

지중열전도도 측정과 지중열교환기의 열확산 특성 분석

정영만, 구경민, 황유진, 장세용, 이영호*, 이동혁*, 이재근†
 부산대학교 기계공학부, *LG전자

Measurement of Ground Thermal Conductivity and Characteristics of Thermal Diffusion by the Ground Heat Exchanger

Youngman Jeong, Kyungmin Koo, Yujin Hwang, Seyong Jang, Yeongho Lee*, Donghyuk Lee†, Jaekeun Lee†

Department of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

*LG Electronics, Changwon City, Gyeongnam 641-713, Korea

(Received July 16, 2008; revision received September 30, 2008)

ABSTRACT: This paper presents the measurement of ground thermal conductivity and the characteristics of ground thermal diffusion by a ground heat exchanger(GHE). A borehole is installed to a depth of 175 m with a diameter of 150 mm. To analyze the thermal diffusion property of the GHE, thermocouples are installed under the ground near the GHE. The outdoor temperature, the ground temperature, and the water temperature of the GHE are monitored for evaluating the characteristics of ground thermal diffusion. The ground thermal conductivity is evaluated by the in-situ thermal response tester and the line source model. It is found to be 3.08 W/m°C in this study. The ground temperature is greatly dependent on the outdoor temperature from the ground surface to 2.5 m in depth and is stable below 10m in depth. The surface temperature of the GHE varies as a function of the temperature of circulating water. But the ground temperature at 1.5m far from the GHE is not changed in accordance with the temperature of circulating water.

Key words: Thermal conductivity(열전도도), Thermal diffusion(열확산), Ground heat exchanger(지중열교환기), Borehole(보어홀)

기 호 설 명

C	: 오일러 상수	Q	: 열량 [W]
k	: 열전도도 [W/m°C]	R	: 보어홀 반경 [m]
L	: 보어홀 길이 [m]	r	: 직선열원으로부터 반경 [m]
m_{TR}	: 보어홀 열저항 [m°C/W]	T	: 온도 [°C]
\dot{Q}	: 단위 길이당 열량 [W/m]	t	: 시간 [s]

그리스 문자

† Corresponding author

Tel.: +82-51-510-2455; fax: +82-51-582-6368

E-mail address: jklee@pusan.ac.kr

α : 열확산도 [m²/hr]

β : 적분변수

1. 서 론

최근 기후변화 협약 시행과 고유가 시대를 대비하기 위해 신·재생에너지 이용에 대한 관심이 고조되면서 지열원 히트펌프(ground source heat pump)시스템의 보급이 확대되고 있다. 지열원 히트펌프시스템은 크게 지중 열교환기(ground heat exchanger, GHE)와 히트펌프(heat pump)로 구성된 냉·난방 겸용 시스템이다. 냉방 사이클의 지열원 히트펌프시스템은 실내에서 흡수한 열을 지중 열교환기를 통해 지중으로 방출한다. 반대로 난방 사이클의 경우, 지중 열교환기는 지중에서 열을 흡수하여 실내로 공급한다.⁽¹⁾ 이 시스템의 장점은 공기 열원 히트펌프(air-source heat pump)보다 운전을 위한 에너지 소비량이 적고, 실외에 노출되는 기기가 없다는 것이다. 그리고 히트펌프의 히트싱크(heat sink) 및 열원(heat source)의 역할을 하는 지열의 연중 온도변화는 외기 기온보다 안정적이기 때문에 지열 히트펌프시스템은 높은 효율과 우수한 성능을 갖는다. 반면, 지중열교환기의 매설에 따른 높은 초기 설치비를 단점으로 들 수 있다.⁽²⁻³⁾

지중열교환기는 지중에 설치하여 순환 유체를 파이프 내부로 순환시키는 밀폐형 시스템과 지표수와 지하수를 이용하는 개방형 시스템으로 구분되며, 국내에서는 수직형 열교환기(vertical ground loop heat exchanger)를 이용하는 밀폐형 시스템을 주로 설치하고 있다.⁽⁴⁾ 수직형 열교환기는 수직으로 천공된 보어홀(borehole)에 고밀도 폴리에틸렌 재질의 U자형 파이프를 삽입한 후, 파이프와 벽면 사이의 빈 공간에 그라우팅 재료(grouting materials)를 채워 시공한다.

지열원 히트펌프시스템을 최적 설계하기 위해서는 적용 건물의 냉난방 부하를 정확하게 계산해야 되는 것은 물론, 지중열교환기 매설 지역의 토양의 성질 등 다양한 변수를 고려해야 한다. 그렇게 하지 않을 경우 지중열교환기를 실제 필요한 용량보다 과다하게 설계될 수 있으며, 이는 초기투자비의 증가를 초래할 수 있다.

지중열교환기의 매설 지역의 지중 열물성치 값을 구하기 위해 현장에 시추공을 천공하여 직접 측정하는 방법을 현장 열응답 시험(in-situ thermal response test)이라고 한다.

열응답 시험은 지중 열전도도와 보어홀 열저항

을 결정하기 위해 Mogensen⁽⁵⁾이 제안하였으며, 오늘날 지중열교환기 시스템 설계를 위해 지중 열전도도 산정에 주로 이용하고 있다. 이러한 열응답 시험 방법을 이용하여 현장 시험을 통한 지중 유효 열물성 측정⁽⁶⁻¹⁰⁾ 및 그라우팅 재료나 열응답 시험기간⁽¹¹⁻¹²⁾ 등 다양한 인자들이 지중 열전도도에 미치는 영향을 고찰한 연구결과들이 발표되었다.

그러나 지중열교환기는 지중으로부터 열을 흡수하거나 또는 지중으로 열을 방출하는 과정에서 열확산 특성에 따라 성능에 영향을 받으므로 보어홀간 이격거리도 중요하다. 이와 관련하여 Li et al.⁽¹³⁾은 수치해석을 통해 보어홀 주변의 열확산 영향을 분석하였고, Cui et al.⁽¹⁴⁾은 보어홀간에 일정한 간격으로 일정한기간동안 지중온도를 측정하여 수치해석을 통해 지중의 열특성을 분석하였으며, Lee et al.⁽¹⁵⁾은 보어홀 구성요소의 열전도율과 지중열교환기 길이 변화에 따른 시스템 성능변화를 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다.

이상과 같이 지중의 열물성치 및 열확산 특성을 분석하기 위해 다양한 연구결과들이 제시되고 있지만, 지중열교환기의 보어홀 반경으로 열확산에 대한 연구는 다소 미흡한 수준이다.

따라서 본 연구에서는 실험적 장치를 통해 지중 열물성치, 지중 깊이 및 지중열교환기의 보어홀 반경으로 열확산 특성을 분석하여 지중열교환기 최적설계를 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

지중의 열물성치와 지중 온도 변화 특성을 분석하기 위해 Fig. 1과 같이 전체 시스템의 개략도를 도시하였다. 시스템은 열원장치, 순환장치 및 계측장치로 구성되어 있다. 열원장치는 지중 열교환기에 일정한 열량을 주입하도록 전기히터와 수조(water tank)로 구성되어 있고, 순환장치는 열매체가 지중열교환기와 열원장치를 순환하면서 열을 전달 할 수 있도록 순환펌프를 설치하였다. 계측장치는 열매체의 유량 측정을 위해 유량계, 히터에 공급되는 전력을 측정하기 위해 전력량계(power meter)와 열매체의 순환온도 측정을 위해 지중열교환기 입·출구에 온도센서를 설

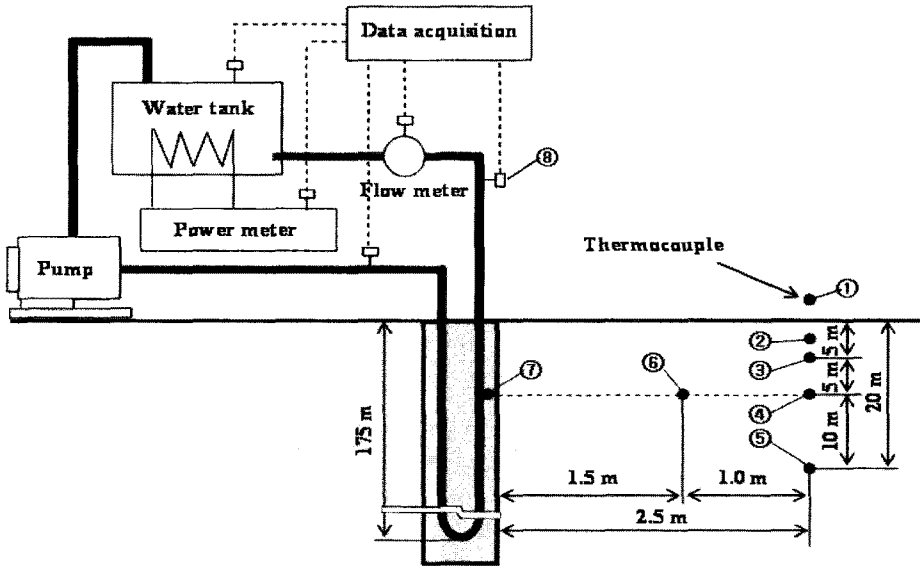


Fig. 1 Schematic diagram of an in-situ thermal response apparatus for measuring the ground thermal conductivity and the location of thermocouples for measuring the ground temperature.

치하였다. 보어홀은 직경이 150 mm, 깊이 175 m로 시공하였으며, 지중열교환기는 고밀도 폴리에틸렌 재질을 사용하였고, Grout 재료는 벤토나이트와 실리카 샌드를 혼합하여 사용하였다.

그리고 지중의 열확산 특성을 분석하기 위해 Fig. 1과 같이 지중 깊이 및 보어홀의 일정 거리에 T형 열전대(T-type thermocouple)를 설치하였다. 온도, 유량, 전력량 등의 데이터를 1분 간격으로 측정 후, 데이터 획득 시스템에 기록하여 성능 분석에 사용하였다.

2.2 지중 열전도도 해석 방법

지중열교환기의 열전도도는 지중열교환기로 열이 주입되거나 추출될 때 지중열교환기의 온도 변화로부터 구해진다.⁽¹⁶⁾ 지중 열전도도를 해석하는 방법에는 원통열원 모델(cylinder source model)과 선형열원 모델(line-source model)이 있다. 본 연구에서는 지중열교환기를 하나의 직선열원(line-source)으로 가정하여 선형열원 모델(line-source model)을 적용하였다. 선형열원 모델은 식(1)로 표현되며, 주입량이 일정한 직선열원으로부터 특성 시간 t 에서 임의의 반경 r 에서의 온도변화를 나타낸다.⁽¹⁷⁾

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

여기서, ΔT 는 온도변화, r 는 직선열원으로부터 임의의 반경, t 는 측정시간, \dot{Q} 는 단위 길이당 열주입량, k 는 열전도도, β 는 적분변수이다. Mogensen⁽⁶⁾은 식(1)에서 적분식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\int_{\frac{r}{2\pi k}}^{\infty} \frac{e^{-\beta^2}}{\beta} d\beta = \ln\left(\frac{4\alpha t}{R^2}\right) - C \quad (2)$$

여기서, α 는 열확산도, C 는 오일러 상수로서 0.5772이다. 이때 지중열교환기의 순환유체와 시추공 벽면 사이의 열저항을 포함하는 식은 다음과 같다.

$$\Delta T(R, t) = \dot{Q} m_{TR} + \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{R^2}\right) - C \right] \quad (3)$$

여기서, R 는 보어홀 반경, m_{TR} 는 순환유체와 보어홀 벽면사이의 열저항이다. 지중열전도도의 평가를 위한 결과식은 아래와 같다.

$$\Delta T(R, t) = \dot{Q}m_{TR} + \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \left[\ln\left(\frac{4\alpha t}{R^2}\right) - C \right] + \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \ln(t) \quad (4)$$

식(4)에서 열주입량이 일정할 경우 우변에서 $\ln(t)$ 을 제외한 나머지 항은 모두 상수이므로 ΔT 와 $\ln(t)$ 사이의 선형관계식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\Delta T = \frac{\dot{Q}}{4\pi k} \ln(t) + b \quad (5)$$

$$\dot{Q} = \frac{Q}{L} \quad (6)$$

여기서, b 는 상수, Q 는 지중열교환기에 주입된 열량, L 은 보어홀 길이, $Slope$ 는 평균 온도의 시간변화에 따른 기울기를 나타낸다. 측정된 지중열교환기의 입·출구 온도변화, 측정시간, 열주입량과 대수시간(logarithmic time)에 대한 평균 온도변화 곡선의 기울기를 이용하여 식(7)로 열전도도를 계산한다.

$$k = \frac{Q}{4\pi L \times Slope} \quad (7)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 지중열전도도 측정

지열원 히터펌프 시스템 성능에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 지중열교환기의 열교환 능력이라 할 수 있다. 지중열교환기가 지중으로부터 열을 흡수하거나 방출하는 과정은 지중열교환기 내를 순환하는 열매체와 지중의 온도차에 기인한다.

열전도도를 측정하기 위해 보어홀 직경 150 mm, 깊이 175 m, single-U type HDPE 파이프 40 mm의 지중열교환기에 전기히터 5.2 kW 열량과 순환수 유량 2.4 m³/h를 사용하였다. Fig. 2는 열전도도 측정 실험을 수행한 지중열교환기의 입·출구 온도 변화와 선형열원 모델(line-source model)을 적용하기 위한 지중열교환기의 입·출구 평균온도 변화를 나타내었다. 히터를 통해 열

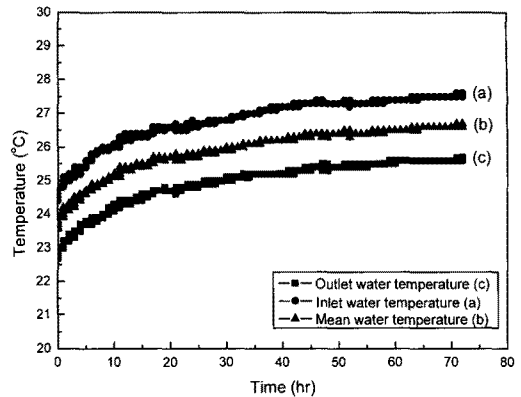


Fig. 2 Temperature distribution of the inlet and the outlet of the ground heat exchanger for measuring the thermal conductivity of ground.

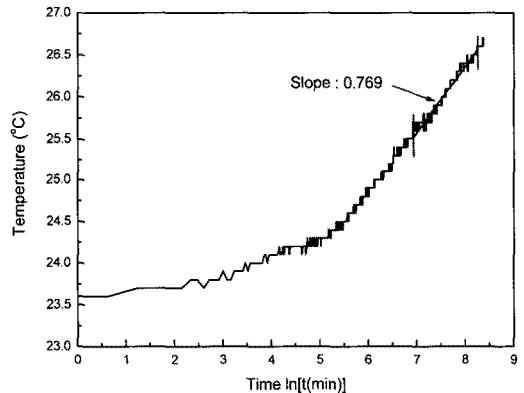


Fig. 3 Logarithmic time plot of the mean fluid temperature for calculating the thermal conductivity of ground.

이 주입되면서 지중열교환기의 입·출구의 온도는 10시간이 경과될 때 까지는 급격히 상승을 하였으며, 점점 완만한 기울기를 유지하였다.

Fig. 3은 지중열교환기 온도변화 곡선에 대하여 대수시간(logarithmic time)에 대한 평균온도 변화 곡선을 나타내었다. 온도변화곡선에서 지중열교환기를 통해 순환유체와 지중에서의 열전달이 안정화되어 기울기가 일정해지는 지점에서 측정값으로 기울기를 구하였다. 식(5)을 통해 기울기를 구하였으며 식(7)을 이용하여 열전도도 값을 계산하였다. 이때 기울기는 0.769이며, 열전도

Table 1 Specification of the in-situ thermal response tester and the ground thermal conductivity in this study

Items	Contents
Borehole depth	175 m
Borehole diameter	150 mm
Material of GHE	HDPE
Pipe size of GHE	40 mm
Circulating fluid	Water
Power injection	5.2 kW
Flow rate	2.4 m ³ /hr
Test duration time	72 hr
Slope	0.769
Thermal conductivity	3.08 W/m°C

도는 3.08 W/m°C로 계산되었다. Table 1은 지중열전도도 측정을 위한 지중열교환기 규격 및 측정 조건 등을 정리하여 나타내었다.

3.2 지중온도 분석

지중열교환기가 지중으로부터 열을 흡수하거나 또는 실내에서 흡수한 열을 지중으로 방출하는 과정에서 지중의 열확산에 따라 영향을 받는다. 이러한 열확산은 다수의 보어홀을 설치하는 경우 보어홀간의 열전달 유무를 판단하기 위한 중요한 인자이다. Fig. 1은 지중열교환기의 열확산 특성

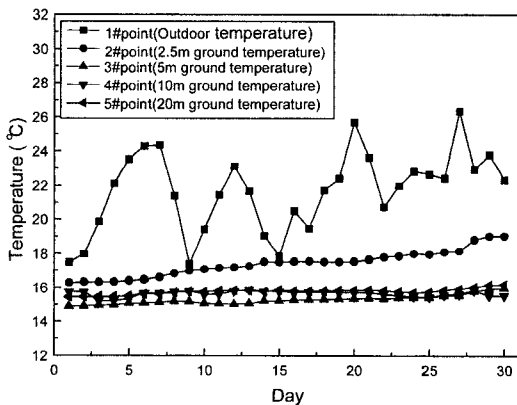


Fig. 4 Daily average outdoor temperature and ground temperature near the ground heat exchanger.

을 분석하기 위해 지중열교환기에서 1.5 m, 2.5 m 떨어진 지점에 깊이별로 열전대를 매설하여 지중온도를 측정하였다. 작동유체는 물을 사용하였으며 히터 등을 이용한 일정한 열원 공급은 없었다. 실험은 5~6월에 실시되었고, 실험기간 동안 순환수의 온도는 평균 19.2 °C이며, 지중 온도는 평균 15.4 °C로서 순환수와 지중온도는 약 3.8 °C의 온도차를 나타내었다.

Fig. 4는 외기 온도에 따른 지중온도 변화를 나타낸다. 지중열교환기에서 2.5 m 떨어진 지점에서 지중의 깊이별로 온도를 측정한 결과 지표면 아래 2.5 m 지점에는 외기 온도에 따라 변화가 크며, 지표면 아래 5 m 지점에는 시험기간 동안 외기온도에 따라 지중 온도가 약 1.1 °C 변화한 것으로 나타났다. 지표면 아래 10 m와 20 m에서는 온도 변화가 없었다. 따라서 지표면 아래 10 m 이하에서의 지중온도는 외기의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 순환수 온도에 따른 지중온도 변화를 관찰하기 위해 외기온도에 영향이 적은 지표면 아래 10 m 지점에서 지중열교환기의 표면 온도와 지중열교환기에서 1.5 m, 2.5 m 떨어진 지점의 지중온도를 측정하였다. 시험기간 동안 외기 온도는 평균 21.7 °C이며, 순환수 온도는 초기 18.4 °C에서 30일 후 약 21.3 °C로 약 2 °C 정도 증가하였으며 순환수의 온도는 외기의 온도에 따라 변화하였다.

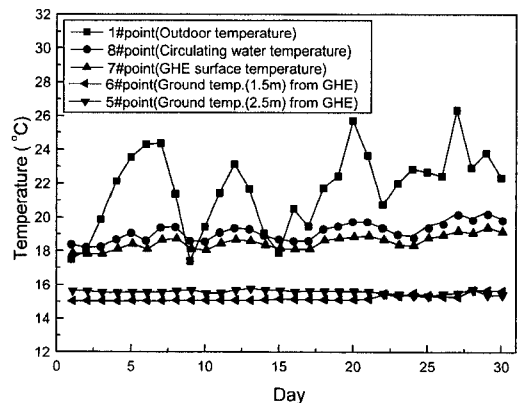


Fig. 5 Daily average temperature of outdoor, circulating water, surface of the ground heat exchanger, and ground temperature far from the ground heat exchanger.

지중열교환기의 표면온도는 순환수 온도에 따라 변화하였고, 지중열교환기에서 1.5m와 2.5m 떨어진 지점에서의 온도는 변화하지 않았다. 따라서 순환수의 온도가 지중열교환기에서 1.5m 떨어진 지점까지 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 실험적 장치를 통해 지중 열물 성치, 지중 깊이 및 지중열교환기의 보어홀 반경으로 열확산 특성을 분석하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

(1) 지중 열전도도를 측정하기 위해 열교환기의 입·출구 온도 변화를 측정하였고, 선형열원 모델(line-source model)을 적용하여 열전도도 값을 계산하였다. 이때 지중 열전도도는 3.08 W/m°C로 계산되었다.

(2) 외기 온도에 의한 지중 온도변화를 분석하기 위해 지중열교환기에서 2.5m 떨어진 지점에서 지중의 깊이별로 측정된 결과 지표면 아래 2.5m 지점에는 외기 온도에 따라 변화하지만 지표면 아래 10m이하 지점에는 온도 변화가 안정적인 것으로 나타났다.

(3) 순환수 온도에 따른 지중 열확산 특성을 분석하기 위해 외기온도에 영향이 적은 지표면 아래 10m 지점에서 지중열교환기의 표면 온도와 지중열교환기에서 1.5m, 2.5m 떨어진 지점의 지중온도를 측정할 결과 지중열교환기의 표면온도는 순환수 온도에 따라 변화하였고, 지중열교환기에서 1.5m와 2.5m 떨어진 지점에서의 온도는 동일하였다. 따라서 순환수의 온도가 지중열교환기에서 1.5m 떨어진 지점까지 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단, 부산대 시설과 및 (주)LG전자의 지원 하에 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Sohn, B. H., Cho, C. S., Shin, H. J. and An,

- H. J., 2005, Cooling and heating performance evaluation of a GSHP system, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 71-81.
2. Hepbasli, A., 2002, Performance evaluation of a vertical ground-source heat pump system in Izmir, Turkey, Int. J. Energy Res., Vol. 26, pp. 1121-1139.
3. Lee, J. K., Jeong, Y. M., Koo, K. M., Hwang, Y. J., Jang, S. Y., Kim, I. K., Jin, S. W., and Lee, D. H., 2007, Cooling Performance of a Ground Source Heat Pump System, Proceedings of the SAREK 2007 Winter Annual Conference, pp. 441-446.
4. Jeong K. H., Sohn B. and Lim H. J., 2007, Regional distribution of ground thermal conductivity for vertical closed type ground heat exchanger design, Proceedings of the SAREK 2007 Winter Annual Conference, pp. 423-428.
5. Mogensen, P., 1983, Fluid to duct wall heat transfer in duct system storages, proceeding of the international Conference on Sub-surface Heat Storage in Theory and Practice. Sewdish Council for Building Research, June 6-8, pp. 652-657.
6. Pahud, D. and Matthey, B., 2001, Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ, Energy and Buildings, Vol. 33, pp. 503-507.
7. Roth, P., Georgiev, A., Busso, A. and Bar-raza, E., 2004, First in situ determination of ground and borehole thermal properties in Latin America, Renewable Energy, Vol. 29, pp. 1947-1963.
8. Nagano, K., Katsura, T. and Takeda, S., 2006, Development of a design and performance prediction tool for the ground source heat pump system, Applied Thermal Engineering, Vol. 26, pp. 1578-1592.
9. Lim, K., Lee, S. and Lee, C., 2007, An experimental study on the thermal performance of ground heat exchanger, Experimen-

- tal thermal and Fluid Science, Vol. 31, pp. 985-990.
10. Florides, G. and Kalogirou, S., 2008, First in situ determination of the thermal performance of a U-pipe borehole heat exchanger in cyprus, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, pp. 157-163.
 11. Sohn, B.H. and Shin, H.J., 2006, Thermal conductivity measurement of grouting materials for ground heat exchanger borehole, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 18, No. 6, pp. 493-500.
 12. Kim, J., Park, K., 2006, Influences of power fluctuation on in-situ ground thermal response testing, Proceedings of the SAREK 2006 Summer Annual Conference, pp. 707-712.
 13. Li, X., Chen, Y., Chen, Z. and Zhao, J., 2006, Thermal performances of different types of underground heat exchangers, Energy and Buildings, Vol. 38, pp. 543-547.
 14. Cui, J, Zhao, J. and Wang, H., 2008, A tower based design method for ground source heat pump systems, Proceedings of the 9th International IEA Heat Pump Conference, Switzerland, May, pp. 20-22.
 15. Lee, M. Y., Kim, Y. and Kang, B. H., 2007, Dynamic simulation of ground source heat pump with a vertical U-tube ground heat exchanger, Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 19, No. 5, pp. 372-378.
 16. Kim, Y. J., Choi, J. S. and Kang, Y. T., 2005, Performance analysis of ground thermal conductivity by ground heat exchanger, Proceedings of the SAREK 2005 Winter Annual Conference, pp. 161-165.
 17. Ingersoll, H. S. and Plass, H. J., 1948, Theory of the ground pipe heat source for the heat pump, Heating, Piping and Air Conditioning, July, pp. 119-122.