루버일체식 양면형 태양광 모듈의 건축적 활용을 위한 연간 발전량 실험 분석

조경주^{1*} · 조동우²

¹한국건설기술연구원, 전임연구원

²한국건설기술연구원, 선임연구위원

Experimental Analysis on Annual Power Generations of Louver-integrated Bi-facial Photovoltaic Modules for Architectural Applications

Cho Kyung-Joo^{1*} · Cho Dong-Woo²

¹Research Specialist, Department of Building Energy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Senior Research Fellow, Department of Building Energy Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

[†]Corresponding author: kyungjoocho@kict.re.kr

Abstract

Solar power systems are the most commonly used renewable energy systems for energy self-sufficiency in buildings. In particular, bifacial photovoltaic modules for solar power generation have been researched for their optimal application, as they can generate electricity from two sides using only a single frame. In addition, because the price of a bifacial photovoltaic module is approximately 20% higher than that of a single-sided module, installing bifacial photovoltaic modules in suitable locations on buildings can be economical. To date, most studies have primarily focused on how to increase the amount of power generation from rear cells by arranging materials with high reflectivity on the floors of buildings. In point of fact, when bifacial photovoltaic modules are arranged in an east-west orientation, the maximum amount of power can be obtained in the mornings and afternoons. However, when these modules are installed in buildings in this orientation, a shadow is produced on the building surface according to the trajectory of the sun. In addition, when photovoltaic modules are used in the building envelope, the amount of power generation is often reduced because of this shadow. Nevertheless, even when considering this reduction in power generation, if the total power generation is higher than when photovoltaic modules are installed only vertically, the self-sufficiency rates of buildings can be improved. In this study, the shadow of a bifacial photovoltaic module was simulated using vertical photovoltaic modules to consider the possibilities of architectural application of bifacial photovoltaic modules.

Keywords: 양면형 태양광 모듈(Bi-facial photovoltaic module), 건물일체형태양광발전(Building-integrated photovoltaic module), 제로에너지건물(Zero Energy Buildings), 동서방향 배치(East-west orientation), 연간 발전량(Annual power generation)

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.42, No.1, pp.47-56, February 2022
<https://doi.org/10.7836/kjes.2022.42.1.047>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 10 October 2021

Revised: 25 October 2021

Accepted: 9 November 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

정부가 2021년 3월 확정된 탄소중립 기술혁신 추진전략에 따르면, 탄소중립을 위한 10대 핵심기술에 태양광 및 풍력 그리고 건물 효율이 포함되어 있다¹⁾. 여기서 건물 효율 부문의 목표는 건물 에너지 효율을 2030년까지 30% 향상시키는 것이며 이는 현재 공공건물의 신축 허가를 위해 의무적으로 획득해야하는 제로에너지건축물 인증과 연계되어있다²⁾.

녹색건축물 조성 지원법에 따르면 ‘제로에너지건축물’이란 건물에 필요한 에너지 부하를 최소화하고 신에너지 및 재생에너지를 활용하여 에너지 소요량을 최소화하는 녹색건축물을 말한다³⁾. 이 제로에너지건축물로 인증받기 위해서는 공인된 프로그램을 통해 계산된 해당 건축물 1차에너지소요량의 20% 이상을 자체적으로 생산할 수 있어야한다.

태양 전지는 건축물의 에너지 자립을 위해 가장 일반적으로 적용되는 신재생에너지 시스템이나 태양의 고도 등에 의해 발전 성능에 큰 차이가 나는 특징이 있다⁴⁾. 특히 건축물에 이 태양 전지를 설치하는 경우, 해당 건축물의 지붕을 제외한 부위에는 태양광 모듈을 최적 각도로 설치하기가 어려워 건축물의 에너지 자립률을 높이는 것이 용이하지 않은 상황이다. 현재 태양광 모듈을 이용해 건축물의 에너지 자립률을 향상시키기 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며, 그 중 활발히 연구되는 아이템 중 하나가 양면형 태양광 모듈이다. 양면형 태양광 모듈은 기존의 단면형 모듈과는 달리 전극을 양면에 적용하여 후면 셀에서도 발전이 가능하다. 태양광 기술 국제 로드맵에 따르면 이 양면형 태양광 모듈에 대한 수요는 지속적으로 증가할 것이며 2028년 시장 점유율이 40%에 달할 것으로 분석됐다⁵⁾. 최근 태양광 모듈의 시장 가격이 과거에 비해 하락하며 태양광 모듈 가격 자체보다 그 구조물 가격이 더 높은 비중을 차지하게 되었다⁶⁾. 양면형 태양광 모듈의 경우 하나의 프레임으로 두면에서 발전이 가능하고 모듈 자체의 가격도 단면형과 비교해 약 20% 정도 높은 편이라 적절한 장소에 설치된다면 경제성이 있을 것으로 판단된다⁷⁾.

건축물에 태양광 모듈을 설치할 때 옥상 설치를 제외하고는 건물의 수직 벽체에 마감재 대신 설치하는 경우가 많은 편인데 남향으로 설치할 경우 제일 발전량이 높다⁸⁾. 태양광 모듈을 남향 수직으로 설치하는 경우 오전에는 발전량이 낮다가 태양고도가 정남에 가까울 때 발전량이 높아지고 다시 오후가 되면 그 발전량이 낮아지는 형태의 포물선을 이루게 되고 최적 각도로 설치된 태양광 모듈과 비교했을 때 약 60 ~ 63%의 발전량을 보여준다⁹⁾. 양면형 태양광 모듈을 동서로 설치하면 오전과 오후에 발전량이 최대가 될 것이며 오전과 오후의 태양광을 남향 수직 배치에 비해 더 효율적으로 이용할 수 있게 된다. 기존 연구에 따르면 이때 양면의 발전량 합계는 남향 수직형 단면 태양광 모듈의 발전량보다 더 높을 수 있다¹⁰⁾.

양면형 태양광 모듈에 대한 연구는 여럿 존재하지만 주로 바닥에 반사율이 높은 재료를 배치하여 그 반사광에 의해 후면의 발전량을 상승시키는 연구가 많고¹¹⁻¹³⁾ 동서로 배치했을 때의 발전량에 대한 연구는 매우 드문 편이다. 이에 양면형 태양광 모듈을 동서로 배치했을 경우의 발전량을 실제 현장실험을 통해 계절별로 분석하여 제로에너지건축물 달성을 위한 디자인 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 연구의 방법

2.1 실험 조건

동서로 배치된 태양광 모듈은 태양의 궤적에 따라 주변에 그림자를 만들어 인근에 남향 수직형으로 배치된 태양광 모듈이 설치되어 있을 경우 그 발전량을 저하시킬 수 있다. 하지만 동서 배치형 모듈을 추가 설치하는 경우의 발전량이 발전량의 저하를 감안하고도 남향 수직형 태양광 모듈만 설치하는 것보다 높다면 이는 건물의 자립률 향상에 도움이 될 수 있다. 이에 본 연구에서는 동서 방향으로 설치된 루버일체식 양면형 태양광 모듈(이하 LIPV (Louver-integrated photovoltaic))과 남향으로 설치된 창호일체식 태양광 모듈(이하 WIPV (Window-integrated photovoltaic))을 인접 배치하여 LIPV의 그림자가 WIPV의 발전량에 영향을 미치게 하였다. 태양의 고도는 계절별로 차이가 크기 때문에 LIPV의 발전량이 LIPV의 그림자로 인해 감소된 WIPV의 발전량을 초과할 정도로 많을 수도 있지만 WIPV만 설치하는 것이 더 이득인 시기가 존재할 수 있다. 이에 연간 발전량을 측정하여 분석하기로 하였다.

(a) Photo

Fig. 1 Chambers with LIPV and WIPV Installation for experiments

본 연구를 위해 2,500 mm × 2,500 mm × 2,500 mm 사이즈의 챔버 2식을 설치하고, 남향인 전면 창호의 하부에 WIPV를, 두 챔버의 사이에 LIPV를 설치하였다(Fig. 1). 본 챔버가 설치된 장소는 위도 37.67, 경도 126.74

에 위치한 건물의 옥상이며 북쪽으로 8층 건물이 위치하고 있고, 동, 서, 남측으로는 본 건물보다 높은 건물이 인접 배치되지 않은 형태이다.

본 LIPV의 발전량 분석은 아래와 같은 세가지 조합을 대상으로 수행되었다.

- (1) Case1 : WIPV 2장의 발전량(Fig. 2a)
- (2) Case2 : LIPV를 WIPV 2장 사이에 동서향으로 인접 배치할 경우의 발전량(Fig. 2b)
- (3) Case3 : LIPV의 그림자가 WIPV의 발전량에 영향을 미치지 않도록 거리를 두고 설치했을 경우의 발전량(Fig. 2c)

Fig. 2a의 케이스는 일반적으로 건물 창호나 외벽 등에 적용되는 남향 수직형 태양광 발전시스템을 모사한 것이며 Fig. 2b는 본 연구를 통해 분석하고자하는 케이스이다. Fig. 2c는 그림자가 지지 않는 이상적인 배치의 경우 가능한 발전량을 분석하기 위한 케이스이다.

Fig. 2 LIPV and WIPV analysis cases

태양광 모듈의 발전량에 영향을 주는 요소는 모듈에 조사되는 일사량(일사의 각도, 구름의 양), 모듈 표면온도, 모듈 자체의 성능 등이 있을 수 있다¹⁴⁾. 본 연구에서는 LIPV의 건축적 활용을 위한 월별, 그림자의 영향별 발전량을 분석대상으로 하며 구름의 양과 같은 변수의 개입을 최소화하기 위해 월별로 전운량이 제일 낮은 날을 골라 발전량을 분석하였다. 실험에 적용된 세 모듈은 모두 동일 회사의 동일 제품이며 본 실험 전 자연 일사에서 초기 성능 테스트를 실시하여 그 발전량 차이를 확인하였다. 세 모듈을 남향 수직형으로 배치하고 전운량이 0인 날 초기 발전량 테스트를 실시한 결과, 시각에 따라 0 ~ 2% 이내의 발전량 차이를 보였으나 그 발전량의

합계 차이는 1% 이내인 것으로 확인되었다.

2.2 실험 장비와 실험 방법

본 연구에서 실험에 적용한 태양광 모듈은 1,650 mm × 990 mm 크기로 양면형 단결정 실리콘 셀 60개가 직렬 연결되어 있으며 두 장의 투명한 유리 커버로 고정한 제품이다.

메이커에 의해 제공된 스펙은 Table 1과 같다. 본 스펙은 메이커에서 제공한 것으로 공인 시험 수행 결과이나 현재 양면형 모듈에 대한 시험법이 존재하지 않아 전면에 대한 시험만 수행된 결과이다. 후면 셀의 효율의 경우 메이커마다 그 성능이 약간씩 다르지만 대체적으로 후면 셀이 전면보다 낮은 발전효율을 보이는 편이다¹⁵⁾. 메이커에서 제공하는 본 양면형 모듈의 후면 셀 효율은 전면의 약 80 ~ 85% 정도이다.

Table 1 Specification of the PV modules (front cells) for experiments

Specification		I-P, P-V Curve	
Rated power (Pmax) (W)	310±3%		
Rated current (Imax) (A)	9.23		
Rated voltage (Vmax) (V)	33.59		
Short circuit current (Isc) (A)	9.77±3%		
Open circuit voltage (Voc) (V)	39.97±3%		
Efficiency (%)	18.8		
Module size (mm)	1,650 × 990		
Solar cell type	Single Crystal		
Cell's number (EA)	60		

주변 건물 음영으로 인한 영향을 최소화하기 위해 북측에만 고층 건물이 존재하는 건물의 옥상에 본 시험 챔버를 설치하였다. 본 실험을 위해 Fig. 1와 같이 단면형 태양광 모듈(WIPV-W, WIPV-E)을 2채의 실험 챔버 남향 창호에 수직하게 설치하고, 그 사이에 양면형 태양광 모듈을 조립하여 동서로 고정하였다.

본 실험데이터의 측정을 위한 기기는 HPM-300A로 1 V에서 1000 V까지 측정이 가능하고 최대 500 W 범위까지 전력생산량의 측정이 가능하다. 이 기기를 통해 1분 단위로 데이터를 수집하였으며 메이커가 제공하는 측정오차는 ±0.1%rdg이다.

3. 실험 결과

3.1 분석 조건

Table 2는 실험이 수행된 2020년 9월 ~ 2021년 8월 중 월별로 전운량 평균이 최저인 날을 정리한 표이다.

실험 챔버가 설치된 장소에서 제일 가까운 관측소(위도 37.88, 경도 126.77)의 10분위 전운량 데이터로 기상청에서 제공하는 데이터의 평균 값을 활용하였다¹⁶⁾.

Table 2 Days with the lowest TAC per month

Month/Day (2020 year)	TAC*	Month/Day (2021 year)	TAC*	Month/Day (2021 year)	TAC*
09/22	0.6	01/02,16	0	05/09	0.8
10/23,24	0	02/08	0	06/21	3.2
11/10,23,30	0	03/07	0.6	07/23	1.6
12/04,20	0	04/10	0	08/15	0.9

* TAC : Total Amount of Cloud

발전량의 비교를 위한 대표일 선정은 해당 월에 전운량 0인 날이 존재하는 경우는 해당 일의 데이터를 사용하되 전운량 0인 여러 날이 존재하거나 전운량 0인 날이 없는 경우는 아래의 규칙을 따랐다.

- 해당 월 전운량 0인 날이 하루인 경우 해당 일을 대표일로 하고 발전량 분석
- 해당 월 전운량 0인 날이 2일 이상인 달의 경우 해당 일들을 대표일로 하고 발전량 합계의 평균값 분석
- 해당 월 전운량 0인 날이 없는 경우 전운량이 제일 낮은 날을 대표일로 하고 발전량 값 분석

Fig. 3 Power generations of 02/08 and 09/22

Fig. 3는 Fig. 2b 조건에서 WIPV-W, WIPV-E, LIPV 세 모듈의 2월 8일과 9월 22일 전력생산량 그래프이다.

WIPV-W와 WIPV-E 전력생산량이 급격히 상승하거나 떨어지기 시작하는 구간이 있는데 이는 그림자의 영향으로 볼 수 있다. Fig. 3의 A와 B 부위는 LIPV 그림자로 인한 WIPV의 손실 발전량으로 LIPV를 설치하지 않았다면 전력생산량에 반영되었을 부분으로 볼 수 있다. 본 발전량 측정은 Fig. 2b 조건에서 1년 동안 진행되었으며, 실제로 실험을 하지 않은 Case1 (Fig. 1a)과 Case3 (Fig. 1c)의 발전량 분석을 위해 A부분은 WIPV-E 발전량에서 WIPV-W 발전량을 감하고, B부분은 WIPV-W 발전량에서 WIPV-E 발전량을 감한 후 각각 적산하여 손실된 부위를 복원 한 후 분석에 이용하였다.

3.2 분석 결과

Fig. 4는 LIPV와 Case1의 월별 대표일 발전량을 나타내고 있다.

Case1의 경우 월별 대표일 발전량이 0.88 ~ 3.09 kWh로 나타났으며 1,2월 대표일 발전량이 제일 높고 6, 7월 대표일 발전량이 제일 낮았다. 단, 6월과 7월 대표일은 전운량이 각각 3.2, 1.6인 날로 다른 달의 대표일에 비해 전운량이 높아 해당 월의 전운량 0인 날들의 분석 경우보다 발전량이 더 낮게 측정되었을 것이며 본 분석의 한계로 판단된다. 본 분석 조건에서 WIPV의 5 ~ 7월 발전량 평균은 12월 ~ 2월 발전량 평균의 약 35.2%인 것으로 분석되었다.

LIPV의 월별 대표일 발전량은 0.67 ~ 1.28 kWh로 Case1에 비해 변동이 작은 편이며 5,8월 발전량이 제일 높고 11,12월 발전량이 제일 낮았다. 대체적으로 Case 1의 발전량이 LIPV보다 높은 편이었으나 5 ~ 7월의 경우는 LIPV의 발전량과 비슷한 경향을 보였다.

Fig. 4 Power generations of LIPV for a representative day per month

Fig. 5는 Section 3.1에서 정리한 분석 방법을 통해 월별 대표일의 발전량을 케이스별로 정리한 그래프이다. 월별로 차이가 있으나 LIPV 그림자의 영향으로 WIPV 발전량이 줄어드는 경우에도 Case1보다 높은 발전량을

보여주고 있다. 특히 Case1의 발전량이 낮은 5 ~ 7월의 경우 Case1보다 Case2가 87.5 ~ 89.5% 높은 발전량을 보였다.

Case2의 경우 1.67 kWh ~ 3.52 kWh의 발전이 가능한 것으로 분석되었고 Case1에 비해 Case2는 연평균 29.9%의 발전량 상승이 가능할 것으로 분석되었다.

Fig. 5 Power generations for a representative day per month

Table 3은 Case2의 대표일 발전량을 Case1 및 3과 비교했을 때의 분석 결과로 Case1보다 9.4% (12월) ~ 89.5% (7월)의 발전량 상승을 보였고, 그림자로 인해 Case3보다 5.2% ~ 16.7% 발전량 손실을 본 것으로 분석되었다.

Table 3 Analyses of Case2 power generations with Case1,3

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
*Increase (%)	12.3	13.8	25.2	47.5	87.5	87.7	89.5	48.1	31.3	12.6	18.3	9.4
**Decrease (%)	11.7	15.0	12.8	10.0	7.4	5.2	6.4	16.3	15.5	16.7	5.9	12.6

*Increase : Power generation increase of Case2 compared to Case1

**Decrease : Power generation decrease of Case2 compared to Case3

4. 결론

본 연구는 양면형 태양광 모듈을 동서방향으로 배치했을 경우 발전량을 확인하기 위한 실험 연구로 태양고도에 의해 월별로 달라질 수 있는 발전량을 확인하기 위해 1년 동안 실험을 실시하였다. 또한, BIPV로서의 활용

가능성을 확인하기 위해 LIPV의 좌우, LIPV 그림자의 영향을 받는 위치에 WIPV를 설치한 후 발전량 저하를 연구의 범위에 포함하였다.

본 연구의 목적을 달성하기 위해 단면형 태양광 모듈을 남향 수직으로 설치하는 경우(Case1), Case1 사이에 LIPV를 설치하는 경우(Case2), Case1와 LIPV를 그림자의 영향이 없게 떨어뜨려 설치하는 경우(Case3), 총 3가지 경우에 대한 분석을 실시하였다. 분석을 위한 실험은 Case2의 실험 챔버를 통해 실시되었고, Case1과 Case3는 Case2의 데이터를 근거로 복원과정을 거쳐 정리되었다.

본 실험 조건에서 Case1보다 Case2가 (그림자로 인한 발전량 손실을 고려하더라도) 전체 발전량 증가의 측면에서 장점을 가질 수 있었다. 특히, WIPV의 발전량이 현저히 낮아지는 5 ~ 7월의 경우 LIPV 한 장이 WIPV 두장과 거의 유사한 발전량을 보여주며 LIPV의 그림자로 인한 손실을 고려하더라도 87.5 ~ 89.5%의 발전량 상승이 발생했음을 확인하였다.

또한, 연간 발전량을 비교해도 Case2가 Case1보다 약 29.9% 높은 발전량을 보여주어 건물의 실질 자립률 상승에도 도움이 될 수 있을 것으로 분석된다. 단, 본 분석은 월별로 전운량이 최소인 날만을 대표일로 하여 분석한 것이라 매월 동일한 날짜의 데이터를 분석하지 못한 한계를 가진다. 또한, 단층을 대상으로 실험을 수행하여 다층 구조에 대한 분석이 실시되지 못했고, 주변 장애물이 없는 이상적인 장소에서 데이터를 수집했기 때문에 실제 건물에 적용되었을 때와는 발전량이 다를 수 있다.

향후 연구로 실제 건물에 다층으로 WIPV와 LIPV를 적용했을 때의 그림자 영향을 반영한 실질 발전량을 분석하여 최적의 배치를 제안하고 이를 통해 건축물의 제로에너지 달성을 위한 기초 데이터를 제공하고자 한다.

후기

본 연구는 안양시의 연구비지원으로 수행되었음(과제번호: 20210535).

REFERENCES

1. Ministry of Science and ICT, Establishment of Carbon-neutral Technological Innovation Promotion Strategy, Press Release, 2021.4.1.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MLIT), Criteria for Building Energy Efficiency Certification And Zero Energy Building Certification, MLIT Ordinance No.878, 2021.
3. MLIT, Green Building Creation Support Act, Law No.18344, 2021.
4. Lee, K. R., Lee, Y. S., and Lim, J. H., Evaluation on the Photovoltaic Module Arrangement Planning Considering Shading Conditions in Apartment Buildings, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction, Vol. 35, No. 5, pp. 169-179, 2019.
5. VDMA Photovoltaic Equipment, International Technology Roadmap for Photovoltaic 9th Edition, 2018, <https://www.vdma.org>, 2020. 07.10.
6. Lee, C. Y. and Lee, M. K., Commercial (100 kW) Photovoltaic System Cost Structure : The Cases of Korea,

- Germany, and China, *New & Renewable Energy*, Vol. 15, No. 2, pp. 31-41, 2019.
7. Yun, Y. S., Cho, K. J., Cho, D. W., Economic Analysis of a Photovoltaic system for Zero-energy Multi-residential Houses, *KIEAE Journal*, Vol. 20, No. 6, pp. 93-99, 2020.
8. Song, J. H., Yoon, J. H., An, Y. S., Kim, S. G., Lee, S. J., and Choung, Y. K., Power Performance Characteristics of Transparent Thin-film BIPV Module Depending on an Installation Angle, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 28, No. 2, pp. 58-63, 2008.
9. Kim, D. S., Shin, U. C., and Yoon, J. H., Annual Energy Yield Prediction of Building Added PV System Depending on the Installation Angle and the Location in Korea, *Korea Institute of Ecological Architecture and Environment*, Vol. 14, No. 1, pp. 67-74, 2014.
10. Kang, J. G., Kim, J. H., and Kim, J. T., Analysis of Generation Characteristics of a Bifacial BIPV System According to Installation Methods Bifacial Solar Cell, *Current Photovoltaic Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 121-125, 2015.
11. Park, D. H., Kim, M. S., So, W. S., Oh, S. Y., Park, H. W., Chang, S. H., Park, S. H., and Kim, W. K., Evaluation of Bifacial Si Solar Module with Different Albedo Conditions, *Current Photovoltaic Research*, Vol. 6, No. 2, pp. 62-67, 2018.
12. Jang, J. H., Kwon, O. H., Lee, S. H., Shin, M. S., Lee, K. S., A Preliminary Research of the Bifacial PV System under Installation Conditions, *Journal of the Korean Solar Energy Society*, Vol. 38, No. 6, pp. 51-63, 2018.
13. Yoo, Y. K., Seo, Y. J., Park, D. H., Kim, M. S., Jang, H. J., Kwon, Y. H., Hwangbo, C., Kim, W. K., and Chang, S. H., Evaluation of Power Generation Performance for Bifacial Si Photovoltaic Modules Installed on Different Artificial Grass Floors, *Journal of Energy Engineering*, Vol. 27, No. 3, pp. 1-9, 2018.
14. Lee, Y. S., Shin, J. H., Moon, J. F., A study on the Prediction of Power Generation of Regenerated PV Module, *The Transaction of the Korea Institute of Electrical Engineers*, Vol. 69P, No. 4, pp. 235-242, 2020.
15. Kang, J. G. and Kim, J. T., Technology Development Trend of Bi-facial Solar Cell, *Bulletin of the Korea Photovoltaic Society*, Vol. 1, No. 2, pp. 27-64, 2015.
16. Korea Meteorological Agency, Automated Synoptic Meteorological Observation Data, Available from : <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36>, last accessed on the 15th September 2021.