

현장 실험을 통한 Sputter Coating 컬러 BIPV 모듈의 발전성능 평가

이효문* · 윤종호*** · 김현일*** · 이건환****

*한밭대학교 일반대학교 건축공학과, 박사과정

**한밭대학교 건축공학과, 교수

***현대에너지솔루션 태양광연구소, 선임연구원

****한국기계연구원부설 재료연구소 표면기술연구본부, 책임연구원

Performance Assessment of Sputter-Coating- Colored BIPV Modules Through Field Test

Lee Hyo-Mun* · Yoon Jong-Ho*** · Kim Hyun-Il*** · Lee Gun-Hwan****

*Ph.D Student, Department of Architecture Engineering, Graduate school, Hanbat National University

**Professor, Department of Architecture Engineering, Hanbat National University

***Senior Researcher, Photovoltaic R & D Center, Hyundai Energy Solutions Co., Ltd.

****Principal Researcher, Surface Technology Division, Korea Institute of Materials Science

†Corresponding author: jhyoon@hanbat.ac.kr

Abstract

To assess the performance and characteristics of colored building-integrated photovoltaic (BIPV) modules, a comparative assessment of empirical performance was conducted on colored BIPV modules (gray, blue, and orange) and general BIPV module. These modules were installed on the south-facing slope (30°) for comparative assessment through a field test. Monitoring data were collected every 10 min from December 20, 2019 to January 21, 2020 and used to performance and characteristics analysis. Performance ratio and module efficiency were utilized during performance indexing for comparative assessment. For general BIPV modules, the operational efficiency was analyzed at 16.63%, whereas for colored BIPV modules, 13.70% (gray), 15.12% (blue), and 14.49% (orange) were analyzed. It was discovered that the efficiency reduction caused by transmission losses owing to the application of colored cover glasses were 17.74% (gray), 9.05% (blue), and 9.86% (orange), under field testing conditions. These values turned on an additional 7% reduction in efficiency for gray BIPV modules, compared to the degradation resulting from transmission drop (gray: 10.87%, blue: 8.99%, and orange: 9.02%) calculated using the efficiency of each module in standard test conditions (STC). Performance ratio analysis resulted in the following values: 0.92 for general BIPV modules, and 0.85 (gray), 0.91 (blue), and 0.91 (orange) for colored BIPV modules. As demonstrated by the above results, modules with a colored cover glass may differ in their operational performance depending on their color, unlike general modules. Therefore, in addition to the performance evaluation under STC, additional factors of degradation require consideration through field test.

Keywords: 컬러BIPV모듈(Colored building-integrated photovoltaic (BIPV) module), 옥외성능평가(Field test), 성능계수(Performance ratio), 모듈 효율(Module efficiency)



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.40, No.5, pp.1-12, October 2020
<https://doi.org/10.7836/kses.2020.40.5.001>

pISSN: 1598-6411

eISSN: 2508-3562

Received: 30 July 2020

Revised: 30 August 2020

Accepted: 31 August 2020

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.

기호설명

- PR : Performance Ratio [-]
 PR_{DC} : Performance Ratio for Array Yield(DC) [-]
 Y_r : Reference Yield [hour/day]
 Y_A : Array Yield [hour/day]
 Y_f : Final Yield [hour/day]
 η_A : Array Efficiency [%]
 H_i : Cumulative Irradiation for day [kWh/m²·day]
 G_{i.ref} : Irradiation of Standard Test Condition [kWh/m²]
 E_A : PV Array output energy for day (DC) [kWh/day]
 E_{out} : Energy output from PV system for day (AC) [kWh/day]
 P_O : Array power rating [kWp]
 A_a : Total Array Area [m²]

1. 서론

정부는 2014년 녹색건축물 기본 계획을 수립하면서 제로에너지빌딩 활성화 방안을 발표하였다¹⁾. 이후 노원 임대주택 등 시범사업을 지정 및 운영해왔으며, 2020년을 기점으로 1,000 m² 이상 규모의 공공건축물에 제로에너지건축물 인증을 의무화하는 등 제도를 본격 시행하였다. 제로에너지건축물 인증을 위해서는 3가지 조건을 모두 만족해야만 한다. 첫 번째는 건축물에너지효율등급 1++ 이상, 두 번째는 에너지자립률 20% 이상, 세 번째는 건물에너지관리시스템 또는 원격검침전자식 계량기 설치이다²⁾. 에너지자립률은 1차에너지소비량(kWh/m²·yr) 대비 1차에너지생산량(kWh/m²·yr)의 비율이며, 이를 20% 이상 달성해야 제로에너지건축물로 인증을 받을 수 있기 때문에 신·재생에너지를 활용한 에너지생산은 필수적이다.

신·재생에너지 종류 중 태양광발전시스템의 한 유형인 건물일체형 태양광발전 시스템은 태양광발전 모듈이 전기 생산 역할 외에 외장재의 역할을 동시에 수행하는 신·재생에너지의 유형으로 제로에너지건축물 인증을 위한 신·재생에너지로 활용도가 높다. 이 외에도 에너지 생산과 소비가 결합되는 Prosumer 개념과 Smart-grid의 기초인 분산 발전의 개념을 가지고 있기 때문에 차세대 전력 생산 방식으로 주목 받고 있다³⁾. 하지만 미래 BIPV 시장의 잠재성과 규모의 희망적 예측은 이미 수십년 전부터 많은 기업과 기관으로부터 집중 조명을 받아 왔으며, 이에 대한 꾸준한 연구 개발과 상용화 제품화의 노력이 이어져 왔다. 이를 기반으로 매우 빠른 시간 내에 대규모의 BIPV 시장이 열릴 것으로 지속적으로 기대해 왔으나, 실상은 현재까지도 건축설계의 디자인적 문제, 도시미관 문제, 발전성과 관련된 효율성의 문제, 경제성의 문제 등과 같은 몇 가지 핵심 장애요인에 의해 아직

까지도 본격적인 시장이 열리고 있지 못한 실정이다⁴⁾.

최근 들어 BIPV 시장 활성화 장애 요인 중 디자인 및 도시미관 등 심미성에 대한 문제를 개선하기 위한 연구가 국내·외로 활발히 이루어지고 있다. 최근에는 태양광 모듈의 심미성 개선을 위해 전면커버유리에 색상을 구현하는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 일반모듈에 사용되는 저철분강화유리의 경우 매우 높은 투과율을 가지고 있지만 컬러모듈은 300 nm ~ 2,500 nm의 Solar Spectrum 중 특정 영역(가시광선영역 380 nm ~ 780 nm)의 반사율을 높여 색상을 구현하기 때문에 투과율 감소에 따른 효율저하가 불가피하다. 이러한 요인으로 인해 표준시험조건 및 외기조건에서의 컬러모듈에 대한 발전 성능 및 특성 평가 연구도 활발히 수행되고 있다.

Tzikas et al.⁵⁾은 3가지 변수(모듈 유형 : c-Si, CIGS / 모듈 텍스처 유무 / 색상 : 검정, 빨강, 회색)를 조합하여 구성된 총 9종류의 모듈을 활용하여 실제 외기 조건에서 발전성능 및 발전특성 평가를 수행하였으며, 그 결과를 바탕으로 암스테르담 지역에서 설치조건(방위 및 경사)에 따른 연간발전성능 해석연구를 수행하였다. Saretta et al.⁶⁾은 4개의 태양전지로 제작된 소형 컬러모듈에 대해 전면커버유리의 색상 종류(No color, Blue, Green, Light Gray, Dark Gray, Terracotta), 색상 구현 위치(전면커버글라스의 외측, 내측) 및 유리 종류(Satin, Float)에 따라 표준 시험 조건의 성능 측정과 함께 실제 외기 조건에서의 성능 실험을 통해 비교 평가하였다. 이 외에도 다양한 색상의 컬러모듈(일반모듈 포함)을 활용하여 직렬연결을 통해 어레이를 구성했을 때 미스매치에 의한 성능저하 정도를 표준시험조건과 실제 외기 조건에서 평가하였다. Frontini et al.⁷⁾은 Dot Print 기법을 활용하여 제작된 컬러모듈(색상 : Black, White, Green / Printing Degree : 0 ~ 100%)을 대상으로 태양복사스펙트럼 반응도 및 온도계수, 일사강도에 따른 출력특성 등을 표준시험조건에서 측정하였으며, 실제 외기 조건에서도 평가하였다.

컬러모듈의 색상 구현에 따른 발전성능 및 특성평가와 관련된 연구가 일부 수행되었지만, 이는 모두 국외에서 수행된 실험으로 국내의 외기조건에서 컬러모듈에 대한 발전 성능 평가는 매우 부족한 실정이다. 국내의 경우 개발 및 생산된 모듈에 대해 주로 표준시험조건에서 측정한 발전 성능만을 기준으로 성능평가가 이루어지고 있다. 표준시험조건은 일사강도, 온도 및 Air Mass 등의 환경조건이 고정되어 성능 측정이 이루어진다. 하지만 실제 외기는 일사의 강도, 온도, 일사의 입사각, Air Mass 등 모든 요소들이 시시각각 변화한다. 그리고 이러한 요소들이 변화함에 따라 광학적 특성을 이용하여 색상을 구현한 컬러BIPV모듈의 경우 표준시험조건과 실제 운영 성능간의 성능차이가 클 가능성이 존재한다.

따라서, 본 연구에서는 국내에서 개발 및 제작된 컬러 BIPV 모듈(3종 : Gray, Blue, Orange)과 일반 BIPV 모듈을 대상으로 실제 외기조건에서 발전 운영 성능 비교 평가를 수행하였다.

2. 실험 개요

일반 BIPV 모듈과 컬러 전면 커버 글라스가 적용된 BIPV 모듈(이하 컬러 BIPV 모듈)의 발전 성능 비교 평가를 위해 일반 BIPV 모듈 1종과 컬러 BIPV 모듈 3종을 대상으로 실측 발전 성능 비교 평가를 수행하였다. 발전 성능 비교 평가를 위해 활용된 BIPV 모듈, 모니터링 시스템 및 발전 성능 비교 평가 방법은 다음과 같다.

2.1 컬러 BIPV 모듈 및 일반 BIPV 모듈의 특성

일반 BIPV 모듈과 컬러 BIPV 모듈의 발전 성능 비교 평가를 위해 모듈을 제작하였다. 컬러 BIPV 모듈 3종의 경우 일반 BIPV 모듈에서 전면커버유리만 다르게 제작한 모듈이다. 일반 BIPV 모듈은 전면커버유리(저철분 강화유리) + POE (Polyolefin elastomer) films Film + Cell + POE Film + Back Sheet로 구성되어 있으며 컬러 BIPV 모듈의 경우 전면커버유리만 컬러유리도 구성되어 있다. Sputter coating을 통해 전면커버유리의 광학적 특성을 조절하여 색상을 구현하였으며, 색상은 ① Gray, ② Blue, ③ Orange, 3종을 구현하였다. 제작된 모듈의 투과율 곡선 및 전압-전류 특성 곡선은 Fig. 1과 같으며, 각 모듈의 성능 정보는 Table 1과 같다.

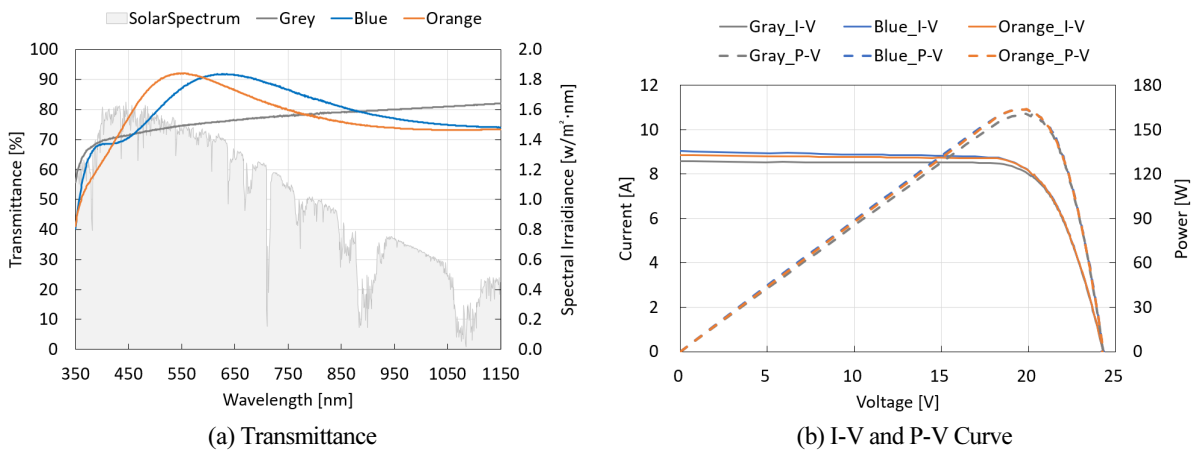


Fig. 1 Transmittance of color front cover glass and I-V curve of color BIPV module on standard test condition

Table 1 Specification of BIPV modules

Category	Color	Transmittance [%]	Pmax [W]	Vmpp [V]	Impp [A]	Voc [V]	Isc [A]	Efficiency [%]	Temp.Coeff [%/°C]
BIPV Module with General Front Cover Glass	-	91.51	180.53	19.50	9.26	24.18	9.71	18.05	-0.417
BIPV Module with Color Front Cover Glass	Gray	76.75	160.44	19.70	8.14	24.31	8.55	16.04	-0.417
	Blue	77.63	163.81	19.55	8.38	24.34	8.97	16.38	-0.417
	Orange	79.48	163.76	19.56	8.37	24.32	8.81	16.37	-0.417

Table 1의 투과율(Transmittance)과 Pmax를 활용하여 각 색상의 전면커버유리 적용에 따른 투과율 및 출력 감소 비율을 산출한 결과, Gray, Blue, Orange가 각각 16.13%, 15.17%, 13.15%의 투과율 감소를 보인 것으로 분석되었으며 11.13%, 9.26%, 9.29%의 발전성능 저하를 보인 것으로 분석되었다. 이를 통해 전면유리의 투과율 감소가 발전성능 감소와 동일한 것은 아니며, 색상마다 상의하지만 투과율 감소의 60 ~ 70% 수준인 것으로 분석되었다.

2.2 옥외 BIPV 모듈 성능 실험 장치

실측을 통한 일반 BIPV 모듈과 컬러 BIPV 모듈의 발전 성능 비교 평가를 위해 대전지역에 위치한 옥외 BIPV 모듈 성능 실험 장치에 모듈을 설치하였다. 성능 실험 장치는 일사량 및 온도 등 옥외 환경 변화 조건에서 전압-전류 특성 곡선을 측정하여 측정 모듈의 발전 성능 및 특성을 평가할 수 있도록 하는 장비이다. IEC 60904-4⁸⁾ 규격에 준한 변수 측정이 가능하며, 상세한 측정 변수는 Table 2와 같다. 단, 별도 인버터가 없기 때문에 DC 출력에 대한 정보만을 측정 한다. 측정 간격은 사용자가 임의로 조정할 수 있으며, 본 연구에서는 10분 간격으로 측정하도록 설정하였다. 옥외 BIPV 모듈 성능 실험 장치는 모듈을 2가지 설치 조건(정남향 수직면, 정남향 경사면)으로 설치할 수 있도록 구성되어 있으며, 본 연구에서는 정남향 경사면(30도)에 설치된 모듈을 활용하여 측정 자료를 수집하였다. 옥외 BIPV 모듈 성능 실험 장치의 전경은 Fig. 2와 같다.

Table 2 Measured Parameters of Monitoring System

Category	Items (Unit)
Meteo Data	Horizontal Irradiation (W/m ²), Inclined Irradiation (W/m ²), Vertical Irradiation (W/m ²)
Module Data	Pmax (W), Vmpp (V), Imp (A), Voc (V), Isc (A), Module Temperature (°C), I-V Curve



Fig. 2 View of the BIPV module performance test facility

실험 시설에는 인접 건물 및 산으로 인해 일출 직후와 일몰 직전에 일부 음영이 발생하는 시간이 존재한다. 따라서, 음영 분석을 통해 모니터링 자료 중 음영이 발생하는 시간의 자료는 분석에서 배제할 필요가 있다. 시설의 위치에 대한 음영 분석을 위해 측정 장비를 활용하여 분석을 수행하였으며, 결과를 바탕으로 월별 음영이 발생하지 않는 시간을 도출할 수 있었다. 측정 장비를 활용하여 해당 위치의 음영 분석 결과는 Fig. 3과 같으며, 분석 결과에 따라 전체 모니터링 자료 중 11:00 ~ 15:50 사이의 모니터링 자료만을 분석에 활용하였다. 이 외에도 시스템 유지 보수(측정 모듈에 음영 발생 가능성 존재), 모니터링 PC의 재부팅 및 PC의 전원 꺼져 있는 기간(모니터링 자료의 누락)의 모니터링 자료는 성능 분석에 활용하지 않았다.

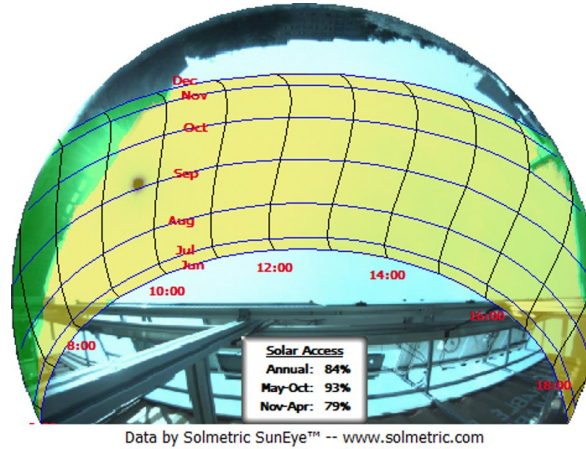


Fig. 3 Result of shading analysis for test facility

2.3 발전 성능 비교 분석 방법

일반 BIPV 모듈과 컬러 BIPV 모듈의 정량적인 발전 성능 비교 평가를 위해 적합한 성능 변수에 대한 결정이 필요하다. 현재 BIPV 및 PV시스템의 대표적인 성능 지표는 Array & Final Yield⁹⁾, Performance Ratio⁹⁾, Normalized Efficiency¹⁰⁾ 등이 있다. 3가지 성능 지표 중 PR의 경우 어레이와 동일한 설치조건으로 측정된 일사량을 필요로 한다. 일사량에 대한 Y_r 와 발전량에 대한 Y_A , Y_f 를 통해 PR이 산출되며, 본 연구와 같이 유형이 다른 모듈에 대한 정량적인 성능 비교 평가가 가능한 지표이다. 따라서, 본 연구에서는 Y_A 와 이에 근거한 PR(식 -2)과 발전 효율을 분석하여 발전 성능 비교평가를 수행하였다.

$$PR = Y_f / Y_r \tag{1}$$

$$PR_{DC} = Y_A / Y_R \tag{2}$$

$$Y_r = H_i / G_{i,ref} \tag{3}$$

$$Y_A = E_A / P_O \tag{4}$$

$$Y_f = E_{out} / P_O \tag{5}$$

$$\eta_A = E_A / (H_i \times A_a) \tag{6}$$

일반 BIPV 모듈과 컬러 BIPV 모듈의 발전 성능 비교 분석에 활용된 측정 자료는 2019년 12월 20일부터 2020년 1월 21일까지 10분 간격으로 측정된 자료이며, 동일 기간에 대한 외기조건 분석을 위해 기상청에서 제공하는 일평균전운량 자료를 추가로 활용하였다.

3. 컬러 BIPV 모듈 및 일반 BIPV 모듈의 발전 성능 분석

3.1 수평면전일사량 및 운량 분석

Fig. 4는 컬러 BIPV 모듈과 일반 BIPV 모듈의 발전 성능 비교 분석 기간 동안의 일일누적일사량과 일평균전운량을 도식화한 것이다. 측정 기간 동안 수평면에 대한 일일누적일사량은 $0.28 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{day} \sim 3.15 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{day}$ 의 범위를 갖는 것으로 분석되었으며, 평균 $2.03 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{day}$ 으로 분석되었다. 일평균전운량의 경우 $0.6 \sim 10.0$ 의 범위를 갖는 것으로 분석되었으며, 평균 4.96으로 분석되었다. 측정기간의 일일누적일사량과 일평균전운량 분석을 통해 일평균전운량이 1.0 미만인 2019년 12월 27일, 28일, 31일을 대표일로 선정하여 Performance Ratio 및 모듈 효율 분석을 수행하였다.

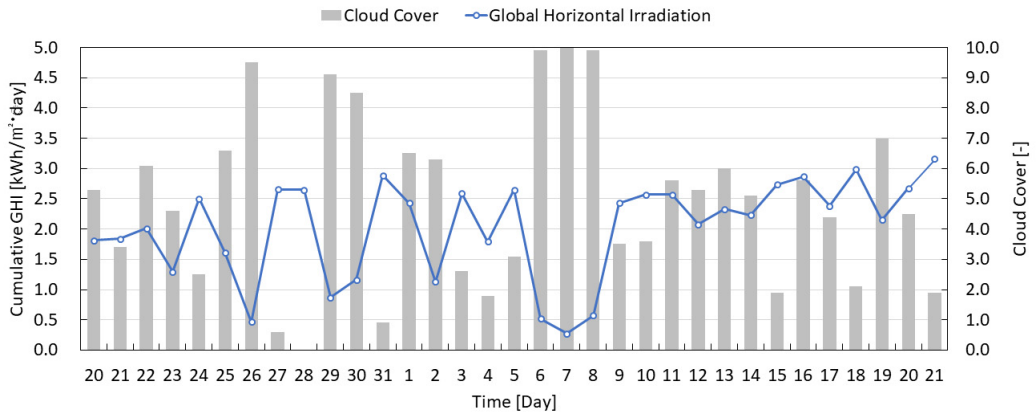


Fig. 4 Daily cumulative global horizontal irradiation(GHI) and daily averaged cloud cover

3.2 컬러 BIPV 모듈 및 일반 BIPV 모듈의 발전 성능 비교 분석

(1) Array Yield 비교 분석

Fig. 5는 컬러 BIPV 모듈과 일반 BIPV 모듈의 Y_A 를 나타낸 것이다. 앞서 언급한 것처럼 Y_A 는 일일누적발전량과 설치용량을 통해 산출되는 성능 지표이며, 설치용량의 경우 표준시험조건에서 측정한 값으로 효율이 반영되어 있는 수치이다. 따라서, Y_A 는 동일한 조건(일사 강도, 모듈 온도, 입사각 등)에 노출되었다면 효율과 관계 없이 동일한 수치로 산출되는 것이 보통이다.

일반 BIPV 모듈과 컬러 BIPV 모듈의 Y_A 분석 결과, 일반 BIPV 모듈의 경우 평균 2.70 h/d를 나타냈으며, 컬

러 BIPV 모듈의 경우 Gray, Blue, Orange가 각각 2.50 h/d, 2.67 h/d, 2.70 h/d를 나타냈다. 컬러 BIPV 모듈 중 Blue, Orange 모듈의 경우 일반 BIPV 모듈과 매우 유사한 성능을 나타내는 것으로 분석되었지만, Gray 모듈의 경우 약 7.74%의 성능 차이가 있는 것으로 분석되었다.

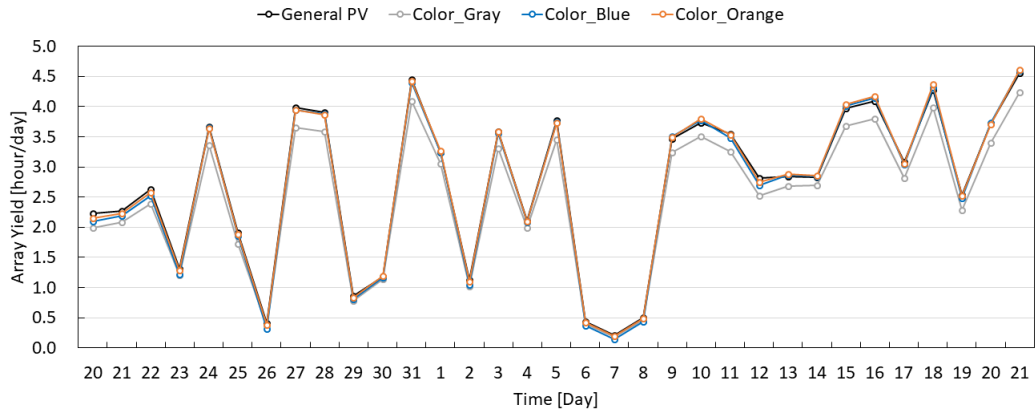


Fig. 5 Array yield for BIPV module with clear front cover glass and BIPV module with color front cover glass

(2) 대표일(일평균전운량 1.0 미만)의 직류출력에 대한 Performance Ratio 비교 분석

Fig. 6는 컬러 BIPV 모듈과 일반 BIPV 모듈의 PR을 나타낸 것이다. IEC 61724-1의 PR은 Y_r 과 Y_f 의 비율로써 산출된다. 하지만 본 연구에서는 측정 시스템의 한계로 인해 AC 발전량을 활용하여 산출된 Y_f 가 아닌 어레이(모듈)의 발전량을 활용하여 산출된 Y_A 를 통해 변형된 PR을 산출하였다.

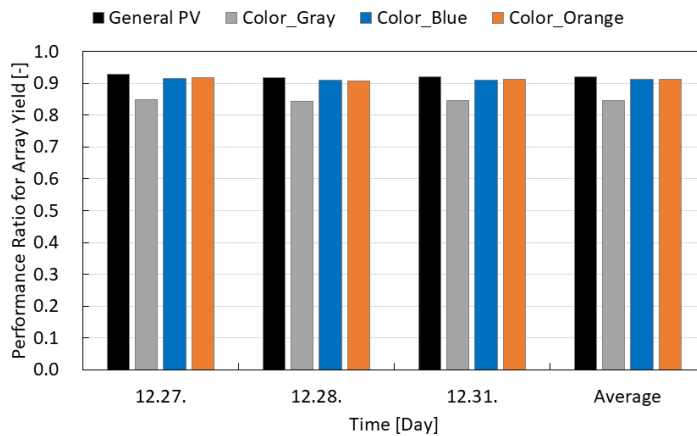


Fig. 6 Performance ratio for days with cloud cover less than 1.0

컬러 BIPV 모듈과 일반 BIPV 모듈의 발전 성능 비교 분석을 위해 구름의 영향이 매우 적은 대표일을 선정하였으며, 대표일은 앞서 언급한 2019년 12월 27일, 28일, 31일이다. 각 대표일의 PR 분석 결과는 Fig. 5와 같다.

분석 결과를 보면 오전 전기간에 대한 Array Yield 분석 결과와 동일하게 컬러 BIPV 모듈 중 Gray의 경우 다른 모듈에 비해 낮은 성능을 나타내는 것으로 분석되었다. 대표일의 PR 평균값은 일반 BIPV 모듈이 0.92, 컬러 BIPV 모듈이 각각 0.85 (Gray), 0.91 (Blue), 0.91 (Orange)로 분석되었다. 위 분석 결과를 통해 컬러 BIPV 모듈의 경우 부가적인 발전 효율 저하가 있는 것으로 나타났으며, Gray 색상의 컬러 BIPV 모듈의 경우 약 6~7% 정도 발생한 것으로 분석되었다.

(3) 대표일(일평균전운량 1.0 미만)의 모듈 효율 비교 분석

Fig. 7 및 Table 3은 컬러 BIPV 모듈과 일반 BIPV 모듈의 발전 효율을 나타낸 것으로 PR분석과 동일하게 대표일을 대상으로 분석하였으며, 특정시간 오전 11시부터 오후 2시까지의 일사량과 발전량을 활용하여 효율 분석을 수행하였다. 효율 분석 결과, 일반 BIPV 모듈의 경우 운영 효율이 16.63% (166.3 W/m²)로 분석되었으며, 컬러 BIPV 모듈의 경우 Gray, Blue, Orange가 각각 13.68% (136.8 W/m²), 15.12% (151.2 W/m²), 14.99% (149.9 W/m²)로 분석되었다.

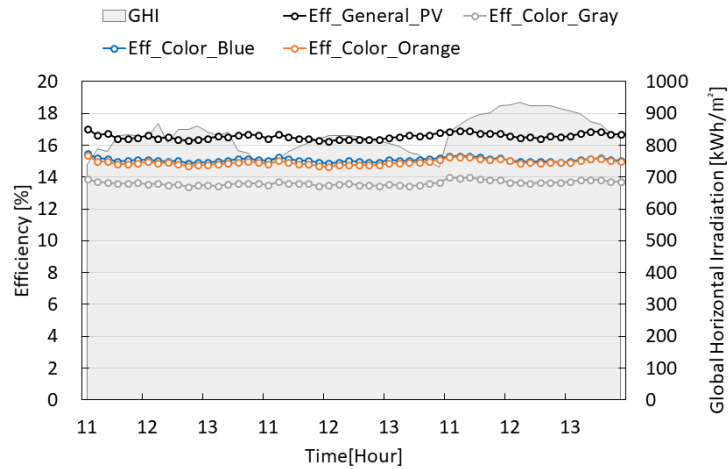


Fig. 7 Module efficiency for days with cloud cover less than 1.0

저철분강화유리가 아닌 컬러커버유리 적용에 따른 투과손실로 인한 효율 저하는 표준시험조건에서 Gray, Blue, Orange가 각각 11.13%, 9.26%, 9.29% 발생하는 것으로 분석되었으며, 외기 조건에서는 각각 17.74%, 9.05%, 9.86% 발생하는 것으로 분석되었다. 위의 발전 성능 분석 결과를 종합해보면 컬러 BIPV 모듈의 경우 표준시험조건에서 측정된 투과손실에 따른 효율저하 외에도 다른 요인에 의한 효율저하가 나타나는 것을 명확히 알 수 있으며, 정도는 색상마다 상이한 것을 알 수 있다.

Table 3 Power Efficiency of modules for Standard Test Condition and Measurement

Category	Typical Front Cover Glass	Color Front Cover Glass		
		Gray	Blue	Orange
Standard Test Condition	18.05	16.04	16.38	16.38
Measurement	16.63	13.68	15.12	14.99

앞선 발전 성능 분석 결과를 통해 색상구현으로 인한 전면커버유리의 투과율 감소 외에 성능 저하가 추가적으로 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 성능 저하가 전압과 전류 중 어떤 요소의 감소로 인해 발생되었는지 분석하기 위해 컬러 BIPV 모듈을 대상으로 표준시험조건 및 외기조건에서 Voc, Isc, Vmpp, Impp를 비교 분석하였으며, 분석 자료는 앞선 효율 분석 대상 자료와 동일한 기간 동안의 측정 자료를 활용하였다. 분석 결과는 Table 4와 같다.

Table 4 Power Efficiency of modules for Standard Test Condition (STC) and Measurement (MEA)

Category	Voc			Isc			Vmpp			Impp		
	STC	MEA	Ratio[%]	STC	MEA	Ratio[%]	STC	MEA	Ratio[%]	STC	MEA	Ratio[%]
Gray	24.31	23.74	97.67	8.55	6.04	70.61	19.70	19.35	98.23	8.14	5.87	72.16
Blue	24.34	23.90	98.20	8.97	6.84	76.25	19.55	19.11	97.77	8.38	6.57	78.45
Orange	24.32	23.83	97.99	8.81	6.75	76.65	19.56	19.17	98.00	8.37	6.50	77.61

전압 특성의 경우 컬러 BIPV 모듈 3종이 모두 표준시험조건과 차이가 약 3% 내로 색상과 관계없이 유사한 수준으로 나타났지만, 전류 특성의 경우 색상에 따라 표준시험조건 대비 24.35% ~ 29.39% 감소된 수치로 분석되었다. 전류 특성의 경우 표준시험조건과 다른 일사량 및 입사각에 따른 투과손실에 의해 차이가 발생할 수 있다. 특히 Gray 색상의 경우 표준시험조건 결과값과 차이가 다른 색상에 비해 약 5.5% 더 크게 분석되었으며, 이를 통해 Gray 컬러 BIPV 모듈의 성능 저하는 전류 특성의 변화로 인해 나타난 것으로 판단할 수 있다. BIPV모듈을 포함한 PV모듈에서 전류특성을 나타내는 지표는 일사량과 매우 밀접한 관계가 있으며, 실제 Solar Cell에 도달한 일사량은 일사량계로 측정한 일사량과 전면커버유리의 투과율 및 입사각 수정계수 등에 의해 결정된다. 본 연구의 컬러BIPV모듈의 경우 전면유리의 광학특성을 조절하여 색상을 구현하였기 때문에 광학적 특성에 따라 상이한 운영 성능을 나타낼 가능성이 있다고 판단된다.

5. 결론

컬러 BIPV 모듈과 일반 BIPV 모듈의 발전 성능을 비교 평가를 위해 대전지역의 옥외 BIPV 모듈 성능 시험 장치에서 약 1개월 간의 성능 측정이 이루어졌으며, 측정자료와 함께 추가적으로 기상청의 일평균전운량을 활용 비교 분석을 수행하였다. 발전 성능 비교 평가를 위한 지표는 Y_A , PR, 발전 효율을 활용하였다. Y_A 의 경우 측정

기간 전체에 대해 분석하였으며, PR 및 발전효율의 경우 앞서 언급한 일평균전운량이 1.0 미만인 날을 대표일로 선정하여 분석하였다.

- (1) 옥외 BIPV 모듈 성능 평가 시설에서 측정된 일일누적일사량과 기상청에서 제공하는 일평균전운량을 활용하여, 성능 측정 기간(2019년 12월 20일부터 2020년 1월 21일까지) 동안의 기상조건에 대한 분석을 수행하였다. 측정 기간 동안의 일일누적일사량은 평균 $2.03 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{day}$ 로 분석되었으며, 일평균전운량의 경우 4.96으로 분석되었다. 측정 기간 중 일평균전운량이 1.0 미만인 날은 12월 27일, 28일, 31일로 확인되었다.
- (2) 대표일 중 11시부터 14시까지의 경사면 일사량과 각 모듈의 발전량을 활용하여 모듈의 발전 효율 분석을 수행하였다. 일반 BIPV 모듈의 경우 운영 효율이 16.63%로 분석되었으며, 컬러 BIPV 모듈의 경우 13.68% (Gray), 15.12% (Blue), 14.99% (Orange)로 분석되었다. 컬러커버유리 적용에 따른 투과손실로 인한 효율 저하는 실제 운영 조건에서 각각 17.74% (Gray), 9.05% (Blue), 9.86% (Orange) 발생하는 것으로 분석되었다. 이 수치는 표준시험조건에서 각 모듈의 효율을 활용하여 산출된 투과손실로 인한 효율 저하 수치(Gray : 11.13%, Blue : 9.26%, Orange : 9.29%)와 비교했을 때, Gray 색상의 경우 약 7%의 추가적인 효율저하가 발생하는 것으로 분석되었다.
- (3) 대표일(06시부터 19시까지)을 기준으로 PR 분석을 수행한 결과, 일반 BIPV 모듈의 경우는 0.92로 분석되었으며, 컬러 BIPV 모듈의 경우 0.85 (Gray), 0.91 (Blue), 0.91 (Orange)로 분석되었다. 위의 결과를 통해 Gray 색상의 컬러 BIPV 모듈의 경우 색상구현에 따른 투과율 감소 외에 부가적인 발전 성능 저하가 약 6~7% 정도 발생한 것으로 분석되었다.
- (4) 앞선 분석 결과를 종합해보면, Gray 색상의 컬러 BIPV 모듈의 경우 색상구현에 따른 투과율 감소로 인한 성능저하 외에 부가적인 성능 저하 요인이 존재하는 것으로 판단되며, 정확한 요인 조사에 앞서 전압 및 전류 특성에 대해 비교 분석을 수행하였다. 분석 결과, 전압 특성은 차이가 약 3% 내로 매우 유사한 수준이었으나, 전류 특성은 다른 색상의 BIPV 모듈에 비해 약 5.5% 낮게 측정된 것으로 분석되었다.
- (5) 위의 연구 결과를 통해 알 수 있듯이 컬러커버유리가 적용된 모듈의 경우 일반적인 모듈과 달리 색상에 따라 운영 성능에서 차이가 발생할 수 있다. 그렇기 때문에 표준시험조건에 의한 성능평가 외에 옥외 성능 실험을 통해 부가적인 성능 저하 요인에 대한 고찰이 필요하다. 향후 위의 연구 결과를 토대로 특정 색상에서 발생한 추가적인 성능 저하 요인 도출을 위한 연구를 수행할 예정이다.

후기

본 연구는 한국에너지기술평가원의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호: 20183010013840).

REFERENCES

1. Zero Energy Building Certification System of Korea Energy Agency, <https://zeb.energy.or.kr/>
2. Korea Energy Agency, <https://www.energy.or.kr/>
3. Song, H. J., 결정질 실리콘 컬러 태양광 모듈 기술 동향, *Bulletin of the Korea Photovoltaic Society*, Vol. 5, No. 1, pp. 38-45, 2019.
4. Yoon, J. H., 국내 건물일체형 태양광발전(BIPV) 기술현황 고찰 및 분야별 활성화 방안 제안, *The Magazine of Korean Solar Energy Society*, Vol. 16, No. 2, pp. 21-30, 2018.
5. Tzikas, C., Valckenborg, R., Dorenkamper, M., van den Donker, M. N., Duque Lozano, D., Bognar, A., Loonen, R., Hensen, J., and Folkerts, W., Outdoor Characterization of Colored and Texture Prototype PV Facade Elements, 35th EUPVSEC, 2018.
6. Saretta, E., Bonomo, P., and Frontini, F., BIPV Meets Customizable Glass: A Dialogue Between Energy Efficiency and Aesthetics, 35th EUPVSEC, 2018.
7. Frontini, F., Bonomo, P., Saretta, E., Weber, T., and Berfhold, J., Indoor and Outdoor Characterization of Innovative Colored BIPV Modules for Facade Application, 32th EUPVSEC, 2016.
8. International Electrotechnical Commission, IEC 60904-1 ; Photovoltaic devices – Part 1: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics, 2006.
9. IEC 61724-1:2017, Photovoltaic system performance - Part 1: Monitoring.
10. Herteleer, B., Huyck, B., Catthoor, F., Driesen, J., and Cappelle, J., Normalised efficiency of photovoltaic systems: Going beyond the performance ratio, *Solar Energy*, Vol. 157, No. 15, pp. 408-418, 2017.