

## 발광다이오드 광원에 따른 시금치 생육, 엽 형태형성 및 세포길이 변화

이명옥 · 박상민 · 조은경 · 안진희 · 최은영\*

한국방송통신대학교 농학과

### Changes of Plant Growth, Leaf Morphology and Cell Elongation of *Spinacia oleracea* Grown under Different Light-Emitting Diodes

Myungok Lee, Sangmin Park, Eunkyung Cho, Jinhee An and Eunyoung Choi\*

Dept. of Agricultural Science, Korea National Open University, Seoul 110-791, Korea

**Abstract.** This study aimed to determine effects of light-emitting diodes on plant growth, leaf morphology and cell elongation of two cultivars ('World-star' and 'Sushiro') of *Spinacia oleracea*. Plants were grown in a NFT system for 25 days after transplanting (DAT) under the LEDs [White (W), Red and Blue (RB, ratio 2:1), Blue (B), Red (R) LED] under the same light intensity and photoperiod ( $130 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 12 hours). The 'World-star' variety was significantly higher in shoot fresh and dry weights, leaf number, and leaf area than the 'Sushiro' variety. For the 'World-star' variety, the two treatments of mixed light (RB) and red light (R) showed a 35% higher shoot dry weight than that of blue light (B) and white light (W) at 25 DAT. In the 'Sushiro' variety, mixed light (RB) treatment, which had the highest shoot fresh and dry weights, showed 40% higher than the white light (W) treatment, which had the lowest shoot fresh and dry weights. Both varieties showed leaf epinasty symptom at 21 DAT only in both mixed light (RB) and red light (R), and red light (R) treatment showed significantly higher symptom than mixed light (RB), indicating the leaf epinasty is associated with red light. Microscopic observations of the cell size in the leaf center and edge parts showed that the cell density of leaf edge under the red light (R) was lower than that in leaf center, supporting previous reports that suggest an association of the cell size difference between the leaf center and edge with the leaf epinasty occurrence. Since the blue light (B) plays a role in alleviating the epinasty symptom caused by the red light (R), it seems necessary to identify the appropriate mixing ratio of the two light sources. In addition, the World-star variety seems to be more suitable for the cultivation of plant factory using LED light sources.

**Additional key words :** photomorphogenic response, leaf epinasty index, photosynthesis rate, specific leaf weight

## 서 론

최근 안전한 농산물에 대한 소비자들의 요구가 증가하고 있으며 이상기상 현상으로 농산물 안정적 생산에 대한 관심이 고조되고 있다. 이러한 변화로 인하여 외부 환경요인에 관계없이 작물을 생산할 수 있는 식물공장에서 인공광원을 이용하여 작물을 연중 대량생산하는 것에 관심이 집중되고 있다. 식물공장 시스템에 많이 사용되는 인공광원인 발광다이오드(light-emitting diode; LED)는 무수으로 전력 절감이 탁월하고 수명이 길다(Hwang et al., 2004). 특히, 식물체 내 신호 자극원이 되는 특정 파장대 광질 선택이 가능하여 광합성 촉진 및 개화조절에 활용되어 작물 발달에 중요한 역할을 담당한다(Wang et al.,

2009). 식물체 광수용체 단백질인 피토크롬(적색 및 근적외선 흡수), 크립토크롬 및 포토트리핀(청색 및 근자외선 흡수)이 특정 파장대의 광을 흡수하여 자극을 인식하고 신호변환 경로를 통해 식물의 생육 및 형태변화에 영향을 주는데(Barnes and Bugbee, 1991) 이러한 현상을 광형태형성 반응(photomorphogenic responses)이라고 한다(Carvalho et al., 2001; Sullivan and Deng, 2003). 청색광은 상추 지하부 및 잎두께를 촉진하고(Johkan et al., 2010) 엽록소 함량과 기공전도도를 증가 시키고(Hogewoning et al., 2010; Savvides et al., 2012) 적색과 청색 혼합광에서 녹색광 추가는 상추 생체중을 증가시켰다고 보고되었다(Johkan et al., 2012; Kim et al., 2004). 적색광은 광합성 유효광으로써 생체중과 엽면적 증가 등 긍정적 효과도 있지만 엽의 형태가 비정상적으로 길게 유도된다고 하였다(Lee et al., 2010; Son et al., 2012). 또한 본 연구팀 선행연구에서도 고품배추가 적색광에서 20일 이상 재배되었을 때 잎 가장

\*Corresponding author: [ch0097@knou.ac.kr](mailto:ch0097@knou.ac.kr)  
Received May 16, 2018; Revised June 30, 2018;  
Accepted July 3, 2018

자리가 굽어지는 현상이 나타났다(Park et al., 2017). 이러한 결과는 식물은 자연적으로 다양한 파장의 광을 활용하여 광형태형성 반응(photomorphogenic responses)을 조절하므로(Kendrick and Kronenberg, 1994) 특정한 좁은 파장대 광에서 식물 재배 시 생육 특징에 대한 이해가 필요하다(Goins et al., 1997)는 고찰을 뒷받침 하고 있다.

외부환경과 차단된 밀폐형 식물공장에서는 수경재배법으로 생산 가능한 채소들 중 호냉성이며 장일성 채소인 시금치는 국내 재배면적이 5,149 ha이고 그 중 시설재배는 2,264 ha 이다(MAFRA, 2016). 고온기에는 주로 고랭지에서 생산되고 있으나 그 외 지역에서는 수급이 안정적이지 않다. 따라서 수경재배 방식으로 식물공장에서 생산할 경우 청정재배와 주년생산이 가능하다. 환경제어된 시설에서 시금치 생산을 위한 연구는 주로 배지의 종류에 따른 생육과 무기양분 흡수 특성(Yun et al., 1997), 양액 용존산소 농도에 따른 무기양분 흡수량상(Seo et al., 2002), 적정 육묘배지 및 양액농도 규명 등이고 LED 광원종류에 의한 시금치 생육과 엽형 변화에 대한 정보는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구는 완전제어형 식물공장에서 시금치 주년생산을 목적으로 대량재배 할 때 생산효율을 극대화 시킬 수 있는 최적 환경 중 적절한 LED 광원에 대한 정보를 얻고자 적색, 청색, 혼합(적색+청색) 및 백색 LED 광원에 반응하는 두 시금치 품종 생육 특징과 엽형 변화를 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 식물재배 및 재배환경

본 실험은 LED 인공광이 설치된 식물공장에서 2016

년 8월1일부터 2017년 8월19일까지 4회 반복 수행되었다. 시금치(*Spinaci oleracea* L.) 서양계 품종인 ‘월드스타(세종종묘)’와 동양계 품종인 ‘수시로(아시아종묘)’ 품종 종자를 Ethanol(에탄올) 70% 용액, NaOCl 1% 용액, 1차 증류수에 차례로 세척 후 1차 증류수에 실온에서 24시간 침지하였다. 침지 처리된 종자를 여과지를 깔고 증류수 4 mL를 넣은 페트리디쉬 1개 당 종자 10개씩 파종하여 생육상(20°C)에서 최아 시킨 후 버미큘라이트가 충전된 72구 육묘용 트레이에 이식한 후 식물공장의 형광등(150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )이 설치된 재배벤치(온도 20°C, 습도 60%, Watchdog 2450)에서 10일간 육묘하였다. 정식은 본엽 2~3매 나왔을 때 NFT 수경재배기 [45cm(L) $\times$ 32cm(W) $\times$ 23cm(H)]에 EC 1.0dS $\cdot\text{m}^{-1}$ , pH 6.0로 조정된 코넬대시금치배양액 (N-P-K-Ca-Mg = 8.9-1.0-5.5-2.1-1.0me $\cdot\text{L}^{-1}$ )을 13L 채운 뒤 각 재배기에 처리별 14주를 정식하였다. 배양액 pH는 주 2회 보정하였고 배양액은 1주일 간격으로 완전 교체하였다.

재배환경은 Watchdog 데이터로거(Watchdog 2450, Spectrum Technologies, inc, USA)로 30분 간격으로 저장하였다. 온도는 명기에 22 $\pm$ 2°C, 암기에 18 $\pm$ 2°C로, 상대습도는 60 $\pm$ 10%로 유지되도록 냉·난방기(CSV-Q075U, Carrier, Seoul, Korea) 및 가습기(Cairs, Woongjin, Seoul, Korea)를 이용하여 조절하였고, 광주기는 16/8(명기/암기) 시간으로 하였고 탄산가스의 공급은 별도로 실시하지 않았다. 광강도는 LED조명 전원 공급장치(SMPS, Switched Mode Power Supply, LRS-350-36, Mean Well, New Taipei, Taiwan)로 광원으로부터 25cm 떨어진 식물체 상부 일 표면에서의 평균 광합성유효광양자속(photosynthetic photon flux density, PPF)을 모든

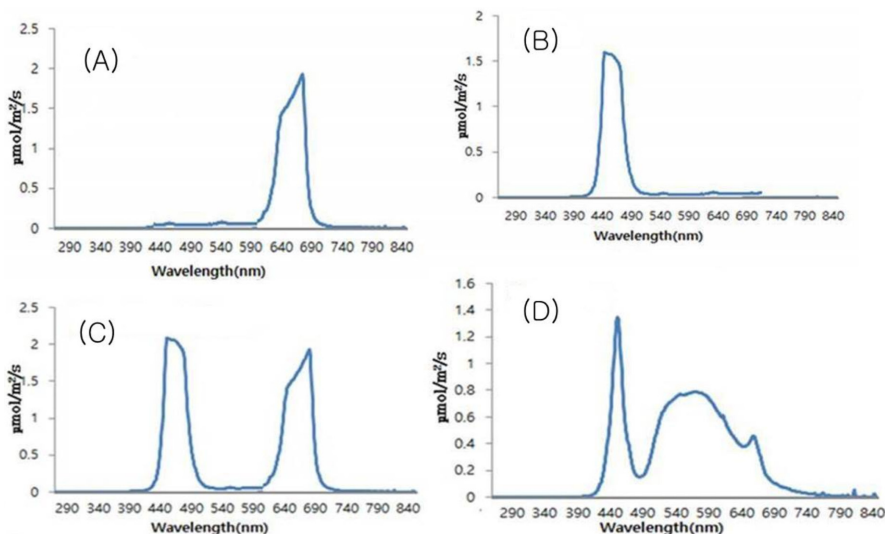


Fig. 1. Spectral characteristics of (A) red LED, (B) blue LED, (C) red LED + blue LED (2:1), and (D) White LED.

처리구에 광양지측정기(3415FSE, Spectrum Technologies inc, USA)를 이용하여  $130\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 고정하여 재배하였다.

## 2. 실험처리

실험처리는 LED광(ZVAS-02-0300, Sunghyun Hightech Co Ltd, Korea)은 적색광(R), 청색광(B), 적색과 청색의 혼합광(2:1비율 RB), 백색광(W)으로 처리하였다. 실험에 사용한 LED 광원의 광파장 스펙트럼은 적색광(R)이 630-660nm, 청색광이 440nm, 흰색광(W)이 450-540nm 그리고 원적색광이 740nm에서 각각 최대 피크를 보였다 (Fig. 1).

## 3. 조사항목 및 측정항목

정식 후 시금치 생육을 비교하기 위하여 정식 후 일주일 간격으로 가장 긴 엽장, 가장 넓은 엽폭, 엽수, 엽병, 엽형지수(엽장과 엽폭 비율), 상편생장지수(leaf epinasty index) 및 엽록소 함량(SPAD-501, MINOLTA, Japan)을 측정하였다. 정식 후 21일째에 광합성 측정기(Model 6400, Li-COR, Lincoln, NE, USA)로  $1500\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  광합성유효광과  $\text{CO}_2$  400ppm 조건에서 수분이용효율(Water Use Efficiency, WUE( $= \mu\text{mol CO}_2 / \text{mmol H}_2\text{O} = \text{net photosynthesis rate } (P_n) / \text{transpiration rate } (E)$ ), 기공전도도(Stomata conductivity, Cond), 세포내 이산화탄소농도(Intercellular carbon dioxide concentration, Ci), 증산율(Transpiration rate, Trmmol), 엽과 대기의 수증기압차(Leaf to air vapor pressure deficit, VpdL)를 측정하였다. 정식 후 25일째에 엽면적측정기(GA-5, KIYA, Japan)를 이용하여 측정하였고, 생체중은 전자저울(HS-4104, Inc. Hansung machine, China)로 조사하였고, 건물중은 건조기(HB-504F-0, Inc. Hanbaek science, Korea)를 이용하여  $65^\circ\text{C}$ 에서 72시간 건조 후 전자저울(HS-4104, Inc. Hansung machine, China)로 측정하였다. 비엽중(specific leaf weight: SLW)은 엽면적당 건물중(mg)으로 표현하였다. 엽형태는 엽장과 엽폭을 측정한 후 엽형지수(엽장/엽폭)로 표현하였다.

상편생장(Epinasty)을 보인 잎의 상편생장지수는  $1-0.5 \times (\text{LD}/\text{LW})$ 로 계산하였는데 LW는 상편생장된 잎을 편평하게 폈을 때 최대 폭이고 LD는 상편생장된 잎 끝이 굽어진 상태에서 잎 두 가장자리 사이의 거리를 말한다(Fukuda, et al., 2008). 상편생장이 발생된 잎 가운데와 가장자리 조직의 세포 길이, 폭 및 세포 면적은 400배율 광학현미경(BX51TE, Olympus, Tokyo, JAPAN)을 이용하여 눈금 하나가  $10\mu\text{m}$ 인 대물 마이크로미터를 사용하여 접안마이크로미터 한 눈금의 수치를 대물마이크로미터 한 눈금의 수치에 대물마이크로미터 눈금수를 곱하고

접안마이크로미터와 겹치는 수로 나누어 계산하여 측정하였다.

## 4. 통계

통계분석은 각 처리 당 3 반복한 평균값으로, 각 처리 간의 통계적 유의성 검정은 SAS(Statistical Analysis System, V.9.4, Cary, NC, USA) 프로그램을 이용하여 분산분석을 하였으며, 유의성 검정은 던컨의 다중범위검정(DMRT, Duncan's multiple range test,  $P \leq 0.05$ )을 사용하여 검증하였다.

## 결 과

정식 7일 후 엽장은 두 품종 모두 적색광(R)과 백색광(W)에서 유의적으로 길었으며 혼합광(RB) 또는 청색광(B)에서 유의적으로 짧았다. 두 품종 중 월드스타는 엽장이 적색광(R)에서 혼합광(RB)보다 35%, 수시로는 18% 길었다. 엽폭은 백색광(W)에서 재배된 월드스타 품종에서 가장 넓게 나타났고 청색광(B)에서 재배된 수시로에서 가장 좁게 나타났으며 다른 광에서 재배된 두 품종은 유의적 차이를 보이지 않았다(Table 1). 엽형지수(엽장/엽폭)는 두 품종 모두 적색광(R)에서 유의적으로 높았고 혼합광(RB)에서 유의적으로 낮았다. 적색광(R)에서 재배된 수시로는 적색광(R)에서 재배된 월드스타보다 엽형지수가 29% 높은 결과를 보였다. 엽병길이는 엽장과 유사한 패턴으로 적색광(R)에서 재배된 월드스타 품종의 엽병이 가장 길었고 두 품종 모두 혼합광(RB)에서 다른 광에 비해 가장 짧았고 두 품종 간 차이는 없었다. 엽수는 광원별 유의차가 있으나 품종 간 큰 유의차는 없었다. 정식 14일 후 엽장은 두 품종 모두 적색광(R)에서 유의적으로 길었으며 적색광(R)에서 재배된 수시로는 적색광(R)에서 재배된 월드스타 보다 약 8.7% 더 긴 것으로 나타났다. 엽장은 혼합광(RB)에서 두 품종 모두 가장 짧았다. 엽형지수는 엽장이 가장 길었던 적색광(R)의 수시로에서 가장 높았다. 수시로의 경우 엽장이 가장 짧았던 혼합광(RB)에서, 월드스타의 경우 혼합광(RB)과 청색광(B)에서 엽형지수가 가장 낮았다. 엽병길이는 적색광(R)에서 재배된 수시로에서 월드스타 보다 1.2배 길었고 혼합광(RB)에서 두 품종 모두 가장 짧았다. 엽수는 청색광(B)과 백색광(W)에서 재배된 월드스타 품종에서 가장 많았고 적색광(R)에서 재배된 수시로 품종에서 가장 낮았다.

정식 21일 후 엽장은 두 품종 모두 적색광(R)에서 유의적으로 길었다. 적색광(R)에서 재배된 수시로 품종 엽장이 적색광(R)에서 재배된 월드스타 품종 엽장보다 약 2.5cm 더 길었고 두 품종 모두 혼합광(RB)에서 가장 짧

발광다이오드 광원에 따른 시금치 생육, 엽 형태형성 및 세포길이 변화

**Table 1.** Leaf length and width and leaf shape index, petiole length, leaf number of *Spinacia oleracea* cv ‘Worldstar’ and ‘Sushiro’ grown for 7 and 14 days after transplanting (DAT) under the LEDs (White, Red and Blue (R+B, ratio 2:1), Blue, and Red LED).

Variety	LED	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf shape index	Petiole length (cm)	Leaf number (ea)
7 DAT						
World star	W	6.72a	1.81a	3.97cd	2.67ab	4.75ab
	RB	4.43c	1.46ab	3.09d	1.66c	5.11ab
	B	5.55abc	1.37ab	3.94cd	2.22bc	5.11ab
	R	6.89a	1.56ab	4.16bc	3.26a	5.33a
Sushiro	W	5.70abc	1.56ab	3.47cd	2.20bc	4.00c
	RB	4.80bc	1.70ab	3.02d	1.65c	4.50bc
	B	4.96bc	0.96b	4.95ab	2.10bc	4.00c
	R	5.90ab	1.20ab	5.91a	2.75ab	4.00c
14 DAT						
World star	W	12.90bc <sup>z</sup>	3.86a	3.52ab	4.94b	8.29a
	RB	10.32e	3.65a	2.91b	3.32c	7.86ab
	B	11.22de	3.76a	2.99b	3.94bc	8.58a
	R	13.75ab	4.03a	3.62ab	5.05ab	7.72ab
Sushiro	W	12.48bcd	3.50a	3.59ab	4.95b	6.80bc
	RB	10.94de	3.72a	3.04b	3.58c	7.20abc
	B	11.96cd	3.26a	3.68ab	4.42bc	7.20abc
	R	14.86a	3.62a	4.23a	6.06a	6.00c

<sup>z</sup>Mean separation within columns by Duncan’s multiple range test at  $P < 0.05$ . \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.001$

**Table 2.** Leaf length and width and leaf shape index, petiole length, leaf number of *Spinacia oleracea* cv ‘Worldstar’ and ‘Sushiro’ grown for 21 and 25 days after transplanting (DAT) under the LEDs (White, Red and Blue (R+B, ratio 2:1), Blue, and Red LED).

Variety	LED	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf shape index	Petiole length (cm)	Leaf number (ea)
21 DAT						
World star	W	18.21cde	6.24a	3.00bc	6.81bc	15.28b
	RB	16.35e	7.21a	2.28c	5.11d	17.86b
	B	17.68de	7.00a	2.55bc	6.88bc	17.14b
	R	21.64b	7.92a	2.79bc	7.08bc	15.86b
Sushiro	W	18.90cd	6.50a	3.14ab	8.06ab	18.60ab
	RB	16.80de	7.50a	2.37bc	5.86cd	23.00a
	B	20.32bc	6.80a	3.09ab	8.56a	12.20ab
	R	24.10a	6.76a	3.78a	8.64a	19.20ab
25 DAT						
World star	W	21.37bc <sup>z</sup>	8.64a	2.54ab	8.89b	22.14ab
	RB	19.66c	9.43a	2.14b	6.20c	26.43a
	B	20.09c	9.09a	2.25b	8.49b	23.43ab
	R	24.25a	9.83a	2.16b	8.72b	23.67ab
Sushiro	W	22.20abc	8.60a	2.60ab	10.06ab	18.60b
	RB	19.60c	10.04a	2.12b	6.40c	23.00ab
	B	23.74ab	9.42a	2.56ab	10.80a	19.20b
	R	24.36a	8.00a	3.10a	9.40ab	19.20b

<sup>z</sup>Mean separation within columns by Duncan’s multiple range test at  $P \leq 0.05$ . \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.001$

왔다(Table 2). 엽폭은 처리별 유의차가 없었다. 엽형지수는 엽장이 가장 길었던 적색광(R)의 수시로에서 가장 높게 나타났고, 모든 광원에서 엽형지수는 수시로 품종이 월드스타 품종에 비해 유의적으로 높았다. 엽병길이는 수시로 품종의 경우 엽장이 길었던 적색광(R)과 청색광(B)에서 가장 길었고 적색광(R)에서 수시로가 월드스타보다 1.2배 길었다. 엽병길이는 광원에 관계없이 수시로 품종이 월드스타 품종보다 유의적으로 더 길었다. 엽수는 혼합광(RB)의 수시로 품종이 가장 많았다. 정식 25일 후 엽장은 두 품종 모두 적색광(R)에서 유의적으로 가장 길었으며 두 품종 모두 혼합광(RB)에서 가장 짧았다. 청색광(B)과 백색광(W)에서는 수시로 품종이 월드스타보다 각각 3.6cm, 0.83cm 유의적으로 길었다. 엽폭은 처리별 유의차가 없었다. 엽형지수(엽장/엽폭)는 적색광(R)의 수시로에서 가장 높았다. 수시로 품종의 경우 혼합광(RB)에서 엽형지수가 가장 낮았고 월드스타는 혼합광(RB), 청색광(B) 및 적색광(R)에서 백색광(W)보다 낮았다. 엽병 길이는 수시로의 경우 청색광(B)과 적색광(R)에서 가장 길었고 두 품종 모두 혼합광(RB)에서 가장 짧았다. 수시로 품종의 경우 혼합광(RB)에서 백색광(W)에 비해 3.66cm, 월드스타는 백색광(W)에 비해 혼합광(RB)에서 2.79cm 짧았다. 엽수는 혼합광(RB)에서 재배된 월드스타가 가장 많아 같은 혼합광(RB)에서 재배된 수시로 보다 12%(3개) 유의적으로 많았다.

정식 25일 후 엽면적은 적색광(R)과 혼합광(RB)에서 재배된 수시로 품종에서 가장 넓었으며 백색광(W)에서 재배된 월드스타에서 가장 작았다(Table 3). 뿌리 길이는 혼합광(RB)에서 재배된 월드스타에서 가장 길었으며 혼합광(RB)에서 재배된 수시로 보다 약 13cm 유의적으로 길었다. 정식 25일 후 지상부 생체중과 건물중은 수시로

의 경우 적색광(R)에서 가장 높았으며 혼합광(RB)이 그 뒤를 이었고 월드스타의 경우, 혼합광(RB)에서 가장 높았다. 적색광(R)의 수시로는 백색광(W)의 수시로 보다 지상부 생체중 건물중 모두 1.72배 높았다. 또한 적색광(R)의 수시로 지상부 생체중과 건물중은 두 번째로 높았던 혼합광(RB)보다 20.95% 높았다. 지하부 생체중과 건물중은 두 품종 모두 혼합광(RB)에서 높았고 월드스타의 경우 청색광(B)에서도 높았다. 수시로 품종의 경우 혼합광(RB)에 이어 적색광(R)에서 높았다. 비엽중은 두 품종 모두 혼합광(RB)에서 가장 높았고 적색광(R)이 그 뒤를 이었다.

정식 21일 후 잎이 굽어지는 상편생장(leaf epinasty)이 두 품종 모두 적색광(R)과 혼합광(RB)에서만 관찰되었고 두 품종 모두 적색광(R)에서 혼합광(RB)보다 유의적으로 상편생장지수가 높았는데 수시로의 경우 12%, 월드스타의 경우 10.58% 높았다(Table 4). 정식 25일 후 상편생장지수는 적색광(R)에서 재배된 수시로 품종에서 가장 높았으며 적색광(R)에서 재배된 월드스타보다 2.6% 유의적으로 높았다.

정식 21일 후 광합성률은 월드스타 품종의 경우 상편생장이 가장 심했던 적색광(R)에서 가장 낮았다(Table 5). 수시로 품종은 혼합광(RB)과 청색광(B)에서 가장 높았다. 수시로 품종은 광합성률이 청색광(B)에서 적색광(R)에 비해 20% 높았고 월드스타 품종은 청색광(B)에서 적색광(R)에 비해 15% 높았다. 기공전도도와 증산율은 두 품종 모두 혼합광(RB)에서 가장 높았고 엽과 대기의 수증기압차는 혼합광(RB)에서 가장 낮았다. 정식 25일 후 광합성률은 적색광(R)에서 재배된 월드스타 품종에서 가장 낮았다. 수시로 품종은 혼합광(RB)과 청색광(B)에서 광합성률이 가장 높았고 청색광(B)에서 기공전도도와

**Table 3.** Leaf area and Root length, fresh and dry weights of *Spinacia oleracea* cv ‘Worldstar’ and ‘Sushiro’ grown for 25 days after transplanting (DAT) under the LEDs (White, Red and Blue (R+B, ratio 2:1), Blue, and Red LED).

Variety	LED	Leaf area (cm <sup>2</sup> )	Root length (cm)	Fresh weights (g/plant)		Dry weights (g/plant)		Specific leaf weight (mg/cm <sup>2</sup> )
				shoot	root	shoot	root	
World star	W	471.8c	44.00ab	30.02d	8.44bc	1.73d	0.363bc	3.66d
	RB	641.7bc	49.67a	45.22bc	12.98a	2.92abc	0.610a	4.55a
	B	612.1bc	38.33ab	39.31cd	12.89a	2.36bcd	0.553ab	3.85bcd
	R	557.1bc	36.67b	36.77cd	8.90bc	2.39bcd	0.447abc	4.36abc
Sushiro	W	572.7bc	39.33ab	38.38cd	8.00c	2.05d	0.347c	3.56d
	RB	723.4ab	36.67b	54.57ab	13.46a	3.19ab	0.550ab	4.41ab
	B	617.3bc	43.33ab	38.33cd	9.00bc	2.29cd	0.433abc	3.71cb
	R	868.2a	36.00b	66.00a	12.33ab	3.53a	0.557ab	4.10abcd
Variety × LED		*	ns	**	*	*	*	ns

<sup>a</sup>Mean separation within columns by Duncan’s multiple range test at  $P < 0.05$ . \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.001$

**Table 4.** Leaf epinasty index (LEI), LD, and LW of *Spinacia oleracea* cv. 'Worldstar' and 'Sushiro' grown for 21, 25 days after transplanting (DAT) under the LEDs (Red and Blue (R+B, ratio 2:1), and Red LED).

Variety	LED	LD <sup>y</sup> (cm)	LW <sup>x</sup> (cm)	LEI <sup>z</sup>
21 days after transplanting				
Worldstar	RB	4.70a	6.98a	0.671b
	R	3.74b	6.97a	0.742a
Sushiro	RB	4.74a	7.00a	0.666b
	R	3.16b	6.43a	0.746a
25 days after transplanting				
Worldstar	RB	4.89a	8.83a	0.719bc
	R	3.87b	8.45a	0.767ab
Sushiro	RB	5.59a	8.91a	0.687c
	R	3.61b	8.05a	0.787a

<sup>z</sup>LEI leaf epinasty index =  $1 - 0.5 \times (LD/LW)$

<sup>y</sup>LD: the distance between the two edges of the leaf at level of the maximum width.

<sup>x</sup>LW: the maximum leaf width when flat.

Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at  $P < 0.05$ . \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.001$

증산율도 가장 높았다. 월드스타 품종은 혼합광(RB), 청색광(B), 백색광(W) 모두에서 유의차 없이 적색광(R)보다 높았으며 혼합광(RB)과 청색광(B)에서 기공전도도와 증산율이 높았다.

잎 가운데(center part) 세포면적을 광학현미경으로 측정한 결과, 수시로로 경우에는 혼합광(RB)에서 세포길이와 폭이 가장 길었고 면적도 가장 컸으며 적색광(R)과 청색광(B)에서 세포길이와 폭이 가장 짧았고, 면적이 가장 작았다. 수시로로 적색광(R) 잎 세포면적이 혼합광(RB)의 잎 세포면적보다 47% 작았다(Table 6). 월드스타 품종의 경우 잎 가운데 세포면적은 혼합광(RB)에서 가장 작아 수시로 품종과 반대의 결과를 보였다. 월드스타는 백색광(W)에서 세포길이와 폭이 가장 길었고, 면적도 가장 커서 혼합광(RB) 보다 약 1.9배 큰 것으로 나타났다.

두 품종 모두 상편생장이 나타난 적색광(R) 처리구에서 잎 가장자리 부위(edge part)의 세포밀도가 가운데 부위(center part)보다 더 낮은 것으로 나타났다(Table 7). 이 세포밀도는 정해진 구획 내에 세포수와 관련이 있어서 상편생장을 보인 잎의 가장자리 세포크기가 큰 것과 관련이 있었다.

**Table 5.** Photosynthetic characteristics of leaves of *Spinacia oleracea* grown for 21 and 25 days after transplanting (DAT) under LEDs (Red and Blue (R+B, ratio 2:1), and Red LED).

Variety	LED	Photo synthesis ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Stomatal conductance ( $\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Internal CO <sub>2</sub> ( $\mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{air}$ )	Transpiration rate ( $\text{mol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Leaf to air vapor pressure deficit ( $\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
21 DAT						
Worldstar	W	5.94a	0.070b	242b	1.24c	1.82a
	RB	5.82ab	0.136ab	308a	1.95abc	1.52c
	B	6.03a	0.100b	280a	1.69bc	1.76ab
	R	5.02b	0.116ab	310a	1.88abc	1.68b
Sushiro	W	5.67ab	0.081b	263b	1.46bc	1.88a
	RB	6.22a	0.184a	322a	2.55a	1.48b
	B	6.33a	0.142ab	303ab	2.23ab	1.67ab
	R	5.50ab	0.138ab	313a	2.23ab	1.71ab
25 DAT						
Worldstar	W	5.70ab	0.054b	209b	1.07b	2.01a
	RB	5.94ab	0.113ab	294a	1.78ab	1.63cd
	B	5.79ab	0.083ab	264ab	1.58ab	1.95ab
	R	5.12b	0.066ab	254ab	1.24b	1.91ab
Sushiro	W	6.20ab	0.088ab	262ab	1.66ab	1.94ab
	RB	6.59a	0.106ab	267ab	1.60ab	1.59d
	B	6.51a	0.126a	289a	2.19a	1.82ab
	R	6.02ab	0.102ab	280a	1.78ab	1.79bc

<sup>z</sup>Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at  $P < 0.05$ . \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.001$

**Table 6.** The area, perimeter, length and width of single cell and cell numbers of leaf blade center part of ‘Worldstar’ and ‘Sushiro’ variety grown for 25 days after transplant under the LEDs (Red and Blue (R+B, ratio 2:1), and Red LED).

Treatment		Width (μm)	Length (μm)	Perimeter (μm)	Area (μm <sup>2</sup> )	Cell density (ea/4000)	
World star	Center part	W	38a	37a	150a	1472a	49c
		RB	28de	27cde	110c	763def	69ab
		B	31c	29c	120c	899d	55c
		R	34bc	32b	132b	1097c	49c
Sushiro	Center part	W	30d	27cd	115c	839de	53c
		RB	36ab	35a	142ab	1281b	38d
		B	26e	24e	101d	641f	66b
		R	26e	25e	103d	669ef	76a

**Table 7.** The area, perimeter, length and width of single cell and cell numbers of leaf blade center and edge parts of ‘Worldstar’ and ‘Sushiro’ variety grown for 25 days after transplant under the red LED

Treatment		Width (μm)	Length (μm)	Perimeter (μm)	Area (μm <sup>2</sup> )	Cell density (ea/4000)
World star	center part	34b	32b	132b	1097b	49b
	edge part	40a	41a	163a	1680a	39c
Sushiro	center part	26c	25c	103c	669c	76a
	edge part	28c	27c	111c	785c	52b

## 고찰

본 실험 결과들로 LED 광원 종류가 시금치 생육 뿐 아니라 엽형에도 영향을 크게 준다는 것을 알 수 있었다. 적색광(R)은 두 품종 모두에서 생육을 크게 향상시키나 정식 14일 이후부터 상편생장이 발생되고 정식 21일 이후부터는 상편생장이 급속도로 진전되어 엽형이 변화되었다. 수시로 품종에서 월드스타 품종보다 상편생장 정도가 더 심하게 나타나 품종 간 차이를 보여주었다. 적색광(R) 뿐 아니라 혼합광(RB)에서도 상편생장이 나타났는데 상편생장지수는 적색광(R)에서 혼합광(RB) 보다 높아 적색광(R)이 상편생장과 관련이 있음을 나타내고 있다. 적색광(R)에서 유도된 엽장과 엽병길이 증가가 혼합광(RB)에서 둔화된 결과를 보여 적색광(R)에 장기간 노출된 식물의 형태형성 변화에 대한 영향을 청색광(B)이 억제하는 것으로 보였다. 이 결과는 적색 LED광이 제라늄 잎의 상편생장을 유도하였고 청색 LED가 그 상편생장을 상쇄시켜 정상적인 잎 성장을 유도한다는 결과를 뒷받침하고 있다(Fukuda et al., 2008). 이 연구에서 식물 형태형성은 광질에 의해 크게 영향을 받는데 적색 LED광이 제라늄 잎 가장자리(Abaxial) 상편생장을 유도하는 것이 관찰되었다. 적색과 청색 LED에서 각각 재배된 제라늄 잎 세포크기를 조사한 결과 청색(B) LED에서 재배된 잎 세포길이가 더 긴 것으로 관찰되었고 적색광(R)에서 상편생장을 보인 잎에 청색광을 조사

하였을 때 상편생장 정도가 감소되었다. 이 결과는 청색광(B)을 적색광(R)에서 자란 잎 가장자리에 조사했을 때 그 부위의 표피세포 길이가 길어지면서 잎 상편생장이 억제된 것이라고 하였다. 즉, 제라늄의 경우, 청색광의 광도가 높은 조건에서 광합성 속도가 증가되고 당함량이 높아져 세포가 신장 되는 것으로 가설하였다. Christopher와 Volkenburgh(1997)는 옥신이 담배 잎 상편생장을 유도하였는데 이 결과는 잎 가장자리 부위의 세포신장이 억제되거나 잎 가운데 세포신장이 증가된 것과 관련이 있다고 하였는데 Fukuda et al. (2008) 연구에서도 적색광(R)에서 나타난 상편생장과 세포 신장에 관여하는 옥신 호르몬과의 연관성에 대해서 제시하였고 적색광(R)에서 잎 가장자리 표피세포 신장이 억제된 결과로 상편생장이 나타났고 청색광에서 세포가 신장되어 상편생장을 감소시킨다고 하였다. 하지만, Kozuka et al. (2005)는 식물체 잎 가장자리 세포가 청색광(B)이 아닌 적색광(R)에서 신장되었고 세포신장은 sucrose 농도와 비례적이라고 하였다. 본 연구에서는 상편생장이 나타난 적색광(R)에서 잎 가장자리 세포밀도가 잎 가운데 보다 낮은 결과를 보여 앞서 보고된 연구결과들에서 제시한 상편생장과 잎 가운데와 가장자리 부위의 세포크기 차이 연관성을 뒷받침하고 있다. 앞에 언급된 가설을 바탕으로 본 연구에서 관찰된 상편생장에 대해 고찰해보면, 적색광(R)은 광합성 유효광 중 효율이 높은 파장으로 잎 가운데 세포 내 세포분열 에너지원인 탄소함량을 높여 세

포밀도가 증가되고 잎 가장자리는 굴광성과 관련 있는 옥신 함량 증가로 세포 신장이 일어나 세포크기가 커지면서 세포밀도가 낮아져 상편생장이 일어난 것으로 보인다.

본 연구에서 정식 후 25일째에 적색광(R)에서 재배된 시금치 지상부 생체중 및 건물중이 가장 높았던 이유는 정식 후 7일 부터 21일까지 다른 광원에서 보다 생육이 훨씬 빠르게 진행되었고 상편생장이 나타나는 21일에서 25일 사이에만 생장과 광합성율이 미비했기 때문이다. 적색광(R)의 작물생육 증가 효과는 많이 보고되고 있지만(Johkan et al., 2010; Son et al., 2012), 본 연구에서는 식물공장에서 적색광(R)으로 정식 후 21일 이상 재배 할 경우 시금치 상품성을 낮추는 것으로 나타났다. 하지만 청색광(B)이 적색광(R)에서 발생하는 상편생장을 완화시켜주는 역할을 하는 것으로 판단되어 두 광원의 적절한 혼합비율 규명이 필요한 것으로 보인다. 또한 상편생장이 나타나지 않은 청색광(B) 또는 백색광(W) 광도를 조정하여 적절한 품종을 재배하면 식물공장에서 시금치 고품질 생산이 가능 할 것으로는 판단된다.

## 적 요

본 실험은 LED 광원이 시금치 품종 별 생육, 잎 형태 변화 및 세포 길이에 대한 영향을 구명하고자 수행하였다. 최아된 시금치(*Spinacia oleracea*) 품종 ‘월드스타’와 ‘수시로’를 버미컬라이트에 육묘한 후 NFT 시스템에 정식 한 뒤 LED 적색광(R), 청색광(B), 혼합광(적색:청색=2:1)(RB) 및 백색광(W)에서  $130\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  PPFD 광도로 25일간 재배하였다. 정식 후 일주일 간격으로 25일 동안 엽장, 엽폭, 엽병, 엽수, 광합성률을 측정하였고, 상편생장지수(leaf epinasty index, LEI)는 잎이 최대로 전개된 후에 측정하였다. 상편생장이 발생한 잎 가운데와 가장자리를 자른 조직의 세포길이, 폭 및 세포면적은 400배율 광학현미경을 이용하여 측정하였다. 정식 후 25일째에는 엽면적, 뿌리길이, 지상부 및 지하부의 생체중, 건물중을 조사하였다. 지상부 생체중과 건물중, 엽수, 엽면적 모두 월드스타 품종이 수시로 품종에 비해 유의적으로 높았다. 건물중은 월드스타 품종의 경우 혼합광(RB)와 적색광(R) 두 처리구에서 청색광(B)와 흰색광(W) 두 처리보다 약 35% 유의적으로 높았다. 수시로 품종의 경우 혼합광(RB) 처리구에서 지상부 건물중이 가장 높아 건물중이 가장 낮았던 흰색광(W) 처리구에 비해 40% 높은 건물중 결과를 보였다. 두 품종 모두 혼합광(RB)와 적색광(R) 두 처리구에서만 정식 21일 이후 잎 상편생장(leaf epinasty)이 나타났고 적색광(R) 처리구에서 혼합광(RB) 처리구 보다 유의적으로 높아 잎 상편

생장은 적색광(R)과 관련이 있는 것을 알 수 있었다. 잎 가운데와 가장자리 부위 세포크기를 현미경으로 관찰한 결과 두 품종 모두 상편생장이 나타난 적색광(R) 처리구의 잎 가장자리 세포밀도가 잎 가운데 보다 낮은 것으로 나타나 앞서 보고된 연구결과들에서 제시한 상편생장과 잎 가운데와 가장자리 부위의 세포크기 차이 연관성을 뒷받침하고 있다. 또한 청색광(B)이 적색광(R)에서 발생하는 상편생장을 완화시켜주는 역할을 하는 것으로 보여 앞으로 두 광원의 적절한 혼합비율 규명이 필요한 것으로 판단된다. 또한, 엽형 변화가 심했던 수시로 품종보다는 월드스타 품종이 LED 광원을 이용한 식물공장 재배에 더 적합한 것으로 판단된다.

**추가 주제어:** 광형태형성 반응, 상편생장지수, 광합성율, 비엽중

## 사 사

이 연구는 2017년도 방송통신대학교 학술연구비 지원으로 수행되었음.

## Literature Cited

- Barnes, C. and B. Bugbee. 1991. Morphological responses of wheat to changes in phytochrome photoequilibrium. *Plant Physiol* 97:359-65.
- Carvalho, R.F., M. Takaki, and R.A. Azevedo. 2011. Plant pigments: The many face of light perception. *Acta Physiol. Plant* 33:241-248.
- Christopher, P., Volkenburgh, E.V., 1997. Auxin-induced epinasty of tobacco leaf tissues, a nonethylene-mediated response. *Plant Physiol.* 113, 603-610.
- Fukuda, N., M. Fujita, Y. Ohta, S. Sase, S. Nishimura, and H. Ezura. 2008. Directional blue light irradiation triggers epidermal cell elongation of abaxial side resulting in inhibition of leaf epinasty in geranium under red light condition. *Sci. Hortic.* 115:176-182.
- 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. Expt. Bot.* 48:1407-1413.
- 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. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.* 18(4): 15-21.
- Hogewoning, S.W., G. Trouwborst, H. Maljaars, H. Poorter, W. vanLeperen, and J. Harbinson. 2010. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *J. Expt. Bot.* 61:3107-3117.



- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hashida, and T. Yoshigara. 2012. Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environ. Expt. Bot.* 75:128-133.
- Kendrick R.E., G.H.M. Kronenberg. 1994. *Photomorphogenesis in plants*. 2nd ed. Kjuwer Academic Publishers, Netherlands.
- Kozuka T., G. Horiguchi, G. Kim, M. Ohgishi, T. Sakai, and H. Tsukaya. 2005. The different growth responses of the *Arabidopsis thaliana* leaf blade and the petiole during shade avoidance are regulated by photoreceptors and sugar. *Plant Cell Physiol.*, 46: 213-223.
- 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.
- 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. Control* 19:351-359.
- MAFRA. 2016. *Agriculture, The major statistics in agriculture, food and rural affairs*. Sejong, South Korea. p. 28 (in Korean).
- Park, H., Y.J. Yu, and E.Y. Choi. 2017. Effects of fluorescent light and light-emitting diodes on Leaf morphology, growth and antioxidant capacity of *Salvia plebeia*. *Protec. Hort. Plant Fact.* 26:208-214.
- Seo, T.C., Y.C. Kim, J.W. Lee, H.K. Yun, and K.Y. Kim. 2002. The effect of dissolved oxygen concentration on the growth and nutrient uptake of spinach and lettuce grown hydroponically in summer season. *J. Kor. Soc. Hort. Sci.* 43(4):421-424 (in Korean).
- Sullivan, J.A. and X.W. Deng. 2003. From seed to seed: The role of photoreceptors in Arabidopsis development. *Dev. Biol.* 260:289-297.
- Savvides, A., D. Fanourakis, and W. van Leperen. 2012. Coordination of hydraulic and stomatal conductances across light qualities in cucumber leaves. *J. Expt. 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. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 30:664-672.
- Wang, H., M. Gu, J. Cui, K. Shi, T. Zhou, and J. Yu. 2009. Effects of light quality on CO<sub>2</sub> assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus*. *J. Photochem. Photobiol. B.* 96:30-37.
- Yun, H.K., I.S. Kim, and K.C. Yoo. 1997. Effect of substrates growth and nutrient absorption character of shanghai pak choi, garland chrysanthemum and spinach in sandponics. *Kor. J. Hort. Sci.* 15(1):209-210 (in Korean).