

Research Article

Open Access

인공광 식물공장내 광질 제어가 방풍나물 생장에 미치는 영향

허정욱,^{1*} 김동억,¹ 한길수,² 김숙종^{2,3}

¹농촌진흥청 국립농업과학원 농업공학부 생산자동화기계과,

²농촌진흥청 국립농업과학원 기술지원팀, ³충청북도농업기술원

Effect of Light-Quality Control on Growth of *Ledebouriella seseloides* Grown in Plant Factory of an Artificial Light Type

Jeong-Wook Heo,^{1*} Dong-Eok Kim,¹ Kil-Su Han² and Sook-Jong Kim^{2,3} (¹Department of Agricultural Engineering, National Academy of Agricultural Science, Rural Development of Administration, Suwon 441-707, Korea, ²Technology Services Team, National Academy of Agricultural Science, Rural Development of Administration, Suwon 441-707, Korea, ³Chungcheongbukdo Agricultural Research & Extension Services, Chungbuk, Ochang 383, Korea)

Received: 19 June 2013 / Revised: 25 June 2013 / Accepted: 26 June 2013

© 2013 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.

Abstract

BACKGROUND: Plant factory system of an artificial light type using Light-Emitting Diodes (LEDs), fluorescent light, or metal halide lamp instead of sun light is an ultimted method for plant production without any pesticides regardless of seasonal changes. The plant factory is also completely isolated from outside environmental conditions such as a light, temperature, or humidity compared to conventional greenhouse. Light-environment control such as a quality or quantity in the plant factory system is essential for improving the growth and development of plant species. However, there was little report that the effects of various light qualities provided by LEDs on *Ledebouriella seseloides* growth under the plant factory system.

METHODS AND RESULTS: *Ledebouriella seseloides* seedlings transplanted at urethane sponge were grown in the

plant factory system of a horizontal type with LED artificial lights for 90 days. Yamazaki solution for hydroponic culture of the seedlings was regularly irrigated by the deep flow technique (DFT) system on the culture gutters. Electrical Conductivity (EC) and pH of the solution was recorded at 1.4 ds/m and 5.8 in average, respectively during the experimental period. Number of unfolded leaves, leaf length, shoot fresh and dry weight of the seedlings were three times measured in every 30 days after beginning of the experiment. Blue LEDs, red LEDs, and fluorescent lights inside the plant factory were used as light sources. Conventional fluorescent lamps were considered as a control. In all the treatment, light intensity was maintained at 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ on the culture bed. Fresh weight of the seedlings was 3.7 times greater in the treatment with the mixture radiation of fluorescent light and blue+red LEDs (1:3 in energy ratio; Treatment FLBR13) than in fluorescent light treatment (Treatment FL). In FLBR13 treatment, dry weight per seedling was two times greater than in FL or BR11 treatment of blue+red LEDs (1:3 in energy ratio; Treatment BR11) during the culture period. Increasing in number of unfolded leaves was also significantly affected

*교신저자(Corresponding author)

Phone: +82-31-294-0855; Fax: +82-31-290-1860;

E-mail: wooncho@korea.kr

by the FLBR13 treatment comparing with BR11 treatment.
CONCLUSION(S): Hydroponic culture of *Ledebouriella seseloides* seedlings was successfully achieved in the plant factory system with mixture lights of blue, red LEDs and fluorescent lights. Shoot growth of the seedlings was significantly promoted by the FLBR13 with the mixture radiation of fluorescent light, blue, and red LEDs under 1:3 mixture ratio of blue and red LEDs during the experimental period compared to conventional light conditions.

Key Words: Closed-type plant factory, Horizontal-type plant factory, Hydroponic culture, Light-Emitting Diodes, Pesticide free

서 론

식물공장은 외부 환경과 차단된 시설에서 온·습도, 광 및 이산화탄소 등의 환경요인을 인공적으로 제어하여 계절에 상관없이 연중 농약을 사용하지 않고 작물을 안정적으로 생산할 수 있는 시스템이다. 일반적으로 식물공장은 자연광 및 인공광 식물공장으로 분류하는데, 온실과 같은 자연광 식물공장은 작물재배를 위한 주광원으로 태양광을 사용하며, 낮의 길이를 연장할 필요가 있을 경우에는 인공광을 보조광원으로 사용하기도 한다(Takatsuzi *et al.*, 1997). 한편 환경조건이 제어된 인공광 식물공장(또는 폐쇄형 식물공장)에서는 태양광이 차단된 폐쇄 공간 내에서 인공광만을 사용하여 작물을 재배한다. 인공광 식물공장은 자연광 식물공장과 달리, 태양광이 차단된 시설 내에서 작물재배를 위해 인공광을 사용하기 때문에 광원설비에 소요되는 투자비용이 가중되는 단점이 있다. 그러나 인공광 식물공장은 외부 환경의 영향을 거의 받지 않는 조건에서 병충해 방제를 위한 화학물질을 사용하지 않고 작물을 친환경적으로 주년 안정 생산할 수 있는 재배 시스템으로, 최근 들어 인공광 식물공장 실용화를 위한 다양한 연구가 진행되고 있다(Ikeda *et al.*, 1992; Heo *et al.*, 2010a; Inden *et al.*, 2011; KIEE Report, 2011).

인공광 식물공장의 경우, 작물생장에 필요한 물리적·화학적 환경을 비교적 용이하게 인위적으로 제어하면서 태양광 대신 인공광을 사용하고, 토양이 아닌 인공 배양액을 이용하여 수경재배 방식으로 작물을 재배한다. 인공광 식물공장에서 작물의 광합성과 생장을 촉진하기 위하여 사용하는 인공광원은 백색냉음극형광등(Cool-White Fluorescent Lamp), 메탈할라이드 램프(Metal Halide Lamp), 고압나트륨 램프(High Pressure Sodium Lamp), 하이브리드전극형광 램프(Hybrid Electrode Fluorescent Lamp) 및 발광다이오드(Light-Emitting Diode, LED) 등이 대표적이다.

백색냉음극형광등(이하 형광등)은 특성상 태양광과 유사한 스펙트럼 분포를 가지고 있는 광원으로, 가격이 비교적 저렴하여 태양광 대신에 인공광만을 사용하여 무균식물을 생

산하는 조직배양시설이나 인공광 식물공장에서 가장 많이 사용하는 광원의 하나이다. 그러나 형광등은 램프의 수명이 짧고 램프 중간과 선단부분의 광강도가 불균일하고, 폐전구에 의한 환경오염이나 램프로부터의 발열량이 많아 시설내 공조비용을 증가시키는 등의 단점이 있어 대체 램프 개발 및 이용에 관한 연구가 진행되고 있다(Bula *et al.*, 1991; Tennessen *et al.*, 1994).

한편 수명이 길고 전력소모량이 적으며, 광원으로부터의 열발생이 적어 메탈 할라이드 램프, 백열등이나 형광등과 같은 광원에 비해 시설내 공조비용 절감효과가 높다. 따라서 최근 인공광 식물공장 및 온실과 같은 자연광 식물공장에서 LED를 주광원이나 보조광원으로 이용하여 작물을 재배하는 사례가 늘고 있다(Bula *et al.*, 1991; Tennessen *et al.*, 1994; Heo *et al.*, 2002; Morrow, 2008). 특히 LED는 다른 광원과 달리, 청색, 적색 및 녹색 등 3파장의 광을 각각 또는 이들 단일광을 청색+적색 또는 청색+녹색 등으로 혼합하거나, 혼합비율을 임의로 제어하여 조사할 수 있다는 특징이 있다. 이와 같이 LED는 광질이나 광질별 혼합비율을 자유로이 제어할 수 있기 때문에 식물의 생장반응뿐만 아니라 식물체내 유용 물질이나 색소 합성 조절 등의 연구를 통하여 인공광원으로서의 이용성이 검토되고 있다(Heo *et al.*, 2006; Caldwell and Britz, 2006; Heo *et al.*, 2009; Heo *et al.*, 2010a; Heo *et al.*, 2010b).

현재 인공광 식물공장은 소비량이 많고 생장기간이 짧은 상추와 같은 호냉성 엽채류를 중심으로 한 수경재배에 주로 이용되고 있다. 인공광 식물공장은 외부 환경과 차단된 완전 폐쇄형 작물재배 시스템이기 때문에 무농약, 친환경 작물 재배가 가능하여 고품질 작물재배 연구는 물론 급후 식물공장의 실용화를 위한 요소기술 개발 연구에 활용되고 있다(Park and Lee, 1996; Qin *et al.*, 2008; Watanabe, 2011; Cha *et al.*, 2012). 또한 식물공장에서 이용되는 인공광원의 광질은 재배작물의 양적생장뿐만 아니라 식물체내 물질합성과 같은 질적생장과 관련된 생장 반응을 유도하기 때문에 상추와 같은 엽채류 이외에 약용작물의 식물공장내 재배 가능성이 연구되고 있다(Cho *et al.*, 2012).

방풍나물(*Ledebouriella seseloides*)은 뿌리에서 다수의 잎이 발생하는 다년생 약용작물의 하나로, 주로 어린잎을 생식하거나 익혀서 섭취하는 나물류로 이용한다. 한방에서는 파종 후 2년 재배한 방풍나물의 뿌리를 감기와 두통, 발한 및 관절통 완화를 위한 약재로 사용하는 등, 식품뿐만 아니라 약용작물로서의 이용성이 기대되는 작물의 하나이다(Jin *et al.*, 1992). 현재 방풍나물은 잎을 수확·이용하기 위하여 노지나 무가온 온실 등에서 재배하고 있기 때문에 주년 안정생산이 제한적인 작물중 하나이다. 그러나 약용작물로서 이용성을 확대시키기 위한 재배기술과 관련하여, 방풍나물의 생장에 미치는 광환경의 영향에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 농촌진흥청 국립농업과학원에서 운영하고 있는 엽채류 재배용 인공광 식물공장을 테스트베드로 활용하여 일정 광강도 조건에서 배양액을 이용한 방풍나물

수경재배 가능성을 검토하였다. 또한 LED를 주광원으로 하는 식물공장 내에서, 청색과 적색의 LED 혼합광, 청색과 적색 LED의 혼합비율의 차이 및 기존광원인 형광등과 청색+적색 LED 혼합광 조사 등의 광질 제어가 방풍나물의 생장에 미치는 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

식물재료 및 식물공장 재배조건

식물재료는 본엽이 2~3매 전개한 방풍나물(*Ledebouriella seseloides* (Hoffm.) Wolff) 싹묘로 하였다. 방풍나물 싹묘는 파종 트레이에서 꺼낸 후에 뿌리에서 원예상토를 제거하고 우레탄 스폰지에 정식하였다. 실험기간 중에는 엽재배용 양액 Yamazaki 배양액(N: 6.5, P: 1.5, K: 4.0, Ca: 2.0 및 Mg: 1.0 me/L을 사용하여 수경재배 하였으며, 배양액의 평균 EC 및 pH는 각각 1.4 ds/m 및 5.8이었다. 배양액 EC 및 pH는 스폰지 정식시와 동일한 수준으로 정기적으로 보정하였으며 실험기간 동안 배양액은 교체하지 않았다. 재배실험은 농촌진흥청 국립농업과학원내 수평형 식물공장에서 싹묘 정식후 90일간 수행하였다(Fig. 1).

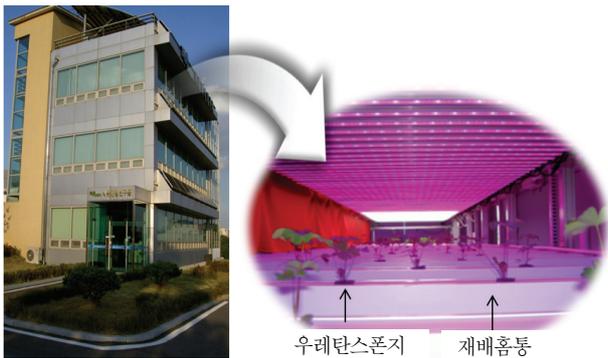


Fig. 1. Outside and inside view of vertical type plant factory system.

농촌진흥청 수평형 식물공장은 2단 재배베드로 구성되어 있으며(8.4×3.0×2.1 m), 담액수경 시스템(Deep Flow Technique)을 채용하고 있다. 수평형 식물공장 내에서 방풍나물 싹묘는 각 재배베드 상부에 설치된 재배함통에 정식한 후 양액공급관을 통해 재배함통으로 배양액을 공급하였다. 본 실험에서는 정식묘 재배함통을 등간격, 고정식으로 설정한 후 재배실험을 수행하였다.

실험기간 중 식물공장내 평균 온도 및 습도는 각각 22±0.4 °C 및 58.6±0.7%였다. 실험기간 동안 식물공장 내에 CO₂는 사용하지 않았으며 대기중 농도는 400±100 μmol/mol이었다. 광질 제어를 위하여 기 설치되어 있는 형광등에 혼합비율을 각각 1:1과 1:3으로 조절된 적색과 청색 LED를 혼합한 혼합광질을 이용하였다.

실험구는 형광등에 청색과 적색 LED 혼합비율이 각각 1:1과 1:3인 LED 혼합광을 함께 조사한 FLBR11구와

FLBR13구, 형광등을 제외하고 청색과 적색 LED 만을 1:1과 1:3의 비율로 혼합 조사한 BR11구와 BR13구 및 형광등만을 조사한 FL구(대조구) 등 총 5개로 설정하였다. 수평형 식물공장내 광조사시간(명기시간)은 1일 12시간이었다. 수평형 식물공장내 광원에서 재배함통 사이의 거리는 40 cm로, 이 간격에서 모든 실험구의 명기시간 동안 광강도는 100±10 μmol/m²/s였다.

생장량 조사 및 통계분석

실험기간 90일 동안 30일 간격으로 3회 방풍나물 싹묘의 지상부 잎을 수확하여 생육조사를 실시하였으며 실험반복은 2회였다. 1회 생육조사를 위해 각 실험구에서 20개체를 임의로 선택하여 전개된 모든 잎을 채취한 후에 생체중, 엽장, 엽폭 및 엽수 등을 측정하였다. 식물체당 엽수는 전개한 잎의 수만을 측정하였으며, 지상부 건물중은 70 °C로 설정된 드라이오븐(VS-1202D4, VISION Co., LTD, Korea)에서 4일간 건조시킨 후 측정하였다. 통계분석은 SAS 프로그램(Version 6.21; SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 이용하여 수행하였으며, ANOVA 분석후 3회차 측정결과에 대하여 Duncan의 다중검정(P=0.05)을 실시하였다.

결과 및 고찰

형광등과 LED 간의 혼합광질과 LED 간의 혼합비율 제어는 인공광 식물공장내에서 수경재배한 방풍나물 싹묘의 지상부 생체중, 건물중 및 엽생장에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다(Fig. 2). 방풍나물 지상부 평균 생체중은 형광등과 LED를 혼합 조사한 FLBR13구에서 최대값을, 형광등 조사구인 FL구에서 최소값을 나타내었다(Fig. 3). 형광등과 LED의 혼합광 조사구에서 생체중은 청색과 적색의 혼합비율이 1:1보다 1:3 처리구에서 통계적으로 유의하게 증가하여, FLBR11구에 비해 FLBR13구에서 1.3배, FL구에 비해 3.7배 증가하였다. 또한 지상부 생체중은 청색과 적색 혼합광 조사구에서도 1:1 비율로 조사한 처리구에 비해 1:3 비율 처리구에서 증가하였다.

광질 제어에 따른 건물중 변화는 생체중 증가와 유사한 경향을 나타냈으며, FL구와 BR11구에서는 생체중과 달리 건물중이 감소하였으며 두 처리구 간에는 통계적인 유의차가 없었다. 건물중은 FLBR13구에서 최대였으며 FL구나 BR11구에 비해 2배 이상 증가하였다. 모든 광조사구에서 건물중은 청색과 적색의 혼합비율 1:1 처리구에 비해 1:3인 처리구에서 현저하게 증가하는 것으로 나타났다.

방풍나물의 전개엽수는 FLBR13구와 대조구인 FL구에서 증가하였으며 BR11구에서는 다른 처리구에 비해 엽수증가가 억제되었다(Fig. 4). 형광등과 LED 혼합광 처리구에서 엽수는 생체중과 건물중에서와 같이 청색과 적색 혼합비율 1:1 처리구에 비해 1:3 처리구에서 증가하였으며, BR11구에 비해 FLBR13구에서 약 2배 증가하였다.

FLBR13구, FLBR11구 및 BR13구에서 엽장 신장은 촉진

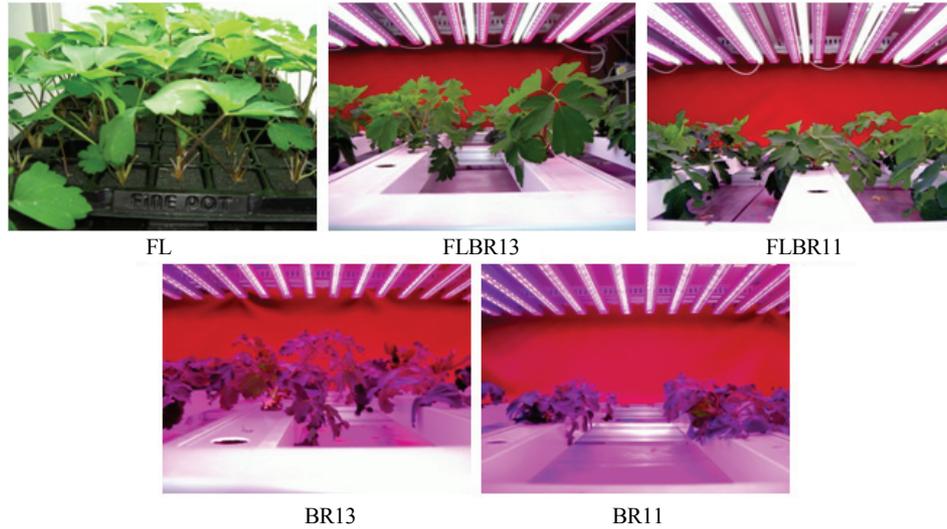


Fig. 2. Growth of *Ledebouriella seseloides* under the plant factory system with different light qualities. FL, control; FLBR13, fluorescent lamp + LED (1:3 in energy ratio of blue plus red LED); FLBR11, fluorescent lamp + LED (1:1 in energy ratio of blue plus red LED); BR13, blue + red LED (1:3 in energy ratio); BR11, blue + red LED (1:1 in energy ratio).

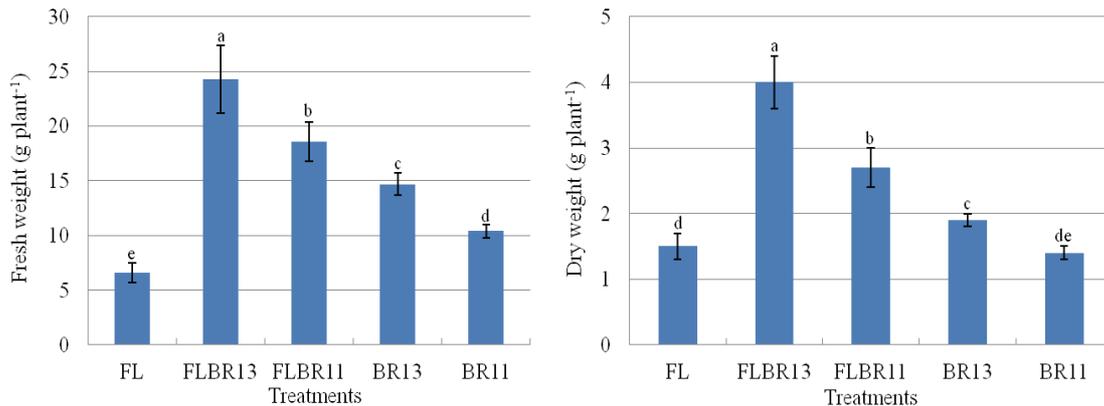


Fig. 3. Fresh (left) and dry (right) weight per plant of *Ledebouriella seseloides* grown under the plant factory system with different light qualities for 30 days. Different letter indicates the significantly difference at the 5% level by Duncan's multiple range test. FL, control; FLBR13, fluorescent lamp + LED (1:3 in energy ratio of blue plus red LED); FLBR11, fluorescent lamp + LED (1:1 in energy ratio of blue plus red LED); BR13, blue + red LED (1:3 in energy ratio); BR11, blue + red LED (1:1 in energy ratio). Vertical bars represent standard error (n=60).

되었으나 이들 처리구 간에는 통계적인 유의차가 없는 것으로 나타났다(Table 1). 대조구인 FL구에서는 잎의 길이생장이 억제되었으며, FLBR13구의 엽장은 FL구에 비해 70% 이상 증가하였다. 엽폭 신장은 형광등 조사구에서 억제되었으며, 엽장과 마찬가지로 FLBR13구, FLBR11구 및 BR13구 간에는 광질 제어에 의한 유의성이 없었다. 엽장/엽폭 비율은 FLBR13구에서 유의하게 증가하였는데, FLBR13구에서는 엽폭 증가도 촉진되었으나 다른 처리구에 비해 형태적으로 잎이 길어지는 것을 알 수 있었다(결과 미제시).

인공광 식물공장에서 재배한 상추의 경우, 청색과 적색의 단일광이나 청색+적색의 혼합광질은 동일한 광강도 조건에서 지상부 생체중이나 건물중 증가에는 유의한 영향을 미치지

않는다고 보고되고 있다(Shimizu *et al.*, 2011). 적색 단일광 조건에서 재배한 상추의 생체중은 형광등 조사구나 청색과 적색의 혼합광 조사구에 비해 현저하게 감소하기도 한다(SHITA Report, 2006). Saito *et al.* (2010)의 연구 결과에 의하면 상추의 생체중 증가는 적색 단일광이나 형광등에 의해 촉진되지만 건물중 증가는 대조구인 형광등에 비해 오히려 적색광에 의해 억제된다고 한다.

한편 Heo *et al.* (2002)의 연구에 의하면 초화식물인 아프리카 메리골드는 청색보다 적색광이, 셀비어는 형광등+적색이나 형광등+청색의 혼합광질 하에서 건물중이 유의하게 증가한다는 것을 알 수 있다. LED를 인공광원으로 하는 선행 연구에 의하면 대부분 식물의 양적생장은 주로 단일광질 보

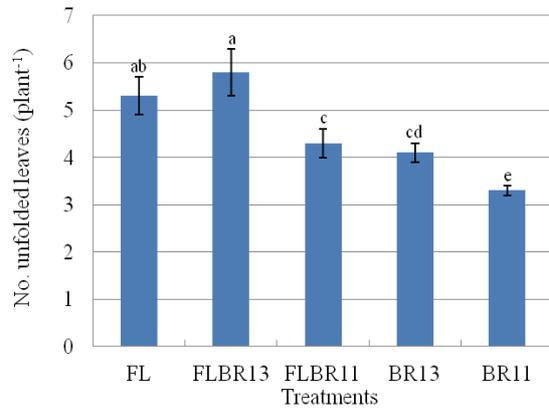


Fig. 4. Number of unfolded leaves per plant of *Ledebouriella seseloides* grown under the plant factory system with different light qualities for 30 days. FL, control; FLBR13, fluorescent lamp + LED (1:3 in energy ratio of blue plus red LED); FLBR11, fluorescent lamp + LED (1:1 in energy ratio of blue plus red LED); BR13, blue + red LED (1:3 in energy ratio); BR11, blue + red LED (1:1 in energy ratio). Different letter indicates the significantly difference at the 5% level by Duncan's multiple range test. Vertical bars represent standard error (n=60).

다는 청색, 적색이나 녹색의 혼합광질에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있다(Oyaert *et al.*, 1999; Khattak and Pearson, 2005; Heo *et al.*, 2009). 이러한 연구 결과들은, 생체중이나 건물중 증가와 같은 식물체의 양적생장이 광질이나 식물 종에 따라 달라질 수 있으나 단일광 보다는 혼합광 조사가 효과적이며, 적색의 단일광은 양적생장에 유의한 영향을 미치지 않는다는 것을 시사한다.

인공광 식물공장과 같은 폐쇄공간내에서 상추나 방풍나물과 같이 지상부를 수확하는 작물을 재배할 경우에는 작물의 생체중이나 건물중 증가와 같은 양적생장을 증가시키기 위하여 LED 단일광 보다는 형광등과 LED 혼합광이나 LED 혼합광이 효과적이라는 것을 알 수 있다. 특히 방풍나물의 경우에는 형광등과의 혼합광 처리구에서 적색광 에너지를 1:3으로 3배 증가시켜 조사하는 것이 1생체중이나 건물중 증가

에 효과적이었다. 본 실험 결과, 형광등의 낮은 적색광역 에너지를 적색 LED를 이용하여 인위적으로 보충해줌으로써 형광등에 비해 식물체의 양적생장을 촉진시킬 수 있었던 것으로 생각된다.

실험기간 중 방풍나물의 잎 발달은 1:1 비율의 청색과 적색 혼합광질에 의해 억제되었고 FLBR13구와 FL구에서 촉진되었으며 두 처리구간에 통계적인 유의차는 없었다. FL구에서 식물체당 엽수는 FLBR13구에서와 같은 수준으로 증가하였으나 생체중이나 건물중이 감소한 것으로 보아, FL구의 잎은 FLBR13구에 비해 크기가 작았거나 엽중 증가가 억제되었기 때문으로 생각된다. FL구에서 엽장과 엽폭 신장 역시 다른 처리구에 비해 현저히 감소하였는데, 방풍나물의 엽면적을 측정하지는 않았으나 FL구에서 전개된 잎의 크기가 다른 처리구에 비해 작다는 것을 알 수 있다.

일반적으로 적색광은 식물체의 화경, 잎, 엽병이나 신초 등의 길이생장을 촉진하는 광질로 알려져 있다(Yanagi *et al.*, 1996; Miyashita *et al.*, 1997; Heo *et al.*, 2003). 방풍나물 잎의 길이생장 결과로부터 적색의 단일광 이외에도 FLBR13구에서와 같이 청색과 적색광을 동일 비율로 혼합한 광을 조사하는 것보다 적색광 에너지를 높은 혼합광질 조사로 잎의 길이 생장을 촉진할 수 있다는 것을 알 수 있다.

인공광이나 자연광 식물공장에서 재배한 상추, 국화나 관엽식물과 같은 일부 식물체에서 엽수 증가에 미치는 광질의 영향이 보고되고 있다. 조직배양한 국화 배양소식물체의 경우에는 광강도가 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 인 청색, 적색과 녹색의 단일광 및 이들 광질을 혼합 조사할 경우, 형광등 조사구나 LED 혼합광 조건에서 엽수가 증가하였다(Heo *et al.*, 2010a). 이 연구 결과에 의하면 다른 광질에 비해 청색과 녹색의 혼합광질이 국화의 엽수증가에 효과적인 것으로 나타났다. 또한 엽수증가에 미치는 LED 혼합광질의 영향은 온실과 같은 자연광 식물공장에서 재배한 관엽식물에서도 볼 수 있다. 온실조건에서 일출과 일몰시에 청색, 적색 및 청색+적색(혼합비율 1:1)의 LED를 30 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 비교적 낮은 광강도로 보광할 경우, 관엽식물인 디펜바키아와 고무나무의 엽수는 청색+적색의 혼합광질에 의해 증가하였다(Heo *et al.*, 2010b). 인

Table 1. Leaf length and width per plant of *Ledebouriella seseloides* grown under the plant factory system with different light qualities for 30 days

Treatments	Leaf length (cm/plant)	Leaf width (cm/plant)
FL	6.4d ^z	8.7 ^c
FLBR13	11.3 ^a	14.1 ^{ab}
FLBR11	10.8 ^{ab}	14.9 ^a
BR13	10.1 ^{ab}	13.9 ^{ab}
BR11	9.1 ^c	12.9 ^b

^zDifferent letter indicates significantly different at the 5% level by Duncan's multiple range test. FL, control; FLBR13, fluorescent lamp + LED (1:3 in energy ratio of blue plus red LED); FLBR11, fluorescent lamp + LED (1:1 in energy ratio of blue plus red LED); BR13, blue + red LED (1:3 in energy ratio); BR11, blue + red LED (1:1 in energy ratio).

공광이나 자연광 식물공장내 작물의 종류와 재배조건은 상이 하였으나 인공광원의 종류에 따라 작물의 엽 발달 및 엽수증가에 미치는 영향이 다르다는 것을 알 수 있다.

상기 연구결과에서 보는 바와 같이 작물의 종류나 환경조건에 따라 식물체의 생장에 미치는 광질의 영향은 다양하다. 본 실험에서 인공광원으로 이용한 LED는 광질 제어가 용이하다는 점에서 작물재배 측면에서의 이용성이 검토되고 있으나, 인공광이나 자연광 식물공장과 같은 시설내 LED 설치를 위한 초기 투자비용은 다른 광원에 비해 현저히 높은 단점이 있다. 따라서 식물공장에서 LED를 보광용이나 주광원으로 이용할 경우에는 형광등이나 메탈할라이드 램프 등과 같은 기존 광원과 병용하여 설비투자 비용이나 전력소모량을 절감하는 광제어 기술 연구가 필요할 것으로 판단된다. 인공광 식물공장에서 재배하는 작물의 양적생장을 증진시킬 목적으로 LED를 이용하여 광질이나 광강도를 제어하는 것은 식물공장 경영비 절감측면에서 주의해야 할 필요가 있다. 특히, 인공광 식물공장에서 생육기간이 짧은 작물에 비해 방풍나물과 같이 1회 정식으로 지상부 전개엽을 지속적으로 수확하는 작물의 경우에는 주로 재배기간 동안의 전력소모량이 생산비용을 결정하기 때문이다. 재배기간이 비교적 긴 방풍나물의 경우에도 생체중, 건물중 및 엽수증가와 같은 양적생장을 촉진하기 위해서 LED만을 사용하는 방식에 비해 기존의 인공광원인 형광등이나 청색+적색의 LED를 혼합하는 병용형 광제어 방식이 효과적인 것으로 판단된다. 그러나 LED에 의한 광질 제어는 양적생장 이외에 식물체내 당, 전분 합성이나 색소발현 등과 관련된 질적생장과 연관성이 깊다(Caldwell *et al.*, 2006; Heo *et al.*, 2006; Sivakumar *et al.*, 2006; Shin *et al.*, 2008; Shoji *et al.*, 2011; Heo *et al.*, 2012). 그러므로 인공광 식물공장내 작물 생장을 위한 광질과 식물체내 물질합성과의 관련성이 구명되어야 할 것이다.

인공광 식물공장내 상추재배와 관련하여 Cha *et al.* (2012)는 형광등을 인공광원으로 하여 적측면 상추를 재배할 경우, 일정 광강도 조건에서는 배양액 EC가 1.5 ds/m 보다 2 또는 3 ds/m일 때 상추의 생체중이 증가한다고 보고하였다. 그러나 상기 배양액 EC 2 또는 3 ds/m 처리구 간에는 엽수증가에 유의성이 없었으며, 오히려 잎의 선단에서는 잎끝마름증(Tip burn)이 발생하였다. 일반적으로 잎끝마름증은 칼슘공급이 불충분하거나 식물체내 양분 불균형에 의해 발생하는 생리장해로, 엽채류 수경재배시 다발하는 대표적인 생리장해의 하나이다(Kozai *et al.*, 1992). 광처리 기간 중 배양액 EC 1.4 ds/m 조건에서 재배한 방풍나물의 경우, 광질이 식물체당 생체중이나 엽수 증가에 미치는 영향은 관찰되었으나 잎끝마름증과 같은 생리장해는 관찰되지 않았다. 현재 인공광 식물공장에서 고품질 상추를 생산하기 위하여 적정 광강도나 수경재배용 배양액 농도를 결정하기 위한 연구결과가 다수 보고되고 있다(Park and Lee, 1996; Lee *et al.*, 2012). 그러나 식물공장과 같이 폐쇄된 공간에서 작물의 생장은 배양액 이외 다른 광, 이산화탄소 농도와 같은 물리환경의 영향을 받기 때문에 복합 물리환경 영향에 대한 연구를 통하여 식물

공장 재배작물의 생장과 생리장해에 대한 관련성 구명 연구가 필요하다.

본 실험에서는 방풍나물의 공장재배기술 개발을 위한 적정 배양액 조성이나 EC와 관련된 내용은 검토되지 않았으나 일정기간 동안 일정 광강도 조건에서, 엽채류 재배용 배양액을 사용하여 90일간 수경재배하였다. 방풍나물의 지상부 생장은 실험기간 동안 배양액 EC나 조성을 달리하지 않은 조건에서 3회차 수확 이후부터 점진적으로 되기 시작하였다. 따라서 엽채류와 달리, 방풍나물과 같이 재배기간이 길고 주기적으로 잎을 수확하는 작물의 경우, 90일 이상 재배기간을 연장시키기 위해서는 재배기간 동안 범용 배양액의 영양성분을 주기적으로 파악하는 등 양분조성과 관련된 연구가 필요할 것으로 판단하였다.

본 실험을 통하여, 기존 광원과 LED의 혼합광질 제어에 의해 식물공장 시스템 내에서 재배기간이 길고 주기적으로 잎을 수확하는 방풍나물 실생묘의 공장형 생산 가능성이 제시되었다. 상기 서술한 바와 같이, 인공광 식물공장에서 상추류와 같이 단기간 1회 수확하는 작물과 달리, 재배기간이 비교적 긴 약용작물을 재배할 경우에는 지상부 환경 제어 이외에 작물의 생장 및 물질합성을 촉진할 수 있는 적정 인공 배양액 관련 연구가 함께 진행되어야 할 것으로 생각된다.

농촌진흥청 식물공장에서는 청색광질에 대한 적색광질의 적정 혼합비율을 결정하는 연구를 통하여 방풍나물 이외에 작물의 양적생장을 극대화하는 연구를 진행중에 있다. 또한 방풍나물의 생장 뿐만 아니라 유용물질 합성 관련 연구를 통하여 광질 제어에 의한 식물체내 물질의 합성량 변화에 대한 결과를 도출할 예정이다. 앞으로 광, 온도, 이산화탄소 농도 등 재배환경 제어 연구를 통하여 방풍나물 이외에 유용 약용작물의 주년 안정생산을 위한 재배시스템으로써 인공광 식물공장의 실용화 및 활용도를 높일 수 있을 것으로 생각된다.

요약

형광등이나 LED와 같은 인공광을 사용하는 식물공장(인공광 식물공장)은 계절에 상관없이 광, 온도 및 습도 등을 인위적으로 제어하면서 작물을 안정적으로 연중 생산할 수 있는 시스템이다. 본 연구에서는 수경재배 방식을 채택하고 있는 인공광 식물공장 시스템 내에서 엽채재배용 배양액을 이용한 방풍나물의 수경재배 가능성과 혼합광질이 생장에 미치는 영향을 검토하였다. 방풍나물은 청색과 적색 LED를 1:1 및 1:3의 비율로 혼합한 혼합광 조건에서 90일간 수행하였다. 광원의 광강도는 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 설정한 후 30일 간격으로 지상부 잎을 3회 수확하여 성장량을 조사하였다. 재배기간 동안 형광등과 LED의 혼합광 조사는 방풍나물 지상부 생장에 유의한 영향을 미치는 것으로 나타났다. 재배개시 30일째 방풍나물 지상부 생체중 및 건물중은 형광등+청색+적색의 혼합광(청, 적색 혼합비율 1:3, FLBR13구)에 의한 영향을 받아, 대조구인 형광등 조사구(FL구)에 비해 각각 3.7배 및 2배 증가하였다. 또한 식물체당 전개엽수는 FLBR13구에서 형광등+

청색+적색 혼합광(청, 적색 혼합비율 1:1) 조사구인 FLBR11 구에 비해 유의하게 증가하였다. LED와 형광등을 혼합 조사한 처리구에서와 같이, 형광등을 혼합하지 않고 청색과 적색의 LED만을 혼합하여 조사한 처리구에서도 청색과 적색의 혼합비율이 1:1인 BR11구에 비해 적색광의 혼합비율을 3배 증가시킨 BR13구에서 방풍나물의 지상부 생장이 촉진되었다.

Acknowledgment

This study was supported by Agenda (Project No. PJ008608) of the National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration, Republic of Korea.

References

- Bula, R.J., Morrow, R.C., Tibbitts, T.W., Barta, D.J., Ignatius, R.W., Martin, T.S., 1991. Light-emitting diodes as a radiation sources for plants, *HortSci.* 26, 203-205.
- Caldwell, C.R., Britz, S.J., 2006. Effect of supplemental ultraviolet radiation on the carotenoid and chlorophyll composition of greenhouse-grown leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars, *J. Food Com. and Anal.* 16, 617-644.
- Cha, M.Y., Kim, J.S., Cho, Y.Y., 2012. Growth response of lettuce to various levels of EC and light intensity in plant factory, *J. Bio-Environ. Cont.* 21, 205-311.
- Cho, Y.Y., Choi, K.Y., Lee, Y.B., Son, J.E., 2012. Growth characteristics of sowthistle (*Ixeris dentata* Nakai) under different level of light intensity, electrical conductivity of nutrient solution and planting density in a plant factory, *Hort. Environ. Biotechnol.* 53, 368-372.
- Heo, J.W., Lee, C.W., Chakrabarty, D., Paek, K.Y., 2002. Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a light-emitting diode (LED), *Plant Growth Regulat.* 38, 225-230.
- Heo, J.W., Lee, C.W., Murthy, H.N., Paek, K.Y., 2003. Influence of light quality and photoperiod on flowering of *Cyclamen perisicum* Mill. cv. 'Dixie White', *Plant Growth Regul.* 40, 7-10.
- Heo, J.W., Shin, k.S., Kim, S.K., Paek, K.Y., 2006. Light quality affects *in vitro* growth of grape 'Teleki 5BB', *J. Plant Biol.* 49, 276-280.
- Heo, J.W., Lee, Y.B., Lee, D.B., Chun, C., 2009. Light quality affects growth, net photosynthetic rate, and ethylene production of *Ageratum*, African marigold, and *Salvia* seedlings, *J. Kor. Hort. Sci. & Tech.* 27, 187-193.
- Heo, J.W., Lee, Y.B., Chang, Y.S., Lee, J.T., Lee, D.B., 2010a. Effects of light quality and lighting type using an LED Chamber System on *Chrysanthemum* growth and development cultured *in vitro*, *Kor. J. Environ. Agr.* 29, 374-380.
- Heo, J.W., Lee, Y.B., Kim, D.E., Chang, Y.S., Chun, C.H., 2010b. Effects of supplementary lighting on growth and biochemical parameters in *Dieffenbachia amoena*'Camella' and *Ficus elastica*'Melany', *J. Kor. Hort. Sci. & Tech.* 28, 51-58.
- Heo, J.W., Kang, D.H., Bang, H.S., Hong, S.G., Chun, C., Kang, K.K., 2012. Early growth, protein content, and phenylalanine ammonia-lyase activity of red curled lettuces grown under different lighting conditions, *J. Kor. Hort. Sci. & Tech.* 30, 6-12.
- Hirai, T., Amaki, W., Watanabe, H., 2006. Effects of monochromic light irradiation by LED on the internodal stem elongation of seedlings in eggplant, leaf lettuce and sunflower, *J. SHITA.* 18, 160-166.
- Ikeda, A., Tanimura, Y., Ezaki, K., Kawai, Y., Nakayama, S., Iwao, K., 1992. Environmental control and operation monitoring in a plant factory using artificial light, *Acta Hort.* 304, 151-158.
- Inden, H., Akamatsu, Y., Matsuda, T., Yamamoto, M., 2011. Low cost plant factory using hybrid electrode fluorescent lamp (HEFL), *Acta Hort.* 907, 157-160.
- Jin, G., Li, J., Piao, H., 1992. Chemical constituents of *Ledebouriella seseloides* Wolff, *China J. Chinese materia medica.* 17, 38-40.
- Khattak, A.M., Pearson, S., 2005. Light quality and temperature effects on antirrhinum growth and development, *J. Zhejiang Univ. Sci.* 6, 119-124.
- Kozai, T., Karion, A., Granto, K.G., Ikeda, H.O., 1992. New greenhouse management, in: Kozai T., Karion, A., Granto, K.G., Ikeda, H.O. (Eds), Askura, Japan, pp. 117-120.
- Lee, S.G., Choi, C.S., Lee, J.G., Jang, Y.A., Nam, C.W., 2012. Effects of different EC in nutrient solution on growth and quality of red mustard and par-choi in plant factory, *J. Bio-Environ. Cont.* 21, 322-326.
- Miyashita, Y., Kimura, T., Kitaya, Y., Kubota, C., Kozai, T., 1997. Effects of red light on the growth and morphology of potato plantlets *in vitro* using light-emitting diodes (LEDs) as a light source for micropropagation. *Acta Hort.* 418, 169-173.
- Morrow, R.C., 2008. LED lighting in horticulture, *HortSci.* 43, 1947-1950.

- Oyaert, E., Volckaert, E., Debergh, P.C., 1999. Growth of a chrysanthemum under coloured plastic films with different light qualities and quantities. *Sci. Hort.* 79, 195-205.
- Park, M.H., Lee, Y.B., 1996. Effect of light intensity and nutrient level on the growth and quality of leaf lettuce in a plant factory, *J. Bio-Env. Con.* 8, 108-114.
- Qin, L., Guo, W.A., Tang, Y., 2008. Selection of candidate salad vegetables for controlled ecological life support system, *Adv. Space Res.* 41, 768-772.
- Saito, Y., Shimizu, H., Nakayama, H., Miyasaka, J., Ohdoi, K., 2010. The effect of light quality on growth of lettuce, *Agricontrol.* 3, 294-298.
- Shimizu, H., Saito, Y., Nakashima, H., Miyasaka, J., Ohdoi, K., 2011. Light environment optimization for lettuce growth in plant factory, *Proceeding of 18th IFAC World Congress.* 605-609.
- Shin, K.S., Murthy, H.N., Heo, J.W., Paek K.Y., 2008. The effect of light quality on the growth and development of in vitro cultured *Doritaenopsis* plants, *Acta Physiol. Plant.* 30, 339-343.
- Shoji, K., Goto, E., Hashida, S., Goto, F., Yoshihara, T., 2011. Effect of light quality on the polyphenol content and antioxidant activity of sweet basil (*Ocimum basilicum* L.), *Acta Hort.* 907, 95-99.
- Sivakumar, G., Heo, J.W., Kozai, T., Paek, K.K., 2006. Effect of continuous or intermittent radiation on sweet potato plantlets *in vitro*, *J. Hort. Sci. and Biotech.* 81, 546-548.
- Takatsuzi, M. 1997. Handbook of Plant Factory, in: Takastuzi, M. (Eds), Tokai University, Japan, pp. 3-8.
- Tennessen, D.J., Singrass, E.L., Sharkey, T.D., 1994. Light emitting diodes as a light source for photosynthesis research, *Photosynthesis Res.* 39, 85-92.
- Watanabe, H., 2011. Light-controlled plant cultivation system in Japan - Development of a vegetable factory using LEDs as a light source for plants, *Acta Hort.* 907, 37-44.
- Yanagi, T., Okamoto, K., Yakita, S., 1996. Effect of blue, red and blue/red lights of two different PPF levels on growth and morphogenesis of lettuce plants, *Acta Hort.* 440, 117-122.
- Yoon, C.G., Choi, H.K., 2011. A study on the various light source radiation conditions and use of LED illumination for plant factory, *J. KIIEE.* 25, 14-22.