# 지중열교환기 설치 조건이 지중 유효 열전도도에 미치는 영향

최 재 호, 임 효 재<sup>\*</sup>, 공 형 진<sup>\*</sup>, 손 병 후<sup>\*\*</sup> 호서대학교 기계공학과, <sup>\*</sup>지열인력양성센터, <sup>\*\*</sup>한국건설기술연구원 화재및설비연구센터

# Effect of Some Parameters on Ground Effective Thermal Conductivity

Jae-Ho Choi, Hyo-Jae Lim<sup>†</sup>, Hyoung Jin Kong<sup>\*</sup>, Byonghu Sohn<sup>\*\*</sup>

**ABSTRACT:** A ground-loop heat exchanger in a ground source heat pump system is an important unit that determines the thermal performance of a system and its initial cost. The Size and performance of this heat exchanger is highly dependent on ground thermal properties. A proper design requires certain site-specific parameters, most importantly the ground effective thermal conductivity, the borehole thermal resistance and the undisturbed ground temperature. This study was performed to investigate the effect of some parameters such as borehole lengths, various grouting materials and U-tube configurations on ground effective thermal conductivity. In this study, thermal response tests were conducted using a testing device with 9-different ground-loop heat exchangers. From the experimental results, the length of ground-loop heat exchanger affects to the effective thermal conductivity. Among the various grouting materials, the bentonite-based grout with silica sand shows the largest thermal conductivity value.

Key words: Ground-loop heat exchanger(지중열교환기), Ground effective thermal Conductivity (지중 유효 열전도도), Thermal response test(열응답 시험)

▪ 기 호 설 명 ━

△ T(r,t) : 시간에 따른 온도 변화 [℃]
α : 열확산율 [m<sup>2</sup>/s]
Q : 보어홀에 투입한 열량 [W]
k : 열전도도 [W/mK]
L<sub>b</sub> : 보어홀의 길이 [m]
m : 대수변환한 온도-시간 그래프의 기울기
R<sub>b</sub> : 총합 열저항 [℃/W]
γ : 오일러 상수

Corresponding author
 Tel.: +82-42-540-5802; fax: +82-42-540-5808
 *E-mail address*: hjlim@hoseo.edu

#### 1. 서 론

지열원 열펌프 시스템(ground source heat pump system)은 지열 에너지를 활용하여 건물의 냉/난 방과 급탕을 동시에 구현한다. 대표적인 환경 보 호 및 신·재생에너지 활용 기술로써 최근에 많 은 주목을 받고 있다. 이 시스템은 연중 일정한 지열에너지를 열펌프의 열원(heat source)과 히트 싱크(heat source)로 활용하기 때문에, 에너지 이 용 효율이 높고 친환경적인 것이 특징이다.

지열원 열펌프 시스템의 핵심 요소인 지중열교 환기의 성능을 향상시키고 신뢰성을 확보하기 위 해 저가·고효율 그라우팅 재료 개발 및 각종 열 물성 테이터베이스 구축과 관련된 연구는 매우 중요한 연구라 사료된다. 지중열교환기의 열전달 해석을 위하여 지중 지반에서 장기간에 걸친 암 석과 물의 화학적 상호반응에 의한 여러 가지 설 계변수를 고려하여 그라우팅 재료의 변형에 대해 다각도로 검토하여 지열루프간의 간섭 등을 고려 한 열전달 모델 등을 정립하여야 한다.<sup>(1-3)</sup> 특히 수학적인 모델링과 다양한 실험을 통한 형상, 조 건 최적화 및 실험실 수준의 실험과 현장 실험이 이루어져야 할 것이며, 시간의 흐름에 따라 형성 되는 여러 가지 문제점들에 대한 연구가 수반되 어야 할 것이다.

이에 본 연구에서는 그라우팅 재료, 지중열교 환기의 길이 및 스페이서 간격에 따른 지중열교 환기의 열전도도의 변화에 대하여 알아보고자 한 다.

# 2. 지중 유효 열전도도 측정

#### 2.1 현장 열응답 시험 장비

Fig. 1은 지중 유효 열전도도 측정 시스템의 개략도를 도시한 것이다. 실제 시공되는 지중열 교환기와 동일한 사양으로 시험용 지중열교환기 를 시공한 후, Fig. 2의 지중 열전도도 측정 유닛 을 연결한다. 지중 열전도도 측정 유닛은 열원(전 기히터), 순환펌프, 온도와 소비 전력 측정 장치, 데이터로거 등으로 구성된다. 열응답 시험의 원 리는 열교환기 파이프 내부로 히터에 의해 가열 된 유체를 유입시켜 지중 열교환을 통해 환수되



Fig. 1 Schematic of an in-situ thermal response test apparatus.



Fig. 2 In-situ ground effective thermal conductivity test unit.

는 유체의 온도차와 유량, 에너지 투입량을 측정 하여 산정하는 것이다.

본 연구에서는 Fig. 2의 지중 열전도도 측정 유닛을 자체 제작하였으며, 유닛은 작동부(열량투 입, 유체순환)와 제어부(온도, 전압, 전류 등 기 록)로 구분된다. 수조는 보충수의 보급이 용이하 도록 4리터의 체적으로 제작되었다. 단계별 투입 열량 조절이 가능하도록 4개의 3 kW히터를 장착 하였으며, 관로 손실과 각종 밸브의 부차적인 손 실을 고려하여 최고 양정 11 m, 최고 유량 140 liter/min의 성능을 가진 펌프를 장착하였다. 히터에 공급되는 전력을 측정하기 위해 전력량계(power meter)를 장착하였으며, 지중열교환기 입·출구 온 도를 측정하기 위해 K-type 열전대를 배관 상에 설치하였다. 시험에서 온도, 유량, 전력량 등의 데이터를 1분 간격으로 측정하여 데이터 획득시 스템에 저장한 후 실험결과 분석에 사용한다.

#### 2.2 현장 열응답 시험 방법

시험용 지중열교환기는 폴리에틸렌(PE) 또는 고 밀도 폴리에틸렌(HDPE) 파이프를 열융착법(thermal fusion method)으로 U자 관 형상으로 성형 한 후, 시험용 보어홀 삽입하고, 그라우팅 재료를 보어홀 내에 주입하여 완성한다. 그림 2에서와 같이 지중 열전도도 측정 유닛의 입·출구 배관 과 지중열교환기 파이프의 입·출구 배관을 연결 하고, 파이프 내에 순환유체를 주입한다. 펌프를 가동하여 파이프 내의 유체를 순환시켜 이물질과

순번		항목	기준		
측정 시간	1	열전도도 측정 개시	그라우팅 완료 후 72시간 이후		
	2	제외시간	시험 시작 후 12시간 데이터 제외		
	3	유효 데이터의 연속 취득 시간	48시간 이상 연속 취득		
	4	데이터 취득 간격	10분 이하		
측정 조건	5	측정공 투입 전력량	2관식 : 50~80 W/m 3관식 : 60~95 W/m 4관식 : 65~105 W/m		
	6	지중열교환기 입/출구 온도차 (이 온도 범위에서 유량 조절)	3.5∼7℃		
측정 오차	7	측정온도의 오차	±0.3℃ 이하 (평균온도에 대한 표준편차)		
	8	입력전력의 오차	±1.5% 이하 (평균전력에 대한 표준편차)		
재 측정	9	재측정개시	초기 지중 온도의 0.3℃ 이내까지 회복 후 재측정		

Table 1 Measurement standard for in-situ thermal response test.

공기를 완전히 제거한다. 일정 시간 동안 지속적 으로 유체를 순환시켜 지중 온도가 정상 상태 (steady-state)에 도달하면, 열을 공급하면서 1분 간격으로 온도와 유량, 입력 열량 등을 측정한다. Table 1 은 열응답 시험 수행 시 준수사항을 정 리한 것이다.

# 3. 지중 유효 열전도도 산정

지중 열전도도를 산정하는 방법에는 원통열원 모델(cylinder source model)과 선형열원 모델 (line-source model)이 있다. 이 중에서 선형열원 모델이 원통열원모델보다 상대적으로 적용하기 쉽기 때문에, 현장에서 측정한 데이터를 이용하여 지중 열전도도를 산정할 때 주로 적용된다. 선형열원 모델은 Kelvin의 무한 선형열원 이론(infinite linesource theory)에 기초를 두고 있으며, 다음과 같 다.<sup>(4,5)</sup>

$$\Delta T(r,t) - T_i = \frac{Q}{4\pi kL} \int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du + \frac{QR_b}{L} \quad (1)$$

식(1)에서  $R_b$ 는 순환유체, 파이프, 그라우팅 재 료 등의 열저항이 모두 포함된 총합 열저항(overall thermal resistance)이다. 여기서 지수적분함수를 다음과 같이 근사식으로 표현할 수 있다.

$$\int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \approx -\gamma - \ln x_0 + Ax_0 - Bx_0^2 \qquad (2)$$
$$+ Cx_0^3 - Dx_0^4 + Ex_0^5$$

식(2)에서 A, B, C, D, E는 각각 0.99999193, 0.24991055, 0.05519968, 0.00976004, 0.00107857이 며, γ는 Euler 상수로서 0.5772다. 식(1)과 식(2) 에서 적분변수 x<sub>0</sub>(r<sup>2</sup>/4αt)가 매우 작기 때문에 식 (2)를 식(3)과 같이 더 단순화할 수 있다. 다시 식(3)을 식(1)에 대입하여 정리하면 식(4)의 단순 선형열원 모델을 얻을 수 있다.

$$\int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \approx \ln \frac{1}{x_0} - \gamma \quad \text{for } \frac{\alpha t}{r^2} \ge 5$$
(3)

$$\Delta T(r,t) - T_i \approx (4)$$

$$\frac{Q}{4\pi kL} ln \left(\frac{4\alpha t}{\gamma_1 r^2}\right) + \frac{QR_b}{L}, \ \gamma_1 = 1.78$$

여기서 시간의 자연로그 값(lnt)에 대하여 온도 변화를 도시할 경우, 식(4)는 직선 형태를 보인다. 따라서 식(4)의 기울기, 평균 열 입력량, 보어홀



Fig. 3 Layout of ground-loop heat exchanger boreholes tested.

길이 등을 다음 식(5)에 대입하면 지중 유효 열 전도도를 계산할 수 있다.

$$k = \frac{Q}{4\pi m L_b} \tag{5}$$

지중열교환기의 길이, 그라우팅 재료, 스페이서

4. 결과 및 고찰

의 설치 유무 및 간격에 따른 지중 유효 열전도 도 변화를 고찰하기 위해 시험용 지중열교환기를 시공한 후, 열응답 시험을 수행하였다. Fig. 3은 시험용 지중열교환기의 위치를 나타낸 것이며, Table 2는 시험 조건과 결과를 정리한 것이다.

#### 4.1 지중열교환기 길이의 영향

지중열교환기 길이에 따라 1번, 2번 및 5번 지

Test	Length	Grouting	Power	Flow	$\Delta T$	Slope m	k
Borehole	(m)	Materials Input(kW) Rate(LPM) (EW)		(EWT-LWT)	Slope, m	(W/mK)	
#1	70	Bentonite 25 kg/Water 100 L	5.82	17.72	4.43	2.05	3.22
#2	60	Bentonite 25 kg/Water 100 L	2.90	9.95	3.90	1.32	2.92
#3	150	Bentonite 25 kg/Water 150 L	8.81	28.76	3.90	2.21	2.11
#4	150	Bentonite 25 kg/Water 100 L/ Silica sand 30 kg, Spacer(4 m)	9.78	26.53	3.92	1.76	2.95
#5	40	Bentonite 25 kg/Water 100 L	2.93	9.27	4.38	1.72	3.39
#6	150	Bentonite 25 kg/Water 100 L/ Silica sand 30 kg Spacer(1 m)	8.47	26.53	3.88	1.53	2.94
#7	150	Silica sand 100%	8.80	31.00	3.60	1.67	2.79
#8	150	Coarse sand(10 mm) 100%	8.64	26.04	4.43	1.70	2.69
#9	150	Bentonite 25 kg/Water 100 L /Silica sand 30 kg	8.80	26.03	4.40	1.81	2.58

Table 2 Test conditions and results.

중열교환기에 대하여 실험을 수행하였다. 그라우 팅은 벤토나이트 25 kg과 물 100 L의 비율로 동 일하게 적용하였다. 지중열교환기 1번은 70 m, 지중열교환기 2번은 60 m, 지중열교환기 5번은 40 m의 길이를 가지며 3.22, 2.92, 3.39 W/mK의 유효 열전도도 값을 보였다. 기울기를 구할 때, 초기 13시간의 데이터를 제외한 후 산출하였다.

지중열교환기 1번의 현장 시험 결과를 Fig. 4 에, 순환유체의 평균온도(*T<sub>avg</sub>*) 대 ln*t*를 Fig. 5에 나타냈다. 나머지 지중열교환기도 동일한 양상을 보였다. 지중열교환기의 길이가 낮아지면 기후 및 외부적인 요인의 영향이 커진다. 본 실험에서 지중열교환기를 설치 시 약 50 m 가량이 토양층 을 이루었으며, 지중열교환기 설치장소 옆에 호



Fig. 4 Temperature variations with elapsed test time.



수가 있어 토양층으로 물이 침투한 것으로 판단 된다. 이로 인해 지중 유효 열전도도 값이 커진 것으로 보인다. 아울러 외부 요인이 크게 작용하 기 때문에 정확한 지중 열전도도의 산정이 곤란 하였다.

#### 4.2 그라우팅 재료의 영향

그라우팅 재료가 지중 유효 열전도도에 미치는 영향을 규명하기 위해 3번, 7번, 8번 및 9번 지중 열교환기를 대상으로 열응답 시험을 수행하였다. 각각의 지중 열교환기에 주입한 그라우팅 재료는 Table 2에 주어져 있으며, 기타 나머지 조건은 동일하게 주었다. 각각의 지중 유효 열전도도는 2.11, 2.79, 2.69, 2.58 W/mK으로 산정되었다. 3번 지중열교환기가 가장 작은 값을 보였으며, 9번 지중열교환기가 다음으로 작은 값을 보였다. 다 음으로 8번 지중열교환기, 7번 지중열교환기 순 이다.

지중열교환기 설치 시 그라우팅 재료의 시료를 채취하여 재료 자체의 열전도도를 측정하였으며, 결과는 Table 3에 주어져 있다. 그라우팅 재료의 열전도도를 측정한 결과 3번 지중열교환기 그라 우트 재료보다 9번 지중열교환기 그라우트 재료 의 열전도도 값이 컸다. 이러한 결과로 미루어 보아 그라우트 재료의 열전도도 상승은 지중열교 환기의 열전도도를 높이며, 벤토나이트와 물로만 그라우팅을 수행하는 것보다 실리카샌드를 추가 함으로써 지중 유효 열전도도가 상승함을 알 수 있다. 8번 지중열교환기와 7번 지중열교환기의 그라우트 재료로 사용된 콩자갈과 실리카샌드는 공극이 상대적으로 크며, 공극이 공기로 채워져

Table	3	Thermal	conductivity	of	grouting
		materials			

Test	Grouting	k (W/mK)	
Borehole	Materials		
#0	Coarse sand	0.38 for dry	
#0	(10 mm)	13.20 for saturated	
#7	Cilian and	0.29 for dry	
#1	Shica sand	17.90 for saturated	
	Bentonite 25 kg/		
#9	Silica sand 30 kg/	1.61	
	Water 100 L		
#2	Bentonite 25 kg/	1.10	
#3	Water 150 L	1.10	

있을 때(건조시료)와 공극이 물로 채워져 있을 때(포화시료)의 열전도도의 차이 또한 크다. 현재 8번과 7번 지중열교환기의 지중열전도도가 상대 적으로 높으며, 이는 지하수의 영향으로 공극이 물로 채워져 있기 때문으로 해석된다. 또한 이는 지하수의 영향에 따라 지중열전도도의 변화가 심 하다는 것을 의미한다. 그리고 콩자갈과 실리카 샌드는 공극이 크기 때문에 지상에서의 오염물질 이 지하수로 바로 유입될 우려가 있을 뿐만 아니 라 지하수의 유속에 의하여 그라우트 재료의 손 실우려가 있으며, 그라우트 재료의 손실로 인한 보어홀의 붕괴우려가 있다. 그러므로 콩자갈과 실리카샌드와 같은 재료는 그라우트 재료가 아닌 첨가제로의 사용이 적합하다고 생각된다.

#### 4.3 지중열교환기 파이프 스페이서의 영향

스페이서 설치에 따른 지중 유효 열전도도의 변화를 알아보기 위해 4번, 6번, 9번 지중열교환 기를 대상으로 실험을 수행하였다. 스페이서는 유입수 배관과 유출수 배관이 서로 접촉하는 것 을 막아 열효율을 높이기 위하여 장착한다. 플라 스틱 재질의 클립을 이용하여 U-tube의 수직방 향으로 장착된다. 그라우팅 재료는 동일하게 적 용하였다. 스페이서는 4번 지중열교환기에 수직 간격 4 m, 6번 지중열교환에 수직간격 1 m로 설 치하였으며, 9번 지중열교환기는 스페이서를 설 치하지 않았다. 각각의 지중열전도도는 2.95, 2.94, 2.58 W/mK 이다. 스페이서를 설치하지 않 은 9번 지중열교환기가 가장 낮은 지중열전도도 를 보이는 것으로 보아 스페이서의 설치는 지중 열전도도의 증가에 도움이 되는 것으로 보이며, 4 m 이상의 간격은 많은 효과를 얻지 못하였다.

# 5. 결 론

본 연구에서는 지중열교환기의 길이, 그라우팅 재료, 스페이서 설치 유무 및 간격 등이 지중 유 효 열전도도 변화에 미치는 영향을 열응답 시험 을 통해 고찰하였다. 이를 위해 각각의 시험 조 건에 맞는 시험용 지중열교환기를 시공하였으며, 자체 제작한 열응답 시험 장치를 이용하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 지중열교환기의 길이가 짧을수록 외부요인

의 영향이 커 정확한 지중 유효 열전도도 산정이 곤란하였다.

(2) 그라우팅 재료 자체의 열전도도가 클수록지중 유효 열전도도 값도 크게 나타났다.

(3) 지중열교환기 파이프 사이에 스페이서를 장착할 경우, 그렇지 않은 경우보다 지중 유효 열전도도 값이 크게 나타났다. 하지만, 스페이서 의 수직 설치 간격에 대한 영향은 미미하였다.

# 후 기

본 연구는 에너지관리공단 신·재생에너지센터 의 2006년 신·재생에너지기술개발사업(2006-N-GE02-P-02)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립 니다.

# 참고 문 헌

- Sohn, B., 2007, Evaluation of ground effective thermal conductivity and borehole effective thermal resistance from simple line-source method, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 19, No. 7, pp. 512–520.
- Lee, S. K., Woo, J. S., Ro, J. D. and Kim, D. K., 2006, A study on the estimation of soil formation thermal conductivities and borehole resistances with one-dimensional numerical model and in-situ field tests, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18, No. 10, pp. 783-790.
- IGSHPA, 2000, Grouting for Vertical Geothermal Heat Pump Systems: Engineering Design and Field Procedures Manual, International Ground Source Heat Pump Association, Stillwater, Oklahoma.
- Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Oxford University Press.
- Ingersoll, L. R. and Plass, H. J., 1948, Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, Heating, Piping&Air Conditioning, July, pp. 119–122.