로 실험공-2의 열전도도가 실험공-1보다 저조하게 나타났다. 그러나 초기 6시간의 데이터를 제외한 6~48시까지의 데이터를 기준으로 한다면 실험공-1은 1.832 및 2.949로, 실험공-2는 1.805 및 3.073으로 나타나 실험공-2의 결과값이 다소 우수함을 알 수 있다. 이는 열응답 특성이 좋지 못한 실험공-1은 실험 초기에 순환수의 온도가 빠르게 상승하며 12시간 이후에는 고온 안정화가 이루어져, 측정종료 시점까지의 온도상승이 크지 않아 지열 열전도도가 높게 계산되나, 열응답 특성이 좋은 실험공-2는 12시간 이후에도 원활한 열전달이 발생하며, 순환수의 온도가 비교적 저온에서 지속적으로 상승함으로서 지열 열전도도는 낮게 계산되는 결과가 발생하는 것으로 사료된다.

상기 열전도도의 차이가 지열 열교환기의 필요 길이에 미치는 영향을 파악하기 위하여 임의의 부하를 입력한 후 지열 열전도도를 제외한 모든 입력값을 동일하게 적용한 후 지열 열교환기를 설계하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 열교환기 총 필요길이의 차이는 약 3.4% 이내로 나타나 지열 열전도도가 지열 열교환기 설계프로그램의 입력 값으로는 그리 크지않은 변수로 작용함을 알 수 있었다.

## 5.5 지열 열교환기 운전온도 변화

지열히트펌프 냉난방 시스템의 운전 중 지열 열교환기의 심도별 온도변화는 각종 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 예측할 수 있다. 그러나 본 실험에서 실제로 냉,난방 운전하는 히트펌프로 인입되는 열교환기 외부의 온도 변화를 측정된 결과, 150m 심도의 지열 열교환기를 기준 한다면 최 하단부인 U-band를 지나 상부로 순환되며 지

중과 열교환되어 약 -90m~-60m 사이에 최적의 온도로 열교환된 후, 냉방운전 시에는 다시 상승하고 난방운전 시에는 다시 하강한다는 것을 알 수 있다. 이는 동일한 천공홀에 인입, 토출수가 인접하여 순환되는 지열 열교환기의 특성상 열간섭을 일으켜 발생하는 것으로 추정된다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 그라우팅 재료를 달리한 2개의 실험공에 대하여 지열 열응답을 측정하였다. 실험에서 얻어진 온도변화의 기울기를 이용하여 지열 열전도도를 산정하였다. 이 열전도도를 임의부하를 적용하여 지열 열교환기를 설계하여 비교, 고찰하였다. 또한 냉,난방 운전 중인 지열 열교환기의 외부에 온도감지기를 부착하여 온도변화를 측정하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 그라우팅재로서 심도 -150m~-50m를 공자갈로 시공한 후 상부를 벤토나이트로 그라우팅한 실험공-2는 전체를 벤토나이트 그라우팅한 실험공-1보다 우수한 열응답 특성을 나타내었다.

(2) 실험 초기 12시간의 데이터를 제외한 후 지열 열전도도를 산정할 경우 실험공-1은 열응답 특성이 좋지 못하여 초기에 고온으로 상승하였으나 지열 열전도도는 3.428W/m℃로 높게 나타났다. 그러나 실험공-2의 경우 열응답 특성은 우수하였으나 순환수 온도의 지속적인 상승으로 지열 열전도도는 3.268W/m℃로 낮게 나타났다. 그러나 초기 6시간의 데이터를 제외하고 산정할 경우 실험공-1은 2.949W/m℃, 실험공-2는 3.073W/m℃로 상기의 열전도도의 역전현상은 다소 방지할 수 있었다.

(3) 현장에서 측정된 데이터를 기준으로 산정한 지열 열전도도인 3.428W/m℃와 2.949W/m℃를 상용 프로그램에 입력값으로 대입하여 지열 열교환기를 계산한 결과 열교환기의 길이 차이는 6,609m와 6,833m로 3.4% 이내의 차이만을 보여 열교환기 길이 산정의 큰 변수는 아니었다.

(4) 운전중인 지열히트펌프 냉난방 시스템의 150m 심도인 지열 열교환기는 히트펌프 인입측을 기준으로 -90~-60m에서 최적의 온도로 열교환된 후 상부로 갈수록 온도가 난방 시에는 저하되었으며 냉방 시에는 상승 하였다.

## 참고문헌

1. Korea Ministry of Knowledge & Economy., Notification 2008-3, The standard of support·installation·management for New·Renewable Energy.
2. Korea Ministry of Commerce, Industry and Energy, KEMCO, 2005, The technical standard of installation and support for New·Renewable Energy.
3. Sohn, B. H. and Lim, H. J. and Jung, G. H., 2007, Evaluation of borehole thermal resistance from thermal response test, Proceedings of the SAREK 07' Summer Annual Conference
4. Sohn, B. H. and Shin, H. J. and Park, S. K., 2005, Evaluation of effective thermal conductivity and thermal resistance in ground heat exchanger boreholes, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 8, pp. 695-703
5. ASHRAE, Methods for Determining Soil and Rock Formation Thermal Properties from Field Tests, Report of ASHRAE. , Reserch - ASHRAE 1118-TRP
6. Gaia Geothermal Co., Ltd, 2008, Ground Loop Design Version 5.1. America