

유출지하수 열원 지열히트펌프용 Pond Loop형 열교환기의 열전달 성능

박근우*, 김진상, 이용열

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

Geunwoo Park, Jinsang Kim, Eungyoul Lee

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 5,500~4,500kcal/h의 열량이 전달되었고, 수조를 Heat Sink로 사용할 경우 5,200 ~ 3,500kcal/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.

Key words

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

* 삼양에코너지 연구소

□E-mail : gwpark@ecosy.co.kr

□Tel : (031)713-8157

□Fax : (031)713-8158

Nomenclature

Nu_d : Nusselt number based on diameter, hD_h/k
 Re_d : Reynolds number based on diameter, GD_h/μ_i
 Pr : Prandtl number, $\mu_c/\rho k$
 U : overall heat transfer coefficient, W/m^2-K
 h_i : inner heat transfer coefficient, W/m^2-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, $W/m-K$
 $LMTD$: 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 매설해야하는 특성을 갖고 있다. 특히 우리나라와 같이 냉난방 수요지에 유희공간이 적은 경우에는 천공 또는 트렌치 작업 등에 많은 애로사항이 있다. 도심지의 경우에는 이로 인해 지열히트펌프의 적용이 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 판형열교환기나 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 Loop형 열교환기의 일반적인 형태이다. Pond Loop형 열교환기는 미국 등지에서는 부분적으로 사용되고 있으나, 국

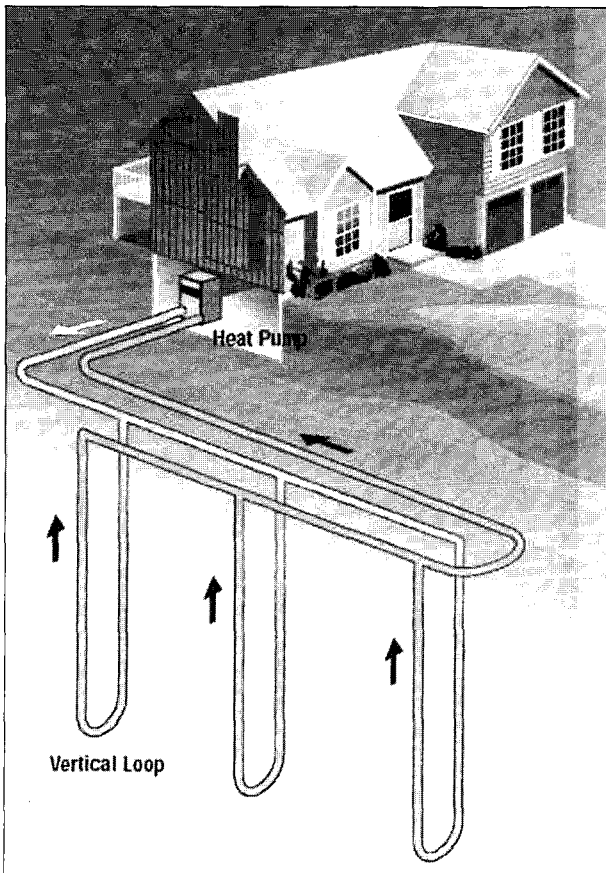


Fig. 1 Typical Vertical Loop GSHP

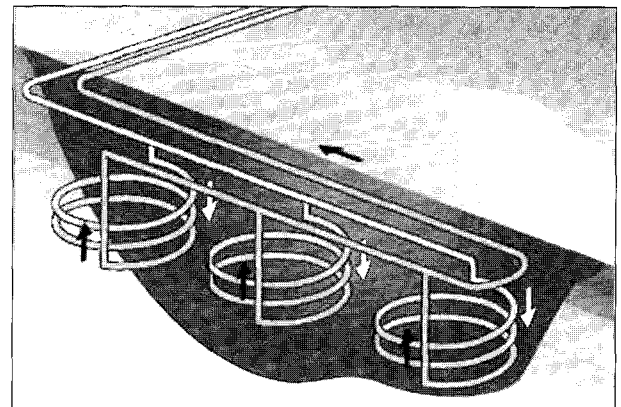
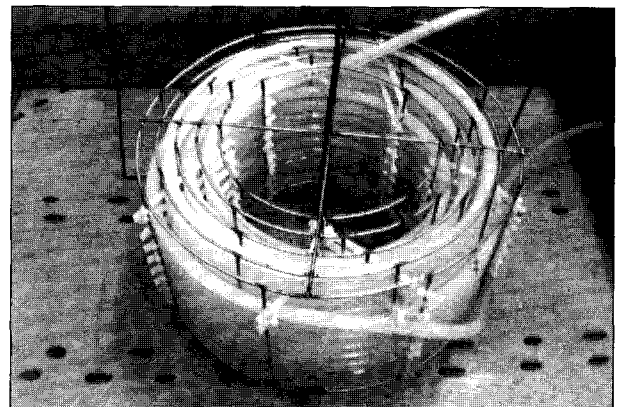


Fig. 2 Pond Loop type Heat Exchanger



Picture. 1 Pond Loop type Heat Exchanger

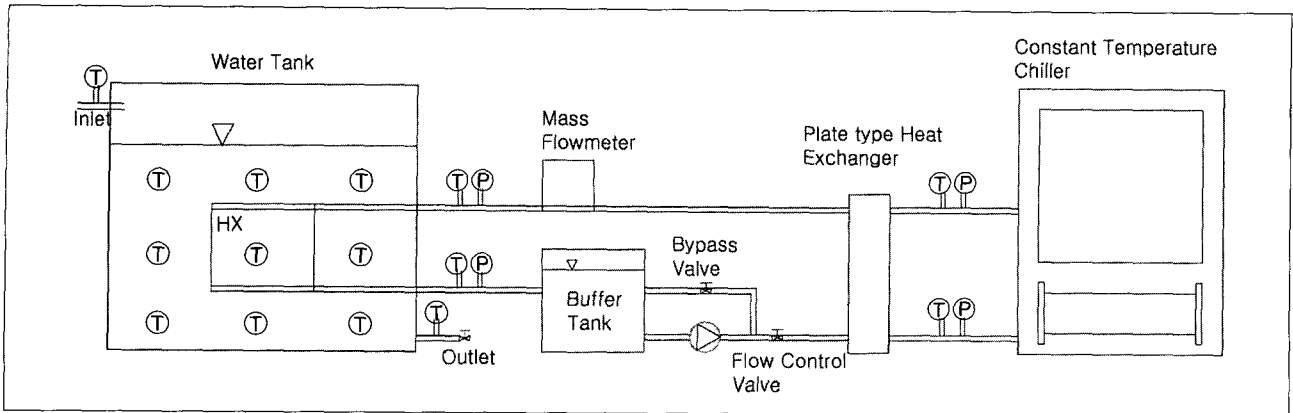


Fig. 3 Diagram of Experimental Facility for Pond Loop Type Heat Exchanger

내의 경우에는 사용한 예가 없고 이에 대한 기초자료가 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 유효지표수에 이용할 수 있는 Pond Loop 형태의 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 Loop 형 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.

2.2 실험장치

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 실험장치의 개략도이다. 유출

수를 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 ΔT=5°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℃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℃인 경우, 시간에 따른 유출수조 온도와 열전달량 변화를 나타내고 있다. 초

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	Heat Sink Mode	30 °C
Inlet Temp.	Heat Source Mode	7 °C
Water Tank	Heat Sink Mode	15~24 °C
Average Temp.	Heat Source Mode	10 ~ 18 °C
Water Tank State	Still, Stagnation	
Velocity of water in Tube	0.5, 1, 1.5 m/s	

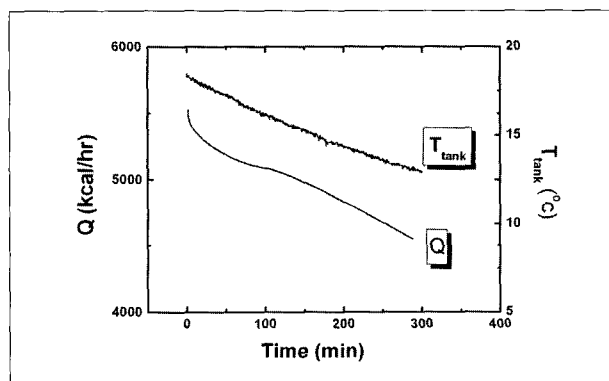


Fig. 4 Change quantity of heat and reserve tank temp. in heat Source mode (v=1m/s)

기 수조의 온도는 18℃에서 출발하였다. 초기의 열전달량 Q는 5,500 kcal/h 를 나타내고 있다.

시간이 경과함에 따라 수조온도가 13℃까지 점차 낮아지면서 열전달량, Q도 4,500 kcal/h로 저하되는 것을 볼 수 있다. 이는 열교환기 입구온도는 7℃로 유지되는 반면 수조의 온도가 점차 낮아져 전체적인 온도차가 감소했기 때문이다.

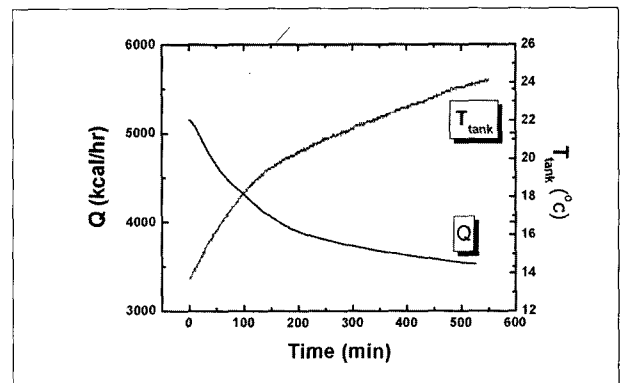


Fig. 5 Change quantity of heat and reserve tank temp. in heating mode (v=1m/s)

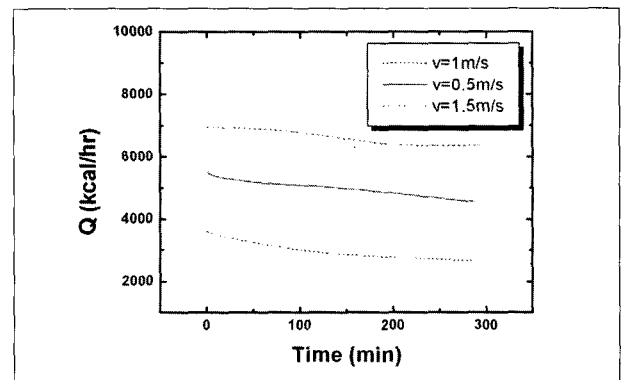


Fig. 6 Change quantity of heat at variety velocity

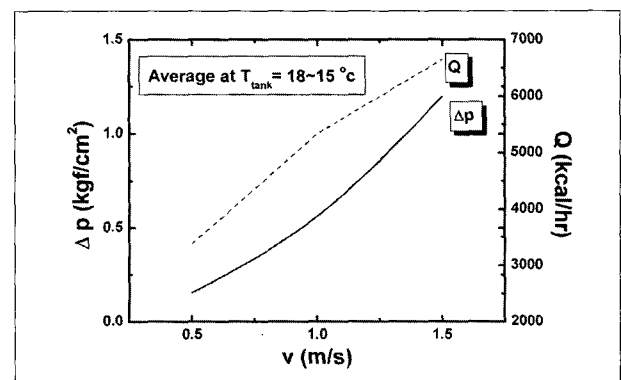


Fig. 7 Pressure drop at variety velocity

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 1m/s, 입구온도가 30°C인 경우, 시간에 따른 유출수조 온도와 열전달량 변화를 나타내고 있다. 초기 수조의 온도는 13°C에서 출발하였다. 초기의 열전달량 Q는 5,200 kcal/h 를 나타내고 있다. 시간이 경과함에 따라 수조온도가 24°C까지 증가하여 열전달량은 3,500kcal/h로 감소하였다. 이 역시 수조와 열교환기 입구온도의 차가 감소했기 때문이다. 수조의 온도와 열교환기 입구온도차가 16~6°C인 경우 상기 제원의 열교환기를 통해 5,200~3,500kcal/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 ~ 1.5m/s)에 따른 열전달량의 변화를 나타낸다. 열전달량은 유속이 증가할수록 증가하였다. 열전달량의 증가현상은 수조의 온도가 변화하는 시간에 따라 지속적으로 나타났다. 유속1m/s를 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 증가현상과 열교환기 입출구의 압력강하 특성을 동시에 나타낸 것이다. 유속이 증가함에 따라 열전달량은 선형적으로 증가하지만 압력강하는 2차 함수형태로 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서 열교환기내 순환하는 유속을 선정할 때는 압력강하를 고려하여야 함을 알 수 있다.

3.4 열교환기 Tube 주변의 온도분포

본 절에서는 Pond Loop형 열교환기의 열 경계층의 두께에 대해 알아보고자 Pipe표면과 10mm 근처 그리고 Tank의 중심부에서 수온을 측정하여 비교하였다.

3.4.1 Heat Source 모드의 주변온도

Fig. 8은 유출수를 Heat Source로 사용하였을 경우의 Pond Loop형 열교환기 주변의 물온도를 나타낸다. 열교환기의 외벽면의 온도와 10mm 떨어진 부분의 온도는 1.8 ~ 1°C의 차이를 나타내고 있다. 그러나 Tube에서 10mm 이격된 부분의 물온도는 지하수의 Tank 중앙부의 온도와 거의 일치하게 나타났다. 따라서 Tube 외벽면의 열경계층의 두께는 10mm 미만인 것을 알 수 있다. 보다 조밀한 간격(3, 5, 7mm 등)에서 온도를 측정해야 했으나 온도센서의 설치가 곤란하여 더 이상 실험은 진행하지 못했다. 보다 자세한 내용은 Fluent와 같은 해석Tool을 이용하여 진행해야 할 것이다.

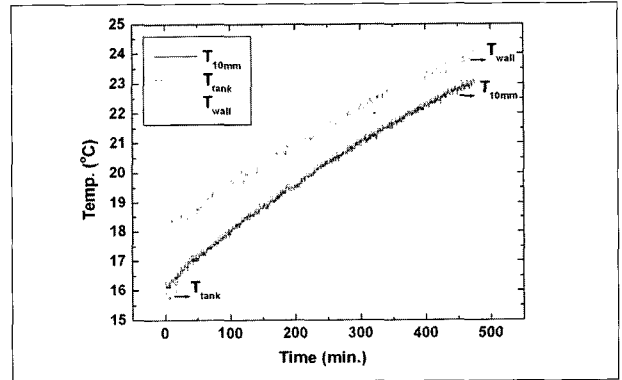


Fig. 8 Water temp. beside tube in heat source mode

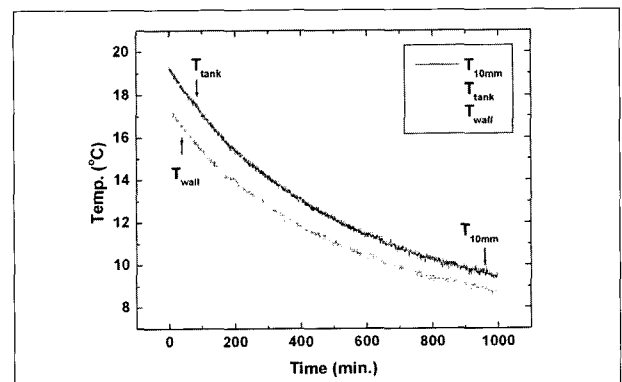


Fig. 9 Water temp. beside tube in heat sink mode

3.4.2 Heat Sink 모드의 주변온도

Fig. 9는 유출수를 Heat Sink로 사용하였을 경우의 Pond Loop형 열교환기 주변의 물온도를 나타낸다. 열교환기의 외벽면의 온도와 10mm 떨어진 부분의 온도는 1.2 ~ 0.8℃의 차이를 나타내고 있다. 앞의 경우와 같이 Tube에서 10mm 이격된 부분의 물온도는 지하수의 Tank 중앙부의 온도와 거의 일치하게 나타났다. 따라서 Tube 외벽면의 열경계층의 두께는 10mm 미만인 것을 알 수 있다.

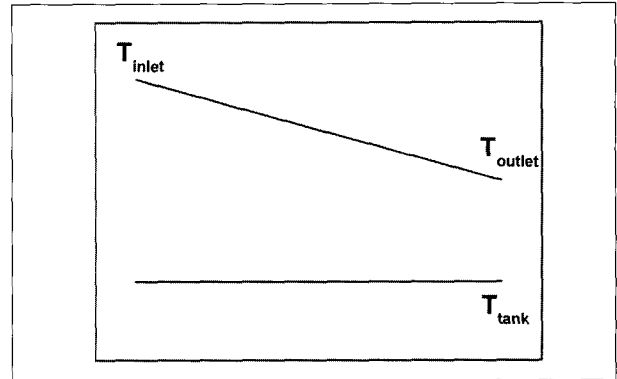


Fig. 10 Inlet and outlet Temp. of pond loop heat exchanger in water Tank

3.5 총괄열전달계수, U 산출

본 절에서는 실험을 통하여 얻어진 Pond Loop형 열교환기의 성능을 바탕으로 설계인자인 총괄열전달계수 U값을 산출하였다.

3.5.1 LMTD 산정

일반적인 열교환기와 달리 Pond Loop형 열교환기는 Tank의 온도가 동일하기 때문에 Fig.10과 같이 온도분포가 나타나게 된다. 따라서 U값은 식(1)~(5)와 같은 과정을 통해서 산출하였다.

$$Q = UA_oLMTD \quad (1)$$

$$LMTD = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 - \Delta T_2)} \quad (2)$$

$$\Delta T_1 = T_{inlet} - T_{tank} \quad (3)$$

$$\Delta T_2 = T_{outlet} - T_{tank} \quad (4)$$

$$U = \frac{Q}{A_oLMTD} \quad (5)$$

실험결과를 바탕으로 상기과정을 통하여 얻어진 LMTD와 U값을 Heat Source 모드와 Sink 모드에서 나타내었다.

3.5.2 실험값을 통한 U값 산출

Fig. 11은 Heat Source모드의 결과이다. 시간이 경과함에 따라 LMTD는 7℃에서 4℃로 감소하고 있고 U값은 250에서 400 kcal/h m²℃로 증가하였다. 이는 LMTD가 감소함에 따라

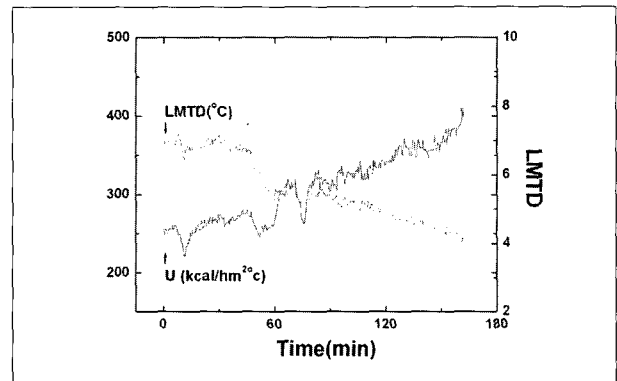


Fig. 11 LMTD and U in heat source mode

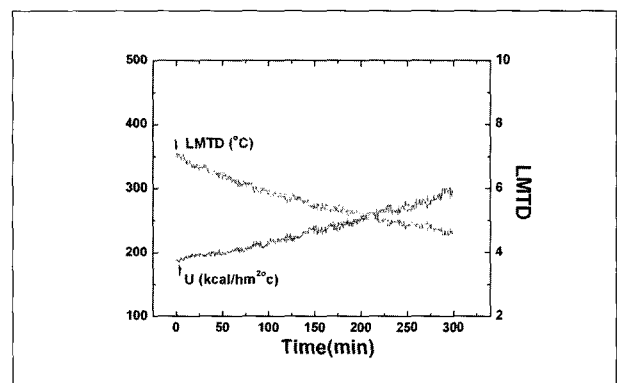


Fig. 12 LMTD and U in heat sink mode

열전달의 유효성이 증가하여 U값이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

Fig. 12는 Heat sink모드에서의 결과이다. 시간이 경과함에 따라 LMTD는 7℃에서 4.5℃로 감소하고 있고 U값은 190에서 300 kcal/h m²℃로 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 앞서 설명

한 바와 같이 LMTD가 감소함에 따라 열전달의 유효성이 증가함을 보여준다.

전체적으로 U값은 heat source mode가 heat sink mode에서보다 크게 나타났다. 이는 관내측의 강제대류열전달계수와 관외측의 자연대류열전달계수의 복합적인 효과로 나타난 것으로 보여진다.

4. 결론

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

1. Table 2의 사양과 같은 열교환기와 실험조건에서 수조를 Heat Source로 하여 실험한 결과 수조와 열교환기 입구의 온도차가 11~7℃ 사이에서 5,500~4,500kcal/h의 열량을 전달할 수 있음을 확인하였다
2. 수조를 Heat Sink로 하여 실험한 결과 수조와 열교환기 입구의 온도차가 16~6℃ 사이에서 5,200 ~ 3,500 kcal/h의 열량을 전달할 수 있음을 확인하였다.
3. 열교환기 내 유속이 증가할수록 동일한 수조온도에서 전달할 수 있는 열량이 선형적으로 증가하나 입출구 압력차는 2차함수로 증가하므로 적정점에서 설계가 필요하다.
4. 실험대상 Pond Loop형 열교환기의 열경계층은 10mm 미만임을 확인하였다.
5. 본 연구를 통하여 유출지하수 뿐만아니라 하수 및 하천수를 이용한 지열히트펌프에 이용할 수 있는 Pond Loop형 열교환기의 기초성능자료를 확보할 수 있었다.

후기

본 연구는 2005년 신재생에너지기술개발사업 중 「유출지하수를 이용한 건물냉난방기술개발(2005-N-GE02-P-01-000)」의 일환으로 수행되었습니다.

References

- (1) J. P. Holman, "Heat Transfer" pp. 271~ 341, McGraw-Hill, 1986.
- (2) 한정상 외 3인, "지열펌프 냉난방 시스템", 한림원, 2004
- (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.

박근우



1994년 고려대학교 기계공학과 공학사
1996년 고려대학교 기계공학과 공학석사
2000년 고려대학교 기계공학과 공학박사
2000~2006년 (주)신성이엔지 연구소 책임연구원

현재 삼양에코너지(주) 연구소장
(E-mail ; gwpark@ecosity.co.kr)

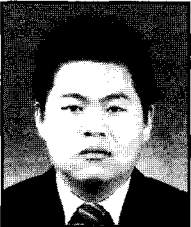
김진상



1986년 Stanford University 기계공학 석사
1993년 Texas A&M University 기계공학박사
1994~1997년 고등기술연구원 선임연구원
1999~2004년 (주)타이엔 대표
2005~2006년 삼양에코너지(주) 연구소장

(E-mail ; genakim@chol.com)

이응열



2004년 인천대학교 기계공학과 공학사
2006년 인천대학교 기계공학과 공학석사

현재 삼양에코너지 (주) 부설연구소 근무
(E-mail ; yuli_1st@incheon.ac.kr)