

과제구분	IPET	수행시기		전반기	
연구과제 및 세부과제		연구분야	수행기간	연구실	책임자
스마트농업 정밀생산 실용화 기술 개발		채소	'21~'24	농업기술원 원예연구과	이지영
수직농장 인공광 검증 및 생산성 향상기술 개발		채소	'21~'24	농업기술원 원예연구과	이지영
색인용어	수직농장, 토마토, 육묘, 백색 LED, 포트, 보광처리				

ABSTRACT

Tomato (*Solanum lycopersicum*) is a major greenhouse vegetable crop. In 2022, the cultivated area in South Korea was 6,111 ha, with a production volume of 378,808 tons, making it the second-largest greenhouse crop after watermelon in terms of cultivation area and production. Over the past three years, production has been steadily increasing. This study was conducted to select suitable pots and LED light sources for tomato seedling production in a vertical farm and to determine an appropriate supplemental light source for supplemental lighting cultivation. The first experiment was conducted in a vertical farm using seedling pots with different types, thicknesses, pore presence, and pore sizes. The results showed that using a sponge medium with a pot thickness of 0.5 mm and pore sizes of 0.7~0.9 mm improved growth characteristics such as fresh weight, stem diameter, and compactness, while also reducing root entanglement. In the second experiment, the effects of four LED light sources—cool white LED and warm white LED, both with and without far-red LED light—were tested. The cool white LED light source showed an effect in suppressing elongation and enhancing seedling quality compared to the warm white LED light source. When far-red light was added at a red/far-red (R/FR) ratio of 2.5–3.6 to the cool white LED light source, shoot growth characteristics, such as fresh weight and leaf area, as well as seedling quality, improved. Additionally, plant growth was optimal at a light intensity of at least $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

To evaluate supplemental lighting, the experiment was conducted twice: from April to September 2023 and from September 2023 to March 2024, in a glass greenhouse

under a hydroponic system. As supplemental light sources, warm white LED and a combination of warm white LED and far-red light were compared with the control. The supplemental lighting was applied for four hours before sunrise. In both summer and winter growing season, there were no significant differences among treatments in growth characteristics such as plant height, number of leaves, number of nodes, SPAD value, and fruit quality, including fruit weight, acidity, and sugar content. However, the total fruit yield significantly increased in the supplemental lighting treatments compared to the control. In the summer growing season, fruit yield increased by 10.9% under the warm white LED treatment and by 11.6% under the warm white LED + far-red (FR) light treatment compared to the control. In the winter growing season, the total fruit yield increased by 19.2% under the warm white LED treatment and by 31.9% under the warm white LED + FR light treatment. Although the combination of white LED and far-red light tended to increase total fruit yield compared to white LED alone, there was no statistically significant difference. Based on these results, supplemental lighting with warm white LEDs is considered effective in increasing tomato production.

Key words: White LED, seedling pot, Vertical farm, Supplemental lighting, Tomato, Far-red LED, Vertical farm

1. 연구목표

토마토(*Solanum lycopersicum*)는 시설 과채류로 2022년 국내 재배면적은 6,111ha이며 생산량은 378,808톤으로 과채류 중 수박에 이어 시설 재배면적과 생산량이 두번째로 많은 작목으로 최근 3년간 생산량이 꾸준히 증가하고 있다 (Statistics Korea, 2023). 토마토는 묘의 품질이 생육과 과실 품질에까지 영향을 미치는 작목으로 건전묘 생산이 매우 중요하기 때문에 고품질 묘를 생산하기 위한 육묘시기, 온도, 시비, 육묘포트 등에 관한 많은 연구가 이루어졌다(Lee 등 2015; Lim 등, 1997; Park 등, 2017; Seo 등, 2018). 최근 농가에서는 노동력 절감, 농지 활용도 향상을 위해 공정육묘장을 활용하여 묘를 공급받는 비율이 증가하고 있으나 계절에 따라 외부 환경요인의 영향을 받을 수 있다. 특히 토마토 묘의 수요가 많은 가을재배인 경우 고온기에 육묘를 하기 때문에 묘가 도장하거나 연약해질 수 있어 이를 해결하기 위한 성장조절제나 적색광 등 인공광을 이용한 연구가 이루어졌다(Lee, 2001; Yun 등, 2007; Zhang 등, 2003). 식물공장은 연중 균일한 묘를 계획적으로 생산할 수 있는 장점이 있어 최근 과채류 우

량묘를 생산하기 위한 광, 온도, 이산화탄소 등 환경제어 및 관수방법 등의 연구들이 수행되고 있다(Choi 등, 2023; Kim 등, 2019; Moon 등, 2023; Song 등, 2024; Yun 등, 2023). 특히 환경요인 중 선택적 파장을 조합하여 작물을 재배할 수 있는 장점을 가진 LED 광원은 기존에는 청색광과 적색광이 녹색에 비해 광합성 색소를 더 효과적으로 흡수하기 때문에 많이 이용되어 왔으나 최근 오이, 파프리카, 상추 등 여러 작물에서 광합성을 보조하는 녹색광이 포함된 넓은 스펙트럼의 백색 LED의 생장 및 기능성물질 증가 효과 등의 연구가 활발히 이루어지고 있다(Dung et al, 2020; Lee 등, 2022; Park 등, 2013). 또한, 원적색광은 700~800nm의 파장대역으로 종자발아, 개화조절 및 초장, 엽면적 등 지상부 생육 촉진 효과가 보고되었다(Choi, 2003; Kang 등, 2019; Oh와 Runkle, 2015; Runkle and Heins, 2001). LED 효과는 작물, 품종, 환경에 따라 다른 경향이 나타나는 경우가 많아 작물에 따라 재배 목적에 따른 최적 광질의 조합이 필요하다. 육묘 뿐만 아니라 토마토 등 호광성 과채류는 정식후 약광기에 일조시간 및 광량이 부족할 경우 수량 및 품질이 저하되기 쉬워 인공광을 이용한 보광재배효과에 관한 연구가 이루어지고 있다(Paucek et al., 2020; Hwang 등, 2022). 보광처리를 하였을 때 파프리카는 과중은 무거웠던 반면 주당 과실수와 수량은 적었고 착색단고추는 품종에 따라서 수량 및 당도 증가 효과가 달라졌다고 한 보고와 같이 작목, 품종, 광원, 환경 등에 따라 보광효과가 다르게 나타났다(An 등, 2011; Lee 등, 2014). 따라서 본 시험은 인공광을 이용한 토마토 생산성 향상기술을 개발하기 위하여 식물공장 육묘에 적합한 포트와 육묘 및 보광재배에 적합한 LED 광원을 선발하기 위하여 수행하였다.

2. 재료 및 방법

<시험1> 과채류 육묘용 배지 선발

시험재료는 토마토 ‘데프니스’ (Dafnis)를 사용하였다. 인큐베이터에서 24℃, 50~60% 습도로 유지하면서 종자를 2~3일간 최아시킨 후 완전밀폐형 식물공장 순환식 담액수경시스템에서 육묘하였다. 양액은 야마자키 토마토 전용 배양액으로 EC는 1.2~1.8dS·m⁻¹으로 공급하였다. 광원은 백색 LED를 이용하였고 350μmol·m⁻²·s⁻¹의 광량에서 시험하였다. 환경은 주야간 온도 25/20℃, 광주기는 14/10h, 상대습도는 60~70% 수준으로 유지하였다. 1차 시험처리는 육묘용 포트의 공극 유무와 포트 두께를 0.5, 1.0, 1.5, 2.0mm로 달리하고 코코넛화분과 에코 종이컵을 추가한 처리를 대상으로 시험하였다. 공극형은 PLA 재질로 3D 프린터를 이용하여 포트 측면, 밑면에, 원통형은 밑면에 공극을 뚫어 포트를 제작하였다. 육묘배지는 블랙피트를 사용하였다. 2차는 1차에서 선발한 공극형, 원통형 0.5mm 포트와 코코넛화분, 에코 종이컵, 무토

양육묘포트(관행)를 이용하여 육묘시험을 추진하였다. 배지는 블랙피트를 사용하였고 무토양 육묘포트는 우레탄스펀지를 사용하였다. 생육조사는 파종 1주 후부터 1주 간격으로 초장과 엽수를 조사하였고 최종 조사시 초장, 엽수, 절간장, 줄기직경, 엽면적, 생체중, SPAD, 엽록소형광지수, 화아수 등을 최종 조사하였다. 엽면적은 엽면적 측정기(LI-3100c, LI-COR)를 이용 하였으며, 엽록소 형광지수는 생장점 아래 중간부위 위에 leaf dark clip을 물려서 30분간 암처리 후 휴대용 엽록소형광측정기(FP-100, Photon System Instruments)로 측정하였다. 엽록소함량은 휴대용 엽록소함량 분석기인 SPAD meter (SPAD-502, Minolta)를 이용하였다. 건물중은 조사 후 시료를 78℃로 설정된 열풍건조기(SIN-1100, SINIL-science)에서 48시간 건조한 후 측정하였다. 초장, 엽수 등의 생육조사는 농사시험 연구기준(RDA, 2012)에 기준하여 조사하였다. 엽면적비(LAR)는 엽면적/지상부 건물중, 엽면적지수(LAI)는 엽면적/재배면적, 묘 충실도는 지상부 건물중/초장으로 계산하였다.

실험구 배치는 완전임의배치 10개체씩 3반복으로 배치하였으며 통계분석은 SAS프로그램(SAS 9.4, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 이용하여 Duncan의 다중검정 $p \leq 0.05$ 수준에서 분석하였다. 시험2~시험4의 시험환경은 시험 1과 동일하게 수행하였다.

〈시험2〉 과채류 육묘용 용기 개발

시험 1의 결과로 선발한 공극형 육묘포트를 이용하여 배지종류별로 코코피트, 암면, 그로우폼, 우레탄스펀지 4종의 배지를 시험하였다. 육묘포트의 공극크기별 시험은 포트를 PLA 0.5mm의 두께로 고정하고 포트 측·밑면의 공극 크기를 0, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9mm로 제작하여 스펀지배지에 파종하여 무토양 육묘포트와 하우스 플러그트레이와 비교하였다.

〈시험3〉 토마토 재배 적합 LED 광원 선정

육묘용 LED 광원시험은 cool white LED, warm white LED와 far-red의 유무를 달리하여 4종의 bar 타입의 LED를 대상으로 시험하였고 원적색광 추가시 적색과 원적색광의 비율은 0.8~1.1으로 맞춰 주었다. 광량은 $350\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 를 유지하면서 시험하였다.

토마토 보광재배용 LED 광원 시험은 경기도농업기술원내 유리온실에서 수행하였으며 warm white LED, warm white LED+FR, 무처리구로 생장점으로부터 50cm 기준으로 $150\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량으로 일출전 4시간 보광처리하였다. 시험기간은 '23년 4월 4일부터 '23년 8월 30일, '23년 9월 20일부터 '24년 3월 31일까지 2회 수행하였다. 생육조사는 초장, 엽수, 엽장, 엽폭, 마디수, 경경, 엽록소함량, 과실은 수량, 과중, 당도, 산도를 조사하였다.

〈시험4〉 토마토 식물공장 육묘용 LED 광원 최적화

시험3에서 선발한 cool white LED를 이용하여 적색광과 원적색광의 비율을 조절하여 red/far-red(R/FR) 비율을 1.4, 2.5, 3.6, 15.2로 설정하여 시험하였고 광량 시험은 R/FR 비율이 2.5인 cool white LED를 이용하여 $200, 300, 400\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 3수준으로 처리하였다.

3. 결과 및 고찰

〈시험1〉 과채류 육묘용 배지 선발

식물공장에서 연중 토마토 건전묘를 생산하기 위한 육묘용 포트를 개발하기 위해 1차 육묘포트의 종류 및 두께를 달리하여 육묘한 결과 초장, 엽수, 엽장, 엽면적 등은 공극형과 코코넛화분 처리구에서 가장 양호한 반면, 원통형은 초장은 작아지나 줄기 경도가 높아졌으며, 에코 종이컵 처리구는 전반적인 생육이 가장 저조하였다(표 1, 그림 1). 엽면적지수와 묘 충실도는 공극형 0.5mm와 원통형 0.5mm 두께의 포트 및 코코넛 화분이 양호하였다(표 2). 토마토는 육묘 용기의 크기, 묘령, 배지 부피 등에 따라 묘소질과 정식 후 생육이 달라졌다는 보고와 같이 본 시험에서도 육묘포트에 따라서도 묘소질이 달라졌다(Kim 등, 2013; Lee와 Kim, 1999; Seo 등, 2018).

표 1. 육묘 포트 종류에 따른 토마토 육묘 생육특성 (1차)

처리	육묘포트 종류 및 두께	초장 (cm)	경경 (mm)	화이출현수(개/주)		엽수 (매/주)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	SPAD
				1화방	2화방				
T1	공극형PLA 0.5mm	24.3	9.43	3.0	1.2	8.7	29.7	26.5	50.7
T2	공극형PLA 1.0mm	27.2	9.28	3.0	1.0	8.7	29.5	28.8	53.0
T3	공극형PLA 1.5mm	27.8	8.62	3.0	0.8	9.0	29.2	26.2	48.1
T4	공극형PLA 2.0mm	24.9	8.29	3.7	-	8.7	25.1	27.5	52.1
T5	원통형PLA 0.5mm	19.3	5.88	3.0	1.1	8.3	25.3	15.2	50.2
T6	원통형PLA 1.0mm	18.8	5.84	3.3	0.6	7.6	18.6	13.7	50.6
T7	원통형PLA 1.5mm	18.8	6.57	2.7	-	7.3	16.4	15.2	50.1
T8	원통형PLA 2.0mm	17.1	5.57	3.0	-	7.0	14.7	13.4	50.0
T9	코코넛 화분	23.8	8.56	3.5	1.4	9.0	26.0	23.0	54.4
T10	에코 종이컵	10.4	3.04	0.8	-	3.5	9.6	6.1	32.8

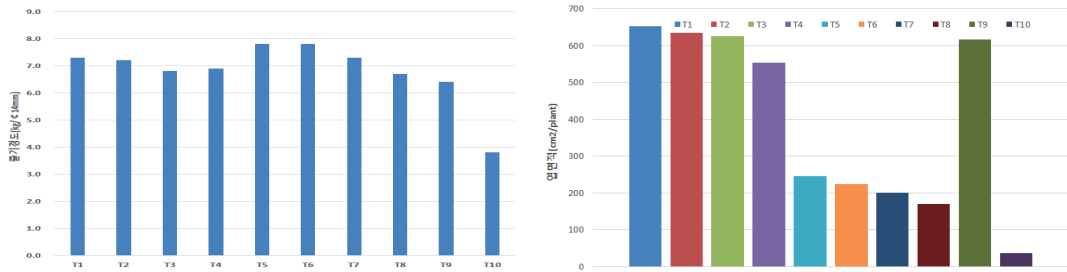


그림 1. 육묘포트 종류 및 두께에 따른 토마토 유효 정도 및 엽면적 비교(1차)

표 2. 육묘 포트 종류에 따른 토마토 묘소질 (1차)

육묘포트 종류 및 두께	엽면적비 (LAR)	엽면적지수 (LAI)	엽록소형광 (Fv/Fm)	묘충실도 (Compactness)
공극형PLA 0.5mm	174.1	4.08	0.80	0.15
공극형PLA 1.0mm	208.9	3.97	0.75	0.11
공극형PLA 1.5mm	218.1	3.91	0.77	0.10
공극형PLA 2.0mm	239.8	3.46	0.78	0.09
원통형PLA 0.5mm	89.7	1.53	0.77	0.14
원통형PLA 1.0mm	95.4	1.40	0.76	0.13
원통형PLA 1.5mm	92.3	1.26	0.75	0.12
원통형PLA 2.0mm	77.6	1.06	0.74	0.13
코코넛 화분	148.0	3.86	0.81	0.18
에코 종이컵	90.2	0.23	0.71	0.04

1차 시험에서 생육 및 묘소질이 양호한 처리구와 기존 무토양 육묘포트를 대조로 하여 2차 시험을 수행한 결과 공극형, 원통형, 코코넛화분 처리 모두 초장이 30cm 이상으로 일반육묘에 비해 길어 육묘일수를 단축시켜 생산해야 할 것으로 판단되었다(표 3). 묘소질은 포트 전체가 막힌 에코 종이컵만 낮은 편이었으며, 그 중 0.5mm 두께의 공극형 포트가 묘충실도가 가장 높았다(표 4). 시금치 육묘시 코코넛피트와 펄라이트 배지가 양액 베드내 배수구 및 흡입구를 메우는 문제가 많았다고 한 Seo 등(2007)과 같이 본 시험에서도 블랙피트를 사용하였을 때 식물공장 배관 등의 막힘 현상이 나타났다.

표 3. 육묘 포트 종류에 따른 토마토 유묘 생육특성 (2차)

처리	초장 (cm)	경장 (cm)	경경 (mm)	화이출현수(개/주)		엽수 (매/주)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	SPAD
				1화방	2화방				
공극형PLA 0.5mm	44.3	41.4	12.16	3.3	1.9	10.4	38.5	34.7	43.1
원통형PLA 0.5mm	41.9	38.4	11.37	4.0	2.2	10.1	37.5	35.0	46.3
코코넛화분	42.5	39.7	11.90	3.4	2.4	10.1	39.0	37.1	43.2
에코 종이컵	31.0	28.4	6.88	2.5	-	7.0	25.2	20.6	43.6
무토양육묘포트(대조)	28.6	25.7	9.34	3.1	1.8	9.2	33.6	30.0	42.6

표 4. 육묘 포트 종류에 따른 토마토 묘소질 (2차)

처리	엽면적비(LAR)	엽면적지수(LAI)	묘충실도(Compactness)
공극형PLA 0.5mm	197.6	9.00	0.17
원통형PLA 0.5mm	186.3	8.00	0.15
코코넛화분	197.6	8.48	0.16
에코 종이컵	91.5	2.19	0.05
무토양육묘포트(대조)	194.9	6.42	0.13

<시험2> 과채류 육묘용 용기 개발

육묘용토의 배관 막힘 현상을 해소하기 위해 시험1에서 선발한 공극형 육묘포트를 이용하여 육묘배지를 달리하여 시험한 결과 우레탄스펀지와 코코피트를 사용하였을 때 압면과 그로우폼에 비해 경경, 경도, 생체중 등 지상부 생육과 묘충실도는 양호하였지만 코코피트 배지에서는 용토의 부서짐이 발생하였다(표 5). Choi 등은(2011) 식물공장 내 상추와 청경채를 압면과 우레탄스펀지배지에서 육묘하였을 때 스펜지에 수분관리가 충분한 경우 압면보다 발아율이 높았으며 묘 충실도는 차이가 없었다고 한 반면, Jeong 등(2018)은 더덕, 황기의 경우 압면, 코이어, 상토배지가 우레탄스펀지에 비해 묘 생육이 우수하였는데 이러한 차이는 우레탄배지의 수분관리의 차이로 보였다.

표 5. 육묘 배지별 토마토 생육특성

배지종류	초장 (cm)	엽수 (개/주)	경경 (mm)	경도 (kg/4mm)	생체중 (g/주)	엽면적 (cm ²)	엽록소함량 (SPAD)	묘출실도
우레탄스펀지	22.2a	7.8a	6.6a	4.7a	22.4a	451.8a	40.3b	0.068ab
코코피트	21.3a	7.7a	6.9a	4.6a	25.1a	512.9a	45.2a	0.079a
그로우폼	17.2b	6.8b	5.6b	3.9b	13.6b	308.4b	42.1ab	0.057bc
암면	15.0c	6.3b	4.6c	3.6b	9.1b	224.5b	39.4b	0.046c

육묘용 포트의 공극크기를 달리하여 시험한 결과는 표 6, 7과 같다. 공극형 0.7~0.9mm의 육묘포트와 무토양 육묘포트에서 경경, 엽수, 엽면적 등의 생육 및 엽록소형광지수, 엽면적지수, 묘출실도 등 묘소질이 양호하였고 공극이 없는 포트에서는 생육이 저조하였다. 이 결과는 공극 크기에 따른 양액 흡수율의 차이로 보여졌다. 또한 하우스에서 육묘한 플러그트레이 처리구에서도 생육이 저조하였는데 이는 육묘기간이 온도가 높은 편인 6~7월이었기 때문으로 판단되었다. 토마토 플러그 육묘시 정식시 뿌리영킴으로 인한 정식시 불편을 해소시키기 위해 종이포트를 활용한 Seo 등(2018)과 같이 본 시험에서도 뿌리 영킴정도를 조사한 결과 0.5mm 이상 공극의 포트에서 정식시 영킴정도가 적은 편이었고 무토양 육묘포트는 정식시 뿌리영킴 정도가 심한 편이었다(표 7). 시험1, 2의 결과 식물공장 토마토 육묘용으로는 스펀지를 이용하여 공극이 0.7~0.9mm인 포트를 이용하는 것이 묘 생육이 양호하였고 뿌리영킴 감소에도 효과적으로 판단되었다.

표 6. 육묘용 용기 공극크기별 토마토 육묘 생육특성

처리내용	초장 (cm)	엽수 (개/주)	경경 (mm)	경도 (kg/4mm)	지상부 생체중(g/주)	엽면적 (cm ²)	엽록소함량 (SPAD)
공극형 0mm	24.2c	7.4d	5.7d	3.4c	14.0c	258.7d	29.4d
공극형 0.3mm	24.6c	8.0c	6.5c	4.6b	21.0c	391.2c	42.4b
공극형 0.5mm	30.4b	8.4bc	8.2b	6.2a	35.5b	592.5b	45.2ab
공극형 0.7mm	33.0ab	8.6ab	9.1a	6.1a	42.0ab	639.6ab	47.7a
공극형 0.9mm	34.1ab	8.6ab	8.9ab	6.1a	43.6ab	676.5ab	46.3a
무토양육묘포트	34.2a	9.1a	9.2a	6.1a	48.0a	759.6a	45.0ab
플러그트레이	30.2b	7.3d	5.4d	4.8b	12.6c	288.2cd	38.4c

표 7. 육묘용 용기 공극크기별 토마토 묘소질

처리내용	엽면적지수 (LAI)	엽록소형광 (Fv/Fm)	묘충실도 (Compactness)	뿌리영킴정도 ¹
공극형 0mm	1.55d	0.65d	0.038c	+
공극형 0.3mm	2.34c	0.76c	0.061b	++
공극형 0.5mm	3.55b	0.8ab	0.082ab	++
공극형 0.7mm	3.83ab	0.82ab	0.080ab	+++
공극형 0.9mm	4.05ab	0.82ab	0.080ab	+++
무토양육묘포트	4.54a	0.82ab	0.098a	+++++
플러그 트레이	1.72d	0.85a	0.036c	-

1) 뿌리영킴정도: + 매우약함, ++ 약함, +++ 보통, ++++ 강함, +++++ 매우강함

<시험3> 토마토 재배 적합 LED 광원 선정

가. 식물공장 토마토 육묘용 광원 선발

Cool white LED 등 4종의 LED를 이용하여 토마토를 육묘한 결과는 표 8과 같다. 초장과 절간장은 CW LED 처리가 WW LED에 비해서는 짧은 편이었으나 통계적인 유의차는 없었다. 청색광이 줄기 신장 억제 효과가 있는 것으로 알려져 있으나, 본 시험에서는 오히려 원적색광이 추가된 CWFR과 WWFR LED에서 초장과 절간장이 유의하게 증가하였다. CW와 WW LED에 원적색광이 추가되었을 때 초장은 각각 71.3, 97.0%, 절간장은 109.1, 123.1% 증가하였다. Azad et. al.(2011)는 고추 육묘시 원적색광 처리가 적색광 처리보다 경장과 절간장이 증가하였다고 보고한 바 있다. 이 시험에서도 토마토의 초장과 절간장은 적청색의 비율보다 원적색광의 영향이 더 컸던 것으로 보여졌다. 백색 LED는 녹색광을 포함하며 넓은 스펙트럼을 가지고 있기 때문에 단일 혼합광장에 비해 적청색의 차이가 크게 나타나지 않았고 오히려 원적색광의 비율이 높은 처리에서 음지회피반응으로 원적색광의 효과가 더 크게 나타난 것으로 판단된다. 원적색광이 추가된 광원의 R/FR 비율은 0.8~1.1로 자연광의 비율인 1.0~1.3과 유사하였는데 이 비율은 엽채류인 상추, 이고들빼기 등에서는 지상부 생육촉진효과가 있어 효과적이었으나 토마토 육묘용으로는 높았던 것으로 판단된다(Bae et al., 2017). 생체중과 엽면적도 초장과 같은 경향이 나타났으며 원적색광이 포함된 처리에서 유의하게 증가하였고 그 중 적색과 원적색광 비율이 높았던 WWFR 처리에서 가장 컸다. 토마토는 줄기 직경이 클수록 묘가 강건한 편인데 원적색광이 추가된 처리에서 줄기 직경이 큰 편이었다. CWFR 처리에서 줄기직경은 CW 처리보다 25.3% 증가하였고 WWFR 처리에서는 WW 처리보다 36.1% 증가하였다. 결과적으로 원적색광은 토마토의 생체중, 엽면적 및 줄기직경의 지상부 생육증가 효과는 있었으나 초장과 절간장의 과도한 신장으로 인해 원적색광의 비율 조정이 필요하다고 판단되었다. 엽록소함량은 지상부

생장과는 다르게 원적색광을 추가한 처리에서 17.2~21.9% 감소하였으며 오이의 경우 원적색광을 추가한 처리에서 엽면적과 엽병의 길이는 증가한 반면 SPAD는 감소하였다고 한 Kang 등 (2019)의 보고와도 같은 경향이였다. WWFR 처리에서 엽면적과 생체중 등 지상부 생육은 양호하였으나 묘충실도는 CW LED에서 다소 높은 편이었다(그림 2). 이는 WW LED가 CW LED에 비해 청색 비율이 낮고 CWFR과 WWFR LED는 원적색광의 효과로 초장이 길어져 묘소질이 상대적으로 낮았던 것으로 판단되었고 원적색광하에서 적색광보다 토마토 묘의 충실도가 낮았다고 한 Lee(2001)의 보고와도 같은 경향을 보였다. 묘 스트레스 지수인 엽록소형광지수도 CW LED에서 양호한 편이었다. 토마토 육묘에는 백색 LED 종류간에는 청색광이 많은 CW LED를 활용하는 것이 도장억제효과 및 묘소질에 효과적이라고 판단되었다.

표 8. LED 광원별 식물공장 토마토 유묘 생육특성

광원	초장 (cm)	절간장 (cm)	경경 (mm)	경도 (kg/14m ²)	엽수 (개/주)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	엽면적 (cm ²)	엽록소함량 (SPAD)	생체중 (g/주)
CW	16.4b	1.1c	6.3b	4.2b	7.3ab	21.0b	19.0bc	388.4b	40.7a	17.9c
CW+FR	28.1a	2.3b	7.9a	5.6a	7.8a	26.1a	21.6ab	467.0ab	33.7b	24.4ab
WW	16.9b	1.3c	6.1b	4.2b	7.1b	20.5b	18.0c	374.9b	40.1a	16.4c
WW+FR	33.3a	2.9a	8.3a	5.5a	7.8a	27.2a	22.2a	514.6a	31.3c	28.1a

↓ CW: Cool white LED, CW+FR: CW+far-red, WW: Warm white LED, WW+FR: WW+far-red

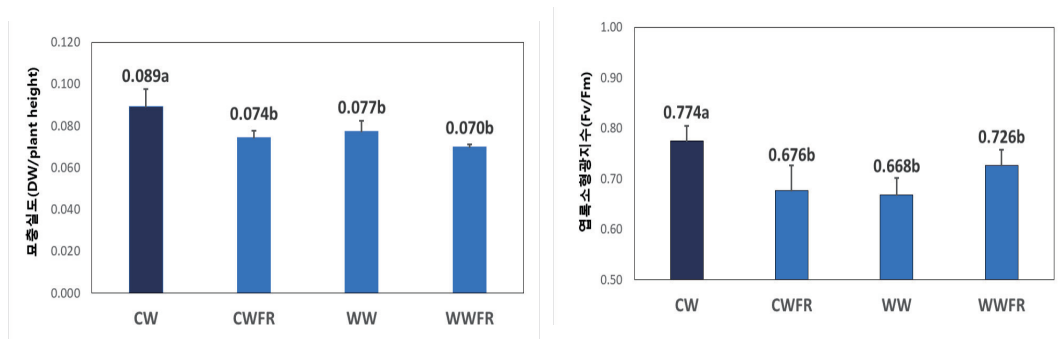


그림 2. LED 광원별 식물공장 토마토 묘소질

나. 토마토 보광재배용 인공광원 선발

LED 광원의 종류에 따른 보광재배 효과를 검토하고자 4월에 정식하여 하절기에 재배한 결과 초장, 엽수, 마디수 등 생육특성과 과중, 과장, 과폭, 당산도 등 과실 특성은 처리 간에 유의적 차이를 보이지 않았다(표 9, 표 10). 고추 보광재배시 초장, 마디수, SPAD는 광원에 따른 차이가 없었다고 한 Hwang 등(2022)의 보고와도 일치하였다. 반면, 상품수량은 백색 LED 보광처리시 무처리에 비해 10.9~11.6% 증가하였으나 원적색광의 유무에 따른 통계적 차이는 나타나지 않았다. 이는 주간에 태양광으로 인해 원적색광의 공급이 충분하였기 때문으로 판단되었다. 위 결과는 토마토는 LED interlighting 보광시 수량은 증가하였지만 과색과 당함량의 차이는 없었다는 Paucek et al.(2020)의 보고와도 일치하였다. 여름 고온기에는 주간에 생성된 동화산물이 온도가 상승함에 따라 꽃이나 과실로의 이동이 원활하지 않아 하절기 재배시 수량의 증가효과는 크게 나타나지 않은 것으로 판단되었다.

표 9. 하절기 토마토 보광재배 생육특성 비교

처리	초장 (cm)	엽수 (개/주)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	마디수 (개/주)	경경 (mm)	마디길이 (cm)	엽록소함량 (SPAD)
WW	301.3	43.1	41.4	36.5	33.9	10.7	11.1	55.5
WW+FR	293.6	42.5	39.6	34.1	35.7	8.2	11.1	51.7
무처리	304.0	43.6	40.4	34.7	36.8	10.1	11.7	54.8

J WW: Warm white LED, WW+FR:WW=far-red

표 10. 하절기 토마토 보광재배 과실수량 및 품질 비교

처리	상품수량 (g/주)	수량지수 (%)	평균과중 (g/개)	당도 (° brix)	산도 (acid)
WW	2614.1a	110.9	141.3 ^{ns}	4.5 ^{ns}	0.70ab
WW+FR	2630.1a	111.6	140.4	4.5	0.78a
무처리	2357.4b	100	137.4	4.5	0.65b

J WW: Warm white LED, WW+FR:WW=far-red

가을에 정식하여 동절기 보광시험을 한 결과 초장, 엽수 등 생육 및 과중, 당도, 산도, 카로틴 함량 등 과실 특성은 하절기 재배와 같은 경향을 보였으며 처리간 차이를 보이지는 않았다. 과실 수량은 LED 보광시 19.2~31.9% 증가하였고 하절기 재배와 같은 경향을 보였으나 수량 증가율은 더 컸다(표 11, 표 12). 이는 동절기가 하절기에 비해 광이 부족하여 광의 효과가 더 컸었던 것으로 판단된다. 따라서 보광재배의 경제성 분석 결과 10a당 연간 7,773,636원의 소득 증대 효과가 있었다(표 13).

표 11. 동절기 토마토 보광재배 생육특성 비교

처리	초장 (cm)	엽수 (개/주)	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	마디수 (개/주)	경경 (mm)	마디길이 (cm)	엽록소함량 (SPAD)
WW	447.0	72.2	29.4	27.6	61.2	10.9	8.1	46.0
WW+FR	445.6	70.3	29.6	30.4	61.2	11.3	8.3	46.7
무처리	472.9	68.6	31.4	32.4	60.4	10.0	9.2	44.5

J WW: Warm white LED, WW+FR:WW=far-red

표 12. 동절기 토마토 보광재배 과실수량 및 품질 비교

처리	상품수량 (g/주)	수량지수 (%)	과중 (g/개)	당도 (brix)	산도 (acid)	베타카로틴 (ug/g)
WW	3303.9a	119.2	138.0	3.9	0.6	13.9
WW+FR	3655.6a	131.9	140.8	3.9	0.6	13.9
무처리	2771.8b	100	137.5	3.9	0.6	13.7

J WW: Warm white LED, WW+FR:WW=far-red

표 13. 토마토 보광재배 경제성 분석

(10a기준, 2700주, 2작기)

손실적 요소(A)	이익적 요소(B)
o 증가되는 비용: 6,430,189원 보광등 설치: 5,600,000원 • 보광등: 100,000원×180개=18,000,000원/ 내구년한 5년 = 3,600,000원 • 설치비용: 2,000,000원 전기요금 • 100W×180개×4hr×203일=14,616,000W • 56.8원×14,616KW=830,189원(농업용 을)	o 증가되는 이익: 14,203,825원 - 생산량 증가 3,277kg • 월별수량증가액×월별 평균가격 (1,998원~5,072원/kg)
추정수익액 (B-A) = 14,203,825원-6,430,189원 = 7,773,636원	

〈시험4〉 토마토 식물공장 육묘용 LED 최적화

시험3의 결과로 선발한 cool white LED 광원의 R/FR 비율을 다르게 한 시험한 결과 R/FR 비율이 낮을수록 원적색광의 비율이 증가하여 전체적인 지상부 생육은 증가하였다(표 14). 원적색광의 비율이 높아질수록 초장, 절간장, 엽수, 엽면적, 생체중, 줄기직경, 화아수가 증가하였고 엽록소 함량은 감소하였다. 엽면적과 줄기직경은 R/FR의 비율이 3.6~1.4 처리에서는 통계적인 차이가 없었다. 화아수는 cool white LED에서는 1.5개인데 비해 원적색광이 추가되었을 때 원적색광의 비율과 상관없이 2.3~2.5개로 많이 형성되었다. 원적색광은 금어초와 장일식물의 개화를 촉진하였다고 보고한 바 있다(Park and Runkle, 2017). 토마토는 식물체 내에 영양분이 축적되면 화아를 형성하는 영양감응형으로 원적색광이 토마토 화아형성에도 영향을 미친 것으로 보인다. 원적색광이 많을수록 생육은 촉진되었으나 묘출실도는 R/FR비율이 3.6과 2.5인 처리에서 0.09로 유의하게 높았으며 원적색광의 비율이 높은 F/R비율이 1.4인 처리에서는 초장이 길어 오히려 감소하는 경향이 나타났다(그림 3). 엽록소형광지수 역시 유사한 경향이 나타났다. 결과적으로 R/FR의 비율이 3.6과 2.5인 cool white LED처리에서 생육은 양호하면서 초장이 길지 않고 묘 출실도가 높아 건전묘 생산에 효과적이라고 판단되었다.

표 14. 백색 LED 적색/원적색광 비율에 따른 토마토 육묘 생육특성

R/FR ratio	초장 (cm)	절간장 (cm)	엽수 (개/주)	엽면적 (cm ² /plant)	생체중 (g)	경경 (mm)	SPAD	화아수 (개/주)
15.2	13.8c	0.8c	6.4c	309.7b	14.4c	5.8b	43.6a	1.5b
3.6	21.3b	1.6b	7.2b	479.5a	26.7b	7.7a	40.2b	2.4a
2.5	21.5b	1.7b	7.2b	484.1a	26.4b	7.8a	38.6c	2.3a
1.4	28.3a	2.3a	7.5a	533.3a	30.2a	8.2a	35.4d	2.5a

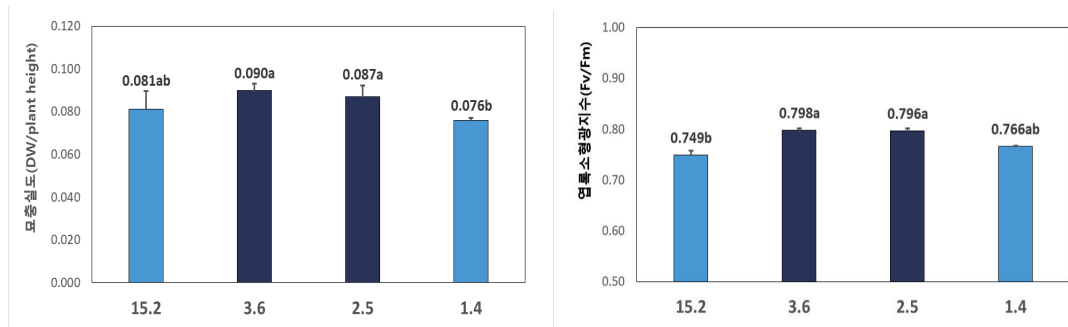


그림 3. 백색 LED 적색/원적색광 비율에 따른 토마토 묘소질

육묘용 적합광원으로 선발한 R/FR 비율인 2.5인 cool white LED를 이용하여 $200 \sim 400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서 육묘한 결과 광량이 증가함에 따라 전반적인 생육 및 묘층실도가 증가하였고 $300 \sim 400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량에서는 유의차가 없었다(표 15). Fan et. al.(2013)은 적색과 청색 혼합 LED에서 토마토 육묘 생장과 에너지 효율면에서 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량이 적합하다고 하였고, Park 등(2020)은 토마토의 백색 LED에서 $100 \sim 300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량이 증가할수록 묘의 생육이 촉진되었다고 한 보고와 같이 토마토 육묘에는 광원 종류에 상관없이 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광량이 효과적이라고 판단되었다.

표 15. LED 광량별 토마토 육묘 생육특성

광량 ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	초장 (cm)	경경 (mm)	엽수 (개/주)	엽면적 (cm^2/plant)	생체중 (g)	SPAD	묘층실도 (DW/height)
200	16.6b	4.8b	5.8b	252.4b	10.5b	33.7b	0.041b
300	18.6b	6.8a	7.2a	398.9ab	19.2ab	37.4a	0.072a
400	21.9a	7.1a	7.8a	484.9a	25.7a	38.2a	0.087a

4. 적 요

인공광을 이용한 토마토 생산성 향상기술을 개발하기 위하여 식물공장 육묘에 적합한 포트 및 육묘와 보광재배에 적합한 LED 광원 선발 시험을 수행한 결과는 다음과 같다.

가. 식물공장 토마토 육묘용 용기로 포트의 종류, 두께, 공극 유무, 공극 크기를 달리하여 시험한 결과 포트의 두께는 0.5mm, 공극이 0.7~0.9mm인 PLA 육묘포트에서 스펀지배지를 이용하여 육묘하였을 때 생육 및 묘소질이 양호하였고 뿌리영김현상이 적었다.

나. 식물공장에서 토마토 육묘에 적합한 광원의 시험 결과 cool white LED 광원이 warm white LED에 비해 초장이 짧았고 도장 억제효과 및 묘층실도가 높은 편이었으며, cool white LED 광원에 적색/원적색광 비율을 2.5~3.6로 원적색광을 추가하였을 때 생체중, 엽면적 등 지상부 생육 및 엽록소형광지수, 묘층실도 등 묘소질이 양호하였다. 또한 광량은 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상에서 토마토 육묘 생육이 양호하였다.

다. 토마토의 백색 LED와 원적색광의 보광재배효과를 시험하기 위해 하절기, 동절기에 온실에서 시험한 결과 두 시기 모두 초장, 엽수, 엽록소 함량 등 생육특성과 과중, 당도, 산도 등 과실 품질은 처리간 차이를 보이지 않았던 반면, 과실 수량은 warm white LED 보광재배시 무처리에 비해 하절기 재배는 10~11%, 동절기 재배에서 19~32% 증가하였다.

5. 인용 문헌

- An C.G., Y.H. Hwang, J.U. An, H.S. Yoon, Y.H. Chang, G.M. Shon, S.J. Hwang, 2011. Effect of LEDs irradiation on growth of paprika. J. of Bio-Environ 20:253-257
- Azad M.O.K., I.J. Chun, J.H. Jeong, S.T. Kwon, and J.M. Hwang 2011, Response of the growth characteristics and phytochemical contents of pepper (*Capsicum annuum* L.) seedlings with supplemental LED light in glass house. J Bio-Env Con 20:182-188.
- Bae J.H., S.Y. Park, and M.M. Oh 2017, Supplemental irradiation with far-red light-emitting diodes improves growth and phenolic contents in *Crepidiastrum denticulatum* in a plant factory with artificial lighting. Hortic Environ Biotechnol 58:357-366.
- Choi H.E., S.Y. Hwang, J.H. Yun, J. Yu, J.H. Hwang, E.W. Park, J.K. Koo, H.S. Hwang, and S.J. Hwang 2023, Growth and seedling quality of grafted cucumber seedlings by different cultivars and supplemental light sources of low radiation period and early yield of cucumber after transplanting. J Bio-Env Con 32:319-327.
- Choi H.G., J.K. Kwon, K.S. Park, Y.I. Kang, M.W. Cho, I.R. Rho, N.J. Kang 2011, Effects of germination condition, nursery media and nutrient concentration on seedling growth characteristics of pak-choi and lettuce in plant factory. J of Bio-Environ Con 20:320-325
- Choi Y.W. 2003, Effect of red, blue and far-red LEDs for night break on growth flowering, and photosynthetic rate in *Perilla ocymoides*. J Kor Soc Hort Sci 44:442-446.
- Dung N.T.P., T.T.T. Huyen, D.C. Jang, I.S. Kim, N.Q. Thach 2020, Effects of supplemental green LEDs to red and blue light on the growth, yield and quality of hydroponic cultivated spinach(*Spinacia oleracea* L.) in plant factory.

- Protected Hort Plant Fac 29:171-180.
- Fan X.X., Z.G. Xu, X.Y. Liu, C.M. Tang, L.W. Wang, and X.L. Han 2013, Effects of light intensity on the growth and leaf development of young tomato plants grown under a combination of red and blue light. *Sci Hortic* 153:50-55.
- Hwang H.S. and Chun C.H 2022, Application of white light emitting diodes to produce uniform scions and rootstocks for grafted fruit vegetable transplants *J Bio-Env Con* 31:14-21.
- Hwang H.S., K.H. Lee, H.W. Jeong, S.J. Hwang, 2022. Selection of supplemental light source for greenhouse cultivation of pepper during low radiation period growth and economic analysis. *J of Bio-Env Con* 31:204-211
- Jeong H.W., H.M. Kim, H.M. Kim, H.R. Lee, S. J. Hwang 2018, Germination and growth of *Codonopsis lanceolata* and *Astragalus membranaceus* as affected by different media types during seedling period. *Protected Hort Plant Fac* 27:13-19
- Kang W.H., J.W. Kim, and J.E. Son 2019, Growth and photomorphogenesis of cucumber plants under artificial solar and high pressure sodium lamp with additional far-red light. *Protected Hort Plant Fac* 28:86-93.
- Kim H.G., Y.H. Choi, and Y.H. Kim 2019, Graft-taking and growth characteristics of grafted cucumber(*Cucumis sativus* L.) seedlings as affected by light quality and blink cycle of LED modules. *Protected Hort Plant Fac* 28:143-149.
- Kim S.E., M.H. Lee, B.J. Ahn, and Y.S. Kim 2013, Efficient light treatment for graft-take and early growth of grafted tomato seedlings. *Protected Hort Plant Fac* 22:322-327.
- Lee G.H. 2001, Development of light-treatment technology for producing tomato transplants of high quality - Effects of end-of-day light treatment affecting on the quality of tomato transplants. *J Bio-Env Con* 10:55-60.
- Lee H.K., M.H. Lee, G.S. Park, N.M. Lee, N.B. Jeon, S.D. Seo, P.H. Cho, Y.S. Kim, S.E. Kim, and S.K. Cho 2015, Effect of seedling type and early transplanting of summer grown seedling on the growth and yield of tomato. *Korean J Organic Agri* 23:59-66.
- Lee J. H., J. H. Jeong, S. Kim, W. Y. Choi, K. B. Lee, 2014. Effect of LEDs on paprika growth and yield in glasshouse in reclaimed land. *Korean J Int Agric* 26:279-283
- Lee S.H., B. Ko, J.H. Bae, Y.G. Ku, and H.C. Kim 2022, Growth characteristics of

- paprika seedlings affected by different LED light qualities raising seedlings using rockwool cube. J Bio-Env Con 31:60-66.
- Lim K.B., K.C. Son, and J.D. Chung 1997, Influence of DIF on growth and development of plug seedlings of *Lycopersicon esculentum* before and after transplanting. J Bio Fac Env 6:34-42.
- Moon Y.H., U.J. Woo, H.S. Sim, T.Y. Lee, H.R. Shin, S.W. An, S.K. Kim, and J.S. Jo 2023, Establishment of proper irrigation method for scion and rootstock production of Solanaceous vegetables accoring to water use efficiency in a plant factory with artificial lighthgting. Hort Sci Tech 41:686-694.
- Oh W. and E.S. Runkle 2015, Flowering and morphological responses of petunia and pansy as influenced by lamp type and lighting period to provide long days. Korean J Hortic Sci Technol 34:207-219.
- Park J.E., Y.G. Park, B.B. Jeong, and S.J. Hwang 2013, Growth of lettuce in closed-type plant production system as affected by light intensity and photoperiod under influence of white LED light. Protected Hort Plant Fac 22:228-233.
- Park I.S., C.Y. Shim, and J.M. Choi 2017, Influence of post-planting fertilizer supplied through sub-irrigation in winter season cultivation of tomato on the seedling growth and changes in the chemical properties of root media. Protected Hort Plant Fac 26:35-42.
- Park Y.J. and E.S. Runkle 2017, Far-red radiation promotes growth of seedlings by increasing leaf expansion and whole-plant net assimilation. Environmental and Experimental Botany 136:41-49.
- Park S.W., S.W. An, and Y. Kwack 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. Protected Hort Plant Fac 29:399-405.
- Paucek I., G. Pennisi, A. Pistillo, E. Appolloni, A. Crepaldi, B. Calegari, F. Spinelli, A. Cellini, X. Gabarrell, F. Orsini, G. Gianquinto, 2020. Supplementary LED interlighting improves yield and precocity of greenhouse tomato in the miditerranean. Agromomy. 10:1002-1003
- Runkle E.S. and R.D. Heins 2001, Specific functions of red, far-red, and blue light in flowering and stem extension of long-day plants. J Amer Soc Hort Sci 126:275-282.

- Seo J.B., J.M. Jung, S.K. Kim, K.J. Choi, J.G. Kim, S.J. Hong, 2007. Growth characteristics of spinaches by nursery media and the seedling number per plug tray cell in hydroponics. J of Bio Env Cont 16:62-66
- Seo T.C., S.W. An, H.W. Jang, C.W. Nam, H. Chun, Y.C. Kim, T.K. Kang, and S. H. Lee 2018, An approach to determine the good seedling quality of grafted tomatoes (*Solanum Lycopersicum*) growth in cylindrical paper pot through the relation analysis between DQI and short-term relative growth rate. Protected Hort Plant Fac 27:302-311.
- Song W.J., H.W. Goo, G.W. Lee, H.M. Kim, and K.S. Park 2024, Comparision with growth characteristics of Korean melon(*Cucumis melo* var. *makuwa*) grafted seedlings in a container type farm with LED light and a greenhouse under high temperature conditions. J Bio-Environmental Control 33:229-29.
- Statics Korea 2023. 2022 Status of vegetable greenhouse and vegetable production. Available via https://www.mafra.go.kr/sn3hcv_v2023/skin/doc.html?fn=D51EEF3E-8F11-5CFA-3663-67C3DA5CABFE.pdf&rs=/sn3hcv_v2023/atchmnfl/bbs/202408/
- Yun H.K., T.C. Seo, J.W. Won, and E.Y. Yang 2007, Effect of triazole growth regulator treatment on the growth of plug seedling and yield of tomato. J Bio-Env Con 16:205-209.
- Yun J.H., H.W. Jeong, S.Y. Hwang, J. Yu, H.S. Hwang, and SJ Hwang 2023, Growth of cucumber and tomato seedlings by different light intensities and CO₂ concentrations in closed-type plant production system. J Bio-Env Con 32:257-266.
- Zhang C.H., I.J. Chun, Y.C. Park, and I.S. Kim 2003, Effects of timings and light intensities of supplemental red light on the growth characteristics of cucumber and tomato pot seedlings. J Bio-Env Con 12:173-179

6. 연구결과 활용제목

- 식물공장 토마토 육묘용 재배 포트(영농활용)
- 식물공장 토마토 육묘를 위한 적정 LED 광원(영농활용)
- LED 광원을 활용한 토마토 보광재배효과(영농활용)
- 수직농장에서 백색과 원적색 LED 광조사에 의한 토마토 묘의 생육특성(논문게재)

7. 연구원 편성

세부과제	구분	소속	직급	성명	수행업무	참여년도			
						'21	'22	'23	'24
수직농장 인공광 검증 및 생산성 향상기술 개발	책임자	원예연구과	농업연구관	이지영	세부과제 총괄	-	○	○	○
	공동 연구자	원예연구과	농업연구사	김혜형	자료조사	-	-	-	○
		〃	농업연구사	정현경	자료조사	○	○	-	○
		〃	농업연구사	이슬기	생육조사	-	-	-	○
		소득지원연구소	농업연구사	이영석	자료조사	○	○	○	-
		환경생물연구소	농업연구사	박남원	통계분석	○	○	○	-
		원예연구과	농업연구관	정윤경	과제총괄	○	-	-	-
		작물연구과	농업연구관	이수연	연구자문	-	○	○	○