

태양광열 복합 모듈을 활용한 공기열원 히트펌프 실외기 가열 시스템 개발

주홍진¹ · 안영섭² · 이경호^{3†}

¹한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실, 선임연구원

²한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실, 선임기술원

³한국에너지기술연구원 신재생시스템연구실, 책임연구원

Development and Performance Analysis of an Air Source Heat Pump Outdoor Unit Heating System with Photovoltaic Thermal Modules

Joo Hong-Jin¹ · An Young-Sub² · Lee Kyoung-Ho^{3†}

¹Senior Researcher Ph.D., Renewable Energy System Laboratory, Korea Institute of Energy Research

²Senior Engineer Ph.D., Renewable Energy System Laboratory, Korea Institute of Energy Research

³Principal Researcher Ph.D., Renewable Energy System Laboratory, Korea Institute of Energy Research

[†]Corresponding author: khlee@kier.re.kr

Abstract

In this study, a convergence technology that can be linked with photovoltaic thermal (PVT) modules was derived to increase the performance and efficiency of air source heat pumps that are currently most widely used as cooling, heating, and domestic hot water supply equipment in public buildings. The solar energy and air source heat pump convergence technology developed through this study was an indirect supply type outdoor unit heating system that supplied heat energy acquired through a PVT module by increasing the temperature of the air flowing into the outdoor unit when the heat pump heating mode was operating. A bench-scale test device was designed and manufactured to verify the performance of the outdoor unit heating system of an air source heat pump using a PVT module. The performance evaluation confirmed that the heating performance of the air source heat pump was improved compared with that of the conventional air source heat pump without the heating system under the same test conditions. In addition, the heating demonstration was performed by applying the air source heat pump outdoor unit heating system using a PVT module to the air source heat pump installed at the Seodaemun Fire Station Hongseun 119 Safety Center, where an actual public building was remodeled. Consequently, the air source heat pump was heated. The analysis revealed that COP increased by more than 0.5.

Keywords: 태양광열복합모듈(Photovoltaic thermal module), 공기열원히트펌프(Air source heat pump), 성능계수(Coefficient of performance), 융합시스템(Convergence system), 태양에너지(Solar energy)



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.43, No.6, pp.163-180, December 2023
<https://doi.org/10.7836/kjes.2023.43.6.163>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 22 October 2023

Revised: 5 December 2023

Accepted: 6 December 2023

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.

기호 및 약어 설명

η_{th}	: 태양광열(PVT) 복합 모듈 열 효율(-)
η_{el}	: 태양광열(PVT) 복합 모듈 전기 효율(-)
C_p	: 비열(J/kg·K)
Q_c	: 히트펌프 생산 열량(W)
Q_{th}	: 태양광열(PVT) 복합 모듈 생산 열량(W)
W_{comp}	: 히트펌프 소비동력(W)
W_{fan}	: 팬 소비동력(W)
W_{pump}	: 펌프 소비동력(W)
$\dot{m}_{PVT}$	: 태양광열 복합 모듈을 통과하는 열매체 유량(LPM)
$T_{PVT,i}$	: 태양광열(PVT) 복합 모듈 입구 온도(°C)
$T_{PVT,o}$	: 태양광열(PVT) 복합 모듈 출구 온도(°C)
A_{PVT}	: 태양광열(PVT) 복합 모듈 전면적(m ²)
G	: 일사량(W/m ²)

1. 서론

국내 건물 부문에서 직접적으로 배출되는 온실가스 배출량은 국가 전체 온실 가스 배출량의 7.2%를 차지하며 전력 소비로 인한 간접배출량까지 포함하면 24.7%를 차지할 정도의 높은 비율을 차지하는 실정이다¹⁾. 따라서 건물에서 사용되는 난방, 냉방 및 온수 급탕에 필요한 에너지를 기존 화석연료에서 지속 가능한 에너지원으로의 전환이 반드시 필요하다. 이러한 관점에서 태양에너지와 건물의 통합 기술은 설치 공간이 제한되고 인구 밀집도가 높은 도시 지역에서 건물 부문 탄소 배출을 절감하기 위해 필수적 요소로 부각되고 있다. 특히 신재생에너지 설치 면적이 제한된 건물의 경우 공간 활용성 극대화를 위해 하나의 모듈에서 전기와 열을 동시에 생산할 수 있는 태양광열(PVT) 복합 모듈이 시장에서 높은 관심도를 나타내고 있으며 제품개발 및 상용화를 위한 기술개발이 현재 다양한 국가에서 진행 중에 있다²⁻⁵⁾.

건물에서의 탈탄소화 달성을 위해서는 신재생에너지 적용과 함께 또 다른 중요한 항목으로 난방, 환기 및 공조를 위한 청정기술의 보급이 필요하다. 이를 위해 현재 전 세계 각국에서는 히트펌프를 통한 공간난방, 공간냉방 및 급탕을 공급 하기 위한 필수 기술로 간주되고 있으며 급격한 성장률을 보이고 있다.

IRENA의탄소중립로드맵에 따르면 2050년까지 현재대비 건물용으로 설치되는 태양열의 경우 10.1배, 지열의 경우 5.9배, 히트펌프 경우 12.7배 늘어날 것으로 전망하고 있다. 특히 태양에너지와 히트펌프의 융합을 통해 건물난방과 지역난방용으로 활용하면 에너지자립형 건물 및 도시를 구현할 수 있을 것으로 전망 하고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 공공건축물의 냉·난방·급탕 공급을 위해 현재 가장 널리 사용되고 있는 공기대공기(Air to Air) 히트펌프의 난방 성능 증대 및 효율 향상을 위해 태양광열(PVT) 복합 모듈과 손쉽게 연계가 가능한 융합 기술을 제안하고자 하며 이를 위해 벤치스케일 규모의 성능 시험장치를 통한 성능 시험 및 실증 시스템의 실증운전을 통해 성능 검증을 진행하였다.

2. 문헌고찰

히트펌프는 작동에 사용되는 에너지의 형태에 따라 대표적으로 증기 압축과 열 구동 방식으로 구분할 수 있다. 그 중 태양에너지와 연계된 대표적인 기존의 히트펌프 방식으로는 열 구동 방식의 흡수식 히트펌프와 태양열 집열 시스템과의 연계를 통한 태양열 구동 흡수식 시스템을 들 수 있다. 이에 대한 많은 연구가 진행되어 효율성이 입증되었으나 경제성이 높지 않아 시장에서는 큰 관심을 받지 못하고 있는 실정이다.

공기대공기(Air to Air) 히트펌프 시스템에서 다양한 요인이 히트펌프의 성능에 영향을 미치지만 가장 대표적인 요인으로는 증발과 응축 사이의 온도차 즉 작동 온도라 할 수 있다. 외기 온도를 열원으로 사용하는 공기열원 히트펌프의 대표적인 단점으로는 공기열원의 온도를 제어 할 수 없어 동절기 난방 모드에서 낮은 외기 조건에서 운전이 수행되며 이에 따라 히트펌프의 난방능력과 에너지 효율 저하가 크게 나타나거나 제상 운전이 빈번히 발생하는 문제가 발생된다.

이러한 문제를 해결하고자 다양한 방식의 연구가 수행되었으며 대표적으로 태양에너지와의 연계를 통해 이 문제를 해결하고자 하는 연구가 진행되어 왔다. 문헌을 통해 태양에너지를 이용한 히트펌프(Solar Assisted Heat Pump) 시스템은 Sporn과 Ambrose에 의해 1955년에 최초로 제안되었으며 그 뒤로 태양에너지와 히트펌프가 융합된 다양한 시스템에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. Rossi et al.⁶⁾은 서로 다른 3가지 방식의 기후 조건에서 태양열 집열기와 공기열원 히트펌프를 사용하는 기존 SAHP(Solar Assisted Heat Pump), PV의 발전전력을 통해 구동되는 공기열원 히트펌프 시스템 및 태양광열(PVT) 복합 모듈과 융합된 3가지 시스템을 서로 다른 기후 조건에서 비교하였으며 그 결과 PVT와 공기열원 히트펌프가 융합된 시스템이 PVT의 전기 효율과 1차 에너지 소비 측면에서 더 나은 성능을 나타내는 것으로 나타났다. Emmi et al.⁷⁾은 건물 난방을 위해 태양광열(PVT) 복합 모듈, 지중열원, 공기열원 히트펌프 및 수열원 히트펌프의 4가지 방식의 조합을 제시하였으며 시뮬레이션과 실증을 통해 성능을 검증하였으며 그 결과 실증 운전을 통한 태양광열(PVT) 복합 모듈과 연계된 히트펌프 시스템의 SCOP가 3.62로 다른 3가지 시스템에 비해 통해 에너지 효율을 16 ~ 25% 증가 시킬 수 있는 것으로 나타났다. Simonetti et al.⁸⁾은 기존의 Air to Water 히트펌프와 PV 연계 시스템, 물대물(Water to Water) 히트펌프 시스템과 태양광열(PVT) 복합 모듈 연계 그리고 이중열원 히트펌프 시스템과 태양광열(PVT) 복합 모듈이 연계된 시스템과 같은 세 가지 다른 타입의 태양에너지 연계 히트펌프 시스템에 대한 연간 에너지 및 경제성 평가를 수행하였으며 그 결과 태양광열(PVT) 복합 모듈과 연계된 다중열원 히트펌프 시스템의 경우 동일한 용량의 기존 보일러 대비 77%의 1차에너지 절감이 가능한 것으로 나타났다. Pak et al.⁹⁾은 기존 보일러/칠러

시스템 대비 태양광열(PVT) 복합 모듈과 지열원 히트펌프(GSHP, Ground Source Heat Pmp)가 융합된 시스템에 대하여 초기 설치비용, 운전비용 및 인센티브제도에 따른 경제성 평가를 수행하였으며 그 결과 PVT-GSHP 이 기존 시스템 대비 40.4%의 운전비용 절감 효과를 보일 것으로 분석되었다.

이상과 같이 건물에 냉방·난방·급탕 설비로 현재 많은 보급이 이루어지고 있는 히트펌프 시스템과 하나의 모듈에서 열과 전기를 동시에 생산할 수 있는 태양광열(PVT) 복합 모듈이 연계된 다수의 연구가 수행된 바 있으나 대부분이 물대물(Water to Water) 히트펌프의 수열원으로 태양광열(PVT) 복합 모듈을 통해 획득한 태양 에너지를 사용하는 방식으로 적용성 및 수용성의 한계가 있는 시스템이 대부분으로 히트펌프 시스템 중 가장 경제적이고 보급이 활발히 이루어지고 있는 공기대공기(Air to Air) 또는 공기대물(Air to Water)방식의 히트 펌프 시스템과 직접적으로 연계 시킬 수 있는 관련 연구는 미진한 실정이다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 Bench-Scale 실험 장치

본 연구에서는 태양광열(PVT) 복합 모듈과 공기대공기(Air to Air) 히트펌프와의 융합 기술을 도출하기 위하여 간접공급 방식의 공기열원 히트펌프의 실외기 가열 시스템을 개발하였다. 본 연구를 통해 제안한 간접공급 방식의 공기열원 히트펌프의 실외기 가열 시스템은 태양광열(PVT) 복합 모듈을 통해 획득한 태양열에너지를 히트펌프 난방 모드 가동시 실외기로 유입되는 공기를 승온 시켜 공급하는 방식으로 구성하였으며 태양광열 (PVT) 복합 모듈을 이용한 공기열원 히트펌프 실외기 가열 시스템의 성능 검증을 위한 벤치스케일 규모의 시험 장치를 설계 및 제작하였다. Fig. 1은 간접공급 방식의 태양광열 복합 모듈을 활용한 공기열원 히트펌프 실외기 가열 시스템의 개념을 나타낸 것이다.

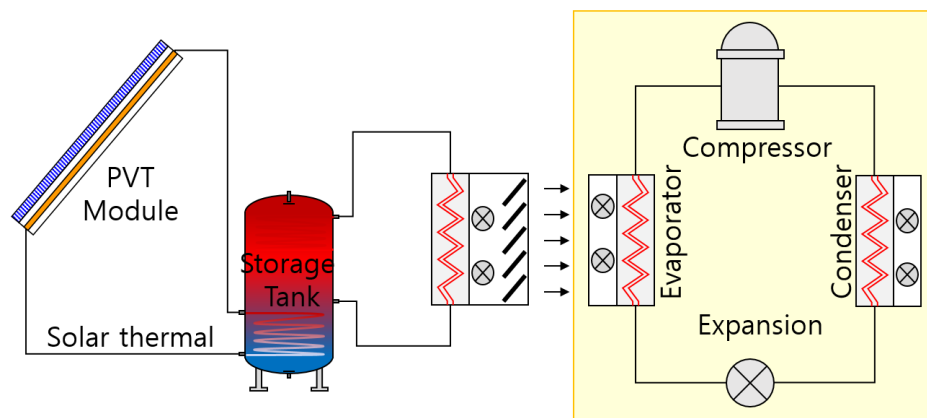


Fig. 1 Concept of air source heat pump outdoor unit heating system

벤치스케일 규모의 태양광열(PVT) 복합 모듈과 공기열원 히트펌프의 융합 시스템은 현재 상용화되어 실제 현장에서 사용되고 있는 공기열원 히트펌프와 태양광열(PVT) 복합 모듈을 활용가능하도록 벤치스케일 규모의 실험 장치를 구축하였으며 태양광열(PVT) 복합 모듈을 통해 획득한 태양열에너지를 열저장 장치인 수축열 축열조에 저장한 후 공기열원 히트펌프 난방 모드 동작시 축열조로부터 온수를 팬코일 유닛에 공급 하여 팬코일 유닛으로부터 온도가 상승된 공기를 히트펌프 실외기에 직접 공급하는 방식을 도입하였다. Fig. 2는 벤치스케일 공기열원 히트펌프의 실외기 가열 시스템의 구성도를 나타낸 것이다.

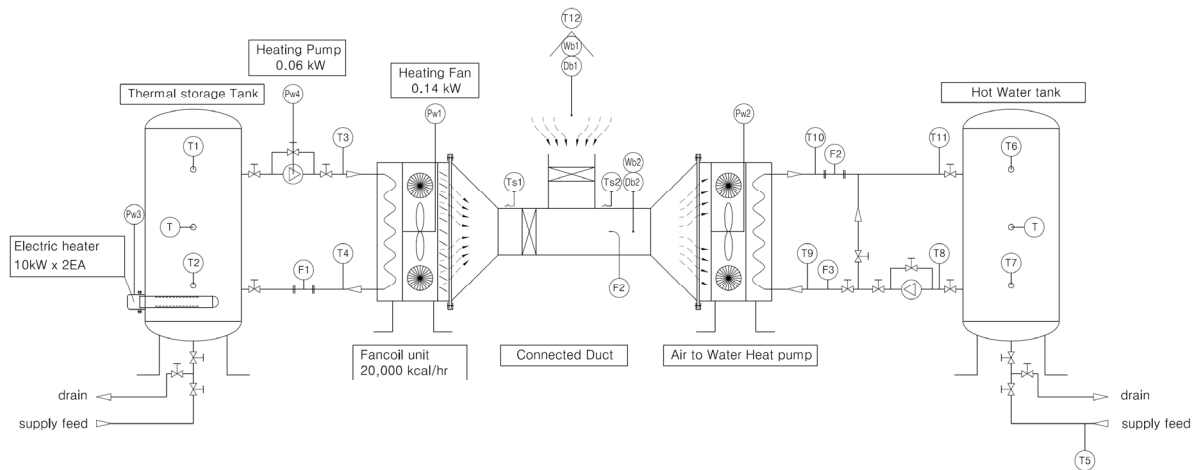


Fig. 2 Schematic diagram of bench scale experimental testing apparatus

벤치스케일 규모의 공기열원 히트펌프 실외기 가열 시스템의 구성은 액체식 태양광열(PVT) 복합 모듈을 모사할 수 있는 전기 히터가 장착된 수축열 축열조, 수축열 축열조로부터 온수를 팬코일 유닛에 공급할 수 있는 배관 설비, 공급 받은 온수를 공기와 열교환 시키는 방식의 팬코일 유닛, 가열된 공기가 히트펌프 실외기로 이송할 수 있는 덕트 및 히트펌프로 구성하였다. Table 1은 벤치스케일 규모의 공기열원 히트펌프 실외기 가열 실험 장치의 상세 사양을 나타낸 것이다.

Table 1 Specifications of experimental devices for Bench scale

Item	Capacity
Thermal storage tank	650 Litter
Hot water tank	300 Litter
Fancoil unit	20,000 kcal/hr
Heating Fan	0.14 kW
Heating Pump	0.06 kW
Electric heater	20 kW
Air to Water Heat Pump	12 kW

3.2 실증시스템

태양광열(PVT) 복합 모듈을 활용한 공기열원 히트펌프의 실외기 가열 시스템의 성능 검증을 위해 공공건물인 서대문소방서홍은119안전센터(이하 홍은119안전센터)에 실증시스템을 구축하여 실증운전을 수행하였다. 실증시스템이 적용된 홍은119안전센터 건물은 1992년 구축된 건물로 연면적 662.7 m^2 의 지하 1층, 지상 3층 건물이다. 이 중 태양광열(PVT) 복합 모듈과 융합된 공기열원 히트펌프를 통해 냉/난방이 공급되는 공간은 2층에 위치한 구급대기실(남, 여) 공간과 독서실 공간으로 냉난방 공급 면적은 약 65 m^2 이다. 또한 이와 함께 화장실 두 곳과 샤워실에는 급탕을 공급 할 수 있도록 시스템을 구성하였다. Fig. 3은 실증시스템이 적용된 홍은119안전센터 전경 및 실증시스템을 통해 냉난방 급탕이 공급되는 2층 공간의 평면도를 나타낸 것이다.

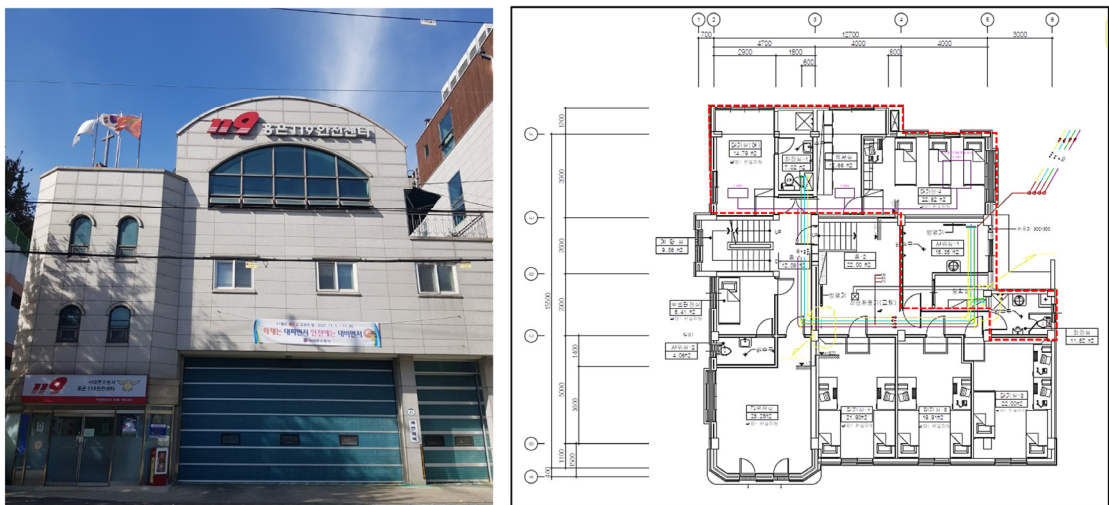


Fig. 3 Demonstration building and drawing

홍은119안전센터에 적용된 실증 시스템의 구성은 냉/난방을 담당하는 공기대공기(Air to Air) 히트펌프와 급탕을 담당하는 공기대물(Air to Water) 히트펌프 두 대가 동시에 적용되었으며 이 중 태양광열(PVT) 복합 모듈을 통해 동절기 난방 모드시 실외기를 가열하는 시스템은 냉/난방을 담당하는 공기대공기(Air to Air) 히트펌프에만 적용하였다. 실증시스템에 적용한 냉/난방을 위한 공기대공기(Air to Air) 히트펌프는 8 kW 급 L사의 상용 히트펌프를 사용하였다. Fig. 4는 홍은119안전센터에 적용된 실증 시스템 구성도를 나타낸 것이며, Fig. 5는 냉난방을 담당하는 공기열원 히트펌프 실외기에 장착된 실외기 가열기와 DEC (Direct Evaporative Cooling)가 일체화된 열원덕트 시스템의 장착 모습을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 상용 공기열원 히트펌프에 일체화시킬 수 있는 형태이며 공기대공기(Air to Air) 히트펌프의 실외기에 필요한 공기유량을 충분히 확보할 수 있도록 자동댐퍼를 통해 상부 쪽의 외기 유입이 이루어지도록 구성하였다. 또한 실외기 가열기의 작동 없이도 공기열원 히트펌프가 정상적으로 동작 할 수 있도록 실외기 상부에 외기 유입 덕트를 자동 댐퍼를 사용하여 조절 할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

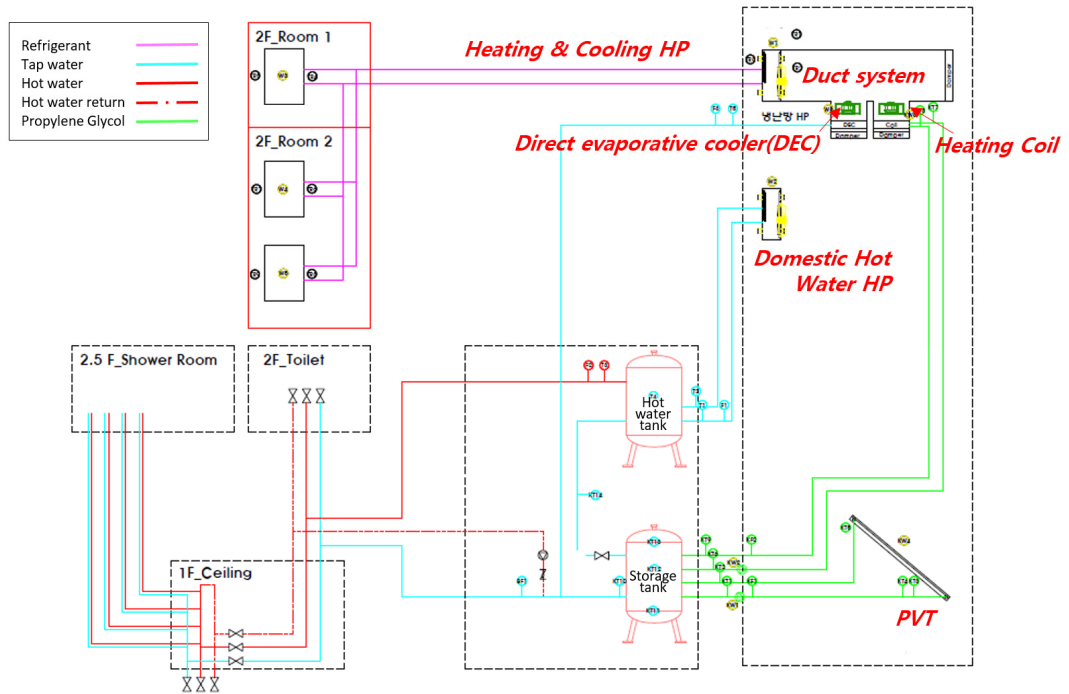


Fig. 4 Schematic diagram of demonstration system

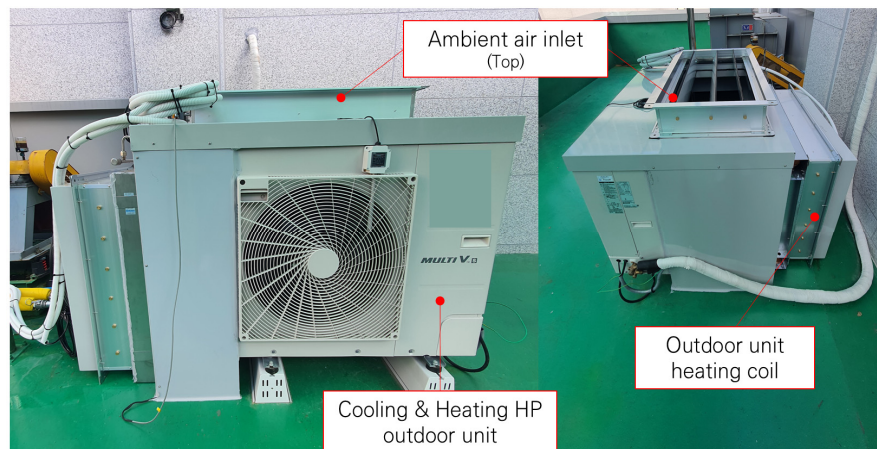


Fig. 5 Outdoor unit of air to air heat pump in demonstration system

실증시스템에 적용된 공기대공기(Air to Air) 히트펌프의 실외기 가열을 위한 태양광열(PVT) 복합 모듈은 홍은119안전센터 4층 옥상에 8매 전면적 기준 약 16 m^2 의 면적이 설치 되었으며 실증 건물의 지형적 특성에 따라 정남향이 아닌 동남향으로 설치 되었다. 실증시스템에 적용된 태양광열(PVT) 복합 모듈의 용량은 전기 2.64 kWp, 열 4.24 kWth이며 태양광열(PVT) 복합 모듈을 통해 획득한 태양열에너지는 650 Litter 용량의 축열조에 저장된 후 공기대공기(Air to Air) 히트펌프의 난방 모드 동작시 축열조에 저장된 열매체를 실외기 가열기에 공급하는 방식으로 시스템을 구성하였다. Fig. 6은 홍은119안전센터 4층에 설치된 액체식 평판형 태양광열(PVT)

복합 모듈의 계통도와 설치 모습을 나타낸 것이며 Fig. 7은 홍은119안전센터 3층에 위치한 체력단련실 내에 설치된 기계실을 나타낸 것이다. Table 2는 실증시스템의 상세 사양을 나타낸 것이다.

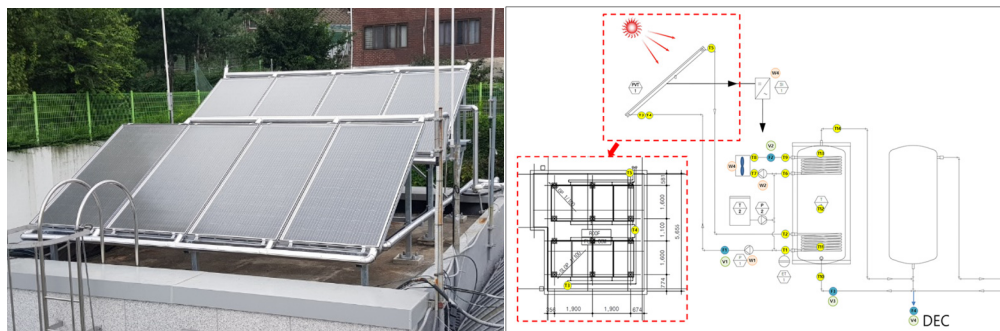


Fig. 6 Photovoltaic Thermal modules view of demonstration system



Fig. 7 Machine room view that demonstration system is installed

Table 2 Specification of experimental setup for demonstration

Item	Capacity
Photovoltaic Thermal modules	8 EA, 16 m ²
Installaion angle	30°
PVT module	Power 332 W, Thermal 6.56 MJ/m ²
Storage Tank	640 Litter
Fancoil unit	20,000 kcal/hr
Heating Fan	0.16 kW
Heating Pump	0.13 kW
Air to Air Heat Pump	8 kW

4. 결과 및 고찰

4.1 Bench-Scale 실험 방법 및 결과

공기열원 히트펌프의 실외기 가열 시스템의 성능 평가를 위해 앞서 기술한 바와 같은 용량으로 벤치스케일 규모의 실험장치를 한국에너지기술연구원 S5동 지하 1층에 구축하여 성능 평가를 수행하였다. 벤치스케일 규모의 실험 장치에 사용된 공기대물(Air to Water) 히트펌프 실외기 부분에 태양광열(PVT) 복합 모듈을 모사한 축열조와 팬코일 유닛을 통해 실외기 전면에 가열된 공기를 일정한 조건으로 공급할 때와 외부 공기 열원을 통해 운전되는 일반 운전 모드에서의 히트펌프의 성능계수인 COP를 정량적으로 비교하였다. 벤치스케일 규모의 성능시험에서 실외기 가열기의 효과를 입증하기 위해 수행된 실험조건으로는 실외기 가열을 위해 축열조로부터 팬코일 유닛으로 공급되는 온수의 유량과 온도는 35 LPM 및 45°C이며, 온수 탱크 내부 유체 전체 온도를 25°C로 전체 믹싱 이후 히트펌프를 통해 탱크 상부 및 하부의 평균 온도가 47°C가 될 때까지의 가열 시간 및 전력량을 측정하였다. 이때 히트펌프 내부에 순환되는 유량은 35 LPM으로 고정하였다. 이와 같은 조건으로 실외기 가열기 전면에 축열조로부터 온수를 공급받아 팬코일 유닛을 통해 온도가 상승된 공기를 공급 할 때와 일반 외기 온도를 공급 받을 때의 성능을 비교 하였다.

벤치스케일 규모의 각각의 실험장치 유체의 입·출구 온도를 측정하기 위해 사용된 온도센서는 4 Wire RTD를 설치하여 측정하였고, 배관 덕트의 풍속, 온습도는 CTV210를 이용하여 측정하였다. 실외기 가열기 팬코일 유닛 및 시수탱크의 유량은 GF630 전자식유량계를 사용하여 유량을 측정하였으며 히트펌프의 소비 전력 및 실외기 가열기의 팬 소비동력, 실외기 가열기에 온수 공급을 위한 펌프 소비동력을 측정하기 위해 GEMS3500 다채널 전력량계를 사용하여 각각의 전력을 측정하였다. 실험장치에 설치된 모든 센서는 34972A 데이터 수집 장치를 통해 수집하였으며 Labview 프로그램을 이용하여 실시간 데이터 확인 및 데이터를 저장 할 수 있도록 모니터링 시스템을 구축하였다. Fig. 8은 벤치스케일 규모의 실험장치의 모니터링 화면을 나타낸 것이다. Table 3에는 실험에 사용된 측정기기들의 사양을 나타낸 것이다.

Table 3 Specifications of measuring devices for bench scale set up

Measurement Target	Measurement Sensors and Equipments	Accuracy
Temperature	4 Wire RTD	$\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
Water mass flow	GF630	$\pm 0.3\%$
Electrical power	GEMS3500	$\pm 0.5\%$
Air velocity	CTV210	$\pm 3\%$
Data logger	34972A / Switch	-

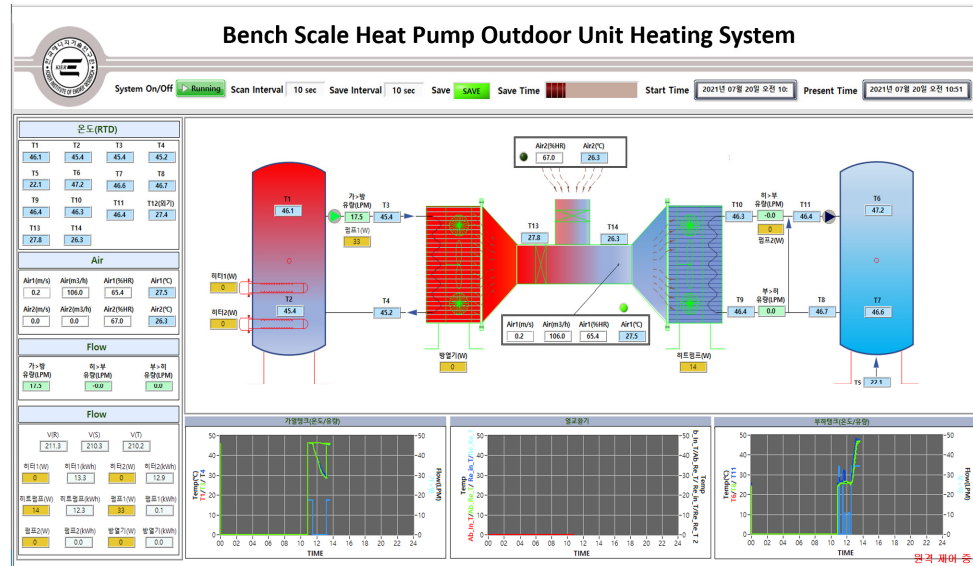


Fig. 8 Monitoring system of bench scale experimental testing apparatus

벤치스케일 규모의 실험데이터 분석에는 다음과 같은 식을 사용하였으며, 공기대물(Air to Water) 히트펌프를 통해 생산된 열량은 식(1)을 사용하여 계산하였으며, 실외기 가열기 사용 유무에 따른 공기대물(Air to Water) 히트펌프의 성능계수인 COP 비교를 위한 계산은 식(2), (3)을 사용하였다.

$$Q_c = \dot{m}_{HP} C_p \Delta T \quad (1)$$

$$COP_{normal} = \frac{Q_c}{W_{comp}} \quad (2)$$

$$COP_{heating} = \frac{Q_c}{W_{comp} + W_{fan} + W_{pump}} \quad (3)$$

식(3)에서 W_{fan} 과 W_{pump} 는 실외기 가열기 사용에 있어서 팬코일 유닛을 통해 상승된 공기를 불어주기 위해서는 별도의 동력장치인 팬과 펌프가 필요하며 따라서 이러한 동력 장치에 작동에 필요한 소비전력을 포함시키면 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 9는 벤치스케일 실험 장치의 실외기 가열 모드일 때와 일반 모드에서의 공기대물(Air to Water) 히트펌프의 온수 생산 온도를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 실험 시작전 급탕 탱크의 상, 하 온도를 믹싱하여 25°C를 유지한 상태에서 히트펌프를 가동하여 급탕 탱크의 상하 평균 온도가 46°C가 될 때까지의 소요시간을 비교하였다. 그 결과 일반 외기 온도를 사용하는 모드에서는 오히려 급탕 탱크의 초기 온도가 약 0.8°C높은

상태인 25.6°C에서 시작하였음에도 불구하고 탱크 상, 하부 평균 온도가 46°C에 도달하기 위해 소요된 시간은 55분인 반면 동일한 조건에서의 실외기 가열에서는 약 9분 정도의 히트펌프 작동시간이 감소된 것으로 나타났다. 이를 통하여 히트펌프 열원온도를 상승시켜 히트펌프의 난방출력이 향상되었음을 알 수 있다.

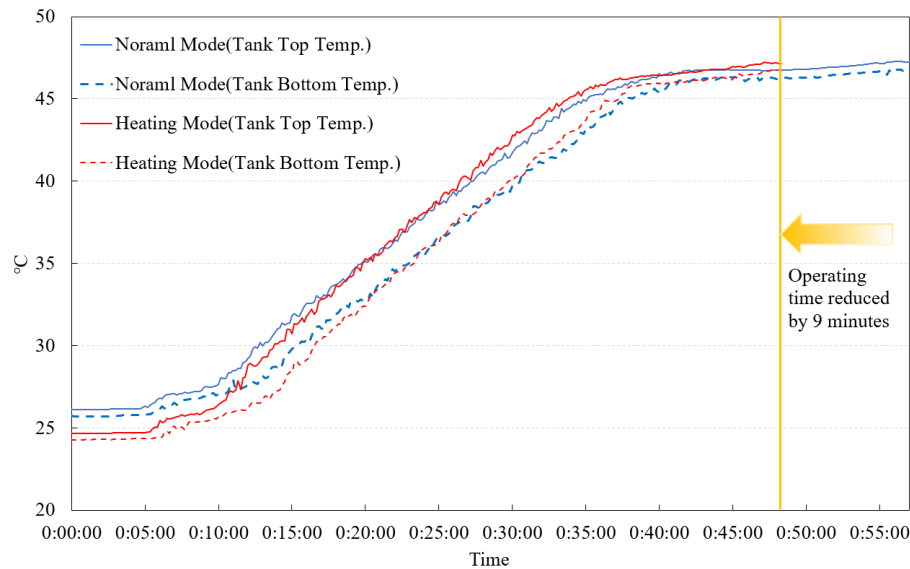


Fig. 9 Comparison of normal mode and heating mode operating time

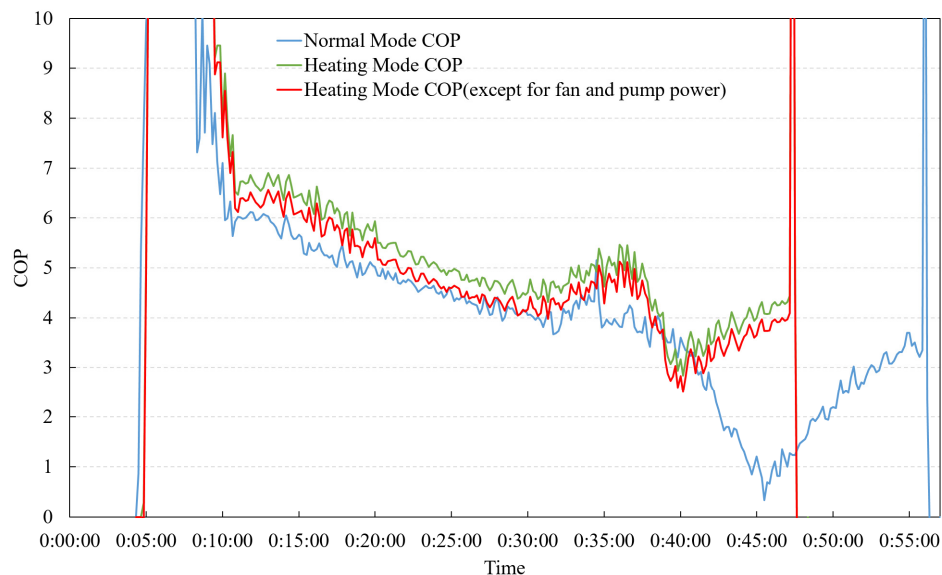


Fig. 10 Comparison of normal mode and heating mode COP

Fig. 10은 같은 실험에서의 실외기에 외기가 유입되는 일반모드, 실외기 가열기 작동 모드 및 실외기 가열 작동모드에서 팬코일 유닛트에 소요되는 팬 및 펌프의 소비동력을 제외한 공기대물(Air to Water) 히트펌프의 성

능계수인 COP를 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와같이 일반 모드에서의 COP가 실외기 가열 모드 조건에서의 COP 보다 낮게 유지되는 것을 알 수 있다. 일반모드에서의 평균 COP는 4.54로 나타났으며 실외기 가열모드 조건에서는 평균 COP는 5.55로 나타났다. 따라서 실외기 가열 모드를 통해 일반 모드 대비 약 18.2% 정도의 COP 상승효과를 나타내었다. 이와 함께 실외기 가열 모드에서 실외기에 공급되는 공기를 가열하기 위해 사용된 팬코일 유닛의 팬 및 펌프 소비동력을 포함하여도 평균 COP 는 5.08로 나타났으며 일반 모드 대비 COP는 10.6%가 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 벤치스케일 실험 결과를 통해 공기열원 히트펌프의 실외기 가열 방식의 효율성을 입증 할 수 있다고 판단되었다.

4.2 실증시스템 실험 방법 및 결과

공기열원 히트펌프의 실외기 가열 시스템의 실증 평가를 위해 앞서 전술한 바와 같이 홍은119안전센터에 시스템을 구축하여 난방기 실증 운전을 수행하였다. 실증시스템에 적용된 공기열원(Air to Air 및 Air to Water) 히트펌프 두 대 중 거주용 공간의 냉/난방을 담당하는 공기대공기(Air to Air)타입의 히트펌프에만 실외기 가열 시스템을 부착하였으며 동절기 난방 모드 조건에서 실외기 가동 시간에는 태양광열(PVT) 복합 모듈을 통해 가열된 축열조의 상부 온도가 외기 온도보다 높으면 실외기 가열기 팬코일 유닛에 열매체를 공급하는 조건으로 실증 운전을 수행하였다. 만약 축열조 내부의 열매체 온도가 외기 온도보다 낮을 경우는 실외기 가열기에 장착된 자동 댐퍼를 통해 외기가 유입되도록 시스템 및 제어를 구성하였으며 실외기 가열기에 적용된 팬코일 유닛 및 배관의 동파를 방지하기 위하여 실외기 가열기에 공급되는 열매체는 프로필렌글리콜 부동액을 40% 농도로 맞추어 운전을 수행하였다. 실증시스템의 공기대공기(Air to Air)히트펌프 실외기 가열기에 공급되는 열매체의 유량은 18.3 LPM이며 공급온도는 앞서 전술한 바와 같이 외기 온도보다 높을 경우 축열조에 축열된 열 에너지를 활용 하도록 제어 시스템을 구성하였다. 또한 실증시스템의 급탕용으로 샤워실 및 화장실에 공급되는 온수를 공급하기 위해 도입된 급탕 시스템은 시수가 태양광열(PVT) 복합 모듈의 축열조를 통과하여 승온된 이후 급탕 탱크로 공급하도록 시스템을 구성하였으며 급탕 탱크의 온도는 공기대물(Air to Water) 히트펌프를 통해 급탕을 공급 하도록 시스템을 설계 및 구축하였다.

실증시스템의 태양광열(PVT) 복합 모듈을 활용한 공기열원 실외기 가열 시스템의 성능을 평가하기 위해 사용된 센서는 태양광열(PVT) 복합 모듈에 조사되는 태양복사에너지 측정을 위한 일사량계(CMP 11, $\pm 1.0\%$)를 태양광열(PVT) 복합 모듈과 동일한 설치 경사각(30°)으로 설치하였으며 이와 함께 열매체, 축열조 내부 온도, 온수, 시수, 대기온도 및 실내온도 측정을 위해 4 Wire RTD 36개를 사용하여 각각의 온도를 측정하였다. 태양광열(PVT) 복합 모듈, 실외기 가열기, 온수 공급, 시수 공급 등과 같은 유량 측정을 위해 각각의 배관 라인에 전자식유량계(KFCM-1000, $\pm 0.5\%$)를 적용하였다. 또한 공기열원 히트펌프 두 대의 동력 및 각각의 펌프 및 동력 장치들의 소비 동력을 측정하기 위하여 다채널 전력량계인 GEMS3500을 이용하여 전력을 측정하였다. 이와 함께 34980A 데이터 수집 장치를 통해 데이터를 실시간으로 수집하였으며 Labview 프로그램과 PLC를

이용하여 자동 제어, 실시간 데이터 확인 및 데이터를 저장 할 수 있도록 원격 제어 및 모니터링 시스템을 구축 하였다. Fig. 11은 실증시스템의 원격 제어 및 모니터링 시스템을 나타낸 것이다. Table 4는 실증시스템의 성능 평가를 위해 사용된 각종 측정기기들의 사양을 나타낸 것이다.

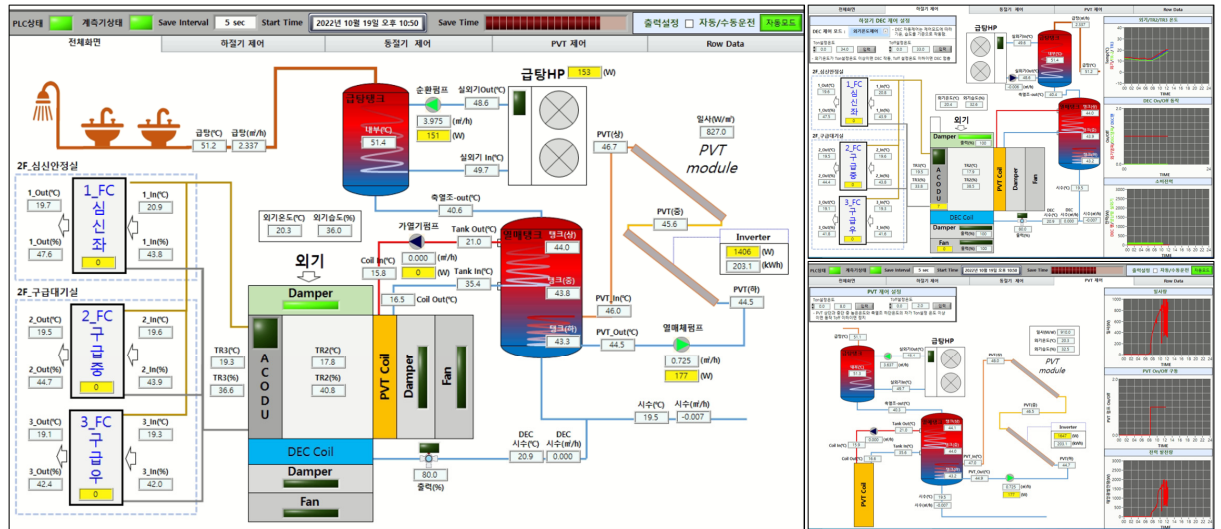


Fig. 11 Remote control and monitoring system of bench scale experimental device

Table 4 Specifications of measuring devices for demonstration set up

Measurement Target	Measurement Sensors and Equipments	Accuracy
Temperature	4 Wire RTD	± 0.1°C
Water mass flow	FLOWCELL, KFCM-1000	± 0.5%
Electrical power	GEMS3500	± 0.5%
Irradiance	Kipp & Zonen, CMP 11	± 1.0%
Data logger	KEYSIGHT, 34980A / Switch	-

실증시스템에 적용된 태양광열(PVT) 복합 모듈의 성능 분석을 위해 다음과 같은 식들을 사용하였으며, 태양 광열(PVT) 복합 모듈을 통해 획득한 열 획득량은 식(4)를 사용하여 계산하였으며, 태양광열(PVT) 복합 모듈의 열 효율 및 전기 효율은 식(4), (5)를 통해 계산하였다.

$$Q_{th} = \dot{m}_{PVT} C_p (T_{PVT,o} - T_{PVT,i}) \quad (4)$$

식(4)에서 $\dot{m}_{PVT}$ 는 태양광열(PVT) 복합 모듈 내부로 유입되는 열매체 유량, C_p 는 열매체의 비열, $T_{PVT,o}$ 과 $T_{PVT,i}$ 는 태양광열(PVT) 복합 모듈로 유입되는 열매체의 입·출구 온도이다.

$$\eta_{th} = \frac{Q_{th}}{A_{PVT} G} \quad (5)$$

$$\eta_{el} = \frac{I_m V_m}{A_{PVT} G} \quad (6)$$

식(5)에서 η_{th} 은 태양광열(PVT) 복합 모듈의 열효율이며 A_{PVT} 는 실증시스템에 설치된 태양광열(PVT) 복합의 전면적, G 는 태양광열(PVT) 복합 모듈에 조사되는 태양일사량이다. 식(6)에서 η_{el} 은 태양광열(PVT) 복합 모듈의 발전효율이며 I_m 과 V_m 은 태양광열(PVT) 복합 모듈에서 출력된 전류와 전압이다.

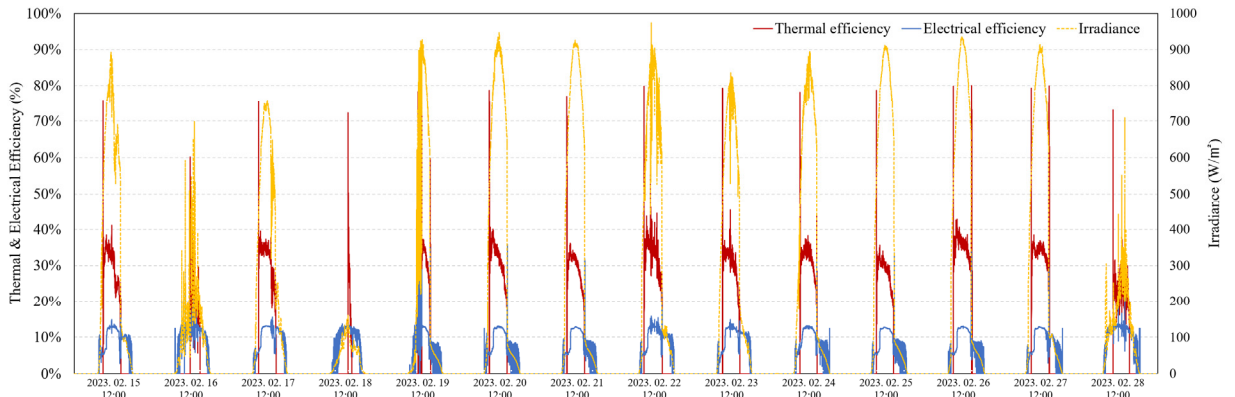


Fig. 12 Thermal and electrical efficiencies of PVT system

Fig. 12와 Fig. 13은 2023년 2월 15일부터 2023년 2월 28일까지 동절기 기간의 홍은119안전센터 4층 옥상에 설치된 액체식 평판형 태양광열(PVT) 복합 모듈 8장의 운전 상태를 나타낸 것이다. Fig. 13에 나타난 데이터를 분석한 결과, 실증시스템의 경우 동절기 기간인 2023년 2월의 경우 태양광열(PVT) 복합 모듈의 정상 운전 동안의 집열 효율은 평균 34%, 평균 발전 효율은 12%로 나타났다. Fig. 13에 나타난 축열조 온도 및 태양광열(PVT) 복합 모듈 입출·구 온도와 같이 실증시스템이 설치된 홍은119안전센터의 건물 부하 특성상 24시간 구급대원들이 상주하는 건물로 일반 주거용 건물에 비하여 온수 사용량이 매우 높아 축열조의 과열 없이 태양광열(PVT) 복합 모듈의 열매체 공급 온도를 항상 낮게 유지시켜 태양광열(PVT) 복합 모듈의 열 효율을 높게 운영할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 13의 일사량, 집열 효율 및 발전 효율 곡선에서 보는 바와같이 오후 3시 이후에는 집열 효율 및 발전 효율이 급격히 감소되는 것을 확인할 수 있으며, 이유는 실증시스템이 위치한 서대문소방서 홍은119안전센터 건물 측면에 20층 높이의 공동주택이 위치함에 따라 음영이 발생되어 일사가 급격히 떨어지기 때문이다.

Fig. 13은 동일한 기간의 태양광열(PVT) 복합 모듈의 열매체 입·출구 온도, 외기온도 및 축열조 상부의 온도

를 나타낸 것이다. 앞서 전술한 바와 같이 24시간 상주 및 화재 진압 이후 사위를 수행해야 하는 소방서 특성상 온수 사용량이 매우 많아 낮시간 동안 축열된 축열조의 열에너지를 오후 시간에 대부분 사용하여 다음날 태양 광열(PVT) 복합 모듈 작동시 모듈 내부로 공급되는 열매체의 온도를 낮게 유지 할 수 있기 때문이다.

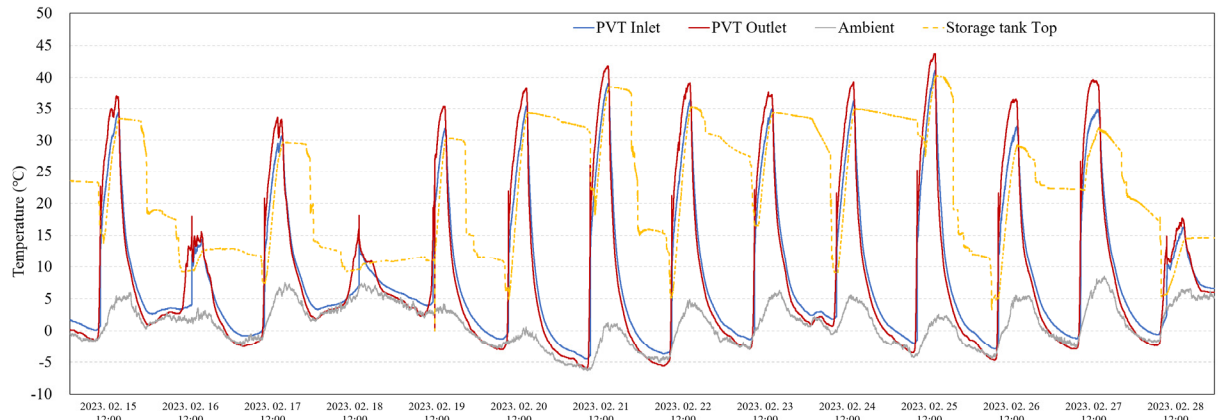


Fig. 13 PVT system inlet & outlet temperature

Fig. 14와 Fig. 15는 홍은119안전센터에 설치된 실증시스템의 냉/난방을 위한 공기열원(Air to Air) 히트펌프의 동절기 난방 운전에서의 COP를 나타낸 것이다. Fig. 14의 경우 태양광열(PVT) 복합 모듈을 통한 실외기 가열 시스템이 동작하지 않을 때이며 Fig. 15는 실외기 가열 시스템이 동작할 때의 COP를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 실외기 가열이 동작 하지 않을 경우 동절기 실증시스템에 적용된 공기대공기(Air to Air) 히트펌프의 COP는 평균 2.4로 나타났으나 실외기 가열 시스템의 운전을 통해 공기대공기(Air to Air) 히트펌프의 COP를 평균 3.4 까지 증가시킬 수 있는 것으로 나타났다. Fig. 16은 실증시스템의 냉/난방을 위한 공기대공기(Air to Air)히트펌프 소비전력 및 실외기 가열 시스템에 사용된 팬코일 유닛의 팬 및 펌프의 소비동력을 나타낸 것이다. Fig. 17은 실외기 가열기에 적용된 팬 및 펌프의 소비동력 포함 유무에 따른 실증시스템에 적용된 냉/난방을 위한 공기대공기(Air to Air) 히트펌프의 COP를 비교한 것이다. 실증시스템에 적용된 냉/난방을 위한 공기대공기(Air to Air)히트펌프의 정상 작동 구간에서의 소비 동력은 평균 1,300 W로 나타났으며 실외기 가열 시스템에 사용된 팬의 소비 전력은 평균 160 W, 실외기 가열기에 열매체 공급을 위한 펌프 소비 동력은 134 W 인 것으로 분석되었다. 실외기 가열 시스템을 통한 실증시스템에 적용된 냉/난방을 위한 공기대공기(Air to Air) 히트펌프의 COP 향상은 앞서 이야기한 실외기 가열기의 팬 및 펌프 소비 동력을 포함하면 평균 약 3.0으로 나타났다. 따라서 실외기 가열 시스템 운전을 위해 소모된 팬과 펌프의 소비동력을 포함시켜도 기존 공기열원 히트펌프의 COP를 20% 이상 향상 시킬 수 있는 것으로 나타났다.

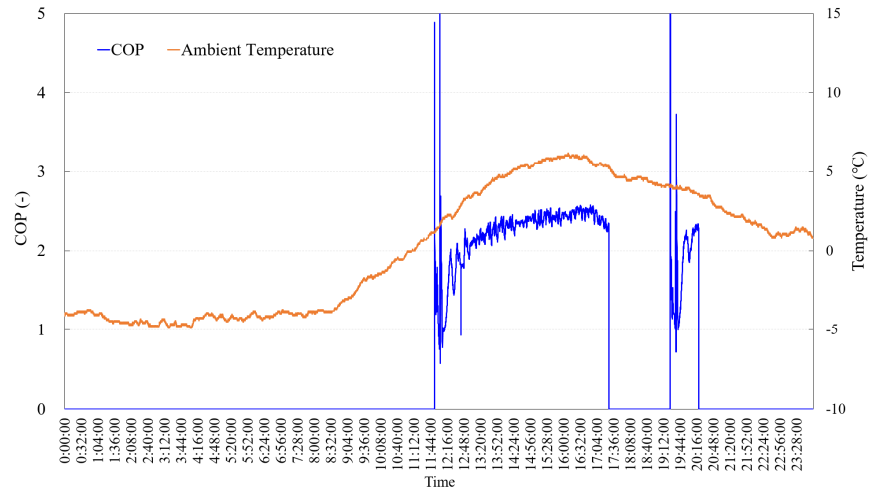


Fig. 14 Conventional mode Air to Air heat pump COP

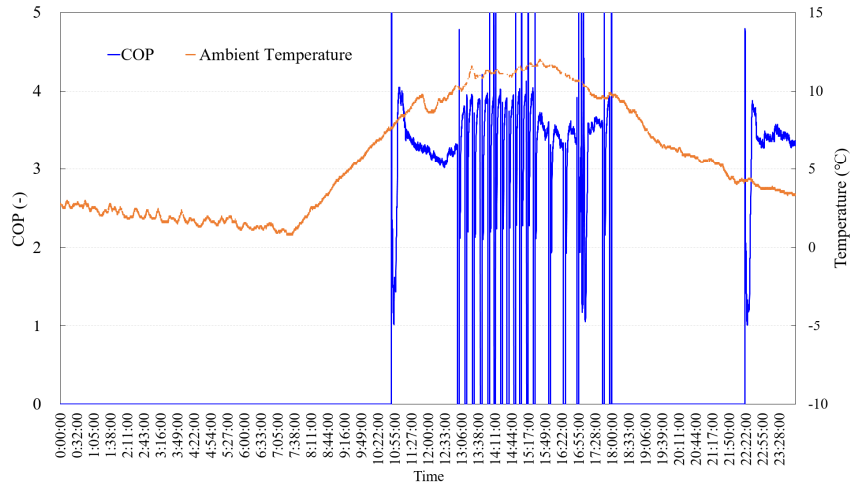


Fig. 15 Outdoor unit heating mode Air to Air heat pump COP

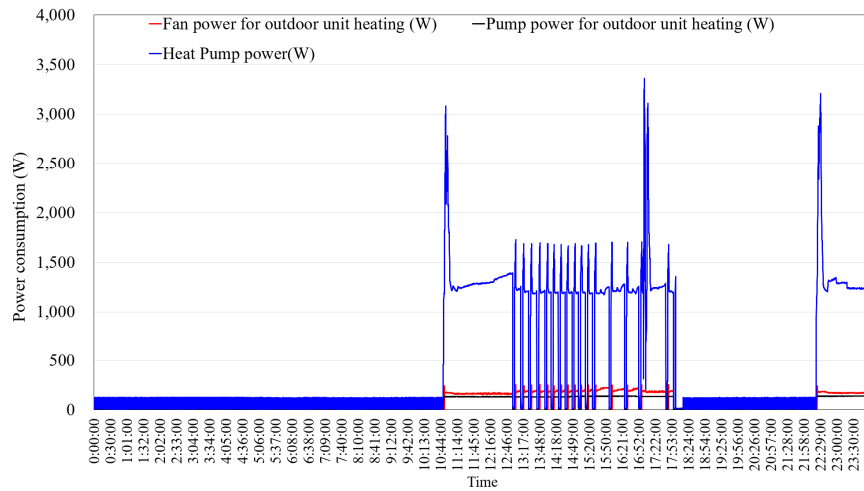


Fig. 16 Comparison of power consumption

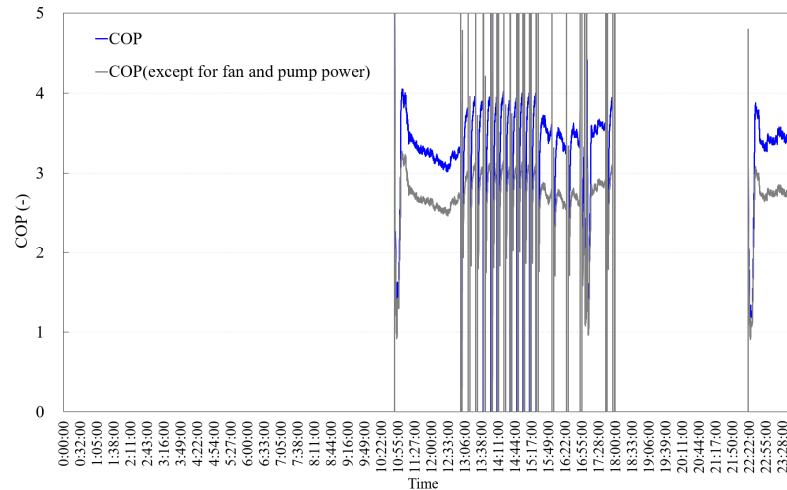


Fig. 17 Comparison of COP with and without heating of heat pump outdoor unit inlet air

5. 결론

본 연구에서는 공기열원(Air to Air, Air to Water) 히트펌프의 난방 모드 동작시 효율 증대를 위해 태양광열(PVT) 복합 모듈을 활용한 공기열원 히트펌프의 실외기 가열 시스템을 제안하였으며 벤치스케일 규모의 성능 평가 실험장치를 통해 성능 평가를 수행하였고, 또한 실제 건물에 실증용 시스템을 구축 하여 실증연구를 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 공기열원 히트펌프의 실외기 가열 시스템의 성능 평가를 위해 벤치스케일 규모의 성능 실험장치를 구축하여 공기열원 히트펌프 난방 모드 동작 시 실외기 가열 모드와 일반모드의 COP를 정량적으로 비교하였으며 실외기 가열기 운전을 위한 팬코일 유닛의 팬 및 펌프 소비동력을 포함하고도 일반 모드 대비 실외기 가열 모드에서의 평균 COP는 5.08로 일반 모드 대비 COP가 10.6%가 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 실증시스템에 적용된 태양광열(PVT) 시스템의 2월 동절기 정상 운전 동안의 집열 효율은 평균 34%이며, 발전 효율은 12%로 분석 되었으며 일사량이 부족한 동절기에도 불구하고 비교적 집열 효율이 높게 나온 것은 24시간 온수를 사용하는 119안전센터의 건물 특성상 태양광열(PVT) 복합 모듈의 열매체 공급 온도를 항상 낮게 유지할 수 있어 집열 효율을 높게 운영 할 수 있는 것으로 나타났다.
- (3) 실증시스템에 적용된 냉/난방을 위한 공기대공기(Air to Air) 히트펌프의 실외기 가열 시스템의 실증 운전 결과 실외기 가열 시스템의 운전을 위해 소모된 팬과 펌프의 소비 동력을 포함하고도 동절기 난방 모드 일 때 공기열원 히트펌프의 COP를 20% 이상 증가 시킬 수 있는 것으로 나타났다.
- (4) 본 연구에서는 제안한 공기열원 히트펌프 실외기 가열 시스템의 실증시스템을 구축하여 성능을 평가하였으나 외기 기상 조건이 완전히 동일한 날에 평가하는 것에는 어려움이 있다. 따라서 향후 연구에서는 본 연구에서 얻어진 결과를 토대로 수치화 및 모델링을 통한 성능 평가 및 경제성 분석이 필요할 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 2023년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행한 연구임 (No. 20202020800960).

REFERENCES

1. GESI, IGT, NEXT Group, Agora Energiewende, 2050 Climate Neutrality Roadmap for Korea K-Map Scenario, 2023.
2. Kim, K. H. and Choi, Y. J., Seasonal Analysis of Solar Energy Utilization Effect of Air-based PVT System by Comparing with Photovoltaic System, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 42, No. 4, pp. 69-78, 2022, <https://doi.org/10.7836/kses.2022.42.4.069>.
3. Ahn, J. G., Yu, J. S., and Kim, J. T., Simulation Performance Analysis of an Air-type PVT Collector with Curved Baffles, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 41, No. 4, pp. 27-38, 2021, <https://doi.org/10.7836/kses.2021.41.4.027>.
4. Liu, L., Shalwan, A., Teng, J., Liu, C., and Li, Z., The Entropy Generation Analysis of a PVT Solar Collector with Internally Needle Finned Serpentine Absorber Tube, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Vol. 155, pp. 1123-1130, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2023.07.018>.
5. Joshi, S. S. and Dhoble, A. S., Photovoltaic -Thermal Systems (PVT): Technology Review and Future Trends, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 92, pp. 848-882, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.067>.
6. Rossi, C., De Rosa, M., Bianco, V., Scarpa, F., and Tagliafico, L., Comparison between Different Photovoltaic Solar-Assisted Heat Pumps (PVT-SAHP) Configurations with Retrofitted Photovoltaic Panels, *WSEAS Trans. Environ. Dev.*, Vol. 10, No. 1, pp. 329-340, 2014.
7. Emmi, G., Zarrella, A., and De Carli, M., A Heat Pump Coupled with Photovoltaic Thermal Hybrid Solar Collectors: A Case Study of a Multi-source Energy System, *Energy Conversion and Management*, Vol. 151, pp. 386-399, 2017, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.08.077>.
8. Simonetti, R., Moretti, L., Molinaroli, L., and Manzolini, G., Energetic and Economic Optimization of the Yearly Performance of Three Different Solar Assisted Heat Pump Systems Using a Mixed Integer Linear Programming Algorithm, *Energy Conversion and Management*, Vol. 206, 112446, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112446>.
9. Pak, J. W., Kang, E. C., and Lee E. J., PVT-GSHP System Economic Evaluation Study with IEA ECBCS Annex 54 Method, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 34, No. 1, pp. 64-71, 2022, <https://doi.org/10.7836/kses.2014.34.1.064>.