Journal of Environmental Science International
28(11); 1019~1025; November 2019

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2019.28.11.1019

ORIGINAL ARTICLE

태양광 집광장치의 광 특성분석 및 유묘기 상추의 생장에 미치는 영향

이상규 · 이재수* · 원진호

농촌진흥청 국립농업과학원 스마트팜개발과

Analysis of Light Traits in a Solar Light-collector Device and its Effects on Lettuce Growth at an Early Growth Stage

Sanggyu Lee, Jaesu Lee*, Jinho Won

Division of Smart Farm Development, National Institute of Agricultural Science, RDA, Jeonju 54875, Korea

Abstract

The aim of this study was to analyze the light traits in a solar light-collector device and its effects on lettuce growth at an early growth stage. The three hyper parameters used were the reflector diameter (2 cm and 4 cm), coating inside the reflector (chrome-coated, non-coated) and distance from the light fiber (15 cm and 20 cm). The results showed that light efficiency, which is the ratio of light intensity inside the fiber to the solar intensity, improved by 41.1 % when using a 2 cm diameter chrome-coated reflector at a distance of 15 cm from the light fiber; whereas it only improved by 20.6% when a non-coated reflector was used. As the reflector size was increased to 4 cm, the light efficiency for the coated and non-coated reflectors increased by 28.5 % and 26.4 %, respectively, hence, no significant difference was observed. When the light fiber was placed at a distance of 20 cm, the increase in light efficiency with coating treatment was 8 % higher than without coating treatment. We also compared the efficiency of light-fiber treatment with that of LED treatment in our lettuce nursery, and observed that the plants exhibited better growth with light-fiber treatment. We observed an average increase of 1.7 cm in leaf height, 7 cm^2/plant increase in leaf area, and 32 mm increase in root length upon light-fiber treatment as opposed to those observed with LED treatment. These findings indicate that the collector light-fiber is economically feasible and it improves lettuce growth compared with the LED treatment.

Key words : Collector light, Growth, Lettuce(*Lactuca sativa* L.), Light fiber, Leaf height

1. 서 론

최근 스마트팜 기술이 농업분야에도 적용 되면서 식물공장(plant factory)내에서 작물 생산 기술에 대한 관심이 고조되고 있다. 식물공장은 온도, 광, 이산화탄소 등 환경조절을 작물 생육에 맞추어서 할 수 있으므로 연중으로 계획적인 생산이 가능하다(Kozai, 2007; Kim, 2009; Park et al., 2016). 식물공장은 광의 공급방식에 따라서 태양광 이용형과 LED 등을 이용한 인공광 이용형, 그리고 태양광과 인공광 병용형으로 구분할 수 있다. 국내에서는 2005년도부터 식물공장 자동화 장치에 관한 연구(Jang, 2005), 광 파장별 엽채류의 생육특성(Um et

Received 5 November, 2019; **Revised** 17 November, 2019;
Accepted 19 November, 2019
***Corresponding author**: Jaesu Lee, Division of Smart Farm Development, National Institute of Agricultural Science, RDA, Jeonju 54875, Korea
Phone: +82-63-238-4182
E-mail: butiman@korea.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
ⓒⓒ 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.

al., 2010)과 LED 광원을 이용한 엽채류 생산(Lee et al., 2010), 인공광 병용형 식물공장에서의 상추 생산기술(Lee et al., 2000), 식물공장내 양액을 사용한 엽채류 생산시 긍정적인 효과가 있었다(Yun et al., 2006; Kang and Kim, 2007)는 연구가 있다. 또한 폐쇄형 식물공장에서 음이온 처리시 상추나 케일의 생육이 촉진된다(Song, 2014; Lee et al., 2015)는 연구 결과가 있다. 쌈채소 소비의 증가와 더불어 소비자는 안전하면서도 기능성 성분이 다량 함유된 최고의 품질의 엽채류를 원하고 있어서 생산성과 품질을 동시에 만족시킬 수 있는 적절한 환경관리가 필요하다. 환경관리에서 가장 중요한 것은 광관리 기술인데 LED, 형광등 등으로 재배하는 인공광 식물공장에서는 광량이나 광질이 태양광과 차이가 있어서 생육이나 수확량에 차이가 있다. 태양광을 이용하는 방법에는 광파이프나 광파이버 등을 이용하여 실내로 태양광을 들어와 이용하는 방법이 있다. 광파이버방식은 태양광을 프라넬렌즈 등으로 집광한 후 집광된 광을 광파이버를 통해 전송하고, 광을 공급하는 방식으로 구성된다(Yoon, 2009; Lee et al., 2013). 광을 집광하는 방식에는 고정식으로 반사거울식, 광덕트방식이 있고 추적식으로는 렌즈-광섬유 방식, 반사거울-광섬유 방식(Lee et al., 2012) 등이 있다. 집광된 광을 전송하는 방법은 매질에 따라서 반사필름이나 반사시트를 이용한 광덕트방식과 유리와 플라스틱 소재를 이용한 광섬유(Fiber) 방식 및 공기를 전송부로 이용하는 방식이 있다(Jeong et al., 2002; Kim and Kwon, 2009). 광섬유를 이용한 방식은 산광부의 형태, 배치간격, 거리에 따라서 광 효율에 차이가 있다. 또한 태양광을 집광하여 실내 조명을 위하여 광파이버를 통해 실내로 들여옴으로써 조명에너지 절감에 대한 연구를 수행하였다(Park, 2000; Kim, 2011; Oh et al., 2011; Vu and Shin, 2016). 태양광을 실내로 들어와 작물재배에 활용하는 것은 인공광원에 비해서 파장이 짧은 자외선을 충분히 활용함으로써 작물의 생태형성 등에 좋은 영향을 미치기 때문이다(Mahdavian et al., 2008). 따라서 본 실험은 태양광을 집광한 후 실내로 들여온 광의 효율을 높이기 위하여 광 파이버 끝부분에 설치한 반사갓의 크기별, 디퓨져 사용여부에 따른 광 효율을 분석하고 그 장치를 이용하여 상추를 육묘하였을 때 효과를 구명하기 위하여 실시하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 광 공급장치

태양광 공급은 비구면 볼록렌즈 형태로 된 프레넬필름(Jeong et al., 2017)을 사용하여 집광된 광을 유리 광섬유(GOF; Glass Optical Fiber)를 통해서 식물재배 컨테이너(W 3730 × D 2100 × H 2700 mm) 안쪽으로 유입시켰다. 광섬유(Φ 1.7, WDG 1500, Whilkor Co. Ltd., Seoul, Korea)는 실리카소재로 된 코어와 저굴절레진 소재의 클래드 및 버퍼로 구성된 SOF (Silica Optical Fiber) 6가닥을 1개의 번들로 구성하였는데 감쇄율이 0.2-2.5 dB/km로 낮고, 균일한 광학특성을 손실을 줄이면서 장거리 전송이 가능하며 인장력이 좋은 재질로 만들었다. 실내로 들어온 광 섬유를 6개로 각각 분리하여 태양광 공급(이하 "광파이버")을 하였다. 비가 오거나 구름이 낀 날에는 광량이 200 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ 이하가 되면 LED 등이 자동으로 작동되어 광량을 보충하였다. LED 처리는 광파이버 처리의 베드와 조사 광량, 조사 위치, 조사 높이 등 동일한 조건으로 하였으며, 광량은 200±10 $\mu molm^{-2}s^{-1}$로 조절하여 공급하였다.

광주기는 광파이버 처리와 LED 처리 모두 Kim and Lee(2016)의 상추에서 적절한 광주기라고 발표한 16/8 (명기/암기) 시간으로 하였다. 태양광과 LED 광원에 대한 광파장 분석은 필드스펙트로메타(Fieldspec4 Standard-RES, ASD, USA)로 분석하였다(Fig. 1).

2.2. 광파이버의 반사갓 및 디퓨져 활용 기술

태양광 효율을 높이고자 광파이버 끝부분에 반사갓을 설치하였는데, 반사갓의 적정 크기를 구명하고자 직경이 2 cm, 4 cm 크기로 제작하였고, 반사갓 내부에 반사률을 높이기 위하여 크롬(Cr) 도금으로 코팅처리 유무를 하였다. 반사갓 처리에 따른 광의 확산 정도를 처리별로 광량센서(LI-COR Inc., Nebraska, USA)를 사용하여 분석하였다. 반사갓의 무게에 의해 빠지는 것을 방지하기 위해서 광파이버 굵기에 맞추어서 유도관을 제작하였다. 아울러 광을 확산시키기 위하여 반사갓 하단에 투명아크릴 소재(PolyMethyl MethAcrylate) 디퓨져(4.7 T, YPP Co., Sydney, Australia)를 장착한 후 광효율(외부 태양광 대비 광파이버로 유입된 광도의 비율)을 분석하였다.

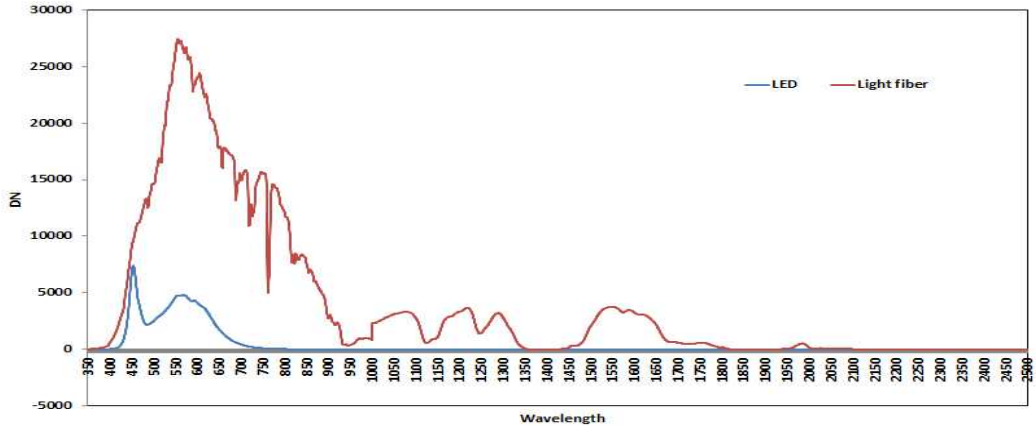

Fig. 1. Analysis of irradiance spectrum in the light fiber of solar and LED light.

2.3. 광파이버 및 LED 배치 간격

광파이버 배치는 광 확산도를 보기 위한 실험으로 광파이버로부터 센서까지 거리는 15 cm로 고정하고 바로 아래(0 cm), 5, 7.5, 10, 12.5, 15 cm 옆으로 이동한 위치에서 광효율을 측정하였다. 아울러 광파이버 처리는 비가오거나 구름낀 날 등 태양광이 부족하거나 없을 때에는 LED등(Cool White 5700k, 150mA, 3V, W 1248 × D 40 × H 34 mm, LG innotek, Korea)이 보조적으로 들어올 수 있도록 하였는데, LED등은 광파이버와 광파이버 사이에 설치하였다. LED 처리의 배치 간격은 5.5 cm 로 하였다.

2.4. 생육특성 및 엽록소함량

상추 묘의 생육을 조사하기 위해서 2단으로 된 육묘틀(W 1300 × D 700 × H 1910 mm)을 제작하여 상단에는 광파이버 처리, 하단에는 LED 처리가 가능하도록 하였다. 상추 품종은 잎이 진한 적색이고 반결구 상추인 삼선적축면(Farmhannong Co., Seoul, Korea)품종을 2019년 9월 20일에 플러그트레이(105공) 안에 스폰지를 넣고 스폰지 상부에 종자를 넣기 위해 구멍을 낸 후 거기에 종자를 1립씩 파종하였다. 파종 후 플러그트레이를 담을 수 있는 틀에 물을 채우고 파종한 트레이를 담가서 수분을 공급해 주었고, 온도는 항온으로 25℃를 유지하였다. 묘 생육조사는 종자 파종 후 20일에 엽수, 엽장, 엽폭, 엽면적, 엽록소함량, 최대 뿌리길이, 생체중 및 건물중을 조사하였다. 엽록소함량 측정은 엽록소측정기(SPAD 502, Minolta Co., Osaka, Japan)로 주당 5회를 측정한 후 평균값을 사용하였고, 처리당 3반복으로 조사하였다.

통계분석은 SAS 프로그램(SAS 9.4, SAS Institute Inc., USA)을 이용하여 Duncan의 다중검정(DMRT), T-검정을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 광 공급장치

태양광 파이버 처리와 LED 처리의 광파장을 분석한 결과는 Fig. 1과 같다. 자외선 영역인 380 nm 부근에서는 태양광파이버 처리는 130 DN, LED 처리는 8 DN을 보였고, 408 nm에서는 각각 1,039, 39 DN을 보였다. 태양광파이버처리는 562 nm에서 27,262 DN 으로 최고의 피크를 보였고, 이때 LED 처리는 4,724 DN을 보여 태양광 파이버 처리가 LED 처리보다 높게 나왔다. LED 처리는 454 nm에서 7,417 DN으로 가장 높았고, 이때 태양광 파이버 처리는 9,586 DN을 보였다. 또한 LED 처리는 748 nm 이후에는 광량이 거의 없었으나 태양광 파이버 처리는 1,806 nm 까지도 광량이 100 DN 이상을 유지하였고, 전체적으로 태양광 파이버 처리가 LED 처리보다 광합성에 유효한 가시광선 영역이 높은 것으로 나타났다. 이와같은 결과는 상추 파종 후 20일간 육묘한 결과(Table 2), 광파이버 처리가 LED 처리보다 엽장, 엽면적 및 뿌리길이를 증가시키는 효과를 초래하게 되었다.

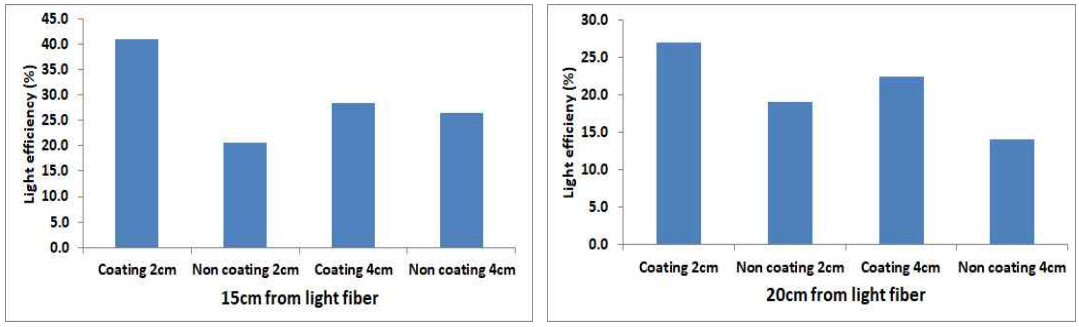

Fig. 2. Light efficiency rate at 15cm (left) and 20cm (right) from light fiber by using reflector diameter and coating.

3.2. 태양광 파이버 처리의 반사갓 및 디퓨져 활용 기술

태양광 파이버 처리의 반사갓의 적정 크기(직경)와 크롬 도금 코팅 유무에 따른 광효율(외부 태양광 광도 대비 실내 광파이버로 유입된 광도의 비율)을 분석한 결과는 Fig. 2와 같다. 광파이버로부터 아래쪽 15 cm 지점에서 측정한 광효율은 반사갓 직경이 2 cm이고 코팅처리시에는 41.1%이었고, 무코팅시 20.6%로 코팅시 2배정도 광효율이 높았다. 반사갓 직경이 4 cm의 경우에는 코팅처리시 광효율이 28.5%, 무코팅시 26.4%로 큰 차이를 보이지 않았다. 광파이버로부터 아래쪽 20 cm 지점에서 측정한 광효율은 15 cm 지점에서 측정한 것과 유사한 경향을 보였는데, 반사갓 직경이 2 cm이고 코팅처리시에는 광효율이 27.1%, 무코팅시 19.1%이었고, 반사갓 직경이 4 cm이고 코팅처리에서는 광효율이 22.4%, 무코팅시 14.1%로 나타났다. 따라서 반사갓의 직경은 2 cm와 4 cm 모두 가능할 것으로 생각되었고, 반사갓 내부에 크롬도금 코팅처리시에는 광효율이 20% 이상으로 나타나 무코팅에 비해서 광효율이 높기 때문에 코팅처리를 한 후 사용하는 것이 좋을 것으로 생각된다.

아울러 반사갓에 디퓨져 사용 유무에 따른 광효율을 분석한 결과는 Fig. 3과 같다. 디퓨져를 사용하지 않은 경우에 광효율은 46%이었고, 디퓨져를 사용하면 14.0%로 디퓨져 사용시 광효율이 크게 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 광파이버를 통한 식물재배시 광효율을 높이기 위해서는 디퓨져를 사용하지 않는 것이 좋을 것으로 사료되었으며, 이것은 디퓨져 사용시 광이 옆으로 퍼지지만 조도는 낮았다는 연구 결과와 유사하였다 (Jeong et al., 2017).

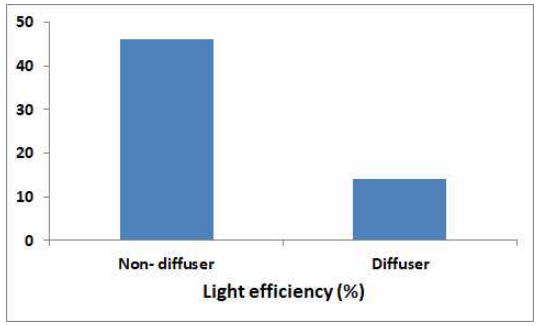

Fig. 3. Light efficiency rate at 15cm distance from light fiber by using diffuser and non-diffuser.

3.3. 광파이버 및 LED 배치 간격

광파이버 처리에서 반사갓 내부에 크롬도금으로 코팅된 4 cm 직경의 반사갓을 씌우고 광 확산정도를 조사한 결과는 Table 1과 같다. 야외 태양광은 1,174 $\mu molm^{-2}s^{-1}$인데 반하여 반사갓 아래 부위(0 cm)에서 측정한 광파이버 평균값은 최고 495 $\mu molm^{-2}s^{-1}$로써 42.2%의 효율을 보였고, 중앙부에서 5 cm 떨어진 곳은 277 $\mu molm^{-2}s^{-1}$로 23.0%, 10 cm는 93 $\mu molm^{-2}s^{-1}$로 8.1%, 15 cm 에서는 32 $\mu molm^{-2}s^{-1}$로써 3.0%를 보였다. 따라서 광파이버 간격은 좁을수록 광효율을 높일 수 있는 것으로 나타났다. 하지만 광파이버와 반사갓 설치를 고려하면 10 cm(최고값은 101 $\mu molm^{-2}s^{-1}$) 이하로 배치하면 좋을 것으로 사료되며 광효율이 4% 이하인 12.5 cm와 15 cm 간격은 문제가 발생할 것으로 판단된다. 아울러 비가 오는 날이나 구름낀 날 등 햇빛이 없는 조건에서도 상추를 키우기 위해서 광파이버와 광파이버 사이에 LED 등을 5.5 cm 간격으로 설치하여 보조적으로 사용하면 좋을

Table 1. Analysis of diffusion at various distance from the center by using light fiber

Distance from center	0 cm ($\mu molm^{-2}s^{-1}$)	5 cm	7.5 cm	10 cm	12.5 cm	15 cm
Light intensity (Fiber/outside)	495/1,174 (42.2%)	277/1,204 (23.0%)	96/1,081 (8.9%)	93/1,147 (8.1%)	42/1,082 (3.9%)	32/1,071 (3.0%)

Table 2. Growth of affected lettuce 20 days after sowing

Treatment	Leaf no. (ea/pl.)	Leaf height (cm)	Leaf diam. (cm)	Leaf area (cm^2/pl.)	Root length (mm)	Chlorophyll content (SPAD)	Fresh wt. (g/pl.)	Dry wt. (g/pl.)
Light fiber	3.78az	8.73a	4.44a	39.4a	125.0a	14.30a	0.98a	0.056a
LED	3.67a	6.99b	4.13a	32.4b	93.0b	14.39a	0.83a	0.049a

[z]Means followed by the same letter are not significantly different using T-test, P=0.05.

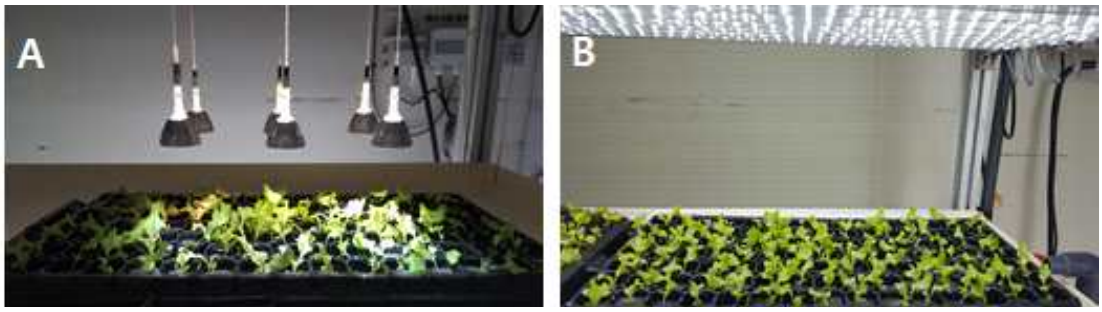

Fig. 4. Pictures of experiments under light fiber of solar (A) and LED light (B) at 20 days after sowing.

것으로 판단된다.

3.4. 상추의 생육특성

상추의 생육을 분석하기 위하여 광파이버 간격은 10 cm, 반사갓 직경 4 cm, 반사갓 내부 코팅처리 및 디퓨져 미사용한 후 상추 종자를 파종하여 20일의 생육을 분석한 결과와 육묘중인 사진은 다음과 같다(Table 2, Fig. 4). 엽장은 광파이버처리가 8.73 cm 로 LED처리의 6.99 cm 보다 유의성 있게 컸는데 이것은 광파이버로 공급된 광이 LED 보다 가시광선 영역이 많았기 때문으로 생각된다. 엽면적은 광파이버처리가 39.4 cm^2/주 로 LED처리의 32.4 cm^2/주 보다 큰 것으로 나타났고, 뿌리길이 역시 광파이버처리가 125 mm 로 LED처리의 93 mm 보다 유의성 있게 컸다. 그러나 엽수, 엽폭, 엽록소함량, 생체중 및 건물중은 처리간 유의성이 없는 것으로 나타났다. 상추 묘의 잎색을 관찰한 결과, 광파이버처리가 LED 처리보다 적색 발현이 빠르고 잘된 것을 확인할 수 있었다. 이것은 광질에 차이가 나는 형광등과 백색 LED에서 적상추를 재배한 결과 광파장대역이 다양한 형광등에서 생육이 좋았고(Park et al., 2012), 상추재배시 적색이나 적색 LED+UV-A 처리가 청색이나 청색 LED+UV-A 를 처리한 것보다 상추의 생육 및 수량이 높았다(Kim and Lee, 2016)는 보고와 유사한 결과이다. 따라서 본 실험에서 개발한 태양광 이용 광파이버를 통한 상추 묘 생산은 가능한 것으로 판단되었다.

4. 결 론

본 연구는 태양광 집광장치의 광효율을 높여 상추육묘시 활용 가능성을 보기 위해서 실험하였다. 집광효율

을 높이기 위한 처리는 총 6개로 반사갓의 크기 2종류(지름 2 cm, 4 cm), 반사갓 내부에 크롬코팅 유무 2처리 및 광파이버로부터 거리 2처리(15 cm, 20 cm)로 하였다. 광파이버로부터 15 cm 거리에서 반사갓 직경이 2 cm인 처리의 광효율을 측정한 결과, 반사코팅 처리는 41.1% 이었으나 무코팅 처리에서는 20.6% 정도로 큰 차이를 보였다. 그러나 반사갓 직경이 4 cm인 경우에는 코팅 처리는 28.5%, 무코팅은 26.4% 로 큰 차이를 보이지 않았다. 광파이버로부터 20 cm 거리에서 측정한 것에서는 반사갓의 직경과 관계없이 코팅 처리가 무코팅 처리보다 광 효율이 8% 이상 높은 것으로 나타났다. 상추 실험에서 태양광 파이버처리구가 LED만 처리한 것보다 생육이 좋았는데, 엽장은 1.7 cm, 엽면적은 7 cm^2/주, 뿌리길이는 32 mm 정도 유의하게 차이가 있었다. 따라서 태양광 집광장치의 광파이버를 통한 상추재배는 LED등 보다 생육을 증진시키고 에너지 절약이 가능하여 활용성이 있을 것으로 판단된다. 아울러 구름 낀 날이나 비가 오는 등 태양광이 부족한 날을 위해서 LED 등을 보조적으로 활용하면 좋을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ01278001)의 지원에 의해 이루어진 것임.

REFERENCES

Jang, Y. S., 2005, The automatic system of plant factory, Res. Ext., 46, 44-47.

Jeong, H. G., Han, S. B., Jung, B. M., Lee, E. J., Lim, S. H., 2002, A Study on solar light collector using fresnel lens film, J. of Kor. Solar Energy Soc., 22, 81-86.

Jeong, H. J., Kim, W. S., Kim, Y. M., Han, H. J., Choi, W. G., 2017, Electric lighting energy saving through the use of a fresnel lens based fiber-optic solar lighting system: Simulation and measurements, J. of Kor. Solar Energy Soc., 37, 1-12.

Kang, H. M., Kim, I. S., 2007, Effect of nutrient solution composition modification on the internal quality of some of leaf vegetable in hydroponics, J. Bio-Env. Con., 16, 348-351.

Kim, J. H., 2009, The present state and future of plant factory, Res. of KREI, 61, 1-19.

Kim, Y. H., Lee, J. S., 2016, Growth and contents of anthocyanins and ascorbic acid in lettuce as affected by supplemental UV-A LED irradiation with different light quality and photoperiod, Kor. J. Hort. Sci. Techno., 34, 596-606.

Kim, Y. M., 2011, Study on the preformance enhancement of low-temperature solar application: Daylighting and adsorption desalination system, Master Thesis.

Kim, Y. S., Kwon, K. W., 2009, Skin load reduction technology of building, Korea Green Building Council, 38-41.

Kozai, T., 2007, Propagation, grafting and transplant production in closed systems with artificial lighting for commercialization in Japan, Propag Ornam Plants, 7, 145-149.

Lee, C. S., Kim, J. M., Park, Y. M., Sung, T. K., Joung, C. B., Kang, S. H., Kim, B. C., 2012, The development of solar tracking concave mirror type daylighting system, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineeris of Korea, summer Conference, 12-S-209.

Lee, C. S., Kim, J. M., Park, Y. M., Sung, T. K., Joung, C. B., Kang, S. H., Kim, B. C., 2013, Development of tracking daylighting system using Multi-Parabolic reflector, J. of Kor. Solar Energy Soc., 33, 56-63.

Lee, J. G., Oh, S. S., Cha, S. H., Jang, Y. A., Kim, S. Y., Um, Y. C., Cheong, S. R., 2010, Effects of red/blue light ratio and short-term light quality conversion on growth and anthocyanin contents of baby leaf lettuce, J. Bio-Env. Con., 19, 351-359.

Lee, S. R., Kang, T. H., Han, C. S., Oh, M. M., 2015, Air anions improve growth and mineral content of kale in plant factories, Hortic Environ Biotechnol., 56, 462-471.

Lee, Y. B., Jin, Y. H., Jo, S. S., Lee, C. E., 2000, Lettuce production in factory-style plant production system, Kor. J. Hort. Sci. Technol., 18, 178. (Abstr.)

Mahdavian, K., Ghorbanli, M., Kalantari, K. M., 2008, The Effects of ultraviolet radiation on the contents of chlorophyll, flavonoid, anthocyanin and proline in *Capsicum annuum* L., Turk. J. Bot., 32, 25-33.

Oh, S. J., Lee, Y. J., Kim, N. J., Hyun, J. H., 2011, Development of an AVR MCU-based solar tracker, Journal of Energy Engineering, 20, 353-357.

Park, J. E., Park, Y. G., Jeong, B. R., Hwang, S. J., 2012,

Growth and anthocyanin content of lettuce as affected by artificial light source and photoperiod in a closed-type plant production system, Kor. J. Hort. Sci. Technol., 30, 673-679.

Park, K. S., Bekhzod, K., Kwon, J. K., Son, J. E., 2016, Development of a coupled photosynthetic model of sweet basil hydroponically grown in plant factories, Hortic Environ Biotechnol., 57, 20-26.

Park, Y. C., 2000, Sun tracking system for active daylighting system, The Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 11, 47-58.

Song, M. J., 2014, Air anion enhances growth of several edible sprouts and lettuce in a closed-type plant production system, Master's Thesis, Chungbuk National University, Cheongju, Korea, 34-43.

Um, Y. C., Oh, S. S., Lee, J. G., Kim, S. Y., Jang, Y. A., 2010, The development of container-type plant factory and growth of leafy vegetables as affected by different light source, J. Bio-Env. Con., 19, 333-342.

Vu, N. H., Shin, S. Y., 2016, Cose-effective optical fiber daylighting system using modified compound parabolic concentrators, Solar Energy, 136, 145-152.

Yoon, Y. J., 2009, Architecture and Daylighting System, Journal of the Korea Solar Energy Society, 8, 3-10.

Yun, H. K., Zhang, C. H., Seo, T. C., Lee, J. W., 2006, Effect of selenium application concentration and periods on growth in garlic, J. Bio-Env. Con., 15, 346-351.

• 이상규, 농촌진흥청 국립농업과학원 연구관
sanggyul@korea.kr
• 이재수, 농촌진흥청 국립농업과학원 농업연구사
butiman@korea.kr
• 원진호, 농촌진흥청 국립농업과학원 전문연구원
wjh9446@korea.kr