

업무용 건물의 지열 히트펌프 시스템에 대한 성능 예측

Performance Prediction on the Application of a Ground-Source Heat Pump(GSHP) System in an Office Building

손병후(Byonghu Sohn)[†], 권한솔(Han Sol Kwon)

한국건설기술연구원 그린빌딩연구소

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

(Received May 30, 2014; revision received July 2, 2014; Accepted: July 4, 2014)

Abstract Ground-source heat pump (GSHP) systems have become an efficient alternative to conventional cooling and heating methods due to their higher energy efficiency. These systems use the ground as a heat source and the heat sink for cooling mode operation. The purpose of this simulation study is to evaluate the performance of a hypothetical GSHP system in an office building and to assess the energy saving effect against the existing HVAC systems (boiler and turbo chiller). We collected monthly energy consumption data from an actual office building (32,488 m²) in Seoul, and created a model to calculate the hourly building loads with EnergyPlus. In addition, we used GLD (Ground Loop Design) V8.0, a GSHP system design and simulation software tool, to evaluate hourly and monthly performance of the GSHP system. The energy consumption for the GSHP system based on the hourly simulation results were estimated to be 582.6 MWh/year for cooling and 593.2 MWh/year for heating, while those for the existing HVAC systems were found to be 674.5 MWh/year and 2,496.4 MWh/year, respectively. The seasonal performance factor (SPF) of the GSHP system was also calculated to be in the range of 3.37~4.28.

Key words Ground-source heat pump system(지열 히트펌프 시스템), Office building(업무용 건물), Performance prediction(성능 예측), Simulation(시뮬레이션), EnergyPlus(에너지플러스), Cooling and heating(냉난방)

[†] Corresponding author, E-mail: byonghu@kict.re.kr

기호설명

c_p	: 비열 [J/kgK]
COP	: 히트펌프 또는 시스템 성능계수 [-]
L	: 지중열교환기 길이 [m]
\dot{m}	: 지중 순환수 유량 [kg/s]
Q	: 시간대별 건물 부하 [kWh]
q	: 열전달량 [W/m]
R	: 열저항 [mK/W], 식(1)
r	: 반경 [m], 식(2)
T	: 온도 [°C] 또는 [K]
t	: 시간 [hour] 또는 [month]
W	: 소비 전력 또는 에너지 소비량 [kWh]

하첨자

a	: 연간(annual)
b	: 보어홀(borehole)
c	: 냉방
d	: 일일(daily)
m	: 월간(monthly)

g	: 지중(ground)
h	: 난방

1. 서론

지열에너지(geothermal energy)를 활용하는 여러 분야 중 가장 큰 부분을 차지하는 기술이 지열 히트펌프(ground-source heat pump) 시스템이다. 지열 히트펌프 시스템(이하 ‘지열 시스템’)은 연중 거의 일정한 온도를 보이는 땅(ground)을 열원(heat source) 또는 히트싱크(heat sink)로 활용하기 때문에, 기존 설비에 비해 냉난방 에너지를 크게 줄일 수 있는 친환경적인 시스템이다. 아울러 기존 냉난방 시스템과 비교했을 때, 지열 시스템은 이산화탄소와 같은 온실효과 가스를 적게 배출하는 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾

지열 시스템은 크게 지상 설비와 지중 설비로 구분된다. 지열 히트펌프 유닛, 순환펌프, 제어설비 등이 지상 설비이며, 트렌치 배관과 지중열교환기(ground heat exchanger, GHE) 등이 지중 설비다. 지중열교환기를 이

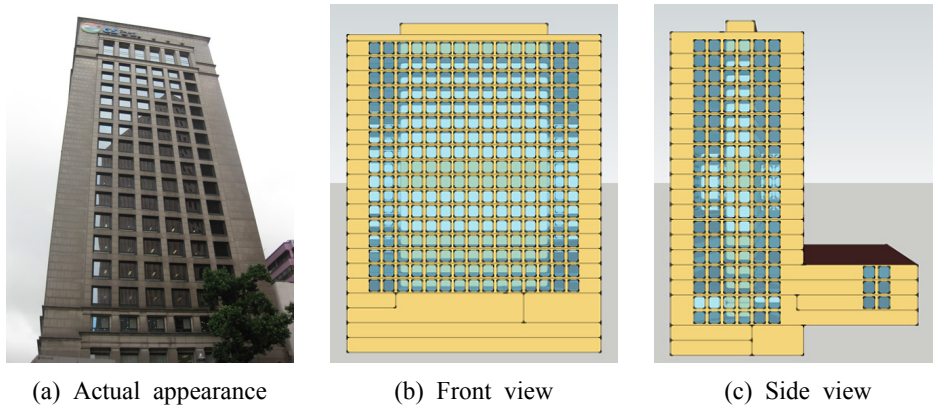


Fig. 1 Actual appearance of building and exterior modeling in this simulation.

용하는 점이 기존 냉난방 설비와 다른 점이라고 할 수 있다. 지역에 따라 다소 차이는 있지만, 전 세계적으로 수직 밀폐형 지중열교환기(vertical closed-loop type GHE)를 주로 적용하고 있으며⁽²⁾, 우리 실정도 크게 다르지 않다. 수직 밀폐형 지중열교환기는 건물의 냉난방 부하에 따라 다양한 깊이로 매설할 수 있는 장점이 있다.

지열 시스템의 성능 향상과 경제성 확보는 최적 설계와 정확한 시공 그리고 비용 효율적 유지관리와 관련 있다. 지열 시스템이 소기의 목적을 달성하기 위해서는 설계 단계에서 대상 건물의 에너지 사용량을 정확하게 산정한 후, 지중열교환기와 시스템을 설계해야 한다. 지중열교환기 최적 설계방법을 포함하여 다양한 지열 시스템에 대한 성능 측정이나 시뮬레이션 결과들⁽³⁻⁷⁾이 발표되었다. 국내에서도 지열 시스템에 대한 관심이 증가하면서 다양한 연구결과들⁽⁸⁻¹⁰⁾이 발표되고 있다. 하지만 국내에서 상업용 건물의 실제 에너지 소비량과 지열 시스템의 에너지 소비량을 비교한 연구는 다소 미흡한 수준이다.

본 연구에서는 실제 업무용 건물의 기존 냉난방 설비를 지열 시스템으로 대체한다고 가정한 후, 시뮬레이션을 통해 지열 시스템의 연중 시간대별(8,760시간) 냉난방 성능을 분석하였다. 성능 예측을 위해 대상 건물의 최대 냉난방 부하와 시간대별 또는 월별 에너지 부하를 산정한 후, 이에 상응하는 히트펌프 용량을 선정하였다. 이를 바탕으로 지중열교환기 순환수의 온도 변화와 지중열교환기의 열전달 성능 그리고 지열 시스템의 에너지 소비량 등을 분석하였다. 마지막으로 지열 시스템과 실제 냉난방 설비의 에너지 사용량을 비교하였다.

2. 대상 건물 모델링과 지열 시스템 설계

2.1 대상 건물 모델링

대상 건물은 연면적 약 32,488 m²의 업무용 건물(서

울 중구 남대문로 소재, 지상 19층, 지하 2층)이다. 건축 후 20년이 지난 건물로, 외장은 건식벽체(dry wall) 마감에 2중 유리 구조를 가지고 있다. 현재 보일러와 터보 냉동기가 냉난방을 담당하고 있다. 또한 지하 기계실과 건물 중심부(core)를 제외한 전 층 공조에는 공조기(AHU)를 그리고 상대적으로 사용 빈도가 낮은 공용 공간(강당과 회의실 등)은 패키지 에어컨(PAC)을 이용한다.

대상 건물의 모델링과 시간대별 에너지 부하 산정을 위해 외피 부분과 냉난방 설비로 구분하였다. 실제 월간 에너지 사용량(kWh)과 냉난방 설비의 사양(효율) 등을 건물 에너지 시뮬레이션 프로그램(EnergyPlus)⁽¹¹⁾에 입력하여 시간대별 에너지부하를 산정하였다. 또한 외피 모델링은 EnergyPlus와 연동 가능한 OpenStudio⁽¹²⁾를 이용하였다. 이때 실제 공조구역을 최대한 반영하여 시뮬레이션 모델의 구역을 나누었다. Fig. 1은 대상 건물의 실제 모습과 외피 모델링 결과를 보여준다.

에너지부하 산정 시 사용 특성이 유사한 공간들을 하나의 구역(zone)으로 묶어 해석하는 것이 편리하다. 본 논문에서는 대상 건물을 27개의 구역으로 분할하였다. 대상 건물은 하루 15시간(07:00~20:00)·주 5일 사용하며, 주말과 공휴일에는 사용자가 없는 것으로 가정하였다. 아울러 실측 사용량을 기준으로 기저부하를 계산하였다.

기저부하는 주말과 휴일 그리고 평일 야간(전 날 21:00~다음 날 06:00), 건물 관리에 필요한 최소 에너지를 의미한다. 일부 조명과 전열 부분의 소비전력이 이에 해당하며, 일정한 경향은 없다. 이러한 불규칙성을 해결하기 위해 시간대별 전력 사용량 데이터 중 주말에 해당하는 96일의 값을 평균하였다. 또한 예상치 못한 주말 사용량은 계산에 반영하지 않았다.

Table 1은 건물 모델링에 입력한 변수들을 정리한 것이다. 이러한 변수에는 대표적으로 건물 외피의 열물성, 재질 스케줄, 평균 조명밀도와 조명 스케줄, 엘리

Table 1 Building parameters and values.

Parameters	Value
Building envelope	
U-value, exterior wall [W/m ² K]	0.45
U-value, exterior floor [W/m ² K]	0.32
U-value, exterior roof [W/m ² K]	0.18
U-value, ground wall [W/m ² K]	0.3
U-value, exterior window [W/m ² K]	3.7
SC(g-value), exterior window [-]	0.5
Internal	
Number of Occupants	2,500
Lighting density, average [W/m ²]	11
Equipment, average [W/m ²]	15
Infiltration [ACH]	0.2
Set temperature for cooling [°C]	26
Set temperature for heating [°C]	22

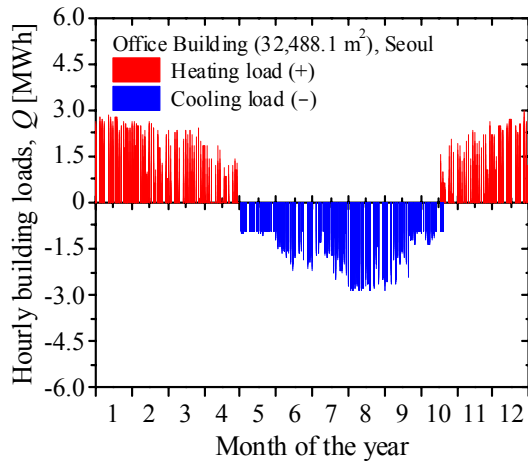


Fig. 2 Hourly cooling and heating loads of the target building.

배터리 등 기타 기기의 평균 에너지 사용밀도와 스케줄, 실내 설정 온도, 침기량 등이 있다.

대상 건물의 실제 공조기와 냉난방 설비의 사양을 에너지부하 산정에 적용하였다. 대상 건물의 기본적인 공조는 정풍량(CAV) 방식이며, 1기의 공조기가 2개의 층을 담당한다. 총 16개의 CAV 유닛을 가동하며, 각 층마다 3기의 코너유닛을 운전한다. 난방과 급탕에는 수관식 보일러 2대와 관류형 보일러 1대를 사용한다. 아울러 냉방을 위해 터보 냉동기와 대향류형 냉각탑을 이용한다. 이때 공조 설비의 운전은 07:00~19:00 그리고 냉난방 설비의 운전은 06:00~18:00로 설정하였다.

Fig. 2는 이상에서 언급한 방법을 적용하여 대상 건물의 시간대별 부하를 산정한 결과다. 연간 냉난방 에너지 부하는 각각 2,495.7 MWh/year(냉방)와 1,997.2 MWh/year(난방)인 것으로 계산되었다.

Table 2 Design parameters and specifications.

Parameter	Specification
Building	
Conditioned area [m ²]	32,488.1
Cooling energy load [MWh/y]	2,495.7
Heating energy load [MWh/y]	1,997.2
Heat pump	
Total unit capacity [kW]	3,189.9
Heat pump cooling COP [-]	4.4
Heat pump heating COP [-]	3.7
Design EWT* for cooling [°C]	30.0
Design EWT* for heating [°C]	5.0
Ground heat exchanger	
Borehole number/diameter[m]	342/0.15
Borehole depth for cooling [m]	153
Borehole depth for heating [m]	100
U-tube configuration	Single
Pipe inner/outer diameter [mm]	27.3/33.4
Ground, mean values	
Thermal conductivity [W/mK]	2.68
Thermal diffusivity [m ² /day]	0.063

* Entering brine temperature to heat pumps.

2.2 시스템 설계와 시뮬레이션

시간대별 에너지 부하와 각종 정보를 상용 프로그램(GLD V8.0)⁽¹³⁾에 입력하여 가상의 지열 시스템을 설계하였다. 히트펌프(K사, KGH0500W)는 물 대 물 방식이며, 정격조건(열원 온도 기준, 냉방 25°C/난방 5°C)에서 냉난방 COP는 4.4와 3.7이다. 또한 지중열교환기는 단일 U자관(single U-tube)을 보어홀에 삽입한 수직 밀폐형 방식이다. U자관의 재질은 고밀도폴리에틸렌(HDPE)이며 수직 보어홀 안에서 두 파이프는 일정 간격을 유지⁽¹⁾하는 것으로 가정하였다. Table 2는 지열 시스템 설계에 필요한 각종 정보와 설계 결과를 정리한 것이다. 시간대별 에너지부하로 보어홀 깊이(borehole depth)를 산정하였기 때문에, 냉방에 필요한 보어홀 깊이가 난방에 필요한 보어홀 깊이보다 컸다.

지중열교환기 길이 계산을 위해 Kavanaugh and Rafferty⁽¹⁾의 방법을 적용하였다. 이 방법은 현재 상용 설계 프로그램에도 적용되고 있으며, 다른 방법들보다 정확한 것으로 평가된다.⁽¹⁴⁾

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

식(1)에서 q_a 와 q_i 는 연 평균 지중 부하와 대상 건물의 최대 부하를 그리고 W 는 시스템 소비전력이다. 아울러

R 은 열저항을 대변하며, 각 값에서 하첨자 a, m, d 는 연간, 월간, 일일을 의미한다. 보어홀 열저항(R_b) 산정은 문헌⁽¹⁵⁾에 제시된 방법을 적용하였다. 월별 총 부하량 대비 최대 부하로 정의되는 부분부하율을 PLF_m 로 표현하였다. 또한 T 는 온도이며, 하첨자 f_i 와 f_o 는 각각 지중 순환수의 히트펌프 입·출구 온도다.

지중 순환수의 지중열교환기 출구 온도와 보어홀 벽면 온도 분석을 위해 식(2)로 표현되는 중첩법(superposition)과 Eskilson⁽³⁾이 제안한 g -함수(g -function)를 적용하였다.

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

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 가상의 지열 시스템을 대상으로 1년 동안의 성능을 분석한 결과 중, 지중 순환수의 시간대별 온도 변화를 도시한 것이다. 여기서 EWT는 지중 순환수의 히트펌프 입구 온도를 그리고 LWT는 히트펌프 출구 온도를 각각 의미한다. 지열 시스템의 냉난방 성능은 EWT 변화에 영향을 받으며 또한 EWT는 지중열교환기의 열전달 성능과 관련 있다. 통상 지열 시스템의 성능 시뮬레이션에서 EWT 변화를 주로 언급하기 때문에 본 논문에서도 이를 따랐다. 그림에서 지중 순환수의 히트펌프 입·출구 온도는 시간대별 부하변동에 상응하여 변한다. 아울러 EWT는 냉·난방 설계 온도인 30°C(냉방)와 5°C(난방) 사이에 있음을 볼 수 있

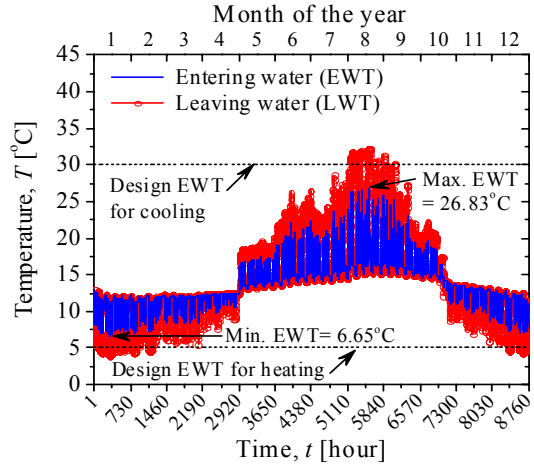
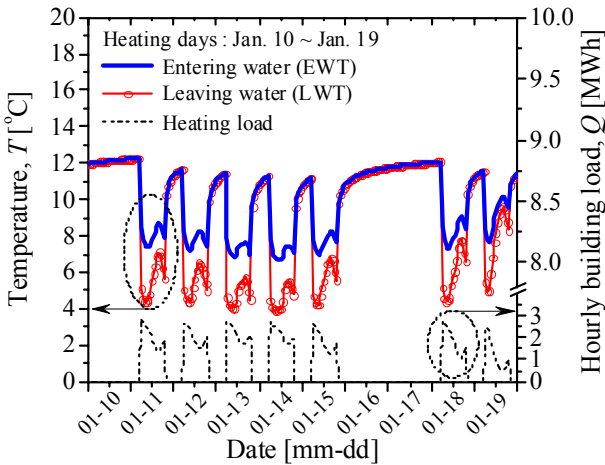


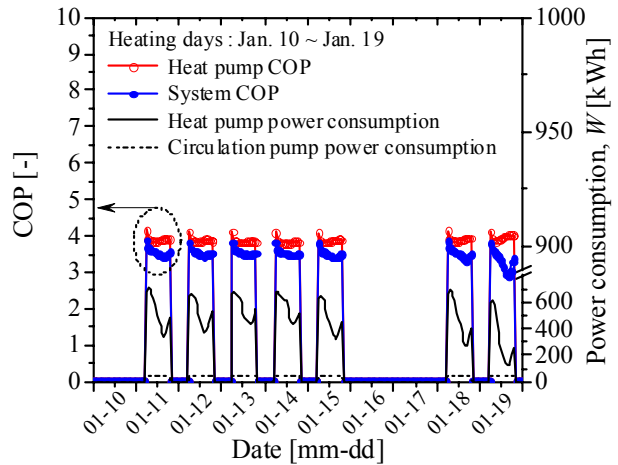
Fig. 3 EWT and LWT variation of VGHE during 1st year.

다. 최고·최저 온도는 각각 26.8°C(8월 20일, 냉방)와 6.7°C(1월 14일, 난방)인 것으로 계산되었다.

Fig. 4는 난방 설계일(1월 14일)을 기준으로 10일 동안의 난방 운전 특성, 즉 지중 순환수의 히트펌프 입·출구 온도 변화(Fig. 4(a)) 그리고 난방 COP와 시스템 소비전력 변화(Fig. 4(b)) 등을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)에서 보듯이, EWT와 LWT는 대상 건물의 난방 부하 양상(pattern)에 따라 감소와 회복 과정을 반복한다. 전체적으로 지중열교환기의 성능 시뮬레이션 결과는 일일 부하 변동 특성을 포함한 전체 난방기간의 부하 특성이 잘 반영된 것으로 판단된다. Fig. 4(b)에서 시스템과 히트펌프의 난방 COP 역시 EWT에 따라 변하며, 이는 쉽게 예측할 수 있는 결과다. 히트펌프 COP 변화에 비해 시스템 COP 변화가 상대적으로 컸으며, 지중 순환수 펌프의 소비전력은 일정(47.8 kW)하다고 가정하였기 때문이다.

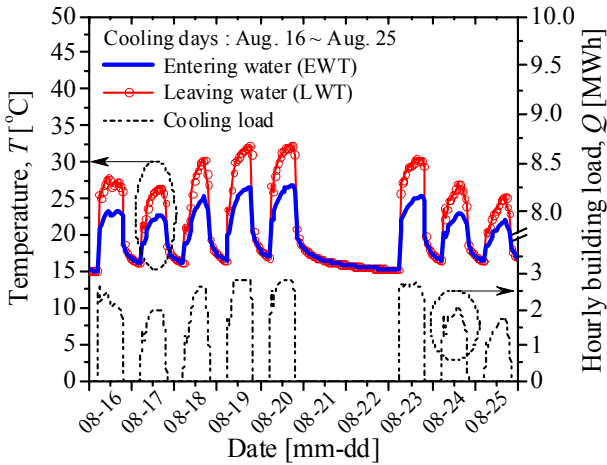


(a) EWT and LWT

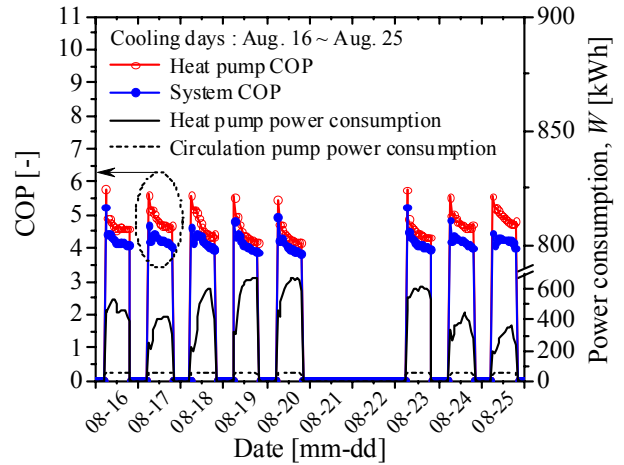


(b) COP and power consumption

Fig. 4 Simulated variation of EWT, LWT, and heating COP values in typical heating days(10 days).



(a) EWT and LWT



(b) COP and power consumption

Fig. 5 Simulated variation of EWT, LWT, and cooling COP values in typical cooling days(10 days).

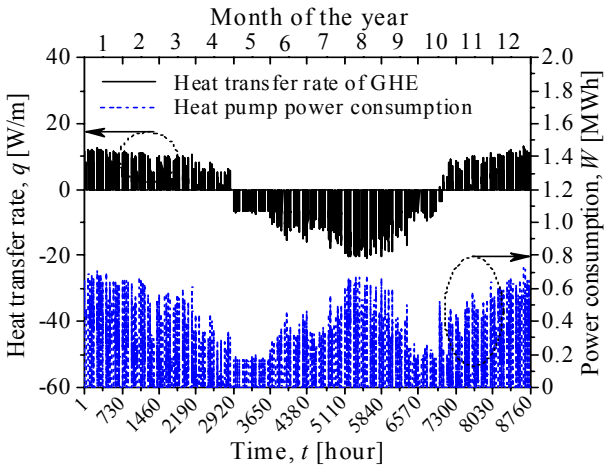


Fig. 6 Heat transfer rate and power consumption of the system during 1st year.

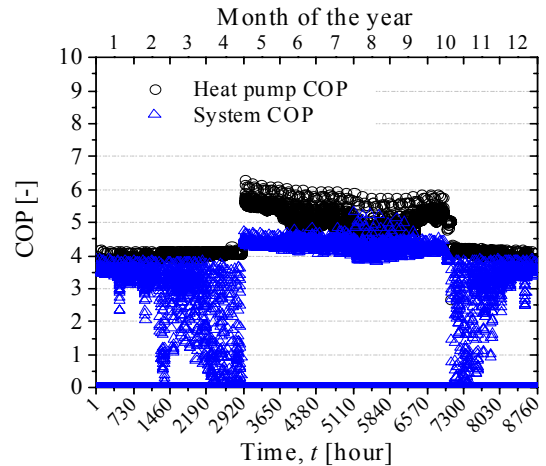


Fig. 7 Hourly variation of COP values for the GSHP system during 1st year.

Fig. 5는 특정 냉방 기간(8월 16일~8월 25일, 10일)에 대한 결과를 나타낸 것이다. 냉방부하 변동에 따른 지중 순환수의 온도와 냉방 COP 변화 그리고 냉방 소비전력 변화 경향은 앞선 난방 경향과 유사하였다. 다만 일일 COP 변화 경향에서 차이를 보였다. 시스템 가동 중(06:00~19:00) 난방 부하는 대략 오후 4시까지 감소하다가 그 이후부터 정지할 때까지 증가한다. 반면 냉방 부하는, 외기 온도에 따라 다소 차이는 있지만, 시스템이 정지할 때까지 지속적으로 증가한다. 따라서 이러한 부하 양상이 냉방과 난방 COP의 일일 변화 경향에 영향을 미친 것으로 볼 수 있다.

Fig. 6은 지중열교환기의 단위 길이당 열전달량(W/m)과 히트펌프만의 에너지 소비량을 분석한 결과다. 이 결과 역시 대상 건물의 시간대별 부하에 상응하여 변

하였다. 난방 기간 중 지중열교환기의 최대 열전달량은 13.2 W/m이었으며, 냉방 기간에는 20.6 W/m이었다. 히트펌프의 최대 에너지 사용량은 난방 737.4 kWh와 냉방 675.9 kWh이며 연간 냉난방 에너지 사용량은 각각 500.3 MWh/year와 501.9 MWh/year였다. 지중 순환수 펌프의 소비전력까지 감안하면, 전체 시스템의 에너지 소비량은 582.6 MWh/year(냉방)와 593.2 MWh/y(난방)였다.

Fig. 7은 지열 히트펌프와 전체 시스템의 시간대별 냉난방 COP 변화를 나타낸 것이다. 지열 히트펌프의 연평균 냉난방 COP는 4.99(냉방)와 3.98(난방)이었다. 이는 정격조건에서 히트펌프의 냉난방 COP인 4.4나 3.7보다 큰 값이다. Fig. 3에서 보듯이 EWT의 최고·최저 온도는 각각 26.8°C와 6.7°C이었으며, 이는 가상

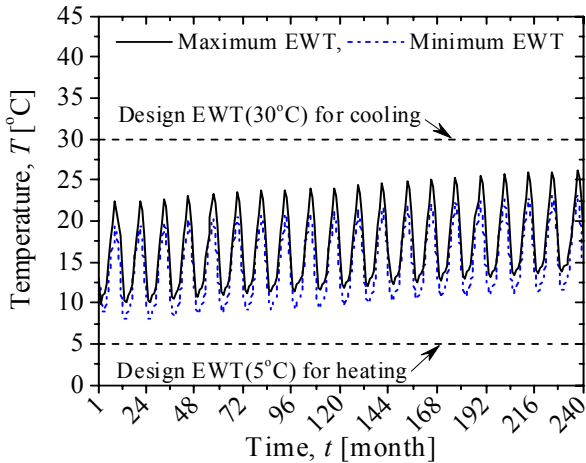


Fig. 8 EWT and LWT variation from monthly simulation results.

의 지열 시스템(또는 지중열교환기)은 이 두 값 사이에서 운전된다는 것을 의미한다. 아울러, 냉난방 에너지 부하가 큰 며칠을 제외하면, EWT는 대부분 냉방 정격조건인 25°C보다 낮거나 또는 난방 정격조건인 5°C보다 높다는 것과 같은 의미다. 가상의 지중열교환기 사양(150 m×342홀)이 다소 과하게 설계되었으며, 이를 줄일 수 있는 여지가 있다는 것을 또한 유추할 수 있다. 지중열교환기 사양을 포함한 여러 변수들이 지열 시스템의 성능에 미치는 영향 규명은 본 논문의 범위를 벗어나기 때문에, 다른 지면을 빌리기로 한다. 마지막으로 전체 지열 시스템의 연평균 냉난방 COP는 4.28(냉방)과 3.37(난방)이었다.

Fig. 8은 지중열교환기 순환수의 장기간(20년) 온도 변화 경향을 나타낸 것이다. 앞서도 언급하였듯이, 지열 시스템의 성능과 에너지 소비량은 EWT에 영향을 받는다. 현재 국내에서는 지열 시스템의 운전 온도 범위(기준)를 냉방 30°C 이하와 난방 5°C 이상으로 정하고 있다. 그림에서 보듯이, 장기간에 걸쳐 기준을 만족하는 것으로 예측되었다. 하지만 대상 건물의 냉방부하가 난방부하보다 크기 때문에, 지중 순환수의 온도는 시간이 지날수록 상승한다. 아울러 시간대별 시뮬레이션 결과(Fig. 3)와 비교했을 때, 최고·최저 온도는 서로 차이를 보였다. 시간대별 에너지부하를 월별 평균값으로 적용하여 지중 순환수의 온도변화를 계산했기 때문에 이러한 결과가 나온 것으로 판단된다.

Fig. 9는 기존 설비(보일러/터보냉동기)와 지열 시스템의 에너지 소비량에 대한 예측 결과를 비교한 것이다. 여기서 지열 시스템에 대해서는 장기간(20년)의 예측 결과 중 특정 해(1년/10년/20년)에 대한 결과를 선별하여 도시하였다. 기존 설비는 냉방에 674.5 MWh/year를 소비하며 난방에 2,496.4 MWh/year를 소비한다.

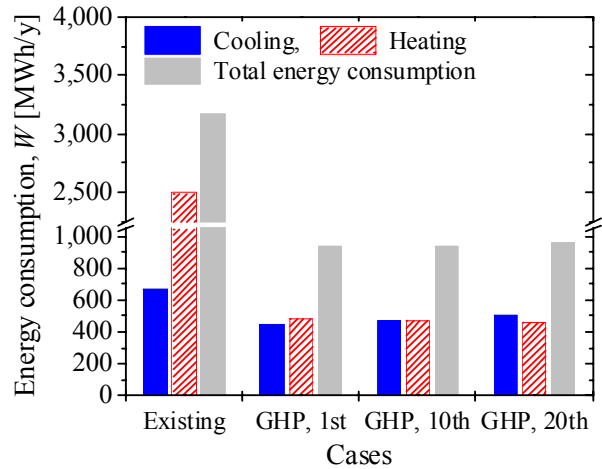


Fig. 9 Comparison of total energy consumption between existing and GSHP systems.

이는 실제 월별 에너지 소비량을 가지고 예측한 시간대별 사용량(8,760개) 중, 냉방과 난방에 해당하는 값들을 합산한 결과다. 실제 소비량과 예측 소비량의 평균편향오차(mean bias error)를 분석한 결과, 난방은 1.6% 그리고 냉방은 4.4%였다. 이 결과는 미국 에너지부의 시뮬레이션 기준⁽¹⁶⁾인 ±5%를 만족하며, 따라서 대상 건물의 연중 시간대별 에너지 부하가 합리적으로 산정되었다는 것을 의미한다. 반면, 지열 시스템은 대상 건물의 연중 시간대별 부하를 감당하기 위해 평균 475.8 MWh/year(냉방)와 471.3 MWh/year(난방)의 에너지를 사용하는 것으로 예측되었다. 전체적으로 지열 시스템이 기존 설비에 비해 성능이 우수한 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 지열 히트펌프 시스템을 실제 업무용 건물에 설치하는 것으로 가정한 후, 시뮬레이션을 통해 냉난방 성능을 예측하였다. 또한 기존 설비의 실제 에너지 사용량과 지열 시스템의 에너지 소비량 예측 결과를 비교하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 지중 순환수의 온도와 시스템의 냉난방 성능은 대상 건물의 냉난방 부하 양상에 따라 변화하였다.
- (2) 연중 시간대별 시뮬레이션 결과에서, 지열 히트펌프의 에너지 사용량은 500.3 MWh/year(냉방)와 501.9 MWh/year(난방)였다. 아울러 지중 순환수 펌프의 소비전력까지 감안하면, 전체 시스템의 에너지 소비량은 582.6 MWh/year(냉방)와 593.2 MWh/year(난방)였다.
- (3) 지열 히트펌프의 연평균 COP는 4.99(냉방)와 3.98

(난방)이었다. 아울러 지열 시스템의 연평균 COP는 4.28(냉방)과 3.37(난방)이었다.

- (4) 지열 시스템이 기존 설비에 비해 에너지를 적게 사용하며, 따라서 지열 시스템의 성능이 우수한 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20133010111750).

References

1. Kavanaugh, S. P. and Rafferty, K., 1997, Ground-source heat pumps : Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings, ASHRAE, Atlanta.
2. Priority Metrics Group, 2009, Industry insights report-energy beneath the backyard : The global geothermal heat pump market 2009, Priority Metrics Group.
3. Eskilson, P., 1987, Thermal analysis of heat extraction boreholes, Ph.D. thesis, University of Lund, Lund, Sweden.
4. Pahud, D. and Hellstrom, G., 1996, The new duct ground model for TRNSYS, Proceedings, Eurotherm Seminar 49, Eindhoven, Netherlands, 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. Gao, J., Zhang, X., Liu, J., Li, K. S., and Yang, J., 2008, Thermal performance and ground temperature of vertical pile-foundation heat exchangers : a case study, Applied Thermal Engineering, Vol. 28, No. 17-18, pp. 2295-2304.
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. Sohn, B., Choi, J. M., and Choi, H. S., 2011, Performance simulation of ground-coupled heat pump(GCHP) system for a detached house, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 392-399.
10. Nam, Y. J., 2013, Numerical analysis of the effect of ground source heat pump systems on the underground temperature, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 8, pp. 427-411.
11. Henninger, R. H. and Witte, M. J., 2011, EnergyPlus energy simulation software : Testing and validation, US Department of Energy, Building Technology Program, US DOE.
12. NREL, 2013, Openstudio-commercial buildings research and software development, NREL.
13. Gaia Geothermal, 2014, Ground loop design-geothermal design studio User's manual, Gaia Geothermal.
14. 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.
15. Sohn, B., 2012, Evaluation of ground effective thermal properties and effect of borehole thermal resistance on performance of ground heat exchanger, Transactions of the Korea Society of Geothermal Engineers, Vol. 8, No. 4, pp. 32-40.
16. US DOE, 2008, M&V Guidelines : Measurement and verification for Federal energy projects V.3.0, US Department of Energy.