



영농형 태양광 발전 솔라쉐어링에 따른 하루 일사량 변화의 해석 및 분석

Simulation and Analysis of Solar Radiation Change Resulted from Solar-sharing for Agricultural Solar Photovoltaic System

이상익^a · 최진용^b · 성승준^c · 이승재^d · 이지민^e · 최원^{f,†}

Lee, Sang-ik · Choi, Jin-yong · Sung, Seung-joon · Lee, Seung-jae · Lee, Jimin · Choi, Won

ABSTRACT

Solar-sharing, which is an agricultural photovoltaic system installing solar panels on the upper part of crop growing field, has especially drawn attention. Because paddy fields for cultivating crops are large flat areas, there have been various attempts to utilize solar energy for solar photovoltaic as well as growth of crops in agriculture. Solar-sharing was first proposed in Japan, and has been actively studied for optimization and practical uses. The domestic climate differs from the climate conditions in which the solar-sharing has been widely studied, therefore, it is required to develop the solar-sharing technology suitable for the domestic climate. In this study, a simulation model was developed to analyze the change of solar radiation resulted from the solar-sharing installation. Monthly solar illumination intensity and the change of illumination intensity according to the various conditions of solar panel installation were simulated. The results of monthly illumination analysis differed by altitude of the sun, which was related to season. In addition, it was analyzed that the monthly illumination decreased by up to 42% due to solar-sharing. Accordingly, it is recommended that solar-sharing should be installed as a way to maximize the efficiency of solar photovoltaic system while minimizing the decrease in solar radiation reaching the crops.

Keywords: Solar-sharing; solar radiation; illumination intensity; simulation model; solar photovoltaic

1. 서론

태양광 에너지는 발전기의 초기 설치 이후, 적은 추가 비용으로 전기를 생산할 수 있는 친환경 에너지이다 (Lee et al., 2003; Choi, 2009). 이러한 태양광 발전은 효율 측면에서 넓은 면적에 많은 수의 태양광 패널을 설치하는 것이 중요하다. 농작물을 재배하는 논과 밭은 넓은 면적의 평지이기 때문에 농

업 분야에서도 태양에너지를 작물의 생육뿐만 아니라 태양광 발전에 이용하고자 하는 다양한 시도가 있었다. 최근에는 농작물 재배지 상부에 일정한 간격을 두고 태양광 패널을 설치하는 영농형 태양광 발전인 솔라쉐어링 (Solar-sharing)이 주목받고 있으며 (Yoon et al., 2019), 이는 태양광 발전과 작물의 생육을 위해 태양에너지를 공유한다는 의미를 지니고 있다.

솔라쉐어링을 농지에 설치하여 운영하기 위해서는 해당 시설이 농작물의 생육에 미치는 영향에 대해 고려해야 한다. 특히 농지에 태양광 패널을 설치하면 농작물이 받는 일사량이 감소하게 되며, 작물생육에 있어 일사량은 주요한 변수이기 때문에 (Amir and Sinclair, 1991; Hunt et al., 1998; Mo et al., 2005; Trnka et al., 2007) 작물생산량에 영향을 미칠 수 있다. 한편 광포화점을 초과하는 일사량은 오히려 작물의 광합성 효율을 낮추며 (Falster and Westoby, 2003; Je et al., 2006) 수분을 증발시켜 작물을 고사시키는 문제를 발생시킬 수 있어, 최적화된 방법으로 태양광 패널을 설치하는 것은 작물생장에 도움을 줄 수 있다. 또한 태양광 패널은 강한 비와 우박을 막아주는 비가림막의 역할을 하여 생산량 개선에 도움을 줄 수 있다. 따라서 작물생육에 필요한 일사량은 유지하면서 광포화점을 초과하는 빛은 태양광 발전에 사용하는 상호 공조의 방법을 찾는 것은 매우 중요하다 (Lee et al., 2019).

^a Ph.D. Student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

^b Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University

^c Part Leader, Solar Development Part, SK D&D

^d Principal Researcher, National Center for Agro-Meteorology

^e Research Professor, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

^f Associate Professor, Department of Rural Systems Engineering, Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Global Smart Farm Convergence Major, Seoul National University

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4715 Fax.: +82-2-873-2087

E-mail: fembem@snu.ac.kr

Received: July 9, 2020

Revised: September 14, 2020

Accepted: September 17, 2020

솔라셰어링은 농업과 전기 생산을 융합하여 토지의 이용 효율을 높이는 차세대 기술로써, 2003년 Nagashima에 의해 처음 고안되어 일본에서부터 활발한 연구가 진행되었다. 현재 일본과 유럽에서는 실용화를 위한 연구와 함께 실증과정을 거친 실제 운영과 관련 제도 제정이 이루어지고 있으며, 솔라셰어링의 설치가 작물생육에 미치는 영향에 대해 다양한 연구가 진행되었다. Nagashima (2015)는 솔라셰어링을 설치하고 다양한 농작물을 재배하여 그 영향을 분석하였으며, 솔라셰어링에 따른 수확량 감소는 농작물별로 상이하나, 매우 적다고 분석한 바 있다. 또한 그는 솔라셰어링을 통해 직사광을 완화하여 토양 수분의 증발을 억제하고 관개수량을 절감할 수 있다고 평가하였으며, 전기 판매수익에 따른 경제성 분석을 수행하였다 (Nagashima, 2015). Dupraz et al. (2011)은 프랑스의 기상환경에서 농지에 설치된 태양광 패널에 따른 일사량 감소 비율을 해석하고 이에 따른 작물의 성장을 모의하였으며, 다양한 지역 및 기상환경에 대한 해석의 필요성을 제시하였다. 또한 Batorova (2015)는 일본 전체 농지의 20%에 솔라셰어링을 보급하여 일본의 연간 전기 사용량의 57%를 공급할 수 있다고 평가하였고, Janiak (2017)은 유럽의 기상환경을 바탕으로 SEA (Solar Energy Analysis application)를 이용하여 솔라셰어링을 통한 전기 생산량 예측 모델을 개발한 바 있다.

그러나 일본과 유럽을 비롯한 국외의 작물 재배 환경과 태양에너지 및 일사량 등의 기상환경은 국내와 다르며, 이에 따라 국외에서 개발된 솔라셰어링 기술을 국내에 그대로 적용하기에는 어려움이 있다. 국내에서는 해외의 설계 및 연구결과를 바탕으로 시범단지들을 건설하고, 전력 생산량과 작물 수확량의 단순 모니터링으로 국내 적용 가능성을 검토하는 단계에 머물러 있다. 또한 Yoon et al. (2019)은 모의 차광 관측 실험을 통해 솔라셰어링에 따른 일사량 변화를 연구한 바 있

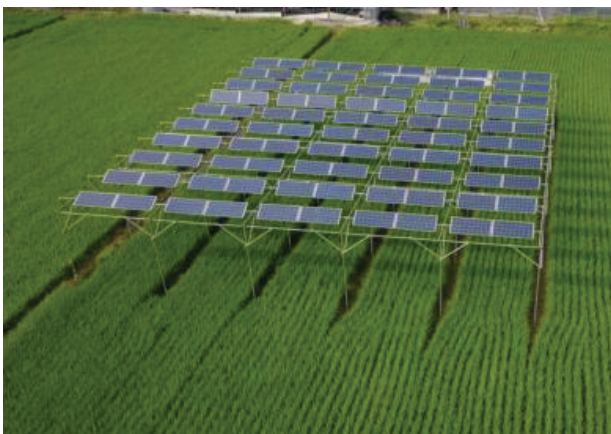
으나, 한정된 기간에서의 실측에 그쳤고 실제 태양광 패널이 아닌 모의 차광막을 이용하는 한계를 가졌다. 따라서 국내 작물생육 환경에 적합한 솔라셰어링 기술과 규격의 시설설계 확보가 시급히 요구되고 있다.

본 연구에서는 솔라셰어링을 통해 신재생 에너지를 생산하면서 작물생육에 필요한 일사량을 확보하는 최적의 조건을 분석하고자 태양광 패널 구조물 하부에 도달하는 일사량의 변화를 해석하였다. 이를 위해 현장 실험을 통하여 솔라셰어링에 따라 감소하는 조도를 분석하고, 이를 바탕으로 수치 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 개발된 시뮬레이션 모델을 통해서 태양의 고도 및 운량과 태양광 패널의 설치 조건에 따른 특정 지점 및 시간에서의 조도를 분석하였으며, 이를 바탕으로 일사량 변화에 대한 구역별, 계절별, 시간별 분석을 진행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상 시설

본 연구의 대상 시설은 충청북도 청주시 청원구 오창읍에 위치한 솔라팜 (Solar Farm)이며, 벼가 재배되고 있는 논에 솔라셰어링을 위한 태양광 패널이 설치되어 있다 (Fig. 1). 태양광 패널은 지면으로부터 높이 3.3 m에 설치하였으며, 하나의 크기는 가로 2.986 m, 세로 0.665 m이다. 설치된 패널의 총 개수는 50개 (가로 5개, 세로 10개), 패널 간의 간격은 1.3 m로 패널의 크기와 간격의 비율이 1:2가 되도록 설치하였다. 솔라셰어링 구조물의 기둥은 농작업의 편의성을 고려하여 독립 콘크리트 기초를 이용해 제작되었으며, 패널이 설치되는 철골 구조물은 동바리 형태로 제작되었다. 태양광 패널이 지표면과 이루는 각도는 태양광 발전의 효율을 위해 상황에 따라



(a) Panorama of solar-sharing



(b) View from below of solar-sharing

Fig. 1 Panorama of solar-sharing installed on paddy field in Solar Farm

조절될 수 있도록 하였다.

2. 태양광에 따른 조도

본 연구에서는 솔라쉐어링에 따른 하부 농작물에 도달하는 일사량을 분석하기 위해 지표면에서의 조도를 측정하고, 이를 분석하여 일사량의 변화를 해석하였다. 일사량과 조도는 임의의 기상조건에서 발광효율과 같은 관계를 통해 서로 표현될 수 있기 때문에, 본 연구에서는 같은 기상조건에서 솔라쉐어링에 의해 변화된 일사량의 비율과 조도의 비율이 동일하다고 가정하였다 (Vartiainen, 2000; Yang et al., 1991; Yoon et al., 2011). 이때 농지와 같이 넓은 면적의 평야에서 태양광에 따른 조도를 결정하는 주요한 요소는 태양의 고도와 대기의 운량이다. 태양 고도에 따라 구름이 전혀 없는 맑은 대기 환경에서의 조도가 결정될 수 있으며, 운량에 따른 조도의 감소 정도를 고려하여 특정 지점에서의 조도를 해석할 수 있다.

가. 태양 고도와 조도

특정 지점에서의 태양 고도는 지평선을 기준으로 태양의 높이를 각도로 표현한 것이다. 태양 고도를 결정하는 요인은 지역적 요인과 계절적 요인, 그리고 시간적 요인으로 구분된다. 지역적 요인은 위도에 따른 차이이며, 계절적 요인은 태양 적위의 영향에 따른 차이이다. 또한 시간적 요인은 하루 동안 일출 이후부터 일몰까지의 태양 위치의 변화에 따른 차이를 나타낸다. 태양광은 그 고도에 따라 지표면에 도달하기까지 대기를 통과하는 거리가 변화하며, 대기를 통과하면서 빛의 산란이 일어나기 때문에 태양 고도의 차이에 따라 조도는 변화하게 된다.

Igawa et al. (1997)과 Igawa et al. (1999)은 국제 조명 위원회 (International Commission on Illumination, CIE)에서 제시한 야외 조도 측정을 위한 기상환경 ‘standard clear sky’를 기준으로 일본 도쿄지역에서의 태양 고도에 따른 조도 자료를 수집하여 이를 회귀분석한 결과 Fig. 2와 같이 특정 관계를 도출한 바 있다. 이때 회귀분석 결과의 세로축은 조도의 상대값으로, 태양에서 지구까지의 거리만큼 떨어진 지점에서의 일사량을 1로 보았을 때의 상대적 값을 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 운량과 대기의 혼탁한 정도를 나타내는 시정 등의 기상조건이 동일하다면, 같은 태양 고도에서 일정한 조도가 지표면에 도달하는 것으로 해석하였으며 이를 통해 일사량 변화를 분석하였다. 임의 시각에 대해 태양의 고도는 식 (1)과 같이 계산될 수 있다.

$$\sin h = (\sin \delta \cdot \sin \phi) + (\cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos H) \quad (1)$$

where, h : Solar elevation angle

δ : Solar declination ($-23.5^\circ \sim 23.5^\circ$)

ϕ : Latitude

H : Hour

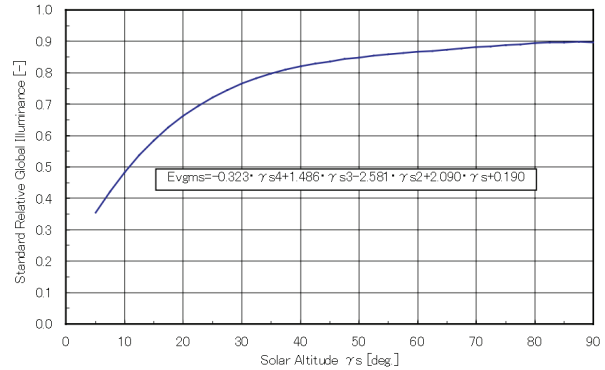


Fig. 2 Standard relative global illuminance in Japan (Igawa et al., 1997)

나. 운량과 조도

운량은 하늘을 덮고 있는 구름의 비율을 의미한다. 본 연구에서는 기상청에서 제공하는, 나안으로 관찰했을 때 구름의 두께나 종류와 관계없이 하늘을 덮고 있는 비율을 0에서 10까지의 값으로 나타낸 운량 자료를 이용하였다. 태양 고도에 따른 조도를 해석하기 위해서는 구름이 존재하지 않는 대기 기상조건에서 태양 고도에 따른 일사량 자료를 수집하여 이를 분석하고, 앞서 제시한 일사량과 조도의 관계를 이용하였다. 기상청에서 제공하는 청주 기상대의 2016년 3월부터 10월까지의 시계열 일사량 자료 중, 운량이 0인 자료들에 대해 해당 시각의 태양 고도와 일사량 자료를 통해 그 관계식을 도출하였다. 운량에 따른 조도를 분석하기 위해서는 운량이 0일 때의 조도를 기준으로 운량에 따른 조도 감소 비율을 선정하고, 운량이 0일 때와 10일 때의 일사량 자료에 대한 통계분석을 통해 운량에 의한 소광계수를 선정하였다. 또한 운량에 따른 일사량은 소광계수와 운량 0에서의 일사량을 이용하여 아래와 같이 산정하였다.

$$I_n = \beta_n \cdot I_0 \quad (2)$$

where, n : Amount of cloud

I_n : Solar radiation when the amount of cloud is n

β_n : Extinction coefficient

3. 솔라쉐어링 하부 조도 분석

가. 솔라쉐어링 하부 지점별 분석

지표면에 도달하는 태양광은 천공 휘도 분포에 따른 직달 일사 (direct radiation) 및 산란일사 (diffuse radiation)와 식생 또는 태양광 패널 등 주변 구조물에 의해 반사되어 도달하는 반사광으로 구분된다. 넓은 농지의 지표면에 도달하는 태양광 전체에서 반사광이 차지하는 비율은 매우 낮으며, 태양광 대부분을 구성하는 직달일사와 산란일사는 솔라쉐어링 구조물에 의해 영향을 받게 된다. 태양으로부터 지표면까지의 직선 경로에 태양광 패널 등의 구조물에 의해 빛이 차단되면, 직달일사가 도달할 수 없거나 그 세기가 감소하게 된다.

본 연구에서는 구조물에 의한 지표면에 도달하는 조도의 변화를 분석하기 위해 솔라쉐어링 하부 조도를 지점별로 측정하였다. 측정지점은 솔라쉐어링에 의해 영향을 받지 않고, 일반 노지와 같이 직달일사와 산란일사가 모두 도달하는 지점 (S1), 태양광 패널 간격을 통해 태양광이 전달되면서 일사가 감소하는 지점 (S2), 태양광 패널에 의해 직달일사는 차단되고 산란일사가 도달하는 지점 (S3)으로 구분하였다 (Fig. 3). 이를 바탕으로 측정지점에 따른 조도 특성을 분석하여 솔라쉐어링에 의한 일사량의 변화를 해석하였다.

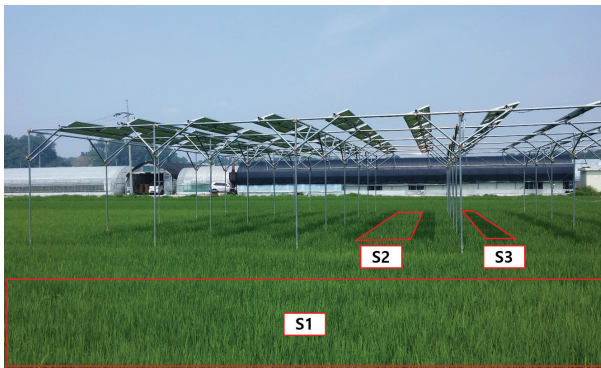


Fig. 3 Station configuration for the illuminance measurement

나. 직산 분리 모델

지점 S3에서 직달일사는 차단되고 산란일사만 도달하므로 해당 지점에 대한 분석을 위해서는 직산 분리 모델을 이용하였다. 직산 분리 모델은 태양광에 의한 일사를 직달일사와 산란일사로 분리하는 모델로서, 직달일사와 산란일사가 각각 구성하는 비율을 산정한다. Watanabe (1983)가 제안한 Watanabe 직산 분리 모델은 일본 후쿠오카에서 측정된 전일사량과 산란일사량을 바탕으로 개발되었으며, 비교적 국내 기후와 유사한 지역에서 개발되어 국내에 적합한 모델로 보고된 바 있다 (Shim and Song, 2016, 2017). 본 연구에서는

Watanabe 직산 분리 모델을 이용하여 지점 S3에서의 산란일사를 해석하였으며, 이를 이용한 전일사량에 대한 산란일사량의 비율은 아래의 식을 이용해 산정할 수 있다.

$$k_t = \frac{I_g}{I_g \sinh} \quad (3)$$

$$k_{t,clear} = 0.4268 + 0.1934 \sin h \quad (4)$$

$$k_t \geq k_{t,clear} : k_{DS} = \frac{k_t - (1.107 + 0.03569 \sin h + 1.681 \sin^2 h)(1 - k_t)^3}{k_t} \quad (5-1)$$

$$k_t < k_{t,clear} : k_{DS} = (3.996 - 3.862 \sin h + 1.54 \sin^2 h)k_t^3 \quad (5-2)$$

where, k_t : Clearness coefficient (0~1)

$k_{t,clear}$: Clear day coefficient (0~1)

k_{DS} : Ratio of diffuse radiation

I_o : Extraterrestrial radiation

4. 솔라쉐어링 일사량 모델 설계

솔라쉐어링에 따른 일사량 변화를 분석하기 위해 대상 시설에서의 시간별 조도에 대한 시뮬레이션 모델을 설계하였다. 특정 시각의 조도는 해당 시각에서의 태양 고도와 방위각, 그리고 운량을 통해 산정하였다. 솔라쉐어링에 따른 지점별 조도는 앞서 제시된 지점별 조도 분석과 직산 분리 모델을 이용하여 산정하였다. 지점 S1, S2, S3의 분포를 설정하기 위해 태양의 고도와 방위각에 따라 지표면에 생성되는 그림자 분포를 산출하여 지점별 시각에 따른 조도를 산출하였다. 그림자 분포 산출을 위한 태양광의 방향벡터는 아래와 같이 계산하였다.

$$[u, v, w] = [\sin(a - a_s), \cos(a - a_s), \tan h] \quad (6)$$

where, $[u, v, w]$: Direction vector of sunlight

a : Azimuth of the sun

a_s : Azimuth of the solar-sharing facility

본 해석에서 태양광 패널의 두께는 패널의 길이와 폭과 비교해 매우 작으므로, 그림자 형상에 미치는 영향은 매우 적다. 따라서 태양광 패널은 두께가 없는 평면으로 설정하였으며, 이때 패널의 위치 좌표와 패널에 의해 지표면에서 생성되는 그림자의 위치 좌표는 태양광의 방향벡터를 이용하여 Fig. 4와 식 (7)과 같이 설정하였다.

$$[x'_k, y'_k, 0] = \left[\frac{-u \cdot z_k}{w} + x_k, \frac{-v \cdot z_k}{w} + y_k, 0 \right] \quad (7)$$

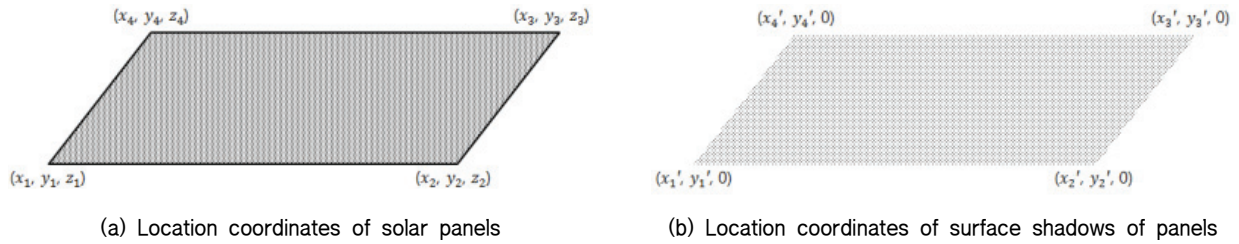


Fig. 4 Location coordinates of solar panels and surface shadows

5. 솔라쉐어링 일사량 해석

대상 시설이 설치된 실제 조건을 고려하여, 태양 고도, 방위각, 운량, 지점별 조도 분포 및 직산 분리 모델을 이용해 지표면에서의 시간별 조도 분포를 해석하였다. 해석 기간은 농작물의 일반적인 재배 기간인 3월부터 10월로 설정하였으며, 2016년을 대상으로 시계열 조도 결과를 도출하였다. 태양광 패널의 각도와 솔라팜의 방위각은 실제 설치 조건을 고려하여 각각 20°로 설정하였으며 운량은 2016년의 기상청 관측 자료를 활용하였다. 각 해석지점에 대한 일 적산 조도를 산정하여 전체 해석지점에 대한 일 적산 조도의 분포를 산정하고 이에 대한 월별 평균값을 산출하여 비교하였다.

태양광 패널의 설치 조건에 따른 일사량 변화를 분석하기 위해서는 태양광 패널의 각도와 간격을 조절하여 해석을 수행하였다. 패널의 각도에 따른 하루 일사량의 변화를 분석하기 위해 패널이 지표면과 수평을 이루는 0°부터 5°, 10°, 20°, 30°, 40°의 값에 대해 해석을 수행하였다. 이에 대한 일 적산 조도의 월별 평균값과 연 평균값인 연평균 조도를 산출하여 솔라쉐어링에 의한 조도 변화를 해석하였다. 태양광 패널의 간격에 따른 지표면 조도의 영향을 분석하기 위해서는 패널의 간격을 기존의 1:2 (패널의 폭 : 패널의 간격)와, 간격을 좁힌 1:1의 조건에 대해 해석을 수행하였다. 이때 패널의 각도는 20°와 40°의 조건을 설정하였으며, 해석 결과에 대한 일 적산 조도의 연 평균값을 산출하여 솔라쉐어링에 의해 변화된 조도의 비율을 산정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 태양 고도 및 운량에 따른 조도

가. 태양 고도에 따른 조도

청주 기상대의 위도와 일시에 따른 태양 고도를 산출하여, 기상청에서 제공하는 일사량 자료와의 관계를 도출하였다 (Fig. 5). 해당 자료의 관계에서 자료의 개수가 적지 않고 뚜렷한 S 곡선 형태의 추세 모양을 보였기 때문에 다른 선형, 지수, 로그 등의 추세선보다 다항식을 이용한 추세선이 가장 적합

하다고 판단되었다. 또한 그 차수를 결정하기 위해서는 차수를 올리면서 결정계수가 가장 높고 자료의 구조에 가장 적합한 차수를 선택하였다. 이때 5차에서 6차로 차수를 증가시킬 때에는 결정계수의 값이 거의 증가하지 않았고, 자료의 전반적 형태가 짝수 차항의 추세선보다는 홀수 차항의 추세선이 적합하다고 판단되어 5차의 다항식을 이용하였다. 그 결과, 결정계수는 0.9864로 나타나 해당 회귀분석이 두 자료간의 관계를 충분히 설명하는 것으로 분석되었다. 해당 관계식은 식 (8)과 같이 나타났다.

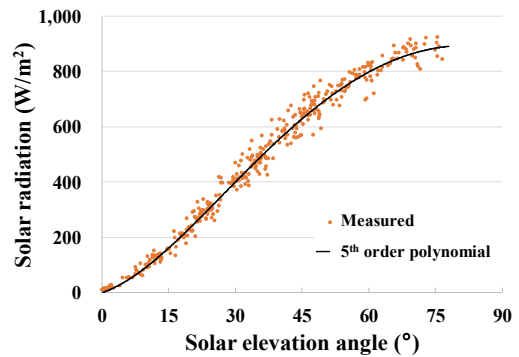


Fig. 5 Relation between solar radiation and solar elevation angle in Cheongju in 2016, cloud amount : 0

$$I_0 = (1.331 \times 10^{-7})h^5 + (5.111 \times 10^{-5})h^4 + (8.160 \times 10^{-3})h^3 + (4.652 \times 10^{-1})h^2 + 5.441h \quad (8)$$

나. 운량에 따른 조도

일사량은 운량에 따라 식 (2)에 의해 감소하게 되며, 이때 운량에 의한 소광계수를 산정하기 위해 태양 고도에 따른 운량이 10일 때의 일사량 자료를 분석하였다 (Fig. 6). 해당 자료의 평균 제곱근 편차 (RMSE)를 최소화하는 함수를 산정하여, I_{10} 과 I_0 의 관계를 분석하였다. 그 결과, β_{10} 는 0.243으로 산정되었다. 운량에 따른 소광계수를 일반화하기 위해 전체 일사량 자료에 대한 평균을 이용하였으며, 그 결과 운량과 소광계수의 관계를 식 (9)와 같이 도출하였다.

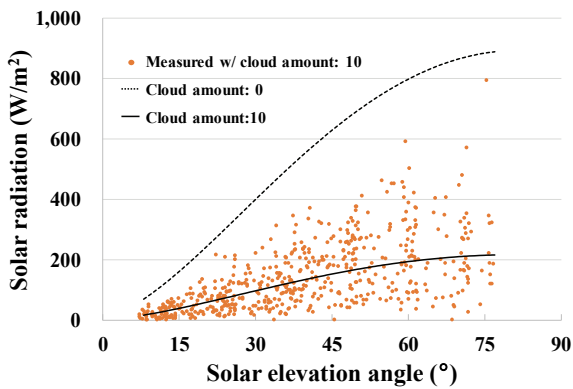


Fig. 6 Relation between solar radiation and solar elevation angle in Cheongju in 2016, cloud amount : 10

$$\beta_n = 1 - 0.757 \left(\frac{n}{10}\right)^{2.97} \quad (9)$$

2. 슬라웨어링 하부 지점별 조도 분석

슬라웨어링 하부에 도달하는 일사에 따라 구분된 S1, S2, S3 지점의 조도 측정결과는 Fig. 7과 같다. 조도는 2017년 3월 13일, 맑은 기상조건에서 12시부터 17시까지 1분 간격으로 측정되었다. 이에 대한 기술통계 분석 결과, 일반 노지에 해당하는 S1 지점의 경우 최대 96,910 lux의 조도를 나타냈으며, S2과 S3 지점에서는 각각 최대 83,970 lux, 31,020 lux의 조도를 나타냈다. 시간이 지남에 따라 조도는 감소하여 각 지점별로 19,858 lux (S1), 13,491 lux (S2), 11,997 lux (S3)의 최솟값을 나타냈다. 또한 해당 측정 기간 동안 평균 조도는 S1 지점부터 각각 65,500 lux, 53,522 lux, 24,678 lux로 분석되었다.

S1과 S2 지점에서 측정된 조도는 시간에 따라 비슷한 경향을 가지며 감소하거나 증가한 것으로 나타났다. 그러나 S1과 S3 지점의 비교 시, 그 경향이 다른 것을 확인할 수 있었다. 이는 S3 지점은 태양광 패널에 의해 직달일사가 차단되고 산란일사만 도달하는데 직달일사는 구름 등에 의해 순간적인 변화가 일어나는 반면, 산란일사는 비교적 일정하게 유지되기 때문이다. 따라서 직달일사가 S3 지점보다 비교적 많이 도달하는 S2 지점은 S1과 유사한 경향을 나타낸 것으로 분석되었다. 지점 구분에 따른 조도 해석을 위해, S1에서 측정된 자료로부터 최소제곱근 보간법을 통해 S1의 조도에 대한 S2 조도의 비율을 0.824로 산정하였다. 같은 방법으로, S3 지점의 비율은 0.380으로 산정되었다. 이를 통해 S1에서 산출된 조도를 이용하여 S2 및 S3에서의 조도를 해석하였다.

S2 및 S3 지점에서 각각 분석된 S1에 대한 조도의 비율을 검증하기 위해 2017년 7월 21일 1분 간격으로 측정된 조도

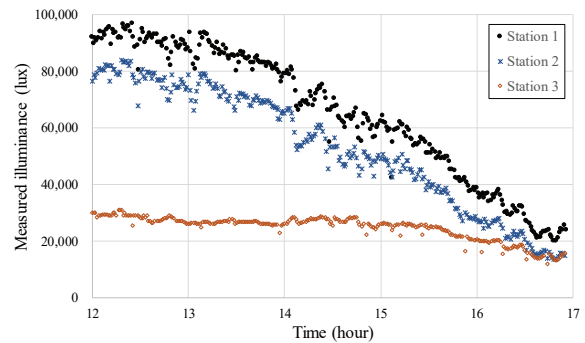
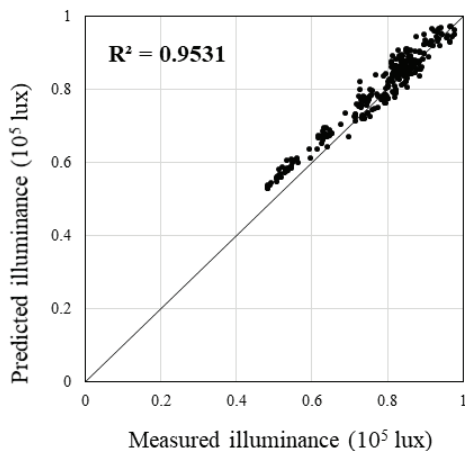
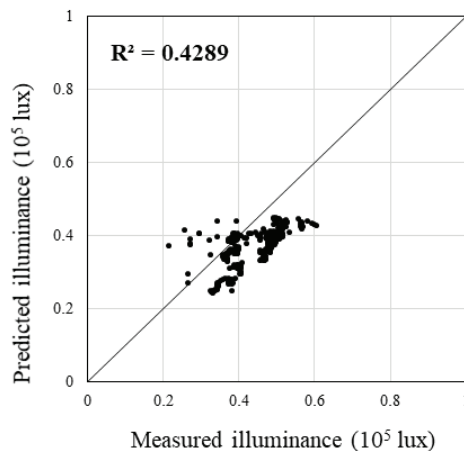


Fig. 7 Measured illuminance in various stations on 13th March 2017



(a) Calibration of ratio of illuminance between station 1 and station 2



(b) Calibration of ratio of illuminance between station 1 and station 3

Fig. 8 Calibration of ratio of illuminance on 21st July 2017

Table 1 Statistical indices for calibration of ratio of illuminance

Statistical index	S2 (using ratio of illuminance between S1 and S2)	S3 (using ratio of illuminance between S1 and S3)
R^2	0.9531	0.4289
$RMSE$	0.0339	0.0898
NSE	0.9291	-0.5485
$PBIAS$	-0.0227	0.1628

자료를 이용하였으며, Fig. 8과 Table 1은 그 검정 결과를 나타낸다. S2 지점의 검정 결과, 0.9531의 높은 결정계수 (R^2)와 0.9291의 높은 NSE 가 산정되었지만, S3 지점의 검정 결과, 그 적합성이 없다고 분석되었다. 즉, 태양광 패널 사이의 간격을 통해 감소된 일사가 도달하는 S2 지점의 경우에는 직달일사가 큰 비중을 차지하며 S1 지점과 매우 비슷한 양상을 보였으나, S3 지점의 경우 태양광 패널에 의해 직달일사가 차단되고 산란일사만 도달하는 지점이기 때문에 S1에 대한 비율만으로 일사를 해석하기에는 어려움이 있었다. 따라서 해당 지점에서의 조도 해석을 위해서는 전체 일사로부터 산란일사를 도출할 수 있는 Watanabe 직산 분리 모델을 이용하였다.

3. 솔라쉐어링 일사량 해석 결과

가. 월별 조도 해석

앞서 분석된 태양 고도 및 운량에 따른 일사량과 지점별 조도 해석 결과를 바탕으로 솔라쉐어링 일사량 모델을 설계하였으며, 이를 통해 일 적산 조도의 해석과 월별 조도 분석을 수행하였다. 월별 조도 분포에 대한 해석지점별 기술통계 분석 결과는 Table 2와 같다. 월별 조도의 분석 결과, 5월의 조도가 다른 월보다 높게 산출되었으며, 10월의 조도가 가장 낮게 산출되었다.

5월, 8월, 10월에 대한 월별 조도 분포의 입체도는 Fig. 9, Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 이때 지표면의 x 축이 남쪽과 이루는 각은 대상 시설의 방위각인 20° 이다. 솔라쉐어링에 의해 영향을 받지 않는 지점 S1과 태양광 패널 하부의 S3 지점의 일 적산 조도는 최대 42%까지 차이를 보였다. 10월의 월평균 조도는 다른 월에 비해 낮게 산출되었지만, 지점별로 그 변동 폭은 크지 않은 것으로 나타났다. 반면 5월의 월평균 조도는 높게 산출되었지만, 지점별 최댓값과 최솟값의 차이가 크며 큰 변동 폭을 보였다.

나. 패널 각도 및 간격에 따른 조도 해석

태양광 패널의 각도에 따른 월별 조도 해석과 연평균 조도의 해석 결과는 Fig. 12와 같다. 솔라쉐어링이 없을 때의 일

Table 2 Descriptive statistics of monthly illumination intensity analysis results

Month	Max. (lux)	Min. (lux)	Average (lux)
March	503,932	314,035	379,938
April	578,274	362,015	440,011
May	725,329	419,019	544,777
June	680,675	415,091	530,798
July	536,494	371,481	431,282
August	648,578	417,472	495,496
September	413,763	290,737	332,480
October	320,899	211,205	253,479

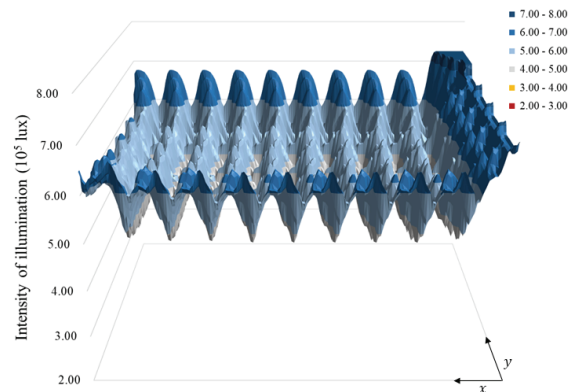


Fig. 9 Distribution of monthly illumination intensity in May 2016

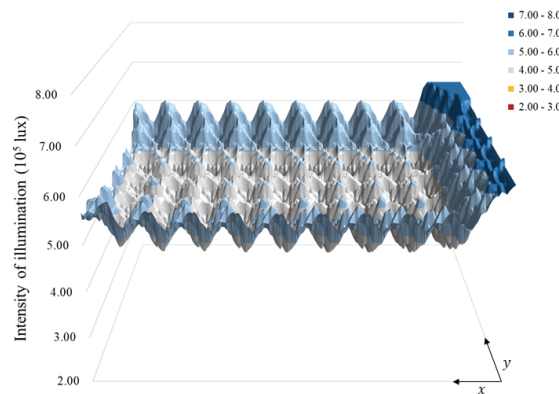


Fig. 10 Distribution of monthly illumination intensity in August 2016

적산 조도 해석 결과와 각 조건에서의 결과를 비교한 비율을 산정하였으며, 연평균 조도 해석은 3월부터 10까지의 결과의 평균으로 산출하였다. 그 결과, 솔라쉐어링 설치에 따른 조도는 노지와 비교하여 최대 80.1%, 최소 73.8%로 감소한 것으로 나타났다. 각 월별로 하루 동안 같은 시각에 대해서 태양의 고도가 다르기 때문에 일사량의 변화는 월별로 차이

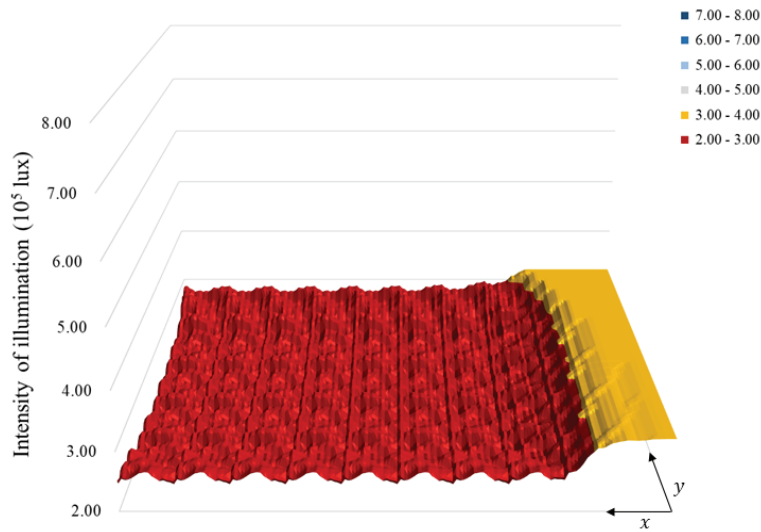


Fig. 11 Distribution of monthly illumination intensity in October 2016

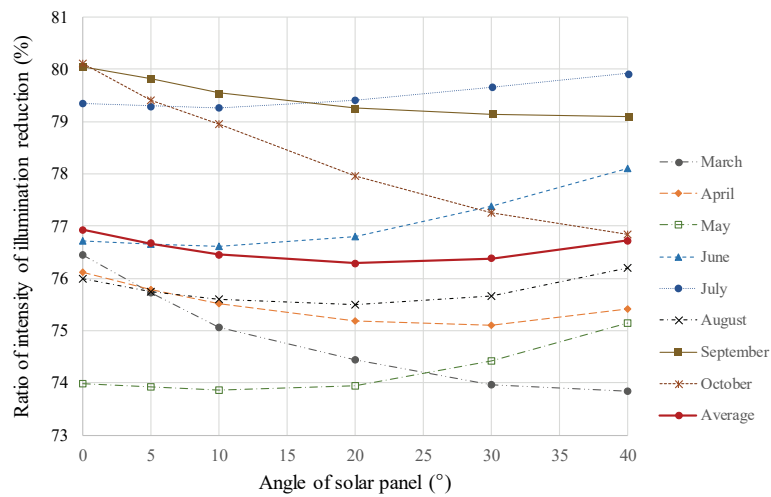


Fig. 12 Ratio of monthly illumination and annual average illumination according to the angle of solar panel

를 나타냈다. 특히 4월부터 8월까지의 기간에는 패널의 설치 각도가 증가할수록 지표면에 도달하는 조도가 증가하는 것으로 나타났고, 3월, 9월, 10월에는 각도가 증가할수록 조도가 감소하였으며, 이는 계절에 따라 태양의 고도 특성이 다르기 때문으로 분석된다. 봄과 가을에 해당하는 3월과 10월에는 태양의 고도가 낮아 태양광 패널에 의해 생성되는 그림자의 면적이 비교적 넓게 나타나며, 패널의 각도에 더 민감하게 반응한 것으로 분석되었다. 특히 10월에는 0°의 패널 각도가 40°로 변화함에 따라 조도의 비율이 80.1%에서 76.8%로 감소함을 확인할 수 있었다. 따라서 패널 각도별 지표면에 도달하는 일사량의 변화는 태양 고도가 낮은 봄과 가을의 계절에서 더

크게 나타나며, 해당 기간 동안의 적절한 패널 각도 조절이 필요하다.

각도에 따른 연평균 조도의 해석 결과에서는 그 변동 폭이 76.9%에서 76.3%로 매우 작아 각도에 따른 연평균 조도의 차이가 크지 않았다. 따라서 기간에 따른 패널 각도의 조절이 어려운 환경에서는 태양광 발전의 효율을 최대화시킬 수 있는 각도로 패널이 설치되어야 한다.

태양광 패널의 설치 간격에 따른 솔라쉐어링 일사량 모델의 해석 결과는 Table 3과 같다. 태양광 패널의 폭과 패널 간의 간격이 기존보다 좁혀진 1:1의 조건에서 연평균 조도는 솔라쉐어링이 설치되지 않은 노지와 비교하여 71.76%로 감소하였

Table 3 Annual average illumination according to solar panel spacing and angle

Width of solar panel : spacing between panels	Angle of panel (°)	Annual average illumination (lux)	Ratio (%)
N/A	N/A	550,203.5	100.00
1:1	20	395,389.5	71.76
	40	399,205.7	72.46
1:2	20	419,701.2	76.28
	40	422,071.8	76.72

으며, 패널 간의 간격이 기존의 1:2인 설치 조건에서는 76.28%로 감소한 것으로 분석되었다. 또한 패널 각도를 20°에서 40°로 증가시켰을 시, 1:1의 간격에서는 72.46%, 1:2의 간격에서는 76.72%로 나타나 1:1의 간격으로 설치되었을 때에도 각도 조절에 따른 조도 변화의 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 따라서 기존에 설치되었던 연구대상 시설보다 좁은 간격으로 설치되어도 일사량이 매우 큰 폭으로 감소하지는 않을 것으로 분석되었으나, 1:1의 간격보다 지나치게 좁혀질 경우에는 일사량에 큰 변화가 있을 것으로 판단된다. 반면 간격이 증가할 경우에는 같은 솔라쉐어링 재배 면적에 대해 패널의 설치 대수와 그 면적이 현저하게 감소하기 때문에 태양광 발전량이 크게 감소할 수 있어 이를 고려한 솔라쉐어링 설치가 필요하다.

솔라쉐어링에 따른 일사량 변화를 해석한 결과, 태양광 패널 설치에 따라 일사량의 감소가 연평균을 기준으로 약 23%에서 28% 수준으로 나타났다. 따라서 많은 일사량이 요구되는 작물보다는 적은 일사량에도 재배가 수월한 농작물이 솔라쉐어링에 적합할 것으로 사료된다. 또한 광포화점이 낮거나 강한 비와 우박에 취약한 농작물을 재배할 경우, 태양광 패널이 불필요한 일사량을 차단하고 비가림막의 역할을 수행할 수 있어 작물생산량을 개선할 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구에서 해석한 일사량 외에도 작물생육에 영향을 주는 환경 요인은 다양하며, 한정된 솔라쉐어링 규격시설에 대해 해석한 한계를 가진다. 뿐만 아니라 본 연구에서 고려한 태양 고도와 운량 외에도 미세먼지 및 황사 등의 에어로졸에 따라서도 일사량이 변화할 수 있다. 대규모 재배단지에 적용될 경우에는 농작업의 편의성과 농기계의 활용성, 그리고 시설에 대한 구조안전성 또한 충분히 확보되어야 한다. 따라서 국내 기상환경에 적합한 솔라쉐어링에 대한 추가적인 연구개발과 체계적 시설설계 보급이 필요하며, 이를 통해 농촌의 새로운 수입원 창출과 한국형 친환경 에너지 기술 확보를 가져올 수 있을 것으로 기대한다.

IV. 결론

솔라쉐어링에 따른 지표면에 도달하는 일사량의 변화를 분석하기 위해 시뮬레이션 모델을 설계하여 월별 조도 해석 및 태양광 패널 설치 조건에 따른 조도의 해석을 진행하였다. 이를 위해 태양 고도와 일사량과의 관계 및 일사량과 조도와의 관계를 이용하였으며, 운량과 지점별 조도 분석, 그리고 직산 분리 모델을 이용하여 조도 분포를 해석하였다. 그 결과, 솔라쉐어링 태양광 패널에 의해 직달일사가 도달하지 못하고 그림자가 생기는 지점은 솔라쉐어링이 설치되지 않은 지점과 비교하여 일사량이 42%까지 감소할 수 있는 것으로 나타났다. 연평균 조도를 고려할 때에는 솔라쉐어링에 따른 일사량의 감소가 약 23%에서 28% 수준으로 분석되었다.

또한 태양의 고도가 높은 기간일수록 솔라쉐어링에 따른 일사량의 변화가 지점별로 큰 변동 폭을 나타내는 것으로 분석되었다. 패널 각도에 따른 조도 해석에서는 태양 고도가 낮은 계절일수록 발생하는 그림자 면적이 넓기 때문에 일사량의 변화가 패널의 각도에 더 민감하게 반응한 것으로 분석되었다.

연평균 일사량 감소의 패널 각도에 따른 차이는 매우 작은 것으로 나타났다. 따라서 패널 각도의 조절이 어려운 조건에서는 태양광 발전의 효율을 최대화시킬 수 있도록 설치해야 한다. 패널 설치 간격에 따른 조도 해석 결과에서는 간격이 절반으로 좁혀지더라도 도달하는 조도가 작은 폭으로 감소하는 것으로 그쳤으나, 지나치게 감소하거나 증가된 간격으로 설치할 경우 일사량과 태양광 발전량이 크게 변화할 수 있어 이를 고려한 솔라쉐어링 설치가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 SK D&D 민간지원사업의 지원을 받아 수행되었음 (과제명 : 영농형 태양광발전 사업의 농작물 생태환경 연구 용역).

REFERENCES

1. Amir, J., and T. R. Sinclair, 1991. A model of the temperature and solar-radiation effects on spring wheat growth and yield. *Field Crops Research* 28(1-2): 47-58. doi: 10.1016/0378-4290(91)90073-5.
2. Batorova, S., 2015. Solar sharing in Japan: Opportunities and experiences. <http://st.sustainability.k.u-tokyo.ac.jp>. Accessed 15Mar. 2019.

3. Choi, D. J., 2009. Comparison researches for installation of the module angles and array spacing on photovoltaic power system. *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers* 23(1): 162-168 (in Korean).
4. Dupraz, C., H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier, and Y. Ferard, 2011. Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* 36(10): 2725-2732. doi:10.1016/j.renene.2011.03.005.
5. Falster, D. S., and M. Westoby, 2003. Leaf size and angle vary widely across species: What consequences for light interception?. *New Phytologist* 158(3): 509-525. doi:10.1046/j.1469-8137.2003.00765.x.
6. Hunt, L. A., L. Kuchar, and C. J. Swanton, 1998. Estimation of solar radiation for use in crop modelling. *Agricultural and Forest Meteorology* 91(3-4): 293-300. doi:10.1016/S0168-1923(98)00055-0.
7. Igawa, N., H. Nakamura, and K. Matsuura, 1999. Sky luminance distribution model for simulation of daylight environment. In *Proceedings of Building Simulation 1999*, 969-975, Kyoto, Japan.
8. Igawa, N., H. Nakamura, T. Matzusawa, Y. Koga, K. Goto, and S. Kojo, 1997. Sky luminance distribution between two CIE standard skies1. 2. In *Proc. Lux Pacifica*, E7-E18.
9. Janiak, T., 2017. Crops and solar farms - Solar sharing. <https://tomaszjaniak.wordpress.com>. Accessed 29Mar. 2019.
10. Je, S. M., S. G. Son, S. Y. Woo, K. O. Byun, and C. S. Kim, 2006. Photosynthesis and chlorophyll contents of *Chloranthus glaber* under different shading treatments. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 8(2): 54-60 (in Korean).
11. Lee, S. I., J. J. Lee, J. Y. Choi, W. Choi, and S. J. Seong, 2019. Agricultural solar photovoltaic power generation to share solar energy, solar-sharing. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers* 61(4): 2-11 (in Korean).
12. Lee, Y. G., S. Y. Kang, and K. H. Kim, 2003. A development of the solar position tracker on the program method for the small typed stand-alone PV system commercialization. *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics* 8(3): 260-265 (in Korean).
13. Mo, X., S. Liu, Z. Lin, Y. Xu, Y. Xiang, and T. R. McVicar, 2005. Prediction of crop yield, water consumption and water use efficiency with a SVAT-crop growth model using remotely sensed data on the North China Plain. *Ecological Modelling* 183(2-3): 301-322. doi:10.1016/j.ecolmodel.2004.07.032.
14. Nagashima, A., 2015. Change Japan, Change the World! Advise of "Solar Sharing". Tokyo, Mass.: Rick.
15. Shim, J. S., and D. S. Song, 2016. Validity of the solar radiation decomposition model in domestic regions. *Proceedings of Architectural Institute of Korea* 36(2): 567-568 (in Korean).
16. Shim, J. S., and D. S. Song, 2017. Applicability of the direct-diffuse insolation decomposition models considering the domestic sky conditions. In *Proceedings of the SAREK 2017 Summer Annual*, 763-766 (in Korean).
17. Trnka, M., J. Eitzinger, P. Kapler, M. Dubrovský, D. Semerádová, Z. Žalud, and H. Formayer, 2007. Effect of estimated daily global solar radiation data on the results of crop growth models. *Sensors* 7(10): 2330-2362. doi:10.3390/s7102330.
18. Vartiainen, E., 2000. A comparison of luminous efficacy models with illuminance and irradiance measurements. *Renewable Energy* 20(3): 265-277. doi:10.1016/S0960-1481(99)00115-9.
19. Watanabe, T., Y. Urano, and T. Hayashi, 1983. Procedures for separating direct and diffuse insolation on a horizontal surface and prediction of insolation on tilted surfaces. *Transactions of the Architectural Institute of Japan* 330: 96-108. doi:10.3130/aijsaxx.330.0_96.
20. Yang, I. H., K. W. Kim, and M. H. Kim, 1991. A study on the luminous efficacy of solar radiation in Seoul area. *Architectural Research* 7(3): 261-268 (in Korean).
21. Yoon, C., S. Choi, K. N. An, J. H. Ryu, H. Jeong, and J. Cho, 2019. Preliminary experiment of the change of insolation under solar panel mimic shading net. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 21(4): 358-365 (in Korean). doi:10.5532/KJAFM.2019.21.4.358.
22. Yoon, K. C., G. Yoon, and K. S. Kim, 2011. Comparison of measurement and calculation model of solar luminous efficacy for all sky conditions in Seoul. *Journal of the Korean Solar Energy Society* 31(6): 86-94 (in Korean). doi:10.7836/kses.2011.31.6.086.