

주거용 건물 태양광발전시스템의 설치유형에 따른 발전성능 평가

김덕성* · 김법전** · 신우철****

*솔라테크(주)
**한국토지주택공사
***대전대학교 건축공학과

Evaluation of Electricity Generation According to Installation Type of Photovoltaic System in Residential Buildings

Kim, Deok-Sung* · Kim, Beob-Jeon** · Shin U-Cheul****

*Solar Tech CO.,LTD
**Korea Land&Housing Corporation
***Department of Architectural Engineering, Daejeon University

†Corresponding author: shinuc@dj.u.ac.kr

Abstract

The types of installation of the photovoltaic system applied to domestic residential buildings are classified as follows: Mounted modules with air circulation, semi-integrated modules with air duct behind, integrated modules with fully insulated back. In order to study generation characteristics of PV system, we verified the validity of interpretation program based on long-term measurement data of demonstration house installed in BAPV form and also analyzed the generation characteristics and performance of each installation type. The results are as follows. First, the RMSE of amount of generation and simulation according to annual daily insolation of demonstration system located in Daejeon was 0.98kWh and the range of relative error of monthly power generation was -5.8 to 3.1. Second, the average annual PR of mounted modules was 82%, semi-integrated modules 76.1% and integrated modules 71.9%. This differences were attributed to temperature loss. Third, the range of operating temperature of annual hourly photovoltaic modules was -6.5 to 61.0°C for mounted modules, -6.0~73.9°C for semi-integrated modules and -5.5 to 88.9°C for integrated modules. The temperature loss of each installation type was -14.0 to 16.1%, -13.8 to 21.9%, and -13.6 to 28.5%, respectively.

Keywords: 건물일체형 태양광발전시스템(Building Integrated Photovoltaic system), 성능계수(Performance Ratio), 온도손실(Temperature loss), 태양광발전시스템(Photovoltaic system)

기호설명

A : 태양광모듈 면적 (m²)



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.37, No.2, pp.35-45, April 2017
<https://doi.org/10.7836/kjes.2017.37.2.035>

pISSN : 1598-6411
eISSN : 2508-3562

Received: 16 February 2016

Revised: 17 March 2017

Accepted: 21 April 2017

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

- E_N : 태양광모듈 정격효율 (%)
- I_t : 입사면 연간 총일사량(kWh/m²)
- PR : 성능비
- Y_F : 연간 태양광발전량(kWh)
- x_i : 실측치
- \bar{x}_i : 예측치
- U_L : 열손실계수(W/m²°C)
- T_a : 외기온(°C)
- T_{ref} : 표준셀작동온도(25°C)

그리스 문자

- $\tau\alpha$: 모듈 태양흡수율
- η_c : 모듈 정격효율
- μ_c : 온도손실계수

1. 서론

주거용 건물에 적용되는 태양광발전시스템의 설치유형을 살펴보면 건물의 지붕이나 옥상에 태양광모듈 후면을 개방한 노출형(Mounted modules with air circulation)과 경사 지붕위에 가대를 설치하여 태양광모듈을 덧댄 형태인 통기형(Semi-integrated with air duct behind)의 건물부착형 태양광발전(Building Applied Photovoltaic, 이하 BAPV)이 많은 부분을 차지하고 있으며, 지붕의 마감재 역할을 할 수 있는 밀폐형(Integration with fully insulated back)으로 건물일체형 태양광발전(Building Integrated Photovoltaic, 이하 BIPV) 시스템은 거의 찾아보기 어려운 실정이다.

한편 동일한 기상조건에서도 설치유형별 태양광모듈 후면의 열적경계조건이 구별되고, 상이한 모듈온도에 따라 발전성능의 차이가 발생하게 된다. 2000년대 후반부터 유럽을 중심으로 BIPV를 포함한 설치유형에 따른 발전성능의 비교분석이 진행되어 왔으며, 최근에는 주거용 건물의 지붕재형 BIPV 시스템을 BAPV와 비교할 때 미적 측면뿐만 아니라 경제적 측면에서도 경쟁력이 있는 것으로 평가되고 있다¹⁾.

국내에서도 2025년 정부의 제로에너지건물 의무화에 대비한 기반구축으로 BIPV 시스템 보급의 필요성이 제기되고 있다²⁾. 이에 2011년부터 2020년 이후까지 신재생에너지 공급의무비율을 산정하여 건축물에 대한 에너지사용량의 일부는 신재생에너지로 공급하도록 규정하고 있으며 공급의무비율은 점차 증가하는 추세이다. 또한 BIPV의 경우 11.7의 월별 보정계수를 설정하여 BIPV 기술개발의 촉진 및 산업 활성화 등을 고려하였다³⁾. 따라서 국내의 건

축구조 및 재료에 적합하고 다양한 BIPV 시스템의 개발이 시도되고 있다.

태양광발전시스템의 설치조건에 따른 PV 모듈의 발전특성에 관한 국내 연구동향을 살펴보면 Yoon et al.⁴⁾은 건물 외벽에 BIPV 형태로 설치된 3개의 동일한 태양광모듈에 대해, 후면 통기조건에 따른 태양광모듈 온도변화와 발전성능 실험을 통해 분석하였으며, 그 결과 태양광모듈 후면의 배기에 따라 온도강화 효과 및 이에 따른 발전성능 상승효과가 있음을 입증하였다. 또한 Kim et al.⁵⁾은 지붕형태의 모듈 밀착상태에서 결정질 태양광모듈모듈(BIPV)의 부하조건에 따른 온도특성을 공칭작동셀온도(Nominal Operating Cell Temperature, 이하 NOCT)와 비교하였다. 그 결과 동일한 모듈인 경우에도 부하조건 따라 작동온도가 NOCT와 상이한 결과를 도출하였으며, 모듈의 설치유형에 따른 NOCT 측정의 필요성을 제기한 바 있다.

그러나 이와 같은 다양한 설치방법에도 불구하고, 국내 기후여건에서 주거용 태양광발전시스템의 발전특성에 관한 분석 및 설계자료는 매우 한정된 실정이다. 이에 본 연구에서는 BAPV 형태로 설치된 실증주택의 장기 실측자료를 기반으로 해석 프로그램의 타당성을 검증하고, 이를 통해 국내 주거용 태양광발전시스템의 설치유형에 따른 발전특성을 고찰하고자 한다.

2. 주거용 태양광발전시스템의 설치유형

전술한 바와 같이 주거용 건물에 적용되는 태양광발전시스템의 설치유형은 노출형과 통기형, 밀폐형 등 3가지로 구분할 수 있다. Fig. 1은 노출형으로 설치된 태양광발전시스템을 나타낸 것이다. 이 방식은 태양광모듈을 기존 주택의 향과 경사각을 고려하여 설치하는데 적합하다. 그러나 지붕이나 옥상 위에 구조물을 이용하여 그 상부에 모듈을 설치하기 때문에 기존 주택형태와 부조화가 문제점으로 지적되고 있으며, 풍압에 따른 구조물의 보강이 필요하다. Fig. 2와 같이 설치되는 통기형은 경사지붕면에 가대를 설치하고 태양광모듈을 덧댄 설치방식이다. 노출형에 비해 의장적 거부감을 줄일 수 있으며, 자연통풍이 가능한 설치형태이다. Fig. 3과 같은 밀폐형은 지붕마감재를 대체하는 건물일체형 태양광발전시스템으로 설계조건에 따라 설치비용을 절감하고⁶⁾, 심미적 효과로 건물의 부가가치를 상승시킬 수 있는 장점이 있으나, 자연통풍이 제한적이다.



Fig. 1 Mounted modules with air circulation



Fig. 2 Semi-integrated with air duct behind



Fig. 3 Integration with fully insulated back⁷⁾

3. 실증주택의 태양광발전시스템

3.1 실증주택

Fig. 4는 대전광역시 유성구 죽동에 위치(위도 36.38도, 경도 127.32도)한 실증주택의 전경을 나타낸 것이다. 실증주택의 태양광발전시스템은 지붕 아스팔트 상글(Asphalt Shingle) 마감재 위에 가대를 고정한 후, 태양광모듈을 배치한 통기형으로 설치되었다. 건물의 방위는 정남향이며, 지붕의 경사각은 30도 이다.



Fig. 4 View of the analyzed house

3.2 실증주택 태양광발전시스템 설치현황

Table 1과 Table 2는 실증주택에 설치된 태양광모듈과 인버터의 사양을 나타낸 것이다. 태양광모듈의 용량은 200W로 정격효율은 13.36%이며, 인버터의 정격용량은 3kW로 최대효율은 94.5%이다.

Table 1 Specification of PV module

Item	Content	Unit
Solar Cell Type	Multi-crystalline	-
Voc	32.9	V
Vmp	25.7	V
Isc	8.3	A
Imp	7.8	A
PV Module Size	1,501 × 997 × 38	mm
Temperature Loss Coefficient (Power)	-0.45	%/ °C
PV Module Amount	15	Sheet
Nominal Efficiency of Module	13.36	%

실증주택에 사용된 인버터와 각종 센서는 RS-485와 RS-232C 통신과 연결된 원격단말장치(RTU : Remote Terminal Unit)을 통해 서버 컴퓨터의 데이터베이스에 전송되며, 웹서버를 통해 개인 컴퓨터 또는 스마트폰으로도 데이터를 확인할 수 있다. 데이터 수집을 위한 기본 측정시간은 1분 단위로 하였다. 본 연구를 위한 분석기간은 2014년 1월 1일부터 2014년 12월 31일까지 1년을 설정하였다.

Table 2 Specification of invertor

Item	Content	Unit
Running Method	Grid Connection	-
DC Input	Maximum Power	3 kW
	MPPT Voltage Range	150 ~ 600 Vdc
	Maximum Voltage	600 Vdc
	Maximum Current	15 A
	Rated Power	3 kW
	Rated Voltage	193 ~ 242 Vac
AC Input	Rated Current	14 A
	Frequency	60 Hz
	Power Factor	0.99 over
	Maximum Efficiency	94.5 %
	Euro Efficiency	92.5 %
Size	340 × 458 × 217	mm

4. 실증주택의 태양광발전시스템 분석

Fig. 5는 2014년 1월부터 12월까지 실증주택의 월별 일사량과 태양광발전량을 나타낸 것이다. 일사량에 따른 태양광발전량은 대체적으로 선형적 관계를 보이고 있다. 발전량이 가장 많은 달은 5월로 494 kWh가 되었으며, 가장 적은 12월의 265 kWh에 비해 1.87배 많은 수준을 보이고 있다. 실증주택의 연간 총 발전량은 4,184 kWh로 단위용량당(kWp) 1,395 kWh가 되었다.

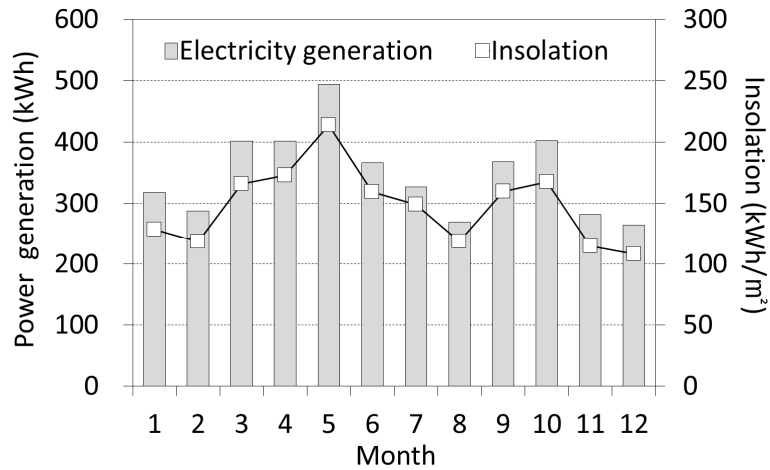


Fig. 5 Monthly mean daily electricity generation & insolation

5. 시뮬레이션을 통한 태양광발전시스템 성능분석

5.1 평가도구 및 기상데이터 선정

본 연구에서는 태양광발전시스템의 성능분석을 위해 PVsyst를 사용하였다. PVsyst는 스위스 제네바 대학교에서 개발된 태양광발전해석 소프트웨어로서 광범위한 기상자료와 PV 구성요소의 데이터베이스를 제공하고 있다. 다양한 시스템의 시간별 해석이 가능하며, 전 세계적으로 연구 및 실무용 프로그램으로 사용되고 있다⁸⁾. 본 연구에서는 2014년 대전 기상청 시간별 기상자료(온도, 노점온도, 일사량, 풍속, 습도 등)를 EPW 파일로 변환하여 분석에 활용하였다.

5.2 시뮬레이션의 타당성 분석

Fig. 6은 실증시스템의 연간 일별 일사량에 따른 실측 발전량을 시뮬레이션 결과와 비교한 것이다. 두 결과의 오차(Error)에 의해 발생된 표준편차를 의미하는 식(1)의 RMSE(Root Mean Square Error)는 0.98 kWh로 상당히 일치하는 결과를 보이고 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2} \quad (1)$$

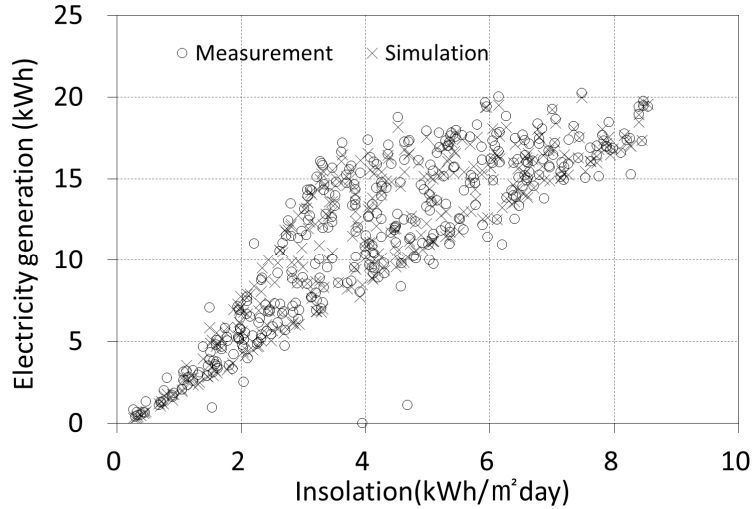


Fig. 6 Daily electricity generation

Table 3은 주택의 월별 실측 태양광발전량과 시뮬레이션 발전량을 비교한 것이다. 월별 상대오차는 -5.8 ~ 3.1%로 동절기에 상대적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 동절기 두 결과 오차 증가원인을 검토하기 위해 2일간의 시간별 태양광발전량을 비교한 것이다. 12월 2일은 일사량에 따른 정상적인 발전형태를 나타냈으나, 익일 실측 발전량이 시뮬레이션에 비해 크게 저하되고 있다. 이는 12월 2일 야간부터 다음날 새벽까지 기록된 5.3 cm의 적설이, 당일 오후까지 태양광모듈 상부에서 제거되지 않았기 때문으로 추정된다. 모니터링 기간 동안의 동절기 총 적설일수는 16일로 나타났다. 적설에 따른 발전손실을 제외할 때 12월, 1월, 2월의 발전오차는 각각 -2.1%, -2.1%, -3.6%로 감소된다.

Table 3 Monthly electricity generation

Month	Measurement (kWh)	Simulation (kWh)	Error (%)
1	318.4	330.7	-3.7
2	287.8	299.2	-3.8
3	401.8	401.3	0.1
4	401.6	402.2	-0.1
5	494.0	484.0	2.1
6	366.0	359.9	1.7
7	326.9	331.0	-1.2
8	269.5	265.8	1.4
9	368.0	360.3	2.1
10	402.8	390.5	3.1
11	281.7	279.5	0.8
12	265.2	281.5	-5.8
Total	4,183.7	4,185.9	-0.1

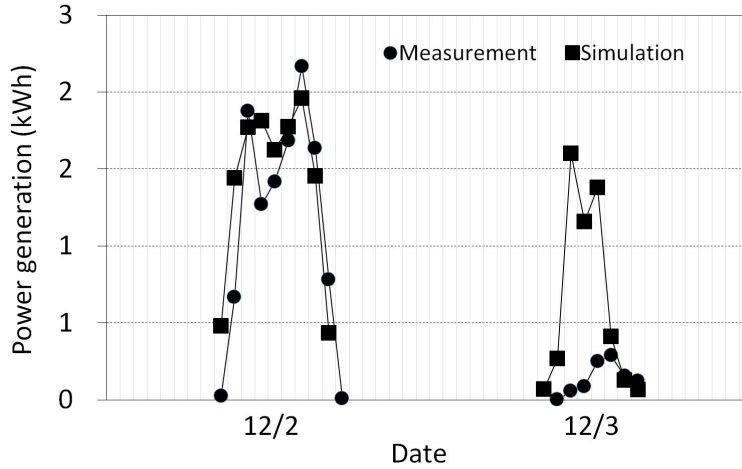


Fig. 7 Electricity generation after snow

5.3 태양광발전시스템 손실분석

성능비(Performance Ratio, 이하 PR)은 표준시험조건(Standard Test Condition, STC)에서 손실을 고려하지 않은 이상 발전성능에 대한 실제 발전성능비이며, 연간 태양광발전량은 식(2)에 의해 계산된다.

$$Y_F = I_t \times E_N \times A \times PR \tag{2}$$

태양광발전시스템의 손실요소는 입사각 수정계수 손실(IAM factor loss), 일사강도 손실(Irradiance level loss), 모듈 온도 손실(Temperature loss), 모듈 품질 손실(Module quality loss), 어레이 부정합 손실(Array mismatch loss), 저항 배선 손실(Ohmic wiring loss), 인버터 작동 손실(Inverter operation loss) 등으로 구분된다¹⁵⁾.

Fig. 8은 PVsyst를 이용하여 실증주택 태양광발전시스템의 연 평균 PR을 분석한 것이다. 온도손실이 8.8%로 가장 많았으며, 인버터 작동손실, 입사각 수정계수 손실, 일사강도 손실 등의 순으로 나타났으며, 연 평균 PR은 76.1%가 되었다.

Fig. 9는 연간 월별 손실성분의 작동범위를 나타낸 것이다. 온도손실을 제외한 손실성분들의 연간 변화는 미미한 것으로 분석되었다. 실증주택 태양광모듈의 온도계수가 $-0.45\%/^{\circ}\text{C}$ 인 상태에서 월별 온도손실은 최소 4.9%에서 최대 13%로 나타났다.

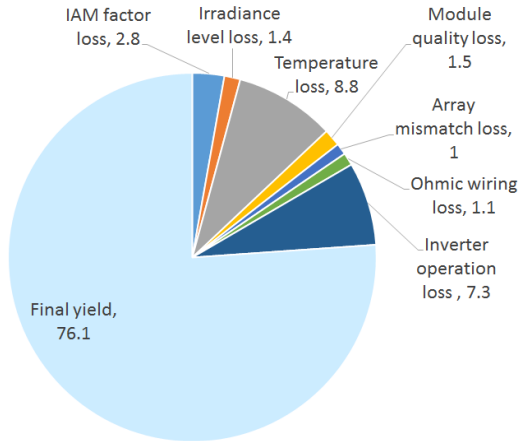


Fig. 8 Annual yield and losses

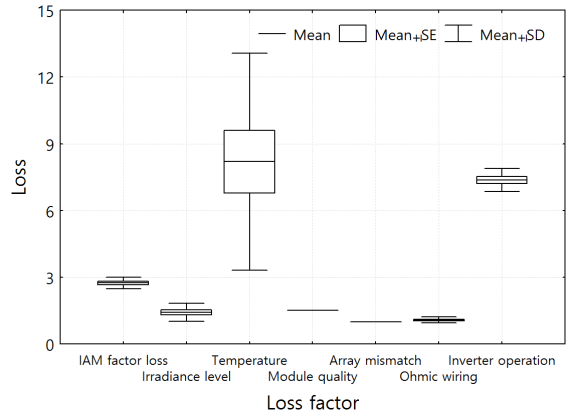


Fig. 9 Monthly losses

5.4 태양광발전시스템의 온도손실해석

PVsyst에서는 발전성능에 영향을 미치는 태양광모듈의 열적거동을 평가하기 위해, 에너지평형방정식(energy balance equation)을 식(3)과 같이 유도하고 있다.

$$U_L(T_c - T_a) = (\tau\alpha)G_t(1 - \eta_c) \tag{3}$$

여기서 태양광모듈의 일사 흡수율, $(\tau\alpha)$ 은 0.9가 일반적이며, 열손실계수, U_L 는 설치유형(후면 경계조건)에 따라 Table 4와 같이 제안하고 있다.

Table 4 Thermal loss factor by installation's type

Installation's type	Thermal loss factor, [W/m ² K]
Mounted modules with air circulation	29
Semi-integrated modules with air duct behind	20
Integrated modules with fully insulated back	15

식(3)의 태양광모듈 작동온도, T_c 에 따른 모듈 온도손실은 식(4)과 같이 결정된다.

$$Loss\% = (T_c - T_{ref})\mu_c \tag{4}$$

5.5 설치유형에 따른 태양발전시스템 성능분석

Table 5는 실증시스템과 동일한 설계조건에서, 3가지 설치유형에 따른 연간 성분별 PR 손실을 PV_{syst}로 해석한 결과이다. 온도손실을 제외한 나머지 손실요소들은 변화가 없는 것을 알 수 있다. 온도손실은 노출형(Case 1), 통기형(Case 2), 밀폐형(Case 3) 순으로 증가하였으며, 밀폐형의 경우 13%로서 노출형의 4.9%에 비해 2.5배 이상 높게 나타났다. 통기형의 연 평균 PR, 76.1%와 비교할 때 노출형과 밀폐형은 각각 3.9%와 -4.2%가 증감된 82%와 71.9%가 되었다.

Fig. 10은 연간 시간별 태양광모듈온도에 따른 온도손실을 해석한 것이다. 노출형의 작동 온도범위는 -6.5 ~ 61.0°C, 통기형은 -6.0 ~ 73.9°C, 밀폐형은 -5.5 ~ 88.9°C로 저온측은 거의 동일한 상태에서 고온 측으로 작동온도가 확산되는 것을 알 수 있다. 이에 따른 온도손실은 각각 -14.0 ~ 16.1%와 -13.8 ~ 21.9%, -13.6 ~ 28.5%로 증가하는 것으로 나타났다.

Table 5 Annual PR by the type of PV installation

Section	Case1	Case2	Case3
IAM factor loss	2.8	2.8	2.8
Irradiance level loss	1.4	1.4	1.4
Temperature loss	4.9	8.8	13.0
Module quality loss	1.5	1.5	1.5
Array mismatch loss	1.0	1.0	1.0
Ohmic wiring loss	1.1	1.1	1.1
Inverter operation loss	7.3	7.3	7.3
Final yield (%)	82	76.1	71.9
Annual yield (kWh/a)	4,365	4,186	3,990

Case 1 : Mounted modules with air circulation

Case 2 : Semi-integrated modules with air duct behind (BAPV)

Case 3 : Integrated modules with fully insulated back (BIPV)

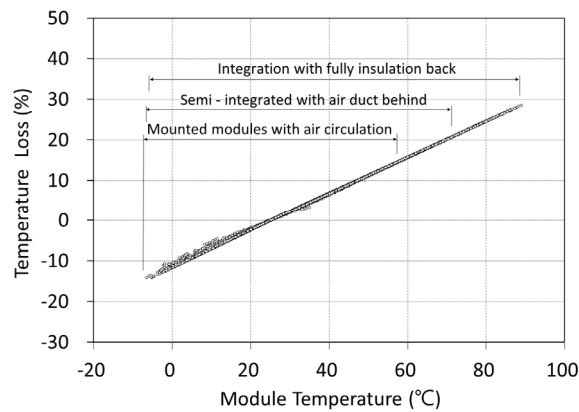


Fig. 10 Temperature losses by module temperature

6. 결론

본 연구에서는 국내기후 여건에서 주거용 태양광발전시스템의 3가지 설치유형에 따른 발전성능을 평가하였다. 이를 위해 BAPV 형태로 설치된 실증주택의 장기 실측자료를 기반으로 해석 프로그램, PVsyst의 타당성을 검증하고, 이를 통해 설치유형별 발전특성과 성능을 분석하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 대전에 위치한 실증시스템의 연간 일별 일사량에 따른 실측 발전량과 시뮬레이션 RMSE는 0.98kWh가 되었으며, 월별 발전량의 상대오차는 -5.8~3.1로 나타났다.
- (2) 실증시스템과 동일한 조건에서 노출형과 통기형, 밀폐형에 따른 태양광발전시스템의 연평균 PR은 각각 82%와 76.1%, 71.9로 점차 감소하였으며, 이와 같은 결과의 주요원인은 온도손실에 기인하는 것으로 파악되었다.
- (3) 연간 시간별 태양광모듈의 작동온도 범위는 설치유형에 따라 큰 차이를 나타냈다. 노출형, 통기형, 밀폐형의 순으로 작동온도범위가 증가하였으며, 이에 따른 온도손실은 각각 -14.0 ~ 16.1%와 -13.8 ~ 21.9%, -13.6 ~ 28.5%로 나타났다.

후기

이 논문은 2016학년도 대전대학교 교내학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

REFERENCES

1. Verbernel, G., Bonomo, P., Frontini, F., van den Donker, M. N., Chatzipanagi, A., Sinapis, K., and Folkerts, W., BIPV PRODUCTS FOR FACADES AND ROOFS: A MARKET ANALYSIS, 29th EU-PVSEC in Amsterdam, The Netherlands, session 6DO.7, Thursday 25th, 2014.
2. Yoon, J., The State of the Art in BIPV Technology, Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, Vol. 27, No. 11, pp. 1-7, 2014.
3. <http://www.knrec.or.kr/knrec/index.asp>
4. Yoon, J. H. and Kim, J. U., Experimental Study on the Thermal Effect of BIPV Modules Depending on the Ventilation Type of PV Module Backside, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 26, No. 1, pp. 81-89, 2006.
5. Kim, K. S., Kang, G. H., Yu, G. J., and Yoon, S. G., Roof-attached Crystalline Silicon Photovoltaic Module's Thermal Characteristics, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 32, No. 3, pp. 11-18, 2012.
6. Oh, B. C., A Study on the Economic Feasibility of Building-Integrated Photovoltaics System Installed on the Roof of Residential Building -Focused on Comparison with Construction Cost of BAPV System Depend on Roof Finishing Materials-, Journal of Korea Institute of Ecological Architecture and Environment, in press.
7. <http://www.solarcentury.com>
8. PVsyst, User's Guide, PVsyst Contextual Help, PVsyst SA 1994-2012.