건물일체형 태양광발전(BIPV) 시스템 실증분석 및 열성능 평가

조가영^{1†} · 엄재용² · 오민석³ · 김의중⁴

¹서울기술연구원 스마트도시연구실, 수석연구원

²(주)이건창호 창호개발팀, 수석

³(주)대진 기술연구소, 연구소장

⁴인하대학교 건축학부, 교수

Empirical Analysis and Thermal Performance Evaluation for Building Integrated Photovoltaic System

Cho Ga Young^{1†} · Eom Jaeyong² · Oh Min-seok³ · Kim Eui-Jong⁴

¹Principal Researcher, Seoul Institute of Technology, Department of Smart City Research

²Senior Manager, Technical Division, EAGON Windows&Doors Co., Ltd

³CTO, R&D Division, DAEJIN

⁴Professor, Department of Architectural Engineering, Inha University

[†]Corresponding author: zec@sit.re.kr

Abstract

The Seoul Metropolitan Government announced a comprehensive plan for “Solar City, Seoul,” which is aimed at 1GW of power for 1 million households by 2022. Subsidies for the installation of BIPV(Building Integrated Photovoltaic Systems) in private buildings were expanded in 2020. It is therefore necessary to consider the building-integrated photovoltaic performance to harmonize with urban landscapes using renewable energy sources to realize zero-energy buildings. A field experiment was conducted to investigate the conditions of the BIPV, and the performance impact factors were analyzed. The results showed that the general glass, BIPV intermediate space, and internal surface of the BIPV temperature increased when insulation was added to the BIPV back panel in the spandrel part. The temperature increase in the Spandrel part is mainly caused by solar radiation, and the intermediate space temperature of the general glass rises higher than that of the BIPV module installation. The performance of the BIPV system was evaluated through a simulation. The simulation results showed that the temperature of the solar cell during BIPV generation depended on the energy balance of the effective solar radiation and ambient temperature. In the future, a comprehensive review of the module and material performances, such as the power generation and efficiency, will be required based on experimental verification.

Keywords: 건물일체형태양광시스템(Building Integrated Photovoltaics), 제로에너지건축물(Zero Energy Building), 신재생에너지(Renewable energy), 태양광발전(PhotoVoltaic)

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.1, pp.69-77, February 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.1.069>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 5 October 2020

Revised: 19 January 2021

Accepted: 20 January 2021

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.

1. 서론

서울은 도시화 등 지리적, 환경적 제약으로 도입 가능한 신·재생에너지가 제한되어 있다. 따라서 2020년까지 원전 1기 용량인 1 GW에 해당하는 태양광 설비용량을 설치하고, 태양광 참여가구를 100만 가구를 목표로 하는 ‘태양의 도시, 서울’ 종합 계획을 발표(2017.11)¹⁾하여 건물 지붕, 입면, 주차장 가용 공공부지 등 다양한 적용 방안을 고려하여 태양광 중심의 재생에너지 정책을 확대 추진 중이다. 제로에너지건축물 의무화가 본격적으로 진행됨에 따라 신재생에너지원으로 도시경관과 조화가 되도록 건축 외장재에 태양광 모듈을 접합하여 건축자재로서 태양광 에너지를 얻을 수 있는 건물일체형 태양광시스템(BIPV: Building Integrated Photovoltaic Systems)도 주목받고 있으며, 국내 환경 여건에 맞는 발전성과 효율 등에 대한 성능검증이 요구된다. 이에 서울시는 선제적으로 “서울특별시 녹색건축물 설계기준(‘19.2.24)’²⁾에서는 연면적 3,000 m² 이상 신축건물의 경우 태양광 발전 설비 의무비율을 설정하였다. 또한 “서울특별시 건물일체형 태양광(BIPV) 보급 민간 시범사업(20.2.28 (1차), 8.24 (2차))”³⁾ 및 “서울시 신재생에너지 생산량 산정 지침(20. 3. 26)”⁴⁾을 통하여 BIPV 설치 면적 산정기준을 신설하여 다양한 BIPV의 보급이 가능한 정책을 펼치고 있다.

따라서 본 연구에서는 본격적인 BIPV 보급확산에 앞서서 태양전지 모듈을 건축물 외장재로 결합시키는 경우, 효율적으로 열을 분산하는 방안을 모색하기 위하여 건물 입면 요소로서 건물일체형 태양광 설계와 운영단계에서 태양광 패널의 후면 발열 및 발전량에 대하여 현장 실증과 관련 열성능평가를 통하여 현장 상황 검토를 하였다. 이에 BIPV 온도 및 발전량 성능검증을 위하여 보편적으로 공공건축물에 적용된 결정질 실리콘(c-si) 태양광 전지(solar cell)를 이용한 G-to-G(Glass-to-Glass) 복층 BIPV 모듈을 대상으로 실증분석을 실시하였다. 실험을 통한 현장 측정 데이터는 1년 365일에 대하여 시뮬레이션 모델이 실제 현장 상황을 구현할 수 있도록 최적화를 진행하였다.

2. BIPV 실증 개요

2.1 BIPV 실증대상 현황

BIPV 시스템 현장 실증 대상으로는 BIPV 온도와 발전량의 현장 측정을 위하여 다음과 조건을 고려하여 실증 대상을 선정하였다. “① c-Si Solar Cell을 이용한 G-to-G 복층 BIPV 모듈 설치, ② 건물 입면의 스펠드럴 구간에 백판넬 단열재 시공, ③ BIPV 모듈 설치 부분에 대하여 실내 및 외부에서 접근 가능, ④ BIPV 모듈 설치 부분에 대한 발전량 확인이 가능한 곳, ⑤ 현장 측정을 위한 BIPV 모듈 설치 부분에 대한 일부 해체 가능 여부, ⑥ 건물 주향이 남향으로 음영 관련 요소가 없는 곳, ⑦ 현장 측정 기간 동안 건물 출입이 자유롭고 측정 공간의 안전이 확보된 곳, ⑧ 현장 도서 및 관련 자료 지원이 가능한 8가지 조건을 고려하였다.”⁵⁾ 위의 조건을 만족하는 건물은 Fig. 1과 같이 인천에 위치한 국가 R&D 실증 건물로 결정질 실리콘(c-Si:Crystalline silicon) BIPV 모듈뿐만 아니라 비정질 박막 실리콘(a-Si, Amorphous Silicon) BIPV 모듈과 고효율 PV 모듈이 건물외피의 다양한면에

복합적으로 설치가 되어 향후 연구의 연계가 가능한 점을 고려하였으며, 서울과 지리적으로 근접하고 Table 1에 나타난 바와 같이 기후 측면에서도 유사한 점을 바탕으로 본 건물을 실증대상으로 고려하였다⁵⁾.

BIPV 모듈 남쪽 파사드의 스펀드렐(spandrel) 부문에 결정질 실리콘(c-si) 모듈이 총 58개가 설치되어 있으며, 모듈의 크기는 1.034 m^2 , 정격 전력은 116 Wp, VMPP 는 14.2V, IMPP는 8.17 A(표준시험조건(STC), 일사량 = 1000 W/m^2 , 대기질량정수 = 1.5 G, 태양전지온도 = 25°C), 모듈 용량은 6.728 kW 로 11 kW급 인버터에 연결된 시스템으로 구성되어 있다⁷⁾. 본 건물의 BIPV의 발전량은 '19년 11월에 발전량은 263 kWh/month이며, 19년 1월부터 19년 11월까지의 누적 발전량은 3,162 kWh이다. 태양광 모니터링 시스템의 데이터를 통하여 해당 인버터 출력 및 발전량 데이터를 구하여 시뮬레이션 검토에 활용하였다.

Location	Incheon Metropolitan City
Ground area	9,000.00 m^2
Building area,	4,466.63 m^2
Total floor area	17,932.11 m^2
Building coverage	49.63%
Floor area ratio	199.25%
Application	Office Building
Structure	Reinforced concrete
Number of floors	B1 F, 15 F
Height	65.1 m
Floor height	3.9 m
Finishing	Wall AL. SHEET
Material	Window T24 low-E Double glass

Fig. 1 Building characteristic and BIPV Module Installation Location

Table 1 Comparison of Climate Conditions between Seoul and Incheon (KMA)⁶⁾

Area	Tem.ave [$^\circ\text{C}$]	Tem.high [$^\circ\text{C}$]	Tem.low [$^\circ\text{C}$]	Cloud amount [%]	Sunshine duration [hr]	Percentage of sunshine [%]	Precipitation [mm]	Wind velocity [m/s]
Seoul	7.6	22.1	-4.6	4.1	203.2	66	78.8	2.2
Incheon	8.2	19.9	-2.7	4.2	205.3	67	89.4	3.0

2.2 BIPV 실증 방법

측정기간은 19년 11월 8일 ~ 19년 12월 15일 동안 진행, Fig. 2 ~ Fig. 3과 같이 외기온도, BIPV 모듈 외부 온도, BIPV 모듈 내부 온도, 중공층 온도, 반자공간 내부 온도, 실내 온도, 일반 유리 내부 온도, 일반 유리 외부 온도, 일사량을 측정하였으며, 비교군을 위하여 건물에 적용된 일반유리에 비드법 1종(스티로폼 단열재) 단열재를 백패널에 시공하여 건물일체형 태양광 패널과 일반유리의 후면의 온도를 비교 분석하였다.

Fig. 3과 같이 스펀드럴 부분에 위치한 BIPV가 설치 된 중공층 온도를 측정하기 위해서 Fig. 4에 나타난 바와 같이 ① 실내공간에서 상부 마감재인 반자를 제거 해체하고 ② BIPV 모듈 설치 부분의 후면 백판넬 타공하여 외 피제거 한 후 그라스울을 제거, 내측 타공을 하고 ③ BIPV 모듈 후면 유리 표면 및 중공층(BIPV 모듈과 백판넬 사이공간) 온도 측정을 위하여 열전대(Thermocouple) 설치 후 역순으로 마감하였다.

Fig. 2 Temperature measurement location on the south vertical section

Fig. 3 Measurement location of BIPV and Glass

Fig. 4 Field measurement device installation process

3. BIPV 시스템 현장 실증 결과 분석

분석결과는 11월 28일의 경우, Fig. 5와 같이 수직면 직달 일사량은 700 W/m^2 미만이며, BIPV 모듈의 외부 표면 온도는 50°C 미만으로 일반유리의 온도에 비해 약 10°C 높게 나타났다. 일반유리의 경우에는 일사투과 영향으로 내부 유리 온도가 외부 유리 온도보다 높게 나타났다. 중공층의 온도는 50°C 이하로 BIPV 모듈 내부 표면 온도보다 낮게 나타났다. 일반유리 내부표면온도는 오전에는 BIPV 모듈의 내부표면온도보다 더 빠르게 상승하지만 정오가 지나면서부터는 역전되며, 천정 반사공간의 내부 온도는 실내온도와 비슷한 패턴을 보였다.

12월 14일에 일반 유리의 경우는 내부표면 온도, 중공층 온도, 외부표면 온도 순으로 높은 경향을 보이며, 중공층의 경우는 최대 66°C 까지 온도가 상승하였다. 모듈에서는 내부표면온도가 중공층온도보다 높은 양상을 보여 일반유리와 유사하였으나, 중공층의 최대 온도는 일반유리보다 낮은 47°C 로 나타났다. 오전 11시 이전까지는 외부 표면온도의 온도가 중공층 온도보다 높다가 그 이후 역전되는 것을 볼 수 있으며, 이는 BIPV 모듈이 불투명하여 모듈의 온도가 먼저 올라가고 이후에 내부 표면 온도와 중공층 온도가 상승하기 때문이다. 실측 기간 동안 데이터의 자료 중 일사조건이 좋은 12월 14일 데이터를 가지고 Fig. 6과 같이 분석하였으며, 이를 토대로 1년 365일에 대한 시뮬레이션 분석을 통한 최적화 데이터로 활용하고자 한다.

Fig. 5 Field Measurement Data (11/28)

Fig. 6 Field Measurement Data (12/14)

4. 시뮬레이션을 통한 BIPV 시스템 성능평가

4.1 실측 데이터 기반 물리 모델 최적화

본 연구에서는 TRNSYS 17에서 제공하는 Type 567 – BIPVT 모델을 사용하였으며 실증 건물의 BIPV의 설계 및 시공 정보를 바탕으로 초기의 물성치를 구하고, 11월 8일부터 실제 현장을 측정하였던 데이터를 시뮬레이션 모델이 묘사 가능하도록 최적화를 진행하였다.

TRNSYS TESS 라이브러리에서 제공하는 TRNOPT 컴포넌트를 사용하여 최적화를 하였으며, TRNSYS 플랫폼에서 TRNOPT는 GenOpt 최적화 프로그램을 사용할 수 있도록 연동해주는 모듈로서 여러 공학분야에

서 단일목적함수를 갖는 최적화 설계에 사용된다⁸⁾. 본 연구에서는 TRNOPT가 제공하는 알고리즘 중에서 PSO(Particle Swarm Optimization) 반복적 최적화 알고리즘을 사용하였으며, PSO 알고리즘은 지정된 일정 수의 그룹(Swarm) 개체(Particle)를 바탕으로 최적해를 광범위하게 탐색해나가는 최적화 알고리즘으로써 설계변수와 목적함수, 그리고 설계변수의 하한값(Min)과 상한값(Max) 및 초기값(Initial)을 지정하여 사용한다^{5,8)}. 목적함수는 BIPV 모듈 표면 온도(cover temp.) 및 중공층의 온도(channel temp.) 시뮬레이션 값과 실측값과 같도록 식(1)과 같이 정의하였다.

$$\min f(x) = \sum_{start}^{stop} (|T_{PVsur, sim} - T_{PVsur, measured}| + |T_{chan, sim} - T_{chanl, measured}|) \quad (1)$$

4.2 BIPV 시스템 시뮬레이션 및 시스템 성능평가

최적화는 11월 14일과 11월 28일 실측된 데이터에 대하여 1시간 간격으로 시뮬레이션을 실시하였으며, BIPV 모델 Type 567의 최적화 결과는 Table 2와 같다. 최적화 결과는 중공층 내표면 방사율과 일사 흡수투과율, 모듈 커버 방사율 및 후면부재의 초기값과 비교하였을때 최적화를 통해 얻어진 값과 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이것은 설계 변수의 민감도에 있어서 시뮬레이션 모델의 열적 거동에 경미한 영향을 주는 것으로 여겨진다. 반면 모듈 커버의 열전도도, 외부 대류 열전달계수와 보정계수(α)의 경우에는 매우 민감한 변수로 보여진다. 특히, TRNSYS Type 567 BIPV 모델의 보정계수 최적화 결과로 실제 거동을 적용하기 위해 천공 복사 온도에 대한 외기 온도보다는 커버 표면의 온도 영향을 증가시키는 방향으로 최적화가 이루어졌음을 알 수 있다.

Table 2 RMSE according to the measurement date

Cases		BIPV cover surface temp.		BIPV channel temp.	
		RMSE	%RMSE	RMSE	%RMSE
1 min	11/14	3.4°C	0.89%	8.9°C	0.54%
	11/28	3.9°C	0.35%	11.2°C	0.72%
1 hr	11/14	2.7°C (Optimizing reference)	1.36%	8.2°C (Optimizing reference)	0.48%
	11/28	3.2°C	0.25%	10.2°C	0.55%

최적화 과정을 통해 얻은 BIPV 모델의 변수들을 바탕으로 Fig. 7 ~ Fig. 8은 11월 14일과 11월 28일 1분과 1시간 간격으로 측정된 데이터와 시뮬레이션 값을 비교한 결과이다. TRNSYS Type 567 BIPV 모듈에 대한 시뮬레이션 결과, 실측 데이터에 대하여 1분 단위로 매우 근접하게 묘사하고 있음을 알 수 있다. 단, 중공층의 온도는 측정값과 시뮬레이션 값을 비교해본 결과 약 1시간 지연 효과가 나타남을 알 수 있다. RMSE와 오차비율을 나타내는 %RMSE는 다음 식(2)와 식(3)을 바탕으로 결과값을 Table 2에 나타냈다.

Fig. 7 Comparison of simulation results of optimized BIPV models (1 minute)

Fig. 8 Comparison of simulation results of optimized BIPV model (1 hour average data)

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_1 - X_2)_i^2}{n}} \quad (2)$$

$$\% \text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{X_1 - X_2}{X_2} \right)_i^2}{n}} \quad (3)$$

Table 2는 11월 14일 1시간 단위로 변환한 데이터를 대상으로 최적화를 진행한 모델 파라미터를 다른 케이스에 적용한 결과를 나타낸 것으로, 전체적으로 최적화가 이루어진 케이스와 유사한 오차를 보였다. 이는 기본적으로 물리모델 기반 최적화가 이루어졌기 때문에 예측 기간이 달라도 적절한 수준의 예측이 이루어진 것으로 판단한다.

5. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 실증결과 스펀드렐(Spandrel) 구간에서의 온도의 상승의 원인은 일사량에 의한 요인이 주된 원인이며,

일반유리에서는 설치 부문의 중공층 온도가 BIPV 모듈 설치 부문보다 더 높게 상승하였다. BIPV 모듈에서는 태양전지에서 발전 시 발생하는 발열량 보다는 태양전지의 불투명한 특성에 의해 외부의 일사에너지가 차단되어 중공층의 열적특성에 영향을 더 미치는 것으로 나타났다.

- (2) 건물일체형 태양광(BIPV)이 발전을 할 경우, 태양전지 온도가 입사하는 일사량에서 발전량을 제외한 유효 일사량과 주위 온도의 에너지 밸런스에 의해 정해진다. 따라서 태양전지의 온도 상승은 태양전지 패널에서 흡수되는 일사량에 의한 것이 주된 영향으로 나타났다.
- (3) 일반적인 BIPV 패널인 (외부)Glass-Solar Cell-Glass-Air-Glass(실내)로 이루어진 구성에서 스펀들(Spandrel) 부문 같이 실내 측에 추가적으로 중공층과 단열재가 시공 된 경우에는 BIPV 셀에 가까운 외기온도에 의하여 냉각효과가 나타나며, 열전달계수에 의하여 온도가 크게 변하는 것으로 나타났다.
- (4) 본 연구에서는 BIPV 패널에 대해서 단기간 실증된 데이터 값과 결과를 가지고 파라미터(parameter) 최적화 방식을 이용하여 모델을 보정하였으며, 보정된 모델을 사용하여 장기간에 대해서는 시뮬레이션을 수행한 것으로, 연구 결과는 실증기간의 환경조건이 주로 반영된 결과이다.

서울시(서울기술연구원)에서는 지자체 최초로 공공건축물을 대상으로 태양광 신기술 실증단지를 운영⁹⁾ 중이다. 따라서 향후 본 연구를 토대로 서울시 태양광 설비설치 관리 업무매뉴얼(2019)¹⁰⁾에서 국내 표준을 준용하면서도 BIPV 건재재 성능을 보완하고자 결정질 실리콘(c-si) 이외에도 다양한 BIPV 태양광 패널에 대하여 지속적으로 실증데이터를 통하여 태양광 기술 선정, 검증 보급 등 전 과정을 지원하는 방안을 마련하고자 한다.

후 기

본 연구는 서울기술연구원의 연구비 지원으로 수행되었음(과제번호:19-4-3, 2020-AD-005).

REFERENCES

1. Seoul Metropolitan Government, Comprehensive plan for “Solar City, Seoul” for 5years, <https://opengov.seoul.go.kr/sanction/14336800>, 2017, (last accessed on 15, December, 2020).
2. Seoul Metropolitan Government, The Standard of Green Building Design in Seoul, 2019, https://legal.seoul.go.kr/legal/front/page/lawmake.html?pAct=lawmake_view&pLawmakeNo=25202016, (last accessed on 29, November, 2020).
3. Seoul Metropolitan Government, The private pilot project of Building Integrated Photovoltaic system(BIPV) supply, 2020, http://solarmap.seoul.go.kr/notice/detailFormNoticeU.do?bbsctt_no=152&currPage=1, (last accessed on 20, September, 2020).
4. Seoul Metropolitan Government, Guidelines for Estimation of Renewable Energy production in Seoul, 2020, <http://news.seoul.go.kr/snap/doc.html?fn=5c4ac2ab534954.51914010.hwp&rs=/wp-content/blogs.dir/23/files/2013/03/>, (last accessed on 20, September, 2020).
5. Cho, G. Y., Performance Evaluation and Application of the Building Integrated Photovoltaic System, Seoul Institute of Technology, 2019.

6. KMA, Korea Meteorological Administration, ASOS (Automated Synoptic Observing System), <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36>, (last accessed on 20, December, 2019).
7. Cho, G.Y., Green New Deal for Zero Carbon City Application of Integrated Building Photovoltaic Technology, Technical Excellence Vol. 6, Seoul Institute of Technology, 2020.
8. Ha, S. W., Park, S H., Eom, J. Y., Oh, M. S., Cho, G. Y., and Kim, E. J., Parameter Calibration for a TRNSYS BIPV Model Using In Situ Test Data, Energies, Vol. 13, No.18, 4935, 2020.
9. Seoul Institute of Technology, Demonstration Project for Solar Technology, 2020, <http://www.seoul-tech.com/web/board/boardContentsView.do>, (last accessed on 20, September, 2020).
10. Seoul Metropolitan Government, The manual of Photovoltaics Installation and Management, 2019, <https://opengov.seoul.go.kr/sanction/18811183?from=cis&tid=30121>, (last accessed on 20, December, 2020).