

온수 급탕 및 난방을 위한 히트 펌프 태양열 시스템의 성능 분석

손진국[†]

한라대학교 기계자동차공학부, 교수

Performance Analysis of Solar Thermal System with Heat Pump for Domestic Hot Water and Space Heating

Sohn Jin-Gug[†]

Department of Mechanical & Automotive Engineering, Halla University, Professor

[†]Corresponding author: jgsohn@halla.ac.kr

Abstract

This study aims to analyze the performance of solar thermal system with heat pump for domestic hot water and heat supply. There are four types of system. Systems are categorized based on the existence of a heat pump and the ways of controlling the working fluid circulating from the collector. Working fluid is controlled by either temperature level (categorized as system 1 and 2) or sequential flow (system 3 and 4). Heat balance of the system, the solar fraction, hot water and heating supply rates, and performance of heat pump are analyzed using TRNSYS and TESS component programs. Technical specifications of the main facilities are as follow; the area of the collector to 25 m², the volumes of the main tank and the buffer tank to 0.5 m³ and 0.8 m³, respectively. Heating capacity of the heat pump in the heating mode is set to 30,000 kJ / hr. Hot water supply set 65 liters per person each day, total heat transfer coefficient of the building to 1,500 kJ / kg.K. Indoor temperature is kept steadily around 22°C. The results are as follows; 6 months average solar fraction of system 1 turns out to be 39%, which is 6.7% higher than system 2 without the heat pump, indicating a 25% increase of solar fraction compared to that of system 2. In addition, the solar fraction of system 1 is 2% higher than that of system 3. Hot water and heating supply rate of system 1 are 93% and 35%, respectively. Considering the heat balance of the system, higher heat efficiency, and solar fraction, as whole, it can be concluded that system 1 is the most suitable system for hot water and heat supply.

Keywords: 태양열 의존율(Solar fraction), 태양열 시스템(Solar thermal system), 히트펌프(Heat pump), 트랜시스(TRNSYS), 온수급탕(Domestic hot water), 난방(Space heating)

기호설명

f : 태양열 의존율 (%)

P : 동력 (KW)



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.38, No.5, pp.49-62, October 2018
<https://doi.org/10.7836/kses.2018.38.5.049>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 20 August 2018

Revised: 16 October 2018

Accepted: 30 October 2018

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Q : 열량 (kJ/hr)

Y : 급수 혼합비 (%)

하첨자

Aux. : 보조기기

dhw : 온수급탕

g, gain : 집열

hp : 히트펌프

Load : 난방부하

sh : 건물난방

1. 서론

태양열 에너지는 전기를 생산하는 풍력이나 태양광과는 다르게 태양 복사에너지를 직접 열에너지로 변환시켜 이용하는 무공해 에너지원으로 화석연료를 대체하여 환경문제에 능동적으로 대처할 수 있는 무한한 에너지 자원이다.

태양열 시스템은 태양으로부터 직접 열을 획득하여 이용하기 때문에 집열 효율이 우수하고, 집열과 축열 그리고 운전에 필요한 설비가 비교적 단순하여 가정용 온수공급뿐만 아니라 난방과 산업 공정열 등 다양한 이용이 가능하다.

우리나라 일반 주택에 대한 에너지 소비형태 분석에 따르면 총 에너지 사용량 중 80% 이상의 열에너지가 동절기 난방과 온수급탕에 쓰이는 것으로 나타나고 있다¹⁾. 이처럼 열에너지 수요 비중이 높은 경우 태양열 시스템은 에너지 이용이 효율적이고 경제적인 것으로 판단되지만, 무엇보다 열에너지 수요에 대응하여 지속적이고 안정적인 공급이 수반되어야 한다.

그간 태양열 에너지의 단점을 개선하여 보다 적극적으로 활용하기 위한 많은 연구가 수행되어 왔다. 태양열 온수 및 난방 일체형 복합시스템 연구²⁾에서는 태양열 에너지를 보일러 내장형 축열조 시스템과 연계하여 태양열 에너지의 이용과 보일러 시스템의 에너지 절감 효과를 검토하였다. 지열과 연계한 히트펌프 하이브리드 태양열 시스템 연구^{3,4)}에서는 다양한 시스템 개발과 운전방식에 따른 성능을 분석하였다. 이러한 연계형 또는 복합형 태양열 시스템의 연구는 태양열 시스템을 위한 기술개발보다 상호 보완적 차원에서 효율적인 에너지 이용 방안이라 할 수 있다.

태양열 시스템 유형에 따른 집열특성에 대한 연구⁵⁾에 의하면 태양 일조시간이 적고 일사량이 적은 경우 설비형 태양열 시스템의 집열량이 자연형 설비에 비해 적은 것으로 나타나고 있다. 이것은 시스템의 온도차 제어방

식에 의해 낮은 온도영역에서 집열량이 제한된 결과로 시스템 운전방식이 집열량과 매우 밀접한 관계가 있다는 것을 나타낸다.

히트펌프는 저온과 고온, 두 영역의 온도차를 이용하여 열에너지를 이동시키는 특성을 지니고 있다. 태양열 시스템에 이러한 히트펌프 원리를 적용하면 태양열 시스템의 저온측 열에너지를 온도가 높은 유용한 에너지로 변환이 가능하다. 또한 저온부의 탱크 온도를 낮은 상태로 유지하여 일사량이 적거나 일조시간이 짧은 경우에도 집열기로 부터 열에너지 획득이 가능하다. 이와 관련한 히트펌프를 이용한 태양열 시스템의 개발과 성능에 대한 연구^{6,7)}에 의하면 시스템 성능은 크게 향상하는 것으로 나타나고 있으나 연구가 온수급탕 공급을 위한 시스템을 대상으로 하고 있어 온수급탕뿐만 아니라 난방공급이 가능한 태양열 히트펌프 시스템에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 태양열 시스템의 문제점으로 지적되는 열에너지 수요와 공급의 불균형과 운전제어에 따른 집열량 감소의 개선책으로 히트펌프를 활용한 태양열 히트펌프 시스템을 제시하고, 시스템의 운전 특성과 성능을 분석하였다. 특히 설비의 구성에 있어 히트펌프와 버퍼탱크의 활용에 따른 시스템의 축열 방식과 히트펌프가 태양열 시스템의 운전 특성에 미치는 영향을 검토하였다. 이를 위해서 시스템의 운전 특성, 열성능 평형, 온수급탕과 난방 부하 대응력 그리고 히트펌프의 성능을 정량적으로 고찰하였다. 분석 도구로는 태양열 에너지 시스템의 동적 시뮬레이션을 위해 개발되어 국내외적으로 널리 이용되는 TRNSYS 17과 TESS component 프로그램을 사용하였다.

2. 시스템 개요

2.1 시스템 구성 및 유형

본 논문의 태양열 히트펌프 시스템은 Fig.1(a)에 나타난 바와 같이 집열과 축열, 온수 및 난방부하에 필요한 기본 태양열 설비에 히트펌프와 히트펌프 활용을 위한 버퍼탱크가 추가로 구성되었다. 시스템 구성에 있어 버퍼탱크와 히트펌프의 설치는 기존의 단순한 태양열 시스템과 달리 시스템의 작동유체 순환에 있어 축열과 운전 방식에 변화가 가능하다. 따라서 본 논문에서는 히트펌프의 유무와 작동유체의 순환 방식에 따라 시스템 4가지 유형을 구성하여 제시하였다.

Fig. 1(a)의 시스템 1은 태양열 히트펌프 시스템이고, 시스템 2는 시스템 1과 동일한 집열 순환과정의 운전이지만 히트펌프가 없는 설비이다. 시스템 1과 2는 집열기에서 가열된 작동유체가 유동 분배기(Flow diverter)에 의해 메인탱크 또는 버퍼탱크로 공급되어 열교환을 수행하고 집열기로 바로 순환되는 운전방식이다. 일출과 함께 집열기 출구 온도가 상승하여 버퍼탱크 출구 온도와 운전 조건이 만족하면 축열이 이루어진다. 집열기 출구 온도가 메인탱크 하단 보다 높으면 작동유체는 유동분배기에 의해 메인탱크로 전환되고, 이후 고온 영역의 축열 기능이 저하되면 버퍼탱크로 다시 전환되어 순환유동이 이루어진다.

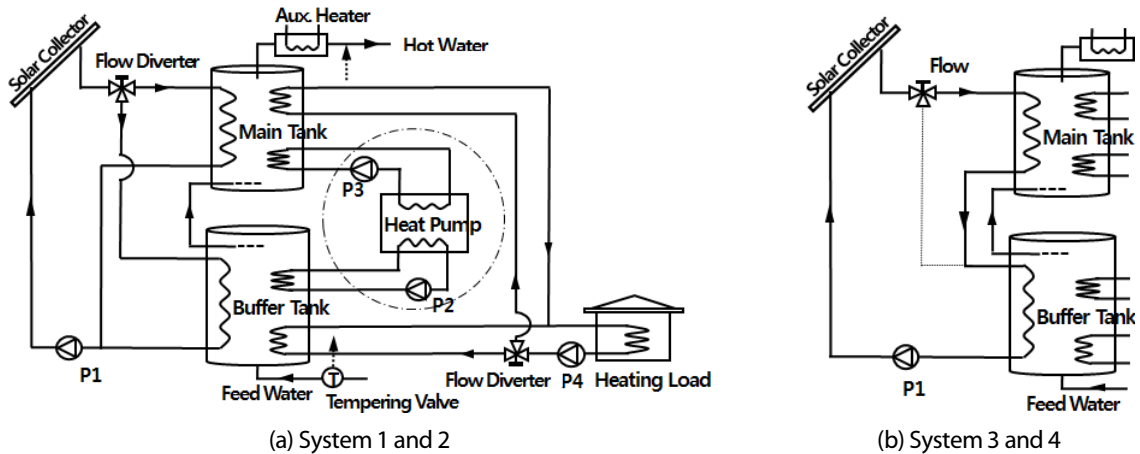


Fig. 1 Schematic diagram of solar thermal system with heat pump

반면 Fig. 1(b)의 시스템 3과 4는 작동유체가 집열기로 부터 메인탱크와 버퍼탱크를 순차적으로 흐르면서 축열이 이루어지는 순차적 유동방식이다. Fig.1(a)와 축열과정의 작동유체 유동방식에 차이가 있다. 시스템 4는 시스템 3과 동일한 집열축열 방식이나 히트펌프가 없는 시스템이다. 시스템 4의 축열과정은 집열기 출구와 버퍼탱크 하단의 온도차에 의한 차온제어방식과 같아 2개의 탱크를 갖춘 일반적인 태양열 시스템으로 볼 수 있다.

급수의 공급은 1차로 저온 축열 탱크인 버퍼탱크로 공급하고, 이와 직렬로 연결된 메인 탱크에 2차로 보내는 간접 공급방식으로 낮은 온도의 급수가 메인탱크에 미치는 영향이 최소화 될 수 있도록 하였다. 난방은 메인탱크와 버퍼탱크에서 공급이 가능하도록 시스템을 구성하였다. 버퍼탱크의 온도가 난방 설정온도보다 높은 경우 난방공급은 버퍼탱크에서 우선적으로 이루어지고, 난방 기능이 떨어지면 메인탱크로 전환된다. 히트펌프는 버퍼탱크의 저온영역 열에너지를 메인탱크로 이동시키는 역할을 담당하도록 메인탱크와 버퍼탱크 사이에 설치하여 메인탱크 온도가 온수급탕과 난방 조건을 항상 유지할 수 있도록 하였다.

2.2 설비 기술 사양

시스템의 주요설비에 대한 기술 사양은 Table 1에 제시하였다. 집열기, 축열탱크 등의 설비 용량은 온수급탕과 난방 부하를 감안하여 년평균 30~40% 정도의 열부하를 감당하는 것으로 가정하고, 시스템 설계과정에서 시뮬레이션을 반복적으로 수행하여 설정하였다.

집열기 면적은 25 m²으로 하고, 경사각은 열에너지 수요가 많은 동절기 낮은 태양 고도를 반영하여 55° 로 높게 설정하였다. 메인 탱크와 버퍼탱크의 용량은 각각 0.5 m³와 0.8 m³으로 선정하고, 버퍼탱크는 저온 영역 축열과 히트펌프 열원 사용을 감안하여 메인탱크보다 60% 큰 용량으로 설정하였다. 탱크는 열교환기가 내장되어 있는 수직 원통형으로 용량에 따라 높이와 직경 비가 1.6으로 일정하고 상단에서 하단까지 7단(Node7)의 층으로 구분하여 입구와 출구 지정이 가능한 형식이다.

Table 1 Technical specification of system components

Components	Type	Contents	Specification
Collector	Type 1b	Type	Flat-plate
		Area	25 m ²
		Slope	55°
		Efficiency slope	13 kJ/hr.m ² K
Main storage tank	Type 534	Capacity (Volume)	0.5 m ³
		Hight/Diameter	1.2/0.5 m
		Node	7
Buffer storage tank	Type 534	Capacity (Volume)	0.8 m ³
		Hight/Diameter	1.5/0.6 m
		Node	7
Heat pump	Type 927	Capacity (Heating)	30000 kJ/hr
		Set. temp	45-55°C
Building Load	Type 12a	UA	1500kJ/hr.K
		House set. temp.	22°C

히트펌프는 Type 927 형식으로 난방 모드에서 30,000 kJ/hr의 난방용량을 갖는 단단의 물-물 열교환 방식으로 운전과 정지는 온도레벨제어(TLC, Temperature level control)를 통해 이루어진다. 난방 모델은 단일 존에 대한 건물에너지 난방부하를 단순화하여 부하에 대응할 수 있는 Type 12a 형식을 사용하였다. 실내온도가 22°C로 유지되도록 하고, 건물 총합 열전달계수는 1,500 kJ/h.K로 설정하였다.

3. 시뮬레이션 방법

3.1 시뮬레이션 개요

본 논문에서는 태양열 에너지 시스템의 동적 시뮬레이션을 위해 개발되어 현재 다양한 분야에 대한 에너지 시스템 분석과 응용해석이 가능한 TRNSYS (Transient System Simulation) 17과 TESS GHP 컴포넌트를 이용하였으며, 시스템1에 대한 시뮬레이션 실행 구성도를 Fig. 2에 나타내었다. 시뮬레이션은 온수급탕과 난방이 주로 이루어지는 11월에서 4월까지 6개월에 대하여 수행하였다.

3.2 운전 제어 조건

태양열 시스템의 운전은 태양열 에너지의 축열 유동, 온수 및 난방 공급, 히트펌프 가동을 위한 제어에 의해 이루어지며, Table 2에 각 설비의 온도차 방식의 운전 조건을 나타내었다. 먼저 태양열의 축열은 집열기로부터 가온된 작동유체의 순환에 의하여 이루어진다. 집열기 출구와 버퍼탱크 하단의 온도차 제어 방식에 의해 두 지점의 온도차가 각각 10°C / 2°C에서 운전(ON)과 정지(OFF)가 이루어진다.

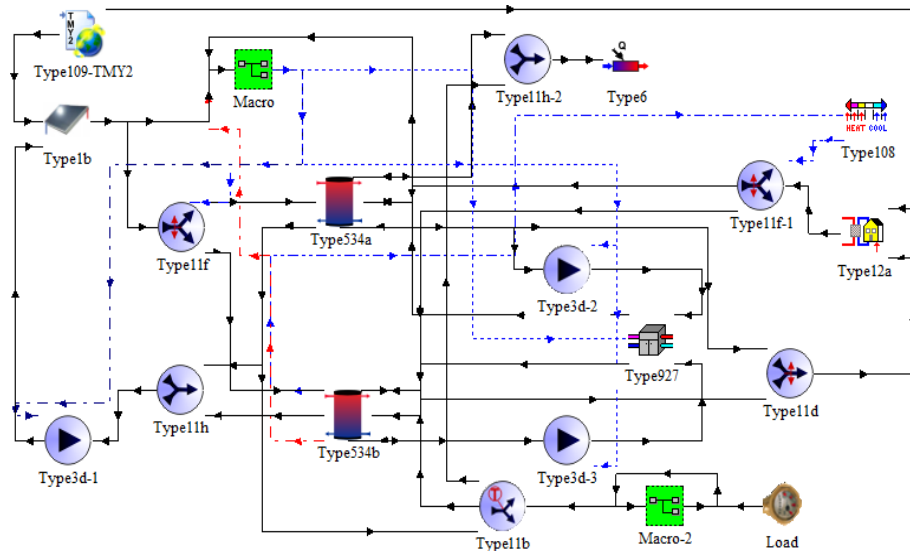


Fig. 2 TRNSYS simulation studio of system 1

Table 2 Operation conditions of temperature difference

Type	Components	Control	Range & Setting
Temp. differential controller	Collector/Main Tank	Temp. On/Off	5 / 2°C
	Collector/Buffer Tank	Temp. On/Off	10 / 2°C
Aquastat heating	Heat pump	Tset/UDB/LDB	45 / 10 / 0°C 45~55°C
Five-stage room thermostat	Heating Load	Temp. stage	40°C
Controlled flow diverter	Main/Buffer tank flow	signal On/Off	1 / 0
Tempering valve	Feed water supply	Tset/fraction Y	55°C / Y

집열기 출구의 온도가 메인탱크의 출구 온도보다 낮은 경우, 유량분배기의 제어로 작동유체 흐름이 버퍼탱크로 우선적으로 이루어지고, 점차로 집열기 출구의 온도가 메인탱크 출구 보다 높아지면 5°C / 2°C의 범위에서 ON/OFF가 이루어진다.

Fig. 1(a) 시스템1의 경우 집열기로부터 메인탱크와 버퍼탱크의 순환이 독립적으로 이루어지도록 시스템을 설계함으로서 메인탱크의 작동유체 순환이 빠르게 진행되도록 하였다. 히트펌프는 난방제어기(Aquastat-H)의 45~55°C 사이의 온도제어를 통해 메인탱크 중앙부 온도가 일정온도 이상을 유지할 수 있도록 운전과 정지가 이루어진다.

급수는 저온 축열 탱크인 버퍼탱크로 우선적으로 공급되어 직렬로 연결된 메인 탱크로 보내는 간접 공급방식으로 설계하였다. 낮은 온도의 급수가 메인탱크에 미치는 영향이 최소화되도록 하였다. 온수급탕은 메인탱크 상단에서 공급된다. 상단부의 온도가 설정한 급탕온도 55°C보다 높은 경우 템퍼링 밸브(Tempering valve)에서 급수를 혼합비율 Y만큼 바이패스 공급하여 급수의 온도를 조절한다.

난방은 메인탱크와 버퍼탱크에서 탱크의 온도에 따라 공급되는 방식으로 온도제어(Five-stage room thermostat)

로 유동매체 밸브(Type11f-1)를 통해 유동 방향을 제어한다. 버퍼탱크의 온도가 40°C 이상일 경우 우선적으로 공급되고, 온도가 낮아지면 메인탱크에서 난방이 이루어진다. 한편 메인탱크의 온도가 45°C 이하로 낮아지면 히트펌프가 작동한다. 부하는 건물 총 열전달율을 기준으로 외기온도에 대하여 실내온도가 일정하게 유지되도록 에너지 공급율(ERC, Energy rate control) 제어를 통해 이루어진다.

3.3 기상 및 열부하 조건

본 논문에서는 전체적 시스템 관점에서 동일한 온수급탕과 난방 열부하 조건하에서 태양열 히트펌프 시스템에 대한 운전과 성능에 대한 비교 분석을 수행하는 것으로 기상자료, 급수온도, 급탕 및 난방 부하율 등의 외적 인자는 프로그램에서 활용할 수 있는 범위에서 단순화하고, 가정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 대상지역 서울에 대한 월평균 대기온도, 지중온도, 일사량은 Fig. 3(a)과 같다. 일사량은 TRNSYS Type109-TMY2 기상데이터에서 제공하는 서울지역 월평균 값을 사용하였으며, 우리나라 기상청의 20년간 (1988년~2007년) 월평균 일사량(MJ/m²)과 잘 일치하는 것으로 나타나고 있다.

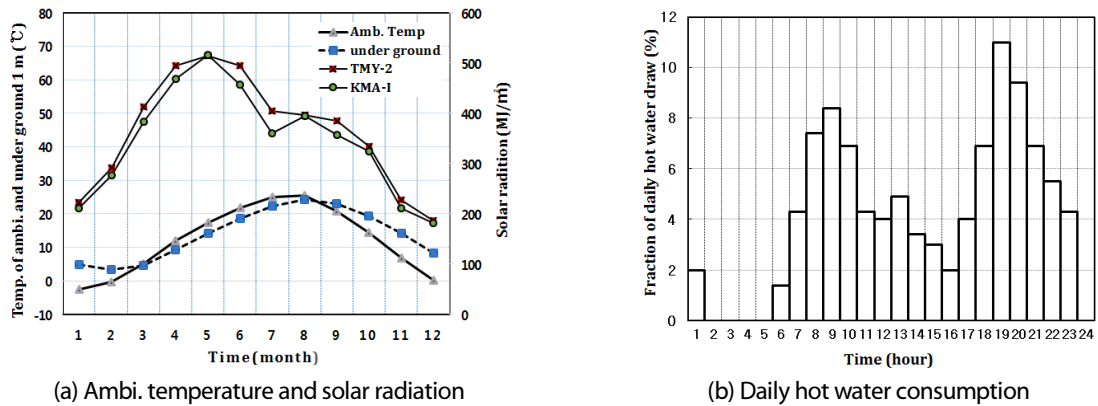


Fig. 3 Simulation conditions for hot water and solar radiation

일일 온수 급탕량은 1인이 65 Liter를 사용하는 것으로 가정하여 4인 기준, 260 Liter의 급수를 Fig. 3(b)와 같은 시간별 사용비율⁸⁾에 따라 공급하는 것으로 하였다. 또한 계절에 따른 온수 사용량은 동일하게 적용하고, 급수 온도는 서울지역 지중 1 m에서의 월평균 평년 온도로 가정하였다.

난방부하는 단일 존의 난방 부하를 평가할 수 있도록 건물 총합 열전달율(UA)을 1,500 kJ/h.K로 설정하고, 시간에 따라 건물내에서 취득되는 열량은 없는 것으로 가정하였다. 시뮬레이션 기간 동안 실내 온도는 22°C가 유지되고, 건물 총 열전달율을 기준으로 외기온도에 대하여 실내온도가 일정하게 유지되도록 에너지 공급율(ERC, Energy rate control)제어를 한다.

4. 시스템 성능 분석

시스템에 대한 성능분석은 열성능 평형, 태양열 의존율, 온수급탕부하 공급율, 난방 부하 공급율, 히트펌프 성능의 관점에서 실시하였다. 분석 결과는 히트펌프를 사용한 시스템 1에 대한 열성능 평형 상태를 보다 상세히 나타내었으며, 시스템 유형에 따른 성능 분석은 난방이 필요한 기간 6개월에 대한 결과를 제시하였다.

4.1 시스템 운전 특성

시스템 유형에 따른 운전 특성을 파악하기 위해 시뮬레이션 기간중 1월 15일부터 30일까지(시뮬레이션 시간 350~744 h) 15일간의 메인탱크와 버퍼탱크 평균온도, 히트펌프 작동, 버퍼탱크의 난방 공급에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 4에 비교하여 나타내었다.

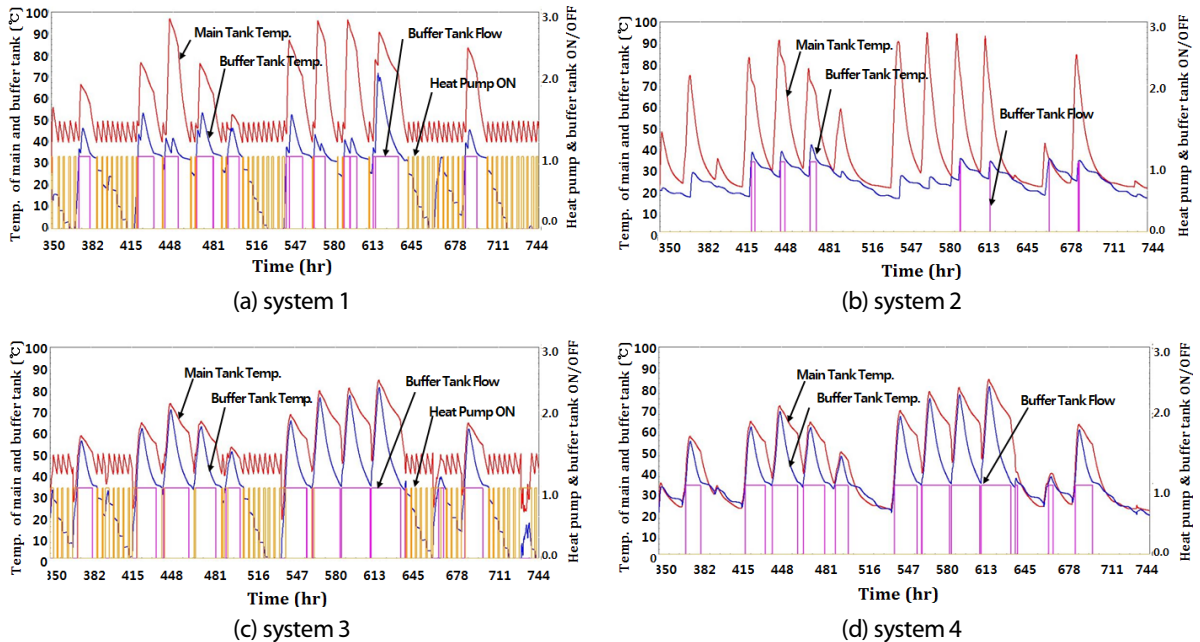


Fig. 4 Simulation results of four systems

히트펌프의 유무와 작동유체의 순환 방식에 따라 메인탱크와 버퍼탱크의 평균 온도는 큰 차이가 있으며, 히트펌프의 운전과 버퍼탱크에서의 난방 공급도 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 메인탱크의 온도는 온도제어방식인 시스템 1과 2가 순차적 유동 시스템 3과 4에 비해 높은 반면, 버퍼탱크의 온도는 이와 반대의 현상을 보이고 있다.

시스템 2의 경우 버퍼탱크의 평균 온도가 20°C까지 내려가는 것으로 나타나고 있고, 그 원인으로는 메인탱크에 비해 축열량이 상대적으로 적은 상태에서 급수가 1차로 버퍼탱크로 공급되는 영향에 기인하는 것으로 판단된다. 시스템별 버퍼탱크 유동 비교에 의하면 난방공급은 시스템 1과 2에서는 메인탱크에서 이루어지는 비

율이 높고, 시스템 3과 4에서는 버퍼탱크에서 1차공 공급되는 비중이 높은 것으로 보인다. 동일한 축열 시스템의 경우에는 히트펌프가 있는 경우에 버퍼탱크에서의 난방공급 비중이 없는 경우에 비해 높은 것으로 나타나고 있다.

시스템 2는 버퍼탱크에서 난방 공급횟수가 7회이나 시스템 4의 경우 버퍼탱크 온도가 높게 유지되고 있어 난방 공급이 12회의 긴 시간 동안 이루어지고 있음을 알 수 있다. 또한 히트펌프의 운전시간은 시스템 1이 3에 비해 다소 긴 것으로 나타나고 있다. 이것은 난방 공급이 주로 메인 탱크에 의해서 이루어지고 있는 것에 따른 운전 형태의 결과로 분석된다.

4.2 열성능 평형

Table 3은 시스템 1(a)에 대한 집열기 획득 열량(Q_{gain}), 메인탱크와 버퍼탱크의 축열량(Q_{g1}, Q_{g2}, Q_{hp1})과 방열량(Q_{dhw}, Q_{sh}), 온수급탕과 난방부하열량(Q_{dhw}, Q_{shload}), 급탕과 난방의 보조열량(Q_{hwaux1}, Q_{shaux1}), 히트펌프의 소요동력(P_{hp})을 나타낸다. 시스템에 있어 탱크를 중심으로 공급되는 열량은 양으로, 방출된 열량은 괄호() 값으로 나타내었다.

Table 3 Heat balance of the system 1 for heating periods (unit : MJ)

Year	TMY Coll.		Main Tank				Buffer Tank				Load				
	Qit	Qgain	Qg1	Qdhw1	Qhp1	Qsh1	Qg2	Qdhw2	Qhp2	Qsh2	Qdhw	Qhwaux1	Qshload	Qshaux1	Php
Jan	11133	4811	(1209)	935	(3724)	3173	(3590)	488	2537	725	1526	103	17313	13416	1205
Feb	12193	4704	(1200)	826	(3222)	2885	(3495)	510	2199	659	1425	88	14314	10767	1040
Mar	13946	5466	(1373)	689	(2977)	2807	(4078)	745	2088	1021	1536	102	11503	7673	905
Apr	13988	4846	(1716)	466	(1731)	2095	(3115)	481	1222	1074	998	50	6042	2869	517
Nov	10389	4556	(1102)	755	(3390)	2986	(3444)	316	2347	657	1173	102	9668	6022	1061
Dec	9302	4348	(667)	941	(4215)	3247	(3674)	346	2879	585	1408	121	15112	11281	1359

집열량은 Fig. 3의 기상자료에 의한 월평균 일사량 추세와 동일하게 4월에 가장 많고, 12월에 가장 적은 것으로 나타났다. 집열 효율은 6개월 평균 41.2%에 이르고 있다. 특히 12월에는 집열기에서 경사면 전일사량이 9,302 MJ에서 4,348 MJ의 열량이 획득되어 집열효율이 47%에 달한다. 태양열 시스템의 우수한 열에너지 변환성을 잘 나타낸 준다.

태양열 에너지는 높은 온도 영역의 메인탱크보다 낮은 온도를 유지하는 버퍼탱크에 대부분 축열되는 것으로 나타났다. 따라서 히트펌프는 저온 버퍼탱크의 열에너지를 메인탱크에 이동시키고, 온수급탕과 난방 공급에 필요한 열의 70% 이상을 감당하는 것으로 나타났다. 또한 시스템에 저장되는 열에너지의 88%는 난방부하에 사용되고, 주로 메인탱크에 의해 이루어지고 있다.

온수급탕 공급율은 6개월 평균 93%로 매우 높은 상태이다. 보조열량은 온수 급탕 설정온도 55°C와 히트펌프 운전 평균온도 50°C의 온도차 $\Delta T 5^\circ\text{C}$ 에 따른 것으로 온수 급탕은 보조 가열기 없이 설정 온도의 조정으로 시스템에 의해 충분히 공급될 수 있을 것으로 판단된다. 시스템1에 대한 열성능 평형 분석 결과 시스템에 공급되고 방출되는 전체 열에너지는 잘 일치하고 있어 시스템 유형에 따른 성능의 비교가 가능한 것으로 판단된다.

Fig. 5에는 각각의 시스템 유형에 대한 1월 한 달 메인탱크와 버퍼탱크에 출입된 열에너지를 비교하여 나타내었다. 히트펌프의 유무와 유동 제어 방식에 따라 집열기로부터 두 탱크에 저장되는 열량 Q_{g1}, Q_{g2} 에 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 집열량($Q_{g1} + Q_{g2}$)은 시스템 1이 4,799 MJ로 가장 많고, 히트펌프가 없는 시스템 2가 가장 작은 것으로 나타났다. 이는 축열이 메인탱크에서 주로 이루어져 메인탱크와 버퍼탱크의 온도차가 크고 집열 운전 시간이 짧은 결과로 보인다. 한편 시스템 3과의 비교에서는 시스템 1의 집열효율이 6.6% 높은 것으로 나타나고 있다.

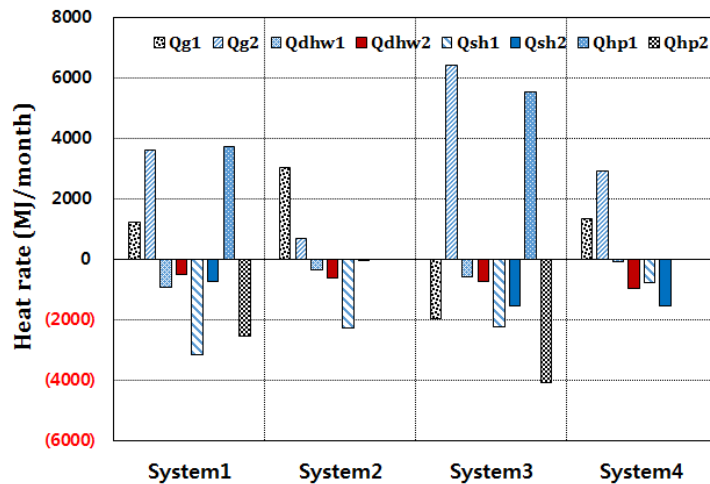


Fig. 5 System heat balance in the main and buffer storage tank

순차적 유동방식의 경우 집열량은 히트펌프가 있는 시스템 3이 시스템 4보다 높은 것으로 나타나고 있다. 두 시스템 간에는 온도제어 유동방식에 비해 그 차이가 상대적으로 작은 것으로 나타나고 있다. 시스템 3의 경우 히트펌프에 의해 메인탱크와 버퍼탱크간에 열교환 이동에 역전현상이 일어나고 있어 사전에 시스템 운전 설계에 반영이 필요한 것으로 나타났다.

한편 히트펌프가 없는 순차적 유동방식 시스템 4의 집열 효율이 시스템 2에 비해 높은 것은 온도제어 유동방식의 축열이 주로 메인탱크에서 이루어지는 것과 대조적으로 메인탱크와 버퍼탱크에서 균일하게 이루어지고 있기 때문인 것으로 판단된다.

4.3 태양열 의존율

태양열 시스템의 설비 용량에 대한 설계 사항으로 태양열 의존율은 온수급탕과 난방에 필요한 부하 중 태양

열 시스템으로 얼마나 많은 양의 에너지를 공급하는가를 판단하는 기준이다. 따라서 태양열 의존율은 설비 각각의 성능을 나타내기보다 전체 시스템 차원에서 부하에 대응한 설비 열용량을 나타내는 지표이므로 동일한 용량의 시스템 열성능 비교에 의미가 있다.

태양열 의존율(f)은 시스템에서 설계한 온수급탕 및 난방 부하를 충족하는데 필요한 전체 열에너지 부하(Q_{load})에 대한 태양열 시스템에서 실제 공급한 열에너지($Q_{used,act}$)의 비로 정의하여 다음 식(1)에 의하여 산출된다.

$$\begin{aligned}
 f &= Q_{used,act} / Q_{Load} = (Q_{Load} - Q_{Aux}) / Q_{Load} \\
 &= 1 - Q_{Aux} / Q_{Load}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

시스템 유형에 따른 시뮬레이션 6개월에 대한 월별 태양열 의존율을 Fig. 6에 비교하였다. 시스템 1의 태양열 의존율은 6개월 평균 39%로 시스템중 열성능이 가장 우수하고, 시스템 2는 32.3%로 가장 낮은 상태이다. 히트 펌프를 통해 시스템 성능이 25% 향상됨을 알 수 있다. 반면 순차적 유동 방식의 시스템 3과 4의 태양열 의존율은 각각 37%와 35%를 나타낸다. 시스템4는 전형적인 차온제어방식의 태양열 시스템에 해당하는 것으로 시스템 1의 태양열 의존율이 4% 높게 나타나고 있다. 히트펌프를 활용한 태양열 시스템의 성능이 10% 크게 향상되는 것을 의미한다.

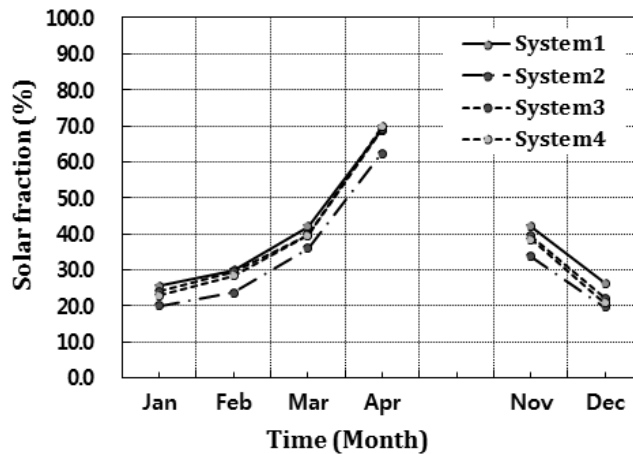


Fig. 6 Monthly solar fraction

시스템 유형별 집열효율은 각각 41.2%, 32.3%, 38.4%, 37.1%로 나타나고 있어 히트펌프의 유무와 작동유체 순환 방식에 따라 시스템의 열성능에 큰 차이가 있다는 것을 보여준다. 시스템1의 경우에도 12월과 1월, 2월 태양열 의존율이 30% 이하로 매우 낮고, 3월과 11월은 40% 수준을 나타낸다. 부하가 비교적 작은 4월의 경우에도 태양열 의존율이 70% 정도여서 태양열 의존율을 높일 수 있는 방안이 필요하다.

4.4 온수급탕 및 난방 부하

시스템 성능을 좀 더 상세하게 파악하기 위해 온수공급과 난방 공급율을 Figs. 7과 8에 비교하였다. 히트펌프가 있는 경우 운전 제어방식과 무관하게 90% 이상의 온수공급이 가능하다. 반면 태양열 의존율과 마찬가지로 히트펌프가 없는 시스템2는 평균 76%로 가장 낮은 공급을 보인다. 이것은 시스템의 인위적인 온도 제어방식에 따른 집열량 감소로 메인탱크의 평균 온도가 낮아 상대적으로 온수급탕 공급에 필요한 보조 열량이 증가한 결과로 분석된다.

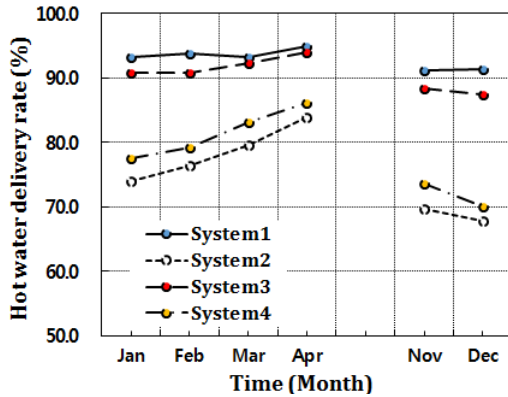


Fig. 7 Monthly hot water delivery

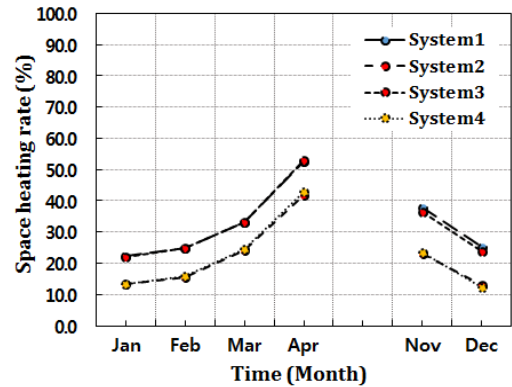


Fig. 8 Monthly space heating

히트펌프가 없는 시스템의 경우에도 비교적 높은 수준의 온수급탕 공급이 이루어지고 있어 동절기 가정용 온수급탕 설비로 충분히 활용될 수 있을 것으로 기대한다. 히트펌프 사용에도 불구하고 보조열량이 공급된 것은 히트펌프 운전 평균온도 50°C와 급탕 온도 55°C의 온도차 5°C에 따른 것으로 보조가열기 없이 설정 온도의 변경만으로 온수급탕 공급이 가능할 것으로 판단한다.

난방부하에 대한 시스템의 열에너지 공급은 Fig. 8과 같이 온도제어나 순차 유동제어 방식에 따라 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 단지 히트펌프가 있는 시스템 1과 3의 경우 동절기 평균 난방부하 공급율이 33%를 나타내고 있고, 히트펌프가 없는 경우에 비하여 약 10% 높은 것으로 히트펌프에 의해 난방공급 능력이 크게 향상되는 것을 알 수 있다. 한편 난방부하가 가장 필요한 1월과 12월에 난방 공급율은 24%에 불과하여 온수급탕 공급과는 다르게 보다 큰 난방공급 설비가 필요하다. 히트펌프가 기존의 보조 열원 장치 역할을 수행할 수 있고 보조 열원 없는 시스템의 가능성을 제시해 준다.

4.5 히트 펌프

히트펌프는 집열기로부터 축열된 저온 영역의 버퍼탱크의 열에너지를 높은 온도영역의 메인탱크로 이동시켜 버퍼탱크의 저온 영역에 대한 이용 범위를 넓히고 일사량이 적은 경우에도 집열기 집열순환을 가능하도록 만들어 저온 영역의 유효에너지가 증대되는 효과를 기대할 수 있다.

히트펌프의 성능은 히트펌프의 구동에 소요된 동력에 대한 고온측 공급열량의 비로 정의하여 식(2)과 같이 성적계수 COP (Coefficient of performance)로 나타낸다.

$$COP = Q_{hp1} / P_{hp} \tag{2}$$

여기서 Q_{hp1} 은 히트펌프의 난방용량으로 메인탱크에 공급되는 열량이며 P_{hp} 는 난방모드에서 히트펌프 구동에 필요한 동력이다.

태양열 시스템에 히트펌프를 활용하는 경우 축열과정, 즉 집열 순환방식에 따른 히트펌프의 성능을 비교는 전체 시스템 성능과 함께 운전 특성을 파악할 수 있다. Fig. 9는 시스템 1과 시스템 3에 대한 히트펌프 성적계수를 나타낸 것으로, 시스템 3의 성적계수는 6개월 평균 3.75로 시스템 1의 3.15에 비해 높게 나타났다. 이것은 집열기의 축열 방식에 의해 히트펌프의 열원으로 사용하고 있는 버퍼탱크의 온도에 따른 결과로, 시스템 3의 버퍼탱크 온도가 시스템 1 보다 높게 유지되기 때문인 것으로 파악된다.

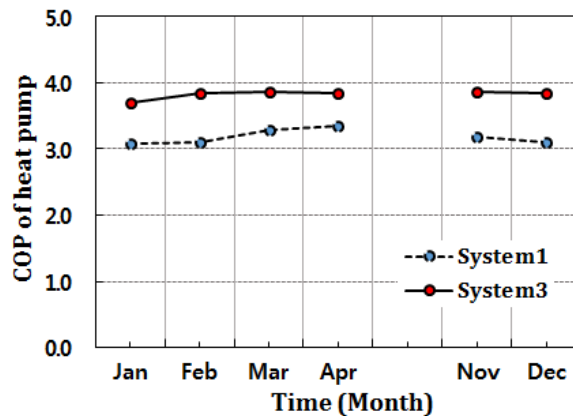


Fig. 9 Performance of heat pump(COP)

5. 결론

본 논문에서는 온수급탕 및 난방부하 공급을 위한 태양열 집열 시스템의 활용에너지를 극대화하기 위한 히트 펌프 연계형 태양열 시스템을 제안하고 이를 트랜시스 해석을 통해 가능성을 실험한 것으로, 제어 및 시스템 구성 등 전반적으로 대상 시스템과 프로그램 활용을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 히트펌프의 유무와 작동유체의 집열 순환 방식에 따라 메인탱크와 버퍼탱크의 온도는 큰 차이를 보이고 있으며, 히트펌프의 운전 시간과 버퍼탱크의 난방 공급도 시스템별 큰 차이가 있는 것으로 나타나고 있어 시스템 구성과 운전이 성능에 많은 영향을 미치고 있음을 확인하였다.
- (2) 히트펌프를 이용한 태양열 시스템 1의 태양열 의존율은 39%로 히트펌프가 없는 시스템 2와 비교할 때의

존율의 경우 6.7% 높아 열성능이 크게 향상되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 집열효율은 6개월 평균 41.2%로 태양열 시스템의 에너지 변환성이 매우 우수하다.

- (3) 시스템 3과 4의 태양열 의존율은 각각 37%와 35%이고, 집열 효율은 38.4%와 37.1%로 나타나고 있다. 히트펌프의 유무와 작동유체의 순환 방식이 시스템 열성능에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 특히 시스템 1의 태양열 의존율은 시스템4에 비해 4% 높은 것으로 차온제어방식의 전형적인 태양열 시스템에 비해 10%의 성능이 향상되고 있다.
- (4) 온수급탕 공급율은 히트펌프가 있는 시스템 1과 3의 경우 평균 93%와 90%에 달하고 있다. 또한 히트펌프가 없는 시스템 2와 4의 경우에도 평균 76%와 78.3%에 달하고 있어 최소한의 보조가열기를 갖춘 동절기 가정용 온수급탕 설비로 충분히 활용될 수 있는 것으로 판단된다.
- (5) 한편 시스템 1과 3의 난방부하 공급율은 제어방식과 무관하게 6개월 평균 33%에 달한다. 히트펌프가 없는 시스템 2와 4에 비해 약 10%가 높게 나타나고 있어 히트펌프는 시스템의 성능 향상과 안정적인 온수급탕 및 난방 공급에 매우 중요한 역할을 한다.
- (6) 히트펌프의 성능은 시스템 3의 성적계수(COP)가 평균 3.75로 시스템1의 3.15에 비해 우수한 것으로 나타났다. 유동 제어방식의 차이에 의해 시스템3의 버퍼탱크 온도가 시스템 1 보다 높게 유지된 결과이지만 시스템 전체적으로 운전 특성과 온수급탕 및 난방 공급 능력을 감안할 때 시스템 1이 가장 적합한 것으로 판단된다.

REFERENCES

1. Park, J. W., Yoon, J. H., Kwak, H. Y., Lee, J. B., and Shin, U. C., A Study on Building Energy Demand for Design of Energy System on Green Home Apartment, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 33, No. 1, pp. 24-31, 2013.
2. Han, Y. R., Park, Y. C., Performance Prediction of a Hot Water Supply and Panel Heating System with Solar Energy, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 5, pp. 11-17, 2012.
3. Baek, N. C., Jeong, S. Y., Yoon, E. S., and Lee, K. H., 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, 2012.
4. Nam, Y. J., Gao, X. Y., Study on the Performance Prediction Simulation of the Heat Pump System Using solar and Geothermal Heat Source, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 34, No. 3, pp. 75-81, 2014.
5. Lee, D. W., Lee, K. H., The Experimental Research for the Collecting Characteristics of the Passive and Active Type Domestic Solar Hot Water Systems, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 33, No. 6, pp. 12-18, 2013.
6. Sterling, S.J., Collins, M. R., Feasibility Analysis of an Indirect Heat Pump Assisted Solar Domestic Hot Water System, Applied Energy 93, pp. 11-18, 2012.
7. Barnister, C. J., Collins, M. R., Development and Performance of a Dual Tank Solar-assisted Heat Pump System, Applied Energy 149, pp. 125-132, 2015.
8. Philip. F & Danny. P., A Review of Hot Water Draw Profiles Used in Performance Analysis of Residential Domestic Hot Water Systems, Publication No. FSEC-RR-56-04, Florida Solar Energy Center, July 20, 2004.