

Research Article



CrossMark

Open Access

인공광 식물공장내 광질 제어가 작물생육에 미치는 영향

허정욱*, 백정현

농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부

Effects of Light-Quality Control on the Plant Growth in a Plant Factory System of Artificial Light Type

Jeong-Wook Heo* and Jeong-Hyun Baek (Department of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, Rural Development of Administration, Jeonju 54875, Korea)

Received: 4 November 2021/ Revised: 15 November 2021/ Accepted: 16 November 2021

Copyright © 2021 The Korean Society of Environmental Agriculture

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.

ORCID

Jeong-Wook Heo

<https://orcid.org/0000-0002-9968-7783>

Jeong-Hyun Baek

<https://orcid.org/0000-0002-5867-2171>

Abstract

BACKGROUND: Horticultural plant growth under field and/or greenhouse conditions is affected by the climate changes (e.g., temperature, humidity, and rainfall). Therefore investigation of hydroponics on field horticultural crops is necessary for year-round production of the plants regardless of external environment changes under plant factory system with artificial light sources.

METHODS AND RESULTS: Common sage (*Salvia plebeia*), nasturtium (*Tropaeolum majus*), and hooker chive (*Allium hookeri*) plants were hydroponically culturing in the plant factory with blue-red-white LEDs (Light-Emitting Diodes) and fluorescent lights (FLs). Leaf numbers of common sage under mixture LED and FL treatments were 134% and 98% greater, respectively than those in the greenhouse condition. In hooker chives, unfolded leaf numbers were 35% greater under the artificial lights and leaf elongation was inhibited by the conventional sunlight compared to the artificial light treatments. Absorption pattern of NO₃-N composition in hydroponic solution was not affected by the different light qualities.

CONCLUSION(S): Plant factory system with different light qualities could be applied for fresh-leaf production of

common sage, nasturtium, and hooker chive plants culturing under field and/or greenhouse. Controlled light qualities in the system resulted in significantly higher hydroponic growth of the plants comparing to conventional greenhouse condition in present.

Key words: Environmental control, Hydroponics, Mixture radiation, Year-round production

서론

작물의 생장이 강우, 이상저온 등 기후 조건의 영향을 받는 노지나 온실과 달리, 인공광형 식물공장(이하 식물공장)에서는 작물 생장에 필요한 온도, 습도, 이산화탄소 농도나 배양액 등 물리·화학적 환경요인을 인위적으로 제어하면서 연중 안정적으로 작물을 재배할 수 있다[1, 2]. 일반적으로 식물공장에서는 재배기간이 비교적 짧은 신선 엽채류를 위주로 한 실용화 연구가 진행되고 있으나, 경제성 향상을 위하여 노지나 시설에서 계절 한정적으로 생산되고 있는 다양한 원예작물의 연중 안정생산을 위한 연구도 진행되고 있다[3-5]. 식물공장에서는 토양 대신에 일본원시배양액, 원시배양액 및 Yamazaki 잎상추액 등 화학비료 기반의 영양성분을 사용하여 쌈채나 샐러드채 등 신선 엽채류를 수경재배한다. 식물공장은 폐쇄된 공간이기 때문에 자연광 대신 형광등이나 적색, 청색, 백색 등의 파장역을 갖는 발광다이오드(LED, Light-emitting Diode)를 인공광원으로 채택하여 작물재배에 사용한다. 형광등을 인공광원으로 채택하는 경우에는 광원 사용기

*Corresponding author: Jeong-Wook Heo
Phone: +82-63-238-4063; Fax: +82-63-238-4035;
E-mail: wooncho@korea.kr

간이 길어질수록 광원 자체의 광분포가 불균일해짐에 따라 작물 생장이 일정하지 않게 되며 수명이 짧아 광원 교체주기가 짧아지는 등의 단점이 있다[6]. 한편 수명이 반영구적인 LED는 작물 생육에 필요한 파장역만을 선택적으로 조사할 수 있고 광원 크기가 작아 다단식 재배시스템을 운용하는 식물공장에 적합한 광원으로 알려져 있다. LED는 식물공장 뿐만 아니라 작물 재배에 자연광을 이용하는 시설재배지에서도 광원 고유의 파장역 특성을 활용하기 위하여 보광광원으로 채택하는 등, 기존 광원에 비해 광원의 가격이 비싸지만 광원이 가지고 있는 장점으로 인하여 국내·외적으로 LED를 인공광원으로 채택하는 식물공장이 증가하고 있다[6-8, 11]. LED를 채택하는 식물공장에서는 작물종에 따라 적색, 청색 등의 광질을 단일 또는 혼합 조사하여 작물 생장뿐만 아니라 작물 체내 특정 물질합성을 촉진하기도 한다[7-10]. 식물공장은 노지나 시설에 비해 외부환경의 영향을 받지 않으면서 작물을 연중 안정적으로 생산할 수 있지만, 재배기간이 비교적 짧은 엽채류 위주의 생산 시스템이기 때문에 시설투자과 관련하여 경제성 측면에서 기능성 향상이나 고부가의 대체 작물 발굴을 위하여 단일보다 혼합광을 이용한 광환경 제어 및 재배기술에 대한 요구도가 높아지고 있다[12, 13].

한편 곰보배추로 불리는 배암차즈기(*Salvia plebeia*)는 폴리페놀과 플라보노이드 성분을 함유하고 있는 식용 또는 약용작물로 재배 적온은 20°C 내외이다. 따라서 겨울을 제외하고 노지에서 약 10주 이상 재배하여 연중 4개월 정도 수확이 가능하지만 고온이나 건조 등 외부 기후변화에 따라 생장이 억제되기 때문에 차광이나 수분관리가 어렵다. 길이가 1.5 m 까지 자라는 덩굴성 1년생초인 한련화(*Tropaeolum majus*)는 관상화로 이용되고 있으나 철분이나 비타민 C를 다량 함유하며 꽃, 잎과 종자를 식용하기도 한다. 한련화 잎 침출액은 식용 이외에 약용으로도 이용되는데 광량이 높은 여름철에는 잎의 전개나 생장이 억제되어 이용부위가 대폭 감소한다. 삼채는 미얀마나 인도, 중국 남부지역 등에서 토경재배하는 아열대성 작물로 잎과 뿌리를 식용 또는 약용하지만 국내에서는 신선엽 생산성 향상을 위한 재배기술은 확립되지 않은 상태이다. 우리나라에서는 최근 들어 지상부 잎과 뿌리를 모두 이용하는 등 삼채 신선엽에 대한 수요가 급증하고 있으나 노지나 시설에서는 생산성이 저하한다. 특히 토경재배의 경우 연중 신선엽 수확회수는 3~5회로 한정적이므로 신선엽 안정생산 기술이 요구되고 있다. 따라서 산업화 환경에서는 분포하지 않는 생태환경 지표종의 하나로 환경변화에 민감한 배암차즈기나 한련화 및 삼채와 같이 신선엽 이용성이 높은 작물을 외부 환경변화와 상관없이 연중 생산할 수 있는 재배기술 확립이 필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서는 엽채나 샐러드채 등 신선엽을 연중 생산할 수 있는 인공광 식물공장 조건에서 배암차즈기, 한련화 등 노지에서 토경재배되고 있는 작물의 수경재배 가능성을 검토하였다. 또한 상기 작물 신선엽의 안정 생산기술 확립을 위하여 형광등 및 혼합LED를 이용한 광질 제어가 작물 생육에 미치는 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

식물재료 및 재배조건

우레탄 스폰지에 종자를 파종한 후 본엽이 3~4매 전개한 배암차즈기(국내산 05-0087-2013-2, *Salvia plebeia*, Common sage), 한련화(네덜란드산 4-127-2016-1, *Tropaeolum majus*) 실생묘 및 3개의 액아를 갖는 삼채 종근(국내산 1-31L919C1, *Allium hookeri*, Hooker chive) 등 3종을 식물재료로 이용하였다. 삼채 종근의 평균 길이 및 생체중은 각각 3.5 cm 및 1.5 g이었다. 시험작물 수경재배를 위하여 관행 엽채재배에 사용되는 Yamazaki 배양액(N: 6.5, P: 1.5, K: 4.0, Ca: 2.0 및 Mg: 1.0 me/L)을 공시하였으며 재배기간 동안 배양액내 EC 및 pH는 각각 1.5 dS/m 및 6.0의 엽채류 재배조건으로 제어하였다. 배암차즈기 및 한련화 재배기간은 작물 초장이 광원에 닿는 각각 13주 및 7주로 하였으며, 삼채 종근은 총 35주 수경재배하였으며 종근 정식후 5회 수확하여 평균 생장량을 조사하였다.

시험재료는 수평형 식물공장 재배시스템에 정식하였으며 담액식(Deep Flow Technique) 수경방식을 채택하여 수경재배하였다. 실험구는 형광등 및 적, 청, 백색의 혼합LED (혼합비율 2:1:1) 등 인공광 조사구와 대조구로는 유리온실 조건의 자연광 조사구(Sunlight) 등 3개로 설정하였다. 인공광원으로 사용한 LED는 32 W 스틱형으로 자가 제작하여 사용하였으며, 형광등은 36 W Cool-White형으로 설치하였다. 백색 LED는 적색계열 파장을 포함하는 Warm-white로 하였으며, 적색과 청색은 피크 파장역이 각각 660±10과 460±10 nm인 LED를 채택하였다. 인공광 제어 조건에서 작물 재배기간 동안 식물공장내 평균 온도 및 습도는 각각 21±0.5°C 및 55±0.7%로 제어되었다. 한편 인공광 조사구에서 1일 명기 12시간 동안 광강도는 150±20 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 제어하였으며 시험기간 동안 유리온실 조건의 자연광 조사구에서 개인 날 최대 광강도는 416 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 흐린 날 최소 광강도는 3.7 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 기록되었다. 대조구에서 일출 및 일몰 시간을 포함하는 명기시간 동안 평균 광강도는 153±4.6 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 였으며 평균 온도 및 습도는 25±5°C와 50±20%로 측정되었다.

생장량 조사 및 통계분석

각 시험구당 시험반복은 2였으며 반복수는 40개체로 하였다. 배암차즈기는 재배개시 13주차에, 한련화 실생묘는 재배개시 7주차에 각 처리구에서 40개체를 임의로 선발하여 지상부와 지하부의 생체중, 엽장, 및 초장 등을 측정하였고, 엽내 색소합성능 평가를 위하여 작물 상부 3마디까지 발달한 잎에서 SPAD치를 측정하였다(SPAD-502, Minolta Spectrum Tech., USA). 삼채 종근의 엽수와 신초수는 재배기간 35주 동안 7주 간격으로 전개한 잎을 대상으로 하여 5회 측정하였으며, 생체중, 엽장, SPAD치는 5회 수확후 평균 생장량을 조사하였다. 한련화의 경우 재배개시 4주차부터 지상부 과번무로 인한 엽수 증가로 측정이 불가하여 전개엽수는 7주차까지

총 5회 측정하였다. 또한 배암차즈기 전개엽수는 재배개시후 1주 간격으로 13회 측정하였다. 시험작물의 지상부 건물중은 70°C로 설정된 드라이 오븐(VS-1202D4, VISION Co., LTD, Korea)에서 4일간 건조시킨 후 측정하였다. 또한 재배종료일에는 발색법 기반의 흡광광도계(C-MAC, Korea)를 이용하여 재배종료시 $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 및 $\text{NO}_2\text{-N}$ 등 배양액내 9종의 무기성분 농도를 3회 반복 측정하였다. 통계분석은 SAS 프로그램(Version 6.21; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용, 담액식 재배시스템내 임의배치법으로 작물재배시험을 수행하였으며, ANOVA 분석후 측정결과에 대하여 Duncan의 다중검정($P=0.05$)을 실시하였다.

결과 및 고찰

인공광형 식물공장 조건에서 관행 엽채류 재배 전용 수경 배양액을 공급하여 노지재배 위주의 배암차즈기, 한련화 및 삼채종근을 수경재배할 수 있었다(Fig. 1). 재배개시 13주차 배암차즈기 실생묘의 지상부와 지하부 생장은 자연광 대비 인공광 제어조건에서 통계적으로 유의하게 증가하여 지상부

와 지하부 생체중은 각각 154% 및 16% 증가하였다(Fig. 2). 식물공장 조건에서 지상부 생체중 증가는 광질 차이에 의한 유의성은 없는 것으로 나타났으며 지하부의 경우 자연광 조사구 대비 혼합LED 조사구에서 유의하게 증가하였다. 배암차즈기의 건물중은 생체중 증가와 유사한 경향을 나타내었는데(결과 미제시) 일반적으로 엽내 SPAD치는 광강도와 정의 관계에 있어 광강도 증가에 따라 SPAD치는 증가한다[22, 23]. 본 실험에서와 같이 재배기간 동안 광강도를 일정하게 제어한 식물공장 조건에서 엽내 SPAD치 증가에 있어 광질의 영향은 없었으나 인공광 대비 광강도가 높았던 자연광 조사구에서 약 12% 증가하였다. 인공광 및 자연광 조건에서 명기시간 동안 개인 날과 흐린 날 최대 광강도 차이는 각각 266과 146 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로, 흐린 날 인공광과 자연광 최소 광강도 차이에 비해 개인 날 광강도의 차이가 큰 것으로 보아 인공광과 자연광 조건에서의 광강도 차이가 엽내 색소합성능에 영향을 미친 것으로 생각된다. 재배 7주차 전개엽수는 광원의 차이에 따른 영향은 나타나지 않았으나 재배종료시 엽수는 혼합 LED 조사구>형광등 조사구>자연광구 순으로 증가추세를 보여 자연광 조사구 대비 혼합 LED 조사구에서 134%,

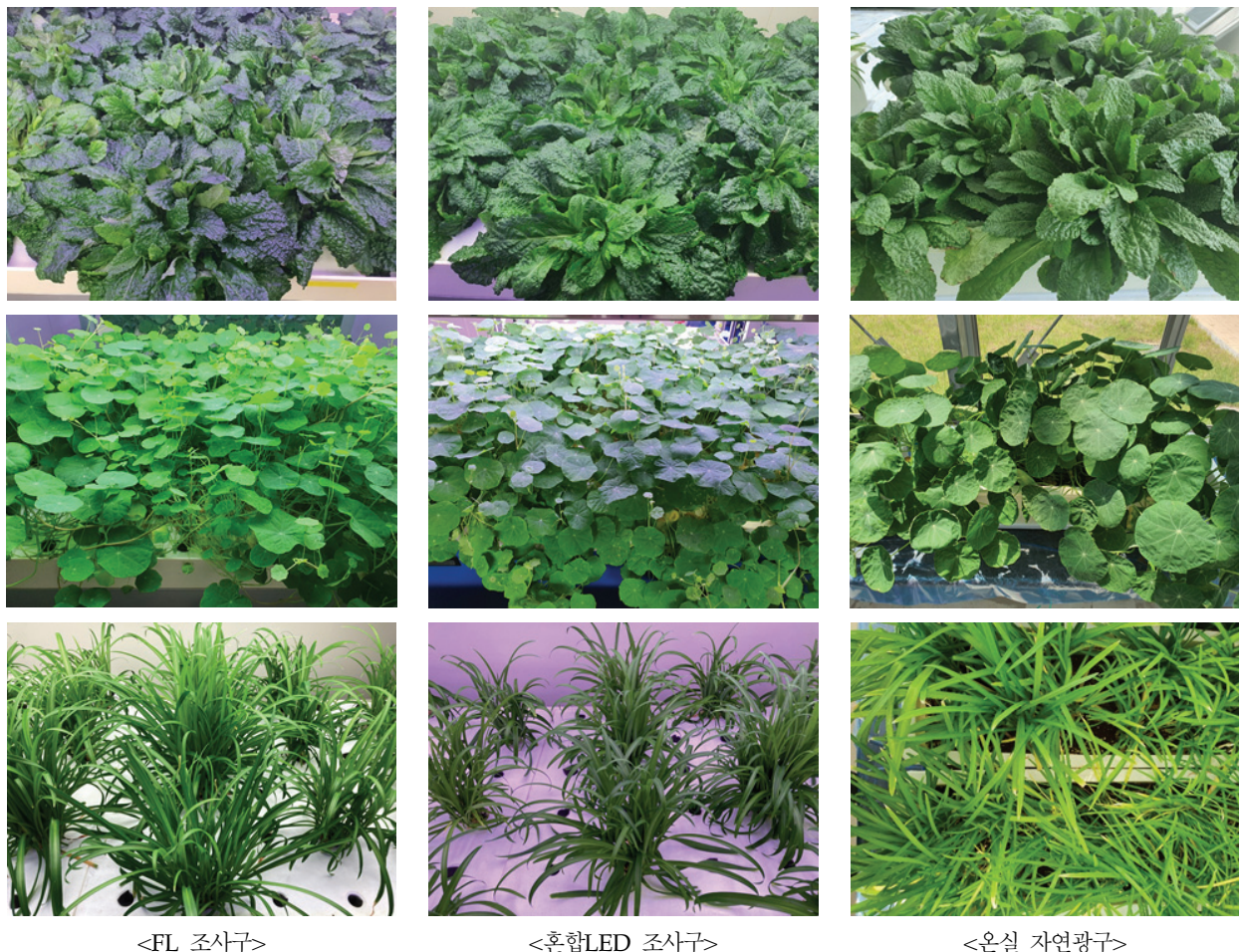


Fig. 1. Plant growth of the *Salvia plebeia* (Common sage, top), *Tropaeolum majus* (Nasturtium, middle) and *Allium hookeri* (Hooker chive, bottom) cultured under the plant factory of artificial light or glasshouse condition during the culture period.

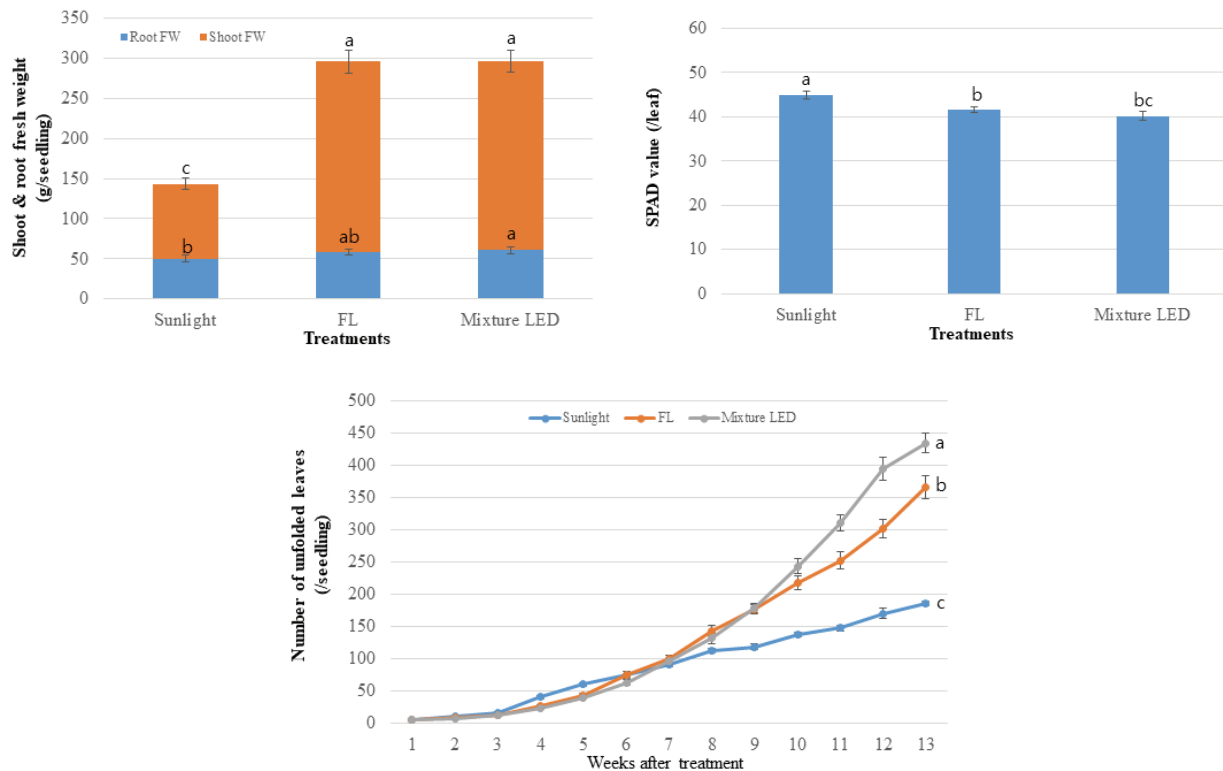


Fig. 2. Fresh weight, SPAD value and time courses of leaf number of *Salvia plebeia* (Common sage) seedlings grown under the plant factory of artificial light or glasshouse condition for 7 weeks. Different letter indicates significantly different at the 5% level by Duncan's multiple range test. Vertical bars represent standard error.

형광등 조사구에서 98% 증가하여 인공광 식물공장 조건에서 배암차즈기 실생묘의 엽수 증가에 있어 광질의 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 또한 재배기간 동안 1주일 간격으로 전개엽수 증가 패턴을 조사한 결과, 재배개시 7주차까지 재배조건의 차이가 엽수 증가에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 나타났다. 자연광구에서 엽수는 재배시간이 경과함에 따라 점진적으로 증가하였으나 8주차 이후부터 식물공장내 광질 제어조건에서 현저히 증가하는 것을 알 수 있었다. LED에 의한 단일 광질보다 혼합광질을 채택하는 식물공장 조건에서는 엽채류 이외에 초화, 관엽식물 등 다양한 작물종의 생육촉진 효과가 구명되고 있다[16-18]. 본 실험에서와 같이 시설이나 노지에서 계절 한정적으로 수확하는 잎을 주로 이용하는 작물종을 대상으로 한 수경재배는 관행의 혼합LED 이용 인공광 식물공장에 도입 가능성이 높을 것으로 기대된다.

배암차즈기에서와 마찬가지로 재배개시 7주차 한련화 실생묘의 지상부와 지하부 생체중 증가에 있어 광질의 차이에 의한 유의성은 인정되지 않았으나 자연광구 대비 인공광 조사구에서 유의하게 증가하여 자연광구 대비 지상부 생체중은 약 117%, 지하부 생체중은 120% 증가하였다(Fig. 3). 한련화 초장은 자연광구에 비해 인공광 조건에서 유의하게 신장하여 실생묘당 70 cm 이상 증가한 것으로 나타났다. 재배기간 동안 전개엽수 증가 패턴을 조사한 결과 재배개시 3주차 이후부터 재배조건에 따라 상이한 증가 패턴을 보였다. 재배

종료시 광질 차이가 엽수 증가에는 유의한 영향을 미치지 않았으나, 자연광 조건에 비해 인공광 조사구에서 170% 이상 증가하였다. Fig. 1에서와 같이 육안으로도 온실조건에서 한련화와 배암차즈기의 엽색이 짙은 것으로 보아 색소합성능이 높은 것을 알 수 있었다. 온실조건에서 색소합성능이 높고 식물공장 대비 약 39% 증가한 것으로 보아 배암차즈기와 한련화 두 작물종에서의 차이는 색소합성을 위해 필요한 광강도나 재배기간의 차이에 의한 것으로 생각된다(결과 미제시).

삼채의 경우 종근을 정식한 후 7주 간격으로 5회 수확한 결과, 지상부 잎의 생체중과 건물중은 온실 대비 식물공장 조건에서 증가하였으며 광질의 영향을 받아 혼합LED 조사구에 비해 형광등 조사구에서 생체중 143%, 건물중 211%로 유의하게 증가하였다(결과 미제시). 종근에서 발달한 신초수는 식물공장 조건에서 수확회수가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으나 광질 차이에 의한 유의한 영향은 없었다. 자연광 조건에서는 4회 수확까지 신초수가 증가하였으나 4주차 이후 현저히 감소하였다(Fig. 4). 전개엽수는 신초수 감소와 마찬가지로 온실보다 식물공장 재배조건에서 증가하였다. 인공광 조건에서 5회 평균 신초수는 모든 처리구에서 통계적인 유의성이 없었으나 평균 전개엽수는 인공광 조사구에서 35% 이상 증가한 것으로 보아 인공광 조건에서 신초에서의 엽 발달이 자연광 조건에 비해 촉진된 것으로 판단되었다. 삼채 엽내 색소합성능을 나타내는 SPAD치를 측정한 결과 자연광 조건

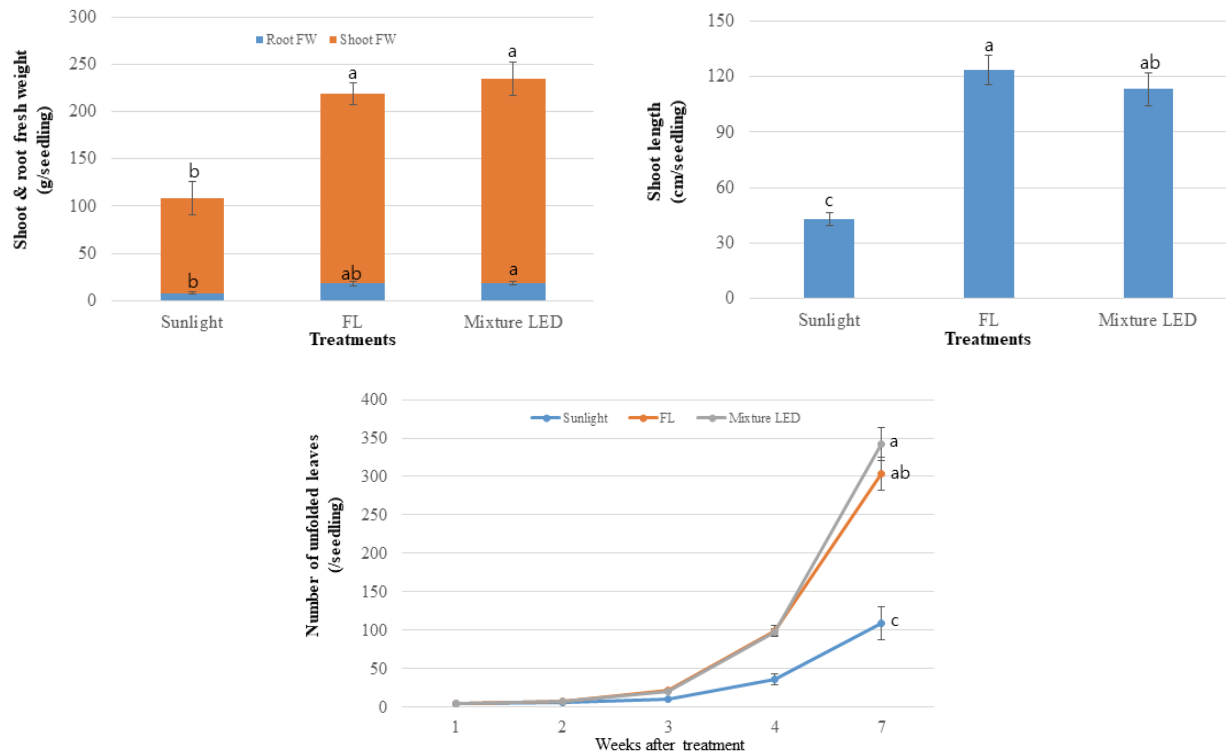


Fig. 3. Fresh weight, shoot length, and time courses of leaf number of *Tropaeolum majus* (Nasturtium) seedlings grown under the plant factory of artificial light or glasshouse condition for 7 weeks. Different letter indicates significantly different at the 5% level by Duncan's multiple range test. Vertical bars represent standard error.

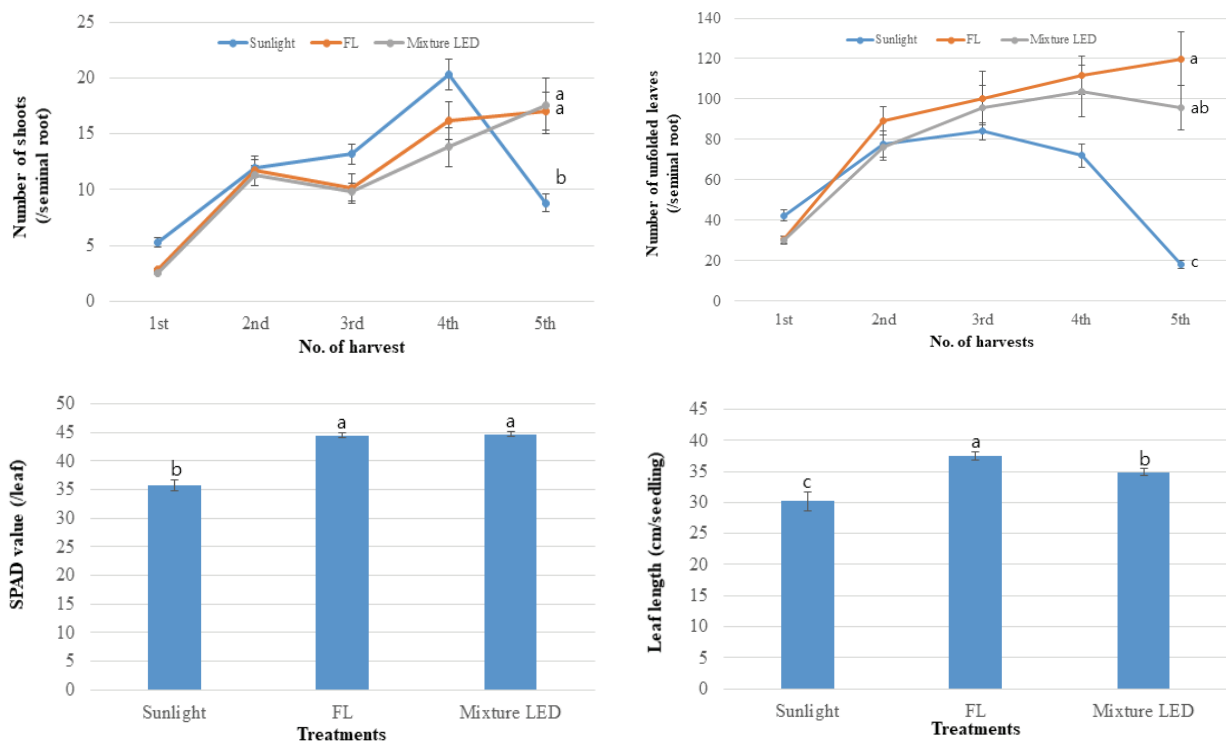


Fig. 4. Time courses of shoot and leaf number, SPAD value, and leaf length of *Allium hookeri* (hooker chive) grown under the plant factory of artificial light or glasshouse condition during the culture period. Different letter indicates significantly different at the 5% level by Duncan's multiple range test. Vertical bars represent standard error.

에서 색소합성능이 높았던 배암차즈기나 한련화 실생묘와 달리 식물공장 조건에서 최대값을, 온실조건에서 최소값을 나타내었으나 광질 차이에 의한 유의성은 인정되지 않았다. 삼채엽장은 5회 수확 평균 30 cm 이상 신장하여 신선엽 유통기준인 30 cm 이상을 충족할 수 있었는데, 형광등 조사구에서 37.5, 혼합LED 조사구에서 34.9 cm로 온실 조건에 비해 각각 24 및 15% 이상인 삼채 잎을 재배할 수 있었다.

배암차즈기 실생묘를 수경재배한 배양액내 $\text{NH}_3\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, SiO_2 등 9종의 무기성분 농도를 측정한 결과 재배종료일 배양액내에 남겨진 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도는 형광등 조사구 320, 혼합LED 조사구에서 359 mg/L로 혼합LED 조사구 대비 형광등 조사구에서 작물체에 의한 흡수량이 39 mg/L 증가하였다(Fig. 5). 식물공장에서 재배한 한련화 실생묘는 질소성분 흡수량이 FL 조사구에서 혼합LED 조사구에 비해 200 mg/L 증가하였으나 작물의 양적생장을 촉진하지 않은 것으로 보아, 광질제어 조건에서는 질소성분 흡수량과 양적생장 간에 반드시 정의 관계가 성립하지는 않은 것으로 생각된다. 한편 재배시간이 경과함에 따라 곰보배추 재배 배양액내 SiO_2 는 재배개시일 대비 흡수후 잔여량이 현저히 낮았으나, 한련화에서는 오히려 재배개시일 25.7 mg/L 대비 유의하게 증가하였으며 작물체 흡수량 역시 형광등 조사구에서 증가하여 재배종료일 잔여량은 형광등 조사구에서 112.2,

혼합LED 조사구에서 126.3 mg/L로 산출되었다. 삼채의 경우 재배기간 동안 무기성분 농도 경시변화를 조사한 결과 Cu, Fe 등 미량의 무기성분농도 변화는 광질에 따른 유의한 변화는 관찰되지 않았으나 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도는 재배개시일부터 시간이 경과함에 따라 감소하여 5회차 수확기 $\text{NO}_3\text{-N}$ 잔여량은 초기 배양액 농도 대비 1/10로 광질의 차이가 질소성분 흡수 패턴 변화에 미치는 영향은 미미한 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과로부터 삼채 잎 수확회수가 증가할수록 5회차 수확 이후 배양액내 질소량이 감소하는 패턴에 주목할 필요가 있다. 재배개시 2회차 수확이후부터 5회차 수확까지 작물체에 의한 질소 흡수량에 유의한 변화가 관찰되지 않았으나 식물공장 조건에서 신선엽 수확회수를 증가시키기 위해서는 5회차 이후 지상부 생장과 영양분 흡수패턴을 검토하여 삼채 장기 수경재배시 질소성분 추가 공급과 같은 배양액 관리 기술에 대한 검토 필요성이 대두되었다. 작물 생장에 있어 중요한 무기성분들은 인공광뿐만 아니라 자연광 이용 재배시설에도 질소와 같은 특정 성분의 공급 농도를 인위적으로 제어하여 작물 생장에 미치는 영향을 검토하고 있다[14, 15]. 연구 결과에 의하면 광질 제어조건에서 배양액의 종류에 따라 작물 생장에 미치는 영향은 다양하지만 화학비료 유래 배양액을 사용할 경우 배양액내 질소 흡수량에 비례하여 작물 생육이 증가하지 않았다. 이로써 작물 생육이 외부 환경요인의 영

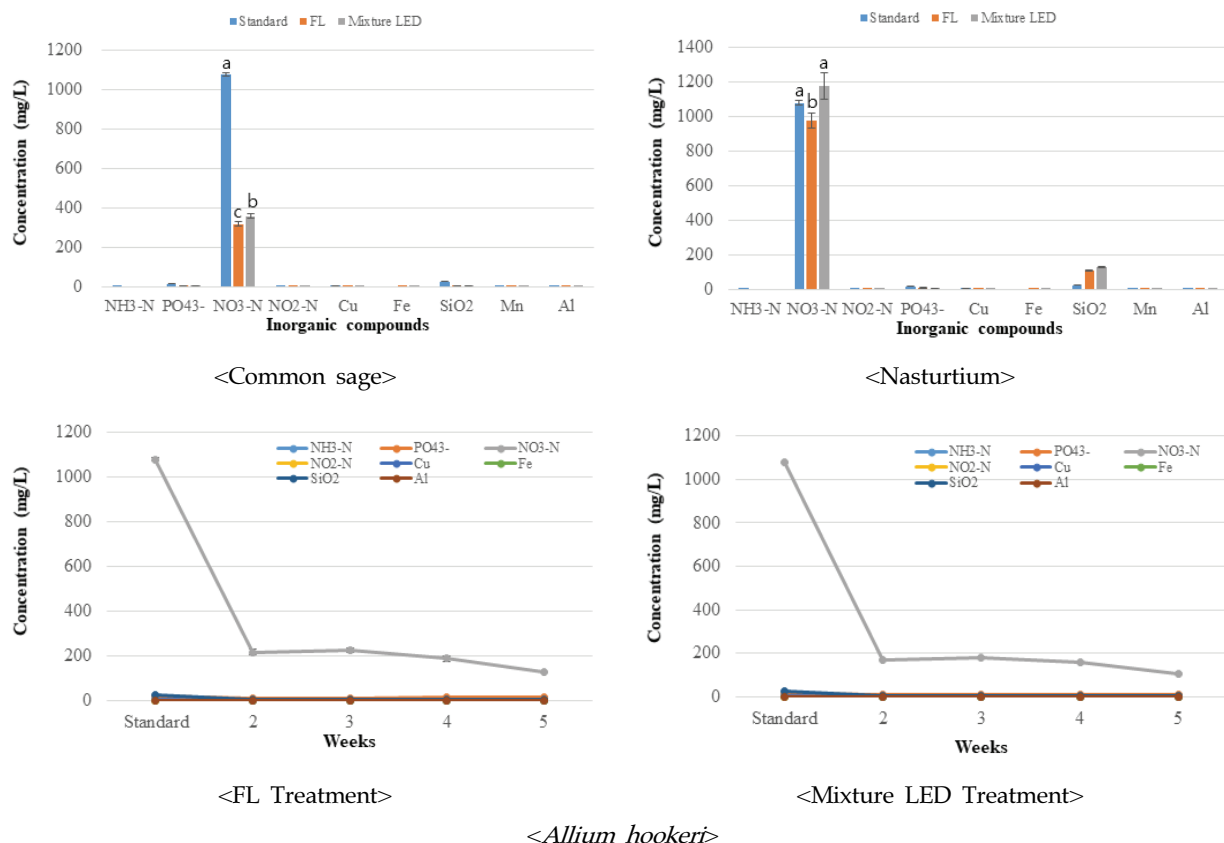


Fig. 5. Concentration changes of the inorganic compounds inside the hydroponic culture medium comparing to standard culture medium for hydroponics on the last day. Different letter indicates significantly different at the 5% level by Duncan's multiple range test. Vertical bars represent standard error.



<FL 조사구>



<혼합LED 조사구>

Fig. 6. *Allium hookeri* (Hooker chive) grown under the plant factory of artificial light condition in 8th harvest period.

향에 의해 좌우되는 시설재배 조건과 달리 온도, 습도, 광질 등 재배환경이 일정하게 제어되는 인공광 식물공장에서는 호랭성 엽채류 이외에도 지상부 잎을 위주로 수경재배하는 작물의 생육이 영양성분 흡수량 차이에 기인하기 보다는 조사하는 광질에 의한 것임을 알 수 있었다.

본 실험조건에서는 7주 간격, 5회로 한정하여 삼채 잎을 수확하여 종근을 1회 정식하여 수경재배할 경우 연 3~5회 수확하는 노지나 시설에서와 달리 6회 수확할 수 있었다. 엽수확 조건을 엽장 기준으로 할 경우 식물공장이나 온실에서 재배기간을 최소 1주 단축할 경우 8회 수확이 예측된다. 최적 광강도 조건을 도출하여 재배기간을 6주 이하로 단축할 수 있다면 노지나 시설 대비 연 수확회수는 3~5회로 증가하여 신선엽 생산성 향상을 기대할 수 있다. 온실에서는 Fig. 1과 같이 재배기간을 7주 이하로 단축하여도 상품성을 고려할 때 엽폭이 좁아지고 잎이 황화한 것을 육안으로도 확인가능하였는데 이와같은 삼채 잎의 상품성 저하나 분지수와 엽수 감소로 인한 수확량 감소 문제가 제기되므로 최대 수확회수는 연 5회를 초과하기는 어려울 것으로 판단된다. 하절기 온실에서 삼채를 토경재배할 경우 70% 이상의 차광이 필요한 것으로 보아 태양광에 비해 광강도가 낮은 인공광 조건에서도 삼채 재배가 가능하다는 것을 알 수 있었다[20]. 인공광 식물공장 조건에서 삼채 안정생산을 위한 수경재배 연구는 국내·외적으로 거의 진행되고 있지 않으나, 본 연구 결과로부터 신선엽으로 유통되는 삼채 잎을 안정적으로 생산하기 위해서 온실과 같은 시설보다 인공광을 활용한 식물공장 조건에서 수경생산하는 것이 연중생산에 효과적임을 알 수 있었다. 본 실험에서는 다회차 엽수확을 위하여 뿌리 성장을 측정하지는 못하였으나 삼채는 본래 뿌리에 다양한 종류의 유용물질을 함유하고 있기 때문에[19] 수경재배에 의한 다회차 수확 후 남겨지는 뿌리 생장이나 활용도까지 고려하여 연중 엽 수확회수를 결정해야 할 것으로 생각된다.

인공광 식물공장 조건에서 일부 과채류나 수도작 재배용 광원으로 LED를 이용한 작물 생장·생리 등 실용화 연구가 진행되고 있는데 이때 광강도는 $500\sim1,000\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 엽채류 재배에 비해 높은 광강도로 제어해야 하므로 전력소모량이 문제시 되고 있다[21, 24]. 그러나 재배기간이 비교적

짧은 호랭성 엽채류를 생산할 목적으로 광강도를 $150\sim250\ \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 범위의 비교적 낮은 광강도의 인공광 식물공장에서 노지나 시설에서 계절 한정적으로 수확하는 배암차즈기, 한련화 및 삼채 잎을 장기간 수경재배하여 수확할 수 있었는데, 이는 불균일한 온도, 습도, 광강도 등 외부 기후변화의 영향을 받는 노지나 시설에 비해 온도, 습도 및 광질과 같은 환경요인을 안정적으로 제어하였기 때문으로 생각된다. 본 실험에서는 5회차 수확한 삼채 잎의 수경생장 특성을 검토하였으나, 광질이 제어된 엽채류 식물공장 조건에서 노지나 시설대비 엽장 신장량을 기준으로 재배기간을 5~6주로 단축할 경우 다수확의 신선엽 안정 공급이 기대된다. 본 실험과 동일한 재배 조건에서 종근 정식 후 7주 간격으로 8회차 수확을 종료하여 1회 종근 정식으로 엽채류 수경재배용 관행 배양액을 공급하면서 장기 수경재배한 결과 8회 이상 신선엽 수확이 가능함을 확인하였다(Fig. 6). 금후 인공광 식물공장내 삼채 뿐만 아니라 시험작물의 고품질 신선엽 안정생산을 위하여 광질, 광강도 및 배양액 농도 제어가 신선엽 생육이나 수확량, 잎과 뿌리내 유용 물질함성에 미치는 영향을 비교·검토할 필요가 있다.

Note

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgement

This study was funded by a research program (PJ01481001) of Rural Development Administration (RDA), Republic of Korea.

References

1. Kozai T (2013) Resource use efficiency of closed plant production system with artificial light: Concept, estimation and application to plant factory. Proceedings of the Japan Academy, Series B, 89(10), 447-461. <https://doi.org/10.2183/pjab.89.447>.

2. Orsini F, Pennisi G, Zulfiqar F, Gianquinto G (2020) Sustainable use of resources in plant factories with artificial lighting (PFALs). *European Journal of Horticultural Science*, 85(5), 297-309. <https://doi.org/10.17660/eJHS.2020/85.5.1>.
3. Heo J, Kang D, Bang H, Hong S, Chun C, Kang K (2012) Early growth, pigmentation, protein content, and phenylalanine ammonia-lyase activity of red curled lettuces grown under different lighting conditions. *Horticultural Science & Technology*, 30(1), 6-12. <https://doi.org/10.7235/hort.2012.11118>.
5. Heo JW, Kim HH, Lee KJ, Yoon JB, Lee JK, Huh YS, Lee KY (2015) Effect of supplementary radiation on growth of greenhouse-grown kales. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 34(1), 38-45. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2015.34.1.02>.
6. Arcel M, Lin X, Huang J, Wu J, Zheng S (2021) The application of LED illumination and intelligent control in plant factory, a new direction for modern agriculture: A review. *International Journal of Physics: Conference Series*, 1732(1), 012178, IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1732/1/012178>.
7. Promratrak L (2017) The effect of using LED lighting in the growth of crops hydroponics. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 6(2), 133-140. <https://doi.org/10.12720/sgee.6.2.133-140>.
8. Zhang X, He D, Niu G, Yan Z, Song J (2018) Effects of environment lighting on the growth, photosynthesis, and quality of hydroponic lettuce in a plant factory. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 11(2), 33-40. <https://doi.org/10.25165/j.jjabe.20181102.3420>.
9. Toldi D, Gyugos M, Darkó É, Szalai, G, Gulyás Z, Gierczik, K, Székely A, Boldizsár Á, Galiba G et al. (2019) Light intensity and spectrum affect metabolism of glutathione and amino acids at transcriptional level. *PloS One*, 14(12), e0227271. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227271>.
10. Fan XX, Xue F, Song B, Chen LZ, Xu G, Xu H (2019) Effects of blue and red light on growth and nitrate metabolism in pakchoi. *Open Chemistry*, 17(1), 456-464. <https://doi.org/10.1515/chem-2019-0038>.
11. Wojciechowska R, Kołton A, Długosz-Grochowska O, Kunicki E, Mrowiec K, Bathelt P (2020). LED lighting affected the growth and metabolism of eggplant and tomato transplants in a greenhouse. *Horticultural Science*, 47(3), 150-157. <https://doi.org/10.17221/78/2019-HORTSCI>.
12. Kozai T (2017) Benefits, problems and challenges of plant factories with artificial lighting (PFALs): A short review. *International Symposium on New Technologies for Environment Control, Energy-Saving and Crop Production in Greenhouse and Plant Factory*, 25-30. <https://doi.org/10.17660/ActaHort.2018.1227.3>.
13. Kozai T (2019) Towards sustainable plant factories with artificial lighting (PFALs) for achieving SDGs. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 12(5), 28-37. <https://doi.org/10.25165/j.jjabe.2019205.5177>.
14. Sapkota S, Sapkota S, Liu Z (2019) Effects of nutrient composition and lettuce cultivar on crop production in hydroponic culture. *Horticulturae*, 5(4), 72-80. <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040072>.
15. Heo JW, Park KH, Hong SG, Lee JS, Baek JH (2019) Hydroponic nutrient solution and light quality influence on lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth from the artificial light type of plant factory system. *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 38(4), 225-236. <https://doi.org/10.5338/KJEA.2019.38.4.31>.
16. Khattak AM, Pearson S (2005) Light quality and temperature effects on antirrhinum growth and development. *Journal of Zhejiang University Science B*, 6(2), 119-124. <https://doi.org/10.1631/jzus.2005.B0119>.
17. Kobayashi K, Amore T, Lazaro M (2013) Light-emitting diodes (LEDs) for miniature hydroponic lettuce. *Optics and Photonics Journal*, 3(1), 74-77. <https://doi.org/10.4236/opj.2013.31012>.
18. Pattison PM, Tsao JY, Brainard GC, Bugbee B (2018) LEDs for photons, physiology and food. *Nature*, 563(7732), 493-500. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0706-x>.
19. Kim MW (2017) Effects of dietary supplementation with allium hookeri root on hepatic enzyme contents in streptozotocin-induced diabetic rats. *Journal of the East Asian Society of Dietary Life*, 27(4), 399-407. <https://doi.org/10.17495/easdl.2017.8.27.4.399>.
20. Park EK, Noh JG, Lee MJ, Nam SY, Hong EY, Lee CH (2016) Effects of shading rates on growth and yield of allium hookeri cultivation at greenhouse in middle area of Korea. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 25(4), 320-327. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2016.25.4.320>.
21. Zheng J, Ji F, He D, Niu G (2019) Effect of light intensity on rooting and growth of hydroponic strawberry runner plants in a LED plant factory. *Agro-nomy*, 9(12), 875. <https://doi.org/10.3390/agronomy9>

- 120875.
22. Cha MK, Kim JS, Cho YY (2012) Growth response of lettuce to various levels of EC and light intensity in plant factory. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 21(4), 305-311. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2012.21.3.305>.
23. Park MH, Lee YB (1999) Effects of light intensity and nutrient level on growth and quality of leaf lettuce in a plant factory. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 8(2), 108-114. <https://doi.org/10.12791/KSBEC.1999.8.2.108>.
24. Nguyen DT, Kitayama M, Lu N, Takagaki M (2020) Improving secondary metabolite accumulation, mineral content, and growth of coriander (*Coriandrum sativum* L.) by regulating light quality in a plant factory. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 95(3), 356-363. <https://doi.org/10.1080/14620316.2019.1677510>.