

밀폐형 식물생산시스템에서 백색 LED를 이용한 광도와 광주기에 따른 상추의 생장

박지은¹ · 박유경¹ · 정병룡^{1,2,3} · 황승재^{1,2,3*}

¹경상대학교 대학원 응용생명과학부(BK21 Program), ²경상대학교 농업생명과학연구원, ³경상대학교 생명과학연구원

Growth of Lettuce in Closed-Type Plant Production System as Affected by Light Intensity and Photoperiod under Influence of White LED Light

Ji Eun Park¹, Yoo Gyeong Park¹, Byoung Ryong Jeong^{1,2,3}, and Seung Jae Hwang^{1,2,3*}

¹Department of Horticulture, Division of Applied Life Science (BK21 Program),
Graduate School of Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

²Institute of Agriculture & Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

³Research Institute of Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

Abstract. This study was conducted to examine the effect of light intensity and photoperiod of white LEDs as the artificial light source on the growth of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) 'Seonhong Jeokchukmyeon' in a closed-type plant production system. Seedlings, transplanted at a density of 20 cm × 20 cm in a completely randomized design, were grown under white LEDs (FC Poibe Co. Ltd., Korea), at one of the 3 light intensities (100, 200, or 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), and each with one of 3 photoperiods [12/12, 18/6, or 24/0 (Light/Dark)]. Plants were cultured for 22 days under the condition of $21 \pm 2^\circ\text{C}$, $60 \pm 10\%$ RH, and $400 \pm 50 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1} \text{CO}_2$. The greatest leaf length and width, fresh and dry weights, and total anthocyanin content were obtained in the 24/0 photoperiod, regardless of the light intensity. Length of the longest root, fresh and dry weights, and number of leaves were greater in light intensity of 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ than 100 or 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$. Chlorophyll value was the greatest in the photoperiod 12/12 than 18/6 or 24/0. The results obtained suggest that plant grew the best kept by light intensity at 200 or 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, and photoperiod of 12/12 or 18/6.

Additional key words : artificial light source, chlorophyll value, total anthocyanin content

서 론

21세기 지구와 인류에게는 여러 분야에 있어서 많은 어려움에 직면하는 시대가 될 것이라는 예측을 하고 있다. 특히 인구 증가, 에너지자원의 고갈, 토양의 황폐화와 이상기후에 의한 농업 생산의 불확실성과 정체는 세계 식량 대란이라는 위협한 문제점을 안고 있다(Kim, 2010). 그래서 최근 계절이나 기온, 풍수해 등 자연환경에 구애받지 않고 일정한 공간에서 농작물을 생산하는 식물공장에 관한 관심이 커지고 있다.

식물공장이란 농작물에 대하여 통제된 일정한 시설 내에서 광, 온도, 습도, 이산화탄소 농도 및 배양액 등의 환경조건을 인공적으로 제어하여 계절이나 장소에 관계없이

이 자동적으로 연속 생산하는 시스템을 말한다(Takatsuji, 2008). 따라서 시설 내에서 최적 재배환경을 유지하면서 연중 균일한 품질의 식물을 자동 생산할 수 있는 식물 생산시스템이라 할 수 있다(Kozai, 2007). 또한 농작물의 생육 상태를 과학적으로 관리하여 비료나 농약을 저 투입하는 정밀농업의 성격을 가지며, 노지에서 재배가 어려운 기능성 농작물을 재배함으로써 고부가가치 농업을 실현할 수 있다.

식물공장에서 인공광원으로 LED의 사용이 증가되고 있는데, LED 광은 파장 폭이 작고 단색광이므로 작물재배에 쉽게 사용할 수 있기 때문이다. 현재 식물재배용 인공광원으로서의 LED가 식물재배에 유효하다는 연구 결과들이 보고되고 있다(Um 등, 2009; Choi, 2003; Massa 등, 2008). 또한 다양한 엽채류 및 과채류에 대하여 LED 램프의 선택적 파장에 따른 생장과 품질에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되고 있다(Li와 Kubota, 2009; Lee 등, 2012).

*Corresponding author: hsj@gnu.ac.kr

Received July 16, 2013; Revised July 22, 2013;

Accepted July 29, 2013

상추는 인공광원을 이용한 시설 내에서 광에 대한 식물체의 반응을 연구하는데 가장 적합한 작물로 알려져 있다. 그러나 아직까지도 광환경 조건에 따른 작물의 생장반응 및 기능성 향상에 대한 자료가 부족한 실정이다. 특히 LED 램프의 광주기가 식물 생장에 미치는 효과에 관한 연구는 국내에서는 부족한 실정이므로 보다 체계적인 연구가 이루어져야 한다. 또한 식물재배에 LED를 이용하고 있지만 아직까지 적절한 광원의 배합, 적절한 광도, 다른 환경요인과의 관계 등이 확실하게 구명되어 있지 않다(Um 등, 2009). 따라서 본 연구는 밀폐형 식물생산시스템에서 백색 LED의 광도와 광주기에 따른 상추의 성장 효과를 알아보고자 수행되었다.

재료 및 방법

1. 실험재료

밀폐형 식물생산시스템 내 광도와 광주기에 따른 상추의 성장 조건을 구명하기 위하여 ‘선홍적축면’ 상추 (*Lactuca sativa* L. ‘Seonhong Jeokchukmyeon’, Asia

Seed Co. Ltd., Korea)를 사용하였다. 2011년 2월 26일에 암면 펠렛(UR암면)이 담긴 240구 육묘용 플러그트레이(60cm×41cm×5cm)에 상추종자를 파종하였다. 20°C의 항온발아실(DS-10L-2, Dasol Scientific Co. Ltd., Korea)에서 3일 동안 발아시킨 후 밀폐형 식물생산시스템(C1200H3, FC Poibe Co. Ltd., Korea)의 형광등(Philips Co. Ltd., the Netherlands) 하에서 24시간 광주기로 16일간 육묘하였다. 밀폐형 식물생산시스템은 온도, 광주기, CO₂, 각 단별 광원제어 등을 위한 제어 시스템, 인공광원, 재순환 양액 시스템, 양액 탱크, 펌프, 냉·난방 시스템, CO₂ 공급기, 광도 조절기로 구성되어 있다(Fig. 1).

2. 인공광원과 광도와 광주기 처리

파종 후 19일째 밀폐형 식물생산시스템에 상추를 20cm×20cm의 재식밀도로 정식하였다. 3처리 광도와 3처리의 광주기를 설정하여 18개체씩 완전임의배치로 정식하였다. 인공광원으로 백색 LED(FC Poibe Co. Ltd., Korea)를 사용하여 광도는 100, 200, 300 μmol·m⁻²·s⁻¹로 설정하였고, 광주기를 12/12, 18/6, 24/0(명기/암기)로 처리하였다. 인공광원의 길이는 1,200mm로 동일한 크기를 사용하였다.

3. 재배환경

밀폐형 식물생산시스템의 재배환경은 온도 21±2°C, 상대습도 60±10%로 조절하여 정식 후 총 22일간 재배하였다. 광과장은 광원과의 9cm 높이에서 분광복사계(RPS-900R, International Light Co. Ltd., USA)를 이용하였고, 광도계(HD2101.1, Delta OHM, Italy)를 이용하여 광도를 측정하였다. 재배기간 동안의 관주는 담액식 재순환 수경재배 방식으로 Sonneveld 상추 양액처방(Sonneveld와 Straver, 1994)을 기준으로 양액을 조제하여 사용하였다. 양액의 pH는 6.5, EC는 1.5dS·m⁻¹로 조절하여 공급하였다.

4. 생육조사

상추의 생육은 초장, 엽장, 엽폭, 엽수, 엽록소 함량(SPAD 502, Minolta, Japan), 최대근장, 지상부와 지하부의 생체중과 건물중, 총 안토시아닌 함량을 조사하였다. 총 안토시아닌 함량은 상추 잎의 생체중 2g을 채취하여 95% ethanol과 1.5N HCl을 85:15(v/v)로 혼합한 추출액을 막사시발에 2mL 첨가하여 마쇄한 용액을 마이크로 튜브에 1mL 취하였다. 이후 4°C 암조건 하에서 24시간 보관 후 13,000rpm에서 20분간 원심 분리하여 얻은 상등액을 1:5로 희석하여 분광광도계(Libra S22, Biochrom, United Kingdom)의 535nm에서 흡광도를 측정하였다(Fuleki와 Francis, 1968).

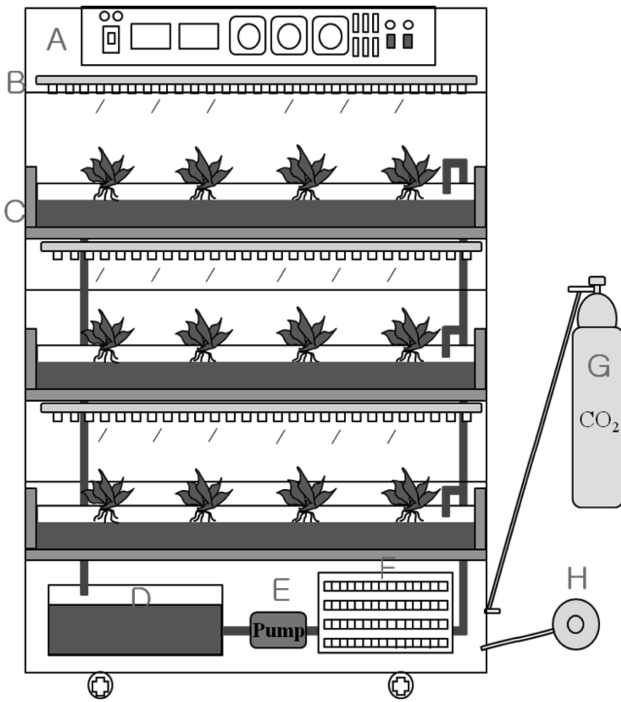


Fig. 1. Schematic diagram of a recirculating ebb and flow hydroponic system in the closed-type plant production system. The main features are A, control system; B, artificial light (white LED) source; C, recirculating ebb and flow hydroponic system; D, solution tank; E, pump; F, heating and cooling system; G, CO₂ supplier; and H, light intensity control. The environmental conditions were PPFD; 100, 200, 300 μmol·m⁻²·s⁻¹, air temperature; 21±2°C, relative humidity; 60±10%, and CO₂; 400±50 μmol·mol⁻¹.

5. 통계분석

SAS(Statistical Analysis System, V. 9.1, Cary, NC, USA)프로그램을 이용하여 Duncan 다중검정으로 통계적 유의성을 검정하였으며, 그래프는 Sigma Plot(10.0, Systat software, Inc., Chicago, IL, USA)프로그램을 사용하여 작성하였다.

결과 및 고찰

실험에 사용한 백색 LED 광원을 100, 200, 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광도로 처리하였을 때 광파장 스펙트럼은 청색광 파장 영역인 447nm, 녹색광 파장 영역인 544nm에

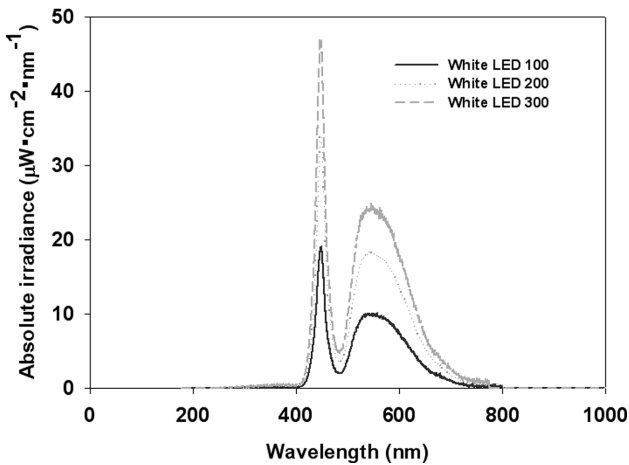


Fig. 2. Spectral distributions of white LED with different light intensity used. The light intensity were 100, 200, or 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ provided by the white LED (FC Poibe Co. Ltd., Korea).

서 최대 피크를 보였으며, 광도가 높을수록 절대 방사량의 비율도 높아졌다(Fig 2).

백색 LED 광원 하에서 ‘선홍적측면’ 상추의 생장은 광도와 광주기에 따른 차이를 보였다. 3가지 광도 처리구에서 광주기를 24/0(명기암기)으로 처리하였을 때 지상부와 지하부의 생체중과 건물중이 유의성 있게 증가하였으며, 특히 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광도와 24/0(명기암기) 광주기 처리에서 가장 무거웠다(Table 1). 최대근장은 100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 짧았고, 200과 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 은 비슷한 수준이었다. 하지만 광주기에 따른 차이는 인정되지 않았다. 초장은 100 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 가장 길었고 광도가 증가할수록 감소하는 경향을 보였다. 광주기별로는 24/0(명기암기) 처리에서 증가하였다. 광도 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 과 광주기 24/0(명기암기) 처리에서 전반적인 생육이 우수하였는데, 이러한 결과는 Park과 Lee(1999)의 식물공장 내 광도와 양액수준에 따른 상추의 생육을 조사한 결과 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 가장 무거운 생체중을 얻었다는 보고와 일치하였다. 또한 Kim 등(2004)도 광합성효율모델을 통해 상추의 최적 재배환경을 추정해 본 결과 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이상에서 광합성 속도가 높은 것으로 보고하였다. 그러나 상추의 생장은 광도가 낮은 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 보다 300 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 처리가 생육이 저조하였는데, 그 이유는 광포화점 이상의 광도에서 스트레스를 받아 상추의 생육이 억제 된 것으로 추정하였다. Fu 등(2012)은 다양한 광도에서 상추의 생육 실험 시 Fv/Fm 값을 측정하였다. 그 결과 Fv/Fm 값이 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 처리에서 0.80과 유사한 값을 얻었고, 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 처리에서는 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 처리와 비교하여 수치가 다소 낮게 나타났다. 대부분의 식물에서 건강한

Table 1. Effect of light intensity and photoperiod under the white LED on growth and development of lettuce grown in a closed-type plant production system.

Light intensity ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (A)	Photoperiod (Light/Dark) (B)	Plant height (cm)	Length of the longest root (cm)	Fresh weight (g)		Dry weight (g)	
				Shoot	Root	Shoot	Root
100	12/12	14.1 bc ^z	28.1 e	22.1 e	1.7 f	1.0 f	0.09 d
	18/6	15.7 ab	32.6 cd	34.5 d	3.0 e	1.4 e	0.13 b-d
	24/0	16.2 a	31.0 de	37.0 cd	3.3 de	1.8 cd	0.18 b
200	12/12	13.2 cd	36.7 b	34.5 d	3.7 d	1.6 de	0.17 bc
	18/6	13.0 cd	36.2 bc	41.7 c	4.6 c	1.9 c	0.19 ab
	24/0	14.5 bc	37.9 ab	55.1 a	6.8 a	2.8 a	0.25 a
300	12/12	13.7 c	41.1 a	32.2 d	3.6 d	1.5 e	0.11 cd
	18/6	11.9 d	35.5 bc	41.3 c	5.1 bc	2.0 c	0.19 b
	24/0	13.8 c	36.1 bc	48.9 b	5.6 b	2.6 b	0.18 b
F-test ^y	A	***	***	***	***	***	***
	B	*	NS	***	***	***	***
	A × B	NS	**	NS	***	*	NS

^zMean separation within columns by Duncan’s multiple range test at $P = 0.05$.

^yNS, *, **, ***, Nonsignificant or significant at $P = 0.05, 0.01$ and 0.001 , respectively.

Table 2. Effect of light intensity and photoperiod under the white LED on leaf measurement of lettuce grown in a closed-type plant production system.

Light intensity ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) (A)	Photoperiod (Light/Dark) (B)	Leaf		No. of leaves	Chlorophyll (SPAD)
		Length (cm)	Width (cm)		
100	12/12	13.7 bc ^z	11.2 e	9.0 ab	14.4 ab
	18/6	14.7 ab	12.8 d	9.0 ab	11.8 c
	24/0	15.4 a	13.9 bc	9.1 a	11.7 c
200	12/12	13.3 c	13.1 cd	9.0 ab	14.8 ab
	18/6	13.3 c	13.3 cd	9.3 a	14.3 ab
	24/0	14.8 a	14.9 a	9.5 a	11.1 c
300	12/12	13.3 c	12.7 d	8.7 ab	15.6 a
	18/6	13.3 c	13.3 cd	8.7 ab	14.1 b
	24/0	13.5 c	14.3 ab	8.2 b	11.6 c
F-test ^y	A	***	***	**	**
	B	***	***	NS	***
	A × B	NS	NS	NS	**

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

^yNS, *, **, ***, Nonsignificant or significant at $P = 0.05, 0.01$ and 0.001 , respectively.

잎의 경우 Fv/Fm 값이 보통 0.83 정도로 보고되어 왔고 (Choi 등, 2004), 이 값보다 낮을 경우 식물이 스트레스에 노출된 것이라 할 수 있다. 또한 초장은 광도가 낮은 $100\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 처리에서 가장 길었다. 제라늄에 광을 달리 처리하였을 때 대체로 약광 하에서 잎의 관다발조직의 크기나 지름이 증가되어 잎 크기가 커진다고 했는데 (Armitage 등, 1981), 상추에서도 그러한 이유로 초장이 길어진 것으로 보인다.

엽장은 광도처리 $100\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 길었고, 엽폭은 광도 $200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 넓었다 (Table 2). 엽수는 100과 $200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 처리에서 다소 많아지는 경향이었으나 광주기에 따른 차이는 인정되지 않았다. 하지만 광도가 높아질수록 엽수가 다소 감소하는 경향을 보였는데, $300\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 에서 상추의 광합성 대사가 활발하지 않아 이러한 결과를 얻은 것으로 판단된다. Sicora 등 (2003)은 광의 강도뿐만 아니라 노출 시간도 식물의 광합성에 영향을 준다고 하였다. Park 등 (2012)은 본 실험과 동일한 백색 LED 광원으로 광주기를 달리하여 실험한 결과 광주기가 길어질수록 엽록소 형광 값이 0.6 이하로 감소하는 결과를 얻었다. Fv/Fm이 높은 값으로 측정되었다는 것은 빛을 효율적으로 잘 이용할 수 있다는 것이며, 동일한 광 조건이라 하더라도 광수복합체에서 외부의 광을 선택적이면서 효율적으로 받아들이며 광합성 대사를 촉진한다는 것을 의미한다 (Kang 등, 2008). Table 1의 결과와 유사하게 엽장, 엽폭, 엽수가 광도 $200\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 과 24/0(명기암기) 처리에서 가장 우수한 경향이였다. 하지만 엽록소는 광도가 높아질수록 증가하였으나 광주기가 길어질수록 감소하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 국화에서 광주기가 길어지

면 엽면적과 엽수는 증가하지만 엽록소는 감소한다는 보고와 일치 하였다 (Lee 등, 2001).

광도와 광주기에 따른 총 안토시아닌 함량은 광도가 높고, 광주기가 길어질수록 전체적으로 증가하는 경향을 보였다. 특히 청색광 파장대의 면적이 넓은 $300\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 의 광도 (Fig. 2)와 광주기가 가장 긴 24/0(명기/암기) 처리에서 $0.19\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW로 가장 높게 나타났다 (Fig. 3과 4). 지속적인 광 처리는 안토시아닌 합성 관련 효소의 활성을 높이고 (Sato 등, 1996), 청색광은 안토시아닌 합성을 촉진한다는 연구보고 (Noh와 Spalding, 1998)가 이러한 결과를 뒷받침하였다. 그러나 총 안토시아닌 함량은 $0.19\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW 이하로 전반적으로 낮은 수치

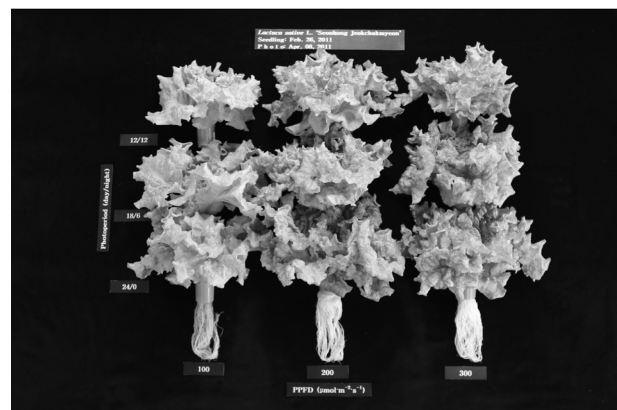


Fig. 3. Effect of light intensity and photoperiod under the white LED on growth and development of lettuce grown in a closed-type plant production system. The light intensity were 100, 200, or $300\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ provided by the white LED (FC Poibe Co. Ltd., Korea). The photoperiods (Light/Dark) were 12/12, 18/6, or 24/0.

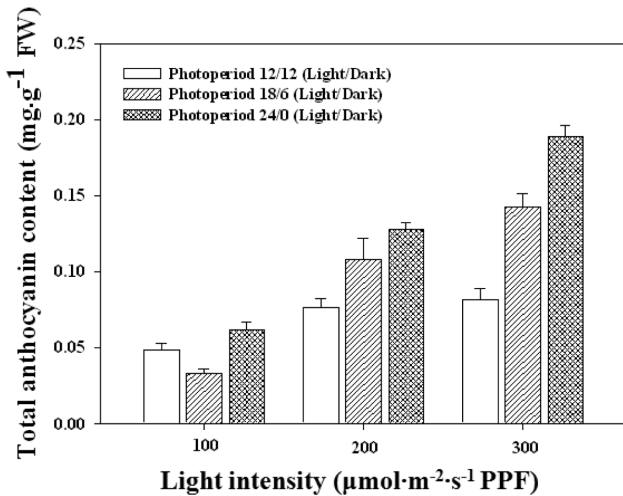


Fig. 4. Effect of light intensity and photoperiod under the white LED on total anthocyanin content of lettuce grown in a closed-type plant production system.

를 보였다. Nishimura 등(2009)은 적색광이 포함된 광원에서 자소(*Perilla frutescens* L. Britt. var. *acuta* Kudo)의 생육이 촉진되며, 안토시아닌 함량은 적색광과 청색광의 혼합광원에서 증대된다는 보고가 있는데, 본 실험에서는 백색의 인공광원 조건에서 실험한 결과 안토시아닌 함량이 전체적으로 낮았던 것으로 추정할 수 있었다. Lee 등(2010)도 LED 청색광과 적색광의 혼합광 하에서 생육한 어린잎 적상추는 적색광 단일광원의 4배, 형광등의 6배 높은 안토시아닌 함량을 나타내었다고 보고하였다.

밀폐형 식물생산시스템에서 백색 LED를 이용한 광도와 광주기에 따른 실험결과 처리에 따른 상추의 생육은 뚜렷한 차이를 보였고, 단일광인 백색 LED 처리시 안토시아닌 함량이 다소 낮게 나타났다. 향후 혼합광원 하에서 광과장 조합 비율을 달리한다면 안토시아닌 함량을 보다 높일 수 있는 연구 결과를 도출할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 200~300μmol·m⁻²·s⁻¹ 범위의 광도에서 최적 광도를 탐색하기 위한 후속 실험이 필요할 것으로 판단된다. 본 연구결과를 바탕으로 밀폐형 식물생산시스템에서 백색 LED를 이용한 상추의 생산이 가능할 것으로 생각된다.

적 요

본 실험은 식물공장시스템에서 인공광원인 백색 LED의 광도와 광주기에 따른 ‘선홍적측면’의 생육조건을 구명하고자 수행하였다. 그리고 각각의 챔버에 백색 LED를 설치 후 완전임의배치법으로 20cm×20cm 간격으로 재식하였다. 광도는 100, 200, 300μmol·m⁻²·s⁻¹로 처리하였고, 광주기는 12/12, 18/6, 24/0(명기암기)으로 처리

하였다. 온도는 21±2°C, 상대습도는 60±10%로 조절하여 22일간 재배하였다. 엽폭과 엽장, 생체중과 건물중, 총 안토시아닌 함량은 24/0(명기암기) 처리에서 좋았다. 최대근장, 생체중과 건물중, 엽수는 100, 300μmol·m⁻²·s⁻¹보다 200μmol·m⁻²·s⁻¹ 처리에서 좋았다. 엽록소는 광주기 18/6과 24/0 처리 보다 12/12(명기암기) 처리에서 높았다. 본 실험의 결과로 광도는 200, 300μmol·m⁻²·s⁻¹, 광주기는 12/12 또는 18/6(명기암기) 처리를 하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

추가 주제어 : 엽록소, 인공광원, 총 안토시아닌 함량

사 사

본 연구는 2011년 농림수산식품부 농림기술개발사업의 지원에 의해 수행되었음. 박지은과 박유경은 교육인적자원부의 BK21 프로그램의 장학금을 수혜 받아 본 연구에 기여하였음.

Literature Cited

- Armitage, A.F., W.H. Carlson, and J.A. Flore. 1981. The effect of temperature and quantum flux density on the morphology, physiology, and flowering of hybrid geraniums. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 106:643-647.
- Choi, Y.H., J.K. Kwon, J.H. Lee, N.J. Kang, M.W. Cho, and J.S. Kang. 2004. Effect of night and daytime temperatures on growth and yield of paprika ‘Fiesta’ and ‘Jubilee’. *J. Bio-Environ. Con.* 13:226-232.
- 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.
- Fu, W., P. Li, and Y. Wu. 2012. Effects of different light intensities on chlorophyll fluorescence characteristics and yield in lettuce. *Sci. Hort.* 135:45-51.
- Fuleki, T. and F.J. Francis. 1968. Quantitative methods for anthocyanins-1-extraction and determination of total anthocyanins in cranberries. *J. Food Sci.* 33:72-77.
- Kang, S.B., H.I. Jang, I.B. Lee, J.M. Park, and D.K. Moon. 2008. Effect of waterlogging condition on the photosynthesis of ‘Campbell Early’ grapevine. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 26:372-379.
- Kim, J.W. 2010. Trend and direction for plant factory system. *J. Plant Biotechnol.* 37:442-455.
- Kim, K.S., M.K. Kim, and S.W. Nam. 2004. Optimization of growth environment in the enclosed plant production system using photosynthesis efficiency model. *J. Bio-Environ. Con.* 13:209-216.
- Kozai, T. 2007. Propagation, grafting and transplant production in closed systems with artificial lighting for commer-

- cialization in Japan. Propagation of Ornamental Plants 7: 145-149.
- Lee, B.J., M.K. Won, D.H. Lee, and D.G. Shin. 2001. Changes in SPAD chlorophyll value of chrysanthemum (*Dendranthema grandiflora* Tzveley) by photoperiod and light intensity. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 19:555-559.
- Lee, J.G., S.S. Oh, S.H. Cha, Y.A. Jang, S.Y. Kim, Y.C. Um, and S.R. Cheong. 2010. Effects of red/blue light ratio and short-term light quality conversion on growth and anthocyanin contents of baby leaf lettuce. J. Bio-Environ. Con. 19: 351-359.
- Lee, J.S., H.I. Lee, and Y.H. Kim. 2012. Seedling quality and early yield after transplanting of paprika nursed under light-emitting diodes, fluorescent lamps and natural light. J. Bio-Environ. Con. 21:220-227.
- Li, Q. and C. Kubota. 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. Environ. Exp. Bot. 67:59-64.
- Massa, G.D., H.H. Kim, R.M. Wheeler, and C.A. Mitchell. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. Hort-Science 43:1951-1956.
- Nishimura, T., K. Ohyama, E. Goto, and N. Iangaki. 2009. Concentration of perillaldehyde, limonene, and anthocyanin of *Perilla* plants as affected by light quality under controlled environments. Sci. Hort. 122:134-137.
- Noh, B. and E.P. Spalding. 1998. Anion channels and the stimulation of anthocyanin accumulation by blue light in arabidopsis seedlings. Plant Physiology 116:503-509.
- Park, J.E., Y.G. Park, B.R. Jeong, and S.J. Hwang. 2012. Growth and anthocyanin content of lettuce as affected by artificial light source and photoperiod in a closed-type plant production system. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 30:673-679.
- Park, M.H. and Y.B. Lee. 1999. Effects of light intensity and nutrient level on growth and quality of leaf lettuce in a plant factory. J. Bio-Environ. Con. 8:108-114.
- Sato, K., M. Nakayama, and J. Shigeta. 1996. Culturing conditions affecting the production of anthocyanin in suspended cell cultures of strawberry. Plant Science 113:91-98.
- Sicora, C., M. Zoltan, and V. Imre. 2003. The interaction of visible and UV-B light during photodamage and repair of photosystem II. Photosyn. Res. 75:127-137.
- Sonneveld, C. and N. Straver. 1994. Nutrient solutions for vegetables and flower grow in water on substrates. 10th ed. Proefstation voor tuinbouw onder glas te Naaldwijk, no. 8, Holland, 45 p.
- Takatsuji, M. 2008. Definition and meaning of the plant factory. P. 8-13. In Takatsuji, M. (ed.). Plant factory. World Science Publishment, Seoul.
- Um, Y.C., Y.A. Jang, J.G. Lee, S.Y. Kim, S.R. Cheong, S.S. Oh, S.H. Cha, and S.C. Hong. 2009. Effects of selective light sources on seedling quality of tomato and cucumber in closed nursery system. J. Bio-Environ. Con. 18:370-376.