

수경재배 시 적산 일사량과 배지 수분 함량 복합 급액 제어에 의한 ‘설향’ 딸기(*Fragaria annanassa* Dutch, cvs. ‘Sulhyang’)의 생육 및 품질

최수현¹ · 김소희^{2*} · 최경이² · 정호정³ · 임미영⁴ · 김대영⁵ · 이선이¹

¹국립원예특작과학원 채소과 연구사, ²국립원예특작과학원 시설원예연구소 연구사,
³국립원예특작과학원 시설원예연구소 연구관, ⁴국립원예특작과학원 시설원예연구소 전문연구원,
⁵국립원예특작과학원 채소과 연구관

Growth and Quality of the Strawberry (*Fragaria annanassa* Dutch, cvs. ‘Sulhyang’) as affected by Complex Nutrient Solution Supplying Control System using Integrated Solar Irradiance and Substrate Moisture Contents in Hydroponics

Su Hyun Choi¹, So Hui Kim^{2*}, Gyeong Lee Choi², Ho Jeong Jeong³, Mi Young Lim⁴,
Dae Young Kim⁵, and Seon Yi Lee¹

¹Researcher, Vegetable Research Division, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Wanju 55365, Korea

²Researcher, Protected Horticulture Research Institute, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Haman 52054, Korea

³Senior Researcher, Protected Horticulture Research Institute, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Haman 52054, Korea

⁴RDA Research Associate, Protected Horticulture Research Institute, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Haman 52054, Korea

⁵Senior Researcher, Vegetable Research Division, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Wanju 55365, Korea

Abstract. Strawberry cultivation in Korea is grown in greenhouse, but most farms manage their water supply using a timer control method based on the experience of growers. The timer control has problems in that it is difficult to consider the weather condition, the growth stage of crops, and the moisture content of the substrate, so that the crops cannot be managed at an optimal level, and the accuracy of cultivation management are lacking. The watering methods using integrated solar irradiance and substrate moisture contents are control systems that provide eco-friendly and precise water supply considering the growth conditions of crops. The purpose of this study was to compare the combined water supply control with integrated solar irradiance and substrate moisture contents and timer control method in hydroponic cultivation of strawberries using coir, and to set the optimal integrated solar irradiance level for complex water supply control. The irrigation system was automatically watered when it reached 100, 150, 250 J·cm⁻² based on the external solar irradiance, and forced irrigation was performed at a substrate moisture content of less than 60% in all treatments. The amount of irrigation at once was 50 mL. The timer treatment was applied as a control. The smaller the level of integrated radiation to start watering, the greater the daily amount of irrigation. Both the fresh weight and dry weight per plant were higher in the complex irrigation control method than the timer control, and the 100 and 150 J·cm⁻² treatment had the highest fresh weight, and the 100 J·cm⁻² treatment showed a significantly higher dry weight. The yield was also significantly higher in the complex control method than in the timer, and the early yield increased as the level of integrated solar irradiance was smaller. The fresh weight of fruit was the lowest in the timer-controlled irrigation. As a result of this study, the possibility of combined control irrigation method using integrated solar irradiance and substrate moisture content was confirmed for precise water supply management of strawberries in hydroponics.

Additional key words : correlation analysis, FDR, irrigation, water use efficiency

*Corresponding author: sohuikim@korea.kr

Received October 1, 2021; Revised October 16, 2021;

Accepted October 18, 2021

서 론

딸기 생산액은 2019년 15.1천억 원(MAFRA, 2021)으로 원예작물 중 생산액 1위로 농가의 주요 소득 작목이며 신선 딸기 수출액은 2020년 4,823톤, 5,375만 달러(KTSPI, 2021)로 꾸준히 증가 추세에 있다. 2020년 딸기 재배 면적은 5,683ha 이고 이 중 노지 재배 면적은 49ha로 1% 미만의 점유율을 나타내며 우리나라 딸기 재배는 대부분 시설 재배로 이루어지는 것을 알 수 있다(KOSTAT, 2021).

수경재배는 토양이 아닌 배지에서 양액을 이용하여 작물에 양분을 공급하는 방법으로, 수경재배를 통해 집약적이고 효과적인 작물 관리가 이루어질 수 있다(Dorais 등, 2001). 배액을 재활용하는 순환식 수경재배 비율은 우리나라 5% 미만인 실정이며 대부분 비순환식 수경재배로 양액을 공급하고 있다(Lee와 Kim, 2019). 수경재배에서 급액 제어는 작물의 생장을 최적의 상태로 유지하고 배양액의 손실을 최소화하며 품질을 높이기 위해 행해지며 급액량, 배액량, 배지 내 함수량 등을 고려해야 한다. 재배 방식이나 베드 구조 등에 따라 공급 방법이 다양한데, 작물 재배에는 작물의 활력, 기상 환경의 변화 등 여러가지 변수가 작용하기 때문에 한 가지 방법으로만 제어하기 충분하지 않아 두 가지 이상의 변수를 고려하여 복합 제어를 하는 경우가 많다(Choi, 2017). 대부분의 농가에서 사용하는 타이머 제어법은 타이머를 이용하여 급액 시간을 설정하는 방법으로 급액 조절법 중 가장 저렴하고 설치와 조작이 간단하지만 작물, 품종, 생육 단계 및 계절에 따른 급액 조절이 곤란하고 급액량의 과부족 현상이 자주 나타나는 결점이 있다고 알려져 있다(RDA, 2018).

적산일사량을 이용한 급액 제어는 현재 수경재배 농가에서 상업적으로 많이 사용하는 방법으로, 일사량과 수분 흡수량의 관계를 고려하여 일사량이 시간이 경과함에 따라 누적되어 일정한 일사량에 도달하면 급액이 되는 방법이다(Na 등, 2008). 적산일사량 수준에 따라 급액량을 조절하고 작물이 수분을 필요로 할 때 배양액을 공급할 수 있다(Kim과 Kim, 2000). 수분 센서는 토양에서 수분함량과 수분 이동 등을 측정하기 위한 목적으로 사용되고 있다(Topp 등, 1980; Ledieu 등, 1986; Starr와 Paltineanu, 1998; Yoo 등, 1999). FDR(frequency domain reflectometry) 센서는 전자파의 공명진동수 변화에 따른 정전용량 또는 유전률 변화를 이용하여 수분 함량을 측정하는 방식이다(Veldkamp와 O'Brien, 2000). FDR 센서는 정확하고 경제적이며 다양한 측정 방식과 접목하여 실용화가 용이하기 때문에 사용이 증가하고 있다(Park 등, 2010). 근권 수분 측정을 통한 급액 제어로 급액 목표 지점에 도달하는 것을 신속하고 분명하게 측정하여 급액량 공급이 초과되지 않도록

방지를 할 수 있다고 하였다(Park 등, 2014).

센서를 이용하여 작물 재배 시 수분 공급을 조절하고 식물의 생육과 품질, 수량에 미치는 영향을 분석한 선행 연구(Sim과 Kim, 2009a, 2009b; Rhee 등, 2010; Choi 등, 2013; Kim 등, 2013; Rhee 등, 2013; Lee 등, 2018a; Kim 등, 2019)는 적산 일사량 또는 배지 수분 함량이라는 단일 조건을 계속하여 급액 제어에 사용하였다. 시설 내부는 작물에 영향을 미치는 다양한 요인이 존재하며 이를 복합적으로 활용하여 급액 기준을 설정하면 작물 생육에 최적의 근권 환경을 조성하여 농가 소득 증진에 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구는 급액 제어 방법으로 많이 활용하고 있는 적산일사량 급액 방법과 FDR 센서를 이용한 급액 방법을 복합적으로 사용하여 기존의 타이머 제어와 급액 특성을 비교하고, 급액이 되는 적산일사량 기준 별 딸기의 생육과 품질을 분석하여 적절한 적산일사량 기준을 설정하고자 수행하였다.

재료 및 방법

1. 실험 재료 및 재배 관리

본 실험은 경상남도 함안군에 소재한 국립원예특작과학원 시설원예연구소의 플라스틱 온실(폭 10m, 길이 40m)에서 수행하였다. 2019년 8월 28일 빗물저류조에서 집수한 빗물(EC 0.14dS·m⁻¹, pH 7.42)로 코이어 배지를 7일동안 포수한 후 9월 4일 EC 1.0dS·m⁻¹ 배양액으로 6일동안 포수하여 양이온이 흡착되도록 하였다. 2019년 9월 10일 코이어 슬라브에 ‘설향(*Fragaria × ananassa* Duch. cvs. ‘Sulhyang’)’ 딸기묘를 20cm 재식 간격으로 10주씩 정식 하였다. 코이어 배지는 효성 오앤비(HyoSung ONB, Daejeon, Korea)에서 수입한 칩:더스트 비율 6:4(100cm×20cm×10cm), 정식 구멍 10공, 배액 구멍 4공 슬라브를 사용하였다. 급액핀을 한 개의 슬라브 당 5개씩 설치하여 한 슬라브 당 5개의 급액핀이 10개의 식물체에 급액하도록 하였다. 고설벤치는 온실에 가로 6줄, 세로 3줄씩 배치하여 총 18개의 벤치에서 재배하였으며, 가장 바깥쪽 벤치를 제외한 12개의 벤치에서 실험을 진행하였다. 양액은 딸기 전용 국립원예특작과학원 표준 배양액을 공급하였다(다량 원소 NO₃-N 6.0me·L⁻¹, NH₄-N 0.2me·L⁻¹, PO₄-P 2.0me·L⁻¹, K 3.5me·L⁻¹, Ca 3.0me·L⁻¹, Mg 1.0me·L⁻¹, SO₄-S 1.0me·L⁻¹; 미량원소 Fe 1.30mg·L⁻¹, B 0.30mg·L⁻¹, Mn 0.30mg·L⁻¹, Zn 0.30mg·L⁻¹, Cu 0.02mg·L⁻¹, Mo 0.01mg·L⁻¹). 재배 기간 온실 내 온도, 상대습도 및 외부 일사량은 환경계측기 데이터로거(CR1000, Campbell Scientific Inc., Utah, USA)를 사용하여 5초 간격으로 측정하였다(Fig. 1). 월 평균 온실 내부 온도는 12월 14.0°C, 1월 13.9°C, 2월 15.3°C, 3월 16.1°C이고, 상대

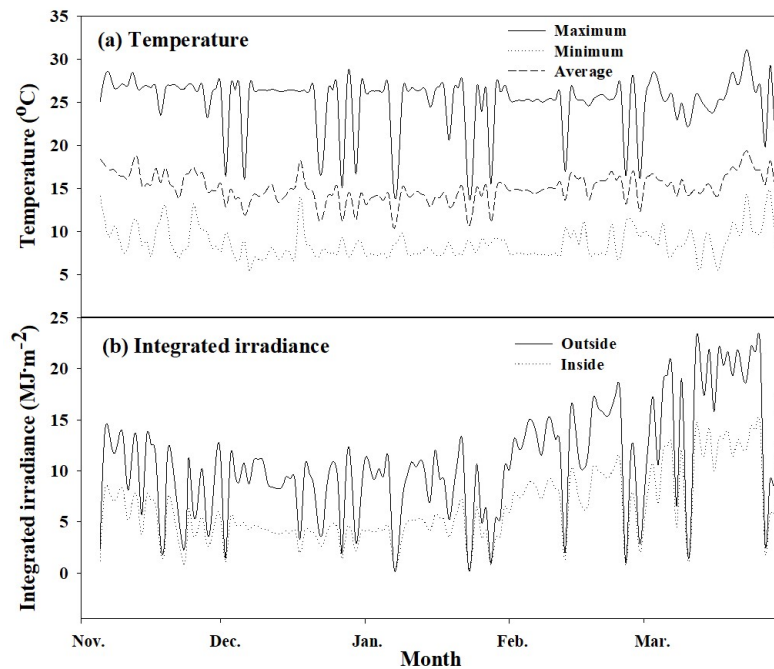


Fig. 1. Daily minimum, average, and maximum temperature in greenhouse and inside and outside integrated solar radiation during growing period.

습도는 12월 65.5%, 1월 67.9%, 2월 58.9%, 3월 57.7%로 재배하였다. 월 평균 외부적산일사량은 12월 $8.28\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 1월 $7.94\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 2월 $12.47\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$, 3월 $16.35\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 이었다. 흐리고 비가 오는 날에는 온실 내부 최고 온도가 16°C 이하, 일일 외부 일사량이 $1\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ 이하로 떨어지기도 하였다.

2. 적산 일사량과 배지 수분함량을 이용한 복합 급액 제어 처리

적산 일사량과 배지 수분 함량을 이용한 복합 급액 제어는 수경재배 급액 프로그램(CR1000, Campbell Scientific Inc., Utah, USA)을 이용하였다. 모든 처리에서 1회 급액량은 50mL 로 설정하였고, 일출 1시간 30분 후 1회 급액, 일몰 2시간 전 급액 종료하였다. 외부 일사량을 측정하여 일정 적산 일사량 기준 $100\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$, $150\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$, $250\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 에 도달하면 1회 급액하고, 30분 대기 후 일사량이 다시 누적되도록 설정하였다. FDR 타입의 토양수분센서(CS616, Campbell Scientific Inc., Utah, USA)를 이용하여 측정한 배지 수분 함량이 60% 미만이면 1회 강제 급액 후 30분 대기 하는 급액 조건을 12시 이전 오전 시간대에 추가로 설정하였다. 즉, 오전 시간에는 적산일사량과 배지수분함량을 기준으로 급액 하였고, 오후 시간에는 적산일사량만을 이용하여 급액하였다. 대조구인 타이머 제어는 급액 시간을 농가 관행으로 가장 많이 쓰고 있는 하루 5회 8시, 10시, 12시, 14시, 16시로 고정하였다.

3. 생육, 품질 및 배액의 화학성 조사

농촌진흥청 특성조사 표준매뉴얼(RDA, 2017)에 따라 딸기의 생육, 품질, 수량 특성을 측정하였다. 생육 특성 조사항목은 초장, 엽병장, 엽수, 엽장, 엽폭, 관부직경이다. 완전히 전개된 잎 중 신엽으로부터 세 번째 잎을 기준으로 엽장, 엽폭, 엽병장을 측정하고 초장은 지체부로부터 수체의 최상위엽을 수직으로 세위 길이를 측정하였다. 관부직경은 관부의 최대 직경을 디지털캘리퍼스(CD-20CPX, Mitutoyo Corp., Kawasaki, Japan)로 측정하였다. 과실은 11월 15일부터 3월 26일까지 1주일 간격으로 수확하였다. 표준매뉴얼에 따라 중량 25g 이상 과실은 특과, 17g 이상 25g 미만은 대과, 12g 이상 17g 미만은 중과, 11g 이하는 소과로 분류하였다. 상품과는 특과, 대과, 중과이며 소과와 기형과는 비상품과로 분류하여 상품과율을 조사하였다. 과실 경도는 경도계(FHM-1, Takemura Techno Works Co., Ltd, Kyoto, Japan)를 이용하여 $\text{g}\cdot\text{mm}^{-2}$ 단위로 측정하였으며, 가용성 고형물 함량(Soluble solids content, SSC)은 휴대용 당도계(PAL-1, ATAGO, Co., Ltd, Tokyo, Japan)를 이용하여 $^{\circ}\text{Brix}$ 단위로 나타내었다. 과중, 과장, 과폭을 조사하여 과실 품질을 비교 분석하였다.

배액의 EC와 pH를 분석하기 위하여 처리 별로 배액을 3-4일 간격으로 수집한 후 EC 및 pH 미터(HI 9813-6N, Hanna Instruments, Rhode Island, USA)를 사용하여 배액의 EC와 pH를 측정하였다. 수분이용효율(Water use efficiency, WUE)은 식물체의 보유함수량 대비 지상부 생육과 과실 수량을 얻

마나 생산하였는지 나타내는 지표로, 지상부와 과실의 생체 중에서 보유함수량을 나누어 수분이용효율을 계산하였다 (Choi 등, 2016).

4. 통계분석

통계 분석은 Sigmaplot 프로그램(SigmaPlot 8.0, Systat Software, Inc., Chicago, IL, USA), SAS 프로그램(Statistical Analysis System, V. 9.2, Cary, NC, USA), Excel 프로그램(Microsoft Office Professional Plus 2016, Redmond, WA, USA), R 프로그램(R 4.0.2, R Foundation)을 이용하였고, 평균 간 비교는 Duncan의 다중검정(Duncan's multiple range test, $p \leq 0.05$)을 이용하였다.

결과 및 고찰

재배기간 급액량과 배액량을 조사한 결과(Fig. 2), 타이머 제어에 의한 급액 방법보다 $100\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 기준 급액 시 급액량이 많았고, $150\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 기준 급액 시 비슷하였으며 $250\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 기준 급액 시 타이머 제어 방법보다 낮은 급액량을 나타냈다. 적산 일사량 $250\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 기준에서 일일 급액량과 배액량이 가장 적

었고 $100\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 기준에서 가장 많았다. 타이머 제어 시 평균 일일 주당 급액량은 220mL 로 나타났고, $100, 150, 250\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 에서 각각 $249, 230$ 및 171mL 로 조사되었다. $150\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 기준 급액 시 타이머 제어와 비슷한 수준의 급액량을 나타낸 것을 알 수 있다. 적산 일사량 기준이 낮아질수록 급액량이 증가하였는데 $100\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 기준 급액 시 급액량은 $250\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 처리구 대비 46% 많았다. 이는 적산 일사량 기준이 클수록 관수 시점에 도달하는 시간이 오래 걸려 급액 횟수가 감소하고 따라서 급액량 또한 감소한 것으로 판단된다. 딸기 재배 시 일일 관수량은 주당 $200 - 300\text{mL}$ 로 알려져 있으며(RDA, 2019) $250\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 기준으로 급액 시 작물이 적정 생육을 유지하기 위한 필요량 보다 적은 양이 급액된 것으로 판단된다. 배액량 또한 급액량과 비슷한 양상을 나타내었으며 타이머 제어에 의한 급액 시 $250\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 기준 보다 배액량이 40% 많았다. FDR 센서를 이용한 딸기 자동 급액 제어 시 배지 수분 함량 50 - 60% 수준일 때 무배액 상태로 작물에 수분 스트레스를 주지 않는다고 하였으며 버려지는 배액을 최소화하여 효율적이고 환경 친화적인 양분과 수분의 이용이 가능하다고 하였고(Choi 등, 2016), 장미 수경 재배 시 FDR 센서를 이용하면 59%의 양액이 절약된다고 하였다(Farina 등, 2007). FDR 센서를 이용한 복합 제어 급

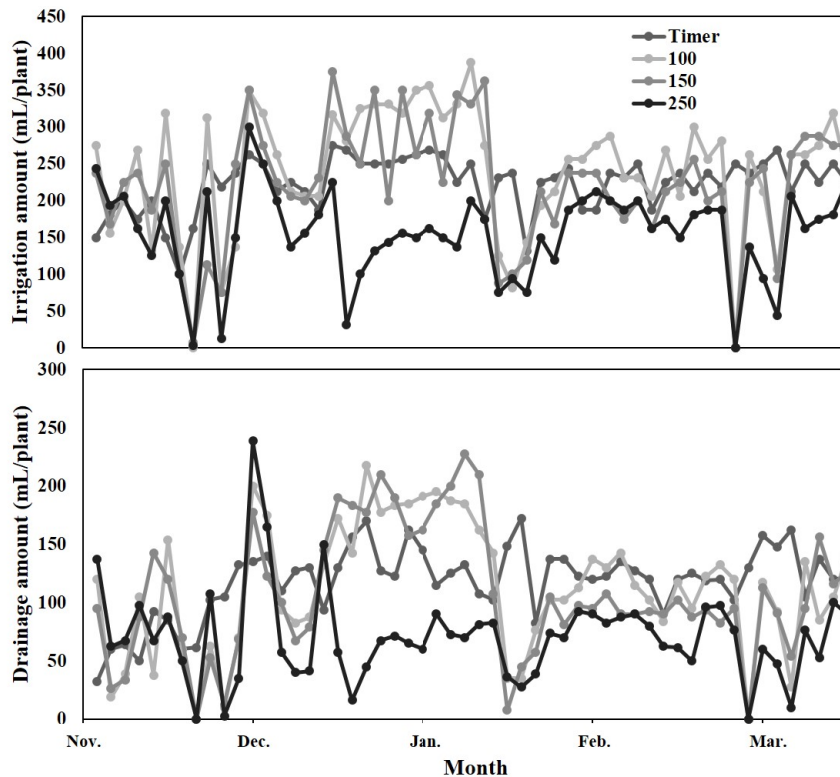


Fig. 2. Changes of irrigation and drainage amount of strawberry 'Sulhyang' as affected by the nutrient solution supplying system using different integrated solar irradiance levels and timer during growing period.

액 방법을 이용하면 기존의 타이머 제어법 보다 배양액을 효율적으로 사용할 수 있을 것으로 판단된다. 평균 일일 배액량은 타이머 제어, 100, 150, 250J·cm⁻²에서 각각 119, 118, 108 및 84mL로 조사되었으며 복합 제어 중 100J·cm⁻² 급액 시 배액량이 가장 많았다. 배액량에서 급액량을 나눈 배액률은 전체 복합 제어 처리구에서 47–49%로 비슷한 수준이었다 (Data not shown).

재배 기간 급액 EC와 배액 EC의 변화를 조사하였다(Fig. 3). 급액 EC는 모든 처리구에서 평균 1.12–1.15ds·m⁻¹ 수준으로 공급하였다. 처리 별 급액량이 다르기 때문에 배액 EC가 달라졌는데 타이머 제어, 100, 150, 250J·cm⁻²에서 평균 배액 EC는 각각 1.06, 1.05, 1.09 및 1.17ds·m⁻¹로 측정되었다. 타

이머 제어 보다 250J·cm⁻¹ 급액 기준에서 10% 높은 배액 EC를 나타내었다. 복합 제어 시 적산일사량 250J·cm⁻¹ 기준으로 급액하면 최대 배액 EC 1.54ds·m⁻¹를 나타내며 가장 높은 값을 가졌다. 코이어를 이용한 멜론 수경재배 시 급액량을 증가 시킴에 따라 배액률은 상승하였고 배액의 EC는 낮아졌으며 급액량이 많을 때는 급액 EC 수준의 영향이 적다고 하였으며 (Lim과 Choi 등, 2021), 토마토 수경재배 시 적산일사량 기준이 낮아 급액량이 많은 처리는 적산일사량 기준이 높은 처리보다 배액률이 높고 배액 EC가 낮아졌다는 보고가 있다 (Choi, 2017). 250J·cm⁻¹ 기준으로 급액 시 급액량이 가장 적으므로 배액률이 가장 작고 배액의 EC가 가장 높은 것과 일치하는 결과이다. 급액 pH는 모든 처리구에서 평균 7.03–7.13

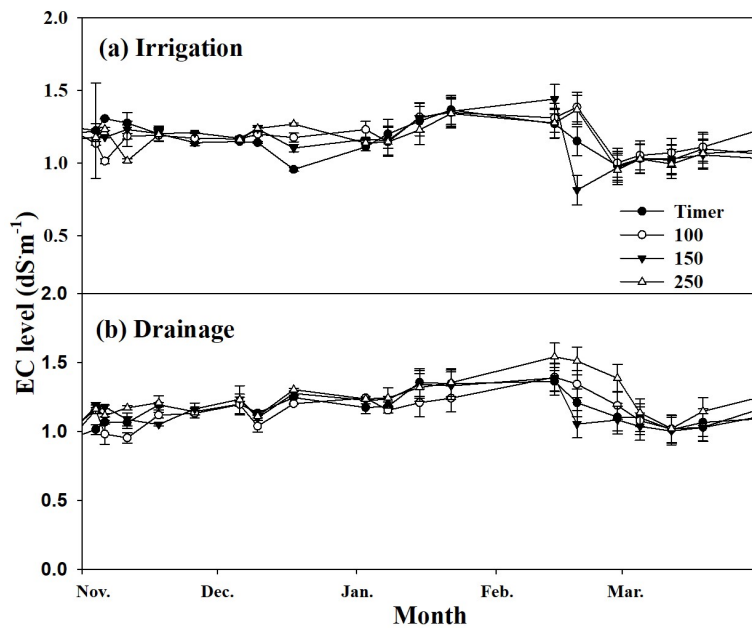


Fig. 3. Irrigation and drainage EC level of strawberry ‘Sulhyang’ as affected by the nutrient solution supplying system using different integrated solar irradiance levels and timer during growing period.

Table 1. Leaf characteristics of strawberry ‘Sulhyang’ as affected by the nutrient solution supplying system using different integrated solar irradiance levels and timer at 85 and 197 days after transplanting.

Integrated irradiance level (J·cm ⁻²)	Early harvest season						Late harvest season					
	No. of leaves	Plant height (cm)	Petiole length (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Crown diameter (mm)	No. of leaves	Plant height (cm)	Petiole length (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Crown diameter (mm)
Timer	8.9 a ^z	26.4 a	12.3 b	11.6 a	8.4 a	16.7 a	10.8 a	25.9 a	6.9 b	6.8 b	5.3 b	22.0 a
100	9.3 a	27.1 a	14.3 a	11.4 a	8.4 a	16.0 a	9.1 c	25.5 a	11.6 a	10.1 a	8.1 a	21.9 a
150	8.7 a	27.1 a	13.8 ab	11.3 a	8.0 a	16.2 a	9.7 b	27.2 a	12.7 a	10.6 a	8.3 a	20.9 b
250	9.1 a	26.6 a	14.0 a	11.2 a	8.2 a	16.3 a	10.2 b	26.4 a	8.3 b	7.3 b	5.8 b	21.8 a

^zMean separation within columns by DMRT at 5% level.

수준으로 공급하였고 배액 pH는 7.27–7.50 수준으로 처리 간 유의한 차이가 나타나지 않았다(Data not shown).

급액 방법에 따른 딸기의 생육 조사 결과를 분석하였다 (Table 1). 생육 초기 단계에서 타이머 제어 시 생육 지표인 엽병 길이는 12.3cm로 복합 제어보다 유의적으로 가장 낮은 값을 나타내었고 적산 일사량과 배지 수분함량을 기준으로 한 급액 시 타이머 제어보다 12–16% 높은 값을 나타내었다. 생육 후기 조사 결과 엽병장, 엽장, 엽폭은 복합 제어 시 타이머 제어보다 높은 값을 나타내었다. 적산 일사량 기준에 따라 분석한 결과, 엽병장, 엽장, 엽폭은 100J·cm⁻²에서 각각 11.6, 10.1 및 8.1cm이고 150J·cm⁻²에서 12.7, 10.6, 및 8.3cm로 250J·cm⁻² 기준 처리구에 비하여 유의적으로 높은 값을 나타내었다. 150J·cm⁻² 처리구에서 250J·cm⁻² 기준 대비 엽병장, 엽장, 엽폭은 각각 53, 45 및 43% 높았다. 코어어 배지경에서 멜론 엽생육은 근권의 함수율의 영향을 받으며 함수율이 높은 처리구에서 엽생육이 우수하였다고 하였다(Lim과 Choi 등, 2021). 외부 환경 변화와의 상호작용이 없는 타이머 제어보다 외부 일사량, 증산량 등을 고려한 복합 제어에서 양호한 생육을 나타낸 것으로 보이며, 적산 일사량 기준이 낮아 일일 급액

량이 많은 처리구가 적산 일사량이 높은 처리구보다 근권 함수율이 높아 딸기 생육이 증진된 것으로 판단된다. 식물체 지상부의 생체중과 건물중을 조사한 결과(Fig. 4), 타이머 제어 시 생체중은 복합 제어 방법보다 적었다. 복합 제어 처리구 중 250J·cm⁻² 기준 급액 시 생체중이 유의하게 작았으며 100, 150J·cm⁻² 기준 급액 시 생체중은 각각 주당 223, 229g으로 250J·cm⁻² 대비 17, 20% 유의적으로 높은 값을 나타내었다. 건물중은 복합 제어 처리구 중 100J·cm⁻² 기준 급액 시 주당 58g으로 가장 높았고 250J·cm⁻² 기준 급액 시 48g으로 유의하게 가장 낮았다. 엽생육 조사 결과와 마찬가지로 급액량이 많은 100, 150J·cm⁻² 기준 처리구에서 생체중과 건물중이 높았으며 급액량이 적은 타이머 제어와 250J·cm⁻² 기준 처리구에서 무게가 적은 것을 알 수 있다. 급액량 감소는 근권 함수율이 낮아져 생육 억제, 건물중 감소 및 과실 성장 저해로 이어진다는 보고가 있으며(Hayata 등, 1998), 급액량이 높아질수록 딸기 생육이 증진된다는 것을 알 수 있다.

급액 처리 별 딸기 식물체 당 상품과의 무게와 개수를 조사하고 상품과율을 분석하였다(Table 2). 타이머 제어 시 상품과의 무게와 개수는 주당 130.2g, 7.0개로 적산 일사량과 배지

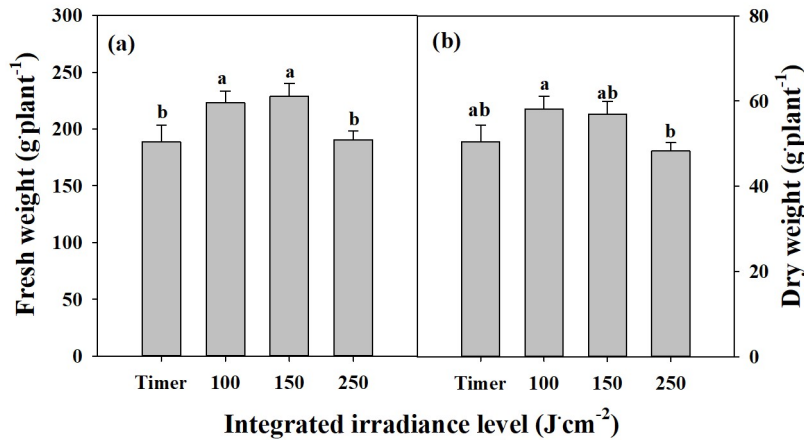


Fig. 4. Plant weight (a, fresh weight; b, dry weight) of strawberry ‘Sulhyang’ as affected by the nutrient solution supplying system using different integrated solar irradiance levels and timer during growing period.

Table 2. Number of marketable fruits and yield of strawberry ‘Sulhyang’ as affected by the nutrient solution supplying system using different integrated solar irradiance levels and timer.

Integrated irradiance level (J·cm ⁻²)	Marketable fruit yield (Above 10g)		Marketable fruit ratio (%)
	Yield (g·plant ⁻¹)	No. of fruits	
Timer	130.2 b ^z	7.0 b	76.9 b
100	215.9 a	10.5 a	85.9 a
150	196.6 a	9.5 a	83.1 a
250	181.9 ab	8.8 a	82.6 a

^zMean separation within columns by DMRT at 5% level.

함수율을 이용한 급액 처리 보다 유의적으로 적은 값을 나타내었다. 복합 제어 시 적산일사량 기준에 따른 상품과는 100J·cm⁻² 기준 급액 시 가장 높았으며 이는 250J·cm⁻² 기준보다 무게는 18.7%, 개수는 19.3% 높은 값이다. 상품과울 또한 타이머 제어 시 76.9%로 가장 낮은 값을 나타내었고 복합 제어 시 100J·cm⁻² 기준 급액 처리구에서 250J·cm⁻² 기준보다 3.3% 높은 85.9%를 나타내었다.

처리 별 재배 기간 총 수량을 분석하였다(Fig. 5). 타이머 제어 시 주당 130.2g으로 통계적으로 유의하게 가장 낮은 값을 나타내었다. 봄철 온도가 상승하고 증산량이 증가하면서 식물체가 필요로 하는 수분 함량이 증가하지만 타이머 제어는 이러한 환경 변화에 적절히 대응할 수 없기 때문인 것으로 판단되며 적산 일사량과 배지 수분 함량을 통한 급액 제어를 통해 딸기 수량성을 증진시킬 수 있을 것으로 판단된다. 적산 일사량 기준에 따른 총 수량은 유의한 차이가 나지 않았지만 100, 150, 250J·cm⁻² 순으로 높은 수량을 나타내었다. 그러나 12월 생산량은 100J·cm⁻²에서 통계적으로 유의하게 높은 수량을 보였다. 적산 일사량 기준이 작아 급액 횟수가 증가하여

급액량이 많을수록 딸기의 조기 수확량이 증가하는 것으로 판단된다.

수확한 과실의 품질 특성을 조사한 결과(Table 3), 과실 한 개 당 중량은 복합 제어 급액 방법 시 타이머 제어보다 유의하게 높은 값을 나타내었다. 250J·cm⁻² 기준 처리구에서 타이머 제어 방법보다 과실 무게가 27% 높았다. 펠라이트 오이 재배 시 적산 일사량을 이용하여 급액 제어 하였을 때 근권 환경의 영양소 균형과 수분을 유지하는 데 효과가 있었고, 반면에 타이머 제어 시 근권 양액의 영양소 비율을 균형 있게 유지해 줄 수 없다고 하였다(Roh와 Lee, 1997). 적산 일사량을 이용한 복합 제어 처리구가 타이머 제어보다 균형 있는 영양소 비율을 나타내어 엽생육이 증진 되었고 이러한 생육 증가가 과실 중량에 영향을 미친 것으로 판단된다. 평균 과중은 총 급액량 뿐만 아니라 일사량, 배지 수분 함량, 작물 증산량 등이 복합적으로 작용하여 적정 재배 환경이 유지 될 때 증가하는 것으로 판단된다.

2019년 12월부터 2020년 3월까지 수확기 딸기 식물체의 수분흡수특성을 분석하였다(Table 4). 총 급액량은 100J·cm⁻² 기준 급액 시 주당 32.4L로 가장 적은 급액량을 나타낸 250J·cm⁻² 처리구보다 50% 높은 수치였다. 타이머 제어 시 복합 제어 급액 방법보다 배액량이 많았으며, 복합 제어 처리 중 100J·cm⁻² 기준 급액 시 배액량은 주당 15.7L로 배액량이 가장 적은 250J·cm⁻² 처리구보다 53% 많은 배액을 배출하였다. 총 급액량에서 배액량을 뺀 보유함수량은 100J·cm⁻² 기준 급액 시 주당 16.1L로 250J·cm⁻² 기준 급액 대비 49% 높은 함수량을 가졌다. WUE를 분석한 결과, 타이머 제어 시 주당 26.2g·L⁻¹로 복합 제어를 이용한 급액 방법보다 낮은 수분이용효율을 보였고, 가장 높은 WUE를 나타낸 250J·cm⁻² 처리구 대비 31% 낮은 값을 나타내었다. 이는 FDR 센서를 이용한 딸기 급액 제어 시 타이머 제어보다 1.2배 높은 WUE를 나타냈다는 보고와 일치하는 결과이다(Choi 등, 2016).

주당 총 급액량, 보유함수량, WUE간의 상관분석 결과(Fig. 6), 급액량과 보유함수량 사이에 $r^2 = 0.66, p < 0.01$ 의 양

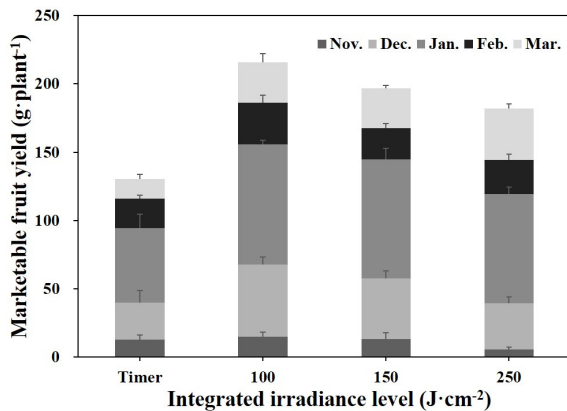


Fig. 5. Monthly marketable fruit yield of strawberry ‘Sulhyang’ as affected by the nutrient solution supplying system using different integrated solar irradiance levels and timer during growing period.

Table 3. Fruits characteristics of strawberry ‘Sulhyang’ as affected by the nutrient solution supplying system using different integrated solar irradiance levels and timer at 121 days after transplanting.

Integrated irradiance level (J·cm ⁻²)	Fruit weight (g)	Fruit height (cm)	Fruit width (cm)	Soluble solids content (°Brix)	Firmness (g·mm ⁻²)
Timer	30.3 b ^z	4.9 a	4.3 a	11.0 a	27.0 a
100	37.4 a	5.2 a	4.4 a	11.2 a	26.9 a
150	35.2 a	5.1 a	4.4 a	11.0 a	26.4 a
250	38.6 a	5.0 a	4.4 a	11.2 a	26.8 a

^zMean separation within columns by DMRT at 5% level.

의 상관관계가 나타났고, WUE와는 $r^2 = -0.6, p < 0.05$ 음의 상관관계가 나타났다. 적산 일사량 기준이 낮아 급액량이 높은 처리구일수록 보유함수량이 높고, WUE는 낮았다. 보유함수량과 WUE는 $r^2 = -0.93, p < 0.001$ 의 높은 음의 상관관계가 나타났다. WUE는 보유함수량이 낮을수록 높게 나타나는 지표이며 보유함수량이 가장 낮은 $250\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 기준 급액 시 WUE가 가장 높은 것을 알 수 있다. 급액 방법에 의한 수분흡수특성을 분석한 결과, 일사량과 배지 수분함량 등 기상 환경

및 근권 환경 센싱을 통한 복합 제어가 타이머 제어보다 더 효율적인 급액 방법인 것으로 판단된다.

적 요

우리나라 딸기 재배는 시설 재배로 이루어지고 있으며, 대부분 농가의 급액 관리는 재배자의 경험을 토대로 타이머 제어 방식으로 이루어지고 있다. 타이머 급액 방법은 재배 환경,

Table 4. Total irrigation volume per plant, total drainage volume, total retained volume, and water use efficiency(WUE) of strawberry ‘Sulhyang’ as affected by the nutrient solution supplying system using different integrated solar irradiance levels and timer from December 2019 to March 2020.

Integrated irradiance level ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$)	Total irrigation volume ($\text{L}\cdot\text{plant}^{-1}$)	Total drainage volume ($\text{L}\cdot\text{plant}^{-1}$)	Total retained volume ($\text{L}\cdot\text{plant}^{-1}$)	Water use efficiency ($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}/\text{plant}$)
Timer	28.8 b ^z	15.8 a	12.2 a	26.2 a
100	32.4 a	15.7 a	16.1 a	27.3 a
150	31.5 a	14.2 a	15.2 a	28.0 a
250	21.6 c	10.3 a	10.8 a	34.4 a

^zMean separation within columns by DMRT at 5% level.

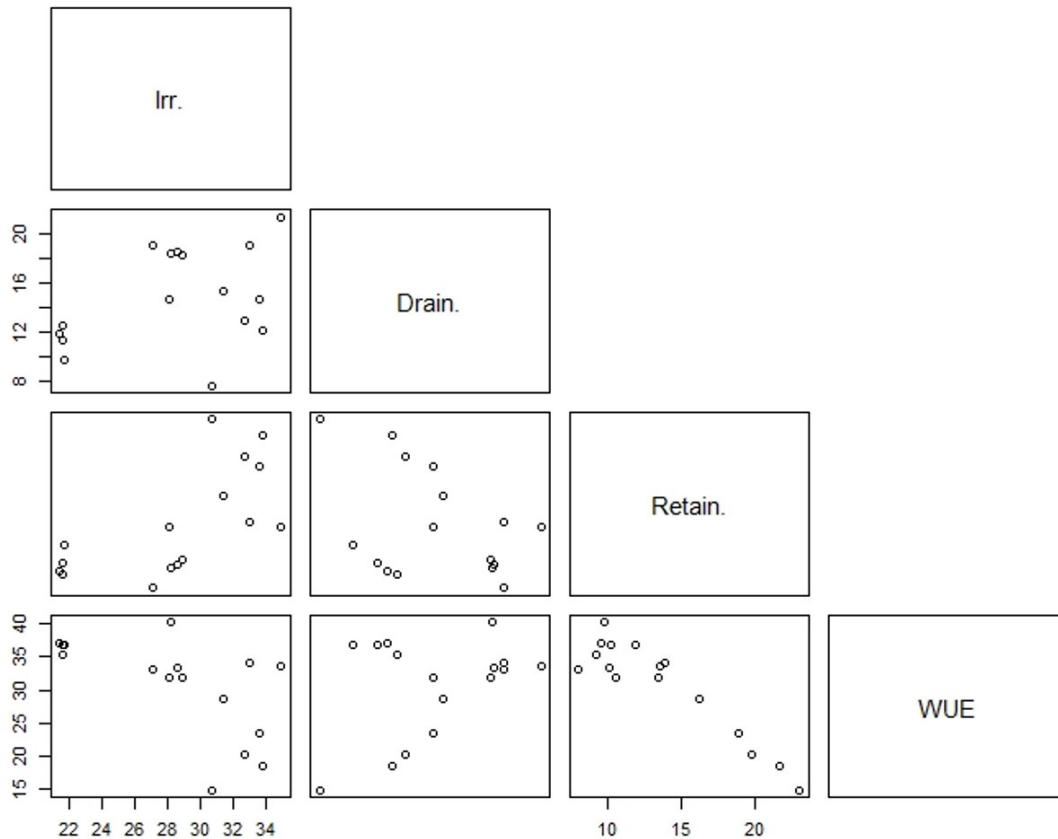


Fig. 6. Scatter plot matrix between total irrigation volume per plant (Irr.), total drainage volume (Drain.), total retained volume (Retain.), and water use efficiency (WUE) of strawberry ‘Sulhyang’ as affected by the nutrient solution supplying system using different integrated solar irradiance levels and timer from December 2019 to March 2020.

작물의 생육 단계, 배지 수분 함량 등을 고려하기 어려워 작물을 최적 수준으로 관리하지 못하고, 급액 관리의 정확성이 결여되는 문제점이 있다. 적산 일사량과 배지 수분함량을 이용한 급액 방법은 작물의 생육 상태에 따라 정밀하게 양액을 공급하는 친환경적인 방법이다. 본 연구는 코이어배지를 이용한 딸기 수경재배에서 적산일사량과 배지 수분함량을 이용한 복합 급액 제어와 타이머 제어 급액 방법을 비교하고 복합 급액 제어 시 최적의 적산 일사량 기준을 설정하고자 수행하였다. 적산일사량 급액 방법은 외부 일사량을 기준으로 100, 150, 250J·cm⁻²에 도달하면 자동으로 급액하며 배지 수분함량이 60% 미만이면 강제 급액하고, 1회 급액량은 50mL로 공급하였다. 타이머 제어는 대조구로 설정하였다. 급액을 개시하는 적산 일사량 기준이 작을수록 일일급액량이 많았으며 100J·cm⁻² 기준 급액 시 급액량은 250J·cm⁻² 처리구 대비 46% 많았다. 지상부 생체중과 건물중 모두 복합 급액 제어 방법이 타이머 제어보다 높았으며, 100, 150J·cm⁻² 처리구에서 지상부 생체중이 높았고 100J·cm⁻² 처리구에서 건물중이 유의하게 높은 값을 나타냈다. 수량 또한 타이머 제어 방법보다 복합 제어 방법에서 유의하게 높았으며 적산 일사량 기준이 작을수록 초기 수량이 증가하였다. 평균 과중은 타이머 제어 급액 시 가장 낮았다. 본 연구 결과 딸기의 정밀 급액 관리를 위하여 적산 일사량과 배지 수분 함량 센서를 이용한 복합 제어 활용 가능성이 확인하였다.

추가 주제어 : 급액, 상관분석, 수분이용효율, FDR

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구개발사업(과제번호: PJ01425601)의 지원에 의해 수행되었음.

Literature Cited

- 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 Plant Fac* 22:248-255. doi:10.12791/ksbec.2013.22.3.248
- Choi K.L. 2017, Characteristics of water and nutrient uptake in hydroponics and management of nutrient solution in tomato cultivation using coir substrate. PhD Dissertation, Gyeongsang Natl Univ., Jinju, Korea, pp 37-39. (in Korean)
- Choi K.Y., E.Y. Choi, I.S. Kim, and Y.B. Lee 2016, Improving water and fertilizer use efficiency during the production of strawberry in coir substrate hydroponics using a FDR sensor-automated irrigation system. *Hortic Environ Biotechnol* 57:431-439. doi:10.1007/s13580-016-0072-2
- Dorais M., A. Papadopoulos, and A. Gosselin 2001, Greenhouse tomato fruit quality. *Hort Rev* 26:239-319. doi:10.1002/9780470650806.ch5
- Farina E., F.D. Battista, and M. Palagi 2007, Automation of irrigation in hydroponics by FDR sensors-Experimental results from field trials. *Acta Hort* 747:193-196. doi:10.17660/ActaHortic.2007.747.21
- Hayata Y., T. Tabe, S. Kondo, and K. Inoue 1998, The effects of water stress on the growth, sugar and nitrogen content of cherry tomato fruit. *J Jpn Soc Hortic Sci* 65:759-766. (in Japanese) doi:10.2503/jjshs.67.759
- Kim H.J. and Y.S. Kim 2000, Effect of irrigation control by time and integrated solar radiation on muskmelon quality in perlite culture. *J Bio-Env Con* 9:66-72. (in Korean)
- Kim H.J., S.W. Ahn, K.H. Han, J.Y. Choi, S.O. Chung, M.Y. Roh, and S.O. Hur 2013, Comparison study of water tension and content characteristics in differently textured soils under automatic drip irrigation. *Protected Hort Plant Fac* 22:341-348. (in Korean) doi:10.12791/ksbec.2013.22.4.341
- KOSTAT 2021, Agricultural area survey. Available via https://kosis.kr/statHtml/statHtml.do?orgId=101&tblId=DT_1ET0017&conn_path=I2 Accessed 28 June 2021
- KTSP 2021, Trade statistics service. Available via <https://www.bandtrass.or.kr/customs/total.do?command=CUS001View&viewCode=CUS00201>
- Ledieu J., Ridder, P.D., Clerck, P.D. and S. Dautrebande 1986, A method of measuring soil moisture by time-domain reflectometry. *J Hydrol* 88:319-328. doi:10.1016/0022-1694(86)90097-1
- Lee S.Y. and Y.C. Kim 2019, Water treatment for closed hydroponic systems. *J Korean Soc Environ Eng* 41:501-513. (in Korean) doi:10.4491/KSEE.2019.41.9.501
- Lim M.Y., S.H. Choi, G.L. Choi, S.H. Kim, and H.J. Jeong 2021, Effects of irrigation amount on fruiting period and EC level by growth period on growth and quality of melon (*Cucumis melo* L.) using coir substrate hydroponics during autumn cultivation. *Hortic Sci Technol* 39:446-455. doi:10.7235/HORT.20210040
- MAFRA 2021, Agricultural production index. Available via <https://mafra.go.kr/bbs/mafra/131/327493/artclView> Accessed 7 July 2021
- Na T.S., J.G. Kim, K.J. Choi, G.Y. Gi, and Y.K. Yoo 2008, Study on optimum water supply by solar radiation in cut rose(*Rosa hybrida* cv Cardinal). *J Bio-Env Con* 17:215-220. (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) doi:10.12791/KSBEC.2014.23.2.158

- Park S.T., K.Y. Choi, and Y.B. Lee 2010, Water content characteristics of coconut coir substrates on different mixture ratios and irrigation rates and times. *Kor J Hort Sci Technol* 28:227-233. (in Korean)
- RDA 2017, Standard manual of characteristics investigation for breeding new varieties of strawberries. RDA, Wanju, Korea, pp 4-29.
- RDA 2018, Smart greenhouse guideline. RDA, Haman, Korea, pp 68-73.
- RDA 2019, Manual for strawberry cultivation. RDA, Wanju, Korea, pp 144.
- 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) doi:10.12791/ksbec.2013.22.4.378
- Rhee H.C., T.C. Seo, G.L. Choi, M.Y. Roh, and M.W. Cho 2010, Effect of air humidity and water content of medium on the growth and physiological disorder of paprika in summer hydroponics. *J Bio-Env Con* 19:305-310. (in Korean)
- Roh M.Y., and Y.B. Lee 1997, Predictive control of concentration of nutrient solution according to integrated solar radiation during one hour in the morning. *Acta Hort* 440:256-261. doi:10.17660/ActaHortic.1996.440.45
- Sim S.Y., and Y.S. Kim 2009a, Improvement of water and fertilizer use efficiency by daily last irrigation time for tomato perlite bag culture. *J Bio-Env Con* 18:408-412. (in Korean)
- Sim S.Y., and Y.S. Kim 2009b, Management of dripper position in tomato perlite bag culture. *J Bio-Env Con* 18:413-419. (in Korean)
- Starr J.L., and I.C. Paltineanu 1998, Soil water dynamics using multisensor capacitance probes in nontraffic interrows of corn. *Soil Sci Soc Am J* 62:114-122. doi:10.2136/sssaj1998.03615995006200010015x
- Topp G.C., Davis, J.L. and A.P. Annan 1980, Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour Res* 16:574-582. doi:10.1029/WR016i003p00574
- Veldkamp E., and J.J. O'Brien 2000, Calibration of a frequency domain reflectometry sensor for humid tropical soils of volcanic origin. *Soil Sci Soc Am J* 64:1549-1553. doi:10.2136/sssaj2000.6451549x
- Yoo S.H., Park, M.E., Han, G.H. and B.S. Bae 1999, Monitoring of water content and electrical conductivity in paddy soil profile by time domain reflectometry. *Kor J Soil Sci Fertil* 32:365-374.