

Quantum dot LED (QD-LED)와 White-LED 보광에 따른 방울토마토 과실의 품질, 수확량 및 경제성 비교

이주환¹, 최담희², 노유한², 권용범², 아포라비 아비오둔 사무엘², 최인이³,
김용득⁴, 신정철⁵, 김민하⁶, 김지동⁷, 왕립⁸, 강호민^{9*}

¹강원대학교 스마트농업융합학과 박사과정, ²강원대학교 스마트농업융합학과 석사과정, ³강원대학교 농업생명과학연구원 연구교수,
⁴철원플라즈마산업기술연구원 수석연구원, ⁵철원플라즈마산업기술연구원 선임연구원, ⁶철원플라즈마산업기술연구원 주임연구원,
⁷주식회사 퓨처그린 대표, ⁸산동농업과학원 채소연구소 연구원, ⁹강원대학교 스마트농업융합학과 교수

Comparison of Quality, Yield and Economic Feasibility of Cherry Tomato (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) Fruit under Quantum Dot LED (QD-LED) and White-LED

Joo Hwan Lee¹, Dam Hee Choi², Yoo Han Roh², Yong Beom Kwon², Abiodun Samuel Afolabi², In-Lee Choi³,
Yongduk Kim⁴, Jung Chul Shin⁵, Minha Kim⁶, Jidong Kim⁷, Li-Xia Wang⁸, Ho-Min Kang^{9*}

¹Ph.D Course, Interdisciplinary Program in Smart Agriculture, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea
²Master's Course, Interdisciplinary Program in Smart Agriculture, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea
³Research Professor, Agricultural and Life Science Research Institute, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea
⁴Principle Research Engineer, Cheorwon Plasma Research Institute, Cheorwon 24062, Korea
⁵Research Engineer, Cheorwon Plasma Research Institute, Cheorwon 24062, Korea
⁶Research Assistant Engineer, Cheorwon Plasma Research Institute, Cheorwon 24062, Korea
⁷CEO, FutureGreen Co., Ltd., Yongin 17095, Korea
⁸Researcher, Insitute of vegetables, Shandong Academy of Agricultural Sciences, China
⁹Professor, Interdisciplinary Program in Smart Agriculture, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Korea

*Corresponding author: Ho-Min Kang (E-mail: hominkang@kangwon.ac.kr)

ABSTRACT

Received: 27 June 2022

Revised: 8 September 2022

Accepted: 8 September 2022

This study was conducted to investigate the yield of fruits and changes in internal and external quality, and to select an economical and effective light source. Sunlight was set as a control, and lights were supplemented on the upper canopy of cherry tomatoes (*Solanum lycopersicum* var. *cerasiforme*) using white and QD-LED. The supplemental light through the artificial light source increased the light intensity by 45.4% on average compared to the control, and the Fv/Fm increased by 9.2%. There was a difference in light quality as well as a change in light intensity, and it was found that the QD-LED with the highest a*/b* value progressed faster at the breaking stage and the maturation period was greatly shortened compared to that of White-LED and the



control. The supplemental lighting treated group showed higher values than the control group for length, width, number of fruit, and weight of cluster, and among them, QD-LED showed the highest value. The QD-LED, which matured tomatoes the fastest within the same period, resulted in the highest soluble solids and the lowest titratable acidity and firmness. For DPPH radical scavenging activity and ascorbic acid, the supplemental lighting treatment showed higher values than the control group, and QD-LED showed better effects than White-LED in the supplemental lighting treatment. Additionally, the malformed fruit incidence rates were the lowest in QD-LED. Considering the economical aspect of both light sources, the QD-LED showed a relatively lower electrical power consumption, lower cost, and a much higher energy use efficiency than White-LED. We conclude that supplemental lighting on the upper canopy of cherry tomatoes is effective and QD-LED is the most suitable for use.

Keywords: Cherry tomato, LED, Light source, Supplemental lighting, Upper canopy

서론

토마토는 전 세계적으로 5백만 헥타르(ha) 이상의 경작지에서 재배되고 있으며 1억 8천 2백만 톤(ton) 이상 생산되는 가장 많이 재배되는 원예작물이다(Caruso et al., 2022). 다양한 형태의 토마토 중 방울토마토는 구경 2-3 cm 작은 방울 형태 과실로 부드러운 과육과 높은 당도를 가져, 세계에서 인기가 많은 채소작물 중 하나이다(Kim et al., 2020a). 최근 빈번한 기상이변으로 일조량이 부족해 과채류의 생산량 및 착과율 감소, 기형과 증가 등의 문제가 증가하고 있다. 특히 토마토는 수확량을 높이기 위해 밀식재배를 하는 경우가 많아 작물들 사이에 그들이 생겨 생육에 필요한 빛이 부족해질 수 있을 가능성이 높다(Li et al., 2019).

광은 식물의 광합성 및 생육을 촉진시켜 생체중을 증가시키고 수확량에 큰 영향을 미치는 중요한 요소로(Zhu et al., 2010), 광 부족 문제를 해결하기 위해 현재 시설 내 다양한 인공광원이 이용되고 있다. 이러한 인공광원을 이용한 보광은 시설 내 부족한 광을 보충해줄 뿐만 아니라, 광질에 따라 다르게 반응하는 광수용체에 의해서도 다양한 생리반응을 나타낼 수 있다고 보고되어 있다(Lee and Kim, 2014).

대표적인 보광방법으로는 균락 위 보광이 있으며, 예전부터 균락위 보광등으로는 형광등(Fluorescent lamp), 고압나트륨등(High pressure sodium lamp), 그리고 메탈할라이드등(Metal halide lamp) 등 다양한 광원이 사용되어 왔다(Park et al., 2016). 최근에는 기존 인공광원에 비해 긴 수명, 다양한 광질의 제어, 그리고 낮은 발열량 특성을 갖고 있는 LED (light emitting diode)가 사용되고 있다(Bantis et al., 2018). 또한 LED는 고압나트륨등보다 75% 더 높은 전기변환효율로 가격도 기존보다 25% 미만으로 낮출 수 있어(Gomez et al., 2013), 작물의 종류와 목적에 따라 다양한 연구에 이용되고 있다.

식물생장용 등으로 사용되는 LED는 다양한 종류가 있는데, 그중 White-LED는 Red-LED (600-700 nm), Green-LED (500-580 nm), Blue-LED (400-500 nm)를 결합하거나, 형광체를 이용해 단색의 Blue-LED의 빛을 백색으로 하향 변환하여 만든 LED로(Yuen et al., 2013), 온실 내 보광용이나 폐쇄형의 식물공장에서 작물의 성장용등으로 이용되고 있다(Wojciechowska et al., 2015). QD (Quantum dot)-LED는 나노미터 단위의 크기로 줄어들었을 때 광학 및 전기적 성질이 변하는 반도체 입자인 양자점(Quantum dot, QD)을 이용해 제작된 인공광원이다(Jung et al., 2021). QD-LED는 파장의 가변성으로 스펙트럼이 고정되어 있는 기존의 LED의 문제점을 극복할 수 있으며, 넓은 배광각으로 균일성을 높여 직하형인 일반 LED보다 넓은 범위의 고른 조광이 가능하다(Han, 2019). 또한 다른 두 파장을 독립적으로 처리했을 때 각각의 광합성률의 합보다 광합성률이 더욱 높아지는 에머슨 상승효과까지 얻을 수 있는 다색파장의 LED 조명들을 저가로 제작이 가능하다는 장점을 가지고 있다(Han, 2019). 기존 연구에서는

QD-LED에 포함되어 있는 FR (Far-red; 근적외선 700 – 800 nm)을 Blue (청색) 혹은 Red (적색) 빛에 결합했을 때 시너지 효과로 인해 광합성이 증가할 수 있다고 하였다(Zhen and van Iersel, 2017). 그리고 Han 등(2018)은 방울토마토의 발아율, 엽록소 함량, 건물물 및 생육이 우수했던 QD-LED광이 식물공장내 방울토마토 발아 및 재배 시 적합하다고 하였으며, 엽채류인 로메인 상추에서도 QD-LED의 생육지수가 자연광 및 다양한 인공광원보다 우수하다고 하였다(Kim et al., 2020b).

이에, 본 연구는 방울토마토를 대상으로 자연광을 대조구로 설정하고 White-LED, QD-LED의 균락 위 보광을 통해 재배용 인공광원으로 경제적이고 효율적인 광원을 선발하기 위해 수행되었다.

재료 및 방법

공시재료 및 재배방법

공시재료는 50일 동안 육묘 된 접목묘 ‘TY 스위트니’ 방울토마토(PPS Seed Co., Ltd., Korea)를 사용하였다. 재배 방법은 수경재배 방식으로 펄라이트(New PerlShine No. 3, Green Fire Chemicals Co., Ltd., Korea) 베드(19,900 × 300 mm)에 450 mm 간격으로 20주씩 정식하였다. 2019년 4월 중순부터 9월 중순까지 주간온도는 30°C 이하였으며, 토마토 한방비료(토마토한방, Coseal Co., Korea)를 물 20리터당 A비료(N:P:K = 8.5:5.0:26.0) 1,360 g, B비료(N:P:K = 11.0:0.0:0.0) 760 g을 각각 녹인 다음 100배로 희석하여 pH 6.0 ± 0.5, EC 1.5 ± 0.5 dS·cm⁻¹로 조절한 배양액을 공급하였다. 또한 정상과 발현 및 착과 촉진을 위해 각 화방별로 만개 후 토마토톤(IAP GIBBERELLIN, Bayer CropScience Ltd., Korea) 희석액(1.29 g/l L)을 오전 10시 전에 분무기로 같은 날 스프레이 처리하였다.

광원 종류 및 처리

무보광(Sunlight)을 대조구, White-LED (100 W), QD-LED (100 W)를 실험구로서 하였고(Fig. 1), 20주당 3개의 보광등을 사용하였다. 보광은 2화방 형성 직후부터 처리하였고, 보광광원의 광도는 Quantum radiometric probe (LP471PAR, Delta OHM, Italy)와 Photo/Radiometer (HD 2102.2, Delta OHM, Italy)를 이용해 암조건에서 150 ±

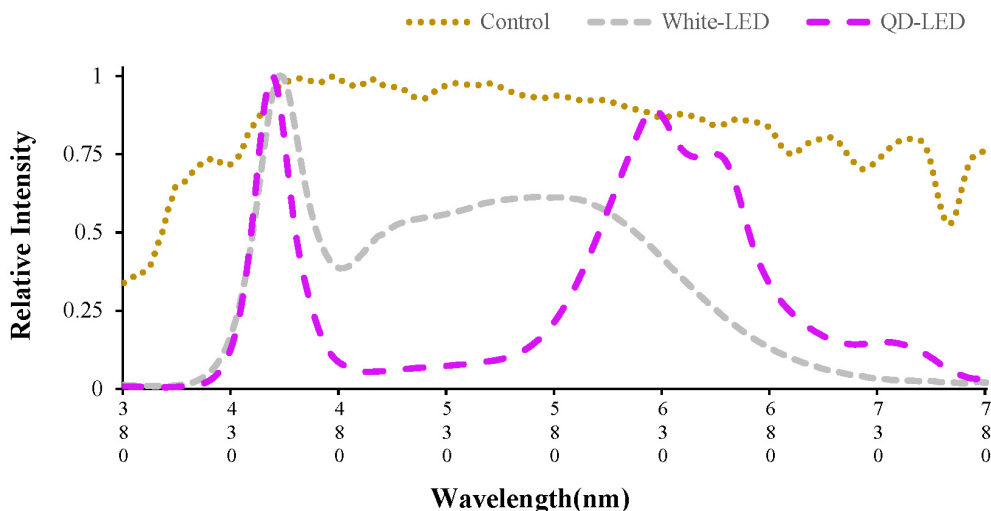


Fig. 1. The spectrum of control (sunlight), White-LED, and QD-LED used in the experiment.

10 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 수준이 되는 거리로 설정하였으며, 오전 5시간(05:00 – 10:00am), 오후 3시간(17:00 – 20:00pm) 처리하였다.

광원별 광 환경 조사

PPFD (Photosynthesis Photon Flux Density) 측정위치는 광원 자체의 광도가 $150 \pm 10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 수준을 나타내는 거리에서 오전 보광시간대인 09:00 – 09:30am 사이에 Handheld Spectrometer (MK350S, UPRtek, Taiwan)로 측정하였다. Fv/Fm (Maximum Quantum Yield)은 Dark Leaf Clip으로 30분간 암적응을 시킨 후 Chlorophyll Fluorometer (JUNIOR-PAM, Heinz WALZ GmbH, Germany)을 이용하여 PPFD의 측정 위치 및 시간과 동일하게 측정하였다. 보광등의 발열온도는 각 광원을 작동시키고나서 USB Datalogger (UT330B, Uni-Trend Technology, China)를 발광표면에 부착하고 1시간 후 측정하였다.

외적품질

보광처리 후 광원별로 10개체씩 선별해 각 개체별로 3, 4화방의 과방(Fruit cluster)을 수확하였다. 과피색은 Chroma Meter (CR-400, Konica Minolta Sensing, Inc., Japan)를 사용하여 광원 및 화방별로 5개씩 무작위로 선별해 총 광원 당 10개의 과실을 이용하였으며 적도부분에서 Hunter L*, a*, b* 및 a*/b* 값을 10회 반복 측정하였다. 그리고 과피색이 측정된 과실의 과장, 과폭을 전자식 버니어 캘리퍼스로 측정하였고, 과방무게는 전자저울(PB602-S, Mettler Toledo, Switzerland)을 사용하여 측정하였다.

내적품질

외적품질을 조사한 과실의 당도와 산도는 Digital refractometer (Pocket Refractometer PAL-1, Atago, Japan)를 사용해, 씨를 제거한 과실을 잘게 다진 후 거즈로 걸러진 즙액을 이용하여 10회 반복 측정하였다. 경도는 Fruit Hardness Tester (FR-5105, Lutron, Taiwan)의 직경 \varnothing 6 mm stainless steel probe로 과실의 적도 부분을 측정하여 Peak H. 값을 사용하였으며, 단위는 N (Newton)으로 표기하였다.

DPPH radical scavenging activity 및 Ascorbic acid

DPPH 라디칼 소거능은 Oboh (2005)의 방법에 따라 생체시료 0.5 g에 메탄올 20 mL를 첨가해 균질화하고 균질시료와 0.4 mM DPPH 메탄올 용매를 1:1로 섞어 30분간 암조건에 방치한 후 분광 광도계(Biomate 3S, Thermo Scientific, USA)로 516 nm의 흡광도에서 측정하였다. DPPH 라디칼 소거능은 백분율로 표현했으며 아래와 같은 공식을 적용하여 계산하였다.

$$\text{DPPH Radical scavenging ability (\%)} = [1 - (\text{Sample A}_{516 \text{ nm}}/\text{Blank A}_{516 \text{ nm}})] \times 100$$

Ascorbic acid 함량은 Arvanitoyannis 등(2005)의 방법에 준하여 씨를 포함한 태좌부를 제거한 과실 2 g에 증류수 18 mL를 넣어 homogenizer (HZ1, LABTron Co., Ltd., Korea)로 90초간 균질화한 후 centrifugal separator (Mega

17R, Hanil Science Industrial Co., Korea)로 원심분리하여 얻은 상등액을 이용해 RQ flex reflectometer (Merck RQ flex 2, Darmstadt, Germany)로 측정하였다.

광원 경제성분석

보광광원에 따른 전력소비량, 전기요금, 예상월간전력 및 요금은 전기요금측정기(SJPM-C16, SEOJUN, KOREA)로 측정하였고, 전기 에너지사용효율과 비용성능(Cost performance)은 Tewolde 등(2016)의 식으로 계산하여 백분율로 표기하였다.

광원별 기형과 발생률은 광원 및 화방별로 육안을 통해 판정하여 선발하였다. 그리고 화방별 기형과 개수를 화방별 수확된 과실수로 나누어 백분율로 계산하였고 이를 평균값으로 표기하였다.

통계분석

통계분석은 Microsoft Excel 2016 program 및 IBM SPSS Statistics version 24 program을 이용하여 수행하였다. 보광등의 발열온도와 보광광원에 따른 전력소비량, 전기요금, 예상월간전력 및 요금은 독립표본 T 검정으로 처리구들의 평균간 차이 비교를 $p < 0.05$ 수준에서 분석하였다. 그 외 조사항목의 처리구들의 평균간 차이 비교는 던컨의 다중검정(Duncan's multiple range test)을 이용하여 $p < 0.05$ 수준에서 분석하였다.

결과 및 고찰

광환경 및 보광등의 발열온도

보광을 시작하지 2시간이 지난 오전 8:00 - 8:30간의 PPFd는 보광처리구에서 평균 $574.5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로, $313.5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 을 나타낸 대조구보다 45.4% 높아 통계적으로 유의한 차이를 나타냈으나, 보광처리구 간에는 나타내지 않았다(Table 1). Ke 등(2021)은 $300 - 700 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 사이의 PPFd와 Pn (Net Photosynthetic Rate)과의 관계를 조사한 결과 PPFd가 증가할수록 Pn도 같이 비례하게 증가하는 경향을 보였으며 적색 및 청색 혼합광에서 적색의 비율이 높을수록 Pn이 높다고 하였다.

식물의 건전성을 유추할 수 있으며 값이 높을수록 광합성 효율이 증가된다고 볼 수 있는 Fv/Fm (Maximum Quantum Yield)은, 보광처리구인 QD-LED와 White-LED간에는 차이를 나타내지 않았지만 대조구에 비해 9.2% 높았다. 대조구도 정상적인 식물상태 범주내의 값을 보였다(Table 1). 본 연구에서 보광처리구 간에는 차이를 나타내지 않았는데, Yang 등(2018)의 보고에서 다양한 종류의 광원에 토마토를 육묘했을 때 광원에 따른 Fv/Fm값의 차이가 크지 않았던 결과와 유사하였다. 사용된 보광등에서 발생된 열을 조사한 결과, 실내기온 20°C 에서 작동 1시간 후 측정했을 때 White-LED는 58.7°C 였던 QD-LED보다 약 33% 높은 열이 발생되었다(Table 1).

과실의 착색

토마토의 과피색은 수확 후 유통기한과 성숙도를 평가할 수 있는 외부적 특성 및 소비자 구매 결정의 중요한 요인으로 작용할 수 있다(López Camelo and Gómez, 2004). 본 실험에서는 같은 날 모든 처리구에 토마토톤을 처리하여 착과를 유도한 후 같은 날에 3, 4화방의 과방을 수확하였는데, 과피색의 경우 명도를 나타내는 Hunter L*값은 보광처리

Table 1. The PPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), Fv/Fm, and heating temperature of supplemental light ($^{\circ}\text{C}$) by each light source during upper canopy supplemental lighting on September 2, 2019 (cloudy)

| Treatments | PPFD ¹⁾ (08:00 – 08:30 am) | Fv/Fm ²⁾ (09:00 – 09:30 am) | Heating temperature of supplemental light ³⁾ ($^{\circ}\text{C}$) |
|---------------|--|---|---|
| Sunlight (SL) | 313.5 b ⁴⁾ | 0.841 b | - |
| SL+White-LED | 573.7 a | 0.912 a | 87.3 |
| SL+QD-LED | 575.4 a | 0.924 a | 58.7 |
| T-value | - | - | 137.111 |
| P-value | - | - | 0.000 |

¹⁾PPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) was measured at a level of $150 \pm 10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ below the light source in dark conditions from 08:00 to 08:30 am.

²⁾Fv/Fm was measured at a level of $150 \pm 10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ below the light source in dark conditions from 09:00 to 09:30 am.

³⁾The heating temperature of supplemental light (White-LED and QD-LED) was measured 1 hour after the operation at room temperature of 20 degrees.

⁴⁾Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

Table 2. Average L*, a*, b*, and a*/b* in the third and fourth cluster's fruits by each light source during upper canopy supplemental lighting

| Treatments | L* | a* | b* | a*/b* |
|---------------|-----------------------|---------|---------|--------|
| Sunlight (SL) | 40.11 b ¹⁾ | 8.38 c | 39.91 a | 0.29 c |
| SL+White-LED | 41.08 a | 11.95 b | 34.97 b | 0.34 b |
| SL+QD-LED | 41.58 a | 13.80 a | 33.24 b | 0.44 a |

¹⁾Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

구에서 평균 41.33으로 대조구에 비해 유의하게 높았다. 0을 기준으로 음의 값은 녹색, 양의 값은 적색을 의미하는 Hunter a*값은 QD-LED에서 가장 높았고 White-LED, 대조구 순 이었으며, 보광처리구는 대조구보다 평균 53% 이상 유의하게 높았다. 과실의 과피색이 녹색에서 주황색, 마지막으로 붉은색으로 착색되면서 성숙이 진행되는 토마토는 성숙이 진행될수록 라이코펜(lycopene)의 함량이 증가해 짙은 붉은색을 나타내기 때문에 황색을 띠는 과실은 붉은색의 과실보다 성숙이 덜 되었다는 것을 의미한다. Hunter b*는 값이 0을 기준으로 음의 값은 청색, 양의 값은 황색을 나타내는데, 두 보광처리구에서 대조구에 비해 14.5% 유의하게 낮았다(Table 2). 이와 같은 Hunter a*, b*의 결과는 광원 내 스펙트럼에서 적색광 비율, 청색광과 녹색광의 관계에 의한 것으로 판단되는데, 본 실험에 사용된 각 보광등의 스펙트럼을 보면 QD-LED가 White-LED보다 더 많은 적색광(600 – 700 nm)을 가지고 있고, White-LED는 QD-LED보다 현저히 많은 양의 녹색광(530 – 570 nm)을 가지고 있다(Fig. 1). Giliberto 등(2005)과 Ntagkas 등(2020)은 청색광을 흡수하는 크립토크롬이 토마토의 잎뿐만 아니라 과피에도 존재해 과실의 대사에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있어 빛의 광도뿐만 아니라 광질도 토마토 대사체에 잠재적으로 영향을 줄 수 있다고 하였다. Li와 Kubota (2009)는 적색광이 식물 조직에서 카로티노이드(carotenoids) 생산에 중요한 영향을 미쳤으며, 청색광 또한 토마토 과실의 라이코펜 함량을 증가시켰다고 하였다(Gautier et al., 2005). 하지만 녹색광은 중요한 플라빈 아데닌 디뉴클레오티드 발색단(flavin adenine dinucleotide chromophore)의 광환원주기를 수정함으로써 청색광에 반응하는 크립토크롬의 작용을 억제한다고 하였다(Banerjee et al., 2007; Bouly et al., 2007). 본 실험에서 대조구가 가장 낮은 a*값과 높은 b*값을 나타낸 원인으로는 보광처리구에 비해 낮은 광도와 함께 전체 스펙트럼 중 녹색광이 30 – 33%

포함되어 있기 때문으로 판단된다.

붉은색의 비율이 높을수록 증가하게 되는 a^*/b^* 는 위 결과에서 Hunter a^* 값이 가장 높고, Hunter b^* 값이 가장 낮았던 QD-LED에서 0.44로 모든 처리구들보다 유의하게 높았다. QD-LED에서는 White-LED와 대조구보다 각각 29.4%와 51.72% 이상 높았고, White-LED에서는 대조구보다 17.2% 더 높은 값을 보였다(Table 2). 이는 광원 내 적색광의 비율 및 청색광과 녹색광의 길항작용에 의한 것을 포함해 FR-LED의 효과도 있는 것으로 생각되는데, Kim 등 (2019)은 LED 보광이 무보광처리구에 비해 수확시간을 크게 단축했고 특히 높은 비율의 FR-LED가 13일로 수확단축효과가 가장 컸다고 하였는데, 본 실험에서도 FR가 약 5% 포함되었던 QD-LED에서 재배된 토마토의 숙기가 다른 처리구들에 비해 가장 빨랐던 것으로 생각된다.

과실의 형태 및 수량

토마토 과실의 성장속도는 온실 내 광의 PPFD와 분포에 강하게 의존한다고 보고되어 있는데(Lu et al., 2012), 본 연구에서 보광처리구 간의 3, 4화방 평균 과장은 28.72 mm를 차이로 나타내지 않았지만 대조구보다 2.45 mm 유의하게 길었다(Table 3). 과폭은 과장과는 달리 보광처리구 간에도 유의한 차이를 보였는데 QD-LED에서 32.39 mm로 White-LED와 대조구에 비해 각각 2.18 mm, 3.92 mm 더 넓었다(Table 3). 이는 QD-LED가 일반 LED에 비해 넓은 배광각을 가져 넓은 범위에 고른 조광이 되었기 때문으로 판단된다. 기존 보고에서도 온실에서 재배 중인 토마토에 균락 내 보광을 한 결과, 그렇지 않은 토마토보다 세로 및 가로지름이 각각 14%, 13% 증가했다고 보고된 바 있다(Jiang et al., 2017).

토마토 재배 시 균락 위 보광을 했을 때 더 많은 과실을 수확할 수 있다는 결과는 많이 보고되어 있는데(Kim et al., 2019), 본 연구에서도 QD-LED의 3, 4화방에서 착과된 과실의 수가 평균 17.40개로 가장 많았고, White-LED, 대조구 순이었고, QD-LED에서 대조구 13.20개보다 24.1% 더 많아 유의한 차이를 보였다(Table 3).

서로 다른 광원으로 보광처리 후 착과된 3, 4화방의 평균 과방무게는 QD-LED에서 201.93 g으로 가장 높았고 White-LED, 대조구 순이었고, QD-LED에서 대조구 158.81 g보다 21.3% 높아 유의한 차이를 나타냈다(Table 3). QD-LED에서의 과방무게가 가장 무거웠던 것은 FR(far-red)의 과실로의 바이오매스 할당 및 영양생장에서 생식생장으로의 전환을 촉진하는 효과(Kim et al., 2019)로 판단된다. 기존 보고된 연구에서도 LED로 토마토의 균락 위에서 보광했을 때 무처리구보다 높은 과방무게로 유의한 차이를 나타냈는데, 보광 광원 내 FR-LED의 함량이 높아질수록 과방의 무게가 높았고 이는 FR-LED가 식물에서 생식생육으로의 전환을 가속화하면서 과실에 대한 바이오매스 할당을 촉진하기 때문이라고 하였다(Kim et al., 2019).

Table 3. Average length, width, number of fruit, and fruit cluster weight in the third and fourth cluster's fruits by each light source during upper canopy supplemental lighting

| Treatments | Length (mm) | Width (mm) | No. of fruit | Fruit Cluster weight (g) |
|---------------|-----------------------|------------|--------------|--------------------------|
| Sunlight (SL) | 26.27 b ¹⁾ | 28.47 c | 13.20 b | 158.81 b |
| SL+White-LED | 28.23 a | 30.21 b | 15.40 ab | 173.48 ab |
| SL+QD-LED | 29.20 a | 32.39 a | 17.40 a | 201.93 a |

¹⁾Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

과실의 내적품질 및 항산화능

빛은 식물 조직의 감각 및 화학적 특성에 영향을 미치는 1, 2차 대사과정의 강력한 유발인자로 알려져 있다. 본 연구의 가용성 고형분 함량은 모든 처리구에서 유의한 차이를 나타냈으며, QD-LED, White-LED, 대조구 순으로 높았다. 특히 4.58 Brix를 보인 QD-LED에서는 White-LED보다 0.26 Brix 더 높은 가용성 고형분 함량을 나타냈고, 대조구보다는 20% 이상 높았다(Table 4). Paponov 등(2020)은 LED 보광처리로 증가된 광도가 잎의 증산작용을 조절해 자당의 수송을 촉진시켜 밤 동안 뿌리에서의 물 흡수로 인한 carbohydrate 희석을 줄일 수 있다고 하였지만, 다양한 파장에 따른 효과는 없다고 하였다. 또한 Red-LED를 단독으로 보광했을 때 보다 FR-LED를 추가했을 때 가장 높은 당도로 유의한 차이를 보였다고 하였다(Kim et al., 2020a). 토마토의 과실은 성숙되는 과정에서 당과 산 사이에 높은 부의 상관관계를 보여 당산비가 증가한다고 보고되어 있는데(Islam et al., 2010), 3, 4회방에 착과된 과실의 평균 산도는 모든 처리구에서 유의한 차이를 보였으며, 그 중 대조구가 0.78%로 가장 높았다. 보광처리구에서는 QD-LED에서 가장 낮은 산도를 보였는데 두번째로 높았던 White-LED보다 9.2% 낮았다(Table 4). 본 연구에서 대조구의 가장 높은 산도는 낮은 광도의 환경이 토마토 과실의 산도를 크게 증가시킨다는 기존의 연구와 일치하였다(El-Gizawy et al., 1992). Climacteric형 과실인 토마토는 성숙이 진행됨에 따라 당도가 증가하고 산도와 경도는 감소한다고 보고되어 있는데(Lee, 1996), 본 연구에서 3, 4회방에 착과된 과실의 평균 경도는 QD-LED에서 7.45N으로 가장 낮게 나타났으며 대조구가 가장 높았고 모든 처리구에서 유의한 차이를 나타냈다. 또한 보광처리구가 대조구에 비해 평균 30% 이상 낮았으며 QD-LED가 White-LED보다는 14% 이상 낮은 경도를 나타냈다(Table 4). 일반적으로 토마토의 과실은 녹색에서 붉은색으로 변색되는 과정에서 내부 에틸렌 농도의 절정으로 대사체가 급격히 변하고(Ntagkas et al., 2020), 색소 변화 외에도 변색기가 진행됨에 따라 세포벽에 변형이 일어나 경도가 감소된다고 하였다(Giovannoni, 2001). 이와 같은 이유로 토마토의 성숙도를 나타낼 수 있는 Hunter a^*/b^* 의 값이 가장 높았던 QD-LED에서 가장 낮았고 이어서 White-LED, 대조구 순으로 나타난 것으로 판단된다.

DPPH 라디칼 소거능은 보광처리구에서 대조구보다 약 28% 높아 유의한 차이를 보였지만, 37.31%로 가장 높았던 QD-LED와 White-LED 간에는 약 8% 차이를 나타내었으나 통계적으로 유의하지 않았다(Table 4). 본 연구에서 보광을 함으로써 더 높은 항산화능을 보였는데, 상주재배 시 청색과 적색의 혼합광이 White-LED로 보광 했을 때 보다 평균 20% 이상 더 높은 항산화능을 나타냈다(Wojciechowska et al., 2015). 또한 광질에 의한 영향과 함께 PPFD 차이에 의해서도 항산화능의 결과값이 달랐는데, Crozier 등(2006)은 고강도 빛에서 높은 광합성 속도로 생성된 당 가용성의 증가와 phenylpropanoid 경로 및 shikimate 경로를 통한 탄수화물 대사 사이의 관계로 설명될 수 있다고 하였다.

Ascorbic acid 함량은 QD-LED에서 66.1 mg/100 g fresh weight로 가장 높았고 White-LED, 대조구 순으로 높은 값을 나타냈다. QD-LED에서는 White-LED보다 25.6%, 대조구보다는 44.6% 많은 양을 함유하고 있었으며 모든 처

Table 4. Average firmness, soluble solid, titratable acidity, DPPH, and ascorbic acid in the third and fourth cluster by each light source during upper canopy supplemental lighting

| Treatments | Soluble solid (°Brix) | Titratable acidity (%) | Firmness (N) | DPPH (%) | Ascorbic acid (mg/100 gFW) |
|---------------|-----------------------|------------------------|--------------|----------|----------------------------|
| Sunlight (SL) | 3.76 c ¹⁾ | 0.78 a | 10.64 a | 25.88 b | 36.6 c |
| SL+White-LED | 4.32 b | 0.65 b | 8.71 b | 34.36 a | 49.2 b |
| SL+QD-LED | 4.58 a | 0.59 c | 7.45 c | 37.31 a | 66.1 a |

¹⁾Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

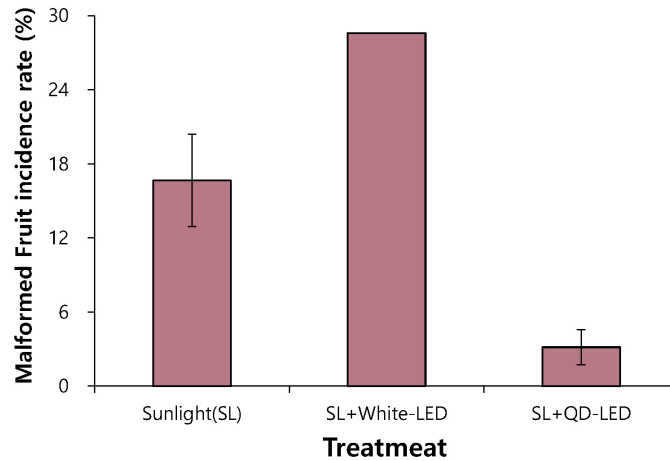


Fig. 2. Average malformed fruit incidence rate (%) of the third and fourth cluster by each light source during upper canopy supplemental lighting. Vertical bars represent \pm SD (n = 5).

리구에서 통계적 유의성을 보였다(Table 4). Verkerke 등(2014)도 햇빛에서만 재배된 토마토보다 보광처리한 토마토에서 Ascorbic acid 함량이 현저하게 높았다고 했으며, Javanmardi와 Emami (2013)는 적색, 백색, 청색광 중 청색 단독광 아래에서 재배된 토마토에서 Ascorbic acid 함량이 가장 높았고, 다음으로는 청색광의 비율이 높은 혼합광에서 높았다고 하였다. 따라서 본 연구에서 보광처리구가 대조구보다 DPPH 라디칼 소거능과 Ascorbic acid 함량이 높고, 보광처리구 중에서는 QD-LED가 가장 높은 값을 나타낸 이유는 대조구와 White-LED 및 QD-LED 사이의 PPFD 차이와 광 스펙트럼 내 청색광의 효과를 감소시킬 수 있는 녹색광의 양 때문으로 판단된다.

기형과 발생률

토마토 재배 중 과실의 왁스층이 합성되는 속도와 팽창하는 속도가 불균형 하거나 칼슘의 결핍으로 인해 열과 및 배꼽썩음과와 같은 기형과가 빈번히 발생하는 경우와 함께, 계속되는 흐린 날로 인한 광 부족 또한 기형과 발생을 촉진시킬 수 있다(Park et al., 2018). 본 연구에서는 QD-LED에서 3.2%로 가장 낮은 기형과 발생률을 보였고 다음 차례로 대조구, White-LED 순으로 높았다. QD-LED에서는 White-LED보다 25% 이상 대조구보다는 13% 이상 낮은 발생률을 나타냈는데(Fig. 2), 이는 Red와 Far-red LED에 의한 것으로 판단된다. 이전 연구에서 Red는 PAR의 과도한 흡수로부터 식물의 보호 메커니즘을 일으킬 수 있는데, 이는 잎의 마그네슘을 일시적으로 상승시켜 결과적으로 과실의 마그네슘 농도도 증가시킬 수 있다고 하였으며 Red-LED에 FR-LED를 추가했을 때 이와 같은 과정이 촉진된다고 하였다(Kim et al., 2020a). 이때 마그네슘과 함께 칼슘과 칼륨 또한 흡수가 촉진되어 과실 내 함량이 유의하게 높아졌다고 하였고(Kim et al., 2020a), 이와 같은 이유로 QD-LED에서 기형과 발생률이 가장 낮았던 것으로 판단된다. 반면에 기형과 발생률이 가장 높았던 White-LED는 Fig. 1에서 대조구와 QD-LED에 비해 전체 스펙트럼 중 적색부분의 비중이 매우 적은 것을 확인할 수 있다.

경제성 분석

광질은 식물의 광이용효율(RUE)에 영향을 미치는데(McCree, 1971), 본 연구의 시간당 전력소비량 및 요금, 예상 월간전력 및 요금, 전기에너지효율, 비용성능은 White-LED와 QD-LED사이에서 모두 유의한 차이를 보였다.

Table 5. Electric power consumption and cost, expected electric power monthly consumption and cost, electric energy use efficiency, and cost performance by each supplemental light source

| Treatments | Electric power consumption ¹⁾ (Kwh/h) | Cost ²⁾ (Won/h) | Expected electric power monthly consumption ³⁾ (Kwh/month/m ²) | Expected monthly cost ⁴⁾ (Won/month/m ²) | Electric energy use efficiency (%) | Cost performance ⁵⁾ (%) |
|------------|---|-------------------------------|--|--|------------------------------------|---------------------------------------|
| White-LED | 0.103 | 9.6 | 24.660 | 2300.8 | 4.993 | 1077.265 |
| QD-LED | 0.097 | 9.1 | 23.280 | 2172.0 | 11.203 | 2282.068 |
| T-value | 7.667 | 7.667 | 7.667 | 7.667 | -110.275 | -1.326 |
| P-value | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

¹⁾Electric power consumption is measured after an hour.

²⁾Cost is measured after an hour.

³⁾Expected electric power monthly consumption is measured after a month. When the average electric power monthly consumption was 1-200 kwh, it was calculated as 93.3 won/kwh.

⁴⁾Expected monthly cost is measured after a month.

⁵⁾Average price of cherry tomatoes in the third quarter of 2019 (July-September): 2,449.2 Won/kg.

QD-LED에서는 White-LED보다 시간당 0.006 Kwh 적은 전기를 소비했고 0.5원 더 적은 요금을 사용했으며, 예상월 간전력 및 요금 또한 QD-LED에서 모두 약 6% 낮았다. 1 m²당 전기에너지효율 같은 경우 QD-LED에서 White-LED보다 2.2배 이상 높았으며, 마지막으로 비용대비 성능(가성비)는 모두 대조구보다 1,000% 이상의 높은 값을 나타냈고 그 중 QD-LED에서 2,282.068%로 White-LED보다 1,200% 이상 높은 비용대비 성능(가성비)를 보였다(Table 5). 기존 연구에서 LED 스펙트럼 내 Red (600 - 700 nm)의 함량이 많을수록 광이용효율이 높다고 했으며 반대로 Blue (400 - 500 nm)가 많을수록 감소한다고 하였다(Ke et al., 2021). 또한 Han 등(2018)은 방울토마토 발아 및 재배 시 다른 광원들보다 QD-LED에서 발아율이 양호하고 같은 재배기간 내 생육이 우수하며 건물물과 엽록소 함량이 높다고 하였다.

요약

본 연구는 햇빛을 대조구로 설정하고 White 및 QD-LED를 이용하여 방울토마토의 균락 위 보광을 하였으며, 과실의 수확량 및 내·외적 품질변화에 대해 알아보고 경제적이며 효과적인 광원을 선발하기 위해 수행하였다. 인공광원을 통한 보광은 대조구보다 평균 45.4% 광도를 높였으며 Fv/Fm은 9.2% 증가했다. 광도 변화와 함께 광원의 광질에 따라서도 차이를 보였는데, QD-LED에서 가장 높은 a*/b*값으로 White-LED 및 대조구보다 변색기의 진행이 빨라 속기가 가장 많이 단축됨을 알 수 있었다. 또한 과장, 과폭, 과실수, 과방무게에서 보광처리구가 대조구보다 높은 값을 보였으며, 그 중 QD-LED가 결과값이 가장 높았다. 당도는 같은 기간 내 성숙이 가장 빨랐던 QD-LED가 가장 높았고 산도 및 경도는 가장 낮았다. DPPH 라디칼 소거능과 Ascorbic acid는 보광처리가 대조구보다 높은 값을 보였고 보광처리구에서는 QD-LED가 White-LED보다 더 좋은 효과를 나타냈으며, 기형과 발생률도 QD-LED에서 가장 낮았다. 두 광원의 경제적인 측면을 고려할 때 QD-LED는 White-LED에 비해 상대적으로 전력 소비가 적고 비용이 저렴하며 에너지 사용 효율이 훨씬 높았다. 이 모든 요소를 종합하면 방울토마토의 균락 위에 대한 보광은 효과적이며 광원으로는 QD-LED를 사용하는 것이 가장 적합하다고 판단된다.

사사

본 결과물은 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 기술사업화지원사업의 지원을 받아 연구되었고(122056-3), 한국연구재단의 기초연구사업(NRF-2021R1A6A1A03044242)의 지원을 받아 수행됨.

인용문헌(References)

- Arvanitoyannis, I. S., Khah, E. M., Christakou, E. C., Bletsos, F. A. (2005) Effect of grafting and modified atmosphere packaging on eggplant quality parameters during storage. *Int J food Sci* 40(3):311-322.
- Banerjee, R., Schleicher, E., Meier, S., Viana, R. M., Pokorny, R., Ahmad, M., Bittl, R., Batschauer, A. (2007) The signaling state of Arabidopsis cryptochrome 2 contains flavin semiquinone. *J Biol Chem* 282:14916 – 14922.
- Bantis, F., Smirnaku, S., Ouzounis, T., Koukounaras, A., Ntagkas, N., Radoglou, K. (2018) Current status and recent achievements in the field of horticulture with the use of light-emitting diodes (LEDs). *Sci Hortic* 235:437-451.
- Bouly, J. P., Schleicher, E., Dionisio-Sese, M., Vandebussche, F., Van Der Straeten, D., Bakrim, N., Meier, S., Batschauer, A., Galland, P., Bittl, R., Ahmad, M. (2007) Cryptochrome blue light photoreceptors are activated through interconversion of flavin redox states. *J Biol Chem* 282:9383 – 9391.
- Caruso, A. G., Bertacca, S., Parrella, G., Rizzo, R., Davino, S., Panno, S. (2022) Tomato brown rugose fruit virus: A pathogen that is changing the tomato production worldwide. *Ann Appl Biol*.
- Crozier, A., Jaganath, I. B., Clifford, M. N. (2006) Phenols, polyphenols and tannins: an overview. *Plant secondary metabolites: Occurrence, structure and role in the human diet* (1):1-25.
- El-Gizawy, A. M., Abdallah, M. M. F., Gomaa, H. M., Mohamed, S. S. (1992) Effect of different shading levels on tomato plants. 2. Yield and fruit quality. In *Symposium on Soil and Soilless Media under Protected Cultivation in Mild Winter Climates* 323:349-354.
- Gautier, H., Rocci, A., Buret, M., Grasselly, D., Dumas, Y., Causse, M. (2005) Effect of photoselective filters on the physical and chemical traits of vine-ripened tomato fruits. *Can J Plant Sci* 85(2):439-446.
- Giliberto, L., Perrotta, G., Pallara, P., Weller, J. L., Fraser, P. D., Bramley, P. M., Fiore, A., Tavazza, M., Giuliano, G. (2005) Manipulation of the blue light photoreceptor cryptochrome 2 in tomato affects vegetative development, flowering time, and fruit antioxidant content. *Plant Physiol* 137(1):199-208.
- Giovannoni, J. (2001) Molecular biology of fruit maturation and ripening. *Annual Rev Plant Biol* 52(1):725-749.
- Gomez, C., Morrow, R. C., Bourget, C. M., Massa, G. D., Mitchell, C. A. (2013) Comparison of intracanopy light-emitting diode towers and overhead high-pressure sodium lamps for supplemental lighting of greenhouse-grown tomatoes. *HortTechnology* 23(1):93-98.
- Han, S. J. (2019) Effect of irradiation of various light sources including QD(Quantum dot)-LED on the growth and quality of romaine lettuce. Thesis of master's degree, Kangwon National University, Chuncheon, Korea p:5.
- Han, S. J., Choi, I. L., Kim, J. Y., Shin, Y. G., Kang, H. M. (2018) Influence of LED and Quantum dot-LED (QD-LED) Irradiation on the Germination and Growth of Cherry Tomato in Plant Factory. *Hortic Sci Technol* 36(Suppl. I):78-79(Abstr.).
- Javanmardi, J., Emami, S. (2013) Response of tomato and pepper transplants to light spectra provided by light emitting diodes. *Int J Veg Sci* 19(2):138-149.
- Jiang, C., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ebihara, M., Nakaminami, A., Maruo, T. (2017) Photosynthesis, plant growth, and fruit production of single-truss tomato improves with supplemental lighting provided from underneath or within the inner canopy. *Sci Hortic* 222:221-229.

- Jung, S. M., Eom, H. J., Lee, S. Y., Seo, E. H., Kim, Y. D., Yoo, Y. H., Chung, B. H., Ra, M. J. (2021) Evaluating the Contents of Ginsenoside Based on the Growth of Ginseng Sprouts using QD-LED (Quantum Dot) plant lighting. *J Agri Life Environ Sci* 33:225-235.
- Ke, X., Yoshida, H., Hikosaka, S., Goto, E. (2021) Optimization of Photosynthetic Photon Flux Density and Light Quality for Increasing Radiation-Use Efficiency in Dwarf Tomato under LED Light at the Vegetative Growth Stage. *Plants* 11(1):121.
- Kim, H. J., Lin, M. Y., Mitchell, C. A. (2019) Light spectral and thermal properties govern biomass allocation in tomato through morphological and physiological changes. *Environ Exp Bot* 157:228-240.
- Kim, H. J., Yang, T., Choi, S., Wang, Y. J., Lin, M. Y., Liceaga, A. M. (2020a) Supplemental intracanopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes. *Sci Hortic* 261:108985.
- Kim, Y. D., Han, S. J., Lee, J. H., Choi, I. L., Kwon, H. J., Roh, Y. H., Yoo, Y. H., Kang, H. M. (2020b) Influence of Light Quality on the Growth of Baby Romaine Lettuce. *J Agri Life Environ Sci* 32:108-115.
- Lee, J. S., Kim, Y. H. (2014) Growth and anthocyanins of lettuce grown under red or blue light-emitting diodes with distinct peak wavelength. *Korean J Hortic Sci Technol* 32(3):330-339.
- Lee, S. G. (1996) Postharvest physiology of horticultural crops. Sunggun Publish, Suwon, Korea.
- Li, Q., Kubota, C. (2009) Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environ Exp Bot* 67:59-64.
- Li, Q., Liu, Y., Tian, S., Liang, Z., Li, S., Li, Y., Wei, M., Zhang, D. (2019) Effect of supplemental lighting on water transport, photosynthetic carbon gain and water use efficiency in greenhouse tomato. *Sci Hortic* 256:108630.
- López Camelo, A. F., Gómez, P. A. (2004) Comparison of color indexes for tomato ripening. *Hortic Bras* 22:534-537.
- Lu, N., Maruo, T., Johkan, M., Hohjo, M., Tsukagoshi, S., Ito, Y., Ichimura, T., Shinohara, Y. (2012) Effects of supplemental lighting with light-emitting diodes (LEDs) on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high planting density. *Environ Control in Biol* 50(1):63-74.
- McCree, K. J. (1971) The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *J Agric Meteorol* 9:191-216.
- Ntagkas, N., de Vos, R. C., Woltering, E. J., Nicole, C., Labrie, C., Marcelis, L. F. (2020) Modulation of the tomato fruit metabolome by LED light. *Metabolites* 10(6):266.
- Oboh, G. (2005) Effect of blanching on the antioxidant properties of some tropical green leafy vegetables. *LWT* 38(5):513-517.
- Paponov, M., Kechasov, D., Lacek, J., Verheul, M. J., Paponov, I. A. (2020) Supplemental light-emitting diode inter-lighting increases tomato fruit growth through enhanced photosynthetic light use efficiency and modulated root activity. *Front Plant Sci* 10:1656.
- Park, K. S., Kwon, D. Y., Lee, J. W., Son, J. E. (2018) Comparing Photosynthesis, Growth, and Yield of Paprika (*Capsicum annuum* L. 'Cupra') under Supplemental Sulfur Plasma and High-Pressure Sodium Lamps in Growth Chambers and Greenhouses. *J Bio-Env Con* 27(4):332-340.
- Park, Y. H., Seo, B. S., Seo, J. B., Shin, G. H., Yun, B. G. (2016) Effects of supplemental light on quality, yield, and growth rate of tomatoes. *Acta Hortic* 1129:105-110.
- Tewelde, F. T., Lu, N., Shiina, K., Maruo, T., Takagaki, M., Kozai, T., Yamori, W. (2016) Nighttime supplemental LED inter-lighting improves growth and yield of single-truss tomatoes by enhancing photosynthesis in both winter and summer. *Front Plant Sci* 7:448.
- Verkerke, W., Labrie, C., Dueck, T. (2014) The effect of light intensity and duration on vitamin C concentration in tomato fruits. In XXIX International Horticultural Congress on Horticulture: Sustaining Lives, Livelihoods and Landscapes (IHC2014) VI 1106:49-54.

- Wojciechowska, R., Długosz-Grochowska, O., Kolton, A., Żupnik, M. (2015) Effects of LED supplemental lighting on yield and some quality parameters of lamb's lettuce grown in two winter cycles. *Sci Hortic* 187:80-86.
- Yang, X., Xu, H., Shao, L., Li, T., Wang, Y., Wang, R. (2018) Response of photosynthetic capacity of tomato leaves to different LED light wavelength. *Environ Exp Bot* 150:161-171.
- Yuen, P. H., Shiung, H. H., Devarajan, M. (2013) Influence of phosphor packaging configurations on the optical performance of Chip on Board phosphor converted Warm White LEDs. In *Fifth Asia Symposium on Quality Electronic Design (ASQED 2013)* 329-333.
- Zhen, S., van Iersel, M. W. (2017) Far-red light is needed for efficient photochemistry and photosynthesis. *J Plant Physiol* 209:115-122.
- Zhu, X. G., Long, S. P., Ort, D. R. (2010) Improving photosynthetic efficiency for greater yield. *Annu Rev Plant Biol* 61:235-261.