

영농형 태양광 하부의 일사량 변화 분석을 위한 모의 차광 관측 실험

윤창용¹ · 최선웅² · 안규남¹ · 류재현² · 정희정² · 조재일^{2*}

¹전남농업기술원 식량작물연구소, ²전남대학교 농업생명과학대학 응용식물학과
(2019년 9월 23일 접수; 2019년 12월 3일 수정; 2019년 12월 4일 수락)

Preliminary Experiment of the Change of Insolation under Solar Panel Mimic Shading Net

Changyong Yoon¹, Seonwoong Choi², Kyu-Nam An¹,
Jae-Hyun Ryu², Hoejeong Jeong² and Jaeil Cho^{2*}

¹Jeollanam-do Agricultural Research & Extension Services, Naju 58213, Republic Korea

²Department of Applied Plant Science, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro,
Gwangju 61186, Republic of Korea

(Received September 23, 2019; Revised December 3, 2019; Accepted December 4, 2019)

ABSTRACT

An agrivoltaic systems (AVS) is mixed systems associating photovoltaic panels (PVPs) and crop cultivation at the same time on the given land area. It is receiving attention to improve rural economy. However, it is likely that, the crop yield should be decreased due to the reduced absorption of solar radiation by leaves. Thus, before popularizing the AVS, it is necessary to comprehend the degree of shading by PVPs in AVS. In this study, the change of radiation condition under AVS mimic shading net was investigated. The minimum and maximum of difference of photosynthetically active radiation (PAR) between under and outside shading net were 3.03 mol/m²/day on a cloudy day and 17.08 mol/m²/day on a sunny day. This difference decreased when the ratio of diffuse irradiance to global irradiance increased. Such a shading effect resulted in the increase of rice height and decrease of rice tillering.

Key words: Agrivoltaic Systems, Photovoltaic panels, Shading net, Photosynthetically Active Radiation, Diffuse irradiation, Rice tillering

I. 서 언

영농형 태양광 발전(Agrivoltaic Systems, AVS)은 기존의 농지에 태양광 패널(Solar Photovoltaic Panel, PVP)을 설치하여 농지 보존과 일정 작물 수확량 유지를 전제로 전기 생산도 병행하는 시스템이다 (Goetzberger and Zastrow, 1982). 최근, 국내에서도

태양광 부지 수요 충족 및 농촌 경쟁력 제고를 위한 방안으로 주목받고 있다(Cho *et al.*, 2019). AVS의 기본 개념은 작물이 흡수하지 못하는 광을 ‘잉여 태양광’이라고 정의하고 그것을 전기 생산에 사용한다는 개념을 가지고 있다(Dinesh and Pearce, 2016). 이러한 설명은 일반적으로 하절기에는 주간 일사량이 단일 잎에서의 광합성 광포화점을 훨씬 초과한다는 점에 주목하



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

고 있다. 하지만, 실제로 작물 초판이 흡수한 광량이 증가하면 작물 성장률(crop growth rate, g/m²/day)은 거의 선형적으로 높아지므로(Yoshida, 1981) PVP의 차광 효과에 따른 작물 생산량 감소는 필연적인 것으로 예상된다.

경제적 관점에서 영농형 태양광의 핵심은 태양광 발전량 가치 보다 작물 수확량 손해가 크지 않아야 한다는 것이다(Dinesh and Pearce, 2016). 따라서 PVP 하부경지에서 태양광 에너지 유입 감소로 대표되는 미기상 변화를 올바로 이해하고, 그에 따른 생산량 감소 정도를 작물과 기후에 따라 구분 지어 정확히 파악할 필요가 있다. 하지만, 그 첫 단계라고 할 수 있는 PVP 하부의 태양광 입사 조건 변화에 대한 연구는 국내외적으로도 많지 않은 실정이다. 과거에도 차광에 따른 생육 차이를 실험한 연구는 다수 진행되었지만(Han *et al.*, 1988; Hwang *et al.*, 2014; Lee *et al.*, 2014), PVP는 완전 차광이 아니라 부분적 차광이라는 점을 고려할 때, PVP 효과를 직접 효과적으로 예단하기는 어렵다.

Armstrong *et al.*(2016)은 영국 스윈던 근교에 위치한 태양광 공원(solar park)에서 PVP 하부의 다양한 미기상 요소를 측정하였다. 이 시설은 영농형이 아니라 태양광 발전 전용 시설이며, 잔디 위에 30°각도로 정남쪽을 향하고 있는 패널이 거의 지면에 닿을 정도의 높이로 설치되었다. 패널들이 열을 이루고 있고, 그 열과 열 사이 간격은 11.2 m 이다. 패널의 설치 높이가 매우 낮으므로, 패널 하부는 주간 시간 대부분 그림자가 드리워져 있어 산란광의 비율이 90% 이상으로 매우 높았으며, 기온도 외부보다 낮았다. 하지만, 밤에는 패널의 보온 효과로 기온이 다소 높아졌다.

Marrou *et al.*(2013)은 프랑스 몽펠리에의 밀, 보리, 상추 경작지에 설치된 AVS에서 미기상 요소를 관측하였다. 경작지에 농기계가 들어갈 수 있도록 25° 각도의 패널들은 4 m 높이에 설치되었고, 패널은 남쪽을 향하고 있다. 패널의 열과 열 사이의 폭을 1.6 m와 3.2 m로 하여 시험하였다. 패널 간격이 좁은 경우 하부의 일사량은 62% 그리고 간격이 넓은 경우는 37%의 감소가 있었다. 이에 따라 기온, 토양온도, 및 작물온도가 낮아져 분얼 등 생육 저하로 수확량은 감소하였다.

우리나라의 AVS 사업은 3~4년 전부터 산업체와 민간 주도로 수행되고 있어, PVP 하부의 태양광 유입량 변화에 따른 경작지 미기상 변화를 체계적으로 이해하고 있지 못한 실정이다. 따라서, 본 실험에서는

연구용 AVS 건설에 앞서 PVP와 유사한 형태의 모의 차광 시설을 전남농업기술원 전작 포장에 설치하고 그 하부의 일사광 조건 변화를 분석하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 태양광 패널 모의 차광막 설치

전남 나주시 산포면 소재 전남농업기술원 전작 포장에 영농형 태양광 패널을 설치하기 전에 동일 위치에 본 시설 규격과 유사한 모의 차광막을 설치하였다(Fig. 1). 전작 포장 40 m × 60 m 면적에 폭 100 cm의 차광막을 4 m 높이에 18줄 배열하였고 차광막 사이의 폭은 150 cm로 하였다. 차광막 재질은 4중지 차광막을 사용하였고 차광율은 약 99%이었다.

일반적으로 태양광 발전 패널은 정남쪽을 향하지만, 영농형 태양광의 경우 경작지의 형태에 따라 패널의 방향이 유동적일 수밖에 없다. 본 실험의 경우도 사각형 면적의 각 모퉁이가 동, 서, 남, 북이 되어, 차광막은 북동-남서쪽 길이 방향으로 설치 되었고, 남동-북서쪽에 걸쳐 차광막을 차례로 배치하였다. 차광막 자체 무게로 인해 아래로 처지거나 바람에 의해 펄럭이지 않도록 다수의 와이어로 고정하였다.

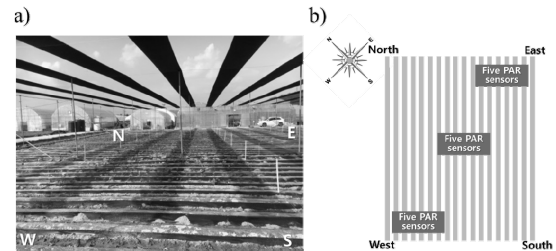


Fig. 1. a) Photograph of experimental shading net and b) position diagram of PAR sensors under shading net (blue color).

2.2. 미기상 관측 센서 설치

모의 차광막 하부의 동, 서, 남, 북, 중앙 지점과 그 외부에는 광합성유효복사계(SQ-110, Apogee Instruments Inc., USA), 일사계(SP-100, Apogee Instruments Inc., USA), 온·습도계(ATMOS-14, METER Inc., USA), 우량계(ECRN-100, METER Inc., USA)를 설치하였다. 또한 본 연구결과에는 제시하지 않았지만, 향후 연구용 AVS 건설을 위한 실험 설계를 위해 토양수분

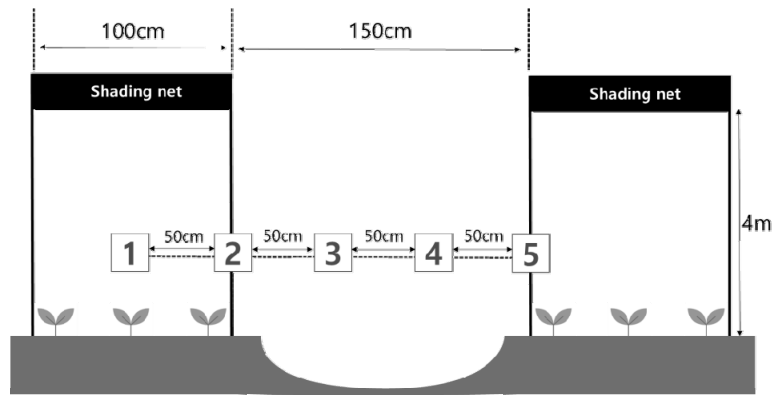


Fig. 2. Installation diagram of five PAR (Photosynthetically Active Radiation) sensors under experimental shading net.

계(TEROS-12, METER Inc., USA), 2차원 초음파풍속계(ATMOS-22, METER Inc., USA) 등 추가로 설치하였다. 모든 관측기기는 METER사의 ZL6 로거에 연결하였다.

차광에 의한 PAR 변화를 상세히 분석하기 위해 광합성유효복사계를 경작지의 동, 서, 남, 북, 중앙의 각 지점 당 5개를 50 cm 간격으로 북서-남동에 걸쳐 연속적으로 설치하였다(Fig. 2). 두 번째 광합성유효복사계가 차광막 가장자리에 위치하도록 조정하였고 초관에 의해 그늘이 지지 않도록 지면으로부터 1 m 높이로 설치하였다. 시험작물인 벼는 중만생종인 일미와 조생종인 조명1호 두 개 품종을 포트(1a/2000)당 25일묘를 5분씩 파종하였다.

산란복사계(Razon+, Kipp & Zonen Inc., NL)는 모

의 차광 시설로부터 직선거리로 약 230 m 떨어진 1층 높이 건물 옥상에 설치하여 관측하였다. 산란복사계 자료는 1분 간격으로 기록 되었으며, 그 외의 차광막 하부의 모든 미기상 관측자료는 5분으로 설정하였다. 자료 분석 기간은 2019년 7월 11일부터 8월 23일까지로 대부분 하절기 작물의 영양생장 시기에 해당되며 광 조건에 민감하고 기후적으로는 장마기간에 해당된다.

III. 결과 및 토의

3.1. 관측 기간 동안의 기상 조건

Fig. 3은 관측 기간 동안의 기상 상황을 시계열로 나타내고 있다. 맑은 날과 흐리거나 강우가 있는 날을 모두 포함하고 있으며, 그에 따라 PAR 값과 온도가

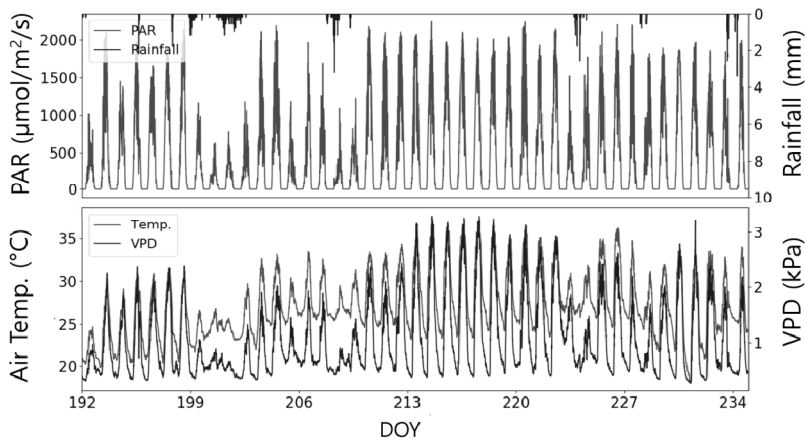


Fig. 3. Weather conditions in experimental place from July 11th to August 23rd (Day of Year: 192~234) in 2019.

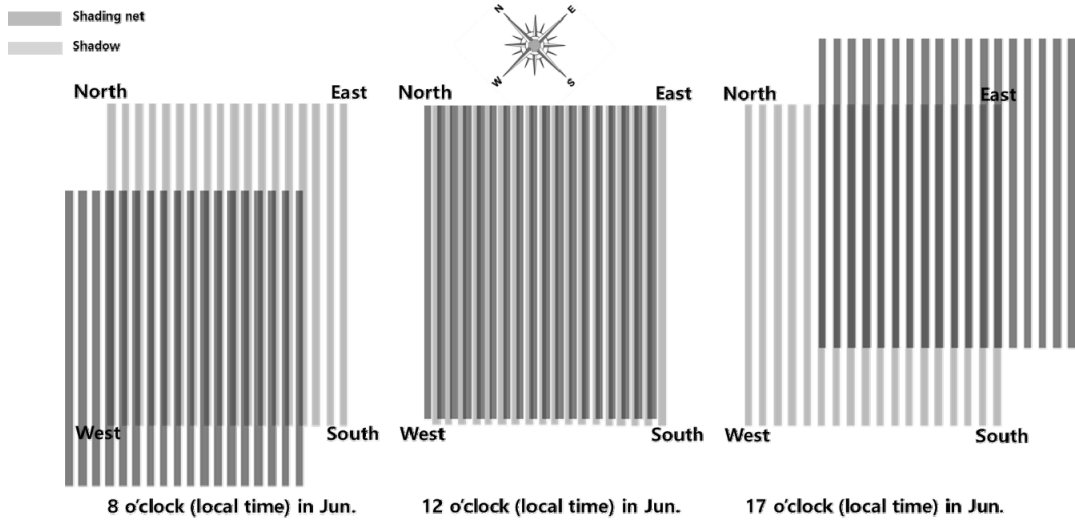


Fig. 4. Change of shadow state by shading net at 8, 12, and 17 o'clock (local time) in June. Sky color represents shadow and gray color is shading net.

크게 영향을 받는다. 기공 개폐에 관련이 있는 포화수 증기압차(vapor pressure deficit, VPD)는 기온의 변동 패턴과 매우 유사하다. *Armstrong et al.*(2016)의 태양광 발전 공원에 설치된 태양광 패널의 경우는 하부에 경작지가 없어 패널 높이가 지상으로부터 1.5 m로 낮기 때문에 패널 하부와 외부의 기온차이가 컸던 반면에, 본 실험의 차광막 하부와 외부의 기온 차이는 거의

없었다.

3.2. 차광막 하부 PAR의 일 변화

Fig. 4는 하루 중 오전(8시), 정오(12시), 오후(17시)의 차광막 그림자의 전체 모습을 지상에 기록하고 그림으로 나타낸 것이다. 대부분의 AVS가 농기계의 사용에 적합하도록 4~5 m 높이에 PVP를 설치하는 것

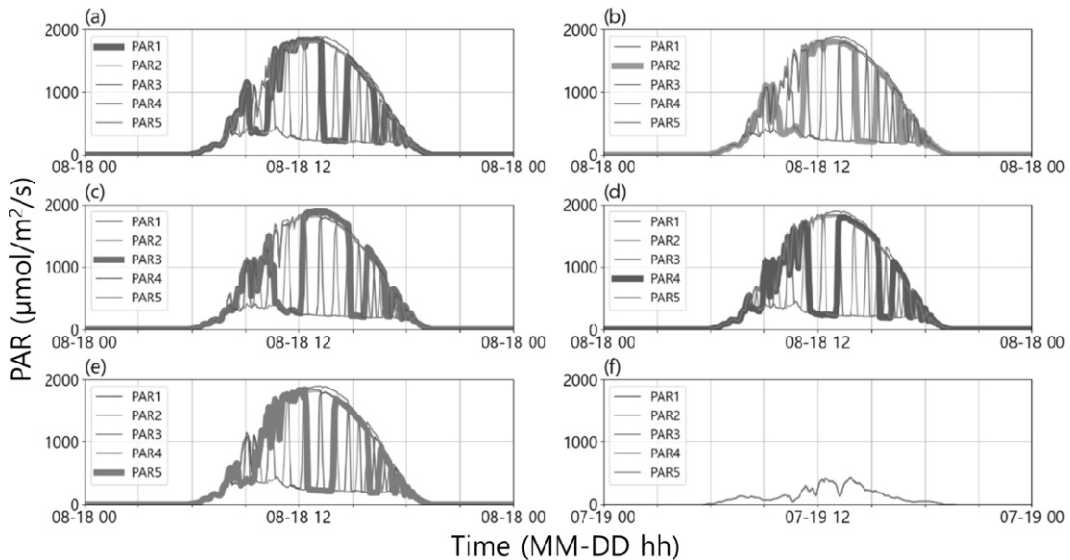


Fig. 5. Diurnal change of five PAR sensors under shading net (a, b, c, d, and e) at sunny day in August 18th, and (f) at cloudy day in July 19th in 2019.

처럼 차광막도 4 m 높이에 설치되었기 때문에 태양고도가 낮은 이른 오전과 늦은 오후에는 그림자가 실험 경작지를 벗어나게 된다. 또한 정오에는 대부분의 경작지가 전체 그늘 형상 아래에 놓이게 된다. 따라서 차광막 하부 경작지의 가장자리 부분과 중앙에서의 일사 수광량은 차이가 있을 것이다. 이는 차광막의 높이가 높고, 하부 경작지 면적이 좁을수록 차이가 크게 나타날 것으로 예상된다.

Fig. 5는 연구 기간 중 맑은 날이었던 8월 18일과 흐린 날인 7월 19일의 차광막 하부 중앙에 위치한 5개 광합성유효복사계들의 5분 간격 일 변화를 나타낸 것이다. 50 cm 간격으로 북서-남동으로 배치되어 있는 PAR 복사계들은 맑은 날의 경우, 복사계에 그림자가 드리운 시간 동안 광량이 급격히 떨어지므로 차광 효과의 정도가 복사계들 간에 확연히 구분된다(Fig. 5a-e). 또한, 흐린 날의 경우 각 PAR 복사계 값은 맑은 날에 비해 낮을 뿐만 아니라, 복사계들 간의 하루 중 시간 별 차이도 거의 없었다(Fig. 5f). 즉, 각 5개 복사계에 입력되는 광량은 태양 천정각에 따른 하루 중 그림자의 위치 변화와 운량 증가에 따른 일사량 감소 및 산란광 증가의 영향에 따라 차광 효과가 달라졌다.

3.3. 차광막 하부의 일 누적 PAR 변동

Fig. 6는 차광막 하부 중앙과 차광막 외부에 설치된 복사계들의 5분 단위 일 누적 PAR량을 나타낸 것이다. 차광막 하부의 5개 복사계들 간 일 누적량 차이가 최소인 날은 0.20 mol/m²/day (흐린 날)이었으며, 최대인 날은 5.15 mol/m²/day (맑은 날)로 나타났다. 이는 일반적인 완전 차광 조건의 생육 실험과 달리 부분 차광의 효과가 드러난 것으로, Fig. 5에서처럼 5개 복사계 지점에 드리우는 그림자가 하루 중 태양고도에 따라 다르게 형성되기 때문이다. 중앙 지역 5개 PAR 복사계들의 평균값과 차광막 외부의 복사량 간 차이는 차광 시설 자체의 효과를 의미하는 것으로, 최대 17.08 mol/m²/day (맑은 날), 최소 3.03 mol/m²/day (흐린 날)이었다.

Fig. 7은 차광막 외부에서의 PAR 관측값에 대한 중앙 하부 지역 5개 PAR 복사계들의 평균값 차광율을 나타낸 것이다. 동, 서, 중앙 세 지점을 비교하였을 때, 서쪽 지점이 상대적으로 낮은 차광율을 보였다. 이는 차광막이 설치된 방향과 지형으로 인해 하부 서쪽 지점은 늦은 오후에 상대적으로 긴 시간 동안 그림자가 드리우지 않았기 때문으로 보인다. 이러한 차광율은

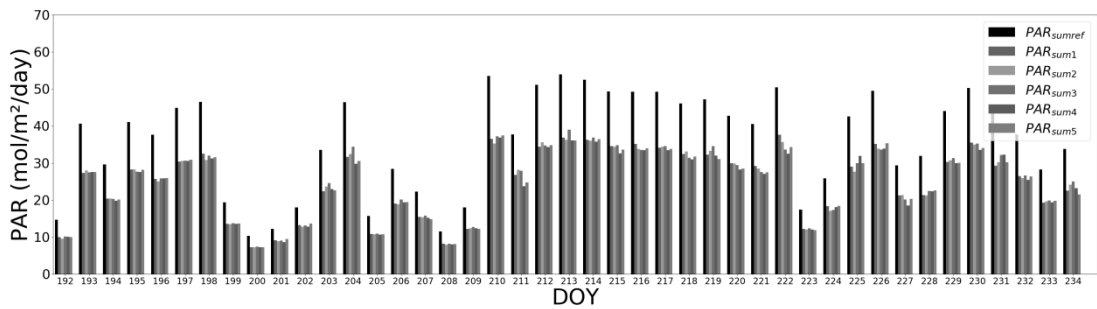


Fig. 6. Daily change of five PAR sensors under shading net during study period.

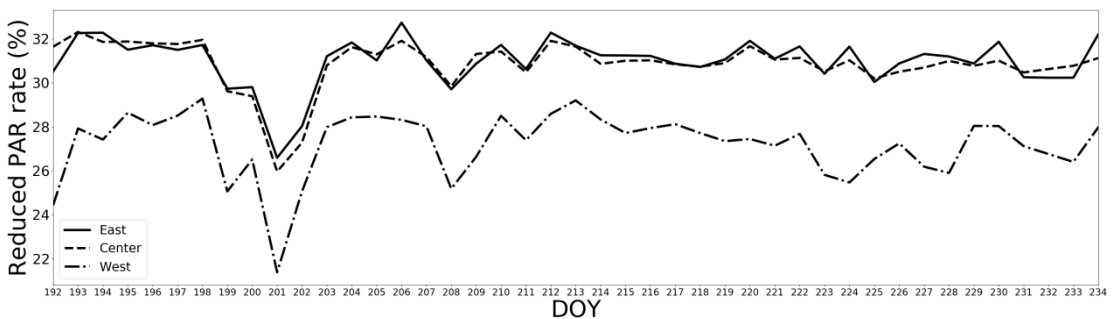


Fig. 7. Daily change of reduced PAR rate under shading net during study period.

항상 동일하지 않았으며, 산란광 비율이 높아 차광막 외부와 하부의 복사량 차이가 적어지는 흐린 날에 차광율이 낮아지는 모습을 보였다.

3.4. 산란복사 조건에 따른 차광막 하부 PAR의 변화

AVS와 같은 부분 차광 조건에서는 지표면까지의 일사광 침투 능력이 산란광과 직달광에서 다르게 나타날 것이다. Fig. 8에서 전천일사량에 대한 산란일사량의 비율(Diffuse irradiance/Global irradiance)에 대한 차광 효과를 살펴보았다. 직달광의 비율이 높아질수록 차광막 하부 5개 PAR 복사계들 간의 차이가 커졌다 (Fig. 8a). 또한 동일한 직달광(또는 산란광) 비율 조건이라고 해도 일사광량이 클 때에 더욱 복사계들 간 차이가 커졌다. 이는 Fig. 5에서 보인 것처럼 직달광이 만드는 그림자가 광 포획량을 크게 감소시킨 것으로 판단된다.

차광막 아래 복사계들의 PAR 평균값과 외부 복사계 PAR 값 간의 차이 또한 산란광이 증가할수록 그 차이가 줄어들었다(Fig. 8b). 이는 산란광이 직달광과는 달리 여러 광 투사 방향성을 가지고 부분 차광막

시설을 통과했기 때문으로 보인다. 따라서 구름이나 부유 먼지가 많은 대기 상태이거나, 낮은 태양 고도각에서 발생하는 산란광의 양이 증가한다면 AVS 차광 효과는 줄어들 것으로 예상된다.

3.5. 차광막 하부에서의 벼의 초기 생육

포트에 이양한지 30일 이후에 차광막 하부 포트에서 생육된 벼와 차광막 외부 포트의 벼를 조사하였다. 일미와 조명1호 초장은 차광막 외부의 정상 생육환경에서 각각 평균 44.1 cm와 43.4 cm로 나타났으나 차광막 아래 중앙 위치에서는 각각 평균 49.2 cm와 47.9 cm 이었다. 그리고 주당경수(개/m²)는 차광막 외부에서 일미와 조명1호가 각각 평균 48.9개와 42.5개 이었고, 차광막 아래에서는 각각 평균 34.4개와 32.2개 이었다. 이는 광 부족으로 인하여 길이 생장이 촉진된 것으로 보이며, 결국 주당경수의 감소로 이어졌을 것으로 사료된다. 이러한 초기 생육 상황에서는 이삭 수와 잎 면적의 감소를 야기하며, 이에 따라 광합성량도 점차 줄어들 것으로 예상된다.

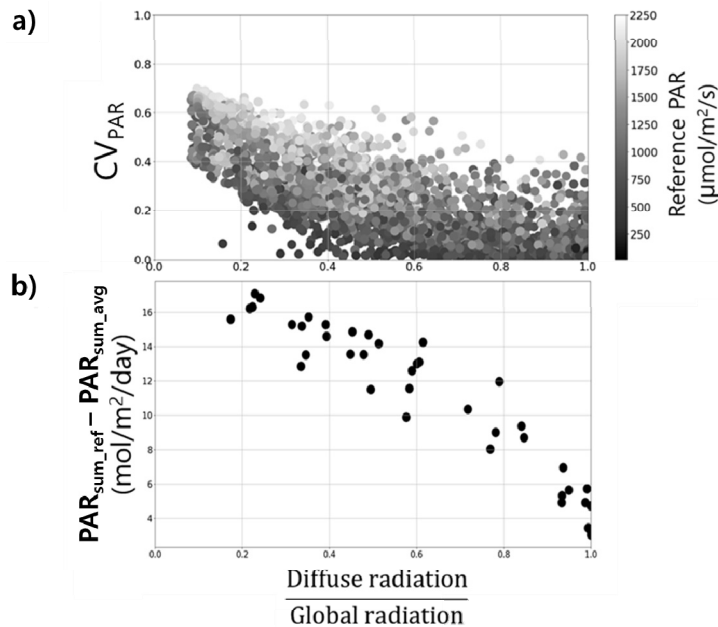


Fig. 8. Effect of shading net according to the ratio of diffuse irradiance to solar irradiance. The patterns of (a) coefficient of variation (CV) from five PAR sensors and (b) difference between reference PAR in outside of shading net and averaged five PAR sensors' value.

IV. 고찰 및 결론

본 연구는 영농형 태양광 발전 시설과 유사한 형태의 차광 모의 시설을 설치하여 하부 농지에 미치는 차광 정도를 분석하였다. 차광의 관점에서 영농형 태양광 패널은 2가지 특징이 있을 수 있다. 전면 차광이 되는 일반 차광 재배 실험과는 달리 일정한 간격으로 정렬된 태양광 패널에 의해 부분 차광이 형성된다는 점과 일반 태양광 발전 시설과는 달리 지면 가까이 패널이 설치되지 않는다는 점이다.

패널에 의한 차광 효과는 직달광 비율이 높은 맑은 날에 컸다. 이러한 차광에 따른 작물 생육 차이는 산란광의 비율이 높아져 차광효과가 적어지는 기상조건에서 감소할 수도 있겠으나, 산란광의 비율이 높은 대기 상태는 보통 일사량이 낮은 조건이기 때문에 차후 다양한 기후 및 기상조건에서 다년간 AVS 하부 재배 실험이 이루어져야 할 것으로 보인다. 또한 영농형 태양광 패널의 위치가 높아짐에 따라 시설 하부의 동과 서쪽에서 재배된 작물은 중앙 위치의 작물보다 상대적으로 더 많은 광을 포획하여 생장에 기여할 것으로 예상된다. 이렇게 영농형 태양광 시설로 인해 발생하는 복사 차광의 이해를 넓히기 위해, 다양한 기상 요소들과 복사량과의 관계에 대한 연구가 병행되어야 할 것이다(e.g., Kang *et al.*, 2019).

영농형 태양광 시설이 작물의 재배 및 생산량에 미치는 영향이 구명된다면, 향후 발생할 수 있는 여러 가지 문제를 예측하고 선제적으로 대응할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 벼의 생육 초기 연구결과만 제시하였으나, 수확 품질의 균질성은 작물에 따라 차이가 나타날 수 있어, 향후 추가 연구를 통해 상세히 분석되어야 할 것으로 판단된다.

적 요

영농형 태양광 발전은 기존 농지에 태양광 패널을 설치하여 농지 보존과 일정 수확량 유지를 전제로 전기 생산도 병행하는 시스템이다. 최근 태양광 부지 수요 충족 및 농촌 경쟁력 제고를 위한 방안으로 주목 받고 있다. 따라서, 본격적인 개발에 앞서 영농형 태양광 패널 하부에서의 경작지 차광 정도를 분석하는 것이 작물 생육·수확량 변동 예측에 반드시 필요할 것이다. 본 실험은 연구용 영농형 태양광 건설에 앞서, 영농형 태양광 시설 규격과 유사한 모의 차광 시설을

설치하고 하부의 광합성유효복사량 특성을 분석하였다. 차광막 하부와 외부의 광합성유효복사량 차이는 일사광에서 산란광 비율이 낮아질수록 증가하였는데, 최대 17.08 mol/m²/day (맑은 날), 최소 3.03 mol/m²/day (흐린 날)이었다. 이러한 광 조건 변화는 벼의 초기 생육에 있어 초장의 증가와 주당경수의 감소를 가져왔다.

감사의 글

한전 전력연구원(과제명: 장경간 고도상향 구조의 유틸리티급 농업공존형 태양광 개발)과 공동연구사업 일환으로 수행되었음.

REFERENCES

- Armstrong, A., N. J. Ostle, and J. Whitaker, 2016: Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters* **11**(7), 1-11.
- Cho, Y., S. Cho, H. Kwon, and D. Yoo, 2019: Building an agrophotovoltaic system and suggesting activation plans. *The Journal of Information Systems* **28**(1), 115-131. (in Korean with English abstract)
- Dinesh, H., and J. M. Pearce, 2016: The potential of agrivoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **54**, 299-308.
- Goetzberger, A., and A. Zastrow, 1982: On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy* **1**(1), 55-69.
- Han, H., and J. Ryoo, 1988: Effects of shading on growth and dry matter accumulation of corn and sorghum species. *The Korean Society of Grassland and Forage science* **8**(1), 61-65. (in Korean with English abstract)
- Hwang, J. G., and Y. D. Kim, 2014: Effect of shade net on reduction of freezing damage at a tea garden. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **16**(2), 146-154. (in Korean with English abstract)
- Kang, D., S. Hyun, and K. Kim, 2019: Development of a deep neural network model to estimate solar radiation using temperature and precipitation. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **21**(2), 85-96. (in Korean with English abstract)

- Lee, M. H., S. G. Kang, W. G. Sang, B. I. Ku, Y. D. Kim, H. K. Park, and J. H. Lee, 2014: Change of photosynthetic characteristics of high-quality rice cultivars by shading on grain filling stage. *Journal of Agriculture & Life Sciences* **45**(2), 60-65. (in Korean with English abstract)
- Marrou, H., L. Guilioni, L. Dufour, C. Dupraz, and J. Wery, 2016: Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology* **177**, 117-132.
- Yoshida, S., 1981: *Fundamentals of rice crop science*. The international rice research institute, 269pp.