

식물공장시스템의 발광다이오드와 UVA 광원 하에서 자란 시금치 생육 및 아스코르브산 함량

박상민¹ · 조은경¹ · 안진희¹ · 윤범희¹ · 최기영² · 최은영^{1*}

¹한국방송통신대학교 농학과, ²강원대학교 시설농업과

Plant Growth and Ascorbic Acid Content of *Spinacia oleracea* Grown under Different Light-emitting Diodes and Ultraviolet Radiation Light of Plant Factory System

Sangmin Park¹, Eunkyung Cho¹, Jinhee An¹, Beomhee Yoon¹, Kiyoung Choi², and Eunyong Choi^{1*}

¹Dept. of Agricultural Science, Korea National Open University, Seoul 110-791, Korea

²Dept. of Controlled Agriculture, Kangwon National University, 1 Kangwondae-gil, Chuncheon, Gangwon-do 24341, Korea

Abstract : The study aimed to determine effects of light emitting diode (LED) and the ultraviolet radiation (UVA) light of plant factory on plant growth and ascorbic acid content of spinach (*Spinacia oleracea* cv. Shusiro). Plants were grown in a NFT (Nutrient Film Technique) system for 28 days after transplanting with fluorescent light (FL, control), LEDs and UVA (Blue+UVA (BUV), Red and Blue (R:B(2:1)) + UVA (RBUV), Red+UVA (RUV), White LED (W), Red and Blue (R:B(2:1)), Blue (B), Red (R)) under the same light intensity ($130 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) and photoperiod (16/8h = day/night). All the light sources containing the R (R, RB, RUV, and RBUV) showed leaf epinasty symptom at 21 days after transplanting (DAT). Under the RUV treatment, the lengths of leaf and leaf petiole were significantly reduced and the leaf width was increased, lowering the leaf shape index, compared to the R treatment. Under the BUV, however, the lengths of leaf and leaf petiole were increased significantly, and the leaf number was increased compared to B. Under the RBUV treatment, the leaf length was significantly shorter than other treatments, while no significant difference between the RBUV and RB for the fresh and dry weights and leaf area. Dry weights at 28 days after transplanting were significantly higher in the R, RUV and BUV treatments than those in the W and FL. The leaf area was significantly higher under the BUV treatment. The ascorbic acid content of the 28 day-old spinach under the B was significantly higher, followed by the BUV, and significantly lower in FL and R. All the integrated data suggest that the BUV light seems to be the most suitable for growth and quality of hydroponically grown spinach in a plant factory.

Additional key words: leaf epinasty index, leaf shape index, specific leaf weight

서 론

발광다이오드(LED, light-emitting diode)는 형광등에 비해 수명이 길고, 전력소모량이 적어 시설내 공조비용 절감효과가 높고(Bula 등, 1991; Tennessen 등, 1994; Heo 등, 2002; Morrow, 2008) 열 발생이 적어 식물체에 근접 조명이 가능하다(Kozai, 2007). 특히 식물체 내 유용 물질이나 색소 합성 조절 등의 기능을 수행할 수 있다는 장점이 있다(Caldwell과 Britz, 2006; Heo 등,

2010). 적색광은 여러 작물들에서 초장, 근장, 생체중, 엽면적 등의 생장에 효과적이고(Johkan 등, 2010; Nishimura 등, 2007, 2009; Nishioka 등, 2008), 콩 모종에서 엽면적, 베타 카로틴 및 항산화도를 증가시키는 것으로 보고되었다(Wu 등, 2007). 청색광은 상추 지하부 및 잎 두께(Johkan 등, 2010), 오이잎의 루비스코(rubisco) 활성, 자당 및 전분 함량(Wang 등, 2009), 질소 및 엽록소 함량과 기공전도도(Hogewoning 등, 2010; Savvides 등, 2012)를 증진시키는 것으로 보고되었다. 또한 청색광은 제라늄 모종 초장을 억제시키는데(Appelgren, 1991) 이는 크립토크롬 색소와 관계가 있다고 하였다(Zhao 등, 2007). 이러한 특정 파장대의 광을 흡수하는 광 수용체는 피토크롬(적색광 및 원적색광 파장 흡수), 크립토크롬

*Corresponding author: ch0097@knou.ac.kr

Received September 20, 2018; Revised December 3, 2018;

Accepted December 11, 2018

및 포토트로핀(청색광 및 근자외선 [UVA] 파장 흡수)이 있다고 알려져 있으며, 이들은 각 파장 자극을 인식하고 광 신호전달 기작에 의해서 개화, 굴광성, 기공 개폐 및 안토시아닌 합성 등에 영향을 주게 되는데, 이런 현상을 광형태형성(photomorphogenesis) 반응이라고 한다(Carvalho 등, 2011; Sullivan과 Deng, 2003). 자외선(Ultraviolet radiation)은 파장에 따라 UVA(315-380nm), UVB (280-315nm), 및 UVC(100-280nm) 영역으로 구분되는데 UVC는 오존층에 의해 차단되어 지표면에 도달하는 자외선 95%가 UVA다(Kim과 Lee, 2016). 많은 선행 연구결과에서 UVA광을 부가적으로 조사하였을 때 엽채류의 엽록소, 안토시아닌 및 아스코르브산 함량이 증가되는 것으로 보고되었다(Basahi 등, 2014; Kim과 Lee, 2016; Lee와 Kim, 2014; Li와 Kubota, 2009; Tsormpatsidis 등, 2008).

시금치는 카로틴과 섬유소가 풍부하여 변비에 효능이 뛰어나고 엽록소가 다량 함유되어 항암 효과 및 동맥경화를 예방하는 대표적인 알칼리성 채소로 알려져 있다(Maeda 등, 2005). 질병관리본부의 국민건강영양조사 결과에 의하면 시금치의 주요 영양소 급원 순위는 식이섬유, 칼륨, 리보플라빈은 21위, 비타민 A는 11위, 비타민 C는 9위로 사과, 감, 배추김치, 오렌지, 딸기, 참외, 무, 고구마 다음으로 비타민 C의 주요 급원이다(KNHNES, 2017). 비타민 C함량은 채소 생장 조건에 따라 다를 수 있다고 하였다(Kim 등, 2010). 시금치는 신선한 상태로 섭취하므로 무엇보다도 위생적이고 청결해야 하므로 무공해, 청정 신선채소를 선호하는 소비자의 요구와 부합되기 위해 환경 친화형 수경재배 시스템으로 재배하는 것이 필요하다. 시금치의 수경재배에 대한 기존 연구는 수경재배에 의한 고랭지 시금치의 여름철 안정생산 기술 개발(Lee 등, 2011) 등이 있다. 본 연구는 LED 및 UVA 광원에 의한 시금치 식물공장 재배에서 시금치 생육 및 아스코르브산 함량에 대해 구명하고자 하였다.

재료 및 방법

식물재배 및 재배환경

본 실험은 식물공장장에서 2016년 12월 14일부터 2017년 2월 5일까지 3회 반복 수행되었다. 동양계 시금치 수시로 품종(*Spinaci oleracea* cv. Sushiro)(Asia Seed Co., Ltd. Seoul, Korea) 종자를 Ethanol(에탄올) 70% 용액, NaOCl(차아염소산나트륨) 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±2°C)에서 최아 시킨 후 버미클라이트가 충전된 72구 육묘용 트레이에 이식하였다. 이식 후 식물공장의 형

광등(150μmol·m⁻²·s⁻¹)(FL 20SD, City Lighting Co. Ltd. Incheon, Korea)이 설치된 재배벤치(온도 20°C, 습도 60%)에서 10일간 육묘하였다. 정식은 본엽 2~3매 나왔을 때 NFT 수경재배기(45cm(L)×32cm(W)×23cm(H))에 EC 1.0dS·m⁻¹, pH 6.0로 조정된 코넬대시금치배양액(N-P-K-Ca-Mg-S = 8.9-1.0-5.5-2.1-1.0-0me·L⁻¹, Fe-EDTA 3.0, H₃BO₃ 0.5, MnSO₄·H₂O 0.05, ZnSO₄·7H₂O 0.05, CuSO₄·5H₂O 0.02, Na₂MoO₄·2H₂O 0.01 mg·L⁻¹) 13L를 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., IL, USA)로 30분 간격으로 저장하였다. 온도는 명기에 22±2°C, 암기에 18±2°C로, 상대습도는 60±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 잎 표면에서의 평균 광합성유효광량(photosynthetic photon flux density, PPF)을 광합성유효광(PAR) 미터기(3415FSE, Spectrum Technologies Inc., IL, USA)을 이용하여 130μmol·m⁻²·s⁻¹으로 고정하였고, UVA 측정기(SKU420, SKYE, Powys, UK)로 평균 광 조사강도는 70mW·m⁻²로 조정하였다.

실험처리

실험처리는 형광등(FL 20SD, City Lighting Co. Ltd. Incheon, Korea)을 대조구로 하여 LED 칩(ZVAS-02-03000, SungHyun HighTech, Co. Ltd., Kyunggido, Korea)의 개수 비율을 조합하여 적색광(R), 청색광(B), 적색과 청색의 혼합광(2:1비율)(R:B), 백색광(W), 적색광+UVA(RUV), 청색

Table 1. Abbreviations for treatments with light sources used in this study.

Abbreviations for treatments	Lighting sources
FL (control)	White fluorescent lamp
BUV	Blue LED + UVA
RBUV	Red:Blue LED (2:1) + UVA
RUV	Red LED + UVA
W	White LED
RB	Red:Blue LED (2:1)
B	Blue LED
R	Red LED

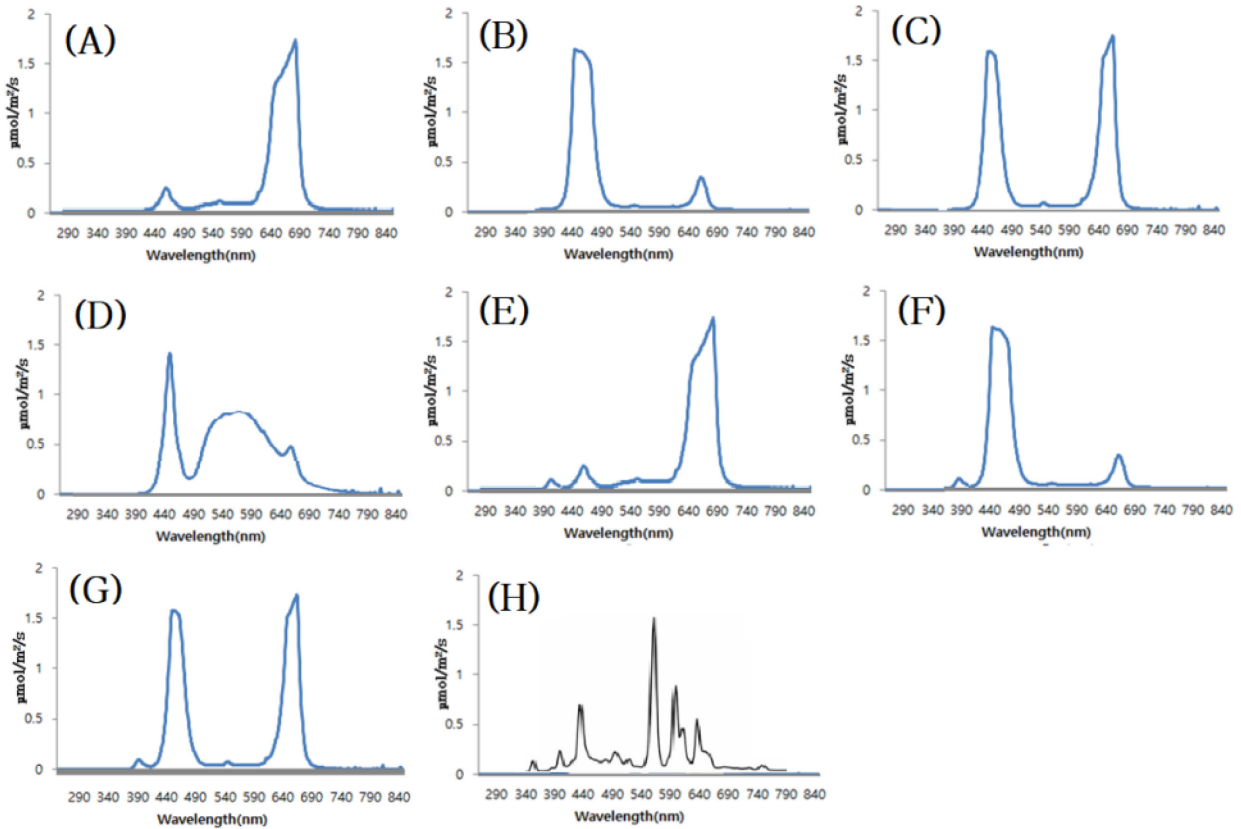


Fig. 1. Spectral characteristics of (A) red LED, (B) blue LED, (C) red:blue (2:1), (D) white LED, (E) red LED + UVA, (F) blue LED + UVA, (G) red:blue (2:1) + UVA, (H) white fluorescent lamp (FL).

광+UVA(BUV), R:B(2:1)+UVA(RBUV) 총 8 종류로 제작하여 광 조사 처리 하였다(Table 1). 실험에 사용된 UVA(SungHyun HighTech, Co. Ltd., Kyunggido, Korea)는 380~400nm 파장대를 포함하는 광을 사용하였다. 광 스펙트럼 분포는 휴대형 분광 복사계(BLACK-Comet C-50, Stellarnet.Inc. FL, USA)로 식물재배 위치에서 측정하여 광 스펙트럼의 강도로 표현하였다(Fig. 1)

조사 및 측정항목

생육조사는 정식 후 7, 14, 21, 28일에 엽장, 엽폭, 엽병, 엽수, 엽면적, 뿌리길이, 지상부 및 지하부의 생체중, 건물중을 조사하였다. 엽면적은 간이 엽면적측정기(GA-5, Leaf area meter, Kiya Seisakusho, Japan)를 이용하여 측정하였다. 지상부와 지하부로 구분된 시금치의 생체중과 건물중은 전자저울(HS-4104, Hansung machine Inc, China)로 측정하였다. 건물중은 65°C 온도로 설정된 항온건조기 (HB-504F-O, Hanback Science Inc, Korea)에서 72시간 건조시킨 후 측정하였다. 상편생장지수(leaf epinasty index)는 재배 중 상편생장(leaf epinasty)을 보인 처리구에 대하여 LW(엽폭)과 LD(수하된 잎 양쪽 선

단사이 거리)를 측정하여 계산하였다(leaf epinasty index = $1 - 0.5 \times (LD/LW)$)(Fukuda, 등, 2008). 비엽중(specific leaf weight, SLW)은 엽면적당 건물중(mg)으로 표현하였다. 엽형태는 엽장과 엽폭을 측정한 후 엽형지수(엽장/엽폭)로 표현하였다.

아스코르브산 함량을 분석하고자 수확 한 시금치 잎 생체중 10g에 10% 메탄인산용액(Daejung Chemical & Metals Co., Siheung, Korea)을 넣고 마쇄기(IKA DI25, Wilmington, NC, USA)를 이용하여 마쇄 하였다(Korea Food and Drug Administration, 2008). 마쇄된 시료를 10% 메탄인산용액으로 50mL를 정용하여 0.45μm의 membrane filter로 여과한 후 HPLC(Ultimate 3000, Thermo Fisher Scientific, Sunnyvale, CA, USA)로 분석하였다. 이때 C-18 column(inno C18 column 4.6*250, 5μm, Innopia, Anyang, Korea)을 사용하였고, UV검출기 파장 264nm, 이동상은 A: 0.05M (NH₄)H₂PO₄, B: MeOH로 분석하였다. 0.8mL·min⁻¹의 유속을 갖는 이동상 A와 B의 gradient는 0-5min에서 각각 100, 0%이었고, 8-13min에서는 각각 20, 80% 이었으며, 15-20min에서는 100, 0%이었다.

통계분석

통계분석은 처리별 시금치 식물체 14개체(주)를 정식 하여 매주 처리별 대표적 3개체씩 측정하였으며, 아스코 르브산 함량은 처리별 대표적 3개체에서 각각 생체중 10g씩 취하여 측정하였다. 각 처리 간 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 후 7일째 엽폭 및 엽수는 처리 간 유의차가 크 지 않았으나 엽장은 R 처리구에서 가장 길었고 RBUV

와 RB에서 유의적으로 가장 짧았다(Table 2). 엽장은 R 처리구에서 대조구인 형광등(FL)에 비해 약 48.9% 증가 되었고 RBUV와 RB 처리구는 각각 9.1, 12.33% 감소 되었다. 엽병길이는 R 처리구에서 다른 모든 처리구보다 가장 길었고 이는 FL 처리구에 비해 약 2배(88%) 긴 것으로 나타났다. 따라서 엽장을 엽폭으로 나눈 엽형지 수(leaf shape index)는 R 처리구에서 FL 처리구보다 73% 높았다. 정식 후 14일 째 측정된 엽장도 R 처리구 에서 다른 처리구에 비해 길었고 그 다음으로 RUV 처 리구에서 가장 길었다. RBUV, RB와 B 처리구에서 엽 장이 다른 처리에 비해 유의적으로 짧았다(Table 3). 엽 수는 RUV, BUV에서 다른 처리구에 비해 유의적으로 많 았다. 또한 RUV와 BUV 처리구가 R과 B 단독광 처리구 에 비해 각각 1개씩의 엽수가 증가되었다. 엽병길이는 R

Table 2. Leaf length and width, leaf number, and petiole length of *Spinacia oleracea* cv. Sushiro grown for 7 days after transplanting (DAT) under the different light-emitting diodes (LED) and ultraviolet radiation (UVA) light in plant factory system.

Light source ^y	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf shape index	Number of leaves	Petiole length (cm)
FL	4.38bc ^z	1.28a	3.46b	4.40a	1.56b
BUV	4.26bc	1.00ab	4.57ab	4.00ab	1.76b
RBUV	3.98c	0.74b	5.45ab	4.00ab	1.82b
RUV	4.98b	1.34a	3.99ab	4.40a	2.02b
W	4.52bc	1.16a	4.19ab	3.80ab	1.62b
RB	3.84c	1.02ab	3.95ab	4.20a	1.54b
B	4.10bc	0.80b	5.39ab	3.40b	1.54b
R	6.52a	1.20a	6.00a	4.00ab	2.94a

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

^yRefer to Table 1.

Table 3. Leaf length and width, leaf number, and petiole length of *Spinacia oleracea* cv. Sushiro grown for 14 days after transplanting (DAT) under the different light-emitting diodes (LED) and ultraviolet radiation (UVA) light in plant factory system.

Light Source ^w	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf shape index	Number of leaves	Petiole length (cm)	Leaf epinasty index ^y	Leaf epinasty (%) ^x
FL	9.30bcd ^z	3.16ab	3.08c	6.80ab	3.50bc	-	-
BUV	10.46bc	2.92abc	3.61bc	7.20a	4.34b	-	-
RBUV	8.12d	2.68bc	3.07c	6.20ab	2.80c	0.700b	20
RUV	11.32b	3.50a	3.23c	7.40a	3.62bc	0.864a	100
W	9.76bcd	2.26c	4.37b	5.60b	3.80bc	-	-
RB	8.54cd	2.50bc	3.51bc	6.40ab	3.20bc	-	-
B	7.82d	2.65bc	3.06c	6.00ab	2.62c	-	-
R	14.26a	2.62bc	5.54a	6.80ab	6.82a	0.880a	80

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

^yLeaf epinasty index = $1 - 0.5 \times (LD(\text{the distance between the two edges of the leaf at level of the maximum width})/LW(\text{the maximum leaf width when flat}))$

^xLeaf epinasty percentage of leaver showing epinasty out of total 5 leaves.

^wRefer to Table 1.

Table 4. Leaf length and width, leaf number, and petiole length of *Spinacia oleracea* cv. Sushiro grown for 21 days after transplanting (DAT) under the different light-emitting diodes and ultraviolet radiation (UVA) light in plant factory system.

Light Source ^w	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf shape index	Number of leaves	Petiole length (cm)	Leaf epinasty index ^y	Leaf epinasty (%) ^x
FL	12.82cd ^z	4.04ab	3.40abc	8.40ab	4.60cd	0.850c	100
BUV	16.46ab	4.90ab	3.34abc	10.40a	6.96ab	-	-
RBUV	11.24d	4.58ab	2.56c	9.00ab	3.56d	0.943ab	100
RUV	15.26bc	5.26a	2.92bc	9.80ab	4.52cd	0.967a	100
W	14.30bcd	3.62b	4.00ab	7.20b	5.44bc	0.7667d	60
RB	13.10cd	4.06ab	3.27bc	10.80a	4.50cd	0.882bc	80
B	12.60cd	4.30ab	3.22bc	8.40ab	5.10cd	-	-
R	18.80a	4.34ab	4.41a	9.00ab	8.16a	0.973a	100

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

^yLeaf epinasty index = $1 - 0.5 \times (\text{LD}(\text{the distance between the two edges of the leaf at level of the maximum width}) / \text{LW}(\text{the maximum leaf width when flat}))$

^xLeaf epinasty percentage of leaver showing epinasty out of total 5 leaves.

^wRefer to Table 1.

Table 5. Leaf length and width, leaf number, and petiole length of *Spinacia oleracea* cv. Sushiro grown for 28 days after transplanting (DAT) under the different light-emitting diodes (LED) and ultraviolet radiation (UVA) light in plant factory system.

Light Source ^w	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf shape index	Number of leaves	Petiole length (cm)	Leaf epinasty index ^y	Leaf epinasty (%) ^x
FL	16.22bc ^z	5.32a	3.18b	16.20b	5.96b	0.900b	100
BUV	20.34ab	6.90a	3.09b	23.40a	9.72a	-	-
RBUV	14.56c	6.06a	2.48b	18.00ab	5.42b	0.946ab	100
RUV	19.66ab	7.84a	2.53b	20.00ab	6.12b	0.993ab	100
W	17.18bc	6.20a	3.06b	15.40b	6.66b	0.900b	20
RB	16.56bc	6.00a	2.84b	20.40ab	6.72b	0.957ab	100
B	16.70bc	6.73a	2.53b	15.75b	6.55b	-	-
R	21.76a	5.52a	4.56a	19.80ab	9.28a	1.000a	100

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

^yLeaf epinasty index = $1 - 0.5 \times (\text{LD}(\text{the distance between the two edges of the leaf at level of the maximum width}) / \text{LW}(\text{the maximum leaf width when flat}))$

^xLeaf epinasty percentage of leaver showing epinasty out of total 5 leaves.

^wRefer to Table 1.

처리구에서 대조구 형광등(FL)에 비해 2배 길었고, 그 다음으로 BUV 처리구에서 길었다. 또한 RBUV와 B 처리구에서 유의적으로 가장 짧았다. 정식 후 21일 째에 측정된 엽장도 R 처리구에서 다른 처리구에 비해 길었고, 그 다음으로 BUV와 RUV 처리구가 뒤를 이었다. 또한 RBUV, RB와 B에서 엽장이 다른 처리에 비해 유의적으로 짧았다(Table 4). 엽수는 BUV 처리구에서 다른 처리구에 비해 유의적으로 많았고 B보다 BUV 처리구에서 엽수가 2개 더 많았다. 또한 다른 처리구에 비해 FL, W, B 처리구에서 엽수가 유의적으로 적었다. 엽병길이는 R에서 유의적으로 가장 길었고 그 다음으로 BUV에서 길었으며, RBUV에서 유의적으로 가장 짧았다. 정식

후 28일째에 엽장은 R 처리구에서 유의적으로 가장 길었고 엽형지수도 가장 높았다. RBUV 처리구에서 엽장이 가장 짧았다. 엽수는 BUV 처리구에서 가장 많아 B 처리구에 비해 BUV의 엽수가 8개 더 많았다. 엽병은 BUV와 R 처리구에서 가장 길었다(Table 5). 정식 후 28일 째에 측정된 지상부 생체중 및 건물중은 R, RUV 및 BUV 처리구에서 유의적으로 가장 높았고 W와 FL 처리구에서 유의적으로 낮았다(Table 6). R, RUV 및 BUV 처리구에서 지상부 건물중은 FL에서 재배된 시금치보다 약 2.0배 높았다. 지하부 생체중은 BUV 처리구에서 유의적으로 가장 높았고 다음으로 R에서 높았다. 지하부 생체중은 BUV처리구에서 FL에 비해 약 2배 중

Table 6. Fresh and dry weights(wt.) of shoot and root, leaf area, specific leaf weight and leaf epinasty index of *Spinacia oleracea* grown for 28 days after transplanting (DAT) under the different light-emitting diodes (LED) and ultraviolet radiation (UVA) light in plant factory system.

Light Source ^y	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)		Leaf area (cm ²)	Specific leaf weight (mg/cm ²)
	Shoot (g)	Root (g)	Shoot (g)	Root (g)		
FL	13.39bc ^z	4.58bc	0.93b	0.22a	232b	4.15ab
BUV	25.85a	9.28a	1.85a	0.43a	572a	3.37b
RBUV	19.99abc	6.36abc	1.41ab	0.31a	353b	3.95ab
RUV	24.21ab	7.77abc	1.91a	0.41a	357b	5.49a
W	11.77c	3.98c	0.81b	0.20a	216b	3.77ab
RB	21.16abc	6.74abc	1.60ab	0.33a	355b	4.53ab
B	18.64abc	6.60abc	1.39ab	0.34a	339b	4.16ab
R	28.06a	8.21ab	1.91a	0.38a	403ab	4.75ab

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

^yRefer to Table 1.

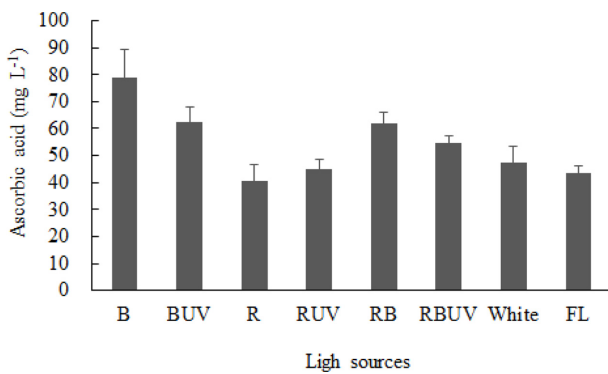


Fig. 2. Ascorbic acid concentration in leaf of *Spinacia oleracea* cv. Sushiro grown for 28 days after transplanting (DAT) under the different light-emitting diodes (LED) and ultraviolet radiation (UVA) light in plant factory system. The data indicate the means \pm S.E. (n = 3). Refer to Table 1.

가되었다. 엽면적은 BUV 처리구에서 유의적으로 가장 높았고 다음으로 R에서 높았다. 정식 28일째 수확된 시금치의 아스코르브산 함량은 B 처리구에서 유의적으로 가장 높았고 그 다음으로 BUV에서 높았으며 대조구인 FL과 R 처리구에서 유의적으로 낮았다(Fig. 2). 아스코르브산 평균 함량은 B 처리구에서 BUV 처리구 보다 약 16mg·L⁻¹ 높았고 R과 RUV 처리구는 유의차가 없었다.

고 찰

본 연구결과에서 R이 포함된 모든 광원은 시금치 엽장을 길게 유도하는 것으로 나타났는데 본 연구팀의 선행 연구에서도 같은 결과를 얻었다(Lee 등, 2018). 홍미

롭게도 R 처리구에 비해 RUV 처리구에서 엽장은 20.6% 감소되어 엽형지수가 41.7% 유의적으로 낮아지고 엽수는 더 많았는데 이는 UVA 광원이 R 처리로 유도된 비정상적인 엽장길이를 감소시키고 엽수는 증가시켜 품질을 향상시키는 것으로 보인다. Khoshimkhujav 등 (2014)에 의하면 R 처리구 보다 R과 UVA 혼합 처리구에서 토마토 모종 줄기(hypocotyl + internodes) 길이가 현저히 감소되었다고 보고하여 UVA가 B와 유사하게 식물생장에 작용한 것으로 보인다(Ohashi-Kaneko 등, 2006). 또한, 본 실험에서 RBUV 처리구의 엽장이 다른 처리구보다 가장 짧아 UVA와 B가 엽장을 감소시키는데 상승적 효과를 준 것으로 보인다. BUV 처리구에서 B 처리구보다 엽수가 많아져 엽면적이 유의적으로 높았는데 이는 UVA의 부가 조사로 인하여 상추의 엽면적이 감소한 연구 결과와(Kim과 Lee, 2016) 상반된다. 또한 RBUV 처리구에서 RB 처리구와 비교하여 생체중, 건물중 및 엽면적 유의차가 없어 역시 UVA에 의한 엽면적 감소 결과와는 상반된다. 또한, 아스코르브산 함량이 B 처리구에서 BUV 처리구 보다 유의적으로 높았는데 Kim과 Lee(2016)에 의하면 BUV 처리구에서 B 처리구에 비해서 1.1-1.3배 높았다고 하여 상반된다. 이는 청색광과 UVA의 광수용체로서 작용하는 크립토크롬(cryptochrome)이 작물 종류에 따라 생육 뿐 아니라 기능성 물질 함량 축적에도 다르게 작용할 수 있다는 것을 나타낸다. 본 연구팀이 실시한 광원 종류에 따른 다채의 안토시아닌 함량 구명 실험에서도 안토시아닌 함량이 B 처리구에서 BUV 처리구보다 유의적으로 높았다(논문 미제출). 본 실험에서 사용된 UVA 조사광도가 70mW·m⁻² 이었고 Kim과 Lee(2016) 연구에서는 80mW·m⁻²로 약간 차이가 있는데 UVA 효율

이 가시광선 LED에 비해 매우 낮아 조사강도 차이로 인해 효과가 다르게 나타났을 수 있다고 보인다. 따라서 UVA의 부가적 조사를 위해서는 작물 종류 별 적정 조사강도와 효율에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 R이 포함된 모든 처리구에서 정식 21일 부터 시금치 잎의 상편생장(leaf epinasty)이 나타나 상품성이 떨어지는 결과를 얻었는데 이는 제라늄 잎에 R광을 조사하였을 때 잎 가장자리(Abaxial) 상편생장이 유도되었다는 결과와 유사한 결과이다(Fukuda 등, 2008). 저자들은 상편생장 제라늄 잎에 다시 B를 조사하였을 때 정상적인 잎 생장이 유도되어 R과 B에서 각각 재배된 제라늄 잎 세포크기를 조사한 결과 B에서 재배된 잎 세포길이가 더 긴 것으로 관찰되었다. 이 결과는 B를 R에서 자란 잎 가장자리에 조사했을 때 그 부위의 표피 세포 길이가 길어지면서 잎 상편생장이 억제된 것이라고 하였다. 본 연구팀의 선행연구에서는 반대로 R 처리구에서 상편생장을 보인 잎 가장자리(edge part)에서 잎 가운데(center part)보다 세포밀도가 낮고 세포크기가 큰 것으로 나타났다(Lee 등, 2018). 이 결과는 비록 제라늄 잎에서 표피세포 길이가 길어지면서 잎 상편생장이 억제된다는 결과와 상반되지만 상편생장과 잎 가운데와 가장자리 부위의 세포크기 차이 연관성을 뒷받침하고 있다. R은 광합성 유효광 효율이 높은 광으로 잎 가운데 부분에 세포분열 에너지원인 탄소함량을 높여 세포밀도가 증가되고 잎 가장자리는 빛의 반대 방향으로 이동하는 옥신 함량 증가로 세포 신장이 일어나 세포크기가 커져 세포밀도가 낮아짐으로 상편생장이 일어난 것으로 가설을 세워볼 수 있다.

본 실험의 모든 결과를 종합해 보면 생육과 품질적인 측면에서 BUV광이 가장 시금치 식물공장 재배에 적합한 것으로 보인다. 하지만 시금치가 어린잎 채소로 활용될 경우 정식 후 14일에 상편생장을 유도하지 않은 W 또는 FL도 적합한 것으로 판단된다.

적 요

본 연구는 식물공장시스템의 발광다이오드와 UVA 광원에서 자란 시금치 생육 및 아스코르브산 함량을 구명하고자 하였다. 시금치 ‘수시로’ 품종은 정식 후 28일간 NFT 수경시스템에서 형광등(FL)을 대조구로 하여 적색광(R), 청색광(B), 적색과 청색의 혼합광(2:1비율)(R:B), 백색광(W), 적색광+UVA(RUV), 청색광+UVA(BUV), R:B(2:1)+UVA(RBUV) 총 8 종류 광에서 같은 광도($130\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)와 광주기(명/암 = 16/8h)로 재배되었다. R이 들어간 모든 광 처리구(R, RB, RUV, RBUV)에서 정식 21일 부

터 잎 상편생장(leaf epinasty)이 나타났다. RUV 처리구에서 R에 비해 엽장과 엽병은 유의적으로 감소되고 엽폭은 유의적으로 증가되어 엽형지수가 낮은 결과를 보였다. 하지만, BUV 처리구에서 B에 비해 엽장과 엽병의 길이가 유의적으로 증가되었고 엽폭은 유의적 차이가 없었으며 엽수는 유의적으로 많았다. RBUV 처리구에서는 다른 처리구보다 엽장이 가장 짧았으며 RB 처리구와 비교하여 생체중, 건물중 및 엽면적 유의차는 없었다. 정식 후 28일 째에 측정된 지상부 건물중은 R, RUV 및 BUV 처리구에서 유의적으로 높았고 W와 FL에서 유의적으로 낮았다. 엽면적은 BUV 처리구에서 유의적으로 가장 높았다. 정식 28일째에 시금치 아스코르브산 함량은 B 처리구에서 유의적으로 가장 높았고 그 다음으로 BUV에서 높았으며 FL과 R에서 유의적으로 낮았다. 따라서 식물공장에서 시금치 재배 시 생육과 품질적인 측면에서 BUV광이 가장 적합한 것으로 보인다.

추가주요어: 잎상편생장지수, 엽형지수, 비엽중

Literature Cited

- Appelgren, M. 1991. Effects of light quality on stem elongation of pelargonium in vitro. *Sci. Hort.* 45:345-351
- Basahi, J.M., I.M. Ismail, and I.A. Hassan. 2014. Effects of enhanced UV-B radiation and drought stress on photosynthetic performance of lettuce (*Lactuca sativa* L. Romaine) plants. *Annu. Res. Rev. Biol.* 4:1739-1756.
- Bula, R.J., R.C. Morrow, T.W. Tibbitts, D.J. Barta, R.W. Ignatius, and T.S. Martin. 1991. Light-emitting diodes as a radiation sources for plants. *HortSci.* 26:203-205.
- Carvalho, R.F., M. Takaki, and R.A. Azevedo. 2011. Plant pigments: the many face of light perception. *Acta Physiol. Plant.* 33:241-248.
- Caldwell, C.R. and S.J. Britz. 2006. Effect of supplemental ultraviolet radiation on the carotenoid and chlorophyll composition of greenhouse-grown leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars. *J. Food. Com. Anal.* 16:617-644.
- 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.
- Heo, J.W., C.W. Lee, D. Chakrabarty, and K.Y. Paek. 2002. Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a light-emitting diode (LED). *Plant Growth Regulat.* 38:225-230.
- Heo, JW, Lee YB, Kim DE, Chang YS, Chun CH. 2010. Effects of supplementary lighting on growth and biochemical parameters in *Dieffenbachia amoena* ‘Camella’ and *Ficus*

- elastica* 'Melany'. Kor. J. Hortic. Sci. Technol. 28:51-58
- Hogewoning, S.W., G. Trouwborst, H. Maljaars, H. Poorter, W.V. Leperen, 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. Yoshihara. 2010. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. HortSci. 45:1809-1814.
- Khoshimkhujae, B., Kwon, J.K., Park, K.S., Choi, H.G. and S.Y. Lee. 2014. Effect of monochromatic UV-A LED irradiation on the growth of tomato seedlings. Hort. Environ. Biotechnol. 55(4):287-292.
- Kim, J.S. Shim, I.S., Kim, I.S., Kim, M.J. 2010. Changes of Cysteine, Glutathione and Ascorbic Acid Content in Chinese Cabbage, Head Lettuce and Spinach by the Growth Stage. Kor. J. Hortic. Sci. Technol. 28, 186-191.
- Kim, Y.H. and J.S. Lee. 2016. Growth and contents of anthocyanins and ascorbic acid in lettuce as affected by supplemental UV-A LED irradiation with different light quality and photoperiod. Hort. Sci. Technol. 34:596-606.
- KNHNES (Korea National Health and Nutrition Examination Survey). 2017. Korea Centers for Disease Control and Prevention.
- Korea Food and Drug Administration. 2008. Food standard codex. Korean Food Industry Association, Seoul, Korea.
- Kozai, T. 2007. Propagation, grafting and transplant production in closed systems with artificial lighting for commercialization in Japan. Propag. Ornament. Plants 7:145-149.
- Lee, E.H., J.N. Lee, J.S. Im, S.Y. Ryu, Y.S. Kwon, and S.W. Jang. 2011. Development of stable production technique of summer spinach (*Spinacia oleracea* L.) in soilless culture in the highlands. J. Bio-Env. Con. 20(1):21-26.
- Lee, J.S. and Y.H. Kim. 2014. Growth and anthocyanins of lettuce grown under red or blue light-emitting diodes with distinct peak wavelength. Kor. J. Hortic. Sci. Technol. 32:330-339.
- Lee, M.O., E.K. Cho, J.H. An, S.M. Park, and E.Y. Choi. 2018. Changes of Leaf Morphology and Cell Elongation of *Spinacia oleracea* Grown under Different Light-Emitting Diodes. Protected Hort. Plant Fac. 27(3):222-230.
- 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.
- Maeda N., T. Hada, C. Murakami-Nakai, I. Kuriyama, H. Ichikawa, Y. Fukumory, J. Hiratsuka, H. Yoshida, K. Sakaguchi, Y. Mizushina. 2005. Effects of DNA polymerase inhibitory and antitumor activities of lipase-hydrolyzed glycolipid fractions from spinach. J Nutr Biochem 16: 121-128.
- Morrow, R.C. 2008. LED lighting in horticulture. HortSci. 43:1947-1950
- Nishimura, T., S.M.A. Zobayed, T. Kozai, and E. Goto. 2007. Medicinally important secondary metabolites and growth of *Hypericum perforatum* L. plants as affected by light quality and intensity. Environ. Control. Biol. 45:113-120.
- Nishimura, T., K. Ohyama, E. Goto, and N. Inagaki. 2009. Concentration of perillaldehyde, limonene, and anthocyanin of *Perilla* plants as affected by light quality under controlled environments. Sci. Hort. 122:134-137.
- 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.
- Ohashi-Kaneko, K., R. Matsuda, E. Goto, K. Fujiwara, and K. Kurata. 2006. Growth of rice plants under red light with or without supplemental blue light. Soil Sci. Plant Nutr. 52:444-452.
- 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(3):1135-1143.
- Sullivan, J.A. and X.W. Deng. 2003. From seed to seed: The role of photoreceptors in arabidopsis development. Dev Biol 260:289-297.
- Tennessen, D.J., E.L. Singrass, and T.D. Sharkey. 1994. Light emitting diodes as a light source for photosynthesis research. Photosynthesis Res. 39:85-92.
- Tsormpatsidis, E., R.G.C. Henbest, E.J. Davis, N.H. Battey, P. Hadley, and A. Wagstaffe. 2008. UV irradiance as a major influence on growth, development and secondary products of commercial importance in Lollo Rosso lettuce 'Revolution' grown under polyethylene films. Environ. Exp. Bot. 63:232-239.
- Wang, H., M. Gu, J. Cui, K. Shi, T. Zhou, and J. Yu. 2009. Effects of light quality on CO₂ assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus*. J. Photochem. Photobiol. B 96:30-37.
- Wu, M.C., C.Y. Hou, C.M. Jiang, Y.T. Wang, C.Y. Wang, H.H. Chen, and H.M. Chang. 2007. A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings. Food Chem. 101:1753-1758.
- Zhao, X., X. Yu, E. Foo, G.M. Symons, J. Lopez, K.T. Bende-hakkalu, J. Xiang, J.L. Weller, X. Liu, J.B. Reid, C. Lin. 2007. A study of gibberellin homeostasis and cryptochrome-mediated blue light inhibition of hypocotyl elongation. Plant Physiol. 145:106-118