韓藥作誌(Korean J. Medicinal Crop Sci.) 34(5) : 387 – 396 (2026)
ISSN(Print) 1225-9306
ISSN(Online) 2288-0186
http://www.medicinalcrop.org
http://dx.doi.org/10.7783/KJMCS.2026.34.5.387

# 스마트팜 환경에서 분무경 및 토경 재배체계에 따른 쥐오줌풀(*Valeriana fauriei*)의 생육, 생리적 특성 및 valerenic acid 함량 비교

한양수[1#] · 김용일[2] · 전성훈[3] · 김용구[4#†]

# Comparison of Growth, Physiological Characteristics, and Valerenic Acid Content of *Valeriana fauriei* under Aeroponic and Soil Cultivation Systems in a Smart Farm

**Yangsoo Han[1#], Yong il Kim[2], Sung Hoon Jun[3], and Yong-Goo Kim[4#†]**

**Received:** 2026 September 30
**1st Revised:** 2026 October 07
**2nd Revised:** 2026 October 15
**3rd Revised:** 2026 October 19
**Accepted:** 2026 October 19
**Published:** 2026 October 30

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.

## ABSTRACT

**Background:** Data on the growth, biomass allocation, and valerenic acid content of *Valeriana fauriei* under controlled cultivation conditions remain limited. This study compared the growth and biochemical characteristics of plants grown using aeroponic and soil-based cultivation in a smart farm.

**Methods and Results:** Plants were cultivated for 12 weeks at approximately 150 μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$ PPFD. Aeroponically grown plants received Yamazaki nutrient solution, whereas soil-grown plants were cultivated in a commercial growing medium and irrigated with water. Within-system repeated-measures ANOVA revealed significant temporal effects on plant height and SPAD values in both systems, and on NDVI, MCARI1, PRI, and SIPI in the aeroponic system. Branch numbers were higher in aeroponically grown plants. Mean shoot dry weight was higher under aeroponic cultivation than under soil cultivation (9.3 vs. 5.3 g·plant$^{-1}$), whereas mean root dry weight (2.4 vs. 4.5 g·plant$^{-1}$) and the root-to-shoot ratio (0.24 vs. 0.95) were lower. Valerenic acid concentrations in pooled root samples were 3,627 ± 191 and 1,437 ± 55 μg·g$^{-1}$ DW under aeroponic and soil cultivation, respectively. Each system comprised a single cultivation unit; therefore, differences between systems were descriptive and were not statistically tested.

**Conclusions:** Aeroponic and soil cultivation showed contrasting patterns of biomass allocation and root valerenic acid concentration. Further studies using replicated cultivation units, comparable nutrient conditions, and independent biological samples are required.

***Key Words***: *Valeriana fauriei*, Smart Farm, Cultivation System, Biomass Allocation, Valerenic Acid

## 서 언

쥐오줌풀 (*Valeriana fauriei* Briq.)은 동아시아 지역에 분포하는 다년생 약용작물이다. 대한민국약전에는 쥐오줌풀 또는 기타 동속 근연식물의 뿌리와 뿌리줄기를 길초근 (吉草根, Valerianae Radix et Rhizoma)으로 수록하고 있다 (MFDS, 2026). 쥐오줌풀에는 valerenic acid, isovaleric acid 및 iridoid류를 비롯한 다양한 생리활성 성분이 존재하며, 안정적인 약용원료 생산을 위해서는 지상부 생육뿐 아니라 약용부위인 지하부의 생체량을 확보하는 것이 중요하다 (Lee *et al*., 2020; Li *et al*., 2022). 국내에서는 온도, 토양수분, 광도 및 종자번식 등 재배환경에 따른 쥐오줌풀의 생육반응에 관한 연구가 수행되어 왔으나 (Lee, 1995a, b; Cho *et al*., 1997; Ahn *et al*, 2012), 제어환경을 활용한 재배기술 연구는 비교적 최근에 이루어지고 있다.

이들 선행연구 중 Lee (1995a, b)와 Cho 등 (1997)은 광릉쥐오줌풀 (*Valeriana fauriei* var. *dasycarpa* H.Hara)을 대상으로 하였으며, 해당 학명은 현재 *V. fauriei*의 이명으로 처

†Corresponding author: (Phone) +82-43-871-5684 (E-mail) ygkimsy@korea.kr
#Yangsoo Han and Yong-Goo Kim are contributed to equally to this paper.
[1]농촌진흥청 국립원예특작과학원 인삼특작부 전문연구원 / Researcher, Department of Herb Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseoung 27709, Korea
[2]농촌진흥청 국립원예특작과학원 인삼특작부 농업연구관 / Senior Researcher, Department of Herb Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseoung 27709, Korea
[3]농촌진흥청 국립원예특작과학원 인삼특작부 농업연구사 / Researcher, Department of Herb Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseoung 27709, Korea
[4]농촌진흥청 국립원예특작과학원 인삼특작부 농업연구사 / Researcher, Researcher, Department of Herb Crop Research, NIHHS, RDA, Eumseoung 27709, Korea

리되고 있다 (POWO, 2026). Park 등 (2025)은 시설 내 광량에 따라 생육과 휘발성 성분 함량이 달라질 수 있음을 보고하였고, Han 등 (2026)은 스마트팜 환경에서 LED 광질 조성이 생체량과 생리적 특성에 영향을 미칠 수 있음을 보고하였다. 그러나 이러한 연구는 주로 토양 또는 고형배지를 이용한 조건에서 광환경 등 지상부 환경요인의 영향을 평가한 것으로, 재배방식에 따른 근권환경의 차이와 이에 따른 생육 및 생체량 분배를 직접 비교한 연구는 제한적이다.

쥐오줌풀과 같이 지하부를 주요 이용부위로 하는 약용작물에서는 근권의 수분, 무기양분 및 산소 공급조건이 뿌리의 생장과 식물체의 생체량 분배에 영향을 미칠 수 있다. 분무경 (aeroponic cultivation)은 토양이나 고형배지를 사용하지 않고 뿌리를 공기 중에 노출한 상태에서 양액을 일정한 간격으로 분무하는 재배방식으로, 근권에 수분과 양분을 직접 공급하면서 뿌리의 공기 접촉을 유지할 수 있는 특징이 있다 (Eldridge *et al.*, 2020). 또한 고형배지를 사용하지 않기 때문에 재배 중 근권을 직접 관찰할 수 있으며, 수확 시 뿌리에 부착된 배지를 제거하는 과정이 필요하지 않다. 이러한 특성은 뿌리와 근경을 약용부위로 이용하는 작물에서 지하부 회수와 수확 후 처리과정을 줄이는 데 유리하다.

분무경은 인삼을 비롯한 일부 약용작물의 재배에도 적용되어 왔다. Kim 등 (2012)은 분무경에서 재배한 인삼의 생육과 ginsenoside 함량이 양액 및 재배환경에 따라 달라질 수 있음을 보고하였다. Ferrini 등 (2021)은 Cannabis sativa에서 분무경과 토양재배 간 뿌리 biomass와 뿌리 유래 성분 생산에 차이가 나타날 수 있음을 보고하였으며, Hemidesmus indicus에서도 재배방식에 따라 뿌리 형태, biomass 및 주요 대사산물 축적이 달라지는 것으로 나타났다 (Gangopadhyay *et al.*, 2021). 이러한 선행연구는 분무경에 대한 약용작물의 생육 및 성분반응이 작물종과 양액공급, 근권관리 조건에 따라 달라질 수 있음을 보여준다. 따라서 쥐오줌풀에 분무경을 적용하기 위해서는 기존 재배방식과 직접 비교하여 생육, 지상부와 지하부의 생체량 분배 및 약용부위의 생산성을 종합적으로 평가할 필요가 있다.

현재까지 쥐오줌풀에서는 광환경과 토양수분 등 재배환경에 따른 생육반응이 보고되어 있으나, 스마트팜 환경에서 분무경과 토경을 직접 비교하여 생육의 시간적 변화, 생리적 특성, 수확기의 지상부와 지하부 생체량 및 주요 약용성분 함량을 종합적으로 평가한 연구는 제한적이다. 특히 뿌리와 근경을 주요 약용부위로 이용하는 쥐오줌풀에서는 재배방식에 따른 지상부와 지하부의 생육 및 건물분배뿐 아니라 약용부위의 주요 성분 함량을 함께 평가할 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 동일한 지상부 스마트팜 환경조건에서 쥐오줌풀을 분무경과 토경으로 재배하고, 초장과 분지수, SPAD 및 식생지수의 변화와 수확기의 지상부·지하부 생체중 및 건물중을 비교하였으며, hydroxyvalerenic acid, acetoxyvalerenic acid 및 valerenic acid 함량을 분석하였다. 이를 통해 근권환경과 양분 공급조건이 서로 다른 두 재배체계에서 관찰된 생육, 건물분배 및 valerenic acid 관련 성분의 차이를 비교하고, 쥐오줌풀의 스마트팜 기반 분무경 재배 적용 가능성을 검토하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 식물재료 및 재배환경

본 연구는 농촌진흥청 국립원예특작과학원 인삼특작부 스마트팜 생산 표준화 연구동 (충북 음성군)에서 수행하였다. 생육상태가 균일한 쥐오줌풀 (*Valeriana fauriei* Briq.) 유묘를 선발하여 분무경 (aeroponic cultivation)과 토경 (soil cultivation)에서 각각 8개체씩 재배하였으며, 총 재배기간은 12주로 하였다. 각 재배방식에는 1개의 재배기를 사용하였으며, 분무경의 8개체는 동일한 양액 저장탱크와 분무시스템을 공유하였다. 토경의 8개체는 동일한 재배기 내 개별 포트에서 재배하였다. 따라서 각 재배방식의 8개체는 재배기 내 식물체 수준의 관찰반복이며, 재배방식별 독립적인 실험단위의 반복을 의미하지 않는다.

두 재배방식의 지상부 환경은 동일하게 관리하였다. 재배실의 공기온도와 상대습도는 각각 18 ± 1℃와 60 ± 10%로 유지하였으며, 분무경의 양액과 토경의 관수용수 온도는 20 ± 1℃로 관리하였다. 광합성광양자속밀도 (photosynthetic photon flux density, PPFD)는 약 150 μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$로 설정하였으며, 광주기는 16 h light / 8 h dark로 설정하였다.

재배기간 동안 광, 온도 및 상대습도 등의 환경조건은 스마트팜 환경제어시스템을 이용하여 관리하였고, 분무경과 토경의 재배시스템은 Fig. 1에 제시하였다.

### 2. 분무경 및 토경 재배

분무경 처리구에서는 식물체의 뿌리가 재배조 내부의 공기 중에 노출되도록 고정한 후 Yamazaki nutrient solution을 근권에 직접 분무하였다. 양액의 전기전도도 (electrical conductivity, EC)는 1.0–1.2 dS·m$^{-1}$ 범위로 유지하였으며, 30 s 동안 분무한 후 4 min 30 s 동안 분무를 중단하는 주기를 반복하였다.

토경 처리구는 Baroker 원예용 상토 (Seoul Bio, Korea)를 충진한 포트에서 재배하였다. 제조사에서 제시한 상토의 화학적 특성은 pH 5.5–7.0, EC 0.6 ± 0.3 dS·m$^{-1}$, 질산태질소 200–350 mg·L$^{-1}$, 암모니아태질소 150 mg·L$^{-1}$ 이하 및 유효인산 200–350 mg·L$^{-1}$이었다. 다만 본 연구에서는 사용한 상토의 초기 양분함량을 별도로 분석하지 않았다. 관수용수는 식물체당 100 mL씩 1일 1회 공급하였으며, 별도의 양액은 공급하지 않았다. 두 재배방식은 동일한 지상부 환경조건에서 재

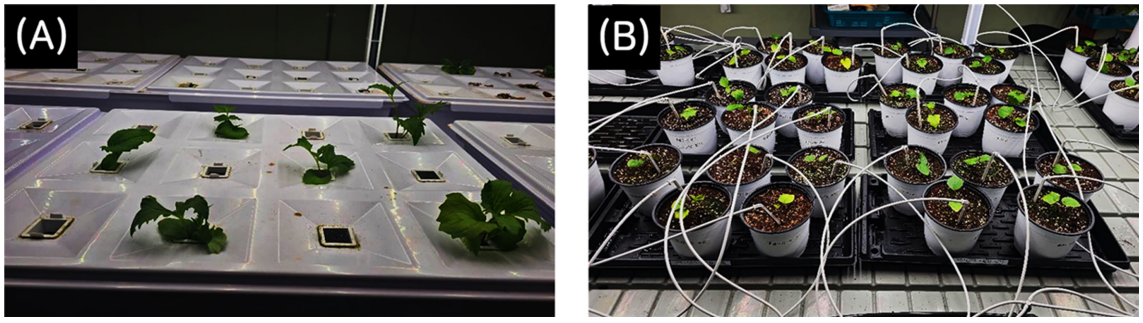



**Fig. 1. Cultivation systems of *Valeriana fauriei* under smart farm conditions.** (A) Aeroponic cultivation and (B) soil cultivation. Both cultivation systems were maintained under the same aboveground environmental conditions. Aeroponic plants were supplied with Yamazaki nutrient solution, whereas soil-grown plants were cultivated in commercial growing medium and irrigated with water without additional nutrient solution.

배하였으나, 고형배지의 유무와 근권의 수분 및 양분 공급조건에는 차이가 있었다. 따라서 본 연구는 재배방식 자체의 독립적인 효과를 검증하기보다는 근권환경과 양분 공급조건이 서로 다른 두 재배체계에서 관찰된 특성을 비교하는 것으로 설정하였다. 두 재배시스템의 주요 환경 및 재배조건을 Table 1에 제시하였다.

### 3. 생육 및 생리적 특성 조사

재배 시작일부터 12주까지 1주 간격으로 초장, SPAD 및 식생지수를 측정하였다. 초장은 식물체의 지제부에서 가장 높은 생장점까지의 길이를 측정하였으며, 분지수는 재배 12주 후 각 식물체에서 발생한 분지의 수를 조사하였다.

엽록소 상태는 SPAD meter (SPAD-502 Plus, Konica Minolta, Tokyo, Japan)를 이용하여 측정하였다. 식생지수는 휴대용 식물센서 (RP410/UVIS, Photon Systems Instruments, Drásov, Czech Republic)를 이용하여 normalized difference vegetation index (NDVI), modified chlorophyll absorption in reflectance index 1 (MCARI1), photochemical reflectance index (PRI) 및 structure-insensitive pigment index (SIPI)를 측정하였다. SPAD와 식생지수는 각 식물체에서 생육상태가 균일하고 완전히 전개된 잎을 선정하여 동일한 기준으로 측정하였다.

재배 12주 후 식물체를 수확하여 지상부와 지하부로 분리한 후 각각의 생체중을 측정하였다. 이후 시료를 약 5일간 동결건조한 후 지상부 및 지하부 건물중을 측정하였다. 전체 생체중과 전체 건물중은 각각 지상부와 지하부의 생체중 및 건물중을 합산하여 산출하였으며, root-to-shoot ratio (R/S ratio)는 각 개체의 지하부 (뿌리와 근경 포함) 건물중을 지상부 건물중으로 나누어 산출한 후 개체별 비율의 평균값으로 제시하였다. 또한 수확 시 분무경과 토경에서 재배된 식물체의 지상부 및 지하부 형태를 비교하였다.

### 4. Valerenic acid 관련 성분 분석

재배 12주 후 수확한 쥐오줌풀의 지상부와 지하부를 동결건조한 후 분쇄하고, 재배방식 및 기관별로 혼합하여 분석용 대표시료를 조제하였다. 본 연구에서 지하부 시료는 뿌리 (root)와 근경 (rhizome)을 분리하지 않고 함께 분석하였으며, 원고

**Table 1.** Environmental and cultivation conditions of *Valeriana fauriei* under aeroponic and soil cultivation systems.

| Cultivation condition | Aeroponic cultivation | Soil cultivation |
|---|---|---|
| Root-zone medium | No solid medium | Baroker horticultural growing medium |
| Air temperature | 18 ± 1℃ | 18 ± 1℃ |
| Relative humidity | 60 ± 10% | 60 ± 10% |
| Nutrient solution / irrigation water temperature | 20 ± 1℃ | 20 ± 1℃ |
| PPFD | 150 μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$ | 150 μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$ |
| Photoperiod | 16 h light / 8 h dark | 16 h light / 8 h dark |
| Water and nutrient management | Yamazaki nutrient solution | Water only |
| Nutrient solution EC | 1.0–1.2 dS·m$^{-1}$ | - |
| Cultivation period | 12 weeks | 12 weeks |

PPFD, photosynthetic photon flux density; EC, electrical conductivity; –, not applicable. Aeroponic plants were supplied with Yamazaki nutrient solution using a repeated cycle of 30 s misting followed by a 4 min 30 s interval. Soil-grown plants were irrigated once daily with 100 mL of water per plant without additional nutrient solution.

에서 사용한 'Root'는 이들 기관을 포함한 지하부 분석단위를 의미한다. 각 시료의 동결건조 분말 200 mg을 각각 독립적으로 3회 평량한 후, 각 평량 시료에 80% methanol 10 mL를 첨가하여 40℃에서 1 h 동안 초음파 추출하였다. 추출액은 12,000 rpm에서 4 min 동안 원심분리한 후 0.45 μm syringe filter로 여과하여 HPLC 분석에 사용하였다. 따라서 이들 반복은 생물학적 반복이 아닌 독립적인 추출·분석 반복 (extraction/analytical replicates)으로 간주하였으며, 처리 간 추론통계는 실시하지 않았다.

Hydroxyvalerenic acid, acetoxyvalerenic acid 및 valerenic acid는 Ultimate 3000 DAD HPLC system과 CAPCELL PAK C18 MGII S-5 column (4.6 × 250 mm, 5 μm, OSAKA SODA, Japan)을 이용하여 분석하였다. 이동상은 0.05% phosphoric acid in water를 mobile phase A, acetonitrile을 mobile phase B로 사용하였다. 초기 이동상 조성은 A:B = 55:45 (v/v)로 하였으며, 10 min 동안 A:B = 10:90까지 변화시킨 후 5 min 동안 유지하고, 이후 2 min 동안 초기 조성인 A:B = 55:45로 복귀하였다. 유속은 1 mL·min$^{-1}$, column temperature는 35℃, injection volume은 10 μL로 설정하였으며, 검출파장은 220 nm로 하였다. 세 성분의 정량을 위해 valerenic acid (CFN 70254), hydroxyvalerenic acid (CFN70286) 및 acetoxyvalerenic acid (CFN70459) 표준물질 (purity ≥ 98%; Wuhan ChemFaces Biochemical Co., Ltd., Wuhan, China) 을 사용하여 혼합표준액을 25, 50, 100 및 250 ppm의 농도로 조제하였다. 각 성분의 검량선은 표준물질 농도 (x, ppm)와 peak area (y, mAU·min)의 관계를 이용하여 작성하였다. Hydroxyvalerenic acid, acetoxyvalerenic acid 및 valerenic acid의 검량식은 각각 $y = 0.34627x$ ($R^2 = 0.999965$), $y = 0.21917x + 0.05874$ ($R^2 = 0.999967$) 및 $y = 0.22388x + 0.06530$ ($R^2 = 0.999969$)으로 나타났다. 각 시료에서 얻어진 peak area를 해당 검량식에 적용하여 추출액 중 성분농도를 산출하였으며, 성분함량은 시료의 건물중과 추출용매 부피를 기준으로 환산하였다. 분석 반복성 (repeatability)은 검량범위 내에서 정량된 valerenic acid에 대하여 동일한 pooled sample에서 독립적으로 수행한 3회의 추출·분석 반복값의 상대표준편차(relative standard deviation, RSD)로 평가하였다.

시판 *Valeriana officinalis* 뿌리 제품 (Valerian Root, NOW Foods, Bloomingdale, IL, USA; 500 mg root·capsule$^{-1}$)은 분석결과의 상대적 수준을 비교하기 위한 참고시료 (commercial reference sample)로 사용하였으며, 캡슐 내 분말을 취하여 쥐오줌풀 시료와 동일한 시료량, 추출조건 및 HPLC 분석조건을 적용하였다.

### 5. 통계분석

본 연구에서는 분무경과 토경을 각각 1개의 재배기에서 운영하였으며, 각 재배시스템 내 8개 식물체는 동일한 재배환경을 공유하였다. 따라서 각 식물체는 재배시스템 수준의 독립적인 실험반복이 아닌 재배기 내 개체별 관찰반복으로 간주하였으며, 재배시스템 간 차이에 대한 추론통계는 실시하지 않았다. 재배기간 동안 동일한 개체에서 반복 측정한 초장, SPAD 및 식생지수 (NDVI, MCARI1, PRI, SIPI)의 시간적 변화를 평가하기 위하여 각 재배시스템별로 일원 반복측정 분산분석 (one-way repeated-measures ANOVA)을 실시하였다. 조사시기 효과에 대해서는 Greenhouse–Geisser correction을 적용하였으며, 분석결과는 각 재배시스템 내 개체 수준의 시간적 변화에 한정하여 해석하였다. 재배 12주 후 조사한 분지수와 수확 시 측정한 지상부, 지하부 및 전체 생체중과 건물중, R/S ratio는 각 재배시스템 내 8개체의 평균 ± 표준편차 (mean ± SD)로 나타내었으며, 재배시스템 간 유의성 검정은 실시하지 않았다. 통계적 유의수준은 $p < 0.05$로 설정하였다. 통계분석은 GraphPad Prism version 10.0 (GraphPad Software, San Diego, CA, USA)을 이용하였다.

Valerenic acid 관련 성분 분석은 재배방식 및 기관별로 조제한 하나의 대표 혼합시료에서 각각 독립적으로 3회 평량 및 추출하여 수행하였다. 따라서 이들 반복은 생물학적 반복이 아닌 독립적인 추출·분석 반복 (extraction/analytical replicates)으로 간주하였으며, 처리 간 추론통계는 실시하지 않았다. 성분분석값은 3회 추출·분석 반복의 평균 ± 표준편차 (mean ± SD)로 나타내었으며, 검량범위 내에서 정량된 값에 대해서는 재배방식 및 참고시료 간 상대적인 수준만 기술적으로 비교하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 재배방식에 따른 생육특성

분무경과 토경에서 재배한 쥐오줌풀의 초장 변화와 재배 12주 후 분지수를 Fig. 2에 제시하였다. 초장은 두 재배방식 모두 재배기간이 경과함에 따라 증가하였다. 재배시스템별 일원 반복측정 분산분석 (one-way repeated-measures ANOVA) 결과, 초장에 대한 조사시기 효과는 분무경 [$F$ (1.70, 11.92) = 74.541, $p < 0.0001$]과 토경 [$F$ (1.23, 8.63) = 16.540, $p = 0.0023$]에서 모두 유의하였다 (Table 2). 다만 재배시스템별 독립적인 실험반복이 확보되지 않았으므로 재배시스템 간 초장 차이에 대한 유의성 검정은 실시하지 않았다.

재배 12주 후 분지수는 분무경에서 토경보다 높게 나타났다 (Fig. 2B). 다만 재배시스템별 독립적인 실험반복이 확보되지 않았으므로, 이러한 차이는 통계적으로 검증된 재배시스템 효과가 아닌 본 시험에서 관찰된 기술적 차이로 해석하였다.

분무경은 뿌리가 공기 중에 노출된 상태에서 양액을 직접 공급받기 때문에, 고형배지를 이용하는 재배방식과는 근권의 수분, 양분 및 산소 공급환경이 다르게 형성될 수 있다. Eldridge

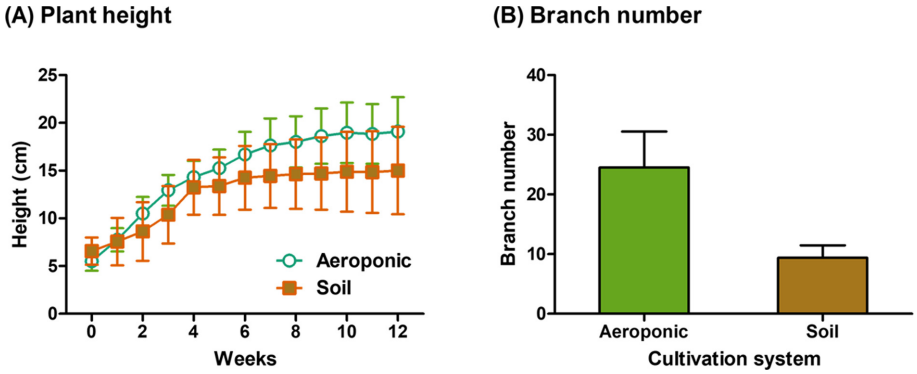



**Fig. 2. Growth characteristics of *Valeriana fauriei* under aeroponic and soil cultivation systems in smart farm conditions.** (A) Changes in plant height during 12 weeks of cultivation and (B) branch number at 12 weeks. Values are presented as mean ± SD ($n$ = 8). Plant height was analyzed using one-way repeated-measures ANOVA separately within each cultivation system with Greenhouse–Geisser correction; statistical results are presented in Table 2. Branch number was evaluated descriptively without statistical comparison between cultivation systems.

**Table 2.** Results of one-way repeated-measures ANOVA for temporal changes in growth and physiological characteristics of *Valeriana fauriei* within aeroponic and soil cultivation systems.

| Variable | Aeroponic $F$ (df) | $p$ | Soil $F$ (df) | $p$ |
|---|---|---|---|---|
| Plant height | 74.541 (1.70, 11.92) | < 0.0001 | 16.540 (1.23, 8.63) | 0.0023 |
| SPAD | 25.206 (4.16, 29.15) | < 0.0001 | 5.173 (3.48, 24.33) | 0.0049 |
| NDVI | 8.355 (4.27, 29.86) | < 0.0001 | 2.086 (3.43, 23.99) | 0.1221 |
| MCARI1 | 8.111 (3.63, 25.44) | 0.0003 | 1.382 (2.95, 20.68) | 0.2763 |
| PRI | 5.780 (3.52, 24.65) | 0.0027 | 1.438 (2.64, 18.46) | 0.2641 |
| SIPI | 37.337 (3.55, 24.83) | < 0.0001 | 2.214 (2.73, 19.11) | 0.1237 |

Values are presented as $F$ statistics with degrees of freedom (*df*) and $p$-values from one-way repeated-measures ANOVA conducted separately for each cultivation system. The same eight plants were measured at 13 time points (weeks 0–12) within each system. Degrees of freedom and $p$-values were adjusted using the Greenhouse–Geisser correction. The reported $p$-values represent within-system time effects and are not adjusted for multiple comparisons across variables. Because each cultivation system consisted of a single cultivation unit, between-system treatment effects were not statistically tested.

등 (2020)은 분무경에서 양액의 직접적인 분무와 근권환경 관리가 식물의 생육반응에 영향을 미칠 수 있음을 보고하였다. 또한 쥐오줌풀은 시비수준에 따라 생육과 뿌리 수량이 달라지는 것으로 보고되어 있어 (Cho *et al*., 1997), 양분공급 조건도 생육반응에 영향을 미치는 요인으로 볼 수 있다. 이러한 점을 고려하면, 본 연구에서 관찰된 분지수 차이에는 재배방식에 따른 근권환경과 양분공급 조건의 차이가 함께 관여했을 가능성이 있다.

본 연구의 토경 처리구에는 별도의 양액을 공급하지 않았으므로, 분지수에서 나타난 차이를 분무경 재배시스템 자체의 효과로 단정하기에는 제한이 있다.

## 2. 재배방식에 따른 SPAD 및 식생지수 변화

분무경과 토경에서 재배한 쥐오줌풀의 SPAD, NDVI, MCARI1, PRI 및 SIPI의 변화를 Fig. 3에 제시하였다. 재배시스템별 일원 반복측정 분산분석 (one-way repeated-measures ANOVA) 결과, 분무경에서는 SPAD, NDVI, MCARI1, PRI 및 SIPI 모두에서 조사시기 효과가 유의하였다 ($p$ < 0.05). 반면 토경에서는 SPAD에서만 조사시기 효과가 유의하였으며 ($p$ = 0.0049), 나머지 식생지수에서는 유의하지 않았다 (Table 2). 이러한 결과는 각 재배시스템 내 시간적 변화에 대한 것으로, 재배시스템 간 차이가 통계적으로 검증되었음을 의미하지 않는다.

SPAD는 잎의 엽록소 상태를 간접적으로 파악하는 데 널리 이용된다. 본 연구에서는 분무경과 토경 모두에서 SPAD의 조사시기 효과가 유의하였으며 (Table 2), 이러한 결과는 각 재배시스템 내에서 SPAD가 재배기간에 따라 변화하였음을 보여준다. 생육 후기 일부 조사시점에서 분무경의 SPAD 값은 토경보다 높게 나타났다. Park 등 (2025)은 쥐오줌풀에서 생육량과 엽록소 관련 지표가 항상 동일한 변화양상을 보이지는 않는다고 보고하였으며, Han 등 (2026)에서도 LED 광질에 따라 SPAD와 식생지수의 반응이 서로 다르게 나타났다. 따라서 SPAD는 재배방식에 따른 생육량의 차이를 직접 설명하기보다는 생육과정에서의 엽록소 상태 변화를 보완적으로 파악

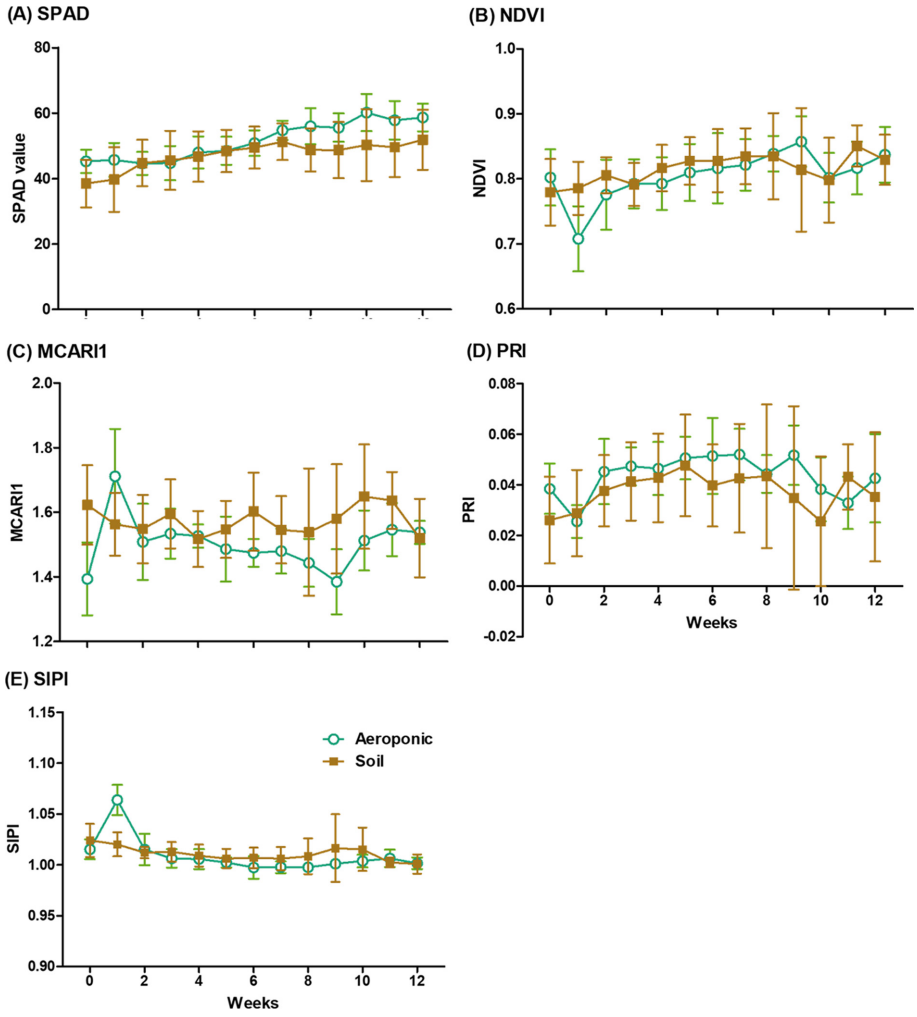



**Fig. 3. Changes in SPAD and vegetation indices of *Valeriana fauriei* under aeroponic and soil cultivation over 12 weeks.** (A) SPAD, (B) normalized difference vegetation index (NDVI), (C) modified chlorophyll absorption in reflectance index 1 (MCARI1), (D) photochemical reflectance index (PRI), and (E) structure-insensitive pigment index (SIPI). Values are presented as mean ± SD ($n$ = 8). Temporal changes were analyzed separately within each cultivation system using one-way repeated-measures ANOVA with Greenhouse–Geisser correction. Statistical results are presented in Table 2.

하는 지표로 볼 수 있다.

NDVI는 식생 상태를 나타내는 지표이며, MCARI1은 엽록소 함량 변화에 민감한 반사특성을 이용하는 지수로 알려져 있다 (Daughtry *et al*., 2000). PRI는 xanthophyll cycle 및 광 이용 효율의 변화와 관련되고 (Gamon *et al*., 1992), SIPI는 carotenoid와 chlorophyll a의 상대적 관계를 반영하는 지수로 제안되었다 (Penuelas *et al*., 1995).

종합하면, SPAD와 식생지수의 조사시기 효과는 각 재배시스템 내에서 평가되었으며, 유의한 시간 효과가 확인된 지표는 재배시스템에 따라 달랐다. 다만 이러한 결과만으로 두 재배시스템 간 생리적 반응의 차이를 통계적으로 판단할 수는 없다. 이러한 관찰은 형태적 생육반응과 엽록소 및 분광학적 특성의 변화가 반드시 일치하지 않을 가능성을 시사한다. 따라서 SPAD와 식생지수는 생육량의 차이를 직접 설명하기보다는 재배기간 중 생리적 상태의 변화를 보완적으로 파악하는 자료로 활용할 수 있다.

### 3. 수확기 식물체의 형태적 특성

재배 12주 후 분무경과 토경에서 재배한 쥐오줌풀의 수확기 형태를 Fig. 4에 제시하였다. 대표 식물체를 비교한 결과, 분무경에서는 지상부가 상대적으로 넓게 발달하고 뿌리가 길게 신장된 형태가 관찰되었다. 반면 토경에서는 지상부가 비교적 조밀하게 형성되었으며, 뿌리는 분무경보다 좁은 범위에 밀집된 형태를 보였다.

분무경에서는 뿌리가 고형배지의 물리적 저항 없이 공기 중에 노출된 상태에서 생장하고, 양액이 일정한 주기로 근권에




**Fig. 4. Representative morphology of *Valeriana fauriei* after 12 weeks of aeroponic and soil cultivation.** Representative whole plants from each cultivation system were photographed at harvest to show qualitative d

직접 공급된다. 따라서 토경과 비교하여 뿌리가 경험하는 물리적 환경과 수분, 양분 및 산소 공급조건이 다르게 형성될 수 있다. Eldridge 등 (2020)은 이러한 근권환경이 분무경에서의 뿌리 발달과 식물 생육에 영향을 미칠 수 있음을 보고하였다. 본 연구에서 관찰된 두 재배방식 간 형태적 차이도 이러한 근권환경의 차이와 관련될 가능성이 있다.

Fig. 4는 각 재배방식에서 수확한 대표 식물체의 형태를 제시한 것으로, 본 연구에서는 총 뿌리길이, 뿌리 표면적, 평균 뿌리직경 및 근계 부피 등의 근계구조를 정량적으로 조사하지 않았다. 따라서 분무경에서 관찰된 긴 뿌리 형태와 토경에서의 상대적으로 밀집된 뿌리 형태를 각 재배방식의 일반적인 특성으로 단정하기는 어렵다. 본 연구에서는 이를 대표 식물체에서 관찰된 정성적 형태 차이로 제시하였으며, 지상부와 지하부의 생산성 비교는 생체중 및 건물중 자료를 중심으로 판단하였다.

### 4. 재배방식에 따른 생체중 및 건물중

재배 12주 후 쥐오줌풀의 지상부와 지하부 생체중 및 건물중을 Fig. 5에 제시하였다. 지상부 생체중은 분무경과 토경에서 각각 63.2 및 38.4 g·plant$^{-1}$이었고, 지하부 생체중은 각각 52.2 및 38.1 g·plant$^{-1}$이었다. 전체 생체중은 분무경과 토경에서 각각 115.5 및 76.5 g·plant$^{-1}$이었다. 건물중에서는 지상부와 지하부가 서로 다른 양상을 나타냈다. 지상부 건물중은 분무경과 토경에서 각각 9.3 및 5.3 g·plant$^{-1}$로 분무경에서 더 컸던 반면, 지하부 건물중은 각각 2.4 및 4.5 g·plant$^{-1}$로 토경에서 더 컸다. 전체 건물중은 분무경과 토경에서 각각 11.7 및 9.8 g·plant$^{-1}$이었다.

지하부 생체중과 건물중이 재배체계별로 서로 다른 양상을 보였으므로, 지하부 생산성을 비교할 때 조직의 수분상태를 함께 고려할 필요가 있다. 그러나 본 연구에서는 뿌리의 수분함량, 조직 밀도 및 세근 비율 등을 별도로 측정하지 않았으므로, 이들 요인이 생체중과 건물중의 차이에 어느 정도 관여했는지는 확인할 수 없었다. 따라서 지하부 생산성은 생체중만으로 판단하기보다 건물중을 함께 고려하여 평가할 필요가 있다.

Hayden 등 (2004)은 burdock의 분무경 재배에서 지상부 건물생산이 증가한 반면, 수확 대상인 뿌리 건물중은 대조 재배방식과 유의한 차이를 나타내지 않았다고 보고하였다. 본 연구에서도 지상부 건물중은 분무경에서 더 컸던 반면, 지하부 건물중은 토경에서 더 컸다. 이러한 관찰은 두 재배체계에서 지상부와 지하부의 건물축적이 서로 다른 양상으로 나타날 수 있음을 시사한다.

이상의 결과에서 지상부 건물중은 분무경에서 토경보다 높았으나, 뿌리와 근경을 포함한 지하부 건물중은 토경에서 더 높았다. 두 재배방식은 양분공급 조건이 동일하지 않았으므로, 이러한 차이를 재배시스템 자체의 효과로 해석하기는 어렵다. 지상부와 지하부의 상대적 건물분배 특성은 다음 절에서 R/S ratio를 이용하여 추가적으로 평가하였다.

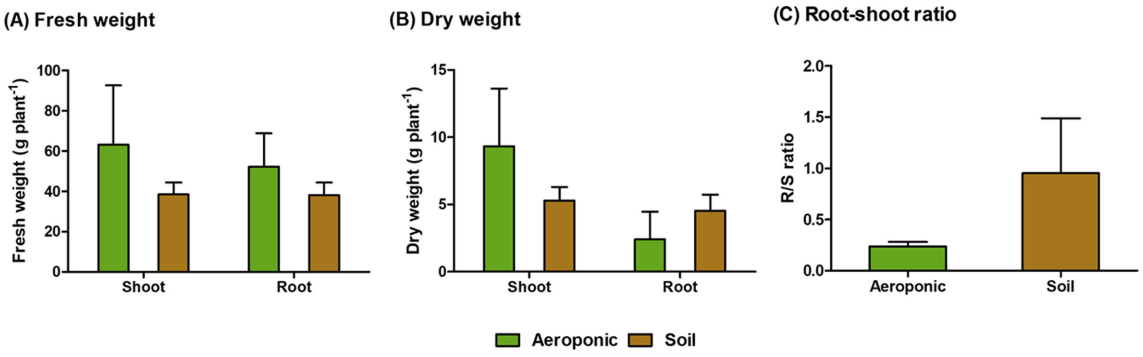



**Fig. 5. Biomass accumulation and root-to-shoot ratio of *Valeriana fauriei* after 12 weeks of aeroponic and soil cultivation.** (A) Fresh weight and (B) dry weight of shoots and roots, and (C) root-to-shoot (R/S) ratio based on dry weight. The R/S ratio was calculated separately for each plant as root dry weight divided by shoot dry weight. Values are presented as mean ± SD ($n$ = 8). Differences between cultivation systems were evaluated descriptively without inferential statistical testing because each cultivation system consisted of a single independent cultivation unit.

### 5. 지상부와 지하부의 건물분배 특성

지상부와 지하부 간 건물분배 특성을 평가하기 위하여 건물중 기준 R/S ratio를 산출한 결과, 분무경과 토경에서 각각 0.24와 0.95로 나타났다 (Fig. 5). 이는 분무경 처리구에서 지상부 건물중에 대한 지하부 건물중의 상대적 비율이 토경보다 낮았음을 의미한다. 앞 절의 건물중 결과를 고려하면, 두 재배체계의 지상부와 지하부 간 건물분배 양상은 서로 달랐다.

식물의 지상부와 지하부 간 생체량 분배는 고정된 특성이 아니라 광, 양분 및 수분 등 재배환경과 생육단계에 따라 달라질 수 있다. Poorter 등 (2012)은 다양한 식물종을 대상으로 한 meta-analysis에서 생육환경의 변화가 잎, 줄기 및 뿌리 간 biomass allocation에 영향을 미칠 수 있음을 보고하였다. 이러한 관점에서 본 연구에서 관찰된 R/S ratio의 차이도 두 재배시스템의 생육환경 차이와 관련되었을 가능성이 있다.

*Valeriana officinalis*의 양액재배에서도 phosphate 수준에 따라 지상부와 지하부의 생육 및 생체량 분배가 달라지는 것으로 보고되었다. Mousavi 등 (2021)은 높은 phosphate 농도에서 지상부 생장이 증가한 반면 뿌리 건물중은 감소하였으며, 낮은 phosphate 조건에서는 상대적으로 지하부에 더 많은 biomass가 배분되는 경향을 보고하였다. 이와 같은 결과는 쥐오줌풀속(*Valeriana*) 식물에서 양분공급 조건이 지상부와 지하부의 건물분배와 관련될 수 있음을 뒷받침한다. 다만 대상 종과 재배조건이 본 연구와 다르므로 직접적인 비교에는 주의가 필요하다.

본 연구의 분무경과 토경은 양분공급 조건뿐 아니라 고형배지의 유무와 근권의 수분 및 산소 공급환경에서도 차이가 있었다. 또한 상토의 양분함량과 식물체의 무기성분 함량을 분석하지 않았기 때문에, 토경에서 나타난 높은 R/S ratio를 특정 양분조건에 대한 반응으로 직접 해석하기에는 제한이 있다. 따라서 본 연구에서 관찰된 건물분배의 차이를 특정 요인의 독립적인 효과로 해석하기는 어렵다.

종합하면, 분무경 처리구에서 나타난 낮은 R/S ratio는 본 시험조건에서 지상부와 지하부 간 건물분배 양상이 토경과 달랐음을 의미한다. 특히 지상부 건물중은 분무경에서 더 컸으나, 지하부 건물중은 토경에서 더 컸으므로, 분무경 재배의 적용성을 지상부 생육만으로 판단하기는 어렵다. 향후에는 양액의 조성과 EC, 분무주기 등 근권관리 조건을 조절하여 지하부 건물생산을 높일 수 있는 재배조건을 구명할 필요가 있다. 또한 약용작물로서의 생산성을 판단하기 위해서는 지하부 수량뿐 아니라 valerenic acid 등 주요 성분의 함량도 함께 고려할 필요가 있다.

### 6. 재배방식에 따른 valerenic acid 관련 성분 함량

분무경과 토경에서 재배한 쥐오줌풀의 지상부와 지하부에서 hydroxyvalerenic acid, acetoxyvalerenic acid 및 valerenic acid를 분석한 결과를 Table 3에 제시하였다. 재배방식별 지하부 혼합시료에서 valerenic acid는 모두 검량범위 내에서 정량되었으며, 3회 추출·분석 반복의 평균 ± 표준편차는 분무경에서 3,627 ± 191 μg·g$^{-1}$ DW, 토경에서 1,437 ± 55 μg·g$^{-1}$ DW로 나타났다. 분무경 지하부 혼합시료의 valerenic acid 함량은 토경보다 약 2.5배 높았으나, 이는 통계적으로 검증된 재배체계의 효과를 의미하지 않는다. 반면 지상부 valerenic acid는 두 재배방식 모두 검량범위 미만이었다. Hydroxyvalerenic acid는 분무경과 토경의 지상부 및 지하부에서 신뢰할 수 있는 정량값을 얻지 못하였으며, acetoxyvalerenic acid는 분무경 시료에서는 정량값이 확보되지 않았고 토경의 지상부와 지하부에서는 검량범위 미만이었다. 동일한 분석조건에서 참고시료로 분석한 시판 *Valeriana officinalis* 뿌리 제품의 valerenic acid 함량은 1,441 ± 14 μg·g$^{-1}$으로 토경 지하부와 유사한 수준이었으며, 분무경 지하부에서는 시판제품보다 약 2.5배 높은

**Table 3.** Valerenic acid-related compounds in shoots and roots of *Valeriana fauriei* grown under aeroponic and soil cultivation and in a commercial *Valeriana officinalis* root supplement.

| Material | Part | Hydroxyvalerenic acid | Acetoxyvalerenic acid | Valerenic acid |
|---|---|---|---|---|
| Aeroponic cultivation | Shoot | n.a. | n.a. | BCR |
| | Root | n.a. | n.a. | 3,627 ± 191 |
| Soil cultivation | Shoot | n.a. | BCR | BCR |
| | Root | n.a. | BCR | 1,437 ± 55 |
| Commercial *V. officinalis* root supplement[1] | Root powder | BCR | BCR | 1,441 ± 14 |

Unit: $\mu g \cdot g^{-1}$ DW
Values are presented as mean ± SD of three independent extraction/analytical replicates prepared from the same pooled sample. The calibration range for each compound was 25–250 ppm. BCR, below the calibration range; a chromatographic response was obtained, but the calculated concentration was below the lowest calibration standard (25 ppm), and therefore the numerical value is not reported. n.a., not quantitatively determined because the analytical signal was insufficient for reliable quantification. [1]The commercial *V. officinalis* root supplement was analyzed as a reference sample and was not included as an experimental treatment.

농도가 관찰되었다.

*V. fauriei*에서 valerenic acid 관련 성분이 주로 지하부에 분포한다는 결과는 기존 연구에서도 보고된 바 있다. Park 등 (2016)은 *V. fauriei*의 지상부와 지하부를 비교한 결과, valerenic acid와 acetoxyvalerenic acid가 지하부에서 각각 219.03 및 32.22 $\mu g \cdot g^{-1}$ DW로 검출된 반면 지상부에서는 검출되지 않았으며, hydroxyvalerenic acid는 두 기관 모두에서 검출되지 않았다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서도 valerenic acid가 지하부에서 검량범위 내에서 정량된 반면 지상부에서는 검량범위 미만으로 나타난 점은 쥐오줌풀에서 보고된 기관별 성분분포와 대체로 일치하였다. 본 연구의 지하부 valerenic acid 함량은 선행연구에서 보고된 값보다 높은 수준이었으며, 특히 분무경 시료에서 그 차이가 크게 나타났다. 그러나 연구 간 절대 함량은 재배환경뿐 아니라 식물재료, 생육단계, 수확시기 및 추출·분석조건에 따라 달라질 수 있으므로 직접적인 처리효과로 비교하기에는 제한이 있다.

본 연구에서 valerenic acid 함량의 차이는 지하부 건물생산과 동일한 방향으로 나타나지 않았다. 수확기 지하부 건물중은 분무경과 토경에서 각각 2.4 및 4.5 $g \cdot plant^{-1}$로 나타났으며, 토경에서 더 높았다. 반면 단위 건물중당 valerenic acid 함량은 분무경 지하부에서 토경보다 약 2.5배 높은 수준을 나타냈다. 다만 단위 건물중당 valerenic acid 함량과 개체당 성분생산량은 서로 다른 지표이며, 본 연구에서는 재배방식별 혼합시료를 분석하였으므로 개체별 성분 생산량을 직접 평가할 수 없었다. *V. officinalis*의 양액재배에서도 양액 내 phosphate 농도에 따라 지하부 건물중과 valerenic acid 생산이 달라졌으며, 양분조건이 biomass 생산과 약용성분 축적에 동시에 영향을 줄 수 있음이 보고된 바 있다 (Mousavi *et al*., 2021). 분무경 처리구에는 Yamazaki 양액을 공급한 반면 토경 처리구에는 별도의 양액을 공급하지 않았으므로, 분무경 지하부에서 관찰된 높은 valerenic acid 함량을 재배시스템 자체의 효과로 해석하기는 어렵다. 분무경과 토경 사이에는 고형배지의 유무와 근권의 수분 및 산소조건뿐 아니라 무기양분 공급조건에도 차이가 있었으며, 이러한 근권 및 양분조건의 차이가 지하부 valerenic acid 함량에 복합적으로 영향을 미쳤을 가능성이 있다. 따라서 향후에는 두 재배방식의 양분수준을 가능한 한 동일하게 조절한 조건에서 지하부 biomass와 valerenic acid 함량을 함께 평가할 필요가 있다.

시판 *V. officinalis* 뿌리 제품은 본 시험의 처리구가 아니라 분석결과의 상대적인 수준을 확인하기 위한 참고시료로 이용하였다. 시판제품은 식물종, 원료의 생산환경 및 수확·가공과정이 본 시험의 *V. fauriei*와 다르므로 직접적인 재배처리 비교대조구로 볼 수 없다. 따라서 시판제품과의 비교는 동일한 HPLC 분석조건에서 확인된 상대적 수준을 제시하는 참고자료로 한정하였다.

종합하면, 본 시험조건에서 분무경은 토경보다 지상부 건물중이 높았던 반면 지하부 건물중과 R/S ratio는 낮게 나타났다. 한편 지하부 혼합시료의 valerenic acid 함량은 분무경에서 약 2.5배 높게 관찰되어, 지하부 건물생산과 단위 건물중당 성분함량이 서로 다른 양상을 보였다. 그러나 재배체계별 독립 재배단위의 반복이 없고 양분 공급조건이 서로 달랐으며, 성분분석에서도 생물학적 반복이 확보되지 않았으므로 이러한 차이를 재배체계 자체의 효과로 해석하기에는 제한이 있다. 향후 독립 재배단위와 성분분석의 생물학적 반복을 확보하고 양분 공급조건을 통제하여 지하부 건물생산과 valerenic acid 함량을 함께 검증할 필요가 있다.

## ACKNOWLEDGMENTS

본 연구는 농촌진흥청 시험연구사업 (PJ01756102)과 2026년도 농촌진흥청 국립원예특작과학원 전문연구원 과정 지원사업으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## REFERENCES


**Ahn YS, Hur M, An TJ, Park CG, Kim YG, Park CB and Baek WS.** (2012). Study on flowering, bearing fruit, seed harvesting and seedling transplanting cultivation of *Valeriana fauriei* Briquet. Korean Journal of Medicinal Crop Science. 20:365-371.

**Cho CH, Han OK, Choi YH and Yun SG.** (1997). Effect of fertilization rates on growth, root yield and essential oil composition in Korean valerian(*Valeriana fauriei* var. *dasycarpa* Hara). Korean Journal of Crop Science. 42:814-820.

**Daughtry CST, Walthall CL, Kim MS, Brown de Colstoun E and McMurtrey JE III.** (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. Remote Sensing of Environment. 74:229-239.

**Eldridge BM, Manzoni LR, Graham CA, Rodgers B, Farmer JR and Dodd AN.** (2020). Getting to the roots of aeroponic indoor farming. New Phytologist. 228:1183-1192.

**Ferrini F, Fraternale D, Donati Zeppa S, Verardo G, Gorassini A, Carrabs V, Albertini MC and Sestili P.** (2021). Yield, characterization, and possible exploitation of *Cannabis sativa* L. roots grown under aeroponics cultivation. Molecules. 26:4889. https://www.mdpi.com/1420-3049/26/16/4889 (cited by 2026 Oct 16).

**Gamon JA, Penuelas J and Field CB.** (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. Remote Sensing of Environment. 41:35-44.

**Gangopadhyay M, Das AK, Sahu R, Saha A, Dey S, Bandyopadhyay S and Mitra A.** (2021). Evaluation of growth response for mass production and accumulation of 2-hydroxy-4-methoxybenzaldehyde in endangered *Hemidesmus indicus* by an aeroponic system. Industrial Crops and Products. 172:114072.

**Han YS, Yu J, Jun SH, Bang KH and Kim YG.** (2026). Effects of LED light quality on growth and physiological characteristics of *Valeriana fauriei* in a smart farm environment. Korean Journal of Medicinal Crop Science. 34:95-104.

**Hayden AL, Yokelsen TN, Giacomelli GA and Hoffmann JJ.** (2004). Aeroponics: An alternative production system for high-value root crops. Acta Horticulturae. 629:207-213.

**Kim GS, Lee SE, Noh HJ, Kwon H, Lee SW, Kim SY and Kim YB.** (2012). Effects of natural bioactive products on the growth and ginsenoside contents of Panax ginseng cultured in an aeroponic system. Journal of Ginseng Research. 36:430-441.

**Lee DH, Park SH, Huh YH, Kim MJ, Seo HD, Ha TY, Ahn J, Jang YJ and Jung CH.** (2020). Iridoids of *Valeriana fauriei* contribute to alleviating hepatic steatosis in obese mice by lipophagy. Biomedicine & Pharmacotherapy. 125:109950.

**Lee JC.** (1995a). Effect of temperature on the growth of Korean valerian (*Valeriana fauriei* var. *dasycarpa* HARA). Korean Journal of Medicinal Crop Science. 3:77-80.

**Lee JC.** (1995b). Effect of soil moisture content on the growth of Korean valerian(*Valeriana fauriei* var. *dasycarpa* HARA). Korean Journal of Medicinal Crop Science. 3:81-83.

**Li J, Li X, Wang C, Zhang M, Ye M and Wang Q.** (2022). The potential of *Valeriana* as a traditional Chinese medicine: Traditional clinical applications, bioactivities, and phytochemistry. Frontiers in Pharmacology. 13:973138.

**Ministry of Food and Drug Safety(MFDS).** (2026). The Korean Pharmacopoeia. Ministry of Food and Drug Safety Notification No. 2026-44. Ministry of Food and Drug Safety. Cheongju, Korea. https://mfds.go.kr/brd/m_211/view.do?seq=14975 (Accessed October 13, 2026).

**Mousavi SA, Dalir N, Rahnemaie R and Ebadi MT.** (2021). Phosphate concentrations and methionine application affect quantitative and qualitative traits of valerian(*Valeriana officinalis* L.) under hydroponic conditions. Industrial Crops and Products. 171:113821.

**Park YJ, Li X, Noh SJ, Kim JK, Lim SS, Park NI, Kim S, Kim YB, Kim YO, Lee SW, Arasu MV, Al-Dhabi NA and Park SU.** (2016). Transcriptome and metabolome analysis in shoot and root of *Valeriana fauriei*. BMC Genomics. 17:303.

**Park YJ, Kim YG, Jeong SM, Kim YS and Park IK.** (2025). Effect of light intensity on growth and volatile compound content of *Valeriana fauriei* a walk-in growth chamber. Korean Journal of Medicinal Crop Science. 33:1-10.

**Penuelas J, Baret F and Filella I.** (1995). Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. Photosynthetica. 31:221-230.

**Poorter H, Niklas KJ, Reich PB, Oleksyn J, Poot P and Mommer L.** (2012). Biomass allocation to leaves, stems and roots: Meta-analyses of interspecific variation and environmental control. New Phytologist. 193:30-50.

**POWO.** (2026). Plants of the World Online. Facilitated by the Royal Botanic Gardens, Kew. Published on the Internet. https://powo.science.kew.org/ (Accessed October 12, 2026).