

## LED의 간헐조명과 RGB 비율에 따른 상추의 품종별 생육 특성

김성진<sup>1</sup> · 복권정<sup>1</sup> · 이공인<sup>2</sup> · 박종석<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 농업생명과학대학 원예학과, <sup>2</sup>국립농업과학원 농업공학부

## Growth Characteristics of Lettuce under Different Frequency of Pulse Lighting and RGB Ratio of LEDs

Kim Sungjin<sup>1</sup>, Bok Gwonjeong<sup>1</sup>, Lee Gongin<sup>2</sup>, and Park Jongseok<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Horticultural Sciences, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

<sup>2</sup>Department of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon 441-707, Korea

**Abstract.** This study was aimed to investigate the effect of 1)irradiation with several different ratios using red, green, and blue LEDs and 2)various pulsed light irradiation with 50% duty ratio using red and blue LEDs on the growth and morphogenesis of three lettuce cultivars (*Lactuca sativar* L. cv. 'Jukchukmeon', 'Lolo Rosa', and 'Grand Rapid') in hydroponics culture system for 4 weeks after transplanting. Seeds were sown in rock-wool plug trays and they were placed in a culture room which was controlled at 23±1°C/18±1°C temperature and 50-60/70-85% for day and night, respectively, during cultivation period. Irradiated RGB ratios with LEDs were 6:3:1, 5:2.5:2.5, 3:3:4, 2:2:6, and 1:1:8 with 110±3µmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> PPFD on the surface of cultivation bed. The frequencies of pulsed lighting was 50, 100, 500, 1,000, 5,000, 10,000, 25,000Hz (20, 10, 0.1, 0.04 ms) with red and blue LEDs and 50% duty ratio. At the RGB ratio of 6:3:1, the average fresh weight of 'Jukchukmeon' was significantly higher than that of other RGB treatments, but no significant difference compared to the fluorescent treatment. The average fresh weight at 1:1:8 RGB ratio in 'Lolo Rosa' was significantly lower than that of other RGB treatments. Leaf number and fresh weight of 'Grand Rapid' were significantly lower in the control and 1:1:8 RGB treatments, compared to the other RGB treatments. As the ratio of blue light increased, leaf length decreased and leaf shape became round in three lettuces. Although there is little change in growth, it could not be found any tendency to affect the growth and morphogenesis of three lettuces caused by increasing or decreasing frequency of pulsed lighting with 50% duty ratio at the 72µmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> PPFD.

**Additional key words :** duty ratio, *Lactuca sativar*, plant growth, PPFD

### 서 론

발광 다이오드(LEDs)는 제조기술의 발달과 가격하락의 영향으로 많은 분야에서 더욱더 보편화되고 있다. 이러한 이유로는 상대적으로 높은 전기에 대한 광 에너지의 변환 효율과 다양한 스펙트럼, 상대적으로 낮은 표면 온도, 긴 수명, 가스가 없고 경도가 높은 재질 특성 때문이다. 특히, 흰색 LED 칩은 그 효율(lumen/W)이 2010년에 75, 2016년 150, 2020년에는 200에 도달 할 것으로 기대된다(US Department of Energy, 2011).

광은 일반적으로 광강도, 광질, 광주기라는 요소들이 식물의 생육, 형태형성, 2차 대사산물의 생성(Lee et al.,

2016) 등에 관여한다. 이러한 광의 3가지 요소들은 식물의 생육과 발달에 중요한 환경요인으로써 식물의 생리학적, 형태형성학적, 해부학적으로 뿐만 아니라 광합성의 중요한 에너지원으로서 그 역할을 수행한다(Taiz and Zeiger, 1991). 이러한 광의 요소 중에서 광질은 광수용체와 관련이 있는데, 피토크롬(phytochromes; 적색과 근적외선), 크립토크롬(cryptochromes; 청색과 UV-A), 포토트로핀(청색과 UV-A), UVR8 (UV-B) 등이 현재까지 보고되었다(Son et al., 2016). 이러한 광수용체들은 다양한 신호 전달 경로를 통해서 광형태형성과 식물의 생장과 발달을 유도하며(Carvalho et al., 2011; Park et al., 2013) 특히 가시광선 영역 중 적색과 청색광 파장은 엽록소에 의해서 가장 효과적으로 흡수되는 파장이며 광합성에 있어 매우 중요한 에너지원으로써 요구된다(McCree, 1972). 적색광(620-670nm)은 피토크롬을 활성화시켜 종자발아, 착과, 꽃눈 분화를 조절할 수 있으며, 청색광

\*Corresponding author: jongseok@cnu.ac.kr

Received March 28, 2017; Revised April 17, 2017;

Accepted April 25, 2017

(420-480nm)은 크립토크롬이나 포토트로핀을 활성화시켜 형태형성, 꽃눈의 형성, 굴광성, 엽록체의 운동, 기공 열림 등에 관여한다고 알려져 있다. 이러한 두 파장 영역의 광은 식물의 성장, 발달, 형태형성에 매우 중요하게 인식되어 식물공장이나 수직농장과 같은 식물 생산시스템에 많이 채택되고 있는 중요한 광원이다. 최근에 녹색광원에 대한 연구가 진행되어 Folta and Maruhnich(2007)는 녹색광이 광합성의 에너지원과 시그널 작용에 유효하지 않다고 보고하였으나, 녹색광이 식물의 성장에 유효한 에너지원으로 작용한다는 보고도 있다(Johkan et al., 2012; Son et al., 2012). 녹색광에 대한 광합성 및 성장과 관련한 효율성 논란은 매우 오래 지속되어 왔으며 배경광원의 조건에 따라서 달라지는 경향을 나타내었다. 현재, 인공광 이용형 식물공장의 광원으로 형광등과 LED (RB, RGB, White) 등의 광원이 주로 사용되고 있는바, 상추 3품종에 대한 형광등과 RGB 비율에 대한 최적 광조건에 대한 평가가 필요하다.

LED 광원의 경우 펄스폭 변조 방법(pulse width modulation)을 사용하게 되면 LED의 주파수범위(Hz)와 듀티비(전류가 흐르지 않은 시간에 대한 흐른 시간의 비율)를 제어할 수 있기 때문에 LED와 같은 다이오드 형태의 인공광원을 이용한 식물 생산시스템의 경우 이러한 주파수변조방식으로 광조사를 할 수 있다(Loo et al., 2009). 이러한 펄스광 조사를 할 경우 생육의 차이를 보이지 않으면서 소비 전력량을 줄일 수 있고(Tamulaitis et al., 2005), 또한 10 $\mu$ s의 특정 진동수(Hz)에서 상추의 생육이 증가되는 보고가 있었다(Yoneda and Mori, 2004). 그러나, Son et al.(2016)은 10kHz과 30kHz 처리구에서 연속광과 75% 듀티비 처리는 상추 생육에 있어 유의적 차이를 명확히 보인 반면, 1kHz 에서 75% 듀티비 조건과 연속광 처리에서 생육시킨 상추의 생체중이 유의적인 차이가 없다고 보고하였다. 또한, 펄스광조사를 하면 식물의 순광합성은 듀티비 비율에 정의 상관관계를 보인다고 하였다(Hashimoto et al., 1987). 연속광 조건과 비교하여 소모전력은 감소되지만, PPFd 값은 낮아지며, 결국, 지상부 바이오매스의 증가는 이루어지지 않았다. 그러나, 펄스광 조사는 진동수와 듀티비에 따라서 달라질 수 있는데, 75%의 듀티비는 연속광에 가까운 특징을 나타내기 때문에, 펄스광에 대한 명확한 효과를 보기 위해서는 50%의 듀티비 처리에서 같은 PPFd 조건의 연속광과 펄스광의 차이를 살펴보는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 1)녹색광원을 전체 광원의 10-30% 조건으로 고정시키고 적색광과 청색광의 RGB비율을 변화시켜 상추 3개 품종의 생육과 형태형성에 미치는 영향과 2)적청색 LED 광원 기반의(4:1 비율-소비전압) 듀

티비 50% 조건에서 다양한 펄스광 조사가 상추 3품종의 생육과 형태형성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수행되었다.

## 재료 및 방법

### 1. 식물재료

상추(*Lactuca sativa* L. cv. ‘적축면’, ‘물로롯사’, ‘그랜드래피드’)의 3개 품종(Asia Seed Co. Ltd., Seoul, Korea)의 종자 240립을 각각 240공 암면 파종판(한국 UR암면, Ansung, Korea)에 파종하였다. 이러한 파종판은 형광등 광원의 광강도 120 $\mu$ mol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 온도 22±2°C, 습도 50-70% 조건의 재배실에 정치하고 2일 간격의 저면관수 방식으로 관수하였다. 배양액은 아마자키 상추 배양액(NO<sub>3</sub>-N 6me·L<sup>-1</sup>, NH<sub>4</sub>-N 0.5me·L<sup>-1</sup>, Ca 2me·L<sup>-1</sup>, PO<sub>4</sub>-P 1.5me·L<sup>-1</sup>, Mg 1me·L<sup>-1</sup>, SO<sub>4</sub>-S 1me·L<sup>-1</sup>, K 4me·L<sup>-1</sup>)의 1/2 농도로 본엽이 발생한 시점부터 급액하였다. 본엽 4매가 출현한 파종 후 21일째 각각의 묘는 같은 크기의 생육정도를 판단하여 27주를 선발하였으며 스티로폼 베드(600×600) 2개에 15cm의 주간 간격으로 각각의 품종 9주씩 총 27주를 정식하였다. 묘가 식재된 정식판은 박막수경장치가 설치된 3단 재배장치에 각각 정치하였으며 이러한 재배장치는 총 4대가 설치되어 실험에 이용되었다. 양액은 양액탱크에(300L) 수중펌프(IP217, 윌로펌프, 부산, 대한민국)를 설치하여 최상단 재배베드로 양액을 공급하고 배수되는 양액은 아래 재배베드로 흘러보내 최종적으로 하단의 양액탱크로 순환시켰다. 재배베드는 PVC재질을 이용하여 성형가공하였으며 600mm(폭)과 1200mm(길이)로 제작되었으며, 가운데 압축 스티로폼으로 공간을 나누었다. 정식 후 아마자키 상

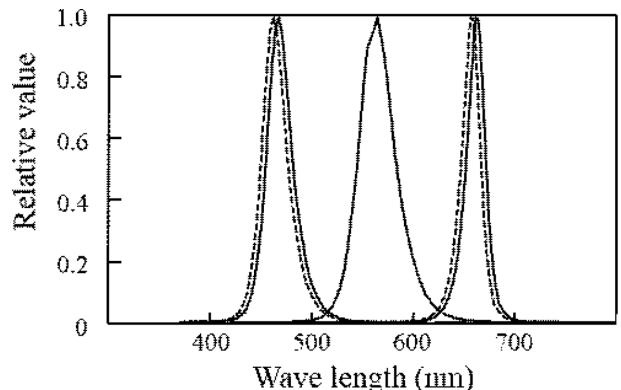


Fig. 1. Relative spectral distribution of light from different light-emitting diodes (LEDs) (peak wavelength 465, 570, and 660nm solid line for experiment 1, and 460, 657 nm dotted line for experiment 2, respectively) at the bottom of culture bed on applying their standard-rated forward voltages.

LED의 간헐조명과 RGB 비율에 따른 상추의 품종별 생육 특성

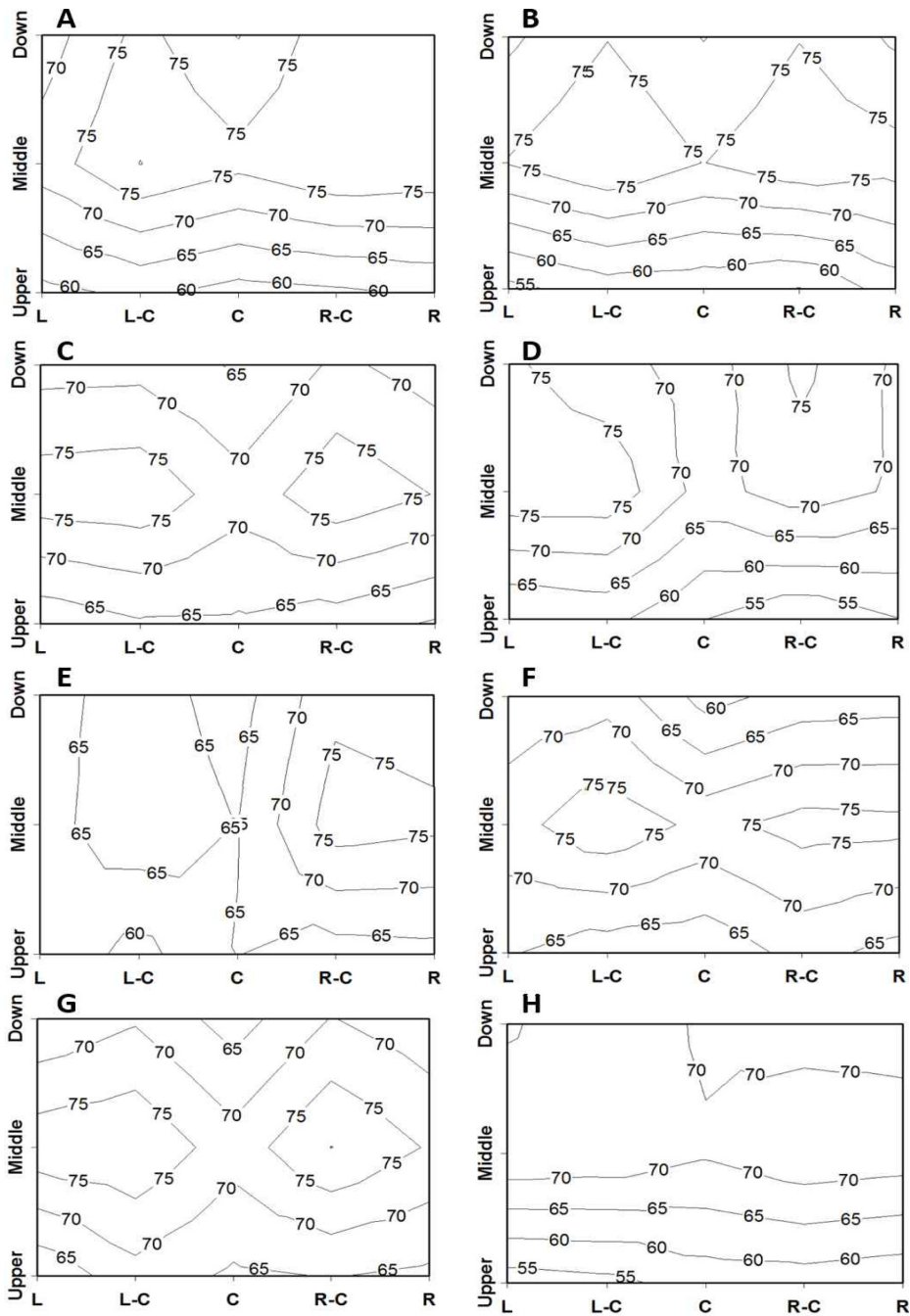


Fig. 2. Distribution of PPFDs on the culture bed with different frequency of continuous (A), 50(B), 100(C), 500(D), 1,000(E), 5,000(F), 10,000(G), and 25,000Hz (H). All duty ratios were 50%.

추배양액의 EC 농도  $1.2\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 를 초기 농도로 설정하여 사용하였으며 2주 후에 새로운 양액으로 갱신하였고 실험중에 pH는 조절하지 않았다.

2. LED 광조사 장치

<Experiment 1> RGB 비율에 따른 상추 생육에 대한 실험을 위해서 Red (UR101, 서울반도체, 대한민국;

peak wavelength: 660nm), Green (GR101, 서울반도체, 대한민국; peak wavelength: 570nm), Blue (NB104, 서울반도체, 대한민국; peak wavelength: 460nm) 칩을 이용하여 각각의 광원을 독립적으로 제어할 수 있는 엠티타입의 면광원[300(길이)×300(높이)]을 개발하였다(Fig. 1, RIST-포항산업과학연구원, 포항, 대한민국). RGB 각 광원의 1개의 모듈은 입력전압을 1-10단계의 등간격으로

디밍 조절하였다. 이러한 광원모듈을 2줄로 4개씩 총 8 개를 식물재배상 위에 고정하여 RGB 비율을 6:3:1, 5:2.5:2.5, 3:3:4, 2:2:6, 1:1:8의 비율로 5개의 LED처리구를 만들었으며 1개는 형광등(FHF32 SSEX-D, 씨티전기, 서울, 대한민국)을 이용하여 대조구로 설정하였다. RGB의 비율에 따른 각 광원의 광합성유효광량자속밀도(PPFD: photosynthetic photon flux density)는 광량자센서(LI-190, LI-COR, Lincoln, NE, USA)와 모니터링 장치(LI-250, LI-COR, Lincoln, NE, USA)를 이용하여 측정하였으며, 모든 LED와 형광등의 스펙트럼 분포는 분광방사측정기(MS-720; Eko Instruments Co., Tokyo, Japan)를 이용하여 측정하였다(Fig. 2). 식물 재배베드 바닥 16 곳에서 모든 광처리의 PPFD값의 평균은  $110\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  이었으며, 일장은 16:8h(주:야) 조건이었다(Table 1).

<Experiment 2> 본 실험에 사용된 LED광조사 시스템(LCSZMS-001, 파루스, Chunan, Korea)은 광조절 장치, 환경측정장치, 유틸리티로 구성되어있으며 무선 Zigbee 통신을 사용하여 제어기와 본체의 데이터 송수신을 수행한다. 광조사 시스템에 사용된 LED는 적색(IWS-L5056-UR-K3, peak wavelength 657nm, 이츠웰, 인천, 대한민국)과 청색(IWS-L3512-UB-K1, peak wavelength 460nm, 이츠웰, 인천, 대한민국)을 이용하였으며 적색칩과 청색칩이 설치된 비율은 4:1(개수) 이었다(Fig. 1). 사용된 LED 광원은 주파수 변조 방법(pulse width modulation)을 이용하여 듀티비 50%를 고정시킨 상태에서 발생 주파수를 50, 100, 500, 1,000, 5,000, 10,000, 25,000 Hz(20, 10, 2, 1, 0.2, 0.1, 0.04ms)조건으로 발생시켰으며 모든 주파수 처리구에서의 PPFD값은 식물 재배베드 바닥 16곳에서의 평균값으로 구하였으며 대조구로는 적

청색 LED의 연속광으로 하였으며 같은 PPFD 조건에서 실험하였다.

### 3. 식물 분석 및 통계

정식 4주 후, 3개 품종의 생육조사를 실시하였다. 생체중, 엽수, 엽장, 엽폭, 근중, 최대 근장을 측정하였다. 생체중은 수확 후 지상부를 절단하여 전자저울(HR-A, 대현사이언스, 서울, 대한민국)을 이용하여 측정하였으며, 이후 엽장 10mm 이상의 엽을 본엽으로 간주하여 엽수를 측정하였다. 가장 큰 엽의 엽장, 엽폭과 최대 근장은 디지털 버니어 캘리퍼(BD-DC200P, 홍원, 서울 대한민국)를 이용하여 측정하였고, 근중의 경우 뿌리 표면에 흡착되어 있는 수분을 실험용 티슈(김테크, 유한김벌리, 서울, 대한민국)를 이용하여 수분을 완벽히 제거한 후 전자저울을 이용하여 측정하였다.

본 실험은 완전임의 배치법으로 2반복 수행되었다. 식물 생육 측정을 위한 모든 처리구는 반복 당 9개체를 측정하였으며, 통계분석은 SAS 통계분석 프로그램 (ver. 9.2)을 이용하였다. 평균 간의 유의성 검증을 위하여 던컨의 다중 분산분석(Duncan's multiple range test; DMRT)를  $P<0.05$  조건으로 분석하였다.

## 결 과

### 1. RGB 광조사 및 펄스광 조사 균일도

RGB 비율에 따른 재배 바닥에서의 각 LED 처리구의 PPFD값은  $110\pm 2\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  수준으로 나타났다(Table 1). 실제 작물이 정식되고 성장하면서 균락에서의 입사 광량은 초기 바닥에서의 측정값보다는 높은 값으로 유지

**Table 1.** Mean PPFD values of each red, green, and blue LED according to RGB ratio at 9 points of the growth bed bottom and total PPFDs of each treatment.

Light parameter	RGB ratio <sup>z</sup>					FL <sup>y</sup>
	6:3:1	5:2.5:2.5	3:3:4	2:2:6	1:1:8	
PPFD <sup>x</sup> ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )						
PPFD (400-800 nm)	108.9	112.7	108.2	109.2	109.1	110
Red (600-670 nm)	68.2	59.8	30.3	21.0	13.8	27.5
Green (520-570 nm)	31.6	26.1	31.4	21.6	12.5	39.6
Blue (430-480 nm)	9.1	26.8	46.6	66.7	82.8	27.5
Far-red (700-800 nm)						15.4
Fraction <sup>w</sup> (%)	100		100	100	100	
PPFD (400-800 nm)	62.6	100	28.0	19.2	12.6	100
Red (600-670 nm)	29.0	53.1	29.0	19.8	11.4	25.2
Green (520-570 nm)	8.4	23.1	43.0	61.0	76.0	36.3
Blue (430-480 nm)		24.8				25.2
Far-red (700-800 nm)						13.3

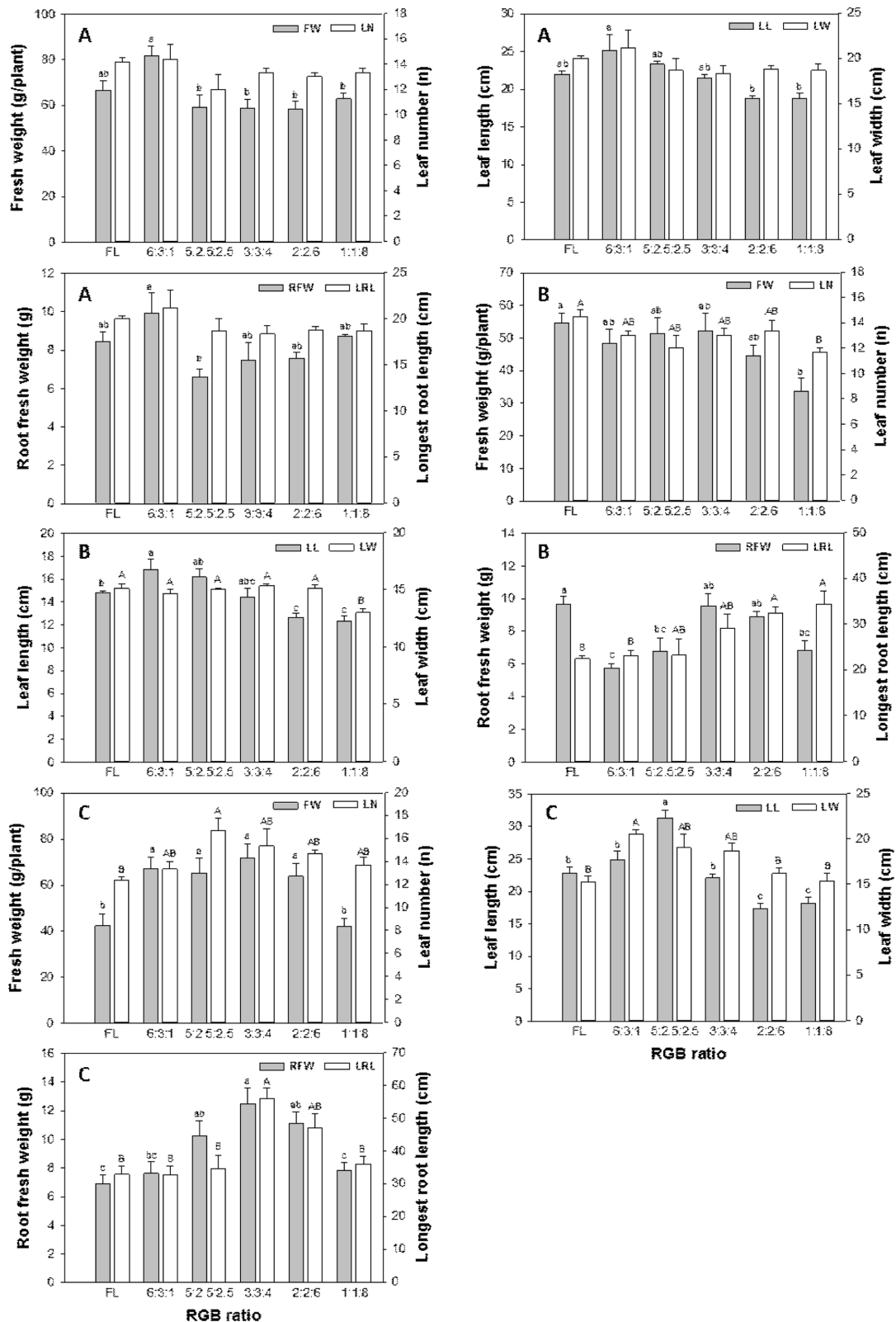
<sup>z</sup>Ratio of RGB from the software divided into 10 grades of forward input voltages.

<sup>y</sup>Fluorescent lamp.

<sup>x</sup>Photosynthetic photon flux density.

<sup>w</sup>Fraction of red, green, blue, and far-red wavelength in terms of measured photosynthetic photon flux density(PPFD).

LED의 간헐조명과 RGB 비율에 따른 상추의 품종별 생육 특성



**Fig. 3.** Fresh weight, leaf number, leaf length, leaf width, root fresh weight, and longest root length of lettuce grown under the irradiation of the different RGB ratio (6:3:1, 5:2.5:2.5, 3:3:4, 2:2:6, and 1:1:8, relatively) with fluorescent lamp (FL) for 4 weeks after transplanting (A: Jukchukmeon, B: Lollo losa, C: Grand rapid). Data represent means and standard error (n=9). Means followed by the same letter in a graph are not significantly different by DMRT (P < 0.05).

되었으며 수확 전 근락에서의 광강도는  $230\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  수준으로 나타났다. 입력전압의 최소값과 최대값을 10등분하여 조절할 수 있는 소프트웨어로 처리된 RGB의 실제 측정된 값의 비율은 -16%에서 +26%까지 차이가 났으나 이렇게 큰 차이가 보인(이렇게 크게 나타난) 처리구는 6:3:1과 1:1:8의 10% 비율로 처리된 광원에서 나타났다. RGB 실험의 대조구로 사용된 형광등의 경우 약 13.3%의 Far-red 영역이 포함되었다. 주파수 변조방식에 의한 재배베드 위에서의 듀티비 50%를 가진 펄스광에 의한 PPFd 값의 분포는  $72\pm 5\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  수준으로 나타났다(Fig. 2).

## 2. RGB 비율에 따른 상추의 생육

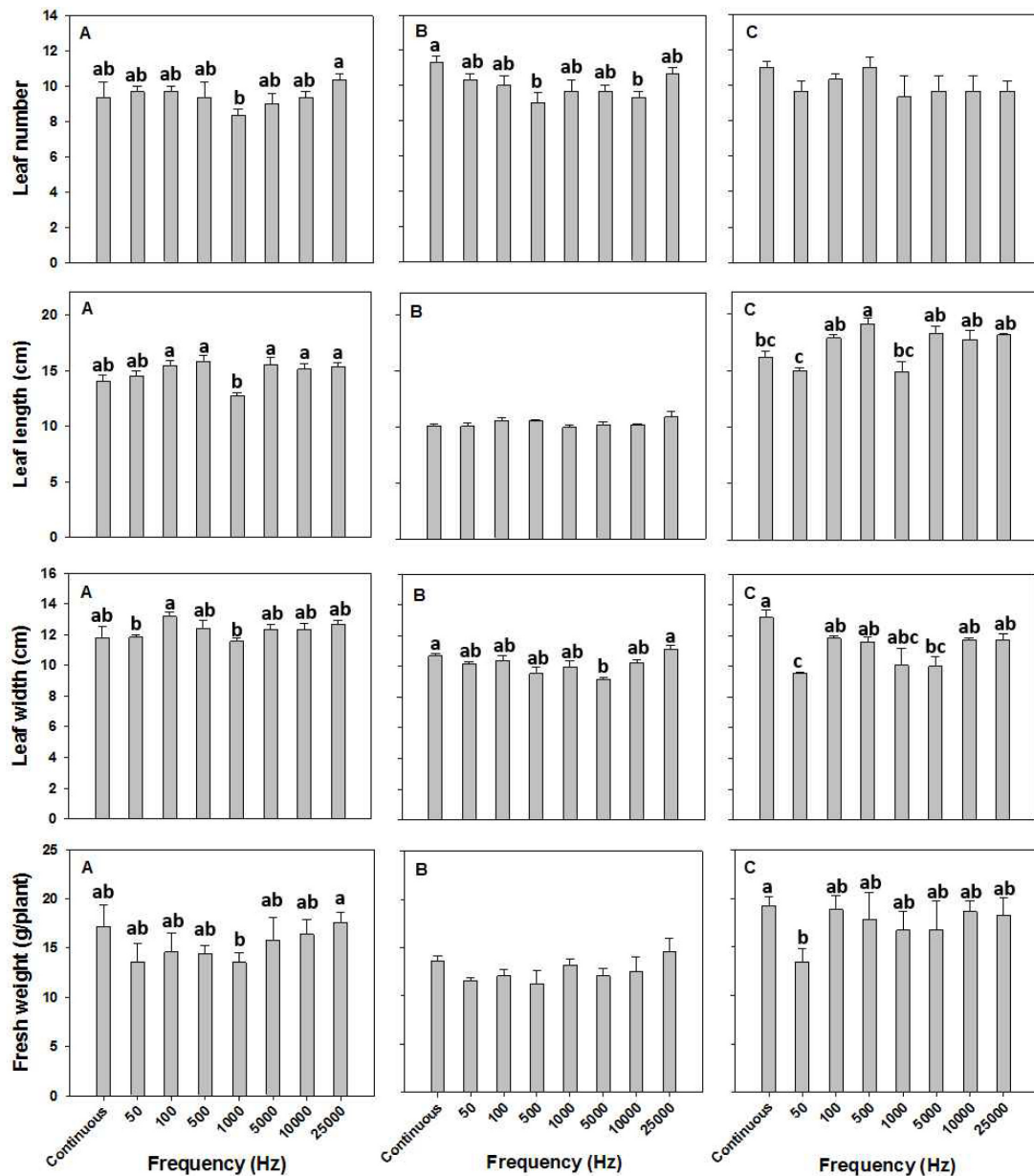
정식 4주 후 ‘적측면’ 상추의 생체중은 RGB 비율이 6:3:1의 경우 주당 평균 생체중이 81g인 것과 비교하여 R의 비율이 높은 처리구에서 낮은 순으로 59, 58, 58과 62g으로 유의적 차이를 나타냈다. 그러나 형광등 처리구의 생체중 66g과 비교할 때 평균값은 6:3:1의 처리구가 높았으나 유의적 차이는 나타나지 않았다(Fig. 3). 엽장의 경우 RGB의 비율이 6:3:1의 경우 2:2:6과 1:1:8 비율 처리구와 비교하여 유의적으로 길게 나타났다(Fig. 3). 적측면 상추 뿌리의 생체중에 있어서 6:3:1의 비율이 5:2.5:2.5의 처리와 비교하여 유의적으로 높게 나타났으나, 엽수, 엽폭, 최대 근장의 부분에서는 유의적인 차이를 보이지 않았다(Fig. 3). 롤로로사의 경우 대조구인 형광등 처리구와 RGB 1:1:8 처리구의 생체중이 각각 54g과 34g으로 형광등 처리구에서 유의적으로 높은 값을 보였으며, 엽수에서도 형광등 처리구는 RGB 1:1:8 처리구보다 유의적으로 높게 나타났다(Fig. 3). 엽장과 엽폭 또한 RGB의 비율에 따라서 달라지는데, 청색의 비율이 높아질수록 엽장은 짧아지는 경향을 나타내어 엽의 모양이 둥근 형태로 나타났다. 대조구의 뿌리 생체중과 비교하여 RGB의 비율이 3:3:4와 2:2:6의 처리구는 유의적 차이가 없었으나, 나머지 RGB 처리는 유의적으로 낮은 값을 나타내었다. 롤로로사 품종의 최대 근장을 측정한 결과 형광등처리에서 가장 낮은 값을 보였으며 이후 RGB의 비율에서 청색광이 증가함에 따라서 최대 근장이 증가하는 경향을 보였다. RGB 비율이 2:2:6과 1:1:8 처리구에서 다른 나머지 처리구와 비교하여 유의적으로 높은 결과를 보였다(Fig. 3). 그랜드래피드 품종의 경우 RGB 비율이 6:3:1, 5:2.5:2.5, 3:3:4와 2:2:6의 처리구에서 대조구인 형광등 처리구와 RGB 비율 1:1:8 처리구와 비교하여 생체중과 엽수에서 유의적으로 높은 값을 나타내었다. 엽장의 경우 RGB 비율이 5:2.5:2.5 처리구에서 가장 높게 나타났으며 이후 청색광의 증가에 비례하여(계)

엽장은 계속 작아지는 경향을 보였다. RGB 비율이 6:3:1에서 그랜드 래피드 품종의 엽폭은 가장 길었으며 이후 청색광의 비율이 증가함에 따라서 엽폭이 감소하는 경향을 보였다. 광원에 따른 엽장과 엽폭의 감소비율은 달랐으나, 전체적으로 청색의 비율이 증가하면서 둥근 형태의 엽형으로 나타났으며, 적측면과 롤로로사에서 보여준 경향과 유사한 것으로 판단된다. 뿌리 생체중의 경우 RGB 비율이 3:3:4 처리에서 유의적으로 가장 높은 값을 보였으며, 청색광 또는 적색광이 증가할수록 뿌리 생체중이 감소하는 경향을 나타내었으며 대조구인 형광등 처리에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 롤로로사도 유사한 경향을 보였으며, RGB의 비율에 따른 광합성 산물이 지하부로 이동되는 전류속도의 차이에 의해 발생하는 것으로 생각된다. 상추 3개 품종에 조사된 광의 다른 RGB 비율은 지상부 및 지하부 생육과 엽형을 변화시켰으며, 특히 청색광의 비율이 증가할수록 엽장은 감소하는 경향이 모든 품종에서 나타났으며, 청색광이 80%를 차지하는 처리구에서는 생체중이 유의적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 품종에 따른 광에 대한 각각의 반응으로 상이한 형태형성을 유도하고 광합성량과 분배율의 차이에 의해 다른 반응을 보이는 것으로 판단된다.

## 3. 펄스광 조사

펄스광에 의한 상추 3개 품종의 엽수는 대조구인 연속광과 비교하여 유의적으로 증가한 처리구는 없었다(Fig. 4). 다만, 적측면 상추에서 1,000Hz에서 대조구와 비교하여 유의적으로 낮았으며 롤로로사에서는 500과 10,000Hz에서 유의적으로 낮았다(Fig. 4). 그랜드 래피드에서는 유의적인 차이를 관찰할 수 없었다. 엽장의 경우, 대조구와 비교하여 적측면 상추의 경우 유의적 차이가 없었으나, 1,000Hz에서 낮은 값을 보였으며, 롤로로사의 경우 유의적 차이가 발생되지 않았고, 그랜드 래피드의 경우 연속광인 대조구와 비교하여 500Hz 처리구에서 유의적으로 크게 나타났다. 적측면 상추의 엽폭은 대조구인 연속광과 비교하여 모든 처리구에서 유의적 차이를 보이지 않았으나, 100Hz 처리구는 50과 1,000Hz 처리구와 비교하여 유의적으로 높게 나타났다. 롤로로사의 경우 대조구와 비교하여 5,000Hz 처리구에서 유의적으로 적게 나타났다. 그랜드 래피드의 경우 대조구가 가장 높은 값을 보이면서 50과 5,000Hz에서 유의적으로 낮은 값을 보였다(Fig. 4). 펄스광에 의한 상추 3 품종의 생체중은 대조구인 연속광과 비교하여 모든 펄스 처리구에서 유의적으로 높지 않았다(Fig. 4). 그러나, 적측면 상추의 경우 25,000Hz 처리구는 1,000Hz 처리구와 비교하여 유의적으로 높은 값을 보였

LED의 간헐조명과 RGB 비율에 따른 상추의 품종별 생육 특성



**Fig. 4.** Leaf number, leaf length, leaf width, and fresh weight of three cultivar lettuces (A: jukchukmeon, B: lollo rosa, C: grand rapid) grown under the different frequencies (50, 100, 500, 1,000, 5,000, 10,000, and 25,000 Hz; 20, 10, 2, 1, 0.2, 0.1, 0.04ms) of red and blue LED with 50% duty ratio using plus width modulation method for 4 weeks after transplanting. Continuous light was used with fluorescent lamp having far-red wavelength. Data represent means and standard error (n=9). Means followed by the same letter in a graph are not significantly different by DMRT (P < 0.05).

다. 그랜드 래피드의 50Hz 처리구는 연속광인 대조구와 비교하여 유의적으로 낮은 값을 보였다. 따라서, 본 실험에서 처리된 50에서 25,000Hz 까지의 펄스광은 같은 PPFD 조건의 연속광과 비교하여 상추의 성장에는 영향을 주지 않는 것으로 판단되며, 일부의 처리 또는 품종에서 형태형성 측면에서 일부 차이를 나타내었으나, 펄스광의 주기에 따른 경향값으로 판단하기에는 어렵다고 사료된다.

## 고 찰

### 1. RGB 비율에 따른 상추의 생육

적색광의 비율이 낮아질수록 적축면과 톨로로사의 생체중이 감소하는 경향을 나타낸 것은 RGB 복합 또는 2개의 광처리에서 적색광의 비율이 높은 처리구에서 낮은 처리구로 갈수록 “선망” 적축면 상추의 생체중이 유의적으로 감소(Son and Oh, 2015) 하는 경향과 일치하였다.

상추 또는 식물의 생장에 적색광의 긍정적 효과는 여러 연구자들에 의해서 보고되었으며(Johkan et al., 2010; Kim et al., 2005; Matsuda et al., 2007), 상추를 단색광 조건과 적청 혼합광 조건에서 재배할 때 상추의 생체중 증가는 적청 혼합광에서 더욱 효과가 컸다(Son et al., 2012; Son and Oh, 2015). 또한 여러 식물에 대한 적색, 또는 청색의 단색광 보다는 혼합광원이 광합성에 매우 유리하다고 보고하였다(Goins et al., 1997; Matsuda et al., 2007; Samuolienė et al., 2011; Savvides et al., 2012). 또한 여러 파장들 중에서 적색광은 작물 생육을 증진시키는 매우 효과적인 광파장이다(Folta and Childers, 2008). 파이토크롬에 의해서 흡수되는 적색광은 식물의 생장과 발달에 매우 중요한 역할을 하며 광합성 기구들의 발달과 전분의 축적에 매우 중요한 에너지원으로 사용된다(Saebo et al., 1995). 그러나, 그랜드 래피드 품종의 경우 RGB 1:1:8을 제외한 나머지 LED 혼합 처리에서 유의적인 차이를 보이지 않았다. 그랜드 래피드 품종은 광질의 변화에 덜 민감한 품종으로 사료되며, RB 9:1처리구와 RGB 7:1:2 처리에서 그랜드 래피드 TBR 품종의 상추가 각각의 광처리 4주 후 생체중이 53.9와 50.34g 으로 유의적 차이가 나지 않은 결과(Son and Oh, 2015)와 유사하였다. RB광원으로만 처리된 광환경에 G광원을 추가할 경우 상추의 바이오매스가 1.4-1.6배 증가하는 결과에 반하여, G광원이 B광원을 대체하는 역할을 하는 것은 아니라고 보고하였다(Kim et al., 2005; Son and Oh 2015). 따라서, 녹색광원은 상추의 바이오매스 증가에 꼭 필요한 광원으로 사료되며, 적색광원이 전체광원의 50% 이상 확보되는 조건에서 G와 B의 조합이 필요한 것으로 판단된다.

엽채류 3품종 모두에서 엽장과 엽폭의 변화는 적색광에서 청색광이 많아지는 광조합에서 엽의 길이가 짧아지고, 상대적으로 엽폭은 줄어들어 엽모양이 둥근 형태에 가까워지는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 적색광과 청색광의 비율이 영향을 미치는데, 청색광이 증가할수록 엽이 두꺼워지면서 길이 생장이 대조구와 비교하여 억제된다는 결과와 유사하였다(Son and Oh, 2015). 청색광이 메소필셀 조직을 자극하기 때문에, 양자수율의 증가와 단위파장이 갖는 에너지 증가가 엽육조직을 두껍게 한다고 하였다(Liu et al., 2014; Xiao et al., 2011). 롤로로사와 그랜드 래피드의 지하부 생체중은 녹색과 청색의 비율이 높았던 RGB 3:3:4에서 유의적으로 가장 높은 값을 나타냈으며, 적색광과 청색광이 증가하는 광조합으로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다. 청색광의 광수용체로 알려진 phototropins-1은 토양의 가뭄내성에 대한 자연선택에 의해 진화적으로 형성되었다는 것을 *Arabidopsis thaliana*의 실험을 통하여 암시하면서 이러한 phototropins-

1은 뿌리의 생장에 직접 관련이 있다고 하였다(Galen et al., 2007). 또한 Son and Oh(2015)는 그랜드 래피드 TBR 품종의 재배 실험에서 LED를 이용한 RGB 7:2:1 처리는 형광등과 고압나트륨 램프처리의 대조구와 비교하여 PPFD  $173\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  조건에서 지하부의 생체중이 유의적으로 높게 나타났다고 보고하였다. 따라서, RGB의 조합은 대상작물의 형태형성을 고려하여 둥근형태의 엽형을 원한다면 R이 50% 이상인 조건에서 B의 비율이 높은 조건의 광조사가 필요하며, 정상적으로 생육을 증가시키고자 할 경우 60% 수준의 R조건과 G와 B의 비율을 조절하는 것이 바람직하다고 판단되었다.

## 2. 펄스광 조사

광이용 효율(Light use efficiency)은 PPFD 값에 대한 생체중의 증가량을 나타낸 값으로 같은 PPFD 조건에서 생체중 증가에 의해 좌우 된다. 따라서 에너지 이용 효율(Energy use efficiency)이 더 중요하다고 할 수 있다. 10과 30kHz 조건에서 50%의 듀티비를 갖는 조건은 75%의 듀티비 조건과 비교하여 에너지 이용효율은 감소한다고 보고 하였다(Son and Oh, 2015). 그러나, 듀티비 값이 증가하면 실제 PPFD 값도 증가하기 때문에, 작물 생육에 직접적으로 영향을 미친다고 볼 수 있다. 그러나 1kHz 조건에서 듀티비 70-80%로 광조사할 경우 밀의 생장은 연속광과 차이가 없다고 보고하였다(Dong et al., 2015). 그러나, 180과 720Hz 조건의 50% 듀티비를 이용한 LED 광조사는 대조구인 연속광과 비교하여 감자 유포의 생장을 더욱 증가시켰으며, 또한 1kHz 이하의 낮은 주파수 영역의 듀티비 75%는 순광합성률이 연속광과 비교하여 유의적 차이가 발생되지 않았고, 상추의 생장에 긍정적 영향을 끼친 결과 이러한 주파수의 특징은 식물의 생장에 영향을 줄 수 있는 인자라고 평가하였다(Son and Oh et al., 2015). 그러나, Hashimoto(1987)는 펄스광과 연속광이 같은 PPFD 조건으로 조사되었을 경우 순광합성은 변화하지 않으며, 듀티비의 증가는 광합성의 증가로 이어지는 양의 상관관계에 있다고 보고하였다. 또한, 0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4, 12.8kHz 조건의 펄스광 LED 조건에서 연속광조건과 비교하여 로메인 상추의 순광합성 속도는 유의적 차이가 발생되지 않았다(Jishi et al., 2011). Olvera-Gonzalez et al.(2013a, 2013b)는 0.1과 1Hz 조건과 50%의 듀티비 조건에서 연속광과 비교하여 식물의 광계II ( $\phi\text{PSII}$ )의 양자수율에서 더 좋은 결과를 나타내었으며, 이러한 결과는 광합성에 긍정적으로 작용하였고, 100과 1,000Hz를 추가한 실험에서도 광합성 형광과 관련된 인자( $F_v/F_m'$ , NPQ,  $\phi\text{PSII}$ , ETR,  $\text{CO}_2$ 흡수율)들이 연속광과 비교하여 높았고 이러한 결과 에너지를 절약하면서 광합성 효율을 증가시



킬 수 있는 광조사 방식이라고 보고하였다.

이러한 결과로 보아, 듀티비와 주파수 조건은 분명히 식물체의 생장에 영향을 줄 수 있는 인자인 것은 분명한 것으로 사료된다. 그러나, 온도, 습도, 광과 같은 환경요인이 식물체의 생장에 영향을 미치는 환경범위가 긍정적 영향을 주어 효과가 상승하는 영역과 그 효과가 유지되는 영역, 과부하되어 역효과를 주는 영역으로 넓게 정의할 수 있는 반면 식물의 광환경으로 조사되는 주파수와 듀티비의 경우 증가 또는 감소에 따른 생장의 경향이 어떠한 패턴을 가지고 있는 것은 아닌 것으로 판단된다. 또한 이 부분은 추가 실험 또는 추후 논의가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 적 요

본 연구는 상추(*Lactuca sativar* L.)의 3가지 품종에 대해서 RGB LEDs의 각각의 다른 비율과, 듀티비 50% 조건의 RB LEDs를 이용한 여러 가지 주파수를 가지는 펄스광 조사가 상추의 생장과 형태형성에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 수행되었다. 파종 후 육묘 기간을 거쳐 유사한 외형을 갖는 묘를 선발하여 재배 림의 온도와 습도,  $23\pm 1^{\circ}\text{C}/50\text{-}60\%$ (주간)과  $18\pm 1^{\circ}\text{C}/70\text{-}85\%$ (야간) 조건에서 담액수경재배로 4주간 재배하였다. 광합성유효광량속밀도(PPFD)는 재배베드 위에서  $110\pm 3\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , RGB 비율은 6:3:1, 5:2.5:2.5, 3:3:4, 2:2:6, 1:1:8 이었다. 50% 듀티비를 갖는 펄스광은 RB LEDs로 구성되었고 설정된 주파수는 50, 100, 500, 1,000, 5,000, 10,000, 25,000Hz(20, 10, 0.1, 0.04ms) 이었다. RGB 비율 6:3:1에서 적축면 상추의 생체중은 다른 RGB 처리구와 비교하여 유의적으로 높은 값을 보였으나, 대조구인 형광등 처리구와는 유의적 차이가 발생되지 않았다. RGB 비율 1:1:8의 조건에서, 롤로로사는 생체중, 그랜드 래피드는 엽수와 생체중이 다른 RGB 처리구와 비교하여 유의적으로 낮았다. 청색광의 비율이 증가할수록, 3개 품종 모두에서 엽장이 감소하면서 엽형이 둥근 형태로 발달하였다. RB LED로 구성된 LED 광조건 하에서 50% 듀티비 조건과 처리된 여러 주파수의 증가 또는 감소에 따른 상추의 생육 및 형태형성에 미치는 경향성을 발견하기 힘들었다.

**추가주제어:** 듀티비, *Lactuca sativar*, 식물생장, PPFD

## 사 사

본 연구논문은 CNU 학술연구지원사업(2014) 지원으로 이루어졌습니다.

## Literature Cited

- Carvalho R.F., M. Takaki, and R.A. Azevedo. 2011. Plant pigments: the many face of light perception. *Acta Physiol. Plant* 33:241-248.
- Dong C, L. Shao, G. Liu, M. Wang, H. Liu, B. Xie, B. Li, Y. Fu, and H. Liu. 2015. Photosynthetic characteristics, antioxidant capacity and biomass yield of wheat exposed to intermittent light irradiation with millisecond-scale periods. *J. Plant Physiol.* 184:28-36.
- Folta K.M. and S.A. Maruhnich. 2007. Green light: a signal to slow down or stop. *J. Exp. Bot.* 58:3099-3111.
- Folta, K.M. and K.S. Childers. 2008. Light as a growth regulator: controlling plant biology with narrow-bandwidth solid-state lighting systems. *HortScience* 43:1957-1964
- Galen, C., J.J. Rabenold, and E. Liscum. 2007. Functional ecology of a blue light photoreceptor: effects of phototropin-1 on root growth enhance drought tolerance in *Arabidopsis thaliana*. *New Phytologist* 173:91-99.
- Goins, G.D., N.C. Yorio, M.M. Sanwo, and C.S. Brown. 1997. Photomorphogenesis, photosynthesis, and seed yield of wheat plants grown under red light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental blue lighting. *J. Exp. Bot.* 48:1407-1413.
- Hashimoto Y, Y. Yi, F. Nyunoya, Y. Anzai, H. Yamazaki, S. Nakayama, and A. Ikeda. 1987. Vegetable growth as affected by on-off light intensity developed for vegetable factory. *Acta Hort.* 229:259-264.
- Jishi T., R. Matsuda, and K. Fujiwara. 2015 A kinetic model for estimating net photosynthetic rates of cos lettuce leaves under pulsed light. *Photosynth Res.* 124:107-116.
- Johkan M., K. Shoji, F. Goto, S. Hashida, 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. Hahida, 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 H.H., R. Wheeler, J.C. Sager, N. Yorio, and G. Goins. 2005. Light-emitting diodes as an illumination source for plants: A review of research at Kennedy Space Center. *Habitat (Elmsford)* 10:71-78.
- Lee, G.I., H.J. Kim, S.J. Kim, J.W. Lee, and J.S. Park. 2016. Increased growth by LED and accumulation of functional materials by fluorescence lamps in a hydroponics culture system for *Angelica gigas*. *Protected Horticulture and Plant Factory* 25:42-48.
- Liu, M., Z. Xu, S. Guo, C. Tang, X. Liu, and X. Jao. 2014. Evaluation of leaf morphology, structure and biochemical substance of balloon flower (*Platycodon grandiflorum* (Jacq.) A. DC.) plantlets in vitro under different light spectra. *Sci. Hortic.* 174:112-118.

- Loo K.H., W.K. Lun, S.C. Tan, Y.M. Lai, and C.K. Tse. 2009. On driving techniques for LEDs: toward a generalized methodology. *IEEE Trans. on Power Electron* 24:2967-2976.
- Matsuda R, K. Ohashi-Kaneko, K. Fujiwara, and K. Kurata. 2007. Analysis of the relationship between blue-light photon flux density and the photosynthetic properties of spinach (*Spinacia oleracea* L.) leaves with regard to the acclimation of photosynthesis to growth irradiance. *Soil Sci. Plant Nutr.* 53:459-465.
- McCree K.J. 1972. Action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.* 9:191-216.
- Olvera-Gonzalez E, D. Alaniz-Lumbreras, R. Ivanov-Tsonchev, J. Villa-Hernández, C. Olvera-Olvera, E. González-Ramírez, and V. Castaño. 2013a. Intelligent lighting system for plant growth and development. *Comput Electron Agric.* 92:48-53.
- Olvera-González E, D. Alaniz-Lumbreras, R. Ivanov-Tsonchev, J. Villa-Hernández, I. Rosa-Vargas, I. López-Cruz, and A. Lara-Herrera. 2013b. Chlorophyll fluorescence emission of tomato plants as a response to pulsed light based LEDs. *Plant Growth Regul.* 69:117-123.
- Park, J.E., Y.G. Park, B.R. Jeong, and S.J. Hwang. 2013. Growth of lettuce in closed-type plant production system as affected by light intensity and photoperiod under influence of white LED light. *Protected Horticulture and Plant Factory* 22:228-233.
- Saebo A., T. Kreckling, and M. Appelgren. 1995. Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets in vitro. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 41:177-185.
- Samuolienė, G., R. Sirtautas, A. Brazaitytė, J. Sakalauskaitė, S. Sakalauskienė, and P. Duchovskis. 2011. The impact of red and blue light-emitting diode illumination on radish physiological indices. *Central Eur. J. Biol.* 6:821-828.
- Savvides A., D. Fanourakis, and W. van Leperen. 2012. Coordination of hydraulic and stomatal conductances across light qualities in cucumber leaves. *J. Exp. Bot.* 63:1135-1143.
- Son K.H., J.H. Park, D. Kim, and M.M. Oh. 2012. Leaf shape, growth, and phytochemicals in two leaf lettuce cultivars grown under monochromatic light-emitting diodes. *Korean J. Hortic. Sci. Technol.* 30:664-672.
- Son K.H., and M.M. Oh. 2015. Growth, photosynthetic and antioxidant parameters of two lettuce cultivars as affected by red, green, and blue light-emitting diodes. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 56:639-653.
- Son, K.H., Y.M. Jeon, and M.M. Oh. 2016. Application of Supplementary White and Pulsed Light-emitting Diodes to Lettuce Grown in a Plant Factory with Artificial Lighting. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 57:560-572.
- Taiz L., and E. Zeiger. 1991. *Plant physiology*. 1st ed., 179-264. Benjamin Cummings Publishing Co. New York.
- Tamulaitis G, P. Duchovskis, Z. Bliznikas, K. Breive, R. Ulinskaite, A. Brazaityte, A. Novickovas, and A. Zukauskas. 2005. High-power light-emitting diode based facility for plant cultivation. *J. Phys. D Appl Phys* 38:293-3187.
- US Department of Energy 2011. Solid-state lighting research and development: multi year program plan (Fig. 3.4), p. 130.
- XiaoYing, L., G. ShiRong, X. ZhiGang, J. XueLei, and T. Tezuka. 2011. Regulation of chloroplast ultrastructure, cross-section anatomy of leaves, and morphology of stomata of cherry tomato by different light irradiations of light-emitting diodes. *HortScience* 46:217-221.
- Yoneda K, and Y. Mori. 2004 Method of cultivating plant and illuminator for cultivating plant. European Patent Ofce. EP1374665A1.