

완전제어형 식물생산시스템에서 광질에 따른 아이스플랜트의 생육과 기능성물질 함량

김영진¹ · 김혜민¹ · 황승재^{1,2,3*}

¹경상대학교 대학원 응용생명과학부, ²경상대학교 농업생명과학대학 원예학과, ³경상대학교 농업생명과학연구원

Growth and Phytochemical Contents of Ice Plant as Affected by Light Quality in a Closed-type Plant Production System

Young Jin Kim¹, Hye Min Kim¹, and Seung Jae Hwang^{1,2,3*}

¹Division of Applied Life Science, Graduate School of Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

²Department of Horticulture, College of Agriculture & Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

³Institute of Agriculture & Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

*Corresponding author: hsj@gnu.ac.kr

Abstract

A study was conducted to examine the effects of light quality on the growth and phytochemical contents of ice plant in a closed-type plant production system. Seeds were sown in a 128-cell plug tray using rockwool. The seedlings were then transplanted into a deep floating technique system with recirculating nutrient solution (EC 1.5 dS·m⁻¹, pH 6.5) in a closed-type plant production system. The nutrient solution was supplied at two weeks after transplanting with 2.0 mM NaCl concentration in all treatments for the development of the bladder cells. The three light sources with different light qualities used were as followed; FL (fluorescent lamps), combined RW LED (red:white = 7:3), and combined RBW LED (red:blue:white = 8:1:1) at 150 μmol·m⁻²·s⁻¹ PPFD with a photoperiod of 14/10 hours (light/dark). The results showed that the FL treatment had the greatest growth enhancement effects on the leaf area and the fresh and dry weights of the shoots and roots. The SPAD values were significantly higher under the FL and RBW LED treatments, at 29.8 and 30.6, respectively. No significant difference was observed in salinity under all treatments. Chlorophyll fluorescence was significantly higher under the FL treatment. The total phenol content and antioxidant activity were the highest under the RBW LED treatment. The total flavonoid content was significantly higher under the RBW LED and FL treatments. Hence, the results indicate that the growth of ice plant was maximized under the FL treatment. The phytochemical contents were maximized under the RBW LED treatment.

Additional key words: bladder cell, fluorescent lamp, light emitting diode, *Mesembryanthemum crystallinum* L., salinity

 OPEN ACCESS



Korean J. Hortic. Sci. Technol. 34(6):878-885, 2016
<https://doi.org/10.12972/kjhst.20160092>

pISSN : 1226-8763
eISSN : 2465-8588

Received: May 6, 2016

Revised: August 16, 2016

Accepted: August 24, 2016

Copyright©2016 Korean Society for Horticultural Science.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution NonCommercial License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

본 연구는 농림축산식품부 첨단기술개발사업(과제번호 312034-04)에 의해 수행되었음.

서 언

식물생산시스템이란 일정한 시설 내에서 계절이나 장소에 관계없이 광, 온도, 상대습도 그리고 이산화탄소 농도와 같은 환경조건을 인공적으로 제어하여 계획적으로 작물을 생산하는 재배시스템을 말한다(Takatsuji, 2008). 식물생산시스템은 인공광원만을 이용하여 작물을 재배하는 완전제어형과 인공광원을 보광형태로 이용하는 인공광 병용형으로 구분된다. 식물생산시스템에서 사용 가능한 인공광원으로는 형광등(fluorescent lamp), 고압나트륨 램프(high pressure sodium lamp), 메탈할라이드 램프(metal halide lamp), 그리고 발광다이오드(light-emitting diode, LED) 등이 있으며, 이러한 인공광원들은 광질이 서로 다르기 때문에 사용되는 인공광원에 따라 식물 생육에 다양한 영향을 미친다. 그 중 LED는 낮은 발열량과 반영구적인 수명으로 경제적이며, 크기가 작아 공간 활용이 높고 특정 파장대의 광 조사가 가능한 장점이 있어 식물생산시스템에서 많이 이용되고 있다(Yeh and Chung, 2009; Heo et al., 2013; Lin et al., 2013). 이전의 연구들에서 LED의 이용은 썸바귀의 생육 뿐만 아니라 토마토와 오이 묘의 생육을 증진시켰고(Um et al., 2009; Kim et al., 2016; Matsuda et al., 2016), 광질에 따라 생육뿐만 아니라 기능성물질 함량 등에서 긍정적인 효과가 보고되고 있다(Son et al., 2012; Abinaya et al., 2015).

최근 완전제어형 식물생산시스템 내에서 재배되는 기능성 작물에 대한 소비자들의 관심이 증가하여 그에 따라 안전하면서 기능성물질이 다량 함유된 고부가가치 작물에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그 중 체내 혈당치를 낮춰 당뇨병과 성인병 치료에 효과적인 아이스플랜트(ice plant)가 각광받고 있다(Agarie et al., 2009; Lee et al., 2015). 아이스플랜트는 번행초과에 속하는 다육식물로 기후조건이 열악한 아프리카 남서부의 사막지역이 원산지이며, 발아율이 낮고 성장속도가 일반 엽채류에 비해 상대적으로 느린 식물이다. 잎과 줄기를 가식부위로 이용하며, 특히 잎과 줄기의 표면에 있는 투명한 결정체(bladder cell)에 이노시톨류, 폴리페놀류, 베타카로틴 등과 같은 인체에 유용한 성분과 각종 미네랄 등이 함유되어 있다(Kozai et al., 2011). 현재 국내에서는 완전제어형 식물생산시스템 내에서 아이스플랜트를 이용하여 인공광원, 광도, 재식밀도, EC 농도 등에 따른 생육특성에 관한 연구와 아이스플랜트의 재배 방법에 따른 생산성 연구, 생육모델링 예측 연구가 수행되었다. 하지만 완전제어형 식물생산시스템 내에서 LED의 광질에 따른 아이스플랜트의 생육과 기능성물질 축적에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구는 완전제어형 식물생산시스템에서 인공광원인 형광등과 적색, 청색, 백색광을 혼합한 LED를 이용하여 광질에 따른 아이스플랜트의 생육과 기능성물질에 미치는 효과를 구명하기 위해 수행되었다.

재료 및 방법

실험재료 및 재배환경

실험재료로는 아이스 플랜트(*Mesembryanthemum crystallinum* L.) (Asia Seed Co. Ltd., Korea) 종자를 128구 플러그 트레이(54 x 28 x 4.8cm)에 암면(Rockwool, Grodan Co. Ltd., Denmark) 배지를 이용하여 1셀당 2립씩 파종한 후 경상대학교 부속 농장 벤로형 유리온실에서 20일간 육묘하였다. 1립 이상 발아된 셀은 수습작업을 통해 1셀당 1주씩 남겼으며, 식물체의 본엽이 2-3매 출현했을 때 경상대학교 시설원예학실험실 완전제어형 식물생산시스템(C1200H3, FC Poibe Co. Ltd., Korea)에 9 x 9cm의 재식간격으로 정식하였다. 재배기간 동안의 관주는 재순환 담액식 수경재배방식을 이용하였고, 일본원예시험장 배양액을 조제하여 사용하였다(Table 1). 배양액의 공급은 아이스플랜트의 균일한 생육을 위해 정식 후 2주동안 EC 수준을 1.5dS·m⁻¹로 맞추어 공급하였고, 정식 후 2주째부터 아이스플랜트의 블러더 세포 발달을 위해 재순환 담액식 수경재배시스템에 사용된 양액의 양을 고려하여 2mM의 염화나트륨(NaCl)을 첨가하였다. 재배기간동안 pH는 6.5로 조절하였다. 완전제어형 식물생산시스템의 재배환경은 재배온도 25 ± 1°C, 상대습도 60 ± 10%, 광주기 14/10(명기/암기)로 동일하게 유지시켰고, 광합성유효광량자속밀도는 광도계(HD2101.2, Delta Ohm S.r.l., Italy)를 이용하여 식물체의 상부 잎을 기준으로 모든 처리구를

150 ± 10 μmol·m⁻²·s⁻¹ PPFD로 고정하였다.

인공광원과 광파장

실험에 사용된 인공광원은 형광등(TLD 32W/865RS, Philips Co. Ltd., The Netherlands)을 대조구로 사용하였고, 적색, 청색, 백색 LED를 조합하여 RW LED(red:white = 7:3, KC Chemical Co. Ltd., Korea)와 RBW LED(red:blue:white = 8:1:1, KC Chemical Co. Ltd., Korea) 2종류의 LED 혼합광원을 실험 처리구로 사용하였다. 광파장은 분광복사계(ILT950, International Light Co. Ltd., USA)를 이용하여 300–700nm 범위를 1nm 간격으로 측정하였다(Fig. 1).

생육조사

광질에 따른 아이스플랜트의 생육을 비교하기 위해 정식 후 28일째에 엽면적 측정기(LI-3100, LI-COR Inc., USA)를 이용하여 엽면적을 측정하였고, 전자저울(EW 220–3NM, Kern&Sohn GmbH., Germany)을 이용하여 각 처리별 지상부와 지하부의 생체중을 측정하였으며, 건물중은 시료를 70°C 향온 건조기(Venticell-222, MMM Medcenter Einrichtungen GmbH.,

Table 1. Chemicals and their concentration used as the nutrient solution for the culture of ice plant.

| Chemical | Conc. (mg·L ⁻¹) | Chemical | Conc. (mg·L ⁻¹) |
|--|-----------------------------|---|-----------------------------|
| Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O | 944.0 | Fe-EDTA | 23.00 |
| NH ₃ NO ₃ | 54.0 | H ₃ BO ₃ | 2.94 |
| KH ₂ PO ₄ | 181.0 | CuSO ₄ ·5H ₂ O | 0.08 |
| MgSO ₄ ·7H ₂ O | 493.0 | MnSO ₄ ·5H ₂ O | 2.00 |
| K ₂ SO ₄ | 580.0 | Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O | 0.03 |
| | | ZnSO ₄ ·7H ₂ O | 0.20 |

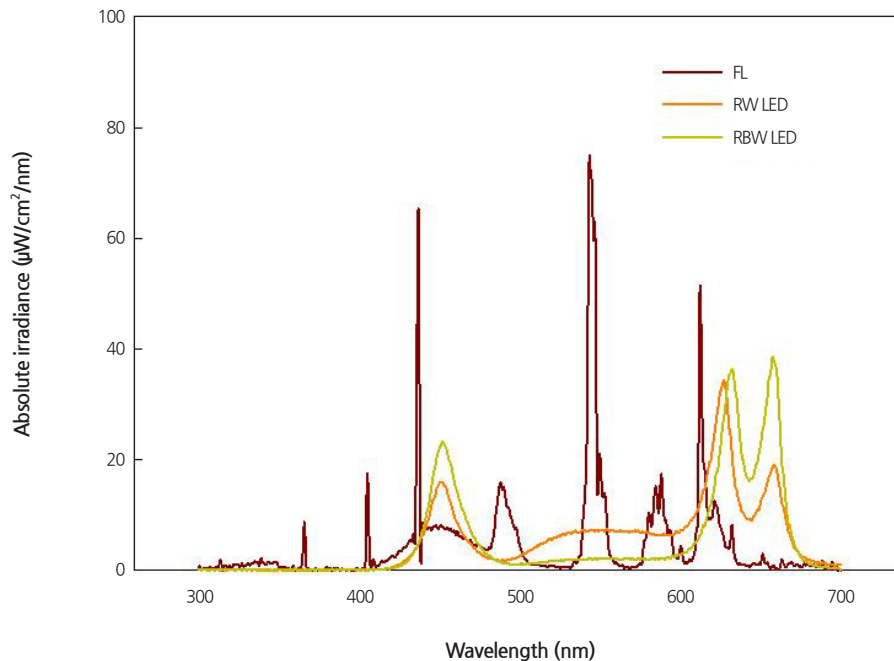


Fig. 1. Spectral distribution of light qualities used in a closed-type plant production system. The light sources are FL, fluorescent lamp; RW LED, red:white = 7:3; and RBW LED, red:blue:white = 8:1:1.

Germany)에서 72시간 건조한 후 측정하였다. SPAD 값은 엽록소 측정기(SPAD 502, Konica Minolta Inc., Japan)를 이용하였고, 엽록소형광 측정기(PAM-2100, Heinz Walz GmbH, Germany)를 이용하여 식물의 스트레스 지수를 나타내는 엽록소형광 값인 Fv/Fm을 측정하였다. 엽도 측정을 위해 아이스플랜트 생시료 5g을 45mL의 증류수에 희석하여 엽도계(TM-30D, Takemura Co. Ltd., Japan)를 이용하였다.

총페놀 함량, 총플라보노이드 함량 및 항산화능 분석

총페놀 함량과 총플라보노이드 함량 측정을 위해 아이스플랜트 잎을 액체질소로 동결시킨 후 -72°C 의 초저온 냉동고(NF-140SF, Nihon Freezer Co. Ltd., Japan)에 보관하여 분석에 사용하였다. 아이스플랜트의 총페놀 함량은 Folin-Ciocalteu 방법을 일부 변형하여 분석하였다(Yu et al., 2002). 분석을 위해 보관한 시료 1g을 막자사발에 넣어 액체질소와 함께 분쇄하였으며 5mL의 80%(v/v) 메탄올을 추가하여 분석을 위한 샘플을 추출한 후 마이크로 튜브에 2mL씩 넣고 암상태에서 12시간 동안 보관하였다. 그 후 샘플을 4°C 에서 10,000rpm으로 10분간 원심분리 시킨 후 상층액을 이용하였다. 증류수 900 μL 와 50%(v/v) Folin-Ciocalteu 시약(Sigma-Aldrich, MO, USA) 500 μL , 2.5% Na_2CO_3 1mL의 혼합물에 추출물 100 μL 를 넣고 vortex mixer(Vortex-geenie 2, Scientific Industries Inc., USA)로 2초간 섞은 후 암조건에서 40분간 반응시켰다. 반응이 끝난 시료는 분광광도계(Libra S22, biochrom Ltd., UK)를 이용하여 765nm에서 흡광도를 측정하였다. 아이스플랜트의 총페놀 함량은 1mg당 gallic acid(μg)로 표현하였다.

아이스플랜트의 총플라보노이드 함량은 Kumaran and Karunakaran(2007)의 방법을 일부 변형하여 분석하였고, 시료의 추출방법은 총페놀 함량 분석과 동일하게 수행하였다. 80% 메탄올 900 μL 와 2% AlCl_3 1mL의 혼합물에 추출물 100 μL 를 넣고 vortex mixer로 2초간 섞은 후 30분간 반응시켰다. 반응이 끝난 시료는 분광광도계를 이용하여 415nm에서 흡광도를 측정하였다. 아이스플랜트의 총플라보노이드 함량은 1mg당 rutin(μg)으로 표현하였다.

항산화능은 Prieto et al.(1999)의 방법을 이용하여 분석하였고, 시료의 추출방법은 총페놀 함량 분석과 동일하게 수행하였다. 0.6M H_2SO_4 와 28mM Na_3PO_4 , 4mM $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 를 혼합한 용액에 추출물 300 μL 를 넣고 vortex mixer로 2초간 섞은 후 95°C 의 항온 수조(GR150, Grant Instruments Ltd., UK)에 90분간 반응시켰다. 혼합물을 상온까지 식힌 후 분광광도계를 이용하여 695nm에서 흡광도를 측정하였다. 아이스플랜트의 항산화능은 1mg당 ascorbic acid(μg)로 표현하였다.

통계분석

실험구 배치는 완전임의배치 3반복으로 하였고, 반복당 3주씩 정식하였다. 통계분석은 SAS 프로그램(SAS 9.1, SAS Institute Inc., USA)을 이용하여 분산분석(ANOVA)을 실시하였고, 평균 간 비교는 Tukey 다중검정을 이용하였다. 그래프는 SigmaPlot 프로그램(Sigma Plot 12.0, Systat Software, USA)을 이용하여 나타냈다.

결과 및 고찰

생육조사 결과

정식 후 28일째 아이스플랜트의 생육조사 결과는 Table 2와 같다. 광질 처리에 따른 아이스플랜트의 엽면적과 지상부와 지하부의 생체중 및 건물중은 형광등에서 유의적으로 높은 값을 나타냈다. 이는 식물공장에서 재배된 반결구상추 'Seneca RZ' 품종의 생육이 메탈할라이드 램프나 RBW LED보다 형광등에서 효과적으로 나타난 결과와 유사하다(Kim et al., 2013). 하지만 Um et al.(2010)에 따르면 '청치마' 상추의 경우 형광등에서 생육이 가장 양호했고, '물로로샤'와 '적치마' 상추는 형광등과 메탈할라이드 램프 혼합광에서 좋았다. 이러한 결과들을 종합해보면 작물에 따라서 인공광원의 영향이 서로 다르게 나타난다는

것을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 형광등은 다양한 파장대의 광 스펙트럼을 포함하며 특히 550nm의 녹색광 영역에서 높은 피크를 나타냈다(Fig. 1). 일반적으로 저광도의 녹색광 단일조사는 식물의 도장과 생체중을 감소시킨다고 보고 되었다(Johkan et al., 2012; Son et al., 2012). 본 연구에서는 상대적으로 녹색광 영역이 높은 형광등에서 아이스플랜트의 생육이 효과적인 것으로 나타났는데(Fig. 2), 이는 적색과 청색 혼합광에 녹색광을 보광하여 재배된 상추의 생육이 적색과 청색 혼합광과 비교해서 효과적이라는 결과(Kim et al., 2004)와 백색광과 녹색광을 혼합하여 조사할 경우 해바라기 잎의 광합성을 촉진시켜 생육을 향상시킨다는 연구 결과와 유사하다(Terashima et al., 2009). 따라서, 녹색광이 적절히 포함된 형광등에서 아이스플랜트의 생육이 우수하였으며 녹색광의 적정 비율에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

광질 처리에 따른 아이스플랜트의 SPAD 값은 RBW LED에서 유의적으로 가장 높은 값을 나타냈다(Table 2). 실험에 사용된 RBW LED는 다른 광원과 비교할 때 460nm의 청색광 영역에서 높은 피크를 가지는데, 이전의 연구에서 청색광의 조사는 완두와 오이 재배시 엽록소 함량을 증가시키고, 적치마 상추의 경우 SPAD 값을 증가시킨다고 알려져 있다(Wu et al., 2007; Wang et al., 2009; Lee and Kim, 2014). 따라서, 본 연구에서 사용된 RBW LED의 청색광 피크가 아이스플랜트의 SPAD 값에 영향을 미친 것으로 판단된다. 식물체의 스트레스 지표로 사용되는 엽록소형광(Fv/Fm)의 경우, 정상적인 환경에서는 0.8-0.84의 수치를 나타낸다(Baker and Rosenqvist, 2004). 본 연구에서 광질에 따른 아이스플랜트의 Fv/Fm 값은 형광등에서 0.806으로 가장 높은 값을 나타내 광질에 따른 생육 스트레스를 가장 적게 받았으며, RW LED, RBW LED 순으로 Fv/Fm 값을 나타

Table 2. Effect of light qualities on the growth of ice plant measured at 28 days after transplanting in a closed-type plant production system.

| Light source ^z | Leaf area (cm ²) | Fresh weight (g) | | Dry weight (g) | | SPAD value | Chlorophyll fluorescence (Fv/Fm) | Salinity (%) |
|---------------------------|------------------------------|------------------|--------|----------------|--------|------------|----------------------------------|--------------|
| | | Shoot | Root | Shoot | Root | | | |
| FL | 131.6 a ^y | 12.80 a | 1.70 a | 0.35 a | 0.07 a | 29.8 a | 0.806 a | 0.33 a |
| RW LED | 53.5 c | 5.21 c | 0.40 c | 0.11 c | 0.02 c | 26.6 b | 0.795 ab | 0.37 a |
| RBW LED | 74.7 b | 7.89 b | 0.77 b | 0.21 b | 0.04 b | 30.6 a | 0.788 b | 0.43 a |

^zThe light sources are FL, fluorescent lamp; RW LED, red:white = 7:3; and RBW LED, red:blue:white = 8:1:1.

^yMean separation within columns by Tukey's multiple range test at $p = 0.05$.

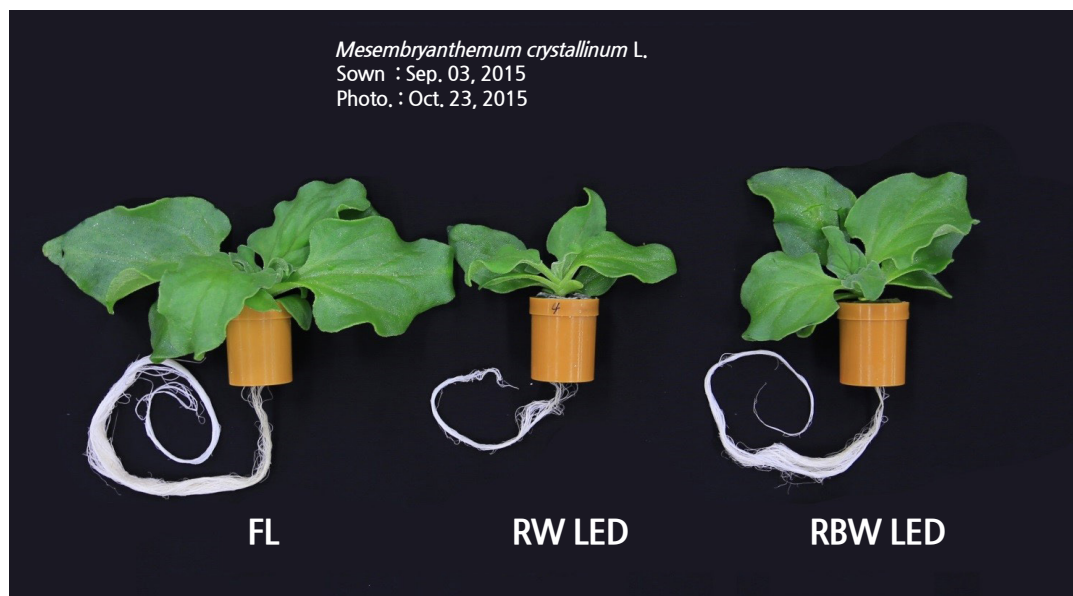


Fig. 2. Growth of ice plant as affected by light qualities in a closed-type plant production system. The light sources are FL, fluorescent lamp; RW LED, red:white = 7:3; and RBW LED, red:blue:white = 8:1:1.

났다. 아이스플랜트는 스트레스를 받으면 줄기와 잎 표면에 물방울 모양의 블러더 세포를 형성하는데 이 세포가 많아질수록 엽분을 많이 함유한다(Kozai et al., 2011). 광질에 따른 엽도의 경우 처리별 유의적인 차이가 없었지만 RBW LED에서 다른 처리들에 비해 0.43%로 가장 높은 수치를 나타냈다. 이는 RBW LED 처리에서 재배된 아이스플랜트가 광질에 따른 스트레스를 가장 많이 받았기 때문에 블러더 세포가 많아져 엽도가 높은 것으로 판단된다.

총페놀 함량, 총플라보노이드 함량 및 항산화능

아이스플랜트의 기능성물질을 분석한 결과는 Fig. 3과 같다. 광질에 따른 아이스플랜트의 총페놀 함량은 RBW LED 처리에서 $3.3\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 으로 가장 높은 값을 나타냈다. 총플라보노이드 함량은 형광등과 RBW LED에서 유의적으로 높았으며, 특히

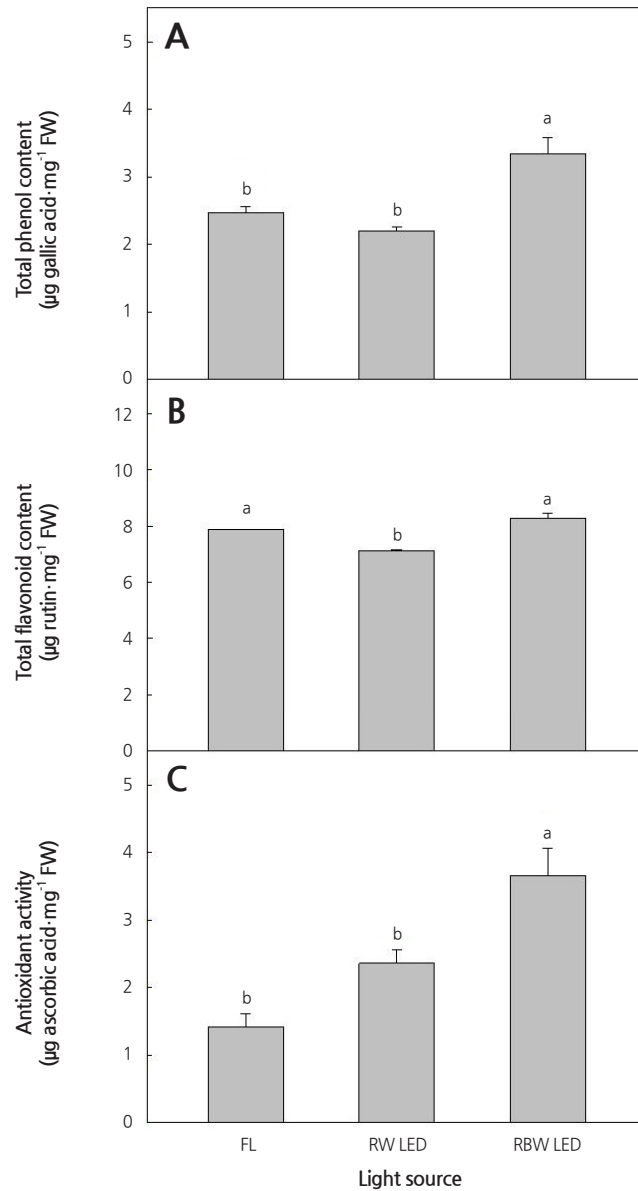


Fig. 3. Total phenol content (A), total flavonoid content (B), and antioxidant activity (C) of ice plant as affected by light qualities in a closed-type plant production system. The light sources are FL, fluorescent lamp; RW LED, red:white = 7:3; and RBW LED, red:blue:white = 8:1:1. Vertical bars indicate standard error of the means. Tukey's multiple range test at $p = 0.05$.

RBW LED 처리에서 $8.3\mu\text{g}\cdot\text{mg}^{-1}$ 으로 가장 높은 값을 나타냈다. 모든 식물체는 환경적인 스트레스를 받으면 식물체 내에 2차 대사산물을 축적하기 때문에 항산화 물질의 양이 많아 진다(Dixon and Paiva, 1995). 본 연구에서 광질에 따른 아이스플랜트의 스트레스 지수인 Fv/Fm 값을 고려하였을 때(Table 2), RBW LED에서 값이 가장 낮게 나타나 스트레스가 가장 높았으며 이러한 결과로 기능성물질의 함량 또한 가장 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한 실험에 사용된 RBW LED의 경우 460nm의 청색 피크 파장에서 다른 광질에 비해 높은 방사량을 보이는데(Fig. 1), 이는 상추 재배시 청색 LED 처리가 페놀 물질과 항산화 물질의 축적을 유도하는데 효과적이라는 결과와 유사하다(Son et al., 2012). 아이스플랜트의 항산화능 역시 총페놀, 총플라보노이드 함량과 유사한 경향으로 460nm의 청색광 영역에서 높은 피크 파장을 가진 RBW LED 처리에서 가장 높은 값을 나타냈다.

결과적으로 광질에 따른 아이스플랜트의 생육은 형광등을 이용한 처리에서 가장 양호하였고, 기능성물질의 경우 Fv/Fm 수치가 상대적으로 낮은 RBW LED 처리에서 효과적이었다. 하지만 본 연구에서 사용된 형광등과 LED 혼합광원의 경우 다양한 파장대를 가지고 있기 때문에 어떠한 특정 파장대가 아이스플랜트의 생육과 기능성물질 축적에 확실한 영향을 미치는지 판단하기 어렵다고 생각되어 특정 파장에 따른 단일 LED 광원을 이용하여 아이스플랜트의 생육과 기능성물질 축적에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

초 록

본 연구는 밀폐형 식물생산시스템에서 아이스플랜트의 생육과 기능성물질에 따른 광질의 효과를 구명하고자 수행하였다. 아이스플랜트 종자를 128구 플러그 트레이에 암면을 이용하여 파종하였고, 묘는 밀폐형 식물생산시스템에서 담액식수 경재배를 이용하여 정식하고 재배하였다(EC $1.5\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, pH 6.5). 정식 후 2주째부터 아이스플랜트의 블러더 세포 발달을 위해 2mM의 염화나트륨(NaCl)을 첨가하여 공급하였다. 실험에 이용된 다른 광질을 가진 세 개의 인공광원으로는 형광등과 RW LED, RBW LED를 사용하였다. 이때 광주기는 14/10(명기/암기), 광도는 $150\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD로 설정했다. 결과적으로 엽면적, 지상부와 지하부의 생체중과 건물중은 형광등 처리에서 아이스플랜트의 생육 증진에 가장 효과적이었다. SPAD 값은 형광등과 RBW LED 처리에서 각각 29.8과 30.6으로 높은 값을 나타냈다. 염도는 모든 처리구에서 유의적인 차이가 없었다. 엽록소 형광은 형광등 처리에서 유의적으로 가장 높았다. 총페놀함량과 항산화능은 RBW LED 처리에서 높은 값을 나타냈다. 총플라보노이드 함량은 형광등과 RBW LED 처리에서 유의적으로 높았다. 따라서, 본 결과는 형광등 처리에서 아이스플랜트의 생육이 가장 효과적인 것으로 나타났다. 반면에 기능성물질은 RBW LED 처리에서 가장 효과적이었다.

추가주요어: 블러더 세포, 형광등, 발광다이오드, *Mesembryanthemum crystallinum* L., 염도

Literature Cited

- Abinaya M, Prabhakaran S, Nur H, Ko CH, Jeong BR (2015) Blue LED light enhances growth, phytochemical contents, and antioxidant enzyme activities of *Rehmannia glutinosa* in vitro. *Hortic Environ Biotechnol* 56:105-113. doi: 10.1007/s13580-015-0114-1
- Agarie S, Kawaguchi A, Kodera A, Sunagawa H, Kojima H, Nose A, Nakahara T (2009) Potential of the common ice plant, *Mesembryanthemum crystallinum* as a new high-functional food as evaluated by polyol accumulation. *Plant Prod Sci* 12:37-46. doi: 10.1626/pp.s.12.37
- Baker NR, Rosenqvist E (2004) Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. *J Exp Bot* 55:1607-1621. doi: 10.1093/jxb/erh196
- Dixon RA, Paiva NL (1995) Stress-induced phenylpropanoid metabolism. *Plant Cell* 7:1085-1097. doi: 10.1105/tpc.7.7.1085
- Heo JW, Kim DE, Han KS, Kim SJ (2013) Effect of light-quality control on growth of *Ledebouriella seseloides* grown in plant factory of an artificial light type. *Kor J Environ Agric* 32:193-200. doi: 10.5338/KJEA.2013.32.3.193

- Johkan M, Shoji K, Goto F, Hashida T, Yoshihara T (2012) Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environ Expt Bot* 75:128-133. doi: 10.1016/j.envexpbot.2011.08.010
- Kim DE, Lee HJ, Kang DH, Lee GI, Kim YH (2013) Effects of artificial light sources on the photosynthesis, growth and phytochemical contents of butterhead lettuce (*Lactuca sativa* L.) in the plant factory. *Protected Hortic Plant Fac* 22:392-399. doi: 10.12791/KSBE.2013.22.4.392
- Kim HM, Kang JH, Jeong BR, Hwang SJ (2016) Light quality and photoperiod affect growth of sowthistle (*Ixeris dentate* Nakai) in a closed-type plant production system. *Kor J Hortic Sci Technol* 34:67-76
- Kim HH, Goins GD, Wheeler RM, Sager JC (2004) Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red and blue light-emitting diodes. *HortScience* 39:1617-1622
- Kozai T, Koto H, Nakayama C, Nozue M, Nishina H, Taniguchi A, Takachuzi M, Murase H, Sugimoto K, et al (2011) Cultivation of ice plant. In SY Nam, CH So, GH Cho, eds. *Industrial of agriculture*. RGB Press, Seoul, Korea, pp 135-143
- Kumaran A, Karunakaran J (2007) In vitro antioxidant activities of methanol extracts of five *Phyllanthus* species from India. *Food Sci Technol* 40:344-352. doi: 10.1016/j.lwt.2005.09.011
- Lee JS, Kim YH (2014) Growth and anthocyanins of lettuce grown under red or blue light-emitting diodes with distinct peak wavelength. *Kor J Hortic Sci Technol* 32:330-339. doi: 10.7235/hort.2014.13152
- Lee SY, Choi HD, Yu SN, Kim SH, Park SK, Ahn SC (2015) Biological activities of *Mesembryanthemum crystallinum* (ice plant) Extract. *J Life Sci* 25:638-645. doi: 10.5352/JLS.2015.25.6.638
- Lin KH, Huang MY, Huang WD, Hsu MH, Yang ZW, Yang CM (2013) The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Sci Hortic* 150:86-91. doi: 10.1016/j.scienta.2012.10.002
- Matsuda R, Yamano T, Murakami K, Fujiwara K (2016) Effects of spectral distribution and photosynthetic photon flux density for overnight LED light irradiation on tomato seedling growth and leaf injury. *Sci Hortic* 198:363-369. doi: 10.1016/j.scienta.2015.11.045
- Prieto P, Pineda M, Aguilar M (1999) Spectrophotometric quantitation of antioxidant capacity through the formation of a phosphomolybdenum complex: Specific application to the determination of vitamin E. *Anal Biochem* 269:337-341. doi: 10.1006/abio.1999.4019
- Son KH, Park JH, Kim D, Oh MM (2012) Leaf shape index, growth, and phytochemicals in two leaf lettuce cultivars grown under monochromatic light-emitting diodes. *Kor J Hortic Sci Technol* 30:664-672. doi: 10.7235/hort.2012.12063
- Takatsuji M (2008) Definition and meaning of the plant factory. In SW Kang, JP Baek, SG Seo, KW Park, YB Lee, SH Kim, eds, *Plant factory*. World Science, Seoul, Korea, pp 8-13
- Terashima I, Fujita T, Inoue T, Chow WS, Oguchi R (2009) Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *Plant Cell Physiol* 50:684-697. doi: 10.1093/pcp/pcp034
- Um YC, Jang YA, Lee JG, Kim SY, Cheong SR, Oh SS, Cha SH, Hong SC (2009) Effects of selective light sources on seedling quality of tomato and cucumber in closed nursery system. *Protected Hortic Plant Fac* 18:370-376
- Um YC, Oh SS, Lee JG, Kim SY, Jang YA (2010) The development of container-type plant factory and growth of leafy vegetables as affected by different light sources. *Protected Hortic Plant Fac* 19:333-342
- Wang H, Gu M, Cui J, Shi K, Zhou Y, Yu J (2009) Effects of light quality on CO₂ assimilation, chlorophyll-fluorescence quenching, expression of Calvin cycle genes and carbohydrate accumulation in *Cucumis sativus*. *J Photochemistry and Photobiology B: Biol* 96:30-37. doi: 10.1016/j.jphotobiol.2009.03.010
- Wu MC, Hou CY, Jiang CM, Wang YT, Wang CY, Chen HH, Chang HM (2007) A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings. *Food Chem* 101:1753-1758. doi: 10.1016/j.foodchem.2006.02.010
- Yeh N, Chung JP (2009) High-brightness LEDs-energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Rev* 13:2175-2180. doi: 10.1016/j.rser.2009.01.027
- Yu L, Haley S, Perret J, Harris M, Wilson J, Qian M (2002) Free radical scavenging properties of wheat extracts. *J Agri Food Chem* 50:1619-1624. doi: 10.1021/jf010964p