

Research Article

Open Access

온실재배 케일의 생장에 미치는 보광효과

허정욱^{1,2*}, 김현환¹, 이광재^{1,2}, 윤정범¹, 이정관², 허윤선², 이기열²,

¹농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부, ²충청북도농업기술원 식물공학팀

Effect of Supplementary Radiation on Growth of Greenhouse-Grown Kales

Jeong-Wook Heo^{1,2*}, Hyeon-Hwan Kim¹, Kwang-Jae Lee^{1,2}, Jung-Boem Yoon¹, Joung-Kwan Lee², Yoon-Sun Huh² and Ki-Yeol Lee² (¹Department of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Wanju-gun 565-851, Korea, ²Plant engineering team, Chungbuk Agricultural Research & Extension Service, Cheongju 363-882, Korea)

Received: 20 November 2014 / Revised: 2 January 2015 / Accepted: 17 January 2015

Copyright © 2015 The Korean Society of Environmental Agriculture

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract

BACKGROUND: For commercial production of greenhouse crops under shorter day length condition, supplementary radiation has been usually achieved by the artificial light source with higher electric consumption such as high-pressure sodium, metal halide, or incandescent lamps. Light-Emitting Diodes (LEDs) with several characteristics, however, have been considered as a novel light source for plant production. Effects of supplementary lighting provided by the artificial light sources on growth of Kale seedlings during shorter day length were discussed in this experiment.

METHODS AND RESULTS: Kale seedlings were grown under greenhouse under the three wave lamps (3 W), sodium lamps (Na), and red LEDs (peak at 630 nm) during six months, and leaf growth was observed at intervals of about 30 days after light exposure for 6 hours per day at sunrise and sunset. Photosynthetic photon flux (PPF) of supplementary red LEDs on the plant canopy was maintained at 0.1 (RL), 0.6 (RM), and 1.2 (RH) $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$

PPF. PPF in 3 W and Na treatments was measured at 12 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$. Natural light (NL) was considered as a control. Leaf fresh weight of the seedlings was more than 100% increased under the 3 W, Na and RH treatment compared to natural light considering as a conventional condition. Sugar synthesis in Kale leaves was significantly promoted by the RM or RH treatment. Leaf yield per 3.3 m^2 exposed by red LEDs of 1.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF was 9% and 16% greater than in 3W or Na with a higher PPF, respectively.

CONCLUSION: Growth of the leafy Kale seedlings were significantly affected by the supplementary radiation provided by three wave lamp, sodium lamp, and red LEDs with different light intensities during the shorter day length under greenhouse conditions. From this study, it was suggested that the leaf growth and secondary metabolism of Kale seedlings can be controlled by supplementary radiation using red LEDs of 1.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF as well as three wave or sodium lamps in the experiment.

Key words: *Brassica oleracea*, Conventional production, Light-emitting diode, Sugar synthesis, Yield

*Corresponding author: Jeong-Wook Heo
Phone: +82-43-220-5656; Fax: +82-43-220-5629;
E-mail: wooncho@korea.kr

서론

온실과 같은 재배 시설내 구름, 강우 등의 기후변화에 의



Fig. 1. Inside view of the kale greenhouse before (left) and after (right) supplementary radiation provided by three wave lamps, sodium lamps, and red LEDs.

해 태양광 입사량이 부족해지거나 계절적으로 일장이 짧아지는 시기에는 작물의 광합성과 생장을 촉진시키기 위해서는 인공광을 이용하여 온실내 부족한 광을 인위적으로 보충해주는 보광기술이 필요하다(Albright, 1997; Dorais, 2003; Heo *et al.*, 2010; 2011a; 2011b). 온실재배 작물의 영양생장 및 생식생장에 영향을 미치는 다양한 환경요인 중에서 광강도와 광질은 보광을 위해 사용하는 인공광원의 영향을 받게 되는데, 온실과 같은 시설에서는 주로 고압나트륨등, 삼파장등, 백열등이나 메탈할라이드등과 같은 광원을 이용하여 보광하고 있다(Farina and Veruggio, 1996). 이 중에서 삼파장등, 백열등 및 고압나트륨등과 같이 비교적 전기에너지 소모량이 많은 인공광원은 우리나라 시설재배지에서 자연일장 연장을 위한 보광 목적보다는 동절기에 광원으로부터의 발열로 인한 시설내부 온도상승을 목적으로 많이 사용한다. 그러나, 일부 작물재배를 제외하고는 전력소모량에 비해 온도 상승이나 보광에 의한 생장촉진 효과는 현저하지 않은 것으로 알려져 있다.

상기 인공광원을 보광광원으로 사용할 경우 램프 자체로부터의 발열로 인해 동절기 이외에는 시설내 공조비가 증가하고 보광에 필요한 전력소모량이 높기 때문에, 발열량과 전력소모량을 절감시킬 수 있는 발광다이오드(Light-Emitting Diodes, LEDs)와 같은 대체광원에 대한 연구가 진행되고 있다(Bula *et al.*, 1991; Barreiro *et al.*, 1992; Tanaka *et al.*, 1998; Heo *et al.*, 2011a; 2011b; 2013; Chen *et al.*, 2014). LEDs는 다른 인공광원에 비해 전력소모량이 적고 램프 수명이 길며 광질을 용이하게 제어할 수 있다는 특징이 있어, 현재 다양한 작물 재배를 위한 인공광원으로써의 이용성이 검토되고 있다(Hoenecke *et al.*, 1992; Hunter and Burritt, 2004; Heo *et al.*, 2006; Morrow, 2008; Heo *et al.*, 2009; Olle and Akvile, 2013). 그러나 온실 조건에서 기존 인공광원 대신 LEDs를 보광광원으로 이용하여 케일과 같은 엽채류를 재배하는 경우, 보광광질이나 보광강도가 작물생장에 미치는 영향이나 관행의 인공광원의 생육특성 비교에 대한 연구는 그다지 많지 않다.

십자화과에 속하는 케일(*Brassica oleracea* L.)은 꽃케

일, 쌈케일 및 생즙용 케일 등 종류가 다양하며, 쌈채소, 녹즙용 채소나 샐러드용 채소로 이용되는 작물중 하나이다. 엽병이 굵고 엽장이 15 cm 이상인 케일은 쌈이나 샐러드용 엽채로 이용되기 보다는 주로 녹즙용으로 이용되는 경우가 대부분이다. 케일은 비타민류, 철분, 섬유질이나 베타카로틴 등 다양한 영양성분을 함유하고 있는데, 특히 glucosinolates나 flavonoids와 같은 물질을 다량 함유하고 있어 항산화, 항암 및 항염증 작용이 우수하기 때문에 최근 들어 국내에서도 녹즙용 건강식품으로 주목을 받고 있는 엽채이다(Velasco *et al.*, 2011).

일반적으로 온실과 같은 시설내에서 녹즙용 케일 잎을 재배할 경우에는 화학물질을 사용하지 않고 미생물 체제를 사용하여 병충해를 방제하면서 친환경적으로 연중 재배한다. 하절기와 같이 자연일장이 비교적 긴 계절에는 문제가 되지 않지만, 가을부터 이듬해 봄까지 케일을 재배하는 경우에는 자연일장이 짧아지거나 구름, 강우 등에 의해 온실 내부로 입사되는 태양광의 양이 감소하여 케일 잎의 생체중이나 수량이 감소하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 자연일장이 감소하는 시기에 시설내에서 케일을 재배하는 경우, 삼파장등, 나트륨등 및 적색 LEDs를 인공광원으로 이용하는 보광재배가 케일 신선엽의 생장 및 수량에 미치는 영향을 검토하였다.

재료 및 방법

식물재료 및 재배조건

식물재료는 파종후 3주간 육묘하여 본엽이 2~3매 전개한 케일(*Brassica oleracea* L., cv. Juicy Green) 싹생묘를 이용하였다. 보광실험은 충청북도 진천군에 위치한 ‘태평양 농장’수막식 케일재배 온실에서 자연일장이 짧아지는 시기인 9월부터 이듬해 3월까지 수행하였다(Fig. 1). 온실내 보광면적은 578 m²였으며, 3.3 m²당 42개체를 재식하였으며 실험기간 동안 온실내 최소 및 최대 온도는 16 및 38℃ 및 상대습도는 40~60%였다.

보광기간은 정식기인 9월부터 이듬해 3월까지 6개월로 하였으며 1일 평균 보광시간은 해질녘과 해뜰무렵 각각 3시

Table 1. Experimental design and amount of electricity consumption in each treatments of the experiment

Treatment codes	Light source	PPF ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)	Amount of electricity consumption (Watt/h)
NL	Natural light*	-	-
3 W	Three wave lamp	12	75
Na	Sodium lamp	12	100
RL	Red LEDs	0.1	12
RM	"	0.6	18
RH	"	1.2	24

* without any supplementary lighting during the experimental period

¹ PPF: Photosynthetic photon flux



Fig. 2. Kale leaves grown under supplementary lighting conditions with different light sources or intensities for 30 days after transplantation. NL, natural light without supplementary radiation; 3 W, three wave lamp with $12 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; Na, sodium lamp with $12 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; RL, red LEDs with $0.6 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; RH, red LEDs with $1.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF.

간씩 총 6시간으로 설정하였다. 각 보광광원은 온실 지면에 서 2 m 높이에 1 m 20 cm 간격으로 설치하였다. 보광을 위해 사용한 인공광원은 삼파장등, 나트륨등 및 630 nm 적색 LEDs 3종이었으며, 대조구는 보광을 하지 않은 자연광구 (NL구)로 하였다(Table 1). 보광처리구 중에서 적색 LEDs 처리구의 보광강도는 각각 0.1 (10 Lux, RL구), 0.6 (50 Lux, RM구) 및 1.2 (100 Lux, RH구) $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 세 수준으로 설정하였다. 또한 삼파장등(75 W, 3 W구) 및 나트륨등(100 W, Na구) 보광구의 보광강도는 12 (1,000 Lux) $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 였다.

생장량 조사 및 통계분석

보광기간 동안 30일 간격으로 케일 실생묘 전개엽을 수확하여 총 6회 생육조사를 실시하였다. 임의로 선발한 20개체의 실생묘를 대상으로, 30일 간격으로 농가 출하시기에 맞추어 각 개체 하부의 전개엽을 차례로 수확한 후 생체중, 건물중, 엽장 및 엽폭 등을 측정하였다. 또한 1, 3 및 5회차 수확

시에는 케일 잎을 수확하여 잎에서 합성된 당함량을 측정하여 평균값을 산출하였다(Rufty and Huber, 1983). 3.3 m^2 에 정식한 케일 개체수는 총 42개체로, 1개체에서 수확한 엽수를 수확량으로 하여, 보광개시 180일째 42개체 케일 잎의 평당 수확량을 조사하였다. 케일 잎의 건물중은 생체중을 측정한 후에 70°C 로 설정된 드라이오븐(VS-1202D4, VISION Co., LTD, Korea)에서 4일간 건조시킨 후 측정하였다. 통계분석은 SAS 프로그램(Version 6.21; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 수행하였으며, ANOVA 분석 후 6회 평균 생육 결과에 대하여 Duncan의 다중검정($P=0.05$)을 실시하였다.

결과 및 고찰

실험기간 동안 인공광원에 의한 보광강도 및 광질 제어는 케일 실생묘의 잎생장에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다(Fig. 2). 삼파장등(3 W구), 나트륨등(Na구) 및 적색 LEDs (RL구, RM구 및 RH구)를 이용하여 보광 재배한 케

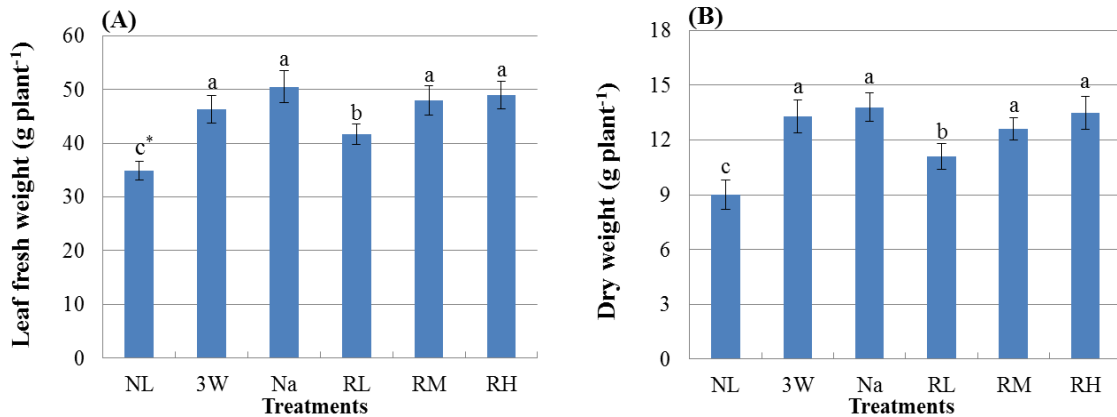


Fig. 3. Leaf fresh (A) and dry weights (B) including petiole of kale seedlings grown under supplementary lighting conditions with different light sources or intensities for 30 days. Vertical bars represent mean \pm standard error (n=6). *Different letter indicates the significant difference at the 5% level by Duncan's multiple range test. NL, natural light without supplementary lighting; 3 W, three wave lamp with $12 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; Na, sodium lamp with $12 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; RL, red LEDs with $0.1 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; RM, red LEDs with $0.6 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; RH, red LEDs with $1.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF.

일 잎의 생체중(엽병포함)은 보광하지 않은 자연광구인 NL 구에 비해 증가하였다(Fig. 3A). 생체중은 NL구에서 최소 값을 나타내었으며 보광강도 $12 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 3 W구, Na 구 및 $1.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 RH구에서 증가하였고, 이들 세 처리구의 생체중 간에는 통계적인 유의성이 없는 것으로 나타났다. NL구의 생체중은 보광강도 $0.1 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 적색 LEDs 보광구인 RL구에서 약 20%, RH구에서 40% 이상 증가하였으며, RM구와 RH구 간에는 보광강도 차이에 의한 유의성이 인정되지 않았다. RH구는 3 W구 및 Na구에 비해 보광강도가 1/10로 낮았음에도 불구하고 3 W 및 Na구에 비해 생체중이 감소하지 않았으며 세 처리구 간에 통계적인 유의차가 없는 것으로 나타났다. 건물중은 생체중 증가와 유사한 경향을 나타내었는데, 보광하지 않은 NL구에서 현저히 감소하였으며 3 W구, Na구 및 RH구에서 증가하는 것으로 보아 온실조건에서 보광배제한 케일 잎의 건물중 증가 역시 보광강도 보다 보광광질의 영향이 큰 것을 알 수 있었다(Fig. 3B). Na구에서 건물중이 증가하는 경향을, 3 W구에 비해 감소하는 경향을 보였으나 두 처리구간에는 통계적인 유의성은 없었으며, 3 W구, Na구와 RH구의 건물중은 NL구에 비해 47% 이상 증가하였다. 온실조건에서 적색광을 이용하여 보광하는 경우, $0.6 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이상의 보광강도에서는 건물중 증가에 유의한 차이를 나타내지 않았으며 $0.1 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 낮은 보광강도 조건에서도 보광하지 않은 경우에 비해 건물중이 20% 이상 증가하였다.

일반적으로 단일의 적색광질은 엽채류를 비롯한 다양한 작물의 생체중, 건물중 및 광합성에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Yanagi *et al.*, 1996; Goins *et al.*, 2001; Heo *et al.*, 2002; 2003; 2011a; 2011b; 2013). 적색 파장영 중에서도 피크 파장이 660~690 nm의 적색광질은 건물중 증가에 유효한 광질이라고 보고되고 있으나, 본 실험

에 이용된 630 nm 파장영과 같이 640 nm 이하 파장영의 적색광질 또한 일부 작물에 유의한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Lefsrud *et al.*, 2008; Samuoliene *et al.*, 2012). 그러나, 태양광이 입사되지 않는 실험실 조건에서 적색광을 단일광질로 이용하거나 형광등과 혼합하여 형광등의 보조광원으로 이용하거나 녹색, 청색 등의 기타 파장영과 혼합 조사는 작물의 생체중이나 건물중 증가에 미치는 영향은 작물 종류나 생육단계의 차이에 따라서 '정'이나 '부'의 효과로 나타나기도 한다(Heo *et al.*, 2002; 2003; 2011a; 2011b; 2013). 또한, 상기 연구결과들은 본 실험조건과 달리 실험실 조건에서 적색광질을 주광원이나 기타 인공광원의 보조광원으로 이용한 연구사례이지만, 케일의 경우에는 태양광을 주광원으로 하는 온실내에서 태양광의 보광광원으로 적색광질을 조사하는 경우에도 건물중증가에 유의한 영향을 미친 것을 알 수 있다.

본 실험조건에서는 다른 보광처리구에 비해 비교적 보광강도가 높았던 3 W구, Na구와 RH구의 경우, 엽병을 제외한 엽장 신장은 보광광질이나 보광강도의 차이에 의한 영향이 그다지 크지 않은 것으로 나타났다(Table 2). 그러나, 적색 LEDs 보광구의 경우 보광강도가 $0.1 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 인 RL구에서는 Na구에 비해 엽장신장이 억제되었다. 보광강도가 0.6, 1.2 또는 $12 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 였던 RM구, RH구, 3 W구 및 Na구의 엽장은 RL구에 비해 약 6%, NL구에 비해 17% 증가하였으며 NL구에서는 엽장신장이 억제되었다. 한편 결과에는 나타나지 않았으나 보광하지 않은 NL구에서는 보광강도 및 보광광질의 차이와 상관없이 케일 잎의 엽장 및 엽폭이 감소하는 것으로 보아, 보광에 의한 엽장장 촉진효과를 확인할 수 있었다. 본 실험조건에서 엽장/엽폭 비율 변화에는 통계적인 유의성이 인정되지 않았는데, 이는 실험기간 동안 보광강도 및 보광광질의 차이가 케일 잎의 형태적인 변화에는 영향을

Table 2. Leaf length and total sugar content in the leaves of kale seedlings grown under supplementary lighting conditions with different light sources or intensities for 30 days

Treatment codes	Leaf length (cm)	Total sugar content (g Kg ⁻¹)
NL	15.3 c*	10.9 d
3 W	20.6 a	23.6 c
Na	21.6 a	30.1 b
RL	18.3 b	23.9 c
RM	18.9 b	33.0 ab
RH	20.8 a	36.7 a

* Different letter indicates the significantly difference at the 5% level by Duncan's multiple range test. NL, natural light without supplementary lighting; 3 W, three wave lamp with 12 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; Na, sodium lamp with 12 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; RL, red LEDs with 0.1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; RM, red LEDs with 0.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; RH, red LEDs with 1.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF.

미치지 않았다는 것을 의미한다.

보광기간 동안 케일 잎에서 합성된 당의 함량을 측정한 결과, 적색 LEDs 보광구의 경우 NL구에 비해 보광강도가 증가할수록 엽내 당합성이 촉진되어 보광강도 1.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 인 RH구에서 유의하게 증가하였다(Table 2). 그러나 RM구와 RH구에 있어서 보광강도의 차이에 의한 유의성은 인정되지 않았다. 엽내 당함량은 NL구에 비해 RH구에서 약 3.5배, RM구에서 약 3배 증가하였다. 12 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 보광강도가 높았던 3 W구와 Na구의 경우, Na구에서 3 W구에 비해 합성량이 27% 이상 증가하는 것으로 나타났다. 보광강도가 가장 낮았던 RL구에서는 보광강도가 120배 높았던 3 W구와 비교하여 당합성량에 유의한 차이가 인정되지 않았으나 NL구에 비해 2배 이상 증가하였다.

광합성 부산물의 하나인 당은 다양한 환경요인의 영향에 의해 합성되는데, 그중에서도 엽내에서 합성되는 당함량 증가에 영향을 미치는 광환경에 관한 연구결과들이 보고되고 있는데(Boo, *et al.*, 2002; Noichinda *et al.*, 2007), 레드비트 모상근이나 저장 케일잎내 당합성에 미치는 혼합광질 영향뿐만 아니라, 상추에서 적색 또는 청색의 단일광질 이외에 적색, 백색 또는 청색광 혼합광질에 의한 당합성 촉진관련 연구결과가 있다(Lin *et al.*, 2013). 또한 적색광질의 효과는 작물체내 당합성 뿐만 아니라 baby leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.)의 안토시아닌 색소합성에도 영향을 미치는 것으로 보고되고 있는데(Li and Kubota, 2009), 상기의 연구결과들은 대부분 실험실 조건에서 인공광만을 사용하여 작물을 재배하였을 때에 한정된 연구결과이다. 그러나 본 실험과 같이 작물의 생장이 자연광에 주로 의존하는 온실조건에서 인공광보다 1/10로 광강도가 낮은 적색광질만을 3~6시간 보광하는 것만으로도 케일 잎의 생장은 물론 당합성량이 유의하게 증가하는 것으로 보아, 온실조건에서 케일 이외에 잎을 수확하는 신선엽 재배시에도 적색 LEDs를 효과적으로 이용할 수 있을 것으로 생각된다. 한편, 적색 이외에 청색이나 원적색 등 특정 LEDs 광질은 작물체내 당합성 뿐만 아니라 항산화물질 합성이나 페놀물질 합성에도 영향을 미치는 것으로 보아

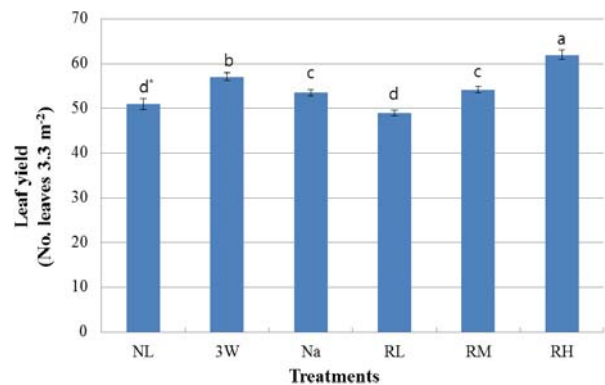


Fig. 4. Total leaf yield per seedling inside 3.3 m² of kales grown under supplementary lighting conditions with different light sources or intensities for 30 days. Vertical bars represent mean \pm standard error (n=42). *Different letter indicates the significantly difference at the 5% level by Duncan's multiple range test. NL, natural light without supplementary lighting; 3 W, three wave lamp with 12 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; Na, sodium lamp with 12 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; RL, red LEDs with 0.1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; RM, red LEDs with 0.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF; RH, red LEDs with 1.2 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ PPF.

(Farina and Veruggio, 1996; Boo *et al.*, 2002; Shinga *et al.*, 2009) 금후 당성분 이외에 케일내 물질대사와 관련된 광질 영향에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

보광기간 중 3.3 m²내 1개체당 30일 간격으로 수확된 총 케일 잎의 평균 수확량은 Fig. 4와 같다. 보광기간 동안 RH구의 수확량은 최대였으며, 보광강도가 높은 3 W구나 Na구에 비해 RH구의 잎수확량은 각각 9% 및 16% 증가하였다. RL구와 NL구의 수확량은 다른 보광처리구에 비해 현저히 감소하였다. 본 실험에서 설정된 광강도 범위내에서 적색 LEDs는 삼파장등이나 나트륨등에 비해 보광강도는 현저히 낮은 조건이지만 보광강도가 증가할수록 수확량이 증가하는 경향을 나타내었다.

Gomez 등(2013)의 연구결과에 의하면 과채류인 토마토의 경우 고압나트륨등이나 LEDs를 보광광원으로 이용할 경우 보광하지 않는 것보다 토마토의 수량이 증가하지만 케일과 달리 보광광원의 차이에 따른 수량 차이는 없었다. 그러나 보광광원으로 이용한 고압나트륨등과 LEDs의 전력소모량에는 현저한 차이가 있을 것으로 판단된다. 본 실험조건에는 적색 LEDs 보광구 중에서 보광강도가 비교적 높았던 $1.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ RH구 및 $12 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ Na구의 경우, 두 처리구간의 보광강도 및 광질은 상이하였다. 그러나 보광시간이나 보광기간이 동일한 조건에서는 생체중이나 건물중 증가에 있어서 두 처리구간에 유의한 차이가 없었다. 또한 나트륨등의 시간당 전력소모량이 RH구에 비해 4배 이상 높은 것으로 보아, 경제적 측면에서도 적색 LEDs를 이용한 보광이 전기에너지 절감면에서도 유용하다는 것을 알 수 있었다. 밀의 경우에는 적색의 단일의 적색 LEDs 광질 이외에 청색이나 백색 LEDs를 적색 LEDs와 혼합하여 조사하는 것이 수량 증가에 유의하다고 보고되었다(Dong *et al.*, 2014). Dong (2014)이나 Massa 등(2008)의 연구에서 알 수 있듯이, 앞으로는 적색을 포함하는 다양한 파장역의 LEDs를 이용한 온실 보광재배가 자연광 의존형 재배나 고전력소모 광원 보광재배와 달리 작물의 생산성을 높이는 동시에 전기에너지 절감에 유의한 재배기술이 될 것으로 전망된다.

한편, 모든 처리구 중에서 보광강도가 비교적 높았던 3 W 구나 Na구에서는 RH구에 비해 생장량이나 수확량이 동등한 수준이거나 감소하는 경향을 보였는데, 온실조건에서 보광하여 케일을 재배할 경우에는 보광강도나 광질의 차이뿐만 아니라 보광광원으로부터의 발열도 잎 생장에 영향을 미친 것으로 판단된다. 실제로 적색 LEDs 보광구에 비해 3 W 구나 Na구에서는 잎 끝이 마르거나 황화하는 현상이 관찰되기도 하였는데, 삼파장이나 나트륨 광원 하부에서 지표면 1 m 높이에에서의 온도를 측정한 결과, 적색 LED 광원에 비해 3 W 구나 Na구에서 평균 $1.5\sim 2^\circ\text{C}$ 높은 것으로 확인되었다.

결과에 나타내지는 않았으나 삼파장등, 나트륨등 및 적색 LEDs와 같은 인공광을 이용한 보광은, 보광하지 않은 NL구에서와 마찬가지로 실험기간 동안 케일 실생묘에서 개화 및 추대 현상은 관찰되지 않았다. 이로써 본 실험에서 설정된 $0.1\sim 12 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 수준에서의 보광강도는 실험기간 9월에서 이듬해 3월까지 케일의 추대 및 개화에 영향을 미치지 않는 광강도 범위임을 알 수 있었다. 특히, $1.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 적색 LEDs 보광구에서 케일 잎의 수확량이 유의하게 증가한 것은 적색광질이 엽채류 개화 및 추대지연에도 영향을 미쳤다는 것을 시사한다. 개화와 관련된 광질 특성 연구는 주로 화훼류를 중심으로 연구되고 있는데, Arabidopsis에서도 적색광질 조건에서 개화가 지연되었으며(Kenneth, 2006), 케일에서도 마찬가지로 적색광 하에서 개화가 지연되는 것으로 보아, 잎을 수확하는 엽채류의 경우에 개화 및 추대 특성이 수확량과 연결되기 때문에 특정 파장역을 갖는 LEDs를 보광광원으로 이용할 경우에는 보광광질의 특성을 파악하여 보광광원을 결정해야 할 것으로 생각된다.

일반적으로 녹즙용 케일은 2월과 9월 년 2회 파종하여 신선업을 지속적으로 수확하는데, 2월 파종 실생묘의 경우 일반적으로 6월 이후부터 8월 수확기까지 고온장일의 보광하지 않은 자연광 조건에서는 개화 및 추대가 관찰된다. 한편 9월 파종 실생묘의 경우, 춘 하절기에 비해 추 동절기에는 자연일장이 짧아지고 외부 기온이 낮아지기 때문에 의해 인공광원을 이용한 적정 광강도 수준에서의 보광에 의한 일장연장이 케일 실생묘의 개화 및 추대에는 영향을 미치지 않은 것으로 생각된다. 온실내에서 나트륨이나 메탈할라이드 등과 같은 인공광을 이용한 보광은 온실작물의周年생산을 위해 필요한 재배기술의 하나이다(Dorais, 2003; Moe *et al.*, 2006). 특히 적색 LEDs와 같이 상기 광원에 비해 보광강도가 낮고 전력소모량이 적은 광원을 이용하는 경우에도 상기 광원 대비 케일의 생장이나 수확량이 유사한 수준으로 유지되거나 증가하는 것으로 보아, 적색 LEDs를 이용한 보광은 케일 잎의 연중생산을 위해 유용한 보광기술로 생각된다. 앞으로는 보광강도 및 보광광질의 차이가 케일 실생묘의 생장뿐만 아니라, 개화 및 추대에 미치는 영향을 검토하고 케일 시설재배에 있어서 경제성을 고려한 재배 시기별 적절한 보광강도 및 보광광질을 구명할 필요가 있을 것으로 판단된다.

요 약

자연일장이 짧은 조건에서 온실과 같은 시설에서는 인위적으로 일장을 연장하여 작물 생육을 촉진하기 위해서 고압나트륨등, 백열등과 메탈할라이드등과 같은 다양한 인공광원을 이용하여 보광한다. 기존의 인공광원은 전력소모량이 높기 때문에 발광다이오드와 같이, 램프 수명이 길고 전력소모량이 적은 광원을 이용한 보광재배가 시도되고 있다. 녹즙용 엽채류의 하나인 케일을 재배하는 온실내에 삼파장등, 나트륨등 및 적색의 발광다이오드를 인공광원으로 하여 1일 3~6시간 보광하여 재배한 결과, 케일 잎의 생체중 및 건물중은 보광강도 $1.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 적색 LEDs 보광구, $12 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 삼파장등 보광구와 나트륨 보광구에서 보광하지 않은 자연광구에 비해 유의하게 증가하였다. 적색 LEDs 보광구에서는 보광강도가 증가할수록 케일 잎내 당함성량이 유의하게 증가하였으며, 평당 수확량 또한 최대값을 나타내었다. 본 실험을 통하여 온실조건에서 일출 및 일몰시 삼파장등, 나트륨등 및 적색 LEDs 인공광을 이용한 보광광원 및 광질을 제어하는 보광재배로, 케일 잎의 생체중, 건물중, 엽내 당함성 및 수확량을 증가시킬 수 있었다. 특히, 보광강도 $1.2 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 적색 LEDs는 삼파장등이나 나트륨등에 비해 전기에너지 소모량을 절감하면서 케일 잎의 생장 및 수확량을 유의하게 증가시킨 것으로 보아 보광광원으로서의 이용성이 기대된다.

Acknowledgment

This work was supported by a grant from the Agenda Program (PJ907067), Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Albright, L. D. (1997). Greenhouse thermal environment and light control. In *Plant Production in Closed Ecosystems* (pp. 33-47). Springer Netherlands.
- Bula, R. J., Morrow, R. C., Tibbitts, T. W., Barta, D. J., Ignatius, R. W., & Martin, T. S. (1991). Light-emitting diodes as a radiation source for plants. *HortScience*, 26(2), 203-205.
- Barreiro, R., Guiamét, J. J., Beltrano, J., & Montaldi, E. R. (1992). Regulation of the photosynthetic capacity of primary bean leaves by the red: far-red ratio and photosynthetic photon flux density of incident light. *Physiologia Plantarum*, 85(1), 97-101.
- Boo, H., Shin, K., Heo, J., Jeong, J., & Paek, K. (2000, November). Betalain synthesis by hairy root of red beet cultured in vitro under different light quality. In IV International ISHS Symposium on Artificial Lighting 580 (pp. 209-214).
- Chen, C. C., Huang, M. Y., Lin, K. H., Wong, S. L., Huang, W. D., & Yang, C. M. (2014). Effects of Light Quality on the Growth, Development and Metabolism of Rice Seedlings (*Oryza sativa* L.). *Research Journal of Biotechnology*, 9(4), 15-24.
- Dong, C., Fu, Y., Liu, G., & Liu, H. (2014). Growth, Photosynthetic Characteristics, Antioxidant Capacity and Biomass Yield and Quality of Wheat (*Triticum aestivum* L.) Exposed to LED Light Sources with Different Spectra Combinations. *Journal of agronomy and crop science*, 200(3), 219-230.
- Dorais, M. (2003, October). The use of supplemental lighting for vegetable crop production: light intensity, crop response, nutrition, crop management, cultural practices. In *Canadial Greenhouse Conference*, 1-8.
- Eskins, K. (1992). Light-quality effects on Arabidopsis development. Red, blue and far-red regulation of flowering and morphology. *Physiologia Plantarum*, 86(3), 439-444.
- Farina, E., & Veruggio, R. (1995, February). The effects of high-intensity lighting on flower yield of rose "Dallas". In II International Rose Symposium 424 (pp. 35-40).
- Goins, G. D., Ruffe, L. M., Cranston, N. A., Yorio, N. C., Wheeler, R. M., & Sager, J. C. (2001). Salad crop production under different wavelengths of red light-emitting diodes (LEDs) (No. 2001-01-2422). SAE Technical Paper.
- Gómez, C., Morrow, R. C., Bourget, C. M., Massa, G. D., & Mitchell, C. A. (2013). Comparison of intracanopy light-emitting diode towers and overhead high-pressure sodium lamps for supplemental lighting of greenhouse-grown tomatoes. *HortTechnology*, 23(1), 93-98.
- Heo, J. W., Kim, D. E., Han, K. S., & Kim, S. J. (2013). Effect of Light-Quality Control on Growth of *Ledebouriella seseloides* Grown in Plant Factory of an Artificial Light Type. *The Korean Journal of Environmental Agriculture*, 32(3), 193-200.
- Heo, J., Lee, J., Hong, S., & Kang, K. (2011a). Effects of light quality and intensity on the growth of cut roses under greenhouse conditions. *Japan Biology & Environmental Engineer & Scientists Conference*, 86-87.
- Heo, J. W., Lee, Y. B., Bang, H. S., Hong, S. G., & Kang, K. K. (2011b). Supplementary blue and red radiation at sunrise and sunset influences growth of *Ageratum*, *African Marigold*, and *Salvia* plants. *The Korean Journal of Environmental Agriculture*, 30(4), 382-389.
- Heo, J., Lee, C., Chakrabarty, D., & Paek, K. (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 Regulation*, 38(3), 225-230.
- Heo, J. W., Lee, C. W., Murthy, H. N., & Paek, K. Y. (2003). Influence of light quality and photoperiod on flowering of *Cyclamen persicum* Mill. cv. 'Dixie White'. *Plant Growth Regulation*, 40(1), 7-10.
- Heo, J. W., Lee, C. W., & Paek, K. Y. (2006). Influence of mixed LED radiation on the growth of annual plants. *Journal of Plant Biology*, 49(4), 286-290.
- Heo, J. W., Shin, K. S., Kim, S. K., & Paek, K. Y. (2006). Light quality affects in Vitro growth of grape 'Teleki 5BB'. *Journal of Plant Biology*, 49(4), 276-280.
- Heo, J. W., Lee, Y. B., Lee, D. B., & Chun, C. H. (2009). Light quality affects growth, net photosynthetic rate, and ethylene production of *ageratum*, *African marigold*, and *salvia* seedlings. *The Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 27(2), 187-193.
- Heo, J. W., Lee, Y. B., Kim, D. E., Chang, Y. S., & Chun, C. (2010). Effects of supplementary LED lighting on growth and biochemical parameters in *Dieffenbachia amoena* 'Camella' and *Ficus elastica* 'Melany'. *The Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 28(1), 51-58.
- Hoenecke, M. E., Bula, R. J., & Tibbitts, T. W. (1992). Importance of "Blue" Photon Levels for Lettuce Seedlings Grown under Red-light-emitting Diodes. *HortScience*, 27(5), 427-430.
- Hunter, D. C., & Burritt, D. J. (2004). Light quality influences adventitious shoot production from cotyledon

- explants of lettuce (*Lactuca sativa* L.). In *In Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 40(2), 215-220.
- Lefsrud, M. G., Kopsell, D. A., & Sams, C. E. (2008). Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in kale. *HortScience*, 43(7), 2243-2244.
- Li, Q., & Kubota, C. (2009). Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. *Environmental and Experimental Botany*, 67(1), 59-64.
- Lin, K. H., Huang, M. Y., Huang, W. D., Hsu, M. H., Yang, Z. W., & Yang, C. M. (2013). The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Scientia Horticulturae*, 150, 86-91.
- Massa, G. D., Kim, H. H., Wheeler, R. M., & Mitchell, C. A. (2008). Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience*, 43(7), 1951-1956.
- Moe, R., Grimstad, S. O., & Gislerod, H. R. (2005, June). The use of artificial light in year round production of greenhouse crops in Norway. In *V International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture* 711 (pp. 35-42).
- Morrow, R. C. (2008). LED lighting in horticulture. *HortScience*, 43(7), 1947-1950.
- Noichinda, S., Bodhipadma, K., Mahamontri, C., Narongruk, T., & Ketsa, S. (2007). Light during storage prevents loss of ascorbic acid, and increases glucose and fructose levels in Chinese kale (*Brassica oleracea* var. *alboglabra*). *Postharvest biology and technology*, 44(3), 312-315.
- Olle, M., & Viršile, A. (2013). The effects of light-emitting diode lighting on greenhouse plant growth and quality. *Agricultural and Food Science*, 22(2), 223-234.
- Rufty, T. W., & Huber, S. C. (1983). Changes in starch formation and activities of sucrose phosphate synthase and cytoplasmic fructose-1, 6-bisphosphatase in response to source-sink alterations. *Plant Physiology*, 72(2), 474-480.
- Samuolienė, G., Sirtautas, R., Brazaitytė, A., Viršilė, A., & Duchovskis, P. (2012). Supplementary red-LED lighting and the changes in phytochemical content of two baby leaf lettuce varieties during three seasons. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 10, 701-706.
- Shiga, T., Shoji, K., Shimada, H., Hashida, S. N., Goto, F., & Yoshihara, T. (2009). Effect of light quality on rosmarinic acid content and antioxidant activity of sweet basil, *Ocimum basilicum* L. *Plant biotechnology*, 26(2), 255-259.
- Tanaka, M., Takamura, T., Watanabe, H., Endo, M., Yanagi, T., & Okamoto, K. (1998). *In vitro* growth of *Cymbidium* plantlets cultured under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs). *Journal of Horticultural Science and Biotechnology (United Kingdom)*, 73(1), 39-44.
- Velasco, P., Francisco, M., Moreno, D. A., Ferreres, F., García-Viguera, C., & Cartea, M. E. (2011). Phytochemical fingerprinting of vegetable *Brassica oleracea* and *Brassica napus* by simultaneous identification of glucosinolates and phenolics. *Phytochemical Analysis*, 22(2), 144-152.
- Yanagi, T., Okamoto, K., & Takita, S. (1996, August). Effects of blue, red, and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants. In *International Symposium on Plant Production in Closed Ecosystems* 440 (pp. 117-122).