

수평형 지중열교환기의 열전달 성능에 관한 연구

장 기창¹⁾, 정 민호²⁾, 박 성룡, 나 호상, 백 영진, 윤 형기

A Study on Heat Transfer Performance of Horizontal Ground Heat Exchanger

Kichang Chang, Minho Chung, Seongryong Park, Hosang Ra, Youngjin Baik, Hyungkee Yoon

Key words : Ground source heat pump(지열히트펌프), Horizontal ground heat exchanger(수평형 지중열교환기), Thermal conductivity(열전도도), Thermal response test(열응답테스트)

Abstract : Ground source heat pump systems are used for heating, ventilating and air-conditioning systems in commercial buildings, schools, and factories because of low operating and maintenance costs. These systems use the earth as a heat source in heating mode and a heat sink in cooling mode. Ground heat exchangers are classified by a horizontal type and vertical type according to the installation method. A horizontal type means that a heat exchanger is laid in the trench bored in 1.2 to 1.8 m depth. The solar heat and the rainwater are affected by the performance of heat exchanger and causes mutual influence among heat exchangers. In this study, to evaluate the performance of straight type, slinky type, and spiral type of horizontal ground heat exchangers designed on 1 RT scale, test sections are buried on the earth and experimental apparatus is installed. Therefore the performance of these is estimated.

Nomenclature

k : thermal conductivity, W/m²℃

Q : heat transfer rate, W

r : radius, m

T : temperature, ℃

t : time, hour

1. 서 론

지중의 온도는 대기의 온도에 비해 일간 물론 이고 연간 변화가 훨씬 적으며, 지표로부터 깊이 들어갈수록 온도의 변화가 줄어들고 지표로부터 3 m 정도만 내려가도 연중 온도변화가 매우 적어 안정적인 냉난방 에너지의 열원으로 이용하기에 적합하다. 히트펌프의 실외기를 지중에 설치함으로써 지중온도가 대기보다 높은 겨울에는 난방용 에너지의 열원으로, 대기온도보다 낮은 여름에는 냉방용 에너지의 냉각수열원으로 사용할 수가 있다.

지열히트펌프(ground source heat pump)는 열전달매체의 순환방식에 따라 개회로와 폐회로로 분류할 수 있으며, 폐회로는 폐쇄된 PE(polyethylene) 파이프 회로내로 열전달매체가 순환하여 지중으로부터 열을 흡수하거나 방출하는 방식으로 펌핑에 동력이 크게 소비되지 않으며, 대략

전체 소비동력의 5% 정도를 차지하고 있다. 이와 같은 폐회로는 시공방법에 따라 수평형과 수직형으로 나누는데 수평형의 경우는 지중 1.2 ~ 1.8 m 깊이의 트랜치를 파고 열교환기를 매설하는 방식으로 열교환기의 성능이 태양열과 빗물에 많은 영향을 받으며, 매설 열교환기 사이에서 상호 영향을 끼친다. 특히, 태양열에 대한 해석이 어려우므로 일반적인 열교환기 설계방법이 존재하지 않고 있다. 수평형에 비해 상대적으로 작은 설치공간을 필요로 하는 수직형은 2개의 고밀도의 폴리에틸렌 튜브를 수직으로 설치된 시추공에 매설하는 방식으로 시추공에 설치된 튜브의 아래쪽 말단에는 2차 유체의 순환을 위한 U 벤드가 연결된다.

본 연구에서는 수평형 지중열교환기(horizontal ground heat exchanger) 중에 straight loop, slinky loop 및 spiral loop를 각각 0.71, 0.75, 1 RT 규모로 설계하고, 이에 대한 성능평가를 위해 지중에 매설하여 성능실험을 수행하도록 실험장치를 구성하여 유량과 브라인 입구측 초기온도,

1) 책임 저자의 소속

E-mail : kcchang@kier.re.kr

Tel : (042)860-3163 Fax : (042)860-3133

2) 저자2의 소속

E-mail : s_minho@cnu.ac.kr

Tel : (042)860-3062 Fax : (042)860-3133

순환유체의 유량 및 열입력을 바꿔가면서 열응답 테스트(thermal response test) 성능시험을 수행하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 지중열교환기 제작 및 시공

수평형 지중열교환기의 코일은 20A PE 파이프를 선정하여 제작하였으며, 수평형 중에 Fig. 1과 같이 straight, spiral 및 slinky loop를 형성하도록 각각에 대해 구성하였다. straight loop의 경우 지중 1.8 m의 깊이에 31 m 길이로 한쌍, 지중 1.2 m 깊이에 한쌍씩 설치하여 전체 코일의 길이는 128 m가 되게 하였다. slinky loop의 경우 0.9 m의 지름을 갖는 원이 0.6 m의 간격이 되게 1.8 m 깊이에 설치하였으며, 지중코일의 총 길이는 180 m가 되게 하였다. spiral loop의 경우는 지름 1.0 m의 원이 0.4 m의 간격으로 나선형이 되게 설치한 것이며, 트렌치(trench)의 길이는 21 m, 전체 코일의 길이는 160 m이다. 접속부는 용착기를 가지고 밀착시켜 기밀을 유지하도록 하였으며, 매설을 위한 트렌치는 깊이 1.8 m, 폭 1.0 m로서 가능한 시공비용을 저감시킬 수 있는 최저 깊이를 선정하도록 하였다.

2.2 성능시험장치 및 방법

지중열교환기의 성능시험장치는 지중열교환기의 열전도도(thermal conductivity)를 평가하기 위하여 코일내에 일정한 온도의 브라인을 공급할 수 있도록 5 HP 압축기를 적용한 히트펌프와 브라인탱크, 열교환기, 펌프 등으로 구성되어 있다.

그리고 코일내의 유량을 측정하기 위하여 전자유량계를 각각 설치하였으며, 열의 방출 및 흡수 실험을 동시에 할 수 있도록 냉각탑 및 전기히터를 설치하였다. 펌프의 유량은 인버터를 이용하여 조절하였고, 지중 및 코일의 온도를 측정하기 위하여 45개의 RTD를 코일의 입출구와 지중에 설치하였다. 온도 및 유량의 데이터는 Data Acquisition System (E8401A, 13slots, VXI)을 사용하여 얻었다. Fig. 1은 수평형 지중열교환기의 성능시험을 위한 실험장치의 개략도이다.

본 연구에서는 세가지 종류의 수평형 지중열교환기 열응답테스트를 위하여 유량과 압축 브라인의 온도, 입력 열량을 변화시켜가면서 측정을 하였다. 일반적인 지중열교환기 사용유량인 0.908 m³/hr로 설정하여 펌프를 구동하고, 전기히터를 이용하여 투입열량을 바꿔가면서 성능시험을 수행하였으며, 브라인 탱크의 초기온도와 투입 유량을 변화시켜가면서 성능시험을 수행하여 각각의 브라인 입출구 온도와 입력 열량을 가지고 지중열교환기에 대한 열전도도를 측정, 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

열응답테스트를 이용한 열전도도 측정은 일정한 열량을 지중열교환기로부터 추출하거나 주입하는 동안 지중열교환기를 순환하는 브라인의 입구와 출구온도를 측정하여 계산한다. 본 연구에서 제작한 수평형 지중열교환기와 같은 형태의 해석적인 열전도도 측정 방식은 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 수평형 지중열교환기를 하나의 직선(line source)으로 가정하여 해석하였다. 열전도 해석 방법이 비교적 단순한 라인소스 모델은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

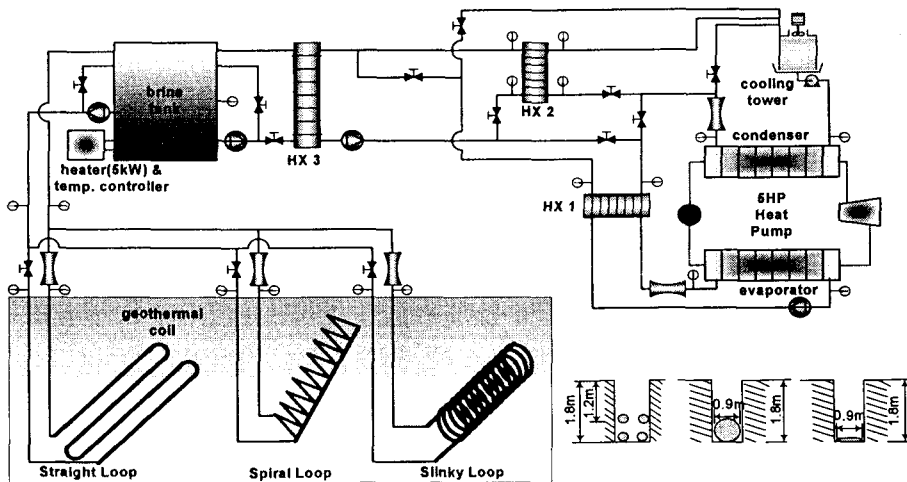


Fig. 1 Schematic of horizontal ground heat exchanger test apparatus

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

여기서 ΔT 는 온도변화, r 은 반경, t 는 경과시간, Q 는 단위길이당 열전달량, k 는 열전도계수, β 는 적분변수이다. 식(1)을 Mogensen이 제안한 간단한 식으로 표현하면 다음과 같은 식이 된다.

$$\Delta T(r, t) = \frac{Q}{4\pi k} \ln t + m \quad (2)$$

지중열교환기의 입출구온도 변화를 대수시간(logarithmic time)에 대한 평균온도 변화 곡선으로 나타내고 그때의 기울기를 구하여 열전도도를 계산할 수 있게 된다.

본 연구에서 열응답테스트를 위한 순환 유체는 물을 사용하였으며, 열입력은 5 kW와 4 kW 용량의 전기히터를 이용하였다. 순환유체의 용량을 0.908 m³/hr, 0.43 m³/hr로 바꾸어 가면서 초기온도를 40°C와 일반 상온에서 실험을 수행하였다. 또한 열입력을 8 kW와 1.5 kW, 3 kW로 변화시켜가면서 지중열교환기 입구와 출구에서의 온도를 측정하여 그 온도의 평균으로 대수 그래프의 기울기를 계산하여 각각의 열전도도를 구했다. Fig. 2는 Straight loop의 초기온도 40°C,

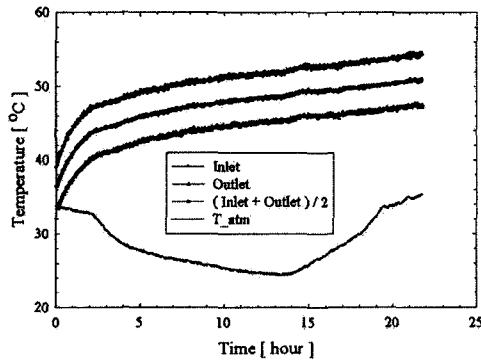


Fig. 2 Variation of inlet and outlet temperature for the straight loop

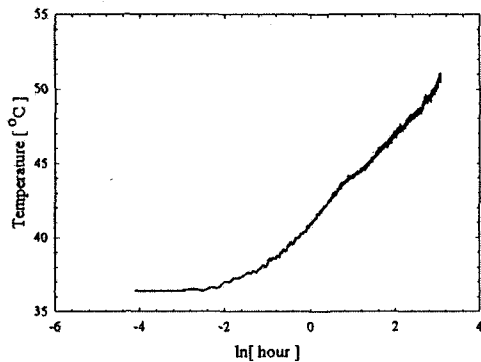


Fig. 3 Log plot of average temperature for the straight loop

열입력 8 kW, 순환유체 유량 0.908 m³/hr일때의 지중열교환기 입구와 출구, 대기온도를 나타낸 그래프이다. 측정은 온도가 높은 오후 4시경에 시작하여 다음날 오후 4시까지 24시간 정도를 측정하였으므로 대기온도는 약 34°C에 시작하여 새벽이 되는 14시간 후에 가장 낮은 24.5°C가 되며, 해가 뜨면서 온도가 올라가고 있다. 대기온도는 지중열교환기의 입출구 온도에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 초기에 입구온도 40°C의 물이 34°C 정도로 온도가 하강하여 지중열교환기를 통과하며, 처음 3시간 동안은 입구와 출구온도가 급격히 상승한다. 3시간 후부터 온도의 기울기는 완만해지면서 입구와 출구의 온도차는 6.7°C 정도를 유지하고 있다. Fig. 3은 입구와 출구 평균온도를 대수시간에 대해 나타낸 그래프이다. 전체 실험 데이터 중에 지중열교환기로부터 지중으로의 열전달이 안정화되어 기울기가 선형적으로 일정해지는 실험 시작 5시간 후부터의 데이터를 가지고 기울기를 구하게 된다. 이때의 기울기는 2.9774이며, 이 기울기로부터 계산한 열전도도는 7.834 W/m°C이다. Fig. 4는 Spiral loop에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 초기에 급격하게 온도가 상승하는 경향은 비슷하지만 그 기울기는 Straight loop의 경우보다 약간 완만하며, 약 5시간 후부터 온도 기울기가 초

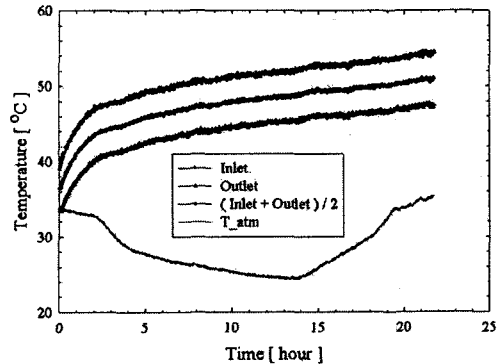


Fig. 4 Variation of inlet and outlet temperature for the spiral loop

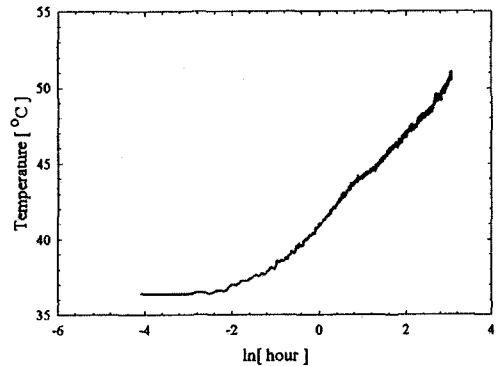


Fig. 5 Log plot of average temperature for the spiral loop

기보다 완만해지면서 입출구의 온도차는 약 7.5 °C를 유지하고 있다. Fig. 5는 대수시간에 대한 입출구 평균온도를 나타낸 것으로 이때의 기울기는 2.513, 이로부터 구한 열전도도는 11.37 W/m°C이다. Fig. 6은 Slinky loop에서의 온도분포를 나타낸 것으로 Slinky loop에서는 Straight나 Spiral loop와는 다르게 초기에도 온도 상승하는 기울기는 완만하며 약 5시간 후부터 입출구의 온

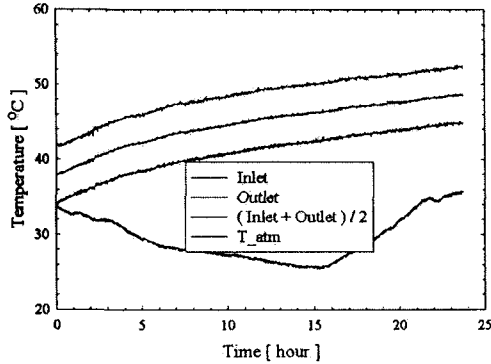


Fig. 6 Variation of inlet and outlet temperature for the slinky loop

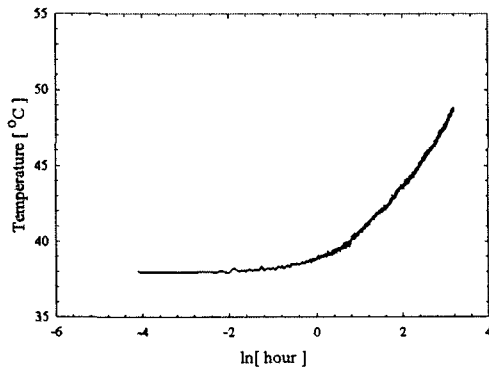


Fig. 7 Log plot of average temperature for the slinky loop

Table 1 Test conditions and results

Loop	Flow rate (m ³ /h)	Power input (kW)	Initial temp. (°C)	Thermal conductivity (W/m°C)
Straight	0.908	8	40	7.834
	0.908	1.5	normal	7.458
	0.43	3.0	normal	6.843
Slinky	0.908	8	40	9.027
	0.908	1.5	normal	9.240
	0.43	3.0	normal	10.51
Spiral	0.908	8	40	11.37
	0.908	2.0	normal	11.98
	0.60	3.5	normal	10.33

도차는 약 7.5°C를 유지하고 있다. Fig. 7은 대수시간에 대한 입출구 평균온도를 나타낸 것으로 이때의 기울기는 2.654, 이로부터 구한 열전도도는 9.027 W/m°C이다.

Table 1은 수평형 지중열교환기 열응답테스트의 실험조건과 실험으로부터 구한 열전도도를 나타낸 것이다. 실험조건이 변하면서 열전도도가 약간 차이가 있지만 전체적인 평균에서 Spiral loop의 경우가 가장 큰 열전도도를 가지며, Slinky loop는 Spiral loop보다 약간 낮은 값을 나타내고 Straight loop가 가장 낮은 열전도도를 보이고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 세가지 타입의 수평형 지중열교환기를 설계 제작하여 열응답테스트를 수행하였다. 지중열교환기 입구와 출구온도의 평균을 이용, 라인소스 모델을 적용하여 지중열교환기의 열전도도를 측정하였으며, 그 결과 지중코일이 나선 모양을 한 Spiral loop의 경우 가장 높은 열전도도를 보이며, 지중 코일을 원 모양으로 겹치게 설치한 Slinky loop의 경우 Spiral loop보다 약간 낮은 값을 구할 수 있었고, 지중 코일을 직선형태로 설치한 Straight loop가 가장 낮은 열전도도를 보인다. 본 연구에서 적용한 라인소스 모델은 수직형 지중열교환기 해석에 사용되는 모델로 수평형 모델에 대해 해석 모델을 적용시키는 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 에너지관리공단 에너지·자원기술개발사업의 연구비 지원(2003-N-GE02-P-01-3-010)으로 수행되었습니다.

References

- [1] Mogensen, P., 1983, Fluid duct wall heat transfer in duct system heat storage, Proceedings of International Conference on Subsurface Heat Storage in Theory and Practice, Stockholm, Sweden, pp. 652-657.
- [2] Andrew, D, 1999, Advances in modeling of ground-source heat pump systems, Master of Science Thesis, Oklahoma State University.
- [3] Yavuzturk, C., 1999, Modeling of vertical ground loop heat exchangers for ground source heat pump system, Doctor of Philosophy Thesis, Oklahoma State University.
- [4] Kavanaugh, P. and Rafferty, K., 1997, Ground-source heat pumps : Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings, ASHRAE.
- [5] Shon, B. H., Cho, C. S., Shin, H. J. and An, H. J., 2004, Heat exchanger performance of vertical u-tube ground heat exchangers, Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference, pp. 1323-1328.