

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

*Journal of the Korean Solar Energy Society*

Vol. 27, No. 4, 2007

## 액체식 PV/Thermal 복합모듈의 성능실험연구

이현주\*, 김진희\*\*, 김준태\*\*\*

\*(주)메카니아 공주대학교 기업부설연구소 (bond81@kongju.ac.kr),

\*\*공주대학교 건축학과 대학원 (jiny@kongju.ac.kr),

\*\*\*공주대학교 건축학과 부교수(jtkim@kongju.ac.kr)

### An Experimental Study of a Water Type PV/Thermal Combined Collector Unit

Lee, Hyun-Ju\*, Kim, Jin-Hee\*\*, Kim, Jun-Tae\*\*\*

\*Research Insitute, Mekania Co.(bond81@kongju.ac.kr),

\*\*School of Architecture, Graduate School, Kongju National University(jiny@kongju.ac.kr),

\*\*\*School of Architecture, Kongju National University(jtkim@kongju.ac.kr)

#### Abstract

Hybrid PV/Thermal systems consisting of photovoltaic module and thermal collector can produce the electricity and thermal energy. The solar radiation increases the temperature of PV modules, resulting in the decrease of their electrical efficiency. Accordingly hot air can be extracted from the space between the PV panel and roof, so the efficiency of the PV module increases. The extracted thermal energy can be used in several ways, increasing the total energy output of the system. This study describes a basic type of PV/T collector using water. In order to analyze the performance of the collector, the experiment was conducted. The result showed that the thermal efficiency was 17% average and the electrical efficiency of the PV module was about 10.2%~11.5%, both depending on solar radiation, inlet water temperature and ambient temperature.

Keywords : 태양광 · 열 복합모듈(PV/Thermal module), 설계(design), 성능실험(performance experiment), 열효율(thermal efficiency), 전기효율(electrical efficiency)

접수일자 : 2007년 11월 6일, 심사완료일자:2007년 12월 8일

교신저자 : 김준태(jtkim@kongju.ac.kr)

## 기 호 설 명

$\eta_{th}$	: 열효율
$\eta_{el}$	: 전기효율
$A_{pvt}$	: 집열면적 ( $m^2$ )
$T_i$	: 집열매체 입구온도 ( $^{\circ}C$ )
$T_o$	: 집열매체 출구온도 ( $^{\circ}C$ )
$T_a$	: 외기온도 ( $^{\circ}C$ )
$\dot{m}$	: 집열매체 유량 (kg/h)
$C_p$	: 집열매체 비열 (J/kg $^{\circ}C$ )
$G$	: 일사량 (W/ $m^2$ )
$I_m$	: 최대전류 (A)
$V_m$	: 최대전압 (V)

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

에너지 문제의 사회적 인식이 높아짐에도 불구하고 2005년 최종에너지 소비는 전년대비 3.7% 증가한 172.1백만 TOE를 기록하였다. 특히 산업부문 에너지 소비는 전년대비 2.2% 증가에 그쳤으나, 가정상업공공기타 부문이 난방용 에너지 수요의 급증으로 전년대비 8.4%의 높은 증가세를 보여 최종 에너지 소비 증가세를 주도하였다.<sup>1)</sup> 이에 가정상업공공기타 부문의 에너지 소비가 이루어지는 건물 에너지의 효율향상을 위해 신·재생에너지 개발 및 보급에 대한 중요성이 강조되고 있다. 그 중 특별한 유지관리나 공해 및 부식 없이 간단하게 태양광을 이용하여 전기를 생산하는 태양광발전 시스템의 기술은 상당한 발전을 거듭하였다. 건축에 적용하기 위한 태양광발전 시스템은 전기 생산뿐 아니라 건축물의 외피 마감 재료로 이용가능한 건물일체형 태양광발전(BIPV: Building Integrated PV)에 대한 기술개발이 적극적으로 시도되고 있다. 한편 전기에너지와 열에너지를 동시에 절약하고 환경 친

화적 건축을 위한 건물에너지 절약기술로 기존 PV 시스템에 태양열 집열 장치를 결합하여 전기와 열을 동시에 생산하는 PV/Thermal(Photovoltaic/Thermal) 복합시스템이 제안되었다.

PV/Thermal 복합모듈은 PV모듈이 전기 생산 과정에서 발생 하는 열을 실내로 유입시켜 건물 및 각종 시설의 난방에 이용한다. 이 과정에서 PV 모듈 온도가 저하되어 PV모듈의 효율을 증대시키고 PV모듈 후면에 발생한 고온의 열을 실내로 유입해 실내 난방에 활용이 가능하다. 이러한 PV/Thermal 복합모듈 중 수식 PV/Thermal 복합 시스템의 경우 온수 이용이 용이하고 열효율이 높아 활발한 연구가 이루어지고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 태양열과 태양광을 동시에 활용하여 건물에너지 감소를 기대 할 수 있는 PV/Thermal 복합모듈에 대한 기초 연구로, 기본적인 유형의 PV/Thermal 복합모듈에 대한 열적, 전기적 성능을 실험을 통해 분석하는 것이다.

### 1.2 연구방법

본 연구는 문헌고찰을 통하여 PV/Thermal 복합모듈의 특성 및 유형을 정리하였다. 또한 실험연구를 위한 기본유형의 수식(water type) PV/Thermal 복합모듈을 설계하고 시제작하였다.

제작된 PV/Thermal 복합모듈에 대한 성능실험을 수행하여 태양에너지 이용 모듈의 열적, 전기적 성능에 대한 효율을 정량적으로 분석하였다.

## 2. PV/Thermal 복합 모듈

### 2.1 기술개요

PV모듈에 도달하는 일사량이 증가할수록 PV시스템의 전력 생산량은 증가한다. 반면 결정질계 PV모듈의 온도는 전기효율에 영향을 미치는 것으로 밝혀졌고, 25 $^{\circ}C$  이상 일 때 1 $^{\circ}C$ 씩 증가할수록 발전성능효율이 0.4~0.5% 감소하는 것으로 밝혀졌다. 즉, 전기 생산과정에서 발생하는 PV모듈

1) 박광수 외, 2005, 에너지수요전망, 에너지경제연구원, pp.1-11

후면의 많은 열은 PV시스템의 전기 효율을 떨어뜨리는 원인이 된다. 따라서 PV모듈 온도를 낮추게 되면 PV모듈의 전기성능을 향상시킬 수 있다.

PV/Thermal 복합모듈은 그림 1과 같이 기존 PV 시스템에서 폐열을 외부로 방출하는 것과 달리 버려지던 폐열을 건물 난방 및 급탕에 이용하는 원리이다. 이러한 시스템은 PV패널 후면에 태양열 집열장치를 결합하여 하나의 모듈로 구성이 가능하다. 집열매체로 공기를 이용하거나 액체식 집열기를 결합하는 방식에 따라 공기식과 액체식으로 구분된다. PV/Thermal 복합모듈은 건물에 필요한 전기와 열에너지를 동시에 생산할 뿐만 아니라 PV모듈의 냉각효과로 전기효율의 증진을 기대 할 수 있다.

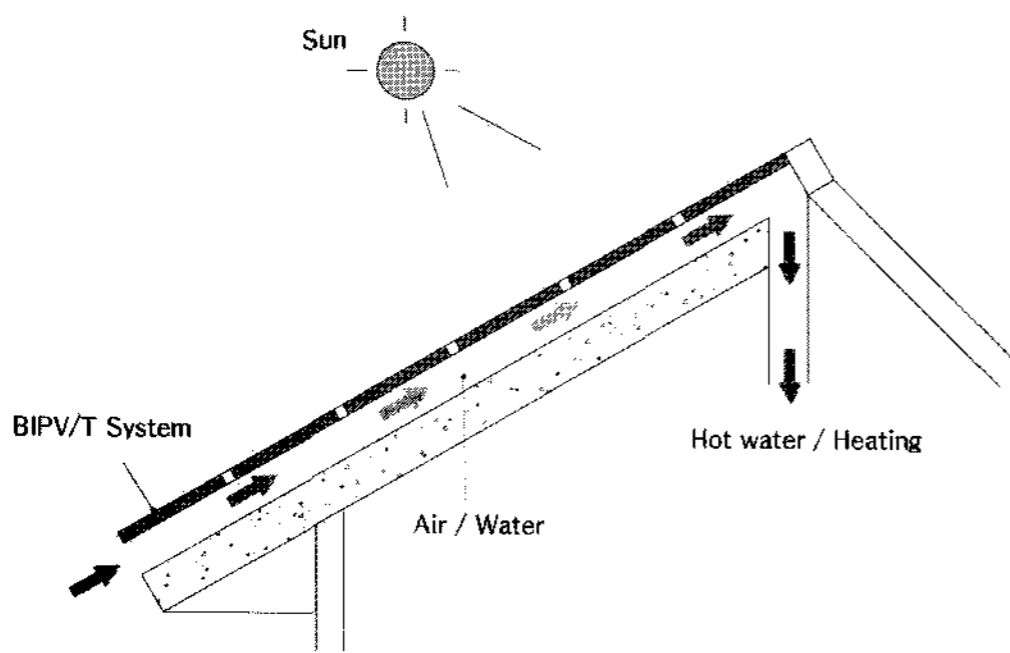


그림 1. PV/Thermal 복합시스템 개념도

## 2.2 연구문헌 고찰

PV/Thermal 복합모듈에 대한 연구는 1978년 Kern과 Russel이 물과 공기를 이용하여 벽면의 열을 제거한 PV/Thermal 복합모듈을 디자인하고 그에 대한 실험을 수행한 이후 현재까지 다양하게 이루어지고 있다.<sup>2)</sup>

Tripanagnostopoulos et al.(2002)은 PV모듈 후면에 수식 또는 공기식 열매체 채널 등을 이용

한 PV/Thermal 복합모듈의 열적, 전기적 성능을 분석하고 성능향상에 영향을 주는 요소에 대해 평가하였다.<sup>3)</sup> 이 연구에서 제안한 PV/Thermal 복합모듈은 그림 2와 같이 PV/Water(수식)와 PV/Air(공기식) 타입을 기본 형태로 디자인하고, 모듈의 종류를 달리 하거나 집열효율을 높이기 위한 반사재 또는 유리를 덧붙인 형태로 총 10가지 유형의 성능을 분석하였다. 열효율의 경우 아모퍼스(a-PV) 모듈이 다결정(pc-si)모듈에 비해 효율이 좋은 것으로 분석되었으며 기본 타입보다는 유리를 덧붙이거나 반사재를 부착한 PV/Thermal 복합모듈의 성능이 더 우수한 것으로 분석되었다.

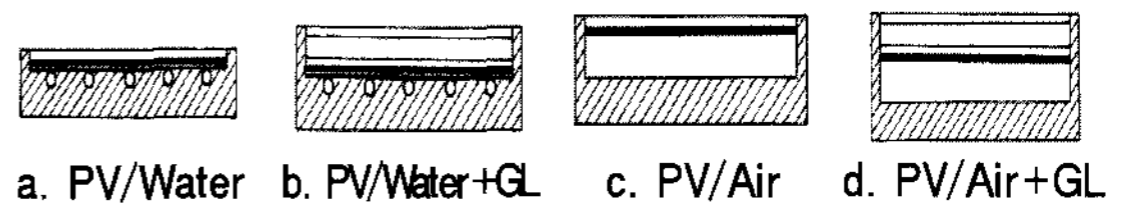


그림 2. 공기식과 수식 PV/Thermal 복합모듈 디자인

Zondag et al.(2003)은 수식(Water) PV/Thermal 복합모듈을 11가지 형태로 다양하게 디자인하고 각각의 디자인에 대한 열적, 전기적 성능과 전기 생산량을 시뮬레이션을 통해 분석하였다.<sup>4)</sup> 이 연구에서 기본 PV/Water(수식)타입 뿐만 아니라 PV/Thermal 복합모듈 후면에 발생하는 열을 줄이기 위해 공기채널 또는 이중 흡열판을 이용하였다. 열손실이 없는 조건에서 흡열판에 열매체도관을 부착한 디자인에 비해 채널 타입 디자인의 열성능이 우수한 것으로 분석되었다. 또한 흡열판에 열매체 도관을 부착한 디자인에 유리를 2장 덧붙일 경우가 유리를 붙이지 않은 경우에 비해 열효율은 증가하지만 전기효율은 감소하는 것으로 분석되었다. 이는 유리로 인한 단열효과가

2) Y. Tripanagnostopoulos et al, 2002, Hybrid Photovoltaic /Thermal Solar Systems, Solar Energy, Vol. 172, pp.217-234

3) Ibid., p.218

4) H. A. Zondag et al, 2003, The Yield of Different Combined PV-Thermal Collector Designs, Solar Energy, pp.253-269

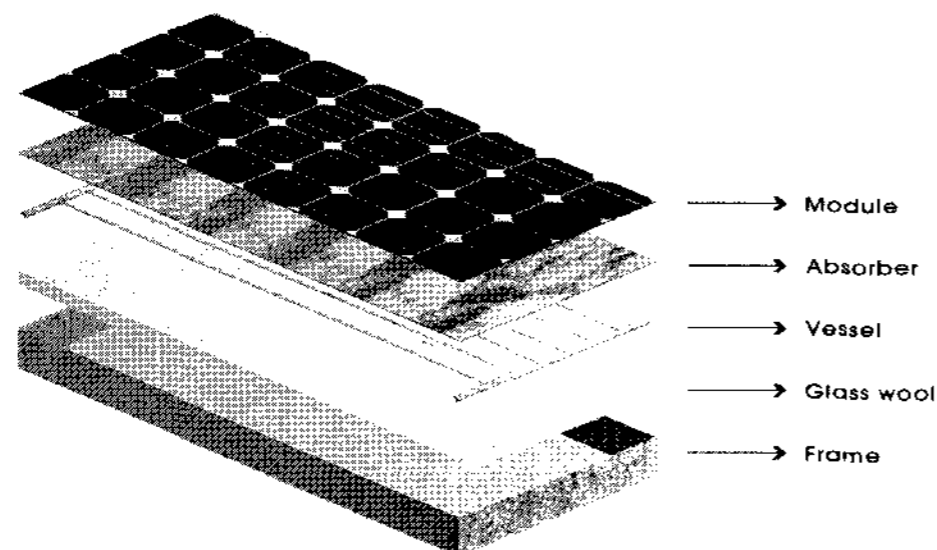
증가하면서 열효율 개선에 영향을 주는 것과 달리, PV모듈 온도가 증가하는 원인으로 작용하여 전기효율이 감소하는 것으로 분석되었다. 또한 유리를 통해 PV모듈 표면에 도달하는 일사량이 감소하는 영향도 클 것으로 분석되었다.

### 3. PV/Thermal 복합모듈 설계 및 제작

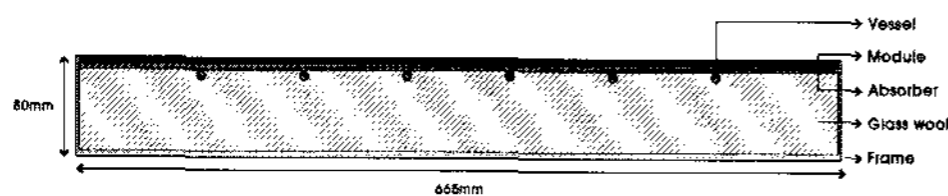
#### 3.1 PV/Thermal 복합모듈

본 연구에서는 앞서 살펴본 문헌고찰 결과를 바탕으로 기본적인 수식 PV/Thermal 복합모듈을 설계하고 이를 시제작하였다.

성능실험을 위해 제작된 PV/Thermal 복합모듈은 그림 3과 같이 PV모듈 하부에 집열판 및 배관을 배치하고 집열효율 향상을 위하여 하면에 단열재를 시공하였다.



(a) PV/Thermal 복합모듈 구성



(b) PV/Thermal 복합모듈 단면도

그림 3. PV/Thermal 복합모듈

제작에 사용된 PV모듈은 표준실험조건 STC 에서 전기효율 13%인 다결정 실리콘 PV모듈을 사용하였으며 사용된 PV모듈의 상세사양은 표 1과 같다.

표 1. PV 모듈 상세 사양

셀 타입	6' poly crystalline silicon
최대 효율	12.46%
최대 출력	125W
최대 전압	17.8V
최대 전류	7.04A
단락 전류	7.66A
개방 전압	21.1V
크기	665*1,505*38mm

흡열판은 열매체 도관위에 집열을 높이기 위한 목적으로 0.2mm 블랙크롬 구리판을 사용하였다. 열매체 도관은 그림 4와 같이 구성되도록 하였고 기존 태양열 집열기에 사용되는 주관지름 20mm, 지관지름 8mm의 동관을 사용하여 제작하였다. 지관의 경우 6개의 채널로 구성되었으며 지관과 지관 사이는 80mm 간격을 두었다. 흡열판과 열매체 도관은 용접되었으며 흡열판은 PV모듈 아래에 열전도성 접착제를 사용하여 부착하였다. 최종 제작된 PV/Thermal 복합모듈의 모습은 그림 5와 같다.

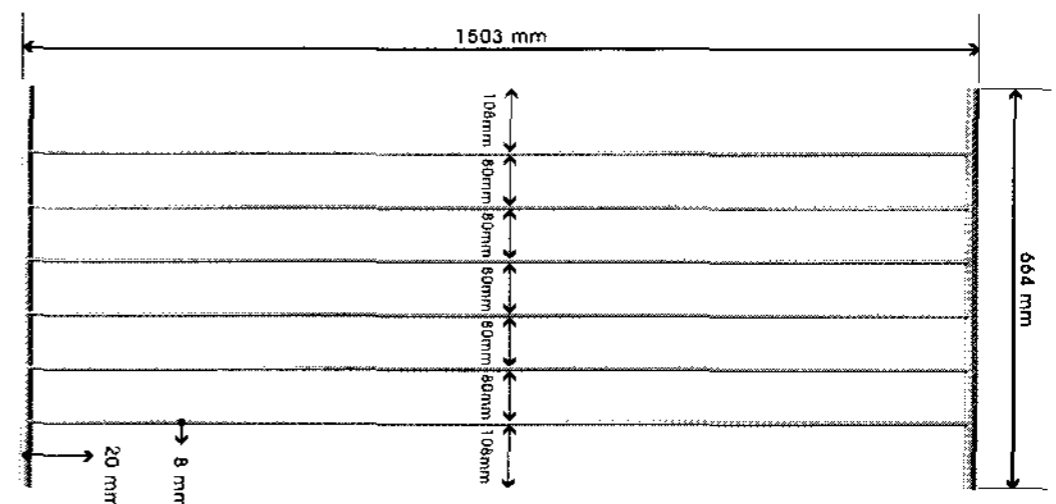


그림 4. PV/Thermal 복합모듈 열매체도관 평면도

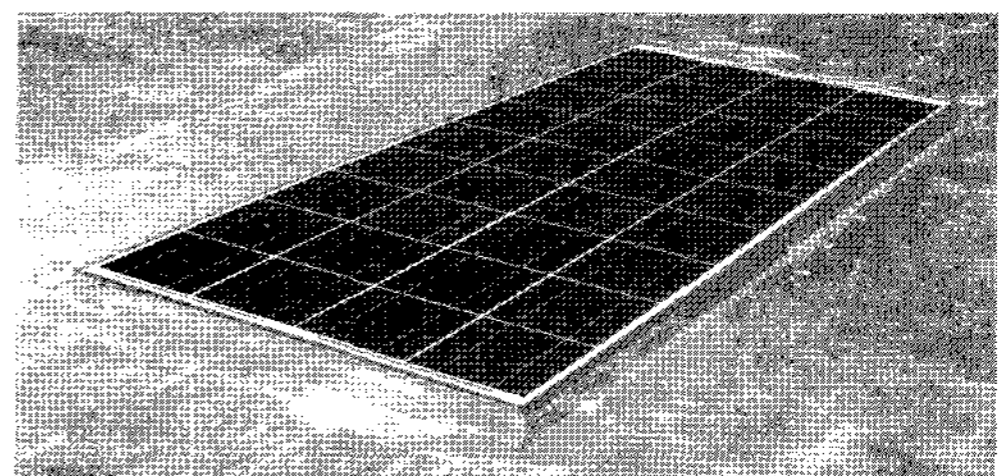


그림 5. PV/Thermal 복합모듈

### 3.2 실험장치

제작된 PV/Thermal 복합모듈의 성능실험을 위해 '태양열 집열기의 집열성능 시험방법 (KS B 8200'5)을 기준으로 실험장치를 설계, 제작하였다. 실험장치는 순환되는 유체의 온도를 일정하게 유지시키기 위한 항온조와 유체순환을 돕는 펌프, 실험 유량을 맞추기 위한 유량계로 구성되었다. 주요 구성품의 규격은 표 2와 같다.

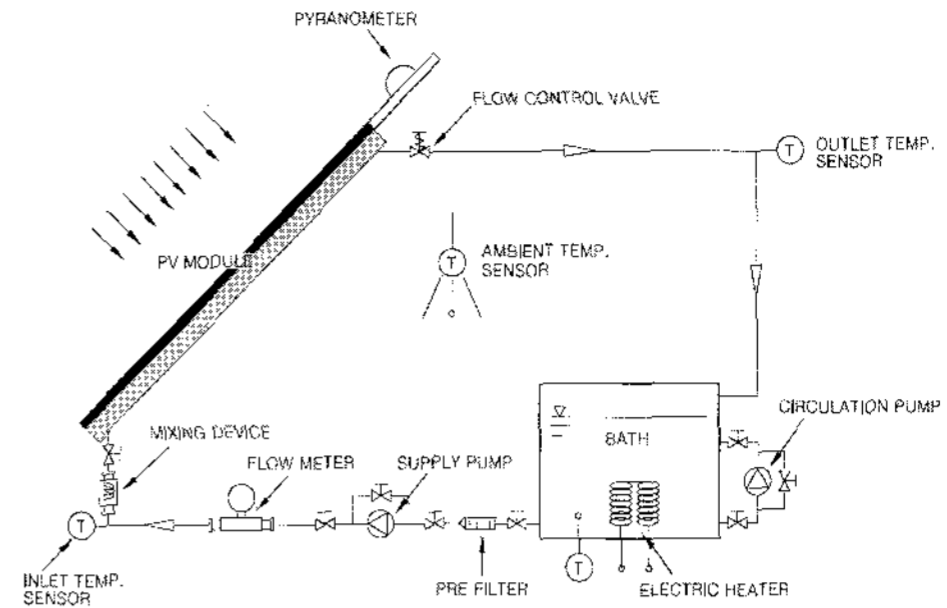


그림 6. 실험장치 구성도

표 2. 실험장치 주요 구성품 상세규격

항목	상세 규격	
항온수조	크기	600*400*200
	용량	48L
	온도범위	-20~99℃
	Power	220V 1Φ 17A
	냉각기	1HP
순환펌프	유량(Q)	최대 9m <sup>3</sup> /h
	양정(H)	최대 9m
	사용온도	2℃~110℃
	사용압력	최대 10bar
유량계	정밀도	RMA:4% RMB:3% RMC:2%of full scale
	온도	54℃
	압력	6.9bar

그림 6과 같이 구성된 실험장치는 시스템 제어 및 사용이 용이하도록 하나의 제어장치로 제작하였다. 또한 전동기에 의해 실험체의 수평 및 수직 각도가 조절되도록 하였고 시험가대는 수평 집열면이 광원면에 대하여 수직으로 면할 수 있도록 0°~90° 경사각 조절과 360°회전이 가능하도록 제작하였다.

그림 7은 PV/Thermal 복합모듈이 실험장치에 장착된 실제 설치 모습이다. 또한 실험에 필요한 데이터 수집을 위해 일사량계와 외기온도, 집열기의 입·출구 온도를 측정하는 센서장치를 설치하고 측정센서로부터 얻어지는 데이터는 자동데이터 수집장치를 이용하여 수집하였다. 이 데이터 수집장치와 컴퓨터간 통신을 통해 PV/Thermal 복합모듈의 측정데이터를 실시간으로 측정하고 자동으로 기록하는 측정 시스템을 구성하였다.

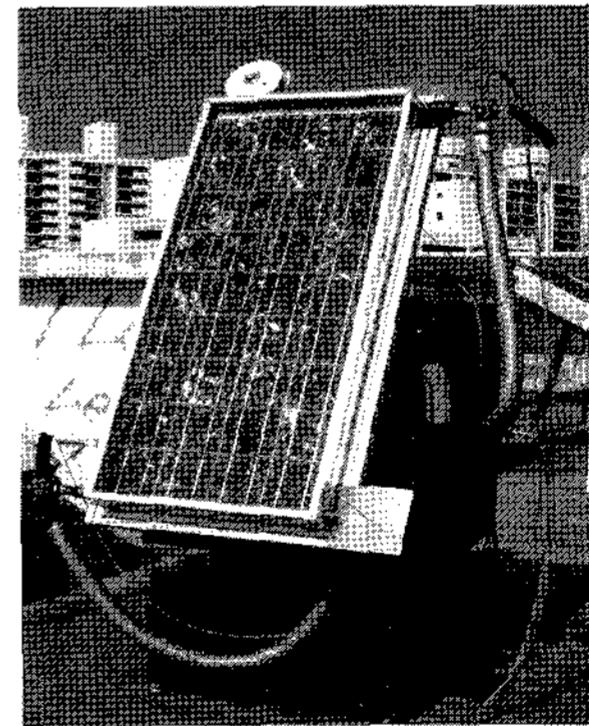


그림 7. 실험체 설치사진

## 4. 성능실험

### 4.1 실험방법

실험은 2007년 6월 2주 동안 충남 공주시(위도 30°26'37", 경도 127°14'15") 소재 공주대학교 공과대학 건물의 옥상에서 「태양열 집열기의

5) 산업표준심의회, 2006, 태양집열기의 집열 성능 시험 방법 (KS B 8200), 산업표준심의회

집열성능 시험방법 (KS B 8200)」의 실험조건을 기준으로 실시하였다. 시험체 집열면 일사량 중 평균값이 630W/m<sup>2</sup> 이상이고 측정 중 변동이 50W/m<sup>2</sup> 이내 일 경우만 측정치를 저장하는 방법으로 실시되었다. 입구온도를 30℃, 40℃, 50℃, 로 10℃씩 변화를 주어 PV/Thermal 모듈의 입구온도에 따른 열적, 전기적 성능을 측정하였다.

#### 4.2 실험결과

PV/Thermal 복합모듈의 열성능 및 전기 성능에 대한 실험 결과는 다음과 같다.

##### (1) PV/Thermal 복합모듈의 열 성능

PV/Thermal 복합모듈의 성능에 영향을 주는 인자를 고려하여 아래와 같은 수식 (1)6) 에 의해 열효율을 계산하였다. 즉, 태양열 집열기의 열효율은 집열판에서 얻어지는 총 획득에너지인 Q<sub>1</sub>에 대한 집열기 자체의 획득에너지 Q<sub>2</sub>의 비율로서 산출된다.

$$\begin{aligned}
 Q_1 &= A_{pvt} \times G & (1) \\
 Q_2 &= \dot{m}c_p(T_i - T_a) \\
 \eta_{th} &= \frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\dot{m}c_p(T_i - T_a)}{A_{pvt} \times G}
 \end{aligned}$$

PV/Thermal 복합모듈의 열성능은 그림 8과 같으며 열효율  $\eta_{th} = 0.31 - 8.63x$  (J/m<sup>2</sup>h℃)로 나타낼 수 있다. 따라서 X축(ΔT/G)에 대한 열손실계수(FRUL)는 -8.63, 열효율계수는 0.31인 것을 알 수 있다.

아래 그래프와 같이 외기온도와 입구온도, 일사량에 따른 x축 계수 값에 대한 효율을 보면, x축 계수가 작을수록 효율이 높은 것을 알 수 있다. 따라서 입구온도가 낮을수록, 외기온도와 일사량이

높을수록 효율이 높은 것으로 분석되었다. 또한 PVT 복합모듈은 성능에 직접적인 영향을 미치는 일사량보다 시험체 유수의 입구온도와 외기에 대한 집열판의 열손실에 의해 시스템 효율이 감소되는 것으로 분석되었다.

시험체 전체 열효율은 x축(Ti-Ta/G)계수의 실험조건하에 8~29% 분포로 나타났으며 평균 열효율은 17%로 나타났다.

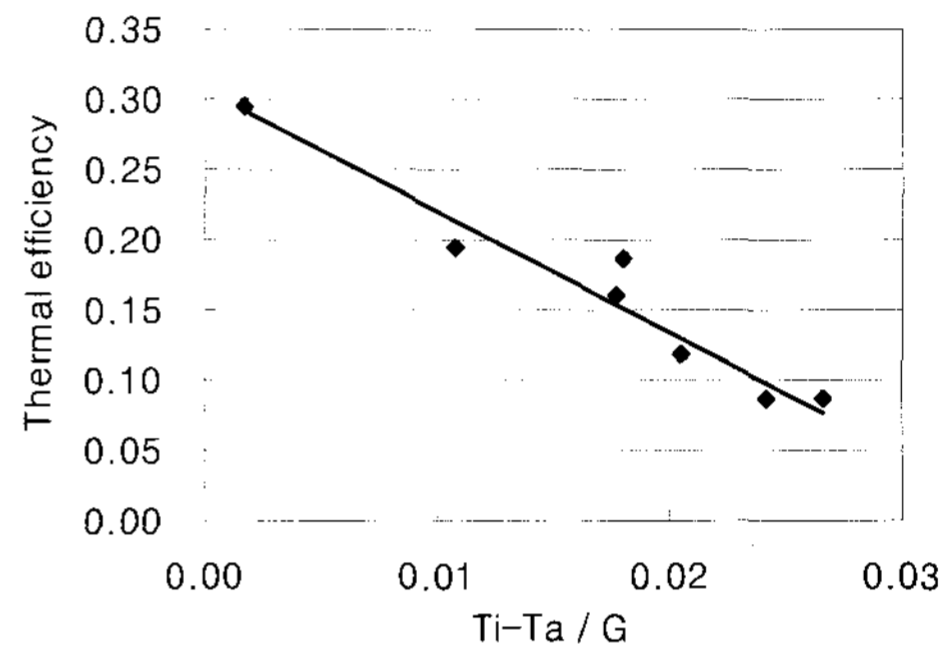


그림 8. PV/Thermal 복합모듈 열효율

##### (2) PV/Thermal 복합모듈의 전기 성능

PV/Thermal 복합모듈의 전기효율은 아래 수식(2)7)에 의해 계산하였다. PV모듈의 출력전력은 출력전압과 출력전류의 곱으로 계산된다. 출력전력이 최대가 되는 점이 집열 면적 당 일사량에 따라 변화하는데 출력 전력이 최대가 될 때의 전압은 최대출력 동작 전압 V<sub>m</sub> 이라하고 전류를 최대출력 동작전류 I<sub>m</sub>이라 한다.

$$\eta_{el} = I_m V_m / A_{pvt} G \quad (2)$$

PV/Thermal 복합모듈의 전기 효율은 그림 9와 같다. 아래 그래프와 같이 외기온도와 입구온도, 일사량에 따른 x축 계수 값에 대한 효율을 보면 열효율과 같이 x축 계수가 작을수록 효율이 높은 것을 알 수 있다. 따라서 입구온도가 낮을수

6) Y. Tripanagnostopoulos et al, 2002, Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar System, Solar Energy, Vol.72, No.3, p.222

7) Ibid., p.222

록, 외기온도와 일사량이 높을수록 효율이 높은 것으로 분석되었다. 이는 PV모듈의 경우 일사량에 따라 전기성능이 크게 좌우되며 PV모듈 후면의 유체 온도가 낮을수록 PV모듈의 냉각효과를 통해 전기효율을 향상시키는 것을 알 수 있다.

전체 전기효율은 열성능실험과 같은 x축( $T_i - T_a / G$ )계수의 실험조건하에서 10.2%~11.5%로 나타났으며 평균 전기효율은 11.0%로 나타났다.

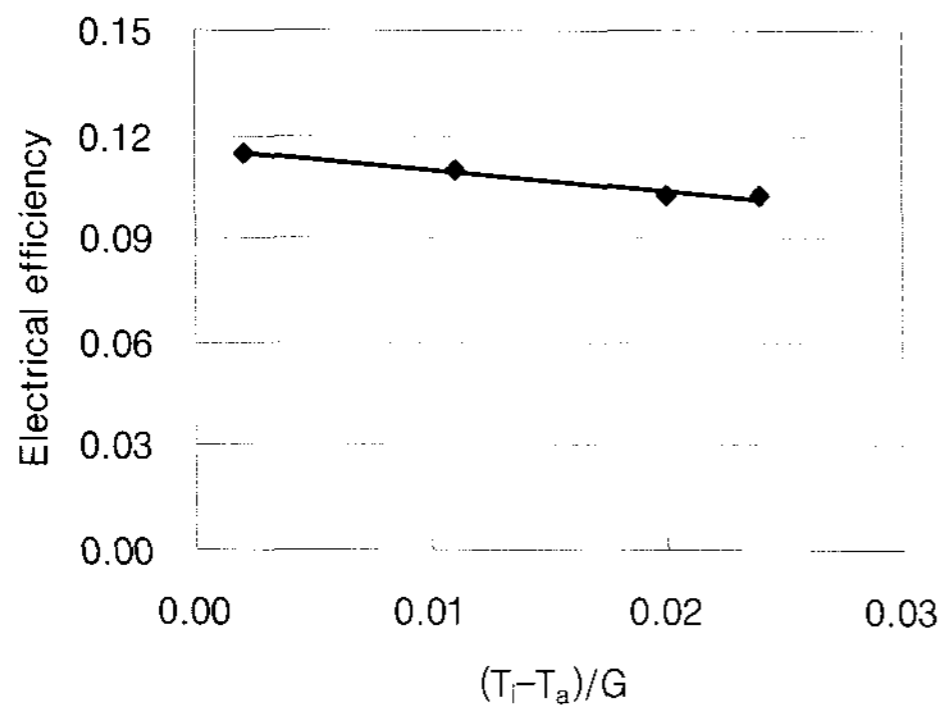


그림 9. PV/Thermal 복합모듈 전기효율

## 5. 결 론

본 연구는 태양열과 태양광시스템을 결합한 액체식 PV/Thermal 복합모듈에 대한 성능실험 결과를 분석하였다. 실험분석 결과 본 PV/Thermal 복합모듈의 열성능은 실험체 유수 입구온도가 낮을수록, 입구온도와 일사량이 높을수록 열효율이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 일사량과 외기온도가 높을수록 대류와 전도에 의한 열손실이 적어 열효율이 증가하는 것으로 분석되었다.

PV/Thermal 복합모듈의 전기성능은 유수 입구온도와 외기온도가 낮을수록 전기효율은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 PV모듈 후면의 온도를 냉각시켜 전기효율의 증가를 가져오는 것으로 분

석되었다.

본 연구에서 제작된 액체식 PV/Thermal 복합모듈의 평균 열성능 및 전기성능은 각각 17%, 11%로 나타났으며 시스템 전체 효율은 28%로 나타났다. 따라서 PV/Thermal 복합모듈의 성능은 단독으로 설치되는 태양광시스템 효율 10% 대비 18% 효율이 추가되는 것을 알 수 있으며 열적 성능은 다소 낮지만 단독으로 설치되는 태양열 시스템 대비 단위면적당 효율은 비슷한 수준인 것으로 판단된다. 또한 열매체도관 용접 방식 등 제작 공정상의 개선을 통해 열성능 및 시스템 전체 효율 향상을 기대 할 수 있다.

향후 이러한 연구를 바탕으로 PV/Thermal 복합모듈에 영향을 미치는 각 요소에 대한 정확한 분석이 요구되며, 이를 바탕으로 보다 성능이 우수한 PV/Thermal 복합모듈의 개발이 필요하다.

## 참 고 문 헌

1. 박광수 외, 2005. 에너지수요전망, 에너지경제연구원, pp.1-11
2. 산업표준심의회, 2006, 태양집열기의 집열 성능 시험 방법(KS B 8200), 산업표준심의회
3. Y. Tripanagnostopoulos, 2002, Hybrid Photovoltaic/Thermal Solar System, Solar Energy, Vol. 72, No. 3, pp.217-234
4. H. A. Zondag et al, 2003, The Yield of Different Combined PV-thermal Collector Designs, Solar Energy. pp.253-269
5. A. Pascal et al, 2006, PVT Roadmap : A European Guide for the Development and Market Introduction of PV-Thermal Technology, IEA