

지중열교환기 설치 조건이 지중 유효 열전도도와 보어홀 열저항에 미치는 영향

임 효 재[†], 공 형 진^{*}, 강 성 재^{*}, 최 재 호^{**}

호서대학교 기계공학과, ^{*}지열인력양성센터, ^{**}코텍엔지니어링

The Effects of the Installation Conditions of Ground Loop Heat Exchanger to the Thermal Conductivity and Borehole Resistance

Hyo Jae Lim[†], Hyoung Jin Kong^{*}, Sung Jae Kang^{*}, Jae Ho Choi^{**}

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

^{}Geothermal Energy Education Center, Hoseo University, Asan, 336-795, Korea*

*^{**}R&D Center, Kotec Engineering Co. Ltd, Anyang, 431-767, Korea*

(Received May 31, 2010; revision received October 12, 2010)

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. 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 and borehole thermal resistance. In this study, thermal response tests were conducted using a testing device to 9 different ground loop heat exchangers. From the experimental results, the length of ground loop heat exchanger affects to the effective thermal conductivity. The results of this experiment shows that higher thermal conductivity of grouting materials leads to the increase effective thermal conductivity from 22 to 32%. Also, mounting spacers have increased by 14%.

Key words: Ground loop heat exchanger(지중열교환기), Ground effective thermal conductivity(지중 유효 열전도도), Thermal response test(열응답 시험), Thermal resistance(열 저항)

기 호 설 명

$D_{p,i}$: 파이프 내경 [m]
 $D_{p,o}$: 파이프 외경 [m]
 h : 대류열전달계수 [$W/m^2\cdot C$]
 k : 열전도도 [W/mK]
 L : 보어홀의 길이 [m]

Q : 보어홀에 투입한 열량 [W]
 R : 총합 열저항 [mK/W]
 S_b : 보어홀 형상계수
 m : 대수변환한 온도-시간 그래프의 기울기
 T : 온도 [C]
 T_i : 초기 지중 온도 [C]
 $\Delta T(r, t)$: 시간에 따른 온도 변화 [C]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-540-5802; fax: +82-42-540-5808

E-mail address: hjlim@hoseo.edu

그리스 문자

α : 열확산율 [m^2/s]

γ : 오일러 상수

하첨자

b : 보어홀
 f : 지중 열교환기 순환 유체
 g : 그라우팅 재료
 p : 파이프
 s : 지중 토양 또는 암석

1. 서 론

지열원 열펌프 시스템(ground source heat pump system)은 지열 에너지를 활용하여 건물의 냉/난방과 급탕을 동시에 구현한다. 대표적인 환경 보호 및 신·재생에너지 활용 기술로써 최근에 많은 주목을 받고 있다. 이 시스템은 연중 일정한 지열에너지를 열펌프의 열원(heat source)과 히트싱크(heat sink)로 활용하기 때문에, 에너지 이용 효율이 높고 친환경적인 것이 특징이다.

지열원 열펌프 시스템의 핵심 요소인 지중열교환기의 성능을 향상시키고 신뢰성을 확보하기 위해 저가·고효율 그라우팅 재료 개발 및 각종 열물성 데이터베이스 구축과 관련된 연구는 매우 중요한 연구라 사료된다. 지중열교환기의 열전달 해석을 위하여 지중변화에 따른 설계변수를 고려하여 그라우팅 재료의 변형에 대해 다각도로 검토하여 지열루프간의 간섭 등을 고려한 열전달 모델 등이 정립되었다.⁽¹⁻³⁾ 특히 다양한 실험을 통한 형상, 조건 최적화 및 실험실 수준의 실험과 현장 실험이 이루어져야 할 것이며, 시간의 흐름에 따라 형성되는 지중 온도변화 및 그라우팅 재료의 변형에 대한 연구가 수반되어야 할 것이다.

이에 본 연구에서는 그라우팅 재료, 지중열교환기의 길이와 스페이스 간격 그리고 그라우팅재료 열저항에 따른 지중 유효 열전도도의 변화에 대하여 실험적인 고찰을 수행하였다.

2. 지중 유효 열전도도 측정

2.1 현장 열응답 시험 장비

Fig. 1은 지중 유효 열전도도 측정 시스템의 개략도를 도시한 것이다. 지중 유효 열전도도 측정은 실험

제 시공되는 지중열교환기와 동일한 조건으로 시험용 지중열교환기를 시공한 후, Fig. 2의 지중 열전도도 측정 유닛을 연결한다. 지중 열전도도 측정 유닛은 열원(전기히터), 순환펌프, 온도와 소비 전력 측정 장치, 데이터로거 등으로 구성된다. 열응답 시험의 원리는 열교환기 파이프 내부로 히터에 의해 가열된 유체를 유입시켜 지중 열교환을 통해 환수되는 유체의 온도차와 유량, 에너지 투입량을 측정하여 산정하는 것이다.

본 연구에서는 Fig. 2의 지중 열전도도 측정 유닛을 자체 제작하였으며, 유닛은 작동부(열량투입, 유체순환)와 제어부(온도, 전압, 전류 등 기록)로 구분된다. 수조는 보충수의 보급이 용이하도록 4리터의 체적으로 제작되었다. 단계별 투입열량 조절이 가능하도록 4개의 3 kW히터를 장착하였으며, 관로 손실과 각종 밸브의 부차적인 손실을 고려하여 최고

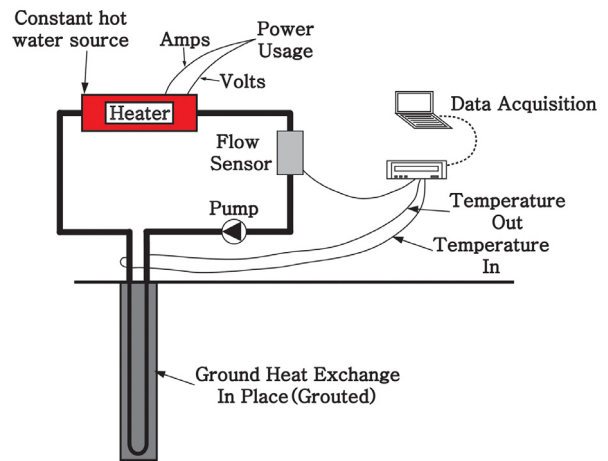


Fig. 1 Schematic of an in-situ thermal response test apparatus.



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

양정 11 m, 최고 유량 140 ℓ/min의 성능을 가진 펌프를 장착하였다. 히터에 공급되는 전력을 측정하기 위해 전력량계(power meter)를 장착하였으며, 지중 열교환기 입·출구 온도를 측정하기 위해 K-type 열전대를 배관 상에 설치하였다. 시험에서 온도, 유량, 전력량 등의 데이터를 1분 간격으로 측정하여 데이터 획득시스템에 저장한 후 실험결과 분석에 사용한다. 본 지중 열전도도 측정 유닛은 매년 KORAS 인증기관의 검·교정을 거쳐 95%의 신뢰수준을 보였다.

2.2 현장 열응답 시험 방법

시험용 지중열교환기는 고밀도 폴리에틸렌(HDPE) 파이프를 열융착법(thermal fusion method)으로 U자 관 형상으로 성형한 후, 시험용 보어홀에 삽입하고, 그라우팅 재료를 보어홀 내에 주입하여 완성한다. 그리고 지중 열전도도 측정 유닛의 입·출구 배관과 지중열교환기 파이프의 입·출구 배관을 연결하고, 파이프 내에 순환유체를 주입한다. 펌프를 가동하여 파이프 내의 유체를 순환시켜 이물질과 공기를 완전히 제거한다. 일정 시간 동안 지속적으로 유체를 순환시켜 지중 온도가 정상 상태(steady state)에 도달하면, 외기와 접촉하는 부분을 보온한 후 열을 공급하면서 1분 간격으로 온도와 유량, 그리고 투입 전력을 측정한다.

세부 사항은 에너지관리공단 신재생에너지 센터 지침서를 참조하였다.

3. 지중 유효 열전도도 산정

3.1 지중 유효 열전도도 산정

지중 열전도도를 산정하는 방법에는 선형열원 모델(line source model)⁽⁴⁾이 원통열원모델(cylinder source model)보다 상대적으로 열전도도 산정에 주로 사용된다. 선형열원모델은 지중에 매설된 파이프와 토양사이의 열전달에 관한 이론해는 Kelvin의 무한 선형열원 이론(infinite line source theory)^(5,6)으로부터 구할 수 있다. 즉, 무한히 길고 열유속이 일정한 선형열원(line source)이 초기온도 T_i 로 균일한 무한 매질(지중 토양)속에 매설되어 있는 경우 토양온도에 관하여 정립 된다. 본 해석 대상과 같이 직선 열원 주위의 열전달 매체가 그라우트와

토양(또는 암석) 등으로 구성된 복합매질인 경우, 이 열원 주위의 열저항을 모두 고려해야 한다. 따라서, 직선 열원으로부터 이 복합매질의 반경 방향으로 열이 전달될 때 과도 열전도 방정식의 해는 다음과 같다.

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

식(1)에서 우변 적분항은 지수적분(exponential integral)이며 $E_i(x)$ 로 표시하고 다음과 같이 무한급수로 나타낼 수 있다.

$$E_i(x) = \int_{x_0}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = \gamma - \ln x_0 + \left(\frac{x_0}{1 \cdot 1!} - \frac{x_0^2}{2 \cdot 2!} + \frac{x_0^3}{3 \cdot 3!} \dots \right) \quad (2)$$

식(2)에서 γ 는 Euler 상수로서 0.5772다. 식(1)과 식(2)에서 적분변수 $x_0(r^2/4\alpha t)$ 값이 매우 작으면 우측 마지막 항을 무시할 수 있으며 식(3)과 같이 단순하게 표현할 수 있다. 다시 식(3)을 식(1)에 대입하여 정리하면 식(4)의 단순 선형열원 모델을 얻을 수 있다.

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

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

열응답시험을 통하여 시간에 따른 보어홀 유체온도를 측정하고 이 결과를 $T_f - \ln t$ 의 좌표위에 나타내어 직선식을 얻고 그 직선의 기울기 m 을 구한 후 식(5)로부터 k 를 결정하게 된다.⁽⁷⁾

$$k = \frac{Q}{4\pi m L_b} \quad (5)$$

3.2 보어홀 유효 열저항 산정

Fig. 3는 지중 열교환기 파이프를 순환하는 유체온

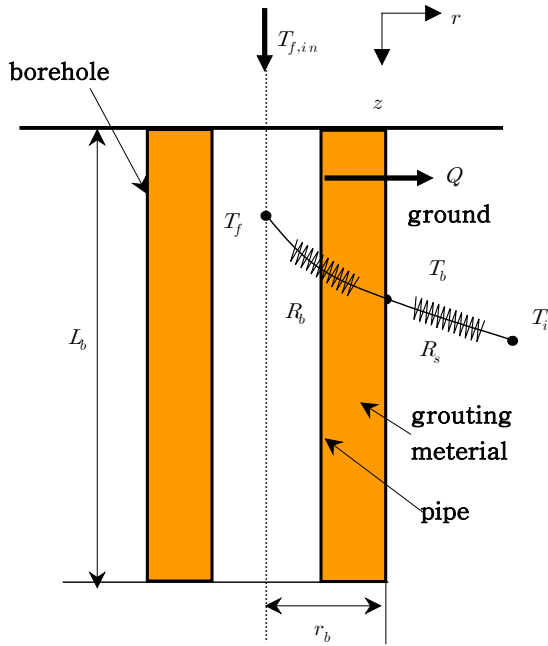


Fig. 3 Schematic representation of a borehole embedded in an infinite medium.

도 T_f 로부터 지중으로 열이 전달될 때, 온도 변화와 열저항에 대한 개념을 간략히 나타낸 것이다.⁽¹⁾ 그림에서 총 열저항은 보어홀 열저항 R_b 과 지중 열저항 R_g 의 합으로 표현되며 이 중에서 보어홀 열저항은 다음과 같다.

$$T_f - T_b = \frac{QR_b}{L_b} \quad (6)$$

식(6)에서 보어홀 벽면의 온도(T_b)를 현장에서 측정하는 것은 매우 힘들다. 따라서 실측한 순환 유체의 온도와 초기 지중 온도를 이용하여 식(6)의 왼쪽 항을 다시 표현하면 다음과 같다.

$$T_f - T_i - (T_f - T_b) + (T_b - T_i) \quad (7)$$

다시, 식(7)의 오른쪽 항에 식(6)과 식(4)를 대입하면 식(8)로 표현할 수 있고, 이를 식(9)와 같이 보어홀 열저항(R_b)으로 정리할 수 있다.

$$T_f - T_i = \frac{QR_b}{L_b} + \frac{Q}{4\pi k_s L_b} \ln\left(\frac{4\alpha_s t}{\gamma_1 r_b^2}\right) \quad (8)$$

$$R_b = \frac{1}{4\pi k_s} \left[\frac{T_f - T_i}{m} - \ln\left(\frac{4\alpha_s t}{\gamma_1 r_b^2}\right) \right] \quad (9)$$

식(9)은 단순 선형열원 모델에 의한 결과와 온도만으로 보어홀 열저항을 산정할 수 있는 식이다.

반면, 지중 열교환기 상용 설계 프로그램^(8,9)은 순환 유체에 의한 열저항, 파이프의 열저항, 그라우팅 재료의 열저항이 모두 포함된 총합 열저항 개념을 적용하여 보어홀 열저항을 계산한다.

$$R_b = R_f + R_p + R_g \quad (10)$$

식(10)에서 유체가 관내를 유동함에 따라 발생하는 열저항은 식(11)으로 계산되며, 파이프의 열저항은 문헌⁽³⁾에 제시된 값이 적용하였다.

$$R_f = \frac{1}{2\pi D_{p,i} h_f} \quad (11)$$

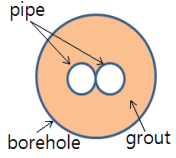

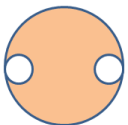
그라우팅 재료의 열저항은 보어홀 형상계수 S_b 와 그라우팅 재료 자체의 열전도도 k_g 를 이용하여 다음과 같이 계산한다.⁽¹⁰⁾

$$R_g = \frac{1}{S_b k_g} \quad (12)$$

$$S_b = \beta_0 \left(\frac{D_b}{D_{p,o}} \right)^{\beta_1} \quad (13)$$

식(13)에서 β_0 와 β_1 은 보어홀 형상에 따름 계수며 Table 1에 값이 주어져 있다.

Table 1 Coefficients for the borehole shape factor correlation⁽¹⁰⁾

U tube Configurations	β_0	β_1
	20.10	-0.9447
	17.44	-0.6052
	21.91	-0.3796

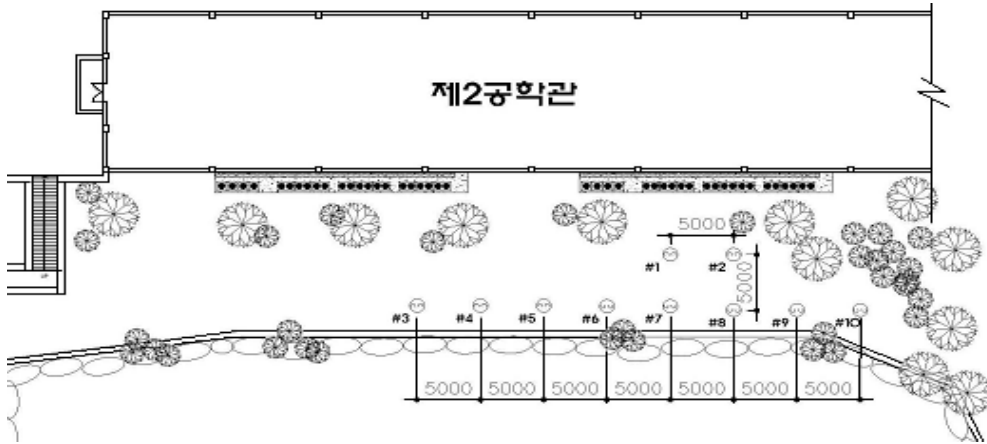


Fig. 4 Layout of ground loop heat exchanger boreholes.

4. 결과 및 고찰

지중열교환기의 길이, 그라우팅 재료, 스페이서의 설치 유무 및 그라우팅 재료 열저항에 따른 지중 유효 열전도도 변화를 고찰하기 위해 시험용 지중열교환기를 시공한 후, 열응답 시험을 수행하였다. Fig. 4는 시험용 지중열교환기의 위치를 나타낸 것이며, Table 2는 시험 조건과 결과를 정리한 것이다.

4.1 지중열교환기 길이의 영향

지중열교환기 길이에 따라 1번, 2번 및 5번 지중열교환기에 대하여 실험을 수행하였다. 그라우팅은 벤토나이트 25 kg과 물 100 l의 비율로 동일하게 적용하였다. 지중열교환기 1번은 70 m, 지중열교환기 2번은 60 m, 지중열교환기 5번은 40 m의 길이를 가지며 각각 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. 5에, 순환유체의 평균온도 T_{avg} 대 $\ln t$ 를 Fig. 6에 나타냈다. 나머지 지중열교환기도 동일한 양상을 보였다. 본 실험에서 지중열교환기를 설치 시 약 50 m 가량이 토양층을 이루었으며, 지중열교환기 설치장소 옆에 호수가 있어 토양층으로 물이 침투한 것으로 판단된다. 이로 인해 지중 유효 열전도도 값이 커진 것으로 보인다.

4.2 그라우팅 재료의 영향

그라우팅 재료가 지중 유효 열전도도에 미치는

영향을 규명하기 위해 3번, 7번, 8번 및 9번 지중열교환기를 대상으로 열응답 시험을 수행하였다.

각각의 지중 열교환기에 주입한 그라우팅 재료는

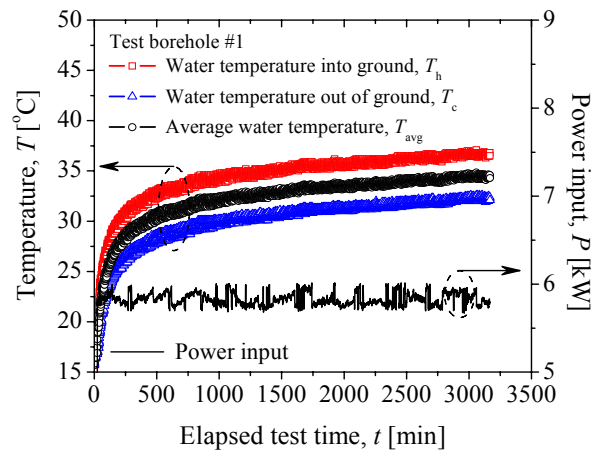


Fig. 5 Temperature variations with elapsed test time.

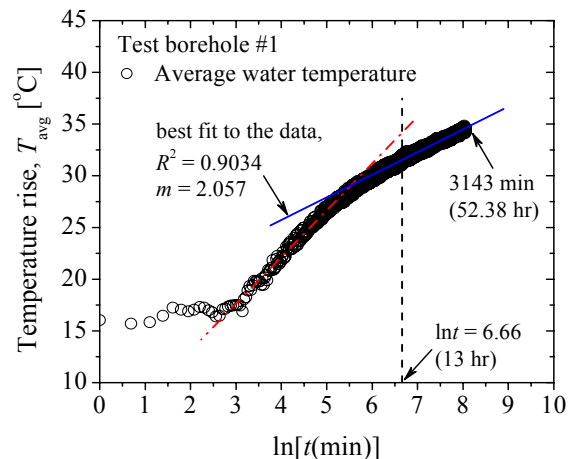


Fig. 6 $\ln(t)$ versus T_{avg} .

Table 2 Test conditions and results

Test Borehole	Length (m)	Grouting Materials	Power Input(kW)	Flow Rate (ℓ/min)	ΔT (EWT-LWT)	Slope, m	k (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 2에 주어졌으며, 기타 나머지 조건은 동일하게 주었다. 각각의 지중 유효 열전도도는 2.11, 2.79, 2.69, 2.58 W/mK으로 측정되었다.

지중열교환기 설치 시 그라우팅 재료의 시료를 채취하여 재료 자체의 열전도도를 측정하였으며, 결과는 Table 3에 주어졌다. 그라우팅 재료의 열전도도를 측정한 결과 3번 지중열교환기 그라우트 재료보다 9번 지중열교환기 그라우트 재료의 열전도도 값이 컸다. 이러한 결과로 미루어 보아 그라우트 재료의 열전도도 상승은 지중열교환기의 열전도도를 높이며, 벤토나이트와 물로만 그라우팅을 수행하는 것보다 실리카샌드를 추가함으로써 지중 유효 열전도도가 상승함을 알 수 있다. 7번 지중열교환기

와 8번 지중열교환기의 그라우트 재료로 사용된 실리카샌드와 콩자갈은 공극이 상대적으로 크며, 공극이 공기로 채워져 있을 때(건조시료)와 공극이 물로 채워져 있을 때(포화시료)의 열전도도의 차이 또한 크다. 현재 7번과 8번 지중 유효 열전도도가 상대적으로 높으며, 이는 지하수의 영향으로 공극이 물로 채워져 있기 때문으로 해석된다. 또한 이는 지하수의 영향에 따라 지중 유효 열전도도의 변화가 심하다는 것을 의미한다. 그리고 콩자갈과 실리카샌드는 공극이 크기 때문에 지상에서의 오염물질이 지하수로 바로 유입될 우려가 있다. 그러므로 콩자갈과 실리카샌드와 같은 재료는 그라우트 재료가 아닌 첨가제로의 사용이 적합하다고 생각된다.

Table 3 Thermal conductivity of several grouting materials

Test Borehole	Grouting Materials	k(W/mK)
#3	bentonite 25 kg/ water 150 ℓ	0.62
#7	silica sand (0.02~2 mm)	0.23 for dry 2.43 for saturated
#8	coarse sand (10 mm)	0.20 for dry 2.28 for saturated
#9	bentonite 25 kg/ silica sand 30 kg/ water 100 ℓ	0.81

4.3 지중열교환기 파이프 스페이서의 영향

스페이서 설치에 따른 지중 유효 열전도도의 변화를 알아보기 위해 6번, 9번 지중열교환기를 대상으로 실험을 수행하였다. 스페이서는 유입수 배관과 유출수 배관이 서로 접촉하는 것을 막아 열효율을 높이기 위하여 장착한다. 플라스틱 재질의 클립을 이용하여 U tube의 수직방향으로 장착된다. 그라우팅 재료는 동일하게 적용하였다. 6번 지중열교환에 수직간격 1 m로 설치하였으며, 9번 지중열교환기는 스페이서를 설치하지 않았다. 각각의 지중 유효 열전도도는 2.94, 2.58 W/mK이다. 스페이서를 설치하지 않은 9번 지중열교환기가 낮은 지중열전도도

를 보이는 것으로 보아 스페이서의 설치는 지중열전도도의 증가에 도움이 되는 것으로 사료됩니다.

4.4 보어홀 열저항에 미치는 영향

그라우팅 재료 열저항에 따른 보어홀 열저항을 알아보기 위해 3번, 7번, 8번 및 9번 지중 열교환기에 대한 열저항을 분석하였다. 보어홀의 길이와 직경을 동일하게 설정함으로써 유체 순환에 의한 열저항과 파이프의 열저항은 동일하다고 가정하고, 그라우팅 재료의 열저항이 보어홀의 열저항에 미치는 영향을 산출하였다. 각각 그라우팅의 열저항은 식(10)을 이용하여 Table 4와 같이 각각 0.201, 0.543(0.051), 0.624(0.055), 0.154 mK/W이고, 보어홀의 열저항은 각각 0.336, 0.678(0.186), 0.759(0.190), 0.289 mK/W이다. 보어홀 열저항은 그라우팅 재료 열저항에 비례함을 알 수 있다.

공극이 공기로 채워진 콩자갈로 그라우팅된 8번 지중 열교환기가 가장 큰 열저항을 나타내고 있다.

두 번째로 실리카샌드로 구성된 7번 지중열교환기의 열저항이 높다. 또한 공극이 물(지하수)로 채워진 경우도 같은 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

3번 지중 열교환기는 벤토나이트 25 kg, 물 150 l가 혼합되어 그라우팅 됐으며 9번 지중 열교환기는 벤토나이트 25 kg, 실리카샌드 30 kg, 물 100 l로 구성되어 있다.

즉, 재료 고유의 열전도가 그라우팅 재료 및 보어홀 열저항에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 지중열교환기의 길이, 그라우팅 재료, 스페이서 설치 유무 및 그라우팅 재료 열저항

이 지중 유효 열전도도 변화에 미치는 영향을 열응답 시험을 통해 고찰하였다. 이를 위해 각각의 시험 조건에 맞는 시험용 지중열교환기를 시공하였으며, 자체 제작한 열응답 시험 장치를 이용하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 지중열교환기의 길이가 길수록 지중 유효 열전도도는 향상 되었다.

(2) 그라우팅 재료의 열전도도가 높을수록 지중 유효 열전도도 값은 22~32% 증가 하였다.

(3) 지중열교환기 파이프 사이에 스페이서를 설치할 경우, 그렇지 않은 경우보다 지중 유효 열전도도 값이 14% 증가 하였다. 그러나 스페이서의 수직 설치 간격에 대한 영향은 미미하였다.

(4) 그라우팅 재료의 열저항이 작을수록 보어홀의 열저항은 작게 나타났다.

(5) 그라우팅 재료의 공극률로 인한 지하수 유무에 따라 열저항값이 4~5배의 차이를 보이고 있으며, 그라우팅 재료의 고흥율이 높을수록 보어홀 열저항은 낮아진다.

후 기

이 논문은 2009년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구이며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. IGSHPA, 2000, Grouting for Vertical Geothermal Heat Pump Systems : Engineering Design and Field Procedures Manual, International

Table 4 Thermal resistances of grouting materials and boreholes

Test Borehole	R_g (mK/W)	R_b (mK/W)
#3	0.201	0.336
#7	0.543 for dry 0.051 for saturated	0.678 0.186
#8	0.624 for dry 0.055 for saturated	0.759 0.190
#9	0.154	0.289

- Ground Source Heat Pump Association, Still water, Oklahoma.
4. Lim, H. J., Kong, H. J., Song, Y. S., and Park, S. K., 2005, Thermal conductivity measurement of grouting materials for geothermal heat exchanger, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No.4, pp. 364-369.
 5. Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C., 1947, Conduction of Heat in Solids, 2nd ed., Oxford University Press.
 6. 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.
 7. Sohn, B. H., 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.
 8. Spitler, J. D., 1999, GLHEPRO 3.0 for Windows Users Guide, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Oklahoma State University, pp. 74-77.
 9. Gaia Geotherminal, 2003, Ground Loop Design Version 2.7 for Windows, Gaia Geothermal.
 10. Remund, C. P., 1999, Borehole thermal resistance : laboratory and field studies, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 439-445.