토마토 암면재배에서 정전용량 측정장치를 기반으로 한 급액방법 구명

한동섭¹ · 백정현¹ · 박주성² · 신원교³ · 조일환⁴ · 최은영^{1*}

¹한국방송통신대학교 농학과, ²부산대학교 전자공학과, ³충남농업마이스터대학, ⁴주텔로팜

Determination of Proper Irrigation Scheduling for Automated Irrigation System based on Substrate Capacitance Measurement Device in Tomato Rockwool Hydroponics

Dongsup Han¹, Jeonghyeon Baek¹, Juseong Park², Wonkyo Shin, Ilhwan Cho⁴, and Eunyoung Choi^{1*}

¹Department of Agricultural Science, Korea National Open University, 86 Daehak-ro, Jongro-gu, Seoul 03087, Korea

²Department of Electronics Engineering, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Korea

³Chungnam Agriculture Meister College, Chungnam National University, 99, Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea

⁴Telofarm Inc., Research Park, Seoul National University, 1 Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, Korea

Abstract. This experiment aims to determine the proper irrigation scheduling based on a whole-substrate capacitance using a newly developed device (SCMD) by comparing with the integrated solar radiation automated irrigation system (ISR) and sap flow sensor automated irrigation system (SF) for the cultivation of tomato (*Solanum lycopersicum* L. 'Hoyong' 'Super Doterang') during spring to winter season. For the SCMD system, irrigation was conducted every 10 minutes after the first irrigation was started until the first run-off was occurred, of which the substrate capacitance was considered to be 100%. When the capacitance threshold (CT) was reached to the target point, irrigation was re-conducted. After that, when the target drain volume (TDV) was occurred, the irrigation stopped. The irrigation volume per event for the SCMD was set to 50, 75, or 100 mL at CT 0.9 and TDV 100 mL during the spring to summer cultivation, and the CT was set to 0.65, 0.75, 0.80, or 0.90 in the winter cultivation. When the irrigation volume per event was set to 50, 75, or 100 mL, the irrigation frequency in a day was 39, 29, and 19, respectively, and the drain rate was 3.04, 9.25, and 20.18%, respectively. When the CT was set to 0.65, 0.75, or 0.90 in winter, the irrigation frequency was about 6, 7, 15 times, respectively and the drain rate was 9.9, 10.8, 35.3% respectively. The signal of stem sap flow at the beginning of irrigation starting time did not correspond to that of solar irradiance when the irrigation volume per event was set to 50 or 75 mL, compared to that of 100 mL. In winter cultivation, the stem sap flow rate and substrate volumetric water content at the CT 0.65 treatment were very low, while they were very high at CT 0.90 was high. All the integrated data suggest that the proper range of irrigation volume per event is from 75 to 100 mL under at CT 0.9 and TDV 100 mL during the spring to summer cultivation, and the proper CT seems to be higher than 0.75 and lower than 0.90 under at 75 mL of the irrigation volume per event and TDV 70 mL during the winter cultivation. It is going to be necessary to investigate the relationship between capacitance value and substrate volumetric water content by determining the correction coefficient.

Additional key words : solar irradiance, irrigation frequency, volumetric water content, water use efficiency

서 언

합리적인 급액관리는 원예 작물의 품질과 수확량을 향상시키는 중요한 요인이다. 국내외 비순환식 수경재배에서 사용되는 주요 자동급액방식에는 누적일사량 제어법(Integrated Solar Radiation, ISR) (Lizarraga 등, 2003),

물관수액흐름속도 센서 기반 제어법(Sap flow, SF) (Vermeulen 등, 2007), 배지 함수율 센서 기반 용적함수량 제어법(Cardenas-Lailhacar 등, 2010; Farina 등, 2007; Jaria와 Madramootoo, 2013), 배액량 센서 기반 배액전극법(Kim 등, 2011), 배지 중량 변화 기반 로드셀 제어법(Hunt and McDonald, 2015) 등이 있다. 이들 중 가장 많이 사용되는 방식인 ISR 제어법은 일사량이 식물 증산량과 비례한다는 이론에 근거한 제어방식이나 (De Swaef 등, 2012) 스마트팜 내부에서 작물 지상부

*Corresponding author: ch0097@mail.knou.ac.kr

Received August 22, 2019; Revised September 17, 2019;

Accepted October 02, 2019

환경은 첨단화된 환경제어 기술을 적용하여 습도 환경이 실시간 변하고 있어서(Heuvelink 등, 2008), 그 관계성이 실시간 구축될 필요가 있다. 위에 언급된 물관수액흐름 속도에 의한 제어법(SF)은 sap flow 센서를 생체정보로 활용하고 있으며 측정 방식으로는 열 용착법(Heat Pulse, HP), 열 소실법(Heat Dissipation, HD), 열 발생장 변형법(Heat Filed Deformation, HFD), 열 평형법(Stem Heat Balance, SHB) 등이 있는데(González-Altozano 등, 2008), 이러한 측정법으로 식물체 지상부의 수분이동 상태는 알 수 있으나 근권 함수량에 대한 피드백이 어렵다는 단점이 있다. 용적함수량 제어법은 근권 함수량 모니터링은 가능하나 식물체 지상부의 수분이동 상태는 알 수 없다. 따라서 최적 급액관리를 위해서는 근권 함수량과 지상부 식물체 수분상태를 동시에 계측하여 식물이 요구하는 적정한 수분량을 필요한 시기에 공급하는 것이 필요하다. 적정한 급액량을 공급할 경우 배액을 최소화할 수 있어 물과 비료 사용량을 감소시키고 환경오염을 줄여 환경 친화적인 과채류 수경재배가 확립될 수 있다. 배지 함수량 측정 센서는 TDR(Time Domain Reflectometry)과 FDR(Frequency Domain Reflectometry)이 있다. FDR 센서를 활용한 배지재배에서 관수조절 및 관리, 센서 간 간격과 측정위치 및 보정방법, 적정 근권 수분제어 범위 구명, 급액 개시와 종료 시기, 배양액 관리 등이 연구되어 왔다(Choi 등, 2013a; 2013b; 2014, 2015; Park 등, 2011a; 2011b; 2014). 이러한 FDR 센서는 배지의 국부적 위치의 함수량을 대푯값으로 제어하는 한계가 있고 유기배지인 코이어 배지의 경우 칩 비율이 70% 이상될 경우 정밀도가 떨어지는 단점이 있다. 중량으로 제어하는 경우 배지 내 수분함량은 정확하게 제어할 수 있으나 과실 수확이나 하엽제거 등의 농작업에 의한 배지 무게가 변할 수 있다. 최근 개발된 정전용량 측정장치(SCMD, Substrate capacitance measurement device)(특허번호: 10-2019-0031856, Park 등, 2019)는 배지 전체의 정전용량을 측정하는 장치로 배지수분이 증가할수록 유전율(ϵ)이 증가하고, 정전용량(C)이 증가하며, 면적에 비례하고, 거리에 반비례하는 이론을 근거로 한다[$C=(\epsilon/D)*A$ (C:정전용량, ϵ :유전율, D:거리, A: 면적)]. 본 연구는 개발된 SCMD를 기반으로 한 적정 급액 방식을 구축하기 위하여 적정 급액 방법을 구명하고 적산일사량(ISR) 및 물관수액흐름속도에 의한 급액 방식(SF)을 대조구로 설정하여 수분이용 효율 등을 비교하였다.

재료 및 방법

1. 식물재배 및 재배환경

토마토 재배는 2018년 3월 25일부터 6월 24일까지 봄

부터 여름철 재배와 2018년 11월 24일부터 2019년 2월 6일까지 겨울철 재배를 PO 필름(두께0.15mm)으로 피복된 스마트 단동형 비닐온실에서 실시하였다. 여주 육묘장에서 60일 재배된 토마토(*Solanum lycopersicum* 'Hoyong', 'Super Doterang') 모종을 구입하여 봄부터 여름철 재배의 경우는 누적일사량 제어구(ISR)는 40주, 물관수액흐름 제어구(SF)는 77주, 배지 정전용량 측정장치 제어구(SCMD)는 37주 모종을 암면 블록(10×10×6.5cm, Rockwool, Grotop expert, Grodan Co. Roermond)에 이식하여 암면배지(100cm×20cm×10cm, Grotop Master, Grodan, Roermond, The Netherlands)에 배지 한 개 당 5주씩 정식하였고 겨울철 재배는 ISR제어구는 80주, SCMD 제어구는 73주를 배지 한 개 당 5주씩 정식하여 완전임의배치방식으로 재배하였다. 정식 전날 수돗물로 암면을 충분히 포수하였으며, 배지 슬라브 하단에 3cm 크기의 배수구 6개씩을 뚫어 배수되도록 하였다. 정식 직후 EC농도는 $0.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 급액 하였으며 서서히 올려서 정식 2주후부터는 EC와 pH를 각각 $2.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 및 6.5수준으로 조정하여 자동급액시스템(Aqua-M, Shinhan A-Tec, Seoul, Korea)으로 공급하였다. 정식 후 발생하는 측지는 지속적으로 제거하였으며, 착과 축진을 위하여 토마토톤 500배로 희석하여 스프레이로 개화된 화방 별로 오전10시 이전에 살포하였다. 착과 후 과방별로 착과된 4과를 남겨 놓고 적화 및 적과를 하였다.

여름철 재배에서는 냉각기(Daeil, DA-1500B, Pusan, Korea)를 사용하여 원수온도를 6°C 로 공급하였고 급액 연결호스는 알루미늄 열반사단열재로 감싸주었다. 겨울철 온실 보온을 위해 보온다겹커튼을 시설 내 광이 유입되기 10분전에 열고, 일몰 90분전에 닫았다. 난방은 공기열 히트펌프 60만kW와 팬코일유닛(SFC -120TFV, LG, Seoul, Korea) 4대를 이용하여 시설 내 균일하게 열분배를 하였다. 전 실험기간 야간 최저온도를 13.5°C 로 하였으며, 시설내·외부 기상환경(온도, 습도, 일사량, CO_2)측정은 신한환경계측시스템(Shinhan SH-3000 V8.0, Seoul, Korea)으로 하였다.

2. 급액 제어 처리

누적일사량 제어구(ISR)는 급액 시스템(Aqua-M, Shinhan A-Tec, Seoul, Korea)을 활용하여 전 재배기간 동안 $80\sim 180\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 범위에서 관수 최소 대기시간을 20분으로 최대대기 시간을 2시간으로 설정하였고 누적일사량이 목표치에 도달했을 때 2분간 100mL가 급액 되도록 하였다. SF 제어구는 물관수액흐름(Sap flow, SF) 신호가 광량(solar irradiance) 신호와 유사하다는 앞선 연구 결과를 바탕으로 SF 신호를 일사량 신호처럼 활용하여 급액 알고리즘에 적용하였다(Baek 등, 2018). SF 센서

Fig. 1. Experimental images; plants growing on rockwool slab in a newly developed device (Patent No.: 10-2019-0031856) (A, B, C) for measurement of substrate capacitance and an automated irrigation system (D).

32개를 토마토 32개 줄기(뿌리에서 20cm 위치)에 설치한 후 정규화된 평균 수액 흐름 누적값이 목표 누적일사량(ISR 제어구와 동일)에 도달할 때마다 급액 시스템(Aqua-M, Shinhan A-Tec, Seoul, Korea)을 활용하여 2분 동안 100mL씩 급액 되도록 하였다. 각 센서의 보정은 다음 fitting curve를 활용하여 수행되었다: curve fitting $u = 9.54 \times ((T_m - T)/T)^{0.99}$, $adj. R^2 = 0.974$ (u : 유속, T_m : 유속이 0일 때 가열 한 후 최대로 상승된 온도, T : 특정 유속이 있을 때 온도상승) (Baek et al., 2018). 배지 정전용량 측정 장치(Substrate capacitance measurement device, SCMD)(Fig. 1)는 오전에 급액 개시 후 배지 한 개 당 설정된 배액 목표량이 처음 발생하는 시점까지 10분간격으로 지속적으로 급액 되고 첫 배액이 배출되면 그 때 배지의 정전용량(Capacitance) 값을 100%로 간주하고 그 기준치의 급액제어점(Capacitance threshold, CT)에 도달하면 급액 되고 그 뒤 목표 배액량이 발생하면 급액이 멈추는 방식으로 제어되었다. 즉, CT에 의해 급액이 ON으로 작동되고 목표 배액량에 의해 급액이 OFF되는 방법으로 제어되었다. 이 장치는 실시간 배지 전체의 정전용량, 배지무게, 급액량, 배액량 변화가 측정 및 저장되었다. 봄부터 여름철 재배에서는

오전 9시에 급액 개시 후 배지 한 개 당 배액 목표량을 100mL로 설정하고 배액이 처음 발생하는 시점까지 10분간격으로 지속적으로 급액하면서 첫 배액이 배출되면 그 때의 배지의 정전용량(Capacitance)을 100%로 간주하고 CT가 0.9 되면 다시 급액 되도록 설정하였다. 실험 처리를 위해 봄부터 여름철 재배에는 일회 급액량(Irrigation volume per event)을 50, 75, 또는 100mL로 설정하였고 겨울철 재배에서는 CT를 0.65, 0.75, 또는 0.90로 설정하여 1회 급액량을 75mL로, 배액 목표량을 70mL로 설정하였다.

3. 측정항목 및 측정방법

식물 생육조사는 초장의 경우 기부에서 생장점까지 길이, 생장길이는 지난주 생장점에서 금주 생장점 길이, 엽수는 개화 화방아래의 완전히 전개한 엽수, 엽장은 맨 위에 개화 화방에서 3번째에 해당하는 엽의 길이, 엽폭은 맨 위에 개화 화방에서 3번째 해당하는 엽의 폭, 줄기 굵기는 개화화방(생장점 첫 화방) 위치에 바로 아래의 줄기 굵기, 화방높이는 개화화방에서 생장점까지의 거리, 개화속도는 1화방 첫 번째 꽃부터 개화하는 속도를 순차적으로 측정하였고, 착과수는 토마토 개체당과

전체 착과수를 측정하였고 과실 수량과 당도는 수확된 과실로 바로 측정하였다. 토마토 식물 잎과 줄기의 생체 중은 최종 수확일에 측정되었다. 급액량은 자동급액장치에 저장된 기록을 사용하였고 배액량은 SF, ISR 제어구의 겨우 각 슬라브 밑면에 검정 필름을 설치하여 슬라브 배수 구멍에서 흘러나온 배액을 검정 필름 끝자락에 받쳐진 비이커에 집수하여 측정하였고 SCMD 제어구의 경우 정전용량 측정장치에 포함된 급배액통과 그 무게를 측정하는 로드셀(road cell)을 활용하여 배액량 무게와 배액량을 측정하고 컴퓨터와 인터페이스 장치를 통해 데이터를 수집하였다. 배액량을 다음과 같이 계산하였다 (배액률(%) = $100 \times (\text{식물체당 배액량} / \text{식물체당 일일 총급액량})$). 수분이용효율(WUE, Water Use Efficiency)는 다음과 같이 측정되었다 [WUE = (수확 시 잎, 줄기 및 과실생체중) / (급액량 - 배액량)] (Burnett and van Iersel, 2008). 배지 용적수분함량은 FDR센서(WT1000N, Mirae-Sensor®, Seoul, Korea)를 사용하여 10분 간격으로 측정하였다.

4. 실험 통계 방법

겨울철 재배에 급액제어점 실험과 여름철 재배에서 일회 급액량 실험은 처리당 3반복 진행되었고 최종 수확일에 측정된 생체중은 겨울철 재배에서는 처리당 15개 식물을 여름철 재배에서는 4개 식물에 대해 수행하였다. 물관수액흐름(SF) 모니터링은 SF 센서를 SF 제어구는 32개 식물체 줄기에 각각 한 개씩 설치하였고, ISR 제어

구는 16개, SCMD 제어구는 4개 식물체 줄기에 각각 설치하여 그 결과를 활용하였다. 통계분석은 SAS 9.2 소프트웨어 패키지 (SAS Institute, Cary, NC, USA)를 사용하여 ANOVA(변량 분석) 분석하였다.

결과 및 고찰

봄부터 여름철 재배에서 4, 5, 6월 온실 최고 온도는 각각 33.5, 37.3, 34.5°C이며 일평균 광량(Solar irradiance, SI)은 최고 573W·m⁻²이었으며 일평균 상대습도(Humidity)는 75에서 99% 수준으로 유지되었다. 일평균 이산화탄소(CO₂) 농도는 313에서 610·10⁻⁶·m³ CO₂·m⁻³, 누적일사량은 268에서 4927J·cm⁻² 범위였다. 겨울철 재배에서는 시설 내부 기온은 13.4에서 19.9°C 범위로 평균기온은 16.3°C로 유지되었다. 야간 난방기 설정온도는 13.5°C로 전 생육 기간에 설정온도 이상으로 제어되었다. 상대습도는 64에서 92% 범위였고 평균습도는 79%였다. 실험 기간 동안 누적일사량은 8에서 1303J·cm⁻²·day⁻¹ 범위였고 일평균 광량은 최고 165.95W·m⁻²이었으며 일평균 CO₂ 농도는 407에서 818·10⁻⁶·m³ CO₂·m⁻³ 범위였다(자료 미제출).

봄부터 여름철 재배에서 일회 급액량을 50, 75, 또는 100mL로 처리하고 Capacitance threshold (CT, 급액제어점)를 0.9로, 배액 목표량을 100mL로 설정하여 급액하였을 때 급액 횟수는 각각 39, 29, 19회였고 배액율은 각각 3.04, 9.25, 20.18%였다(Table 1). 겨울철 재배에서 1회 급액량을 75mL로, 배액 목표량을 70mL로 설정하고

Table 1. Irrigation frequency and drain ratio (%) with the different irrigation volume per irrigation event using the substrate capacitance measurement device (SCMD)-automated irrigation system between the 31st of May and 10th of July. Irrigation was started at 8:00 and finished at 17:20 with 10 minutes' interval.

Irrigation-ON threshold (%)	Irrigation-OFF threshold (Drain, mL)	Irrigation volume per event (mL)	Irrigation frequency	Drain ratio (%)
0.9	100	50	39.0(±2.65)	3.04(±0.46)
0.9	100	75	29.0(±0.58)	9.25(±2.22)
0.9	100	100	19.0(±1.79)	20.18(±2.40)

²Each value is the mean(±SE, standard errors) of 3 replications.

Table 2. Irrigation frequency and drain ratio (%) with the different irrigation volume per irrigation event using the substrate capacitance measurement device (SCMD)-automated irrigation system between the 24th of Nov and 6th of Jan. Irrigation was started at 9:00 and finished at 17:20 with 10 minutes' interval.

Irrigation-ON threshold (%)	Irrigation-OFF threshold (Drain, mL)	Irrigation volume per event (mL)	Irrigation frequency	Drain ratio (%)
0.65	70	75	5.67(±1.67) ²	9.91(±3.56)
0.75	70	75	6.50(±0.37)	10.78(±3.09)
0.90	70	75	14.67(±3.28)	35.3(±2.33)

²Each value is the mean(standard errors) of 3 replications.

Fig. 2. Representative images of hourly average sap flow density when irrigation volume per irrigation event was set at 50mL (A), 75mL (B), or 100mL (C) with irrigation-ON threshold at 0.9% and irrigation-Off threshold (drainage) at 100mL with 3 or 4day-intervals between the 31st of May and 10th of July using the substrate capacitance measurement device (SCMD)-automated irrigation system. Arrows show the point of solar irradiance was recorded as 200W/m².

CT를 0.65, 0.75, 또는 0.90로 처리하였을 때 급액횟수는 5.67, 6.50, 14.67회였고 배액율은 9.91, 10.78, 35.3%였다. 토마토 줄기 물관수액흐름속도(SF)는 오전 일사량이 증가함에 따라 증가를 보이나 오후부터 감소하여 오후 늦게까지 계속 점진적으로 감소하였다. 1회 급액량을 50 또는 75mL로 처리한 경우 급액개시 후 SF 신호가 외부 광량 신호 (SI) 보다 늦어지는 경향(time lag)을 보였는데 광량이 200W·m⁻² 이상으로 기록된 시점에도(화살표) SF 신호가 약하게 반응하고 있다(Fig. 2 A, B). 하지만 일회 급액량을 100mL로 처리한 경우는 급액개시 후 SF 신호와 외부 광량 신호가 비슷한 시간대에 관찰되었다(Fig. 2 C). 물관수액흐름 변화는 토양 내 수분이 제한적일 때 수분이 충분한 토양에 비해 공기 포차(VPD) 변화에 늦게 반응하는 것으로 알려져 있다(Bo 등, 2017). 일회 급액량을 50, 75, 또는 100mL로 처리하고 FDR 센서로 오전 근권 함수율을 관찰한 결과 1회 급액량이

100mL인 경우 50 또는 75mL로 처리한 경우보다 오전 중에 근권 수분이 빠르게 포화되는 것을 알 수 있었다(Fig. 3).

겨울철 재배에서 토마토 줄기 물관수액흐름속도(SF)는 CT를 0.65, 또는 0.75로 처리한 경우, 각각 최대 2.676, 2.712μL/mm²·s⁻¹ 였고(Fig. 4 A, B), CT를 0.90로 설정한 경우는 가장 높은 2.936μL/mm²·s⁻¹로 다른 두 처리보다 높았다(Fig. 3C). CT를 0.65로 처리한 경우 누적일사량 값이 0.75로 처리한 날보다 높았음에도 불구하고 최대 수액흐름속도가 낮은 것을 알 수 있다.

겨울철 재배에서 SCMD의 정전용량 변화와 FDR 센서로 측정된 배지 용적함수율 변화 패턴이 거의 일치되는 결과를 보였다(Fig. 5). CT를 0.65로 설정한 경우 급액개시 후 첫 목표 배액량이 배출된 뒤 다시 CT 지점에 도달하지 못해 급액 재개가 이루어지지 않았고 그로 인해 배지 함수율이 점점 낮아져 보온커튼이 닫히는 시간

토마토 암면재배에서 정전용량 측정장치를 기반으로 한 급액방법 구명

Fig. 3. Representative images of hourly average volumetric water content measured by a FDR sensor when irrigation volume per irrigation event was set at 50 mL (A), 75 mL (B), or 100mL (C) with irrigation-ON threshold at 0.9% and irrigation-Off threshold (drainage) at 100 mL with 3 or 4day-intervals between the 31st of May and 10th of July using the substrate capacitance measurement device (SCMD)-automated irrigation system. Arrows show the point of substrate saturated after irrigation was started.

대에는 함수율이 45%를 나타냈다(Fig. 5 A). CT를 0.75로 설정한 경우 첫 배액이 발생한 후 오후에 1회 더 급액이 재개되어 첫 배액이후 커튼이 닫히는 지점까지 55~65%의 적절한 수분함수율을 보였다(Fig. 5 B). CT를 0.80로 설정한 경우 첫 배액이 발생한 후 커튼이 닫히기 전까지 55~65%의 적절한 수분함수율이 나타났고 CT를 0.90로 설정한 경우는 첫 설정배액이 발생한 후 잦은 급액으로 커튼이 닫히는 지점까지 60~68%의 높은 함수율로 많은 배액이 배출되었다(Fig. 5 C). 이 결과들로 줄기물관수액흐름 속도(Fig. 4)가 배지 수분함량(Fig. 5)과 밀접한 관련이 있다는 것을 알 수 있고 배지 함수량 변화와 함께 지상부 물관수액흐름 속도 정보를 함께 활용하여 급액제어 하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 따라서 토마토 봄부터 여름철 재배에서 SCMD를 활용하여 CT를 0.9로, 배지 한 개당 배액 목표량을 100mL

로 설정하였을 때 일회 급액량은 75~100mL 범위가 적합하고 겨울철 재배에서는 1회 급액량을 75mL로, 배액 목표량을 70mL로 설정하였을 때 CT는 0.75이상 0.9이하 범위가 적합할 것으로 판단되었다.

봄부터 여름철 재배에서 정식 후 28일부터 82일까지 총급액량, 배액량, 지상부 생체중, 과실 생체중, 수분이용효율 및 과실 200g 생산에 소요된 물량을 비교한 결과, 총급액량은 SCMD 제어구에서 ISR 제어구보다 약 1.8L 적게 공급되었고 SF 제어구는 ISR 제어구보다 약 5.0L 적게 공급되었다. 지상부 생체중이 SCMD 제어구에서 높아 수분이용효율(WUE)이 SCMD 제어구에서 가장 높았다. 과실 200g을 생산하는데 소요된 물량은 SCMD 제어구에서 ISR 제어구에 비해 0.5L 적게 소요된 것으로 나타났다(Table 3). 겨울철 재배에서는 총급액량은 SCMD 제어구에서 ISR 제어구 보다 약 1.22L 적

Fig. 4. Sap flow density and solar irradiance when plants were grown under different irrigation-on thresholds (A: CT 0.65; B: CT 0.75; C: CT 0.90).

Fig. 5. Capacitance (Parallel) (A, B, C) and volumetric water content (FDR, %) of rockwool substrate when different irrigation-on thresholds were applied (A: CT 0.65; B: CT 0.75; C: CT 0.90).

Table 3. Total irrigation volume (TIV), total drained volume (TDV), total retained volume (TRV), fresh weight (fwt.) of leaf, stem, and fruit, water use efficiency (WUE) and irrigation volume (IrrV) for producing 200g of fruit during 49 and 75 days after transplant during winter season under the Sap Flow (SF)-, Integrated Solar Radiation (ISR)- and Substrate capacitance measurement device (SCMD)-automated irrigation system.

Treatment	TIV (L/plant) (A)	TDV (L/plant) (A)	TRV (L/plant) (A-B)	Leaf fwt. ^z (kg/plant)	Stem fwt. (kg/plant)	Fruit fwt. ^x (kg/plant)	WUE ^y (g/L/plant)		IrrV (L/200g fruit)
							2018	2017	
SF	74.30	13.43	60.87	0.631b ^y	0.265b	2.64a	58	63	5.63
ISR	79.22	13.66	65.56	0.776ab	0.256b	2.44a	53	59	6.50
SCMD	81.05	15.39	65.66	0.898a	0.319a	2.68a	59	-	6.04

^zMeasured at 82 DAT(15th of June)

^yMeans with different letter are significantly different

^xEach value is the mean of 4 replications.

^wFresh fruit weights harvested from the 1st cluster to 4th cluster.

^yWUE = (Fresh weights of leaf, stem, and fruit per plant at harvest)/(total retained volume).

게 공급되었고 배액율도 낮았다(Table 4).

정식 64일부터 82일까지 일평균 광량과 줄기 물관수 액흐름속도를 모니터링 하였을 때 물관수액흐름속도와

일평균 광량(Solar Irradiance, SI)은 SF와 SCMD 제어 구에서 ISR 제어구보다 더 비례적 패턴을 보였다(Fig. 6 A). 이 결과는 SCMD 제어구에서 SI와 물관수액흐름속

Table 4. Total irrigation volume (TIV), total drained volume (TDV), total retained volume (TRV), fresh weight (fwt.) of leaf, stem, and fruit, water use efficiency (WUE) and irrigation volume (IrrV) for producing 200g of fruit during 49 and 75 days after transplant during winter season under the Integrated Solar Radiation (ISR)- and Substrate capacitance measurement device (SCMD)-automated irrigation system.

Treatment	TIV (L/plant) (A)	TDV (L/plant) (B)	TRV (L/plant) (A-B)	Leaf fwt ^{zy} (kg/plant)	Stem fwt ^{zy} (kg/plant)	Fruit fwt ^x (kg/plant)	WUE ^w (g/L/plant)	IrrV (L/200g fruit)
SCMD	15.27	3.26	12.01	0.38	0.13	0.89	117	3.43
ISR	16.50	6.45	10.05	0.34	0.11	0.89	133	3.70

Fig. 6. Sap flow density and solar irradiance (SI) during 64 and 82 (A) days after transplant (DAT) and correlation coefficient between sap flow density and solar irradiance (B) during 58 and 82 days after transplant (DAT) under the Sap Flow (SF)-, Integrated Solar Radiation (ISR)-, and Substrate capacitance measurement device (SCMD)-automated irrigation system.

도 상관관계(r^2)가 높은 것 결과와 일치된다(Fig. 6 B). 즉, 줄기물관수액흐름속도(Fig. 4), 배지 수분함량(Fig. 4) 및 실시간 광량변화(Fig. 6)가 비례적 관계를 구축한 다는 것을 알 수 있다. 선행연구에서 물관수액흐름 신호가 광량 신호와 유사하였다는 연구결과(Baek 등, 2018)를 뒷받침한다. 즉, SCMD와 SF 제어구에서 재배된 식물은 실시간 광량변화에 물관수액흐름이 반응하는 adaptive performance를 보인다. 이것이 SCMD와 SF 제어구에서

급액량은 많이 소비되지 않았으나 과실 생산량이 감소되지 않은 것과(Table 3, 4) 관계가 있는 것으로 보인다.

첫 배액 배출 시점의 의미는 급액개시 후 배지가 포화되어 오전에 작물의 광합성에 요구되는 수분이 충분히 공급될 수 있는 환경조건이 갖추어진 것으로 볼 수 있는데 이는 전날 급액종료 후 다음날 급액개시까지 건조해진 배지가 급액개시 이후 충분히 포화되어야 배액이 흘러 나오기 때문이다. 따라서 배지가 포화될 때까지 충분한 물공급이 필요한데(Banavar와 Johnson, 1987; Bergman과 Stroud, 1992), 함수율을 일정한 수준으로 높이는데 암면배지가 유기물 배지인 코이어 배지보다 공극이 작고 배액속도가 늦어 시간이 더 요구된다고 하였다(Bhagat 등, 2014; Biswas 등, 2013). 또한 급액 되는 동안 식물 증산이 이루어지므로($< 0.005\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}/\text{plant}$)(Ta 등, 2011) 이로 인한 근권 내 수분변화를 고려하여 급액되는 것이 필요하다고 하였다. 이 결과들로 SCMD 급액 시스템은 전날 급액 종료 후 다음 날 급액개시까지 감소된 물량을 급액개시 후 바로 충족시키는 시스템으로 Yeager 등 (1997)이 언급한 관수의 개념을 잘 반영하는 방식이며 FDR 측정값과 유사한 패턴을 보여 급액제어 장치로 활용 가능성이 있음을 보여주고 있다. 현재 본 연구팀에서는 정전용량 값과 배지 용적수분함량의 관계성을 구명하고 보정계수를 구하는 연구가 진행 중이다.

적 요

본 실험은 토마토(*Solanum lycopersicum* L. 'Hoyong' 'Super Doterang') 암면재배에서 배지 전체의 정전용량을 측정할 수 있는 장치(Substrate capacitance measurement device, SCMD)를 기반으로 한 적정 급액 방법을 구명하기 위하여 누적일사량 제어구(Integrated solar radiation automated irrigation, ISR)와 물관수액흐름 제어구(sap flow automated irrigation, SF)를 대조구로 비교하면서 봄부터 여름철과 겨울철에 재배를 실시하였다. SCMD 제어구는 급액 개시 후 배지 한 개당 설정된 배액 목표량이 처음 발생하는 시점까지 10분간격으로 급액하였고 첫 배액이 배출되면 그 때의 배지의 정전용량

(Capacitance)을 100%로 간주하고 그 기준치의 급액제어 점(Capacitance threshold, CT)에 도달하면 급액 되었고 그 뒤 목표 배액량이 발생하면 급액이 멈추는 방식으로 제어되었다. 봄부터 여름재배에서 실험 처리를 위해 SCMD제어구의 일회 급액량 (Irrigation volume per event)을 50, 75, 또는 100mL로 설정하였고 겨울철 재배에서는 CT가 0.65, 0.75, 또는 0.90가 되면 급액 되도록 설정하였다.

봄부터 여름철 재배에서 일회 급액량을 50, 75, 100mL로 설정하였을 때 급액 횟수는 각각 39, 29, 19회였고 배액율은 각각 3.04, 9.25, 20.18%였다. 겨울철 재배에서 CT를 0.65, 0.75, 0.90로 설정하였을 때 급액횟수는 각각 5.67, 6.50, 14.67회였고 배액율은 9.91, 10.78, 35.3%였다. 봄부터 여름철 재배에서 일회 급액량 처리에 따른 물관수액흐름속도(SF) 변화는 1회 급액량과 배액량을 각각 50과 75mL로 제한한 경우 100mL로 제한한 경우와 비교하여 SF 신호가 외부 광량 신호 (SI) 보다 늦어지는 경향(time lag)을 보였고 겨울철 재배에서 CT를 0.65로 설정한 경우는 물관수액흐름 속도나 함수율이 매우 낮아졌고 CT를 0.90로 설정한 경우는 함수율과 물관수액흐름 속도는 매우 높았으나 많은 배액이 배출되었다. 따라서 토마토 봄부터 여름철 재배에서 SCMD를 활용하여 CT를 0.9로, 배지 한 개당 배액 목표량을 100mL로 설정하였을 때 일회 급액량은 75~100mL 범위가 적합하고 겨울철 재배에서는 1회 급액량을 75mL로, 배액 목표량을 70mL로 설정하였을 때 CT는 0.75이상 0.9이하 범위가 적합할 것으로 판단되었다. 앞으로 정전용량 값과 배지 용적수분함량의 관계성을 구명하고 보정계수를 구하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

추가 주제어: 광량, 급액횟수, 배지용적함수율, 수분이용 효율

사 사

본 연구는 2018년 농림식품기술기획평가원(과제번호:118015-3)과 농촌진흥청(과제번호: PJ01384302 2018)에 의하여 수행되었음.

Literature Cited

- Baek, S., E. Jeon, K.S. Park, K.H. Yeo and J. Lee. 2018. Monitoring of water transportation in plant stem with microneedle sap flow sensor. JMEMS. 27: 440-447.
- Banavar, J.R., and D.L. Johnson. 1987. Characteristic pore sizes and transport in porous media. Physical Review B. 35:7283-7286.
- Bo, X., T. Du, R. Ding, and L. Comas. 2017. Time lag characteristics of sap flow in seed-maize and their implications for modeling transpiration in an arid region of Northwest China. J. Arid Land. 9:515-529.
- Burnett, S.E., and M.W. van Iersel. 2008. Morphology and irrigation efficiency of *Gaura lindheimeri* growth with capacitance sensor controlled irrigation. HortSci. 43:1555-1560.
- Bergman, D.J., and D. Stroud. 1992. Physical Properties of Macroscopically Inhomogeneous Media. Solid State Physics 46: 147-269.
- Bhagat, V.K., S. Biswas, and J. Dehury. 2014. Physical, mechanical, and water absorption behavior of coir/glass fiber reinforced epoxy based hybrid composites. Polym. Composite. 35:925-930.
- Biswas, S., Q. Ahsan, A. Cenna, M. Hasan, and A. Hassan. 2013. Physical and mechanical properties of jute, bamboo and coir natural fiber. Fiber and Polym. 14:1762-1767.
- Cardenas-Lailhacar, B., M.D. Dukes, and G.L. Miller. 2010. Sensor-based automation of irrigation on Bermuda grass during wet weather conditions. J Irr Drain Eng. 134:120-128.
- Choi, E.Y., K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2013a. Non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a frequency domain reflectometry sensor. Europ. J. Hortic. Sci. 78:132-143.
- Choi, E.Y., Y.H. Woo, M. Son, K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2013b. Nutrient solution concentration effects on non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a FDR sensor. Intl. J. Food Agr. Environ. 11:636-641.
- Choi, E.Y., S.K. Seo, K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2014. Development of a non-drainage hydroponic system with a coconut coir substrate by a frequency domain reflectometry sensor for tomato cultivation. J. Plant Nutr. 37:748-764.
- Choi, E.Y., Y.H. Yoon, K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2015. Environmentally sustainable production of tomato in coir substrate hydroponic system using a frequency domain reflectometry sensor. Hort. Environ. Biotechnol. 56:167-177.
- De Swaef, T., K. Verbist, and W. Cornelis. 2012. Tomato sap flow, stem and fruit growth in relation to water availability in rockwool growing medium. Plant Soil 350:237-252.
- Farina, E., F.D. Battista, and M. Palagi. 2007. Automation of irrigation in hydroponics by FDR sensors-Experimental results from field trials. Acta Hortic. 747:193-196.
- González-Altozano, P., E.W. Pavel, J.A. Oncins, J. Doltra, M. Cohen, T. Paço, R. Massai, and J.R. Castel. 2008. Comparative assessment of five methods of determining sap flow in peach trees. Agr. Water Manage. 95: 503-515.
- Heuvelink, E., M.J. Bakker, L.F.M. Marcelis, and M.

- Raaphorst 2008. Climate and yield in a closed greenhouse. *Acta Hortic.* 801:1083-1092.
- Hunt, D.S. and J. McDonald. 2015. Automating irrigation scheduling in production nurseries using a weight-based irrigation controller. *Acta hortic.* 1104:49-56.
- Jaria, F. and C.A. Madramootoo. 2013. Thresholds for irrigation management of processing tomatoes using soil moisture sensors in Southwestern Ontario. *Trans. ASAE.* 56:155-166.
- Kim, S.E., Y.S. Kim, and S.Y. Sim. 2011. Design of measuring trays in the irrigation system using drainage electrodes for tomato perlite bed culture. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 29:568-574 (in Korean).
- Lizarraga, A., H. Boesveld, F. Huibers, and C. Robles. 2003. Evaluating irrigation scheduling of hydroponic tomato in Navarra, Spain. *Irrig. Drain.* 52:177-188.
- Park, J.S., S.M. Kim, Y.J. Park and Telofarm Inc. 2019. System for measuring water content of medium for water culture. Korea Patent Application No. 10-2019-0031856 (in Korean).
- Park, S.T., G.H. Jung, K.Y. Choi, Y.B. Lee, J.S. Oh, and H.J. Yoo. 2011a. Changes of measuring water content values on FDR sensors at different distances. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 29(2):187 (in Korean).
- Park, S.T., G.H. Jung, K.Y. Choi, Y.B. Lee, J.S. Oh, and H.J. Yoo. 2011b. Changes of water content according to measuring locations of FDR sensors on content coir substrate for hydroponics. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 29:187-188 (in Korean).
- Park, S.T., G.H. Jung, H.J. Yoo, E.Y. Choi, K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2014. Measuring water content characteristics by using frequency domain reflectometry sensor in coconut coir substrate. *Protected Hort. Plant Fac.* 23:158-166 (in Korean).
- Ta, T.H., J.H. Shin, T.I. Ahn, and J.E. Son. 2011. Modeling of transpiration of paprika (*Capsicum annuum* L.) plants based on radiation and leaf area index in soilless culture. *Horti. Environ. Biotechnol.* 52:265-269.
- Vermeulen, K., K. Steppe, K. Janssen, P. Bleyaert, J. Dekock, J.M. Aerts, D. Berckmans, and R. Lemeur. 2007. Solutions to overcome pitfalls of two automated systems for direct measurement of greenhouse tomato water uptake. *Hort-Tech.* 17: 220-226.
- Yeager, T.R., C.J. Gilliam, T.E. Bilderback, D.C. Fare, A.X. Niemiera, and K.M. Tilt. 1997. Best management practice: guide for producing container-grown plants. Southern Nursery Assoc., Marietta, GA.