

선행 연구된 태양광열 복합 시스템의 문헌 검토를 통한 성능 및 효율분석

어승희*, 김대현*

*강원대학교 농업생명과학대학 바이오시스템공학과

The Performance and Efficiency Analysis of PVT system : A Review

Euh, Seung-Hee*, Kim, Dae-Hyun*

*Department of Biosystems engineering, Kangwon National University

Abstract

A Photovoltaic/Thermal(PVT) solar system consists of PV module and thermal absorber plate which convert the absorbed solar radiation into electricity and heat. Meaningful researches and development (R&D) on the PVT technologies have been performed since the 1970s. This paper presents a review of the previous works covering the various types of PVT and their performance analysis in terms of electrical and thermal efficiency. This review compares electrical and thermal efficiency of the different types of PVT collectors and analyzes the parameters affecting PVT performance. Based on the literature review, box channel type PVT with unglazed, or flat plate PVT with glazed have the highest efficiency among them. From the literature review, R&D should be carried out aiming at improving their overall electrical and thermal efficiency and cutting down the cost, making them more competitive in the energy consumption market.

Keywords : solar energy, PV/Thermal collector, electrical and thermal efficiency

1. 서 론

태양광열 복합(Photovoltaic / Thermal hybrid solar system, PVT) 시스템은 태양광 모듈 및 태양열 집열판의 단일화를 통한 전기 및 열에너지의 동시 생산이 가능한 장치로 기존 태양에너지 단일 발전 시스템의 문제점 보완 및 효율 향상을 목적으로 개발되었다. 청정·대체에너지 개발의 필요성이

점차 부각되는 시점에서, 선진국을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있으며, 에너지 수급의 핵심적 역할을 수행할 수 있는 시스템으로 주목받고 있다.

본 연구에서는 PVT 복합 시스템을 주제로 선행 연구된 국내외 주요 문헌의 고찰을 통해 각 조건, 변수 등에 따른 성능, 효율의 비교·분석을 수행하여, 태양에너지 발전 분야의 바람직한 연구 방향을 제시하고자 한다.

2. PVT 시스템의 분류 및 성능분석

2.1 평판형 및 집광형

평판형 PVT복합시스템은 평판형 태양열 집열관 상에 태양광 모듈이 접합되어 일체화된 형태로, 태양광 모듈의 전기 생산 과정에서 발생하는 열의 흡수가 용이하다(그림 1).

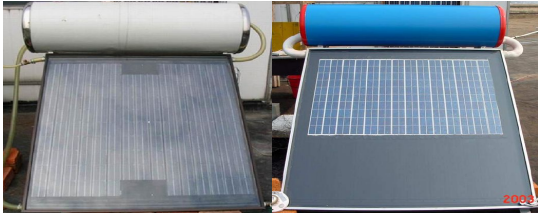


그림 1. Flat-plate PVT collectors¹⁾²⁾³⁾

Kang(2009) 등은 유리판이 있는 액체식 평판형 PVT 복합모듈을 설계 및 제작하여 열적, 전기적 성능에 영향을 주는 입구온도, 외기온도, 일사량의 변화 등을 고려한 실험을 수행한 결과, 전기적 성능은 일사량과 비례하고, 우수 입구온도 및 외기온도에는 반비례한다는 결론을 내렸다⁴⁾.

집광형 태양광/열 (Concentrating Photovoltaic/Thermal, CPV/T) 시스템은 제한된 면적의 PV module에 렌즈 혹은 반사판 등의 광학장치를 이용, 수배에서 수백 배의 집광을 통해 발전효율을 향상시키고, 온도상승에 의한 출력저하를 방지하기 위한 냉각 장치를 결합한 고집적 태양광 발전 시스템이다(그림 2).

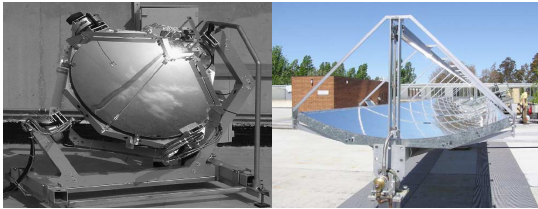


그림 2. Concentrating PVT collectors⁵⁾⁶⁾⁷⁾

화합물 반도체 태양전지(Compound semiconductor solar cell)인 III-V 족 화합물계를 통한 집광

률은 200배 이상에서 효율이 증가하고, 500배 이상에서 과다 전류 발생에 의한 전극에 저항 발생으로 인한 효율이 감소하며⁸⁾, 실리콘계 태양전지(Silicon solar cell)는 20배 이상 집광 시 효율이 급격히 감소하는 문제가 발생하며, 최대 전기생산 효율이 18% 이하가 된다⁹⁾.

CPV/T의 집광 성능을 극대화하기 위해서는 빛을 receiver상에 정확히 모으기 위한 적절한 규모의 태양전지 사이즈 및 배율을 설정하고, 냉각장치 및 초점거리의 효율적 설계가 필수적이며¹⁰⁾, $\pm 1^\circ$ 이상의 높은 태양위치 추적을 위한 정밀추적기가 부착되어야 하는 단점 및 추적기의 고장이나 추적실패에 따른 효율저하는 보완해야할 점이다¹¹⁾. 이에, Jung(2010) 등은 4개의 Cell을 병렬 연결하여, PMMA 소재의 굴절률 1.4를 갖는 구형 렌즈를 이용하여 집광할 수 있는 설계를 통해 추적기 없는 집광형 태양전지 모듈을 구성하였고, 냉각을 위해 자연대류를 이용한 히트싱크(Heat Sink)를 설치하여, 20% 이상의 발전효율을 확인하였다.

Do(2010) 등은 열분산기 및 자연대류 히트싱크로 구성된 집광형 태양전지 모듈의 냉각장치를 제안하고, 열분산기 및 히트싱크의 재료변화에 따른 열저항을 비교한 결과, 히트싱크에서는 구리의 열저항이 알루미늄보다 크고, 열분산기에서는 알루미늄의 열저항이 구리보다 크다는 결과를 얻었다¹²⁾.

Muñoz(2010) 등의 CPV에 대한 표준화 연구를 통해, PV모델에 준하는 전기적, 열적, 기계적 성능을 발휘할 수 있는 CPV의 개발에 높은 비용을 필요로 하며, 기기의 작동 상황이 기술적으로 유사하다고 발표하였다⁷⁾.

2.2 액체식 및 공기식

액체식은 PV 모듈에 흡수관과 열매체 도관이 부착된 형태로 열매체를 물이나 부동액 등의 액체를 이용하는 것으로, 공기식에 비해 작은 용적의 덕트를 흐르는 유체를 이용

하여 시간적·물리적인 냉각효율향상을 기대할 수 있고, 열의 효율적 저장이 용이하다¹³⁾.

공기식은 PV module에 공기층 및 채널을 설치, 열매체로 공기를 이용하는 형태로, 동결 및 과열, 누수에 의한 결함 및 피해 위험성이 적은 반면, 현장적용에 있어 좋은 열효율을 위해서는 높은 공기유량 및 큰 용적의 덕트가 요구되고, 팬의 소음이 발생하는 등의 문제점을 가지고 있다¹³⁾. 공기가 순환하는 channel의 형태 따라 그림 3과 같이 분류할 수 있다.

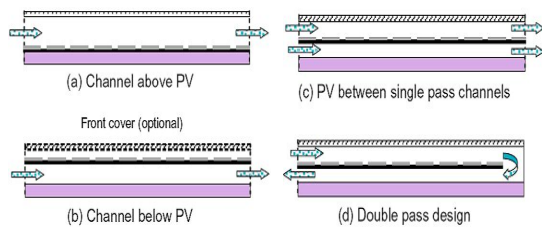


그림 3. Longitudinal cross-sections of PVT with air collector designs¹⁾

표 1. Test results of the compared systems PV/WATER, PV/AIR, PV/FREE and PV INSUL, regarding PV module temperature T_{pv} and electrical efficiency η_{el} under different weather conditions¹⁵⁾

T_a (°C)		15.0	29.0	35.0
G (Wm^{-2})		850	910	898
PV/WATER	T_{pv} (°C)	32.0	38.1	47.2
	η_{el}	0.134	0.128	0.123
PV/AIR	T_{pv} (°C)	31.9	41.2	48.4
	η_{el}	0.134	0.126	0.121
PV/FREE	T_{pv} (°C)	33.9	42.7	54.1
	η_{el}	0.132	0.124	0.114
PV/INSUL	T_{pv} (°C)	50.2	55.2	68.7
	η_{el}	0.118	0.113	0.098

Hegazy(2000)¹⁴⁾는 그림 3에 나타난 4가지 유형의 모듈을 이용하여 열, 전기, 유압 등의 종합적인 성능에 대한 연구를 수행, 수학적으로 분석한 결과 (a)의 경우가 가장 낮은 효율을 나타내었고, 나머지 3가지는 거의 유사

한 성능을 나타내었다. 또한 (c)의 경우, 가장 낮은 fan의 전력을 소비하였다.

Tripanagnostopoulos(2002)¹⁵⁾ 등은 다양한 유형의 공기식 및 액체식 PVT 집열기를 설치하여 전기 및 열적 성능을 실험한 결과, 공기식은 약 5%, 액체식은 약 8%의 효율향상을 나타내었다(표 1).

2.3 Glazed 및 Unglazed

glazed 모듈은 공기층을 둔 유리커버 마감으로 PVT 복합모듈의 열손실을 줄임으로써 unglazed 모듈에 비해 열효율이 우수하다. 반면, 열적특성 및 유리커버의 일사 반사율에 의해 PV 모듈의 전기성능은 낮아지는 단점이 있다¹³⁾.

Chun(2010) 등의 연구에 의하면, PVT 모듈 표면온도는 일사량 및 유수입구온도에 비례하여 상승하며, 열 및 전기성능은 각각 32.3%, 12.4%로 전체효율은 44.7%로 나타났다¹⁶⁾.

Kim(2009) 등은 액체식 Glazed PVT(G-PVT) 복합모듈과 Unglazed PVT(U-PVT) 복합모듈의 성능실험의 비교·분석을 수행한 결과, G-PVT 복합모듈은 U-PVT 복합모듈 대비 열효율은 약 18% 향상되었고, 전기효율은 1.5% 감소되었다는 결론을 얻었다¹⁷⁾.

Chow(2009)¹⁸⁾ 등은 G-PVT 및 U-PVT의 효율의 비교·분석을 수행하였으며, 유체의 순환을 위해 펌프의 사용 대신, 온도 차이에 따른 밀도차에 의한 순환 방식을 채택하였다.

PVT의 성능은 energetic (first law) 효율 η_{pvt} 에 의해 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\eta_{pvt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (A_c \dot{E}_t + A_{pv} \dot{E}_{pv}) dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} G dt} = \eta_t + \zeta \eta_{pv} \quad (1)$$

여기서, A_c 와 A_{pv} 는 집열판 및 PV모듈 면적(m^2), G 는 일사량(W/m^2), η_t 와 η_{pv} 는 집열판 및 PV모듈의 energetic 효율, ζ 는

packing factor(=태양광모듈면적/흡수판면적, PF)이다.

Exergetic (second law) 효율 ϵ_{pvt} 은 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\epsilon_{pvt} = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (A_c \dot{E}x_t + A_{pv} \dot{E}x_{pv}) dt}{A_c \int_{t_1}^{t_2} \dot{E}x_{sun} dt} = \epsilon_t + \zeta \epsilon_{pv} \quad (2)$$

여기서, $\dot{E}x_{pv}$ 와 $\dot{E}x_t$ 는 PV cell 및 집열판의 단위 면적 당 출력되는 exergy이고, $\dot{E}x_{sun}$ 는 입력되는 태양복사 exergy이다.

아래의 그림 4는 cell의 효율, PF의 증가에 따른 energetic 및 exergetic 효율 변화를 나타낸다.

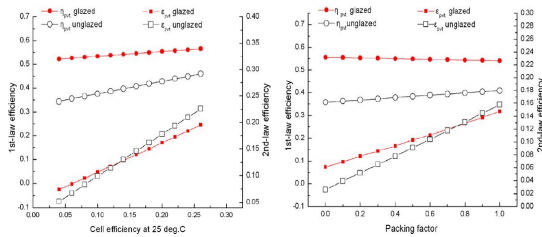


그림 4. Variation of overall efficiency with cell efficiency and packing factor.¹⁸⁾

Cell 효율이 증가함에 따라, glazed 및 unglazed의 energetic 및 exergetic 효율은 향상되며, exergetic 효율의 경우, cell 효율 0.127 이상에서 unglazed가 glazed를 초과하는 것을 확인할 수 있다.

PF의 증가에 따라, glazed의 energetic 효율은 감소하고, unglazed는 상승하는 것을 알 수 있으며 exergetic 효율의 경우, PF 0.72 이상에서, unglazed가 glazed를 초과하는 것을 확인할 수 있다.

2.4 다양한 형태의 흡수판

채널이 통과하는 위치는 PV module의 앞면 또는 뒷면에 설치 가능하며, 채널의 형태

는 tube형, box channel형 등이 있으며, 그림 5를 통해 확인할 수 있다.

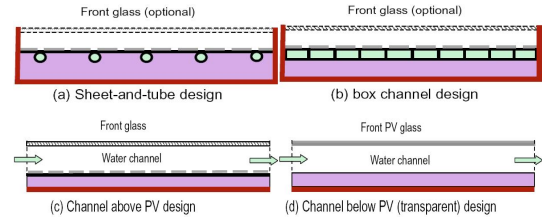


그림 5. Cross-sections of some common PVT with water collector designs¹⁾

Zondag(2003)¹⁹⁾ 등은 다양한 형태의 PV-thermal 집열기를 이용하여, 성능을 비교 분석 하였다. 평가된 디자인으로는 sheet and tube, channel, free flow, two absorber 형태로 기존 PV 모듈을 기준으로 비교 분석 하였다. unglazed 된 sheet and tube 디자인이 가장 낮은 열효율 및 PV 모듈에 상응하는 전기효율을 나타낸 반면, 단일 처리된 two-absorber 디자인이 가장 높은 열효율을 나타내었다. 표 2를 통해 흡수판의 형태에 따른 열 및 전기 성능 분석 결과를 확인할 수 있다.

표 2. Annual average efficiencies for the presented PVT-collector design concepts¹⁹⁾

시스템	열 효율	전기 효율
PV	-	0.072
sheet and tube PVT	0.24	0.076
sheet and tube PVT+유리커버1	0.35	0.066
sheet and tube PVT+유리커버2	0.38	0.058
PV 위 채널 결합 PVT	0.38	0.061
PV(불투명) 아래 채널 결합 PVT	0.35	0.067
PV(투명) 아래 채널 결합 PVT	0.37	0.065
자유 흐름 방식 PVT	0.34	0.063
단열 이중 흡수판 PVT	0.39	0.061
미단열 이중 흡수판 PVT	0.37	0.061
태양열 집열판	0.51	-

흡수판의 다양한 형태에 따른 PVT의 열 및 전기적 효율은 일사량이 크고, 작동유체의 입구온도가 작을수록 높게 나타나는 것을

알 수 있다. 그림 6은 각 형태별 효율변화를 나타낸 것이다.

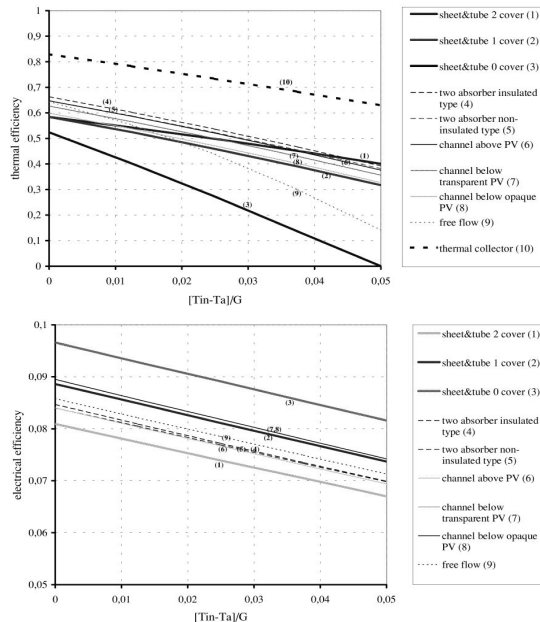


그림 6. Thermal and electrical efficiency of the PVT¹⁹⁾

3. 결 론

본 연구에서는 PVT 복합 시스템에 적용된 다양한 변수에 따라 분류하여 국내·외 주요 연구문헌을 바탕으로, 효율 및 성능을 비교 분석하였다.

PVT 복합 시스템은 작동유체의 물성치 및 입구온도 등에 의해 전기 및 열적 성능이 좌우되며, 특히 PF가 증가함에 따라 glazed의 energetic 효율은 감소하는 반면, unglazed는 상승하는 것을 알 수 있다.

집광형은 고가의 PV 모듈의 크기를 제한하여 수 배 이상 집광하여 효율을 향상시키기 위해서는 고성능 냉각 기술이 필요하며, 자연대류를 이용한 히트싱크 설치시 20% 이상의 발전효율을 기대할 수 있다. 이에 집광형의 특성상 glazed의 설치는 고려해야 할 것으로 사료된다.

공기식 및 액체식 PVT 복합 시스템은 PV

모듈에 비해, 전기 효율이 각각 5%, 8% 정도 향상되며, 열효율은 유리커버의 유무에 따라 달라진다. 또한 Glazed 및 Unglazed의 여부에 따라, 전기 및 열효율의 차이가 발생하는데, glazed의 경우 unglazed 대비, 열효율은 18%, 전기효율은 1.5% 감소되었다.

흡수관의 형태에 따라 열 및 전기 효율이 차이를 나타내는데, unglazed된 sheet and tube 디자인의 연간 전기효율이 76%로 가장 우수하게 나타났으나 열효율은 24%로 가장 낮게 나타났으며, 단열된 two-absorber 디자인의 열효율은 39%로 가장 우수하게 나타난 반면, 전기효율은 61%로 나타났다. PVT 복합모듈의 성능은 작동유체, 유리판 유무, 흡수관의 형태에 따라 다양하게 나타나며, 특히 전기 및 열효율은 서로 반비례하여 변화하는 것을 알 수 있다.

본 연구를 통해, 각 형태 및 변수에 의한 PVT 시스템 성능을 개략적으로 분석하였으며, 각 분야의 적용을 위해서는 열 및 전기적 특성을 고려한 시스템 선정이 요구되며, 근본적으로 열 및 전기 효율의 일방적 상승 현상을 완화할 수 있는 연구가 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Chow T.T., A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology, Applied Energy, Vol.87, No 2, pp. 365-379, 2010
2. 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
3. Ji Jie, Lu Jian-Ping, Chow Tin-Tai, He Wei, Pei Gang, A sensitivity study of a hybrid photovoltaic/thermal water-heating system with natural circulation, Applied Energy, Vol.84, No2, pp. 222-237, 2007
4. 강준구, 김진희, 김준태, 평판형 액체식

- PVT 모듈의 성능 실험 분석, 대한설비공학회, 하계학술발표대회 논문집, pp. 0780-0785, 2009
5. Kribus Abraham, Kaftori Daniel, Mittelman Gur, Hirshfeld Amir, Flitsanov Yuri, Dayan Abraham, A miniature concentrating photovoltaic and thermal system, *Energy Conversion and Management*, Vol.47, No 20, pp. 3582-3590, 2006
 6. Coventry Joe S., Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector, *Solar Energy*, Vol.78, No 2, pp. 211-222, 2005
 7. Muñoz E., Vidal P.G., Nofuentes G., Hontoria L., Perez-Higueras P., Terrados J., Almonacid G., Aguilera J., CPV standardization: An overview, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.14, No 1, pp. 518-523, 2010
 8. Garboushian V., Gordon, R., Optical Design Considerations for High Concentration Photovoltaics, *Proc. SPIE Conference 6339, High and Low Concentration for Solar Electric Applications*, pp. 905-913, 2005
 9. 정병호, 윤상진, 정병수, 정용호, 이강연, 고집광 CPV모듈 제작기술에 관한 연구, 대한전기학회, 제 41회 하계학술대회 논문집, pp. 1197-1198, 2010
 10. 강성원, 김용식, 심창호, 고집광 시스템에서 2차 광학계를 적용한 PV receiver 상에 빔 경로 모의실험, 한국태양에너지학회, 추계학술발표대회 논문집, Vol.30, No 2, pp. 323-330, 2010
 11. 정병호, 김남오, 이강연, 구형렌즈를 적용한 CPV 모듈 발전성능 분석에 관한 연구, 대한전기학회, 전기학회논문지, Vol.59, No 3, pp. 293-297, 2010
 12. 도규형, 김태훈, 최병일, 한용식, 김명배, 고집광 태양전지 모듈의 냉각시스템 개발, 대한기계학회, 열공학부문 춘계학술대회 논문집, pp. 174-181, 2010
 13. 김진희, 김준태, 액체식 Glazed PVT 복합모듈의 성능실험연구, 대한설비공학회, 설비공학논문집, Vol.20, No 4, pp. 260~265, 2008
 14. Hegazy Adel A. *Energy Conversion and Management*, Vol.41, No 8, pp. 861-881, 2000
 15. Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M., Yianoulis P., Hybrid photovoltaic/thermal solar systems, *Solar Energy*, Vol.72, No 3, pp. 217-234, 2002
 16. 천진아, 김진희, 강준구, 김준태, 실험에 의한 액체식 Unglazed PVT모듈의 성능 분석, 한국태양에너지학회, 추계학술발표대회 논문집, Vol.30, No 2, pp. 21-26, 2010
 17. 김진희, 강준구, 김준태, 액체식 PVT 복합모듈의 유형별 성능 비교 분석, 대한설비공학회, 하계학술발표대회 논문집, pp. 0792-0797, 2009
 18. 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
 19. Zondag H.A., de Vries D.W., van Helden W.G.J., van Zolingen R.J.C., The yield of different combined PV-thermal collector designs, *Solar Energy*, Vol.74, No 3, pp. 253-269, 2003