



인공광원이 방울토마토(*Lycopersicon esculentum* var. cv. 'CF Jelly') 생육에 미치는 영향

허정욱*, 백정현, 홍영신

농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부

Artificial Light Sources Influence Cherry Tomato (*Lycopersicon esculentum* var. cv. 'CF Jelly') Growth and Development

Jeong-Wook Heo*, Jeong-Hyun Baek, Young-Sin Hong (Department of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, Rural Development of Administration, Jeonju 54875, Korea)

Received: 3 November 2022/ Revised: 17 November 2022/ Accepted: 18 November 2022

Copyright © 2022 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ORCID

Jeong-Wook Heo <http://orcid.org/0000-0002-9968-7783>

Jeong-Hyun Baek <http://orcid.org/0000-0002-5867-2171>

Young-Sin Hong <http://orcid.org/0000-0002-7886-4752>

Abstract

BACKGROUND: Selection an suitable light source is essential in the year-round production of horticultural crops in closed production systems such as plant factory with controlled environments. This study was investigated to confirm the effects of artificial light sources on growth of cherry tomato 'CF Jelly' (*Lycopersicon esculentum* var.) under high-pressure sodium lamps (HPS), metal-halide lamps (MH), and LEDs.

METHODS AND RESULTS: Light intensity of the light sources was controlled at $220 \pm 30 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ with 12 hrs of photoperiod for a day. Flower development was significantly faster in HPS and MH treatments compared to the LEDs. There was no significant difference between the leaf number and leaf shape under the HPS and MH treatments. Reproductive growth of cherry tomato was significantly promoted by the LEDs treatment of blue plus red lights. Fruit yield per plant also increased under the LEDs compared to the others.

CONCLUSION(S): Growth, flowering, and fruit setting of the cherry tomato were accomplished by the artificial

lights under plant factory conditions. The HPS treatment showed negative effect on fruit quality in terms of blossom-end rot incidence compared to the LEDs or MH treatment. Effect of the LEDs on promotion of fruit weight and yield was also proved. Additional research should be carried out for improving sugar metabolism or decreasing disease in the fruits under plant factory system using only artificial lights.

Key words: Artificial light quality, Fruit quality, Light control, Reproductive growth

서 론

태양광 대신 인공광을 사용하여 작물을 재배하는 식물공장에서는 외부 기후변화에 의해 작물 생장이 좌우되는 노지나 온실과 달리 광질, 광강도, 온도 등의 재배환경을 인위적으로 제어할 수 있어 기후변화와 상관없이 연중 안정적으로 작물을 생산할 수 있다[2,5]. 작물 생장에 영향을 미치는 여러 요인 중에서 광질(파장역)과 광강도는 종자 발아, 잎과 줄기 생장, 개화 등 작물의 광합성이나 형태형성에 영향을 미친다[1,7,8]. 인공광이나 자연광 재배시설에서는 작물 재배를 위하여 주로 고압나트륨등(High-Pressure Sodium lamp, HPS), 메탈할라이드등(Metal-Halide lamp, MH), 백열등(Incandescent lamp,

* Corresponding author: Jeong-Wook Heo
Phone: +82-63-238-4063; Fax: +82-63-238-4035;
E-mail: wooncho@korea.kr

IL), 형광등(Fluorescence lamp, FL) 및 발광다이오드(Light-Emitting Diodes, LEDs) 등을 인공광원으로 이용하고 있다 [23,25]. 이들 광원 중에서 MH나 IL, HPS는 주로 온실에서 강우, 폭설, 황사 등 자연광이 부족한 시기에 광을 보충해주는 보광광원으로 이용하고 있다. 한편 LEDs는 형광등이나 기타 광원에 비해 수명이 길고 전력소모량이나 광원으로부터의 발열량이 적어 근접 조사가 가능하므로 다단재배 방식을 채택하는 인공광 재배시설인 식물공장에서 활용도가 높은 광원이다 [11,20,21].

인공광 재배시설뿐만 아니라 노지나 온실과 같은 자연광 시설에서도 엽채류나 과채류 재배를 위하여 상기 서술한 광원을 보광광원으로 이용하는데, 이들 광원은 전력소모량이 많아 LEDs를 채용하는 경우가 늘고 있다. LEDs는 상대적으로 낮은 전력소모량 뿐만 아니라, HPS에 비해 재배작물의 전개엽 수나 화방수, 라이코펜 합성에 있어 유리한 광원으로 보고되고 있다[6,19,33,34]. 본 연구에서는 자연광을 채용하지 않는 인공광 식물공장 조건에서 온실 보광광원으로 범용되는 LEDs, HPS 및 MH를 인공광원으로 하여 방울토마토 'CF Jelly'의 수확 가능성을 검토하였으며, 인공광하에서 재배한 방울토마토의 생장, 생산성이나 품질을 비교·검토하였다.

재료 및 방법

식물재료 및 재배조건

공시작물은 방울토마토(*Lycopersicon esculentum* var. cv. 'CF Jelly') 실생묘로 하였다. 방울토마토 종자는 우레탄 스폰지($3\times3\times3$ cm)에 과종하여 24일간 온도 $25\pm5^{\circ}\text{C}$, 상대습도 $60\pm10\%$ 로 제어한 생장상실에서 육묘하였다. 재배시험은 샌드위치 판넬 구조의 생장상실에 1단 베드($270\times200\times50$ cm) 3조를 구축, 상부에 3종의 광원을 설치하였으며 온도와 습도는 각 $25\pm5^{\circ}\text{C}$ 및 $60\pm10\%$ 로 제어하였다. 본엽이 4~5매 전개한 방울토마토 실생묘는 코코피트 그로우백($90\times15\times4$ cm, CocoMix, Seowon, Korea)에 정식하고 원예시험장 토마토 전용 배양액(N-P-K-Ca-Mg-Fe-Cu-Mn-Zn-B-Mo=9-2-5-4-2-3-0.02-0.5-0.05-0.5-0.01 me/L)을 1일당 3L/개체씩 161일간 자동 공급하였다[26]. 시험기간 동안 배양액 EC와 pH는 각각 2.5 dS/m와 6.0으로 제어하였다.

인공광원으로는 Fig. 1과 같이, 적색과 청색 혼합비율이 1:9인 발광다이오드(Light-Emitting Diodes, Philips GreenPower LED, Philips, Netherlands, LEDs), 고압나트륨등

(High-Pressure Sodium Lamp, HPS), 메탈할라이드등(Metal-Halide Lamp, MH)의 3종으로 하였다. 시험기간 모든 조사구의 광강도는 평균 $220\pm30\text{ }\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 제어하였으며, 1일 명기 및 암기는 각 12시간으로 제어하였다.

생장량 조사 및 통계분석

재배개시 후 일주일 간격으로 각 처리구에서 방울토마토 초장, 줄기 직경, 전개엽수, 화방수 및 개화수 등을 측정하였다. 줄기 직경은 개화 화방 하부 1 cm 위치에서 측정하였으며, 재배개시 7주차부터는 수확 과실수, 과장, 과중과 과폭 및 배꼽썩음병 발생률 등을 조사하였다. 재배개시 7주차부터 수확한 과실의 길이와 폭을 측정하여 과장을 과폭으로 나누어 과형지수를 산출하였다. 과실의 당도(Brix)는 각 조사구에서 개체당 완숙과 중에서 임의로 20개씩 수확하여 믹서로 분쇄한 뒤 즙액을 여과지(No.1, Advantec, Japan)로 여과한 후 휴대용 디지털 당도계(SUGAR-1 PLUS, CAS Corporation)를 이용하여 측정하였다.

실험은 식물공장 생장상실 2개소에서 2회 반복하였으며, 완전임의배치법으로 수행하였다. 수집된 모든 데이터는 SAS 프로그램(Statistical Analysis System, 9.4 Version, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 일원분산분석 (one-way analysis of variance, ANOVA)하고, 처리구간의 평균값은 Duncan의 다중검정($P=0.05$)으로 비교하였다.

결과 및 고찰

식물공장 조건에서 광원을 LEDs, HPS 및 MH 등으로 달리하였을 때 조사한 광원에 따라 'CF Jelly' 방울토마토의 영양생장과 생식생장은 다소 다른 반응을 나타내었다. 재배개시 5주차부터 재배종료 시까지 광원의 차이는 줄기 직경에는 영향을 미치지 않았다. 줄기 직경은 LEDs 조사구에 비해 HPS와 MH조사구에서 각각 18% 및 11% 증가하는 경향을 보였으나 광원처리구 간에 통계적인 유의성은 인정되지 않았다. HPS과 MH 조사구에서의 초장은 LEDs 조사구보다 유의하게 증가하여 재배 종료일에는 LEDs 조사구에 비해 24% 이상 신장하였다(Table 1). 토마토 재배 초기의 화방수는 광원 간 현저한 차이가 없었으나, 재배종료 시에는 HPS 조사구의 화방수가 LEDs와 MH에 비하여 유의성 있게 높았다. 열 내 색소합성능에 미치는 조사 광원의 영향을 살펴보면, LEDs나

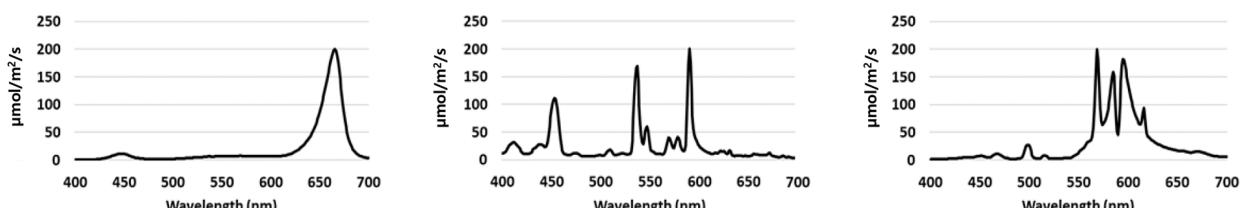


Fig. 1. Light intensity of LEDs (Left) of blue plus red lights, Metal-Halide Lamps (MH, Middle), and High-Pressure Sodium Lamps (HPS, Right) tested in the experiment.

Table 1. Plant height, stem diameter, number of trusts, SPAD value and sugar content of cherry tomato grown under the different light sources during the culture period on day 161

Treatments	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	No. of trusts	SPAD	Sugar content (°Brix)
LEDs (Blue+Red)	263.7±5.2 ^b ^y	7.3±0.9a	28.7±0.4b	60.8±0.9a	9.2±0.1a
HPS (High Pressure Sodium Lamp)	344.1±8.4a	8.6±0.6a	30.7±0.6a	60.1±0.4a	9.9±0.2b
MH (Metal Halide Lamp)	328.0±6.5a	8.1±0.8a	28.9±0.6b	57.1±0.9b	9.3±0.2a
Significance ^x	***	ns ^w	*	*	*

^zmeans average±standard error.

^yDifferent letter indicates significantly different at the 5% level by Duncan's multiple range test.

^xThe difference are significant at 5%(*) or 0.1% (****) levels as indicated (n=8).

^wmeans non significance.

HPS 하에서 재배한 방울토마토 엽의 SPAD치가 MH 조사구에 비해 5% 이상 증가하는 것으로 나타났다.

조사 광원에 따른 토마토 재배시기 별 과실 수확량 변화는 Fig. 2와 같다. 조사 광원 중 LEDs 조사구는 재배기간 동안 다른 광원들에 비해 전반적으로 수량이 높은 경향을 보였으며, 특히 재배 초기의 수량 증가에 효과적인 것으로 나타났다. 다른 처리구에 비해 MH 조사구의 수량은 비교적 안정적인 추세를 유지하였으나 다른 광원에 비해 총 수량은 적었다. 재배기간 동안 총 수확량은 LEDs 조사구 > HPS 조사구 > MH 조사구 순으로 수확량이 증가하였으며, LEDs 조사구의 수량은 MH 조사구에 비해 2배 이상 증가하였다. 과실수뿐만 아니라 평균 과중 역시 MH 조사구에 비해 수확량이 높았던 LEDs나 HPS 조사구에서 증가하였다. 재배종료 시 과중은 MH 조사구에 비해 28% 증가하였으며, 과중 증가에 있어 LEDs나 HPS 조사구간에 통계적인 유의성은 인정되지 않았다(Fig. 3). 과실의 형태를 나타내는 과형지수는 수확 초기인 58일째에는 MH 조사구에서 유의하게 증가하여 다른 조사구에 비해 과실의 상하 길이가 길어지는 형태가 관찰되었으나 시간이 경과함에 따라 광원에 따른 과형 차이는 나타나지 않았다. 한편, 재배종료 시 HPS 조사구의 과실 당도는 9.9 °Brix로서 LEDs나 MH 조사구의 9.2와 9.3 °Brix에 비해 약 8% 증가하였다(Table 1).

재배기간 동안 수확한 과실을 대상으로 배꼽썩음병 발생률

을 산출한 결과, HPS 조사구의 배꼽썩음병 발생률은 LEDs나 MH 조사구에 비해 24% 가량 유의성 있게 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 4).

Fig. 1에서와 같이, 본 연구에서 이용된 LEDs, HPS 및 MH 광원은 상이한 파장역, 즉 광질을 갖고 있음을 알 수 있는데 이와 같은 광질 차이가 식물공장 조건에서 재배한 'CF Jelly' 방울토마토의 줄기 신장, 착과나 당합성능에 영향을 미치는 것으로 알 수 있었다. 인공광 식물공장 조건에서 시험기간 동안 방울토마토를 12회 수확할 수 있었으며, 줄기 직경비대에는 HPS나 MH 광원의 영향이 크게 나타났으나 두 광원간 유의성은 인정되지 않았다. 또한 작물 초장 신장이나 화방수 또한 HPS 또는 MH 하에서 재배한 방울토마토에서 증가하였음을 알 수 있었다. 그러나 생식생장 측면에서 과실 발달 및 수확량은 HPS 또는 MH 조사구에 비해 LEDs 조사구에서 유의하게 향상되는 결과를 얻었다.

일반적으로 인공광 식물공장 조건에서 430-470 nm의 청색과 630-670 nm의 적색 광질은 작물의 양적생장을 촉진시키는 광질로 알려져 있는데, 청색보다는 적색광질 하에서 생장 촉진 효과가 큰 것으로 보고되고 있다[14,18]. 또한 청색과 적색의 혼합광질을 조사한 경우에도 적색광의 비율이 높을수록 작물의 양적생장이 촉진된다는 보고들을 고려할 때 작물의 생장과 발달을 위해서는 청색과 적색광질의 혼합비율이 중요하다는 것을 알 수 있다[4,7,12,13,15]. Zha 등 [36]의 연구에 의

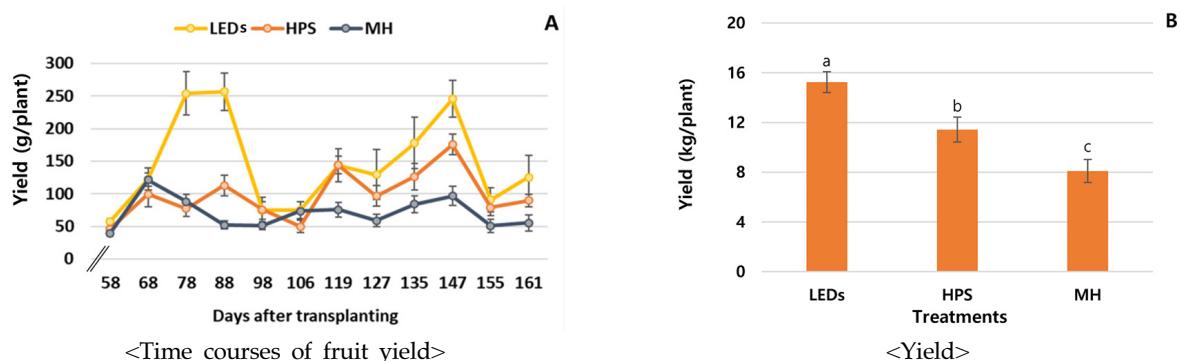


Fig. 2. Time courses of fruit yield per plant (A) and accumulated yield (B) of cherry tomato grown under the different light sources during the culture period. Vertical bars represent standard error. Treatment codes see Table 1.

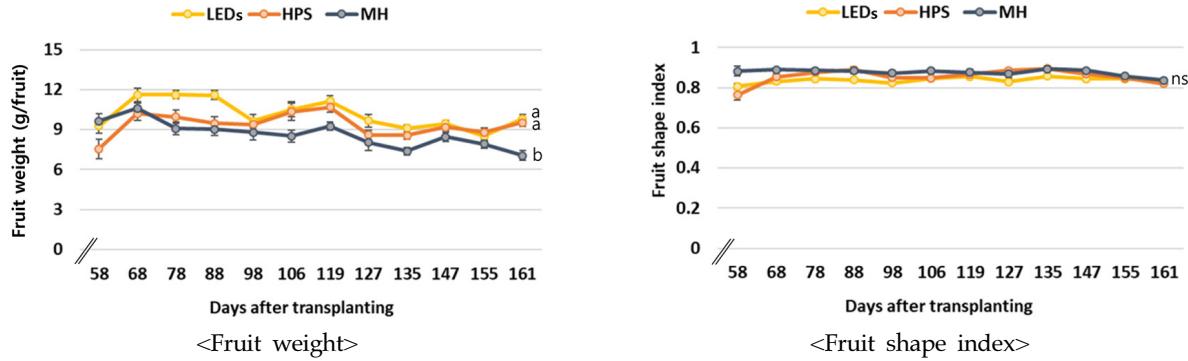


Fig. 3. Fruit fresh weight and shape index of cherry tomato grown under various light sources during harvest period. Vertical bars represent standard error. Different letter indicates significantly different at the 5% level by Duncan's multiple range test. Treatment codes see Table 1 (Fruit weight, n=50; Fruit shape index, n=20).

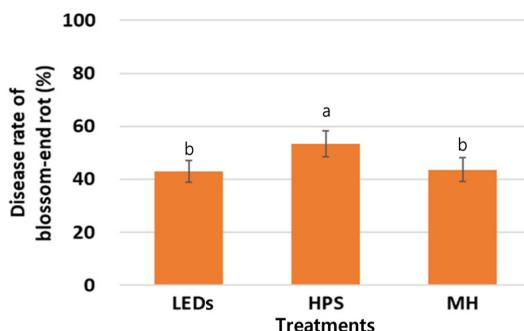


Fig. 4. Disease rate of blossom-end rot of cherry tomato grown under various light sources during harvest period. Vertical bars represent standard error. Different letter indicates significantly different at the 5% level by Duncan's multiple range test. Treatment codes see Table 1 (n=50).

하면 청색과 적색광질의 혼합 비율을 제어한 결과 적색광질 비율이 높을 경우 엽채류 생장, 물질합성을 촉진한다고 보고하였다. 또한 엽채류 이외에 과채류인 방울토마토를 식물재료로 한 광질제어 연구에서도 혼광광질을 조사할 경우 청색과 대비 적색광질의 혼합비율이 높을 경우 육묘기간 동안 실생묘의 생장이나 정식후 과실 수확량을 촉진하는 등 적색광질의 생장촉진 효과를 보고하고 있다[4,27,37]. 인공광 또는 자연광 재배시설에서 청색 대비 적색광질 비율을 증가시킴으로써 작물 육묘나 재배기간 동안 엽채류나 과채류의 영양이나 생식생장을 촉진시킨다[24,30]. 상기 연구결과에서와 같이, 본 시험조건에는 비록 적색광질 비율 제어 효과 시험은 수행되지 않았으나 청색광 대비 적색광질의 비율을 1:9로 최대로 하여 조사한 것이 'CF Jelly' 방울토마토의 생장에 유의한 영향을 미친 것으로 판단된다.

시험기간 동안 HPS나 MH는 LEDs에 비해 방울토마토의 신장생장을 촉진하였으며, 재배개시 초기 줄기 비대에 있어서는 LEDs나 HPS 조사구의 영향이 유의하게 나타났으나 이후 광원의 차이에 의한 영향은 나타나지 않았다. 인공광 식물공장 조건은 아니지만 온실에서 재배한 토마토 생장이나 생산성 향상을 위하여 HPS나 MH, 형광등이나 LEDs 등의 광원을 보

광광원이나 주광원으로 사용하는 것이 유리하다[10,11,24,27]. 인공광 식물공장에서는 주광원으로 이를 광원을 조사하면 과방수 증가에 있어 광원 차이에 의한 유의성은 인정되지 않았으나 HPS 대비 LEDs 조사에 의한 토마토 생장 촉진효과에 대한 연구결과가 보고되어 있다[9,16,33]. 본 연구조건에서와 같이 HPS 광원이 방울토마토의 신장생장이나 과방수 증가에 있어 LEDs에 비해 효과적이었다고 하더라도 수확량 증가에는 오히려 LEDs가 효과적이었다고 하더라도 수확량 증가에는 오히려 LEDs가 효과적이었다고 할 수 있었다. 이러한 광원별 수확량이나 생장의 차이는 광원 이외에 재배시설의 재배환경, 배양액 관리, 보광광원이나 주광원 등의 광원이용방법 등의 차이에 의한 영향도 함께 고려해야 할 것으로 판단된다.

LEDs 광원은 'CF Jelly' 방울토마토의 개체당 과실 수확량은 15kg 수준으로서 HPS 대비 33% 이상, MH 대비 88% 이상 증가하였다. 인공광 식물공장 조건에서 시험한 3종의 광원 중 과실당도는 HPS 조사구에서 9.9 °Brix로 최대인 반면 LEDs나 MH 조사구에서는 9.2와 9.3 °Brix로 낮게 나타났다. LEDs에 비해 조사한 광원이 포함하고 있는 적색광 광장역이 넓은 HPS 조사구에서 당도가 증가하였는데, 이는 적색광질이 작물의 호흡이나 해당작용을 촉진하여 과실내 당을 축적하는 기작에 영향을 미친 것으로 생각된다[17,31,32].

인공광 식물공장 조건에서 조사광원이 갖는 광질이 배꼽썩음병 발생에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 드문데, 본 연구에서와 같이 광원별 광강도를 동일하게 제어한 조건에서는 방울토마토 과실의 배꼽썩음병 발생율은 HPS 조사구에서 최대로 나타났다. 이는 선행 연구결과와 비교해 볼 때 본 시험에서 청색과 적색 비율이 1:9로 낮게 제조한 LEDs 채용이나 MH 광원이 갖는 청색 광장역의 비율에 비해 HPS 광원내 청색광질 비율이 낮아 토마토의 물질대사능이 억제되었기 때문으로 예측된다[28,36-38]. 일반적으로 작물의 이차대사산물은 광합성동화산물로부터 합성되는데[32], 광합성 속도는 광강도나 광질, 광조사 시간 등 광환경에 의해 좌우되므로 결국 이차대사산물의 합성 역시 광질의 영향을 받는다고 할 수 있다.

적색광질은 세포생장을 촉진하는 반면 청색광질은 세포비대를 억제하여 과실 발달을 지원시킬 수 있으므로, 과실이 급격하게 비대하면서 발달하는 배꼽썩음병은 청색광질 조사에

의해 억제될 수 있다[3,39]. 또한 과채류의 경우 세포 팽창속도가 증가하는 개화기부터 과실 발달 초기에는 Ca 결핍이 일어나기 쉽기 때문에 배꼽썩음병이 발생하기 쉽다[22]. 배꼽썩음병 발생은 과실 세포 팽창 속도의 영향을 받기 때문에 과실 발달 초기에 청색광을 조사할 경우 세포 팽창속도를 지연시키면 배꼽썩음병 발생률을 저감할 수 있다고 한다[29].

식물 재배에 사용되는 고압나트륨등, 메탈할라이드등, 형광등과 같이 온실조건에서 보광광원으로 이용되고 있는 광원의 경우 청색이나 적색 파장역이 LEDs 광원에 비해 낫다. 따라서 인공광만으로 자연광과 동등한 수준의 광강도를 확보하기 어려운 인공광 식물공장 시스템에서는 각 광원을 주광원으로 이용하는 것보다 파장역을 선택하여 단일 또는 혼합광 제어가 용이한 LEDs 광원의 활용도가 높아지고 있다[23,25,35]. 물론 LEDs도 온실과 같은 자연광 재배시설에서 보광광원으로 일부 채용되고 있으나, 광원의 크기, 발열량, 광원 수명 등을 고려하면 주년 생산시설인 인공광 식물공장의 광원으로 적합하다고 할 수 있다[14,17,21,25]. 본 실험 조건에서 LEDs나 MH 조사는 HPS에 비해 'CF Jelly' 방울토마토의 당합성을 억제하였으나 배꼽썩음병 발생 억제에는 HPS 대비 효과적인 것으로 나타났다. 본 연구에서는 광원과 재배베드 간의 거리 문제로 인하여 재배기간이나 수확기간이 긴 온실재배 방울토마토를 1회 과종정식 후 12회까지 수확하였으나 HPS나 MH에 비해 LEDs 광원은 과실 생산성을 증가시키기에 유리한 광원임을 알 수 있었다. 금후 식물공장 재배 방울토마토의 배꼽썩음병 발생율과 관련한 배양액 조성, 광강도 및 품종간 생육 특성 등의 상세 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This study was funded by a research program (PJ 01579601) of Rural Development Administration (RDA), Republic of Korea.

References

1. Heo JW, Baek JH (2021) Effects of light-quality control on the plant growth in a plant factory system of artificial light type. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 40(4), 270-278. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2021.40.4.31>.
2. Cha MK, Cho JH, Cho YY (2013) Growth of leaf lettuce as affected by light quality of LED in closed-type plant factory system. *Journal of Bio-Environment Control*, 22(4), 291-297. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2013.22.4.291>.
3. Cosgrove DJ, Green PB (1981) Rapid suppression of growth by blue light: Biophysical mechanism of action. *Plant Physiology*, 68(6), 1447-1453. <https://doi.org/10.1104/pp.68.6.1447>.
4. Deram P, Lefsrud MG, Orsat V (2014) Supplemental lighting orientation and red-to-blue ratio of light-emitting diodes for greenhouse tomato production. *HortScience*, 49(4), 448-452. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.49.4.448>.
5. Koza T (2013) Sustainable plant factory: closed plant production systems with artificial light for high resource use efficiencies and quality produce. *Acta Horticulturae*, 1004, 27-40. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2013.1004.2>.
6. Inden H, Akamatsu Y, Mastuda T, Yamamoto M (2011) Low cost plant factory using hybrid electrode fluorescent lamp (HEFL). *Acta Horticulturae*, 907, 157-160, <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.907.21>.
7. Lee MJ, Son, KH, Oh, MM (2016) Increase in biomass and bioactive compounds in lettuce under various ratios of red to far-red LED light supplemented with blue LED light. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 57(2), 139-147. <https://doi.org/10.1007/s13580.016.0133.6>.
8. Batista DS, Felipe SHS, Silva TD, de Castro KM, Mamedes-Rodrigues TC, Miranda NA, Ríos-Río AM, Faria DV, Fortini EA et al. (2018) Light quality in plant tissue culture: does it matter?. *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 54(3), 195-215. <https://doi.org/10.1007/s11627.018.9902.5>.
9. Dueck TA, Janse J, Eveleens-Clark B, Kempkes F (2011) Growth of tomatoes under Hybrid LED and HPS lighting. *Acta Horticulturae*, 952, 335-342. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2012.952.42>.
10. Liu XY, Chang SR, Guo ZG, Li XJ (2011) Effect of different light quality of LED on growth and photosynthetic character in cherry tomato seedlings. *Acta Horticulturae*, 907, 325-330. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.907.53>.
11. Liu XY, Xu YL, Wang Y, Yang QC, Li QM (2022) Rerouting artificial light for efficient crops production: A review of lighting strategy in PEALs. *Agronomy*, 12(5), 1021-1029. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051021>.
12. Lee SY, Kwon JK, Park KS, Choi HG (2014) The effect of LED light source on the growth and yield of greenhouse grown tomato. *Acta Horticulturae*, 1037, 789-793. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2014.1037>.

- .104.
13. Lee KH (2018) Effects of LED light quality of urban agricultural plant factories on the growth of daughter plants of 'Seolhyang' strawberry. *Journal of Environmental Science International*, 27(10), 821-829. <https://doi.org/10.5322/JESI.2018.27.10.821>.
 14. Kang SN, Yang HJ, Ko BS, Kim MJ, Kim BS, Park SM (2015) Effect of LED with mixed wavelengths on bio-active compounds in cherry tomato and red cabbage. *Korean Journal of Food and Cookery Science*, 31(4), 505-509. <https://doi.org/10.9724/kfcs.2015.31.4.505>.
 15. Kim SJ, Bok GJ, Lee GJ, Park JS (2017) Growth characteristics of lettuce under different frequency of pulse lighting and RGB ratio of LEDs. *Journal of Bio-Environment Control*, 26(2), 123-132. <https://doi.org/10.12791/KSBC.2017.26.2.123>.
 16. Gómez C, Mitchell CA (2015) Growth responses of tomato seedlings to different spectra of supplemental lighting. *HortScience*, 50(1), 112-118. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.1.112>.
 17. Bian ZH, Yang QC, Liu WK (2015) Effects of light quality on the accumulation of phytochemicals in vegetables produced in controlled environments: a review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95(5), 869-877. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6789>.
 18. Karimi M, Ahmadi N, Ebrahimi M (2022) Red LED promotes biomass, flowering and secondary metabolites accumulation in hydroponically grown *Hypericum perforatum* L. (cv. Topas). *Industrial Crops and Products*, 175, 114239-114251. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.114239>.
 19. Sui YX, Harvey PJ (2021) Effect of light intensity and wavelength on biomass growth and protein and amino acid composition of *Dunaliella salina*. *Foods*, 10(5), 1018-1028. <https://doi.org/10.3390/foods10051018>.
 20. Chen, XL, Guo WZ, Xue XZ, Wang LC, Qiao XJ (2014) Growth and quality responses of 'Green Oak Leaf' lettuce as affected by monochromic or mixed radiation provided by fluorescent lamp (FL) and light-emitting diode (LED). *Scientia Horticulturae*, 172(9), 168-175. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.04.009>.
 21. Morrow RC (2008) LED lighting in horticulture. *HortScience*, 43(7), 1947-1950. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.7.1947>.
 22. Willumsen J, Petersen KK, Kaack K (1996) Yield and blossom-end rot of tomato as affected by salinity and cation activity ratios in the root zone. *Journal of Horticultural Science*, 71(1), 81-98. <https://doi.org/10.1080/14620316.1996.11515385>.
 23. Orsini F, Pennisi G, Zulfiqar F, Gianquinto G (2020) Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFAFs). *European Journal of Horticultural Science*, 85(5), 297-309. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.1>.
 24. Paucek I, Pennisi G, Pistillo A, Appolloni E, Crepaldi A, Calegari B, Spinelli F, Cellini A, Gabarrell X et al. (2020) Supplementary LED lighting improve yield and precocity of greenhouse tomatoes in the mediterranean. *Agronomy*, 10(7), 1002-1015. <https://doi.org/10.3390/agronomy10071002>.
 25. Promratrak L (2017) The effect of using LED lighting in the growth of crops hydroponics. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 6(2), 133-140. <https://doi.org/10.12720/sgce.6.2.133-140>.
 26. Lee HG, Lee HK, Lee MH, Kim GJ, Choi JJ (2010) Effects of the Concentration of Nutrient Solution on Growth and Qualities of Truss Tomato in Hydroponic Culture, Proceeding of Kor. J. Hort. Sci. Technol, 28 (SUPPL, II). <https://doi.org/10.7235/hort.2010>.
 27. Son KH, Kim EJ, Oh MM (2018) Growth and development of cherry tomato seedlings grown under various combined ratios of red to blue LED lights and fruit yield and quality after transplanting. *Journal of Bio-Environment Control*, 27(1), 54-63. <https://doi.org/10.12791/LSBEC.2018.27.1.54>.
 28. Landi M, Zivcak M, Sytar O, Breštic M, Allakhverdiev S (2020) Plasticity of photosynthetic processes and the accumulation of secondary metabolites in plants in response to monochromatic light environments. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)- Bioenergetics*, 1861(2), 148131. <https://doi.org/10.1016/j.bbabi.2019.148131>.
 29. Djangsou H, Enrico F, Domenico R, Matteo B (2019) Blossom end-rot in tomato (*Solanum lycopersicum* L.): a multi-disciplinary overview of inducing factors and control strategies. *Scientia Horticulturae*, 249, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.01.042>.
 30. Olle M, Viršile A (2013) The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science*, 22(2), 223-234. <https://doi.org/10.23986.afsci.7897>.
 31. Owen J, Laybourn-Parry J, Wellburn A (1987) Influences of light quality, growth regulators and in-

- hibitors of protein synthesis on respiration of protoplasts from meristematic cells in barley seedlings. *Annals of Botany*, 59(1), 99–105. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087291>.
32. Bartwal A, Mall R, Lohani P, Guru SK, Arora S (2013) Role of secondary metabolites and brassinosteroids in plant defense against environmental stresses. *Journal of Plant Growth Regulation*, 32(1), 216-232. <https://doi.org/10.1007/s00344-012-9272-x>.
33. Meramkulova K, Tanybayeva Z, Kydyrbekova A, Turbekova A (2021) The efficiency of LED irradiation for cultivating high-quality tomato seedlings. *Sustainability*, 13(16), 9426-9426. <https://doi.org/10.3390/su13169426>.
34. Dannehl D, Schwend T, Veit D, Schmidt U (2021) Increase of yield, lycopene, and lutin content in tomatoes grown under continuous PAR LED lighting. *Frontiers in Plant Science*, 12, 611236. <https://doi.org/10.3389/fpis.2021.611236>.
35. Wang S, Jin N, Jin L, Xiao X, Hu L, Liu Z, Wu Y, Xie Y, Zhu W et al. (2022) Response of tomato fruit quality depends on period of LED supplementary light. *Frontiers in Nutrition*, 9, 833723. <https://doi.org/10.3389/fruit.2022.833723>.
36. Zha LY, Liu WK, Yang QH, Zhang YB, Zhou CB, Shao MJ (2020) Regulation of ascorbate accumulation and metabolism in lettuce by the red:blue of continuous light using LEDs. *Frontiers in Plant Science*, 11, 704. <https://doi.org/10.3389/fpis.2020.00704>.
37. Yan W, Zhang Y, Zhang Y, Cheng R, Zhang Y, Yang Q, Li T (2018) Effects of supplementary artificial light on growth of the Tomato (*Solanum lycopersicum*) in a Chinese greenhouse. *The Horticulture Journal*, 87(4), 516-523. <https://doi.org/10.2503/hortj.OKD-165>.
38. Xie BX, Wei JJ, Zhang YT, Su W, Sun GW, Hao YW, Liu HC (2019) Supplemental blue and red light promote lycopene synthesis in tomato fruits. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(3), 590-598. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62062-3](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)62062-3).
39. Cosgrove DJ (1988) Mechanism of rapid suppression of cell expansion in cucumber hypocotyls after blue-light irradiation. *Planta*, 176(1), 109-116. <https://doi.org/stable/23379378>.