

시설 토양 오이재배에서 관수개시점 처리가 광합성 형광반응, 줄기수액흐름 및 엽온에 미치는 영향

안진희¹ · 전상호² · 최은영³ · 강호민⁴ · 나종국⁵ · 최기영^{5*}

¹강원대학교 농산업학과 대학원생, ²국립농업과학원 토양 비료과 연구사, ³한국방송통신대학교 농학과 교수,
⁴강원대학교 원예학과 교수, ⁵강원대학교 미래농업융합학부 교수

Effect of Irrigation Starting Point of Soil on Chlorophyll Fluorescence, Stem Sap Flux Relative Rate and Leaf Temperature of Cucumber in Greenhouse

Jin Hee An¹, Sang Ho Jeon², Eun Yong Choi³, Ho Min Kang⁴, Jong Kuk Na⁵, and Ki Young Choi^{5*}

¹Graduate Student, Department of Agriculture and Industries, Kangwon National University Graduate School, Chuncheon 24341, Korea

²Researcher, Soil and Fertilizer Management Division, National Institute of Agricultural Science, RDA, Wanju 55365, Korea

³Professor, Department of Agricultural Science, Korea National Open University, Seoul 03087, Korea

⁴Professor, Department of Horticulture, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

⁵Professor, Division of Future Agriculture Convergence, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

Abstract. This experiment was conducted to investigate the effect on chlorophyll fluorescence, stem sap flux relative rate (SFRR) and leaf temperature of cucumber when irrigation is controlled using a soil moisture tensiometer. Cucumber (*Cucumis sativus* L.) ‘Chungchun’ was irrigated of 10-10-20 kPa and 20-10-10 kPa by soil starting point of irrigation at each growth stage. At the 66 days after treatment (DAT) of 736 to 854 W·m⁻² and above 32°C, chlorophyll fluorescence variables (Fo, Fm, Fv/Fm) values showed significantly different between treatments. The Fo and Fv/Fm value in the daytime (10:30 am to 6:00 pm) at 66 DAT was higher in 20-10-10 kPa treatment than in 10-10-20 kPa treatment. The Fv/Fm value decreased when the leaf temperature was increased. There was no difference in leaf growth (length, width and area) at 28 and 66 DAT, but the chlorophyll content (SPAD value) was significantly higher in 20-10-10kPa treatment. SFRR and leaf temperature increased with light intensity and temperature increased. In both treatments, the SFRR started to increase sharply between 8 am and 9 am when the solar radiation is 170 W·m⁻² or higher. The soil temperature of the treatments decreased after irrigation, that showed 31.0°C at 10-10-20kPa and 28.5°C at 20-10-10kPa on July 5 (820W·m⁻² at 1 pm). However, there was no difference in SFRR, leaf temperature, temperature difference (leaf temperature - air temperature) and VPD between treatments. SFRR was significantly positive correlate with the leaf temperature ($p < 0.01$, $r = 0.770$). The SFRR and leaf temperature showed positive significant correlation with solar radiation, temperature, soil temperature, soil moisture content and VPD. There was a negative significant correlation with relative humidity and temperature difference.

Additional key words : Fv/Fm, soil temperature, SPAD value, temperature difference, VPD

서 론

오이는 1년생 초본으로 적정 생육 온도가 22~28°C이나 비교적 시원한 온도를 좋아하며, 고온에서는 암꽃 착생이 어렵고, 광, 온도, 수분, 비료 등 환경 조건에 민감하여 재배가 까다

로운 작물이다(RDA, 2018). 그러나 과채류 중에서 정식 후 30일 이내에 수확할 수 있는 작물 특성으로 시설 오이 소득률은 44.5%(억제) ~ 49.4%(반축성)으로 평균(42.1%)보다 높은 고소득 작물이며(RDA, 2020), 과채류 시설재배면적 5위(4,164ha, 2018년)를 차지하고 있다(MAFRA, 2020).

채소의 잎과 과실은 90% 이상이 수분이며 특히, 오이의 함수율은 96%로 채소류 중에서도 높다(Moon and Yu, 2013). 관수의존도가 높은 시설 재배에서 이들 수분 요구도가 높은

*Corresponding author: choiky@kangwon.ac.kr

Received January 11, 2021; Revised January 18, 2021;

Accepted January 19, 2021

작물의 적시에 적절한 수분공급은 매우 중요하다. 이를 위해서는 작물 뿌리 근처 수분함량을 정확하게 측정하는 센서와 작물의 생육 단계별 관수 시점과 관수시간 조건을 자동제어하는 기술이 필요하다. 시설재배 작물의 관수방식은 타이머에 의한 간접제어, 토양의 함수량 및 식물의 생체정보를 적용하는 방식이 있다. 시설의 토양재배에서는 토양 이화학적 특성을 반영한 관비재배 EC농도에 의한 양 수분 공급 방식(Rhee 등, 2013), 다공킵식 토양수분장력계를 이용한 관수방식(Jeon 등, 2010), 전기저항식 워터마크센서기반 자동제어 관수(Kim 등, 2011; Thompson 등, 2006) 등이 있다. 토양 내 수분 변화에 의한 전기저항 변화가 퍼텐셜과 높은 상관성이 있음에 착안된 워터마크센서는 다공킵식 수분장력계에 비해 가격이 저렴하고, 설치가 간단하나, 워터마크센서의 토양과 전극간의 접촉 형태가 다공킵식 수분장력계에 비해 수분 값에 연속적으로 반응하지 못하여 관수가 안정적으로 이루어지지 않았으며, 수분 증발량에 의한 수분함량 변화가 토성별, 측정 위치별 영향을 줌으로써 연구의 보장이 필요하였다(Kim 등, 2011). 또한 다공킵식 수분장력계에 관수와 양액을 동시에 공급하는 관비 재배 관수는 작물의 양 수분 과 부족에 의한 장애를 경감시켜 줄 수 있는 방법이지만, 비료의 조성 정도, 공급량 설정, EC 농도 설정 등이 토양 내 비료 과잉 공급을 유발시킬 수 있으며, 토양과의 밀착성을 견고히 하면서 세라믹 컵 내에 물을 계속적으로 채워야 하는 관리상의 번거로움 등이 수분장력계 관비 재배 관수 제어에서 문제점으로 남아있다. 이에 비해 수경재배는 배지의 근권조절이 가능한 특성을 고려하여 FDR 센서를 이용한 배지 함수량 관수제어방식(Choi 등, 2013), 일사량에 의한 광 기준 관수 제어 방식(Yoon 등, 2020) 외에도 작물의 증산량 예측(Woo 등, 2000)을 통한 정밀 관수 제어를 시도하고 있다. 이는 토양에 비해 수경재배용 배지는 수분원충능이 낮아 수분환경이 급변하므로 근권의 수분함량 변화, 일사량 등과 작물 증산량 생육 정보를 반영한 관수로 물과 양분의 효율성을 높일 수 있다.

작물 생체정보를 반영한 관수제어에서는 식물 증산과 관련된 생리반응 중 잎의 기공전도도와 관련된 도구들이 전략에 이용되고 있다(Jones, 2004; Oletic and Bilas, 2020). 엽온은 지상부 온도 간의 기온차를 분석하여 수분 스트레스 정도를 파악할 수 있으며(Idso, 1982; Yun 등, 2020), 줄기의 증산류 측정을 통해 관수에 적용하려는 센서의 개발과 작물 적용 연구도 활발히 진행되고 있다(Oletic and Bilas, 2020; Yoon 등, 2020). 광합성형광반응 측정 역시, 부적합 환경에서 광합성 광량자의 양적 변화를 감지하는 변수와 이를 적용한 광합성 감소 정도를 비파괴적으로 분석함으로써 환경 스트레스에 관한 정보를 제공해 줄 수 있어 작물의 생체정보를 얻는데 유의

한 도구로 활용이 가능하다(Anjum 등, 2011; Oh 등, 2014).

따라서 본 연구에서는 시설토양 오이재배에서 토양수분장력계를 이용하여 관수제어 하였을 때 오이의 광합성 형광반응, 수액흐름, 엽온 등에 미치는 영향을 구명하여 시설토양 관수제어에 측정 변수들의 활용 가능성을 알아보고자 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

1. 실험작물 재배 및 관수처리

오이(*Cucumis sativus* L.)는 다다기 계통 ‘청춘’(해오름 종묘, 한국) 접목묘(대목 ‘하나짱토좌’)를 사용하였다. 장소는 강원도 춘천시 남산면 소재 생산용 PE 연동 온실(W6 × L115 × H3.5m, 위도 37°, 경도 127°)에서 수행하였고, 2020년 4월 20일에 오이를 정식(평균 초장 3.9cm, 엽수 4.6개)하여 7월 5일까지 토양재배 하였다. 시험 전 재배지 토성은 사양토, pH 5.1 ~ 5.5, EC 1.4 ~ 2.0dS·m⁻¹로 pH는 적정 수준보다 낮았으며, EC 수준은 적정 범위에 있었다(An 등, 2021). 온실 1동에는 4개 이랑이 조성되었고, 각 이랑(W0.5m × L50m)에 점적 호스를 2줄씩, 20cm 간격(1.4 L·h⁻¹)의 점적 테이프(Eolos compact, Eurodrip, France)를 설치하였다. 오이 재식 밀도는 2.0주/m²로 50cm 주간 간격으로 정식하여 원줄기 재배하면서 재배 관리 및 시비는 관행 방식으로 이루어졌다.

정식 9일 째 토양수분 장력값 기준으로 관수개시점을 생육기(4월 28일 ~ 5월 25일, 28일) - 수확성기(5월 26일 ~ 6월 25일, 31일) - 수확후기(6월 26일 ~ 7월 5일, 10일) 3단계로 나눠 10-10-20kPa과 20-10-10kPa의 관수 2처리하였으며, 가운데 이랑 2곳에 각각 배치하였다. 관수개시는 텐시오미터(2725ARL Jet fill, Soil moisture, USA)를 이랑 안쪽 25cm 지점 중앙부, 지면으로부터 20cm 깊이에 각각 매설하고 역압 센서(Autonics PSAN-LV01CPV, Korea)와 결합하여 얻어진 수분장력 값을 사용하였고(Fig. 1-C), 설정된 관수 시점에 도달하면 자동으로 미리 정해진 시간만큼 공급되는 방식으로 마이크로컨트롤러(아두이노 UNO)와 릴레이를 이용하여 자체 제작한 프로그램 적용하여 관수개시 하였다. 관수 시간은 듀얼 타이머(Dual timer TF62D, Hanyoung NUX, Korea) 제어 판넬을 제작하여 일출 2시간 후부터 일몰까지 하루 중 관수 시간, 1회 관수 시간(4 ~ 15분) 및 대기 시간(1 ~ 4시간)을 작물 생육을 고려하여 조정하였다. 처리기간 중 식물체당 총 관수량은 10-10-20kPa 처리는 54.3L, 20-10-10kPa 처리는 53.8L로 처리 간 차이가 없었다(자료 미제시).

2. 환경 및 생체정보 측정

2.1 환경 측정

광, 온도, 상대습도, 수증기압포차, 지온, 토양수분함량(%)를 측정하기 위해 처리구 이랑 안쪽으로 20m 지점에 계측용 센서를 1개씩 각각 설치하였다(Fig. 1). 지상부 환경은 바닥으로부터 150cm 높이 위치에 일사량센서(LightScout Pyranometer 36701, Spectrum Technologies, Inc. USA)와 온-습도 센서(WatchDog 1000series Micro stations, Spectrum Technologies, Inc. USA., 측정범위 -40~85°C)가 내장된 데이터 로거(WatchDog 1450, Spectrum Technologies, Inc. USA)를 설치하여 1분 간격으로 측정 값을 저장한 후 분석에 이용하였다(Fig. 1-A). 수증기압 포차(VPD)는 온도와 상대습도를 이용하여 산출하였다. 토양 환경은 지면으로부터 20cm 깊이에 토양온도와 토양수분 함량이 동시에 측정되는 FDR 센서(WT1000B, Mirae-Sensor, Korea)를 매설한 후 10분 간격으로 측정하고 데이터 로거(WP700, Mirae-Sensor, Korea)에 저장하였다(Fig. 1-B, D).

2.2 광합성 형광반응

광합성 형광반응은 관수 처리 28일, 66일째에 광합성 형광 반응측정기(Junior-pam chlorophyll fluorometer, Heinz Walz GmbH, Germany)를 사용하여 오전 8시부터 오후 6시까지 1

시간 30분 간격으로 5회 측정하였다. 측정 잎의 위치가 처리 28일째는 지제부로부터 3 마디 위치의 잎(생장점부터 12~14 마디 잎)이며, 처리 66일째는 지제부로부터 21~22 마디 위치의 잎(적심부로부터 10마디 잎) 이용하였다. 20분간 암 적응 시킨 후 445nm 파장의 포화 광도(2800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 청색 LED를 조사하여 측정하였다. 형광측정기로부터 최소 형광값(F_0), 최대 형광값(F_m), 변이 형광값($F_v = F_m - F_0$) 및 최대양자수율(F_v/F_m)을 얻었으며, 측정된 잎의 엽면적(Leaf area)을 F_v 로 나눈 Leaf area/ F_v 값을 산출하여 광합성 형광 변수로 이용하였다.

2.3 엽온과 수액흐름

엽온과 줄기수액흐름 측정은 처리 후 66~68일(6월 30일~7월 4일) 5일간 측정하였다. 엽온 측정 위치는 적심부위부터 10마디 아래 잎 뒷면에 엽온측정기(LT-1M leaf temperature sensor, Bio instruments S.R.L., Republic of Moldova)를 끼우고 1분 간격으로 측정하여 로거에 저장한 후 분석하였다(Fig. 1-A). 엽온 센서부의 태양 복사를 방지하기 위해 측정 엽상부에 알루미늄호일로 덮어 덮개로 사용하였다. 기온차는 엽온에서 지상부 온도를 뺀 값으로 사용하였다.

줄기수액흐름측정은 적심부위 바로 아래 줄기(직경 5mm

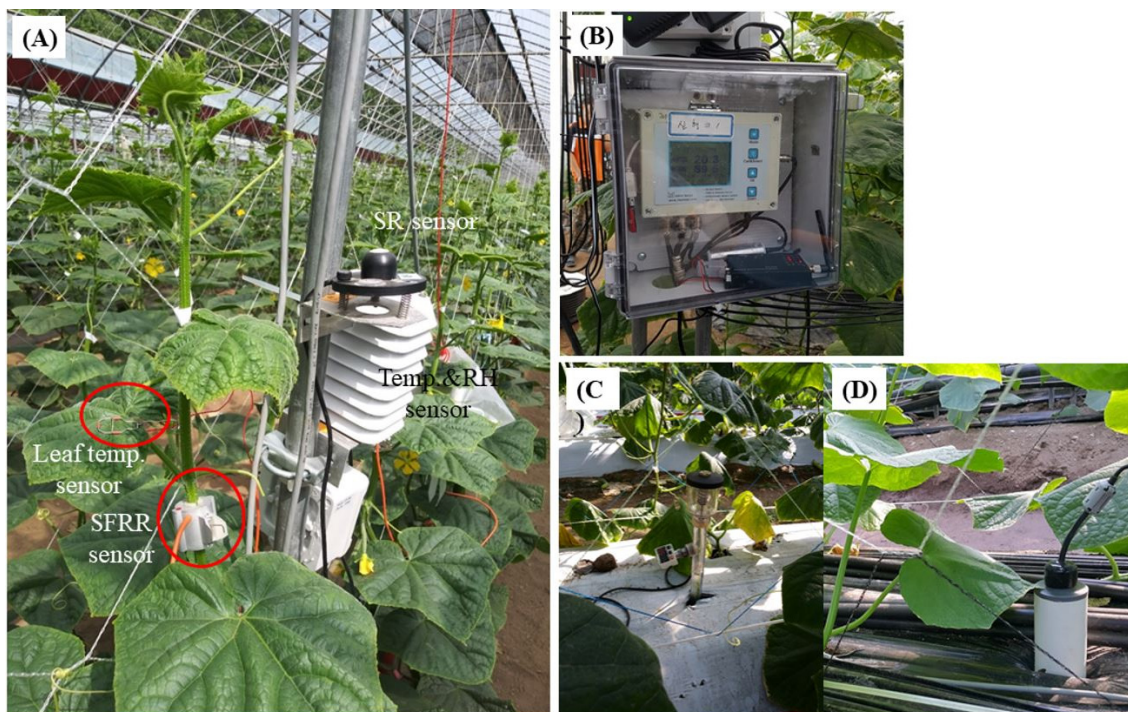


Fig. 1. Sensor Measurement in a commercial cucumber farm PE greenhouse (690m²). Leaf temperature, stem sap flux relative rate (SFRR) and solar radiation (SR), temperature (Temp) and relative humidity (RH) of air (A), data logger for temperature and water content of soil (B), tensiometer for soil water tension (C) and FDR sensor for soil water content (D)

내외)를수액흐름 측정기(SF-5M Sap flow sensor, Bio instruments S.R.L., Republic of Moldova)로 감싸 고정시킨 후 열 흐름의 온도차를 전류 값으로 전환시켜 얻은 값을 줄기수액흐름상대율(Stem sap flux relative rate: SFRR)로 사용하였고, 1분 간격으로 측정 후 저장하였다(Fig. 1-A). 식물체로 내리찍는 직사광선 외부 열원을 방지하기 위해 은박지로 측정기 주변을 감싸 덮개로 사용하였다. 줄기수액흐름비(Stem sap flux relative ratio: SFR)는 오전 0시 측정된 SFRR값 기준 측정시 SFRR값으로 나눠 계산하였다.

2.4 엽 생육

광합성 형광반응에 사용한 처리 후 28일, 66일째 잎의 길이, 폭, 엽면적(LI-3100C; LI-COR, Lincoln, NE, USA) 및 엽록소함량을 측정하였다. 엽록소함량은 휴대용 엽록소측정기 (SPAD-502, Minolta, Co. Ltd. Japan)에서 측정된 SPAD값을 이용하였다.

3. 통계처리

유의성 검정은 4반복 값으로 SAS package(version 9.4, SAS Institute Inc. NC, USA)의 t검정하였다. SFRR, 엽온 등 생체 정보와 환경간의 분석은 관수 처리 후 28일(5월 20일), 38~42일(6월 4일~6월 8일), 63~69일(6월 29일~7월 5일) 째 총 13일간의 계측 자료를 시간 평균화한 후 변수 간의 관계는 최소자승법을 이용하여 결정 계수를 얻었고, 상관성은 던컨다중검정으로 분석하였다.

결과 및 고찰

Fig. 2는 관수 처리 28일째와 66일째 광합성 형광반응 변수들의 측정결과이다. 28DAT에서 Fo 값은 처리별 차이가 없었으나, 20-10-10kPa 처리에서 Fm 값은 오전 10시 30분, Fv/Fm 값은 오전 10시 30분과 오후 6시 측정에서 유의하게 높았으며, Leaf area/Fv 값은 오전 10시 30분, 오후 1시, 오후 6시 측

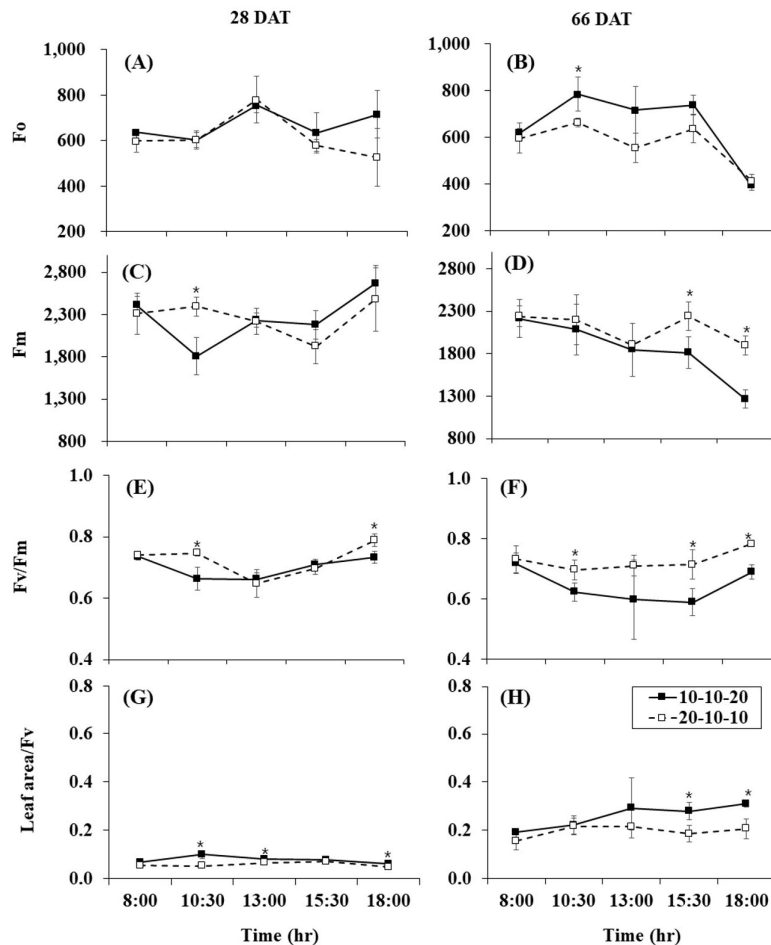


Fig. 2. Effect of soil irrigation starting point using tensiometer on parameters deduced from chlorophyll fluorescence of cucumber at 28 and 66 days after treatment (DAT). Asterisks indicate significant differences (t-test, $p < 0.05$, $n = 3$).

정에서 유의하게 낮았다. 66DAT에서 10-10-20kPa 처리의 Fo 값은 오전 10시 30분에 유의하게 높았으며, Fm 값은 오후 3시 30분, 오후 6시에, Fv/Fm 값은 오전 10시 30분, 오후 3시 30분, 오후 6시에 유의하게 낮았고, Leaf area/Fv 값은 오후 3시 30분, 오후 6시에 유의하게 높아 측정일, 측정 시간에 따른 형광 변수 값은 처리에 따라 달랐다.

일반적으로 고온 또는 저온, 수분 부족 또는 과습, 고농도 염 상태와 같은 스트레스 상태에서 Fo 값은 증가하고, Fm 값은 감소하는 것으로 토마토(Kang 등, 2009), 배추(Oh 등, 2014), 파프리카(Bhandari 등, 2018) 등에서 보고되었다. 또한 광계 II에서 잠재적인 양자효율 Fv/Fm 값은 암 적응된 잎의 최대 양자수율 값으로 식물 잎이 광합성을 수행할 수 있는 잠재력으로 표현하며, 적정 잎의 경우 0.83 값을 나타낸다고 Maxwell and Johnson(2000)은 보고하였다. Bhandari 등(2018)은 파프리카의 유묘를 10°C, 25°C 및 35°C 온도에서 32일간 재배했을 때 10°C 처리에서만 Fv/Fm 값이 0.81에서 0.52까지 32% 감소하였음을 Kim 등(2018)은 오이 접목묘 활착 기간 중 광도에 따른 Fv/Fm 값은 0.84 ~ 0.85로 차이가 없었으며, Seo 등(2015)은 오미자 토양 수분 10kPa 처리(과습 조건)에서 유의하게 감소했음을 보고한 바와 같이 Fv/Fm 값은 작물 재배에서의 스트레스 지표로 활용하고 있다. 본 실험에서도 66DAT(측정일 7월 2일)는 고온기로 13시 736 ~ 854W·m⁻²의 고광과 32°C 이상의 고온(Fig. 4-A, B, C, D)에 노출되었고 처리구의 오전 8시 측정된 Fv/Fm 값은 0.72 ~ 0.74 범위 내에 있었으나, 10-10-20kPa 처리에서는 낮 시간 Fv/Fm 값이 0.61 ~ 0.63으로 감소하였고 오후 6시 0.69 값을 나타내며 회복되는 양상을 보였다. 그러나 20-10-10kPa 처리에서는 Fv/Fm 값이 0.69 ~ 0.71 값을 나타내 측정 시간에 따른 Fv/Fm 값의 상대적 감소폭이 달랐다. 이는 고광, 고온뿐 아니라 관수개시점이 다름에 따라 낮 시간 대 토양 함수량(SWC)과 토양 온도(T_{soil})가 10-10-20kPa 처리에서는 26.8%(22.8 ~ 35.2%), 26.2°C(23.1 ~ 29.0°C)를, 20-10-10kPa에서는 31.8%(25.6 ~ 38.4%), 25.2°C(23.5 ~ 27.2°C)로 달라 10-10-20kPa 처리의 Fv/Fm 값에는 지상부 환경뿐 아니라 토양 함수율, 토양 온도도 관여 했으리라 본다(Fig. 4-G, H) 이들 자료를 이용하여 엽온과 Fv/Fm과의 관계를 도식화한 결과 엽온 증가에 따라 Fv/Fm 값이 감소함을 확인할 수 있었다(Fig. 3). Leaf area/Fv 변수는 엽록소 형광과정에서 키는 전자수용체 감소 정도를 반영하는 것으로 normalized complementary area 로 표현한다. 식물이 스트레스에 처했을 때는 불활성상태의 반응중심이 많아지고, 포획된 에너지의 대부분이 전자전달로 전해지지 않고 있음을 간접적으로 알 수 있는 것으로 고온 스트레스에서 Leaf area/Fv 값이 증가했다고 보고한 사과(Chen and Cheng,

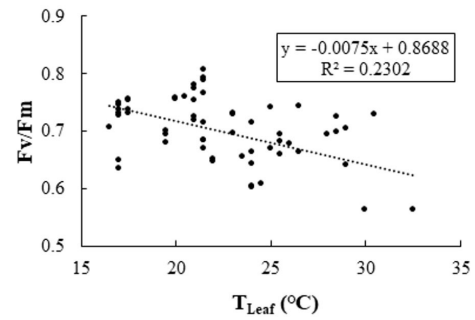


Fig. 3. Relationship between leaf temperature (T_{Leaf}) and maximum quantum yield (Fv/Fm) of cucumber grown in 10-10-20 and 20-10-10 kPa at 28 and 66days after treatment.

2009), 배추(Oh 등, 2014)의 결과와 같이 본 실험에서도 66DAT 10-10-20kPa 처리의 오후 3시 30분과 오후 6시 측정 값의 뚜렷한 증가를 확인할 수 있었다. 이상의 암 적응된 광합성 광계 II의 엽록소 형광반응 변수로 측정된 28DAT과 66DAT의 결과로 볼 때 736 ~ 854W·m⁻²의 고광과 32°C 이상의 고온, 낮은 함수율과 높은 토양 온도 조건(66DAT)에서는 처리 간 Fo와 leaf area/Fv의 증가, Fm과 Fv/Fm의 감소 차이가 크게 작용했으리라 본다. 그러나 28DAT에서 10-10-20kPa 처리는 관수개시점 10kPa에 도달하지 않아 관수가 이루어지지 않은 반면 20-10-10kPa 처리는 관수개시점 20kPa에 도달하여 오전에 관수가 되었으며, 이에 따른 토양 온도와 함수량, 367 ~ 371W·m⁻², 28°C의 지상부 환경(자료 미제시) 등의 영향이 광합성 형광변수 측정값에서 66DAT 보다 28DAT에 낮게 영향을 준 것으로 본다.

Table 1은 관수 처리 28일과 66일째 엽 생육 특성으로 엽장, 엽폭, 엽면적 등은 차이가 없었으나 엽록소 함량(SPAD) 값은 유의한 차이를 보였다. 본 실험에서 처리 기간 동안의 총 관수량은 차이가 없었으나, 생육기에 관수 된 일평균 관수량이 10-10-20kPa 처리는 276mL, 20-10-10kPa 처리는 162mL로 달라 작물의 초장이 136cm, 100cm로 차이를 보였음에도(An 등, 2021) 생장점 또는 적심부 아래 10 ~ 14마디 잎 생육은 차이를 주지 않았다. 그러나 엽록소 함량은 28DAT에 20kPa로 관수 되거나 66DAT에 10kPa로 관수 된 20-10-10kPa 처리에서 유의하게 높았다. Kim 등(2017)은 식물체당 1일 관수량이 적었을 때 정식 후 배추의 최대 엽 생육은 감소했다고 보고하였으나 본 실험에서는 초장과 엽록소 함량 값은 처리 간 차이가 있으나 잎 생육은 차이가 없었다.

Fig. 4는 6월 30일부터 7월 4일까지 하루 중 온실 내 지상부 환경(광, 온도, 수증기압포차), 토양 환경(수분장력, 수분함량, 온도), 식물 줄기수액흐름상대율(SFRR), 엽온, 기온차(엽온-지상부온도) 변화를 시간 평균화한 결과이다. 광도 변화에 따

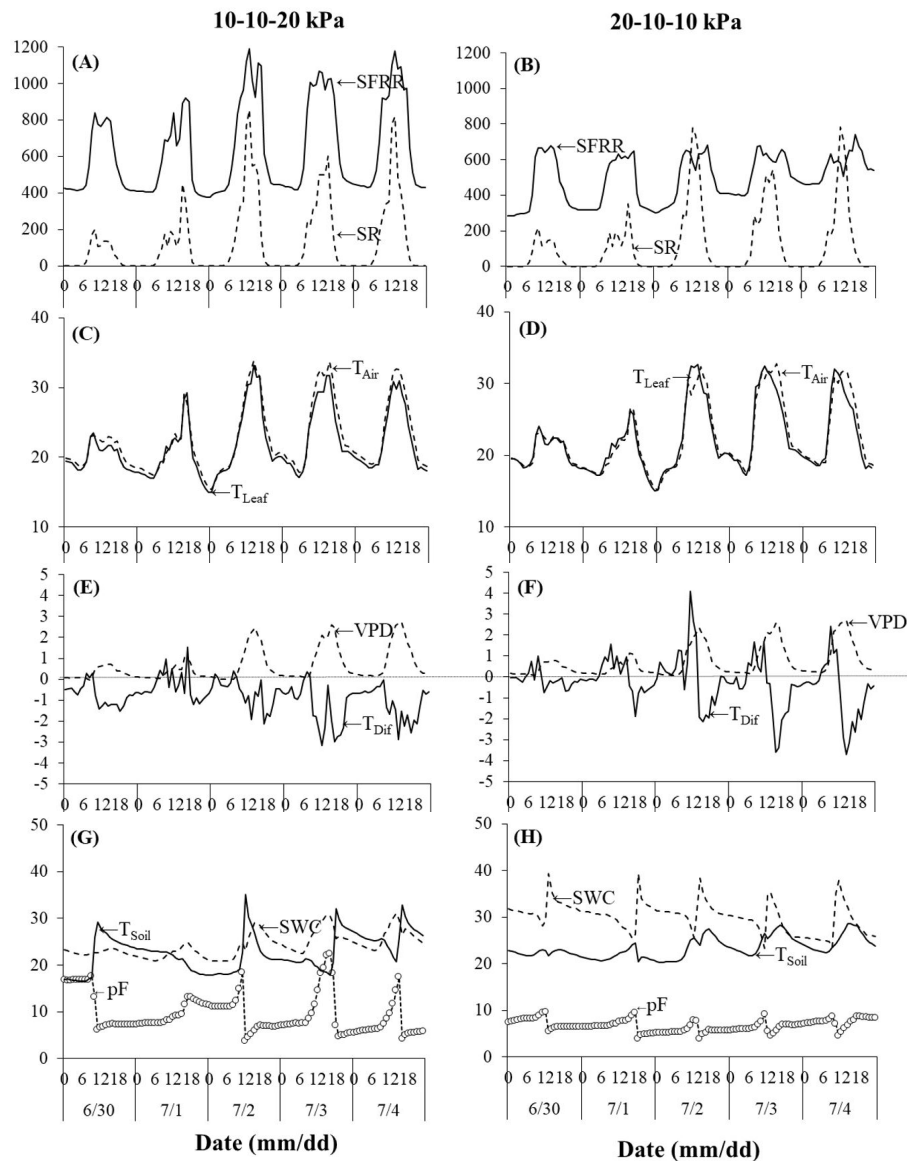


Fig. 4. Changes in the environments in the greenhouse, stem sap flux relative rate (SFRR, mV) and leaf temperature (T_{Leaf} , °C) in 10-10-20 and 20-10-10 kPa treatment for 5 days from 30 of June to 4 of July, 2020. SR (solar radiation, $W \cdot m^{-2}$), T_{Air} (air temperature, °C), T_{Dif} ($T_{Leaf} - T_{Air}$, °C), VPD (vapor pressure deficit, kPa), T_{Soil} (soil temperature, °C), SWC (soil water content, %), pF (soil water tension, kPa).

Table 1. Effect of soil irrigation starting point using tensiometer on leaf growth characteristics and chlorophyll content (SPAD value) of cucumber at the 39 and 66 days after treatment (DAT).

DAT	Treatment (kPa)	Leaf (cm)		Leaf area (cm^2)	SPAD value
		Length	Width		
28	10-10-20	11.8 ^z	16.6	116.5	39.6*
	20-10-10	10.6	16.0	94.3	46.0
66	10-10-20	13.5	20.8	274.1	40.2*
	20-10-10	14.3	20.5	293.3	63.3

^zEach value is the mean of 4 replications.

Asterisks indicate significant differences (t-test, $p < 0.05$).

라 SFR은 변화하였으며, 광도 $170 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 이상인 오전 8시~9시간대에 급격한 증가가 시작되었다(Fig. 4-A, B). 지상부 온도와 엽온은 유사한 경향을 보였으나, $600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 이상의 광도를 나타낸 7월 2일부터 4일 동안의 지상부 온도와 엽온의 낮 시간대 변화는 처리에 따라 상이한 양상을 보였다(Fig. 4-C, D). 기온차(엽온 - 기온)와 수증기압포차는 광도가 낮은 6월 30일과 7월 1일에 비해 광도가 높은 날에서 차이가 큰 경향을 보였다(Fig. 4-E, F). 기온차가(-)상태인 시간대가 10-10-20kPa 처리는 전일 이루어진 반면, 20-10-10Pa 처리에서는 7월 2일~4일 8~12시간대의 기온차는(+)를, 이후는(-) 상태를 나타냈다. 이는 처리구의 위치적 차이로 인한 광도가 영향을 준 것으로 보인다. 낮은 광도인 6월 30일과 7월 1일의 수증기압포차는 평균 $0.3 \sim 0.4 \text{ kPa}$ 범위였으며, 광도가 높은 날의 수증기압포차는 평균 $0.7 \sim 1.0 \text{ kPa}$ 로 차이를 보였으나, 처리 간 차이는 없었다. 측정 기간 중 관수 시간은 오전 8시부터 오후 8시까지 수분장력 처리에 의해 20kPa 또는 10kPa에 도달되면 자동 관수가 이루어졌으며, 관수 된 후의 토양수분함량은 각각 $6.8 \sim 12.5\%$ (Fig. 3-G), 또는 $6.8 \sim 12.8\%$ (Fig. 3-H) 범위로 증가

하는 유사한 경향을 보였고, 관수 후 토양 온도는 감소하는 변화를 나타냈다. 광도가 낮은 6월 30일, 7월 1일의 토양 온도는 최대 24.8°C 를 나타냈으나, 광도가 높은 7월 5일 오후 1시 $820 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 에서의 토양 온도가 10-10-20kPa에서는 31.0°C , 20-10-10kPa에서는 28.5°C 를 나타냈다. 이러한 근권 온도의 차이는 온실 내 처리 위치 간 영향과 함께 10-10-20kPa에서는 오후 12시~오후 5시 사이에 29°C 이상의 온도범위를 나타냈다.

고온기 광도가 달랐던 5일 동안의 환경과 생체정보와의 관계는 Fig. 5~Fig. 7과 같다. 측정기간 중 광도가 증가함에 따라 줄기수액흐름비($R^2 = 0.437$)와 엽온($R^2 = 0.736$)은 증가하였으며(Fig. 5-A, B), 평균 상대습도보다 높거나 낮은 시간대를 구분하여 광도와 기온차 간의 결과 평균 상대습도보다 높은(●) 저광도 또는 야간 시간대의 기온차는(+)범위에 있었으며, 평균 상대습도와 같거나 낮았을(○) 경우에서는 뚜렷한 경향은 볼 수 없었으나(-)범위이었다(Fig. 5-C). SFR이 증가함에 따라 엽온은 상승($R^2 = 0.565$)하였고(Fig. 6), 수증기압포차가 커짐에 따라 기온차는 감소($R^2 = 0.294$)하는 경향을 보였다(Fig. 7).

오이 관수 처리기간 중 환경 요인과 식물의 줄기 흐름 또는 엽온간의 상관성을 분석한 Pearson 상수 값은 Table 2와 같다.

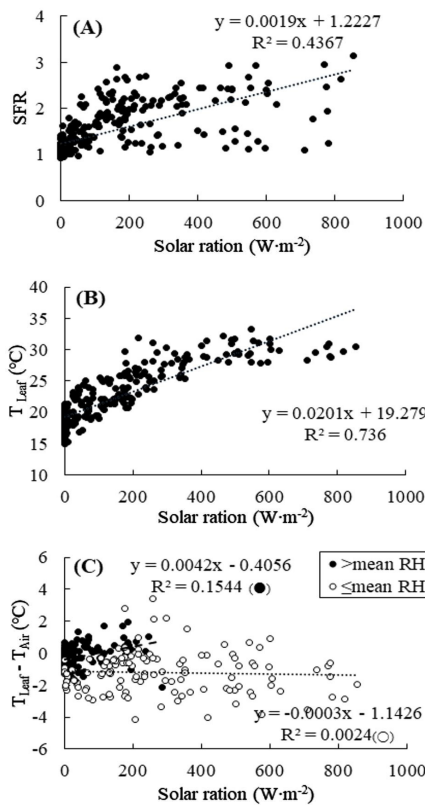


Fig. 5. Relationship between solar radiation and stem sap flux ratio (SFR, A), leaf temperature (T_{Leaf} , B) and leaf to air temperature difference ($T_{\text{Leaf}} - T_{\text{Air}}$, C) of cucumber for 7 days from 30 of June to 4 of July, 2020.

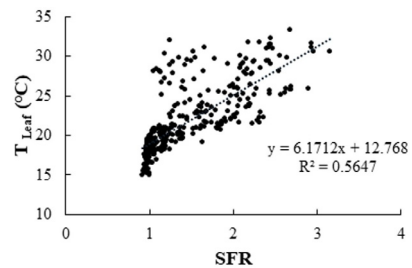


Fig. 6. Relationship between stem sap flux ratio (SFR) and leaf temperature (T_{Leaf}) of cucumber for 7 days from 30 of June to 4 of July, 2020.

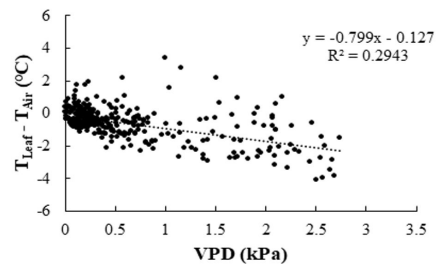


Fig. 7. Relationship between vapor pressure deficit (VPD) and leaf to air temperature difference ($T_{\text{Leaf}} - T_{\text{Air}}$) of cucumber for 7 days from 30 of June to 4 of July, 2020.

Table 2. Pearson’s correlation coefficient among the stem sap flux relative rate(SFRR) and leaf temperature (T_{Leaf}) of cucumber and environmental factors.

Parameters ^z	SFRR	T_{Leaf}	SR	T_{Air}	RH	T_{Soil}	SMC	T_{Dif}
T_{Leaf}	0.770**							
SR	0.692**	0.793**						
T_{Air}	0.786**	0.973**	0.745**					
RH	-0.710**	-0.656**	-0.712**	-0.693**				
T_{soil}	0.578**	0.754**	0.416**	0.826**	-0.474**			
SMC	0.137**	0.247**	0.192**	0.248**	-0.334**	0.042ns		
T_{Dif}	-0.177**	-0.023ns	0.097*	-0.253**	0.253**	-0.418**	-0.038ns	
VPD	0.765**	0.827**	0.801**	0.865**	-0.931**	0.659**	0.296**	-0.280**

^zSR, T_{Air} , RH, T_{soil} , SMC, T_{Dif} , and VPD represent solar radiation, relative humidity, soil temperature, soil water content, leaf temperature to air temperature difference (leaf temperature –air temperature), and vapour pressure deficit.

*Significant at $p < 0.05$, **significant at $p < 0.01$.

SFRR과 엽온 간에는 정의 상관성($p < 0.01$, $r = 0.770$)을 확인 하였으며, SFRR과 광도($p < 0.01$, $r = 0.692$), 지상부 온도($p < 0.01$, $r = 0.786$), 토양 온도($p < 0.01$, $r = 0.578$), 토양수분함량($p < 0.05$, $r = 0.137$), 수증기압포차($p < 0.01$, $r = 0.765$) 간에는 정의 상관성을 SFRR과 상대습도($p < 0.01$, $r = -0.710$), 기온차($p < 0.01$, $r = -0.177$)간에는 부의 상관성을 보였다. 엽온 또한 광도($p < 0.01$, $r = 0.793$), 지상부 온도($p < 0.01$, $r = 0.973$), 토양 온도($p < 0.01$, $r = 0.754$), 토양수분함량($p < 0.05$, $r = 0.247$), 수증기압포차($p < 0.01$, $r = 0.827$) 간에는 정의 상관성을 엽온과 상대습도($p < 0.01$, $r = -0.656$) 간에는 부의 상관성을 보였다. 광도는 지상부 온도, 토양 온도, 토양수분함량, 기온차, 수증기압포차에 정의 상관성을 광도와 상대습도 간에는 부의 상관성을 보였으며, 지상부 온도는 토양 온도, 토양 함수량, 수증기압포차 간에는 정의 상관성을 지상부 온도와 상대습도, 기온차간에는 부의 상관성을 나타냈다. 상대습도와 기온차간에는 정의 상관성을 습도와 토양 온도, 토양 수분함량, 수증기압포차 간에는 부의 상관성을 보였으며, 토양 온도와 수증기압포차 간에는 정의 상관성을 토양 온도와 기온차간에는 부의 상관성을 토양수분함량과 수증기압포차 간에는 정의 상관성을 기온차와 수증기압포차 간에는 부의 상관성을 보였다.

식물의 생육은 끊임없는 물의 흡수와 배출 과정이므로 외부와 차단된 시설재배에서 관수는 필수적이다. 식물의 수분 상태와 생리적 반응들에 근거한 관수는 토양 수분 상태에 근거한 관수방식보다 실용화에 어려움을 갖고 있음에도 불구하고 작물의 수분이용효율을 높이고 작물이 요구하는 수분 상태를 정밀하게 제어하기 위해 식물 생체정보를 이용한 자동 관수방식을 상용화에 시도하고 있다(Jones, 2004; Oletic and Bilas,

2020). 본 실험은 오이의 토양 수분 장력 범위 pF1.7 ~ pF2.3 (대략 5 ~ 30 kPa)내 10ka 또는 20kPa를 관수개시점으로 처리함으로써 수분 장해가 발생되지 않는 범위에서 실험이 이루어졌고, 4월 정식하는 재배한 작형에서 10-10-20kPa 처리는 상품과수와 수량이 가장 높았음을 An 등(2021)은 보고하였다. 그러나 관수개시점을 달리함에 따라 28DAT에서 10-10-20kPa 처리는 관수가 이루어지지 않았으며, 66DAT에서는 관수가 되었음에도 고풋, 고온에 의한 환경이 오이 재배 환경에 부적합한 것으로 작용하여 광합성 II에서의 최대광량자를 Fv/Fm 값의 감소(Fig. 2), 엽온 상승을 확인하였다(Fig. 4). 한편 SFRR은 줄기수액흐름의 상대적 값만을 알 수 있는 측정기로 고풋, 고온기인 66 ~ 68DAT 기간 중 SFRR은 10-10-20kPa 처리에서 20-10-10kPa 처리보다 줄기 수액 흐름이 높았고, 기온차가(-)를 나타낸 시간대에서는 처리구의 수액흐름값이 높았다(Fig. 4-A, B).

또한 식물이 흡수한 수분의 대부분은 증산작용으로 배출되며, 기공이 열려있을 때 기공 증산이 90%를 차지하는 것으로 알려져 있어(Moon and Yu, 2013) 증산의 통로가 되는 기공개폐는 광, 온도, 습도, 수증기압포차(VPD), 토양 수분 등에 영향을 받으므로, 이들 요인을 분석하여 재배적 관점에서는 작물의 수분 상태와 관수 전략에 적용하는 것이다. Lee 등(1998)은 60 ~ 70% 차광하여 오이 재배하였을 때 처리 9일째부터 대조구에 비해 엽온이 1 ~ 2°C 높았으며, 시간이 경과할수록 엽면적 생육이 저하하였으나, 오이 잎의 Fv/Fm 값은 대조구와 차광 처리구 모두 0.7 ~ 0.8범위에 있었다고 보고하였고, Kim 등(2020)은 650W·m⁻² 이상의 여름 오이 재배에서 90%, 40% 또는 무차광시 기온차가 각각 -5.4°C, -7.1°C, -7.4°C 였다고 보고하였다. 이처럼 차광으로 엽온의 상승은 기공 저

항이 증가되었으나 Fv/Fm 값은 적정범위에 분포하였고, 기온차가 (-) 상태에서는 Non-stress, (+)이면 stress로 설정한 Idso(1982)과 다른 결과들은 적정 환경을 벗어난 조건, 극고온(34°C ~ 41°C)과 근권 수분함량(Kim 등, 2020), 차광 등의 환경 요인은 작물 생리 반응에 다양하게 작용했으리라 추측하였다. 본 실험에서 기온차는 20-10-10kPa 처리구 7월 2일 10시대 +4.1°C를 제외하고는 1.5°C ~ -3.2°C(10-10-20kPa), 2.4°C ~ -3.7°C(20-10-10kPa)범위에 분포하였다. 기온차가 -1°C ~ -4°C에서는 증산이 최대가 되며 수분스트레스지수(CWSI)가 0, 엽온이 기온보다 4°C ~ 6°C로 높은 경우 작물은 증산 활동을 하지 않으며, CWSI가 1이 된다고 보고(Jackson 등, 1981; Yun 등, 2020)한 것과 같이 처리구의 기온차는 2.4°C ~ -3.7°C의 증산 범위에 분포하였다. 한편 일사광이 직접 앞에 노출되는 경우, 엽온은 기온보다 높아질 수 있으며, 광도 170 W·m⁻² 이상인 오전 8시 ~ 9시간대에 기온의 급격한 증가는 엽온의 증가와 SFRR의 상승을 보였다(Fig. 4-A, B, C, D). 식물이 기공을 열고 증산을 하면 잠열 소실에 의해 엽온이 기온보다 낮아지며(Park, 2011), 20-10-10kPa 처리의 오전 시간대 엽온은 기온보다 높아 기온차가 + 였다. 이는 태양광 조사가 처리구의 엽온 위치가 영향을 준 것으로 20-10-10kPa의 측정 엽온 위치는 상부로부터 12 ~ 14번째 잎이었으며, 상부로부터 4번째 측정된 엽온이 12 ~ 14번째 엽온보다 낮았고, 10-10-20kPa 처리는 반대의 값을 나타내어(자료미제시) 온실 내 측정 위치로 인한 생체 정보 자료에 영향을 줄 수 있어 추후 실험에서는 보완이 필요한 것으로 생각된다. Yun 등(2020)은 엽온이 일사량 증가시간대와 하강시간대에는 영향을 크게 받지만, 일사량이 높게 유지되는 시간대는 토양수분장력 등 기타 요인이 영향을 받을 것으로 예상한 바와 같이 본 실험에서 온실 내 기온은 오전 11시 이후 28°C 이상의 고온으로 오이 생육 적온 보다 높았으며, 평균 근권 온도가 10-10-20kPa 처리는 24.2°C(20.9 ~ 30.5°C), 20-10-10kPa 처리는 23.7°C(20.5 ~ 28.3°C)로 달랐다. 따라서 오이 적정 토양수분장력 범위 내 관수 제어 처리에서 식물의 광합성 형광 반응, SFRR, 엽온은 광, 온도, 습도, 토양수분함량, 토양 온도, VPD에 의해 영향을 받았고, 생체정보 측정 과정에서 얻어진 변수들은 관수 제어 활용 가능성을 확인하였다.

적 요

시설 토양 오이재배에서 토양수분장력계를 이용하여 관수 제어하였을 때 오이의 광합성 형광반응, 수액 흐름, 엽온 등에 미치는 영향을 구명하고자 실험을 수행하였다. 오이(*Cucumis sativus* L.) ‘청춘’(해오름 종묘)을 공시하여 관수개시점 10-

10-20kPa 또는 20-10-10kPa의 2처리하였다. 766 ~ 854 W·m⁻²의 고광, 32°C 이상의 고온인 처리 66일째 광합성형광반응변수(Fo, Fm, Fv/Fm)값은 처리 간 차이가 컸다. 66일째 낮 시간(오전 10시 반 ~ 오후 6시)의 Fo와 Fv/Fm값은 10-10-20kPa 처리보다 20-10-10kPa 처리에서 높았다. 엽온이 높았을 때 Fv/Fm값은 감소하였다. 28일과 66일째 엽 생육(엽장, 엽폭, 엽면적)은 차이가 없었으나 엽록소 함량(SPAD 값)은 20-10-10kPa 처리에서 유의하게 높았다. 광도와 온도가 증가함에 따라 줄기수액흐름상대율(SFRR)과 엽온은 상승하였다. 두 처리구 모두 SFRR은 광도 170 W·m⁻² 이상인 오전 8시 ~ 9시간대에 급격한 증가가 시작되었다. 관수 후의 처리구 토양 온도는 감소하였으나, 7월 5일(광도 820 W·m⁻², 오후 1시) 토양 온도가 10-10-20kPa에서는 31.0°C, 20-10-10kPa에서는 28.5°C였다. 그러나 처리 간 SFRR, 엽온, 기온차, VPD는 차이가 없었다. SFRR과 엽온 간에는 정의 상관성($p < 0.01$, $r = 0.770$)을 보였으며, SFRR과 엽온은 광, 온도, 토양 온도, 토양 수분함량, VPD 간에는 정의 상관을 상대습도와 기온차 간에는 부의 상관을 보였다.

추가 주제어: Fv/Fm, SPAD 값, 토양 온도, 기온차, VPD

사 사

본 연구는 농림식품기술기획평가원의 첨단생산기술개발 사업(118015-3)의 지원을 받아 연구되었음.

Literature Cited

- An J.H., S.H. Jeon, M.H. Lee, D.C. Jang, E.Y. Choi, J.K. Na, and K.Y. Choi. 2021. Effect of irrigation starting point of soil using tensiometer on growth and water use of cucumber in greenhouse. J. Korea Soc. Hort. Sci. (in pressing, in Korean).
- Anjum S.A., X.Y. Xie, L.C. Wang, M.F. Saleem, C. Man, and W. Lei. 2011. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. African J. of agricultural research 6:2026-2032.
- Bhandari S.R., Y.H. Kim, and J.G. Lee. 2018. Detection of temperature stress using chlorophyll fluorescence parameters and stress-related chlorophyll and proline content in paprika (*Capsicum annuum* L.) seedlings. Hort. Sci. & Tech. 36: 619-629.
- Chen L.S. and L. Cheng. 2009. Photosystem 2 is more tolerant to high temperature in apple (*Malus domestica* Borkh.) leaves than in fruit peel. Photosynthetica 47:112-120.
- Choi E.Y., K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2013. Scheduling non-drainage irrigation in coir substrate hydroponics with different

- percentages of chips and dust for tomato cultivation using a frequency domain reflectometry Sensor. *protected Hort. and Plant Factory* 22:248-255.
- Idso, S.B. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology* 27:59-70.
- Jackson R.D., S.B.Idso, R.J. Reginato, and P.J. Pinter. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour. Res.* 17:1133-1138.
- Jeon S.H., S.O. Hur, S.K. Ha, H.J. Jun, K.H. Han, H.R. Cho, and S.D. Hong. 2010. Water saving irrigation point in cucumber cultivation under greenhouse. *Korean J Soil Sci. Fert.* 43:540-545 (in Korean).
- Jones H.G. 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of experimental botany* 55:2427-2436.
- Kang Y.I., N.J. Kang, M.W. Cho, S.Y. Lee, G.C. Kang, and J.K. Kwon. 2009. Effect of daily weather and soil EC on chlorophyll fluorescence of tomato during high temperature season. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 27.
- Kim D.E., J.K. Kwon, S.J. Hong, J.W. Lee, and Y.H. Woo. 2020. The effect of greenhouse climate change by temporary shading at summer on photo respiration, leaf temperature and growth of cucumber. *protected Hort. and Plant Factory* 29:306-312 (in Korean).
- Kim H.G., J.S. Lee, and Y.H. Kim. 2018. Chlorophyll fluorescence, chlorophyll content, graft-taking, and growth of grafted cucumber seedlings affected by photosynthetic photon flux of LED lamps. *Protected Hort and Plant Factory* 27:231-238 (in Korean).
- Kim H.J., M.Y. Roh, D.H. Lee, S.H. Jeon, S.O. Hur, J.Y. Choi, S.O. Chung, and J.Y. Rhee. 2011. Feasibility test on automatic control of soil water potential using a portable irrigation controller with an electrical resistance-based watermark sensor. *J. Bio-Environment Control* 20:93-100 (in Korean).
- Kim S.K., H.J. Lee, H.S. Lee, B.H. Mun, and S.G. Lee. 2017. Effect of soil water content on growth, photosynthetic rate, and stomatal conductance of Kimchi cabbage at the early growth stage after transplanting. *Protected Hort. and Plant Factory* 26:151-157 (in Korean).
- Lee S.H., G.C. Chung, and S.R. Suh. 1998. Effect of light intensity on the leaf temperature, chlorophyll fluorescence, transpiration and leaf area index in cucumber plants. *Kor J. Hort. Sci. & Tech.* 16:97-97 (in Korean).
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2020 Vegetable greenhouse Status and vegetable production.
- Maxwell K. and G.N. Johnson. 2000. Chlorophyll fluorescence —a practical guide. *Journal of experimental botany* 51: 659-668.
- Moon W. and D.J. Yu. 2013. *Plant physiology*. KNOU Press. ISBN 978-89-20-01122-1 93520.
- Oh S.J., K.H. Moon, I.C. Son, E.Y. Song, Y.E. Moon, and S.C. Koh. 2014. Growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of chinese cabbage in response to high temperature. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 32:318-329 (in Korean).
- Oletic D. and V. Bilas. 2020. How thirsty the crops are: Emerging instrumentation for plant-based field measurement of water stress. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* 23:37-46.
- Park Y.M. 2011. Leaf temperature characteristics being affected by light regimes. *Journal of the Environmental Sciences* 20:1599-1605.
- RDA. 2018. *Cucumber- Agricultural technology guide 107*. RDA, Korea. p. 24-25, 91.
- RDA. 2020. *Agricultural and livestock income databook*. ISBN 978-89-480-6452-0 93520.
- Rhee H.C., G.L. Choi, J.W. Jeong, M.H. Cho, K.H. Yeo, D.M. Kim, C.G. An, and D.Y. Lee. 2013. Effect of soil water potential on the fruit quality and yield in fertigation cultivation of paprika in summer. *Protected Hort Plant Fac.* 22:378-384 (in Korean).
- Seo Y.J., B.S. Kim, J.P. Lee, J.S. Kim, K.C. Park, C.G. Park, and S.W. Cha. 2015. Effects of soil water potential and nitrogen fertilization on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence induction in schisandra chinensis baillon. *Korean J. Soil Sci. Fert.* 48:705-711 (in Korean).
- Thompson R.B., M. Gallardo, T. Agüera, L.C. Valdez, and M.D. 2006. Evaluation of the watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrigation Science* 24:185-202.
- Woo Y.H., H.J. Kim, Y.I. Nam, I.M. Cho, and Y.S. Kwon. 2000. Predicting and measuring transpiration based on phytomonitoring of tomato in greenhouse. *J. Korea Soc. Hort. Sci.* 41:459-463 (in Korean).
- Yoon B.H., E.K. Cho, J.H. Baek, I.H. Cho, Y.H. Woo, and E.Y. Choi. 2020. Comparison of irrigation and drainage volumes, growth and fruit yield under different automated irrigation methods in tomato rockwool hydroponics. *Protected Hort and Plant Factory* 29:28-35 (in Korean).
- Yun S.K., S.J. Kim, E.T. Nam, J.H. Kwon, Y.S. Do, S.Y. Song, M.Y. Kim, Y.H. Choi, G.S. Kim, and H.S. Shin. 2020. Evaluation of water stress using canopy temperature and crop water stress index (CWSI) in peach trees. *Protected Hort. and Plant Factory* 29:20-27.