

방전램프의 광질에 따른 상추의 성장 및 파이토케미컬 분석

이재수¹ · 남상운² · 김용현^{3*}

¹전북대학교 대학원 생물산업정밀기계공학과, ²충남대학교 지역환경토목학과,
³전북대학교 생물산업기계공학과(농업과학기술연구소)

Growth and Phytochemicals of Lettuce as Affected by Light Quality of Discharge Lamps

Jae Su Lee¹, Sang Woon Nam², and Yong Hyeon Kim^{3*}

¹Department of Bioindustrial Precision Machinery Engineering, Graduate School,
Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea

²Department of Agricultural & Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

³Department of Bioindustrial Machinery Engineering, Chonbuk National University, Jeonju 561-756, Korea
(The Institute of Agricultural Science & Technology)

Abstract. This study was performed to analyze the effect of light quality of discharge lamp on growth and phytochemicals contents of lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Jeokchima) grown under metal halide (MH) lamp, high-pressure sodium (HPS) lamp, and xenon (XE) lamp in a plant factory. Cool-white fluorescent (FL) lamp was used as the control. Photoperiod, air temperature, relative humidity, CO₂ concentration, and photosynthetic photon flux (PPF) in a plant factory were 16/8 h (day/night), 22/18°C, 70%, 400 μmol · mol⁻¹, and 200 μmol · m⁻² · s⁻¹, respectively. MH lamp had the greatest fraction of blue light (400-500 nm) of 23.0%. However, HPS lamp had the lowest fraction of 4.7% for blue light and the greatest fraction of 38.0% for red light (600-700 nm). At 11 and 21 days after transplanting, leaf length, leaf width, leaf area, shoot fresh weight, and shoot dry weight of lettuce as affected by the light quality of the discharge lamp were significantly different. The leaf area of lettuce grown under HPS, MH, and XE lamp increased by 45.7%, 16.3%, and 9.5%, respectively, as compared to the control. These results were similar for shoot fresh weight. Growth characteristics of lettuce grown under HPS lamp increased since HPS lamp had more fraction of red light. However, growth of lettuce grown under MH and XE lamp decreased since they had more fraction of blue light. As compared to the control, the ascorbic acid in lettuce leaves grown under discharge lamp decreased. The greatest anthocyanins accumulation of 0.70 mg/100 g was found at MH treatment. Anthocyanins content in lettuce leaves grown under XL and HPS lamp were 79.3% and 8.6%, respectively, compared with the control. Growth and phytochemicals contents of lettuce were highly affected by the different spectral distribution of the discharge lamp. These results indicate that the combination of discharge lamp or LED lamp for enhancing the light quality of discharge lamps is required to increase the growth and phytochemicals accumulation of lettuce in controlled environment such as plant factory.

Additional key words : artificial lighting source, high-pressure sodium lamp, metal halide lamp, xenon lamp, fluorescent lamp, anthocyanin, ascorbic acid

서 론

최근 이상기후 변화와 농업인구의 감소 등으로 작물을 안정적으로 생산할 수 있는 식물공장에 대한 관심(Um 등, 2010)이 높아지고 있는 가운데, 상추가 식물공장 생

산방식에 가장 적합한 작물로 알려져 있다(Cho 등, 1998). 원예작물에는 안토시아닌(anthocyanin), 카로티노이드(carotenoid), 비타민 등과 같은 파이토케미컬(phytochemicals)이 풍부하게 들어 있고 식물계의 꽃, 열매, 잎, 뿌리 등에 폭넓게 함유되어 있다(Henry 등, 1992). 파이토케미컬은 식물 속에 들어 있는 화학물질로서 식물 자체에서 환경 스트레스에 따른 방어 기작 과정에서 생성되며(Oh 등, 2009), 생육 환경 중의 주요 스트레스 원인으로 광 환경이 꼽히고 있다(Perez-Balibrea 등, 2008). 이러한 이

*Corresponding author: yhkim@jbnu.ac.kr
Received October 29, 2013; Revised November 8, 2013;
Accepted November 13, 2013

유로서 식물공장에서 엽채류의 생장 촉진 및 기능성 향상에 미치는 인공광원의 효과에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다(Kim, 1999; Yorio 등, 2001; Nishioka 등, 2008).

식물생산시스템에서는 작물의 전조 또는 보광재배를 위한 인공광원으로 고압나트륨램프, 메탈할라이드램프 또는 형광등과 같은 방전램프가 사용되고 있다(Kim과 Lee, 1998; Park 등, 1992; Goto, 2003). 고압나트륨램프는 적색광 영역을 많이 포함하고 있는 것에 비해서 청색광 영역을 적게 지니고 있다. 때문에 고압나트륨램프 하에서 성장된 작물은 주로 줄기신장이 이루어진다. 메탈할라이드램프는 파장이 가시광선 영역 전반에 걸쳐 분포하고 있기 때문에 작물재배에 효과적이거나, 고압나트륨램프에 비해서 수명이 짧고 광효율이 낮다는 문제점을 지니고 있다. 형광등이나 LED 램프는 식물공장에서 많이 사용되는 광원으로 근접조명에 용이하여 다단식 재배에 사용된다(Ohyama 등, 2005; Nishimura 등, 2006). 특히 LED 램프는 크기가 작고, 긴 수명, 낮은 소비전력, 단색광의 조사, 펄스구동의 용이성 등의 이유로 많이 선호되고 있다(Barta 등, 1992). 그러나 LED 램프의 설치비용이 많이 들기 때문에 경제성을 고려하여 재배작물을 선정해야 한다(Nishimura 등, 2006).

인공광은 그 종류에 따라 광질이 상이하여 식물의 광합성과 광형태형성 반응에 커다란 영향을 주기 때문에 재배목적에 적합한 인공광원의 선정이 중요하다(Kim, 1999). 이러한 이유로 인공광원의 선정은 식물공장과 같이 동일 환경조건을 구현할 수 있는 시설 내에서 각 광원별로 작물의 생장특성을 조사하고, 각 광원별 소비전력 및 광이용효율의 분석을 고려해야 한다(Lee 등, 2011). 현재까지 인공광원의 종류에 따른 작물 생장 및 기능성 향상에 대한 연구가 진행되어 왔으나, 상이한 분광 특성을 갖는 방전램프의 광질 개선에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구의 목적은 식물공장용 방전램프 가운데 메탈할라이드램프, 고압나트륨램프, 제논램프 및 냉백색형광등의 분광 특성을 분석하고, 각각의 방전램프 하에서 재배된 상추의 생육과 파이토케미컬 특성을 분석하여 식물공

장용 방전램프의 광질 개선을 위한 기초 자료를 제시하는데 있다.

재료 및 방법

본 연구의 공시작물로서 적치마상추(*Lactuca sativa* L. cv. Jeokchima)를 사용하였다. 상추의 생육 특성에 미치는 방전램프의 광질 효과를 분석하고자 본 연구에서는 메탈할라이드램프(metal halide, MH), 고압나트륨램프(high-pressure sodium lamp, HPS), 제논램프(xenon, XE), 냉백색형광등(cool-white fluorescent lamp, FL)을 인공광원으로 사용하였으며(Table 1), FL를 대조구로 사용하였다. 식물공장 내부에 있는 재배선반의 크기는 1,200(W)×600(D)×600(H)mm이며, 재배선반 윗면에 방전램프를 거치하여 4개의 처리구를 구성하였다. 인공광원의 분광 특성을 분석하고자 300~1,100nm의 범위에서 측정이 가능한 분광광도계(LI-1800, Li-Cor Inc., USA)를 이용하였다. 또한, 광양자센서(LI-190SA, Li-Cor Inc., USA)를 사용하여 재배베드의 21곳에서 광합성유효광양자속(photosynthetic photon flux, PPF)을 측정하였다. 이때 광원과 광양자센서 사이의 거리는 25cm이었으며, 다른 광원에 의한 광양의 간섭을 차단하고자 각 광원만을 점등한 후 각 처리구를 측정하였다.

수경재배용 스폰지배지에 상추 종자를 1립씩 파종하여 식물공장에서 21일간 육묘하였다. 육묘기간의 환경조건은 기온 22°C, 습도 70%, 광주기 16/8h(명기/암기), PPF 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이었다. 본엽이 4매 정도 출현하였을 때 담액수경재배 시스템에 정식하였다. 양액은 서울시립대 엽채류 배양액(N-P-K-Ca-Mg=0.8-2.0-6.0-3.0-2.0mg·L⁻¹)을 사용하여 pH 6.0, EC 1.5dS·m⁻¹로 조절하였다. 공시작물의 재배가 이루어진 식물공장 내부의 환경조건은 광주기 16/8h(명기/암기), PPF 200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 기온 22/18°C, 습도 70%, CO₂ 농도 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 로 설정하였다.

정식 후 11일과 21일째에 3반복으로 수행된 처리구별로 각 5주씩 임의로 선택된 상추의 초장, 엽수, 엽장, 엽폭, 엽면적, 엽색, 엽록소 함량, 지상부 및 지하부의 생체중 및 건물중 등을 측정하는 생육 조사를 수행하였다. 엽

Table 1. Specifications of metal halide (MH), high-pressure sodium (HPS), xenon (XE), and cool-white fluorescent (FL) lamp used in this study.

Light sources	Model number	Electric power consumption (W)	Number of lamps installed
MH	MH 100W/640P, PHILIPS	100	2
HPS	NHT 100W, SAMLIP	100	2
XE	UCD 60, KAIGEN	60	2
FL	DULUX-L2G11 55W/840, OSRAM	55	6

Table 2. Operating conditions of HPLC for analysis of anthocyanins.

Item	Operation conditions
Instrument	HPLC (Waters HPLC system, USA)
Column	MH 100W/640P, Philips
Detector (UV)	NHT 100W(mini), Samlip
Column temperature	35°C
Mobile phase	Water : Acetonitrile : Acetone : Phosphoric acid = 81.7 : 8.4 : 8.4 : 1.5 (v/v)
Flow rate	1.0 mL · min ⁻¹

록소 함량은 휴대용 엽록소 측정기(SPAD 502, MINOLTA Co., Japan)를 사용하여 측정하였고, 엽면적은 생육조사가 완료된 잎의 영상을 CCD 카메라(VK-C370, HITACHI, Japan)를 이용하여 획득한 후 기준면적과 영상의 회소수에 따른 회귀식으로 실제 면적을 산출하였다. 기준면적의 측정에 3종류(50원, 100원, 500원)의 동전을 사용하였다. 생체중과 건물중의 측정에 전자저울(SBA51, SCALTEC INSTRUMENTS, Germany)을 사용하였다.

한편, 정식 후 21일째에 상추 잎의 축적된 파이토케미컬을 분석하기 위해서 안토시아닌과 아스코르빈산 함량을 분석하였다. 안토시아닌을 추출하기 위해서 일정량의 시료를 1% HCL을 함유한 methanol 200mL를 가하여 Shaking incubator(20°C, 150rpm)에서 15시간 추출 후 여과하여 감압 농축한 후 총량을 10mL로 정용한다. 그 후 syringe filter(PVDF, 0.2µm membrane filter)로 여과한 후 HPLC(e2695E, Waters, USA)로 분석하였다. 분석에 사용된 HPLC의 조건은 Table 2와 같다. 아스코르빈산 함량은 적정법(MFDS, 2011)으로 분석하였다. 이 때 상추의 전시료를 분쇄하여 사용하였다. 시료를 칭량하고 동량의 10% 메타인산용액을 가하여 10분간 현탁시킨 후 적당량의 5% 메타인산을 넣어 균질화하였다. 균질화된 검체를 100mL 메스플라스크에 옮기고 소량의 5% 메타인산 용액으로 용기를 씻은 후 메스플라스크에 합하여 100mL로 하였다. 그 후 3,000rpm에서 15분간 원심분리를 행하여 상정액을 취한 후 0.22µm의 membrane filter로 여과하고 254nm의 UV detector를 장착한 HPLC(e2695E, Waters, USA)로 분석하였다. 이때 칼럼은 Xbridge™(C18.5µm, 4.6 × 250mm), 이동상은 0.05M KH₂PO₄/아세트니트릴(60 : 40), 유속은 1.0mL · min⁻¹로 하였다.

정식 후 11일과 21일째에 3반복으로 5주씩 측정된 상추의 생육 특성에 대해서 통계 분석을 실시하였다. 통계 처리에 SAS(v9.1.3, SAS Institute Inc., USA) 프로그램을 이용하였으며, 측정된 자료에 대한 최소유의차 검정을 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 방전램프의 분광 특성 및 소비전력 분석

본 연구에서 사용된 방전램프들의 분광 특성을 분석하고자 분광광도계를 이용하여 300~1,100nm를 2nm 간격으로 측정하였다(Fig. 1). 각 처리구에서 측정된 분광 특성 데이터를 이용하여 400~700nm의 PPF에 대한 청색광 영역(400~500nm), 녹색광 영역(500~600nm), 적색광 영역(600~700nm)의 비율을 계산하였다. MH램프의 청색광, 녹색광 및 적색광의 비율은 각각 23.0%, 52.4%, 24.5%로서, 다른 방전등에 비해서 청색광과 녹색광 영역을 많이 지니고 있는 것으로 나타났다(Table 3). HPS램프의 녹색광과 적색광 영역은 각각 57.2%, 38.0%로서 다른 방전등에 비해서 가장 크게 나타났으나, 청색광 영역은 4.7%로서 가장 낮게 나타났다. XE 처리구의 청색광, 녹색광 및 적색광의 비율은 각각 22.0%, 48.6%, 29.3%로 나타났으며, 대조구인 FL은 각각 19.4%, 42.3%, 38.3%로 나타났다. 한편 실외에서 측정된 태양광의 PPF에 대한 청색광, 녹색광 및 적색광의 비율은 각각 25.4%, 34.5%, 39.7%로 나타났다. 태양광의 분광 특성과 비교할 때 본 연구에서 사용된 방전램프의 청색광 영역은 2.4~20.7%로 낮게 나타났으며, 적색광 영역은 1.4~15.2%만큼 낮게 나타났다. 한편, 방전램프의 녹색광 비율은 태양광에 비해서 7.8~22.7% 높게 나타났다. 한편, MH와 XE램프는 대조구에 비해서 300~400nm 영역의 자외선을 2.0~3.9배 높게 포함하고 있었으나, HPS램프로부터 조사된 자외선은 대조구에 비해서 9%에 불과할 정도로 작게 나타났다(Table 4). 상기의 결과를 종합하면 MH램프는 청색광, 녹색광 및 자외선을 많이 지니고 있었고, HPS램프는 적색광과 녹색광 영역을 많이 포함하고 있었다. FL과 비교할 때 XE램프에서는 적색광의 비율이 줄어들었으나, 청색광과 녹색광의 비율은 높게 나타났다.

본 연구에서 분석된 MH, PHS, XE 및 FL 램프는 태양광에 비해서 녹색광을 많이 포함하고 있으나, 청색광과 적색광은 상대적으로 낮게 나타났다. 이로 말미암아 상이한 분광 특성을 갖는 MH, PHS, XE 및 FL 램프 하에서 재배된 상추의 생장 특성 및 파이토케미컬 함량이 태양광 하에서 생장된 경우와 비교할 때 다르게 나타날 것이다.

2. 상추의 생장 및 파이토케미컬 분석

정식 후 11일째에 MH, HPS, XE 및 FL 램프 하에서 재배된 상추의 생장 특성을 분석한 결과 엽형지수(엽장/엽폭)를 제외한 모든 항목에서 유의차가 나타날 정도로 다르게 나타났다(Table 5). HPS 처리구에서의 엽수는 11.4매로서 유의차가 인정될 만큼 높게 나타났다. 적색광

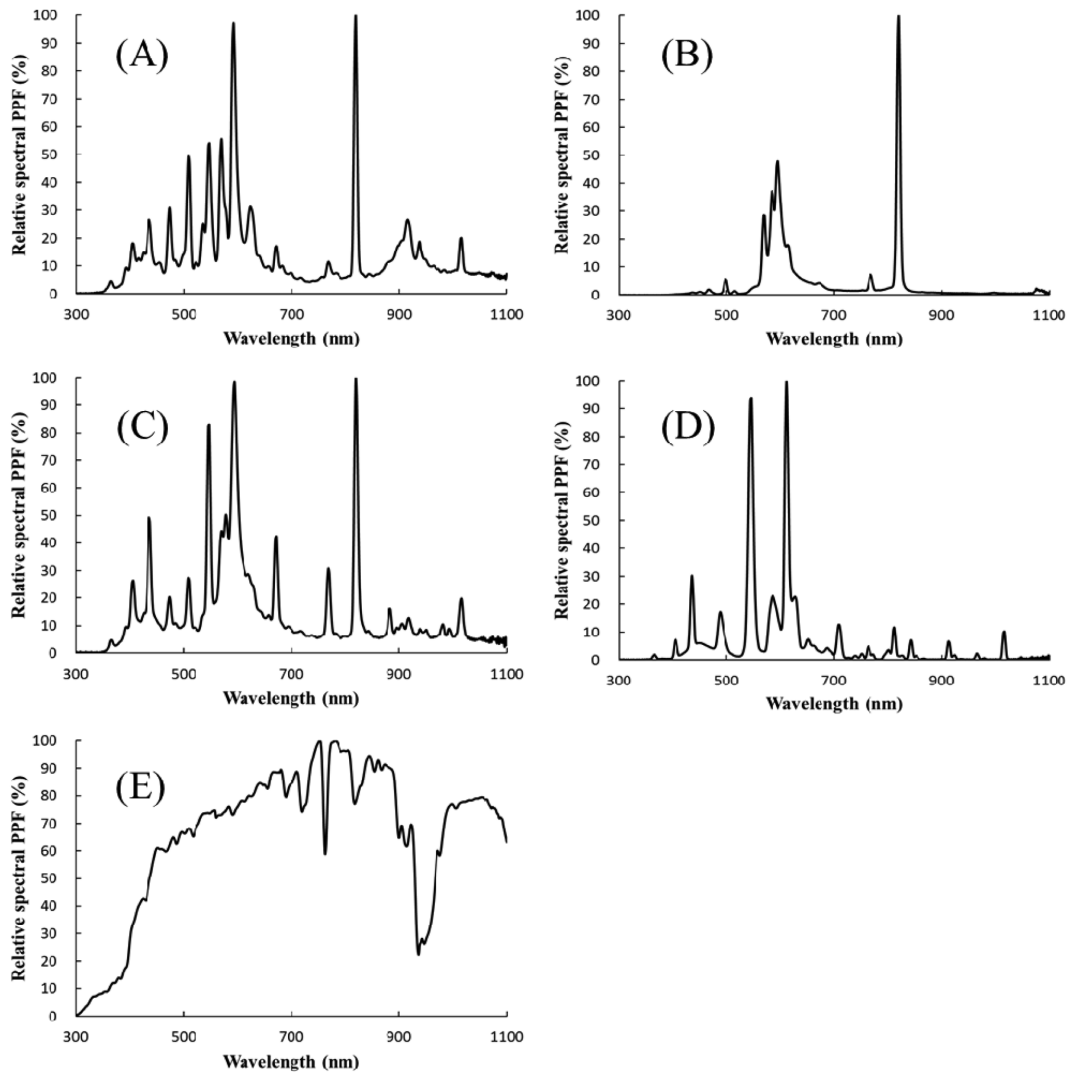


Fig. 1. Spectral characteristics of (A) metal halide lamp, (B) high-pressure sodium lamp, (C) xenon lamp, (D) cool-white fluorescent lamp, and (E) sun light.

Table 3. The fraction of blue light, green light, and red light to photosynthetic photon flux (PPF) illuminated from metal halide (MH) lamp, high-pressure sodium (HPS) lamp, xenon (XE) lamp, cool-white fluorescent (FL) lamp, and sun light (SUN).

Lighting sources	Fraction of blue, green, and red light to PPF (%)		
	Blue light (400-500 nm)	Green light (500-600 nm)	Red light (600-700 nm)
MH	23.0	52.4	24.5
HPS	4.7	57.2	38.0
XE	22.0	48.6	29.3
FL	19.4	42.3	38.3
SUN	25.4	34.5	39.7

Table 4. Ultra-violet (UV) radiation, photosynthetically active radiation (PAR), and infrared (IR) radiation illuminated from metal halide (MH) lamp, high-pressure sodium (HPS) lamp, xenon (XE) lamp, and cool-white fluorescent (FL) lamp.

Lighting sources	Radiation illuminated from artificial lighting sources ($W \cdot m^{-2}$)		
	UV (300-400 nm)	PAR (400-700 nm)	IR (700-1,100 nm)
MH	1.65	32.94	13.72
HPS	0.03	21.69	9.57
XE	1.02	23.74	7.99
FL	0.34	24.46	2.67

을 많이 지니고 있는 HPS 처리구에서는 엽수가 증가하였으나, HPS 처리구에 비해서 청색광 영역이 많이 포함

된 MH와 XE 처리구 및 대조구에서는 엽수의 유의차가 나타나지 않았다. HPS의 광원 하에서 성장된 상추의 엽장과 엽폭은 각각 141.2mm, 87.0mm로서 대조구에 비

Table 5. Growth characteristics of lettuce 'Jeokchima' grown under metal halide (MH) lamp, high-pressure sodium (HPS) lamp, xenon (XE) lamp, and cool-white fluorescent lamp (Control) at 11 days after transplanting.

Treatment	No. of leaves	Leaf length (mm)	Leaf width (mm)	Leaf shape index ^z	ODD ^y	Leaf area (mm ²)
MH	9.8b ^x	122.0b	80.2b	1.52a	17.1b	19,240b
HPS	11.4a	141.2a	87.0a	1.63a	18.0b	25,390a
XE	10.0b	120.8b	73.8c	1.64a	20.9a	20,393b
Control	9.8b	127.0b	80.6b	1.58a	15.0c	19,306b
LSD _{0.05}	1.0	9.3	6.1	0.16	1.4	2,970

Treatment	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)		Leaf color	
	Top	Root	Top	Root	Hue	Saturation
MH	5.87b	1.28ab	0.40b	0.074bc	104.7b	27.8c
HPS	7.29a	1.38a	0.49a	0.095a	114.5a	39.8a
XE	6.98a	1.38a	0.48a	0.086ab	98.5c	21.0d
Control	5.73b	1.05b	0.38b	0.067c	109.6ab	35.4b
LSD _{0.05}	0.91	0.24	0.06	0.013	5.0	3.6

^zLeaf length divided by leaf width.

^yOptical density difference (ODD) measured by a chlorophyll meter (SPAD 502, Minolta, Japan).

^xMeans with the same letter are not significantly different.

해서 각각 11.2%, 7.9% 크게 나타났으나, MH와 XE 처리구에서의 엽장과 엽폭은 대조구보다 낮게 나타났다. 이러한 결과는 엽수의 경우와 유사한 것이다. 즉 적색광을 많이 지니고 있는 HPS 처리구에서 엽장과 엽폭의 신장이 촉진되었으나, 대조구에 비해서 청색광 비율이 높은 MH와 XE 처리구에서는 신장이 상대적으로 억제된 가운데 엽폭의 신장 억제가 분명하게 나타났다. 이로 말미암아 HPS 처리구에서 상추의 엽면적은 25,390mm²로서 최대치가 나타났으나, 다른 처리구에서는 유의차가 인정되지 않았다.

정식 후 11일째에 측정된 HPS 처리구의 지상부 생체중과 건물중은 각각 7.29g/plant, 0.49g/plant로서 다른 처리구에 비하여 높게 나타났다. 이러한 결과는 적색광은 상추의 성장을 촉진하며(Nishioka 등, 2008; Nishimura 등, 2009), 청색광 하에서 재배된 상추의 생장이 상대적으로 억제된다는 보고(Rajapakse와 Kelly, 1992; Kim 등, 2008)와 유사한 것이다. 결과적으로 상추에 조사된 광질에 따라 상추의 성장 반응이 다르게 나타남을 알 수 있다.

상추 잎의 엽록소 함량은 XE 처리구에서 20.9로 가장 높게 나타났으며, 다음으로는 HPS 처리구 18.0, MH 처리구 17.1, 대조구 15.0 순으로 처리구간의 유의차가 인정되었다. 인공광원으로부터 발생된 복사열은 엽록소의 형성과 줄기, 잎, 개화의 형태적 발달을 조절하는데 영향을 끼친다고 알려져 있다(Park 등, 1992). 엽록소함량은 대조구에 비해서 다른 처리구의 방전램프에서 전체적으로 높게 나타났다. 이러한 결과는 FL로부터의 복사열보다 MH, HPS 및 XE램프로부터의 복사열이 상대적으로 많았음을 의미하는 것이다. 실제로 MH, HPS 및 XE

램프로부터 조사된 적외선(700~1,100nm)은 대조구에 비해서 각각 4.1배, 2.6배, 2.0배 높게 나타났다(Table 4). 40W의 형광등 하에서 재배된 결구상추는 400W의 고압 나트륨램프 또는 250W의 메탈할라이드램프 하에서 재배된 경우에 비해서 전반적으로 성장 특성이 낮게 나타났다(Cho 등, 1998).

정식 후 21일째에 대조구인 FL 램프 하에서 성장된 적치마상추는 엽수, 엽형지수, 엽록소함량을 제외한 엽장, 엽폭, 엽면적, 지상부 생체중과 건물중에서 유의차가 인정될 만큼 낮게 나타났다(Table 6). HPS 처리구의 엽면적은 143,486mm²로서 대조구의 98,474mm²에 비해서 1.5배 높게 나타났다. 이러한 결과는 지상부 생체중에서도 유사하게 나타났다. HPS 처리구의 지상부 생체중은 69.8g/plant로서 대조구의 44.9g/plant 보다 1.6배 크게 나타났으며, XE와 MH 처리구의 지상부 생체중도 대조구에 비해서 각각 1.5배, 1.3배 크게 나타났다. 지상부 건물중은 XE 처리구에서 2.70g/plant로서 대조구의 1.72g/plant에 비해서 1.6배만큼 크게 나타났으며, HPS와 MH 처리구도 대조구에 비해서 각각 1.5배, 1.4배 크게 나타났다. 처리구와 대조구에서의 환경 조건, 즉 기온, 상대습도 및 PPF가 비슷하였음에도 불구하고 이러한 차이가 나타난 것은 본 연구에 사용된 방전등의 분광특성에 따른 결과로 판단된다. 엽장과 엽폭은 HPS 처리구에서 높게 나타났으며, MH와 XE 처리구에서는 대조구와 비슷한 수준이었다. 엽색 관련 지표인 색상(Hue)은 색 좌표의 하나로서 인간의 눈으로 감지하는 물체의 색깔을 표시하고, 채도(Saturation)는 색깔의 선명도를 나타낸다. 방전램프의 종류에 따른 색깔의 차이가 크지 않았으나,

Table 6. Growth characteristics of lettuce ‘Jeokchima’ grown under metal halide (MH) lamp, high-pressure sodium (HPS) lamp, xenon (XE) lamp, and cool-white fluorescent lamp (Control) at 21 days after transplanting.

Treatment	No. of leaves	Leaf length (mm)	Leaf width (mm)	Leaf shape index ^z	ODD ^y	Leaf area (mm ²)
MH	21.8a ^x	223.0b	150.0b	1.49a	15.3b	114,481b
HPS	22.2a	249.8a	173.0a	1.45a	12.7c	143,486a
XE	19.8a	216.0b	157.0ab	1.39a	17.2a	107,821b
Control	19.8a	219.0b	145.0b	1.52a	15.5b	98,474b
LSD _{0.05}	2.5	19.4	17.1	0.21	1.4	21,168

Treatment	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)		Leaf color	
	Top	Root	Top	Root	Hue	Saturation
MH	59.5a	7.69a	2.35a	0.41ab	111.2b	36.2b
HPS	69.8a	7.78a	2.57a	0.36ab	116.0a	46.6a
XE	66.6a	9.29a	2.70a	0.45a	111.0b	33.5b
Control	44.9b	5.20b	1.72b	0.29b	114.2a	44.4a
LSD _{0.05}	11.3	2.06	0.56	0.12	1.8	3.0

^zLeaf length divided by leaf width.

^yOptical density difference (ODD) measured by a chlorophyll meter (SPAD 502, Minolta, Japan).

^xMeans with the same letter are not significantly different.

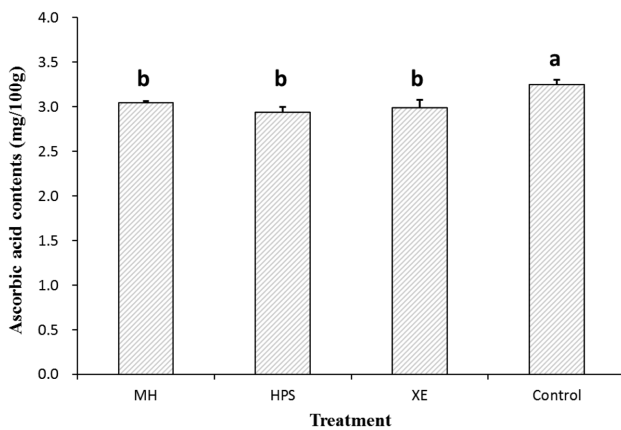


Fig. 2. Ascorbic acid content in lettuce leaves grown under metal halide (MH) lamp, high-pressure sodium (HPS) lamp, xenon (XE) lamp, and cool-white fluorescent lamp (Control).

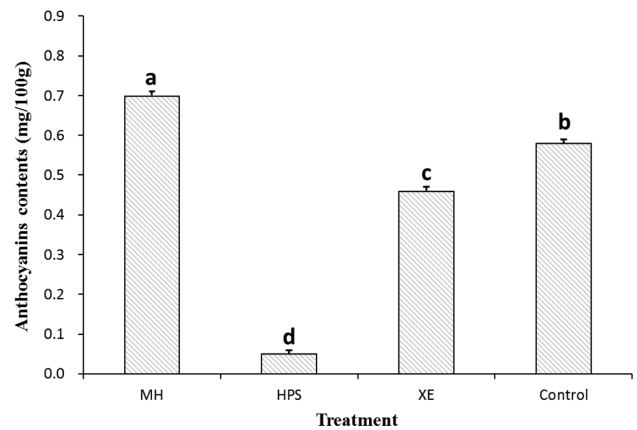


Fig. 3. Anthocyanins content in lettuce leaves grown under metal halide (MH) lamp, high-pressure sodium (HPS) lamp, xenon (XE) lamp, and cool-white fluorescent lamp (Control).

HPS 처리구와 대조구에서는 다른 처리구와 비교될 정도로 적색의 발현이 적게 이루어진 가운데 색상과 채도에 있어 유의차가 높게 나타났다.

상추 잎에 축적된 아스코르빈산 함량은 대조구인 FL에서 3.25mg/100g으로 유의차가 인정될 정도로 크게 나타났으나, 다른 처리구에서는 대조구에 비해서 6.2~9.5% 낮게 나타났다(Fig. 2). 이러한 결과는 온실 내의 백색형 광등 하에서 성장된 적측면 상추의 잎에 축적된 아스코르빈산 함량이 백열등 또는 고압나트륨램프 처리구에 비해서 높게 나타났다는 기존 보고(Park 등, 1992)와 일치한다. 한편 상추 잎의 안토시아닌 함량은 처리구간의 유의차가 크게 인정될 정도로 다르게 나타났다(Fig. 3). 청색광 영역의 비율이 높은 MH 처리구에서의 안토시아닌

함량은 0.70mg/100g으로 최대치가 나타났다. 한편, XE와 HPS 처리구의 안토시아닌 함량은 각각 0.46mg/100g, 0.05mg/100g으로서 대조구의 0.58mg/100g에 비해서 각각 79.3%, 8.6% 수준이었다. 청색광과 자외선을 많이 포함하고 있는 MH램프하에서 성장된 적치마 상추의 안토시아닌 함량이 크게 증가하였으나, 청색광이 적은 HPS램프에서는 안토시아닌의 발현이 매우 작게 이루어졌다. 청색광과 자외선은 안토시아닌의 생합성에 관련된 유전자의 발현을 촉진하는 것으로 보고되었고(Noh와 Spalding, 1998), 이는 청색광 흡수색소인 크립토크롬(cryptochrome)이 광 수용체로서의 역할을 하기 때문이다(Ninu 등, 1999; Giliberto 등, 2005). 결과적으로 파이토케미컬 가운데 아스코르빈산 함량에 미치는 방전등의

광질 효과에 비해서 안토시아닌 함량에 미치는 방전등의 광질 효과가 분명하게 나타남을 알 수 있다.

식물공장에서 서로 다른 분광 특성을 갖는 방전램프가 인공광원으로 사용될 경우 방전램프의 광질에 따라 상추의 수량 및 기능성 성분이 다르게 나타날 수 있다. 본 연구에서 분석된 방전램프가 단독으로 사용될 경우 HPS램프에서는 청색광이 많이 부족하였고, MH와 XE램프에서는 적색광이 상대적으로 부족하였다. 때문에 메탈할라이드램프, 고압나트륨램프, 제논램프 또는 형광등과 같은 방전등을 식물생장용 인공광원으로 단독으로 사용할 경우 상추의 성장 및 파이토케미컬 함량이 다르게 나타날 수밖에 없다. 그러므로 식물공장용 인공광원으로 방전램프를 효율적으로 활용하면서, 원예작물의 성장 및 파이토케미컬 함량을 증진시키기 위해서는 분광 특성이 상이한 방전램프의 병용 또는 단색광 LED의 추가 설치 등으로 방전램프의 광질을 개선하기 위한 노력이 요구된다.

적 요

본 연구는 식물공장용으로 방전램프로서 메탈할라이드램프(MH), 고압나트륨램프(HPS), 제논램프(XE)를 사용하고, 냉백색형광등(FL)을 대조구로 사용한 가운데 상추 (*Lactuca sativa* L. cv. Jeokchima)의 생육 및 파이토케미컬의 특성을 분석하고자 수행되었다. 식물공장 내부의 환경 조건은 광주기 16/8h, 광합성유효광양자속(photosynthetic photon flux, PPF) $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 기온 22/18°C, 습도 70%, CO₂ 농도 $400\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 로 조절하였다. 각 램프의 분광 특성을 이용하여 PPF에 대한 청색광 영역(400~500nm), 녹색광 영역(500~600nm), 적색광 영역(600~700nm)의 비율을 계산하였다. MH램프의 청색광 영역은 23.0%로서 다른 처리구에 비해서 가장 높게 나타났다. 한편 HPS램프의 청색광 영역은 4.7%로서 가장 낮게 나타났으나, 적색광 영역은 38.0%로서 다른 처리구에 비해서 높게 나타났다. 정식 후 11일째와 21일째에 측정된 상추의 엽장, 엽폭, 엽면적, 지상부 생체중 및 건물중은 방전램프의 광질에 따른 유의차가 나타날 정도로 다르게 나타났다. HPS 처리구의 엽면적은 $143,486\text{mm}^2$ 로서 대조구의 $98,474\text{mm}^2$ 에 비해서 45.7% 크게 나타났으며, MH와 XE 처리구는 대조구에 비해서 각각 16.3%, 9.5%로 크게 나타났다. 이러한 결과는 지상부 생체중에서도 유사하게 나타났다. 적색광 영역의 비율이 높은 HPS 처리구에서는 상추의 잎 관련 성장 특성에서 최대치가 나타났으나, 청색광 영역의 비율이 높은 MH와 XE 처리구에서는 낮게 나타났다. 방전등 처리구에 따라 상추 잎에 축적된 아스코르빈산 함량은 대조구에 비해서 작게 나타났으며, 처리구 사이에 유의차가 인정되지 않

았다. 상추 잎의 안토시아닌 함량은 MH 처리구에서 $0.70\text{mg}/100\text{g}$ 으로 최대치가 나타났으며, XE와 HPS 처리구는 대조구의 $0.58\text{mg}/100\text{g}$ 에 비해서 각각 79.3%, 8.6% 수준이었다. 결과적으로 방전램프의 종류에 따라 상추의 성장 특성, 아스코르빈산 및 안토시아닌 함량이 다르게 나타났다. 따라서 식물공장용 인공광원으로서 방전램프를 효율적으로 활용하면서, 상추의 성장 및 파이토케미컬 함량을 증진시키기 위해서는 분광 특성이 상이한 방전램프의 병용 또는 단색광 LED의 추가 설치 등과 같은 방전램프의 광질 개선이 요구된다.

추가 주제어 : 인공광원, 고압나트륨램프, 메탈할라이드램프, 제논램프, 형광등, 안토시아닌, 아스코르빈산

사 사

본 논문은 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ907043)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- Barta, D.J., T.W. Tibbitts, R.J. Bula, and R.C. Morrow. 1992. Evaluation of light emitting diode characteristics for space-based plant irradiation source. *Adv. Space Res.* 12:141-149.
- Cho, Y.R., D.W. Han, and Y.B. Lee. 1998. Effect of artificial light sources on the growth of crisphead lettuce in plant factory. *J. Bio. Fac. Env.* 7(1):35-42 (in Korean).
- Gilberto, 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.
- Goto, E. 2003. Effects of light quality on growth of crop plants under artificial lighting. *Environ. Control in Biol.* 41(2):121-132.
- Henry, B.S., G.F.A. Hendry, and J.D. Houghton. 1992. Natural food color. In *National Food Colorants*, Blackie and Son Ltd, Glasgo p. 39.
- Kim, I.S., C. Zhang, H.M. Kang, and B. Mackay. 2008. Control of stretching of cucumber and tomato plug seedlings using supplemental light. *Hort. Environ. Biotechnol.* 49: 287-292.
- Kim, Y.H. 1999. Plant growth and morphogenesis control in transplant production system using light-emitting diodes (LEDs) as artificial light source -Spectral characteristics and light intensity of LEDs. *J. Kor. Soc. Agric. Mach.* 24(2): 115-122 (in Korean).
- Kim, Y.H. and C.H. Lee. 1998. Light intensity and spectral characteristics of fluorescent lamps as artificial light source for close illumination in transplant production factory. *J.*

- Kor. Soc. Agric. Mach. 23(6):591-598 (in Korean).
- Kim, Y.H. and J.S. Lee. 2012. Growth and phytochemicals of lettuce (*Lactuca sativa* L.) as affected by light quality and photoperiod of LED lamps. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 30(Suppl. I):85-86 (in Korean).
- Lee, H.L., J.S. Lee, J.H. Park, and Y.H. Kim. 2011. Growth and light utilization efficiency of lettuce as affected by different artificial lighting sources and photoperiod. Proceedings of the Kor. Soc. Bio-Environ. Con. 20(1):120-121 (in Korean).
- MFDS. 2011. Food Code.
- 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.
- 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.
- Nishimura, T., S.M.A. Zobayed, T. Kozai, and E. Goto. 2006. Effect of light quality of blue and red fluorescent lamps on growth of St. John's Wort (*Hypericum perforatum* L.). J. SHITA 18(3):225-229.
- 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. Hortic. 122:134-137.
- Noh, B. and E. Spalding. 1998. Anion channels and the stimulation of anthocyanin accumulation by blue light in arabis seedlings. Plant Physiology 116:503-509.
- Ohyama, K., K. Mannabe, Y. Omura, and T. Kozai. 2005. Potential use of a 24 h (continuous light) with alternating air temperature for production of tomato plug transplants in a closed system. HortSci. 40:374-377.
- Oh, M.M., E.C. Edward, and C.B. Rajashekar. 2009. Environmental stresses induce health promoting phytochemicals in lettuce. Plant Physiol. Biochem. 47:578-583.
- Park, J.E., Y.G. Park, B.R. Jeong, and S.J. Hwang. 2012. Growth and anthocyanin content of lettuce as affected by artificial light source and photoperiod in a closed-type plant production system. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 30(6):673-679 (in Korean).
- Park, K.W., Y.J. Shin, and Y.B. Lee. 1992. Studies on the modeling of controlled environment in leaf vegetable crops (II. Effects of various light sources on the growth). J. Bio. Fac. Env. 1(2):135-141 (in Korean).
- Perez-Balibrea, S., D.A. Moreno, and C. Garia-Viquera. 2008. Influence of light on health-promoting phytochemicals of broccoli sprouts. J. Sci. Food Agric. 88:904-910.
- Rajapakse, N.C. and J.W. Kelly. 1992. Regulation of chrysanthemum growth by spectral filters. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 117:481-485.
- 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(4):333-342 (in Korean).
- Yorio, N.C., G.D. Goins, H.R. Kagie, R.M. Wheeler, and J.C. Sager. 2001. Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. HortSci. 36(2):380-383.