

GSHP용 수직형 지중열교환기의 열전달 성능에 관한 연구

정민호*·장기창[†]·나호상**·백영진**·박성룡**·유성연*

A Study on Heat Transfer Performance of Vertical Ground Heat Exchanger of GSHP(Ground Source Heat Pump)

Min-Ho Chung, Ki-Chang Chang, Ho-Sang Ra, Young-Jin Baik,
Seong-Ryong Park and Seong-Yeon Yoo

Key Words: Ground Source Heat Pump(지열히트펌프), Vertical Ground Heat Exchanger(수직형 지중열교환기), Thermal Conductivity(열전도도)

Abstract

GSHP systems are used for 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 and a heat sink in cooling mode. Ground heat exchangers are classified by a horizontal and vertical type according to the installation method. Vertical type is usually constructed by placing small diameter high density polyethylene tube in a vertical borehole. Vertical tube sizes range from 20 to 40 mm nominal diameter. Borehole depth range between 100 and 200 m depending on local drilling conditions and available equipment. In this study, to evaluate the performance of single u-tube with bentonite grouting, single u-tube with broken stone grouting and double u-tube bentonite grouting of vertical ground heat exchangers, test sections are buried on the earth and experimental apparatus is installed. Therefore the heat transfer performance and pressure loss of these are estimated.

기호설명

k : 열전도도(W/m²·°C)

\dot{Q} : 열전달율(W)

r : 반지름(m)

T : 온도(°C)

t : 시간(hour)

1. 서 론

최근 시행된 신재생에너지 이용법과 관련하여 건물의 냉난방설비 중에서 지열원 히트펌프(ground source heat pump, GSHP) 시스템이 도입되고 있다. 지열원 히트펌프 시스템은 히트펌프 유닛과 지중열교환기 그리고 열전달매체가 순환하는 배관과 펌프 시스템으로 구성된다. 히트펌프는 기본적으로 에어컨과 같은 구조로 되어 있는데, 지열원 히트펌프는 공기로부터 에너지를 취득하는 공기열원 히트펌프와 달리 지중의 열을 얻기 위해 지중열교환기를 설치한 것으로 보아도 무방하다. 즉, 지열원 히트펌프로 냉방과 난방을 수행할 때, 필요한 에너지의 대부분(약 75%)은 지중을 통해서 흡수하는데, 부수적으로 약 25%의 전기 에너지가 소비되어 지중으로부터 열 흡수가 가능하게 된다.

지열히트펌프는 열전달매체의 순환방식에 따라

[†] 한국에너지기술연구원 미활용·지열연구센터

E-mail : kcchang@kier.re.kr

TEL : (042)860-3163 FAX : (042)860-3133

* 충남대학교 BK21 메카트로닉스사업단

** 한국에너지기술연구원 미활용·지열연구센터

개회로와 폐회로로 분류할 수 있으며, 폐회로는 폐쇄된 PE(polyethylene) 파이프 회로내로 열전달 매체가 순환하여 지중으로부터 열을 흡수하거나 방출하는 방식으로 펌핑에 동력이 크게 소비되지 않는다. 이와 같은 폐회로는 시공방법에 따라 수평형(horizontal)과 수직형(vertical)으로 나누는데 수평형의 경우는 지중 1.2~1.8m 깊이의 트렌치를 파고 열교환기를 매설하는 방식으로 열교환기의 성능이 태양열과 빗물에 많은 영향을 받으며, 매설 열교환기 사이에서 상호 영향을 끼친다. 수평형에 비해 상대적으로 작은 설치공간을 필요로 하는 수직형은 2개의 고밀도의 폴리에틸렌 튜브를 약 100~200 m 깊이의 수직으로 설치된 시추공에 매설하는 방식으로 시추공에 설치된 튜브의 아래쪽 말단에는 2차 유체의 순환을 위한 U 벤드가 연결된다.

본 연구에서는 Single U-tube와 Double U-tube 수직형 지중열교환기를 시제품으로 제작하여 보어홀 100m 깊이로 설치하였다. 그라우트 재료로는 시멘트와 벤토나이트를 사용하였으며, 그라우트 재료에 대한 특성을 알아보기 위해 쇄석을 이용한 Single U-tube 지중열교환기를 제작하여 모두 3 종류의 수직형 지중열교환기를 설치하였다. 이에 대한 성능평가를 위해 실험장치를 구성하여 유량과 브라인 입구측 초기온도, 순환유체의 유량 및 열입력을 바꿔가면서 열응답테스트(thermal response test) 성능시험을 수행하였다.

2. 지중열교환기 제작 및 시공

지열원 히트펌프의 수직형 지중열교환기는 폐회로로 구성되어 있으며, 설치공사비는 수평형에 비해 많이 소요되지만 설치면적을 적게 차지하므로 대부분의 지열원 히트펌프에서 적용되고 있는 실정이며, 소규모에서부터 대규모에 이르기까지 다양하게 적용되고 있다. 수직형 지중열교환기의 설계는 Fig. 1과 같이 Single U-tube와 Double U-tube의 두가지 형태로 선택하여 보어홀 깊이를 100m로 하였다. 이때 Single U-tube는 보어홀 직경을 150A, Double U-tube는 보어홀 직경을 200A로 천공하였고, 두 보어홀 간의 간격은 5 m로 하였다. 그리고 지중루프는 25A HDPE를 선정하여 U자관으로 용착하여 루프를 완성시켰고, 지중온도를 측정하기 위하여 별도로 100 m의 보어홀을

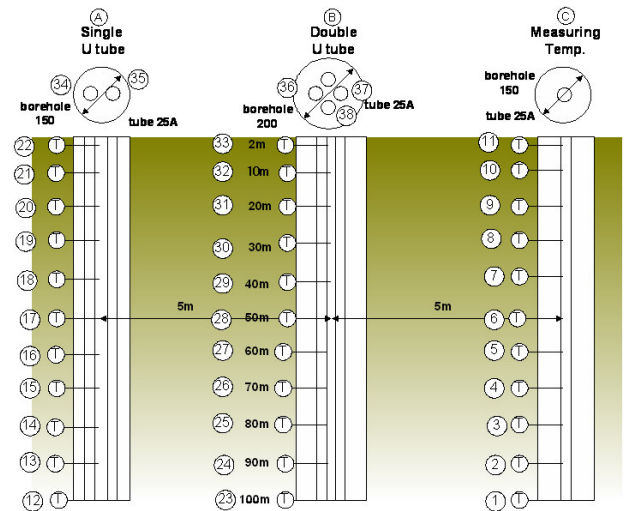


Fig. 1 Schematic of vertical ground heat exchangers

천공하여 각 10 m마다 RTD 센서를 설치하도록 하였다. 수직형 지중열교환기의 그라우팅 재료로는 시멘트와 벤토나이트를 8 : 1로 희석하여 사용하였고, 10mm 정도 크기의 쇄석만을 사용한 것과 비교·검토하기 위하여 별도로 Single U-tube의 수직형 지중열교환기를 제작하였다.

지중열교환기 시공은 먼저 천공기로 100 m를 천공하고, U자관 지중루프에 대해 10 kg/cm²의 압력으로 누설시험을 마친 후 보어홀 내에 삽입시켰다. 지중루프와 트레미 파이프를 삽입하고 난 후 그라우트 재료를 희석하여 그라우팅을 수행하였다. 또한, 그라우트 재료로 쇄석을 사용할 때는 보어홀 내에 주입시 일부가 중간에서 막힘으로 인하여 주입이 불가능하게 되었을 때 건축시 시멘트 타공을 위한 바이브레이터를 사용하여 쇄석이 보어홀 내에 균일하게 채워지도록 하였다.

3. 실험장치 및 방법

수직형 지중열교환기의 성능실험장치는 각각의 지중열교환기에 대한 지중열전도도의 측정과 지중으로 열을 방출 및 흡수할 수 있는 열전달율을 도출하기 위하여 루프내에 일정한 온도를 공급할 수 있도록 5HP 압축기를 적용한 히트펌프와 순환매체 탱크, 열교환기, 펌프 등으로 구성되어 있다. 그리고 루프내의 유량을 측정하기 위하여 전자유량계를 각각 설치하였고, 각각의 루프내 유량에 따른 압력강하를 측정하기 위해서 차압계를

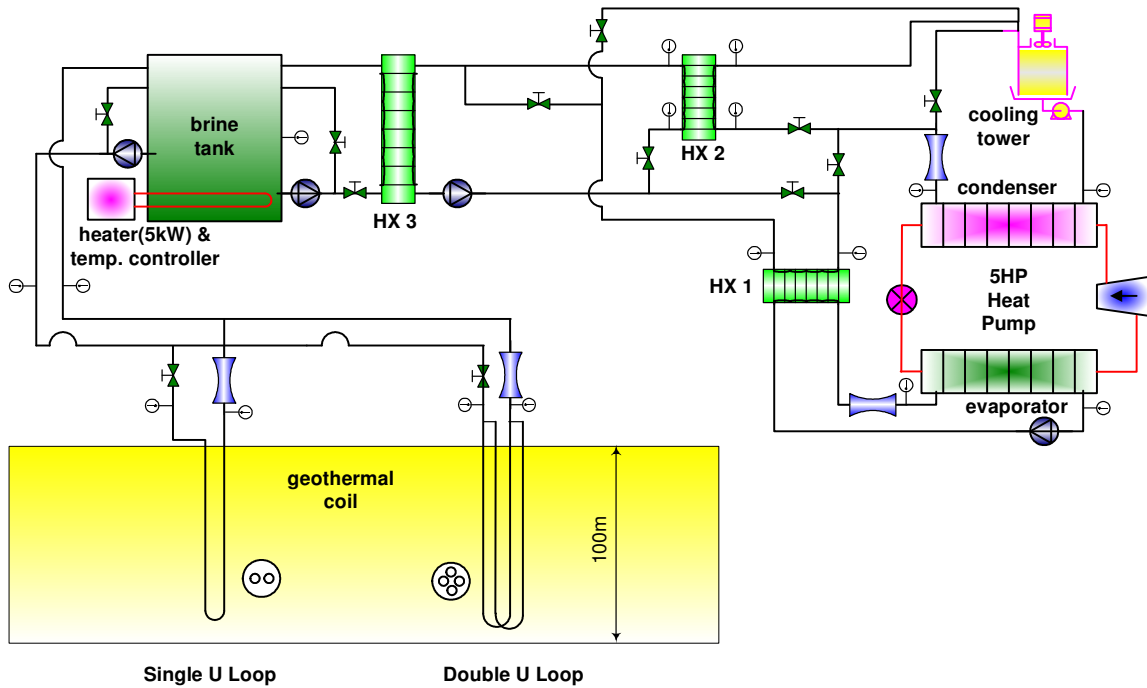


Fig. 2 Schematic of vertical ground heat exchanger test apparatus

설치하였으며, 열의 방출 및 흡수 실험을 동시에 할 수 있도록 냉각탑 및 전기히터를 설치하였다. 그리고 지중의 루프 및 온도를 측정하기 위하여 각 보어홀마다 10 m 간격으로 RTD를 설치하였다. 온도 및 유량측정은 Data Acquisition System (E8401A, 13slots, VXI)을 사용하였으며, 측정데이터의 모니터링은 각각의 주요부분에서 데이터를 취득할 수 있도록 구성하였다. Fig. 2는 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 세가지 종류의 수직형 지중열교환기 열응답테스트를 위하여 유량과 입구측 브라인의 온도, 입력 열량을 변화시켜가면서 측정을 하였다. 일반적인 지중열교환기 사용유량인 0.908 m³/hr와 1.362 m³/hr로 설정하여 펌프를 구동하고, 전기히터로 열량을 투입하여 열전도도 측정실험을 수행하여 각각의 브라인 입·출구 온도와 입력 열량을 가지고 지중열교환기에 대한 열전도도를 측정, 분석하였다. 또한 각각의 지중열교환기에서 압력손실을 알아보기 위해 유량을 0.2~3.8 m³/h까지 변화시켜가면서 지중열교환기 입구와 출구 사이의 차압을 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 압력손실

열전달계수와 더불어 열교환기의 설계에 있어서 중요한 요소는 압력손실에 대한 고려이다. 지중열교환기에서 펌프의 동력은 유량과 압력손실의 곱으로 표시된다. 지중열교환기에서 압력손실은 주로 열교환기의 입구와 출구, 유로에서 가장 많이 일어난다. 유로의 형상이 똑같은 지중열교환기의 경우 압력손실은 유로의 길이와 유로가 설치된 형태에 따라 값의 차이가 많이 나게 되지만 유로의 면적이 커지게 되면 압력손실은 반대

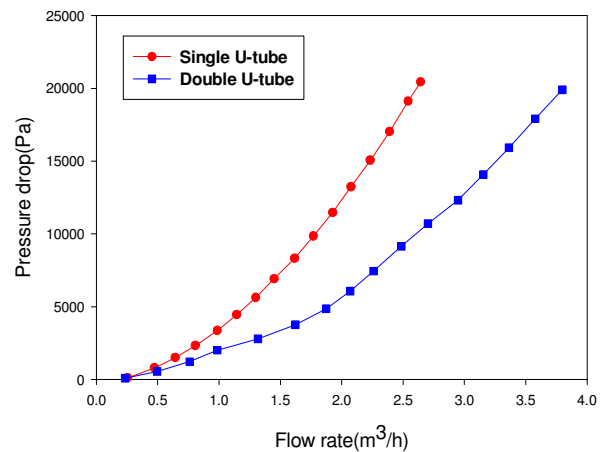


Fig. 3 Comparison of pressure loss for ground heat exchangers

로 작아지게 된다. Fig. 3은 수직형 지중열교환기의 유량에 따른 압력강하를 나타낸 것이다. Single U-tube와 Double U-tube 모두 유량이 증가하면서 증가하는 경향을 보이며, 그 크기는 유량의 제곱에 비례한 2차함수의 곡선 형태를 보이고 있다. 동일한 유량에서 유로의 단면적이 두 배가 되는 Double U-tube의 경우 Single U-tube의 경우보다 동일 유량에서 압력손실은 약 50% 정도로 작아지는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 열전도도

열응답테스트를 이용한 열전도도 측정은 일정한 열량을 지중열교환기로부터 추출하거나 주입하는 동안 지중열교환기를 순환하는 브라인의 입구와 출구온도를 측정하여 계산한다. 본 연구에서는 수직형 지중열교환기를 하나의 직선(line source)으로 가정하여 해석하였다. 열전도 해석방법이 비교적 단순한 라인소스 모델은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서 ΔT 는 온도 변화, r 은 반경, t 는 경과 시간, 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 입출구 온도 변화를 대수시간(logarithmic time)에 대한 평균온도 변화 곡선으로 나타내고, 그때의 기울기를 구하여 열전도도를 계산할 수 있게 된다.

수직형 지중열교환기의 열응답테스트를 위한 순환유체는 물을 사용하였으며, 열입력은 5 kW와 4 kW 용량의 전기히터를 이용하였다. 순환유체의 용량을 0.908 m³/h와 1.362 m³/h로 바꾸어가면서 초기 온도를 일반 상온에서 열입력을 8 kW로 설정하여 실험을 수행하였다. 지중열교환기 입구와 출구에서의 온도를 측정하여 그 온도

의 평균으로 대수 그래프의 기울기를 계산하여 각각의 열전도도를 구하였다. Fig. 4는 Single U-tube(벤토나이트 그라우팅)의 순환유체 유량 0.908 m³/h일 때의 지중열교환기 입구와 출구, 대기온도를 나타낸 그래프이다. 측정은 온도가 높은 오후 4시경에 시작하여 다음날 오후 4시까지 24시간 정도를 측정하였다. 초기에 입구온도 20°C의 물이 지중열교환기를 통과하며, 처음 5시간 동안은 입구와 출구온도가 급격히 상승한다. 5시간 후부터 온도의 기울기는 완만해지면서 입구와 출구의 온도차는 약 7°C 정도를 유지하고 있다. Fig. 5는 입구와 출구 평균온도를 대수시간에 대해 나타낸 것이다. 전체 실험 데이터 중에 지중열교환기로부터 지중으로의 열전달이 안정화

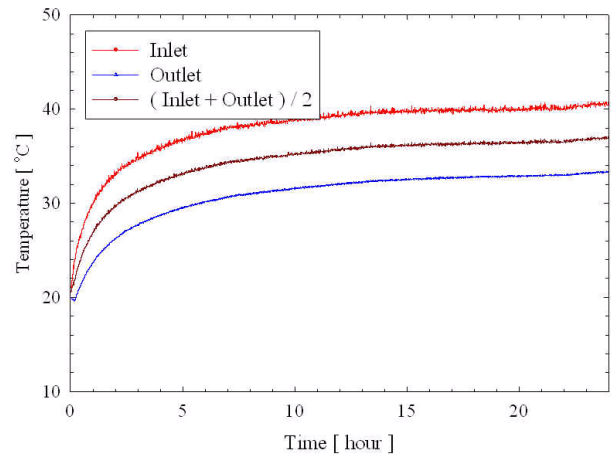


Fig. 4 Variation of inlet and outlet temperature for single u-tube loop(bentonite)

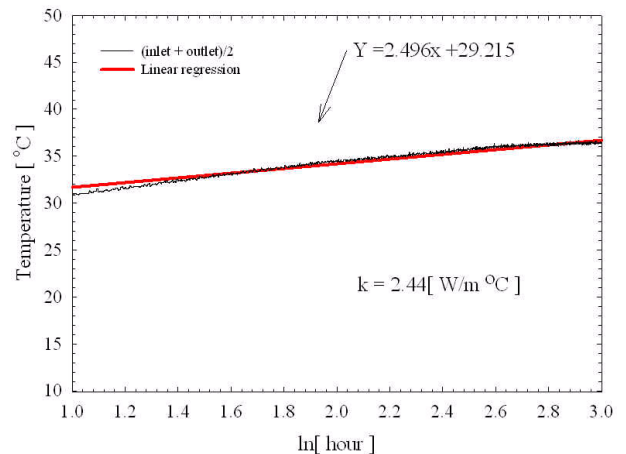


Fig. 5 Log plot of average temperature for single u-tube loop(bentonite)

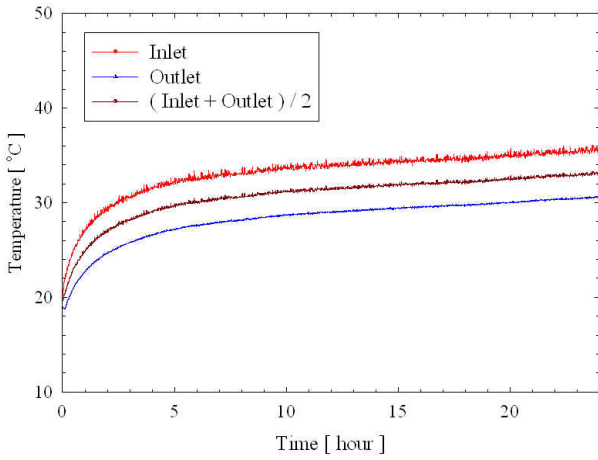


Fig. 6 Variation of inlet and outlet temperature for single u-tube loop(broken stone)

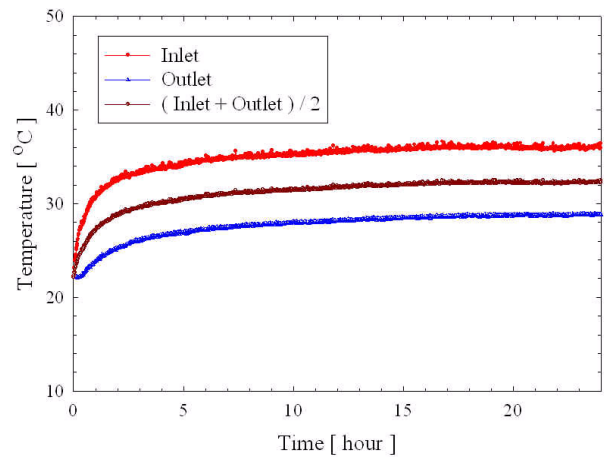


Fig. 8 Variation of inlet and outlet temperature for double u-tube loop

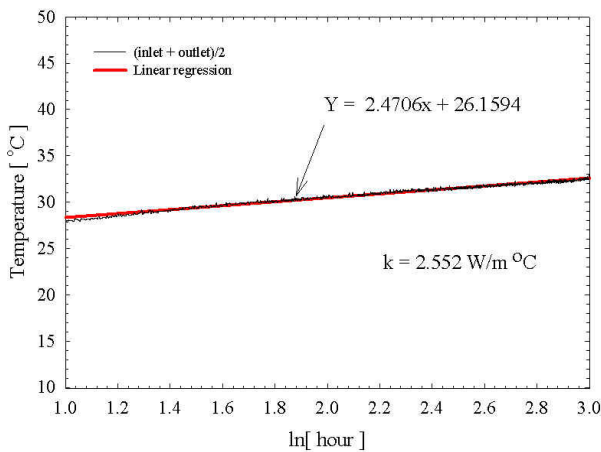


Fig. 7 Log plot of average temperature for single u-tube loop(broken stone)

되어 기울기가 선형적으로 일정해지는 실험 시작 5시간 후부터의 데이터를 가지고 기울기를 구하게 된다. 이때의 기울기는 2.496이며, 이 기울기로부터 계산한 열전도도는 2.44 W/m²°C이다.

Fig. 6은 Single U-tube(쇄석 그라우팅)에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 초기에 급격하게 온도가 상승하는 경향은 비슷하지만 그 기울기는 Single U-tube(벤토나이트 그라우팅)의 경우보다 약간 완만하며, 약 5시간 후부터 온도 기울기가 초기보다 완만해지면서 입출구의 온도차는 약 5.7°C를 유지하고 있다. Fig. 7은 대수시간에 대한 입출구 평균온도를 나타낸 것으로 이때의 기울기는 2.4706, 이로부터 구한 열전도도는 2.552 W/m²°C이다.

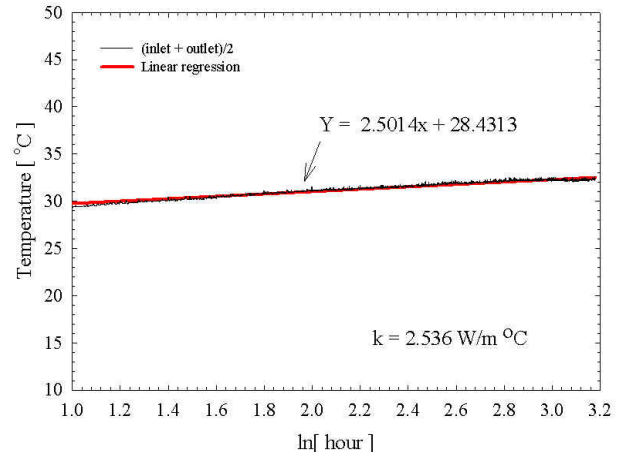


Fig. 9 Log plot of average temperature for double u-tube loop

Fig. 8은 Double U-tube에서의 온도분포를 나타낸 것으로 Single U-tube(벤토나이트 그라우팅)나 Single U-tube(쇄석 그라우팅)와는 다르게 초기에도 온도 상승하는 기울기는 완만하며 약 5시간 후부터 입출구의 온도차는 약 5.6°C를 유지하고 있다. Fig. 9는 대수시간에 대한 입출구 평균온도를 나타낸 것으로 이때의 기울기는 2.5014, 이로부터 구한 열전도도는 2.536 W/m²°C이다.

Table 1은 수직형 지중열교환기 열응답테스트의 실험조건과 실험으로부터 구한 열전도도를 나타낸 것으로 유량조건이 변하면서 유효열전도도가 약간 차이가 있지만 평균적으로 유효열전도도는 열전달 면적이 가장 큰 Double U-tube의 경우가 가장 높은 값을 보이며, Single U-tube의 경우

Table 1 Test conditions and results

Loop	Flow rate (m ³ /h)	Power input (kW)	Thermal conductivity (W/m°C)
Single U (bentonite)	0.908	8	2.440
	1.362	8	2.618
Single U (broken stone)	0.908	8	2.158
	1.362	8	2.552
Double U	0.908	8	2.536
	1.362	8	2.653

벤토나이트 그라우팅과 쇠석 그라우팅의 유효열전도도 차이가 거의 없는 것으로 나타나지만 벤토나이트의 경우가 약간 높은 것으로 나타났다. 쇠석 그라우팅의 경우 벤토나이트 시멘트 그라우팅보다 입자가 크기 때문에 입자 사이 공극의 영향으로 열전도도가 낮아지는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 세가지 타입의 수직형 지중열교환기를 설계 제작하여 압력손실과 열응답테스트를 수행하였다. 유량변화에 따른 압력강하를 차압계를 이용하여 측정하였으며, 지중열교환기 입구와 출구온도를 측정하고 그 평균값을 이용, 라인소스 모델을 적용하여 지중열교환기의 열전도도를 측정하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압력손실의 경우 Single U-tube와 Double U-tube 모두 유량이 증가하면서 증가하는 경향으로 그 크기는 유량의 제곱에 비례한 2차함수의 곡선 형태를 보이고 있으며, 동일한 유량에서 유로의 단면적이 두 배가 되는 Double U-tube의 경우 Single U-tube의 경우보다 동일 유량에서 압력손실은 약 50% 정도로 작아진다.

2. 유효열전도도는 열전달 면적이 가장 큰 Double U-tube의 경우가 가장 높은 값을 보이며, Single U-tube의 경우 벤토나이트 그라우팅과 쇠석 그라우팅의 유효열전도도는 쇠석 공극의 영향으로 벤토나이트의 경우가 약간 높은 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단 에너지·자원기술개발사업의 연구비 지원(2003-N-GE02-P-01-3-01 0)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Mogensen, P., 1983, "Fluid to 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*, Atlanta.
- (5) Chung, M. H., Chang, K. C., Park, S. R., Lee, Y. S., Yoon, H. K., Park, J. T., Ra, H. S., Baik, Y. J., "An Experimental Study on Heat Transfer Performance of Horizontal Ground Heat Exchanger of GSHP(Ground Source Heat Pump)," *Proceedings of the SAREK 2005 Summer Annual Conference*, pp. 457-462.
- (6) 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.
- (7) Lee, S. H., Choi, B. Y., Jeong, Y. H., Chai, K. H. and Lim, K. B., 2004, "An Experimental Study for Thermal Performance Measurement of Vertical Borehole Heat Exchanger(BHE)," *Proceedings of the SAREK 2004 Summer Annual Conference*, pp. 48-54.