

지열-태양열원 복합시스템의 성능평가에 관한 연구

황 인 주[†], 우 남 섭^{*}, 이 흥 철

한국건설기술연구원 화재 및 설비연구부, ^{*}성균관대학교 기계공학과 대학원

A Study on the Performance Evaluation of Hybrid Energy System with Geothermal and Solar Heat Sources

In-Ju Hwang[†], Nam-Sub Woo^{*}, Hong-Chul Lee

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

^{*}School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

(Received November 1, 2005; revision received February 8, 2006)

ABSTRACT: The present study concerns the annual performance evaluation of a hybrid-renewable energy system with geothermal and solar heat sources for hot water, heating and cooling of the residential buildings. The hybrid energy system consists of ground source heat pump of 2 RT for cooling, solar collectors of 4.8 m², storage tank of 250 liters and gas fired backup boiler of 11.6 kW. The averaged coefficients of performance of geothermal heat pump system during cooling and heating seasons are measured as 4.1 and 3.5, respectively. Also solar fraction for hot water is measured as 35 percent. Overall, the results shows that the hybrid-renewable energy system satisfactorily operated under all climatic conditions.

Key words: Hybrid energy system(복합에너지시스템), Ground source heat pump(지열원 히트 펌프), Solar energy(태양에너지), Ground heat exchanger(지중 열교환기)

기 호 설 명

C : 비열 [J/kgK]
 COP : 성적계수
 F : 분담률 [%]
 I : 단위면적당 수평면 전일사량 [W/m²]
 m : 유량 [m³/h]
 Q : 열전달량 [W]
 T : 온도 [°C]
 t : 시간
 W : 펌프 일 [kW]

하첨자

air : 외기
 comp : 압축기
 g : 지중
 hp : 히트펌프
 in : 입구
 out : 출구
 pumps : 순환펌프
 room : 실내
 s : 태양열
 sl : 냉난방 공간
 sys : 시스템

[†] Corresponding author

Tel.: +82-31-910-0390; fax: +82-31-910-0381

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

1. 서 론

최근 건물 분야의 자원 및 에너지 사용에 있어서 공급 위주의 일방향 패턴에서 에너지의 단계적 이용 및 재이용 등의 순환이용에 대한 관심이 점차 증가하고 있다. 유럽, 일본 등 주요 선진국에서는 에너지원의 단계적 이용 및 재이용 등 순환이용기술을 통한 화석에너지의 사용량과 오염물질 배출량의 최소화 기술을 지구환경문제의 핵심적인 해결방안으로 제시하고 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.

국내 건물부분 총에너지소비량 중 75%는 주거용 건물부분에 소비되며, 이중 78% 이상이 난방 및 급탕에 소비되고 있다. 이러한 현실에서 태양열, 지열 등과 같이 신재생에너지 이용을 통한 화석에너지 총소비량 절감과 이산화탄소 저감을 위한 지속적인 연구개발의 중요성이 증가하고 있다.

특히 지열원 히트펌프에 대한 연구는 최근 국내에서도 활발하게 이루어지고 있다.^(1,2) 이들은 히트펌프의 성능에 큰 영향을 미치는 지중 열교환기의 성능에 많은 관심을 가지고 연구를 수행하였으며, 시스템의 냉난방 운전 결과 및 시스템의 성능(COP) 등에 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.

또한 태양열과 히트펌프가 조합된 복합시스템에 대한 연구로는 Kaygusuz,⁽⁴⁾ Axaopoulos et al.,⁽⁵⁾ Ozgener and Hepbasli,⁽⁶⁾ Pahud and Matthey,⁽⁷⁾ 그리고 Kim et al.⁽⁸⁾의 연구를 들 수 있다. 이중, Kim et al.⁽⁸⁾은 공동주택에 적용될 수 있는 태양열 난방 및 급탕시스템에 대한 연구를 수행하였고, 나머지 연구자들은 태양열원이 히트펌프의 보조열원으로 사용되는 시스템에 대한 연구를 수행하였다. 반면, Kaygusuz⁽⁴⁾는 태양열이 히트펌프의 열원으로 사용되는 방식과 급탕으로 사용되는 방식의 성능을 비교하여 태양열이 보조열원이 아닌 급탕으로 사용되는 방식이 더 효율

적임을 밝혔다.

하지만 Kaygusuz⁽⁴⁾에 의해 태양열 급탕과 히트펌프, 냉난방시스템 조합의 우수성은 확인되었지만, 현재 이러한 복합시스템을 주거용 건물에 적용하여 다양한 성능을 분석한 연구사례는 없는 것으로 파악되었다.

이에 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. 지열-태양열원 복합이용 시스템

2.1 소형 시뮬레이터 설계 및 설치

지열-태양열원 복합시스템의 냉난방 성능을 분석하기 위한 전체 시스템의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다. 시스템은 크게 히트펌프, 지중 열교환기, 태양열 집열기 및 축열조, 보조 가스보일러, 실내 냉난방을 위한 팬코일 유닛, 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. 복합시스템 주요 요소의 제원을 Table 1에 정리하였다.

냉난방을 위한 대상 공간은 3m×6m의 컨테이너 사무실 2개를 결합하여 구성하였으며, 3m×3m의 컨테이너를 추가로 설치하여 지열원 히트펌프, 축열조, 배관 계통 및 보일러 등이 설치되는 기계실로 하였다. 본 연구에 사용된 히트펌프는 냉방 2RT급으로 압축기, 판형열교환기, 팽창밸브, 4방향 밸브 및 시스템 제어장치 등으로 구성되어 있다.

지중 열교환기는 수직 밀폐형 U자 형상으로 파이프의 재질은 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)이며, 파이프 내경은 30 mm이고 설치 깊이는 150m이다.

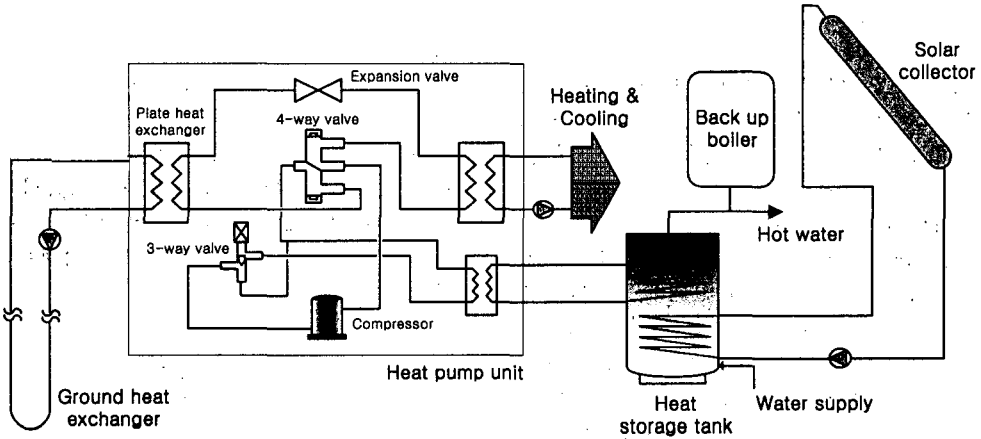


Fig. 1 Schematic diagram of experimental simulator.

지중 열교환기의 작동유체는 물을 사용하였으며, 지중과 열교환을 한다. 지중 열교환기와 시추공 사이의 그라우팅 작업은 벤토나이트와 규사를 물과 혼합하여 수행하였다.

급탕을 위한 태양열시스템은 태양열 집열기, 축열조 및 순환펌프 등으로 구성된다. 집열기는 평판형으로 집열면적은 4.8m²이고, 축열조는 0.25m³ 용량으로 내부 열교환 코일을 가지는 형식으로 제작하였다. 축열조의 하부에는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 태양열 집열기에 연결된 열교환기를 설

치하여 기저 급탕부하를 담당하도록 하였고, 상부에는 히트펌프의 급탕용 열교환기에 연결된 열교환기를 설치하여 부족한 경우의 순간 급탕부하를 담당하도록 하였다.

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.

Table 1 Specifications of the hybrid energy system module

System modules	Elements	Technical specifications
Refrigeration circuit	Compressor	Type: Scroll type, the rated power of electric motor driving: 2 HP, refrigerant: R-22
	Heat exchanger	Capacity: 6.6 kW, heat transfer surface: 0.55 m ²
	Expansion valve	Capacity: 12 liters
Ground coupling circuit	Ground heat exchanger	Vertical-single U-bend type, bore diameter: 20 cm, diameter of pipe: 30 mm, boring depth: 150 m, material: high density polyethylene
	Circulation pump	Volumetric flow rate: 5 m ³ /h, power: 640 W
	Expansion tank	Capacity: 12 liters, precharge: 1 bar
Solar collector circuit	Solar collector	Collecting area: 4 m ² , flat plate type
	Storage tank	Capacity: 250 liters
	Circulation pump	Volumetric flow rate: 0.9 m ³ /h, power: 90 W
Fan-coil circuit	Expansion tank	Capacity: 12 liters, precharge: 1 bar
	Fan-coil unit	Cooling/heating capacity: 6,450/10,300 kcal/h
	Water circulating pump	Volumetric flow rate: 5 m ³ /h

2.2 성능평가 조건 및 방법

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

급탕부하의 경우 경기도 A지역에 위치한 공동주택단지를 대상으로 2003년 12월부터 현재까지 측정된 데이터⁽⁹⁾를 기초로 Fig. 2와 같은 급탕 프로파일을 작성하였으며, 제어기와 전동밸브를 이용하여 시간에 따른 급탕 유량과 스케줄을 조절하는 방식으로 급탕부하 프로파일을 설정하였다.

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

히트펌프의 성능은 작동유체의 유량과 입·출구에서의 온도변화 및 소비전력을 측정하여 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.

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

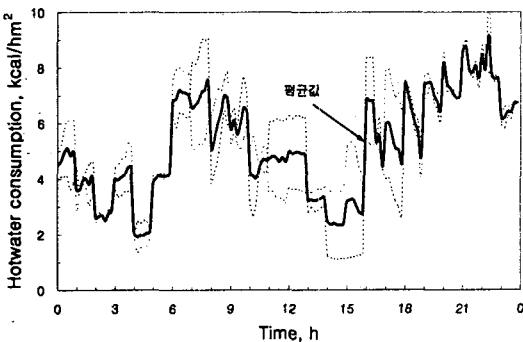


Fig. 2 Averaged hot water load profile in November, 2004.

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 냉방운전시 지열원 히트펌프의 성적계수는 식(3)과 같이 계산된다.

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

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

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

3. 결과 및 고찰

3.1 시스템 구성모듈의 운전 특성

지열교환기 성능은 주로 지반의 열전도도, 지중 온도, 지하수 순환유량과 같은 지반 특성, 열매체의 종류, 열매체 순환속도, 지중 열교환기 재질 및 직경과 같은 재료 특성, 최대 냉난방부하, 연간 냉난방부하와 같은 부하 특성에 따라 결정된다.

지열 열교환기에서의 입·출구 온도차, 측정시간, 열주입량을 구하면 온도와 시간의 로그함수로 구성된 그래프의 접선을 구하여 열전도도를 계

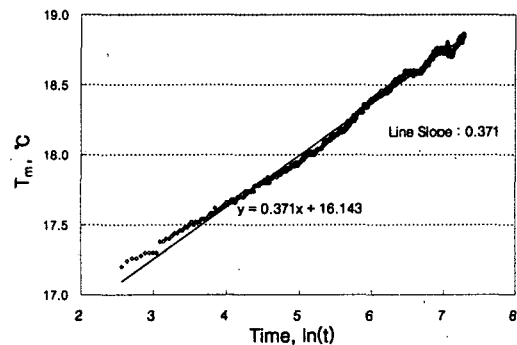


Fig. 3 Log time graph for thermal conductivity calculation.

산할 수 있다. 지열원 히트펌프가 설치된 본 현장의 지반 열전도도는 Fig. 3에 보이는 그래프로부터 $3.16 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ 로 계산되었다. 매 실험시간은 27시간으로 하였다. 위에 계산된 열전도도는 지반의 열전도도와 관련된 문헌과 비교할 때 매우 높은 값으로 지열교환에 매우 양호한 조건임을 나타내는 것이다.

복합시스템의 냉난방운전 중 실내의 온도, 태양의 일사량, 히트펌프의 성적계수(COP)의 변화 등을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4는 복합시스템의 전체 운전기간 중 맑은 날, 최대 냉난방부하를 갖는 대표적인 날에 대한 일일 운전성능을 분석한 결과이다.

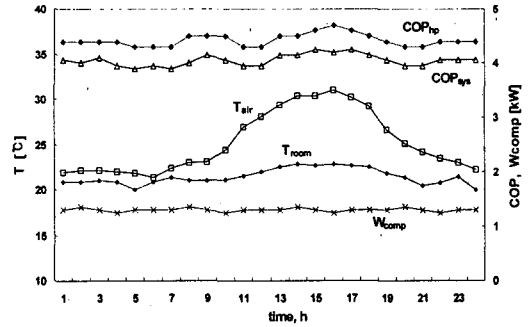
최대 태양일사는 계절에 상관없이 정오 부근에서 발생한다. 이때 최대 일사는 여름철의 경우 950 W/m^2 , 겨울철의 경우 900 W/m^2 정도로 측정되었다. 태양열 급탕시스템의 순환유량은 집열기 단위면적당 최적유량으로 제시된 값들을 고려하여 $0.39 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 하였다.

지열원 히트펌프의 성적계수는 냉난방운전 모두 시간에 따른 변화는 크지 않았다. 냉방운전의 경우 히트펌프의 COP는 약 4.5, 난방운전의 경우는 3.5 정도를 각각 나타내었다. 이때 히트펌프의 순간 소비전력은 냉방운전의 경우 평균 1.9 kW , 난방운전의 경우 2.3 kW 정도로 각각 측정되었다.

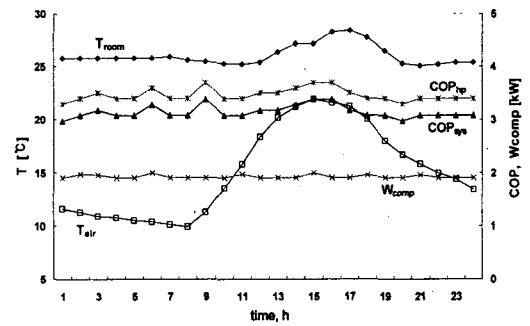
지중과의 열교환량은 지열 열교환기의 설계에 대한 핵심변수로서, 난방운전의 경우 지중에서 흡수하는 열량(heat extraction rate)은 약 7.0 kW 정도를 나타내었고, 지열 열교환기 입·출구 온도차이는 약 3.5°C 정도를 나타내었다. 이때의 평균 실내 난방열량은 8.1 kW 정도를 나타내었다.

냉방운전의 경우에 지중으로 방출되는 열량(heat rejection rate)은 약 9.3 kW 정도를 나타내었고, 지열 열교환기의 입·출구 온도차는 $4\sim 4.5^\circ\text{C}$ 정도를 나타내었다. 이때의 평균 실내냉방열량은 7.0 kW 정도를 나타내었다. 두 경우 모두 지열 열교환기의 작동유체는 물이고 순환유량은 $1.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 로 설정하였다.

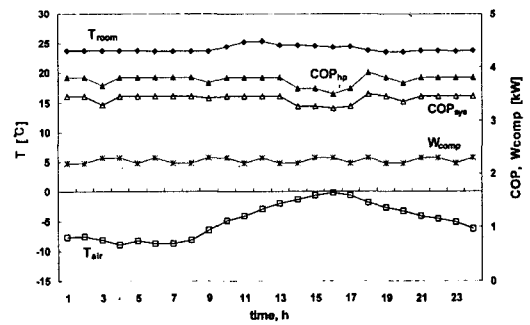
유럽의 경우 지중과의 평균 열교환량이 $55\sim 70 \text{ W/m}$ 정도라고 보고한 Sanner⁽¹⁰⁾의 결과와 비교해 보면 본 실험에서의 지중 열교환량은 지열 열교환기 길이당 약 20% 정도 작은 값이다. 또한, Kim et al.⁽¹¹⁾이 보고한 국내 지열원 히트펌프의 COP가 2.8~4.7 정도의 값을 가진다는 결과와 비



(a) Cooling season



(b) Mid-term



(c) Heating season

Fig. 4 Temperature and heat pump COP variation with the time of a day.

교하면 본 실험에서의 냉난방 부하에 대한 지열원 히트펌프 시스템의 COP 및 지중온도 변화 등 냉난방 운전결과는 양호한 운전성능을 확보하고 있음을 알 수 있다.

태양열시스템의 운전특성을 Fig. 5에 나타내었다. 급탕부하의 기준 데이터는 앞서 설명한 바와 같이 실제 공동주택에서 실측한 데이터를 이용하여 분석하였다. 복합시스템에서 태양열이 담당하지 못하는 급탕부하는 히트펌프가 담당하도록 구

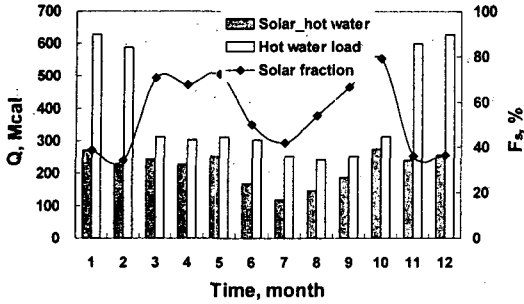


Fig. 5 Solar fraction in the hybrid energy system.

성되어 있다. 월간 기준으로 봄, 가을의 중간기 태양열 집열성능이 가장 우수하고, 급탕부하 담당 비율도 가장 크다. 6~8월 급탕부하에 대한 태양열의 역할이 감소하는데 이는 장마를 포함하여 흐린 날이 많기 때문이다. 본 연구에 적용한 공동주택 부하패턴에 대하여 태양열 급탕시스템은 전체 급탕부하의 약 35% 정도를 담당하는 것으로 나타났다.

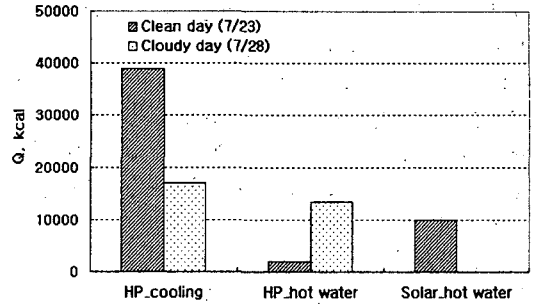
3.2 에너지 이용 특성 분석

지열-태양열원 복합시스템 각 모듈의 운전 특성을 이용하여 종합적으로 분석한 복합시스템의 연간 에너지 이용 특성을 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다.

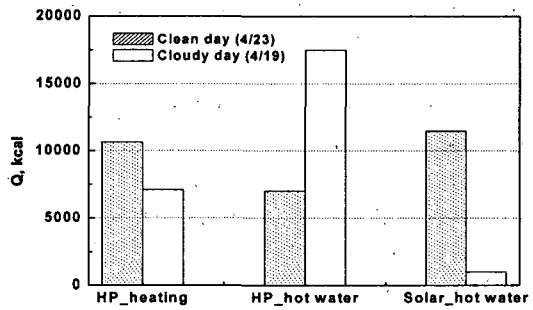
복합시스템의 계절별 냉난방 운전 특성을 Fig. 6에 나타내었다. 실험결과를 30평 기준 공동주택의 냉난방 및 급탕부하로 환산하여 태양열 급탕과 히트펌프에 의한 냉난방 및 급탕운전의 비율을 분석한 결과이다. 여기서 에너지 비율(energy fraction)은 하루에 공급되는 전체 에너지에 대한 각 에너지 요소의 비로 정의된다.

여름철 맑은 날의 경우는 냉방부하가 전체의 80% 정도를 차지하였고, 태양열 급탕공급은 중간기에 40% 정도로 평가되었다. 겨울철 급탕부하는 태양열과 히트펌프가 비슷한 비율로 담당하는 것으로 파악되었다. 냉방기에 비해서 중간기와 난방기의 급탕부하가 상당한 부분을 차지하는데 이 부분을 태양열이 많은 부분을 담당하고 있다.

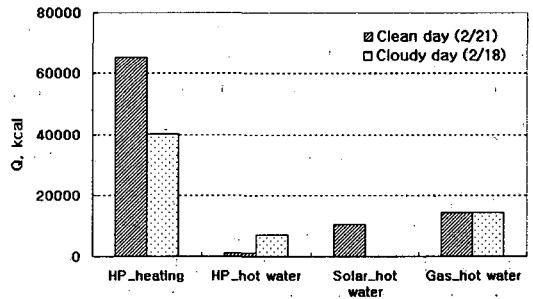
기후조건에 따른 운전 특성을 살펴보면 냉방운전의 경우 Fig. 6(a)에 보이는 바와 같이 날씨가 흐리거나 비가 오면 최고기온이 높게 올라가지



(a) Cooling season



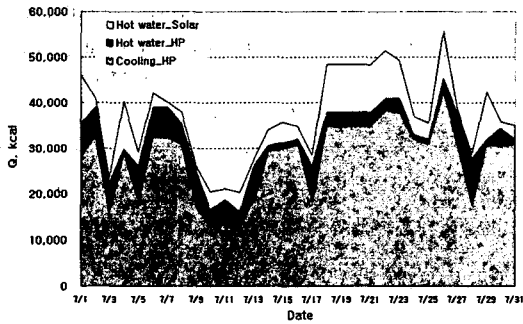
(b) Mid-term



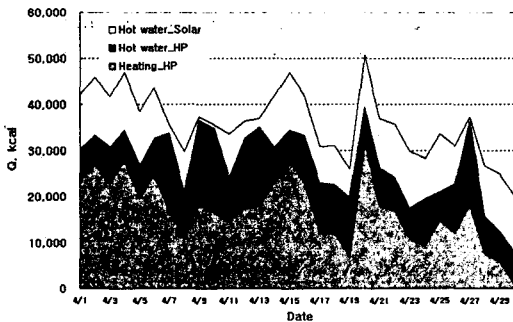
(c) Heating season

Fig. 6 Effect of climatic data on energy fraction of the hybrid energy system.

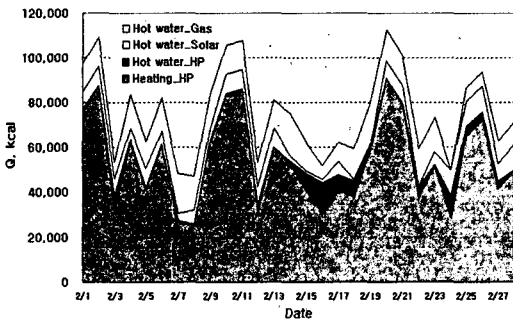
않기 때문에 냉방부하가 급격하게 줄어드는 것을 볼 수 있다. 반면 태양열이 담당하지 못하는 급탕부하 또한 히트펌프가 담당하는 것으로 파악되었다. 이러한 현상은 Fig. 6(c)에 보이는 바와 같이 난방운전에서 나타나는데 흐리거나 눈이 오는 날을 최저기온이 맑은 날에 비해서 많이 내려가지 않기 때문에 난방부하가 30% 정도 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 6(b)의 중간기의 경우는 냉난방기에 비해서 명확한 차이를 보이지는 않지만 유사한 경향을 확인할 수 있다.



(a) Cooling season



(b) Mid-term



(c) Heating season

Fig. 7 Seasonal energy consumption of the hybrid energy system.

복합시스템에서 급탕을 보조하기 위한 방법으로 히트펌프의 난방우선모드를 적용하여 급탕 보조시스템인 가스보일러의 운영을 포함한 시스템의 운전결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 급탕부하에 대한 히트펌프, 태양열시스템, 가스보일러의 담당비율이 기후조건에 따라 달라지는 것을 알 수 있다. 즉, Fig. 6에서 나타난 복합시스템의 에너지 이용 특성과 유사한 경향을 보인다. 주어진 실험조건에서 난방부하가 냉방부하

에 비해 30% 정도 컸으며 겨울철의 경우 기후조건에 따라 난방부하가 크게 변화하는 것으로 분석되었다.

Fig. 7(b)의 중간기의 경우는 난방 및 급탕부하의 비율이 비슷하지만, Fig. 7(a)와 (c)의 하절기 및 동절기의 경우는 냉난방 부하가 월등히 크며, 특히 동절기의 경우는 그 차이가 더욱 증가한다.

냉방운전에 따른 에너지 이용 특성의 결과인 Fig. 7(a)를 살펴보면, 냉방부하는 일기조건에 따라 2배 이상의 차이를 보이며 맑은 날 냉방부하가 증가하고 이때의 태양열 급탕도 증가한다.

난방운전에 따른 에너지 이용 특성의 결과인 Fig. 7(c)를 살펴보면, 대체적으로 난방부하가 Fig. 7(a)의 냉방부하보다 50% 정도 컸고, 태양열 급탕이 비교적 고르게 분포하는 것을 볼 수 있다. 이는 2월의 기상조건이 7월보다 양호하기 때문이다. 또한, 난방부하가 큰 날은 태양열과 가스보일러의 급탕 담당비율이 증가하여 히트펌프의 운전시간을 감소시킨다. 즉, 복합시스템의 운전 특성은 맑은 날과 흐린 날의 기후조건에 따라 명확한 차이를 보였으며, 기후 및 부하조건에 따라 지열원 히트펌프와 태양열 급탕은 상호보완적으로 운전되었다. 즉, 히트펌프의 냉방 및 난방 운전이 증가하는 경우 태양열 급탕도 증가하여 히트펌프의 급탕운전은 감소하는 특성을 보인다.

4. 결 론

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

전체 냉방기간 동안의 일별 평균 냉방 COP는 4~4.5의 범위에 있었으며, 지열 열교환기를 통해서 지중으로 방출하는 평균 열량은 9.3kW로 측정되었다. 난방운전의 경우 일일 평균 COP는 3.5~4.3의 범위에 있었다. 지열 열교환기를 통해서 지중에서 흡수하는 평균 열량은 7.0kW로 측정되었다.

태양열은 동절기에는 급탕부하의 35% 정도를 담당하였으며 봄, 가을철에는 65% 정도로 증가하였다. 반면 하절기에는 불규칙한 기후로 태양열 의존율이 동절기와 비슷한 수준으로 감소하였다.

본 연구에서 구성한 복합열원 시뮬레이터는 기후 및 부하조건에 따라 상호 보완적으로 운전되

면서 복합시스템의 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., Panagakis, P. and Kyritsis, S., 1998, Experimental comparison of a solar-assisted heat pump vs. a conventional thermosiphon 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. Pahud, D. and Matthey, B., 2001, Comparison of the thermal performance of double U-type borehole heat exchangers measured in situ, *Energy and Building*, Vol. 33, pp. 503-507.
8. Kim, J.H., Shin, U.C., Baek, N.C. and Jang, M.S., 2004, Thermal performance of solar space heating & hot water system in an apartment, *Proceeding of the Korean Solar Energy Society, Spring Annual Conference*, pp. 98-102.
9. Hwang, I.J. and Cho, C.S., 2004, Development of effective energy utilization technology for sustainable building (II), *Korea Institute of Construction Technology*, pp. 74-93.
10. Sanner, B., 1995, Earth heat pumps and underground thermal energy storage in Germany proceedings of the world geothermal congress, Vol. 3, Florence, Italy, pp. 1167-1172.
11. Kim, B.C., Shin, H.J. and Cho, C.S., 2003, The measurement and analysis of performance of ground source heat pump system in winter, *Proceeding of the SAREK*, pp. 1086-1093.