지열원 열펌프의 냉·난방 성능 평가

손병후† · 조정식* · 신현준* · 안형준**

Cooling and Heating Performance Evaluation of a Ground Source Heat Pump

Byong Hu Sohn, Chung-Sik Cho, Hyun-Joon Shin and Hyung-Jun An

Key Words : Ground source heat pump(지열원 열펌프), Performance evaluation(성능 평가), Ground heat exchanger(지중 열교환기), Coefficient of performance(COP, 성능계수)

Abstract

The main objective of the present study is to investigate the performance characteristics of a ground source heat pump (GSHP) system with a 130 m vertical 60.5 mm nominal diameter U-bend ground heat exchanger. In order to evaluate the performance analysis, the GSHP system connected to a test room with 90 m^2 floor area in the Korea Institute of Construction Technology (37°39' N, 126°48' E) was designed and constructed. This GSHP system mainly consisted of ground heat exchanger, indoor heat pump and measuring devices. The cooling and heating loads of the test room were 5.5 and 7.2 kW at design conditions, respectively. The experimental results were obtained from July to January in cooling and heating season of 2003～2004. The cooling and heating performance coefficients of the system were determined from the experimental results. The average cooling and heating COPs for the system were obtained to be 4.82 and 3.02, respectively. The temperature variations in ground and the ground heat exchanger surface at different depths were also measured.

기호설명

COP : 성능계수 [-]
c_p : 비열 [J/kgK]
EER : 에너지 효율비 [-]
I : 전류 [A]
$\dot{m}$: 질량유량 [kg/s]
Q_e : 지중 열교환기의 열 흡수율 [W]
Q_r : 지중 열교환기의 열 방출률 [W]
T : 온도 [℃]
V : 전압 [V]
W : 소비전력 [W]
ϕ : 역률 [-]
하첨자
air : 공기
c, f, p : 압축기, 휀, 펌프
cooling: 냉방
heating: 난방
in : 입구
out : 출구
wa : 부동액

† 한국건설기술연구원, 화재 및 설비 연구부
E-mail : byonghu@kict.re.kr
TEL : (031)910-0246 FAX : (031)910-0381
* 한국건설기술연구원, 화재 및 설비 연구부
** 코오롱건설㈜ 기술연구소

1. 서 론

지열원 열펌프 (Ground Source Heat Pump, GSHP)는 크게 지중 열교환기 (Ground Heat Exchanger, GHX)와 열펌프 (heat pump)로 구성된 냉·난방 겸용 시스템이다. 냉방 사이클의 지열원 열펌프는 실내에서 흡수한 열을 지중 열교환기를 통해 지중으로 방출한다. 반대로 난방 사이클인 경우 지중 열교환기는 지중에서 열을 흡수하여 실내로 공급한다.

이 시스템의 장점은 상용 공기 열원 열펌프 (air source heat pump)보다 에너지 소비량이 적고, 대기

중에 노출되는 기기가 없으며, 사용되는 냉매의 양이 상대적으로 적다는 것이다. 또한 열펌프의 히트 싱크 (heat sink) 및 열원 (heat source)으로서 지열은 공기보다 안정적이기 때문에 지열원 열펌프는 높은 효율과 우수한 성능을 갖는다. 반면에 지중 열교환기의 매설에 따른 높은 초기 설치비를 단점으로 들 수 있다.

현재 미국과 북유럽 국가 등이 지열원 시스템 보급 및 연구활동의 중심에 있다. 2000 년을 기준으로 이들 국가는 약 51 만 2000 대의 시스템을 설치하였으며, 특히 지난 십 년 동안 매해 9.7%의 증가율을 보이고 있다.[1] 또한 다양한 주제의 연구가 여러 연구자들에 의해 수행되었다. 대표적인 것으로는 지열원 열펌프의 설계[2], 성능 및 경제성 분석[3], 하이브리드 지열원 시스템에 대한 성능분석[4] 그리고 설계 및 시공기준[5] 등에 대한 연구이다.

지열원 열펌프의 성능에 영향을 미치는 주요 요인은 지중 온도분포, 지중 열교환기의 열교환 능력, 그리고 토양의 성분 등이다. 이에 대한 최근의 연구로는 Hepbasli et al.[6], Bi et al.[7], Pahud and Matthey[8], 그리고 Leong et al.[9]의 연구를 들 수 있다. 또한 Zhao et al.[10]은 지열원 열펌프의 기존 냉매를 비공비 혼합 냉매로 교체하였을 때 이 혼합 냉매의 성분비 및 유량변화가 시스템의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

국내에서 지열원 열펌프에 관심을 갖기 시작한 것은 최근의 일이다. 이는 공기 열원 이외의 대체 열원에 대한 관심 부족, 지열을 회수하기 위한 열교환 기술의 부족, 초기 투자비 문제 등이 원인이다. Shin et al.[11]에 의해 지열 에너지의 이용 가능성이 확인되고, 최근 들어 시스템 설치가 증가하고 있지만 외국과 비교하면 초기단계라고 할 수 있다.

이에 본 연구는 사무실 용도로 사용되는 90 m^2의 공간에 열펌프를 설치하고, 외경 60.5 mm, 깊이 130 m 의 U 자 관 지중 열교환기를 이용한 지열원 열펌프의 성능 특성을 실험적으로 연구하였다. 또한 연간 지중 온도 및 시스템 운전에 의한 지중 온도변화를 비교하기 위해 매설 깊이에 따른 지중 온도를 측정하였다.

2. 실험장치 및 방법

지열원 열펌프의 냉·난방 성능 및 시스템 운전에 따른 지중 온도 변화를 해석하기 위한 실험장치의 개략도를 Fig. 1 에 도시하였다. 실험을 위해 열펌프 및 지중 열교환기 그리고 데이터 획득 장치 등으로 실험장치를 구성하였다. 열펌프는 압축기, 두 개의 열교환기, 사방 밸브 (4 way-valve), 팽창밸브 및 시스템 제어부로 구성되어 있다.

열펌프의 용량은 1.5 RT 급으로 90 m^2의 실내에 설치하였다. 열펌프의 전체 배관은 동관 (copper tube)이며 냉매를 압축하기 위해 회전식 압축기 (rotary compressor)를 사용하였다. 열펌프의 두 열교환기 중 냉매와 실내 공기 사이의 열교환에 사용되는 열교환기는 열전달을 고양시키기 위해 외면에 알루미늄 휜 (fin)이 부착된 동관을 사용하였다. 지중 열교환기의 작동유체와 열펌프의 냉매가 열교환을 수행하는 열교환기는 2 중관 형으로 내부의 관은 열전달을 촉진시키기 위해 플루티드 관 (fluted tube)으로 되어있다. 팽창장치로 직접 팽창밸브를 사용하였으며 냉방과 난방 모드의 변환을 위해 사방 밸브가 설치되어 있다. 또한 냉매 22 를 열펌프의 작동유체로 사용하였다.

지중 열교환기는 직경 150 mm, 깊이 130 m 로 지표면에서 천공한 후, 외경 60.5 mm, 총 길이 260 m 의 고 밀도 폴리에틸렌 (HDPE, High Density Polyethylene) U 자 관을 삽입하고 벤토나이트와 실리카샌드 (bentonite/silica-sand) 혼합물을 채워 완성하였다. 본 연구를 위해 이와 같은 지중 열교환기를 2 개 설치하였으며, 그 중 하나의 지중 열 교환기를 실제 열펌프 운전에 사용하였고, 다른 하나는 열펌프 비 운전 시의 지중 온도측정에 사용하였다. 지중 열교환기와 열펌프를 순환하는 작동유체 (부동액)로는 물 (90 wt %)과 메탄올 (10 wt %) 혼합물을 사용하였다.

성능 평가 기간 중 실내외 온도 및 습도는 온습도계 (TR-72S, T&D corporation)를 이용하여 측정하

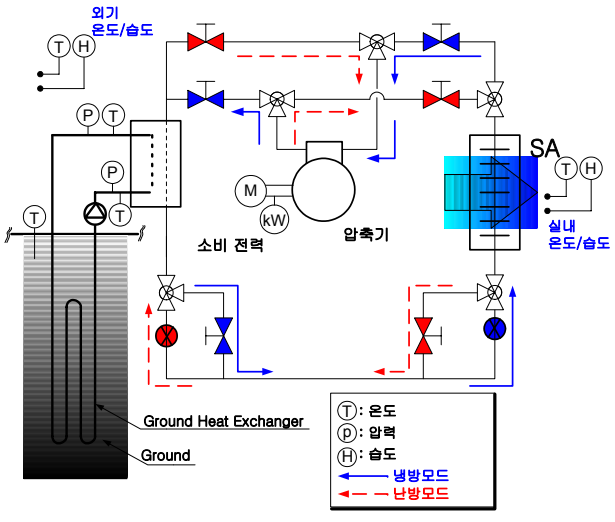

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up.

Table 1 Parameters and uncertainties.

Parameters	Uncertainty
System temperature, T	±0.2℃
Indoor and outdoor temperature, T	±0.3℃
Power, E	±3.0%
Water/antifreeze solution flow rate, $\dot{m}$	±2.0%
Heat transfer rate of the ground heat exchanger, Q	±2.84%
Cooling and heating COP of the system	±4.13%

였다. 지중 온도를 포함한 각종 온도 측정은 T 형 열전대 (T-type thermocouple)를 사용하였으며, 열펌프 및 전체 시스템이 소비하는 전력은 적산 전력계 (MX2040)를 사용하여 측정하였다.

정상 상태에서 시스템의 온도 및 지중온도, 열펌프만의 소비전력, 전체 시스템 소비전력 그리고 실내외 온도와 습도 등의 데이터를 15 분 간격으로 획득한 후 실험결과를 분석하였다. 다음의 Table 1 은 실험에서 측정하는 변수 및 실험결과에 대한 불확실도를 보여주고 있다.

3. 데이터 해석

냉방 사이클로 작동하는 지열원 열펌프가 지중으로 전달한 에너지의 총량은 지중으로 방출한 열량과 시스템을 운전하는데 투입된 에너지의 합이다. 반면 난방 사이클은 지중에서 흡수한 열량과 시스템을 구동하는데 필요한 동력을 실내에 공급한다.

냉방 또는 난방 사이클로 작동하는 지열원 열펌프에서 지중 열교환기가 지중으로 방출 또는 흡수하는 열량은 다음의 식 (1) 또는 (2)로 계산할 수 있다.

$$Q_r = \dot{m}_{wa} c_{p,wa} \left(T_{out,wa} - T_{in,wa} \right) \quad (1)$$

$$Q_e = \dot{m}_{wa} c_{p,wa} \left(T_{in,wa} - T_{out,wa} \right) \quad (2)$$

여기서 $\dot{m}_{wa}$ 는 지중 열교환기를 순환하는 부동액의 질량유량, $c_{p,wa}$ 는 비열이며, $T_{in,wa}$ 와 $T_{out,wa}$ 는 각각 지중 열교환기 입구와 출구에서의 온도이다.

열펌프의 성능은 일반적으로 성능계수 또는 에너지 효율비로 나타낸다. 성능계수와 에너지 효율비는 단위의 차이를 제외하고는 근본적인 의미는 동일하다. 전체 시스템의 냉방 및 난방 성능계수 그리고 에너지 효율비를 각각 다음의 식 (3)과 (4)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\mathrm{COP}_{\mathrm{cooling}} = \frac{Q_{cooling}}{W_c + W_p + W_f}, \qquad \mathrm{COP}_{\mathrm{heating}} = \frac{Q_{heating}}{W_c + W_p + W_f} \quad (3)$$

$$\mathrm{EER} \approx \frac{\mathrm{COP}}{0.2935} \quad (4)$$

식 (3)에서 냉방성능 및 난방성능의 계산은 다음과 같다.

$$Q_{cooling} = \dot{m}_{air} c_{p,air} \left(T_{in,air} - T_{out,air} \right), \qquad Q_{heating} = \dot{m}_{air} c_{p,air} \left(T_{out,air} - T_{in,air} \right) \quad (5)$$

또한 열펌프의 압축기 및 부동액 순환펌프가 소비하는 전력은 다음의 식 (6)과 (7)로 계산된다.

$$W_c = \frac{I_c V_c \cos\phi}{1000} \sqrt{3} \quad (6)$$

$$W_p = \frac{I_p V_p \cos\phi}{1000} \quad (7)$$

그리고 W_f 는 휀 (fan)이 소비하는 전력으로 이 휀은 조화된 공기를 실내에 공급하는 역할을 한다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 지중 온도 분포

지열원 열펌프 시스템은 냉방 시 히트 싱크로, 난방 시 열원으로 지열을 사용한다. 시스템의 성능은 지중 열교환기와 열교환을 수행하는 토양의 온도분포, 구성 성분 등의 영향을 받는다. 본 연구에서는 시스템이 설치된 곳에서의 매설 깊이에 따른 지중온도 변화를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 2 와 3 에 나타내었다.

Fig. 2 는 성능 분석 기간 중의 지중온도 변화를 보여주고 있으며, 측정기간 동안 12.1~15.2℃의 범위에 분포하고 있다. 지하 5 m 지점에서의 온도는 외기의 온도 변화에 다소 영향을 받지만 외기온도가 변동 하는 것과 비교하면 상대적으로 안정적이다. 또한 측정기간 동안 지하 5 m 이하의 지중 온도는 깊이 및 외기 온도의 변동에 상관없이 거의 일정한 값을 보이고 있다. 따라서, 지열원 열펌프가 공기 열원 시스템보다 효율이 높고, 성능이 우수한 이유를 이상의 결과로부터 설명할 수 있다.

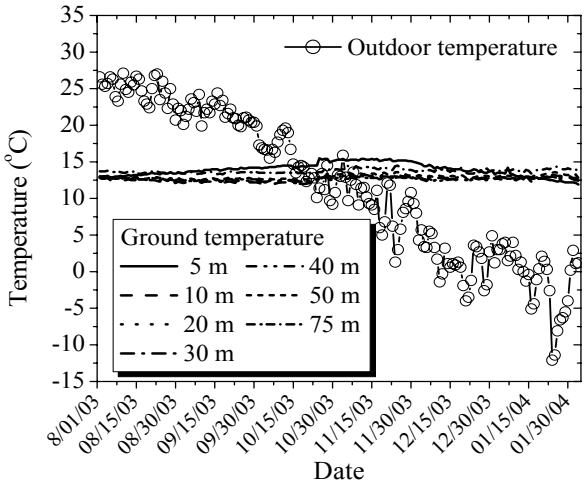

Fig. 2 The daily average ground and outdoor temperature variations during August, 2003～January, 2004.

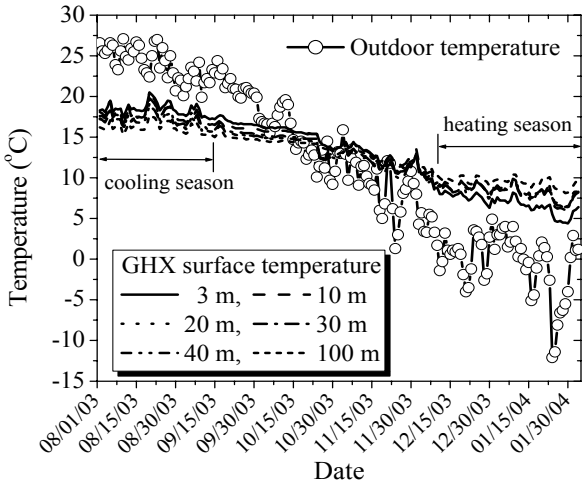

Fig. 3 The daily average ground heat exchanger surface temperature variations during August, 2003～January, 2004.

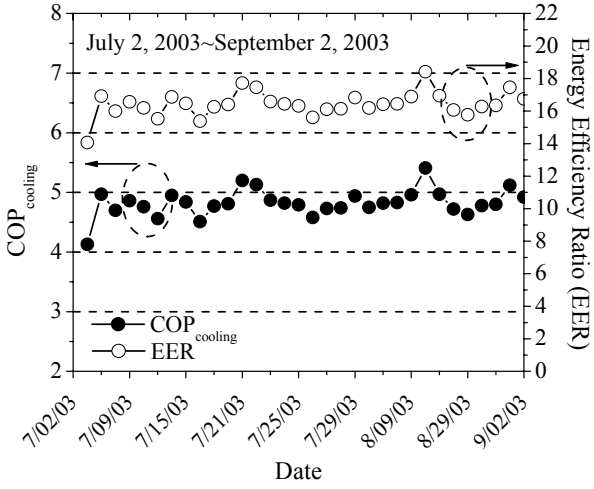

Fig. 4 The daily variations of cooling COP and EER during cooling season, July, 2003～September, 2003.

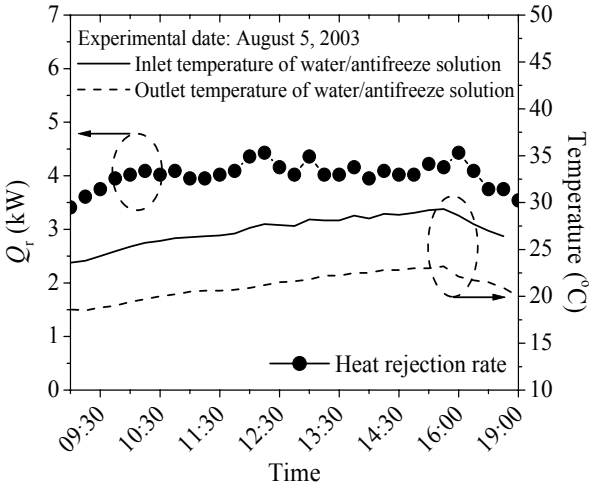

Fig. 5 The variations of water/antifreeze solution temperature and heat rejection rate of the ground heat exchanger.

냉방 및 난방 사이클로 작동하는 지열원 열펌프에서 지중 열교환기 작동유체인 부동액은 지중 열교환기와 열펌프의 열교환기를 순환한다. 이 열교환기는 냉방 사이클에서는 응축기 역할을 하며, 난방 사이클에서는 증발기 역할을 한다. Fig. 3 은 냉·난방 기간을 포함한 전체 성능분석 기간 동안 부동액과 지중간의 열교환 과정으로부터 야기되는 지중 열교환기 표면의 온도 변화를 보여주고 있다. 냉방 사이클의 응축기에서 냉매 증기는 상대적으로 온도가 낮은 부동액과 열교환을 하면서 상이 변한다. 냉매를 응축하는 과정에서 온도가 상승한 부동액은 지중 열교환기를 순환하면서 그 열을 지중으로 방출한다. 따라서 Fig. 3 에서와 같이 지중 열교환기 입구로부터 가까운 지점 (3 m)의 온도가 가장 높고, 깊이 방향으로 갈수록 온도가 감소하는 것을 알 수 있다. 난방 사이클은 냉매를 증발시키는 과정에 지중의 열을 이용하기 때문에 온도 변화가 냉방 사이클과는 반대이다. 즉, 냉매를 증발시키면서 온도가 감소한 부동액은 지중 열교환기 내를 순환하면서 지중의 열을 흡수하여 다시 증발기로 들어오게 된다.

4.2 시스템의 냉방성능 특성

냉방기간 동안에 열펌프가 나타내는 냉방 성능계수 및 에너지 효율비를 Fig. 4 에 도시하였다. 시스템의 냉방 성능계수는 4.13～5.41 의 값을 갖고, 이에 해당하는 에너지 효율비는 15.38～16.94 의 범위에 있음을 알 수 있다. 이는 상용 공기 열원 열펌프나 기타 공기조화에 사용되는 냉·난방 설비보다 매우 높은 값이다. 냉방기간 중 대표적인 경우 (2003 년 8 월 5 일)에 대한 결과를 Fig. 5 와 Fig. 6 에 도시하였다.

Fig. 5 는 부동액의 지중 열교환기 입/출구 온도

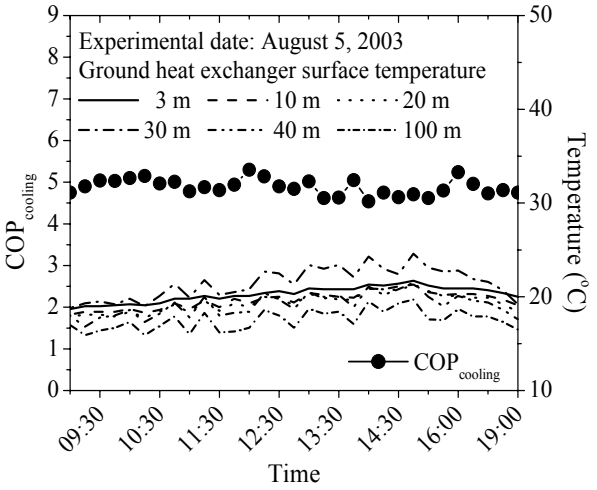

Fig. 6 The variations of cooling COP and ground heat exchanger surface temperature.

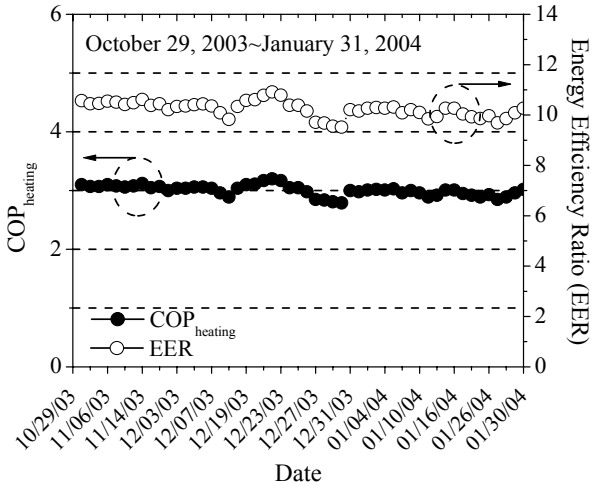

Fig. 7 The daily variations of heating COP and EER during heating season, October, 2003～January, 2004.

와 질량유량으로 계산한 지중 열교환기의 열 방출률 (heat rejection rate)을 도시한 것이다. 부동액의 지중 열교환기 입구 온도는 지중 열교환기 및 전체 시스템의 성능에 영향을 미치는 가장 중요한 인자이다. 이는 냉방 시 외기 온도보다 낮고, 지중 온도보다는 높다. Fig. 5 에서 지중 열교환기가 지중으로 방출하는 열량은 평균 3.84 kW 그리고 입구와 출구에서의 온도는 각각 26.0℃와 20.3℃로 나타났다. 또한 지중 열교환기의 열 방출률이 일정한 값을 갖기 위해 부동액의 지중 열교환기 입/출구 온도 차 역시 일정하게 변하고 있다.

Fig. 6 에서 평균 냉방 성능계수는 4.82 이고, 지중 온도 및 지중 열교환기 표면의 온도 그리고 외기의 평균 온도는 각각 12.8℃, 18.7℃, 26.6℃이었다.

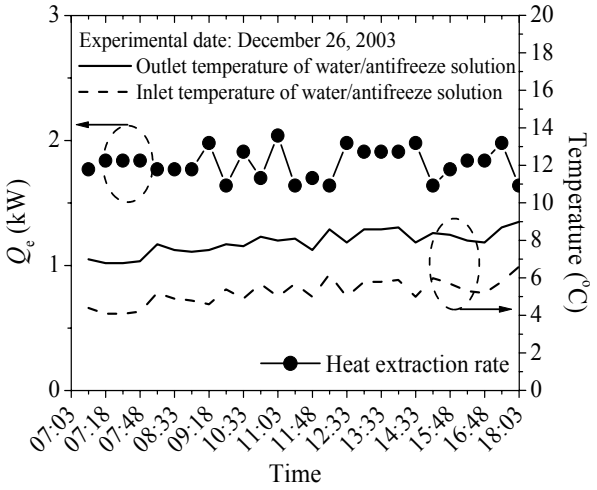

Fig. 8 The variations of water/antifreeze solution temperature and heat extraction rate of the ground heat exchanger.

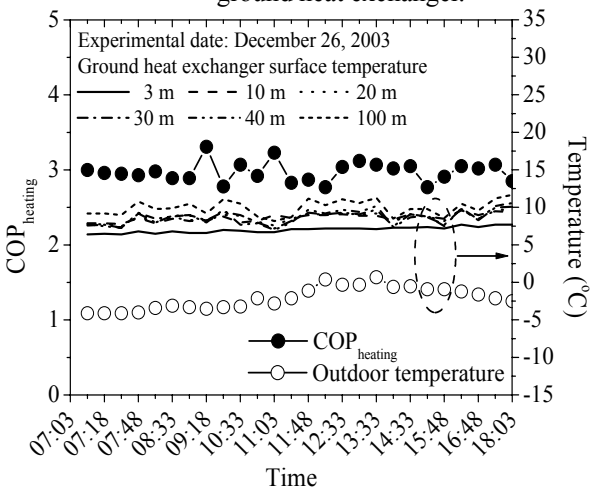

Fig. 9 The variations of heating COP and ground heat exchanger surface temperature.

4.3 시스템의 난방성능 특성

난방기간 (2003 년 10 월 29 일～2004 년 1 월 31 일) 동안에 열펌가 갖는 난방 성능계수를 에너지 효율비와 함께 Fig. 7 에 도시하였다. 본 시스템의 평균 난방 성능계수는 2.96～3.20 이었으며 이에 해당하는 에너지 효율비는 10.09～10.92 의 값을 갖는다. 전체 난방기간 중 대표적인 경우 (2003 년 12 월 26 일)에 대한 측정 결과를 Fig. 8 과 Fig. 9 에 도시하였다.

Fig. 8 은 난방기간 중 지중 열교환기가 지중에서 흡수하는 열량의 변화를 나타낸 것이다. 지중 열교환기의 평균 열 흡수율은 1.93 kW 였으며, 이 때 지중 열교환기 입구와 출구에서 부동액의 평균 온도는 각각 5.0℃와 7.9℃로 나타났다.

Fig. 9 는 하루 중 난방 성능계수 및 지중 열교환기 표면온도 변화를 보여주고 있다. 이 경우 평

균 난방 성능계수, 지중 열교환기 표면의 온도 그리고 외기의 평균 온도는 각각 3.04, 8.4℃, -2.6℃로 나타났다.

5. 결론

본 연구는 90 m^2 의 공간에 설치된 열펌프와 외경 60.5 mm, 길이 260 m 의 지중 열교환기를 이용한 지열원 열펌프의 성능 특성을 실험적으로 연구하였다. 본 연구를 통해 지중 온도 변화, 시스템 운전에 따른 지중 열교환기 표면온도 변화 그리고 시스템의 냉·난방 성능계수 및 에너지 효율비에 대한 결과를 얻을 수 있었다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 본 시스템이 설치된 지역의 지중 온도는 12.1℃에서 15.2℃의 범위에서 일정하였다. 또한 지하 5 m 지점 이하부터는 외기의 온도 변동에 거의 무관하였다. 따라서 열펌프의 열원 및 히트싱크로서 지열은 외기보다 안정적인 것을 확인하였다.

(2) 냉방기간 중 지중 열교환기 표면 온도는 지중 열교환기 입구로부터 가까운 지점 (3 m)의 온도가 가장 높고, 깊이 방향으로 갈수록 온도가 감소하였다. 반면에 난방기간 중에는 반대의 결과가 나타났다.

(3) 냉방기간 (2003 년 7 월 2 일～2003 년 9 월 2 일) 동안의 시스템 성능계수는 4.13 에서 5.41 의 값을 가지며, 이에 해당하는 에너지 효율비는 15.38 에서 16.94 의 값을 나타냈다.

(4) 냉방기간 중 대표적인 경우 (2003 년 8 월 5 일)에 있어서 지중 열교환기의 열 방출률은 평균 3.84 kW, 평균 냉방 성능계수는 4.82 그리고 지중 열교환기 입구와 출구에서 부동액의 온도는 각각 26.0℃와 20.3℃로 나타났다. 이 때 지중 및 지중 열교환기 표면의 평균 온도는 각각 12.8℃와 18.7℃이었다.

(5) 지중 열교환기의 열 방출률이 일정한 값을 갖기 위해 부동액의 지중 열교환기 입/출구 온도차는 일정하게 변하였으며, 외기의 온도가 상승함에 따라 입/출구 온도 역시 상승하였다.

(6) 난방기간 (2003 년 10 월 29 일～2004 년 1 월 31 일) 동안의 시스템 성능계수는 2.96 에서 3.20 의 값을 가지며, 이에 해당하는 에너지 효율비는 10.09～10.92 의 범위에 있었다.

(7) 난방기간 중 대표적인 경우 (2003 년 12 월 26 일)에 있어서 지중 열교환기가 지중으로부터 흡수하는 열량은 평균 1.93 kW 그리고 부동액의 지중 열교환기 입구와 출구에서의 온도는 각각 5.0℃와 7.9℃로 나타났다. 이 경우 평균 난방 성능계수는 3.04 였으며, 지중 열교환기 표면의 평균 온도는 8.4℃로 나타났다.

후 기

본 연구는 에너지관리공단과 코오롱건설㈜의 지원하에 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Lund, J. W. and Freeston, D. H., 2001, “World-wide direct use of geothermal energy 2000,” *Geothermics*, Vol. 30, pp. 29～68.

(2) Kavanaugh, S. P. and Rafferty, K., 1997, *Ground-source heat pumps: design of geothermal systems for commercial and institutional buildings*, ASHRAE. Atlanta.

(3) Healy, P. F. and Ugursal, V. I., 1997, “Performance and economic feasibility of ground-source heat pumps in cold climate,” *Int. J. Energy Research*, Vol. 21, pp. 857～870.

(4) Phetteplace, G. and Sullivan, W., 1998, “Performance of a hybrid ground-coupled heat pump system,” *ASHRAE Trans*., Vol. 104, pp. 763～770.

(5) Martin, P. E., 1990, “A design and economic sensitivity study of single-pipe horizontal ground-coupled heat pump systems,” *ASHRAE Trans*., Vol. 96, pp. 634～642.

(6) Hepbasli, A., Akdemir, O., and Hancioglu, E., 2003, “Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system,” *Energy Conversion and Management*, Vol. 44, pp. 527～548.

(7) Bi, Y., Chen, L. and Wu, C., 2002, “Ground heat exchanger temperature distribution analysis and experimental verification,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, pp. 183～189.

(8) Pahud, D. and Matthey, B., 2001, “Comparison of the thermal performance of double U-pipe borehole heat exchangers measured in situ”, *Energy and Buildings*, Vol. 33, pp. 503～507.

(9) Leong, W. H., Tarnawski, V. R. and Aittomaki, A., 1998, “Effect of soil type and moisture content on ground heat pump performance,” *Int. J. Refrigeration*, Vol. 21, pp. 595～606.

(10) Zhao, P. C., Zhao, L., Ding, G. L. and Zhang, C. L., 2002, “Experimental research on geothermal heat pump system with non-azeotropic working fluids,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 22, pp. 1749～1761.

(11) Shin, H. J., Ahn, C. H. and Cho, C. S., 1995, “Overview for the effective use of geothermal energy,” *Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 409～419.