

지열원 히트펌프시스템의 실사용을 통한 난방성능연구

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

부산대학교 기계공학과, *LG전자

Heating Performance of a Ground Source Heat Pump System through Actual Operation

Kyoungmin Koo, Young-Man Jeong, Jaekeun Lee, 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 paper presents the heating performance of a water-to-refrigerant type ground source heat pump system (GSHP) installed in a school building. The evaluation of the heating performance has been conducted under the actual operating conditions of GSHP system in the winter. Ten units with the capacity of 10 HP each were installed in the building. Also, a closed vertical typed-ground heat exchanger with 24 boreholes of 175 m in depth was constructed for the GSHP system. For analyzing the heating performance of the GSHP system, we monitored various operating conditions, including the outdoor temperature, the ground temperature, and the water temperature of inlet and outlet of the ground heat exchanger. Simultaneously, the heating capacity and the input power were evaluated for determining the heating performance of the GSHP system. The average heating coefficient of performance (COP) of the heat pump was found to be 5.1 at partial load of 46.9%, while the overall system COP was found to be 4.2.

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

기 호 설 명

COP : 성능계수 [-]

h : 엔탈피 [kJ/kg]

\dot{m} : 질량유량 [kg/s]

Q : 열 흡수율 [kW]

V : 풍량 [m^3/s]

W : 압축기 소비전력 [kW]

그 리 스 문 자

ρ : 공기의 밀도 [kg/m^3]

하첨자

[†] Corresponding author

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

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

air : 공기

- c : 압축기
- f : 팬(Fan)
- hp : 히트펌프
- i : 입구
- o : 출구
- overall : 전체 시스템
- p : 순환펌프

1. 서론

세계적으로 신재생에너지에 대한 관심이 높아지는 가운데 에너지 절감효과가 뛰어난 히트펌프 시스템에 대한 관심 및 적용이 증가하고 있다.⁽¹⁾ 지열원 히트펌프시스템(ground source heat pump systems)은 외기의 급격한 변화에도 영향을 받지 않고 일정하게 온도를 유지하는 지열을 활용하기 때문에 효율이 높은 에너지 절약형 시스템이다. 여름과 겨울이 뚜렷한 우리의 기후조건에서 활용 가능성이 매우 우수한 시스템이다. 난방의 경우, 지중 열교환기는 지중에서 열을 흡수하여 실내로 공급한다. 반대로 냉방일 때 지열원 히트펌프시스템은 실내에서 흡수한 열을 지중 열교환기를 통해 지중으로 방출한다.⁽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 지열원 히트펌프시스템은 높은 효율과 우수한 성능을 갖는다. 반면, 지중 열교환기의 매설에 따른 높은 초기 설치비를 단점으로 들 수 있다.⁽³⁾

지열원 히트펌프시스템은 지중의 토양과 온도 분포, 지중열교환기와 히트펌프 방식에 따라 성능에 영향을 미친다. 지열원 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 지열원 히트펌프시스템이 개발되고 있다. 물-냉매 방식의 지열원

히트펌프는 지중열교환기는 기존 방식과 동일하지만 실내에서 냉매-공기가 열교환을 한다. 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 지열원 히트펌프는 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 지열원 히트펌프를 설치하여 실사용 환경에서 난방성능 변화를 연구하였다. 또한 시스템 운전에 따른 지중 온도변화를 측정하고 타열원(공랭식)시스템과 비교분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

물-냉매 방식의 멀티 히트펌프에 지열원을 적용하여 건물에서의 실사용 시험을 통한 지열원 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 지열원 히트펌프가 10대 설치되어 있으며 Fig. 2와 같이 지열원 히트펌프 1대에는 3~4대의 실내기가 부착되어 있다. 지열 히트펌프에는 인버터 기술을 이용한 고효율 압축 방식을 채택하여 부분부하 대응에 우수한 성능을 가지고 있다. 지중열교환기는 수직 밀폐형으로 보어홀은 총 24개이며 깊이는 175 m이다.



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

Table 1 Specification of the components consisting of the GSHP system

Main circuit	Component	Specification
Ground coupling circuit	Ground heat exchanger (1)	Vertical-closed U-bend type Borehole diameter: 150 mm Internal diameter of U-bends: 42 mm Borehole depth: 175 m, Material: polyethylene
	Circulating pump	Manufacturer: Hyosung-Ebara Co. Model: ILP 100-250 Volumetric flow rate: 45~130 m ³ /h Power: 7.5kW, Speed: 1750 rpm
Heat pump circuit (Manufacturer: LG Electronics, model: LRW-N2900D)	Heat exchanger	Manufacturer: SWEP Capacity: 32.6 kW Type: Plate heat exchanger
	Compressors	Manufacturer: Matsushida Type; Rotary Refrigerant: R-410A 1. Inverter type: 4.2 hp (3.1 kW) 2. Fixed type: 4.2 hp (3.1 kW)
	Indoor unit	Manufacturer: LG Electronics Model: LRD-N725T, Cooling capacity: 7.2 kW Air flow rate: 17 m ³ /min

부산대학교 교수연구동은 학과사무실, 세미나실 및 교수연구실로 구성되어 있다. 본 연구에서는 냉난방기의 활용도가 높은 학과사무실에 연결된 지열원 히트펌프를 1대 선정하여 난방성능을 분석하였다. 지열원 히트펌프의 사양은 Table 1과 같다.

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

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

지중온도를 포함한 각종 온도와 난방성능측정하기 위해 T형 열전대(T-type thermocouple)가 사용되었다.

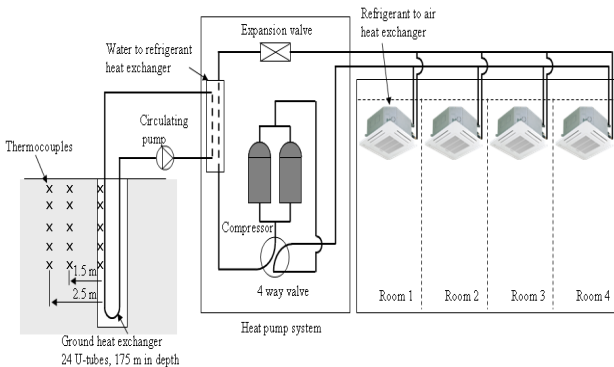


Fig. 2 System diagram of ground source heat pump.

또한 전체 시스템의 소비전력 측정을 위해 적산전력계(MWT-340S, 한국마이크로닉스)를 부착하였고, 히트펌프의 소비전력을 측정하기 위해 별도의 전력계(WT1600, Yokogawa)로 측정하였다. 지중온도, 소비전력 및 실내기의 온도 등의 데이터를 1분 간격으로 측정한 후, 데이터 획득 시스템에 기록하여 성능 분석에 사용하였다.

2.2 실험결과 해석 방법

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

$$COP_{hp} = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}_c} \quad (1)$$

여기서, \dot{Q} 은 실내기가 실내에 방출하는 열량이며, \dot{W}_c 는 히트펌프의 압축기에 소요되는 소비전력이다.

전체 시스템의 성능계수는 다음의 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$COP_{overall} = \frac{\dot{Q}}{\dot{W}_c + \dot{W}_p + \dot{W}_f} \quad (2)$$

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

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

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

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

여기서, \dot{m}_{air} 는 공기의 질량, \dot{V}_{air} 는 공기의 풍량, ρ_{air} 는 공기의 밀도이다. 그리고 $T_{o,air}$ 와 $T_{i,air}$ 는 실내기의 출구와 입구온도이다.

3. 실험결과 및 고찰

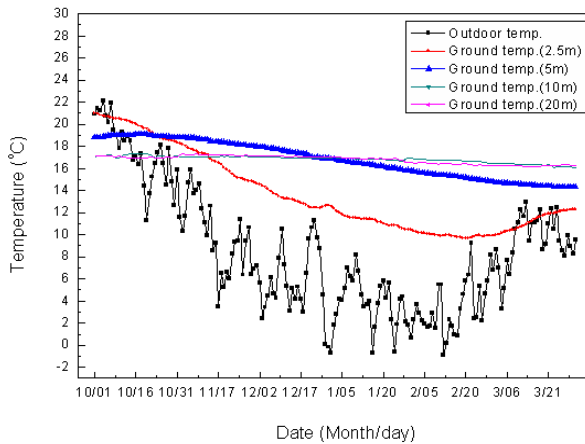


Fig. 3 Daily average subterranean temperature and outdoor air temperature from October 1 to March 31, 2008

3.1 지중 온도 분포

지열원 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 깊이별로 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,

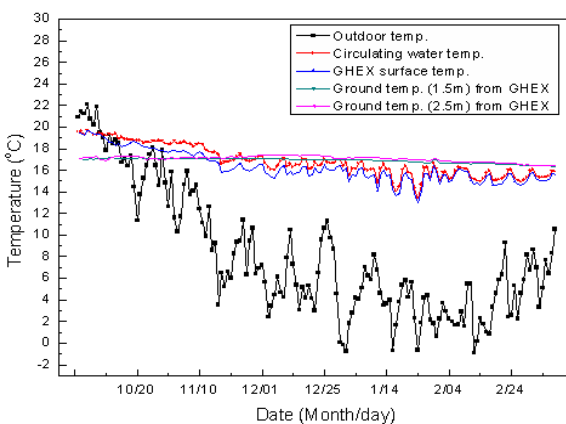


Fig. 4 Daily average temperatures of outdoor air, circulating water, surface of ground heat exchanger, and subterranean temperatures apart from ground heat exchanger.

지표면 아래 5 m 지점에도 외기온도에 따라 영향을 받는 것을 알 수 있다.

난방기간 지표면 아래 10 m이하 지점에는 온도 변화가 안정적이다. 지중온도는 평균16.8°C이다. Fig. 4는 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 난방운전(10/1~3/31) 동안 순환수의 온도는 평균 16.8°C이며, 외기온도와 난방부하에 따라 최저 14.1°C까지 감소하였다. 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.

3.2 시스템의 난방성능

본 연구에서 지열원 히트펌프의 난방성능 특성은 난방 기간 중 대표적인 2008년 1월 8일의 데이터를 기준으로 일일 난방성능을 분석 하였다.

Fig. 5는 지열원 히트펌프의 열교환기(증발기) 입·출구에서 지중열교환기 순환수의 온도 변화를 나타내었다. 외기온도는 평균 6.3°C이며, 순환수 입구온도는 평균 15.3°C로 거의 일정하였으며 출구온도는 시간별 난방부하에 따라 차이가 있었다. 입·출구 온도 차이는 최대 2.5°C이며, 평균 2.0°C 온도 차이를 나타내었다.

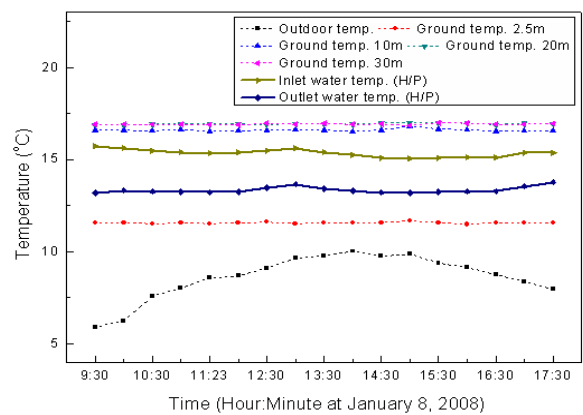


Fig. 5 Inlet and outlet temperature of water circulated through ground heat exchanger.

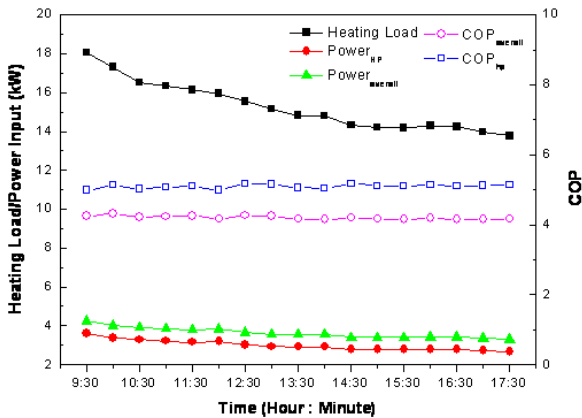


Fig. 6 Heating capacity, power consumption rate and COP of the GSHP system at January 8, 2008

또한 시간이 흐를수록 난방부하가 작아지므로 출입구 온도차가 줄어들게 나타났다.

Fig. 6은 실내기에서 측정된 데이터를 식(3)을 이용하여 계산된 난방부하이다. 실내 난방부하는 시간에 따라 변화하지만 평균 15.3 kW로 지열원 히트펌프의 전부하(32.6 kW) 대비 46.9% 부분부하에서 운전되었다. 본 연구에서 적용된 지열 히트펌프의 난방성능 분석결과 히트펌프 부하율이 46.9%일때 식(1)과 같이 히트펌프의 COP는 평균 5.1이며, 식(2)와 같이 시스템 전체의 COP는 4.2로 나타났다.

3.3 타 열원시스템과 성능 비교

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

본 연구에서 공랭식 히트펌프(ASHP, Air source heat pump)시스템과 지열원 히트펌프의 성능을 비교하기 위해 동일 용량의 공랭식 히트펌프(LRP-V2905B, L사)를 선정하여 분석하였다. 난방성능 비교를 위해 지열 히트펌프는 본 연구에서 측정된 실사용 조건을 사용 하였다. 그때 운전 조건은 외기온도가 6.3℃ 이며, 열교환기(증발기)의 순환수 입구 온도가 15.3℃이었다.

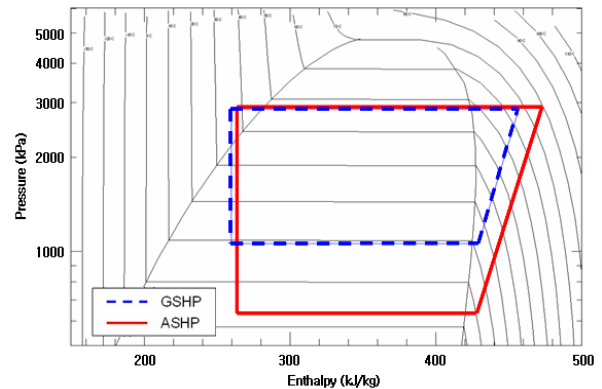


Fig. 7 Simplified pressure-enthalpy diagram of GSHP and ASHP cycle.

공랭식 히트펌프는 표준 조건(실내 20℃ DB/15℃ WB, 실외 7℃ DB/6℃ WB)에서 측정된 데이터를 활용하였다.

Fig. 7은 난방 운전시 지열원 히트펌프와 공랭식히트펌프의 P-h 선도를 나타낸 것이다.

P-h 선도 상에서 지열원 히트펌프의 증발기 압력이 공랭식 히트펌프보다 높은 이유는 지중에서 안정하게 열을 제공받기 때문이다. 따라서 증발기의 압력이 높아지고 압축비가 작아지므로 전력 소비량이 적어 난방성능이 우수하다.

Table 2와 같이 지열원 히트펌프는 공랭식 히트펌프에 비해 난방 COP가 향상되고, 실내 팬 및 순환수 펌프의 소비전력을 감안한 전체 시스템의 난방 성능도 약 31% 우수한 것으로 나타났다.

Table 2 Comparison between GSHP and ASHP system at the same heating load conditions

		GSHP	ASHP
Evaporator	Average circulating water temperature (℃)	15.34	-
	Outdoor air temperature (℃)	6.28	7
Compressor	Discharge pressure (kPa)	2850	2892
	Suction pressure (kPa)	1060	634
Heating performance	COP _{HP}	5.1	3.8
	COP _{overall}	4.2	3.2

4. 결 론

본 연구에서는 물-냉매 방식의 멀티 히프펌프에 지열원을 적용하여 건물에서의 실사용 시험을 통한 난방성능 변화를 연구하였다. 또한 시스템 운전에 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 측정한 결과 지표면 아래 2.5 m 지점에는 외기 온도에 따라 변화가 크며, 지표면 아래 5 m 지점에도 외기 온도에 따라 영향을 받는 것을 알 수 있다. 지표면 아래 10 m이하 지점에는 온도 변화가 안정적이다. 지중온도는 평균 16.8℃이다.

(2) 난방 기간 중 대표적인 2008년 1월 8일에 지열원 히트펌프의 열교환기(증발기) 입·출구에서 지중열교환기 순환수의 입구온도는 평균 15.3℃로 거의 일정하였으며 출구온도는 시간별 난방부하에 따라 차이가 있었다. 실내의 난방부하는 평균 15.3 kW로 지열원 히트펌프의 전부하(32.6 kW) 대비 46.9% 부분부하에서 운전되었다. 본 연구에서 적용된 지열원 히트펌프의 난방성능 분석결과 히트펌프 부하율이 46.9%일 때 히트펌프의 COP는 평균 5.1이며, 시스템 전체의 COP는 4.2로 나타났다.

(3) 지열원 히트펌프는 공랭식 히트펌프에 비해 시스템 전체 난방 성능이 약 31% 우수한 것으로 나타났다.

후 기

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

참 고 문 헌

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.