

지열-태양열원 복합시스템의 부하추종특성에 관한 실험 연구

황인주*[†], 우남섭**

*한국건설기술연구원 화재및설비연구부, **성균관대학교 기계공학과 대학원

An Experimental Study on the Load Delivery Characteristics of Hybrid Energy System with Geothermal and Solar Heat Sources

In-Ju Hwang*[†], Nam-Sub Woo**

Fire&Engineering Services Research Dept., Korea Institute of Construction Tech, Goyang 411-712, Korea

*Graduate School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

Abstract

The objective of the present study is to investigate the load delivery characteristics of a hybrid-renewable energy system with geothermal and solar heat sources for hot water, heating and cooling of a residential house in Korea. The hybrid energy system consists of ground source heat pump of 2 RT for cooling with a 150 m vertical U-bend ground heat exchanger, solar collectors of 4.8 m² and gas fired backup boiler. The averaged coefficient of performance of geothermal module during cooling and heating seasons are evaluated as about 4.5 and 3.8, respectively.

Key words : Geothermal energy(지열에너지), Solar energy(태양에너지), Hybrid energy system(복합에너지시스템), Heat pump(열펌프)

기 호 설 명

하첨자

C : 비열, [J/kgK]

COP : 성능계수

F : 분담률, [%]

I : 단위면적당 수평면 전일사량, [W/m²]

m : 유량, [m³/h]

P : 소비동력, [kW]

Q : 열전달량, [W]

T : 온도, [°C]

t : 시간

W : 펌프 일, [kW]

c : 냉방

h : 난방

in : 입구

out : 출구

g : 지층

e : 열 흡수

r : 열 방출

air : 외기

room : 실내

sl : 냉난방 공간

hp : 히트펌프

sys : 시스템

pumps : 순환펌프

comp : 압축기

s : 태양열

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-369-0505, Fax: +82-31-369-0540

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

1. 서론

20세기 들어 산업화의 급격한 진행과 생활수준의 향상에 따라 화석에너지의 사용이 급격히 증가하였으며, 이들의 무분별한 소비에 따른 오염은 산성비, 지구 온난화, 오존층 및 생태계 파괴, 기상이변 등 심각한 환경문제를 야기하고 있다. 이와 같은 지구환경의 위기에 대비하여 선진국을 중심으로 산업활동의 각 단계에서 단순히 에너지와 자원을 절약하자는 차원을 넘어 환경을 보전하고 생태질서를 회복하려는 움직임이 활발하게 진행되고 있다.

화석에너지 고갈 및 환경문제를 완화하거나 해결하기 위한 방안으로 선진국에서는 친환경 건축 및 설비기술 개발을 적극적으로 지원하고 있으며, 이와 같은 연구는 기본적인 개념 확립과정을 거쳐 기술적으로 실현 가능한 범위에서 요소기술을 개발하고 실증하는 단계로 진행되고 있다. 이러한 기술개발은 건축물의 내구성 향상뿐만 아니라 친환경 건축재료, 에너지 절약기술, 재이용시스템의 적용 등 에너지·자원의 효과적인 활용과 오염물질의 발생을 최소화하기 위한 방향으로 추진되고 있다.

국내의 경우 에너지절약 및 대체에너지 이용기술개발 분야의 많은 연구 결과가 축적되어 왔으나, 상대적으로 경제성이 낮은 신재생에너지 이용기술의 보급에 있어서 시스템의 최적설계와 적용방안, 지원제도 등의 미비로 적극적인 활용 및 실용화에서는 한계를 보이고 있다.

지열원 히트펌프에 대한 연구는 최근 국내외에서 활발하게 이루어지고 있다[1~7]. 이들은 히트펌프의 성능에 큰 영향을 미치는 지중 열교환기의 성능에 많은 관심을 가지고 연구를 수행하였으며, 시스템의 냉난방 운전 결과 및 시스템의 성능에 대한 결과를 제시하였다. 국외의 경우, Healy and Ugursal[3]은 지열원 히트펌프의 성능에 영향을 미치는 다양한 변수에 대한 수치해석적 연구를 통하여 지열원 히트펌프의 운전 및 성능 특성을 분석하였다.

태양열과 히트펌프가 조합된 복합시스템에 대한 연구로는 Kaygusuz[4], Axaopoulos et al.[5], Ozgener and Hepbasli[6] 등의 연구를 들 수 있

다. 특히, Kaygusuz[4]는 태양열이 히트펌프의 열원으로 사용되는 방식과 급탕으로 사용되는 방식의 성능을 비교하여 태양열이 보조열원이 아닌 급탕으로 사용되는 방식이 더 효율적임을 밝혔다. 하지만 현재 이러한 복합시스템을 주거용 건물에 적용하여 다양한 성능을 분석한 연구사례는 없는 것으로 파악되었다.

따라서 본 연구에서는 청정 에너지원의 복합이용 가능성을 평가하기 위해서 지열원 히트펌프와 태양열원 급탕시스템으로 구성된 소규모 시뮬레이터를 설계 및 설치하였다. 시뮬레이터의 운전을 통하여 외기조건, 냉난방 및 급탕 부하패턴에 따른 각 열원의 부하 추종성, 일간 에너지 분석, 열원 간 연계성 등을 검토하여 복합시스템의 적용 가능성을 고찰하고자 한다.

2. 시스템 구성 및 설계

2.1 시스템 구성

지열-태양열원 복합시스템의 냉난방 운전성능을 분석하기 위한 전체 시스템의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 시스템은 크게 히트펌프, 지중 열교환기, 실내 냉난방을 위한 팬코일 유닛으로 구성된 지열원 히트펌프부와 태양열 집열기, 축열조, 보조 가스보일러 등으로 구성된 태양열시스템부와 기타 순환펌프 및 배관시스템 등으로 구성되어 있다.

실내 냉난방은 지열원 히트펌프가 담당하고 태양열은 축열조에 저장되어 급탕부하만을 담당하도록 설계하였다. 히트펌프는 급탕기능도 있어서 태양열이 급탕부하를 담당하지 못할 때에는 히트펌프가 급탕부하를 담당한다. 또한, 부족한 급탕 및 난방부하에 대한 대책으로 가스보일러를 설치하였다.

2.2 시스템 설계

태양열 집열기는 저온에서 집열효율이 높은 평판형 집열기를 사용하였다. 급탕에너지 이용 측면에서 집열되는 열은 온도의 고저에 상관없이 동일한 질의 에너지이므로 사용용도에 따라 적정온

도로 가능한 많은 집열을 하여야 한다.

집열 면적이 증가하면 일반적으로 보조열원 비용은 감소되지만 초기투자비용이 증가하고 태양열시스템 효율도 저하되는 경향이 있기 때문에 집열 면적에 대한 최적치를 결정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 1세대 기준 0.25 m³ 용량의 축열조와 이에 대응하는 4 m² 면적의 태양열 집열기를 설치하였다. 급탕 축열조는 현열 축열조로 온도 성층화를 고려하여 제작하였다.

태양열이 급탕부하에 대응하지 못할 경우에 히트펌프에 의해서 급탕이 이루어지며 히트펌프는 급탕우선 또는 냉난방우선 모드로 운전될 수 있는데 본 연구에서는 냉난방 우선 모드로 운전하였다.

지중 열교환기는 설치되면 변경이 어렵기 때문에 설계 시 부하특성의 결정에 특히 주의하여야 한다. 본 연구에서 지중 열교환기는 수직 밀폐형 U자 형상으로 파이프의 재질은 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)이며, 파이프 내경은 30 mm이고 설치 깊이는 150 m이다. 지중 열교환기의 작동유체는 물을 사용하였다.

본 연구에 사용된 히트펌프는 냉방능력 2 RT 용량을 가진다. 지열 냉난방, 급탕용 작동유체의 순환을 위한 순환펌프가 각각 설치되어 있다. 급탕부하에 대한 운전은 태양열시스템과 연계하여 작동되고 급탕 및 냉난방 부하에 대한 back-up 시스템으로 가스보일러가 설치되어 있다.

2.3 실험 및 분석방법

냉난방을 위한 대상 공간은 3 m×6 m의 컨테이너 사무실 2개를 결합하여 구성하였으며, 3 m×3 m의 컨테이너를 추가로 설치하여 지열원 히트펌프, 축열조, 배관계통 및 보일러 등이 설치되는 기계실로 하였다.

복합 열원시스템의 성능실험은 난방기, 냉방기, 중간기로 구분하여 수행하였고 각각의 운전 모드별로 요구되는 부하의 특성과 기후를 고려하여 운전조건과 제어방법을 설정하였다.

실험공간의 특성상 냉난방부하는 외기조건에 따라 크게 변하며 냉난방부하의 경우는 특별한 조작 없이 기후 및 실험 공간의 단열 특성에 따라

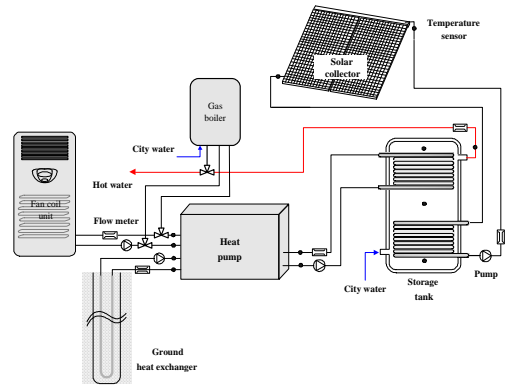


Fig. 1. Schematic diagram of experimental simulator.

대응하도록 설정하였다.

시스템의 성능을 평가하기 위한 데이터 측정을 위하여 T-type 열전대, 압력센서, 전자유량계, 일사량계, 전력계를 각 지점에 설치하여 작동유체의 온도 및 유량, 배관 압력, 히트펌프 및 순환펌프의 소비전력 등을 측정하였다. 히트펌프의 성능은 측정된 데이터를 이용하여 계산할 수 있다.

냉방운전의 경우, 대상 공간의 냉방열량 Q_{sl} 은 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{sl} = m_{sl} C_{sl} (T_{sl, out} - T_{sl, in}) \quad (1)$$

여기서 m_{sl} 은 대상공간 내 팬코일 유닛을 순하는 작동유체의 유량, C_{sl} 은 작동유체의 비열, $T_{sl, in}$ 및 $T_{sl, out}$ 은 팬코일 유닛을 통과하는 작동유체의 입·출구 온도를 나타낸다. 이때, 지중으로 제거되는 열량 Q_g 는 다음과 같이 계산된다.

$$Q_g = m_g C_g (T_{g, out} - T_{g, in}) \quad (2)$$

여기서 m_g 는 지중 열교환기를 순환하는 작동유체의 유량, C_g 는 비열, $T_{g, in}$ 및 $T_{g, out}$ 은 지중 열교환기의 입·출구 온도를 나타낸다. 난방운전의 경우도 이와 같은 방식으로 계산할 수 있다.

히트펌프의 압축기에 투입된 동력을 W_{comp} , 각 순환펌프에 투입된 전체 동력을 W_{pumps} 라 하면 위 동력들은 전력계를 통하여 소비전력으로 측정되며 냉방운전 시 지열원 히트펌프의 성능계수는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$COP_{hp} = \frac{Q_{sl}}{W_{comp}} \quad (3)$$

각 순환펌프의 소비전력까지 포함한 시스템 전체의 성능계수는 식 (4)와 같이 계산된다.

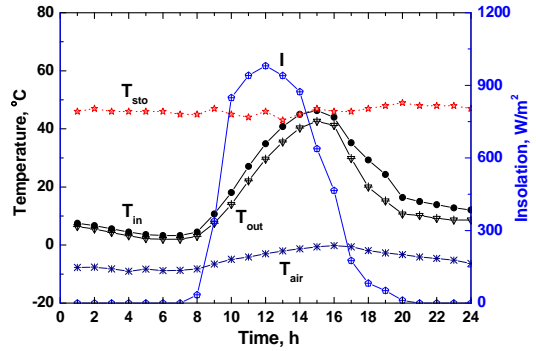
$$COP_{sys} = \frac{Q_{sl}}{W_{comp} + W_{pumps}} \quad (4)$$

3. 결과 및 고찰

공동주택에 적용 가능한 지열-태양열원 복합시스템을 제시하기 위해서 우선 태양열시스템의 성능평가를 위한 우리나라의 태양열 에너지의 산출이 우선되어야 한다.

본 복합시스템이 설치된 한국건설기술연구원에서 실측된 맑은 날 태양열 일사량 및 태양열 시스템의 계절별 일일 운전특성을 Fig. 2에 나타내었다. 일사량의 경우, 최대 태양 일사는 정오부근에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 맑은 날 최대 일사는 여름철의 경우 950 W/m², 겨울철에는 900 W/m² 정도로 측정되었다.

맑은 날 태양열 집열에 의한 축열조 내부의 월평균 수온변화와 최대 도달온도에 대한 연간 운전결과를 Fig. 3에 도시하였다. 동절기의 경우는 큰 급탕부하와 일사량 감소로 축열조 내의 수온은 45 °C 정도까지 상승하였다. 반면 하절기의 경우는 상대적으로 작은 급탕부하와 열손실의 감소 등으로 축열조 내의 수온이 최대 64 °C 정도까지



(b) Heating season

Fig. 2. Insolation and temperature variation with the time of a day.

상승하였다. 복합시스템이 정상적으로 운전되는 상태에서 축열조 내부의 수온은 최대값과 평균값이 3~4 °C 정도 차이를 보였다, 즉, 축열조 내의 수온은 일사조건 외에 풍속, 외기온도에 따라서도 조금씩 변화하는 것을 확인하였다.

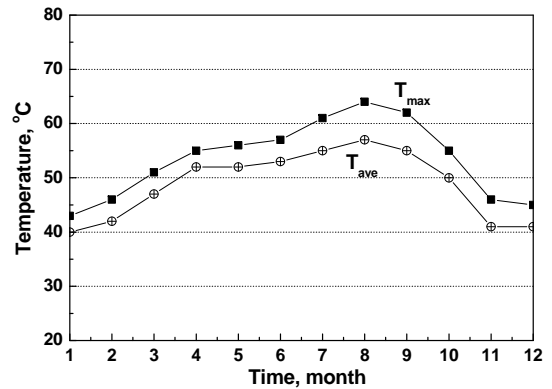
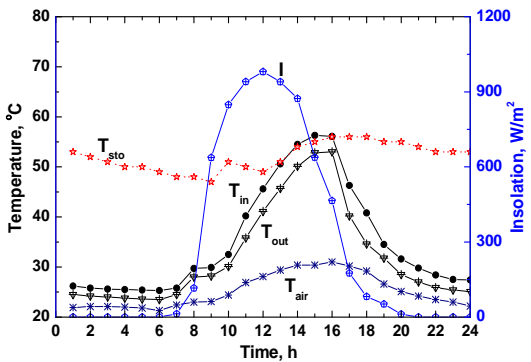


Fig. 3. Temperature variation of storage tank.



(a) Cooling season

지열 히트펌프시스템의 전체 성능에 영향을 미치는 주요 인자 중의 하나가 지중 열교환기의 열교환 능력이다. 지중 열교환기가 지중으로부터 열을 흡수하거나 또는 실내에서 흡수한 열을 지중으로 방출하는 과정은 지중 열교환기의 순환유체와 지중의 온도차에 기인한다. 이에 본 연구에서는 전체 운전기간 동안 지중 열교환기 순환유체와 지중간의 열교환으로 야기되는 지중 열교환기 파이프 표면(근처)의 온도변화를 측정하였으며,

일일 평균 온도에 대한 연간 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

냉방운전의 경우 응축기 내의 냉매는 상대적으로 온도가 낮은 지중 열교환기의 순환유체와 열교환을 하면서 상이 변한다. 이때 냉매를 응축하면서 온도가 상승한 순환유체는 지중 열교환기를 순환하면서 열을 지중으로 방출한다. 따라서 지중 열교환기의 입구부근의 온도가 가장 높고, 깊이 방향으로 갈수록 온도가 감소하는 현상을 보인다. 특히, 지중 1 m 지점의 온도가 다른 위치의 온도보다 평균 2~3 °C 정도 높은 것을 확인할 수 있다. 난방운전의 경우는 지중의 열이 히트펌프의 냉매를 증발시키는 과정에 사용되기 때문에 온도 변화가 냉방운전과는 반대로 나타난다. 즉, 냉매를 증발시키면서 온도가 감소한 순환유체는 지중 열교환기를 순환하면서 지중의 열을 흡수하여 다시 히트펌프의 증발기로 유입된다. 연간 운전을 수행하면서 지중 열교환기의 온도는 지중 깊이에 따라 8~23 °C 사이의 범위에서 변화하였다.

복합시스템의 냉방운전 중 실내의 온도, 태양 일사량, 지열원 히트펌프시스템의 성적계수의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 전체 측정기간 중 맑은 날, 최대 냉방 부하를 갖는 대표적인 날에 대한 일일 냉방운전성능을 분석하였다. 성적계수의 경우 시간에 따른 변화는 크지 않았다. 냉방운전의 경우 히트펌프의 COP는 약 4.5 정도를 나타내었다. 이때 히트펌프의 순간 소비전력은 평균 1.9 kW로 측정되었다. 실내 온도의 변화를 살펴보면 23°C의 설정온도에 대하여 1°C 정도의 범위 내에서 변화하면서 일정하게 유지되고 있다.

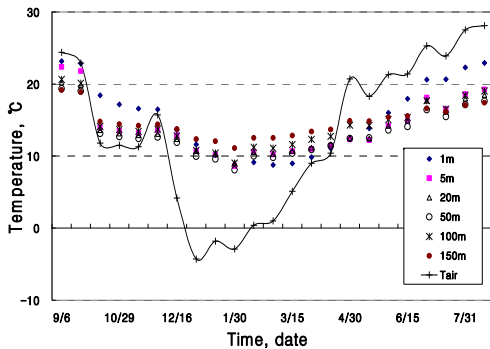
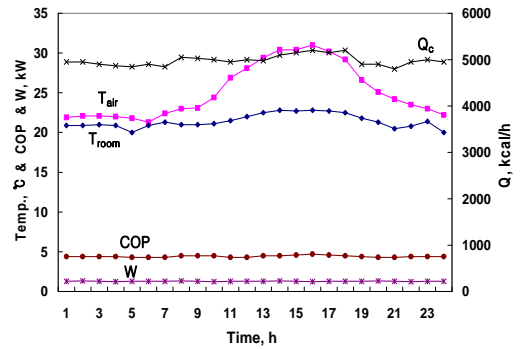
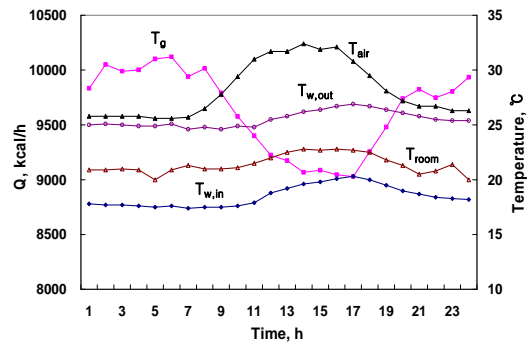


Fig. 4. Variation of soil temperature in 2005-2006 for Ilsan, Korea.



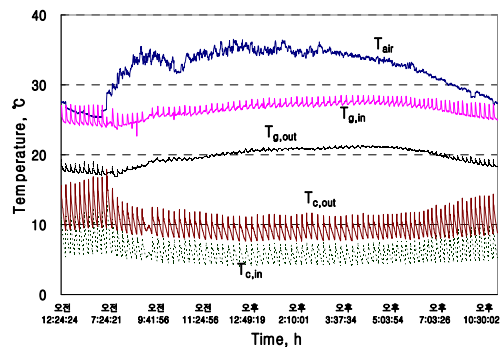
(a) COP, P, and Q_c



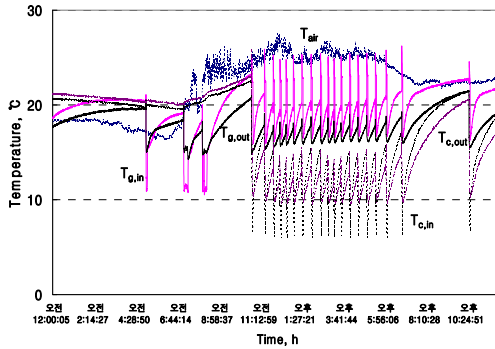
(b) Q_r and EWT

Fig. 5. Variation of heat rejection rate(Q_r), COP and temperature during cooling season.

냉방운전 중 지중열교환기 작동유체의 입·출구 온도와 지중 열교환기의 열 방출률(heat rejection rate)의 변화를 Fig. 5(b)에 나타내었다. 일일 냉방운전에서 지중으로의 열 방출율은 9,000~10,000 kcal/h (70~78 W/m) 범위에서 변화하



(a) Sunny day

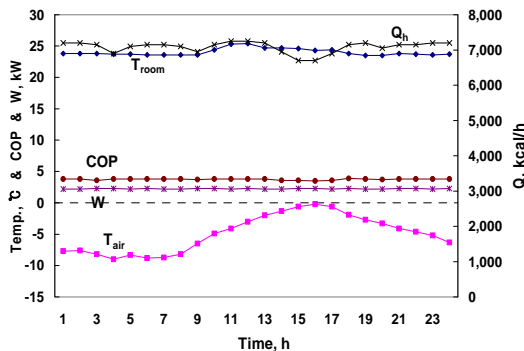


(b) Rainy day

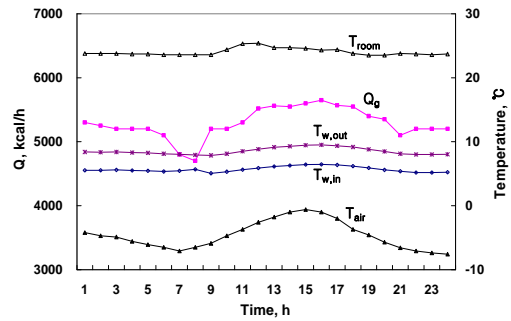
Fig. 6. Variation of outdoor, ground and cooling temperature in cooling season.

였으며 지중 열교환기의 입·출구 온도차는 4~4.5 °C 정도를 나타내었다. 오후 1시 이후 외기 온도의 상승으로 냉방부하가 증가할 때 열 방출율은 일시적으로 감소하게 된다. 이러한 영향으로 지중 열교환기 작동유체의 출구온도도 일시적으로 증가한다.

기후 조건에 따른 일간 냉방운전의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 우리나라의 경우 하절기 맑은 날에는 Fig. 6(a)에 보이는 바와 같이 외기 온도가 35 °C 정도까지 상승하면서 냉방부하 또한 급격하게 증가한다. 반면 흐리거나 비가 오는 날에는 상대적으로 외기 온도의 상승이 크지 않다. 이런 날의 외기 최고온도는 그림 Fig. 6(b)에 보이는 것처럼 25 °C 정도를 유지하면서 냉방부하가 급격히 줄어들게 된다. 따라서 냉방부하에 따라서 히트펌프의 운전 시간이 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다.



(a) COP, P, and Q_h

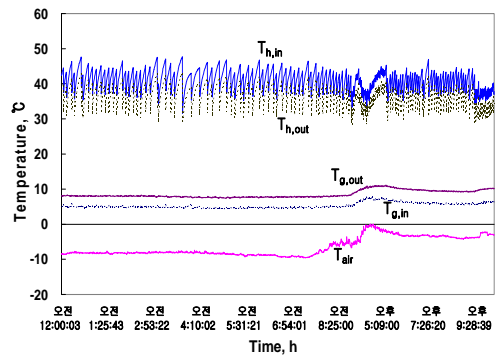


(b) Q_e and EWT

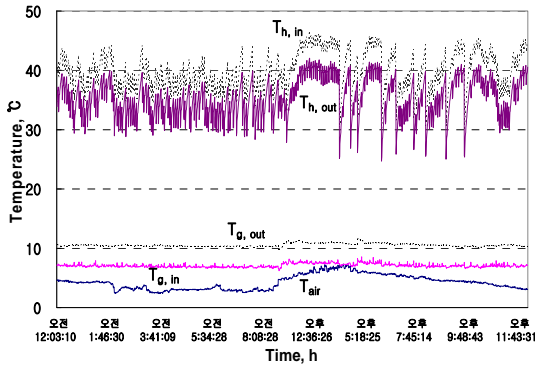
Fig. 7. Variation of heat extraction rate(Q_e), COP and temperature during heating season.

전체 복합시스템의 운전 특성을 살펴보면 맑은 날에는 태양열 집열이 최대로 이루어지면서 급탕 부하는 95% 이상 태양열시스템이 담당하게 되고 히트펌프는 오직 냉방부하만을 담당한다. 반면 흐린 날에는 냉방부하와 급탕부하를 모두 히트펌프가 담당하지만 전체 운전시간은 맑은 날에 비해서 감소하게 된다.

복합시스템의 난방운전 중 실내의 온도, 태양의 일사량, 지열원 히트펌프시스템의 성능계수(COP)의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 복합시스템의 전체 측정기간 중 맑은 날, 최대 난방 부하를 갖는 대표적인 날에 대한 일일 난방운전성능을 분석하였다. 성적계수의 경우 시간에 따른 변화는 크지 않았다. 난방운전의 경우 히트펌프의 COP는 약 3.8 정도를 나타내었다. 이때 히트펌프의 순간 소비전력은 2.3 kW로 측정되었다. 실내온도는 설정 온도인 24°C를 일정하게 유지하였다.



(a) Sunny day

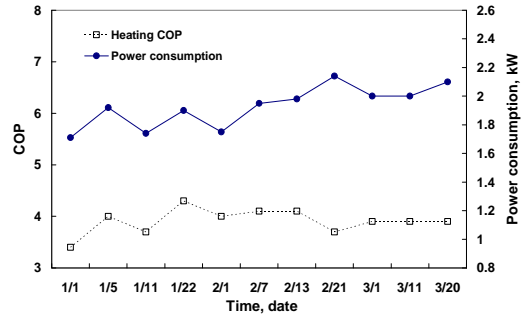


(b) Rainy day

Fig. 8. Variation of outdoor, ground and cooling temperature in heating season.

난방의 경우에는 온도차로 대표되는 현열부하만을 처리하면 되므로 입·출구 온도나 온도차에 특별한 제한은 없으나 어느 정도까지는 온수의 공급유량이 공급열량에 영향을 미치므로 난방부하를 만족하는 합리적인 범위 내에서 입·출구 온도차 및 온수의 공급유량이 선정되어야 한다.

지중과의 열교환량은 지중 열교환기의 설계에 대한 핵심 변수로서, 난방운전의 경우 지중에서 흡수하는 열량(heat extraction rate)은 약 6,000 kcal/h (47 W/m) 정도를 나타내었고, 지중 열교환기 입·출구 온도차이는 약 3.5°C 정도를 나타내었다. 이때의 평균 실내 난방열량은 7,000 kcal/h (54 W/m) 정도를 나타내었다. 유럽의 경우 지중과의 평균 열교환율이 55~70 W/m 정도라고 보고한 Sanner[7]의 결과와 비교해보면 본 실험에서의 지중 열교환량은 지중 열교환기 깊이 당 약



(b) Heating season

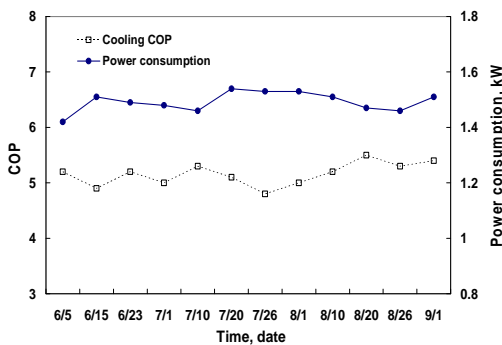
Fig. 9. Daily variation of COP and power consumption of heat pump.

20% 정도 작은 값이다. 그러나 앞의 냉방의 경우에는 이보다 높은 수치를 보이므로 이는 부하에 따라 달라진 것이다. 최대 열교환율은 암석 및 토양의 열 물성 및 지하수 포화여부에 따라 달라지는데, 우리나라의 경우 대부분이 지하수에 포화되어 있으므로 최대 열교환율은 외국에 비해 낮지 않다.

실험 공간 내부에 설치된 냉난방기를 통과하는 냉매 및 지중 열교환기를 통과하는 유체의 입·출구 온도 및 외기온도를 Fig. 8에 도시하였다. 이때 외기온도는 겨울철 맑은 날과 흐린 날의 전형적인 온도분포를 보여주고 있다. 일반적으로 동절기의 경우도 흐리거나 눈이 오는 날은 외기온도가 맑은 날에 비해서 높기 때문에 난방부하가 감소하는 현상을 관찰 할 수 있다.

하지만 여름철의 경우와 같이 기후 조건에 따라 부하가 급하게 변화하지는 않는다. 난방 및 지중 열교환기 순환 유체의 온도도 큰 차이를 보이지 않지만 맑은 날은 히트펌프의 운전시간이 증가하면서 지중 열교환기 순환 유체의 출구 온도가 약간 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

복합시스템의 전체 운전기간 중의 히트펌프의 운전특성을 Fig. 9에 나타내었다. 냉방운전 기간(5월 말~9월 중순) 동안의 히트펌프의 운전 특성을 나타낸 Fig. 9(a)에서 일일 조건에 따라서 약간의 차이가 발생하지만 전반적으로 히트펌프 자체의 성능계수는 4.5~5.5 사이의 범위에서 변화하였다. 이때 소요되는 동력은 1.4~1.5 kW 정도로 측정되었다.



(a) Cooling season

Fig. 9(b)는 난방운전 기간 (11월 초~3월 중순) 동안 히트펌프의 운전특성으로 일일 조건에 따라서 약간의 차이가 발생하지만 전반적으로 히트펌프 자체의 성능계수는 3.5~4.3 사이의 범위에서 변화하였다. 이때 소요되는 동력은 1.9~2.1 kW 정도로 측정되었다.

4. 결론

본 연구에서는 신재생에너지원과 기존 에너지원의 복합이용에 대한 실험을 수행하였으며, 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

전체 측정기간 중 냉방운전의 경우 히트펌프의 평균 COP는 약 4.5 정도를 나타내었으며, 실내 설정온도 23℃를 일정하게 유지하였다. 난방운전의 경우 히트펌프의 평균 COP는 약 3.8 정도를 나타내었으며, 난방운전의 경우도 24℃로 설정된 실내온도를 일정하게 유지하였다.

급탕부하의 경우에 태양열 의존율은 년 평균 35%로서 일사조건 및 기상상태에 따라 큰 차이를 보였다.

본 연구에서 구성한 지열-태양열원 급탕 및 냉난방 복합열원 시뮬레이터는 부하조건에 따라 상호 보완적으로 운전되면서 설정된 기능을 원활히 수행함을 확인하였다.

후 기

본 논문은 공공기술이사회 지원으로 한국건설기술연구원에서 “PLUS50 환경공생빌딩 건축기술개발사업”의 세부과제인 “에너지자원의 유효이용을 위한 순환형 공급처리기술 개발” 연구의 일부 결과임을 알립니다.

참고문헌

1. Son, 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.

2. Choi, B. Y., Lee, S. H., Jeong, Y. H. and Chai, K. H., 2003, An experimental study for heat storage type ground source heat pump system, Proceeding of the SAREK 2003 Winter, pp. 188-195.

3. Healy, P. F. and Ugursal, V. I., 1997, Performance and economic feasibility of ground source heat pumps in cold climate, International Journal of Energy Research, Vol. 21, pp. 857-870.

4. Kaygusuz, K., 1999, Investigation of a combined solar-heat pump system for residential heating. Part 1: Experimental results, International Journal of Energy Research, Vol. 23, pp. 1213-1223.

5. Axaopoulos, P., Panagakakis, P., and Kyritsis, S., 1998, Experimental comparison of a solar-assisted heat pump vs. a conventional thermosyphon solar system, International Journal of Energy Research, Vol. 22, pp. 1107-1120.

6. Ozgener, O. and Hepbasli, A., 2005, Experimental investigation of the performance of a solar-assisted ground-source heat pump system for greenhouse heating, International Journal of Energy Research, Vol. 29, pp. 217-231.

7. Sanner, B., 1995, Earth heat pumps and underground thermal energy storage in Germany Proceedings of the World Geothermal Congress, Vol. 3, Florenca, Italy, pp. 1167-1172.