



농작물 광 피해 방지를 위한 LED 조명 개발 및 생육 검증

조범연^{a,c}, 배은영^{a,c}, 김경상^{a,c}, 조영태^{b,*}, 신오순^{c,*}

Development of LED Lighting to Prevent Light Pollution to Crops and its Growth Verification

Byoum-Youn Cho^{a,c}, Eun-Young Bea^{a,c}, Gyoung-Sang Kim^{a,c}, Young-Tae Cho^{b,*}, Oh-Soon Shin^{c,*}^a R&D Center, STN Co., Ltd.^b Department of Basic Science, College of Engineering, Jeonju University^c Artificial Intelligence IT Convergence, Soongsil University

ARTICLE INFO

Article history:

Received	19	November	2024
Revised	30	November	2024
Accepted	2	December	2024

Keywords:

Light pollution

Crops

Photosynthesis

Light reaction

Dark reaction

PPF(photosynthetic photon flux)

ABSTRACT

This study aimed to develop LED(light emitting diode) lighting that has a minimal impact on crop growth. An LED light source was developed with a wavelength band of 550-620 nm, which does not affect photosynthesis in plants and has a PPF(photosynthetic photon flux) index of 1.0 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ or less, with a minimal impact on photosynthetic activity. Consequently, the light output distribution in the wavelength band of 550-620 nm was 83.1%, with a PPF index of 0.453 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, which minimized the impact on crops. In addition, LED lighting with a color temperature free of heterogeneity was implemented. Therefore, the minimization of the light impact was verified through comparative experiments on the initial growth of the five crops. To verify the light pollution effects of LED lighting on the crop yield, empirical tests must be conducted until the crops are harvested.

1. 서론

도로 건설의 확대로 전국이 일일생활권에 들게 되었고, 이것으로 인해 많은 나트륨 및 메탈 등기구, LED 보안 등기구 등 다양한 조명이 설치되고 있으며, 대도시뿐만 아니라 중·소도시를 비롯해 전국 농어촌 지역까지도 조명(lightning)이 설치되어 있다. 이처럼 무분별한 조명의 설치는 수면장애, 작물 생육 교란 등을 일으키고 있어 빛공해로 인한 광 피해(light pollution)가 발생하고 있다. 광 피해는 무분별하게 설치된 필요 이상의 인공 빛이 인체나 자연환

경 등에 피해를 주는 현상을 말한다. 광 피해의 주요 원인은 80% 이상이 화려한 조명 때문으로 알려져 있다. 특히 도로 주변 야간 조명이 증가됨으로서 조명 빛으로 인해서 농작물(crops) 생육에 큰 영향을 미치고 있다. 전국의 고속도로, 국도와 경작지를 지나는 도로 등 도로 주변에 설치된 조명으로 인해서 작물에 조사되는 빛 때문에 지속되는 생육으로 개화 지연에 따른 등숙 불량과 출수 지연 등의 피해로 수확량 감소 등 다양한 피해가 일어나고 있으며, 농작물 광 피해의 99% 원인은 가로등이다. 이처럼 조명에 의한 빛으로 인한 생태계의 교란이 가장 큰 사회적 문제로 대두되고 있다. 이로

* These authors contributed equally to this work.

^b Corresponding author. Tel.: +82-63-220-2981

E-mail address: choyt@jj.ac.kr (Young-Tae Cho).

^c Corresponding author. Tel.: +82-02-828-7167

E-mail address: osshin@ssu.ac.kr (Oh-Soon Shin).

인하여 2013년에 인공조명에 의한 빛공해 방지법 제정과 함께 지방자치단체에서도 빛공해 방지를 위한 조례와 가이드 라인을 제시하였으며, 이와 함께 빛공해에 관련된 연구가 진행되고 있다^[1-3].

기존에 가로등으로 설치된 할로겐램프, 나트륨등들은 광피해가 심하며, 광 효율이 낮고 에너지 소비가 커서 이러한 조명을 대체하기 위해서 고효율 LED 조명의 개발이 활발하게 이루어졌다. LED 조명은 에너지 및 광 효율이 우수하고 다양한 형태의 고효율 가로등 및 방범등 등의 다양한 산업용 조명을 대체하기 위한 LED 조명이 개발되어 설치되고 있다. LED는 작은 용량에도 광효율이 우수하고, 또한 기존 조명 대비 40~60% 에너지가 절감된다. 그러나 기존에 설치된 조명에 대비해서 조도가 높아 전국이 밝아지고, 동시에 빛공해 우려가 더욱더 심화되고 있다. 특히, 빛공해로 인한 농작물 광 피해에 대한 많은 민원이 발생하고 있으며, 이러한 민원 발생 시 52.4%의 공공기관은 즉시 가로등을 끄는 형태로 민원을 처리하고 있으나, 그로 인해서 반대로 주민들의 생활 불편 및 안전 관련 민원이 지속적인 증가 추세에 있다.

반면에 LED 광원은 광 주파수 조절이 가능함으로 광 피해가 아닌 광을 이용한 식물 성장을 촉진 시켜 효과적으로 식물을 재배할 수 있는 LED 광원 개발 및 응용에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 식물공장 구축, 스마트 팜으로 발전하고 있다. 이처럼 식물 성장을 위한 다양한 형태의 LED 광원이 개발되었고^[4-8], 조명의 적용과 생리적 반응에 관한 연구는 활발하지만, 빛공해로부터 농작물에 미치는 광 피해를 최소화하는 조명에 관한 연구는 많지 않다. LED 조명의 광 피해를 최소화하는 연구로서, 식물생리에 둔감한 광 파장을 선별하여 조명에 적용하거나, 초당 1,000회 전후로 광을 점멸시켜 간헐적인 광으로 인식하도록 하는 형태, 시간대별로 LED 조도의 조절이 가능한 조광기를 개발하여 적용하는 형태로 광 피해를 해결하려 하였으나^[9-15], 광 피해가 없거나, 최소화하는 LED 조명에 관한 연구는 거의 없다^[16,17].

따라서, 본 연구에서는 농작물의 생육에 미치는 영향을 최소화하는 550~620 nm 파장대의 LED 광원을 선정하고, LED 조명으로서 역할이 가능하도록 이질감 없는 색온도의 LED 광원을 조명으로 구현하고, 시제작한 후 작물 5종(밀, 벼, 콩, 들깨, 참깨)의 성장에 미치는 광 영향에 대해서 LED 조명 조건에 따른 작물의 초기성장 비교를 통해서 광 영향의 최소화에 관한 검증을 수행하였다.

2. 식물의 조명 반응과 LED 조명 개발

2.1 식물의 야간 조명 반응

본 연구에서 농작물의 생육에 영향을 최소화하는 LED 조명을 개발하고, 시험 작물로는 빛공해에 의한 피해가 가장 심한 대표 농작물인 밀, 벼, 콩, 들깨 및 참깨 5종을 대상으로 한다.

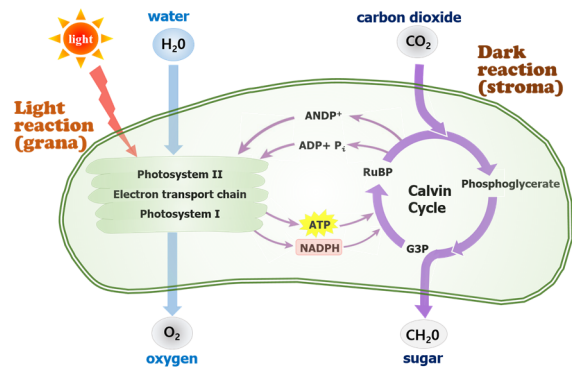


Fig. 1 Photosynthetic process of chloroplasts in plants

식물의 빛에 대한 반응은 광합성(photosynthesis)과 광형태형성(photomorphogenesis)으로 크게 나눌 수 있다. 광합성은 광을 에너지로 사용하여 유기물을 합성하는 과정이고, 광형태형성은 광을 신호로 감지하여 형태적인 반응과 종자의 발아, 꽃눈형성과 잎 및 가지를 형성하는 분화, 기공개폐 및 엽록체 운동, 굴광성, 생체시각 등을 인식하는 것에 활용된다. 또한 광합성은 빛에 의존하는 반응인 명반응(light reaction)과 빛에 의존하지 않는 암반응(dark reaction)으로 나뉘어, 농작물 등 식물의 정상적인 생육을 일으키게 된다. 이처럼 빛의 영향에 따른 명반응과 암반응 과정의 광합성 개념을 Fig. 1에 나타내었다. 그러나 인공조명인 가로등, 보안등 및 경관 조명 등에 의해서 광합성의 암반응 과정을 비정상적으로 작동하게 하여 식물 성장에 문제를 일으키게 되어 작물 수확에 영향을 미치게 된다. 작물의 경우 장일식물, 중일식물 및 단일식물로 분류되는데, 이는 일장(day-length, 하루 24시간 중 연속되는 낮의 길이)에 의존하여 성장이 좌우되고, 일장은 작물의 꽃눈분화와 그 외에 다양한 영향을 미치는 현상으로 이것을 일장효과라고 한다. 일장효과에 따라 식물은 단일성, 장일성 및 중일성 작물로 구분된다. 일장이 12~14시간 이상인 것을 장일, 12시간 이하인 것을 단일이라고 한다. 다시 말하면, 하루 중 일조시간이 길어야만 개화하는 식물을 장일식물, 이와 반대로 단일에 의해서 꽃눈분화가 앞당겨지는 식물을 단일식물이라 한다. 만일 야간에 조명이 식물에 조사 되면, 식물은 광원의 질, 광 강도, 조사 시간, 조사 방향, 식물의 종류와 품종이 생육 단계에 따라 다른 반응으로 나타나게 되고, 작물의 수확량에도 큰 영향을 준다.

본 연구에서 개발하는 LED 조명을 사용하여 성장 시험을 하는 대상인 5종 작물 중에서 장일성 작물은 밀이고, 단일성 작물로는 벼, 콩, 참깨 및 들깨가 이에 해당한다.

장일성 작물은 개화, 이삭이 나오는 출수(heading) 촉진, 등숙율(percent ripened grain)의 저하로 수확량이 감소하는 피해가 발생하고, 단일성 작물은 반대로 출수 및 개화가 지연되어 등숙율이 떨어져 수확량이 감소한다. 특히, 들깨와 시금치는 야간 조명에 의

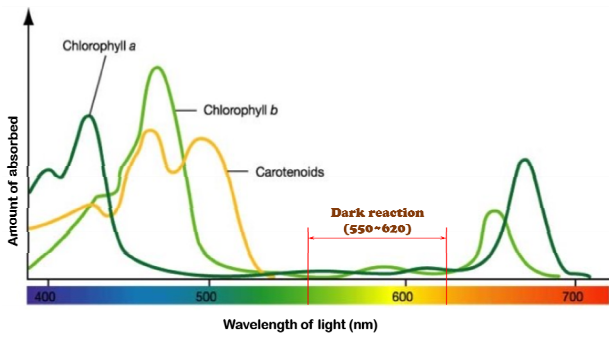


Fig. 2 Wavelength band with no triggering a light reaction

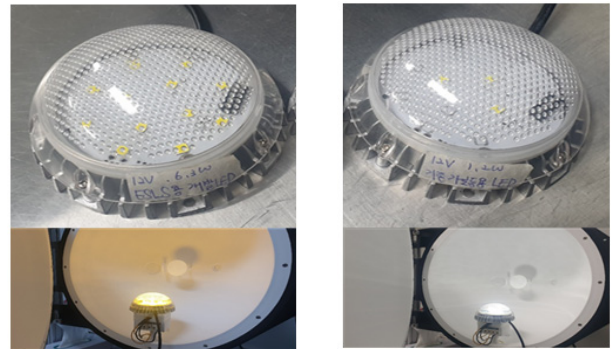
한 피해가 아주 큰 것으로 알려져 있다. 그리고, 중일성 작물로는 고추, 토마토, 강낭콩 등이 있는데 이들은 야간 조명에 의한 피해가 없다고 알려져 있다.

야간 조명에 의한 식물의 피해는 광원의 종류, 조사 시간, 설치 개수, 높이, 방향, 각도 및 논밭과의 거리, 조도에 따라 피해가 다르다. 특히 10 lux 이상에서 대부분의 생육 피해가 발생하고 있다. 그러므로 이에 대한 대책으로 Fig. 2와 같이 식물에 조명이 조사되더라도 명반응을 일으키지 않는 550~620 nm 파장대 LED 광원을 사용해서 조명의 역할을 다하면서도 광 피해가 최소화되는 LED 조명을 개발하고, 5종 작물에 있어서 빛 조사에 따른 농작물의 초기 성장을 비교 시험하였다.

2.2 LED 광원 및 조명 개발

기존 가로등은 일반적으로 나트륨등 또는 메탈등으로 도로 가장 자리에 30~50 m 간격으로 일정하게 설치되어 있었다. 그러나 이들 가로등은 방전식 램프를 사용하고 있어, 전력 소비가 크고, 환경 오염 물질을 다량으로 포함하고 있다. 따라서 에너지 소비가 적고 친환경적인 LED 조명으로 대부분이 교체되고 있다^[18-20]. 그러나 이러한 장점이 있지만, 기존 LED 조명 또한 농작물의 부적절한 생장으로 결실에 커다란 영향은 미치고, 주변 주택가의 야간 수면 방해 등 광공해를 일으키고 있다. 따라서 식물 성장에 영향을 미치지 않는 주파수대역인 550~620 nm 파장대의 LED 광원 개발과 조명용 모듈로 구현하여 가로등을 개발하고, 농작물 초기생장을 시험하였다.

개발하고자 하는 파장대의 LED 광원의 개발에 있어서 식물 성장과 광합성에 영향을 미치는 인자로 PPF(광합성 광자 플럭스)의 제어가 중요하다. 따라서 이를 고려한 LED 광원 개발이 필요하다. PPF는 400~700 nm 파장 범위에 해당하는 광자 흐름(photon flux)을 의미하는데 이는 식물의 광합성에 직접 사용될 수 있는 빛의 강도를 나타낸다. 대낮의 태양광은 약 2,000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 PPF 값을 나타내며, 대부분 실내조명은 약 50~200 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 값을 갖고 있다. PPF 지수가 1.0 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 경우 농작물에 미치는



(a) Developed LED (Ds-LED) (b) Conventional LED (Cv-LED)

Fig. 3 LED sample manufactured for LED characteristic comparison test

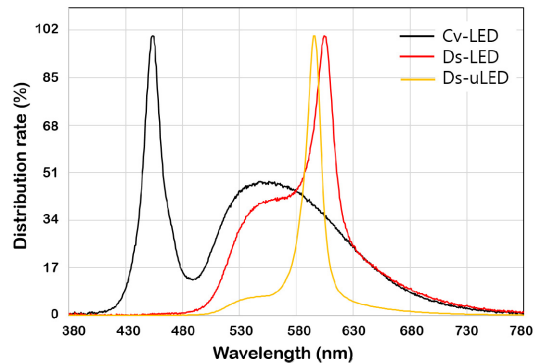


Fig. 4 Comparison of the LED light spectrum distribution

Table 1 LED specifications

	Color coordinates		Luminous flux (lm)	CCT (K)	CRI (Ra)	Input		Power (W)
	Cx	Cy				V (V)	I (A)	
Ds-LED	0.506	0.482	88.4	2,632	55.0	12.0	8.1	8.1
Cv-LED	0.310	0.327	75.6	6,672	76.7	12.0	0.10	1.2

영향은 미미하고 이는 매우 낮은 수준의 빛 강도를 의미하며, 일반적으로 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이상의 일 때 광합성이 활발하게 이루어진다고 알려져 있다. 따라서, 개발되는 LED 광원은 PPF 지수가 1.0 이하로 550~620 nm 파장대의 광출력이 80.0% 이상을 갖도록 LED 패키지(모듈)로 개발되어야 한다.

Fig. 3은 개발된 LED 광원을 이용한 LED 조명(Ds-LED)과 기존 LED(Cv-LED) 조명으로 물리적 특성과 스펙트럼 분석 테스트를 위해 설치한 것이다. Fig. 4는 개발 LED 광원의 단일 모듈(Ds-uLED), 조명으로 구현한 개발 Ds-LED와 기존 Cv-LED의 스펙트럼 분포를 나타내었다.

본 연구는 개발된 LED 광원의 파장이 농작물 성장에 미치는 영향에 따른 검증 관련 연구로서 조명의 등기구 설계 등에 관한

Table 2 LED spectrum data

	Max.	Total	550~620 (nm)	Rate (%)	Requirements
Ds-LED	1.12E+01	2.23E+02	1.94E+02	83.1	≥ 80%
Cv-LED	1.15E-01	1.72E+01	5.69E+00	33.1	

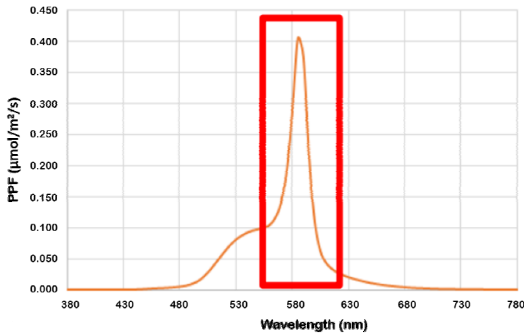


Fig. 5 PPF index by wavelength band of developed LED

기술은 언급하지 않는다. Fig. 3(a)의 개발된 Ds-LED 광원과 (b)의 기존 Cv-LED 광원으로 구현한 LED 조명에 대해서 Table 1의 DC 12 V, 6 W 전원을 인가할 때의 총 광속(luminous flux), 색온도(CCT, correlated color temp.) 및 연색성 지수(CRI, color rendering index) 등의 광 특성에 대해서 나타내었고, Table 2에는 Fig. 4의 LED 광원의 스펙트럼 분석 결과로 전체 파장 대비 550~620 nm 파장대의 분포로 기존 Cv-LED 광원의 경우 33.1%, 개발된 Ds-LED 광원의 경우는 83.1%가 분포함을 알 수 있었으며, 이처럼 광합성에 영향이 없는 550~620 nm 파장 대역이 80% 이상의 분포량을 갖도록 개발해야 하는 조건을 만족하였다. 개발된 Ds-LED에 대하여 광합성에 영향을 주는 FFP 지수를 측정할 파장대 분포를 Fig. 5에 그래프로 나타내었다. 이 분포도에서 적색 사각 부분의 550~620 nm 파장대의 그래프를 보면 PPF 지수가 0.453 μmol/m²/s의 결과를 보이고 있으며, 광합성에 영향을 주지 않는 1.0 μmol/m²/s의 50% 이하로 나타남을 알 수 있다.

3. 작물 5종 초기 성장 실험 및 고찰

3.1 작물 5종 테스트용 어레이 LED 조명 설정

농작물 중에서 가로등 조명에 의한 광피해 가장 심한 작물인 5종(밀, 벼, 콩, 참깨 및 들깨)의 초기성장 비교시험을 위해서, Fig. 6과 같이 광 피해가 없는 파장대의 Ds-LED와 종래의 Cv-LED의 단일 광원 12개를 110×43(80)×1.6 mm MCPCB에 3×4로 배열하고, 105×40×10t(베이스 3.25 t) mm AL 방열판을 후면에 설치하여 조명으로 시제작하였다. 그리고 조명부와 컨트롤러 PCB(110×80 mm)를 30 mm 이격시켜 조립하여 조명을 완성하였다. 농작물은 10 Lux 이상에서 광 피해가 발생하고, 가로등의 설치

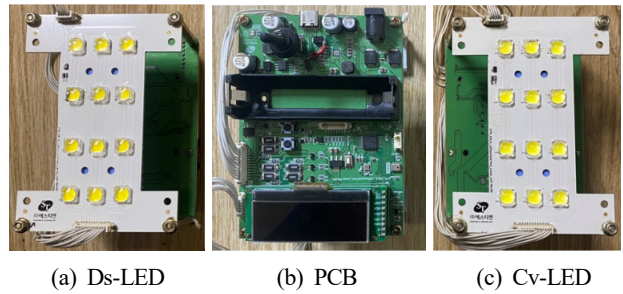


Fig. 6 LED lighting for comparative testing of light pollution during early growth of five types of crops

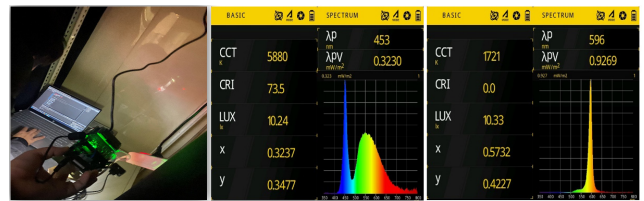


Fig. 7 Demonstrates the luminous flux of LED lights inside the chamber

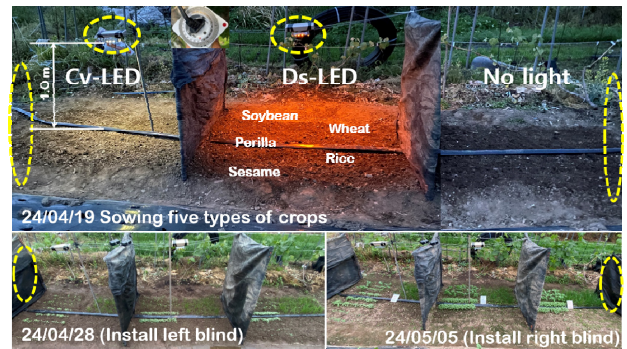
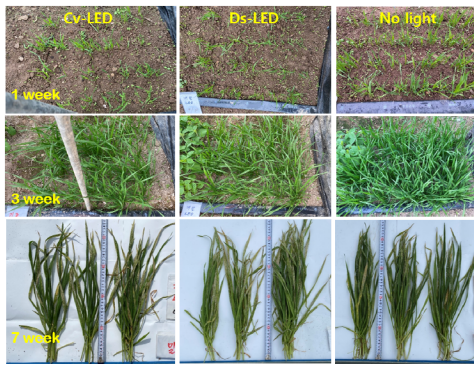


Fig. 8 Sowing five types of crops under LED light

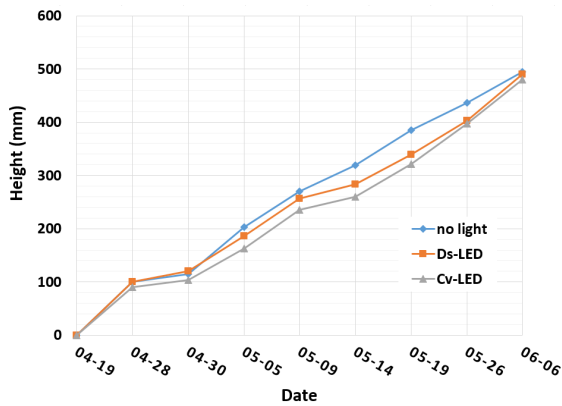
규정에 따라 10 Lux로 설정하였다. 식물 성장 시험 시 조사되는 빛 조도의 신뢰성을 높이기 위해서 밀폐된 챔버내에서 작물로부터 1.0 m 위쪽에 위치하는 조건을 상정하고, Fig. 7과 같이 조도계(Spectrometer, PG200N, uprtek, China)로 측정하면서 제어 SW를 이용하여 조명의 조도를 약 10.0 Lux로 설정하고, 스펙트럼 분포를 확인하였다. 조정된 두 개의 조명을 사용해서 실제 작물 재배환경과 유사한 모사를 위해서 노지(개발된 비닐하우스) 재배사의 1.0 m 바로 위쪽에 설치하고, 작물 5종에 대해서 자연광 상태, 기존 LED조명의 조사, 개발된 LED 조명이 조사되는 조건으로 비교하여 초기 성장을 시험하였다.

3.2 농작물 5종의 초기성장 비교 테스트 및 고찰

농작물 5종에 대한 LED 조명에 대한 영향을 파악하기 위하여 전남 화순군 화순읍 소재의 개방된 노지 비닐하우스에서 24년 4월



(a) Comparison of wheat growth photos



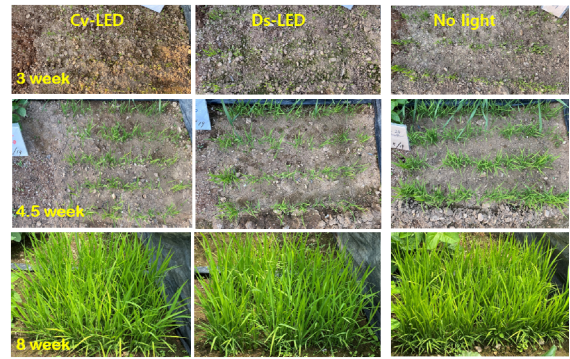
(b) Comparison of wheat height

Fig. 9 Comparison of wheat growth under different LED lights

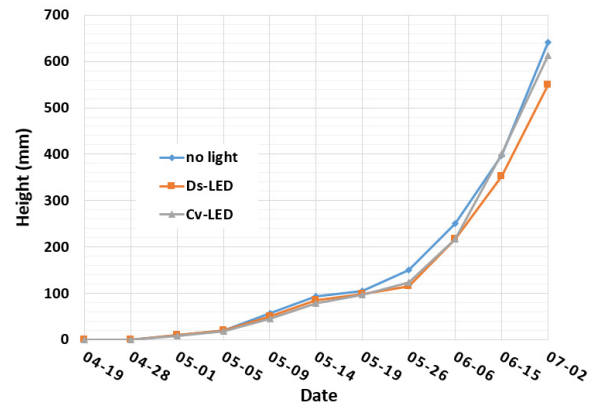
하순에서 7월 초까지 작물별로 약 6~11주간 초기 성장시험을 진행하였다. 초기성장 시험 작물 5종은 밀, 벼, 콩, 들깨 및 참깨를 대상으로 하였으며, LED 조명은 오후 19시~오전 5시까지 10시간 조사되는 조건으로 진행하였다. Fig. 8은 좌측부터 기존 조명(Cv-LED), 개발 조명(Ds-LED) 및 무조명 순의 재배사 설정 상태를 나타내었다. 재배환경은 최대한 실제 노지 환경이 재현될 수 있도록 비닐하우스의 전후좌우는 모두 개방된 상태이고, 비가림막과 심한 바람의 영향만을 피할 수 있는 조건을 유지하고, 주간에는 자연광이 조사되는 실제 환경에서 진행되었다. 또한 각각의 조명이 야간에 다른 재배사에 광 영향이 없도록 검은 암막으로 격벽을 설치하여 조명 빛을 차단하였고, 3곳의 재배사가 최대한 유사한 조건이 되도록 좌우 끝에도 암막을 추가 설치하여 시험하였다. 그 결과는 광 조건에 따른 작물의 신장과 잎장(길이 방향)을 중심을 논하였다.

3.2.1 밀 성장 비교

밀은 기온이 낮은 10월 중순 또는 2월 말경에 파종하는 작물이지만 4월 중순에 파종하였으며, 잎이 좁은 작물로 광 수용성이 낮아 야간 조명의 영향에 의한 광 피해가 크지 않은 작물로 알려져 있다. Fig. 9에 조명 조건에 따른 밀의 초기 성장 과정의 사진 및 신장 비교 그래프다. 관찰 결과, 파종 후 5일이 지나 싹이 올라오기



(a) Comparison of rice growth photos



(b) Comparison of rice height

Fig. 10 Comparison of rice growth under different LED lights

시작하고, 일주일 정도에 대부분 싹이 올라왔고, 10여 일 전후로 100 mm 정도까지 급격하게 성장하였으며, 이후 선형적인 성장곡선을 보인다. 성장에 따른 신장을 비교해 보면 무조명 > Ds-LED > Cv-LED 순서로 성장함을 알 수 있었으며, 파종 약 7주 후 거의 유사한 신장을 보였다. 개발 LED 쪽 밀은 테스트 장소의 중앙에 위치하고 있어서 가장 불리한 조건의 장소이지만 성장은 기존 LED보다 성장이 빠르고, 전체적으로 볼 때 3곳 모두 동일한 환경 조건은 아니지만 거의 유사한 성장을 보였으며, 단지 LED 조명의 바로 아래쪽의 경우 야간에 온도가 조금 상승하여 주변과의 온도 차를 보이며, 광에 의한 약간의 과성장 경향이 관찰되었다.

즉, 조명 조건에 따른 밀의 초기 성장을 전반적으로 볼 때 테스트 구역별로 약간의 환경 조건 차이 등을 고려한다면 초기 성장의 차이는 거의 없다고 말할 수 있으며, Ds-LED 조명의 경우 밀의 초기 성장에 대한 광 피해 영향 거의 없는 것으로 판단된다.

3.2.2 벼 성장 비교

남부지역에서 모내기 시기는 6월 중순경에 실시(모판은 25~30일 전에 함)하고, 모내기하고 60~70일이 지나면 생식 성장(포기증식)을 하게 되며, 생식 성장 후 20~25일 경이면 이삭이 나오게 되면서 수분 및 수정이 이루어지고, 이삭이 나온 후 40~45일 정도에 수확하

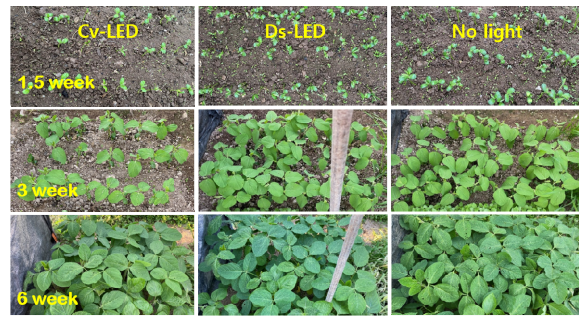
는 단일 작물로 초기 성장만을 관찰하기 위해서 조금 빠르나, 종자 파종을 고려하여 4월 중에 파종한 후, 약 11주간 관찰하였다.

Fig. 10(b)의 성장 과정 신장 비교를 해보면 무조명 하에서의 신장이 가장 크고, 5주 정도까지는 Ds-LED와 Cv-LED는 거의 유사한 신장을 보이다가 이후 Cv-LED 하에서 20 mm 정도 더 성장함을 알 수 있었으나, 이는 장소의 환경적인 차이로 인하여 실질적인 차이는 거의 없을 것으로 예상된다. 그러나, Cv-LED 조명 직하방에 위치한 벼의 키가 30~50 mm 정도 더 컸으며, 이는 단일 작물인데 조명에 의해 명반응에 의한 성장이 지속되었거나, 조명 주위의 온도 상승으로 인해서 웃자라는 것으로 보인다. 전체적으로 볼 때 3곳 모두 동일한 환경 조건은 아니지만, 벼 또한 거의 유사한 성장을 보였으며, 단지 LED 조명의 바로 아래쪽의 경우 야간에 온도가 조금 상승하고, 주변과의 온도 차와 광에 의한 약간의 과성장 경향을 보임이 관찰되었다.

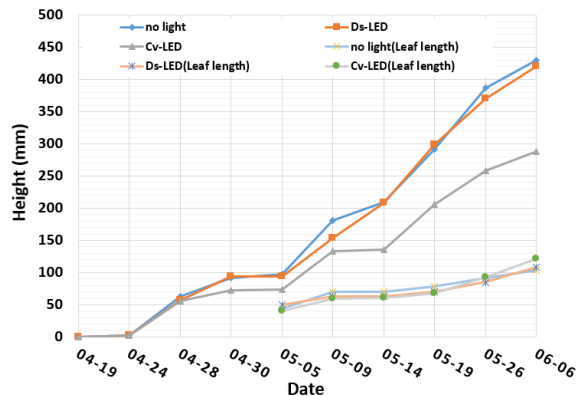
조명의 광조사에 따른 벼의 초기 성장 상태에 관한 전반적인 경향을 볼 때 테스트 구역별로 약간의 환경 조건 차이 등을 고려할지라도 초기 성장의 차이는 크지 않다고 말할 수 있으며, 이는 3가지 조건에서 확인한 차이가 난다고 판단하기에는 적절하지 않으며, 실제 수확 단계까지의 실증이 필요하다.

3.2.3 콩 성장 비교

단일 작물인 콩 재배 시기로 남부지방의 경우, 기온이 올라가는 6월 중하순 경에 종자로 파종하고, 장마와 뜨거운 여름을 지나며 성장을 거치는데 수확량을 증대를 위해서 본잎이 5~7장 정도 나오면 첫 순지르기 후 꽃이 피기 전에 3번 정도 순지르기가 필요하지만, 초기 성장시험에서는 숙음을 진행하면서 본잎이 5~6장 나올 때까지 Fig. 11과 같이 관찰하였다. 콩 종자를 직파 6일 후 싹이 올라오기 시작하였으며, Cv-LED의 경우가 가장 많이 싹이 올라왔다. 이는 비닐하우스 테스트베드 입구에 위치하고, 통풍이 잘 되며 입구에 암막 설치 전으로 오후에도 햇빛이 드는 환경으로 가장 빠르게 많이 발아되어 싹이 올라온 것으로 보인다. 이후 성장 과정을 보면 3주 정도까지 기존 LED가 설치된 부분이 최종적으로 일부 싹이 올라오지 않은 상태로 드물게 자람을 알 수 있었다. 초기 성장을 보면, 싹이 올라온 후 4~5일 만에 신장이 60 mm 전후로 자라고, 1주일 동안 무광 및 Ds-LED 조명하에서는 키가 98, 94 mm까지 자랐으며, Cv-LED 조명하에서는 74 mm까지 서서히 성장한 후, 1개월 동안 430, 421 및 288 mm까지 선형적으로 자라는 것을 알 수 있었다. 떡잎이 나온 이후 성장하여 본잎이 나온 상태에서 본잎의 크기(잎장)를 측정된 결과를 보면 Fig. 11(b)에서 알 수 있듯이 모든 경우에서 크기 차이가 10 mm 전후로 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 콩의 신장 변화에 대한 평균 비교데이터를 보면, 측정 대상에 따른 다소의 편차를 고려하더라도 무조명 및



(a) Comparison of soybean growth photos



(b) Comparison of soybean height

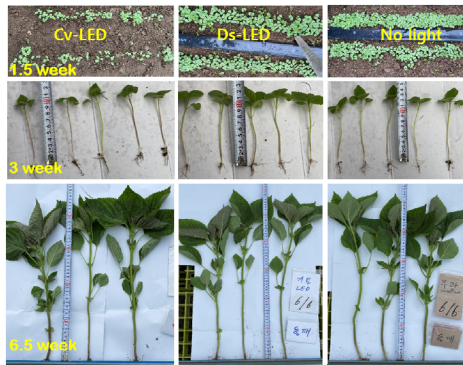
Fig. 11 Comparison of soybean growth under different LED lights

Ds-LED 조명하에서는 1개월 반의 관찰 기간 동안 콩의 초기 신장의 차는 거의 볼 수 없었으며, 이는 광수용성이 높은 넓은 잎이지만, Ds-LED 조명은 콩의 초기성장에는 큰 영향이 미치지 않는다고 말할 수 있다.

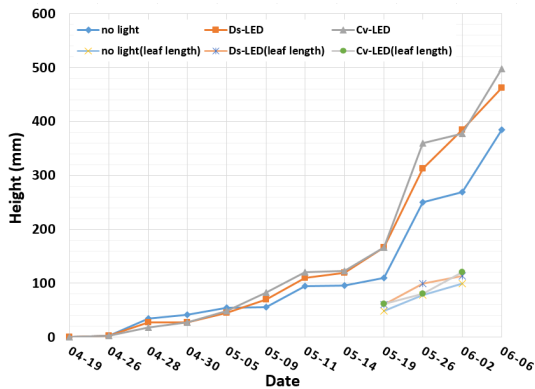
그러나, Cv-LED 조명의 성장을 보면 직파 및 새싹이 나오고 성장이 진행되는 10일째를 지나, 20일 이후부터 20~130 mm 정도로 나머지 조건에 비해 성장이 더디게 나타났다. 이는 기존 LED의 광조사에 따른 광 피해가 크음을 알 수 있다. 또한 Fig. 11을 볼 때 1개월 반 기간 본잎이 5~6장 나올 때까지 관찰 결과 초기 신장은 무조명 \geq Ds-LED $>$ Cv-LED 조명 순으로 성장하였고, 본잎도 같은 순서로 거의 변화가 없었다. 초기에는 조명의 영향이 거의 발현되지 않지만, 본 시험 전에 23년도 수확기의 콩 재배 현장의 가로 등 조명이 조사되는 곳에 대한 사전 확인 결과 줄기 및 콩 꼬투리가 초록색으로 결실이 늦는 확인한 차이가 확인되었었다. 따라서 광 피해에 대한 정확한 검증을 위해서는 결실 및 수확까지의 모니터링이 필요하므로, 향후 실제 필드 테스트를 실시할 예정이다.

3.2.4 들깨 성장 비교

들깨는 5월 하순~6월 상순경에 직파 또는 모종을 키워 6월 말~7월 중에 정식하는 작물이다. 지역과 들깨 또는 종실 수확 목적



(a) Comparison of perilla growth photos



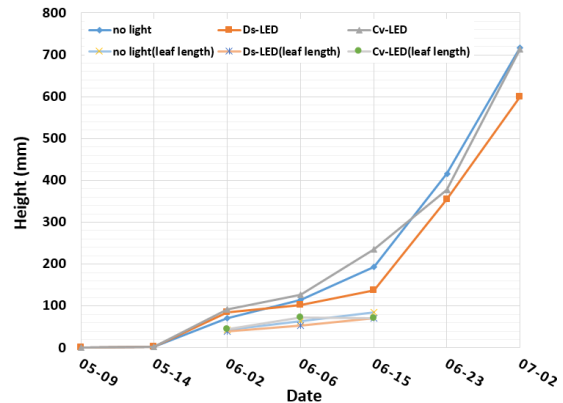
(b) Comparison of perilla height

Fig. 12 Comparison of perilla growth under different LED lights

등 상황에 따라 다소 차이가 있으며, 모종 정식 후 2달 정도 되면 들깨꽃이 하얗게 핀 후 꽃이 지면서 결실이 되어 수확하는 작물로 단일식물에 해당한다. 본 시험은 종실 수확 목적이 아니고, 초기 성장만을 관찰하기 위해서 조금은 이르나 4월 중에 종자로 파종 후 2회에 걸쳐 솟아내고, Fig. 12와 같이 성장 모니터링을 진행하였다. 들깨는 직파 후 일주일 정도 지나서 싹이 올라오기 시작하였으며, Ds-LED의 경우가 가장 적게 싹이 나왔다. 이는 좌우가 암막에 의해 막힌 상태로 바람이 잘 통하지 않고, 테스트베드가 남서향을 보고 있어 오전 및 오후에도 암막에 의해 햇빛이 가려지는 환경으로 초기 발아가 늦어 싹이 올라오는 차이가 발생한 것으로 보인다. 그러나 10일째부터 싹이 대부분 올라왔고, 동일 환경 조건을 조성하기 위해서 Cv-LED 쪽 입구에 암막을 설치하고, 무조명 쪽 우측에도 암막을 설치하는 등의 환경을 조성하고 싹이 올라온 후 3주간 선형적으로 성장하다가 이후에 급격하게 성장함을 알 수 있었다. Fig. 12를 보면 좁은 공간에서의 조사 조건, 테스트 구역별로 약간의 환경 조건 차이 등을 고려할지라도 들깨의 초기 성장 상태에 관한 전반적인 경향을 보면 Cv-LED 및 Ds-LED 하의 초기 파종의 신장 차이는 거의 없으나, Ds-LED 조명하에서 10~20 mm 정도 조금 작아 Cv-LED에 비해 광 피해가 덜함을 알 수 있다.



(a) Comparison of sesame growth photos



(b) Comparison of sesame height

Fig. 13 Comparison of sesame growth under different LED lights

두 조명의 경우 조명으로 인해 과성장 경향을 보였으며, 파종 후 1달 반 후 관찰 마지막일 기준으로 무조명 상태의 신장 대비 Ds-LED 조명하에서는 120%, Cv-LED 조명하에서는 130% 정도 신장의 더 컸으며, LED 조명에 의한 광 피해가 발생한다고 말할 수 있다. 이는 빛과 야간에 약간의 온도를 상승시키는 것에 의한 것이라 사료되며, 최종적인 결실까지에도 영향을 미칠 것으로 예상되지만 종실의 수확량에 실질적으로 어떻게 영향을 미칠지에 대해 단언하기에는 다소 무리가 있었다.

3.2.5 참깨 성장 비교

참깨는 추위에 약하기 때문에 파종 시기는 따뜻한 기온과 토양이 적당한 수분 상태일 때 파종하는 작물로서 남부지역은 4월 말~5월 초 사이가 적절하고, 직파나 모종 정식을 하게 되며, 정식 후 1달 정도 지나면 하단에서부터 상단으로 올라가면서 꽃이 피고 꼬투리가 맺힌다. 잎이 갈변되고 줄기 아랫부분의 꼬투리가 1~2개 벌어지는 시점에서 수확하는 단일 작물이다. 참깨의 경우 파종 시기 및 기온에 민감한 작물로서 초기 성장 모니터링이 주목적임으로 종자를 발아시켜 파종하였다. 초기 성장을 확인하면서 재배 조건에 적합하게 1차 솟음 후 3주가 지나서 첫 신장과 본잎의 길이 방향 크기를 측정하였다. 빛을 가리고 바람이 잘 통하지 않는 재배

사 상태로 뒤쪽 줄은 성장이 조금 느렸다. Fig. 13(b)에서 참깨를 파종하고 싹이 나온 후 1달 동안 참깨의 성장을 보면 선형적으로 성장함을 알 수 있었으며, Cv-LED와 Ds-LED 조명하에서 키가 235, 137 mm까지 자랐고, 무조명 하에서는 194 mm로 각각 점진적인 성장을 보였다. 이후 급격하게 성장하였으며, 17일이 지났을 때 Cv-LED 714 mm, 무조명 716 mm, Ds-LED에서는 599 mm로 다소 신장이 작았다. 또한 본잎이 나온 상태에서 잎장을 측정할 결과 모든 환경에서 잎 길이의 차이가 10 mm 전후로 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.

참깨성장에 따른 신장 변화에 대해 8주의 관찰 기간 Ds-LED 조명하 참깨의 신장은 작았지만, 싹이 나온 후 약 6주 후 무조명부터 꽃이 피기 시작하였으며, 이후 3개소 모두 점진적으로 꽃이 피기 시작하였다. 모니터링 기간이 지난 후 3주 정도 추가 관찰 결과, Cv-LED 조명 바로 밑의 참깨에서는 꽃이 피지 않았고 필 준비도 되지 않았으나, Ds-LED 조명 바로 아래의 경우는 신장이 다소 작고, 늦어지더라도 꽃이 피거나 필 준비가 되는 것을 확인할 수 있었다. 이처럼 광 수용성이 높은 넓은 잎을 가진 참깨의 초기 성장과 이후의 신장 변화에서 Cv-LED 및 Ds-LED 모두 신장 변화에는 큰 영향을 미치지 않았지만, Cv-LED는 참깨 수확량에 많은 영향을 미칠 것으로 판단되지만, Ds-LED의 경우 무조명 대비 조금 늦더라도 꼬투리가 맺혀 광피해가 크게 줄어들 것으로 예상되었다.

4. 결론

본 연구는 농작물의 생육에 미치는 영향을 최소화하는 LED 조명 개발이 목적이다. 이를 위해서 식물의 광합성에 영향을 미치지 않는 550~620 nm 파장대역으로, 광합성 활동에 미치는 영향이 미미한 수준인 PPF 지수가 $1.0 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 이하의 LED 광원을 개발하고, LED 조명으로 구현하였다. 개발된 LED 조명(Ds-LED)은 550~620 nm 파장대의 광출력 분포가 83.1%, PPF 지수는 $0.453 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 농작물에 미치는 빛 강도의 영향을 최소화하고, LED 조명으로서 이질감 없는 색온도 3,230K의 주백색 LED 조명을 구현하여, 이 조명을 이용하여 농작물 작물 5종에 대한 초기성장 시험을 실시하고 검증하였다.

개발된 Ds-LED를 이용하여 작물 5종(밀, 벼, 콩, 들깨, 참깨)의 초기 성장에 미치는 영향에 대해서, 기존 Cv-LED 및 무조명 하에서 비교 시험을 통해서 광 영향의 최소화에 대해 검증하였다. 생육 검증 결과 작물에 따라 신장 차이는 다소 있지만, LED 조명이 초기 성장에 크게 영향을 준다고 확인하기 어렵고, 개발된 Ds-LED 조명의 경우 작물에 따라 Cv-LED 대비 영향이 적었다.

개발된 Dv-LED 조명이 작물의 결실에 미치는 광 피해 영향을 명확하게 검증하기 위해서는 농작물의 수확 시까지 필드 테스트가 필요할 것으로 사료 되며, 향후 추가 농작물 재배 시험을 진행할 예정이다.

후 기

본 연구는 2023년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임. [RS-2023-00224763]

References

- [1] Go, D. H., 2012, Research on the Light Pollution Prevention Plan through BUG Analysis of LED Outdoor Luminaires, Master Thesis, Chonnam National University, Republic of Korea.
- [2] Jeong, Y. D., 2021, A Study on the Application of Environmental Impact Assessment for the Management of Light Pollution(artificial lighting), Master Thesis, Kwangwoon University, Republic of Korea.
- [3] Kim, J. T., 2013, A Study on Lighting Control Technologies in Space for Preventing Light Pollution, Doctorate Thesis, Kyunghee University, Republic of Korea.
- [4] Lee, S. G., Lee, J. S., Won, J. H., 2020, Effects of Lettuce Cultivation Using Optical Fiber in Closed Plant Factory, Protected Horticulture and Plant Factory, 29:2 105-109, <https://doi.org/10.12791/KSBEC.2020.29.2.105>.
- [5] Hong, P. H., Kwon, O. H., Lee, D. I., Park, J. R., Ha, J. M., Jeong, D. U., Han, S. H., Kim, B. H., 2011, Effects of LED Light and Temperature on Lettuce Growth, Agribusiness and Information Management, 3:1 67-74.
- [6] Kim, M. S., 2012, Effect of LED Light Quality Treatment on the Growth and Functional Optimization of Foliage Plant, Doctorate Thesis, Kongju National University, Republic of Korea.
- [7] Kim, S. B., Lee, K. M., Kim, H. R., You, Y. H., 2014, Effects of Light Sources, Light Quality on the Growth Response of Leafy Vegetables in Closed-type Plant Factory System, Korean Journal of Ecology and Environment, 47:1 32-40, <http://doi.org/10.11614/KSL.2014.47.1.032>.
- [8] An, X. M., Hong, Y. J., Kim, H. Y., 2015, Efficient LED Lighting System Design of the Plant Growing System, Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 16:11 7256-7261, <https://doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7256>.

- [9] Kim, N. N., Shin, H. S., Park, H. G., Lee, J., Kil, G. S., Choi, C. Y., 2014, Profiles of Photosynthetic Pigment Accumulation and Expression of Photosynthesis-related Genes in the Marine Cyanobacteria *Synechococcus* sp.: Effects of LED Wavelengths, *Biotechnol. and Bioprocess Eng.*, 19:2 250-256, <https://doi.org/10.1007/s12257-013-0700-y>.
- [10] Tsai, C. Y., Chen, Y. Y., Yen, Y. F., Ay, C., 2018, The Photosynthesis Analysis in Different Wavelength LED Lighting Source on Plant Growth, *Proc. of the Korean Society of the Agricultural machinery Conf.*, 23:1 183-184.
- [11] Gao, S., Liu, X., Liu, Y., Cao, B., Chen, Z., Xu, K., 2020, Photosynthetic Characteristics and Chloroplast Ultrastructure of Welsh Onion (*Allium fistulosum* L.) Grown under Different LED Wavelengths, *BMC Plant Biology*, 20 78, <https://doi.org/10.1186/s12870-020-2282-0>.
- [12] Moon, H. H., Jang, S. H., Bae, J. J., Lee, J. H., 2010, Effects of Irradiation Distance of Various Wavelength LED on PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density) Characteristics, *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 28:suppl.1 158-159.
- [13] Park, G. T., Bae, J. H., Lee, J. S., Park, S. K., Kim, D. Y., Moon, J. K., Seo, M. S., 2004, Establishing Optimal Conditions for LED-Based Speed Breeding System in Soybean [*Glycine max* (L.) Merr.], *Korean Journal of Crop Science*, 68:4 304-312, <https://doi.org/10.7740/kjcs.2023.68.4.304>.
- [14] Im, J. U., Yoon, Y. C., Seo, K. W., Kim, K. H., Moon, A. K., Kim, H. T., 2013, Effect of LED Light Wavelength on Chrysanthemum Growth, *Protected Horticulture and Plant Factor*, 22:1 49-54, <http://doi.org/10.12791/KSBEC.2013.22.1.049>.
- [15] Kang, S. B., Song, Y. Y., Park, M. Y., Kweon, H. J., 2013, Effect of RED and FAR-RED LEDs on the Fruit Quality of 'Hongro' M.26 Apple, *Korean Journal of Environmental Agriculture*, 32:1 42-47, <http://doi.org/10.5338/KJEA.2013.32.1.42>.
- [16] Harada, Y., Yamamoto, H., 2014, Light Controlling for Light Pollution Prevention of Agricultural Product, *The Illuminating Engineering Institute of Japan*, 98:9 508-511, <https://doi.org/10.2150/jieij.98.508>.
- [17] Ito, H., 2014, Diagnosis of Agricultural Crops Using Light, *The Illuminating Engineering Institute of Japan*, 98:9 516-520, <https://doi.org/10.2150/jieij.98.516>.
- [18] Kim, Y. G., Yoo, K. S., Lee, C. S., Hyun, D. H., 2017, Light Distribution Pattern of Optical System in Street Lights with AC COB-Type LEDs, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 26:1 66-73, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2017.26.1.66>.
- [19] Cho, Y. T., 2020, Forced Heat Dissipation in 120 W Street LED Using Thermoelectric Modules, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 29:4 281-287, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2020.29.4.281>.
- [20] Im, Y. J., Kim, E. H., Kim, D. A., Yoo, K. S., Lee, D. J., Hyun, D. H., 2019, A Study on the LED Streetlight using the Advanced Optical Backlight Control System, *Proc. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng. Autumn Conf.*, 87.



Byoum-Youn Cho

CTO in R&D Center, STN Co., Ltd.
 Ph.D Candidate in Artificial Intelligence IT Convergence, Soongsil University.
 His research interests is IoT, Network, Sensing, Data curator.
 E-mail: cto@stngroup.co.kr



Eun-Young Bae

Chief Research Engineer in R&D-Center, STN Co., Ltd.
 M.S in Artificial Intelligence IT Convergence, Soongsil University.
 Her research interest is Machine Learning, Data Analysis, IoT Platform, UX/UI.
 E-mail: eyb@stngroup.co.kr



Gyoung-Sang Kim

Chief Research Engineer in R&D-Center, STN Co., Ltd.
 Master's Degree in Artificial Intelligence IT Convergence, Soongsil University.
 His research interest is in Microprocessor and it's Application, Machine Learning, Artificial Intelligence.
 E-mail: kgs@stngroup.co.kr



Young-Tae Cho

An Associate Professor at the Dept. of Basic Science, College of Engineering, Jeonju University.

His interested in Product and Mechanical Design, Nondestructive Testing and Evaluation using Infrared Thermography.

E-mail: choyt@jj.ac.kr



Oh-Soon Shin

Professor, School of Electronic Engineering, Soongsil University.

His research interests include Wireless Communication and its Applications.

E-mail: osshin@ssu.ac.kr