

[논문] 한국태양에너지학회 논문집

Journal of the Korean Solar Energy Society

Vol. 27, No. 3, 2007

주택 지붕일체형 PV시스템 후면환기에 따른 발전성능 변화 실험연구

윤종호*, 한규복**, 안영섭***

*한밭대학교 건축공학과(jhyoon@hanbat.ac.kr), ** (주)케이지종합건설(hankb999@naver.com)

***한밭대학교 대학원(rnsqks8646@hanmail.net)

Experimental Study on the Combined Effect of Power and Heat according to the Ventilation of Back Side in Roof Integrated PV System

Yoon, Jong-ho* Han, Kyu-bok** An, Young-sub***

*Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National University(jhyoon@hanbat.ac.kr)

**KG construction company(hankb999@naver.com)

***Dept. of Architectural Engineering, Graduate School, Hanbat National University(rnsqks8646@hanmail.net)

Abstract

Building integrated photovoltaic(BIPV) system operates as a multi-functional building construction material. They not only produce electricity, but also are building integral components such as facade, roof, window and shading device. As PV modules function like building envelope in BIPV, combined thermal and PV performance should be simultaneously evaluated. This study is to establish basic information for designing effective BIPV by discovering relations between temperature and generation capability through experiment when the PV module is used as roof material for houses. To do so, we established 3kW full scale mock-up model with real size house and attached an PV array by cutting in half. This is to assess temperature influence depending on whether there is a ventilation on the rear side of PV module or not.

Keywords : 건물일체형 태양광발전(Building Integrated Photovoltaic, BIPV), 실험용 건물(full scale mock-up house), 통기조건(Ventilation Type), 열적효과(Thermal Effect)

접수일자 : 2007년 8월 27일, 심사완료일자 : 2007년 9월 19일

교신저자 : 윤종호(jhyoon@hanbat.ac.kr)

1. 서 론

최근 전 세계적으로 고유가로 인한 경제적 부담으로 인해 청정하고 무궁한 대체에너지 개발에 대한 관심이 커지고 있다. 그 중 무공해이며 무진장한 태양에너지의 개발은 에너지 고갈 문제 및 화석 연료로 인한 지구 환경 문제를 해결할 수 있는 대표적 방법으로 그 연구가 활발히 진행되고 있으며, 정부에서는 10만호 태양광주택 보급사업을 통해 3kW급 가정용 태양광 발전시설 보급을 시작하고 있는 상태이다.

한편 성능측면에서 주류를 이루고 있는 결정계 태양전지 PV모듈을 건물 외장재로 사용할 경우 태양전지 표면의 온도상승에 따른 발전성능 저하가 예상됨으로, 단열재의 설치 위치, 환기구조의 유무, 부착방식 등에 따라 BIPV모듈의 발전성능이 크게 달라진다. 즉 PV모듈이 건축외장재로 적용될 경우 건물외피의 일부로 구성되기 때문에, 최적의 BIPV시스템 구성을 위해서는 건물의 열성능에 미치는 영향과 PV모듈 표면의 온도 상승에 따른 발전성능 저하 등을 비롯하여 건축화 전반에 대한 종합적 고려가 이루어져야 한다.¹⁾

따라서 본 연구에서는 주택 지붕용 건물일체형 태양광발전 시스템(BIPV)을 건축외장재로 적용했을 때 후면환기 유무에 따른 온도 및 발전 성능의 상관관계를 규명하기 위해, 실물 크기의 Mock-up house를 건립하고, 개발된 지붕일체형 PV모듈 3kW를 시범적용하여, 후면 환기조건에 따른 발전 성능의 영향을 평가하는데 주 목적이 있다.

2. Mock-up 실험주택의 개요

본 연구에서는 BIPV의 후면환기 유무에 따른 온도와 발전성능 평가를 위해 실물스케일의 Mock-up 실험주택을 설계 제작하였다. 그림 1은 최종 완성된 건물의 전경을 나타낸다.

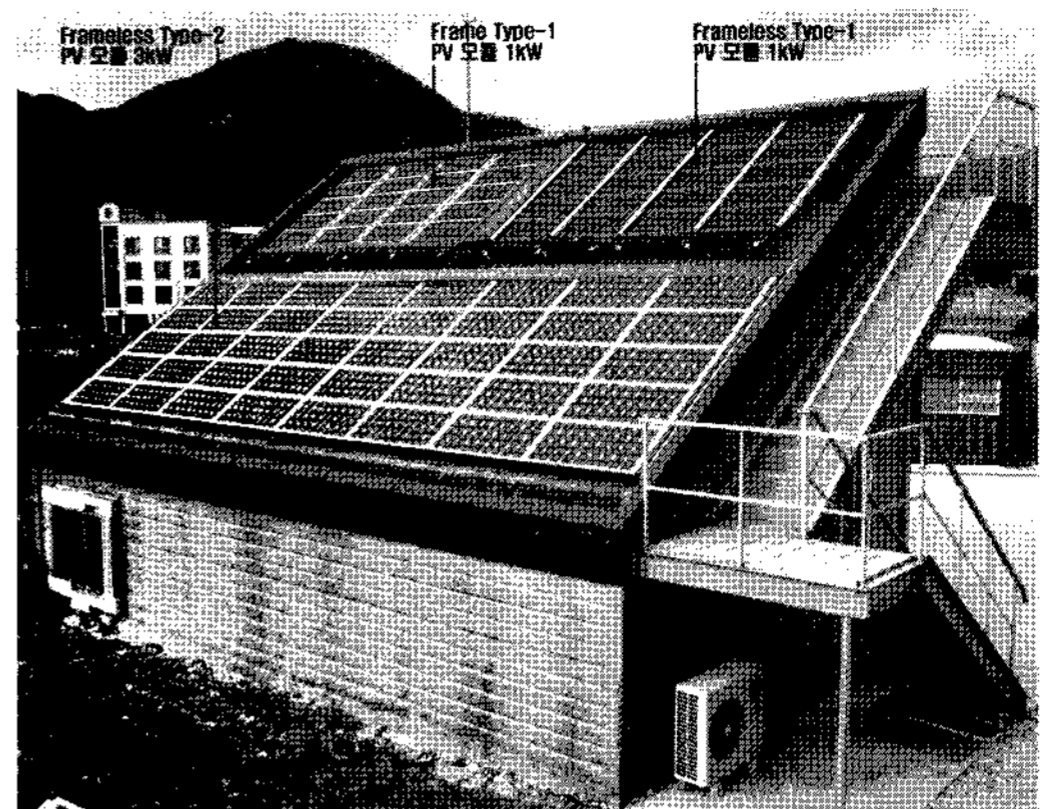


그림 1. 최종 완공된 Mock-up 실험주택의 전경

실험주택은 지붕구조의 자유로운 철거, 재설치를 위해 철골구조를 도입하였으며, 방수 및 환기, 온도 영향 등을 평가하기 위해 조립식 구조의 공간을 구성하였다. 지붕물매는 시공 난이도가 높은 비교적 가파른 35°의 물매로 설계하였으며, 총 지붕면적은 약 67m²이다. 인접건물의 음영영향을 배제하기 위해 인근의 장애물이 없는 정남향 방위로 시공하였다.

본 실험주택의 지붕에는 선행연구²⁾를 통해 개발된 3개 유형의 지붕일체형 PV모듈이 적용되었으며, 본 연구에서는 지붕 하단부에 설치된 Frameless Type 2 PV모듈 3kW를 대상으로 실험을 수행하였다.

3. 후면환기 효과 평가를 위한 실험조건

3.1 실험 개요 및 측정장치

PV모듈 후면부의 환기조건에 따른 발전성능의 영향을 평가하기 위해 지붕 하부의 3kW PV모듈은 좌우 각기 1.5kW씩 구분하여 설치하였다.

PV 모듈의 구분을 위해 그림 2와 같이 좌측군을 PV-array(A)로, 우측군을 PV-array(B)로 명명하였다.

PV-array의 전후면 표면온도 및 후면 통기구의 상, 중, 하부 온도 등 총 10개 지점을 측정하기 위해 각 군별로 T-type 열전대를 설치하였다.

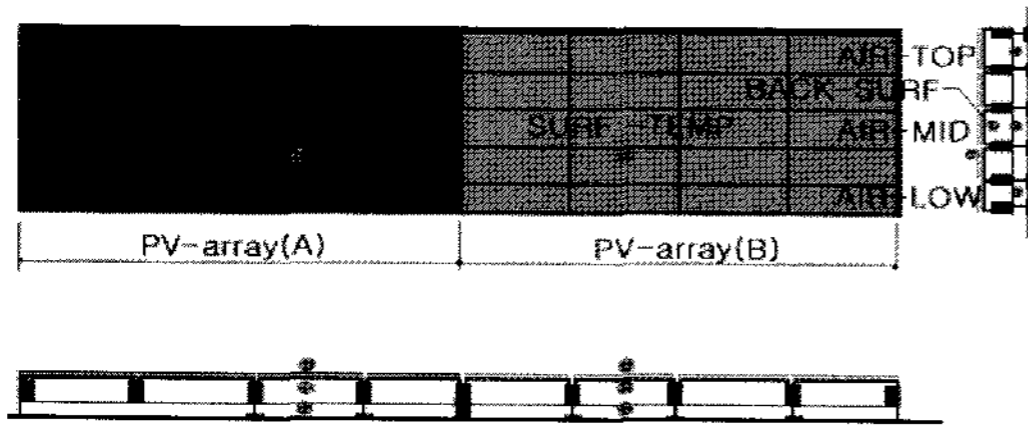


그림 2. 3kW PV모듈의 온도 센서 위치 및 명칭

또한 외기온도 및 지붕물매 경사면과 수평면에 대한 전일사량 값도 측정하였으며, PV모듈을 통한 발전량 산출을 위해 전압·전류값도 1.5kW 각 군별로 측정하였다. 인버터를 설치하는 대신 전기부하는 열저항으로 처리하였다. 데이터로거는 Agilent사의 34970A를 사용하였으며, 매 스캔주기마다 측정된 값을 1분 간격으로 평균하여 저장 모니터링 하였다.

실험에 이용한 PV모듈은 국내 L사 및 H대학 공동으로 개발한 지붕일체형 모듈로 75Wp급 PV모듈 40개가 적용되었다. 단위 모듈의 크기는 1199 × 534mm이며, 외형적으로 프레임이 보이지 않는 형태로 개발된 BIPV모듈이다.

3.2 실험방법

지붕일체형 PV모듈의 후면 환기방식의 변화를 위해 PV-array(A) 및 PV-array(B)의 상/하부 통기구를 개방/밀폐가 가능한 구조로 설계하였다. 이때 통기구의 면적은 상부의 경우 PV모듈 면적의 0.4%를, 하부의 경우 1.16%의 규모로 설계되었다. 상하부 통기구의 개폐 여부에 따라 표 1의 경우와 같이 실험조건을 구분하고 단계별 실험을 수행하였다.

예비실험은 A 및 B군의 초기조건이 동일한지의 여부를 판정하기 위한 사전실험으로 9월1일~9월 6일까지 주야간 일주일간에 걸쳐 수행되었으며, 예비 실험의 결과는 본 실험의 보정자료로 활용하였다.

본 실험의 경우 상부 또는 하부를 각각 교차로 밀폐시키거나 또는 모두 밀폐시키는 3가지의 경우

로 3단계 실험을 수행하였으며, 시기 및 기간은 표 1과 같다.

표 1. 실험조건

실험조건	PV-array(A)		PV-array(B)		실험 기간 (2005년)
	상부통기구	하부통기구	상부통기구	하부통기구	
예비실험	O	O	O	O	9. 1~9. 6
실험조건 I	O	X	O	O	9. 8~9.13
실험조건 II	X	O	O	O	9.15~9.21
실험조건 III	X	X	O	O	9.24~9.30

X : 밀폐, O : 개방

4. 실험결과 분석

4.1 실험조건 I의 분석결과

PV-array(A)는 상부만을, PV-array(B)는 상/하부 모두 개방한 상태에서 실시한 실험조건 I에서 PV모듈의 일사량 구간별 표면온도의 분석결과를 표2에 나타냈다. 표 3은 일사량 구간별 발전량을 나타낸 것이다. 모든 분석의 일사량은 경사면 전일사량값을 기준하였다.

한편 그림 3은 일사량 구간별에 따른 통계처리 결과에 근거해 Box-Whisker 형태의 그래프로 표면온도의 거동특성을 분석, 도식한 결과이다. 그림에서 각 Box 중앙의 \boxtimes , \circ 기호는 각 일사강도 구간별로 2개 모듈군 각각의 평균값(Mean)을, Box \square , \boxplus 기호는 평균±표준편차(Mean±S.D)의 범위를, Whisker I 기호는 최대(Max) 및 최소값(Min)의 변화범위를 나타낸다.

예를 들면 그래프 좌측의 첫 번째 컬럼은 실험조건 1의 측정된 데이터 중 일사강도가 100W/m²이 하인 데이터를 대상으로 PV모듈A, B의 평균(Avg), 표준편차(S.D), 최대(Max)/최소값(Min)의 변화범위를 나타낸 것이다. 이 그래프를 통해 일사량 강도의 크기에 따라 온도편차가 어느 정도 발생하는지의 통계 값을 손쉽게 파악할 수 있으며, 특히 최대 최소의 변화범위 또한 동시에 판정가능하기 때문에 PV 모듈간의 거동특성을 매우 효과적으로 비교 분석할 수 있다.

표 2. 실험조건 I - 일사량 구간별 PV-array 전면의 표면온도 분석

일사량 (W/m ²)	PV-array(A)				PV-array(B)			
	MIN	MAX	S.D	Avg	MIN	MAX	S.D	Avg
≤100	15.4	34.6	3.5	21.7	15.4	32.9	3.2	21.5
(100,200)	26.1	38.9	4.8	32.8	25.2	36.8	4.2	31.2
(200,300)	25.4	51.3	8.6	40.8	24.3	46.7	7.4	38.0
(300,400)	36.4	57.8	7.0	46.8	36.1	51.9	5.5	43.0
(400,500)	43.4	61.8	6.2	51.9	40.5	55.7	5.0	47.8
(500,600)	52.0	61.0	3.7	57.1	50.3	55.9	2.2	52.9
(600,700)	59.1	67.8	3.7	64.4	52.6	62.1	3.8	58.6
(700,800)	60.9	73.5	8.9	67.2	56.5	67.4	7.7	62.0
>800				69.1				62.3

PV모듈 전면의 중앙부에서 측정된 표면온도의 경우는 일사량이 800W이상일 때를 기준하여 PV-array(A)가 69.1℃, PV-array(B)가 62.3℃로 (B)가 6.8℃의 편차를 나타내었으며, 이는 (B)의 경우가 약 10%정도 온도가 더 낮게 유지되었음을 나타낸다.

표 3. 실험조건 I - 일사량 구간별 PV-array의 발전량 분석

	일사량 (W/m ²)	PV-array(A)				PV-array(B)			
		MIN	MAX	S.D	Avg	MIN	MAX	S.D	Avg
발전량 (W)	≤100		12.2	2.6	1		12.5	2.7	1
	(100,200)	21.1	71.6	15.6	42.9	21.8	72	15.5	43.2
	(200,300)	78.6	164.4	31.5	120.3	79.4	164.9	31.4	120.4
	(300,400)	150.5	310.6	52.9	227.5	150.3	308.9	52	226.1
	(400,500)	275.9	520	82.9	408.4	274.2	515.4	82	403.4
	(500,600)	530.4	678.3	75.6	592.2	518.1	672.7	74.7	584.1
	(600,700)	674.7	827.3	56.8	775.6	674.5	824.3	56.6	769.7
	(700,800)	864.6	978.8	80.7	921.7	863	982.9	84.8	922.9
	>800				953.1				984.7
전압 (V)	≤100		26.3	6.7	3		26.3	6.7	3
	(100,200)	35.3	66.7	9.2	50.2	35.3	66.7	9.2	50.2
	(200,300)	70.1	104.5	11.4	86.3	70.1	104.5	11.4	86.4
	(300,400)	101.5	145.3	14	121.6	101.5	145.4	14	121.6
	(400,500)	136.4	178	14.2	158	136.5	178.1	14.2	158
	(500,600)	180.4	208.1	10.2	191.1	180.5	208.2	10.3	191.1
	(600,700)	212.2	232.8	7.9	226.1	212.3	232.9	7.9	226.2
	(700,800)	242.1	262.3	14.3	252.2	242.2	262.5	14.3	252.3
	>800				255.7				255.9
전류 (A)	≤100	0	0.4	0.1	0.1	0	0.4	0.1	0.1
	(100,200)	0.5	0.9	0.1	0.7	0.5	0.9	0.1	0.7
	(200,300)	1	1.5	0.2	1.2	1	1.5	0.2	1.2
	(300,400)	1.4	2.1	0.2	1.7	1.4	2	0.2	1.7
	(400,500)	1.9	2.5	0.2	2.2	1.9	2.5	0.2	2.2
	(500,600)	2.5	3	0.2	2.7	2.5	2.9	0.1	2.7
	(600,700)	3	3.3	0.1	3.2	3	3.3	0.1	3.2
	(700,800)	3.4	3.7	0.2	3.6	3.4	3.7	0.2	3.5
	>800				3.5				3.6

발전량의 경우 일사량 800W이상일 때를 기준하여 PV-array(A) 953.1W, PV-array(B) 984.7W로 31.7W정도 (B)의 발전량이 많으며, 이는 약 3.2%의 발전성능 차이를 나타낸 것이다.

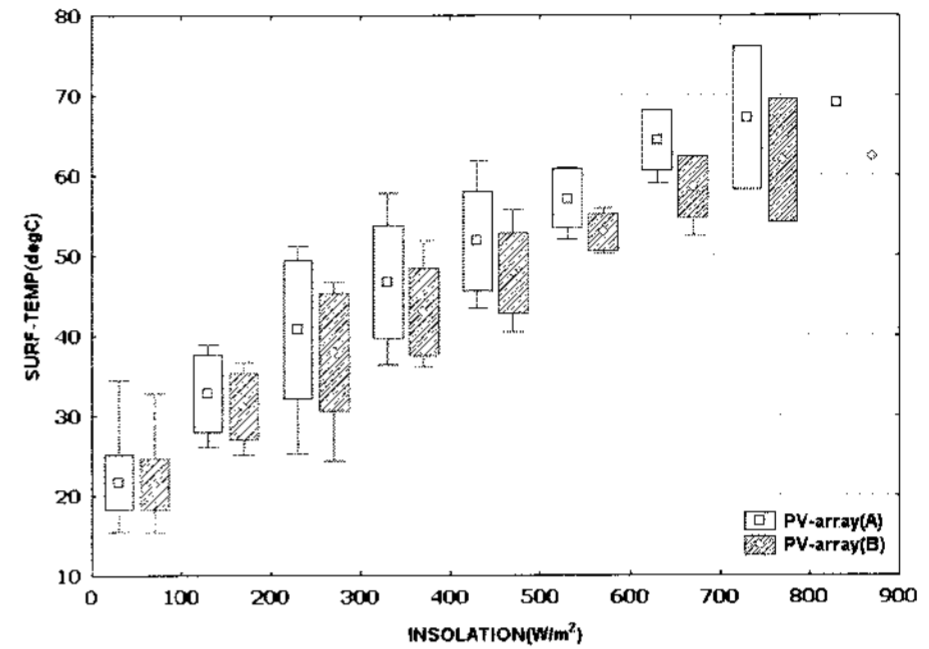


그림 3. 실험조건 I - 일사량 구간별 PV모듈 표면온도

4.2 실험조건 II의 분석결과

그림 4는 PV-array(A)의 하부 통기구만 폐쇄시킨 상태로 측정된 실험조건 II의 일사량 구간별 2개 모듈군의 온도차를 통계분석한 결과를 나타내며, 그림 5는 동일조건에서 발전량의 차이를 도식한 결과이다.

일사강도 800W/m²의 경우를 대상으로 공기층 상/중/하부의 온도를 살펴보면 상부의 경우 (A)가 69.7℃, (B)가 60.5℃로 나타났고 중앙부에서는 (A) 66℃, (B) 54.8℃로, 하부의 경우 (A)가 55.2℃, (B)가 45.8℃로 나타났다.

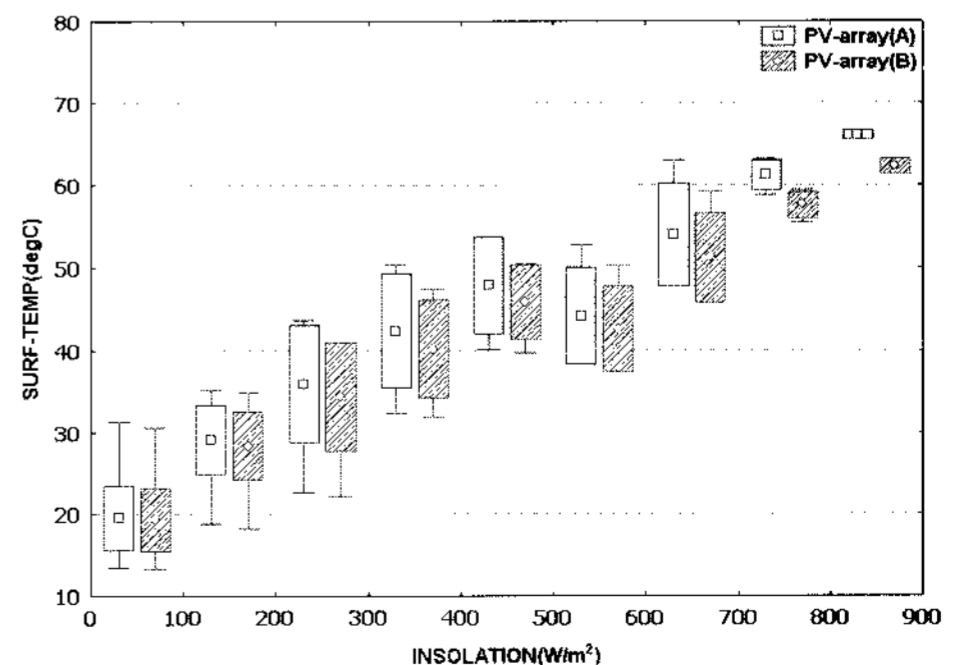


그림 4. 실험조건 II - 일사량 구간별 PV모듈 표면온도

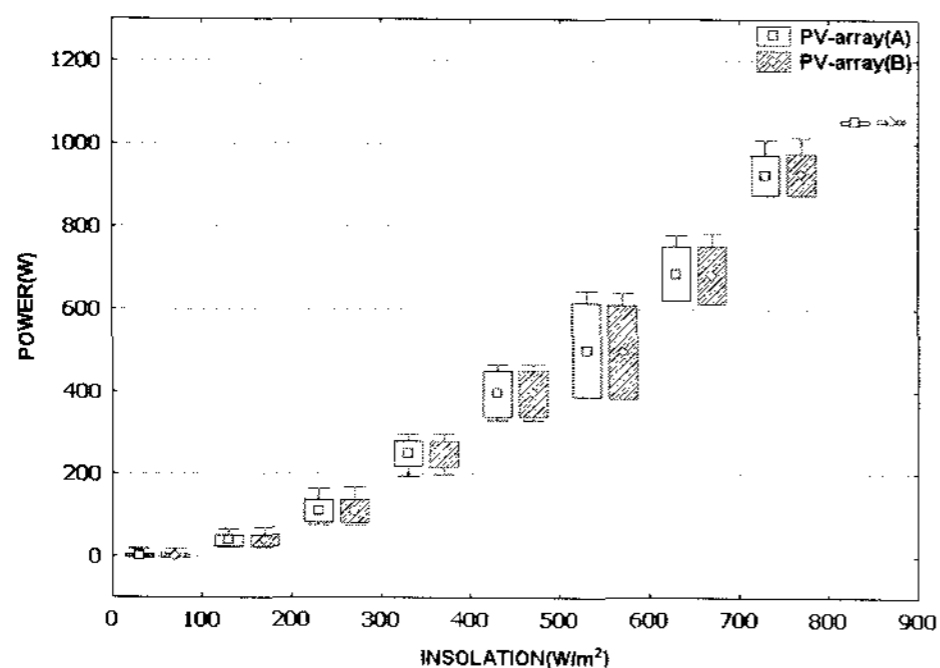


그림 5. 실험조건 II- 일사량 구간별 PV 발전량

PV모듈 전면 표면온도의 경우, 일사강도 800 W/m² 이상을 기준하여, PV-array(A)가 66.1°C, PV-array(B)가 62.3°C를 나타내어 (B)의 표면온도가 (A)보다 5.7% 낮은 온도 분포를 보이는 것으로 분석되었다.

4.3 실험조건 III의 분석결과

그림 6은 PV-array(A)의 상부 및 하부 통기구 모두를 폐쇄시킨 상태로 측정된 실험조건 III의 일사량 구간별 2개 모듈군의 온도차를 통계분석한 결과를 나타내며, 그림 7은 동일조건에서 발전량의 차이를 나타낸다.

일사량 800W/m² 이상을 기준으로 공기층 상/중/하부의 온도는 (A)가 68.8°C, 67.9°C, 65.9°C를, (B)는 55.8°C, 50.3°C, 42.4°C의 온도를 나타냈다.

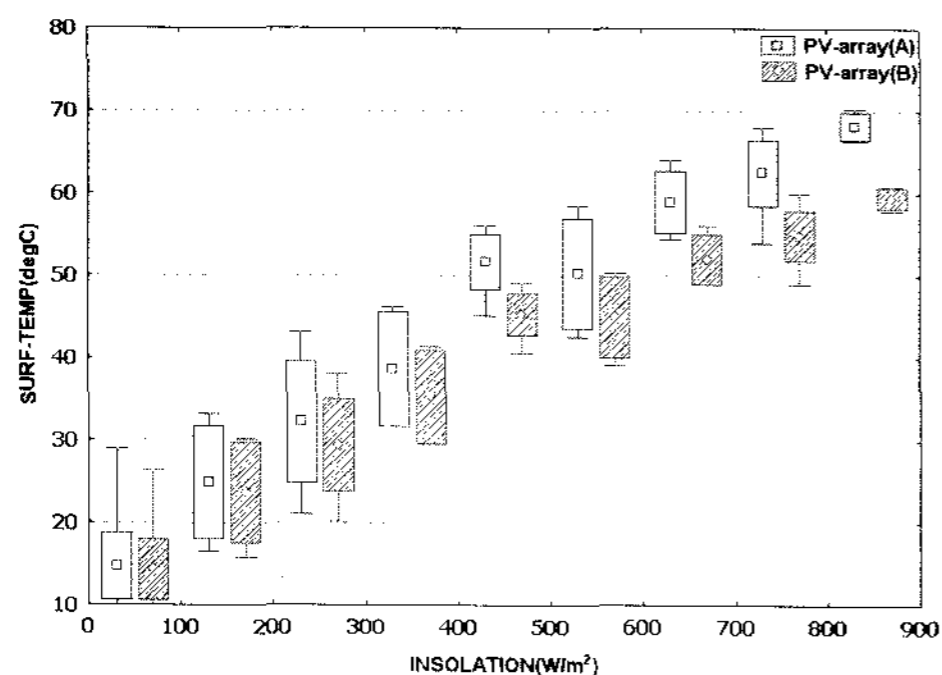


그림 6. 실험조건III-일사량 구간별 PV모듈 표면온도

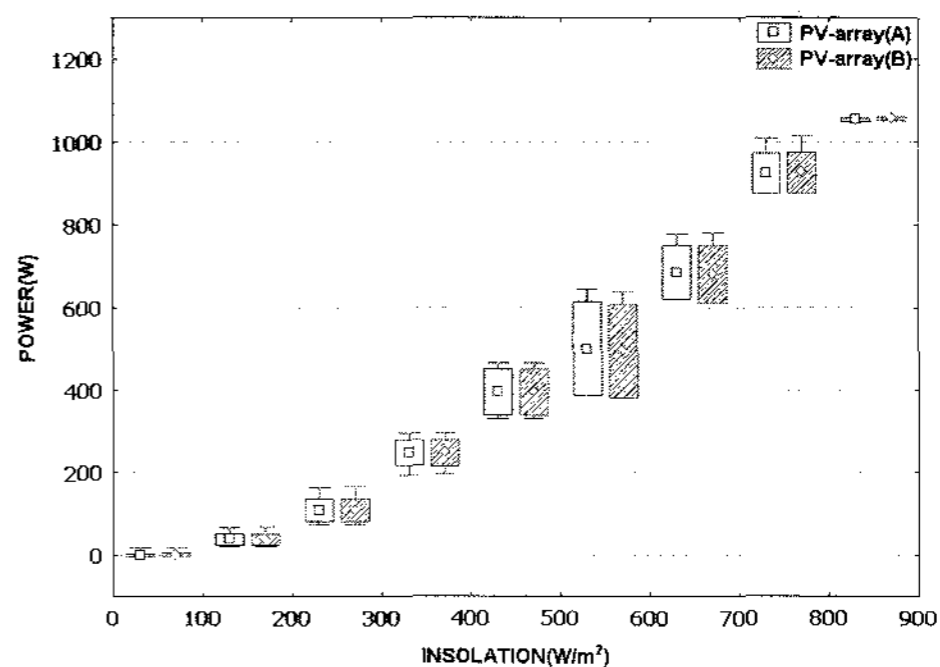


그림 7. 실험조건III- 일사량 구간별 PV발전량

표면온도의 경우 (A)가 68.2°C, (B)가 59.5°C로 (B)가 8.7°C 낮게 분석되었다. 발전량의 경우 (B)가 1,093W로 (A)의 1,070W에 비해 약 23W정도 더 발전한 것으로 나타났다.

4.4. 종합분석

표 4는 측정데이터 중 일사강도 500W/m² 이상인 경우만을 대상으로 일사강도 구간에 따른 PV-array(A)군과 (B)군의 PV모듈 표면온도차 및 그에 따른 발전량차이 비율을 실험조건별로 분석 제시한 것이다. 이때 온도차는 (A)군에서 (B)군의 온도를 뺀 값이며, 발전량차는 (A)군 대비 (B)군의 발전량 비율차로 표현한 값이다.

표 4. 3개 실험조건의 결과 종합분석

구분	일사량 (w/m ²)	예비 실험	예비실험 보정전			예비실험 보정후		
			실험1	실험2	실험3	실험1	실험2	실험3
표면 온도 차 (°C)	(500,600)	1.1	4.2	1.5	5.3	3.1	0.4	4.2
	(600,700)	0.6	5.8	2.7	7.0	5.2	2.1	6.4
	(700,800)	-0.1	5.2	3.7	7.7	5.3	3.8	7.8
	>800	0.9	6.8	3.8	8.7	5.9	2.9	7.8
발전량차 비율 (%)	(500,600)	-1.6	-1.4	1.8	0.0	0.2	3.4	1.6
	(600,700)	-2.6	-0.8	-0.6	-0.2	1.8	2.0	2.3
	(700,800)	-2.8	0.1	0.2	0.9	3.0	3.0	3.7
	>800	-2.5	3.2	0.2	2.1	5.7	2.8	4.6

(A)군과 (B)군의 초기조건 평가를 위해 통기구를 모두 개방한 상태로 수행한 예비실험결과 일사량 구간 전체에 걸쳐 (B)군의 온도가 1°C 아래의 범

위에서 낮게 나타났으며, 전체 발전량 또한 (B)가 1.6%~2.8%의 범위에서 작게 발전되었다. 이들 예비실험의 결과는 일사강도 구간에 따른 온도차 및 발전량차의 변화가 선형적으로 비례한다는 가정 하에 본실험 조건의 보정치로 적용하였으며, 표 4에서 예비실험 보정후의 결과가 이에 대한 결과값을 나타낸다.

분석 결과에 따르면 PV모듈의 하부 통기구만을 폐쇄할 경우, 상하부 모두 개방한 경우에 비해 PV모듈의 표면온도가 3.1°C~5.9°C까지 온도가 상승한 것으로 나타났으며, 이에 따라 발전성능도 최대 5.7%까지 저하될 수 있는 것으로 나타났다.

상부 통기구만을 폐쇄시키고 하부를 개방한 실험 조건 II의 경우 PV모듈 표면온도는, 상하부 모두 개방한 경우에 비해 0.4°C~2.9°C 높게 나타났고, 이에 따라 발전량도 2%~3.4%정도 낮게 나타났다.

상하부 통기구를 모두 폐쇄시킨 실험조건 III의 경우 역시 가장 큰 온도상승폭을 나타내어, 상하부 모두 개방한 경우에 비해 4.2°C~7.8°C까지 온도가 상승된 것으로 나타났다. 이때 온도상승에 따른 발전성능의 저하는 1.6%~4.6%범위로 나타났다.

한편 상기의 결과를 근거로 PV모듈 표면온도 상승에 따른 발전량 감소율의 관계를 분석해 보면, 표면온도 1°C 온도상승에 따라 0.64%씩 발전량이 감소하는 것으로 분석되었다.

5. 결론

본 연구에서는 지붕일체형 태양광발전 모듈의 후면 환기유무 및 통기위치에 따른 PV모듈의 온도변화와, 그에 따른 발전량 변화를 검증하기 위해 3kW 실물 규모의 Mock-up 모델을 대상으로 실증실험을 수행하였다.

후면환기 통기조건에 따른 비교실험 분석결과 지붕일체형 태양광발전 시스템의 후면 통기상황의 여부에 따라 PV모듈의 온도가 크게 변화되며, 그에 따라 PV모듈의 발전성능도 저하됨을 정량적으로 규명

하였다. 또한 다양한 통계적 기법을 통해 일사량 강도별, 시간대별 온도 및 발전성능의 변화특성을 분석하였다. 주요 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 9월 한달간 수행된 본 실험결과 후면 통기 여부에 따라 일사구간 평균 최대 7.8°C까지 온도차가 발생하며, PV발전량의 차이도 최대 5.7%까지 나타났다. 따라서 지붕일체형 PV모듈의 후면 환기는 발전성능에 큰 영향을 미치는 성능변수임이 입증되었다.

둘째, 통기구조는 상하부 모두 개방하는 형태가 가장 바람직하며, 1면만 개방해야 할 경우는 상부 개방 보다는 하부 개방의 경우가 환기효과가 더 커 발전성능이 더 우수한 것으로 나타났다.

셋째, 본 실험조건에 다른 PV모듈 표면온도차에 따른 발전성능 차의 상관관계 분석결과, PV모듈 표면온도 1°C 상승에 따라, 약 0.64%씩의 발전량 감소가 발생하는 것으로 분석 되었다.

본 실험조건은 35° 경사지붕 조건에 상부 및 하부 통기구의 면적도 고정된 상황에서 수행된 실물 스케일의 실험결과이다. 후면 환기효과는 스택효과로 인해 경사각 및 상하부의 통기면적이 큰 영향을 미치는 변수이다. 따라서 후속연구로 이론해석모델을 통한 다양한 조건별 성능해석 시뮬레이션을 수행할 예정이며, 본 논문의 실험결과는 이론모델의 신뢰성검증을 위한 보정자료로 활용될 수 있을 것이다.

본 연구는 과학기술부 우수연구센터육성사업인 한양대학교 친환경건축 연구센터의 지원으로 수행되었음 (R11-2005-056-02005-0)

참고 문헌

1. 윤종호, "BIPV를 위한 PV모듈의 전자재화 기술 동향", 한국태양에너지학회지, v.2 n.4, 2003.11
2. 김재웅, "건물 외피용 태양광발전(BIPV) 모듈의 열적 영향에 관한 성능평가 연구", 한밭대학교 산업대학원 건축공학과, 2005. 2