

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

투고일자 : 2011년 9월 29일, 심사일자 : 2011년 10월 5일, 게재확정일자 : 2012년 3월 26일
교신저자 : 김대현(daekim@kangwon.ac.kr)

T_{in}	: 입구온도 (°C)
T_o	: 출구온도 (°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 기술에서, 태양복사에너지의 입사강도는 전력 및 열 생산에 영향을 미치는 가장 중요한 요소로 작용되며, 단위 면적당 입사되는 태양복사에너지의 한계성을 고려할 때, 집광 및 집열 시스템의 설치 면적은 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 태양열 집열기(Solar collector, SC)의 집열판(collector plate) 상에 태양광판(PV plate)을 접합한 형태로, 전기 및 열에너지의 동시 생산이 가능하다. 특히 태양광판의 전기 생성 과정에서 발생하는 열의 흡수가 용이하여, 온도상승에 따른 효율감소 문제점 등의 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)²⁾ 등은 공기식 및 액체식 PVT-s를 설치, 전기 및 열적 성능을 분석하였고, Fraisse(2007)³⁾ 등은 Unglazed PVT-s 및 방사율이 다른 Glazed

PVT-s, PV-m, SC의 면적에 따른 열 및 전기 효율을 비교·분석한 바 있다. Chow(2006)⁴⁾ 등은 Box channel design, Dubey(2008)⁵⁾ 등은 Sheet and Tube design의 흡수관을 적용하여 Packing Factor(= PV-m 면적 ÷ SC 면적, PF)에 따른 열 및 전기적 성능의 비교·분석을 수행하였고, Chow(2009)⁶⁾ 등은 펌프 대신 온도 차이로 발생하는 밀도 차이에 의한 순환 방식을 적용하여 Glazed PVT-s 및 Unglazed PVT-s의 효율 분석을 수행하였다.

PVT-s는 평판형 및 집광형, 액체식 및 공기식, Glazed 및 Unglazed, 다양한 형태의 흡수관(sheet and tube, box channel, free flow) 등으로 설계·제작이 가능하며, PF, 설치각도, 유량, 작동유체의 물리적 성질, 일사량, 풍속 등의 요인 및 변수에 의해 성능이 결정된다.

본 실험에 사용된 PVT-s는 평판형, 액체식, Glazed, sheet and tube design이며, 구성된 주요 시스템은 기본적으로 빛에너지를 전기에너지로 변환할 수 있는 태양광판, 흡수관 내부를 순환하는 작동유체를 통해 열에너지를 흡수할 수 있는 집열판, 생산된 작동유체의 열을 저장할 수 있는 축열(蓄熱) 장치(Storage tank) 등으로 구성된다. 추가적으로 태양광판의 냉각 및 집열판의 열을 전달하는 작동유체(Working fluid), 작동유체의 순환을 위한 펌프 등으로 구성된다.

본 연구에서는 PVT-s, PV-m, SC를 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 실험은 PV-m(KW-250M, (주)경원, 대한민국), SC(JH-F, 제인상사(주), 대한민국), PVT-s(KW-250M, (주)경원, JH-F, 제인상

사(주), 대한민국) 등 3종류의 시스템을 이용하였다.

평판형 태양열 집열기(SC)의 성능시험은 제인상사(주)에 의해 수행되었으며, 국제시험기관인정협력체(International Laboratory Accreditation Cooperation) 상호인정협정(Mutual Recognition Arrangement)에 서명한 한국인정기구(Korea Laboratory Accreditation Scheme, KOLAS)로부터 공인받은 분야에 대한 실험결과로 지식경제부 고시 제2009-310호(태양열집열기 세부심사기준 SH 101 : 2009)의 시험방법을 통한 효율 검증이 완료된 제품이다(성적서 번호 KIER-19-4-010호). SC의 사양은 PVT-s에 적용된 SC의 사양과 동일하며, 집열부의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 태양열 집열기의 집열부 사양

투과체	저철분강화유리(투과율:90%) (가로:96mm×세로:1996mm ×두께:3.2mm×매수:1)
흡열판	동관(흡수율 : 95%±2% 방사율 5%±2%) (가로:98mm×세로:1960mm ×두께:0.2mm×매수:1)
	도장방식 Magnetron Sputtering
	흡 열 판 제조방식 도관접합
주관	동관 (외경:φ22.22mm×두께:1mm ×길이:1070mm×개수:2)
지관	동관 (외경:φ9.52mm×두께:0.9mm ×길이:191.6mm×개수:10)
집열기	가로:1,000mm×세로:2,000mm×높이 : 80mm
	전면적:2.00m ² 투과면적:1.94m ² 흡수면적:1.87m ²
	빈무게 : 36.23 kg 찬무게 : 37.74 kg

PV-m 및 PVT-s 내 태양광판의 기초 성능 시험은 (주)경원에 의해 수행되었으며, Photovoltaic Module Testing System(SPI-SUN SIMULATOR, Spire Solar corporation, USA)이 이용되었다. 시험 결과를 통한 PV-m 및 PVT-s 내부에 설치된 태양광판의 사양은 표

2와 같다.

표 2. PV-m 및 PVT-s 內 PV-m 사양

	PV module	PVT-s 內 PV plate
셀 유형	156mm×156mm mono crystalline silicon 3 bus bar type	
최대 효율	약 15.67 %	약 15.63 %
최대 출력	251.911 W	251.268 W
최대 전압	30.709 V	30.561 V
최대 전류	8.2032 A	8.2218 A
단락 전류	8.6289 A	8.6551 A
개방 전압	37.452 V	37.397 V
모듈 크기	979mm×1642mm×38mm	

특히, PVT-s의 제작을 위해, (주)경원의 태양광 모듈제조 공장을 방문하여, 집열판 및 태양광판을 열전도성이 우수한 에폭시 계열의 접착제를 사용, PF를 약 0.8로 하여, 그림 1과 같이 접합·일체화하였다.

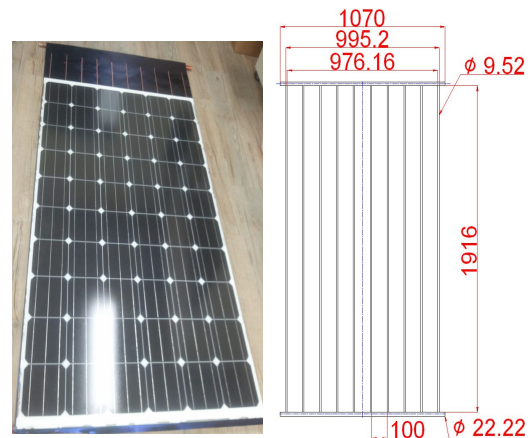
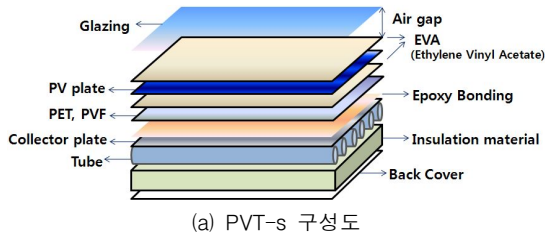
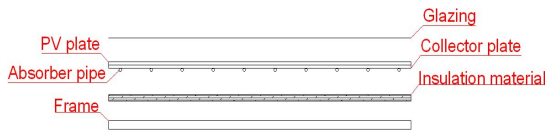


그림 1. PVT-s 및 흡수관 평면도

PVT-s의 구성은 그림 2와 같으며, 유리커버와 태양광판 사이에 약 1cm 간격의 증공층(Air gap)을 두어 열성능이 고려되었으며, 태양광판 뒷면의 내부는 Polyethylene Terephthalate (PET), 외부는 Polyvinyl Fluoride(PVF)가 사용되었다.



(a) PVT-s 구성도



(b) PVT-s 단면도

그림 2. PVT-s 도식

여기서, 태양광판(EVA, PET, PVF) 및 접착층(Epoxy bonding)을 제외한 구성은 SC와 동일하고, 유리커버만 제외할 경우 Unglazed PVT-s의 구성과 동일하다. Insulation material의 재질은 White Glass wool로 두께 30mm, 열전도율 0.0395W/m°C이며, 프레임은 알루미늄이 사용되었다.

3. 실험 구성 및 방법

3.1 실험 장치 구성

태양에너지 이용 시스템은 설치 장소, 설치 환경, 설치 방향 등의 실험 조건이 동일화되어 설정, 구성되었으며, 표 3과 같다.

표 3. 태양에너지 시스템 실험 조건

실험 조건	SC	PV-m	PVT-s
설치 장소	강원대학교 농생대 1호관 옥상 (위도 37°52', 경도 127°44')		
설치 환경	양지, 일직선상, 고정		
설치 방향	정남향, 동일 경사각 33°, 지상고 550mm		
집광·열 방식	평판형		
집광·열 면적	2m ²	1.6m ²	2m ²

이에 대한, 태양에너지 이용 시스템의 설치 사진은 그림 3과 같으며, 좌측부터 PV-m,

SC, PVT-s로 구성된다.



그림 3. PV-m(좌), SC(중), PVT-s(우) 설치사진

기상관측장치(WatchDog 2800, Spectrum Technologies, Inc., Plainfield, IL, USA)는 측방 약 10m 지점, 축열탱크 및 펌프(PH-045M 및 PW-200SMA, 윌로펌프(주), 대한민국)는 후방 약 1m 지점에 설치되었으며, 데이터수집장치인 데이터로거(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.

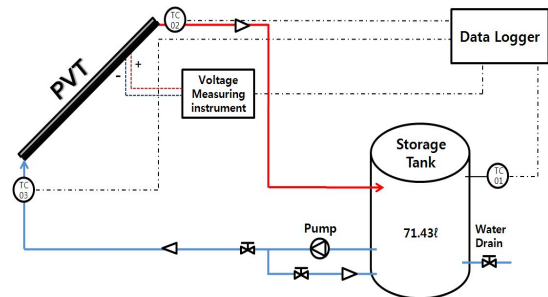


그림 4. 실험장치 구성도

온도 측정을 위해 K-type의 열전대(Thermocouple)를 이용하였으며, 설치된 위치는 PVT-s 및 SC의 입구 및 출구, 축열탱크의 내부, PV-m의 후면커버로, 측정되는 각각의 온도를 시간 단위로 수집하기 위해 데이터로거의 각 채널에 연결하였다.

PVT-s 및 PV-m에서 발생하는 전압 및 전류를 측정하기 위해 그림 5와 같이 회로도를 구성하였다.

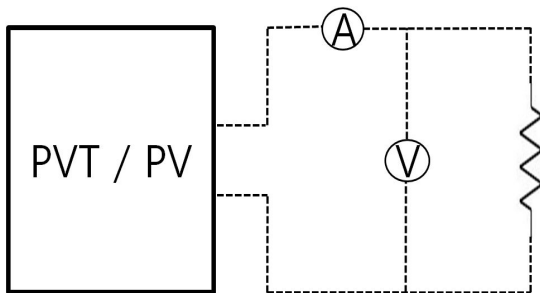


그림 5. 전압 측정 장치 회로도

3.2 실험 방법

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

PVT-s 및 SC 내부를 흐르는 작동유체는 물(H₂O)을 사용하였고, 유량은 제인상사(주)에서 제작된 태양열집열기의 사양에 의해 최대권장량인 약 0.09kg/s로 결정되었으며, 흐름 방향은 하부에서 상부로 하여, 유체가 흡수관 내부를 가득 채워 흐르게 하였다. 또한, 축열탱크 내부 및 시스템을 순환하는 작동유체의 총 부피는 71.43ℓ로 하였다.

온도 측정은 각 부에 설치된 열전대를 이용, 데이터로거에 1분 단위로 수집되었으며, 일사량, 외기온도, 풍속, 습도 등의 데이터는 기상관측장치에 의해, 1분 간격으로 측정·수집되었다.

열효율 시험은 지식경제부에서 주관하는 신재생에너지 설비 중 태양열 집열기 설비심사 세부기준⁷⁾을 근거로 수행되었으며, 실험 조건에 의해, 정오를 기점으로 ±2시간 범위 내에서 일사량 강도 900W/m², 평균 풍속 3m/s

± 1m/s, 단위면적당 유속 약 0.02kg/s 등의 조건을 고려하여, 최소 4개 이상의 유체 입구 온도(30℃, 45℃, 60℃, 75℃)에 대해 각각의 온도에 해당되는 독립된 데이터(총 16개)가 측정되었다. 또한, 시험에 필요한 각각의 작동유체 입구온도를 일정하게 유지하기 위해 20℃에서 120℃까지 조절이 가능한 자동온도조절히터를 이용하였으며, Glazed PVT-s 내부를 통과하면서 온도가 상승된 작동유체는 외부로 배출되었다. 작동유체의 최초 입구온도는 외기온도의 ±3℃ 범위 이내, 최대 온도 80℃ 이하를 만족하였으며, 정상상태에 도달하는 시간은 각 시스템 시간정수의 약 4배(약 10분)로 하여, 공급되는 열매체 온도를 일정하게 유지하였으며, 표 4에 주어진 범위 이내일 경우, 정상상태에서 작동된 것으로 간주되었다.

표 4. 측정 변수 허용 범위⁷⁾

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

(1) Glazed

2011년 8월 31일에 Glazed PVT-s의 성능 실험이 수행되었다. 전기 및 열 성능에 영향을 주는 기상데이터(그림 6)인 일사량, 외기온도, 습도, 풍속을 측정하였다. 일사량은 10시 10분 이후에 구름이 없는 청명한 날씨를 보여, 12시 47분에 최대 954W/m²까지 상승하였으며, 외기온도는 일사량에 비례하여 상승하여, 10시 39분 이후로 30℃ 이상을 유지하였다. 습도는 최초 89.9%에서 점차 감소하여, 11시 39분 이후에 50.0% 이하를 유지하였으며, 평균 풍속은 실험 시간 동안 약 0.183m/s로 나타났다.

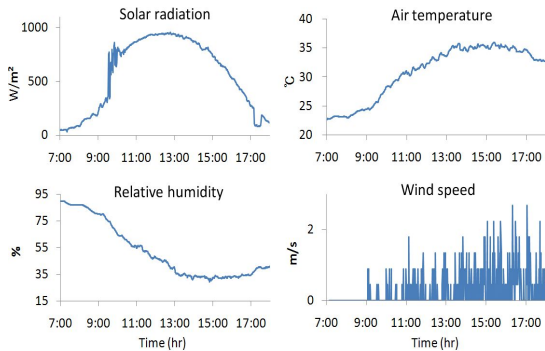


그림 6. 2011년 8월 31일 기상데이터

SC 및 Glazed PVT-s의 축열탱크 내부의 작동유체 초기온도는 07시 10분에 약 21.0°C에서 시작하여, 약 15시 25분에 각각 최대온도 81.3°C, 68.4°C까지 도달한 후 감소하기 시작하였다(그림 7).

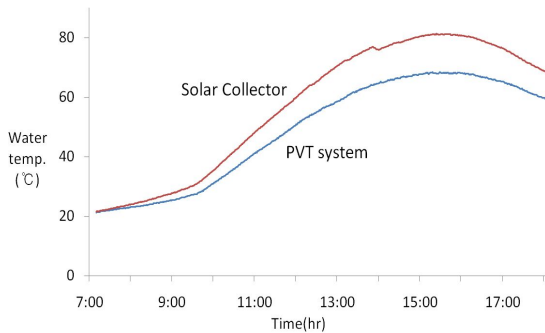


그림 7. Glazed PVT-s 및 태양열 집열기의 열성능

PV-m 및 Glazed PVT-s의 전력은 일사량에 비례, 상승하여 약 12시 48분과 40분에 각각 249.60W, 228.84W까지 상승하였으며, 약 10시 이전 및 약 17시 10분 이후에 일사량의 급속한 변화에 의해 전력 발생의 불규칙성이 나타났다(그림 8). 이는 Glazed PVT-s에 설치된 유리커버에서 발생하는 태양복사에너지의 흡수·반사와 더불어, 유리커버로 인해 발생하는 온실효과에 의한 PVT-s 내부에 설치된 태양광판의 온도 상승으로 인해, PVT-s의 전력 발생이 PV-m 대비 평균 12.69W 낮게 나타났다.

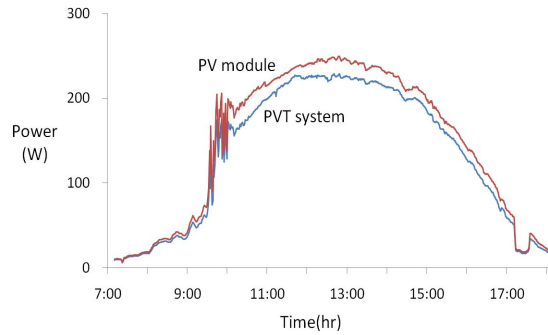


그림 8. Glazed PVT-s 및 PV-m의 전기 성능 비교

(2) Unglazed

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

9월 1일의 기상데이터(그림 9)에서 일사량은 10시 이후에 구름이 없는 청명한 날씨를 보여, 12시 51분에 최대 989W/m²까지 상승한 후 12시 25분~14시 48분에 일사량의 급속한 변화가 일어났으며, 외기온도는 일사량에 비례하여 상승하여, 11시 05분 이후로 30.0°C 이상을 유지하였다. 습도는 최초 87.9%에서 점차 감소하여, 11시 34분 이후에 50.0% 이하를 유지하였으며, 평균 풍속은 실험 시간 동안 약 0.165m/s로 나타났다.

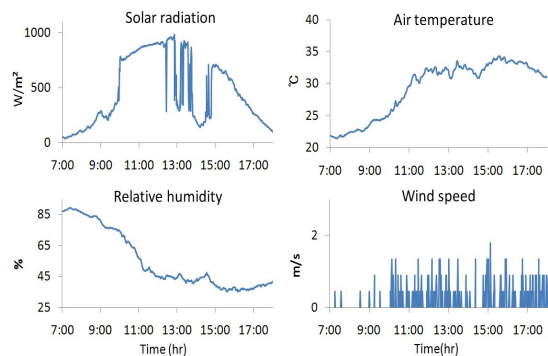


그림 9. 2011년 9월 1일 기상데이터

SC 및 Unglazed PVT-s의 축열 탱크 내부의 작동유체 초기온도는 07시 10분에 약 22.0°C로

시작하여, 약 13시 36분에 각각 최대온도 70.6°C, 51.5°C까지 도달한 후 일사량의 영향을 받아 변화하였다(그림10).

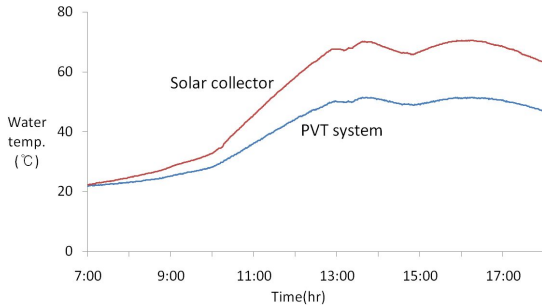


그림 10. Unglazed PVT-s 및 태양열 집열기의 열성능

그림 7과 10을 통해, Unglazed PVT-s는 유리커버가 제거됨으로 인한 외기와의 대류 열손실이 상승되고, 일사 반사율 감소 및 작동유체의 냉각효과에 의해, SC의 작동유체 온도와의 격차가 Glazed PVT-s에 비해 평균 3.9°C 높게 나타났다.

PV-m 및 PVT-s의 전력은 일사량에 비해, 상승하여 약 12시 51분에 각각 243.55W, 244.96W까지 상승하였으며, 약 10시 이전 및 12시 25분~14시 48분에 일사량의 급속한 변화에 의해 전력 발생의 불규칙성이 나타났다(그림 11). 여기서, Unglazed PVT-s는 유리판에 의한 태양복사에너지 흡수·반사가 발생되지 않고, 시스템을 순환하는 작동유체에 의한 냉각 작용이 발생되어, 전력발생량이 PV-m 대비, 평균 4.43W 높게 나타났다.

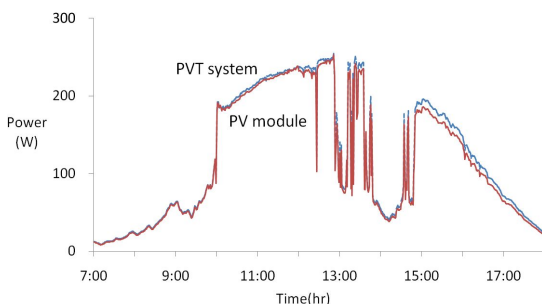


그림 11. Unglazed PVT-s 및 PV-m의 전기 성능 비교

4.2 열효율

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.

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

SC의 열효율 시험은 앞에서 언급된 성능 실험과 함께 제인상사(주)에 의해 수행되었다. 시험 결과에 의해, 작동유체 유량은 약 0.04kg/s, 열효율식은 $\eta_t = 0.7151 - 4.6728 x (W/m^2^\circ C)$ 로 표현되며 여기서, x 는 $(T_{in} - T_a)/G$ 값을 의미한다.

Glazed PVT-s의 열효율식은 $\eta_t = 0.5541 - 9.4986 x (W/m^2^\circ C)$ 로 표현된다. 여기서, $(T_{in} - T_a)/G$ 에 대한 SC와 PVT-s의 열손실계수($F_R U_L$)는 각각 4.6728과 9.4986

이며, 열효율계수는 각각 0.7151과 0.5541로 나타났다.

그림 12를 통해, SC 및 Glazed PVT-s의 $(T_{in} - T_a)/G$ 에 대한 열효율 변화를 나타내었다. $(T_{in} - T_a)/G$ 가 0일 때, SC 및 Glazed 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.

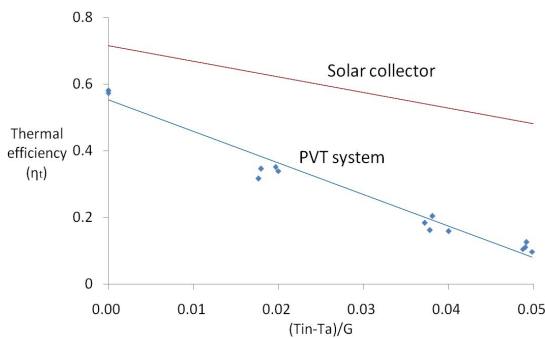


그림 12. SC와 Glazed PVT-s의 열효율 비교

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 13은 $(T_{in} - T_a)/G$ 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.

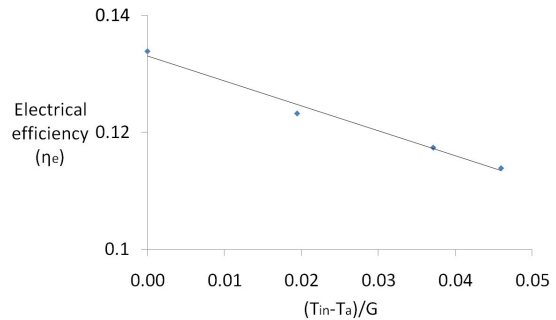


그림 13. Glazed PVT-s의 입구온도에 따른 전기효율

Glazed PVT-s와 PV-m의 일사량의 변화에 따른 전기효율 실험은 7월 20일 7시 30분부터 12시 40분까지, 일사량이 $312W/m^2$ 에서 $945W/m^2$ 까지 변화되는 동안 수행되었다(그림 14).

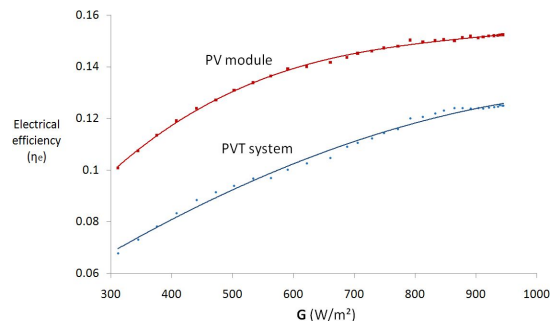


그림 14. 태양광 시스템의 일사량에 따른 전기효율

Glazed PVT-s의 경우, 일사량 $312W/m^2$, 외기온도 25.4°C 일 때, 최소 6.8%를 나타내었고, 일사량 $939W/m^2$, 외기온도 28.2°C 일 때, 최대 12.5%를 나타내었다. PV-m의 경우, 일사량 $312W/m^2$, 외기온도 25.4°C 일 때, 최소 10.1%를 나타내었고, 일사량 $943W/m^2$, 외기온도 28.4°C 일 때, 최대 15.2%를 나타내었다. 평균 전기효율은 Glazed PVT-s가 PV-m 대

비 약 3.2% 낮게 나타났다.

열효율과 전기효율의 합인 총 효율(the total efficiency, η_o)⁸⁾은 식 (6)과 같다.

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

외기온도(30°C)와 동일한 작동유체의 온도 (Zero reduced temperature), 일사량 900W/m²±50W/m²의 조건을 만족하는 SC 및 Glazed PVT-s의 열효율은 각각 71.5%, 57.9%이며, 일사량 900W/m²±50W/m²의 조건을 만족하는 PV-m 및 Glazed PVT-s의 전기효율은 각각 12.5%, 15.2%로 Glazed PVT-s, SC, PV-m의 총 효율은 각각 70.4%, 71.5%, 15.2%로 산출되었다.

에너지 축적 효율(the energy saving efficiency, η_f)⁸⁾에서는 전기에너지를 에너지 획득의 고급 방식으로 고려하여, 발전소에서 전기에너지로의 변환 이전 상태인 열에너지로 표현하기 위한 식 (7)로 표현된다.

$$\eta_f = \eta_e / \eta_{power} + \eta_t \quad (7)$$

여기서, η_{power} 는 발전소의 전력발생효율로, 약 38%의 값을 나타내며, Glazed PVT-s, SC, PV-m의 에너지 축적 효율은 각각 90.8%, 71.5%, 40.0%로 산출되었다.

4. 결 론

본 연구에서는 태양에너지 이용 시스템의 전기 및 열 성능 비교 연구 및 효율 분석이 수행되었다.

Glazed PVT-s의 경우, 축열탱크 내부의 작동유체 온도가 최대 68.4°C까지 상승하여, SC 대비 12.9°C 낮았으며, 평균 8.2°C 낮은 집열 성능을 나타내었다. 전력은 최대 228.84W까지 상승하여, PV-m 대비 20.76W 낮았으며, 평균 12.69W 낮은 출력 성능을 나타내었다.

Unglazed PVT-s의 경우, 축열탱크 내부의 작동유체 온도가 최대 51.5°C까지 상승하여, SC 대비 19.1°C 낮았으며, 평균 12.1°C 낮은 집열 성능을 나타내었다. 전력은 최대 244.96W까지 상승하여, PV-m 대비 1.41W 높았으며, 평균 4.43W 높은 출력 성능을 나타내었다. 이는 유리커버가 제거되어, 일사 반사율의 감소에 의한 PV-m 대비 전기 성능 향상 및 외기에 의한 대류열손실 상승에 의한 작동유체가 냉각되어 SC 대비 작동유체 온도 차이가 크게 낮게 나타난 것으로 판단된다.

열효율은 $(T_{in} - T_a)/G$ 가 0일 때, SC 및 Glazed 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, 작동유체의 입구온도가 30°C에서 75°C로 상승하였을 때, SC 및 Glazed PVT-s의 열효율이 각각 23.4%, 46.9% 감소한 것으로 나타났다. 이는 Glazed PVT-s의 집열 면적의 약 80%를 차지하는 태양광판이 접합된 면적을 통해서 오는 오로지 전기 생산 과정에서 발생하는 열 및 태양광판에 흡수된 태양복사에너지의 전도열전달이 발생되며, 일사 흡수는 나머지 20%의 면적에서만 발생되기 때문에, 작동유체 입구온도 상승에 따른 Glazed PVT-s의 효율감소폭이 SC 대비 크게 나타났다.

전기효율은 Glazed PVT-s의 작동유체 입구온도가 30°C에서 75°C로 상승했을 경우, 2% 감소한 것으로 나타났다. 이는 작동유체 입구온도의 상승에 따라 PVT-s 내부의 태양광판에서 발생하는 열을 흡수할 수 있는 열량이 감소되어, 작동유체 입구온도의 상승에 따른 Glazed PVT-s의 전기효율이 감소된 것으로 판단된다. 일사량에 대한 전기효율은 Glazed PVT-s가 PV-m 대비 평균 3.2% 낮게 나타났으며, 이는 Glazed PVT-s에 설치된 유리커버에 의한 태양복사에너지의 흡수·반사 및 온실효과로 인한 Glazed PVT-s 내부의 태양광판의 온도 상승으로 인해, PV-m 대비 효

율이 낮게 나타났으며, 온도상승의 영향보다 일사량에 큰 영향을 받아 전기효율이 상승되는 것으로 사료된다.

총 효율은 Glazed PVT-s 70.4%, SC 71.5%, PV-m 15.2%로 산출되었으며, 에너지 축적 효율은 Glazed PVT-s 90.8%, SC 71.5%, PV-m 40.0%로 산출되었다. 이를 통해, 총 효율을 고려할 경우, Glazed PVT-s가 SC 대비 1.1% 낮은 반면, 에너지 축적 효율을 고려할 경우, Glazed PVT-s가 SC 대비 19.3% 높게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해, Glazed PVT-s의 단위면적당 태양에너지 축적률이 가장 높은 것을 알 수 있다.

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 Glazed PVT-s가 가장 높게 나타난 것으로 분석되었다.

이에, 전기 및 온수의 동시 공급을 요하는 분야에서는 PVT-s의 적용이 유리한 것으로 판단되며, 이에 대한 경제성 분석이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

향후, PVT-s의 작동유체의 물성, 유량, 흡수관의 형태·재질·개수, 유리판 특성, Packing Factor, PVT-s 내 PV-m의 종류(실리콘, 화합물 반도체, 염료감응 등), 집광 방식, 설치 경사·방위각, 추적 시스템 연계 등, 각각의 실험 변수 및 디자인 등에 따른 열전(熱電) 성능 검증이 진행되어야 하며, 열적 또는 전기적 성능의 일방적 상승 현상을 완화할 수 있는 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

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. Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M., Yianoulis P., Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, Solar Energy, Vol.72, No 3, pp. 217-234, 2002
3. Fraisse G., Ménézo C., Johannes K., Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type, Solar Energy, Vol.81, pp. 1426-1438, 2007
4. Chow T.T., He W., Ji J., Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application, Solar Energy, Vol.80, No 3, pp. 298-306, 2010
5. Dubey Swapnil, Tiwari G.N., Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater, Solar Energy, Vol.82, pp. 602-612, 2008
6. Chow T.T., Pei G., Fong K.F., Lin Z., Chan A.L.S., Ji J., Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover, Applied Energy, Vol.86, No 3, pp. 310-316, 2009
7. 지식경제부 기술표준원 주력산업표준과, 태양열 집열기의 시험방법 - 제1부:집열창이 부착된 압력강하가 발생하는 액체식 집열기의 열적성능, pp. 1-54, 2008
8. He Wei, Chow Tin-Tai, Ji Jie, Lu Jianping, Pei Gang, Chan Lok-shun, Hybrid photovoltaic and thermal solar-collector designed for natural circulation of water, Applied Energy, Vol. 83, No. 3, pp. 199-210, 2006