

## 그라우트 재료에 따른 지중 열교환기의 열전도도에 관한 실험적 연구

임 효 재<sup>†</sup>, 공 형 진<sup>\*</sup>, 송 윤 석<sup>\*</sup>, 박 성 구<sup>\*\*</sup>  
호서대학교 기계공학과, <sup>\*</sup>호서대학교 대학원 기계공학과, <sup>\*\*</sup>(주)지오테크

### Thermal Conductivity Measurement of Grouting Materials for Geothermal Heat Exchanger

Hyo Jae Lim<sup>†</sup>, Hyoung Jin Kong<sup>\*</sup>, Yoon Seok Song<sup>\*</sup>, Seong Koo Park<sup>\*\*</sup>

*Department of Mechanical Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea*

*\*Graduate School, Department of Mechanical Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea*

*\*\*Geotech Inc., Seongnam 463-420, Korea*

*(Received September 13, 2004; revision received March 4, 2005)*

**ABSTRACT:** An experimental study was conducted on the thermal conductivity of various grouting materials for geothermal heat exchanger which is used as a heat sink or source in the heat pump system. The grouting of the vertical heat exchanger is important for environmental and heat transfer reasons and is generally accomplished by the placement of a low permeability material into the annular space between the borehole wall and the pipes suspended in the borehole. In this study, a lab scale test apparatus was made and measured the thermal conductivity of four grouting materials. As a result, the temperature rising tendency was similar among them, but the increasing rate was different. Thus the thermal conductivity showed a maximum difference of 27% among grouting materials.

**Key words:** Ground source heat pump(지열 히트 펌프), Geothermal heat exchanger(지중 열교환기), Grouting material(그라우팅 재료), Thermal conductivity(열전도도)

#### 기 호 설 명

A : 상수  
C : 비열 [W/kg °C]  
G : 기울기  
k : 열전도도 [W/m °C]  
L : 보어홀 길이 [m]

Q : 열전달량 [W]  
q : 단위길이당 열전달량 [W/m]  
R : 열저항 [°C/W]  
r : 반경방향거리 [m]  
S : 형상계수  
T : 온도 [°C]  
t : 시간 [sec]

† Corresponding author

Tel.: +82-41-540-5802; fax: +82-41-540-5808

E-mail address: hjlim@office.hoseo.ac.kr

그리스 문자

$\alpha$  : 열확산계수,  $k/\rho c$  [m<sup>2</sup>/s]

$\beta$  : 적분 변수  
 $\rho$  : 밀도 [ $\text{kg/m}^3$ ]

지중 열교환기의 그라우트 재료에 대한 열전도도를 실험하였다.

**하첨자**

$b$  : 보어홀  
 $g$  : 그라우트  
 $o$  : 초기상태  
 $p$  : 파이프

**2. 지중 열교환기 설계이론**

**1. 서론**

지열 히트 펌프(Ground Source Heat Pump, GSHP)는 지중의 토양이나 암반을 히트 펌프의 히트 소스 또는 히트 싱크로 이용하는 것이다. 이러한 지열 이용 히트 펌프는 외기온도에 상관없이 일정한 냉난방 용량을 유지할 수 있으며 어느 곳에서나 개발이 가능하여 대체에너지원으로서 많은 관심을 받고 있다.

그러나 이 시스템이 아직 보편화되지 않은 이유는 지중 열교환기 설치에 과다한 초기비용이 투자되기 때문이다. 그래서 초기투자비용을 감소시키기 위한 방안으로 최적의 지중 열교환기의 설계가 요구된다.

지열 히트 펌프에 적용되는 지중 열교환기는 여러 방식으로 시공되며 이중 수직형이 가장 일반적이다. 수직형 열교환기는 지중의 온도와 물성변화가 지상에 비해 작으므로 안정적인 열교환을 할 수 있도록 지하 100~200m 정도로 수직으로 천공된 보어홀에 고밀도 폴리에틸렌 파이프를 제작된 U-튜브를 매설하는 방식이다. 그리고 매설된 파이프 안으로 물 또는 물+부동액의 유체가 이동함으로써 지중과 서로 열교환을 하고 히트 펌프 내로 이동하여 냉난방에 이용된다.

지열 시스템의 단점인 초기투자비용을 줄이기 위하여 그라우트 재료의 중요성은 매우 크다. 벤토나이트 계열 국산 DY-100과 외산인 Enviroplug는 가격비가 1:5 정도 차이를 보이고 있다. 그러므로 국내에서 생산되는 그라우트 재료의 열적 물성치를 정확히 파악하여 수입 그라우트 재료를 대체한다면 지열 기술의 국산화는 물론 초기투자비 절감에도 많은 도움이 될 것이다.

본 논문에서는 많은 설치사례를 가지고 있으며, 비교적 적은 설치공간을 필요로 하는 수직형

지중 열교환기의 설치에 관한 해석이론으로는 라인 소스 모델(line source model)과 실린더 소스 모델(cylindrical source model)이 있다.<sup>(1,2)</sup>

라인 소스 모델과 실린더 소스 모델은 열원의 형상에 따라 다르다. 라인 소스 모델은 부피가 없는 라인을 열원으로 가정하는 반면, 실린더 소스 모델은 보어홀 내부의 그라우트 재료, 파이프, 그리고 파이프 내부의 유체를 하나의 실린더로 가정하며, 두 모델 모두 열원의 직각방향 즉 반경 방향으로만 열교환이 이루어진다고 가정한다.

2가지 모델은 열교환기의 성능, 여러 개의 보어홀 사이의 상호작용, U-tube의 열교환량을 파악하는 데 많은 도움이 된다. 본 논문에서는 라인 소스 모델을 이용하여 그라우트 재료의 열전도도를 해석하였다.

**2.1 라인 소스 모델**

라인 소스 모델은 Kelvin의 라인 소스 이론에서 발전되었으며 무한 영역의 열원에서 특정 지점의 온도를 계산하는 기법을 제안한 것이다.

라인 소스 모델은 무한히 긴 열원으로 순환 파이프를 포함한 보어홀과 토양의 접촉면에서 열의 유속이 일정하고 반경방향으로 열전달이 이루어지며 열원이 항상 일정한 온도를 유지한다고 가정한다. 그리고 토양의 물성치는 항상 일정하고 무한하며 지하수의 이동과 보어홀 끝단에서의 영향은 고려치 않는다. Ingersoll<sup>(1)</sup>에 의해 정립된 일반적인 라인 소스 방정식은 다음과 같다.

$$\Delta T(r, t) = \frac{q}{2\pi k} \int_{\frac{r}{2l}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta \quad (1)$$

위 식에서  $\Delta T(r, t)$ 는 중심으로부터의 거리가  $r$ , 경과시간이  $t$ 일 때 초기온도  $T_0$ 와의 온도차이다.  $q$ 는 보어홀의 단위길이당 열전달량(specific heat transfer rate)이며,  $k$ 는 지중 구성물의 열전도계수이다. 그리고  $a$ 는  $k/\rho C$ 로 정의되는 지중 구성

물의 열확산율이다.

식(1)은 실험시간이 충분히 긴 경우에 적합하기 때문에 현장에서 직접적인 열전도율 실험을 실행할 경우 해석이 부정확하다.

따라서 본 실험의 경우 짧은 시간 동안에 실험을 통한 적정 데이터를 수집하는 데 그 목적이 있어 위식을 적절히 변형하여 사용하였다.

보어홀 내부의 온도가 주위의 간섭 없이 일정하게 유지되며, 보어홀 내부의 U-튜브로부터 일정기간 동안 일정한 열의 주입이 이루어지고, 일정한 열저항률을 가정하면 라인 소스 방정식을 다음과 같이 간소화시킬 수 있다.<sup>(3)</sup>

$$\Delta T = A + \left( \frac{q}{4\pi k} \right) \times \ln(t) \quad (2)$$

식(2)에서  $\Delta T$ 는 보어홀 입출구에서 순환유체의 온도차를 말하며,  $A$ 는 상수이고,  $q$ 는 단위길이당 열전달량을, 그리고  $t$ 는 시간이다. 식(2)를 열전도도  $k$ 에 대하여 풀면,

$$k = \frac{Q}{(4 \times \pi \times L \times G)} \quad (3)$$

식(3)에서  $Q$ 는 보어홀 전체의 입력 열( $Q = 3.412 VI$ )이며  $L$ 은 보어홀의 길이이고,  $G$ 는 시간-온도 그래프의 기울기값이다.

### 2.2 열저항 특성

본 연구에서 사용한 실험장치에서 케이싱 내부의 복잡한 열저항 특성은 형상계수를 사용하여 설명할 수 있다.<sup>(4)</sup> 그리고 열저항 특성을 설명할 때는 단순히 작업유체가 흐르는 파이프가 아닌 보어홀의 형상계수로 정의한다.

$$q = S_b k_g (T_p - T_b) \quad (4)$$

위 식에서  $q$ 는 보어홀의 단위길이당 열전달량,  $S_b$ 는 보어홀의 형상계수,  $T_p$ 는 파이프 표면의 온도,  $T_b$ 는 보어홀 벽에서의 온도이며,  $k_g$ 는 그라우트 재료의 열전도도를 나타낸다.

보어홀 안에 그라우트 재료가 있다면 그라우트

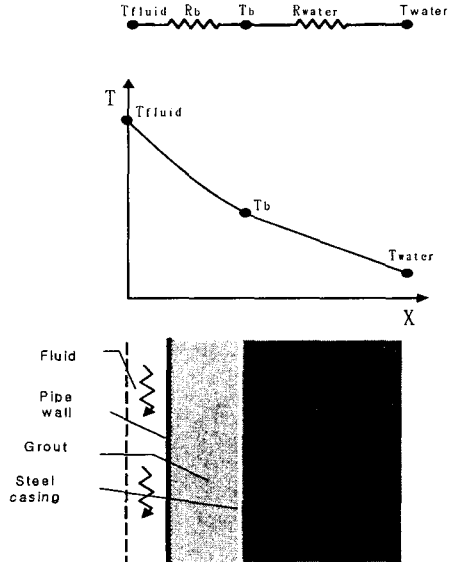


Fig. 1 Casing thermal resistance.

재료의 열저항은 파이프의 열저항에 더해져서 보어홀의 열저항이 증가하는 것으로 가정된다. 즉, 보어홀에서의 열저항은 파이프와 그라우트 열저항의 합으로 나타난다.

$$R_b = \frac{R_p}{2} + R_g \quad (5)$$

식(5)에서 보어홀에서의 열저항  $R_b$ 는 파이프의 저항  $R_p$ 와 그라우트 재료의 저항인  $R_g$ 의 합으로 정의된다.<sup>(4)</sup>

Fig.1은 파이프 내의 유체에서 지중으로의 총합 열전달의 열저항 특성을 나타내는 그림이다.

### 2.3 그라우트 재료

고밀도 폴리에틸렌 파이프(HDPE pipe)를 보어홀에 삽입한 후, 보어홀과 파이프 사이의 빈 공간을 그라우트 재료를 이용하여 채워야 한다. 이때 사용되어지는 재료로는 보통 시멘트류와 벤토나이트류 2가지 종류가 있다.

시멘트류의 그라우트는 물과 반응하여 수화열이 발생되며 이로 인해 지중 토양이나 암반의 형질을 변경시킬 수 있고, 또한 수축이 발생하여 튜브와 밀착이 되지 않을 수 있다. 그러나 보어

홀 내부에 염분이 검출되는 경우와 수분 함유량이 부족한 경우, 그리고 지하수의 유동이 심할 경우는 시멘트류 그라우트를 사용하여야 한다.

벤토나이트류 그라우트 재료의 장점은 공정시간이 짧고, 낮은 밀도를 가지며, 적당한 투과성 등의 장점을 보이거나 오염된 물에서는 재료의 특성변화가 크고, 혼합이나 이송이 어려우며, 각 제품들의 요구사항이 크게 다르다는 단점을 가지고 있다.

그라우팅의 기능은 고밀도 폴리에틸렌 파이프와 토양이나 암반 사이의 열전달을 촉진하고 시추공 주변의 수맥에서 지하수의 흐름을 방지하며, 열교환기를 따라 지표 오염물질이 지하로 침투되는 것을 방지하고 지하수가 지표로 누수됨을 방지한다.

그라우트 재료로서 갖추어야 할 조건으로는 높은 열전도율과 낮은 점도이다.<sup>(5)</sup> 그리고 그라우트가 시추공과 튜브 주위를 완벽히 채워 U-튜브 표면에서 떨어지지 말아야 한다. 또한 균일한 성능을 보여야 하며, 가격이 저렴하고 사용이 편리하여야 한다. 마지막으로 사용이 안전하고 환경 친화적이어야 한다.

### 3. 실험방법 및 순서

지열 히트 펌프의 성능을 결정짓는 중요한 요소로 지중 열교환기의 열교환 효율을 들 수 있다. 열교환 효율은 작동유체, 파이프 재질, 그라우트 재료, 암석의 종류, 함수율 등에 따라 결정되며 본 연구에서는 위의 여러 요인 중 그라우트의 재료에 따른 열전도도를 고찰하여 염가의 그라우트 재료를 얻음과 동시에 국산재료와 외산재료의 열물성 차이를 파악하고자 한다.

본 실험에서는 Fig.2와 같이 직경 160 mm인 스틸 케이싱에 그라우트 재료를 채운 후 4종류의 열전도도를 측정하였다.

Table 1은 각각의 케이싱에 채워진 4종류의 그라우트 재료들의 성분 및 혼합비율을 나타낸 것이다.

본 실험에서는 지중의 조건과 동일한 조건을 재현하기 위해 항온조 내의 온도를 전기 히터 및 열을 이용하여 조절하였고, 항온조 내 온도의 균일성을 위해 순환 펌프를 이용하였다. 실험실 온도는 전기 냉/난방기를 이용하여 10.5℃로 유지

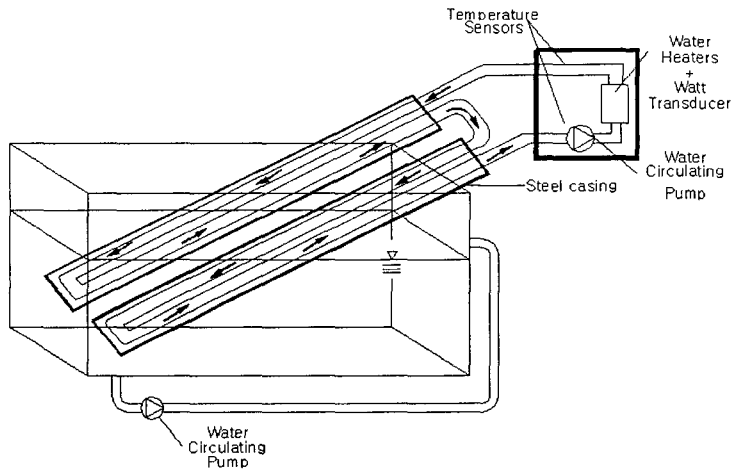


Fig. 2 Schematic diagram of typical apparatus for grout thermal conductivity testing.

Table 1 Composition of the four grouting materials

Sample No.	Grout material (kg)	Water (L)	Ez-mud (mL)	Silica sand (kg)
SN-1	DY-100 (2)	10	0	0
SN-2	Enviro-plug (1.916)	10	25	25
SN-3	DY-100 (2)	10	25	25
SN-4	Enviro-plug (1.916)	10	25	0

하였다.

구체적인 실험순서는 다음과 같다.

우선 내경 25 mm의 고밀도 폴리에틸렌 파이프를 U-bend로 제작하여 직경 160 mm인 케이싱에 삽입한다. 각각의 케이싱 내에서 파이프가 중심에 위치하도록 잡아 준다. Table 1에 언급한 각각의 그라우팅 재료를 정확히 무게를 측정 한 후 충분히 혼합하여 적절한 점도를 유지한 후 케이싱에 채운다. 정확한 데이터 획득을 위하여 파이프와 그라우트 재료, 케이싱과 그라우트 재료 간의 틈새를 충분히 채운다. 그라우트 재료의 외부 대기조건에 의한 영향을 줄이기 위하여 케이싱 입구에 단열처리 및 밀봉처리를 한다. 각각의 케이싱을 수조에 넣어 물을 채운 후 각 케이싱에서 나오는 파이프를 압력손실이 없게 용착하여 연결하고 대기온도에 의해 영향을 받는 파이프 부분을 보온재로 단열처리한다. 열전도 테스트기에 파이프를 연결하고 파이프 내에 물을 채워 공기를 완전히 제거한다.

설치 완료된 상태에서 수조에 물을 채운 후 실험을 실행한다.

4. 실험 결과 분석

수조에 물을 채우고 그라우트 재료가 충전된 스틸 케이싱을 설치한 후 실험을 수행하였다. 작동유체의 순환을 위해 펌프, 히터, 온도계 등을 하나의 kit로 구성하였고, 데이터 취득을 위하여 data logger(MDL, 4채널)를 사용하여 30초당 1 set의 데이터를 취득하였다.

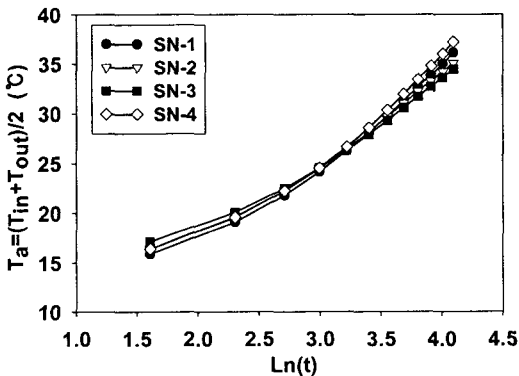


Fig. 3 Temperature variation with time.

Table 2 Constants of time-temperature relation

Sample No.	$T = a \cdot \ln(t) + b$		Thermal conductivity
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>k</i> (W/m°C)
SN-1	17.84	23.02	1.83
SN-2	16.37	27.80	2.02
SN-3	15.32	30.99	2.47
SN-4	18.18	22.91	1.80

Table 1에서 제시한 4종류의 그라우트 재료 및 첨가제에 대해 각각 실험을 수행하였고, 실험 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서 시편번호는 Table 1의 번호와 같은 순서이며, 가로축은 시간을 로그좌표로 나타낸 것이고 세로축은 열교환기 입구와 출구에서의 작동유체 온도의 평균이다. 그림에서 보듯이 4개의 시료 모두 시간에 따른 온도 증가는 비슷한 경향을 보이고 있다. 실험 시작시간 20분 ( $\ln(20) \approx 3$ ) 후부터 각각의 시료에 따라 열전달 차이를 보이고 있으며 시간이 경과할수록 그 차이가 점점 증가함을 알 수 있다. 실험 결과를 간단히 정리하면 Table 2와 같다.

Fig. 4는 위의 시간-온도 변화 실험 결과를 식 (3)에 대입하여 각 시료에 대한 열전도도를 계산한 것이다. 계산 결과에서 알 수 있듯이 4번 시료가 가장 낮은 열전도도를 보이며, 3번 시료의 열전도도는 4번 시료보다 27% 정도 증가함을 알 수 있다. 이는 3번 재료로 지중 열교환기 시공시에는 4번 재료보다 건물 냉난방에 필요한 지중 열교환기의 전체 길이를 줄일 수 있다는 것을 뜻

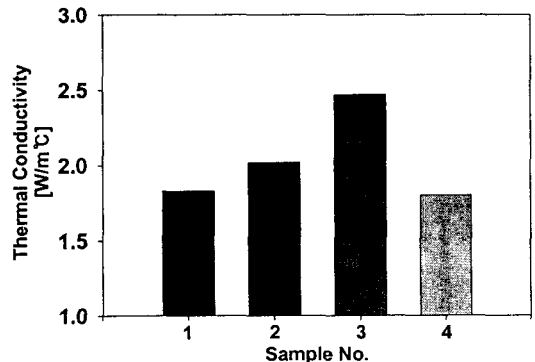


Fig. 4 Thermal conductivity of grouting materials.

한다. 또한 3번 시료와 1번 시료에서 보면 그라우트 재료와 첨가제인 실리카 샌드의 유무에 따라 최대 25%까지 열전도도 차이가 있음을 알 수 있다.

## 5. 결 론

지열 히트 펌프 기술은 현재 연구되는 신·재생 에너지 시스템 중 실용성 높은 기술 중의 하나이다.

지중의 특성은 지역에 따라 그리고 땅속 깊이에 따라 물리적 및 열적 성질의 차이가 매우 크며, 이러한 이유로 지중에서의 열전도도는 지중 열교환기 설치에 매우 큰 변수 중의 하나이다. 특히 수직형 지중 열교환기를 통하여 냉/난방 시설을 설치할 때 지중과 열전달이 효과적으로 되는 그라우트 재료의 사용이 매우 중요하다.

지열 시스템의 단점인 초기투자비용을 줄이기 위하여 그라우트 재료의 중요성은 매우 크다. 그러므로 각각의 그라우트 재료의 열적 물성치를 파악하는 것이 중요하다.

그라우트 재료에 따른 열전도도 실험 결과 시간에 따른 온도 증가의 경향은 서로 비슷하지만 증가율은 실험 시작 후 20분 이후부터 서로 다른 결과를 보인다. 열전도도는 그라우트 재료에 따라 27% 차이를 보이며, 실리카 샌드의 유무에 따라 25% 정도 차이를 보인다. 따라서 그라우트 재료의 선택이 지중 열교환기의 열전달에 매우 큰 영향을 미치고 있으며 시스템 설계시 이를 정확히 고려해야 함을 알 수 있다.

## 후 기

본 연구는 2004년도 에너지관리공단의 지열 냉난방 시스템 기술 기준 구축 사업의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Yavuzturk, C., 1999, Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump systems, Ph.D. thesis, Oklahoma State University, Stillwater, OK, U.S.A.
2. Austin, W.A. III, 1998, Development of an in-situ system for measuring ground thermal properties, MS thesis, Oklahoma State University, Stillwater, OK, U.S.A.
3. Yavuzturk, C. and Spitler, J.D., 1999, A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers, ASHRAE Transactions, Vol.105, Part 2, pp. 540-550.
4. Hiller, C., 2000, Grouting for vertical geothermal heat pump systems, 1st ed., IGSH-PA, Oklahoma State University, pp.25-43.
5. Kavanaugh, S.P. and Rafferty, K., 1997, Ground source heat pumps—Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings, Proceedings of the ASHRAE, Atlanta Georgia, pp.22-34.