

# 수확 전 LED, 형광등, UV-C 조사가 로켓 샐러드 내 글루코시놀레이트 함량에 미치는 영향

이혜진 · 천진혁 · 김선주\*

충남대학교 생물환경화학학과

## Effects of Pre Harvest Light Treatments (LEDs, Fluorescent Lamp, UV-C) on Glucosinolate Contents in Rocket Salad (*Eruca sativa*)

Hye-Jin Lee, Jin-Hyuk Chun, and Sun-Ju Kim\*

Department of Bio-Environmental Chemistry, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

\*Corresponding author: [kimsunju@cnu.ac.kr](mailto:kimsunju@cnu.ac.kr)

### Abstract

The aim of this study was to investigate the effect of different light sources on the levels of glucosinolates (GSLs) in rocket salad (*Eruca sativa* L.). The light sources used in the study were: natural light (Control-1 or 2), red light-emitting diodes(LEDs), blue LEDs, mixed red and blue LEDs (R+B LEDs), white LEDs, fluorescent lamps (FL), and fluorescent lamps plus UV-C (FL+UV-C). Two separate experiments were conducted [Experiment I: Control-1, Red LED, Blue LED, Mix (R+B) LED and Experiment II: Control-2, White LED, FL, FL+UV-C] because of the limited number of growth chambers in our laboratory. The rate of increase in the length of rocket salad leaves was the highest under red LEDs and, FL confirming that red LED and, FL affect the growth of rocket salad. We separated and identified seven types of GSLs from the rocket salad: glucoraphanin, diglucothiobetin, glucoerucin, glucobrassicin, dimeric 4-mercaptobutyl GSL, 4-methoxyglucobrassicin, and gluconasturtiin. The highest total GSL contents in Experiment I was found in plants grown under in red LEDs ( $4.30 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$  dry weight, DW), and the lowest under blue LEDs ( $0.17 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$  DW). The highest total GSL contents in Experiment II was found in plants grown under FL ( $13.45 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$  DW), and the lowest in FL+UV-C ( $0.39 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$  DW). Especially in Experiment II, the content of dimeric 4-mercaptobutyl, which has a strong aroma and spicy flavor in rocket salad, was higher under FL and white LEDs than in Control-2, increasing by approximately 14.9 and 3.2-fold respectively. Therefore, light sources such as red LEDs, white LEDs and FL affected the accumulation of GSLs in rocket salad.

**Additional key words:** fluorescent lamp, glucosinolates, HPLC analysis, light emitting diode (LED), UV-C

Received: February 16, 2016

Revised: August 2, 2016

Accepted: December 20, 2016

 OPEN ACCESS



HORTICULTURAL SCIENCE and TECHNOLOGY  
35(2):178-187, 2017  
URL: <http://www.kjst.org>

pISSN : 1226-8763  
eISSN : 2465-8588

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright©2017 Korean Society for Horticultural Science.

본 연구는 농림축산식품부-해양수산부-농촌진흥청·산림청 Golden Seed 프로젝트 사업 (311022-05-5-SB020)에 의해 이루어진 것임.

## 서 언

Rocket salad(*Eruca sativa*)는 지중해가 원산지이며 배추과(*Brassicaceae*) 채소에 속한다. 이탈리아에서는 'rucola', 독일에서는 'ackerrauke', 일본에서는 'kibanasuzushiro'로 알려져 있다(Kim et al., 2006). 또한 rocket salad의 잎은 고추냉이처럼 맵고 알싸한 맛과 향이 나는데 보통 샐러드로 이용되며, 이탈리아에서는 스파게티, 파스타, 피자 등에 사용되고 있다(Jirovertz et al., 2002). 특히 매운 맛은 rocket salad의 glucosinolates(GSLs)와 그 분해산물인 4-mercaptobutyl isothiocyanate(ITC)와 관련이 깊으며 항발암성, 항균, 항박테리아 효과가 있다(Fenwick et al., 1983). 이외에도 비료 3요소(N, P, K) 양액 처리에 따른 rocket salad 내 총 GSLs 함량이 N의 비율이 낮을수록 높아지고, P의 비율이 높을수록 높아지며, K의 비율에 따라 총 GSLs 함량 변화는 뚜렷한 경향을 나타내지 않은 것으로 보고되었다(Chun et al., 2015).

GSLs는 황과 질소를 함유하고 있는 배추과 식물의 2차 대사산물이다. GSLs는 아미노산으로부터 생합성되고 aliphatic, indolyl, aromatic GSLs로 구분된다(Fahey et al., 2001). GSLs는 myrosinase에 의해 가수분해되어 각각 isothiocyanate, nitrile, thiocyanate와 glucose로 전환된다(Fenwick et al., 1983). 특히 isothiocyanates는 종양을 저해하는 성질을 가지고 있으며 간암, 위암, 폐암 등에 효과가 있을 뿐만 생체방어반응에 관여 한다(Zhang and Talalay, 1994; Talalay and Zhang, 1996). 현재까지 연구 결과에 의하면 rocket salad에는 7종류(glucoraphanin, sinigrin, diglucothiobinin, glucoerucin, glucobrassicin, dimeric 4-mercaptobutyl-GSL, 4-methoxyglucobrassicin)의 GSLs가 존재하는 것으로 보고되어 있다(Kim et al., 2007).

재배환경 요소 중 하나인 광은 식물의 생장 및 2차 대사산물 합성에 관여한다(Lee et al., 2014). 작물 재배 연구에 주로 이용되는 메탈할라이드 램프는 발광효율이 낮고 수명이 짧으며, 형광등은 발광효율이 20% 수준으로 광합성에 유효한 스펙트럼이 적다(Park et al., 2012). 이러한 문제를 보완하기 위해 개발된 발광 다이오드(Light Emitting Diode, LED)는 수명이 길고 전력 소모량이 적어 경제적이다(Hwang et al., 2004). 특히 적색 LED는 광합성에서 엽록소가 흡수하는 파장인 660nm에 가까워 식물 생장에 필수적이며 케일에 적색 LED를 조사하였을 때 GSLs 함량이 증가하는 것으로 보고되어 있다(Lefsrud et al., 2008; Massa et al., 2008). 최근에는 LED와 작물을 이용해 단색광을 주는 것만이 아닌 red, blue LED를 적절히 혼합하여 사용한다. 고추냉이(*Wasabia japonica*)의 경우 red LED와 blue LED를 단일 파장으로 처리했을 때보다 R+B(Red+Blue)를 처리한 고추냉이의 생물체량이 각각 약 1.6, 3.2배 높았다(Kim et al., 2013). 자외선(Ultra-violet, UV)은 파장에 따라 UV-A(320-400nm), UV-B(280-320nm), UV-C(200-280nm)로 나뉜다(Schenk et al., 2011). 그 중 UV-C는 광화학 반응을 일으켜 식물체 DNA 손상을 가한다고 알려져 있다(Danon and Gallois, 1998). 낮은 수준의 UV-C 조사는 페놀 화합물, 폴리아민 등 다양한 2차 대사산물의 생성을 유발시키고, 이러한 2차 대사산물은 항균 활성을 가지거나 작물의 품질에 영향을 끼친다(Jansen et al., 2008). 수확 후 단감(*Diospyros kaki* cv. Fuyu)에 UV-C를 2분간 조사하였을 때 착색이 증진되고 2차 대사산물 중 하나인 carotenoid 함량이 증가하였다(Choi, 2011).

현재까지 LED 조사가 식물체의 생장이나 대사물질(베타 카로틴, 전분 등) 함량에 미치는 실험 결과는 많이 보고되었지만(Wu et al., 2007; Wang et al., 2009), 다양한 LED광원뿐만 아니라 자연광(온실재배)과 비교하여 식물체 내 GSL 함량을 분석한 결과는 거의 없다. 또한 UV-C는 수확 후 과채류 표면의 미생물 오염 방지에 관한 연구에 집중되었다. 따라서 본 실험에서는 rocket salad의 GSL 생합성 과정에 영향을 끼치는 인공광원[Red LED, Blue LED, Mix (Red+Blue) LED, White LED, Fluorescent Lamp] 및 UV-C를 조사하여 식물체 생장과 체내에 축적된 GSL 함량을 조사하였다.

## 재료 및 방법

### 용매

Acetonitrile( $\text{CH}_3\text{CN}$ )과 methanol( $\text{CH}_3\text{OH}$ )은 J.T Baker Chemical Co.(Phillipsburg, NJ, USA)것을 구입하였다. Sodium

acetate( $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ )은 Samchun Pure Chemical Co., Ltd.(Pyeongtaek, Korea) 것을 사용하였다. 컬럼 충전물인 DEAE-Sephadex A-25는 GE Healthcare Bio-Sciences AB(Uppsala, Sweden), sinigrin(2-propenyl GSL)과 aryl sulfatase(type H-1, EC 3.1.6.1)는 Sigma-Aldrich Chemical Co.(St Louis, MO, USA) 제품을 사용하였다.

### 시료 채취 및 재배 환경

2015년 2월 20일, rocket salad 'ODYSSEY'(Sakata Seed Company, Yokohama, Japan) 종자를 충남대학교 농업생명과학대학 유리온실에서 플러그 트레이(plug tray 72 홀)에 원예 상토를 넣고 1차(실험 I), 2월 25일에는 2차(실험 II) 파종(0 DAS, days after sowing, 파종 후 경과 일수)하였다. 본 광원 조사 실험은 6종류의 인공광원을 조사하기 위한 식물생장기 대수의 제한 때문에 [실험 I]과 [실험 II]로 구분하여 수행하였다. Rocket salad 종자는 충남대학교 농업생명과학대학 유리온실에서 플러그 트레이(plug tray 72 홀)에 원예용 상토(high, Punong bed soil, Gyeongju, Korea)를 채운 후 물을 뿌리고 난 다음 작은 흙을 파고 파종한 후 다시 상토로 가볍게 덮어주고 손가락으로 눌러 주었다. 햇볕을 차단하고, 수분의 증발을 막기 위하여 신문지로 덮고 그늘진 곳에 놓고 짝을 틔운 다음 이틀 후에 신문을 걷어내고, 트레이는 햇빛이 잘 비치는 곳으로 옮겨두었다. 관수는 파종 후 이식 전(21 DAS)까지 이틀에 한 번 지하수를 주며 재배하였다. 유묘 이식은 22 DAS(실험 I, 3월 13일; 실험 II, 3월 18일)에 50 유묘 중 12 유묘를 선별하여 포트( $14.5 \times 14.5 \times 16\text{cm}^3$ )에 같은 상토를 넣고 이식하였다. 이식한 포트( $14.5 \times 14.5 \times 16\text{cm}^3$ )는 햇빛이 잘 비치는 곳에 두었다. 유리온실 내 온도가  $28^\circ\text{C}$  이상이면 포트를 바람이 통하고 선선한 외부로 옮겨두고 저녁에는 다시 유리온실에 넣어 두어 재배하였다. 온실 재배(0-41DAS) 동안 식물체 포트는 무작위적으로 배치하여 관수를 할 때 마다 시계 방향으로 이동 시켜서 재배 환경을 동일하게 하였다.

실험에 사용된 광원은 자연광(Control-1 또는 2), Red LED(640nm), Blue LED(430nm), Mix(R+B) LED(Red LED+Blue LED), White LED, Fluorescent Lamp(FL), Fluorescent Lamp+UV-C(FL+UV-C) 7종류이었다. 41 DAS(실험 I, 4월 1일; 실험 II, 4월 5일)에 자연광(Control-1 또는 2) 실험용 식물체는 계속해서 유리온실에서 재배하고, 인공광원 실험용 식물체는 식물생장환경조절장치(growth chamber)로 포트 채 옮겨 Red LED, Blue LED, Mix(R+B) LED(실험 I), White LED, FL, FL+UV-C(실험 II)를 5일(41-46 DAS) 동안 조사하고, 지상부만을 46 DAS에 수확하였다. 'Mix(R+B) LED'의 혼합 비율은 Red: Blue=7: 3이었다. 식물생장환경조절장치 내부 환경은 모든 광원에서 온도  $24/15^\circ\text{C}$ , 습도 55%, 광주기(명기/암기; 16/8 h)로 처리하였다. 처리 광량은 모든 실험구에서 동일하게  $180\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 로 조절하였고, LED광은 식물체 상부에서, FL과 UV-C는 측면에서 조사하였다. 또한, UV-C는 5일 동안 암조건 상태일 때, 2분간 조사하였다. 각 광원의 광량이 식물체에 균등하게 조사되도록 포트를 하루에 한 번씩 시계방향으로 이동시켜 주었다. 수확한 직후 잎의 생체중(fresh weight)과 길이를 측정하고 3차 증류수 순으로 깨끗이 씻고 수분을 제거하여 알루미늄 호일로 포장한 후  $-70^\circ\text{C}$  급속 초저온 냉동고에 보관하여 동결 건조한 후에 막자와 막자사발로 분말화 하였다.

### GSL 추출

건조한 분말 시료 100 mg을 칭량하여 2.0mL-Eppendorf tube에 넣고 70%(v/v) boiling methanol(1.5mL)을 넣고 진동혼합(vortex) 하였다. 그 후 항온수조( $70^\circ\text{C}$ )에서 5분간 조(crude) GSLs를 추출하고, 원심분리(12,000rpm, 10min,  $4^\circ\text{C}$ )한 후에 상층액은 시험관에 수거하였다. 동일한 과정으로 2번 더 반복한 후 각 상층액을 합하였다.

Mini-column 충전용 DEAE Sephadex A-25는 3차 초순수에 녹여 분액여두에 넣은 다음 3차 초순수가 거의 빠져나간 다음에 sodium acetate(0.5 M)로  $\text{H}^+$  형태로 활성화 시켰다. 출구를 탈지면으로 막은 mini-column(1,000 $\mu\text{L}$  pipet tip)에 활성화된 DEAE Sephadex A-25를 넣은 후 GSL 조추출물을 기포가 생기지 않게 주의하며 pasteur pipet으로 로딩 하였다. 추출물이 다 빠지면 3차 초순수 2mL를 로딩 하여 mini-column에 남아있는 불순물을 제거하였다. 3차 초순수가 다 빠져나가면 파라핀

필름(paraffin film)으로 컬럼 아래 부분을 막고 aryl sulfatase solution 75 $\mu$ L을 넣고, mini-column 위 부분을 파라핀 필름으로 막고 16-18시간 동안 상온에서 정치하였다. 다음 날 2.0mL-Eppendorf tube에 3차 초순수(0.5mL  $\times$  3회)로 desulfo(DS)-glucosinolate를 용출시켰다. 용출시킨 시료는 0.45 $\mu$ m hydrophilic PTFE syringe filter(직경 13mm)로 필터한 후, HPLC용 vial 병에 넣어 냉장 보관하였다.

## HPLC 분석

GSL 분석은 Inertsil ODS-3 column(150  $\times$  3.0mm I.d., particle size 3 $\mu$ m)과 가드 컬럼은 Inertsil ODS-2 cartridge Guard column E(10  $\times$  2.0mm I.d., particle size 5 $\mu$ m)(GL Science, Tokyo, Japan)을 장착한 HPLC system(Agilent Technologies 1200 series, CA, USA)를 사용하였다. 검출 파장(detection wavelength)은 227nm, 컬럼 온도는 40 $^{\circ}$ C, 유량(flow rate)은 0.4 mL $\cdot$ min $^{-1}$ 로 설정하였다. 시료는 자동주입기(automatic injector)를 사용하여 10.0 $\mu$ L 주입하였다. 이동상 용액은 용매 A(3차 초순수)와 용매 B(acetonitrile, CH<sub>3</sub>CN)를 사용하였다. 용매 B는 첫 시작부터 2분까지는 0%로 유지시키고 7분까지 0%에서 10%로 증가시키고, 16분까지는 10%에서 31%로 증가시켰다. 19분까지는 31%를 유지시키고 21분까지 31%에서 0%로 감소, 27분까지 0%를 유지시켰다. 각 GSL 성분은 외부표준물질인 sinigrin의 HPLC 피크 면적과 각 성분의 면적을 비교하여 그 값에 response factor를 곱하여 정량화( $\mu$ mol $\cdot$ g $^{-1}$  DW)하였다.

## LC-ESI-MS 분석에 의한 DS-GSL 동정

각 DS-GSLs 성분은 4000 QTrap LC-ESI-MS/MS system(Applied Biosystems Instrument)를 사용하였으며, 분석 컬럼은 Inertsil ODS-3 column(150  $\times$  3.0mm I.d., particle size 3 $\mu$ m)을 사용하였다. 가드 컬럼은 Inertsil ODS-2 cartridge Guard column E(10  $\times$  2.0mm I.D., particle size 5 $\mu$ m)(GL Science, Tokyo, Japan)를 사용하였다. 스캔시간(scan time)은 1.0s, 컬럼 온도는 40 $^{\circ}$ C로 설정하였다. 스캔범위(scan spectra)는 m/z 100-1,000, 검출 파장(detection wavelength)은 227nm, 유량(flow rate)은 0.4mL $\cdot$ min $^{-1}$ 로 설정하였다. 시료는 자동 시료주입기(automatic injector)를 사용하여 10.0 $\mu$ L 주입하였다.

## 통계분석

HPLC 분석 결과는 Microsoft Office Excel 2010을 이용하여 각 성분에 대한 함량의 평균값과 3반복의 표준편차를 구하였다. 통계처리 프로그램은 Windows용 IBM SPSS 21 Statistics을 사용하였다. 유의수준은 0.05 이하로 설정하였고, Tukey 검정을 시행하여 유의성을 검증하였다.

## 결과 및 고찰

### [실험 I] 'Red LED', 'Blue LED', 'Mix LED'의 조사에 따른 생장 효과

광원[Control-1, Red LED, Blue LED, Mix(R+B) LED]이 다른 광질을 5일간 처리 하에서 식물체 길이는 'Red LED'(62.21)에서 증가율이 가장 높았고, 'Mix(R+B) LED'(24.76%)에서 증가율이 가장 낮았다(Table 1). 생체중은 'Red LED'(15.72)와 'Blue LED'(15.94 g)가 높았으며 두 처리구는 큰 차이를 보이지 않았다. 수분함량은 'Red LED'(93.0) > 'Blue LED'(92.92) > 'Control-1'(92.53) > 'Mix(R+B) LED'(90.78%) 순으로 감소했다. 'Red LED'의 수용체인 피토크롬(phytochrome)은 식물의 발아, 묘종의 발달과 개화까지 식물의 다양한 생리학적 반응에 관여하고(Botto et al., 1996), 'Blue LED'는 상추의 잎 두께 촉진(Johkan et al., 2010) 등 잎의 기능과 관련있다. 따라서 식물체에 조사된 광질과 이들을 흡수하는 광수용체의 종류에 따라 작물

**Table 1.** Plant growth (n=3) of rocket salad grown with different lights for five days

Plant growth		Experiment I			
		Control <sup>z</sup> -1	Red LED	Blue LED	R+B LED <sup>y</sup>
Height	Before treatment (cm)	12.67±2.31aw	12.33±0.58a	12.67±0.58a	13.33±1.53a
	After treatment (cm)	17.57±1.05a	20.00±2.55a	19.23±1.05a	16.63±1.58a
	Rate of increase (%)	38.67	62.21	51.78	24.76
Fresh weight (g)		13.05±1.70a	15.72±2.09a	15.94±3.43a	11.36±1.27a
Dry weight (g)		0.95±0.10a	1.10±0.15a	1.13±0.25a	1.05±0.12a
Water content (%)		92.53±0.71a	93.00±0.05a	92.92±0.16a	90.78±0.58b
Plant growth		Experiment II			
		Control-2	White LED	FL <sup>x</sup>	FL+UV-C
Height	Before treatment (cm)	16.00±2.00a	13.33±3.79a	13.33±4.16a	13.33±4.16a
	After treatment (cm)	24.47±0.45a	19.77±1.63a	21.47±0.87a	19.80±3.72a
	Rate of increase (%)	52.94	48.31	61.07	48.54
Fresh weight (g)		24.51±3.27a	15.05±6.08a	26.77±4.96a	18.97±8.57a
Dry weight (g)		2.25±0.27a	1.15±0.36b	2.35±0.30a	1.64±0.54ab
Water content (%)		90.82±0.31a	92.15±0.72a	91.16±0.74a	90.85±1.73a

<sup>z</sup>Control-1 or 2, grown in the greenhouse.

<sup>y</sup>Mix (R+B) LED, Red + Blue (R:B=7:3).

<sup>x</sup>FL, Fluorescent Lamp.

<sup>w</sup>Within each column, values follow by the same letters are not significantly different at  $p \leq 0.05$ , using Tukey's multiple-range test.

Mean ± standard deviation.

의 성장반응이 다르게 나타난다(Lee and Kim, 2014). 상기와 같이 'Red LED'와 'Blue LED' 조사는 식물체의 발아, 잎 두께, 개화 등 작물의 생리적 영향을 주었지만, 본 실험에서는 'Red LED'와 'Blue LED' 간 유의적인 생육 차이는 없었다.

### [실험 III] 'White LED', 'FL', 'FL+UV-C'의 조사에 따른 성장 효과

광원(Control-2, White LED, FL, FL+UV-C)이 다른 광질을 5일간 처리 하에서 식물체 길이는 'FL'(61.07)에서 가장 높은 증가율을 보였으며, 'White LED'(48.31%)에서 가장 낮은 증가율을 보였다(Table 1). 생체중은 'FL'(26.77)에서 가장 높았으며 'White LED'(15.05 g)에서 가장 낮았다. 형광등 조사는 LED 광원에 비해 광파장 대역이 다양하기 때문에 작물의 생육에 좋다고 보고되었다(Park et al., 2012). 수분함량은 'White LED'(92.15) > 'FL'(91.16) > 'FL+UV-C'(90.85) > 'Control-2'(90.82%) 순으로 감소했다. 인공광원에 따른 rocket salad의 생장은 집단 간의 차이는 있었으나 통계학적 유의성은 거의 나타나지 않았다( $p < 0.05$ ).

### GSL 분리 및 동정

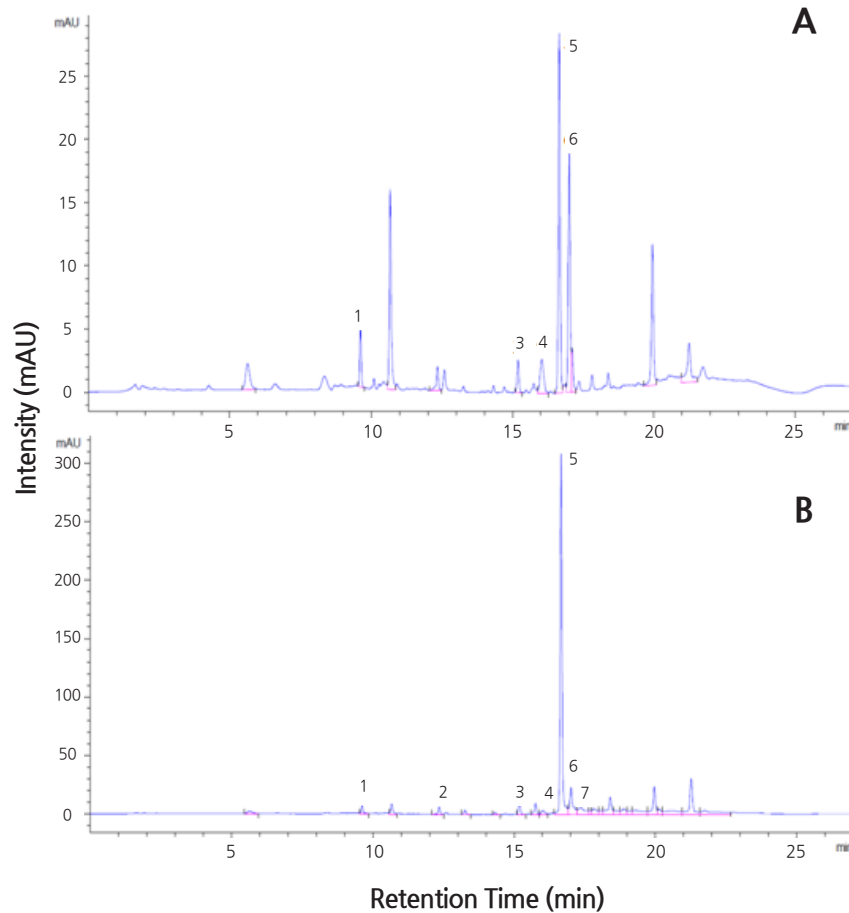
Rocket salad 내 GSLs를 HPLC와 LC-ESI-MS로 분석한 결과, 기존의 발표된 rocket salad의 GSLs는 glucoraphanin, sinigrin, diglucothiobainin, glucoerucin, glucobrassicin, dimeric 4-mercaptobutyl-GSL, 4-methoxyglucobrassicin로 보고되었지만(Kim et al., 2007), 본 실험에서는 7종류의 GSLs(glucoerucin, diglucothiobainin, glucoerucin, glucobrassicin, dimeric 4-mercaptobutyl GSL, 4-methoxy glucobrassicin, gluconasturtiin)를 분리 및 동정하였다(Table 2, Fig. 1. and Fig. 2.).

### [실험 II] 'Red LED', 'Blue LED', 'Mix LED'의 조사에 따른 GSL 함량

광원[Control-1, Red LED, Blue LED, Mix(R+B) LED]이 다른 광질을 5일간 처리 하에서 각 GSL 성분 별 함량 범위는 glucoraphanin(0.10), diglucothiobainin(0.11), glucoerucin(0.22), glucobrassicin(0.06), dimeric 4-mercaptobutyl GSL(0.03-

**Table 2.** Glucosinolates identified using LC-ESI-MS in rocket salad

No. <sup>z</sup>	RT <sup>y</sup>	Name	Molecular weight ( $m/z$ ) <sup>x</sup>	Response factor <sup>w</sup>
1	9.58	Glucoraphanin	357	1.07
2	12.35	Diglucothiobinin	521	1.00*
3	15.12	Glucoerucin	341	1.04 <sup>v</sup>
4	16.04	Glucobrassicin	368	0.29
5	16.68	Dimeric 4-mercaptobutyl GSL	652	1.00*
6	17.02	4-Methoxy glucobrassicin	398	0.25
7	17.30	Gluconasturtiin	343	0.95

<sup>z</sup>No., the elution order in HPLC analysis.<sup>y</sup>RT, retention time (min).<sup>x</sup>As a desulfo-glucosinolate.<sup>w</sup>The international organization for standardization (ISO 9167-11992). \*Undecided by the ISO.<sup>v</sup>According to Clarke (2010).**Fig. 1.** HPLC chromatograms of glucosinolates extracted from rocket salad grown under natural sun-light (A, Control-2) and fluorescent lamps (B). Peak numbers refer to the glucosinolates listed in Table 2.

3,40), 4-methoxy glucobrassicin(0.10–0.29), gluconasturtiin( $0.11\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{ DW}$ )으로 나타났다(Table 3). Kale sprouts 재배 시 ‘LED’와 ‘Far-red’에 따른 총 aliphatic GSL 함량을 조사한 결과, ‘Far-red’(3.50) > ‘Blue LED’(2.94) > ‘Dark’(2.80) > ‘Red LED’(2.64) > ‘White LED’(2.48 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{ DW}$ ) 순으로 감소했다(Carvalho and Folta, 2014). 그러나 본 실험에서 총 GSL 함량

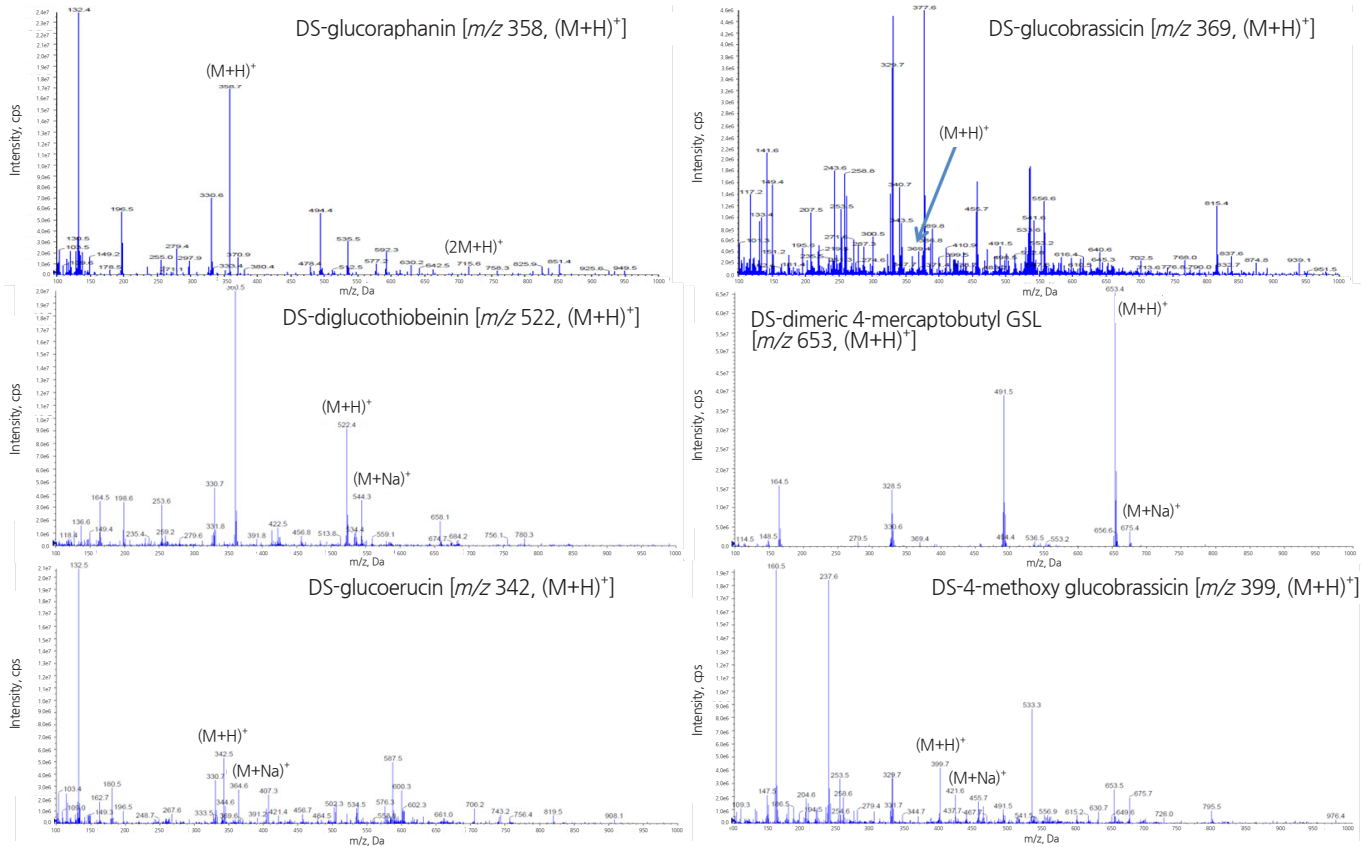


Fig. 2. Mass spectra of glucosinolate(GSL) isolated from rocket salad.

Table 3. Glucosinolate contents ( $\mu\text{mol/g}$  dry wt.) in rocket salad grown with different lights for five days

Experiment I						
No. <sup>z</sup>	RT <sup>y</sup>	Name	Control-1	Red LED	Blue LED	R+B LED
1	9.58	Glucoraphanin	ND <sup>x</sup>	0.10±0.12a <sup>w</sup>	ND	ND
2	12.35	Diglucothiobainin	ND	0.11±0.12a	ND	ND
3	15.12	Glucoerucin	ND	0.22±0.17a	ND	ND
4	16.04	Glucobrassicin	0.06±0.00a	0.06±0.00a	0.06±0.00a	0.06±0.00a
5	16.68	Dimeric 4-mercaptobutyl GSL	0.03±0.06a	3.40±3.76a	ND	0.05±0.05a
6	17.02	4-Methoxy glucobrassicin	0.11±0.05a	0.29±0.17a	0.11±0.02a	0.10±0.02a
7	17.30	Gluconasturtiin	ND	0.11±0.05a	ND	ND
Total			0.20±0.10a	4.30±4.16a	0.17±0.01a	0.21±0.04a
Experiment II						
No.	RT	Name	Control-2	White LED	FL	FL+UV-C
1	9.58	Glucoraphanin	0.08±0.08b	0.20±0.05ab	0.45±0.19a	ND
2	12.35	Diglucothiobainin	ND	0.04±0.08b	0.23±0.03a	ND
3	15.12	Glucoerucin	0.07±0.06b	0.17±0.02b	0.57±0.12a	ND
4	16.04	Glucobrassicin	0.06±0.00a	0.06±0.00a	0.08±0.00a	0.06±0.01a
5	16.68	Dimeric 4-mercaptobutyl GSL	0.54±0.48b	1.91±1.65b	11.12±2.12a	0.08±0.14b
6	17.02	4-Methoxy glucobrassicin	0.16±0.03a	0.39±0.31a	0.38±0.01a	0.14±0.11a
7	17.30	Gluconasturtiin	ND	0.14±0.25ab	0.62±0.29a	0.11±0.19ab
Total			0.90±0.61b	2.91±2.26b	13.45±1.85a	0.39±0.44b

<sup>z</sup>No., the elution order of glucosinolate.<sup>y</sup>RT, retention time (min).<sup>x</sup>ND, not detected.<sup>w</sup>Within each column, values follow by the same letters are not significantly different at  $p < 0.05$ , using Tukey's multiple-range test ( $n=3$ ).

Mean ± standard deviation.

**Table 4.** Individual glucosinolate proportions (%) of the total glucosinolate content in rocket salad grown with different lights for five days

Light source	Gluco-raphanin	Digluco-thiobeinin	Gluco-erucin	Gluco-brassicin	Dimeric 4-mercaptobutyl GSL	4-Methoxy glucobrassicin	Gluco-nasturtiin	Total GSL content ( $\mu\text{mol/g DW}$ )
Experiment I								
Control-1	NDz	ND	ND	30.00	15.00	55.00	ND	0.20
Red LED	2.33	2.56	5.12	1.40	79.07	6.74	2.56	4.30
Blue LED	ND	ND	ND	35.29	ND	64.71	ND	0.17
R+B LED	ND	ND	ND	28.57	23.81	47.62	ND	0.21
Experiment II								
Control-2	8.89	ND	7.78	6.67	60.00	17.78	ND	0.90
White LED	6.87	1.37	5.84	2.06	65.64	13.40	4.81	2.91
FL	3.35	1.71	4.24	0.59	82.68	2.83	4.61	13.45
FL+UV-C	ND	ND	ND	15.38	20.51	35.9	28.21	0.39

<sup>z</sup>ND, not detected.

은 'Control-1'(0.20)과 비교하였을 때, 'Red LED'(4.30)에서는 약 21.4배 높았고, 'Blue LED'(0.17)과 'Mix(R+B) LED'(0.21 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ )에서는 약간 감소하거나 같았다. 현재까지 연구결과에 의하면 'Red LED'는 콩의 묘에서 베타 카로틴 및 항산화도를 증가시킨다고 보고했다(Wu et al., 2007). 본 실험도 'Red LED' 조사에 따라 'Control-1'에서는 검출되지 않았던 glucoraphanin, diglucothiobeinin, glucoerucin, gluconasturtiin이 증가하였다. 'Red LED'의 총 GSL 함량 중 가장 높은 비율을 나타낸 성분은 dimeric 4-mercaptobutyl GSL으로 전체의 79%를 차지하였으며, 4-methoxy glucobrassicin 이 6%로 그 다음으로 높은 비율을 차지하였다(Table 4). 따라서 [실험 I]을 비교 분석해 본 결과, 'Red LED'에서 재배한 rocket salad가 기능적으로 가치가 높을 것으로 판단된다.

### [실험 II] 'White LED', 'FL', 'FL+UV-C'의 조사에 따른 GSL 함량

광원(Control-2, White LED, FL, FL+UV-C)이 다른 광질을 5일간 처리 하에서 각 성분 별 함량 범위는 glucoraphanin(0.08–0.45), diglucothiobeinin(0.04–0.23), glucoerucin(0.07–0.57), glucobrassicin(0.06–0.08), dimeric 4-mercaptobutyl GSL(0.08–11.12), 4-methoxy glucobrassicin(0.14–0.39), gluconasturtiin(0.11–0.62 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ )으로 나타났다. Carvalho and Folta (2014)는 'far-red', 'Red LED', 'Blue LED', 'White LED'에서 kale sprouts 의 indolyl GSLs 함량을 비교한 결과, 'White LED'(0.09 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ )는 다른 광원(평균 0.15)보다 약 40% 낮았다. 또한 glucobrassicin은 'Dark'(0.18)에서 보다 'White LED'(0.06 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ )에서 67% 낮았다고 보고하였다. 하지만 본 실험에서는 indolyl GSLs로 분류되는 4-methoxy glucobrassicin과 glucobrassicin을 비교해 본 결과, 'White LED'(0.39, 0.06 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ )가 'Control-2'(0.16, 0.06)보다 2.4배 증가하거나 동일하였다. 본 실험에서 총 GSL 함량은 'FL'(13.45) > 'White LED'(2.91) > 'Control-2'(0.90) > 'FL+UV-C'(0.39 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ) 순으로 감소하였다. 이 결과는 'FL'가 'White LED'에 비해 'Red LED'와 'Blue LED'의 파장을 포함하여 광파장 대역이 다양하기 때문인 것으로 사료되며, 상추에 'FL'와 'White LED'를 조사한 실험에서도 안토시아닌 함량이 'White LED'보다 'FL' 처리구에서 약 3배 정도 높았다(Park et al., 2012). 또한, 'White LED'와 'FL' 조사에 따라 'Control-2'에서는 검출되지 않았던 diglucothiobeinin, gluconasturtiin이 증가하였다. 수확할 때 rocket salad에서 강한 향기와 매운 맛을 내는 것과 관련(Bennett et al., 2002)이 있는 dimeric 4-mercaptobutyl GSL이 'FL'에서 총 GSL 함량의 82%를 차지하였으며, 'Control-2'와 'White LED'는 각각 60%, 65%, 'FL+UV-C'에서 20.51%를 차지하였다.

Choi(2011)에 의하면 '부유' 단감을 수확 후 UV-C를 조사하였을 때 2차 대사산물인 carotenoid 함량이 증가하였다고 보고하였다. 그러나 본 실험에서는 식물에 치명적이지 않는 UV-C 조사 수준이라고 보고된 시간(매일 2분)을 조사하였지만 총 GSL 함량이 'Control-2'의 약 43.4% 수준이었다. 또한, 'FL'과 비교해 보았을 때 동일한 'FL'의 16시간의 노출이 있었지만 총 GSL



함량이 'FL'의 약 2.9% 수준이었다. 이에 따라 rocket salad의 'UV-C' 조사는 식물 조직의 DNA분자에 직접적인 손상을 가하여 세포 사멸을 일으킨 것으로 보인다(Danon and Gallois, 1998). 따라서 2차 처리구를 비교 분석해본 결과 'FL'과 'White LED'에서 재배한 rocket salad가 가능적으로 가치가 높을 것이라고 판단되며 향후 UV-C와 GSLs과의 상관관계에 대해 심도 깊은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 초 록

인공 광원에 따른 rocket salad(*Eruca sativa* L.) 내 GSL 함량을 조사하였다. 실험에 사용한 광원의 종류는 자연광(Control-1 또는 2), Red LED, Blue LED, Mix(R+B) LED(Red LED+Blue LED), White LED, Fluorescent Lamp(FL), Fluorescent Lamp+UV-C(FL+UV-C). 실험은 식물 생장기 대수 제한 때문에 [실험 I;Control-1, Red LED, Blue LED, Mix(R+B) LED] 과 [실험 II;Control-2, White LED, FL, FL+UV-C]로 구분하여 수행하였다. 그 결과, Red LED와 FL에서 rocket salad의 잎의 길이의 증가율이 가장 높았다. 그러므로 Red LED와 FL이 rocket salad의 성장과 관계가 있음을 확인했다. Rocket salad로부터 총 7종류의 GSLs(glucoraphanin, diglucothiobinin, glucoerucin, glucobrassicin, dimeric 4-mercaptobutyl GSL, 4-methoxy glucobrassicin, gluconasturtiin)를 분리 및 동정하였다. [실험 I]에서 총 GSL 함량은 Red LED(4.30)에서 가장 높고 Blue LED(0.17 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$  DW)에서 가장 낮았다. [실험 II]에서 총 GSL 함량은 FL(13.45)에서 가장 높고 FL+UV-C(0.39 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$  DW)에서 가장 낮았다. 특히 Rocket salad의 강한 향과 매운 맛을 돌아주는 dimeric 4-mercaptobutyl 함량은 [실험 II]에서 Control-2에 비해 FL과 White LED가 각각 14.9, 3.2배 증가했다. 따라서 Red LED, White LED, FL은 rocket salad의 GSL 축적에 영향을 주었다고 판단된다.

**추가주요어:** 형광등, glucosinolates, HPLC 분석, light emitting diode (LED), UV-C

## Literature Cited

- Bennett RN, Mellon FA, Botting NP, Eagles J, Rosa EA, Williamson G (2002) Identification of the major glucosinolate (4-mercaptobutyl glucosinolate) in leaves of *Eruca sativa* L. (rocket salad). *Phytochemistry* 61:25-30. doi: 10.1016/S0031-9422(02)00203-0
- Botto JF, Sanchez RA, Whitelam GC, Casal JJ (1996) Phytochrome a mediates the promotion of seed germination by very low fluences of light and canopy shade light in arabidopsis. *Plant Physiol.* 110:439-444. doi: 10.1104/pp.110.2.439
- Carvalho SD, Folta KM (2014) Sequential light programs shape kale (*Brassica napus*) sprout appearance and alter metabolic and nutrient content. *Hortic Res* 8:1-13. doi: 10.1038/hortres.2014.8
- Choi SJ (2011) Enhancement of skin color by postharvest UV irradiation in 'Fuyu' persimmon fruits. *Korean J Hortic Sci Technol* 29:441-446.
- Chun JH, Kim SB, Arasu MV, AL-Dhabi NA, Chung DY, Kim SJ (2015) Combined effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers on the contents of glucosinolates in rocket salad (*Eruca sativa* Mill.). *Saudi J Bio Sci* 24:436-443 doi:10.1016/j.sjbs.2015.08.012
- Clarke DB (2010) Glucosinolates, structures and analysis in food. *Anal Methods* 2:310-325. doi: 10.1039/b9ay00280d
- Danon A, Gallois P (1998) UV-C radiation induces apoptotic-like changes in *Arabidopsis thaliana*. *FEBS Lett.* 483:131-136. doi: 10.1016/S0014-5793(98)01208-3
- Fahey JW, Zalcmann AT, Talalay P (2001) The chemical diversity and distribution of glucosinolates and isothiocyanates among plants. *Phytochemistry* 56:5-51. doi: 10.1016/S0031-9422(00)00316-2
- Fenwick GR, Heaney RK, Mullin WJ (1983) Glucosinolates and their breakdown products in food and food plants. *CRC Crit. Rev. Food Sci Nutr* 18:123-201. doi: 10.1080/10408398209527361
- Hwang MK, Huh CS, Seo YJ (2004) Optic characteristics comparison and analysis of SMD type Y/G/W HB LED. *J KIIIEE* 18:15-21.
- Jansen MA, Hectors K, O'Brien NM, Guisez Y, Potters G (2008) Plant stress and human health: Do human consumers benefit from UV-B acclimated crops. *Plant Sci* 175:449-458. doi: 10.1016/j.plantsci.2008.04.010
- Jirovetz L, Smith D, Buchbauer G (2002) Aroma compound analysis of *Eruca sativa* (*Brassicaceae*) SPME headspace leaf samples using

- GC, GC-MS, and olfactometry. *J Agric Food Chem* 50:4643-4646. doi: 10.1021/jf020129n
- Johkan M, Shoji K, Goto F, Hashida SN, Yoshihara T** (2010) Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. *Hort Science* 45:1809-1814.
- Kim SJ, Kawaharada C, Ishii G** (2006) Effect of ammonium: nitrate nutrient ratio on nitrate and glucosinolate contents of hydroponically-grown rocket salad (*Eruca sativa* Mill.). *Soil Sci Plant Nutr* 52:387-393. doi: 10.1111/j.1747-0765.2006.00048.x
- Kim SJ, Kawaharada C, Jin S, Hashimoto M, Ishii G, Yamauchi H** (2007) Structural elucidation of 4-(cystein-S-yl) butyl glucosinolate from the leaves of *Eruca sativa*. *Biosci Biotechnol Biochem* 71:114-121. doi: 10.1271/bbb.60400
- Kim SJ, Ishii G** (2007) Effect of storage temperature and duration on glucosinolate, total vitamin C and nitrate contents in rocket salad (*Eruca sativa* Mill.). *J Sci Food Agr* 87:966-973. doi: 10.1002/jsfa.2787
- Kim HR, You YH** (2013) Effects of red, blue, white, and far-red led source on growth responses of *Wasabia japonica* seedlings in plant factory. *Korean J Hortic Sci Technol* 31:415-422. doi: 10.7235/hort.2013.13011
- Lee GR, Kim YJ, Chun JH, Lee MK, Ryu DK, Park SH, Chung SO, Park SU, Lim YP, Kim SJ** (2014) Variation of glucosinolate contents of 'Sinhongssam' grown under various light sources, periods, and light intensities. *CNU J Agr Sci* 41:125-133. doi: 10.7744/cnujas.2014.41.2.125
- Lee JS, Kim YH** (2014) Growth and anthocyanins of lettuce grown under red or blue light-emitting diodes with distinct peak wavelength. *Korean J Hortic Sci Technol* 32:330-339. doi: 10.7235/hort.2014.13152
- Lefsrud MG, Kopsell DA, Sams CE** (2008) Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in kale. *Hort Science* 43:2243-2244.
- Lin C** (2002) Blue light receptors and signal transduction. *Plant Cell* 14:207-225. doi: 10.1105/tpc.000646
- Massa GD, Kim HH, Wheeler RM, Mitchell CA** (2008) Plant productivity in response to LED lighting. *Hort Science* 43:1951-1956.
- Park JE, Park YG, Jeong BR, Hwang SJ** (2012) Growth and anthocyanin content of lettuce as affected by artificial light source and photoperiod in a closed-type plant production system. *Korean J Hortic Sci Technol* 30:673-679. doi: 10.7235/hort.2012.12020
- Schenk M, Raffellini S, Guerrero S, Blanco GA, Alzamora SM** (2011) Inactivation of *Escherichia coli*, *Listeria innocua* and *Saccharomyces cerevisiae* by UV-C light: study of cell injury by flow cytometry. *LWT-Food Sci Technol* 44:191-198. doi: 10.1016/j.lwt.2010.05.012
- Son KH, Park JH, Kim D, Oh MM** (2012) Leaf shape Index, growth, and phytochemicals in two leaf lettuce cultivars grown under monochromatic light-emitting diodes. *Korean J Hortic Sci Technol* 30:664-672. doi: 10.7235/hort.2012.12063
- Talalay P, Zhang Y** (1996) Chemoprotection against cancer by isothiocyanates and glucosinolates. *Biochem Soc Trans* 24:806-810. doi: 10.1042/bst0240806
- Wang H, Gu M, Cui J, Shi K, Zhou T, Yu J** (2009) Effects of light quality on CO<sub>2</sub> assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus*. *J Photochem Photobiol B*.96:30-37. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2009.03.010
- Wu MC, Hou CY, Jiang CM, Wang YT, Wang CY, Chen HH, Chang HM** (2007) A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings. *Food Chem* 101:1753-1758. doi: 10.1016/j.foodchem.2006.02.010
- Zhang Y, Talalay P** (1994) Anticarcinogenic activities of organic isothiocyanates: Chemistry and mechanisms. *Cancer Res* 54:1976-1981.