



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학박사 학위논문

고해상도 도심지 공간 자료의 건물  
옥상과 측면을 고려한 GIS 기반  
태양광 발전량 계산 알고리즘 개발

Development of GIS based PV Power Calculation  
Algorithm Considering Building Roofs and Facades  
using High-resolution Urban Spatial Data

2020년 2월

서울대학교 대학원

에너지시스템공학부

오 명 찬

고해상도 도심지 공간 자료의 건물  
옥상과 측면을 고려한 GIS 기반  
태양광 발전량 계산 알고리즘 개발

Development of GIS based PV Power Calculation  
Algorithm Considering Building Roofs and Facades  
using High-resolution Urban Spatial Data

지도 교수 박 형 동

이 논문을 공학박사 학위논문으로 제출함  
2020년 2월

서울대학교 대학원  
에너지시스템공학부  
오 명 찬

오명찬의 공학박사 학위논문을 인준함  
2020년 2월

위원장	송 재 준	(인)
부위원장	박 형 동	(인)
위원	최 모 순	최모순
위원	서 강 원	(인)
위원	김 성 민	(인)

## 초 록

신재생에너지 중 태양광 발전의 경우 기술의 발달로 인해 급격히 그 보급률이 증가하고 있으며 경제성 높은 친환경 에너지로 많은 관심을 받고 있다. 보급률이 늘어남에 따라 이러한 태양광 발전의 예상되는 발전량을 계산하고 잠재량을 파악하는 연구는 더 중요해지고 있다. 특히 주변의 영향이 많은 도심지와 같은 곳에서는 정확한 잠재량 산정이 에너지 계획에 중요한 역할을 하게 된다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 높은 호환성과 분석 자유도를 지닌 발전량 계산 알고리즘을 개발하고 이를 활용하였다.

새로운 알고리즘은 일사량과 공간 자료를 통해 그림자 분석, 발전량 계산 등을 수행할 수 있으며 결과로 태양광 지도를 제작할 수 있게 구상되었다. 실측 기상 자료나 고해상도 자료를 처리할 수 있으며 3차원 분석을 통한 건물 측면 분석도 가능하게 구상되었다. 결과로서 일사량이나 에너지 밀도는 기존에 연구된 일사량 계산 물리식과 경험식들을 바탕으로 컴퓨터를 사용한 수치 계산을 통해 산정된다. 최종 태양광 발전량은 발전 시스템 관련 변수들을 고려하여 계산되며 지도 형태로 제작되어 다양한 공간 분석을 수행할 수 있다. 해당 알고리즘은 손쉽게 사용될 수 있는 도구 형태로 제작되어 다른 분야의 전문가들이 쉽게 활용할 수 있게 하였다.

개발된 알고리즘은 실제 연구 대상지에 활용되어 잠재량 산정에 사용되었다. 연구 대상지로 선정된 서울대학교 관악캠퍼스를 대상으로 종합 태양광 잠재량을 계산하였으며 이 과정에서 논리적인 가정과 기준을 사용하여 다양한 변수를 고려하였다. 장기 관측값을 통해 제작된 기상 자료와 무인항공기를 통해 제작된 고해상도 자료 등을 사용하여 연구를 수행했으며 연구 대상지의 실제 전력 수요도 분석에 사용되었다. 토지 이용도와 같은 자료는 원자료를 가공하여 제작했고 이러한 공간

자료들은 지리정보시스템 분석을 통해 활용되었다. 결과적으로 연구 대상지의 태양광 잠재량은 연간 약 22 GWh인 것으로 산정되었으며 태양광 발전소 설치 최적지도 선정되었다. 산정된 잠재량은 하나의 정답이 아니라 여러 변수에 따라 바뀔 수 있기 때문에 민감성 분석을 수행하였고 시간에 따른 변동성도 분석하였다.

본 연구에서는 발전량 계산 알고리즘을 통해 대상지의 태양광 잠재량을 파악할 수 있었으며 다양한 변수들을 고려할 수 있었다. 하지만 연구 목적에 맞지 않거나 자료 구조의 한계로 인해 고려하지 못한 요소들이 있었으며 더 구체적인 분석을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 예상된다. 본 연구는 이러한 연구들을 진행할 수 있는 기초로서 사용될 수 있으며 이를 기반으로 다양한 연구들이 수행될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 태양광, 지리정보시스템, 그림자 분석, 신재생에너지, 도심지, 건물 측면

학 번 : 2014-21414

# 목 차

1. 서론.....	1
1.1. 연구의 배경 .....	1
1.2. 태양광 잠재량 산정 연구 동향.....	3
1.3. 연구의 필요성 .....	6
1.4. 연구 목표 .....	8
2. 태양광 잠재량 산정을 위한 배경이론.....	9
2.1. 일사량 측정 지표와 대표기상연도 자료.....	9
2.2. 일사량 계산과 그림자 분석 .....	14
2.3. 일사량을 통한 발전량 계산 .....	22
3. 태양광 잠재량 계산 알고리즘 개발.....	25
3.1. 하늘 공간에서의 계산을 위한 좌표계 .....	27
3.2. 일사량 측정 자료를 통한 일사량 계산.....	33
3.3. 주변 공간 자료를 통한 그림자 분석 .....	40
3.4. 일사량 및 발전량 계산 도구 개발.....	54
4. 연구 대상지 선정 및 공간 자료 전처리 .....	61
4.1. 연구 대상지 특징 분석 .....	61
4.2. 자료 취득 및 전처리.....	67
4.3. 객체 기반 분류를 통한 토지 이용 분석.....	76

---

5. 대학 캠퍼스 태양광 잠재량 산정.....	82
5.1. 연구 대상지의 태양광 지도 제작 및 분석 .....	82
5.2. 공간 분석 및 잠재량 산정 .....	94
5.3. 민감성 분석 .....	107
5.4. 시간에 따른 변동성 분석.....	115
5.5. 측정 발전량을 통한 검증.....	125
5.6. 잠재량 정확도 분석.....	129
 6. 결론.....	 131
 참고문헌 .....	 110
 Abstract .....	 119

## List of tables

Table. 3.1. Variables for calculation of solar energy mapping .....	26
Table. 5.1. Variables for calculation of solar energy mapping .....	84
Table. 5.2. Land use ratio according to classes .....	104
Table. 5.3. Area and estimated solar potential of the study area according to land use .....	105
Table. 5.4. Accuracy indices of each installed power system .....	128



# List of figures

Fig. 2.1. Diagram of sun position and solar radiation types.....	11
Fig. 2.2. Diagram of distribution of diffuse irradiance according to (a) isotropic model and (b) Perez model (Sameti and Jokar, 2017) .....	17
Fig. 2.3. Diagram of shadowing calculation using (a) shadow based calculation (SBC) which focused on object and shadow area, and (b) VIEWMAP based calculation (VBC) which focused on a visibility of sun from observer .....	19
Fig. 3.1. The coordinate system according to equal-area division and visualization of the specific area with azimuth angle ( $Z_i$ and $Z_{i+1}$ ) and zenith angle ( $A_i$ and $A_{i+1}$ ) .....	29
Fig. 3.2. Examples of SKYGRID using (a) equal-area-angle division and (b) equal-angle division .....	31
Fig. 3.3. Examples of the SUNMAP of instant diffuse irradiance according to Perez model using (a) 2D and (b) 3D visualization .....	34
Fig. 3.4. Examples of the SUNMAP of annual irradiance using (a) 2D and (b) 3D visualization .....	36
Fig. 3.5. The diagrams of shadowing calculation method (a) shadow based calculation (SBC) and (b) VIEWMAP based calculation (VBC) .....	42
Fig. 3.6. The 3D visualization of VIEWMAP and basic principle.....	44
Fig. 3.7. Used data in Digital Elevation Model(DEM) when calculating VIEWMAP according to calculation algorithms. (a) all data algorithm, (b) linear algorithm, and (c) pyramid dataset algorithm. The black line represent the azimuth angle and blue	

data represent the used data.....	48
Fig. 3.8. The diagram of pixel index( $p_x$ ). The pixel index represent the distance from calculation point with a pixel angle smaller than the unit azimuth angle.....	50
Fig. 3.9. Calculation time according to the data size of the DEM with different VIEWMAP calculation algorithms L:linear, A:all data, and P:pyramid dataset algorithm.....	52
Fig. 3.10. Graphical User Interface of SNU Solar. (a)main screen with input for irradiance and output (b)input for DSM and (c) input for system.....	55
Fig. 3.11. Examples of result visualization in SNU Solar. (a) 2D result and (b) 3D point cloud result. ....	59
Fig. 4.1. An orthogonal image of the study area, Gwanak campus in Seoul National University. The image is generated from unmanned aerial vehicle images from the actual flight. ....	62
Fig. 4.2. Energy usage of the study area. (a) Annual electricity and gas usage (b) monthly electricity usage and (c) hourly electricity usage.....	65
Fig. 4.3. Point cloud of the study area that is generated from unmanned aerial vehicle images. (a) The whole area and (b) detailed view. ....	68
Fig. 4.4. DSM of the study area that is generated from unmanned aerial vehicle images. ....	70
Fig. 4.5. The location of the study area. (a) satellite image from ArcGIS basemap and (b) ASTER GDEM near the study area. ....	72
Fig. 4.6. Location and features of selected 8 photovoltaic systems in the study area denoted with their building numbers .....	74
Fig. 4.7. Height from surface of the study area that is generated	

from point clouds. Cloth Simulation Filter (CSF) is used to extract the terrain and the height.....	77
Fig. 4.8. The sample result of the object-based classification. (a) high-resolution orthogonal image, (b) height from surface, (c) result of segmentation, and (d) result of classification. ....	78
Fig. 4.9. The result of land use classification and height from the surface of the study area. Five classes are identified by object-based classification. Height from the surface layer is added as a transparent for visualization.....	80
Fig. 5.1. Calculated energy density according to solar panel orientation.....	86
Fig. 5.2. Samples of VIEWMAP in detailed DSM and large DEM which shows (a) the elevation, (b) image, and (c) VIEWMAP from DSM and samples of VIEWMAP in large DEM which shows (d) the elevation, (e) image, and (f) VIEWMAP from DEM.....	88
Fig. 5.3. Solar energy density of the study area calculated by developed tool, SNU Solar.....	91
Fig. 5.4. 3D visualization of solar energy density of the study area; (a) the whole area and (b) the detailed view.....	92
Fig. 5.5. Area and mean energy density according to land use .....	93
Fig. 5.6. Flowchart of the GIS analysis and potential estimation....	94
Fig. 5.7. Slope of the study area calculated from DSM.....	96
Fig. 5.8. The extracted suitable sites for PV power system in the study area according to the land use.....	98
Fig. 5.9. (a) Area and mean energy density of suitable sites and (b) the ratio of suitable area and total area according to land use. ....	100
Fig. 5.10. (a) Façade area and energy density according to the	

azimuth angle of the façade and (b) those according to the building height.....	103
Fig. 5.11. Estimated electricity generation and capacity factor according to classes .....	106
Fig. 5.12. Area and cumulative area rate according to shadowing ratio which is calculated by energy density. Area except for tree is considered.....	108
Fig. 5.13. Energy density according to solar panel orientation; (a) energy density and GCR with zenith angle and (b) energy density with azimuth angle. ....	112
Fig. 5.14. Daily volatility of mean energy density and electricity usage of the study area according to (a) azimuth angle of solar panel and (b) zenith angle of solar panel. Z and A in legend represent zenith and azimuth, respectively.....	117
Fig. 5.15. Yearly volatility of mean energy density and electricity usage of the study area according to (a) azimuth angle of solar panel and (b) zenith angle of solar panel. Z and A in legend represent zenith and azimuth, respectively.....	120
Fig. 5.16. Total energy density and correlation according to (a) azimuth angle of solar panel and (b) zenith angle of solar panel. Z and A in legend represent zenith and azimuth, respectively. ....	123
Fig. 5.17. (a) Monthly normalized measured electricity generation according to each solar power system in the study area and (b) the scatter plot of total 88 measured data and calculated data. ....	127

# 1. 서론

## 1.1. 연구의 배경

신재생에너지는 친환경적인 특성 및 기술 발전에 따른 경제성 등의 이유로 에너지 분야에서 그 공급 비율을 증가시키고 있다. 이 비율은 지속적으로 늘고 있으며 이러한 증가에는 태양광 에너지(Solar Photovoltaic)의 보급률 증가가 큰 역할을 하고 있다. 태양광 에너지 보급의 증가에 따라 태양광 에너지의 예상되는 발전량이나 잠재량을 평가하는 것이 중요해졌다. 태양광 에너지의 경우 대부분의 지역에서 발전이 가능하지만 위치나 다른 요인들에 따라 잠재량이 변화하게 되며 높은 효율을 위해서는 사전 평가가 선행되어야 한다. 주변의 건물로 인한 그림자 효과나 자연 환경에 의한 효율 감소를 방지하기 위해 정량적으로 태양광 발전소의 발전량을 예측하고 다른 요인들을 고려하여 분석할 필요가 있다.

정확한 태양광 잠재량을 파악하기 위해서는 기상조건, 그림자, 시스템 구성 등의 요소들이 고려되어야 한다. 그러나 태양광 패널 관련 업체나 설치 업체에서 태양광 발전량을 예상할 때 평균 일조 시간과 간단한 손실 계수 정도만을 사용하는 경우가 존재하였다(신성엔지니어링, 2019). 이 경우 발전소의 지역적인 특성을 고려할 수 없으며 큰 오차를 유발할 수 있다. 구체적인 계산을 위해서는 실측 자료나 인공 위성 등을 활용하여 제작한 기상 자료를 사용하여야 하며 특히 장기적인 기후를 고려하기 위해서는 장기 측정 자료를 사용하여야 한다. 도심지와 같은 복잡한 지역에서는 주변의 그림자에 의한 효과를 고려해야하며 발전소에서 사용하는 다양한 설비들의 인자들도 계산에 사용되어야 한다. 이 외에도 지형이나 토지 이용 분포를 고려한 공간 분석 또한

수행되어야 전체 연구대상지의 잠재량을 판단할 수 있다. 물리적인 이유나 법적인 이유 등으로 발전소를 설치할 수 없는 영역과 설치 대상지를 분리하여 분석하여야 하며 설치 대상지도 여러 공간 변수를 통해 평가할 필요가 있다. 이러한 연구에는 지리정보시스템(GIS, Geographic Information Systems)을 사용한 분석방법이 유용하며 이를 사용하여 다양한 공간 변수들을 중첩하여 효율적인 평가 및 분석을 수행할 수 있다 (Choi et al., 2019; Huld et al., 2012; Suri et al., 2007; Wiginton et al., 2010).

## 1.2. 태양광 잠재량 산정 연구 동향

잠재량(Potential)이라는 용어는 기본적으로 물리학에서 정의되었으며 위치 에너지나 운동 에너지 등을 의미한다. 에너지 분야에서는 에너지원이 가지고 있는 에너지 총량 혹은 실질적으로 이용이 가능한 에너지량 등의 의미로 널리 사용되고 있다. 하지만 실제로 잠재량이라는 용어를 사용하기 위해서는 구체적인 정의가 선행되어야 하며 그 정의에 따라 부존 잠재량, 기술적 잠재량 등 다양한 이름으로 불린다 (이창훈 외, 2014). 본 연구에서는 이론적 잠재량, 지리적 잠재량, 기술적 잠재량, 시장 잠재량으로 구분하는 정의를 참고하여 (강용혁 외, 2013) 잠재량을 정의하고 사용한다. 기존 문헌을 설명하거나 일반적인 내용을 사용할 때에는 모든 잠재량의 정의를 구분하지 않고 사용한다. 본 연구에서는 현재 기술수준에서 기본적인 경제성을 만족하는 태양광 발전소를 통해 발전이 예상되는 에너지 생산량으로 정의하며 구체적인 지표는 현재 기술 수준이나 경제성의 정의에 따라 변화될 수 있다.

태양광 잠재량과 관련된 연구들은 다양한 규모에서 여러 목적에 따라 연구가 수행되고 있으며 간단한 일조 시간부터 일사량, 발전량 등을 계산, 예측하는 모델들이 존재한다. 일사량에 대한 연구는 구름과 같은 기상 조건을 다루게 되며 태양광 뿐 아니라 태양열이나 농업 등 다양한 분야에서 사용된다. 태양 일사량은 조도(Irradiance)와 조도(Irradiation), 일사량(Insolation) 등 여러 용어들로 세분화되지만 (Sarbu and Sebarchievici, 2017) 본 연구에서는 이들을 통칭하여 일사량이라는 용어를 사용하였다. 이 연구들은 주로 대륙이나 국가 규모에서 수행되며 보간법이나 위성영상을 사용하여 광역적인 일사량을 계산하게 된다. 보간법의 경우 예측 지점의 거리가 멀수록 위성영상을 사용하는 연구보다 정확성이 떨어진다는 연구들이 존재하지만 (Quesada-Ruiz et al., 2015) 현재까지도 여러 연구가 수행되고 있다

(Palmer et al., 2017). 위성영상을 사용할 경우 넓은 지역의 일사량을 저렴한 비용으로 계산할 수 있게 되며 기상위성을 사용하는 경우 수 분 간격의 일사량을 취득할 수 있으며 과거의 자료도 사용할 수 있는 장점이 있다. 계산 방법은 통계학을 통한 경험 식을 사용하거나 (Perez et al., 2002; Rigollier et al., 2002), 물리식을 통한 시뮬레이션을 사용하거나 (Ineichen et al., 2009; Kim et al., 2017) 최근에 각광받고 있는 인공지능망을 쓰는 모델 (Eissa et al., 2013; Quesada-Ruiz et al., 2015) 등이 있다. 한국을 대상으로도 이러한 연구가 다수 수행되었으며 (Kim et al., 2017; Yeom and Han, 2010; 최원석 외, 2015) 모든 신재생에너지의 국가 규모의 자원 지도도 연구되었다 (강용혁 외, 2015).

태양광 발전을 통해 실질적으로 얻게 되는 에너지를 알기 위해서는 지형이나 주변에 의한 그림자, 인근 시설 등의 요소들도 고려하여야 한다. 광역 일사량 연구들이 주로 km 규모의 연구라면 이러한 연구들은 주로 수 m 수준의 높은 공간 해상도에서 연구되는 경우도 많다. 이를 위한 여러 도구들이 개발되었는데 대표적으로 ArcGIS의 Solar Analyst 모듈 (Fu and Rich, 1999)이나 r.sun (Hofierka J, 2002), PPF (Compagnon, 2004) 등이 있다. 주로 일사량이나 일조 시간을 사용하여 그림자 분석을 수행하며 컴퓨터를 사용한 수치 계산을 통해 연산을 수행한다. 이러한 연구들은 약 90년대부터 많은 모델들이 제작되었으며 현재에도 활발히 사용되고 있다 (Freitas et al., 2015). 기존 GIS 소프트웨어의 모듈로 개발된 경우는 기존의 분석들과 같이 사용될 수 있기 때문에 여러 공간 레이어와 자료들을 통해 복합 분석을 수행할 수 있다. GIS를 활용하는 경우 잠재량 지도 제작이나 발전소의 최적 부지를 선정, 대상 발전소의 잠재량 평가 등을 수행하게 된다 (Choi et al., 2019).

최근에는 도심지나 복잡한 지역에 설치되는 태양광 발전소의 잠재량을 계산하기 위한 연구들이 다수 진행되었다. 흔히 유틸리티



규모라고 불리는 대규모 발전소들과 달리 많은 건물들과 건축물이 존재하는 도심지의 소규모 발전소들을 분석하기 위해서는 더 정밀한 자료와 분석 도구가 필요하다. 고해상도 광학 영상을 사용하여 건물의 지붕 영역만을 추출하여 잠재량을 평가한 연구(Mainzer et al., 2017)도 있었으며 도심지의 자료 구조에 따라 박스 형태의 자료(Chatzipoulka et al., 2016; Rodriguez et al., 2017), 라이다(LiDAR, Light Detection And Ranging)(Brito et al., 2017), 무인항공기 자료(Goriuki et al., 2017), 3차원 모델링 자료(Machete et al., 2018)를 사용한 연구들이 있었다. 복잡하고 정확한 자료일수록 취득이 어렵고 분석에도 많은 시간이 걸리게 되기 때문에 연구의 목적에 따라 적합한 자료를 선택할 필요가 있다. SOL(Catita et al., 2014)과 같은 모델들은 복잡한 도심지에 적합하게 개발하여 건물 측면의 잠재량도 계산할 수 있게 제작되었다.

태양광 발전을 통해 실질적으로 얻게 되는 에너지를 알기 위해서는 발전량을 계산하여야 한다. 발전량은 일사량, 기온, 풍속과 같은 기상 조건들과 태양광 패널의 방향, 사용된 장비들 등의 시스템 변수들을 고려하여야 한다. 발전량을 계산하기 위한 도구들도 다수 연구되었는데 앞선 잠재량 계산 도구와 달리 공간적 분포보다는 발전소 시스템, 발전량, 경제성 분석에 중점을 두고있다. 대표적으로 미국 신재생에너지연구소(NREL, National Renewable Energy Laboratory)의 System Advisor Model(SAM)이나 캐나다 정부의 RETScreen 등이 있다. 간단한 그림자 분석을 수행하는 경우도 있지만 기본적으로는 광역 연구로 제작된 일사량을 사용하여 월별, 시간별 발전량을 계산하고 경제성 분석을 수행할 수 있게 제작되었다.

### 1.3. 연구의 필요성

에너지 계획을 수립하기 위해서는 대상 지역의 정확한 잠재량 파악이 필수적이다. 태양광 기술이 발전함에 따라 대상 지역은 점점 더 넓어지며 기존의 개화지 뿐 아니라 저수지, 도심지, 건물 측면 등 다양한 영역으로 확대되고 있다. 특히 제한적인 면적을 가지고 있는 지역에서는 이러한 특수 태양광 발전소의 역할이 중요할 수 있다. 한국은 국가적으로도 높은 인구밀도를 가지고 있으며 국토에 산지의 비중이 높기 때문에 유틸리티 규모의 대규모 태양광 발전소를 건설하기 위한 개화지가 부족할 수 있다. 따라서 장기적인 에너지 계획을 위해 개화지가 아닌 곳에 설치할 수 있는 태양광 발전소에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 도심지에서의 소규모 태양광은 주변 인프라 시설들이 잘 구축되어 있고 수요처가 가깝다는 장점으로 많은 관심을 받고 있으며 실제로 많은 설치 사례가 존재한다. 그러나 복잡한 구조로 인해 기존의 연구를 적용하기 어려운 경우가 많으며 제대로 된 잠재량을 예측하지 못하는 사례들이 존재한다. 따라서 정밀한 태양광 잠재량 지도를 제작하고 분석하는 연구의 필요성은 시간이 지남에 따라 더 커질 전망이다.

태양광 잠재량과 관련된 많은 방법들이 존재하지만 상용으로 제작되어 있거나 학술용으로 제작돼 실사용이 어려운 경우, 분석에 제약이 많거나 기능이 부족한 경우들이 많다. 자료의 취득이나 입출력 자료의 호환성 문제, 긴 연산 시간도 도구 사용의 어려움을 야기하는 요인들이다. 또한 대부분의 데이터베이스가 외국을 기준으로 구성되어 국내에서 이를 적용하는 것이 어려울 수 있다. 이러한 문제점으로 인해 실제 산업현장에서 사용하지 않는 경우가 많으며 연구에서도 낮은 정확도의 분석만을 수행하는 경우들이 있다. 따라서 손쉽게 사용할 수 있으며 높은 호환성과 빠른 연산, 높은 분석 자유도를 가지고 있는 새로운 알고리즘을 개발한다면 많은 사례에 도움이 될 수 있다.

실제 개발된 알고리즘을 활용하기 위해 연구 대상지역을 선정하여 실제 태양광 잠재량을 평가하고 분석을 수행할 필요가 있다. 본 연구에서 선정한 대상 지역은 대학 캠퍼스로 많은 건물과 에너지 수요자를 가지고 있는 시설이다. 대학 캠퍼스는 각 캠퍼스에 따라 그 규모나 면적은 다르지만 대부분 수에서 수백 GWh/년 정도의 높은 에너지 수요를 가지고 있다. 전세계적으로 45개가 넘는 대학에서 이러한 높은 에너지를 친환경 에너지로 변경하기 위해 지속가능한 캠퍼스나 그린 대학(Green university) 등의 활동을 진행하고 있다 (rootAbility, 2019). 또한 대학 캠퍼스는 안정적인 에너지 수요와 독립적인 부지 등을 가지고 있기 때문에 독립적인 전력망을 형성하는 것에 적합하며 웨슬리언 대학이나 캘리포니아 대학 등에서 마이크로그리드를 구축하고 있다 (Maloney, 2017). 마이크로그리드는 여러 정의를 가지고 있지만 기본적으로 독립적인 분산형 전력 시스템을 의미하며 높은 송전효율, 낮은 부하, 신재생에너지와 높은 호환성 등의 장점을 가지고 있다(Zachar and Daoutidis, 2017). 이러한 측면에서 대학 캠퍼스는 태양광 발전소를 활용하기에 적합하다고 볼 수 있으며 본 연구의 대상지로 선정하였다.

## 1.4. 연구 목표

본 연구의 목표는 연구 대상지의 종합 태양광 발전량을 계산하는 알고리즘을 제작하고 잠재량을 평가하는 것이다. 연구 대상지는 대학캠퍼스 중 서울시에 존재하는 서울대학교 관악캠퍼스를 선정하였으며 평가를 위해 알고리즘을 활용한 발전량 계산 도구를 제작하고 GIS 분석을 수행한다. 목표 달성을 위해 다음과 같은 세부적인 목표들을 수립한다.

- (1) 복잡한 도심지에서 활용 가능한 기상 자료와 그림자 효과를 고려하는 태양광 발전량 계산 알고리즘을 개발한다.
- (2) 다양한 공간 자료를 취득하고 여러 GIS 기법을 활용하여 태양광 잠재량 산정을 위한 공간 분석을 수행한다.
- (3) 연구 대상지의 태양광 잠재량의 공간적 분포를 지도로 제작하며 최종 태양광 잠재량을 계산한다.
- (4) 여러 변수들과 시간의 변화에 따른 잠재량의 변화량을 분석한다.

잠재량 계산 결과는 연구 대상지에서 측정된 태양광 발전소의 발전량과 비교하여 검증을 수행한다.

## 2. 태양광 잠재량 산정을 위한 배경이론

본 장에서는 태양광 잠재량을 계산하기 위해 필요한 자료들과 방법들에 대해 알아보려고 한다. 총 3개의 절에서 일사량 측정 자료, 일사량과 그림자 계산, 발전량 계산에 대해 다루도록 한다. 1절에서는 향후 계산을 수행하기 위한 측정 지표들과 장기 기후를 고려하기 위한 가공 자료에 대해 소개한다. 2절에서는 수학적식을 통한 일사량 계산식(Duffie and Beckman, 1991) 및 그림자 분석에 대해 소개한다. 3절에서는 시스템 변수들에 따른 발전량 계산식(Dobos, 2014)에 대해 소개한다.

### 2.1. 일사량 측정 지표와 대표기상연도 자료

일사량은 태양으로부터 오는 복사 에너지를 뜻하며 시간, 공간에 따라 그 값이 바뀌게 된다. 또한 지표에서 측정하는 방향에 따라서도 그 값이 바뀌기 때문에 측정에 주의가 필요하다. 일사량은 크게 세가지 종류로 구분되게 되는데 각각 직달일사량(Direct/Beam Irradiance), 산란일사량(Diffuse Irradiance), 반사일사량(Reflected Irradiance)이다. Fig. 2.1에서 이러한 3가지 종류의 일사량을 모식도로 나타냈다. 직달일사량은 태양에서 직선으로 입사되는 일사량을 말하며 흔히 보이는 그림자를 생성하는 에너지이다. 산란일사량은 구름이나 대기에 의해 산란되어 입사되는 일사량을 말하며 흐린 날에 높은 수치를 보인다. 반사일사량은 주변의 지형이나 사물에 의해 입사되는 일사량이며 주변에 많은 영향을 받는 값이다. 정확한 일사량을 계산하기 위해서는 세가지 일사량을 모두 고려해야하며 산란일사량이나 반사일사량이 직달일사량보다 큰 경우도 존재할 수 있다.

일사량과 관련한 지표를 이해하기 위해 먼저 태양의 위치를 정의할

수 있어야 한다. 태양천정각(Solar zenith angle)이란 관측 지점을 중심으로 수직 상부인 천정에서부터 태양까지의 각도이다. 태양방위각(Solar azimuth angle)은 관측 지점을 중심으로 수평면에 수직으로 투영한 지점과 북쪽이 이루는 각으로 정의된다. 따라서 태양천정각과 태양방위각을 사용한다면 태양의 위치를 정할 수 있으며 이는 Fig. 2.1에도 나타나있다. 추가로 태양고도각(Solar altitude angle)은 지표면으로부터 태양까지의 각도이며 이는 태양천정각의 반대 개념으로 둘을 더하면  $90^\circ$ 가 된다.

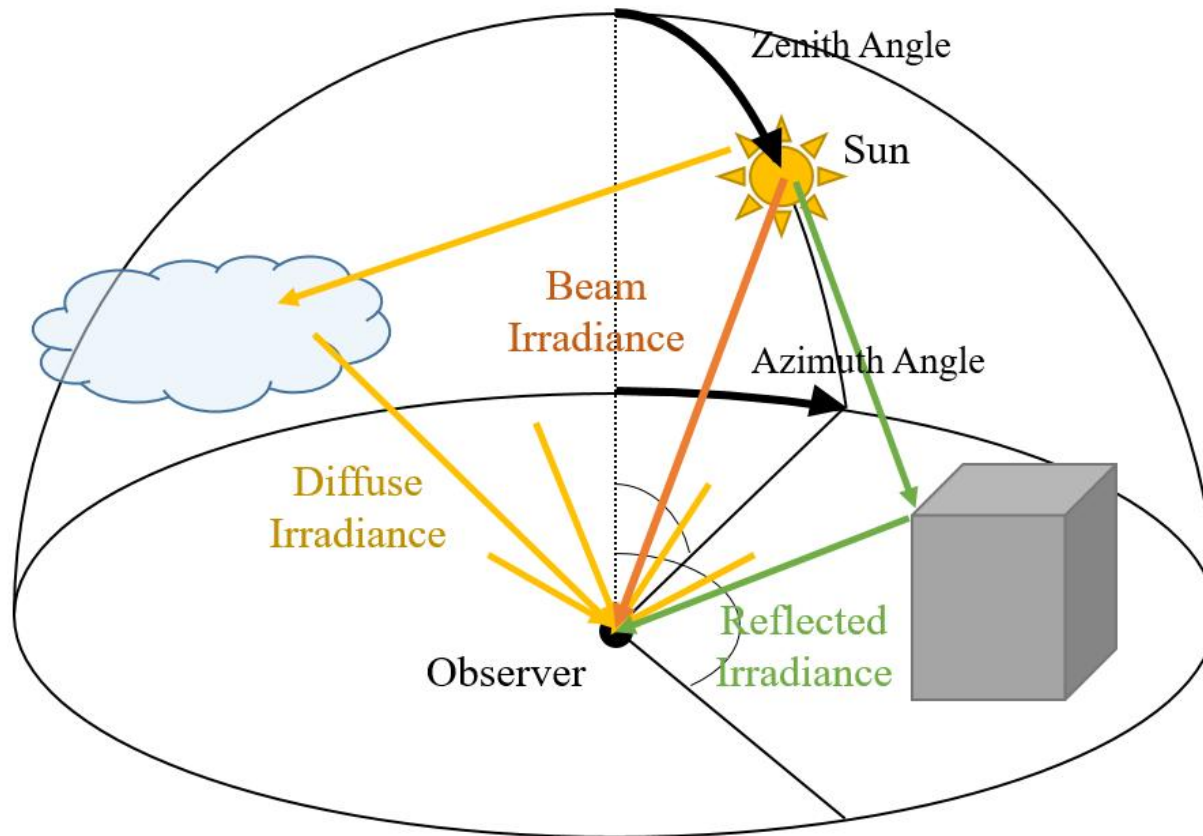


Fig. 2.1. Diagram of sun position and solar radiation types

일사량 측정은 여러 변수에 따라 달라질 수 있기 때문에 몇 가지 지표를 정의하여 측정하고 있다. 흔히 일사량으로 측정되는 지표는 수평면전일사량(GHI, Global Horizontal Irradiance)으로 지표면에서 수직인 방향으로 일사량을 측정한 값이다. 이 값은 직달일사량과 산란일사량을 모두 포함하며 흔히 기상관측소에서 측정하는 일사량은 이를 뜻한다. 이 외에 추가로 측정되는 지표는 법선면 직달일사량(DNI, Direct Normal Irradiance)과 수평면 산란일사량(DHI, Diffuse Horizontal Irradiance)이다. DNI의 경우는 직달일사량의 태양 방향 성분을 뜻하며 이를 측정하기 위해서는 태양의 위치를 정확히 알고있어야 한다. GHI는 직달일사량을 포함하지만 수직 성분만을 포함하기 때문에 DNI가 GHI보다 높은 경우가 다수 존재한다. DHI는 태양의 직달일사량을 제거한 GHI로 정의되며 실제 측정은 태양의 위치에서 오는 일사량을 차단하여 수행한다. DHI는 GHI에서 직달일사량의 수직 성분을 제거한 값이기 때문에 Eqn 2.1이 성립한다. 여기서  $\theta$ 는 태양천정각을 뜻한다. 이론상으로 일사량 세가지 지표는 두가지만 있다면 나머지 하나를 계산할 수 있다.

$$GHI = DNI \times \cos\theta + DHI \quad \text{Eqn 2.1}$$

대표 기상연도 (TMY, Typical Meteorological Year) 자료는 장기 관측자료를 통해 제작된 장기간의 기후 특성을 고려한 기상 자료이다. 평균을 사용하면 고유한 특성이 사라지는 기상자료의 특성을 고려하여 일반적인 값을 계산할 수 있게 구성된 자료라고 볼 수 있다. 특정 기간의 자료와 달리 장기 특성을 고려할 수 있기 때문에 태양광 잠재량 계산 뿐 아니라 건물 냉난방과 같은 분야에서도 널리 사용되고 있다. 일반적으로 수년의 관측 자료에서 해당 지역을 대표할 수 있는 각 월의 자료를 특정 연도의 자료에서 추출하여 제작하게 된다. 최종적으로는 1년의 기간 동안 1시간 단위로 구성된 자료로 배포된다. 대표



기상연도는 기상 자료이기 때문에 일사량 뿐 아니라 기온, 습도 등 다양한 요소들이 포함되어 있으며 그 형식에 따라 구성이나 형식이 다를 수 있다. 해외에서는 미국 NSRDB(National Solar Radiation Database), EnergyPlus, SolarGIS 등에서 제작하여 배포하고 있으며 국내에서는 국가참조표준센터나 한국태양에너지학회에서 배포하고 있다.

## 2.2. 일사량 계산과 그림자 분석

지상에서의 일사량을 계산하기 위해 많은 연구가 선행되었다. 물리 모델을 통해 대기권밖 일사량부터 공기에 의한 효과를 계산하여 일사량을 계산하는 연구들도 다수 수행되었다. 먼저 태양 상수 ( $G_{SC}$ , Solar Constant)는 지구와 태양 사이의 평균 거리에서 태양과 가장 가까운 대기권밖에서 측정되는 단위면적, 단위시간 동안의 복사에너지로  $1367 \text{ W/m}^2$ 이다. 실제 대기권밖 일사량( $G_{on}$ )은 시간에 따라 변화하게 되며 Eqn. 2.2를 통해 계산된다. 여기서  $n$ 은 1년 중 몇 번째 날짜인지를 뜻한다.

$$G_{on} = G_{SC}(1 + 0.033 \times \cos \frac{360n}{365}) \quad \text{Eqn 2.2}$$

실질적인 일사량은 대기권밖 일사량에서 대기에 의한 산란, 흡수 보정이 적용되어야 하며 이를 계산하기 위한 많은 연구가 진행되었다. 이는 1.2에서 설명된 내용과 같이 여러 종류의 방법이 사용될 수 있으며 아래에서 서술될 내용은 이러한 모델이 적용된 결과나 실제 지상에서 측정된 일사량 지표를 통한 계산 방법에 대해 서술한다.

일사량의 값을 계산하기 위해서는 측정하는 면의 방향에 대해 먼저 정의되어야 한다. GHI나 DHI의 경우는 측정면이 지표면에 수직하며 DNI는 태양의 방향이 된다. 측정하는 경사면의 기울기를  $\beta$ 라고 할 때 측정면에 입사하는 직달일사량의 값( $I_b$ )은 Eqn. 2.3을 통해 계산될 수 있다. 이 때  $\alpha$ 는 태양고도이다.

$$I_b = I_{DNI} \times \sin(\alpha + \beta) \quad \text{Eqn 2.3}$$

산란일사량의 경우 직달일사량보다 복잡한 계산이 요구된다. 먼저 산란일사량을 계산하기 위한 모델을 고려해야하는데 등방성 모델의 경우

하늘의 모든 지점에서 동일한 일사량이 입사 된다고 가정한다. Fig. 2.2에 모식도를 나타냈으며 가장 간단한 모델이다. 이 때 측정면에 입사하는 산란일사량의 값( $I_d$ )은 Eqn. 2.4를 통해 계산될 수 있다.

$$I_d = I_{DHI} \times \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad \text{Eqn 2.4}$$

그러나 등방성 모델은 태양 근처나 수평면 인근에서 잘 맞지 않는다고 알려져 있으며 이를 보완하기 위한 여러 모델이 제안되었다. 그 중 가장 대표적인 모델은 Perez 모델(Perez et al., 1993)이며 하늘을 태양 주위, 수평면 주위, 나머지 영역으로 구분하여 각각의 산란일사량을 계산하여 합하는 방식을 사용하였다. Fig. 2.2에 모식도를 나타냈으며 3가지 영역을 확인할 수 있다. 각각의 영역의 경사면 산란일사량을  $I_{dc}$ ,  $I_{dh}$ ,  $I_{di}$  라고 하며 Eqn. 2.5~Eqn. 2.7에 계산식을 나타내었다. 여기서  $F_1$  과  $F_2$  는 청명도나 기단(Air Mass)등에 의해 계산되는 값으로 각각의 범위에 따라 다른 상수를 사용하게 된다. 주의할 사항은 해당 식은 천정각이  $87.5^\circ$ 보다 높은 경우에는 사용하지 않고 그 때에는 등방성 모델을 사용하게 된다. 최종 경사면 산란일사량( $I_d$ )은 Eqn. 2.8에 의해 계산된다. 이 외에도 HDKR 모델 등과 같은 산란일사량 모델들이 존재한다.

$$I_{dc} = I_{DNI} \times F_1 \times \frac{\max(0, \cos(\alpha + \beta))}{\max(\cos 85^\circ, \cos(\alpha + \beta))} \quad \text{Eqn 2.5}$$

$$I_{dh} = I_{DNI} \times F_2 \times \sin \beta \quad \text{Eqn 2.6}$$

$$I_{di} = I_{DNI} \times (1 - F_1) \times \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad \text{Eqn 2.7}$$

$$I_d = I_{dc} + I_{dh} + I_{di} \quad \text{Eqn 2.8}$$

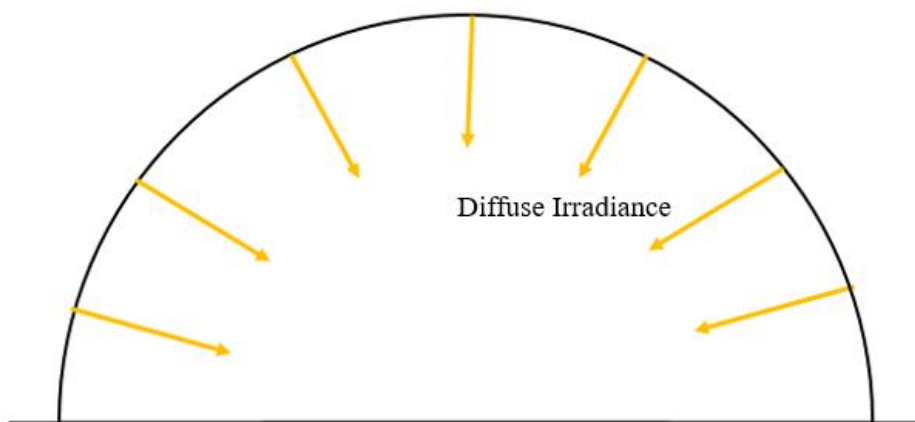
마지막 반사일사량( $I_r$ )은 주로 Eqn. 2.9의 수식을 통해 계산된다. 이 때  $\rho$ 는 알베도를 의미하며 빛을 받았을 때 반사하는 정도를 뜻한다.

사용된 알베도는 주변 지형의 평균값을 사용하며 모든 곳에서 동일한 값이 반사되어 온다고 가정한다. 따라서 해당 값은 개활지를 가정하고 있으며 주변에 사물이 있거나 지형이 평평하지 않다면 높은 오차를 가질 수 있다.

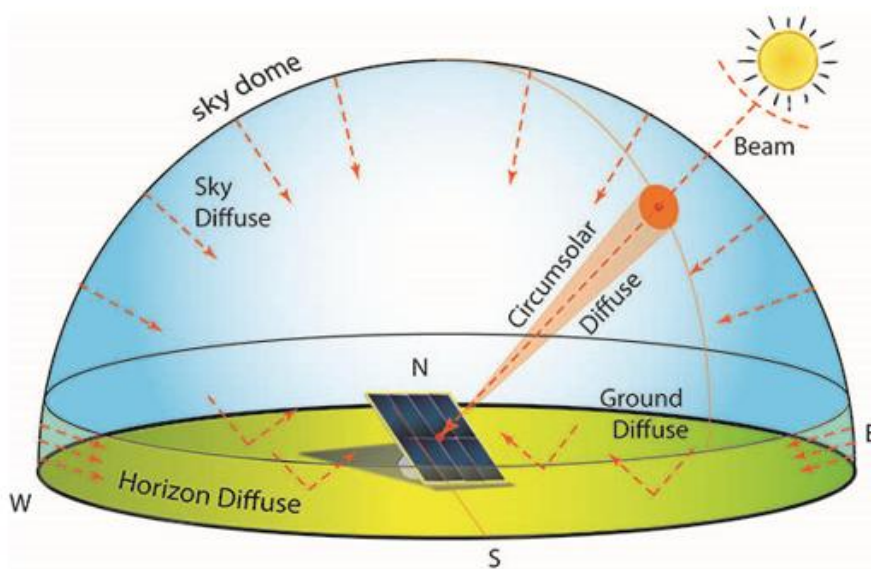
$$I_r = I_{GHI} \times \rho \times \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad \text{Eqn 2.8}$$

앞선 절에서 언급된 바와 같이 일사량은 직달일사량, 산란일사량, 반사일사량으로 구성되며 이를 모두 합한 값이 전체 일사량이 된다. 측정면의 총 일사량( $I$ )는 Eqn. 2.9를 통해 계산된다.

$$I = I_b + I_d + I_r \quad \text{Eqn 2.9}$$



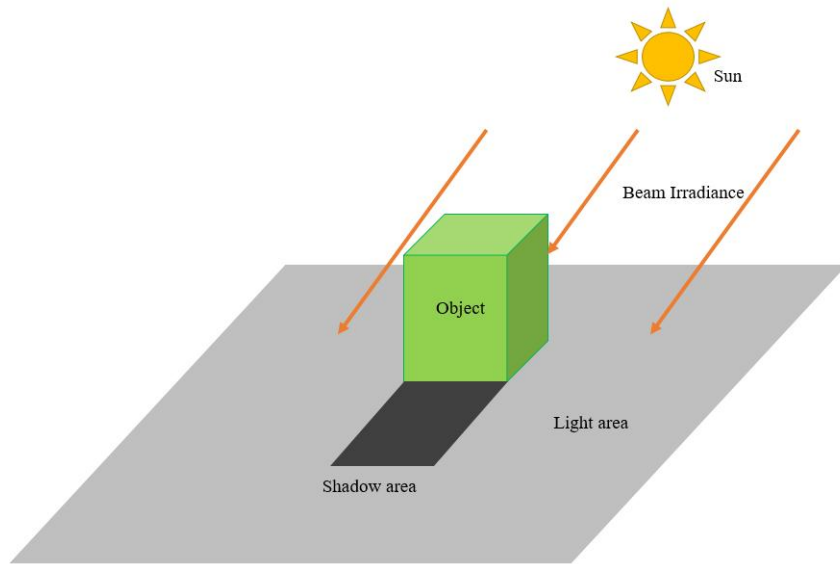
(a)



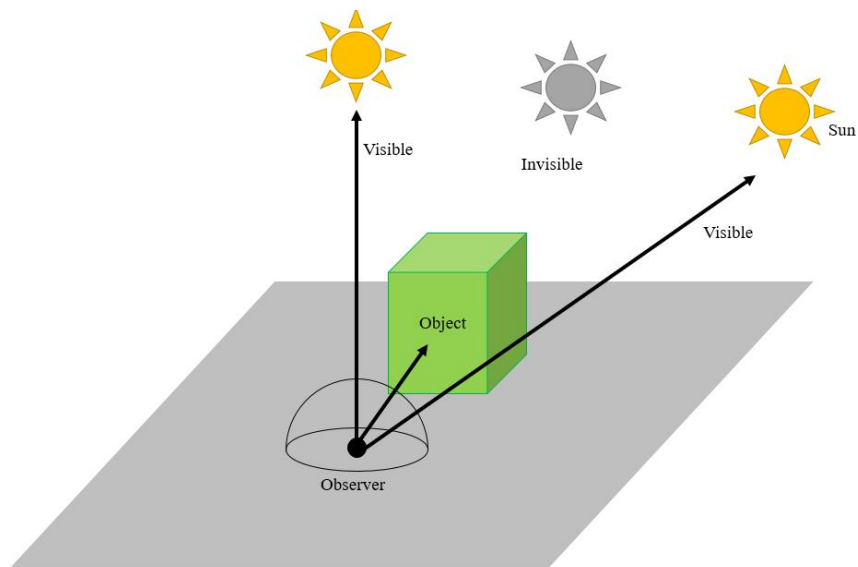
(b)

Fig. 2.2. Diagram of distribution of diffuse irradiance according to (a) isotropic model and (b) Perez model (Sameti and Jokar, 2017)

그림자에 의한 영향력을 고려하기 위해서는 추가적인 계산이 필요하다. 본 연구에서는 주변 사물에 의한 그림자(Shadow)와 측정면의 경사로 인한 응달(Shade)를 구분하여 사용한다. 그림자는 광원이 어떤 사물에 가려져 검게 보이는 부분을 의미하지만 본 연구에서는 태양광에 의해 생성되는 것을 뜻한다. 직달일사량의 영향력은 간단하게 계산할 수 있다. 직달일사량은 태양의 방향에서 직선으로 진행하기 때문에 측정면과 태양 사이에 물체가 있다면 가려지게 된다. 다만 물체가 빛을 투과시키는 성질이 있다면 이를 고려하여야 제대로 된 분석이 가능하다. 이를 계산하기 위한 방법은 두 가지로 나눌 수 있는데 첫 번째는 각 태양의 위치에 따른 그림자의 위치를 계산하는 것이고 두 번째는 각 위치에서 태양이 가려지는 위치를 계산하는 것이다. 본 연구에서는 앞선 방법을 그림자 기준 계산(SBC, Shadow-based calculations), 뒤의 방법을 VIEWMAP 기준 계산(VBC, VIEWMAP-based calculations)이라고 부른다 (Oh and Park, 2018). Fig. 2.3에 SBC와 VBC에 대한 개념 모식도를 나타냈으며 SBC의 경우 사물에 계산의 중심을 두어 일사량이 가려지는 영역을 계산하며 VBC의 경우 측정 지점에 중심을 두어 태양이 가려지는 영역을 계산한다.



(a)



(b)

Fig. 2.3. Diagram of shadowing calculation using (a) shadow based calculation (SBC) which focused on object and shadow area, and (b) VIEWMAP based calculation (VBC) which focused on a visibility of sun from observer





SBC의 경우 기존의 많은 시뮬레이션에서 사용되고 있으며 여러 그림자 지도를 제작하여 잠재량 지도를 제작한다. 전체 영역을 한번에 계산할 때 빠른 계산을 수행할 수 있다. VBC는 기준 영역에서 하늘을 바라보았을 때 주변의 사물들을 반구의 영역에서 계산한다. 이때 태양이 가려진 부분에 존재한다면 그림자가 생기게 된다. 이 방법은 시뮬레이션 외에도 Solmetric 사의 SunEye 장비와 같이 광각 카메라를 사용하여 실측한 값을 사용하는 경우도 있다. 이 방법은 전체 영역을 계산하는 것은 오래 걸리지만 한 지역의 정밀 분석을 수행할 수 있으며 원하는 지역만 빠르게 계산하거나 여러 기간에 대한 계산을 수행할 때 유리하다.

산란일사량의 그림자 효과를 계산하는 것은 몇 가지 모델이 사용되고 있으며 대표적으로 ArcGIS의 Solar Analysis에서 사용되는 방식과 SVF(Sky View Factor) (Dubayah and Rich, 1995)를 사용하는 방식이 있다. 전자의 경우 하늘의 각 위치에서 오는 산란일사량을 직달일사량과 동일하다고 가정하며 계산을 수행한다. 후자의 경우 보이는 하늘과 전체 하늘 영역의 비율을 계산하여 해당 비율에 가려지는 면적이 비례한다고 가정한다. 후자의 경우 등방성 산란 모델을 가정한 경우이며 시간에 상관없이 하나의 상수값을 가지게 된다. 전자의 경우도 등방성 모델을 사용한다면 후자와 동일한 결과를 보이지만 비등방성 모델을 사용하면 다른 결과를 보인다. 최종 그림자의 영향력은 직달일사량과 산란일사량의 그림자를 모두 고려하여 계산된다.

## 2.3. 일사량을 통한 발전량 계산

태양광 잠재량을 분석하기 위해서는 일사량이 아닌 실제로 생산되는 전력 발전량을 계산하여야 한다. 본 연구에서는 일사량을 통한 태양열 사용이나 태양열 발전은 고려하지 않고 태양광의 측면에서만 계산을 수행한다. 태양광 발전은 기본적으로 광전효과를 통해 전력을 생산하며 태양전지(솔라셀)를 사용한다. 현재 가장 많이 사용되는 태양전지의 종류는 다결정 실리콘 태양전지이며 이 외에 단결정 실리콘 태양전지, 박막형 태양전지 등이 일부 사용되고 있다 (Fraunhofer, 2019). 현재 사용되는 실리콘 태양전지는 약 20% 내외의 효율을 가지고 있으며 단결정 실리콘 태양전지가 상대적으로 더 높은 효율과 비용을 가지며 다결정 실리콘 태양전지는 낮은 효율과 비용을 가진다.

발전량을 계산하는 여러 가지 모델이 지금까지 연구되었으며 그 적용 수준에 따라 기본적인 일사량만 사용하는 모델부터 파장에 따른 일사량 스펙트럼까지 고려하는 모델까지 존재한다. 모든 시스템의 구성요소가 결정되어 있고 모니터링 시스템이 잘 구축되어 높은 정확도의 기상 자료도 구축되어 있다면 정확한 태양광 패널과 인버터 모델을 고려하여 정확한 계산을 수행하는 모델이 적합하다. 반대로 시스템에 대한 정보가 구체화 되어있지 않거나 입력 변수가 되는 기상요소 등의 자료가 미흡하다면 상대적으로 간단한 모델을 사용하는 모델이 적합하다. 발전량 계산은 구축된 데이터 등에 따라 적합한 모델을 선정하여 수행해야 하며 필요에 따라 추가적인 변수를 고려할 필요가 있다.

본 연구에서는 미국신재생에너지연구원에서 개발한 SAM 소프트웨어의 PVWatts 모델(Dobos, 2014)을 일부 변형하여 발전량을 계산하였다. 본 연구에서 목표로 하는 모델은 연구 대상지의 전반적인 잠재량 예측이며 광역 범위나 구체적인 시스템 모델이 확정되지 않은 경우를 고려하기 때문에 상대적으로 간단한 모델을 선정하였다.

발전량은 우선 시스템의 설비 용량(P, kW)을 결정한 뒤 계산하게 된다. 설비 용량은 발전소 규모에 따라 결정된 값을 사용하거나 Eqn. 10에 의해 해당 면적에 설치 가능한 값을 사용할 수 있다. 이 때  $A$ 는 대상 부지의 면적( $m^2$ ),  $\eta_p$ 는 사용된 태양전지의 효율,  $R_{gc}$ 는 지표면적비율(GCR, Ground Cover Ratio),  $R_{lu}$ 는 대상 부지에서 태양광 패널이 설치되는 면적의 비율이다.

$$P = A \times \eta_p \times R_{gc} \times R_{lu} \quad \text{Eqn 2.10}$$

GCR은 태양광 패널의 면적과 패널이 설치된 지표 면적의 비율로 정의된다. 2차원상에서는 패널의 수직 높이와 패널 사이의 거리의 비로 계산될 수 있다. 이 값은 태양광 패널의 설치 각도와 이격거리에 의해 결정되며 다른 패널의 그림자로 인해 가려지지 않기 위해서는 그 값이 1보다 작아져야 한다. 본 연구에서는 태양의 남중 고도가 가장 낮은 동지때의 태양고도를 기준으로 자기음영(Self-shadowing)이 생기지 않는 값을 최댓값으로 정의했으며 Eqn. 2.11을 통해 계산할 수 있다. 이 때  $\theta_t$ 는 태양광 패널의 설치 각도( $^\circ$ )이며  $\theta_{lat}$ 은 연구 대상지의 위도( $^\circ$ )이다. 이보다 GCR이 높다면 자기음영에 의한 효율 감소가 나타나며 유지, 보수 측면에서 더 낮은 GCR은 사용할 수 있지만 면적에 대한 효율은 낮아지게 된다.

$$R_{gc} = 1/((\cos \theta_t + \sin \theta_t) \times \tan(\theta_{lat} + 23.5^\circ)) \quad \text{Eqn 2.11}$$

$R_{lu}$ 는 GCR과 달리 연구 대상이 되는 전체에서 태양광 패널을 설치하고자 하는 면적의 비율이다. 이 때는 GCR에서 분모의 값이 분자의 값이 되며 분모에는 인버터나 배터리 등을 설치할 공간, 다른 용도로 사용되는 공간 등을 모두 합친 면적이 사용된다. 넓은 개활지를 예시로 든다면 전체 개활지에서 태양광 패널을 설치할 면적의 비율이

$R_{lu}$ 이며 태양광 패널을 설치할 면적에서 태양광 패널의 면적의 비율이  $R_{gc}$ 가 된다.

발전량(E, kWh)은 설치 용량에서 계산될 수 있으며 Eqn. 2.12를 통해 계산될 수 있다. 이 때  $I$ 는 일사량( $kWh/m^2$ ),  $\eta_i$ 는 인버터 효율,  $R_{da}$ 는 직류 교류 변환 효율,  $T$ 는 패널 온도( $^{\circ}C$ ),  $\gamma$ 는 온도 계수(Temperature Coefficient),  $R_{ol}$ 는 기타 손실 비율,  $R_{dg}$ 는 전체 성능저하율이다. 설치 용량과 달리 시간에 따라 변화하는 값이기 때문에 사용되는 값에 따라 시간당, 월간, 연간 발전량을 계산할 수 있다. 전체 성능저하율의 경우 발전소 설비 수명에 대한 값이며 설치 시 대비 효율의 비율이라고 볼 수 있다.

$$E = I \times P \times \eta_i \times R_{da} \times \frac{(100^{\circ}C - (25^{\circ}C - T)\gamma)}{100^{\circ}C} \times R_{ol} \times R_{dg} \quad \text{Eqn 2.12}$$

설비 용량과 발전량을 통해 설비의 이용률(Capacity factor, C, %)을 계산할 수 있다. 설비 이용률은 해당 발전소에서 최대 출력으로 지속적으로 발전할 수 있는 양과 실제 발전량의 비율을 뜻하며 Eqn. 2.13을 통해서 계산될 수 있다. 태양광 발전소의 최대 발전량은 설비 용량이 24시간동안 표준일사량의 환경에서 발전될 때이며 따라서 24시간과 365일이 사용된다. 다만 일반적으로 사용되는 이용률은 교류에 대한 설비 용량과 발전량이 사용되지만 태양광은 설비 용량이 직류를 기준으로 작성되어 직류 교류 변환 비율 만큼 차이가 나타난다.

$$C = \frac{E}{P \times 24 \times 365} \quad (\text{AC to DC base}) \quad \text{Eqn 2.13}$$

### 3. 태양광 잠재량 계산 알고리즘 개발

기존 잠재량 산정 연구들의 특징을 정리하여 아래 Table. 3.1에 가시화하였다. 각 연구들을 실측 일사량 사용, 공간 분포 계산, 래스터 자료 사용, 건물 측면 분석, 태양광 패널 방향 고려, 발전소 시스템 변수 고려, 시계열 발전량 계산 가능 유무에 따라 정리하였다. ArcGIS Solar Analyst나 r.sun의 경우 GIS 분석에 유리하게 구성되어 있지만 기상 자료의 사용이나 측면 분석, 발전량 계산에서 단점을 가지고 있다. PPF나 SOL의 경우 학술 연구로 많은 기능을 수행하지만 기본적으로 비공개된 자료이며 발전량 보다는 건물 환경에 중점을 두어 GIS 분석이나 발전량 계산에 어려움이 있다. 마지막 SAM, RETScreen, PVSyst 등은 발전량 계산 소프트웨어로 GIS 분석에 적합하지 않다. 이외에도 다수의 연구들이 존재하지만 대부분 그 목적에 따라 비슷한 분석 기능을 보인다. 따라서 본 연구에서는 기존 연구들의 단점을 보완하여 연구를 수행할 수 있는 알고리즘을 개발하였다.

Table. 3.1. Variables for calculation of solar energy mapping

Model	Type	Measured Irradiance	Solar Distribution	Raster data	Building Facade	Panel Orientation	Power System Parameter	Time-series results
ArcGIS Solar Analyst	Commercial	×	○	○	×	×	×	△ (Specific time)
r.sun	Free	×	○	○	×	○	×	△ (Specific time)
PPF	Academic (Private)	○	○	×	○	○	×	○
SOL	Academic (Private)	○	○	×	○	○	×	○
SAM	Free	○	×	×	○	○	○	○
RETScreen	Commercial	○	×	×	○	○	○	○
PVSyst	Commercial	○	×	×	○	○	○	○

본 연구에서 목표로 하는 계산 알고리즘은 연구 목표를 달성하기 위해 제작되었으며 다음과 같은 5가지 기준을 만족하도록 설계되었다. 그리고 고안된 알고리즘은 사용하기 쉬운 소프트웨어 도구로 제작하여 활용할 수 있도록 한다.

- (1) 본 알고리즘은 실측 기상자료를 입력 자료로 사용할 수 있으며 주변 공간 자료를 통해 그림자에 의한 영향력을 분석할 수 있게 한다.
- (2) 본 알고리즘은 다양한 규모의 공간 자료에 적용할 수 있게 제작하며 수 cm 수준의 고해상도 자료도 빠르게 분석할 수 있게 한다.
- (3) 본 알고리즘은 래스터 형태의 자료를 사용할 수 있으며 결과 자료를 다른 GIS 분석 도구와 쉽게 호환되게 한다.
- (4) 본 알고리즘은 건물 측면을 포함한 3차원 분석이 가능하게 하며 결과를 3차원으로 출력할 수 있게 한다.
- (5) 본 알고리즘은 태양광 패널의 방향을 포함한 다양한 발전소 시스템 변수들을 고려할 수 있으며 월별, 시간별 발전량을 계산할 수 있게 한다.

### 3.1. 하늘 공간에서의 계산을 위한 좌표계

태양의 움직임을 고려하여 계산을 수행하기 위해서는 하늘 공간을 좌표화할 필요가 있다. 특히 컴퓨터를 통한 수치 계산을 수행할 때에는 공간을 분할하는 방법에 따라 그 결과가 달라질 수 있다. 기존에는 등면적 좌표, 등각 좌표, 삼각 좌표 등이 사용되었으며 각각 장단점이 존재한다 (Marsh, 2011). 등면적 좌표의 경우 왜곡이 적지만 각각의 좌표 위치가 복잡하며 등각 좌표의 경우 계산의 측면에서 유리하지만

공간 분포에 왜곡이 존재한다. 본 도구에서는 두 좌표계의 단점을 보완하기 위해 등면적-등각 좌표계를 제시한다. 이 좌표계는 기존 등각 좌표계와 같이 방위각을 동일한 각도로 분할한다. 하지만 면적을 동일하게 하기 위해 천정각을 면적을 동일하게 하는 각도로 분할한다. Eqn. 3.1을 사용하여 각각의 영역의 크기가 동일한 천정각을 계산할 수 있다. 이 때  $Z_i$ 은  $i$ 번째 천정각 경계값이며  $n_z$ 는 전체 천정각의 분할 수이다. 이 좌표계에서 각 영역의 천정각 길이는 천정에 가까울수록 큰 값이 지니게 된다.



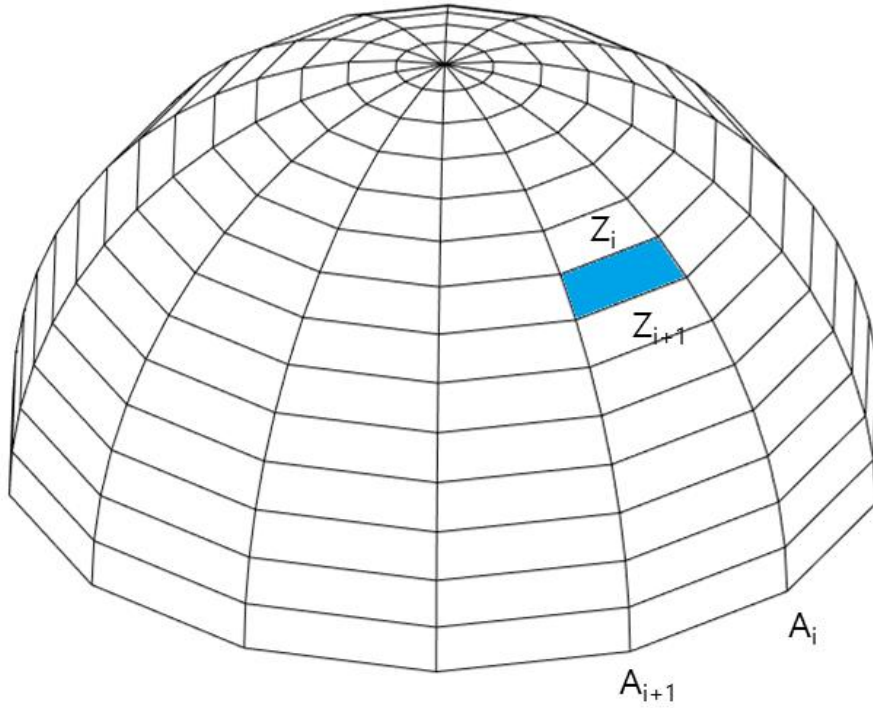


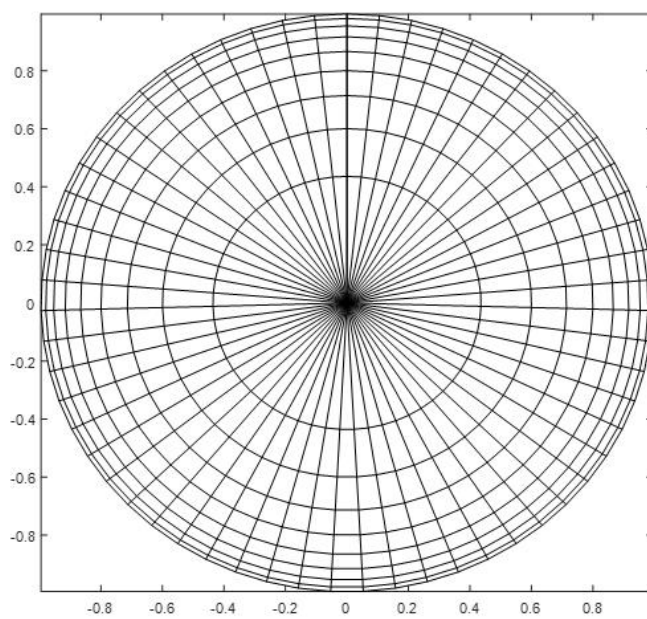
Fig. 3.1. The coordinate system according to equal-area division and visualization of the specific area with azimuth angle ( $Z_i$  and  $Z_{i+1}$ ) and zenith angle ( $A_i$  and  $A_{i+1}$ )

$$Z_i = \arccos(1 - i/n_z) \quad \text{Eqn 3.1}$$

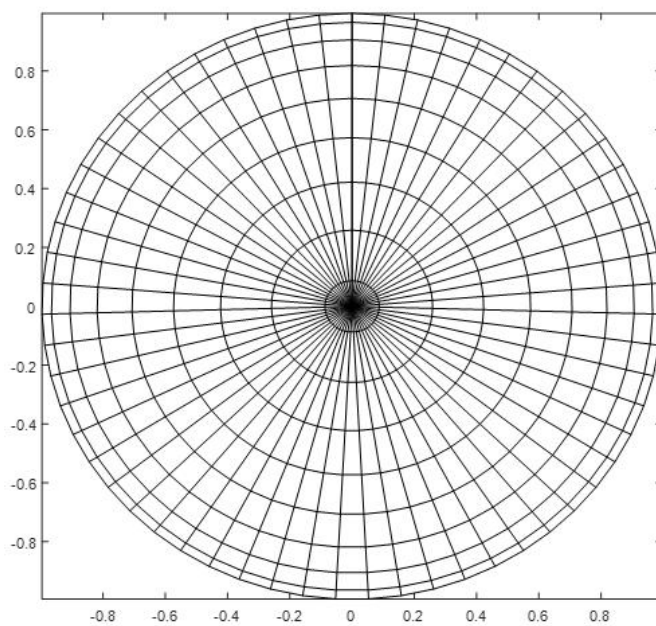
등면적-등각 좌표계를 사용할 경우 그림자 계산을 포함한 연산을 수행할 때 계산 속도를 빠르게 할 수 있다. 모든 격자의 방위각과 천정각이 다르다면 각각의 격자에서 모두 연산을 수행해야 하지만 격자들이 같은 방위각의 그룹으로 분포된다면 한번의 연산으로 그룹 전체의 계산을 수행할 수 있다. 특히 그림자를 계산할 경우 하나의 높이 값을 계산하여 해당 방위각 그룹의 모든 값을 파악할 수 있기 때문에 높은 효율을 보일 수 있다. 면적의 측면에서 기존의 등각 좌표계는 천구

부분과 수평면 부분의 면적차가 수십 배 이상이 될 수 있기 때문에 문제가 될 수 있다. 천정 부분이 과도하게 많은 영역으로 나뉘어져 계산 효율이 떨어지며 수평면 부근에서는 여러 위치가 하나의 값으로 계산되게 된다. 등면적 좌표계를 사용한다면 이러한 왜곡이 없어지며 이후 결과를 사용한 분석의 계산이 쉽다는 장점이 있다.

본 도구에서는 이러한 좌표계를 SKYGRID라 부르며 기존에 많이 쓰이는 방위각과 천정각을 모두 동일한 크기로 나눈 등각 형식과 등면적-등각 형식을 모두 사용할 수 있게 하였다. SKYGRID는 분할 형식과 천정각의 분할 수, 방위각의 분할 수로 정의되며 분할 수가 높아질수록 정확도가 높아지지만 계산량이 많아진다. 본 도구에서 SKYGRID를 2차원으로 가시화 할 때에는 직교투상법(orthographic projection)을 사용한다. Fig. 3.2에는 2차원으로 가시화한 SKYGRID의 예시가 나타나 있으며 (a)는 등면적-등각 형식이며 (b)는 등각 형식으로 제작되었다. 두 예시는 방위각 120분할, 천정각 30분할로 정의되었으며 직교투상법으로 가시화 되어 수평선 부근의 값이 상대적으로 작게 나타나게 된다. 등면적-등각 형식의 경우 단순한 등각 형식보다 천정 부분에서 훨씬 천정각 분할각이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3.2. Examples of SKYGRID using (a) equal-area-angle

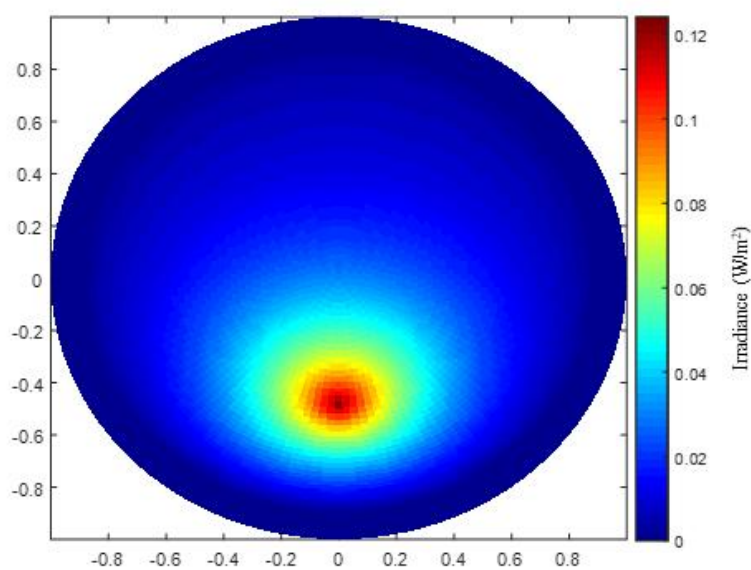
division and (b) equal-angle division

### 3.2. 일사량 측정 자료를 통한 일사량 계산

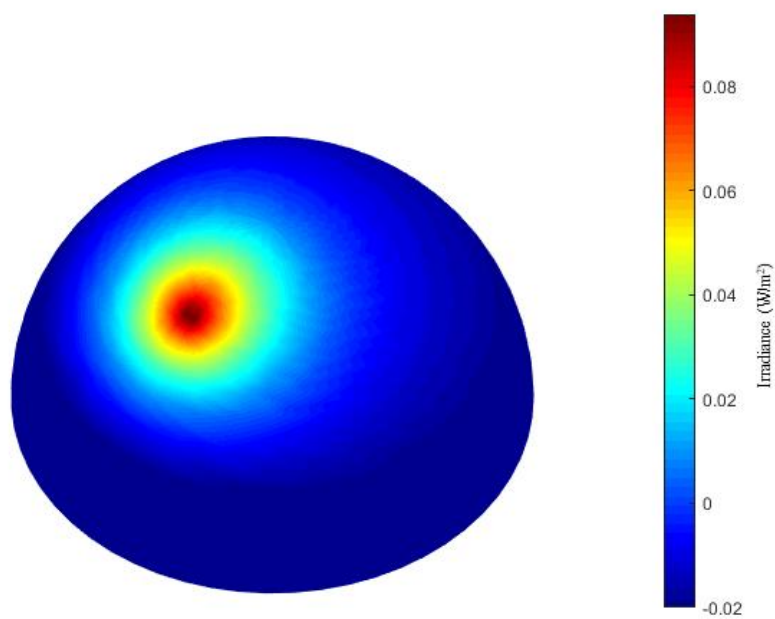
시간에 따른 태양의 위치는 수식을 통해 계산될 수 있으며 그 때의 일사량을 알고 있다면 하늘에서 산란일사량의 분포를 계산될 수 있다. 본 도구에서는 정의된 SKYGRID에서 각 위치에 따른 일사량을 계산하여 SUNMAP이라는 형식의 공간 자료를 구축하여 사용한다. 기존의 일사량 계산은 수식을 통한 이상적인 상황에서의 계산을 수행했지만 본 도구에서는 다양하고 복잡한 상황에서 계산을 수행하기 위해 수치 계산을 수행할 수 있는 SUNMAP을 사용하였다. SUNMAP은 각 하늘의 영역에 따른 일사량 혹은 에너지 밀도로 정의된다. 자료의 생성은 시간에 따른 태양의 위치와 일사량 지표에 사용하여 직달일사량과 산란일사량 분포를 계산하여 수행한다. 이 때 산란일사량은 등방성 모델과 Perez 모델을 모두 사용할 수 있다.

SUNMAP은 2차원이나 3차원으로 가시화 될 수 있으며 Fig. 3.3과 Fig. 3.4에서 확인할 수 있다. 2차원으로 가시화 한 결과는 관측지점에서 하늘을 바라본 것과 같이 나타나며 아래쪽이 남쪽, 오른쪽이 동쪽이 되도록 구성한다. 가운데 영역이 천정을 가리키며 원의 경계가 수평선이 된다. 필요에 따라 천정각, 방위각을 각각 y축, x축으로 사용하여 가시화도 가능하다. 3차원 가시화는 하늘 반구를 나타내며 필요에 따라 투명도를 주거나 방향을 바꿀 수 있다.

SUNMAP은 순간적인 일사량 만을 고려할 수도 있으며 1년 전체의 누적 일사량을 계산할 수도 있다. Fig. 3.3에는 순간적인 SUNMAP의 예시를 나타내고 있으며 태양의 위치를 중심으로 산란일사량의 분포를 확인할 수 있다. Fig. 3.4에서는 1년의 장기 관측값을 고려한 예시를 나타내고 있으며 장기간 누적 값을 사용하면 한번의 연산으로 장기간을 고려할 수 있기 때문에 계산의 효율이 높아진다. 실측값을 입력 자료로 사용하면 해당 기간의 일사량을 나타내며 대표기상연도를 사용하면 장기간의 대표 일사량을 나타낸다.



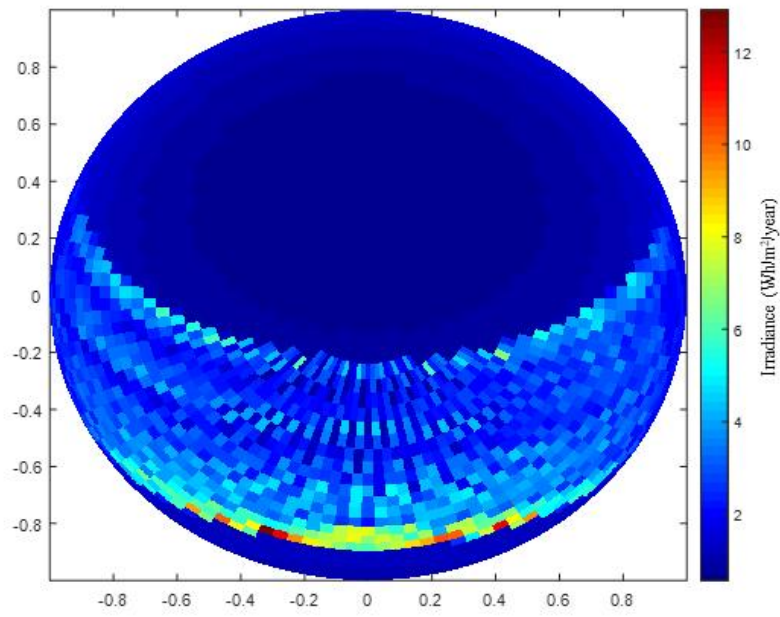
(a)



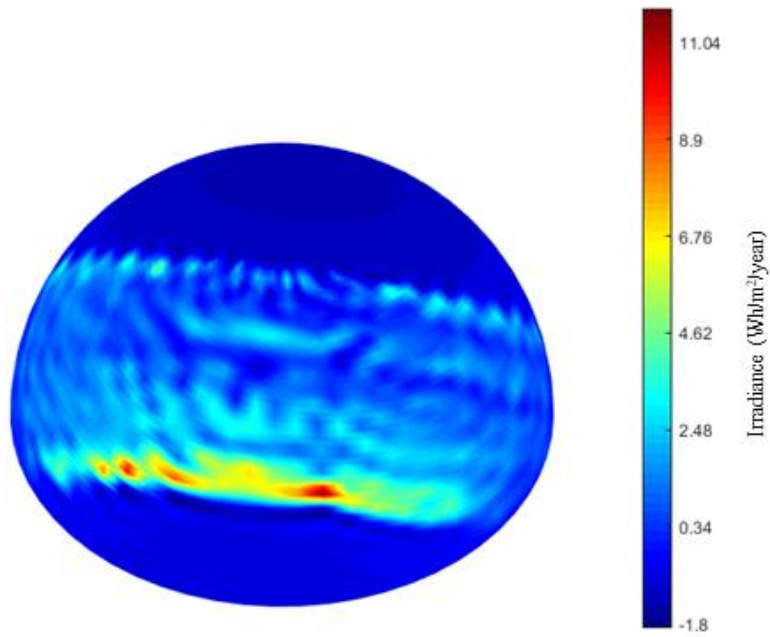
(b)

Fig. 3.3. Examples of the SUNMAP of instant diffuse irradiance according to Perez model using (a) 2D and (b) 3D visualization





(a)



(b)

Fig. 3.4. Examples of the SUNMAP of annual irradiance using (a)



2D and (b) 3D visualization

SUNMAP에서 계산된 값은 각 하늘의 위치에서 관측자를 향한 방향 성분이며 경사면 측정 일사량을 계산하기 위해서는 경사면의 수직성분만을 추출하여 사용한다. 이 때 경사면에 따라 일사량이 변하게 되는 것을 경사로 인한 응달(Shade)이라 하며 그림자와는 구분하여 사용한다(Dubayah and Rich, 1995). 고정형 태양광 패널인 경우 전체 누적 값의 코사인 성분만을 추출하는 방법으로 쉽게 계산을 수행할 수 있다. 하지만 태양의 위치에 따라 경사면이 바뀌는 추적형 태양광 패널을 고려하기 위해서는 태양의 위치에 따른 SUNMAP을 각각 사용하거나 각 태양의 위치에 따른 결과를 변환하여 누적해야 한다.

시간에 따른 혹은 월에 따른 일사량을 계산하기 위해서는 여러 개의 SUNMAP을 사용하거나 여러 SUNMAP을 3차원으로 구성하여 사용할 수 있다. 계산시에 메모리 사용량이 증가하지만 한번만 자료를 제작한다면 이후 장기간의 자료를 손쉽게 계산할 수 있다. 그리고 SUNMAP은 하나의 기상 자료로 제작되며 다른 지역을 계산하기 위해서는 새로운 SUNMAP이 계산되어야 한다. 따라서 넓은 영역을 대상으로 연구를 수행할 때에는 다수의 SUNMAP을 제작하거나 조금 더 넓은 영역에 적용할 수 있는 일조 시간을 사용한 SUNMAP 등을 제작할 수 있다.

발전량을 계산하기 위해서는 각 시간에 온도를 고려할 필요가 있다. 일사량 SUNMAP을 사용할 경우 누적 일사량만을 고려하기 때문에 온도를 고려한 결과와는 결과가 다를 수 있다. 따라서 정확한 계산을 수행하기 위해서는 SUNMAP을 제작할 때 온도까지 고려하여 일사량이 아닌 에너지 밀도를 사용할 수 있다. 에너지 밀도는 Eqn. 2.12에서 설비용량(P)을 제외하여 계산할 수 있으며 일사량과 동일한  $\text{kWh/m}^2$ 의 단위를 가지게 된다. 해당 값은 이후 면적이나 설비용량을 사용하여 발전량으로 변환될 수 있다. 에너지 밀도를 사용한 SUNMAP도 일사량을 사용한 결과와 동일하게 사용될 수 있으며 여러 분석 및 가시화를 수행할 수 있다.



### 3.3. 주변 공간 자료를 통한 그림자 분석

그림자를 고려하기 위한 방법으로 2.2에서 SBC와 VBC 두 가지 방법이 제시되었다. 본 도구에서는 두 가지 방법을 모두 사용할 수 있게 고안되었으나 다양한 분석을 수행할 수 있는 VBC를 기본으로 사용한다. 그림자 분석은 입력 자료로 연구 대상 지역의 수치표고모델(DEM, Digital Elevation Model)을 사용하게 되며 각 위치에 따른 높이를 고려하여 계산된다. 도심지 영역의 그림자를 계산할 때에는 수치표면모델(DSM, Digital Surface Model)이라 불리는 건물 등의 자료를 포함한 자료를 사용하여 계산하게 된다.

SBC는 SUNMAP의 각 위치에 태양이 있을 때의 그림자를 계산하여 그림자 지도를 제작한다. 그림자는 전체 DEM의 높이를 사용하여 계산되며 한번 계산을 수행하면 전체 지역에 대한 결과가 제작된다. 그림자는 DEM이나 DSM 각 위치의 높이에 의한 각도와 태양의 고도각을 비교하여 계산할 수 있다. 이 때 높이에 의한 각도는 태양방위각의 방향으로 결정되며 이 각도가 더 높다면 그림자가 생기게 되며 반대의 경우 태양광이 입사되게 된다. 최종 결과는 각 그림자 지도를 SUNMAP에 따라 가중치를 주어 선형으로 합하여 제작된다. Fig. 3.5 (a)에 SBC를 사용하여 잠재량 지도를 만드는 예시를 나타내었다.

본 도구에서는 산란일사량의 가림을 고려하기 위해 각 방향에서 입사되는 산란일사량을 직달일사량과 동일하게 고려하여 계산을 수행한다. 흔히 태양광에 의한 그림자라고 하면 직달일사량에 의해 생성되는 것을 뜻하며 산란일사량의 경우 전체 하늘에서 입사 되기 때문에 그에 의한 그림자는 거의 관측되지 않는다. 그러나 관측되지 않는 것은 상대적으로 그 값이 작고 다른 그림자와 중첩된 효과이며 이를 고려하여야 정확한 값을 계산할 수 있다. 직달일사량의 그림자만 계산할 경우 계산할 범위가 줄어드나 산란일사량까지 고려하기 위해서는 전체 하늘 영역에 대해 연산을 수행해야 한다. 알고리즘의 시간

복잡도(Time complexity)는 DEM의 세로축 길이( $n$ ), 가로축 길이( $m$ ), 천정각과 방위각의 분할 수( $z, a$ )를 기준으로  $O(nmza)$ 가 된다. 시간 복잡도란 알고리즘을 수행할 때 입력 자료 수에 따른 계산 시간의 함수를 나타낸다.

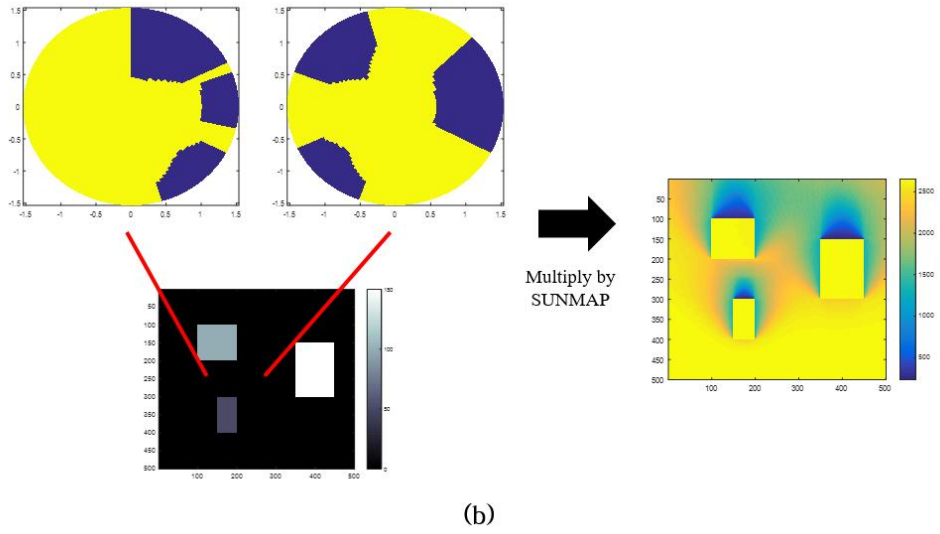
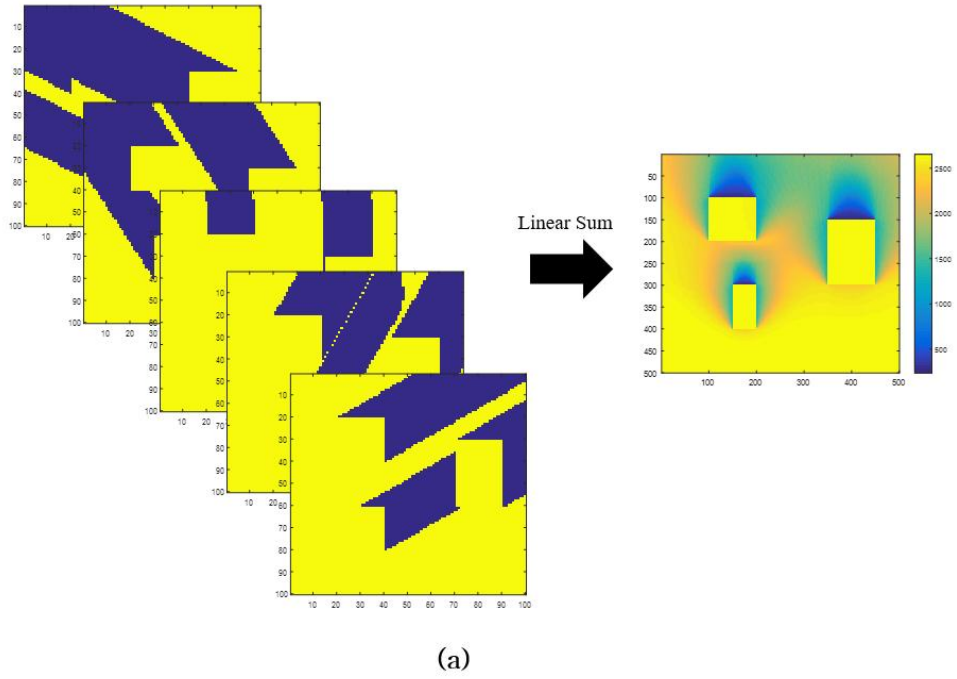


Fig. 3.5. The diagrams of shadowing calculation method (a) shadow based calculation (SBC) and (b) VIEWMAP based calculation (VBC)

VBC는 DEM이나 DSM의 각 위치에서 VIEWMAP을 제작하여 계산을 수행한다. VIEWMAP은 SUNMAP과 대응되는 자료로 각 하늘의 영역에 따른 가림 정도로 정의된다. 실제 제작은 SKYGRID의 좌표 상에서 수행되며 투과율이 없을 경우 0, 1로 구분되고 투과율이 있는 경우 0에서 1사이의 값이 된다. VIEWMAP의 개념은 기존 문헌에서 소개되었으며 (Fu and Rich, 1999) 다른 연구에서는 “Viewshed” 나 “Shading mask” 등의 명칭으로 사용되기도 한다. SBC와 달리 한번의 계산으로 한 지점의 결과가 제작되며 VIEWMAP과 SUNMAP을 곱하여 전체 기간의 값을 계산한다. Fig. 3.5 (b)에 VBC를 사용하여 잠재량 지도를 만드는 예시를 나타내었다. Fig. 3.6에는 VIEWMAP의 3차원 가시화 및 기본 원리를 나타내었다.

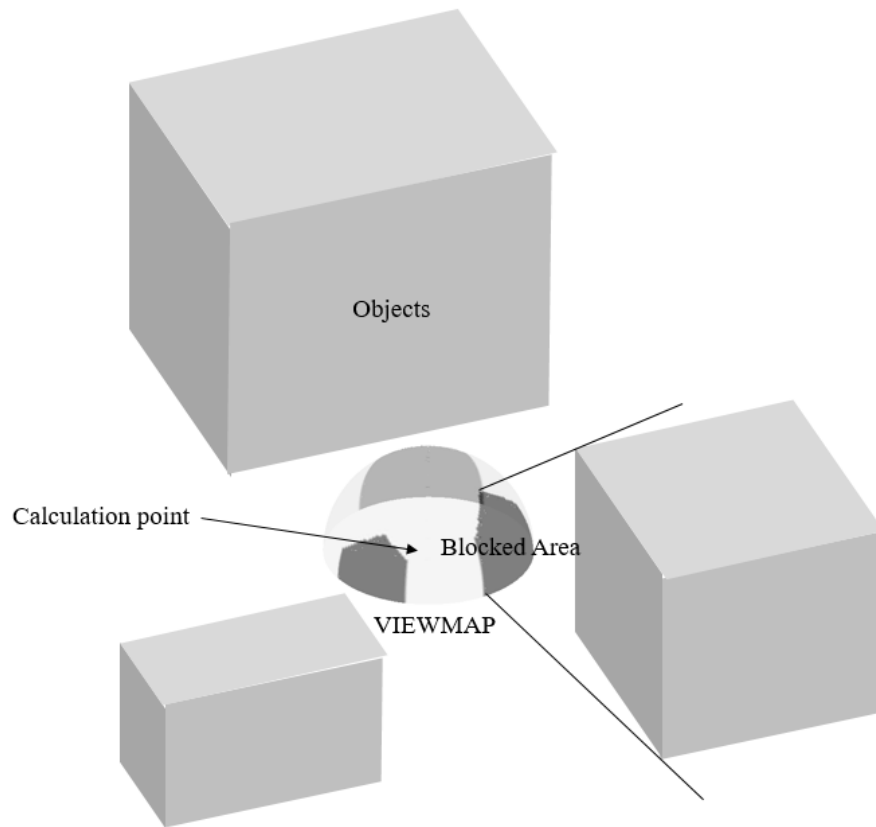


Fig. 3.6. The 3D visualization of VIEWMAP and basic principle



사용하는 알고리즘에 따라 VIEWMAP을 계산할 때의 시간과 결과가 바뀌게 된다. 가장 기본적인 방법은 전체 DEM의 자료를 모두 사용하는 것이며 이 경우 자료의 양이 많아질수록 시간이 계산 불가능한 수준으로 커질 수 있다. 두 번째 방법은 각 방위각의 방향으로 선형으로 존재하는 자료만 사용하는 방법이다. 이 방법은 앞선 방법보다 빠르나 자료의 크기가 커질수록 생략되는 자료가 많아지며 여전히 자료의 수에 취약하다. 마지막 방법은 가까운 영역은 원본 자료를 사용하고 계산 지역이 멀어질수록 저해상도의 자료를 사용하는 것이다. 이 방법은 영상 처리(Image Processing)에서 주로 사용되는 피라미드 데이터 (Pyramid data)를 사용하는 것이며 (Adelson et al., 1984) 먼 거리의 정확도를 줄이지만 계산 시간을 단축시킬 수 있다. 본 연구에서는 이 세가지 알고리즘을 각각 전체 자료, 선형, 피라미드 알고리즘이라 명명하고 사용한다.

전체 자료 알고리즘은 가장 단순한 방법으로 DEM 내의 모든 값을 하나씩 확인하고 각 위치에 따른 방위각, 천정각을 계산하고 가림 여부를 계산하게 된다. 방위각에 따라 고려하는 자료는 Fig. 3.7 (a)에서 확인 가능하다. 한 지점의 VIEWMAP을 계산할 때 마다 전체 DEM의 자료를 확인하기 때문에 전체 DEM 자료 수의 제공에 해당하는 시간 복잡성을 지니게 된다. 계산 시에는 높이에 따라 천정각이 바로 계산되기 때문에 시간 복잡성은 천정각 분할은 영향을 받지 않고 방위각 분할에만 영향을 받는다. 이에 따라 시간 복잡도는  $O(n^2m^2a)$ 가 된다. Matlab의 경우 행렬 연산에 최적화 되어있기 때문에 전체 DEM을 행렬로 계산하면 상대적인 속도 향상이 있으나 최종 계산은 다른 알고리즘에 비해 상당히 오래 걸리게 된다.

정확도의 측면에서 많은 자료를 사용함에도 불구하고 높은 오차를 야기할 수 있는 요인들이 존재한다. 먼저 하나의 방위각 분할 값이 포함하는 픽셀의 수는 거리가 멀어질수록 많아지기 때문에 그 중 가장 천정각이 높은 그림자를 택하게 된다면 그림자를 과대평가하는 문제가

생길 수 있다. 특히 고해상도 영상을 사용하는 경우 울퉁불퉁한 그림자 영역이 가장 높은 값만 선택되어 계산될 수 있다. Fig. 3.7 (a)의 그림을 참고하면 같은 색의 자료들 중 최댓값을 사용하여 VIEWMAP을 계산하게 되는데 그 최댓값은 해당 영역을 대표할 수 없는 경우가 존재한다. 이 외에도 각각의 픽셀의 중심을 기준으로 방위각을 계산하기 때문에 계산 지점에 가까운 데이터의 경우 그 크기를 고려하지 못하고 SKYGRID의 방위각 크기로 판단하게 된다. 다르게 표현하면 가까운 자료를 계산하는 경우 일부 방위각이 누락되게 되어 그림자를 과소평가하는 문제가 발생할 수 있다.

선형 알고리즘은 Fig. 3.7 (b)와 같이 방위각과 동일한 영역만을 고려하여 계산을 수행한다. 전체 자료 알고리즘보다 빠르게 연산을 수행할 수 있으며 기존에도 많이 사용되는 방법이다. 하나의 VIEWMAP을 계산할 때 필요한 자료의 수가 DEM의 가로, 세로 해상도의 제곱이 아닌 1차항이 들어가며 그 외의 요인들은 선형 알고리즘과 비슷하다고 볼 수 있다. 따라서 시간 복잡성은  $O(nma(n+m))$ 가 된다. 앞선 알고리즘과 비교하면 상수 항은 추가로 붙게 되지만 시간복잡성에서는 상수항을 제외한 변수만을 고려하여 계산하게 된다. 정확도의 측면에서 선형의 값만 사용하기 때문에 먼 거리에 있는 자료들이 무시될 수 있다는 점을 주의해야 한다. 추가로 이 알고리즘의 경우 전자와 달리 계산시 방향성이 있기 때문에 투과율을 고려하기가 쉬워지는 장점이 있다.

피라미드 알고리즘의 경우 Fig. 3.7 (c)에서 사용 자료와 그 특징을 파악할 수 있다. 거리에 따라 다른 해상도의 자료를 사용하기 때문에 대부분의 자료가 고려되며 과대평가나 과소평가가 될 가능성이 낮다. 또한 사용되는 자료의 수가 적어지기 때문에 계산 시간 속도의 장점이 있다. 사용하는 자료의 형태는 달라지지만 기본적인 방법은 앞의 두 알고리즘을 모두 활용할 수 있다. 하지만 실질적인 피라미드 자료의 사용 기준에 따라 알고리즘에 따른 사용 자료 수가 거의 차이가 나지

않기 때문에 유의미한 차이는 아니라고 볼 수 있다. 본 도구에서는 피라미드 알고리즘에서 더 높은 계산 속도를 보이는 전체 자료 방식을 사용하여 피라미드 알고리즘의 계산을 수행했다.

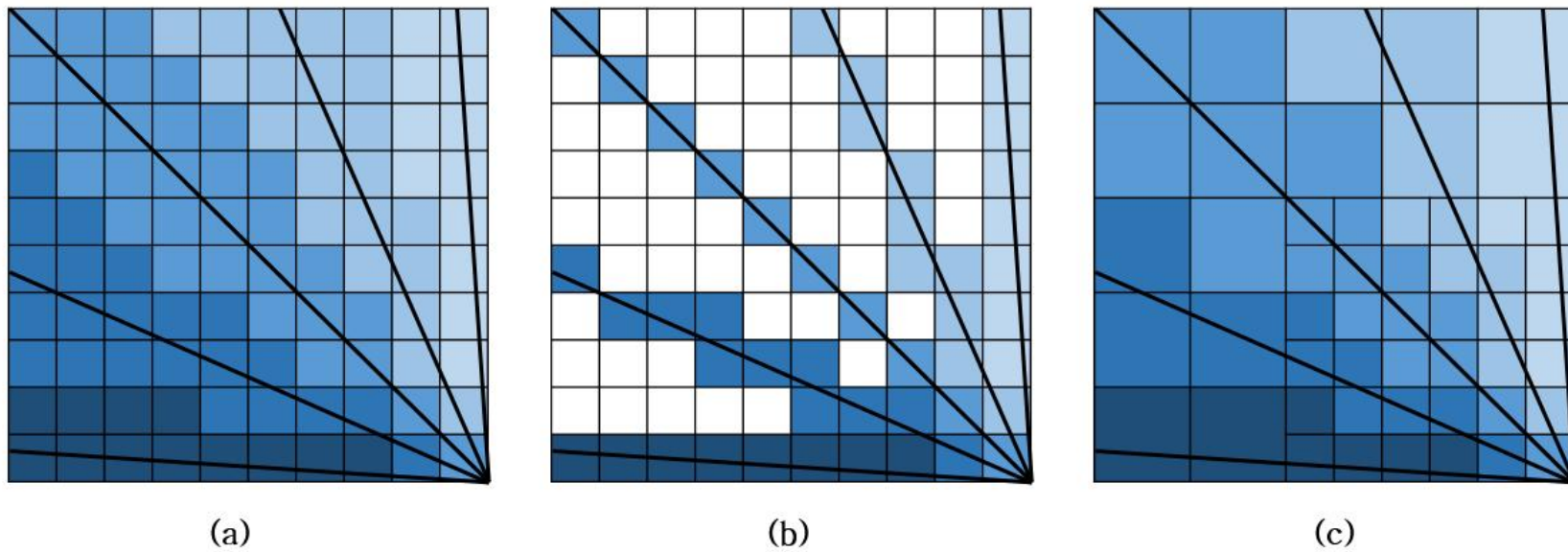


Fig. 3.7. Used data in Digital Elevation Model(DEM) when calculating VIEWMAP according to calculation algorithms.  
 (a) all data algorithm, (b) linear algorithm, and (c) pyramid dataset algorithm. The black line represent the azimuth angle and blue data represent the used data.

이 알고리즘에서 피라미드 자료를 만드는 방법과 계산 시 구분하는 기준을 명확히 할 필요가 있다. 피라미드 자료는 일반적인 영상 처리에서 사용하는 것과 같이 원자료를 기준으로 2배, 4배, 8배와 같이 2배씩 공간해상도를 낮추어 구성한다. 해상도를 낮출 때에는 여러 자료의 평균 값을 사용하여 넓은 영역을 고려할 수 있게 한다. 따라서 전체 자료 알고리즘과 같은 과대 평가 문제를 해결할 수 있다. 피라미드 자료에서 원자료를 레벨1이라 부르며 해상도가 낮아진 자료는 차례대로 레벨2, 3 등으로 명명한다.

계산 시 사용되는 피라미드의 레벨은 픽셀 지표( $p_x$ , Pixel Index)라는 새로운 값을 정의하여 결정한다. 이 지표는 계산 대상 지점에서 바라본 DEM 한 픽셀의 최대 각도가 방위각의 단위 각도보다 커지는 거리를 뜻하며 픽셀의 수로 나타낸다. 여기서 픽셀은 DEM과 같은 래스터 자료의 최소 단위를 뜻한다. Fig. 3.8에 픽셀 지표에 대한 모식도를 나타냈으며 x축 방향으로 픽셀의 최대 각도를 통해 계산한다. Eqn. 3.2에 x축 픽셀 지표를 구하는 식을 나타냈으며 같은 원리로 y축 픽셀 지표도 구할 수 있다. 이 때  $S_y$ 는 y축 공간 해상도,  $S_x$ 는 x축 공간 해상도,  $a$ 는 방위각 분할 수를 뜻한다. 본 도구에서는 픽셀 지표보다 거리가 먼 자료는 다음 피라미드 레벨을 사용하여 방위각 분할 수보다 픽셀 각도가 크게 하여 계산을 수행하였다. 이 경우 각도 상으로 계산에서 누락되는 영역이 없어지며 각 피라미드의 사용량을 최소화하여 계산 속도를 증가시킬 수 있다.

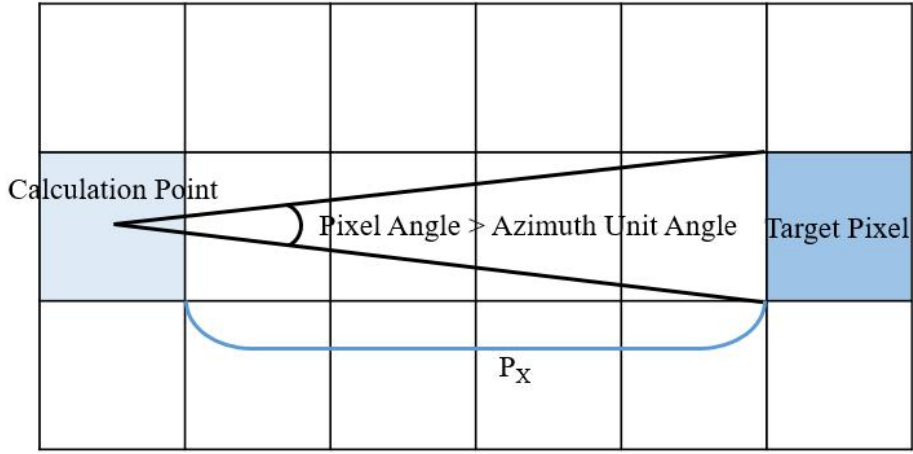


Fig. 3.8. The diagram of pixel index ( $p_x$ ). The pixel index represent the distance from calculation point with a pixel angle smaller than the unit azimuth angle.

$$p_x = \frac{s_y}{2s_x} \times \frac{1}{\tan(\pi/a)} - 0.5 \quad \text{Eqn 3.2}$$

피라미드 알고리즘의 시간복잡도는 사용되는 피라미드 레벨의 수와 피라미드의 자료 수에 비례하게 된다. 필요한 레벨의 수는  $\log_2(n/p)$ 라 할 수 있으며 피라미드 내 자료의 수는  $p^2 \cdot \log_2(n/p)$ 이다. 여기서  $n$ 은 DEM의 가로축, 세로축 중 긴 길이이며  $p$ 는  $p_x$ ,  $p_y$  중 긴 길이이다. 탄젠트( $\tan$ ) 함수는 값이 0에 매우 근사하게 된다면 선형 함수와 비슷한 성질을 가지고 있다. 따라서 Eqn 3.2의 수식에서 방위각 분할( $a$ )가 커짐에 따라  $p$ 의 식도  $a$ 에 비례하게 된다. 최종 시간복잡도는  $O(nma^2 \log(n))$ 으로 계산되며 선형 알고리즘보다  $n/\log(n)$  만큼 빠른 계산 속도를 가지고 있다.

각 알고리즘들의 시간복잡도는  $O(nmza)$ ,  $O(n^2m^2a)$ ,  $O(nma(n+m))$ ,  $O(nma^2 \log(n))$ 으로 계산된다. 자료가 커짐에 따라

체감되는 계산 시간은 DEM의 크기에 따라 결정되며 이에 따라 각 알고리즘의 시간 복잡성은  $n$ 의 제곱, 4제곱, 3제곱, 제곱\*로그 향으로 계산될 수 있다. Fig. 3.9에 측정된 각 알고리즘의 계산 시간이 나타나 있으며 자료의 크기가 커짐에 따라 차이가 증가하는 것을 확인할 수 있다. VBC의 경우 피라미드 알고리즘 외에는 SBC와 비교하여 매우 오랜 계산이 필요하게 나타났다. 다만 정확도의 경우 피라미드 알고리즘이 다른 방법들보다 동일한 하늘 해상도에서 일부 낮게 나타났기 때문에 하늘 해상도를 높일 필요도 있다. 하지만 대부분의 경우 상대 평균 제곱근 오차(rRMSE, Relative Root Mean Squared Error)와 상대 평균 편향 오차(rMBE, Relative Mean Biased Error) 모두 2%내외의 값을 보였기 때문에 잠재량 예측에는 문제가 없을 것으로 예상된다 (Oh and Park, 2018).

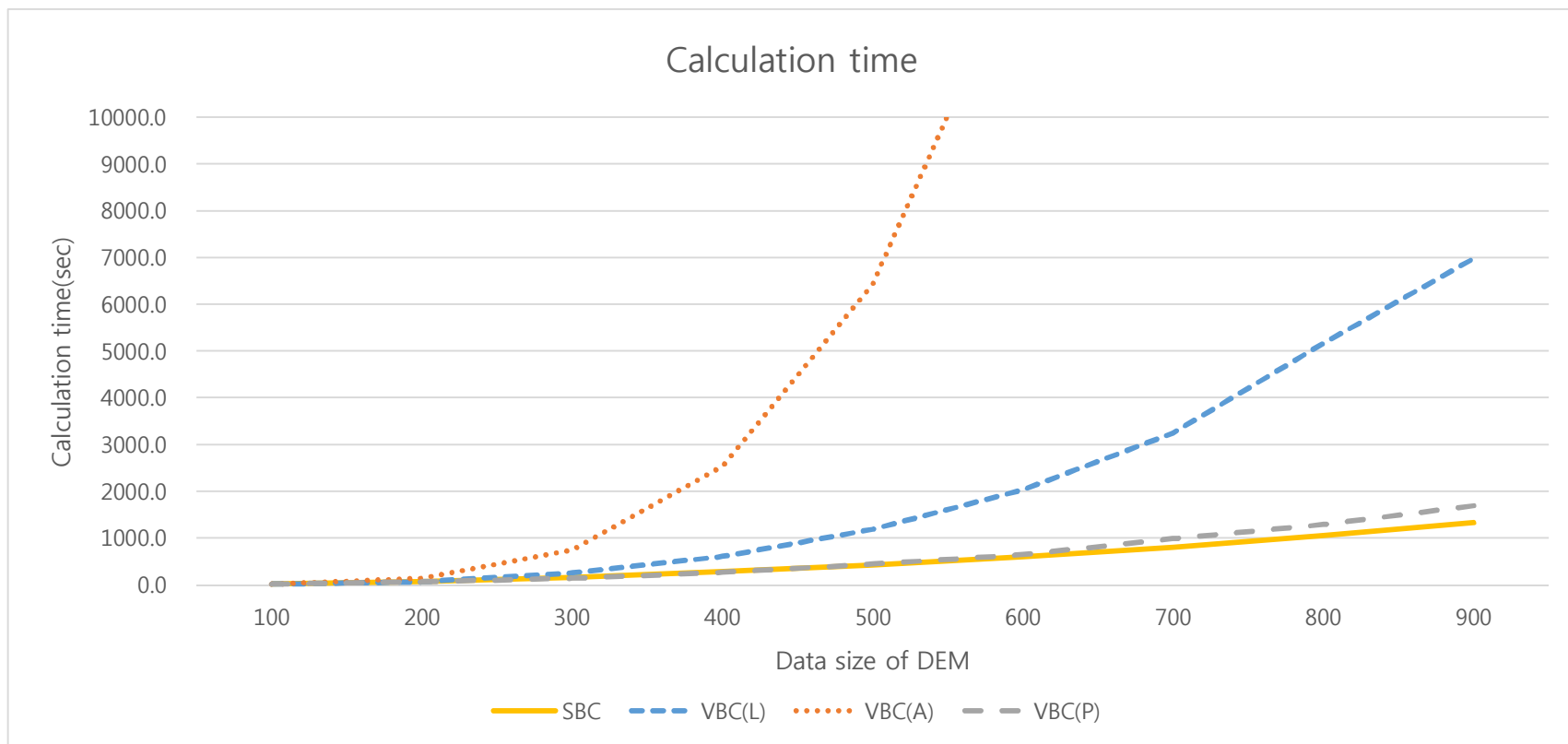


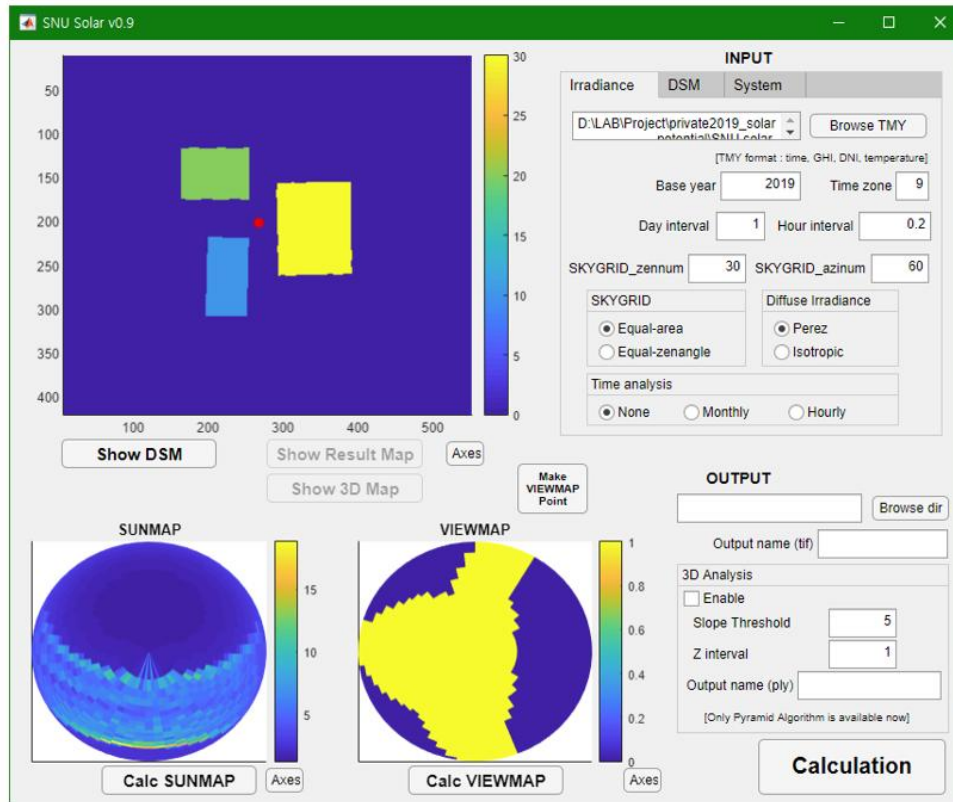
Fig. 3.9. Calculation time according to the data size of the DEM with different VIEWMAP calculation algorithms  
L:linear, A:all data, and P:pyramid dataset algorithm.



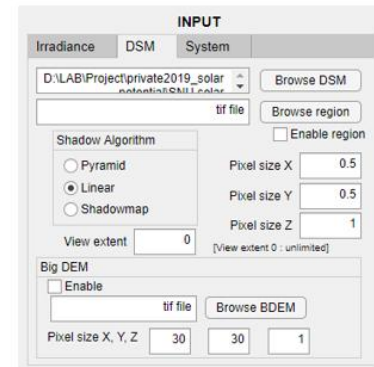
본 도구에서는 SBC 방법과 VBC 방법 중 선형 알고리즘과 피라미드 알고리즘 2가지를 사용하여 계산을 수행할 수 있게 하였다. 각각의 방법들은 장단점을 가지고 있으며 필요에 따라 선택할 필요가 있다. 계산 시간의 측면에서 자료의 크기가 커짐에 따라 계산 시간이 급격하게 커지기 때문에 이 경우 SBC나 피라미드 알고리즘을 사용한 VBC가 추천된다. 하지만 SBC는 건물 측면을 계산하거나 최적 방향을 계산하는 등의 분석을 수행할 수 없다는 단점이 있다. 또한 VBC는 일부 영역만 계산하거나 여러 해상도를 가진 DEM을 동시에 고려하는 등의 자유도가 존재하기 때문에 분석의 측면에서 장점이 있다.

### 3.4. 일사량 및 발전량 계산 도구 개발

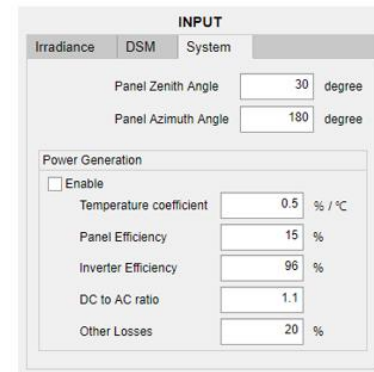
개발된 도구는 “SNU Solar(Seoul National University Solar Potential Mapping Tool)” 라는 이름으로 제작되었다. 앞선 절의 내용을 사용하는 매트랩(Matlab) 기반으로 구현하였으며 그래픽 사용자 인터페이스(GUI, Graphical User Interface) 도구로 개발되었다. Fig. 3.10에 개발된 도구의 GUI를 표시하였으며 중간 과정의 가시화 및 입력 자료들에 대한 내용을 확인할 수 있다. 도구는 앞선 방법들을 사용하여 3장에서 언급된 5가지 목표를 만족할 수 있도록 하였다. 전체 과정은 SKYGRID 정의, SUNMAP 제작, 그림자 분석, 잠재량 지도 제작 순서로 진행된다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.10. Graphical User Interface of SNU Solar. (a)main screen with input for irradiance and output (b)input for

DSM and (c) input for system

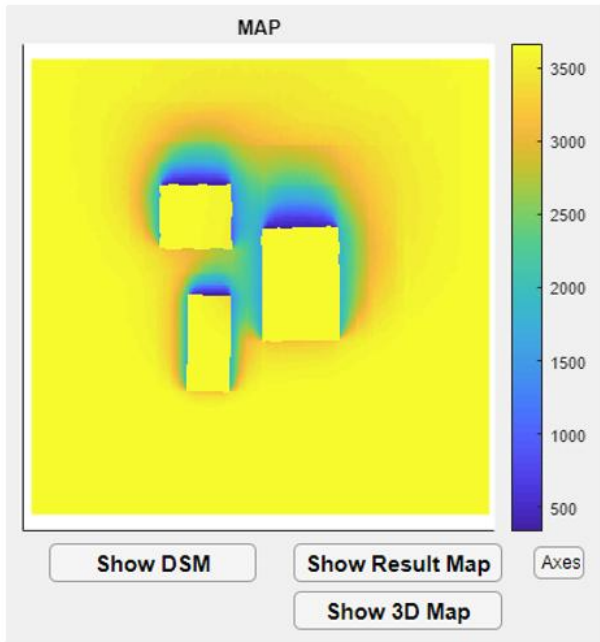
입력 자료는 일사량(Irradiance), 수치표면모델(DSM), 시스템(System) 탭으로 나뉘어 있으며 각각의 자료나 변수를 작성한다. 일사량 탭에서는 기준 연이나 계산의 기준이 되는 시간 간격, SKYGRID, 산란일사량 모델 등을 선택한다. 목표에 따라 연간 잠재량을 계산하거나 월, 시간에 따른 계산도 수행할 수 있다. DSM 탭에서는 기본적인 DSM 외에도 특정 지역만 계산을 수행하기 위한 지역 지도(Region map)이나 다른 규모의 DEM을 입력할 수 있다. 이 외에 각 픽셀의 크기나 VIEWMAP 계산 시 일정 거리 이상을 고려하지 않는 범위(View extent)를 설정할 수 있다. 마지막 시스템 탭에서는 태양광 패널의 방향 및 발전량 계산을 위한 값을 입력할 수 있다. 잠재량 계산을 위한 필수 외부 자료는 기상 자료와 DEM이며 그 외의 외부 자료는 선택에 따라 추가할 수 있다. 출력 자료는 출력을 위한 파일 경로 및 이름을 선택하며 3차원 분석을 추가할 경우 관련 인자들을 추가한다.

본 도구에서 사용하는 3차원이라는 용어는 연구 대상지 사물의 측면 계산을 포함하는 계산을 뜻한다. 이를 고려하게 된다면 건물 일체형 태양광 시스템(BIPV, Building Integrated Photovoltaics)과 같은 설비들의 잠재량도 평가할 수 있게 된다. 이때 추가되는 입력변수는 사물의 측면을 구분하기 위한 경사 기준 값과 계산을 수행하기 위한 수직 축 해상도이다. 사물의 측면은 DSM을 기준으로 인접한 픽셀과의 비율 차이가 일정 값 이상일 때 3차원 분석 대상으로 선택되게 되며 수직 축 해상도에 따라 그 수직면은 여러 점으로 분할되어 계산되게 된다. 표면의 수직 분포는 평평한 형태로 구성되지만 수평 분포는 DSM의 오차에 따라 울퉁불퉁할 수 있다. 이를 보정하기 위해 인근의 일부 픽셀을 제외하고 그림자 계산을 수행하게 된다.

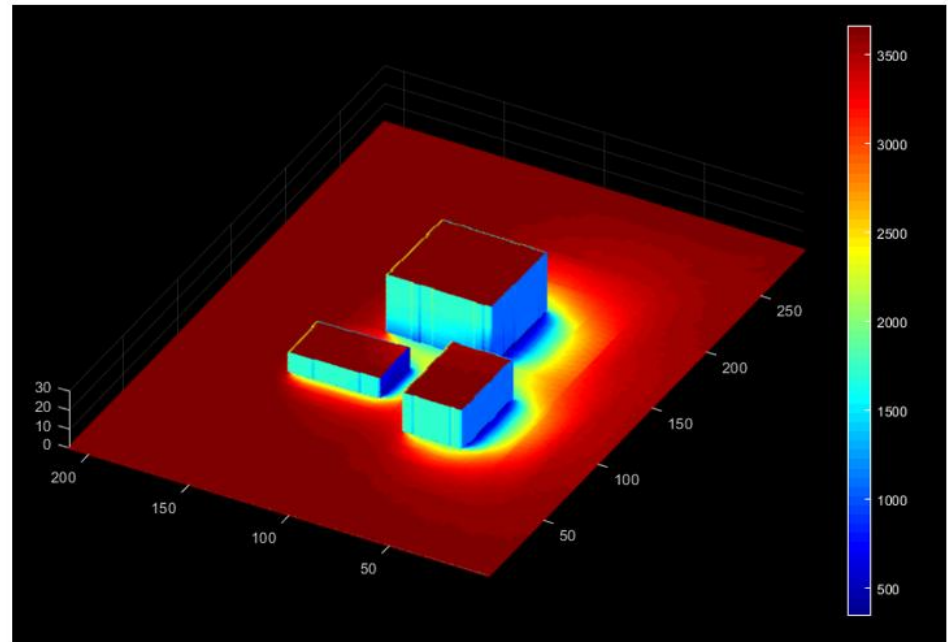
계산 기준 방위각은 해당 경사면의 경사 방향, 기준 경사각은  $90^{\circ}$ 가 된다. 결과적으로 건물이나 나무 등의 측면의 면적이 넓은 영역이 추출되어 해당 영역의 값이 계산된다. 이 영역은 경사각이

수직이기 때문에 SKYVIEW에서 절반의 영역에 일사량이 도달하지 않게 되며 따라서 평지에 비해 최대 일사량이 낮게 나타난다. 계산은 점 단위로 계산되어 점구름(Point cloud) 형태의 결과로 제작된다.

도구에서 바로 가시화 할 수 있는 것은 입력한 DSM, SUNMAP, VIEWMAP, 제작한 잠재량 지도와 3차원 가시화 결과이다. VIEWMAP의 경우 추가 버튼을 통해 DSM에서 위치를 선택하면 해당 위치의 VIEWMAP을 가시화할 수 있다. 결과는 계산을 수행한 후 가시화가 가능하며 DSM과 동일한 창에서 2차원으로 가시화하거나 새로운 창에서 3차원으로 가시화 할 수 있다. Fig. 3.11에 결과를 가시화한 예시를 표시했으며 3차원의 경우 점구름 형태로 가시화하게 된다. 결과는 지도 형식(tif)이나 점 구름(Point cloud) 형식(ply)으로 저장되기 때문에 결과를 다른 도구를 통해 가시화하거나 분석할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 3.11. Examples of result visualization in SNU Solar. (a) 2D result and (b) 3D point cloud result.

발전량 계산 시에는 각 픽셀을 기준으로 계산하기 때문에 에너지 밀도를 계산하게 된다. 이 때 Eqn. 2.12에서 설비용량에는 패널의 효율만 입력하여 계산을 수행한다. 따라서 실제 발전량은 면적과 면적 관련 비율을 사용하여 계산될 수 있다. 해당 식에서 태양광 패널의 온도는 풍속 등의 입력 자료를 통해 실시간으로 계산될 수 있는 값이다. 그러나 풍속은 공간적 분포에 따라 변화가 크며 단순히 대표기상연도의 자료만 사용하기에는 오차가 클 수 있다. 따라서 본 도구에서는 태양광 패널의 온도로 외기 온도를 사용하여 계산을 수행한다.



## 4. 연구 대상지 선정 및 공간 자료 전처리

본 연구에서 개발한 도구를 연구 대상지인 서울대학교 관악캠퍼스에 사용하여 종합 분석을 수행하였다. 태양광 잠재량 분석에 앞서 해당 지역에 대한 기본적인 정보를 조사하고 자료를 취득하여 데이터 베이스를 구축하는 것은 필수적이다. 일부 데이터의 경우 전처리나 다른 자료를 가공할 필요가 있다. 이러한 처리에는 GIS를 사용한 도구들이나 원격 탐사 기법들이 사용될 수 있다. 본 장에서는 연구 대상지에 대한 기본적인 특징 분석 및 데이터 베이스 구축을 다룬다.

### 4.1. 연구 대상지 특징 분석

연구 대상지인 서울대학교 관악캠퍼스는 대한민국 서울에 위치하고 있으며 400만  $m^2$  이상의 면적과 30만명 이상의 사람들이 활동하는 공간이다. 부지 내에는 200개 이상의 건물들이 있으며 많은 나무들이 존재한다. Fig. 4.1에 연구 대상지의 정사 영상을 가시화하였으며 많은 건물들과 시설, 나무들을 확인할 수 있다. 해당 지역의 남쪽에는 관악산이 존재하며 따라서 남쪽으로 갈수록 전체적인 고도가 높아지며 전체 캠퍼스도 기울어진 산지의 특성을 가진다.

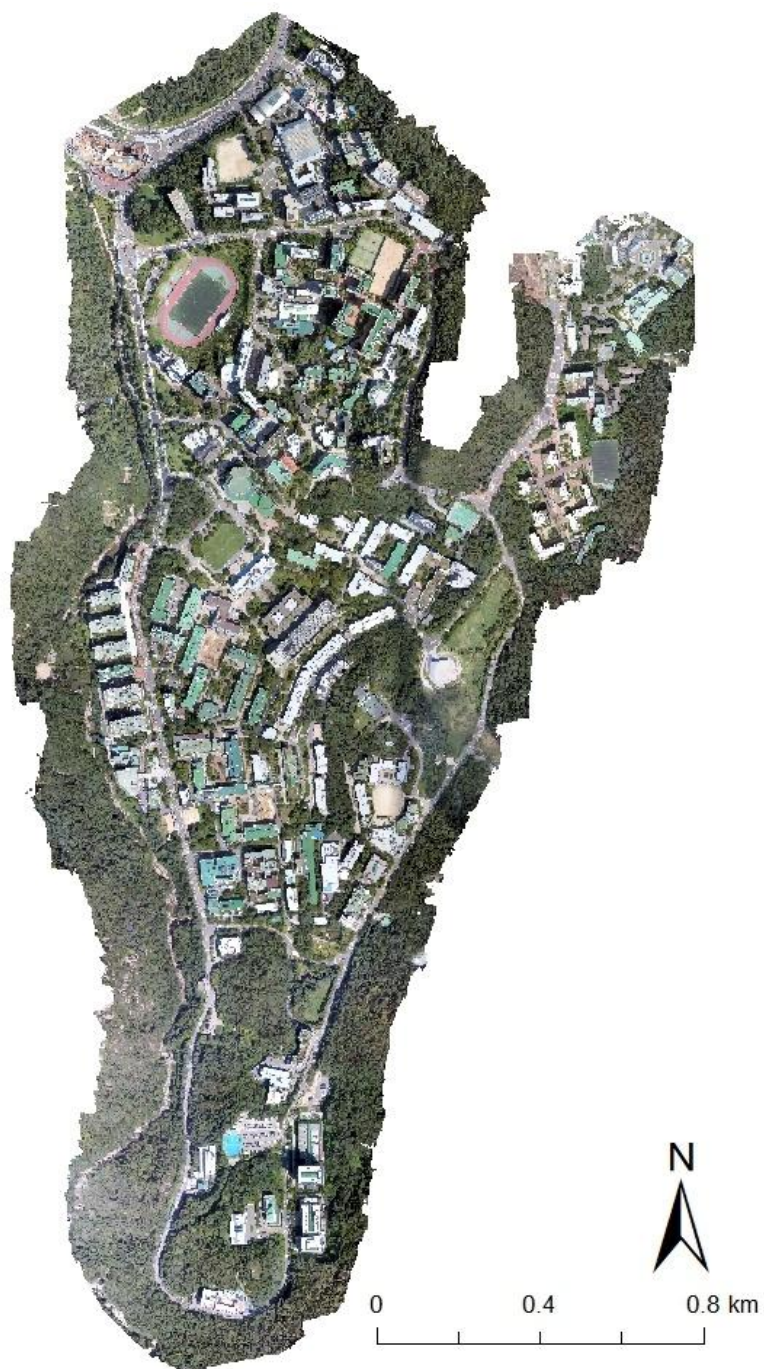
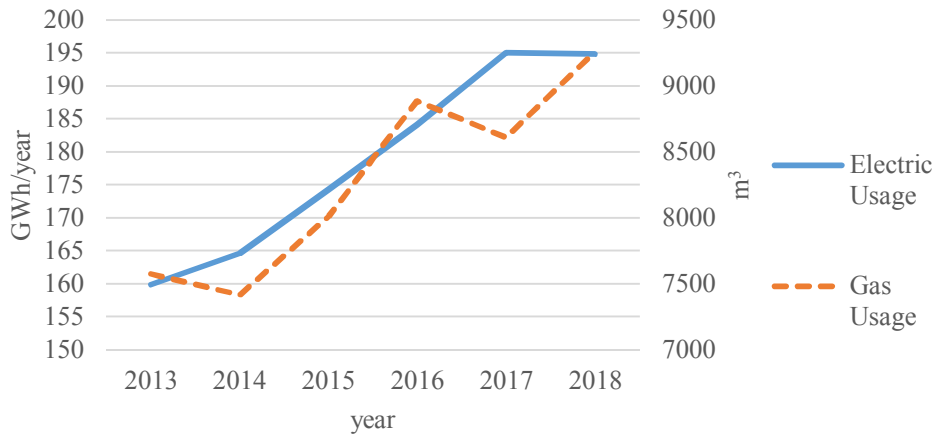


Fig. 4.1. An orthogonal image of the study area, Gwanak campus in Seoul National University. The image is generated from unmanned

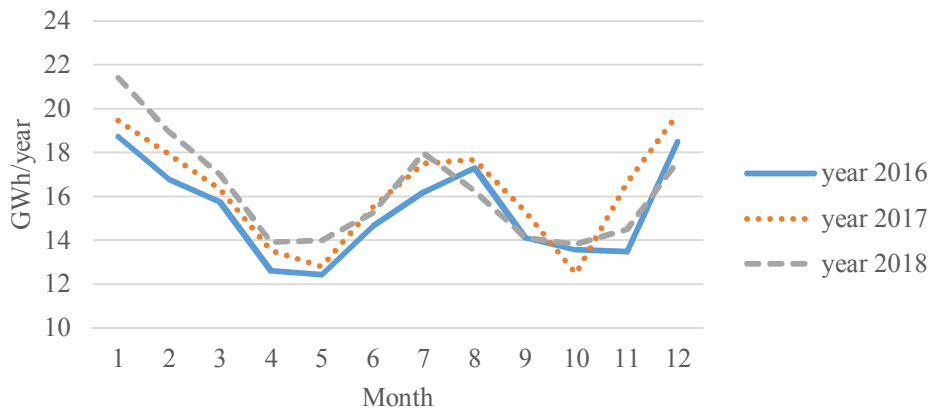
aerial vehicle images from the actual flight.

서울대학교는 연간 190 GWh의 전력 에너지를 소비한다. 이 양은 한국 전체 대학교의 5%에 해당하며 서울대학교는 2012년부터 서울에서 가장 많은 전력을 사용하는 단일 시설로 보고되고 있다. 학생 1인당 전력 소비량 또한 거점국립대 중 1위를 차지한 것으로 나타났다(그린피스 외, 2018). 서울대의 1인당 전력 생산량 중 재생에너지의 비중은 0.8%로 나타났으며 10개의 거점국립대 중 8위인 것으로 나타났다. 연구대상지는 아직까지는 1장에서 언급된 바와 같이 전세계적으로 진행되고 있는 친환경 캠퍼스 활동이 활발하진 않으며 태양광을 중심으로 신재생에너지 보급을 증가시킬 것으로 예상된다.

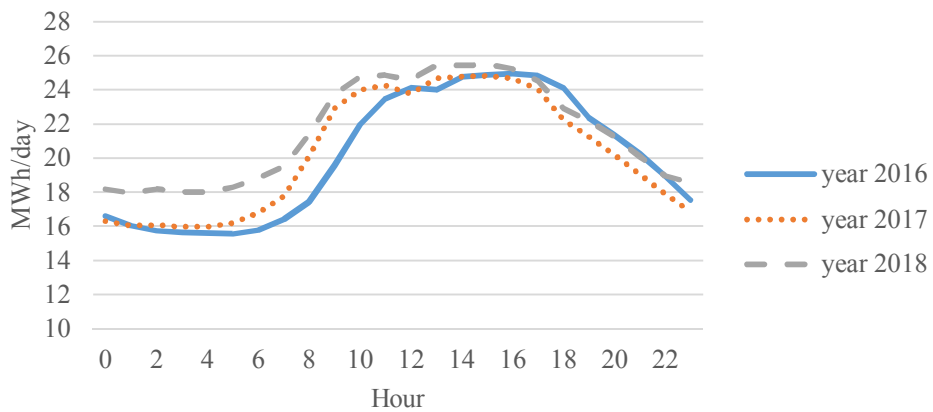
Fig. 4.2에는 (a)연구 대상지역의 연간 전력, 가스 사용량과 (b)월간, (c)하루 중 전력 사용량을 가시화했다. 연간 사용량과 월간 사용량은 서울대학교 시설지원과의 전기, 도시가스 에너지 사용정보를 사용했으며 하루 중 사용량은 서울대학교 온실가스 에너지 맵([www.co2.snu.ac.kr](http://www.co2.snu.ac.kr))의 자료를 사용했다. 연간 에너지 사용량을 보았을 때 사용량은 지속적으로 증가하고 있는 것을 확인할 수 있으며 일부 편차가 존재하였다. 전력 사용량은 5년동안 약 20% 증가한 것을 확인할 수 있었으며 가스 사용량 또한 비슷하게 증가하였다. 월간 전력 사용량을 보면 여름과 겨울에 냉난방을 위한 에너지 사용이 높은 것을 확인할 수 있으며 연간 차이는 크게 두드러지지 않았다. 겨울과 봄, 가을의 전력 사용량은 1.5배 이상 차이가 나기 때문에 안정적인 전력 공급을 위해서는 이러한 차이를 고려해야 한다. 하루 중 전력 사용량은 일반적으로 활동을 하는 아침부터 저녁까지 높고 새벽 시간에 낮은 것을 확인할 수 있다. 다만 2016년부터 최대 에너지 수요 시각이 점점 더 빨라지는 것을 확인할 수 있다. 전력 사용량이 최대가 되는 경우는 오전 10시 부근과 오후 2~3시 부근 두 곳에서 나타났으며 두 최대값은 큰 차이를 보이지 않았다. 새벽과 낮 시간의 시간당 전력 사용량 차는 약 50% 정도로 월간 최대 차와 비슷한 것으로 나타났다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4.2. Energy usage of the study area. (a) Annual electricity and gas usage (b) monthly electricity usage and (c) hourly electricity

usage

## 4.2. 자료 취득 및 전처리

잠재량 분석을 위해 필수적인 자료는 일사량 분석을 위한 기상 자료와 그림자 분석을 위한 DEM 자료이다. 기상 자료는 연구 대상지의 잠재량을 계산하기 위한 서울 지역의 대표기상연도 자료와 계산 결과를 검증하기 위해 연구 대상지에서 측정된 일사량 자료를 사용하였다. 대표기상연도는 한국에너지기술연구원에서 제작하고 국가참조표준센터에서 배포하고 있는 자료를 사용했으며 약 20개의 국내 주요 도시들을 대상으로 구축되어 있다. 구축된 자료는 1991년부터 2010년 까지 20년의 실측 자료를 사용했으며 외기온도, GHI, DNI 등의 지표가 존재한다. 서울 지역의 자료의 정확성은 GHI가 3%, DNI가 18%의 확장불확도를 가진 것으로 나타났다. 측정된 일사량은 서울대학교 캠퍼스 내 38동에서 측정된 값을 사용하였다. 해당 관측 시스템은 태양 추적시스템을 통해 DNI와 GHI를 모두 초단위로 측정 가능하다. 다만 측정된 2018~2019년 자료는 유실된 자료가 많아 2017년 자료만 사용되었다.

그림자 분석을 위해서는 주변의 그림자를 야기하는 물체들이 고려되어야 하며 연구 대상지의 경우 많은 건물을 고려하기 위해서는 고해상도 DSM이 필요하다. 고해상도 자료를 얻기 위해 무인항공기(UAV, Unmanned Aerial Vehicle)를 활용하여 구축된 자료를 사용했다. UAV를 활용하면 기존의 방법들보다 저렴한 비용으로 고해상도의 영상을 취득할 수 있으며 여러 각도의 사진을 사용하여 3차원 자료를 제작할 수 있다. Metashape 등의 다양한 소프트웨어에서 이러한 UAV 영상 분석을 지원하며 고해상도 DSM을 취득할 수 있다. 결과적으로 연구 대상지의 공간해상도 6cm의 정사영상과 1m의 DSM을 취득하였다. Fig. 4.1에 해당 정사영상을 가시화했으며 Fig. 4.3에 점구름, Fig. 4.4에 DSM을 가시화하였다. 해당 자료는 엔젤스윙에서 2016년 12월 진행한 3번의 UAV 촬영을 통해 제작되었다.





(a)



(b)

Fig. 4.3. Point cloud of the study area that is generated from



unmanned aerial vehicle images. (a) The whole area and (b) detailed view.

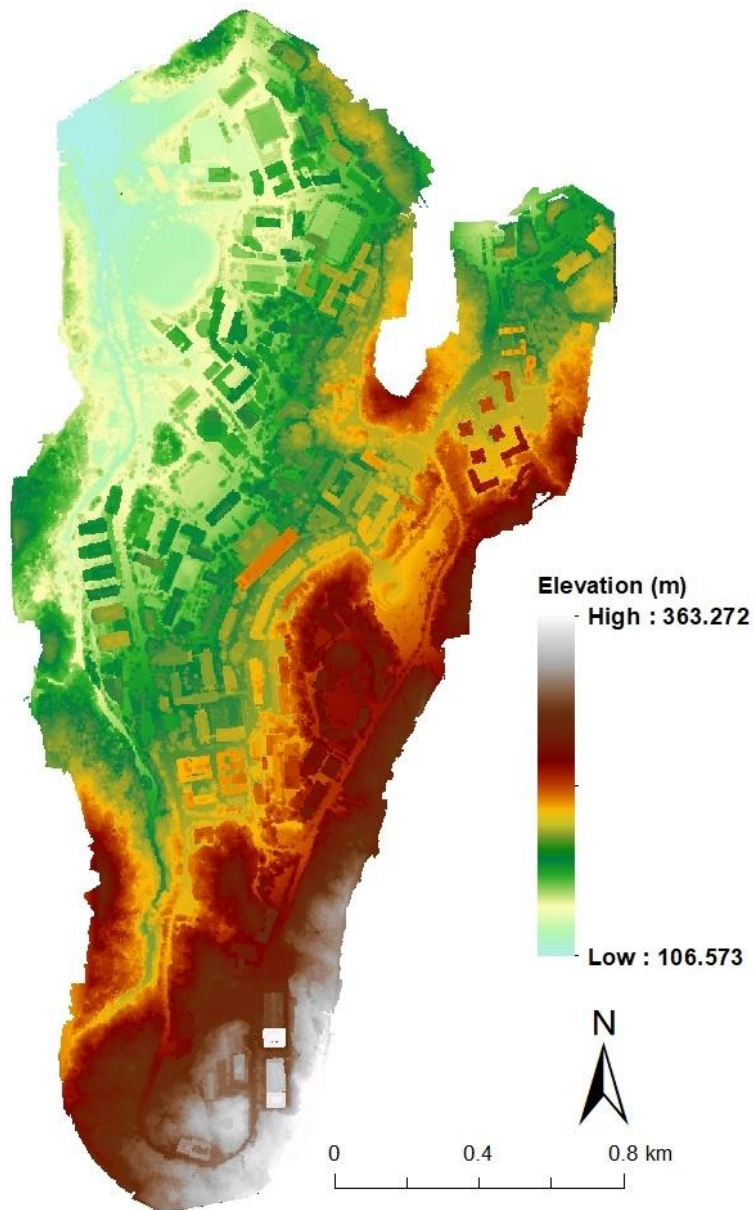
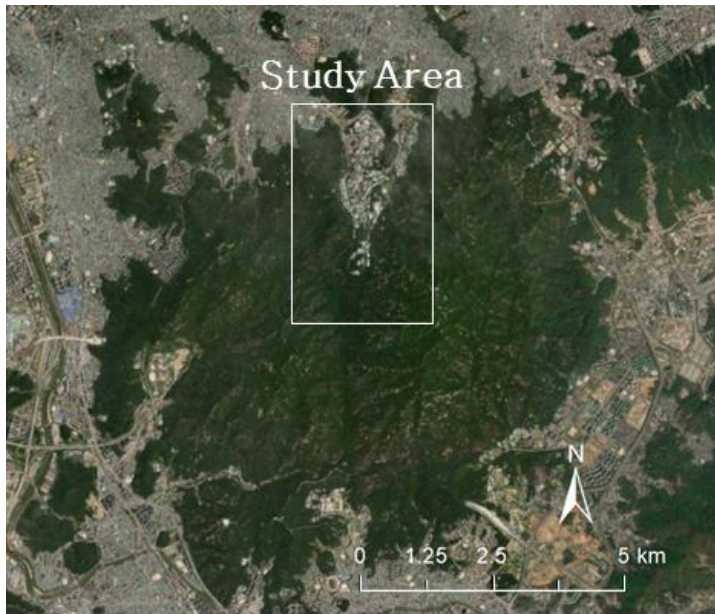
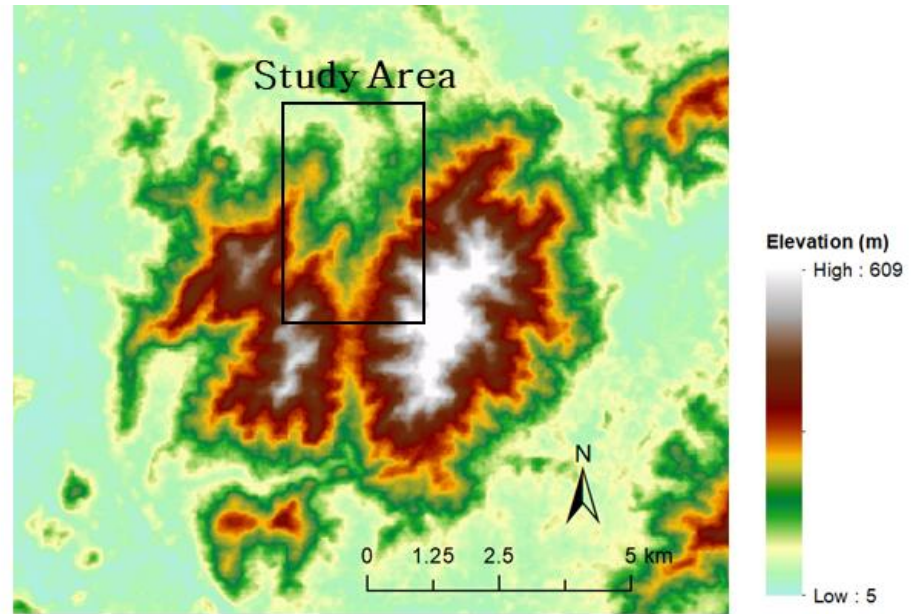


Fig. 4.4. DSM of the study area that is generated from unmanned aerial vehicle images.

연구 대상지는 산지에 위치하며 남쪽에 관악산이 있기 때문에 이를 고려해야 정확한 그림자 분석을 수행할 수 있다. 하지만 UAV로 제작한 영상은 연구 대상지의 자료로만 구성되어 있으며 인근의 산지를 포함하고 있지 않다. 따라서 이를 고려할 수 있는 저해상도의 넓은 면적 지형 자료를 추가로 사용하였다. 사용된 영상은 Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM) 모델이며 전세계 99%의 육지의 DEM을 제작한 자료이다. 공간해상도는 1도(degree)로 연구 대상지의 경우 약 30 m가 된다. Fig. 4.5에 사용된 저해상도 DEM과 해당 지역의 위성 영상을 나타내었다. 위성 영상은 ArcGIS의 기본 지도를 사용하여 가시화하였다. 영상에서 연구 대상 지역 및 대상지 남쪽의 관악산 부분을 확인할 수 있다.



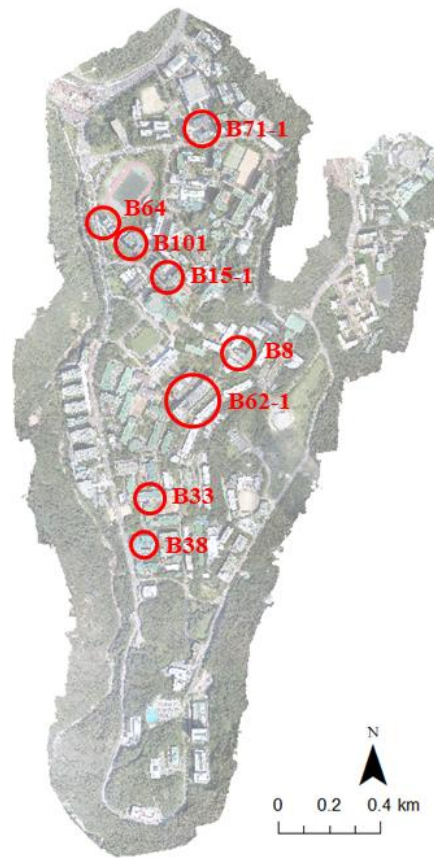
(a)



(b)

Fig. 4.5. The location of the study area. (a) satellite image from ArcGIS basemap and (b) ASTER GDEM near the study area.

연구 결과의 정확성을 검증하기 위한 발전량 자료로는 서울대학교 본부전기실에서 제공한 실제 태양광 발전소의 발전량을 사용하였다. 대상지에는 15개가 넘는 발전소들이 설치되어 있으며 전체 용량은 20 kW를 상회한다. 측정 일사량의 기간과 동일한 2017년의 발전량 자료를 취득하기 위해서는 2017년 이전에 설치되고 안정적인 모니터링 시스템으로 발전량이 측정되어야 한다. 이러한 기준을 만족하는 발전소는 8개가 있었으며 각 발전소의 위치와 정보가 Fig. 4.6에 가시화되었다. 해당 조건을 충족하는 발전소들은 주로 2012~2013년에 설치되었으며 다양한 규모와 태양광 패널 각도를 보였다. 대부분 남쪽이 아닌 건물의 방향에 맞는 방향으로 태양광 패널이 설치되었으며 패널 경사각은 10~30°를 보였다.






	<b>B8</b> Capacity: 30 kW Installation year: 2012 Azimuth: 211 ° Tilt: 10 °		<b>B15-1</b> Capacity: 30 kW Installation year: 2013 Azimuth: 137 ° Tilt: 28 °
	<b>B33</b> Capacity: 37 kW Installation year: 2012 Azimuth: 172 ° Tilt: 30 °		<b>B38</b> Capacity: 27 kW Installation year: 2012 Azimuth: 175 ° Tilt: 30 °
	<b>B62-1</b> Capacity: 325 kW Installation year: 2013 Azimuth: 138 ° Tilt: 10 °		<b>B64</b> Capacity: 30 kW Installation year: 2013 Azimuth: 226 ° Tilt: 14 °
	<b>B71-1</b> Capacity: 123 kW Installation year: 2016 Azimuth: 157 ° Tilt: 23 °		<b>B101</b> Capacity: 35 kW Installation year: 2012 Azimuth: 226 ° Tilt: 28,18 °

Fig. 4.6. Location and features of selected 8 photovoltaic systems in the study area denoted with their building

numbers

### 4.3. 객체 기반 분류를 통한 토지 이용 분석

잠재량 산정을 위해 구성된 공간 자료를 가공하여 토지 이용도를 제작하여 사용하였다. 토지 이용은 연구 대상지에 존재하는 건물, 잔디, 모래, 아스팔트, 나무 5개의 클래스로 분류하였다. 각각의 클래스는 추가적인 세부 항목이 포함되며 건물은 모든 인공적인 건축물, 모래는 보도와 운동장, 아스팔트는 도로와 주차장, 나무는 나무와 두 개의 작은 연못을 포함한다. 연구 대상지에 따라 연못이 매우 중요할 수 있으나 본 연구에서는 매우 작은 2개의 연못이 큰 영향을 미치지 못하고 나무와 동일하게 설치 불가 영역으로 분류되기 때문에 나무 클래스와 동일하게 처리하였다. 실제로 해당 연못들은 나무에 둘러 쌓여 있으며 색이 녹색으로 나타나 나무와 비슷하게 나타났다.

토지 이용도는 고해상도 정사영상과 지표에서의 높이를 가공하여 제작했으며 객체기반분류(Object-based classification) 방법을 사용하였다. 지표에서의 높이는 건물이나 나무의 높이를 말하며 DSM과 달리 해발고도가 아닌 지면에서의 높이이다. 해당 자료는 UAV영상에서 생성된 점구름을 사용하여 추출되었다. 이때 사용된 방법은 Cloth Simulation Filter (CSF)이며 적은 변수로 쉽게 지형과 그 외 물체들을 구분할 수 있다 (Zhang et al., 2016). 추출된 지형의 점구름을 통해 지면을 구성한 뒤 나머지 물체들의 높이를 계산하여 최종 지표에서의 높이를 계산하였다. 실제 구현은 오픈소스 소프트웨어인 CloudCompare ([www.danielgm.net/cc/](http://www.danielgm.net/cc/))를 통해 진행되었다. Fig. 4.7에 제작된 지표에서의 높이를 가시화하였으며 Fig. 4.8의 (a)에는 일부 지역의 정사 영상, (b)에는 추출된 지표에서의 높이가 가시화되었다.



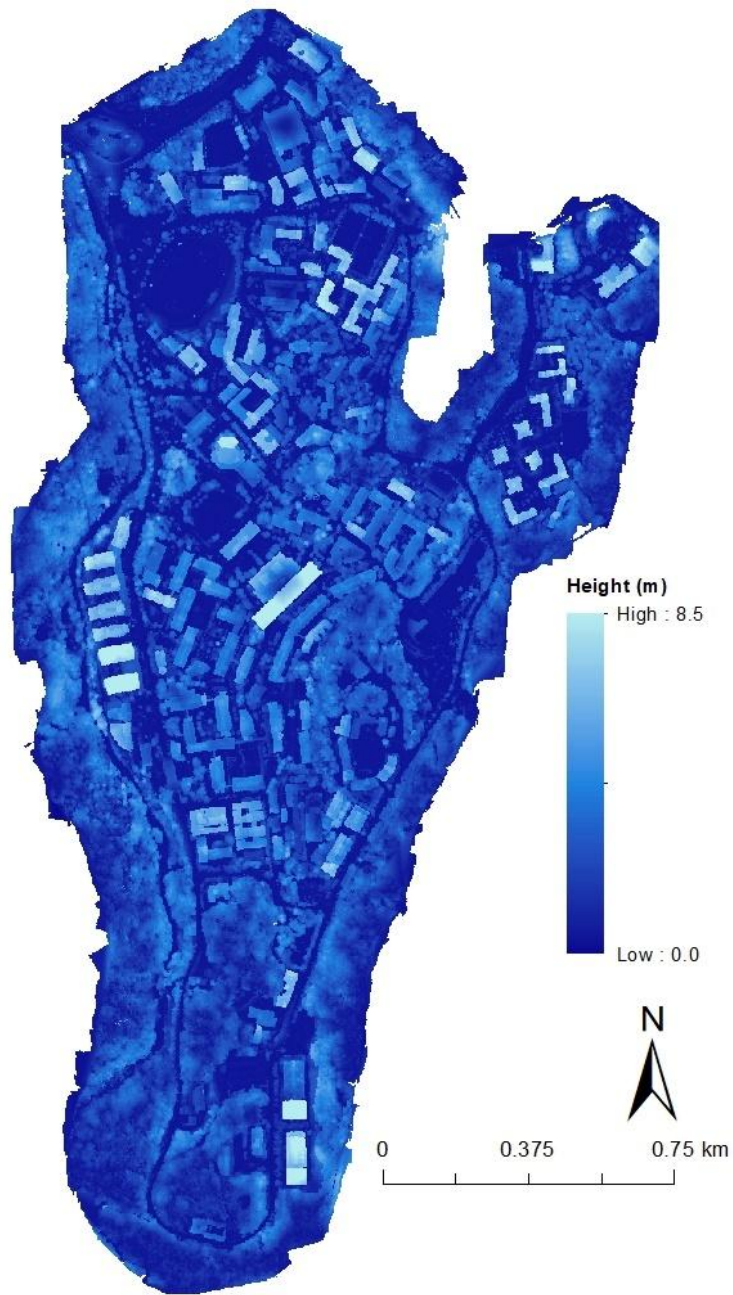


Fig. 4.7. Height from surface of the study area that is generated from point clouds. Cloth Simulation Filter (CSF) is used to extract the terrain and the height.

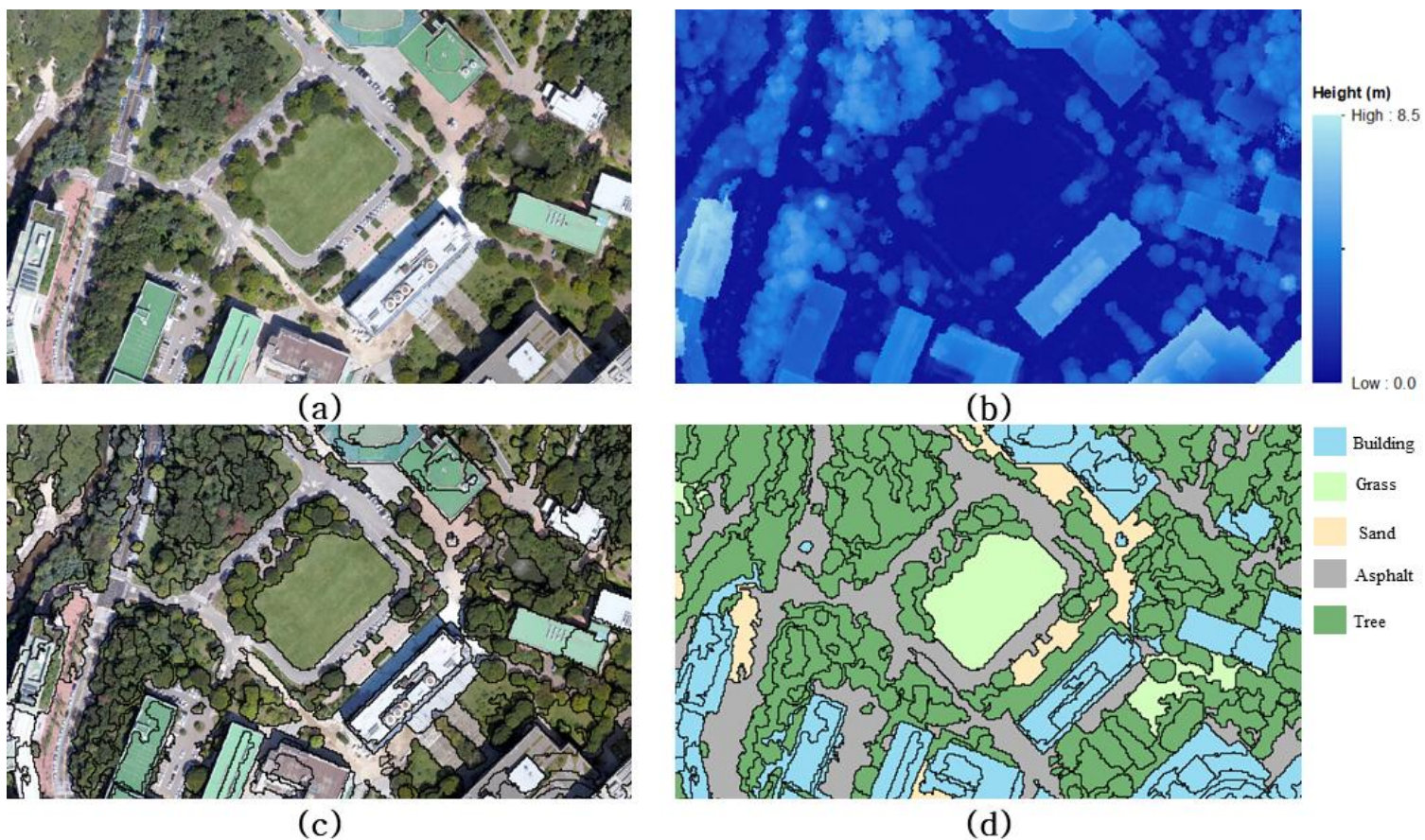


Fig. 4.8. The sample result of the object-based classification. (a) high-resolution orthogonal image, (b) height from surface, (c) result of segmentation, and (d) result of classification.

객체기반분류는 원격탐사 분야에서 많이 사용되는 방법으로 (Benz et al., 2004; Blaschke, 2010) 영상의 각각 픽셀이 아닌 비슷한 픽셀들의 모임인 객체(Object)를 분류의 대상으로 한다. 객체는 주로 분할(Segmentation)을 통해 만들어지며 실제 현실에서의 물체들과 비슷하게 나무, 도로, 건물 등이 각각의 객체로 나누어진다. 본 연구에서는 다중해상도 분할(Multi-resolution segmentation)을 통해 객체를 구성하였다. 이 방법은 고해상도의 영상을 분할하는데 적합하며 내부 변수에 따라 각 객체의 크기나 특징이 바뀔 수 있다. Fig. 4.8의 (c)에 연구 대상지 일부의 정사 영상과 분할 결과를 가시화하였다. 잔디, 나무, 건물 등이 각각의 객체를 구성하는 것을 확인할 수 있다.

분류는 Trimble사의 eCognition 소프트웨어를 사용하여 수행되었다. 해당 소프트웨어는 규칙기반 분류(Rule-based classification)를 수행할 수 있으며 이를 활용하면 여러 규칙을 기준으로 세부적인 분류를 수행할 수 있다. 기본적으로는 각 클래스의 훈련 자료로부터 표준 최근접 이웃(Standard nearest neighbor) 방법을 통해 분류한다. 훈련 자료는 연구 대상지에서 무작위로 선택되었다. 추가적인 규칙으로 지표에서 높이가 일정 값 이상일 경우 건물이나 나무로 분류하며 그 외의 클래스는 지표에서 높이가 낮을 경우에 할당하였다. 실제 분류를 수행할 때에는 건물 옥상의 색상에 따라 회색, 녹색, 흰색의 건물들을 각각의 클래스로 분류하고 후처리를 통해 하나의 클래스로 가공하였다. 결과 중 잘못 분류된 일부 영역과 아스팔트 클래스지만 지표에서 높이가 높은 다리와 같은 특수한 영역도 수동으로 수정되었다. 최종 분류 결과는 Fig. 4.9에 가시화하였으며 가시화를 위해 지표에서의 높이도 투명한 효과와 함께 표현되었다.

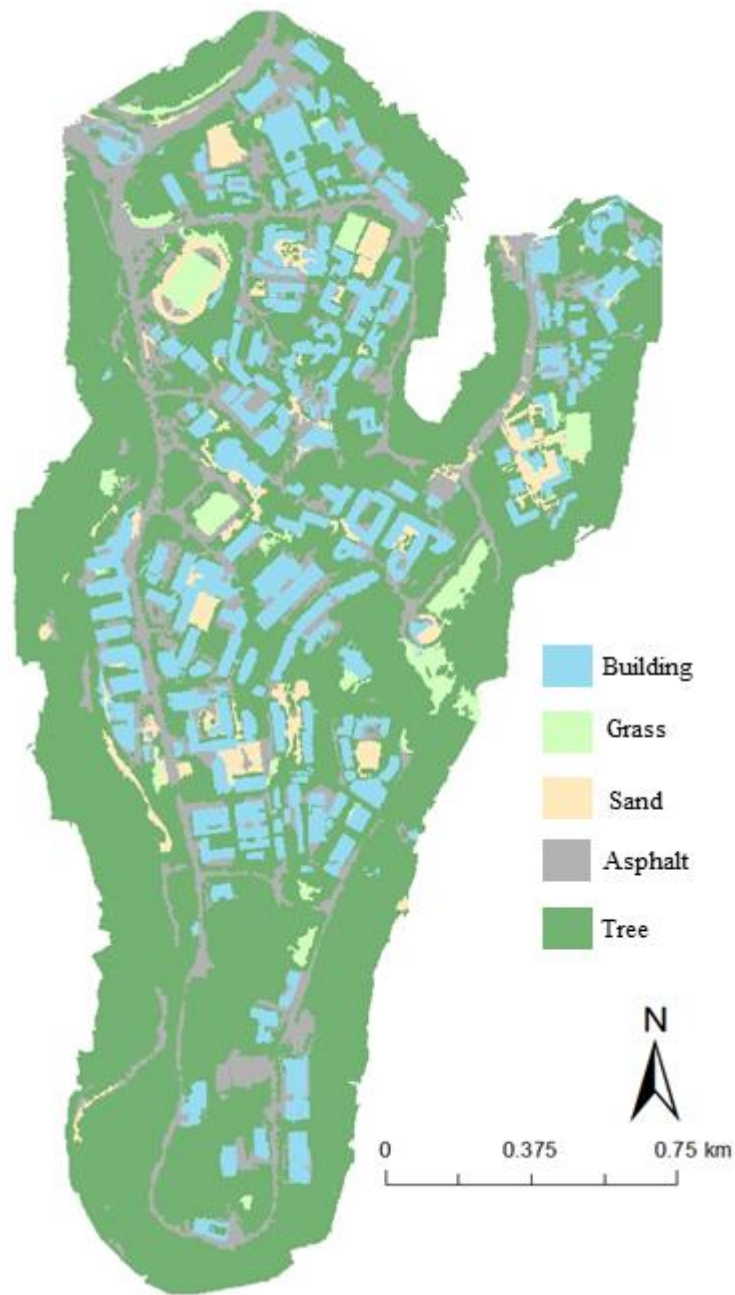


Fig. 4.9. The result of land use classification and height from the surface of the study area. Five classes are identified by object-based classification. Height from the surface layer is added as a transparent for visualization.





## 5. 대학 캠퍼스 태양광 잠재량 산정

연구 대상지의 최종 태양광 잠재량 분석은 개발된 알고리즘을 활용하는 대표적인 사례이며 그에 대한 방법과 실제 대상지의 잠재량 산정 결과를 포함한다. 태양광 지도는 에너지 밀도를 기준으로 계산되었으며 전체 연구 지역을 대상으로 제작되었다. 태양광 지도와 지형 등의 자료, 앞선 장에서 제작된 토지 이용 자료 등을 GIS 분석을 통해 가공하여 태양광 패널이 설치될 수 있는 영역을 추출하고 각 클래스에 따른 잠재량을 산정하였다. 이 후 잠재량의 민감성 분석 및 시간에 따른 변동성 분석을 수행하고 실제 발전량과 비교하여 검증을 수행하였다.

개발한 알고리즘은 기존 연구들의 단점을 보완하였기 때문에 상대적으로 다양한 분석을 수행할 수 있다. Table. 3.1에 따르면 기존 연구들 중 공간 분포 계산, 건물 측면 분석, 발전량 계산 등을 동시에 수행할 수 있는 연구는 없었다. 이를 한번에 수행함으로써 연구의 불필요한 절차를 줄이고 발전량 분포와 같은 통합 결과를 제작할 수 있었다. 또한 빠른 계산 알고리즘을 사용하여 수백만 개의 데이터로 이루어진 공간 자료를 손쉽게 계산할 수 있었으며 VIEWMAP을 사용하여 각 위치의 그림자 요소를 가시화할 수 있었다. 민감성 분석은 이러한 정확한 발전량 분포를 통해 수행되었으며 연구의 자유도가 큰 영향을 미칠 수 있는 분야이다.

### 5.1. 연구 대상지의 태양광 지도 제작 및 분석

연구 대상지의 태양광 지도는 개발된 도구를 사용하여 제작할 수 있으나 입력되는 변수에 따라 여러 형태의 결과가 존재한다. 본 연구에서는 현실적인 가정을 통해 하나의 지도를 제작하여 분석을

수행하였다. 사용된 변수들은 SAM 소프트웨어에서 제시하는 기본 값들이나 논리적인 배경에 근거한 수치들을 사용하였다. 값을 산정할 때에는 연구 대상지의 총 잠재량을 파악하는 것이기 때문에 가능한 경우를 모두 고려하며 선택이 가능한 변수에 대해서는 잠재량을 적게 예측하는 보수적인 관점에서 접근하였다. 태양광 지도에 사용된 계산 변수와 방법, 사용된 값은 Table. 5.1에 나타내었다.

Table. 5.1. Variables for calculation of solar energy mapping

Variables or methods for calculation	Values
Base year	2019
Calculation interval (hour)	0.2
SKYGRID azimuth resolution	60
SKYGRID zenith resolution	30
SKYGRID type	Equal-area-angle
Diffuse Model	Perez Model
Shadow calculation method	VBC (Pyramid)
Panel efficiency (%)	15
Inverter efficiency (%)	96
DC-AC ratio	1.2
Temperature coefficient(%/° C)	0.47
Other losses (%)	14
Degradation rate (%/y)	0.5
Solar panel tilt angle(° )	25

태양광 지도는 발전량을 계산하기 위해 일사량이 아닌 온도를 고려한 에너지 밀도의 형태로 제작하였다. 이 때 사용된 패널 온도는 외기 온도와 동일하게 사용하였다. 실제 패널의 온도를 계산하기 위해서는 외기 온도, 풍속, 태양광 패널의 공칭 태양전지 동작온도(NOCT, Nominal Operating Cell Temperature) 등에 대한 값이 필요하다. 풍속의 경우 대표기상연도에 포함되어 있지만 주변의 지형이나 사물에 따른 변화가 크며 이에 대한 고려가 없다면 오히려 큰 오차를 야기할 수 있다. 또한 본 연구의 목표는 구체적인 태양광 발전소 설비를 가정하지 않고 전반적인 잠재량을 평가하는 것이기 때문에 잠재량 계산에서의 변수를 최소화하였고 따라서 NOCT와 같은 변수는



고려하지 않았다. 이러한 변수를 제외하고 외기온도와 패널의 온도가 동일하다고 가정하여 계산을 수행하였다. NOCT의 경우 패널의 종류에 따라 일반적으로  $30-60^{\circ}$ 의 범위를 가진다.

태양광 패널의 효율은 패널의 종류나 공정에 따라 다르게 나타나며 일반적으로 사용되는 실리콘 태양광 패널의 경우 그 효율은 10%에서 20% 이상까지 다양하게 분포하며 이론적인 최대 효율은 약 29%가 된다. 실험실 환경에서는 26% (Yoshikawa et al., 2017)까지 보고가 되었으나 이 경우 일반적으로 사용되는 상용 제품과는 다른 구성으로 실용화가 되기 위해서는 더 많은 연구가 필요하다. 본 연구에서는 연구 대상지에 이미 설치된 태양광 패널의 효율이 15%에 가깝다는 점을 고려하여 보수적인 관점에서 15% 효율을 선정하여 사용하였다. 경제성과 유지 보수의 측면에서 회전하지 않는 고정형 태양광 패널만 고려하였다.

태양광 패널의 방향은 남향,  $25^{\circ}$ 로 결정되었으며 해당 값은 그림자가 없을 때 가장 높은 효율을 보이는 방향이다. 세계적인 규모로 진행된 여러 연구들에서 태양광 패널의 최적 설치 각도는 위도와 선형으로 비례한다고 알려져 있으며 (Jacobson and Jadhav, 2018) 국내에서도 이 결과와 비슷한 약  $30^{\circ}$  정도의 경사를 지닌 발전 시스템이 다수 설치되었다. 서울 지역의 대표기상연도 자료를 통한 계산을 통해 이보다 더 낮은 경사각을 최적 방향으로 선정하였다. Fig. 5.1에 각 태양광 패널의 방향에 따른 에너지 밀도를 가시화하였다. 실질적인 에너지 밀도의 차이는 방향이  $10^{\circ}$  정도 변화하였을 때에도 1% 미만의 차이를 보였기 때문에 크지 않을 것으로 예상된다.

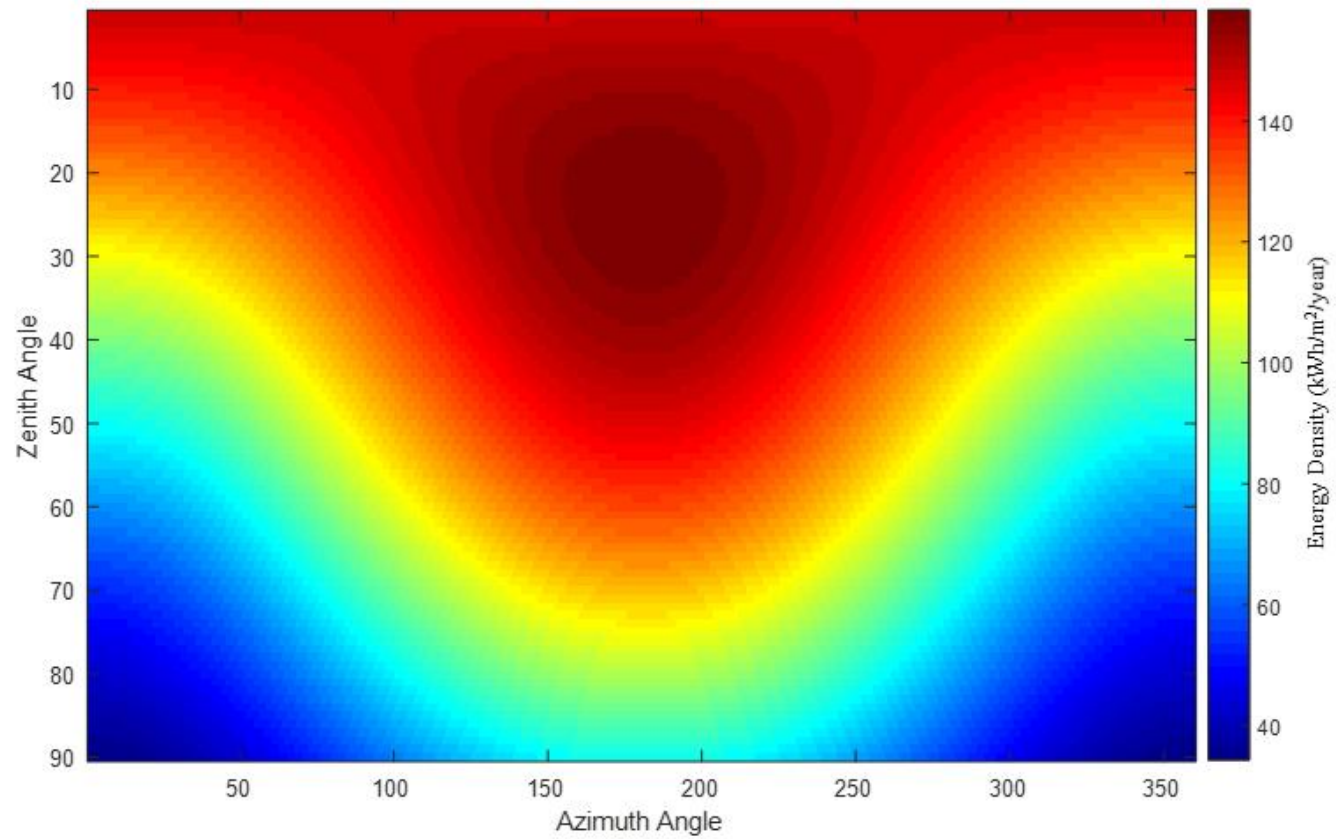


Fig. 5.1. Calculated energy density according to solar panel orientation

그림자 분석은 VBC를 사용하였으며 그렇기 때문에 2개의 다른 규모를 가진 자료를 사용할 수 있었다. 4장에서 소개된 바와 같이 본 연구에서는 주변의 건물과 나무 등에 의한 그림자를 분석할 고해상도의 DSM과 관악산과 같은 지형의 그림자를 분석할 저해상도의 DEM이 모두 사용되었으며 Fig. 5.2에서 그 예시를 확인할 수 있다. (a)부터 (c)까지는 고해상도의 DSM과 이를 통해 계산된 VIEWMAP을 나타내고 있다. (d)에서 (e)는 넓은 영역을 포함하는 DEM과 이를 통해 계산된 VIEWMAP을 나타낸다. 전자는 건물에 의한 그림자를 주로 계산하며 후자는 지형에 의한 그림자를 계산하게 된다. 동일한 위치에서 계산된 두 개의 VIEWMAP은 합쳐서 고려되며 1과 0으로 구분되어 있기 때문에 곱을 통해 손쉽게 계산할 수 있다.

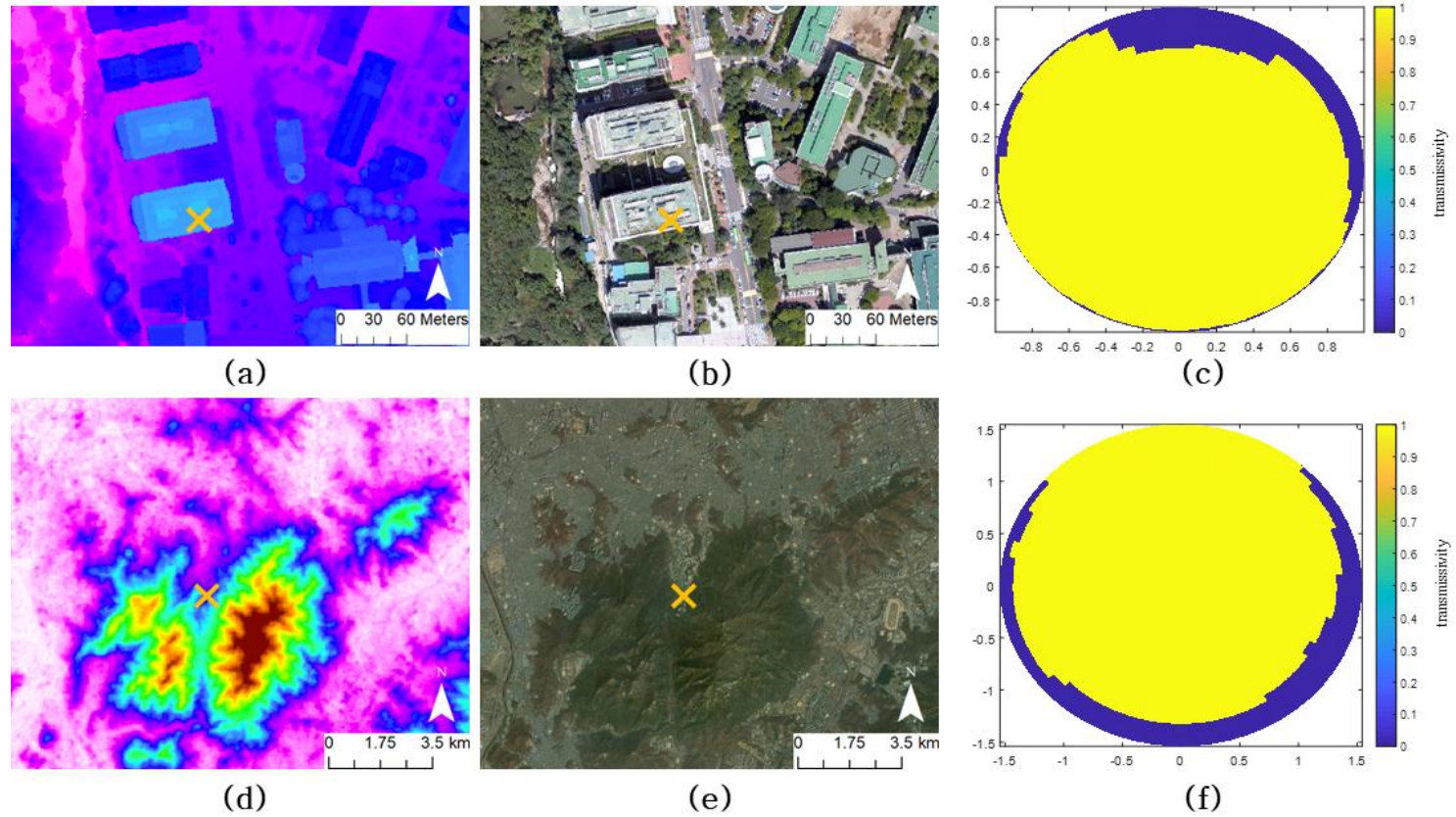


Fig. 5.2. Samples of VIEWMAP in detailed DSM and large DEM which shows (a) the elevation, (b) image, and (c) VIEWMAP from DSM and samples of VIEWMAP in large DEM which shows (d) the elevation, (e) image, and (f)

VIEWMAP from DEM.

계산된 에너지 밀도 지도는 Fig. 5.3에서 확인할 수 있다. 그림자가 생기지 않는 높은 지역에서 그 값이 높게 나타나며 따라서 건물 옥상이나 나무 클래스에서 높게 나타났다. 가장 높은 값은 약  $192 \text{ kWh/m}^2$ 로 나타났으며 이는 약  $3.45 \text{ kWh/m}^2$ 의 평균 일일 일사량일 때의 값이다. 계산된 에너지 밀도의 분포는 정규 분포보다는 높은 값에 편향된 형태로 나타났다. Fig. 5.4에 나타난 3차원 지도에서도 비슷한 경향을 확인할 수 있으며 건물 측면의 경우 산란일사량이 일부만 도달하기 때문에 최댓값이 평지보다 낮은 것을 확인할 수 있다. 그림자가 없는 경우에도 건물 측면은  $100 \text{ kWh/m}^2$  이하의 에너지 밀도를 보인다.

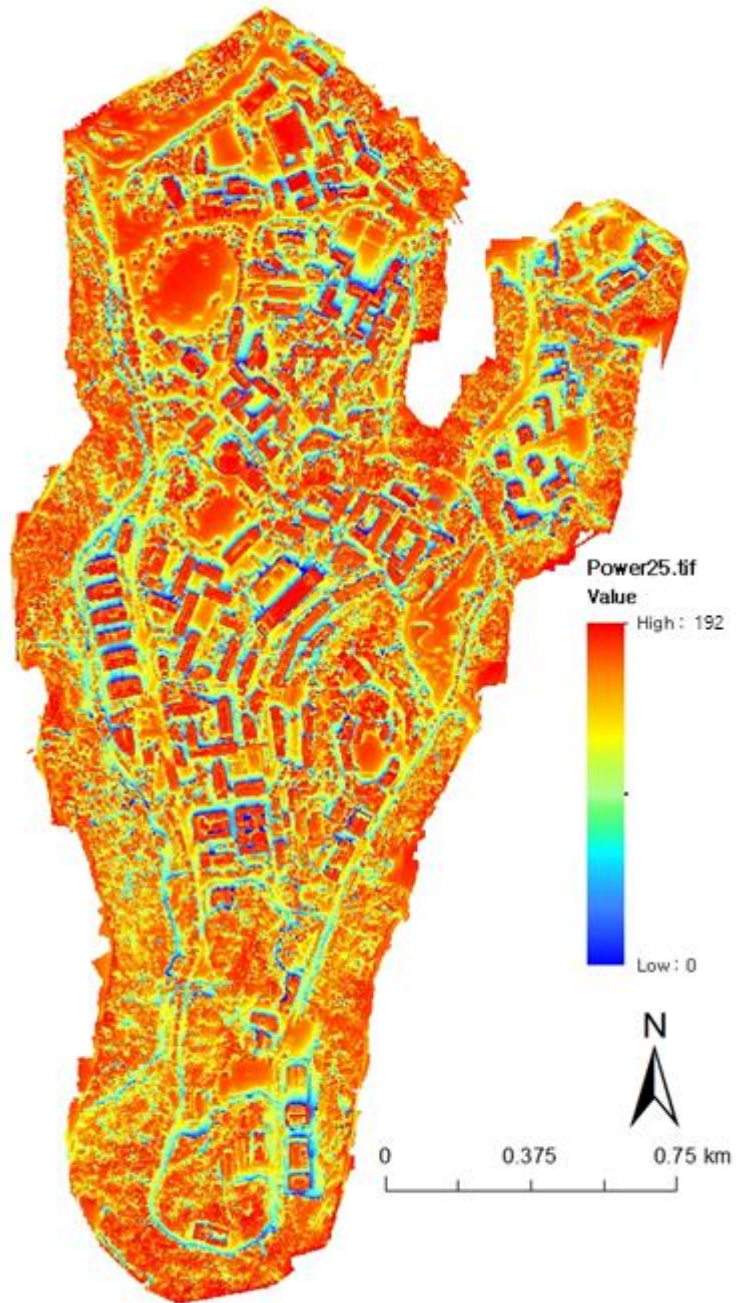
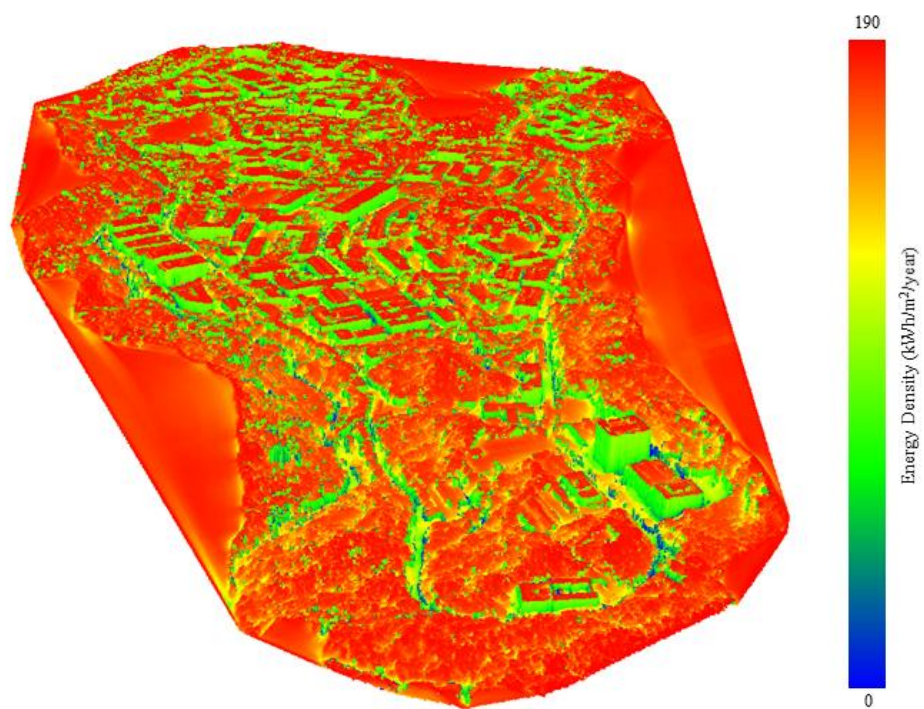


Fig. 5.3. Solar energy density of the study area calculated by developed tool, SNU Solar.





(b)

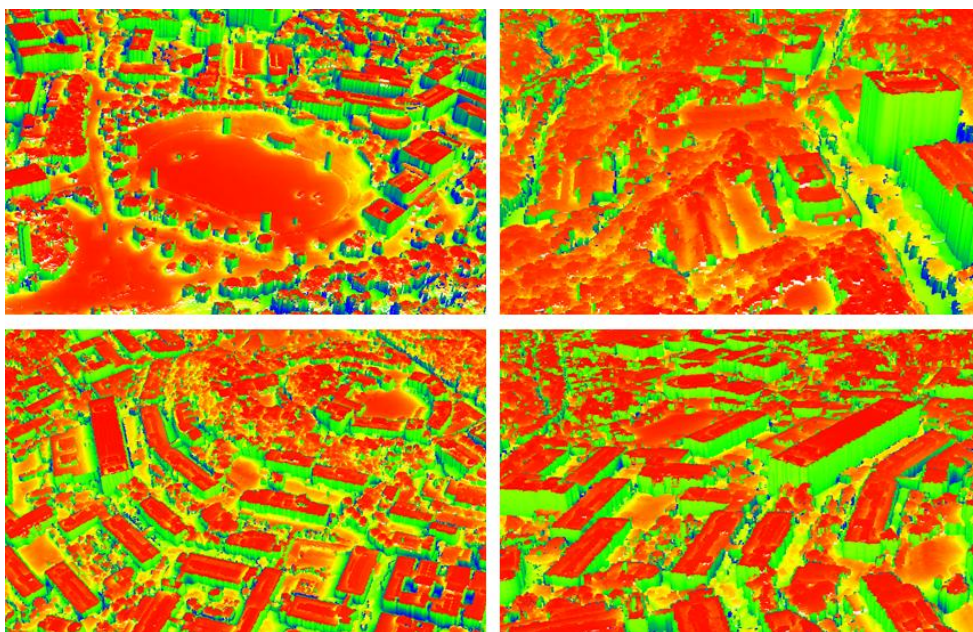


Fig. 5.4. 3D visualization of solar energy density of the study area;  
(a) the whole area and (b) the detailed view.



연구 대상지의 나무를 제외한 클래스에 따른 면적과 평균 일사량은 Fig. 5.5와 같다. 앞선 토지 이용에서 분류된 건물은 건물 옥상이 되며 3차원 분석에서 추출된 측면 중 건물로 분류된 픽셀 인근의 지역이 건물 측면으로 추출되었다. 산지에 건설된 시설의 특성 상 넓은 평야가 없기 때문에 나무를 제외한 클래스 중 면적이 가장 넓은 클래스는 건물 측면으로 나타났다. 이 후로 건물 옥상, 아스팔트, 잔디, 모래 클래스가 차례대로 넓은 면적을 가지고 있는 것으로 나타났다. 건물 측면의 경우 면적은 가장 넓지만 평균 에너지 밀도가 다른 클래스들에 비해 약 절반 정도로 낮은 것을 확인할 수 있으며 기존에 창문 등으로 사용되고 있는 경우가 많기 때문에 태양광 측면에서 높은 잠재량은 가지지 못할 것으로 예상된다. 평균 에너지 밀도는 건물 옥상이 가장 높으며 나머지 클래스들은 그보다 조금 낮은 값을 보였다. 아스팔트 클래스의 경우 면적은 넓지만 실제로 차량이 다니는 도로의 비율이 높기 때문에 이러한 점이 고려되어야 한다.

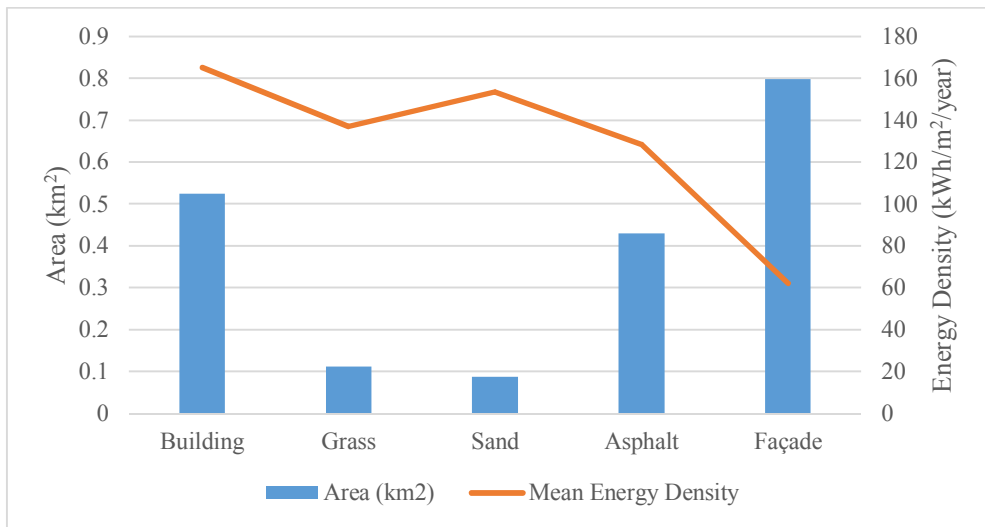


Fig. 5.5. Area and mean energy density according to land use

## 5.2. 공간 분석 및 잠재량 산정

공간 분석을 통해 에너지 밀도와 클래스에 따른 변수를 고려하여 태양광 잠재량을 산정한다. 전체 순서도는 Fig. 5.6에 나타내었다. 순서도에서 평행사변형 형태의 자료는 공간 자료를 의미하며 사각형은 일반 자료, 마름모 형태는 추출 기준을 의미한다. 기존 자료를 가공하여 공간적인 태양광 에너지 분포를 계산하며 이를 다른 공간 자료들과 함께 분석하여 클래스에 따른 태양광 발전소 설치 적정 부지를 추출한다. 해당 결과와 각 클래스에 따른 토지 이용도를 고려하여 최종 잠재량을 산정한다. 이 때 건물 측면에 대해서는 3차원 계산 결과를 바탕으로 분석을 수행하며 기존 2차원 GIS 분석과는 별개로 진행된다.

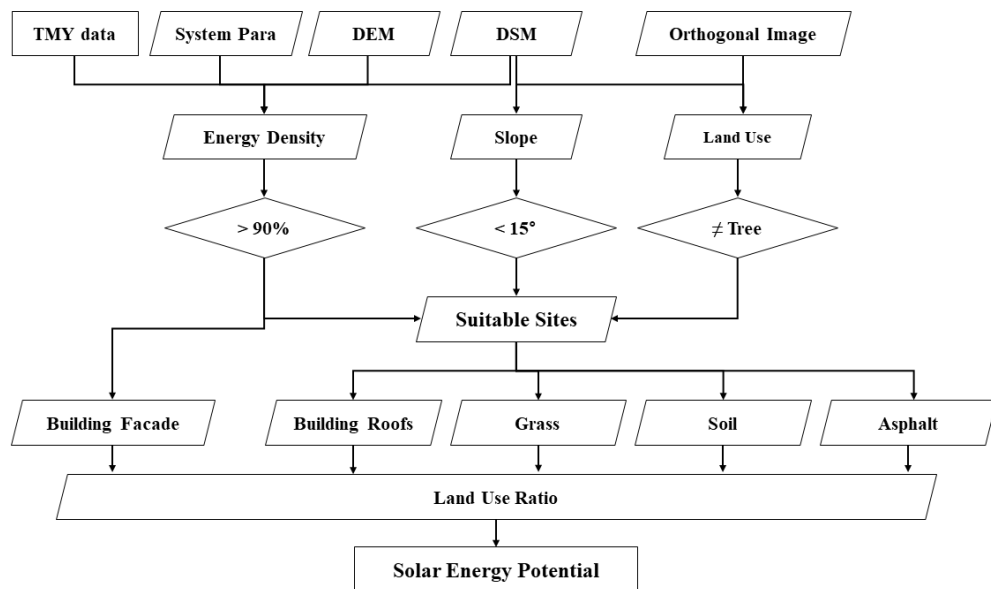


Fig. 5.6. Flowchart of the GIS analysis and potential estimation

에너지 밀도의 경우 그림자가 없는 최댓값을 기준으로 10% 이상의 그림자로 인한 손실이 있는 경우는 제외하였다. 실제 태양광 패널을 설치하기 위한 평가에서는 설치 비용, 전력 가격, 지원금 등 다양한 경제성 지표를 고려한 값이 사용되어야 하지만 본 연구에서는 시기에 따라 변화하는 이러한 경제성 지표를 제외한 값으로 지정하였다. 해당 값은 건물 측면에도 동일하게 적용하여 건물 측면의 에너지 밀도 중 최댓값을 기준으로 계산하였다. 건물 측면의 경우 태양광 패널의 방위각이 모두 다르기 때문에 이러한 요소를 고려하여 수직 패널의 최댓값 기준으로 10% 이상의 손실이 있는 영역을 제외하였다.

지면 경사가  $15^{\circ}$  를 넘는 경우는 태양광 발전 시스템을 설치할 수 없다고 가정하였다. 해당 수치는 환경부의 육상태양광발전사업 환경성 평가 협의 지침을 고려하여 결정되었다. 보수적인 관점에서는 더 낮은 값을 사용할 수도 있지만 기초 공사 등을 통해 보완이 가능하다는 측면에서 해당 값을 선정하였다. 건물 측면의 경우 수직으로 이루어져 있으며 DSM을 통한 경사 계산에서 매우 높은 값을 나타내는데 이는 별도로 추출하여 3차원 계산을 수행하였다. 이를 제외한 경우는 높은 경사에서 설치가 불가능하다고 가정하여 제외하였다. Fig. 5.7에 DSM을 통해 계산된 경사를 가시화하였다.

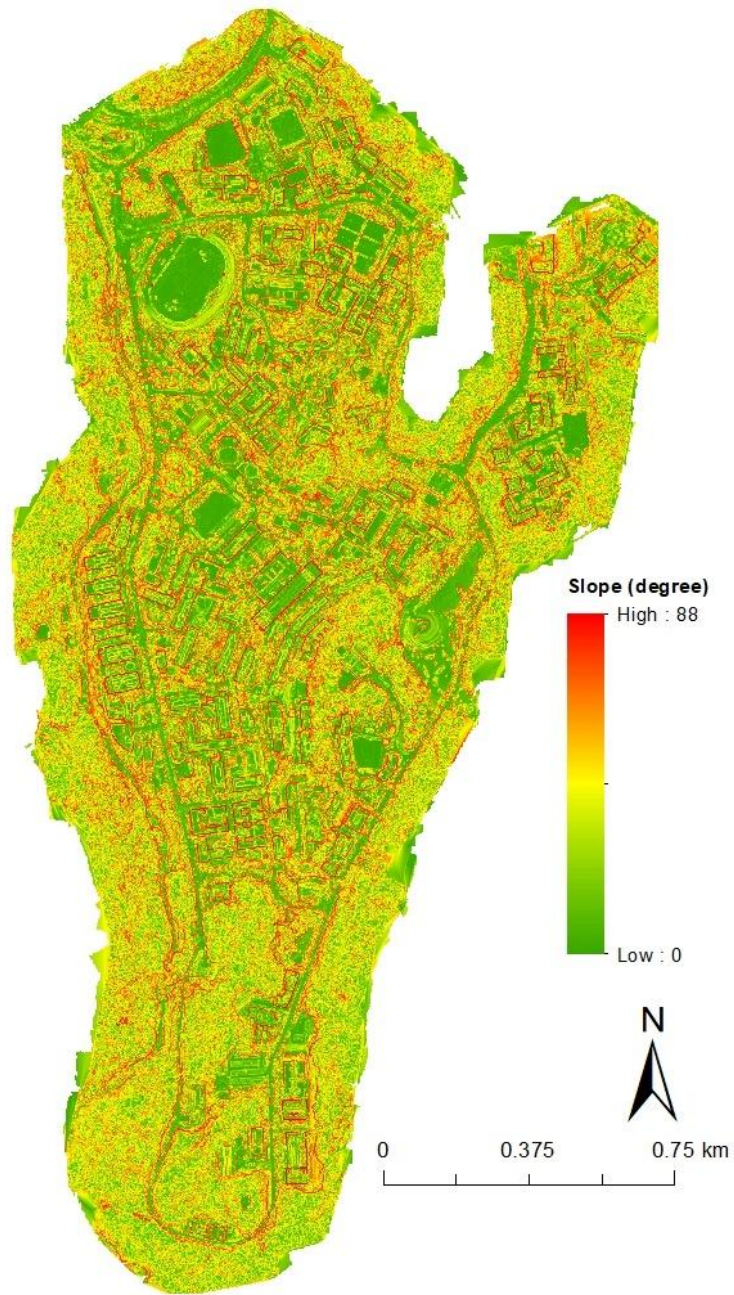


Fig. 5.7. Slope of the study area calculated from DSM.

발전소 건설 대상이 되는 토지이용은 건물 옥상, 아스팔트, 잔디, 모래, 건물 측면 5개이다. 공간 분석을 통해 선정된 클래스 별 설치 가능 부지와 일부 주요 부지들이 Fig. 5.8에 가시화되었다. 선정된 부지를 살펴보면 건물 옥상의 경우 대부분의 건물에서 일부 영역이 선정된 것을 확인할 수 있었으나 다른 클래스는 일부만 선정되었다. 하지만 건물의 경우도 각 옥상에서 일부 영역만 선택되어 적절하지 않은 면적이 많은 것을 확인할 수 있다. 잔디나 모래 클래스의 경우 운동장이나 테니스장이 주로 선택된 것을 확인할 수 있었으며 이 경우 실질적으로 태양광 발전소를 설치하기에는 적절하지 않다고 볼 수 있다. 아스팔트 클래스는 서북쪽의 넓은 도로와 남동쪽 주차장 부지가 주로 선정되었다. 서북쪽의 경우 정문 바깥을 포함하기 때문에 연구 대상지의 일부를 벗어날 뿐 아니라 도로 가운데이기 때문에 발전소 부지로 적절하지 않다. 남동쪽의 경우 현재 야외주차장으로 사용중이지만 차양 등을 통해 충분히 발전소로 활용이 가능하다.

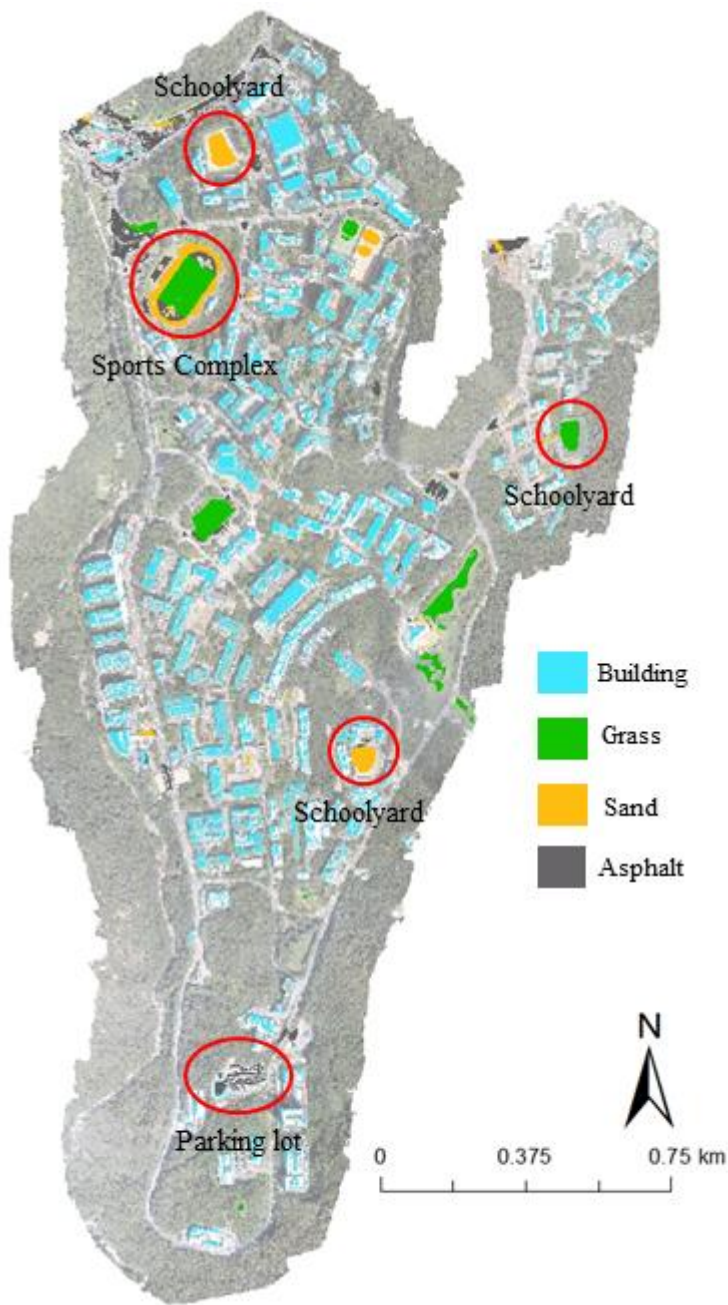
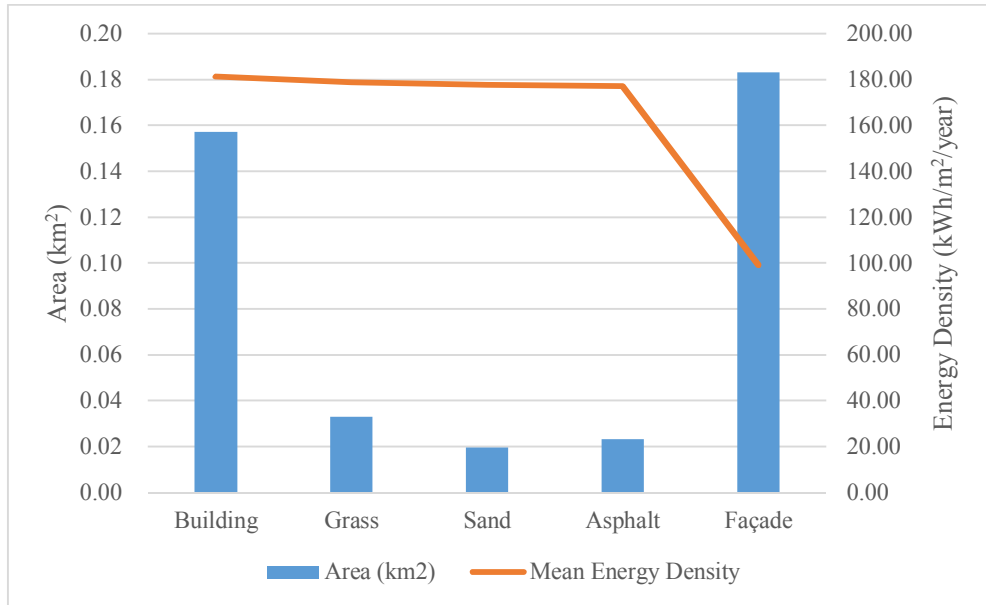
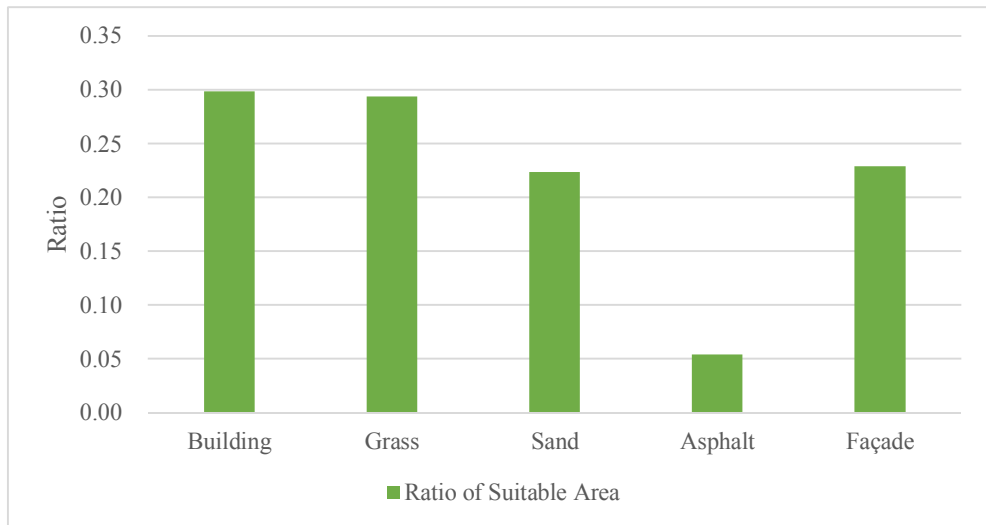


Fig. 5.8. The extracted suitable sites for PV power system in the study area according to the land use and key area indicator

선정된 설치 가능 부지의 토지 이용에 따른 면적과 평균 에너지 밀도는 Fig. 5.9 (a)에 가시화되었다. 전체 면적과 비슷하게 설치 가능 면적은 건물 측면에서 가장 높았으며 아스팔트의 경우 급격히 면적이 줄어들었다. 각 클래스의 선정된 부지는 전체 면적의 약 5~30%로 나타났으며 Fig. 5.9 (b)에 표현되었다. 건물 옥상의 경우 약 30% 정도의 면적이 설치 가능한 부지로 선정되었고 아스팔트의 경우 약 5% 정도로 대부분의 면적이 설치에 부적절한 것으로 계산되었다. 결과적으로 적합한 부지의 면적은 나무 영역을 제외한 전체 영역의 약 20%, 0.4 km<sup>2</sup>로 계산되었으며 이중 44% 정도가 건물 측면인 것으로 확인되었다. 에너지 밀도의 경우 최소 기준을 높게 잡았기 때문에 건물 측면을 제외한 클래스들이 비슷하게 나타났다. 건물 측면은 수직 경사면을 가지고 있기 때문에 낮은 값을 보였다.



(a)



(b)

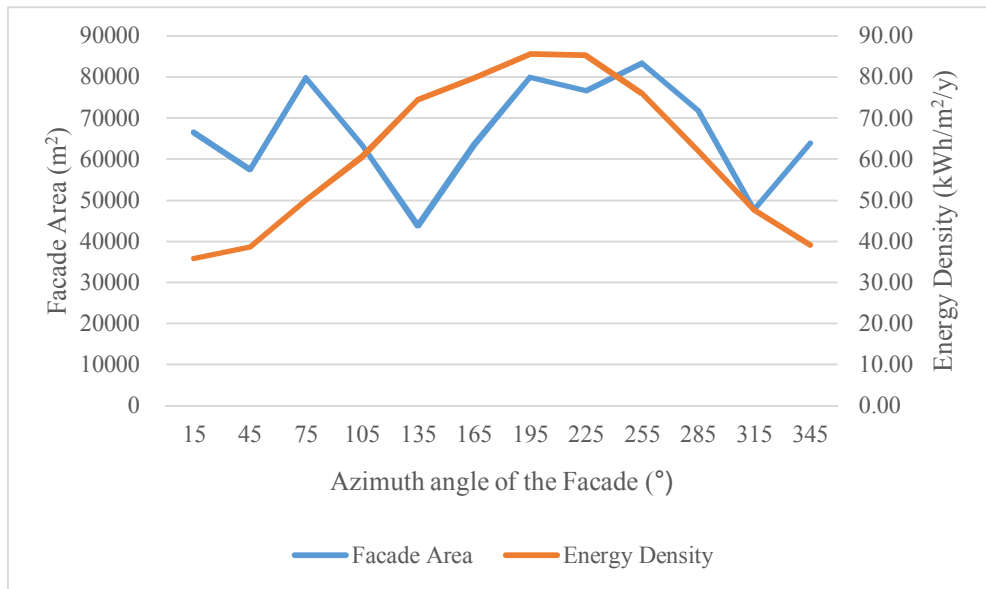
Fig. 5.9. (a) Area and mean energy density of suitable sites and (b) the ratio of suitable area and total area according to land use.



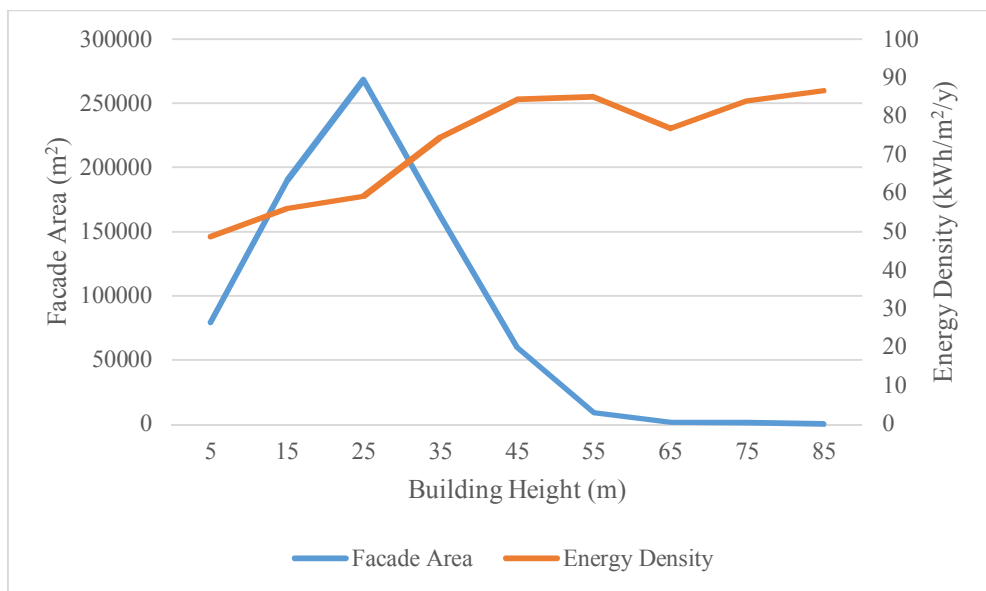


건물 측면은 2차원 GIS 분석에 적용하기 어렵기 때문에 3차원 점 구름을 기준으로 분석을 수행하였다. 전체 영역 중 약 20%의 영역이 최대 에너지 밀도 기준 10% 이하의 효율 감소가 있는 것으로 나타났다. 그림자 외 효율을 감소시키는 요소로는 건물 측면의 방향이 있으며 동일한 그림자 요소가 있는 경우 높이에 따라 그 범위가 바뀔 수 있다. Fig. 5.10 (a)에 건물 측면의 방위각에 따른 면적과 평균 에너지 밀도를 가시화했으며 (b)에는 건물 높이에 따른 값을 가시화하였다.

연구 대상지의 건물 측면은 남서쪽을 향하는 경우가 가장 많았으며 에너지 밀도는 남쪽이 가장 높고 멀어질수록 작아지는 형태를 보였다. 따라서 약 10% 이하의 효율을 보이는 방향은 남쪽에서 남서쪽 사이에 대부분 존재할 것으로 예상된다. 건물 높이의 경우 연구 대상지 대부분이 약 30m 부근에서 가장 많은 면적을 보였으며 이는 낮은 높이 부근이 나무에 막혀 계산되지 않았기 때문으로 분석된다. 에너지 밀도는 전반적으로 높이가 높아짐에 따라 높아지는 양상을 보이며 30m 이상의 영역이 주로 선택된 것으로 예상된다.



(a)



(b)

Fig. 5.10. (a) Façade area and energy density according to the azimuth angle of the façade and (b) those according to the building height.

선정된 부지와 실제 토지 이용을 고려하여 Table. 5.2와 같이 클래스에 따른 부지 이용률을 선정하였다. 보수적인 관점에서 선정된 영역 중 최소 20%는 다른 용도로 사용되거나 여유 공간으로 비우는 것으로 가정하였다. 건물 옥상의 경우 여유 공간을 제외한 전체 부지에 태양광 패널을 설치할 수 있다고 가정했으며 운동장 등의 이미 활용되고 있는 부지가 대부분인 잔디나 모래 클래스는 낮은 값을 할당하였다. 건물 측면의 경우 국토해양부의 건축물 에너지 절약을 위한 창호설계 가이드라인에 따라 최적의 창문 면적이 40%라고 가정하였다. 따라서 20%의 여유공간을 제외한 선정된 영역의 40%의 면적에 태양광 패널을 설치하는 것으로 결정하였다. 이러한 이용률은 절대적인 수치가 아니며 보수적인 관점에서 결정을 하였다.

Table. 5.2. Land use ratio according to classes

Class	Building	Grass	Sand	Asphalt	Façade
Land use ratio	0.8	0.1	0.05	0.2	0.4

계산된 에너지 밀도, 면적, 부지 이용률 등을 통해 각 토지 이용 클래스에 따른 설비 용량, 발전량, 설비 이용률을 계산하였고 이를 Table. 5.3과 Fig. 5.11에 가시화하였다. 면적과 달리 발전량은 건물 옥상에서 가장 높은 값을 보였으며 잔디, 모래, 아스팔트 클래스는 매우 낮은 값을 보였다. 전체 설비 용량은 약 23 MW, 발전량은 연간 22 GWh 계산되었으며 이는 2018년의 연구 대상지 에너지 사용량과 비교하면 약 11%에 해당하는 발전량이다. 건물 옥상은 전체 발전량의 약 60%를 차지하며 건물 측면을 제외한 나머지 영역들도 비슷한 에너지 밀도를 가지지만 설치 가능한 면적이 거의 없기 때문에 매우 낮은 비율을 차지한다. 건물 측면은 낮은 에너지 밀도로 인해 설비 용량에 비해 낮은 발전량을 보였다.

설비 이용률은 건물 측면은 약 8% 나머지는 약 14%를 보였다. 2019년 산업통상자원부의 보도해명자료에 따르면 2018년 태양광 설비 이용률은 약 15%로 나타났으며 본 연구 결과와 비슷하게 나타났다. 연구 대상지의 이용률이 평균적인 값보다 낮은 주요 이유는 서울 지역이 다른 지역보다 상대적으로 일사량이 낮기 때문이다. 하지만 실제 발전소 운영 시 유지, 보수 등의 이유로 이용률이 낮아진다는 점을 고려하면 실제 이용률이 더 낮을 것으로 예상된다. 건물 측면의 경우 약 절반 정도의 이용률을 보이기 때문에 실제 설치를 위해서는 다양한 측면에서의 고려가 필요할 것으로 보인다. 전체 영역을 고려했을 때 설비 이용률은 약 11%로 계산되었다.

Table. 5.3. Area and estimated solar potential of the study area according to land use

Class	Building	Grass	Sand	Asphalt	Facade	Total
Area (km <sup>2</sup> )	0.16	0.03	0.02	0.02	0.18	0.42
Nominal Power (MW)	11.31	0.30	0.09	0.42	10.99	23.11
Electricity Generation (GWh/y)	13.66	0.36	0.10	0.50	7.27	21.89
Capacity Factor (%)	13.79	13.60	13.51	13.47	7.56	10.81

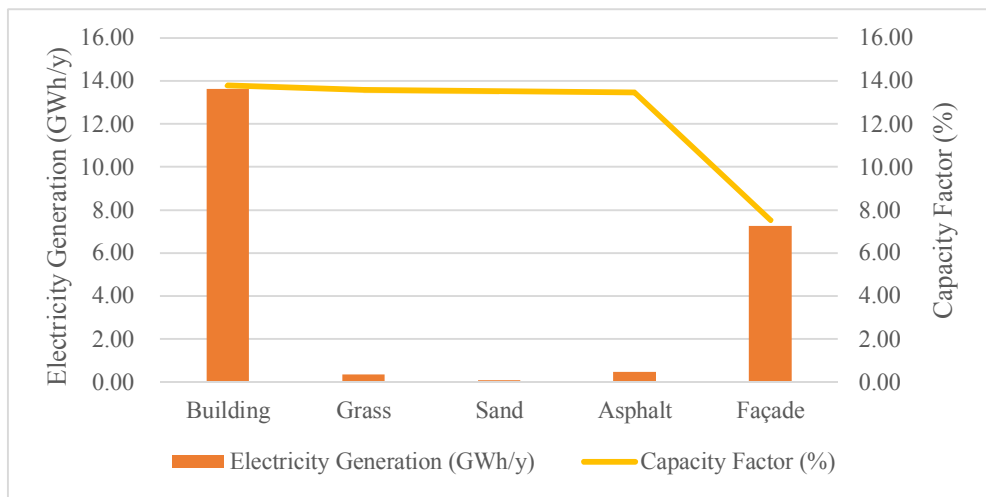


Fig. 5.11. Estimated electricity generation and capacity factor according to classes

### 5.3. 민감성 분석

앞선 절에서는 하나의 값을 연구 대상지의 태양광 잠재량으로 계산하였다. 그러나 이 잠재량은 입력 변수나 다른 요소에 의해 변화될 수 있기 때문에 그러한 민감성에 대한 분석을 수행할 필요가 있다. 특히 대부분의 변수들은 기술의 발전이나 경제성 평가 결과, 사회적 선택에 따라 결정될 수 있는 값으로 절대적인 정답이 존재하지 않기 때문에 이에 따라 결과가 충분히 바뀔 수 있다. 본 절에서는 태양광 패널 효율, 설치 가능 부지 기준, 토지 이용률, 태양광 패널의 방향, 성능 저하율을 중심으로 민감성 분석을 수행하였다.

태양광 패널 효율은 5.1에서 언급된 바와 같이 실리콘 태양 전지는 약 10%에서 26%, 실리콘이 아닌 다중접합 태양전지의 경우 45% 이상까지 실험실 환경에서 보고되었다(NREL, 2019). 본 연구에서 사용한 15% 효율은 1%p의 증가만으로도 전체 효율은 약 7% 정도 증가하게 된다. 따라서 기술의 발전이나 산업의 발전에 따라 설치되는 패널들의 평균 효율이 증가함에 따라 전체 잠재량도 크게 변화할 수 있다. Eqn 2.10~ Eqn 2.12를 고려하면 효율 증가에 따라 발전량은 선형으로 증가함을 확인할 수 있다. 다른 변수들을 그대로 유지한 채 패널 효율을 20%까지 증가시킨다면 전체 발전률은 33%가 증가하며 30%까지 증가시킨다면 100%가 증가한다. 현재 기술 수준에도 투자 비용을 증가시킨다면 충분히 20% 효율의 패널을 사용할 수 있으며 향후에는 더 높은 효율도 상용화될 수 있을 것이다.

본 연구의 설치 가능 부지는 에너지 밀도와 지면 경사를 기준으로 선정하였다. 이 중 에너지 밀도는 10%의 그림자 영향력을 기준으로 설치 가능지를 선정하였는데 기술이 발전함에 따라 이러한 기준은 점점 더 완화될 수 있다. Fig. 5.12에 그림자의 영향력에 따른 면적의 분포를 가시화하였다. 나무 클래스를 제외한 설치 대상 클래스에서의 면적만 계산한 결과이며 많은 영역이 그림자의 영향력이 적은 것을 확인할 수

있다. 그림자 10% 이내 영역은 전체의 약 40%인 것으로 나타났으며 이 기준이 완화되어 5%가 늘어난다면 50%의 영역이 가능한 영역이 된다. 그림자가 많아질수록 그 영역은 줄어들지만 10% 전후에서는 유의미한 영역 차이를 보이고 있기 때문에 이 값의 차이로 인한 발전량도 상당히 크게 나타난다. 경사면에 의한 비율이 동일하다고 가정하고 그림자 효과와 면적만 보게 된다면 10%기준으로 5%씩 기준을 완화한다면 차례대로 약 25, 17, 14, 11% 정도의 추가적인 발전량을 기대할 수 있다.

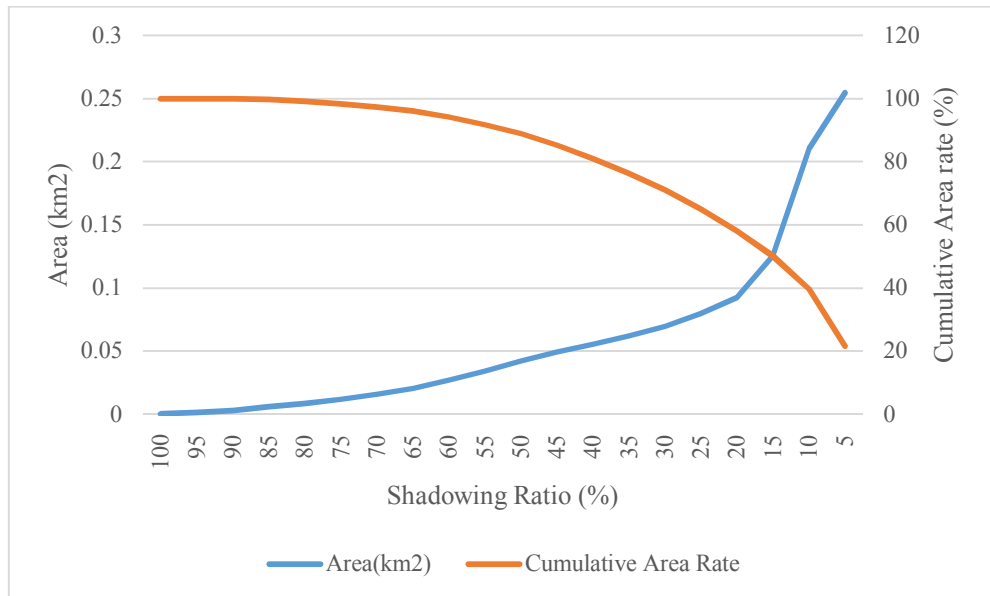


Fig. 5.12. Area and cumulative area rate according to shadowing ratio which is calculated by energy density. Area except for tree is considered.



토지 이용률은 설비 투자 비용, 사회적인 선택, 정책 등 다양한 요소로 인해 변화될 수 있으며 특히 연구 대상지와 같은 도심지는 복잡한 의사 결정 과정을 거쳐 결정되게 된다. 건물 옥상의 경우 옥상 정원과 같은 활용을 할 수도 있으며 이와 같이 새로운 방향의 정책이나 법률이 정해진다면 그 이용률이 변화되어야 한다. 본 연구에서는 건물 옥상의 적합한 30% 부지 중 80%를 선정하여 결과적으로 24%가 태양광 발전소로 운영되는 것을 가정하였다. 이는 앞선 그림자 영향력 기준과 연계된 내용이지만 그 결과 중 얼마나 많은 영역을 사용하는지가 결과에 영향을 미칠 수 있다. 기본적으로는 비율 연산이기 때문에 각 클래스에 따라 다르며 이용률이 아주 낮은 아스팔트와 같은 클래스에서 많은 영역을 사용한다면 결과값이 크게 변화될 수 있다. 모든 클래스의 가능한 면적 중 10%의 영역에 추가적인 발전 설비를 건설한다면 약 20% 정도의 발전량 증가가 이루어지며 각 클래스에 따른 비율은 면적과 비슷하게 계산된다.

토지 이용률과 별개로 클래스 영역의 변화를 고려할 수 있다. 특히 본 연구에서 고려하지 않은 나무 클래스의 영역에 태양광 발전소를 건설하게 된다면 이는 큰 변화를 야기한다. 나무 영역은 정사 영상에 나타난 부분만 고려해도 나머지 전체 클래스의 약 2배의 면적을 가지며 정사 영역 바깥에 영역에도 존재하기 때문에 가장 넓은 영역이다. 따라서 만약 일부 구간이라도 해당 지역을 벌목하거나 개발한다면 전체 잠재량에 큰 영향력을 끼친다. 다만 대부분의 지역은 산지이기 때문에 경사를 가지며 작은 영역은 주변 나무로 인한 그림자가 있기 때문에 이러한 점을 고려하여야 한다.

태양광 패널의 방향은 발전량에 영향을 미치며 본 연구에서는 최적화를 통해 가장 높은 에너지 밀도를 보이는 방향을 선정하였다. 경사각의 측면에서 이격 거리를 고려한다면 에너지 밀도가 높은 것과 최대 발전량은 다를 수 있다. 이는 GCR을 계산하여 고려할 수 있으며 Fig. 5.13 (a)에 태양광 패널의 경사각에 따른 에너지 밀도와 GCR을

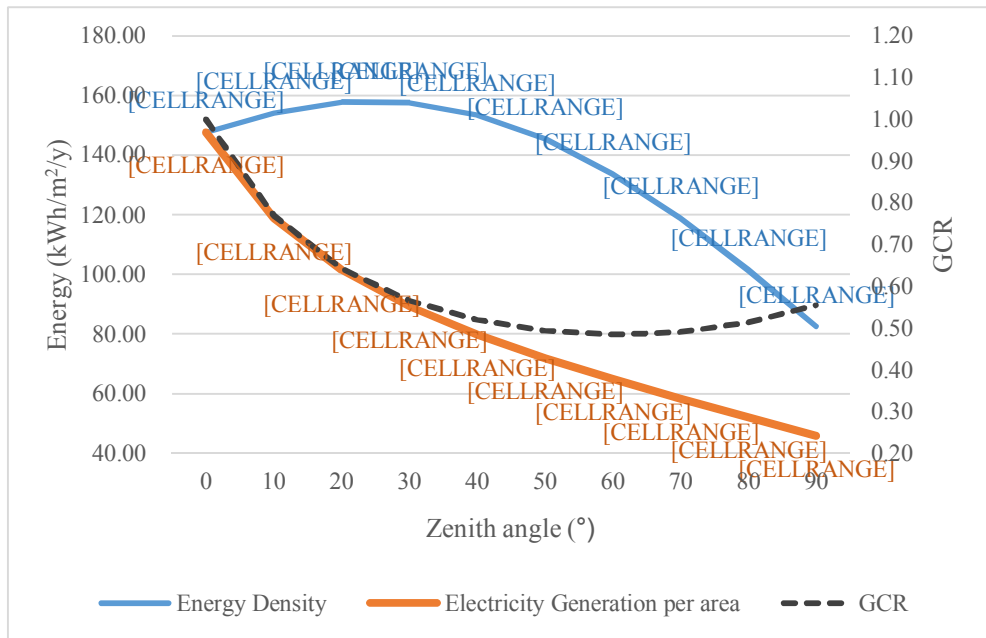
가시화하였으며 이 때 방위각은  $180^\circ$ 이다. 에너지 밀도는 약  $25^\circ$ 에서 가장 높은 값을 보이며 GCR은 경사각이 커짐에 따라 이격 거리가 필요하여 감소하게 되며 약  $60^\circ$ 를 기점으로 다시 증가하게 된다.

공간의 사용 효율 측면에서는 태양광 패널의 비율이 높을수록 유리하기 때문에 GCR이 높은 것이 좋지만 에너지 밀도가 낮다면 발전 효율이 감소하게 된다. 경제성의 관점에서 최대 효율을 내는 것은 경사각  $25^\circ$ 이지만 동일한 공간에서 최대 발전량을 내기 위해서는 GCR을 고려한 경사를 선택해야 한다. 이를 고려한 단위 면적당 발전량을 계산하여 Fig. 5.13 (a)에 함께 표현하였으며  $0^\circ$ 에서 가장 높은 값을 보이고 경사가 커짐에 따라 감소한다. 표시된 라벨은 정남향  $25^\circ$  경사의 태양광 패널과 비교했을 때의 비율을 뜻한다. 즉 수평 방향의 태양광 패널의 경우 에너지 밀도는 낮지만 이격 거리 없이 모든 공간을 활용하여 높은 단위 면적당 발전량을 보인다. 해당 그래프에  $25^\circ$ 를 기준으로 계산한 비율을 표시하였으며 이에 따르면 수직인 태양광 패널을 사용하면 약 7%의 효율 감소가 있지만 단위 면적당 60% 정도의 더 많은 에너지를 생산할 수 있다. 따라서 작은 면적의 발전량을 최대화 하기 위해서는 낮은 경사와 높은 GCR을 활용할 수 있다.

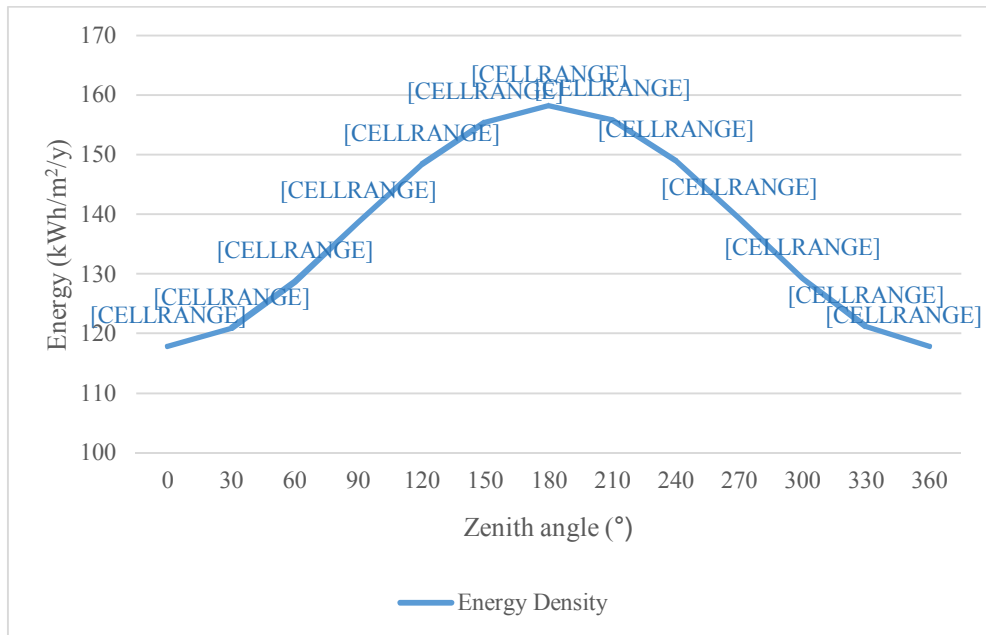
GCR을 고려한 계산에서 예외가 될 수 있는 상황이 몇 가지 있을 수 있다. 그 중 하나는 대상지의 면적이 좁아 하나의 태양광 어레이로 해당 지역이 모두 사용될 때이다. 이 경우 태양광 패널의 경사가 수평이 아니지만 GCR은 1이 된다. 경사진 영역을 활용하거나 계단과 같은 단차를 사용하게 되는 경우도 비슷한 결과가 나타난다. 특히 면적이 크지 않은 건물 옥상에서 이런 시스템을 설치할 수 있으며 GCR을 고려한 경우보다 단위 면적당 발생량이 크게 증가할 수 있다. 그러나 이러한 시스템 구성은 주변 환경이나 건설의 측면에서 접근해야 하기 때문에 본 연구에서는 고려하지 않았다.

방위각은 실제 현장의 상황에 따라 최적의 방향을 선택하지 못할 수 있다. 특히 건물 옥상의 경우 건물의 방향에 맞추는 것이 설치에

용이하며 구조에 따라 제약이 존재할 수도 있다. 따라서 현장 상황과 설치의 어려움, 설치 비용 등을 고려하여 패널 방위각을 결정할 필요가 있다. 방위각에 따른 에너지 밀도와 정남향 25° 경사각 패널과 비교하였을 때의 비율을 Fig. 5.13 (b)에 가시화하였다. 약 30° 정도의 방위각 변화는 2% 이내의 차이만 만들지만 60° 정도의 변화는 6% 정도의 차이를 만드는 것으로 나타났다. Fig. 5.10 (a)에 따르면 연구 대상지의 건물들은 약 200~250° 정도의 방위각을 가장 많이 보이는 것으로 나타나 이를 고려할 경우 5% 내외의 발전량 감소가 나타날 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5.13. Energy density according to solar panel orientation; (a) energy density and GCR with zenith angle and (b) energy density

with azimuth angle. The data labels represent the percentage of the energy density compared to southern  $25^\circ$  .

성능 저하율은 0.5%/y로 정의하였지만 잠재량 분석에는 사용하지 않았으며 검증에서만 사용되었다. 앞서 계산한 잠재량은 성능 저하가 고려되지 않은 최초 1년의 기대값이며 이후 설비의 수명이 지남에 따라 예상 발전량은 감소하게 된다. 사용된 값을 기준으로 10년 후 약 5%의 성능 감소가 있는 것으로 예상되지만 실제 설비의 수명은 그 유지, 관리에 따라 큰 차이가 날 수 있다. 과거 설치된 태양광 발전소 중 연 평균 2.8%p의 성능 저하율과 시간이 지날수록 감소율이 증가하는 사례도 있기 때문에 (김의환 외, 2011), 성능 저하율을 낮게 유지하기 위해서는 지속적인 유지, 관리 및 보수가 필요할 것으로 예상된다.

민감성 분석 결과 본 연구의 경우 변수에 따라 30% 이상도 발전량 편차가 발생할 수 있는 것으로 나타났으며 여러 변수를 고려하면 더 많은 편차도 발생할 수 있다. 현실적인 범위 내에서 잠재량의 편차가 크다는 의미는 많은 가능성을 가지고 있다는 의미이며 투자나 활용의 정도에 따라 잠재량의 큰 변화를 야기할 수 있다. 따라서 올바른 의사결정을 수행하기 위해서는 잠재량 뿐 아니라 연구의 목적이나 상황에 따라 변화하는 편차까지 고려해야 한다.

## 5.4. 시간에 따른 변동성 분석

태양광은 시공간에 따라 실시간으로 변하는 자원으로 잠재량을 파악하기 위해서는 그 변화량 또한 중요할 수 있다. 특히 밤낮으로 구분되어 발전량이 없는 시간이 존재하는 하루 중 변화나 계절에 따라 변화되는 1년의 특성은 비슷한 경향이 유지되기 때문에 발전소를 구성할 경우 필수적으로 고려되어야 한다. 전력은 공급이 수요에 맞춰져야 하기 때문에 이러한 시간 변동성은 전력망의 규모가 작을수록 더 중요하다. 연구 대상지의 경우 대학 캠퍼스를 중심으로 마이크로그리드가 구성된다면 수요와 발전량의 변동성이 매우 중요하다. 본 절에서는 하루 중 평균 변동성과 일년 중 평균 변동성을 연구 대상지의 전력 수요와 비교하여 분석하였다.

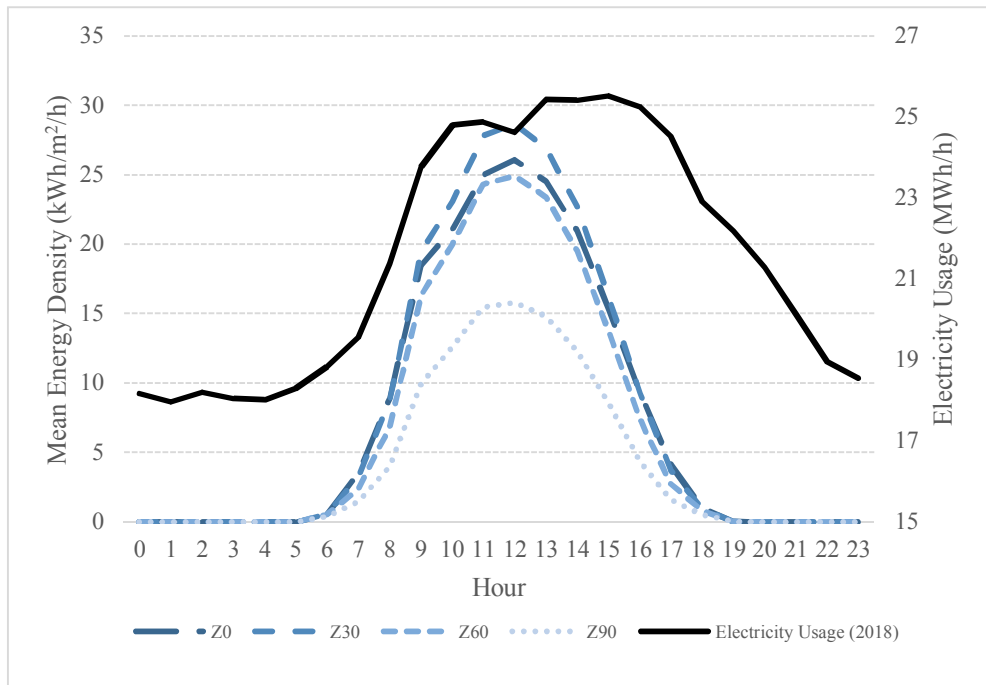
공간 분석에서 추출한 부지들은 그림자 효과가 10% 이하이기 때문에 클래스에 따른 발전량 변동성은 유의미한 차이가 나타나지 않았으며 건물 측면만 패널 경사에 따른 변동성을 보였다. 따라서 시간 변동성은 클래스에 따른 분석 보다는 태양광 패널의 방향에 따른 분석을 수행하였다. 먼저 패널의 방위각, 천정각 방향에 따른 하루 중 발전량의 변화와 전력 수요량을 Fig. 5.14에 가시화하였다. 방위각에 따른 변화를 계산할 때에는  $25^{\circ}$ 의 천정각이 사용됐으며 반대의 경우  $180^{\circ}$ 의 방위각이 사용되었다.

태양광 발전량을 전력 사용량과 비교해 보았을 때 둘 다 낮에 높은 값을 보인다는 점에서 수요 공급의 균형에 이점을 가지게 된다. 다만 전력 수요가 최대값이 되는 시간대와는 일부 차이가 있기 때문에 태양광을 중심으로 발전을 하게 될 경우 추가적인 소형 발전원이나 에너지 저장 시스템(ESS, Energy Storage System)이 필요하다. 이러한 설비가 없다면 최대 수요를 맞추기 위해 설비 용량을 증가시켜 일부 전력 손실을 감수해야 한다. 또한 전력 수요는 태양광이 발전되지 않는 밤에도 높은 값을 보이기 때문에 이에 대한 방안도 필요하다.

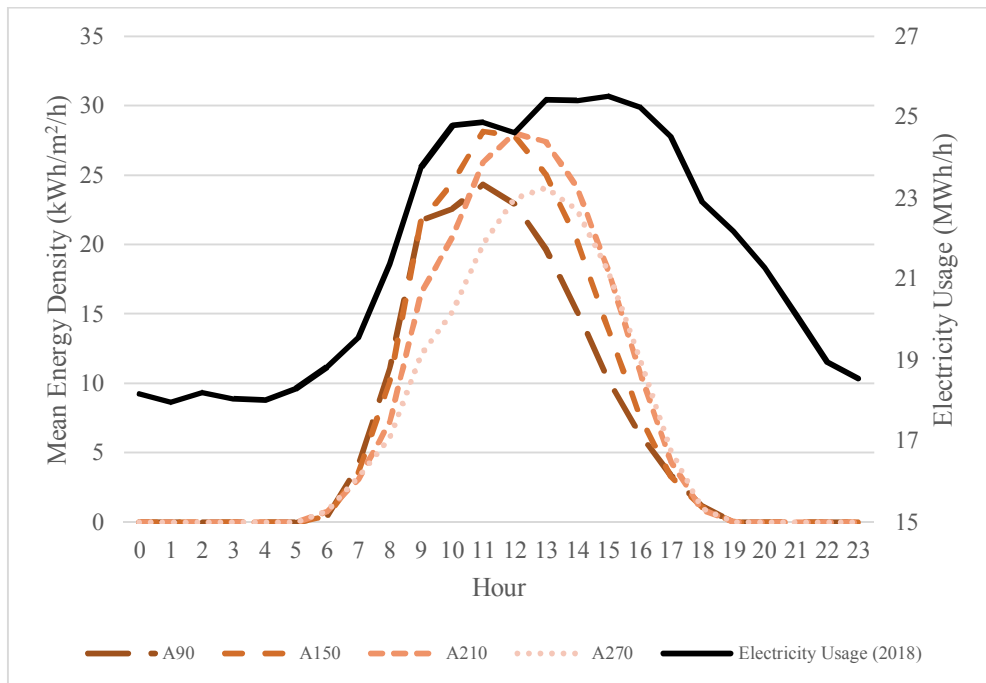
그러나 기저 발전이 있거나 대규모 전력망에 연결되는 경우 태양광은 낮 시간의 높은 수요량을 공급하는 것에 큰 도움이 될 수 있다. 본 연구에서 제시된 잠재량은 전체 수요량의 약 10%이기 때문에 이 정도의 범위에서는 수요 완화에 도움이 될 것으로 기대된다.

Fig. 5.14에서 (a)는 천정각에 따른 변동성 변화 (b)는 방위각에 따른 변화를 나타낸다. 전자에서는 발전량의 절대값 변화는 있지만 그 변동성 자체에는 변화가 거의 없는 것을 확인할 수 있으며 후자에서는 전체 발전량은 변화하지만 최대 발전량 시점이 변화하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 하루 동안의 변동성을 고려한다면 경사각은 거의 의미가 없으나 방위각은 전력 수요를 맞추어 변화시킨다면 유의미한 결과를 얻을 수 있다. 연구 대상지의 많은 남서 방향 건물 측면을 고려할 시 최대 발전량 시점을 늦추어 최대 전력 수요와 가까워지는 효과를 기대할 수 있다.





(a)



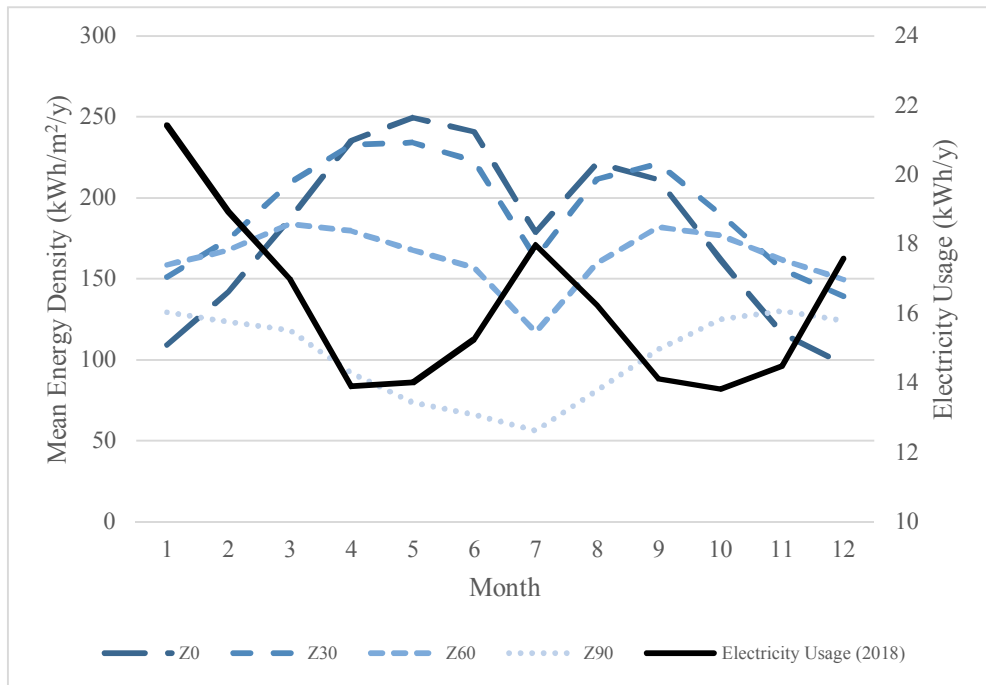
(b)

Fig. 5.14. Daily volatility of mean energy density and electricity usage of the study area according to (a) azimuth angle of solar

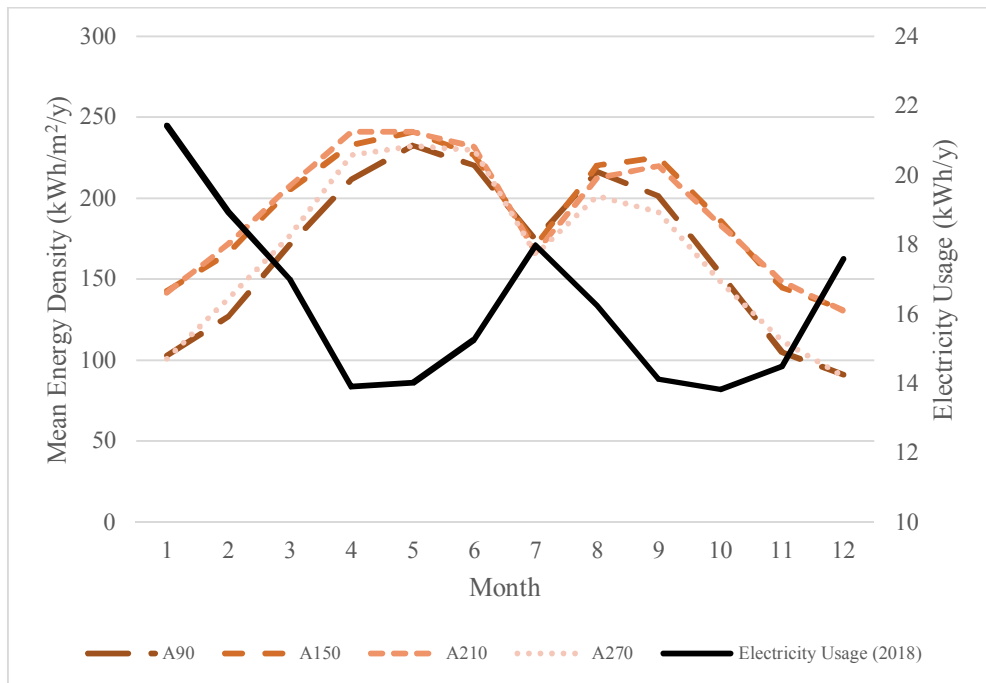
panel and (b) zenith angle of solar panel.  $Z$  and  $A$  in legend represent zenith and azimuth, respectively.

Fig. 5.15에 Fig. 5.14과 동일한 방법으로 연간 변동성을 계산하여 가시화하였다. 천정각  $25^\circ$  패널의 연간 변동성은 일간 변동성과 달리 전력 수요와 반대되는 패턴을 보인다. 전력 수요는 냉난방이 필요한 겨울과 여름철에 높게 나타나는데 태양광 발전량은 봄과 가을에 높기 때문에 장기적인 측면에서 공급과 수요가 맞지 않게 된다. 이를 ESS로 해결하기 위해서는 대형 시스템이 요구되며 일간 변화량과 달리 수 개월에 걸친 다량의 에너지 변동성 관리가 요구된다. 본 연구에서와 같이 10% 정도의 비율에서는 이러한 차이가 유의미하지 않을 수 있지만 태양광 발전소의 규모가 커지게 된다면 이를 극복하기 위한 방안이 필요하다.

천정각에 따른 변동성 변화와 방위각에 따른 변화도 앞선 일간 변동성과 반대의 결과를 나타낸다. Fig. 5.15에 따르면 방위각은 그 변동성에 큰 영향을 끼치지 않지만 천정각은 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 비록 전체 발전량이 감소되기는 하지만 천정각이 수직이 됨에 따라 월간 변동성이 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그러나 변동성 자체만 감소하며 전력 수요의 변화와 비슷해지는 효과는 나타나지 않았다. 건물 측면의 경우 경사각이 수직이기 때문에 연간 변동성은 다른 클래스에 비해 낮게 나타나며 이는 건물 측면의 비율이 높아질수록 변동성이 줄어드는 효과를 기대할 수 있다.



(a)



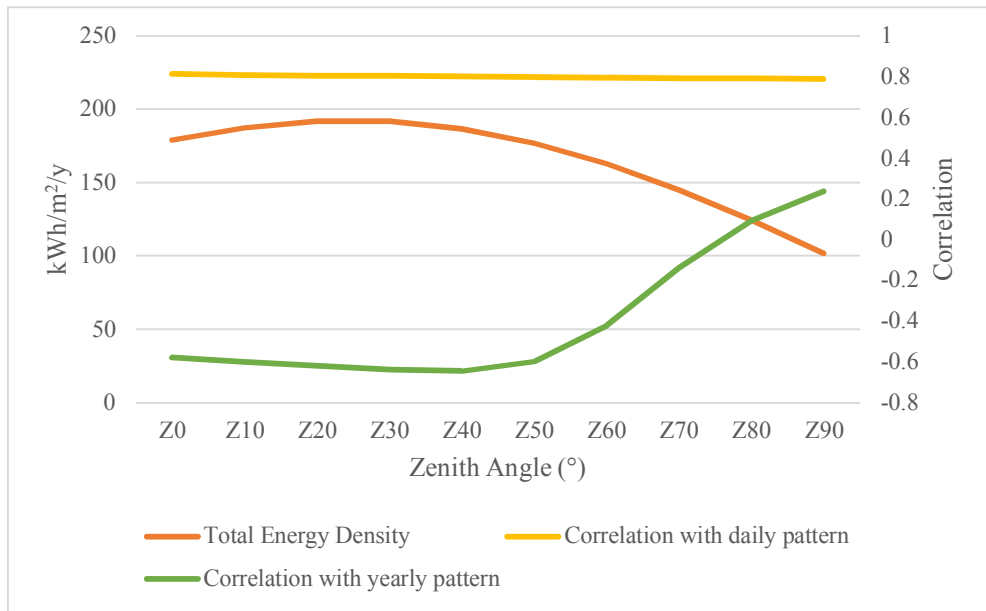
(b)

Fig. 5.15. Yearly volatility of mean energy density and electricity usage of the study area according to (a) azimuth angle of solar

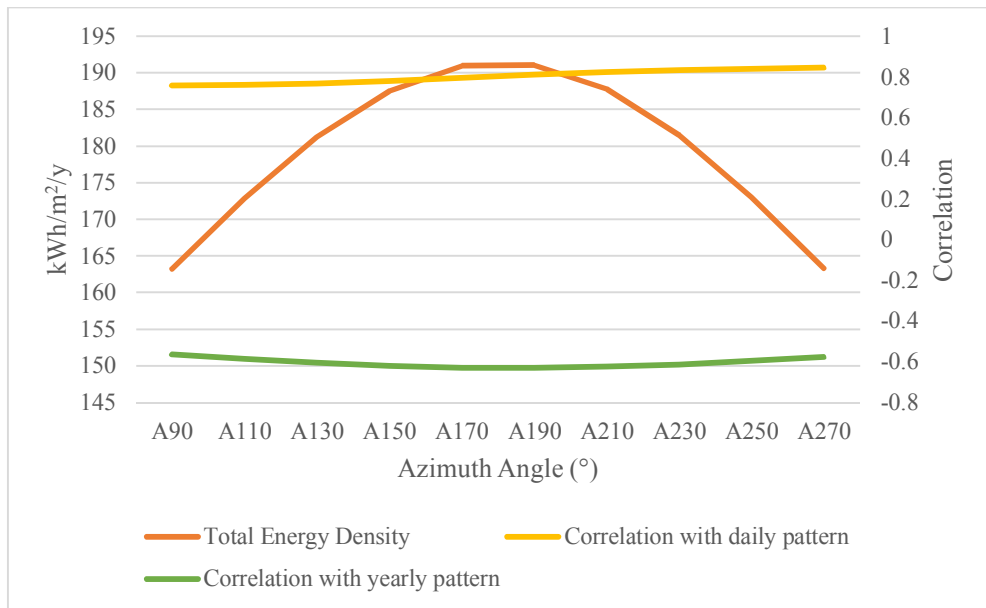
panel and (b) zenith angle of solar panel.  $Z$  and  $A$  in legend represent zenith and azimuth, respectively.

앞서 계산한 패널의 방향과 시간 변동성을 종합하여 패널의 방위각, 천정각에 따른 에너지 밀도와 상관성(Correlation)을 계산하여 Fig. 5.16에 나타내었다. 먼저 천정각을 보면  $25^{\circ}$  에서 최대 에너지 밀도를 보이며 일간 변동성은 높은 양의 상관관계, 연간 변동성은 음의 상관관계를 보인다. 다만 연간 변동성은 천정각이 높아짐에 따라 상관관계가 0에 가까워 지기 때문에 음의 상관관계를 보완할 수 있다. 실제 시스템을 구성할 때에는 이에 따른 에너지 밀도 감소를 고려할 필요가 있다.

방위각은 정남 방향에서 최대 에너지 밀도를 보이며 일간 변동성과 연간 변동성은 천정각과 거의 동일한 상관관계를 보인다. 차이는 방위각에 따른 상관관계는 거의 변화가 없다는 점이다. 일간 변동성의 경우 최대 전력 수요 시각과 시간차를 줄일 수 있으나 연구 대상지의 최대 전력 수요 시각이 낮 12시를 기준으로 전후에 한번씩 있기 때문에 상관관계는 유의미한 차이를 보이지 않았다. 그러나 오전의 최대 수요량 보다 오후가 더 높다는 측면에서 필요에 따라 최대 발전량 시각을 늦추는 선택이 필요할 수 있다.



(a)



(b)

Fig. 5.16. Total energy density and correlation according to (a) azimuth angle of solar panel and (b) zenith angle of solar panel. Z and A in legend represent zenith and azimuth, respectively.





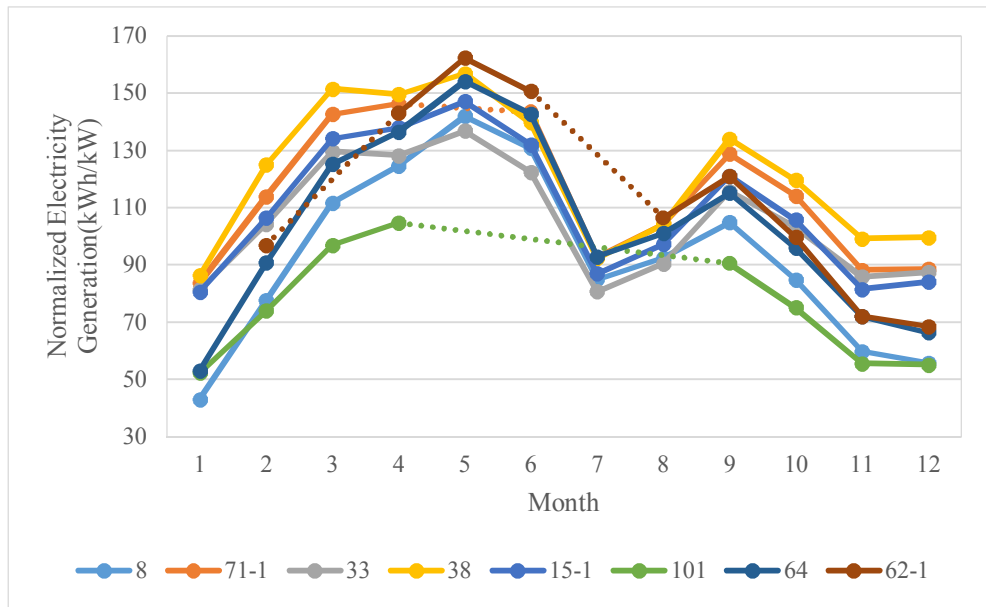
## 5.5. 측정 발전량을 통한 검증

연구 대상지 내 8개 건물의 태양광 발전소에서 측정된 월간 발전량을 Table. 5.4과 Fig. 5.17 (a)에 가시화하였다. 각 태양광 발전소의 위치는 Fig. 4.6에서 확인할 수 있으며 사용된 발전량은 실제 발전량을 사용하였다. Fig. 5.17 (a)에서는 각 발전소의 규모 차이를 고려하여 발전량을 발전 설비로 나누어 정규화 된 값을 사용했다. 각 발전소들은 동일한 지역 내에 있기 때문에 전체적으로 비슷한 변동성을 보였으나 패널 방향이나 시스템에 따라 일부 차이가 존재했다. 일부 발전소의 경우 자료의 유실이 존재했으며 특히 여름철에 자료의 유실율이 높은 것으로 나타났다. 101동의 경우 선정된 8개의 발전소 중 가장 많은 유실율을 보였으며 4개월의 자료가 유실되었다. 연구 대상지의 발전소들은 서로 다른 회사들에서 설치, 운영하였으며 유지, 보수, 관리가 잘 이루어지지 않았고 모니터링 시스템이 잘 구축되지 않아 이러한 문제점이 발생하였다.

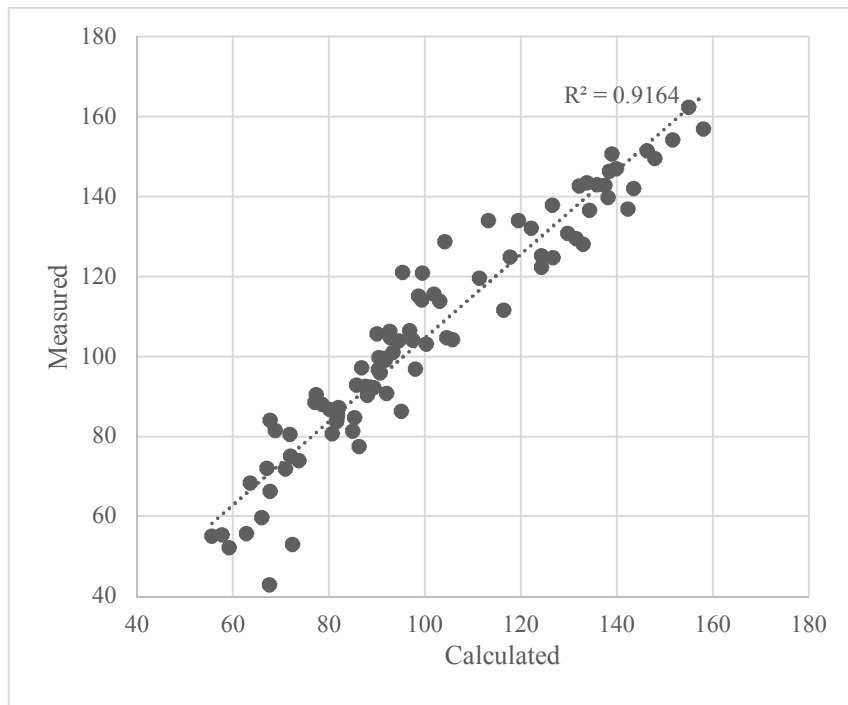
2017년의 실측 일사량을 기준으로 계산한 월별 발전량과 실측 발전량의 산점도를 Fig. 5.17 (b)에 나타내었다. 발전량과 계산값은 동일한 시간을 기준으로 계산되고 비교되었다. 가시화에는 정규화된 전체 발전소의 88개 월간 발전량 자료를 사용하였다. 사용된 변수는 기본적으로 앞선 잠재량 산정과 동일하나 설치 년도를 기준으로 성능저하율이 고려되었고 기타 손실률이 각 발전소에 따라 개별적으로 적용되었다. 기타 손실률은 5% 단위로 가장 높은 상관도를 보이는 값이 사용되었다. 산점도에서의 상관계수는 0.96, 결정계수( $R^2$ , coefficient of determination)는 0.92로 나타났다.

Table. 5.4. Monthly measured electricity generation according to each solar power system in the study area (kWh)

Building Number	Month												Mean
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
8	1,292	2,328	3,352	3,742	4,262	3,926	2,551	2,774	3,146	2,546	1,796	1,675	2,783
71-1	10,307	14,017	17,553	18,009	–	17,651	11,403	12,802	15,843	14,049	10,851	10,900	13,944
33	3,013	3,860	4,796	4,745	5,066	4,531	2,989	3,346	4,283	3,819	3,176	3,234	3,905
38	2,332	3,375	4,092	4,042	4,238	3,775	2,493	2,813	3,620	3,232	2,680	2,692	3,282
15-1	2,420	3,194	4,025	4,140	4,414	3,964	2,609	2,918	3,633	3,173	2,447	2,523	3,288
101	1,831	2,590	3,395	3,666	–	–	–	–	3,172	2,632	1,944	1,929	2,645
64	1,593	2,726	3,758	4,099	4,627	4,286	2,789	3,032	3,456	2,879	2,159	1,992	3,116
62-1	–	31,482	–	46,500	52,800	49,000	–	34,620	39,330	32,440	23,430	22,265	36,874



(a)



(b)

Fig. 5.17. (a) Monthly normalized measured electricity generation according to each solar power system in the study area and (b) the scatter plot of total 88 measured data and calculated data.

각각의 발전소에 대해 상관계수, 결정계수, rMBE, rRMSE, 평균 절대값 퍼센트 오차(MAPE, Mean Absolute Percentage Error) 5개의 정확도 인자들을 계산했으며 이를 Table. 5.5에 나타냈다. 상관계수와 결정계수는 각각 0.95, 0.90 이상의 높은 수치를 나타내는 것을 확인할 수 있다. rMBE의 경우 음의 편향이 다수 발생한 것으로 확인되나 이는 계산시 예측한 기타 손실률과 연관되어 크게 유의미하다고 보기는 어렵다. 평균 rRMSE는 약 10%, MAPE는 8%로 나타났으며 오차의 요인은 부정확한 시스템 구성에 대한 가정과 측정에서의 오차, 측정값 로깅에서의 오차 등이 있을 것으로 예상된다.

Table. 5.5. Accuracy indices of each installed power system

Building Number	CORR	$R^2$	rMBE(%)	rRMSE(%)	MAPE(%)
8	0.96	0.93	3.06	9.67	9.88
71-1	0.97	0.94	-9.39	10.54	9.36
33	0.97	0.95	-2.12	17.51	12.46
38	0.96	0.92	-0.85	4.94	3.75
15-1	0.98	0.96	-4.23	6.94	5.92
101	0.96	0.92	-11.73	12.57	12.15
64	0.97	0.94	-1.09	7.27	4.80
62-1	0.99	0.98	-2.22	8.03	7.04
mean	0.97	0.94	-8.24	9.26	8.34

## 5.6. 잠재량 정확도 분석

본 연구에서 산정한 대학 캠퍼스의 잠재량은 국가 단위의 대규모 일사량만 사용한 연구보다는 정확도가 높지만 구체적인 시스템 구상이나 경제성 평가가 이루어지는 프로젝트 보다는 정확도가 낮다. 이에 대해서는 연구의 목적이나 프로젝트의 수준 등에 따라 정해지는 변수와 결과의 기대 오차가 다르기 때문에 정확도가 높을수록 우수하다고 보기는 어렵다. 본 연구에서는 연구 대상지 전체의 기대 가능한 발전량을 계산하고자 하였고 그렇기 때문에 다양한 수준의 설비들이나 사회적 투자를 고려해야 했다. 이런 경우 태양광 패널을 특정한 모델로 결정하거나 특정 인버터를 선택하는 것은 유의미한 선택이라고 볼 수 없다. 따라서 본 연구에서는 일반적인 범위의 값을 고려한 뒤 민감성 분석을 수행하였고 이를 통해 전반적인 잠재량을 산정하였다.

향후 연구 대상지에서 구체적인 부지를 선정하여 실제 태양광 발전소를 설치하기 위한 연구를 수행하게 된다면 본 연구보다 더 구체적인 변수들과 분석을 수행할 필요가 있다. 기술적인 측면에서는 발전 시스템의 배선이나 모듈 어레이의 구성 등이 고려될 수 있으며 경제적인 측면에서는 순현재가치나 내부수익률 등이 분석될 수 있다. 이와 같이 잠재량 평가의 정확도가 높아지고 구체적이 될수록 사용되는 변수는 많아지며 시간에 따라 변화될 가능성이 높아진다. 현대 사회는 기술이나 경제성, 정책이 빠르게 변경되기 때문에 구체적인 분석은 수 년 내로 많은 변화가 있을 수 있다. 이러한 상세 연구는 현재 제작된 도구를 통해서도 수행되기 어렵기 때문에 향후에는 이러한 더 구체적인 분석도 수행할 수 있는 도구가 활용되기를 기대한다.

이 외에 본 도구에서 다루지 않은 오차 요소들이 몇가지 존재한다. 그 중 하나는 ESS로 발전량의 변동성이 큰 태양광 에너지는 이러한 에너지 저장소의 역할이 크다. 특히 마이크로그리드와 같은 독립형 전력망을 구성하기 위해서는 필수적으로 고려되어야 한다. 다만 이러한

ESS가 전체 잠재량에 영향을 미치기 위해서는 구체적인 경제성 평가가 수행되거나 외부 전원이거나 전력망에 대한 명확한 정의가 필요하다. 본 연구에서는 그러한 상황은 고려하지 않았기 때문에 ESS에 따른 잠재량의 변화량은 존재하지 않았다. 하지만 향후 태양광의 보급이 증가하고 발전원으로서 비율이 증가하게 된다면 고려되어야 할 것이다.

결과에 영향을 미칠 수 있는 요건 중 하나는 반사일사량이다. 일반적인 유틸리티 규모의 태양광 발전소는 여러 어레이가 연속적으로 분포하며 태양전지가 다른 태양광 패널의 뒷면을 향하기 때문에 전체 발전량에 큰 영향을 미치기 어렵다. 그러나 작은 영역에 설치되는 태양광 패널이나 건물 측면에 설치되는 경우 상대적으로 높은 반사일사량을 기대할 수 있다. 또한 최근 연구되고 있는 양면형(Bifacial) 태양광 패널의 경우도 반사일사량에 의한 발전량 증가가 기대될 수 있다. 이러한 요소들을 고려하기 위해서는 다양한 물체들의 반사율 데이터베이스가 구축되어야 하며 건물 측면 등을 고려하기 위해서는 측면의 재질도 고려되어야 한다. 향후 더 많은 데이터베이스와 정확한 3차원 자료가 구성된다면 이러한 반사일사량도 고려될 수 있을 것이다.

이 외에도 자료의 한계 등의 이유로 고려되지 못한 요소들이 존재한다. DSM의 경우 한 위치에 하나의 높이 자료만 존재하기 때문에 나무와 같은 버섯 형태의 자료는 제대로 표현할 수 없으며 따라서 본 연구에서도 그러한 형태에 따른 오차가 존재한다. 비슷한 이유로 투과율도 고려되기 어려우며 이러한 부분에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 예상된다. 대기 모델을 통한 풍향, 풍속 시뮬레이션은 향후 더 정확한 태양광 패널 온도 계산을 가능하게 할 것이며 연구 대상지에 새롭게 건설되는 건축물이나 시설을 고려하면 그에 따른 잠재량 변화도 분석 가능할 것이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 최초 4개의 연구 목표를 수립하였고 각각은 알고리즘 개발, 공간 분석 수행, 태양광 잠재량 계산, 잠재량 변화량 분석이다. 먼저 기존 방법들의 단점들을 보완하여 태양광 지도를 제작하고 잠재량을 평가할 수 있는 알고리즘을 개발하였다. 개발 결과와 새로운 공간 자료들을 바탕으로 연구 대상지의 공간 분석을 수행하였다. 공간 분석의 결과로서 논리적인 절차를 통해 연구 대상지의 종합 태양광 잠재량을 산정하였다. 최종적으로 민감성 분석과 시간 변동성 분석을 통해 변화량 분석을 수행하여 전체 연구 목표를 달성하였다.

태양광 발전량 계산 알고리즘은 5개의 기준을 만족하도록 구상되었으며 각각의 항목은 실측 자료 사용 및 그림자 분석, 고해상도 자료 분석, GIS 분석 호환, 3차원 분석, 발전 변수를 통한 시계열 계산이다. 개발된 알고리즘은 실측 자료나 대표 기상연도 자료를 활용할 수 있으며 여러 그림자 분석 알고리즘을 사용할 수 있다. 고해상도의 자료를 빠른 속도로 처리할 수 있으며 이를 통해 UAV와 같은 최신 기술이나 센서들을 활용하기에 유리하다. 건물 측면의 수직 태양광 패널을 고려할 수 있는 3차원 분석은 BIPV와 같은 시스템을 고려할 수 있으며 2차원 분석에서 고려하지 못한 영역의 잠재량을 파악할 수 있다. 일사량이나 에너지 밀도의 공간 분포 결과물은 GIS 분석을 수행할 수 있으며 다른 분석 소프트웨어들과 쉽게 연계가 가능하다. 시간 단위의 계산과 월 단위의 계산을 수행할 수 있으며 이는 시공간에 따라 그 잠재량이 변화하는 태양광 에너지 시스템 운용에 도움을 줄 수 있다.

도구 형태로 제작된 알고리즘은 다양한 분야에서 사용될 수 있으며 GUI로 구성되어 있기 때문에 비전문가도 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구와 같이 연구 대상지의 태양광 에너지의 분포를 파악할 수 있으며 여러 입력 변수에 따른 변화를 계산할 수 있다. 이를 활용하여 연구 대상지의 최적 태양광 발전소 위치를 선정하거나 여러

위치를 비교, 해당 지역의 설치 가능한 면적 계산 등도 수행할 수 있다. 이는 에너지 계획을 수립할 때 초기 탐사의 역할로 사용될 수 있으며 계획을 보완하거나 유지, 보수 시에도 활용될 수 있다. 공간 자료를 고려할 수 있다는 점에서 연구 대상지의 도시 계획, 계절적 순환 등을 고려한 시공간 분석도 수행할 수 있다. 특히 빠른 계산 속도를 활용하여 광역 지역의 고해상도 자료도 효과적으로 활용할 수 있기 때문에 많은 활용이 가능할 것으로 기대된다.

대학 캠퍼스의 잠재량 분석은 개발된 알고리즘의 효과적인 활용을 나타내며 민감성 분석, 시간 변동성 분석 등 기존 광역 공간 분석에서 다루지 않은 요소들을 다루었다. 본 연구는 단순히 연구 목표를 수행하는 것 뿐 아니라 향후 더 복잡한 요소들을 고려하기 위한 기초의 역할을 수행할 수 있을 것으로 생각된다. 알고리즘의 기본적인 구조를 유지한 채 몇가지 추가적인 변수들을 고려하거나 새로운 자료 구조에 활용할 수 있으며 이를 통해 새로운 연구 분야를 개척할 수 있다. 특히 반사 일사량이나 DSM의 한계와 같이 잠재량의 정확도에 영향을 미치는 추가 요소들을 고려하기 위한 연구로 활용될 수 있다. 향후에는 본 연구 결과를 바탕으로 이러한 여러 요소들을 분석할 수 있는 알고리즘이나 방법에 대한 연구가 이루어질 수 있을 것으로 기대된다.



## 참고 문헌

Adelson, E.H., Anderson, C.H., Bergen, J.R., Burt, P.J., Ogden, J.M., 1984. Pyramid methods in image processing. *RCAEn* 29(6), 33–41.

Benz, U.C., Hofmann, P., Willhauck, G., Lingenfelder, I., Heynen, M., 2004. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. *Isprs J Photogramm* 58(3–4), 239–258.

Blaschke, T., 2010. Object based image analysis for remote sensing. *Isprs J Photogramm* 65(1), 2–16.

Brito, M.C., Freitas, S., Guimaraes, S., Catita, C., Redweik, P., 2017. The importance of facades for the solar PV potential of a Mediterranean city using LiDAR data. *Renew Energ* 111, 85–94.

Catita, C., Redweik, P., Pereira, J., Brito, M.C., 2014. Extending solar potential analysis in buildings to vertical facades. *Comput Geosci-Uk* 66, 1–12.

Chatzipoulka, C., Compagnon, R., Nikolopoulou, M., 2016. Urban geometry and solar availability on facades and ground of real urban forms: using London as a case study. *Sol Energy* 138, 53–66.

Choi, Y., Suh, J., Kim, S.M., 2019. GIS-Based Solar Radiation Mapping, Site Evaluation, and Potential Assessment: A Review. *Appl Sci-Basel* 9(9).

Compagnon, R., 2004. Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energ Buildings* 36(4), 321–328.

Dobos, A.P., 2014. PVWatts Version 5 Manual. ; National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), p. Medium: ED; Size: 20 pp.

Dubayah, R., Rich, P.M., 1995. Topographic Solar-Radiation Models for Gis. *INT J GEOGR INF SCI* 9(4), 405–419.

Duffie, J.A., Beckman, W.A., 1991. Solar engineering of thermal processes. Wiley, New York.

Eissa, Y., Marpu, P.R., Gherboudj, I., Ghedira, H., Ouarda, T.B.M.J.,

Chiesa, M., 2013. Artificial neural network based model for retrieval of the direct normal, diffuse horizontal and global horizontal irradiances using SEVIRI images. *Sol Energy* 89, 1–16.

Fraunhofer, 2019. PHOTOVOLTAICS REPORT. Fraunhofer, Freiburg, Germany.

Freitas, S., Catita, C., Redweik, P., Brito, M.C., 2015. Modelling solar potential in the urban environment: State-of-the-art review. *Renew Sust Energ Rev* 41, 915–931.

Fu, P., Rich, P., 1999. Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation at landscape scales. *Proceedings of the 19th annual ESRI user conference*.

Gorički, M., Poslončec–Petrić, V., Frangeš, S., Bačić, Ž., 2017. ANALYSIS OF SOLAR POTENTIAL OF ROOFS BASED ON DIGITAL TERRAIN MODEL. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLII–4/W3, 37–41.

Hofierka J, S.M., 2002. The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. *Open source GIS – GRASS users conference*, 11–13.

Huld, T., Muller, R., Gambardella, A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Sol Energy* 86(6), 1803–1815.

Ineichen, P., Barroso, C.S., Geiger, B., Hollmann, R., Marsouin, A., Mueller, R., 2009. Satellite Application Facilities irradiance products: hourly time step comparison and validation over Europe. *Int J Remote Sens* 30(21), 5549–5571.

Jacobson, M.Z., Jadhav, V., 2018. World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels. *Sol Energy* 169, 55–66.

Kim, C.K., Kim, H.G., Kang, Y.H., Yun, C.Y., 2017. Toward Improved Solar Irradiance Forecasts: Comparison of the Global Horizontal Irradiances Derived from the COMS Satellite Imagery Over the Korean

Peninsula. PApGe 174(7), 2773–2792.

Machete, R., Falcao, A.P., Gomes, M.G., Moret Rodrigues, A., 2018. The use of 3D GIS to analyse the influence of urban context on buildings' solar energy potential. *Energy Buildings* 177, 290–302.

Mainzer, K., Killinger, S., McKenn, R., Fichtner, W., 2017. Assessment of rooftop photovoltaic potentials at the urban level using publicly available geodata and image recognition techniques. *Sol Energy* 155, 561–573.

Maloney, P., 2017. The University Microgrid: Why Clean Energy and Campuses are a Good Fit, The Microgrid Knowledge series. Microgrid Knowledge.

Marsh, A., 2011. Sky subdivision. Natural Frequency.

NREL, 2019. Best Research–Cell Efficiency Chart. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>. (Accessed 04. 29 2019).

Oh, M., Park, H.D., 2018. A new algorithm using a pyramid dataset for calculating shadowing in solar potential mapping. *Renew Energ* 126, 465–474.

Palmer, D., Cole, I., Betts, T., Gottschalg, R., 2017. Interpolating and Estimating Horizontal Diffuse Solar Irradiation to Provide UK–Wide Coverage: Selection of the Best Performing Models. *Energies* 10(2).

Perez, R., Ineichen, P., Moore, K., Kmiecik, M., Chain, C., George, R., Vignola, F., 2002. A new operational model for satellite–derived irradiances: Description and validation. *Sol Energy* 73(5), 307–317.

Perez, R., Seals, R., Michalsky, J., 1993. All–Weather Model for Sky Luminance Distribution – Preliminary Configuration and Validation. *Sol Energy* 50(3), 235–245.

Quesada–Ruiz, S., Linares–Rodriguez, A., Ruiz–Arias, J.A., Pozo–Vazquez, D., Tovar–Pescador, J., 2015. An advanced ANN–based method to estimate hourly solar radiation from multi–spectral MSG imagery. *Sol Energy* 115, 494–504.

Rigollier, C., Lefèvre, M., Cros, S., Wald, L., 2002. Heliosat 2: an improved method for the mapping of the solar radiation from Meteosat

imagery, 2002 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference. Dublin, Ireland, pp. 585–592.

Rodriguez, L.R., Duminil, E., Ramos, J.S., Eicker, U., 2017. Assessment of the photovoltaic potential at urban level based on 3D city models: A case study and new methodological approach. *Sol Energy* 146, 264–275.

rootAbility, 2019. List of 45 sustainable campus networks and green university initiatives worldwide. <http://rootability.com/sustainable-campus-and-green-university-networks-and-initaitives/>. (Accessed 2019.07.17 2019).

Sameti, M., Jokar, M.A., 2017. Numerical modelling and optimization of the finite-length overhang for passive solar space heating. *Intell Build Int* 9(4), 204–221.

Sarbu, I., Sebarchievici, C., 2017. Chapter 2 – Solar Radiation, in: Sarbu, I., Sebarchievici, C. (Eds.), *Solar Heating and Cooling Systems*. Academic Press, pp. 13–28.

Suri, M., Huld, T.A., Dunlop, E.D., Ossenbrink, H.A., 2007. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries. *Sol Energy* 81(10), 1295–1305.

Wiginton, L.K., Nguyen, H.T., Pearce, J.M., 2010. Quantifying rooftop solar photovoltaic potential for regional renewable energy policy. *Comput Environ Urban* 34(4), 345–357.

Yeom, J.M., Han, K.S., 2010. Improved estimation of surface solar insolation using a neural network and MTSAT-1R data. *Comput Geosci-Uk* 36(5), 590–597.

Yoshikawa, K., Kawasaki, H., Yoshida, W., Irie, T., Konishi, K., Nakano, K., Uto, T., Adachi, D., Kanematsu, M., Uzu, H., Yamamoto, K., 2017. Silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contacts for a photoconversion efficiency over 26%. *Nat Energy* 2(5).

Zachar, M., Daoutidis, P., 2017. Microgrid/Macrogrid Energy Exchange: A Novel Market Structure and Stochastic Scheduling. *Ieee T Smart Grid* 8(1), 178–189.

Zhang, W.M., Qi, J.B., Wan, P., Wang, H.T., Xie, D.H., Wang, X.Y., Yan, G.J., 2016. An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation. Remote Sens-Basel 8(6).

강용혁, 김현구, 조덕기, 윤창열, 박완순, 이철형, 이준표, 김형찬, 이의준, 강은철, 2015. 대한민국 신재생에너지 자원지도. 미래창조과학부, 한국에너지기술연구원, 대전, 한국.

강용혁, 조덕기, 김현구, 박완순, 이준표, 윤창열, 이철형, 박순철, 2013. 신재생에너지 자원지도 및 활용시스템 구축사업. 한국에너지기술연구원, 대전, 한국.

그린피스, 그린유스, 대학생신재생에너지기자단, 2018. 2018 대한민국 거점 국립대학교 기후변화 리더십 현황. 용산, 한국.

김의환, 강승원, 김재언, 2011. 태양광발전시스템의 장기운전에 의한 성능특성 분석. 신재생에너지 7(2), 28-35.

신성엔지니어링, 2019. 태양광시스템, in: 신성엔지니어링 (Ed.) 제품 카탈로그. 신성엔지니어링, 서울, 한국.

이창훈, 조지혜, 윤정호, 2014. 화석연료 대체에너지원의 환경·경제성 평가 (II) : 재생에너지 발전원을 중심으로. 한국환경정책평가연구원, 세종, 한국.

최원석, 송아람, 김용일, 2015. 수정된 Heliosat-II 방법과 COMS-MI 위성영상을 이용한 한반도 일사량 추정. 한국측량학회지 33(5), 463-472.

## Abstract

# Development of GIS based PV Power Calculation Algorithm Considering Building Roofs and Facades using High-resolution Urban Spatial Data

Myeongchan Oh

Energy Systems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Supply of photovoltaic (PV) power, one of the major renewable energy, is rapidly increasing because of the development of technology. It is also receiving much attention as economical eco-friendly energy. Studies for calculating the PV power and identifying their potential are becoming more important as penetration rates of PV increase. In this study, a calculation algorithm with high compatibility and analytical utilization were developed and utilized.

A new algorithm is designed to perform shadow analysis, electricity generation calculation through solar irradiance data and

spatial data. The photovoltaic power and solar map can be calculated considering various variables and can be used to perform various spatial analysis. The algorithm is designed in an easy-to-use tool that can be easily used by experts in other fields.

The developed algorithm was applied to estimate the potential at the actual site. Comprehensive photovoltaic potential was calculated for the Gwanak Campus of Seoul National University. As a result, the photovoltaic potential of the study area was estimated to be approximately 22 GWh per year, and the suitable sites for the photovoltaic power plant were extracted. As the potential cannot be one correct answer, sensitivity analysis according to several variables was performed and temporal volatility was also analyzed.

As a result, the developed algorithm can estimate the solar potential of the study area and consider various variables. However, some limitations exist and further study is required for some objectives. This study can be used as a basis for conducting these studies, and it is expected that various studies can be conducted based on this research.

**Keywords : Photovoltaic, Geographic Information System, Shadow Analysis, Renewable Energy, Urban Area, Building Facade**  
**Student Number : 2014-21414**