

유출지하수 열원 지열히트펌프용 Pond Loop형 열교환기의 열전달 성능

박 근우¹⁾, 김 진상²⁾, 이 응열³⁾

Heat Transfer Performance of Pond Loop type Heat Exchanger for Ground Source Heat Pump using Extruding Ground Water

Geunwoo Park, Jinsang Kim, Eungyool Lee

Key words : Extruding ground water(유출지하수), Ground source heat pump(지열히트펌프), Pond Loop type heat exchanger(Pond Loop형 열교환기), Heat transfer performance(열전달성능)

Abstract : 유출지하수나 지표수를 열원으로 하는 지열히트펌프의 기초자료로 활용하기 위하여 Pond Loop형 열교환기를 설계, 제작하여 유동이 없는 수조 내에서 수조의 온도가 변화함에 따라 일정한 열교환기 입구온도를 유지하면서 열전달량을 측정하였다. 그 결과 수조를 Heat Source로 사용하는 경우 5,500~4,500 kcal/h의 열량이 전달되었고, 수조를 Heat Sink로 사용할 경우 5,200 ~ 3,500 kcal/h의 열량이 전달되었다. 또한 열교환기 관내 유속이 증가함에 따라 열전달량이 증가하는 경향성을 확인할 수 있었고, 이는 동시에 열교환기 입출구의 차압을 증가시킴을 알 수 있었다. 열교환기의 설계단계에서 사용하였던 열전달관계식으로 구한 총괄열전달계수, U와 실험값을 통해 유추한 U값을 비교한 결과 실험에 의해 유추된 U값이 24~27% 설계치보다 크게 나타났다. 본 연구를 통하여 유출지하수 뿐만 아니라 하수 및 하천수를 이용한 지열히트펌프의 기초자료를 확보할 수 있었다.

Nomenclature

- Nu_d : Nusselt number based on diameter, hD_h/k
- Red : Reynolds number based on diameter, GD_h/μ
- Pr : Prandtl number, $\mu c_p/k$
- U : overall heat transfer coefficient, $W/m^2\cdot K$
- h_i : inner heat transfer coefficient, $W/m^2\cdot K$
- A_i : total internal surface area, m^2
- r_o : tube outside radius, m
- r_i : tube inner radius, m
- k_{pe} : thermal conductivity of polyethylene, $W/m\cdot K$
- LMTD : Log mean temperature
- Q : heat flux, W/m^2
- T_R : Temperature of reservoir, $^{\circ}C$
- T_o : Temperature of tube outside wall
- L : Length of PE Pipe, m

1. 서론

신재생에너지로 세계적으로 이용되고 있고, 향후 이용가능성이 높은 시스템 중의 하나가 지열히트펌프이다. 지열히트펌프는 적용현장에 수직형 또는 수평형의 지중열교환기를 매설해야 하는 특성을 갖고 있다. 특히 우리나라와 같이 냉난방 수요지에 유휴공간이 적은 경우에는 천공 또는 트렌치 작업 등에 많은 애로사항이 있다. 도심지의 경우에는 이로 인해 지열히트펌프의 적용이

-
- 1) 삼양에코너지 연구소
E-mail : gwpark@ecosy.co.kr
Tel : (031)713-8157 Fax : (031)713-8158
 - 2) 삼양에코너지 연구소
E-mail : genakim@chol.com
Tel : (02)566-6754 Fax : (031)713-8158
 - 3) 삼양에코너지 연구소
E-mail : yuli_1st@incheon.ac.kr
Tel : (031)713-8157 Fax : (031)713-8158

더욱 곤란해진다. 그러나 도심지나 중대형건물을 신축하는 경우 지하공간공사를 위해 터파기공사를 하면 지역에 따라 유출되는 지하수가 많은 경우가 있다. 서울시 지하철 역사나 S병원의 경우에는 연중 내내 지하수가 유출되고 있고 그 온도도 연중 12℃~16℃ 범위에서 일정하게 유지되고 있다. 이러한 유출수는 지열히트펌프의 유용한 열원이 될 수 있고 별도의 천공작업이 없이 유출수를 모을 수 있는 적정크기의 저장탱크만 있으면 지열히트펌프의 설치, 운영이 가능하다. 이때 지하수와 히트펌프 사이의 열전달을 위한 형태는 관형열교환기나 Shell & Tube 열교환기를 사용할 수 있으나 이러한 Open 형태의 열교환기는 운전이 진행됨에 따라 배관과 열교환기에 스케일이나 부식 등이 발생하여 결과적으로 열전달효율을 낮추는 요인으로 작용할 수 있다. 지열히트펌프에서 지표수에 주로 이용하는 열교환기의 형태중에 Pond Loop형 열교환기가 있다. Pond Loop형 열교환기는 이용하는 물을 직접 끌어들이지 않는 Close type의 열교환기 형태이므로 운전이 진행됨에 따른 관내 스케일로 인한 열전달저하현상이 없으며, 지표수와 같은 열원만 있다면 저렴한 비용으로 설치할 수 있다는 장점이 있다. Fig. 1은 수직밀폐형 지열히트펌프의 일반적인 형태이고, Fig. 2는 수직밀폐형 열교환기 대신 사용할 수 있는 Pond Loop 형 열교환기의 일반적인 형태이다. Pond Loop형 열교환기는 미국 등지에서는 부분적으로 사용되고 있으나, 국내의 경우에는 사용례가 없고 이에 대한 기초자료가 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 유출지표수에 이용할 수 있는 Pond Loop형태의 열교환기의 열전달 성능을 실험을 통하여 파악하고 이를 토대로 설계의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 연구에서는 열전달관계식에 의해서 설계한 Pond Loop형 열교환기를 제작하였고, 열전달성능 파악을 위한 실험장치를 설치하여 실험을 진행하였다.

2.1 Pond Loop형 열교환기

Picture. 1은 본 실험에서 사용한 Pond Loop형 열교환기의 사진이다. 관의 재질은 PE이며 시중에서 흔히 구할 수 있는 X-L Pipe를 사용하였다. 열교환기의 형태는 원형으로 하였고 동일길이에 보다 Compact하게 제작하기 위해 radial 방향으로 4열, 수직방향으로 10열로 제작하였다. 또한 관 외측의 열전달 저하현상을 방지하기 위해 상하좌우로 10mm의 간격을 유지하도록 제작하였다.

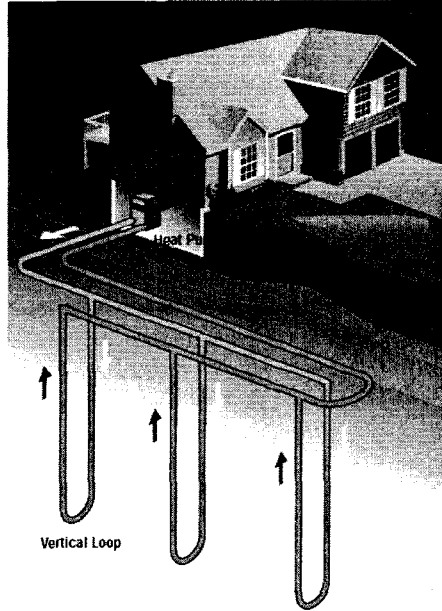


Fig. 1 Typical Vertical Loop GSHP

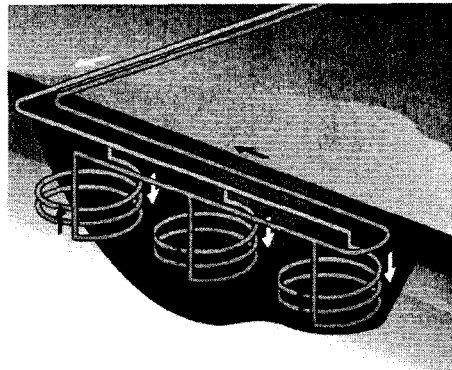
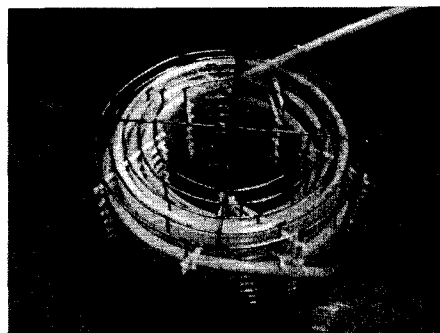


Fig. 2 Pond Loop type Heat Exchanger



Picture. 1 Pond Loop type Heat Exchanger

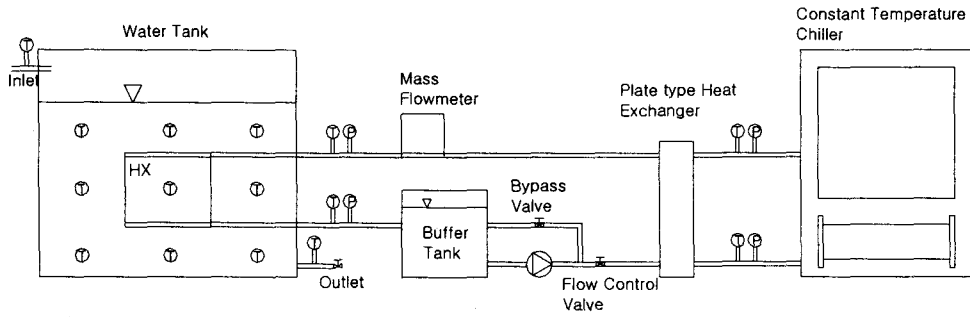


Fig. 3 Diagram of Experimental Facility for Pond Loop Type Heat Exchanger

2.2 실험장치

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 유출수를 저장하는 저장 탱크를 제작하여 지하수를 높이 1m 정도 채우고 자체 제작한 Pond Loop형 열교환기를 탱크의 중심부에 설치하였다. Pond Loop형 열교환기의 입출구 조건을 유지하기 위해 항온칠러를 설치하였고 이와 열교환을 할 수 있도록 판형열교환기를 설치하였다. Pond Loop형 열교환기와 판형 열교환기의 입출구에 온도, 압력센서를 설치하고 질량유량계를 사용하여 열전달능력을 파악할 수 있도록 하였다. 또한 압력센서에 의해 Pond Loop형 열교환기와 판형열교환기의 압력강하 특성을 파악하였다. Table 1은 본 실험에 사용된 실험장치의 제원이다.

Table 1 Experimental Facility List

Item	Contents
Water Tank	STS304, 1,500(W) x 1,500(D) x 1,300(H)
Buffer Tank	STS304 500(W) x 500(D) x 500(H)
Temp. Sensor	RTD(Pt 100Ω) 6 sets, TC 27 points
Pressure Sensor	0 ~ 30 bar, 4 ~ 20 mA, 4sets
Flowmeter	Mass Flowmeter 0 ~ 20 kg/min
Heat Exchanger	Plate type water to water 5RT at $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$
Data Logger	MX100-E-1F, Yokogawa
Constant Temp. Chiller	5RT at water temp. 5°C
Circulation Pump	100 l/min at 3 bar, LG Wilo

2.3 실험방법

본 연구에서는 유출지하수의 기준온도를 15°C 로 가정하고 이를 Heat Source(난방모드)로 사용하는 경우와 Heat Sink(냉방모드)로 사용하는 경우에 대해서 실험을 진행하였다. Table 2에 본 실험을 수행한 조건들을 정리하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 Heat Source 모드에서의 열전달량

Fig. 4는 Heat Source 모드에서 Pond Loop형 열교환기 내를 순환하는 물의 유속이 1 m/s, 입구온도가 7°C 인 경우, 시간에 따른 유출수조 온도와 열전달량 변화를 나타내고 있다. 초기 수조의 온도는 18°C 에서 출발하였다. 초기의 열전달량 Q 는 5,500 kcal/h 를 나타내고 있다.

Table 2 Conditions for Experiments

Variable	Conditions	
Pipe Diameter	I.D 16mm, O.D 20mm, t=2mm	
Pipe Span	10mm	
Pipe Length	60m	
Heat Exchanger Inlet Temp.	Heat Sink Mode	30°C
	Heat Source Mode	7°C
Water Tank Average Temp.	Heat Sink Mode	$15 \sim 24^{\circ}\text{C}$
	Heat Source Mode	$10 \sim 18^{\circ}\text{C}$
Water Tank State	Still, Stagnation	
Velocity of water in Tube	0.5, 1, 1.5 m/s	

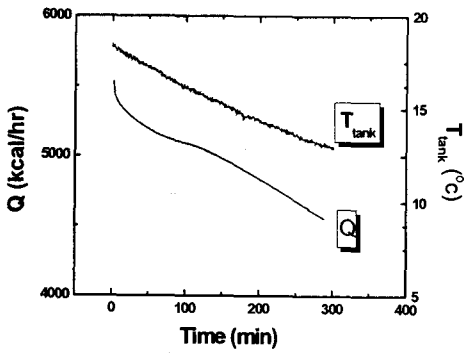


Fig. 4 Change quantity of heat and reserve tank temp. in heat Source mode ($v=1\text{m/s}$)

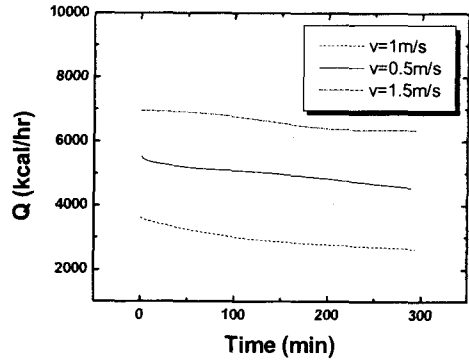


Fig. 6 Change quantity of heat at variety velocity

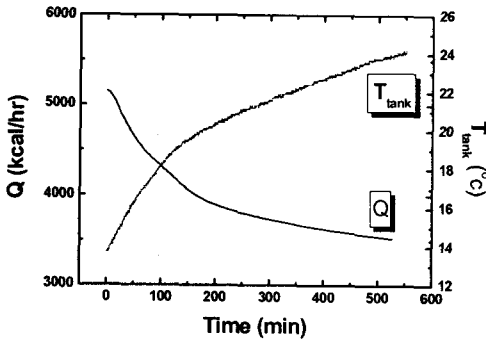


Fig. 5 Change quantity of heat and reserve tank temp. in heating mode ($v=1\text{m/s}$)

시간이 경과함에 따라 수조온도가 13°C까지 점차 낮아지면서 열전달량, Q 도 4,500 kcal/h로 저하되는 것을 볼 수 있다. 이는 열교환기 입구 온도는 7°C로 유지되는 반면 수조의 온도가 점차 낮아져 전체적인 온도차가 감소했기 때문이다.

본 실험을 통해서 유출수(혹은 지표수)를 Heat Source로 사용할 경우 수조의 온도와 열교환기 입구의 온도차가 11~7°C인 경우 상기 제원의 Pond Loop형 열교환기를 통해 5,500~4,500 kcal/h의 열량을 전달할 수 있음을 확인하였다.

3.2 Heat Sink모드에서의 열전달량

Fig. 5는 Heat Sink모드에서 Pond Loop형 열교환기 내를 순환하는 물의 유속이 1 m/s, 입구 온도가 30°C인 경우, 시간에 따른 유출수조 온도와 열전달량 변화를 나타내고 있다. 초기 수조의 온도는 13°C에서 출발하였다. 초기의 열전달

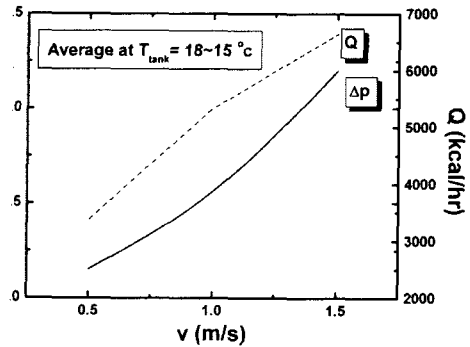


Fig. 7 Pressure drop at variety velocity

량 Q 는 5,200 kcal/h 를 나타내고 있다. 시간이 경과함에 따라 수조온도가 24°C까지 증가하여 열전달량은 3,500 kcal/h로 감소하였다. 이 역시 수조와 열교환기 입구온도의 차가 감소했기 때문이다. 수조의 온도와 열교환기 입구온도차가 16~6°C인 경우 상기 제원의 열교환기를 통해 5,200~3,500 kcal/h의 열량을 전달할 수 있음을 알 수 있었다.

3.3 열교환기 관내 수속에 따른 열전달량과 압력강하 특성

Fig. 6은 냉방모드에서 열교환기 튜브 내 유속 변화 (0.5 ~ 1.5 m/s)에 따른 열전달량의 변화를 나타낸다. 열전달량은 유속이 증가할수록 증가하였다. 열전달량의 증가현상은 수조의 온도가 변화하는 시간에 따라 지속적으로 나타났다. 유속 1m/s 를 기준으로, 1.5m/s 인 경우는 열전달량이 32% 증가하였고, 또한 유속이 0.5m/s 인 경우는

열전달량이 평균적으로 63% 감소하였다. 이는 식 (1)에서 보는 바와 같이 관내측 열전달계수가 레이놀즈수의 0.8승에 비례한 결과로 예측되지만 PE 튜브의 열전달저항을 고려하면 그 증가와 감소폭이 예상보다 컸다.

Fig. 7은 유속이 변화할 경우에 열전달 증가 현상과 열교환기 입출구의 압력강하 특성을 동시에 나타낸 것이다. 유속이 증가함에 따라 열전달량은 선형적으로 증가하지만 압력강하는 2차함수 형태로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 열교환기내 순환하는 유속을 선정할 때는 압력강하를 고려하여야 함을 알 수 있다.

3.4 총괄열전달계수 비교

본 절에서는 Pond Loop형 열교환기에 대해 참고문헌¹⁾을 인용하여 계산된 총괄열전도계수와 실험데이터에서 유출된 총괄열전도계수, U값을 비교하여 실험식의 유용성을 검증하고자 한다.

3.4.1 총괄열전달계수 U 계산

참고문헌¹⁾에 의하면 완전발달유동의 관내유동에 있어서 난류유동이면 식(1)과 같이 관내측 열전달계수를 구할 수 있다.

$$Nu_d = 0.023 Re_d^{0.8} Pr^n \quad (1)$$

여기서 $n = 0.4$ (관으로 열유입)
 $n = 0.3$ (관외로 열방출) 이다.

2) PE의 열전도계수값, k_{pe} 는 $0.5 \text{ W/m}^2\text{C}$ 이다. 계산에서 고려한 모델은 Fig. 8과 같다. 본 실험에서는 유출수조의 물을 고인 형태로 유지하면서 열교환기 내측으로 열교환을 위한 작동유체 (물)을 순환시켰으므로 수조의 온도, T_R 이 관외 벽의 온도, T_o 와 동일하다고 가정하여 계산하였다.

Fig. 8과 같은 계산 모델을 적용할 경우 총괄열전달계수 U는 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln(r_o/r_i)}{2\pi k_{pe} L}} \quad (2)$$

3.4.2 실험값을 통한 U값과 비교

3.4절의 실험 데이터를 근거로 U값을 유출하였다. 이 때 수조의 대표온도는 Pond Loop 열교환기가 위치한 수직방향으로 중앙부의 온도(5점의 평균)를 기준으로 하였고, 열교환기의 입출구

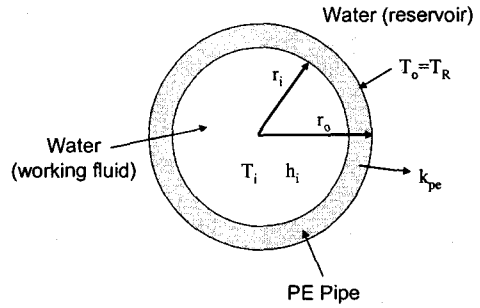


Fig. 8 Model of Heat transfer calculation

온도를 고려하여 LMTD를 산정하여 U값을 구하였다. 계산과정은 식(3), (4)와 같다. Table 3에 모델 단순화를 통해 계산한 U값과 실험값에 의한 U값을 비교하였다.

비교결과 계산치보다 실험에 유도된 값이 더 24~27% 크게 나타났다. 실험값과 계산치의 차이에 대한 이유는 보다 더 많은 실험과 분석을 통해 밝혀져야 할 것이다.

$$LMTD = \frac{\Delta T_{inlet} - \Delta T_{out}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{inlet}}{\Delta T_{out}}\right)} \quad (3)$$

$$U = \frac{Q}{A_i LMTD} \quad (4)$$

Table 3 Comparison of U at v=1m/s

Mode	U [kcal/(h·m ² ·°C)]		Difference %
	계산치	실험치	
Heat Source	224.7	295	23.8
Heat Sink	224.4	309	27.4

4. 결론

유출지하수를 이용한 지열히트펌프용 Pond Loop 열교환기의 기초실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Table 2의 사항과 같은 열교환기와 실험조건에서 수조를 Heat Source로 하여 실험한 결과 수조와 열교환기 입구의 온도차가 11~7°C 사이에서 5,500~4,500 kcal/h의 열량을 전달할 수 있음을 확인하였다

2. 수조를 Heat Sink로 하여 실험한 결과 수조

와 열교환기 입구의 온도차가 16-6℃ 사이에서 5,200 ~ 3,500 kcal/h의 열량을 전달할 수 있음을 확인하였다.

3. 열교환기 내 유속이 증가할수록 동일한 수 조온도에서 전달할 수 있는 열량이 증가함을 알 수 있었다.

4. 열교환기의 기초설계에 사용한 관계식에 의해 구한 총괄열전달계수와 실험을 통해 유출한 총괄열전달계수는 24~27%의 차이를 나타내었다.

5. 본 연구를 통하여 유출지하수 뿐만아니라 하수 및 하천수를 이용한 지열히트펌프에 이용할 수 있는 Pond Loop형 열교환기의 기초성능자료를 확보할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2005년 신재생에너지기술개발사업 중 「유출지하수를 이용한 건물냉난방기술개발(2005-N-GE02)」의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] J. P. Holman, "Heat Transfer", McGraw-Hill, 1986.
- [2] <http://www.maropolymeronline.com>
- [3] Stephen P. Kavanaugh, Kevin Rafferty, 1997, "Ground-Source Heat Pump: Design of Geothermal systems for commercial and institutional buildings", ASHRAE.
- [4] Kevin Rafferty, P. E., 2001, "An Information survival kit for the prospective geothermal heat pump owner", Geo-Heat Center Oregon Institute of Technology.
- [5] 이영수, 2005, "하수열원이용 고효율 히트펌프시스템 기술개발현황분석, ETIS분석지 제25권, pp. 55-61.