연구논문

그린캠퍼스 조성을 위한 남동향 건물 옥상 태양광발전시스템의 잠재량 평가에 따른 최적 배치 설계

서희진¹ · 서장원^{2*}

¹강원대학교 에너지자원융합공학과 석사과정

²강원대학교 에너지공학부 (에너지자원융합공학전공) 조교수

Optimal Layout Design according to Potential Assessment of Rooftop Photovoltaic System on Southeast-facing Buildings for Establishing Green Campus

Heejin Seo¹ and Jangwon Suh^{2*}

¹M.S Course, Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Kangwon National University

²Assistant Professor, Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Division of Energy Engineering,
Kangwon National University

Received 25 November 2020 Final version Received 12 December 2020 Accepted 22 December 2020

Abstract : This paper presents an optimal layout design of rooftop photovoltaic (PV) system that maximize the power output for each building in Kangwon National University's Samcheok Campus. The available area was calculated by excluding fixed facilities and shaded areas on the roof of each building. The inclination of module was set to onsite latitude value. Considering the characteristics of rooftops, two layout designs of the solar module were applied (southeast facing - parallel to the rooftop boundary that maximizes the number of modules and south facing that maximizes PV power generation efficiency) to 14 buildings to analyze and compare the PV potentials. As a result using the RETScreen software generally used, the southeast-facing installation method showed higher potential for 11 buildings, while the south-facing installation method was selected as the optimal design for three buildings. This result can be used as basic data for designing the rooftop PV system.

Key words : Rooftop photovoltaic, Potential, Tilt & Orientation Factor, Green campus, RETScreen

요 약 : 본 연구에서는 강원대학교 삼척캠퍼스 옥상 공간에 태양광발전시스템을 도입할 경우, 건물별로 발전량을 최대화하는 최적 배치 설계 방안을 제시하였다. 각 건물 옥상의 고정시설물과 음영 지역을 제외하여 태양광 모듈 설치 가능한 면적을 계산하였다. 태양광 모듈의 설치 경사는 연구지역의 위도 값을 적용하였다. 건물 별로 옥상 공간의 면적과 형태가 상이한 특성을 고려하여 태양광 모듈을 옥상 경계와 평행하게 남동향으로 설치하는 방법(태양광 모듈 개수 최대화)과 남향으로 설치하는 방법(태양광 발전 효율 최대화) 등 2가지 설계 방법을 14개 건물에 적용하여 설계안에 따른 옥상 태양광발전시스템의 발전 잠재량을 비교 분석하였다. RETScreen 소프트웨어를 이용하여 분석 결과 11개 건물은 태양광 모듈 개수를 최대화하는 남동향 설치 방법이 더 높은 잠재량을 나타낸 반면, 3개 건물은 태양광 발전 효율을 최대화하는 남향 설치 방법이 최적의 설계안으로 선정되었다. 본 연구는 강원대학교 삼척 캠퍼스 옥상 태양광발전시스템 설치를 위한 기초 설계 자료를 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

주요어 : 옥상 태양광 발전, 잠재량, 경사 및 방향 요인, 그린캠퍼스, RETScreen

서 론

파리기후변화협정이 2015년부터 본격적으로 발효되면서 에너지 전환과 그린 뉴딜 정책의 중심에 신재생에너지가 핵심요소로 꼽히며 사회 전반에서 다양한 방법으로 온실

가스 감축을 위한 노력이 진행되고 있다(Suh and Brownson, 2016; Suh *et al.*, 2020). 특히, 대학은 거대한 에너지 소비 주체로써 교육뿐만 아니라 온실가스 감축을 통해 사회와 환경에 기여할 필요가 있다. 온실가스 감축 방안으로 다양한 방법들이 검토되고 있는 가운데 대학 캠퍼스 공간을 직접

*Corresponding Author, Jangwon Suh, jangwonsuh@kangwon.ac.kr, Dept. of Energy and Mineral Resources Engineering, Kangwon National University, Samcheok, Korea

활용하는 재생에너지 기반의 그린 캠퍼스(green campus) 조성에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다(Song and Choi, 2012, 2015; Zeiler and Boxem, 2013). 특히 태양광 에너지의 경우 타 재생에너지에 비하여 설치 관점에서 공간적인 제약이나 거부감이 적고, 친환경적이며, 다양한 형태(일반부지형, 지붕형, 옥상형, 건물 일체형 등)로 개발될 수 있는 장점이 있어 그린 캠퍼스 조성에 가장 적합한 에너지원으로 꼽히고 있다.

대학 캠퍼스에서 태양광에너지를 활용하기 위해서는 부지 확보가 필수적이다. 태양광발전시스템을 설치하기 위해서는 일정 면적 이상의 공간이 필요하다. 고정형 태양광 모듈은 바닥부에 사각형으로 설치되며, 인근 지형이나 건물의 그림자에 의한 영향을 고려할 필요가 있다. 따라서 캠퍼스 내에 별도의 공간 마련이 어려운 경우 이러한 문제가 상대적으로 적은 건물의 옥상 공간의 유휴부지를 활용하는 방법이 가장 합리적인 것으로 평가되고 있다. 강원대학교 삼척캠퍼스의 경우 에너지 특성화 캠퍼스로 지정되었을 뿐만 아니라 그린 캠퍼스 조성을 위해 가능한 모든 건물의 옥상 공간에 태양광발전시스템 도입을 준비하고 있다. 다만 옥상 공간의 활용 가능 높이에 대한 제약과 더불어 태양광 어레이(solar array) 형태에 대한 대학 구성원들의 시각적 비선호 문제로 인하여 대학측에서는 어레이 형태가 아닌 태양광 모듈(solar module)을 다수 설치할 계획을 갖고 있다. 그러나 강원대학교 삼척캠퍼스는 건물 옥상의 형태가 다양하고, 대부분 남향(180°)이 아닌 남동쪽을 향하고 있다. 그렇기 때문에 태양광 모듈의 설치 방향에 따라 설치 가능 개수와 발전 효율이 크게 달라질 수 있다. 즉, 태양광 모듈을 남향으로 설치할 경우 태양광 발전 효율은 최대가 되지만 설치 가능 모듈 개수가 상대적으로 적어진다. 반면에 태양광 모듈을 옥상 경계와 평행하게 남동향으로 설치할 경우 설치 가능 개수는 최대가 되지만 태양광 발전 효율이 낮아질 수 있다. 따라서 태양광 모듈의 설치 경사와 방향 인자(tilt and orientation factor, TOF)를 고려하여 두 가지 설계 방안에 따른 각 건물별 태양광발전시스템의 잠재량을 비교 분석함으로써 최적 배치 설계 방안을 제시할 필요가 있다.

최근 들어 옥상 태양광발전시스템의 잠재량 평가 또는 설계에 대한 다양한 연구가 보고되었다. Song and Choi (2012)는 System Advisor Model (SAM) 소프트웨어를 이용하여 부경대학교에 옥상 태양광발전시스템을 도입할 경우 기대할 수 있는 발전량을 예측하고, 전기 요금 변화에 따른 경제적 효과를 분석하였다. Choi *et al.* (2011)은 지리정보시스템 소프트웨어인 ArcGIS와 태양광발전 잠재량 평가 소프트웨어인 TRNSYS를 커플링(coupling)하여 도심지 옥상 지역의 태양광발전 잠재량을 정확하고 효과적으로

예측하고 가시화할 수 있는 익스텐션(extension) 형태의 PV Analyst 소프트웨어를 개발하였다. Shin and Lee (2019)는 Solar Pro 소프트웨어를 활용하여 국내 건축물 옥상 및 지붕 지역을 대상으로 태양광발전시스템의 잠재량을 평가하였다. 그 외에도 다양한 지역에서 태양광 프로젝트의 타당성을 평가한 사례가 보고되었다. Choi *et al.* (2013)은 RETScreen 소프트웨어를 이용하여 전라남도 폐광산의 유휴부지에 태양광발전시스템을 설치할 경우 예상되는 발전량과 경제적 효과를 분석하였다. Song *et al.* (2014)은 산성광산배수 자연정화처리 시설의 산기장치 전력공급을 위한 태양광발전시스템 설계 사례를 제시한 바 있다. Kim *et al.* (2014)은 지리정보시스템(Geographic Information Systems, GIS)을 기반으로 울릉도의 태양광발전시스템 설치를 위한 지형적 적지를 추출하고, RETScreen 소프트웨어를 이용하여 태양광발전잠재량을 평가하였다. 이러한 기존 연구들은 태양광발전시스템 설치 가능 지역을 파악하는 과정에서 간단한 가정을 통해 가용 면적을 대략적으로 계산하거나 태양광 모듈의 면적과 이격거리(setback distance or separation distance) 등을 단순화함으로써 태양광 모듈의 설치 가능 개수를 대략적으로 분석하였다. 이는 태양광발전시스템의 설치 용량과 발전 잠재량 산정의 정확도를 낮추는 요인으로 작용한다. 또한, 옥상 지역의 형태와 방향성을 고려하여 태양광발전시스템의 최적 설계안을 제시하는 연구는 미비한 실정이다.

본 연구의 목적은 강원대학교 삼척캠퍼스에 옥상 태양광발전시스템을 도입할 경우 건물별 옥상 공간의 면적과 형태를 고려하여 발전 잠재량을 최대화하는 최적 설계 방안을 제시하는 것이다. 이를 위해 태양광 모듈을 남동향으로 설치하는 방법(태양광 모듈의 설치 개수 최대화)과 남향으로 설치하는 방법(태양광발전 효율 최대화)의 경우로 나누어 분석을 수행하고 결과를 비교 분석하고자 한다.

연구지역

연구대상지역은 강원도 삼척시에 위치한 강원대학교 삼척캠퍼스이다(Fig. 1). 연구지역의 위도는 $37^\circ 26'$, 경도는 $129^\circ 10'$ 이며, 총 면적은 약 $347,600 \text{ m}^2$ 이다. 강원대학교 삼척캠퍼스 건물들의 주 방위는 129° 로 남동쪽을 향하고 있다. 본 연구에서는 건물 옥상의 형태와 시설물 설치 가능 여부를 종합적으로 검토하여 옥상 태양광발전시스템의 설치가 가능한 14개의 건물을 선정하였다. 14개 건물 옥상 면적의 합은 $18,486 \text{ m}^2$ 으로 나타났다. 개별 건물의 옥상 면적은 강의동(10번)이 가장 넓으며, 학생군사교육단으로 사용 중인 제2학생회관(12번)이 가장 좁은 것으로 조사되었다.

Fig. 1. Aerial view of the study area with selected 14 buildings (image source from <http://map.vworld.kr/>). 1) Engineering Building I, 2) Engineering Building II, 3) Engineering Building III, 4) Engineering Building IV, 5) Engineering Building V, 6) College of Humanities & Social Science, 7) Joint Laboratory & Practice Building, 8) Main Administration Building, 9) Computer Center, 10) Lecture Building, 11) Student Union Building I, 12) Student Union Building II, 13) Central Library, 14) Formative Arts Building

연구방법

연구지역의 14개 건물 옥상에 설치될 태양광발전시스템의 잠재량을 평가하기 위해 5단계의 절차에 따라 분석을 수행하였다(Fig. 2). 연구지역의 3차원 지형 및 건물에 대한 지리정보시스템 데이터와 기존에 설치된 태양광발전시스템의 발전량 자료를 구축하였다. 그림자 분석과 옥상 고정시설물 영역에 대한 현장 조사를 통해 옥상 공간의 태양광 모듈 설치 가능 면적을 분석하고 형태를 파악하였다. 그리고 태양광 모듈의 설치 개수를 최대화(옥상 경계와 평행하게 배치)하는 방법과 태양광 발전 효율을 최대화(남향 배치; Orientation factor 최적화)하는 두 가지 설계 방법으로 나누어 각 건물 별로 설치 가능한 모듈의 개수를 계산하였다. RETScreen 소프트웨어를 이용하여 장기간 관측된 현장 주변의 기상 특성과 태양광발전시스템의 모델과 용량을 고려하여 두 가지 설계안에 따른 각 건물 별 태양광발전시스템의 발전 잠재량을 각각 평가하고, 이를 근거로 최적 설계 배치 방안을 제시하였다. 이 과정에서 태양광발전 잠재량 예측 결과를 실측 결과와 비교함으로써 검증을 수행하고, 예측의 신뢰도를 향상시키기 위하여 예측값의 보정을 수행하였다.

데이터 구축

본 연구에서는 연구지역의 3차원 지형과 건물을 보여주는 지리정보시스템 데이터와 연구지역에 기 설치된 옥상

Fig. 2. Flowchart of procedures for developing optimal design for rooftop PV system.

태양광발전시스템 모델 및 발전량 측정 자료를 획득하였다. 3차원 GIS 자료의 경우 기본적으로 건물 옥상 공간의 면적과 형태를 파악하고, 음영 지역 등을 고려한 태양광발전시스템 설치 가능 지역을 산정하는데 활용되었다. 데이터 구축을 위해 건물통합정보 등을 제공하는 국가공간정보포털(<http://www.nsdi.go.kr/>)과 공간정보 오픈플랫폼 지도(브이월드)(<http://map.vworld.kr/>)를 이용하였다. 태양광발전시스템 자료는 구성 요소인 태양광 모듈이나 인버터 모델, 설치 각도, 최근 발전량 측정 자료를 구축하였다. 태양광발전시스템 구성요소의 속성 자료는 태양광발전시스템의 발전 잠재량을 평가할 때 입력자료로 사용되며, 발전량 자료는 검증의 목적으로 활용된다. 이러한 데이터는 학교 시설과 측과의 협의와 실제 현장 조사를 통해 확보하였다.

옥상 공간의 가용 면적 분석

본 연구에서는 옥상 공간의 가용 면적을 계산하기 위하여 옥상에 설치된 고정시설물 영역과 음영지역을 함께 고려하였다. 첫째, 연구지역 내 14개 건물 옥상 지역의 태양광 모듈 설치 가능 지역을 파악하기 위해 고해상도 항공사진(Fig. 3a)의 판독과 현장조사(Fig. 3b)를 통하여 전체 건물 옥상 지역의 고정시설물 영역을 조사하였다. 다만 비고정시설물의 경우 음영 지역으로의 이동이 가능하기 때문에 옥상의 가용 면적 계산시에는 이를 제외하였다. 둘째, 옥상의 고정시설물, 주변 지형 및 건물에 의한 그림자(음영지역) 분석을 통해 태양광 모듈 설치 가능 지역을 분석하였다. 국내의 경우 효과적인 태양광 발전을 위해서 최소 오전 9시부터 오후 3시까지는 태양광 모듈이 햇빛에 노출되는 것을 권장하고 있다(KEI, 2009). 이를 위해 본 연구에서는 연구

Fig. 3. Investigation of fixed facilities on the rooftop based on (a) Aerial photograph analysis. (b) A field survey.

Fig. 4. Conceptual diagram of setback distance between PV modules.

지역의 수치표면모델(digital surface model)과 태양의 방위각 및 고도를 이용하는 ArcGIS 10.7 소프트웨어(<http://www.esri.com>)의 Hillshade 도구를 이용하여 연구지역의 그림자 지도를 작성하고, 이로부터 음영지역을 파악하였다. 그림자 분석 방법에 대한 자세한 설명과 원리는 Choi *et al.* (2013)을 참고할 수 있다.

옥상 공간의 전체 가용 면적에 태양광 모듈을 설치할 수 있는 것은 아니다. 왜냐하면 설치된 태양광 모듈에 의해 생기는 그림자로 인한 인접 모듈의 발전 효율 저감 문제를 해결하기 위해서 모듈 간 이격거리를 고려해야 하기 때문이다. 이격거리를 계산하는 원리는 Fig. 4와 같으며, 계산 공식은 다음과 같다. 여기서 L 은 태양광 모듈의 길이(m), α 는 태양광 모듈의 경사각($^\circ$), β 는 태양 고도각($^\circ$)을 의미한다. 본 연구에서 이격거리는 3.6 m로 산정되었고, 이를 적용하여 분석을 수행하였다.

$$d = L \times \frac{\sin(180^\circ - \alpha - \beta)}{\sin \beta} \quad (1)$$

남동향 건물의 태양광 모듈 설치 방법

태양광발전시스템의 발전량을 최대화하기 위해서는 태양광 모듈 설치 지역의 위도와 건물의 방향 요인을 고려할 필요가 있다. 일반적으로 고정형 태양광 모듈의 최적 배치 설계를 위해 경사각은 연구지역의 위도값을 이용한다. 반면 태양광 모듈은 일반적으로 남향(180°)으로 설치하는 경

Fig. 5. Two different module installation methods (a) Southeast facing - Maximizing the number of PV modules. (b) South facing - Maximizing PV efficiency.

우가 대부분이다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 연구지역의 건물들이 주로 남동향이기에 때문에 태양광 모듈을 남향으로 설치할 경우 옥상 공간을 최대 효율로 활용할 수 없고, 설치 가능 모듈 개수가 줄어드는 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 각 건물들에 대하여 태양광 모듈을 옥상의 경계와 평행하게 남동향으로 배치함으로써 설치 개수를 최대화하는 방법(Fig. 5a)과 남향으로 배치함으로써 태양광 발전 효율을 최대화하는 방법(Fig. 5b) 등 두 가지 방법으로 나누어 잠재량을 평가하였다. 고해상도 항공사진을 활용하여 옥상 공간의 가용 지역 내에서 태양광 모듈의 실제 크기($1.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$)와 이격거리(3.6 m)를 적용하여 배치 설계를 수행하고 모듈의 개수를 분석하였다.

RETScreen을 이용한 발전 잠재량 평가

본 연구에서는 옥상 태양광발전시스템의 잠재량을 평가하기 위하여 RETScreen 소프트웨어를 사용하였다. RETScreen은 Natural Resource Canada의 VANMET Energy Diversification Research Laboratory에서 개발하였으며 전문가 버전을 제외하고는 무료로 사용 가능하다. 이 소프트웨어는 전세계 여러 국가와 도시에 대한 통계적 기상 데이터베이스와 함께 다양한 태양광발전시스템의 종류와 유형별 특성값들을 제공한다. 따라서 사용자가 도시와 시스템 유형 등을 선택할 수도 있고, 실제 조사한 값을 직접 입력하여 원하는 분석을 수행할 수도 있다. 이미 다수의 연구자들이 RETScreen 소프트웨어를 이용하여 태양광발전시스템의 잠재량이나 경제성 등을 평가한 사례(Lee, 2011; Choi *et al.*, 2013; Kim *et al.*, 2014)이 있기 때문에 이 소프트웨어의 신뢰성에 대해서는 설명을 생략한다.

태양광발전시스템으로부터 생산 가능한 발전량을 산정하기 위해서는 입력자료로서 해당 지역의 다양한 기상 조건과 설치할 태양광발전시스템의 특성값이 필요하다. 이때 기상 조건은 관심지역의 일사량, 평균 온도, 습도, 풍속, 풍향 자료 등을 의미한다. RETScreen 소프트웨어에는 연구지역인 삼척지역의 기상 자료가 포함되어 있지 않았기

Table 1. Parameters of PV module and inverter inputted in RETScreen software

PV module	Type	mono-Si
	Capacity	175 W
	Efficiency	13.7%
	Slope	37°
	Normal operating cell temperature	45°
	Temperature coefficient	0.40%/°C
	Solar collector area	1
Inverter	Miscellaneous losses	0.5%
	Efficiency	96%
	Miscellaneous losses	0.5%

때문에 삼척과 가까우며(약 16 km) 기상 조건이 유사한 강원도 동해시의 기상 데이터를 사용하였다. 반면 태양광발전시스템의 특성은 설비 종류에 따른 용량이나 효율 등을 포함한다. 태양광 모듈과 인버터의 성능에 관한 인자 값들은 강원대학교 삼척캠퍼스에서 실제 사용 중인 Sympony Energy 社의 SE-173 모델과 모든 측면에서 가장 유사한 Grape Solar 175를 선택하여 잠재량을 예측하였다(Table 1). 본 연구에서 선택한 태양광 모듈은 고정형(fixed) 방식이며 태양광 모듈의 최대 발전 효율을 위해 경사각은 연구 지역의 위도 값인 37°을 입력하였다. 인버터 특성값으로는 실제 교내에서 사용 중인 Kaco 社의 Powador 5000xi 모델의 효율인 96%를 입력하였다.

연구결과 및 해석

옥상 공간의 태양광 모듈 설치 가용 면적

옥상 고정시설물 영역과 그림자 분석에 의한 음영 지역을 모두 고려한 결과 연구지역 14개 건물의 옥상 총 면적 18,486 m² 중 태양광 모듈을 설치할 수 있는 면적은 총 10,649 m²로 분석되었다(Table 2). 각 건물별 태양광 모듈 설치 가능 지역은 최소 167 m², 최대 1,811 m²로 확인되었고, 태양광 모듈 설치가 가능한 평균 면적값은 761 m²로 분석되었다.

RETScreen을 이용한 발전량 잠재량 평가 결과

Table 3은 두 가지 설계안(태양광 모듈 개수를 최대화하도록 옥상 경계와 평행하게 남동향으로 배치 vs. 태양광 모듈의 발전 효율을 최대화하도록 남향으로 배치)에 따른 건물 별 태양광 모듈의 설치 가능 개수와 발전 잠재량 산정 결과를 나타낸다.

옥상 공간의 가용 면적 내에 태양광 모듈의 크기와 이격

Table 2. Rooftop areas and available area of the 14 buildings selected

No.	Building name	Rooftop area (m ²)	Available area (m ²)
1	Engineering Building I	1,650	1,300
2	Engineering Building II	1,398	927
3	Engineering Building III	2,127	1,669
4	Engineering Building IV	2,290	1,184
5	Engineering Building V	1,200	584
6	College of Humanities & Social Science	1,034	246
7	Joint Laboratory & Practice Building	1,291	504
8	Main Administration Building	605	167
9	Computer Center	554	243
10	Lecture Building	2,419	1,811
11	Student Union Building I	866	554
12	Student Union Building II	558	288
13	Central Library	1,254	450
14	Formative Arts Building	1,240	722
Σ		18,486	10,649

거리를 고려하여 항공사진 위에 태양광 모듈을 가상으로 설치하였다. 그 결과 태양광 모듈 설치 개수를 최대화하도록 설계한 경우 건물 별로 167~815개, 총 5,627개의 태양광 모듈을 설치할 수 있었다. 반면에 태양광 발전 효율을 최대화하도록 설계한 경우 건물 별로 146~742개, 전체 14개 건물에 대해서는 총 4,879개의 태양광 모듈을 설치할 수 있는 것으로 분석되었다. 태양광 모듈의 설치 개수를 최대화하는 경우가 태양광 발전 효율을 최대화하는 경우와 비교할 때 건물 별로 최소 8개, 최대 153개의 모듈을 추가적으로 설치할 수 있었다.

연간 발전 잠재량의 경우, 태양광 모듈의 설치 개수를 최대화한 경우 최소 42,925 kWh부터 최대 206,410 kWh까지 발전이 가능한 것으로 분석되었으며, 전체 잠재량은 1,425,102 kWh로 계산되었다. 반면 태양광 발전 효율을 최대화하는 남향 설계 기법의 경우 건물 별 연간 발전 잠재량은 39,914~202,850 kWh의 분포를 보였고, 잠재량 합계는 1,333,825 kWh로 계산되었다. 총 14개 중 11개 건물에서 옥상 경계와 평행하게 남동향으로 태양광 모듈을 설치하는 방안이 더 높은 발전 잠재량을 보인 반면, 3개 건물(6-인문 사회과학관, 9-전산정보관, 11-제1학생회관)은 태양광 모듈을 남향으로 설치하는 경우에 더 높은 잠재량을 보이는 것으로 분석되었다(Fig. 6).

Table 3. Results of number of PV modules and annual power output from PV system for 14 buildings according to the installation methods

No.	Number of PV modules		Annual electricity production (kWh/year)		Optimal installation method
	Southeast facing	South facing	Southeast facing	South facing	
1	537	486	136,002	132,864	Parallel to RB*
2	482	360	122,072	98,417	Parallel to RB
3	737	678	186,650	185,350	Parallel to RB
4	552	399	139,801	109,079	Parallel to RB
5	284	218	71,926	59,597	Parallel to RB
6	180	171	45,587	46,748	South facing
7	370	314	93,707	85,842	Parallel to RB
8	183	169	46,347	46,202	Parallel to RB
9	173	165	43,814	45,108	South facing
10	815	742	206,410	202,850	Parallel to RB
11	490	455	124,098	124,389	South facing
12	167	146	42,295	39,914	Parallel to RB
13	290	254	79,446	69,436	Parallel to RB
14	367	322	92,947	88,029	Parallel to RB
Σ	5,627	4,879	1,431,102	1,333,825	

*RB (rooftop boundary)

Fig. 6. No. of modules from south facing design of rooftop PV system (a) College of Humanities & Social Science (b) Computer Center (c) Student Union Building I.

태양광 모듈의 최적 배치 설계안

본 연구에서는 태양광 모듈의 설치안으로 제시된 두 가지 방법 중 발전 잠재량이 높게 나타난 경우를 건물 별 태양광 모듈의 최적 설계안으로 선정하였다. 연구지역의 14개 건물 중 11개 건물은 옥상 경계와 평행하게 남동향으로 설치하여 태양광 모듈 개수를 최대화하는 방법이 더 나은 방법인 것으로 판단된다. 반면에 나머지 3개 건물(6-인문사

회과학관, 9-전산정보원, 11-제1학생회관)은 태양광 모듈을 남향으로 설치하여 태양광 발전 효율을 최대화하는 방법이 최적의 설계 방법으로 분석되었다. 일반적으로 옥상 태양광발전시스템이 건물 옥상 경계에 평행하게 설치하는 경우가 대부분인 점을 감안하면 본 연구에서 제시한 결과는 건물 옥상의 형태와 방향에 따라 태양광 모듈의 최적 배치 설계가 달라질 수 있음을 제시한다.

토 의

RETScreen 소프트웨어를 이용하여 도출한 옥상 태양광 발전시스템의 발전 잠재량의 정확도를 검증하기 위해 월별 잠재량 예측값을 교내 공동실험실습관에 기 설치된 태양광 발전시스템의 최근 4년(2015~2018) 평균 월별 발전량 실측값과 비교 분석하였다. 2019년 자료의 경우 일부 기간에 대한 데이터 누락으로 인하여 본 검증에서 제외하였다. 교내 공동실험실습관에 기 설치된 태양광발전시스템은 어레이(array) 형태로 이에 포함된 모듈의 개수와 성능 정보를 이용하여 발전량 예측값과 실측값을 비교분석하였다. 그 결과 예측값과 실측값간의 결정계수(R^2)는 0.7764로 계산되었으며, 본 연구의 예측값은 실측값과 다소 높은 수준의 상관관계를 보이는 것으로 사료된다(Fig. 7).

그러나 예측값과 실측값의 1차 상관관계식을 도출한 결과 실측값은 예측값보다 전반적으로 낮은 값을 보이는 것으로 확인되었다(Fig. 7). 그 이유는 RETScreen 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션 과정에서 태양광 어레이의 병렬 구조 결합에 따른 손실, 실시간으로 변하는 연구지역의 기상 특성, 태양광 모듈의 쏠일링(soiling) 현상, 그리고 노후화에 따른 발전 효율 저감 등을 반영할 수 없었기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 RETScreen으로 예측한 건물 별 발전 잠재량에 예측값-실측값간의 상관식($y =$

$0.6417x + 230.8$)을 적용하여 보다 신뢰성 있는 예측값을 다시 도출하였다(Table 4). 수정된 건물 별 옥상 태양광발전시스템의 잠재량은 기존 잠재량의 약 65% 수준의 값을 나타냈다. 그러나 모든 건물에 대해 동일한 수식을 적용했기 때문에 건물 별 최적 설계안은 변화하지 않는다.

Fig. 7. A plot showing correlation between simulation-based monthly estimated power output and monthly observed mean power output of Joint Laboratory & Practice Building (No. 7).

Table 4. Results of modified annual power output from PV system for 14 buildings according to the installation methods

No.	Modified annual power production (kWh/year)		Difference (ratio)	Optimal installation method
	Southeast facing	South facing		
1	87,503	85,490	2.4%	Parallel to RB*
2	78,564	63,385	23.9%	Parallel to RB
3	120,004	119,170	0.7%	Parallel to RB
4	89,941	70,227	28.1%	Parallel to RB
5	46,386	38,474	20.6%	Parallel to RB
6	29,484	30,229	-2.5%	South facing
7	60,363	55,316	9.1%	Parallel to RB
8	29,972	29,879	0.3%	Parallel to RB
9	28,346	29,177	-2.8%	South facing
10	132,684	130,400	1.8%	Parallel to RB
11	79,864	80,051	-0.2%	South facing
12	27,372	25,844	5.9%	Parallel to RB
13	47,361	44,788	5.7%	Parallel to RB
14	59,875	56,719	5.6%	Parallel to RB
Σ	917,719	859,147		

*RB (rooftop boundary)

14개 건물 중 1공학관(No. 1), 3공학관(No. 3), 대학본부(No. 8), 강의동(No. 10)의 경우 태양광 모듈의 개수를 최대화하는 설계 방안이 더 높은 발전 잠재량을 나타냈지만 그 차이의 비율이 3% 미만으로 크지 않았다(Table 4). 본 연구에서는 설계안에 따른 발전 잠재량만을 비교하여 건물 별 최적 설계안을 제시하였으나 향후 태양광 발전의 경제성까지 고려한다면 잠재량 결과의 차이가 크지 않은 4개 건물의 경우 최적 설계 방법이 변화할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 옥상 태양광 발전 잠재량 예측값의 정확도 검증을 위하여 공동실업실습관에 기 설치된 태양광발전시스템 모델의 특성값을 적용하였다. 그러나 최근 태양광 셀과 모듈의 제작 기술이 발달하면서 과거 제품과 유사한 크기에 더 높은 용량과 효율을 갖는 태양광 모듈이 다수 개발되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구지역에 이와 같은 고효율의 태양광 모듈을 설치할 경우 발전 잠재량은 더욱 증가할 것으로 판단된다. 따라서 앞에서 제시된 태양광 발전량 예측값은 절대적인 의미를 갖지 못한다. 추후 실제로 연구지역 전체 건물 옥상에 태양광발전시스템을 설치할 경우에는 다양한 태양광 모듈과 인버터 모델을 미리 검토할 필요가 있을 것으로 사료된다.

결 론

본 연구에서는 강원대학교 삼척캠퍼스에 옥상 태양광발전시스템을 도입할 경우 기대할 수 있는 건물 별 발전 잠재량과 최적 설계 방법을 분석하였다. 연구지역 건물 옥상의 형태와 주 방향 등의 특성을 고려하여 발전 잠재량을 도출한 결과, 14개 중 11개 건물은 태양광 모듈의 설치 개수를 최대화하는 남동향 설치 방안이 적절한 것으로 평가된 반면 3개 건물은 태양광 발전 효율을 최대화하는 남향 설치 방법이 적합한 것으로 분석되었다. 또한, 추후 경제성 분석까지 고려된다면 몇몇 건물의 태양광 모듈 최적 설계 방법이 변화할 수 있음을 제시할 수 있었다.

본 연구에서는 RETScreen 소프트웨어를 이용하여 월별 발전 잠재량을 예측하였다. 그러나 향후에는 보다 신뢰성 있는 기상 자료의 확보를 통해 예측의 정확도를 향상시키거나 시간별 입력자료를 확보하여 시간별 발전 잠재량을 분석할 필요가 있을 것으로 판단된다. 또한, 법적·미관상의 문제와 구성원들의 민원으로 어레이 형태의 태양광발전시스템 설계를 수행하지 못하는 점 등은 연구의 한계점으로 사료된다. 그럼에도 불구하고 본 연구는 강원대학교 삼척캠퍼스의 옥상 태양광발전시스템 설치를 위한 설계 자료를 제공할 수 있고, 건물 옥상 공간의 활용성 증대와 에너지 특성화 캠퍼스 이미지 정립에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2019R1I1A3A01062541).

References

- Choi, Y., Choi, Y., Suh, J., Park, H., Jang, M., and Go, W.R., 2013. Assessment of Photovoltaic Potentials at Buguk, Sungsan and Younggwang Abandoned Mines in Jeollanam-do, Korea. *Journal of Korean Society for Mineral and Energy Resources Engineers*, 50(6), p.827-837.
- Choi, Y., Rayl, J., Tammineedi, C., and Brownson, J.R.S., 2011. PV Analyst: Coupling ArcGIS with TRNSYS to assess distributed photovoltaic potential in urban areas. *Solar Energy*, 85, p.2924-2939.
- KEI, 2009. *Environmental Assessment and Environment friendly Development of Renewable Energy I- Photovoltaic and Wind Energy*, Korea Environment Institute, Seoul, Korea, p.131-186.
- Kim, J., Suh, J., Park, H., Kang, Y., and Yun, C., 2014. Assessment of Photovoltaic Potential for Constructing Ulleung-do as a Sustainable Energy Island. *Journal of Korean Society for Mineral and Energy Resources Engineers*, 51(4), p.513-524.
- Lee, E.J., 2011. Introduction to RETScreen: Assessment tool for renewable energy project, energy and greenhouse gas reduction. *Journal of the KSME*, 51(5), p.35-39.
- Shin, M.-S. and Lee, K.-S., 2019. A study on the installation potential of photovoltaic system based on regional architectural data. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, 39(3), p.29-45.
- Song, J. and Choi, Y., 2012. Assessment of Rooftop Photovoltaic Potential in the Pukyong National University for Establishing a Green Campus. *Journal of the Korean Society for Geosystem Engineering*, 49(3), p.369-378.
- Song, J. and Choi, Y., 2015. Evaluation of rooftop photovoltaic electricity generation systems for establishing a green campus. *Geosystem Engineering*, 18, p.51-60.
- Song, J., Choi, Y., Cheong, Y.-W., Yim, G.-J., and Park, H.-S., 2014. Design of Photovoltaic Systems for Supplying Electric Power to Aerators in Natural Purification Treatment Facilities of Acid Mine Drainage. *Journal of Korean Society for Mineral and Energy Resources Engineers*, 51(1), p.19-29.
- Suh, J. and Brownson, J.R.S., 2016. Solar farm suitability using geographic information system fuzzy sets and analytic

- hierarchy processes: Case study of Ulleung Island, South Korea. *Energies*, 9(8), p.648-671.
- Suh, J., Jang, Y., and Choi, Y., 2020. Comparison of Electric Power Output Observed and Estimated from Floating Photovoltaic Systems: A Case Study on the Hapcheon Dam, Korea. *Sustainability*, 12, p.276-289.
- Zeiler, W. and Boxem, G., 2013. Net-zero energy building schools. *Renewable Energy*, 49, p.282-286.

서 희 진

2020년 강원대학교 공학대학 에너지자원
융합공학전공 공학사

현재 강원대학교 에너지자원융합공학과 석사과정
(E-mail; heejinseo@kangwon.ac.kr)

서 장 원

현재 강원대학교 에너지공학부 (에너지자원융합공학전공) 조교수
(本學會誌 第56卷 第5号 参照)