



에너지 생산성 분석 기반 양면발전형 수직 태양전지의 활용 가능성 탐색

최승주¹⁾ · 한승훈^{2)*}

A Study on the Applicability of Double-Sided Vertical Photovoltaic Panels Based on Energy Productivity Analysis

Seung-Ju Choe¹⁾ · Seung-Hoon Han^{2)*}

Received 1 September 2023 Revised 25 September 2023 Accepted 9 October 2023 Published online 1 December 2023

ABSTRACT This study aimed to investigate the feasibility and potential applications of utilizing bifacial photovoltaic (PV) panels from an architectural perspective. It also aimed to establish a foundational dataset for installation and operational guidelines for bifacial PV panels through a comparative analysis of energy production performance with single PV panels. The research encompassed several key steps, including a comprehensive literature review, calculation of solar surface radiation values, development of datasets for bifacial and single PV energy production, and a performance comparison between both approaches. The results of the study show that bifacial PV panels exhibit optimized energy production capabilities within the range of 40 to 80 degrees, contingent upon the specific installation location. Consequently, it is recommended that the installation of bifacial PV panels in Korea should primarily focus on southwest-to-west orientation. Furthermore, it was concluded that bifacial PV panels could contribute an equivalent or even superior level of energy production compared to single PV panels, even if their performance exhibited a marginally lower efficiency of 2% to 5% with an 18% power generation efficiency.

Key words Photovoltaic(태양광발전), Bifacial photovoltaic(양면발전 태양전지), Solar cell efficiency(태양전지 발전효율), Solar radiation(태양일사)

1. 서론

한국수출입은행 해외경제연구소에서 발간한 ‘2023년 상반기 태양광산업 동향’ 보고서에 따르면 2023년 상반기 국제 태양광 설치량은 제품가격과 설치비 감소에 따라 미국,

중국 등에서 수요가 증가할 것으로 추정된다.^[1] 그러나 국내 태양광 설치량은 RPS(Renewable Portfolio Standard) 제도의 폐지, 전력 도매가격 상한가 고정 등 정책 기조의 변화에 따라 수요가 정체되고 있다.^[1] 이에 더해 현 정부에서는 소형 태양광 고정가격계약제도 등 신재생에너지 정책의 대대적인 개편, 그리드패리티 환경 구축 미비, 태양광사업 부정수복 사례 적발에 따른 보조금 환수처분 등으로 인해 국내 태양광산업 추세는 점차 동결되는 실정이다.^[2,3]

이러한 상황에서 국내 태양광산업의 정체를 막기 위해서는 태양광사업 수급환경의 투명화와 함께 경제적인 에너지

1) Ph.D. Candidate, Department of Architecture and Civil Engineering, Chonnam National University

2) Professor, School of Architecture, Chonnam National University

*Corresponding author: hshoon@jnu.ac.kr

Tel: +82-62-530-1646

Fax: +82-62-530-1639

생산성을 갖춘 새로운 태양광 발전방식이 도입될 필요가 있다. 특히 유기박막 태양전지, 페로브스카이트(Perovskite) 등 3세대로 분류되는 차세대 태양전지는 발전효율과 폐기물관리, 재사용성 등 다각적 관점에서 경제성을 지녀 향후 상용화될 주요 태양전지 유형으로 인식될 수 있다.^[4,5]

미국 에너지부 산하 국립재생에너지연구소에 따르면 차세대 태양전지는 단면발전 대비 양면발전유형이 높은 에너지 생산성과 낮은 생산비용을 통해 산업적으로 우수한 잠재력을 가질 것으로 전망하고 있다. 아울러 개발된 양면발전형 페로브스카이트 태양전지는 종래 단면발전형 페로브스카이트 대비 10~20% 높은 전력 생산량을 가질 것으로 예측되고 있다.^[6]

그러나 양면발전형 태양전지 관련 연구는 아직까지 기초적인 수준이며 건축·도시적 단계의 활용을 위한 연구 및 근거가 미비하다. 이는 향후 차세대 태양전지의 산업적 활용이 수행될 단계에서 건축·도시적 단계의 무분별한 적용과 최적화되지 못한 태양전지의 활용을 야기할 수 있다. 따라서 건축적 관점에서 양면발전형 태양전지의 활용 가능성 및 유효성을 탐색할 필요가 있다.

이에 따라 본 연구는 전력 수요가 높은 국내 지역의 태양광 유입환경을 고려하여 양면발전 태양전지의 활용 가능성을 검토하고, 에너지 환경 관점에서 단면발전 태양전지 대비 양면발전 유형의 기여도가 우수할 것으로 판단되는 대표적 성능지표의 기준 탐색을 목적으로 수행되었다. 동시에 지역별 양면발전 태양전지의 최적 설치각도 및 PV 발전효율을 제시하여 향후 양면발전 태양전지의 활용을 위한 지침 수립의 기초자료를 제공하는 것을 목표로 연구를 진행했다.

연구의 단계는 문헌 및 선행연구 검토, 시뮬레이션 기반 표면 일사량 산출, 일사량 데이터 기반 태양전지 에너지 생산량 산출, 양면발전 태양전지 활용 가능성 탐색 순으로 수행되었고 세부적인 내용은 아래와 같다.

첫 번째로 문헌 및 선행연구 검토 단계에서는 3세대 태양전지 및 양면발전 태양전지, 수직발전형 태양전지 등 새로운 설치방식이 활용될 수 있는 태양전지에 대한 탐색을 진행했다. 이를 통해 표면유입 일사량 기반 태양전지 발전량 추정 관련 공식 등을 검토했다.

다음으로 시뮬레이션 기반 표면 일사량 산출 단계는 시뮬레이션의 시·공간적 범위, 조작 및 통제변인 설정 등을 통해

시뮬레이션 알고리즘을 구축했다. 이를 기반으로 양면 및 단면발전 태양전지의 표면유입 일사량을 산출했다.

세 번째로 일사량 데이터 기반 태양전지 에너지 생산량 산출 단계에서는 산출된 단면 및 양면발전 유형의 표면유입 일사량 데이터를 기반으로 광전변환효율과 단위 설치각도를 조작변인으로 설정하여 지역별 에너지 생산량 매트릭스를 구축하여 에너지 생산량의 변화경향을 분석했다.

마지막으로 양면발전 태양전지 활용 가능성 탐색 단계에서는 단면발전 유형의 에너지 생산량과 양면발전 에너지 생산량 매트릭스를 비교분석하여 양면발전 유형의 지역별 최적 설치각도 및 광전변환효율을 검토하여 양면발전 태양전지의 건축적 활용 가능성을 탐색했다.

2. 문헌 및 선행연구 검토

선행연구 검토 단계에서는 3세대 및 양면발전 태양전지에 대한 동향 및 선행연구를 탐색했다. 아울러 본 연구는 양면발전 태양전지의 건축적 활용 가능성을 기초적인 수준에서 검토하므로 상용화 단계에서 태양전지 발전량 예측과 관련되어 검토되는 세부적인 성능인자를 고려하지 않았다. 따라서 문헌검토 단계에서 태양전지의 발전성능 추정이 가능한 기본 산출식을 중점적으로 탐색했다.

2.1 3세대 태양전지

한국거래소(Korea Exchange, KRX)에서 2020년 발간한 혁신성장상품분석보고서 중 ‘태양전지(3세대)’에 따르면 현재 상용화된 태양전지는 총 3개의 세대로 분류되며 단·다결정형 결정질 실리콘으로 구성되는 1세대, 박막 실리콘, CIGS(Copper Indium Gallium Selenide), CdTe(cadmium Telluride)과 같이 소재의 변화에 따라 박막형태 혹은 복합체로 구성된 2세대, DSSC(Dye Sensitized Solar Cell), 유기 태양전지, 페로브스카이트 등 새로운 광반응 물질을 사용한 3세대로 구별된다.^[7] 이 중 DSSC와 페로브스카이트 태양전지는 투명재질의 구현이 가능하므로 건축물의 창호 및 커튼월 부위의 유리를 대체할 수 있고 액상에서의 광전변환 특성으로 인해 양면발전의 가능성을 가진다.

DSSC와 관련하여 Jihuai Wu *et al.* (2014)에서는 DSSC

의 광전변환효율 향상을 위해 TiO₂ 산란층에 거울효과를 줄 수 있는 폴리아닐린으로 상대전극 레이어를 구성해 패널의 양면에서 염료분자의 자극이 가능한 양면발전형 DSSC 구조를 제시하고, 이를 통해 단면발전 대비 20~40% 수준의 변환효율 증대를 기대할 수 있다는 연구결과를 보였다.^[8] 또한 Venkatesan *et al.*(2019)의 연구에서는 DSSC의 양면을 실내·외부면으로 규정하고 실내조명조건에서 양면의 고효율 발전을 위해 염료의 구조와 전해질의 농도, 광양극 및 상대전극의 두께 등을 매개변수로 하여 최종적으로 6 μm의 주층과 4 μm의 산란층, 16 nm의 백금층 두께가 일반적인 실내공간 조도환경(201.8, 607.8, 999.6 lx)에서 가장 효율적이라는 연구결과를 제시했다.^[9]

Bastiani *et al.*(2022)은 지면의 산란광과 실리콘 결정형과 페로브스카이트를 접합한 탠덤 태양전지 구조를 통해 안정성이 증대된 양면발전형 페로브스카이트 태양전지 모듈을 제시했으며 이를 통해 안정적인 전력수급 및 제품의 신뢰성 확보에 대한 가능성을 시사했다.^[10] Jiang *et al.*(2023)은 양면접합형 페로브스카이트 태양전지의 발전성능 증대를 위해 모듈의 전·후면에서 태양복사에너지를 활용할 수 있는 투명 전도성 후면 전극을 설계했고, 이를 통해 양면발전형 페로브스카이트 태양전지의 후면 발전효율을 전면 대비 91~93% 수준으로 상승시킬 수 있다는 연구결과를 제시했다.^[11]

2.2 태양전지 에너지 생산량 계산식

태양전지 에너지 생산량을 예측하기 위해 사용되는 추정식은 일조시간 혹은 일사량을 활용하는 두가지 방식으로 구분된다. 첫 번째 방식은 식 (1)과 같이 태양광 발전설비의 설비용량(P)과 일조시간(SH), 발전설비의 가동율(i)을 곱하여 에너지 생산량을 산정한다. 해당 상황에서의 설비용량은 태양광패널의 면적, 단위면적 당 모듈의 발전효율의 곱을 통해 산정할 수 있다.^[12]

$$E = P \times SH \times i \quad [\text{kWh}] \quad (1)$$

두 번째 추정식은 식 (2)와 같이 태양전지 표면에 유입되는 총 일사량(I)과 태양전지의 설치면적(A), 단위면적 당 모듈의 발전효율(S)의 곱을 통해 산정할 수 있다.^[13]

$$E = I \times A \times S \quad [\text{kWh}] \quad (2)$$

이러한 두 가지 공식을 기초로 하여 운전온도, 배선손실, 변환기효율과 같은 설비 매개변수와 설치방향, 설치각도, 설치간격 등 계획 매개변수 및 전운량, 외부기온, 상대습도 등 기후 및 기상 매개변수를 고려하여 개선된 에너지 생산량 예측식이 연구·활용되고 있다. An *et al.*(2021)의 연구에서는 정밀한 태양전지 에너지 생산량 예측모델을 구축하기 위해 시간에 따른 매개변수의 변화특성을 탐지할 수 있는 LSTM(Long Short Term Memory) 방식으로 일조시간과 일사량 산정공식을 적용한 딥러닝 예측모델을 구축하고, 이를 통해 예측된 발전량 변화경향 데이터와 실제 발전량 데이터를 비교하여 정밀도를 파악함으로써 예측모델의 활용 가능성을 시사하고 있다.^[12]

Yoo and Lee(2017)에서는 태양광 발전소 구축사업의 타당성 검토를 위한 도구로 활용되었던 한국전력거래소의 발전량 계량값과 기상청 데이터 및 지역의 위도, 경도, 고도, 시간대 및 일사량과 같은 지역 기상정보, 태양광 설비 종류 및 용량, 설계방식 등을 입력하여 발전량을 예측하는 PVsyst 방식 간 오차를 비교하여 PVsyst 방식의 유효성이 더 높다는 연구결과를 제시했다.^[14]

2.3 소결

문헌 및 선행연구 검토 결과, 3세대 태양전지의 양면발전 연구는 TRL(Technology Readiness Level)의 고도화에 따라 산업적 활용이 가능한 전망을 보이며 건축적 관점에서 양면발전 태양전지를 활용하기 위한 연구의 당위성이 도출되었다. 아울러 태양광 설비의 기획 단계에서 태양전지의 에너지 생산량 예측에는 설비를 활용할 장소의 일사량 혹은 일조시간에 대한 정보가 필요하며 이를 통해 개괄적인 에너지 생산량 산정이 가능할 것으로 판단된다.

이에 따라 양면발전 태양전지를 건축물의 옥상면에 수직으로 설치했다는 가정하에 양면발전 태양전지의 건축적 활용 가능성을 검토했다. 또한, 발전설비의 가동율을 명확하게 정의할 수 없으므로 일사량을 활용하여 에너지 생산량을 추정하는 공식을 활용하여 연구를 진행했다.

3. 시뮬레이션 기반 표면 일사량 산출

선행연구 검토 결과에 따라 기존 단면발전형식의 태양전지에 대비하여 양면발전형식의 태양전지에 대한 건축·도시적 활용 가능성 검토를 진행했다. 이를 위한 연구 방법으로 건축물 모델링 프로그램인 Rhino 6 및 파라메트릭 모델링 프로그램인 Grasshopper, 알고리즘 구축 형식의 환경분석 도구인 Grasshopper Ladybug Series를 활용했다.

3.1 시뮬레이션 기획

기획 단계에서는 분석의 시·공간적 범위 및 분석대상 공간의 규격과 태양전지의 설치위치, 시뮬레이션의 매개변수 및 통제변인을 설정했으며, 건축·도시적 관점에서 양면발전형 태양전지의 활용 가능성을 검토하기 위해 공간적 범위를 각각 장소와 공간으로 구분하여 매개변수를 설정했다. 분석대상 공간의 경우, 선행연구에서 규정된 보편적인 건축공간 규격의 옥상에 설치 가능한 양면 및 단면발전형 태양전지의 개수를 산정한 뒤 일사량 및 에너지 생산량을 산출, 비교분석하는 순서대로 연구를 진행했다.

3.1.1 시·공간적 범위

시뮬레이션 수행의 시간적 범위는 기상조건 및 입력 매개변수의 통제를 위해 Fig. 1과 같이 월별 및 연중 유입 일사량을 산출했으며 태양전지 에너지 생산량 산출에 필요한 일사량은 연중 데이터를 활용했다. 월별 데이터는 연중 데이터의 신뢰성 검토를 위한 기준지표로 활용했다.

공간적 범위 중 장소는 인구밀도, 위치적 특성, EPW (EnergyPlus Weather) 데이터의 구축 여부 등을 고려하여 Table 1에 제시된 내용과 같이 서울, 인천, 강릉, 대전, 대구, 광주, 부산, 목포의 8개 지역을 선정했다. 선정된 지

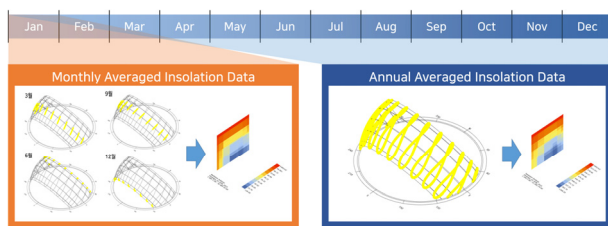


Fig. 1. Temporal scope

Table 1. Target region index

Region	Seoul	Gangneung	Gwangju	Busan
Index	A	B	C	D
Region	Daejeon	Daegu	Incheon	Mokpo
Index	E	F	G	H

역의 EPW 데이터는 Ladybug EPW Map에서 제공하는 2015년 기준 연간 기상 데이터를 활용했다.

3.1.2 분석대상 공간

시뮬레이션 수행 공간은 에너지 분석이 수행된 연구 중 소규모 사무실로 규정된 가상의 공간을 준용하여 Fig. 2와 같이 가로 6,000 mm, 세로 4,500 mm, 높이 2,700 mm로 구성된 공간을 규정했다.^[15] 아울러 동일한 건축환경에서의 활용 가능성 검토를 위해 태양전지 설치영역은 분석대상 공간의 옥상으로 설정했다.

태양전지 설치간격은 Fig. 3의 알고리즘을 활용하여 태양광 유입을 간섭하지 않는 최소 간격을 탐색하여 설정했다. 검토 결과, 1 m²의 단위면적을 기준으로 태양전지의 전후 배치간격은 양·단면발전 유형에서 각각 1,970 mm,

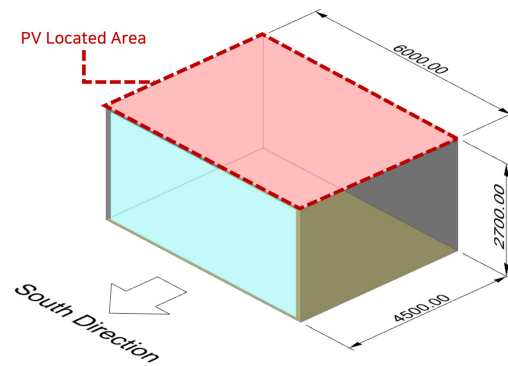


Fig. 2. Spatial scope

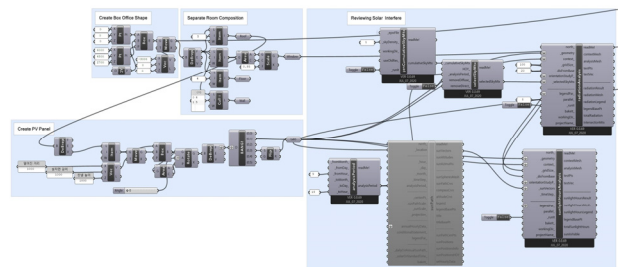


Fig. 3. Detached distance analysis algorithm

2,550 mm이 최적 간격으로 도출되었다.

이를 기반으로 분석대상 공간의 옥상에 설치할 수 있는 양·단면발전 태양전지의 설치개수를 검토하여 최종적인 발전면적을 설정했다. 단면발전 유형의 경우 정남향을 기준으로 개수를 산정했으며 양면발전 유형은 0~170도 범주에서 10도의 단위각도 당 설치 가능한 규격 1 m²의 태양전지 패널 수를 탐색하여 최솟값을 적용했다. 이 과정에서 수평 옥상면에 반드시 존재하는 건축요소인 파라피트를 고려하여 최종적인 설치개수를 설정했다. 이에 따라 최종 발전면적은 단면발전형에서 10 m², 양면발전형에서 최소 면적으로 산출된 16 m²를 설정하여 에너지 생산량을 산출했다.

3.1.3 시뮬레이션 매개변수

시뮬레이션 매개변수 중 태양전지 평면 회전각도는 정동향을 0도로 규정했으며 최대 170도까지를 범주로 하여 10도의 단위각도를 적용해 총 18개의 회전각도 매개변수를 구축했다. 이에 따라 양면발전 태양전지의 전, 후면이 정동, 정서향을 바라보는 유형을 0도, 태양전지 전면부가 정남향을 바라보는 유형을 90도로 설정했으며 180도는 0도와 동일한 분석조건을 가지기 때문에 본 시뮬레이션의 매개변수에서 제외되었다.

에너지 생산량 산출을 위한 양면발전 태양전지의 발전효율은 향후 개발 방향이 제시되어야 할 성능지표로 분류되므로 범주형 매개변수로 설정하여 10~15%의 범주에서 1% 간격으로 매개변수 유형을 설정했다. 단면발전 태양전지는 산업통상자원부에서 공표한 태양광 모듈 최저효율제 판단 기준 중 17.5% 이상의 발전효율을 정수로 변환하여 최종적으로 18%의 발전효율로 설정했다.^[16]

3.1.4 통제변인

시뮬레이션의 기획 단계에서 에너지 생산량 추정에 영향을 끼치는 변인으로 앞서 설정된 요인 외에 지형구조, 발전면의 위치, 발전면의 회전축, 건축물의 좌향 및 단면발전 유형의 Tilt Angle을 통제변인으로 설정했다. 이에 따라 지형구조는 차폐물이 존재하지 않는 평지로 설정했으며, 분석대상 공간의 옥상 중심을 기준으로 분석면이 회전하도록 설정하여 발전면의 위치 및 회전축을 고정했다. 아울러 모든 분석대상 지역의 정남향을 절대좌표 Y축 음의 방향으로

로 설정하여 방위에 의한 일사량 산출 데이터 변질을 방지했다. 마지막으로 단면발전형 태양전지의 Tilt Angle은 Park and Seo(2012)에서 제시된 각 지역별 태양광설비 최적 설치각도를 준용하여 정남향 기준 지역별로 34~38도의 기울기를 가지는 것으로 설정했다.^[17]

환경적 관점에서의 통제변인으로 기상환경과 태양일사의 유입방식을 검토했는데, 본 연구의 목적상 비교분석을 수행할 매개변수는 각도와 발전효율이므로 지역 간 기상환경의 통일에 대한 필요성은 없다고 판단했다. 이에 따라 기상환경 데이터는 지역별로 패시브건축협회에서 제작한 EPW 데이터에 근간하여 직사광과 반사광이 함께 고려된 Global Sky Matrix를 구축하여 일사량을 산출했다.

3.2 시뮬레이션 데이터 산출

데이터 산출 단계에서는 제시된 Fig. 4, 5에 나타나는 알고리즘 구성으로 양면 및 단면발전 태양전지의 표면유입 일사량을 산출했다. 이를 통해 최종적으로 Table 2, 3과 같이 각도 별 발전면적 1 m²의 연중 표면유입 일사량 데이터를 산출했다. 단면발전형 태양전지의 표면유입 일사량 산

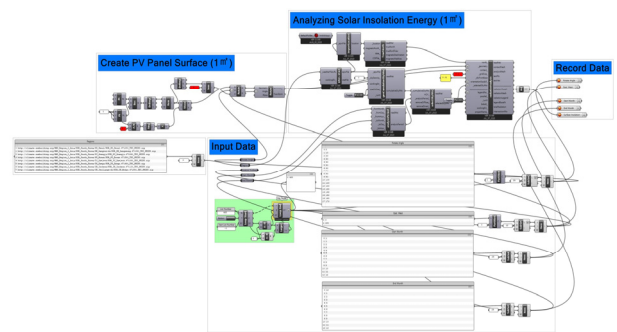


Fig. 4. Bifacial PV insolation analysis algorithm

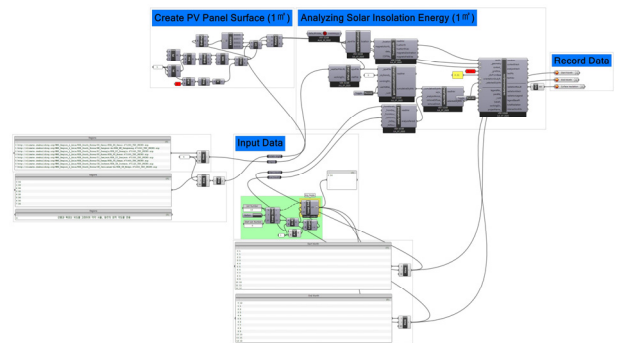


Fig. 5. Single PV insolation analysis algorithm

Table 2. Annual insolation of bifacial PV in region A to D (Unit : kWh/m²)

Angle Type	Region			
	A	B	C	D
0	1,113.26	1,171.46	1,238.10	1,225.65
10	1,120.26	1,184.58	1,253.63	1,244.38
20	1,124.00	1,195.47	1,270.16	1,262.85
30	1,117.97	1,195.26	1,278.12	1,270.73
40	1,124.32	1,207.55	1,305.01	1,295.38
50	1,119.92	1,206.73	1,319.79	1,305.15
60	1,110.55	1,199.05	1,327.36	1,305.35
70	1,108.49	1,197.96	1,338.60	1,311.74
80	1,103.75	1,193.12	1,341.63	1,310.91
90	1,088.90	1,175.77	1,327.10	1,293.59
100	1,096.23	1,179.19	1,329.61	1,293.60
110	1,094.06	1,170.59	1,315.35	1,278.23
120	1,090.62	1,159.29	1,294.28	1,257.39
130	1,097.20	1,158.60	1,280.73	1,245.66
140	1,101.49	1,157.45	1,264.15	1,233.07
150	1,097.79	1,150.50	1,240.25	1,215.25
160	1,110.07	1,163.67	1,242.21	1,222.69
170	1,112.97	1,168.47	1,238.70	1,223.10

Table 3. Annual insolation of bifacial PV in region E to H (Unit : kWh/m²)

Angle Type	Region			
	E	F	G	H
0	1,207.67	1,189.41	1,173.44	1,186.47
10	1,218.68	1,203.17	1,187.20	1,199.89
20	1,227.79	1,216.00	1,198.11	1,215.50
30	1,226.23	1,218.75	1,198.64	1,223.47
40	1,239.92	1,237.66	1,212.77	1,251.27
50	1,241.42	1,243.87	1,215.76	1,267.19
60	1,236.81	1,242.29	1,212.94	1,276.71
70	1,238.68	1,244.45	1,215.30	1,290.15
80	1,236.56	1,241.33	1,212.17	1,295.09
90	1,221.22	1,224.43	1,195.29	1,282.83
100	1,226.79	1,227.19	1,197.67	1,286.40
110	1,219.18	1,216.58	1,187.48	1,273.39
120	1,208.36	1,202.21	1,174.32	1,253.29
130	1,206.78	1,196.95	1,171.25	1,240.13
140	1,203.57	1,190.44	1,167.38	1,223.06
150	1,193.55	1,177.85	1,157.04	1,197.43
160	1,203.98	1,186.63	1,167.77	1,196.37
170	1,206.16	1,187.85	1,170.66	1,189.50

Table 4. Annual insolation of single PV in each region (Unit : kWh/m²)

Region	A	B	C	D
Insolation	1289	1386.42	1498.5	1540.07
Region	E	F	G	H
Insolation	1463.28	1424.48	1385.65	1437.91

출 또한 통제변인 단계에서 준용한 34~38도의 Tilt Angle 을 지역별로 적용하여 최적 경사각도에서의 분석을 수행했다. 그 결과 Table 4와 같이 지역별 단면발전 태양전지의 표면유입 일사량 데이터를 함께 산출했다.

3.3 소결

건축적 관점에서 양·단면발전형 태양전지의 에너지 생산량 비교검토를 위해 태양전지 패널을 설치할 분석대상 공간과 장소, 시간 및 매개변수·통제변인을 설정했다. 이에 따라 Grasshopper 알고리즘을 구축했으며 두 유형의 단위 면적 당 연간 표면유입 일사량을 산출했다. 양면발전형의 경우, 분석대상면의 전·후면 일사량 합산값을 산출했으며 단면발전형은 최적 설치각도를 적용한 상황에서의 전면부 표면유입 일사량을 산출했다.

산출된 일사량 데이터의 수치를 비교했을 때, 정동·정서를 향하는 0도 유형과 전후면이 뒤집어진 170도 유형의 일사량 산출값은 연간 0.29~3.03 kWh/m² 수준으로 분석기간을 고려했을 때 유의미한 차이를 보이지 않는다고 판단된다. 따라서 산출 데이터는 정합성을 가질 것으로 판단되며, 이를 기반으로 에너지 생산량 산출을 진행했다.

4. 일사량 데이터 기반 태양전지 에너지 생산량 산출

이전 단계에서 표면유입 일사량 시뮬레이션을 수행하여 양면발전 태양전지의 전·후면 표면 합산 일사량과 단면발전 태양전지의 전면 일사량을 산출했다. 이를 기반으로 일사량 기반 태양전지 에너지 생산량 추정식을 활용해 양·단면발전형 태양전지 간 에너지 생산량을 산출했다. 에너지 생산량 산출은 3.1 문단에서 설정된 발전효율과 산출된 1 m²당 연중 표면유입 일사량을 활용했다.

단면발전형 태양전지의 에너지 생산량 데이터는 18%의

발전효율과 10 m²의 발전면적을 기준으로 Table 5에 제시된 일사량을 적용하여 Table 6과 같이 에너지 생산량을 산출했다.

Table 5. Single PV energy production matrix of each region (Unit : kWh)

Region	A	B	C	D
Generated Energy	2320.2	2495.55	2697.29	2772.13
Region	E	F	G	H
Generated Energy	2633.91	2564.07	2494.16	2588.24

이와 함께 양면발전형 태양전지의 에너지 생산량은 범주형 매개변수를 적용하여 Table 6~13과 같이 지역별 태양전지 에너지 생산량 매트릭스를 구축했다. 구축된 매트릭스 데이터 중 발전효율 15% 유형을 에너지 생산량을 비교 기준으로 설정하여 최적화된 설치각도를 탐색했다.

서울 지역(A)은 40도 유형에서 최적화된 에너지 생산이 가능하며 10~50도 범주가 양면발전형 태양전지 설치에 적합할 것으로 판단된다. 이에 따라 서울 지역은 정면이 남서에서 남서향을 바라보는 각도가 양면발전형 태양전지 운영에 적합한 설치각도인 것으로 나타났다.

Table 6. Bifacial PV energy production matrix of region A (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	1781.21	1959.33	2137.45	2315.57	2493.69	2671.82
10	1792.41	1971.65	2150.89	2330.13	2509.37	2688.62
20	1798.39	1978.23	2158.07	2337.91	2517.75	2697.59
30	1788.75	1967.62	2146.50	2325.37	2504.25	2683.12
40	1798.91	1978.80	2158.69	2338.58	2518.47	2698.36
50	1791.88	1971.06	2150.25	2329.44	2508.63	2687.81
60	1776.87	1954.56	2132.25	2309.94	2487.62	2665.31
70	1773.58	1950.94	2128.30	2305.66	2483.01	2660.37
80	1766.00	1942.60	2119.20	2295.80	2472.40	2649.00
90	1742.24	1916.46	2090.68	2264.91	2439.13	2613.36
100	1753.97	1929.36	2104.76	2280.16	2455.55	2630.95
110	1750.50	1925.55	2100.60	2275.65	2450.70	2625.75
120	1744.99	1919.49	2093.99	2268.49	2442.99	2617.49
130	1755.52	1931.07	2106.62	2282.17	2457.72	2633.27
140	1762.38	1938.62	2114.86	2291.10	2467.34	2643.58
150	1756.46	1932.10	2107.75	2283.39	2459.04	2634.68

160	1776.12	1953.73	2131.34	2308.95	2486.56	2664.18
170	1780.76	1958.83	2136.91	2314.98	2493.06	2671.13

강릉 지역(B) 또한 40도 유형이 에너지 생산이 최적화된 각도로 나타났으나 범주는 40~70도로 서울 대비 서향에 치우치는 경향을 보였다. 이에 따라 강릉은 남서에서 서남서향으로 양면발전형 태양전지의 설치가 필요하다는 분석 결과가 도출되었다.

Table 7. Bifacial PV energy production matrix of region B (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	1874.33	2061.76	2249.20	2436.63	2624.06	2811.50
10	1895.32	2084.86	2274.39	2463.92	2653.45	2842.99
20	1912.76	2104.03	2295.31	2486.58	2677.86	2869.14
30	1912.42	2103.66	2294.90	2486.14	2677.38	2868.62
40	1932.08	2125.28	2318.49	2511.70	2704.91	2898.12
50	1930.77	2123.85	2316.93	2510.00	2703.08	2896.16
60	1918.49	2110.34	2302.19	2494.03	2685.88	2877.73
70	1916.74	2108.41	2300.08	2491.76	2683.43	2875.10
80	1908.99	2099.89	2290.79	2481.69	2672.59	2863.49
90	1881.24	2069.36	2257.48	2445.61	2633.73	2821.85
100	1886.70	2075.37	2264.04	2452.71	2641.38	2830.05
110	1872.94	2060.23	2247.53	2434.82	2622.11	2809.41
120	1854.86	2040.35	2225.84	2411.32	2596.81	2782.30
130	1853.76	2039.13	2224.51	2409.88	2595.26	2780.63
140	1851.91	2037.11	2222.30	2407.49	2592.68	2777.87
150	1840.80	2024.88	2208.96	2393.04	2577.12	2761.20
160	1861.87	2048.06	2234.24	2420.43	2606.62	2792.80
170	1869.55	2056.51	2243.46	2430.42	2617.37	2804.33

광주 지역(C)의 최적 설치각도는 80도로 나타났으며 범주는 70~100도로 태양전지의 정면이 남동에서 남서향을 바라보도록 설치할 필요가 있다는 분석결과가 도출되었다.

Table 8. Bifacial PV energy production matrix of region C (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	1,980.95	2,179.05	2,377.14	2,575.24	2,773.34	2,971.43
10	2,005.81	2,206.39	2,406.98	2,607.56	2,808.14	3,008.72
20	2,032.25	2,235.47	2,438.70	2,641.92	2,845.15	3,048.37
30	2,045.00	2,249.50	2,454.00	2,658.50	2,863.00	3,067.50

40	2,088.01	2,296.81	2,505.61	2,714.41	2,923.22	3,132.02
50	2,111.66	2,322.83	2,534.00	2,745.16	2,956.33	3,167.49
60	2,123.77	2,336.15	2,548.53	2,760.91	2,973.28	3,185.66
70	2,141.77	2,355.94	2,570.12	2,784.30	2,998.47	3,212.65
80	2,146.60	2,361.26	2,575.92	2,790.58	3,005.24	3,219.90
90	2,123.36	2,335.70	2,548.03	2,760.37	2,972.71	3,185.04
100	2,127.38	2,340.12	2,552.85	2,765.59	2,978.33	3,191.07
110	2,104.56	2,315.02	2,525.47	2,735.93	2,946.39	3,156.84
120	2,070.84	2,277.93	2,485.01	2,692.10	2,899.18	3,106.27
130	2,049.17	2,254.09	2,459.00	2,663.92	2,868.84	3,073.75
140	2,022.64	2,224.90	2,427.17	2,629.43	2,831.70	3,033.96
150	1,984.39	2,182.83	2,381.27	2,579.71	2,778.15	2,976.59
160	1,987.53	2,186.29	2,385.04	2,583.79	2,782.55	2,981.30
170	1,981.92	2,180.11	2,378.30	2,576.49	2,774.69	2,972.88

부산 지역(D) 또한 최적 설치각도가 70도 유형인 것으로 파악되었으나 범주는 50~70도로 강릉과 마찬가지로 남서에서 서남서향으로 양면발전형 태양전지가 설치될수록 운영이 용이하다는 에너지 생산량 산출경향을 보였다.

Table 9. Bifacial PV energy production matrix of region D (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	1961.04	2157.15	2353.25	2549.36	2745.46	2941.57
10	1991.00	2190.10	2389.20	2588.30	2787.40	2986.50
20	2020.56	2222.62	2424.67	2626.73	2828.78	3030.84
30	2033.16	2236.48	2439.79	2643.11	2846.43	3049.74
40	2072.60	2279.86	2487.12	2694.38	2901.64	3108.90
50	2088.24	2297.07	2505.89	2714.72	2923.54	3132.36
60	2088.56	2297.42	2506.27	2715.13	2923.99	3132.84
70	2098.78	2308.66	2518.53	2728.41	2938.29	3148.17
80	2097.45	2307.20	2516.94	2726.69	2936.43	3146.18
90	2069.75	2276.72	2483.70	2690.67	2897.65	3104.62
100	2069.75	2276.73	2483.70	2690.68	2897.65	3104.63
110	2045.17	2249.68	2454.20	2658.72	2863.23	3067.75
120	2011.82	2213.00	2414.18	2615.36	2816.54	3017.73
130	1993.06	2192.36	2391.67	2590.97	2790.28	2989.59
140	1972.92	2170.21	2367.50	2564.79	2762.08	2959.38
150	1944.40	2138.84	2333.28	2527.72	2722.16	2916.60
160	1956.30	2151.93	2347.56	2543.19	2738.82	2934.45
170	1956.96	2152.65	2348.35	2544.05	2739.74	2935.44

대전 지역(E)의 태양전지 에너지 생산량 최적 각도는 50도로 나타났으며 생산량이 높은 범주는 40~80도로 나타났다. 이에 따라 대전의 양면발전형 태양전지는 패널의 정면이 남서에서 정서향을 바라보도록 설치하는 것이 에너지 생산환경 측면에서 이점을 가질 것으로 예측된다.

Table 10. Bifacial PV energy production matrix of region E (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	1932.28	2125.50	2318.73	2511.96	2705.19	2898.41
10	1949.88	2144.87	2339.86	2534.85	2729.84	2924.82
20	1964.46	2160.90	2357.35	2553.79	2750.24	2946.69
30	1961.97	2158.17	2354.37	2550.56	2746.76	2942.96
40	1983.87	2182.25	2380.64	2579.03	2777.41	2975.80
50	1986.27	2184.90	2383.53	2582.16	2780.78	2979.41
60	1978.90	2176.79	2374.68	2572.57	2770.45	2968.34
70	1981.89	2180.08	2378.27	2576.46	2774.65	2972.84
80	1978.50	2176.35	2374.20	2572.05	2769.90	2967.75
90	1953.95	2149.35	2344.74	2540.14	2735.53	2930.93
100	1962.87	2159.15	2355.44	2551.72	2748.01	2944.30
110	1950.68	2145.75	2340.82	2535.89	2730.96	2926.03
120	1933.38	2126.71	2320.05	2513.39	2706.73	2900.06
130	1930.85	2123.94	2317.02	2510.11	2703.19	2896.28
140	1925.72	2118.29	2310.86	2503.44	2696.01	2888.58
150	1909.68	2100.64	2291.61	2482.58	2673.55	2864.51
160	1926.36	2119.00	2311.63	2504.27	2696.91	2889.54
170	1929.86	2122.85	2315.83	2508.82	2701.80	2894.79

대구 지역(F)의 최적 설치각도 및 범주는 각각 70도, 40~80도로 대전과 유사한 결과가 도출되었다. 이러한 결과를 통해 대구 또한 대전과 마찬가지로 태양전지의 정면이 남서에서 정서향을 바라보도록 설치할 필요가 있다는 분석 결과가 도출되었다.

Table 11. Bifacial PV energy production matrix of region F (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	1903.06	2093.37	2283.68	2473.98	2664.29	2854.59
10	1925.08	2117.59	2310.09	2502.60	2695.11	2887.62
20	1945.59	2140.15	2334.71	2529.27	2723.83	2918.39

30	1950.00	2145.00	2340.00	2535.00	2730.00	2925.00
40	1980.25	2178.28	2376.30	2574.33	2772.35	2970.38
50	1990.20	2189.22	2388.24	2587.26	2786.28	2985.30
60	1987.67	2186.43	2385.20	2583.97	2782.73	2981.50
70	1991.12	2190.23	2389.34	2588.45	2787.56	2986.67
80	1986.12	2184.74	2383.35	2581.96	2780.57	2979.19
90	1959.08	2154.99	2350.90	2546.81	2742.71	2938.62
100	1963.51	2159.86	2356.21	2552.56	2748.91	2945.26
110	1946.53	2141.19	2335.84	2530.49	2725.15	2919.80
120	1923.54	2115.90	2308.25	2500.61	2692.96	2885.31
130	1915.13	2106.64	2298.15	2489.66	2681.18	2872.69
140	1904.70	2095.17	2285.64	2476.11	2666.58	2857.05
150	1884.57	2073.02	2261.48	2449.94	2638.39	2826.85
160	1898.60	2088.46	2278.32	2468.18	2658.04	2847.90
170	1900.56	2090.62	2280.68	2470.73	2660.79	2850.85

인천 지역(G)의 최적 설치각도는 50도, 범주는 40~80도로 강릉과 유사하며 가장 가까운 지역인 서울과는 상이한 결과가 산출되었다. 인천에 양면발전형 태양전지를 적용할 경우, 그 설치방면은 남서에서 서남서향으로 설치되어야 한다.

Table 12. Bifacial PV energy production matrix of region G (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	1877.50	2065.25	2253.00	2440.75	2628.50	2816.25
10	1899.51	2089.46	2279.41	2469.37	2659.32	2849.27
20	1916.98	2108.68	2300.38	2492.07	2683.77	2875.47
30	1917.82	2109.60	2301.38	2493.16	2684.94	2876.73
40	1940.43	2134.47	2328.51	2522.55	2716.60	2910.64
50	1945.22	2139.74	2334.26	2528.79	2723.31	2917.83
60	1940.71	2134.78	2328.85	2522.92	2716.99	2911.06
70	1944.47	2138.92	2333.37	2527.81	2722.26	2916.71
80	1939.48	2133.43	2327.37	2521.32	2715.27	2909.22
90	1912.47	2103.72	2294.96	2486.21	2677.46	2868.70
100	1916.27	2107.90	2299.52	2491.15	2682.78	2874.40
110	1899.96	2089.96	2279.95	2469.95	2659.94	2849.94
120	1878.91	2066.80	2254.70	2442.59	2630.48	2818.37
130	1874.00	2061.40	2248.80	2436.20	2623.60	2811.00
140	1867.81	2054.59	2241.37	2428.15	2614.93	2801.71
150	1851.27	2036.39	2221.52	2406.65	2591.77	2776.90
160	1868.43	2055.28	2242.12	2428.97	2615.81	2802.65
170	1873.06	2060.36	2247.67	2434.97	2622.28	2809.59

마지막으로 목포 지역(H)의 최적 설치각도, 설치범주는 각각 80도, 범주는 70~100도로 나타났다. 산출 결과는 가장 가까운 지역인 광주와 동일하며 이에 따라 목포의 양면발전형 태양전지 설치는 정면이 남동에서 남서향을 향할수록 이점을 가질 것으로 파악되었다.

Table 13. Bifacial PV energy production matrix of region H (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	1898.35	2088.19	2278.02	2467.86	2657.69	2847.53
10	1919.82	2111.81	2303.79	2495.77	2687.75	2879.74
20	1944.80	2139.28	2333.76	2528.24	2722.73	2917.21
30	1957.55	2153.31	2349.06	2544.82	2740.58	2936.33
40	2002.03	2202.24	2402.44	2602.64	2802.85	3003.05
50	2027.51	2230.26	2433.01	2635.77	2838.52	3041.27
60	2042.74	2247.02	2451.29	2655.57	2859.84	3064.11
70	2064.23	2270.66	2477.08	2683.51	2889.93	3096.35
80	2072.15	2279.36	2486.58	2693.79	2901.01	3108.22
90	2052.53	2257.78	2463.03	2668.29	2873.54	3078.79
100	2058.24	2264.07	2469.89	2675.71	2881.54	3087.36
110	2037.42	2241.16	2444.90	2648.64	2852.38	3056.13
120	2005.27	2205.80	2406.33	2606.85	2807.38	3007.91
130	1984.20	2182.62	2381.04	2579.47	2777.89	2976.31
140	1956.90	2152.59	2348.28	2543.97	2739.66	2935.35
150	1915.88	2107.47	2299.06	2490.65	2682.23	2873.82
160	1914.20	2105.62	2297.04	2488.46	2679.88	2871.30
170	1903.20	2093.52	2283.84	2474.16	2664.48	2854.80

양·단면발전형 태양전지의 에너지 생산량 산출을 위해 발전효율 및 설치면적 매개변수를 건축적 관점에서 설정했다. 이에 따라 최종적으로 16, 10 m²의 발전면적에서 10~15%, 18%의 발전효율을 적용하여 8개 지역별로 0~170도 범주에서 단위 각도별 에너지 생산량 매트릭스를 구축했다. 이에 따라 산출된 8개 지역의 양면발전형 태양전지의 지역별 최적 설치각도를 분석한 결과, Fig. 6과 같이 남서에서 정남향 방면인 40~80도 범주에서 최적화된 에너지 생산이 가능하다는 분석결과가 도출되었다.

그러나 설치각도의 탐색은 양면발전형 태양전지가 가지는 건축적 활용 가능성의 명확한 판단 지표가 될 수 없으므로, 이를 판단하기 위해 지역별로 양·단면발전형 태양전지의 에너지 생산량 비교분석을 진행했다.

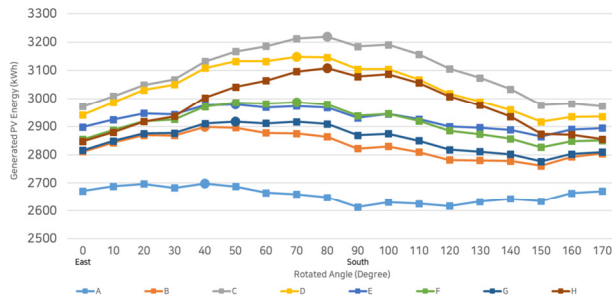


Fig. 6. Generated PV energy of efficiency 15% type

5. 양면발전 태양전지 활용 가능성 탐색

4장의 소결에 따라 이전 연구단계에서 산출된 두 태양전지 유형 간 에너지 생산성 비교분석을 수행했다. 해당 분석은 양면발전 태양전지의 에너지 생산량에서 단면발전 유형의 에너지 생산량을 차감하는 방식으로 수행했다. 이 과정에서 도출된 값이 음수에서 양수로 바뀌는 양면발전 태양전지의 발전효율 유형을 탐색하여 최종적으로 양면발전 유형이 단면발전 대비 높은 기여도를 가지는 발전효율 유형을 탐색했다. 이에 따라 Table 14~21과 같이 지역별로 양면발전 태양전지의 기여도가 높아지는 기점을 탐색했다.

서울 지역(A)의 경우, 4장에서 최적화된 각도로 도출되었던 10~50도 범주에서 발전효율 13%를 기점으로 양면발전 유형이 단면발전 대비 에너지 생산 기여도가 높아지는 현상을 확인했으며 14%의 발전효율부터 모든 방위에서 단면발전 대비 에너지 생산성이 좋아지는 결과를 보였다.

Table 14. Energy balance matrix between single & bifacial PV in region A (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	-538.99	-360.87	-182.75	-4.63	173.49	351.62
10	-527.79	-348.55	-169.31	9.93	189.17	368.42
20	-521.81	-341.97	-162.13	17.71	197.55	377.39
30	-531.45	-352.58	-173.70	5.17	184.05	362.92
40	-521.29	-341.40	-161.51	18.38	198.27	378.16
50	-528.32	-349.14	-169.95	9.24	188.43	367.61
60	-543.33	-365.64	-187.95	-10.26	167.42	345.11
70	-546.62	-369.26	-191.90	-14.54	162.81	340.17
80	-554.20	-377.60	-201.00	-24.40	152.20	328.80
90	-577.96	-403.74	-229.52	-55.29	118.93	293.16

100	-566.23	-390.84	-215.44	-40.04	135.35	310.75
110	-569.70	-394.65	-219.60	-44.55	130.50	305.55
120	-575.21	-400.71	-226.21	-51.71	122.79	297.29
130	-564.68	-389.13	-213.58	-38.03	137.52	313.07
140	-557.82	-381.58	-205.34	-29.10	147.14	323.38
150	-563.74	-388.10	-212.45	-36.81	138.84	314.48
160	-544.08	-366.47	-188.86	-11.25	166.36	343.98
170	-539.44	-361.37	-183.29	-5.22	172.86	350.93

반대로 강릉 지역(B)에서는 최적각도로 제시되었던 40~70도 범주에서 각각 -1.52, -5.79 kWh의 연간 에너지 생산량 기여도 차이가 발생했다. 이에 따라 실제 최적각도의 범주는 40, 50도로 줄어들어야 할 것으로 판단된다.

Table 15. Energy balance matrix between single & bifacial PV in region B (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	-621.22	-433.79	-246.35	-58.92	128.51	315.95
10	-600.23	-410.69	-221.16	-31.63	157.90	347.44
20	-582.79	-391.52	-200.24	-8.97	182.31	373.59
30	-583.13	-391.89	-200.65	-9.41	181.83	373.07
40	-563.47	-370.27	-177.06	16.15	209.36	402.57
50	-564.78	-371.70	-178.62	14.45	207.53	400.61
60	-577.06	-385.21	-193.36	-1.52	190.33	382.18
70	-578.81	-387.14	-195.47	-3.79	187.88	379.55
80	-586.56	-395.66	-204.76	-13.86	177.04	367.94
90	-614.31	-426.19	-238.07	-49.94	138.18	326.30
100	-608.85	-420.18	-231.51	-42.84	145.83	334.50
110	-622.61	-435.32	-248.02	-60.73	126.56	313.86
120	-640.69	-455.20	-269.71	-84.23	101.26	286.75
130	-641.79	-456.42	-271.04	-85.67	99.71	285.08
140	-643.64	-458.44	-273.25	-88.06	97.13	282.32
150	-654.75	-470.67	-286.59	-102.51	81.57	265.65
160	-633.68	-447.49	-261.31	-75.12	111.07	297.25
170	-626.00	-439.04	-252.09	-65.13	121.82	308.78

다음으로 광주 지역(C)은 13% 발전효율 군에서 기존에 제시되었던 70~100도의 범주를 넘어 40~60도 범주에서도 에너지 생산성이 단면발전 대비 높다는 분석결과가 도출되었다.

Table 16. Energy balance matrix between single & bifacial PV in region C (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	-716.34	-518.24	-320.15	-122.05	76.05	274.14
10	-691.48	-490.90	-290.31	-89.73	110.85	311.43
20	-665.04	-461.82	-258.59	-55.37	147.86	351.08
30	-652.29	-447.79	-243.29	-38.79	165.71	370.21
40	-609.28	-400.48	-191.68	17.12	225.93	434.73
50	-585.63	-374.46	-163.29	47.87	259.04	470.20
60	-573.52	-361.14	-148.76	63.62	275.99	488.37
70	-555.52	-341.35	-127.17	87.01	301.18	515.36
80	-550.69	-336.03	-121.37	93.29	307.95	522.61
90	-573.93	-361.59	-149.26	63.08	275.42	487.75
100	-569.91	-357.17	-144.44	68.30	281.04	493.78
110	-592.73	-382.27	-171.82	38.64	249.10	459.55
120	-626.45	-419.36	-212.28	-5.19	201.89	408.98
130	-648.12	-443.20	-238.29	-33.37	171.55	376.46
140	-674.65	-472.39	-270.12	-67.86	134.41	336.67
150	-712.90	-514.46	-316.02	-117.53	80.86	279.30
160	-709.76	-511.00	-312.25	-113.50	85.26	284.01
170	-715.37	-517.18	-318.99	-120.80	77.40	275.59

부산 지역(D)은 발전효율 13% 구간에서 전 방향이 양면 발전형 태양전지의 에너지 생산 기여도가 단면발전보다 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 분석대상 지역 중 가장 이례적이며 양면발전형 태양전지의 활용이 타 지역 대비 제한될 수 있다는 분석결과를 보였다.

Table 17. Energy balance matrix between single & bifacial PV in region D (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	-811.09	-614.98	-418.88	-222.77	-26.67	169.44
10	-781.13	-582.03	-382.93	-183.83	15.27	214.37
20	-751.57	-549.51	-347.46	-145.40	56.65	258.71
30	-738.97	-535.65	-332.34	-129.02	74.30	277.61
40	-699.53	-492.27	-285.01	-77.75	129.51	336.77
50	-683.89	-475.06	-266.24	-57.41	151.41	360.23
60	-683.57	-474.71	-265.86	-57.00	151.86	360.71
70	-673.35	-463.47	-253.60	-43.72	166.16	376.04
80	-674.68	-464.93	-255.19	-45.44	164.30	374.05
90	-702.38	-495.41	-288.43	-81.46	125.52	332.49

100	-702.38	-495.40	-288.43	-81.45	125.52	332.50
110	-726.96	-522.45	-317.93	-113.41	91.10	295.62
120	-760.31	-559.13	-357.95	-156.77	44.41	245.60
130	-779.07	-579.77	-380.46	-181.16	18.15	217.46
140	-799.21	-601.92	-404.63	-207.34	-10.05	187.25
150	-827.73	-633.29	-438.85	-244.41	-49.97	144.47
160	-815.83	-620.20	-424.57	-228.94	-33.31	162.32
170	-815.17	-619.48	-423.78	-228.08	-32.39	163.31

대전 지역(E)은 강릉에서 나타났던 에너지 생산 기여도 경향이 심화되어 발전효율 13%에서는 설치각도가 에너지 생산성에 유의미한 영향력을 주지 못하는 것으로 나타났다. 이에 따라 대전 지역은 14%의 발전효율을 가진 양면발전 태양전지의 적용이 필요한 지역으로 분류된다.

Table 18. Energy balance matrix between single & bifacial PV in region E (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	-701.63	-508.41	-315.18	-121.95	71.28	264.50
10	-684.03	-489.04	-294.05	-99.06	95.93	290.91
20	-669.45	-473.01	-276.56	-80.12	116.33	312.78
30	-671.94	-475.74	-279.54	-83.35	112.85	309.05
40	-650.04	-451.66	-253.27	-54.88	143.50	341.89
50	-647.64	-449.01	-250.38	-51.75	146.87	345.50
60	-655.01	-457.12	-259.23	-61.34	136.54	334.43
70	-652.02	-453.83	-255.64	-57.45	140.74	338.93
80	-655.41	-457.56	-259.71	-61.86	135.99	333.84
90	-679.96	-484.56	-289.17	-93.77	101.62	297.02
100	-671.04	-474.76	-278.47	-82.19	114.10	310.39
110	-683.23	-488.16	-293.09	-98.02	97.05	292.12
120	-700.53	-507.20	-313.86	-120.52	72.82	266.15
130	-703.06	-509.97	-316.89	-123.80	69.28	262.37
140	-708.19	-515.62	-323.05	-130.47	62.10	254.67
150	-724.23	-533.27	-342.30	-151.33	39.64	230.60
160	-707.55	-514.91	-322.28	-129.64	63.00	255.63
170	-704.05	-511.06	-318.08	-125.09	67.89	260.88

대구 지역(F)은 서울과 마찬가지로 발전효율 13% 성능 차에서 최적각도로 제시되었던 40~80도 범주에서의 태양 전지 설치를 통해 최적화된 에너지 생산 기여도를 보일 수 있는 지역으로 분류되었다. 이러한 경향은 인천 지역(G)도

동일하게 나타나고 있으며 결과적으로 두 지역은 4장에서 제시된 최적각도 산정을 통해 최적화된 양면발전 태양전지의 활용이 가능한 지역임이 확인되었다.

Table 19. Energy balance matrix between single & bifacial PV in region F (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	-661.01	-470.70	-280.39	-90.09	100.22	290.52
10	-638.99	-446.48	-253.98	-61.47	131.04	323.55
20	-618.48	-423.92	-229.36	-34.80	159.76	354.32
30	-614.07	-419.07	-224.07	-29.07	165.93	360.93
40	-583.82	-385.79	-187.77	10.26	208.28	406.31
50	-573.87	-374.85	-175.83	23.19	222.21	421.23
60	-576.40	-377.64	-178.87	19.90	218.66	417.43
70	-572.95	-373.84	-174.73	24.38	223.49	422.60
80	-577.95	-379.33	-180.72	17.89	216.50	415.12
90	-604.99	-409.08	-213.17	-17.26	178.64	374.55
100	-600.56	-404.21	-207.86	-11.51	184.84	381.19
110	-617.54	-422.88	-228.23	-33.58	161.08	355.73
120	-640.53	-448.17	-255.82	-63.46	128.89	321.24
130	-648.94	-457.43	-265.92	-74.41	117.11	308.62
140	-659.37	-468.90	-278.43	-87.96	102.51	292.98
150	-679.50	-491.05	-302.59	-114.13	74.32	262.78
160	-665.47	-475.61	-285.75	-95.89	93.97	283.83
170	-663.51	-473.45	-283.39	-93.34	96.72	286.78

Table 20. Energy balance matrix between single & bifacial PV in region G (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	-616.66	-428.91	-241.16	-53.41	134.34	322.09
10	-594.65	-404.70	-214.75	-24.79	165.16	355.11
20	-577.18	-385.48	-193.78	-2.09	189.61	381.31
30	-576.34	-384.56	-192.78	-1.00	190.78	382.57
40	-553.73	-359.69	-165.65	28.39	222.44	416.48
50	-548.94	-354.42	-159.90	34.63	229.15	423.67
60	-553.45	-359.38	-165.31	28.76	222.83	416.90
70	-549.69	-355.24	-160.79	33.65	228.10	422.55
80	-554.68	-360.73	-166.79	27.16	221.11	415.06
90	-581.69	-390.44	-199.20	-7.95	183.30	374.54
100	-577.89	-386.26	-194.64	-3.01	188.62	380.24
110	-594.20	-404.20	-214.21	-24.21	165.78	355.78

120	-615.25	-427.36	-239.46	-51.57	136.32	324.21
130	-620.16	-432.76	-245.36	-57.96	129.44	316.84
140	-626.35	-439.57	-252.79	-66.01	120.77	307.55
150	-642.89	-457.77	-272.64	-87.51	97.61	282.74
160	-625.73	-438.88	-252.04	-65.19	121.65	308.49
170	-621.10	-433.80	-246.49	-59.19	128.12	315.43

마지막으로 목포 지역(H)은 광주와 함께 양면발전 태양전지의 에너지 생산 기여도가 최적각도 범주보다 넓어진 지역으로 분류된다. 목포지역의 최적 설치각도는 70~100도로 나타났으나, 실제 에너지 생산성 비교를 통해 분석할 경우, 해당 지역의 최적 설치각도는 40~100도로 보다 넓은 범주에서의 양면발전 태양전지 활용이 가능하다.

Table 21. Energy balance matrix between single & bifacial PV in region H (Unit : kWh)

Angle Type	Solar Cell Efficiency (%)					
	10	11	12	13	14	15
0	-689.89	-500.05	-310.22	-120.38	69.45	259.29
10	-668.42	-476.43	-284.45	-92.47	99.51	291.50
20	-643.44	-448.96	-254.48	-60.00	134.49	328.97
30	-630.69	-434.93	-239.18	-43.42	152.34	348.09
40	-586.21	-386.00	-185.80	14.40	214.61	414.81
50	-560.73	-357.98	-155.23	47.53	250.28	453.03
60	-545.50	-341.22	-136.95	67.33	271.60	475.87
70	-524.01	-317.58	-111.16	95.27	301.69	508.11
80	-516.09	-308.88	-101.66	105.55	312.77	519.98
90	-535.71	-330.46	-125.21	80.05	285.30	490.55
100	-530.00	-324.17	-118.35	87.47	293.30	499.12
110	-550.82	-347.08	-143.34	60.40	264.14	467.89
120	-582.97	-382.44	-181.91	18.61	219.14	419.67
130	-604.04	-405.62	-207.20	-8.77	189.65	388.07
140	-631.34	-435.65	-239.96	-44.27	151.42	347.11
150	-672.36	-480.77	-289.18	-97.59	93.99	285.58
160	-674.04	-482.62	-291.20	-99.78	91.64	283.06
170	-685.04	-494.72	-304.40	-114.08	76.24	266.56

지역별 양면 및 단면발전 태양전지의 에너지 생산성 비교분석 결과, 제시된 Fig. 7과 같이 부산을 제외한 7개 지역에서 발전효율 14% 유형에서부터 설치각도에 관계없이 양면발전이 단면발전 대비 에너지 생산 기여도가 우수하다는 결과가 도출되었다. 부산의 경우, 0도와 140~170도 범

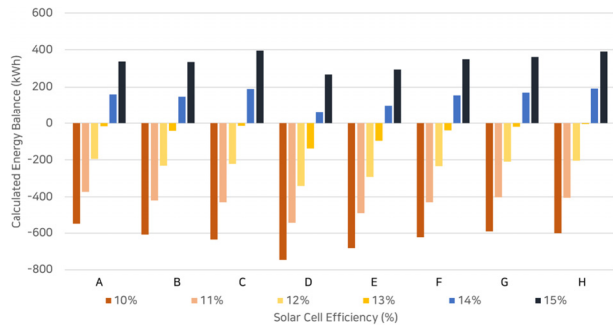


Fig. 7. Averaged energy balance data of target site

주에서 단면발전 대비 연간 10.05~49.97 kWh가 부족한 에너지 생산량을 보였다.

이러한 결과는 양면발전형 태양전지가 단면발전 대비 3% 범주내의 성능차이를 가지더라도 국내에서 에너지 생산 측면의 이점을 가질 수 있음을 시사한다. 아울러 위도·경도 특성에 따른 설치각도의 최적화에 따라 일부 지역에서는 양면발전 태양전지의 발전능력이 단면발전 대비 최대 5% 부족하더라도 에너지 생산 기여도는 유사하거나 오히려 높을 수 있다는 연구결과도 함께 도출되었다. 이에 따라 양면발전 태양전지의 발전능력 편차가 단면발전 대비 3% 이내일 경우 건축물에 활용되었던 기존 단면발전형 태양전지 대비 우수한 에너지 생산성을 갖추므로 건축적 활용 가능성이 높아질 것으로 판단된다.

6. 결론

상용화된 신재생에너지 설비이자 가장 보편적인 친환경 설비요소인 태양전지는 종래 1·2세대 실리콘 결정질 형식에서 유기·화합물을 활용하는 3세대에 도달했다. 이로 인해 태양전지의 에너지 생산방식과 형식, 발전효율, 활용광원 등 다양한 유형의 태양전지가 연구·개발되고 있는 실정이며 일부 태양전지는 기초적 연구단계에서 점진적으로 실용화 추세를 보이는 실정에 있다. 그러나 이러한 기술적 진보를 수용해야 할 태양전지 관련 제도, 지침 및 가이드라인과 같은 기술활용 측면에서의 연구는 그 필요성의 대두에도 불구하고 아직까지 미비한 실정이다.

이에 따라 본 연구는 표면 일사량 시뮬레이션 및 태양전지 발전량 추정식을 기반으로 양면발전 태양전지 활용 가능

성을 검토했으며, 이에 따라 국내에서는 지역의 위치에 따라 40~80도가 최적화된 설치 범주라는 결과를 도출했다. 아울러 단면발전 태양전지의 18% 발전효율을 기준으로 양면발전 태양전지는 14% 수준에서 에너지 생산 기여도가 높아질 수 있다는 연구결과가 함께 도출되었다. 제시된 연구결론은 향후 양면발전 태양전지의 건축·도시적 적용을 위한 후속연구에서 설치 및 운용에 대한 기초자료로 활용 가능하며 나아가 제도적 측면에서 양면발전 태양전지의 설치 관련 지침 및 가이드라인 개발에 대한 근거자료로써 유의미성을 지닐 수 있다.

그러나 본 연구는 전·후면의 에너지 생산능력이 동일하지 않다는 양면발전 태양전지의 특성을 반영하지 못했다는 점과 기상 상황·전기에너지 손실·배터리 등 발전효율 검토에 고려되어야 할 세부적인 매개변수를 연구에 적용하지 못했다는 한계를 지닌다. 여기에 더해 설정된 분석대상 공간이 일반적인 건축물의 면적과 체적보다 작아 실제 건축물에 설치되는 태양전지 발전면적보다 작게 적용되었다는 부분도 한계점 중 하나로 인지된다. 따라서 향후 연구에서는 태양전지 발전효율 및 에너지 생산과 관련된 세부 매개변수의 적용과 함께 보편적인 건축물 규격을 가진 분석공간을 대상으로 양면발전 태양전지의 활용 가능성에 대한 검토가 함께 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 이공분야기초연구사업 중견연구자지원사업(NRF-2021R1A2C2011893, 과제명 : 지역 대응형 에너지스케이프 구현을 위한 스마트 건축외피 개발)의 지원으로 수행되었습니다

References

- [1] Gang, J.W., 2023, "Solar industry trends in the first half of 2023", Korea Eximbank Overseas Economic Research Institute, <https://keri.koreaexim.go.kr/HPHFOE050M01/102692?curPage=1>.
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2023, "Guidelines

- for operation of renewable portfolio standard and renewable fuel standard”.
- [3] Prime Minister’s Secretariat, 2023, “Check result briefing data of second inspection of the electric power industry foundation construction work”, Accessed 20 July 2023, <https://www.opm.go.kr/opm/news/press-release.do?mode=view&articleNo=154055&srSearchVal=%ED%83%9C%EC%96%91%EA%B4%91&article.offset=0&articleLimit=10>.
- [4] Jeong, Y.S., and Yeo, J.S., 2018, “KISTEP Technology trend brief perovskite solar cell”, Korea Institute of Science & Technology Evaluation and Planning, https://www.kistep.re.kr/boardDownload.es?bid=0031&list_no=34958&seq=9649.
- [5] Kim, D.H., 2021, “Next generation of solar cell development and technology trends based on perovskite”, Accessed 20 July 2023, <http://www.sejongpr.ac.kr/sejongwebzin/newspaperview.do?pkid=33456>.
- [6] National Renewable Energy Laboratory, 2023, “News release: Bifacial perovskite solar cells point to higher efficiency”, Accessed 20 July 2023, <https://www.nrel.gov/news/press/2023/news-release-bifacial-perovskite-solar-cells-point-to-higher-efficiency.html>.
- [7] Park, G.T., 2020, “Innovative growth item analysis report: Third generation solar cell”, Korea Exchange, http://data.krx.co.kr/inc/lib/pdfjs/web/viewer.html?file=%2Fcomm%2FfileDn%2Fdownload_att%2Fdownload.cmd%3Fcode%3DE3QYxRw%2BguOeN5kZgZ0HkxZzbiqiGmk2IBNoxfMWk7VecWj%2F5%2BVpRhKV%2FCNHFu7p365zuS%2Bqvft83t0cRCDILE7jhFi43K0XBUCT0a3AzSd7EpIF1RtIV7X1GG81%2FyVz9j4KTdeURNSNrVE2c9DIRsKtiZjdE5buBelFpG26rK%2FvJt%2FdkbJfv8y3sD5KeAVD%2Bkw%2BSz9mauooJv%2Ffx7hbzw%3D%3D.
- [8] Wu, J., Li, Y., Tang, Q., Yue, G., Lin, J., Huang, M., and Meng, L., 2014, “Bifacial dye-sensitized solar cells: A strategy to enhance overall efficiency based on transparent polyaniline electrode”, *Scientific Reports*, **4**(1), 4028.
- [9] Venkatesan, S., Lin, W.H., Teng, H., and Lee, Y.-L., 2019, “High-efficiency bifacial dye-sensitized solar cells for application under indoor light conditions”, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**(45), 42780-42789.
- [10] Bastiani, M.D., Subbiah, A.S., Babics, M., Ugur, E., Xu, L., Liu, J., Allen, T.G., Aydin, E., and Wolf, S.D., 2022, “Bifacial perovskite/silicon tandem solar cells”, *Joule*, **6**(7), 1431-1445.
- [11] Jiang, Q., Song, Z., Bramante, R.C., Ndione, P.F., Tirawat, R., Berry, J.J., Yan, Y., and Zhu, K., 2023, “Highly efficient bifacial single-junction perovskite solar cells”, *Joule*, **7**(7), 1543-1555.
- [12] An, Y.J., Lee, T.K., and Kim, K.H., 2021, “Prediction of photovoltaic power generation based on LSTM considering daylight and solar radiation data”, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **70**(8), 1096-1101.
- [13] Youn, J.H., 2020, “Digital surface model based proper installation site analysis for soundproof wall integrated photovoltaic system”, *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*, **21**(3), 556-563.
- [14] Yoo, B.J., and Lee, J., 2017, “A study on photovoltaic power generation amount forecast at design stage for extended application in the field of railways”, *Journal of the Korean Society for Railway*, **20**(2), 182-189.
- [15] Kim, S.H., Kim, S.S., Kim, K.W., and Cho, Y.H., 2014, “A study on the proposes of energy analysis indicator by the window elements of office buildings in Korea”, *Energy and Buildings*, **73**, 153-165.
- [16] Hwang, I.T., 2019, “Introduced the minimum efficiency system for solar modules by 17.5% from 2020”, Ministry of Trade, Industry and Energy, Accessed 23 July 2023, https://motie.go.kr/motie/gov3.0/gov_openinfo/sajun/bbs/bbsView.do?bbs_seq_n=162382&bbs_cd_n=81.
- [17] Park, S.H., and Seo, J.H., 2012, “A study on the photovoltaic module layout considering the azimuth and inclination in region”, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, **24**(6), 461-466.