배양액의 종류 및 광질이 물냉이의 생육 및 Glucosinolate 함량에 미치는 영향

최재윤¹ · 김성진¹ · 복권정¹ · 이광야² · 박종석^{1*}

¹충남대학교 농업생명과학대학 원예학과

²한국농어촌공사 재난안전처 농업가뭄센터

Effect of Different Nutrient Solution and Light Quality on Growth and Glucosinolate Contents of Watercress in Hydroponics

Jae Yun Choi¹, Sung Jin Kim¹, Kwon Jeong Bok¹, Kwang Ya Lee², and Jong Seok Park^{1*}

¹Department of Horticulture, College of Agricultural and Life Science, Chungnam National University, Daejeon 22222, Korea

²Agricultural Drought Mitigation Center, Korea Rural Corporation (KRC), Daejeon 35260, Korea

Abstract. Aim of this study was to investigate the effects of different nutrient solutions and various light qualities generated by LED on the growth and glucosinolates contents of watercress (*Nasturtium officinale*) grown under hydroponics for 3 weeks. The seeds of watercress were sown on crushed rockwool media and raised them for two weeks. They were transplanted in a semi-DFT (deep flow technique) hydroponics system. A controlled-environment room was maintained at 20±1°C and 16±1°C temperatures and 65±10% and 75±10% relative humidity (day and night, respectively), with a provided photosynthetic photon flux density (PPFD) of 180±10 μmol·m⁻²·s⁻¹ and a photo-period of 16/8h. To find out the best kinds of nutrient solutions for growing watercress, Otsuka House 1A (OTS), Horticultural Experiment Station in Korea (HES), and Netherland's Proefstaion voor Bloemisterij en Gasgroente (PBG) were adapted with initial EC of 1.0-1.3 dS·m⁻¹ and pH of 6.2, irradiating PPFD with fluorescent lamps (Ex-1). Either monochromatic (W10 and R10) or mixed LEDs (R5B1, R3B1, R2B1G1, and W2B1G1) were irradiated with a differing ratio of each LED's PPFD to understanding light quality on the growth and glucosinolates contents of watercress (Ex-2). Although significant difference in the shoot growth of watercress was not found among three nutrient solutions treatments, but the root fresh weight increased by 13.7% and 55.1% in PBG and OTS compared to HES, respectively. OTS increased the gluconasturtiin content by 96% and 65% compared to PBG and HES. Compared with the white light (W10), the red light (R10) showed a 101.3% increase in the shoot length of watercress. Increasing blue light portion positively affected plant growth. The content of total glucosinolates in watercress was increased by 144.5% and 70% per unit dry weight in R3B1 treatment compared with R2B1G1 and W10 treatments, respectively. The growth and total glucosinolates contents of the watercress were highest under R3B1 among six light qualities.

Additional key words: functional materials, LED, *Nasturtium officinale*, secondary metabolite

서 론

물냉이(*Nasturtium officinale* R. Br.)는 십자화과에 속하는 다년생 수생 초본식물로 맑고 차가운 물가에서 자라며 유럽, 미국 그리고 아시아에 걸쳐 널리 분포한다(Cruz 등, 2008). 우리나라의 물냉이는 유럽 원산의 귀화 식물로 '워터크레스(watercress)'로 불리지만 유럽에서는 프랑스명인 '크레송(cresson)'으로 더 잘 알려진 향신 채

소이다. 2014년 미국 질병예방통제센터(Centers for disease control and prevent, CDC)에서 칼로리당 영양밀도가 가장 높은 작물로 물냉이가 선정(Di Noia, 2014)되면서 사람들의 관심이 높아지게 되었다. 물냉이는 자연하천이나 온실수경재배로 생산되며 일반적으로 샐러드용 채소로 섭취하며(Manion 등, 2014), 물냉이는 비타민 C, B, E 뿐만 아니라 Ca, P, K, Fe, Mg, Zn, Se, β-carotene같은 많은 미네랄과 glucosinolates를 포함한다(Zahradníková와 Petříková, 2013). 식물에 함유된 glucosinolates는 풍미에 기여하고 항암제로서의 기능을 가지고 있으며(Mithen, 2001), 특히 배추과 작물은 섬유질, 비타민 또는 미네랄이 풍부하지만, 많은 연구들은 glucosinolates를

*Corresponding author: jongseok@cnu.ac.kr

Received October 4, 2018; Revised October 16, 2018;

Accepted October 22, 2018

포함하는 2차 대사산물의 함량에 집중되어 있다 (Björkman 등, 2011). 인체 역학 연구에 의하면 glucosinolates를 함유한 채소 섭취는 일부 암발병을 감소와 연관이 있다는 사실이 밝혀졌으며(Cohen 등, 2000; Steinbrecher와 Linseisen, 2009; Traka와 Mithen, 2009; Verkerk 등, 2009), Steinbrecher 등(2009)은 유방암진단-하이델베르크 코호트 연구의 일환으로 glucosinolates의 섭취량과 전립선 암 위험 사이의 역 상관 관계를 보고 하였다. 특히 물냉이는 유익한 산화방지제인 2-phenethyl isothiocyanate (PEITC)를 많이 함유하는 것으로 알려져 있으며, PEITC는 특정 발암물질에 대한 신체의 저항능력을 증가시키는 것으로 보고되었다(Palaniswamy 등, 1997; Syed Alwi 등, 2010).

식물은 양수분과 대기환경에 지배되어 성장한다. 식물의 영양분은 그 농도의 낮고 높음에 따라서 영양생장 및 생식생장으로 발달 및 전환 등에 관여하고 임계농도 이하가 되었을 경우 결핍증상을 보이기도 한다. 양액내의 무기이온을 직접 제어하는 것이 가장 이상적이지만 현실적으로 양액의 이온농도 전체를 측정하여 이용하고 있다(Ahn과 Son, 2011). 작물의 무기이온 흡수는 기상조건, 생육단계, 양액의 pH 등에 의해서 이온간 흡수비율이 달라지므로(Choi 등, 2008), 주기적인 양액의 교체, 배액을 조절, 원수의 회석비율(Ann과 Son, 2011) 등을 통한 이온 불균형 완화 연구가 수행되었으나 근본적인 문제는 해결할 수 없다. 이러한 이유 등으로 수경재배 또는 식물공장에서 재배하기 위해서 새롭게 도입하려는 작물의 경우, 생육의 안정적인 유지를 위해서 배양액의 선정 및 공급은 필수적이라고 할 수 있다.

최근 10년 동안, 식물의 광합성, 형태형성, 이차대사산물의 축적에 대한 광질의 연구는 다양한 식물을 대상으로 이루어져 왔다. 발광다이오드는 가격대비 우수한 성능, 상대적으로 높은 에너지 환산 계수, 다양한 스펙트럼, 비교적 낮은 표면 온도, 긴 수명 등 많은 장점을 가지고 있으며(Kozai 등, 2006), 특히, LEDs 광원은 방사 파장의 선택과 조절을 통하여 조사 광에 대한 식물의 반응 연구를 가능하게 하였다(Gerke 등, 2014). 식물에 조사되는 광질은 다른 광수용체의 선택적인 활성화를 통해 식물의 성장과 발달에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다(Schuerger 등, 1997). 특히 잎 세포의 엽록소 a와 b는 적색(600-700nm)과 청색(400-500nm) 파장의 빛을 효과적으로 흡수하기 때문에 적색과 청색광은 식물의 성장 및 발달에 필수적인 역할을 한다(Hopkins와 Huner, 2004). 적색 LED는 생체중, 건물중, 초장, 엽면적과 같은 식물 생물체량 증가를 촉진시키는데 효과적이며(Johkan 등, 2010), 청색 LED는 식물 성장에 직접적인 영향 보다 엽록소 형성과 발달을 유도하는 것으로 보고

되었다(Senger, 1982). 녹색광은 적색과 청색 혼합광에 보광으로 이용할 경우 상추의 생육을 촉진시켰다는 보고(Kim 등, 2004), 또는 식물 성장, 특히 광 형태 형성 및 광합성에 유용하지 않다고 보고 되기도 하였다(Johkan 등, 2010). 이와 같이, 식물은 조사된 광환경에 따라서 성장과 발달을 촉진 시키거나, 이차대사산물의 증감에 직접적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 연구는 수경재배에 이용되는 배양액의 종류와 LED를 이용한 혼합광 조건이 물냉이의 성장과 glucosinolates 함량에 미치는 영향에 대해서 살펴보고자 본 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

1. 식물 재료

물냉이 종자(*Nasturtium officinale*)는 아시아 종묘사(Asia seed Co. Ltd. Korea)로부터 구매하여 포수된 240공 암면과종판(Kiemplug standard tray, Grodan, Denmark)에 파종하였다. 파종된 종자는 광발아 후 자엽이 전개되었을 때, Hoagland 배양액(Arnon과 Hoagland, 1952) 조성의 양액(5L, EC 0.6dS·m⁻¹)을 컨테이너에 채우고 10초 씩 침지하는 저면관수 방식으로 1일 1회 관수하여 2주간 육묘하였다. 육묘실은 주간온도 22±1°C 야간온도 18±1°C, 습도는 50-70%, 형광등(T5-14W FHF14ST EX-D, Sigmamp Co. Ltd., Korea)을 이용하여 170±5μmol·m⁻²·s⁻¹ 광합성 광량지속밀도(Photosynthetic Photon Flux Density: PPFD)로 설정하여 관리되었다. 파종 후 2주 된 유묘들은 스티로폼 정식판에서 분리하여 스펀지를 이용하여 근권을 감싼 후, 직경 50mm 검정색 포트에 넣고 semi-DFT 시스템의 폴리카보네이트 정식판에 120mm의 주간간격으로 처리당 20주씩 정식하였다.

2. 재배 시스템

환경조절룸[6m(길이) × 2.5m(폭) × 4.5m(높이)]은 semi-DFT (Deep Flow Technique; 양액높이 50mm) 방식, 재배베드[1,200mm(길이) × 800mm(폭) × 100mm(높이)]를 3단, 각 단의 높이는 600mm로 구성한 재배모듈 2개는 LED 모듈로, 1개는 형광등 모듈로 설정하여 총 9개의 독립재배베드 시스템에서 실험을 수행하였다. 환경조절룸의 온도는 히트펌프(CSV-Q115UI, CLK Co. Ltd., Korea)와 냉동기(Unit Cooler BSU-030E, Sungjin Industrial Co. Ltd., Korea)를 이용하여 제어되었으며 주간온도 20±1°C, 야간온도 16±1°C범위로 조절되었다. 상대습도는 낮 동안에 가습기(HU-4200C, Ohsungsa Co. Ltd., Korea)를 이용하여 65±10%, 야간에는 가습을 중지하여 75±10% 범위로 조절되었다. 실내에 설치된 배기팬을 이용하여 낮동안 외부와 공기를 교환하여 CO₂ 농도

Table 1. The composition of each nutrient solution for of *Nasturtium officinale* in hydroponics.

Nutrient solution ^z	Nutrient concentration (me/L)							EC (dS·m ⁻¹)
	NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	Ca	Mg	S	
OTS	16.8	1.8	5.1	8.6	8.2	3.0	3.0	1.3
HES	14.0	1.0	3.0	6.0	8.0	4.0	4.0	1.2
PBG	19.0	1.25	2.0	11.0	9.0	2.0	2.5	1.0

^zOTS: The nutrient solution developed by Otsuka House1A developed by Otsuka Co. Ltd., in Japan.

HES: The nutrient solution developed by Horticultural Experiment Station in Korea.

PBG: The nutrient solution developed by Netherland's Proefstaion voor Bloemisterij en Gasgroente.

를 유지하였으며 광주기는 16/8h(주간/야간)로 설정하였다. 광도는 유묘의 군락 높이에서 광 균일도를 유지하기 위해서 0.3mm의 종이테이프를 형광등 반사판에 부착시켜 재배배드의 중앙을 중심으로 $180 \pm 10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ PPFD 조건으로 조절하였다. 휴대용 온습도 센서(testo-174H, Testo Co. Ltd., Germany) 3개를 이용하여 각 재배 모듈의 중간 재배배드의 온습도를 모니터링 하였다. 각 모듈은 독립적인 양액탱크를 두어 양액을 공급할 수 있도록 구성되었으며 재배 모듈 하단에 100L 크기의 양액탱크를 설치하였으며 수증펌프(PD-G050M, WILO Co. Ltd., Germany)를 24시간 순환시켰다. 배양액의 EC는 각 조성의 표준배양액으로 $1.0 \sim 1.3 \pm 0.1 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, pH는 6.2 ± 0.1 으로 조정하여 공급하였고 초기에 처리된 양액은 3주동안 교체하지 않았으며 양액의 EC와 pH를 2일 간격으로 재배기간인 3주 동안 측정하였다.

3. 배양액 종류 및 LED 광원

배양액의 종류에 따른 물냉이 생육과 glucosinolates 함량 변화를 살펴보기 위하여 오오츠카 하우스 1A액(OTS: Otsuka House 1A), 한국원시(HES: Horticultural Experiment Station in Korea), 화란 온실작물연구소(PBG: Netherland's Proefstaion voor Bloemisterij en Gasgroente) 배양액을 이용하였다(Table 1). 광질 처리에 따른 물냉이 생육 및 glucosinolates 함량 변화를 보기 위해 LED를 이용하여 6가지 광질 처리를 설계하였다. 침두 파장이 각각 적색 (R : 660nm), 청색 (B: 450nm), 녹색 (G: 540nm), 백색 (W: 연속광) (SungGwang LED Co. Ltd., Korea)인 발광 다이오드를 사용하였으며 각 광원의 비율 조합은 파장별 PPFD를 기준으로 W10(white 10), R10 (R:B:G = 10:0:0), R5B1 (R:B:G = 5:1:0), R3B1 (R:B:G = 3:1:0), R2B1G1 (R:B:G = 2:1:1), W2B1G1 (W:B:G = 2:1:1)을 설정하였다. 각 LED 광원은 Dimming 스위치를 이용하여 각 파장별 광도를 조절하였다. 모든 처리는 광량자 센서(LI-190, LICOR, Lincoln, NE, USA)를 이용하여 재배바닥 30mm 위에서 광강도 $180 \pm 10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 로 맞추었으며 각각의

광처리에 대한 스펙트럼 분포는 분광측정기(LI-1800; Li-Cor, Lincoln, NE, USA)를 사용하여 측정하였다. 광주기 16/8 h로 설정하여 3주간 재배하였다.

4. Glucosinolate 분석

물냉이의 glucosinolates 함량은 HPLC (High Performance Liquid Chromatogram)를 이용하여 분석하였다. 정식 3주 후 물냉이 지상부를 Freeze-drying (TFD5503, IISinBioBase, Korea)를 이용하여 동결 건조 후 막자사발로 분말화 하였다. 2.0mL eppendorf-tube에 분말시료 100mg 씩 평량하여 70% (v/v) boiling menthanol (1.5mL)을 넣었다. 진동혼합(vortex) 처리 후 항온수조 (water bath) 70°C에서 5분 동안 넣어 조(crude) GSLs를 추출한다. 원심분리(12,000 rpm, 10 min, 4°C)한 후에 상층액을 추출하였다. 동일한 과정을 2회 반복 추출 후, 각 상층액을 합쳤다. Mini-column 충전용 DEAE-Sephadex A-25(30g)는 초순수에 녹여 분액여두에 넣은 후 약 1.5배(v/v)의 초순수를 넣고 빠져나가면 0.5M sodium acetate ($68 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$)를 넣어 H⁺형태로 활성화 시켰다. Mini-column은 1mL pipette tip 끝을 탈지면으로 막고 DEAE-Sephadex A-25 (50mg dry wt.)를 기포가 발생하지 않게 주의하면서 pasteur pipette으로 조금씩 넣어 만들었다. GSL 조 추출물(crude extract)을 pasteur pipette으로 mini-column에 로딩한다. 추출물이 모두 빠져나가면, 초순수 2mL를 넣었다. 초순수가 다 빠져나가면, mini-column 아래 부분을 paraffin film으로 막은 후 aryl sulfatase solution ($23 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) 75μL을 수평으로 로딩하였다. Paraffin film으로 mini-column 위 부분을 막고, 충분한 효소반응을 위하여 16시간 동안 상온에서 정치하였다. 정치 후, 2.0mL eppendorf-tube에 초순수를 0.5mL씩 3회 흘려서 desulfo-GSLs를 용출하였다. 용출시킨 시료는 $0.45 \mu\text{m}$ hydrophilic PTFE millipore filter (직경 13mm)로 여과한 후, HPLC용 vial병에 넣어 냉장 보관하였다. HPLC에 의한 glucosinolates 분석은 inertsil ODS-3 column ($150 \times 3.0 \text{ mm i.d.}$, particle size $3 \mu\text{m}$)을 장착한 Agilent Technologies 1200 series HPLC systems으로 분석하였다(Rapeseed I, 1992).

Fig. 1. The changes of electrical conductivity (EC) and pH of each nutrient solution during experimental periods of 3 weeks.

5. 생육측정 및 통계분석

수확 후 물냉이의 초장, 엽장, 엽폭, 근장, 지상부와 지하부의 생체중을 디지털 버니어캘리퍼스(SD500-300PRO, ShinCon Co. Ltd., Korea)와 전자저울(MW-2N, CAS Co. Ltd., Korea)을 이용하여 측정하였으며 생육 측정 후 물냉이는 70°C로 설정한 건조기(HB-501M, Hanbaek Scientific Co. Ltd., Korea)에 1주일간 보관 후 건물중을 측정하였다. glucosinolate 성분 분석을 위해서 각처리당 3주를 분석하였다. 본 실험은 완전임의 배치법으로 2반복 수행되었다. 식물 생육분석을 위한 모든 처리구는 반복 당 5개체를 측정하였으며, 통계분석은 SPSS 통계분석 프로그램(ver. 21)을 이용하였다. 평균간의 유의성 검증을 위하여 Tukey's 다중 분산분석을 $P \leq 0.05$ 조건으로 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 배양액에 따른 물냉이의 생육 및 glucosinolates 함량

재배기간 동안 배양액의 EC는 초기 설정농도값에서 크게 변하지 않았으나 pH는 6.2~7.2의 범위내에서 시간의 경과에 따라 서서히 증가하는 경향을 나타내었으며 (Fig. 1), 실험 기간동안 환경조절실의 온도와 습도는 설정값에 근사하게 유지 관리되었다(Fig. 2). 재배기간이 끝난 후 수확한 물냉이와 LED 재배장치, 광 처리별 스펙트럼은 Fig. 3과 같다.

배양액의 조건을 달리하여 3주간 수경재배한 물냉이의 초장과 근장, 엽장과 엽폭은 양액종류에 관계없이 유의적인 차이를 보이지 않았다(Fig. 4). PBG와 HES 배양액 처리조건에서 지상부 생체중은 OTS 배양액 조건과 비교하여 20.7%와 13.0% 증가하였으나 유의적인 차이는 보이지 않았으며, 건물중의 경우 PBG 배양액은 OTS 배양액 처리보다 4% 증가하는 것으로 나타났다(Fig. 4). 그러나 PBG와 OTS 배양액 처리에서 뿌리의 생체중은

Fig. 2. Time course of the temperature and humidity of the culture room controlled by a heat pump, refrigeration, and humidifier during experimental periods of 3 weeks.

HES 배양액 처리와 비교하여 13.7%와 55.1% 증가하였으며, 뿌리 건물중의 경우 21.4%와 49.3% 증가하였으며, OTS 처리의 뿌리 생체중은 다른 두 처리구와 비교하여 유의적으로 높은 값을 나타내었다(Fig. 4). 이러한 결과는 꿀풀과 식물인 배초향을 여러가지 배양액으로 수경재배할 경우, 배양액의 EC값이 약간 높았던 오오츠카하우스 1A액 처리가 유럽채소연구소 배양액과 한국원시 배양액 보다 유의적으로 높은 뿌리의 생체중과 건물중 증가를 유도한 결과와 유사하였다(Kim 등, 2017). 재배기간 중의 EC 농도는 크게 변화하지 않았으나, 각 이온간의 균형은 변화될 것으로 예측된다. 이에, Ahn과 Son(2011)은 배양액의 지속적 사용에 따른 이온의 불균형을 파악하기 위해 양이온과 음이온들의 비율 변화를 파악한 결과 양이온의 경우는 Ca^{2+} 와 K^{+} 이온을 중심으로 분포하고, 음이온의 경우 SO_4^{2-} 와 PO_4^{3-} 의 비율 변화를 중심으로 분포한다고 보고하였다. 또한 각 이온의 EC에 가장 큰 영향을 미치는 1가 이온인 K^{+} 과 NO_3^{-} 이온은 이온 활동도 계수가 0.8-0.9정도이며, 다음으로 영향을 미치는 2가 이온인 Ca^{2+} , SO_4^{2-} , Mg^{2+} 이온은 이온 활동도 계수가 0.5-0.6 수준으로 보고하였다(Son, 1998).

배양액의 종류 및 광질이 물냉이의 생육 및 glucosinolate 함량에 미치는 영향

Fig. 3. *Nasturtium officinale* irradiated with different LEDs light sources and absolute irradiance of various combinations of LED light source (W10, R3B1, R5B1, R10, R2B1G1, W2B1G1 based on each LED's PPFD).

Fig. 4. Stem length, root length, leaf length and width, shoot and root fresh weights, and shoot and root dry weights of *Nasturtium officinale* grown under the different nutrient solution, Otsuka House 1A (OTS), Netherlands' Proefstaion voor Bloemisterij en Gasgroente (PBG), Horticultural Experimental station in Korea (HES) with $180 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ PPFD irradiated by fluorescents lamps for 3 weeks. Data represent means and standard deviation ($n=5$). For mean separation Turkey's multiple range test at $P \leq 0.05$ has been done and * means significant differences.

배양액 종류에 따른 물냉이 지상부 생육은 유의적 차이가 없었지만, OTS 배양액 처리구에서 지하부의 생육이 유의적으로 증가한 것은 EC 농도가 $0.1-0.3 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 증가한 조건이 지하부 생육의 증가에 유의적인 영향을 준 것으로 판단된다.

각각의 배양액을 이용하여 3주간 재배된 물냉이의 건

물중 1g당 gluconasturtin 함량은 유의적인 차이를 보이며 OTS 처리가 PBG와 HES보다 96%와 65% 높았으며, glucobrassicin의 경우 68%와 -3%의 차이를 보였으며 glucosiberin의 경우 191%와 117% 증가하였고, glucohirsutin의 경우 157%와 125%의 증가를 보였으며 4-methoxyglucobrassicin의 경우 85%와 19%의 함량 증

Fig. 5. Total glucosinolate contents of *Nasturtium officinale* grown under the different nutrient solution, Otsuka House 1A (OTS), Netherland's Proefstaion voor Bloemisterij en Gasgroente (PBG), Horticultural Experimental station in Korea (HES) with $180 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ PPFD irradiated by fluorescents lamps for 3 weeks. Data represent means and standard error ($n=3$). Means with different letters are significantly differences by Turkey's multiple range test ($P \leq 0.05$).

Fig. 6. Stem length, root length, leaf length and width, shoot fresh and dry weights, and root fresh and dry weights of *Nasturtium officinale* grown under the combinations of different light qualities, W10 (white 10), R10 (R:B:G = 10:0:0), R5B1 (R:B:G = 5:1:0), R3B1 (R:B:G = 3:1:0), R2B1G1 (R:B:G = 2:1:1), W2B1G1 (W:B:G = 2:1:1) with $180 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ PPFD irradiated by different LEDs for 3 weeks. Data represent means and standard error ($n=5$). Means with different letters are significantly differences by Turkey's multiple range test ($P \leq 0.05$).

가를 나타내었다(Fig. 5). 또한 물냉이 지상부 전체 건중
에 대한 총 glucosinolates 함량은 유의적인 차이를 보이
며 OTS 처리구에서 가장 높았다(Fig. 5). 황이온과 질소
이온 또는 두 이온간의 균형이 배추과 작물의
glucosinolates 함량에 큰 영향을 미치는데, 높은 황이온
농도는 총 glucosinolates의 함량을 증가시켰으며(Li 등,
2007), 총 glucosinolates 종류에 속하는 각각의
glucoraphanin과 glucoraphasatin (Krumbein 등, 2001),
sinigrin, glucobrassicinapin, gluconapin and progoitrin
(Kaur et al., 1990)의 함량을 증가시킨다고 보고하였다.
Schonhof 등(2007)의 보고에 의하면, 황이온 농도와 관

계없이 낮은 농도의 질소조건에서 자란 브로콜리는 총
glucosinolates 함량이 증가한 반면, 적정 질소농도 조건
에서 낮은 황이온 농도 처리는 총 glucosinolates 함량을
감소시켰다. 이러한 이유는 glucosinolates는 질소와 황을
포함하고 주로 포도당과 결합된 유기화합물이기 때문이
다. OTS 처리조건에서 적정 수준의 질소와 황 이온 농도
가 직접적으로 총 glucosinolates 함량이 증가에 영향을
미친다고 보고되었으나, OTS 양액의 질소와 황이온 농도
는 3개의 양액처방 중에서 모두 중간농도를 나타내고 있
다. 그러나, OTS의 인산 농도는 HES와 PBG 보다 1.7배,
2.55배 높았으며, 이러한 인산의 농도가 glucosinolates 함

량에 영향을 미친 것으로 볼 수도 있다. 또한 OTS의 증가된 EC농도에 의한 영향이 glucosinolates 함량 증가에 영향을 준 것으로 보인다.

2. 광질 종류에 따른 물냉이 생육

광질의 조건을 달리하여 3주간 수경재배한 물냉이의 초장은 W10 처리조건과 비교하여 R10 조건에서 유의적인 차이를 보이며 306mm, 101.3% 증가하였으나, 근장, 엽장과 엽폭은 광질종류에 관계없이 유의적인 차이를 보이지 않았다(Fig. 6). 근장은 W10 처리구와 비교하여 R3B1 처리구에서 292mm, 4.3% 증가하였으나 유의적인 차이를 보이지 않았다(Fig. 6). 엽장은 R2B1G1 처리구와 비교하여 W2B1G1 처리구에서 580mm, 24.2% 증가하였고 엽폭은 R2B1G1 처리구와 비교하여 R3B1 처리구에서 650mm, 16.9% 증가하였으나 엽장과 엽폭 모두에서 유의적인 차이를 보이지 않았다(Fig. 6). 지상부 생체중과 건물중은 R3B1 처리구에서 각각 127.8g과 6.2g으로 평균값은 높았으나 유의적인 차이를 보이지 않았으며, 지하부의 생체중과 건물중은 R10 처리구에서 각각 2.0g, 0.3g으로 유의적으로 낮았다(Fig. 6).

꿀풀과인 배초향(*Agastache rugosa*)의 초장은 100% 적색광 처리구에서 유의적으로 R2B1B1 처리구보다 유의적으로 높았으며 엽장은 모든 광처리(R10, W10, R3B1, R2B1G1, W2B1G1, 형광등: PPFD 비율 기준)에서 유의적인 차이가 없었으나, 엽폭의 경우 R3B1 처리구에서 W10, W2B1G1 처리구에서 유의적으로 높다고 보고하였으며, 지상부 생체중과 건물중의 경우에도 R10 처리구에서 다른 혼합광 처리와 비교하여 유의적으로 낮은 값을 보였다(Kim 등, 2018). 엽폭의 유의적 차이는 본 실험결과와 상이한 결과였으나, 본 실험에서 지상부 생체중과 건물중은 R10 처리구에서 가장 낮았으며(유의적인 차이는 나타나지 않았음), 각 광원의 처리에 대한 생육의 결과는 혼합광 간에는 유의적 차이를 보이지 않은 반면에 R10 처리구가 가장 낮은 생육결과는 매우 유사하였다. 또한 R3B1 처리구에서 생육이 가장 좋았던 것은 배초향의 경우 약 80cm 높이까지 성장하는 반면 물냉이는 포복 성장을 하는데서 오는 광의 차단에서 기인된 것으로 작물 군락내의 광질의 분포는 광의 투과율과 반사율 등에 따라서 매우 다른 환경이 조성된다. 적색광 처리에서 감자(*Solanum tuberosum*)는 엽이 매우 얇고 길게 자라며 엽형지수가 낮은 값을 보이는 반면 청색광 처리시 엽이 짧고 두꺼운 특성을 보였다(Aksenova 등, 1994). 상추(*Lactuca sativa* L.)의 경우에도 적색광을 처리할 경우 엽이 얇아지면서 엽면적을 증가시키지만 청색광을 처리시, 엽폭의 증가가 억제된다고 보고하였다(Cha 등, 2013; Lee와 Kim, 2014). 물냉

이의 경우도 적색광을 처리한 경우, 초장은 매우 길며, 지상부 생체중이 가장 낮은 것은 그 만큼 식물체의 충실도(건물중/초장)에서 위의 경우와 매우 유사한 결과를 얻었다. 또한 R10, R5B1, R3B1의 결과를 보면 청색광의 비율이 증가할수록 지상부 및 지하부 생육이 증가되는 경향이 나타났다(Fig. 6). 그러나, 적청 혼합광 LED를 비율별로 처리했을 경우, 청색광의 비율이 증가할수록 적축면 상추(*Lactuca sativa* L. 'Sunmang')와 잎상추(*Lactuca sativa* L. 'Grand Rapid TBR')에서 생체중과 건물중이 감소하였다고 보고되었으며(Son과 Oh, 2014), 적색 및 청색 파장이 식물에 미치는 영향을 평가한 이전의 연구에 따르면 적색 LED가 생체중과 건물중, 초장 및 엽면적을 증가시키는데 더 효과적으로 작용하며 식물 성장을 유도한다고 보고하였다(Heo 등, 2012; Johkan 등, 2010; Wang 등, 2009; Wu 등, 2007). 물냉이는 수생식물에 속하고, 음지에서 매우 잘 자라는 특성이 있어 적색광과 청색광에 대한 많은 사전 연구결과와 다른 경향을 나타내는 것으로 사료된다. 폐쇄된 공간에서 식물을 생산하는 식물공장에서 식물의 성장을 고려할 경우 적색광이 많이 포함된 광원이 유리하지만, 기능성 물질의 축적은 청색광 조사가 더 효과적이라는 보고를 고려해 볼 때(Son and Oh, 2014), 물냉이의 경우에는 청색광 비율이 높은 조건에서 성장을 증가시키는 결과는 매우 효과적이라 할수 있다.

물냉이의 건물중 0.1g당 glucosinolates의 함량은 W10 처리구에서 $14.09\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, R3B1처리구에서 $24.06\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, R5B1 처리구에서 $13.23\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, R10 처리구에서 $14.79\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, R2B1G1 처리구에서 $9.84\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$, W2B1G1 처리구에서 $10.17\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 이었다. 따라서 각 처리구 물냉이의 건물중 당 glucosinolates 함량은 R2B1G1 처리구와 비교하여 R3B1 처리구에서 생육된 물냉이는 144.5% 증가하였다. 각 처리구 물냉이의 식물체당 glucosinolates 함량은 R3B1에서 $149.96\mu\text{mol}/\text{plant}$ 로 가장 높게 나타났다(Fig. 7). R3B1을 컨트롤구인 W10과 비교 하였을 때 glucosinolate의 농도는 약 70% 증가 되었다.

광강도, 광주기 및 광질은 식물의 생리적 반응에 영향을 미치지만 glucosinolate 농도에 대한 영향은 매우 다양하다고 보고 하였으며 여름철 고위도지방의 긴 광주기는 전형적으로 glucosinolate 함량 증가에 긍정적인 영향을 준다고 하였다(Björkman 등, 2011). 총 glucosinolate 함량은 *Brassica oleracea* 줄기와 뿌리에서 12h 일장조 건보다 18h 또는 24h 일장처리에서 높게 나타났으며(Charron과 Sams, 2004), 흰 겨자의 종자에서도 14h 일장조건보다 22h 일장에서 증가하였다(Keskitalo, 2001). 브로콜리의 꽃눈이 유도된 후 저온 7-13°C 조건과 함께

Fig. 7. Total glucosinolate contents of *Nasturtium officinale* grown under the combinations of different light qualities, W10 (white 10), R10 (R:B:G = 10:0:0), R5B1 (R:B:G = 5:1:0), R3B1 (R:B:G = 3:1:0), R2B1G1 (R:B:G = 2:1:1), W2B1G1 (W:B:G = 2:1:1) with 180 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD irradiated by different LEDs for 3 weeks. Data represent means and standard error ($n=3$). Means with different letters are significantly differences by Turkey's multiple range test ($P\leq 0.05$).

116-150 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD 조건이 23-69 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD 낮은 수준의 광조사와 비교하여 적당한 방사선 조사가 브로콜리 꽃눈에서 alkyl glucosinolate 함량을 증가시켰으며, 낮은 수준의 광조건에서는 indole glucosinolate glucobrassicin의 함량이 증가되었다 (Schonhof 등, 2007). *Brassica oleracea* 품종의 잎에서 glucosinolate와 지방성 glucosinolate의 함량은 광강도 200-400 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 수준에서 음의 선형반응을 보인 반면, indole glucosinolate는 조사된 광에 대해서 비선형적 반응을 나타내었고 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 가장 높은 값을 보였다 (Charron과 Sams, 2004).

광질에 대한 연구결과로 Engelen-Eigles 등(2006)은 근적색광 조사와 비교하여 적색광이 풍부한 장일조건에서 물냉이의 gluconasturtiin 함량이 증가하였다고 보고하였으나, Lefsrud 등(2008)은 케일의 총 glucosinolate 함량에 대해 LED를 이용한 400, 440, 525, 640 및 730nm의 파장에서 실질적 차이를 발견하지 못했으며, 단지 지방성 glucosinolate sinigrin만이 파장 처리에 반응하는

것으로 나타났으며, 특히 640nm 적색광에서 피크를 보였다고 보고하였다. 그러나, 적청 혼합광에서 청색이 비율이 증가할수록 적축면 상추와 청치마 상추에서 엽록소, 총 페놀, 플라보노이드, 항산화물질 등과 같은 이차대사산물이 증가하는 것으로 보고되었으며 (Son과 Oh, 2014) 이는 R3B1 처리구에서 glucosinolate 함량이 증가한 결과와 유사하였다. 배추향의 건물중 당 tilianin의 함량 또한 형광등에 처리와 비교하여 LEDs 처리(W10, R2B1G1, W2B1G1, R10, R3B1)에서 유의적으로 높은 값을 나타내었으며, 형광등 처리구 대비 각각 68.4%, 15.7%, 59.1%, 27.3%, 110.3% 높았으며 R3B1은 유의적으로 가장 높은 함량을 나타내어 본 실험결과와 유사하였다 (Kim 등, 2018).

배추과속의 여러 작물들은 주로 하우스 또는 노지에서 재배되는 것이 현실이지만, 물냉이의 경우 하우스 수경재배 또는 식물공장에서 재배가 가능한 대표적인 배추과속의 작물이다. 식물공장에서 생산되는 채소는 신선함과 청결함을 추구하는 동시에 기능성 물질을 증가시키기 위한 다양한 노력을 시도하고 있다. 본 실험의 결과 광질에 따른 물냉이의 생육을 관찰하였으며, 특히 적색과 청색의 비율을 3:1의 조건으로 광조사할 경우, 물냉이의 지상부 생육과 glucosinolate 함량을 최고로 높여 생산할 수 있는 결과를 얻었다. 향후, 광량과 광주기 및 좀더 세밀한 광질에 대한 연구가 수행되어야 할 것으로 사료된다.

적 요

배양액의 종류 및 LED를 이용한 다양한 광질 조건이 물냉이의 생장과 glucosinolates 함량에 미치는 영향을 3주간의 수경재배를 통하여 살펴보았다. 물냉이 종자를 암면배지에 파종 후 발아시켜, 2주간 육묘하였다. 유묘들은 semi-DFT 시스템에 이식하였다. 환경조절실은 주간온도 20±1°C와 야간온도 16±1°C, 주간습도 65±10%와 야간습도 75±10%의 범위에서 조절되었으며 16/8h 조건의 광주기와 180±10 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 광강도를 유지하였다. 배양액은 오오츠카 하우스 1A(OTS), 한국원시(HES)과 화란온실작물연구소(PBG) 배양액을 초기 EC 1.0-1.3, pH 6.2와 형광등을 광원으로 실험하였다(실험-1). 광질에 대한 생육과 glucosinolates 함량을 분석하기 위하여 단색광(적색: R10, 백색: W10) 처리구와 혼합광(적청녹색: R2B1G1, 백청녹색: W2B1G1, 적색: R10, 적청색: R5B1, 적청색: R3B1) 처리구를 두었다. 물냉이 지상부의 생육은 3개의 배양액 처리구에서 유의적인 차이가 발견되지 않았지만, 뿌리의 생체중은 HES와 비교하여 PBG와 OTS에서 13.7%와 55.1% 증가하였다. OTS 처

리는 PBG와 HES 처리구에 비해 gluconasturtiin 함량이 96%, 65% 증가하였다. 백색광조건(W10)과 비교하여 적색광(R10) 처리는 초장이 101.3% 증가하였다. 청색광 비율의 증가는 지상부 생육에 긍정적인 영향을 주었다. 물냉이의 건물중 당 glucosinolates 함량은 R2B1G1 처리구와 비교하여 R3B1 처리구에서 144.5% 증가하였으며, W10 처리구와 비교 시, 약 70% 증가하는 경향을 보였다. R3B1 처리구에서 물냉이의 생육과 총 glucosinolates의 함량이 가장 높게 나타났다.

추가 주요어 : 기능성 물질, LED, *Nasturtium officinale*, 이차대사산물

사 사

본 연구는 충남대학교 학술연구지원사업으로 수행되었습니다.

인용문헌

- Ahn, T.I. and J.E. Son. 2011. Changes in ion balance and individual ionic contributions to EC reading at different renewal intervals of nutrient solution under EC-based nutrient control in closed-loop soilless culture for sweet peppers (*Capsicum annuum* L. 'Fiesta'). Kor. J. Hort. Sci. Technol. 29:29-35(in Korean).
- Aksenova, N.P., T.N. Konstantinova, L.I. Sergeeva, I. Macháková, and S.A. Golyanovskaya. 1994. Morphogenesis of potato plants in vitro. I. effect of light quality and hormones. Journal of Plant Growth Regulation 13(3):143.
- Arnon, D. J., and Hoagland, D. R. 1952. Nutrient solution. Sand and Water Culture Methods Used is the Study of Plant Nutrition. Ed. EJ Hewitt, 85.
- Björkman M., I. Klingen, A.N.E. Birch, A.M. Bones, T.J.A. Bruce, T.J. Johansen, R. Meadow, J. Mølmann, R. Seljåsen, L.E. Smart, and D. Stewart. 2011. Phytochemicals of brassicaceae in plant protection and human health – Influences of climate, environment and agronomic practice. Phytochem. 72:538-556.
- Cha, M.K., J.H. Cho, and Y.Y. Cho. 2013. Growth of leaf lettuce as affected by light quality of LED in closed-type plant factory system. Protected Horticulture and Plant Factory 22:291-297 (in Korean).
- Charron, C.S. and C.E.Sams. 2004. Glucosinolate content and myrosinase activity in rapidcycling Brassica oleracea grown in a controlled environment. J. Am. Soc. Hort. Sci. 129, 321-330.
- Choi, J.M, S.K. Jeong, and M.K. Yoon. 2008. Characterization of symptom and determination of tissue critical concentration for diagnostic criteria in 'Maehyang' strawberry as influenced by magnesium concentrations in the fertigation solution. Protected Horticulture and Plant Factory 17:238-245 (in Korean).
- Cohen, J.H., A.R. Kristal, and J.L. Stanford. 2000. Fruit and vegetable intakes and prostate cancer risk. J. Natl. Cancer Inst. 92: 61-68.
- Cruz, R.M., M.C. Vieira, and C.L. Silva. 2008. Effect of heat and thermosonication treatments on watercress (*Nasturtium officinale*) vitamin C degradation kinetics. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 9:483-488.
- Di Noia, J. 2014. Peer Reviewed: Defining powerhouse fruits and vegetables: A nutrient density approach. Preventing Chronic Disease. 11.
- Engelen-Eigles, G., G. Holden, J.D. Cohen, and G. Gardner. 2006. The effect of temperature, photoperiod, and light quality on gluconasturtiin concentration in watercress (*Nasturtium officinale* R. Br.). Journal of Agricultural and Food Chemistry 54:328-334.
- Gerke, B.F., A.T. Ngo, A.L. Alstone, and K.S. Fisseha. 2014. The evolving price of household LED lamps: Recent trends and historical comparisons for the US market. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720, USA.
- Heo, J.W., D.H. Kang, H.S. Bang, S.G. Hong, C. Chun, and K.K. Kang. 2012. Early growth, pigmentation, protein content, and phenylalanine ammonia-lyase activity of red curled lettuces grown under different lighting conditions. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 30:6-12.
- Hopkins, W.G and N.P.A. Hüner. 2004. Introduction to plant physiology. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc. NJ, USA. p. 25-46.
- Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hashida, and T. Yoshihara. 2010. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. HortScience. 45:1809-1814.
- Kaur, S., S.K. Gupta, P.S. Sukhija, and S.K. Munshi. 1990. Accumulation of glucosinolates in developing mustard (*Brassica juncea* L.) seeds in response to sulphur application. Plant Sci. 66:181-184.
- Keskitalo, M., 2001. Effect of abiotic growth factors on the concentration of health promoting secondary metabolites in crops grown in northern latitudes. In: W. Pfannhauser, G.R. Fenwick, S. Khokhar. (Eds.), Biologically-active phytochemicals in food. Royal Society of Chemistry, Springer-Verlag, Portland. p. 34-35.
- Kim, H.H., G.D. Goins, R.M. Wheeler, J.C. Sager. 2004. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red and blue lightemitting diodes. HortScience 39:1617-1622
- Kim, S.J., K.J. Bok, V.P. Lam, and J.S. Park. 2017. Response of nutrient solution and photosynthetic photon flux density for growth and accumulation of antioxidant in *agastache*

- rugosa* under hydroponic culture systems. Protected Horticulture and Plant Factory 26:249-257.
- Kim, S.J., K.J. Bok, and J.S. Park. 2018. Analysis of antioxidant content and growth of *Agastache rugosa* as affected by LED light qualities. Protected Horticulture and Plant Factory 27:260-268 (in Korean).
- Kozai, T., K. Ohyama, and C. Chun. 2006. Commercialized closed systems with artificial lighting for plant production. Acta Hortic. 711:61-70.
- Krumbein, A., I. Schonhof, J. Ruhlmann, and S. Widell. 2001. Influence of sulphur and nitrogen supply on flavour and health-affecting compounds in Brassicaceae. In: W.J. Horst, M.K. Schenk, A. Burkert, N. Claassen, H. Flessa, W.B. Frommer, H. Goldbach, H.W. Olf, V. Romheld, B. Sattelmacher, U. Schmidhalter, S. Schubert, N.V. Wiren, and L. Wittenmayer. (Eds.), Plant Nutrition – Food security and sustainability of agro-ecosystems. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands. p. 294-295.
- Lee, J.S., and Kim, Y.H. 2014. Growth and anthocyanins of lettuce grown under red or blue light-emitting diodes with distinct peak wavelength. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 32:330-339 (in Korean).
- Lefsrud, M.G., D.A. Kopsell, and C.E. Sams. 2008. Irradiance from distinct wavelength light-emitting diodes affect secondary metabolites in kale. HortScience 43:2243-2244.
- Li, S., I. Schonhof, A. Krumbein, L. Li, H. Stutzel, and M. Schreiner. 2007. Glucosinolate concentration in turnip (*Brassica rapa* L. ssp. “rapifera”) roots as affected by nitrogen and sulfur supply. J. Agric. Food Chem. 55:8452-8457.
- Manion, L. K., Kopsell, D. E., Kopsell, D. A., Sams, C. E., & Rhykerd, R. L. (2014). Selenium fertilization influences biomass, elemental accumulations, and phytochemical concentrations in watercress. *Journal of plant nutrition*, 37:327-342.
- Mithen, R., 2001. Glucosinolates–biochemistry, genetics and biological activity. Plant Growth Regulation 34:91-103.
- Palaniswamy, U., McAvoy, R., and Bible, B. (1997). Supplemental light before harvest increases phenethyl isothiocyanate in watercress under 8-hour photoperiod. HortScience, 32:222-223.
- Rapeseed I, Determination of glucosinolates content?part 1: Method using high performance liquid chromatography; 9167-1:1992
- Schonhof, I., D. Blankenburg, S. Muller, and A. Krumbein. 2007. Sulfur and nitrogen supply influence growth, product appearance, and glucosinolate concentration of broccoli. J. Plant Nutr. Soil Sci. 170, 65-72.
- Schuerger, A.C., C.S. Brown, and E.C. Stryjewski. 1997. Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light. Annals of Botany 79:273-282.
- Senger, H., 1982. The effect of blue light on plants and microorganisms. Photochemistry and Photobiology 35:911-920.
- Syed Alwi, S. S., Cavell, B. E., Telang, U., Morris, M. E., Parry, B. M., and Packham, G. (2010). In vivo modulation of 4E binding protein 1 (4E-BP1) phosphorylation by watercress: a pilot study. British journal of nutrition, 104:1288-1296.
- Son, J.E. 1998. Precise control of nutrient solution and analysis of ionic contribution to EC reading. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 16:354-362 (in Korean).
- Son, K.H. and M.M. Oh. 2014. 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.
- Steinbrecher, A. and J. Linseisen. 2009. Dietary intake of individual glucosinolates in participants of the EPIC-Heidelberg cohort study. Ann. Nutr. Metab. 54:87-96.
- Traka, M. and R. Mithen. 2009. Glucosinolates, isothiocyanates and human health. Phytochem. 8:269-282.
- Verkerk, R., M. Schreiner, A. Krumbein, E. Ciska, B. Holst, I. Rowland, R.D. Schrijver, M. Hansen, C. Gerhauser, R. Mithen, and M. Dekker. 2009. Glucosinolates in Brassica vegetables: the influence of the food supply chain on intake, bioavailability and human health. Mol. Nutr. Food. 53:219-265.
- Wang, H., M. Gu, J. Cui, K. Shi, T. Zhou, and J. Yu, 2009. Effects of light quality on CO₂ assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus*. J. Photochem. Photobiol. B 96:30-37.
- Wu, M.C., C.Y. Hou, C.M. Jiang, Y.T. Wang, C.Y. Wang, H.H. Chen, and H.M. Chang. 2007. A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings. Food Chem. 101:1753-1758.
- Zahradníková, H. and K. Petříková. 2013. Nematocid effects of watercress (*Nasturtium officinale* R. Br.). Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis 61:233-236.