

초기 설계 단계의 제로에너지 건축물 계획을 위한 SketchUp 기반 PV 시스템 배치 및 의사 결정 지원 도구 개발

Development of a SketchUp-Based PV System Layout and Decision Support Tool for Zero-Energy Building Planning in the Early Design Stage

박준환* · 백승효**

Jun-Hwan Park* · Seung-Hyo Baek**

Abstract

Existing photovoltaics (PV) performance evaluation tools typically require expert-level engineering knowledge, limiting their effectiveness in supporting decision-making for Zero Energy Building (ZEB) implementation during the early design stage—a phase characterized by frequent modifications. To address this, this study developed a PV Planning Support Tool within the SketchUp environment to automatically generate placement plans based on user-defined target energy supply rates. To implement this tool, two core algorithms were developed: a Maximum Placement Algorithm that calculates the maximum installable capacity on the building envelope, and a Target Energy Supply Rate-based Optimal Placement Algorithm that optimizes the arrangement using the minimum modules required to meet the target. Furthermore, a C++/CUDA-based GPU acceleration engine was developed to handle large-scale computations for hourly shading and power generation analysis, ensuring high responsiveness by providing feedback within seconds. To verify the tool's utility, 20 design alternatives created by architecture majors for a site in Seoul were analyzed with a target energy supply rate of 20%. The results demonstrated that the tool successfully derived placement plans within a 20-21% energy supply range for all designs. The number of modules per gross floor area averaged 0.11 modules/m² with a deviation of approximately 2%, confirming the tool's capability to provide consistent and reliable placement planning across diverse architectural forms.

Keywords: Zero Energy Building, Photovoltaics, Early Design Stage, PV Planning Support Tool, Optimal PV Module Placement Algorithm

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축 분야에서는 제로에너지 건축물(Zero Energy Building, ZEB) 인증 제도를 도입하여 건물 부문의

탄소 중립을 실현하고자 한다. ZEB 구현을 위해 적용되는 다양한 신재생 에너지 시스템 중, PV(Photovoltaics) 시스템은 비교적 설치가 간편하고, 유지관리가 용이하다는 특징으로 인해 2017년을 기점으로 건물 부문의 보급률이 가장 높게 나타나고 있다(조

**목원대학교 일반대학원 건축학과 박사과정(주저자: pjh@mokwon.ac.kr)

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

Received: March 11, 2026 / Accepted: May 14, 2026

일현·박정순, 2022). 이는 ZEB 계획 시 PV 시스템 배치를 우선적으로 고려하는 것이 합리적인 선택임을 시사한다.

일반적으로 PV 시스템은 건물 외피에 배치되어 에너지를 생산하기 때문에, 외피 면적에 따라 PV 시스템의 설치 가능 용량이 결정된다. 그러나 무분별한 PV 시스템 배치는 건물의 디자인을 크게 훼손할 우려가 있으므로 이를 고려하여 배치안을 결정할 필요가 있다(김이레 외, 2025). 특히, ZEB 구현을 목적으로 하는 경우, 목표 자립률이라는 명확한 기준치를 만족하면서 건물 외관 디자인을 훼손하지 않는 범위에서의 적정 PV 시스템 용량, 위치, 설치방식을 결정할 수 있어야 한다.

이를 위한 방안으로 SAM, PVsyst, Skelion 등과 같은 PV 시스템 발전 성능 시뮬레이션 도구들을 활용할 수 있다. 해당 도구를 활용하면 디자인한 건물을 대상으로 PV 시스템 배치안을 계획하고 발전 성능을 평가하는 것이 가능하다. 그러나, 해당 도구들은 PV 시스템의 성능을 정밀하게 평가하는 데에 초점을 두어 개발된 도구들이다. 즉, 목표 자립률이라는 기준치를 달성하면서 디자인 또한 만족하는 배치안을 결정하기 위해서는 건축가 스스로 PV 시스템 용량 및 설치방식을 반복적으로 수정해가며 적절한 대안을 탐색해야 한다. 이는 적게는 수십, 많게는 수백 개의 디자인을 검토하는 초기 설계 단계에서 수행하기에 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 초기 설계 단계에서 ZEB 구현을 위해 건축가가 목표 에너지 자립률을 만족하는 PV 시스템 배치안을 신속하게 검토할 수 있도록, SketchUp 기반의 PV 시스템 자동 배치 및 의사결정 지원 도구를 개발하고 그 유용성을 검증하고자 한다. 본 논문에서는 해당 도구를 PV planning support tool로 정의하였다. 구체적으로는 건축 실무에서 가장 보편적으로 활용되는 SketchUp 환경 내에서 건축가가 모델링한 건물을 대상으로 목표 자립률을 만족

할 수 있는 PV 시스템 배치안을 자동 생성하는 도구를 개발하는 것을 목표로 한다. 이는 단순히 성능 계산을 넘어, 제시된 다양한 설계안에 따른 필요 PV 시스템 용량과 발전 성능을 제시함으로써, 설계 초기 단계에서 ZEB 구현을 위해 반복적으로 수행하던 PV 배치안 탐색 과정을 최소화하는 데 목적이 있다. 나아가 개발된 도구가 실제 다양한 설계 대안에서도 목표 자립률에 부합하는 PV 시스템 배치안을 도출할 수 있는지 검증하여 그 유용성을 판단하고자 한다.

1.2 연구의 범위 및 방법

PV planning support tool 개발에 앞서, 기존에 상용화되어 있는 PV 시스템 성능 평가 시뮬레이션 도구들을 크게 3가지 기준으로 분류하여 고찰하였다. 이를 통해, 각 도구에서 제공하는 주요 기능을 확인하고, 해당 도구를 활용한 ZEB 설계 방법의 한계점을 도출하였다. 도출된 한계점을 기반으로 건축가 관점에서 ZEB 구현을 위해 요구되는 PV planning support tool의 기능 요건과 개발 방향을 정리하였다.

이후, ZEB 계획 지원 관점에서 PV planning support tool의 전체 프로세스를 수립하고, 해당 프로세스의 핵심이 되는 PV 시스템 최대 배치 알고리즘과 목표 자립률 기반 PV 시스템 최소 배치 알고리즘을 개발하였다. 그 후 PV planning support tool의 시스템 아키텍처를 수립하고 이를 기반으로 SketchUp 플러그인 형태로 구현하였다.

마지막으로, 개발된 PV planning support tool이 제시하는 PV 시스템 배치안이 건축가의 의사결정을 지원하는 데 있어 유의미한 정보인지를 정량적으로 평가하기 위한 유용성 검증을 수행하였다. 구체적으로 건축 관련 전공자 20인을 대상으로 서울시 마포구 망원동에 있는 임의 부지를 대상으로 매스 스터디를 진행 후, 각 설계 대안별 최소한의 모듈수로 목표 자립률 20%를 만족하는 배치안을 각각 생성하여 그 결과를 분석하였다.

2. 기존 PV 시스템 성능 평가 시뮬레이션 도구 고찰

2.1 PV 시스템 성능 평가 전용 도구

PV 시스템 성능 평가 전용 도구란, 다른 건축 설계 도구와 연계 없이 PV 시스템 설계부터 배치안 검토, 발전 성능 평가까지의 전 과정을 수행할 수 있도록 지원하는 도구를 의미하며 대표적으로 SAM, RETScreen 등이 존재한다. SAM은 미국 에너지부 산하 국립재생 에너지연구소(NREL)에서 개발한 Window 환경에서 구동되는 애플리케이션으로, PV 시스템의 성능 평가 및 경제성 분석에 적극 활용되고 있다. RETScreen은 신재생에너지 시스템의 예비 타당성 검토, 에너지 생산량 산정, 비용 및 온실가스 저감 효과 분석 등을 지원하는 도구로, PV 시스템을 포함한 다양한 에너지 시스템의 초기 검토에 활용될 수 있다.

ZEB 구현 관점에서 보면, SAM은 정밀한 PV 시스템 성능 평가에 초점을 둔 도구로서 건축가가 모듈 온도계수, 인버터의 DC/AC 변환효율, 연평균 표면 오염도 등의 세부 설계 정보를 입력할 수 있는 특징이 있다. 이는 ZEB 달성 여부를 높은 정확도로 예측하는 데 이점이 있을 수 있으나, 이를 위해 PV 시스템 설계와 관련한 엔지니어 수준의 지식이 요구된다. 또한 목표 자립률을 달성할 수 있는 배치안을 결정하기 위해 건축가가 직접 PV 시스템 배치 방식 및 용량을 변경해가며 탐색해야 한다는 번거로움이 존재한다.

2.2 건축 설계 도구와 연계되는 PV 시스템 성능 평가 도구

건축 설계 도구와 연계되는 PV 시스템 성능 평가 도구란, 건물 설계 시 주로 활용되는 AutoCAD, Revit, Rhino 등과 연계하여 PV 시스템 성능 평가를 수행하는 도구를 의미하며 대표적으로 Solar Analysis, LadyBug Tools가 있다. Solar Analysis는 Revit에

플러그인 형태로 구현된 PV 시스템 성능 분석 및 경제성 평가 도구이다. LadyBug Tools는 Rhino/Grasshopper 환경에서 일사량, 일조시간, 음영, 열환경 등 건축 환경성능 분석을 수행할 수 있는 파라메트릭 분석 도구로, 건물 디자인 변화에 따른 일조건 및 PV 발전량을 검토하는 데 활용될 수 있다.

ZEB 설계 관점에서 보면, Solar Analysis는 BIM 모델을 기반으로 건물 외피별 일사량 분포와 PV 시스템의 예상 발전성능을 빠르게 파악할 수 있어 초기 설계 단계에서 여러 설계안을 검토하는 데 유용하다는 장점이 있다. 특히 지붕 및 입면 중 일사량이 높은 부위를 컬러맵을 통해 직관적으로 식별하고, 외피별 예상 연간 발전량과 투자 회수 기간을 즉시 검토할 수 있어 ZEB 구현을 위해 PV 시스템을 배치할 외피 면을 선별하는 데 도움을 준다. 그러나 Solar Analysis는 기본적으로 입사되는 일사량을 기반으로 PV 시스템의 발전성능을 빠르게 평가하는 데 초점을 둔 도구이다. 즉, PV 시스템 배치안을 모델링하여 제공하지 않고, 건축가가 선택한 외피 면에 PV 모듈을 최대로 배치한다는 가정하에 성능을 평가한다. 이는 ZEB 설계 과정에서 PV 시스템의 잠재력 및 경제성을 간단하게 검토하는 의사결정 지원 도구로는 유용할 수 있으나, PV 시스템의 방위, 기울기, 개수를 조정하여 배치안을 정밀하게 계획하거나, 배치안에 대한 디자인을 시각적으로 검토하고자 하는 경우 다른 도구를 활용해야 한다는 한계가 있다.

2.3 SketchUp과 연계되는 PV 시스템 성능 평가 도구

SketchUp과 연계되는 PV 시스템 성능 평가 도구란, 3D 기반 설계 도구인 SketchUp 내에서 PV 시스템 계획 및 발전성능 평가를 지원하는 도구를 의미하며, 대표적으로 Skelion, PVsyst 등이 있다. Skelion은 SketchUp 환경에서 PV 시스템 계획을 더욱 간편하게 수행할 수 있도록 지원하는 것을 목적으로 개

발된 플러그인 도구로, 2011년 스페인 출신 엔지니어인 Juan Pons가 구성한 팀에 의해 개발되었다. PVsyst는 PV 어레이 구성, 인버터, 손실요소, 음영 조건 등을 반영하여 PV 시스템의 발전성능을 정밀하게 분석하는 전문 시뮬레이션 도구이며, SketchUp과 연계하여 음영 분석 및 배치 검토에 활용될 수 있다.

ZEB 설계 관점에서 보면, Skelion은 SketchUp 환경에서 건물 형상 변화에 따라 PV 시스템의 설치 가능 용량과 예상 발전량을 비교적 빠르게 확인할 수 있어 초기 설계 단계에서 PV 시스템의 잠재력을 검토하는 데 유용하다고 판단된다. 다만 Skelion의 기능은 건축가가 선택한 건물 외피를 대상으로 한 PV 시스템 배치 및 성능 평가에 초점이 맞춰져 있다. 즉, 디자인한 건물에 대해 목표 에너지 자립률을 만족하는 배치안을 결정하기 위해서는 건축가가 PV 시스템 배치안을 반복적으로 변경해가며 적절한 대안을 탐색해야 한다는 번거로움이 존재한다.

앞서 분석한 내용을 종합하자면, SAM, Solar Analysis, Skelion과 같은 기존 도구들은 PV 시스템 배치에 따른 성능 검토에는 유용할 수 있으나, 다양한 건물 설계안에 대해서 목표 자립률을 만족하는 PV 시스템 배치안 결정에 대한 지원 도구로서의 역할은 부족하다는 공통적인 한계점이 존재한다고 볼 수 있다.

3. ZEB 구현을 위한 PV 시스템 자동 배치 알고리즘 수립 및 PV planning support tool 개발

3.1 PV planning support tool 전체 프로세스

일반적으로 초기 설계 단계에서는 매스 스터디를 통해 용적률, 일조권 사선제한 등과 같은 건축 법규와 건축주의 요구사항을 동시에 만족하는 건물 디자인을 결정하게 된다. 그러나 이 과정에서 ZEB 구현을 위한 PV 시스템 계획을 추가로 고려할 경우, PV

시스템 배치에 따른 발전성능과 디자인을 동시에 고려해야 한다는 복합적인 문제에 직면하게 된다. 특히, 앞서 고찰을 통해 알 수 있듯이 PV 시스템 성능 평가 시뮬레이션 도구를 활용하더라도 건축가가 직접 PV 시스템의 설치 위치, 기울기, 방위각 및 용량을 반복적으로 변경해가며 목표 자립률 달성 가능한 대안을 찾아야 한다는 번거로움이 존재하였다. 따라서 본 연구에서는 이러한 ZEB 설계 과정의 어려움을 해소할 수 있도록 지원하기 위해 크게 두 가지 정보가 제공되어야 한다고 판단하였다.

첫째, 현재의 설계 대안이 목표 자립률을 달성할 수 있는 형태인지에 대한 정보이다. 이는 매스 스터디 이후 설계가 구체화하는 과정에서 PV 시스템 배치 가능 영역이 부족하여 목표 자립률 달성이 불가해 건물 형태를 변경해야 하는 불필요한 시행착오를 최소화하기 위함이다. 둘째, 목표 자립률 달성을 위해 필요한 최소 모듈수와 설치방식에 대한 정보이다. 이는 PV 시스템 설계와 관련하여 전문 지식이 없는 건축가가 과설계를 하지 않도록 방지하기 위함이다. 본 연구에서는 이러한 정보 제공을 위하여 Fig. 1과 같이 PV planning support tool의 프로세스를 수립하였으며, 해당 프로세스는 크게 Project Information, Maximized PV Layout, PV Layout Optimization의 3단계로 구성된다.

첫째, Project Information 단계는 시뮬레이션을 위한 경계 조건을 설정하는 과정이다. 건축가는 SketchUp 환경에서 대상 건물 및 주변 구조물을 모델링 한 후, 입력창을 통해 건축 지역, 용도, 목표 자립률, 모듈 크기 등 성능 계산에 필요한 필수 파라미터를 정의한다. 둘째, Preliminary Review 단계는 건물 외피에 PV 모듈을 최대치로 배치하였을 때 목표 자립률을 달성할 수 있는지 사전에 검토하는 단계이다. 이때, 각 PV 모듈 표면에 발생하는 음영 비율 및 그에 따른 발전량 산출 방법은 박준환·백승효(2025) 연구에서 제시한 Ray Casting 기반 음영 비율 산정

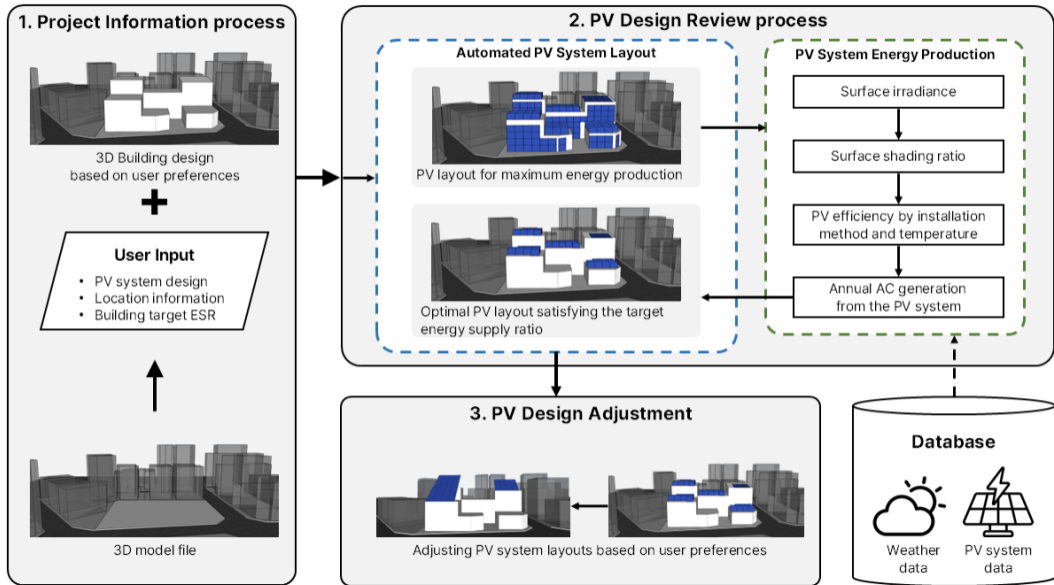


Fig. 1. PV Design Tool Whole Process

및 표면 일사량 기반 발전성능 평가 알고리즘을 동일하게 적용하여 산정한다. 셋째, Optimizing PV design 단계에서는 최소한의 PV 모듈수로 목표 자립률을 달성할 수 있는 배치안을 자동으로 생성하여 건축가에게 제공한다. 건축가는 생성된 배치안을 통해 목표 달성에 필요한 PV 모듈수와 시각적인 배치 형태를 검토하여 심미성과 에너지 성능을 동시에 고려한 합리적인 의사결정을 내릴 수 있다.

3.2 목표 자립률 기반 PV 시스템 배치안 생성 알고리즘 수립

본 절에서는 3.1절에서 제시한 PV planning support tool의 프로세스를 구현하기 위한 핵심 알고리즘으로, PV 시스템 최대 배치 알고리즘과 목표 자립률 기반 PV 시스템 최소 배치 알고리즘을 수립하였다. PV 시스템 최대 배치 알고리즘은 SketchUp상에 모델링된 건물 외피에 PV 모듈을 최대로 배치하고, 이때의 발전성능을 평가하여 해당 설계안이 달성할 수 있는 최대 자립률을 제시하는 알고리즘이다. 목

표 자립률 기반 PV 시스템 최소 배치 알고리즘은 목표 자립률을 만족하는 범위에서 최소한의 PV 모듈수로 배치안을 생성하는 알고리즘이다.

일반적으로 PV 시스템의 발전성능은 음영 비율, 설치 각도, 방위 등 다양한 변수에 따라 크게 변화한다. 따라서 최소한의 모듈수로 목표 자립률에 부합하는 배치안을 제시하기 위해서는 Backtracking, Local Search 등 확정적(Exact) 알고리즘이나, Simulated Annealing, Particle Swarm Optimization 등 메타휴리스틱(Metaheuristics) 알고리즘을 활용할 수 있다. 그러나 수많은 설계안을 검토해야 하는 초기 설계 단계에서 방대한 공간을 탐색하는 방식은 과도한 연산 비용을 초래한다는 한계가 있다.

이에 본 연구에서는 표면 일사량 기반의 PV 시스템 배치 방법을 제안하고자 한다. 이는 PV 시스템의 발전성능이 잠재적으로 높게 나타날 수 있는 위치를 선별해 우선 배치하는 방식이다. 이러한 배치 방법은 방대한 공간 탐색 없이 발전성능이 높게 나타나는 PV 시스템 배치안을 결정할 수 있다.

구체적인 배치 과정은 다음과 같다. 먼저, 건물의 각 외피면을 PV 모듈 크기의 그리드로 나눈다. 각 그리드 영역별로 주변 구조물에 의해 발생하는 음영 비율을 산출하며, 이를 기반으로 표면 일사량을 산출한다. 이때, 음영을 반영한 표면 일사량 계산식은 식 (1)과 같다. 각 그리드 중 표면 일사량이 높게 나타나는 영역, 즉 PV 모듈을 배치하였을 때 발전능력이 높게 나타날 가능성이 높은 영역부터 PV 모듈을 배치한다. 이때, PV 모듈의 발전량 계산식은 식 (2)와 같다. 만약, PV 모듈을 배치하는 과정에서 목표 자립률을 달성하는 경우, 즉시 배치를 중단하고 현재의 PV 시스템 배치안을 건축가에게 제시한다.

$$I = [(I_d + I_b) \times (1 - \frac{R_{sh}}{100})] + I_r \quad (1)$$

여기서,

- I : 표면에 입사되는 전 일사량(W/m²)
- I_d : 표면에 입사되는 확산 일사량(W/m²)
- I_b : 표면에 입사되는 직달 일사량(W/m²)
- I_r : 표면에 입사되는 반사 일사량(W/m²)
- R_{sh} : 표면 음영 비율(%)

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

여기서,

- L_{DC} : PV 모듈 발전 과정에서의 손실률(%)
- A_m : PV 모듈 면적(m²)
- η_p : 후면 온도에 따른 PV 모듈 발전 효율(%)
- P_{DC} : PV 모듈의 직류 전력(W)

3.3 시스템 아키텍처 및 SketchUp Plugin 구현

본 절에서는 앞서 제시한 PV 시스템 배치안 자동 생성 알고리즘을 SketchUp Plugin 형태로 개발하

고자 한다. 해당 도구를 구현하기 위한 플랫폼으로 SketchUp을 채택한 이유는 초기 설계 단계에서의 높은 활용도에 기인한다. Horvat et al.(2011) 연구에 따르면, 건축 관련 종사자 1,623명을 대상으로 설계 단계별 주로 사용하는 설계 도구에 대한 설문을 한 결과, 약 25%가 초기 설계 단계에서 SketchUp을 활용한다고 응답하였다. 이는 29% 수준인 AutoCAD에 이어 두 번째로 높은 수치이며, 3D 모델링 도구 중에서는 가장 독보적인 점유율이다. 즉, 건물 디자인을 결정하는 초기 설계 단계에서 가장 널리 활용되는 플랫폼 중 하나인 SketchUp 상에 목표 자립률에 부합하는 PV 시스템 배치안을 자동 생성 및 이를 건축가가 시각적으로 검토할 수 있다면, 심미성과 에너지 성능을 동시에 고려한 합리적인 의사결정이 가능할 것으로 판단하였다.

한편, 건물에 설치되는 PV 시스템의 성능을 정밀하게 평가하기 위해서는 일반적으로 1년을 시간 단위로 나누어 PV 모듈 표면 일사량, 셀(Cell) 온도, 표면에 발생하는 음영 비율 등을 고려한 시뮬레이션을 수행해야 한다. 특히 건물 외피 전역에 수백~수천 개의 모듈을 배치하는 경우, 시간별 모듈 단위의 음영·발전량 계산을 반복 수행해야 하므로 연산 부담이 급격히 증가한다. 따라서 초기 설계 단계에서 건축가가 다양한 배치안을 반복적으로 검토할 수 있도록 지원하기 위해서는, 이러한 대규모 연산을 수 초 내로 처리하고 결과를 즉시 제공할 수 있어야 한다. 이에 본 연구에서는 고비용 수치 연산과 건축가 친화적 인터페이스 요구를 동시에 충족하기 위해, Fig. 2에 제시된 바와 같이 PV planning support tool의 시스템 아키텍처를 계산 엔진 계층, 데이터 전·후처리 및 건축가 인터페이스 계층, 데이터 입출력 계층으로 구성하였다. 계산 엔진 계층의 핵심인 시간 단위의 음영 및 일사량 계산 등 수치 연산 알고리즘은 C++/CUDA 기반 GPU 라이브러리로 구현하였다. 반면, 데이터 전·후처리 및 건축가 인터페이스 계층에

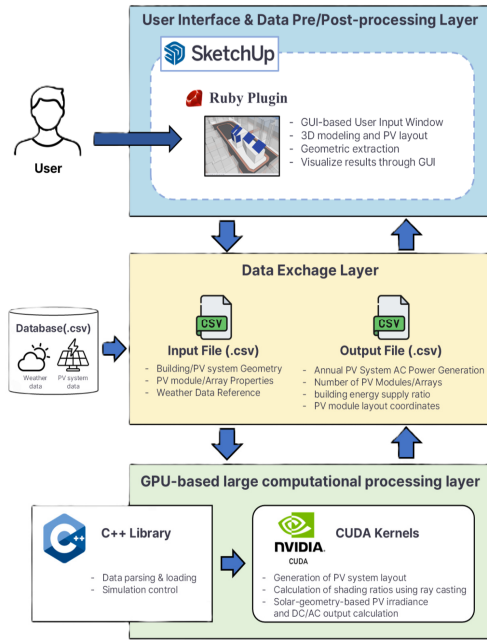


Fig. 2. System Architecture of the PV Design Tool

서는 건물 3차원 모델의 기하 정보 추출, PV 시스템 배치 시각화 및 건축가 입력 데이터 관리를 SketchUp에서 공식적으로 지원하는 Ruby 언어 기반 API를 이용한 Plugin으로 구현하였다. 마지막으로 계산 엔진 계층과 SketchUp Plugin 계층은 데이터 입출력 계층에서 CSV 형식의 입력·출력 파일을 매개로 결합하도록 설계하였다.

4. PV Planning Support Tool 유용성 검증

4.1 검증 조건 및 Mass Study 결과

ZEB 구현을 위한 지원 도구로서 실질적으로 사용되기 위해서는, 정형화되지 않은 다양한 건물 설계안에 대해서도 목표 자립률에 맞춰 일관성 있게 PV 시스템 배치안을 제시할 수 있어야 하며, 그 결과가 건축가 관점에서 충분히 이해할 수 있는 수준이어야 한다. 이에 본 장에서는 실제 건축가가 디자인한 Mass 대상으로 목표 자립률 20%일 때에 PV 배치

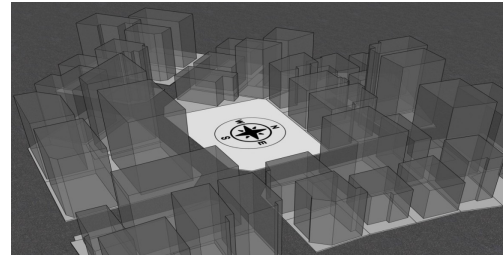


Fig. 3. A Bird's-Eye View of the Site Used for the Mass Study

안을 자동으로 생성하고 그 결과에 대한 일관성을 분석하여, 본 연구에서 개발한 도구의 유용성을 판단하고자 한다. 이를 위해 건축 관련 전공자 20인을 대상으로 서울시 마포구 망원동에 있는 부지에 대한 매스 스터디를 수행하도록 하여 20개의 설계안을 도출하였다. 대상 부지의 조감도는 Fig. 3과 같으며, 참가자는 건폐율, 용적률, 일조권 사선 제한 등 관련 건축 법규를 준수하여 매스 스터디를 수행하였다. 최종적으로 생성된 20개의 설계안은 Mass 1부터 Mass 20까지 일련번호를 부여하여 구분하였으며, 이는 Tables 1, 2와 같이 각 설계안의 층수, 연면적, 지붕 면적 등 상세 설계 정보를 정리하였다. 에너지 자립률 산정에 필요한 건물 소비량의 경우, 하수연(2020) 연구에서 제시한 업무시설 규모별 단위면적당 연간 에너지 소비량에 각 건물의 연면적에 곱한 값을 활용하였으며, 구체적인 수치는 Table 3에 정리하였다. 자립률 산출을 위해 필요한 각 대안의 총 연간 에너지 소비량은 설계안의 연면적에 해당 단위 면적당 소비량을 곱하여 산출하였다.

PV 시스템의 경우, 2m^2 크기의 단결정 실리콘 모듈 설치를 가정하였다. 모듈 효율은 19.0%로 설정하였으며, 표준시험조건(STC, $1,000\text{W}/\text{m}^2$) 기준 모듈 1장당 정격용량은 약 380Wp 로 산정하였다. 온도계수는 RETScreen 기술 보고서(National Resource Canada, 2003)에서 제시하는 일반적인 단결정 모듈의 특성값인 $-0.4\%/^{\circ}\text{C}$ 를 적용하였다. 또한, 발전 과

Table 1. Mass Study Results by 20 Architecture Majors

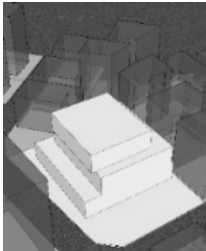
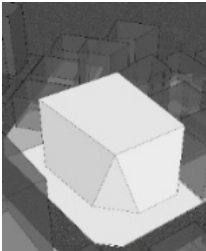
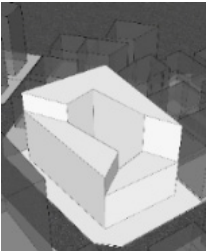
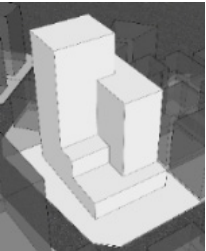
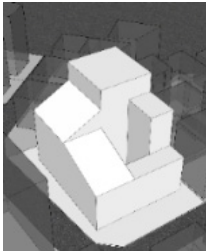
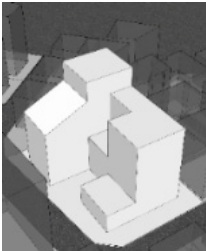
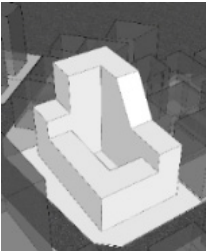
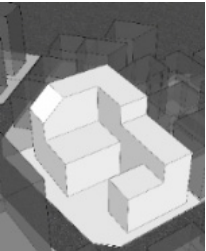
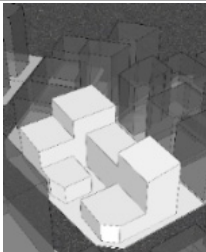
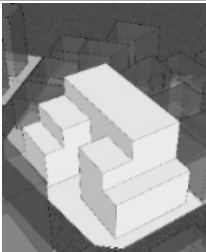
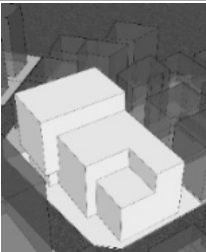
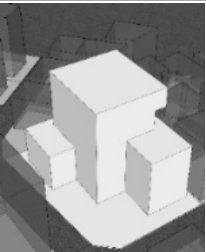
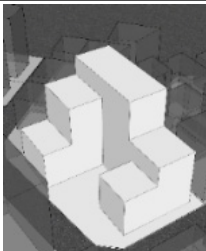
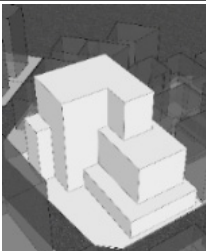
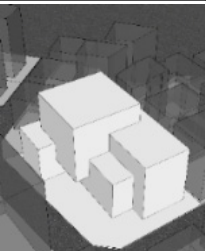
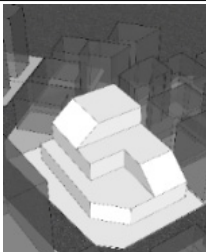
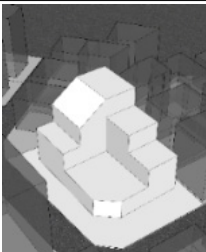
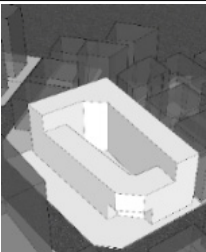
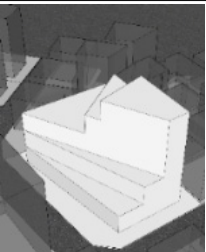
Mass Study Results			
			
Mass 1	Mass 2	Mass 3	Mass 4
			
Mass 5	Mass 6	Mass 7	Mass 8
			
Mass 9	Mass 10	Mass 11	Mass 12
			
Mass 13	Mass 14	Mass 15	Mass 16
			
Mass 17	Mass 18	Mass 19	Mass 20

Table 2. Design Information for Each Mass

Design No.	The Number of Floor (-)	Total Floor Area (m ²)	Roof Area (m ²)	Facade Area (m ²)	Energy Consumption (kWh/yr)
Mass 1	3	883	412	816	151,787
Mass 2	4	1,323	336	1,168	227,388
Mass 3	4	1,155	341	1,761	198,625
Mass 4	7	1,465	340	1,728	251,838
Mass 5	5	1,444	211	1,805	248,224
Mass 6	5	1,358	304	1,705	233,355
Mass 7	5	1,073	302	1,763	184,363
Mass 8	4	1,136	351	1,462	195,193
Mass 9	3	851	413	1,115	146,263
Mass 10	4	1,492	452	1,504	256,476
Mass 11	4	1,468	452	1,344	252,349
Mass 12	5	1,437	390	1,546	246,964
Mass 13	5	1,488	410	1,728	255,787
Mass 14	5	1,532	453	1,600	263,377
Mass 15	5	1,434	400	2,008	246,454
Mass 16	4	1,342	420	1,324	230,655
Mass 17	3	842	349	854	144,820
Mass 18	4	924	324	1,065	158,913
Mass 19	3	943	369	1,525	162,147
Mass 20	5	1,372	435	1,387	235,898

Table 3. Annual Energy Consumption per Unit Area for Office Buildings

Total floor Area Range	Annual Energy Consumption per Unit Area
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)	171.4

정에서 발생하는 모듈 표면 오염 및 시스템 간 불일치 등에 의한 손실률은 Freeman et al.(2014)의 연구에 제시된 SAM의 기본값인 10.5%를 적용하였다.

4.2 목표 자립률 20%일 때, PV 시스템 배치안 생성 결과 분석

Tables 4, 5는 목표 자립률 20%를 적용하였을 때, 각 설계안별로 PV 시스템 배치 결과를 정리한 것이다. 분석 결과, 모든 설계안의 에너지 자립률은 20.0~21.0% 범위에 분포하며, 목표 자립률에 근접한 배치가 이루어짐을 확인하였다. 전체 20개 설계안 중 Mass 3, 4, 7, 14, 20을 제외한 15개 설계안은 지붕면을 활용하는 것만으로 목표 자립률을 달성하였으나, 지붕 면적이 상대적으로 협소한 나머지 5개의 설계안은 입면 배치를 병행하여 목표를 충족하였다. 단위 모듈당 연간 발전량은 평균 315kWh/yr 수준으로 산정되었으며, 대부분의 설계안에서 300kWh/yr

Table 4. PV System Layout Results at a 20% Target Energy Supply Ratio

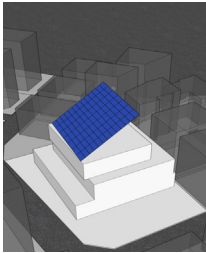
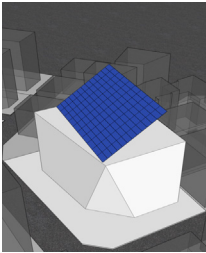
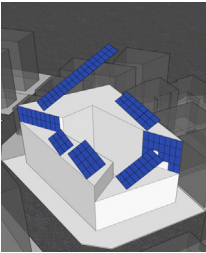
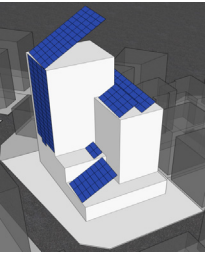
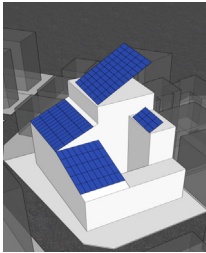
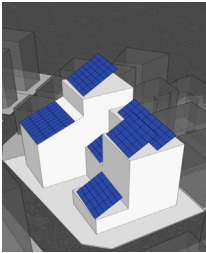
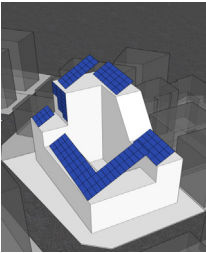
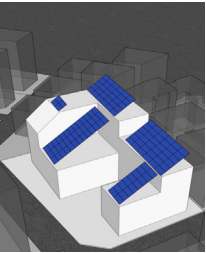
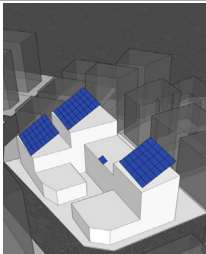
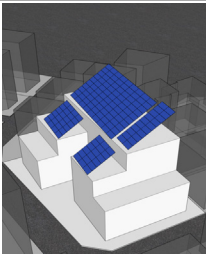
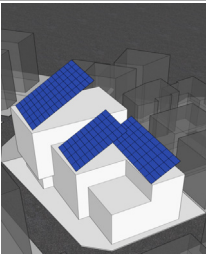
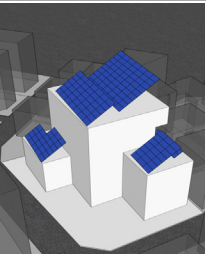
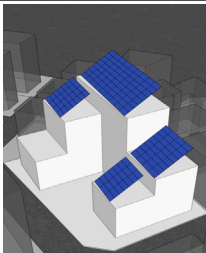
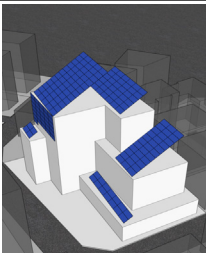
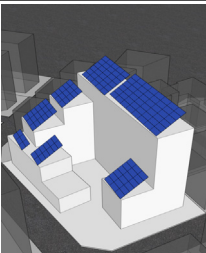
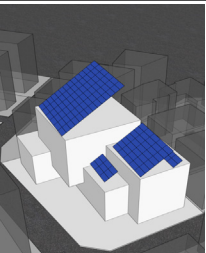
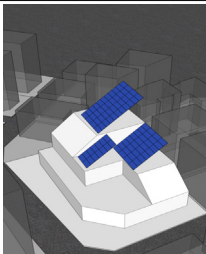
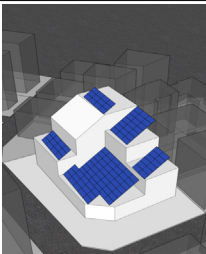
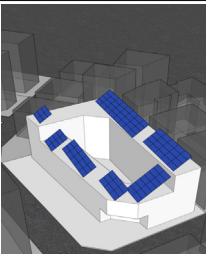
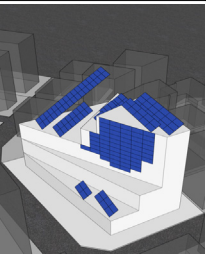
PV System Layout Results			
			
Mass 1	Mass 2	Mass 3	Mass 4
			
Mass 5	Mass 6	Mass 7	Mass 8
			
Mass 9	Mass 10	Mass 11	Mass 12
			
Mass 13	Mass 14	Mass 15	Mass 16
			
Mass 17	Mass 18	Mass 19	Mass 20

Table 5. Details of PV System Layouts for 20 Masses at a 20% Target Energy Supply Ratio

Design No.	Energy Supply Ratio (%)	Amounts of Energy Production per PV Module (kWh)	The Number of PV Module	
			Roof	Facade
Mass 1	21.0	350.8	91	0
Mass 2	20.2	353.7	130	0
Mass 3	20.4	297.3	95	41
Mass 4	20.1	256.3	120	77
Mass 5	20.0	316.4	157	0
Mass 6	20.1	300.9	156	0
Mass 7	20.0	284.0	114	16
Mass 8	20.8	325.4	125	0
Mass 9	20.1	330.6	89	0
Mass 10	20.7	348.9	152	0
Mass 11	20.4	317.4	162	0
Mass 12	20.4	314.1	160	0
Mass 13	20.2	337.9	153	0
Mass 14	20.1	296.8	147	31
Mass 15	20.0	335.9	147	0
Mass 16	20.1	313.3	148	0
Mass 17	20.3	326.9	90	0
Mass 18	20.4	312.5	104	0
Mass 19	21.0	327.6	104	0
Mass 20	20.0	291.3	107	55

이상의 발전성능을 유지하였다.

배치 형태에 따른 발전성능 분석 결과, 단일 어레이를 크게 배치한 Mass 1, 2, 13은 350kWh/yr에 근접한 고성능을 보인 반면, 다수의 어레이를 밀집 배치한 Mass 3, 4, 7, 14, 20은 어레이 간 상호 음영 간섭으로 인해 300kWh/yr 이하로 성능이 저하되는 양상을 보였다. 이는 목표 자립률 달성을 위해 개별 모듈의 성능뿐만 아니라 어레이 간 이격거리 및 배치의 최적화가 필요하다는 것을 의미한다. 한편, 배치 결과의 일관성 측면에서 연면적 대비 모듈수는 평균 0.11장/m²이며 최대 편차는 2% 이내로 나타났다. 이러한 결과는 건물의 각기 다른 형상에서도 본 연구의 알고리즘이 목표 자립률 달성을 위한 모

듈 밀도를 일관성 있게 산출하고 있음을 입증하는 지표로 볼 수 있다.

4.3 건물 형태와 목표 자립률 달성 간의 상관관계 분석

건물 형태와 목표 자립률 달성 가능성의 상관관계를 분석하기 위해, Fig. 4와 같이, 각 설계안별로 지붕 및 입면 면적과 배치된 PV 모듈수를 그래프로 나타내었다. 해당 그래프를 보면, 지붕과 입면의 비율이 약 1:2 혹은 1:3으로 비교적 지붕이 넓게 설계된 Mass 1, 2, 9, 17, 18의 경우, 연면적 대비 PV 모듈수가 약 0.10장/m² 수준으로 나타나 다른 배치 결과와 달리 상대적으로 적은 수로 목표 자립률을 만족할 수 있

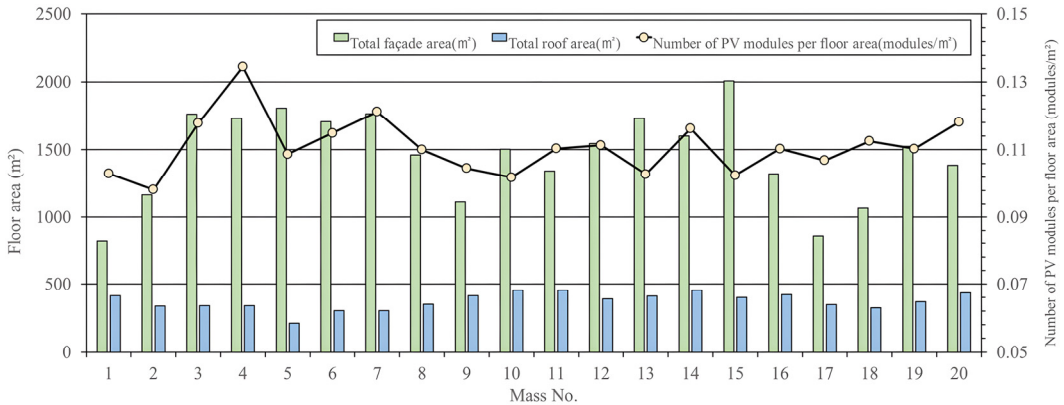


Fig. 4. Comparison of Roof and Facade Areas and PV Module Counts per Total Floor Area by Mass

었다. 이는 발전 효율이 높은 지붕면을 충분히 활용하여 PV 시스템 배치안을 결정할 수 있었기 때문으로 판단된다. 그와 반대로, 지붕보다 입면 면적의 비중이 높은 Mass 3, 4, 7, 14 등의 경우 연면적 대비 PV 모듈수가 약 0.11장/m²에서 최대 0.14장/m²까지 상승하는 것을 확인하였다. 이는 입면에 비해 다소 협소한 지붕면만으로는 목표 자립률을 만족하지 못해, 발전 효율이 상대적으로 낮은 입면에 PV를 다수 배치하여 목표 자립률을 달성한 것이라 판단된다.

건물의 기하학적 형태 측면에서의 자가 음영(Self-Shading)은 PV 발전 효율에 유의미한 영향을 미치는 것으로 나타났다. Mass 4, 7, 14와 같이 서남측이 높고 북동측으로 낮아지는 계단식 디자인은 옥상의 상당 부분에 자체적인 음영을 발생시킨다. 이는 옥상에 배치되는 PV의 성능을 하락시키는 요소로 작용하며, 결과적으로 목표 자립률 달성을 위해 평균 0.13장/m² 이상의 높은 PV 모듈 밀도가 요구되는 것으로 나타났다. 뿐만 아니라, PV 어레이 배치 방식 측면에서 보면, 지붕에 단일 어레이를 크게 배치한 Mass 1, 2, 13은 350kWh/yr에 근접한 고성능을 보인 반면, 다수의 어레이를 밀접하게 배치한 Mass 3, 4, 7, 14, 20은 어레이 간 상호 음영으로 인해 300 kWh/yr 이하로 성능이 저하되는 양상을 보였다. 이

는 목표 자립률 달성을 위해 PV 어레이 간 이격거리 및 배치 구도의 최적화가 필요함을 의미한다.

마지막으로, 연면적 및 지붕 면적의 비례와 입면 배치 결정 간의 인과관계를 분석한 결과, 단순히 지붕 면적을 확보하기보다는 높은 발전성능을 나타낼 수 있는 지붕면의 확보가 더 중요한 요소임이 드러났다. Tables 2와 5를 교차 분석하면, 지붕 면적 비율이 14%로 매우 낮았던 Mass 5는 지붕에 모듈을 밀착 배치하여 입면 활용 없이 목표 자립률을 달성하였으나, 지붕 비율이 약 28%로 두 배 이상 높았던 Mass 7은 오히려 16개의 모듈을 입면에 추가로 배치하였다. 이는 Mass 7의 건물 형상 및 어레이 간 음영 영향이 PV 시스템의 발전성능을 크게 저하했기 때문으로 판단된다. 종합하면, ZEB 구현을 위한 초기 설계 시에는 지붕 면적을 단순히 확보하기만 하는 과정을 넘어, 건물 자체의 기하학적 형상과 PV 어레이 배치 계획을 고려하여 높은 발전성능을 나타낼 수 있는 지붕 면적을 최대한 확보하는 것이 중요하다.

5. 결론

본 연구는 2050 탄소 중립 정책 실현을 위한 건축 분야의 핵심 과제인 ZEB 구현을 목적으로, 초기 설

제 단계에서 활용할 수 있는 목표 자립률 기반 PV 시스템 자동 배치 및 의사결정 지원 도구를 개발하고 그 유용성을 검증하였다. 기존의 PV 시스템 성능 평가 도구는 빈번한 디자인 수정이 일어나는 초기 설계 단계의 특성을 반영하지 못하였으며, ZEB 구현 측면에서 건축가의 의사결정을 지원하는데 한계가 존재하였다. 이를 보완하기 위해 본 연구는 건축 실무에서 보편적으로 사용되는 SketchUp 환경 내에서 목표 자립률에 맞춰 PV 배치안을 생성하는 플러그인은 개발하였다. 특히, 대규모 연산이 요구되는 시간 단위의 발전 성능 및 음영 계산을 위해 C++/CUDA 기반의 GPU 가속 엔진을 개발함으로써, 설계안 변경에 따른 PV 배치안을 즉각적으로 제공할 수 있도록 구현하였다.

유용성 검증에서는 건축 관련 전공자 20인이 도출한 20개 설계안을 대상으로 목표 자립률 20% 조건의 PV 배치안을 자동 생성 후 결과를 분석하였다. 그 결과, 모든 설계안에서 에너지 자립률이 20~21% 범위로 분포하여 목표에 1% 이내로 근접하도록 PV 시스템 배치안이 생성되었으며, 5개의 설계안을 제외한 나머지 설계안은 지붕면 배치만으로 목표를 달성하였다. 또한 단위 모듈당 연간 발전량은 평균 약 315 kWh/yr 수준을 유지하였고, 연면적 대비 모듈 수는 평균 약 0.11장/m²로 설계안 간 편차가 2% 수준으로 나타나, 다양한 형상에서도 일관된 배치안을 제공할 수 있음을 확인하였다.

다만, 본 연구에서는 PV 모듈의 종류를 단결정 실리콘 모듈로 한정하였고, 건물의 에너지 소비량은 단위면적당 소비량을 활용하였기 때문에 실제 건물의 운영 특성을 반영한 정밀한 자립률 산정에는 한계가 있다. 또한 본 연구에서 제시한 자립률 산정 방식은 국내 ZEB 인증에서 활용하는 1차에너지 소요량 기반의 자립률 산정 방식과 직접적으로 연계되지는 않는다. 따라서 본 연구는 실제 인증 등급 판정을

위한 도구 개발이기보다는, 초기 설계 단계에서 PV 시스템 계획 및 의사결정 지원을 위한 PV 시스템 배치안 생성 방법론을 제안한 것이라 볼 수 있다. 향후에서는 다양한 모듈 제품군의 재료적·전기적 특성을 라이브러리화하여 반영하고, EnergyPlus와 같은 동적 시뮬레이션 엔진과의 연계를 통해 건물 에너지 소요량 산정의 정밀도를 고도화할 필요가 있다. 나아가 1차에너지 소요량 및 국내 ZEB 인증 기준의 신재생에너지 생산량 산정 체계를 반영함으로써, 실제 제도적 평가 기준과 연계 가능한 종합적인 ZEB 설계 지원 플랫폼으로 발전시키고자 한다.

참고문헌

1. 김이레·박준환·백승효(2025), “제로에너지 건축물 계획을 위한 태양광 시스템의 디자인·성능 통합 평가 프로세스”, 『토지주택연구』, 16(2): 131~141.
2. 박준환·백승효(2025), “SketchUp 기반의 PV 시스템 발전 성능 평가 도구 개발”, 『한국건축친환경설비학회 논문집』, 19(1): 22~34.
3. 조일현·박정순(2022), “건물 부문 재생에너지 보급 장벽 분석과 시사점”, 『에너지 포커스』, 19(2): 46~59.
4. 하수연(2020), “계측데이터 기반 표본 업무시설에서의 용도별 에너지사용량 원단위 통계값 도출 및 분석”, 석사학위논문, 이화여자대학교.
5. Freeman, J., J. Whitmore, N. Blair and A. Dobos (2014), *Validation of Multiple Tools for Flat Plate Photovoltaic Modeling Against Measured Data*, Golden: National Renewable Energy Laboratory, 1~20.
6. Horvat, M., M.-C. Dubois, M. Snow and M. Wall (eds) (2011), *International Survey About Digital Tools Used By Architects For Solar Design, Report T.41.B.2*, Cedar: International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme, 45~47.
7. National Resource Canada (2003), *RETScreen International: Clean Energy Project Analysis*, Varennes, PV.21~PV.22.

 요약

기존의 PV 시스템 성능 평가 도구들은 전문 엔지니어 수준의 지식을 요구하며, 빈번한 디자인 수정이 발생하는 초기 설계 단계에서 제로에너지 건축물 구현을 위한 의사결정을 지원하기에는 한계가 있다. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 건축 실무에서 보편적으로 활용되는 SketchUp 환경 내에서 건축가가 설정한 목표 자립률 가능한 PV 시스템 배치안을 자동 생성하는 PV planning support tool을 개발하였다. 해당 도구를 구현하기 위해 대상 건물의 외피에 설치 가능한 최대 용량을 산정하는 최대 배치 알고리즘과 목표 자립률을 달성하는 범위 내에서 최소한의 모듈수로 자동 배치하는 목표 자립률 기반 최적 배치 알고리즘을 각각 구현하였다. 이때, 대규모 연산이 요구되는 시간 단위 음영 및 발전량 계산을 위해 C++/CUDA 기반의 GPU 가속 엔진을 개발함으로써, PV 시스템 배치안 생성 및 수정에 따른 성능 평가 결과를 즉각적으로 제시할 수 있도록 하였다. 개발된 도구의 유용성을 검증하기 위해 서울시 망원동에 위치한 부지를 대상으로 건축 관련 전공자 20인이 작성한 설계안에 대해 목표 자립률 20%를 만족하는 PV 시스템 배치안을 생성 및 분석하였다. 그 결과, 모든 설계안에서 에너지 자립률 20~21% 범위를 만족하는 배치안을 도출하였으며, 연면적 대비 모듈수의 경우 평균 0.11장/m²로 약 2%의 편차를 나타내어 다양한 설계 형상에서도 일관성 있는 배치 계획이 가능함을 확인하였다.

주제어: 제로에너지 건축물, 태양광 시스템, 초기 설계 단계, 태양광 계획 의사 결정 지원 툴, 최적 태양광 모듈 배치 알고리즘
