

단독주택 적용 지열 히트펌프 시스템의 성능 분석

손 병 후[†], 최 종 민*, 최 항 석**

한국건설기술연구원 설비플랜트연구실, *국립 한밭대학교 기계공학과, **고려대학교 건축사회환경공학과

Performance Simulation of Ground-Coupled Heat Pump(GCHP) System for a Detached House

Byonghu Sohn[†], Jong Min Choi*, Hangseok Choi**

Plant Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Hanbat National University, Daejeon 305-719, Korea

**School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

(Received March 31, 2011; revision received April 20, 2011)

ABSTRACT: Ground-coupled heat pump(GCHP) systems have been shown to be an environmentally-friendly, efficient alternative to traditional cooling and heating systems in both residential and commercial applications. Although some work related to performance evaluation of GCHP systems for commercial buildings has been done, relatively little has been reported on the residential applications. The aim of this study is to evaluate the cooling and heating performances of a vertical GCHP system applied to an artificial detached house(117 m^2) in Seoul. For this purpose, a typical design procedure was involved with a combination of design parameters such as building loads, heat pump capacity, borehole diameter, and ground thermal properties, etc. The cooling and heating performance simulation of the system was conducted with different prediction times of 8760 hours and 240 months. The performance characteristics including seasonal system COP, average annual power consumption, and temperature variations related to ground heat exchanger were calculated and compared.

Key words: Ground-coupled heat pump(지열 히트펌프), Vertical ground heat exchanger(수직형 지중열교환기), Detached house(단독주택), Hourly performance simulation(시간대별 성능 분석), Monthly performance simulation(월간 성능 분석)

기호 설명

c_p	: 비열 [J/kgK]
k	: 열전도도 [W/mK]
L	: 지중열교환기 길이 [m]

q	: 열전달량 [W/m]
R	: 열저항 [mK/W]
r	: 반경 [m]
T	: 온도 [K]
t	: 시간 [hour] 또는 [month]

† Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0495; fax: +82-31-910-0246

E-mail address: byonghu@kict.re.kr

그리스 문자

α	: 열확산계수 [m^2/s]
----------	-----------------------------------

하침자

<i>a</i>	: 연간(annual)
<i>b</i>	: 보어홀(borehole)
<i>c</i>	: 냉방(cooling)
<i>d</i>	: 일일(daily)
<i>m</i>	: 월간(monthly)
<i>g</i>	: 지중(ground)
<i>h</i>	: 난방

1. 서 론

최근 전 세계는 온실효과 가스에 의한 기후변화 문제를 해결하기 위해 다양한 방안을 모색하고 있다. 온실효과 가스는 주로 에너지 소비 과정에서 발생한다. 연도마다 다소 차이는 있지만, 국내에서 건물 부문의 에너지 소비량은 전체 에너지 소비량의 약 25%를 차지하며, 특히 주거용 건물은 전체 건물 에너지 소비량의 약 68%를 차지한다.⁽¹⁾ 이러한 건물 부문의 에너지 소비를 줄이기 위해, 기술개발 투자와 함께 건물 에너지효율등급 인증제도와 그린홈 보급사업 등 관련 정책들도 시행되고 있다.

건물 신·재생에너지 설비로 많은 관심을 받고 있는 지열 히트펌프(ground-coupled heat pump, GCHP) 시스템은 크게 지중열교환기와 히트펌프로 구성된 냉난방 겸용 시스템이다. 외기에 거의 영향을 받지 않는 지중의 항온성을 활용하기 때문에 효율이 높은 시스템이다.⁽²⁾ 아울러 기존 냉난방 설비와 비교했을 때, 이산화탄소와 같은 온실효과 가스를 상대적으로 적게 배출하기 때문에 친환경적이다. 여름과 겨울이 확연하게 구분되는 국내에서 건물 부문의 에너지 절감 방안으로 활용 가능성이 매우 우수하다고 할 수 있다.

지열 히트펌프 시스템이 소기의 목적을 달성하기 위해서는 설계 단계에서 대상 건물의 에너지 사용량을 정확하게 산정한 후, 지중열교환기와 시스템을 설계해야 한다. 건물 부하와 연계한 지중열교환기 최적 설계방법을 포함하여 단기 또는 장기간의 성능해석 등과 관련된 다양한 방법과 결과들⁽³⁻⁵⁾이 제시되었으며, 이러한 결과들은 현재 상용 설계프로그램에도 널리 적용되고 있다. 아울러 시스템과 지중열교환기의 장기간 성능 분석 방법에 대한 타당성 검증 연구⁽⁶⁾를 비롯하여, 실험을 통한 시스템의 정상 상태 에너지 분석과 엑서지 해석(exergy analysis) 연구⁽⁷⁾도 수행되었다. 국내에서 Sohn et al.⁽⁸⁾은 소

용량 지열 히트펌프 시스템을 대상으로 성능 분석에 필요한 데이터를 1년에 걸쳐 수집한 후, 시스템의 냉난방 성능을 분석하였다.

본 연구에서는 Fig. 1의 가상의 단독주택(117 m^2)에 적용된 지열 히트펌프 시스템을 대상으로 분석 기간(8760시간 대 20년)을 달리하여 냉난방 성능을 분석하였다. 이를 위해 대상 건물의 최대 냉난방 부하, 시간대별 에너지 사용량, 월간 에너지 사용량 등을 계산한 후, 히트펌프의 용량과 지중열교환기 사양을 선정하였다. 이를 바탕으로 각각의 분석 기간에 대해 지중열교환기 순환수의 히트펌프 입·출구 온도, 지중열교환기의 열전달 성능 그리고 시스템의 에너지 소비량 등을 분석한 후 비교하였다.

2. 시스템 설계 및 분석 조건

가상의 단독주택에 설치된 수직형 지열 히트펌프 시스템의 냉난방 성능 분석을 위해, 먼저 Fig. 2에 나타낸 서울의 2009년 외기 온도와 Table 1의 설계 변수들을 적용하여 시스템을 설계하였다. 대상 건물은 지하 1층과 지상 2층 규모이며, 총 면적은 117 m^2 이고 침실·화장실·거실·주방·서재 등을 포함한 공조 대상 면적을 107 m^2 로 하였다. 부하 계산에 필요한 건물 각 부위(외벽·내벽·바닥·지붕·창호 등)의 두께와 열전도도 그리고 열관류율 등은 현행 국내 건축법에 명기된 값들을 적용하였다. 또

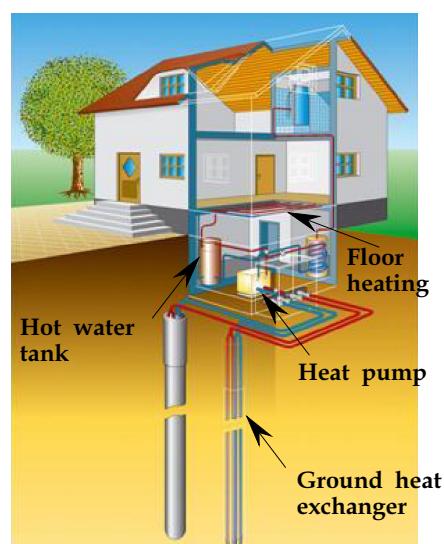


Fig. 1 Typical vertical ground-coupled heat pump (GCHP) system for a detached house.

한 환기량, 인체 발열량, 기기와 조명 발열량 등을 기준 연구결과⁽⁹⁾에 제시된 값들을 적용하였다. 시스

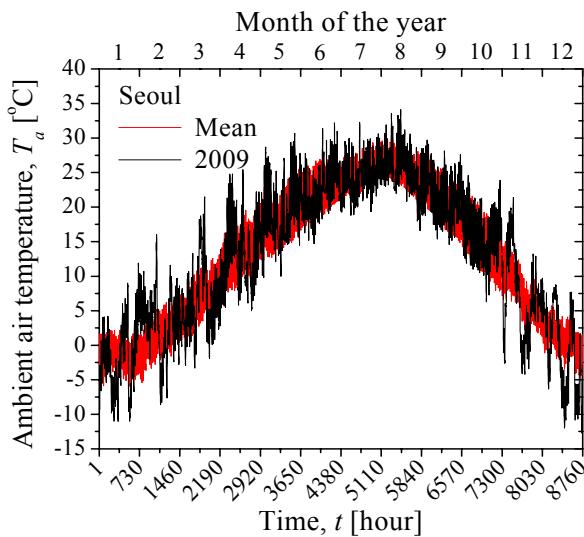


Fig. 2 Ambient air temperature.

Table 1 Design parameters or specifications in modeling of a vertical GCHP system

Parameters	Values or specification
Building	
Floor area/conditioned area [m ²]	117/107
Location	Seoul
Cooling design day	Aug. 16
Heating design day	Jan. 23
Cooling peak load [kW]	14.9
Heating peak load [kW]	8.9
Ground	
Initial ground temperature [°C]	12.9
Thermal conductivity [W/mK]	2.0
Thermal diffusivity [m ² /day]	0.079
Ground heat exchanger	
Nominal pipe diameter [mm]	32
Pipe resistance [mK/W]	0.061
U-tube configuration	Single
Radial pipe placement	Average
Borehole diameter [m]	0.152
Grout thermal conductivity [W/mK]	0.8
Borehole thermal resistance [mK/W]	0.216
Fluid	Methanol

템 용량 선정에 필요한 냉난방 설계 일(design day)은 각각 8월 16일(냉방)과 1월 23일(난방)이었으며, 이에 해당하는 부하는 각각 14.9 kW와 8.9 kW로 계산되었다. Fig. 3은 설계조건과 외기온도를 상용 프로그램(TRNSYS 17)에 적용하여 계산한 연중 시간대별 냉난방 부하를 나타낸 것이다, Fig. 4는 월별 최대 냉난방 부하와 에너지 부하(MWh)를 도시한 것이다.

본 시스템에 필요한 지중열교환기를 산정하기 위해 Table 1의 설계 데이터와 Kavanaugh and Rafferty⁽²⁾가 제시한 방법을 적용하였다. 이 방법은 현

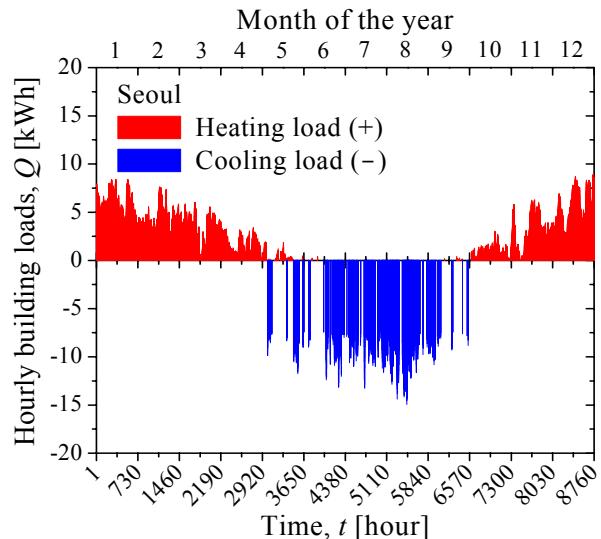


Fig. 3 Hourly cooling and heating loads of a detached house for simulation.

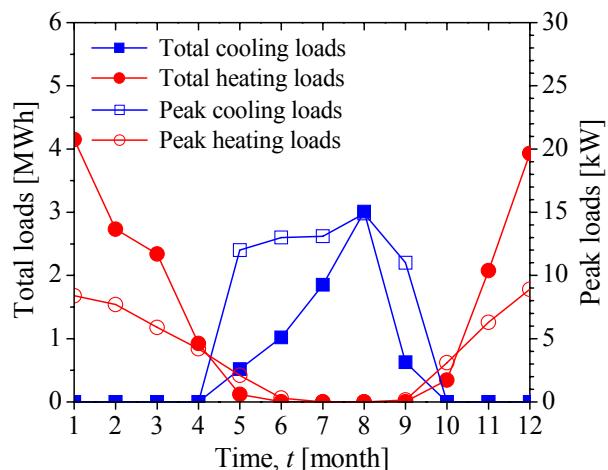


Fig. 4 Monthly total and peak loads of a detached house for long-term simulation.

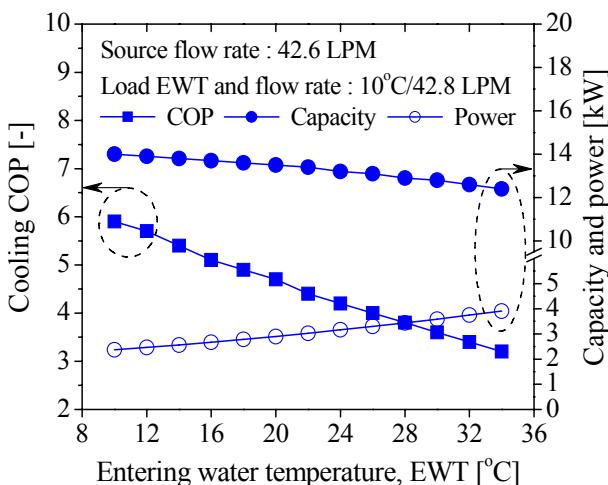
재 상용 설계 프로그램에도 적용되고 있으며, 다른 방법들보다 정확한 것으로 평가된다.⁽¹⁰⁾

$$L = \frac{q_a R_a + (q_l - W)(R_b + PLF_m R_m + R_d F_s)}{T_g - \frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} - T_p} \quad (1)$$

식(1)에서 q_a 와 q_l 은 각각 연 평균 지중 부하와 대상 건물의 최대 부하를 그리고 W 는 시스템 소비전력을 의미한다. 아울러 R 은 열저항을 대변하며, 각 값에서 하침자 a , m , d 는 연간, 월간, 일일을 의미한다. 보어흘 열저항 R_b 는 문헌⁽¹¹⁾에 제시된 방법을 적용하였다. 월별 총 부하량 대비 최대 부하로 정의되는 부분부하율(part load factor)을 PLF_m 으로 표현하였다. 또한 T 는 온도를 의미하며 하침자 fi 와 fo 는 각각 지중 순환수의 히트펌프 입구 온도(이하 'EWT')와 출구 온도다.

지중 순환수의 연중 시간대별 지중열교환기 출구 온도(히트펌프 입구 온도)와 보어흘 벽면 온도 분석을 위해 아래의 식(2)로 표현되는 중첩법(superposition)과 Eskilson⁽³⁾이 제안한 g-함수(g-function)를 적용하였다.

$$T_{fo} = T_g + \frac{q_i}{2mc_p} + \frac{q_i R_b}{L} + \frac{1}{2\pi L} \sum_{i=1}^N (q_i - q_{i-1}) g\left(\frac{(t_i - t_{i-1})}{t_s}, \frac{r_b}{L}\right) \quad (2)$$



(a) Cooling performance

식(1)과 식(2)의 물리적 의미와 이 식들을 이용한 실제 설계 방법 등은 본 논문의 범위를 벗어나기 때문에, 다른 지면을 빌리기로 한다.

Fig. 5는 성능 분석에 적용된 히트펌프의 성능 특성을 나타낸 것이다. 성능계수를 포함한 지열 히트펌프의 특성을 EWT의 함수로 나타낼 수 있으며, 식(3)에서 식(6)과 같다. 이를 적용하여 시스템의 시간대별 또는 월간 성능을 분석하였다.

$$W_c = 1.9877 + 0.0302EWT + 0.00078EWT^2 \quad (3)$$

$$\text{COP}_c = 7.369 - 0.154EWT + 0.0009EWT^2 \quad (4)$$

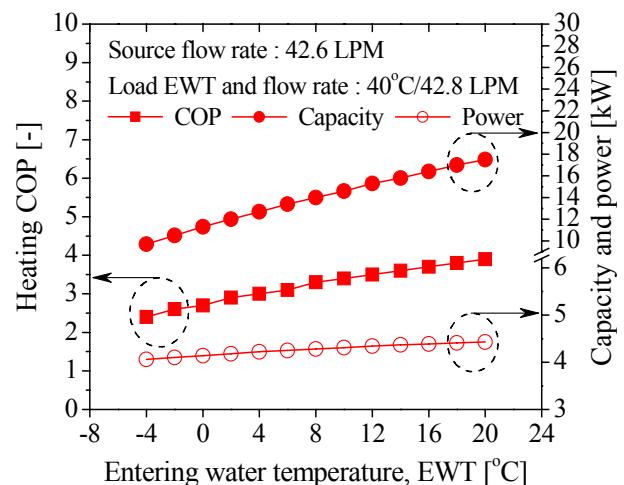
$$W_h = 4.1416 + 0.0197EWT - 0.00026EWT^2 \quad (5)$$

$$\text{COP}_h = 2.724 + 0.074EWT - 0.0008EWT^2 \quad (6)$$

위 식에서 하침자 c 와 h 는 냉방과 난방을 각각 의미한다.

3. 시스템 설계 결과

Table 2는 앞서 언급한 설계 조건들을 적용하여 지열 히트펌프 시스템과 이에 상응하는 지중열교환기의 사양을 설계한 결과다. 냉·난방 설계 일에서 설계 EWT와 최대 부하 등을 적용하여 보어흘 깊이를 산정하였으며, 각각 169.5 m(냉방)와 136.9 m(난방)로 계산되었다. 설계 EWT와 월간 냉난방 부하 그리고 소비전력 등을 적용했을 때, 시스템의 냉난방 성능계수는 각각 3.2와 2.5로 계산되었다.



(b) Heating performance

Fig. 5 Cooling and heating performance of a heat pump unit used in this simulation.

Table 2 Design results

	Cooling	Heating
Total pipe length [m]	338.9	273.8
Borehole number [-]	2	2
Borehole length [m]	169.5	136.9
Unit inlet, EWT ^{a)} [°C]	30.0	5.0
Unit outlet, LWT ^{b)} [°C]	35.7	2.0
Total unit capacity [kW]	14.9	14.4
Peak load [kW]	14.9	8.9
Peak demand [kW]	4.6	3.5
Heat pump COP [-]	3.6	2.9
System COP [-]	3.2	2.5
System flow rate [lpm]	48.2	28.8

a) Entering water temperature

b) Leaving water temperature

4. 결과 및 고찰

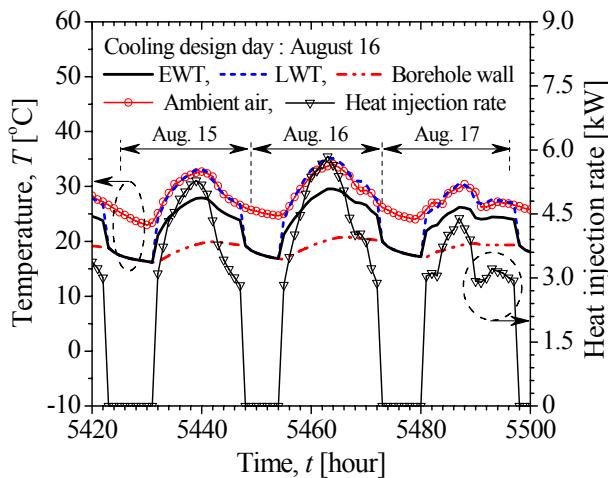
4.1 시간대별 성능 분석 결과

Fig. 6은 냉방 설계 일(8월 16일)에서 지중열교환기와 관련된 각종 온도와 지중열교환기의 열전달 성능(Fig. 6(a)) 그리고 시스템 소비전력과 냉방 성능 계수 변화(Fig. 6(b))를 나타낸 것이다. 아울러 단기간의 성능을 비교하기 위해, 최대 냉방 부하가 걸리는 8월 16일을 기준으로 앞뒤 일의 결과도 함께 도시하였다. Fig. 6에서 보듯이, 본 시스템은 시간대별 부하 변동(외기 온도 변화)에 따라 단속(on-off)운전

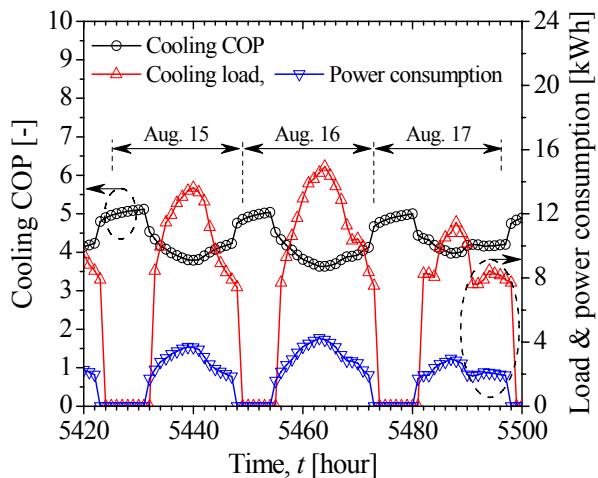
을 하였으며, 지중열교환기의 열전달률도 이에 상응하여 변하였다. 또한 지중 순환수의 온도와 보어홀 벽면 온도 역시 동일한 경향을 보였다.

냉방 설계 일에서 최고 기온은 34.1°C(16시)까지 올라갔으며, 일평균 기온은 29.2°C였다. 지중열교환기의 일평균 열전달률은 9.9 W/m였으며, 이때 보어홀 벽면의 최고·최저 온도는 각각 20.8°C와 16.7°C 그리고 일평균 온도는 19.1°C로 계산되었다. 또한 지중 순환수의 일평균 EWT와 LWT는 각각 24.4°C와 27.8°C로 3.4°C의 온도 차이를 보였다. 특히 EWT는 시스템이 정지(8월 15일 24시~8월 16일 6시)했을 때 19.2°C에서 16.9°C까지 감소하였다가, 시스템이 다시 가동함에 따라 최고 29.6°C(8월 16일 15시)까지 증가하였다. 마지막으로 본 시스템은 일평균 2.3 kWh의 전력을 소비하였으며, 최저 3.6에서 최고 5.1(평균 4.2)의 냉방 COP를 갖는 것으로 계산되었다.

Fig. 7은 난방 설계 일(1월 23일)에서 지중 순환수와 보어홀 벽면의 온도 변화, 지중열교환기의 열전달 성능(Fig. 7(a)) 그리고 시스템 소비전력과 난방 성능계수 변화(Fig. 7(b))를 나타낸 것이다. 냉방 분석 결과와는 달리, 본 시스템은 난방 설계 일에서 24시간 연속으로 운전하였다. 이때 지중열교환기의 열전달률(heat extraction rate)은 시간대별 부하 변동에 대응하였으며, 일평균 4.7 W/m(최저 4.2 W/m, 최고 5.1 W/m)였다. 단속 운전을 한 냉방(0~17.2 W/m, 평균 9.9 W/m)과는 달리 상대적으로 좁은 범위에서 변하였다. 이때 일평균 보어홀 벽면 온도와 EWT는 각각 9.9°C와 7.4°C였다. 아울러 난방 설계 일에서 시스템의 성능계수는 3.25에서 3.34의 범위에 있었으며,

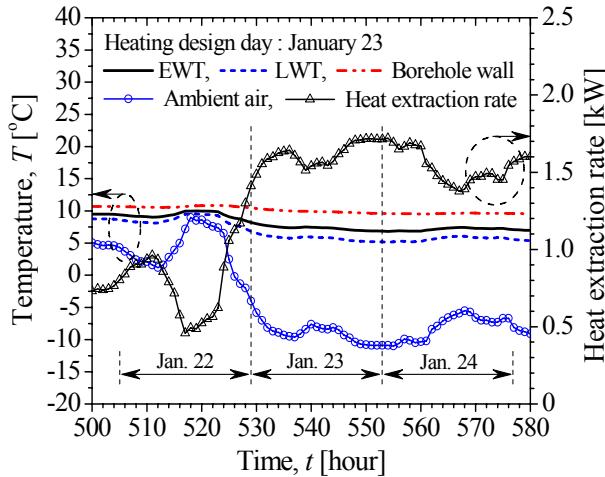


(a) Temperature and heat injection rate

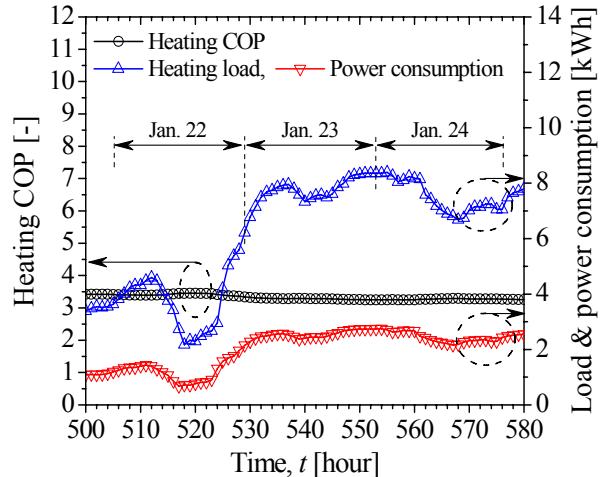


(b) COP, load, and power consumption

Fig. 6 Performance characteristics of a vertical GCHP system in cooling design day.



(a) Temperature and heat extraction rate



(b) COP, load, and power consumption

Fig. 7 Performance characteristics of a vertical GCHP system in heating design day.

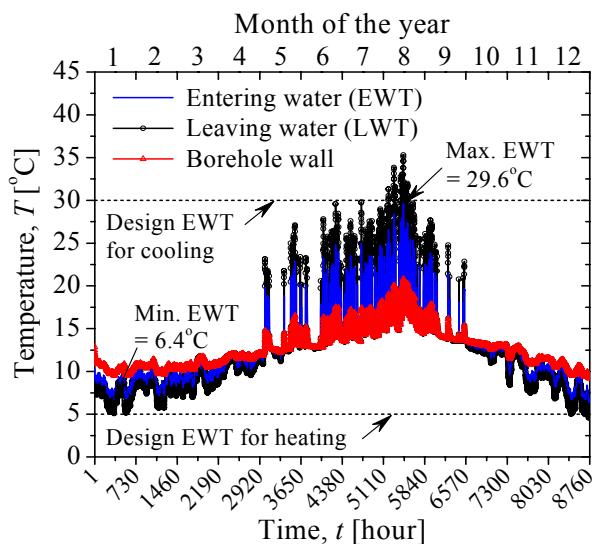
일평균 2.5 kWh(최저 2.2 kWh, 최고 2.7 kWh)의 전력을 소비하였다.

이상에서 언급한 냉난방 설계 일에 대한 결과를 포함하여 연중 시간대별(8760시간) 성능 분석 결과를 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8(a)는 지중열교환기 순환수와 보어홀 벽면의 온도 변화를 그리고 Fig. 8(b)는 지중열교환기의 단위 길이당 열전달 성능과 시스템 소비전력 변화를 나타낸 것이다. 히트펌프 입구에서 지중열교환기 순환수의 최고·최저 온도는 각각 29.6 $^{\circ}$ C와 6.4 $^{\circ}$ C였으며, 설계 EWT 범위인 5 $^{\circ}$ C와 30 $^{\circ}$ C 사이에 있음을 볼 수 있다. 앞서도 언급하였듯이, 대상 건물의 시간대별 부하가 변동함에 따라 지

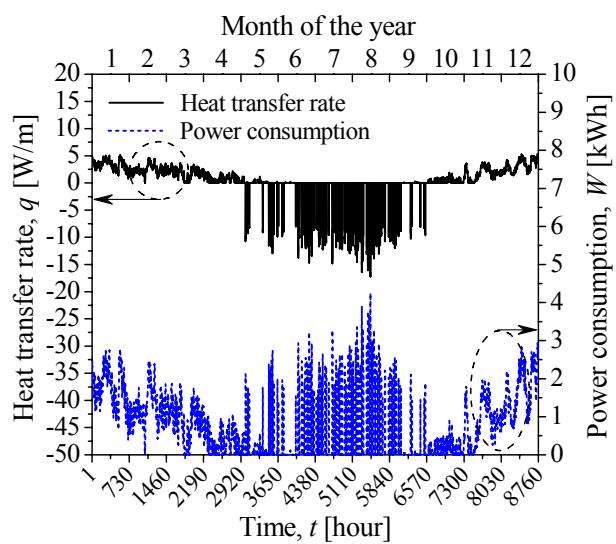
중 열교환기의 열전달량과 시스템 소비전력이 변하는 것도 확인할 수 있다.

4.2 월간 성능 분석 결과

Fig. 9는 지중 순환수의 히트펌프 입·출구 온도와 보어홀 벽면 온도 그리고 지중열교환기의 열전달 성능과 시스템 소비전력 변화를 20년의 분석 기간을 적용하여 계산한 결과다. 지열 히트펌프 시스템이 장기간에 걸쳐 안정된 성능을 발휘하는데 중요한 인자는 지중 순환수의 히트펌프 입구 온도(EWT)다. Fig. 9(a)에서 보듯이, EWT는 설계온도



(a) Temperature



(b) Heat transfer rate and power consumption

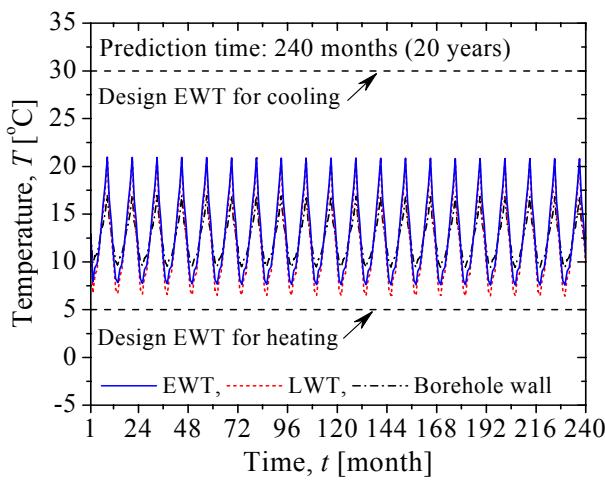
Fig. 8 Hourly performance simulation of ground heat exchanger and power consumption.

범위에서 변함을 볼 수 있다. EWT의 최고(냉방)와 최저(난방) 온도는 각각 21.2°C 와 7.1°C 로 계산되었으며, 이에 상응하여 보어홀 벽면 온도와 LWT도 변하였다. 아울러 지중열교환기의 열전달량과 월간 소비전력 역시 대상 건물의 월간 부하에 상응하여 변하는 것을 Fig. 9(b)에서 확인할 수 있다. 본 건물의 냉방부하는 난방부하보다 컸지만 상대적으로 난방 가동 시간(1863시간)이 냉방(471시간)보다 더 길었기 때문에 장기간에 걸친 시스템의 성능은 안정적으로 유지되었다.

Table 3은 성능 분석 결과를 정리한 것이다. 시스템 가동 후 1년이 지난 다음, 지중온도는 초기 온도보다 0.21°C 감소하였으며, 20년이 경과했을 때에는 0.11°C 감소하였다. 따라서 지중온도는 거의 일정하게 유지됨을 확인할 수 있었다. 또한 시스템 성능에 영향을 미치는 EWT는 설계 범위에 들어왔지만, 분석 기간에 따라 다소 차이를 보였다. 특히 냉방 결과의 차이가 난방보다 컸으며, 이러한 결과는 에너지 소비량 등에서도 동일한 경향을 보였다.

5. 결 론

본 연구에서는 가상의 단독주택(117 m^2)에 적용된 지열 히트펌프 시스템을 대상으로 분석 기간(8760시간 대 20년)을 달리하여 냉난방 성능을 분석하였다. 이를 위해 서울의 2009년 외기 데이터를 적용하여 대상 건물의 최대 냉난방 부하, 시간대별 에너지 사용량, 월간 에너지 사용량 등을 계산한 후, 히트펌프의 용량과 지중열교환기 사양을 선정



(a) Temperature

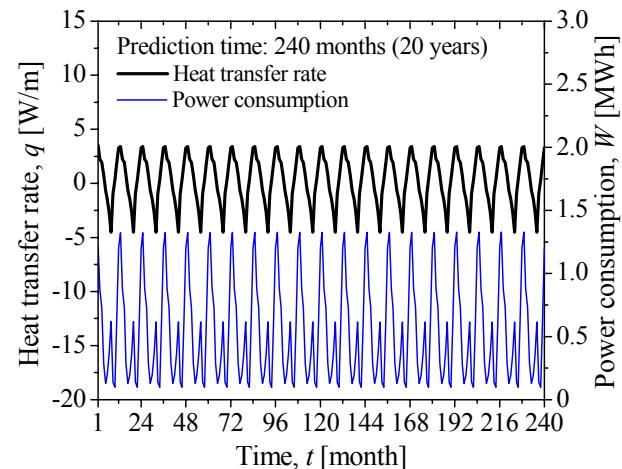
Table 3 Simulation results

		Hourly	Monthly
Ground temperature change [°C]		-0.21	-0.11
Peak unit inlet [°C]	cooling	29.6	21.2
	heating	6.4	7.1
Peak unit outlet [°C]	cooling	35.3	25.8
	heating	4.6	5.2
Seasonal Heat Pump COP [-]	cooling	4.3	4.9
	heating	3.2	3.2
Average annual power [MWh]	cooling	1.65	1.41
	heating	5.22	5.17

하였다. 이를 바탕으로 각각의 분석 기간에 대해 지중열교환기 순환수의 히트펌프 입·출구 온도, 지중열교환기의 열전달 성능 그리고 시스템의 에너지 소비량 등을 분석한 후 비교하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

(1) 지중열교환기의 열전달량은 대상 건물의 냉난방 부하(또는 외기 온도)에 대응하여 변하였으며, 지중 순환수의 히트펌프 입·출구 온도와 보어홀 벽면 온도 역시 이에 상응하여 변하였다.

(2) 본 시스템은 냉방 부하에 따라 운전과 정지를 주기적으로 반복하였으며, 냉방 최대 일에서 일평균 2.3 kWh 의 전력을 소비하여 평균 4.2 의 냉방 성능계수를 갖는 것으로 계산되었다.



(b) Heat transfer rate and power consumption

Fig. 9 Monthly performance simulation of a vertical GCHP system with 20 years of prediction time.

(3) 난방 설계 일에서 본 시스템은 24시간 연속 운전을 하였다. 일평균 2.5 kWh의 전력을 소비하였으며, 성능계수는 3.25에서 3.34의 범위에 있었다.

(4) 분석 기간을 달리 하였을 때 시스템 성능에 영향을 미치는 EWT는 모두 설계 범위에 들어왔지만, 절대 온도에서는 차이를 보였다. 특히 냉방 결과의 차이가 난방보다 컸다.

(5) 지열 히트펌프 시스템이 장기간에 걸쳐 안정적인 성능을 발휘하기 위해서는, 월간 성능 분석은 물론 시간대별 성능 분석을 수행하여 결과를 비교할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2009년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20093020110010).

참고문헌

1. MKE/KEEI, 2008, Yearbook of Energy Statics, Report of Ministry of Knowledge Economy/Korea Energy Economics Institute, ISSN 1226-606X.
2. Kavanaugh, S. P. and Rafferty, K., 1997, Ground-Source Heat Pumps : Design of Geothermal Systems for Commercial and Institutional Buildings, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers(ASHRAE), Atlanta, US.
3. Eskilson, P., 1987, Thermal analysis of heat extraction boreholes, Doctoral thesis, University of Lund, Sweden.
4. Pahud, D. and Hellstrom, G., 1996, The new duct ground model for TRNSYS, Eurotherm Seminar, Eindhoven, Netherlands, Vol. 49 pp. 127-136.
5. Yavuzturk, C. and Spitler, J. D., 1999, A short time step response factor model for vertical ground loop heat exchangers, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 475-485.
6. Yavuzturk, C. and Spitler, J. D., 2001, Field validation of a short time step model for vertical ground loop heat exchangers, ASHRAE Transactions, Vol. 107, pp. 617-625.
7. Akpinar, E. K. and Hepbasli, A., 2007, A comparative study on exergetic assessment of two ground-source(geothermal) heat pump systems for residential applications, Building and Environment, Vol. 42, pp. 2004-2013.
8. Sohn, B. H., Cho, C. S., Shin, H. J. and An, H. J., 2005, Cooling and heating performance evaluation of a GSHP system, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 71-81.
9. Kim, B. S., 2009, The energy performance analysis of ground heat sources heat pump system installed in green home, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 25, No. 9, pp. 339-346.
10. Shonder, J. A., Baxter, V., Thornton, J. and Hughes, P., 1999, A new comparison of vertical ground heat exchanger design methods for residential applications, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 1179-1188.
11. Remund, C. P., 1999, Borehole thermal resistance : laboratory and field studies, ASHRAE Transactions, Vol. 105, pp. 439-445.