

토마토 코이어 수경재배에서 FDR센서, 적산일사량센서 및 타이머 급액방식에 따른 급배액량, 생육 및 과실수량 비교

최은영¹ · 김희용¹ · 최기영² · 이용범^{3*}

¹한국방송통신대학교 농학과, ²강원대학교 시설농업학과, ³서울시립대학교 환경원예학과

Comparisons in Volumes of Irrigation and Drainage, Plant Growth and Fruit Yield under FDR Sensor-, Integrated Solar Radiation-, and Timer-Automated Irrigation Systems for Production of Tomato in a Coir Substrate Hydroponic System

Eun-Young Choi¹, Hee-Yong Kim¹, Ki-Young Choi², and Yong-Beom Lee^{3*}

¹Department of Agriculture, Korea National Open University, Seoul, 110-791, Korea

²Department of Protected Agriculture, Kangwon National University, Chuncheon, 200-701, Korea

³Department of Environmental Horticulture, The University of Seoul, Seoul, 130-743, Korea

Abstract. Water drainage from the open hydroponics often causes significant environmental pollution due to agrochemicals and loss of water and nutrients. The objectives of this study were to show the potential application of an irrigation schedule based on threshold values of volumetric substrate water content for tomato (*Solanum lycopersicum* L. ‘Samsangu’) cultivation in a commercial hydroponic farm during spring to summer cultivation. This study was performed for minimizing effluent from coir substrate hydroponics using a frequency domain reflectometry (FDR) sensor-automated irrigation, as compared with an integrated solar-radiation (IR) and conventional timer-irrigation (TIMER) after transplanting. In results, no significant difference in daily irrigation volume was found among the treatments until 88 days after transplant (DAT). However, during the 88 to 107 DAT, the daily irrigation volume was in the order of IR (2125 mL) > TIMER (2063 mL) > FDR (1983 mL), and during the 108 to 120 DAT, it was in the order of IR (2000 mL) > TIMER (1664 mL) > FDR (1500 mL). The lowest drainage volume was observed in the FDR treatment with the order of IR (12~19%) > TIMER (4~12%) > FDR (0~7%) during the entire growing period. A lower irrigation volume in the FDR treatment after 88 DAT may be due to the sensor’s detecting capacity for less water absorption by plant after completing fruit maturity with apical pruning and removal of lower leaves, while a higher irrigation volume in the IR treatment may be due to gradual increase in integrated solar-radiation amount as closer to summer season. There was no significant difference in plant growth and fruit yield among the treatments; however, a 11% and 18% of higher soluble sugar content was observed in the FDR than that of TIMER and IR treatment, respectively.

Additional key words : irrigation control; retained volume; volumetric water content; water use efficiency

서 론

현재 시설채소의 전체 면적(2013년 기준)은 63,815ha 이고 생산량은 2,714,519톤이며 이중 과채류는 46,693ha 이고 그 생산량은 2,164,919톤이다. 과채류 재배 면적 중 토마토 재배면적은 7,070ha이고 생산량은 49,960톤에

이르고 있다(MAFRA, 2014). 시설재배 전체 면적 63,815ha 중 양액재배면적은 2,981ha이고 그 중 고품배 지경은 2,171ha, 순수수경은 810ha의 면적이다. 최근 지구온난화로 인한 기온상승과 가뭄(IPCC, 2013) 등으로 인한 작물피해가 급증하여 노지재배면적이 감소되고 있는 추세이다. 따라서 세계적으로 지속 가능한 원예농업 경영을 위하여 물소비를 줄이는 재배시스템과 품종 개발의 연구가 요구되고 있다. 다양한 양액재배의 방식 중 과채류에서는 순수수경 보다는 배지를 사용하는 고품배 지경 재배면적이 높은 비율을 차지하고 있다. 국내의 고

*Corresponding author: hydropo@uos.ac.kr

Received February 19, 2016; Revised March 21, 2016;

Accepted March 23, 2016

형배지경은 순환식과 비순환식(방류식)이 있으며 주로 비순환식으로 이루어지고 있다(Seo, 1999). 일반적으로 비순환식 고품배지경은 배지 내 염류축적 방지를 위해 배액율을 20~40%정도로 관리하는 것이 일반적이다. 이때 방류되는 배액으로 인하여 수분 및 비료가 손실되며, 환경오염을 유발시킬 뿐 아니라 배액의 온실 내부 방류 시 토양환경이 열악해지고 병발생의 원인이 될 수 있다(Hwang 등, 2012). 이러한 문제를 극복하기 위해 순환식 방식이 권장되지만 특정이온의 비율이 증가하고 축적되는 어려움이 있어서(Ehret 등, 2005; Zekki 등, 1996) 실용화 단계까지는 추가 연구가 필요한 실정이다. 토양과 지하수의 염류오염에 따른 환경적, 경제적 우려가 커지는 가운데(Giuffrida 등, 2003; Kim, 2014), 북미 및 유럽국가에서는 온실로부터 고농도의 화학비료 성분이 배출되지 못하도록 법적으로 규제하고 있다(Runia와 Amsing 2001). 이러한 문제를 극복하기 위하여 근권 내 함수량을 쉽게 모니터링하여 배액을 극소화하거나 배액을 전혀 방출시키지 않는 무배액 비순환식 수경재배방법이 개발되는 것이 필요하다.

비순환식 고품배지경에서 효과적인 관수제어방식으로 타이머제어법이나 적산일사량센서 제어법을 사용해 왔다(Lee 등, 2007). 하지만 두 가지 방법 모두 근권 내 수분함량을 실시간 측정하는데 어려움이 있다. 최근 비순환식 고품배지경에서 작물의 수분요구도와 배지의 수분상태를 측정할 수 있는 토양수분센서(soil moisture sensor) 개발이 이루어져왔다. 수분센서의 종류로는 Time Domain Reflectometry(TDR) 센서와 Frequency Domain Refelctometry(FDR)가 있다. TDR 센서는 고주파를 발생시켜 되돌아오는 전파속도에 근거하여 토양 내 수분을 측정하는 것이고, FDR 센서는 고주파를 이용하여 토양 내 수분함량에 따른 유전율 정도에 따라 측정 회로내에 걸리는 주파수영역에서 콘덴서에 걸리는 정전용량(electric capacity)으로 읽어 토양수분함량으로 환산하여 나타내는 것이다. 최근 FDR 센서를 활용한 고품배지경에서 관수조절 및 관리(Jaria 등, 2013), 센서 간 간격과 측정위치 및 보정방법(Kim, 2014; Park 등, 2011a; 2011b; 2014), 적정 근권 수분제어 범위 구명(Park, 2015), 급액 개시시기와 종료 시기, 배양액 관리(Yoo, 2014) 등이 연구되어 왔다. FDR 센서를 활용하여 실험한 작물은 토마토(Choi 등, 2013a; 2013b; 2014, 2015), 딸기(Kim, 2015), 파프리카(Yoo 등, 2014), 절화장미(Park, 2015; Farina 등, 2007)등이 있으나 아직까지 실질적 농가활용을 위한 체계적 연구 자료의 축적은 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 토마토의 코이어 배지를 활용한 비순환 수경재배 시 배액 최소화를 위한 재배방식을 확립하고자 FDR, 적산일사량 센서 및 타이머의 서로 다른 관수제어 방식을 적용하고 그에 따른 급

배액량, 생육 및 생산량을 비교 및 평가하였다.

재료 및 방법

1. 식물 재배

본 실험은 강원도 춘천시 사농동에 위치한 토마토 재배 농가의 단동 2중 수막하우스 3동에서 실시하였다. 면적은 처리당 500m² (150평, 1050주)이며 총 1500m²에서 실시하였다. 춘천 육묘장에서 구입한 토마토(*Solanum lycopersicum* L. 'Samsamgu') 유묘는 2015년 2월 17일에 세척된 재활용 코이어 슬라브 (100cm×20cm×10cm 대영지 에스(주); dust: chip (v/v) = 50:50%)에 6주씩 심고 1줄기로 유인 하였다. 배양액은 시립대학교 토마토 배양액을 기준으로 가감하여 사용하였다; 5[Ca(NO₃)₂·2H₂O]NH₄NO₃ 90.8kg, KNO₃ 43.9kg, NH₄NO₃ 1.7kg KCl 6.8kg, KH₂PO₃ 20.3kg, Fe-EDTA 860g, MgSO₄·7H₂O, 68.4kg, K₂SO₄ 36.7kg, MnSO₄·4H₂O 169g, ZnSO₄·7H₂O 104g, CuSO₄·5H₂O 18.7g, Na₂B₄O₇·10H₂O 280g, NaMoO₄·2H₂O 12.1g (1000 L 100배).

2. 급액제어

급액은 FDR 센서(WT1000N, Mirae-Sensor, Seoul, Korea)에 의한 자동급액방식 처리와 비교하기 위하여 누적일사량센서(IR: Interated Solar Radiaion)와 타이머(TIMER) 제어구를 대조구로 정식 후부터 설정하였다. FDR 센서에 의한 방식과 IR 센서에 의한 급액방식은 동일한 자동관수제어기(Magma-1000, Green CS, Seoul, Korea)로 제어 되었고 TIMER 방식은 타이머가 장착된 자동급액기로 제어되었다. FDR센서에 의한 급액방식은 목표 배지 용적당 수분함량 보다 낮은 경우 급액이 되고 목표 수분함량에 도달하였을 때 급액이 중지 되도록 처리 하였다. FDR과 IR 센서 처리구에서 급액간의 최소 대기시간은 10분으로 설정하였고 TIMER 방식은 하루에 8~11회의 급액이 40~50분 간격으로 되도록 하였다. IR 센서 처리구에서는 목표 누적일사량에 도달하였을 때 급액 되도록 설정하여 전 재배기간 동안 80J~350J 범위에서 급액제어 되었다(Table 1). 모든 제어구에서 1회 급액량을 생육단계에 따라 다르게 설정하였다(Table 1). 관수 개시 및 종료시간을 계절 변화에 따라 일출 1시간 후 관수하여 일몰 3시간 전에 관수종료 하였다.

3. 조사항목

관수 제어 시작 후 매일의 주당 급액량은 각 처리구의 재배베드의 중앙에 위치한 여분의 1개 점적핀에서 나오는 실제 급액량을 플라스틱 실린더에 모아 매일 측정하였다. 매일 배액량은 각 처리구의 재배베드의 중앙에 코

이어 슬라브 아래에 배액받이 PE필름을 깔아 그 필름 아래로 배액이 흐르도록 하여 플라스틱 실린더에 모아 매일 급액종료 후 측정하였고 배액의 pH 및 EC농도도 함께 측정하였다. 배액률(%)은 다음과 같이 계산되었다: 배액률(%) = 100 × (주당 배액량 ÷ 주당 급액량). 전 재배 기간 중 FDR과 IR 처리구의 1회 급액량을 시기별로 자동관수제어기(Magma-1000, Green CS, Seoul, Korea)에 인위적으로 설정하였고 시기 별 변경된 1회 급액량은 일지에 기록하였다. 두 처리 모두 급액횟수는 센서에 의해 자동제어 되었고 그 기록도 자동관수제어기에 자동저장 되었다. TIMER 처리구의 1회 급액량과 급액횟수는 모두 인위적으로 설정되었고 그 설정 값을 일지에 기록하였다. 식물 초장은 정식 후 50일 이후(4월 8일)부터 적심일(정식 후 76일, 5월 4일)까지 7~10일 간격으로 측정하였다. 식물 생육은 최종 수확일 하루 뒤인 정식 후 121일 췌(6월 15일)에 식물체를 뿌리와 분리한 후 엽 및

줄기 생체중을 측정하였다. 상품과 수량 및 당도는 각 처리구에서 3개의 식물을 선택하여 1화방에서 5화방까지 수확된 과실에서 측정되었다. 또한 5월 11일부터 6월 19일까지 각 처리구의 전체 식물체(1050주)에서 매일 수확된 상품과중(1화방에서 7화방까지)을 측정하였다. 수분 이용효율(WUE: Water Use Efficiency = [(수확기 주당 잎, 줄기, 과실의 생체중) ÷ (전 재배기 동안 주당 총급액량 - 전 재배기 동안 주당 배액량)])은 수확기의 잎, 줄기, 과실을 포함한 총 지상부 생체중을 총급액량에서 총 배액량을 뺀 값으로 나눈 값으로 나타났다. 근권 내 함수율 및 EC(Electrical Conductivity)농도 변화는 FDR 처리구는 자동관수제어기(Magma-1000, Green CS, Seoul, Korea)에 의해 자동 기록되었다. TIMER와 IR 처리구의 근권 내 함수율 및 EC농도는 재배베드에 FDR 센서(WT1000N, Mirae-Sensor, Seoul, Korea)를 설치하여 데이터로그(WT600, Mirae-Sensor, Seoul, Korea)에

Table 1. Water set point (WSP), average irrigation volume (IV), average drainage ratio (%), and irrigation volume at each irrigation (IVE), irrigation frequency (IF), and plant height under the TIMER, FDR, and Integrated-Radiation (IR) irrigation systems for days after transplant (DAT) during early spring to summer growing season.

Treatment	Days after transplant (DAT)	WSP	IV (mL/plant/day)	Drain (%)	IVE (mL)	IF (times/day)	Plant height (cm)
TIMER	13-51(1-Mar-8-Apr)		628	10.6(2.7) ^z	85(2) ^y	9(0) ^y	149(2) ^x
	52-60(9-Apr-17-Apr)		1036	11.5(4.6)	100(3)	10(1)	170(4)
	61-68(18-Apr-24-Apr)		1247	9.0(6.5)	100(6)	13(1)	194(7)
	69-78(25-Apr-4-May)		1783	10.2(6.0)	100(5)	17(1)	224(4)
	78-87(5-May-13-May)		1820	9.2(6.6)	100(3)	18(0)	- ^z
	88-107(14-May-3-Jun)		1983	7.6(6.0)	105(2)	19(0)	-
	108-120(4-Jun-14-Jun)		1664	5.3(3.3)	83(4)	20(0)	-
FDR	13-51(1-Mar-8-Apr)	58~61%	603	6.8(2.2)	75(2)	10(0)	153(1)
	52-60(9-Apr-17-Apr)		1244	6.6(2.8)	100(3)	16(3)	179(1)
	61-68(18-Apr-24-Apr)		1382	3.9(2.3)	70(1)	20(2)	198(1)
	69-78(25-Apr-4-May)	59~60%	1863	3.2(4.1)	70(2)	27(2)	233(2)
	78-87(5-May-13-May)		1883	4.3(5.2)	70(1)	26(1)	-
	88-107(14-May-3-Jun)		2063	1.6(1.2)	70(1)	29(1)	-
	108-120(4-Jun-14-Jun)		1500	0(0)	67(0)	22(2)	-
IR	13-51(1-Mar-8-Apr)	350~170J	605	14.5(2)	80(3)	9(0)	156(1)
	52-60(9-Apr-17-Apr)	150~130J	1014	11.7(0)	100(1)	11(1)	180(3)
	61-68(18-Apr-24-Apr)	130J	1424	16.6(0)	100(1)	15(2)	202(4)
	69-78(25-Apr-4-May)	130~110J	1827	14.1(0)	108(3)	19(2)	236(4)
	78-87(5-May-13-May)	110~80J	1900	18.5(0)	88(2)	21(2)	- ^z
	88-107(14-May-3-Jun)	80J	2125	16.0(0)	86(1)	25(1)	-
	108-120(4-Jun-14-Jun)	80J	2000	12.0(0)	88(1)	24(2)	-

^z: The numbers in parentheses are standard deviation.

^y: The numbers in parentheses are standard errors.

^x: The apex of plant was removed after the 2nd of May at 76 days after transplant.

저장 되도록 하였다. 결과에서 얻은 데이터는 SAS 9.2 프로그램 (SAS Institute, Cary, NC)으로 ANOVA(변량 분석) 분석하였다.

결과 및 고찰

전 재배기간 동안 생육단계별 일일 식물체당 평균 급액량은 13-51일에는 600-630mL, 52-60일에는 1000-1200mL, 61-68일은 1200-1400mL, 69-78일은 1800-1860mL, 79-87일은 1820-1900mL 범위로 공급되어 처리구 별 큰 유의적인 차이가 없었다(Table 1). 그러나 정식 후 88일부터 107일까지 TIMER, FDR, IR 제어구 각각의 일일 식물체당 평균 급액량은 IR(2125mL) > TIMER(2063mL) > FDR(1983mL) 수준이었고 108일부터 120일까지는 IR(2000mL) > TIMER(1664mL) > FDR(1500mL) 수준이었다. 88일 이후부터는 FDR과 IR 제어구가 상이한

결과를 보였는데, 이는 정식 후 94일쯤 부터 누적일사량의 증가로(Fig. 1) IR 제어구는 급액이 증가된 반면, FDR 처리구는 정식 후 107일쯤 부터(적심 후 30일이 경과) 급액이 IR 제어구보다 주당 평균 500mL 적게 공급된 결과이다. 두 처리와는 다르게 TIMER 제어구는 정식 78일부터 120일까지 평균 급액량이 큰 편차 없이 공급되었다. 따라서 타이머 제어법은 FDR과 IR 제어법에 비해 식물의 수분 요구량이나 환경변화에 유동적이지 않다는 것을 알 수 있다. IR 제어구는 타이머 제어구와는 다르게 일사량 변동이 있을 때 급액량 변동이 발생하였다. 하지만 최근 발표된 연구결과에 의하면 IR에 의해 급액 시 오전에 해 뜬 후 225 W·m⁻²가 되기까지 1시간이 소요되는데 반해 낮 동안에는 30분미만으로 소요된다고 하였다(Lizarraga 등, 2003). 이러한 IR 제어법과 FDR 제어법을 함께 병행하여 급액 한다면 관수 효과를 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. FDR 센서 제어법은

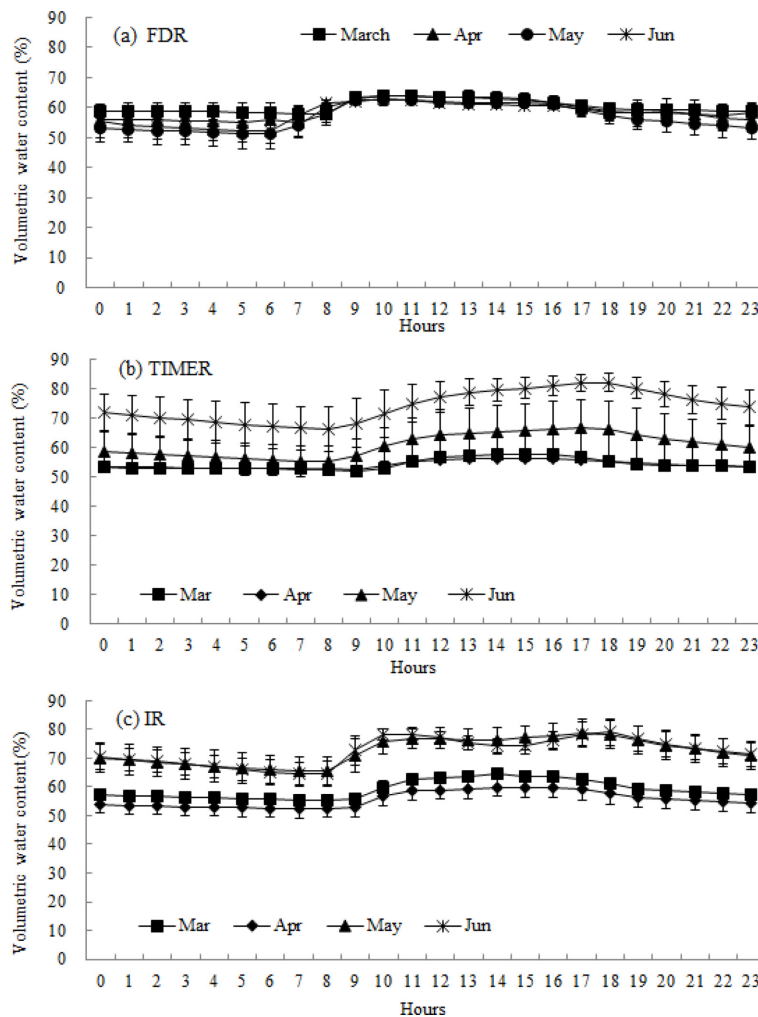


Fig. 1. Changes of volumetric water content in substrate under the FDR-automated(a), TIMER(b), and Integrated-Radiation (IR)(c) irrigation systems. Bars represent standard errors (\pm) for the replications (30 days or 31 days).

관수종료 후 관수개시까지 감소된 물량을 관수개시 후 바로 충족시키므로(Choi 등, 2013a, b), Yeager 등 (1997)이 언급한 관수의 의미를 잘 반영하는 방식이다.

배액률은 TIMER 제어구의 경우 5~12%, FDR 센서 제어구의 경우 0~7%, IR 제어구의 경우 12~19% 수준으로 IR > TIMER > FDR 순이었다(Table 1). FDR 센서구에서는 정식 후 88일 이후에는 배액이 극소화 되어 '배액 제로화'(Mathers 등, 2005) 결과를 얻었다. 일반적으로 비순환식 수경재배 농가에서는 배지 내 염류집적 발생을 피하기 위해 배액을 20~40% 배출한다(Fricke, 1998; Schröder와 Lieth, 2002; Giuffrida 등, 2003). 하지만 본 연구의 선행연구 결과(Choi 등, 2013a; 2013b; 2014, 2015)에서는 FDR 센서에 의한 자동관수시스템에서는 근권 내 수분함량과 전기전도도(EC)를 실시간 모니터링을 통하여 배액 극소화가 가능하다는 결과를 얻었고 본 실험에서도 같은 결과를 얻었다. 그 동안의 선행

실험과 다른 점은 본 실험을 수행한 농가의 재배지는 TIMER를 이용한 급액방식을 사용하면서도 배액률을 10%로 제한하여 재배하였다는 점이다. 반면, IR 제어구는 다른 일반 농가와 유사하게 배액을 배출하는 것을 목표로 생육단계별 누적일사량을 설정한 결과 배액률이 12~19% 범위였다. 정식 초기에는 뿌리 활착과 생육발달을 위해서 FDR 센서구도 배액이 7% 정도 발생하도록 1회 급액량을 설정하였다(Table 1). 정식 후 88일 이후 TIMER와 FDR 센서구의 급액량 차이가 크게 없었지만 FDR 센서구에서 배액률이 현저히 낮았다. 이는 TIMER 제어구는 1회 급액량을 85~100mL 수준으로 급액횟수를 9~20회 범위로 인위적으로 공급한 반면 FDR 센서구는 정식 후 60일 이후부터 107일까지는 1회 급액량을 70mL 수준으로 낮추어 급액횟수가 자동적으로 20~29회 범위로 증가되었기 때문이다(Table 1).

배지 함수율은 FDR 센서구는 계절에 관계없이 52~64%

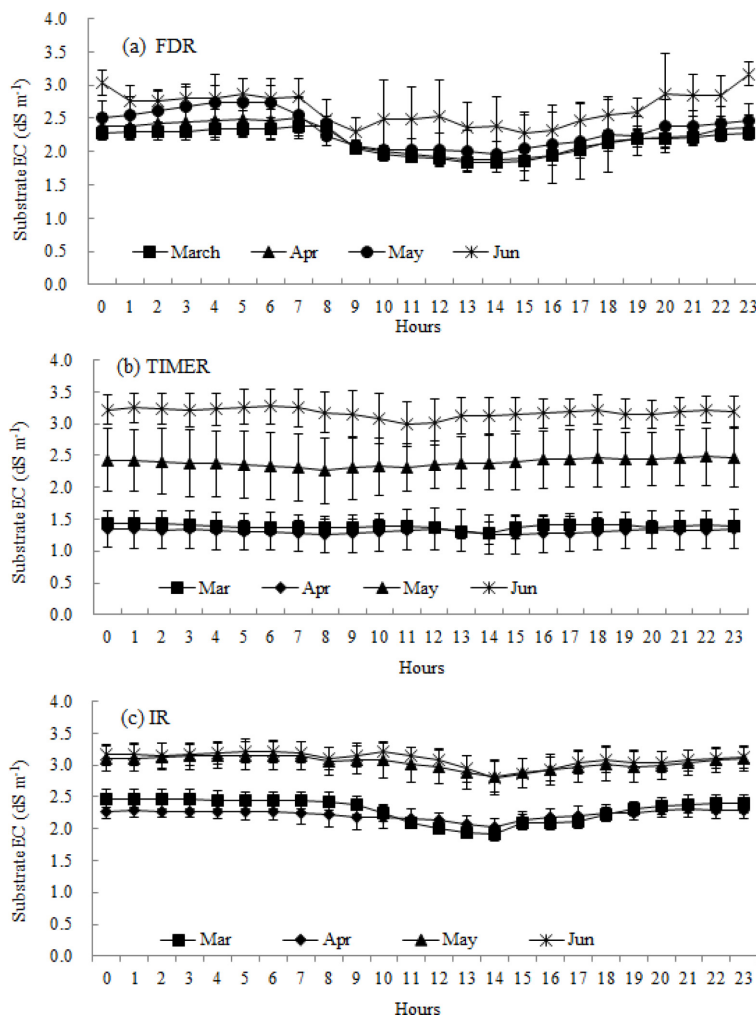


Fig. 2. Changes of EC in substrate under the FDR-automated(a), TIMER(b), and Integrated-Radiation (IR)(c) irrigation systems. Bars represent standard errors (\pm) for the replications (30 days or 31 days).

범위로 유지 되었고(Fig. 1a), TIMER 제어구는 3, 4월에는 평균 54%로 유지되었고 5월에는 평균 60%, 6월에는 평균 74%로 유지되었다(Fig. 1b). IR 제어구에서는 3, 4월에는 평균 55~59%, 5, 6월에는 평균 72%로 유지되었다(Fig. 1c). TIMER와 IR 처리구에서 재배 후기에 함수율 증가는 TIMER 처리는 생체중의 증가로 인해 인위적으로 급액량을 높여 공급한 결과이고 IR 처리구는 재배 후기에 일일누적일사량 증가로 급액량이 증가된 결과이다.

FDR 센서구에서 급액량이 다른 두 처리구에 비해 부족하지 않으면서 배액률도 0~7% 수준으로 유지한 급액 방식의 결과가 배지 내 적정 수분함량으로 나타난 것으로 고찰된다. 즉, 잉여분의 물과 양분이 다른 두 처리구에 비해 감소된 결과이다. Bilderback(2000)은 분화재배에 대해 언급한 것이지만 효율적인 관수는 배액 되고 흘러버려지는 수분량을 즉각적이고 경제적인 방법으로 감소시키는 것이라고 했다. 또한 Burnett(2008)와 van Iersel 등 (2010)은 온실이나 상업적 농원에서 수분센서를 활용하여 배지 내 수분함량을 측정함으로써 효율적인 관수를 할 수 있었다고 하였다. FDR 센서구가 두 처리에 비해 효율적인 관수 시스템인 것을 뒷받침하고 있다.

배지 EC농도는 FDR 센서구에서 3월에는 1.83~2.37, 4월에는 1.88~2.50, 5월에는 1.97~2.74, 6월에는 2.29~3.17dS·m⁻¹ 범위로 유지되었다(Fig. 2a). TIMER 제어구에서 3월에는 1.27~1.44, 4월에는 1.26~1.34, 5월에는 2.26~2.48, 6월에는 2.99~3.27dS·m⁻¹ 범위로 유지되었다(Fig. 2b). 적산 일사량에 의한 IR 제어구에서 3월에는 1.92~2.47, 4월에는 2.02~2.30, 5월에는 2.82~3.15, 6월에는 2.80~3.22dS·m⁻¹ 범위로 유지되었다(Fig. 2c). FDR 센서구에 비해 3, 4월에 배액률이 높았던 TIMER와 IR 두 제어구는 FDR 센서구에서 비해 3, 4월에 근권 EC 농도가 낮게 유지되었다. 하지만 근권 수분함량이 높게 유지되었던 5, 6월에는 FDR센서구와 유사한 수준을 나타냈다.

배지 무기이온 함량은 사용하지 않은 새 코이어 배지를 씻은 후 건조시켜 분석한 결과에 비해 사용한 후 분석한 배지의 총질산염(NO₃-N) 함량은 오히려 낮았지만 유효인산(P₂O₅)은 최대 30배, 치환성 칼륨(K)은 8배, 치환성 칼슘(Ca)은 2.6배, 치환성 마그네슘(Mg)은 3.9배 높았다(Table 2). 이 결과는 사용된 농가 배지가 네 번의 재배 작기 동안 재사용되었기 때문인 것으로 판단된다. IR 처리구 배지에서 NO₃-N과 유효 P₂O₅ 함량이 가장 높았고(*p* < 0.05) 치환성 K, Ca, Mg 함량이 가장 낮았

Table 2. Total nitrate nitrogen (NO₃-N), available phosphorous (P₂O₅), and exchangeable potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) in coir substrates of washed never-used (WNU) and of used in this experiment. Plants were grown under the TIMER, FDR-automated, and Integrated-Radiation(IR) irrigation systems during early spring to summer growing season.

Treatment	NO ₃ -N (%)	Available (mg/kg)		Exchangeable (cmol ⁺ /kg)		
		P ₂ O ₅	K	Ca	Mg	
TIMER	0.093b ^z	1113b	23.71b	99.89a	50.98a	
FDR	0.095b	1091b	24.47a	86.42b	31.07b	
IR	0.177a	1419a	17.40c	71.99c	20.60c	
WNU	0.41(0.06) ^y	47.5(8.4)	3.0(0.1)	37.7(0.4)	13.2(0.03)	

^z Means with different letter are significantly different.

^y The numbers in parentheses are standard errors.

Table 3. Fresh weight (FW) of leaf, stem and fruit, soluble solid content(SSC), total irrigation volume (TIV), total retained volume (TRV), and water use efficiency (WUE) under the TIMER, FDR-automated, and Integrated-Radiation(IR) irrigation systems during early spring to summer growing season.

Treatment	Leaf FW ^z (g/plant)	Stem FW (g/plant)	Fruit FW ^x (g/plant)	SSC (°Brix)	TIV (L/plant)	TRV ^w (L/plant)	WUE ^u (g/L/plant)
TIMER	705a ^y	426a	3240a	4.7b	138	113(6.9) ^y	38.68b
FDR	651a	398a	4243a	5.2a	146	121(2.8)	43.74a
IR	762a	420a	3403a	4.4c	148	111(1.0)	41.31ab

^z Measured at 121 DAT (15th of June).

^y Means with different letter are significantly different.

^x Fresh weights of fruits harvested from the first cluster to the fifth cluster.

^w Total retained volume = (total applied irrigation volume per plant – total drained volume per plant).

^v The numbers in parentheses are standard deviation 2 representative plants per treatment.

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

다($p < 0.05$). TIMER 처리구에서 치환성 Ca, Mg이 가장 높았다($p < 0.05$). 하지만 TIMER 처리구의 실제 배액의 EC 농도는 재배기간 동안 2.0~4.5dS·m⁻¹ 수준이었고 세 처리구 모두 배액 pH는 정식 후 61일까지(4월 18일) 7.0~8.0 범위로 유지되다가 그 이후 6.5 수준이었다(자료 미제시).

정식 후 121일에 측정된 엽 및 줄기 생체중은 급액방식에 따른 통계적 유의차가 없었다. 상품과 수량(1-5화방)도 급액방식에 따른 통계적 유의차는 없었고(Table 2), 각 처리구의 전체 식물체 (1050주)에서 매일 수확된 토마토 상품과중(1화방에서 7화방까지)도 통계적으로 유의차가 없었다(Table 3). 수분이용효율(WUE)은 FDR 센서구에서 통계적으로 약간(13%, $p < 0.05$) 높았다. 하지만, 당도는 FDR 처리구에서 TIMER 처리구에 비해 약 11%($p < 0.05$), IR 처리구에 비해 약 18%($p < 0.05$) 높아 처리구 중 가장 높았다(Table 2). 이 결과는 FDR 센서구의 일일 주당 급액량을 관행수준으로 공급하면서 배액을 극소화를 목표로 1회 공급량을 생육단계별로 다르게 설정해 준 것과 이에 따라 급액횟수가 다른 것(Table 1)과 관련이 있는 것으로 판단된다.

처리구 간의 일일 식물체당 급액량의 상관계수(r^2)(자료 미제시)를 분석한 결과 FDR 센서와 TIMER 제어구 간에는 0.879, IR과 TIMER 제어구 간에는 0.836로 높은 상관관계를 나타냈고, FDR 센서와 IR 제어구 간에는 0.774로 다른 두 비교보다 낮은 상관관계를 나타냈다. 이 결과는 흐리고 비가 오는 날과 맑은 날의 급액 패턴과 하루 시간대별 급액빈도가 FDR과 IR 제어구 간에 차이가 있는 것과 관련이 있다. 이러한 미세한 변화를 FDR 센서가 감지하고 자동관수기와의 통신이 원활하게 될 수 있도록, 또 재배자가 최소 시간 투자로 바로 활용 가능하도록 기술을 안정화 시키는 것이 앞으로의 과제이다.

결론적으로 수분센서를 활용한 자동관수제어 방식은

배액을 극소화하면서 적정 근권 환경을 조성하여 배액으로 인한 토양과 지하수 오염을 방지할 수 있는 기술이며, 생산성은 관행기술에 비해 감소되지 않으면서 당도가 향상된 토마토를 생산하는 장점을 가진 기술로 판단된다.

적 요

비순환식 고품배지경에서 배액이 토양과 지하수 오염을 발생시키는 문제를 해결하고자 그 동안 연구된 데이터를 바탕으로 배액 최소화 재배방식을 확립을 위해 본 연구는 토마토 코이어 수경재배농가 시설에서 FDR 센서, 적산일사량 센서 및 타이머를 이용하여 토마토를 재배하며 급액량, 생육 및 생산량을 비교하였다. 정식 후 88일까지 일일 식물체당 평균 급액량은 처리구에 따른 큰 차이가 없었다. 하지만 정식 후 88일 이후 107일까지 TIMER, FDR, IR 제어구 각각의 일일 식물체당 평균 급액량은 IR(2125mL) > TIMER(2063mL) > FDR(1983mL) 수준이었고 108일부터 120일까지는 IR(2000mL) > TIMER(1664mL) > FDR(1500mL) 수준이었다. 배액률은 TIMER 제어구의 경우 5~12%, FDR 센서 제어구의 경우 0~7%, IR 제어구의 경우 12~19% 수준으로 IR > TIMER > FDR 순이었다. 정식 후 88일 이후부터는 FDR과 IR 제어구가 급액량에 상이한 결과를 보였는데, 이는 재배 후기 즉, 5월 20일 이후(정식 후 94일) 누적일사량의 증가로, IR 제어구에서는 급액이 증가된 반면 FDR 센서 처리구는 적심 이후 30일이 경과된 6월 2일경부터 IR 제어구 보다 일일 급액량이 평균 500mL 적게 공급된 결과이다. 식물체 생육 및 상품과 수량도 급액방식에 따른 통계적 유의차는 없었지만, 당도는 FDR 처리구에서 TIMER 처리구에 비해 약 11%, IR 처리구에 비해 약 18% 높았다.

추가 주제어 : 급액제어, 수분이용효율, 용적수분함량, 잔류수분함량

사 사

본 연구는 농수산식품기술기획평가원(IPET)의 지원에 의해 수행되었습니다.

Literature cited

Bilderback, T.E. 2002. Water management is key in reducing nutrient runoff from container nurseries. HortTechnology 12:541-544.

Table 4. Comparison in total and daily average weights of fruit harvested from a greenhouse sized in 500m² where 1050 plants are grown under the TIMER, FDR-automated, and Integrated-Radiation(IR) irrigation systems during early spring to summer growing season.

Treatment	Total weight of fruit (kg/500m ²)	Daily average weight of harvested fruit ^z (kg/500m ²)
TIMER	6402	207a ^y
FDR	6435	208a
IR	6545	211a

^z Fresh weight of fruits harvested from cluster 1 to cluster 7 from 84 (11th of May) to 123 DAT (19th of June).

^y Means with different letter are significantly different.

- Burnett, S.E. 2008. Morphology and irrigation efficiency of *Gaura lindheimeri* growth with capacitance sensor-controlled irrigation. *Hortic. Sci.* 43:1555-1560.
- 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.
- Ehret, D.L., J.G. Menzies, and T. Helmer. 2005. Production and quality of greenhouse roses in recirculating nutrient systems. *Sci. Hortic.* 106:103-113.
- 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.
- Fricke, A. 1998. Influence of different surplus irrigation and substrate on production of greenhouse tomatoes. *Acta Hort.* 458:33-42.
- Giuffrida, F., S. Argento, V. Lipari, and C. Leonardi. 2003. Methods for controlling salt accumulation in substrate cultivation. *Acta Hortic.* 614:799-803.
- Hwang, Y.H., C.G. An, Y.H. Chang, H.S., Yoon, J.U. An, G.M. Shon, C.W. Rho, and B.R. Jeong. 2012. Effect of zero drainage using drainage zero sensor on root zone environment, growth and yield in tomato rockwool culture. *J. Bio-Env. Con.* 21:398-403.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. Climate change 2013: The physical science basis. Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1.
- Jaria, F. and C.A. Madramootoo. 2013. Thresholds for irrigation management of processing tomatoes using soil moisture sensors in Southwestern Ontario. *Transactions of the ASABE.* 56(1):155-166.
- Kim, J.Y. 2014. Efficient irrigation practice through soil moisture sensors based automated irrigation system in ornamental plant production. *Flower Res. J.* 22(2):48-53
- Kim, M.K. 2015. The effects of off-time duration between irrigation cycles and the end-time of irrigation hours on drainage ratio, water and fertilizer use efficiencies, and yield in coir substrate hydroponic system for strawberry cultivation by a FDR (Frequency Domain Reflectometry) sensor. PhD Diss., The University of Seoul, Seoul, Korea.
- Lee, J.H., Y.B. Lee, E.Y. Choi, and E.Y. Yang. 2007. A controlled irrigation method using integrated solar radiation has effect on both the production and quality of single-node cutting rose 'versillia'. *Acta Hortic.* 761:379-385.
- Lizarraga, A., H. Boesveld, F. Huibers and C. Robles. 2003. Evaluating irrigation scheduling of hydroponic tomato in Navarra, Spain. *Irrig. Drain.* 52:177-188.
- Mathers, H.M. T.H. Yeager, and L.T. Case. 2005. Improving irrigation water use in container nurseries. *HortTech.* 15:8-12.
- MAFRA, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2014. Actual production of greenhouse vegetables in 2013.
- 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 dy different distances. *Kor. J. Hortic. Sci. Technol.* 29(2):187.
- Park, S.T. G.H. Jung, K.Y. Choi, Y.B. Lee, J.S Oh, H.J. Son, and H.J. Yoo, 2011b. Changes of water content according to measuring locations of FDR sensors on coctent coir substate for hydroponics. *Kor. J. Hortic. Sci. Technol.* 29:187-188.
- 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.
- Park, S.T. 2015 Irrigaton control in coir substrate hydroponic system for rose cultivation by a frequency domain reflectometry (FDR) Sensor. The University of seoul. seoul. Korea.
- Runia, W.T. and J.J. Amsing. 2001. Disinfection of recirculating water from closed cultivation; State by heat treatment. *Acta Hortic.* 548:215-222.
- Schröder, F.G. and J.H. Lieth. 2002. Irrigation control in hydroponics, p. 265-296. In: D. Savvas and H. Passam (eds.). *Hydroponic production of vegetables and ornamentals.* Embryo Publishing, Athens, Greece.
- Seo, B.S. 1999. Future prospects and countermeasures for hydroponics in 21C. *Kor. J. Hortic. Sci. Technol.* 17:796-802.
- Yeager, T.R., C.H. 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.
- Yoo, H.J. 2014. Effects of irrigation control by FDR(frequency domain reflectometer)sensor on drain on ratio and growth of sweet pepper(*Capsicum annuum* L.) hydroponics in coconut coir. PhD Diss., The University of Seoul, Seoul, Korea.
- van Iersel, M.W., S. Dove, J.G. Kang, and S.E. Burnett. 2010. Growth and water use of petunia as affected by substrate water content and daily light integral. *HortSci.* 45:277-282.
- Zekki, H., L. Gauthier, and A. Gosselin. 1996. Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 121:1082-1088.