

PVT 시스템의 PV 모듈 및 태양열 집열기 대비 성능 및 효율 비교분석

어승희*, 이정빈*, 최윤성*, 김대현*

*강원대학교 농업생명과학대학 바이오시스템공학과

The Performance and Efficiency Analysis of a PVT System Compared with a PV module and a Solar collector

Euh, Seung-Hee*, Lee, Jeong-Bin*, Choi, Yun-Sung* Kim, Dae-Hyun*

*Department of Biosystems engineering, Kangwon National University

Abstract

A photovoltaic/thermal (PVT) solar system is the solar technology that allows for simultaneous conversion of solar energy into both electricity and heat. This paper compared the performance of PVT system with a conventional PV module and solar collector and analyzed electrical and thermal efficiency of PVT system in terms of solar irradiance and inlet temperature of the working fluid. Based on the experimental data, thermal and electrical efficiencies of the glazed PVT system were **57.9%** and **14.27%** under zero reduced temperature condition which were lower by **13.6%** than the solar thermal absorber plate and by **0.08%** than the PV module respectively. For the unglazed PVT system, it had lower thermal efficiency than the solar thermal absorber plate but higher electrical performance than the PV module due to the cooling effect by the working fluid. However, total efficiency of the glazed PVT system was **72.2%** which was higher than combined efficiencies of the solar collector and PV module. Besides, total efficiency of the PVT system would be much higher if calculated based on unit area.

Keywords : PV/Thermal system, electrical/thermal efficiency, performance

기 호 설 명

G	: 일사량 (W/m^2)	\dot{m}	: 작동유체 유량 (kg/sec)
Q	: 열량 (W)	C_p	: 작동유체 비열 ($J/kg^\circ C$)
A	: 집열면적 (m^2)	T_a	: 외기온도 ($^\circ C$)
η_t	: 열효율	T_{in}	: 입구온도 ($^\circ C$)
η_e	: 전기효율	T_o	: 출구온도 ($^\circ C$)

I_m : 최대전류 (A)
 V_m : 최대전압 (V)

1. 서 론

태양에너지를 이용하는 방법은 광전변환소자를 이용하여 태양에너지를 전기로 전환·생산하는 태양광 이용 기술, 집열(集熱) 장치를 이용하여 태양열을 유체에 저장·생산하는 태양열 이용 기술이 있으며, 전기 및 열에너지의 동시 생산이 가능한 태양광·열 복합 이용 기술이 있다¹⁾.

태양에너지 이용 기술에 있어, 태양복사에너지의 입사강도는 전력 및 열 생산에 영향을 미치는 가장 중요한 요소로 작용된다. 단위 면적당 입사되는 태양복사에너지의 한계성을 고려할 때, 집광 및 집열 시스템의 설치면적은 매우 중요하다. 특히, 태양광 모듈(Photovoltaic module, PV-m)의 표면 온도의 상승은 효율 감소 및 수명 단축의 원인으로 알려져 있다.

태양광열 복합 시스템(Photovoltaic / Thermal hybrid solar system, PVT-s)은 PV-m 및 태양열 집열판(Solar thermal absorber plate, STA-p)의 단일 접합을 통해 전기 및 열에너지의 동시 생산이 가능하며, 태양에너지 단일 이용 시스템의 문제점 보완과 동시에 단위 면적당 에너지의 효율적 활용을 통한 성능 향상이 가능하다.

1970년 대 이후, PVT-s에 대한 연구가 시작되어, 2000년 대 들어서 다양한 변수 및 요인 등, 효율 향상을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. Tripanagnostopoulos(2002) 등은 공기식 및 액체식 PVT-s를 설치, 전기 및 열적 성능을 분석하였고, Fraisse(2007) 등은 unglazed 및 방사율이 다른 glazed PVT-s, PV-m, STA-p의 면적에 따른 열 및 전기 효율을 비교·분석한 바 있다. Chow(2006) 등은 Box channel design, Dubey(2008) 등은 Sheet and Tube design의 흡수관을 적용하

여 Packing Factor(= PV-m 면적 ÷ STA-p, PF)에 따른 열 및 전기적 성능의 비교·분석을 수행하였고, Chow(2009) 등은 펌프 대신 온도 차이로 발생하는 밀도 차이에 의한 순환 방식을 적용하여 glazed 및 unglazed된 PVT-s의 효율 분석을 수행하였다.

본 실험에 사용된 PVT-s의 주요 시스템은 기본적으로 빛에너지를 전기에너지로 변환할 수 있는 PV-m, 열에너지를 흡수할 수 있는 STA-p, 생산된 열을 저장할 수 있는 축열(蓄熱) 장치(Storage tank) 등으로 구성되며, 추가적으로 PV-m 냉각 및 STA-p의 열을 전달하는 작동유체(Working fluid), 작동유체의 순환을 위한 펌프 등으로 구성된다.

본 연구에서는 PVT-s, PV-m, STA-p를 이용, 단일 태양에너지 이용 시스템 대비 실험 조건 및 변수 등에 의한 집열 및 집광 효율의 비교·분석을 통해, PVT-s의 성능 검증을 수행하고, 열 및 전기 효율을 분석하고자 한다.

2. 태양에너지 이용 시스템 설계 및 제작

본 실험을 위해 설계·제작된 태양에너지 이용 시스템으로는 PV-m(KW-250M, (주)경원, 대한민국), STA-p(JH-F, 제인상사(주), 대한민국), PVT-s(KW-250M, (주)경원, JH-F, 제인상사(주), 대한민국)이다. STA-p는 지식경제부 기술표준원 한국인정기구(Korea Laboratory Accreditation Scheme, KOLAS)의 시험을 통한 효율 검증이 완료된 제품이며(성적서 번호 KIER-19-4-010호), PV-m의 기초 성능 시험은 photovoltaic module testing system(SPI-SUN SIMULATOR, Spire Solar corporation, USA)을 이용하였다.

PV-m 및 STA-p를 열전도성이 우수한 에폭시 계열의 접착제를 사용, PF를 약 0.8로 하여, 그림 1과 같이 접합·일체화하였다.

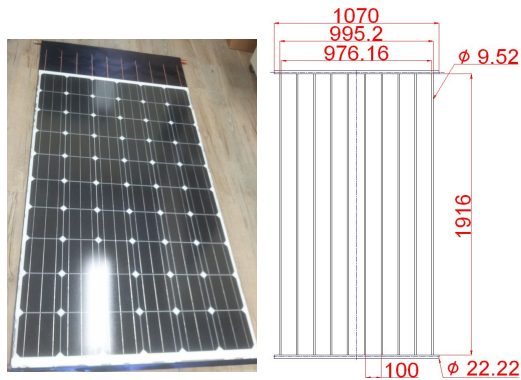
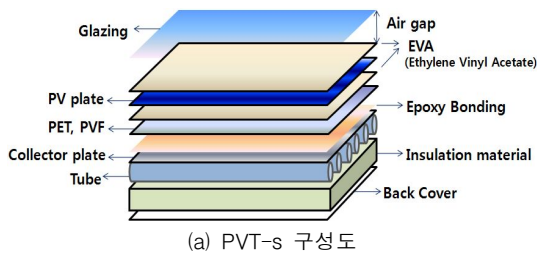


그림 1. PVT-s 및 흡수관 평면도

PVT-s의 구성은 그림 2와 같으며 유리판과 PV plate 사이에 약 1cm 간격의 중공층을 두어 열성능을 고려하였으며, PV plate 뒷판의 내부는 Polyethylene Terephthalate (PET), 외부는 Polyvinyl Fluoride(PVF)가 사용되었다.



(a) PVT-s 구성도



(b) PVT-s 단면도
그림 2. PVT-s 도식

여기서, Insulation material의 재질은 White Glass wool로 두께 30mm, 열전도율 0.0395W/m²이며, 프레임은 알루미늄이 사용되었다.

3. 실험 구성 및 방법

3.1 실험 장치 구성

태양에너지 이용 시스템은 설치 장소(강원도 춘천시 강원대학교 농업생명과학대학 1호

관 옥상, 위도 37°52', 경도 127°44'), 설치 환경(양지, 일직선상, 고정), 설치 방향(정남향, 동일 경사각 30°, 지상고 550mm), 시스템 형태(평판형) 등의 조건을 동일화하여 구성되었으며, 집광면적은 PV-m 1.6m², STA-p 2m², PVT-s 2m²이다. 각 시스템의 구성은 그림 3과 같다.



그림 3. PV-m(좌), STA-p(중), PVT-s(우) 설치사진

Weather Station(WatchDog 2800, Spectrum Technologies, Inc., Plainfield, IL, USA)은 측방 약 10m 지점, Storage Tank 및 Pump(PH-045M 및 PW-200SMA, 윌로펌프(주), 대한민국)는 후방 약 1m 지점에 설치되었으며, 데이터 수집 장치인 Data logger(GL800, Graphtech, JAPAN)는 각 시스템으로부터 전선이 연결되는 단자대 등이 강수에 영향을 받지 않도록 방수 케이스 내에 고정 설치되었다. 그림 4는 PVT-s를 포함하는 실험장치의 구성을 나타내고 있다.

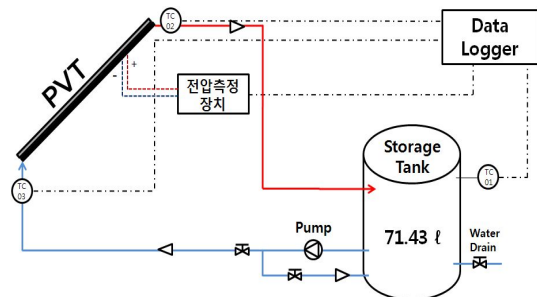


그림 4. 실험장치 구성도

온도 측정을 위해 K-type의 열전대 (Thermocouple)를 이용하였으며, 설치된 위치는 PVT-s 및 STA-p의 입구 및 출구, Storage Tank의 내부, PV-m의 back cover로, 측정되는 각각의 온도를 시간 단위로 수집하기 위해 Data logger의 각 채널에 연결하였다.

3.2 실험 방법

성능 비교 실험이 수행된 기간은 2011년 8월 31일(Glazed 성능 실험)과 9월 1일(Unglazed 성능 실험) 총 2일 간이며, 일출~일몰간의 데이터를 수집하였다. 또한, 각 시스템의 작동 및 정지를 동시에 하였으며, PVT-s의 집열 효율은 STA-p와, PVT-s의 전기 효율은 PV-m과 비교·분석되었다.

PVT-s 및 STA-p 내부를 흐르는 작동유체는 물(H₂O)을 사용하였고, 유량은 약 6 l/min으로 하였으며, 흐름 방향은 하부에서 상부로 하여, 유체가 흡수관 내부를 가득 채워 흐르게 하였다. 또한, Storage Tank 내부 및 시스템을 순환하는 작동유체의 총 부피는 71.43 l로 하였다.

열효율 시험²⁾은 일사량 강도 900W/m², 평균 풍속 3m/s ± 1m/s, 단위면적당 유속 약 0.02kg/s 등의 조건을 고려하여, 최소 4개 이상의 유체 입구 온도에 대해 측정, 최초 입구 온도는 외기온도의 ±3℃ 범위 이내, 최대 온도 80℃ 이하를 만족하였다. 정상상태에 도달하는 시간은 각 시스템 시간정수의 약 4배 (약 10분)로 하여, 공급되는 열매체 온도를 일정하게 유지하였으며, 표 1에 주어진 범위 이내일 경우, 정상상태에서 작동된 것으로 간주하였다.

표 1. 측정 변수 허용 범위

변 수	평균값으로부터 허용 오차
집열면 전 일사량	± 50 W/m ²
외기온도	± 1 ℃
작동유체 유량	± 1 %
집열기 입·출구의 작동유체 온도	± 0.1 ℃

4. 실험 결과

4.1 열 및 전기 성능

4.1.1 Glazed

2011년 8월 31일에 Glazed PVT-s의 성능 실험이 수행되었다. 전기 및 열 성능에 영향을 주는 기상데이터(그림 5)인 일사량, 외기 온도, 습도, 풍속을 측정하였다.

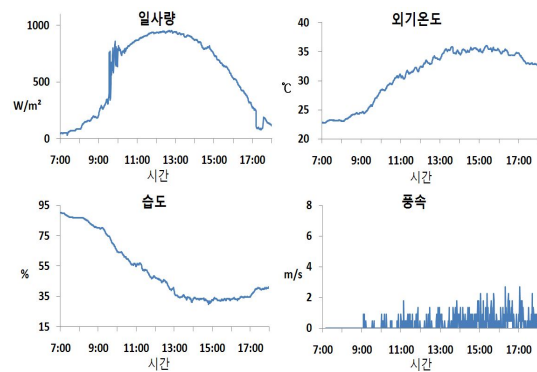


그림 5. 2011년 8월 31일 기상데이터

STA-p 및 PVT-s의 축열탱크 내부의 작동유체 초기온도는 07시 10분에 21℃로 시작하여, 약 15시 25분에 각각 최대온도 81.3℃, 68.4℃까지 도달한 후 감소하기 시작하였다 (그림 6).

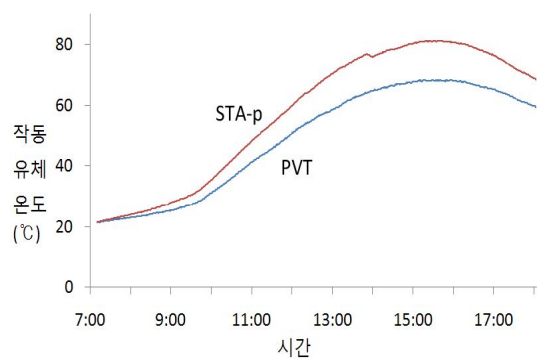


그림 6. Glazed PVT-s 및 STA-p의 열성능

PV-m 및 PVT-s의 전력은 일사량에 비례, 상승하여 약 12시 48분과 40분에 각각

260.00W, 238.38W까지 상승하였으며, 약 10시 이전 및 약 17시 10분 이후에 구름에 의한 일사 반사에 의해 전력 발생의 불규칙성이 나타났다(그림 7). 이는 PVT-s에 설치된 유리판에서 발생하는 태양복사에너지의 흡수·반사와 더불어, 유리판으로 인해 발생하는 온실효과에 의한 PVT-s 내부에 설치된 PV-m의 온도 상승으로 인해, PVT-s의 전력 발생이 PV-m 대비 평균 13.22W 낮게 나타났다.

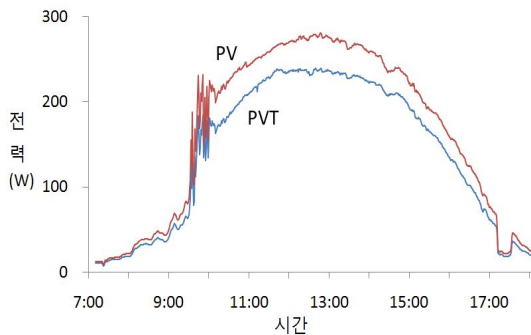


그림 7. Glazed PVT-s 및 PV-m의 전기 성능 비교

4.1.2 Unglazed

9월 1일에 Unglazed PVT-s의 성능 실험이 수행되었으며, 이를 위해 유리판이 제거된 상태로 Glazed PVT-s와 동일한 실험 방법에 의해 성능 검증이 진행되었다.

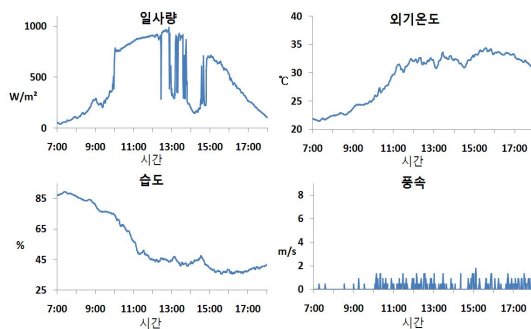


그림 8. 2011년 9월 1일 기상데이터

STA-p 및 PVT-s의 축열 탱크 내부의 작동유체 초기온도는 07시 10분에 22°C로 시작

하여, 약 13시 36분에 각각 최대온도 70.6°C, 51.5°C까지 도달한 후 일사량의 영향을 받아 변화하였다(그림 9).

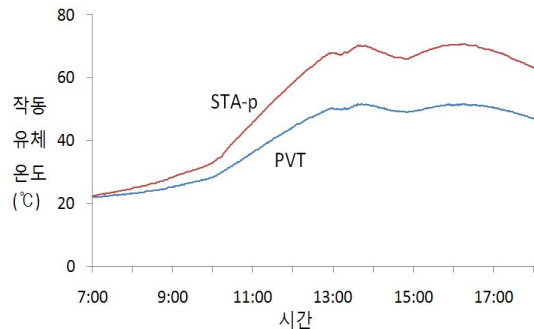


그림 9. Unglazed PVT-s 및 STA-p의 열성능

그림 6과 9를 통해, Unglazed PVT-s의 유리판이 제거됨으로 인한 외기와의 대류열손실이 상승되어, STA-p의 작동유체 온도와 격차가 Glazed PVT-s에 비해 평균 3.9°C 높게 나타났다.

PV-m 및 PVT-s의 전력은 일사량에 비해, 상승하여 약 12시 51분에 각각 263.84W, 265.37W까지 상승하였으며, 약 10시 이전 및 12시 25분~14시 48분에 구름에 의한 일사 반사에 의해 전력 발생의 불규칙성이 나타났다(그림 10). 여기서, Unglazed PVT-s는 유리판에 의한 태양복사에너지 흡수·반사가 발생되지 않고, 시스템을 순환하는 작동유체에 의한 냉각 작용이 발생되어, 전력발생량이 PV-m 대비, 평균 4.79W 높게 나타났다.

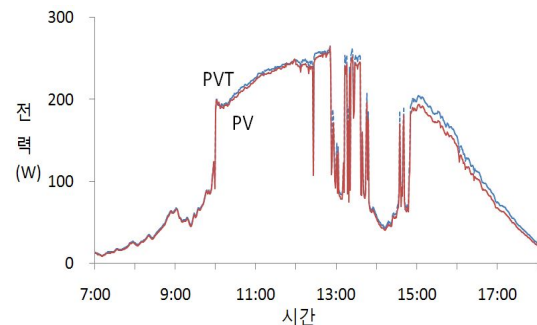


그림 10. Unglazed PVT-s 및 PV-m의 전기 성능 비교

4.2 열 효율

정상상태 조건에서 작동하는 태양열 이용 시스템의 순간 열효율은 시스템에 도달한 일사량에 대한 실제 집열된 열량의 비율로 정의할 수 있다.

실제 집열된 열량 Q_1 은 식 (1)과 같이 계산된다.

$$Q_1 = \dot{m} C_p (T_{in} - T_o) \quad (1)$$

여기서, 작동유체의 비열 $C_p (J/kg^\circ C)$ 는 시스템의 입구온도 하에서의 값이 사용되며, $\dot{m} (kg/s)$ 은 질량유량, $T_{in} (^\circ C)$ 과 $T_o (^\circ C)$ 는 각각 입구 및 출구 온도를 나타낸다.

시스템에 도달한 일사량 Q_2 는 식 (2)와 같이 계산된다.

$$Q_2 = A_{PVT} G \quad (2)$$

여기서, $A_{PVT} (m^2)$ 는 태양열 이용 시스템의 집열 면적, $G (W/m^2)$ 는 일사량을 나타낸다.

식 (1)과 (2)를 이용하여 단위면적 당 계산되는 순간 열효율 η_t 는 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\eta_t = \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\dot{m} C_p (T_{in} - T_o)}{A_{PVT} G} \quad (3)$$

STA-p의 열효율은 KOLAS의 효율시험 결과로 작동유체 유량은 약 0.04kg/s, 열효율식은 $\eta_t = 0.7151 - 4.6728x (W/m^2^\circ C)$ 로 표현되며 여기서, x 는 $(T_{in} - T_a)/G$ 값을 의미한다. PVT-s의 열효율 시험은 작동유체 입구온도 30°C(외기온도와 동일), 45°C, 60°C, 75°C를 만족하였으며, 열효율식은 $\eta_t = 0.5541 - 9.4986x (W/m^2^\circ C)$ 로 표현된다. 여기서, $(T_{in} - T_a)/G$ 에 대한 STA-p와 PVT-s의 열손실계수($F_R U_L$)는 각각 4.6728과 9.4986이며, 열효율계수는 각각 0.7151과 0.5541로 나타났다.

실험기간은 총 4일 간 정오를 기점으로 ± 2 시간 동안 수행되었으며, 유량은 0.04kg/s로 유지, Open loop system으로 하여 시스템 내부를 순환한 물을 외부로 배출하였다. 또한, 20°C~120°C까지 조절이 가능한 자동온도조절히터를 이용하여 열효율 시험에 필요한 각각의 작동유체 입구 온도를 일정하게 유지하였으며, Weather station에 의해 시험에 필요한 기상데이터(일사량, 외기온도, 풍속)가 수집되었다. 그림 11을 통해, STA-p 및 PVT-s의 $(T_{in} - T_a)/G$ 에 대한 열효율 변화를 나타내었다. $(T_{in} - T_a)/G$ 가 0일 때, STA-p 및 PVT-s의 열효율은 각각 71.5%와 57.9%로 나타났으며, $(T_{in} - T_a)/G$ 가 0.05일 때, 각각 48.1%와 11.0%로 나타났다.

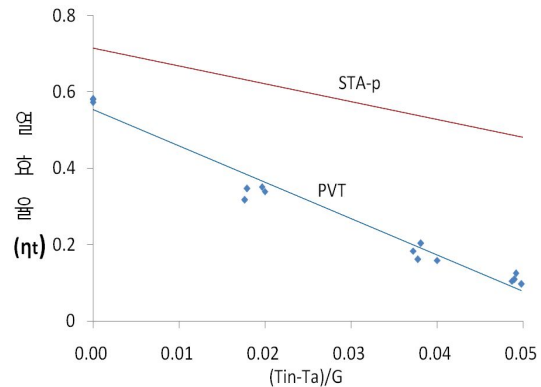


그림 11. STA-p와 PVT-s의 열효율 비교

4.3 전기 효율

태양광 이용 시스템의 순간 전기효율은 시스템에 도달한 일사량에 대한 시스템의 출력되는 최대 전력의 비율로 정의할 수 있다.

최대 출력 전력 P_m 은 최대 출력 동작 전압 V_m 과 최대 출력 동작 전류 I_m 의 곱으로 나타내며, 식 (4)와 같다.

$$P_m = I_m V_m \quad (4)$$

시스템에 도달한 일사량은 식 (2)와 동일하며, 단위 면적당 계산되는 순간 전기효율 η_e

는 식 (5)와 같이 계산된다.

$$\eta_e = \frac{I_m V_m}{A_{PVT} G} \quad (5)$$

그림 12는 $(T_{in} - T_a)/G$ 에 대한 전기효율 (η_e)의 변화를 나타낸 것으로, 전기효율식은 $\eta_e = 0.133 - 0.426x (W/m^2\text{ }^\circ\text{C})$ 로 표현된다. 여기서, 전기손실계수는 0.426, 전기효율계수는 0.133으로 나타났으며, 최초 약 13.4%에서 최종 약 11.4%까지 감소하였다.

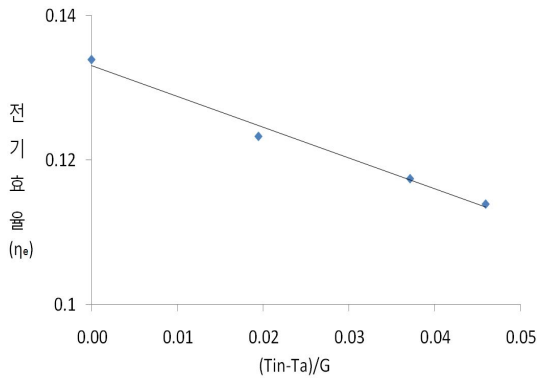


그림 12. PVT-s의 입구온도에 따른 전기효율

PVT-s의 입구온도는 실험기간(10시 ~ 14시) 동안 외기온도와 함께 유지하였으며, 그림 13을 통해, PVT-s 및 PV-m의 일사량에 따른 전기 효율 변화를 나타내었다. PV-m의 경우, 일사량 $949W/m^2$, 외기온도 31.5°C 일 때, 최대 14.3%를 나타내었고, 일사량 $1030W/m^2$, 외기온도 33.0°C 일 때, 최소 12.7%를 나타내었다. PVT-s의 경우, 일사량 $949W/m^2$, 외기온도 31.5°C 일 때, 최대 14.2%를 나타내었고, 일사량 $1030W/m^2$, 외기온도 33.0°C 일 때, 최소 12.5%를 나타내었다. PV-m의 효율이 PVT-s의 효율에 비해 약 2.3% 높게 나타났다. 이는 PVT-s에 설치된 유리판에 의한 태양복사에너지의 흡수·반사 및 온실효과로 인한 PVT-s의 온도 상승으로 인해, PV-m 대비 효율 감소폭이 크게 나타났다.

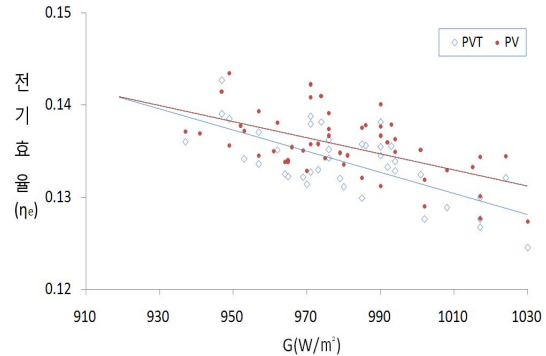


그림 13. 태양광 시스템의 일사량에 따른 전기효율

열효율과 전기효율의 합인 총 효율(the total efficiency, η_o)은 식 (6)과 같다.

$$\eta_o = \eta_t + \eta_e \quad (6)$$

외기온도(30°C)와 동일한 작동유체의 온도, 일사량 $900W/m^2 \pm 50W/m^2$ 의 조건을 만족하는 STA-p 및 PVT-s의 열효율은 각각 71.51%, 57.95%, PV-m 및 PVT-s의 전기효율은 각각 14.35%, 14.27%로 PVT-s의 총 효율은 72.22%를 나타내었다.

4. 결 론

본 연구에서는 태양에너지 이용 시스템의 전기 및 열 성능 비교 연구 및 효율 분석을 수행하였다.

Glazed PVT-s의 경우, 축열 탱크 내부의 작동유체 온도가 최대 68.4°C 까지 상승하여, STA-p 대비 12.9°C 낮았으며, 평균 8.2°C 낮은 집열 성능을 나타내었다. 전력은 최대 $238.38W$ 까지 상승하여, PV-m 대비 $21.62W$ 낮았으며, 평균 $13.22W$ 낮은 출력 성능을 나타내었다.

Unglazed PVT-s의 경우, 축열 탱크 내부의 작동유체 온도가 최대 51.5°C 까지 상승하여, STA-p 대비 19.1°C 낮았으며, 평균 12.1°C 낮은 집열 성능을 나타내었다. 전력은 최대 $265.37W$ 까지 상승하여, PV-m 대비 $1.53W$

높았으며, 평균 4.79W 높은 출력 성능을 나타내었다. 이는 Glazed PVT-s와 달리, 일사 반사율의 감소에 의한 전기 성능 향상 및 작동 유체의 냉각효과가 나타난 것으로 판단된다.

열효율은 $(T_{in} - T_a)/G$ 가 0일 때, STA-p 및 PVT-s의 열효율은 각각 71.5%와 57.9%로 나타났으며, $(T_{in} - T_a)/G$ 가 0.05일 때, 각각 48.1%와 11.0%로 나타났다. 즉, 작동 유체의 입구온도가 30°C에서 75°C로 상승하였을 때, STA-p 및 PVT-s의 열효율이 각각 23.4%, 46.9% 감소한 것으로 나타났다. 이를 통해, 태양열 이용 시스템은 작동 유체의 입구온도가 낮을수록 열효율이 상승되는 것으로 분석된다.

전기효율은 PVT-s의 작동 유체 입구온도가 30°C에서 75°C로 상승했을 경우, 2% 감소한 것으로 나타났다. 일사량에 대한 전기효율은 PV-m이 PVT-s에 비해 평균 0.002% 높게 나타났으며, 일사량 약 950W/m²에서 1030W/m²로 약 80W/m² 상승, 외기온도 약 31.5°C에서 33.0°C로 1.5°C 상승하였을 때, PV-m과 PVT-s의 효율은 각각 1.6%, 1.7% 감소하였다. 이는 PVT-s에 설치된 유리판에 의한 태양복사에너지의 흡수·반사 및 온실효과로 인한 PVT-s의 온도 상승으로 인해 PV-m 효율 대비 최대-최소 효율 감소폭이 0.1% 크게 나타난 것으로 판단된다.

총 효율은 STA-p 71.51%, PV-m 14.35%, PVT-s 72.22%로 PVT-s의 총 효율이 STA-p 대비 0.71%, PV-m 대비 57.87% 높게 나타났다.

본 연구를 통해, Glazed 및 Unglazed PVT-s의 열 및 전기 성능 실험과 더불어 Glazed PVT-s의 입구온도에 따른 열효율 시험 및 일사량에 따른 전기효율 시험을 수행하였으며, 단위 면적당 총 효율은 PVT-s가 가장 높게 나타난 것으로 분석되었다. 향후 Box channel design의 흡수관 및 염료감응 태양 전지 적용 등의 변수에 따른 성능 비교 실험이 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 어승희, 김대현, 선행 연구된 태양광열 복합 시스템의 문헌 검토를 통한 성능 및 효율분석, 한국태양에너지학회 논문집, Vol.31, No 3, pp. 57-66, 2011
2. 지식경제부 기술표준원 주력산업표준과, 태양열 집열기의 시험방법 - 제1부:집열창이 부착된 압력강하가 발생하는 액체식 집열기의 열적성능, pp. 1-54, 2008