

인공광형 식물공장형육묘시스템에서 양수분이용 효율에 따른 가지과 채소의 접수와 대목 생산을 위한 적정 관수법 확립

문유현¹⁺ · 우의정¹⁺ · 심하선¹ · 이태연¹ · 신하람¹ · 안세웅² · 김성겸³  · 조정수^{4*}

¹경북대학교 대학원 원예학과, ²한국농수산대학교, ³경북대학교 원예과학과, ⁴전남대학교 원예생명공학과

Establishment of Proper Irrigation Method for Scion and Rootstock Production of Solanaceous Vegetables According to Water Use Efficiency in a Plant Factory with Artificial Lighting

Yu Hyun Moon¹⁺, Ui Jeong Woo¹⁺, Ha Seon Sim¹, Tae Yeon Lee¹, Ha Rang Shin¹, Sewoong An², Sung Kyeom Kim³ , and Jung Su Jo^{4*}

¹Department of Horticultural Science, Graduate School of Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

²Korea National University of Agriculture and Fisheries, Jeonju 54874, Korea

³Department of Horticultural Science, College of Agricultural and Life Science, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

⁴Department of Horticulture, College of Agricultural and Life Science, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

*Corresponding author: jungsu@jnu.ac.kr

[†]These authors contributed equally to this work.

Received: February 22, 2023

Revised: May 2, 2023

Accepted: May 8, 2023

 OPEN ACCESS



HORTICULTURAL SCIENCE and TECHNOLOGY
41(6):686-694, 2023

URL: <http://www.hst-j.org>

pISSN : 1226-8763

eISSN : 2465-8588

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright©2023 Korean Society for Horticultural Science.

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(과제번호: PJ017029012022)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Abstract

A plant factory forms a closed ecosystem unaffected by external weather and can control environmental variables (temperature, relative humidity, light, etc.). Currently, plant factories equipped with artificial lighting are in the limelight as a means of sustainable agricultural development. However, the efficient irrigation method for seedling production needs to be improved in a closed-type cultivation system. A study was conducted to reveal the appropriate irrigation regime through a comparison of the growth of the seedlings and the water use efficiency when scions and rootstocks of tomato and hot pepper are cultivated in the plant factory with artificial lighting. Water treatment was set to 100% of the moisture content level of the plug tray's weight when each tray's topsoil was sufficiently wet, and irrigation was performed when the water content level reached 80%, 70%, 60%, and 50%. The dry matter production of tomato scions was the highest in the 70% treatment, and rootstocks were the highest in the 50% treatment. However, the water use efficiency of tomato scions and rootstocks was the highest in the 70% and 50% treatments, respectively. The dry matter production of hot pepper scions was the highest in the 50% and 70% treatments, and hot pepper rootstocks were the highest in the 80% treatment. The water use efficiency of hot pepper scions and

rootstocks was the highest in the 50% treatment. This study confirmed that the seedling growth and water use efficiency were significantly affected by different irrigation regimes during the raising seedling period of tomatoes and hot peppers in the plant factory with artificial lighting. It is expected to reduce waste of water resources through proper irrigation.

Additional key words: *Capsicum annuum*, grafted seedling, *Solanum lycopersicum*, vertical farm, water resource

서 언

증가하는 인구는 기후 변화의 위협에 직면하면서 식량 공급의 필요성을 증가시키고 있다. 자원은 점점 더 제한되고, 농경지의 황폐화가 진행되며, 대기, 토양 및 물의 오염이 더욱 가시화되고 있다(Pandey, 2020). 진보적인 농업 지속가능성을 달성하기 위해 전 세계적으로 다양한 해결책이 시행되고 있다. 그 중 최근 몇 년 동안 농업 분야에서 지속 가능한 발전의 수단으로 실내 수직 농업이 각광받고 있다(Kozai et al., 2019; Vitoshkin and Haslavsky, 2020; Jurga et al., 2021). 실내 수직 농업은 폐쇄적인 생태계가 형성되어 작물 생장에 가장 적합한 환경 매개변수(기온, 상대습도, 빛 등) 제어를 통해 수율 극대화를 이룰 수 있다(Jurga et al., 2021). 실내 수직 농장의 형태인 폐쇄형 육묘시스템은 여름철 고온 및 겨울철 저일조 등의 이상 기후 대비한 우량 묘 생산을 위한 대책으로 가능성을 보여주었다(An et al., 2020; An, 2021).

2018년 육묘업체의 작목별 판매액 16,323,362만원 중 채소묘가 전체의 81.7%를 차지하며, 그 중 가지과 작물인 토마토 및 고추가 상당수를 차지하고 있다(Park, 2020). 토마토와 고추는(육묘과정에서) 토양 매개 병원균 및 해충, 다양한 환경에서의 수확량 극대화를 위해 접목묘를 사용해오고 있다(Oda, 1999; Yetisir and Sari, 2003; Kumar et al., 2015; Roupheal et al., 2016). 하지만, 일정치 못한 형태의 접수 및 대목으로 접목 생산 시 종종 작물 수확량과 품질에 예측할 수 없는 영향을 미치며(Mauro et al., 2020), 여름철 고온 및 겨울철 저일조 등의 이상 기후에 따라 잦은 빈도로 발생하고 있어 사계절 균일한 규격의 채소 공정묘를 생산하는데 어려움이 증가하고 있다(An et al., 2021). 그렇기 때문에 토마토와 고추 접수 및 대목은 수직농장과 같은 폐쇄된 환경에서 재배될 수 있는 주요 후보작물이다.

하지만, 수직농장의 형태인 폐쇄형 육묘시스템은 육묘업체별 보유 비율이 5%에 불과하여(Park, 2020) 관수 방식이 정형화 되어있지 않다. 관수 수준이 작물 생장에 미치는 영향을 식별하는 것은 성공적인 물 관리를 위해 매우 중요하다(Lee and Kim, 2021; Lee et al., 2021; Lim et al., 2021; Tavan et al., 2021). 관수 관리는 채소의 생장, 수확량 및 품질에 영향을 미친다. 관수 부족과 과잉 모두 작물에 부정적인 영향을 미칠 수 있다(Pignata et al., 2017). 온실 내 토마토 육묘 시 양수분이용효율을 높이기 위한 시도(Shibuya et al., 1997)는 있었지만, 증발산량에 대한 건물생산비 즉 작물 생육은 고려한 것으로 작물 생육은 고려하였지만, 실제 양수분이용량을 고려하지 않았다. 양수분이용효율이란, 작물 생육에 적합한 양수분관리를 위한 지표로 사용될 수 있다(Rho et al., 2023).

폐쇄형 육묘시스템 내 관개시스템은 저면관수를 대부분 이용하고 있으며, 양수분이용효율을 높이기 위한 관수 일정에 관한 연구는 미흡한 실정이다. 관수 시점의 임계값을 정의하기 위해 일반적으로 사용되는 기준에는 물의 유전 상수가 측정되고, 수분 함량과 관련된 방법뿐만 아니라 물의 중량 측정을 비롯한 다양한 접근 방식을 통해 도출될 수 있는 기질의 체적 수분 함량 측정 등이 포함될 수 있다(Jones, 2007). 하지만, 폐쇄형 육묘시스템 내에서 이를 통한 관개 방식을 채택하기에는 제약이 많은 실정이다(An et al., 2020). 만약 폐쇄형 육묘시스템 내에서 로드셀을 통한 무게 측정을 이용한다면 적정 관수 개시점에 관수를 진행할 수 있을 것이다. 특히, 양수분량은 작물의 관수 개시점을 달리하여 절약할 수 있다. 하지만, 관수 개시점을 달리하면 작물 생장에 어떤 영향을 미치는지도 확인할 필요가 있기 때문에 양수분이용효율을 통해 이를 확인하였다. 따라서, 본 연구는 과도한 물 사용으로 인한 환경에 미치는 악영향을 최소화하면서 원활한 작물 생장이 가능하도록 최적화된 관개 수준을 구명하기 위해 실시되었다.

재료 및 방법

식물재료 및 육묘환경

토마토 접수는 ‘라피토’(Farm Hannong Co., Ltd, Korea), 대목은 ‘B블로킹’(Koregon Co., Ltd, Korea), 고추 접수는 ‘신흥’(Danong Co., Ltd, Korea), 대목은 ‘탄탄’(Nongwoo Bio Co., Ltd, Korea)을 배양기(LBI-500E, Daihan Labtech Co., Ltd, Korea) 25°C, 암 상태에서 3일간 최아시켰다. 토마토 접수는 128공 셀 트레이(2.8 × 2.8cm), 토마토 대목, 고추 접수 및 대목은 105공 셀 트레이(3.3 × 3.3cm)에 육묘용 상토(Numberone Sangto, Cham Grow., Inc, Korea)를 충전한 후, 관수 4처리당 3반복으로 각 12 트레이를 파종하였다. 파종 후 소립 버미큘라이트(1mm)를 이용해 복토해주었다. 식물공장형육묘시스템에서 항온·항습(25°C, 70%) 및 광량 약 238 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 설정하여 일장 16h로 설정하였으며, 광원은 white LEDs (SG-BAR-28W, Future Green Co. Ltd., Yongin, Republic of Korea)를 사용하였다. 토마토 접수, 대목 및 고추 대목은 총 16일간, 고추 접수는 총 17일간 육묘하였다. 육묘기간 중 파종 후 7일까지는 양분 없이 저면 관수를, 8일부터 원예연구소 육묘용 표준배양액을 EC 1.0dS/m 및 pH 6.0으로 저면 관수 하였다.

관수 처리

토마토와 고추는 파종 후 1일에 충분히 저면 관수 후 육묘 기간동안 로드셀을 이용해 무게 변화를 관찰하였다(Fig. 1A). 저면 관수는 5분동안 실시하였고, 트레이 내 상토가 충분히 적셔진 포장용수량 상태인 트레이 무게를 수분함량수준 100%로 설정하여, 각 3트레이를 수분함량수준 50, 60, 70, 그리고 80 ± 3% 수준이 되었을 때를 관수 개시점으로 각 4개의 처리구를 설정하였다. 관수 개시점이 되면 로드셀에 있던 트레이를 저면 관수 베드에 옮겨 관수 처리 후 다시 로드셀로 옮겨 무게 변화 관찰을 반복하였다.

접수 및 대목 성장과 양수분이용효율 평가

토마토와 고추 접수 및 대목의 생장은 초장, 경경, 엽수, 엽면적, 생체중 및 건물중을 조사하였다(Tables 1 and 2). 경경은 vernier calipers(CD-20CPX, Mitutoyo Co., Inc., Japan)를 이용하여 상배측에서 가장 두꺼운 부분을 측정하였고, 엽면적의 측정은 엽면적측정기(LI-3100c, LI-COR Co., Inc., USA)을 이용하였다. 그리고 각 생체중을 측정하고, 75°C 조건에서 3일간 건조한 후 건물중을 측정하였다. 측정한 성장 데이터 기반 양수분이용효율을 평가하기 위해 Compactness, LAI, WUE₁, WUE₂, WUE₃을 다음과 같이 계산하여 정량화 하였다.

$$\text{Compactness} = \frac{\text{shoot dry weight (mg)}}{\text{plant height (cm)}} \quad (1)$$

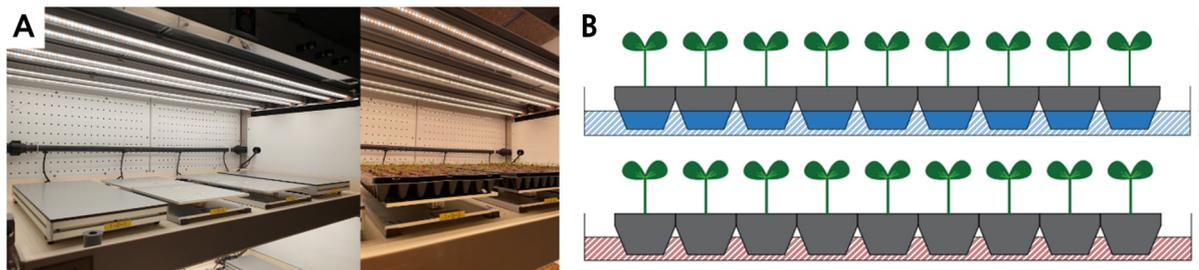


Fig. 1. (A) the plant factory transplant production system with an artificial lighting installed with load cells to manipulate the weight difference of the tray and (B) actual irrigation volume and remaining wasted water of ebb and flow in a plant factory with an artificial lighting.

$$\text{Leaf area index (LAI)} = \frac{\text{leaf area (cm}^2\text{)}}{\text{plug tray area (cm}^2\text{)}} \quad (2)$$

$$\text{Water use efficiency (WUE) based on irrigation volume (WUE}_1\text{)} = \frac{\text{shoot dry weight (mg)}}{\text{irrigation volume (L)}} \quad (3)$$

$$\text{WUE based on evapotranspiration (WUE}_2\text{)} = \frac{\text{shoot dry weight (mg)}}{\text{evapotranspiration rate (mL)}} \quad (4)$$

$$\text{WUE based on surplus water (WUE}_3\text{)} = \frac{\text{shoot dry weight (mg)}}{\text{surplus water (L)}} \quad (5)$$

Table 1. Plant height, stem diameter, Number of leaves, leaf area, shoot fresh and dry weight of tomato as affected by different irrigation regimes during cultivation in a PFAL

Irrigation treatments		Shoot length (cm)	Stem diameter (mm)	No. of leaves (/plant)	Leaf area (cm ²)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
Scion	50	7.11 ± 0.54 c ^z	2.06 ± 0.18 b	3.00 ± 0.00 b	23.9 ± 4.08 b	0.78 ± 0.11 b	0.04 ± 0.03 b
	60	7.78 ± 0.73 b	2.38 ± 0.20 a	4.00 ± 0.43 a	32.2 ± 5.47 a	1.14 ± 0.24 a	0.06 ± 0.02 b
	70	8.88 ± 0.40 a	2.41 ± 0.11 a	4.00 ± 0.00 a	33.0 ± 4.87 a	1.21 ± 0.20 a	0.09 ± 0.03 a
	80	9.08 ± 0.79 a	2.34 ± 0.16 a	3.83 ± 0.39 a	31.2 ± 6.35 a	1.19 ± 0.24 a	0.06 ± 0.04 b
Significance		***	***	***	***	***	***
Rootstock	50	8.57 ± 0.75a	2.90 ± 0.31 a	4.92 ± 0.29 a	36.3 ± 6.48 a	1.52 ± 0.27 a	0.10 ± 0.03 a
	60	9.03 ± 1.07 a	2.80 ± 0.21 a	4.67 ± 0.49 a	29.9 ± 6.29 b	1.45 ± 0.35 a	0.08 ± 0.03 a
	70	8.25 ± 1.42 a	2.96 ± 0.30 a	4.83 ± 0.39 a	39.6 ± 8.68 a	1.59 ± 0.43 a	0.08 ± 0.03 a
	80	7.16 ± 0.92 b	2.06 ± 0.28 b	3.92 ± 0.51 b	20.5 ± 6.62 c	0.70 ± 0.21 b	0.03 ± 0.02 b
Significance		***	***	***	***	***	***

^zMeans and standard errors within each column followed by the same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at $p < 0.05$. NS: non-significant. ***: significant at $p < 0.001$, **: significant at $p < 0.01$, *: significant at $p < 0.05$.

Table 2. Plant height, stem diameter, Number of leaves, leaf area, shoot fresh and dry weight of hot pepper as affected by different irrigation regimes during cultivation in a PFAL

Irrigation treatments		Shoot length (cm)	Stem diameter (mm)	No. of leaves (/plant)	Leaf area (cm ²)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
Scion	50	5.45 ± 0.50 b ^z	1.43 ± 0.12 ab	3.33 ± 0.65 ab	10.1 ± 1.71 a	0.43 ± 0.07 b	0.05 ± 0.01 a
	60	5.32 ± 0.53 b	1.37 ± 0.13 b	3.00 ± 0.74 b	10.1 ± 2.01 a	0.39 ± 0.08 b	0.03 ± 0.01 b
	70	5.92 ± 0.57 a	1.52 ± 0.11 a	3.67 ± 0.49 a	11.2 ± 2.96 a	0.54 ± 0.08 a	0.05 ± 0.01 a
	80	6.11 ± 0.47 a	1.50 ± 0.17 a	3.42 ± 0.79 ab	12.5 ± 4.11 a	0.55 ± 0.12 a	0.04 ± 0.02 ab
Significance		**	*	NS	NS	***	*
Rootstock	50	6.03 ± 0.54 b	1.78 ± 0.12 a	3.67 ± 0.49 a	13.6 ± 2.50 b	0.60 ± 0.12 b	0.06 ± 0.02 b
	60	6.21 ± 0.75 b	1.76 ± 0.22 a	3.58 ± 0.79 a	14.2 ± 4.96 b	0.63 ± 0.15 b	0.06 ± 0.02 b
	70	6.13 ± 0.68 b	1.85 ± 0.13 a	3.58 ± 0.51 a	16.0 ± 2.13 ab	0.71 ± 0.09 b	0.07 ± 0.02 b
	80	7.15 ± 0.81 a	1.85 ± 0.22 a	4.00 ± 0.74 a	17.7 ± 6.05 a	0.85 ± 0.21 a	0.10 ± 0.02 a
Significance		***	NS	NS	NS	***	***

^zMeans and standard errors within each column followed by the same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at $p < 0.05$. NS: non-significant. ***: significant at $p < 0.001$, **: significant at $p < 0.01$, *: significant at $p < 0.05$.

양수분이용효율은 전체 관수량, 로드셀을 통해 측정된 증발산량 및 저면 관수 시 발생하는 과잉의 수분(Fig. 1B)을 고려하였다.

통계 분석

확률화블록설계 4반복으로 트레이에서 임의로 각 3주의 토마토와 고추의 접수 및 대목 성장 데이터를 SAS 프로그램 (Statistical analysis system ver.9.4, USA)을 이용하여 산술 통계 값을 구하였고, 일원분산분석 이후 Duncan의 다중 범위 테스트를 통해 사후검증하였다.

결과 및 고찰

토마토와 고추 접수 및 대목의 육묘기간은 각각 16/16/17/16일이었다. 육묘기간 동안 토마토와 고추 접수 및 대목 모두 수분 함량수준 80% 처리구에서 가장 많은 관수를 하였다(Tables 3 and 4). 고추와 달리 토마토 접수 및 대목의 같은 수분함량수준 비교 시 관수 횟수 차이가 많이 났던 것은 128공 셀 트레이와 105공 셀 트레이의 각 셀 부피가 각각 21mL, 30mL로 트레이 내 충전된 상토양이 다르기 때문인 것으로 판단된다. 식물공장형육묘시스템 내 오이 접수 및 대목의 관수 횟수는 육묘기간 6일 동안 최대 2번이었다(An et al., 2020). 또한, 토마토 및 고추 접수와 대목 육묘 시, 관수처리를 수분함량수준 40, 50 및 60%로 두었을 때 육묘기간 15일 동안 각각 3, 4, 7번(토마토 접수 및 대목)/4, 6, 10번(고추 접수 및 대목) 관수하였다(An et al., 2021). 본 연구와 달리 재배 환경이 상대적으로 더 습한 환경(야간 온습도: 20°C/85%)과 짧은 재배 기간으로 관수 횟수에 차이가 있었던 것으로 판단된다.

파종 15일 후 토마토 접수의 정확한 건물생산량 평가를 위해 모종품질을 결정하는 중요한 지표로 활용될 수 있는 compactness (초장에 대한 건물생산비)를 활용하였다(Currey et al., 2012). 건물생산비는 정확한 비교를 위하여 증발산량 추정이 가능하도록 묘개체군의 개념을 도입하여(Shibuya et al., 1997; Park et al., 2020) 한 트레이에 파종된 묘를 한 집단으로 보았다. 그에 따른 WUE₁, WUE₂와 WUE₃는 각 처리(50%, 60%, 70% 및 80%)에서 70% 처리구가 0.28 ± 0.04mg/L, 2.88 ± 0.93mg/mL 와 0.31 ± 0.05mg/mL로 가장 효율이 높았고, 가장 낮은 80% 처리구보다 각각 약 115, 123 및 121% 높았다(Table 3). WUE₁은 실제 관수량에 따른 건물생산비를 알려준다. 이를 통해 실제 관수량 대비 70% 처리구가 물 이용 효율이 좋은 것을 알 수 있다. 하지만, WUE₁만을 가지고 실제로 낭비되는 물 자원에 대해 판단하는 것은 어렵다. WUE₂는 식물이 실제로 흡수한 물에 따른 이용효율을 알 수 있다. 마찬가지로, WUE₃는 낭비되는 물에 대한 건물생산비를 나타내므로 수치가 클수록 낭비되는 물이 적다는 것을 판단할 수 있다. 따라서, 70% 처리구가 실제 토마토 접수에 필요한 물을 효율적으로 공급하면서, 낭비되는 물이 가장 적다는 것을 확인할 수 있었다.

각 지표를 통해 70% 처리구가 관행방법으로 재배했을 때의 초장인 7-8cm(An, 2021)에 비해 도장하였지만, 토마토 접목 묘 생산 시 접수는 상배축을 사용하기에 문제가 없을 것이라 판단되었다. 또한, 건물생산량은 50% 처리구에서, 양수분이용효율은 80% 처리구에서 가장 낮았다. 토마토 접수 육묘 시 배지를 건조하게 수분관리하면 양수분 자원을 절약할 수 있지만, 양수분이용효율이 낮아져 성장에 부정적인 영향을 미치고, 습하게 관리 시 생장뿐만 아니라 양수분 이용량 또한 증가한 것으로 판단되었다.

토마토 대목의 compactness는 50% 처리구가 11.3 ± 3.26mg/cm로 가장 높았으며, 60% 및 70% 처리구의 8.63 ± 3.32mg/cm 및 9.56 ± 3.54mg/cm와는 유의적인 차이는 보이지 않았다(Table 3). 토마토 접수와 마찬가지로 80% 처리구에서 3.94 ± 2.48mg/cm로 가장 낮았다. WUE₁, WUE₂와 WUE₃는 각 처리(50%, 60%, 70% 및 80%)에서 50% 처리구가 0.57 ± 0.19mg/L, 4.28 ± 1.44mg/mL와 0.66 ± 0.22mg/mL로 유의적으로 가장 효율이 높았고, 가장 낮은 80% 처리구보다 각각 약

612, 651 및 633% 높았다.

고추 접수의 Compactness는 50% 처리구가 8.66 ± 2.36mg/cm로 가장 높았고, 70% 처리구의 8.10 ± 2.17mg/cm와는 유의적인 차이는 보이지 않았으며, 가장 낮은 60% 처리구 5.93 ± 1.57mg/cm보다 약 37% 높았다(Table 4). WUE₁, WUE₂와 WUE₃는 각 처리(50%, 60%, 70% 및 80%)에서 50% 처리구가 0.20 ± 0.06mg/L, 1.62 ± 0.49mg/mL와 0.35 ± 0.7mg/mL로 가장 효율이 높았고, 가장 낮은 80% 처리구보다 각각 약 122, 110 및 109% 높았다(Table 4). 파종 16일 후 고추 접수의 모든 처리구에서 생장은 관행 육묘 농가의 초장 6-7cm와 엽수 2.5-4매인 것을 고려하였을 때(An, 2021), 고추 접목묘 생산 시 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 하지만, 경경, 건물생산량과 관행적으로 알려진 접목묘의 출하 크기를 고려하였을 경우 50% 처리구가 적합하였다.

파종 15일 후 고추 대목의 Compactness는 건물중과 달리 70% 처리구 11.48 ± 3.36mg/cm와 80% 처리구 13.23 ±

Table 3. Compactness, leaf area index (LAI), water use efficiency based on irrigation volume (WUE₁), water use efficiency based on evapotranspiration (WUE₂), water use efficiency based on surplus water (WUE₃) and number of irrigation (No. of irrigation) of tomato scion and rootstock as affected by different irrigation regimes during the cultivation in a PFAL

Irrigation treatments	Compactness (mg/cm)	LAI	WUE ₁ (mg/L)	WUE ₂ (mg/mL)	WUE ₃ (mg/L)	No. of irrigation	
Scion	50	5.35 ± 3.73 b ^z	3.04 ± 0.52 b	0.20 ± 0.06 ab	2.01 ± 1.48 ab	0.22 ± 0.07 ab	7
	60	7.20 ± 2.19 ab	4.10 ± 0.70 a	0.22 ± 0.03 a	2.25 ± 0.68 a	0.24 ± 0.04 a	9
	70	9.91 ± 3.43 a	4.20 ± 0.61 a	0.28 ± 0.04 a	2.88 ± 0.93 a	0.31 ± 0.05 a	11
	80	6.61 ± 3.92 b	3.98 ± 0.81 a	0.13 ± 0.03 b	1.28 ± 0.77 b	0.14 ± 0.04 b	17
Significance	**	***	***	***	***		
Rootstock	50	11.30 ± 3.26 a	3.33 ± 0.59 a	0.57 ± 0.19 a	4.28 ± 1.44 a	0.66 ± 0.22 a	5
	60	8.63 ± 3.32 a	2.74 ± 0.58 b	0.37 ± 0.13 b	2.79 ± 0.97 b	0.43 ± 0.15 b	6
	70	9.56 ± 3.54 a	3.64 ± 0.80 a	0.26 ± 0.11 c	1.94 ± 0.85 c	0.30 ± 0.13 c	9
	80	3.94 ± 2.48 b	1.88 ± 0.61 c	0.08 ± 0.05 d	0.57 ± 0.36 d	0.09 ± 0.06 d	11
Significance	***	***	***	***	***		

^zMeans and standard errors within each column followed by the same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at $p < 0.05$. NS: non-significant. ***: significant at $p < 0.001$, **: significant at $p < 0.01$, *: significant at $p < 0.05$.

Table 4. Compactness, leaf area index (LAI), water use efficiency based on irrigation volume (WUE₁), water use efficiency based on evapotranspiration (WUE₂), water use efficiency based on surplus water (WUE₃) and number of irrigation (No. of irrigation) of hot pepper scion and rootstock as affected by different irrigation regimes during the cultivation in a PFAL

Irrigation treatments	Compactness (mg/cm)	LAI	WUE ₁ (mg/L)	WUE ₂ (mg/mL)	WUE ₃ (mg/L)	No. of irrigation	
Scion	50	8.66 ± 2.36 a ^z	0.93 ± 0.16 a	0.20 ± 0.06 a	1.62 ± 0.49 a	0.23 ± 0.07 a	7
	60	5.93 ± 1.57 c	0.93 ± 0.18 a	0.12 ± 0.03 c	0.95 ± 0.28 c	0.13 ± 0.04 c	8
	70	8.10 ± 2.17 ab	1.03 ± 0.27 a	0.15 ± 0.04 b	1.26 ± 0.34 b	0.18 ± 0.05 b	9
	80	6.72 ± 2.12 bc	1.15 ± 0.38 a	0.09 ± 0.03 c	0.77 ± 0.28 c	0.11 ± 0.04 c	13
Significance	**	**	NS	***	***		
Rootstock	50	10.38 ± 2.44 b	1.25 ± 0.23 b	0.31 ± 0.09 a	2.56 ± 0.74 a	0.35 ± 0.10 a	6
	60	9.65 ± 2.73 b	1.30 ± 0.36 b	0.22 ± 0.08 b	1.84 ± 0.63 b	0.25 ± 0.09 b	8
	70	11.48 ± 3.36 ab	1.47 ± 0.20 ab	0.22 ± 0.05 b	1.86 ± 0.45 b	0.25 ± 0.06 b	9
	80	13.23 ± 2.56 a	1.63 ± 0.56 a	0.23 ± 0.06 b	1.92 ± 0.46 b	0.26 ± 0.06 b	12
Significance	*	NS	*	*	*		

^zMeans and standard errors within each column followed by the same letter are not significantly different according to Duncan's multiple range test at $p < 0.05$. NS: non-significant. ***: significant at $p < 0.001$, **: significant at $p < 0.01$, *: significant at $p < 0.05$.

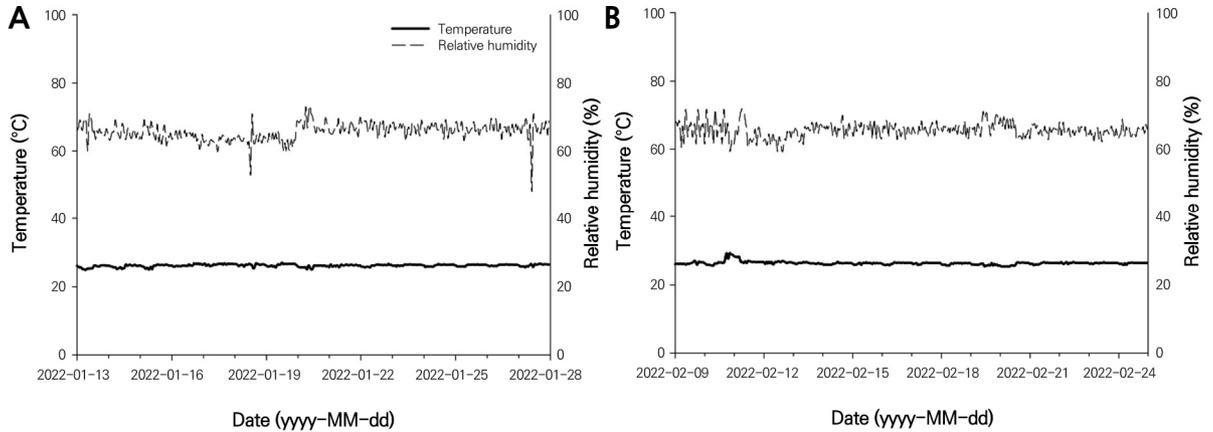


Fig. 2. Changes in temperature and relative humidity in the plant factory with artificial lightings during the seedling period. A; seedling period of tomato scions and rootstocks, B; seedling period of hot pepper scions and rootstocks.

2.56mg/cm에서 유의적인 차이를 보이지 않았다(Table 4). 건물중을 고려했을 때 80% 처리구에서 가장 적합한 성장을 보였지만, compactness를 함께 비교 시 70% 처리구 또한 적합한 성장을 하였다. WUE_1 , WUE_2 와 WUE_3 는 각 처리(50%, 60%, 70% 및 80%)에서 50% 처리구가 $0.31 \pm 0.06\text{mg/L}$, $2.56 \pm 0.74\text{mg/mL}$ 와 $0.35 \pm 0.10\text{mg/mL}$ 로 가장 효율이 높았다. 50% 처리구의 초장, 경경 및 건물생산량은 80% 처리구와 유의적으로 낮았으나, 80% 처리구는 양수분이용효율이 현저히 떨어졌다. 또한, 50% 처리구의 생장이 고추 접목묘 생산 시 크게 문제가 되지 않는다는 점을 고려할 때 고추 대목은 건조한 수분 관리가 유리하였다.

An (2021)은 식물공장형육묘시스템 내 토마토와 고추 접수 및 대목 육묘 시 수분함량수준 처리60% 수준이 가장 적합하다고 보고하였다. 하지만, 정확한 양수분이용효율을 고려하지 않은 결과였다. 또한, 온실 내 고추 육묘 시 부족한 관수는 모종의 성장에 부정적인 영향을 끼칠 뿐 아니라, 양수분이용효율도 높지 않은 것으로 보고하였다(Ahmed et al., 2014). 양수분이용효율 고려 시 관수시기는 토마토 접수 및 대목은 각각 70%와 50%, 고추 접수 및 대목 모두 50% 처리구가 적합하였다. 건조한 수분관리가 효율적이었던 것은 폐쇄적인 환경을 이루어 높은 상대습도가 유지되었기 때문이라고 판단된다(Fig. 2).

본 실험에서는 로드셀을 사용하여 토양수분함량을 파악한 후 관수 처리를 하였다. 토마토 접수를 제외하고 50% 수분함량 처리가 양수분 이용 효율 및 생육에 효과적이었다. 특히, 육묘기간 동안 50% 처리구가 평균 관수 횟수 6회로 80% 처리구의 13회 보다 관수량 약 53%(접수: 208mL/plant, 대목: 263mL/plant) 만큼 절약할 수 있었다. 또한, 식물공장형육묘시스템의 경우 일정한 환경조건을 유지할 수 있으며, 로드셀 없이도 특정 환경조건 조성을 통해 계획적인 관수가 가능하다. 따라서, 식물공장형육묘시스템 내 토마토와 고추의 접수 및 대목 육묘 시 적정 양수분 관리를 통해 자원의 낭비를 줄일 수 있으며, 최적의 생장이 가능할 것으로 기대된다.

초록

실내 수직 농업의 한 형태인 식물공장형육묘시스템은 폐쇄된 생태계를 구성하여, 사계절 외부 기상의 영향을 받지 않고 환경 매개변수(기온, 상대습도, 빛 등) 제어가 가능하며, 지속가능한 농업의 발전 수단으로 각광받고 있다. 하지만, 시스템 내 작물 재배 시 작물 재배 방법들이 미흡한 실정이다. 토마토와 고추 접수 및 대목 재배 시 관수 처리에 따른 묘의 성장과 양수분이용효율 비교를 통해 적정관수시기를 구명하고자 연구를 수행하였다. 각 트레이의 상토가 충분히 적셔진 상태 일 때, 플러그트레이 무게를 수분함량수준 100%로 두어 80%, 70%, 60% 및 50%가 되었을 때 관수 처리를 하였다. 토마토 접수의 건물생산량은

70% 처리구에서 가장 높았으며, 대목은 50% 처리구에서 가장 높았다. 접수와 대목 모두 모든 처리구에서 접목묘 생산에 적합한 생장을 보였다. 하지만, 토마토 접수는 70% 처리구에서, 대목은 50% 처리구에서 양수분이용효율이 가장 높았다. 고추 접수의 건물생산량은 50%와 70% 처리구에서, 대목은 80% 처리구에서 가장 높았다. 하지만, 대목의 경우 compactness 비교를 통한 전체 건물생산비율은 80%와 70%가 유의적인 차이가 없었다. 고추 접수 및 대목의 양수분이용효율은 모두 50% 처리구에서 가장 높았다. 본 연구는 식물공장형육묘시스템 내 토마토와 고추 접수 및 대목 육묘 시 관수 시기에 따라 작물의 성장과 양수분이용효율에 크게 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, 적정 관수시기를 파악할 수 있는 기초를 제공하였으며, 적정 관수 시기에 따른 물 자원의 낭비와 오염을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

추가 주요어 : 수직농장, 접목묘, 고추, 토마토

Literature Cited

- Ahmed AF, Yu H, Yang X, Jiang W (2014) Deficit Irrigation affects growth, yield, vitamin c content, and irrigation water use efficiency of hot pepper grown in soilless culture. HortScience 49:722-728. doi:10.21273/HORTSCI.49.6.722
- An S (2021) Development of plant factory type seedling production system to produce standard fruit vegetable seedlings linked with a grafting robot. National Institute of Horticultural and Herbal Science. <https://scienceon.kisti.re.kr/srch/selectPORSrchReport.do?cn=TRKO202100010082>. Accessed February 2021
- An S, Bae JH, Kim HC, Kwack Y (2021) Production of grafted vegetable seedlings in the republic of korea: achievements, challenges and perspectives. Hortic Sci Technol 39:547-559. doi:10.7235/HORT.20210049
- An S, Park SW, Kwack Y (2020) Growth of cucumber scions, rootstocks, and grafted seedlings as affected by different irrigation regimes during cultivation of 'Joenbaekdadagi' and 'Heukjong' seedlings in a plant factory with artificial lighting. Agronomy 10:1943. doi:10.3390/AGRONOMY10121943
- Currey CJ, Hutchinson VA, Lopez RG (2012) Growth, morphology, and quality of rooted cuttings of several herbaceous annual bedding plants are influenced by photosynthetic daily light integral during root development. HortScience 47:25-30. doi:10.21273/HORTSCI.47.1.25
- Jones HG (2007) Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. J Exp Bot 58:119-130. doi:10.1093/JXB/ERL118
- Jurga A, Pacak A, Pandelidis D, Kaźmierczak B (2021) A long-term analysis of the possibility of water recovery for hydroponic lettuce irrigation in an indoor vertical farm. Part 2: rainwater harvesting. Appl Sci 11:310. doi:10.3390/APP11010310
- Kozai T, Niu G, Takagaki M (2019) Plant factory: an indoor vertical farming system for efficient quality food production. Ed 2, Academic Press, Cambridge, USA. <https://books.google.com/books?id=z-C7DwAAQBAJ>
- Kumar P, Lucini L, Roupael Y, Cardarelli M, Kalunke RM, Colla G (2015) Insight into the role of grafting and arbuscular mycorrhiza on cadmium stress tolerance in tomato. Front Plant Sci 6:477. doi:10.3389/FPLS.2015.00477/BIBTEX
- Lee C, Kim J (2021) Water absorption analysis of a peat-perlite horticultural substrate in response to various subirrigation conditions using a thermal imaging camera. Hortic Environ Biotechnol 62:537-545. doi:10.1007/s13580-021-00338-x
- Lee IB, Jung DH, Yi PH, Lee JG, Bhandari SR (2021) Analysis of changes in growth, nutrient absorption characteristics, and glucosinolate contents of chinese cabbage (*brassica rapa pekinensis*) grown in reclaimed land according to irrigation with different salt concentrations. Hortic Sci Technol 39:572-582. doi:10.7235/HORT.20210051
- Lim MY, Choi SH, Choi GL, Kim SH, Jeong HJ (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
- Mauro RP, Agnello M, Onofri A, Leonardi C, Giuffrida F (2020) Scion and rootstock differently influence growth, yield and quality characteristics of cherry tomato. Plants (Basel) 9:1725. doi:10.3390/PLANTS9121725
- Oda M (1999) Grafting of vegetables to improve greenhouse production. Food & Fertilizer Technology Center Extension Bulletin, Taipei, Taiwan, 480:1-11
- Pandey D (2020) Agricultural Sustainability and Climate Change Nexus. In: Singh, P., Singh, R., Srivastava, V. (eds) Contemporary Environmental Issues and Challenges in Era of Climate Change. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-32-9595-7_4
- Park KH (2020) Research on the actual condition of raising seedling industry. Korea Rural Economic Institute. <https://www.krei.re.kr/krei/researchReportView.do?key=67&biblioid=523461&pageType=010101&pageUnit=10&searchCnd=all&searchKrwrd=&pageIndex=316&engView=/>. Accessed 30 April 2020
- Park SW, An S, Kwack Y (2020) Changes in transpiration rates and growth of cucumber and tomato scions and rootstocks grown under different light intensity conditions in a closed transplant production system. J Bio-Env Con 29:399-405. doi:10.12791/KSBEC.2020.2

9.4.399

- Pignata G, Casale M, Nicola S** (2017) Water and nutrient supply in horticultural crops grown in soilless culture: resource efficiency in dynamic and intensive systems. In Tei, F., Nicola, S and Benincasa, P. (eds.) *Advances in research on fertilization management of vegetable crops*. Cham Springer Publication pp.183-219. doi:10.1007/978-3-319-53626-2_7
- Rho H, Gray J, Paetzold L, Xue Q, Rush C** (2023) Evaluation of surface drip irrigation systems focusing on water-use efficiency in high-value vegetable production in the semi-arid, windy region of the texas high plains. *Hortic Sci Technol* 41:125-143. doi:10.7235/HORT.20230013
- Rouphael Y, Rea E, Cardarelli M, Bitterlich M, Schwarz D, Colla G** (2016) Can adverse effects of acidity and aluminum toxicity be alleviated by appropriate rootstock selection in cucumber? *Front Plant Sci* 7:1283. doi:10.3389/FPLS.2016.01283/BIBTEX
- Shibuya T, Kitaya Y, Kozai T** (1997) Dynamic measurements of net photosynthetic and evapotranspiration rates, and sensible and latent heat transfer rates of plug sheets based on micrometeorological and weighing methods. *Environ Control Biol* 35:71-76. doi:10.2525/ecb1963.36.131
- Tavan M, Wee B, Brodie G, Fuentes S, Pang A, Gupta D** (2021) Optimizing sensor-based irrigation management in a soilless vertical farm for growing microgreens. *Fron Sustain Food Syst* 4:313. doi:10.3389/FSUFS.2020.622720/BIBTEX
- Vitoshkin H, Haslavsky V** (2020) Thermal Analysis and Climate Control of Experimental two-level Hydroponic Growth Cell. In *Proceedings of the 6th World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering, Virtual Conference, Prague, Czech Republic*. doi:10.11159/hfff20.136
- Yetisir H, Sari N** (2003) Effect of different rootstock on plant growth, yield and quality of watermelon. *Aust J Exp Agric* 43:1269-1274 doi:10.1071/EA02095