



공기식 PVT 시스템이 연계된 히트펌프 시스템의 실증성능 분석

김상명¹⁾ · 김진희²⁾ · 김준태³⁾*

Demonstration Performance Analysis of Heat Pump System with Air-based PVT System

Sang-Myung Kim¹⁾ · Jin-Hee Kim²⁾ · Jun-Tae Kim³⁾*

Received 29 April 2025 Revised 13 June 2025 Accepted 11 July 2025 Published online 4 September 2025

ABSTRACT Photovoltaic/thermal (PVT) systems simultaneously generate electricity using photovoltaic (PV) modules and recover thermal energy for applications like space heating and domestic hot water. Air-based PVT systems that use air as the heat transfer medium offer easier integration into building systems than the liquid-based alternatives. When coupled with an air-source heat pump, the thermal energy harvested by the air-based PVT collector serves as an auxiliary heat source for the heat pump. This integration is particularly beneficial during the heating season, when the performance of air-source heat pumps typically declines because of low outdoor air temperatures. The combined system can reduce electricity consumption and enhance the thermal efficiency by preheating the air supplied to the heat pump. In this study, a demonstration experiment was conducted to evaluate the performance of a heat pump system that utilizes thermal energy from an air-based PVT system. It was experimentally analyzed the thermal and electrical performance of the PVT system and the overall energy performance of the heat pump system.

Key words Photovoltaic/thermal system(태양광·열 복합시스템), Air-based PVT system(공기식 PVT), Air-source heat pump(공기열원 히트펌프), Demonstration experiment(실증실험), Performance evaluation(성능평가)

Nomenclature

η_{th} : thermal efficiency, %

η_{el} : electrical efficiency, %

m : flow rate, m³/h

A_{pvt} : area of PVT collector, m²

C_p : specific heat, J/kg·K

G : global solar radiation, W/m²

I_{mp} : maximum current, A

T_i : inlet temperature, °C

T_o : outlet temperature, °C

V_{mp} : maximum voltage, V

1) Ph.D. Candidate, Department of Energy System Engineering,
Kongju National University, Cheonan, Korea

2) Research professor, Green Energy Technology Center, Kongju
National University, Cheonan, Korea

3) Professor, Department of Smart Green Architectural Engineering,
Kongju National University, Cheonan, Korea

*Corresponding author: jtkim@kongju.ac.kr

Tel: +82-41-521-9333 Fax: +82-41-562-0310

1. 서론

전 세계적으로 지구온난화에 따른 해수면 상승, 폭염, 집중호우와 같은 자연재해의 발생 빈도가 증가하고 있으며, 이

러한 이상기온의 원인인 온실가스 배출량 감축에 대한 중요성이 강조되고 있다. 2018년, 기후변화에 관한 정부간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC)에서 발표한 「지구온난화 1.5°C 특별보고서」에 따르면 산업화 이전 대비 지구 평균 온도는 약 1°C가량 증가하였으며, 지구 평균 온도가 2°C 이상 상승하였을 때 기후변화로 인한 위험이 매우 증가하며, 이로 인한 심각한 결과를 초래할 수 있다는 연구 결과를 발표하였다.^[1] 이러한 문제를 해결하기 위해 지구 평균 온도를 산업화 이전 대비 1.5°C 이하로 억제하여야 하며, 이를 위해서는 2050년까지 전 세계적으로 탄소 중립 실현을 달성해야 한다고 권고하였다.^[2] 현재 전 세계적으로 많은 국가에서는 탄소 중립을 선언하였으며, 이를 달성하기 위해 다양한 정책들이 진행되고 있다. 이러한 국제적 흐름에 발맞추어 대한민국은 2020년에 2050 탄소 중립을 선언하였으며, 이를 위한 다양한 정책들을 시행하고 있다.

2050 탄소 중립 달성을 위해서 「재생에너지 3020 이행 계획」을 수립하여 2030년까지 전체 전력 생산에서 재생에너지 비중을 20% 이상으로 확대하겠다는 계획을 세워 화석 에너지 중심에서 신·재생에너지 중심으로 에너지전환을 추진하고 있다. 이 외에도 2030 국가 온실가스 감축 목표(Nationally Determined Contribution; NDC)를 2030년 배출전망치 대비 37%를 감축 목표로 설정하여 유엔에 제출하였으며, 신·재생에너지공급의무화제도, 제로에너지건축물 의무화 등 온실가스 감축을 달성하기 위한 다양한 정책들이 각 산업 분야별로 진행되고 있다.^[3~5]

이러한 이유로 온실가스를 배출하는 화석 연료를 대체하기 위한 신재생에너지에 대한 중요성은 점점 더 증가하고 있으며, 특히 태양광 및 열을 활용하여 전기와 열에너지를 생산하는 태양에너지 기술에 대한 필요성은 증가하고 있다.

신재생에너지 기술 중 태양광·열 복합발전(Photovoltaic/Thermal; PVT) 시스템은 태양광 모듈과 태양열 집열기를 결합한 형태로, 열과 전기를 동시에 생산할 수 있는 태양에너지 기술이다. 전면에 있는 PV 모듈을 통해 전기를 생산하며, 전기 발전 시 발생하는 PV 모듈 후면에 열을 건물의 열원으로 이용하여 PV 모듈 과열에 의한 전기효율 저감을 방지할 수 있다는 장점이 있다.^[6] PVT 시스템은 사용하는 열전달 매체에 따라 공기식과 액체식 그리고 복합형으로 나누어지며, 공기식 PVT 시스템은 공기를 열전달 매체로

사용하여 액체식에 비해 누수와 동결 같은 문제가 없으며, 건물 냉난방 설비시스템과의 연계가 쉽다는 장점이 있다.^[7]

건물의 냉난방설비 중 히트펌프 시스템은 화석 연료 대신 전기를 이용하는 친환경 냉난방설비로 기존 화석 연료를 사용하는 보일러를 대체하여 전 세계적으로 수요가 증가하고 있다. 국제에너지기구(International Energy Agency; IEA)에서 발표한 「Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector」 보고서에서는 전 세계적으로 탄소 중립 2050을 달성하기 위한 분야별 달성 목표를 제안하고 있다. 이 중 탄소 중립을 달성하기 위해서 건물 분야에서는 2045년까지 화석 연료를 사용하는 보일러의 사용을 줄이고 건물에서 필요한 난방에너지의 50% 이상을 히트펌프로 공급해야 한다고 제시하고 있다.^[8]

공기 열원 히트펌프 시스템은 공기를 열원으로 활용하여 건물에 필요한 냉난방 및 급탕을 위한 열원을 생산한다. 그러나 겨울철 극도로 차가운 외기는 공기 열원 히트펌프 시스템의 난방효율을 저하하고, 히트펌프 내구성의 영향을 줄 수 있다. 공기식 PVT 시스템을 공기 열원 히트펌프 시스템과 연계하여 사용할 경우 공기식 PVT를 통해 획득한 열원을 활용하여 겨울철 히트펌프 시스템의 난방성능을 개선할 수 있다.

공기식 PVT 컬렉터의 성능 및 건물 냉난방설비와 연계된 시스템의 성능평가에 관한 연구는 활발히 진행되고 있는데, An *et al.*^[9]은 이중 채널 및 반원형 난류 촉진제를 적용한 공기식 PVT 시스템의 공기 유량에 따른 열 및 전기성능을 실험을 통해 평가하였다. 실험결과, 공기 유량이 증가함에 따라 PV 모듈 온도 감소로 인한 전기효율이 향상됨을 확인하였다. 또한, 유량 증가에 따른 PVT 입·출구 온도 차는 감소하지만, 열효율은 증가하는 것을 확인하였다. Lee *et al.*^[10]은 공기식 PVT 컬렉터의 열 성능 개선을 위해서 PVT에 적용되는 PV 셀 면적 비에 따른 열 및 전기성능평가를 실험을 통해 진행하였다. Yu *et al.*^[11]은 CFD 시뮬레이션 프로그램을 통해 공기식 PVT 컬렉터에 적용되는 베플판의 각도, 길이, 높이, 간격 그리고 베플판의 개구율에 따른 공기식 PVT 컬렉터의 열특성을 분석하여 공기식 PVT 컬렉터의 열 성능을 개선하기 위한 PVT 컬렉터의 최적화 연구를 진행하였다.

공기식 PVT 컬렉터의 성능에 관한 연구뿐만 아니라 건물 설비와 연계에 따른 연구도 진행되었다. Kim *et al.*^[12]

은 공기식 PVT 컬렉터와 Air handling unit(AHU)을 연결하여 PVT의 공기 열원을 AHU의 난방 열원으로 사용할 수 있는 공기 조화시스템을 개발하였으며, Mock-up 실험을 통해 시스템의 성능 평가를 진행하였다. 실험을 통해 공기식 PVT 시스템에서 생산된 공기 열원을 AHU와 연계하여 사용함으로써 난방에너지를 절감할 수 있다는 것을 확인하였다. 또한, Joo *et al.*^[13]은 공공건축물에 냉난방 및 급탕 공급을 위해 널리 사용되고 있는 공기 열원 히트펌프 시스템의 난방 성능 및 효율 향상을 위해 액체식 PVT 컬렉터를 연계하여 벤치스케일 규모의 성능시험을 진행하였다. 액체식 PVT를 통해 축열된 열원을 실외기로 유입되는 공기 온도를 상승시켜 공기 열원 히트펌프에 공급하였으며, 이를 통해 일반 히트펌프 시스템 대비 히트펌프의 난방성능계수(Coefficient of Performance; COP)가 10.6% 증가한 것을 확인하였다. 이처럼 PVT 시스템의 성능과 건물의 냉난방 설비와 연계된 시스템에 관한 연구는 다양하게 진행되고 있지만, 실제 사용되고 있는 건물에서 공기식 PVT 시스템을 통해 생산된 열원을 공기 열원 히트펌프 시스템과 연계하여 진행된 성능 평가 및 이와 관련된 연구는 미미한 실정이다.

이에 본 연구에서는 건물에 적용된 공기식 PVT 시스템이 연계된 공기열원 히트펌프 시스템의 성능 평가를 진행하였다. 실증 실험을 통해 공기식 PVT 시스템의 열 및 전기성능을 분석하였으며, 공기 열원 히트펌프 시스템과 연계하였을 때의 성능 및 특성을 분석하였다.

2. 공기식 PVT 연계 히트펌프 시스템

2.1 공기식 PVT 시스템

본 연구를 위해 개발된 공기식 PVT 컬렉터는 GtoB(Glass-to-Backsheet) 타입의 PV 모듈을 전면에 적용하였으며, 후면에는 열 손실을 최소화하기 위해서 단열재를 추가하였다. PVT 컬렉터 내부에 공기가 지나가는 공기층에는 타공 및 절곡된 흡열판을 설치하였으며, 이를 통해 공기의 유로가 길어지게 하고 난류가 발생하여 PVT 컬렉터의 열 성능이 향상될 수 있도록 설계하였다. 공기식 PVT 컬렉터의 경량화를 위해 프레임은 알루미늄 프레임을 사용하여 제작하였다.

PVT 컬렉터에 사용된 PV 모듈의 사양은 Table 1과 같다.

실증 실험을 위해 충청남도 아산시에 위치한 초등학교(36.88N, 127.07E)에 공기식 PVT 시스템과 연계된 공기 열원 히트펌프 시스템을 설치하였다. 공기식 PVT 시스템은 주변 음영 간섭이 없는 학교 건물 옥상에 설치하였으며, 건물에 적용된 공기식 PVT 시스템은 Fig. 2의 계통도와 같이 설치되었다.

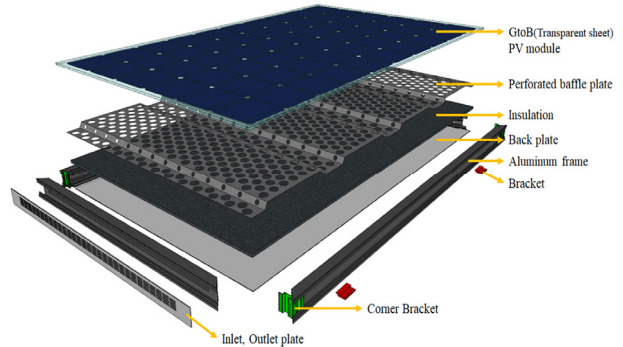


Fig. 1. Air-based PVT collector

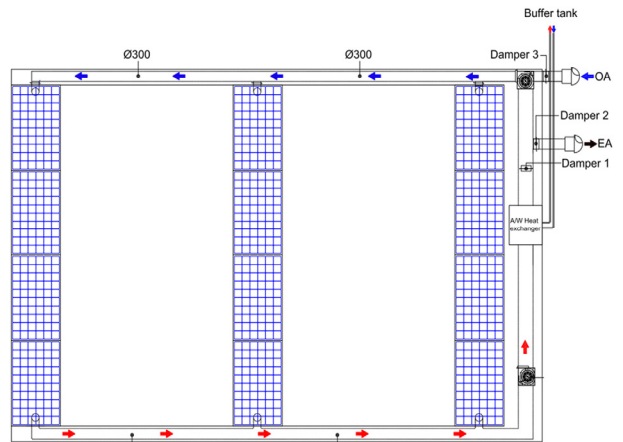


Fig. 2. Schematics of air-base PVT system

Table 1. Specification of PV module

Parameter	Value
Cell type	Mono-crystalline silicon (66 cells)
Module size	1860 × 1066 × 6 mm
Module efficiency	16.05%
Maximum power (P_{max})	318.16 W
Maximum voltage (V_{mp})	36.97 V
Maximum current (I_{mp})	8.61 A
Open voltage (V_{oc})	44.66 V
Short current (I_{sc})	9.06 A

공기식 PVT 시스템은 총 12개의 PVT 컬렉터가 설치되었으며, 설치된 PVT의 총 발전 용량은 3.72 kWh이다. 12개의 PVT 컬렉터는 3열로 4개씩 연결하여 설치하였으며, 4개의 컬렉터를 연결하여 공기의 유로를 증가시켜 높은 온도의 공기를 생산할 수 있도록 설계하였다. PVT 시스템은 팬을 이용하여 컬렉터 내부와 덕트 내 공기가 순환될 수 있도록 하였으며, PVT 컬렉터를 통해 예열된 공기는 Air-to-water 열교환기로 유입되어 열교환을 할 수 있도록 설계하였다.

또한, PVT 컬렉터로 유입되는 공기 온도는 댐퍼를 이용하여 제어할 수 있도록 설계되었으며, 설정된 입구 온도에 따라 댐퍼를 이용하여 외기 또는 열 교환된 공기를 선택하여 PVT 컬렉터 입구로 유입되도록 설계되었다.

Fig. 3은 건물 옥상에 설치된 공기식 PVT 시스템의 설치 사진을 보여주고 있다. PVT 시스템을 통해 예열된 공기 및 유체의 열 손실을 줄이기 위하여 덕트와 배관에는 단열재를 적용하였다. 또한, PVT 시스템의 성능분석을 위해 공기식 PVT 컬렉터가 설치된 동일한 경사면에 일사량계를 설치하여 PVT 컬렉터로 입사되는 일사량을 측정하였다. 또한, PVT 시스템이 위치한 옥상에 weather station을 설치하여 외기 건구온도 및 상대습도, 풍향, 풍속 등과 같은 기상 데이터를 측정하였다.

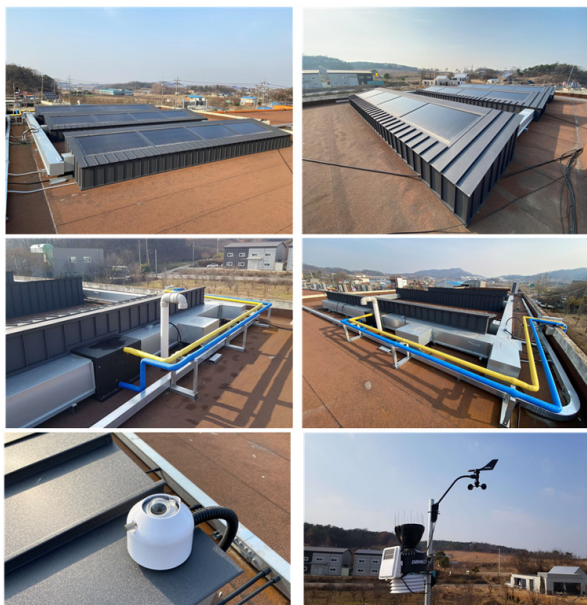


Fig. 3. Air-based PVT system

2.2 공기 열원 히트펌프 시스템

공기식 PVT 시스템은 건물의 난방 및 냉방 그리고 급탕 공급이 가능한 공기 열원 히트펌프 시스템과 연계되어 건물에 적용되었다. Fig. 4는 공기식 PVT 시스템과 연계된 공기열원 히트펌프 시스템의 계통도를 보여주고 있다.

건물에 적용된 히트펌프 시스템은 공기열원 히트펌프(Air-source heat pump), 축열 탱크(Storage tank), 버퍼 탱크(Buffer tank), 급탕 탱크(Domestic hot water tank) 그리고 팬 코일 유닛(Fan coil unit)과 유체를 순환시키기 위한 연결 배관 및 펌프로 구성되었다.

공기열원 히트펌프 시스템은 축열 탱크와 연결되어 축열 탱크 설정 온도에 따라 여름철에는 냉수를, 겨울철에는 온수를 생산하여 축열 탱크에 저장될 수 있도록 하였다. 축열 탱크에 저장된 온수와 냉수는 펌프를 통해 팬 코일 유닛의 열교환 코일을 순환하고, 팬 코일 유닛은 열교환을 통한 공기를 실내에 공급함으로써 학교 급식실의 냉방 및 난방이 이루어지도록 설계되었다.

또한, 공기열원 히트펌프는 급탕 탱크와 연결되어 있어, 설정된 온도의 온수를 급탕 탱크에 저장하여 건물에 필요한 온수를 공급할 수 있도록 하였다.

공기식 PVT 시스템을 통해 예열된 공기는 air-to-water 열교환기로 유입되고, 버퍼 탱크 내부에 유체가 air-to-water 열교환기를 통과하면서 PVT 공기와 버퍼 탱크 유체 사이에 열교환이 진행되도록 설계하였다. Air-to-water 열교환기를 통해 버퍼 탱크 내부에 열을 저장하여 온수를 생산할 수 있도록 하였다. 버퍼 탱크 내 저장된 온수는 겨울철 난방 시 공기열원 히트펌프 시스템의 외기가 유입되

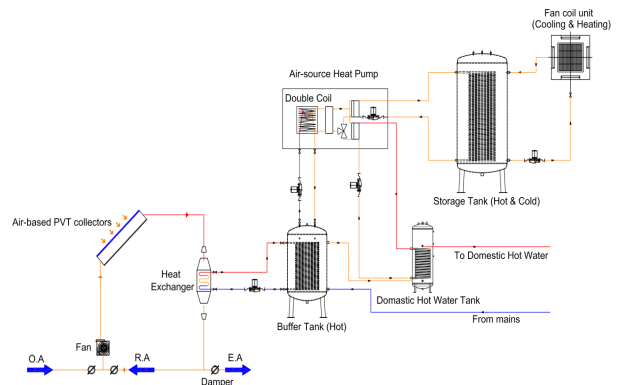


Fig. 4. Schematics of PVT heat pump system

는 후면에 있는 이중 코일(Double coil)을 순환하도록 설계되었다. 이를 통해 히트펌프로 유입되는 차가운 외기 온도가 이중 코일을 통과하면서 일차적으로 예열되어 외기 온도를 상승시킴으로써, 히트펌프가 필요한 전력을 감소시키고 난방 COP를 향상할 수 있도록 하였다.

또한, 히트펌프가 난방하지 않는 여름철 및 간절기에는 PVT 공기 열원으로 저장된 버퍼 탱크의 온수가 히트펌프 열원으로 필요하지 않으므로, 버퍼 탱크 내에 온수는 급탕 탱크와 연계하여 급탕에 필요한 열원으로 사용할 수 있도록 설계하였다. 이를 통해 PVT 공기 열원이 겨울철뿐만 아



Fig. 5. Air source heat pump system

Table 2. Instrument and sensor specification

Type	Specification
Solar radiation (Pyranometer)	Model: Thermopile Operating temperature: -40°C to 80°C Measurement range: 0 to 2000 W/m^2 Non-linearity: $\pm 2\%$ Direction response: $< \pm 20\text{ W/m}^2$
Flow rate (Flow meter)	Model: Vortex flow sensor (VWX20) Operating temperature: -20°C to 70°C Measurement range: 5 to 80 L/min Accuracy: $\pm 2\%$ of range Repeatability: $\pm 1\%$ at -20 to 5°C $\pm 0.5\%$ at 5 to 70°C
Air temperature and relative humidity (Humidity and temperature transmitter)	Model: Humidity Transmitter HF 5 Operating temperature: -40°C to 60°C Measurement range: -50°C to 100°C 0% RH to 100% RH Accuracy: $\pm 0.1\text{ K}$ at $23^{\circ}\text{C}/\pm 0.8\%$ RH
PV surface temperature (Thermocouple)	Model: Omega T type thermocouple Operating temperature: -60°C to 100°C Measurement range: -250°C to $+350^{\circ}\text{C}$ Accuracy: $\pm 0.5\%$

니라 전 계절에 걸쳐 난방 및 급탕 열원으로 건물에 사용될 수 있도록 하였다.

Fig. 5는 히트펌프 시스템과 팬 코일 유닛 사진을 보여주고 있으며, 공기 열원 히트펌프, 축열 탱크, 버퍼 탱크, 급탕 탱크 순으로 설치되었다. 팬 코일 유닛은 축열 탱크와 연결되어 학교 급식실 천장에 2대 설치되었다. 공기식 PVT 시스템과 연계된 히트펌프 시스템의 실증 성능평가를 위하여 설치된 계측기의 사양은 아래 Table 2와 같다.

3. 분석 결과

3.1 공기식 PVT 시스템 성능분석

공기식 PVT 시스템이 연계된 공기열원 히트펌프 시스템의 성능분석을 위하여 24년 3월 14일 0시부터 24시까지 측정된 데이터를 활용하였다. 겨울철 낮은 외기에 의해 난방 성능이 저하되는 공기열원 히트펌프 시스템에 공기식 PVT 시스템을 통해 생산된 공기 열원을 활용하였을 때, 히트펌프 시스템의 난방성능 개선을 분석하기 위하여 건물의 난방 기간 중 측정된 데이터를 분석하였다.

또한, 건물 용도의 특성상 겨울철 방학으로 인해 건물의 거주 인원이 없어 건물 난방을 위한 히트펌프 설비를 사용하지 않으며, 3월부터 학생들이 개학을 하면서 건물을 사용하기 때문에 급식실의 설치된 히트펌프 시스템이 작동되는 3월 중 일사가 좋은 날을 선정하여 분석하였다.

Fig. 6은 시간에 따른 일사량 및 공기식 PVT 컬렉터의

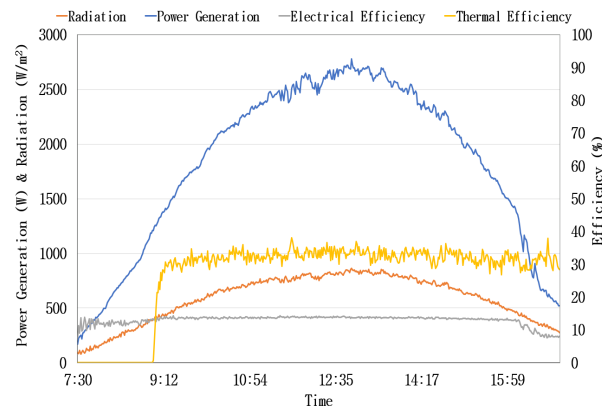


Fig. 6. Thermal and electrical performance of Air-based PVT collectors

열 및 전기효율을 나타낸 그래프이며, 공기식 PVT 컬렉터의 열 및 전기효율은 식 (1)^[14]과 (2)^[15]를 통해 계산되었다.

$$\eta_{th} = m C_p (T_o - T_i) / (A_{pvt} \cdot G) \quad (1)$$

$$\eta_{el} = (I_{mp} \cdot V_{mp}) / (A_{pvt} \cdot G) \quad (2)$$

공기식 PVT 시스템의 성능은 평균 일사량이 589.4 W/m², 최고 일사량이 863 W/m²인 날에 측정된 데이터를 사용하였다. 공기식 PVT 컬렉터의 평균 발전량은 1.83 kWh였으며, 최고 발전량은 일사량이 가장 높은 13시에 약 2.78 kWh로 나타났다. 공기식 PVT 컬렉터의 열효율은 평균 31.9%를 가지는 것으로 나타났으며, 일일 최고 열효율은 약 38%까지 상승하였다. PVT 컬렉터의 전기효율은 일사가 450 W/m² 이상일 때 평균 13%이며, 하루 동안 균일한 전기효율을 가지는 것으로 나타났다. PV 모듈의 전기효율은 일반적으로 일사가 증가하고 PV 모듈 온도가 상승함에 따라 모듈의 효율이 저하되지만, 공기식 PVT 시스템은 공기 순환을 통해 PV 모듈 후면의 열을 배출함으로써 PV 모듈의 과열을 방지하고 PV 모듈 온도상승에 따른 효율 저하 없이 균일한 전기효율을 가지는 것으로 분석되었다.

Fig. 7은 공기식 PVT 시스템의 온도특성을 나타낸 그래프이며, 공기식 PVT 시스템의 입·출구 공기 온도, air-to-Water 열교환기의 출구 온도, 일사량 및 외기 온도를 시간에 따라 나타내었다. 분석 결과 공기식 PVT 시스템으로 유입된 공기는 PVT 시스템을 순환하면서 온도가 증가하는 것을 확인하였다. 공기식 PVT 시스템의 출구 온도는 평균

23.8°C로 나타났으며, 최대 온도는 일사가 가장 높은 정오 시간에 37.3°C까지 증가한 것으로 분석되었다. PVT 시스템의 입구와 출구의 온도 차는 평균 9.8°C이며, 일일 최고 온도 차는 17.9°C로 분석되었다. 공기식 PVT 시스템을 통해 예열된 PVT의 출구 공기는 air-to-water 열교환기로 유입되며, 열교환기를 지나면서 버퍼 탱크 내부의 유체와 만나 열교환이 진행되는 것을 확인하였다. Air-to-water 열교환기로 유입되는 PVT 시스템의 출구 공기 온도(Outlet Temp_PVT)와 air-to-water 열교환기 출구 온도(Outlet Temp_Heat EX)를 비교한 결과 열교환기 전후의 공기 온도는 9.94°C 낮아졌으며, 최고 19.6°C까지 낮아진 것으로 분석되었다. 이는 열교환기로 유입된 PVT의 출구 공기가 열교환기 안에서 유체와의 열교환이 진행되었으며, 이를 통해 열교환기를 통과한 공기 온도가 낮아진 것으로 분석된다.

3.2 공기 열원 히트펌프 시스템 성능분석

Fig. 8은 히트펌프 시스템을 구성하고 있는 버퍼 탱크의 입·출구 온도 및 유량, 일사량을 시간에 따라 나타낸 그래프이다. 버퍼 탱크 입구와 출구는 air-to-water 열교환기와 연결되어 있으며, 펌프를 통해 순환되었다. 버퍼 탱크를 중심으로 버퍼 탱크 출구를 통해 간간 유체는 air-to-water 열교환기로 유입되며, 열교환기를 통과하면서 PVT의 예열된 출구 공기와 열교환이 진행되었다. 열교환 되어 온도가 상승한 유체는 버퍼 탱크 입구를 통해 버퍼 탱크로 유입되어 탱크의 내부 온도를 상승시켰다. 실험결과 공기식 PVT

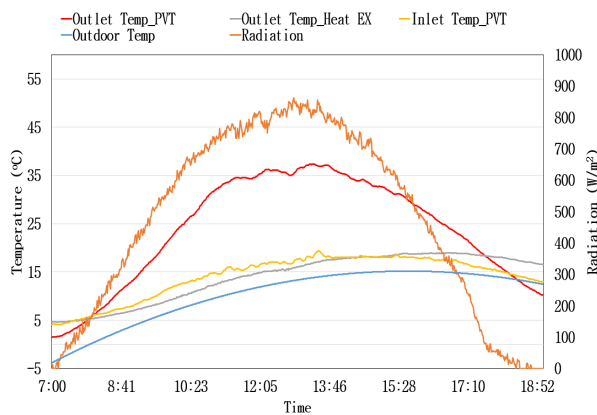


Fig. 7. Temperature characteristics of PVT system

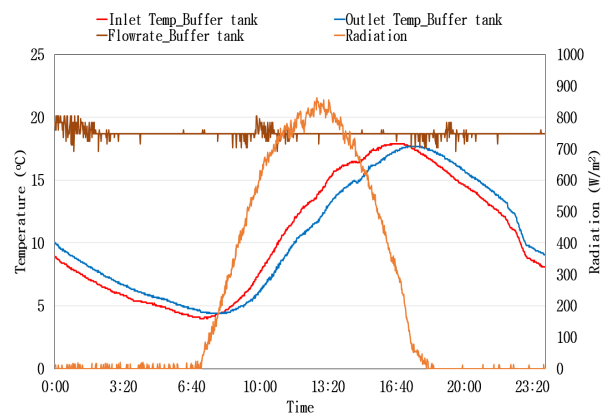


Fig. 8. Temperature characteristics of buffer tank

시스템과 열교환이 시작되면서 버퍼 탱크 입구로 들어오는 유체의 온도가 증가하는 것을 확인하였으며, 입구로 들어온 유체는 탱크 내부에 축열 후 낮아진 온도의 유체로 다시 출구로 나가는 것을 확인하였다. 공기식 PVT와 열교환은 아침 8시 30분부터 오후 5시까지 진행되었으며, 열교환이 진행되는 동안 버퍼 탱크 입구 온도는 출구 온도보다 약 1.5~2°C 높은 온도를 가지는 것으로 분석되었다. 공기식 PVT 시스템과 열교환을 통해 버퍼 탱크 내부 온도는 4°C에서 17.9°C까지 온도가 증가하였으며, 하루 동안 버퍼 탱크의 온도는 약 14°C 증가하였다. 이를 통해 PVT 공기 열원을 이용하여 버퍼 탱크의 축열이 가능하며, 이를 히트펌프 시스템의 열원으로 활용이 가능한 것을 확인하였다.

Fig. 9는 공기열원 히트펌프 시스템 작동에 따른 온도특성을 분석한 그래프이며, 축열 탱크 온도, 실내온도 그리고 히트펌프와 팬 코일 유닛의 유량을 나타낸 그래프이다. 히트펌프의 난방설정 온도는 50°C로 설정하였으며, 축열 탱크의 온도가 설정 온도보다 낮아지면 히트펌프가 가동하여 축열 탱크의 온도를 설정 온도까지 가열하는 것을 확인할 수 있다. 오전 11시 30분 건물 난방을 위해 팬 코일 유닛을 가동하면서 축열 탱크에 저장된 온수가 팬 코일 유닛으로 순환되는 것을 확인하였다. 이에 따라 난방이 진행되면서 축열 탱크의 온도는 감소하였고, 실내온도는 증가하는 것을 확인하였다. 또한, 오전 10시경과 밤 23시경에 축열 탱크의 온도가 설정 온도보다 낮아져서 히트펌프가 가동하여 축열 탱크의 온도를 상승시킨 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 히트펌프 시스템의 전력사용량 및 PVT 시스템의 발전량을 나타낸 그래프이다. 그래프를 보면 히트펌프

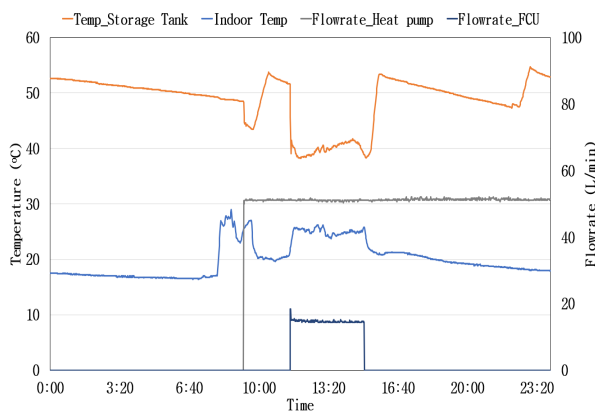


Fig. 9. Temperature characteristics of Heat pump system

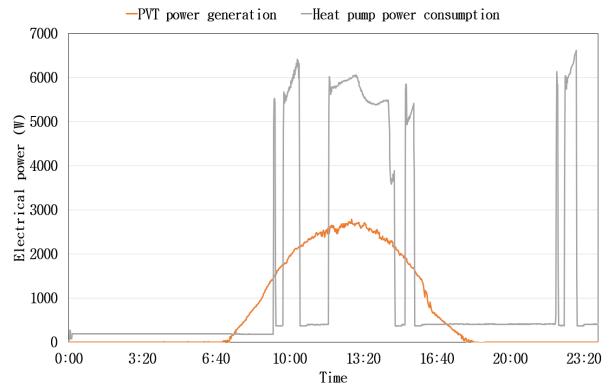


Fig. 10. Electrical power of Heat pump with PVT

프는 축열 탱크 온도가 설정 온도보다 낮아진 10시, 11시 30분, 23시에 히트펌프가 작동하면서 히트펌프의 소비전력이 증가한 것을 알 수 있다. 히트펌프 작동 시 소비전력은 약 6 kW 전후로 전력을 소비하는 것으로 분석되었다. 하지만 시간대에 따라 히트펌프의 소비전력은 다르게 나타났는데, 10시와 23시에 작동한 히트펌프의 소비전력은 5.5~6.5 kW로 나타나지만, 오전 11:40~15:40 사이에 작동한 히트펌프의 소비전력은 5~6 kW로 소비전력이 감소한 것을 확인하였다. 이는 PVT 시스템과 열교환을 통해 축열된 버퍼 탱크의 온수가 히트펌프 후면의 더블 코일로 순환하면서 히트펌프로 유입되는 공기 온도를 일차적으로 예열하고 이로 인해 히트펌프의 난방 시 요구되는 소비전력이 감소한 것으로 분석된다. 또한, 하루 동안 PVT를 통해 생산된 발전량은 히트펌프 사용 전력량의 약 46.9%에 달하는 것으로 분석되었다.

4. 결론

본 논문은 건물에 적용된 공기식 PVT 시스템과 연계된 공기 열원 히트펌프 시스템의 성능평가를 진행하였다. 본 논문의 결론은 아래와 같이 정리할 수 있다.

- 1) 공기식 PVT 시스템은 BIPV 시스템과 달리 PV 발전을 통한 후면 열을 건물의 열원으로 활용함으로써 PV 모듈의 온도상승에 따른 효율 저하를 방지하였다. 본 논문에서 연구된 공기식 PVT 컬렉터는 PV 모듈의 효율 저하 없이 13%의 균일한 전기효율을 가지며, 열효

율은 약 32%로 나타났다.

- 2) 공기식 PVT 시스템을 통해 예열된 공기는 air-to-water 열교환기를 통해 히트펌프 시스템의 버퍼 탱크 유체와 열교환을 하며, 이를 통해 버퍼 탱크에 축열이 가능한 것을 확인하였다. PVT 시스템의 예열된 공기와 열교환을 통해 버퍼 탱크 물의 온도는 약 14°C 증가하였다.
- 3) 공기식 PVT 시스템의 열원을 이용하여 버퍼 탱크에 축열된 열원을 공기열원 히트펌프 시스템의 열원으로 사용하였을 때, 히트펌프의 전력소비량이 감소한 것을 확인하였다. 이를 통해 공기식 PVT 열원을 통한 공기열원 히트펌프의 난방성능 및 난방효율 개선이 가능한 것을 확인하였다. 또한, 공기식 PVT 시스템을 통해 발전된 발전량을 통해 히트펌프의 사용된 전력량의 약 47%를 감당할 수 있는 것으로 분석되었다.

전기를 사용하는 친환경 냉난방 시스템인 히트펌프 시장은 전 세계적으로 급성장하고 있으며, 전기를 생산하는 PVT 시스템과 연계 시 시스템 효율을 극대화할 수 있다. 또한, PVT를 통해 생산된 열원은 히트펌프 시스템의 열원으로 활용하여 히트펌프 시스템 성능을 개선할 수 있어 PVT와 연계된 히트펌프 시스템에 관한 다양한 연구들이 진행되고 있다. 하지만 PVT 히트펌프 시스템과 연계된 공기 열원 히트펌프에 관한 연구들은 주로 액체식 PVT를 대상으로 진행되고 있다. 본 연구를 통해 액체식 PVT뿐만 아니라 공기식 PVT 또한 PVT를 통해 생산된 공기 열을 히트펌프 시스템과 연계하여 활용할 수 있으며, 이를 통해 히트펌프 시스템의 난방소비전력을 줄이고 난방효율을 개선할 수 있음을 확인하였다.

향후 연구에서는 공기식 PVT 시스템이 연계된 히트펌프 시스템의 연간 에너지성능 및 건물에 적용하였을 때 건물 에너지 절감에 관한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다 (No. RS-2023-00266248, RS-2024-00394769).

References

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2022, “Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty”, Cambridge University Press, <https://doi.org/10.1017/9781009157940>.
- [2] 2050 Carbon Neutrality Committee, 2021, “2050 Carbon Neutrality Scenario”, 2050 Carbon Neutrality Committee Secretariat, <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=101&page=1&searchCategory=&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=15>.
- [3] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2017, “Renewable Energy 3020 Implementation Plan (draft)”, Announcement No. 2017-12, <https://www.motie.go.kr/kor/article/ATCL3f49a5a8c/159996/view#>.
- [4] A Joint Session of Relevant Ministries, “2030 NDC upward plan” Announcement No. 2021-10, <http://webarchives.pa.go.kr/19th/www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=4&boardNo=84&searchCategory=&page=1&searchType=&searchWord=&menuLevel=2&menuNo=15>.
- [5] Lee, G.B., and Kang, J.Y., 2025, “The Impact of Renewable Energy Sources on Greenhouse Gas Emissions Reduction -Focusing on Solar and Wind Energy”, *New. Renew. Energy*, **21**(2), 60-70.
- [6] Ahn, J.W., Yu, J.S., Kim, J.H., and Kim, J.T., 2021, “Simulation Performance Analysis of an Air-type PVT Collector with Curved Baffles”, *J. Korean Solar Energy*, **41**(4), 27-38.
- [7] Kim, S.M., Kim, J.H., and Kim, J.T., 2019, “An Experimental Study on Thermal and Electrical Performance of an Air-type PVT Collector”, *J. Korean Solar Energy*, **39**(2), 23-33.
- [8] International Energy Agency (IEA), 2021, “Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector”, IEA Publications
- [9] An, B.H., Kim, S.B., Moon, K.A., and Choi, K.H., 2024, “Performance Evaluation of Air-Type PVT with Dual Channels and Semi-Circular Turbulence Promoters

- According to Air Mass Flow Rate”, J. Korean Solar Energy, **44**(6), 65-77.
- [10] Lee, K.S., Yu, J.S., Kim, J.H., and Kim, J.T., 2021, “Analysis of Thermal and Electrical Performance for Air-Type PVT Collectors According to PV Module Cell Ratios”, J. Korean Solar Energy, **41**(1), 45-58, <https://www.ksesjournal.co.kr/articles/article/YGPW/#Information>.
- [11] Yu, J.S., Kim, J.H., and Kim, J.T., 2019, “A Study for Improving Thermal Performance According to Variables of Perforated Baffle in Air-type PVT Collector”, J. Korean Solar Energy, **39**(6), 83-91.
- [12] Kim, J.H., Kim, S.M., and Kim, J.T., 2021, “Experimental Performance of an Advanced Air-Type Photovoltaic/Thermal (PVT) Collector with Direct Expansion Air Handling Unit (AHU)”, Sustainability, **13**(2), 888.
- [13] Joo, H.J., An, Y.S., and Lee, K.H., 2023, “Development and Performance Analysis of an Air Source Heat Pump Outdoor Unit Heating System with Photovoltaic Thermal Modules”, J. Korean Solar Energy, **43**(6), 163-180.
- [14] International Organization for Standard, 2017, “ISO 9806:2017 Solar Energy-Solar Thermal Collectors-Test Methods”, International Organization for Standard, <https://www.iso.org/standard/67978.html>.
- [15] International Electrotechnical Commission, 2016, “IEC 61215:2016 Crystalline Silicon Terrestrial Photovoltaic (PV) Modules-Design Qualification and Type Approval”, International Electrotechnical Commission.