

식물공장에서 인공광원의 종류가 반결구상추의 광합성, 생육 및 기능성물질 함량에 미치는 영향

김동억¹ · 이해진^{2*} · 강동현¹ · 이공인¹ · 김유호¹

¹국립농업과학원 농업공학부, ²국립원예특작과학원 채소과

Effects of Artificial Light Sources on the Photosynthesis, Growth and Phytochemical Contents of Butterhead Lettuce (*Lactuca sativa* L.) in the Plant Factory

Dong Eok Kim¹, Hye Jin Lee^{2*}, Dong Hyeon Kang¹, Gong In Lee¹, and You Ho Kim¹

¹Department of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, RDA, Suwon 441-707, Korea

²Vegetable Research Division, National Institute of Horticultural and Herbal Sciences, RDA, Suwon 440-706, Korea

Abstract. This study aimed to investigate responses of photosynthesis, plant growth, and phytochemical contents to different artificial light sources for ‘Seneca RZ’ and ‘Gaugin RZ’ two butterhead lettuce (*Lactuca sativa* L.). In this study, fluorescent lamps (FL), three colors LEDs (red, blue and white, 5 : 4 : 1; RBW) and metalhalide lamps (MH) were used as artificial lighting sources. Photoperiod, air temperature, relative humidity, EC, and pH in a cultivation system were maintained at 16/8 h, 25/15°C, 60~70%, $1.4 \pm 0.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, and 6.0 ± 0.5 , respectively. The photosynthetic rate of both two butterhead lettuce were the highest under RBW in middle growth stage. However, in late growth stage, the photosynthetic rate of both two butterhead lettuce were higher under RBW and MH than FL. The light sources showed significant results for plant growth but those effects were different to variety. Fresh and dry weight of ‘Gaugin RZ’ butterhead lettuce under MH were heavier than other lights in all growth stages. Growth of ‘Seneca RZ’ butterhead lettuce was maximized highest under MH in middle growth stage and FL in late growth stage. In the leaf tissue of ‘Seneca RZ’ butterhead lettuce, tipburn symptom occurred under all light sources and in the leaf tissue of ‘Gaugin RZ’ butterhead lettuce, it occurred under two light sources except for fluorescent lamps in late growth stage. kinds of lamp affect plant growth more than plant quality. Relative growth rate of both two butterhead lettuce was faster in middle growth stage than late stage. Growth of ‘Gaugin RZ’ was shown by kinds of lamp in middle growth stage and but it was not significantly affected by light sources and variety in late stage. Most of the phytochemical contents of two butterhead lettuce were significantly affected by different light sources. Contents of all vitamins showed higher than other light sources on RBW for both two lettuce, especially β -Carotene content of ‘Gaugin RZ’ was the highest. Plant growth, photosynthesis, and phytochemical contents were observed significant effects by different light sources for two butterhead lettuce but those effects were highly different between variety and kinds of phytochemicals. Therefore, the selection of optimum light source should be considered by variety and kinds of phytochemicals in the plant factory.

Additional key words : light intensity, light quality, tipburn, wavelength

서 론

최근 들어 이상기상, 자연재해로 인한 식량부족, 농업 인구 감소 및 안전한 먹거리에 대한 관심 증대로 고품질 농산물을 안정적으로 생산할 수 있는 생산 시스템과

관련된 기술에 대한 연구가 증가하고 있다. 식물공장이 미래의 식량위기와 이상기상을 극복할 수 있는 대안으로 제시되면서 식물공장에 투입되는 여러 분야의 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 식물공장이란 작물을 시설 내에서 광, 온·습도, 이산화탄소 농도 및 배양액 등의 환경조건을 인공적으로 제어해 계절이나 장소에 관계없이 연중 연속 생산이 가능하며 작물의 수량과 품질을 조절할 수 있는 공장형 식물생산시스템을 뜻한다(Kang, 2008; Lee와 Choi, 2010). 최근에는 인공광원을 이용하

*Corresponding author: paprika78@korea.kr

Received September 5, 2013; Revised October 23, 2013;

Accepted November 7, 2013

여 외부환경과 무관하게 식물을 재배할 수 있는 장점이 있는 인공광형 식물공장에 관심이 집중되고 있다.

식물공장에서 사용 가능한 인공광원으로는 고압나트륨램프, 메탈할라이드램프, 형광등, 발광다이오드(Light emitting diodes, LED) 등이 있는데, 이 광원들은 광량과 광질이 각기 다르기 때문에 광원에 따라 식물생육에 미치는 영향이 다르다. 국내의 인공광형 식물공장은 형광등과 LED를 주 광원으로 채택하는 경우가 많은데, 형광등은 고압나트륨램프이나 메탈할라이드램프에 비해 광속은 낮으나 식물에 근접 조사할 수 있고, 광량을 조절함으로써 우수한 품질의 작물생산이 가능한 것으로 보고되고 있다(Kim 등, 2008). LED는 1960년대 초 미국에서 개발된 후 많은 관심을 끌지 못하다가 1990년대에 이르러 일본에서 고휘도 청색 LED가 개발되면서 식물재배용 인공광원으로서의 이용가능성이 활발하게 검토되기 시작하였다(Yoon, 2012). LED는 무수으로 안전하고 환경 친화적이며, 형광등을 비롯한 방전램프에 비해 수명이 길고, 전력소모가 적으며, 광질(파장) 선택 및 광량 제어가 다른 광원에 비해 용이하며, 광합성에 유리한 펄스 조사가 가능한 장점을 지니고 있어 식물재배용 인공광원으로서 많은 연구가 진행되고 있다(Kim, 1999; Hwang 등, 2004). 그러나 LED는 고가의 설치비로 인해 식물공장 초기 투자비용이 높고 발열이 많은 단점과 파장의 조합에 따라 식물의 생육반응이 상이한 결과를 보여 식물의 종류에 따른 적절한 파장의 조합이 아직은 명확하게 밝혀져 있지 않은 실정이다(Matsumoto 등, 2010).

광원에 따라 광량이나 광질이 서로 다르기 때문에 식물의 생육반응 또한 많은 차이를 보이는데, 이에 대한 연구는 상추를 비롯하여 다양한 작물에서 수행되고 있다. 특히 최근 주목받고 있는 LED를 이용해 특정 광과장을 조사하여 베타카로틴, 안토시아닌과 같이 작물이 가지고 있는 기능성 성분의 함량을 증가시키거나 생육을 촉진하는 등 고품질 농산물 생산에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Kim 등, 2011; Lee 등, 2010; Li와 Kubota, 2009; Nishimura 등, 2006; Wu 등, 2007). 현재 국내 인공광형 식물공장에서 다양한 종류의 광원을 이용하여 식물공장 연구가 진행되고 있으나 아직까지는 광원의 적절한 배합이나 적절한 광도, 폐쇄된 공간에서 광과 기타 환경요인과의 관계 등이 아직 명확히 밝혀지지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 인공광형 식물공장에서 활용가능한 인공광원의 종류와 광도가 반결구상추의 생육과 광합성특성 및 품질에 미치는 영향을 조사하여 향후 국내 인공광형 식물공장의 실용화와 식물공장내에서 고품질 반결구상추 생산을 위한 기초자료를 얻고자 수행하였다.

재료 및 방법

본 실험은 2011년 8월 16일부터 10월 13일까지 국립농업과학원 식물공장연구동에서 수행되었다. 공시작물은 반결구상추(*Lactuca sativa* L.) ‘Seneca RZ’와 ‘Gaugin RZ’(Rijk Zwaan Co., Netherlands) 두 품종을 2011년 8월 16일에 우레탄스폰지(35×35×40mm, 가화텍, Korea)에 파종하여 아마자키 잎상추 배양액(EC 0.5~0.8dS·m⁻¹, pH 5.5~6.5)으로 육묘하였다. 본 실험에 사용한 공시품종인 ‘Seneca RZ’와 ‘Gaugin RZ’ 품종은 일반적으로 유럽에서 Salanova®라는 제품명으로 유통되고 있다. 21일간 육묘한 후 9월 6일 플라스틱베드(436×656×32mm, 내쇼날플라스틱, Korea)에 처리당 18주씩 정식하였으며 재배방식은 담액수경(Deep flow technique; DFT)방식으로 하였고 정식 후 37일간 재배하였다. 배양액은 EC 1.4 ± 0.2dS·m⁻¹, pH 6.0 ± 0.5로 유지하였으며 주1회 보정하였고, 재배상의 환경조건은 광주기 16/8h, 기온 25/15°C, 상대습도 60~70%로 유지하였다.

시험에 사용된 광원의 종류는 형광등(FH 28W/865HE, OSRAM, Germany) 8개(FL)를 대조구로 하여 메탈할라이드(HQI-TS 150W, OSRAM, Germany) 4개(MH), LED RBW(red5:blue4:white1; red and blue LED 38W, 오디텍, Korea; white LED, 1W 20개, 서울반도체, Korea) 3종이었다. 형광등, LED는 베드위의 정식판과 광원사이의 높이가 30cm 되도록 설치하였고 MH는 형광등과 비슷한 수준으로 광량을 맞추기 위해 64cm 높이로 설치하였다. 각 광원의 광합성유효광량지속밀도는 FL은 235 ± 10μmol·m⁻²·s⁻¹, MH는 225 ± 10μmol·m⁻²·s⁻¹, RBW는 210 ± 10μmol·m⁻²·s⁻¹ 수준이었고 광량지속밀도는 광량센서(LI-190SA, Li-Cor Inc., USA)를 연결한 광측정기(LI-250, Li-Cor Inc., USA)를 이용하여 측정하였다. 각 광원별 광스펙트럼은 분광복사계(FieldSpec3, ASD Inc., USA)를 이용하여 측정하였으며, 처리에 이용된 각 광원별 파장은 Fig. 1과 같다. 시험에 사용한 각 광원의 전력량은 전력량 계측기(OMWH-121-B, 옴니시스템, Korea)를 이용하여 계측하였으며 전력량은 Fig. 2와 같다.

인공광원의 종류에 따른 반결구 상추의 광합성 특성을 조사하기 위하여 정식 후 15일 간격으로 광합성 측정기(Li-6400, Li-COR Inc., USA)를 사용하여 광합성속도와 증산량을 측정하였다. 광합성속도와 증산량 측정 조건은 정식 후 15일째 PPFD 150μmol·m⁻²·s⁻¹, CO₂ 농도 400μmol·mol⁻¹, 엽온 22 ± 0.5°C, RH 55 ± 1%, flow rate 500 ± 0.5μmol·s⁻¹이었고, 정식 후 30일째 측정 조건은 PPFD 200μmol·m⁻²·s⁻¹, CO₂ 농도 400μmol·mol⁻¹, 엽온 22 ± 0.5°C, RH 35 ± 1%, flow rate 500 ± 0.5μmol·s⁻¹이었다.

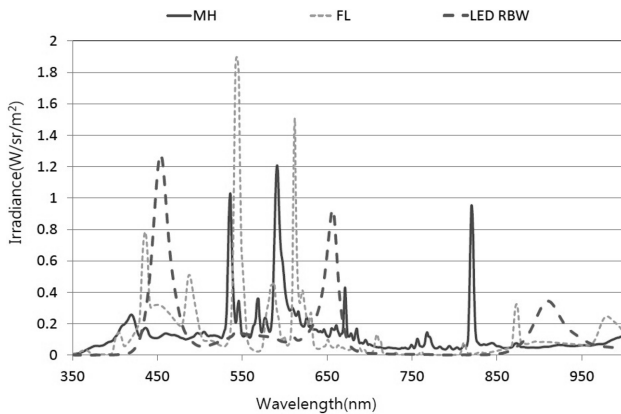


Fig. 1. Spectral irradiance of each artificial light source in the plant factory.

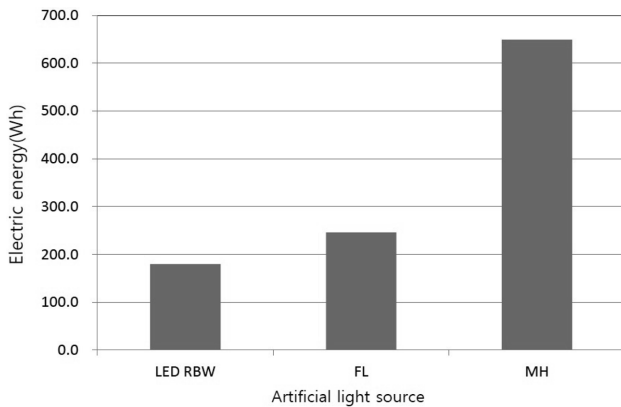


Fig. 2. Power consumption of each artificial light source in the plant factory.

인공광원의 종류에 따른 반결구 상추의 생육 특성을 조사하기 위하여 정식 후 15일 간격으로 지상부 생체중과 건물중, 지하부 생체중과 건물중, 엽수, 엽장, 엽폭, 엽

형지수, 잎끝마름증 발생율과 상대생장률을 조사하였다.

반결구 상추의 주요영양성분을 분석하기 위하여 정식 후 37일째 상추를 수확하여 식품분석기관에 의뢰하여 비타민 B1, B2, 나이아신, 베타카로틴, 칼슘, 철분, 칼륨, 마그네슘, 인 함량 등을 분석하여 그 결과를 이용하였다.

통계분석은 SAS 프로그램(SAS 9.2, SAS Institute Inc., USA)을 이용하여 ANOVA(analysis of variance) 및 Duncan's multiple range test(DMRT)를 실시하여 5% 유의수준에서 각 처리간 차이의 유의성을 검정하였다.

결과 및 고찰

1. 인공광원의 종류에 따른 반결구 상추의 광합성 특성

생육 중기 광원의 종류에 대한 두 품종의 광합성속도는 품종과 인공광원 처리에 따라 고도로 유의한 결과를 보였는데, 'Seneca RZ'와 'Gaugin RZ' 두 품종 모두 RBW에서 가장 높은 광합성속도를 보였다. 그러나 광합성속도를 제외한 기공전도도와 증산량에서는 품종과 광원의 종류에 따른 통계적 유의성이 나타나지 않았다 (Table 1).

생육 후기 두 품종의 광합성 속도는 품종간의 차이보다 광원에 따른 차이가 더 크게 나타났으며 'Seneca RZ'는 생육 중기와 마찬가지로 RBW에서 그 값이 가장 높았고, 'Gaugin RZ'는 MH에서 가장 높은 결과를 보였다. 증산량과 기공전도도 모두 생육 후기에는 품종간의 유의한 차이가 인정되었으나 광원에 따른 통계적 유의성은 없었다 (Table 2). 식물 성장과 발달에 있어서 앞에 도달하는 빛의 색, 즉 파장과 같은 광질은 가장 큰 영향을 미치는 요인으로 알려져 있고, 특히 적색광과 청색광은 광합성을 통한 CO₂ 고정에 있어서 가장 효과적인 파장으로 알려져 있다 (Cosgrove, 1981; Johkan et al., 2010;

Table 1. Effects of different artificial light sources on photosynthetic characteristics of two butterhead lettuce at 15 days after transplant under in plant factory.

Varieties	Light sources	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance ($\text{mol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Seneca RZ	FL	7.2	0.45	2.8
	RBW	7.5	0.48	2.9
	MH	6.2	0.50	3.2
Gaugin RZ	FL	6.1	0.30	2.3
	RBW	6.7	0.48	3.0
	MH	6.2	0.28	2.1
Significance ^z				
Variety (V)		***	NS	NS
Light source (L)		***	NS	NS
V × L		***	NS	NS

^zProbability of significant F values: NS, *, **, ***: non-significant or significant at $p \leq 0.05, 0.01, 0.001$, respectively.

Table 2. Effects of different artificial light sources on photosynthetic characteristics of two butterhead lettuce at 30 days after transplant under in plant factory.

Varieties	Light sources	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance ($\text{mol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Seneca RZ	FL	3.9	0.32	3.2
	RBW	5.5	0.32	3.4
	MH	5.2	0.32	3.7
Gaugin RZ	FL	4.8	0.16	2.2
	RBW	5.3	0.20	2.6
	MH	5.7	0.24	2.8
Significance ^z				
Variety (V)		*	**	**
Light source (L)		***	NS	NS
V × L		NS	NS	NS

^zProbability of significant F values: NS, *, **, ***: non-significant or significant at $p \leq 0.05, 0.01, 0.001$, respectively.

Kasajima et al., 2008). 본 실험에서도 관행의 노지재배에 비해 현저히 낮은 광도로 인해 전체적인 광합성속도는 낮은 결과를 보였으나 기타 연구 결과와 마찬가지로 적색광과 청색광이 많이 분포하는 RBW 처리에서 그 값이 높은 것을 확인할 수 있었다. 기공전도도는 정상적으로 성장하는 식물의 잎에서 기공의 개폐정도를 진단하는 지수로서(Knapp와 Smith, 1990), 광합성에 필수적인 CO₂가 기공을 통하여 이동하기 때문에 기공전도도는 광합성속도의 높고 낮음에 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 본 실험에서도 두 품종 모두에서 기공전도도가 높은 경우 광합성속도도 높은 경향을 보였다. Kim 등(2004b)은 LED Red + Blue, LED Red + Blue + 녹색 형광등, 녹색 형광등, 백색 형광등 조건에서 23일간 상추를 재배한 후 상추의 기공전도도를 측정하였을 때 백색 형광등에서 자란 상추의 기공전도도가 다른 광질처리에 비해 명기동안의 변화가 가장 급격하게 일어났으며 그 값은 명기동안 최대에 달하고 암기에 가장 낮은 값을 나타내어 광질이

작물 생육기간 동안 기공전도도의 일중변화에 영향을 미치는 것으로 보고하였다.

2. 인공광원의 종류에 따른 반결구상추의 생육 특성과 상대생장률

두 품종의 반결구 상추의 생육특성은 두 품종 모두 생육 중기에 생체중과 건물중, 엽폭에서 품종과 광원의 종류에 따라 고도로 유의한 결과를 보였는데, 두 품종 모두 MH에서 지상부와 지하부 생체중과 건물축적률이 가장 높았다(Table 3).

생육 후기에는 두 품종 모두 생체중과 엽장에서 품종과 광원 종류에 따른 통계적 유의성이 인정되었고 건물중과 엽폭에서는 광원 종류에 따라 고도로 유의하지만 품종에 대한 유의성은 인정되지 않았다(Table 4). ‘Seneca RZ’는 생육 중기에는 MH에서 그 생육이 가장 좋았으나 생육 후기에는 FL에서 가장 좋은 결과를 보였고, RBW에서 가장 저조한 생육 결과를 보였다. ‘Gaugin RZ’은

Table 3. Growth response of two butterhead lettuce at 15 days after transplant under different artificial light sources in plant factory.

Varieties	Light sources	Fresh weight (g)		Dry weight (g)		No. of leaf (ea)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf shape index	Tipburn (%)
		Shoot	Root	Shoot	Root					
Seneca RZ	FL	31.0	4.4	1.20	0.60	28.6	9.3	7.6	1.5	0
	RBW	29.5	5.1	1.17	0.57	29.4	8.5	7.1	1.2	100
	MH	39.3	6.2	1.39	0.62	30.2	10.1	9.0	1.1	44.4
Gaugin RZ	FL	14.6	3.0	0.7	0.44	28.4	9.3	6.0	1.6	0
	RBW	17.0	3.1	0.8	0.47	29.0	8.3	6.2	1.3	0
	MH	22.6	4.0	1.0	0.52	26.6	10.0	7.2	1.4	22.2
Significance ^z										
Variety (V)		***	***	***	***	NS	NS	***	NS	
Light source (L)		***	**	***	**	NS	***	***	NS	
V × L		NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	

^zProbability of significant F values: NS, *, **, ***: non-significant or significant at $p \leq 0.05, 0.01, 0.001$, respectively.

Table 4. Growth response of two butterhead lettuce at 30 days after transplant under different artificial light sources in plant factory.

Varieties	Light sources	Fresh weight (g)		Dry weight (g)		No. of leaf (ea)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Leaf shape index	Tipburn (%)
		Shoot	Root	Shoot	Root					
Seneca RZ	FL	168.6	16.6	5.1	1.1	118.3	12.0	9.0	1.35	77.8
	RBW	147.1	15.7	4.7	0.8	108.0	10.2	8.2	1.30	100
	MH	160.1	15.8	5.5	1.1	125.3	14.4	11.0	1.33	66.7
Gaugin RZ	FL	115.5	9.3	4.5	0.8	87.3	14.1	9.1	1.55	0
	RBW	117.4	10.8	4.5	1.0	90.3	11.9	8.4	1.40	100
	MH	166.2	16.0	6.9	1.1	135.0	13.7	9.1	1.50	83.3
Significance ^z										
Variety (V)		***	***	NS	NS	NS	*	NS	*	
Light source (L)		**	**	***	***	**	***	***	NS	
V×L		**	***	**	***	NS	*	**	NS	

^zProbability of significant F values: NS, *, **, ***: non-significant or significant at p ≤ 0.05, 0.01, 0.001, respectively.

생육 후기에도 MH에서 월등히 높은 생육을 보였다. 생육 중기에는 차이가 없었던 엽수도 생육 후기에는 두 품종 모두 MH에서 다른 처리에 비해 많이 분화되는 결과를 보였다(Table 4).

Cho 등(1998)은 인공광형 식물공장에서 동일한 광도 조건에서 형광등, 메탈할라이드램프, 고압나트륨램프 세 가지의 광원을 가지고 결구상추의 생육을 실험한 결과 생육에는 차이가 없었으나 생육과 경제성을 고려할 경우 고압나트륨램프를 사용하는 것이 좋다고 하였다. 그러나 본 실험에서 사용했던 각 광원의 전력소모량을 측정된 결과 대조구인 FL을 100으로 했을 때 RBW는 73.2%, MH는 264% 수준의 전력이 소모되었다(Fig. 2). 본 실험에서는 MH가 결구상추의 생육에 미치는 효과는 좋았으나 잎끝마름증 발생도 많고, 전력소모가 크고 열이 많이 발생하여 광원과 작물 사이 간격이 가까운 다단식 재배에 사용하기에는 적합하지 않은 것으로 판단하였다.

Um 등(2010)은 따르면 광량이 비슷한 형광등과 형광등+메탈할라이드램프 혼합광 처리에서 측면상추, 레드치커리, 적근대, 엔디브, 적치커리 등을 재배한 결과 4주 후 생육은 형광등 처리에서 가장 양호하였다고 보고하여 본 실험의 ‘Seneca RZ’ 품종 결과와 유사한 결과를 보였다. 그러나 겨자채와 케일, 잎브로콜리는 형광등과 메탈할라이드램프의 혼합광 처리에서 그 생육이 더 양호하여 광원종류에 따라 작물의 생육이 영향을 받는 것은 확실하나 품종별로 광원의 영향이 서로 다른 것도 확인할 수 있었다. 또한 Li와 Kubota(2009)에 따르면 ‘Red Cross’ 어린잎 채소를 형광등, 형광등과 UV LED (373nm), 형광등과 적색LED(658nm), 형광등과 원적색 LED(734nm) 조건에서 재배하였을 때 형광등과 원적색 LED(734nm) 조건에서 그 생육이 가장 좋은 결과를 보여 작물에 따라서 인공광원의 영향이 서로 다를 수

있었다.

광원이 상추의 형태발달에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 엽형지수를 측정된 결과 두 품종 모두 생육 중기에는 광원의 종류와 품종의 차이가 엽형지수에 영향을 미치지 않았다(Table 3). 그러나 생육 후기에는 품종에 대한 차이가 나타났는데, ‘Seneca RZ’ 품종 보다 ‘Gaugin RZ’이 세 가지 광원처리 모두 잎이 길어지는 결과를 보였으나 광원에 대한 엽형지수의 통계적 유의성은 인정되지 않아 광원이 잎의 형태에 미치는 영향을 찾을 수 없었다. Fig. 4에서 보는 것처럼 품종에 관계없이 FL에서 잎이 가장 잘 전개되고 RBW와 MH에서 생장점을 중심으로 엽수는 증가하나 완전히 전개되지 못하고 총생하는 경향을 보였으며, 상대적으로 잎이 말리는 증상도 많이 관찰되었다. LEE 등(2010)도 광질을 변환하면서 어린잎 상추를 재배한 결과 형광등에서 엽장이 가장 길어져 엽형지수가 상대적으로 가장 큰 결과를 보였으며, LED의 청색광 비율을 증가시킴에 따라 엽형지수가 감소하여 상추 잎의 길이신장보다는 엽폭이 증가하는 경향을 나타내어 도장이 억제되는 결과를 보였다고 하였다.

상추재배에 있어서 상품성에 가장 큰 영향을 미치는 요인 중에 하나가 잎끝마름증이다. 식물공장에서 자란 식물은 성장속도가 빠른 것이 특징인데, 이러한 빠른 생육속도로 인해 양수분 흡수에 문제가 발생하고 배양액 환경이 자주 급변하기 때문에 식물공장에서 잎끝마름증이 많이 발생하는 것으로 알려져 있다(Cho 등, 1998; Daniel과 Tibbitts, 1991). 생육 중기에 ‘Seneca RZ’ 품종은 FL을 제외한 모든 광원에서 잎끝마름증이 발생하였으며, 특히 RBW에서 그 발생정도가 가장 심하였다. 반면 ‘Gaugin RZ’ 품종은 MH에서만 약간의 잎끝마름증이 발생하여 ‘Seneca RZ’ 품종에 비해 잎끝마름증에 둔감한 품종으로 판단하였다. 그러나 생육 후기로 갈수록

식물공장에서 인공광원의 종류가 반결구상추의 광합성, 생육 및 기능성물질 함량에 미치는 영향

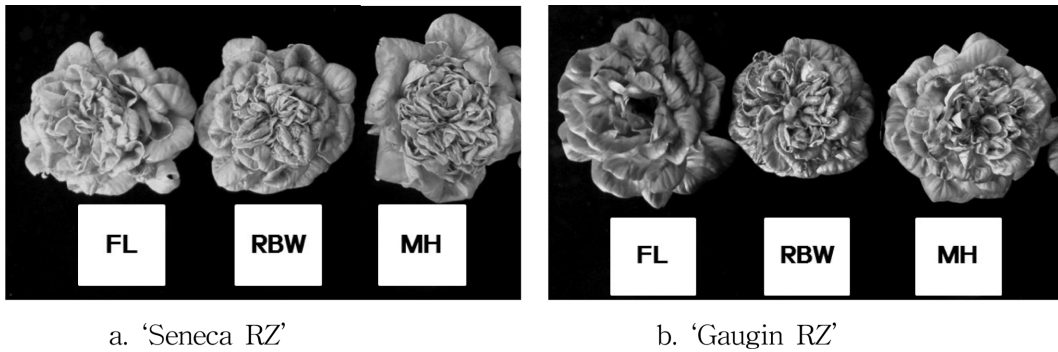


Fig. 3. The growth characteristics of two butterhead lettuce grown with different artificial light sources at 32 days after transplant in the plant factory.

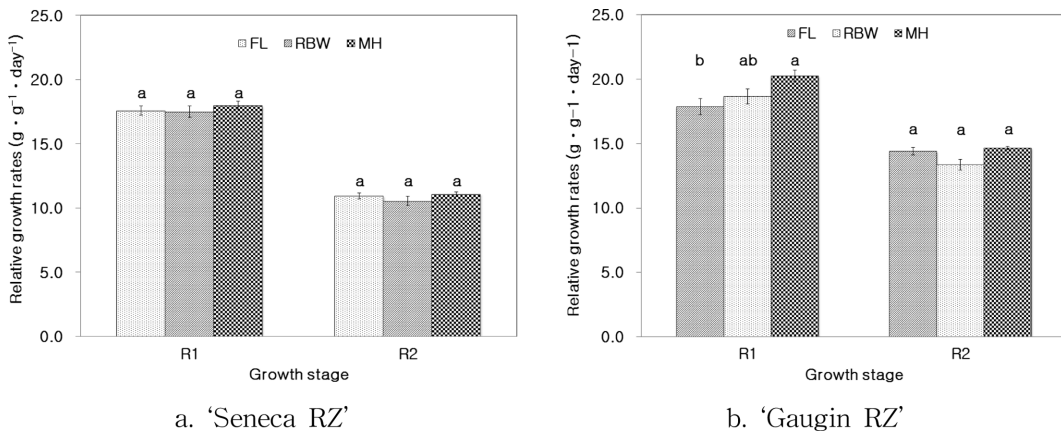


Fig. 4. The relative growth rates (RGR) of two butterhead lettuce grown with different artificial light sources in the plant factory (R1: middle stage- measured From Sep. 9 to Sep. 23, 2011/R2: last stage-measured From Sep. 23 to Oct. 10, 2011). Small letters inside the figure indicate mean separation by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

잎끝마름증은 'Gaugin RZ' 품종의 FL을 제외한 모든 광원에서 발생되었으며, 특히 RBW에서는 그 발생율이 100%로 잎끝마름증 발생이 심하게 촉진되는 것으로 나타났다. 생육이 좋았던 MH에서도 품종별로 각각 66.7%와 83.3%의 발생율을 보여 상품성이 많이 떨어지는 결과를 보였다. Collier와 Tibbitts(1982)에 따르면 잎끝마름증은 온실이나 챔버에서 구가 형성되는 초기단계에 더 심하게 발생한다고 하였으나 본 실험에서는 생육 후기로 갈수록 그 발생정도가 심하게 나타나 기존의 연구결과와 다른 결과를 보였다. 일반적으로 광도가 증가하거나 일장이 길어지면 잎끝마름증의 발생률이 증가하고 발생정도가 심해지는 것으로 알려져 있는데(Gaudreau 등, 1994; Pressman 등, 1993) 본 실험의 결과에 의하면 광도뿐만 아니라 광원 종류에 따른 광질도 영향을 미치는 것으로 판단된다. 더욱이 시설재배 조건과 비교했을 때 광도가 낮고 광질, 온도 등 환경조건이 다르기 때문에 광도, 광질, 환경조건이 잎끝마름증 발생에 미치는 영향에 대한 추가적인 실험이 필요할 것으로 판단하였다.

생육단계를 두 단계로 나누어 그에 따른 반결구 상추의 상대생장률을 분석한 결과 두 품종 모두 대부분의 광원에서 생육 중기에 그 생육이 촉진됨을 알 수 있었다(Fig. 4). 'Seneca RZ'는 시기에 따른 생육속도의 차이는 있었으나 각 시기별로 광원의 종류에 대한 생육속도의 차이는 나타나지 않았다. 반면에 'Gaugin RZ'은 생육 중기에 MH에서 생육속도가 다른 광원에 비해 조금 빠른 결과를 보였으나 생육후기에는 광원 종류에 대한 생육속도의 차이는 나타나지 않았다.

3. 인공광원의 종류에 따른 반결구 상추의 영양학적 품질평가

서로 다른 인공광원에서 재배한 반결구상추의 영양학적 품질을 평가하기 위해 주요 영양성분을 분석하였다(Table 5). 본 실험에서 나이아신을 제외한 비타민 B1, B2 및 β -Carotene 함량은 품종과 인공광원의 종류에 대해 고도로 유의한 통계적 차이가 인정되었다. 'Seneca RZ'는 RBW에서 4종의 비타민 모두 함량이 높은 결과

Table 5. Phytochemical contents of two butterhead lettuce at 32 days after transplant under different artificial light sources in the plant factory.

Varieties	Light sources	Vitamins				Minerals				
		B1 (mg/100 g)	B2 (mg/100 g)	Niacin (mg/100 g)	β-Carotene (μg RE/ 100 g)	Calcium (mg/100 g)	Iron (mg/100 g)	Potassium (mg/100 g)	Magnesium (mg/100 g)	Phosphorous (mg/100 g)
Seneca RZ	FL	0.049	0.093	0.087	181.011	67.457	1.369	354.491	28.112	14.222
	RBW	0.076	0.098	0.107	234.383	61.578	1.514	270.319	28.067	13.799
	MH	0.062	0.077	0.077	134.177	62.246	1.553	250.791	28.485	2.541
Gaugin RZ	FL	0.018	0.077	0.068	567.801	50.875	1.689	336.033	22.145	5.003
	RBW	0.031	0.095	0.143	702.743	50.915	1.567	264.532	23.971	7.261
	MH	0.036	0.079	0.072	595.381	56.388	1.702	274.264	25.411	10.214
Significancez										
Variety (V)		***	***	NS	***	***	*	NS	***	***
Light source (L)		***	***	***	***	**	NS	***	*	***
V × L		***	***	***	***	***	NS	NS	*	***

*Probability of significant F values: NS, *, **, ***: non-significant or significant at $p \leq 0.05, 0.01, 0.001$, respectively.

를 보였다. ‘Gaugin RZ’는 비타민 B1을 제외한 3종의 비타민에서 ‘Seneca RZ’와 같이 RBW에서 그 함량이 높았다. 특히 β-Carotene 함량은 ‘Gaugin RZ’ 품종에서 ‘Seneca RZ’에 비해 2배 이상 높은 함량을 보였고, ‘Gaugin RZ’ 품종 내에서도 RBW에서 월등히 높은 결과를 보였다. 이것은 메탈할라이드등은 자연광과 유사한 방사분포를 보유하고 있으며 적색광역을 많이 포함하고 있으나 청색광역이 적고, 형광등은 청색광영역은 많이 포함하고 있으나 적색광영역이 부족하기 때문에 적색광과 청색광을 많이 포함하고 있는 RBW에서 보다 비타민과 β-Carotene 합성이 저조했기 때문으로 판단된다. Li와 Kubota(2009)의 결과에서는 잎상추의 β-Carotene 함량이 백색 형광등과 백색 형광등 + UV(373nm)와 백색 형광등 + Blue(476nm)에서 높게 나타났고, 어린 콩묘의 잎에서 β-Carotene의 함량은 적색 LED에서 청색, 백색 LED와 암상태에서 재배한 것에 비해 높은 결과를 보였다고 하였다(Wu 등, 2007).

식물체의 무기물 함량을 분석한 결과 칼슘, 마그네슘, 인 함량에서 품종에 따른 차이와 광원의 종류에 대한 차이가 나타났고 철 함량은 품종간의 차이만 나타났으며, 칼륨 함량은 광원의 종류에 대한 차이만 나타났다.

본 실험에서 분석한 결과 대부분의 성분에서 광원의 종류에 따른 통계적 유의성이 인정되어 광질이 반결구 상추의 영양학적 품질에 기여하는 바가 큰 것으로 판단하였다. 그러나 성분과 품종에 따라 각각의 광원의 영향이 서로 달라 특정한 광원으로 많은 종류의 성분을 증가시키는 것은 어려운 것으로 생각하며 특정한 기능성 성분을 기준으로 광원을 선택하여 재배방법을 확립한다면 기능성 결구상추 생산에 유용할 것으로 판단하였다.

적 요

본 연구는 식물공장에서 인공광원에 따른 서로 다른 파장이 ‘Seneca RZ’와 ‘Gaugin RZ’ 반결구 상추의 광합성 특성, 생육 및 기능성물질 함량에 미치는 영향을 밝히고자 수행하였다. 본 실험에서는 FL(fluorescent lamp), 적색LED와 청색LED 및 백색LED(RBW; red : blue : white = 5 : 4 : 1)와 MH(metalhalide lamp)를 사용하였다. 두 품종 모두 생육 중기에는 RBW에서 광합성속도가 높고 생육 후기에는 ‘Seneca RZ’ 품종은 RBW에서, ‘Gaugin RZ’ 품종은 MH에서 그 생육이 좋았다. 반결구 상추의 생육은 광원에 따라 생육 차이를 보였으나 각각의 광원의 영향은 품종에 따라 서로 다른 결과를 보였다. ‘Seneca RZ’ 품종은 생육 중기에는 MH에서, 생육 후기에는 FL에서 생육이 좋았고, ‘Gaugin RZ’ 품종은 생육 중기와 후기 모두 MH에서 생육이 좋은 결과를 보였다. 그러나 수확시기에 ‘Seneca RZ’ 품종은 모든 광원 처리에서, ‘Gaugin RZ’ 품종은 FL을 제외한 나머지 광원에서 반결구 상추의 잎끝마름증이 발생하는 결과를 보였다. 생육 단계별로 두 품종 모두 생육 중기가 후기에 비해 전 반적으로 생육속도가 빠른 결과를 보였다. ‘Gaugin RZ’ 품종에서 생육 중기에만 광원 종류에 대한 생육속도의 차이를 보였고 생육후기에는 광원의 종류와 품종의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 인공광원에 따른 두 품종의 반결구 상추의 영양학적 특성은 대부분의 성분에서 광원의 종류에 따른 통계적 유의성이 인정되어 광질이 반결구 상추의 영양학적 품질에 미치는 것으로 판단하였다. 두 품종 모두 RBW에서 4종의 비타민 함량이 높은 결과를 보였으며, 특히 β-Carotene의 함량이 ‘Gaugin RZ’ 품종의 MH에서 가장 높은 결과를 보였다. 이상의

결과에서 인공광원의 종류에 따라 반결구 상추의 생육, 광합성 특성 및 영양학적 품질이 차이가 있으나 품종과 기능성 물질에 따라 각 광원의 영향이 서로 다른 결과를 보여 식물공장 내에서 재배하는 품종과 증진시키고자 하는 기능성 물질에 따라 광원의 선택을 고려해야 할 것으로 판단하였다.

추가 주제어 : 광도, 광질, 잎끝마름증, 파장

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호: PJ907044032012)의 지원에 의해 이루어진 것임.

Literature Cited

- 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-Env. Con.* 7(1):35-42.
- Collier, G.F. and T.W. Tibbits. 1982. Tipburn of lettuce. *Hort. Rev.* 4:54-57.
- Cosgrove, D. 1981. Rapid suppression of growth by blue light. *Plant Physiol.* 67(3):584-590.
- Daniel, J.B. and T.W. Tibbits. 1991. Calcium localization in lettuce leaves with and without tipburn : comparison of controlled environment and field-grown plants. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116(5):870-875.
- Gaudreau, L., J. Charbonneau, L.P. Vezina, and A. Gosselin. 1994. Photoperiodic and photosynthetic photon flux influence growth and quality of greenhouse-grown lettuce. *Hort-Science* 29(11):1285-1289.
- Hwang, M.K., C.S. Huh, and Y.J. Seo. 2004. Optic characteristics comparison and analysis of SMD type Y/G/W HB LED. *J. Killee.* 18(4):15-21.
- 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.
- Kang, S.W. 2008. *Plant factory.* World science.
- Kasajima, S., N. Inoue, R. Mahmud, and M. Kato. 2008. Developmental responses of wheat cv. Norin 61 to fluence rate of green light. *Plant Prod. Sci.* (11):76-81.
- Kim, H.H., G.D. Goins, R.M. Wheeler, and J.C. Sager. 2004a. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red and blue-light-emitting diodes. *HortScience* 39(7): 1617-1622.
- Kim, H.H., G.D. Goins, R.M. Wheeler, and J.C. Sager. 2004b. Stomatal conductance of lettuce grown under or exposed to different light qualities. *Annals of Botany* 94(5):691-697.
- Kim, M.S. 2011. Effect of LED light quality treatment on the growth and functional optimization of foliage plant. PhD Thesis. Kongju National Univ., Kongju. Korea.
- Kim, T.S., S.P. Lee, S.I. Park, J.Y. Lee, S.Y. Lee, and H.Y. Jun. 2011. Physico-chemical properties of Broccoli sprouts cultivated in a plant factory system with different lighting conditions. *J. Korean Soc. Food Sci. Nutr.* 40(12):1757-1763.
- Kim, Y.H. 1999. Plant growth and morphogenesis control in transplant production system using light-emitting diodes (LEDs) as artificial light source. *J. Biosystems Eng.* 24(2): 115-122.
- Kim, Y.H., H.J. Kim, J.W. Lee, and J.M. Kim. 2008. Growth of potato plug seedlings as affected by photosynthetic photon flux in a closed transplants production system. *J. of Biosystems Eng.* 33(2):106-114.
- Knapp, A.K. and W.K. Smith. 1990. Stomatal and photosynthetic responses to variable sunlight. *Physiologia Plantarum* 78(1): 160-165.
- 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-Env. Con.* 19(4): 351-359.
- Lee, Y.B. and K.Y. Choi. 2010. Current status of plant factory in developed countries. *Bioin WebZine* 18.
- Li, Q. and C. Kubota, 2009. Effects of supplementary light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environ. Exp. Bot.* 67:59-64.
- Masahiro, K.M., T.E. Swartz, M.A. Olney, A. Onodera, N. Mochizuki, H. Fukuzawa, E. Asamizu, S. Tabata, H. Kanegae, M. Takano, J.M. Christie, A. Nagatani, and W.R. Briggs. 2002. Photochemical properties of the flavin mononucleotide-binding domains of the phototropins from Arabidopsis, rice, and *chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Physiology* 129(2):762-773.
- Matsumoto, T., H. Ihoh, Y. Shirai, and Y. Uno. 2010. Effects of light quality on growth and nitrate concentration in lettuce. *J. SHITA* 22(3):140-147.
- 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* 18:225-229.
- Pressman, E., R. Shaked, and L. Arcan. 1993. The effect of flower-inducing factors on leaf tipburn formation in Chinese cabbage. *J. Plant Physiol.* 141:210-214.
- 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-Env. Con.* 19(4):333-342.
- 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 Chemistry* 101:1753-1758.
- Yoon, C.G. 2012. A Study on the LED illumination lamp development and application for plant factory. PhD Thesis. Hongik University, Seoul. Korea. p. 38-48.