

지중열교환기 설치 조건이 지중 유효 열전도도에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

공 형 진[†], 임 효 재*, 최 재 호**, 손 병 후***

지열인력양성센터, *호서대학교 기계공학과, **코텍엔지니어링(주) 기술연구소,

***한국건설기술연구원 설비플랜트연구실

An Experimental Study on the Effect of Ground Heat Exchanger to the Overall Thermal Conductivity

Hyoung Jin Kong[†], Hyo Jae Lim*, Jae Ho Choi**, Byonghu Sohn***

Geothermal Education Center, Hoseo University, Asan, 336-795, Korea

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

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

****Engineering Plant Research Center, KICT, Koyang, 445-861, Korea*

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), Borehole effective thermal resistance(보어홀 유효 열저항), Thermal response test(열응답 시험)

기 호 설 명

c_p : 비열 [J/kgK]

k : 열전도도 [W/mK]

L_b : 보어홀의 길이 [m]

m : 대수변환한 온도-시간 그래프의 기울기

Q : 열전달량 또는 열 입력량 [W]

R_b : 총합 열저항 [$^{\circ}$ C/W]

T : 온도 [K]

T_i : 초기 지중 온도 [K]

t : 시간 [s] 또는 [hour]

[†] Corresponding author

Tel.: +82-42-540-5581; fax: +82-42-540-5582

E-mail address: becorn@hoseo.edu

- x_0 : 적분 변수, 식(4)~식(5)
- z : 보어홀 깊이 방향으로 거리 [m]

그리스 문자

- α : 열확산계수(= $k/\rho c_p$) [m^2/s]
- γ : Euler 상수, 0.5772

하첨자

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

1. 서론

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

국내에 설치되는 지열 시스템 중 대부분을 차지하는 수직형 지중 열교환기의 최적 설계를 위해 지중 유효 열전도도(이하 지중 열전도도)를 정확히 산정한 후, 지중 열교환기 설계에 적용해야 한다.

지중 유효 열물성 산정을 위한 방법으로는 시추(천공)과정에서 획득한 시료를 실험실에서 측정하거나, 현장에서 직접 측정하는 방법이 있다. 시료를 실험실에서 측정할 경우, 실제 지중 열교환기가 설치된 상황과 많은 차이가 있기 때문에 이 값을 설계에 적용하는 것은 무리가 있다. 그래서 측정에 상당히 긴 시간이 필요한 단점에도 불구하고 현장에서 직접 측정하는 현장 열응답 시험(in-situ thermal response test)을 수행하고 있다.

이러한 열응답 시험에 대한 개념과 구체적인 방법을 Mogensen⁽¹⁾이 처음 제안한 후, 현재까지 지중 열전도도 산정을 위해 주로 이용하고 있다.

그라우팅 재료나 열응답 시험 시간 등 다양한 인자들이 시험 결과와 지중 유효 열물성에 미치는 영향을 고찰한 연구결과들⁽²⁻⁷⁾이 발표되었다.

하지만 국내 지중 특성이 외국과 다르기 때문에 기존 연구결과를 여과 없이 수용하여 지중 열교환기를 설계하는 것은 다소 무리가 있을 것으로 판단된다.

국내에서도 일부 연구자들이 현장 시험을 통한 지중 유효 열물성 산정결과를 발표하였다. Lim et al.⁽⁸⁾은 그라우팅 재료를 달리하여 모의 지중 열교환기를 실험실 규모로 설치한 후, 유효 열전도도를 측정하였다. Lee et al.⁽⁹⁾은 2관식(single U-tube)과 4관식(double U-tube) 지중 열교환기를 이용하여 지중 열전도도를 측정하였으며, 1차원 수치모델 결과와 비교하였다. Sohn et al.^(10,11)은 국내 세 지역에 설치된 지중 열교환기를 대상으로 열응답 시험을 수행하고 선형열원 모델(line source model)과 수치모델에 의한 계산결과와 비교하였다.

지열원 열펌프 시스템의 핵심 요소인 지중열교환기의 성능을 향상시키고 신뢰성을 확보하기 위해 지중 열교환기의 수학적 모델링과 다양한 실험을 통한 형상, 조건 최적화 및 실험실 수준의 실험과 현장 실험이 이루어져야 할 것이며, 시간의 흐름에 따라 발생하는 여러 가지 문제점들에 대한 연구가 수반되어야 할 것이다.

이에 본 연구에서는 지중열교환기의 길이, 그라우팅 재료 및 스페이서 간격에 따른 지중 열전도도의 변화에 대해 알아보하고자 한다.

2. 지중 유효 열전도도 측정

2.1 현장 열응답 시험 장비

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

본 연구에서는 현장에서 시공되는 지중열교환기와 동일한 사양으로 시험용 지중열교환기를 설치한 후, 자체 제작한 지중 열전도도 측정 유닛을 이용하여 테스트 하였다.

지중 열전도도 측정 유닛은 작동부(열량투입, 유체순환)와 제어부(온도, 전압, 전류 등 데이터 기록)로 구성된다. 그리고 보충수 보급 및 열원공급을 위한 4 ℓ 체적의 수조, 단계별 투입 열량

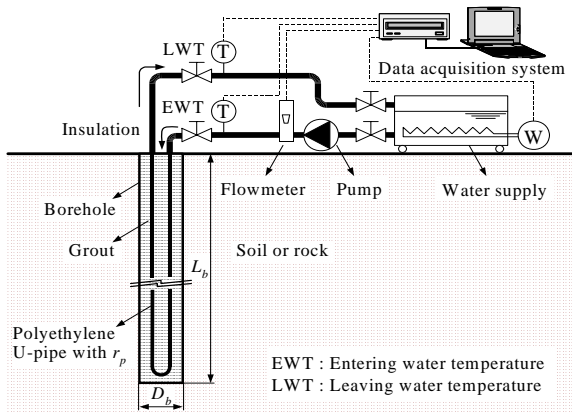


Fig. 1 Schematic of an in-situ thermal response test apparatus.

조절을 위한 3 kW 히터 4개, 배관 및 밸브 등 부차적인 손실을 고려한 양정 11 m, 유량 140 l/m의 펌프를 장착하였다.

열응답 시험의 원리는 열교환기 파이프 내부로 히터를 통해 가열된 유체를 유입시켜 지중과 열교환 후 환수된 유체의 온도차, 유량 및 에너지 투입량을 측정하여 산출한다. 따라서 전력량계를 설치하여 히터에 공급되는 전력을 측정하고, 입·출구 온도 측정을 위한 K-type 열전대를 배관에 부착하여 데이터 획득 시스템에 저장한 후, 분석에 이용하였다.

2.2 현장 열응답 시험 방법

지중 열전도도 측정 유닛의 입·출구 배관과

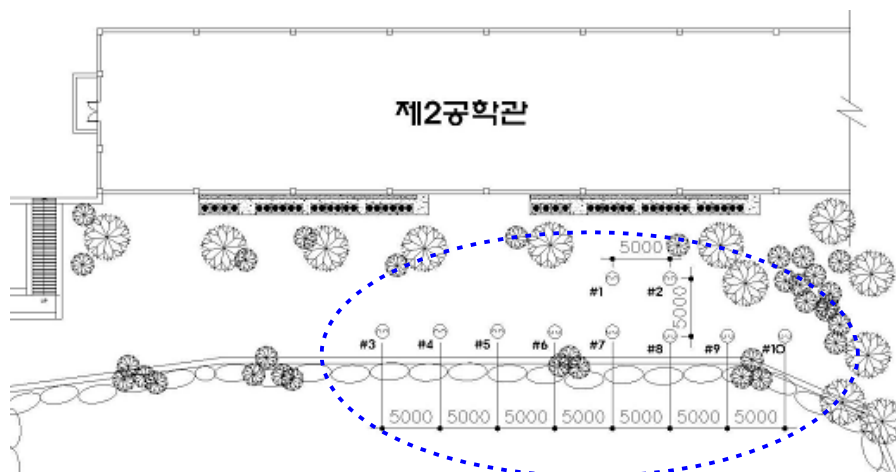


Fig. 2 Layout of ground-loop heat exchanger boreholes tested.

지중열교환기 파이프의 입·출구 배관을 연결하고, 파이프 내에 순환유체를 주입한다. 그리고 펌프를 가동하여 파이프 내의 유체를 순환시켜 배관내 이물질과 공기를 완전히 제거한 후, 일정 시간 동안 지속적으로 유체를 순환시켜 지중 온도가 정상 상태(steady-state)에 도달하면, 일정한 열원을 48시간 연속으로 공급하여 1분 간격으로 온도, 유량 및 입력 열량 등을 측정한다.

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 원통열원모델에 비해 적용이 용이하여 지중 열전도도 산정시 주로 이용된다.

선형열원 모델은 Kelvin의 무한 선형열원 이론(infinite line source theory)에 기초를 두고 있으며, 다음과 같다.^(4,5)

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

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

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

식(2)에서 A, B, C, D, E는 각각 0.99999193, 0.24991055, 0.05519968, 0.00976004, 0.00107857이며, γ 는 Euler 상수로서 0.5772다. 식(1)과 식(2)에서 적분변수 $x_0(r^2/4\alpha t)$ 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 단순선형열원 모델을 얻을 수 있다.

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

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

여기서 시간의 자연로그 값($\ln t$)에 대하여 온도 변화를 도시할 경우, 식(4)는 직선 형태를 보인다. 따라서 기울기, 평균 투입열량, 보어홀 길이 등을 다음 식(5)에 대입하면 지중 유효 열전도도를 계

산할 수 있다.

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

4. 결과 및 고찰

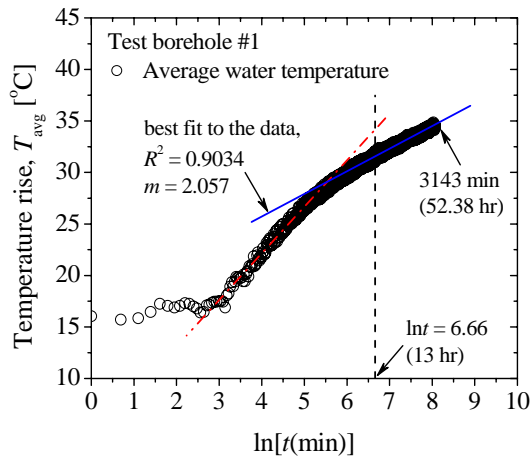
지중열교환기의 길이, 그라우팅 재료, 스페이서의 설치 유무 및 간격에 따른 지중 열전도도 변화를 고찰하기 위해 시험용 지중열교환기를 시공한 후, 열응답 시험을 수행하였다. Fig. 2는 시험용 지중열교환기의 위치를 나타낸 것이며, Table 2는 각 열교환기의 설치조건과 시험결과를 정리한 것이다. 지중 열전도도를 산정하기 위해 초기 13시간의 데이터를 제외하였다.

4.1 지중열교환기 길이의 영향

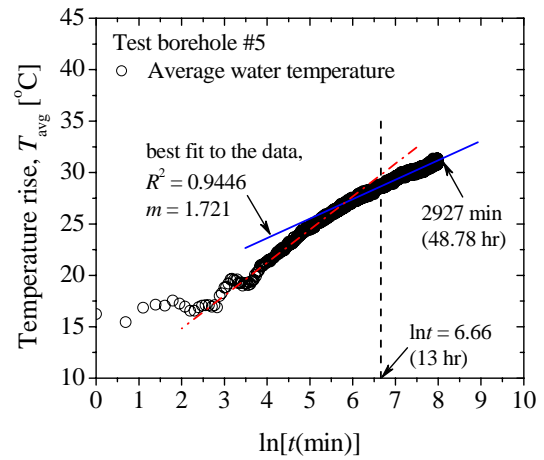
지중열교환기 길이에 따른 영향분석을 위해 1번, 2번 및 5번 지중 열교환기에 대하여 실험을 수행하였다. 그라우팅은 벤토나이트 25 kg과 물 100 ℓ의 비율로 동일하게 적용하였다. 1번 홀은 70 m, 2번 홀은 60 m, 5번 홀은 40 m의 길이로

Table 2 Test conditions and results.

Test Borehole	Length [m]	Grouting Materials	Power Input[kW]	Flow Rate[LPM]	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

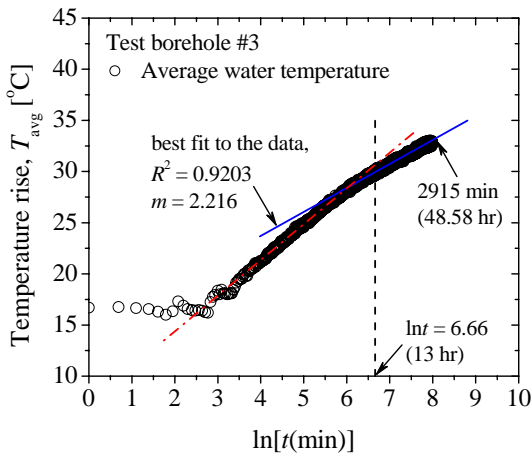


(a) Test borehole #1.

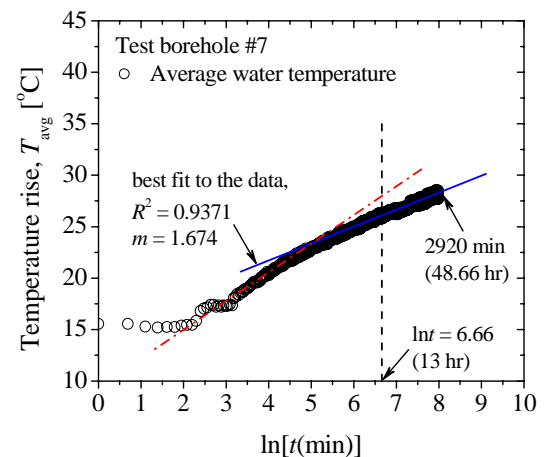


(b) Test borehole #5.

Fig. 3 $\ln(t)$ vs. T_{avg} .

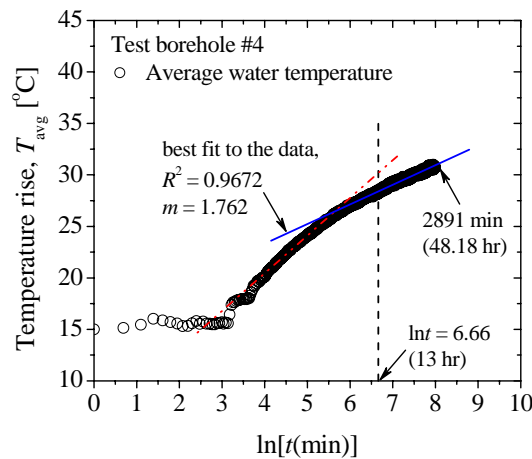


(a) Test borehole #3.

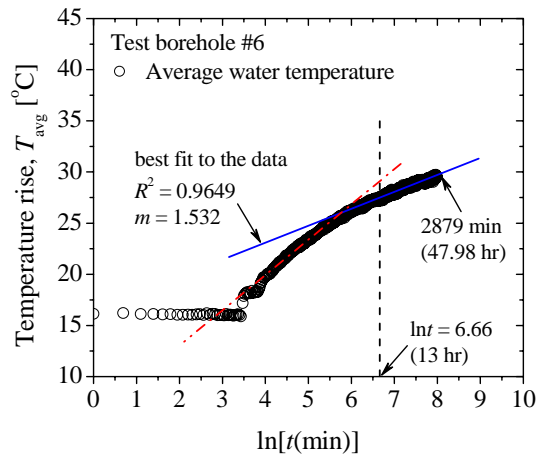


(b) Test borehole #7.

Fig. 4 $\ln(t)$ vs. T_{avg} .



(a) Test borehole #4.



(b) Test borehole #6.

Fig. 5 $\ln(t)$ vs. T_{avg} .

설치 하였으며, 3.22, 2.92, 3.39 W/mK의 유효 열전도도 값을 보였다.

Fig. 3 (a)는 1번 홀 그리고 (b)는 5번 홀의 순환유체 평균온도(T_{avg}) vs. $\ln t$ 그래프를 나타냈다. 2번 홀도 비슷한 양상을 보였다.

지중 열교환기 길이가 작아지면 기후 및 외부요인의 영향이 발생한다. 본 실험을 위해 지중열교환기를 설치한 지역은 지표에서 약 50m까지 퇴적층으로 이루어졌으며, 설치장소 옆에 호수가 있어 토양층으로 물이 침투한 것으로 판단된다. 이러한 복합적인 외부요인의 작용으로 정확한 지중 열전도도 산정이 곤란하였다.

4.2 그라우팅 재료의 영향

그라우팅 재료가 지중 열전도도에 미치는 영향을 분석하기 위해 3번, 7번, 8번 및 9번 지중열교환기를 대상으로 지중 열전도도 테스트를 수행하였다. 각각의 지중 열교환기에 주입한 그라우팅 재료는 Table 2에 주어져 있으며, 기타 나머지 실험 조건은 동일하게 구성하였다.

각 보어홀에 채워진 그라우팅 재료의 구성물 및 열물성은 Table 3에 나타냈으며, 고품률은 3번 홀 14%, 9번 홀 35%, 7번 홀 50%, 8번 홀 50%이다.

Fig. 4의 (a)는 3번 홀, (b)는 7번 홀의 기울기 그래프를 나타낸 것이다.

각 보어홀의 지중 유효 열전도도는 2.11, 2.79, 2.69, 2.58 W/mK으로 산정되었다. 지중 열전도도는 3번 홀이 가장 낮고, 7번 홀이 가장 높은 것을 알 수 있다. 이러한 결과로 미루어 보아 그라

우트 재료의 열전도도 상승은 지중열교환기의 열전도도를 높이며, 벤토나이트와 물로만 그라우팅을 하는 것보다 실리카샌드를 추가함으로써 지중 유효 열전도도가 상승함을 알 수 있다.

7번과 8번 홀 그라우트 재료로 사용된 콩자갈과 실리카샌드는 공극이 크다. 공극이 공기로 채워져 있을 때(건조시료)와 공극이 물로 채워져 있을 때(포화시료)의 열전도도의 차이 또한 크다. 이는 지하수 영향으로 공극이 물로 채워져 있어, 지중 열전도도의 변화가 심하다는 것을 뜻한다. 이에 반하여 3번 홀과 9번 홀은 벤토나이트로 그라우팅되어, 공극을 메움으로서 지하수에 의한 그라우팅 재료 유실과 오염 물질의 지중 유입을 막아 지중 열교환기 성능을 유지할 수 있음을 알 수 있다.

4.3 지중열교환기 파이프 스페이서의 영향

스페이서 설치에 따른 지중 유효 열전도도의 변화를 알아보기 위해 4번, 6번 그리고 9번 지중열교환기를 대상으로 실험을 수행하였다. 스페이서는 플라스틱 재질의 클립으로, 입·출구 배관이 지중에서 서로 접촉하는 것을 방지한다.

4번 홀은 간격 4 m, 6번 홀은 간격 1 m 로 설치하였으며, 9번 홀은 스페이서를 설치하지 않았다. 지중 열전도도 테스트 결과 2.95, 2.94, 2.58 W/mK 임을 알 수 있다. 이를 통하여 4번 홀의 열전도도가 스페이서를 설치하지 않은 9번 홀에 비해 약 13%의 높은 열전도도를 보이고 있다. 그러나 설치 간격 4 m 이하의 간격은 큰 효과를 얻지 못하였다.

5. 결론

본 연구에서는 지중열교환기의 길이, 그라우팅 재료, 스페이서 설치 유무 및 간격이 지중 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 짧을수록 외부요인의 영향이 커 정확한 지중 유효 열전도도 산정이 곤란하였다.

Table 3 Thermal conductivity of grouting materials.

Test Borehole	Grouting Materials	k (W/mK)
#3	Bentonite 25 kg/ Water 150 L	1.16
#7	Silica sand	0.29 for dry 17.90 for saturated
#8	Coarse sand (10 mm)	0.38 for dry 13.20 for saturated
#9	Bentonite 25 kg/ Silica sand 30 kg/ Water 100 L	1.61

(2) 그라우팅 재료의 열전도도가 클수록 지중 유효 열전도도 값도 크게 나타났다.

(3) 고형율이 높을수록 지중 열전도도는 높아진다. 그러나 공극률로 인해 지하수의 영향을 받음으로서 적절한 고형율을 유지하고, 공극을 채우도록 한다.

(4) 지중열교환기 파이프 사이에 스페이서를 설치할 경우, 그렇지 않은 경우보다 지중 유효 열전도도 값이 높게 나타났다. 그러나, 스페이서의 설치 간격에 대한 영향은 미미하였다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 신·재생에너지센터의 2006년 신·재생에너지기술개발사업(2006-N-GE02-P-02)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Mogensen, P., 1983, Fluid to duct wall heat transfer in duct system storages, Proceedings of the International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice. Swedish Council for Building Research, June 6-8.
2. Spilker, E. H., 1998, Ground-coupled heat pump loop design using thermal conductivity testing and the effect of different backfill materials on vertical bore length, ASHRAE Transactions, Vol. 104, pp. 775-779.
3. Zhang, Q. and Murphy, W. E., 2000, Measurement of thermal conductivity for three borehole fill materials used for GSHP, ASHRAE Transactions, Vol. 106, pp. 434-441.
4. Smith, M. D. and Perry, R. L., 1999, Borehole grouting: field studies and thermal performance testing, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 451-457.
5. Shonder, J. A. and Beck, J. V., 2000, Field test of a new method for determining soil formation thermal conductivity and borehole resistance, ASHRAE Transactions, Vol. 106, pp. 843-850.
6. Martin, C. A. and Kavanaugh, S. P., 2002, Ground thermal conductivity testing control site analysis, ASHRAE Transactions, Vol. 108, pp. 945-952.
7. Beier, R. A. and Smith, M. D., 2003, Minimum duration of in-situ tests on vertical boreholes, ASHRAE Transactions, Vol. 109, pp. 475-486.
8. 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.
9. Lee, S.-K., Woo, J.-S., Ro, J.-G. 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.
10. Sohn, B. H., Shin, H.-J. and An, H.-J., 2005, Evaluation of thermal conductivity for grout/soil formation using thermal response test and parameter estimation models, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 173-182.
11. 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.