

ORIGINAL ARTICLE

순환식 NFT 상추 수경재배에서 질소 저감과 규산칼륨 공급이 배출수 이온 구성과 EC 변화에 미치는 영향

유성탁¹⁾ · 박민규^{1,2)*}

¹⁾제주대학교 지하수학협동과정, ²⁾제주대학교 환경공학과

Effects of Nitrogen Reduction and Potassium Silicate Supplementation on Effluent Ion Composition and EC Changes in a Recirculating NFT Hydroponic Lettuce System

Seongtak Yu¹⁾, Min-Kyu Park^{1,2)*}

¹⁾Interdisciplinary Graduate Program in Groundwater Studies, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

²⁾Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea

Abstract

In this study, the combined effects of nitrogen reduction and potassium silicate (K_2SiO_3) application on lettuce growth, effluent ion composition, and electrical conductivity (EC) were evaluated in a recirculating nutrient film technique system. A 2×2 factorial design was applied with two NO_3^- -N levels (Standard N: 8 mM; Low N: 1 mM) and two silicon treatments (Si^{4+} : 1.5 mM Si; Si^{4+} : untreated) in which NO_3^- in the Low N treatment was substituted with Cl^- and SO_4^{2-} by using a modified Hoagland solution. Low N significantly reduced all growth parameters ($p < 0.001$), whereas K_2SiO_3 additively enhanced growth regardless of nitrogen level ($p < 0.05$). In the effluent, NO_3^- was nearly eliminated under Low N, whereas substitute anions (Cl^- , SO_4^{2-}) accounted for 44–47% of total ions. K_2SiO_3 application further increased residual K^+ and PO_4^{3-} derived from the silicon source and H_3PO_4 -based pH adjustment. EC increased by 23.3–28.5% under Low N, with an additional 6.0–10.5% increase from K_2SiO_3 . Centered log-ratio principal component analysis resolved the EC elevation into two independent mechanisms: substitute anion accumulation (PC1, 43.70%) and $K^+ \cdot PO_4^{3-}$ loading from the silicon source and pH control (PC2, 40.21%). These results demonstrate that, while the combined strategy effectively reduces nitrogen discharge and partially compensates for the growth suppression, it concurrently elevates EC through substitute and accompanying ion accumulation.

Key words : Recirculating hydroponics, Nitrogen reduction, Potassium silicate, Effluent ion composition, Electrical conductivity, Centered log-ratio PCA

1. 서 론

현대 시설원예에서 수경재배는 물과 비료의 이용효율을 높일 수 있는 생산 방식으로 널리 활용되고 있으나, 양액(nutrient solution)의 관리가 적절하지 않을 경우

배출수에 포함된 질소 및 기타 용존 이온이 외부로 유출되어 환경부하를 초래할 수 있다(Massa et al., 2020). 이에 따라, 양액을 반복적으로 사용하는 순환식 수경재배는 물과 양분의 배출을 줄일 수 있는 유효한 전략으로 평가되고 있다(Fussy and Papenbrock,

Received 9 June, 2026; Revised 9 July, 2026;

Accepted 14 July, 2026

*Corresponding author : Min-Kyu Park, Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 63243, Korea
Phone : +82-64-754-3442
E-mail : mkpark@jeju.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Table 1. Experimental treatment combinations of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration levels (Standard N, Low N) and K_2SiO_3 supply (Si^+ , Si^-) in the recirculating NFT hydroponics lettuce cultivation system

Label	Nutrient solution	$\text{NO}_3\text{-N}$ set point	K_2SiO_3 supply
Standard N- Si^+	Hoagland	8 mM	1.5 mM Si
Standard N- Si^-	Hoagland	8 mM	-
Low N- Si^+	Hoagland+modified Hoagland	1 mM	1.5 mM Si
Low N- Si^-	Hoagland+modified Hoagland	1 mM	-

Table 2. Composition of stock solutions used to prepare 100X concentrated Hoagland and modified Hoagland Nutrient solutions

Compound	Stock concentration (M)	Volume for Hoagland 100X (mL L^{-1})	Volume for modified Hoagland 100X (mL L^{-1})
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	2.0	250	-
KNO_3	2.0	250	-
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2.0	-	250
K_2SO_4	1.0	-	250
KH_2PO_4	2.0	50	50
$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2.0	100	100
Micronutrients (1000× stock)	-	100	100
Fe-EDTA (1000× stock)	-	100	100

2022). 그러나 양액의 재순환이 지속될수록 작물의 선택적 흡수로 인해 근권 환경의 이온비가 목표 조성과 달라지고, 이러한 불균형이 수량저하나 배출수 방류의 원인이 될 수 있다는 점이 함께 지적되어 왔다(Miller et al., 2020; Son et al., 2020). 실제로 순환식 박막수경(nutrient film technique, NFT) 상추 재배에서도 재배 기간 동안 양액 조성의 시간적 변화(질산염의 농도 감소, 칼슘 농도의 상대적 증가 등)가 관찰되어, 폐쇄형 시스템에서는 단순한 양분 공급량보다 이온 조성의 구조적 변화를 고려할 필요가 있다(Vought et al., 2024).

수경재배 배출수의 질산염(NO_3^-) 부하를 줄이기 위한 양액의 질소 치환 운영방식은 환경관리 측면에서 유효한 대안이 될 수 있다. 최근 순환식 수경재배 상추 생산 연구에서는 양액의 질소 투입을 낮추거나 질산염 일부를 염화물로 치환함으로써 잎 내 질산염 함량과 전체 양분 투입량을 줄이면서도 수량 손실을 최소화할 가능성이 제시되었다(Neocleous et al., 2021; Giannothanas et al., 2025). 그러나 질산염 일부를 다른 음이온으로 치환하는 과정은 배출수 이온 조성을

변화시키며, 전기전도도(electrical conductivity, EC) 상승을 초래할 가능성이 있다(Neocleous et al., 2024). 이에 질소 저감 전략이 EC 변화와 어떤 상관관계를 가지는지 평가하는 것이 중요하다.

한편, 질소 결핍 조건에서 나타나는 생육 저하를 완화하기 위한 방법으로 규소화합물의 활용이 가능하다(Campos and da Silva, 2023). 규소는 대부분의 식물에서 필수원소로 분류되지 않지만, 다양한 환경 스트레스 조건에서 생육을 보완하고 식물의 생리적 안정성을 높이는 유익원소로 보고되었다(Luyckx et al., 2017). 또한, 규소화합물이 질소 결핍 조건에서 생육 저하를 부분적으로 완화하여, 질소 치환 운영방식에 활용 가능할 것으로 전망된다(Khan et al., 2023; Costa et al., 2024). 그러나 규소화합물에 동반되는 이온이 양액 조성에 미치는 영향을 고려해야 하며, pH 조절 과정을 통해 양액 조성에도 영향을 줄 수 있다(Biru et al., 2023). 따라서 생육 증진 효과와 배출수 이온 조성 변화는 동시에 평가되어야 한다.

기존 연구는 질소 저감과 규소화합물 공급을 각각 분리하여 주로 생산성 측면에서 수행되어 왔지만, 이를 하

나의 순환식 시스템에서 동시에 적용하여 생육 반응과 배출수 EC 상승을 정량적으로 평가한 연구는 제한적이다. 따라서 본 연구는 순환식 수경재배 상추를 대상으로 질소 치환 및 규소화합물 공급에 따른 생육 반응과 배출수의 이온 조성 및 EC 상승의 관계를 통합적으로 평가하고자 하였다. 이를 위해 작물 생육 지표, 배출수 이온 조성 및 EC를 분석하고, 중심로그비율에 따른 주성분 분석(centered log ratio-principal component analysis, CLR-PCA)을 통해 처리에 따른 배출수의 조성 변화를 해석하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 설계 및 처리구

본 실험은 순환식 NFT 수경재배 상추를 대상으로, 양액의 질산성질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 농도수준(Standard N, Low N)과 규소화합물(K_2SiO_3)의 공급(Si^+ , Si^-)을 요인으로 하는 2×2 완전요인배치법으로 설계하였다. 처리구는 총 4개 처리구(Standard N- Si^+ , Standard N- Si^- , Low N- Si^+ , Low N- Si^-)를 구성하였다(Table 1). 각 처리구는 독립된 NFT 채널·탱크 단위로 3회 반복하였다. 양액은 100% 회수·재사용되는 순환식으로 운영하였고, 탱크 초기 부피는 15 L로 설정하였다.

$\text{NO}_3\text{-N}$ 농도를 구분하기 위하여 Standard N 처리구의 탱크 내 양액의 목표 농도는 농촌진흥청의 수경재배 농업기술집합이(RDA, 2021)를 참고하여 상추 생육에 적합한 8 mM $\text{NO}_3\text{-N}$ 로 설정하였다. 반면, Low N 처리구의 목표 농도는 유럽연합(European Union, EU)의 농업부문 질소 감축 의무화를 위한 질산염취약구역(nitrate vulnerable zones, NVZ) 규제 기준(EEC, 1991)인 지하수 NO_3^- 농도 50 mg L^{-1} 를 참고하여, 이에 상응하는 수준인 1 mM $\text{NO}_3\text{-N}$ (약 62 mg L^{-1} NO_3^-)로 설정하였다. 목표 농도를 조절하기 위해 Hoagland and Arnon(1938)을 기반으로 두 종류의 고농축 양액(Hoagland solution, modified Hoagland solution)을 별도로 조제하였으며, 이를 NFT 탱크에 투입하여 Standard N과 Low N의 NO_3^- 농도를 조절하였다.

고농축 양액은 Hoagland and Arnon(1938)을 기반으로 보관 및 사용이 용이하도록 100배 농축 형태로 조제하였다(Table 2). Hoagland solution은 원 조성을 따랐으며, modified Hoagland solution은 질소공급원

을 제외하기 위해 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 대신 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 를, KNO_3 대신 K_2SO_4 로 치환하여 조제하였다. 이 때, K_2SO_4 는 1몰당 K^+ 2몰을 해리하므로, K_2SO_4 stock 용액의 농도는 K^+ 공급농도를 KNO_3 와 동일하게 유지하기 위해 절반 농도인 1 M로 설정하였다.

규소 공급원으로는 시판 규산칼륨(K_2SiO_3) 용액(대정화금 Extra Pure; SiO_2 20.1%, K_2O 8.0%, 비중 1.242; CAS 1312-76-1)을 용수 보충 시 함께 공급하여 Si^+ 처리구의 농도를 1.5 mM Si 로 유지하였다(Kaloterakis et al., 2021; Mavrič Čermelj et al., 2022). Si^- 처리구는 K_2SiO_3 를 공급하지 않은 무처리 대조구로, Si^+ 처리구와 동일한 운영 절차로 관리하였다. 본 연구에서는 K_2SiO_3 처리 시 동반되는 K^+ 에 대해서는 별도의 보정을 실시하지 않았는데, 이는 보정용 칼륨화합물 공급에 따른 추가 음이온 유입을 차단하고, 현장 조건에서 상용 K_2SiO_3 사용 시 동반되는 K^+ 의 영향을 평가하기 위함이다.

양액은 탱크에 용수를 채운 뒤 Hoagland solution과 modified Hoagland solution을 투입하여 조제하였다. 양액의 NO_3^- 농도는 질산이온측정기(LAQUAtwin $\text{NO}_3\text{-11}$, HORIBA, Japan)로 측정하였으며, Standard N 처리구는 Hoagland solution을 목표 농도(8 mM $\text{NO}_3\text{-N}$)까지 투입하였다. Low N 처리구는 Hoagland solution을 목표 농도(1 mM $\text{NO}_3\text{-N}$)까지 투입한 뒤, 대응되는 Standard N 처리구 탱크의 총 양액 투입량이 일치하도록 modified Hoagland solution을 추가하여 운영하였다. 이를 통해 두 처리구 간 NO_3^- 이외의 다량원소 투입 총량을 동일하게 유지하면서 NO_3^- 을 Cl^- 와 SO_4^{2-} 로 치환한 효과를 분리하여 평가하였다. 양액 보충은 2~3일 간격으로 실시하였다. Standard N 처리구는 보충 주기마다 감소한 부피만큼 용수를 보충하였으며, 대응되는 Low N 처리구에도 동일 부피의 용수를 보충하였다. 이후 NO_3^- 측정값을 기준으로 고농축 양액을 투입하여 목표 농도를 유지하였다.

2.2. 식물 재료 및 재배 조건

공식 작물은 상추(*Lactuca sativa* L.) ‘척치마’(미래종묘, 경북 포항시)를 사용하였다. 종자는 우레탄 스펀지에 파종하여 육묘하였으며, 본엽 3~4매 전개 시점에 순환식 NFT 재배시스템에 정식하였다. 정식 후, 22일간(생육 1~22일)은 정상 생육을 진행하였고, 식물

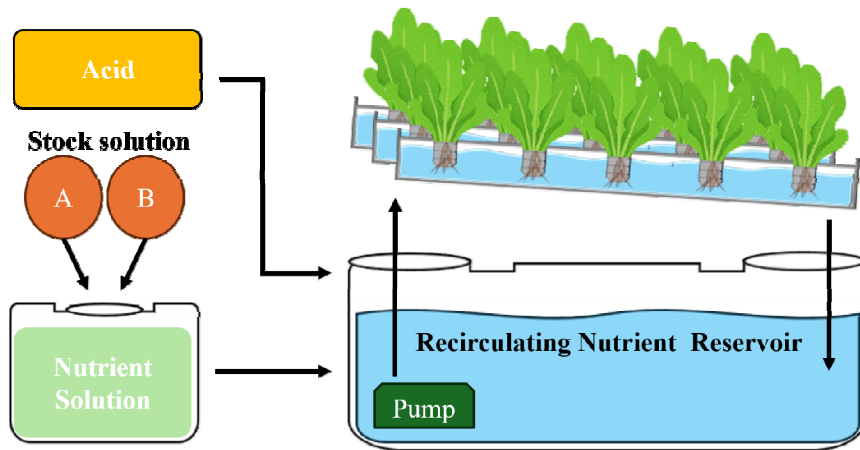


Fig. 1. Schematic diagram of a recirculating nutrient film technique (NFT) hydroponic system used in this study.

체 내 Si 축적을 유도하기 위해 K_2SiO_3 유무에 따른 처리구(Si^+ , Si^-)를 구분하여 21일간(생육 23~44일) 식물 축적을 유도하였다(Haddad et al., 2018). 본 연구에서 질소 저감 실험은 K_2SiO_3 공급 8일차부터 14일간(생육 31~44일) 질소 처리구(Standard N, Low N)를 구분하여 실험을 진행하였다.

실험기간 동안 실험실 내 주/야간 온도 $20 \pm 2^\circ C$, 상대습도 $60 \pm 10\%$ RH으로 유지하였다. 광원은 LED (LM301H-EVO, Samsung Electronics, Korea)를 사용하였으며, 광주기 16시간 명기/8시간 암기, 광합성유효광양자속밀도(photosynthetic photon flux density, PPFD) $200 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ 로 유지하였다(Iqbal et al., 2022). 양액의 pH는 5.7~6.3으로 관리하였으며, DO는 $6.4 \sim 7.1 mg L^{-1}$, 수온 $20.1 \sim 22.2^\circ C$ 범위로 유지하였다.

2.3. 생육 측정

질소 저감 실험 종료일(44일)에 처리구당 6개체를 수확하여 생육 지표를 측정하였다. 엽수는 육안으로 계수하였고, 엽면적은 각 개체에서 가장 최근에 전개된 3번째 잎을 디지털 카메라로 촬영한 후 Fiji 소프트웨어(<https://imagej.net/software/fiji/>)를 활용하여 측정하였다(Schindelin et al., 2012). 지상부 생체중 및 건물중은 전자저울(EL204, Mettler-Toledo, Switzerland)을 이용하여 측정하였다. 생체중은 수확 직후 측정하였으며, 건물중은 시료를 $70^\circ C$ 열풍 건조

기(OF-W155, DAIHAN Scientific, Korea)에서 72시간 동안 완전히 건조시킨 후 측정하여 바이오매스를 평가하였다.

2.4. 양액 관리 및 배출수 분석

2.4.1. pH 및 EC 측정

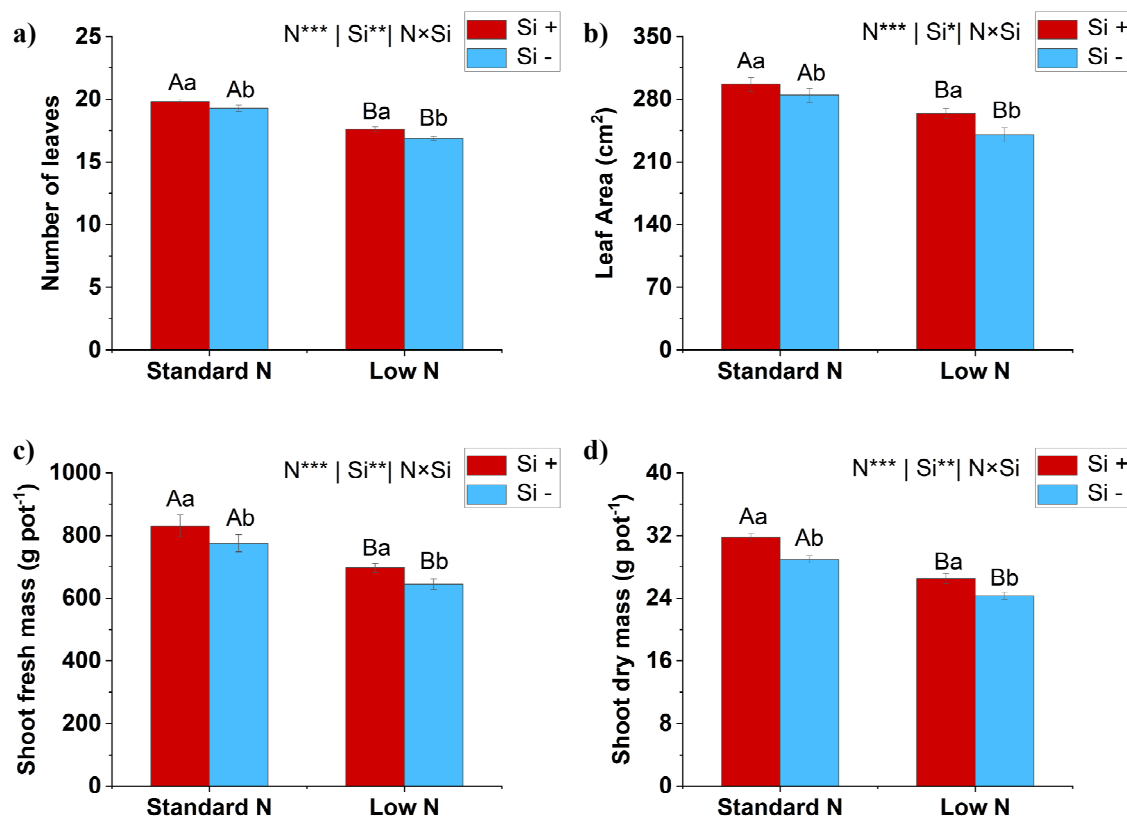
질소 조절 실험이 진행된 시점을 Day 1으로 하여, 실험 종료(Day 14)까지 총 6 시점에 걸쳐 배출수의 pH, EC를 측정하였다. pH 및 EC는 휴대용 다항목수질측정기(Professional Plus Multiparameter Instrument, YSI, USA)를 사용하여 용수·양액 보충 직후 각 처리구의 탱크에서 측정하였다. 양액의 pH는 RDA(2021)를 참고하여 6.0 ± 0.3 범위로 설정하였다. 양액 공급 시 pH 6.3을 초과한 경우 4 N H_3PO_4 용액을 적정 주입하여 목표 범위로 조정하였으며, 실험 기간 동안 pH 5.7 미만으로 하강한 사례는 발생하지 않아 염기성 보정은 수행하지 않았다.

2.4.2. 시료 채취 및 전처리

이온 농도 분석을 위한 배출수 시료는 EC 측정과 동일한 시점에 각 탱크에서 50 mL 채취하였다. 시료의 균질성을 확보하기 위해 채취 직전 순환 펌프를 10분간 가동하여 탱크 내 양액을 충분히 혼합하였다. 채취한 시료는 $0.45 \mu m$ PVDF 시린지 필터(Whatman, UK)로 부유물을 제거한 후 폴리에틸렌 용기에 옮겨

Table 3. Operating conditions of ion chromatography (IC) for the analysis of major anions and cations in the hydroponic effluent

Parameter	Conditions (Anion)	Conditions (Cation)
Column	IonPac AS14 (250 mm × 4 mm I.D.)	IonPac CS12A (250 mm × 4 mm I.D.)
Eluent composition	3.5 mM Sodium Carbonate / 1.0 mM Sodium Bicarbonate	20 mM Methanesulfonic acid
Eluent flow rate	1.2 mL min ⁻¹	1.0 mL min ⁻¹
Back pressure	1400 psi	1000 psi
Injection volume	25 μ L	25 μ L
Suppressor	ASRS 500-4 mm	CSRS 500-4 mm
Column temperature	30°C	30°C

**Fig. 2.** Growth characteristics of lettuce: number of leaves (a), leaf area (b), shoot fresh weight (c), and shoot dry weight (d) as affected by NO₃-N concentration levels and K₂SiO₃ treatments. Values are presented as mean±SD (n=3). Different letters above the bars indicate significant differences among treatments at $p < 0.05$ by Tukey's HSD test.

4℃ 냉장조건에서 보관하였다.

2.4.3. 이온크로마토그래피 분석

배출수의 주요 음이온(NO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) 및 양이온(Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Na^+) 농도는 이온크로마토그래프(Dionex ICS-1100, Thermo Fisher Scientific, USA)를 활용하여 정량 분석하였다(Table 3). 음이온 분석에는 고정상으로 IonPac™ AS 14 컬럼을, 이동상으로 3.5 mM Na_2CO_3 와 1.0 mM NaHCO_3 혼합 용액을 사용하였으며, 유속은 1.2 mL min^{-1} 로 설정하였다. 양이온 분석에는 고정상으로 IonPac™ CS12A 컬럼을, 이동상으로 20 mM 메탄술폰산(methanesulfonic acid, MSA, $\text{CH}_3\text{SO}_3\text{H}$)을 사용하였으며, 유속은 1.0 mL min^{-1} 로 설정하였다. 두 분석 모두 시료 주입량은 $25 \mu\text{L}$, 컬럼 온도는 30℃로 유지하였으며, 분석 감도를 높이기 위해 자가재생억제기(suppressor)를 적용하였다.

2.5. 통계 분석 및 다변량 자료 해석

모든 정량적 자료는 3회 반복의 평균±표준편차(mean±SD, n=3)로 제시하였다. 통계 처리는 OriginPro2025 (OriginLab, USA) 소프트웨어를 활용하였다. $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도 수준(N)과 K_2SiO_3 공급(Si)의 주효과 및 두 요인 간의 상호작용($\text{N} \times \text{Si}$)을 분석하기 위해 이원배치 분산분석(two-way ANOVA)을 수행하였으며, 유의성이 나타난 경우 Tukey의 HSD (honestly significant difference) 사후검정을 적용하여 평균 간 차이를 확인하였다. 배출수 이온 조성의 다변량 구조를 해석하기 위해, 8종의 이온 농도 자료(mmol L^{-1})를 중심로그비(centered log-ratio, CLR)로 변환한 후 주성분 분석(principal component analysis, PCA)을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도 수준과 K_2SiO_3 공급에 따른 작물 생육 특성

$\text{NO}_3\text{-N}$ 농도 수준에 따른 상추의 생육에 미치는 영향을 분석한 결과, Low N 처리구는 모든 생육 지표를 감소시키는 경향을 보였다(Fig. 2). Standard N 처리구와 비교할 때 Low N 처리구의 엽수는 11.1~12.4%,

엽면적은 11.0~15.5%, 지상부 생체중은 16.1~16.8%, 그리고 지상부 건물중은 16.0~16.6% 감소하였다. 이원배치 분산분석 결과, $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도 수준에 따른 주효과는 모든 생육 지표에서 유의하였다($p < 0.001$). 이러한 결과는 본 실험조건에서 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 상추 잎의 발달과 바이오매스 축적에 중요한 제한요인으로 작용하였음을 보여준다(Liu et al., 2022).

반면, K_2SiO_3 를 공급한 조건에서는 Standard N과 Low N 처리구 모두에서 생육 지표를 향상시켰다. Si^+ 처리구는 Si^- 처리구 대비 엽수 2.9~4.4%, 엽면적 4.3~9.9%, 지상부 생체중 7.2~8.1%, 지상부 건물중 9.0~9.7%의 증가를 나타내었다. K_2SiO_3 공급의 주효과는 엽면적에서 유의하였고($p < 0.05$), 엽수, 지상부 생체중, 지상부 건물중에서도 유의한 차이를 보였다($p < 0.01$). 그러나 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도와 K_2SiO_3 공급 간 상호작용은 모든 생육 지표에서 유의하지 않았다($p > 0.05$). 이는 K_2SiO_3 공급 효과가 특정 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도에서만 국한되지 않고, 독립적으로 작용하였음을 시사한다.

3.2. 배출수 내 주요 이온농도 및 EC 변화

배출수의 주요 이온과 EC는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도 수준 및 K_2SiO_3 공급에 따라 차이를 나타내었다(Table 4). Standard N 처리구에서 NO_3^- 농도는 $431.4 \sim 456.1 \text{ mg L}^{-1}$ 수준이었으나, Low N 처리구에서는 $1.4 \sim 1.6 \text{ mg L}^{-1}$ 수준으로 낮아졌다. 반면, Cl^- 와 SO_4^{2-} 농도는 Low N 처리구에서 각각 $190.6 \sim 205.2 \text{ mg L}^{-1}$ 및 $376.9 \sim 377.1 \text{ mg L}^{-1}$ 수준으로 나타나 Standard N 처리구보다 높았다. 또한 PO_4^{3-} 농도는 Si^+ 처리구에서 $168.9 \sim 175.7 \text{ mg L}^{-1}$ 로, Si^- 처리구의 $81.7 \sim 100.8 \text{ mg L}^{-1}$ 보다 높게 나타났다.

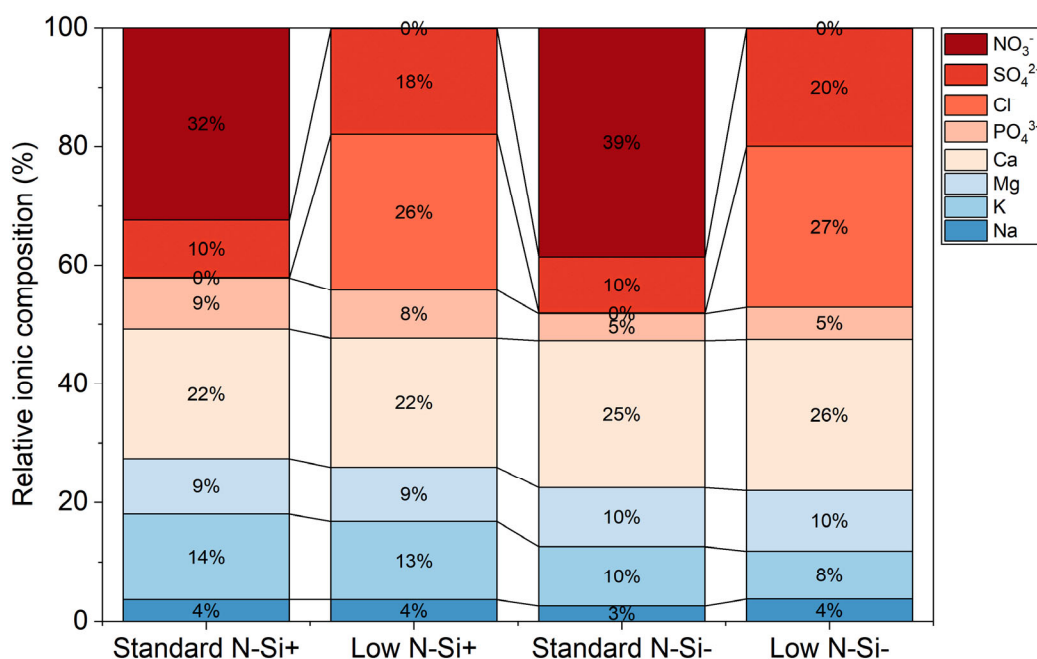
양이온에서는 K^+ 농도가 Si^+ 처리구에서 $113.4 \sim 121.1 \text{ mg L}^{-1}$ 로, Si^- 처리구의 $62.2 \sim 74.6 \text{ mg L}^{-1}$ 보다 높게 나타났다. Ca^{2+} 농도는 $188.5 \sim 202.8 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 모든 처리구에서 비교적 높게 유지되었으며, Mg^{2+} 농도는 $45.6 \sim 49.0 \text{ mg L}^{-1}$, Na^+ 농도는 $11.4 \sim 18.4 \text{ mg L}^{-1}$ 범위로 나타나 K^+ 에 비해 처리구 간 변화 폭이 작았다.

배출수의 EC는 Standard N- Si^+ 처리구에서 $1.23 \pm 0.02 \text{ dS m}^{-1}$, Low N- Si^+ 처리구에서 $1.58 \pm 0.04 \text{ dS m}^{-1}$, Standard N- Si^- 처리구에서 $1.16 \pm 0.03 \text{ dS m}^{-1}$, Low N- Si^- 처리구에서 $1.43 \pm 0.06 \text{ dS m}^{-1}$ 로 나타났다(Table 4). Low N 처

Table 4. Ion concentrations and electrical conductivity (EC) in the hydroponic effluent under different $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration levels and K_2SiO_3 treatments. Values are presented as mean $\pm$ SD (n = 3)

Parameters	Standard N-Si ⁺	Low N-Si ⁺	Standard N-Si ⁻	Low N-Si ⁻
Anions (mg L ⁻¹)				
NO_3^-	431.4 $\pm$ 38.6	1.6 $\pm$ 0.2	456.1 $\pm$ 28.0	1.4 $\pm$ 0.2
SO_4^{2-}	200.1 $\pm$ 3.6	376.9 $\pm$ 2.0	174.1 $\pm$ 0.6	377.1 $\pm$ 1.4
Cl^-	0.8 $\pm$ 0.0	205.2 $\pm$ 0.1	0.6 $\pm$ 0.0	190.6 $\pm$ 1.0
PO_4^{3-}	175.7 $\pm$ 6.0	168.9 $\pm$ 2.6	81.7 $\pm$ 1.5	100.8 $\pm$ 1.1
Cations (mg L ⁻¹)				
Ca^{2+}	188.5 $\pm$ 0.7	192.9 $\pm$ 0.6	189.6 $\pm$ 0.5	202.8 $\pm$ 0.7
Mg^{2+}	48.7 $\pm$ 0.2	48.8 $\pm$ 0.2	45.6 $\pm$ 0.2	49.0 $\pm$ 0.1
K^+	121.1 $\pm$ 1.3	113.4 $\pm$ 0.7	74.6 $\pm$ 0.5	62.2 $\pm$ 2.8
Na^+	18.0 $\pm$ 0.1	18.4 $\pm$ 0.0	11.4 $\pm$ 0.2	17.1 $\pm$ 0.0
EC (dS m ⁻¹) ^a	1.23 $\pm$ 0.02	1.58 $\pm$ 0.04	1.16 $\pm$ 0.03	1.43 $\pm$ 0.06

^a Two-way ANOVA showed significant main effects of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration (*** $p < 0.001$) and K_2SiO_3 supply (** $p < 0.01$) on EC. The interaction (N $\times$ Si) was not significant ($p > 0.05$).

**Fig. 3.** Relative ionic composition (mol%) of the hydroponic effluent as affected by $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration levels and K_2SiO_3 treatments.

리구의 EC는 Standard N 처리구보다 23.3~28.5% 높았으며, Si^+ 처리구의 EC는 Si^- 처리구보다 6.0~10.5% 높게 나타났다. 이원배치 분산분석 결과, EC는 요인인 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도 수준과 K_2SiO_3 공급에 대해 모두 유의하게 상승하였으며(각각 $p < 0.001$, $p < 0.01$), 두 요인 간 상호작용은 유의하지 않았다($p > 0.05$). 이는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도 수준 감소와 K_2SiO_3 공급이 모두 배출수의 EC 상승과 관련되어 있음을 보여준다.

3.3. 배출수 내 이온 조성 변화

배출수의 상대적 이온 조성은 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도 수준에 따라 차이를 나타내었다(Fig. 3). Standard N 처리구에서는 NO_3^- 가 전체 이온 조성 중 32~39%를 차지하여 주요 음이온으로 나타난 반면, Low N 처리구에서는 NO_3^- 의 비중이 1% 미만 수준으로 낮아졌다. 반면, Cl^- 와 SO_4^{2-} 의 비중이 각각 26~27% 및 18~20%까지 증가하여 Standard N 처리구의 1% 미만 및 10% 수준과 차이를 보였다. 이는 Hoagland solution의 NO_3^- 를 Cl^- SO_4^{2-} 로 치환하여 조제한 modified Hoagland solution 조성이 배출수에 반영되었음을 보여준다.

K_2SiO_3 공급 유무에 따른 배출수 내 이온 조성의 차이도 나타났다. Si^+ 처리구에서 K^+ 와 PO_4^{3-} 의 비중은 각각 13~14% 및 8~9%로 나타나, Si^- 처리구의 8~10%, 및 5%보다 높은 경향을 보였다. 반면, Ca^{2+} 와 Mg^{2+} 비중은 Si^+ 처리구에서 22% 및 9% 수준으로, Si^- 처리구의 25~26% 및 10%보다 낮게 나타났다. 이러한 결과는 K_2SiO_3 공급에 따른 K^+ 비중 증가가 배출수의 상대적 양이온 조성 변화와 함께 나타났음을 보여준다.

3.4. 양액의 pH 유지 과정 중 H_3PO_4 투입량 변화

재배기간 동안 모든 처리구의 양액 pH는 설정 범위 내에서 유지되었다(Fig. 4a). pH 유지를 위해 인산(H_3PO_4)을 사용하였으며, 누적 투입량은 처리구에 따라 차이를 나타내었다(Fig. 4b). H_3PO_4 투입량은 Standard N- Si^+ 처리구에서 $28.3 \pm 1.2 \text{ mL reservoir}^{-1}$ 로 가장 높았고, Low N- Si^+ 처리구는 $23.7 \pm 0.6 \text{ mL reservoir}^{-1}$, Standard N- Si^- 처리구에서 $18.0 \pm 0.0 \text{ mL reservoir}^{-1}$, Low N- Si^- 처리구는 $13.7 \pm 0.6 \text{ mL reservoir}^{-1}$ 로 나타났다. H_3PO_4 투입량은 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도 수준과 K_2SiO_3 공급에 대해 모두 유의한 주효과를 나타내었으나($p < 0.001$), 두 요인 간 상호작용은 유의

하지 않았다.

Si^+ 처리구의 H_3PO_4 투입량은 Si^- 처리구보다 57.2~73.0% 높게 나타났으며, 이는 K_2SiO_3 수용액이 일반적으로 pH 11~12 정도의 강한 알칼리성을 나타내므로(OMRI, 2023), 동일한 pH 범위를 유지하기 위한 산 요구량이 증가하였기 때문으로 판단된다. 한편, Standard N 처리구의 H_3PO_4 투입량은 Low N 처리구보다 19.4~31.4% 높게 나타났는데, 이는 NO_3^- 흡수 및 동화과정 시 OH^- , HCO_3^- 가 방출되거나 H^+ 가 소비되어 상대적으로 높은 Standard N 처리구에서 근권 pH 상승이 유도된 결과로 사료된다(Feng et al., 2020).

3.5. CLR-PCA를 활용한 배출수의 이온 조성 변화 확인

배출수의 이온 조성 변화와 EC 상승 요인을 통합적으로 해석하기 위하여 CLR-PCA를 수행하였다(Fig. 5). PC1과 PC2는 각각 전체 분산의 43.70%와 40.21%를 설명하여, 두 주성분이 전체 분산의 83.91%를 설명하였다. 이는 처리구 간 배출수 이온 조성 차이가 두 개의 주요 주성분을 중심으로 구분될 수 있음을 보여준다.

PC1에서는 Standard N 처리구와 Low N 처리구가 구분되었으며, Standard N 처리구는 NO_3^- 방향에, Low N 처리구는 Cl^- , SO_4^{2-} 방향에 위치하였다. Low N 처리구의 EC는 $1.43 \sim 1.58 \text{ dS m}^{-1}$ 로 Standard N 처리구의 $1.16 \sim 1.23 \text{ dS m}^{-1}$ 보다 23.3~28.5% 높게 나타났으므로, PC1은 Low N 처리구에서 증가한 Cl^- 와 SO_4^{2-} 에 의한 EC 상승을 반영하는 주성분으로 해석되었다.

PC2에서는 Si^+ 처리구와 Si^- 처리구가 구분되었으며, Si^+ 처리구는 K^+ 및 PO_4^{3-} 방향에, Si^- 처리구는 Ca^{2+} 및 Mg^{2+} 방향에 위치하였다. 동일한 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도 수준에서 Si^+ 처리구의 EC는 Si^- 처리구보다 6.0 ~ 10.5% 높게 나타났으므로, PC2는 K_2SiO_3 공급 및 pH 유지 과정에서 증가한 K^+ 와 PO_4^{3-} 가 추가적인 EC 상승에 반영된 주성분으로 해석되었다.

배출수의 EC 상승은 단일 이온의 변화보다는 두 개의 처리 요인에 의해 형성된 이온 조성 변화가 함께 반영된 결과로 해석되었다. 즉 Low N 처리구에서 나타난 EC 상승은 Cl^- 와 SO_4^{2-} 증가가 주로 반영된 결과이며, Si^+ 처리구에서의 추가적인 EC 상승은 K^+ 와 PO_4^{3-} 증가가 반영된 결과로 판단되었다. 따라서 배출수의 EC

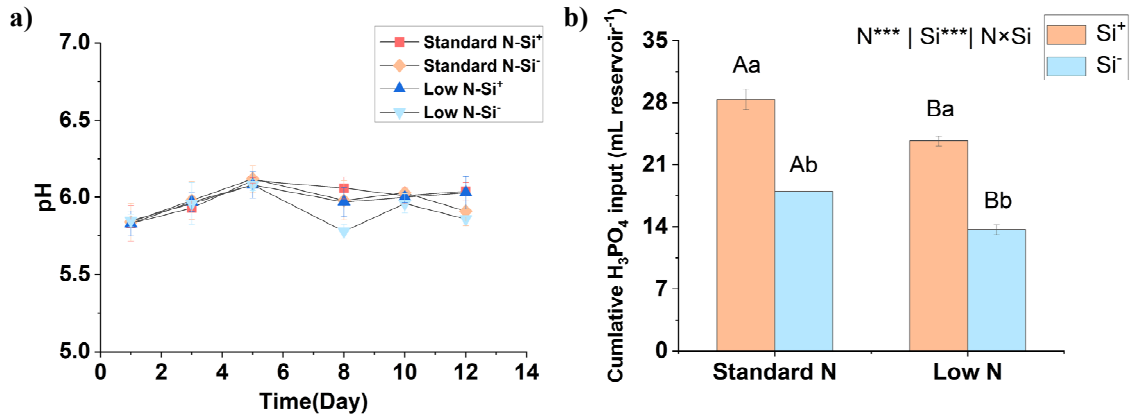


Fig. 4. Temporal changes in the nutrient solution pH (a) and cumulative H₃PO₄ input for pH adjustment (b) under different NO₃-N concentration levels and K₂SiO₃ treatments in the recirculating NFT hydroponic system. Values are presented as mean ± SD (n=3). In (b), different letters above the bars indicate significant differences among treatments at $p < 0.05$ by Tukey's HSD test.

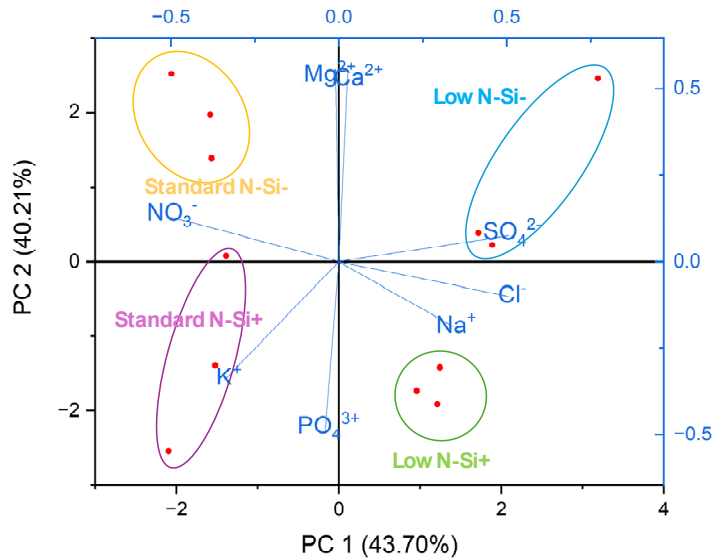


Fig. 5. Principal component analysis (PCA) biplot of the centered log-ratio (CLR) transformed ionic composition of the hydroponic effluent.

변화는 NO₃-N 농도 수준 저하에 따른 음이온 조성 변화와 K₂SiO₃ 공급에 따른 K⁺, PO₄³⁻ 변화가 복합적으로 작용한 결과로 볼 수 있다.

4. 결론

본 연구는 폐쇄형 순환식 NFT 수경재배 상추를 대상으로 질소 저감과 규소 공급원 투입이 작물 생육과 배출수 EC 상승에 미치는 영향을 분석하였다. modified Hoagland solution을 사용한 Low N 처리구는 배출수 내 NO₃⁻ 농도를 낮춰 질소계 오염부하

저감에 기여하였다. 그러나 NO_3^- 의 음이온 치환을 위해 투입된 Cl^- , SO_4^{2-} 가 NFT 시스템 내에 축적되어, Standard N 처리구 대비 EC가 23.3~28.5% 상승하였고, 모든 생육 지표의 감소를 초래하였다. 이는 양액의 질소 저감 전략이 배출수의 질소 부하를 줄이는데 유효한 방안이 될 수 있으나, 동시에 이온 축적과 생산성 저하의 문제를 동반함을 시사한다.

K_2SiO_3 공급은 상추의 생육 지표를 질소 수준과 무관하게 가산적으로 향상시켜 Low N 조건에서의 생육 저하를 부분적으로 보완하였으나, 배출수 이온 조성에도 변화를 나타냈다. K_2SiO_3 공급에 따른 K^+ 의 축적과 pH 조절을 위해 투입된 H_3PO_4 에 따른 PO_4^{3-} 의 축적이 EC를 추가적으로 상승시켰다. 이는 수경재배 시 생육 보안을 목적으로 규소화합물을 활용할 시 동반이온을 고려해야 할 필요성을 시사한다.

결과적으로 순환식 수경재배에서 질소 치환과 규소화합물 공급은 각각 배출수의 질산염 저감과 생육 보완의 가능성을 보여주었으나, 두 처리 모두 배출수의 이온 조성 변화와 EC 상승을 동반하였다. 이러한 결과는 환경적 오염부하 저감 효과로 단순화하여 해석하기에는 신중할 필요가 있으며, 질산염 저감과 함께 나타난 이온 조성 변화 및 EC 상승을 함께 고려할 필요가 있다. 또한 이는 치환 음이온 및 동반 양이온의 축적까지 포함한 이온 수치 관리의 중요성을 시사한다. 향후에는 치환 음이온의 종류와 비율 최적화, 규소 공급원의 형태 비교, 그리고 EC 임계점에 기반한 양액 배출 주기 설정 등에 관한 추가 연구가 요구된다.

감사의 글

본 과제(결과물)는 2026년도 교육부 및 제주특별자치도의 재원으로 제주엔지니어링센터의 지원을 받아 수행된 지역성장 인재양성체계(앵커)의 결과입니다(2026-ANCHOR-17-001).

REFERENCES

- Biru, F. N., Cazzonelli, C. I., Elbaum, R., Johnson, S. N., 2023, Silicon-mediated herbivore defence in a pasture grass under reduced and Anthropocene levels of CO_2 , *Front. Plant Sci.*, 14, 1268043.
- Campos, C. N. S., da Silva, B. C., 2023, Silicon mitigates the effects of nitrogen deficiency in plants, in: de Mello Prado, R. (ed.), *Benefits of silicon in the nutrition of plants*, Springer, Cham, Switzerland, 87–100.
- Costa, M. G., Alves, D. M. R., da Silva, B. C., de Lima, P. S. R., de Mello Prado, R., 2024, Elucidating the underlying mechanisms of silicon to suppress the effects of nitrogen deficiency in pepper plants, *Plant Physiol. Biochem.*, 216, 109113.
- EEC (European Economic Community), 1991, Council Directive 91/676/EEC of 12 December 1991 concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources, *Official Journal of the European Communities*, Brussels, Belgium, 1–8.
- Feng, H., Fan, X., Miller, A. J., Xu, G., 2020, Plant nitrogen uptake and assimilation: Regulation of cellular pH homeostasis, *J. Exp. Bot.*, 71(15), 4380–4392.
- Fussy, A., Papenbrock, J., 2022, An Overview of soil and soilless cultivation techniques—chances, challenges and the neglected question of sustainability, *Plants*, 11(9), 1153.
- Giannothanas, E., Ntanasi, T., Karavidas, I., Spyrou, G. P., Neocleous, D., Ntatsi, G., Savvas, D., 2025, Exploring nutrient reduction strategies without yield losses in hydroponic lettuce production, *Sci. Hortic.*, 352, 114458.
- Haddad, C., Arkoun, M., Jamois, F., Schwarzenberg, A., Yvin, J. C., Etienne, P., Laîné, P., 2018, Silicon promotes growth of *Brassica napus* L. and delays leaf senescence induced by nitrogen starvation, *Front. Plant Sci.*, 9, 516.
- Hoagland, D. R., Arnon, D. I., 1938, The water-culture method for growing plants without soil, *Circular (No. 347)*, California Agricultural Experiment Station, Berkeley, USA.
- Iqbal, Z., Munir, M., Sattar, M. N., 2022, Morphological, biochemical, and physiological response of butterhead lettuce to photo-thermal environments, *Horticulturae*, 8(6), 515.
- Kaloterakis, N., van Delden, S. H., Hartley, S., De Deyn, G. B., 2021, Silicon application and plant growth promoting rhizobacteria consisting of six pure *Bacillus* species alleviate salinity stress in cucumber (*Cucumis sativus* L.), *Sci. Hortic.*, 288, 110383.
- Khan, I., Awan, S. A., Rizwan, M., Brestic, M., Xie, W., 2023, Silicon: An Essential element for plant nutrition and phytohormones signaling mechanism under stressful conditions, *Plant Growth Regul.*, 100(2), 301–319.
- Liu, X., Hu, B., Chu, C., 2022, Nitrogen assimilation in plants: Current status and future prospects, *J. Genet.*

- Genomics, 49(5), 394–404.
- Luyckx, M., Hausman, J. F., Lutts, S., Guerriero, G., 2017, Silicon and plants: Current knowledge and technological perspectives, *Front. Plant Sci.*, 8, 411.
- Massa, D., Magán, J. J., Montesano, F. F., Tzortzakis, N., 2020, Minimizing water and nutrient losses from soilless cropping in southern Europe, *Agric. Water Manage.*, 241, 106395.
- Mavrič Čermelj, A., Fideršek, E., Golob, A., Kacjan Maršić, N., Vogel Mikuš, K., Germ, M., 2022, Different concentrations of potassium silicate in nutrient solution affects selected growth characteristics and mineral composition of barley (*Hordeum vulgare* L.), *Plants*, 11(11), 1405.
- Miller, A., Adhikari, R., Nemali, K., 2020, Recycling nutrient solution can reduce growth due to nutrient deficiencies in hydroponic production, *Front. Plant Sci.*, 11, 607643.
- Neocleous, D., Nikolaou, G., Ntatsi, G., Savvas, D., 2021, Nitrate supply limitations in tomato crops grown in a chloride-amended recirculating nutrient solution, *Agric. Water Manage.*, 258, 107163.
- Neocleous, D., Savvas, D., Giannothanas, E., Ntatsi, G., 2024, Partial substitution of nitrate by chloride in fertigation recipes allows for lower nitrate input in hydroponic lettuce crops, *Front. Plant Sci.*, 15, 1411572.
- OMRI (Organic Materials Review Institute), 2023, Aqueous potassium silicate crops, Limited Scope Technical Report, Eugene, USA.
- RDA (Rural Development Administration), 2021, Hydroponics, Agricultural technology guide 071, Jeonju, Korea.
- Schindelin, J., Arganda-Carreras, I., Frise, E., Kaynig, V., Longair, M., Pietzsch, T., Preibisch, S., Rueden, C., Saalfeld, S., Schmid, B., 2012, Fiji: An open-source platform for biological-image analysis, *Nat. Methods*, 9(7), 676–682.
- Son, J. E., Kim, H. J., Ahn, T. I., 2020, Hydroponic systems, *Plant factory*, Elsevier, Amsterdam, 273–283.
- Vought, K., Bayabil, H. K., Pompeo, J., Crawford, D., Zhang, Y., Correll, M., Martin-Ryals, A., 2024, Dynamics of micro and macronutrients in a hydroponic nutrient film technique system under lettuce cultivation, *Heliyon*, 10(11), e32316.

-
- Professor. Min-Kyu Park
Department of Environmental Engineering, Jeju National University
mkpark@jejunu.ac.kr
 - Doctor's course. Seongtak Yu
Interdisciplinary Graduate Program in Groundwater Studies, Jeju National University
tak3975@stu.jejunu.ac.kr