Studies on LED Wavelength to Enhance Growth and Bio-active Compounds of Carrots

Suna Kang · Min-Jung Kim · Bong Soo Kim · Sunmin Park*

당근의 성장과 생리활성물질 함량을 증진시키는 LED 파장에 관한 연구

강선아 · 김민정 · 김봉수 · 박선민*

Received: 5 January 2015 / Accepted: 3 March 2015 / Published Online: 30 June 2015
© The Korean Society for Applied Biological Chemistry 2015

Abstract Commercial greenhouse plant factories are highly efficient for controlling external factors such as floods, drought, insects, air pollution etc. However, they require substantial startup & maintenance investments and experimental research to optimize production. These facilities are especially useful for urban farming where high efficiency in small spaces is required. In this study, we investigated whether light emitting diode (LED) lights with mixed dominant wavelengths (650 nm : 550 nm : 445 nm=8:1:1, 650 nm : 445 nm=6:4) can increase the growth rate and bio-active compound content of carrots in comparison to that of fluorescent light (FL). LED with mixed wavelength (650 nm : 550 nm : 445 nm=8:1:1) increased the total weight and root circumference of carrots compared to FL. However, β -carotene contents were not significant in LED (650 nm : 550 nm : 445 nm=8:1:1). However, LED (650 nm : 445 nm=6:4) increased the β -carotene (FL: 7.27,

LED: 10.48 mg/g β -carotene dried weight). These results suggested that using LED light at the ideal wavelength, at the antithesis color of the plant, might enhance plant growth and bio-active compound contents.

Keywords β -carotene · carrot · growth · light emitting diode · plant factory

서 론

평균수명이 증가함으로 인해 노인의 인구가 증가하면서 국민들의 건강(well-being)에 대한 인식도가 날로 증가하고 있는 추세이다(Jang, 2010). 웰빙은 신체적 정신적으로 건강한 것을 의미하고 세계보건기구에서 처음 사용하였다. 건강에 관심이 높아짐으로 인해 유기농 식품, 친환경 식품, 노화방지 식품, 다이어트 식품 등 기능성 식품에 대한 소비자의 관심이 높아지고 있다(Park, 2011; Wang과 Lee, 2012). 이러한 기능성 식품을 생산하기 위해 다양한 연구가 진행되고 있는데 그 예로 식물공장(Plant factory)에서 재배하는 기능성 채소들에 대한 연구가 있다(Jeon과 Son, 2013).

식물공장(Plant factory, vertical farm)은 외부 환경에 영향을 받지 않고 정해진 환경 내에서 질 높은 수확물을 얻기에 적합한 시설이다. 기상 이변에 영향을 받는 일반 노지나 하우스 시설과 달리 병충해, 이상 기후와 같은 외부의 피해를 막을 수 있다는 장점을 가지고 있다(Lee, 2010). 전통적인 노지 경작보다 재배 기기가 비싸고 유지비용이 비싸다는 단점이 있으나(Kim, 2010) 이러한 단점을 보완하는 다양한 연구가 이루어지고 있다(Ijaz 등, 2012; Lee와 Kim, 2013). 식물공장은 기계적으로 빛과 습도, 온도 등을 조정하여 재배하는데 최근 light emitting diode (LED)를 이용한 식물공장 재배 연구가 늘어가고 있는 추세이다(Goto, 2012; Lee와 Park, 2014). LED는 가격은 비싸지

S. Kang and M.-J. Kim contributed equally.

S. Kang · S. Park
Dept. of Food and Nutrition, Division of Biotechnology Industry, Institute of Basic Science, College of Natural Science, Hoseo University, Asan, Republic of Korea

M.-J. Kim
Food Functional Research Division, Korean Food Research Institutes, Sungnam, Republic of Korea

B. S. Kim
Dept of R&D, Korea Parus, Cheonan, Republic of Korea

*Corresponding author (S. Park: smpark@hoseo.edu)

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.

만, 오랫동안 사용할 수 있고 에너지 효율이 높아 형광등이나 백열등에 비해 경제적이라는 장점이 있고, 특정 파장을 조절하고 혼합하여 사용할 수 있다는 특징이 있어서 형광등을 LED등으로 바꾸도록 권장하고 있다(Fred 등, 2005).

당근은 뿌리작물로 vitamin A의 전구체인 carotenoid를 다량 함유하고 있어 눈 건강에 좋은 채소로 알려져 있다(Karrer 등, 1930). carotenoid는 tetraterpenoids이고 이들은 400-550 nm의 파장을 가진 빛을 흡수한다. 이들은 빛 에너지를 흡수하여 광합성을 하는데 사용하고 클로로필 II가 빛에 의해서 파괴되는 것을 방지해 주는 역할을 한다. 사람에서는 carotenoid 중에서 α -carotene, β -carotene와 β -cryptoxanthin이 비타민 A의 효과를 나타내며 다른 carotenoid들은 항산화 기능을 한다고 알려져 있다. 특히 carotinoids 중에서 lutein, astaxanthin과 zeaxanthin는 자외선을 흡수하여 망막을 보호하는 역할을 한다고 알려져 있다. 특히 밝은 주황빛을 띄는 β -carotene은 비타민 A의 전구체로 작용할 뿐 아니라(Nishino, 1995) 암의 발생을 방지하는 역할이 있고(Lee 등, 1985), 산화적 스트레스로 인한 세포의 노화를 억제하는 역할을 한다고 알려졌다(Terao, 1989; Horton 등, 2001; Rattner와 Nathans, 2006). 당근은 carotenes을 섭취할 수 있는 가장 보편적인 식품이다.

본 연구자 사전연구에 따르면 연구에 사용된 LED 혼합 파장(red : blue : white=8:1:1)이 적체의 생육과 적체 내 생리활성 물질의 함량을 유의적으로 증진시켰지만, 방울토마토의 성장과 lycopene의 함량에는 영향을 미치지 않았다. 이는 적색의 비율이 높은 LED 등이 청색의 비율이 높은 적체의 성장에는 도움이 되지만 적색이 높은 식물의 성장에는 적합하지 않은 것으로 생각되었다. 이에 당근의 β -carotene의 함량의 증가에 영향을 미치는 LED의 파장에 관심을 가지게 되었다. 최근에 파장이 다른 LED 등으로 당근을 재배하였을 때 당근의 성장과 carotene 함량을 측정한 연구들이 있기는 하지만 다양한 혼합파장에서 연구한 것은 적었다(Samuolienė와 Duchovskis, 2012; Fu 등, 2013). 본 연구에서는 사전연구를 바탕으로 특정 파장을 조합한 혼합파장을 가진 LED를 조사하여 당근의 재배하였을 때 당근의 성장과 당근의 생리활성물질인 α -carotene과 β -carotene 함량을 가장 향상시키는 파장을 탐색하는 연구를 하였다.

재료 및 방법

광원 실험 1. 본 연구에서는 당근의 성장에 효과적인 조도가 $150 \mu\text{mol}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 알려져 있어서 이 조도를 LED군과 대조군에 모두 적용하였다. 대조군의 광원으로 형광등(white oslam super; Oslam, Korea)을 사용하였고, 실험군 광원으로는 LED (Parus, Korea)는 적색(650 nm), 백색(550 nm)과 청색(445 nm)파장을 8:1:1로 혼합한 것을 사용하였다. 대조광인 오슬람 형광등과 3색 혼합 LED를 각각 평균 $150 \mu\text{mol}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 조사하여 당근의 생육과 생리활성 물질에 미치는 영향을 조사하였다. 이러한 복합 파장 LED를 사용한 것은 적색 파장인 660-665 nm에서는 엽록소 작용이 최대이며, 발아작용과 잎 배포 화아형성을 극대화하였고, 청색 파장인 430-440 nm에서는 광합성 작용과 엽록소 작용의 최대를 나타낸다고 보고되어(Massa 등, 2008) 뿌리 생성에 효과적일 것이라고 생각되는 적색 파장을 주파장으로 하고 광합성에 필요한 청색 파장을 첨가하고 적색 파장과 청색 파장을 연결해주는 board 파장인 백색 파장을 첨가한 LDE

등을 제조하여 사용하였다. Samuolienė와 Duchovskis (2012)에 따르면 백색과 청색파장을 혼합한 LED를 조사하여 재배하였을 때 상추에 비타민 C와 총 페놀 함량이 증가하였고 적색 파장도 상추 생산을 증가시켰다(Shin 등, 2012). 또한, 적색과 청색 파장은 $88\text{-}238 \mu\text{mol}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 를 주로 사용하였다(Muneer 등, 2014).

광원 실험 2. 광원실험 1에서 당근을 재배시 적색(650 nm), 백색(550 nm)과 청색(445 nm)파장을 8:1:1로 혼합한 것이 생리활성 물질의 생성을 증가시키지 못했다. 이에 당근 내 생리활성 물질을 증가시키는 LED 탐색을 위하여 대조광으로 형광등(osram 30 W)을 사용하였고, LED 단파장은 15 W의 445, 460, 470, 625, 650 nm의 파장을 달리하였고, 혼합파장은 적색(650 nm), 청색(445 nm)파장을 5:5, 6:4, 7:3, 9:1로 비율을 조정하여 LED 사용하였다. 광원 실험 1에서 백색광은 당근 제조에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되어 적색과 청색 파장의 비율을 조절하여 당근의 성장을 관찰하였다. 이때 조사량은 모두 평균 $150 \mu\text{mol}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 이었다. 당근의 생리활성 물질에 미치는 LED의 영향을 조사하였다.

식물 재배 방법. 실내에서 식물의 재배시설을 갖추고 식물재배 공간을 구획하여 대조군으로는 형광등을 공급하였고 실험군으로 LED 혼합 광원을 각각 공급하였다. 당근은 농업회사법인 아시아종묘(주)(Korea)에서 구매하여 재배하였다. 당근의 품종은 국내 재배 품종인 소천 5촌 종자를 사용하였다. 당근은 재배 조건 중 온도는 밤낮의 온도 차이 없이 $19 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지시켜 주었고, 당근은 뿌리 작물이므로 배수 및 성장에 도움을 주기 위해 이랑의 높이를 20 cm로 조성해 주었다. 재식 거리는 22 cm로 하였고, 관수는 1회/2 day로 하였으며 배수를 위해 하단에 구멍이 뚫린 넓은 화분을 사용하였다. 광량은 8월 31일부터 11월 21일까지 약 3개월 동안 조사하였다. 당근을 수확한 후 당근의 총 무게, 뿌리 무게, 뿌리 길이, 뿌리 둘레를 측정하였고 당근의 색도, 생리활성 물질 함량을 측정하였다.

식물 성장 측정. 당근은 약 3개월 간 재배 후 수확하였고 당근의 총 무게와 뿌리무게를 카스전자저울(MW 11-3000N; 카스전자저울, Korea)로 측정하였고, 뿌리 길이와 뿌리의 가장 윗부분의 직경을 버니어캘리퍼스(verniercallipers, (주)메가툴, Japan)를 사용하여 측정하였다. 뿌리의 둘레는 직경으로부터 계산하였다.

색도 측정. 색도의 차이는 당근을 갈아서 여과지로 걸러서 spectrophotometer CM-3500d (Konica Minolta Sensing, INC, USA)로 조사하였고, L 값(명도; 높을수록 밝은 것), a 값(적색도; +a: 적색, -a: 녹색), b 값(황색도; +b: 황색, -b: 청색)의 값을 조사하였다.

생리활성 물질 함량 분석. 동결 건조 당근 시료를 취하여 무수 황산나트륨(Na_2SO_4)과 탄산수소나트륨(NaHCO_3)를 넣고 0.01% butylated hydroxytoluene (Sigma-Aldrich, USA) 포함한 acetone을 넣고 혼합하였고, 혼합액은 5,000 rpm으로 원심 분리(4°C , 10 min) 후 상등액을 취하였다. 이러한 추출 과정을 4-5회 반복하고 원심 분리한 다음 얻어진 상등액을 $0.45 \mu\text{m}$ membrane filter를 사용하여 여과한 후 High performance liquid chromatograph (HPLC)시료로 사용하였다. HPLC 분석 조건은 Table 1에 주었다. column은 YMC C30 analytical column ($5.0 \mu\text{m}$, $250 \times 4.6 \text{ mm}$; YMC, Japan)이고 용매의 조성비는 다음과 같았다. 용매 A로는 MeOH : water : triethylamine (TEA)=90:10:0.1, 용매 B는 methyl tert-butyl ether (MTBE) : MeOH : water : TEA=90:6:4:0.1의 비율로 정하였다. 정량을 위한 표준물질은 α -carotene과

Table 1 The conditions of HPLC system to measure the amounts of α - and β -carotene

	Conditions
Column Temperature (°C)	35
Flow rate (mL/min)	1.0
Injection volume (μ L)	10
Solvent A : Solvent B (0–33 min)	93.5: 6.5
Solvent B (34–38 min)	0:100
Detector	UV/VIS
Detection wavelength (nm)	203

β -carotene (Sigma, USA)을 외부표준법을 사용하여 표준물질의 함량과 peak의 면적을 비교하여 샘플에 함유된 각 성분의 함량을 비례식으로 분석하였다.

통계처리. 실험 결과는 통계 처리하여 평균 $\pm$ 표준오차로 측정하였다. SAS (7.0, SAS, USA)를 이용하여 형광등을 조사한 군 (FL)과 LED를 조사한 군(LED)에 대한 통계적 유의성은 two-sampled t-test로 측정하였다. 파장을 달리하여 재배한 군들의 통계적 유의성은 one-way ANOVA 방법으로 측정하였고 유의적 차이가 있을 때 군들 사이의 통계적 유의성은 Tukey test에 의해서 검정하였다. 통계적 유의성의 기준은 $p < 0.05$ 로 정의하였다.

(A)

(B)

(C)

(D)

(E)

Fig. 1 Spectrometer of fluorescent light and LED.

A. Fluorescent light

B. LED with mixed wavelength (red : blue : white=8:1:1)

C. LED with red wavelength

D. LED with blue wavelength

E. LED with mixed wavelength (red : blue=6:4)

Fig. 2 Growth characteristics of the carrots grown under the fluorescent light (FL) (A) and LED with mixed wavelength (red : blue : white=8:1:1) (B) groups in light experiment 1. *Significantly different from the control group (FL) at $p < 0.05$.

결과 및 고찰

파장 측정. 광원실험 1에서는 사전 연구에 사용하였던 적색, 청색, 백색(650 nm : 550 nm : 445 nm) 파장을 8:1:1로 혼합한 LED 혼합 파장을 사용하였고, 광원실험 2에서는 적색(650 nm)과 청색(445 nm) 파장을 5:5, 6:4, 7:3, 9:1로 비율을 조정하여 LED를 조사하여 당근을 재배하였을 때 당근의 성장과 생리활성물질의 함량을 증진시키는 LED 파장을 탐색하였다. 이때 대조광으로 형광등을 사용하였다. 실험에 사용한 LED의 파장은 Fig. 1에 주었는데 혼합파장 LED (적색파장:청색파장=6:4)에서 적색파장의 최고 파장(peak wavelength)은 660 nm, 주 파장(dominant wavelength)은 650 nm이었으며 청색파장의 최고파장은 450 nm, 주 파장은 445 nm이었다.

광원 실험 1. 식물 성장 측정. 형광등을 사용한 군의 당근의 총 무게(뿌리+잎)는 89.8 g이었고 LED 혼합 파장(적색:청색:백색=8:1:1, LED군)을 사용한 군의 총무게는 218 g이었다. 뿌리의 무게는 형광등 군은 27.3 g, LED군은 55.5 g이었다(Fig. 2). 총무게와 뿌리의 무게는 모두 LED 군이 형광등에 비해 통계적으로 유의하게 약 두 배 높은 값을 보였다. 뿌리의 둘레는 두 군 간

Table 2 Comparison of color of carrots grown under the fluorescent light (FL) or LED

	L	a	b
FL	31.4±2.6	17.3±3.3	32.8±5.9
LED	34.1±1.8	20.6±1.3*	36.9±3.2

L: Brightness, a: Redness (+red/-green), b: Yellowness (+yellow/-blue)

*Significantly different from the control (FL) group at $p < 0.05$.

의 차이는 없었으나 LED군이 형광등 군에 비해 조금 높은 값을 나타내었고, 뿌리의 길이는 LED군이 92.3 mm, 형광등군이 45.0 mm로 LED군이 형광등 군에 비해 2배 이상 유의적으로 높은 값을 나타내었다. LED를 조사한 당근의 무게가 대조군에 비하여 당근의 성장을 유의적으로 증가시켰다. 본 연구 결과와 유사하게 Andrei 등(2006)의 연구에 따르면 LED를 526 nm로 백색광에 가깝게 조절하여 37.2 W m⁻²로 당근에 조사하였을 때, LED를 조사한 당근의 무게가 대조군인 형광등을 조사한 것보다 약 두 배 이상 높다고 보고하였다.

광원 실험 1. 색도 및 생리활성물질 측정. 3개월 동안 형광등,

Fig. 3 HPLC chromatograms of acetone extracts of the carrots grown under the fluorescent light (A) and LED with mixed wavelength (red : blue : white=8:1:1) (B) groups in the light experiment 1.

Fig. 4 Contents of β -carotene and α -carotene in the carrots grown under the fluorescent light and LED with mixed wavelength (red : blue : white=8:1:1) in the light experiment 1. *Significantly different from the control group (FL) at $p < 0.05$.

Fig. 5 Growth characteristics of the carrot grown under the fluorescent light (A) and LED with mixed wavelength (red : blue=6:4) (B) groups in the light experiment 2. ^{a,b,c}Different alphabets indicate significant differences.

LED 혼합 파장(적색:청색:백색=8:1:1)을 조사하여 당근을 재배한 후 수확하여 색도를 측정하였다(Table 2). LED를 조사하여 키운 당근이 형광등에서 키운 것 보다 적색도와 황색도도 높은 값을 보였고 적색도는 LED군에서 형광등군에 비해 통계적으로 유의하게 높았다(Table 2). 결과적으로 LED등에서 키운 것이 형광등에서 키운 것보다 더 붉고 황색 빛을 나타내었다. 그러나 당근의 β -carotene 함량 분석 결과 LED에서 재배한 당근의 생리활성물질이 형광등에서 재배한 것 보다 낮게 나왔다(Figs. 3, 4). 반면에 형광등을 조사한 당근과는 달리 LED를 조사하여 키운 당근에는 carotenoid의 하나인 α -carotene이 상당량 함유되어 있었다(Fig. 3).

광원 실험 2. 식물 성장 측정. 당근의 총무게(뿌리+잎)는 LED의 적색과 청색 파장을 혼합한 비에 의해서도 영향을 받아서

Table 3 Comparison of β -carotene in different condition of the light

		β -carotene (mg/g dried weight)	α -carotene (mg/g dried weight)
LED single wave length	445 nm (blue)	9.83 $\pm$ 0.26 ^a	3.41 $\pm$ 0.42
	460 nm (blue)	7.17 $\pm$ 0.39 ^b	2.32 $\pm$ 0.48
	470 nm (blue)	7.00 $\pm$ 0.31 ^b	2.14 $\pm$ 0.31
	625 nm (red)	5.56 $\pm$ 0.13 ^c	2.04 $\pm$ 0.39
	650 nm (red)	7.95 $\pm$ 0.67 ^b	2.84 $\pm$ 0.46
LED mixed wave lengths	red:blue 5:5	6.47 $\pm$ 0.45 ^c	2.28 $\pm$ 0.44
	red:blue 6:4	10.48 $\pm$ 0.28 ^a	3.84 $\pm$ 0.39
	red:blue 7:3	8.90 $\pm$ 0.35 ^b	3.07 $\pm$ 0.38
	red:blue 9:1	7.18 $\pm$ 0.32 ^c	2.34 $\pm$ 0.35
11 W white-easy on		6.23 $\pm$ 0.13	-
20 W white-vungaepyo		6.02 $\pm$ 0.07	-
30 W white-osram super		7.27 $\pm$ 0.64 ^{c,c}	-

^{a,b,c}Different alphabets indicate significant differences by Tukey test at $p < 0.05$.

적색과 청색의 비가 6:4일 때 가장 높았지만 다른 군들과 큰 차이는 없었다. 그러나 당근 자체의 무게는 적색과 청색비가 6:4과 7:3일 때 모두 형광등에 비해 높았고 6:4일 때 가장 무거웠으며 무게 차이도 컸다(Fig. 5A). 당근 뿌리는 적색과 청색 파장의 비가 6:4일 때 가장 무거웠던 것은 당근의 길이와 둘레가 모두 길었기 때문이다(Fig. 5B). 특히 적색과 청색비가 7:3인 LED는 당근의 길이는 6:4의 것과 유사하게 증가시켰으나 당근의 둘레를 성장시키지 못했고, 5:5는 당근의 둘레는 증가시켰으나 길이는 증가시키지 못하여서 당근 무게가 6:4의 비를 가진 LED에 비해 당근의 무게가 무겁지 않았다. 그러므로 적색과 청색의 비가 6:4인 LED가 가장 뿌리의 성장을 골고루 증가시키는 것으로 사료되었다. Choi 등(2013)은 적색이나 청색 단 파장 LED보다 적색:청색=7:3 혼합파장 LED를 딸기에 조사하였을 때, 과실의 생산량과 생리활성물질인 안토시아닌의 함량을 증가시켰다고 보고하였다. 광원 실험 1, 2와 생리활성 물질 함량 측정 결과를 참고하면 적색과 청색의 비가 6:4인 LED를 조사한 당근이 형광등을 조사한 것 보다 식물의 성장에 효과적이었고, 생리활성물질 함량에서는 형광등에서는 나타나지 않았던 α -carotene이 생성되었다.

광원 실험 2. 생리활성물질 측정. 광원 실험1에서 LED 혼합 파장(적색:청색:백색=8:1:1)군이 형광등 군에 비해 당근뿌리의 성장은 향상시켰지만 생리활성물질(β -carotene)의 함량은 오히려 낮은 경향을 나타내었으므로 당근의 β -carotene 함량을 증가시키는 LED 파장을 찾아내기 위해 지속적으로 파장연구를 하였다. Table 3에 보면 LED 단 파장을 조사하였을 때, 적색인 650 nm와 청색인 450 nm에서 β -carotene의 함량이 높게 측정되었고, 적색(650 nm)과 청색(445 nm) 혼합 파장을 6:4나 7:3으로 조사하였을 때, β -carotene의 함량이 대조광보다 더 높았다(Table 3, Fig. 6). 본 연구와 유사하게 Fu 등(2013)의 연구에 따르면 적색과 청색을 3:1로 혼합한 LED 혼합 파장을 170 $\mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 조사한 당근의 carotenoid 함량이 대조광인 형광등에 비해 285.1% 높았으며, LED 적색 단파장을 조사하였을 때는 대조광에 비해 96.1%이었다. 결과적으로 적색과 황색을 3:1로 혼합한 LED 조사가 적색 단파장 LED에 비해 3배 정도 높았다고 보고하였다. Samuolienė 등(2012)의 연구에 따르면 445, 638,

Fig. 6 HPLC chromatograms of the acetone extract of carrots grown under the fluorescent light (A) and LED with mixed wavelength (red : blue=6:4) (B) groups in the light experiment 2.

731nm 혼합파장의 LED를 조사하였을 때, 당근의 carotenoid 합성량을 증가시켰고, 뿌리 내 과당, 자당, 서당의 함량을 증가시켰다고 보고하였다. 뿐만 아니라 638 nm의 LED가 합성경로에서 carotenoid antennal complex를 합성을 촉진시킨다고 보고하였다. 반면에 Lefsrud 등(2008)은 LED 파장이 식물의 biomass에 미치는 영향을 조사하였는데, 440 nm의 청색 파장을 $10.6 \mu\text{mol}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 로 조사하였을 때, β -carotene의 양을 증가시켰다고 보고하여 본 연구 결과와는 다른 연구 결과를 나타내었다. 적색과 청색을 6:4로 혼합한 LED의 혼합 파장에서 β -carotene의 함량이 가장 높게 나왔으므로 이 LED 혼합파장을 조사하여 당근을 생육할 경우 생리활성 물질인 β -carotene과 α -carotene의 함량이 높은 기능성 당근을 수확할 수 있을 것으로 사료된다.

초 록

LED의 적색, 백색, 청색 파장의 비율을 조절한 후 당근에 조사하여 당근의 생육과 당근의 생리활성 물질인 β -carotene의 함량을 증진시키는 파장을 탐색하였다. Light emitting diode (LED) 혼합 파장(적색:청색:백색=8:1:1)을 조사하였을 때, 당근의 총 무게와 뿌리의 둘레길이를 증가시켰으나, 뿌리 무게나 길이는 효과적이지 않았다. β -carotene의 함량 분석에서도 LED 혼합 파장은 대조광인 형광등보다 낮은 값을 나타내었다. β -carotene의 함량을 증진시키는 LED의 파장을 연구하기 위해 단색 파장, 적색과 청색 혼합 파장, 일반 형광등을 당근에 조사하여 β -carotene의 함량을 분석하였다. 15W LED 단색 파장을 조사하였을 때, 445 nm와 650 nm에서 높은 값을 나타내었고(445 nm = 9.8, 650 nm = 9.3 mg/g dried weight), 적색과 청색 혼합 파장에서는 6:4로 혼합한 혼합 광에서 가장 높은 값을 나타내었다 (10.48 mg/g dried weight). LED 혼합 파장(적색:청색:백색=8:1:1)은 당근의 생육에서만 긍정적인 영향을 미쳤고, α -carotene 함량을 증가시키기는 하였으나 β -carotene의 함량에서는 그 효과가 미미했다. 추가적으로 당근의 생리활성 물질을 증진시키는 LED 파장을 연구하였을 때, LED 혼합 파장(650 nm : 445 nm = 6:4)이 당근의 성장과 α -carotene과 β -carotene 함량을 가장 효과적으로 증가시킨 것으로 나타났다. LED 청색 파장이 주황빛을 나타내는 생리활성 물질인 β -carotene과 α -carotene 함량을 증가시키는데 영향을 미치는 것으로 사료된다. 본 실험에서는

사전연구에서 적색 비율이 높았던 LED 혼합 파장(적색:청색:백색=8:1:1)이 청색을 나타내는 적체의 anthocyanins의 함량을 높였던 결과와 유사하게 나타났다. LED 혼합 파장(적색:청색:백색=8:1:1)에서 적색의 비율을 낮추고 청색 파장의 비율을 높였을 때(적색:청색=6:4), β -carotene의 함량을 증가시킬 수 있었다. LED를 조사하여 작물을 재배할 경우, 재배 작물과 반대되는 색의 파장의 비율을 높여 LED의 파장을 혼합시켜 조사하면 작물의 생리활성 물질의 합성을 향상시킬 것으로 기대한다. LED를 조사한 당근의 생육 및 색도, 생리활성 물질 함량에 대해 연구가 많이 되어있지 않으므로 본 연구가 후에 당근의 품질을 향상시키는 연구에 도움을 줄 것으로 사료된다.

Keywords 당근 · 발광 다이오드 · 베타-카로틴 · 성장 · 식물 공장

Acknowledgment 이 논문은 2015년도 산업통상자원부의 ‘창의산업융합 특성화 인재양성사업’의 지원을 받아 연구되었음.

References

- Choi HG, Kwon JK, Moon BY, Kang NJ, Park KS, Cho MW et al. (2013) Effect of different light emitting diode (LED) lights on the growth characteristics production of strawberry fruits during cultivation. *Kor J Hort Sci Technol* **31**, 56–64.
- Fred S, Thomas G, and Kim JK (2005) Light emitting diode. *Kirk-Othmer Encyclopedia Chem Tech* **2**, 1–33.
- Fu W, Guðmundsson Ó, Paglia G, Herjólfsson G, Andrésson Ó.S, Pálsson BØ et al. (2013) Enhancement of carotenoid biosynthesis in the green microalga *Dunaliella salina* with light-emitting diodes and adaptive laboratory evolution. *Applied Microbiology Biotechnol* **97**, 2395–403.
- Goto E (2012) Plant production in a closed plant factory with artificial lighting. In: *VII International Symposium on Light in Horticultural Systems* **956**, 37–49.
- Horton JW, White DJ, Maass DL, Hybki DP, Haudek S, and Giroir B (2001) Antioxidant Vitamin Therapy Alters Burn Trauma-Mediated Cardiac NF-[kappa] B Activation and Cardiomyocyte Cytokine Secretion. *J Trauma-Injury, Infection, & Critical Care* **50**, 397–408.
- Ijaz F, Siddiqui A, Im K, and Lee C (2012) Remote management and control system for LED based plant factory using ZigBee and Internet. In *Advanced Communication Technol (ICACT), 2012 14th International Conference on*, 942–6. IEEE, USA.
- Jang YJ (2010) Food-related lifestyle segments of older consumers in Seoul

- and its characteristics. *J Korean Soc Food Sci Nutr* **39**, 146–53.
- Jeen JH and Son JE (2013) Modeling of canopy light interception of lettuce in LED plant factory. *Korean Soc Agricul Machinery* **18**, 349–50.
- Karrer P, Helfenstein A, Wehrli H, and Wettstein A (1930) Pflanzenfarbstoffe XXV. Über die Konstitution des Lycopins und Carotins. *Helvetica Chimica Acta* **13**, 1084–99.
- Kim HR and You YH (2013) Effects of red, blue, white, and far-red LED slurce on growth responses of *Wasabia japonica* seedlings in plant factory. *Kor J Hort Sci Technol* **31**, 415–22.
- Kim JW (2010) Trend and direction for plant factory system. *J Plant Biotechnol* **37**, 442–55.
- Lee KY, Lee YC, Park YS, Yoon KH, and Kim BS (1985) A study of relation between dietary vitamin A levels and cancer risk in Korea. *Korean J Nutr* **18**, 301–11.
- Lee SW (2010) Plant cultivation using plant factory and LED artificial light. *Optical Sci Technol* **14**, 12–9.
- Lee SW and Park SK (2014) LED array design for optimal combination of plant grown. *J Plant Biotechnol* **41**, 123–6.
- Lee WS and Kim SG (2013) Analysis of photosynthetic photon flux by prototype of rotational lighting system for plant factory. *J Korea Academia-Industrial Cooperation Soc* **14**, 529–34.
- Lefsrud MG, Kopsell DA, and Sams CE (2008) Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in kale. *HortSci* **43**, 2243–4.
- Massa GD, Kim HH, Wheeler RM, and Mitchell CA (2008) Plant productivity in response to LED lighting. *HortSci* **43**, 1951–6.
- Muneer S, Kim EJ, Park JS, and Lee JH (2014) Influence of green, red and blue light emitting diodes on multiprotein complex proteins and photosynthetic activity under different light intensities in lettuce leaves (*Lactuca sativa* L.). *Int J Mol Sci* **17**, 4657–70.
- Nishino H (1995) Cancer chemoprevention by natural carotenoids and their related compounds. *J Cell Biochem Suppl* **22**, 231–5.
- Park KH (2011) The relationships between well-being lifestyle, well-being attitude, life satisfaction, and demographic characteristics. *Family Environ Res* **49**, 39–49.
- Rattner A and Nathans J (2006) Macular degeneration: recent advances and therapeutic opportunities. *Nat Rev Neurosci* **7**, 860–72.
- Samuolienė G and Duchovskis P (2012) Interaction between flowering initiation and photosynthesis. *Applied Photosynthesis* **121**, 121–40.
- Shin YS, Lee MJ, Lee ES, Ahn JH, Lim JH, Kim HJ et al. (2012) Effect of LEDs (light emitting diodes) irradiation on growth and mineral absorption of lettuce (*Lactuca sativa* L. 'Lollo Rosa'). *J Kor Bio-Environ control* **21**, 180–5.
- Terao J (1989) Antioxidant activity of β -carotene-related carotenoids in solution. *Lipids* **24**, 659–61.
- Wang H and Lee SL (2012) Well-being orientation, consumer needs for lunch, and lunch behaviors. *Life Sci* **15**, 99–119.