

지열히트펌프시스템의 냉방운전에 따른 성능연구

이재근†, 정영만, 구경민, 황유진, 장세용, 김인규*, 진심원*, 이동혁*

부산대학교 기계공학과, *LG전자 DA연구소

Cooling Performance of a Ground Source Heat Pump System

Jae-Keun Lee†, Young-Man Jeong, Kyoung-Min Koo, Yu-Jin Hwang,
Se-Yong Jang, In-Kyu Kim*, Sim-Won Jin*, Dong-Hyuk Lee*

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

*Digital Appliance Laboratory, LG Electronics, Changwon 641-711, Korea

ABSTRACT: This present study is to evaluate the cooling performance of a water-to-refrigerant ground source heat pump system(GSHP) under actually operating condition. 1 unit is selected among 10 units of the GSHP in the building to analyze the performance. The average cooling COP of the GSHP at the part load of 64% is 8.2, overall system COP is 6.19. In the GSHP system, the cooling temperature of the condenser is lower compared to the air source heat pump system. Conclusively, the cooling performance of the GSHP is higher than the air source heat pump system by 80%.

Key words: Ground source heat pump(GSHP), Cooling performance, Coefficient of performance(COP), Air source heat pump(ASHP)

기 호 설 명

하첨자

COP : 성능계수 [-]

h : 엔탈피 [kJ/kg]

\dot{m} : 질량유량 [kg/s]

Q : 열 흡수율 [kW]

V : 풍량 [m^3/s]

W : 압축기 소비전력 [kW]

air : 공기

c : 압축기

f : 팬(Fan)

hp : 히트펌프

i : 입구

o : 출구

overall : 전체 시스템

p : 순환펌프

그리스 문자

ρ : 공기의 밀도 [kg/m^3]

† Corresponding author

Tel.: +82-51-510-3085; fax: +82-51-582-6368

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

1. 서론

최근 화석에너지의 고갈 및 환경문제로 인해 지열 히트펌프시스템에 대한 관심 및 적용이 증

가하고 있다.⁽¹⁾ 지열 히트펌프시스템(ground source heat pump systems)은 크게 지중 열교환기(ground heat exchanger)와 히트펌프로 구성된 냉·난방 겸용 시스템이다. 냉방 사이클의 지열 히트펌프시스템은 실내에서 흡수한 열을 지중 열교환기를 통해 지중으로 방출한다. 반대로 난방 사이클의 경우, 지중 열교환기는 지중에서 열을 흡수하여 실내로 공급한다.⁽²⁾ 이 시스템의 장점은 공기 열원 히트펌프(air-source heat pumps) 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, 지중 열교환기의 매설에 따른 높은 초기 설치비를 단점으로 들 수 있다.⁽³⁾

지열 히트펌프시스템은 지중의 토양과 온도 분포, 지중열교환기와 히트펌프 방식에 따라 성능에 영향을 미친다. 지열 히트펌프 방식으로는 주로 물-물 방식을 사용하고 있으며, 이에 대한 지열 히트펌프의 성능 연구로는 Hepbasli et al.(4), Zhao(5), Nagano et al.(6) 그리고 Michopoulos et al.(7)의 연구를 들 수 있다. 물-물 지열 히트펌프시스템은 전체건물의 냉·난방에 필요한 냉수 또는 온수를 만들어 Fan coil unit(FCU) 실내기로 보내어 냉·난방 운전을 한다. 최근에는 물-냉매 방식의 지열 히트펌프시스템이 개발되고 있다. 물-냉매 방식의 지열 히트펌프는 지중열교환기는 기존 방식과 동일하지만 실내에서 냉매-공기가 열교환을 한다. 따라서 기존의 물-물 방식에서는 물이 현열만 이동시키지만, 물-냉매 방식은 현열과 잠열을 동시에 이동시키므로 높은 에너지 전달 효율을 갖고 있다. 또한 물-물 방식은 실내 FCU에 물을 보내기 위한 펌프가 필요하고, 물 배관의 부식 및 누수의 문제로 정기적인 유지 보수가 필요하며, 개별적인 실의 제어가 불가능하다. 하지만 물-냉매방식의 지열히트펌프는 실내 FCU에 물을 보내기 위한 펌프가 필요 없고, 펌프 운전에 필요한 전력소모를 줄일 수 있으며, 부식 및 누수에 따른 정기적인 유지보수가 필요 없고, 개별적으로 실의 제어도 가능한 장점이 있다.

본 연구에서는 사무실 및 교수연구실 용도로

사용되는 학교 건물에 물-냉매 방식의 지열 히트펌프를 설치하여 실사용 환경에서 냉방성능 변화를 연구하였다. 또한 시스템 운전에 따른 지중 온도변화를 비교하기 위해 매설 깊이에 따른 지중 온도를 측정하여 분석 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

물-냉매 방식의 멀티 히트펌프에 지열원을 적용하여 건물에서의 실사용 시험을 통한 지열 히트펌프의 성능 및 경제성을 분석하기 위해 Fig. 1과 같이 부산대학교 교수연구동의 1~2층에 지열 히트펌프를 설치하였다.

본 건물에는 "L"사에서 제조된 10 HP(LRW-N2900D, L사) 용량의 지열 히트펌프가 10대 설치되어 있으며 Fig. 2와 같이 지열 히트펌프 1대에는 3~4대의 실내기가 부착되어 있다. 지열 히트펌프에는 인버터 기술을 이용한 고효율 압축방식을 채택하여 부분부하 대응에 우수한 성능을 가지고 있다. 지중열교환기는 수직 밀폐형으로 보어홀은 총 24개이며 깊이는 175 m이다.

부산대학교 교수연구동은 학과사무실, 세미나실 및 교수연구실로 구성되어 있다. 본 연구에서는 냉난방기의 활용도가 높은 학과사무실에 연결된 지열 히트펌프를 1대 선정하여 냉방성능을 분석하였다.



Fig. 1 Building of the ground source heat pump installed.

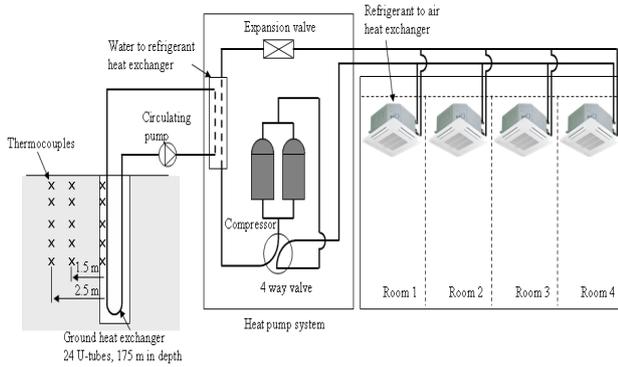


Fig. 2 System diagram of ground source heat pump.

지열 히트펌프의 성능 특성 및 지중 온도 변화 특성을 분석하기 위해 실험장치의 개략도를 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2와 같이 지열 히트펌프 1대에 4개의 학과사무실에 실내기가 각 1대씩 설치되어 있다. 학과사무실은 43.2 m²의 공간이며, 실내기는 2.5 HP(LRD-N725T, L사)이다.

지중온도를 포함한 각종 온도 측정을 위해 T형 열전대(T-type thermocouple)가 사용 되었으며, 냉방성능을 측정하기 위해 실내기의 온도와 습도는 온습도계(EL-2, LASCAR사)로 측정 하였다. 또한 전체 시스템의 소비전력 측정을 위해 적산전력계(MWT-340S, 한국마이크로닉스)를 부착하였고, 히트펌프의 소비전력을 측정하기 위해 별도의 전력계(WT1600, Yokogawa)로 측정하였다. 온도, 소비전력 및 실내기의 온습도 등의 데이터를 1분 간격으로 측정한 후, 데이터 획득 시스템에 기록하여 성능 분석에 사용하였다.

2.2 실험결과 해석 방법

지열 히트펌프의 성능은 일반적으로 성능계수(COP, Coefficient of Performance)로 나타내며 냉방성능은 다음의 식(1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\text{COP}_{\text{hp}} = \frac{\dot{Q}_{sl}}{\dot{W}_c} \quad (1)$$

여기서, \dot{Q}_{sl} 은 실내기에서 실내의 열을 흡수하는

열량이며, \dot{W}_c 는 히트펌프의 압축기에 소요되는 소비전력이다.

전체 시스템의 성능계수는 다음의 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$\text{COP}_{\text{overall}} = \frac{\dot{Q}_{sl}}{\dot{W}_c + \dot{W}_p + \dot{W}_f} \quad (2)$$

여기서, \dot{W}_p 는 지중열교환기의 순환펌프에서 소요되는 소비전력이며, \dot{W}_f 는 실내기의 팬에서 소요되는 소비전력이다.

실내기에서 흡수하는 열량 \dot{Q}_{sl} 은 다음의 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$\dot{Q}_{sl} = \dot{m}_{air}(h_{o,air} - h_{i,air}) \quad (3)$$

$$\dot{m}_{air} = \rho_{air} \dot{V}_{air} \quad (4)$$

여기서, \dot{m}_{air} 는 공기의 질량, \dot{V}_{air} 는 공기의 풍량, ρ_{air} 는 공기의 밀도이다. 그리고 $h_{o,air}$ 와 $h_{i,air}$ 는 실내기에서 출구와 입구의 엔탈피이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 지중 온도 분포

지열 히트펌프는 지중열교환기가 지중으로부터 열을 흡수하거나 또는 실내에서 흡수한 열을 지중으로 방출하는 과정에서 지중의 열확산 특성에 따라 영향을 받는다. 따라서, 지중열교환기의 열확산 특성을 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 지중열교환기에서 1.5 m, 2.5 m 떨어진 지점에 깊이 별로 열전대를 매설하여 지중온도를 측정 하였다. Fig. 3은 지중열교환기에서 2.5 m 떨어진 지점에서 지중의 깊이별로 측정한 결과 지표면 아래 2.5 m 지점에는 외기 온도에 따라 변화가 크며, 지표면 아래 5 m 지점에도 외기온도에 따라 영향을 받는 것을 알 수 있다. 지표면 아래 10 m 이하 지점에는 온도 변화가 안정적이지만 지열 히트펌프 가동 초기(3월 21일)의 지중온도는 평균 15.8°C에서 9월 30일에는 평균 17.3°C로

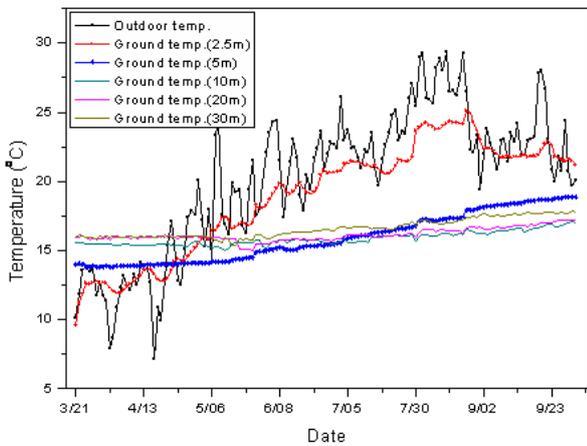


Fig. 3 The daily average ground temperature and outdoor temperature variation during March 2007~September 2007.

약 1.5°C 상승한 것으로 나타났다.

Fig. 4은 순환수 온도에 따른 지중온도 변화를 관찰하기 위해 외기온도에 영향이 적은 지표면 아래 10 m 지점에서 지중열교환기에서 1.5 m, 2.5 m 떨어진 지점의 지중온도를 측정하였다. 시스템의 냉방운전(5/7~9/30) 동안 순환수의 온도는 평균 19.7°C 이며, 외기온도와 냉방부하에 따라 최고 22.1°C까지 증가 하였다. 순환수 온도에 따라 지중열교환기의 표면온도는 변화가 크지만 지중열교환기에서 1.5 m와 2.5 m 떨어진 지점에서의 온도는 동일하였으며 순환수 온도에 의한 지중온도는 변화가 거의 없었다.

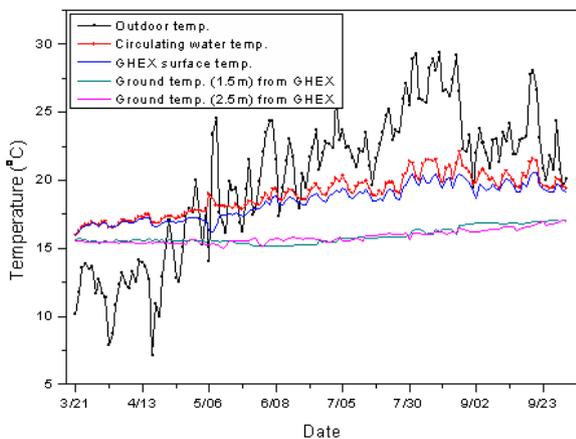


Fig. 4 The daily average circulating water temperature and ground temperature variation during March 2007~September 2007.

3.2 시스템의 냉방성능

본 연구에서 지열 히트펌프의 냉방성능 특성은 냉방 기간 동안 외기온도가 높고 냉방부하가 최대인 2007년 8월 16일의 데이터를 기준으로 일일 냉방성능을 분석 하였다.

Fig. 5는 지열 히트펌프의 열교환기(응축기) 입·출구에서 지중열교환기 순환수의 온도 변화를 나타내었다. 외기온도는 평균 32.7°C이며, 순환수 입구온도는 평균 21.5°C로 거의 일정하였으며 출구온도는 시간별 냉방부하에 따라 차이가 있었다. 입·출구 온도 차이는 최대 5.0°C이며, 평균 3.1°C 온도 차이를 나타내었다.

Fig. 6은 실내기에서 측정된 데이터를 식(3)을 이용하여 계산된 냉방부하이다. 실내 냉방부하는 시간에 따라 변화하지만 평균 18.7 kW로 지열 히트펌프의 전부하(29 kW) 대비 64% 부분부하에서 운전되었다. 본 연구에서 적용된 지열 히트펌프의 냉방성능 분석결과 히트펌프 부하율이 64%일때 식(1)과 같이 히트펌프의 COP는 평균 8.2이며, 식(2)와 같이 시스템 전체의 COP는 6.19로 나타났다.

3.3 타 열원시스템과 성능 비교

지열 히트펌프(GSHP, Ground source heat pump)는 히트싱크(heat sink) 및 열원(heat source)의 역할을 하는 지열의 연중 온도변화는 외기보다 안정적이기 때문에 공랭식 열원시스템보다 높은 효율과 우수한 성능을 갖는다.

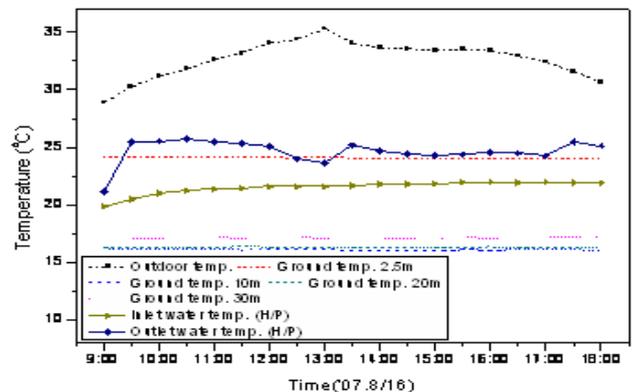


Fig. 5 The variation of the water temperature at the condenser inlet and outlet of ground source heat pump.

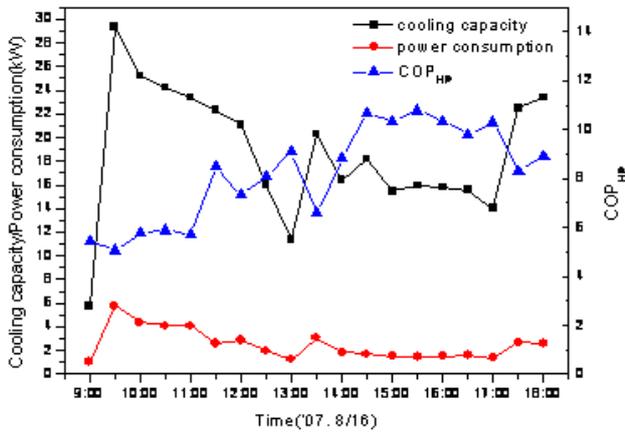


Fig. 6 The variation of space cooling capacity and power consumption.

본 연구에서 공랭식 히트펌프(ASHP, Air source heat pump)시스템과 지열 히트펌프의 성능을 비교하기 위해 동일 용량의 공랭식 히트펌프(LRP-V2905B, L사)를 선정하여 분석하였다. 냉방성능 비교를 위해 지열 히트펌프는 본 연구에서 측정된 실사용 조건을 사용 하였으며, 공랭식 히트펌프는 표준 조건(실내 27°C DB/19.5°C WB, 실외 35°C DB/24°C WB) 에서 측정된 데이터를 활용하였다.

Fig. 7는 냉방 운전시 지열 히트펌프와 공랭식 히트펌프의 P-h 선도를 나타낸 것이다. 운전 조건은 외기온도가 35°C 이며, 지열 히트펌프의 경우 열교환기(응축기)의 순환수 입구 온도가 21.5°C로 가정하였다. P-h 선도 상에서 지열 히트펌프의 응축기 압력이 공랭식 히트펌프보다 낮은 이유는 응축기를 판형열교환기를 사용하기 때문에 외기온도에 영향을 받지 않고, 지중의 안정한

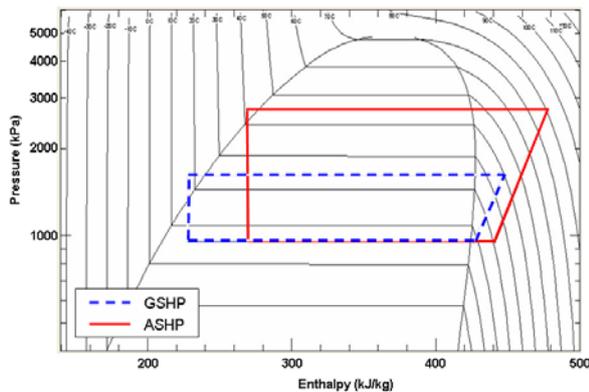


Fig. 7 Thermodynamic cycle of GSHP and ASHP.

Table 1 Compare with GSHP and ASHP (Part load 60%)

		GSHP	ASHP
Condenser	Inlet water temp.(°C)	21.5	-
	Outdoor temp.(°C)	-	35
Compressor	High pressure(kPa)	1620	2731
	Low pressure (kPa)	956	956
Cooling performance	COP _{hp}	8.2	3.91
	COP _{overall}	6.19	3.37

열을 제공 받으며, 공기 대신 물에 의한 열교환을 하기 때문에 열전달 특성이 우수하다. 따라서, 응축기의 압력이 낮아지고 압축비가 작아지므로 전력 소비량이 적어 냉방성능이 우수하다.

Table 1과 같이 지열 히트펌프는 공랭식 히트펌프에 대비 2배 이상 냉방 COP가 향상되고, 실내 팬 및 순환수 펌프의 소비전력을 감안한 전체 시스템의 냉방 성능도 약 80% 우수한 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 물-냉매 방식의 멀티 히트펌프에 지열원을 적용하여 건물에서의 실사용 시험을 통한 냉방성능 변화를 연구하였다. 또한 시스템 운전 에 따른 지중온도변화를 비교하기 위해 매설 깊이에 따른 지중온도를 측정하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 지중열교환기의 열확산 특성을 분석하기 위해 지중열교환기에서 2.5 m 떨어진 지점에서 지중의 깊이별로 측정된 결과 지표면 아래 2.5 m 지점에는 외기 온도에 따라 변화가 크며, 지표면 아래 5 m 지점에도 외기온도에 따라 영향을 받는 것을 알 수 있다. 지표면 아래 10 m이하 지점에는 온도 변화가 안정적이지만 지열 히트펌프 가동초기(3월 21일)의 지중온도는 평균 15.8°C에서 9월 30일에는 평균 17.3°C로 약 1.5°C 상승한 것으로 나타났다.

(2) 냉방 기간 동안 외기온도가 높고 냉방부하가 최대인 2007년 8월 16일에 지열 히트펌프의 열교환기(응축기) 입·출구에서 지중열교환기 순환수의 입구온도는 평균 21.5℃로 거의 일정하였으며 출구온도는 시간별 냉방부하에 따라 차이가 있었다. 실내의 냉방부하는 평균 18.7 kW로 지열 히트펌프의 전부하(29 kW) 대비 64% 부분부하에서 운전되었다. 본 연구에서 적용된 지열 히트펌프의 냉방성능 분석결과 히트펌프 부하율이 64%일 때 히트펌프의 COP는 평균 8.2이며, 시스템 전체의 COP는 6.19로 나타났다.

(3) 지열 히트펌프는 응축기에서 열전달 특성이 우수하기 때문에 응축기 압력이 낮아지고 압축비가 작아지므로 전력 소비량이 적어 공랭식 히트펌프에 비해 냉방 성능도 약 80% 우수한 것으로 나타났다.

후 기

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

참고문헌

1. Zhaho, P. C., Zhaho, L., Ding, G. L., Zahang, C. L., 2002, Experimental research on geothermal heat pump system with non-azeotropic working fluids, Applied Thermal Engineering, Vol. 22, pp. 1749-1761.
2. Sohn, B. H., Cho, C. S., Shin, An, H. J., 2005, Cooling and heating performance evaluation of a GSHP system, Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 71-81.
3. 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.
4. Hepbasli, A., Akdemir, O., Hancioglu, E., 2003, Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system, Energy Conversion and Management, Vol.

- 44, pp. 527-548.
5. Zhao, L., 2004, Experimental evaluation of a non-azeotropic working fluid for geothermal heat pump system, Energy Conversion and Management, Vol. 44, pp. 1369-1378.
6. Nagano, K., Katsura, T., 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.
7. Michopoulos, A., Bozis, D., Kikidis, P., Papakostas, K., Kyriakis, N. A., 2007, Three-years operation experience of a ground source heat pump system in Northern Greece, Energy and Building, Vol. 39, pp. 328-334.