



강판일체형 경량 Polycarbonate BIPV 모듈의 장기 옥외 발전성능 측정 연구

Long-Term Outdoor Power Generation Performance Evaluation of a Lightweight Polycarbonate BIPV Module with Integrated Steel Plate

강은호* · 송광현** · 최문규*** · 김동수**** · 윤중호*****

Eunho Kang* · Kwanghyun Song** · Mungyu Choi*** · Dongsu Kim**** · Jongho Yoon*****

* Ph.D. Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (silverskang@gmail.com)

** Coauthor, Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (skh990409@naver.com)

*** Coauthor, Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (mungyu.choi97@gmail.com)

**** Coauthor, Associate professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (dongsu.kim@hanbat.ac.kr)

***** Corresponding author, Professor, Dept. of Architectural Engineering, Hanbat National Univ., South Korea (jhyoon@hanbat.ac.kr)

ABSTRACT

Purpose: PV modules manufactured using lightweight materials such as polycarbonate are lighter than those manufactured using denser materials such as glass, which offers the advantage of reducing initial installation costs. However, these modules can be vulnerable to changes in the external environment, and their performance may deteriorate over time. There are still few installation cases and long-term measurement studies on polycarbonate modules, resulting in a lack of baseline data on module performance. Therefore, in this study, a long-term measurement experiment was conducted on the polycarbonate modules, and baseline performance data were derived from the measured data. **Method:** This study conducted long-term measurement experiments in an outdoor environment for the polycarbonate-covered modules and existing glass modules, evaluating the changes in the modules' power generation performance in relation to temperature fluctuations and system operating time, based on data collected over 1 year and 6 months. **Results:** The deterioration in power generation performance due to increased operating time of the polycarbonate module was less than 1%, indicating no significant performance degradation. Furthermore, the efficiency distribution was comparable to that of the existing glass module. Additionally, the efficiency changes of the polycarbonate modules in response to temperature variations differed by less than 2% compared to the glass module, demonstrating similar performance to that of the existing module.

KEYWORD

신재생에너지
태양광발전
폴리카보네이트 모듈

New and Renewable Energy
Photovoltaics
Polycarbonate Module

ACCEPTANCE INFO

Received Jan. 21, 2025

Final revision received Feb. 3, 2025

Accepted Feb. 7, 2025

© 2025. KIEAE all rights reserved.

1. 서론

1.1. 연구의 배경 및 목적

탄소배출에 의한 지속적인 기온 상승으로 지구온난화가 가속화되고 있으며, 이에 따라 전 세계적으로 탄소배출 저감을 위한 움직임을 보이고 있다. 2015년 파리 협정 이후 선진국을 중심으로 2050 탄소 중립을 선언하였으며, 우리나라는 2030 국가 온실가스 감축목표(Nationally Determined Contributions)와 더불어 2050 장기 저탄소 발전전략을 제출하였다. 2030년까지 2018년도 대비 온실가스 40% 감축을 목표로 설정하였으며, 이를 실현하기 위해 신재생에너지에 관한 정책을 시행하였다[1].

신재생에너지 중 하나인 태양광의 전세계 보급용량은 2023년 기준 565.0GW로 이는 전년 대비 60% 이상 증가한 수치를 보였으며 2024년의 신설 용량은 약 20% 추가 증가할 것으로 예상된다[2]. 건축물에서 소비되는 전력의 일부분을 대체하기 위한 태양광발전 설비의 설치 증가함에 따라 설치 장소는 소규모 건축물에서부터 대규모 건축물까지 다양한 분포를 갖게 되었다.

그중, 건물 일체형 태양광 발전(BIPV; Building Integrated Photovoltaic) 시스템은 건축물의 외장재를 대체함으로써 효율적인 설치 면적과 더불어 건물 에너지의 일부분을 완화할 수 있다는 점에서 다기능적인 시스템으로 평가받는다[3].

일반적으로 BIPV 시스템 구축에 사용되는 모듈은 구조적 안정성 및 외부 환경으로부터의 보호를 위해 저철분 강화유리 등 높은 밀도를 갖는 자재를 활용하여 제작된다. 이는 모듈의 무게를 증가시키는 주요 원인으로 고층 건물 혹은 높은 시설물에 모듈을 설치할 시에 구조적 안정적 확보를 위해 시스템 시공에 요구되는 부자재 및 시공비용을 증가시킨다[4,5]. 따라서 신재생에너지 활성화를 위해서는 태양광 모듈의 경량화는 주요 해결사항이라고 할 수 있다. 최근 모듈 제조업체 및 연구자들은 모듈의 레이어 구조를 개량하거나 PVC, Polycarbonate 등 가벼운 소재를 모듈 제작에 활용함으로써 모듈의 경량화를 위해 다양한 시도를 하고 있다[6-10]. Martins at al.은 ETFE와 허니컴 샌드위치 구조를 결합한 경량형 태양광 모듈을 2셀과 16셀로 나누어 열사이클 테스트를 통한 내구성을 평가하였다. 열사이클 200회 반복 후 전력 손실은 2셀 모듈의 경우 -1.2%~2.4%, 16셀 모듈은 2.4%로 IEC 기준인 5% 미만을 만족하는 경량형 모듈을 개발하였다[11]. 이러한 경량형 모듈의 초기 성능 검증에 관한 연

구 결과는 경량형 태양광 모듈의 개발 가능성을 보여준다.

그러나 아직까지 경량화된 모듈의 상용화를 위한 장기성능에 대한 기초데이터는 부족한 실정이다. 밀도가 낮은 자재는 특성상 외부 환경의 변화에 장기적으로 노출되면 물리적인 성질이 변할 수 있으며 이에 따라 경년 변화에 의한 출력 저하 문제가 발생할 수 있다. 또한 상부 재질의 변화로 인하여 태양전지에 입사되는 일사량의 차이가 나타날 수 있으며 모듈의 열적 특성 또한 기존과 다르게 나타날 수 있다. 이러한 변화는 기존 상용되고 있는 모듈들과의 발전성능 차이를 불러일으킬 수 있는 주요 요인으로 작용할 수 있기 때문에 실제 옥외 환경을 기반으로 장기 측정을 통하여 경량화된 모듈의 기초성능 자료를 도출할 필요가 있다.

이에 본 연구는 전면부에 Polycarbonate 커버를 적용한 강판일체형 경량 태양광 모듈을 대상으로, 옥외 환경에서 1년 6개월간의 장기 측정을 통해 수집된 실측 데이터를 바탕으로, 모듈의 발전성능 및 온도변화와 시스템 운전 특성에 따른 경년변화를 분석 검증하는 데 주 목적이 있다.

1.2. 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 강판일체형 경량 Polycarbonate 커버 모듈(이하 PC 모듈)을 대상으로 시스템 운영에 따른 성능 변화 및 온도에 따른 발전 성능을 분석한다. 이를 위해 실용 규모 모듈 성능 측정용 옥외 테스트베드에서 장기 실측 실험을 수행하여 측정 데이터에 기반한 연구 결과를 도출한다. 약 1년 6개월 동안의 측정 실험을 통해 장기측정 데이터가 수집되고, 해당 데이터에 기반하여 운영 기간에 따른 모듈의 발전성능의 경년변화와 모듈 온도에 따른 발전효율을 정량적으로 분석한다. 한편 현재 가장 일반적으로 통용되고 있는 유리 커버 태양광 모듈의 성능과 비교 분석하기 위해, PC 커버 부분만 컬러유리로 교체된 동일 규모, 동일사양의 유리 모듈도 제작하여 비교 실험을 진행한다. PC 모듈은 총 3매, 유리 모듈은 1매를 제작하여 납측 수직설치 조건으로 성능 측정을 수행한다.

2. 강판일체형 PC BIPV 개발 모듈의 사양

본 연구에서 다루는 강판일체형 PC 모듈은 건물의 지붕, 외벽 등의 외피 또는 방음벽 등의 가설물 등에 보다 용이하게 시공될 수 있도록 경량화를 중점으로 개발된 모듈이다. 일반적으로 BIPV 모듈의 전면재 또는 후면재로 적용되는 유리는 모듈 전체 무게 증가의 핵심 요인으로 작용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 유리의 대체 소재로 후면재로는 박판의 강판류 소재를, 전면재로는 비교적 높은 기계적 강도와 투광성을 가지고 있는 필름 및 폴리카보네이트 등의 플라스틱 소재를 적용하였다.

Fig. 1.은 강판일체형 경량 모듈의 단면 구조를 나타낸다. 우선 모듈 후면재의 경우 기계적 강성을 높이는 동시에 경량성을 최대한 확보하기 위해 벌집 구조의 알루미늄 박판을 섬유강화플라스틱(Fiber reinforced plastics)과 결합시킨 허니컴보드 형태의 후면재를 적용하였다. 전면재의 경우는 기본 모듈과 심미성 모듈로 구분하여, 기본모듈은 셀보호를 위한 ECTFE (Ethylene Chloro Tetra Fluoro

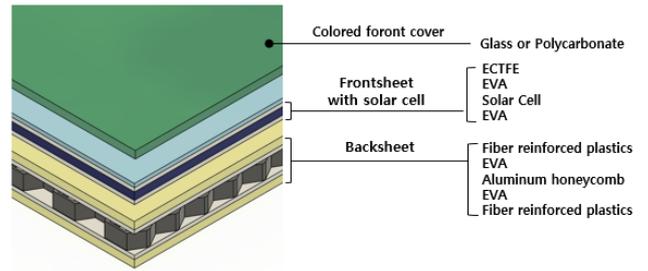


Fig. 1. Cross-sectional configuration of a steel integrated lightweight PV module with colored glass or colored PC as front material



Fig. 2. Front and rear views of PV modules with colored glass or colored PC as the front material

Ethylene) 필름만을 적용하며, 심미성 모듈의 경우는 ECTFE 필름 위에 필요한 색상의 컬러 PC판을 부가적으로 추가한다. 태양전지 전 후면 층에는 일반 태양광 모듈과 동일하게 EVA (Ethyl Vinyl Acetate)가 적용된다. 본 연구에서 후면재로 적용한 알루미늄 재질의 허니컴보드는 벌집구조의 물리적 특성 덕분에 태양광 모듈의 기계적 하중을 견딜 수 있는 구조적 안정성을 제공한다. 또한 내부가 대부분 비어있는 구조를 가지므로 경량화된 모듈 제작이 용이한 장점이 있다. 이러한 방식으로 경량화된 최종 기본 모듈(컬러 PC층이 부가되지 않은 모듈)의 무게는 모듈 프레임을 포함해 약 6.2kg/m²로 기존 강화유리 적용 모듈의 중량 대비 약 40% 경량화를 달성하였다[12].

Fig. 2.는 허니컴보드 형태의 후면재와 ECTFE 필름이 전면재로 적용된 경량화 기본 모듈에, 심미성을 위해 컬러 PC가 추가된 경량화 심미성 모듈의 후면 및 전경을 나타내며, 가장 우측 사진은 컬러 PC 대신에 컬러 유리를 기본 모듈에 적용한 유리 모듈의 전면 전경을 나타낸다. 유리 모듈은 경량 PC 모듈과 동일 사양, 동일 면적에 PC만 컬러 유리로 대체하여 제작된 것으로 성능의 상대비교를 위해 측정 실험에 적용되었다.

해당 방식으로 제작된 모듈에 대해 몇 가지 성능평가가 이루어졌다. Shin at al.은 저철분 강화 유리를 부착한 태양광 모듈과ETFE 필름을 부착한 태양광 모듈에 대해 Damp heat 및 Thermal Cycle 실험을 통한 비교 분석을 수행하였다. Damp Heat 실험 이후 ETFE 필름의 출력 저하는 0.93%, Thermal Cycle 실험 이후 0.98%로 유리 모듈과 출력 성능이 비슷함을 입증하였다[6]. Park at al.은 전면 유리 시트를 ETFE 필름으로 대체하고, 허니컴 샌드위치 구조를 후면 시트로 사용하여 기존 유리 모듈 대비 무게를 48% 낮춘 경량형 모듈의 발전성능을 표준시험 조건에서 평가하였다. IEC 61215 표준에 따른 DH 1000, TC 200, ML 2400 및 PID 시험을 통한 경량형 ETFE 모듈의 최대 전력의 감소율이 5% 미만임을 입증하였다[12].

태양전지 유형으로는 P형 c-Si 태양 전지가 적용되었으며, 제한

된 면적 내에서 태양광-전력 변환을 극대화하기 위해 싱글드(shingled) 구조를 적용하였다. 싱글드(shingled) 태양광 모듈은 전면 버스바(busbar)를 기준으로 셀을 분할한 후, 각 셀의 전면 버스바에 전도성 접착제(ECA, Electrically Conductive Adhesives)를 적용하여 다른 셀의 후면과 접합하는 방식으로 제작된다. 이러한 접합 방식은 전면의 버스바가 겹치는 구조를 채택하므로 광학적 손실이 줄어들어 단위 면적당 출력이 증가하는 효과가 있다[13].

3. 태양광 모듈의 장기 발전성능 측정을 위한 옥외 테스트베드 및 측정 시스템 개요

실측 데이터를 기반으로 성능 평가를 진행하기 위해 대전시 유성구(위도 36.4, 경도 127.3)에 위치한 옥외 테스트베드 시설을 이용하여 모듈의 측정 실험을 진행하였다. Fig. 3.은 측정 실험이 진행되고 있는 테스트베드 시설을 보여준다. 측정 대상 모듈은 테스트베드 입면에 설치된 알루미늄 거치대에 전용 브라켓을 이용하여 남측 수직면에 설치되었다. 모듈이 거치된 알루미늄 프레임은 테스트베드 외피와 약 500mm 이격되어 설치되었기 때문에 각 모듈의 모듈 후면은 외부 공기에 완전히 노출된 상태로 고려된다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 총 4장의 컬러 PC 모듈과 1장의 컬러 유리 모듈이 설치되어 있으며, 다른 목적으로 활용된 1장의 컬러 PC 모듈을 제외한 3장의 컬러 PC 모듈(M1, M2, M3)과 컬러 유리 모듈(Glass)을 대상으로 성능평가가 진행되었다.

Table 1.은 실험에 적용된 모듈들의 제원과 설치 정보를 보여준다. 표준조건(STC, Standard Test Condition)에서 측정된 정격출력은 PC 모듈의 경우 150.01W이며 유리 모듈의 경우 164.41W로 단위면적당 출력은 유리 모듈에서 약 9W 높은 출력을 보인다.

해당 측정 실험은 2023년 7월 1일부터 2024년 12월 30일까지 약 1년 6개월 동안 진행되었으며 데이터는 10분 간격으로 수집되었다. 측정 실험동안 모듈의 직류 출력과 같은 전기적 특성 데이터와 모듈 표면온도 그리고 수직면 일사량이 수집되었다. 모듈 표면온도는 모듈 후면에 온도 센서를 부착하여 측정되었으며 수직면 일사량은 설치된 모듈과 동일한 방위 및 각도로 설치된 일사량계를 이용하여 측정되었다. 아래 Table 2.는 테스트베드를 운영하는 기간 동안 수집

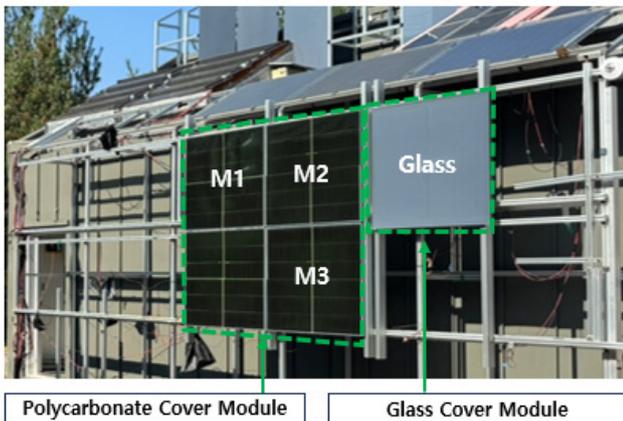


Fig. 3. PV module test-bed system installed on site

된 데이터들의 항목을 나타낸다.

Fig. 4.는 실험 시설에 적용된 통합 모니터링 시스템의 구성도를 나타낸다. 이 시스템은 일사량과 태양광 발전 특성(태양광 모듈의 온도, 전류, 전압)과 같은 계측 데이터를 수집하기 위해 개발되었다. 해당 실험 설비 모니터링 시스템은 32개의 개별 모듈을 독립적으로 모니터링할 수 있도록 구축되어 있다. 모니터링 시스템은 1개의 I-V 트레이서, 아날로그-디지털 컨버터가 있는 열전대 및 일사량계로 구성된다. 하나의 I-V 트레이서는 모듈을 전환하는 동안 각 모듈의 전기적 특성(전력, 전압, 전류)을 측정한다.

Fig. 5.는 설치된 일사량계와 가동 중인 모니터링 시스템의 화면을 나타낸다. 모듈의 전기적 특성 수집 장치인 I-V 트레이서의 측정 프로세스는 IEC 60904-1(국제전기기술위원회, 2016)을 따른다. 실험 설비의 작동으로 생성된 전기는 배터리 또는 전력망에 연결되어 있지 않기 때문에 저항을 통해 소비되도록 구성되어 있다. 데이터 측정을 위해 설치된 각 PV 모듈은 각 채널에 연결된다[14]. 설치된

Table 1. Module specifications

Item	Polycarbonate module	Glass module
Nominal power [W]	150.01	164.42
Voltage at maximum power [V]	15.78	17.06
Current at maximum power [A]	9.72	9.52
Size [mm, Width*Height]	1.056*0.985	1.034*1.034
Azimuth angle, Tilt angle	180° (South), 90°	
Location (latitude, longitude)	Daejeon, Korea (36.37, 127.37)	

Table 2. Measured parameters of the monitoring system

Category	Item
Electrical data	Maximum power output (W)
	Maximum power voltage (V)
	Maximum power current (A)
	Open circuit voltage (V)
	Short circuit current (A)
	Fill factor (%)
	Module level I-V curve
Meteorological data	Horizontal plane irradiance (W/m ²)
	Inclined plane irradiance (W/m ²)
	Vertical plane irradiance (W/m ²)
Temperature data	Module surface temperature

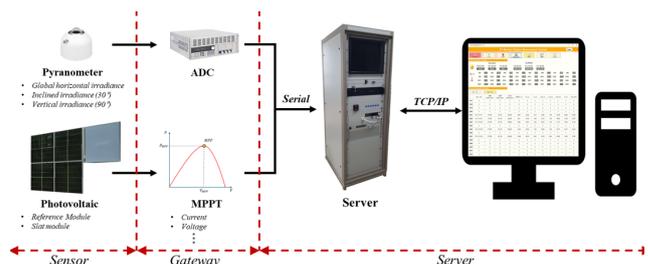


Fig. 4. Configuration of the data acquisition system

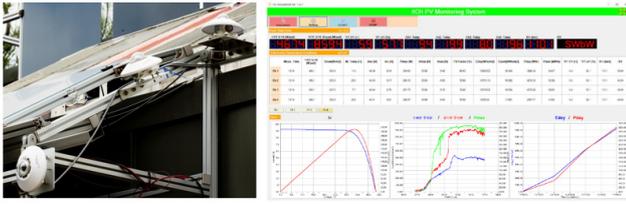


Fig. 5. Pyrometers installed on the test-bed (left), screen of the monitoring system (right)

Table 3. Measuring device specifications

Category	Instrument	Measuring range	Accuracy
Meteorological data	Pyranometer (MS-60)	0 to 2000W/m ²	± 15W/m ²
Temperature data	Thermocouple (T type)	-250°C to 350°C	± 0.5°C
Electrical data	IV curve tracer	20 to 300V 0.2 to 20V	± 1.7%

일사량계의 유형은 “클래스 B”이며, 수평, 수직 및 경사면 전일사량을 모니터링 한다[15].

각 채널의 최대 측정 가능 전력은 600W이며, 최대 전압 및 전류 범위는 각각 300V 및 20A이다. 별도의 인버터 장치는 설치되어 있지 않으며, 직류에 대한 전기 데이터만 측정한다. 최대전력점추적(MPPT)을 통해 측정된 전력은 서버에 저장된다. 또한 일사량계로 측정된 아날로그 전기 신호는 아날로그-디지털 변환기(ADC)를 통해 디지털 전기 신호로 변환되어 서버에 저장된다. 서버에 저장된 데이터는 전송 제어 프로토콜/인터넷 프로토콜 통신을 통해 일반 PC에서 확인 가능하다. 모니터링 시스템 프로그램 업데이트 및 설치 작업 기간 중 일부 작업 기간은 데이터 분석에 고려되지 않았다.

Table 3.은 측정실험에 사용된 측정 장비의 모델 및 제원을 보여 준다.

4. 장기측정 데이터 기반 발전성능 평가

4.1. 시스템 운영 기간에 따른 발전성능 변화

Fig. 6.은 모듈 설치 후 시스템 운영 기간 경과에 따른 PC 모듈의 발전효율 분포와 데이터 수집 시점의 모듈 표면온도 분포를 나타낸다. 해당 그래프는 약 1년 6개월 동안의 모듈 운영시간에 따른 발전효율 변화를 보여주며 계절에 따른 효율 변화를 확인할 수 있도록 3개월 간격으로 작성되었다.

Table 4.는 3개월 간격으로 도시된 월의 월평균 발전효율을 나타낸다. 모듈의 발전효율 E_{PV} 은 Eq. 1과 같이 단위면적당 모듈의 직류 출력 P_{DC} 과 유입일사량 I_{POA} 로 산출된다.

$$E_{PV} = \frac{P_{DC}}{I_{POA}} \times 100\% \quad (\text{Eq. 1})$$

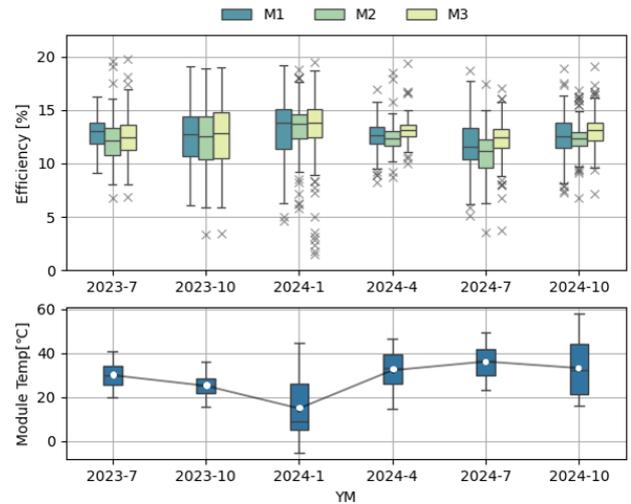


Fig. 6. Measured results of polycarbonate modules (top: module power generation efficiency, bottom: module average surface temperature)

Table 4. Monthly efficiency of polycarbonate modules

Date	M1	M2	M3	Mean
Jul-23	13.0%	12.2%	12.4%	12.5%
Oct-23	12.8%	12.6%	12.9%	12.7%
Jan-24	13.9%	13.8%	14.0%	13.9%
Apr-24	12.6%	12.3%	13.1%	12.7%
Jul-24	11.6%	11.2%	12.5%	11.8%
Oct-24	12.6%	12.3%	13.1%	12.7%

여기서,

E_{PV} : 모듈의 효율 [%]

P_{DC} : 단위면적당 모듈의 직류 출력[W/m²]

I_{POA} : 모듈에 입사된 일사량 [W/m²]

모듈의 발전효율 변화를 운영 시간 1년 경과 후를 기준으로 비교 하였을 때, 7월과 10월의 월평균 발전효율의 변화량은 2023년 대비 2024년에 0.1%~0.8% 감소한 경향을 보인다. 하지만 해당 발전효율의 변화량은 2023년 대비 2024년에 비교적 높은 온도를 나타낸 것을 감안하였을 때 해당 변화는 미미한 것으로 확인된다. 모듈온도 40±0.5°C를 갖는 시간대인 2023년의 발전효율과 2024년의 발전효율을 검토한 결과, 상대편차는 1% 미만으로 나타났다. 이는 일반적으로 발생하는 모듈의 연간 발전량 감소량이 0.8%인 점을 감안하였을 때, 기존 모듈과 차이가 거의 없음을 나타낸다.

또한 Fig. 6.에 따르면 각 3개 모듈의 발전효율은 계절에 따라 증가 및 감소 패턴이 유사한 것을 보여준다. 7월의 발전효율은 약 12%로 타 계절 대비 비교적 낮게 나타나지만 이후 1월에 가까워질수록 증가하여 월별 평균 효율이 약 14%까지 이르는 것을 확인할 수 있다. 이는 계절변화에 따른 설치환경의 온도상승 및 하강에 의한 영향으로 판단되며 여름철에 모듈의 효율이 상대적으로 낮게 나타나고

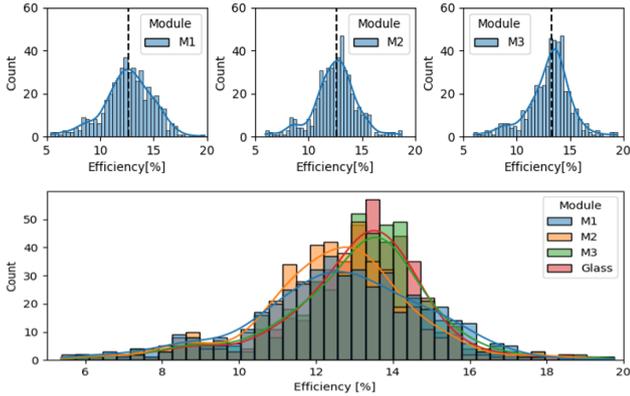


Fig. 7. Module efficiency distribution under operating conditions (Vertical irradiation>120W/m²)

Table 5. Statistics of power generation efficiency

Module	Mean	Std	PCT-2.5%	PCT-97.5%
M1	12.65%	2.28%	7.53%	16.72%
M2	12.60%	1.99%	8.10%	16.43%
M3	13.27%	2.04%	8.20%	16.64%
Glass	13.28%	1.96%	8.15%	16.50%

PCT: Percentile

겨울철에 비교적 높은 양상을 보인다. 도식된 일자들의 월평균 발전효율의 변동계수는 4.1%~6.2%로 나타나 운영시간 경과에 따라 성능저하가 발생하지 않고, 전반적으로 안정된 출력 결과를 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 7.은 측정기간 동안 수집된 모듈의 발전효율을 나타내며 Table 5.는 각 모듈의 발전효율에 대한 통계량을 보여준다. Fig. 7.의 분포는 시스템이 작동하는 조건상의 특성을 분석하기 위해 모듈에 입사되는 일사량이 120W/m² 이상을 만족하는 데이터만을 이용하여 작성되었다. 컬러 PC 모듈과 컬러 유리 모듈의 발전성능을 비교하였을 때, 평균 발전효율은 PC 모듈과 유리 모듈에서 각각 12.84%, 13.28%로 유리 모듈이 약 3% 높은 수치를 보였다. 또한 전체 운영 시간의 90%를 차지하는 모듈의 발전효율의 범위는 PC 모듈의 경우 7.94%~16.60%로 나타났으며 유리 모듈에서는 8.15%~16.50%로 나타나 두 유형의 모듈의 발전효율은 유사한 분포를 보였다.

4.2. 모듈 온도상승에 따른 발전성능 변화

Fig. 8.은 측정된 데이터를 기반으로 각 모듈의 표면온도 대비 발전효율을 나타낸 산점도이다. 전반적으로 표면온도가 상승할수록 모듈의 발전효율은 저하되는 양상을 보인다. 표면온도 상승에 따른 발전효율 변화를 정량적으로 파악하기 위해 각 모듈의 온도계수를 산출하였다. 온도계수는 발전성능에 영향을 미치는 변수들을 통제하고 특정 온도에서의 관측된 효율을 이용하여 계산하는 것이 타당하다.

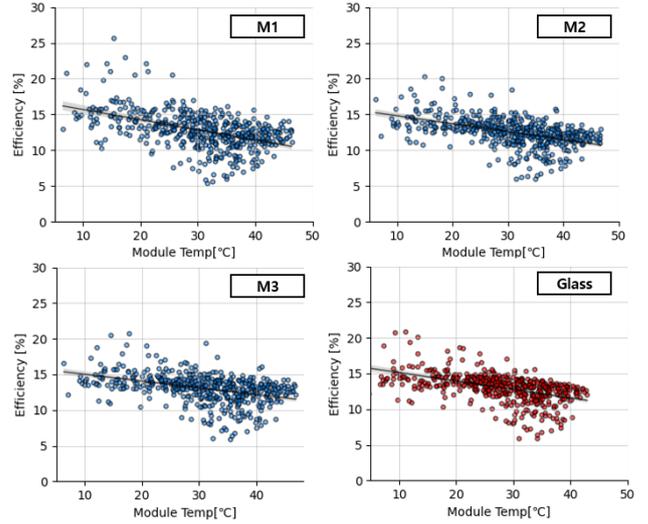


Fig. 8. Relationship between module surface temperature and module power generation efficiency

하지만 본 연구는 실제 옥외조건의 현장 장기 성능 검증을 주 목적으로 한다. 이에 따라 다량의 데이터에서 각 온도의 대표성을 갖는 모듈 효율 산출을 위해 선형회귀를 이용하였다. 선형회귀를 통해 온도에 따른 발전효율 직선을 생성한 후, 해당 직선의 표면온도 25°C의 발전효율 대비 표면온도 26°C에서의 발전효율 감소량을 이용하여 Eq. 2를 통해 각 모듈의 온도계수를 산출하였다.

$$\frac{\bar{E}_{PV,26^{\circ}\text{C}} - \bar{E}_{PV,25^{\circ}\text{C}}}{\bar{E}_{PV,25^{\circ}\text{C}}} \times \frac{100\%}{1^{\circ}\text{C}} \quad (\text{Eq. 2})$$

여기서,

$$\bar{E}_{PV,T}: \text{온도 } T \text{에서 발전효율 } [\%]$$

측정 데이터에 기반하여 각 모듈의 온도계수를 산출한 결과, PC 모듈인 M1과 M2 그리고 M3의 온도계수는 각각 -0.140%/°C, -0.112%/°C, -0.096%/°C로 나타났으며 유리 모듈의 온도계수는 -0.118%/°C로 집계되었다.

제시된 결과를 이용하여 PC 모듈과 유리 모듈의 온도특성을 비교하였을 때, 3개 PC 모듈의 평균 온도계수 -0.116%/°C와 유리 모듈의 온도계수 -0.118%/°C의 상대 편차는 2% 미만으로 미미한 차이를 나타내었다.

5. 결론

본 연구는 PC 모듈을 대상으로 시스템 운영에 따른 성능변화 및 온도에 따른 발전성능을 검토하기 위해 태양광 모듈 테스트베드 시설을 이용한 장기측정 실험을 실시하고 측정된 데이터를 기반으로 모듈의 운영시간에 따른 발전효율 변화 및 온도변화에 따른 발전성능을 평가하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) PC 모듈 운영시간에 발전성능 저하는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다. 1년 6개월의 장기 측정데이터를 이용하여 PC 모듈의 발전효율을 검토한 결과, 계절에 따른 발전성능의 변화는 다소 있었다. 하지만 동일 계절상의 데이터를 비교하였을 때, 발전성능의 차이는 타 모듈들과 유사한 수준으로 나타나 경년변화에 따른 발전성능 저하는 허용 가능한 수준으로 확인되었다.
- (2) 전체 측정 데이터에 기반하여 PC 모듈의 발전효율을 확인한 결과, 기존 유리 모듈과 PC 모듈의 발전효율 분포는 근소한 차이를 보여 PC 모듈 또한 안정적인 발전성능을 유지하는 것으로 확인되었다. 발전 효율분포의 표준편차 또한 PC 모듈과 유리 모듈의 분포는 유사한 경향을 보여 PC 재질 커버에 따른 발전성능 저하는 발생하지 않는 것으로 나타났다.
- (3) PC 모듈의 온도특성에 따른 발전성능 변화는 기존에 상용되는 유리 모듈과 유사한 것으로 나타났다. 측정 데이터에 기반하여 PC 모듈과 유리 모듈의 온도특성을 비교한 결과, PC 모듈의 온도계수와 유리 모듈의 온도계수의 편차는 미미한 차이를 보였다.

본 연구의 결과들은 옥외조건에서의 장기 실측 데이터를 기반으로 성능 검증이 도출되었기 때문에, 향후 경량화 목적으로 추진되는 PC 등의 다양한 플라스틱 소재가 적용된 PV 모듈의 개발과정에 유용하게 활용될 것으로 기대한다.

한편 본 연구는 모듈 후면이 외기에 완전 개방된 형태로 남향 수직면 설치 조건을 대상으로 성능 검증이 이루어졌다. 보다 다양한 조건의 실측 성능 검증을 위해 향후 후면 밀폐 또는 가변적 통기 조건과 설치 각도의 변화를 대상으로 플라스틱 모듈의 장기성능에 대한 실험 및 해석 연구가 진행될 예정이다.

Acknowledgement

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부의)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 202030300100200, 건물 적용 가능한 강판일체형 태양광 모듈 개발).

이 성과는 정부(과학기술정보통신부의) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A2C1092138).

References

- [1] 원동규, 이병식, 주희천, 신재생 에너지 지원정책 현황 및 동향 분석 -태양광 발전을 중심으로-, 한국혁신학회지, 제12권 제3호, 2017.08, pp.83-115. // (D.K. Won, B.S. Lee, H.C. Ju, Analysis on status and trend of supporting policies for renewable energies, Journal of Korea Society of Innovation, 12(3), 2017.08, pp.83-115.)
- [2] IEA (International Energy Agency), Electricity 2024, <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>, 2025.01.06.
- [3] 윤중호, 건물일체형 태양광 발전 (BIPV) 기술 동향, 전기전자재료학회논문지, 제27권 제1호, 2014.01, pp.1-7. // (J.H. Yoon, The state of the art in BIPV Technology, Journal of the Korean Institute of Electrical and Electronic Material Engineers, 27(1), 2014.01, pp.1-7.)
- [4] E. Holton et al., Cost and market analysis of integrative lightweight PV systems for low-slope commercial rooftops, 2014 IEEE 40th

- Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014, pp.2740-2742.
- [5] D. Metacarpa et al., Reduced balance of system costs using lightweight photovoltaics integrated with roofing material membranes, 2015 IEEE 42nd Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2015, pp.1-4.
- [6] 신우균 외 4인, ETFE 필름을 적용한 태양광 모듈의 전기적 출력 및 신뢰성에 관한 연구, 한국태양에너지학회 논문집, 제40권 제4호, 2020.08, pp.13-22. // (W.G. Shin et al., Electrical output and reliability of photovoltaic module using ethylene tetrafluoroethylene film, Journal of the Korean Solar Energy Society, 40(4), 2020.08, pp.13-22.)
- [7] A.C. Martins et al., Robust glass-free lightweight photovoltaic modules with improved resistance to mechanical loads and impact, IEEE Journal of Photovoltaics, 9(1), 2019.01, pp.245-251.
- [8] A.C. Martins et al., Thermo-mechanical stability of lightweight glass-free photovoltaic modules based on a composite substrate, Solar Energy Materials and Solar Cells, 187, 2018.12, pp.82-90.
- [9] A. Halbe et al., Evaluation of mounting mechanisms for the installation of lightweight PV systems on commercial rooftops, 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2014, pp.3539-3542.
- [10] C. Honeker et al., Reducing installed costs of residential solar by the use of adhesive mounted lightweight solar modules, 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2016, pp.3135-3140.
- [11] A.C. Martins et al., Ultra-lightweight PV module design for building integrated photovoltaics, 2017 IEEE 44th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), 2017, pp.2104-2108.
- [12] M.J. Park et al., Shingled design lightweight photovoltaic modules using honeycomb sandwich structures as backsheets, Solar Energy Materials and Solar Cells, 278, 2024.12, 113152.
- [13] N. Wöhrle et al., Solar cell demand for bifacial and singulated-cell module architectures, Photovoltaics International, 36, 2017, pp.48-62.
- [14] International Electrotechnical Commission, IEC 60904-3:2016, IEC, 2016.
- [15] Apogee Instruments, New ISO 9060:2018 pyranometer classifications, https://www.apogeeinstruments.com/content/ISO_9060_Apogee_Comparison.pdf, 2025.01.06.