

적색/청색광의 비율 및 수확 전 광질변환이 어린잎상추의 생육 및 안토시아닌 함량에 미치는 영향

이준구* · 오상석 · 차선화 · 장윤아 · 김승유 · 엄영철 · 정승룡
국립원예특작과학원 채소과

Effects of Red/Blue Light Ratio and Short-term Light Quality Conversion on Growth and Anthocyanin Contents of Baby Leaf Lettuce

Jun Gu Lee*, Sang Seok Oh, Seon Hwa Cha, Yoon Ah Jang,
Seung Yu Kim, and Young Chul Um, Seung Ryong Cheong

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

Abstract. To establish the optimum artificial light illumination method for baby leaf lettuce in closed plant factory system, the effects of red/blue light quality and short-term light quality conversion on growth and anthocyanin content were investigated. The growth of 'Hongha' lettuce was most favorable under red single wavelength LED light after 23 days of treatment, sequentially followed by the growth under red/blue mixed light, blue light, and fluorescent light. Total anthocyanin content in the mixed red/blue light (R57-B43) was 4.1-fold and 6.9-fold increased compared to the red LED and fluorescent light, respectively. With increasing the blue light ratio to 43%, the growth of lettuce was significantly decreased, while the relative chlorophyll content and Hunter's a* value was increased, indicating that the red/blue light ratio inversely affects on growth and anthocyanin pigment development. By changing light quality from red to red/blue mixed light source (R57-B43) for 9 days before harvest, the growth rate decreased compared to the continuous red light illumination, while the anthocyanin content dramatically increased compared to either red LED or fluorescent light. Whereas, when the light source was changed to red light, the growth rate was increased but anthocyanin content was reversely decreased. The result demonstrated that both growth and anthocyanin expression could be effectively regulated by shifting of light quality between red and red/blue mixed light source at a specific growth stage of lettuce in a plant factory.

Key words : anthocyanin, LED, light quality conversion

서 론

상추는 쌈과 샐러드로 많이 이용되는 대표적인 신선 채소로 국내 생산량이 엽채류 중 배추 다음으로 높다. 전통적인 우리나라 음식문화의 한 형태인 쌈으로 많이 이용되었던 상추의 소비는 최근 샐러드와 어린잎채소의 주요 소재로서도 그 재배와 소비가 증가하고 있으며, 여러 생태형 중 적상추 계통은 항산화능과 기능성분이 청상추 계통에 비해 높게 함유된 것으로 알려져 있다(Riceevans 등, 1995; Youdim 등, 2002).

최근 계절에 무관하게 노지와 동등한 품질의 엽채류를 주년 생산하기 위하여 고도의 환경조절이 가능한 밀폐형 식물공장 생산방식에 대한 관심이 높아지고 있는데, 상추는 이러한 인공광원 이용 식물공장 생산방식에 가장 적합한 작물로 알려져 있다. 지금까지 상추는 시설 내에서 광에 대한 식물체의 반응을 연구하는데 있어서 모델식물로서 국내·외에서 빈번하게 활용되어 왔으며(Dougher와 Bugbee, 2001; Kim 등, 2004) LED 광원 관련 기술의 비약적 발전과 함께 식물공장 내 광환경조절에 의한 고품질 상추의 상업적 생산에 대한 기대도 국내에서 점차 높아지고 있다. 밀폐 공장형 생산방식으로 고품질 상추를 생산하기 위해서는 생산성을 확보할 수 있는 적절한 재배 시스템에

*Corresponding author: goahead1@korea.kr
Received November 9, 2010; Revised November 19, 2010;
Accepted November 30, 2010

서 품질과 기능성분 함량을 높일 수 있는 다양한 부가적 환경 스트레스의 부여가 필요한데, 이러한 스트레스 중 광환경 조절은 가장 효과적으로 기능성 물질의 함량을 증진시킬 수 있는 방법임이 알려져 있다 (Kopsell과 Kopsell, 2008; Perez-Balibrea 등, 2008).

광질이 성장과 품질에 영향을 미치는 요인에 대한 연구는 상추 등 다양한 작물을 대상으로 다각도로 수행되었는데, 적색광에서의 생육촉진 효과(Nishimura 등, 2009; Warrington과 Mitchell, 1976; Mortensen과 Strømme, 1987; Inada와 Yabumoto, 1989; Nishimura 등, 2006, 2007; Nishioka 등, 2008)와 LED에 대한 상추의 생리적 반응(Hoenecke 등, 1992) 등이 발표된 바 있다. 최근에는 플러그의 생장조절 목적으로서의 LED 광원의 이용 가능성도 검토되었는데, 식물공장형 묘 생산 시 LED 광질의 효과(Um 등, 2009)와 EOD 시점의 보광 시 다양한 광질의 효과(Kim 등, 2008)가 보고되었다. 생장 조절 뿐만 아니라 광원의 파장을 변화시킴으로써 작물의 색소 함량과 기능성 관련 물질을 증진시킬 수 있는 가능성도 많은 연구를 통해 확인되었다 (Nishimura 등, 2008; Hrazdina와 Creasy, 1979; Oh 등, 2009; Ordidge 등, 2010; Tsormpatsidis 등, 2008; Li와 Kubota, 2009). 또한 채소의 새로운 재배 형태로 주목되고 있는 새싹채소의 기능성 증진(Cho 등, 2008)과 파프리카의 수확 후 색도증진(Choi 등, 2009) 등 다양한 농업분야에 있어서 LED의 적용 가능성이 계속해서 밝혀지고 있다.

이와 같이 광질에 대한 상추의 생육 및 품질 변화 관련 연구는 국내·외에서 다수 수행된 바 있으나 셀러드용 어린잎채소 종류 중 적색의 풍미를 더하는 중요한 소재인 적상추를 대상으로 LED 조합광질 조건하에서의 생육과 안토시아닌 색소 함량 변화에 대한 검토는 부족한 실정이다. 이에 본 연구는 식물공장 내 적색광과 청색광의 다양한 혼합 광원 하에서 적상추의 생산성과 색소발현을 극대화시킬 수 있는 조건을 구명하여 향후 국내 식물공장에서의 고품질 및 가능성이 향상된 상추와 어린잎채소의 생산을 위한 기초 자료로 이용하기 위하여 수행되었다.

재료 및 방법

광질에 대한 상추의 생육 및 품질변화를 구명하기

위하여 온도가 조절되는 저면관수 다단 생육상을 제작하여 재배에 이용하였다. 실험에 사용한 품종은 ‘홍하적측면’(농우바이오)으로, 육묘용 플러그트레이(105공)에 원예용상토(홍농바이오 1호)를 충전하여 파종부터 수확 시점까지 생육상의 인공광 조건하에서 23일간 재배하였다. 파종 직후부터 플러그트레이 하부의 출수공을 통해 주야간 1회, 각 20분간 타이머에 의하여 자동으로 저면 관수하였고 시험 종료 시점까지 물만 공급하여 재배를 하였다.

일장은 16시간으로 하였고, 온도는 15 및 25°C로 처리하여 LED 광질의 효과를 구명하기 위하여 반사필름으로 격리된 각 모듈별로 적색광(R100-B0), 청색광(R0-B100) 및 적색과 청색 혼합광의 광원을 설치하여 관행 형광등(FL) 조건과 상추의 생육 및 품질 변화를 조사하였다. 적색과 청색광의 혼합비율을 달리한 광질로 처리하기 위하여 적색과 청색의 LED 소자비율을 100:0(R100-B0), 87:13(R87-B13), 67:33(R67-B33), 57:43(R57-B43)으로 각각 처리하였다. 수확 전 9일간 단기 광질 변화의 효과를 구명하기 위하여 별도로 파종 14일 후 단일파장의 적색광(R100-B0) 처리에서 적색과 청색의 혼합광(R57-B43)으로 광질을 변환시킨 처리구와, 역으로 R57-B43으로부터 R100-B0으로 변환시킨 처리구를 두어 지속적으로 동일 파장에서 재배한 식물체의 생육 및 색소함량과 비교하였다. 시험에 사용한 LED 광원의 광파장 스펙트럼은 적색광이 668nm, 청색광이 462nm의 최대피크를 보였고(Fig. 1), 각 모듈별 광도는 R100-B0(적색광 단일), R87-B13,

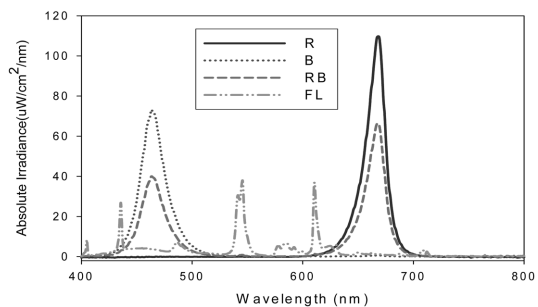


Fig. 1. The absolute irradiance spectrum of LED and fluorescent light sources. R, B, RB, and FL in legend represent Red, Blue, Red/Blue, and Fluorescent light sources, respectively. The wavelengths of maximum irradiance for Red and Blue LED lamps were 668 and 462 nm, respectively.

적색/청색광의 비율 및 수확 전 광질변환이 어린잎상추의 생육 및 안토시아닌 함량에 미치는 영향

R67-B33, R57-B43, R0-B100(적색광 단일), FL(형광 등)에서 식물체의 수광 부위를 기준으로 측정시 각각, 79, 79, 73, 66, 74 및 $70\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 값을 대략 나타내었다. 시험에 사용한 LED 광원 1개에는 1W 소자가 15개 포함되어 있었으며 각 광처리 모듈의 상단에 5개의 15W 소켓형 광원(총 75W)을 설치하였는데, 시험에 사용한 105공 플러그트레이($570\times 280\text{mm}$) 2개의 면적에 전 생육기간 동안 균등하게 조사되도록 하였다. 형광등(Osram co.)은 20W 용량의 소켓형으로 5개를 설치하였으며 각 모듈에 발생하는 열은 환기팬을 이용하여 주기적으로 순환시켜 모든 모듈의 온도분포가 동일하도록 처리하였다.

광원별 광질 분석에는 분광복사계(RPS-900R, InternationalLight Co.)를 이용하였고 광도의 측정은 Quantum meter(Spectrum technologies Inc.)를 이용하였다. 광처리 14 및 23일 후 어린잎 상추의 지상부와 지하부의 생체중, 엽형지수, 근장, 엽수, 엽면적을 처리별로 조사하였다. 적상추의 안토시아닌 색소발현의 간지 측정은 색도색차계(Chromameter, CR400, Minolta)를 이용하여 Hunter's a* 값으로 표시하였으며 상대 엽록소 함량은 간지 엽록소측정기(SPAD-502)를 이용하여 측정하였다. 총 안토시아닌 함량은 생체중으로 잎 2g을 채취하여 95% ethanol과 1.5N HCl을 85:15(v/v)로 혼합한 추출액을 가지고 마쇄하여 4°C에서 암조건 하에서 추출한 후 13,000rpm에서 20분간 원심분리하여 얻은 상정액을 희석하여 535nm에서 흡광도를 측정

하여 산출하였다(Fulecki와 Francis, 1968; Xu 등, 2007).

결과 및 고찰

재배상의 온도와 광질을 달리하여 파종 23일 후 어린잎 상태의 생육을 조사한 결과 25°C 하에서 지상부와 지하부의 생육이 촉진되었고 온도조건에 상관없이 광질에 따라서 생육에 큰 차이를 보였다. 시험에 공시한 '홍하' 적색면 상추는 단일 파장의 적색광(R100-B0) 조건하에서 지상부의 생육이 촉진되었으며 단일 파장의 청색광(R0-B100)하에서는 생육이 억제되었을 뿐만 아니라 엽수에서도 유의적으로 낮은 값을 나타냈다. 잎의 형태는 적색광 단일파장과 형광등 조건에서 잎의 길이신장이 촉진되었고 도장하는 경향을 보였으며 엽형지수 값이 높았던 반면, 적색광과 청색광의 혼합광원(R57-B43)하에서는 낮은 엽형지수 값을 보여 상추의 형태 및 발달 차원에서도 광질이 유의적인 변화 요인임을 확인할 수 있었다.

엽의 생육 측면으로만 보면 어린잎 상추를 생산하기 까지 23일간 적색광 단일파장이 생육 촉진에 가장 효과적이었고 혼합광, 청색광 및 형광등의 순으로 생육이 억제되었다. 저온 조건하에서 광질에 대한 영향은 고온 조건에 비해 상대적으로 컸으며 광질에 따른 생육속도의 차이는 고온 조건에서 상쇄되는 경향을 보였다 (Table 1). 형광등 하에서 생육이 크게 억제된 것은

Table 1. Effects of growing temperature and light qualities on growth of 'Hongha' lettuce at 23 days after treatment.

Temp. (°C) (A)	Light source (B)	No. of leaf	Leaf shape index ²	Fresh weight (g/plant)		Root length (cm)
				Leaf	Root	
15	R100-B0	4.6	1.59	3.41	0.17	13.6
	R0-B100	3.2	1.77	1.66	0.11	13.8
	R57-B43	4.0	1.16	2.30	0.09	13.6
	FL	4.2	1.65	1.33	0.06	11.4
25	R100-B0	4.4	1.54	3.52	0.77	14.8
	R0-B100	3.6	1.93	2.18	0.28	10.8
	R57-B43	4.8	1.21	3.02	0.71	13.0
	FL	4.0	1.72	1.67	0.35	12.0
A		*	ns	ns	**	ns
B		**	**	**	**	**
A*B		*	ns	**	**	*

²Leaf length to width ratio.

ns, *, ** Non-significant or significant at P = 0.05 or 0.01, respectively.

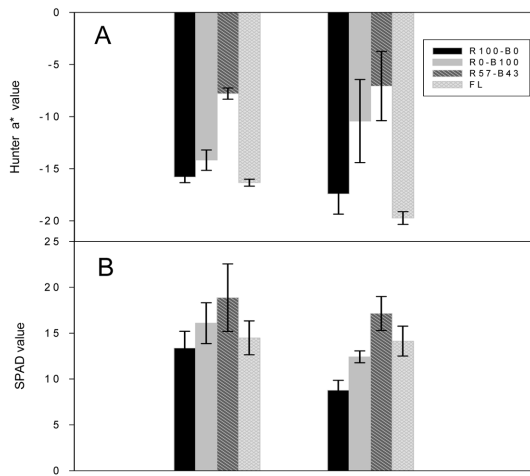


Fig. 2. Effects of growing temperature and light sources on Hunter's a and SPAD value of 'Hongha' lettuce. A; Hunter's a* value, B; SPAD value. Vertical bars represent mean \pm SD.

시험에 사용한 광도가 $70\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 LED와 ($66\sim 79\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 광도가 비슷하지만 동일한 광도에서 형광등에는 광합성에 필요한 적색광과 청색광의 광량이 LED에 비하여 적기 때문에 같은 광도 조건에서 생육은 형광등에 비해 LED의 조사로 촉진되는 것으로 추정할 수 있다.

온도와 광질에 따른 어린잎 상추의 색도색차 및 상대엽록소 함량 역시 생육양상과 유사하게 유의적인 차이를 나타내었다(Fig. 2). 적색의 발현을 대표할 수 있는 Hunter a* 값은 적색과 청색의 혼합광 LED 하에서 높은 수치를 나타내었는데 형광등에 비해 2.1배 향상된 적색도를 나타내었다. 형광등 하에서는 다른 광원 조건에 비해 색소발현이 낮았으며 상대 엽록소 함량에서도 동일하게 나타났다. 따라서 LED 단일파장 또는 형광등 조건에 비해 적절한 적색광과 청색광의 혼합광원하에서 식물공장 내 적상추의 색소발현을 유의적으로 높일 수 있는 가능성을 확인하였다. 저온에서는 고온에 비해 상대적으로 적색의 발현과 엽록소의 생성이 높아지는 경향을 확인할 수 있었으며 적절한 주야간 온도차와 광질의 조절을 통하여 밀폐 식물공장 내에서도 노지 조건과 동등한 품질의 상추를 생산할 수 있는 가능성을 확인하였다.

Nishimura 등(2009)은 적색광이 포함된 광원에서 자소의 생육이 촉진되며 안토시아닌 함량은 적색과 청

색광의 혼합광원에서 증대된다고 보고한 바 있다. 이외에도 적색광이 많이 포함된 광질에서 생육효과는 다수 보고(Warrington과 Mitchell, 1976; Mortensen과 Stromme, 1987; Inada와 Yabumoto, 1989; Nishimura 등, 2006, 2007)된 바 있으며 본 실험에서도 적색광의 생육촉진 효과가 뚜렷하게 나타났다. 품질과 기능성분의 축적에는 광도가 가장 크게 기여하지만(Vergeer 등, 1995; Keller과 Hrazdina, 1998), 광질 역시 안토시아닌 등 색소의 축적 영향을 미친다는 보고도 발표된 바 있다. 포도에서 UV 효과(Kataoka 등, 2003), 상추에서의 UV 효과(Tsormpatsidis 등, 2008), 토마토에서 청색광의 효과(Giliberto 등, 2005), 커피에서 청색광과 카로티노이드 함량 관계(Ramalho 등, 2002), 크랜베리의 안토시아닌 축적에서의 적색광의 효과(Zhou와 Singh, 2002), Far-red의 비율이 높을 경우 안토시아닌 생성 억제 효과(Yanovsky 등, 1998; Ramalho 등, 2002; Alokam 등, 2002) 등 다양한 작물과 측면으로 광질과 물질함량과의 관계가 검토된 바 있다. 특히 안토시아닌 색소의 발현과 관련해서는 청색광과 UV-A가 크게 작용하며 이는 cryptochrome이 이들 광파장의 광수용체로서 역할을 하기 때문(Ninu 등, 1999; Giliberto 등, 2005)으로 일반적으로 알려져 있다. 또한 청색광은 CHS(chalcone synthase)와 DFR(dihydroflavonol-4-reductase)의 발현을 촉진하여 안토시아닌 생합성을 조절하는 것으로 알려진 바 있다(Meng 등, 2004). 따라서 밀폐 식물공장 내 상추의 생산성을 유지하면서 고색도의 산물을 생산하기 위해서는 적색광과 청색광의 적절한 비율의 조절이 필요함을 나타내고 있다. 청색광 이외에도 UV-A 또는 B의 안토시아닌 증진 효과는 학술적으로 검토된 바 있으나(Kataoka 등, 2003; Khare와 Guruprasad, 1993)이의 실제 이용시에는 안전상의 문제가 제기될 수 있다. 본 실험에 있어서 혼합광 하에서의 적색도가 증진된 것은 청색광 과장영역의 포함으로 인한 안토시아닌 생합성 촉진 때문으로 추정되며 향후 생육량을 고려하면서 최대 품질을 달성하기 위한 최적 광파장 조합비율에 대한 보다 정밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

적색소의 주요한 부분인 안토시아닌 함량 역시 색도 색차 측정치와 유사한 결과를 나타냈으며 청색광과 적색광의 혼합광(R57-B43)하에서 생육한 어린잎 적상추는 적색광 단일광원의 4.1배, 형광등(FL) 조건에 비해

적색/청색광의 비율 및 수확 전 광질변환이 어린잎상추의 생육 및 안토시아닌 함량에 미치는 영향

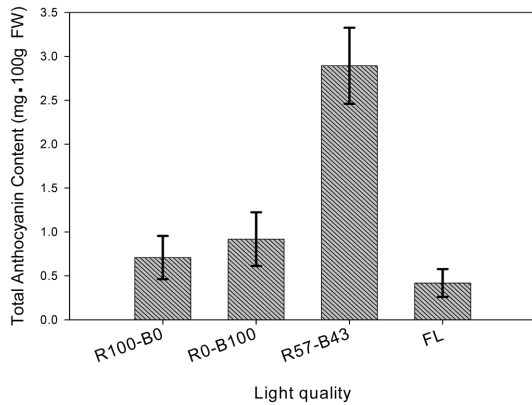


Fig. 3. Total anthocyanin contents of ‘Hongha’ lettuce under different light qualities. Growing temperature is constant 15°C. Vertical bars represent mean ± SD.

6.9배 높은 안토시아닌 함량을 나타내었다(Fig. 3). 시험에 사용한 광원별 광도는 66~79 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로서 실용적 식물공장 조건에 적용하기에는 낮은 광도로 판단되나 이러한 저광도 조건에서도 안토시아닌 색소발현의 차이가 처리별로 크게 난 이유는 LED의 광형태형성에 미치는 영향이 형광등에 비해 상대적으로 크게 작용하기 때문으로 추정되며 고광도 조건하에서의 안토시아닌 함량차이는 본 실험의 결과보다는 적을 것으로 예상된다. 본 실험을 통해 적절한 혼합광원의 조절은 적색도의 향상에 기여하며 식물공장 내 상품성이 있는 고색도 상추의 생산에 적용 가능할 것으로 생각된다.

광원의 적색과 청색광의 비율을 달리하여(적색 57~100%, 청색 0~43%) 처리한 후 생육과 안토시아닌 색소 발현 정도를 평가하였다(Table 2). 광원 내 청색광의 비율이 0에서 43%까지 높아짐에 따라 엽형지수가 감소하여 길이신장 보다는 엽폭이 증가하는 경

향을 나타내어 도장하는 경향이 감소하였다. 반면, 적색광과 청색광의 비율이 같은 혼합광(R57-B43) 하에서는 파종 후 하배측의 신장이 억제되는 경향을 보였고 형광등 조건 하에서 가장 길었다. 혼합광 하에서의 하배측의 생육 억제와 엽형지수의 감소는 향후 실용적 식물공장 재배 시 건설한 식물체의 초기 발달 유도에 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 엽면적과 생체중은 적색광 단일(R100-B0) 또는 낮은 비율의 청색광 혼합처리구(R87-B13)에서 높았으며 청색광의 혼합비율이 43%까지 높아짐에 따라 생육은 뚜렷하게 억제되었다. 청색광의 혼합비율 증가에 따른 생육억제 양상과는 반대로 상대 엽록소 함량과 적색도의 발현은 크게 증가하는 경향을 보였는데 Hunter's a* 값의 경우 형광등 또는 적색 단일광 조건에 비해 혼합광 처리구에서 최대 2.1~2.6배 증가하였다.

상추 생육에 적절한 청색광의 비율은 0~6%이고 (Hoenecke 등, 1992), 이를 환산하면 12시간 일장 조건하에서 15~30 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Li와 Kubota, 2009)이라고 보고된 바 있다. 본 실험에서는 청색광의 비율이 13~43%로 문헌상에 보고된 적정 생육에 도달시키기 위한 청색광의 비율 이상을 처리하였다. 생육 측면만을 고려할 경우 10% 미만의 약한 청색광을 조성하는 것이 효과적인 것으로 생각되나 색소함량을 높이기 위해서는 좀 더 높은 비율의 청색광 처리가 효과적일 것으로 판단된다. 청색광의 혼합비율이 증가함에 따라 생육량은 감소하는 대신 색소함량은 현저히 증가하였는데, 이는 실용적 측면에서 고려하면 재배 초기에 일정 수량을 달성한 후 수확 전 단기간 혼합광원으로 광질을 변환하여 색소함량을 증가시키거나, 반대로 색소함량을 일정 수준에 도달시킨 후 후기에 생육속도를 증가시키는 두 가지 가설이 검토될 수 있다.

Table 2. Effects of red and blue LED light ratio on growth of ‘Hongha’ lettuce at 23 days after treatment in growth chamber.

Light source	Hypocotyl length (cm)	No. of leaf	Leaf shape index ¹	Leaf area (cm ² /plant)	FW of leaf (g/plant)	SPAD value	Hunter's a* value
R100-B0	1.13 b ²	4.3 b	2.0 b	84.9 a	2.7 a	15.0 b	-25.7 c
R87-B13	1.10 b	5.0 a	1.8 bc	94.0 a	2.8 a	10.9 d	-15.5 c
R67-B33	1.19 b	4.4 b	1.7 c	50.1 b	1.8 b	13.1 c	-12.9 c
R57-B43	0.70 c	4.3 b	1.2 d	60.0 b	2.3 ab	17.1 a	-10.0 a
FL	1.71 a	3.0 c	3.0 a	34.1 c	1.3 c	11.5 d	-20.6 c

¹Leaf length to width ratio.

²Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

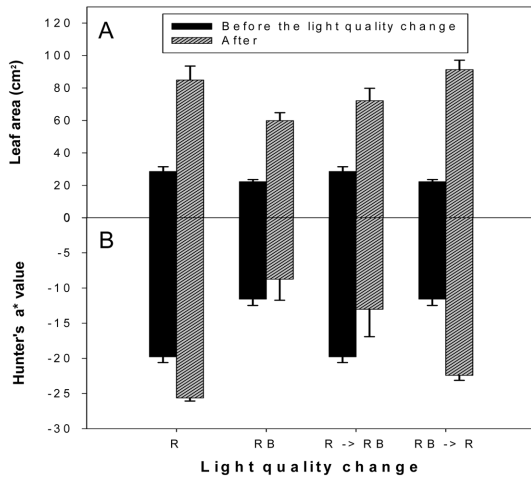


Fig. 4. Effects of short-term light quality change on leaf area (A) and Hunter's a* value (B) in 'Hongha' lettuce. The R, RB, R → RB, and RB → R in X axis represent continuous R100-B0, continuous R57-B43, R57-B43 conversion from R100-B0, and R100-B0 conversion from R57-B43 at 14 days after treatment for 9 days. Vertical bars represent SE of the means.

따라서 생육속도가 가장 빨랐던 적색 단일광 LED와 색소 발현이 촉진되었던 혼합광 LED의 상호 단기간 광질 변환 효과를 엽면적 변화와 색도색차 변화를 측정하여 검토하였다(Fig. 4). 전 생육기간 동안 지속적으로 적색 단일광(R100-B0) 조건하에서 재배한 경우 수확 전 9일간의 엽면적 증가속도는 6.3cm²/day이었고 혼합광(R57-B43) 지속 조사 조건에서는 4.2cm²/day 이었던 반면, 적색 단일광에서 혼합광으로 마지막 9일간 변환 처리시(R → RB)에는 4.8cm²/day로 크게 감소하였고, 혼합광에서 적색 단일광으로 변환시(RB → R)에는 7.7cm²/day로 증가하여 상추의 생육이 상대적으로 왕성해지는 시점에서 단기간 광질 변환으로 생육속도의 조절이 가능함을 확인하였다.

색소발현의 경우도 이와 유사하여 혼합광 조건에서 강하게 발현된 적색도는 적색 단일광 조건으로 변환시킬 경우 급격하게 소실되었으며, 반대로 적색 단일광 조건하에서 왕성하게 생육한 식물체를 혼합광으로 변환할 경우 적색도의 발현이 혼합광 지속 처리구에 근접하도록 향상되었다. 실제 식물공장의 적용성을 고려하면 후기에 생육을 증대시킬 목적으로 적색광의 비율이 높은 광원을 사용할 경우 생육량은 크게 증가하나 색소 역시 급격하게 소실되어 상품성 있는 적색상추

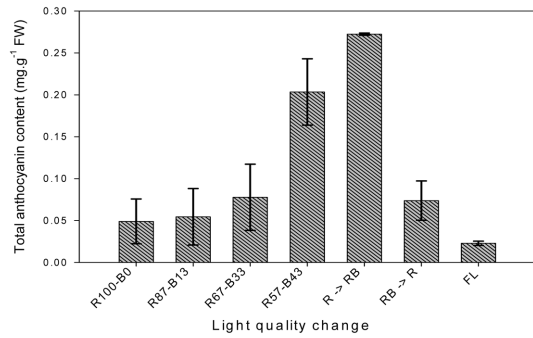


Fig. 5. Total anthocyanin contents of 'Hongha' lettuce under continuous or short-term change of light qualities. The R → RB and RB → R in X axis represent R57-B43 conversion from R100-B0, and R100-B0 conversion from R57-B43 at 14 days after treatment for 9 days. Vertical bars represent SD of the means.

의 생산은 어려울 것으로 판단되고, 반대로 생육을 일정 확보한 후 색소의 발현을 혼합광원 하에서 촉진시킬 경우에는 수량성도 일정 확보하면서 색소발현도 증진시킬 수 있을 것으로 판단되었다.

지속적인 광질 처리 및 광질 변환 처리에 따른 엽 색도색차의 변화가 실제로 안토시아닌 색소 함량의 증가로 연결되었는지 확인하기 위하여 상추 엽내 총 안토시아닌 함량을 분석하였다(Fig. 5). 적색 단일광 처리에 비하여 청색광의 비율이 증가함에 따라 안토시아닌 함량이 증가하는 경향이었으며 적색광과 청색광의 비율이 동등 혼합된 광원(R57-B43) 하에서 가장 높은 함량을 나타내었다. 단일 적색광 조건에서 혼합광으로 변환하였을 경우(R → RB) 안토시아닌 함량은 9일간의 처리로 약 5.4배 그 함량이 증가하였는데, 이는 혼합광원의 23일간 지속처리구에 비해서도 유의적으로 높은 수준이었다. 반대로 재배 14일까지 높은 적색도를 유지하였던 혼합광 조건에서 적색 단일광 조건으로 광질을 변환하였을 경우(RB → R), 혼합광 지속처리구와 혼합광으로의 변환 처리구에 비해 그 색소함량이 63.7%와 72.9%의 수준으로 안토시아닌 색소가 급격하게 소실되어 적색의 상품성 있는 상추의 생산이 어려울 것으로 판단되었다.

결론적으로, 식물공장 내 상추의 생육과 품질을 동반 제고시키기 위한 하나의 방법으로 상추의 생육이 왕성하게 진행되는 파종 후 2~3주 시점에서의 LED 광질 변환으로 생육과 색소함량의 동시조절 가능성이

확인되었다. 많은 작물에 있어서 적색의 파장 영역은 생육촉진을, 청색광과 UV 영역은 색소 및 기능성 물질 함량의 증대 효과가 있음이 수많은 연구를 통해 밝혀진 바 있으나, 색소 등 물질함량을 극대화시키기 위한 전략으로 청색광의 비율을 높이면 상대적으로 생육량이 떨어져 상업적 생산이 어려울 수 있으므로 작물에 따른 적색광과 청색광의 적합 비율, 에너지 효율을 고려한 광도 조건 및 UV-A 또는 B의 안전한 활용성에 대한 면밀한 검토가 필요하리라 판단된다.

본 연구는 식물공장에 대표적으로 이용되는 작물인 상추를 대상으로 어린잎 단계까지의 생육 및 색소함량의 변화를 적색광과 청색광의 비율 및 단기간 광질변환의 차원에서 접근한 것으로서 식물공장에서 고품질의 상추를 생산하기 위한 광조절 방법의 기초 자료로 이용 가능할 것으로 판단된다. 향후 엽채류의 기능성 물질의 증진을 위한 UV-A의 보광방법 및 형광등과 LED의 병용이용 시스템 등에 대한 세부적인 검토가 추가적으로 필요할 것으로 예상된다.

적 요

식물공장 내 생육과 안토시아닌 함량을 동반 제고시킬 수 있는 최적 광조사 방법을 구명하고자 적색광과 청색광의 비율 및 단기간 광질변환 조건을 달리하여 어린잎 상추의 생육 및 안토시아닌 색소발현 양상을 비교 평가하였다. 적색광 단일파장에서 어린잎 상추의 생육이 가장 좋았으며 혼합광, 청색광 및 형광등의 순으로 생육이 억제되었다. 어린잎 상추의 엽내 총 안토시아닌 함량은 청색광과 적색광의 혼합광(R57-B43) 처리에 의해 적색광 단일광원 조건에 비해 4.1배, 형광등(FL) 조건에 비해 6.9배 각각 증가되었다. 청색광의 혼합비율이 43%까지 순차적으로 높아짐에 따라 생육은 억제되었으나 상대 엽록소 함량과 적색도의 발현은 크게 증가하는 경향을 보였다. 수확전 9일간 적색 단일광으로의 광질변환시 생육은 크게 증진된 반면 색소는 급격하게 소실되었으며 반대로 혼합광으로의 광질변환시에는 생육속도는 감소한 대신 안토시아닌 색소함량은 형광등과 적색광에 비해 크게 높아졌다. 따라서 수확 전의 단기간 광질변환 시 적색광의 비율이 높은 광원조건에서 생육을 촉진시킨 후 적색과 청색의 동등 혼합광원으로 변환할 경우 생산성을 유지하면서

고품질의 고색도 상추를 생산할 수 있을 것으로 판단되었다.

주제어 : 광질변환, 안토시아닌, LED

인 용 문 헌

1. Alokam, S., C.C. Chinnappa, and D.M. Reid. 2002. Red/far-red light mediated stem elongation and anthocyanin accumulation in *Stellaria longipes*: differential response of alpine and prairie ecotypes. *Can. J. Bot.* 80:72-81.
2. Choi, I.L., J.H. Won, H.J. Jung, and H.M. Kang. 2009. Effect of red LED, blue LED and UVa light sources on coloration of paprika fruits. *J. Bio-Env. Con.* 18:431-435.
3. Cho, J.Y., D.M. Son, J.M. Kim, B.S. Seo, S.Y. Yang, B.W. Kim and B.G. Heo. 2008. Effects of LEDs, on the germination, growth, and physiological activities of Amaranth sprouts. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 26: 106-112.
4. Dougher, T.A.O., and B. Bugbee. 2001. Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue radiation. *Phytochem. Photobiol.* 73:199-207.
5. Fulecki T. and F.J. Francis 1968. Quantitative methods for anthocyanins. 1. Extration and determination of total anthocyanins in cranberries. *J. Food Sci.* 33:72-77.
6. Giliberto, 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.
7. Hoenecke, M.E., R.J. Bula, and T.W. Tibbitts. 1992. Importance of blue photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes. *Hortscience* 27: 427-430.
8. Hrazdina, G. and L.L. Creasy. 1979. Light induced changes in anthocyanin concentration, activity of phenylalanine ammonia-lyase and flavanone synthase and some of their properties in Brassica Oleracea. *Phytochemistry* 18:581-584.
9. Inada, K. and Y. Yabumoto. 1989. Effects of light quality, daylength and periodic temperature variation on the growth of lettuce and radish plants. *Jpn. J. Crop. Sci.* 58:689-694.
10. Kataoka, I., A. Sugiyama, and K. Beppu. 2003. Role of ultraviolet radiation in accumulation of anthocyanin in berries of 'Gros Colman' grapes (*Vitis vinifera* L.). *J. Jpn. Soc. Hort. Sci.* 72:1-6.
11. Keller, M. and G. Hrazdina. 1998. Interaction of nitro-

- gen availability during bloom and light intensity during veraison. II. Effects on anthocyanin and phenolic development during grape ripening. *Am. J. Enol. Vitic.* 49:341-349.
12. Khare, M. and K.N. Guruprasad. 1993. UV-B induced anthocyanin synthesis in maize regulated by FMN an inhibitors of FMN photoreactions, *Plant Sci.* 91:1-5.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Kopsell, D.A. and D.E. Kopsell. 2008. Genetic and environmental factors affecting plant lutein/zeaxanthin. *Agro Food Ind. Hi-Tech.* 19:44-46.
 16. Li, Q. and C. Kubota. 2009. Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany* 67:59-64.
 17. Meng, X.C., T. Xing, and X.J. Wang. 2004. The role of light in the regulation of anthocyanin accumulation in *Gerbera hybrida*. *J. Plant Growth Regul.* 44:243-250.
 18. Mortensen, L.M. and E. Strømme. 1987. Effects of light quality on some greenhouse crops. *Sci. Hortic.* 33:27-36.
 19. 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.
 20. Nishimura, T., K. Ohyama, E. Goto, N. Inagaki. 2009. Concentration of perillaldehyde, limonene, and anthocyanin of Perilla plants as affected by light quality under controlled environments. *Sci. Hortic.* 122:134-137.
 21. Nishimura, T., K. Ohyama, E. Goto, N. Inagaki, and T. Morota. 2008. Ultraviolet B radiation suppressed the growth and anthocyanin production of Perilla plants grown under controlled environments with artificial light. *Acta Hortic.* 797:425-429.
 22. Nishimura, T., S.M.A. Zobayed, T. Kozai, and E. Goto. 2006. Effect of light quality of blue and red fluorescent lampson growth of St. John's wort (*Hypericum perforatum* L.) *J. SHITA* 18:225-229 (in Japanese with English abstract).
 23. 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.
 24. 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 Hortic.* 797:431-436.
 25. 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.
 26. Ordidge, M., P. Garcia-Macias, N.H. Battey, M.H. Gordon, P. Hadley, P. John, J.A. Lovegrove, E. Vysini, and A. Wagstaffe. 2010. Phenolic contents of lettuce, strawberry, raspberry, and blueberry crops cultivated under plastic films varying in ultraviolet transparency. *Food Chemistry* 119:1224-1227.
 27. Perez-Balibrea, S., D.A. Moreno, and C. Garcia-Viguera. 2008. Influence of light on health-promoting phytochemicals of broccoli sprouts. *J. Sci. Food Agric.* 88: 904-910.
 28. Ramalho, J.C., N.C. Marques, J.N. Semedo, M.C. Matos, and V.L. Quartin, 2002. Photosynthetic performance and pigment composition of leaves from two tropical species is determined by light quality. *Plant Biol.* 4:112-120.
 29. Riceevans, C.A., N.J. Miller, P.G. Bolwell, P.M. Bramley, and J.B. Pridham, 1995. The relative antioxidant activities of plant-derived polyphenolic flavonoids. *Free Radical Res.* 22:375-383.
 30. Tsormpatsidis, E., R.G.C. Henbest, F.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 film. *Environmental and Experimental Botany* 63:232-239.
 31. Um, Y.C., Y.A. Jang, J.G. Lee, S.Y. Kim, S.R. Cheong, S.S. Oh, S.H. Cha, and S.C. Hong. 2009. Effects of selective light sources on seedling quality of tomato and cucumber in closed nursery system. *J. Bio-Env. Con.* 18:370-376.
 32. Vergeer, L.H.T., T.L. Aarts, and J.D. Degroot. 1995. The wasting disease and the effect of abiotic factors (light-intensity, temperature, salinity) and infection with labyrinthula-zosterae on the phenolics contents of zostera-marina shoots. *Aquat. Bot.* 52:35-44.
 33. Warrington, I.J. and K.J. Mitchell. 1976. The influence of blue- and red-biased light spectra on the growth and development of plants. *Agric. Meteorol.* 16:247-262.
 34. Xu, J., M. Zhang, X. Liu, Z. Liu, R. Zhang, L. Sun, and L. Qiu. 2007. Correlation between antioxidation and the content of total phenolics and anthocyanin in black soybean accessions. *Agricultural Sciences in China* 6:150-158.
 35. Yanovsky, M.J., T.M. Alconada-Magliano, M.A. Maz-

적색/청색광의 비율 및 수확 전 광질변환이 어린잎상추의 생육 및 안토시아닌 함량에 미치는 영향

- zella, C. Gatz, B. Thomas, and J.J. Casal. 1998. A phytochrome affects stem growth, anthocyanin synthesis, sucrose-phosphate-synthase activity and neighbour detection in sunlight-grown potato. *Planta* 205: 235-241.
36. Youdim, K.A., J. McDonald, W. Kalt, and J.A. Joseph. 2002. Potential role of dietary flavonoids in reducing microvascular endothelium vulnerability to oxidative and inflammatory insults. *J. Nutr. Biochem.* 13:282-288.
37. Zhou, Y. and B.R. Singh. 2002. Red light stimulates flowering and anthocyanin biosynthesis in American cranberry. *Plant Growth Regul.* 38:165-171.