

<응용기술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-C.2016.4.1.019>

ISSN 2288-3991(Online)

【특집섹션: ICT와 지열에너지 융합】

냉각탑 병용 하이브리드 지열 히트펌프 시스템의 성능 분석

손병후*†, 이두영**, 최재호**, 민경천**

* 한국건설기술연구원 건축도시연구소, ** 코텍엔지니어링(주) 기술연구소

Performance Analysis of Cooling Tower-Assisted Hybrid Ground-Coupled Heat Pump (HGCHP) System

Byonghu Sohn*†, Doo-Young Lee**, Jae-Ho Choi** and Kyong-Chon Min**

* Building and Urban Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology,

** Research Development Division, KOTEC Engineering

(Received December 21, 2015 ; Revised January 11, 2016 ; Accepted February 3, 2016)

Key Words: Hybrid Ground-Coupled Heat Pump System(하이브리드 지열 히트펌프 시스템), Cooling Tower (냉각탑), Supplemental Heat Rejector(보조 히트싱크), Performance Factor(성능지수)

초록: 하이브리드 지열 히트펌프 시스템은 열원을 안정적으로 유지하기 위해 보조 히트싱크나 보조 열원을 활용한다. 본 연구에서는 병원 건물에 설치한 지열-냉각탑 하이브리드 시스템의 냉난방 성능을 분석하였다. 시스템에 각종 센서와 계측 장비를 설치하였으며, 2014년 2월부터 2015년 2월까지 측정된 데이터를 이용하여 성능을 분석하였다. 냉방 기간 중, 냉수 공급 온도는 평균 11.7℃이었으며, 설계 온도인 12℃를 넘지 않았다. 또한 난방 기간 중에는 일평균 39℃~40℃의 온수를 공급하였다. 지열 히트펌프만의 월 평균 성능지수는 3.8에서 8.4의 범위에서 변화하였다. 반면 냉각탑을 포함한 하이브리드 지열 시스템의 월 평균 성능지수는 2.6에서 6.6 사이에서 변화하였다.

Abstract: This paper presents the measurement and analysis results for the performance of HGCHP system using a cooling tower as a supplemental heat rejector. In order to demonstrate the performance of the hybrid approach, we installed the monitoring equipments including sensors for measuring temperature and power consumption, and measured operation parameters from February 1, 2014 to February 28, 2015. Leaving load temperatures to building showed an average value of 11.7℃ for cooling and 39.5℃ for heating, respectively. From the analysis, the daily PF of hybrid GCHP system varied from 2.6 to 6.6 over the measurement period.

1. 서 론

지열 히트펌프 시스템은 대상 건물의 냉난방 에너지 사용량이 균형을 이룰 때 효과를 크게 본다. 반면, 냉방 에너지 사용량이 큰 건물(cooling-dominated building)에서는 지중 순환수의 온도가 지속적으로 상승할 것이며, 이는 시스템의 성능 저하로 이어진다. 난방 에너지 사용량이 큰 건물(heating-dominated building)에서는 이와 반대 현상이 발생하며, 이는 시스템의 난방 성능 저하를 야기한다. 이에 대한 대안으로 하이브리드 지열 히트펌프 시스템(이하 ‘하이브리드 지열 시스템’)이 주목받고 있다.⁽¹⁾

하이브리드 지열 시스템은 보조 히트싱크(냉방주도 건물)나 보조 열원(난방주도 건물)을 활용한다. 보조 설비로 냉각탑과 인공 연못(이상 냉방) 그리고 보일러와 태양열(이상 난방) 등을 이용할 수 있다. 이러한 설비를 지열 시스템과 연계함으로써 지중 온도(또는 지중열교환기 순환수 온도)는 장기간에 걸쳐

† Corresponding Author, byonghu@kict.re.kr

균형을 맞출 수 있다.⁽²⁾

지열 시스템 시공 시, 일반적으로 냉난방 부하 중 큰 쪽에 맞춰 지중열교환기를 시공하기 때문에, 어느 한 쪽은 필요 이상이 된다. 냉방주도 건물(냉방용 지중열교환기>난방용 지중열교환기)은 난방부하에 맞춰 지중열교환기를 설치하고, 부족한 냉방부하를 냉각탑에서 처리한다. 반면 난방주도 건물일 경우는 이와 반대다. 통상 보조 설비의 시공비가 지중열교환기 시공비보다 저렴하기 때문에 경제적이다. 따라서 하이브리드 지열 시스템은 초기 시공비를 줄이면서, 동시에 안정적인 성능 유지가 가능한 시스템으로 간주된다.

지열 시스템의 성능 향상과 지중열교환기 시공부지 제약에 따른 문제를 해결하기 위해, 하이브리드 시스템에 대한 관심이 증가하면서 다양한 연구들^(3~5)이 수행되었다. 국내에서는 주로 지열 단독 시스템^(6,7)에 대한 연구가 진행되었다. Phetteplace와 Sullivan⁽⁸⁾은 냉각탑 병용 하이브리드 지열 시스템의 성능을 측정하였다. 대상 건물의 면적은 2,230 m²이며, 시스템은 수직형 지중열교환기 70개와 냉각탑(275 kW) 등으로 구성된다. 측정 결과를 이용하여 지중열교환기의 열 방출량(냉방), 열 추출량(난방), 냉각탑과 전체 시스템의 에너지 소비량 등을 분석하였다. 시스템의 에너지 소비량 중 히트펌프는 77%, 순환펌프는 19%, 냉각탑은 4%를 차지한다고 밝혔다. Hackel과 Pertzborn⁽⁹⁾은 하이브리드 지열 시스템의 성능을 측정하였으며, 아울러 측정 결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다. Pertzborn 등⁽¹⁰⁾은 제어 방법이 냉각탑-지열 하이브리드 시스템의 성능에 미치는 영향을 시뮬레이션으로 분석하였다.

기존 국내외 연구는 하이브리드 지열 시스템의 성능을 주로 시뮬레이션으로 분석하였다. 또한 제어 방법과 시스템 구성 방법이 전체 시스템의 성능에 미치는 영향을 주로 분석하였다. 지열-냉각탑 하이브리드 시스템을 대상으로 장기간 데이터를 측정된 연구는 부족하다. 본 연구에서는 병원 건물에 설치한 지열-냉각탑 하이브리드 시스템의 냉난방 성능을 분석하였다. 시스템에 각종 센서와 계측 장비를 설치한 후 2014년 1월부터 데이터를 측정하였다. 실제 성능 분석에는 2014년 2월부터 2015년 2월까지 측정된 데이터를 이용하였다. 본 논문은 하이브리드 지열 시스템의 단기 냉방 성능과 장기 성능 변화 서술로 한정하였다.

2. 대상 건물과 데이터 측정

2.1 대상 건물과 하이브리드 지열 히트펌프 시스템

Fig. 1은 대상 건물 그리고 시스템의 대표 구성 요소인 히트펌프와 냉각탑을 보여준다. 대상 건물은 진료실과 입원실 등으로 조합된 대학병원 건물(경상남도 양산시 소재, 지하 2층/지상 8층)이며, 연면적은 17,610 m²이다. 지하 2층 기계실에 지열 히트펌프와 지중 순환수 펌프 등 시스템의 주요 요소들이 있으며, 지하 1층에는 전기실, 강당, 도서관이 있다. 지상 1층에서 3층은 진료실과 검진센터로 그리고 4층에서 7층은 병동으로 이용된다. 마지막으로 지상 8층은 조제실과 공조실로 쓰인다. 시스템은 2009년 3월부터 공사를 시작하여 그해 12월에 완공되었다.

건물에 필요한 설비를 설계할 당시, 지하층과 공조실 등을 제외한 실제 사용 공간의 최대 부하는 냉



Fig. 1 Exterior pictures of building, closed-circuit cooling tower, and ground-coupled heat pumps

방 1,598.7 kW와 난방 1,360.4 kW를 적용하였다. 여기서 지열 시스템은 냉방 1,434.8 kW(408 RT)와 난방 970.8 kW(276 RT)를 담당하는 것으로 설계하였다. 나머지는 전기구동 히트펌프(EHP, 129.8 kW), 패키지 에어컨(PAC, 17.4 kW), 항온항습기(16.7 kW)가 담당한다.

시스템 계통도와 데이터 측정 위치를 Fig. 2에 나타내었다. 지열 히트펌프(WaterFurnace, NXW540)는 물 대 물 방식이며, 총 10대가 가동 중이다. 냉방 정격조건(열원 입구 25℃/부하 입·출구 12℃와 7.6℃)에서 히트펌프의 냉방 용량은 166.2 kW이고, 이때 COP는 4.99다. 난방인 경우(열원 5℃/부하 입·출구 40℃와 44.5℃), 용량과 COP는 159.5 kW와 3.47이다. 아울러 정격 소비전력 5 kW의 지중 순환수 펌프(Grundfos, TP50-340/4) 10대가 히트펌프에 일대일로 대응한다. 지중열교환기 순환수로 물(80%)-에틸알코올(20%) 혼합 유체를 사용하며, 부하측 냉온수로는 물을 사용한다. 또한 팽창탱크(500리터)는 지중 순환수를 안정적으로 공급하고 동시에 시스템 압력을 일정하게 유지하는 역할을 수행한다.

지중열교환기는 수직 밀폐형 방식이며, 깊이 200 m와 직경 150 mm의 보어홀(borehole) 60개를 이용한다. 전체 보어홀은 건물 뒤에 격자 모양(10×6)으로 배치되어 있고, 보어홀 사이의 간격은 6 m다. 보어홀에 고밀도폴리에틸렌(HDPE) 재질의 지중열교환기 파이프가 단일 U관(single U-tube) 형상으로 삽입되어 있다. 파이프 외경은 42.2 mm이고 내경은 34.5 mm다. 보어홀 내 빈 공간은 벤토나이트 20%와 물 80%의 질량비율로 혼합한 그라우팅 재료로 채웠다. 지중열교환기 설계 시, 현장 열응답 시험(in-situ thermal response test)에서 산정한 지중 유효 열전도도 값(2.65 W/mK)을 적용하였다.

Fig. 2에서 보듯이 밀폐형 냉각탑(100 RT, 2대)은 히트펌프와 지중열교환기 사이에 직렬로 연결되어 있다. 냉방 운전 중 지중 순환수의 히트펌프 출구 온도(LST, leaving source temperature)가 32℃를 넘으면 냉각탑-1을 가동한다. 냉각탑 한 대로 온도를 유지하지 못해, LST가 33℃를 넘으면 냉각탑-2까지 두 대를 가동한다. 냉각탑 정지는 운전과 반대다.

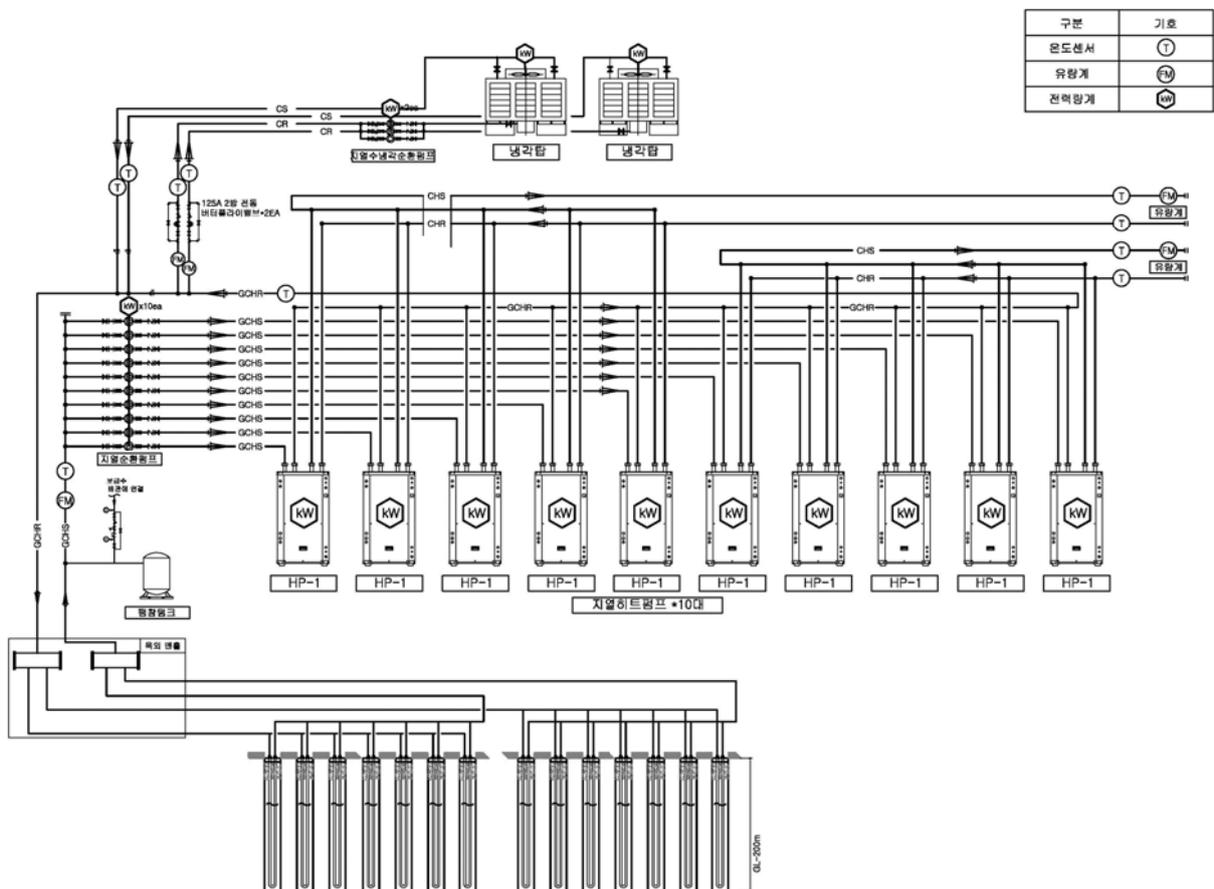


Fig. 2 Layout of cooling tower-assisted hybrid GCHP system installed in hospital building

지중열교환기 순환수는 냉각탑 본체에 설치된 관군(tube bundle) 내부를 유동한다. 이때 냉각탑 상단에 서 관군 외면에 물(냉수)을 살포하며, 동시에 상단의 팬은 주변 공기를 냉각탑 하단에서 상단으로 유동 시킨다. 관군 외면에 살포된 냉수가 증발하면서 관군 내부를 유동하는 지중 순환수의 온도를 낮추게 된다. 개별 냉각탑의 정격유량은 1,300 LPM이다.

2.2 데이터 측정과 분석

Fig. 2에 표시한 위치에서 온도(PT-100Ω)와 유량(Euromag International, MUT-1222)을 측정하였다. 아울러 전력 측정 센서(CT)와 전력·전력량 변환기(Hanyoung, WM3)를 사용하여 전력 소비량을 측정하였다. 데이터로거(Hanyoung, GR100-20)를 통해 1초 간격으로 측정값을 저장한 후, 결과를 분석하였다.

지중 순환수는 지중열교환기 파이프 안을 유동하면서 주변 지반과 열을 주고받는다. 이때 시스템이 냉방 운전이면 지반으로 열을 방출하고, 난방 운전이면 지반에서 열을 추출한다. 지중열교환기의 순간 방출 또는 추출 열량 계산에 식 (1)을 이용하였다.

$$\dot{Q}_s = \dot{m}_s C_{p,s} |LST - EST| \quad (1)$$

식(1)에서 EST (entering source temperature)는 지중열교환기 순환수의 히트펌프 입구 온도, 즉 지중열교환기 출구 온도이고 LST (leaving source temperature)는 히트펌프 출구 온도(지중열교환기 입구 온도)다. 또한 \dot{m}_s 는 지중 순환수의 질량유량이고 $C_{p,s}$ 는 지중 순환수의 비열이다.

냉방 또는 난방 운전 중, 히트펌프가 건물에서 제거(냉방)하거나 건물로 공급(난방)하는 열량 계산에는 식(2)를 사용하였다.

$$\dot{Q}_{HP} = \dot{m}_l C_{p,l} |ELT - LLT| \quad (2)$$

식 (2)에서 ELT (entering load temperature)는 건물(부하) 순환수의 히트펌프 입구 온도이고, LLT (leaving load temperature)는 히트펌프 출구 온도다. 아울러 \dot{m}_l 와 $C_{p,l}$ 는 각각 건물 순환수의 질량유량과 비열이다.

지열 히트펌프 시스템의 냉난방 성능은 통상 COP나 성능지수(PF, performance factor)로 표현한다. 식 (3)과 같이, 히트펌프의 순간 열량(\dot{Q}_{HP})과 시스템의 순간 소비전력(\dot{W}_{sys})을 이용하여 COP를 계산할 수 있다.

$$COP_{sys} = \frac{\dot{Q}_{HP}}{\dot{W}_{sys}} = \frac{\dot{Q}_{HP}}{\dot{W}_{HP} + \dot{W}_P + \dot{W}_{CT}} \quad (3)$$

식 (3)은 매초 획득한 원 데이터(raw data)를 사용하기 때문에 순간 성능(instantaneous performance)이다. 장기 성능 분석을 위해 시스템 운전(ON)과 정지(OFF)를 모두 고려하면, 합산의 개념이 포함된 성능지수(PF)로 표현하는 것이 효과적이다. 히트펌프와 시스템의 성능지수 산정에 식 (4)와 식 (5)를 적용하였다.

$$PF_{HP} = \frac{\int_0^t \dot{Q}_{HP}(t) dt}{\int_0^t \dot{W}_{HP}(t) dt} \quad (4)$$

$$PF_{sys} = \frac{\int_0^t \dot{Q}_{HP}(t)dt}{\int_0^t \{\dot{W}_{HP}(t) + \dot{W}_P(t) + \dot{W}_{CT}(t)\}dt} \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)에서 적분 시간(integration period)에 따라 일일 성능지수(daily performance factor, DPF), 계간 성능지수(seasonal performance factor, SPF), 연간 성능지수(annual performance factor, APF)를 구할 수 있다. 식 (3)과 식 (5)에서 순환펌프의 전력 소비량(\dot{W}_P)은 지중 순환수 펌프와 냉각탑 순환수 펌프의 합이고, 하첨자 CT 는 냉각탑을 의미한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시간대별(hourly) 냉방 성능

본 연구는 하이브리드 지열 히트펌프 시스템의 장기(2014년 2월~2015년 2월) 성능을 분석하였다. 장기 성능 분석에 앞서, 특정 냉방 기간의 시간대별 성능을 분석하였다. 대상 건물이 있는 양산 지역의 2014년 최고 기온은 36.0°C(2014년 7월 31일)이었다. 따라서 최고 기온을 보인 날을 포함하여 일주일(2014년 7월 28일~8월 3일) 동안의 운전 특성을 Fig. 3과 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 3에서 외기 온도는 1시간 간격으로 측정된 값이고, 지중 순환수와 건물 순환수의 온도는 매초 측정된 데이터를 시간 간격으로 평균한 값이다. 또한 Fig. 4에서 히트펌프와 시스템의 시간대별 성능지수(hourly PF) 산정에 식 (4)와 식(5)를 각각 적용하였다. 이때 열량과 전력 소비량은 초당 데이터를 1시간 간격으로 적산한 값이다.

지열 히트펌프 시스템의 냉방 성능은 지중열교환기 순환수의 히트펌프 입구 온도(EST)에 영향을 받는다. 아울러 지중열교환기는 외기 온도, 즉 부하에 따라 운전과 정지를 반복한다. Fig. 3(a)에서 보듯이, 본 시스템의 지중열교환기도 이러한 일반적인 운전 특성을 보였다. 다만 상업용 또는 사무용 건물과 달리 하루 20시간 가까이 운전되었다. 본 시스템은 통상 오전 6시에서 7시 사이에 부하가 걸리기 시작하였다. 이때부터 지속적으로 운전되다가 저녁과 밤 시간대로 가면서 지중 순환수의 온도는 다소 감소하였다. 하지만 7월 31일에는 거의 24시간 작동한 것을 볼 수 있다. 본 시스템은 또한 LST 가 32°C에 도달하면 냉각탑이 구동되기 때문에, LST 는 이 설정 온도를 넘지 않았다. 이 기간 동안 EST 는 평균 27.3°C이었으며, 매우 안정적이라고 할 수 있다. 시스템의 운전 방식(ON-OFF 운전)과 냉각탑 구동 때문에 지중 순환수가 일정한 온도를 유지할 수 있는 것으로 판단된다.

지열 히트펌프가 건물로 공급하는 냉온수의 온도(LLT) 변화로 시스템이 정상적으로 운전되는지 판단할 수 있다. 냉방 운전 중 건물(부하) 순환수의 온도 변화를 Fig. 3(b)에 나타내었다. 지중 순환수의 온도 변화와 마찬가지로, 부하 측 순환수의 온도 역시 건물에 필요한 냉방 부하에 따라 변화였다. 이 기간 중, 냉

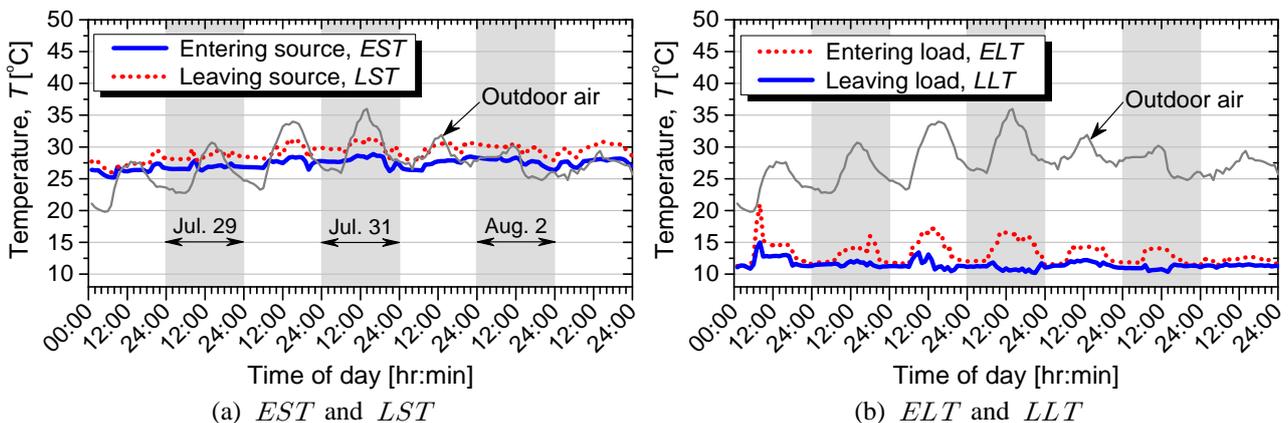


Fig. 3 Temperature variations of source and load sides on typical cooling days (July 28~August 3, 2014)

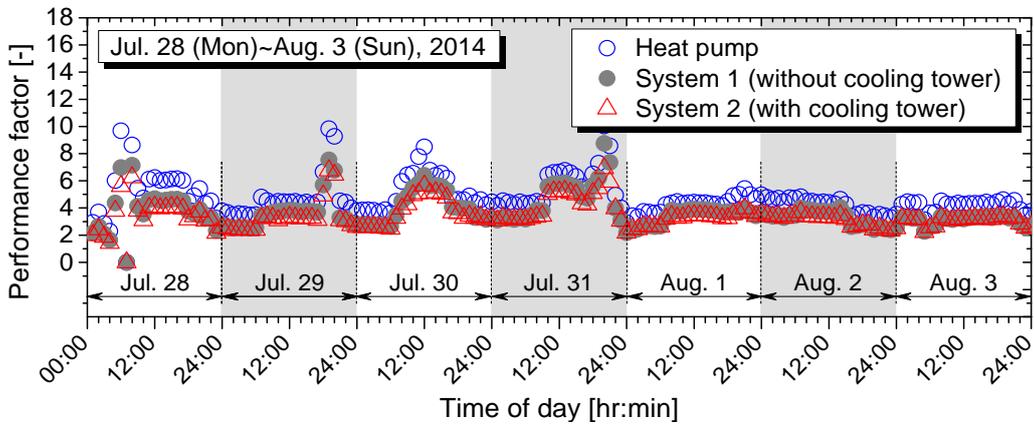


Fig. 4 Hourly performance factor variation on typical cooling days (July 28~August 3, 2014)

수 공급 온도(LLT)는 평균 11.5°C 이었으며 이는 최초 설계 온도인 12°C 를 만족하는 결과다.

히트펌프와 시스템의 시간대별 냉방 성능지수를 Fig. 4에 나타내었다. 히트펌프의 냉방 성능지수는 평균 4.74였다. 냉각탑을 제외한 상태에서 시스템(System 1)의 성능지수를 산정하면 평균 3.71이었다. 반면 모든 요소들의 전력 소비량까지 감안했을 때, 시스템(System 2)의 냉방 성능지수는 평균 3.42였다. 냉각탑을 구동하면 전력을 더 소비하기 때문에 성능지수는 다소 감소한다. 하지만 냉각탑이 지중 온도 회복에 미치는 영향이 더 클 것으로 판단하기 때문에 수용할 만한 결과라고 할 수 있다.

3.2 일일(daily) 성능

Fig. 5는 순환수의 온도와 지중열교환기 부하(Q_s) 그리고 건물 에너지부하(Q_L)를 일일 적산 또는 평균 값으로 나타낸 결과다. Fig. 5(a)에서 보듯이 외기온도 즉 건물 부하에 따라 지중 순환수의 온도와 지중 열교환기 부하는 변한다. 난방 기간(2014년 2월~4월, 2014년 11월~2015년 2월) 중 일평균 EST 는 16°C ~ 19°C 에서 변하였다. 본 건물은 냉방 에너지부하가 난방 에너지부하보다 상대적으로 큰 건물이다. 냉방 운전 시 지중으로 방출되는 열이 지중열교환기 주변에 축적되며, 따라서 일반적인 경우보다 일평균

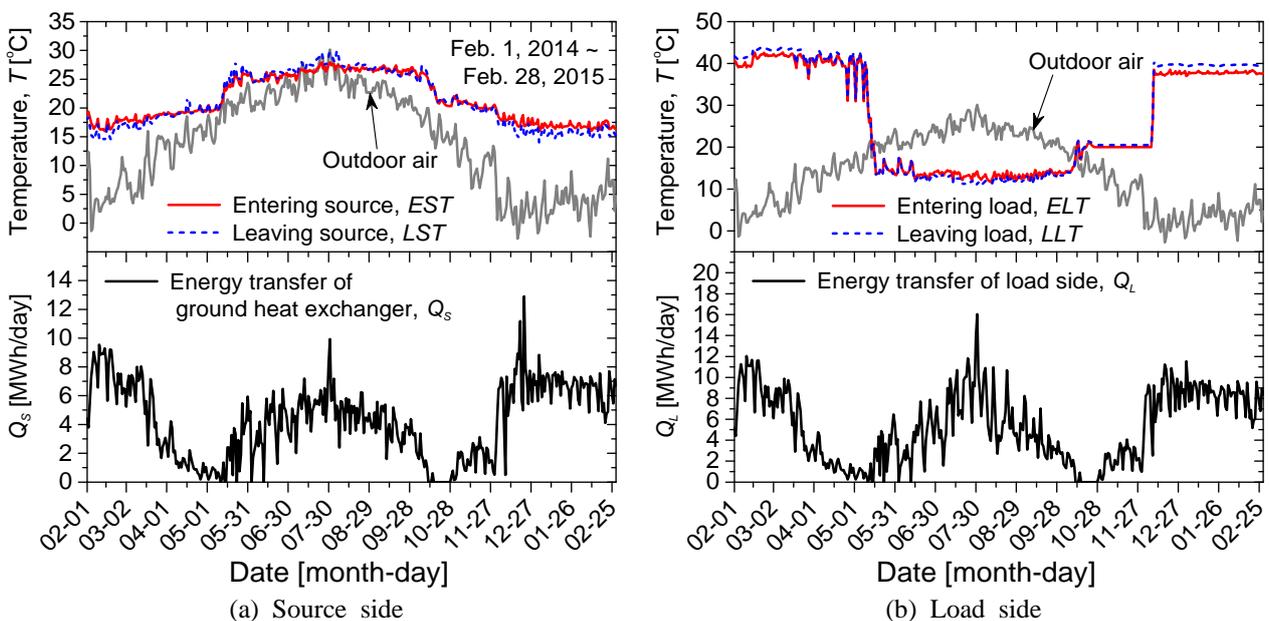


Fig. 5 Temperature variations of source and load sides on entire measurement period

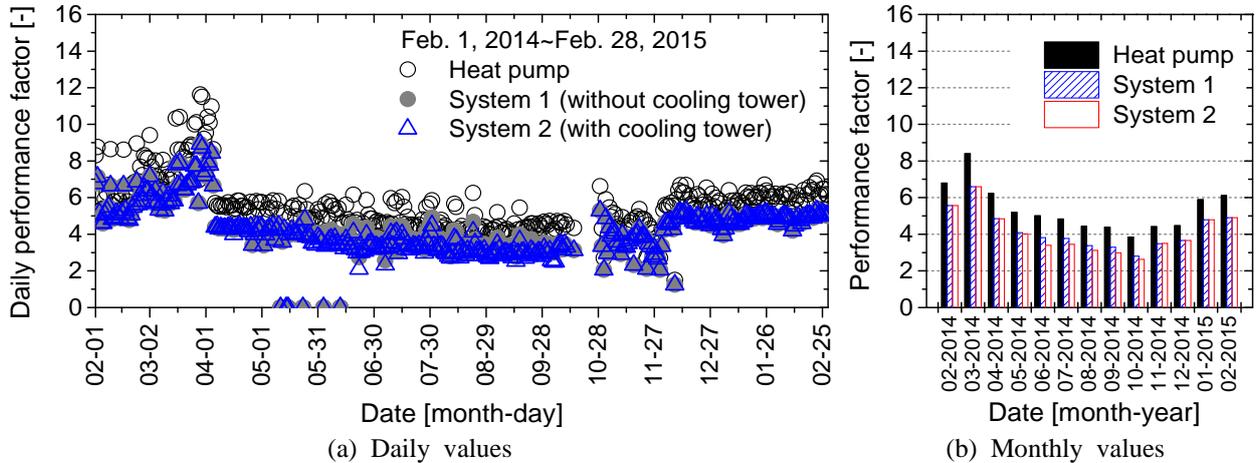


Fig. 6 Daily and monthly performance factors of the cooling tower-assisted hybrid GCHP system

EST는 비교적 높은 온도를 유지하였다. 아울러 Fig. 5(b)에서 보듯이, 부하 측 운전 특성 역시 지중열교환기의 운전 특성과 유사하였다. 전체 냉방 기간 중, 냉수 공급 온도(LLT)는 평균 11.7°C이었으며, 설계 온도인 12°C를 넘지 않았다. 또한 난방 모드에서는 일평균 39°C~40°C의 온수를 공급하였다. 본 시스템은 5월 중순부터 10월 중순까지 5개월은 냉방 모드로 그리고 약 6개월(1월~4월, 11월~12월)은 난방 모드로 운전되었다.

일평균 성능지수를 Fig. 6(a)에 그리고 월별 평균 성능지수를 Fig. 6(b)에 도시하였다. 지열 히트펌프의 월 평균 성능지수는 3.8에서 8.4의 범위에서 변화하였다. 냉각탑을 제외(System 1)했을 때, 시스템의 월평균 성능지수는 2.8에서 6.6이었다. 아울러 냉각탑을 포함한 하이브리드 지열 시스템(System 2)의 월평균 성능지수는 2.6에서 6.6의 범위에서 변화하였다. 또한 냉방 운전 중 건물에서 제거한 열이 지중에 축적되기 때문에 난방 성능지수가 상승하는 것을 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 병원 건물에 설치한 지열-냉각탑 하이브리드 시스템의 냉난방 성능을 분석하였다. 시스템에 각종 센서와 계측 장비를 설치한 후 2014년 1월부터 데이터를 측정하였다. 실제 성능 분석에는 2014년 2월부터 2015년 2월까지 측정한 데이터를 이용하였다. 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 지중열교환기와 지열 히트펌프는 건물 부하에 따라 운전(ON)과 정지(OFF)를 반복하였다. 냉방 부하가 가장 크게 걸리는 날을 포함한 일주일(2014년 7월 28일~8월 3일) 동안 EST는 평균 27.3°C이었으며, 시스템 운전 방식과 냉각탑 구동 때문에 지중 순환수는 비교적 일정한 온도를 유지하였다.
- (2) 특정 기간(2014년 7월 28일~8월 3일) 중, 히트펌프와 시스템의 평균 냉방 성능지수는 4.74와 3.71이었다. 냉각탑 소비전력까지 감안하면 성능지수는 3.42였다.
- (3) 본 시스템은 5월 중순부터 10월 중순까지 5개월은 냉방 모드로 그리고 약 6개월(1월~4월, 11월~12월)은 난방 모드로 운전되었다.
- (4) 냉방 기간 중, 냉수 공급 온도는 평균 11.7°C이었으며, 설계 온도인 12°C를 넘지 않았다. 또한 난방 기간 중에는 일평균 39°C~40°C의 온수를 공급하였다.
- (5) 지열 히트펌프만의 월 평균 성능지수는 3.8~8.4이었다. 반면 냉각탑을 포함한 하이브리드 지열 히트펌프 시스템의 월평균 성능지수는 2.6~6.6이었다.

후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한

연구 과제입니다.(No. 20133010111750)

참고문헌
(References)

- (1) Kavanaugh, S., 1998, "A Design Method for Hybrid Ground-Source Heat Pump," *ASHRAE Transactions*, Vol. 104, pp. 691~698.
- (2) Qi, Z., Gao, Q., Liu, Y., Yan, Y., and Spitler, J., 2014, "Status and Development of Hybrid Energy Systems from Hybrid Ground Source Heat Pump in China and Other Countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp. 37~51.
- (3) Fan, R., Gao, Y. Hua, L., Deng, X., and Shi, J., 2014, "Thermal Performance and Operation Strategy Optimization for a Practical Hybrid Ground-Source Heat-Pump System," *Energy and Buildings*, Vol. 78, pp. 238~247.
- (4) Nguyen, H. V., Law, Y. L. E., Alavy, M., Walsh, P., Leong, W., and Dworkin, S., 2014, "An Analysis of the Factors Affecting Hybrid Ground-Source Heat Pump Installation Potential in North America," *Applied Energy*, Vol. 125, pp. 28~38.
- (5) Wang, S., Liu, X., and Gates, S., 2015, "Comparative Study of Control Strategies for Hybrid Gshp System in the Cooling Dominated Climate," *Energy and Buildings*, Vol. 89, pp. 222~230.
- (6) Sohn, B. and Kwon, H. S., 2014, "Performance Prediction on the Application of a Ground-Source Heat Pump(GSHP) System in an Office Building," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 26, No. 9, pp. 409~415.
- (7) Sohn, B., Choi, J. H., and Min, K. C., 2015, "Heating Performance of Geothermal Heat Pump System Applied in Cold Climate Region(Mongolia)," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 27, No. 1, pp. 31~38.
- (8) Phetteplace, G. and Sullivan, W., 1998, "Performance of a Hybrid Ground-Coupled Heat Pump System," *ASHRAE Transactions*, Vol. 104, pp. 763~770.
- (9) Hackel, S. and Pertzborn, A., 2011, "Effective Design and Operation of Hybrid Ground-Source Heat Pumps: Three Case Studies," *Energy and Buildings*, Vol. 43, pp. 3497~3504.
- (10) Pertzborn, A., Hackel, S., Nellis, G., and Klein, S., 2011, "Experimental Validation of a Ground Heat Exchanger Model in a Hybrid Ground Source Heat Pump," *HVAC&R Research*, Vol. 17, pp. 1101~1114.