

영농형 태양광 패널의 부분 차광 생육 환경이 작물 전자전달효율과 비광화학적 형광소멸에 미치는 영향

조유나^{1,2}, 김현기^{1,2}, 조은이¹, 오도혁³, 정희정⁴, 윤창용⁵, 안규남⁵, 조재일^{1,2*}

¹전남대학교 농업생명과학대학 응용식물학과, ²전남대학교 IT-Bio 융합시스템농업교육연구단,
³경기도농업기술원 소득자원연구소, ⁴농촌진흥청 국립식량과학원, ⁵전남농업기술원 식량작물연구소
(2021년 5월 26일 접수; 2021년 6월 24일 수정; 2021년 6월 25일 수락)

Effect of Partial Shading by Agrivoltaic Systems Panel on Electron Transport Rate and Non-photochemical Quenching of Crop

Yuna Cho^{1,2}, Hyunki Kim^{1,2}, Euni Jo¹, Dohyeok Oh³, Hoejeong Jeong⁴,
Changyong Yoon⁵, Kyunam An⁵, Jaeil Cho^{1,2*}

¹Department of Applied Plant Science, Chonnam National University,
77 Yongbong-ro, Gwangju 61186, Republic of Korea

²Interdisciplinary Program in IT-Bio Convergence System, Chonnam National University,
Gwangju, Republic of Korea

³Agricultural Resources Research Institute, Gyeonggi Agricultural Research & Extension Services,
61 Yeoncheon-ro Yeoncheon-gun 11017, Republic of Korea

⁴National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, 181, Hyeoksin-ro,
Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea

⁵Jeollanam-do Agricultural Research & Extension Services, Naju 58213, Republic of Korea
(Received May 26, 2021; Revised June 24, 2021; Accepted June 25, 2021)

ABSTRACT

An agrivoltaic system (AVS) is a system of innovation that comprises productions of photovoltaic power and agricultural crops on the same area. However, the decline in crop yield will be fatally occurred because the pigments of crop absorbs less light energy under AVS. In addition, the photosynthetic capacity of crop grown under the partial shading of AVS is not well reported. In this study, the electron transport rate (ETR) and non-photochemical fluorescence quenching (NPQ) of soybean and rice under the AVS in Boseong and Naju was investigated using chlorophyll fluorescence measurement. The ETR value of soybean and rice under AVS were not significantly differed by location. It represents that the photophosphorylation rate of the crops is not critically different. It means that the decreases in total photosynthesis under AVS were mostly affected by the amount of light absorbed by leaves. Under AVS the photosynthesis of crops will be lower than field crops grown in open fields. This is because the crops under AVS observed higher NPQ, which means that the available energy cannot distribute to photophosphorylation reaction.

Key words: Agrivoltaic Systems, Partial shading, Chlorophyll fluorescence, Electron transport rate, Non-photochemical fluorescence quenching



* Corresponding Author : Jaeil Cho
(chojaeil@jnu.ac.kr)

I. 서 언

영농형 태양광 발전 시스템(Agrivoltaic Systems, AVS)은 농지에서 태양광 패널(Solar Photovoltaic Panel, PVP)을 이용한 발전과 작물 경작을 동시에 수행하는 혼합 시스템이다(Dupraz *et al.*, 2011). 일반 태양광 시설 내에 패널 간 음영을 피하기 위한 이격 공간을 작물 재배로 활용한 일부 사례들과는 달리 (e.g., AL-agele *et al.*, 2021), 영농형 태양광 시설은 동일 토지 면적에 대해 상부의 태양광 패널 발전과 그 하부의 작물 경작이 함께 이루어지는 형태이다 (Goetzberger and Zastrow, 1982).

패널의 배열과 태양 추적 여부에 따라 고정형과 추적형으로 나눌 수 있는데, 일반 보급 형태인 고정형 영농형 태양광은 농기계 높이보다 위에 패널 배열(array)들 간에 일정한 간격을 두고 설치되어 있어 패널 하부는 부분적인 차광·채광 생육 환경이 조성된다 (Cho *et al.*, 2020). 이렇게 생육 광조건을 결정하는 고정형 영농형 태양광의 차광률은 주로 패널 배열의 이격거리 및 패널의 설치 각도에 따라 결정된다 (Marrou *et al.*, 2013).

작물에 흡수한 광량이 증가할수록, 작물 생장률 (crop growth rate, g/m²/day)은 일반적으로 거의 선형적 증가를 보인다(Yoshida, 1981). 따라서, 태양광 패널에 의한 차광 정도가 광합성 효율과 같은 작물 생리 반응과 생장에 영향을 주는 것은 필연적일 것이다. Kim *et al.* (2020)은 경남 고성군에 설치된 영농형 태양광 하부에서 벼 생산량이 약 20 % 감소하였음을 보였다. 그리고 An *et al.* (2021)에 따르면 전남농업기술원에서 조사한 2020년 보성 영농형 태양광의 벼 수확량은 약 29 % 줄었으며, 같은 해 나주 시설에서도 콩 수량이 약 22 % 감소하였다. 이러한 생산량 변동은 시설 차광율에 따라 감소된 광 조건에서 생육된 작물의 광합성 효율에 의해 크게 좌우된 것으로 보인다 (e.g., Zhu *et al.*, 2008), 영농형 태양광 하부에서의 생산성의 기반이 되는 광합성능에 대한 연구는 국내외적으로 매우 드물다.

영농형 태양광 하부와 같은 부분 차광 생육 환경에서의 작물 광합성능을 실험한 사례는 아니지만, 지속적으로 강광과 약광에 노출된 작물 대상의 선행연구들은 다수 존재하며, 이는 영농형 태양광에서의 광합성능을 이해하는데 유용할 것이다. Fu *et al.* (2012)는 100, 200, 400, 600, 800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광조건에서 재배된

로메인 상추(*Lactuca sativa* L.)의 엽록소 형광을 관측하였다. 200, 400, 600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 생육 조건에서 관측된 전자전달효율(Electron Transport Rate, ETR) 값은 비교적 높고 서로 큰 차이가 나지 않았지만, 약광(100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)과 강광(800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)의 ETR 값은 둘 다 낮게 나타났다. 약한 광 에너지를 이용하면 광화학반응(photochemical reaction)에 의한 양자수율(Quantum Yield, QY)이 낮아지며, 강광 조건의 경우는 지속적으로 생육 최적 광을 초과하여 노출된 탓에 광화학계 II (photosystem II) 관련 기관이 파괴되어 광인산화(photophosphorylation) 효율이 낮아진다. 이에 따라 비광화학적 형광소멸(Non-Photochemical fluorescence Quenching, NPQ)은 약광에서 높고, 강광에서는 현저히 낮아졌다.

Seródio and Lavaud(2011)는 강광과 약광에서 자란 애기장대(*Arabidopsis thaliana*)의 엽록소 형광을 빠른 광반응곡선(Rapid Light-response Curve, RLC) 실험을 통해 관측하였다. 약한 광에서 생육한 애기장대의 ETR은 강광보다 낮았으며, NPQ는 약광에서 높았다. 또한, NPQ가 증가할수록 광반응곡선의 ETR의 최대값은 낮아졌다. 이는 NPQ를 최대로 유도하는데 중요한 크산토펜 회로(xanthophyll cycle)의 제아크산틴(zeaxanthin) 합성 및 총량이 광 조건에 따라 좌우되게 때문이다.

앞선 약광 또는 강광 조건에서의 생육 실험들과는 달리 강광에서 약광으로의 즉각적인 변화에 따른 CO₂ 고정(fixation)의 광합성 효율과 광보호기작(photoprotection)의 척도인 NPQ를 관측한 선행연구들이 수행되었다(e.g., Pérez-Bueno *et al.*, 2008). 강광을 흡수한 잎은 많은 광 에너지를 이용할 수 있어 CO₂ 고정량 또한 높지만, 광인산화 용량을 초과한 에너지는 제아크산틴의 탈에폭시화(de-epoxidation)를 통해 비광화학적(NPQ)으로 소멸된다. 강광에서 약광으로 바뀌어 잎이 흡수한 에너지는 줄어들었지만, 강광에서 활성화된 비광화학적 소멸로 여전히 많은 에너지를 소비하고 있어 CO₂ 고정에 이용할 에너지는 적을 수밖에 없다. 약광에 수 분에 걸쳐 적응되면 NPQ는 감소하며 CO₂ 고정 억제도 완화된다. 이런 현상을 주목하는 이유는 영농형 태양광 하부 그림자가 이동하면서 작물에 유사한 현상이 일어날 수 있기 때문이다. 다시 말해, 패널 사이로 침투한 강광에 의해 광저해(photoinhibition)가 발생할 수 있으며, 패널 그림자가 드리워진다고 해도 높아진 NPQ 활성이 즉각 완화되

지 않기 때문에 낮은 광합성 효율을 보일 수도 있다.

이처럼 영농형 태양광 하부의 부분 차광 생육 환경이 광화학계의 광보호와 광저해를 비롯한 광합성능 전반에 미치는 영향을 쉽사리 예단하기 어렵다. 하지만 영농형 태양광 하부 작물의 광합성 관련 연구는 생산량 변동을 생리적으로 설명하고 예측하는데 반드시 필요할 것이다. 본 연구는 대표적인 식량 작물인 콩과 벼가 영농형 태양광 패널에 의해 지속적으로 부분 차광이 형성되는 조건에서 광인산화 반응 효율을 나타내는 ETR과 열 방출 기작인 NPQ 변화를 2020년 전라남도 나주와 보성의 시설에서 관측하였다.

II. 방법

2.1. 영농형 태양광 시설

전라남도 나주시 산포면 전남농업기술원 포장에 설치된 고정형 영농형 태양광 시설에서 대원콩을 재배하였다. 구조물의 면적은 3,900 m² (65 × 60 m)이며, 패널의 설치 간격은 2.5 m, 높이 6 m, 설치 각도 35°이며, 이에 따른 설계상 차광율은 32 % 이다. 패널의 수광면은 남서 방향을 바라보고 있다.

전라남도 보성군 보성을 옥암리 613-2의 논에 설치된 시설에서 일미벼를 재배하였다. 구조물의 면적은 2,016 m² (84 × 24 m)이고, 패널의 설치 간격은 1.5 m, 높이 6 m, 설치 각도 30°이다. 설계 차광율은 28.9 % 이며, 패널의 수광면은 남쪽에서 다소 서쪽으로 치우친 남남서 방향을 바라보고 있다.

2.2. 관측 표본

대원콩은 나주에 2020년 6월 15일에 파종 되었고, 일미벼는 보성에 2020년 6월 11일에 이앙 되었다. 그 이후 영양생장기를 거쳐 출수를 앞둔 2020년 8월 17일과 18일의 양일에 걸쳐 나주와 보성에서 대상 작물의 잎 연령이 가장 낮은 상위엽을 대상으로 엽록소 형광을 관측하였다. 이 시기는 동화산물의 분배가 잎에 집중되어 광합성 효율이 높기 때문에 ETR과 NPQ 반응 결과를 분석하기 용이하다(Gardner *et al.*, 2017). 관측대상 잎은 개체 내에서 엽면적이 넓고 SPAD (SPAD-502Plus, MINOLTA) 엽록소 수치가 큰 것 중에 노지와 영농형 태양광 하부에서 SPAD 엽록소 수치가 유사한 것을 선택하였다. 형광 관측 잎은 영농형 태양광 하부와 일반 노지에서 작물별로 각 4개씩 총

16개 잎을 선택하였다. SPAD 값은 각 잎 표본에 대해 10회 관측 평균값을 사용하였다.

2.3. 엽록소 형광 관측

모니터링펜(Monitoring Pen MP 100-A, PSI)는 엽록소 형광 측정 기기로서 형광 신호 검출 센서와 광조사 장치가 함께 위치한 말단 부위를 잎 표면 가까이 두어 광화학반응에 대한 최대양자효율(F_v/F_m), ETR, NPQ 등의 엽록소 형광 매개변수를 측정할 수 있다. 본 실험에서는 센서 말단과 잎의 거리가 약 5 mm를 넘지 않도록 거의 밀착시켰다.

RLC와 NPQ 프로토콜 엽록소 형광 관측은 기기 설치를 위한 별도의 작업 조명 없이 밤 8~9시 사이에 암 조건을 유지한 채 수행되었다. 일반 노지와 영농형 태양광 하부는 광 환경이 상이하여 필연적으로 낮 동안 일사광에 의해 발생하는 광저해 스트레스 정도가 다르게 나타날 수밖에 없다. 따라서, 주간에 두 곳에서 측정된 엽록소 형광 값으로는 식물의 발육 상태 또는 생육 스트레스와 관련한 광합성능을 평가하기 어렵다. 엽록소 형광 관측에 있어 밤의 암 조건을 유지시킨 또 다른 이유는 엽록소에 흡수된 광 에너지가 광인산화 반응, 형광 방출, 그리고 열 소실될 때에 암적응 잎은 열 소실 기작이 불활성화되어 형광 에너지 측정 값으로부터 광인산화 정도를 파악하기 용이하기 때문이다(Krause *et al.*, 1991).

RLC 프로토콜은 7단계의 조사광(irradiating light)으로 구성되어 있다. 광도의 순서는 10, 20, 50, 100, 300, 500, 1000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이며, 각 단계는 60초 정도가 소요된다. 광도에 따라 반응한 QY 값을 이용해 ETR과 NPQ는 아래의 식으로 구하였다:

$$\text{ETR} = \text{QY} \times \text{PAR} \times 0.84 \times 0.5 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{NPQ} = F_m/F_m' - 1 \quad (\text{Eq. 2})$$

ETR은 흡수 광 에너지에 대한 전자전달량($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), PAR는 잎에 조사된 광합성유효복사광(photosynthetic active radiation)의 강도이며 녹색 잎의 평균적 흡광 비율 0.84와 잎의 총 엽록소 중 광화학계II 엽록소가 차지하는 비율 0.5 값을 사용하였다. NPQ는 암적응 상태에서 측정된 최대 형광(Maximum Fluorescence, F_m)과 명적응(light adapted) 상태에서 측정된 최대 형광(F_m')을 사용하였다.

NPQ 프로토콜은 명과 암 단계로 나뉘며 광 단계의

첫번째 펄스는 11초가 걸리고, 펄스 간격은 21초로 총 10번을 반복한다. 암 회복(Dark recovery) 단계에서는 첫번째 펄스가 20초이고, 21초 간격으로 2번 관측을 하여 총 241초에 걸쳐 관측된다(e.g., Oxborough and Baker, 1997). NPQ 값은 RLC 프로토콜과 마찬가지로 Eq. 2로부터 계산되었다.

RLC 프로토콜과 NPQ 프로토콜 두 방법에서 관측된 NPQ는 서로 다르게 해석할 수 있다. RLC 프로토콜은 광 세기에 따른 식물의 광화학 효율과 광합성 능력 변화를 나타내고 있으며, NPQ 프로토콜은 명 단계(light phase)에서 받았던 광저해 스트레스로부터 암 단계(dark phase) 동안의 회복 능력을 평가할 수 있다.

2.4. 미기상 센서 설치

나주 포장의 경우 노지(비교군)에 대원콩의 최대 높이를 고려하여 1.0 m 지점에 광합성유효복사계(SQ-110, Apogee Instruments Inc., USA), 온·습도계(ATMOS-14, METEER Inc., USA), 토양수분계(TEROS-12, METEER Inc., USA), 우량계(ECRN-100, METEER Inc., USA)를 설치하였다. 영농형 태양광 하부의 부분 차광 환경을 보다 상세히 이해하고자 1.5 m 높이 50 cm 간격으로 광합성유효복사계 5개를 북동·남서에 걸쳐 총 6세트를 설치하였다. 각 복사계 지점에 노지와 마찬가지로 온·습도계와 토양수분계를 설치하였으며 모든 기기의 관측 값은 데이터로저(ZL6, METEER Inc., USA)에 5분 간격으로 저장되었다.

보성 포장의 경우 나주 포장과 동일한 구성으로 센서를 설치하였으며 광합성유효복사계 5개로 된 세트는 태양광 하부 중앙부분에 약 1.5 m 높이로 2곳에 설치하였다.

III. 결과 및 토의

3.1. 기상 조건 및 영농형 태양광 일차광율

Fig. 1은 두 실험 지역의 재배 기간 동안 기상 현황을 일 평균(기온, 토양수분)과 누적(광합성유효복사량, 강우량) 값으로 나타낸 것이다. 2020년 남부 지방의 장마가 7월 31일(기상청 발표)에 종료되어, 나주 콩 포장의 토양수분이 8월 중순에 다소 감소하였다. 또한, 보성 논에서도 같은 시기에 출수를 앞두고 물떼기를 하여 토양수분이 일시적으로 0.36 m³/m³까지 감소하였다. 이 시기는 벼 생육 단계에서 출수기 직전에 해당

되며, 기온은 일평균 약 29 °C으로써 당해 재배 기간 중 가장 높았다. 당해 2020년은 기록적인 긴 장마로 인해 강우일수가 평년대비 6.1일 많고(기상청 발표) 일사량이 매우 적었는데, 엽록소 형광 관측은 장마 종료일로부터 약 2.5주 뒤인 8월 17일과 18일에 이루어졌다.

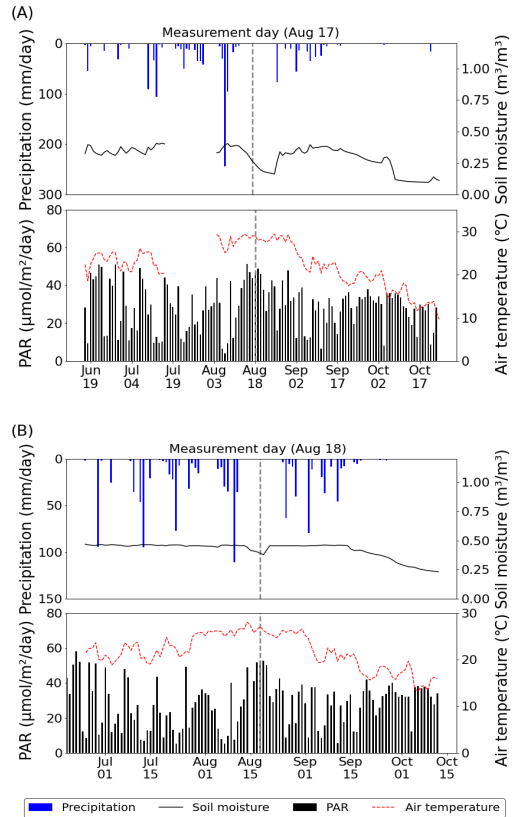


Fig. 1. Daily meteorological conditions in experimental areas. (A) From 13 Jun. to 24 Oct. 2020 in Naju and (B) from 24 Jun. to 13 Oct. in 2020 in Boseong.

Fig. 2는 두 지역 영농형 태양광 시설의 일 평균 차광율(100-하부광/노지광×100)을 나타낸 것이다. 하부광은 패널 하부 5개 PAR 센서 세트의 평균값이며 노지광은 인접 노지에서 관측한 PAR값이다. 전체 재배 기간 동안에 일사량과 태양고도의 변동 그리고 장마 여부에도 불구하고 일 차광율은 대체로 큰 변동을 보이지 않았다. 하지만, 애초에 설계된 영농형 태양광 시설의 차광율은 나주 32 %, 보성 28.9 %로써 실제 평균 일차광율인 나주 47.1 %, 보성 40.8 %와 약 10~15 %

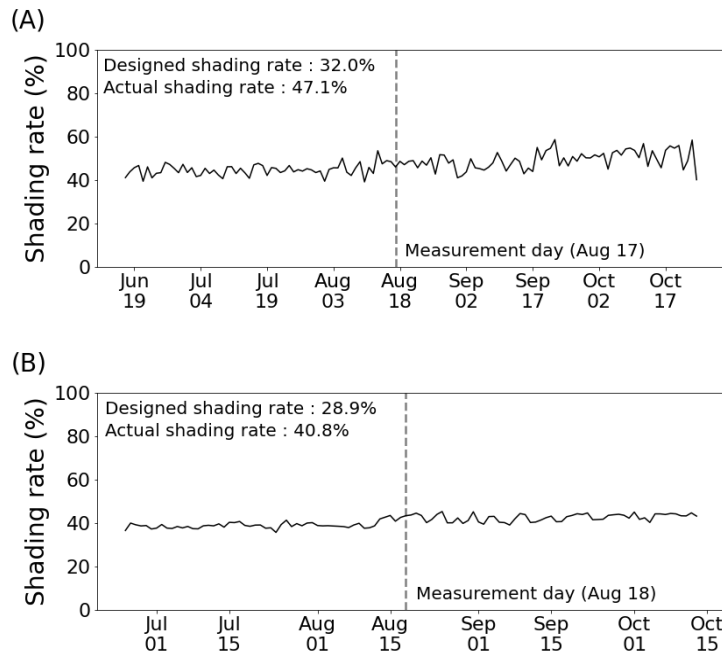


Fig. 2. Measured daily shading rate of agrivoltaic system in (A) Naju and (B) Boseong during cultivating period in 2020.

차이가 있었다.

3.2. 표본 잎의 SPAD와 F_v/F_m

Fig. 3은 콩과 벼의 SPAD와 F_v/F_m 을 나타내고 있다. SPAD 값의 경우 두 작물 모두 패널 하부와 노지 사이에서 유의한 차이를 나타내지 않았다($p \geq 0.05$). F_v/F_m 값은 콩에서 유사하였으나 벼에서는 통계적인 차이를 보였다($p < 0.05$). 하지만 모두 0.8 이상의 값으로써 스트레스가 없는 고등 식물의 F_v/F_m 은 경험적으로 약 0.8을 보이기 때문에 모든 관측 표본은 스트레스를 받지 않는 상태임을 나타낸다. 결국, 패널 하부와 노지의 관측 표본 잎은 엽록소 함량과 스트레스 상태가 동일한 수준으로 볼 수 있으며, 이에 따라 엽록소 형광 관측의 결과는 생육의 차이로 해석될 수 있겠다.

3.3. ETR과 NPQ

Fig. 4는 RLC 프로토콜을 사용한 광 반응 그래프로 형광 관측 기기의 광 펄스 강도에 따른 ETR과 NPQ 변화량을 보이고 있다. 관측 표본 4개의 평균을 사용하였으며 그에 따른 편차를 에러바로 표시하였다. 콩과 벼의 경우 조사광 강도가 높아질수록 NPQ는 지속적인 증가를 보였으며, ETR도 마찬가지로 약한 광 수준

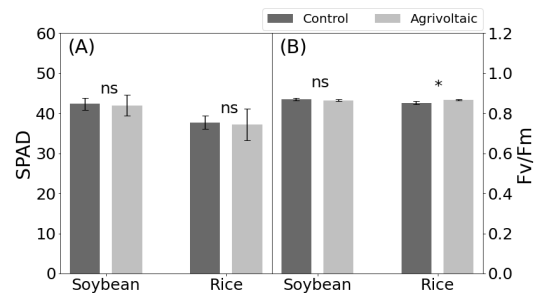


Fig. 3. Comparison of (A) SPAD and (B) F_v/F_m of soybean and rice between open filed (control) and under agrivoltaic systems in Naju and Boseong. Bars are the means of samples ($n=8, 4$). Error bars represent standard deviation. Independent two-sample t-test results: * $p < 0.05$, ns: not significant ($p \geq 0.05$).

에서 광 강도에 따라 값이 증가하다가 $500 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 조사광에서부터 변화가 둔화되었다. 콩은 노지에서 ETR 값이 $1,000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 조사광일 때 12 % 더 높은 반면, NPQ는 패널 하부가 $1,000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 조사광일 때 21 % 더 높았다(Fig. 4(A)). 벼는 노지와 패널 하부의 ETR 값에서 큰 차이를 보이지 않았지만, NPQ는 태양광 하부가 $1,000 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 조사광일 때 12.5 %

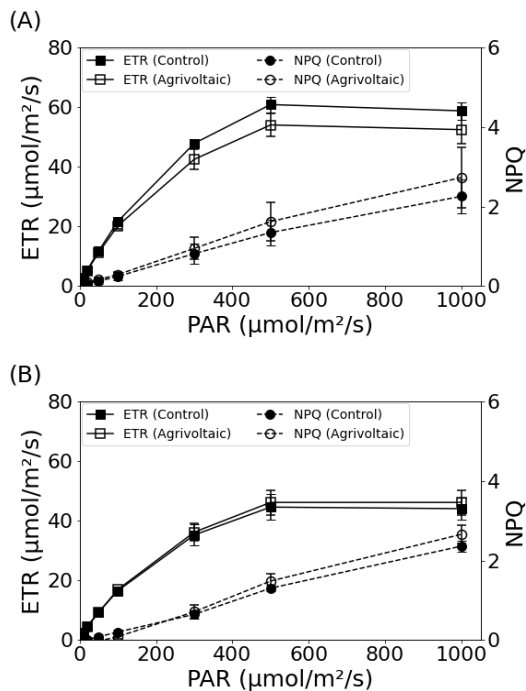


Fig. 4. Rapid light response curve of ETR and NPQ measured in (A) soybean on 17 August in Naju and (B) rice on 18 August in Boseong under open field (control) and agrivoltaic systems. Error bars represent standard deviation and data are the means of values ($n=4$).

더 높았다(Fig. 4(B)). 이는 콩에서 패널 하부의 광인산화 효율이 다소 낮으며, 벼에서는 유사했음을 시사한다.

Fig. 5는 NPQ 프로토콜을 사용한 명과 암의 지속 시간에 따른 NPQ 유도 곡선을 나타낸 것이다. 패널 하부와 노지의 두 작물 모두는 명 단계에서 NPQ가 증가하며, 이어진 암 단계에서는 직전의 광저해가 회복되며 NPQ가 감소하는 모습을 보인다. 콩은 명 단계의 조사광이 시작되자마자 NPQ는 빠르게 증가하고 50초 이후로는 다소 완만하게 증가하는데, 패널 하부의 NPQ는 명 단계의 종료 시점인 200초에서 통계적으로 유의($p<0.05$)하게 노지보다 높았다. 암 단계에서도 패널 하부가 상대적으로 더 높은($p<0.05$) 상태를 유지 하였다(Fig. 5(A)). 벼는 명 단계 동안 지속적으로 NPQ가 증가했다. 약 100초 까지는 패널 하부와 노지의 NPQ 값이 유사했으나($p\geq 0.05$), 그 이후에는 패널 하부 값이 더 빠른 증가를 보이며 상대적으로 노지보다 큰 값($p<0.05$)을 보였다. 암 단계에서는 반대로 패

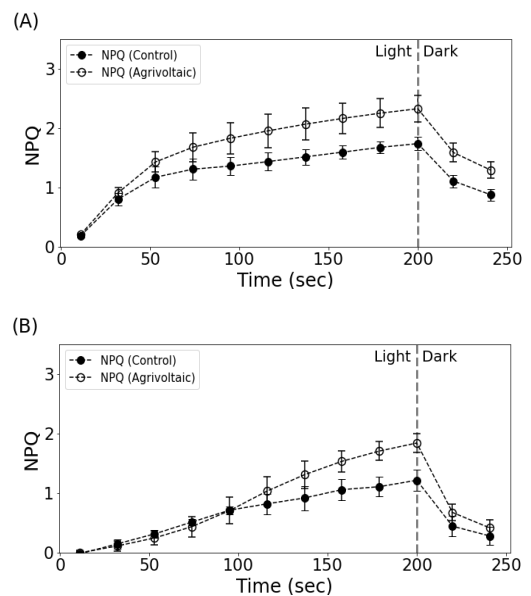


Fig. 5. NPQ induction curves measured in (A) soybean on 17 August in Naju and (B) rice on 18 August in Boseong under open field (control) and agrivoltaic systems. Error bars represent standard deviation and data are the means of values ($n=4$).

널 하부 값의 4.5 % 더 급격한 감소로 인해 노지와와의 차이가 줄었다(Fig. 5(B)).

탈에폭시화 활성은 지속적인 광 조사에 의해 유도된 광저해 스트레스 완화와 관련이 있는데(Li *et al.*, 2002), 콩과 벼 모두 비광화학적 소멸에 있어 노지보다 패널 하부 NPQ 값이 높았다는 것은 광보호기작이 더 발달되어 있음을 알 수 있다.

IV. 고찰 및 결론

본 연구는 영농형 태양광 시설에서 작물 생산량에 영향을 미치는 광합성능의 차이를 확인하고자 하였다. 영농형 태양광 시설 하부와 노지의 출수 전 작물을 대상으로 엽록소 형광 기기를 사용하여 ETR과 NPQ를 분석하였다. 패널 하부와 노지의 관측 표본 잎은 엽록소 함량과 F_v/F_m 이 유사했으므로 본 연구의 엽록소 형광 결과는 작물의 생육 상태에 따른 광합성능 차이로 볼 수 있겠다.

관측 결과로는 영농형 태양광 패널에 의한 부분 차광 조건에서 생육한 콩과 벼는 노지보다 NPQ가 더 높았으며, ETR은 콩에서 패널 하부가 다소 낮았고 벼

에서는 유사했다. 즉, 영농형 태양광 시설과 노지에서 재배된 작물은 광인산화 효율에 있어 큰 차이를 보이지 않기 때문에 전적으로 흡수 광 에너지에 따라 CO₂ 고정에 이용되는 생화학적 에너지 양이 결정될 것이다. 하지만, 패널 하부 작물이 부분적으로 드리워지는 채광을 흡수하여 노지 작물의 광합성 수준을 회복하는 것은 쉽지 않아 보인다. 패널 하부의 콩과 벼는 모두 높은 NPQ를 보였는데, 이는 광보호기작을 위해 과도하게 활성화된 탈에폭시화가 광인산화에 소비되는 에너지를 억제시킬 수 있기 때문이다.

본 관측 결과는 장마가 이례적으로 길었던 2020년에 수행되어 노지와 태양광 하부 간의 미기상적 환경 차이가 상대적으로 적었다. 따라서, 다양한 기후 환경 및 작물과 품종에 대해 패널 하부와 노지의 ETR과 NPQ 값이 상대적으로 얼마나 차이를 보이는지에 대한 추가적 연구가 필요하다.

적 요

영농형 태양광은 동일 토지면적에서 태양광 패널에 의한 발전과 작물 경작을 융합한 시스템이다. 광 에너지가 부족한 영농형 태양광 하부에서 작물의 수확량이 감소하는 것은 필연적이나, 이를 관장하는 패널 하부에서 생육한 작물의 광합성 반응에 대해서는 국내외적으로 거의 알려진 바가 없다. 본 연구는 고정형 영농형 태양광 시설 하부에서 재배된 작물 앞에 흡수된 광 에너지가 광합성 반응 중심에 전달되고 열로 방출되는 효율을 엽록소 형광 관측을 통해 조사하였다. 패널 하부와 노지의 콩과 벼는 ETR에서 큰 차이가 없는 것으로 보아 광인산화 효율보다는 잎이 흡수한 광 에너지에 따라 CO₂ 고정량이 결정되는 것으로 보인다. 또한, 패널 하부의 콩과 벼는 노지보다 NPQ가 더 높은 것으로 보아 활성화된 광보호기작이 광인산화로의 에너지 분배에 부정적 역할을 할 수 있을 것으로 보인다. 향후 영농형 태양광에서의 작물 생산량과 광합성의 관계를 이해하기 위해 보다 다양한 기후 및 재배조건에서의 광합성 반응을 조사할 필요가 있겠다.

감사의 글

이 논문은 한전 전력연구원(과제명: 장경간 고도상향 구조의 유틸리티급 농업공존형 태양광 개발)과 공동 연구사업 일환으로 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

REFERENCES

- AL-agele, H. A., K. Proctor, G. Murthy, and C. Higgins, 2021: A Case Study of Tomato (*Solanum lycopersicon* var. Legend) Production and Water Productivity in Agrivoltaic Systems. *Sustainability* **13**(5), 2850.
- An, K., C. Yoon, S. Shin, S. Kim, and J. Cho, 2021: Characteristics of Paddy Rice by Planting Density under Agrophotovoltaic module structure. *Proceeding of the Korean Solar Energy Society of Conference*, 175pp.
- Cho, Y., C. Yoon, H. Kim, H. Moon, K.N. An, and J. Cho, 2020: Meteorological data measured under agrivoltaic systems in Boseong-gun during winter barley season. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **22**(3), 144-151. (in Korean with English abstract)
- 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.
- Fu, W., P. Li, and Y. Wu, 2012: Effects of different light intensities on chlorophyll fluorescence characteristics and yield in lettuce. *Scientia Horticulturae* **135**, 45-51.
- Gardner, Frank P., R. Brent Pearce, and Roger L. Mitchell, 2017: *Physiology of Crop Plants*. Scientific publishers, 64pp.
- Goetzberger, A., and A. Zastrow, 1982: On the Coexistence of Solar- Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy* **1**, 55-69.
- Kim, H., S. Jee, J. Kim, M. Kang, S. Yun, M. Kim, J. Kim, Y. Lee, J. Son, G. Song, H. Jeon, and J. Chung, 2020: Rice and electric power production by adjusting the module angle of grid-connected agro-photovoltaic plant. *Proceedings of the Korean Society of Crop Science Conference*, 91pp.
- Krause, G. H., and E. Weis, 1991: Chlorophyll fluorescence and photosynthesis: the basics. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* **42**, 313-349.
- Li, X. P., P. Müller-Moulé, A. M. Gilmore, and K. K. Niyogi, 2002: PsbS-dependent enhancement of feedback de-excitation protects photosystem II from photoinhibition. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **99**(23), 15222-15227.
- Marrou, H., L. Guillioni, L. Dufour, C. Dupraz, and

- J. Wery, 2013: Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agriculture and Forest Meteorology* **177**, 117-132.
- Oxborough, K., and N. R. Baker, 1997: Resolving chlorophyll a fluorescence images of photosynthetic efficiency into photochemical and non-photochemical components—calculation of qP and F_v'/F_m' ; without measuring F_o' . *Photosynthesis research* **54**(2), 135-142.
- Pérez-Bueno, M. L., M. P. Johnson, A. Zia, A. V. Ruban, and P. Horton, 2008: The Lhcb protein and xanthophyll composition of the light harvesting antenna controls the Δ pH-dependency of non-photochemical quenching in *Arabidopsis thaliana*. *Federation of European Biochemical Societies letters* **582**(10), 1477-1482.
- Serôdio, J., and J. Lavaud, 2011: A model for describing the light response of the nonphotochemical quenching of chlorophyll fluorescence. *Photosynthesis research* **108**, 61-76.
- Yoshida, S., 1981: *Fundamentals of rice crop science*. The international rice research institute, 269pp.
- Zhu, X. G., S. P. Long, and D. R. Ort, 2008: What is the maximum efficiency with which photosynthesis can convert solar energy into biomass? *Current Opinion in Biotechnology* **19**(2), 153-159.