


# 유연기판 태양전지가 설치된 온실 내의 광분포 분석 및 적상추의 생산

임은정<sup>1,2</sup>  · 서경수<sup>1,2</sup> · 황인하<sup>3</sup> · 신일경<sup>4</sup> · 오명민<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>충북대학교 축산·원예·식품공학부 원예학전공, <sup>2</sup>충북대학교 생물건강소재산업화사업단, <sup>3</sup>서울대학교 농림생물자원학부 원예생명공학전공, <sup>4</sup>동신폴리켄

## Light Environment Analysis and Production of Red Leaf Lettuce in Greenhouses with Flexible Solar Cells

Eunjeong Lim<sup>1,2</sup> , Gyeong-Su Seo<sup>1,2</sup>, Inha Hwang<sup>3</sup>, Il-Kyung Shin<sup>4</sup>, and Myung-Min Oh<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Division of Animal, Horticultural and Food Sciences, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea  
<sup>2</sup>Brain Korea 21 Center for Bio-Health Industry, Chungbuk National University, Cheongju 28644, Korea  
<sup>3</sup>Department of Agriculture, Forestry and Bioresources (Horticultural Science and Biotechnology), Seoul National University, Seoul 08826, Korea  
<sup>4</sup>Dongshin Polychem Co., Ltd., Cheongju 28456, Korea

\*Corresponding author: [moh@cgnu.ac.kr](mailto:moh@cgnu.ac.kr)

Received: March 13, 2023

Revised: June 28, 2023

Accepted: July 18, 2023

 OPEN ACCESS



HORTICULTURAL SCIENCE and TECHNOLOGY  
 42(2):225-233, 2024  
 URL: <http://www.hst-j.org>

pISSN : 1226-8763  
 eISSN : 2465-8588

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

Copyright©2024 Korean Society for Horticultural Science.

본 연구는 농림축산식품부 및 과학기술정보통신부, 농촌진흥청의 재원으로 농림식품기술기획평가원과 재단법인 스마트팜연구개발사업단의 스마트팜 다부처패키지혁신기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(421033-4).

## Abstract

Recently, agrivoltaic systems, which utilize a solar-sharing conception by having solar cells installed on top of the cultivation area, using the extra solar light for photovoltaics, have been attracting attention. However, most applications are reported in open-field conditions, and some issues have been raised about the installation of these structures. Accordingly, we conducted a cultivation experiment in which an agrivoltaic system was applied to protected horticulture with flexible solar cells. Red leaf lettuce was used in the experiment and was cultivated in three single greenhouses with the system installed either on one side of the greenhouse ceiling, denoted as photovoltaic I, or on both sides denoted as photovoltaic II. The control system used no agrivoltaic system. A ray-tracing simulation was also conducted to determine the light distribution of the total greenhouse floor area and daily difference according to solar altitude changes. It was found that the monthly amounts of energy generated in the greenhouses were 156.85 and 323.34 kWh for photovoltaic I and photovoltaic II, respectively. Due to the area shaded from light by the solar cells, daily light integral (DLI) values were 86% of the control for photovoltaic I and 71% for photovoltaic II. In the results of the ray-tracing simulation under identical conditions, the root mean square error between the calculated DLI and the measured DLI was  $14.8 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ . The shoot fresh weight, leaf area, SPAD and anthocyanin content of red leaf lettuces showed no significant differences according to the treatment. Through this study, it was confirmed that greenhouses with flexible solar cells can be applied for the production of leafy vegetable such as lettuce with low light saturation points.

**Additional key words:** agrivoltaic system, daily light integral (DLI), light distribution, ray-tracing simulation, solar sharing

## 서 언

농업분야에서 환경적 및 경제적인 이유로 화석에너지 사용에 대한 이슈는 광범위하게 논의되고 있으며 에너지 절약방안 중 하나로 신재생 에너지의 활용이 대두되고 있다(Cho et al., 2019). 대한민국 정부는 2017년 재생에너지 3020 이행계획으로 재생에너지의 발전량을 2030년까지 20%로 확대하는 계획을 발표하였다. 재생 에너지에 의한 총 발전량의 절반이 태양에너지 발전에 할당되었으며, 그 중 1/3은 농촌 태양광으로 발전 되어야한다. 하지만 태양광 발전 시설을 평탄한 농경지에 설치할 경우 농지면적 감소 및 발전수익의 외지 유출 문제가 발생하므로, 이런 문제를 해결하기 위해 새롭게 제시된 개념이 영농형 태양광 발전 시스템이다.

영농형 태양광 발전 시스템(agrivoltaic system)은 노지 농지면적 상부에 태양광 발전 시설을 설치하여 일조량 중 작물의 광 포화점을 초과하는 잉여의 태양광 에너지를 발전에 사용하는 솔라셰어링(solar-sharing) 시스템이다(Kim, 2020). 이 시스템은 1981년 독일의 물리학자 A. Goetzberger와 A. Zastrow에 의해 알려졌으며, 2004년 일본의 나가시마 아키라가 프로토타입 모델을 개발하면서 확산되었다. 이는 특히 토지가 한정적이거나 태양복사량이 높은 지역에서 유용하므로, 유럽에서 많은 주목을 받고 있다(Fatnassi et al., 2015; Cossu et al., 2017; Yano and Cossu, 2019; Cossu et al., 2020). 최근 국내에서도 영농형 태양광 발전 시스템의 실증 실험이 수행된 바 있다(Kwon and Lee, 2021; Kim et al., 2022). 작물을 재배할 노지에 태양전지(solar cell)와 이를 지지하는 구조물을 설치하고, 구조물에 의한 차광 및 기타 환경변수가 작물 생산에 미치는 영향을 분석하면서 동시에 수집된 태양광 에너지에 의한 발전량을 측정하는 연구들이 수행되어왔다(Lee et al., 2022). 발전시설에 의한 차광율(태양광 발전 부지 면적 대비 태양광 모듈 전체 면적이 차지하는 비율)은 일반적으로 20-40%이며, 이에 따른 작물 생산 수율이 80% 아래로 떨어지지 않는 조건이라 할 수 있다(Kim, 2020).

이러한 시스템은 태양광 발전에 의한 농가의 추가적인 수익 창출과 함께 호광성 작물이 아닌 경우 강광에 의한 생육 저해현상을 예방하면서 오히려 적절한 광도 환경을 조성할 수 있으며, 고온기 노지 표토 부근의 상대적 온도 저하 유도로 증발산량을 감소시켜 물이용효율을 높이는 장점을 갖는다(Kang et al., 2021). 유럽에서 보고된 영농형 태양광발전에서 경우 대부분 태양광 패널을 온실의 천장에 설치하는 형태이지만, 국내 보고된 사례는 많은 경우 노지에 지지 구조물을 설치하여 태양광 발전을 수행한다. 노지 적용의 경우, 지지 구조물에 의한 농기계 사용의 제약 및 높은 구조물 설치에 따른 안정성 확보 등의 문제가 제기된다(Jeong, 2020).

본 연구에서는 비닐하우스 온실에 유연기판 태양전지를 지붕 곡면에 맞게 설치함에 따른 영농형 태양광 발전 시스템을 구현하였다. 시스템의 두 가지 목적인 태양광 발전과 작물 재배에 대하여 전기 발전량 및 해당 조건에서 재배된 적상추의 생육과 품질이 평가되었고, 태양전지의 설치 위치와 면적에 따라 비교되었다. 온실 내 작물 생육에 미치는 영향을 파악하기 위한 환경조건, 특히 광환경을 처리별 그리고 시간별로 측정하였다. 또한 본 연구에서는 광조건을 측정한 위치에 대해서만이 아닌 재배 면적 전체에 대한 영향을 파악하기 위해, 일중 태양의 고도 변화에 대한 태양전지 유래 차광이 시간에 따른 온실 내부의 광도 변화에 미치는 영향을 광추적 시뮬레이션을 통해 알아보았다.

## 재료 및 방법

### 실험 재료 및 재배 환경

실험에는 ‘적치마’ 품종의 상추(*Lactuca sativa* L., 피피에스, 용인, 대한민국)가 사용되었으며, 충청북도 청주시 충북대학교(36.63°N, 127.45°E)에 위치한 비닐하우스 온실(폭×길이×동고, 5.6m×13m×3.3m) 세 동에서 재배되었다. 각 온실은 남북방향 단동 아치형이며 피복재로는 이중 폴리올레핀(Polyolefin, PO) 필름이 사용되었다. 상추는 파종 후 10일간 환경조절 챔버의 온도 23°C, 상대습도 80%, 광합성 유효 광량자속 밀도 200 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 조건에서 육묘한 뒤 7일간 충북대학교 유리온

실(온도  $22.0 \pm 0.1^\circ\text{C}$ , 상대습도  $51.3 \pm 0.3\%$ )에서 순화과정을 거쳤다. 자엽이 발생한 뒤부터 pH 5.5, EC 0.8dS/m의 상추 전용양액(Sonneveld and Straver, 1994)을 공급하였으며 순화과정 중에도 동일한 양액을 저면관수 형식으로 공급하였다. 상추 묘는 원예용 상토(한아름원예용상토, 신성미네랄, 괴산, 대한민국)가 담긴 포트( $11.5\text{cm} \times 11.5\text{cm} \times 11.3\text{cm}$ )에 옮겨 심어 각 온실 당 36개체씩 세 동의 온실에 정식하였다. 온실의 남북방향 중앙선을 기준으로 놓인 세 개의 테이블에 각각 12개의 포트가 놓여 재배되었으며, 온실 내 온도 분포를 고려하여 테이블 간 간격은 2m로 설정되었다(Suppl. Fig. 1). 총 26일간의 재배기간 동안 상추전용양액을 pH 5.5, EC 1.2dS/m로 맞추어 포트가 담긴 트레이( $72\text{cm} \times 44\text{cm} \times 9.5\text{cm}$ )에 저면관수하였다. 세 동의 온실에는 각 온실 당 3개의 온습도센서(Sensor node, Farmlink, 진주, 대한민국)가 설치되었고 재배기간동안 10분 간격으로 온실 내 온습도 데이터를 수집하였다. 센서와 연동된 온실 내 자동측량개폐장치를 사용해  $25^\circ\text{C}$  이상의 기온에서는 측창을 열고,  $15^\circ\text{C}$  이하에서는 온풍난방(HP-K2100, Hyperion, 아산, 대한민국)을 하였다. 태양전지 설치에 따른 온실 내 작물 재배공간에 도달하는 광량 및 하루 중 태양의 고도 변화에 따른 일적산일사량(Daily light integral, DLI)를 측정하기 위해 광센서로거(LI-1500, LI-COR, Lincoln, NE, USA)를 상추 재배위치에 설치하였다. 각 온실에 배치된 세 개의 테이블 위에서 측정되었으며 15분마다 센서의 광도값이 수집되었다.

### 온실 지붕 위 유연기판 태양전지 설치

화합물 반도체 CIGS 태양광 모듈과 유연성을 갖는 폴리카보네이트 소재를 기판으로 하는 유연기판 태양전지를 온실 천장의 곡면에 맞게 시공하였다(동신폴리켄, 음성, 한국). 실험에 사용된 태양전지 설치 용량은 2.88kW이었다. 실험에 사용된 처리 조건은 태양전지의 설치 위치와 면적으로, 설치 위치에 대하여 처리구는 태양전지가 온실 천장의 한 쪽만 설치된 태양광 I (Photovoltaic I), 양 쪽 모두에 설치된 태양광 II (Photovoltaic II)로 구성하였고, 태양전지가 설치되지 않은 온실을 대조구(Control)로 사용하였다(Fig. 1A). 또한, 설치 면적은 태양광 I에는 온실 천장의 동쪽면에  $1,900\text{mm} \times 2,200\text{mm}$ 의 시트가 4세트 설치되었으며 태양광 II에는  $2,460\text{mm} \times 2,060\text{mm}$ 의 시트가 천장 양쪽 면에 총 6세트 배치되어 동일한 천장 면적에 태양전지가 차지하는 면적은 태양광 I는  $16.7\text{m}^2$ 이고 태양광 II는  $30.4\text{m}^2$ 로 태양광 I 설치 면적의 약 1.8배이다. 태양전지로부터 생성된 전기 발전량은 사용된 인버터(S3R6K(20A), Keumbee electronics, Ansan, Korea)의 모니터링 시스템을 사용하여 수집되었다.

### 광 추적 시뮬레이션

3차원 CAD 소프트웨어(SOLIDWORKS, Dassault Systemes, Vélizy-Villacoublay, France)를 사용하여 세 동의 비닐하

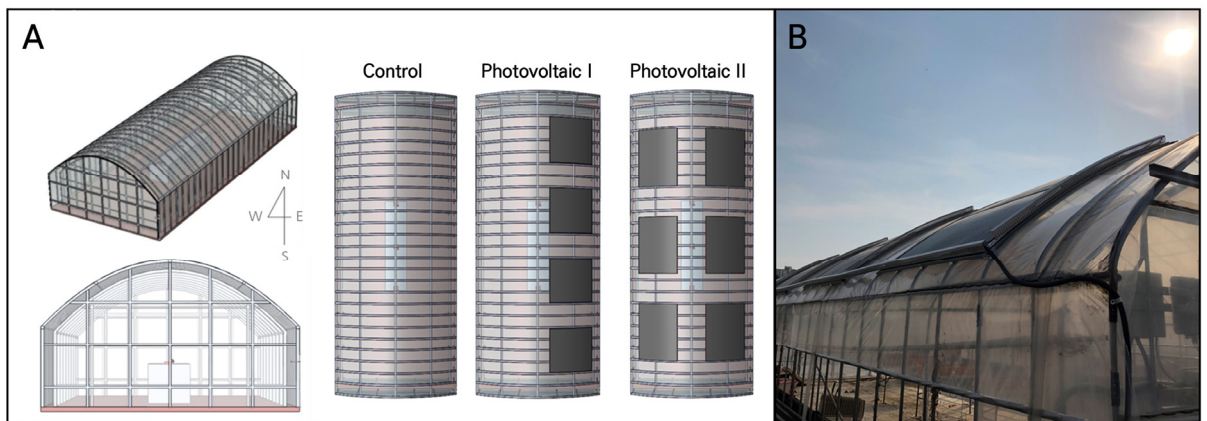


Fig. 1. 3-D model of greenhouses with solar cells for the ray-tracing simulation (A) and a view of the experimental site (B).

우스 및 그 지붕에 설치된 태양전지를 측정된 값을 기반으로 시뮬레이션 상에 구축하였다(Fig. 1B). 비닐하우스의 피복재인 PO 필름과 골조에 대한 광학적 특성은 ray-tracing 광학 시뮬레이션 프로그램(Optisworks, OPTIS Inc., La Farlède France)에 반영하였으며 태양전지의 투과율은 0%로 설정하였다. 비닐하우스 세 등의 위치와 방향을 반영하여 재배기간 중 하루인 2022년 2월 26일의 일중 광변화를 시뮬레이션하였다. 온실 내 광추적 조건은 실제 온실의 광센서의 위치와 온실바닥면 전체에 대해 수행되었다. 본 연구에서 사용한 광추적 시뮬레이션 소프트웨어는 CIE 표준 천구 모델을 기반으로 일반적인 맑은 날(CIE standard sky)의 태양광을 구현하였으며, 이 때 직사광과 산란광의 비율은 6:4였다.

## 생육 특성

처리구 당 36개체의 상추는 수확 후 생육측정항목에 대하여 전수조사하였다. 생육측정항목은 지상부 생체중과 엽면적, 엽록소 함량이었다. 지상부 생체중과 엽면적은 각각 정밀전자저울(Si-234, Denver Instrument, NY, USA), 엽면적측정기(LI-3100, LI-COR, Lincoln, NE, USA)를 사용하여 측정하였다. 엽록소 함량은 휴대용 엽록소 측정기 값(SPAD)으로 SPAD-502(Minolta corporation, Ltd., Osaka, Japan)를 사용하여 개체 당 세 측정 위치의 평균값을 사용하였다.

## 안토시아닌 분석

적상추의 품질적 요소 중 하나인 안토시아닌 함량을 분석하였는데, 분석에 사용된 샘플은 처리구당 36개체의 엽신의 중앙부 생체 중량 0.5g을 사용하였으며 분석방법은 Lee et al.(2014)을 따랐다.

## 통계 분석

모든 측정항목에 대하여 SAS statistical program(Statistical Analysis System, Version 9.4, SAS Institute, Cary, NC, USA)을 사용해 one-way analysis of variance로 통계적으로 분석하였으며 처리구간 평균값의 유의적 차이는 Tukey's range test에 의해 비교되었다.

## 결과 및 고찰

### 처리별 태양광 발전량 차이 및 월변화특성

비닐하우스 천장에 설치한 태양광 발전 전지에 따른 4개월 간의 발전량은 Fig. 2와 같다. 두 처리구 모두에서 시간이 지날수록 증가하는 발전량을 보였으며, 특히 4월에 큰 증가폭을 보였다. 각 16.7m<sup>2</sup>, 30.4m<sup>2</sup>의 태양광 I와 태양광 II의 발전전지의 면적당 발전량만으로 계산했을 때, 태양광 I은 단위면적당 9.39kWh, 태양광 II는 10.64kWh의 발전량을 보였다. 일반적으로 발전량의 일주기는 태양의 일주기에 따르며 오후 1시를 최대로하는 정규분포 형태를 보이고, 월별 발전량은 일조량이 부족한 겨울과 장마로 인한 일조량 감소 및 온도 상승에 인한 발전 전지의 효율 저감이 나타나는 여름을 제외하고 봄과 가을에 많아지는 패턴을 보인다(Shin et al., 2008). 본 실험에서도 측정기간(1월부터 4월)동안 겨울에서 봄에 가까운 4월에 높은 발전량을 보였다. 태양광 II의 동향과 서향에 설치된 태양전지에 대한 차이는 4-8% 수준으로 크지 않았으며(data not shown), 두 처리구의 단위면적당 발전량 역시 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 동향과 서향은 모두 정남향에 비해 2.6배 낮은 발전량을 보이는 이전문헌과도 유사한 결과이다(Jo et al., 2004). 따라서 비닐하우스 온실의 설치 방향에 따라 결정되는 천장의 태양광 패널의 방향에 대하여 일반적인 남북향 온실의 경우 태양전지의 설치방향은 큰 영향을 미치지 않으며 차광 및 작물의 광요구량에 따라 결정할 수 있다.

### 태양전지 차광에 따른 일적산광량

Fig. 3은 재배기간 중 2022년 2월 26일의 온실 내부의 광도 일변화를 나타낸다. 오전 7시부터의 일출 이후부터 11시까지 동쪽 지붕에 태양전지가 설치된 태양광 I와 태양광 II는 모두 대조구에 비해 낮은 온실 내 광도값을 보이며 유사한 패턴을 보였다. 하지만 서쪽 지붕에 태양전지가 없는 태양광 I의 경우, 정오 이후에는 대조구와 흡사한 광도의 변화를 보인 반면, 태양광 II는 11시부터 일몰까지 나머지 처리구에 비해 낮은 광도를 기록했다. 동일한 조건에서 태양광 발전 시스템이 설치되지 않은 대조구 온실 내 DLI  $16.12\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  대비 같은 날 태양광 I와 태양광 II는 각각 86%( $13.92\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ ), 71%( $11.46\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )의 값을 기록했다(Table 1). 전 재배기간의 평균 일간 온도 변화는 처리구간 유의한 차이를 보이지 않았다(Fig. 4). 영농형 태양광발전 시스템은 농업과 에너지 발전의 두 가지 목적성을 가짐에 따라 일반적인 태양광 발전에 비해서는 동일 발전량 대비 1.7배 많은 설치면적이 요구된다고 알려져 있다(Kim, 2020). 영농형 태양광발전 시스템의 적용 시 일반적인 차광을 계산 방법에 따르면 본 연구에서 태양광 I는 22.96% 그리고 태양광 II는 36.66%의 차광율로 20-40%로 알려진 기존의 설치 기준을 따른다. 하지만 이 계산 방법은 설치 구조물에 의한 차광율의 계산은 복잡성을 이유로 제외하고 발전모듈만을 나타낸 결과이므로 실제로 차광이 발생하는 비율은 더 증가할 것으로 보이나 본 실험에서는 기타 구조물이 없으므로 부가적인 차광은 발생하지 않았다. 차광율을 기준으로 하는 이유는 또한 일조량의 경우 설치 위치, 기후, 계절 등 다양한 요인에 대하여 가변적이기 때문이다. 차광율과 측정된 DLI값을 비교했을 때 두 처리구 모두에서 차광율과 일조량의 감소비율은 유사하게 나타났다.

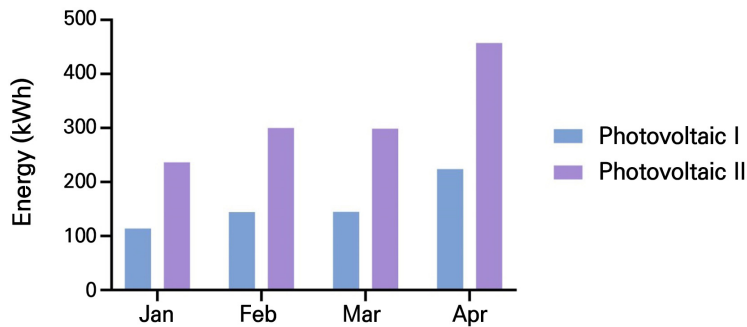


Fig. 2. Power generation energy of solar cell modules installed on two greenhouses. This data was obtained over four months in 2022. See Table 1 for a description of the treatments.

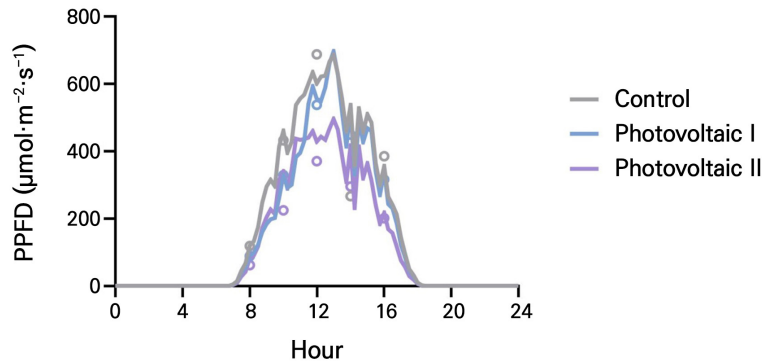


Fig. 3. Photosynthetic photon flux density (PPFD) inside the three greenhouses on the day of the cultivation experiment (Feb. 26, 2021). The lines in the figure are the measured PPFD values by the sensor, and the dots are the estimated values from the ray-tracing simulation. See Table 1 for a description of the treatments.

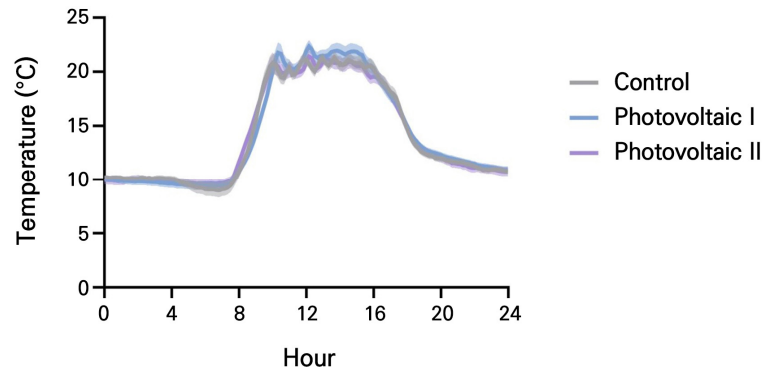


Fig. 4. Daily temperature changes in three greenhouses on Feb. 26, 2022. See Table 1 for a description of the treatments.

Table 1. Daily light integral (DLI) measured in three greenhouses on February 26, 2022

Treatment <sup>z</sup>	DLI (mol·m <sup>-2</sup> ·day <sup>-1</sup> )
Control	16.12
Photovoltaic I	13.92
Photovoltaic II	11.46

<sup>z</sup>Flexible solar cells were installed on one side of the greenhouse ceiling for Photovoltaic I and on both sides for Photovoltaic II, with none for the control (Fig. 1).

Table 2. Total light intensity of the floor area of each greenhouse as calculated from the ray-tracing simulation. See Table 1 for a description of the treatments

Treatment	Total light intensity (mol·s <sup>-1</sup> )				
	08:00	10:00	12:00	14:00	16:00
Control	0.66	2.42	3.87	3.14	2.12
Photovoltaic I	0.52	1.90	3.08	2.55	1.78
Photovoltaic II	0.42	1.55	2.48	2.18	1.26

### 광추적 시뮬레이션을 통한 온실 재배면적 내 광분포 비교

광추적 시뮬레이션을 통해 동일한 온실 내 광센서 위치에서의 시뮬레이션 예측 광도와 실제 측정 광도값을 비교한 결과는 Fig. 3과 같으며, 이 때 DLI의 평균제곱근오차값은  $14.8\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 이었다. 동일한 조건으로 온실바닥면 전체에 도달하는 광도값은 정오까지 태양광 I 과 태양광 II 모두 각각 대조구 대비 80% 및 64% 수준으로 유지되다가 태양광 I 에서는 16:00에 84%까지 올라갔지만 태양광 II 에서는 59%로 낮아지는 경향을 보였다(Table 2). 태양전지 설치에 따른 온실 바닥면 전체의 광분포에 대하여 태양광 II 의 경우 태양광 I 에 비해 전반적인 광량은 적으나 좌우의 분포가 균일하였다(Fig. 5). 본 실험에서 사용된 태양전지 처리조건에 대하여, 설치 위치 및 면적을 동시에 고려한 처리구에 대한 제한된 해석에 실제 온실 바닥 면적 내 위치별 광도 조건 및 면적 전체로 수행된 광추적 시뮬레이션을 활용할 수 있었다. 광추적 시뮬레이션은 Monte Carlo 알고리즘을 사용하여 신뢰성있는 수준에서 광분포나 수광 분석 등을 위해 활용되어왔으며, 원예 분야에서 3차원 작물 모델에 대한 수광량 분석 및 인공광원의 최적 배열에 대한 활용이 보고된 바 있다(Hwang et al., 2023; Kwon et al., 2023; Lee et al., 2023). 태양광 I, 태양광 II 에서 각각 대조구 대비 86%, 71%이었던 센서 측정 DLI값에 비해 시뮬레이션으로 계산한 온실 바닥면에 도달하는 전체 DLI값은 각각 80%, 64%로 더 낮은 비율을 기록했다. 온실 내 전면적에서 작물을 재배하는 것이 일반적이므로 센

서로 측정된 온실 중앙부의 값에 비해 온실의 바닥면을 기준으로 한 감소비율이 작물 생산량과 더 밀접한 연관성을 갖는 값이 될 것이라고 사료된다. 온실 바닥면 전체를 분석했을 때 태양광 I 에서 발견되는 재배면적 내 광량의 불균형은 균일한 품질의 작물을 생산하기에 부적절할 수 있다. 영농형 태양광 발전에 대한 차광의 효과를 광추적 시뮬레이션을 통해 분석한 보고들은 주로 유럽의 경우로, 벤로형 온실과 같은 평면의 지붕을 활용하는 경우가 많다(Fatnassi et al., 2015; Cossu et al., 2017; Cossu et al., 2020). 국내에서 절대적 비율을 차지하는 비닐하우스의 곡면 지붕에 대해서는 바둑판형 배열을 적용하는 보고들도 있다(Marucci et al., 2018; Yano and Cossu, 2019). 본 실험에서 사용된 시트 패널이나 바둑판형 배열과 같이 태양전지의 설치에 대하여 전력 생산 효율, 온실 내 차광 등을 복합적으로 고려하기 위해 추가적인 연구가 필요하다.

한편, 영농형 태양광발전에서 재배 면적에 도달하는 광량은 태양전지 설치에 의한 차광 이후에도 정상적인 작물 생육을 위한 수준인지 파악하는 것이 중요하다. 온실에서의 겨울철  $1000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 대조구에 대하여 26% 수준까지 shading 처리하였을 때 상추의 생체중이 대조구 대비 57% 수준까지 감소하는 결과가 보고되었다(Kosma et al., 2013). 따라서 Fig. 5의 시뮬레이션 결과를 통해 확인한 태양광 I 온실 내 광도 불균형은 유의적인 수확량 차이를 유발할 수 있다. 광추적 시뮬레이션과 함께 광도를 입력변수로 갖는 상추의 생육모델을 활용함으로써 영농형 태양광 발전에서 작물 수확량에 대한 적정 차광면적을 결정하는 데 사용할 수 있을 것으로 사료된다(Van Henten, 1994).

### 적상추의 재배적 특성 및 처리별 차이

세 동의 비닐하우스에서 재배된 적상추 지상부생체중의 평균값은 태양광 I, 대조구, 태양광 II 순서로 115.0g, 110.9g, 107.1g을 기록하였고 나머지 엽면적, SPAD, 안토시아닌 함량과 함께 처리구간 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다(Table 3). Fig. 5의 태양광 I 에서 재배면적 내 좌우 불균일한 광분포에 대해 온실 내 좌측, 우측에서 재배된 개체간 통계적 유의한 차이 또한 관찰되지 않았다(data not shown). 하지만 본 실험은 난방기 설치에 따른 온도 분포 조절을 위해 온실 수직 중앙

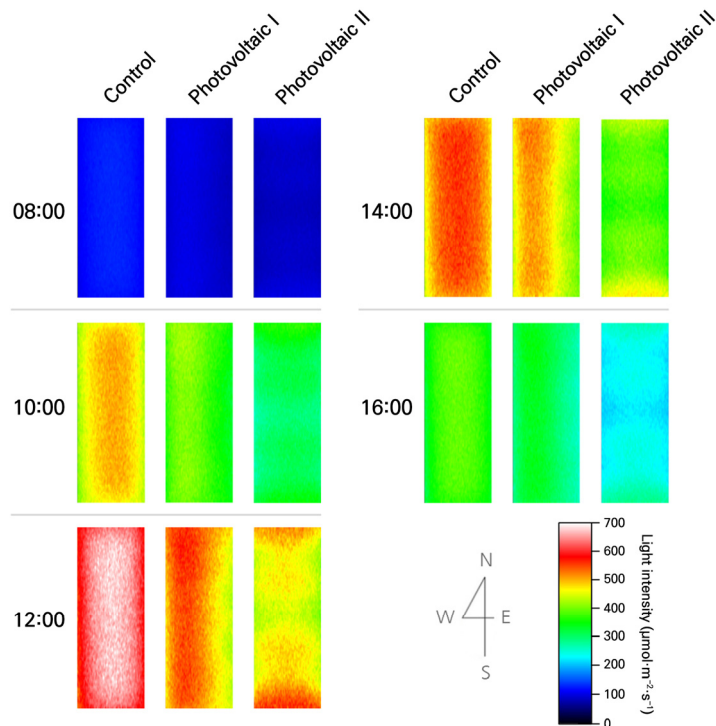


Fig. 5. Simulation result of the light intensity distributions for greenhouse floor areas at different times on the same date (2022.02.26) with the installation of solar cells. See Table 1 for a description of the treatments.

**Table 3.** Average values of the shoot fresh weight, leaf area, SPAD and anthocyanin content for lettuce plants cultivated in different greenhouses. See Table 1 for a description of the treatments

Treatment	Shoot fresh weight (g)	Leaf area (cm <sup>2</sup> )	SPAD	Anthocyanin content <sup>z</sup> (mg/g)
Control	110.9	2393.6	17.6	9.7
Photovoltaic I	115.0	2401.0	17.1	5.6
Photovoltaic II	107.1	2404.6	16.1	7.7
Significance <sup>y</sup>	ns	ns	ns	ns

<sup>z</sup>Lettuce leaf fresh weights of 0.5g were used for the anthocyanin content. Twelve samples per treatment were analyzed.

<sup>y</sup>ns means no significant difference according to Tukey's range test at  $p < 0.05$ .

부에서 주로 재배되어 수직 분포에 대한 결과는 반영되지 않았다. 보고된 다수의 영농형 태양광발전 시스템 논문에서 벼, 콩, 배와 같은 작물의 생산량의 감소는 10–20% 수준이다(Kim, 2020). 세부적인 작물의 생육특성을 비교했을 때 쪽파와 고구마는 위경의 개수와 길이, 괴근의 장폭비 등에서 차이를 보였으나 배추의 경우 엽장, 엽폭, 엽수, 엽록소함량과 함께 생체중에서도 통계적 차이를 보이지 않았다(Han et al., 2020; Han et al., 2021; Kim et al., 2022). 상대적으로 본 실험에서 사용된 상추는 대표적인 호냉성 작물로 다른 작물에 비해 저광조건에서 좋은 생육조건을 가질 수 있다. 따라서 작물의 광요구량, 재배기간 등을 고려하여 영농형 태양광발전 시스템 아래에서도 생산량 감소를 최소화할 수 있는 작물을 선택해야 한다. 또한 작물 생산량 감소뿐만 아니라 특히 광량의 영향이 큰 것으로 알려진 과실의 착색과 같이 작물 품질에 대한 고려 역시 중요하다(Cossu et al., 2017). 온실 내 센서 측정값과 시뮬레이션 기반 온실 바닥면 전체의 처리별 광분포 변화의 차이를 통해, 본 실험에서는 재배면적을 온실의 전면적을 대상으로 하지 않은 것이 생산량 차이에 영향을 미쳤을 수 있다.

이와 같이 본 연구에서는 영농형 태양광 발전 시스템에 대하여 국내 시설원예면적의 대부분을 차지하는 비닐하우스의 아치형 곡면 지붕에 도입하기 위해 유연기판의 CIGS 태양전지를 활용하였다. 온실의 양쪽 지붕에서 설치 위치와 설치 면적에 대하여, 전기발전량부터 온실 내 환경조건, 입사 광량, 작물 생육과 품질, 광추적 시뮬레이션까지 전반적 과정의 복합 데이터의 분석을 수행하였다. 태양전지의 설치 위치에 따른 동서쪽의 차이보다는 면적에 따른 효과가 전기발전량과 온실 내 차광 모두에서 나타났다. 이런 시뮬레이션 기법은 앞으로 다양한 형태의 영농형 태양광발전 시스템에서 태양전지의 설치구조에 따른 차광율과 온실 내 센서 측정 위치와 재배 면적에 도달하는 광분포 비교에 활용될 수 있으며 작물 생산량 예측에 대한 정량적 정보 또한 제공할 수 있다. 마지막으로 본 연구를 통해 광 요구도가 낮은 상추와 같은 엽채류의 경우 태양전지가 설치된 온실에서도 전기발전과 더불어 차광에 의한 작물 생산량 감소 없이 작물을 생산할 수 있는 가능성을 확인하였다.

## 초록

최근 작물 재배면적 상부에 태양전지를 설치하여 잉여의 태양광을 에너지 발전에 사용하는 solar sharing 개념의 영농형 태양광발전 시스템이 주목을 받고 있다. 하지만 대부분의 적용은 노지재배이며 태양전지 설치를 위한 구조물에 따른 문제점이 대두되면서 본 연구에서는 유연기판 태양전지를 활용하여 영농형 태양광발전 시스템을 시설원예로 적용하기 위해 재배실험을 수행하였다. 실험에는 적상추가 사용되었으며 태양전지가 온실 천장의 한 면에만 설치된 태양광 I, 두 면 모두에 설치된 태양광 II 그리고 설치되지 않은 대조구의 세 단동 아치형 비닐하우스에서 재배되었다. 또한 온실 내부 면적 전체의 광량 및 태양 고도 변화에 따른 일중 변화를 위해 시뮬레이션상에 온실 조건을 구현하여 광추적 시뮬레이션을 수행하였다. 두 처리구 온실에서의 월별 발전량은 태양광 I, 태양광 II에서 각각 평균 156.85kWh, 323.34kWh였다. 태양전지에 의한 차광으로 인해 온실 내부에서 측정된 DLI값은 대조구 대비 태양광 I에서 86%, 태양광 II는 71%를 보였으며, 동일한 조건에서 광추적 시뮬레이션 결과 DLI값은 측정값과 14.8 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ 의 평균제곱근오차를 기록했다. 재배 결과 지상부생체중, 엽면적, SPAD, 안토



시아닌 함량과 같은 전 항목에서 처리에 따른 통계적 유의성을 보이지는 않았다. 이를 통해 유연기판 태양전지가 설치된 온실에서의 상추과 같은 광요구도가 낮은 엽채류 생산이 가능함을 확인하였다.

**추가 주요어 :** 영농형태양광발전, 일적산광량, 광분포, 광추적시물레이션, 솔라쉐어링

## Literature Cited

- Cho YH, Cho SJ, Kwon HS, Yoo DH (2019) Building an agrophotovoltaic system and suggesting activation plans. J Inf Syst 28:115-132. doi:10.5859/KAIS.2019.28.1.115
- Cossu M, Ledda L, Urracci G, Sirigu A, Cossu A, Murgia L, Pazzona A, Yano A (2017) An algorithm for the calculation of the light distribution in photovoltaic greenhouses. Sol Energy 141:38-48. doi:10.1016/j.solener.2016.11.024
- Cossu M, Yano A, Solinas S, Deligios PA, Tiloca MT, Cossu A, Ledda L (2020) Agricultural sustainability estimation of the European photovoltaic greenhouses. Eur J Agron 118:126074. doi:10.1016/j.eja.2020.126074
- Fatnassi H, Poncet C, Bazzano MM, Brun R, Bertin N (2015) A numerical simulation of the photovoltaic greenhouse microclimate. Sol Energy 120:575-584. doi:10.1016/j.solener.2015.07.019
- Han JW, Jean MJ, Kim RW, Lee SK, Seo DS, Seo JH, Kim W (2021) Growth characteristics of sweet-potato under agro-photovoltaic power system. J Kor Soc Agri Machi 26:182
- Han JW, Jean MJ, Lee HJ, Lee SK, Seo DS, Seo JH, Kim W (2020) Growth characteristics of chinese cabbage under agro-photovoltaic power system. J Kor Soc Agri Machi 25:72-72
- Hwang I, Yoon S, Kim D, Kang JH, Kim JH, Son JE (2023) Evaluation of the effects of supplemental lighting and stem number on greenhouse sweet pepper growth and yield via ray-tracing simulation with 3D plant models. Biosyst Eng 226:252-265. doi:10.1016/j.biosysteng.2023.01.010
- Jeong JH (2020) Current status and prospect of agrovoltatics system. Bull Korea Photovolt Soc 6:25-33
- Jo DK, Kang YH, Lee EJ, Auh CM (2004) A study on the optimal installation of solar photovoltaic system in Korea. J Kor Solar Energy 24:19-25
- Kang M, Sohn S, Park J, Kim J, Choi SW, Cho S (2021) Agro-environmental observation in a rice paddy under an agrivoltaic system: Comparison with the environment outside the system. Kor J Agric For Meteorol 23:141-148
- Kim GH (2020) Development of domestic agrophotovoltaic system and analysis and consideration of crops growth characteristics. Bull Kor Photovolt Soc 6:15-24
- Kim W, Jean MJ, Kim RW, Lee SK, Han JW (2022) Growth characteristics of spring onion under agro-photovoltaic power system. J Kor Soc Agri Machi 27:250
- Kosma C, Triantafyllidis V, Papasavvas A, Salahas G, Patakas A (2013) Yield and nutritional quality of greenhouse lettuce as affected by shading and cultivation season. Emir J Food Agric 974-979. doi:10.9755/ejfa.v25i12.16738
- Kwon OH, Lee KS (2021) Agrophotovoltaic designs: Irradiation analysis on and under PV modules. J Kor Solar Energy 41:9-23. doi:10.7836/kse.2021.41.2.009
- Kwon SM, Hwang IH, Son JE (2023) Evaluation of the light use efficiency and water use efficiency of sweet peppers subjected to supplemental interlighting in greenhouses. Hortic Environ Biotechnol 64:605-614. doi:10.1007/s13580-022-00508-5
- Lee HJ, Moon YH, An SW, Sim HS, Woo UJ, Hwang HS, Kim SK (2023) Determination of LEDs arrangement in a plant factory using a 3D ray-tracing simulation and evaluation on growth of Cucurbitaceae seedlings. Hortic Environ Biotechnol 64:765-774. doi:10.1007/s13580-023-00523-0
- Lee MJ, Son JE, Oh MM (2014) Growth and phenolic compounds of *Lactuca sativa* L. grown in a closed-type plant production system with UV-A, -B, or -C lamp. J Sci Food Agric 94:197-204. doi:10.1002/jsfa.6227
- Lee SI, Kim DS, Kim TJ, Jeong YJ, Lee JH, Son YH, Choi W (2022) Integral design and structural analysis for safety assessment of domestic specialized agrivoltaic smart farm system. J Kor Soc Agric Eng 64:21-30. doi:10.4491/KSEE.2022.44.1.21
- Marucci A, Zamboni I, Colantoni A, Monarca D (2018) A combination of agricultural and energy purposes: Evaluation of a prototype of photovoltaic greenhouse tunnel. Renew Sust Energ Rev 82:1178-1186. doi:10.1016/j.rser.2017.09.029
- Shin Y, Jung R, Ko J, Jeon J (2008) Present situation and utilization-rate of mass solar-powerplant in Korea. J Kor Phys Soc 469-471
- Sonneveld C, Straver N (1994) Nutrient solutions for vegetables and flower grow in water or substrates. No. 8, Voedingsoplossingen Glastuinbouw 33p
- Van Henten EJ (1994) Validation of a dynamic lettuce growth model for greenhouse climate control. Agric Syst 45:55-72. doi:10.1016/S0308-521X(94)90280-1
- Yano A, Cossu M (2019) Energy sustainable greenhouse crop cultivation using photovoltaic technologies. Renew Sust Energ Rev 109:116-137. doi:10.1016/j.rser.2019.04.026