

# 밀폐형 식물생산시스템에서 인공광원과 광조사 시간에 따른 상추의 생장 및 안토시아닌 함량

박지은<sup>1</sup> · 박유경<sup>1</sup> · 정병룡<sup>1,2,3,4</sup> · 황승재<sup>1,2,3,4\*</sup>

<sup>1</sup>경상대학교대학원 응용생명과학부(BK21 Program), <sup>2</sup>경상대학교 농업생명과학대학 원예학과,

<sup>3</sup>경상대학교 농업생명과학연구원, <sup>4</sup>경상대학교 생명과학연구원

## Growth and Anthocyanin Content of Lettuce as Affected by Artificial Light Source and Photoperiod in a Closed-type Plant Production System

Ji Eun Park<sup>1</sup>, Yoo Gyeong Park<sup>1</sup>, Byoung Ryong Jeong<sup>1,2,3,4</sup>, and Seung Jae Hwang<sup>1,2,3,4\*</sup>

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

<sup>2</sup>Department of Horticulture, College of Agriculture & Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

<sup>3</sup>Institute of Agriculture & Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

<sup>4</sup>Research Institute of Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 660-701, Korea

**Abstract.** This study was conducted to examine the effect of artificial light source and photoperiod on the growth of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) ‘Seonhong Jeokchukmyeon’ in a closed-type plant production system. Seedlings were grown under 3 light sources, fluorescent lamp (FL, Philips Co. Ltd., the Netherlands), WL #1 (Hepas Co. Ltd., Korea), and WL #2 (FC Poibe Co., Ltd., Korea), each with 3 photoperiods, 12/12, 18/6, and 24/0 (Light/Dark). An irradiance spectrum analysis showed that FL has various peaks in the 400-700 nm range, while WL #1 and WL #2 have only one monochromatic peak at 450 and 550 nm, respectively. The greatest plant height, fresh and dry weights were obtained in the 24/0 (Light/Dark) photoperiod. The 24/0 (Light/Dark) photoperiod treatment promoted vegetative growth of the leaf area. Length of the longest root, number of leaves, fresh weight, and total anthocyanin contents were greater in FL than in either WL #1 or #2. The greatest chlorophyll fluorescence (Fv/Fm) was found in the 12/12 (Light/Dark) photoperiod with FL treatment. The energy use efficiency of the LED increased by about 35-46% as compared to FL. Results suggest a possibility of LED being used as a substitute light source for fluorescent lamp for lettuce cultivation in a plant factory system.

**Additional key words:** fluorescent lamp, spectrum, white light emitting diode

### 서 언

최근 안전한 농산물의 공급을 요구하는 소비자가 증가하고 있고, 한편으로는 이상기후 현상으로 고품질 원예작물 안전생산의 중요성이 강조되고 있으며 국제적으로 곡물가격의 급등으로 식량안보를 걱정하고 있는 현실에서 식물공장에 대한 관심이 높아지고 있다(Um et al., 2010). 또한 농산물에 있어서 고도의 품질관리기술을 도입하여 안전한 먹

거리를 지속적으로 공급할 수 있고 농업과 상업, 그리고 공업이 융합하여 부가가치가 높은 식자재를 공급할 수 있는 연구가 진행되고 있다(TIIC, 2009; Um et al., 2010).

식물공장이란 농작물에 대하여 통제된 일정한 시설 내에서 광, 온도, 습도, 이산화탄소 농도 및 배양액 등의 환경조건을 인공적으로 제어하여 계절이나 장소에 관계없이 자동적으로 연속 생산하는 시스템을 말한다(Takatsujii, 2008). 현재 전세계적으로 식물공장과 관련한 연구가 다각도로 진행

\*Corresponding author: hsj@gnu.ac.kr

※ Received 7 February 2012; Revised 24 July 2012; Accepted 26 July 2012. 본 연구는 2011년 농림수산식품부 농림기술개발사업의 지원에 의해 수행되었음.

되고 있지만 이에 대한 명확한 정의가 정립되지 못하고 있는 실정이다. 식물공장은 광원의 이용형태에 따라 일반적으로 완전제어형과 태양광병용형, 그리고 태양광이용형 식물공장 등으로 구분되고 있다. 이 중 폐쇄형식물공장 시스템은 최적생육조건에서 광이용 효율을 2-3배 향상시켜 식물생육을 촉진할 수 있으며, 병해충 및 외기의 영향을 받지 않기 때문에 균일한 생육조건하에서 고품질묘를 생산할 수 있다는 장점이 있다(Kozai, 2007). 이와 같이 식물재배에 효율적인 식물공장을 실용화시키기 위해서는 인공광원의 종류와 광조사 시간과 같은 환경요인을 구명하는 것이 시급한 실정이다.

일반적으로 식물공장에서는 발광에 따른 열의 발생과 에너지 손실이 많은 고압나트륨등보다는 메탈할라이드등 또는 형광등을 주로 이용하고 있다(Kozai, 2007; Tadahisa et al., 2004). 메탈할라이드등은 파장이 가시광 전반에 분포하여 고압나트륨등보다 식물재배 효과가 우수하다. 하지만 고압나트륨등에 비교하여 발광효율이 낮고 수명이 짧기 때문에 식물공장에 사용하기에는 적합하지 못하다. 형광등은 식물공장에 많이 사용되는 조명으로 다단식재배에서 식물에 근접조명이 가능하나 발광효율이 20% 정도로 광합성에 유효한 스펙트럼이 적다. 이처럼 기존의 인공광원들은 여러 문제를 갖고 있는데, 이러한 문제를 보완할 수 있는 발광다이오드(light-emitting diode; LED)는 무수으로 환경친화적이고 경량이다. 또한 전력 절감이 탁월하고 수명이 길면서도 구동회로가 간단하며 특정 광질을 쉽게 만들 수 있는 장점이 있다(Hwang et al., 2004). 이처럼 특정한 광질을 이용하여 식물공장에서 채소재배 시 재배목적에 따라 맞춤형 광질로 제어할 수 있다는 장점이 있어 상추 등 다양한 작물을 대상으로 여러가지 측면의 연구가 수행되고 있다. 적색광에서의 생육촉진 효과(Nishimura et al., 2006, 2009; Nishioka et al., 2008)와 LED를 이용한 광질변환에 따른 어린상추의 생육에 미치는 영향(Lee et al., 2010) 등이 보고된 바 있다. 하지만 주로 적색광이나 청색광 위주의 연구결과가 많으며, 다양한 파장대역을 만들어 식물광합성과 생육을 촉진시킬 수 있는 백색 LED에 관한 연구결과는 부족한 실정이다.

광은 식물의 성장과 발달에 매우 중요한 요인이다. Dorais et al.(1990)은 광도가 높으면 다양한 채소의 생산성을 증가시킨다고 하였다. 그리고 Knight and Mitchell(1983, 1988)은 광도가 높으면 건물중과 상대적 생장율이 증가한다고 하였다. 다양한 광주기에 따라 개화반응, 식물생장과 발달뿐만 아니라 신장, 측지, 엽록소 함량에도 영향을 미친다(Attridge, 1990; Salisbury and Ross, 1992). 여러 종의 식물에서 초장

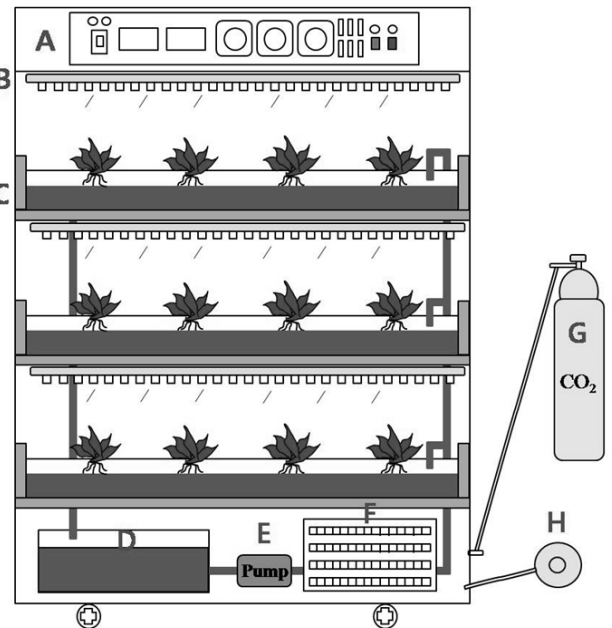
은 온도와는 무관하게 광주기가 길어짐에 따라 증가하며 (Berghage et al., 1991; Erwin et al., 1991), 광주기를 늘리는 것은 다양한 상추 품종의 생체중과 건물중을 증가시킨다는 보고도 있다(Ikeda et al., 1988a, 1988b; Koontz and Prince, 1986). 상추는 시설 내에서 광에 대한 식물체의 반응을 연구하기에 적합한 모델식물로서 국내·외에서 빈번하게 활용되어 왔으며(Dougher and Bugbee, 2001; Kim et al., 2004), 재배가 쉽고 생육기간이 짧아 인공광원을 이용한 식물공장 생산방식에 적합한 식물로 알려져 있다.

따라서 본 연구는 밀폐형 식물생산시스템에서 인공광원의 종류(형광등, 백색 LED)와 광조사 시간에 따른 생육을 조절하여 균일하고 안정적인 상추의 생산을 위해 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 실험재료

밀폐형 식물생산시스템 내 광원의 종류와 광조사 시간에 따른 상추의 생육조건을 구명하기 위하여 ‘선홍적측면’ 상추(*Lactuca sativa* L. ‘Seonhong Jeokchukmyeon’, Asia Seed Co., Ltd., Korea)를 사용하였다. 2011년 1월 14일에 암면 펠렛(UR암면, UR Co., Ltd., Korea)이 담긴 240구 육묘용



**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 (fluorescent and white LED) sources; C, recirculating ebb & flow hydroponic system; D, solution tank; E, pump; F, heating and cooling system; G, CO<sub>2</sub> supplier; and H, light intensity control. The environmental conditions are PPFD, 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ; air temp., 21  $\pm$  2°C; RH, 60  $\pm$  10%; and CO<sub>2</sub>, 400  $\pm$  50  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ .

플러그트레이(60cm × 41cm × 5cm)에 파종하였다. 20°C의 항온발아실(DS-10L-2, Dasol Scientific, Korea)에서 3일간 발아시킨 후 성장상 형태의 밀폐형 식물생산시스템(C1200H3, FC Poibe Co., Ltd., Korea)의 형광등(Philips Co., Ltd., the Netherlands) 하에서 정식 전 2011년 2월 8일까지 재배하였다. 실험에 이용한 상추의 평균 초장은 10.6cm, 평균 생체중은 6.5g의 균일한 묘를 선발하여 2011년 2월 9일 정식하였다. 밀폐형 식물생산 시스템은 온도, 광주기, CO<sub>2</sub>, 각 단별 광원제어 등을 위한 환경제어 시스템, 인공광원, 재순환 양액 시스템, 양액 탱크, 펌프, 냉·난방 시스템, CO<sub>2</sub> 공급기, 슬라이드스로 구성되어 있다(Fig. 1).

### 인공광원과 광조사 시간 처리

경상대학교 시설원예학실험실에 설치된 밀폐형 식물생산시스템에서 상추를 20cm × 20cm의 재식밀도로 3종류의 인공광원과, 3주기의 광조사 시간을 설정하여 18개체씩 난괴법으로 배치하였다. 실험에는 평균 초장이 10.6cm, 평균 생체중은 6.5g의 균일한 상추 묘를 이용하였다. 2011년 2월 9일에 총 162개체를 정식하였다. 인공광원은 WL #1(White LED, Hepas Co. Ltd., Korea), WL #2(White LED, FC Poibe, Korea), 그리고 형광등(Philips Co. Ltd., the Netherlands)을 대조구로 사용하였으며, 광조사 시간은 12/12, 18/6, 24/0(명기/암기)으로 처리하였다. 인공광원 길이는 1,200mm로 동일한 크기를 사용하였다.

### 재배환경

밀폐형 식물생산시스템의 재배환경은 온도 21 ± 2°C, 상대습도 60 ± 10%, 광도 100 ± 30 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>로 조절하여 정식 후 총 23일간 재배하였다. 광파장은 광원과 9cm 높이에서 분광복사계(RPS-900R, International Light Co., Ltd., USA)를 이용하여 측정하였고, 광도계(HD2101.1, Delta OHM, Italy)를 이용하여 광도를 측정하였다. 관주는 담액식 재순환 수경재배방식으로 Sonneveld 양액(Sonneveld and Straver, 1994)을 조절하여 이틀에 한번씩 순환시켜 주었다. 양액의 pH는 6.5, EC는 1.5dS·m<sup>-1</sup>로 조절하여 공급하였다.

### 생육조사

상추의 생육은 2011년 3월 3일까지 재배하여 초장, 엽장, 엽폭, 엽수, 엽면적(LI-3100, LI-COR Inc., USA), 엽록소 함량(SPAD 502, Minolta, Japan), 최대근장, 지상부와 지하부의 생체중과 건물중, 엽록소 형광(Fv/Fm)을 조사하였다. 엽록소 형광은 휴대용 엽록소형광분석기(PAM-2100, Heinz Walz GmbH, Germany)를 사용하여 성장점에서 2번째 잎을 기준

**Table 1.** Electrical energy use efficiency of light source used in a closed-type plant production system.

Light source <sup>z</sup>	Electrical energy calculation	Electrical energy (W)
WL #1	205V × 1.36A × 2	557
WL #2	80V × 2.46A × 2	393
FL	210V × 2.02A × 2	848

<sup>z</sup>The light sources are WL #1, white LED (Hepas Co., Ltd., Korea); WL #2, white LED (FC Poibe Co., Ltd., Korea); and FL, fluorescent lamp (Philips Co., Ltd., the Netherlands).

으로 동일한 위치에서 측정하였다. 측정하기 전에 암적응 클립으로 30분간 적응시킨 후 처리당 9개체를 측정하여 Fv/Fm 평균값을 구하였다(Genty et al., 1989).

### 안토시아닌 분석

총 안토시아닌 함량은 상추 잎의 성장점에서 2번째 잎을 기준으로 생체중 2g을 채취하여 95% ethanol과 1.5N HCl을 85:15(v/v)로 혼합한 추출액을 막자사발에 2mL를 넣고 마쇄하였다. 마쇄한 용액을 마이크로 튜브에 1mL를 취한 후 4°C 암조건 하에서 24시간 보관 후 13,000rpm에서 20분간 원심 분리하여 얻은 상등액을 희석하였다. 그리고 분광광도계(Libra S22, Biochrom, United Kingdom)의 535nm에서 흡광도를 측정하여 총 안토시아닌 함량을 산출하였다(Fuleki and Francis, 1968).

### 인공광원의 에너지 소비 측정

인공광원의 에너지 소비측정은 상추를 정식하기 전 2011년 1월 24일에 측정하였다. 3종류 광원의 광도를 동일하게 100 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>로 조절한 후 측정기(Fluke 39, Fluke Co., Ltd., USA)를 사용하여 전압과 전류를 측정하였다. 그리고 다음과 같은 전력(W) = 전압(V) × 전류(A)의 공식으로 계산하였다(Table 1).

### 통계분석

통계는 처리당 18개체의 평균값으로 SAS(Statistical Analysis System, V. 9.1, Cary, NC, USA) 프로그램을 이용하여 Duncan 다중검정으로 유의성을 검정하였으며, 그래프는 SigmaPlot(10.0, Systat software, Inc., Chicago, IL, USA) 프로그램을 사용하여 작성하였다.

## 결과 및 고찰

### 인공광원에 따른 광파장 분석과 전력

WL #1과 WL #2 광원의 광파장 분포는 450nm와 550nm

에서 가장 높게 나타났다(Fig. 2). 이는 현재 대부분의 LED 제조회사에서 가장 경제적인 비용으로 백색 LED를 생산하기 위해 주로 blue(파란색) LED 칩(chip)에 노란색 phosphor(형광체) 도포를 이용한 제조방법으로 LED를 생산하기 때문에 광질 즉 광파장이 주로 450nm와 550nm의 영역에서 분포되었다. 또한 형광등은 광합성 유효광(PAR, Photosynthesis Active Radiation) 영역인 406, 437, 488, 547, 586, 612, 709nm에서 각각 0.06, 0.19, 0.11, 0.41, 0.12, 0.35, 0.03  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 나타났으며, 총  $14.27\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 였다. WL #1은 453, 558, 574nm에서 각각 0.12, 0.13, 0.13  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 나왔으며, 총  $17.17\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 였다. WL #2는 448, 550, 569nm에서 각각 0.21, 0.18, 0.17  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 나타났고, 총  $20.24\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 다른 광원에 비해 높았다. 인공광원의 전력은 형광등 광원의 848W에 비해 WL #2 광원이 393W로 에너지 효율 면에서 2배 이상의 에너지 절감효과를 나타냈다(Table 1).

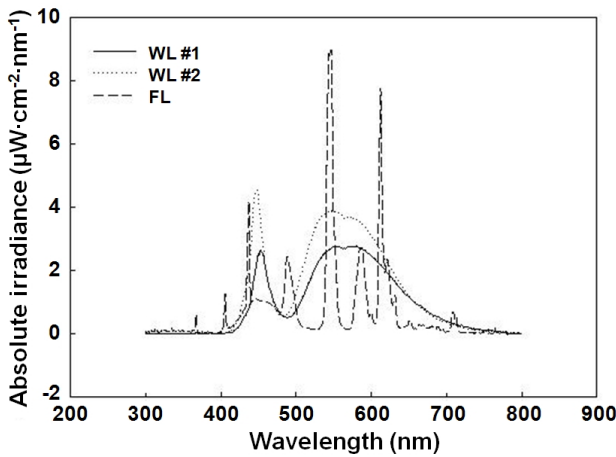


Fig. 2. Spectral distributions of different light sources used: WL #1, white LED (Hepas Co., Ltd., Korea); WL #2, white LED (FC Poibe Co. Ltd., Korea); and FL, fluorescent lamp (Philips Co. Ltd., the Netherlands).

인공광원과 광조사 시간에 따른 상추의 생육

### 인공광원과 광조사 시간에 따른 상추의 생육

밀폐형 식물생산시스템에서 인공광원의 종류와 광조사 시간을 달리하여 정식 후 23일째 상추의 생육을 조사한 결과 초장, 지상부와 지하부의 생체중과 건물중은 형광등 광원의 24/0(명기/암기) 처리구에서 가장 높았다(Table 2). 형광등 조건에서 잎의 길이 신장이 촉진되었다는 연구결과가 있었고(Lee et al., 2010), 여러 종의 식물에서 초장은 온도와는 무관하게 광주기가 길어짐에 따라 증가한다는 보고와 일치하였다(Berghage et al., 1991; Erwin et al., 1991). 식물의 광합성은 450nm(청색광)와 660nm(적색광) 사이의 광파장대에서 효율이 높다고 알려져 있다. 광형태형성 조절에는 일정량의 청색광과 적색광이 필요하다고 하였으며(Britz and Sager, 1990; Hoenecke et al., 1992), 적색광은 식물체의 광합성에 관여하고 청색광은 형태적으로 식물체의 건전한 생장에 필요하다고(Okamoto et al., 1996) 하였다. 그러나 식물의 광형태형성에는 광합성 유효복사 이외의 파장과도 관계가 있는데, 이 가운데 300nm-800nm 광은 식물의 생리 반응에 관계가 되므로 생리적 유효복사로도 불린다

Table 2. Effect of light source and photoperiod on growth of lettuce grown in a closed-type plant production system.

Light source <sup>z</sup>	Photoperiod (Light/Dark)	Plant height (cm)	Length of the longest root (cm)	Leaf area (cm <sup>2</sup> /plant)	No. of leaves	Fresh weight (g)		Dry weight (g)	
						Shoot	Root	Shoot	Root
WL #1	12/12	14.9 f <sup>y</sup>	32.0 b	1,505.1 bc	6.2 bc	22.6 d	2.0 c	0.8 d	0.07 d
	18/6	15.8 d-f	32.5 ab	1,671.7 b	6.1 bc	31.1 c	3.4 b	1.3 c	0.11 c
	24/0	17.9 bc	26.3 c	1,318.7 de	6.1 bc	40.1 b	3.5 b	1.8 b	0.19 a
WL #2	12/12	15.2 ef	27.7 c	1,167.8 e	5.3 c	21.7 de	1.8 c	0.9 d	0.07 d
	18/6	16.2 de	31.7 b	1,257.9 e	6.3 b	38.9 b	4.3 a	1.7 b	0.13 bc
	24/0	18.1 b	31.8 b	1,599.6 bc	6.3 b	47.6 a	4.6 a	2.2 a	0.19 a
FL	12/12	15.2 ef	35.0 ab	1,264.3 e	7.9 a	17.4 e	1.5 c	0.8 d	0.05 d
	18/6	16.9 cd	36.0 a	1,440.4 cd	7.9 a	30.9 c	3.0 b	1.5 c	0.12 c
	24/0	20.8 a	33.8 ab	1,990.6 a	7.9 a	52.3 a	4.6 a	2.2 a	0.16 b
	Light source (A)	***	***	***	***	**	**	***	*
F-test	Photoperiod (B)	***	*	***	NS	***	***	***	***
	A × B	**	**	***	NS	***	***	*	NS

<sup>z</sup>The light sources are WL #1, white LED (Hepas Co., Ltd., Korea); WL #2, white LED (FC Poibe Co., Ltd., Korea); and FL, fluorescent lamp (Philips Co., Ltd., the Netherlands).

<sup>y</sup>Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at  $P = 0.05$ .

NS, \*, \*\*, \*\*\* Nonsignificant or significant at  $P = 0.05, 0.01, \text{ or } 0.001$ , respectively.

(Kim, 1997). 이러한 결과로 형광등 광원 처리가 LED 광원에 비해 광과장 대역이 다양하기 때문에 생육이 좋은 것으로 판단된다(Fig. 2). 최대근장은 형광등 광원의 18/6(명기/암기)으로 처리하였을 때 가장 길었다. 엽면적의 경우 형광등 광원을 조사하면서 광조사 시간을 24/0(명기/암기)으로 처리한 실험구에서 가장 높은 값을 보였다. 살비아의 경우 엽면적은 적색광질 또는 혼합광에서 엽면적이 증가한 보고가 있는데(Heo et al., 2009), 이 또한 형광등 광원이 청색광과 적색광을 포함한 다양한 파장대역을 포함하고 있어서 엽면적이 증가한 것으로 생각된다. 그리고 광원의 종류와 관계없이 전체적으로 광조사 시간을 24/0(명기/암기)으로 처리하였을 때 상추의 엽면적이 많이 확보되어 생육이 양호한 것으로 보였다.

엽록소 형광값인 Fv/Fm 값은 광조사 시간이 길어짐에 따라 감소하였고, 형광등 광원에서 광조사 시간을 12/12(명기/암기)로 처리하였을 때 0.77로 가장 높았다(Fig. 3). 또한 WL #1 광원의 24/0(명기/암기) 광조사 시간처리에서 0.37로 가장 낮았다. 엽록소 형광값(Fv/Fm)은 엽록체의 틸라코이드막에서 방출되는 반응을 수치화한 값으로 식물의 광이용 효율과 직접적으로 관여되는 대사 능력 정도를 간접적으로 보여주는 수치이면서 제2광계(photosystem II)의 광화학 반응을 나타내 준다(Lavorel and Etienne, 1977). Fv/Fm 값이 높은 값으로 측정되었다는 것은 빛을 효율적으로 잘 이용할 수 있다는 것이며, 동일한 광조건이라 하더라도 광수확복합체(Light Harvesting Complex-II)에서 외부의 광을 선택적이면서 효율적으로 받아들여 광합성 대사를 촉진하고 체 내에 당을 더욱 능동적으로 공급한다고 볼 수 있다

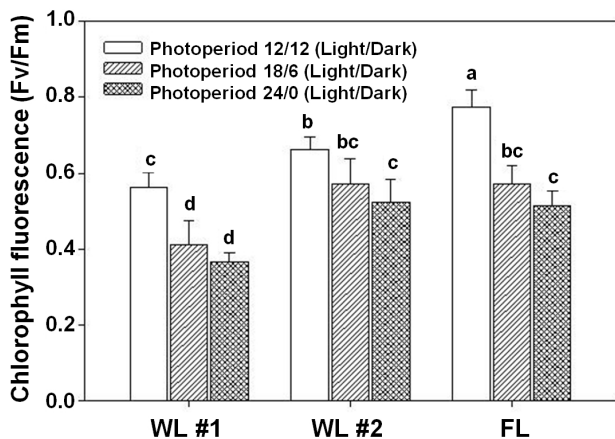


Fig. 3. Chlorophyll fluorescence as affected by light source and photoperiod of lettuce grown in a closed-type plant production system. Light source: WL #1, white LED (Hepas Co., Ltd., Korea); WL #2, white LED (FC Poibe Co. Ltd., Korea); and FL, fluorescent lamp (Philips Co., Ltd., the Netherlands). Data shown are means  $\pm$  SE (n = 18).

(Kang et al., 2008). 대부분의 식물에서 건강한 잎의 경우 Fv/Fm 값이 보통 0.83 정도로 보고되어(Choi et al., 2004), 이 값보다 낮을 경우 식물이 스트레스에 노출되었거나 노화가 진전되었다고 할 수 있다. 광의 강도뿐 아니라 노출 시간도 식물의 광합성에 영향을 준다고 하였다(Sicora et al., 2003). 이와 같이 본 실험에서 24/0(명기/암기) 광조사 시간 처리구에서 Fv/Fm 값이 0.83보다 낮은 것으로 보아 연속적인 광조사는 식물에 스트레스 인자로 작용한 것으로 보인다. 또한 광원의 종류에 따라 12/12(명기/암기) 광조사 시간 처리에서 Fv/Fm 값이 낮은 수치를 보였는데, 이는 광합성유효 파장대인 400-700nm에서 광원의 종류에 따른 차이로 판단된다.

총 안토시아닌 함량은 LED 광원 처리에 비해 형광등의 24/0(명기/암기) 처리구에서 약 3배 정도 높았다(Fig. 4). 형광등 처리에서 생육한 상추의 적색발현은 다른 처리구에 비해 명확한 차이를 보였고(Fig. 5), 적색발현도에 따른 총 안토시아닌 함량도 형광등 처리에서 유의적으로 높은 결과를 보였다. WL #2와 형광등 광원에서 광조사 시간을 24/0(명기/암기)으로 처리하였을 때 상추의 총 안토시아닌 함량이 가장 높았고, WL #1 광원은 18/6(명기/암기) 광조사 처리에서 가장 높았다. Nishimura et al.(2006)의 보고에 의하면 광원에 적색광을 포함시킴으로써 약용식물인 자소(*Perilla frutescens* Britt.)의 생육을 촉진하였으며, 안토시아닌 함량 또한 적색광과 청색광의 두 가지 광원을 혼합하였을 경우 증대된다고 하였다. 또한 안토시아닌 색소 발현을 증가시키기 위해 청색광과 UV-A가 관련성이 높다고 하였는데 이는 청색과 근자외선 흡수색소인 크립토크롬이 광수용체로서의

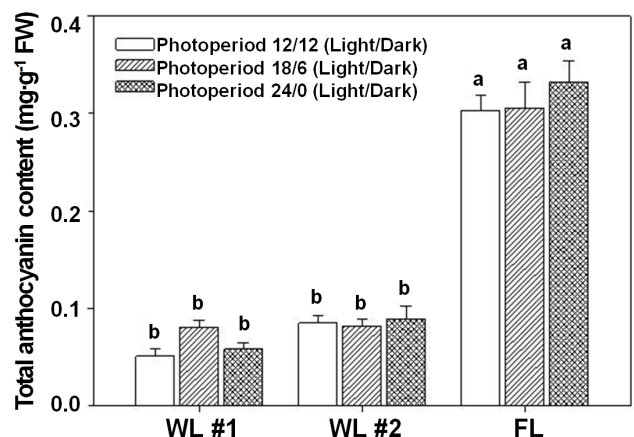
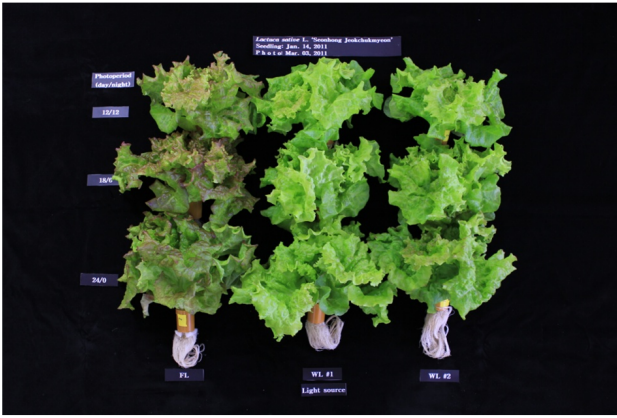


Fig. 4. Total anthocyanin content as affected by light source and photoperiod of lettuce grown in a closed-type plant production system. Light source: WL #1, white LED (Hepas Co., Ltd., Korea); WL #2, white LED (FC Poibe Co., Ltd., Korea); and FL, fluorescent lamp (Philips Co., Ltd., the Netherlands). Data shown are means  $\pm$  SE (n = 18).



**Fig. 5.** Effect of light source and photoperiod on growth of lettuce measured at 48 days after sowing. FL, fluorescent lamp (Philips Co., Ltd., the Netherlands); WL #1, white LED (Hepas Co., Ltd., Korea); and WL #2, white LED (FC Poibe Co., Ltd., Korea). Photoperiods were 12/12, 18/6, or 24/0 (Light/Dark).

역할을 하기 때문으로 보고되고 있다(Giliberto et al., 2005; Ninu et al., 1999). Lee et al.(2010)의 보고에서도 상추의 생산성을 유지하면서 안토시아닌과 엽록소 함량을 증가시킨 고색도의 산물을 생산하기 위해서는 적색광과 청색광의 적절한 비율의 조절이 필요하다고 보고하였다. 이와 같이 형광등 처리에 비해 LED 광원 처리의 안토시아닌 발현이 적은 이유는 형광등 파장에서는 UV-A(300-400nm) 파장대역이 조사되었으나(Fig. 2), LED 광원에서는 이러한 안토시아닌 발현과 관련이 있는 파장이 전혀 포함되어 있지 않은 400-800nm의 대역에서만 파장분포를 나타내는 광원의 조사가 원인으로 판단된다.

결과적으로 밀폐형 식물생산시스템 내에서 형광등 광원을 이용하여 광조사 시간을 24/0(명기/암기)으로 처리했을 때 생육이 가장 우수하였다. 하지만 LED는 전력 효율성이 높고, 기존의 인공광원에 비해 장기간 사용이 가능하며, 광원 자체에서의 발열온도가 낮아 밀폐형 다단식 식물생산 시스템에서 근접조명이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 미래형 인공 광원으로서의 LED 활용을 위해 향후 다양한 파장대역을 포함한 혼합 LED의 사용을 위한 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 초 록

본 실험은 밀폐형 식물생산시스템에서 인공광원과 광조사 시간에 따른 잎상추 '선홍적측면' 품종의 적정 생육 조건을 구명하고자 수행하였다. 상추 유묘를 3종류의 인공광원인 형광등과 에프씨 포이베(사)와 헤파스(사)의 백색 LED 아래에서 재배하였고, 광조사 시간을 각각 12/12, 18/6, 24/0

(명기/암기)으로 처리하였다. 광파장대를 측정된 결과 형광등은 400-700nm 범위에서 다양한 피크를 나타냈지만, 2종류의 백색 LED에서는 450nm와 550nm의 파장대역에서만 피크를 나타냈다. 초장, 생체중 및 건물중은 광조사 시간을 24/0(명기/암기)으로 처리하였을 때 가장 우수했다. 또한 엽면적도 광조사 시간 24/0(명기/암기) 처리구에서 좋았다. 형광등 처리가 2종류의 백색 LED와 비교하여 최대근장, 엽수, 생체중 및 총 안토시아닌 함량이 우수하였다. 엽록소 형광값은 형광등을 사용하여 광조사 시간을 12/12(명기/암기)로 처리하였을 때 가장 높았다. 형광등 광원에서 광 에너지 사용 효율은 LED 등이 형광등과 비교하여 약 35-46% 더 높았다. 본 결과는 식물공장 시스템에서 상추 재배를 위한 형광등의 대체 광원으로써 LED의 이용가능성을 보여 주었다.

**추가 주요어 :** 형광등, 스펙트럼, 백색 LED

## 인용문헌

- Attridge, T.H. 1990. Light and plant responses. Edward Arnold, London.
- Berghage, R.D., J.E. Erwin, and R.D. Heins. 1991. Photoperiod influences leaf chlorophyll content in chrysanthemum grown with a negative DIF temperature regime. HortScience 26:92. (Abstr.)
- Britz, S.J. and J.C. Sager. 1990. Photomorphogenesis and photoassimilation in soybean and sorghum grown under broad spectrum or blue deficient light sources. Plant Physiol. 82: 909-915.
- 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.
- Dorais, M., A. Gosselin, and M.J. Trudel. 1990. Annual greenhouse tomato production under a sequential intercropping system using supplemental light. Sci. Hort. 45:225-234.
- Dougher, T.A.O. and B. Bugbee. 2001. Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue radiation. Phytochem. Photobiol. 73:199-207.
- Erwin, J.E. and R.D. Heins. 1991. Temperature and photoperiod effects on *Fuchsia* × *hybrid* morphology. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 116:955-960.
- Fuleki, T. and F.J. Francis. 1968. Quantitative methods for anthocyanins. I. Extraction and determination of total anthocyanin in cranberries. J. Food Sci. 33:72-77.
- Genty, B., J.M. Briantais, and N.R. Baker. 1989. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. Biochim. Biophys. Acta 990:87-92.
- Giliberto, L., G. Perrotta, P. Pallara, J.L. Weller, P.D. Fraser, P.M. Bramley, A. Fiore, M. Tavazza, and G. Giuliano. 2005. Manipulation of the blue light photoreceptor cryptochrome 2

- in tomato affects vegetative development, flowering time, and fruit antioxidant content. *Plant Physiol.* 137:199-208.
- Heo, J.W., Y.B. Lee, D.B. Lee, and C.H. Chun. 2009. Light quality affects growth, net photosynthetic rate, and ethylene production of ageratum, african marigold, and salvia seedlings. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 27:187-193.
- Hoenecke, M.E., R.J. Bula, and T.W. Tibbitts. 1992. Importance of blue photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes. *HortScience* 27:427-430.
- Hwang, M.K., C.S. Huh, and Y.J. Seo. 2004. Optic characteristics comparison and analysis of SMD type Y/G/W HB LED. *J. Killee.* 18:15-21.
- Ikeda, A., S. Nakayama, Y. Kitaya, and K. Yabuki. 1988a. Effects of photoperiod, CO<sub>2</sub> concentration, and light intensity on growth and net photosynthetic rates of lettuce and turnip. *Acta Hort.* 229:273-282.
- Ikeda, A., S. Nakayama, Y. Kitaya, and K. Yabuki. 1988b. Basic study on material production in plant factory (1)-Effects of photoperiod, light intensity, and CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis of lettuce. *Environ. Control Biol.* 26:107-112. (in Japanese with English summary)
- 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, H.H., G.D. Goins, R.M. Wheeler, and J.C. Sager. 2004. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red- and blue-light-emitting diodes. *HortScience* 39: 1617-1622.
- Kim, Y.H. 1997. The physical term of the light related to the plant production and concept. *J. Biosystems Eng.* 22:503-512.
- Knight, S.L. and C.A. Mitchell. 1983. Enhancement of lettuce yield by manipulation of light and nitrogen nutrition. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 108:750-754.
- Knight, S.L. and C.A. Mitchell. 1988. Effects of CO<sub>2</sub> and photosynthetic photon flux on yield, gas exchange and growth rate of *Lactuca sativa* 'Waldmann's Green'. *J. Expt. Bot.* 39:317-328.
- Koontz, H.V. and R.P. Prince. 1986. Effect of 16 and 24 hours daily radiation (light) on lettuce growth. *HortScience* 21:123-124.
- Kozai, T. 2007. Propagation, grafting and transplant production in closed systems with artificial lighting for commercialization in Japan. *Prop. Ornamental Plants* 7:145-149.
- Lavorel, J. and A.L. Etienne. 1977. In vivo chlorophyll fluorescence, p. 203-268. In: J. Barber (ed.). Primary processes of photosynthesis. Elsevier/North Holland Biomedical Press, Amsterdam, The Netherland.
- 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.
- Ninu, L., M. Ahmad, C. Miarelli, A.R. Cashmore, and G. Giuliano. 1999. Cryptochrome 1 controls tomato development in response to blue light. *Plant J.* 18:551-556.
- 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.
- Nishimura, T., S.M.A. Zobayed, T. Kozai, and E. Goto. 2006. Effect of light quality of blue and red fluorescent lampson growth of St. John's wort (*Hypericum perforatum* L.) *J. SHITA* 18:225-229.
- Nishioka, N., T. Nishimura, K. Ohyama, M. Sumino, S.H. Malayeri, E. Goto, N. Inagaki, and T. Morota. 2008. Light quality affected growth and contents of essential oil components of Japanese mint plants. *Acta Hort.* 797:431-436.
- Okamoto, K., T. Yanagi, S. Takita, M. Tanaka, T. Higuchi, Y. Ushida, and H. Watanabe. 1996. Development of plant growth apparatus using blue and red LED as artificial light source. *Acta Hort.* 440:111-116.
- Salisbury, F.B. and C.W. Ross. 1992. *Plant physiology*. 4th ed. Wadsworth, Belmont, California.
- 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.
- Tadahisa, H., S. Hideo, H. Hiroshi, S. Teruaki, and T. Masuyuki. 2004. Characteristics of light and heat conditions of a chamber with prism light guides and electrodeless discharge lamps and its effect on growth of tomato and cucumber seedlings. *Yasai Chagyo Kenkyujo Kenkyu Hokoku* 3:109-118.
- Takatsuji, M. 2008. Definition and meaning of the plant factory, p. 8-13. In: M. Takatsuji (ed.). *Plant factory*. World Science Publishment, Seoul.
- Technical Information Institute Co., LTD. (TIIC). 2009. *A plant factory business strategy and the latest cultivation technology*. TIIC, Tokyo, Japan.
- Um, Y.C., S.S. Oh, J.G. Lee, S.Y. Kim, and Y.A. Jang. 2010. The development of container-type plant factory and growth of leafy vegetables as affected by different light sources. *J. Bio-Environ. Con.* 19:333-342.