

제로에너지 건축물 계획을 위한 태양광 시스템의 디자인·성능 통합 평가 프로세스*

Integrated Design Process for Performance and Aesthetic Evaluation of PV System in Zero-Energy Building Plans

김이레** · 박준환*** · 백승효****

I-Re Kim** · Jun-Hwan Park*** · Seung-Hyo Baek****

Abstract

With the implementation of Zero-Energy Building (ZEB) certification, the installation of photovoltaic (PV) systems in buildings has become virtually mandatory. Consequently, planning for ZEBs must consider both the performance and integration of PV systems. Moreover, since the aesthetic impact of PV panels on architectural design must also be addressed, this study proposes an integrated evaluation process that simultaneously considers both the design and performance of PV systems in ZEB planning. The proposed process enables early-stage feasibility assessments of achieving target energy independence rates during the massing study phase, while also evaluating system performance and visualizing PV panel layouts. The accuracy of the core function- the performance evaluation module- was validated using the System Advisor Model (SAM), yielding a maximum CV(RMSE) of only 3.68% across various test cases, indicating high computational precision. Finally, case studies were conducted to verify the practical applicability of the process, with all three participants successfully developing design schemes that met the target energy independence rate.

Keywords: Zero-Energy Building, Photovoltaic, Target Energy Independence Rate, Integrated Evaluation Process for Both the Design and Performance

1. 서론

건축분야에서 탄소 중립 목표를 효과적으로 달성하기 위해 제로에너지 건축물 인증제도가 시행되고 있다. 연면적 1,000m² 이상 공공건축물을 시작으로 적용 범위가 점차 확대되고 있으며 2030년 이후에는 사실상 국내 대부분의 신축 건물이 제로에너지

건축물로 구현되어야 할 것으로 예상된다. 지금까지는 단열 기준 강화, 기밀 시공, 창호 시스템 개선 등을 통하여 건물 에너지 소비 절감에 정책이 집중되었으나, 앞으로는 에너지 자립을 위한 신재생 에너지 시스템의 계획 및 설치가 더욱 중요해질 것으로 보인다. 정민희(2024)의 연구에서도 탄소중립 건물의 달성을 위해 다양한 신재생에너지원의 적용 필요성

*이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2022R1F1A1062895).

**목원대학교 일반대학원 건축학과 석사과정(주저자: dlfpdlfp82@mokwon.ac.kr)

***목원대학교 일반대학원 건축학과 석사과정

****목원대학교 건축학부 조교수(교신저자: shbaek@mokwon.ac.kr)

을 언급하였다.

이를 위해서는, 기존의 건축 계획 과정에 신재생 에너지 시스템의 계획이 더 긴밀하게 연계될 필요가 있다. 한정된 기계실 면적으로도 설치가 충분한 기존의 설비 시스템과 달리 신재생 에너지 시스템은 건물의 외피 및 대지에 설치되고, 설치면적에 따라서 용량이 달라진다. 즉, 설치면적이 충분하지 않을 경우, 제로에너지 건축물 인증을 위한 목표 에너지 자립률의 달성이 불가능할 수 있다. 이러한 설치면적은 건축가가 결정하는 건물의 형태에 따라서 달라지므로, 건축 매스 계획 단계에서부터 신재생 에너지 시스템의 설치 가능 면적과 이에 따른 달성 가능한 에너지 자립률의 산정 또한 필요할 것으로 예상할 수 있다.

다양한 신재생 에너지 시스템 중에서도 태양광 발전 시스템은 건물의 외피에 설치된다는 점에서, 건축 매스 계획 단계에서 에너지 성능에 대한 평가뿐만 아니라 디자인에 대한 검토도 필요하다. 정민희(2020)의 연구에서 확인할 수 있듯이, 창호형 BIPV와 같은 기술 개발로 과거에 비하여 건물 외피와 태양광 발전 시스템 간의 미적인 측면에서의 조화가 잘 이루어지는 편이지만, 여전히 태양광 발전 시스템은 건물의 디자인을 훼손한다는 인식이 강하게 존재한다. 제로에너지 건축물 구현을 위하여 태양광 발전 시스템의 설치가 사실상 필수적인 상황임을 고려한다면, 건물의 형태 및 입면 디자인과 최대한 조화를 줄 수 있는 태양광 발전 시스템의 디자인 또한 매우 중요하다.

태양광 발전 시스템의 성능과 디자인에 대한 평가 및 계획을 위하여 기존의 태양광 발전 시스템 계획 툴의 활용이 가능하다. 하지만 기존의 툴은 태양광 발전 시스템에 관련된 성능 정보와 배치, 개수, 각도와 같은 설치정보에 따른 에너지 생산량 계산에 기능이 집중되어 있다. 즉, 기존 툴의 활용 시 태양광 시스템의 디자인 측면에서의 검토가 어렵다고 볼 수

있다. 또한, 건축가가 매스 계획 단계에서 설계안을 변경할 때마다 태양광 시스템에 대한 계획과 성능 평가를 새롭게 해야 한다는 번거로움이 존재한다. 최근에 발표된 Revit의 Solar Analysis는 Revit 내에서 태양광 패널을 시각적으로 모델링하고, 모델링된 정보를 바탕으로 즉각적으로 에너지 생산량을 계산함으로써, 태양광 발전 시스템의 디자인, 성능 평가를 모두 가능하게 한다. Salimzadeh et al.(2020)의 연구에서는 BIM 기반 태양광 시스템 디자인 플랫폼을 개발하여 민감도 분석 결과에 따른 태양광 패널 최적 배치안을 제공하도록 하였다. 하지만, 제로에너지 건축물 계획을 위해서는 목표에너지 자립률을 달성할 수 있는 태양광 발전 시스템의 계획을 사용자가 개별적으로 수행해야 한다.

종합하면, 건축가에 의해 주로 수행되는 매스 계획 단계에서 목표 에너지 자립률 달성 여부를 판단할 수 있는 성능 관점에서의 사전 검토와 태양광 발전 시스템 배치에 따른 디자인 검토가 모두 수행될 수 있는 새로운 태양광 발전 시스템 디자인 프로세스와 이를 구현하기 위한 툴의 개발이 필요하다. 이러한 프로세스의 활용 측면에서 별도의 디자인 툴의 개발이 아닌 건축가가 주로 활용하는 설계 툴과의 통합 또한 필요하다. 이에, 본 연구에서는 제로에너지 건축물 계획을 위한 태양광 시스템의 디자인·성능 통합 평가 프로세스의 제안을 목표로 한다. 또한, 제안된 프로세스를 일반적인 건축 설계 툴인 SketchUp에서 구현될 수 있도록 플러그인 형태로 개발을 수행하였다.

이를 위하여 우선 제로에너지 건축물 계획 관점에서 태양광 발전 시스템의 디자인·성능 통합 평가 프로세스를 제안하였다. 다음 단계로 프로그래밍 언어 중 하나인 Ruby를 이용하여 제안된 프로세스를 스케치업의 플러그인을 통하여 구현하였다. 디자인·성능 통합 프로세스의 태양광 발전 시스템 에너지 성능 계산 파트의 정확도를 평가하기 위하여 신재생

에너지 시스템 계획 및 평가 프로그램인 SAM을 이용하였으며, 마지막으로 실제 사용자가 본 프로세스에 따라서 목표에너지 자립률 달성을 위한 건축 매스터디를 수행함으로써, 제안된 프로세스의 유용성을 확인하였다.

2. 태양광 발전 시스템의 디자인·성능 통합 평가 프로세스 제안 및 구현

2.1 태양광 발전 시스템의 디자인·성능 통합 평가 프로세스 수립

SAM, Homer, PVsyst와 같은 기존의 태양광 발전 시스템 전용 평가툴과 달리 Revit에 탑재된 Solar Analysis는 건축 모델링 과정에서 즉각적으로 태양광 패널의 배치, 성능 평가를 가능하게 한다. 건축 디자인 툴과 결합이 되지 않은 기존 전용 툴에 비하여 Revit의 Solar Analysis는 건축가가 활용할 수 있는 설계 툴에 PV 성능 평가가 탑재되어 있다는 점에서 건축 설계 과정과 태양광 발전 시스템 성능 평가의 통합을 가능하게 한다. 하지만 이러한 개선에도 불구하고 여전히 제로에너지 건물 구현을 위한 태양광 발전 시스템 계획 측면에서 건축가 및 엔지니어는 어려움을 겪을 수 있다. 목표 에너지 자립률 달성을 위한 태양광 발전 시스템 계획을 위해서는 반복적으로 태양광 패널의 배치를 변경해가며 에너지 생산량 계산을 수행해야하기 때문이다.

본 연구에서는 이러한 어려움을 해결하기 위하여 기존의 건축 매스 계획 단계에 제로에너지 건축물 구현 관련 사전 검토 프로세스를 결합하였다. 즉, 사용자가 계획한 건축안에 대하여 최대 태양광 패널을 설치할 때 달성 가능한 에너지 자립률을 제시함으로써, 사용자가 제로에너지 건축물 달성 여부를 판단할 수 있게 한다. 건축가 또는 엔지니어에게 설계안에서 달성 가능한 최대 에너지 자립률을 알려줌으로써, 제로에너지 건축물 달성 여부와 제로에너지

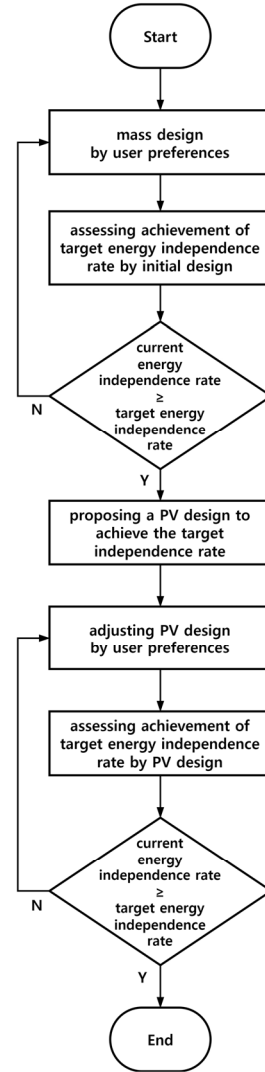


Fig. 1. Integrated Design Process for Performance and Aesthetic Evaluation of PV

건축물 달성을 위해 필요한 대략적인 PV의 규모를 확인할 수 있는 사전 검토 기능의 역할을 수행할 수 있다. 또한, 해당 단계에서 태양광 배치안을 시각화하여 사용자에게 보여줌으로써, 태양광 패널이 건축물에 배치되었을 때의 디자인에 대한 검토까지 사용자가 할 수 있도록 하였다.

이를 위해서는, 건물에 최대 설치가능한 태양광 패널의 개수 산정이 필요하다. 이는 각 면의 표면적

과 태양광 패널 한 장의 크기를 이용하여 산정할 수 있다. 태양광 패널을 옥상에 설치하는 경우에는 에너지 생산량을 최대화하기 위하여 후면 통풍형으로 설치하는 것이 유리하다. 이때, 인접 PV 모듈에 의한 음영으로 에너지 생산이 저하될 수 있으므로 각 모듈의 최소 이격거리를 설정하여 PV 모듈의 설치 가능개수를 산정하였다. 그리고 PV의 각도와 방위, 설치 방식은 에너지 생산량을 최대화할 수 있는 유형으로 가정한다.

다음으로 건축가의 선호도에 따라서 자유롭게 태양광 패널을 모델링할 수 있는 단계 또한 제안하였다. 사전 검토 단계에서 제시된 태양광 발전 시스템의 설치 개수를 참고하여 사용자는 자유롭게 목표 에너지 자립률을 달성할 수 있는 태양광 패널의 배치를 수행한다. 다음 단계로 배치안에 대한 에너지 생산량 계산을 수행함으로써, 목표 에너지 자립률 달성 여부를 사용자에게 알려준다. 사용자는 이를 참고하여 태양광 발전 시스템의 계획안을 수정하거나, 건물의 형태를 조정하여 다시 성능 평가를 수행하여 최종적으로 사용자가 만족할 수 있는 태양광 발전 시스템 계획안을 도출하도록 하였다. 제안하는 프로세스를 정리하면 Fig. 1과 같다.

2.2 에너지 자립률 계산 알고리즘 수립

에너지 자립률은 식 (1)과 같이 건물의 에너지 소비량에 대한 신재생 에너지 시스템에서의 에너지 생산량의 비율로 계산된다.

건물 에너지 소비량의 산정을 위하여 동적 건물 에너지 시뮬레이션의 활용이 가능하다. 하지만, 매스 계획이 이루어지는 초기 설계 단계에서는 다양한 건축적 정보(건물 형태, 창 면적, 단열 정도 등)가 불확실하므로 에너지 시뮬레이션을 위한 정확한 모델링이 어렵다고 볼 수 있다. 이에, 건물 에너지 소비량 측정 데이터를 이용한 에너지 소비량 산정이 좀 더 타당한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 하수연(2020)

Table 1. The Annual Energy Consumption per Unit Area for Office Buildings

Total Floor Area Range	Annual Energy Consumption per Unit Area (kWh/m ² ·yr)
Office Buildings (Less than 3,000 m ²)	115.3
Office Buildings (3,000 m ² ~9,999 m ²)	126.4
Office Buildings (10,000 m ² or More)	171.9

Source: Ha (2020) (in Korean)

의 연구에서 제시한 연면적에 따른 업무시설의 단위 면적당 연간 에너지 소비량 데이터를 활용하였다. 해당 데이터는 Table 1과 같다.

태양광 시스템의 에너지 생산량 계산은 Gilman et al.(2018)에서 제시한 이론을 이용하였다. 해당 이론은 미국 국립재생에너지 연구소(NREL, National Renewable Energy Laboratory)에서 검증된 이론으로 대표적인 신재생 에너지 평가 프로그램인 System Advisor Model(이하, SAM)에도 적용된 이론이다. 태양광 시스템 에너지 생산량은 식 (2)와 같이 계산되며, 계산을 위하여 셀 온도에 따른 태양광 모듈의 발전 효율, 태양광 모듈에 입사되는 일사량, 발전 과정에서 손실이 필요하다. 셀 온도에 따른 태양광 모듈의 발전 효율은 Evans(1981)이 제시한 이론을 이용하였으며, 식 (3)과 같다. 태양광 셀의 온도는 King et al.(2004)에서 제시한 이론을 이용하였으며 계산식은 식 (4)와 같다. 태양광 모듈의 후면 온도는 모듈의 설치 방식에 따라 크게 달라진다. 즉, 후면이 외기에 면할 경우에는 자연적으로 냉각되어 효율의 상승을 기대할 수 있지만, 후면이 건물에 밀착될 경우에는 냉각 효과가 저감되어 효율이 저감될 수 있다. 식 (5)는 태양광 모듈의 설치 방식에 따른 영향을 반영할 수 있도록 온도 계수를 이용하고 있으며, 해당 계수는 Table 2와 같다.

Table 2. a , b , and ΔT According to the Structure and Mounting of Solar Panels

PV Type	Structure and Mounting	a	b	ΔT
Mono & Poly	Glass/Cell/Glass - Open Rack	-3.47	-0.0594	3
	Glass/Cell/Glass - Close Roof Mount	-2.98	-0.0471	1
Thin-Film	Polymer/Thin Film/Steel - Open Rack	-3.58	-0.1130	3
	Polymer/Thin Film/Steel - Close Roof Mount	-	-	-

Note: The values for thin-film close roof mount are not available. Therefore, the same values as the open rack are applied.

태양광 패널의 에너지 생산에 가장 큰 영향을 미치는 일사량의 경우, 신재생에너지 데이터센터에서 제공하는 국내 11개 지역의 기상 데이터를 이용하였다. 기상 데이터에 포함되어 있는 법선면 직달일사량과 수평면 산란일사량을 기반으로 태양광 패널 표면에 입사되는 전일사량을 계산하였다. 또한, 태양광 패널에서의 전력 생산부터 공급까지의 손실을 고려하였으며, 이에 대한 계산식은 식 (6)과 같다.

$$EIR = \frac{E_g}{E_c} \times 100 \quad (1)$$

여기서,

EIR : 건물의 에너지 자립률(%)

E_g : 신재생 에너지 시스템의 에너지 생산량
($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$)

E_c : 건물의 에너지 소비량($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{yr}$)

$$P_{DC} = \frac{\eta_p}{100} \cdot A_m \cdot I \cdot \left(1 - \frac{L_{DC}}{100}\right) \quad (2)$$

여기서,

A_m : 태양광 패널의 면적(m^2)

η_p : 셀 온도에 따른 태양광 패널의 발전 효율(%)

I : 태양광 패널의 표면 일사량(W/m^2)

L_{DC} : 태양광 패널의 직류 발전과정에서 손실률(%)

P_{DC} : 태양광 패널의 직류 전력(Wh)

$$\eta_p = \eta_r [1 - \beta_p (T_c - T_r)] \quad (3)$$

여기서,

T_c : 태양광 셀의 온도($^{\circ}\text{C}$)

T_r : 기준 온도(STC, 25°C)

β_p : 태양광 패널의 온도 계수($\%/^{\circ}\text{C}$)

η_r : 태양광 패널의 공칭 효율(%)

η_p : 셀 온도에 따른 태양광 패널의 발전 효율(%)

$$T_c = T_m + \frac{I}{1000} \Delta T \quad (4)$$

여기서,

I : 태양광 패널의 표면 일사량(W/m^2)

T_m : 태양광 패널의 후면 온도($^{\circ}\text{C}$)

T_c : 태양광 셀의 온도($^{\circ}\text{C}$)

$$T_m = I \cdot e^{a+bV_w} + T_a \quad (5)$$

여기서,

$a, b, \Delta T$: 태양광 패널의 종류 및 설치 방식에 따른 온도 계수

T_a : 외기 온도($^{\circ}\text{C}$)

I : 태양광 패널의 표면 일사량(W/m^2)

V_w : 풍속(m/s)

T_m : 태양광 패널의 후면 온도($^{\circ}\text{C}$)

$$P_{AC} = P_{DC} \cdot \frac{\eta_i}{100} \cdot \left(1 - \frac{L_{AC}}{100}\right) \quad (6)$$

여기서,

P_{DC} : 태양광 패널의 직류 전력(Wh)

η_i : 인버터의 변환 효율(%)

L_{AC} : 인버터 교류 변환 효율 외 손실률(%)

P_{AC} : 건물에 공급되는 교류 전력(Wh)

2.3 스케치업 플러그인 개발

본 연구에서 제안한 알고리즘의 구현을 위하여, 스케치업에서 사용할 수 있는 별도의 플러그인을 개발하였다. Visual studio 개발환경 내의 Ruby언어를 이용하였으며, 최대 에너지 자립률 평가 기능, 태양광 발전 시스템 에너지 성능 평가 기능을 각각 개발하였다. 사용자가 최대 에너지 자립률 평가 기능을 실행하면, Fig. 2과 같이 건물 외피에 최대 태양광 패널을 설치했을 때의 결과를 시각화하여 보여주고, 이와 더불어 연간 에너지 생산량, 에너지 자립률과 같은 에너지 성능 데이터와 태양광 패널 설치 각도, 방위, 개수와 같은 설치와 관련되는 정보를 제공한다.

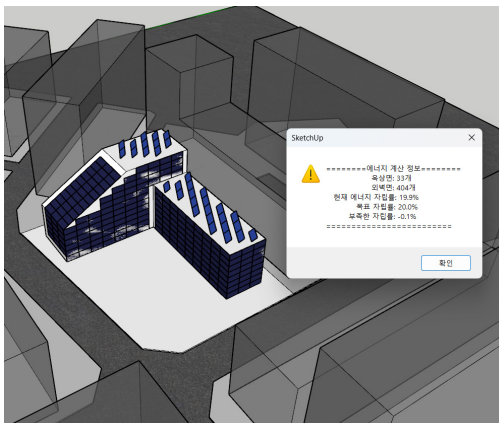


Fig. 2. Evaluating the Rate of Maximum Energy Independence by the Tool

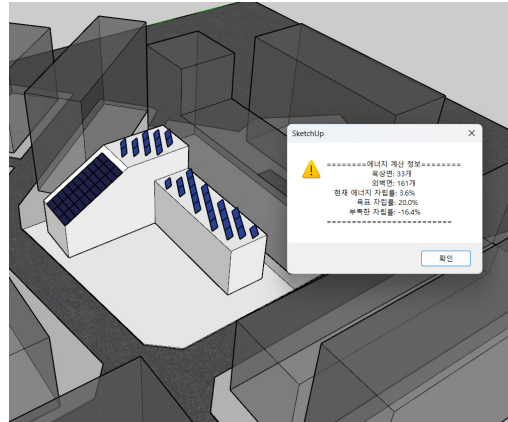


Fig. 3. Evaluating the Energy Performance of a PV System by the Tool

태양광 발전 시스템 에너지 성능 평가 기능을 실행했을 때에도 Fig. 3과 같이, 계획안에 대한 에너지 성능 데이터와 태양광 패널 설치 정보를 사용자에게 제공하여 변경된 설계안에 대한 성능을 평가할 수 있도록 하였다.

3. 태양광 발전 시스템 에너지 성능 평가 모듈 검증

3.1 검증 조건

태양광 발전 시스템의 디자인·성능 통합 평가 프로세스의 활용성을 확인하기 위해 앞서 태양광 발전 시스템의 에너지 성능 평가 모듈 정확성을 우선적으로 검증하였다. 국내 주요 도시와 태양광 발전 시스템의 설치 방식에 따른 연간 에너지 생산량을 계산하였고, 동일한 조건을 대표적인 신재생 에너지 시스템 평가 프로그램인 SAM에 모델링하여 그 결과를 비교하였다. 대상 지역은 서울, 부산, 대구, 대전, 광주 5개 도시이며, 태양광 패널 설치를 위해 스케치업 상에 가로 12m, 세로 12m, 높이 8m 크기의 건물을 모델링하였다. 태양광 패널의 설치 방식은 옥상에 설치하는 옥상 후면 통풍형, 옥상 부착형, 벽면 부착

Table 3. Detailed Items of Loss Factors Applied to the Energy Production of Solar Panels

Name	Description	Value (%)
AC Wiring	AC wiring losses of Inverter	1.0
PV Mismatch	Connection losses between PV modules	0.5
Diodes and Connections	Connection losses between bypass diodes	2.0
DC Wiring	DC wiring losses of PV modules	2.0
Soiling	Average annual soiling loss	5.0

형 3가지를 가정하였다. 후면 통풍형의 경우, 김진철·김경남(2018)에서 제시하는 태양광 패널 최적 설치 각도인 33°로 가정하였고, 정남, 정동, 정서 세 방향의 설치에 대해서도 평가하였다.

건물에 설치되는 태양광 패널 12개를 하나의 어레이로 구성하였으며, 패널의 종류는 2m² 크기의 단결정 모듈이다. 해당 패널의 효율은 19.0%로 설정하였으며, 이때의 온도 계수는 -0.4%/°C이다. 태양광 모듈의 에너지 생산량에 적용되는 손실률은 10.5%로 이에 대한 세부 항목은 Table 3과 같다.

3.2 검증 결과

각 지역, 설치 방식별 태양광 발전 시스템의 연간 에너지 생산량을 정리하면 Table 4와 같다. SAM과 성능 평가 모듈 간의 오차를 비교하기 위하여 각 방식 별로 오차율을 CV(RMSE)로 정리하여 표에 기입하였다. 결과에 따르면, 가장 오차율이 낮은 경우는 대구에 옥상 후면 통풍으로 정남 설치를 한 경우로 CV(RMSE)는 0.59%이며, 가장 오차율이 큰 경우 역시 지역이 대구인 경우로 벽 부착 방식으로 정동을 향하는 경우이다. 이 때의 CV(RMSE)는 3.68%이며 연간 에너지 생산량의 차가 22.9kWh/yr에 불과하다. 설치방식 별 오차율의 패턴을 분석하여 보면, 옥상 후면통풍, 옥상 부착, 벽 부착의 순으로 오차가 크게 나타난다. 이는, 태양광 패널 후면의 온도에 따른 효율 계산이 SAM의 경우 Gilman et al.(2018)에서 제시한 Simple Efficiency Module Model을 사용하

며, PV design tool의 경우 Evans(1981)에서 제시한 이론을 사용하기 때문인 것으로 판단된다. 하지만, 가장 일반적인 설치 방식인 옥상 후면 통풍 또는 옥상 부착의 경우 평균 CV(RMSE)가 각 1.1%, 1.36%로 SAM과 성능 평가 모듈의 계산 결과가 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

4. 케이스 스터디

4.1 케이스 스터디 수행 조건

본 연구에서 제안하는 태양광 발전 시스템의 디자인·성능 통합 평가 프로세스의 유용성을 확인하기 위하여 3명의 참가자를 대상으로 케이스 스터디를 수행하였다. 참가자는 모두 관련 전공 학생들로 구성되어 있다. 대상 학생들은 실무 경험이 전무하나 초기 설계 단계에서의 매스 스터디를 대상으로 한다는 측면에서, 학생들을 대상으로 케이스 스터디를 수행하는 데 있어 큰 어려움이 없다고 판단하였다. 케이스 스터디를 통하여 사용자가 목표 에너지 자립률을 달성할 수 있는 태양광 발전 시스템의 계획을 수행할 수 있는지 여부를 확인하고자 하였다.

이를 위하여, 각 참가자에게 동일한 대지 조건을 제공하고 해당 대지에 대하여 사용자의 선호에 따라서 자유롭게 매스 스터디를 진행하도록 하였다. 제로에너지 빌딩 구현 측면에서 사전 검토 기능의 유용성을 확인하기 위하여 매스 스터디가 완료된 사용자에게 최대 에너지 자립률 평가 기능을 실행하여

Table 4. Comparison of Energy Production Calculation Results by Region between SAM and Energy Performance Evaluation Module

	Mounting	Azimuth	SAM (kWh/yr)	Performance Evaluation Module (kWh/yr)	CV(RMSE) (%)
Seoul	Roof - Open Rack	East	5,733.8	5,727.8	1.52
		South	6,867.7	6,877.8	0.63
		West	5,565.1	5,557.9	1.33
	Close Wall Mount	East	3,491.7	3,514.5	2.99
		South	4,916.7	4,965.1	3.27
		West	3,296.9	3,318.5	2.47
	Close Roof Mount	-	6,093.3	6,072.3	1.46
Busan	Roof - Open Rack	East	5,810.4	5,804.0	1.19
		South	7,033.0	7,044.3	0.60
		West	5,840.1	5,834.7	1.21
	Close Wall Mount	East	3,415.3	3,436.1	1.63
		South	4,868.9	4,918.5	2.47
		West	3,423.5	3,445.4	1.83
	Close Roof Mount	-	6,346.8	6,327.7	1.31
Daejeon	Roof - Open Rack	East	5,769.5	5,764.6	1.66
		South	6,878.2	6,889.4	0.69
		West	5,669.2	5,663.6	1.27
	Close Wall Mount	East	3,459.6	3,482.5	3.68
		South	4,878.1	4,927.2	2.57
		West	3,334.4	3,355.7	1.62
	Close Roof Mount	-	6,174.7	6,155.8	1.38
Daegu	Roof - Open Rack	East	5,867.5	5,861.3	1.21
		South	7,086.9	7,097.9	0.59
		West	5,827.0	5,821.7	1.25
	Close Wall Mount	East	3,511.4	3,532.2	1.82
		South	5,005.0	5,053.4	2.38
		West	3,436.5	3,458.3	1.78
	Close Roof Mount	-	6,346.2	6,326.2	1.35
Gwangju	Roof - Open Rack	East	5,868.2	5,861.6	1.49
		South	6,906.8	6,916.5	0.64
		West	5,833.1	5,826.2	1.22
	Close Wall Mount	East	3,593.8	3,613.2	3.10
		South	4,908.1	4,956.7	2.50
		West	3,543.2	3,561.7	1.49
	Close Roof Mount	-	6,242.8	6,225.2	1.31

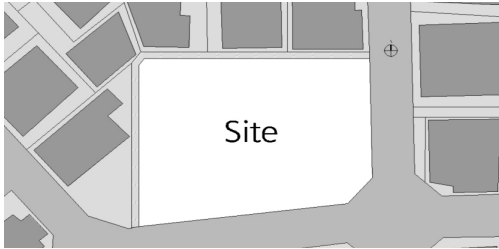


Fig. 4. Site of the Case Studies

최대로 태양광 패널이 설치되었을 때의 에너지 자립률을 확인할 수 있도록 하였다. 그 이후에는 사용자가 자유롭게 태양광 패널의 계획을 변경하고 태양광 발전 시스템 에너지 성능 평가 기능을 이용하여 즉각적으로 목표 에너지 자립률 달성 여부를 확인할 수 있도록 하였다. 케이스 스터디 수행을 위한 대지의 형태는 Fig. 4과 같다. 대지면적은 767.3m²이며 건폐율 60%, 용적률 200%의 업무시설을 기준으로 하여 설계를 수행하였다. 또한 지역은 서울로 가정하였다.

4.2 케이스 스터디 수행 결과

각 참가자 별로 목표 에너지 자립률을 달성하는 설계안을 도출하는 과정을 정리하여 Table 5에 나타내었다. Table 5에서 보는 바와 같이 각기 다른 초기 매스 디자인이 결정되었고, 초기 매스 디자인으로부터

목표 에너지 자립률 달성 여부의 판단, 태양광 모듈 배치에 따른 성능 평가, 매스 수정의 과정을 반복하면서 최종적인 설계안을 도출해내는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 제시한 디자인·성능 통합 평가 프로세스에 따라서 설계안이 도출되는 것 역시 확인할 수 있다.

하지만, 각 참가자 별로 설계안의 도출하는 데 있어 접근법 역시 다름을 알 수 있다. 1번 참가자는 초기 매스 디자인을 최대한 고수하면서 태양광을 건물 형태에 맞추고, 주로 옥상에 태양광을 배치하여 매스 디자인에 태양광이 미치는 영향을 최소화함으로써 목표 에너지 자립률을 달성하였다. 2번 참가자는 최대 에너지 자립률 평가 기능을 통해 디자인한 매스에 태양광 패널이 최대 설치되었을 때의 에너지 자립률을 확인하고, 이를 바탕으로 매스 디자인에 따라 결정되는 태양광 설치 가능 면적의 관계를 파악하였다. 이후 매스 디자인을 변경하고, 변경된 매스 디자인에 적합한 태양광 배치를 계획하여 목표 에너지 자립률을 달성하였다. 3번 참가자는 목표 에너지 자립률을 달성하기 위해 초기 매스 디자인을 대폭 수정하여 태양광 설치 면적을 최대한 확보하였다. 또한 건물 형태보다는 에너지 생산을 우선적으로 고려하여 태양광 계획을 수행함으로써 목표 에너지 자립률을 달성하였다.

Table 5. Test Results by Participant

Participant	Process							Achieving the Target Independence Rate
	Initial Mass Design	Preliminary Review	PV Placement	Mass Modification	PV Placement	Mass Modification	PV Placement	
No. 1								
No. 2							Pass →	
No. 3								

이러한 결과를 종합하여 볼 때, 디자인·성능 통합 평가 프로세스에 따른 설계 결과가 일차적으로 목표 에너지 자립률을 달성할 수 있는 태양광 시스템 계획을 도출할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 그와 별개로 건물의 형태를 결정하는 데도 태양광 패널의 배치를 고려하여 결정하였다. 실무 경험이 전무한 학생들도 목표 에너지 자립률을 달성할 수 있는 건물 매스와 태양광 패널에 대한 계획을 무리없이 하는데에서 본 설계 프로세스의 유용성이 충분히 입증되었다고 판단된다.

5. 결 론

제로에너지 건축물 구현을 위해서는 기존의 건축 설계 프로세스에 신재생 에너지 시스템의 계획이 더 긴밀하게 연계되어야 한다. 특히, 태양광 발전 시스템은 건물의 외피에 설치된다는 점에서 에너지 성능 뿐만 아니라 디자인에 대한 검토가 제로에너지 건축물 계획 단계에서 반드시 수행되어야 할 것이다. 본 연구는 이를 위하여, 태양광 발전 시스템의 디자인·성능 통합 평가 프로세스를 제안하고 대표적인 건축 설계물인 스케치업의 플러그인 형태로 제안하는 프로세스를 구현하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

성능 검토 차원에서 단순히 태양광 발전 시스템 계획안의 성능 평가를 수행하는 것이 아니라, 건축 설계안에 대하여 제로에너지 건축물 달성 여부를 판단할 수 있는 사전 검토 프로세스를 태양광 발전 시스템의 디자인·성능 통합 평가 프로세스에 결합하였다. 이를 통하여 제로에너지 건축물 달성에 필요한 태양광 시스템의 용량을 사용자가 파악함으로써, 제로에너지 건축물 계획이 더 효과적으로 수행될 수 있도록 하였다.

디자인·성능 통합 평가 프로세스의 핵심 기능인 성능 평가 모듈의 정확도를 검증하기 위하여 대표적

인 신재생 에너지 시스템 평가 프로그램인 SAM을 이용하였다. 국내 5개 지역에 대하여 옥상 후면 통풍, 벽 부착, 옥상 부착 세 가지 설치 방식에 대하여 성능 계산 결과를 비교하였고, 가장 오차율이 낮은 경우의 CV(RMSE)는 0.59%이며, 가장 오차율이 큰 경우에도 CV(RMSE)가 3.68%로 계산 정확도가 높다고 볼 수 있다.

디자인·성능 통합 평가 프로세스의 활용성을 확인하기 위하여 세 명의 참가자를 대상으로 케이스 스터디를 수행하였다. 주어진 대지에 대하여 목표 에너지 자립률을 달성하는 관점에서의 매스 스터디를 진행하였고, 세 참가자 모두 목표 에너지 자립률을 만족하는 설계안을 도출할 수 있음을 확인하였다.

하지만, 건물의 형태에 따라서 일사의 유입량, 관류 열손실 정도가 달라져 에너지 소비량이 달라지나, 본 연구에서는 이러한 특성을 반영하지 못하였다. 추후에는 스케치업의 오픈 스튜디오 등의 플러그인을 활용하여 건물 형태에 따른 에너지 소비량 평가를 더 정확하게 하는 점이 보완되어야 할 것이다. 다만, 건물 에너지 소비량에 영향을 미치는 다양한 요인들이 초기 설계 단계에서는 여전히 불확실한 경향이 있으므로, 이에 대한 특성도 적절하게 반영을 할 필요가 있다.

본 연구에서 제안한 태양광 발전 성능 평가 알고리즘에는 음영에 의한 영향을 반영하지 않았다. 추후에는 인접 태양광 패널, 건물 형상, 인접 건물에 의한 음영 발생 및 이에 따른 발전 성능 저하에 대한 평가 까지도 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 김진철·김경남(2018), “태양광 시스템의 지역별 최적 방향 및 각도 연구”, 『신·재생에너지』, 14(2): 9~20.
2. 정민희(2020), “반투과형 태양전지를 이용한 창호형 BIPV 건물의 환경성능 분석”, 『LHI Journal』, 11(1): 87~94.

3. 정민희(2024), “탄소중립 건물의 기술적 정의와 사례 분석을 통한 탄소중립 달성 잠재성 분석”, 『LHI Journal』, 15(2): 19~28.
4. 하수연(2020), “제측데이터 기반 표본 업무시설에서의 용도별 에너지사용량 원단위 통계값 도출 및 분석”, 석사학위논문, 이화여자대학교.
Ha, S. Y. (2020), “Statistical Analysis of Energy Use Intensity by End Use in Sample Office Buildings Based on Measurement Data”, Master’s Thesis, Ewha Womans University. (in Korean)
5. Evans, D. L. (1981), “Simplified Method for Predicting Photovoltaic Array Output”, *Solar Energy*, 27(6): 555~560.
6. Gilman, P., A. Dobos, N. Diorio, J. Freeman, S. Janzou, and D. Ryberg (2018), *SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update*, Golden: NREL.
7. King, D. L., W. E. Boyson, and J. A. Kratochvil (2004), *Photovoltaic Array Performance Model*, Albuquerque: Sandia National Laboratories.
8. Salimzadeh, N., F. Vahdatikhaki, and A. Hammad (2020), “Parametric Modeling and Surface-Specific Sensitivity Analysis of PV Module Layout on Building Skin Using BIM”, *Energy and Buildings*, 216: 109953.

요 약

제로 에너지 건축물(ZEB) 인증제 시행에 따라 건물에 태양광(PV) 시스템의 설치가 의무화되고 있는 추세이다. 이에 따라, PV 시스템의 발전 성능을 고려한 계획이 수행되어야 한다. 또한, PV 패널이 건축 디자인에 미치는 미적 영향도 고려해야 하므로, 본 연구에서는 ZEB 계획에서 PV 시스템의 디자인과 성능을 동시에 평가할 수 있는 디자인·성능 통합 평가 프로세스를 제안하고자 한다. 이 프로세스는 매스 스터디 단계에서 목표 자립률 달성 가능성을 초기에 평가할 수 있도록 하며, PV 패널 계획을 기반으로 성능을 평가하고 배치를 시각화한다. SAM을 사용하여 핵심 기능인 성능 평가 모듈의 정확도를 검증하였으며, 다양한 케이스 중 최대 CV(RMSE)는 3.68%로 계산 정확도가 높게 나타났다. 마지막으로, 케이스 스터디를 통해 이 프로세스의 실제 적용 가능성을 확인한 결과, 세 명의 참가자가 모두 목표 자립률을 만족하는 설계안을 도출할 수 있음을 확인하였다.

주제어: 제로에너지 건축물, 태양광, 목표 에너지 자립률, 디자인·성능 통합 평가 프로세스