

PLANT&FOREST

Selection of appropriate nutrient solution for simultaneous hydroponics of three leafy vegetables (*Brassicaceae*)

Young Hwi Ahn¹, Seung Won Noh², Sung Jin Kim³, Jong Seok Park^{3,4,*}

¹Graduate school of Bio-AI Convergence, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

²PlanTFarm Co., Ltd., AgT research institute, Pyeongtaek 17706, Korea

³Department of Horticultural Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

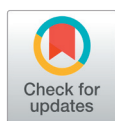
⁴Graduate school of Bio-AI Convergence, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

*Corresponding author: jongseok@cnu.ac.kr

Abstract

This study investigated which nutrient solution is suitable for growth and secondary metabolite contents when three different vegetable plants are grown simultaneously in one hydroponic cultivation bed. Seeds of pak choi (*Brassica campestris* L. ssp *chinsensis*), red mustard (*Brassica juncea* L.), and arugula (*Eruca sativa* Mill.) were sown in the shape of a triangle in three places on rockwool cubes. The rockwool cubes were placed in semi deep-flow technique (semi-DFT) hydroponic systems in a rooftop greenhouse after three weeks of growth as seedlings then cultivated with four different nutrient solutions, Korea Horticultural Experiment Station (KHE), Hoagland, Otsuka-A, and Yamazaki, at the rooftop greenhouse for two weeks. The leaf area of pak choi cultivated in Otsuka-A was the largest but SPAD values, leaf area, and fresh weight of arugula were highest with KHE treatment. The total glucosinolate (GSL) content of pak choi was 151.7% higher in KHE than in Hoagland, and there was no significant difference in Yamazaki and Otsuka-A treatments. The total GSL content of red mustard was 34.6 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ in Hoagland, and it was 32.6% higher in Hoagland than in Yamazaki. Total GSL content of arugula was 57.5% higher in Yamazaki and Hoagland nutrients than in KHE and Otsuka-A nutrients solutions. The total GSL content of three plants grown with KHE was 40.7% higher than with Yamazaki, and the other nutrient solutions did not show significant differences. Therefore, KHE nutrient solution is considered suitable for nutrient solution composition for the cultivation of three different Brassicaceae crops in a single hydroponic cultivation system.

Keywords: arugula, glucosinolates, pak choi, Red Frill, rooftop greenhouse



OPEN ACCESS

Citation: Ahn YH, Noh SW, Kim SJ, Park JS. Selection of appropriate nutrient solution for simultaneous hydroponics of three leafy vegetables (*Brassicaceae*). Noncontact measurements of the morphological phenotypes of sorghum using 3D LiDAR point cloud. Korean Journal of Agricultural Science 49:643-653. <https://doi.org/10.7744/kjoas.20220058>

Received: June 17, 2022

Revised: August 18, 2022

Accepted: August 23, 2022

Copyright: © 2022 Korean Journal of Agricultural Science



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

십자화과(*Brassicaceae*) 작물은 전 세계적으로 재배되며, 350개의 속, 3,200여 종이 보고되었다(Gonçalves et al., 2012). 십자화과 작물에는 청경채(*Brassica campestris* L. ssp *chinsensis*), 적세엽겨자(*Brassica juncea* L.), 루꼴라(*Eruca sativa* Mill.) 등이 포함되며, 샐러드, 파스타 등 각종 요

리에 많이 쓰인다. 십자화과 작물은 2018년 6,920만 톤에서 2019년 7,010만 톤까지 생산량이 증가했으며(Samec and Salopek-Sondi, 2019; Intelligence, 2021), 비타민, 카르테노이드, 페놀, 무기염류, 글루코시놀레이트류(glucosinolates, GSLs) 등과 같은 건강 기능성 물질을 포함하고 있다(Bhandari and Kwak, 2015). 십자화과 작물의 대표적인 기능성 물질인 GSLs는 현재까지 200종 이상이 알려져 있고, glucobrassicin, glucobrassicinapin, neoglucobrassicin 등 30여 종이 생리적 활성을 가진다고 보고되었다(Clarke, 2010). 또한, GSLs는 심근경색을 예방하고 폐암, 위암 등에 항암 효과가 있는 등(London et al., 2000; Seow et al., 2002; Cornelis et al., 2007), 중요성이 대두되며 시장 규모 역시 2020년 약 1조 6,000만 달러에서 연평균 6.5% 증가하며 2021년 약 1조 7,040만 달러에 이르렀다(Global Market Insight, 2021).

수경재배는 물을 이용하여 작물에 양분을 공급하는 무토양 재배 방법이며, 작물 관리가 효율적이고 집약적 관리가 이루어진다는 장점이 있다(Bharti et al., 2019). 수경재배는 노지재배와 비교해 농약 및 오염물질로부터 안정성이 높고 물과 영양분을 절약할 수 있어 선호도가 높아졌으며(Ryoo, 2009; Nandwani, 2018), 국내 수경재배 면적 역시 2000년 700 ha에서 2020년 3,949 ha로 약 20년간 5배 이상 늘어났다(MAFRA, 2020). 수경재배에서 양액 관리는 작물의 성장을 최적의 상태로 유지하고 배양액의 손실을 최소화하며 품질을 높이기 위해 필수적이며 급액량, 배액량, 배지 내 수분 함량 등을 고려해야 한다(Choi et al., 2021). 십자화과와 같은 엽채류 재배의 경우 재식 간격이 좁고 근권 부피가 한정되어있는 점에서 양액 관리의 중요성이 더욱 높아진다.

수경재배에서 양액의 조성은 작물 재배 시 품질을 결정짓는 중요한 요소이며(Kang and Kim, 2007; Kwack et al., 2015), 작물에 적절한 양액을 선발하는 과정을 거쳐야 한다(Choi et al., 2005). 이에 관해 Won 등(2005)은 파(*Allium fistulosum* L.)의 생육에 적합한 양액으로 전 이온 농도가 상대적으로 저농도인 동시에 질산태(NO_3^-): 암모늄태(NH_4^+) 질소의 비율이 높았던 Yamazaki 양액을 선정하였다. 또한, 네덜란드 온실작물연구소(Proefstation voor Bloemisterij en Glasgroente, PBG)와 서울시립대학교(University of Seoul, US) 중 인(P)과 칼슘(Ca)의 함량이 높았던 PBG 양액 처리에서 엔다이브(*Cichorium endivia* L.)의 엽수, 엽장, 엽폭의 결과가 좋았다고 보고되었으며(Cho and Lee, 1998), Choi 등(2018)은 Otsuka-A (OTS), 한국원예시험장(Korea Horticultural Experiment Station, KHE), PBG 양액 3종 가운데 Otsuka-A 양액이 물냉이(*Nasturtium officinale* R. Br)의 총 GSLs 함량을 증가시켰다고 보고하였다.

최근 국내 엽채류 재배면적은 2020년 46,481 ha로 2019년 41,635 ha와 비교하여 11.6% 증가했고, 생산량 역시 전년 대비 15.4% 증가했다(KOSIS, 2020). 하지만 대다수의 수경재배 농가에서는 작물마다 양분 요구도가 다르기에 여러 품종을 동시에 재배하기보다, 한 개의 베드에서 단일 품종을 재배하는 경우가 많다. 수경재배 시 한 개의 재배 베드에서 생육 환경이 유사한 여러 가지 작물을 재배한다면 동일 면적대비 수확량의 증가(Baron et al., 2006; Wee et al., 2018), 동시 수확 및 포장을 통하여 소비자의 요구에 맞는 상품화가 쉽고, 작물별 양분 요구도와 우선으로 흡수하는 이온 역시 다르므로 양액의 이온 변화가 적어져 단일 작물 재배 대비 양액을 안정적으로 관리할 수 있다(Zhang and Li, 2003). 따라서 본 연구에서는 십자화과 작물 3종을 동시에 수경재배하기 위해 가장 많이 사용되는 양액 4종을 선발하여 한 개의 재배 베드에서 동시 재배할 때 양액 조성이 생육 및 기능성 물질 함량에 미치는 영향을 살펴보기 위해 수행하게 되었다.

Materials and methods

식물재료 및 재배관리

청경채(*Brassica campestris* L. ssp *chinsensis*) ‘싱싱하계(SingSingHaGye)’, 적세엽겨자(*Brassica juncea* L.) ‘레드프릴(Red Frill)’, 루꼴라(*Eruca sativa* Mill.), ‘로켓샐러드(Rocket Salad)’ 종자를 아시아종묘(Asia seed Co., Ltd., Seoul, Korea)

에서 구매하여 사용하였으며, 암면 큐브(10 cm × 10 cm × 6.5 cm, KB101, KAMICO Co., Ltd., Cheonan, Korea)에 깊이 1 cm, 간격 8 cm로 3종류의 종자를 삼각형 모양으로 파종한 후 48시간 암처리를 했다. 48시간 후 LED를 분광계(Li-180, LI-COR Inc., USA)로 측정하여 RGB 6 : 2 : 2 (PPFD)으로 설정하고 광도 $300 \pm 20 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 명암기 16/8 h로 제어하여 3주간 육묘하였고(Fig. 1A and B), Yamazaki 양액(EC $1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 및 pH 6.0)으로 본엽이 발생한 시점부터 2일 간격으로 저면관수 하였다. 21일 후 한국기계연구원에 위치한 옥상 유리온실에서 1개의 semi-DFT (Gafates Co., Ltd., Jincheon, Korea)에 4개의 암면 큐브를 정식 하였고, semi-DFT는 처리구 당 2반복으로 8주씩 재배하였다(Fig. 1C). Hoagland, Yamazaki, Otsuka-A, 한국원예시험장(Korea Horticulture Experiment Station, KHE) 양액 4가지를 선정하였으며(Table 1), Yamazaki 양액을 대조구로 설정하였다. 재배 기간 중 양액(EC $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 및 pH 6.2 ± 0.3)로 설정하여 2일 간격으로 보정하고 일주일에 한 번씩 교체하였다. 총 14일간 semi-DFT를 이용하여 큐브의 아랫부분 4 cm가 양액에 잠기도록 설치하여 청경채, 적세엽겨자, 루꼴라를 재배하였으며, 이후 수확하여 생육조사 및 GSLs 성분 분석을 시행하였다.

Table 1. Compositions of nutrient solutions used in the experiment.

Division	Hoagland		KHE		Otsuka A		Yamazaki	
	A ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	B ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	A ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	B ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	A ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	B ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	A ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	B ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
KNO ₃	303.0	303.0	250.0	255.6	350	350	202.2	202.2
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	944.0	-	1,026.0	-	965	-	236.0	-
MgSO ₄ ·7H ₂ O	-	492.0	-	493.0	-	370	-	123.2
NH ₄ H ₂ PO ₄	-	114.0	-	80.1	-	-	-	-
KH ₂ PO ₄	-	-	-	136.1	-	228	-	57.4
NH ₄ NO ₃	-	-	24.0	-	120	-	-	-
Fe-EDTA	18.5	-	40.0	-	21	-	24.0	-
H ₃ BO ₃	-	1.54	-	4.50	-	2.58	-	3.0
MnSO ₄ ·4H ₂ O	-	0.45	-	3.00	-	4.81	-	2.0
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	-	0.57	-	0.88	-	0.39	-	0.2
CuSO ₄ ·5H ₂ O	-	0.12	-	0.50	-	0.12	-	0.1
NaMoO ₄ ·2H ₂ O	-	0.13	-	0.04	-	0.08	-	0.0

KHE, Korea Horticultural Experiment Station.

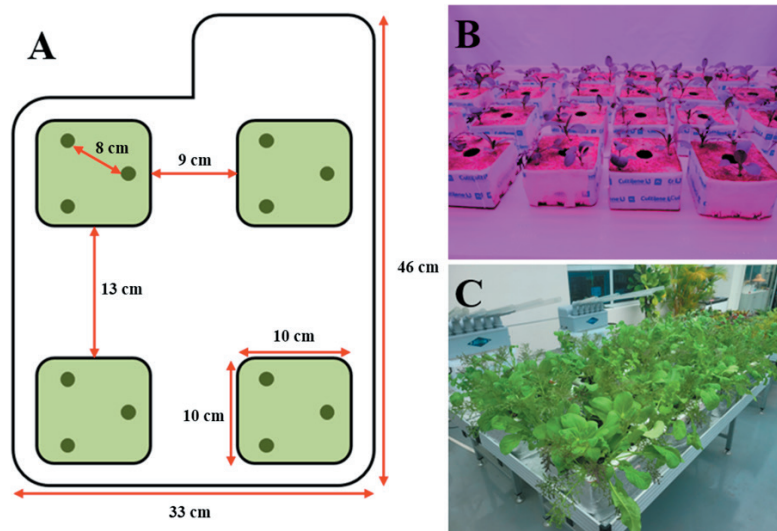


Fig. 1. Drawing of the cube and cultivation bed used in the experiment (A). The seedlings of pak choi, Red Frill and arugula seeded on a rock wool cube after 2 weeks from sowing (B). Pak choi, Red Frill and arugula 3 weeks after transplanting (C).

생육조사

청경채, 적세엽겨자, 루꼴라의 생육조사는 정식 14일 후 처리구 당 4주(n=4)를 표본으로 하여 진행하였다. 버니어 캘리퍼스(SD500-300PRO, Shin Con CO., Ltd., Korea)를 이용하여 가장 큰 엽을 기준으로 엽수, 엽장, 엽폭을 측정하였으며, 엽면적은 엽면적 측정기(LI-3100, LI-COR Co., Lincoln, NE, USA)를 사용하여 측정하였다. 처리구별 엽록소 수치를 SPAD-502 (Minolta Camera Co., Ltd., Japan)을 활용하여 측정하였다. 지상부의 생체중과 건물중은 전자저울(MW-2N, CAS Co., Ltd., Yangju, Korea)로 조사하였고, 건물중은 처리구별 시료를 봉투에 담아 70°C로 설정한 건조기(HB-501M, Hanbaek Scientific Technology Co., Ltd., Bucheon, Korea)를 통해 1주일간 건조한 후 같은 전자저울로 측정하였다.

Glucosinolate 함량 분석

청경채, 적세엽겨자, 루꼴라의 GSLs 함량 분석은 Lee 등(2015)의 분석방법을 참고하여 HPLC (1260 Infinity Series, Agilent Technologies Inc., California, USA)를 이용하여 분석하였다. 정식 2주 후 청경채, 적세엽겨자, 루꼴라 지상부를 Freeze-dryer (TFD5503, ilSinBioBase, Dongducheon, Korea)를 이용하여 동결 건조 후 막자사발로 분말화하였다. 2.0 mL eppendorf-tube에 분말 시료 100 mg씩 평량하여 70% (v/v) boiling menthanol (1.5 mL)를 넣고 진동혼합(vortex) 처리 후 70°C 항온수조(water bath)에서 5분 동안 넣어 조(crude) GSLs를 추출하고 원심분리(12,000 rpm, 10 min, 4°C)한 후에 상층액을 추출하였다. 이후 식물체 내 GSLs 함량 분석방법(Norm, 1992)을 기준으로 inertsil ODS-3 column (150 × 3.0 mm i.d., particle size 3 μm)을 장착한 HPLC를 이용하여 sinigrin을 표준물질로 gluconasturtiin, glucobrassicin, glucosiberin, 4-methoxyglucobrassicin, glucohirsutin 각각의 response factor 값을 곱하여 5종류의 GSLs 함량을 분석하였다. 분석한 청경채, 루꼴라, 적세엽겨자 세 작물의 총 GSLs 함량을 합하여 plants total GSLs contents를 산출했다(Fig. 5).

통계 분석

생육조사를 위하여 각 처리구 당 4주를 조사하였으며, GSLs 함량을 분석하기 위해 처리구 당 3개의 청경채, 적세엽겨자, 루꼴라가 이용되었다. 측정 데이터의 통계분석을 위해 SPSS (SPSS 26, SPSS Inc., Chicago, IL, USA) 프로그램을 이용하였으며, 각 처리구 평균의 유의성 검증을 위해 Duncan의 다중검정법을 이용하였다.

Results and Discussion

4가지 양액에 대한 작물의 생육분석

정식 2주 후 수확하여 생육조사를 한 결과 청경채의 엽장은 KHE에 비해 Otsuka-A가 14.03 cm로 10.2% 높게 나타났고 엽폭과 SPAD는 유의적 차이가 없었다. 청경채의 엽수는 KHE가 14.25로 12.5였던 Yamazaki에 비해 14% 유의적으로 높았으며 청경채의 엽면적은 Yamazaki가 Otsuka-A와 비교하여 유의적으로 낮았다. 청경채의 생체중은 유의적 차이가 없었으나 Yamazaki에서 가장 낮은 수치를 보였으며, 건물중은 Otsuka-A가 Yamazaki보다 22.4% 높은 결과를 보이며 2.35 g으로 유의적 차이를 보였다. 적세엽겨자의 경우 처리구 간 유의적 차이가 없었지만, 엽면적, 생체중, 건물중이 Hoagland에서 가장 높았다. 루꼴라는 KHE가 엽장, SPAD가 27.6 cm, 40.63으로 Otsuka-A보다 각각 22.1%, 12.5%, 높게 나타났으며 엽폭과 엽수는 유의적 차이가 발생하지 않았다. 루꼴라의 엽면적은 KHE가 605.79 cm²로 Otsuka-A보다

22.5% 높았다. 루꼴라의 생체중 및 건물중은 KHE가 각각 40.86, 2.00 g으로 가장 낮은 수치를 나타낸 Otsuka-A에 비해 34, 83.7% 높았다(Table 2). 따라서 분석 결과를 토대로 청경채, 적세엽겨자, 루꼴라의 생육 측면을 고려하였을 때 3가지 작물을 동시 재배할 때 KHE 양액이 적절한 것으로 판단된다.

Table 2. Growth parameters of pak choi, red frill, arugula seedlings grown in different nutrient solutions for 2 weeks after transplanting (n = 4).

Plant	Treatment ^z	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	SPAD	No. of leaves	Leaf area (cm ² ·plant ⁻¹)	Shoot fresh weight (g·plant ⁻¹)	Shoot dry weight (g·plant ⁻¹)
Pak choi	Yamazaki	13.43ab	9.63a	32.25a	12.50b	582.66b	47.56a	1.92b
	KHE	12.73b	9.55a	31.73a	14.25a	644.74ab	53.20a	2.11ab
	Hoagland	13.25ab	10.05a	31.4a	13.00ab	611.65ab	52.07a	2.04ab
	Otsuka-A	14.03a	9.93a	32.7a	13.00ab	698.09a	56.63a	2.35a
Red Frill	Yamazaki	27.98a	10.2a	28.63a	9.75a	263.97a	18.23a	0.96a
	KHE	28.45a	10.03a	27.38a	10.25a	258.19a	17.52a	0.81a
	Hoagland	28.23a	11.95a	27.18a	10.50a	322.6a	21.58a	1.07a
	Otsuka-A	27a	10.05a	28.65a	10.25a	252.1a	17.62a	0.82a
Arugula	Yamazaki	22.2b	9.55a	34.48b	9.75a	518.47ab	33.89ab	0.93c
	KHE	27.6a	10.7a	40.63a	10.75a	605.79a	40.86a	2.00a
	Hoagland	22.2b	10.75a	34.20b	10.50a	609.07a	37.37ab	1.42b
	Otsuka-A	22.6b	9.63a	36.13b	10.75a	494.44b	30.5b	1.09c

^z Treatments were Yamazaki (control), Korea Horticultural Experiment Station (KHE), Hoagland, Otsuka-A.

a - c: Means with the different letters are significantly different ($p < 0.05$) by Duncan's multiple range test.

수경재배에 사용되는 양액 내 원소는 다량 원소, 미량 원소로 나뉘며, 이 중 작물 생장에 큰 영향을 미치는 다량 원소는 질소(N), 인(P), 칼륨(K), 칼슘(Ca), 황(S), 마그네슘(Mg)이 있다(Cho et al., 2020). 그중 질소는 질산염(NO₃⁻)과 암모늄(NH₄⁺)의 형태로 흡수되는데, 작물마다 두 가지 형태에 대한 선호도가 다르다(Britto and Kronzucker, 2013). Ikeda and Osawa (1981)에 따르면 십자화과 작물인 배추(*Brassica oleracea* L.), 양배추(*Brassica rapa* subsp. *pekinensis*), 순무(*Brassica rapa* subsp. *rapa*)는 질산염을 선호하는 작물이다. 배추와 순무는 pH와 무관하게 질산염을 선호하고 양배추는 pH 5 - 7 범위에서만 질산염을 선호하였고 7이 넘어가게 되면 질산염을 선호하는 작물이 없었다. 본 실험에서 재배한 십자화과 작물 3종 청경채, 루꼴라, 적세엽겨자는 질산염 비율의 비율이 9:1로 높았던 4종의 양액 간 큰 생육 차이를 보이지 않으며 좋았고(Table 1), 재배 동안 양액의 pH를 6 - 6.5 사이로 유지한 점 역시 생육에 도움이 된 것으로 생각된다.

4가지 양액에 대한 glucosinolate 함량 분석

정식 후 4가지 양액 처리에서 2주 동안 재배한 청경채, 적세엽겨자, 루꼴라 지상부에 함유된 GSLs 함량을 분석한 결과, 청경채의 GSLs 함량은 neoglucobrassicin, gluconapin, gluconasturtiin, glucobrassicinapin, 4-methoxyglucobrassicin, glucobrassicin, glucoalysin 순으로 많이 함유되었다. Glucoalysin은 KHE가 0.94 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 Hoagland, Otsuka-A와 비교해 각각 39.2, 51.2% 높았으며, gluconapin은 Otsuka-A가 3.97 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 KHE에 비해 10.4% 높은 유의적 차이를 보였다(Fig. 2A). Glucobrassicinapin은 Hoagland가 1.72 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 Otsuka-A보다 7.1% 높았으며, glucobrassicin은 0.67 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 Otsuka-A와 비교해 각각 28.4% 높은 함량을 보였다(Fig. 2B). 4-methoxyglucobrassicin은 Yamazaki, Hoagland, Otsuka-A, KHE 순으로 많이 함유되었고, gluconasturtiin은 Yamazaki가 2.46 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 으로 Hoagland에 비해 33.3% 더 많았다(Fig. 2C). Neoglucobrassicin은 KHE가 Otsuka-A, Yamazaki, Hoagland에 비해 각각 33.3, 90.6, 382.5% 증가한 수치를 보였으며, GSLs 전체적인 함량은 KHE가 31.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 Otsuka-A, Yamazaki, Hoagland에 비해 각각 39.6, 51.7, 151.7% 높으

며 유의적인 차이를 보였고, 청경채의 총 GSLs 함량 역시 KHE가 가장 높았다(Fig. 2D). 적세엽겨자의 GSLs 함량은 sinigrin, neoglucobrassicin, 4-methoxyglucobrassicin, glucobrassicin 순으로 많이 함유되어 있으며, sinigrin은 Hoagland가 $30.3 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 으로 높았고 glucobrassicin은 KHE가 $0.13 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 Hoagland에 비해 25.2% 높은 수치를 나타냈다(Fig. 3A). 4-methoxyglucobrassicin은 Hoagland가 $0.96 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 으로 높았으며, neoglucobrassicin은 KHE가 $4.12 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 Hoagland에 비해 25.2% 차이를 보이며 높았다(Fig. 3B). 적세엽겨자의 총 GSLs 함량은 Hoagland에서 $34.6 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 으로 높게 나타났다(Fig. 3C). 루꼴라의 GSLs 함량은 glucobrassicinapin, 4-methoxyglucobrassicin, gluconapin, gluconasturtiin, 4-hydroxyglucobrassicin, glucobrassicin 순으로 많이 함유되었다. Gluconapin은 Hoagland, KHE, Yamazaki, Otsuka-A 순으로 각각 $3.0, 3.0, 3.5, 3.4 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 으로 유의적 차이가 없었으며, 4-hydroxyglucobrassicin은 Yamazaki가 $0.72 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 Hoagland, Otsuka-A, KHE보다 각각 50.9, 104, 149% 유의적으로 높았다(Fig. 4A). Glucobrassicinapin은 Hoagland와 Yamazaki에서 각각 $19.4, 18.2 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 이었고, KHE와 Otsuka-A도 각각 $9.2, 7.7 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 으로 Hoagland가 Otsuka-A보다 152.5% 높았다(Fig. 4B). Glucobrassicin의 경우 KHE이 Otsuka-A보다 42.3% 높게 나타났다. 4-methoxyglucobrassicin은 Otsuka-A가 $6.8 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났으며, KHE보다 19% 높게 나타났다(Fig. 4C). Gluconasturtiin은 Yamazaki가 Hoagland보다 31.5% 높았다. 루꼴라의 총 GSLs는 Yamazaki가 $31.92 \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 로 KHE보다 57.5% 높은 함량을 보였다(Fig. 4D). 한 개의 암면 큐브에서 얻을 수 있는 총 GSLs 양을 측정하기 위해 3가지 작물의 GSLs 총합을 처리별로 비교한 결과 KHE가 가장 높았으며, KHE가 Otsuka-A보다 40.7% 높게 나타났다(Fig. 5).

GSLs는 황과 질소를 함유하는 성분으로 양액 내 질소질 및 황산이온의 조성에 의해 십자화과 작물의 GSLs 함량이 변화하는 것으로 보고되었다(Pedras et al., 2006; Kim et al., 2011; Jung et al., 2015). 질소 비료의 작용은 작물에서 1차 및 2차 대사산물의 형성에 필수적이며, 질소는 탄소 및 황과 함께 단백질 합성, 작물의 성장과 화학적 생합성의 중요한 공급원이므로 비료는 영양 함량을 결정하는 데 중요한 역할을 한다(Martinez-Ballestra et al., 2008). 양액 성분에 함유된 암모늄(NH_4^+)과 질산염(NO_3^-) 비율은 십자화과 작물의 GSLs 함량에 영향을 미친다고 보고되었으며, 양액 내 암모늄과 질산염이 5:5의 비율로 조성되었을 때 케일(*Brassica oleracea* L.) 및 루꼴라 작물에서 가장 많은 GSLs를 함유하고 생육 역시 우수하다 보고되었다(Kim et al., 2006; La et al., 2013). 또한, 양액 조성에 포함된 황은 GSLs의 대사에 밀접한 관계가 있다고 보고되었는데(Borpatragohain et al., 2016), SO_4^{2-} 함량을 0.5 mM에서 1 mM로 증가시키자, 순무(*Brassica rapa* L.)의 GSLs 함량이 281.6% 증가하였으며, SO_4^{2-} 를 0 mM에서 1 mM로 조절하자, 유채의 총 GSLs 함량이 15배 현저히 증가하는 결과를 보였다(Blake-Kalff et al., 1998; Kim et al., 2002).

Conclusion

옥상 온실과 같은 제한된 공간 내 다양한 품종의 작물을 수확하기 위한 재배법을 개발하기 위해 3가지 십자화과 작물을 대상으로 적정 양액 선정 목적으로 실험을 진행한 결과 외관 측면에서 유의적 차이는 발생하였지만, 생육에 있어 적정 EC 및 pH를 조성하여 진행하였기 때문에 수확량은 큰 차이를 나타내지 않았다. 그러나 십자화과 식물의 기능성 물질인 GSLs 함량 분석 결과 양액 종류에 따라 다르게 나타났으며, 양액마다 조성이 달라 GSLs를 구성하는 질소와 황의 흡수량이 다르기 때문으로 보인다. 따라서 수확량과 3가지 작물의 총 기능성 물질 함량을 고려하면 KHE 양액이 적합한 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에서는 양분 흡수량을 측정하지 않았기 때문에 추후 연구에서는 작물별 양분 흡수량에 관한 연구가 시행되어야 할 것으로 생각된다. 또한, 향후 다품종 수경재배 생산 효율성 및 품질을 높이기 위해서는, 다양한 생육 및 품질 요인을 고려하여 양액 이외의 온도, 습도, 광 등을 포함한 여러 가지 재배 요인들에 관한 연구가 복합적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

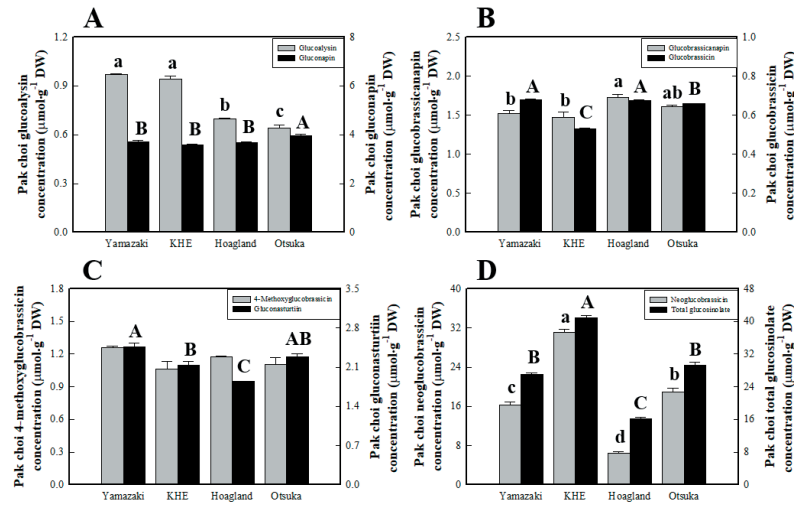


Fig. 2. Glucoalyisin and gluconapin (A), glucobrassicinapin and glucobrassicin (B), 4-methoxyglucobrassicin and gluconasturtiin (C), neoglucobrassicin and total glucosinolate (D) of the pak choi grown under the different nutrient solutions (Hoagland, Korea Horticultural Experiment Station [KHE], Yamazaki, Otsuka-A). The data represent the means and the vertical bars indicate standard error (n = 4). DW, dry weight. Different letters at the top of bars indicate significance in different nutrient solutions. ($p \leq 0.05$). bars indicate standard error (n = 4). DW, dry weight. Different letters at the top of bars indicate significance in different nutrient solutions ($p \leq 0.05$).

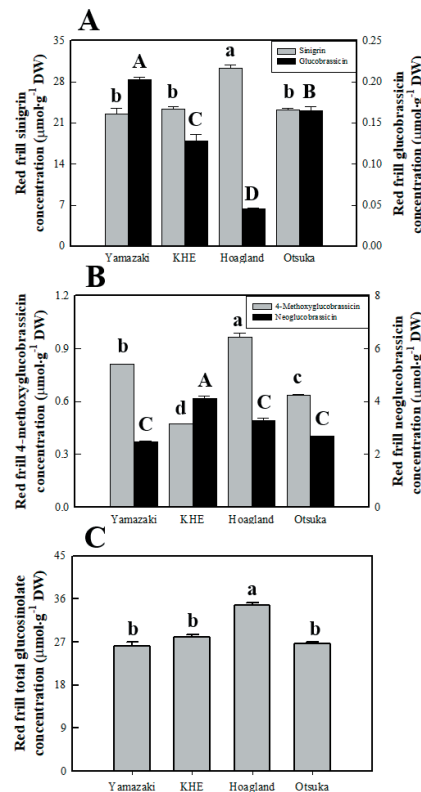


Fig. 3. Sinigrin and glucobrassicin (A), 4-methoxyglucobrassicin and neoglucobrassicin (B) total glucosinolate (C) of Red Frill grown different nutrient solutions (Hoagland, Korea Horticultural Experiment Station [KHE], Yamazaki, Otsuka-A). The data represent the means and the vertical bars indicate standard error (n = 4). DW, dry weight. Different letters at the top of bars indicate significance in different nutrient solutions ($p \leq 0.05$).

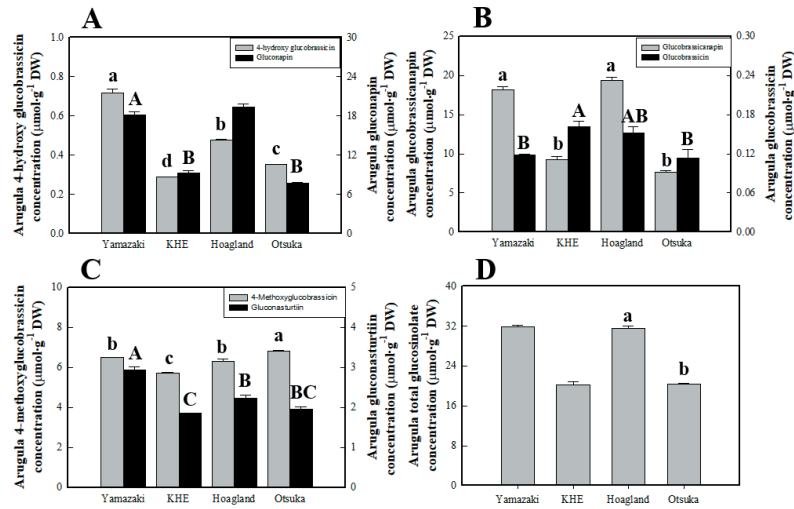


Fig. 4. 4-hydroxy glucobrassicin and Gluconapin (A), glucobrassicinapin and glucobrassicin (B), 4-methoxyglucobrassicin and gluconasturtiin (C), total glucosinolate (D) of arugula grown under the different nutrient solutions (Hoagland, Korea Horticultural Experiment Station [KHE], Yamazaki, Otsuka-A). The data represent the means and the vertical bars indicate standard error ($n = 4$). DW, dry weight. Different letters at the top of bars indicate significance in different nutrient solutions ($p \leq 0.05$).

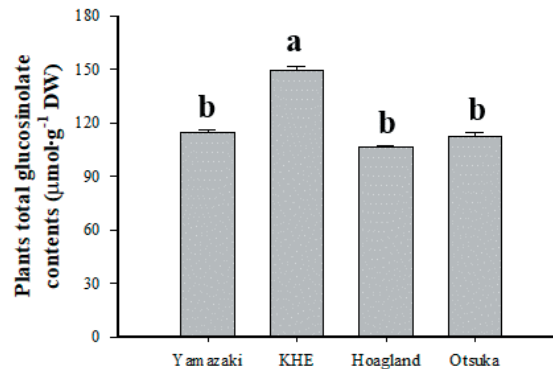


Fig. 5. Contents of plants total glucosinolate treated with different nutrient solutions (Yamazaki, Korea Horticultural Experiment Station [KHE], Hoagland, Otsuka-A). The data represent the means and the vertical bars indicate standard error ($n = 4$). DW, dry weight. Different letters at the top of bars indicate significance in different nutrient solutions ($p \leq 0.05$).

Conflict of Interests

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgements

본 연구는 2022년도 정부 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행되었음 (20212020800050, 다중 분산발전 기반의 옥상온실형 스마트 그린빌딩 융복합 시스템 개발 및 실증).

Authors Information

Young Hwi Ahn, <https://orcid.org/0000-0001-9229-4234>

Seung Won Noh, <https://orcid.org/0000-0003-4154-9780>

Sung Jin kim, <https://orcid.org/0000-0002-0354-0454>

Jong Seok Park, <https://orcid.org/0000-0003-4537-6223>

References

- Baron VS, Najda HG, Stevenson FC. 2006. Influence of population density, row spacing and hybrid on forage corn yield and nutritive value in a cool-season environment. *Canadian Journal of Plant Science* 86:1131-1138. DOI:10.4141/P05-136.
- Bhandari SR, Kwak JH. 2015. Chemical composition and antioxidant activity in different tissues of Brassica vegetables. *Molecules* 20:1228-1243. DOI:10.3390/molecules20011228.
- Bharti A, Prasanna R, Kumar G, Kumar A, Nain L. 2019. Co-cultivation of cyanobacteria for raising nursery of chrysanthemum using a hydroponic system. *Journal of Applied Phycology* 31:3625-3635. DOI:10.1007/s10811-019-01830-9.
- Blake-Kalff M, Harrison MA, Hawkesford KR, Zhao MJ, McGrath SP. 1998. Distribution of sulfur within oilseed rape leaves in response to sulfur deficiency during vegetative growth. *Plant Physiology* 118:1337-1344. DOI:10.1104/pp.118.4.1337.
- Borpatragohain P, Rose TJ, King GJ. 2016. Fire and brimstone: Molecular interactions between sulfur and glucosinolate biosynthesis in model and crop Brassicaceae. *Frontiers in Plant Science* 7:1735. DOI:10.3389/fpls.2016.01735.
- Britto DT, Kronzucker HJ. 2013. Ecological significance and complexity of N-source preference in plants. *Annals of Botany* 112:957-963. DOI:10.1093/aob/mct157.
- Cho TK, Yoo SN, Choi YS. 2020. Development of an automated nutrient solution management system by macronutrient concentration control in drain solution. *Journal of Agriculture & Life Science* 55:117-125. [in Korean] DOI:10.14397/jals.2021.55.1.117.
- Cho YY, Lee YB. 1998. Composition of nutrient solution for endive (*Cichorium endivia* L.) hydroponics. *Journal of Bio-Environment Control* 7:123-129. [in Korean]
- Choi JY, Kim SJ, Bok GJ, Lee GY, Park JS. 2018. Effect of different nutrient solution and light quality on growth and glucosinolate contents of watercress in hydroponics. *Protected Horticulture and Plant Factory* 27:371-380. [in Korean] DOI:10.12791/KSBEC.2018.27.4.371.
- Choi KY, Yang EY, Park DK, Kim YC, Seo TC, Yun HK, Seo HD. 2005. Development of nutrient solution for hydroponics of Cruciferae leaf vegetables based on nutrient-water absorption rate and the cation ratio. *Journal of Bio-Environment Control* 14:289-297. [in Korean]
- Choi SH, Kim SH, Choi GL, Jeong HJ, Lim MY, Kim DY, Lee SY. 2021. Growth and quality of the strawberry (*Fragaria annanassa* Dutch. cvs. 'Sulhyang') as affected by complex nutrient solution supplying control system using integrated solar irradiance and substrate moisture contents in hydroponics. *Journal of Bio-Environment Control* 30:367-376. [in Korean] DOI:10.12791/KSBEC.2021.30.4.367.
- Clarke DB. 2010. Glucosinolates, structures and analysis in food. *Analytical Methods* 2:310-325. DOI:10.1039/B9AY00280D.
- Cornelis MC, El-Sohemy A, Campos H. 2007. GSTT1 genotype modifies the association between cruciferous vegetable intake and the risk of myocardial infarction. *The American Journal of Clinical Nutrition* 86:752-758. DOI:10.1093/ajcn/86.3.752.
- Global Market Insight. 2021. Glucosinolates market size, industry analysis report, regional outlook, application potential, covid-19 impact analysis, price trends, competitive market share & forecast, 2021-2027. Accessed in <https://www.gminsights.com/industry-analysis/glucosinolates-market> on 2 August 2022.

- Gonçalves ÁLM, Lemos M, Niero R, Andrade SF, Maistro EL. 2012. Evaluation of the genotoxic and antigenotoxic potential of *Brassica oleracea* L. var. *acephala* DC in different cells of mice. *Journal of Ethnopharmacology* 143:740-745. DOI:10.1016/j.jep.2012.07.044.
- Ikeda H, Osawa T. 1981. Nitrate and ammonium-N absorption by vegetables from nutrient solution containing ammonium nitrate and the resultant change of solution pH. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* 50:225-230. DOI:10.2503/jjshs.50.225.
- Intelligence M. 2021. Cabbages and other brassicas market—growth, trends, covid-19 impact, and forecast (2022-2027). Accessed in <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/cabbages-and-other-brassicas-market> on 25 July 2022.
- Jung NR, Chun JH, Park EJ, Lim YH, Kim SJ. 2015. Variations of glucosinolates in kale leaves (*Brassica oleracea* var. *acephala*) treated with drought-stress in autumn and spring seasons. *Korean Journal of Agricultural Science* 42:167-175. [in Korean] DOI:10.7744/cnujas.2015.42.3.167.
- Kang HM, Kim JS. 2007. Effect of nutrient solution composition modification on the internal quality of some leaf vegetables in hydroponics. *Journal of Bio-Environment Control* 16:348-351. [in Korean] DOI:10.12791/KSBEC.2015.24.4.271.
- Kim CR, Lim YS, Lee SW, Kim SJ. 2011. Identification and quantification of glucosinolates in rocket salad (*Eruca sativa*). *Korean Journal of Agricultural Science* 38:285-294. [in Korean] DOI:10.7744/cnujas.2011.38.2.285.
- Kim SJ, Kawaharada C, Ishi G. 2006. Effect of ammonium: Nitrate nutrient ratio on nitrate and glucosinolate contents of hydroponically grown rocket salad (*Eruca sativa* Mill.). *Soil Science and Plant Nutrition* 52:387-393. DOI:10.1590/S0102-053620200302.
- Kim SJ, Matsuo T, Watanabe M, Watanabe Y. 2002. Effect of nitrogen and sulphur application on the glucosinolate content in vegetable turnip rape (*Brassica rapa* L.). *Soil Science and Plant Nutrition* 48:43-49. DOI:10.1080/0038076.8.2002.10409169.
- KOSIS (Statistics Korea). 2020. A crop production statistics. p. 19. KOSIS, Daejeon, Korea. [in Korean]
- Kwack YRN, Kim DS, Chun CH. 2015. Growth and quality of baby leaf vegetables hydroponically grown in plant factory as affected by composition of nutrient solution. *Protected Horticulture and Plant Factory* 24:271-274. [in Korean] DOI:10.12791/KSBEC.2021.30.1.085.
- La X, Yang TG, Fang P, Guo HX, Hao X, Huang SM. 2013. Effect of $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratios on the growth and bolting stem glucosinolate content of Chinese kale (*Brassica alboglabra* L.H. Bailey). *Australian Journal of Crop Science* 7:618-624. DOI:10.1590/S0102-053620200302.
- Lee DS, Jeon DS, Park SG, Arasu MV, Al-Dhabi NA, Kim SC, Kim SJ. 2015. Effect of cold storage on the contents of glucosinolates in Chinese cabbage (*Brassica rapa* L. ssp. *pekinensis*). *South Indian Journal of Biological Sciences* 1:38-42. DOI:10.22205/sijbs/2015/v1/i1/100441.
- London SJ, Yuan JM, Chung FL, Gao YT, Coetzee GA, Ross RK, Mimi CY. 2000. Isothiocyanates, glutathione S-transferase M1 and T1 polymorphisms, and lung-cancer risk: A prospective study of men in Shanghai, China. *The Lancet* 356:724-729. DOI:10.1016/S0140-6736(00)02631-3.
- MAFRA (Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs). 2021. Status of greenhouse and vegetable production 2020. Accessed in <https://www.mafra.go.kr/bbs/mafra/71/328594/artclView.do> on 12 November 2021.
- Martinez-Ballestra MC, Lopez-Perez L, Hernandez M, Lopez-Berenguer C, Fernandez-Garcia N, Carvajal M. 2008. Agricultural practices for enhanced human health. *Phytochemistry Reviews* 7:251-260. DOI:10.1007/s11101-007-9071-3.
- Nandwani D. 2018. Urban horticulture. pp. 3-29. Springer, Berlin, Germany. DOI: 10.1007/978-3-319-67017-1_1.
- Norm ISO. 1992. Rapeseed-determination of glucosinolates content-Part 1: Method using high-performance liquid chromatography. ISO 9167:1-9.
- Pedras MS, Sarwar MG, Suchy M, Aadio AM. 2006. The phytoalexins from cauliflower, caulilexins A, B and C: Isolation, structure determination, syntheses, and antifungal activity. *Phytochemistry* 67:1503-1509. DOI:10.1016/j.phytochem.2006.05.020.
- Ryoo JW. 2009. Effects of compost leachate on growth and yield of leaf lettuce in hydroponic culture. *Journal of*

- Animal Environmental Science 15:51-58. [in Korean] DOI:10.12791/KSBEC.2021.30.1.085.
- Šamec D, Salopek-Sondi B. 2019. Cruciferous (*brassicaceae*) vegetables. pp. 195-202. In Nonvitamin and nonmineral nutritional supplements, Academic Press, Cambridge, USA. DOI:10.1016/B978-0-12-812491-8.00027-8.
- Seow A, Yuan JM, Sun CL, Van Den Berg D, Lee HP, Yu MC. 2002. Dietary isothiocyanates, glutathione S-transferase polymorphisms and colorectal cancer risk in the Singapore Chinese Health Study. *Carcinogenesis* 23:2055-2061. DOI:10.1093/carcin/23.12.2055.
- Wee WC, Lai KS, Kong CL, Yap WS. 2018. Impact of within-row plant spacing and fixed fruit setting on yield and quality of rockmelon fruit cultivated by drip irrigation in a greenhouse. *Horticultural Science and Technology* 36:172-182. DOI:10.12972/kjhst.20180018.
- Won JH, Jeon SJ, Kim SS, Park GW. 2005. Development of nutrient solution for hydroponics of cruciferae leaf vegetables based on nutrient-water absorption rate and the cation ratio. *Journal of Bio-Environment Control* 14:263-268. [in Korean]
- Zhang F, Li L. 2003. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency. *Plant and Soil* 248:305-312. DOI:10.1023/a:10223522298.