

적색/원적색광 조사 비율에 따른 3종 배추과 채소 새싹의 Glucosinolate 함량 및 항산화 기능성 평가

조정수¹ · 이준구^{1,2*}

¹전북대학교 원예학과, ²전북대학교 농업과학기술연구소

Evaluation of Individual Glucosinolates, Phytochemical Contents, and Antioxidant Activities under Various Red to Far-Red Light Ratios in Three *Brassica* Sprouts

Jung Su Jo¹ and Jun Gu Lee^{1,2*}

¹Department of Horticulture, College of Agriculture & Life Sciences, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

²Institute of Agricultural Science & Technology, Chonbuk National University, Jeonju 54896, Korea

Abstract. The aim of this study was to evaluate the individual glucosinolate (GSL), total phenol, total flavonoid, and vitamin C content, and antioxidant activity under various light quality condition, mainly focusing on red (R) to far-red (FR) light ratios in three *Brassica* sprouts (radish, Chinese cabbage, and broccoli). Three R/FR ratio of 0.6, 1.3, and 2.0 were exposed to 5-day old sprouts for 48 h in a controlled environment, and the targeted phytochemical contents and antioxidant activities were compared with three separate control plot of dark, fluorescent, and red:blue 8:2 conditions. Total GSL content was highest in broccoli among the cultivars throughout the respective treatments, and increased with the increasing of R/FR ratio in the broccoli sprouts, while the content showed non-significant results in the Chinese cabbage sprouts. The progoitrin, a major GSL in Chinese Cabbage and broccoli, content decreased by upto 38% and 69%, respectively, with decreasing the R/FR ratio compared to the control plots (fluorescent, red:blue 8:2, and dark condition). The contents of phenol, flavonoid, and vitamin C were lowest in dark condition in all the three *Brassica* sprouts. The total phenol content and antioxidant activities increased with decreasing the R/FR ratio in all the *Brassica* sprouts, while total flavonoid and vitamin C content showed different patterns depending upon the *Brassica* sprouts. These results suggest that additional use of FR is expected to improve the functional quality of *Brassica* sprouts in different ways.

Additional key words : Flavonoid, Phenolic compound, Progoitrin, Vitamin C

서 언

식물공장은 기후에 영향을 받지 않고 시설 내에서 빛, 온도, 이산화탄소, 양분 및 습도와 같은 환경요인을 인위적으로 통제하여 작물을 계획 생산할 수 있는 농업 시스템이다(Heo 등, 2013; Kozai, 2013). 인공광 이용형 식물공장은 형광등, LED 및 고압 나트륨 램프와 같은 인공광원을 이용하거나 태양광의 보조 광원으로서 설치 이용하는 작물 재배 시스템이다(wheeler, 2008). 식물재배용 인공광원 중 발광다이오드(Light Emitting Diode, LED)는 외부 환경 조건에 관계없이 주년 생산이 가능한

밀폐형 식물공장의 인공광원으로 주로 사용되고 있다(Son와 Oh, 2013). LED는 다양한 단파장을 만들 수 있어 식물의 생산 및 품질을 향상시킬 수 있는 최적의 광 품질을 생성 할 수 있기 때문에 원예산업 및 광 생리학 연구에 유용하게 사용되고 있다 (Massa 등, 2008; Morrow, 2008; Yeh와 Chung, 2009).

식물의 성장 및 발달에 영향을 미치는 다양한 환경 요인 중에 하나가 광합성의 주된 에너지원인 광이며, 광도, 광주기 및 광질은 직접 또는 간접적으로 식물의 생리적, 형태학적 및 해부학적 반응에 영향을 미친다(Goto, 2012; Taiz와 Zeiger, 1991). 따라서 다양한 LED 광질, 광도 및 광주기에 따른 식물 형태 및 식물화학물질의 변화에 관한 많은 연구가 진행되었다. 광질에 따른 식물 성장 및 2차대사산물 축적에 미치는 영향에 관한 연구는 다수 수행되었다. 적색광은 다양한 식물의 성장에 효

*Corresponding author: jungu@jbnu.ac.kr

Received July 30, 2018; Revised October 23, 2018;

Accepted October 25, 2018

과적이며(Johkan 등, 2010; Nishimura 등, 2009), 청색광의 경우 안토시아닌함량의 증가에 효과적이고(Giliberto 등, 2005), 또한 케일의 새싹에서 glucoraphanin, 총 phenolic, 안토시아닌함량 및 항산화활성을 증가시킨다고 보고하였고(Qian 등., 2016), UV-A 역시 상추에서 안토시아닌 축적을 유도한다(Tsormpatsidis 등, 2008). 밀폐형 식물공장에서 R/FR 비율에 따라 상추의 생육 및 다양한 생체활성화합물이 증가 하였다고 보고하였다(Lee 등, 2016; Lee 등, 2015).

GSL은 배추과 채소에 주로 존재하는 기능성 물질군으로 잘 알려져 있으며, 체내 존재하는 myrosinase 등의 효소에 의한 가수분해 산물로는 isothiocyanates, thiocyanates, nitrile 등이 있고, 이러한 분해산물은 인간과 동물에게 항암 및 항산화효과를 가진다고 보고되었다(Halkier와 Gershenzon, 2006). 현재 GSL의 종류는 200여 종에 이르고, 품종이나 계통의 선발 및 다양한 작물 종에서의 GSL 함량 변이 평가에 관한 연구가 보고되었다(Clarke, 2010; Bhandari 등, 2015; Jo 등, 2016). 광 처리에 따른 배추과 작물의 GSL 함량의 변화에 대한 연구는 몇가지 제한된 연구결과가 발표된 바 있다. 케일의 새싹에 LED 단일광 처리에 따라서 다양한 패턴의 GSL 함량변이가 관찰되었고(Qian 등, 2016), 광주기(12시간과 24시간)에 따른 브로콜리의 식물화학물질의 변화(Steindal 등, 2013), 광주기에 따른 애기장대의 GSL 생합성 연구가 보고되었다(Huseby 등, 2013). 이와 같은 기존 연구결과들은 주로 단일광 또는 단순한 조합의 적색과 청색광의 혼합광 처리에 의한 효과에 집중되어 있다.

식물은 피토크롬을 포함한 다양한 유형의 광 수용체를 통해 특정 광 파장을 감지하여 생물주기를 변화시킬 수 있다(Taiz와 Zeiger, 1991). 피토크롬은 비활성 또는 활성 형태를 가지며 R/FR 비율이 밀접하게 관련되어 있고, 일반적인 태양광에서 R/FR 비율은 약 1.0~1.3의 값을 가진다(Holmes와 Smith, 1977a). R/FR의 비율은 새벽과 자정에 낮으며, 구름의 양에 따라 약간 달라지지만 계절 변화에 따라서는 민감하지 않다(Holmes와 Smith, 1977b; Hertel et al., 2011; Turnbull와 Yates, 1993). 최근에는 FR가 식물생장에 미치는 영향을 평가하는 연구들이 다수 수행되었다. 그 중 배추과의 모델식물인 애기장대에서 R/FR의 비율이 감소함에 따라 즉 FR의 증가로 줄기(Finlayson 등, 2010), 입자루(Sasidharan 등, 2010)의 길이가 증가하지만, 반대로 기공밀도(Boccalandro 등, 2009), 뿌리분지(Salisbury 등, 2007), 뿌리길이(Reed 등, 1993) 및 indolic GSL인 indol-3-ylmethyl GSL의 함량이 감소하였다(Cargnel 등, 2014). 케일의 새싹에서 FR를 보광함으로써 일반적인 항산화 수준과 aliphatic glucosinolate(GSL) 함량이 증가하였다고 보고하였다

(Carvalho와 Folta, 2014).

따라서 본 연구에서는 최근 식물 기능성 제고 및 형태 발달에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나 다른 광질에 비하여 상대적으로 기능성 제고에 대한 평가가 부족했던 FR의 비율을 3수준으로 달리하고 배추과 작물의 핵심 유용 물질인 개별 GSL의 함량 및 일반 항산화 기능성을 3종 배추과 싹채소를 이용하여 평가하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 식물재료

식물 재료로는 “청룡” 무(Koregon, Seoul, Korea), “국풍” 배추(Koregon, Seoul, Korea), “베리돔” 브로콜리(Takii, Kyoto, Japan)의 3종 배추과 채소 상용 품종을 싹채소의 형태로 재배하여 실험에 이용하였다.

2. 재배 환경조건 및 LED를 이용한 광질 비율 처리

싹채소의 재배를 위하여, 적색(R, 660nm), 청색(B, 450nm) 및 원적색광(FR, 730nm)의 비율이 조절 가능한 식물생장상(65×35×50cm)을 별도로 제작하여 실험에 이용하였다. 무, 배추, 브로콜리의 종자를 각 4, 2, 2g씩 증류수에 18시간 침지시킨 후 새싹재배기(32×22×14cm)에 파종하고, 재배 기간 동안 물로 관수하고, 식물생장상에서 재배하였다.

식물생장상 내부의 온도는 24±1°C, 습도는 35±5%로 유지되었고, 광도계(SpectraPen LM 500, Photon Systems Instruments)를 이용하여 싹채소 자엽 부위 기준 광합성광량속을 150μmol·m⁻²·s⁻¹로 설정하였다. 생장상 내 파종 후 5일 동안 암조건에서 재배하여 하배측 신장을 유도하고, 이후 2일 동안 24시간 연속조명으로 LED를 이용한 각 광질 비율 처리를 하였다. 암조건의 경우에는 광처리 없이 7일동안 연속 암조건에서 재배하였다. R/FR 비율 처리는 고정된 red:blue 8:2에 FR를 각각 200, 90, 60μmol·m⁻²·s⁻¹로 추가하여 R/FR 비율을 0.6, 1.3 및 2.0으로 설정하였다. 암조건(dark)과 형광등(fluorescent), red:blue 8:2를 R/FR 광질비율 처리구의 대조구로 설정하고 상호 처리효과를 비교 분석하였다. 수확한 새싹은 냉동 보관 후 동결건조(Freeze dryer FD, Ilshinbiobase, Korea)하여 분말화한 뒤 GSL, phenolic, flavonoid, 비타민 C 및 항산화활성 분석을 위하여 -20°C에 보관하였다.

3. Glucosinolate 분석

GSL은 Jo 등(2016) 방법에 의하여 정량 분석하였다. 동결건조 분말시료(100mg)와 70% methanol 1mL를

2mL tube에 넣고 70°C에서 1시간동안 추출하고 4°C, 10000g에서 20분간 원심분리(Centrifuge Smart R17, Hanil Science Industrial, Korea)를 하였다. 원심분리 후 상층액을 새로운 튜브에 옮기고 남아있는 잔여물을 가지고 위 과정을 2회 반복하여 추출하였다. 상층액 전체를 미리 준비한 DEAE sephadex-A-25 slurry(Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)와 0.1M sodium acetate(pH 4.0)를 혼합물로 충전된 mini Bio-spin chromatography column(Bio-Rad Laboratories, Hercules, CA, USA)에 흘려주고 200 μ L sulfatase(EC 3.1.6.1, type H-1 from *Helix pomatia*, Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)를 처리 후 밀봉하여 상온에 18시간 desulfation 시켰다. Desulfation된 GSL를 증류수 0.5mL로 3번 추출하여 0.2 μ m PTFE syringe filter를 이용하여 여과했다. 그 후 1200 series HPLC(1200 series, Agilent Technologies, USA)를 이용하여 분석하였다. 컬럼은 Acquity UPLC BEH-C18 column(1.7 μ m, 2.1 \times 100mm; Waters Co., USA)을 사용하고, 229nm의 흡광도로 photodiode array detector를 이용하여 분석하였다. 용매 A(100% 증류수)와 용매 B(20% acetonitrile)를 1-99% gradient 변화로 0.2mL \cdot min⁻¹의 조건에서 흘려주었다(총 머무름 시간 25분). Gradient 조건은 최초 11분까지 A 99%에서 B 99%로 변화시키고, 15분까지 B 99% 조건에서 유지시킨 뒤 15분까지 다시 A 99% 조건으로 변화시키고, 25분까지 유지하여 개별 desulfo-GSL를 분리동정 하였다. Glucosinolate의 분리동정을 위하여 glucoiberin(IBR), progoitrin(PRO), epiprogoitrin(EPI), glucoraphanin(GRA), glucoraphenin(GRE), sinigrin(SIN), gluconapin(NAP), glucobrassicinapin(BCN), glucoerucin(ERU), glucobrassicin(BRA), glucobarbarin(BAR), gluconasturtiin(NAS) 총 12종의 표준물질(Cfm Oskar Co. Marktredwitz, Germany)을 사용하였다. 각각의 표준물질들은 시료와 동일한 방법으로 desulfation 시켰고, HPLC로 분리된 피크의 면적과 농도를 이용하여 정량 및 정성 분석을 하였다.

4. 총 phenolic 함량 분석

총 phenol 함량은 Singleton와 Rossi (1956)에 기술된 분석방법에 따라 Folin-Ciocalteu 비색법으로 분석하였다. 새싹 분말 (200mg)을 80% 메탄올 5mL와 혼합하고 50°C 및 120rpm으로 설정한 water bath에서 60분간 추출한 후 4°C의 4000g에서 15분간 원심 분리했다. 간단하게, 400 μ L의 추출물을 400 μ L의 물과 혼합하고 200 μ L의 Folin-Ciocalteu (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) 시약을 첨가했다. 다음에 200 μ L Na₂CO₃ (15%)를 첨가, 볼텍싱하고 암조건에 보관했다. 1 시간 후, Multiskan GO 분광분석기(Thermo Fisher Scientific

Inc., Waltham, MA, USA)를 사용하여 640nm에서 흡광도를 측정하였다. gallic acid (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)를 표준 물질로 사용하여 검량선을 만들었고, 결과는 건조 중량을 기준으로 mg GAE \cdot g⁻¹ DW으로 표시하였다.

5. 총 flavonoid 함량 분석

총 플라보노이드 함량은 Menichini 등(2009)의 방법을 변형하여 분석하였다. 총 phenol 분석으로부터 얻어진 동일한 추출물을 플라보노이드 분석에 사용 하였다. 추출물 200 μ L를 물 800 μ L과 혼합 한 다음 NaNO₂ 60 μ L를 첨가하였다. 5 분 후, AlCl₃ \cdot 6H₂O (10 %) 60 μ L와 NaOH (1M) 400 μ L를 첨가하고 Multiskan GO 분광분석기(Thermo Fisher Scientific Inc.)를 사용하여 510nm에서 흡광도를 측정하였다. Catechin hydrate(Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA)를 표준물질로 사용하였으며, 건조 중량을 기준으로 mg CE \cdot g⁻¹ DW로 표시하였다.

6. Vitamin C 함량 분석

Vitamin C 함량은 Bhandari와 Kwak (2015)의 방법을 따라 분석하였다. 간단히, 동결 건조된 분말 시료 0.2g을 5% meta-phosphoric acid 10mL 혼합하고 추출 하였다. 4000g에서 5 분간 원심 분리한 후 상등액을 0.20 μ m 주사기 필터로 여과한 후 Acquity UPLC $\text{\textcircled{R}}$ HSS T3(1.8 μ m, 2.1 \times 100mm)컬럼이 장착된 Agilent 1200 HPLC를 이용하였고, PAD 검출기를 254nm로 설정하여 분석하였다. 이동상은 99% 0.05M metaphosphoric acid와 1% acetonitrile (ACN)로 이루어졌으며, 유속은 0.2mL/min⁻¹이었다. Vitamin C (Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA) 표준물질을 사용하여 피크를 확인하고 정량 하였다.

7. 항산화능 분석

7.1 Ferric reduced antioxidant power (FRAP) 분석

항산화 활성은 Thaipong 등, (2006)의 방법을 조금 수정하여 분석하였다. 먼저, 300mM 아세테이트 완충액 (3.1g C₂H₃NaO₂ \cdot 3H₂O 및 16mL C₂H₄O₂; pH 3.6), 10mM 2,3,6-Tris(2-pyridyl)-s-triazine (TPTZ), 40mM HCl 및 20mM FeCl₃ \cdot 6H₂O를 각각 제조하였다. 그런 다음 아세테이트 완충액, TPTZ 용액 및 FeCl₃ \cdot 6H₂O 용액을 10 : 1 : 1 (v / v / v)의 비율로 혼합하고 37°C로 가온하여 FRAP 분석용액을 제조하였다. 1.5mL 튜브에서 새싹 추출물 (50 μ L)을 950 μ L FRAP 분석용액과 10분간 반응시킨 후, Multiskan GO 분광분석기를 사용하여 593nm에서 흡광도를 측정하였다. 표준물질로는 trolox(Sigma-Aldrich, St. Louis, MO, USA; 100-

500 μ mol)를 사용하였으며 μ mol TE·g⁻¹ DW 로 표시하였다.

7.2 2,2'-Azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic Acid) (ABTS) 분석

ABTS 분석은 Thiapong 등, (2006)의 방법을 이용하여 분석하였다. 처음으로 ABTS 라디칼 양이온 7mM ABTS용액과 2.45mM 황산칼륨을 혼합 제조하여 사용하기 전까지 16~20°C의 암조건에 보관하였다. ABTS용액을 734nm에서 0.9+0.02의 흡광도에 도달할때까지 100% 메탄올을 이용하여 20배 희석하였다. 새싹 추출물(50 μ L)을 ABTS 용액 950 μ L에 첨가하고 2시간 암조건에 보관 후 Multiskan GO 분광분석기를 사용하여 734nm에서 흡광도를 측정 하였다. 표준물질로는 trolox(100-500 μ mol)를 사용하였으며, μ mol TE·g⁻¹ DW 로 표시 하였다.

7.3 2,2-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) assay

DPPH 분석은 DPPH용액의 색상반응(보라색에서 황색으로)에 근거하고 Bhandari와 Kwak (2014)의 논문을 참고하여 분석하였다. 먼저, 80% 메탄올에 400 μ M DPPH 용액의 혼합물을 제조하였다. 메탄올에 용해된 새싹 추출물과 메탄올을 각각 100 μ L씩 96well plate 분주하고 DPPH용액 100 μ L를 혼합한 후 Multiskan GO 분광분석기를 사용하여 518nm에서 흡광도를 측정하였다.

8. 통계분석

총 GSL, phenol, flavonoid, vitamin C 함량 및 항산화 활성 분석은 각 처리구별 샘플을 한곳에 모아 테크니컬3반복으로 실험을 실시하였다. 통계분석은 SAS 프로그램을 이용하였고, 평균 간 비교는 던컨 다중범위검정을 이용하여 작물 및 광처리 간 유의적 차이를 확인 하였다.

결과 및 고찰

1. FR 비율에 따른 glucosinolate 함량

실험에 사용된 광원은 총 5가지이며, 광도는 150 μ mol·m⁻²·s⁻¹ 로 동일하게 조정하였고, Red의 경우 660nm, Blue의 경우 440nm, FR의 경우 736nm 파장을 안정적으로 구현하였다(Fig. 1). 인공 광원 하에서 무, 배추, 브로콜리 새싹 내 GSL 함량은 작물별로 상이한 패턴을 보였으며 3 작물 중 브로콜리의 총 GSL 함량이 가장 높은 수준이었다(Fig. 2A). 브로콜리의 주요 GSL는 총 6종으로 확인되었고 (PRO, GRA, NAP, ERU, BRA, NAS), 총 GSL 함량은 Jo 등, (2016)의 연구결과에서도 여러 배추과 작물중에 162.19 μ mol·g⁻¹ DW로 가장 높았으며, 본 실험에서도 3 작물 중 모든 처리에서 가장 높은 함량을 보였다(Fig. 2A). 브로콜리에서는 암조건에서 가장 높은 총 GSL함량(86.3 μ mol·g⁻¹ DW)을 보였고, R/FR 0.6에서 가장 낮은 함량(33.9 μ mol·g⁻¹

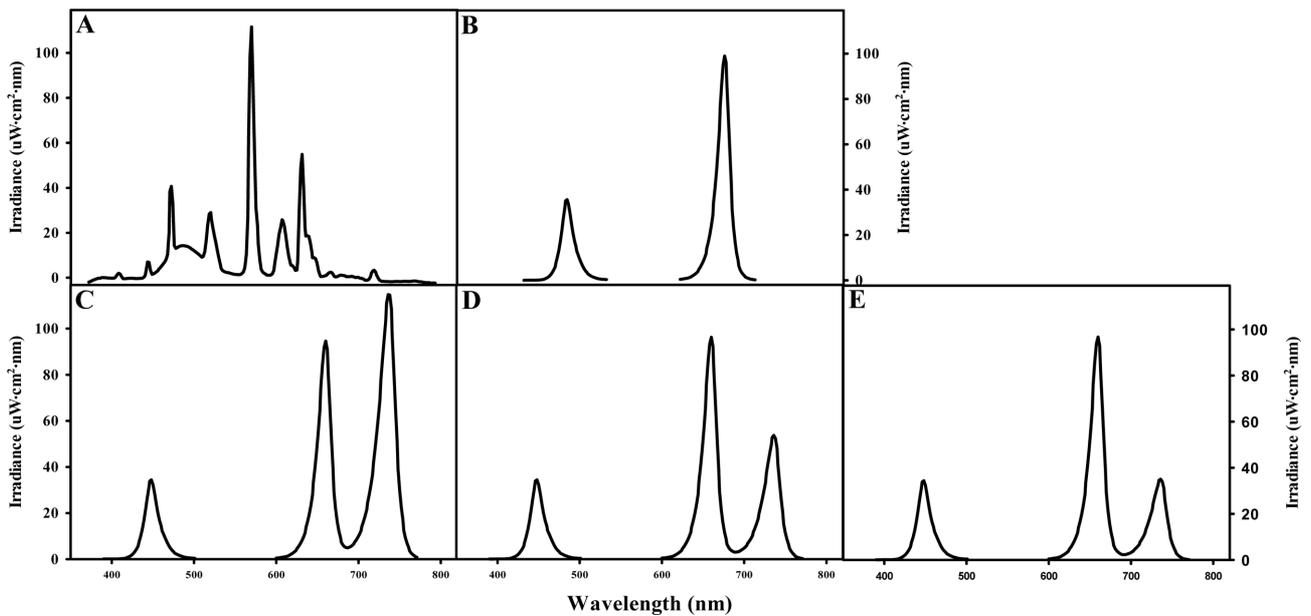


Fig. 1. Relative spectral distribution of fluorescent (A), red-blue mixed light (B) and various ratios of FR light(C: 0.6, D:1.3, C:2.0) used in the experiment.

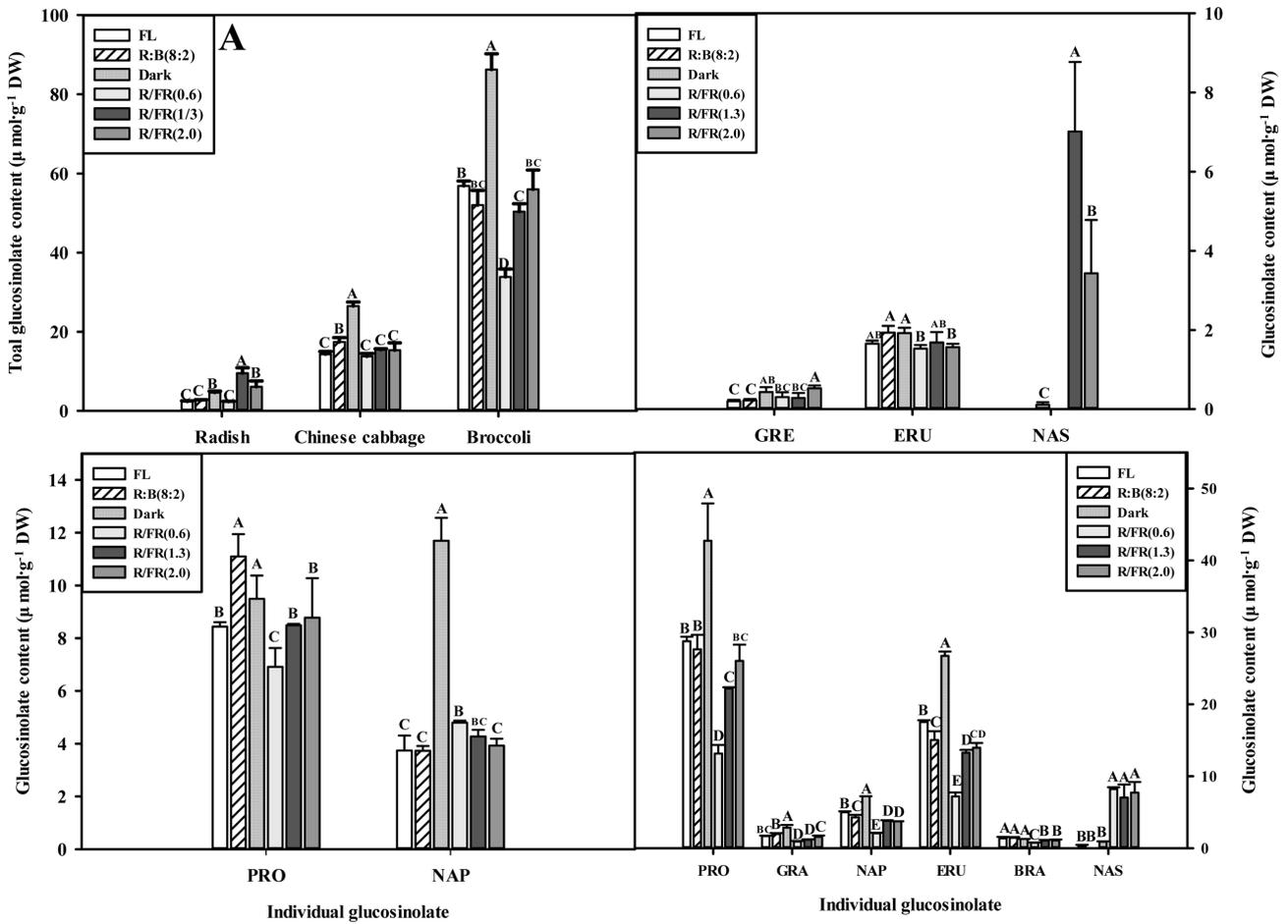


Fig. 2. Total glucosinolate (A) and major glucosinolate content of radish (B), Chinese cabbage (C) and broccoli (D) sprouts under six light quality treatment. Each vertical bar represents mean \pm SD of three replications. Different letters with in each genotypes/glucosinolate of each figure represent statistically difference using Duncan's multiple range test at $P < 0.05$.

DW)을 보였다. FR의 비율이 증가함에 따라서 총 GSL 함량이 감소하는 경향을 보였는데 그 이유는 PRO, ERU의 함량이 FR 비율이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였기 때문이다. PRO는 암조건에서 가장 높은 함량인 $42.7 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ 이었고, R/FR 0.6에서는 약 69% 낮은 함량인 $13.2 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ 로 확인되었다. Deng 등, (2017)의 연구에서는 케일의 새싹 수확 전 white와 red LED를 처리 하였을 때 처리기간이 길어질수록 PRO, ERU의 함량이 감소하는 것을 볼 수 있었다. 본 연구에서 FL과 R:B(8:2)의 PRO의 함량은 유의적 차이는 없었지만, ERU는 Deng 등, (2017)의 연구와 동일한 경향으로 브로콜리에서 암조건보다 LED와 형광등 처리에서 함량이 감소하였다(Fig. 2D). 또한 R/FR 처리구에서는 FR 비율이 높아질수록 PRO와 ERU의 함량이 유의적으로 감소하는 것을 확인하였다. 따라서 PRO와 ERU의 함량은 Red와 FR 광질에 반응하여 증감되는 것을 확인

하였다. 또한 NAS함량은 FR 비율에 따른 유의적 차이는 없었으나 대조구와 비교하면 FR광을 추가하였을 때 유의적으로 증가하는 것을 확인하였고, 대조구와 개별 GSL을 비교하였을 때 NAS를 제외하고 모든 개별 GSL의 함량은 감소하였다(Fig. 2D).

브로콜리와 비교하여 배추와 무에서 개별 GSL는 단순한 패턴을 보였다. 배추의 주요 GSL는 PRO, NAP였고, 브로콜리와 마찬가지로 PRO의 함량은 FR 비율이 증가하면 대조구보다 감소하는 것을 볼 수 있고, PRO 함량이 가장 높은 R:B(8:2)의 $17.4 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ 보다 R/FR 0.6에서 20.7% 낮은 $13.8 \mu\text{mol} \cdot \text{g}^{-1} \text{DW}$ 을 보였다(Fig. 2C). 총 GSL 함량은 브로콜리와 마찬가지로 암조건에서 가장 높았다. NAP의 경우 암조건이 가장 높은 함량을 보였고, R/FR 비율이 증가함에 따라서 함량이 증가하는 경향을 보였고, R/FR 0.6 처리구는 FL과 R:B(8:2) 처리구 보다 유의적으로 높은 함량을 보였다(Fig. 2C). 무는

Table 1. Phytochemical content and antioxidant activities of radish, Chinese cabbage and broccoli sprouts under six light quality treatment.

		Phenol (mg GAE·g ⁻¹ DW)	Flavonoid (mg CE·g ⁻¹ DW)	Vitamin C (mg·g ⁻¹ DW)	ABTS		FRAP		DPPH (%)				
					μmol TE·g ⁻¹ DW								
Radish	FL	9.11±0.25 ^z	b ^y	4.93±0.18	bc	6.79±0.06	c	36.90±1.05	ab	32.62±0.82	a	91.38±0.37	a
	R:B(8:2)	8.20±0.50	c	4.74±0.28	b	7.23±0.11	b	28.11±2.75	d	21.02±1.28	c	82.68±1.12	c
	Dark	8.24±0.29	c	2.77±0.08	d	4.32±0.13	d	34.00±2.64	bc	28.96±1.25	b	90.85±0.23	a
	R/FR(0.6)	10.14±0.14	a	5.52±0.11	a	7.63±0.09	a	39.72±1.40	a	33.45±1.74	a	91.37±0.73	a
	R/FR(1.3)	8.49±0.23	c	5.10±0.20	b	7.38±0.11	b	35.37±1.28	bc	27.41±0.21	b	86.57±1.30	b
	R/FR(2.0)	8.35±0.35	c	5.00±0.17	bc	7.33±0.02	b	32.95±0.73	c	26.69±1.90	b	86.60±0.59	b
Chinese cabbage	FL	6.82±0.02	b	3.68±0.27	c	6.08±0.10	c	31.35±0.93	a	22.82±0.52	ab	86.52±1.33	ab
	R:B(8:2)	6.46±0.14	bc	4.02±0.07	b	6.88±0.02	a	25.24±3.10	c	19.31±1.54	c	73.13±5.68	d
	Dark	6.23±0.18	c	2.58±0.11	d	3.98±0.29	d	32.77±1.15	a	22.10±0.75	b	82.08±2.07	bc
	R/FR(0.6)	7.35±0.10	a	4.35±0.15	a	5.97±0.04	c	32.98±0.28	a	24.63±1.57	a	88.24±0.40	a
	R/FR(1.3)	6.76±0.25	b	4.02±0.20	b	6.55±0.12	b	29.37±1.50	bc	21.88±1.54	b	78.97±3.04	cd
	R/FR(2.0)	6.47±0.42	bc	3.82±0.05	bc	6.35±0.15	b	29.97±1.19	bc	21.42±0.86	b	78.48±3.80	cd
Broccoli	FL	8.04±0.23	ab	3.78±0.22	a	7.95±0.26	c	28.07±1.40	c	20.85±1.21	c	85.97±1.52	bc
	R:B(8:2)	7.64±0.16	c	3.01±0.10	c	8.08±0.02	c	33.66±0.60	bc	23.87±1.05	b	86.84±0.97	b
	Dark	6.76±0.08	d	2.29±0.12	d	4.27±0.04	d	34.45±1.12	bc	23.26±0.35	b	85.90±1.40	bc
	R/FR(0.6)	8.30±0.13	a	3.24±0.08	bc	8.53±0.03	a	36.94±1.28	a	26.78±0.75	a	89.38±0.58	a
	R/FR(1.3)	7.85±0.25	bc	3.21±0.10	bc	8.31±0.05	b	33.74±1.12	bc	24.12±0.88	b	86.46±0.46	b
	R/FR(2.0)	6.94±0.27	d	3.40±0.16	b	8.50±0.07	ab	34.25±0.77	bc	24.48±1.39	b	84.55±0.41	c

^zValues are mean ± SD of three replications on a dry weight basis.

^yDifferent letters with in each genotypes represent statistically difference using Duncan's multiple range test at P<0.05.

3작물중에서 가장 낮은 총 GSL 함량을 보였고, 주요 GSL는 GRE, ERU, NAS 였다(Fig. 2B).

본 연구에서 총 GSL 함량은 무를 제외하고 암조건에서 가장 높았다. Vale 등, (2015)의 연구결과에서는 본 연구와는 다르게 브로콜리 새싹의 총 GSL 함량은 암조건보다 광조건에서 더 높았다고 보고되었고, Qian 등 (2016)의 연구결과에서는 케일의 새싹에서 광조건보다 암조건에서 총 GSL 함량이 높았다고 보고되었다. 이러한 결과는 GSL 물질군이 환경에 매우 민감하게 반응하고 작물에 따라서도 매우 다양한 함량 패턴을 나타내기 때문이며, 따라서 좀 더 명확한 환경조건과 광질조건에 관한 연구가 필요할 것이라고 판단된다. 또한 FR의 증가로 인하여 PRO의 함량을 감소시킬 수는 있지만, 그와 동시에 다른 개별 GSL의 함량도 감소되므로 전력적인 조사 방법에 관한 연구가 필요하다고 판단된다.

2. FR 비율에 따른 phenolic, flavonoid, vitamin C 함량

FR 비율에 따른 2차 대사산물의 변이를 관찰하기 위하여 total phenol, total flavonoid, vitamin C 함량을 분석하였다. Phenol의 경우 수천 종이 존재하며, 체 내에

서 생성되어 노화나 만성질환을 발생시키는 활성산소 죽을 소멸시키므로 영양학적 품질을 결정하는데 결정적인 요소 중의 하나로 부각되고 있다(Son 등, 2012). 또한 flavonoid, Vitamin C의 섭취도 이러한 산화적 스트레스를 감소시킬 수가 있고, flavonoid는 항 고혈압, 항 부정맥제, 항 염증제, 항균, 항암, 항 알레르기 등의 중요한 역할을 하며, 현재 10개의 화학그룹에서 5000 종류가 넘는 다양한 flavonoid가 발견되었다(Harborne와 Williams, 2000; Oh 등, 2000).

본 연구에서 total phenol, flavonoid, Vitamin C 함량은 무, 배추, 브로콜리 모두 암조건에서 가장 낮은 함량을 확인하였는데 Qian 등(2016)연구에서도 케일의 새싹에서 total phenol과 vitamin C 함량은 암조건에서 가장 낮은 것을 확인할 수 있었다. Total phenol 함량의 경우 무, 배추, 브로콜리 3작물에서 FR 비율이 높아질수록 증가하는 유사한 경향을 보였고, 3작물 모두 R/FR 0.6 처리구에서 가장 높은 함량이 분석되었다(각각 10.14, 7.34, 8.29mg·g⁻¹ DW). 3작물 중 무의 R/FR 0.6 처리구가 가장 높은 총 phenol 함량(10.14mg·g⁻¹ DW)을 함유하고 있었다 (Table 1).

Table 2. Diagram of FR effect on glucosinolates, secondary metabolites and antioxidant activation. All data were compared R:B(8:2) treatment by Duncan's multiple-range test (DMRT) at $\alpha \geq 0.05$.

Radish			Chinese cabbage			Broccoli			
R/FR (0.6)	R/FR (1.3)	R/FR (2.0)	R/FR (0.6)	R/FR (1.3)	R/FR (2.0)	R/FR (0.6)	R/FR (1.3)	R/FR (2.0)	
									Total GSL
									PRO
									GRA
									NAP
									ERU
									BRA
									NAS
									Phenol
									Flavonoid
									Vitamin C
									ABTS
									FRAP
									DPPH

The black, gray and white box represent significant increases, non-significant change and significant decrease in analyzed phytochemicals & antioxidant activities, respectively.

하지만, total flavonoid의 경우 무와 배추에서는 R/FR 0.6 처리구가 가장 높았지만, 브로콜리에서는 유의적 차이를 보이지 않았다(Table 1). vitamin C 함량의 경우 무는 R/FR 0.6 처리구가 가장 높은 함량을 보였지만, 배추와 브로콜리에서는 유의적 차이를 보이지 않았다(Table 1). 모든 작물의 Total flavonoid와 Vitamin C는 GSL의 함량과는 정반대로 암조건에서 가장 낮은 함량을 보였다. 본 연구결과를 통해서 total flavonoid와 Vitamin C는 FR의 보광보다는 광의 유무에 더 많은 영향을 받는 것으로 판단된다.

3. Far-red 비율에 따른 항산화 활성

여러 가지 환경 요인에 의해 생성될 수 있는 불안정한 활성 산소 종은 세포를 파괴시켜 동물과 식물에 산화 스트레스를 유발시킨다 (Jeong 등, 2008; Park 등, 2004). 암, 동맥경화, 당뇨병 및 심혈관 질환과 같은 대부분의 인간 질병은 이러한 산화스트레스와 관련이 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서도 항산화활성을 3가지 방법으로 조사하였다.

항산화활성은 브로콜리를 제외하고 2작물에서는 대조구와 처리구 간의 유의적 차이를 보이지는 않았지만, 3가지 작물 모두 R:B(8:2)보다는 FR을 보광한 처리에서 더 높은 항산화 활성을 확인할 수 있었고, 그 중 R/FR 0.6 처리가 가장 높은 항산화활성을 보였다 (Table 1,

2). R/FR 1.3과 2.0은 유의적 차이를 보이지 않았는데 이러한 이유는 FR 광도가 $30\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 낮은 차이를 보여서 그 효과가 미미한것으로 판단된다.

모든 작물의 총 phenolic, flavonoid, vitamin C는 암조건보다 광조건에서 함량이 증가하는 것을 확인하였다(Table 1). 항산화 활성은 대조구와 처리구 간에 유의한 차이를 보이지 않았지만, R:B(8:2)보다 R/FR 0.6에서 항산화 활성이 높아지는 것을 확인하였다 (Table 1, 2). 무를 제외한 배추와 브로콜리의 총 GSL는 광조건보다 암조건에서 더 높은 함량을 확인하였다 (Fig. 1). FR의 보광처리에는 배추와 브로콜리에서 쓴맛을 내며 갑상선 암을 발생시킨다고 보고된(Liu 등, 2012; Mithen 2001) PRO함량을 R:B(8:2) 보다 38%, 52% 감소시킬 수 있고, 다른 2차대사산물과 항산화 활성도 증가시킬 수 있기 때문에 배추과 싹채소의 기능성 증진에 이용될 수 있을 것이라고 판단된다(Fig. 1., Table 2). 본 연구에서의 식물생리물질의 변화가 추가된 높은 FR의 광량자에 의한 스트레스 작용으로 발생한 것인지 추가적인 연구가 필요하며, 또한 본 연구에서 광원을 조사한 기간이 2일 밖에 되지 않아 FR 비율에 따른 차이가 미미하였고, 추가적으로 광원 조사 시간을 세분화하고 생육기간을 연장시켜 특정 광질 노출에 의한 GSL 함량변이 평가가 필요할 것으로 판단된다.

적 요

본 연구의 목적은 3가지의 배추과 작물의 새싹에서 적색(R)과 원적외선(FR)광에 초점을 맞추어서 glucosinolate (GSL), 총 페놀, 총 플라보노이드, 비타민 C 함량, 항산화 활성을 평가하는 것이다. 제한된 환경조건에서 5일된 새싹에 3가지의 R/FR비율을 2일동안 24시간 노출시켜 식물화학물질과 항산화활성을 대조군[형광등, R:B(8:2), 암조건]과 비교하였다. 총 GSL 함량은 각 처리 기간 동안 3가지의 작물 중 브로콜리에서 가장 높았으며, 브로콜리 새싹에서 R/FR 비율이 증가함에 따라 총 GSL 함량이 감소하는 반면 배추와 무의 새싹에서는 유의하지 않은 결과를 보여주었다. 배추 및 브로콜리의 주요 GSL 인 progoitrin은 대조군에 비해 R/FR 비율이 감소함에 따라 최대 38%, 69%까지 감소하였다. 3가지 배추과 새싹에서 페놀, 플라보노이드 및 비타민 C의 함량 모두 암조건에서 가장 낮았다. 총 페놀 및 항산화 활성은 3가지 배추과 새싹에서 R/FR 비율이 감소할수록 증가하는 반면, 총 플라보노이드와 비타민 C 함량은 작물 간 다른 양상을 보였다. 이러한 결과는 FR의 보광에 따라 배추과 새싹의 기능적 품질을 향상시킬 것으로 기대된다.

추가 주제어 : 비타민C, 프로고이트린, 플라보노이드, 페놀

사 사

본 연구는 농촌진흥청 공동연구사업(과제번호 PJ012300)에 의해 수행되었음.

Literature Cited

- Bhandari S.R. and J.H. Kwak. 2014. Seasonal variation in phytochemicals and antioxidant activities in different tissues of various broccoli cultivars. *Afr. J. Biotechnol.* 13:604-615.
- Bhandari S.R. and J.H. Kwak. 2015. Chemical composition and antioxidant activity in different tissues of *Brassica* vegetables. *Molecules* 20:1228-1243.
- Bhandari, S.R., J.S. Jo, and J.G. Lee. 2015. Comparison of glucosinolate profiles in different tissues of nine *Brassica* crops. *Molecules* 20:15827-15841.
- Boccalandro, H.E., M.L. Rugnone, J.E. Moreno, E.L. Ploschuk, L. Serna, M.J. Yanovsky, and J.J. Casal. 2009. Phytochrome B enhances photosynthesis at the expense of water-use efficiency in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 150:1083-1092.
- Carvalho, S.D. and K.M. Folta. 2014. Sequential light programs shape kale (*Brassica napus*) sprout appearance and alter metabolic and nutrient content. *Horticulture research*, 1, 8.
- Cargnel, M. D., Demkura, P. V., & Ballaré, C. L. 2014. Linking phytochrome to plant immunity: low red: far-red ratios increase *Arabidopsis* susceptibility to *Botrytis cinerea* by reducing the biosynthesis of indolic glucosinolates and camalexin. *New Phytologist*, 204, 342-354.
- Clarke, D.B. 2010. Glucosinolates, structures and analysis in food. *Anal. Methods* 2:310-325.
- Deng, M, H, Qian, L, Chen, Bo Sun, Jiaqi Chang, Huiying Miao, Congxi Cai, Qiaomei Wang. 2017. Influence of pre-harvest red light irradiation on main phytochemicals and antioxidant activity of Chinese kale sprouts. *Food Chem.* 222:1-5.
- Finlayson, S.A., S.R. Krishnareddy, T.H. Kebrom, and J.J. Casal. 2010. Phytochrome regulation of branching in *Arabidopsis*. *Plant Physiol.* 152:914-1927.
- Gilberto, L., G. Perrotta, P. Pallara, J.L. Weller, P.D. Fraser, P.M. Bramley, A. Fiore, M. Tavazza, 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.
- Goto, E. 2012. Plant production in a closed plant factory with artificial light. *Acta Hort.* 956:37-49.
- Heo, J.W., D.E. Kim, K.S. Han, and S.J. Kim. 2013. Effect of light-quality control on growth of *Ledebouriella seseloides* grown in plant factory of an artificial light type. *Kor. J. Environ. Agric.* 32:193-200.
- Huseby, S., A. Koprivova1, B.R. Lee1, S. Saha, R. Mithen, A.B. Wold, G.B. Bengtsson and S. Kopriva. 2013 Diurnal and light regulation of sulphur assimilation and glucosinolate biosynthesis in *Arabidopsis*. *J. Exp. Bot.* 64:1039-1048.
- Halkier, B.A. and J. Gershenzon. 2006. Biology and biochemistry of glucosinolates. *Ann. Rev. Plant Biol.* 57:303-338.
- Harborne, J. B. and C.A. Williams. 2000. Advances in flavonoid research since 1992. *Phytochemistry* 55:481-504.
- Holmes, M.G. and H. Smith. 1977a. Function of phytochrome in natural environment 1. Characterization of daylight for studies in photomorphogenesis and photoperiodism. *Photochem. Photobiol.* 25:533-538.
- Holmes, M.G. and H. Smith. 1977b. The function of phytochrome in natural environment 4. Light quality and plant development. *Photochem. Photobiol.* 25:551-557.
- Hertel, C., M. Leuchner, and A. Menzel. 2011. Vertical variability of spectral ratios in a mature mixed forest stand. *Agric. For. Meteorol.* 151:1096-1105.
- Jeong, E.J., J.W. Kim, and Y.C. Kim. 2008. Rhus verniciflua stokes attenuates glutamate-induced neurotoxicity in primary cultures of rat cortical cells. *Nat. Prod. Sci.* 14:156-160.
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hahida, and T. Yoshihara. 2010. Blue lightemitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in

- red leaf lettuce. HortScience 45:1809-1814.
- Jo, J.S., S.R. Bhandari, G.H. Kang, and J.G. Lee. 2016. Comparative Analysis of Individual Glucosinolates, Phytochemicals, and Antioxidant Activities in Broccoli Breeding Lines. Hort. Environ. Biotechnol. 57(4):392-403.
- Kozai, T. 2013. Sustainable plant factory: Closed plant production systems with artificial light for high resource use efficiencies and quality produce. Acta Hort. 1004:27-40.
- Lee, M.J., K.H. Son, and M.M. Oh. 2016. Increase in biomass and bioactive compounds in lettuce under various ratios of red to far-red LED light supplemented with blue LED light. Hort. Environ. Biotechnol. 57:139-147.
- Lee, M.J., S.Y. Park, and M.M. Oh. 2015. Growth and cell division of lettuce plants under various ratios of red to far-red light-emitting diodes. Hort. Environ. Biotechnol. 56:186-194.
- Liu, Z., A. H. Hirani, P. B. McVetty, F. Daayf, C. F. Quiros, and G. Li. 2012. 'Reducing progoitrin and enriching glucoraphanin in Brassica napus seeds through silencing of the GSL-ALK gene family.' Plant Mol. Biol. 79:179-189.
- Massa, G.D., H.H. Kim, R.M. Wheeler, and C.A. Mitchell. 2008. Plant productivity in response to LED lighting. HortScience 43:1951-1956.
- Menichini F, R. Tundis, M. Bonesi, M.R. Loizzo, F. Conforti, G. Statti, B. De Cindio, P.J. Houghton, and F. Menichini. 2009. The influence of fruit ripening on the phytochemical content and biological activity of *Capsicum chinense* Jacq. Cv Habanero. Food Chem. 114:553-560
- Mithen, R. F. 2001. 'Glucosinolates and their degradation products.' Advances in Botanical Research 35:213-232.
- Morrow, R.C. 2008. LED lighting in horticulture. HortScience 43:1947-1950.
- Nishimura, T., K. Ohyama, E. Goto, and 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.
- Oh, K.W., C.k. Lee, Y.S Kim, S.K. Eo, and S.S. Han. 2000. Antihyperlipidemic activities of acidic protein bound polysaccharide isolated from Ganoderma lucidum alone and in combinations with acyclovir and vidarabine. J. Ethnopharmacol. 72:221-227.
- Park, S.H., H.S. Hwang, and J.H. Han. 2004. Development of drink from composition with medicinal plants and evaluation of its physiological function. Korean J. Nutr. 37:364-372.
- Qian H, T. Liu, M. Deng, H. Miao, C. Cai, W. Shen, and Q. Wang. 2016. Effects of light quality on main health-promoting compounds and antioxidant capacity of Chinese kale sprouts. Food Chem. 196:1232-1238.
- Reed, J.W., P. Nagpal, D.S. Poole, M. Furuya, and J. Chory. 1993. Mutations in the gene for the red/far-red light receptor phytochrome B alter cell elongation and physiological responses throughout Arabidopsis development. Plant Cell Online 5:147-157.
- Salisbury, F.J., A. Hall, C.S. Grierson, and K.J. Halliday. 2007. Phytochrome coordinates Arabidopsis shoot and root development. Plant J. 50:429-438.
- Sasidharan, R., C.C. Chinnappa, M. Staal, J.T.M. Elzenga, R. Yokoyama, K. Nishitani, L. Voeselek, and R. Pierik. 2010. Light quality-mediated petiole elongation in Arabidopsis during shade avoidance involves cell wall modification by Xyloglucan endotransglucosylase/hydrolases. Plant Physiol. 154:978-990.
- Singleton V.L. and J.A. Rossi Jr. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic phosphotungstic acid reagents. Amer. J. Enol. Viticult. 16:144-158.
- Son, K.H., J.H. Park, D.I. Kim, M.M. Oh. 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.
- Son, K.H. and M.M. Oh. 2013. Leaf shape, growth, and antioxidant phenolic compounds of two lettuce cultivars grown under various combinations of blue and red light-emitting diodes. HortScience 48:988-995.
- Steindal, A.L.H., J. Mølmann, G.B. Bengtsson, and T.J. Johansen. 2013. Influence of day length and temperature on the Content of Health-Related Compounds in Broccoli (*Brassica oleracea* L. var. italica). J. Agric. Food Chem. 61:10779-10786.
- Taiz, L. and E. Zeiger. 1991. Plant physiology. 1st ed., Benjamin/Cummings Publishing Co. New York.
- Thaipong K, U. Boonprakob, K. Crosby, L. Cisneros-Zevallos, and D.H. Byrne. 2006. Comparison of ABTS, DPPH, FRAP and ORAC assays for estimating antioxidant activity from guava fruit extracts. J. Food Compos. Anal. 19:669-675.
- 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 films. Environ. Exp. Bot. 63:232-239.
- Turnbull, M.H. and D.J. Yates. 1993. Seasonal variation in the red/far-red ratio and photon flux density in an Australian subtropical rain-forest. Agric. For. Meteorol. 64:111-127.
- Vale, A.P., J. Santos, N.V. Brito, D. Fernandes, E. Rosa, M. Beatriz, and P.P. Oliveira. 2015. Evaluating the impact of sprouting conditions on the glucosinolate content of *Brassica oleracea* sprouts. Phytochemistry 115:252-260.
- Wheeler R.M. 2008. A historical background of plant lighting: an introduction to the workshop. HortScience 43:1942-1943.3-342.
- Yeh, N. and J.P. Chung. 2009. High-brightness LEDs-energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. Renew. Sust. Energy Rev. 13:2175-2180.