

지붕형 태양광 발전량 산정을 위한 서울지역 그림자 효과 분석

윤창열* · 정보린** · 김신영* · 김창기* · 김진영* · 김현구* · 강용혁* · 김용일****

*한국에너지기술연구원 신재생에너지자원정책센터

** (주)GIS United

***서울대학교 건설환경공학부

Analysis of Shadows Effect in Seoul Area for the Estimation of Roof-type PV Power Calculation

Yun ChangYeol* · Jung BoRin** · Kim ShinYoung* · Kim ChangKi* · Kim JinYoung* · Kim HyunGoo* · Kang YongHeack* · Kim YongIl****

*New and Renewable Energy Resource & Policy Center, Korea Institute of Energy Research

**GIS United

***Department of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University

†Corresponding author: yikim@snu.ac.kr

Abstract

For the preliminary step for estimating the performance of roof-type photovoltaic system in urban areas, we analyzed the solar radiation reduction ratio by shadow effect by buildings using DSM (Digital Surface Model) and GIS (Geographical Information System) tools. An average loss by the shadow is about 19% in Seoul. The result was related to the building density and distribution. Monthly results show that the winter season (December and January) was more affected by the shading than during the summer season (June and July). It is expected that useful empirical formulas can be made if more detailed correlation studies are performed.

Keywords: 음영(shadow), 음영 효과(shadow effect), 일사량(solar radiation), 지붕형(roof type), 태양광(Photovoltaic), 잠재량(potential)

1. 서론

전 세계적인 신재생에너지 시장의 확산과 국내 현 정부의 적극적인 신재생에너지 정책 추진에 힘입어 국내 신재생에너지의 보급은 더욱 가속화되고 있는 모습이다. 하지만 아직 까지 다수의 국내태양광 설비의 설치가 사전에 정확하게 평가가 이루어지지 못한 채 설비의 도입이 이루어져 예상과 다른 발전효율을 보이거나 운영상의 어려움이 발생하곤 한다.

본 논문에서는 국내 태양광 잠재량 산정과 관련하여 지붕형 태양광 설비의 성능 예측을 위해 건물에 의한 음영으로 인한 일사량 감소분을 연산하였다. 우선 건물의 밀집도가 높은 서울 지역을 대상으로 3D GIS(Geographical Information System) 분석도구를 활용하여



OPEN ACCESS

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.38, No.1, pp.45-53, April 2018
<https://doi.org/10.7836/kses.2018.38.2.045>

pISSN: 1598-6411

eISSN: 2508-3562

Received: 30 January 2018

Revised: 19 April 2018

Accepted: 23 April 2018

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

시뮬레이션을 수행함으로써 건물 분포에 의한 지역별(구 단위) 특성치와 월별 변화량을 평가하였다.

3D 도구에 의한 일사량 분석에 의한 연구는 기존에 많은 사례가 있으며, 대부분 연산의 부하로 인해 동 단위 규모에 한정된 소규모로 많이 진행되었다. Robinson et al. (2004)¹⁾은 대표적인 ray-tracing tool인 radiance를 활용하여 건물과 지형에 대한 일사량을 분석하였으며, Agugiaro et al. (2012)²⁾은 LiDAR (Light Detection and Ranging)로 추출한 정교한 건물과 지형 모델에 GRASS tool 분석도구를 적용하여 도달 일사량을 산출하고, 지상 일사계실측데이터를 이용하여 평가와 보정을 시도하였다. Chow et al. (2014)³⁾의 경우, 건물과 지형 정보가 수록된 cad 포맷의 3D 데이터를 GIS 포맷으로 전환하여 연산을 수행함으로써, 1시간 간격의 일사량 분포맵을 산출하였다. Kim (2014)⁴⁾은 일조비율(전체의 면적 대비 실제 도달하는 일조면적, Sunlit Frction)과 천공개폐율(Sky View Factor) 계수를 적용하여 기존의 다른 모델과 비교연구를 수행하였다.

각 논문에서 적용된 모델의 성능평가를 위해서는 기본적으로 일사계에 의한 관측값을 기반으로 해야 하지만, 각 위치와 시간 특성별로 일사계를 배치하고 모든 사례별로 결과물을 도출하는 과정은 한계가 있으므로, 대부분의 논문이 모델의 물리적 검증과 타 모델과의 비교연구에 한정되어 있는 모습이다.

본 논문에서 다루는 지역은 비교적 넓은 영역을 대상으로 하므로, 연산의 속도와 시각화 방안(맵 제작)을 고려하여 ArcGIS에서 제공하는 solar radiation tool을 활용하여 연산을 수행하고, 적용 가능성을 분석하였다.

그동안의 일사량 시뮬레이션 도구는 대부분 소수의 건물을 대상으로 하고 있었으나, 본 논문에서는 서울시 전반에 걸친 음영의 영향효과를 평가하여, 지붕형 태양광을 설치하였을 때 발생하는 음영의 영향성에 대하여 정량적인 수치를 산정하고자 하였다. 해당 수치는 국가적인 보급계획 수립을 위한 태양광 잠재량의 연산에 있어 주로 도심형 설비의 도입 가능성 평가에 중요한 지표로 적용될 수 있을 것으로 보인다.

2. 이론적 배경

ArcGIS solar radiation tool⁵⁾에서 제공하는 일사량 분석 도구는 Rich 등이 개발한 반구형 뷰셰드 알고리즘(semispherical viewshed algorithm)의 방법을 기반으로 관측자의 위치별로 일사량을 계산한다(Rich et al., 1994)⁶⁾. 이후 Fu and Rich(2000, 2002)^{7,8,9)} 등에 의해 계속 개선되었으며, 해당 도구에서 활용되는 수식은 다음과 같다.

$$\text{Global}_{\text{tot}} = \text{Dir}_{\text{tot}} + \text{Dif}_{\text{tot}}$$

전일사량(Globaltot)은 직달일사량(Dirtot)과 산란일사량(Diftot)의 합으로 지면과 주변사물에 의한 반사일사량 연산이 제외되었다. 일반적으로 적용되는 알베도 값과 지붕형 태양광 설치각도를 고려하였을 때, 태양광 판넬에 도달하는 반사일사량은 비교적 작은 값으로 본 논문에서는 건물 유무에 따른 일사량 비율을 연산하므로 그 영향이 미비하다고 가정하였다. 관측위치별로 도달 일사량(직달일사량과 산란일사량)을 연산한 후 이를 합

산하는 방식으로 전일사량을 구한다. 본 논문에서 활용하는 일사량 분석 도구는 천구를 표현한 맵을 활용하며, 다음의 네 단계에 따라 연산한다.

- (1) 관측 위치에서의 상향 반구형 뷰 연산
- (2) 직달 일사량 연산 : direct sun map에 의한 오버레이 연산
- (3) 산란일사량 : diffuse sky map을 활용한 오버레이 연산
- (4) 대상 관측지점별 반복 연산 수행

계산 알고리즘의 핵심은 모든 관측위치별로 대해 상향으로 보는 반구형 뷰를 생성하는 것이다. 반구형 뷰 포인트는 상향식 반구형(어안) 사진과 유사하여, 전체 하늘을 바라보는 시각에 대한 연산을 수행한다.

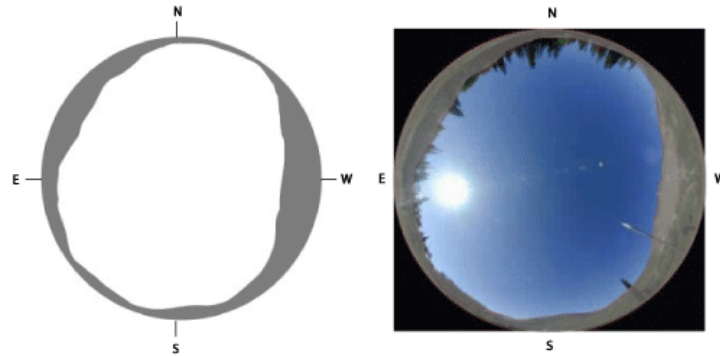


Fig. 1 Resultant viewshed (left), viewshed mapped onto sky view (right) (source: an overview of the solar radiation toolset)⁵⁾

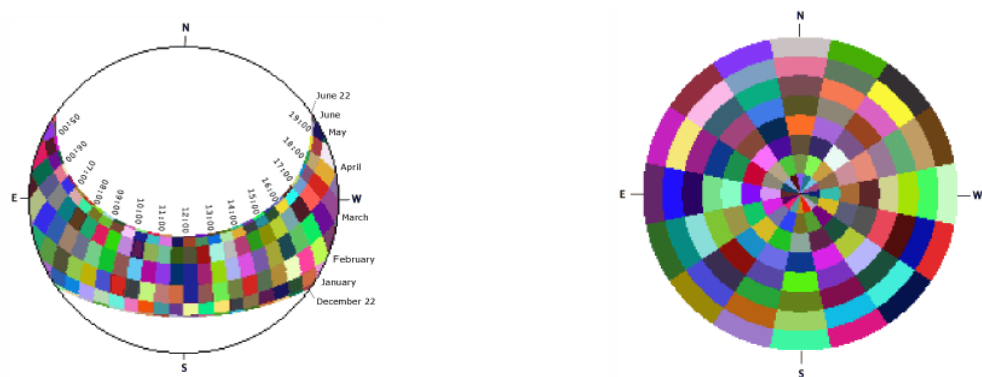


Fig. 2 sun map (example) (left), sky map (example) (right) (source: an overview of the solar radiation toolset)⁵⁾

2.1 직달 일사량의 산출

$$Dir_{tot} = \sum Dir_{\theta, \alpha} \quad (1)$$

천정각 (θ)과 방위각 (α)을 기준으로 천구 맵 섹터(Dir θ, α)로 구분하며, 다음의 방정식을 사용하여 각 섹터별 도달 일사량을 연산한다.

$$Dir_{\theta, \alpha} = S_{const} \times \beta^{m(\theta)} \times SunDur_{\theta, \alpha} \times SunGap_{\theta, \alpha} \times \cos(AngIn_{\theta, \alpha}) \quad (2)$$

S_{const} : 태양 상수(1,367 W/m²)

β : 빛이 도달하는 최단 경로(천정 방향)에 대한 대기 투과율(전 파장에 대해 평균값)

$m(\theta)$: 최단 경로의 길이에 대한 상대적인 일사 도달 길이(아래의 수학 식 (3) 참조)

$SunDur_{\theta, \alpha}$: 일사 지속 시간(관측 시간)

$SunGap_{\theta, \alpha}$: 주변 사물에 의해 차폐되지 않고 태양광이 직접 도달할 수 있는 천구 영역 비율

$AngIn_{\theta, \alpha}$: 일사 입사각(아래의 수학 식 (4) 참조)

상대적인 광학 길이, $m(\theta)$ 는 태양 천정각과 해발 고도에 의해 결정된다. 천정각이 80°보다 작다면 다음 수식을 사용하여 계산할 수 있다.

$$m(\theta) = \text{EXP}(-0.000118 \times \text{Elev} - 1.638 \times 10^{-9} \times \text{Elev}^2) / \cos(\theta) \quad (3)$$

θ : 태양 천정각

Elev : 해발 고도

일사 입사각($AngIn_{\theta, \alpha}$)은 다음 방정식을 사용하여 계산된다.

$$AngIn_{\theta, \alpha} = \text{acos}(\cos(\theta) \times \cos(G_z) + \sin(\theta) \times \sin(G_z) \times \cos(\alpha - G_a)) \quad (4)$$

G_z : 지면 천정각

G_a : 지면 방위각

2.2 산란 일사량의 산출

천구의 각 섹터에 대해 시간별로 산란일사량(Dif)이 계산된다.

$$Dif_{\theta, \alpha} = R_{glb} \times P_{dif} \times Dur \times SkyGap_{\theta, \alpha} \times Weight_{\theta, \alpha} \times \cos(AngIn_{\theta, \alpha}) \quad (5)$$

R_{glb} : 법선면(도달면에 수직으로 입사하는) 전일사량(아래의 수학 식 (6) 참조)

P_{dif} : 산란 비율. 일반적으로 매우 맑은 날 기준 0.2, 매우 흐린 날 기준 0.7 정도의 수치를 나타냄.

Dur : 일사 지속 시간(관측 시간)

$SkyGap_{\theta, \alpha}$: 주변 사물에 의해 차폐되지 않고 태양광이 직접 도달할 수 있는 천구 영역 비율

$Weight_{\theta, \alpha}$: 모든 섹터를 기준으로 볼 때, 해당 섹터에서의 산란일사량 가중치(아래 식 (7) 및 (8) 참조)

$AngIn_{\theta, \alpha}$: 일사 입사각

법선면 전일사량은 다음과 같이 연산된다.

$$R_{glb} = (S_{const} \Sigma(\beta^{m(\theta)})) / (1 - P_{dif}) \quad (6)$$

uniform sky diffuse model의 경우, $Weight_{\theta, \alpha}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$Weight_{\theta, \alpha} = (\cos \theta_2 - \cos \theta_1) / Div_{azi} \quad (7)$$

θ_1 과 θ_2 : 섹터 경계 천정각

Div_{azi} : 방위각 섹터 수

standard overcast sky model의 경우, 가중치 θ 는 다음과 같이 계산된다.

$$Weight_{\theta, \alpha} = (2\cos \theta_2 + \cos 2\theta_2 - 2\cos \theta_1 - \cos 2\theta_1) / 4 \times Div_{azi} \quad (8)$$

위치에 대한 총 산란 일사량(Dif_{tot})은 모든 섹터의 산란 일사량(Dif)의 합으로 연산된다.

$$Dif_{tot} = \Sigma Dif_{\theta, \alpha} \quad (9)$$

3. 그림자 연산 수행

3.1 DSM (Digital Surface Model) 생성

건물 3D 모델을 생성하기 위하여 국토교통부의 '국가공간정보포털'(<http://www.nsdi.go.kr>)¹⁰⁾에서 제공하는 'GIS 건물군 통합정보 데이터'의 'GIS 건물일반집합정보'를 활용하였다. 건물군 데이터의 건물 지상층수 필드에 건물의 평균층고 수치로 3.5 m를 적용하여 건물의 밑면 형태에(polygon) 건물의 높이값이 입력된 건물 모

델을 생성하였다. 지형 3D 모델 생성을 위해서 국토교통부의 ‘국가공간정보포털’(http://www.nsd.go.kr)’에서 제공하는 ‘연속수치지형도’의 등고선 vector 파일을 raster 파일로 변환하여, 마찬가지로 지형 DEM (digital elevation model)을 구축하였으며, 생성된 건물 모델과 연산하여 결합된 DSM을 생성하였다. 실제로는 다양한 형태의 지붕이 존재하지만, 본 연구에서는 대규모 지역에 대한 통계자료 추출을 위하여 슬라브 형태의 평면형 지붕만을 가정하여 적용하였다. 산출된 모델은 해상도 1 m를 기준으로 생성되었다.

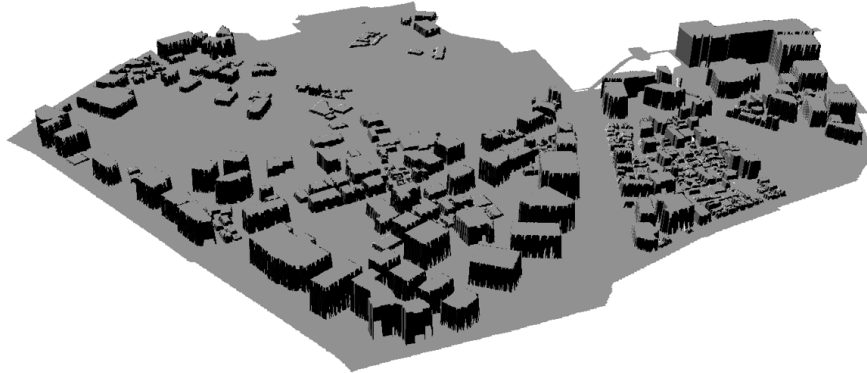


Fig. 3 Hillshade view of DSM (example, Sogong-dong Jongro-gu)

3.2 DSM (Digital Surface Model) 생성

건물의 옥상 도달에 도달하는 일사량의 총량을 구하기 위하여 아래 왼쪽 그림과 같이 생성된 DSM에 ArcGIS solar radiation tool을 적용하여 중간 그림과 같은 건물 옥상 도달 일사량의 총합을 구하였다. 그리고 오른쪽 그림과 같이 건물이 제거된 지형모델(DEM)만을 이용하여 지상 도달 일사량의 총합을 구하였다. Table 1은 (건물 옥상과 지상에 도달한 일사량의 총합)/(지상 도달 일사 일사량의 총합)을 연산한 결과물로 각각의 경우 최초에 입사되는 일사량의 총량은 동일하므로, 해당 비율은 건물에 의해 손실된 일사량을 나타낸다. 손실된 일사량은 모두 건물의 벽체에 입사된 양이라 할 수 있다.

1시간 간격으로 연산을 수행하며, uniform sky diffuse model을 적용하고, 입력 인자로 transmittivity 0.5, diffuse proportion 0.41의 수치를 사용하였다. 해당 수치는 한국에너지기술연구원에서 연산한 결과물로 서울 대학교에 설치한 일사측정장비의 2016년의 지상 관측 평균값을 이용하였다. 대상 지역별로 다른 수치를 적용하여야 하는 것이 이상적이지만, 각 지역별 측정데이터의 확보가 불가능하여, 서울 전 지역에 단일값을 일괄 적용하였다.

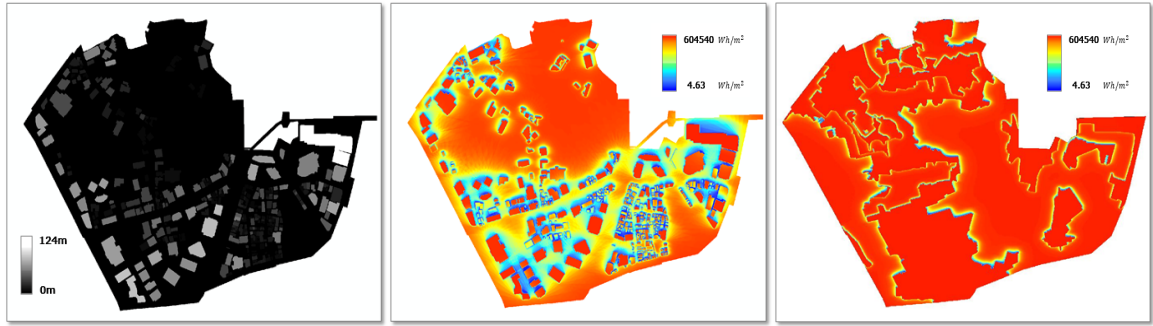


Fig. 4 DSM (building + terrain)(left), shadow effect analysis of DSM (middle), shadow effect analysis of DEM (right)

4. 결과 및 고찰

해당 결과물은 solar radiation tool에서 가정한 물리적 환경을 근간으로 하며, 실제의 일사환경과 차이가 있다. 본 연구에서는 2016년도의 평균 물리인자를 일괄 적용하여 서울 전 지역에 동일한 일사환경을 가정하고, 건물 유무에 의한 일사량 손실분을 연산하는 데 중점을 두기 때문에 연산의 단순 수치보다는 Table 1과 같이 비율값에 초점을 두어 분석을 수행하였다.

Table 1 Solar radiation reduction ratio by shadow effect

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	average
Eunpyeong-gu	0.82	0.82	0.84	0.85	0.86	0.86	0.86	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.84
Seodaemun-gu	0.79	0.79	0.81	0.82	0.83	0.84	0.83	0.83	0.81	0.80	0.79	0.78	0.81
Seongbuk-gu	0.80	0.80	0.82	0.83	0.84	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.82
Jung-gu	0.70	0.71	0.73	0.75	0.77	0.78	0.77	0.76	0.74	0.72	0.70	0.70	0.74
Jongno-gu	0.86	0.86	0.87	0.88	0.89	0.89	0.89	0.88	0.87	0.87	0.86	0.86	0.87
Gangbuk-gu	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.87	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.83	0.85
Dobong-gu	0.87	0.88	0.89	0.90	0.90	0.91	0.91	0.90	0.89	0.88	0.87	0.87	0.89
Nowon-gu	0.90	0.90	0.91	0.92	0.92	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91	0.90	0.90	0.91
Jungnang-gu	0.77	0.77	0.79	0.80	0.82	0.82	0.82	0.81	0.79	0.78	0.77	0.76	0.79
Dongdaemun-gu	0.67	0.68	0.69	0.72	0.73	0.74	0.73	0.72	0.70	0.68	0.67	0.66	0.70
Mapo-gu	0.79	0.80	0.81	0.83	0.84	0.84	0.84	0.83	0.82	0.80	0.79	0.78	0.81
Yongsan-gu	0.84	0.85	0.86	0.87	0.87	0.88	0.87	0.87	0.86	0.85	0.84	0.84	0.86
Seongdong-gu	0.77	0.77	0.78	0.80	0.81	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.79
Gwangjin-gu	0.74	0.75	0.76	0.78	0.79	0.79	0.79	0.78	0.77	0.75	0.74	0.74	0.77
Gangdong-gu	0.78	0.79	0.81	0.83	0.84	0.84	0.84	0.83	0.81	0.80	0.78	0.78	0.81
Gangseo-gu	0.84	0.84	0.85	0.86	0.87	0.88	0.87	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.85
Yangcheon-gu	0.68	0.69	0.71	0.74	0.76	0.77	0.76	0.75	0.72	0.70	0.68	0.67	0.72
Guro-gu	0.74	0.75	0.77	0.79	0.80	0.81	0.80	0.79	0.78	0.76	0.74	0.73	0.77
Yeongdeungpo-gu	0.76	0.77	0.79	0.81	0.82	0.83	0.82	0.81	0.80	0.78	0.76	0.76	0.79

Table 1 Solar radiation reduction ratio by shadow effect (Continued)

	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sept.	Oct.	Nov.	Dec.	average
Geumcheon-gu	0.74	0.75	0.76	0.78	0.80	0.81	0.80	0.79	0.77	0.75	0.74	0.73	0.77
Dongjak-gu	0.75	0.76	0.77	0.79	0.80	0.81	0.81	0.80	0.78	0.76	0.75	0.74	0.78
Gwanak-gu	0.83	0.84	0.85	0.86	0.87	0.87	0.87	0.86	0.85	0.84	0.83	0.83	0.85
Seocho-gu	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.90	0.90	0.89	0.88	0.87	0.86	0.86	0.88
Gangnam-gu	0.74	0.75	0.77	0.80	0.81	0.82	0.82	0.80	0.78	0.76	0.74	0.73	0.78
Songpa-gu	0.76	0.77	0.79	0.81	0.82	0.83	0.83	0.81	0.80	0.78	0.76	0.76	0.79
average	0.78	0.79	0.81	0.82	0.83	0.84	0.84	0.83	0.81	0.80	0.79	0.78	0.81

서울 전체의 평균값은 0.81로 건물에 의하여 약 19%의 손실이 발생함을 알 수 있다. 이는 건물 지붕에만 한정 한 수치로 19%의 수치는 건물의 벽체에 흡수된 양이다.

각 구별로 살펴보면, 노원구, 도봉구, 서초구 순으로 높고, 동대문구, 양천구, 중구 순으로 낮음을 알 수 있다. 이는 산림과 녹지 등으로 건물의 점유가 적은 지역은 건물에 의한 영향이 비교적 작게 발생하여 그 수치가 1에 근접하는 높은 수치를 보이며, 건물이 다수 존재하는 지역은 음영의 효과가 많이 적용되어 수치가 낮다.

월별로 살펴보면, 여름철(6, 7월)보다 겨울철(12월, 1월)이 음영효과가 더욱 많이 발생한다고 볼 수 있다. 겨울철의 낮은 천정각으로 인해 보다 많은 음영이 발생함에 따라 기인한다.

5. 결론

본 연구에서는 도심지역에 대한 지붕형 태양광의 성능 예측을 위한 예비 단계로, 지형정보와 건물정보가 반영된 수치모델을 생성하고 ArcGIS의 solar radiation tool을 활용하여 건물에 의한 일사량 감소분을 분석하였다. 본 논문에서는 서울의 전 지역에 대하여 연산을 수행하였으며, 향후 국토 전역에 해당하는 결과가 생성된다면, 일사량 손실분을 지역별로 추정하는 표준수치가 산출될 수 있을 것으로 기대된다. 산출된 결과물은 다음과 같다.

- (1) 건물과 지형이 모두 반영된 모델(DSM)과 건물이 제거된 지형모델(DEM), 각각의 모델을 이용하여 도달 일사량의 총합을 구하였다. (건물 옥상과 지상에 도달한 일사량의 총합)/(지상 도달 일사량의 총합)을 연산하여 건물에 의한 일사량 손실분을 분석하였다.
- (2) 서울 전체의 평균값은 0.81로 건물에 의하여 약 19%의 손실이 발생하였다. 건물 지붕에만 한정된 값으로 해당 19%는 건물의 벽체에 흡수된 양이다.
- (3) 산림과 녹지 등으로 건물의 점유가 적은 지역은 건물에 의한 영향이 비교적 적어, 그 수치가 1에 근접하는 높은 수치를 보이며, 건물의 효과가 많이 발생하는 지역은 타 지역보다 낮음을 알 수 있다.
- (4) 월별로 살펴보면, 여름철(6, 7월)보다 겨울철(12월, 1월)이 음영효과가 더욱 많이 발생한다, 겨울철의 낮은 천정각으로 인해 보다 많은 음영이 발생함에 따라 해당 결과가 발생하였다.

- (5) 산출된 지역별 비율은 지붕형 태양광의 성능과 직접적인 관련이 있는 지역별 표준데이터로 활용될 수 있으며, 건물의 분포와 밀집도와 관련한 상관성 연구가 수행된다면, 유용한 경험적 수식이 산출될 수 있을 것으로 기대된다.

후기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업(B8-2424-02)을 재원으로 수행한 연구과제의 결과입니다.

REFERENCES

1. Darren Robinson and Andrew Stone, Irradiation Modelling Made Simple: the Cumulative Sky Approach and Its Applications, Plea2004 - The 21st Conference on Passive and Low Energy Architecture, 2004.
2. G. Agugiaro, F. Nex, F. Remondino, R. De Filippi, S. Droghetti and C. Furlanello, Solar Radiation Estimation on Building Roofs, ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 1, No. 2, pp. 177-282, 2012.
3. Annie Chow, Alan S. Fung and Songnian Li, GIS Modeling of Solar Neighborhood Potential at a Fine Spatiotemporal Resolution, Buildings, Vol. 4, No. 2, pp. 195-206, 2014.
4. Kim, E. J., Development of a Solar Insolation Calculation Module in Urban Context Using the Sunlit Fraction and Sky-view Factor, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 30, No 7, pp. 229-236, 2014.
5. An Overview of the Solar Radiation Toolset (<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-solar-radiation-tools.htm>)
6. Rich, P. M., Dubayah, R., Hetrick, W. A., and Saving, S. C., Using Viewshed Models to Calculate Intercepted Solar Radiation: Applications in Ecology, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers, pp. 524-529, 1994.
7. Fu, P., A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Landscape Ecology. Ph.D. Thesis, Department of Geography, University of Kansas, 2000.
8. Fu, P. and Rich, P. M., The Solar Analyst 1.0 Manual, Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), 2000.
9. Fu, P. and P. M. Rich., A Geometric Solar Radiation Model with Applications in Agriculture and Forestry, Computers and Electronics in Agriculture, Vol. 37, No. 1, pp. 25-35, 2002.
10. National Spatial Data Infrastructure Portal (<http://www.nsd.go.kr>)