

저에너지주택의 지열히트펌프시스템 냉·난방 성능분석

Heating and Cooling Performance Analysis of Ground Source Heat Pump System in Low Energy House

백남춘(Namchoon Baek)¹, 김성범(Sungbum Kim)², 신우철(Ucheul Shin)^{3*}

¹한국에너지기술연구원 태양열연구실, ²대전대학교 건축공학과 대학원, ³대전대학교 건축공학과

¹Solar Thermal Laboratory, Korea Institute of Energy Research, Daejeon, 13129, Korea

²Department of Architectural Engineering, Graduate School of Daejeon University, Daejeon, 34520, Korea

³Department of Architectural Engineering, Daejeon University, Daejeon, 34520, Korea

(Received April 30, 2016; revision received August 20, 2016; Accepted: August 25, 2016)

Abstract A ground source heat pump system maintains a constant efficiency due to its stable heat source and radiant heat temperature which provide a more effective thermal performance than that of the air source heat pump system. As an eco-friendly renewable energy source, it can reduce electric power and carbon dioxide. In this study, we analyzed one year of data from a web based remote monitoring system to estimate the thermal performance of GSHP with the capacity of 3RT, which is installed in a low energy house located in Daejeon, Korea. This GSHP system is a hybrid system connected to a solar hot water system. Cold and hot water stored in a buffer tank is supplied to six ceiling cassette type fan coil units and a floor panel heating system installed in each room. The results are as follows. First, the GSHP system was operated for ten minutes intermittently in summer in order to decrease the heat load caused by super-insulation. Second, the energy consumption in winter where the system was operated throughout the entire day was 7.5 times higher than that in summer. Moreover, the annual COP of the heating and cooling system was 4.1 in summer and 4.2 in winter, showing little difference. Third, the outlet temperature of the ground heat exchanger in winter decreased from 13°C in November to 9°C in February, while that in summer increased from 14°C to 17°C showing that the temperature change in winter is greater than that in summer.

Key words Ground source heat pump system(지열히트펌프시스템), Web-based remote monitoring system(웹기반 원격모니터링시스템), System COP(시스템성능계수), Low energy house(저에너지 주택)

* Corresponding author, E-mail: shinuc@dju.ac.kr

기호설명

σ : 표준편차
 COP : 성능계수
 RT : 냉동톤

1. 서 론

지열히트펌프시스템은 안정적인 열원 및 방열온도로 인해 연중 일정한 효율을 갖게 되며 공기열원히트펌프에 비해 상대적으로 높은 열성능을 나타낸다. 따라서 지열히트펌프는 기존시스템의 전기에너지와 이산화탄소를 절감할 수 있는 환경 친화적인 재생에너지원으로 인식되고 있다.

국내에서도 주거용 건물의 지열히트펌프시스템 보

급을 촉진하기 위해 2009년부터 설치비 일부를 지원하는 그린홈 보급사업을 실시하고 있으며, 한전에서는 누진제가 적용되지 않는 일반용 전력을 주택의 지열히트펌프시스템에 한정하여 공급하고 있다. 에너지공단의 그린홈 지열히트펌프시스템 보급현황을 보면 2009년부터 2014년 9월까지 6,905세대에 설치되었으며, 이때 누적 보급량은 90,450 kW로서 세대별 평균 설치용량은 주택의 크기나 부하조건에 상관없이 거의 5 RT (17.5 kW)급인 것으로 추정된다.⁽¹⁾

주거용 건물 지열히트펌프시스템과 관련하여 국내·외 다양한 연구가 진행되고 있다. Safa et al.⁽²⁾은 캐나다 토론토에 소재한 실험주택을 대상으로 수평형 지중열교환기를 갖는 지열히트펌프시스템의 모니터링 자료를 분석하고, 이를 기반으로 검증된 TRNSYS 시

물레이션을 통해 동하절기 열성능과 시스템 제어전략을 제시하였다. 그 결과 난방 성능계수(Coefficient of Performance, 이하 COP)은 4.9~5.6로 나타났으며, 난방 COP에서는 난방 초기 3.05~3.44에서 난방기간이 끝날 무렵에는 2.78~2.98로 다소 낮아지는 것으로 조사되었다. 또한 Liu et al.⁽³⁾은 잉글랜드 코번트리(Coventry)의 62개 주거용 건물을 대상으로 지열히트펌프의 적용성과 수용성을 분석하였다. 사용자들의 시스템에 대한 지식과 이해도에 따라 에너지절약과 히트펌프의 열성능이 차이가 나는 것으로 나타났다. 한편 국내 연구로서 Sohn et al.⁽⁴⁾은 90 m²의 면적을 갖는 공간에 설치된 1.5 RT급 지열히트펌프의 연간 냉·난방 성능을 분석하였으며, 그 결과 냉·난방 시스템 COP 범위는 각각 3.67~4.44(평균 4.02)와 4.19~5.49(평균 4.90)로 나타났으나, 건물 부하 및 히트펌프 제어조건 등은 제시되지 않았다. Sohn et al.⁽⁵⁾은 공조면적 107 m²을 갖는 단독주택을 대상으로 시스템을 설계하고 운전특성 및 열성능을 시뮬레이션을 통해 장기 분석하였다. 또한 Baek et al.⁽⁶⁾은 냉난방 및 급탕 공급을 위한 3 RT 규모의 콤팩트형 태양열/지열하이브리드 시스템을 개발하고 실험용 주택(제로에너지 솔라하우스)을 대상으로 실증실험을 수행하였다. 난방 및 냉방 COP 범위는 각각 3.4~2.75와 3.3~2.5로서 난방성능이 다소 높은 것으로 나타났으며, 1회 평균 운전시간은 50분과 110분이 되었다. 이어 Kong et al.⁽⁷⁾은 공조면적 61.2 m²을 갖는 기숙사 일부 건물을 대상으로 5 RT급 지열히트펌프의 냉난방 운전성능을 분석하고 제조사의 성능자료와 비교하였다. 냉·난방기 히트펌프의 평균 시스템 COP는 각각 3.32와 3.29가 되었으며, 히트펌프 COP와 대비할 때 80.3%와 85% 수준인 것으로 나타났다. 그러나 지열히트펌프의 용량이 공조면적에 비해 과다한 것으로 판단되며, 시스템 제어 또한 2차측 열매체의 입출구 온도차를 기준으로 설정되어 실제 주거용 건물의 제어방식과는 차이를 보이고 있다.

이와 같이 이들 연구에서는 열부하나 설치용량, 제어방식 등에 있어 실제 조건과 다소 상이하며, 현재 국내 주택에 적용되는 지열히트펌프시스템의 설계나 평가 자료로 활용하기에는 다소 부족한 점이 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 거주하는 저에너지주택을 대상으로 지열히트펌프시스템의 혹한 및 혹서일 동적운전특성과 장·단기 열성능을 분석하였으며, 이를 통해 향후 주거건물의 시스템 최적화와 보급 촉진을 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 실증주택

2.1 건축개요

Table 1은 대전광역시 유성구에 위치한 실증대상 주

Table 1 Houses overview

Item	Area(m ²)
Floor area	87
Gloss floor area	194
Heating area	194

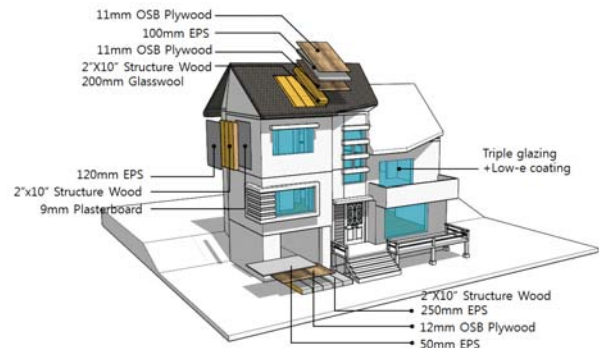


Fig. 1 Exterior wall insulation structure.

Table 2 Thermal insulation level

Element	Heat Transmission(W/m ² K)
Roof	0.10
Wall	0.13
Floor	0.10
Window	0.97

택의 건축개요를 나타낸 것이다. 경골목구조에 1층에서 3층까지의 스킵플로어 형태로 설계되었으며, 2011년 7월 준공되었다.

본 실증주택의 외피 부위별 단열구조 및 단열수준은 Fig. 1과 Table 2와 같다. 현재의 에너지절약 설계기준보다 강화된 고단열주택으로서 외단열로 시공되었다.

2.2 지열/태양열 하이브리드시스템

Fig. 2는 실증주택에 설치된 3 RT급 지열히트펌프 냉난방 및 급탕시스템 계통도를 나타낸 것이다. 태양열 급탕시스템이 연계된 하이브리드 방식으로서 지열히트펌프는 급탕 우선방식으로 운전되며, 급탕탱크의 중상단부에 설치된 열교환기를 통해 급탕온도가 일정한도 이하가 되면 히트펌프에 의해 가열된다. 냉·난방을 위해 150 liter의 버퍼탱크에 저장되는 냉·온수는 모든 실에 설치된 6대의 천정 카세트형 팬코일유닛(fan coil unit)과 바닥 난방배관을 통해서 냉방 또는 난방용으로 각각 공급된다. 여기서 지열히트펌프의 냉·난방 제어는 실온추종 방식으로서 실내 설정온도에 따라

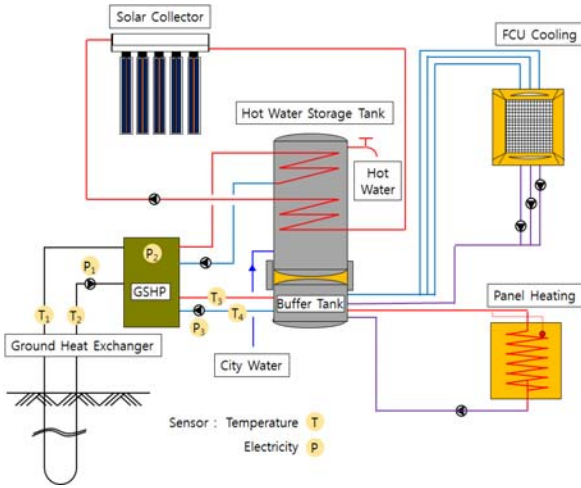


Fig. 2 Schematic of solar/geo thermal hybrid system.

Table. 3 Technical parameters of ground source heat pump system

Equipment		Technical information	Remark
GSHP (nominal capacity)	Heating power	3 RT	40°C*
	Heating COP	3.58	5°C**
	Cooling power	3 RT	12°C*
	Cooling COP	4.94	25°C**
Borehole	Number of loop	2	
	Depth	120 m	
Buffer tank	Volume	150 L	
	Insulation	100 mm	
Circulation pump for ground loop	Flowrate	55.8 LPM	measured
	Power	480 W	
Circulation pump for buffer tank	Flowrate	41.6 LPM	measured
	Power	185 W	

* The entering load temperature to GSHP.
 ** The entering source temperature to GSHP.

작동되고 정지된다. 난방의 경우 거실의 온도설정에 따라 전실 난방이 동시에 이루어지는 반면, 냉방의 경우에는 각 실의 온도설정에 따라 개별적으로 작동한다.

Table 3은 지열히트펌프시스템의 설치사양을 나타낸 것이다. 지중열교환기는 120 m 깊이의 수직형 보어홀(borehole) 2개를 직렬형태로 연결하였으며, 히트펌프 용량은 3 RT이다. 준공 당시 이 시스템은 5 RT로 설치되었으나 건물부하에 비해 과다한 것으로 판단되어 2012년 말 3 RT로 교체되었다.

2.3 모니터링시스템

지열히트펌프시스템의 동적거동을 분석하기 위해 웹 기반 원격 모니터링 시스템을 구축하였다. Fig. 2에 표시된 바와 같이 외기온 및 거실온도, 지열히트펌프 1, 2차측 열매체 온도, 순환펌프의 단락신호, 지열히트펌프와 순환펌프의 소비전력 등이 1분 간격으로 측정되고, 서버에 저장된다.

3. 지열히트펌프시스템의 열성능 분석

지열히트펌프시스템의 연간 동적 열성능을 평가하기 위해 2013년 10월 1일부터 2014년 9월 30일까지 1년간의 모니터링 자료를 분석하였다.

지열히트펌프시스템의 성능평가는 열매체 순환펌프의 소비전력을 포함한 시스템 COP를 기준으로 하였다. 시스템 COP를 나타내면 식(1)과 같다.

$$COP = \frac{\text{히트펌프 생산열량}}{\text{히트펌프 소비전력} + \text{순환펌프 소비전력}} \quad (1)$$

3.1 동절기 일일 동적 열성능

Fig. 3은 동절기 전형적인 혹한기 지열히트펌프의 동적 열성능을 분석하기 위한 일일 외기조건과 거실온도를 나타낸 것이다. 평균 외기온과 일일 총 수평면 일사량은 각각 -4.7°C와 9.5 MJ/m²로 나타났으며, 거실온도는 제어조건(설정온도 23°C ±1)에 따라 적정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

Fig. 4는 당일 지열히트펌프의 순시전력과 시스템 COP를 나타낸 것이다. 시스템의 작동이 단속(斷續)적으로 이루어지며, 새벽 시간대와 저녁부터 심야까지 이 작동이 지속되는 것을 알 수 있다. 반면 외기온이 0°C 이하임에도 불구하고 일사가 건물내부로 유입되는 주간에는 히트펌프가 작동되지 않고 있다. 이와 같은 단속적인 운전특성은 시스템의 설치용량이 건물의 부하에 비해 과다한 경우 발생할 수 있는 현상²⁾으로서, 현재 국내에서 가정용 지열히트펌프의 최소 용량이 3 RT임에도 불구하고 주택의 고단열, 고기밀 등 패시브 기술 적용으로 인해 주택의 난방부하가 크게 감소했기 때문인 것으로 추정된다. 히트펌프의 1회 가동시간은 약 10분으로 일일 총 가동시간은 271분으로 나타났으며, 이때 순시전력은 평균 약 3.1 kW(σ = 0.12)에 시스템 COP는 평균 4.2(σ = 0.42)로 분석되었다. 기존연구⁶⁾에서 동일한 용량의 히트펌프 동절기 COP가 2.5~3.5와 비교할 때 상당히 높은 수준을 나타내고 있다. 이것은 지중열교환기의 설치용량이 크기 때문인 것으로 판단되며, 후술할 Fig. 9의 지중열교환기(borehole)의 입·출구 온도에서도 확인할 수가 있다.

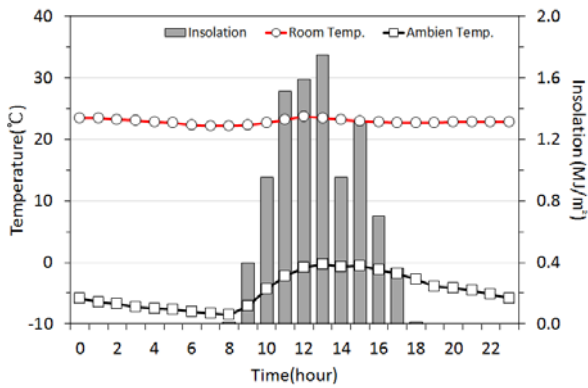


Fig. 3 Indoor and ambient temperature.

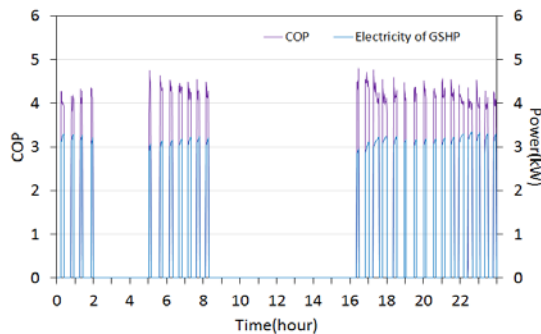


Fig. 4 COP and electrical input power of GSHP.

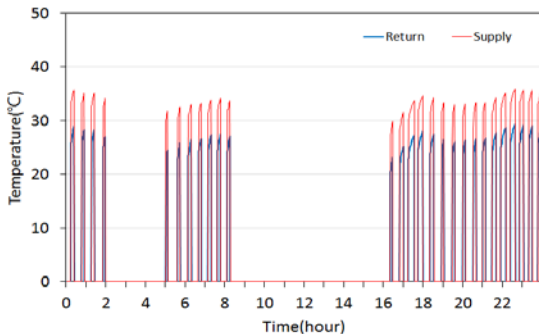


Fig. 5 Hot water supply and return temperature to the house.

Fig. 5는 히트펌프에서 부하측(실내)으로 공급되는 2차측 열매체(온수)의 입·출구 온도를 나타낸 것이다. 평균 공급 및 환수온도는 각각 32.8°C와 25.9°C로 기존 주택의 40~50°C에 비해 낮은 온도를 유지하고 있다. 이것은 고단열주택에서 저온수 복사난방을 통해 실내 온도가 유지되는 것을 의미하며, 제조사의 히트펌프 난방 정격출력 시 2차측 열매체 온도가 40°C인 점을 고려할 때 지열히트펌프의 높은 열성능을 기대할 수 있다.

3.2 하절기 일일 동적 열성능

Fig. 6은 하절기 전형적인 혹서기의 일일 지열히트펌프의 동적 열성능을 분석하기 위한 일일 외기조건과 거실온도를 나타낸 것이다. 최고기온 35°C에 야간에도 27°C 이상을 유지하는 아열대성 기후를 보이고 있으며, 일일 총 수평면 일사량은 25 MJ/m²이 되었다. 실제 거실에서 냉방작동은 늦은 오전(9~12시)에 간헐적으로 이루어지며, 저녁 시간대(18~21시)에 집중되고 것으로 파악되었다. 따라서 실내온도는 25~29°C로 변화 폭이 비교적 크게 나타났다.

Fig. 7은 이날 지열히트펌프의 순시전력과 시스템 냉방 COP를 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 히트펌프의 작동은 저녁시간대에 집중되며, 외기온이 높아지는 주간 시간대와 심야 시간대에는 재실조건에 따라 간헐적으로 이루어지고 있다. 이때 작동형태는 동절기와 동일하게 단속적으로 이루어지고 있다. 히트펌프의 1회 평균 가동시간은 약 7분 정도로 일일 총 가동시간은 147분으로 나타났으며, 이때 순시전력은 평균 약 2.6 kW ($\sigma = 0.06$)에 시스템 COP는 평균 약 4.4($\sigma = 0.30$)로 분석되었다.

Fig. 8은 히트펌프 2차측 열매체(냉수)의 환수 및 공급 온도를 나타낸 것이다. 평균 환수 및 공급온도는

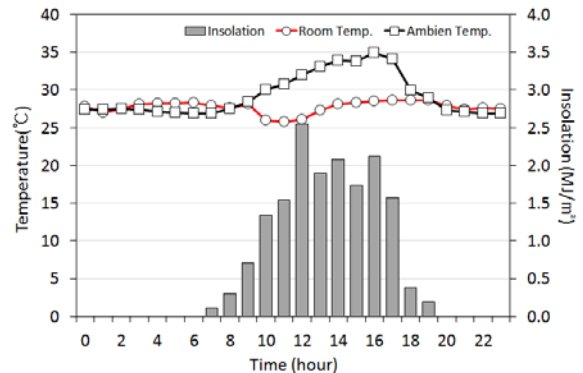


Fig. 6 Indoor and ambient temperature.

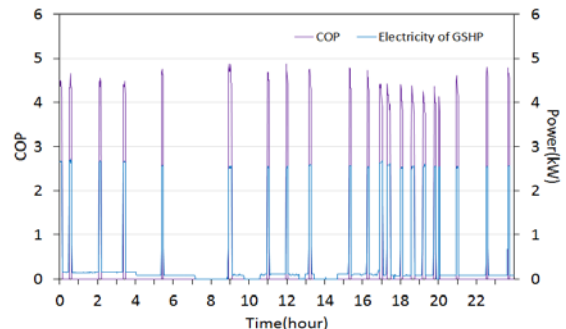


Fig. 7 COP and electrical input power of GSHP.

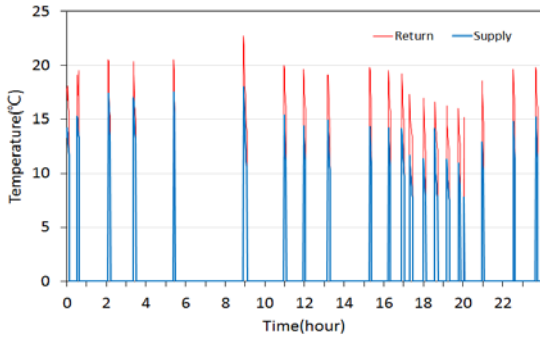


Fig. 8 Cold water supply and return temperature to the house.

각각 16.3°C와 11.9°C로, 히트펌프 정격출력 시 2차측 열매체 설계온도가 각각 12°C와 7°C인 점을 비교할 때 4~5°C 정도 높은 온도에서 작동하고 있다. 이와 같은 운전특성은 열성능(COP)을 높이게 된다.

3.3 연간 에너지 성능

Fig. 9는 난방기간(2013년 11월~2014년 2월) 동안 지중열교환기로 순환되는 1차측 열매체의 일평균 입·출구온도를 나타낸 것이다. 난방기간이 길어질수록 열매체의 온도가 점차 낮아지는 것을 알 수 있다. 지중열교환기 출구 열매체는 난방초기(11월 초) 13°C 내외에서 난방말기(2월 말) 9°C 내외로 보이고 있다. 이 기간 동안 입·출구 평균 온도차는 2.3°C($\sigma = 0.11$)로써 전술한 바와 같이 지중열교환기의 용량이 크게 설치된 것에 기인하는 것 추정되며, 히트펌프 정격출력 시 1차측 열매체 유입온도(지중열교환기 출구온도) 5°C와 비교할 때 높은 온도를 유지하고 있다.

Fig. 10은 지중열교환기에서 히트펌프로 공급되는 열매체의 일평균 온도에 따른 지열히트펌프의 난방 COP

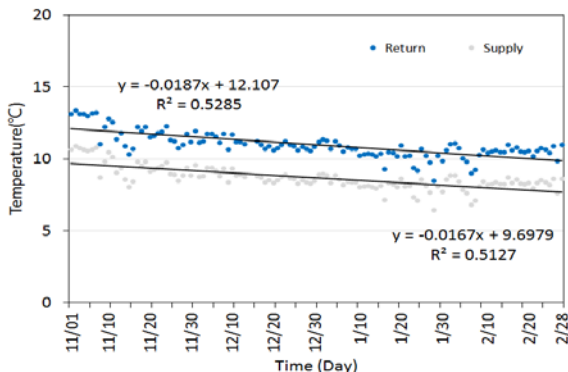


Fig. 9 Daily average supply and return temperature of the ground loop for the winter period.

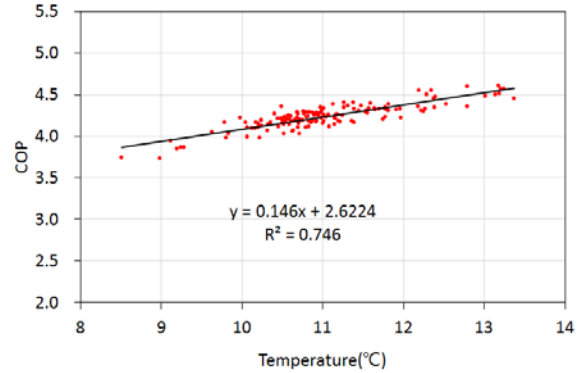


Fig. 10 Heating COP with the return temperature from the ground loop for the winter period.

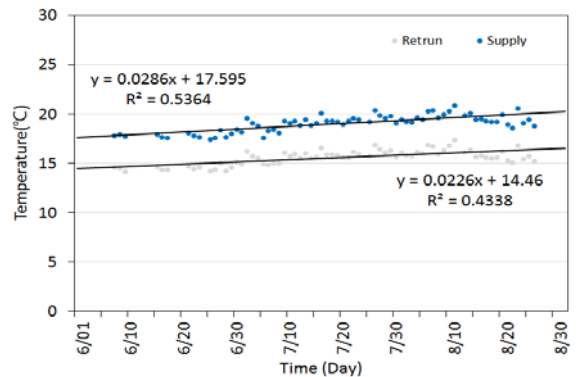


Fig. 11 Daily average supply and return temperature of the ground loop for the summer period.

를 나타낸 것이다. 당연한 사실이지만 열매체의 온도가 높아질수록 성능이 향상되는 것을 알 수 있으며 COP의 작동범위는 3.7~4.6으로 나타났다.

Fig. 11은 냉방기간(2014년 6월~2014년 8월) 동안 지중열교환기로 순환되는 1차측 열매체의 일평균 입·출구온도를 나타낸 것이다. 지중열교환기 출구 열매체의 온도범위는 14~17°C로 난방기간에 비해 상대적으로 적은 온도변화를 보이고 있다. 간헐적 냉방작동에 따라 냉방부하가 난방부하에 비해 적기 때문이다. 히트펌프 정격출력 시 1차측 열매체 유입온도(지중열교환기 출구온도) 25°C와 비교할 때 낮은 온도를 유지하고 있다.

Fig. 12는 지중열교환기에서 히트펌프로 공급되는 1차측 열매체의 일 평균 온도에 따른 지열히트펌프의 냉방 COP를 나타낸 것이다. 열매체의 온도가 높아짐에 따라 작동 COP가 낮아지는 것을 알 수 있으며, 이때 COP의 작동범위는 3.9~4.7로 나타났다.

Table 4는 지열히트펌프시스템의 연간 냉난방 성능을 비교한 것이다. 전일 난방되는 동절기의 에너지 사

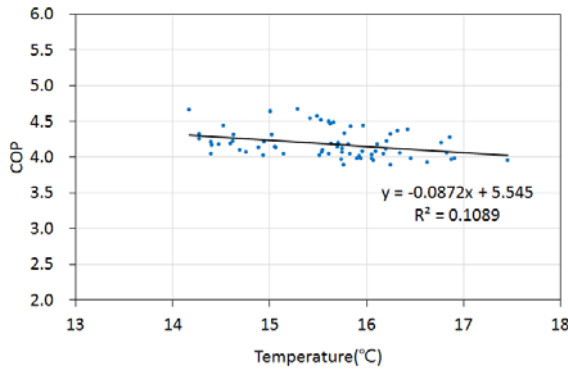


Fig. 12 Cooling COP with the return temperature from the ground loop for the summer period.

Table 4 Seasonal COP of GSHP

	Thermal output (kWh)	Electricity (kWh)	COP
Heating	7,702	1,815	4.2
Cooling	1,062	259	4.1

용량이 간헐적으로 냉방되는 하절기에 비해 7.5배 이상 많은 것으로 분석되었으며, 연간 냉방과 난방 평균 시스템 COP는 각각 4.2와 4.1로 나타났다. Table 3에서 제시된 제작사 히트펌프 냉·난방 정격 COP 4.94 및 3.58과 비교할 때 각각 85%와 115%의 수준을 보이고 있다. 특히 난방 시스템 COP의 경우 순환펌프의 전력이 포함되었음에도 불구하고 히트펌프 정격 COP 보다 상승하는 주요요인은 전술한 바와 같이 크게 설치된 지중열교환기 용량과 저에너지주택의 저온복사난방에 의한 히트펌프의 출수온도 저하에 따른 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 연구에서는 저에너지주택에 적용된 지열히트펌프시스템의 운전특성과 연간 열성능을 평가하기 위해, 대전 소재 단독주택을 대상으로 웹기반 원격모니터링 시스템을 설치하고, 그 측정 자료를 분석하였다. 실증주택은 공조면적 194 m²을 갖고 있는 경골 목구조의 3층 단독주택으로 지붕과 외벽의 열관류율이 각각 0.10 W/m²K과 0.14 W/m²이며, 3 RT급 지열히트펌프는 태양열 급탕시스템과 연계된 하이브리드 방식으로서 설계되었다. 분석 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 외기온이 영하로 유지되는 동절기 전형적인 혹한일의 지열히트펌프는 새벽 시간대와 저녁부터 심야까지 단속적 운전이 지속되는 것으로 나타났으며, 1회 작동시간은 약 10분으로 일일 총 작동시간은 271분이 되었다.

- (2) 하절기 전형적인 혹서기 지열히트펌프의 작동은 외기온이 높아지는 주간대에 집중되고, 심야시간대에는 간헐적으로 이루어졌으며, 작동패턴은 동절기와 동일하게 단속적 운전특성을 보이고 있다. 히트펌프의 1회 가동시간은 약 7분으로 일일 총 가동시간은 147분으로 나타났다.
- (3) 동절기 지중열교환기 출구 열매체는 난방 초기(11월 초) 13°C 내외에서 난방말기(2월 말) 9°C 내외로 점차 낮아지고 있으며, 이기간 난방 시스템 COP는 4.6에서 3.7로 저하되었다.
- (4) 하절기 지중열교환기 출구 열매체는 냉방초기(6월 초) 14°C 내외에서 냉방말기(8월 말) 17°C 내외로 점차 상승하였으며, 난방기간에 비해 상대적으로 적은 온도변화를 보이고 있다. 이 기간 냉방 시스템 COP는 4.7에서 3.9로 저하되었다.
- (5) 전일 난방되는 동절기의 연간 히트펌프 전력사용량은 1,815 kWh로 간헐적으로 냉방되는 하절기, 259 kWh에 비해 7.5배 이상 많은 것으로 분석되었으며, 연간 냉·난방 시스템 COP는 각각 4.2와 4.1로 거의 동일하게 나타났다.

이 연구에서 나타난 바와 같이 저에너지주택에 설치된 3 RT급 지열히트펌프가 실제 냉·난방부하에 대응하여 적절하게 작동하는 것을 확인하였다. 따라서 국내 주택에 보급되고 있는 지열히트펌프 용량이 대부분 5RT급인 점을 고려할 때 향후 주택의 냉난방 부하 및 제어조건에 따른 적절한 용량설계가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업 지원을 받아 수행되었음(과제번호 : B6-2428).

References

1. 2014 NEW and RENEWABLE ENERGY WHITE PAPER, New and Renewable Energy Center, 2014.
2. Safa, A. A., Fung, A. S., and Kumar, R., 2015, Heating and cooling performance characterisation of ground source heat pump system by testing and TRNSYS simulation, Renewable Energy, Vol. 83, pp. 565-575.
3. Liu, S., Shukla, A., and Zhang, Y., 2014, Investigations on the integration and acceptability of GSHP in the UK dwellings, Building and Environment, Vol. 82, pp. 442-449.
4. Sohn, B.-H., Cho, C.-S., Shin, H.-J., and An, H.-J., 2005, Cooling and Heating Performance of a GSHP

- System, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 17, No. 1, pp. 71-81.
5. Sohn, B.-H., Choi, J.-M., and Choi, H.-S., 2011, Performance Simulation of Ground-Coupled Heat Pump (GCHP) System a Detached House, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 23, No. 6, pp. 392-399.
 6. Baek, N.-C., Jeong, S.-Y., Yoon, E.-S., and Lee, K.-H., 2012, The Development and Performance Analysis of Compact Type Solar Thermal/Ground Coupled Heat Pump Hybrid System for Heating, Cooling and Hot water, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 5, pp. 59-67.
 7. Kong, H.-J., Kang, S.-J., Yun, K.-S., and Lim, H.-J., 2013, An Experimental Study on the Cooling and Heating Performance of a Residential Ground Source Heat Pump System, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 3, pp. 156-163.