

봄철 영농형 태양광 시설 하부 휴경논 토양의 온도와 수분 변화

조유나^{1,2}, 조은이^{1,2}, 정재혁³, 정회정^{4,5}, 황운하³, 조재일^{1,2*}

¹전남대학교 농업생명과학대학 응용식물학과, ²전남대학교 IT-Bio 융합시스템농업교육연구단, ³농촌진흥청 국립식량과학원, ⁴농촌진흥청 국립식량과학원 생산기술개발과, ⁵전남대학교 농업생명과학학연협동과정
(2022년 07월 20일 접수; 2023년 06월 26일 수정; 2023년 08월 22일 수락)

Changes of Soil Temperature and Moisture under the Agrivoltaic Systems in Fallow Paddy Field during Spring Season

Yuna Cho^{1,2}, Euni Cho^{1,2}, Jae-Hyeok Jeong³, Hoejeong Jeong^{4,5}, Woon-Ha Hwang³, Jaeil Cho^{1,2*}

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

²BK21 FOUR Center for IT-Bio Convergence System Agriculture, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea,

³National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, 181, Hyeoksin-ro, Iseo-myeon, Wanju-gun, Jeollabuk-do 55365, Republic of Korea,

⁴Crop Production Technology Research Division, National Institute of Crop Science, Rural Development Administration, 20, Jeompiljae-ro, Miryang-si, Gyeongsangnam-do, Republic of Korea,

⁵Interdisciplinary Program for Agriculture & Life Science, Chonnam National University, 77 Yongbong-ro, Gwangju 61186, Republic of Korea

(Received July 20, 2022; Revised June 26, 2023; Accepted August 22, 2023)

ABSTRACT

An agrivoltaic system (AVS) is a combined system that generates power through photovoltaic panels (PVPs) installed above a field where a crop is cultivated. Although soil moisture is an important limiting factor for open-field crop production, particularly during spring season in Korea, it is not well considered in the utilization of AVS. Indeed, the application of water-energy-food nexus on the AVS should be necessary. In this study, the changes of soil moisture and temperature under the AVS was investigated in fallow paddy field during spring season. The AVS that has partial shading condition by PV panels was decreased soil temperature and increased soil moisture compared to open-field. Furthermore, the maximum of the change in soil moisture to the change in soil temperature had a negative correlation both on open-field and AVS under wet condition. It represents that the micro-climate under the AVS is in energy-limited condition. The open-field of relatively high soil temperature was in water-limited condition. The different behavior of soil moisture on the AVS should be considered for the sustainable agricultural system as related to water-energy-food nexus.

Key words: Agrivoltaic systems, Partial shading, Fallow paddy field, Soil temperature, Soil moisture, Water-Energy-Food Nexus



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

I. 서 언

영농형 태양광 발전 시스템(Agrivoltaic Systems, AVS)은 어떤 토지 면적에서 노지 작물 재배와 농기계 높이 보다 위에 설치된 태양광 패널(Photovoltaic panels, PVPs)의 발전이 동시에 이루어지는 혼합 시스템이다(Goetzberger and Zatrow, 1982).

농업·농촌의 관점에서 영농형 태양광 시설은 다양한 평가와 의견이 있을 수 있다. PV 패널에 의해 광 에너지 일부가 차단되는 재배 환경이며, 부분 차광으로 인해 작물 생산량 감소와 미기상의 변화는 필연적인 것이다. 더 나아가 농촌소득 감소와 식량안보에 대한 부정적 시각이 있을 수 있으며, 다른 한편으로는 태양광 발전 전기의 판매로 새로운 농촌소득이 창출하고 신재생 에너지 보급이 확대되는 기대도 있다.

영농형 태양광 시설의 차광 조건에서 감소된 작물 생산량을 발전 소득이 메꾸거나, 때로는 정책적 지원과 그 해 발전량에 따라 농촌의 순소득이 증가할 수도 있겠다. 이러한 교환(Trade-off) 관계는 기본적으로 두 자원 간의 대체가 가능하다고 보는 약 지속가능성(Weak sustainability) 개념으로 설명될 수 있다. 하지만, 한 자원의 희생으로 효율성 높은 다른 자원을 개발하여 그 총량이 늘어나도 지속가능성의 의미로 설명할 수 없다는 강 지속가능성(Strong sustainability)의 가치에는 부합하지 않는다(Pearce and Atkinson, 1993; Gutiérrez, 1996; Gowdy and O'Hara, 1997). 이것은 모든 자원이 대체될 수 없는 고유한 속성을 가지고 있다고 보기 때문이며, 예를 들어 발전량만으로는 대체될 수 없는 식량안보 위험이 대표적인 경우이다.

최근 몇 년간 농업은 지속가능한 시스템을 달성하기 위해 다양한 시도를 하고 있는데, 대표적으로 물, 에너지, 식량 자원의 상호의존성을 강화하고 자원의 통합적 관리를 추구하는 물-에너지-식량 넥서스(Water-Energy-Food Nexus) 개념이 있다(Toledo and Scognamiglio, 2021; Bhandari *et al.*, 2021). 그에 반해, 지금까지 영농형 태양광에 대한 논의는 통합적 관점이 아닌 식량 생산과 에너지 발전의 양자구도로만 편향적으로 집중되어 있었다. 작물 생산과 전기 발전 외에도 영농형 태양광 시설이 농업 환경에 미치는 변화를 보다 세심하고 다각적으로 이해할 필요가 있는데, 예를 들어 패널에 의한 태양 복사 에너지의 차등적 공간 분배는 영농형 태양광 하부의 다양한 미기상 변화를 야기할 수 있다(Yoon *et al.*, 2019). 이는 광량 변화에 의한 작물 생육

차이는 물론이고, 토양의 수분 상태를 변화시켜 관개(Irrigation) 기술로 대표되는 영농활동인 물 관리(Water management)에 영향을 끼칠 것이다(Barron-Gafford *et al.*, 2019; Chamara and Beberagama, 2020). 또한, 온도와 수분 조건의 변화는 농지 온실가스 흡·배출 능력에도 관여할 것으로 예상된다(Kang *et al.*, 2021).

토양수분은 일반적으로 강우에 의해 공급되고 생태계 에너지의 이용 분배에 따라 대부분 증발산으로 잃게 된다(Philip, 1966). 특히, 경작지 토양수분은 강우뿐만 아니라 관개활동에 의해 부족량이 보충될 수 있다. 따라서, 효과적인 물 관리는 작물 생산량을 좌우하는 중요한 역할을 한다(Liu *et al.*, 2019). 이렇게 지속가능한 농업의 핵심인 수분 환경은 영농형 태양광 시설에 의해 영향을 받을 수 있는데, Hamidov and Helming(2020)은 건조 기후지역의 경우 영농형 태양광 하부에서 상대적으로 적은 증발산 손실에 의해 토양은 극단적으로 건조해지지 않아 관수에 필요한 물이 절약되며 태양광으로 발전된 전기는 농업에 사용되므로 이상적인 물-에너지-식량 넥서스의 대표적 사례로 보았다.

영농형 태양광이 농업의 지속가능한 발전에 기여할 수 있는 잠재성이 논의되고 있지만(Zainol Abidin *et al.*, 2021; Proctor *et al.*, 2021a; Proctor *et al.*, 2021b), 대한민국 기후에서 영농형 태양광 시설이 토양수분 환경에 미치는 영향에 대해서는 잘 알려지지 않았다. 토양의 수분과 온도는 농업생태계의 지면 에너지와 수문 균형의 상호작용 결과인 점을 고려하여, 본 연구는 국내 영농형 태양광 연구에서 상대적으로 주목하지 않았던 토양수분 변화를 태양 복사 에너지와 기온이 점차 증가하는 춘절기 동안 휴경논에서 관측하였다. 이를 통해 태양광 하부에서 작물 생육 환경을 보다 이해할 수 있을 것으로 사료된다.

II. 재료 및 방법

2.1. 고정형 영농형 태양광 시설

전라북도 완주군 이서면 국립식량과학원 답작 포장에 설치되어 있는 고정형 영농형 태양광 시설에서 연구를 수행하였다. 구조물의 면적은 756 m² (42×18 m)이며, 패널 설치 간격 1.5 m, 높이 4 m로 설계되었다. 패널의 수광면은 남남동 방향으로 설치 각도는 32°이다. 설계 차광율은 32.0%이며, 본 연구에서 실제 관측한 일일 차광율은 32.2%로 유사하였다. 대조구(Control)인 노지는 약 386 m² 면적으로, 고정형 영농형 태양광

구조물과 같은 필지 내 남남동 방향에 위치하고 있다.

2.2 미기상 관측 및 토양수분, 지온 센서 설치

영농형 태양광 시설의 부분차광에 따른 지온과 토양수분 변화를 측정하기 위해 2개의 토양수분계(TEROS-12, METER Inc., USA)를 설치하였다(Fig. 1). 태양광 패널들은 대략 농기계보다 높이 설치되므로 해당 필지의 동쪽은 오전에, 남쪽은 정오에, 서쪽은 오후에 일사광이 시설의 영향 없이 비취지는 가장자리 효과(Edge effects)가 발생하므로, 이를 고려하여 시설이 있는 필지 중앙 북쪽 부분(A3, A4)에서 토양수분을 관측하였다. 패널과 패널 사이에 설치된 두 토양수분계 위치가 동시에 패널 그림자에 들어갔다가 함께 그림자에서 나오도록 하여 두 자료의 시계열 비교가 용이하도록 했다. 대조구인 노지에도 토양수분계를 2개 설치했다. 설치

방법은 땅을 판 후 5 cm 깊이에 탐침(Probe)이 지면과 수평하게 되도록 옆으로 꽂았다(Red square in Fig. 1). 또한, 노지와 태양광 하부 간 토양수분 분석 시 복수 센서의 평균값을 사용하였다.

그 밖의 미기상 관측을 위해 광합성유효복사계(SQ-110, Apogee Instruments Inc., USA), 온도센서(STL-STHS, STA corporation, South Korea)와 영농형 태양광 포장에서 약 40 m 떨어진 평지에 있는 우량계(RGB, Seoul jeonggisa, South Korea)를 설치하였다. 모든 데이터는 10분 간격으로 2021년 3월 26일부터 5월 18일까지 데이터로거(ZL6, METER Inc., USA)에 기록되었다. 본 연구에서는 광합성유효복사(Photosynthetic active radiation, PAR) 측정값을 일사량으로 변환하여 사용하였다(Monteith, 1997).

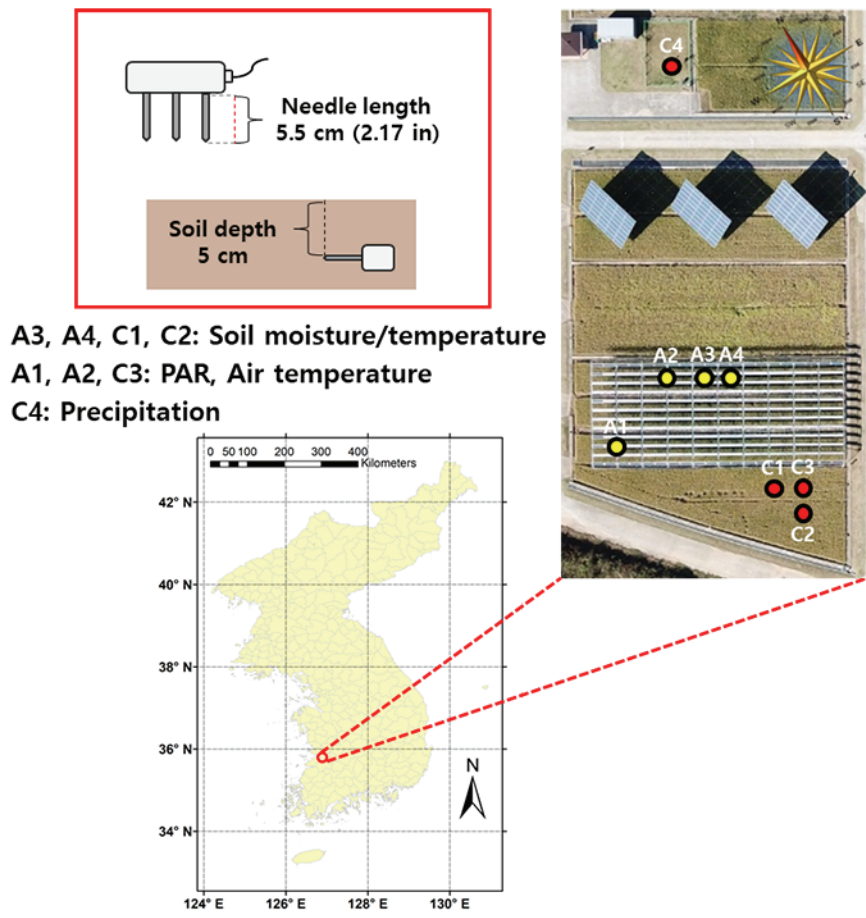


Fig. 1. Position of the agrivoltaic systems and sensor installation in Wanju-gun. Soil moisture sensor installation schematic diagram.

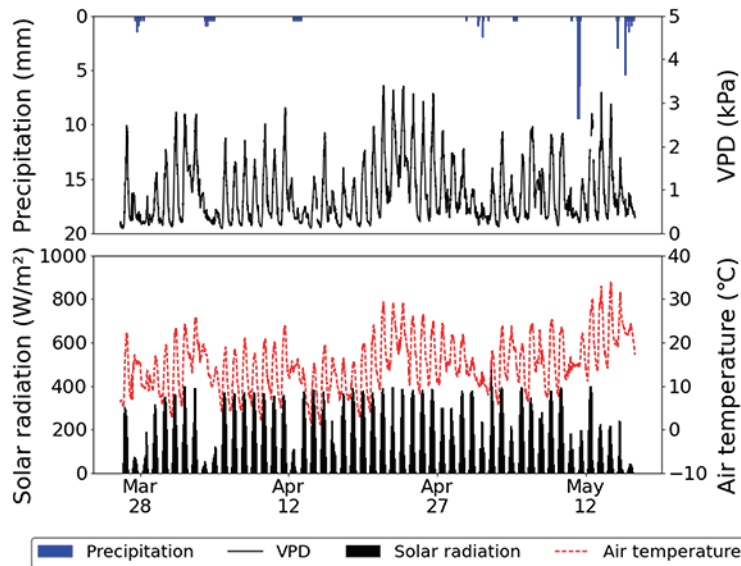


Fig. 2. Daily meteorological conditions from 26 Mar. to 18 May in Wanju-gun in 2021.

III. 결과 및 토의

3.1. 기상 조건

Fig. 2은 국립식량과학원 완주 포장(위도: N35°19' 59.5", 경도: E127°2'40.6")에서 2021년 춘절기 동안의 기상을 시계열로 나타낸 것이다. 기상자료개방포털 (<https://data.kma.go.kr/cmmn/main.do>)의 전주(146지점) 기상 자료를 분석해보면, 연구기간은 20년 동안의 평년보다 기온이 약 0.8°C 정도 높았으며, 강우발생빈도는 80회 이상으로 누적 강우량이 평년대비 30 mm

이상 증가하였다. 이에 따라, 2021년 춘절기의 일별 누적일사량 평균값은 약 46 MJ/m²/day 감소하였다.

3.2. 강우 발생 시 토양수분 변화

토양수분은 기본적으로 강우에 의해 크게 영향을 받는다. Fig. 3은 춘절기 동안 강우 발생이 있었을 때의 토양수분 변화를 나타낸 것이다. 거의 동일한 토양 물리성을 가졌음에도 불구하고 강우 발생에 대한 토양수분 증가폭은 태양광 하부에서 낮았다. 강우 발생 전 태양광 하부의 토양수분이 높은 영향과 더불어 낙하하는 강우 입자가 영농형 태양광 패널에 의해 차단되므로 즉각적인 토양수분 증가로 이어지지 못했던 것으로 사료된다. 본 연구 대상인 영농형 태양광은 패널 아래에 물받이 시설이 없었으므로 패널에 묻었던 강우가 하부 지면으로 낙하했을 수도 있고, 영농형 태양광 구조물을 타고 흘러서 토양에 도달한 경우도 일부 있을 수 있겠다. 더불어 구조물 표면에서 증발되어 손실되는 강우량도 있겠지만 코팅된 금속 재질의 구조물 표면에서 물이 증발할 만큼 오랫동안 묻어 있지 않았을 것으로 추측된다.

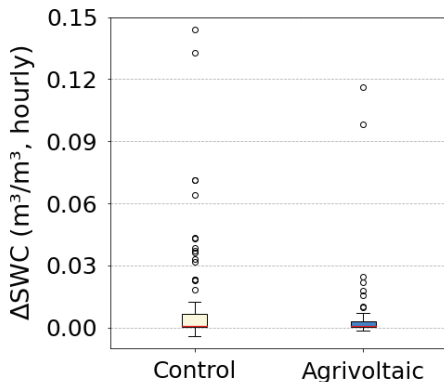


Fig. 3. The amount of change in soil moisture during rain. From 26 Mar. to 18 May in Wanju-gun in 2021.

3.3. 지온과 토양수분 변화

각 토양층의 수분 손실은 증발과 침투에 의해 이루어지며, 논 토양 같이 점토 비율이 많은 경우는 수분 침투가 매우 느리기 때문에 지표에 가까운 토양층의

수분 손실은 대부분 증발에 기인했을 것이다. 증발이 발생하기 위해서는 잠열 에너지가 필요하며, 태양광 하부는 토양수분과 지온 외의 미기상 요소는 거의 동일하므로 에너지 정도는 주요 요인인 지온을 통해 가늠할 수 있겠다.

Fig. 4은 춘절기 동안의 토양수분과 지온을 한시간 간격 시계열로 나타낸 것이다. 영농형 태양광 하부의 토양수분은 전 시기에 걸쳐 노지에 비해 상대적으로 높았다. 반대로, 지온은 영농형 태양광 하부에서 낮았는데, 주간에는 노지 지온이 상대적으로 크게 높았으며 야간에는 그 차이가 약 1~2°C로 줄어들었으나 여전히 하부가 낮았다. 다시 말해, 영농형 태양광 하부 지온이 낮고 일 변화폭은 작았다.

이는 태양광 패널에 의한 부분차광으로 인해 지면에 도달하는 태양광 에너지 총량이 감소하였기 때문에 지온은 낮아진 것으로 보이며, 따라서 두 곳은 수분 침투능과 보유능이 유사한 토양이라 할지라도 증발이 태양광 하부에서 위축되어 상대적으로 토양수분 손실이 적었던 것으로 보인다.

태양광 하부에서 낮아진 지온에 의해 토양수분은 증가하게 되며, 이는 지표면 비열의 증가를 야기하여 복사방출량의 차이에 의해 다시 지온에 영향을 줄 수 있겠다. 하지만, 복사방출량에 의한 열 에너지 손실보다 주간에 지면에 흡수되는 일사 에너지량이 더 크기 때문에 그 영향은 미미할 것으로 사료된다.

3.4. 지온과 토양수분 상관관계

Fig. 5는 노지와 영농형 태양광 하부에서 춘절기 동안 토양온도 변화량(ΔT_{soil})에 따른 토양수분 변화량(Δ

SWC)을 나타낸 것이다. 토양을 건조와 습윤 상태로 구분하기 위해 수분함량에 따른 육안 토양색 변화를 참고하여 토양수분 0.3 m³/m³로 기준을 두었다.

ΔT_{soil} 와 ΔSWC 의 상관관계는 노지와 하부에서 달랐으며, 토양의 건조와 습윤 조건에 따라 노지는 상이한 모습을 보였지만 하부에서는 서로 유사한 모습을 보였다. 습윤 상태의 노지는 비교적 산발적으로 ΔT_{soil} 와 ΔSWC 관계가 형성되어 있는데 이는 증발 손실량의 폭이 컸다는 증거이며, 토양이 보유하고 있는 열 에너지 정도를 나타내는 지온 변화량보다는 기온, 바람 등의 다양한 증발 관련 요소에 의해 지배받기 때문으로 사료된다. 반면 ΔT_{soil} 에 대한 ΔSWC 최댓값은 음의 상관관계를 보이고 있으며, 토양 건조 조건에서는 상관관계가 나타나지 않았다(Open circle in Fig. 5a). 예를 들어 지온이 증가하면 그 절대값에 관계없이 필연적으로 증발도 커질 수밖에 없어 최대 토양수분 변화량의 변화가 낮아지는 모습으로 귀결되었을 것이다. 하지만 이러한 모습은 증발 자원인 토양수분이 제한된 건조 조건에서는 분명하게 나타나지 않았다(Open circle in Fig. 5a).

하부의 ΔT_{soil} 에 대한 ΔSWC 값의 분포는 노지만큼 산발적이지 않았으며, 건조와 습윤 토양 조건 모두 유사한 모습으로 역상관관계를 보였다. 실제로 하부는 비록 토양수분은 비교적 높게 유지되지만, 지온 절대값 자체가 낮은 제한 에너지 조건이므로 토양수분의 증발 손실 현상에는 다른 요소보다 지온 영향이 더 크게 작용했을 것이다. 따라서, ΔT_{soil} 에 대한 ΔSWC 의 변화폭이 상대적으로 작았을 것으로 사료된다.

습윤 조건일 경우 노지에서 ΔT_{soil} 에 대한 ΔSWC 최댓값($\Delta \text{SWC}_{\text{max}}$) 사이에서 보이는 음의 상관관계

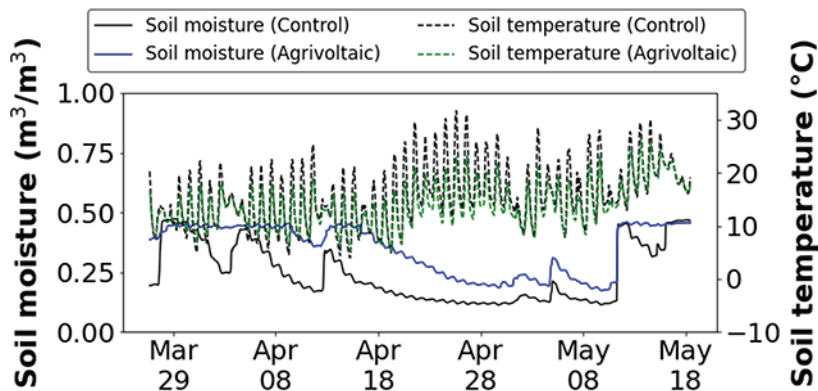


Fig. 4. Daily soil moisture and temperature from 26 Mar. to 18 May in 2021 at control and agrivoltaic systems.

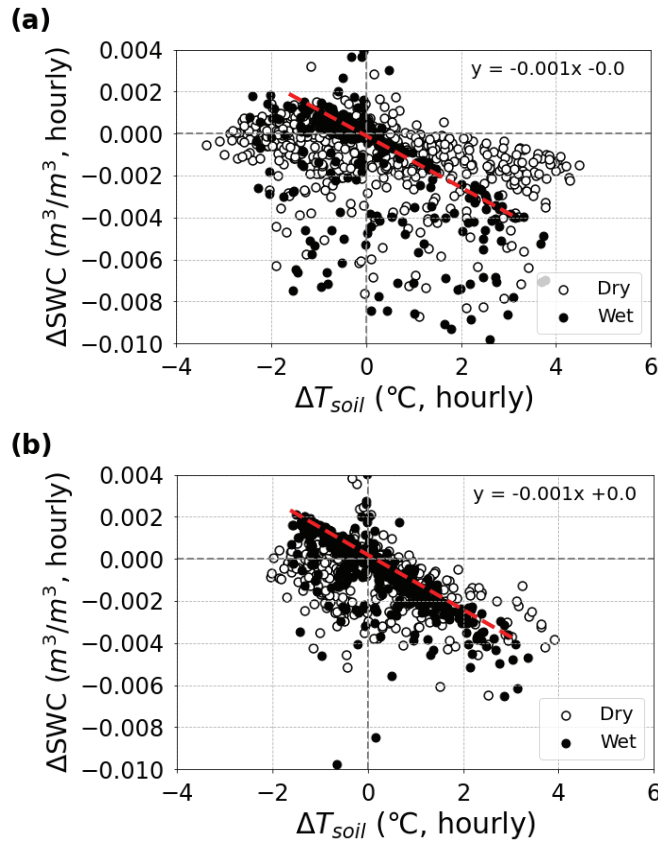


Fig. 5. The relation between ΔT_{soil} and ΔSWC for Control (a) and Agrivoltaic systems (b). The amount of change of soil temperature and soil moisture from 26 Mar. to 18 May in Wanju-gun in 2021. The red line indicates slope of max value of ΔSWC in soil moisture over $0.3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ (wet condition).

(Red line in Fig. 5a; $\Delta T_{soil} = -0.001 \Delta SWC_{max}$)가 하부에서도 유사한 모습(Red line in Fig. 5b; $\Delta T_{soil} = -0.001 \Delta SWC_{max}$)으로 나타났다. 특히, 상관관계의 기울기는 거의 같았다. 이는 노지와 하부의 토양 성질이 같기 때문에 필연적인 모습으로 보인다. 다만 노지는 에너지가 충분하지만 수분 제한 조건이며, 하부는 수분이 충분하지만 에너지 제한 조건이기 때문에 서로 다른 산점도 패턴을 보인 것으로 사료된다.

Fig. 5는 강우 발생 시기를 제외한 것이지만 ΔSWC 가 양의 값을 보이는 경우가 있는데, 이는 일출 직후 금속 재질의 태양광 구조물에 수증기가 응결되어 이슬이 맺혔다가 마치 비가 오는 것 같이 떨어지는 모습을 목격한 경험과 양의 ΔSWC 값이 이른 아침에 나타나는 것으로 보아, 응결된 이슬이 원인으로 보인다.

IV. 고찰 및 결론

영농형 태양광은 두 종류의 에너지와 관련되어 있다. 일반 논과 밭에서는 생산할 수 없는 전기 에너지(Electric energy)를 발전할 수 있으며(Dupraz *et al.*, 2011), 태양복사로부터 지면이 흡수한 유효 에너지(Available energy)가 농업생태계 에너지 교환 및 물질순환, 그리고 광합성에 이용된다. 하지만, 그러한 유효 에너지의 분배 특성은 패널의 부분차광 효과로 인해 일반 경작지와 다르다(Cho *et al.*, 2020). 이러한 농업생태계 에너지 이용의 변화는 미기상과 작물 생리 및 생태에 영향을 미칠 것이다(Yoon *et al.*, 2019; Cho *et al.*, 2021).

본 연구는 봄철동안 휴경논에서 영농형 태양광 시설에 의한 차광으로 인해 지온이 낮아지고 토양수분이 증가함을 보여주었다. 특히, 휴경논은 피복 식물이 없기

때문에 차광으로 인한 토양수분 변화가 상대적으로 더 민감했을 것으로 보인다. 노지는 하부보다 상대적으로 지온이 높기 때문에 토양증발 손실은 수분 제한 환경(Water-limited condition)에 지배되며, 하부는 노지보다 토양수분이 많고 부분차광 조건이므로 에너지 제한 환경(Energy-limited condition)으로 설명된다.

지금까지 영농형 태양광 연구는 태양복사 에너지 제한으로 인한 광합성 생산량 저하에 집중되었다. 하지만, 토양수분은 관수 및 습해 뿐만 아니라 토양 물리성 및 양분 관리에 필수 영농 요소이며 토양호흡에 의한 온실가스 배출에도 영향을 미치므로 하부의 물 환경 변화에 주목할 필요가 있다. 영농형 태양광 패널 각도를 조정하여 입사 광에너지를 조절함으로써 하부의 토양 수분을 조절할 수도 있겠지만, 이는 작물 광합성 생산과 전기 발전에도 영향을 미치기 때문에 지속가능한 농업 환경과 농촌 경제를 위해 합리적인 영농형 태양광 운용 방안이 개발되어야 하겠다.

적 요

영농형 태양광 시스템은 노지 작물 경작과 동일한 토지 상부에 설치된 태양광 패널을 통한 발전을 동시에 하는 시스템이다. 지금까지 영농형 태양광은 에너지와 식량의 양자구도로만 집중되어있다. 영농환경 중 하나인 토양수분은 강우 또는 관개수로 증발 및 유출·침투로 손실된 수분을 공급받아 노지 작물 생산에 기여한다. 본 연구는 식량, 에너지와 함께 물의 개념을 포함하여 영농형 태양광 시설을 보고자 하였으며, 미기상 관측을 통해 봄 기간 동안 휴경논에서 영농형 태양광 시설 하부의 토양수분과 지온의 변화를 분석하였다. 영농형 태양광 하부는 패널로 인한 부분차광 조건으로 지면에 입사되는 광 에너지량이 감소하여 지온이 낮아질 뿐만 아니라 토양수분 손실이 적어 대조구인 노지에 비해 습윤한 조건을 보인다. 또한, 태양광 하부는 에너지 제한 환경이며, 상대적으로 지온이 높은 노지는 수분 제한 환경으로 설명된다. 노지와 태양광 하부의 상이한 토양수분 환경은 필연적으로 작물에 영향을 미칠 것이며, 농업 환경과 농촌 경제를 고려한 지속가능한 대처가 필요하겠다.

감사의 글

이 논문은 농촌진흥청의 영농형 태양광 유형별 버

적정 재배기술 개발 및 발작물 차광 영향 구명(PJ01678001) 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- Barron-Gafford, G. A., M. A. Pavao-Zauckerman, R. L. Minor, L. F. Sutter, L. Barnett-Moreno, D. T. Blackett, N. Thompson, K. Dimond, A. K. Gerlak, G. P. Nabhan, and J. E. Macknick, 2019: Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands. *Nature Sustainability* **2**, 848-855.
- Bhandari, S. N., S. Schlüter, W. Kuckshinrichs, H. Schlör, R. Adamou, and R. Bhandari, 2021: Economic feasibility of agrivoltaic systems in food-energy nexus context: Modelling and a case study in Niger. *Agronomy* **11**(10), 1906.
- Chamara, R. and C. Beneragama, 2020: Agrivoltaic systems and its potential to optimize agricultural land use for energy production in Sri Lanka: A review. *Solar Energy Research* **5**(2), 417-431.
- 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 Agriculture and Forest Meteorology* **22**(3), 144-151. (in Korean with English abstract)
- Cho, Y., H. Kim, E. Jo, D. Oh, H. Jeong, C. Yoon, K. An, and J. Cho, 2021: Effect of partial shading by agrivoltaic systems panel on electron transport rate and non-photochemical quenching of crop. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **23**(2), 100-107. (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 optimizing land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* **36**(10), 2725-2732.
- Goetzberger, A., and A. Zastrow, 1982: On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy* **1**, 55-69.
- Gowdy, J., and S. O'Hara, 1997: Weak sustainability and viable technologies. *Ecological Economics* **22**(3), 239-247.
- Gutés, M. C., 1996: The concept of weak sustainability. *Ecological Economics* **17**(3), 147-156.
- Hamidov, A. and K. Helming, 2020: Sustainability considerations in water-energy-food nexus research

- in irrigated agriculture. *Nature Sustainability* **12**(15), 6274.
- Kang, M., S. Sohn, J. Park, J. Kim, S. W. Choi, and S. Cho, 2021: Agro-environmental observation in a rice paddy under an agrivoltaic system: Comparison with the environment outside the system. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **23**(3), 141-148. (in Korean with English abstract)
- Liu, C., Z. Zhang, S. Liu, Q. Liu, B. Feng, and J. Tanzer, 2019: Evaluating agriculture sustainability based on the Water-Energy-Food Nexus in the Chenmengquan irrigation district of China. *Nature Sustainability* **11**(19), 5350.
- Monteith, J. L., 1997: Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences* **281**(980), 277-294.
- Pearce, D. W., and G. D. Atkinson, 1993: Capital theory and the measurement of sustainable development: An indicator of "weak" sustainability. *Ecological Economics* **8**(2), 103-108.
- Philip, J. R., 1966: Plant water relations: Some physical aspects. *Annual Review of Plant Physiology* **17**, 245-268.
- Proctor, K., S. M. H. Tabatabaie, and G. S. Murthy, 2021a: Gateway to the perspectives of the Food-Energy-Water nexus. *Science of the Total Environment* **764**, 142852.
- Proctor, K. W., G. S. Murthy, and C. W. Higgins, 2021b: Agrivoltaics align with Green New Deal goals while supporting investment in the US' rural economy. *Nature Sustainability* **13**(1), 137.
- Toledo, C. and A. Scognamiglio, 2021: Agrivoltaic systems design and assessment: A critical review, and a descriptive model towards a sustainable landscape vision (Three-dimensional agrivoltaic patterns). *Nature Sustainability* **13**, 6871.
- 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 with English abstract)
- Zainol Abidin, M. A., M. N. Mahyuddin, and M. A. A. Mohd Zainuri, 2021: Solar photovoltaic architecture and agronomic management in agrivoltaic system: A review. *Nature Sustainability* **13**(14), 7846.