RESEARCH ARTICLE https://doi.org/10.7235/HORT.20260024

저온기 박막경과 분무경 시스템에서 양액 가온 온도가 상추의 뿌리 발달과 수량에 미치는 영향

김세진[1] · 임미영[1] · 남주희[1] · 김명석[1] · 최경이[1] · 노미영[1] · 김동필[2]*

[1]국립원예특작과학원 시설원예연구소, [2]충남대학교 원예학과

Effects of Nutrient Solution Heating on the Root Development and Yield of Three Lettuce Cultivars (*Lactuca sativa* L.) Grown in NFT and Aeroponic Systems under Low-Temperature Conditions

Se Jin Kim[1], Mi Young Lim[1], Joo Hee Nam[1], Myeong Suk Kim[1], Gyeong Lee Choi[1], Mi Young Roh[1], and Dong Pil Kim[2]*

[1]Protected Horticulture Research Institute, National Institute of Horticultural and Herbal Science, Haman 52054, Korea
[2]Department of Horticultural Science, College of Agriculture and Life Science, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

*Corresponding author: kimdongpil@cnu.ac.kr

Received: 9 February 2026
Revised: 26 June 2026
Accepted: 2 July 2026
Published online: 22 July 2026

OPEN ACCESS

HORTICULTURAL SCIENCE and TECHNOLOGY
44(5):690-701, 2026
URL: https://www.hst-j.org

pISSN : 1226-8763
eISSN : 2465-8588

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

Copyright ⓒ 2026 Korean Society for Horticultural Science

본 연구는 농촌진흥청 시험연구사업(급배액 및 재배환경 모니터링 기반 수경재배 정밀 급액 기술 개발, PJ017357)의 지원에 의해 수행되었음.

Abstract

This study investigated the effects of nutrient solution heating (NSH) on the root-zone temperature (RZT), root development, shoot growth, and yield of three lettuce cultivars (*Lactuca sativa* L.) grown in two water culture systems, the Nutrient Film Technique (NFT) system and an aeroponic system, during a low-temperature period. Three cultivars (‘Caipira’, ‘Volare’, and ‘Isabel’) were cultivated in a glasshouse using nutrient solutions heated to set temperatures of 20, 25, and 30°C. NSH effectively increased the RZT in both the NFT and aeroponic systems. However, the aeroponic system exhibited noticeably greater temperature stability than the NFT system owing to its Styrofoam-insulated and enclosed structure. Heated nutrient solutions significantly promoted root development by, for instance, increasing the overall root length, number of tips, and the lateral roots while decreasing the average root diameter, indicating enhanced root formation, which is beneficial for water and nutrient uptake and transport. Growth and harvest characteristics, specifically the leaf length, no. of leaves, chlorophyll contents, leaf area, shoot fresh/dry weight, and root fresh/dry weight, also improved with higher RZTs. The NFT system showed higher shoot biomass and yield outcomes, whereas the aeroponic system exhibited superior root development and greater root biomass. Among the tested temperatures, NSH30 resulted in better growth and yield levels than NSH20 and NSH25. Although the nutrient solution was heated to 30°C, the actual RZT achieved was approximately 25°C, which was found to be optimal for lettuce root and shoot growth. These findings suggest that nutrient solution heating is an effective strategy to enhance lettuce productivity in NFT and aeroponic systems during low-temperature periods.

Additional key words: biomass, hydroponics, nutrient film technique, root-zone, shoot:root ratio, water culture

서 언

상추(*Lactuca sativa* L.)는 전 세계적으로 널리 소비되는 엽채류 중 하나로, 다양한 비타민과 무기질, 페놀화합물을 함유하여 필수적인 영양소를 공급하는 중요한 작목이다. 우리나라의 상추 재배 면적은 4,096ha에 달하며, 이 중 약 78.5%가 시설에서 재배된다(MAFRA 2024). 관행 상추 재배는 시설 내에서 토경 또는 저설 베드 방식으로 재배되고 있으나, 토경 방식은 작업 편의성이 낮고 토양 병해충 및 연작 장해 발생 가능성이 높다. 국내 엽채류의 순수수경 재배 면적은 약 381ha로 전체 수경재배 면적의 8.8%를 차지한다(MAFRA 2024). 최근 기후변화로 인한 이상기상 현상이 증가하면서, 연중 안정적인 생산이 가능한 제어환경농업(CEA, Controlled Environment Agriculture)이 주목받고 있다. 제어환경농업의 핵심 기술 중 하나인 수경재배(Hydroponics)는 양분과 수분을 효율적으로 공급하여 작물 생산성을 높일 수 있고, 양분 관리 측면에서도 작물 생육을 보다 정밀하게 제어할 수 있다는 장점을 가지고 있다(Rajaseger et al. 2023). 수경재배는 뿌리를 물리적으로 지지하고 양분을 공급하는 배지를 사용하는 '배지경(Substrate Culture)'과 배지 없이 양액으로만 작물을 재배하는 '순수수경(Water Culture)' 방식으로 구분된다(Chowdhury et al. 2024). 국내 상추 수경재배는 박막경(NFT, Nutrient Film Technique)과 분무경(Aeroponics), 그리고 펄라이트 배지경을 주로 사용한다. 박막경은 뿌리 주변에 얇은 양액 막을 형성하도록 양분을 공급하는 방식이며, 분무경은 분무 노즐을 통해 뿌리에 미세한 입자로 양액을 분사하는 방식이다. 두 가지 방식 모두 작물 뿌리에 필요한 양·수분, 산소를 효과적으로 공급할 수 있으며, 배지가 없어 근권 환경의 완충능은 낮지만 근권의 모니터링 및 관리가 용이한 장점이 있다.

온도는 작물의 다양한 대사작용에 영향을 주는 중요한 환경 요인 중 하나로 작물의 생육 적온에 맞춰 시설 내부 온도를 유지하는 것은 매우 중요하지만, 시설 및 에너지 비용 문제가 수반된다(Lee and Kim 2011). 상추는 서아시아 및 지중해 연안이 원산인 호냉성 채소로, 생육 적온이 15 – 25°C이며(Zhao et al. 2022), 고온 조건에서는 잎의 생육 저하 및 조기 추대를 유발할 수 있다(Fukuda et al. 2009). 상추의 생육 최저 한계온도는 5°C 내외로 그 이하에서는 생육 지연과 냉해 피해가 발생할 수 있다. 우리나라 상추 재배 시설은 단동 중심으로 난방과 보온 설비가 잘 갖춰져 있지 않으며, 설비비와 난방비 등 경제성을 고려해야 간 최저 온도를 약 5 – 10°C 수준으로 유지한다. 이러한 시설 내 저온은 동화산물 전류 효율 저하, 증산량 감소, 엽면적 감소 등 지상부의 생육과 수량, 품질 저하를 유발한다.

작물의 뿌리는 물과 무기양분 흡수의 중심 기관으로, 적절한 뿌리 발달은 지상부 생육과 작물 수량 확보에 필수적이며(Leskovar and Stoffella 1995), 뿌리의 크기, 형태, 구조는 줄기의 상대적 크기와 생장률과도 밀접히 연계된다(Drew and Stolzy 1991). 이때 근권 온도는 뿌리 기능을 결정하는 핵심 요인 중 하나이며, 뿌리의 세포막 유동성·수분 및 이온 이동·대사활성·호흡·호르몬 신호전달 등 광범위한 생리 작용을 조절한다. 근권 온도가 낮아지면 막 유동성 및 원형질막 투과성이 감소하여 NO_3^-, K^+, Ca^{2+} 등의 흡수가 제한되고, ATP 생성 감소와 뿌리 신장 속도 저하, 시토키닌 합성 및 지상부 이동 감소가 발생하여 결국 잎 노화 촉진과 엽면적 축소 등 지상부 생육 저하로 이어진다(Hood and Mills 1994; Yong et al. 2010; Marschner 2012). 반면 근권 난방은 이러한 저온 저해 요인을 완화하여 뿌리 조직의 생장과 이온 능동수송·호흡 활성·시토키닌 및 지베렐린 신호를 강화함으로써 지상부 생육과 광합성 생산성을 향상시키는 것으로 보고되었다(Kawasaki et al. 2014, Xia et al. 2021).

상추의 최적 근권 온도(Root-zone temperature, RZT)는 18 – 25°C 범위로 알려져 있으며, 이 온도를 벗어나면 뿌리의 생육 및 활력이 저하되고, 양수분 흡수능력도 감소할 수 있다. 이전 연구에서도 수경재배시 냉각 또는 가온 처리된 양액을 공급하거나 근권 주변에 냉난방 관을 설치하여 온도 제어하는 방식을 통해 지상부 고온 또는 저온으로 인한 작물의 비생물학적 스트레스를 보상하고 생육과 수량을 개선할 수 있음이 보고되었다(Kawasaki et al. 2014; Kwack et al. 2014; Lee et al. 2022). 일부 순수수경 재배 연구에서 저온기 양액 가온으로 지상부 생육을 개선한 연구가 보고되었는데, 저온기 deep water culture(DWC)

방식으로 baby leaf 상추를 재배한 경우 온실 내부 기온이 평균 14.3°C였을 때 양액 온도를 22°C로 설정한 결과 상추의 지상부 생체중과 건물중이 유의미하게 증가하였으며(Hooks et al. 2022), NFT 와 constant flood table 방식으로 결구상추를 재배했을 때 내부 기온이 평균 13.7°C일 때 양액 온도를 18.8°C로 유지한 처리구에서 무처리(13.2°C)에 비해 지상부 생체중이 통계적으로 유의하게 증가하였다(Miller et al. 2020). 인공광을 활용한 수직농장 내에서 갯방풍 묘를 deep flow technique 방식으로 재배하며 근권 온도 3조건(15, 20, 25°C)과 양액 폭기(aeration) 여부를 조합하여 실험한 결과 근권온도를 25°C로 하고 양액을 폭기 했을 때 가장 유의한 지상부 생체중, 건물중을 보였다(Yeom and Oh 2023). 이러한 선행 연구는 저온기 양액 가온 기술이 엽채류의 생육 및 수량 개선에 긍정적 효과를 줄 수 있음을 시사한다.

그러나 기존 연구는 주로 단일 난방 온도 처리와 지상부 생육 또는 수량의 변화에 초점을 두고 있어, 난방 온도 수준에 따른 지상부 생육 반응 및 뿌리 발달을 추가적으로 검토할 필요가 있다. 따라서 본 연구는 저온기 NFT와 분무경 방식으로 상추를 재배하면서 난방 온도를 세분화하여 단계별(20, 25, 30°C)로 조절하고, 근권 온도 – 뿌리 발달 – 지상부 생육 및 수량 간의 연계성을 통합적으로 평가하여 저온기 재배시스템별 적정 근권 온도를 제시하고자 하였다.

재료 및 방법

재배환경 및 실험 재료

본 실험은 경상남도 함안군에 위치한 국립원예특작과학원 시설원예연구소 내 유리온실에서 2025년 1월부터 3월까지 수행하였다. 야간 온도 유지를 위해 난방 설정온도는 10°C로 유지했으며, 보온 커튼은 일몰 전 40분부터 일출 후 60분까지 닫히도록 설정하였다. 실험 재료는 결구상추 품종 중 국내 소비량이 많은 ‘Caipira(Enza Zaden, Enkhuizen, the Netherlands)’, ‘Volare(Enza Zaden, Enkhuizen, the Netherlands)’, ‘Isabel(Enza Zaden, Enkhuizen, the Netherlands)’을 선정하였다. 2025년 1월 세 품종의 종자를 각 셀의 크기가 25 × 25 × 40mm(가로 × 세로 × 높이)인 200공 파종 암면(Grodan AO Plug, Roermond, the Netherlands)에 파종하였다. 파종 4주 뒤 지상부 생육이 균일한 실생묘를 NFT 베드(재식밀도 35주·m^{-2}) 와 분무경 베드(재식밀도 40주·m^{-2})에 정식하였다.

양액 조성 및 급액 조건

공급 양액의 조성은 네덜란드 PBG 엽채류 양액 조성을 따랐으며 양액 농도는 EC 1.7dS·m^{-1}, pH 5.5로 공급하였다. 양액은 재배기간 동안 폐기 없이 순환하며 재사용하였고 순환탱크 내 양액이 일정량 이하로 떨어지는 경우 표준양액(EC 1.7dS·m^{-1}, pH 5.5)을 보충하였다. 급액 주기 및 시간은 재배 방식과 주·야간에 따라 다르게 설정하였다. NFT 방식에서는 주간(07:00 – 18:00)에는 5분 주기 내 2분, 야간(19:00 – 06:00)에는 5분 주기 내 1분 급액하였고, 분무경 방식에서는 주간에는 5분 주기 내 1분, 야간에는 5분 주기 내 10초로 급액하였다.

양액 가온 방식 및 조건

양액 가온은 3kW 히터봉(KM-PD-T13K, DKHEATER, Korea)을 순환 양액 탱크 내부 바닥에 1개씩 수평으로 설치하여 가동하였다. 가온 설정 온도는 20, 25, 30°C로 하였으며, 순환 탱크 내에서 양액 온도가 설정 온도만큼 충분히 가열되는 것을 확인하였다. 순환 탱크 내 양액 온도와 베드 내부 근권 온도를 측정하기 위해 수온 측정용 데이터로거(HOBO, MX2021, Onset, MA, USA)를 처리구당 2개씩 설치하여 10분 간격으로 온도 데이터를 수집한 뒤, 평균값을 사용하였다. 온도 처리구는 근권 난방 방식(Nutrient Solution Heating, NSH) 방식과 설정 온도를 기준으로 NSH20, NSH25, NSH30으로 명명하였다.

생육조사

정식 후 14일과 28일에 처리당 3반복, 반복당 3개체씩 총 9개체(n = 9)를 무작위로 선발하여 식물체별로 엽장(cm), 엽폭(cm), 엽수, 엽록소함량(SPAD), 엽면적(cm^2), 지상부 생체중(g)·건물중(g), 근권 생체중(g)·건물중(g)을 측정하였다. 엽장과 엽폭은 가장 큰 잎을 대표엽으로 선정해 각각 가장 긴 길이와 넓은 폭을 측정하였다. 엽록소 함량은 엽록소 측정기(SPAD-502, Konica Minolta Inc., Tokyo, Japan)를 이용해 측정했으며, 엽면적은 포기에서 분리한 잎의 면적을 엽면적 측정기(LI-3000, LI-COR, Lincoln, NE, USA)에 넣어 측정하였다. 근권은 파종 및 정식 베드에 작물 고정을 위해 사용했던 암면을 제거한 뒤 뿌리 형태 분석 및 생체중 측정을 수행하였다. 각 처리에 따른 뿌리 발달 정도를 비교하기 위해, 정식 뒤 7, 14일에 근권을 채취하여 스캐너(Expression 12000XL professional scanner, Epson America Inc., Los Alamitos, CA, USA) 로 취득한 이미지를 WinRhizo Pro 2020 뿌리 형태 분석 프로그램(Regent Instruments Inc., Sainte-Foy, QC, Canada)을 이용하여 처리별로 총 근장(cm), 평균 근경(mm), 근단 수 등을 분석하였다. 지상부와 근권 건물중은 70°C에서 72시간 이상 열풍 건조 방식으로 더 이상 무게변화가 없을 때까지 충분히 건조한 뒤 측정하였다.

통계 분석

데이터 전처리는 Microsoft Excel(Microsoft Office Professional Plus 2016, Microsoft Corp., Redmond, WA, USA)을 이용하였으며, 통계 분석은 RStudio(version 4.0.2; R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria)로 *agricolae* 패키지를 사용해 실시하였다. 양액 가온이 뿌리 발달에 미치는 독립적인 효과를 분석하기 위해 재배중(14 DAT), 수확일(28DAT)에 각 재배 시스템 및 품종별로 가온 온도(4수준)를 요인으로 일원분산분석(One-way ANOVA)을 수행하였다. 평균간 차이가 유의할 경우 덩컨의 다중검정(Duncan's multiple range test)을 이용해 5% 유의수준에서 사후검정을 수행하였다. 수확일(28 DAT) 지상부와 지하부의 생육 지표를 분석하기 위해 재배 시스템(2요인), 가온 온도(4요인), 품종(3요인)을 고정요인으로 하여 삼원분산분석(Three-way ANOVA)을 실시하여, 무작위 추출된 9개체를 독립 표본으로 요인 간 주효과와 상호작용을 검정하였다. 다수의 처리 수준을 비교할 때 유의적 차이를 명확히 그룹화하여 비교하기 위해, 각 주요인 및 상호작용의 유의성이 인정되는 경우($p < 0.05$)에 한하여 Duncan의 다중범위검정(DMRT)을 통해 평균 간 비교를 수행하였다.

결과 및 고찰

저온기 양액 가온 설정 온도에 따른 근권 환경 반응 및 재배 시스템 간 열 보존 특성 비교

엽채류 순수수경 방식은 배지의 완충능이 부재하므로, 급액의 온도가 근권 환경에 직접적인 영향을 미친다. 시험 온실 내부의 일일 최저, 평균, 최고 온도는 각각 9.8, 14.9, 25.4°C였다(Table 1). NFT 방식의 무처리구(양액 무가온)의 근권 온도는 최저 10.2°C, 평균 15.1°C, 최고 22.3°C를 나타낸 반면, 분무경 방식의 무처리구 근권 온도는 최저 10.2°C, 평균 13.2°C, 최고 17.7°C로(Table 2), NFT 방식에 비해 낮은 근권 온도를 보였다. 이는 분무경 베드가 스티로폼 소재의 폐쇄형 구조로 설계되어 있어, NFT 방식에 비해 단열 성능이 높아 외부로부터의 광과 열 투과를 효과적으로 차단했기 때문으로 생각된다. 실험 기간 중 온실 내부와 대조구의 근권 온도 변화를 비교한 결과, 일출 후 온실 내부의 온도가 증가함에 따라 근권 온도도 증가하는 경향을 보였으며, 분무경 방식의 대조구 베드에서 NFT 방식의 대조구 베드에 비해 온도 변화 폭이 더 작게 나타났다(Fig. 1).

NFT 방식에서 순환 탱크 내 양액의 평균 온도는 15.2°C로, 온실 내부 평균 온도와 유사했다(Table 1). 가온 처리를 한 경우 순환 탱크 내 양액의 평균 온도는 NSH20에서 20.5°C, NSH25에서 25.5°C, NSH30에서 29.2°C로 설정 온도가 안정적으로 유지되었다(Table 1). 근권 평균 온도는 NSH20, NSH25, NSH30에서 각각 18.5, 21.7, 24.1°C로, 양액 온도 설정이 상승할수록 근권 온도도 선형적으로 증가하는 경향을 보였다(Table 1). NSH30에서 순환 탱크 내 최고 온도가 36.7°C에 달하였으나,

실제 근권 온도는 최고 28.5°C, 평균 24.1°C로 작물 생육에 적합한 범위를 벗어나지 않았다. 순환 탱크 내 양액 온도는 양액 가온 여부와 관계없이 온실 내부 온도 변화와 양액의 공급·회수에 따라 일정하게 유지되지 않았다. 야간에 설정 온도보다 양액 온도가 낮게 나오는 경우는 양액이 베드로 공급될 때 공급 배관과 베드 표면 등에서의 열 손실 등에 기인한 것으로 생각된다. 반대로 주간에 설정 온도보다 양액 온도가 높게 나오는 경우는 온실 내부의 광·온도 환경으로 회수 양액의 열 흡수와 PE재질인 순환 탱크의 낮은 단열성 등에 기인한 것으로 생각된다. 일중 근권 온도의 변동 폭(최고 – 최저)은 무처리구에서 12.1°C였으며, NSH20·NSH25·NSH30에서는 각각 11.4, 13.7, 16.0°C로 나타났다. 양액의 가온 설정 온도가 높아질수록 근권 온도 변동폭도 다소 증가하는 경향을 보였다(Table 1 and Fig. 1).

분무경 방식에서 순환 탱크 내 양액의 평균 온도는 무처리구에서 14.1°C로, NFT 방식과 마찬가지로 온실 내부 평균 온도와 유사하였다(Table 2). 양액 가온 처리 시 순환 탱크 내 평균 온도는 NSH20, NSH25, NSH30에서 각각 20.4, 25.7, 29.6°C로 설정 온도가 안정적으로 유지되었다(Table 2). 근권 평균 온도는 NSH20, NSH25, NSH30에서 각각 17.7, 21.0, 24.5°C로, 양

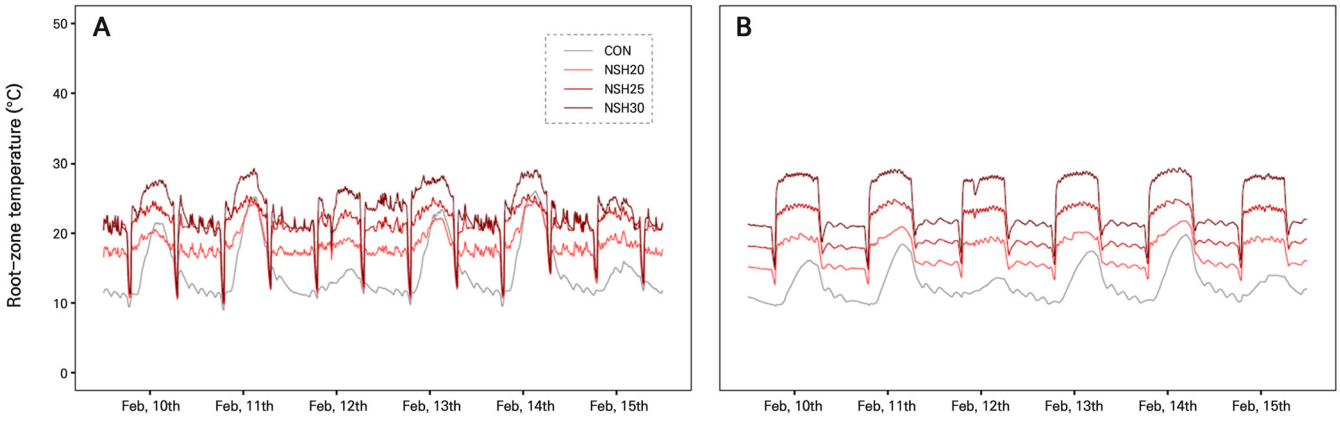


Fig. 1. RZT fluctuations of NFT and aeroponic systems under three different NSH temperatures from Feb. 10th to Feb. 15th (A, NFT; B, Aeroponics).

Table 1. Recirculating tank temperatures and RZT levels in the NFT beds at different nutrient solution heating temperatures

NFT	Air temperature (°C)	Recirculating Tank				Root zone			
		CON (°C)	NSH[z]20 (°C)	NSH25 (°C)	NSH30 (°C)	CON (°C)	NSH20 (°C)	NSH25 (°C)	NSH30 (°C)
T_{min}	9.8 ± 1.7	11.4 ± 1.3	18.9 ± 0.7	23.5 ± 1.2	25.5 ± 2.1	10.2 ± 1.6	11.2 ± 1.7	11.6 ± 1.7	12.5 ± 2.0
T_{mean}	14.9 ± 1.8	15.2 ± 1.5	20.5 ± 0.5	25.5 ± 0.3	29.2 ± 1.1	15.1 ± 1.5	18.5 ± 0.9	21.7 ± 0.7	24.1 ± 1.6
T_{max}	25.4 ± 5.3	21.9 ± 3.8	24.6 ± 1.8	28.8 ± 2.4	36.7 ± 2.5	22.3 ± 3.8	22.6 ± 2.8	25.3 ± 1.6	28.5 ± 1.1

[z]NSH: Nutrient Solution Heating.

Table 2. Recirculating tank and RZT levels in the aeroponic beds at different nutrient solution heating temperatures

Aeroponics	Air temperature (°C)	Recirculating Tank				Root zone			
		CON (°C)	NSH[z]20 (°C)	NSH25 (°C)	NSH30 (°C)	CON (°C)	NSH20 (°C)	NSH25 (°C)	NSH30 (°C)
T_{min}	9.8 ± 1.7	10.8 ± 1.6	19.2 ± 0.1	24.1 ± 0.5	28.6 ± 1.0	10.2 ± 1.6	13.3 ± 1.2	15.3 ± 1.3	16.3 ± 1.4
T_{mean}	14.9 ± 1.8	14.1 ± 1.7	20.4 ± 0.8	25.7 ± 0.4	29.6 ± 0.1	13.2 ± 1.6	17.7 ± 0.8	21.0 ± 0.6	24.5 ± 0.5
T_{max}	25.4 ± 5.3	17.8 ± 2.6	22.5 ± 3.0	28.6 ± 1.9	30.2 ± 0.1	17.7 ± 2.7	21.0 ± 1.4	24.7 ± 0.7	29.0 ± 0.4

[z]NSH: Nutrient Solution Heating.

액 가온 수준이 상승할수록 근권 온도도 단계적으로 증가하였다(Table 2). 저온기 바질 분무경 재배 시 양액을 가온한 실험에서도 유사한 순환 탱크 내 양액과 근권 온도 변화를 보였다(Kim et al. 2025). 근권 일중 온도 변동폭(최고 – 최저)은 무처리구에서 7.5°C였으며, NSH20·NSH25·NSH30에서는 각각 7.7, 9.4, 12.7°C로 나타나, 분무경 방식에서도 NFT 방식과 동일하게 가온 온도가 높아질수록 변동폭이 증가하는 경향을 보였다(Table 2 and Fig. 1). 또한 동일 설정 온도 조건에서 순환 탱크 내부 양액의 일중 온도 변동폭은 분무경 방식이 NFT 방식보다 작았다. 이러한 경향은 분무경 베드가 폐쇄 구조와 단열성이 높은 소재로 설계되어, 가온 양액이 공급·분무·회수되는 과정에서 NFT 방식 대비 열 손실이 적게 발생했기 때문으로 판단된다. 이를 종합하면 동일한 설정 온도 유지 시 분무경 방식이 NFT 방식보다 열 보존 효율이 높으며, 결과적으로 저온기 양액 가온에 필요한 전력 소모량은 NFT 방식이 상대적으로 클 것으로 예상된다.

저온기 재배 방식별 양액 가온 처리에 따른 뿌리 발달 촉진 효과 비교

정식 후 생육 초기(7, 14 DAT)에 근권 생육을 비교한 결과 재배 방식과 품종, 처리 온도에 따라 큰 형태적 차이를 보였다(Supplementary Figs. S2 – S7). 재배 방식과 품종에 관계없이 양액 가온 처리시 무처리구 대비 뿌리 발달이 유의하게 촉진되었으며, NFT 방식이 분무경 방식 보다 활발한 뿌리 생육을 보였다(Fig. 2). 양액 가온에 따른 뿌리 생육 증진 효과는 'Volare'와 'Isabel' 품종에서 높았으며, 특히 분무경 방식은 무처리구에서 뿌리 생육이 제한적이었으나, 양액 가온 처리 시 뿌리 발달 개선 폭이 가장 컸다(Fig. 2). 양액 가온으로 근권 온도가 상승함에 따라 총 근장과 근단 수가 유의하게 증가한 반면, 평균 근경은 유의하게 감소하였다(Fig. 2). 이는 저온기 양액 가온을 통한 근권 온도 증가가 단순한 뿌리 신장뿐 아니라 세근과 측근 등 뿌리의 분지를 촉진하였음을 의미한다.

근권 온도는 뿌리 형태·생장·양수분 흡수·광합성 동화산물 전류 등을 결정하는 핵심 요인으로 알려져 있으며(Udagawa et al. 1991; Klock et al. 1997; Tan et al. 2002; Yamori et al. 2022; Levine et al. 2023), 최저 온도에서 최적 범위까지는 선형적으로 생장을 촉진하지만 그 이상에서는 급격히 억제되는 것으로 보고된다(Arkin and Taylor 1981). 근권 온도에 대한 기존 연구 결과들은 Levine et al.(2023)이 상추 순수수경 재배 시 근권 온도를 저온(15°C) · 적온(25°C) · 고온(35°C)으로 처리한 결과 양 온도의 끝단(15°C · 35°C)에서 모두 뿌리 및 지상부 생육이 감소했다고 보고한 연구와도 일치한다. Tan et al.(2002)이 고온기 상추 재배 시 근권 온도를 20°C로 냉각했을 때 상추의 총 근장과 근단 수가 증가하고 평균 근경이 얇아진다고 보고하였

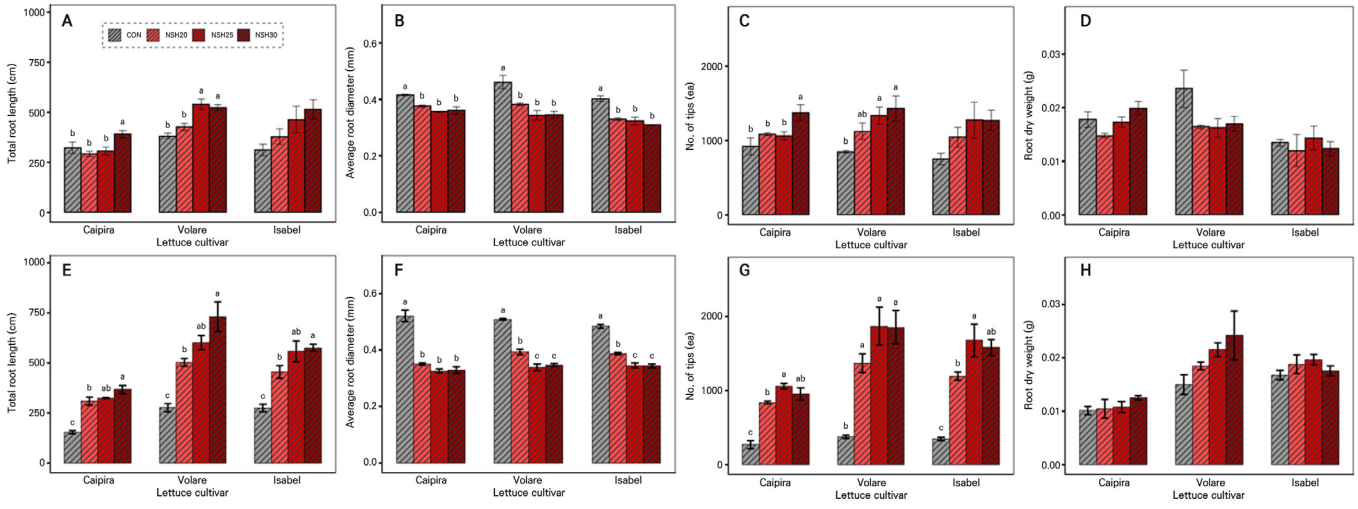


Fig. 2. Comparison of the total root length, average root diameter, number of root tips, and root dry weight of three lettuce cultivars cultivated hydroponically as affected by different cultivation systems and different NSH temperatures (A-D, NFT; E-H, aeroponics) at 14 DAT.

는데, 본 연구에서도 저온기 양액 가온을 통한 근권 난방 시 동일한 형태적 반응이 나타나(Fig. 2 and Supplementary Fig. S1), '근권 온도의 최적 범위 접근'이 뿌리 생장을 결정한다는 점을 지지한다. 새로 형성된 세근은 단위 길이당 표면적이 넓어 양수분 흡수 효율이 극대화된다는 점을 고려할 때(Jeong et al. 2021), 저온기 양액 가온은 초기 뿌리 발달과 기능적 역량을 강화하여 근권에서 지상부로의 자원 공급을 원활하게 할 것으로 예상된다.

저온기 재배 방식별 양액 가온 처리에 따른 품종별 지상부 생육 및 수량 반응

저온기 환경에서 양액 가온은 재배 방식과 품종에 관계없이 지상부 생육을 향상시켰으며, 가온 설정 온도가 높을수록 엽장, 엽폭, 엽수, 엽면적, 생체중 및 건물중이 통계적으로 유의하게 증가하였다(Figs. 3 and 4). 저온기 재배 방식, 양액 가온 온도,

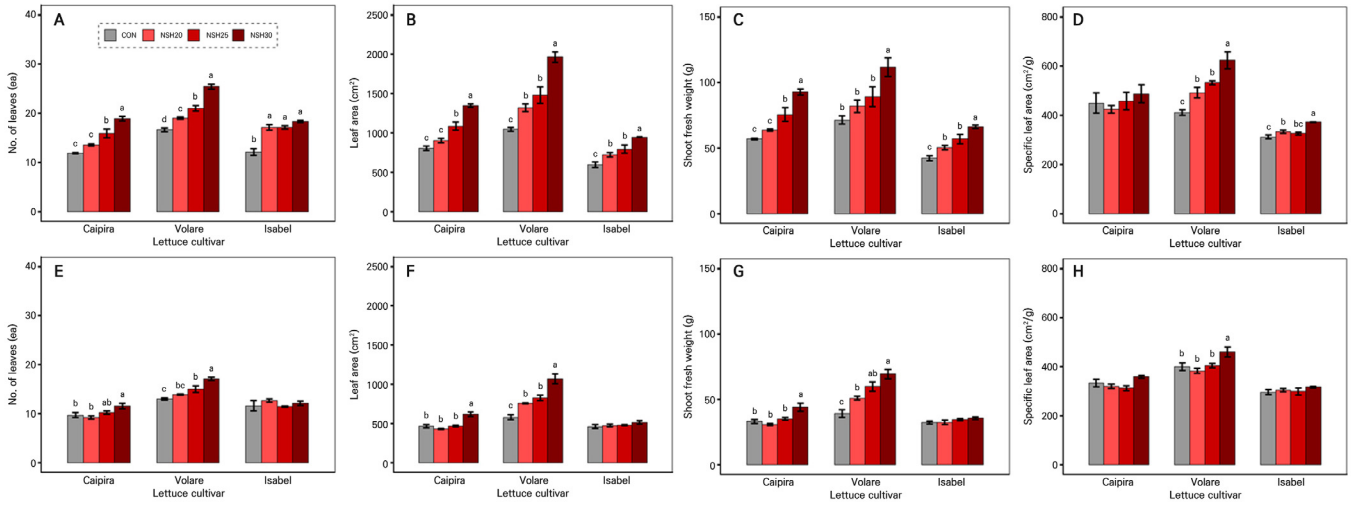


Fig. 3. Comparison of the leaf number, leaf area, shoot fresh weight and specific leaf area as affected by different cultivation systems, NSH temperatures, and cultivars (A-D, NFT; E-H, aeroponics) at 28 DAT.

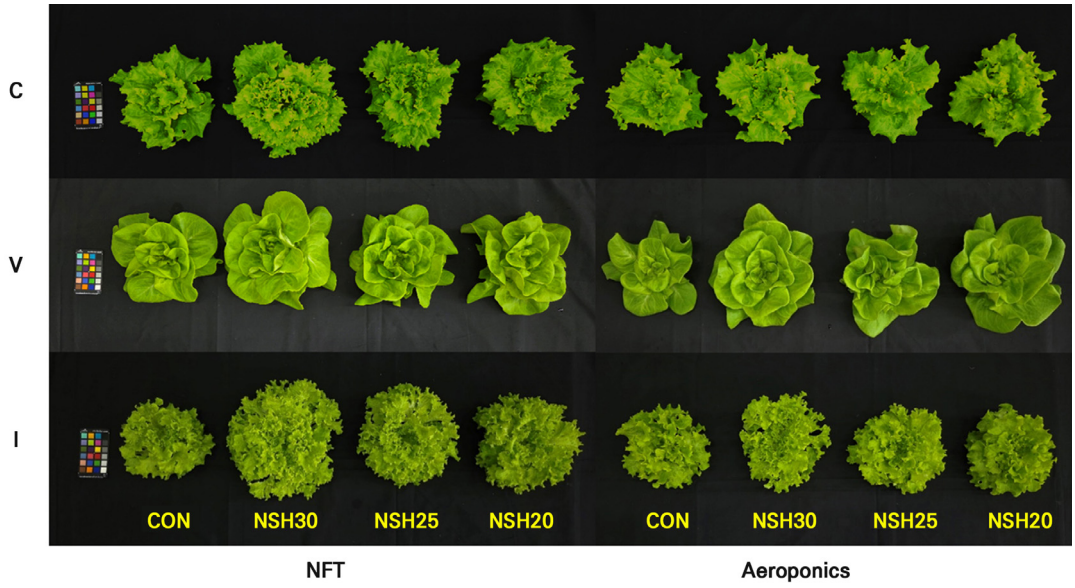


Fig. 4. Lettuce growth characteristics and yield at harvest as affected by different cultivation systems, cultivars and NSH temperatures (C, 'Caipira'; V, 'Volare'; I, 'Isabel') at 28 DAT.

품종이 지상부 생육에 미치는 영향을 분석한 결과(삼원분산분석), 저온기에는 NFT 방식이 분무경 방식에 비해 엽장, 엽폭, 엽수, 엽면적, 지상부 생체중·건물중이 높았던 반면, 근권 생체중과 건물중은 분무경 방식에서 유의적으로 높았다(Table 3). NFT 방식과 분무경 방식은 재배 시스템 특성상 각각 지상부와 근권 생육 촉진에 유리한 상반된 특성을 보였다. 이는 Li et al.(2018)이 NFT, 분무경, 배지경 방식을 적용해 상추를 수경재배한 결과, 근권 생육은 분무경에서 지상부 생육은 NFT에서 우수했던 결과와 일치하였다.

상추 등 엽채류 재배 시에는 NFT, 분무경, 담액경, 배지경 등 다양한 수경재배 시스템을 적용할 수 있으며, 재배 시스템마다 상이한 생육 특성을 가진다. NFT와 분무경 방식의 생육 차이는 각각의 시스템이 가지는 근권 환경과 자원 배분 전략의 차이에 따라 설명이 가능하다. 분무경 방식은 높은 용존산소와 배지 저항의 부재로 뿌리 분지와 길이 생장이 활발한 특징을 가지며, 인위적인 급액 간격 조절을 통해 지상부/근권으로의 탄소 동화산물의 배분을 유동적으로 조절할 수 있는 특징을 지닌다(Tunio et al. 2022). 분무경 방식은 간헐적 분무 환경에서 뿌리가 양·수분을 탐색하고 흡수하기 위해 더 많은 동화산물과 에너지를 근권으로 할당하는 경향이 있는 반면, NFT 방식에서는 뿌리가 지속적으로 양액에 접촉되어 있어 용존산소 확보와 뿌리 호흡에는 불리하지만, 지상부로의 동화산물 배분이 분무경보다 유리한 것으로 생각된다.

양액 가온 온도별로 생육 중(14 DAT)과 수확기(28 DAT) 간의 비엽면적과 생체중 변화를 비교한 결과, 대부분 비엽면적이 증가하는 경향을 보였다(Figs. 5 and 6). 이는 양액 가온을 통한 근권 온도 증가 시 엽장 증가, 엽면적 증가 등 잎의 신장에도 긍정적인 영향을 끼치는 것을 의미한다. 생체중 또한 양액 가온 처리시 설정 온도가 높을수록 일정 기간 동안 생체중이 많이 증가하였다(Fig. 6). 저온기에는 동일 기간 동안 NFT 방식이 분무경 방식에 비해 지상부 생육이 우수했다. 이는 저온기 분무경 방식

Table 3. Effects of cultivation systems, cultivars and NSH temperatures on the growth characteristics and yield of lettuce at 28 DAT

Factors	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	No. of leaves	Chlorophyll contents	Leaf Area (cm^2)	Specific Leaf Weight ($g \cdot cm^{-2}$)	Specific Leaf Area ($cm^2 \cdot g^{-1}$)	Shoot		Root	
								Fresh weight (g)	Dry weight (g)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
[System]	*[z]	*	***	ns	**	**	**	**	**	**	*
NFT	13.7 a[y]	11.5 a	17.3 a	23.6	1084.8 a	0.0024 b	435.2 a	71.6 a	2.46 a	7.64 b	0.234 b
Aeroponics	11.9 b	11.3 b	12.3 b	24.8	594.7 b	0.0029 a	349.3 b	41.4 b	1.68 b	8.94 a	0.281 a
[Cultivar]	***	**	***	***	***	***	**	**	*	*	**
Caipira	12.4 b	13.2 a	12.6 b	23.3 b	765.3 b	0.0027 b	393.2 b	54.0 b	1.90 b	7.14 b	0.226 c
Volare	14.8 a	12.0 b	17.6 a	30.9 a	1130.9 a	0.0022 c	463.4 a	71.7 a	2.38 a	9.20 a	0.289 a
Isabel	11.2 c	10.6 c	14.1 b	18.4 c	623.0 b	0.0032 a	320.1 c	43.8 b	1.93 b	8.53 a	0.258 b
[Treatment]	***	ns	***	**	***	*	*	***	***	***	***
CON	11.8 b	12.0	12.5 c	26.4	658.5 b	0.0028	367.2	45.8 b	1.78 b	9.76 a	0.293 a
NSH20	12.9 ab	11.5	14.2 bc	24.1	768.0 b	0.0024	436.9	51.7 b	1.99 b	7.61 b	0.246 b
NSH25	12.7 ab	11.9	15.1 ab	22.9	855.3 ab	0.0027	388.8	58.6 ab	2.14 ab	7.50 b	0.238 b
NSH30	13.8 a	12.2	17.2 a	23.3	1077.2 a	0.0028	376.1	70.0 a	2.37 a	8.29 b	0.255 b
[System] × [Cultivar]	*	**	ns	ns	**	**	***	*	ns	ns	ns
[System] × [Treatment]	ns	ns	***	ns	***	**	*	**	ns	*	ns
[Cultivar] × [Treatment]	ns	**	***	***	***	ns	**	***	ns	**	***
[System] × [Cultivar] × [Treatment]	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*

[z]*, **, and *** indicate significance levels at $p < 0.05$, $p < 0.01$, and $p < 0.001$, respectively; ns denotes no significance.

[y]Mean separation within columns according to Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

특성상 간헐적 양액 공급을 통해 생육 초기 뿌리 발달을 위해 NFT 방식 대비 더 많은 동화산물과 에너지를 근권으로 분배하기 때문으로 생각된다. 저온기 순수수경 재배시 양액 가온을 통해 근권 온도를 향상시키면, 뿌리 발달 촉진과 함께 지상부 생육 기간 단축, 단위 기간당 생산량 증대가 가능할 것으로 예상된다.

본 연구에서 근권 온도 상승은 저온기임에도 불구하고 잎의 신장과 비엽면적 증가를 유도하여(Figs. 5 and 6), 지상부 생육 반응을 적온에서 재배된 식물의 표현형과 유사하게 유도하였다. 이러한 반응은 양액 가온을 통한 근권 온도 상승이 뿌리 대사 활동 및 양·수분 흡수를 증가시킬 뿐 아니라(Awal et al. 2003; Bi et al. 2022), 생장점의 온도에 영향을 주고(McMaster et al. 2003), 광합성 능력을 촉진시켰기 때문으로 생각된다(Ziska 1998). 더 나아가 근권 온도 상승이 사이토키닌, 지베렐린, 옥신 등의 뿌리 – 지상부 이동성 호르몬의 생합성 및 이동을 촉진했을 가능성도 배제할 수 없다. 특히 사이토키닌과 지베렐린은 잎 확장, 세포 분열 및 동화산물 유입을 촉진하는 것으로 알려져 있어(Aloni et al. 2006; Davière and Achard 2013), 근권 온도 상승 시 나타난 빠른 지상부 형성과 생체중 증가에 기여했을 수 있다. 다만 본 연구에서는 호르몬 함량과 이동을 직접 측정하지 않았으므로, 이러한 잠재적 기작은 후속 연구를 통해 검증할 필요가 있다.

본 연구 결과 광합성 및 생육 속도가 늦어져 수확일수가 길어지는 저온기에는 박막경 방식이 분무경 시스템보다 생육과 수량이 우수하였다. 이는 간헐적으로 양액을 공급하는 분무경 시스템 특성상 초기 뿌리 발달과 양수분 흡수를 위해 근권으로 분배되는 동화산물과 에너지가 많기 때문으로 생각된다. 연중 평균온도가 낮은 지역에서는 박막경 재배가 유리할 것으로 생각되며, 순수수경 재배시 양액 가온 온도를 30°C로 설정할 경우, 열 손실을 감안할 때 실제 근권 온도가 상추 생육 적온인 25°C 내외로 유지되면서 뿌리 발달과 지상부 수량을 극대화할 수 있는 가장 효과적인 전략으로 확인되었다.

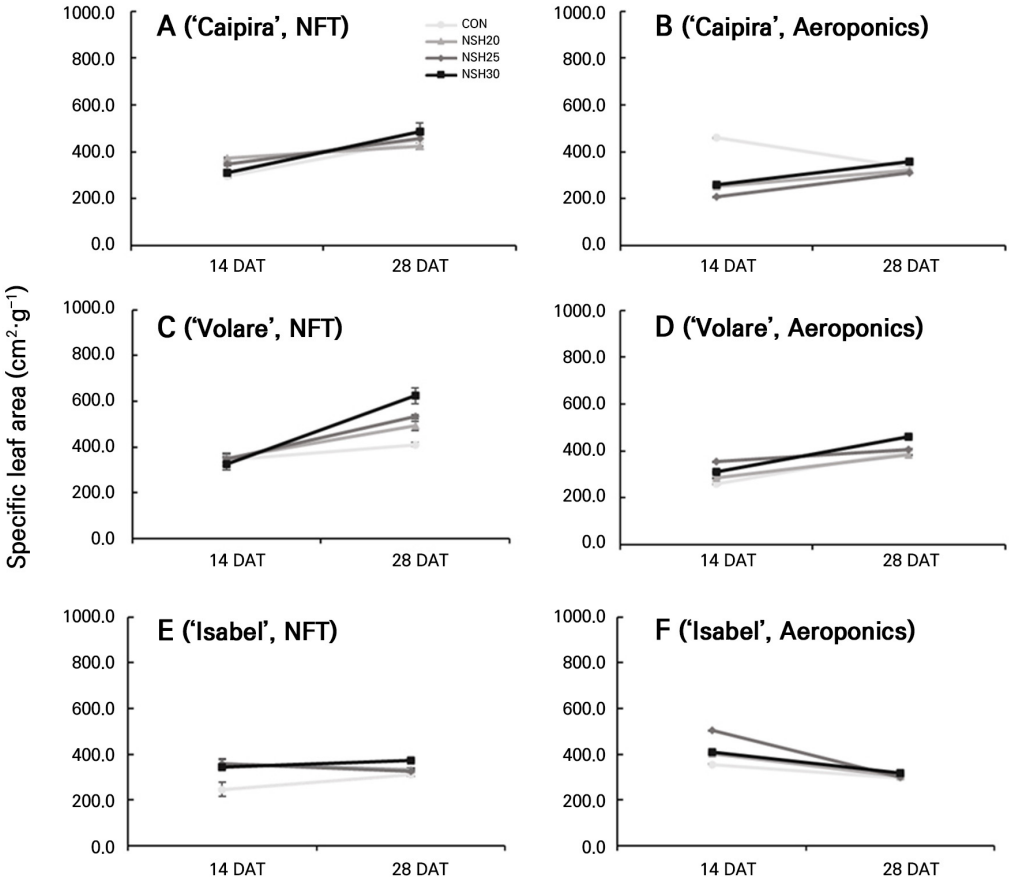


Fig. 5. Effects of different cultivation systems and NSH temperatures on the specific leaf area at 14 and 28 DAT.

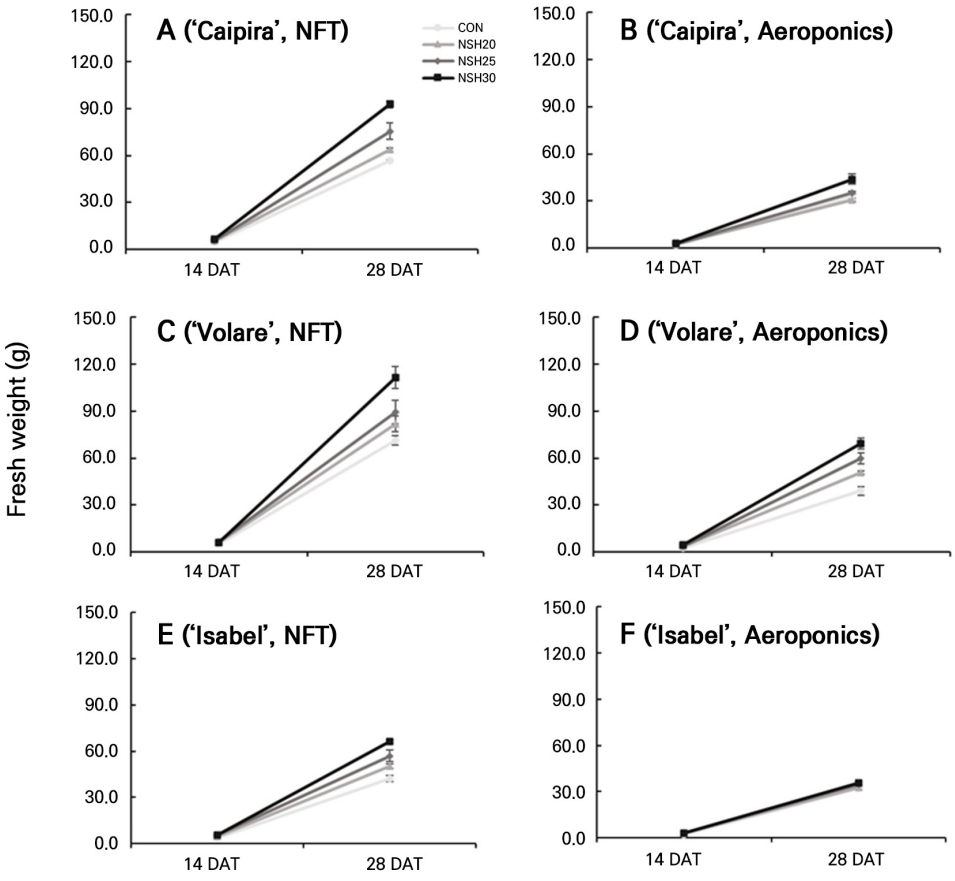


Fig. 6. Effects of different cultivation systems and NSH temperatures on the shoot fresh weights at 14 and 28 DAT.

결 론

본 연구는 저온기 시설 내 NFT와 분무경 방식을 이용한 상추 순수수경 재배 시, 양액 가온이 근권 온도, 뿌리 형태 발달, 지상부 생육 및 수량에 미치는 영향을 분석하였다. 분무경은 NFT 방식에 비해 근권 온도 변화 폭이 작고 베드 자재의 단열성이 높아 열 손실이 적어, 동일한 가온 효과를 위해 더 적은 전력 소비가 예상된다. 양액 가온 시 생육 초기부터 유의하게 뿌리의 길이 생장과 새로운 뿌리의 발달이 촉진되었다. 이는 양·수분 흡수 능력을 향상시켜 지상부 엽장, 엽폭, 지상부 생체중·건물중 등 생육 개선 및 수량 증가로 이어졌다. 저온기 양액 가온 온도를 30°C로 설정할 경우, 열 손실을 감안한 실제 근권 온도가 상추 생육 적온인 25°C 내외로 유지되면서 뿌리 발달과 지상부 수량을 극대화할 수 있는 가장 효과적인 전략으로 확인되었다. 이러한 근권 온도 제어는 지상부 온도를 직접 제어하는 것에 비해 적은 에너지 비용으로도 지상부 생육을 유의하게 개선하고 증수할 수 있는 전략으로 판단된다. 특히 NFT와 분무경 등 서로 다른 수경재배 방식에서 양액 가온 효과가 상이하게 나타난다는 점은, 향후 에너지 비용과 재배 목적을 고려한 재배 방식 선택 및 근권 온도 제어 전략 수립 시 중요한 기초 자료가 될 수 있다. 본 연구 결과는 향후 경제성을 고려한 수경재배 방식의 선택 및 양액 가온을 통한 근권 온도 제어 전략 수립에 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

초 록

본 연구는 저온기 순수수경 재배 시스템인 박막경(NFT)과 분무경(aeroponics)에서 양액 가온이 상추(*Lactuca sativa* L.)의 근권 온도, 뿌리 발달, 지상부 생육 및 수확량에 미치는 영향을 구명하였다. 유리온실에서 세가지 품종('카이피라', '볼라레', '이자벨')을 대상으로 양액 온도를 20, 25, 30°C로 가온하였다. 양액 가온은 NFT와 분무경 시스템 모두에서 근권 온도를 효과적으로 상승시켰다. 그러나 분무경 시스템은 스티로폼 단열 및 밀폐 구조 덕분에 NFT보다 더 높은 온도 안정성을 보였다. 가온 양액은 근장, 근단 수, 측근 발생 증가, 평균 근경 감소 등 양수분의 흡수와 이동에 유리한 형태로 뿌리를 유의미하게 발달시켰다. 엽면적, 생체중, 건물중 등 생육·수확 특성은 더 높은 근권 온도에서 개선되었다. NFT는 더 높은 지상부 바이오매스와 수확량을 보인 반면, 분무경은 더 우수한 뿌리 발달과 근권부 바이오매스를 나타냈다. 처리 온도 중 NSH30이 NSH20과 NSH25보다 더 나은 생육과 수량을 보였다. 양액 가온 온도를 30°C로 설정하였음에도, 실제 근권 온도는 상추의 근권부와 지상부 생육에 적합한 약 25°C였다. 해당 연구 결과는 저온기 NFT와 분무경 시스템에서 상추 재배 시 양액 가온이 생산성을 향상시킬 수 있는 효과적인 전략이 될 수 있음을 시사한다.

추가 주요어 : 생물량, 수경재배, 박막경, 근권, 지상부–근권부 비율, 순수수경

Supplementary Information

The online version contains supplementary material available at https://doi.org/10.7235/HORT.20260024

References

Aloni E, Langhans M, Ullrich CI (2006) Role of cytokinin and auxin in shaping root architecture: balancing root growth and shoot development. Ann Bot 97:883-893. https://doi.org/10.1093/aob/mcl027

Arkin GF, Taylor HM, eds (1981) Modifying the root environment to reduce crop stress. ASAE Monograph 4. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI

Awal MA, Ikeda T, Itoh R (2003) The effect of soil temperature on source-sink economy in peanut (*Arachis hypogaea*). Environ Exp Bot 50:41-50. https://doi.org/10.1016/S0098-8472(02)00111-9

Bi X, Wang X, Zhang X (2022) Effects of different root zone heating methods on the growth and photosynthetic characteristics of cucumber. Horticulturae 8:1137. https://doi.org/10.3390/horticulturae8121137

Chowdhury M, Samarakoon UC, Altland JE (2024) Evaluation of hydroponic systems for organic lettuce production in controlled environment. Front Plant Sci 15:1401089. https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1401089

Davière JM, Achard P (2013) Gibberellin signaling in plants. Development 140:1147-1151. https://doi.org/10.1242/dev.087650

Drew MC, Stolzy LH (1991) Growth under oxygen stress. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U (eds) Plant roots: the hidden half. Marcel Dekker, New York, pp 331-350

Fukuda M, Matsuo S, Kikuchi K, Mitsuhashi W, Toyomasu T, Honda I (2009) The endogenous level of GA_1 is upregulated by high temperature during stem elongation in lettuce through *LsGA3ox1* expression. J Plant Physiol 166:2077-2084. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2009.06.003

Hood TM, Mills HA (1994) Root-zone temperature affects nutrient uptake and growth of snapdragon. J Plant Nutr 17:279-291. https://doi.org/10.1080/01904169409364727

Hooks T, Sun L, Kong Y, Masabni J, Niu G (2022) Effects of nutrient solution cooling in summer and heating in winter on the performance of baby leafy vegetables in deep-water hydroponic systems. Horticulturae 8:749. https://doi.org/10.3390/horticulturae8080749

Jeong HW, Lee HR, Kim JY, Kim GG, Na CI, Hwang SJ (2021) Assessment of growing media and fertigation for production of root pruning splice-grafted cucumber seedlings. Hortic Sci Technol 39:294-304. https://doi.org/10.7235/HORT.20210026

Kawasaki Y, Matsuo S, Kanayama Y, Kanahama K (2014) Effects of root-zone heating on root growth and activity, nutrient uptake, and fruit yield of tomato at low air temperature. J Jpn Soc Hortic Sci 83:295-301. https://doi.org/10.2503/jjshs1.MI-001

Kim SJ, Lim MY, Choi GL, Roh MY, Kim DP (2025) Comparison of root-zone temperature, growth and yield of arugula (*Eruca sativa* L), coriander (*Coriandrum sativum* L.), basil (*Ocimum basilicum* L.), and water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) cultivated with aeroponic system under different nutrient solution heating temperatures during low temperature season. J Bio-Env Control

34:237-248. https://doi.org/10.12791/KSBEC.2025.34.3.237

Klock KA, Taber HG, Graves WR (1997) Root respiration and phosphorus nutrition of tomato plants grown at a 36°C root-zone temperature. J Am Soc Hortic Sci 122:175-178. https://doi.org/10.21273/JASHS.122.2.175

Kwack Y, Kim DS, Chun C (2014) Root-zone cooling affects growth and development of paprika transplants grown in rockwool cubes. Hortic Environ Biotechnol 55:14-18. https://doi.org/10.1007/s13580-014-0117-3

Lee BK, Pham MD, Shin JW, Cui M, Lee HI, Myung JS, Na HY, Chun CH (2022) Photosynthetic changes and growth of paprika transplants as affected by root-zone cooling methods under high air temperature conditions after transplanting. Hortic Sci Technol 40:672-688. https://doi.org/10.7235/HORT.20220061

Lee HW, Kim YS (2011) Application of low pressure fogging system for commercial tomato greenhouse cooling. J Bio-Env Control 20:1-7

Leskovar DI, Stoffella PJ (1995) Vegetable seedling root systems: morphology, development, and importance. HortScience 30:1153-1159. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.30.6.1153

Levine CP, Hayashi S, Ohmori Y, Kusano M, Kobayashi M, Nishizawa T, Kurimoto I, Kawabata S, Yamori W (2023) Controlling root zone temperature improves plant growth and pigments in hydroponic lettuce. Ann Bot 132:455-466. https://doi.org/10.1093/aob/mcad127

Li Q, Li X, Tang B, Gu M (2018) Growth responses and root characteristics of lettuce grown in aeroponics, hydroponics, and substrate culture. Horticulturae 4:35. https://doi.org/10.3390/horticulturae4040035

Marschner P, ed (2012) Marschner's mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London

McMaster GS, Wilhelm WW, Palic DB, Porter JR, Jamieson PD (2003) Spring wheat leaf appearance and temperature: extending the paradigm? Ann Bot 91:697-705. https://doi.org/10.1093/aob/mcg074

Miller A, Langenhoven P, Nemali K (2020) Maximizing productivity of greenhouse-grown hydroponic lettuce during winter. HortScience 55:1963-1969. https://doi.org/10.21273/HORTSCI15351-20

Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs (MAFRA) (2024) The status of greenhouse and vegetable production. Sejong, Korea

Rajaseger G, Chan KL, Tan KY, Ramasamy S, Khin MC, Amaladoss A, Haribhai PK (2023) Hydroponics: current trends in sustainable crop production. Bioinformation 19:925-938. https://doi.org/10.6026/97320630019925

Tan LP, He J, Lee SK (2002) Effects of root-zone temperature on the root development and nutrient uptake of Lactuca sativa L. 'Panama' grown in an aeroponic system in the tropics. J Plant Nutr 25:297-314. https://doi.org/10.1081/PLN-100108837

Tunio MH, Gao J, Qureshi WA, Sheikh SA, Chen J, Chandio FA, Lakhiar IA, Solangi KA (2022) Effects of droplet size and spray interval on root-to-shoot ratio, photosynthesis efficiency, and nutritional quality of aeroponically grown butter head lettuce. Int J Agric and Biol Eng 15:79-88. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20221501.6725

Udagawa Y, Ito T, Gomi K (1991) Effects of root temperature on the absorption of water and mineral nutrients by strawberry plants 'Reiko' grown hydroponically. J Jpn Soc Hortic Sci 59:711-717. https://doi.org/10.2503/jjshs.59.711

Xia Z, Zhang G, Zhang S, Wang Q, Fu Y, Lu H (2021) Efficacy of root zone temperature increase in root and shoot development and hormone changes in different maize genotypes. Agriculture 11:477. https://doi.org/10.3390/agriculture11060477

Yamori N, Levine CP, Mattson NS, Yamori W (2022) Optimum root zone temperature of photosynthesis and plant growth depends on air temperature in lettuce plants. Plant Mol Biol 110:385-395. https://doi.org/10.1007/s11103-022-01249-w

Yeom MS, Oh MM (2023) Air and root zone temperature for growth of coastal glehnia seedlings. Hortic Sci Technol 42:177-187. https://doi.org/10.7235/HORT.20230017

Yong JW, Letham DS, Wong SC, Farquhar GD (2010) Effects of root restriction on growth and associated cytokinin levels in cotton (*Gossypium hirsutum*). Funct Plant Biol 37:974-984. https://doi.org/10.1071/FP10009

Zhao X, Sui X, Zhao L, Gao X, Wang J, Wen X, Li Y (2022) Morphological and physiological response mechanism of lettuce (*Lactuca sativa* L.) to consecutive heat stress. Sci Hortic 301:111112. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2022.111112

Ziska LH (1998) The influence of root zone temperature on photosynthetic acclimation to elevated carbon dioxide concentrations. Ann Bot 81:717-721. https://doi.org/10.1006/anbo.1998.0626