

국제에너지기구 태양광발전 협력사업의 공동실험 방법에 의한 건물일체형 태양광발전(BIPV) 모듈의 성능 평가 분석

김진희¹⁾ · 안종권²⁾ · 김준태³⁾*

¹⁾그린에너지기술연구소, 국립공주대학교, 천안, 31080

²⁾에너지시스템공학과, 국립공주대학교, 천안, 31080

³⁾건축공학전공/에너지시스템공학과, 국립공주대학교, 천안, 31080

Performance Analysis of a BIPV Module Based on Round Robin Test of IEA PVPS Task 15

Jin Hee Kim¹⁾ · Jong Gwon Ahn²⁾ · Jun Tae Kim³⁾*

¹⁾Green Energy Research Centre, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea

²⁾Department of Energy Systems Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea

³⁾Department of Architectural Engineering/Energy Systems Engineering, Kongju National University, Cheonan 31080, Korea

Received May 13, 2020; Revised June 11, 2020; Accepted June 16, 2020

ABSTRACT: Within the IEA (International Energy Agency) PVPS (Photovoltaic Power System) Programme Task 15, 'Enabling Framework for the Acceleration of BIPV,' a round-robin action focusing on the performance of vertical BIPV elements as a facade in different climatic environments was performed. The performance of identical (both, in construction and bill of materials (BOM)) glass-to-glass c-Si BIPV elements was monitored at seven outdoor test sites in 6 different countries in Europe and Asia. In this work, the comprehensive results of the electrical and corresponding meteorological data will be presented and discussed. The monitored data were merged, processed, and filtered for further analysis. The analysis includes the characteristics of the module temperatures and the in-plane irradiation at the outdoor test locations, mean daily PR per test module, time series of mean daily performance ratio coefficients, and monthly yield.

Key words: IEA PVPS, BIPV, Round Robin Test, Electrical Efficiency, Different Climates

Nomenclature

G : irradiation

I_{mp} : current at maximum power

P_{max} : maximum output power

POA : Plane Of Array

V_{mp} : voltage at maximum power

Subscript

BIPV: Building Integrated Photovoltaic

IEA : International Energy Agency

PVPS : Photovoltaic Power Systems

PR : Performance Ratio

RRT : Round Robin Test

1. 서론

지난 1993년부터 시작된 국제에너지기구(IEA; International Energy Agency)의 태양광발전시스템(PVPS; Photovoltaic Power Systems)은 회원국 간의 연구 협력 프로그램으로서 태양광발전과 관련된 다양한 프로젝트를 수행해 오고 있다. 특히 IEA PVPS Task 15 (Enabling Framework for the Acceleration of BIPV)는 국제적인 협력을 통해 전 세계의 시장에서 건물일체형태양광발전(BIPV; Building Integrated Photovoltaic) 제품의 보급을 가속화할 수 있는 프레임워크 구성을 목표로 하고 있다¹⁾.

BIPV 시스템의 발전성능은 기존 PV 시스템과 달리 BIPV 모

*Corresponding author: jtkim@kongju.ac.kr

들의 후면 레이어구성과 단열조건, 이에 따른 BIPV 모듈의 온도 특성, 설치 각도, 운용환경조건 등에 따라 다르게 나타난다²⁾. 특히, 동일한 사양을 갖는 모듈이라도 실제 설치환경조건에서의 발전특성은 다르게 나타날 수 있다^{3,4)}. 이에 따라 다양한 기후환경에서 BIPV 시스템의 성능구명이 필요하며 국제적으로 통용될 수 있는 BIPV 시스템의 시험 및 실증 관련 표준이 요구된다⁵⁾.

이러한 배경으로 IEA PVPS Task 15는 Sub task E. Demonstration을 통해 한국을 포함한 총 7개국의 BIPV 라운드로빈 테스트(RRT; Round Robin Test) 수행을 위한 협의체를 구성하고 서로 다른 기후환경 조건에서 동일한 BIPV 제품의 발전성능 비교분석을 진행하고 있다⁶⁾.

본 연구는 IEA PVPS Task 15 BIPV RRT 수행을 통해 국내환경에서의 BIPV 모듈의 발전특성을 검토하고 다른 기후환경에서 측정된 BIPV 모듈 성능과 비교·분석하였다.

2. BIPV 라운드 로빈 테스트(RRT)

2.1 BIPV RRT sites

BIPV RRT 수행을 위한 참여국은 오스트리아, 프랑스, 네덜란드, 스위스, 이탈리아, 스페인, 한국, 총 7개국으로, UAS, CSTB, SEAC, KNU 등, 11개 기관이 참여했다(Table 1)⁷⁾. 각 참여기관은 동일한 사양으로 생산된 PV모듈을 이용하여, 제시된 BIPV 제작 가이드라인에 따라 시험체를 제작하였다. 또한, BIPV 시험체 제작과정과 설치 위치, 외부환경조건, 담당자 정보 등을 최초보고서(Initial short report)에 작성하여 공유했으며⁸⁾ BIPV RRT 수행에 따른 측정 데이터는 웹 클라우드를 통해 업로드 및 피드백이 이루어졌다.

Table 1. BIPV RRT Participants

Participant	Country	Action
UAS Technikum Vienna	Austria	- Coordination - Evaluation of results
UAS Upper Austria	Austria	- Evaluation of results - Monitoring reference building
AIT	Austria	- Pre-/Re-Characterization - Accelerated Aging tests - Evaluation of results
OFI	Austria	- Accelerated Aging tests - Evaluation of results
CSTB	France	- Sub-task lead
SEAC	Netherlands	- Monitoring test module - Evaluation of results
SUPSI	Switzerland	- Monitoring test module
EURAC	Italy	- Monitoring test module
CIEMAT	Spain	- Monitoring test module
Tecnalia	Spain	- Monitoring test module
Kongju National University	South Korea	- Monitoring test module

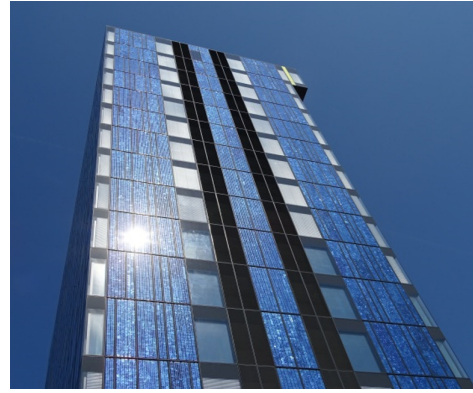


Fig. 1. BIPV building (Power Tower) in Linz, Austria

RRT 수행을 위한 BIPV 모듈사양은 오스트리아 Linz에 위치한 기존 BIPV 건물을 참고하여 설계되었다(Fig. 1). 설계된 BIPV 모듈은 기존 건물에 적용된 모듈과 사이즈만 다르며, 기타 구성(통풍 간격 등)은 동일하다. 기존 건물에 적용된 BIPV 시스템은 10년 이상 작동되고 있으며 다이오드 결함, 변색, 박리 등 작은 문제점은 있으나 모듈 고장, 불규칙성은 없이 운용되고 있다.

이에 따라, BIPV RRT 수행에 따른 다양한 기후환경에서의 데이터 확보뿐만 아니라, 실제 사용조건에서의 온도특성과 발전성능 비교, 가속노화에 따른 성능평가(자연 노화와 비교) 등, 다양한 분석이 지속적으로 진행될 예정이다.

2.2 BIPV experimental set-up

BIPV 시험체 제작을 위해, 오스트리아(AIT; Austrian Institute of Technology)에서 사전 체크된 동일한 사양의 PV모듈이 각 참여기관에 전달되었다. PV 모듈은 다결정질 모듈(G/G)로서 정격출력은 227 Wp, 사이즈는 1.76 m²이며, 자세한 사양은 아래 표와 같다(Table 2).

RRT 수행을 위해 제작된 BIPV 시험체의 사이즈는 1,140 mm × 2,000 mm이며, 합판 등의 목재를 이용해 240 mm의 두께로 제작되었다. 건물 외벽체를 가정하기 위해 PV 모듈 후면에 열전도율 0.04 W/m K, 두께 120 mm의 미네랄울 단열재가 적용되었으며 PV 모듈과 단열재 사이에는 공기층 80 mm가 구성되었다. 또한, 전면 PV 모듈 상·하단부에는 20 mm 공간을 두어 자연

Table 2. PV module specification for BIPV RRT

Subject	Specifications
Cell type	Polycrystalline
Module size	1,100 × 1,600 mm ²
Nominal power	227 W
Short circuit current	8.34 A
Nominal current	7.89 A
Open Circuit voltage	34.07 V
Nominal voltage	28.84 V

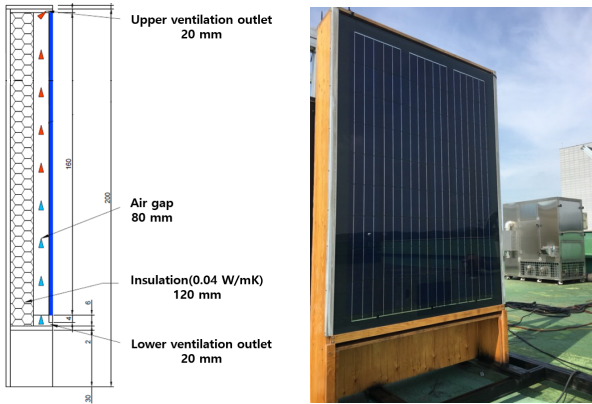


Fig. 2. BIPV model details and installation

환기를 유도하도록 제작되었다. 제작된 BIPV 시험체는 충남 천안의 공주대학교 천안캠퍼스 6공학관 옥상에 수직(90°), 남향으로 설치되었다(Fig. 2).

2.3 BIPV RRT Set-up

RRT는 실험방법론 측면에서 ‘여러 번 독립적으로 수행되는 실험실 간 테스트(측정, 분석 또는 실험)’로 정의되며 동일한 사양을 갖는 시험장비 및 시험방법으로 수행되어야 한다. 이에 따라 각 참여기관은 BIPV RRT 수행을 위한 측정설비의 정밀도, 정확도 등 기준을 제시하고 사양을 만족하는 측정설비를 구성하였다. 또한, BIPV 시험체의 성능분석을 위한 기본 공통측정항목을 결정하였다(Table 3).

BIPV RRT 수행을 위한 기본 측정항목은 외부환경조건(외기 온-습도, 풍향-풍속), 일사량(POA; Plane Of Array), BIPV 시

Table 3. Measuring elements of BIPV model

Mandatory	
Dry-bulb temperature (ambient)	Relative humidity (ambient)
BIPV temperatures (2 EA, back side)	Wind direction and speed
V_{mp}	POA
I_{mp}	P_{max}
Optional	
Sol-metric (Camera)	Cloudiness, Rainfall etc.

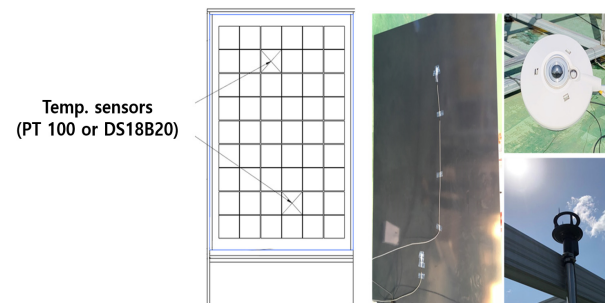


Fig. 3. Temperature sensors and devices

험체의 발전특성(V_{mp} , I_{mp} , P_{max}), BIPV 모듈 후면온도(2개소)이며, 온도 센서 위치는 BIPV 모듈 후면의 좌측 상단부, 우측 하단부에 부착되었다(Fig. 3). 일사량계는 BIPV 시험체와 동일한 각도(수직)로 설치되었으며, 측정 간격(Interval)은 10초(sec)로 설정되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Climate features of the locations

BIPV RRT 수행을 위한 각 참여기관의 BIPV 시험체 설치지역 및 기후특성은 아래 Table 4와 같다. 통상적으로 지역의 기후를 구분할 때 쾨펜의 기후구분법을 사용하며⁹⁾, 열대와 건조, 온대, 냉대, 한대 등 크게 5종류로 나타낸다. 또한, 기후간의 공통특성을 나타내는 아한대, 아열대 등으로 구분되기도 한다.

네덜란드, 스페인(Tecalia)의 경우, 해양성기후(Oceanic climate)로서 기온의 연변화가 적고 비가 잦으며 연중 습도가 높은 특성을 가진다. 또한, 대륙이나 해안에 비해 풍속이 강하게 나타난다. 스위스와 이탈리아는 아열대 습윤기후(Humid subtropical climate)로서 여름철에 덥고 습하며 겨울은 온화하거나 서늘한 특징을 보인다. 스페인(CIEMAT)의 경우, 지중해성 기후특성을 가지고 있어 여름에는 고온건조하고 겨울에는 온난하며 주로 비가 내린다. 한국은 사계절이 뚜렷한 온대 기후로, 기온의 연변화가 크고 날씨변화가 크게 나타난다.

3.2 BIPV performance in Korean climate

Fig. 4는 2018년 5월부터 2019년 3월까지, 공주대학교에서 측정된 BIPV 모듈의 월별 최고온도를 나타낸 그래프이다.

Table 4. Climate features of participants

Participant	Location	Latitude, Longitude	Weather characteristics (Avg high, low temp.)
SEAC (Netherlands)	Eindhoven	51.44 N, 5.50 E	- Oceanic climate - Summer (23.4°C) - winter (-0.1°C)
Tecalia (Spain)	Bizkaia	43.21 N, -2.93 W	- Oceanic climate - Summer (26°C) - Winter (5.1°C)
SUPSI (Switzerland)	Lugano	8.98 N, 45.87 E	- Humid subtropical climate - Summer (26.9°C) - Winter (0.8°C)
EURAC (Italy)	Bolzano	46.50 N, 11.36 E	- Humid subtropical climate - Summer (39.1°C) - Winter (-4.5°C)
CIEMAT (Spain)	Madrid	40.42 N, -3.70 W	- Inland Mediterranean climate - Summer (32.1°C) - Winter (2.7°C)
KNU (South Korea)	Cheonan	36.81 N, 127.11 E	- Temperature climate - Summer (30.1°C) - Winter (-7.9°C)

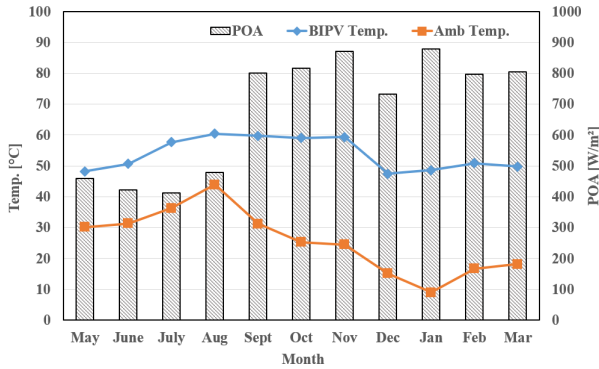


Fig. 4. BIPV temperature characteristics

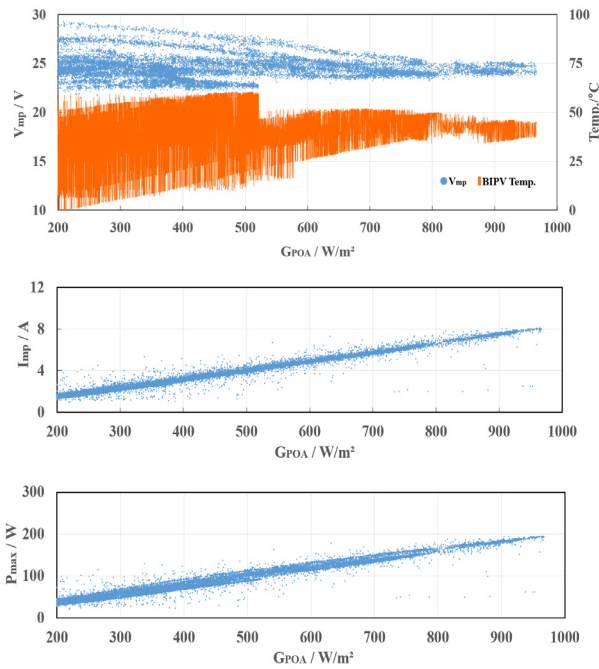


Fig. 5. Electrical characteristics of BIPV model

BIPV 모듈 온도는 8월에 60.4°C로 가장 높게 나타났으며, 8월 대비 외기온도는 낮으나 일사량이 높은 9월(59.7°C), 10월(59.0°C), 11월(59.4°C)에도 온도가 상대적으로 높게 나타났다. 겨울철(12월~2월)의 낮은 외기온도에도 BIPV 모듈 온도는 47°C 이상 높게 나타났으며 5~8월의 POA는 장마 기간(6~8월) 및 여름철 태양고도에 따라 상대적으로 낮게 나타났다.

공주대학교에서 측정된 BIPV 모듈의 전기적 특성은 Fig. 5와 같이 나타났다. BIPV 모듈의 전압(V_{mp})은 20 ~ 30 V 범위로 나타났으며, 상대적으로 일사량이 낮은 조건에서 BIPV 모듈의 전압은 넓게 산포되어 나타났다. 이는 구름 등에 의한 일사량 변화에 따른 BIPV 모듈의 온도변화에 의한 것으로 분석된다. 전류는 2 ~ 8 A 범위로 나타났으며 전력은 20 ~ 200 W 범위로 나타났다.

3.3 BIPV performance in different climates

Fig. 6은 BIPV RRT 참여국의 BIPV 모듈 온도를 빈도수

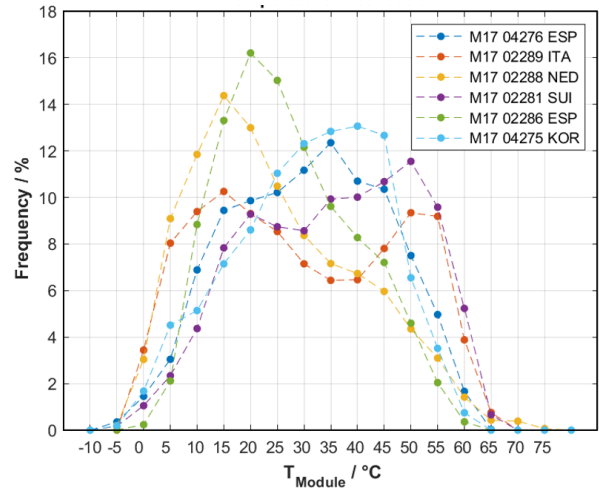


Fig. 6. BIPV temperature distribution in different climate

(Frequency)로 나타낸 그래프이다. 5개 참여국의 6개 지역에서 빈도는 5% 이하로 낮지만 BIPV 모듈온도는 최고 60~70°C로 나타났다. 네덜란드(NED), 이태리(ITA) 그리고 스페인(ESP)의 한 지역 M1702286 (비스카야)의 경우, 10~25°C의 BIPV 모듈온도가 가장 높은 빈도를 나타냈으며 나머지 국가들의 BIPV 모듈온도는 30~50°C에서 높은 빈도를 나타냈다. 스페인의 경우, 두 지역에서 측정된 BIPV 모듈의 온도 빈도수가 상이하게 나타났으며, 모듈온도는 M17 02286 (비스카야)은 25°C, M17 04276 (마드리드)은 35°C의 모듈온도가 가장 높은 빈도를 나타냈다. 한국의 경우, 40°C의 BIPV 모듈온도가 가장 높은 빈도를 나타냈다.

그래프에서 보면, 해양성기후인 네덜란드와 스페인(비스카야)은 빈도수의 약간의 차이는 있으나 BIPV 모듈온도는 유사한 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 또한, 아열대 습윤기후인 스위스와 이탈리아 역시 유사한 BIPV 모듈 온도분포를 나타내는 것을 알 수 있다.

스페인 마드리드 지역과 한국의 가장 높은 빈도의 BIPV 모듈 온도는 30~40°C, 35~45°C로 각각 나타나 10°C의 차이로 나타났으나 두 국가의 BIPV 모듈 온도분포는 유사한 것을 확인할 수 있다. 이는 스페인 마드리드 지역의 경우, 계절별 온도변화가 큰 우리나라 기후와 다른 지중해성 기후특성을 갖고 있으나 여름철 고온의 유사한 기후특성 때문으로 판단된다.

이러한 분석을 통해 BIPV 모듈온도는 각 지역의 기후특성에 따라 유사한 패턴으로 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 7은 6개 지역에서 측정된 BIPV 모듈의 성능비(PR; Performance Ratio)를 일일(Daily) 데이터 값으로 나타낸 것이다. PR은 실제 측정값과 이론적 최댓값을 비율로 나타낸 것이며 아래 식 (1)으로 산정되었다.

$$PR = \frac{\text{Measured Energy}}{\text{Irradiance} \times \text{Active area of PV} \times \text{PV Efficiency}} \quad (1)$$

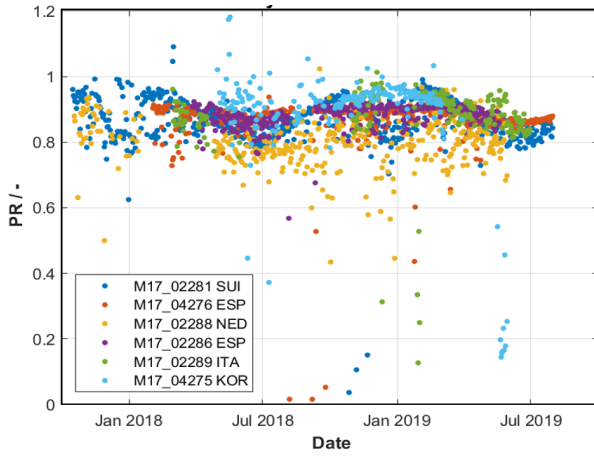


Fig. 7. BIPV electrical characteristics

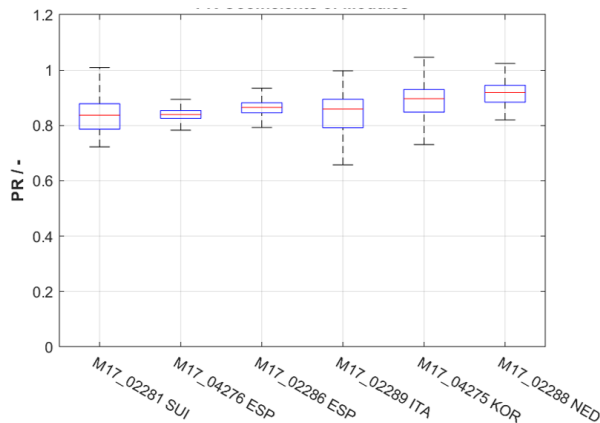


Fig. 8. PR coefficient of BIPV models

각 지역에서 BIPV 모듈간 PR은 큰 차이는 있지만 계절별 눈에 띄는 변화 없이 0.7~1 범위로 분석되었다. 네덜란드의 PR 수준은 0.7~0.8 범위로 상대적으로 다른 참여국가에 비해 낮은 것으로 나타났으며 대부분의 참여국가의 PR 수준은 0.8~1 범위로 분석되었다.

그래프에서 보면, 참여국가 및 지역에서 0.6 이하 또는 1 이상의 PR 값도 나타난 것을 확인할 수 있다. 이는 구름에 의한 음영, 비 등 기상변화 및 온도에 의한 영향으로 판단되며 향후 명확한 원인분석이 필요할 것으로 판단된다. Gaisberger의 발표⁶⁾에 따르면 네덜란드(M17 02288)에서, 매일 일정 시간 동안 BIPV 모듈이 부분적으로 음영이 발생하였으며 이로 인해 PR이 낮아졌다고 밝혔다.

Fig. 8은 모니터링된 Fig. 7의 PR 값에서 음영의 영향이 없는 데이터포인트만 PR의 계산에 사용하는 방식으로, 정상데이터로서 전체 PR 값 중 50%에 해당되는 값을 나타낸 그래프이다. 전체 PR의 50%에 해당하는 값을 박스로 표기하였으며 중간값은 빨간색 선으로 표시하였다. 그래프에서 상단과 하단 경계 바(각각 75번째와 25번째 백분위 수)는 파란색 상자 크기의 1.5 배 거리 내에 있는 값을 나타낸 것이며 이 경계 위 또는 아래의 모든 값

은 이상 값으로 간주된다⁶⁾.

그래프에서 보면, 모든 참여국 전체 데이터의 50%에 해당되는 PR 값은 0.8 이상으로 분석되었다. 스페인, 네덜란드의 경우 전체 PR은 값이 0.8 이상으로 다른 참여국가에 비해 PR이 높은 것을 알 수 있으며 다음으로 한국, 스위스와 이태리 순으로 나타났다. 이태리와 스위스는 유사한 수준의 PR 값으로 나타났으나 이태리는 0.6에 가까운 가장 낮은 PR 값을 갖는 것으로 분석되었다.

앞서 음영에 의한 영향으로 낮은 PR 값을 포함한 분석에서는 네덜란드의 PR 수준이 가장 낮은 것으로 나타났으나 음영의 영향을 제외한 전체의 50% 데이터 분석에서는 네덜란드가 가장 높고 이태리의 PR 이 가장 낮은 것으로 분석되었다. 이는 연평균 기온이 가장 높은 이태리와 가장 낮은 네덜란드의 기후조건에 따른 BIPV 모듈온도의 영향으로 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 IEA PVPS Task 15 RRT 수행에 따라, 국내 기후환경조건에서의 BIPV 시험체의 발전특성을 분석하고 다른 기후환경조건에서의 BIPV 시스템의 성능을 비교하였다.

분석결과로부터 참여기관별로 동일하게 제작 및 설치된 BIPV 시험체는 일사량 및 BIPV 온도 영향으로 여름철보다 겨울철에 BIPV의 발전량 및 PR이 높은 것으로 확인되었다.

참여국가 및 지역의 기후특성에 따라 BIPV 모듈의 온도 수준은 다르게 나타났으며, 해양성, 지중해성, 아열대 기후별로 BIPV 모듈온도 특성은 유사한 것을 확인할 수 있었다.

PR은 음영의 영향이 없는 조건에서 모두 0.8 이상으로 확인되었으며 PR 값은 네덜란드가 가장 높고 이태리가 가장 낮은 수준으로 확인되었다. 이는 BIPV 시스템의 실제 동작 환경 및 외기조건에 의한 영향으로 기인한다.

BIPV 시스템의 성능에 영향을 미치는 요소는 일사량, 외기온도, 모듈온도, 풍향풍속 외에도 먼지에 의한 효율저하, 인버터 효율 등 다양하다. 그러나 BIPV 시스템이 작동되는 일사량 및 외기온도 등 기후환경 조건에 의해 동일한 설치조건에서도 서로 다른 성능수준을 나타내는 것이 확인 되었다. 따라서 다양한 환경조건에서 BIPV 시스템의 성능평가 및 RRT가 수행되어야 하며 지속적인 데이터 확보를 통해 기후특성에 따른 분석이 수행되어야 할 것이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No.20188 550000480, No. 20173010013420).

References

1. International Energy Agency, IEA PVPS Task 15: Compilation and Analysis of User Needs for BIPV and its Functions, Technical Report, IEA, 2019.
2. Lau, S. K., Zhao, Y., Shabunko, V., Chao, Y., Lau, S. S. Y., Tablada, A., Reindl, T., "Optimization and evaluation of naturally ventilated BIPV facade design," 12th International Photovoltaic Power Generation and Smart Energy Conference & Exhibition, Energy procedia, Vol. 150, pp. 87-93, 2018.
3. Salameh, T., Assad, M. E. H., Tawalbeh, M., Ghenai, C., Merabet, A., Oztop, H. F., "Analysis of cooling load on commercial building in UAE climate using building integrated photovoltaic facade system," Solar Energy, Vol. 199, pp. 617-629, 2020.
4. Akata, A. M. E. A., Njomo, D., Agrawal, B., "Assessment of building integrated photovoltaic (BIPV) for sustainable energy performance in tropical regions of Cameroon," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 80, pp. 1138-1152, 2017.
5. D'Orazio, M., Di Perna, C., Di Giuseppe, E., "Experimental operating cell temperature assessment of BIPV with different installation configurations on roofs under Mediterranean climate," Renewable Energy, Vol. 68, pp. 378-396, 2014.
6. Gaisberger, L., Rechberger, P., Eder, G. C., Berger, K. A., Gusztáv, Ú., Illich, P., Moor, D., Boddaert, S., Valckenborg, R., Bonomo, P., López, C. S. P., Buono, M. D., Chivelet, N. M., Mejuto, E., Martinez, A. S., Machado, M., Kim, J. T., Ritzen, M., "BIPV Round Robin Action of IEA PVPS Task 15," Europe Photovoltaic Science and Engineering Conference (EU-PVSEC), pp. 1-7, 2019.
7. Eder, G. C., Maul, L., Illich, P., Folkerts, W., "BIPV research teams & BIPV R&D facilities an international mapping," IEA PVPS report, (2017).
8. Ahn, J. G., Kim, J. H., Kim, J. T., Initial Phase Short Report, Kongju National University, 2017.
9. Grieser, J., Beck, C., Rubel, F., "World map of the Köppen-Geiger climate classification updated," Meteorologische Zeitschrift, Vol. 15, pp. 259-263, 2006.