

# 지열에너지 이용 냉난방시스템 성능분석

본 연구에서는 U자관 지중 열교환기를 이용한 지열원 열펌프 시스템의 성능 특성을 실험적으로 연구하였다. 또한 연간 지중 온도 및 시스템 운전에 따른 지중 온도 변화를 비교하기 위해 매설 깊이에 따른 지중 온도를 측정하였다.

조정식, 손병후, 신현준, 안형준\*  
한국건설기술연구원, \*코오롱건설(주)

## 1. 개요

지열원 열펌프(GSHPs)는 크게 지중 열교환기(GHX)와 열펌프로 구성된 냉·난방 겸용 시스템이다. 냉방 사이클로 작동하는 지열원 열펌프는 실내에서 흡수한 열을 지중 열교환기를 통해 지중으로 방출하며, 반대로 난방 사이클인 경우, 지중 열교환기는 지중에서 열을 흡수하여 실내로 공급한다.

이 시스템의 장점은 상용 공기 열원 열펌프보다 에너지 소비량이 적고, 대기 중에 노출되는 기기가 없으며, 사용되는 냉매의 양이 상대적으로 적다는 것이다. 또한 냉방 및 난방 사이클에서 각각 히트싱크(heat sink) 및 열원(heat source)의 역할을 하는 지열은 공기보다 안정적이다. 따라서 지열을 활용하는 지열원 열펌프 시스템은 높은 효율과 우수한 성능을 갖는다. 반면에 지중 열교환기의 매설에 따른 높은 초기 설치비를 단점으로 들 수 있다.

미국의 환경보호청(EPA)은 현존하는 냉·난방 기술 중에서 가장 에너지 효율적이고, 환경 친화적이며, 비용 효과가 높은 공기조화시스템으로 지열원 시스템을 예로 들고 있다. 실제로 이 시스템은 공기 열원 열펌프에 비해 44%까지 그리고 냉·난방을 에어컨과 전열기를 이용하는 경우와 비교하면 72%까지 에너지 소비를 절감할 수 있

다고 보고하였다. 국내에서 지열원 열펌프 시스템에 관심을 갖기 시작한 것은 극히 최근의 일로서 이는 공기 열원 이외의 대체 열원에 대한 관심 부족, 지열을 회수하기 위한 열교환 기술의 부족, 초기 투자비 문제 등의 원인에 있다. 반면, 외국에서는 지열원 열펌프 시스템의 설계, 성능 분석, 시스템의 경제성 해석 그리고 설계 및 설치 표준 등의 분야에서 활발한 연구가 수행되었다.

지열원 열펌프 시스템의 성능에 영향을 미치는 주요 요인은 지중 및 지중 열교환기 주위의 온도 분포, 지중 열교환기의 구조, 그리고 토양의 성분 등이다.

본 연구에서는 사무실 용도로 사용되는 약 90 m<sup>2</sup>의 공간에 열펌프를 설치하고, 외경 60.5 mm, 깊이 130 m의 U자관 지중 열교환기를 이용한 지열원 열펌프 시스템의 성능 특성을 실험적으로 연구하였다. 또한 연간 지중 온도 및 시스템 운전에 따른 지중 온도 변화를 비교하기 위해 매설 깊이에 따른 지중 온도를 측정하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

지열원 열펌프 시스템의 성능 특성 및 지중 온도 변화 특성을 해석하기 위한 실험장치의 개략도를 그림 1에 도시하였다. 실험을 위해 열펌프 및 지중 열교환기 그리고 데이터 획득장치 등으로 실험장치를 구성하였다. 열펌프는 압축기, 두 개의

열교환기, 4방 밸브(4 way-valve), 팽창밸브 및 시스템 제어부로 구성되어 있다.

열펌프의 용량은 4.5 RT급으로 사무실 용도로 사용되는 90 m<sup>2</sup> (25평)의 공간에 설치하였으며, 냉매를 압축하기 위해 회전식 압축기를 사용하였다. 두 개의 열펌프용 열교환기 중 냉매와 실내 공기 사이의 열교환에 사용되는 물 대 공기(water to air) 열교환기는 열전달을 고양시키기 위해 외면에 알루미늄 늪 흰(fin)이 부착된 동관을 사용하였다. 지중 열교환기의 작동유체와 열펌프의 냉매가 열교환을 수행하는 열교환기는 2중관 형으로 내부의 관은 열전달을 촉진시키기 위해 플루티드관(fluted tube)으로 되어있다. 팽창장치로 직접 팽창 밸브를 사용하였으며, 냉난방 겸용 회로를 구성하기 위해 4방 밸브가 설치되어 있다. 본 지열원 열펌프 시스템의 냉매는 R-22이다.

지중 열교환기는 직경 150 mm, 깊이 130 m로 지표면에서 천공한 후, U자관 형태의 외경 60.5 mm, 길이 130 m의 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)관을 삽입하고 벤토나이트/실리카샌드 혼합물을 채워 완성하였다. 본 연구를 위해 이와 같은 지중 열교환기를 2개 설치하였으며, 그 중 하나의 지중 열교환기를 실제 열펌프 운전에서 사용하였고, 다른 하나는 열펌프 비운전 시의 지중 온도 분포 측정에 사용하였다. 지중 열교환기와 열펌프를 순환하

는 작동유체로는 물(90 wt%)과 메탄올(10 wt%) 혼합물(부동액)을 사용하였다.

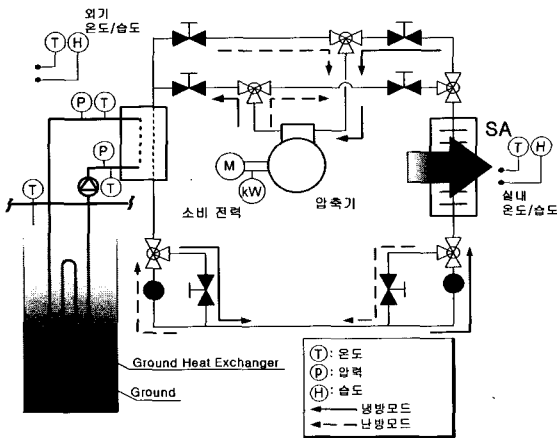
성능평가 기간 중 지중 온도를 포함한 각종 온도 측정은 T형 열전대를 사용하였으며, 또한 열펌프 및 전체 시스템의 소비 전력은 적산 전력계(MX2040)를 사용하여 측정하였다.

정상 상태에서 시스템의 온도 및 지중온도, 열펌프만의 소비전력, 전체 시스템 소비전력 그리고 실내외 온도와 습도 등의 데이터를 15분 간격으로 획득한 후 데이터 획득장치에 기록하여 실험 결과 분석에 사용하였다. 다음의 표 1에 본 실험에서 측정된 데이터 및 실험결과에 대한 불확실도 해석을 나타내었다.

### 3. 해석결과 및 고찰

#### 3.1 해석방정식

지열원 열펌프가 냉방 사이클로 작동할 때 열펌프는 실내에서 열을 흡수하고 그 열을 지중 열교환기를 통해 방출한다. 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.



[그림 1] Schematic of experimental apparatus

<표 1> Parameters and Uncertainty.

Parameters	Uncertainty
System temperature, $T$	$\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
Indoor and outdoor temperature, $T$	$\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
Indoor and outdoor humidity, $RH$	$\pm 5.1\%$
Power, $E$	$\pm 3.0\%$
Water/antifreeze solution flow rate, $\dot{m}$	$\pm 2.0\%$
Heat transfer rate of the ground heat exchanger, $Q$	$\pm 2.84\%$
Cooling and heating COP of the system	$\pm 4.13\%$

본 시스템과 같이, 전기 구동 압축식 열펌프의 성능은 일반적으로 성능계수(COP) 또는 에너지 효율비(EER)로 나타낸다. 여기서, 성능계수와 에너지 효율비는 단위의 차이를 제외하고는 근본적인 의미는 동일하다. 냉방(또는 난방) 사이클로 작동하는 지열원 열펌프에서 지중 열교환기가 지중으로 방출(또는 흡수) 하는 열량은 다음의 식 (1) 또는 (2)와 같이 계산할 수 있다.

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

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

여기서,  $\dot{m}_{wa}$ 는 지중 열교환기를 순환하는 부동액의 질량유량,  $c_{p, wa}$ 는 부동액의 비열이며,  $T_{in, wa}$ 와  $T_{out, wa}$ 는 각각 지중 열교환기 입구와 출구에서 부동액의 온도이다. 또한 열펌프의 압축기 및 부동액 순환 펌프가 소비하는 전력은 다음과 같다.

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

$$W_p = \frac{I_p V_p \cos \phi}{1000} \quad (4)$$

여기서,  $I$ ,  $V$ ,  $\phi$ 는 각각 전류, 전압 그리고 역률(power factor)이며, 하첨자  $c$ 와  $p$ 는 각각 압축기와 펌프를 의미한다.

전체 시스템의 냉방 및 난방 성능계수는 다음의 식 (4) 및 (5)와 같이 계산된다.

$$COP_{cooling} = \frac{Q_{cooling}}{W_c + W_p + W_f} \quad (5)$$

$$COP_{heating} = \frac{Q_{heating}}{W_c + W_p + W_f} \quad (6)$$

여기서,  $W_f$ 와  $Q_{cooling}$  그리고  $Q_{heating}$ 은 각각 팬(fan) 소비전력, 냉방성능, 난방성능을 의미한다. 또한 냉방성능과 난방성능은 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{cooling} = \dot{m}_{air} c_{p, air} (T_{in, air} - T_{out, air}) \quad (1)$$

$$Q_{heating} = \dot{m}_{air} c_{p, air} (T_{out, air} - T_{in, air}) \quad (2)$$

앞서 언급한 것처럼 성능계수와 에너지효율비는 동일한 의미를 가지며, 다음의 관계로 표현할 수 있다.

$$EER = \frac{COP}{0.2935} \quad (9)$$

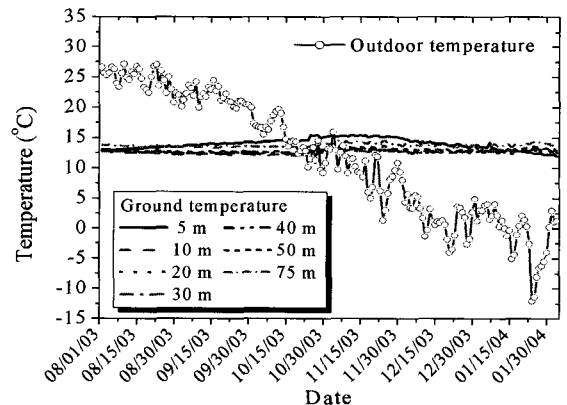
### 3.2 결과분석 및 고찰

#### 3.2.1 지중온도 분포

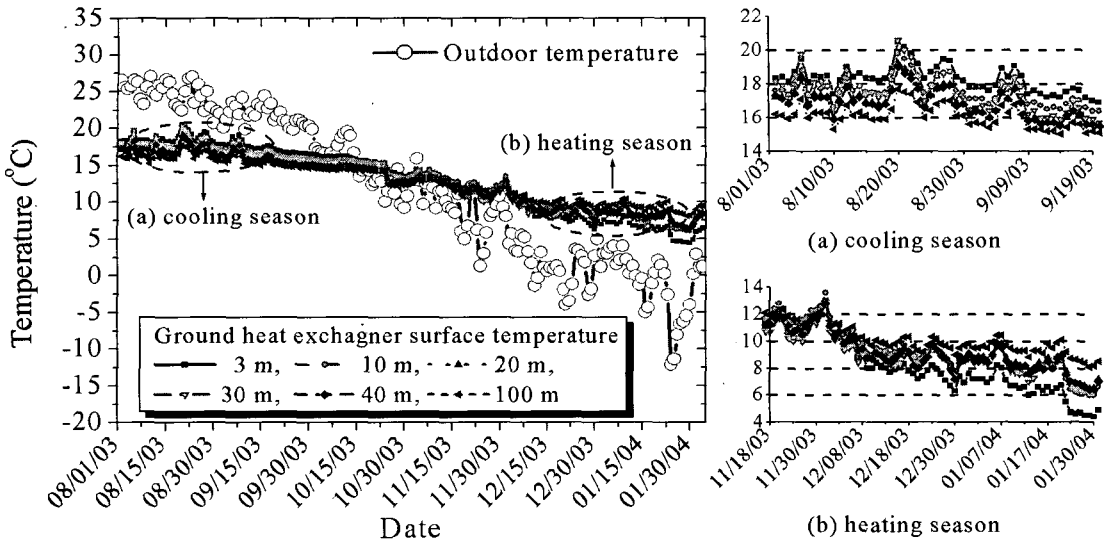
시스템의 성능은 지중 열교환기와 열교환을 수행하는 토양의 온도분포, 구성 성분 등의 영향을 받는다. 따라서 본 연구에서는 시스템이 설치된 곳에서의 매설 깊이에 따른 지중 온도 변화를 측정하였으며, 그 결과를 그림 2, 3에 나타내었다. 그림 2는 부동액이 순환하지 않는 지중 열교환기 주위에서의 지중 온도 변화를 나타내고 있으며, 측정기간 동안 지중온도는 12.1°C ~ 15.2°C의 범위에 분포하고 있다.

지하 5 m 지점에서의 온도는 외기의 온도 변화에 다소 영향을 받지만, 외기 온도가 변동하는 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 유추할 수 있다. 즉, 지열은 상용 공기 열원 열펌프가 열원으로 이용하는 외기보다 매우 안정적이기 때문이다.

냉방 및 난방 사이클로 작동하는 지열원 열펌프에서 지중 열교환기 작동유체인 부동액은 지중



[그림 2] The daily average ground temperature and outdoor temperature variations

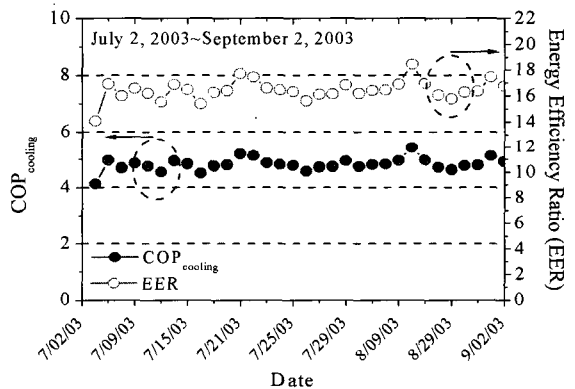


[그림 3] The daily average ground heat exchanger surface temperature variations

열교환기와 열펌프의 열교환기를 순환한다. 이 열교환기는 냉방 사이클에서는 응축기 역할을 하며, 난방 사이클에서는 증발기 역할을 한다. 그림 3은 냉난방 기간을 포함한 전체 성능 측정기간 동안, 부동액과 지중간의 열교환 과정으로부터 야기되는 온도변화를 보여주고 있다.

그림 3의 (a)는 냉방기간 동안의 지중 열교환기 표면 온도의 변화를 구분하여 나타낸 것이다. 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 그림 3의 (a)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 그림 3의 (b)에서와 같이 온도변화가 그림 3의 (a)와 반대이다. 즉, 냉매를 증발시키면서 온도가 감소한 부동액은 지중 열교환기 내를 순환하면서 지중의 열을 흡수하여 다시 증발기로 들어오게 된다.

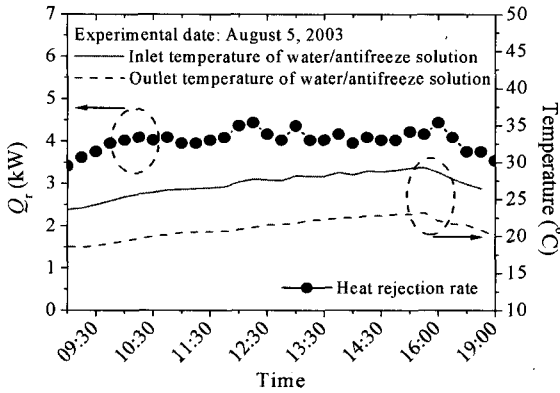


[그림 4] Cooling COP and EER (Energy Efficiency Ratio) variations

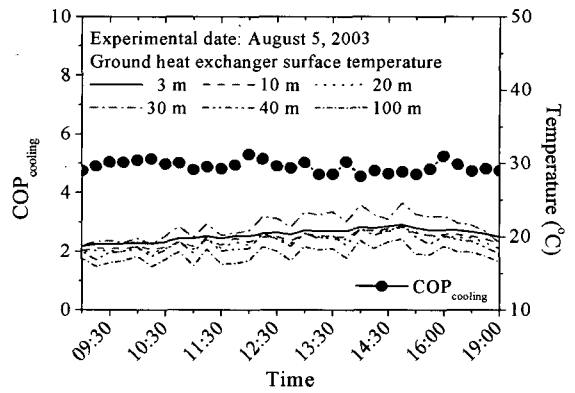
### 3.2.2 냉방성능 특성

그림 4에 냉방기간 동안에 열펌프가 갖는 냉방 성능계수 및 에너지 효율비(EER)를 나타내었다. 본 시스템의 냉방 성능계수는 4.13~5.41의 값을 가지며, 이에 해당하는 에너지 효율비는 15.38~16.94의 범위에 있음을 알 수 있다. 이는 상용 공기 열원 열펌프나 기타 공기조화에 사용되는 냉난방 설비보다 매우 높은 값이다.

지열원 열펌프의 성능에 영향을 미치는 주요 요



(a) The daily variation of water/antifreeze solution and heat rejection rate of ground heat exchanger.



(b) The daily variation of cooling COP and ground heat exchanger surface temperature.

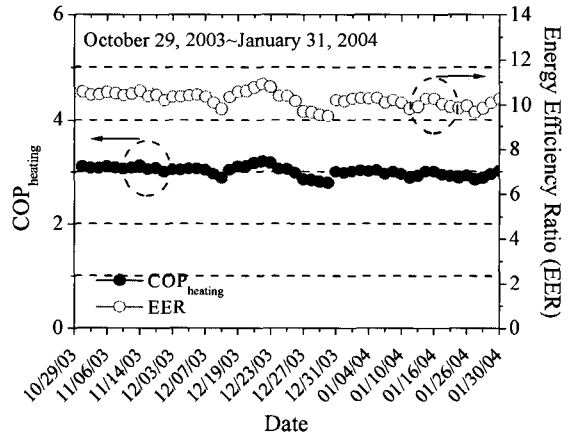
[그림 5] The daily variations of heat rejection rate, cooling COP and ground heat exchanger surface temperature

인으로는 열펌프의 냉난방 성능, 소비 전력 그리고 지중 열교환기의 성능 등을 들 수 있다. 그림 5는 냉방성능에 대한 결과를 보여주고 있다. 그림 5의 (a)는 부동액의 지중 열교환기 입/출구 온도와 질량유량 등으로 계산한 지중 열교환기의 열 방출률을, (b)에 하루 중 냉방 성능계수 및 지중 열교환기 표면온도 변화를 나타냈다. 부동액의 지중 열교환기 입구온도는 지중 열교환기의 성능에 영향을 미치는 중요한 인자로서 일반적으로 냉방시 외기온도보다 낮으며 지중온도보다 높다.

그림 5의 (a)와 (b)에서 지중 열교환기의 지중으로의 열 방출률은 평균 3.84 kW, 평균 냉방 성능계수는 4.82 그리고 입구와 출구에서의 온도는 각각 26.0°C와 20.3°C로 나타났다. 이 경우 지중 온도 및 지중 열교환기 표면의 온도 그리고 외기의 평균 온도는 각각 12.8°C, 18.7°C 그리고 26.6°C 이었다. 또한 시스템의 냉방성능 또는 지중 열교환기의 열 방출률이 일정한 값을 갖기 위해 부동액의 지중 열교환기 입/출구 온도차 역시 일정하게 변하고 있다.

### 3.2.3 난방성능 특성

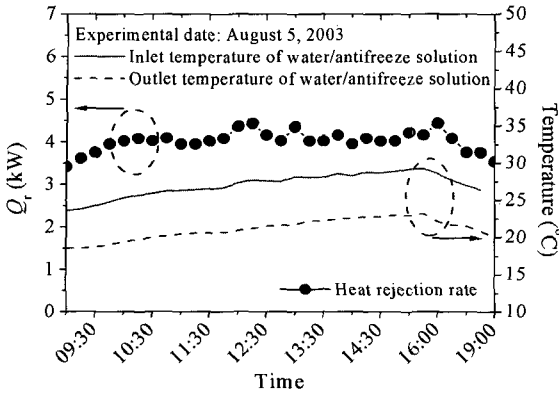
그림 6에 전체 성능분석 기간 중 난방기간 동안에 열펌프가 갖는 난방성능계수 및 에너지 효율



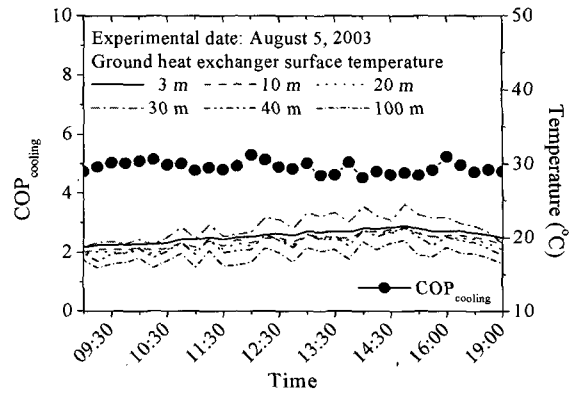
[그림 6] Heating COP and EER (Energy Efficiency Ratio) variations

비(EER)를 나타내었다. 본 시스템의 난방 성능계수는 2.96~3.20의 값을 가지며, 이에 해당하는 에너지 효율비는 10.09~10.92의 범위에 있음을 알 수 있다.

난방성능 측정기간 중 대표적인 경우에 대한 측정 결과를 그림 7에 도시하였다. 그림 7의 (a)는 부동액의 지중 열교환기 입/출구 온도와 질량유량 등으로 계산한 지중 열교환기의 열 흡수율을 나타낸 것이다. 그림에서 지중 열교환기가 지중으로부터 흡수하는 열량은 평균 1.93 kW 그리고 부



(a) The daily variation of water/antifreeze solution and heat extraction rate of ground heat exchanger.



(b) The daily variation of heating COP and ground heat exchanger surface temperature.

[그림 7] The daily variations of heat extraction rate, heating COP and ground heat exchanger surface temperature

동액의 지중 열교환기 입구와 출구에서의 온도는 각각 5.0°C와 7.9°C로 나타났다. 또한 시스템의 난방성능 또는 지중 열교환기의 열 흡수율이 일정한 값을 갖기 위해 부동액의 지중 열교환기 입/출구 온도차 역시 일정하게 변하고 있다. 난방기간 중 부동액의 지중 열교환기 입/출구 온도차는 평균 2.9°C로 나타났다.

그림 7의 (b)는 하루 중 난방 성능계수 및 지중 열교환기 표면온도 변화를 보여주고 있다. 이 경우 평균 난방 성능계수, 지중 열교환기 표면의 온도 그리고 외기의 평균 온도는 각각 3.04, 8.4°C, -2.6°C로 나타났다.

#### 4. 결론

본 연구를 통해 냉난방 기간을 포함한 전체 성능 분석 기간 중의 지중 온도 변화, 시스템 운전에 따른 지중 열교환기 표면온도 변화 그리고 시스템의 냉난방 성능계수 및 에너지 효율비에 대한 결과를 얻을 수 있었으며 결론은 다음과 같다.

(1) 지중 온도는 12.1°C에서 15.2°C의 범위에서 거의 일정하였으며, 또한 지하 5 m 지점 이후부터는 외기의 온도 변동에 거의 무관하였다. 따라서 열펌프의 열원 및 히트싱크

로서 지열은 외기보다 안정적인 것을 확인하였다.

- (2) 냉방기간 중 지중열교환기 표면 온도는 지중 열교환기 입구로부터 가까운 지점(3 m)의 온도가 가장 높고, 깊이 방향으로 갈수록 온도가 감소하였다. 반면에 난방기간 중에는 부동액이 지중 열교환기 내를 순환하면서 지중의 열을 흡수하기 때문에 반대의 결과가 나타났다.
- (3) 전체 실험 기간 중 냉방기간 동안의 시스템 성능계수는 4.13에서 5.41의 값을 가지며, 이에 해당하는 에너지효율비는 15.38에서 16.94의 값을 나타냈다.
- (4) 냉방기간 중 대표적인 경우에 있어서 지중 열교환기의 열 방출률은 평균 3.84 kW, 평균 난방 성능계수는 4.82 그리고 지중 열교환기 입구와 출구에서 부동액의 온도는 각각 26.0°C와 20.3°C로 나타났다. 이 때 지중 및 지중 열교환기 표면의 평균 온도는 각각 12.8°C와 18.7°C이었다.
- (5) 전체 성능분석 기간 중 난방기간 동안의 시스템 성능계수는 2.96에서 3.20의 값을 가지며, 이에 해당하는 에너지효율비는 10.09 ~ 10.92의 범위에 있었다.

(6) 난방기간 중 대표적인 경우에 있어서 지중 열교환기가 지중으로부터 흡수하는 열량은 평균 1.93 kW 그리고 부동액의 지중 열교환기 입구와 출구에서의 온도는 각각 5.0°C와 7.9°C로 나타났다. 이 경우 평균 난방 성능계수는 3.04였으며, 지중 열교환기 표면의 평균 온도는 8.4°C로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 에너지관리공단 신재생에너지보급센터와 코오롱건설(주)의 지원 하에 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Lund, J. W., 2000, Ground-source (geothermal) heat pumps. In: Lineau P. J., editor. Course on heating with geothermal energy: conventional and new schemes. World Geothermal Congress 2000 Short Courses, pp. 209-236.
2. EPA, 1993, Space Conditioning : The Next Frontier. Office of Air and Radiation, 430-R-93-0044 (4/93), EPA, Washington, D.C.
3. Lund, J. W. and Freeston, D. H., 2001, World-wide direct use of geothermal energy 2000, Geothermics, Vol. 30, pp. 29-68.
4. Kavanaugh, S. P. and Rafferty, K., 1997, Ground-source heat pumps: design of geothermal systems for commercial and institutional buildings, ASHRAE.
5. Healy, P. F. and Ugursal, V. I., 1997, Performance and economic feasibility of ground-source heat pumps in cold climate, Int. J. Energy Res., Vol. 21.
6. Phetteplace, G. and Sullivan, W., 1998, Performance of a hybrid ground-coupled heat pump system, ASHRAE Trans., Vol. 104, pp. 763-770.
7. 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.
8. Bose, J. E., Parker, J. D. and McQuiston, F. C., 1985, Design/data manual for closed-loop ground-coupled heat pump systems, ASHRAE, Atlanta.
9. Hepbasli, A., Akdemir, O., and Hancioglu, E., 2003, Experimental study of a closed loop vertical ground source heat pump system, Energy Convers. Mgmt., Vol. 44, pp. 527-548.
10. Bi, Y., Chen, L. and Wu, C., 2002, Ground heat exchanger temperature distribution analysis and experimental verification, App. Therm. Eng., Vol. 22.