*Protected Horticulture and Plant Factory*, Vol. 29, No. 2:105-109, April (2020)
DOI https://doi.org/10.12791/KSBEC.2020.29.2.105

pISSN 2288-0992
eISSN 2288-100X

# 폐쇄형 식물공장내 태양광 파이버를 이용한 상추 재배효과

이상규 · 이재수* · 원진호
농촌진흥청 국립농업과학원 스마트팜개발과

# Effects of Lettuce Cultivation Using Optical Fiber in Closed Plant Factory

**Sanggyu Lee, Jaesu Lee*, and Jinho Won**
*Division of Smart Farm Development, National Institute of Agricultural Science, RDA, Jeonju 54875, Korea*

**Abstract.** This study was conducted to the improvement of solar light-based artificial light supply system and effect of lettuce cultivation. The artificial light supply system was consisted of units such as light source, power, system measurement and controller. The light source supply was composed of a solar transmitter and an LED lamp. The power supply consisted of an leakage breaker, SMPS, LED controller and relay. The solar transmitter was made of a quartz optical fiber with optimal light transmission. Artificial light used white lamp among LEDs. System measurement and control consisted of touch screen, Zigbee communication module and light quantity sensor. The results of test confirmed that the LED light is automatically activated when the intensity measured by the light intensity sensor is 200 $\mu molm^{-2}s^{-1}$ or less. Moreover, the leaf length, root length, chlorophyll content and root fresh weight of optical fiber treatment was hight than LED lamp treatment. Therefore, it can be inferred that the energy-saving solar light collector device can be effective in the indoor lettuce production. However, the use of LED lamp is also recommended to assure the availability of sufficient sunlight in cloudy and rainy days.

**Additional key words :** Artificial light, Lettuce(*Lactuca sativa* L.), Light supply, Optical fiber, Photosynthesis

## 서 론

최근 세계기상기구의 발표에 따르면 2015~2019년의 지구 평균기온은 1850~1900년(산업화 이전시기)보다 1.1℃ 상승하였고 역사상 가장 더운 5년으로 기록될 것이라고 하였다(WMO, 2019). 따라서 농업분야에서도 이를 기후위기로 인식하고 대기 중 이산화탄소의 발생량을 최소화하기 위해 공장에서 발생한 이산화탄소를 재활용하거나 이산화탄소 발생 최소화 기술 연구 등 적극적으로 대응하고 있다(IPCC, 2013). 아울러 기후변화에 따른 이상기상 발생시 안정적인 생산을 위해서 인위적인 환경조건에서 작물을 생산할 수 있는 식물공장(plant factory)에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다(Kim, 2009; Park 등, 2016). 그런데 식물공장은 대부분 화석에너지를 바탕으로 하는 LED, MH 및 형광등 등 인공광원을 이용하여 엽채류나 약용작물을 생산하고 있다(Jang, 2005). 인공광원으로 많이 사용하는 LED에 대한 연구는 파장별 생육특성(Um 등, 2010), 음이온 처리효과(Song, 2014; Lee 등, 2015) 및 생산기술(Choi 등, 2005; Kang과 Kim, 2007; Lee 등, 2010; Seo 등, 2006; Yun 등, 2006)에 대한 연구가 많이 되었다. 하지만 폐쇄형 식물공장에서 광원으로 기후변화를 가속시키는 화석연료를 사용하지 않고 환경친화형 태양광을 이용하는 연구는 미흡한 실정이다. 태양광을 이용하기 위해서는 광을 집광하는 장치(Lee 등, 2012; Lee 등, 2019)가 필요하며 집광한 광을 실내로 들여오기 위한 전송기술(Jeong 등, 2002; Kim과 Kwon, 2009) 그리고 들여온 광을 식물에게 비추게 하는 채광기술이 필요하다. 식물공장에서 광원으로 태양광을 사용할 경우 흐리거나 비가 오는 날에는 작물생육에 적합한 광을 확보하기 어려운 문제가 발생한다. 따라서 본 연구는 태양광을 기반으로 인공광 병렬 광 공급 시스템에 대한 연구로 태양이 비추지 않는 날에 인공광을 보조적으로 활용하는 기술을 개발하고 상추를 대상으로 효과를 구명하고자 수행하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 태양광 집광장치 및 전송

태양광 집광은 비구면 볼록렌즈 6개를 1세트로 구성하였고(Fig. 1-A), 광 전송은 유리 광섬유를 통해서 폐쇄형 컨테이너

*Corresponding author: butiman@korea.kr
Received February 27, 2020; Revised March 17, 2020; Accepted April 09, 2020

내에 상추 재배기로 유입시켰다. 채광 효율을 높이기 위해서 광섬유 끝부분에 크롬으로 코팅된 직경 4cm인 반사갓을 고정하여 실험에 사용하였다(Fig. 1-B, C).

### 2. 태양광 기반 인공광 병렬 광 공급 시스템

태양광 기반 인공광 병렬 광 공급 시스템은 태양광이 좋은 날에는 집광 후 광 파이버를 통해 실내로 들여와 광을 비추는 장치를 통해 광을 공급받고(이하 광파이버 처리), 집광이 어려운 흐린 날이나 비오는 날에는 부족한 광량을 LED 램프로 보광하는 시스템이다. 광파이버로부터 유입된 광은 하위 15cm 지점에 있는 광량 센서(LI-COR Inc., Nebraska, USA)로 측정하여 지그비 통신모듈을 통해 터치스크린에 전달하여 광량이 200μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$ 이상이 되면 100% 태양광만 사용하고, 200μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$ 이하면 LED 램프가 자동으로 작동되어 보광을 하게 된다(Fig. 2). LED 보광 광량은 200μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$ 이고, 일적산광량은 흐린 날은 광파이버 처리와 LED 처리구는 200μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$ 로 같고, 다만 맑은 날은 광파이버 처리구의 광량은 200μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$ 이상이었다.

### 3. 생육특성 및 광합성조사

상추 재배를 위한 양액재배기는 2단으로 담액수경 재배를 할 수 있도록 구성하였고, 상층부에는 광파이버 처리, 하층부에는 LED 처리로 하였으며 상하층 온도 차이를 없애기 위하여 대류팬의 풍속을 0.2m/s 로 상시 작동시켰다. 상추는 잎이 진한 적색이고 반결구 상추인 '삼선적축면'(Farmhannong Co., Seoul, Korea)품종을 2019년 9월 20일에 플러그트레이(105공) 안에 스폰지를 넣고 스폰지 상부를 종자를 넣기 위해 구멍을 낸 후 종자 2립씩을 파종하였다. 파종 후 플러그트레이를 담을 수 있는 틀에 물을 채우고 파종한 트레이를 틀에 담가서 수분을 공급해 주었고, 발아까지 온도는 25°C로 관리하였고, 발아 후 1주만 남기고 솎아 주었으며 온도는 22/18°C(주/야간)로 관리하였다. 생육조사는 파종 후 30일에 처리별로 엽수, 엽장, 엽폭, 엽록소 함량 및 생체중 등을 조사하였다. 엽록소 함량 측정은 엽록소 측정기(SPAD 502, Minolta Co., Osaka, Japan)로 주당 5회 측정 후 평균값을 사용하였고, 처리당 3반복으로 조사하였다. 광합성 측정은 휴대용 광합성 측정기(LI-6400, portable photosynthesis system, LI-COR Inc., Nebraska, USA)로 상추 잎 중에서 가장 넓은 잎을 기준으로 측정하였다. 광합성 측정기의 조건은 온도 22°C, 상대습도 60%, $CO_2$농도는 400μmol·mol$^{-1}$, 광량자속은 500μmol·m$^{-2}$·s$^{-1}$로 하였고 광원은 기기 자체의 LED 모듈 사용하여 동일한 조건으로 설정하였다. 근활력 조사는 Berridge 등(2005)의 방법으로 하였는데, 상추 뿌리를 채취하여 증류수로 세척 후 세근을 약 0.5cm 길이로 절단하여 균일하게 혼합한 후 0.1g을 취해 2mL test tube에 넣었다. 그 후 1mL의 증류수를 첨가하여 혼합한 후 Premix WST-1 cell proliferation assay system (Takara Inc., Tokyo, Japan) 시약 10μL를 가하였다. 이것을 암상태로 25°C에서 3시간 동안 반응시킨 후 ELISA reader

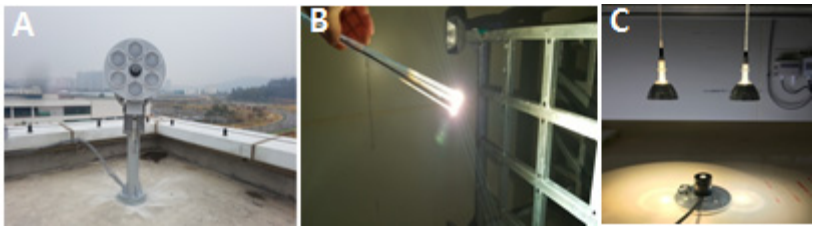



**Fig. 1.** Collector devices of solar light(A), optical fiber(B), and reflector(C).

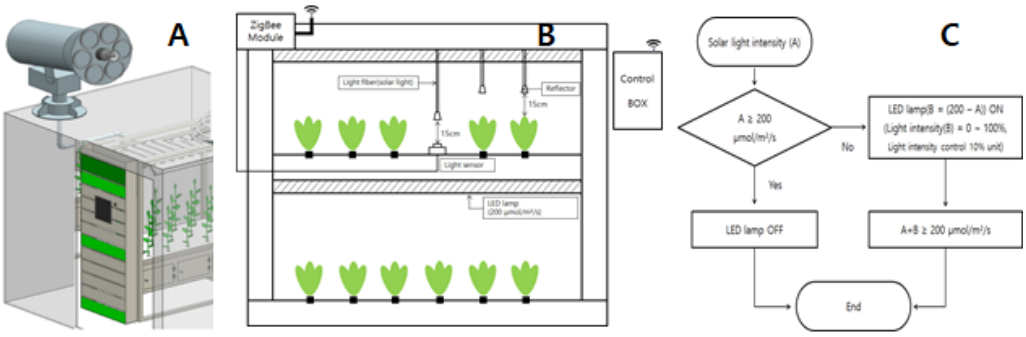



**Fig. 2.** Collector devices design of outside(A), inside(B) and light supply algorithm(C).

(Microplate Spectrophotometer, EonTM, BioTekInc., Vermont, USA)를 이용하여 흡광도 420nm에서 분석하였다.

### 4. 통계분석

통계분석은 SAS 프로그램(SAS 9.2, SAS Institute Inc., USA)을 이용하여 Duncan's Multiple Range Test(DMRT), T-검정을 실시하였다. 광합성 데이터는 처리당 2주씩 3반복으로 측정하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 태양광 집광장치 및 전송

태양광 집광은 프레넬렌즈(Jeong 등, 2017)를 사용하였고, 집광된 광은 플라스틱 광섬유보다도 전송율이 좋은 유리 광섬유(GOF; Glass Optical Fiber)를 통해서 상추 재배기로 유입시켰다. 광섬유는 실리카소재로 된 코어와 저굴절 레진 소재의 클래드 및 버퍼로 구성된 SOF(Silica Optical Fiber) 6개를 분리하여 각각 1개로 구성하였고 그 끝부분에 크롬으로 코팅된 직경이 4cm인 반사갓을 고정하여 광 효율을 높였다(Lee 등, 2019). 태양광 집광장치는 광원 공급부, 시스템 계측 및 제어부, 전원 공급부로 구성되어 있다. 광원 공급부는 태양광 전송장치(광파이버)와 LED 램프(인공광)로 구성하였고, 태양광 전송장치는 광 전송률이 우수한 석영재질의 광섬유(Optical fiber)로 제작(Jeong 등, 2002; Kim과 Kwon, 2009)되었으며, 인공광은 LED 중 White 램프(LG innotek 5700k, 150 mA, 3V)를 사용하였다(Fig. 3-A). 시스템 계측 및 제어부는 터치스크린과 지그비(ZigBee) 통신모듈, 광량 센서로 구성하였다(Fig. 3-B). 전원 공급부는 누전 차단기, 단상전자 접촉기, 교환방식 전원공급장치(Switching Mode Power Supply, SMPS), LED 제어기, 릴레이로 구성하였다(Fig. 3-C).

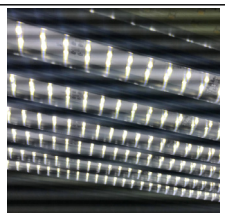
### 2. 광합성 특성 및 생육분석

상추 파종 후 30일의 광합성 특성과 근활력을 조사한 결과는 Table 1과 같다. 순광합성은 광파이버처리가 7.57 μmol·$CO_2$·$m^{-2}$·$s^{-1}$, LED 처리구는 6.50μmol·$CO_2$·$m^{-2}$·$s^{-1}$ 로 통계적인 유의성은 없었다. 또한 기공확산전도도 및 근활력도 광파이버 처리와 LED 처리간 통계적인 유의성이 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 식물공장내에서 상추재배시 광량이 높을수록 광합성 능력이 높은 것으로 나왔다는 결과(Park과 Lee, 1999)와 다른 양상을 보였는데 이것은 실험기간 동안 구름낀 날과 비가 오는 날이 많았기 때문으로 판단된다.

상추 파종 후 30일의 생육특성을 조사한 결과는 Table 2와 같다. 엽장은 광파이버 처리가 19.93cm로 LED 처리구의 16.0cm보다 컸으며, 뿌리길이도 광파이버처리구가 24.6cm로 LED 처리구의 20.53cm 보다 컸다. 또한 엽록소 함량은 광파이버 처리가 18.03 SPAD 이었고, LED 처리구는 15.20

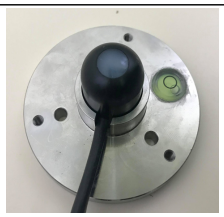
(A)

Optical fiber



LED lamp

(B)

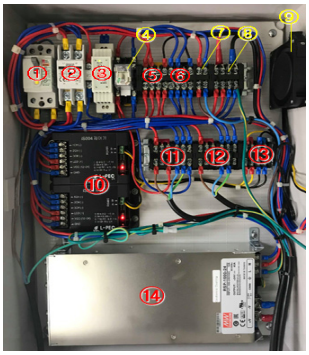


Light sensor

Zigbee module

Touch screen

(C)



| No. | Name | Specification |
|---|---|---|
| ① | Leakage breaker | AC/220V, 30A |
| ② | Phase electronic contactor | 30A |
| ③ | SMPS | DC 5V, 15W |
| ④ | Relay | DC 24V |
| ⑤,⑥,⑦ | N,L Irrigation controller | AC 220V |
| ⑧,⑨ | Pan controller | DC 24V |
| ⑩ | LED lamp controller | Input, 3CH, DC 24V |
| ⑪,⑫ | LED lamp controller | Output, DC 24V |
| ⑬ | 485 communication terminal block | - |
| ⑭ | Power supply | DC 24V, 450W |

**Fig. 3.** System of light supply part(A), measurement and control part(B) and power supply part(C).

**Table 1.** Photosynthesis and root activity of affected lettuce 30 days after sowing.

| Light source | Photosynthetic rate ($\mu mol \cdot CO_2 \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) | Stomatal conductance ($mol \cdot H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) | Transpiration rate ($mmol \cdot H_2O \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$) | Root activity (Absorb., at 420nm) |
|---|---|---|---|---|
| Optical fiber[z] | 7.57 a[y] | 0.28 a | 3.41 a | 0.21 a |
| LED | 6.50 a | 0.22 a | 2.83 a | 0.20 a |

[z]Optical fiber + LED
[y]Means followed by the same letter are not significantly different using T-test, $P \leq 0.05$.

**Table 2.** Growth of affected lettuce 30 days after sowing.

| Light source | Leaf no. (ea/pl.) | Leaf height (cm) | Leaf diam. (cm) | Leaf area ($cm^2$/pl.) | Root length (cm) | Chlorophyll content (SPAD) | Fresh wt.(g/pl.) | | Dry wt.(g/pl.) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Top | Root | Top | Root |
| Optical fiber[z] | 7.83 a[y] | 17.93 a | 16.30 a | 649 a | 24.60 a | 18.03 a | 24.99 a | 5.51 a | 1.04 a | 0.39 a |
| LED | 7.50 a | 16.08 b | 16.65 a | 610 a | 20.53 b | 15.20 b | 23.69 a | 3.74 b | 0.97 a | 0.39 a |

[z]Optical fiber + LED
[y]Means followed by the same letter are not significantly different using T-test, $P \leq 0.05$.

**Fig. 4.** Harvested lettuce under optical fiber of solar (A) and LED light (B) at 30 days after sowing.

SPAD로 광파이버 처리구가 높았다. 지하부 생체중도 광파이버 처리가 LED 처리보다 큰 것으로 나타났다. 이것은 태양광을 유입하여 사용한 광파이버 처리가 LED 처리보다 광파장대역이 다양하였기 때문으로 생각되며 이와같은 결과는 광 파장대역이 다양한 형광등처리가 백색 LED 만 처리한 것보다 적상추 생육이 좋았다(Park 등, 2012)는 결과와 유사하였다. 아울러 파장대역별로 다른 LED를 처리한 결과 수량이 달라졌다(Kim과 Lee, 2016)는 보고와도 유사하였다. 그러나 엽수, 엽폭, 엽면적, 지상부 생체중 및 건물중은 처리간 유의성이 없었다. 수확시 광파이버 처리구와 LED 처리구에서 자란 상추 모습(Fig. 4)을 보면 생육에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구결과 개발된 장치는 LED 처리보다 상추 생육을 증진시킬 뿐 아니라 자연 에너지 활용으로 화석연료 절감효과가 있으므로 향후 식물공장 같은 시설 내에서의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

## 적 요

본 연구는 태양광 기반으로 인공광 병렬 광공급 시스템을 개발하고 상추 재배효과를 구명하기 위하여 수행하였다. 태양광 기반으로 인공광원을 공급하는 장치는 광원 공급부, 전원 공급부, 시스템 계측 및 제어부로 구성하였다. 광원공급부는 태양광 전송장치(광파이버)와 LED 램프(인공광)로 구성하였고, 태양광 전송장치는 광 전송률이 우수한 석영재질의 광섬유(Optical fiber)로 제작되었으며, 인공광은 LED 중 White 램프를 사용하였다. 전원 공급부는 누전 차단기, SMPS, LED 제어기 및 릴레이로 구성하였다. 시스템계측 및 제어부는 터치스크린과 지그비(ZigBee) 통신모듈, 광량센서로 구성하였다. 구성한 장치의 성능시험 결과 광량센서로 측정된 강도가 200$\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 이하가 되면 자동적으로 LED 램프가 작동되어 보광하는 것을 확인하였다. 또한 본 장치를 활용하여 상추를 재배한 결과, 엽장, 뿌리길이, 엽록소 함량 및 지하부 생

체중이 LED 처리보다 큰 것으로 나타났다. 따라서 본 장치는 화석연료 고갈 등으로 전기 사용에 제한이 올 때 폐쇄형 식물공장 같은 시설에서 작물을 재배할 수 있을 것으로 판단된다.

**추가 주제어 :** 광공급, 광섬유, 광합성, 상추(*Lactuca sativa* L.), 인공광

## 사 사

본 성과물은 농촌진흥청 연구사업(세부과제번호: PJ0127-8001)의 지원에 의해 이루어진 것임.

## Literature Cited

Berridge, M.V., P.M. Herst, and A.S. Tan. 2005. Tetrazolium dyes as tools in cell biology: new insights into their cellular reduction. Biotechnol. Ann. Rev. 11:127-152.

Choi, K.Y., E.Y. Yang, D.K. Park, Y.C. Kim, T.C. Seo, H.K. Yun, and H.D. Seo. 2005. Development of nutrient solution for hydroponics of cruciferae leaf vegetables based on nutrient-water absorption rate and the cation ratio. J. Bio-Env. Con. 144:289-297.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2013. Climate change 2013: Contribution of working group I to the Fifth Assessment Report of the Inter governmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge. United Kingdom and New York. NY. USA.

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

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

Jeong, H.J., W.S. Kim, Y.M. Kim, H.J. Han, and W.G. Choi. 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., and I.S. Kim. 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., and J.S. Lee. 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. Technol. 34: 596-606.

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

Lee, C.S., J.M. Kim, Y.M. Park, T.K. Sung, C.B. Joung, S.H. Kang, and B.C. Kim. 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, J.G., S.S. Oh, S.H. Cha, Y.A. Jang, S.Y. Kim, Y.C. Um, and S.R. Cheong. 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.G., J.S. Lee, and J.H. Won. 2019. Analysis of light traits in a solar light-collector device and its effects on lettuce growth at an early growth stage. J. Environ. Sci. Inter. 28:1019-1025.

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

Park, J.E., Y.G. Park, B.R. Jeong, and S.J. Hwang. 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., K. Bekhzod, J.K. Kwon, and J.E. Son. 2016. Development of a coupled photosynthetic model of sweet basil hydroponically grown in plant factories. Hortic Environ Biotechnol. 57:20-26.

Park, M.H., and Y.B. Lee. 1999. Effects of $CO_2$ concentration, light intensity and nutrient level on the growth of leaf lettuce in a plant factory. J. Kor. Soc. Hort. Sci. 40:431-435.

Seo, T.C., H.K. Yun, and C.H. Zhang. 2006. Effect of surfactant addition on Ge absorption and growth of pak-choi and lettuce in DFT culture. J. Bio-Env. Con. 15:130-135.

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., S.S. Oh, J.G. Lee, S.Y. Kim, and Y.A. Jang. 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.

World Meteorological Organization (WMO). 2019. The global climate in 2015-2019. World Meteorological Organization. 21pp.

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