

# Development of 3-dimensional Solar Photovoltaic Simulation System based on Digital Twin in the Smart City

디지털트윈 기반의 스마트시티 3차원 태양광 발전 시뮬레이션 시스템 개발

Jin-Ho Shin · Shin-Ho Lee · Seung-Joon Lee

신진호<sup>†</sup> · 이신호<sup>\*</sup> · 이승준<sup>\*</sup>

## Abstract

The installation of solar photovoltaic panels is gradually spreading even in cities in accordance with the policy of enhancing energy independence and expanding renewable energy through smart city construction. In this paper, a 3-dimensional photovoltaic simulation system suitable for cities such as apartment veranda, rooftop of buildings, parking lot or park site is proposed by generating the shadow of buildings in minutes through the location calculation of the sun every day in the 3D building map. In addition, it is possible to visualize photovoltaic power generation and sunlight volume along with the shadow of 3D buildings moving by time zone by using digital twin technology, and it has the advantage of exploring the optimal direction and angle for maximum generation.

## Key Words

Digital Twin, Generation Simulation, Shadow Effect, Smart City, Solar Photovoltaic

## 1. 서론

도시 인구 비율은 우리나라 91%, 북미 82%, 유럽 75% 등 세계적으로 도시인구 집중의 가속화에 따라 전체 에너지 소비의 약 60~80%를 차지하고 있고, 탄소배출량 또한 75% 정도로 기후변화에 상당한 영향을 끼치고 있기 때문에 도시 단위의 에너지 전환 정책과 실효성 있는 스마트시티 기술개발이 매우 중요하다.

재생에너지 확대보급 및 스마트시티 활성화 정책과 더불어 최근 태양광 패널의 가격하락 및 발전효율 기술이 빠르게 향상되면서 도심지에서도 태양광 패널 설치가 확대되고 있으며, 아파트 베란다에 설치하는 미니 태양광, 건물 옥상이나 단독 주택 지붕, 주차장이나 공원부지와 같은 대지, 도로 및 갯길 등에도 태양광 패널 설치가 점차 확산되고 있다. 특히, 건축물 에너지 효율등급 인증 및 제로 에너지 건축물 인증 제도 시행에 따라 향후 건물에서의 태양광 발전 수요는 크게 증가할 것으로 전망된다.

태양광 패널의 설치를 고려하는 기업이나 시민들은 태양광 패널을 설치하게 되면 얼마나 발전량이 나올지, 전기요금을 얼마나 절감할 수 있을지, 몇 년 내에 투자한 금액을 회수할

수 있을지를 알고 싶어하는 것은 당연하다 할 수 있다. 해외뿐만 아니라 국내에서도 태양광 설치 시뮬레이션 및 경제성 분석을 서비스하는 기업과 일부 지방자치단체가 있다[1].

그러나, 기존의 태양광 설치 시뮬레이션은 건물 배치와 그림자와 같은 도심지의 특성을 고려하지 않고, 2차원 지도상에서 토지나 임야와 동일한 방식으로 시뮬레이션하고 발전량을 개략 추정하며 발전설비의 용량과 일조시간 등만 단순히 반영하여 추정하는 방식을 사용함으로써 현실성이 떨어지는 단점이 있다.

국내에서 많이 이용되고 있는 태양광발전 시뮬레이션 프로그램은 크게 3가지로써, 스위스 제네바 대학에서 개발된 PVsyst, 일본의 Laplace System Company에서 개발한 Solar Pro, 미국의 National Renewable Energy Laboratory(NREL)에서 개발한 SAM이 있다[2].

Solar Pro는 3차원 그림자 음영분석이 3D-CAD 환경에서 가능하지만, 도시 전체 단위로 확장성 및 정부에서 구축한 3차원 국토정보와 호환성을 고려할 필요가 있다. 최근 스마트시티 관련 다양한 응용서비스 개발에 따라 도시 단위의 대규모 빌딩들을 대상으로 디지털트윈 가상환경에서 실시간으로 그림자(shadow) 맵을 생성 또는 변환하는 연구들이 진행되고 있다[3,4].

<sup>†</sup> Corresponding Author : Korea Electric Power Research Institute, Korea.

E-mail: jinho.shin@kepco.co.kr

<https://orcid.org/0000-0003-2500-3251>

<sup>\*</sup> Digital Solution lab. of KEPRI, Korea.

<https://orcid.org/0000-0001-9613-166X> <https://orcid.org/0000-0002-0221-6329>

Received : November 10, 2020 Revised : November 25, 2020 Accepted : November 28, 2020

태양광 발전의 특성상 도심지에서는 건물 그림자가 일조량 및 일사량에 가장 큰 영향을 주는 요소이기 때문에 그림자의 영향을 반영하지 않으면 발전량 시뮬레이션의 정확도는 현저하게 차이가 날 수 있다. 특히, 우리나라는 아파트가 많기 때문에 아파트에 사는 시민을 위한 시뮬레이션에는 그림자 영향 고려가 필수적이며, 건물 옥상이나 단독주택 지붕, 주차장 등도 인근 건물의 그림자 영향을 고려해야 한다.

## 2. 3차원 태양광 발전 시뮬레이션 시스템

2차원 지도에서는 건물의 그림자 영향에 대한 시뮬레이션을 할 수 없기 때문에 이 기술은 3차원 건물지도 기반에서 매일 태양의 위치계산을 통해 건물의 그림자를 분 단위로 생성하여 정확도 높은 일조량을 산출한다. 또한, 디지털트윈 기술을 활용하여 시간대별로 움직이는 3차원 건물의 그림자와 함께 태양광 발전량 및 일조량을 시각화함으로써 실감형 시뮬레이션이 가능하며, 태양광 패널의 설치 방향과 각도까지 시뮬레이션이 가능하여 최대 발전할 수 있는 최적의 방향과 각도를 탐색할 수 있는 특징이 있다.

### 2.1 시뮬레이션 시스템의 구성

스마트시티 3차원 태양광 발전 시뮬레이션 시스템의 구성은 그림 1과 같이 입력데이터는 PV 패널의 제품 및 성능 정보와 종관기상관측 정보이고, 사용자가 PV 설치정보를 선택하면 발전량을 예측한다. 3차원 지도의 그림자 영향을 고려한 태양광 발전량 시뮬레이션은 크게 3단계로 진행하는데, 기상청 종관 관측지점을 대상으로 지역별 기본 발전량을 계산하고, 사용자 설치하고자 하는 지점의 건물의 그림자를 생성하여 일조량을 계산한 다음 설치지점의 발전량과 경제성을 분석한다. 분석결과는 Digital Twin 기반의 실감형 시각화 기법을 이용하여 시간대별 3차원 건물의 그림자의 움직임과 함께 해당 시간대의 발전량과 일조량을 제공한다.

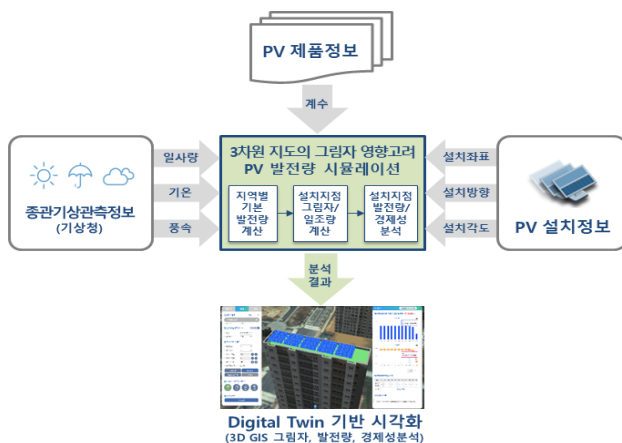


그림 1 3차원 태양광 발전 시뮬레이션 시스템 구성도  
Fig. 1 Architecture for 3D solar photovoltaic simulation

### 2.2 시뮬레이션을 위한 입력데이터

태양광 발전량 계산에 사용되는 입력데이터를 상세히 설명하면, PV 제품정보, 기상청 종관기상관측정보, PV 설치 정보로서 표 1과 같이 구성된다.

PV 시뮬레이션의 기초 제품정보는 제조사에서 제공하는 PV 패널 성능정보를 수집하여 데이터베이스로 구축하였다. 또한, 기상청 국가기후데이터센터에서 제공하는 종관기상관측정보 중 일사량, 기온, 풍속 데이터를 데이터베이스로 구축하였다. 5년 이상의 시간단위 관측정보를 수집하여 데이터베이스로 구축 및 관리하며, 관측장치가 없는 지역은 인근지역의 관측정보를 사용하게 된다[5], 또한, 시뮬레이션 결과의 검증에 위해 Hadoop Ecosystem으로 구축된 10초 단위의 실제 발전량 빅데이터를 연동하여 활용하였다.

표 1 태양광 발전 시뮬레이션을 위한 입력데이터

Table 1 Input data for PV simulation

구 분	입력 항목	비 고
PV 제품정보	<ul style="list-style-type: none"> <li>출력(W)</li> <li>정상작동전지온도(C)</li> <li>면적(m<sup>2</sup>)</li> <li>셀 수량</li> <li>Short-Circuit Current(A)</li> <li>Open-Circuit Voltage(V)</li> <li>Current at Pmax(A)</li> <li>Voltage at Pmax(V)</li> <li>정상 작동조건 출력(W)</li> <li>SAM CEC 모듈정보</li> </ul>	PV 제조사
종관기상관측정보	<ul style="list-style-type: none"> <li>전천일사량</li> <li>기온</li> <li>풍속</li> </ul>	기상청
PV 설치정보	<ul style="list-style-type: none"> <li>PV 설치 경위도 좌표</li> <li>설치방향</li> <li>설치각도</li> </ul>	사용자 선택 가능

### 2.3 일사량 기반 지역별 기본 발전량 시뮬레이션

지역별 기본 발전량을 계산은 그림 2와 같이 수행하며, 먼저 종관기상관측정보를 1월~12월 8,760시간의 평균 일사량, 기온, 풍속데이터와 제조사별로 관리하는 PV 시설정보를 메모리에 적재한다. 태양광 패널을 설치할 지역의 경위도 좌표와 설치각도, 설치방향을 설정한다. 이 설정은 시뮬레이션 시스템에서 사용자가 입력 및 편집할 수 있으며, 디폴트값을 이용하여 임시로 계산한 후 사용자가 입력하는 값으로 재계산할 수 있다.

종관기상관측정보(기온, 풍속)과 일사량 데이터를 이용하여 성능계수 및 PV 패널의 온도를 계산할 수 있다[6,7]. Sandia National Laboratories에서 개발한 Sandia Photovoltaic Array Performance Model을 활용하여 계산하였다[8]. 태양광 발전량 계산 알고리즘은 Five-parameter Model을 적용하였으며, PV

패널에서 가용한 전력은 그림 3과 같이 잘 알려진 등가회로 모델을 사용하였다[9].

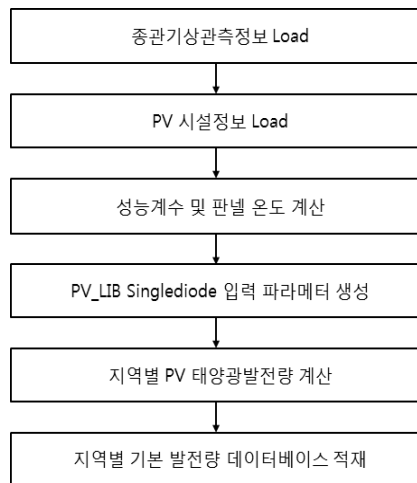


그림 2 지역별 기본 발전량 계산 흐름도

Fig. 2 Process of regional PV generation simulation

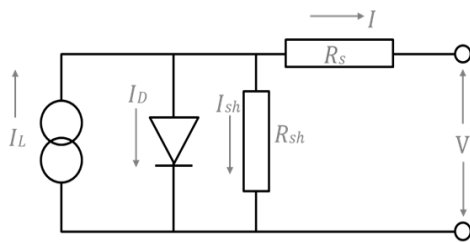


그림 3 Five-parameter Model을 나타내는 등가회로

Fig. 3 Equivalent circuit representing the five-parameter model

이 회로는 직렬 저항과 셉트 저항과 병렬로 연결된 다이오드를 포함하며, 개별 셀 뿐만 아니라 여러 셀로 구성된 단위 모듈 및 여러 모듈된 구성된 어레이에 사용할 수 있다[10].

$$I = I_L - I_O \left[ e^{\frac{(V + IR_s)}{a}} - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

$$a = \frac{N_s n_i k T_c}{q} \quad (2)$$

$I_L$  : light current

$N_s$  : number of cells in series

$I_O$  : diode reverse saturation current

$n_i$  : ideality factor (diode factor)

$a$  : modified ideality factor

$k$  : Boltzman's constant in units of J/K

$R_s$  : series resistance (ohms)

$T_c$  : cell temperature

$R_{sh}$  : shunt resistance (ohms)

$q$  : Electron charge in coulombs

그림 3의 회로에 대한 고정된 셀 온도에서의 전류-전압과 일사량 관계는 식 (1)로 표현된다. 부하로 전달되는 전력, 즉

전류와 전압을 결정하기 위한 식 (2)에 정의된 5개의 Parameter는  $I_L$ ,  $I_O$ ,  $R_s$ ,  $R_{sh}$ ,  $a$ 이다. 이들 정보는 PV 제품정보와 패널의 재질에 따라 상수값이 사용되고, 일사량, PV 패널온도 등 입력 데이터를 이용하여 지역별 기본 발전량을 계산하고 데이터베이스에 적재한다.

## 2.4 3차원 건물 그림자 생성 및 일조량 시뮬레이션

태양광 패널 설치지점의 그림자 생성 및 일조량 계산 방법에 대하여 설명한다. 분 단위의 시각별 태양의 위치 및 그림자 생성 프로세스는 그림 4와 같다.

그림자를 생성하기 위해서는 먼저 시간별 태양의 위치를 계산해야 한다. 태양의 고도는 지평선을 기준으로 태양의 높이를 각도로 나타낸 것으로 태양의 고도각(Solar Altitude Angle)이다. 태양의 고도는 해가 뜬 후 점점 높아져 낮 12시에 가장 높고, 낮 12시가 지나면 다시 낮아진다. 태양이 지평선에 있을 때 태양의 고도는  $0^\circ$ 이며 머리3 위에 있을 때는  $90^\circ$ 이다.

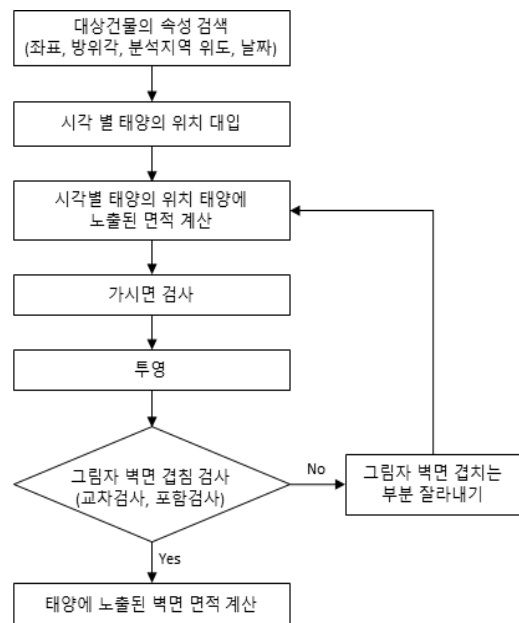


그림 4 건물 그림자 생성 흐름도

Fig. 4 Flowchart to create building shadow

태양의 고도각과 방위각을 구하기 위한 태양의 적위( $\delta$ ) 계산은 지구의 중심과 태양의 중심을 잇는 선이 지구의 적도와 이루는 각도이며 적위 계산식을 이용하여 계산할 수 있다. 태양의 위치 추적 알고리즘의 입력은 시간 위치이고, 고려할 항목 중 짧은 시간은 날짜(년, 달, 날짜)와 일반적인 시간(시간, 분, 초)으로 주어진다. 태양의 위치는 관측하는 위도와 경도의 각도 값으로 주어지고, 입력 자료를 이용하여 식 (2)와 같이 태양의 고도각 및 방위각을 산출하여 사용한다. 태양의 고도각( $\beta$ ) 및 태양의 방위각( $\omega$ )은 다음 식 (3)과 식 (4)과 같이 계산하여 태양광 설치 시뮬레이터 내부 알고리즘으로 적용하였다[11].

$$\beta = \sin^{-1}(\sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega) \quad (3)$$

$$\phi = \sin^{-1}\left(\frac{\cos\delta \cdot \sin\omega}{\cos\beta}\right) \quad (4)$$

$\beta$  : 대지의 위도

$\delta$  : 태양 적위

$\omega$  : 시각(時角) (예: 1시간은 15, 24시간은 360)

태양광을 표현하기 위해 사용된 3차원 좌표변환은 어떤 점을 우리가 원하는 좌표로 이동시키거나 역으로 우리가 원하는 중심점으로 좌표계를 이동시키는 방법이다. 좌표변환에는 평행이동과 회전이동, 확대 축소 등이 있다. 평행이동은 점  $P(x,y,z)$ 를  $(dx,dy,dz)$ 만큼 평행이동 시킨 점  $P'(x',y',z')$ 를 구하며, 회전이동은 점  $P(x,y,z)$ 를 각각  $x, y, z$  축을 중심으로 각  $\theta$ 만큼 회전시킨  $P'(x',y',z')$ 를 구하는 것이다. 이 변환은 4차원 행렬로 표현할 수 있으며, 각 행렬에서 회전이동과 평행이동의 행렬을 합하여 회전이동 후 평행이동을 수행하고 합산된 행렬을 바탕으로 식 (5)과 같은 식을 유도하여 3차원 좌표변환이 가능하다.

$$\begin{bmatrix} x' & y' & z' & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -x & -y & -z & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$x' = x\cos\theta - y\sin\theta - z$$

$$y' = x\sin\theta + y\cos\theta - z$$

$$z' = -z$$

다음은 태양광 설치 시뮬레이터에서 그림자 생성 및 적용을 위한 Shadow Map 생성 방법을 설명한다. Shadow Map은 빛의 관점에서 장면을 텍스처에 렌더링하는 것으로 광원에 의해 차폐되는 지역과 아닌 지역을 구분하여 바닥(지형)에 텍스처(색상 등)를 적용한다.

Shadow Map 알고리즘은 Hard shadow와 Soft shadow로 구분된다. Hard shadow는 point light source를 사용하고, Soft shadow는 area light source를 사용한다. Hard shadow 방식은 현실감이 다소 떨어지지만 표출하기 용이하며, Soft shadow Hard shadow 방식보다 현실감이 있으나, 계산량이 많아 렌더링에 많은 연산을 수행해야하는 단점이 있다. Soft shadow는 광원이 완전히 차단되는 Umbra 지역과 광원이 부분적으로 보이는 Penumbra 지역으로 구분하여 표출함으로써 렌더링 연산량이 많은 만큼 정밀하고 현실적인 표출이 가능하다[12].

본 논문에서는 대량의 건물들의 그림자를 표출하는 부분은 Hard shadow 방식을 사용하고, 일조량 계산과 같은 측정결과를 획득하는 부분은 Soft shadow 방식을 사용하여 보다 정확한 그림자를 생성하도록 개발하였다. Hard Shadow는 한 지점(point source)에서 빛이 발생하여 객체를 투영하는 방식을 사용하며, 그림자 생성 프로세스는 그림 5와 같다.

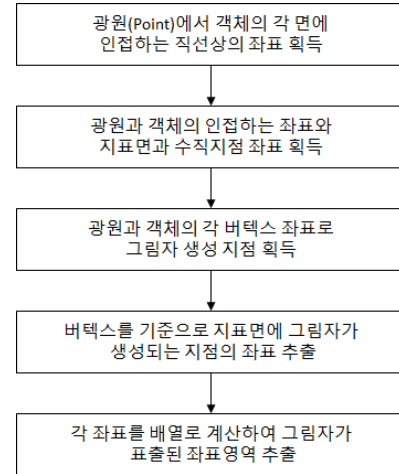


그림 5 Hard shadow 생성 프로세스

Fig. 5 Process to create hard shadow

광원에서 그림자를 표출할 객체와 실제 그려질 지표영역으로 직선을 생성하여 해당 직선에 인접하는 객체의 좌표와 지표면의 좌표를 획득한다. 이후 지표면과 수직지점을 계산하여 광원과 객체의 가장 양끝 모서리와 삼각형을 생성하고 해당 면의 길이를 계산하여 그림자가 그려질 좌표를 획득한다. 각 면에 인접한 지점을 위와 같은 방식으로 그림자가 그려질 영역을 계산하여 지표면에 그림자를 색상 등을 사용하여 표출한다.

Soft Shadow는 한 영역(area source)에서 빛이 발생하여 객체를 투영하는 방식을 사용하며, 빛의 산란(완전 차폐지역인 umbra와 부분차폐지역인 penumbra)까지 고려하여 계산하며, 그림자 생성 프로세스는 그림 6과 같다.

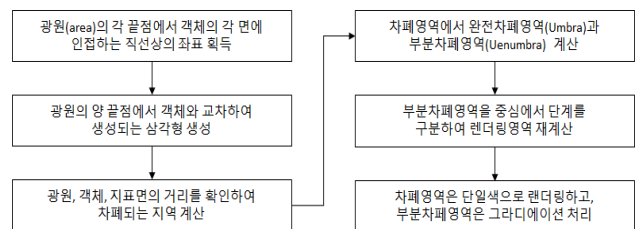


그림 6 Soft shadow 생성 프로세스

Fig. 6 Process to create soft shadow

Soft Shadow의 Volume algorithm은 광원을 기준으로 그림자가 표출되는 지역의 볼륨을 생성하여 해당 볼륨을 기준으로 전체 차폐지역과 부분차폐지역을 계산하여 표출한다. 차폐도를 계산하는 방법은 광원에서 지표면으로 직선으로 바라봤을 때, 몇 개의 오브젝트를 통과해서 도달하는지를 계산(통과하는 객체가 많을수록 수치가 증가)하는 방식을 사용한다. Soft Shadow는 먼저 Hard Shadow로 렌더링하고, 이후 부분 차폐영역을 계산하여 그림자를 보완한다. Soft shadow Volume Algorithm은 그림자가 드리워지는 지점에서 각 간섭되는 면의 양을 계산하여 최종 표출하게 된다. 이 최종 표출되는 양에

따라 그림자 영향에 따른 일조량(일조시간)을 산출한다.

## 2.5 PV 설치에 대한 경제성 분석

일조량이 산출되면 아래 식 (6)과 같이 지역별 기본 발전량 계산결과와 태양광 패널 설치 수량을 곱하여 발전량을 계산한다.

$$TotalPV = \sum powerKwh \times PVCnt \times (SunShine \div 60) \quad (6)$$

$PowerKwh$  : 지역별 기본 발전량 계산결과

$PVCnt$  : 태양광 패널 설치 수량

$SunShine$  : 일조량(분 단위 일조시간)

발전량이 산출되면 태양광 패널 설치에 대한 경제성 분석 결과를 제시한다. 경제성 분석은 선택한 PV 패널, PCS, ESS의 비용에서 정부보조금을 빼서 초기 투자비를 산정하고, 아래와 같은 방식으로 경제지표를 계산한다. 순현재가치(NPV)와 내부수익률(IRR)은 numpy 라이브러리를 사용하여 계산할 수 있으며, IRR은 연결된 인근구간의 두 시점을 기준으로 누락구간의 부하 중에서 더 큰 값을 선택하여 생성한다.

$$\text{투자수익(ROI)} = (\text{이익} - \text{초기투자비}) \div \text{초기투자비} \times 100 \quad (7)$$

$$\text{투자회수기간(PP)} = \text{초기투자비} \div \text{이익} \quad (8)$$

$$\text{순현재가치(NPV)} = \text{numpy.npv}(\text{이자율}, \text{numpy.array}(\text{이익})) \quad (9)$$

$$\text{내부수익률(IRR)} = \text{numpy.irr}(\text{numpy.array}(\text{이익})) \times 100 \quad (10)$$

전기요금 계산은 한전 고객으로 고객번호를 등록한 경우에는 수전 월사용량을 대입하고, 그 외의 경우는 계약종별 평균 전력사용량을 대입하여 경제성을 분석한다. 주택용(저압/고압)인 경우에는 누진단계 인화효과도 표현하며, 이산화탄소 배출량 절감 효과와 나무심기 효과는 아래와 같이 계산하며, 편백나무 20년을 기준으로 산정하였다.

$$\text{이산화탄소 배출량(kgCO}_2\text{eq/kWh)} = \text{발전량(kWh)} \times 0.46625 \quad (11)$$

$$\text{나무심기 효과(그루)} = \text{이산화탄소 배출량} \div 133 \quad (12)$$

## 2.6 디지털 트윈 기반 시각화 구현

사용자가 원하는 설치지점과 유형에 따라 디지털 트윈 기반의 실감형으로 시각화를 구현한 시스템을 설명한다. 설치 유형은 3가리로서 아파트 베란다, 건물 옥상 또는 지붕, 주차장이나 공원부지와 같은 대지로 구분한다. 3가지 설치유형별 발전량 계산 프로세스는 그림 7과 같다.

공동적으로 설치하고자 하는 건물이나 대지의 주소로 이동하기 위해서 주소 검색이나 3차원 지리정보시스템(GIS)에서 직접 지도에서 이동할 수 있다. 설치 유형이 아파트 베란다인 경우에는 해당 아파트 건물로 이동하고 층수 정보를 표시하

고, 그림 8과 같이 PV 패널, PCS, ESS의 모델 및 수량을 선택하여 설치할 수 있다.

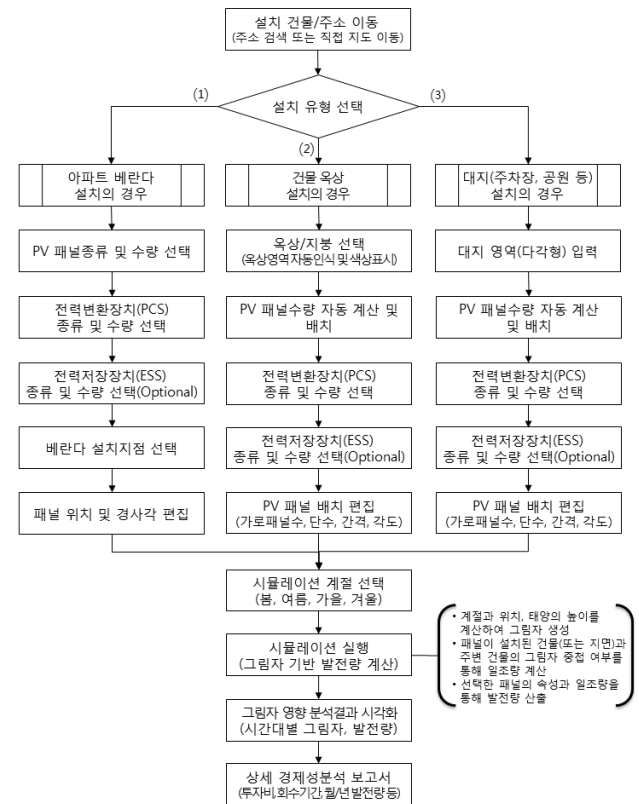


그림 7 설치유형별 시뮬레이션 실행 프로세스

Fig. 7 Simulation execution process by installation type

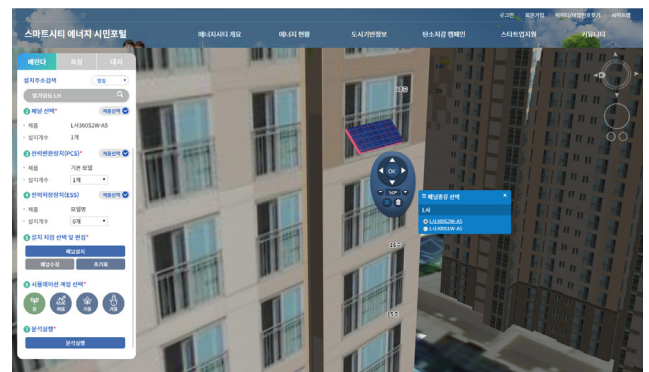


그림 8 아파트 베란다 태양광 설치 시뮬레이션 시각화

Fig. 8 Visualization to install PV at apartment veranda

특히, 실제 아파트 베란단에 설치해 보는 실감형 디지털 트윈 기법을 적용하여 선택한 패널의 동일한 크기로 설치해 볼 수 있으며, 편리한 리모콘 인터페이스를 통해 위치뿐만 아니라 각도를 변경하면서 시뮬레이션이 가능하다.

또한, 사각형의 창문틀내에 베란다 난간 사각틀이 있는 특징을 이용하여 3차원 모델링 데이터에서 베란다 난간틀을 인식하여 적정한 위치에 패널을 자동설치할 수 있고, 2개 패널의 설치로 난간틀의 범위를 벗어나는 경우에는 사용자에게 안



내한다.

시뮬레이션 실행 결과는 그림 9와 같이 화면 중앙에 건물과 시간대별 그림자를 디지털 트윈 기법을 이용하여 실제 인근 아파트 건물의 그림자가 지는 것과 같이 시간대별 건물 그림자의 변화하는 모습을 볼 수 있다. 화면 오른쪽에는 시뮬레이션 분석결과로서 시간대별 태양광 발전량과 일조량(분 단위 일조시간)을 차트와 테이블로 확인할 수 있다.

또한, 각 시간대를 이동시켜 시간대별 그림자에 대한 일조량과 발전량의 영향분석을 할 수 있으며, 아래 그림과 같이 16시에 그림자 영향을 받기 시작함으로써 일조량이 40분으로, 그림자로 인해 20분 감소함에 따라 발전량도 감소하는 것을 확인할 수 있다.

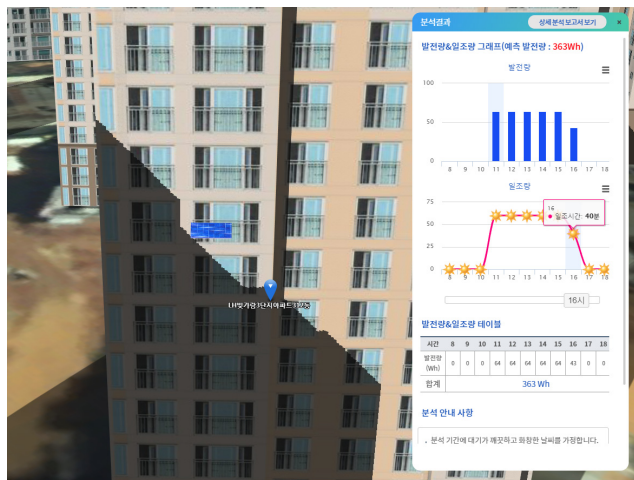


그림 9 그림자 영향분석 결과 시각화(16시)  
Fig. 9 Visualization of shadow effect analysis(4 P.M.)

### 3. 사례 연구

나주혁신도시 빛가람동 K기업의 건물 옥상에 설치되어 있는 PV 패널을 대상으로 시뮬레이션 데이터와 실제 발전량 데이터를 비교 분석하였다. 이 PV 패널의 총 용량은 38.586kW로서 지상으로부터 23m 높이의 옥상에 327W 용량 118개가 1단 4열의 패널 각도 30°로 설치되어있다.

일사량, 기온, 풍속 등 기상 관측 데이터가 가까운 거리에 있을수록 발전량 시뮬레이션의 정확도를 높일 수 있으나, 이 사례는 가장 인근이 광주지방기상청으로 직선거리로 약 20km 떨어져 있기 때문에 일부 오차가 발생할 수 있다.

이 건물 옥상의 PV 설치 시뮬레이션을 수행할 결과 그림자 영향을 받는 계절은 봄과 가을이고, 여름과 겨울에는 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다. 그림 10은 봄철(2020년 4월 3일)의 시뮬레이션 결과로서, 오전 8시부터 그림자 영향을 받기 시작하여 10시에는 그림과 같이 옆 건물의 그림자가 PV 패널들의 절반을 가리게 된다. 이 때의 일조량은 각 패널의 중심점을 기준으로 패널마다 그림자가 오버랩되는 시점을 계산한

다음 합산한다.

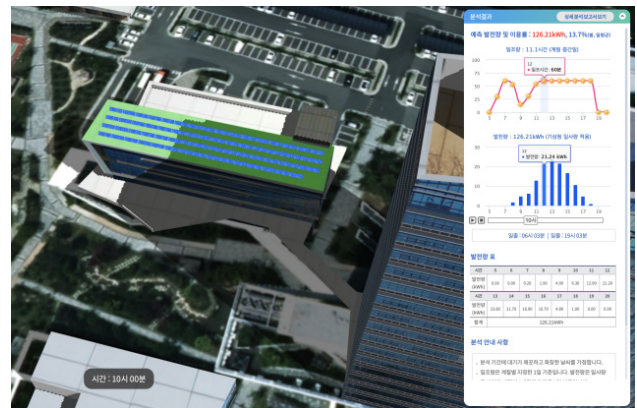


그림 10 나주혁신도시 건물 옥상 PV 시뮬레이션 사례  
Fig. 10 PV simulation for rooftop of building in Naju city

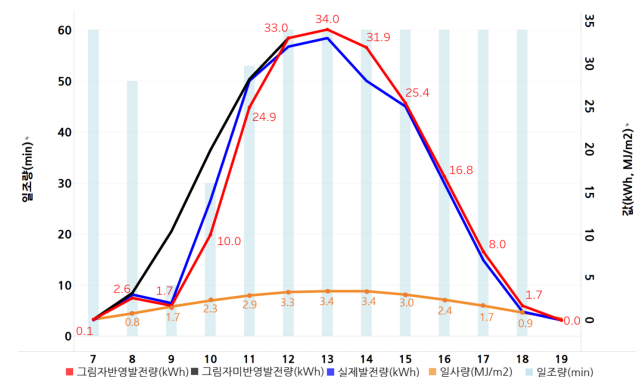


그림 11 4월 건물 옥상 시뮬레이션 결과 그래프  
Fig. 11 Graph of rooftop simulation in April

표 2 4월 건물 옥상 시뮬레이션 결과표

Table 2 Data sheet of rooftop simulation in April

시간	그림자 미반영 발전량 (kWh)	그림자 반영 발전량 (kWh)	실제 발전량 (kWh)	일사량 (MJ/m <sup>2</sup> )	일조량 (min)
7	0.1	0.1	0	0.1	60
8	3.2	2.6	3	0.8	50
9	10.4	1.7	2	1.6	10
10	19.9	10	14	2.3	30
11	28.2	24.9	28	2.9	53
12	33	33	32	3.3	60
13	34	34	33	3.4	60
14	31.9	31.9	28	3.4	60
15	25.4	25.4	25	3	60
16	16.8	16.8	16	2.4	60
17	8	8	7	1.7	60
18	1.7	1.7	1	0.9	60
19	0	0	0	0.2	0

건물 옥상 시뮬레이션 결과는 그림 11과 표 2와 같이 그림자의 영향이 받지 않는 시간대에서는 일사량에 따라 발전량이 결정되지만, 오전 9시, 10시와 같이 그림자 영향에 따라 일조량이 감소하는 경우에는 이 일조량을 반영하는 것이 발전량 장기 예측의 정확도를 향상시킬 수 있는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 고층 건물이 많은 도심지에서의 태양광 발전 시뮬레이션 및 경제성 분석은 3차원 맵을 활용한 그림자 영향분석이 필요하다.

#### 4. 결론

스마트시티 구축을 통한 에너지 자립률 제고 및 재생에너지 확대보급 정책에 따라 도시 내에서도 태양광 패널 설치가 점차 확산되고 있다. 본 논문에서는 3차원 건물지도에서 매일 태양의 위치계산을 통해 건물의 그림자를 분 단위로 생성하여 정확도 높은 일조량을 산출하여 아파트 베란다, 건물의 옥상 및 지붕, 주차장이나 공원부지와 같은 대지 등 도시에 적합한 스마트시티 태양광 발전 시뮬레이션 시스템의 개발 결과를 제시하였다.

또한, 디지털 트윈 기법을 활용하여 시간대별로 움직이는 3차원 건물의 그림자와 함께 태양광 발전량 및 일조량을 시각화함으로써 실감형 시뮬레이션이 가능하며, 3차원 건물지도에서 태양광 패널의 설치 방향과 각도까지 시뮬레이션이 가능하기 때문에 최대 발전할 수 있는 최적의 방향과 각도를 탐색할 수 있는 장점이 있다.

향후에는 도시 전체 영역을 사전에 시뮬레이션을 실행하여 발전 효율이 좋은 위치를 우선순위로 목록화하여 최적의 설치 용량, 방향과 각도 등을 제안할 수 있도록 고도화해 나갈 계획이다.

#### Acknowledgements

This work was supported by the Korea Institute of Energy Technology Evaluation and Planning (KETEP), granted financial resource from the Ministry of Trade, Industry & Energy, Republic of Korea (No. 2019271010015A)

#### References

- [1] Yun-Hyuk Choi, Yoon-Sung Cho, "A Study on Economical Efficiency Analysis of Solar Panel Installation in Low-Voltage Customer," JIEIE Journal, Vol. 34, No. 5, pp. 32-37, May 2020.
- [2] Min Hee Chung, "Comparison of Estimation Methods by Different Photovoltaic Software and Performance Evaluation," KIEAE Journal, Vol. 19, No. 6, pp. 93-99, Dec. 2019.
- [3] F. Miranda, H. Doraiswamy, M. Lage, L. Wilson, M. Hsieh and C. Silva, "Shadow Accrual Maps: Efficient

- Accumulation of City-Scale Shadows Over Time," IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, vol. 25, no. 3, pp. 1559-1574, March 2019.
- [4] Lu Liu and Shuangjiu Xiao, "Real-time Soft Shadows for Large-scale Virtual Environments," 2011 International Conference on Multimedia Technology, pp. 5464-5467, July 2011.
- [5] E. Nuno, M. Koivisto, N. A. Cutululis, and P. Sørensen, "On the Simulation of Aggregated Solar PV Forecast Errors," IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 9, no. 4, pp. 1889-1898, Oct. 2018.
- [6] N. S. K. Shabbir, M. S. A. Chowdhury and X. Liang, "A Guideline of Feasibility Analysis and Design for Concentrated Solar Power Plants," Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, vol. 41, no. 4, pp. 203-217, Fall 2018.
- [7] Cleber Onofre Inacio and Carmen Lucia Tancredo Borges, "Stochastic Model for Generation of High-Resolution Irradiance Data and Estimation of Power Output of Photovoltaic Plants," IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 9, no. 2, pp. 952-960, April 2018.
- [8] Sang-Yeal Kim, Yujin Nam, "Study on the Analysis Performance of PVT system using the Dynamic Simulation," KIEAE Journal, Vol. 15, No. 2, pp. 95-101, Apr. 2015.
- [9] W. De Soto, S. A. Klein, W. A. Beckman, "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance" Solar Energy, Vol. 80(2006), pp. 78-88, Aug. 2005.
- [10] S. A. Pelaez, C. Deline, P. Greenberg, J. S. Stein, and R. K. Kostuk, "Model and Validation of Single-Axis Tracking With Bifacial PV," IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 9, no. 3, pp. 715-721, May 2019.
- [11] Hongya Zhang, Kaimin Sun, and Wenzhuo Li, "Object-Oriented Shadow Detection and Removal From Urban High-Resolution Remote Sensing Images," IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, vol. 52, no. 11, pp. 6972-6982, Nov. 2014.
- [12] Hui Huang, Genyun Sun, Jun Rong and Aizhu Zhang, "Multi-feature Combined for Building Shadow detection in GF-2 Images," 2018 5th International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications, pp. 1-4, June 2018.

## 저자소개



**Jin-Ho Shin**

He received his Ph.D. degree from Chungbuk National University, Korea. He is presently a Principal Researcher at Korea Electric Power Research Institute, Korea.



**Shin-Ho Lee**

He received his B.S. degree from Yonsei University, Korea. He is presently a Researcher at Korea Electric Power Research Institute, Korea.



**Seung-Joon Lee**

He received his B.S. degree from Chosun University, Korea. He is presently a Researcher at Korea Electric Power Research Institute, Korea.