

밀폐형 식물생산시스템에서 상추재배를 위한 인공광원과 신개발 배지의 적용

이혜리¹ · 김혜민⁵ · 김현민¹ · 박상현⁶ · 황승재^{1,2,3,4*}

¹경상대학교 대학원 응용생명과학부, ²경상대학교 농업생명과학대학 농업식물과학과,
³경상대학교 농업생명과학연구원, ⁴경상대학교 생명과학연구원,
⁵국립원예특작과학원 시설원예연구소, ⁶스미더스 오아시스 코리아 연구개발팀

Applicability of Artificial Light Source and Newly Developed Growing Medium for Lettuce Cultivation in a Closed-type Plant Production System

Hye Ri Lee¹, Hye Min Kim⁵, Hyeon Min Kim¹, Sang Hyun Park⁶, and Seung Jae Hwang^{1,2,3,4*}

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

²Department of Agricultural Plant Science, College of Agriculture & Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

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

⁴Research Institute of Life Science, Gyeongsang National University, Jinju 52828, Korea

⁵Protected Horticulture Institute, National Institute of Horticultural & Herbal Science, Rural Development Administration, Haman 52024, Korea

⁶Division of Research, Smithers Oasis Korea, Cheonan 31025, Korea

Abstract. This study was conducted to evaluate the growth characteristics of lettuce (*Lactuca sativa* L.) as affected by artificial light sources and different growing media in a closed-type plant production system (CPPS). The lettuce seeds were sown in the 128-cell plug tray filled with 5 different growing media such as urethane sponge (US), rock-wool (RW), Q-plug (QP), TP-S2 (TP) and PU-7B (PU). The germination rate of lettuce seeds was examined during 12 days after sowing. On the 13 days after sowing, the lettuce seedlings were transplanted in a CPPS with temperature $25 \pm 1^\circ\text{C}$ and nutrient solution ($\text{EC } 2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, pH 6.5) using recirculating deep floating technique system. The light sources were set with FL (fluorescent lamps) and combined RB LEDs (red : blue = 7 : 3) with $150 \pm 10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PPFD and a photoperiod of 14/10 hours (light/dark). The initial germination rate of lettuce was the highest in TP. The final germination and mean daily germination were the significantly highest in RW, QP and TP. The plant height, leaf length, leaf width, leaf area, and fresh and dry weights of shoot were the greatest in QP irradiated with RB LED. The number of leaves, fresh and dry weights of root and SPAD were the greatest in QP and TP irradiated with RB LED. The root length was the longest in TP irradiated with RB LED. Therefore, these results indicate that RB LED was effective for the growth of lettuce and it was also found that the QP and TP were effective for the germination and growth of lettuce in a CPPS. In addition, we confirmed the applicability of the newly developed growing medium TP for the lettuce production in a CPPS.

Additional key words : deep floating technique, fluorescent lamp, light-emitting diode, Q-plug

서 론

인공광을 이용한 밀폐형 식물생산시스템은 외부 환경에 영향을 받지 않기 때문에 고품질의 작물 생산이 가능하다 (Kozai 등, 2000). 또한, 시설 내에서 최적 재배환경을 유지하면서 연중 균일한 고품질의 작물 생산할 수 있다. 사용 가능한 인공광원으로는 고압나트륨등, 메탈할라이드등, 형

광등, 발광다이오드(LED, Light-emitting diodes) 등이 있으나, 고압나트륨등과 메탈할라이드등은 청색광이나 적색광이 부족하고, 에너지 효율성이 낮아 밀폐형 식물생산시스템 내에서 식물 재배를 위한 단독 광원으로 사용하기에 어려움이 따른다. 형광등은 식물에 근접 조사할 수 있고, 광량 조절이 가능하여 우수한 품질의 작물생산이 가능한 것으로 보고되고 있다(Kim 등, 2008). LED는 형광등을 비롯한 방전램프에 비해 수명이 길고, 전력소모가 적고, 광질 선택 및 제어가 용이하여 식물재배용 인공광원으로서 많은 연구가 진행되고 있다(Stutte, 2015; Kang 등, 2016).

*Corresponding author: hsj@gnu.ac.kr

Received February 13, 2019; Revised April 4, 2019;

Accepted April 8, 2019

작물의 안정적 생산을 위해서는 작물의 파종 또는 정식 전에 적절한 배지 사용을 하고 재배기간 동안에도 근권부 환경을 적합한 상태로 유지될 수 있어야 한다. 즉, 안정된 pH, 적절한 배양액의 수준과 조성이 이루어져야 한다(Nelson, 2003; Choi 등, 2009). 이러한 이유로 식물공장의 배지는 수경재배에 용이한 우레탄스펀지나 암면의 이용률이 증가되고 있다. 우레탄스펀지는 가격이 저렴하고 취급이 용이하여 식물재배용 배지로 적절하게 이용할 수 있지만 Seo 등(2007)과 Lee 등(2004)에 따르면 우레탄스펀지의 물리적 구조상 수분 이동이 수직으로 일어나 배지의 상부가 건조되어 시금치 육묘 시 수분 공급이 저해되고 발아율이 저조한 문제가 발생하는 것으로 보고되었고, 실제 엽채류 수경재배 농가에서도 이러한 문제를 지적하고 있다. 암면은 배지의 물리성이 균일하여 양수분관리가 용이하고 재배자가 원하는 pH와 EC 유지가 쉽다는 장점이 있다. 하지만 대부분의 암면은 외국에서 수입되고 원료도 전량 수입국에서 가공 및 보급하기 때문에 구입단가가 높아 작물의 생산단가를 높이는 원인이 되고 있으며(Hwang과 Jeong, 2002), 사용 후 폐기가 어렵고 환경오염을 유발하는 문제가 있다(Kim과 Jeong, 2003). 이 외에도 유기물 인공배지인 Q-plug, 원통형 종이포트 등이 있으며, 이것들은 암면과는 달리 쉽게 분해되는 장점이 있으나 생육초기에 양액의 일부 성분이 흡착되어 생리장해를 일으킬 수 있으며 현재까지 충분한 현장 적용 검증이 진행되지 않은 실정이다.

식물재배용 배지를 전문적으로 생산하는 일부 농산업체 및 연구자는 이러한 문제를 해결하고자 대규모 상업적 수경재배에 활용할 수 있는 파종용, 육묘용, 재배용 배지 개발에 관한 연구를 진행하고 있다(No 등, 2012; Kim 등, 2013). 새로 개발된 배지는 생산과정에서 배지의 물리성(총 공극, 용기용수량, 가비중 등)의 조절뿐만 아니라 수경재배 시 배지분해물에 의한 관 막힘 등의 문제점을 해결할 수 있어 원예용 배지로서 활용도가 높을 것으로 기대하고 있다(Park 등, 2012).

상추(*Lactuca sativa* L.)는 짬용, 샐러드용 등으로 이용

가치가 높아져 다양한 품종들의 수요가 높은 엽채류 작물이다. 그리고 주년생산을 하는 인공광 이용형 식물공장의 생산방식에 적합한 작물로 알려져 있으며, 광에 대한 식물 반응을 연구하는 모델식물로서 활용되고 있다(Dougher와 Bugbee, 2001; Kim 등, 2004). 또한 재배가 쉽고 생육기간이 짧아 밀폐형 식물생산시스템 연구에 다양하게 이용되고 있다.

따라서 본 연구는 밀폐형 식물생산시스템 내에서 고품질의 상추를 연중생산하기 위한 적정 광원을 선발하고, 상업적으로 이용되고 있는 배지들과 비교를 통한 신개발 배지의 적용 가능성을 평가하고자 수행되었다.

재료 및 방법

1. 실험재료 및 재배환경

밀폐형 식물생산시스템(C1200H3, FC Poibe Co. Ltd., Seoul, Korea) 내에서 5종의 배지(Table 1)를 이용하여 128구 플러그 트레이에 충전한 후 상추 ‘농적치마’(*Lactuca sativa* L., ‘Nongjeogchima’, Syngenta Korea Co. Ltd., Seoul, Korea)종자를 1구당 1립씩 파종하였다. 2017년 07월 19일부터 2017년 07월 30일까지 12일간 온도 25±1°C, 광도 150±10µmol·m⁻²·s⁻¹ photosynthetic photon flux density(PPFD)와 광주기 14/10(명기/암기)로 형광등(FHF32SSEX-D, Osram Co. Ltd., Munich, Germany) 하에서 발아 및 육묘를 하였다. 파종 후 13일째의 상추 묘를 형광등과 RB LEDs(red:blue = 7:3, L-PEC Co. Ltd., Jeonju, Korea) 하에 9×9cm의 재식간격으로 정식하였다. 형광등과 RB LED의 광과장 분포는 Fig. 1과 같았다. 재배환경은 육묘조건과 동일하게 유지하였으며, 광도는 상추의 상부에서 광도계(HD2101.1, Delta OHM Co. Ltd., Padova, Italy)를 이용하여 측정하였으며, 광과장은 분광복사계(ILT950, International Light Co. Ltd., MA, USA)를 이용하여 측정하였다. 관수는 파종 후 12일까지는 US를 제외하고는 2일 1회 수도물을 저면 관수하였으며, US는 Choi 등(2011)의 방법에 따라 플러그

Table 1. The type, manufacturer, and specification of the five media used in the experiment.

	Medium	Type ^z	Manufacturer	Specification ^y (mm)
Commercial medium	Urethane sponge (US)	Inorganic material	Gafatec Co. Ltd., Hwaseong, Korea	28 × 28 × 30
	Rockwool (RW)	Inorganic material	Grodan Co. Ltd., Roermond, The Netherlands	32 × 32 × 27
	Q plug (QP)	Mixed material	Ihort Co. Ltd., CA, USA	15 × 25 × 25
Newly developed medium	TP-S2 (TP)	Mixed material	Smithers Oasis Korea Co. Ltd., Chenonan, Korea	27 × 25 × 20
	PU-7B (PU)	Inorganic material	Smithers Oasis Korea Co. Ltd., Chenonan, Korea	27 × 28 × 33

^zMixed material means mixture of organic and inorganic materials.

^ySpecifications were measured as width × length × height.

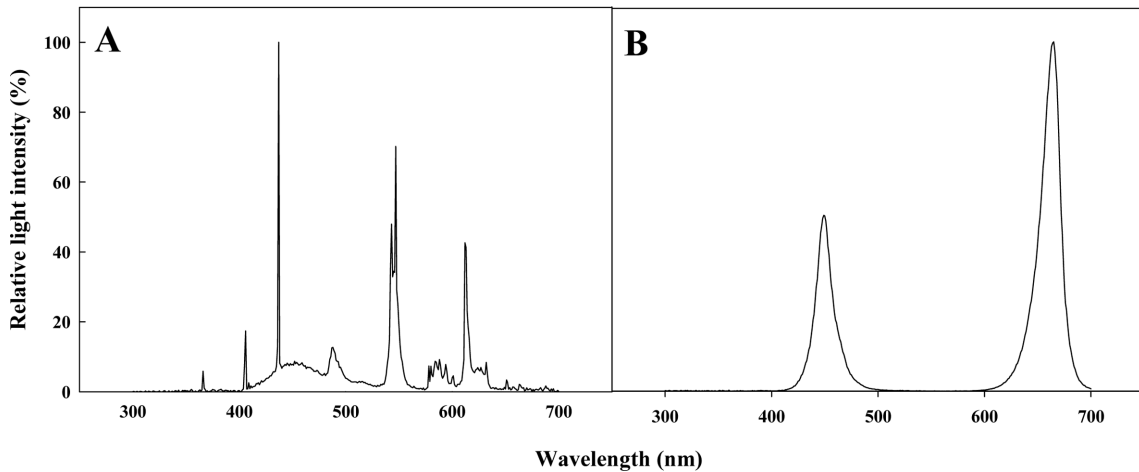


Fig. 1. Relative spectral distributions of FL, fluorescent lamp (A) and RB LED, red:blue = 7:3 (B) used in a closed-type plant production system.

트레이의 80%가 잠기도록 하였다. 파종 후 13일째에 재순환 담액식 수경재배 방식을 이용하여 Sonneveld 상추 양액재배용 액비(Sonneveld와 Straver, 1994)를 pH 6.5와 EC 2.0ds·m⁻¹로 공급하였다. 본 연구에 사용된 배지는 3종의 기존 상용배지인 urethane sponge(US, Gafatec Co. Ltd., Hwaseong, Korea), rockwool(RW, Grodan Co. Ltd., Roermond, The Netherlands), Q-plug(QP, Ihort Co. Ltd., CA, USA), 그리고 최근 Smithers Oasis사에서 개발된 TP-S2(TP, Smithers Oasis Korea Co. Ltd., Cheonan, Korea), PU-7B(PU, Smithers Oasis Korea Co. Ltd., Cheonan, Korea)였다(Table. 1).

2. 배지의 물리·화학적 특성

배지의 물리성인 총 공극, 용기용수량, 기상률, 가비중을 측정하기 위해 배지를 48시간 동안 침지시킨 후 습윤중량을 측정하였고 상온에서 2시간 동안 배수하여 배지의 무게와 배수된 물의 용적을 측정하였다. 그 후 72시간동안 완전 건조한 후 배지의 건조중량 측정하였다. 측정된 값을 Fonteno(1996)와 Choi 등(1997)이 제시한 공식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{총 공극(total porosity, TP)} = \text{CC} + \text{AS}$$

용기용수량(container capacity, CC)

$$= [\text{습윤중량(wet weight)} - \text{건조중량(dry weight)}] / \text{배지의 용적(volume of sample)} \times 100$$

기상률(air space, AS)

$$= \text{배수된 용적량(volume of water drained)} / \text{배지의 용적(volume of sample)} \times 100$$

가비중(bulk density, BD)

$$= \text{건조중량(dry weight)} / \text{배지의 용적(volume of sample)}$$

배지의 pH와 EC를 측정하기 위해 배지와 1차 증류수를 1:5(v/v)의 비율로 혼합하여 3시간 동안 진탕기(KS-500, Kocon Co. Ltd., Hanam, Korea)로 진탕시킨 후 pH/EC meter(HI 98130, Hanna Instruments Co. Ltd., RI, USA)로 측정하였다(Kim과 Jeong, 2000).

3. 조사항목

배지의 종류에 따른 상추의 초기 발아율(initial germination)은 파종 후 6일까지 발아된 종자 수를, 최종 발아율(final germination)은 파종 후 12일까지 발아된 종자 수를 각각 총 파종수로 나누어 백분율로 계산하였다. 평균 발아수(MDG, mean daily germination)는 발아된 종자 수를 조사한 일수로 나누어 계산하였으며, T₅₀은 최종 발아수의 50% 발아까지 소요된 일수로 계산하였다. 상추의 생육은 파종 후 13일째에 초장, 엽장, 엽폭, 엽수를 측정하였고, 30일째에는 초장, 엽장, 엽폭, 엽수, 근장, 엽면적, 지상부와 지하부의 생체중과 건물중, SPAD, 엽록소형광 값을 측정하였다. 엽면적은 엽면적 측정기(LI-3100, LICOR Inc., Nebraska, USA), 조사 항목들의 무게는 전자저울(EW 220-3NM, Kern and Sohn GmbH., Balingen, Germany)을 이용하여 측정하였는데 건물중은 시료를 70°C 향온 건조기(Venticell-222, MMM Medcenter Einrichtungen GmbH., Munich, Germany)에서 72시간 건조한 후 측정하였다. SPAD 값은 엽록소 측정기(SPAD-502, Konica Minolta Inc., Tokyo, Japan)를 이용하였다. 상추의 스트레스 지수를 확인하기 위해 처리별 6개체를 선발하여 30분간 암적응 후 엽록소 형광분석기(PAM-2100, Heinz

Walz GmbH Co. Ltd., Effeltrich, Germany)를 이용하여 엽록소형광 값(Fv/Fm)을 측정하였다. 최소 형광값(Fo)은 0.6kHz의 측정 광을 광섬유로 하여 $0.1\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 보다 낮은 PPF로 LED광을 이용하여 조사하고 측정하였으며, 최대 형광 값(Fm)은 20kHz로 $7,000\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 포화 광을 0.8초 동안 조사하여 측정하였다. Fv/Fm값은 $Fv/Fm = (Fm-Fo)/Fm$ 공식으로 산출하였다(Genty 등, 1989).

4. 통계분석

실험구의 배지는 3반복하여 난괴법으로 배치하였다. 실험결과의 통계분석은 SAS 프로그램(SAS 9.4, SAS Institute Inc., NC, USA)을 이용하여 분산분석(ANOVA)을 실시하였는데, 처리 간 평균 차이는 던컨의 다중검정(Duncan's multiple range test)을 이용하여 5% 유의수준에서 검증하였다. 그래프는 SigmaPlot 프로그램(Sigma Plot 12.0, Systat Software Inc., CA, USA)을 이용하여 나타냈다.

결과 및 고찰

5종의 배지 물리적 특성은 Fig. 2와 같다. 총 공극과 용기용수량은 신개발 배지인 TP에서 97.03%와 93.77%

로 각각 유의적으로 가장 높았으며, US와 RW에서 유의적으로 낮았다. 공극이 많은 배지는 용기 내 배지의 산소와 수분의 공급을 증가시킨다(No 등, 2012). 용기용수량은 물로 포화된 배지를 자연 상태에서 배수시킨 후 배지가 함유할 수 있는 양수분을 나타내는 지표로서 배지가 보유할 수 있는 최대의 함유량이다. 용기용수량이 낮은 배지는 근권에 함유율이 장기간 낮게 유지되어 뿌리에 스트레스가 발생하고 양수분의 흡수가 저해되어 초세가 약해진다(Aljibury와 May, 1970; Martin 등, 1970). 용기용수량이 높으면 보수성이 우수하다는 것을 나타내며 보유한 수분 중 쉽게 이용할 수 있는 영역과 완충영역에서의 수분함량이 많아 물리적 완충력이 높고, 수분관리가 비교적 용이하다(Shin 등, 2012). 기상률은 신개발 배지인 PU에서 7.50%로 유의적으로 높게 나타났다. 식물생장을 위한 최적 근권 환경을 조성하기 위해 고상, 액상, 기상이 적절한 균형을 이루어야 하고(Bunt, 1984), 배지의 총 공극에 대한 기상률은 근권부 산소의 이용을 위한 중요한 지표이다(Soffer와 Burger, 1989; Lemaire, 1995; Hartmann 등, 1997). 가비중이 너무 낮을 경우에는 식물을 지지하는 능력이 약해질 수 있고 용기용수량이 낮아져 단시간 내에 배지에 양수분이 소실되어 보유능력이 떨어지는 문제점이 발생한다(Hwang과 Jeong, 2004). 본 실험에 사용된 배지 중 유기물배지

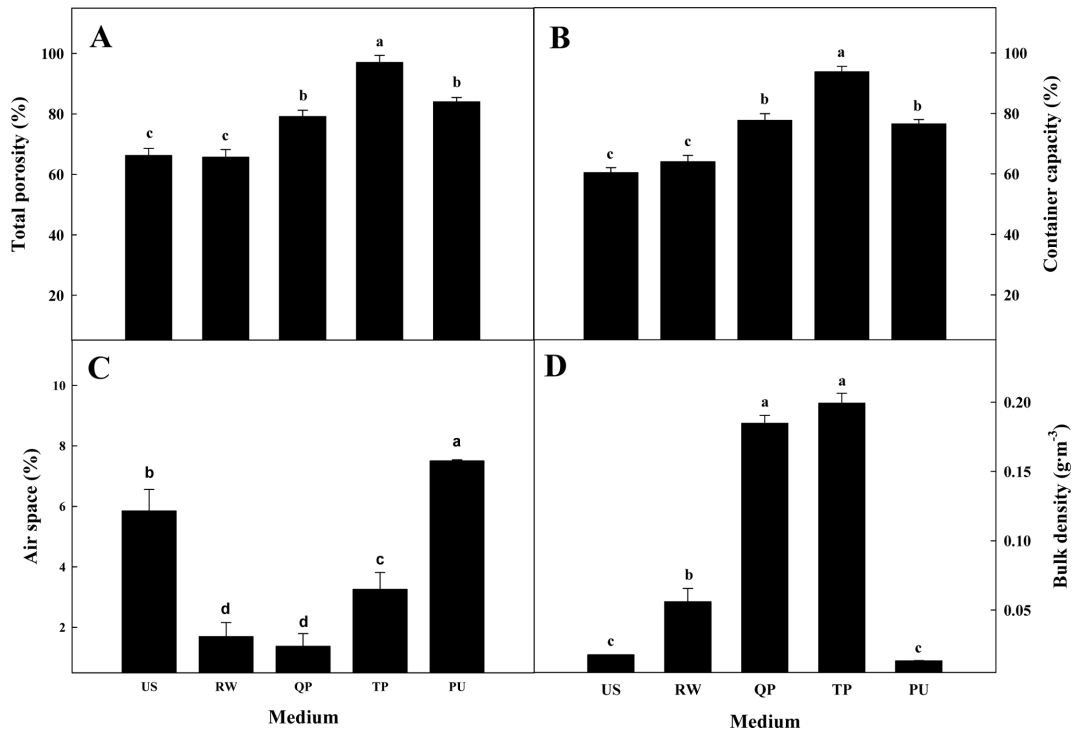


Fig. 2. Total porosity (A), container capacity (B), air space (C), and bulk density (D) of five media used in the experiment for production of lettuce. Refer to the Table 1 for abbreviations of media. Vertical bars indicate \pm standard errors ($n = 3$). Different lower-case letter, above each bar indicate that the means are significantly according to the Duncan's multiple.

인 QP와 TP에서 가비중이 각각 0.19g·m⁻³과 0.20g·m⁻³로 유의적으로 높게 나타났고, US와 PU에서 각각 0.02g·m⁻³와 0.01g·m⁻³로 유의적으로 낮았다.

배지의 화학성인 pH와 EC를 Table 2에 나타냈다. pH는 유기물배지인 QP와 TP에서 무기배지보다 유의적으로 낮게 나타났지만 5종 모두 Nelson(1991)이 제시한 적정 pH 범위인 5.6-6.5의 범위에 포함되거나 혹은 근접하여 그대로 사용하거나 필요하다면 산성이나 알칼리성 비료를 첨가 또는 양액의 관리를 통하여 배지의 pH를 관리할 수 있을 것으로 판단된다. EC는 유기물배지인 QP와 TP에서 높은 경향을 보였으며, US, RW, PU에서는 0.00-0.20dS·m⁻¹의 범위로 측정되어 전형적인 무기물 배지의 화학적 특성을 보였다.

배지 종류에 따른 과종 후 상추의 초기 발아율, 최종 발아율, 평균 발아수, T₅₀은 Table 3에 나타냈다. 초기 발아율은 신개발 배지인 TP에서 59.00%로 유의적으로 높은 값을 나타냈으며, 최종 발아율과 평균 발아수는 RW, QP 및 TP에서 우수한 결과를 보였다. 또한 최종 발아수의 50%까지 소요되는 일수를 나타내는 T₅₀은 QP

에서 7.00일로 발아속도가 가장 빨랐고, 다음으로 TP에서 7.33일로 발아가 빨리되는 것을 확인하였다. US에서는 최종 발아율이 8.33%로 가장 저조하였는데 이는 기상률이 높고 배지 내의 수분이 중력에 의해 하부로 이동하면서 배지 상층부가 급격히 건조하여 발아율이 떨어지는 것으로 판단된다. 이와 유사한 결과로 입상암면, 입상암면+펠라이트 혼용배지, 코이어, 펄라이트, 그리고 우레탄스펀지를 이용한 시금치 육묘배지 선발 연구에서도 US가 가장 발아율이 가장 낮은 결과를 나타냈다(Seo 등, 2007). 또한 Lee 등(2011)의 연구에서도 US에서 시금치의 발아율이 낮았다고 보고된 바 있다. 그러므로 US를 이용하여 종자를 발아시킬 경우 물을 충분히 적신 후 플러그 트레이의 80%가 물에 잠기도록 처리하는 Choi 등(2011)의 방법에 따라 배지상부가 건조되는 것을 막기 위한 지속적인 수분관리가 필요할 것으로 사료된다. US와 마찬가지로 PU도 다른 배지보다 기상률이 높아 배지 상부의 수분이 빠르게 건조되어 발아율이 저조한 것으로 판단된다.

배지 종류에 따른 과종 후 13일째 상추의 초장은 QP가 3.1cm로 가장 길었다. 엽장과 엽수는 RW, QP 및 TP에서 각각 2.1cm와 4.0개로 유의적으로 높았으며, 엽폭은 RW와 TP에서 1.2cm로 가장 넓었다(Table 4). 이는 무기물배지인 US, RW, PU에 비해 유기물배지인 QP와 TP가 EC 0.40와 0.28dS·m⁻¹로 실험에 이용된 배지 중 EC가 높았고(Table 2), 배지 내에 있는 영양성분으로 상추 묘의 생육이 우수하게 나타난 것으로 판단된다. 이는 Kim 등(2018)의 연구에서 실험에 이용된 배지 중 EC가 높은 편에 속한 QP 배지에서 재배된 토마토 묘의 생육이 우수한 결과와 유사하다.

과종 후 30일째 광원과 배지종류에 따른 상추의 생육을 조사한 결과 유의적인 차이를 보였다(Table 5와 6,

Table 2. The chemical properties of five media used in the experiment.

Medium ^z	pH	EC (dS·m ⁻¹)
US	6.52 b ^y	0.00 c
RW	6.73 a	0.17 b
QP	5.71 d	0.40 a
TP	6.22 c	0.28 ab
PU	6.58 b	0.18 b

^zRefer to Table 1.

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P \leq 0.05$.

Table 3. The germination rate of lettuce seeds as affected by five media in a closed-type plant production system.

Medium ^z	Initial germination ^y (%)	Final germination ^x (%)	MDG ^w	T ₅₀ ^v
US	0.00 ^u	8.33 c	0.89 c	- ^t
RW	19.33 bc ^s	85.68 a	9.14 a	8.00 b
QP	26.00 b	86.98 a	9.28 a	7.00 c
TP	59.00 a	90.88 a	9.70 a	7.33 bc
PU	3.33 cd	69.01 b	7.36 b	9.33 a

^zRefer to Table 1.

^yGermination rate at 6th day after sowing.

^xGermination rate at 12th day after sowing.

^wMean daily germination (no. of total germination/total measuring days).

^vDays to reach 50% of the final germination rate.

^uNo germination observed.

^tThe final germination rate did not reach 50%.

^sMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

Table 4. Growth characteristics of lettuce ‘Nongjeogchima’ as affected by five media at 13 days after sowing.

Medium ^z	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	No. of leaves
US	1.4 d ^y	1.1 b	0.7 c	3.0 b
RW	2.4 b	2.1 a	1.2 a	4.0 a
QP	3.1 a	2.1 a	1.0 b	4.0 a
TP	2.6 b	2.1 a	1.2 a	4.0 a
PU	1.8 c	1.3 b	0.6 c	3.0 b

^zRefer to Table 1.

^yMean separation within columns by Duncan’s multiple range test at $P \leq 0.05$.

Table 5. Growth characteristics of lettuce ‘Nongjeogchima’ as affected by light source and five media at 30 days after sowing.

Light source ^z (A)	Medium ^y (B)	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	No. of leaves	Root length (cm)	Leaf area (cm ² /plant)
FL	US	9.6 e ^x	9.0 f	4.5 f	5.3 d	16.2 d	53.7 d
	RW	15.0 c	13.8 d	7.7 d	6.9 e	27.0 bc	227.6 c
	QP	15.2 c	15.0 cd	8.5 c	7.0 bc	24.3 c	237.0 c
	TP	16.3 b	15.8 bc	7.6 d	6.8 c	26.2 bc	237.0 c
	PU	11.9 d	11.6 e	5.2 ef	4.8 d	17.9 d	76.1 d
RB LED	US	8.9 e	8.9 f	4.5 f	5.2 d	17.9 d	53.1 d
	RW	14.4 c	13.8 d	9.0 c	7.6 b	31.8 ab	247.1 c
	QP	17.6 a	17.4 a	11.5 a	8.7 a	30.3 ab	534.5 a
	TP	16.4 b	16.5 ab	10.4 b	8.3 a	32.8 a	354.5 b
	PU	10.9 d	10.8 e	5.7 e	5.1 d	14.5 d	84.0 d
Significance	A	NS	*	***	***	**	***
	B	***	***	***	***	***	***
	A × B	**	**	***	**	**	***

^zThe light sources are FL, fluorescent lamp, and RB LEDs, red:blue=7:3 LEDs.

^yRefer to Table 1.

^xMean separation within columns by Duncan’s multiple range test at $P \leq 0.05$.

NS,*,**,*Nonsignificant or significant at $P \leq 0.05, 0.01$ or 0.001 respectively.

Table 6. Fresh and dry weights of shoot and root, SPAD, and chlorophyll fluorescence of lettuce ‘Nongjeogchima’ as affected by light source and five media at 30 days after sowing.

Light source ^z (A)	Medium ^y (B)	Fresh weight (g/plant)		Dry weight (g/plant)		SPAD	Chlorophyll fluorescence (Fv/Fm)
		Shoot	Root	Shoot	Root		
FL	US	0.97 e ^x	0.98 cd	0.056 e	0.028 cd	15.3 bc	0.557 d
	RW	5.53 d	0.48 e	0.268 d	0.037 c	16.8 b	0.780 a
	QP	6.20 d	0.83 d	0.299 d	0.028 cd	16.5 bc	0.766 a
	TP	5.88 d	0.80 d	0.253 d	0.029 c	15.4 bc	0.789 a
	PU	1.41 e	0.14 f	0.075 e	0.015 de	14.1 c	0.766 a
RB LED	US	1.05 e	1.21 bc	0.074 e	0.013 e	14.4 bc	0.568 d
	RW	7.51 c	1.29 b	0.396 c	0.066 b	16.8 b	0.689 b
	QP	18.69 a	2.28 a	0.832 a	0.081 a	20.1 a	0.735 ab
	TP	12.13 b	2.13 a	0.516 b	0.086 a	19.1 a	0.667 bc
	PU	2.22 e	0.20 f	0.104 e	0.008 e	15.0 bc	0.618 cd
Significance	A	***	***	***	***	**	**
	B	***	***	***	***	***	***
	A × B	***	***	***	***	*	NS

^zThe light sources are FL, fluorescent lamp, and RB LEDs, red:blue=7:3 LEDs.

^yRefer to Table 1.

^xMean separation within columns by Duncan’s multiple range test at $P \leq 0.05$.

NS,*,**,*Nonsignificant or significant at $P \leq 0.05, 0.01$ or 0.001 respectively.

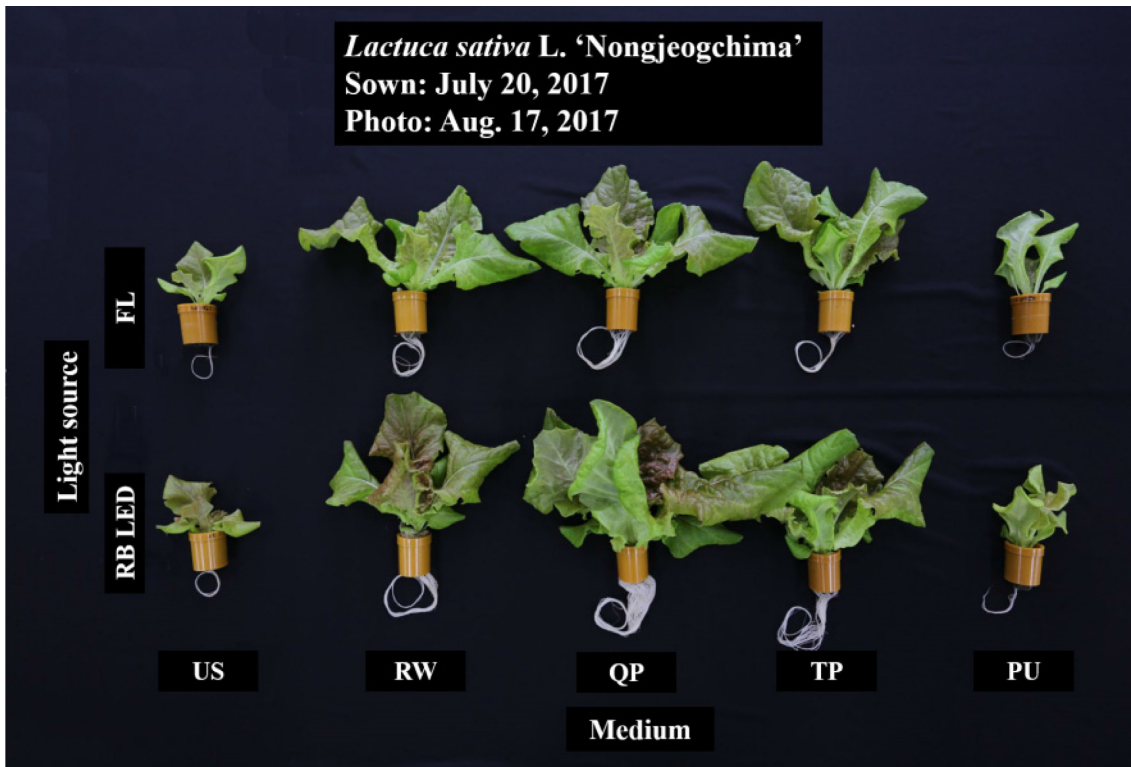


Fig. 3. Effect of light source and five media on growth of lettuce at 30 days after sowing. Refer to the Table 1 for abbreviations of media.

Fig. 3). 엽폭, 엽면적, 지상부와 지하부의 생체중과 건물중이 광원, 배지에 따라 단독 또는 이들 요인간의 상호 작용에서 유의한 차이를 보였다. 상추의 생육이 적색 LED에서 유의적으로 상추의 생육이 증진된 결과(Son 등, 2012)와 마찬가지로 적색광의 비율이 높은 RB LED 하에서 우수한 경향을 보였다. 적색광은 잎의 광합성 관련 기관에 효과적으로 이용되고(Saebo 등, 1995), 작물의 엽면적과 생체중이 증가되는 효과(Johkan 등, 2010; Wu 등, 2007)가 있다. 또한, 상추의 초장, 엽장, 엽폭, 엽면적, 지상부의 생체중과 건물중은 RB LED의 QP에서 유의성 있게 높았고, 그 다음으로 RB LED의 TP에서 우수한 경향을 결과를 보였다. 엽수, 지하부의 생체중과 건물중, SPAD는 RB LED의 QP와 TP에서 유의적으로 높은 값을 나타냈고, 근장은 RB LED의 TP에서 우수하였다. 이는 Kim 등(2018)의 연구에서 토마토 묘의 초기 생육이 우수하였던 QP 배지에서 토마토 묘의 최종 생육이 가장 우수한 것과 유사하게 상추 묘의 초기 생육이 우수하였던 QP와 TP에서 상추의 생육이 우수하였고, TP가 총 공극이 97.03%로 가장 높아 상추의 근권부 발달에 긍정적인 효과가 있었던 것으로 판단된다 (Fig. 2A). 엽록소형광 분석은 광합성 능력의 지표로 사용되며(Fu 등, 2012), 주로 정상적인 성장 조건 하에서 성장된 식물의 Fv/Fm은 약 0.83이다(Maxwell과 Johnson,

2000). 상추의 엽록소형광 값은 다른 배지에 비해 US에서 유의적으로 낮게 보였으며, 이는 초기의 상추 생육 시 배지 상층부의 건조가 발생되어 상추의 생육 저조와 생육기간동안 스트레스에 영향을 미친 것으로 판단된다. 이와 유사한 연구는 Jeong 등(2018)이 더덕의 육묘 시 우레탄스펀지를 배지로 사용하였을 경우 생육저하와 엽록소형광 값이 낮아지는 결과와 일치한다.

결과적으로 본 실험에서 밀폐형 식물생산시스템에서 상추 재배시 RB LED가 상추의 생육이 우수한 결과를 보였으며, QP와 TP에서 상추의 발아와 생육에 효과적이었다. 뿐만 아니라, 신개발 배지 TP가 상용배지인 QP와 유사하게 상추의 발아율과 생육이 우수한 결과를 보여 상추 생산을 위한 배지로서 활용할 수 있을 것이라 판단된다.

적 요

본 연구는 밀폐형 식물생산시스템에서 인공광원과 배지 종류에 따른 상추의 생육 특성을 조사하기 위해 수행되었다. 상추 종자는 5종류의 배지인 urethane sponge(US), rockwool(RW), Q plug(QP), TP-S2(TP)와 PU-7B(PU)가 층진된 128구 플러그 트레이에 파종하였다. 상추 종자의 발아율은 파종 후 12일까지 조사하였다. 상추 묘는 파종 후 13일째에 재순환 담액식 수경재배 시스템을 이용하

여 EC 2.0dS·m⁻¹, pH 6.5와 온도 25±1°C인 밀폐형 식물생산시스템에 정식하였다. 광원은 형광등과 RB LEDs(red:blue=7:3)를 이용하여 광주기 14/10(명기:암기), 광도 150±10μmol·m⁻²·s⁻¹ PPF로 설정했다. 상추의 초기 발아율은 TP에서 가장 높았다. 최종 발아율과 평균 발아수는 RW, QP 및 TP 배지에서 유의적으로 높았다. 초장, 엽장, 엽폭, 엽면적, 지상부의 생체중, 건물중 모두 RB LED의 QP에서 유의성 있게 높은 값을 나타냈다. 엽수, 지하부의 생체중과 건물중과 SPAD는 RB LED의 QP와 TP에서 가장 좋았고, 근장은 RB LED의 TP에서 가장 길었다. 따라서 밀폐형 식물생산시스템에서 RB LED가 상추의 생육이 우수하였으며, QP와 TP가 상추의 발아율과 생육에 효과적인 것으로 나타났다. 뿐만 아니라, 밀폐형 식물생산시스템에서 상추 생산 시 신개발 배지인 TP 배지의 적용가능성을 확인하였다.

추가 주제어: 담액식 수경재배, 발광다이오드, 형광등, Q-plug

사 사

본 연구는 농림축산식품부 농생명산업기술개발사업(과제번호 118078-02)의 지원에 의해 수행되었음.

Literature Cited

Aljibury, F.K., and D. May. 1970. Irrigation schedules and production of processing tomatoes on the San Joaquin Valley Westside. Calif. Agric. 24:10-11.

Bunt, A.C. 1984. Physical properties of mixtures of peats and minerals of different particle size and bulk density for potting substrates. Acta Hort. 150:143.

Choi, H.G., J.K. Kwon, K.S. Park, Y.I. Kang, M.W. Cho, I.R. Rho, and N.J. Kang. 2011. Effect of germination condition, nursery media and nutrient concentration on seedling growth characteristics of pak-choi and lettuce in plant factory. J. Bio-Environ. Con. 20:320-325 (in Korean).

Choi, J.M., J.W. Ahn, J.H. Ku, and Y.B. Lee. 1997. Effect of medium composition on physical properties of soil and seedling growth of red pepper in plug system. J. Korean Hortic. Sci. Technol. 36:618-624 (in Korean).

Choi, J.M., I.Y. Kim, and B.K. Kim. 2009. Root substrates. Hackyesa. Daejeon, Korea (in Korean), pp 237-273.

Dougher, T.A.O., and B. Bugbee. 2001. Differences in the response of wheat, soybean and lettuce to reduced blue radiation. Phytochem Photobiol 73:199-207.

Fonteno, W.C. 1996. Chapter 5. Growing media; Types and physical/chemical properties. pp. 93-122. In David Wn. Reed (ed.). Water, media, and nutrition for greenhouse

crops. Ball Publishing. Batavia. IL.

Fu W, P. Li, and Y. Wu. 2012. Effects of different light intensities on chlorophyll fluorescence characteristics and yield in lettuce. Scientia Horticulturae 135:45-51.

Genty, B., J.M. Briantais, and N.R. Baker. 1989. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. Biochim. Biophys. Acta. 990:87-92.

Hartmann, H.T., D.E. Kester, F.T. Jr. Davis, and R.L. Geneve. 1997. Plant propagation: Principles and practice. 6th ed. Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, NJ.

Hwang, S.J., and B.R. Jeong. 2002. Effect of medium composition of cellular glass foam particles and carbonized chestnut woodchips on growth of plug seedlings of 'Nokkwang' pepper and 'Segye' tomato. J. Korean Hortic. Sci. Technol. 43:399-405 (in Korean).

Hwang, S.J., and B.R. Jeong. 2004. Use of CGF and CCW as medium components for commercial production of plug seedlings of seogun tomato. J. Bio-Environ. Con. 13:81-89 (in Korean).

Jeong, H.W., H.M. Kim, H.M. Kim, H.R. Lee, and S.J. Hwang. 2018. Germination and growth of *Codonopsis lanceolata* and *Astragalus membranaceus* as affected by different media types during seedling period. Protected Hort. Plant Fac. 27:13-19 (in Korean).

Johkan, M., K. Shoji, F. Goto, S. Hashida, and T. Yoshihara. 2010. Blue light-emitting diode light irradiation of seedlings improves seedling quality and growth after transplanting in red leaf lettuce. HortScience 45:1809-1814 (in Korean).

Kang W.H., F. Zhang, J.W. Lee, J.E. Son. 2016. Improvement of canopy light distribution, photosynthesis, and growth of lettuce (*Lactuca sativa* L.) in plant factory conditions by using filters to diffuse light from LEDs. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 34:48-93.

Kim, G.H., and B.R. Jeong. 2003. Hydroponic culture of a pot plant *Ficus benjamina* 'King' using mixtures of used rockwool slab particles and chestnut woodchips. J. Korean Hortic. Sci. Technol. 44:251-254 (in Korean).

Kim, H.H., G.D. Goins, R.M. Wheeler, and J.C. Sager. 2004. Green-light supplementation for enhanced lettuce growth under red and blue light emitting diodes. Hortscience 39:1617-1622.

Kim, H.M., Y.J. Kim, and S.J. Hwang. 2018. Physicochemical properties of newly developed artificial medium and proper irrigation interval for production of tomato plug seedlings. Protected Hort. Plant Fac. 27:71-79 (in Korean).

Kim, K.S., Y.B. Lee, S.J. Hwang, B.R. Jeong and C.G. An. 2013. Irrigation method of nutrient solution affect growth and yield of paprika 'Veyron' grown in rockwool and phenolic foam slabs. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 31:179-185.

Kim, O.I., and B.R. Jeong. 2000. Medium composition including particles of used rockwool and wood affects growth of

- plug seedling of petunia 'Romeo'. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 18:33-38 (in Korean).
- Kim, Y.H., H.J. Kim, J.W. Lee, and J.M. Kim. 2008. Growth of potato plug seedlings as affected by photosynthetic photo flux in a closed transplant production system. J. of Biosystems Eng. 33:106-114.
- Kozai, T., C. Kubota, C. Chun, K. Ohya, and F. Afreen. 2000. Necessity and concept of the closed transplant production system. In: C. Kubota and C. Chun (eds.) Transplant production in the 21st century pp. 3-19, Kluwer Academic Publishers.
- Lee, E.H., J.M. Lee, J.G. Lee, W.B. Kim, and S.Y. Ryu. 2004. Optimum cultivar and solution for summer season hydroponics of spinach in highlands. J. Bio-Environ. Con. 13:208-211 (in Korean).
- Lee, E.H., J.N. Lee, J.S. Im, S.Y. Ryu, Y.S. Kwon, and S.W. Jang. 2011. Development of stable production technique of summer spinach (*Spinacia oleracea* L.) in soilless culture in the highlands. J. Bio-Environ. Con. 20:21-26 (in Korean).
- Lemaire, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. Acta Hort. 396:273-284.
- Martin P.E., J.C. Lingle, R.M. Hagan, and W.J. Flocker. 1970. Irrigation of tomatoes in a single harvest program. Calif. Agric. 6:13-14.
- Maxwell, K., and G.N. Johnson. 2000. Chlorophyll fluorescence: a practical guide. J. Exp. Bot. 51:68-668.
- Nelson, P.V. 1991. Greenhouse operation and management, 4th ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Nelson, P.V. 2003. Greenhouse operation and management. 6th Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- No, K.O., J.H. Kang, H.M. Kim, C.G. An, B.R. Jeong, and S.J. Hwang. 2012. Use of pellet type phenolic foam as a medium for production of plug seedlings of 'Madison' tomato. J. Bio-Environ. Con. 21:299-206 (in Korean).
- Park, J.E., C.G. An, B.R. Jeong, and S.J. Hwang. 2012. Use of phenolic foam as a medium for production of plug seedlings of paprika. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 30:34-41 (in Korean).
- Saebo, A., T. Krekling, and M. Appelgren. 1995. Light quality affects photosynthesis and leaf anatomy of birch plantlets in vitro. Plant Cell Tissue Organ Cult. 41:177-185.
- Seo, J.B., J.M. Jung, S.K. Kim, K.J. Choi, J.G. Kim, and S.J. Hong. 2007. Growth characteristics of spinaches by nursery media and the seeding number per plug tray cell in hydroponics. J. Bio-Environ. Con. 16:62-66 (in Korean).
- Shin B.K., J.E. Son, and J.M. Choi. 2012. Physico-chemical properties of inorganic materials currently used as root medium components for crop production in Korean plant factories. J. Bio-Environ. Con. 21:336-342 (in Korean).
- Soffer, H., and D.W. Burger. 1989. Plant propagation using an aero-hydroponics system. HortScience 24:154.
- Son, K.H., J.H. Park, D.I. Kim, and M.M. Oh. 2012. Leaf shape index, growth, and phytochemicals in two leaf lettuce cultivars grown under monochromatic light-emitting diodes. Korean J. Hortic. Sci. Technol. 30:664-672 (in Korean).
- Sonneveld, C., and N. Straver. 1994. Nutrient solutions for vegetable and flowers grown in water or substrates. 10th ed. Proefstation voor tuinbouw onder glas te Naaldwijk, no. 8, Holland, pp. 14-23.
- Stutte G.W. 2015. Commercial transition to LEDs: A pathway to high-value products. HortScience 50:1297-1300.
- Wu, M.C., C.Y. Hou, C.M. Jiang, Y.T. Wang, C.Y. Wang, H.H. Chen, and H.M. Chang. 2007. A novel approach of LED light radiation improves the antioxidant activity of pea seedlings. Food Chem. 101:1753-1758.