

파장별 LED광이 딸기의 생장 특성과 생리 활성 물질 형성에 미치는 효과

최효길^{1,2} · 권준국¹ · 문병용³ · 강남준^{2*} · 박경섭¹ · 조명환¹ · 김영철¹

¹국립원예특작과학원 시설원예시험장, ²경상대학교 원예학과, ³인제대학교 생명과학부

Effect of Different Light Emitting Diode (LED) Lights on the Growth Characteristics and the Phytochemical Production of Strawberry Fruits during Cultivation

Hyo Gil Choi^{1,2}, Joon Kook Kwon¹, Byoung Yong Moon³, Nam Jun Kang^{2*}, Kyoung Sub Park¹,
Myeong Whan Cho¹, and Young Cheol Kim¹

¹Protected Horticulture Research Station, National Institute of Horticultural & Herbal Science,
Rural Development Administration, Busan 618-800, Korea

²Department of Horticulture, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

³Department of Biological Sciences, Inje University, Gimhae 621-749, Korea

Abstract. Recent unusual weather due to global warming causes shortage of daily sunlight and constitutes one of the primary reasons for agricultural damages. LED light sources are frequently utilized to compensate for the shortage of sunlight in greenhouse agriculture. The present study is aimed at evaluating formations of phytochemicals as well as growth characteristics of mature strawberry fruits ('Daewang' cultivar) during cultivation in a closed growth chamber equipped with artificial LED light as a sole light source. Each LED light of blue (448 nm), red (634 and 661 nm) or mixed blue plus red (blue:red = 3:7) was separately supplied and the intensity of each light was adjusted to $200 \pm 1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ at plant level with a photoperiod consisted of 16 hours light and 8 hours darkness. Strawberries grown under mixed LED light of blue and red wavelengths showed a higher production of fruits than those grown under other LED treatments. Fructose, one of the free sugars, increased in mixed LED light-grown fruits. Anthocyanin contents were elevated remarkably in the mixed LED light-grown fruits compared with those in other LED treatments. Contrastingly, contents of total phenolics and flavonoids were not of much different from one another among the fruits treated with various LED lights. On the other hand, ripening of strawberry fruits was found to be faster when grown under blue LED light compared with other LED treatments. Moreover, antioxidant activities of blue or red LED light-grown fruits, respectively, were significantly higher than those of mixed LED light-grown fruits. We suggest that when daylight is in shortage during cultivation in a greenhouse, supplementation of sunlight with LED light, which is composed of blue and red wavelengths, could be useful for the enhancement of productivity as well as of free sugar content in strawberry fruits. In addition, for the strawberry culture in the plant factory, selective adoption of LED light wavelength would be required to accomplish the purpose of controlling fruit maturation time as well as of enhancing contents of sugars and antioxidants of fruits.

Additional key words: anthocyanin, antioxidants, flavonoids, *Fragaria* × *ananassa* Duch., sugars

서 언

여러 나라와 자유무역협정 체결 이후 한국에서는 농산물 수입에 대응하기 위한 일환으로 농산물 수출에 주력하고 있다. 딸기(*Fragaria* × *ananassa* Duch.)는 중요한 수출 작물

중 하나로서 수출을 위하여 품질의 고급화에 많은 노력이 이루어지고 있다. 수출에 알맞은 딸기의 고품질 특징은 과실의 경도나 크기와 같은 물리적 특징, 그리고 유리당, 유기산, 안토시아닌, 플라보노이드, 페놀 화합물과 같은 식물 기능성 성분의 함량으로 나타낼 수 있다. 딸기는 안토시아닌,

*Corresponding author: k284077@gnu.ac.kr

※ Received 24 May 2012; Revised 22 October 2012; Accepted 31 October 2012. 본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업의 지원에 의해 수행되었음.

플라보노이드, 페놀 화합물과 같은 이차 대사산물을 다량 함유하여 유해한 자유라디칼에 의한 손상으로부터 세포를 보호하는데(Gil et al., 1997; Zheng et al., 2007), 특히 이들 화합물들은 암, 심혈관계 질환, 퇴행성 신경계 질환과 같은 질병의 원인이 되는 활성산소에 대항하는 효과적인 물질로 보고되고 있다(Zhang et al., 2008).

고품질의 딸기를 생산하기 위해서는 기본적으로 광, 수분, 공기 등의 환경 조건이 양호해야 함에도 불구하고, 최근 들어 계속되는 기후변화로 인하여 시설 채소작물의 광합성에 필요한 충분한 광량을 제공하는 맑은 날이 많이 줄어들고 있다. 이와 같이 흐린 날의 증가로 인한 일조량 부족은 딸기의 생산량 감소와 품질 저하의 문제를 유발한다. 이와 관련하여 불리한 자연환경을 극복하기 위한 연구의 일환으로 환경 제어 가능한 식물공장에 대한 관심이 높아지고 있으며, 작물의 광합성 향상을 위한 보조 광원에 대한 연구도 다양하게 이루어지고 있다. 종래에는 광량 보충을 위한 광원으로 백열등, 메탈 할라이드 등 및 고압나트륨 등이 주로 이용되었으나, 최근에는 파장을 조절할 수 있는 light emitting diode(LED) 광원에 대한 이용이 증가하고 있다(Johkan et al., 2012; Samuolienė et al., 2012). 이제까지 식물 공장이나 파장 조절 가능한 LED광에 관한 연구는 주로 엽채류에서 집중적으로 이루어져 온 반면, 딸기 등과 같은 과채류에서는 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다. 이와 같은 점에 착안하여 본 시험에서는 최근 국립 원예 특작 과학원에서 육성한 '대왕' 딸기 품종을 재료로 하여 파장이 서로 다른 LED광이 딸기 과실의 물리적 특성 및 기능성 화합물 함량에 미치는 효과를 분석함으로써 일조량 부족 피해 경감을 위한 보충 광원 선별 및 식물공장에서의 과채류 생육에 대한 기초자료를 얻고자 하였다.

재료 및 방법

실험 재료 및 재배 조건

국립원예특작과학원 시설원예시험장의 폐쇄형 컨테이너 성장실에서 2011년 9월 25일에 엽병이 4개인 '대왕' 딸기 품종(*Fragaria × ananassa* Duch. cv. Daewang)을 정식하여 12월 27일까지 재배하였다. 딸기 재배를 위해 2단 벤치 베드(Shinhan A-Tec Co., Korea)에 딸기 전용 상토(Sinan Grow Co., Korea)를 충전한 후, 네덜란드 PBG 양액의 조성을 기초로 하여 정식 초기에는 EC 0.4dS·m⁻¹로 공급을 시작하여 농도를 조금씩 올려 11월 21일부터는 EC 1.2dS·m⁻¹로 공급하였다. 폐쇄형 컨테이너 성장상 내의 환경은 주간 온도 23 ± 2°C, 야간 온도 13 ± 1°C, 상대 습도 60 ± 10%가

되도록 유지하였으며, 이산화탄소 농도 측정기(Telaire 7001, GE Mcs Co., USA)를 이용하여 모니터링 수준에서 이산화탄소 농도를 관리하였고, 데이터로거(HOBO U12-012, Onset Co., USA)를 이용하여 온도, 습도 및 이산화탄소 농도를 기록하였다(Fig. 1).

LED 광원 처리

생장상 내의 광합성을 위한 인공 광원으로 재배 베드당 2W의 청색 LED 전구 3개와 적색 LED 전구 7개로 결합된 바(bar) 형태의 20W 램프를 10cm 간격의 3개 바로 구성된 LED(Parus LED Co., Korea)를 설치하였다. LED 파장은 컴퓨터의 블루투스 시스템을 이용하여 청색, 적색 혹은 혼합(적색:청색, 비율 7:3) 파장으로 처리하였다(Fig. 2). 빛은 식물에 조사되는 광합성 유효 광량자속 밀도(PPFD)가 약 200 ± 1 μmol·m⁻²·s⁻¹가 되도록 재배 베드 4면의 모서리와 베드 중심 등 5개 지점을 설정한 후 광도계(LI-1800, LI-COR Inc, USA)로 측정하였으며, 청색, 적색 및 혼합 LED의 높이를 각각 12cm, 17cm 그리고 18cm로 조정하였다(Table 1). 광주기는 주간 16시간, 야간 8시간으로 구성하였다.

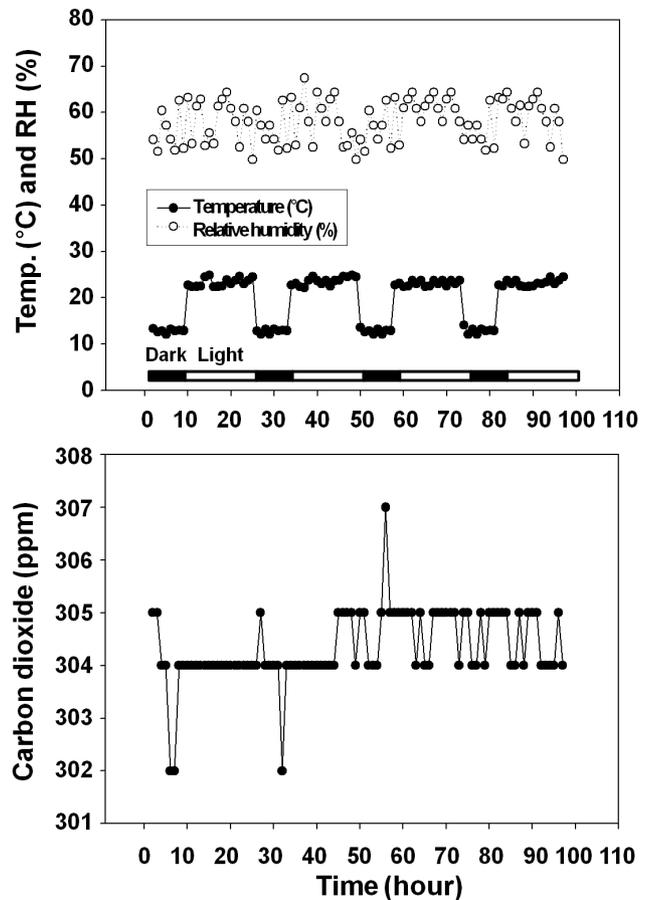


Fig. 1. Time courses of changes in air temperature, relative humidity and carbon dioxide content in a closed chamber.

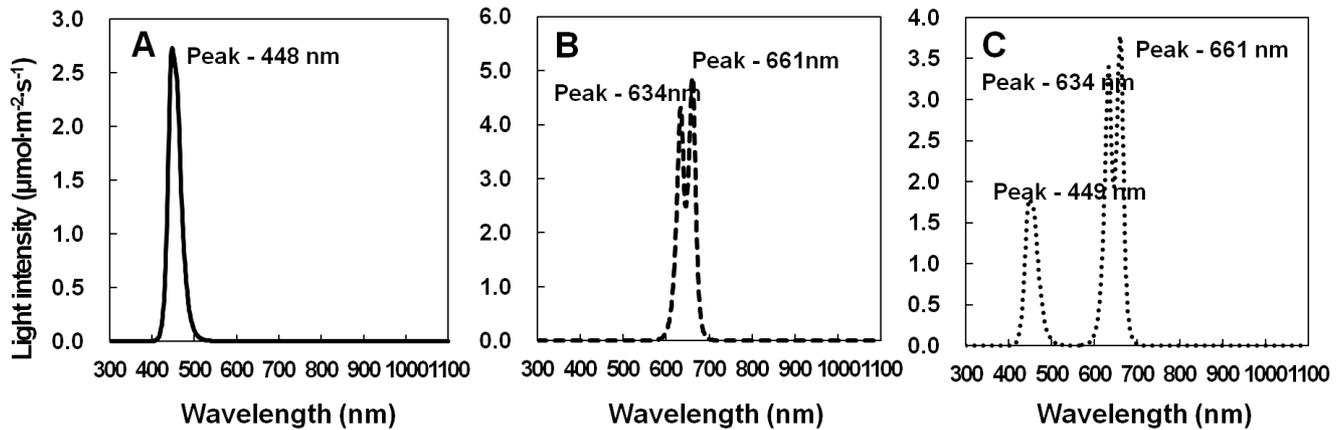


Fig. 2. Spectral distribution of three different LED lights at a distance 17 cm from light in a closed chamber. (A) Blue; (B) Red; (C) Mixed (blue plus red).

Table 1. Photosynthetic photon flux density (PPFD) measured at different distances from LED light sources in a closed chamber.

Distance from light source (cm)	PPFD ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)		
	Blue	Red	Mixed
12	200.7	403.4	449.6
17	100.0	201.0	224.0
18	89.2	179.3	199.8

과실의 물리적 특성 측정

처리구별 딸기 과실의 생산성을 확인하기 위하여 12월 14일부터 27일까지 총 3회에 걸쳐 수확한 후 재배 베드당 과실 수와 과실 무게로 측정하였다. 딸기 엽병의 수 및 길이와 잎의 길이 및 넓이는 마지막 과실을 수확한 12월 27일에 측정하였고, 과실의 경도는 경도계(FHM-1, Takemura Co., Japan)를 이용하여 측정된 후 압력의 단위로 환산하였다.

생리 활성 물질의 함량 측정

분석용 추출액의 준비: 국립원예특작과학원 시설원예시험장에서 재배한 ‘대왕’ 딸기를 3회에 걸쳐 수확하여 꼭지를 제거한 후 마지막 수확일로부터 5일 더 냉동 보관하였다. 4°C에서 천천히 해동하여 각각의 처리당 딸기 생과 5개를 절단하여 꼭지 위 부분으로 40g을 만들어 균질기(PT 3100, Kienmatica Ag Co., USA)로 균질화한 후 원심분리기(64R Centrifuge, Beckman Coulter Inc., USA)를 이용하여 4°C, 16,000×g에서 30분 동안 원심분리하였다. 딸기 추출액의 상등액을 각각 1.5mL microtube 10개에 옮겨 담아 -70°C의 냉동고에 보관하면서 각각의 성분 분석에 사용하였다.

총 페놀화합물, 플라보노이드 및 안토시아닌의 함량의 측정: 총 페놀 화합물의 함량은 Slinkard and Singleton(1977)의 방법을 변형하여 측정하였다. 냉동고에 보관한 딸기 추출액을 4°C에서 천천히 용해시켰다. 완전히 녹은 딸기의 시료 용액과 2% Na_2CO_3 를 혼합하여 2분 후 50% Folin-Ciocalteu

시약을 가하여 상온에서 30분 동안 반응시킨 후 분광광도계(UV/Vis-spectrophotometer, Thermo, Co., USA)로 750nm에서 측정하였다. 표준물질로서 gallic acid(Sigma-Aldrich chemical, Co., USA)에 관한 표준곡선을 작성하여 페놀화합물 함량을 계산하였다. 플라보노이드의 함량은 Kim et al.(2009)의 방법을 변형하여 측정하였다. 시료 용액에 diethylene glycol과 NaOH를 혼합하여 37°C 항온수조에서 1시간 반응시킨 후 420nm에서 흡광도를 측정하고 표준물질인 naringin(Sigma-Aldrich chemical, Co., USA) 표준곡선을 작성하여 계산하였다. 안토시아닌 분석은 Kim et al.(2011)의 방법을 변형하여 사용하였으며, 시료용액과 1% HCl 포함된 MeOH을 혼합하여 여과지로 여과한 용액의 흡광도를 530nm에서 측정하고 pelargonidin-3-glucoside의 표준곡선을 이용하여 농도를 계산하였다.

유리당 및 유기산의 함량 측정: 과실의 유리당 함량을 측정하기 위해 딸기 시료를 균질화하여 원심분리한 상등액을 증류수로 희석하고 0.45μm syringe filter로 여과한 후 HPLC 분석(YL9100, Younlin Co, Korea)을 수행하였다. 분석 칼럼으로 Sugar pak(4.6mm × 250mm, Supelco, USA)을 이용하여 acetonitrile과 증류수(75:25, v/v)를 혼합한 이동상을 1.5mL·min⁻¹의 속도로 흘렸으며 RI detector(YL9170, Younglin Co, Korea)로 유리당을 검출하였다. 표준물질로서 fructose, glucose, sucrose를 사용하였다.

과실의 유기산 함량 측정은 딸기 추출액의 상등액을 증류

수로 희석하여 0.45 μ m syringe filter로 여과한 후 IC 분석 (ICS 5000, Dionex Co, USA)을 수행하였다. 칼럼은 Ion pak(9mm \times 250mm ICE-AS6, Dionex Co, USA)을 이용하였고, 5.0mN tetrabutylammonium hydroxide 용액과 5.0psi의 N² 기체를 Suppressor(Amms IC300, Dionex Co., USA)로 공급하면서 용리액인 0.4mM heptafluorobutyric acid를 1.0mL \cdot min⁻¹의 속도로 흘렸다. 표준물질로는 oxalic, citric, malic acid를 이용하였다.

DPPH 및 ABTS 라디칼 소거능의 측정

1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl(DPPH) 라디칼 소거능의 측정을 위해 전자공여능(Electron donating abilities, EDA)을 이용한 Blois(1958)의 방법을 변형하여 사용하였다. 4×10^{-4} M의 DPPH(Sigma-Aldrich chemical, Co., USA)을 조제하여 517nm에서의 흡광도를 대조구로 정하고 이어서 시료와 DPPH용액과 혼합하여 상온에서 30분 반응시킨 후 517nm의 흡광도를 측정 후 다음의 식을 이용하여 전자공여능을 계산하였다. EDA(%) = $[1 - \text{ABS}/\text{ABC}] \times 100$. 단, 여기서 ABS는 시료의 흡광도, ABC는 대조구의 흡광도를 나타낸다.

한편, 2,2'-azino-bis (3-ethylbenzothiazoline- 6-sulfonic acid(ABTS) 라디칼 소거능의 측정을 위해 Re et al.(1999)의 방법을 변형하여 사용하였다. 이를 위하여 7.4mM ABTS와 2.6mM K₂S₂O₈을 1:1로 혼합한 후 암상태에서 여과지(Whatman No.2, GE Healthcare Co, USA)로 여과한 후 16시간 반응시키고 메탄올을 혼합하여 734nm에서의 흡광도를 조정 후 그 값을 대조구로 하였다. 이어서 조정된 ABTS 용액과 시료를 혼합하고 10분간 37 $^{\circ}$ C의 수조에서 반응시킨 후 734nm에서의 흡광도를 측정 후, 대조구의 흡광도와

시료액 흡광도의 차이를 백분율로 표시하여 ABTS 라디칼 소거능을 계산하였다.

통계분석

본 실험은 청색, 적색 및 혼합 LED 처리로 베드당 딸기 6주씩 재배하였으며 완전임의배치 2반복 처리하였다. 수확한 과실을 각각의 처리구별로 혼합한 후 무작위로 분리하여 과실경도, 생리물질 함량 및 항산화 활성 등은 생과 5개씩 2반복 실험한 결과를 SAS 프로그램(SAS, 9.2, Institute Inc, USA)을 이용하여 던컨의 다중범위검정($P = 0.05$)으로 분석하였다.

결과 및 고찰

딸기의 물리적 특성

폐쇄형 성장상 내에서 LED광에 의한 빛의 공급이 딸기 과실의 물리적 특성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 정식 후 파장이 서로 다른 3가지 처리구의 LED광 조건에서 독립적으로 재배한 딸기 과실을 3회에 걸쳐 수확한 후 처리구별 과실 수확량 및 과실 수확 개수를 측정하였다. 그 결과, 청색과 적색 파장의 혼합 LED에서 자란 딸기의 경우 과실 수확량이 158g으로 이것은 청색 LED의 94g 및 적색 LED의 100g보다 약 40% 및 37% 높았다(Fig. 3A). 또한, 수확된 과실 개수에 있어서도 혼합 LED에서 자란 딸기 과실 수가 19개로 청색과 적색 LED의 15개와 16개에 비해 각각 21% 및 16% 많았다(Fig. 3B).

고추의 생육에 미치는 LED광의 효과를 연구한 Brown et al.(1995)는 청색과 적색의 혼합파장이 적색 단독 파장보다

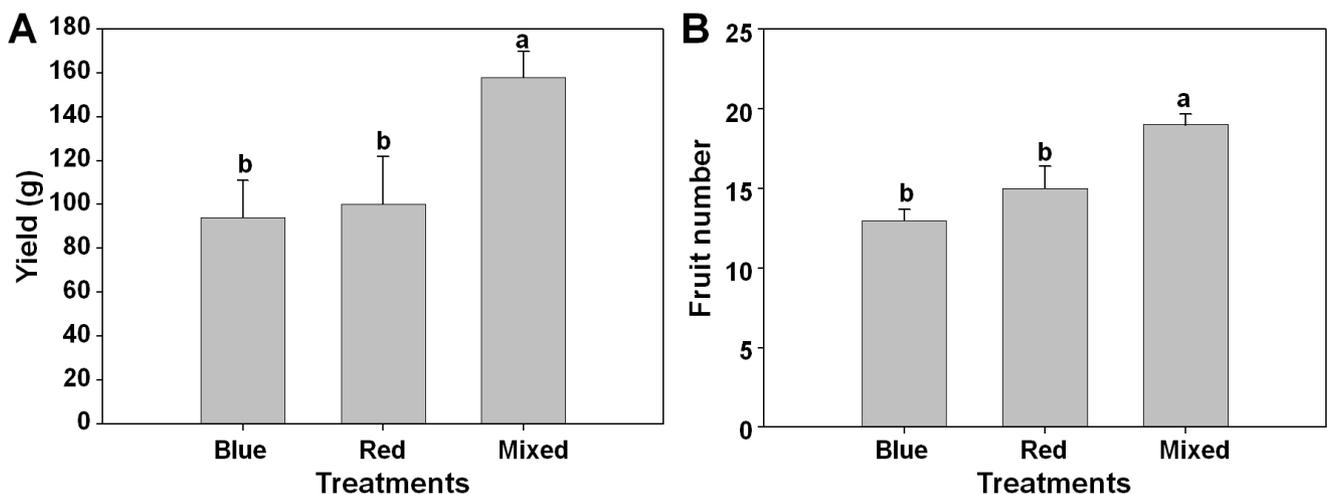


Fig. 3. Fruit yield (A) and number of strawberry fruit (B) separately cultivated under different LED lights in a closed chamber. Vertical bars show standard deviations ($n = 2$). Small letters inside the figure indicate mean separation by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

고추 잎, 줄기 생장을 증가시켰다고 하였으며, Duong et al. (2003)은 LED 광원을 이용한 딸기의 조직배양 실험에서 30% 청색과 70% 적색의 혼합 LED 파장이 청색 또는 적색의 단독 파장보다 토양에 딸기 조직배양 묘를 정식하였을 때 생장에 있어 효율적이라고 보고한 바 있다. 이러한 실험 결과들은 본 시험 결과에서 나타난 바와 같이 청색과 적색의 혼합 LED광이 다른 파장의 LED광에 비해 식물의 생장을 촉진시켜 생산성에 긍정적인 영향을 미친 것으로 사료된다.

한편, 동일한 시기에 붓으로 수분한 딸기 과실의 성숙시기를 확인한 결과 청색 LED광에서 가장 빠르게 결실이 이루어졌으며, 적색 LED광은 가장 늦었다(Fig. 4). 이로 인하여 첫 수확 시 청색 LED광에서 수확량이 가장 많았고, 적색 LED광이 가장 작았으나, 두 번째 수확에서는 반대로 적색 LED광이 가장 많았다(Fig. 5).

파장별 LED광 처리가 딸기의 엽에 미치는 효과를 조사하기 위하여 식물체당 엽병의 수를 조사한 결과, 청색, 적색 및 혼합 LED의 엽병 수는 각각 6.6, 7.4 그리고 7.8개로 혼합 LED에서 유의적으로 높게 나타났다(Fig. 6A). 일반적으로 자외선 영역과 가까운 청색 광은 잎의 생육을 억제한다고 알려져 있으나, 엽병의 길이, 잎의 길이 그리고 잎의 폭에 있어서는 청색 LED에서 유의적으로 높게 나타났다(Fig. 6). Wu et al.(2007)은 각각의 백색, 청색 및 적색 LED광을 이용한 완두콩의 육묘 실험에서 청색 LED에서 줄기의 길이나 잎의 면적과 무게가 유의적으로 높았다고 보고하였고, Azad et al.(2011)은 유리 온실에서 LED 보광을 이용한 고추의 생장을 조사한 연구에서 청색 LED광이 적색이나 혼합 LED광보다 양호한 성장 효과를 보였다고 하였다. 그러나 Folta and Childers(2008)의 27cm³의 성장상에서 LED광을 이용

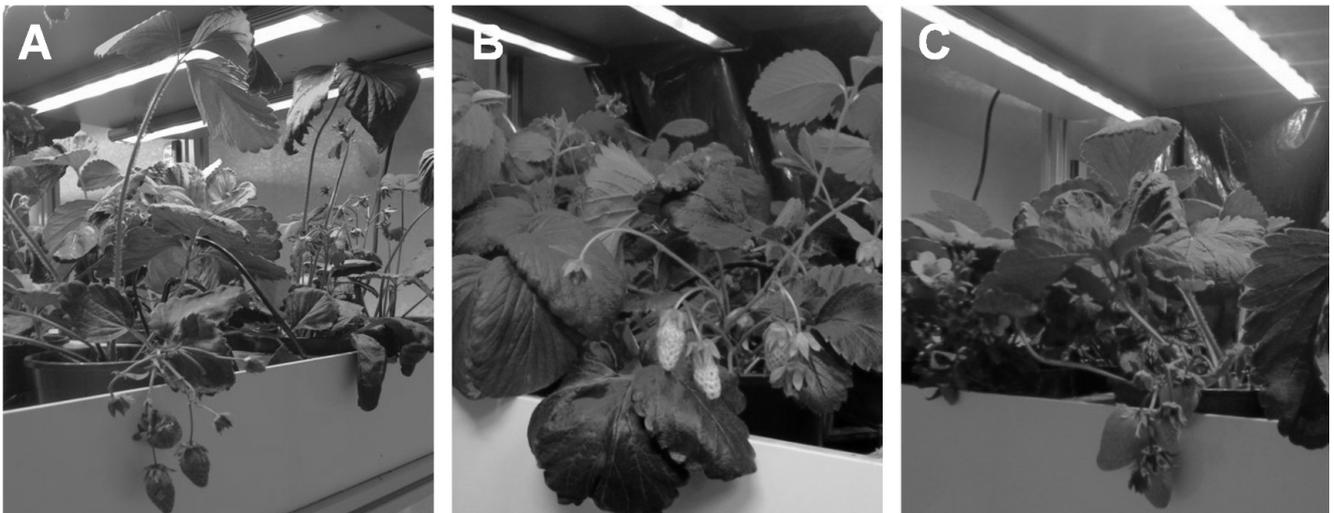


Fig. 4. Photographs showing LED light-dependant fruit development of strawberry 'Daewang' in a closed chamber. (A) Blue; (B) Red; (C) Mixed (blue plus red).

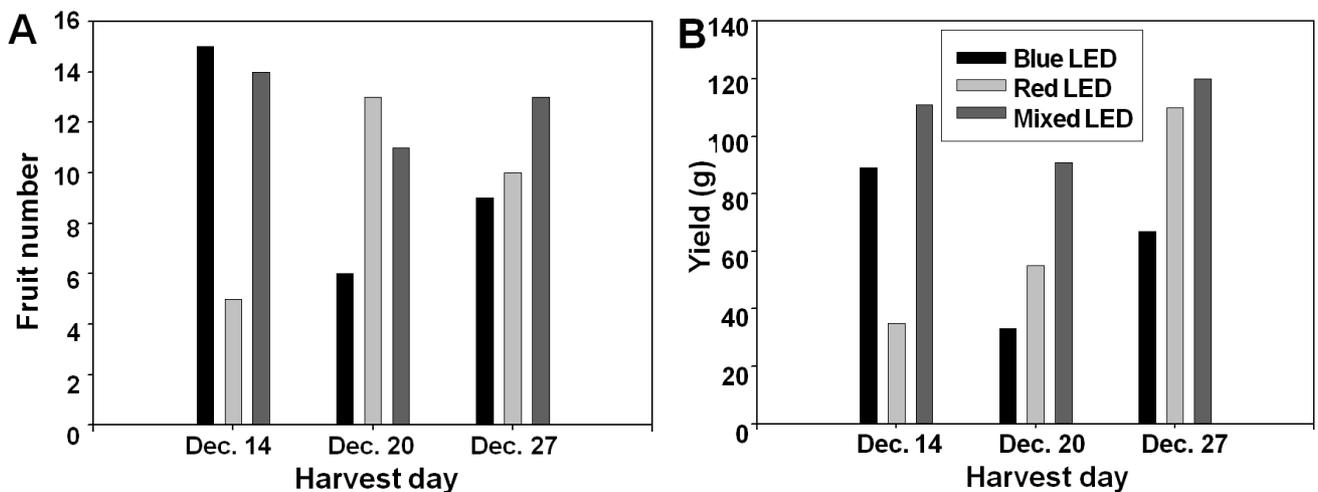


Fig. 5. Changes in strawberry fruit number (A) and yield (B) according to harvested time that had been separately cultivated under different LED lights in a closed chamber.

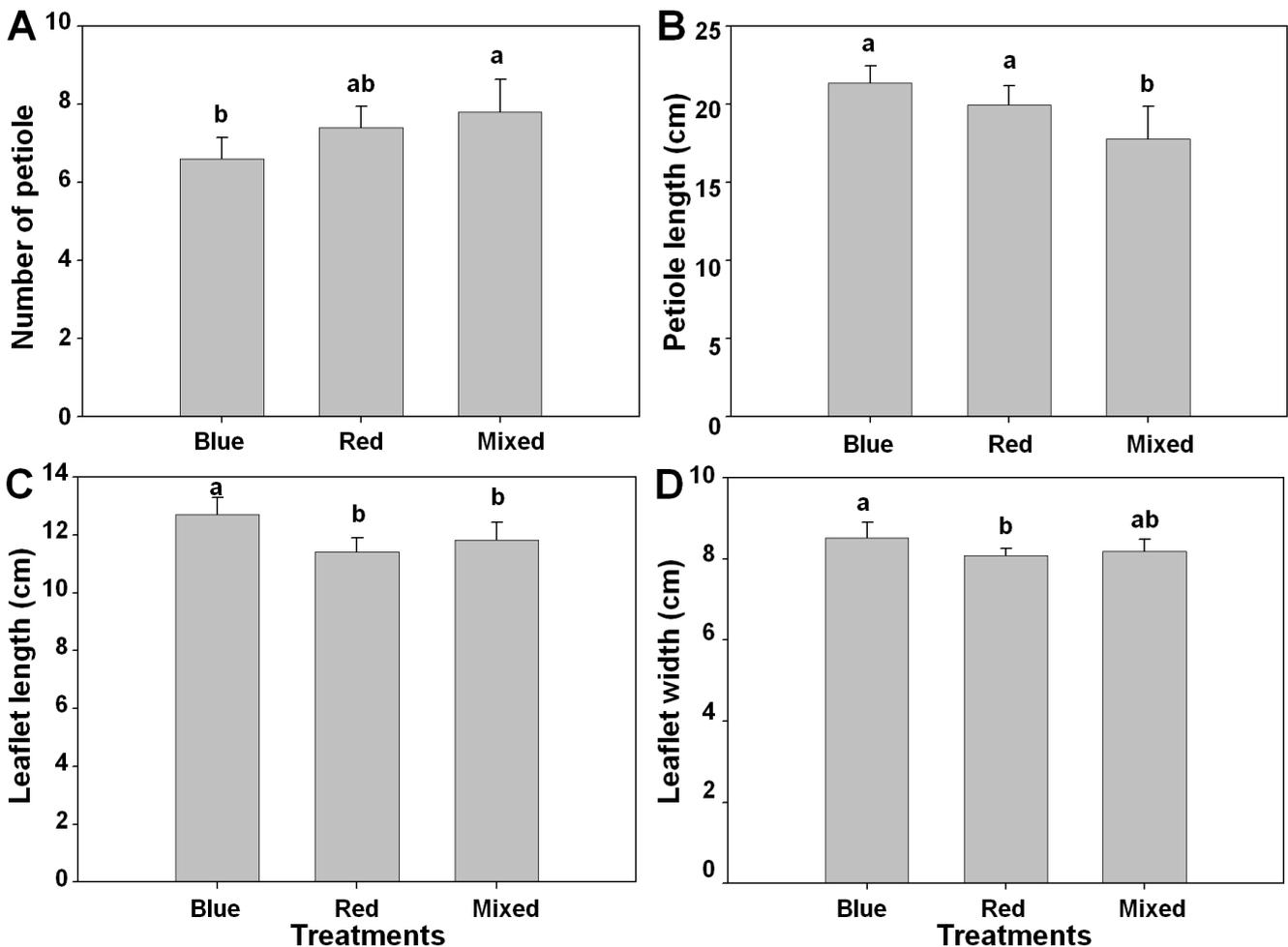


Fig. 6. Effects of different LED light illuminations on the vegetative growth of strawberry 'Daewang' during cultivation in a closed chamber. (A) Number of petioles per plant; (B) Petiole length; (C) Leaflet length; (D) Leaflet width. Vertical bars show standard deviation (n = 2). Small letters inside the figure indicate mean separation by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

하여 40일 동안 기른 딸기의 생장에 있어서는 혼합 LED광이 청색이나 적색의 단파장보다 효과적이었다고 보고하였다. 이처럼 실험에 따라 LED광 파장별 효과가 다르게 나타나는 것은 작물의 생육이 작물의 종류나 품종과 같은 유전적 요인과 토양재배, 수경재배 등의 배지 및 양액 공급 조건, 온도 및 습도 등의 다양한 환경 요인에 의해 영향을 받기 때문에 생기는 것으로 판단된다. LED광 처리가 딸기 과실의 경도에 미치는 효과를 조사한 결과, 청색, 적색 및 혼합 LED처리구에서 모두 약 $0.28\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ 의 경도를 보였으며 처리구간 유의적 차이는 없었다(데이터 미제시).

유리당 및 유기산의 함량

딸기의 풍미와 소비자의 입맛을 결정하는 주요한 함유물질로는 유리당과 유기산이 있으며 그 함량은 딸기의 품질을 좌우한다. 딸기 과실에 함유된 주된 유리당에는 과당, 포도당, 설탕 등이 있는데, 이중에서 식감에 가장 큰 영향을 미치

는 것은 과당으로 포도당이나 설탕에 비해 더 강한 단맛을 나타낸다. 한편, 과실에 함유된 유기산으로 시트르산, 말산, 옥살산 등이 있다. 이들 유리당과 유기산의 함량은 딸기의 성숙단계에 따라 변화하며(Moing et al., 2001), 재배방법 혹은 환경조건에 따라서도 달라진다(Wang and Millner, 2009).

파장이 다른 LED광 조건에서의 생육이 딸기 과실의 유리당 및 유기산 함량에 미치는 효과를 조사하여 Table 2에 나타냈다. 혼합 LED광 처리에서의 딸기 과당 함량은 $3.40\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 로 청색 혹은 적색 LED광 처리에서의 3.00 이나 $3.13\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 보다는 유의적으로 높았으며, 설탕의 함량은 혼합과 적색 LED광 처리가 4.63 과 $4.87\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 으로 청색 LED광 처리의 $3.50\text{g}\cdot 100\text{g}^{-1}$ 보다 유의적으로 높았다(Table 2). 포도당의 함량은 LED광 처리간 유의적 차이가 없었다. 한편, 유기산의 함량에 있어서는 LED광 처리별 유의적 차이가 나타나지 않았다(Table 2).

Table 2. Levels of free sugars and organic acids contained in fruits of strawberry 'Daewang' that had been separately cultivated under different LED lights in a closed chamber.

LED treatment	Sugar contents (g·100 g ⁻¹ , FW)			Organic acid contents (mg·100 g ⁻¹ , FW)		
	Fructose	Glucose	Sucrose	Oxalic	Citric	Malic
Blue	3.00 c ²	3.50 a	3.50 b	12.0 a	158.7 a	43.0 a
Red	3.13 b	3.57 a	4.87 a	9.3 a	140.9 a	42.1 a
Mixed	3.40 a	3.43 a	4.63 a	13.6 a	143.8 a	42.2 a

²Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at *P* = 0.05.

총 페놀화합물, 플라보노이드 및 안토시아닌 함량

플라보노이드, 안토시아닌과 같은 페놀성 화합물들은 식물 기능성 화합물(phytochemicals)의 일종으로서 비생물적인 환경스트레스에 대한 식물의 저항성을 증가시키는 식물 방어 작용 외에도 병원체나 다양한 불량환경으로부터 인체를 보호한다고 알려져 있다(Hernández et al., 2009; Treutter, 2010). 특히 안토시아닌은 딸기의 주요한 색소로써(Andersen et al., 2004) 항산화제의 역할을 수행한다(Zheng et al., 2007). 딸기의 생육 기간 중 공급한 파장별 LED광 처리가 과실의 기능성 화합물 함량에 미치는 영향을 조사하기 위하여 적색, 청색 및 적색과 청색이 혼합된 LED광의 3가지 서로 다른 처리구별로 딸기 과실의 총 페놀화합물, 플라보노이드, 안토시아닌 함량을 측정하였다(Fig. 7). 그 결과, 총 페놀 화합물과 플라보노이드 함량은 LED광 처리별 유의적 차이가 나타나지 않았다(Fig. 7). 반면, 안토시아닌 함량의 경우 혼합 LED광 처리가 334mg·kg⁻¹로 가장 높았고 청색 LED광 238mg·kg⁻¹, 적색 LED광 200mg·kg⁻¹ 순으로 나타났다(Fig. 7C). Johkan et al.(2010)은 잎 상추의 육묘에서 적색과 청색의 혼합 LED광이 청색 혹은 적색의 단독 LED광에 비해 안토시아닌 등의 식물 화합물 축적 효과가 높다고 하였다. 이와 같은 혼합 LED광에 의한 안토시아닌 축적 효과는 청색광이 자외선 영역에 가까워 식물 방어에 필요한 식물 화합물의 발현을 유도한 것으로 해석된다(Ebisawa et al., 2008).

항산화 활성

활성 산소종에서 유래한 자유라디칼은 작물의 신진대사를 감소시키는 한편, 배 발생을 저해하며(Benson et al., 1992), 단백질, 지질, 탄수화물, 유전자 등의 세포 성분을 손상시킴으로써 산화적 스트레스를 유발한다(Gill et al., 2010). 딸기 과실의 항산화 활성에 대한 평가는 흔히 딸기 품종이나 과실의 성숙 시기에 따라 자유라디칼 저감 능력을 측정하여 이루어진다(Cheel et al., 2007; Fan et al., 2012; Meyers et al., 2003).

폐쇄형 성장상을 이용하여 서로 다른 파장의 LED광 조건에서 생육된 딸기 과실의 항산화 활성을 조사하기 위하여

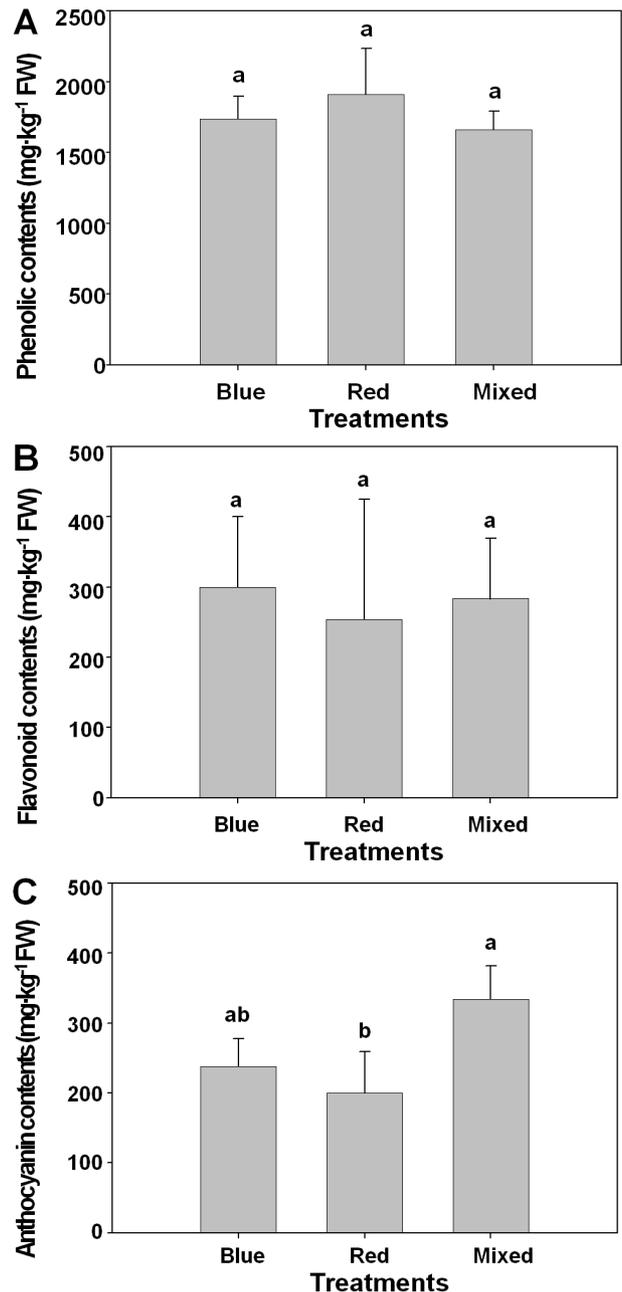


Fig. 7. Amounts of phytochemicals contained in fruits of strawberry 'Daewang' that had been separately grown under different LED lights in a closed chamber. (A) Total phenol; (B) Flavonoids; (C) Anthocyanin. Vertical bars show standard deviations (n = 2). Small letters inside the figure indicate mean separation by Duncan's multiple range test at *P* = 0.05.

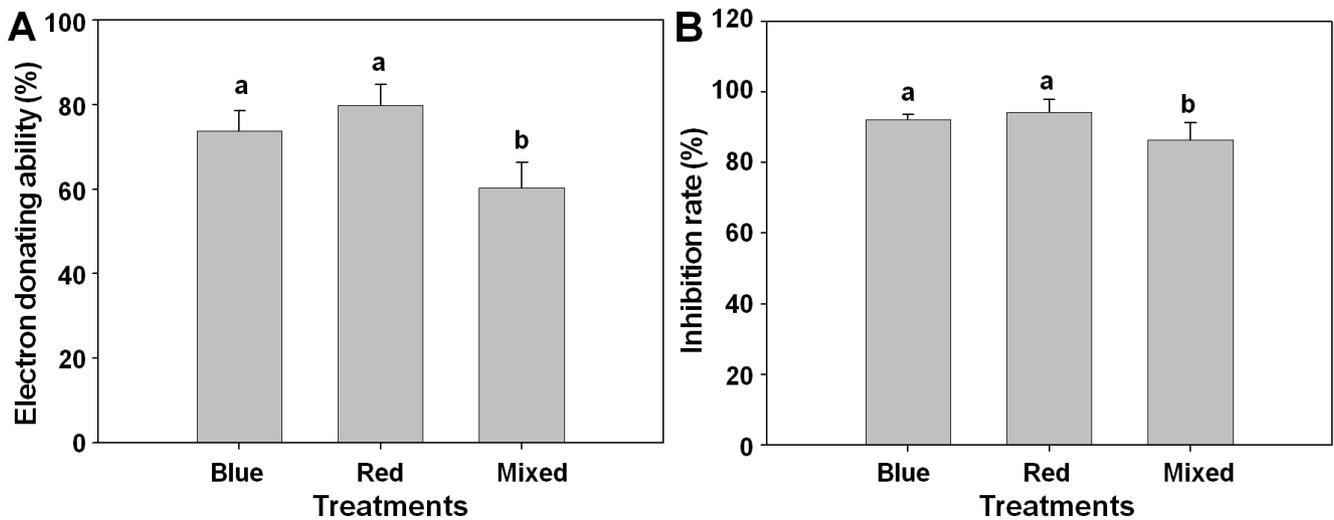


Fig. 8. Antioxidant activities measured in fruits of 'Daewang' strawberry that had been cultivated under different LED lights in a closed chamber. (A) DPPH free radical scavenging activity; (B) ABTS radical cation decolorization. Vertical bars show standard deviations (n = 2). Small letters inside the figure indicate mean separation by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

자유라디칼을 생성하는 DPPH의 전자공여능과 ABTS 라디칼 양이온의 수소공여 반응을 측정하였다(Fig. 8). DPPH를 이용한 자유라디칼 소거 능력이 적색과 청색 LED광에서 각각 79.7과 73.8%로 혼합 LED광의 60.2%보다 유의적으로 높게 나타났다(Fig. 8A). ABTS 라디칼 소거능력 측정결과 또한 적색과 청색 LED광에서 자란 딸기과실이 혼합 LED광보다 유의적으로 높게 나타났다(Fig. 8B). 나무딸기의 경우 성숙 시기 및 저장 과정에 빛의 처리에 따라 항산화 활성이 변화하며(Wang et al., 2009), 높은 재배 온도에서 딸기의 항산화 활성을 높아진다고 알려져 있으나(Wang and Zheng, 2001), 딸기의 재배과정에서 인공광원의 파장별 처리에 따른 딸기 과실의 항산화 활성 효과는 잘 알려져 있지 않지만 본 실험 결과 항산화 활성에 있어서는 혼합 LED광보다는 적색이나 청색 LED가 더 효과적으로 나타났다(Fig. 8). 이는 대표적인 항산화제로 알려진 페놀화합물 함량이 LED 처리별 유의적 차이는 나타나지 않았지만 수치상으로는 적색이나 청색 LED가 혼합 LED보다 높았기 때문인 것으로 사료되나, 이에 대한 자세한 연구는 더욱 이루어져야 할 것으로 판단된다.

초 록

지구 온난화에 따른 최근의 이상기후는 일조량의 부족을 야기하여 농업 피해의 일차적인 요인이 되고 있다. 플라스틱 하우스 재배에서 LED광은 일조량 부족을 보충하기 위해 종종 활용되고 있다. 본 연구는 LED 인공광원을 이용한 폐쇄형 성장실에서 생육 중인 성숙한 딸기 '대왕' 품종 과실의

생장 특성 및 기능성 식물화합물 형성을 조사하는데 목적이 있다. 인공광원으로는 청색 LED광(448nm), 적색 LED광(634nm 및 661nm), 그리고 청색과 적색이 3대 7로 조합된 혼합 LED광을 사용하였으며, 태양광이 없는 폐쇄형 성장상에서 주간 16시간 및 야간 8시간의 광주기와 함께 $200 \pm 1 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 LED광을 처리하였다. 청색과 적색 파장이 혼합된 LED광에서 자란 딸기 과실의 생산량이 다른 LED광 처리보다 높았다. 유리당 중의 하나인 과당은 혼합 LED광에서 증가되었다. 안토시아닌 함량 역시 다른 LED광 처리에 비하여 혼합 LED광에서 현저하게 증가되었다. 총 페놀화합물과 플라보노이드 함량은 LED광 처리별 유의적 차이가 없었다. 반면, 청색 LED광에서 자란 딸기 과실은 다른 LED광 처리에 비하여 빨리 익었다. 적색이나 청색의 LED광에서 생육한 과실의 항산화 활성이 혼합 LED광보다 유의적으로 높게 나타났다. 따라서 온실에서의 딸기 생육 시 부족한 태양광의 보충광원으로서 청색과 적색의 혼합 LED광을 사용하면 과실의 생산량과 유리당 함량의 증진에 유용하리라고 판단되며, 식물공장에서도 딸기 재배 시 성숙시기의 조절이나 당 함량 및 항산화제 증진과 같은 목적을 실현하기 위해서 LED 파장의 선택적 이용이 필요할 것으로 생각된다.

추가 주요어: 안토시아닌, 항산화제, 플라보노이드, 딸기, 유리당

인용문헌

Andersen, Ø.M., T. Fossen, K. Torskangerpoll, A. Fossen, and U. Hauge. 2004. Anthocyanin from strawberry (*Fragaria*

- ananassa*) with the novel aglycone, 5-carboxypyranopelargonidin. *Phytochemistry* 65:405-410.
- 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.) seedling with supplemental LED light in glass house. *J. Bio- Environ. Con.* 23:182-188.
- Benson, E.E., P.T. Lynch, and J. Jones. 1992. Variation in free-radical damage in rice cell suspensions with different embryogenic potentials. *Planta* 188:296-305.
- Blois, M.S. 1958. Antioxidant determination by the use of a stable free radical. *Nature* 81:1199-1200.
- Brown, C.S., A.C. Schuerger, and J.C. Sager. 1995. Growth and photomorphogenesis of pepper plants under red light-emitting diodes with supplemental blue or far-red lighting. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 120:808-813.
- Cheel, J., C. Theoduloz, J.A. Rodríguez, P.D.S. Caligari, and G. Schmeda-Hirschmann. 2007. Free radical scavenging activity and phenolic content in achenes and thalamus from *Fragaria chiloensis* ssp. *chiloensis*, *F. vesca* and *F. × ananassa* cv. Cehandler. *Food Chem.* 102:36-44.
- Duong, T.N., T. Takamura, H. Watanabe, K. Okamoto, and M. Tanaka. 2003. Responses of strawberry plantlets cultured in vitro under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs). *Plant Cell, Tissue Organ Cult.* 73:43-52.
- Ebisawa, M., K. Shoji, M. Kato, K. Shimomura, F. Goto, and T. Yoshihara. 2008. Supplementary ultraviolet radiation B together with blue light at night increased quercetin content and flavonol synthase gene expression in leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Environ. Control Biol.* 46:1-11.
- Fan, L., C. Dube, C. Fang, D. Roussel, M.T. Charles, Y. Desjardins, and S. Khanzadeh. 2012. Effect of production systems on phenolic composition and oxygen radical absorbance capacity of 'Orleans' strawberry. *LWT - Food Sci. Technol.* 45:241-245.
- Folta, K.M. and K.S. Childers. 2008. Light as a growth regulator: Controlling plant biology with narrow band width solid-state lighting systems. *HortScience* 43:1957-1964.
- Gil, M.I., D.M. Holcroft, and A.A. Kader. 1997. Changes in strawberry anthocyanins and other polyphenols in response to carbon dioxide treatments. *J. Agric. Food Chem.* 45:1662-1667.
- Gill, S.S. and N. Tureja. 2010. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiol. Biochem.* 48:909-930.
- Hernández, I., L. Alegre, F. Van Breusegem, and S. Munné-Bosch. 2009. How relevant are flavonoids as antioxidants in plants? *Trends Plant Sci.* 14:125-132.
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S.N. Hashiad, and T. Yoshihara. 2010. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *HortScience* 45:1809-1814.
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hahiad, and T. Yoshihara. 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environ. Exp. Bot.* 75:128-133.
- Kim, S.K., R.N. Bae, and C.H. Chun. 2011. Changes in bioactive compounds contents of 'Maehyang' and 'Seolhyang' strawberry fruits by UV light illumination. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 29:172-180.
- Kim, Y.H., and M. Hamayun, A.L. Khan, C.I. Na, S.M. Kang, H.H. Han, and I.J. Lee. 2009. Exogenous application of plant growth regulators increased the total flavonoid content in *Taraxacum officinale* Wigg. *African J. Biotechnol.* 8:5727-5732.
- Meyers, K.J., C.B. Watkins, M.P. Pritts, and R.H. Liu. 2003. Antioxidant and antiproliferative activities of strawberries. *J. Agri. Food Chem.* 51:6887-6892.
- Moing, A., C. Renaud, M. Gaudillère, P. Raymond, P. Roudeillac, and B. Denoyes-Rothan. 2001. Biochemical changes during fruit development of four strawberry cultivars. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 126:394-403.
- Re, R., N. Pellegrini, A. Proteggente, A. Pannala, M. Yang, and C.R. Evans. 1999. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radic. Biol. Med.* 26:1231-1237.
- Samuolienė, G., R. Sirtautas, A. Brazaitytė, and P. Duchovskis. 2012. LED lighting and seasonality effects antioxidant properties of baby leaf lettuce. *Food Chem.* 134:1494-1499.
- Slinkard, K. and V.L. Singleton. 1977. Total phenol analysis: Automation and comparison with manual methods. *Am. J. Enol. Vitic.* 28:49-55.
- Treutter, D. 2010. Managing phenol contents in crop plants by phytochemical farming and breeding visions and constraints. *Int. J. Mol. Sci.* 11:807-857.
- Wang, S.Y. and W. Zheng. 2001. Effect of plant growth temperature on antioxidant capacity in strawberry. *J. Agric. Food Chem.* 49:4977-4982.
- Wang, S.Y. and P. Millner. 2009. Effect of different cultural systems on antioxidant capacity, phenolic content, and fruit quality of strawberries (*Fragaria × ananassa* Duch.). *J. Agric. Food Chem.* 57:9651-9657.
- Wang, S.Y., C.T. Chen, and C.Y. Wang. 2009. The influence of light and maturity on fruit quality and flavonoid content of red raspberries. *Food Chem.* 112:676-684.
- Wu, M.C., C.Y. Hou, C.M. Jiang, Y.T. Wang, C.Y. Wang, H.H. Chen, and H.M. Chang. 2007. A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings. *Food Chem.* 101:1753-1758.
- Zhang, Y., N.P. Seeram, R. Lee, L. Feng, and D. Heber. 2008. Isolation and identification of strawberry phenolics with antioxidant and human cancer cell antiproliferative properties. *J. Agric. Food Chem.* 56:670-675.
- Zheng, Y., S.Y. Wang, C.Y. Wang, and W. Zheng. 2007. Changes in strawberry phenolics, anthocyanins, and antioxidant capacity in response to high oxygen treatments. *LWT - Food Sci. Technol.* 40:49-57.