태양전지 모듈 상부 및 하부 일조량을 고려한 영농형 태양광발전시스템 설계

권오현¹ · 이경수^{2†}

¹한국산업기술대학교 에너지·전기공학과, 석사과정

²한국산업기술대학교 에너지·전기공학과, 부교수

Agrophotovoltaic Designs : Irradiation Analysis on and under PV Modules

Kwon Oh-Hyun¹ · Lee Kyung-Soo^{2†}

¹Master Course Student, Department of Energy & Electrical Engineering, Korea Polytechnic University

²Associate Professor, Department of Energy & Electrical Engineering, Korea Polytechnic University

[†]Corresponding author: kyungsoolee@kpu.ac.kr

Abstract

To secure agricultural benefits and PV power generation from an agrophotovoltaic system, it is vital that the PV modules and the crop are both irradiated by light. The configuration and design of PV modules have a practical effect on the irradiation uniformity in an agrophotovoltaic system. Irradiation non-uniformity can cause crop growth delays and quality deterioration during different cultivation periods. This paper proposes the design considerations and parameters of an agrophotovoltaic system to optimize crop yield and power energy production. The design parameters are the PV module installation height, ground coverage ratio, tilt angle, azimuth angle, and PV module installation type. The PV module installation type is classified into dual-axis tracking, single-axis tracking, south fixed, and horizontal fixed. We configured a 3D modeling simulation platform to visualize and analyze irradiation under the PV module. Finally, we suggest three evaluation parameters: The overall mean under PV modules, the overall standard irradiation deviation under PV modules, and the transposition factor of the agrophotovoltaic designs.

Keywords: 영농형 태양광발전시스템(agrophotovoltaic, agrivoltaic, agri-PV), 차광률(ground coverage ratio), 주연효과(border effect), 양축 추적식 시스템(dual-axis tracking system), 단축 추적식 시스템(single-axis tracking system), 정남 경사 고정식 시스템(south fixed system), 수평 고정식 시스템(horizontal fixed system), 전 수평면 일조량(global horizontal irradiation)

1. 서론

영농형 태양광발전시스템은 화석 연료 의존도를 포함한 농촌 에너지 문제를 해결하고 안정적인 농촌 수입원을 제공할 수 있다. 영농형 태양광발전시스템의 주요 목표 중 하나는 농경지의 농작물 수확량을 유지하면서 동시에 전력 에너지를 생산하는 것이다. 일조량, 일조 시간, 기온, 강수량 등과 같은 기상 데이터는 농작물 수확에 있어서 양과 질에 영향을 준다.

Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.41, No.2, pp.9-23, April 2021
<https://doi.org/10.7836/kjes.2021.41.2.009>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 10 February 2021

Revised: 22 February 2021

Accepted: 28 February 2021

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.

특히, 일조량은 농작물의 성장 속도, 크기 및 수확량에 큰 영향을 준다¹⁾. 영농형 태양광발전시스템에서 농작물 수확량은 태양전지 모듈의 하부 일조량에 따라 달라질 수 있다²⁻⁴⁾. 또한, 태양전지 모듈의 하부 일조량에 따라 발생하는 그림자는 덥고 건조한 시기에 농지의 증발산량 감소시켜 농작물의 수확량을 증가시키거나 음지의 농지 증가로 인해 태양전지 모듈 표면 온도 감소와 이를 통해 생산되는 전력 에너지 증가 등의 장점이 있다⁵⁾. 보고에 따르면 태양전지 모듈의 하부음영 범위에 따라 해당 농지에서 14 ~ 29%의 절수 효과를 확인하였다⁶⁾.

반면, Table 1과 같이 태양전지 모듈 하부 일조량이 증가해도 더 이상 광포화점 이후에 광합성이 증가하지 않으므로 작물의 성장을 감소시킬 수 있다⁴⁾. 또한, 태양전지 모듈 하부의 불균일한 일조량은 작물의 불규칙한 성장으로 이어지며 또한 수확시기가 달라지는 문제를 일으킨다.

Table 1 Light saturation points of selected crops⁴⁾

Crops	Light Saturation Points (KLX)	Crops	Light Saturation Points (KLX)
Corn	80-90	Rice	40-45
Watermelon	80-90	Carrot	40
Tomato	80	Turnip	40
Taro	80	Sweet potato	30
Cucumber	55	Lettuce	25
Pumpkin	45	Green pepper	20-30
Blueberry	45	Spring onion	25
Cabbage	45	Mushroom	>20

기존의 선행 연구는 태양전지 모듈의 하부 그림자(이하, 차광률)이 50%와 70%인 실증 단지에서 태양전지 모듈의 하부 일조량과 상추 수확량의 상관관계를 확인하였다⁷⁾. 연구에서는 태양전지 모듈의 하부 일조량이 전수 평면 일조량(Global Horizontal Irradiation, GHI) 대비 53%일 때 상추 수확량이 노지 대비 58 ~ 79%에 이르는 것으로 나타났다. 반면, 태양전지 모듈의 하부 일조량이 68 ~ 73%일 때 상추 수확량은 노지 대비 81 ~ 99%로 나타났다. 이러한 결과는 태양전지 모듈의 면적을 변경하여 모듈의 하부 일조량이 증가하면 이로 인해 농작물의 수확량을 높일 수 있고, 더불어 전력 에너지도 생산할 수 있다. 즉, 논문에서는 태양전지 모듈의 하부 차광률에 따른 설계 방법의 중요성을 강조하였다⁸⁾.

또한, 태양전지 모듈 및 어레이 설계는 하부 일조량의 균일성에 큰 영향을 미치는 것으로 밝혀졌으며⁹⁾, 태양전지 모듈의 하부 그림자는 해당 농지의 모서리에 있는 개체들이 농지의 중간에 있는 개체들과는 생육이 불규칙한 주변효과(border effect)를 초래할 수 있음을 제시하였다¹⁰⁻¹²⁾.

본 연구는 영농형 태양광발전시스템에서 농작물의 수확량과 전력 에너지 생산량을 최적화하기 위한 영농형 태양광발전시스템의 설계 고려사항과 설계 변수를 제안한다. 설계 고려사항의 핵심은 농작물을 우선적으로 고려한 일조량을 고려한 후에 태양전지 모듈에서 전력 에너지 생산량을 고려한 내용이다. 설계 변수는 태양전지 모듈 설치 높이, 차광률, 방위각, 경사각 및 태양전지 모듈 설치 형태를 제시한다. 여기서, 태양전지 어레이 설치

형태는 양축 추적식, 단축 추적식 및 고정식으로 구분한다.

영농형 태양광발전시스템의 설계 고려사항과 설계 변수를 분석하기 위한 도구로 3D 시각화 시뮬레이션 플랫폼을 구성하였다. 3D 시각화 시뮬레이션 플랫폼은 Rhinoceros 3D 소프트웨어, 그래픽 알고리즘을 편집하는 Grasshopper 프로그램 그리고 음영을 분석하는 Honeybee 및 Ladybug 플러그인 프로그램으로 구성된다. 이를 통해 영농형 태양광발전시스템의 모듈 하부 일조량 및 그림자를 시각화하여 분석한다.

마지막으로, 앞서 제시한 설계 고려사항에 따른 설계 변수를 평가하기 위하여 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량, 태양전지 모듈 하부 일조량의 표준 편차 그리고 전수평면 일조량 대비 경사면 일조량 비율(Transposition factor)을 평가 항목으로 검증한다.

2. 연구 방법

2.1 영농형 태양광발전시스템 설계 고려사항 및 설계 변수

지상형 태양광발전시스템 설계는 설치하고자 하는 장소에서 태양전지 모듈에 입사하는 최대 일조량과 설치 면적에 따른 태양전지 모듈 용량을 고려한다. 하지만, 영농형 태양광발전시스템은 농작물 수확량을 최우선으로 고려하고 이후에 태양전지 모듈로부터 전력 에너지 생산량을 고려한다.

Fig. 1은 영농형 태양광발전시스템의 설계 고려사항을 나타낸다. 첫 번째 단계는 해당 농작물의 광포화점과 동등 이상의 일조량이 확보되어야 한다. 두 번째 단계는 해당 농작물이 심겨진 농지의 모든 면적에서 균일한 일조량이 확보되어야 한다. 세 번째 단계는 일반적인 지상형 태양광발전시스템의 설계 절차와 동일하게 태양전지 모듈에 입사하는 최대 일조량을 고려한다. 마지막으로 해당 농지에 최대한의 태양전지 모듈 용량이 설치되도록 고려한다.

Fig. 1 Agrophotovoltaic design considerations and design flow

Table 2는 상기 Fig. 1에서 제시한 영농형 태양광발전시스템 설계 고려사항에 영향을 줄 수 있는 설계 변수들을 제시하였다. 대표적인 설계 변수는 태양전지 모듈의 설치 높이, 차광률, 방위각, 경사각 및 태양전지 모듈 설

치 유형이다. 이를 통해 태양전지 모듈 상부와 하부의 일조량을 분석하고 영농형 태양광발전시스템 설계 시 필수적으로 고려해야 할 사항과 설계 변수의 관계를 정량적으로 파악하고자 한다.

식(1)은 차광률이며 태양전지 모듈 면적을 농지 면적으로 나눈 값이 된다.

Table 2 Relationships between design considerations and designs parameters for agrophotovoltaic

Design considerations \ Design parameters	Height	GCR	Azimuth	Tilt angle	Installation type
Irradiation more than the light saturation point of the crop	○	○	○	○	○
Uniformity of the irradiation for the crop	○	○	○	○	○
Optimal irradiation on the PV modules			○	○	○
Maximum capacity of the PV modules		○			

Ground Coverage Ratio (GCR):

$$\frac{PV \text{ Modules area}}{Land \text{ area}} = \frac{PV \text{ Modules length}}{Distance \text{ row to row pitch}} \quad (1)$$

2.2 영농형 태양광발전시스템 시뮬레이션 플랫폼 구축

영농형 태양광발전시스템에서 태양전지 모듈의 상부 및 하부 일조량을 분석하는 방법으로 3D 모델링을 기반으로 한 Rhinoceros 3D 소프트웨어를 사용한다. 그래픽 알고리즘은 Grasshopper 프로그램을 이용하여 편집한다. 태양전지 모듈 하부에 대한 음영 분석은 Ray Tracing Model을 지원하는 Honeybee와 Ladybug 플러그인 프로그램을 사용한다^{13,14}. 태양전지 모듈 상부에 입사하는 일조량은 PVSYST 소프트웨어를 사용하여 정량적으로 분석한다¹⁵.

Fig. 2(a)는 영농형 태양광발전시스템 시뮬레이션 구성 플랫폼과 기능을 구성한 그림이다. Fig. 2(b)는 Grasshopper 프로그램에서 시각화 블록을 이용하여 추적식 시스템을 구현한 전체 도식도를 나타낸다. 도식도

Fig. 2 3D design modeling platform configuration and PV tracking algorithm map in the Grasshopper

Fig. 2 3D design modeling platform configuration and PV tracking algorithm map in the Grasshopper (Continued)

의 흐름은 기상데이터 입력, 태양궤적다이아그램 산출, 태양 추적 태양전지 모듈 구현, 태양전지 모듈 상부 일조량 산출, 태양전지 모듈 하부 일조량 산출, 데이터 추출 순으로 구현하였다.

3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 조건은 Table 3에 제시하였다. 대한민국 인천광역시를 기준으로 EnergyPlus 기반 Ladybug map¹⁶⁾에서 제공하는 2015년 인천광역시 Test Reference Year (TRY)를 사용하였다. 태양전지 모듈은 $922 \times 1964 \times 40$ mm (320 Wp, 72 cells) 상용 모듈을 세로로 구성하였다. 태양전지 모듈 설치 높이는 1 m부터 10 m 까지, 차광률은 30%부터 50%까지, 태양전지 모듈 경사각은 0° 부터 90° 까지, 태양전지 모듈 방위각은 -90° (동)부터 90° (서)까지를 시뮬레이션에서 설정하였다. 태양전지 모듈 설치 유형은 고정식 시스템과 추적식 시스템으로 구성하였고, 추적식 시스템은 다시 양축 추적식 시스템 및 단축 수평 추적식 시스템으로 구성하였다.

Table 3 Simulation conditions and parameters

Conditions	Values
Location	Incheon, Republic of Korea
Simulation weather data	Incheon TRY in 2015
Module information	Poly-Si / 320 Wp / $992 \times 1964 \times 40$ mm (W × H × D)
Module height	1 m to 10 m (by 1m)
Ground Coverage Ratio (GCR)	30% to 50% (by 10%)
PV module tilt angle	0° to 90° (by 10°)
PV module azimuth angle	-90° east to 90° west (by 10°)
PV array installation type	Dual-axis tracking / Single-axis tracking / South fixed / Horizontal fixed

Fig. 3은 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량과 이에 따른 표준편차를 정량적으로 확인하기 위한 태양전지 모듈 구성과 가상 센서 포인트를 나타낸다. 태양전지 모듈 구성은 고정식으로 하였고, 모듈 설치 높이는 지상으로 부터 0.5 m로 설정하였다. 가상 센서 포인트는 모듈 하단 시작점 높이 0.5 m 이후, 면적 당 0.25 m² 간격으로 배치하였다. 태양전지 모듈을 정면과 측면에서 바라볼 때 태양전지 모듈의 하부 일조량과 표준편차를 나타냈고, 이를 통해 정량적인 주변효과를 파악할 수 있도록 하였다.

Fig. 3 The visualization analysis result of the irradiation uniformity under PV modules and its border effect

태양전지 모듈 하부의 평균 일조량은 태양전지 모듈의 하부 일조량을 전수평면 일조량으로 나눈 값으로 식(2)와 같이 백분율로 정의할 수 있다. 이를 통해 태양전지 모듈의 하부 일조량 평균값, 하부 일조량의 표준편차를 계산할 수 있다.

태양전지 모듈 상부에 대한 일조량은 전수평면 일조량 대비 태양전지 모듈과 동일한 경사면 일조량의 비율 (Transposition factor)을 식(3)과 같이 나타낸다.

$$\text{Ratio under PV modules Irradiation (RPI)} = \frac{\text{Irradiation under PV modules}}{\text{Global horizontal irradiation}} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Transposition Factor} = \frac{\text{Incident irradiation on the PV module}}{\text{Global horizontal irradiation}} \times 100 \quad (3)$$

Table 4는 시뮬레이션 수행을 위한 설정 조건을 나타낸다. 시뮬레이션 해석은 앞서 언급한 시스템 구성을 기반으로 5가지 설계 변수(태양전지 모듈 설치 높이, 차광률, 방위각, 경사각, 모듈 설치 유형)에 따라 가상 일조량 센서를 통해 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량, 태양전지 모듈 하부 일조량의 표준편차를 산출하여 태양전지

모듈 하부 일조량의 균일도를 평가한다. 또한, 전수평면 일조량 대비 경사면 일조량의 비율을 통해 태양전지 모듈 상부 일조량에 따른 전력 에너지 생산량을 평가한다.

Table 4 Simulation conditions for the design parameters

Parameters	Simulation conditions
Height (3.1)	GCR : 40%, Azimuth : 0° (S), Tilt angle : 30°, Fixed, System area : 22 m × 24 m, Analysis period : 1 year
GCR (3.2)	Height : 3 m, Azimuth : 0° (S), Tilt angle : 30°, Fixed, System area : 22 m × 24 m, Analysis period : 1 year
Tilt angle & Azimuth angle (3.3)	Height : 3 m, GCR : 40%, Fixed, System area : 22 m × 24 m, Analysis period : 1 year
Installation type (3.4)	Height : 3 m, GCR : 34%, System area : 16 m × 14 m, Analysis period : 6 months

3.1 태양전지 모듈 설치 높이에 따른 태양전지 모듈의 하부 일조량 분석

태양전지 모듈의 설치 높이를 1 m부터 10 m까지 1 m 씩 변경하며 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 초기 설정은 태양전지 모듈 하부의 차광률 40%, 태양전지 모듈 경사각 30°, 방위각 0° (남향), 태양전지 모듈 설치 유형은 고정식 시스템, 시스템 면적은 22 m × 24 m, 분석 기간은 1년으로 하였다.

Fig. 4는 태양전지 모듈의 설치 높이 따른 하부 일조량 분석 결과를 나타내었다. 태양전지 모듈 높이가 증가할 수록 모듈 하부의 평균 일조량의 증가를 나타냈다. 이 추세는 $y = 2.56x + 58.95$ 로 산출되었다. 또한, 태양전지 모듈의 높이가 증가하면 모듈 하부 일조량의 표준 편차는 감소하였다. 특히, 표준 편차가 높이 1 m에서 27.6%, 2 m에서 15.5%, 3 m에서 12.1%로 나타났으며, 3 m 이후부터는 표준 편차의 감소율 변화가 미미하였다. 따라서 영농형 태양광발전시스템에서는 태양전지 모듈의 설치 높이는 최소 3 m 이상으로 고려하는 것이 바람직함을 알 수 있었다.

Fig. 4 The overall irradiation mean and standard irradiation deviation which varies with height

3.2 태양전지 모듈 설치 이격거리와 차광률에 따른 태양전지 모듈의 하루 일조량 분석

태양전지 모듈 설치로 인한 차광률은 30%부터 50%까지 10%씩 변경하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 설정은 태양전지 모듈 설치 높이를 3 m, 태양전지 모듈 경사각을 30°, 방위각을 0°(남향), 태양전지 모듈 설치 유형은 고정식 시스템, 시스템 면적은 22 m × 24 m, 분석 기간은 1년으로 하였다.

Fig. 5는 연속적인 태양전지 모듈에 대한 차광률에 따른 하루 일조량 분석 결과를 나타낸다. 첫째, 태양전지 모듈 차광률이 증가하면 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량이 감소함을 확인하였다. 이와 같은 추세는 $y = -7.4844x + 81.646$ 로 산출되었다.

둘째, 태양전지 모듈 차광률에 따른 태양전지 모듈 하부 일조량의 표준편차는 차광률이 30%에서 10.7%, 차광률이 40%에서 12.1%, 그리고 차광률이 50%에서 14.3%가 나타났다. 즉, 차광률이 증가하면 태양전지 모듈 하부 일조량의 표준편차도 함께 증가함을 확인하였다.

Fig. 5 Overall irradiation mean and standard irradiation deviation which varies with distance and GCR

Fig. 6은 연속적인 태양전지 모듈 배치와 불연속적인 태양전지 모듈 배치에 대하여 태양전지 모듈의 설치 이격거리와 차광률과의 관계를 고려한 시뮬레이션 결과를 나타낸다. Case 1의 (a)와 (b)는 태양전지 모듈의 설치 이격거리는 동일하지만 차광률이 다른 경우이다. (a)는 태양전지 모듈의 설치 이격거리는 5 m이고, 차광률은

40%를 나타낸다. (b)는 태양전지 모듈의 설치 이격거리는 5 m이고, 차광률은 20%이다.

Case 2의 (c)와 (d)는 태양전지 모듈의 설치 이격거리는 다르지만, 차광률이 동일한 경우이다. (c)는 태양전지 모듈의 설치 이격거리는 6.67 m이고, 차광률은 30%를 나타낸다. (d)는 태양전지 모듈의 설치 이격거리는 5 m이고, 차광률은 30%이다.

Case 1과 Case 2에서 태양전지 모듈의 설치 이격거리는 동지 시 태양고도각이 20° 일 때 최소 이격거리는 약 4.5 m이며, 이때 전면에 설치된 태양전지 모듈이 후면에 설치된 태양전지 모듈에 음영을 발생시키지 않는 조건을 고려하였다.

Fig. 6 Regular and irregular PV module layout considering distance and GCR parameters

Table 5는 Fig. 6의 시뮬레이션 분석 결과를 요약한 내용이다. Case 1에서 (a)와 (b)를 비교한 결과, 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량이 약 16.9% 차이가 발생하였고, 태양전지 모듈 하부 일조량의 표준편차는 6.1%로 차이가 발생하는 것으로 나타났다.

Case 2에서 (c)와 (d)를 비교한 결과, 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량이 0.8% 차이가 발생하였고, 표준편차는 2% 차이가 발생하였다.

Case 1과 Case 2를 통해서 (b), (d)와 같이 불연속적인 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량이 크고, 표준편차는 낮음을 확인하였다. 또한, 태양전지 모듈 하부의 차광률이 동일한 상황에서 태양전지 모듈의 설치 이격거리가 짧아지면 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량과 표준편차가 향상됨을 확인하였다.

Table 5 Overall irradiation mean and standard irradiation deviation based on Case 1 and Case 2

Evaluation item	Cases	Case 1		Case 2	
		(a) Dis. 5 m, GCR 40%	(b) Dis. 5 m, GCR 20%	(c) Dis. 6.67 m, GCR 30%	(d) Dis. 5 m, GCR 30%
Overall irradiation mean under PV modules [%]		66.5	83.4	74.2	75
Overall standard irradiation deviation under PV modules [%]		12.1	6.2	11.1	9.1

3.3 태양전지 모듈 경사각과 방위각에 따른 태양전지 모듈 하부 일조량 및 상부 일조량 관계

태양전지 모듈 경사각은 0° 부터 90° 까지 10° 씩, 방위각은 -90° (동쪽)부터 90° (서쪽)까지 10° 씩 변경하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 설정은 태양전지 모듈 설치 높이 3 m, 태양전지 모듈 하부의 차광률 40%, 태양전지 모듈 설치 유형은 고정식 시스템, 시스템 면적은 $22\text{ m} \times 24\text{ m}$, 분석 기간은 1년으로 하였다.

Fig. 7은 태양전지 모듈의 경사각과 방위각에 따른 하부 일조량 변화를 나타낸다. (a)에서 경사각 30° , 방위각 남쪽에서 하부 일조량의 평균값은 66%로 가장 낮았다. (b)에서 하부 일조량의 표준 편차는 12%로 가장 높게 나타났다. 반면, (c)에서는 수평면 일조량 대비 경사면 일조량의 비율은 동일한 경사각과 방위각에서 118%로 가

Fig. 7 Analysis between on and under PV modules according to the tilt angle and the azimuth angle

장 높게 나타났다. 따라서, 태양전지 모듈 하부 일조량과 태양전지 모듈 상부 일조량은 트레이드 오프(Trade-off) 관계를 갖는 것으로 나타났다.

3.4 태양전지 모듈 설치 유형에 따른 모듈의 상부 및 하부 일조량 분석

Fig. 8은 양축 추적식, 단축 추적식, 고정식 시스템을 나타낸다. (a)는 양축 추적식, (b)는 단축 추적식, (c)는 모듈 경사각 30°와 방위각 정남(0°)인 경사 고정식, (d)는 모듈 경사각 0°와 방위각 정남(0°)인 수평 고정식으로 구성하였다.

시뮬레이션 조건은 태양전지 모듈 설치 높이는 지상에서 3 m, 태양전지 모듈 하부 차광률은 34%, 시스템 면적은 16 m × 14 m, 분석 기간은 5월부터 10월까지(6개월) 설정하였다.

Fig. 8 Overview of the PV module installation type configurations

Fig. 9는 태양전지 모듈 유형에 따른 시뮬레이션의 모듈 하부 평균 일조량을 정면(가로축; X축)과 측면(세로축; Y축)에 대해 시각화한 결과이다. 그림에서 (a)와 (c)는 정면과 측면에서 모듈 하부 평균 일조량의 편차가 크게 나타나서 주연효과가 발생함을 알 수 있다. 반면, (b)와 (d)는 태양전지 모듈 하부 평균 일조량이 전반적으로 균일성을 나타내고 있음을 확인하였다.

Fig. 9 Overall irradiation mean analysis from the front view and side view

Table 6는 Fig. 9의 시뮬레이션 시각화 결과값을 정량적으로 요약한 내용이다. 추적식 시스템 (a)와 (b)에서, 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량은 (b)단축 추적식이 (a)양축 추적식보다 1.2% 높았고, 태양전지 모듈 하부 일조량의 표준편차는 (b)단축 추적식이 (a)양축 추적식 보다 6.6% 작았다. 태양전지 모듈 상부 일조량에 대한 Transposition factor (전수평면 일조량 대비 경사면 일조량의 비율)은 (a)양축 추적식이 (b)단축 추적식 보다 31% 높게 나타났다. 이를 통해, 모듈 하부 일조량 비교에서는 (b)단축 추적식이 (a)양축 추적식 보다 우수한 반면, 모듈 상부 일조량 비교에서는 (a)양축 추적식이 (b)단축 추적식보다 일조량이 높은 결과가 도출되었다.

Table 6 Overall irradiation mean under PV modules, overall standard irradiation deviation under PV modules, and transposition factor depending on the tracking system and fixed system

Evaluation item	Cases (a) Dual-axis tracking system	(b) Single-axis tracking system	(c) South fixed system	(d) Horizontal fixed system
Overall irradiation mean under PV modules [%]	72.6	73.8	75.2	76
Overall standard irradiation deviation under PV modules [%]	15.3	8.7	13.8	8.1
Transposition factor on the PV modules [%]	156	125	117	100

고정식 시스템 (c)와 (d)에서는, (d)수평 고정식이 (c)경사 고정식 보다 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량 0.8% 높았고, 태양전지 모듈 하부 일조량의 표준편차는 5.7% (d)수평 고정식이 (c)경사 고정식보다 우수하였다. 반면, Transposition factor는 (c)경사 고정식이 (b)수평 고정식보다 17% 일조량이 높았다. 3가지 비교 항목에 대한 고정식 시스템의 비교 결과는 앞선 추적식 시스템의 비교와 동일하게 모듈 하부 일조량은 (d)수평 고정식이 (c)경사 고정식 보다 우수하였다. 하지만, 모듈 상부 일조량에 있어서는 (c)경사 고정식이 (d)수평 고정식 보다 일조량이 17% 높은 결과를 나타냈다.

태양전지 모듈 하부 일조량 평가 항목에 대한 태양전지 모듈 설치 형태를 분석한 결과, 추적식 시스템에서는 (b) 단축 추적식이, 고정식 시스템에서는 (d) 수평 고정식이 우수하였다. 하지만, 태양전지 모듈 상부 일조량의 평가 항목인 Transposition factor에 있어서는 하부 일조량 평가에서 낮았던 (a)양축 추적식이 (b)단축 추적식보다, (c)경사 고정식이 (d)수평 고정식보다 상대적으로 우수한 결과를 나타냈다.

4. 결론

영농형 태양광발전시스템은 태양전지 모듈을 통해 전력 에너지를 최대로 생산하는 것에 선행되어 농작물의 광포화점과 동등 이상의 모듈 하부 일조량 확보, 농작물의 전체 면적에서 균일한 일조량 확보 등이 고려되어야 한다.

본 논문에서는 태양전지 모듈 설치 높이, 태양전지 모듈 차광률, 태양전지 모듈 설치 방위각 및 경사각, 태양전지 모듈 설치 유형에 따른 태양전지 모듈 상부 및 하부 일조량을 정량적으로 분석하였다. 이를 통해 영농형 태양광발전시스템을 설계하는 경우 다음과 같은 고려사항이 선행적으로 필요함을 확인하였다.

- (1) 태양전지 모듈 설치 높이가 높아질수록 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량은 커지고 태양전지 모듈 하부의 일조량 표준편차는 작아졌다.
- (2) 연속적인 태양전지 모듈 배치와 불연속적인 태양전지 모듈 배치를 고려한 상황에서 태양전지 모듈 차광률이 증가할수록 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량은 작아지고, 모듈 하부의 일조량 표준편차는 높아졌다. 태양전지 모듈의 설치 이격거리는 동일하고 차광률이 상이한 경우, 차광률이 작을수록 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량이 높고, 모듈 하부의 일조량 표준편차는 작아졌다.

또한, 태양전지 모듈의 차광률이 동일하고 설치 이격거리가 상이한 경우에는 특히, 태양전지 모듈의 설치 이격거리가 짧을수록 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량은 높아지고 모듈 하부의 일조량 표준편차는 작아졌다.

- (3) 태양전지 모듈 경사각이 해당 지역 위도와 가깝고, 방위각이 정남에 근접할수록 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량이 낮아지고 모듈 하부의 일조량 표준편차는 높아졌다. 반면, 태양전지 모듈 상부 평균 일조량의 평가 지표인 Transposition factor는 태양전지 모듈 경사각이 해당 지역 위도와 가깝고, 방위각이 정남에 근접할수록 높게 나타났다. 이를 통해, 태양전지 모듈의 하부 일조량과 태양전지 모듈의 상부 일조량은 트레이드 오프(Trade-off) 관계임을 확인하였다.
- (4) 태양전지 모듈 설치 유형 분석에서 추적식 시스템과 고정식 시스템을 비교하였다. 평가항목은 태양전지 모듈 하부의 평균 일조량, 모듈 하부의 일조량 표준편차 그리고 모듈 상부 Transposition factor를 선정하였다. 태양전지 모듈의 하부 평균 일조량과 표준편차는 추적식 시스템 중 단축 추적식이 양축 추적식보다 우수하였다. 또한, 고정식 시스템에서는 수평 고정식이 경사 고정식보다 우수하였다. 태양전지 모듈의 상부 평균 일조량은 추적식에서 고정식으로 순차적으로 작아짐을 확인하였다.

후기

본 연구는 2017년 및 2019년 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 에너지기술개발사업과 에너지 인력양성사업으로 지원받아 수행한 성과입니다(No. 20173030068990, 20194010000180).

REFERENCES

1. Trnka, M., Eitzinger, J., Kapler, P., Dubrovský, M., Semerádová, D., Žalud, Z., and Formayer, H., Effect of Estimated Daily Global Solar Radiation Data on the Results of Crop Growth Models, *Sensors*, Vol. 7, No. 10, pp. 2330-2362, 2007.
2. Chen, H., Li, Q. P., Zeng, Y. L., Deng, F., and Ren, W. J., Effect of Different Shading Materials on Grain Yield and Quality of Rice, *Scientific Reports*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-9, 2019.
3. Sekiyama, T. and Nagashima, A., Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, a Typical Shade-intolerant Crop, *Environments*, Vol. 6, No. 6, p. 65, 2019.
4. Solar Sharing Network, Solar Sharing for Fun, 2018, Available online: <https://solar-sharing.org/?p=6868> (Accessed on 16 May 2019).
5. Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., and Macknick, J. E. Agrivoltaics Provide Mutual Benefits Across the Food – Energy – Water Nexus in Drylands, *Nature Sustainability*, Vol. 2, No. 9, pp. 848-855, 2019.
6. Marrou, H., Dufour, L., and Wery, J., How Does a Shelter of Solar Panels Influence Water Flows in a Soil – Crop System?, *European Journal of Agronomy*, Vol. 50, pp. 38-51, 2013.
7. Marrou, H., Wéry, J., Dufour, L., and Dupraz, C., Productivity and Radiation Use Efficiency of Lettuces Grown in the Partial Shade of Photovoltaic Panels, *European Journal of Agronomy*, Vol. 44, pp. 54-66, 2013.

8. Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., and Ferard, Y., Combining Solar Photovoltaic Panels and Food Crops for Optimising Land Use: Towards New Agrivoltaic Schemes, *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 10, pp. 2725-2732, 2011.
9. Marrou, H., Guillioni, L., Dufour, L., and Dupraz, C., Wéry, J. Microclimate under Agrivoltaic Systems: Is Crop Growth Rate Affected in the Partial Shade of Solar Panels?, *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 177, pp. 117-132, 2013.
10. Mbewe, D. M. N. and Hunter, R. B., The Effect of Shade Stress on the Performance of Corn for Silage Versus Grain, *Canadian Journal of Plant Science*, Vol. 66, No. 1, pp. 53-60, 1986.
11. Chen, H., Li, Q. P., Zeng, Y. L., Deng, F., and Ren, W. J., Effect of Different Shading Materials on Grain Yield and Quality of Rice, *Scientific Reports*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-9, 2019.
12. Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., and Rubel, F., World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated, *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 15, No. 3, pp. 259-263, 2006.
13. Ward, G. J., The Radiance Lighting Simulation and Rendering System, *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer graphics and Interactive Techniques*, pp. 459-472, 1994.
14. Fuller, D. and McNeil, A., Radiance, Available online: <https://www.radiance-online.org>, (Accessed on 10th August 2020).
15. Mermoud, A. and Wittmer, B., PVSYST User's Manual, Switzerland, January, 2014.
16. Ladybug Tools, Available online: <http://www.ladybug.tools/epwmap/> (Accessed on 15th May 2017).