

320081-  
1

시설과채류 3D 구조모델링기반 스마트온실보광효과검증

2021

농림축산식품부  
농림식품기술기획평가원

보안 과제( ), 일반 과제( O ) / 공개( O ), 비공개( ) 발간등록번호( O )

1세대 스마트 플랜트팜 산업화 기술개발사업 2021년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-003700-01

# 시설과채류 3D 구조모델링 기반 스마트온실 보광 효과 검증

2021. 10. 22.

주관연구기관 / 서울대학교  
협동연구기관 / 국립원예특작과학원  
시설원에연구소  
안동대학교  
목포대학교

농림축산식품부  
(전문기관) 농림식품기술기획평가원

제출문

## 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “시설과채류 3D 구조모델링 기반 스마트온실 보광 효과 검증”(개발  
기간 : 2020. 7. 3 ~ 2021. 7. 2)과제의 최종보고서로 제출합니다.

납본일자 : 2021. 10. 22.

주관연구기관명 : 서울대학교산학협력단

(대표자) (인)

협동연구기관명 : 국립원예특작과학원 시설원예연구소

(대표자) (인)

협동연구기관명 : 목포대학교산학협력단

(대표자) (인)

협동연구기관명 : 안동대학교산학협력단

(대표자) (인)

주관연구책임자 : 손정익

협동연구책임자 : 김진현

협동연구책임자 : 박경섭

협동연구책임자 : 신중화

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의 합니다.

### 최종보고서

최종보고서						보안등급			
						일반[ √ ], 보안[ ]			
중앙행정기관명				사업명	사업명	1세대 스마트 플랜트 팜 산업화 기술개발			
전문기관명 (해당 시 작성)					내역사업명 (해당 시 작성)				
공고번호				총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)					
				연구개발과제번호		320081-1			
기술분류	국가과학기술 표준분류	LB0203	80%	LB0299	20%				
	농림식품과학기술분류	AA0203	70%	AA0299	20%	AA0204	10%		
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문							
		영문							
연구개발과제명		국문		시설과채류 3D 구조모델링 기반 스마트온실 보광 효과 검증					
		영문		Evaluation of smart greenhouse supplemental lighting based on 3D structural modeling of greenhouse fruit vegetables					
주관연구개발기관		기관명	서울대학교산학협력단		사업자등록번호	119-82-03684			
		주소	(우) 08826 서울특별시 관악구 관악로 1		법인등록번호	114371-0009224			
연구책임자		성명	손정익		직위	교수			
		연락처	직장전화			휴대전화			
			전자우편			국가연구자번호			
연구개발기간	전체		2020. 07. 03 - 2021. 07. 02( 1 년 0 개월)						
	단계 (해당 시 작성)	1단계							
		n단계							
연구개발비 (단위: 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담		그 외 기관 등의 지원금				합계	연구개발비 외 지원금
		연구개발비	연구개발비	지방자치단체		기타( )			
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물
총계	617,000							617,000	
1단계	1년차	617,000						617,000	
	-								
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고		
공동연구개발기관		국립원예특작과학원 시설원예연구소	김진현	연구사			협동	연구소	
		목포대학교	박경섭	교수			협동	대학	
		안동대학교	신종화	교수			협동	대학	
연구개발담당자 실무담당자		성명	황인하		직위	박사과정			
		연락처	직장전화			휴대전화			
		전자우편			국가연구자번호	1163-0549			

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2021년 10월 22일

연구책임자: 손 정 익 (인)

주관연구개발기관의 장: 서울대학교 산학협력단장 (직인)

공동연구개발기관의 장: 국립원예특작과학원 시설원예연구소장 (직인)

공동연구개발기관의 장: 목포대학교 산학협력단장 (직인)

공동연구개발기관의 장: 안동대학교 산학협력단장 (직인)

농림축산식품부장관·농림식품기술기획평가원장 귀하

## < 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명		1세대 스마트 플랜트팜 산업화 기술개발			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)			
내역사업명 (해당 시 작성)					연구개발과제번호		320081-1	
기술 분류	국가과학기술 표준분류	LB0203	80%	LB0299	20%			
	농림식품 과학기술분류	AA0203	70%	AA0299	20%	AA0204	10%	
총괄연구개발명 (해당 시 작성)								
연구개발과제명		시설과채류 3D 구조모델링 기반 스마트온실 보광 효과 검증						
전체 연구개발기간		2020. 07. 03 - 2021. 07. 02( 1 년 0 개월)						
총 연구개발비		총 617,000 천원 (정부지원연구개발비: 617,000 천원, 기관부담연구개발비: 천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)						
연구개발단계		기초[ ] 응용[ √ ] 개발[ ] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ ]		기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준( ) 종료시점 목표( )		
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)								
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)								
연구개발 목표 및 내용		최종 목표		시설과채류의 3차원 수광 해석 기반 스마트온실 보광 효과를 검증하기 위하여, 3차원 수광 해석과 작물의 생리 반응을 기반으로 보광 기술을 개발하고, 현장 적용을 통하여 온실 내 보광 효과를 실증한다. 이를 위하여 보광 광원 처리에 대한 3차원 수광 해석 기반의 균락 수광 분포 및 광합성 추정을 통하여 적정 보광 수준을 정량화하며, 실제 재배 작물의 생육효과를 분석한다. 보광 광원 적용에 대하여 온실 내 보광 성능, 생육효과, 경제성 관점에서 실증을 수행한다. 개발된 보광 기술을 근거로 현장에 적용 가능한 보광 매뉴얼을 개발한다.				
		전체 내용		본 연구는 시설과채류의 3차원 수광 해석 기반 스마트온실 보광 효과를 검증하기 위하여, 4개의 연구 파트로 구성되어 있다: 1) 3차원 작물모델링 기반 시설과채류 보광 기술 개발: 3차원 작물 수광 해석이 가능한 온실 광 환경 분석 기반 구축, 3차원 수광 해석 기반 작물 광합성 및 에너지 효율을 고려한 적정 보광 수준 도출, 2) 보광 광원 처리에 따른 작물 생산성 향상 생리 반응 구명: 보광 처리에 따른 작물 반응 규명, 보광 처리에 따른 엽 광합성 변화 분석, 보광 처리에 따른 과실 착색 분석, 3) 장기재배용 보광 광원의 온실 현장 실증: 현장 실증을 위한 보광 온실 구축, 작물의 생육 단계 및 재배 형태에 따른 보광 효과 비교 분석, 보광에 따른 작물 수량 증가량 및 시설비·운영비 산정을 통한 경제성 분석, 4) 보광 광원의 시설과채류 온실 적용을 위한 보광 매뉴얼 작성: 보광 기술 매뉴얼 작성 항목 결정 및 조사 분석, 보광 광원 선정, 조명 방식 및 배치, 광 이용 효율 기반 보광 매뉴얼 작성.				
		1단계 (해당 시 작성)	목표					
			내용					
n단계 (해당 시 작성)	목표							
	내용							

연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 정성적 성과 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 군락 상부 및 내부 보광 광원 배치에 따른 온실 내 광분포 및 작물 수광량 변화를 비교 분석함</li> <li>- 파프리카, 토마토의 생육 단계, 줄기 유인 방식, 재식 밀도와 HPS 상부 보광 및 LED 내부 보광에 따른 수광량, 광합성량 및 광 이용 효율을 분석함</li> <li>- HPS 상부 보광 및 LED 내부 보광에 따른 온실 파프리카의 생육 및 수확량을 비교 분석하고, 작물 수확량 증가량과 시설비, 운영비 산정을 바탕으로 경제성 분석을 실시함</li> <li>- 국내 지역별, 계절별 광환경을 데이터로 제시함으로써 보광 적용을 위한 기준으로 활용할 수 있도록 자료를 정리하여 제시함</li> <li>- 시설과채류 온실 보광 현황, 보광 기술 이론, 3차원 시뮬레이션 기반 조명 설계 기준, 보광에 따른 시설 과채류 작물 생육 사례 분석을 포함한 보광 매뉴얼을 작성함</li> </ul> </li> <li>○ 정량적 성과 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 보광 매뉴얼 1건</li> <li>- 정책활용 1건</li> <li>- 학술발표 6건(국제 1건, 국내 5건)</li> <li>- 특허출원 1건</li> <li>- 논문게재 2건(SCI 1건, 비SCI 1건)</li> </ul> </li> </ul>
--------	---

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 온실 내 보광 광원 적용 시 작물의 생산량 증대 및 과실의 품질 향상에 기여</li> <li>○ 3차원 수광해석을 통한 보광 최적화를 통해 보광 이용 온실의 에너지 절감</li> <li>○ 온실 보광 매뉴얼 개발을 통한 관련 산업체 기술 제공 및 산업화 촉진</li> </ul>
---------------------	--

연구개발성과의 비공개여부 및 사유

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
2		1	1									
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설·장비명		규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호		
국문핵심어 (5개 이내)	과채류			보광		3차원 작물 모델		군락 내부 보광		발광 다이오드		
영문핵심어 (5개 이내)	Fruit vegetable			Supplemental lighting		Three dimensional plant model		Intra-canopy lighting		Light emitting diode		

210mm×297mm[(백상지(80g/m<sup>2</sup>) 또는 중질지(80g/m<sup>2</sup>)]

## < 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요
  2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용
  3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도
  4. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도
  5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획
  6. 참고문헌
- 별첨 1. 보광 매뉴얼 원문

# 1. 연구개발과제의 개요

## 1-1. 연구개발의 개요

- 작물 생육에 가장 기본적으로 필요한 광이 부족할 경우, 작물의 생육과 발달이 저해되며 이에 따른 수량과 품질이 감소함, 온실에서 작물의 연중 생산, 수량 및 품질 유지 또는 향상시키기 위해서는 보광을 통한 광 환경 개선이 필수적임.
- 온실 내 보광 기술은 작물 군락의 상단부 또는 중단부에 광원을 배치함으로써 장마철 또는 겨울철과 같은 약광기에 시설작물의 저광 스트레스를 최소화하고 광합성을 촉진하여 시설작물의 수량 증대와 품질 향상을 위해 필수적임.
- 실제로 온실 내 보광은 광원의 사용에 따른 전기 에너지 투입이 발생하기 때문에, 이를 최소화하면서 작물의 개체가 아닌 군락 광합성 효율과 작물 생산성 극대화를 추구하면서 보광 효율을 최적화할 필요가 있음.
- 최적 보광 기술을 도출하기 위해서 광원의 위치, 광도, 스펙트럼 등의 광원 특성, 작물의 수관 구조 등의 작물 재배 특성, 온실 구조, 외부 일사량 등의 온실 구조 및 외부 광환경 특성 등의 다양한 변수들을 고려할 필요가 있지만, 이러한 많은 변수를 적용하여 반복적으로 실험하는 데에는 한계가 있음.
- 보다 체계적인 보광 효과를 분석하기 위하여 3차원 수광해석 시뮬레이션을 이용하여 상기의 항목을 적용하여 작물의 군락 수광량을 정교하게 계산하고, 이를 기반으로 광원 배치, 작물의 재배 조건 등 다양한 조건 변화에 대하여 군락 광합성에 미치는 영향을 정교하게 분석할 필요가 있음.
- 또한 보광 광원을 적용 시 작물 생리적 관점에서 광원의 광도, 스펙트럼, 광원의 발열과 같은 광원의 특성이 작물의 생육 및 수량에 영향을 미칠 수 있음. 따라서 실측 또는 예측 보광 환경에 대하여 계절에 따른 보광 성능평가 및 작물의 생리 반응을 구명하고 검증할 필요가 있음.
- 국내 지역별 온실 재배에서 다양한 재배 조건과 환경 조건 하에서 효율적인 보광 광원의 설치를 위해서, 기술적 관점에서 에너지 및 생산성을 고려한 최적 보광 기술의 제시와 산업적 관점에서 농업인과 산업체가 이용할 수 있는 보광 매뉴얼 개발이 필요함.
- 연구개발 개요: 시설과채류 3차원 작물구조 모델과 수광해석을 기반으로 한 온실 보광 기술과 보광 매뉴얼 개발
  - 3차원 작물모델과 수광해석에 기반한 과채류 보광 기술 개발
  - 보광 광원 처리에 따른 작물 생산성 및 생리 반응 구명
  - 보광 기술과 작물 생리 반응에 대한 보광 광원의 온실 현장 실증
  - 보광 광원의 과채류 온실 적용을 위한 보광 매뉴얼 개발
- 핵심기술
  - 시설과채류 3차원 작물 구조모델과 3차원 수광해석 기법에 기반한 군락 광합성 추정 및 이를 기반으로 한 최적 보광 기술

## 1-2. 연구개발 대상의 국내·외 현황

### 1) 국내 기술 수준 및 시장 현황

#### ○ 기술현황

- 온실 파프리카에서 상부 HPS 와 PLS 등을 이용한 보광을 통한 보광 연구가 진행되었으나 플라즈마 램프 외에는 유의미한 생산량 증가가 나타나지 않음(이종원 등, 2014).
- 온실 재배 케일에서 나트륨 등과 적색 LED의 상단부 적용 시의 생산량을 평가하는 연구가 진행된 바 있음(허정욱 등, 2015)
- 온실 파프리카 재배에서 상단부 보광을 대상으로 HPS, PLS 광원의 온실 적용에 대한 연구가 진행되었으며 작물 생육지표는 개선된 바 있음(권준국 등, 2016).
- 국내에서 수관 내부에 보광 광원을 설치하여(Intra-canopy lighting) 작물 생산성과 에너지 효율성을 분석한 연구는 전무함.
- 온실 파프리카의 3차원 구조 모델을 L-system으로 구현하고 광 추적 시뮬레이션으로 수광 분포 및 광합성을 계산하는 연구가 수행된 바 있음(손정익 등, 2016).
- 식물공장 내 상추의 3차원 구조모델을 이용하여 인공 광원의 사용 시의 작물 광 분포를 계산한 연구가 수행된 바 있음(손정익 등, 2016),
- 온실 파프리카의 3차원 스캔한 작물 모델을 구축하여 구축하고 광 추적 시뮬레이션으로 수광 분포 및 광합성을 계산하는 연구가 수행된 바 있음(손정익 등, 2019).

#### ○ 시장현황

- 온실 과채류의 주 작물인 토마토와 파프리카의 국내 시설 재배 규모는 6,058ha (토마토) 및 698ha(파프리카)로 내 주요 시설원에 작물임(농림축산식품부, 2019 농촌진흥청 2018 통계자료).
- 시설과채류의 생산량은 국내 과채류 생산의 약 87%를 담당하고 있으며 온실 종류에 따라서 연질 필름 온실 면적이 50,876ha, 경질 필름 온실과 및 유리 온실 규모는 350ha를 차지하고 있음(농림축산식품부, 2019 농촌진흥청 2018 통계자료).

#### ○ 경쟁기관현황

- 농촌진흥청 국립원예특작과학원 시설원예연구소(본 연구팀 포함), 전남농업기술원 등에서 산발적으로 상단부 보광에 대한 연구가 진행되었으나, 장기적으로 해당 주제를 연구한 기관은 전무함.

#### ○ 지식재산권현황

- 주로 작물의 필요 광량 및 외부 광량을 기반으로 알고리즘을 구성해 온실 광원을 제어하는 방식에 대한 연구가 진행되었음.
- 보광 광원으로 이용되는 LED 및 백열등과 호환 가능한 전구 타입과 상부 보광 광원의 방향을 조절할 수 있는 장치 등이 개발되었음.
- 광원 하에서 센서를 이용하여 식물의 스트레스를 검출하는 방식이 개발되었음.



<표 1.1> 국내 특허 분석 관련 현황

순번	출원일	출원(등록)명	대표 출원인
1	2009	태양광의 보광 도메인 영역 제어를 통한 LED형 식물재배 등용 조사각도 자동조절장치 및 방법	주식회사 엔케이
2	2010	온실용 조명장치	대한민국(농촌진흥청장)
3	2011	전조 및 보광재배용 전구 타입 엘이디 조명 장치	(주)링크옵틱스
4	2011	온실의 보조 광원 제어 방법	한국전자통신연구원
5	2012	태양광 병용형 식물공장의 생산효율 향상 및 에너지 절감을 위한 지능형 인공광 제어 시스템	공주대학교 산학협력단
6	2014	식물의 성장을 조절하는 방법	헬리오스펙트라 악티볼라그
7	2015	인공 조명을 위한 스펙트럼 최적화	헬리오스펙트라 악티볼라그
8	2015	스트레스로부터 식물 회복을 위한 방법 및 조명 시스템	헬리오스펙트라 악티볼라그
9	2016	인공조명 어레인지먼트의 위치 기반 관리방법	헬리오스펙트라 악티볼라그
10	2018	작물별 필요 광량을 조절할 수 있는 식물재배용 조명 장치	농업회사법인 (주) 육성에그리
11	2018	퀀텀 닷 조명을 이용한 들깨잎의 재배 방법	경북대학교 산학협력단

○ 표준화현황

- 온실 내 보광의 효과를 평가하기 위해서는 외부 광도에 따른 에너지 효율, 작물 광합성 및 수확량을 전반적으로 고려해야 하지만, 보광 방식에 대한 국내 표준화는 현재까지 진행된 바 없음.

○ 기타현황

- 황 플라즈마 램프(SP)와 고압 나트륨 램프(HPS) 램프의 보광에 따른 생육상 및 온실에서 파프리카 광합성 및 생산량 비교 연구가 수행됨(박경섭 등, 2018)
- 일부 연구에서 온실 토마토 보광에서 긴 일주기 와 지속광에 의해서 잎의 황화현상을 발생시킬 수 있음이 보고되었으며 (Demers 외, 2002, Pham 외, 2019) 착색단고추 잎에서 16시간 이상의 일주기가 잎의 광합성에 부정적인 효과를 보인 바 있다 (Demers 외, 1999).

2) 국외 기술 수준 및 시장 현황

○ 기술현황

- 온실 내 보광 방식으로는 상단부에서 HPS 및 LED를 이용하여 보광하는 방식과 수관 내부에 광원을 배치하여 보광하는 방식인 수관 내부 보광(intra-canopy lighting) 방식이 사용되며(Gomez 등, 2013; Gomez 와 Mitchell, 2016)에서는 각각의 방식을 사용하였을 때의 작물 생산량 및 엽 광합성 변화를 분석한 바 있음.
- 작물 수관 내부 보광 광원을 사용한 연구들에서는 수확량이 상부만 이용한 경우보다 증가한 경우(Franz 등, 2000; Hovi-Pekkanen 등, 2008)도 있으나 큰 변화 없거나 감소한 경우(Trouwborst 등, 2010, Gomez 등, 2013; Gomez와 Mitchell, 2016)도 있었음.
- 작물의 L-system 3차원 모델과 광 추적 시뮬레이션을 이용하여 상단부 HPS의 배치에 따

른 광 투영 형태 및 작물 내부 보광 광원의 광이용 효율을 평가한 연구가 수행된 바 있음 (De Visser 등, 2014).

- 온실 외부 광 환경에 따라 LED의 광도를 동적으로 조절하는 알고리즘이 개발되었음 (Phino 등, 2013).

#### ○ 시장현황

- 세계 스마트 온실의 시장 규모는 2016년 약 6억 8천만 달러로, 2022년까지 약 13억 달러 규모까지 성장할 것으로 예상됨(Zion market research, 2018).
- 국가별 시설재배 면적은 중국 2,760,000ha(2010), 스페인 52,170ha(2005), 일본 49,049ha (2011), 이탈리아 39,000ha (2007), 터키 33,515ha (2007), 멕시코 1,759ha (2010), 네덜란드 10,307ha (2011), 독일 5,105ha (2007), 헝가리 4,200ha (2007), 영국 1,500ha (2007)임. 국내의 경우 약 51,784ha의 면적에서 시설재배가 이루어지고 있지만, 현대화된 유리온실의 비율이 약 0.6%로 선진국에 비해 낮은 수치임(Shin, 2016).
- 시설원예가 가장 발달된 네덜란드의 단위 면적당 온실 토마토 생산량은 약 50.9kg/m<sup>2</sup>으로(FAO, 2020), 국내 시설 단위 면적당 토마토 생산량인 약 6.4kg/m<sup>2</sup>(KOSIS, 2018)와 비교했을 때 8배가량 더 높은 생산성을 보이며 재배 시설의 노후화와 더불어 보광 광원의 미적용이 생산량 차이의 주요한 원인으로 판단됨.

#### ○ 경쟁기관현황

- 네덜란드의 Wageningen UR에서 L-system을 기반으로 하여 GroIMP 플랫폼으로 구축된 토마토의 3차원 모델을 이용하여 균락 내부 보광 시 보광원의 조사 각도에 따른 건물중 생산량 변화에 대한 연구를 진행한 바 있음(De Visser 등, 2014).
- Wageningen UR에서 수관 내부 보광등의 Red, Blue 파장 비율에 따른 작물 생육을 평가를 진행한 바 있음(Kaiser 등, 2019).
- 미국의 Purdue 대학에서 캐노피 상단부 및 중단부 보광을 혼합하여 보광했을 때의 겨울 작기 및 여름 작기의 에너지 효율 및 캐노피 광합성이 증진되는 수준을 분석한 바 있음(Gomez, 2016)
- Purdue 대학에서 Far-red 광원 보광에 따른 과실 품질 증진 및 동화산물 분배 변화에 대한 연구를 진행한 바 있음(Kim 등, 2019a, b).

#### ○ 지식재산권현황

- 보광 광원의 제어 시스템에 관한 내용으로, 5분간의 작물 수관 내 PPF(광도)를 기반으로 온실 전체 보광 광원의 ON, OFF 수준을 결정하고 제어하는 시스템을 개발 (WO2014037852A1).
- 조명 및 반사판을 포함하는 조립품의 높이를 식물 생육단계에 따라 조절함으로써 열 발산에 의한 효과를 최소화하고 최적의 식물 생장에 적합한 DLI를 충족시키는 것에 관한 연구가 진행되었으며 마찬가지로 유사한 특허가 초장이 낮은 작물인 딸기에서도 등록된 바 있음(US20150351325A1, CN105165436A).
- 보광 시 광원의 스펙트럼을 다양하게 제어할 수 있는 시스템이 개발되었다. 본 시스템은 작물의 건물중 성장에 필요한 요구 스펙트럼을 충족시키기 위해 채택되었으며 스펙트럼에 의한 피드백을 위해서 필요할 것으로 사료됨(US9681515B2).

○ 표준화현황

- 작물 광합성량을 충족하기 위한 보광 비용 최적화에 대한 연구로는(Watson 등, 2018)가 있으며, 상이한 LED 스펙트럼에 따른 작물 광 이용 효율의 비교에 대한 연구가 있음 (Pedro 외, 2018).

○ 기타현황

- 상단부 보광에 대하여 많은 연구에서 작물 생산량 증가가 보고된 바 있음(Dueck 등, 2012; Hernandez와 Kubota, 2015, Kaukoranta 등, 2015; Kumar 등, 2016).
- 상단부와 내부 보광 광원을 함께 사용한 경우(Heuvelink 등, 2006; Trouwborst 등, 2010, Pettersen 등, 2010, Gomez 와 Mitchell, 2016)와 내부 보광만 단일로 이용한 경우 (Jokinen 등, 2012; Lu 등, 2012a, 2012b; Gomez 등, 2013; Deram 등, 2014)로 구분 되며, 해당 연구 중 대부분에서 생산량 증가가 보고됨.
- 우리나라와 상대적으로 환경이 비슷한 일본에서 내부 보광을 토마토 재배에 적용한 경우, 겨울 및 여름 작기 모두 야간에 내부 보광을 하는 것이 주간보다 높은 효율을 보인 바 있음(Tewolde 등, 2016).
- 온실 재배 토마토에 대한 내부 보광 광원의 스펙트럼의 최적화 연구에서 네덜란드의 자연 광 환경하에서 Red 90~95%, Blue 5~10%가 최적 스펙트럼이 될 수 있었음(Kaiser 등, 2019).
- 기존 HPS 광원에 상대적으로 부족한 Far-red를 파장의 광을 상단부 LED로 추가적으로 보광하였을 때 과실의 생산량이 증가할 수 있었음(Kalaitzoglou 등, 2019).
- Red, Blue 수관 내부 보광등을 사용했을 때 토마토에서 식물 호르몬인 jasmonate가 증가 하였으며 뿌리의 활성 증가를 통해 과실 품질이 향상될 수 있음이 밝혀짐(Papanov 등, 2020).

<표 1.2> 해외 특허 관련 현황

순번	출원일	출원(등록)명	대표 출원인
1	2014	Horticulture lighting system and horticulture production facility using such horticulture lighting system (WO2014037852A1)	Koninklijke Philips N.V.
2	2015	Led grow light with automatic height adjustment (US20150351325A1)	Greenhouse Hvac LLC
3	2015	Automatic greenhouse lamplight compensation device (CN105165436A)	苏州达力客自动化科技有限公司
4	2017	LED structure with a dynamic spectrum and a method (US9681515B2)	Illumipure Corp

## 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

### 2-1.제 1세부과제: 3차원 작물모델링 기반 시설과채류 보광 기술 개발

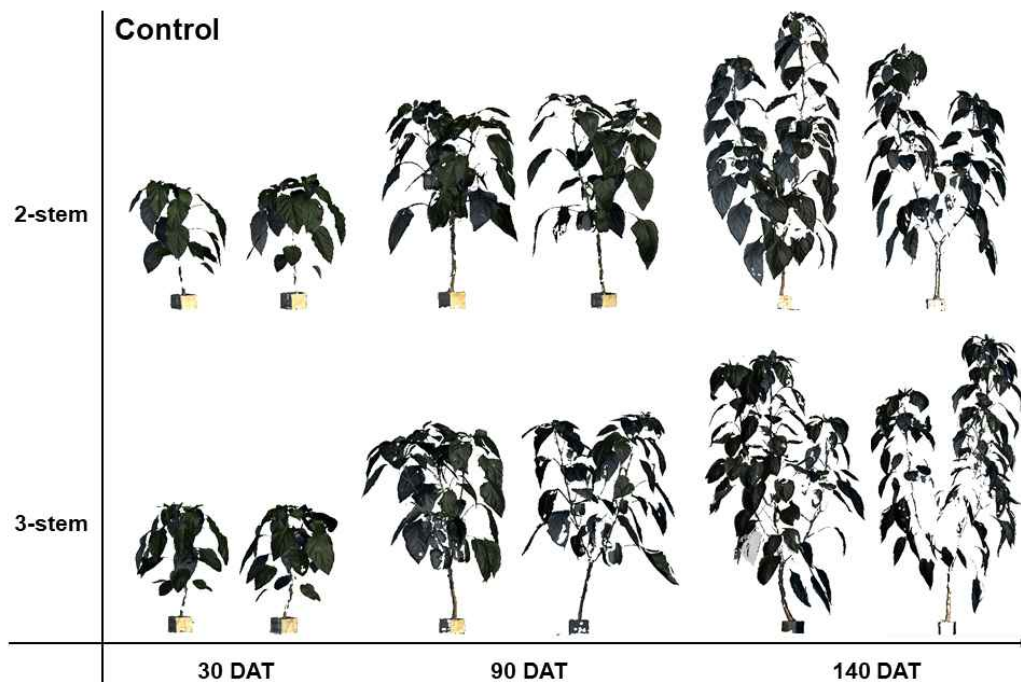
#### 1) 3차원 작물 수광해석이 가능한 온실 광 환경 분석 기반 구축

##### (1) 3차원 수광해석 환경 구축

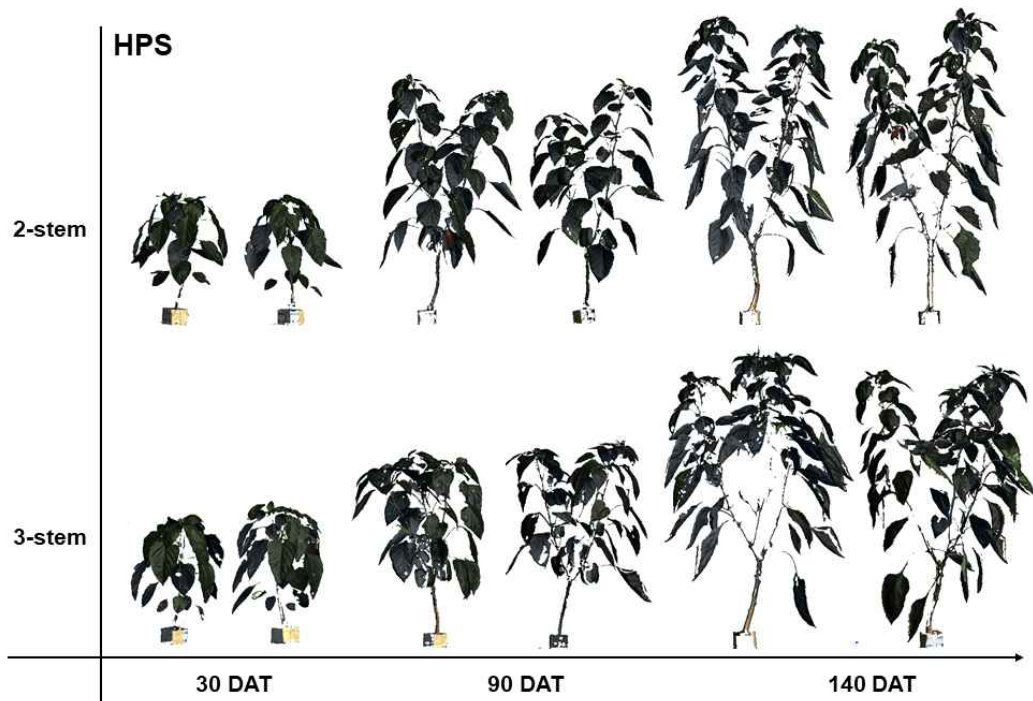
###### 가. 작물(파프리카), 온실 및 보광 광원 3차원 모델링

###### ○ 작물 3차원 모델링

- 함안 시설원예연구소의 벤로형 온실에서 재배된 시로코 품종 파프리카를 정식 35, 90, 140일의 세 가지 생육 단계에서 3개체씩 3차원 스캔하여 구조 모델을 구축하였음.
- 파프리카는 벤로형 온실 내에 제곱미터당 3.5개체의 재식 밀도로 재배되었으며, 줄기 유인 방식에 따른 보광 효과를 분석하기 위해 2줄기, 3줄기 형태로 유인하여 재배되었음.
- 보광 처리구는 대조구, HPS 상부 보광, LED 내부 보광 방식의 3 가지로 분류되었음.
- 줄기 유인, 및 보광 처리구에 따른 파프리카의 스캔 메쉬를 역설계 소프트웨어(Geomagic Design X)를 이용하여 광추적 시뮬레이션이 가능하도록 3차원 구조 모델을 구축하였음.
- 파프리카 엽의 투과율, 반사율 등 광학적 특성을 측정하여 광추적 시뮬레이션 환경에 적용해 주었음.



<그림 2.1.1> 대조구 파프리카의 줄기 유인별 생육 단계에 따른 3차원 구조 모델



<그림 2.1.2> HPS 상부 보광 처리구 파프리카의 줄기 유인별 생육 단계에 따른 3차원 구조 모델



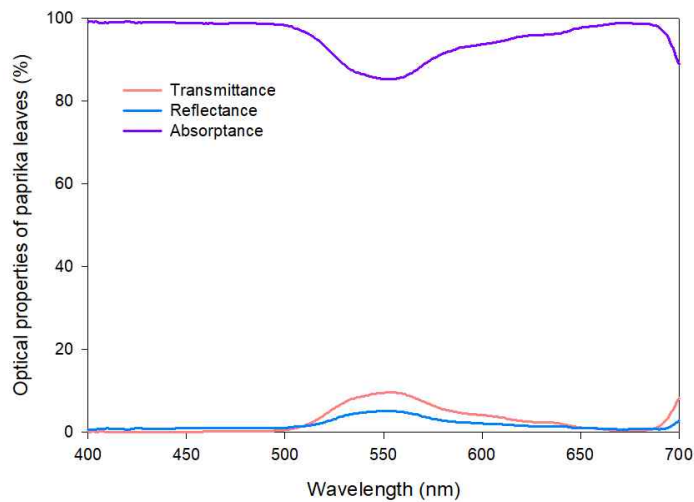
<그림 2.1.3> LED 내부 보광 처리구 파프리카의 줄기 유인별 생육 단계에 따른 3차원 구조 모델

<표 2.1.1> 2줄기 유인 파프리카의 보광 처리구 및 생육 단계별 초장, 엽수, 엽면적

보광 처리구	생육 단계(DAT)	초장(cm)	엽수	엽면적(m <sup>2</sup> )
Control	30	44.7±1.0	22.3±3.2	0.17±0.01
	90	79.1±4.6	41.3±4.5	0.40±0.01
	140	116.2±13.5	65.3±3.5	0.72±0.03
HPS	30	45.7±1.2	26.3±3.1	0.19±0.00
	90	96.9±6.6	45.6±2.5	0.55±0.03
	140	128.3±6.9	80.6±5.5	0.81±0.03
LED	30	39.7±1.7	27.5±4.9	0.19±0.02
	90	82.6±1.7	38.5±3.5	0.46±0.08
	140	111.8±9.9	73.5±4.9	0.64±0.03

<표 2.1.2> 3줄기 유인 파프리카의 보광 처리구 및 생육 단계별 파프리카의 초장, 엽수, 엽면적

보광 처리구	생육 단계(DAT)	초장(cm)	엽수	엽면적(m <sup>2</sup> )
Control	30	43.7±3.6	30.3±3.1	0.21±0.04
	90	89.6±4.7	51.3±6.0	0.55±0.06
	140	128.6±10.0	82.3±7.1	0.88±0.03
HPS	30	48.6±1.5	32.3±1.5	0.22±0.01
	90	81.8±1.2	51.6±5.1	0.55±0.07
	140	109.6±4.7	80.6±4.2	0.79±0.08
LED	30	53.1±1.5	35.0±2.8	0.24±0.04
	90	82.6±1.6	45.5±9.1	0.47±0.10
	140	106.7±0.8	76.0±11.3	0.70±0.10

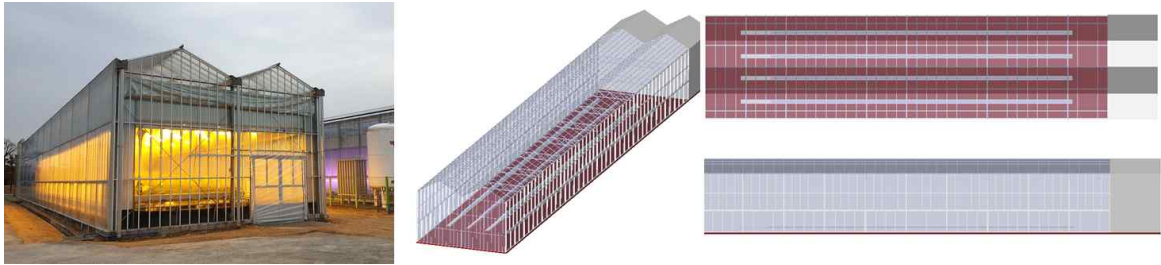


<그림 2.1.4> 파프리카 엽의 광학적 특성

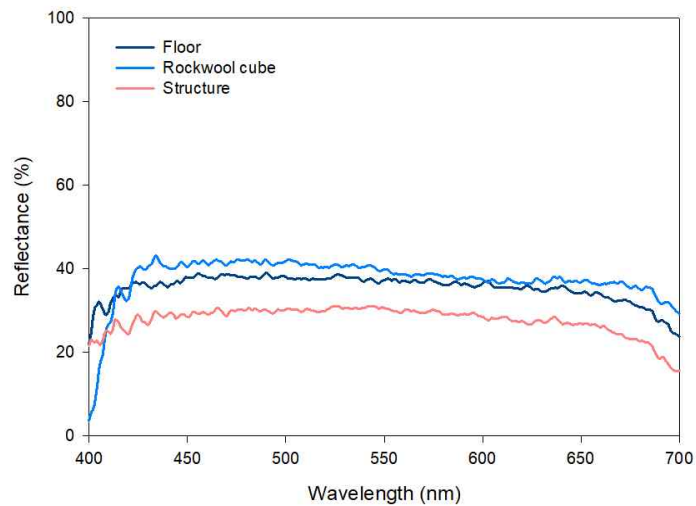
○ 온실 3차원 모델링

- 3차원 온실 모델은 함안 시설원에연구소에 위치한 벤로형 온실의 실측치를 바탕으로 구축 하였음.
- 온실의 규격은 폭 8.0m, 길이 35.0m, 측고 4.0m이며 총 4열의 작물 재배 라인이 150cm의 열간 간격으로 배치되어 있음.

- 온실을 구성하는 바닥면, 골조, 암면 큐브의 자재의 광학적 특성을 실측하여 광추적 시뮬레이션에 적용해 주었고, 피복 유리의 경우 투과율 95%의 광학적 특성을 설정해 주었음.



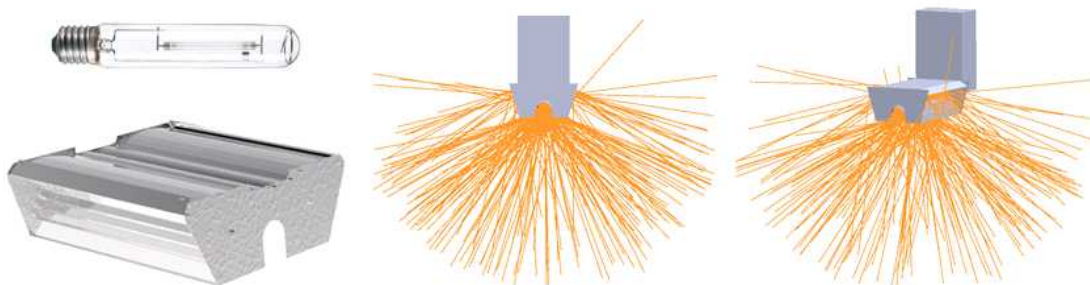
<그림 2.1.5> 시설원에연구소 내 벤로형 온실(좌)과 3차원 온실 모델(우)



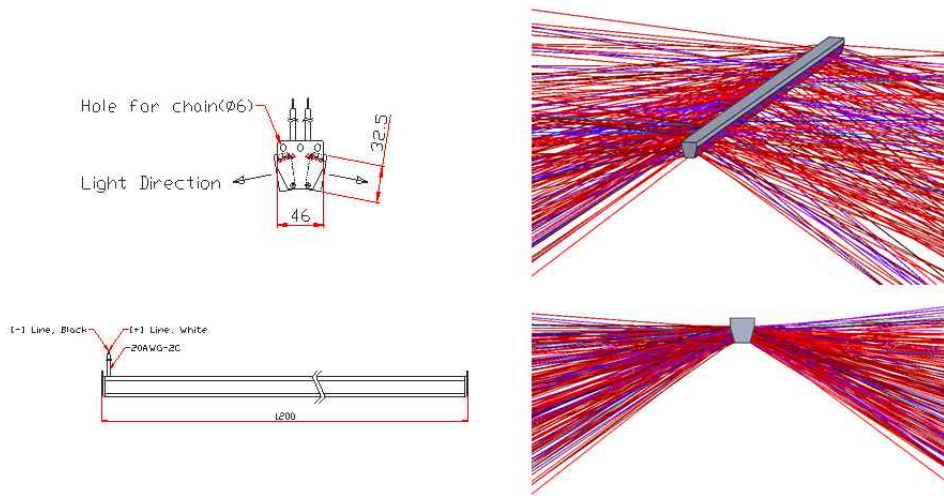
<그림 2.1.6> 온실 바닥면, 암면 큐브, 골조의 광학적 특성

○ 보광 광원(HPS, LED)의 3차원 모델링

- 온실 내 상부 보광 광원은 Dutch lighting innovation사의 1000W 고압 나트륨등(HPS)을 기준으로 하여 3차원 모델링하였으며, 광원과 반사각의 실제 형태를 반영하였음.
- 군락 내부 보광 광원은 (주에이팩)사의 H100Q LED 광원을 기준으로 하여 3차원 모델링하였으며, 실측값을 바탕으로 LED 칩셋 및 조사 각도를 반영하였음.



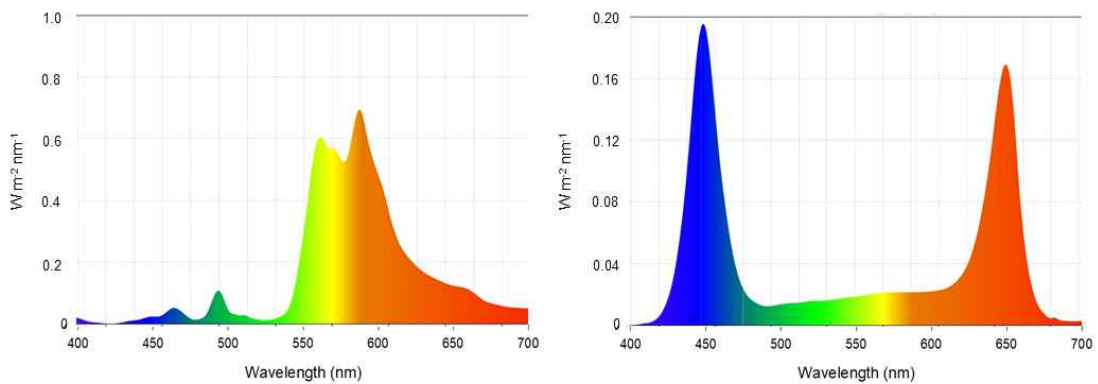
<그림 2.1.7> HPS 광원 및 반사각의 형태(왼쪽)와 구축된 3차원 광원 모델(오른쪽)



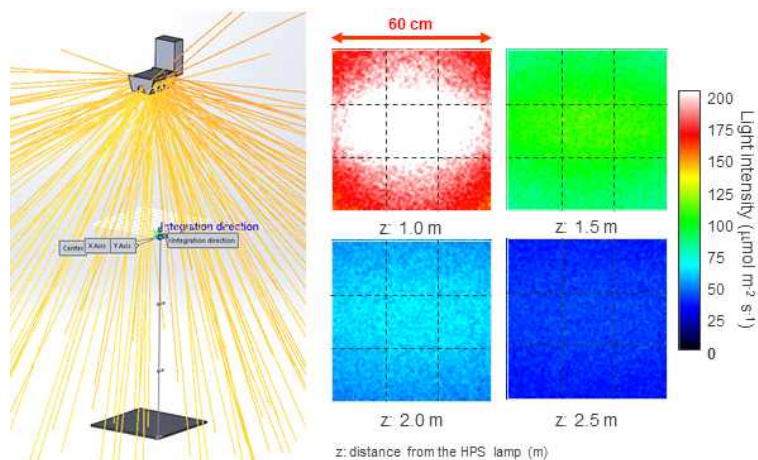
<그림 2.1.8> LED 광원의 형태(좌)와 구축된 3차원 광원 모델(우)

나. 선정 보광 광원의 광학적 특성 분석 및 수광 시뮬레이션 적용

- HPS 및 LED 광원의 분광 특성을 측정한 후 광추적 시뮬레이션 소프트웨어를 이용해 3차원 시뮬레이션 환경에 적용해 주었음.
- 광원에서의 거리별 광도를 실측한 후 시뮬레이션 결과와 일대일 비교함으로써 3차원 HPS 및 LED 광원 모델의 정확성을 확인하였음.

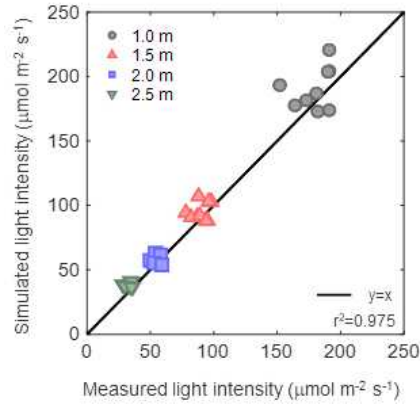


<그림 2.1.9> HPS(좌)와 LED(우) 광원의 분광 특성

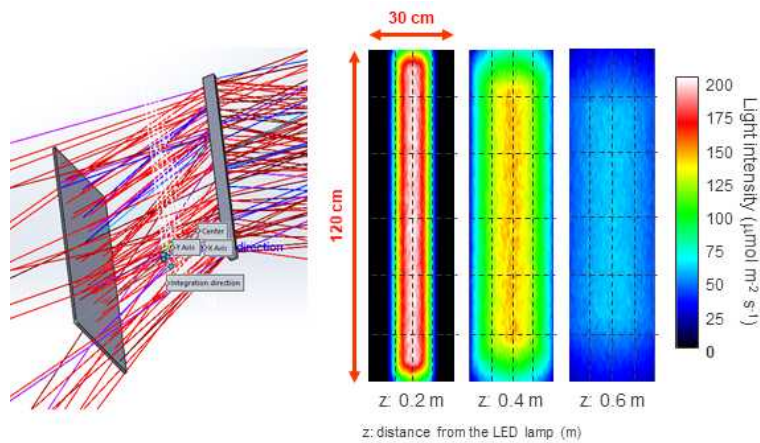


<그림 2.1.10> 광추적 시뮬레이션을 통해 구현된 HPS 광원으로부터의 거리에 따른 광분포

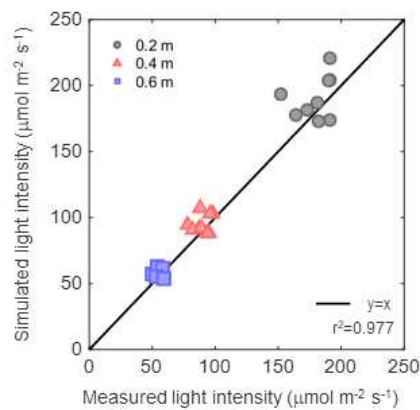




<그림 2.1.11> HPS 광원에서부터의 거리별 실측 광도와 광추적 시뮬레이션을 통해 구현된 광도의 1:1 비교



<그림 2.1.12> 광추적 시뮬레이션을 통해 구현된 LED 광원에서부터의 거리에 따른 광분포



<그림 2.1.13> LED 광원에서부터의 거리별 실측 광도와 광추적 시뮬레이션을 통해 구현된 광도의 1:1 비교

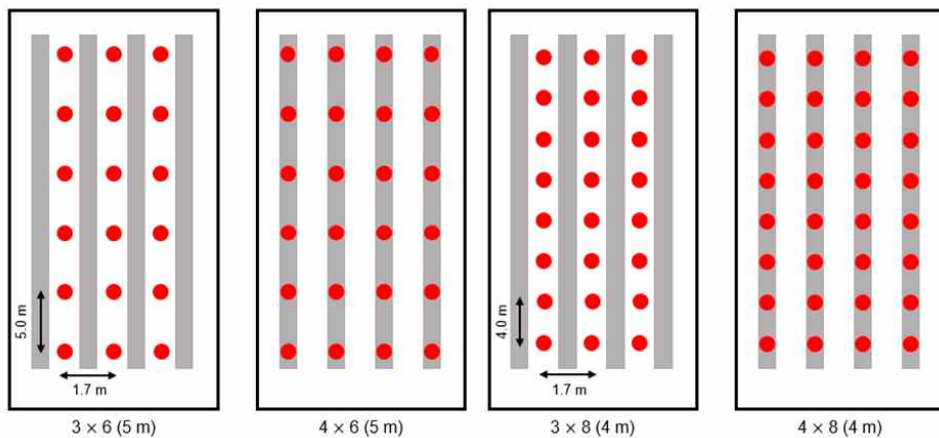
## 2) 3차원 수광 시뮬레이션을 이용한 보광 광원의 온실 적용방식 설계

### (1) 균락 상부 보광 광원의 최적 간격 및 개수 선정

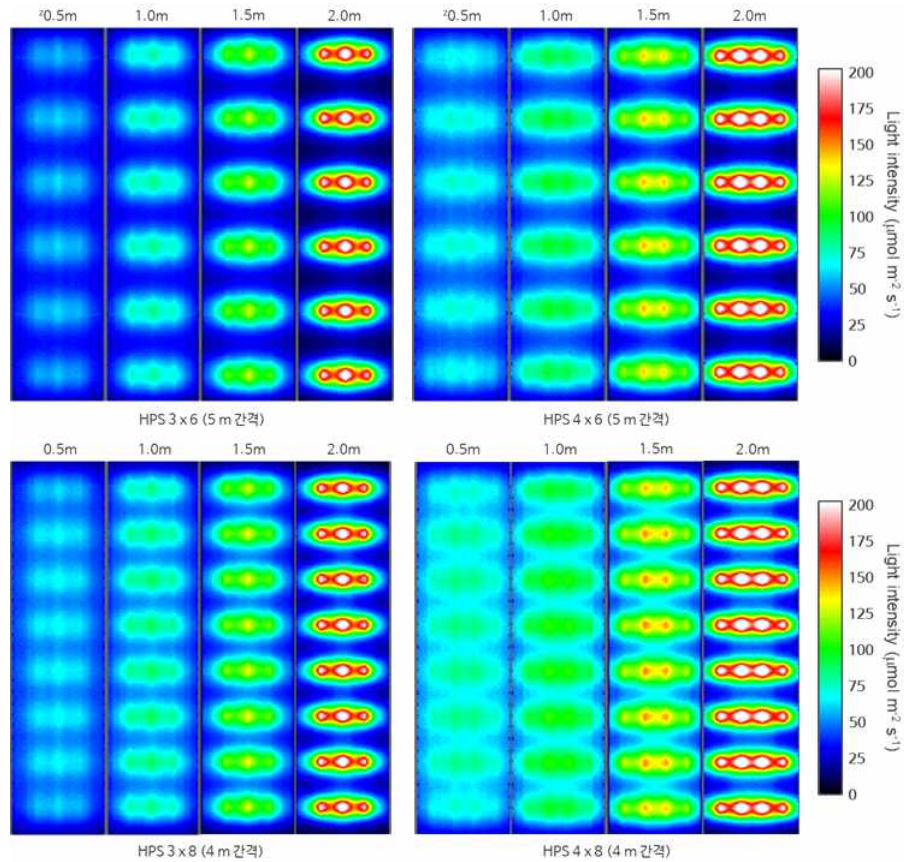
- 광추적 시뮬레이션을 이용하여 균락 상부 보광 광원의 배치에 따른 온실 내 광분포 및 작물 수광량을 비교하였음.
- 일반적으로 작물 상부에 HPS 보광 광원을 설치할 경우 광 중첩이 발생할 수 있도록 하기

위해 보광 광원을 격자 형태로 배치하는 것이 일반적임. 따라서 광추적 시뮬레이션을 위한 광원 배치 결정 과정에서 균락 상부 보광 광원이 격자 형태로 배치되도록 하였음.

- 이후 광원과 작물 재배 라인의 위치에 따라 광원을 작물 재배 라인 바로 위에 위치시키는 것과 작물 재배 열 사이에 위치시키는 두 가지 방식으로 구분하였음.
- 두 가지 광원 배치별로 같은 재배 열 내 광원 사이의 간격을 4.0과 5.0 m 두 가지 경우로 설정하여, 총 네 가지의 상부 보광 광원 배치에 따른 온실 내 광환경을 분석하였음.
- 모든 배치에서 온실 내의 높이별 광도는 광원에서부터의 거리가 멀어짐에 따라 급격히 감소하였으며, 온실 최하단부인 50cm 구간의 경우  $75 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  미만의 낮은 광도를 보였음.
- 광원을 작물 재배열 사이에 위치시킬 경우 온실의 가운데 구역은 높은 평균 광도를 보였으나, 온실의 가장자리 부분의 광도는 비교적 낮은 값을 보였음.
- 광원 사이의 간격이 좁을수록 광원과 광원 사이에 위치한 구역의 광도 분포는 균일해짐. 5.0m 간격으로 광원을 배치할 경우 광원의 바로 아래 지점에서의 광도는 4.0m 간격 배치와 큰 차이가 나타나지 않았으나, 광원 사이의 공간에서의 광도는 급격하게 낮아졌음.
- 광원과 작물 재배 라인의 위치, 그리고 광원 사이의 거리가 광 분포에 미치는 영향은 같은 개수의 광원을 배치한 3×8과 4×6 배치의 비교로 알 수 있었음. 3×8 배치에서는 광원 아래의 광도는 4×6 배치에 비해 낮았으나, 광원 사이에서 더 높은 광도를 보였음.



<그림 2.1.14> HPS 상부 보광 광원의 온실 내 배치 형태



<그림 2.1.15> 온실 내 HPS 상부 보광 광원 배치에 따른 높이별 광분포

<표 2.1.3> 온실 내 HPS 상부 보광 광원 배치에 따른 광원 하부 및 광원 사이의 높이별 광분포

(단위:  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )

광원 배치	HPS 광원 아래				HPS 광원 사이			
	<sup>2</sup> 0.5 m	1.0 m	1.5 m	2.0 m	0.5 m	1.0 m	1.5 m	2.0 m
3×8	55±8.2	64±13.6	76±25.6	95±48.6	50±6.4	53±9.4	53±15.7	46±21.0
3×6	48±8.1	57±13.3	70±25.4	92±48.6	37±4.5	37±6.2	33±9.5	24±9.7
4×8	71±8.3	82±13.6	976±26.1	121±49.2	65±7.1	69±10.7	68±18.2	60±23.2
4×6	61±8.2	73±13.6	89±27.0	117±49.6	47±5.3	47±7.6	42±11.8	31±11.2

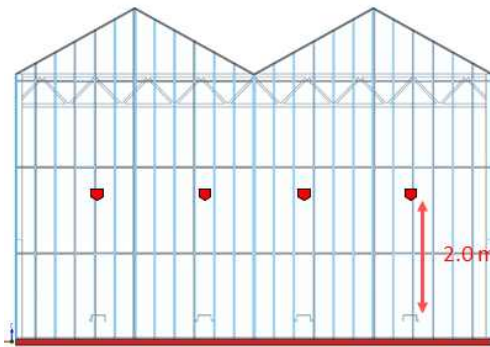
<sup>2</sup>: 온실 바닥면으로부터의 높이

(2) 균락 내부 보광 광원의 균락 내 최적 위치 선정

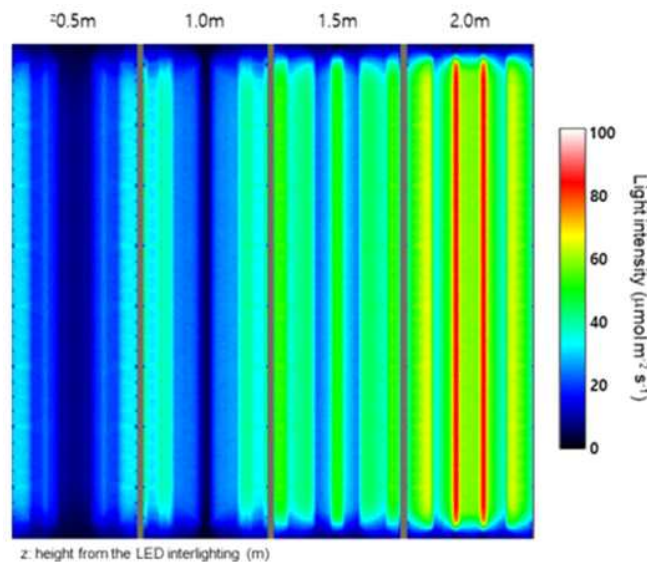
- 균락 내부 보광 방식은 주로 작물 종단부에 추가적인 광을 공급하기 위해 보광 광원이 작물 균락 내부를 가로지르도록 설치되는 만큼 상부 보광 광원에 비해서 광원 배치가 작물 재배 라인과 큰 연관이 없으며, 온실 내에서 수평적인 위치에 의한 영향보다는 수직적인 위치에 따른 영향이 더 큼
- 따라서 균락 내부 보광 광원의 경우 균락 내 수직적인 위치의 변화에 따른 광 환경 차이를 분석하는 데 초점을 맞추었으며, 이에 따라 균락 내부 보광 광원으로부터 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m 거리의 광 분포를 분석하여 균락 내부 보광 광원 설치 시 온실 내 높이별 광 분포의 변화를 분석하였음.
- HPS 상부 보광 광원에 의한 광분포와 다르게 LED 보광 광원으로 인해 발생하는 광분포는

작물 재배열을 따라서 일정했으며, 재배 라인 사이 공간에서 현저한 차이를 보였음.

- 온실 가운데에 위치한 두 개의 재배 라인의 경우 광원과 가까운 거리에서는 높은 광도를 보였으나, 광원과 거리가 멀어짐에 따라 급격히 광도가 낮아졌음.
- 다만 실제 작물 군락 내부에 LED 광원을 설치할 경우 광원으로부터 방출되는 빛을 대부분 주변 개체의 엽에 흡수되는 양상을 보이기 때문에, 작물이 충분히 생육했을 경우 본 결과와 비슷한 광 분포는 크게 나타나지 않을 것으로 생각됨.
- 초기 생육 단계에서 작물의 초장이 아직 군락 내부 보광 광원의 설치 높이까지 닿지 않았을 경우에는 본 시뮬레이션 결과와 비슷한 광 분포 양상이 나타날 수 있을 것으로 생각됨.



<그림 2.1.16> LED 내부 보광 광원의 온실 내 배치 형태



<그림 2.1.17> LED 보광 광원으로부터 거리에 따른 온실 내 광분포

### 3) 3차원 수광해석 기반 작물 광합성 및 에너지 효율을 고려한 적정 보광 수준 도출

#### (1) 보광 수준에 따른 광합성 및 보광 광원의 에너지 효율 분석

##### 가. 군락 상부 및 내부 보광 광원(HPS, LED)에 따른 광합성 및 광 이용 효율 분석

- 군락 상부 및 내부 보광 광원에 따른 작물 광합성과 광이용효율 분석을 위해 생육 단계별 파프리카, 토마토 작물 모델을 배치하여 광추적 시뮬레이션을 진행하였음.
- 토마토 작물 모델의 경우 자체적으로 보유하고 있는 3차원 구조모델 DB에서 목표하는 생육 단계에 일치하는 개체를 선별하여 분석에 이용하였음.
- 7월 하순에서 8월 초에 정식하는 겨울 작기의 재배 일정을 고려하여 작물 생육 단계를 월별로 나누어 9월 정식 후 생육기와 11월 착과기, 1월 성숙기의 총 3 단계에 대한 보광 효

을 분석하였음. 분석에는 각 월별 생육 단계를 대표하는 정식 후 30, 90, 140일 후의 파프리카, 토마토 3차원 모델을 이용하였음.

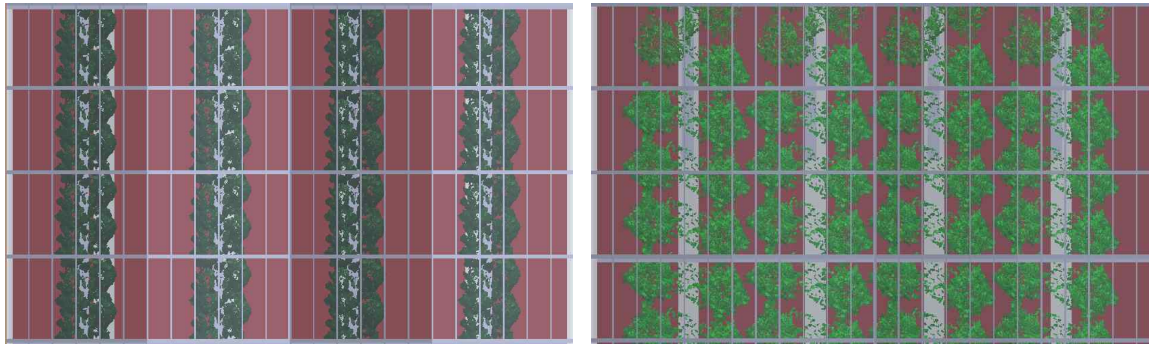


<그림 2.1.18> 광추적 시뮬레이션에 이용된 파프리카 3차원 스캔 모델, 좌측부터 각각 30, 90, 140 DAT (days after transplanting)의 작물



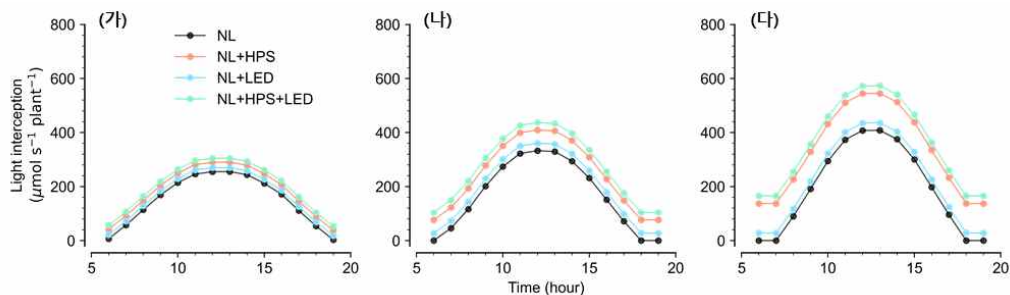
<그림 2.1.19> 광추적 시뮬레이션에 이용된 토마토 3차원 스캔 모델, 좌측부터 각각 30, 90, 140 DAT (days after transplanting)의 작물

- 3차원 작물 모델은 3차원 벤로형 온실 모델 내부에 4구 암면 슬라브 정식을 기준으로  $3.5 \text{ plants} \cdot \text{m}^{-2}$ 의 재식 밀도로 배치하였음.
- 군락 상부 HPS 광원 모델은 온실 바닥에서부터 3.5m 높이에 가로 1.6 m, 세로 4.0 m 간격으로 배치하였고, LED 군락 내부 광원은 개체가 완전히 성장하였을 경우 군락 중간에 위치하도록 파프리카는 암면 배지로부터 60cm, 토마토는 90cm 높이에 배치하여 분석하였음.

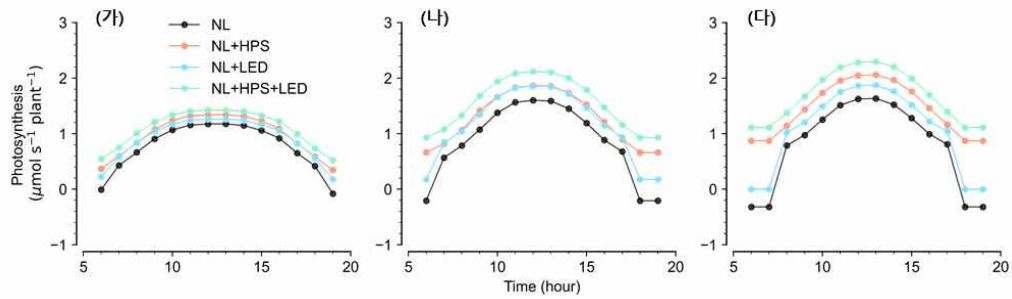


<그림 2.1.20> 파프리카(좌)와 토마토(우) 3차원 모델의 온실 내 배치 형태

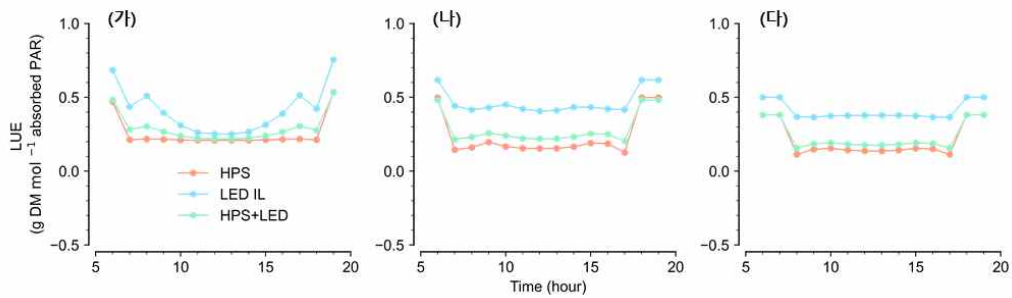
- 광추적 시뮬레이션 상에서의 분석 대상 지역은 경상남도 함안군(동경 128.24°, 북위 35.23°)으로 설정하였으며, 3차원 공간 내 광 분포를 구현하는 과정에서는 천구의 광 분포를 나타낼 수 있는 대표적인 모델 중 하나인 CIE sky model (CIE, 2003; ISO, 2004)을 이용하였음.
- 외부 기상 상태는 비, 안개, 짙은 구름 등의 기상학적 요인이 존재하지 않는 맑은 날을 대변하도록 설정하였으며, 이 때 직사광과 산란광 비율은 6:4였음.
- 파프리카와 토마토의 외부 광 조건에 따른 HPS 상부 보광 및 LED 내부 보광에 따른 수광량, 광합성량 증가량과 이에 따른 일중 광이용효율을 분석하였음.
- 토마토의 수광량은 생육 단계에 따라 증가하였으나, 생육 진전에 따라 외부 광도 감소의 영향으로 인해 생육 단계별로 큰 차이가 없었음. 광합성량도 유사한 양상을 보였음.
- 보광 방식에 따른 작물 수광량 및 광합성량의 경우 LED 내부 보광보다 HPS 상부 보광에 의한 증가량이 더 많았으며, 상부+내부 보광에서 가장 높은 값을 보였음.
- 일중 시간대별로 보광에 의한 작물 수광량 증가량에 대한 작물 광합성 증가량을 나타내는 LUE(light use efficiency, 광이용효율)은 일출과 일몰 부근에서 대체로 높은 값을 보였음.
- 30 DAT 작물의 경우 일중 최고 광도를 보이는 남중시각 부근에서 가장 낮은 LUE를 보였으나, 90, 140 DAT 작물의 경우 일중 내내 비교적 일정한 LUE를 유지하였었음. 이는 생육 단계가 진전됨에 따라 외부 광도가 낮아지기 때문에 나타나는 현상으로 생각됨.



<그림 2.1.21> 토마토의 생육 단계별 보광 방식에 따른 일중 시간대별 작물 수광량(좌측부터 30, 90, 140 DAT)

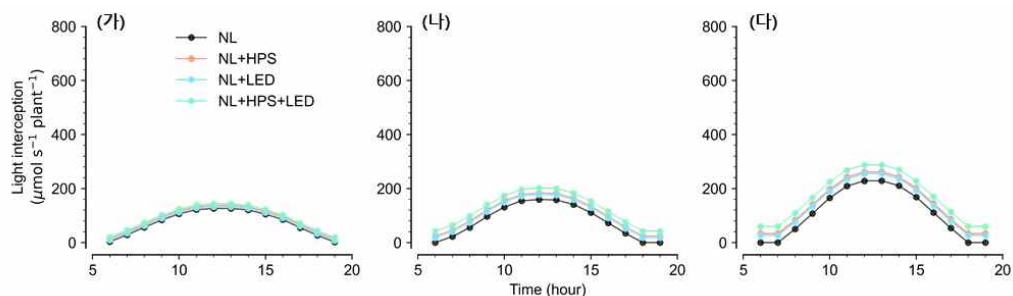


<그림 2.1.22> 토마토의 생육 단계별 보광 방식에 따른 일중 시간대별 작물 광합성량(좌측부터 30, 90, 140 DAT)

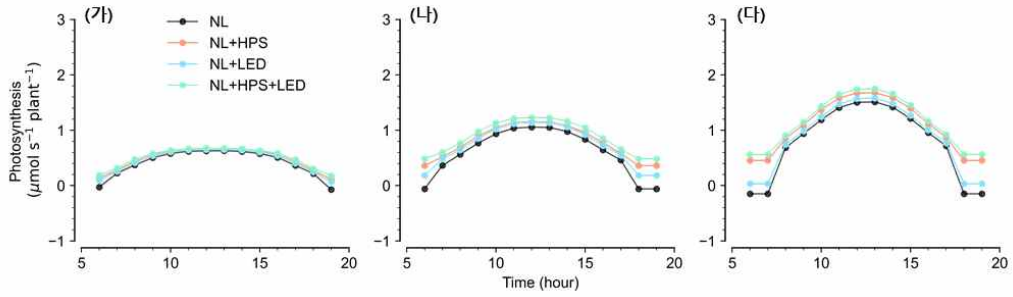


<그림 2.1.23> 토마토의 생육 단계별 보광 방식에 따른 일중 시간대별 작물 광이용효율(좌측부터 30, 90, 140 DAT)

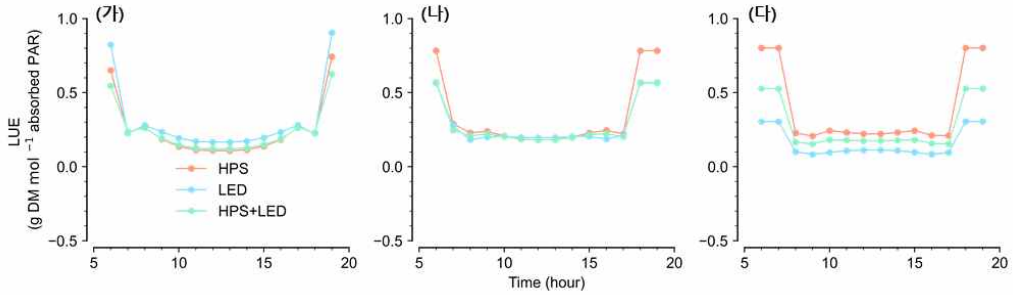
- 파프리카의 작물 수광량과 광합성량은 생육 단계에 따라 증가하였고, 외부 광도 감소의 영향으로 인해 생육 단계별로 큰 차이가 없었음. 그러나 토마토에 비해 수광량과 광합성량은 낮은 절대값을 보였는데, 이는 작은 엽면적으로 인한 것으로 생각됨.
- 보광 방식에 따른 작물 수광량 및 광합성량의 경우 LED 내부 보광보다 HPS 상부 보광에 의한 증가량이 더 많았으며, 상부+내부 보광에서 가장 높았음.
- 일중 시간대별 LUE는 토마토와 마찬가지로 일출과 일몰 부근에서 높은 값을 보였음. 그러나 토마토와 비교해 보았을 때 파프리카는 일출, 일몰 부근에서 상당히 높은 LUE를 나타낸 반면, 일중 시간에는 보광으로 인한 LUE 증가량이 매우 적었음.
- 이는 토마토에 비해 작은 파프리카의 수관으로 인한 영향일 것으로 생각됨. 실제로 90 DAT에서는 보광 방식에 따른 일중 LUE 차이가 거의 나타나지 않았음.
- 위 결과를 통해 파프리카는 일중 시간 내에서의 보광보다 일출과 일몰 시점에서의 보광이 더 높은 효율을 낸다는 것을 알 수 있음.



<그림 2.1.24> 파프리카의 생육 단계별 보광 방식에 따른 일중 시간대별 작물 수광량(좌측부터 30, 90, 140 DAT)



<그림 2.1.25> 파프리카의 생육 단계별 보광 방식에 따른 일중 시간대별 작물 광합성량(좌측부터 30, 90, 140 DAT)



<그림 2.1.26> 파프리카의 생육 단계별 보광 방식에 따른 일중 시간대별 작물 광이용효율(좌측부터 30, 90, 140 DAT)

#### 나. 일누적광량(DLI) 기반 에너지 효율을 고려한 적정 보광 수준 도출

##### ○ 일누적광량(DLI)기반 온실 보광 방법

- 온실 보광의 최종 목표는 자연광으로 달성하지 못하는 작물 최적 생육에 필요한 광량을 인공광원을 통해 보충하는 것임.
- 작목별 최적 생육에 적합한 온실 내 일누적광량(DLI)에 의거하여 보광 수준을 결정하며, 보광을 통해 달성하고자 하는 목표 DLI ( $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ )가 결정되면 이를 일조시간(h)으로 나누어 기준광도를 결정함. 이는 다음과 같은 간단한 수식으로 나타낼 수 있음.

$$\text{기준광도}(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}) = 277.78(\text{환산계수}) \times \frac{\text{목표DLI}(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})}{\text{일조시간}(h)}$$

$$\text{광원의 조명광도}(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}, \text{PPFD}) = \frac{\text{광원의 광속}(\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}, \text{PPF}) \times \text{광원수}}{\text{재배면적}(m^2)}$$

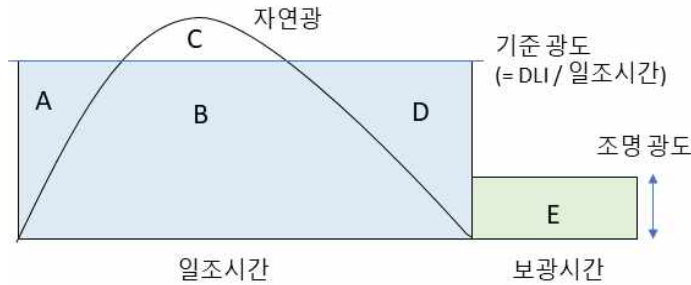
- 일중 필요 보광량은 목표 DLI에서 자연광에 의한 DLI를 제외한 값으로 나타낼 수 있으며, 온실 광투과율(광감소율)을 고려할 경우에 필요 보광량에 광투과율을 곱하거나 조명광도에 광투과율의 역수를 곱하여 외부 광도에 상당하는 내부 보광 광도를 결정할 수 있음.
- 만약 필요 보광량이 0보다 클 경우 보광을 실시하여 부족한 광을 보충하고, 필요 보광량이 0보다 작을 경우 보광을 실시하지 않음. 이는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있음.



필요보광량 = 목표  $DLI$  - 측정  $DLI > 0$ (보광 실시)

필요보광량( $umol \cdot m^{-2}$ ) = 광원의 조명 광도( $umol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )  $\times$  보광시간( $s$ )

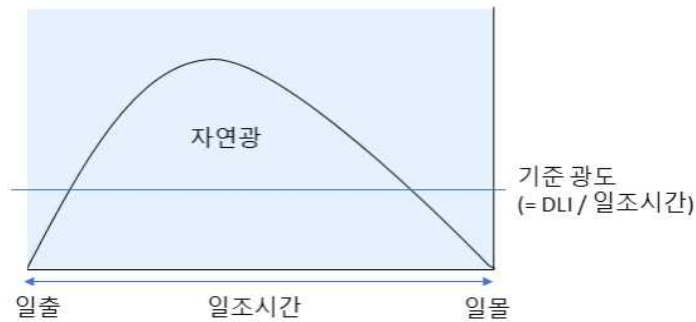
$E$ (필요보광량) =  $A + D - C$



<그림 2.1.27> DLI에 의한 보광 방법의 개요

① 보광이 필요하지 않은 경우

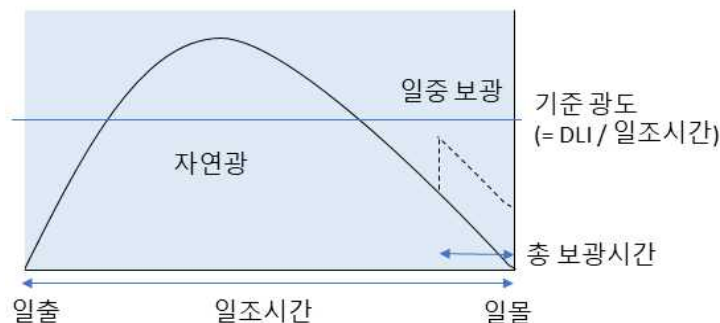
- <그림 2.1.28>과 같이 자연광만으로 목표  $DLI$ 를 달성할 경우 보광을 실시하지 않음.



<그림 2.1.28> DLI가 필요보광량보다 많을 경우 온실 내 일중 광도의 변화 양상

② 일중 또는 일몰 보광이 필요한 경우

- 일중 자연광만으로 목표  $DLI$ 를 충족하지 못할 경우 보광을 통한 광 보충이 필요함.
- 일몰 이후에 보광을 실시할 경우 0 부근의 광도에서 다시 보광을 실시하게 되므로 작물의 생육 증진 효과가 낮고 보광 필요 시간이 길어지는 문제가 있음.
- 따라서 태양광이 평균 기준 광도보다 낮아지는 시점에 보광을 실시할 필요가 있음. 이는 보광 시간이 일몰 이전(그림 2.1.29)과 일몰 이후(그림 2.1.30)로 구분할 수 있음.

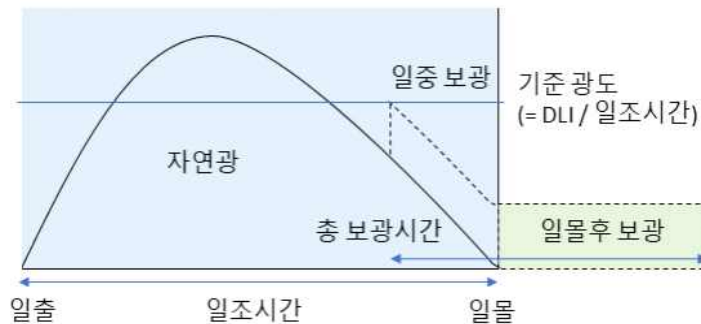


<그림 2.1.29> 일몰 이전에 보광을 실시하는 경우의 온실 내 일중 광도의 변화 양상

- 그림 2.1.29의 경우, 평균 기준 광도와 현재 광도가 교차되는 시점에서 일몰 시간에 직선으로 연결하여 그 사이의 개략 광량을 추정함(정확성 향상을 위해서 평균 일사량 곡선을 사용하는 것을 권장).
- 이때 일중 자연광이 어느 정도 충분히 주어진 경우, 보광 시간이 일몰 시간까지의 시간보다 작으므로 일몰 시간 이전을 기준으로 보광 시간을 산출함. 이 때 온실의 필요 보광시간은 아래의 식으로 나타낼 수 있음.

필요보광시간 = 일중보광시간

$$\text{필요보광시간}(s) = \frac{\text{필요보광량}(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2})}{\text{조명광도}(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})} \quad (\text{시간은 } s \rightarrow h \text{으로 환산가능})$$



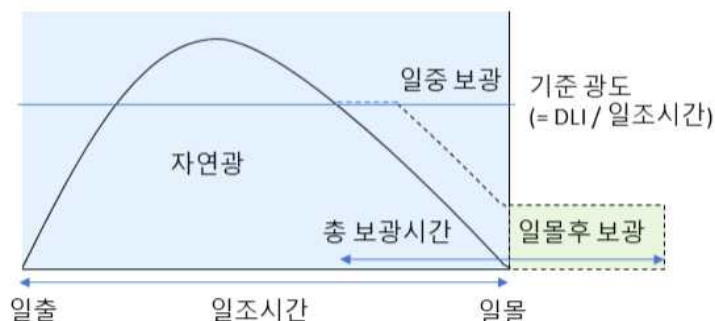
<그림 2.1.30> 일몰 이후에 보광을 실시하는 경우 온실 내 일중 광도의 변화 양상

- <그림 2.1.30>의 경우, 평균 기준 광도와 현재 광도가 교차되는 시점에서 일몰 시간에 직선으로 연결하여 그 사이의 개략 광량을 추정함.
- 이때 보광 시간이 일몰 시간까지의 시간보다 클 경우에는 현재의 광도에 조명 광도가 평균 기준 광도를 넘지 않는 시간부터 보광을 시작함. 이 때 온실의 필요 보광시간은 아래의 식으로 나타낼 수 있음.

필요보광시간 = 일중보광시간 + 일몰후보광시간

$$\text{필요보광시간}(s) = \frac{\text{필요보광량}(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2})}{\text{조명광도}(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})}$$

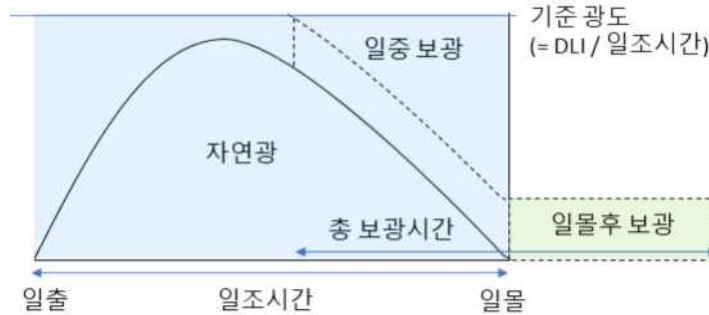
- 이때 조명의 출력을 조절하여 보광 광도의 조절이 가능할 경우 일중 광도가 평균 기준 광도에 도달하는 지점부터 순차적으로 보광 광도를 증가시키며 보광을 실시함(그림 2.1.31).



<그림 2.1.31> 조명의 출력을 조절 가능할 경우 온실 내 일중 광도의 변화 양상

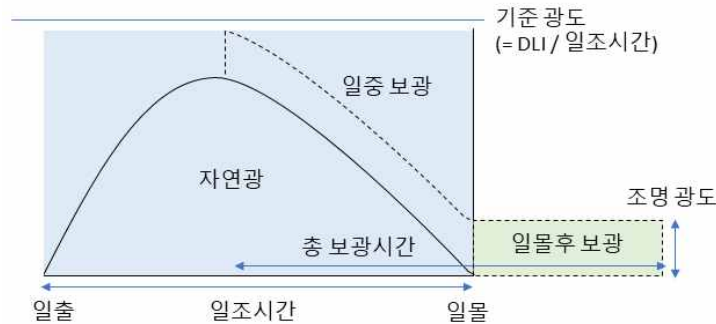
③ 일중과 일몰 후 보광이 필요한 경우

- 외부 기상 조건으로 인해 일중 최고 광도(11~13시 부근)가 평균 기준 광도에 미치지 못하는 경우 최대 광도 시점에서부터 목표 DLI를 충족할 때까지 보광을 실시함.



<그림 2.1.32> 일중 최고 광도 + 조명 광도 > 평균 기준광도일 경우 온실 내 일중 광도의 변화 양상

- 일중 최고 광도 + 조명 광도 > 평균 기준 광도 일 경우, 보광 광원 조사 시 평균 기준 광도를 만족할 수 있는 시점부터 목표 DLI를 충족하는 시점까지 보광을 실시함(그림 2.1.32).



<그림 2.1.33> 일중 최고 광도 + 조명 광도 < 평균 기준 광도일 경우 온실 내 일중 광도의 변화 양상

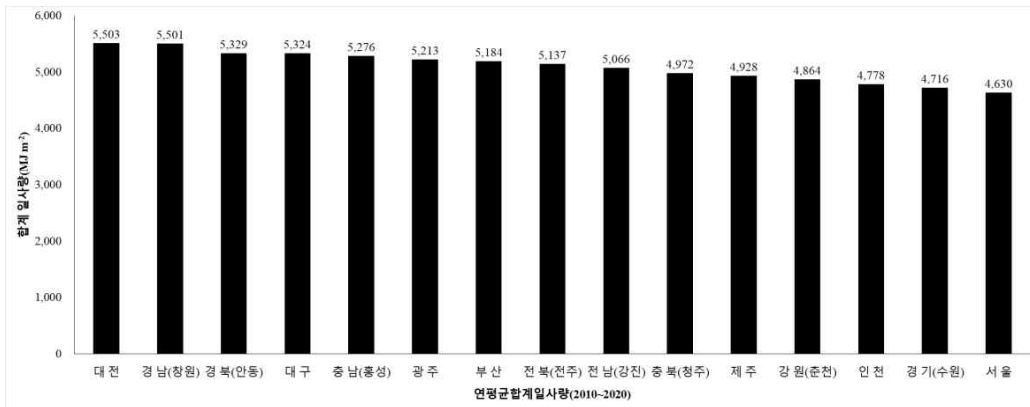
- 일중 최고 광도 + 조명 광도 < 평균 기준 광도 일 경우 일중 최고 광도가 지난 시점부터 목표 DLI를 충족하는 시점까지 보광을 실시함(그림 2.1.33).

○ 국내 지역별, 월별 평균 일적산광량 수준

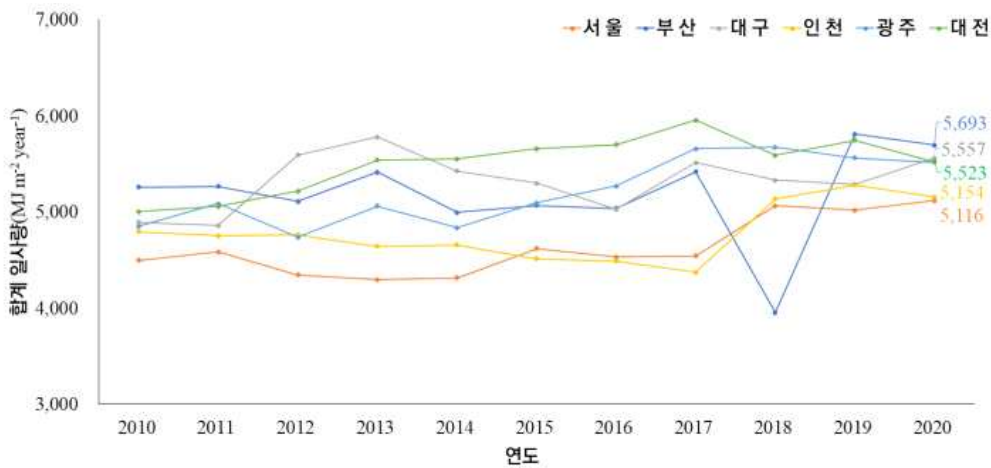
① 지역별 광환경

- 우리나라의 주요 도시의 연 평균 누적 일사량은 대전, 경남(창원), 경북(안동), 대구, 충남, 광주 순이며, 가장 높은 일사량을 나타내는 대전을 100으로 하였을 때 제주도는 89.55, 강원도는 88.39, 서울은 84.14 정도로 나타남.
- 우리나라에 도달하는 연간 합계일사량은 지난 10년간 지역에 따라 증가 혹은 감소하였음. 5대 광역시의 경우 2010년에 비하여 8.5(부산)~13.8(서울)%가량 증가하였으며, 주요 시·도 중 전남(강진), 경남(창원)은 감소하였고, 나머지 충북(청주), 전북(전주), 경기(수원), 경북(안동)은 연간 누적 합계일사량이 2.6(제주)~16.5(충북)% 증가하였음. 이는 태양 복사에너지량이 10년마다 0.05%가량 증가할 것으로 예측한 것(NASA, 2003)에 비하여 매우 큰 수치임.
- 해마다 지구에 도달하는 일사량은 증가하고 있지만, 온실 내에 도달하는 광량은 피복재, 구조물 등에 의하여 차단되기 때문에 실제 온실 내에 투과되는 광은 50~70%에 불과함.

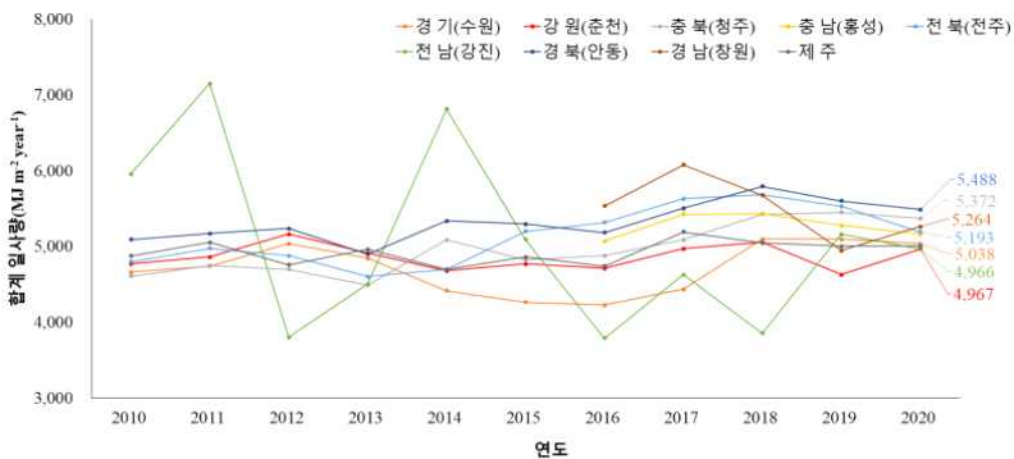
- 따라서 작물 생육에 이용되는 일사량은 부족하며, 특히 주요 과채류인 토마토, 파프리카의 경우 온실 내부에서 2~3m 높이의 균락을 이루게 되어 광 부족현상은 더욱 심화됨.



<그림 2.1.34> 지역별 누적 일사량



<그림 2.1.35> 광역시의 연간 합계일사량

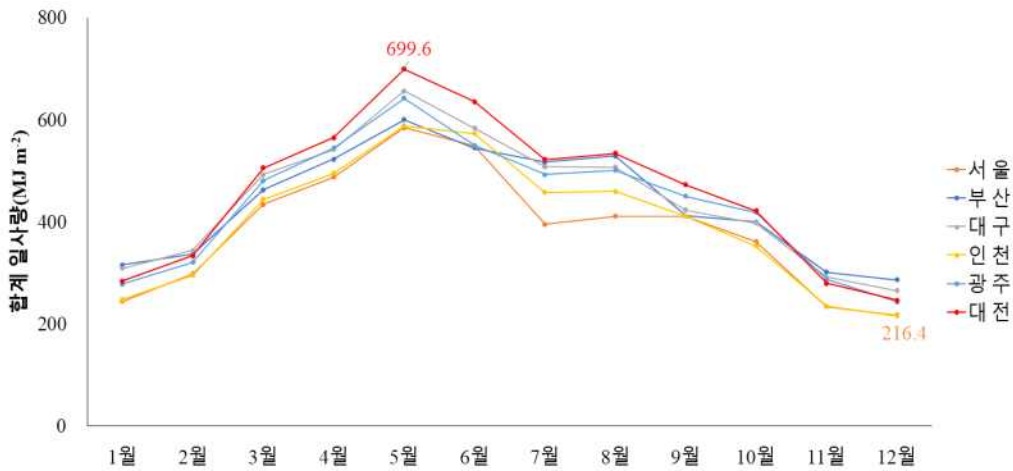


<그림 2.1.36> 주요 시도의 연간 합계일사량

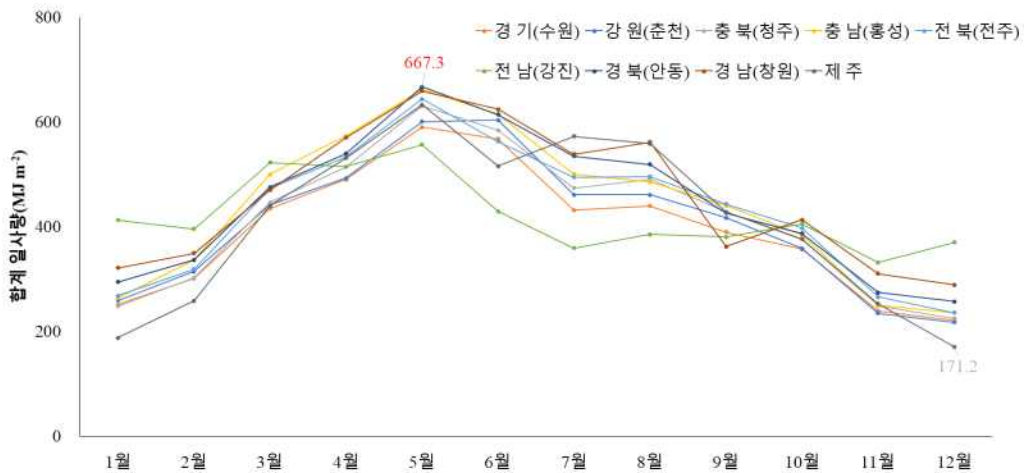
② 계절별 광환경

- 우리나라는 사계절이 뚜렷하여 여름철(하지~추분)에 일장이 길고 단위 시간당 일사량이 증가하며, 겨울철(동지~춘분)에는 일장이 짧고 단위 시간당 일사량이 감소함.
- 실제 월별 합계일사량이 가장 높은 시기는 5월, 가장 낮은 지점은 12월이며, 두 시기의 월 합계일사량 차이는 평균 381.1 MJ·m<sup>-2</sup>였음.

- 12월 월 합계일사량이 가장 작은 지역은 제주도( $171.2 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ )였으며, 그 뒤로는 인천 (372.3), 강원(383.4), 서울(366.7) 순으로 나타남.

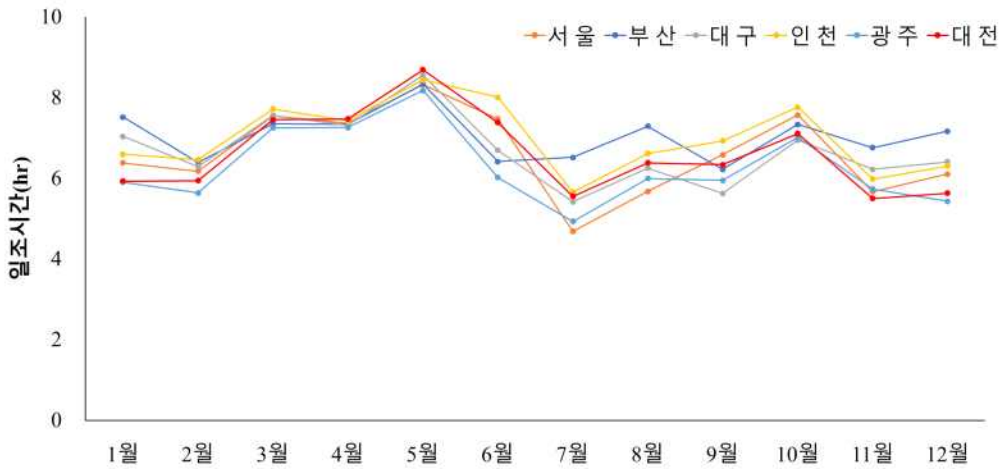


<그림 2.1.37> 광역시의 월별 합계일사량

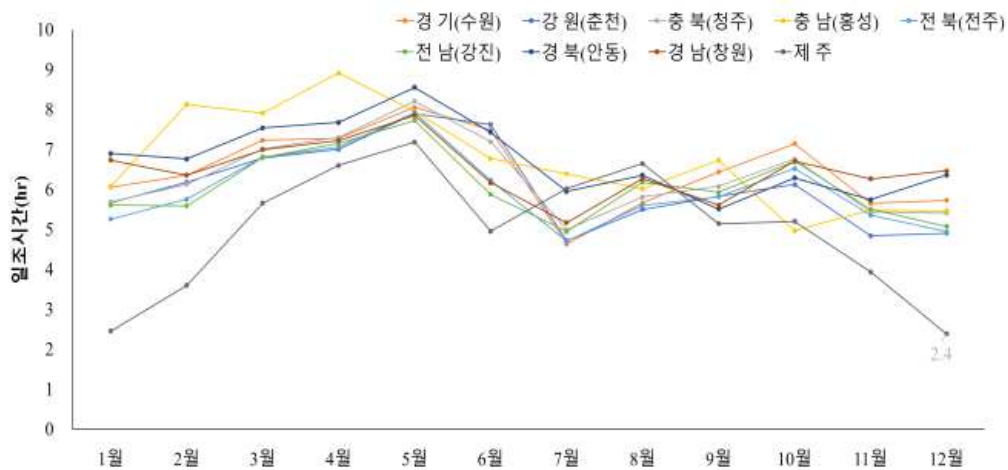


<그림 2.1.38> 주요 시도의 연간 합계일사량

- 계절에 따라서 일조시간(일장)도 변화하는데, 계절성 기후를 고려한다면 겨울철에 가장 일조시간이 낮아야 하지만 여름철 장마 기간(7월~9월)으로 인하여 7월의 일조시간이 5.3시간으로 가장 짧게 나타났고, 평균 일조시간은 5월(8.0시간)에 가장 길었음.
- 긴 일조시간을 보인 지역은 충남(8.9시간), 경북(8.6), 대전(8.4) 순이었으며, 일조시간이 짧은 지역은 제주(2.4시간), 서울(4.5), 경기(4.6) 순으로 짧았음.
- 일조시간의 편차는 제주(4.8시간)에서 가장 컸고, 부산(1.8)에서 가장 작았음.
- 상기 국내 지역별, 월별 광환경 자료를 이용하여 국내 주요 시설과채류 생산 지역의 2010년부터 2020년까지 10년 동안의 월별 평균 DLI를 계산할 수 있었음.



<그림 2.1.39> 광역시의 월별 일조시간



<그림 2.1.40> 주요 시도의 월별 일조시간

<표 2.1.5> 국내 주요 시설과채류 생산 지역의 월별 평균 DLI(2010~2020년의 평균)

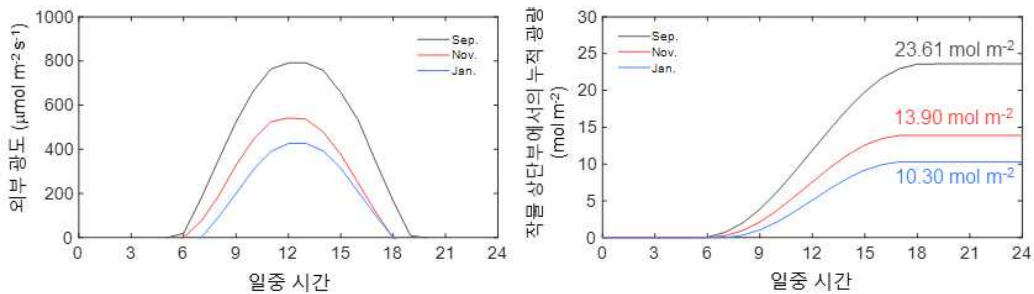
(단위:  $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )

지역	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
서울	16.2	22.7	28.8	33.5	38.8	37.6	26.2	27.3	28.2	24.0	16.0	14.5
수원	20.9	25.7	30.7	35.8	39.8	37.4	34.3	35.1	28.2	26.5	20.7	19.0
인천	20.5	26.2	32.7	37.2	43.6	40.0	33.7	33.7	29.0	26.4	20.0	17.6
청주	16.5	22.5	29.5	34.0	39.1	39.3	30.4	30.5	28.2	23.4	16.1	14.4
대전	18.5	24.5	31.9	37.3	42.6	37.7	32.7	33.3	30.9	27.8	19.7	16.2
홍성	18.9	25.5	33.5	38.7	46.4	43.6	34.6	35.5	32.4	28.0	19.2	16.4
춘천	16.7	22.9	28.8	33.6	39.2	38.9	28.7	29.2	26.7	23.7	16.4	14.6
전주	17.2	24.0	29.4	33.8	39.9	41.4	30.6	30.6	28.6	23.8	16.1	14.4
광주	16.5	23.0	29.6	35.2	41.9	40.0	31.5	32.6	29.4	25.1	17.0	15.0
강진	17.5	25.6	33.2	39.3	43.9	42.2	33.2	32.2	30.2	25.5	17.1	15.7
대구	17.8	24.3	31.5	36.6	42.7	38.6	32.8	32.9	30.4	26.4	18.2	15.7
안동	27.4	30.2	34.7	35.3	36.9	29.5	23.8	25.6	26.1	26.9	22.7	24.6
부산	19.6	25.6	31.6	37.0	44.3	42.1	35.5	34.4	29.2	25.7	18.8	17.1
창원	21.3	26.6	31.2	39.1	43.7	42.8	35.7	37.3	24.8	27.4	21.3	19.2
제주	12.5	19.7	29.2	36.4	42.0	35.4	38.0	37.1	29.4	25.0	17.4	11.4

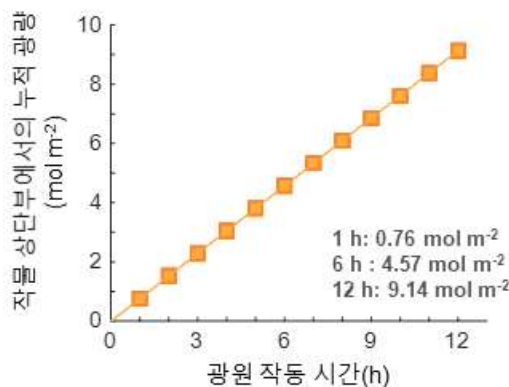
○ 작물 수광량 기반 보광 효율 분석

① 작물 상단부 일누적광량에 의한 보광

- 광추적 시뮬레이션으로 구현된 작물 상단부에서의 월별 일중 광도와 이를 누적광으로 나타낸 것은 <그림 2.1.41>과 같았으며, 9, 11, 1월 순으로 일누적광량은 23.61, 13.90, 10.30 mol·m<sup>-2</sup>이었음(18쪽의 광추적 시뮬레이션 결과 참조).
- 예를 들어 파프리카와 토마토의 일중 목표 DLI를 25 mol·m<sup>-2</sup>로 설정하였을 경우 보광을 통해 이를 만족하기 위해서는 월별로 각각 1.39, 11.10, 14.70 mol·m<sup>-2</sup>의 누적 광량이 필요하다고 할 수 있음.
- 보광을 통해 부족한 광량을 보충하기 위해서는 보광 광원의 조사에 따른 누적 광량을 알아야 함. 시뮬레이션 분석에 사용된 HPS 상부 보광 광원 배치에서 광원 조사 시 작물 상단부에서의 순간 광량은 약 211 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>이었음.
- 이를 바탕으로 광원 조사 시간에 따른 누적 수광량을 계산하면, HPS 광원을 1시간 동안 켜줄 경우 0.76 mol·m<sup>-2</sup>만큼의 DLI를 보충할 수 있다는 결과를 도출할 수 있음.
- 이를 바탕으로 목표 DLI를 보충하기 위한 HPS 광원의 필요 작동 시간을 <표 2.1.6>과 같이 나타낼 수 있었음. 시뮬레이션 결과에서의 목표 DLI인 25 mol·m<sup>-2</sup>를 충족하는 데 필요한 HPS 광원의 필요 조사시간은 차례대로 110분, 877분, 1162분으로 계산되었음.



<그림 2.1.41> 광추적 시뮬레이션 대상 지역(경상남도 함안군)의 월별 일중 광도(좌)와 이를 누적량으로 나타낸 결과(우)



<그림 2.1.42> HPS 상부 보광의 조사시간에 따른 작물 상단부에서의 누적 광량

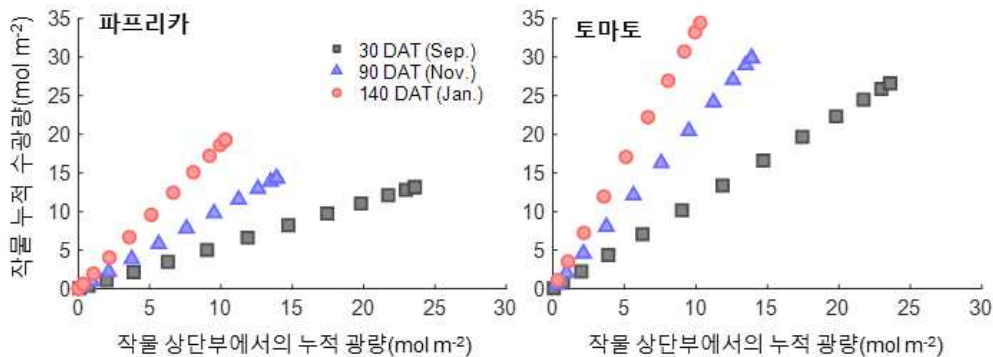
<표 2.1.6> 필요 DLI 보충을 위한 HPS 광원의 추가 조사 시간

보광 광원	목표 DLI									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	1:18	2:37	3:56	5:15	6:34	7:52	9:11	10:30	11:49	13:08

(hh:mm)

② 작물 수광량 기반 보광 효과 분석

- 앞서 계산한 것처럼 작물 상단부에서의 누적광량을 계산하면 작물 최적 생육을 유지하기 위해 얼마 만큼의 보광이 필요한지에 대해 계산할 수 있음.
- 일반적으로 이용되는 군락 상부 보광 방식은 DLI를 이용하여 보광 필요량을 손쉽게 계산할 수 있으나, 군락 내부 보광의 경우 작물 중, 하단부에 광이 조사되기 때문에 DLI를 기반으로 한 보광 필요량 계산이 어렵기 때문에 작물 상단부에서의 누적 수광량이 아닌 작물 표면의 수광량을 기반으로 한 보광 필요량 계산이 필요함.
- DLI 및 보광 방식에 따른 작물 수광량을 수치화하여 나타내기 위해 광추적 시뮬레이션을 이용해 계산된 월별 누적 광량과 작물 표면의 누적 광량을 비교해 본 결과 작목별, 생육 단계별로 변화 양상에는 차이가 있었으나, 작물 상단부에서의 누적 광량과 작물 누적 수광량은 선형적인 관계를 보였음(그림 2.1.43).
- 이를 바탕으로 작목별, 생육단계별 DLI 1에 상응하는 작물 누적 수광량을 계산한 결과는 <표 2.1.7>와 같았으며, 상기 결과를 바탕으로 보광 처리 시 보광 방식에 따른 작물의 누적 수광량이 얼마만큼의 DLI에 상응하는지를 계산할 수 있음.
- 광추적 시뮬레이션 상에서 얻은 군락 상부 및 내부 보광에 따른 생육단계별 파프리카와 토마토 작물의 누적 수광량을 위 변환 계수에 따라 DLI 총족량으로 변환한 것은 <그림 2.1.44-2.1.45>이며, 이를 기반으로 <표 2.1.8-2.1.13>과 같이 파프리카와 토마토의 생육 단계 및 보광 방식에 따른 목표 DLI 총족을 위한 필요 보광시간을 계산할 수 있음.

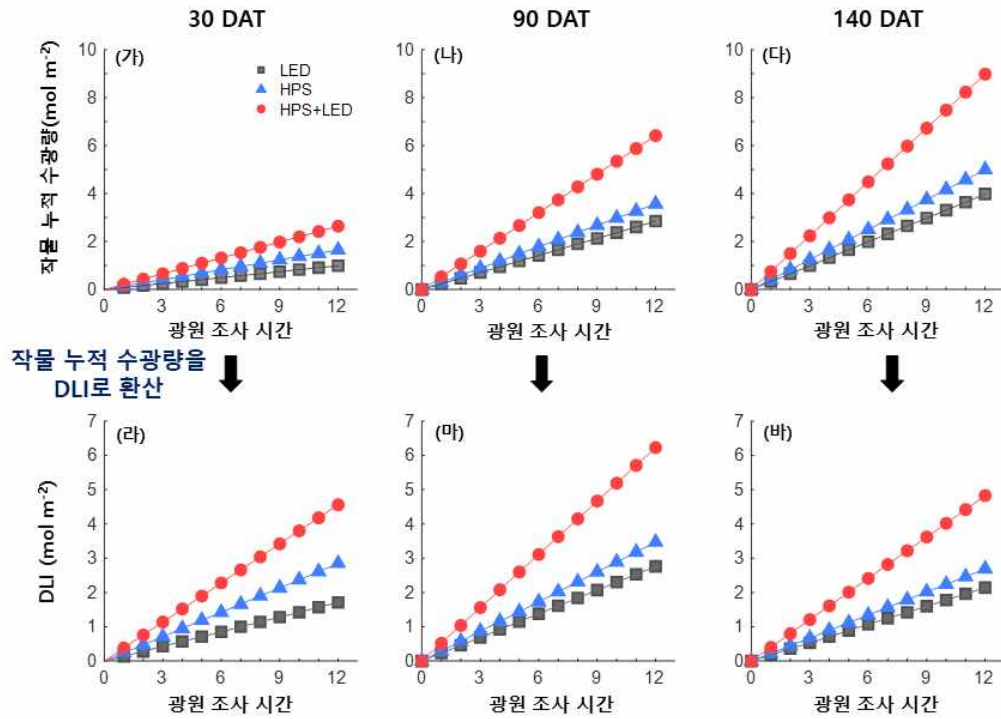


<그림 2.1.43> 광추적 시뮬레이션을 이용해 계산된 파프리카와 토마토 상단부에서의 누적 광량과 작물 표면의 누적 광량 비교

<표 2.1.7> 작물 상단부 기준 1 mol·m<sup>-2</sup>의 누적 수광량에 상응하는 파프리카, 토마토의 생육단계별 작물 표면 누적 수광량

작목	생육 단계(DAT)	작물 표면 누적 수광량 (mol·m <sup>-2</sup> )
파프리카	30	0.58
	90	1.03
	140	1.86
토마토	30	1.13
	90	2.15
	140	3.35





<그림 2.1.44> 보광 방식별 광원 조사시간에 따른 파프리카의 생육 단계별 누적 수광량(가~다)과 이를 DLI로 환산한 결과(라~바)

<표 2.1.8> 30 DAT 파프리카의 필요 DLI 보충을 위한 보광 방식별 광원 추가 조사 시간

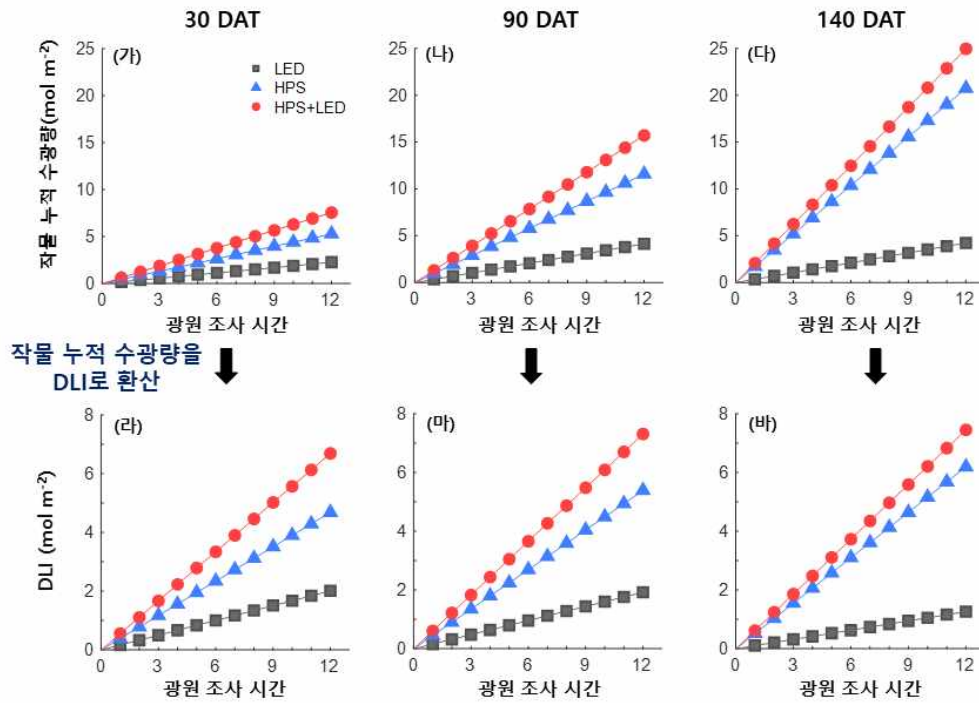
보광 방식	필요 DLI 보충을 위한 필요 광원 조사 시간(hh:mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	4:12	8:25	12:38	16:51	21:04	1:17	5:30	9:43	13:56	18:09
LED	7:01	14:02	21:03	4:04	11:05	18:06	25:07	32:09	39:10	46:11
HPS+LED	2:38	5:16	7:54	10:32	13:10	15:48	18:26	21:04	23:42	26:20

<표 2.1.9> 90 DAT 파프리카의 필요 DLI 보충을 위한 보광 방식별 광원 추가 조사 시간

보광 방식	필요 DLI 보충을 위한 필요 광원 조사 시간(hh:mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	3:27	6:55	10:23	13:50	17:18	20:46	0:14	3:41	7:09	10:37
LED	4:20	8:41	13:01	17:22	21:42	26:03	30:24	34:44	39:05	43:25
HPS+LED	1:55	3:51	5:46	7:42	9:37	11:33	13:29	15:24	17:20	19:15

<표 2.1.10> 140 DAT 파프리카의 필요 DLI 보충을 위한 보광 방식별 광원 추가 조사 시간

보광 방식	필요 DLI 보충을 위한 필요 광원 조사 시간(hh:mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	4:27	8:55	13:23	17:51	22:19	2:46	7:14	11:42	16:10	20:38
LED	5:36	11:13	16:50	22:27	4:04	9:41	15:18	20:54	26:31	32:08
HPS+LED	2:29	4:58	7:27	9:56	12:25	14:55	17:24	19:53	22:22	24:51



<그림 2.1.45> 보광 방식별 광원 조사시간에 따른 토마토의 생육 단계별 누적 수광량(가~다)과 이를 DLI로 환산한 결과(라~바)

<표 2.1.11> 30 DAT 토마토의 필요 DLI 보충을 위한 보광 방식별 광원 추가 조사 시간

보광 방식	필요 DLI 보충을 위한 필요 광원 조사 시간(hh:mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	2:33	5:07	7:41	10:15	12:49	15:23	17:57	20:30	23:04	25:38
LED	5:58	11:56	17:54	23:53	5:51	11:49	17:47	23:46	5:44	11:42
HPS+LED	1:47	3:35	5:22	7:10	8:58	10:45	12:33	14:21	16:08	17:56

<표 2.1.12> 90 DAT 토마토의 필요 DLI 보충을 위한 보광 방식별 광원 추가 조사 시간

보광 방식	필요 DLI 보충을 위한 필요 광원 조사 시간(hh:mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	2:13	4:27	6:40	8:54	11:08	13:21	15:35	17:49	20:02	22:16
LED	6:14	12:28	18:42	0:56	7:11	13:25	19:39	1:53	8:08	14:22
HPS+LED	1:38	3:16	4:55	6:33	8:12	9:50	11:29	13:07	14:46	16:24

<표 2.1.13> 140 DAT 토마토의 필요 DLI 보충을 위한 보광 방식별 광원 추가 조사 시간

보광 방식	필요 DLI 보충을 위한 필요 광원 조사 시간(hh:mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	1:56	3:52	5:48	7:45	9:41	11:37	13:33	15:30	17:26	19:22
LED	9:31	19:02	4:33	14:04	23:35	9:06	18:37	4:08	13:39	23:10
HPS+LED	1:36	3:13	4:49	6:26	8:03	9:39	11:16	12:52	14:29	16:06

(2) 생육 단계 및 재배 형태에 따른 적정 보광 수준 결정

가. 작물의 생육 단계(초기 재배단계, 적실 및 유지단계)에서의 보광 시 효율 분석

- 군락 상부 및 내부 보광 광원에 따른 작물 광합성과 광이용효율 분석을 위해 생육 단계별로 작물을 배치하여 광추적 시뮬레이션을 진행하였음
- 7월 하순에서 8월 초에 정식하는 겨울 작기의 재배 일정을 고려하여 작물 생육 단계를 월별로 나누어 9월 정식 후 생육기와 11월 착과기, 1월 성숙기의 총 3 단계에 대한 보광 효율을 분석하였음. 분석에는 각 월별 생육 단계를 대표하는 정식 후 30, 90, 140일 후의 파프리카, 토마토 3차원 모델을 이용하였음.
- 3차원 작물 모델은 3차원 벤로형 온실 모델 내부에 4구 암면 슬라브 정식을 기준으로 3.5 plants·m<sup>-2</sup>의 재식 밀도로 배치하였음.
- 군락 상부 HPS 광원 모델은 온실 바닥에서부터 3.5m 높이에 가로 1.6 m, 세로 4.0 m 간격으로 배치하였고, LED 군락 내부 광원은 개체가 완전히 성장하였을 경우 군락 중간에 위치하도록 파프리카는 암면 배지로부터 60cm, 토마토는 90cm 높이에 배치하였음.
- 광추적 시뮬레이션 상에서의 분석 대상 지역은 경상남도 함안군(동경 128.24°, 북위 35.23°)으로 설정하였으며, 3차원 공간 내 광 분포를 구현하는 과정에서는 천구의 광 분포를 나타낼 수 있는 대표적인 모델 중 하나인 CIE sky model (CIE, 2003; ISO, 2004)을 이용하였음.
- 외부 기상 상태는 비, 안개, 짙은 구름 등의 기상학적 요인이 존재하지 않는 맑은 날을 대변하도록 설정하였으며, 이 때 직사광과 산란광 비율은 6:4였음.
- 토마토와 파프리카 모두 HPS 상부 보광 방식이 LED 내부 보광 방식에 비해 높은 일 총 수광량 및 광합성량을 보였음.
- 생육 단계 진전에 따라 HPS 상부 보광과 LED 내부 보광 방식에 의해 증가한 일 총 수광량 및 광합성량은 더욱 큰 차이를 나타냄. 이는 온실 내에서 수직 방향으로 유인되는 재배 특성상 작물이 생육함에 따라 상부 보광 광원과의 거리가 가까워졌기 때문으로 생각됨.

<표 2.1.14> 온실 토마토의 생육단계 및 보광 방식에 따른 일 총 수광량 및 광합성량 분석

생육 단계 (DAT)	수광 (mol·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )				광합성 (g[CO <sub>2</sub> ]·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )			
	보광 없음	+HPS	+LED	+HPS, LED	보광 없음	+HPS	+LED	+HPS, LED
30	7.59	9.23	8.29	9.93	1.70	2.08	1.97	2.34
90	8.54	12.12	9.82	13.40	1.95	2.72	2.54	3.27
140	9.84	16.26	11.15	17.57	1.81	3.06	2.34	3.55

<표 2.1.15> 온실 파프리카의 생육단계 및 보광 방식에 따른 일 총 수광량 및 광합성량 분석

생육 단계 (DAT)	수광 (mol·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )				광합성 (g[CO <sub>2</sub> ]·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )			
	보광 없음	+HPS	+LED	+HPS, LED	보광 없음	+HPS	+LED	+HPS, LED
30	3.76	4.27	4.06	4.57	0.92	1.03	1.00	1.09
90	4.09	5.19	4.97	6.08	1.36	1.69	1.59	1.87
140	5.52	7.07	6.75	8.30	1.76	2.31	1.94	2.46

나, 작물의 재식 밀도에 따른 보광 효율 분석 및 적정 보광 수준 도출

- 재식 밀도에 따른 시설과채류 온실 내 보광 효율을 분석하기 위해 파프리카와 토마토의 최종 생육 단계에서의 재식 밀도 변화에 따른 보광 효율을 분석하였음.
- 재식 밀도에 따른 보광 효율에 대한 차이가 가장 크게 나타나는 생육 후기를 기준으로 하여 정식 140일 후의 파프리카와 토마토 3차원 모델을 3구, 4구, 5구 암면 슬라브 정식 형태로 3차원 온실 모델 내부에 배치한 후 광추적 시뮬레이션을 통해 재식 밀도의 변화에 따른 균락 상부 및 내부 보광의 효율에 대해 각각 분석하였음.
- 분석에 사용된 3, 4, 5구 암면 슬라브 정식 시 재식 밀도는 각각 2.6, 3.5, 4.4 plants·m<sup>-2</sup> 였음.
- 균락 상부 HPS 광원 모델은 온실 바닥에서부터 3.5m 높이에 가로 1.6 m, 세로 4.0 m 간격으로 배치하였고, LED 균락 내부 광원은 개체가 완전히 성장하였을 경우 균락 중간에 위치하도록 파프리카는 암면 배치로부터 60cm, 토마토는 90cm 높이에 배치하였음.
- 광추적 시뮬레이션 상에서의 분석 대상 지역은 경상남도 함안군(동경 128.24°, 북위 35.23°)으로 설정하였으며, 3차원 공간 내 광 분포를 구현하는 과정에서는 천구의 광 분포를 나타낼 수 있는 대표적인 모델 중 하나인 CIE sky model (CIE, 2003; ISO, 2004)을 이용하였음.
- 외부 기상 상태는 비, 안개, 짙은 구름 등의 기상학적 요인이 존재하지 않는 맑은 날을 대변하도록 설정하였으며, 이 때 직사광과 산란광 비율은 6:4였음.
- 파프리카 및 토마토의 재식 밀도에 따른 일 총 수광량 및 광합성량을 분석한 결과, 토마토와 파프리카 모두 재식 밀도가 증가함에 따라서 수광 및 광합성이 감소하였음.
- 파프리카의 경우 토마토보다 재식 밀도에 따라서 훨씬 크게 수광량이 감소하였는데, 짧은 절간 및 밀도 높은 형태의 수관이 이러한 결과를 가져온 것으로 사료됨.

<표 2.1.16> 최종 생육 단계에서의 재식 밀도에 따른 온실 토마토의 보광에 따른 일 총 수광량 및 광합성량 분석

재식 밀도	수광 (mol·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )				광합성 (g[CO <sub>2</sub> ]·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )			
	보광 없음	+HPS	+LED	+HPS, LED	보광 없음	+HPS	+LED	+HPS, LED
3구 슬라브	10.87	17.71	12.53	19.37	1.923	3.233	2.220	3.490
4구 슬라브	9.841	16.26	11.15	17.57	1.811	3.062	2.336	3.551
5구 슬라브	9.398	15.44	10.58	16.62	1.745	2.943	1.966	3.057

<표 2.1.17> 최종 생육 단계에서의 재식 밀도에 따른 온실 파프리카의 보광에 따른 일 총 수광량 및 광합성량 분석

재식 밀도	수광 (mol·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )				광합성 (g[CO <sub>2</sub> ]·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )			
	보광 없음	+HPS	+LED	+HPS, LED	보광 없음	+HPS	+LED	+HPS, LED
3구 슬라브	7.057	9.991	8.669	11.60	2.017	3.015	2.292	3.199
4구 슬라브	5.517	7.184	6.843	8.509	1.733	2.383	1.943	2.547
5구 슬라브	4.933	6.722	5.895	7.685	1.404	2.092	1.566	2.220

다. 파프리카의 줄기 유인 방식에 따른 보광 효율

- 시설 파프리카 재배 시 일반적으로 2줄기 유인 방식을 이용하여 파프리카의 수관이 V자 형태가 되도록 유도함. 그러나 단위 면적당 생산량 증대를 목적으로 파프리카를 3줄기 유인 방식을 이용하여 재배하기도 함.
- 파프리카의 3줄기 유인 시 보광 효율에 대해 분석하기 위해 파프리카와 토마토의 최종 생육 단계에서의 재식 밀도 변화에 따른 보광 효율을 분석하였음.
- 보광 효율에 대한 차이가 가장 크게 나타나는 생육 후기를 기준으로 하여 정식 140일 후의 파프리카와 토마토 3차원 모델을 3구, 4구, 5구 암면 슬라브 정식 형태로 3차원 온실 모델 내부에 배치한 후 광추적 시뮬레이션을 통해 재식 밀도의 변화에 따른 균락 상부 및 내부 보광의 효율에 대해 각각 분석하였음.
- 3차원 작물 모델은 3차원 벤로형 온실 모델 내부에 4구 암면 슬라브 정식을 기준으로 3.5 plants·m<sup>-2</sup>의 재식 밀도로 배치하였음.
- 균락 상부 HPS 광원 모델은 온실 바닥에서부터 3.5m 높이에 가로 1.6 m, 세로 4.0 m 간격으로 배치하였고, LED 균락 내부 광원은 개체가 완전히 성장하였을 경우 균락 중간에 위치하도록 암면 배치로부터 60cm 높이에 배치하였음.
- 광추적 시뮬레이션 상에서의 분석 대상 지역은 경상남도 함안군(동경 128.24°, 북위 35.23°)으로 설정하였으며, 3차원 공간 내 광 분포를 구현하는 과정에서는 천구의 광 분포를 나타낼 수 있는 대표적인 모델 중 하나인 CIE sky model (CIE, 2003; ISO, 2004)을 이용하였음.
- 외부 기상 상태는 비, 안개, 짙은 구름 등의 기상학적 요인이 존재하지 않는 맑은 날을 대변하도록 설정하였으며, 이 때 직사광과 산란광 비율은 6:4였음.
- 개체 총 엽면적은 2줄기 파프리카와 3줄기 파프리카에서 각각 평균 0.71, 0.88m<sup>2</sup> 였으며, 높은 엽면적으로 인해 수광량 및 광합성은 3줄기 유인 개체에서 다소 높았음.
- 보광을 하지 않은 경우 특히 2, 3줄기 유인에서의 광합성 값이 차이가 거의 나지 않았으나 HPS보광 시에는 3줄기 유인에서 개체당 광합성이 크게 증가하였음.
- 본 시뮬레이션 결과로 미루어 보아, 3줄기 유인의 경우 HPS 상부 보광이 내부 보광보다 더 효율적일 수 있음.

<표 2.1.18> 최종 생육 단계에서의 재식 밀도에 따른 온실 파프리카의 보광에 따른 일 총 수광량 및 광합성량 분석

줄기 유인 형태	수광 (mol·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )				광합성 (g[CO <sub>2</sub> ]·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )			
	보광 없음	+HPS	+LED	+HPS, LED	보광 없음	+HPS	+LED	+HPS, LED
2줄기 유인	5.517	7.184	6.843	8.509	1.733	2.383	1.943	2.547
3줄기 유인	6.156	8.390	7.358	9.591	1.752	2.611	1.955	2.772

## 2-2. 제 1 협동과제: 장기재배용 보광 광원의 온실 현장 실증

### 1). 장기재배용 보광 광원의 온실 현장 실증

#### (1) 연구 목적

본 연구는 장기재배용 보광 광원의 온실 현장 실증을 위하여 현장 실증을 위한 보광 온실 구축하고 이를 통하여 작물의 생육 단계 및 재배 형태에 따른 보광 효과 비교 분석하기 위하여 실시하였다.

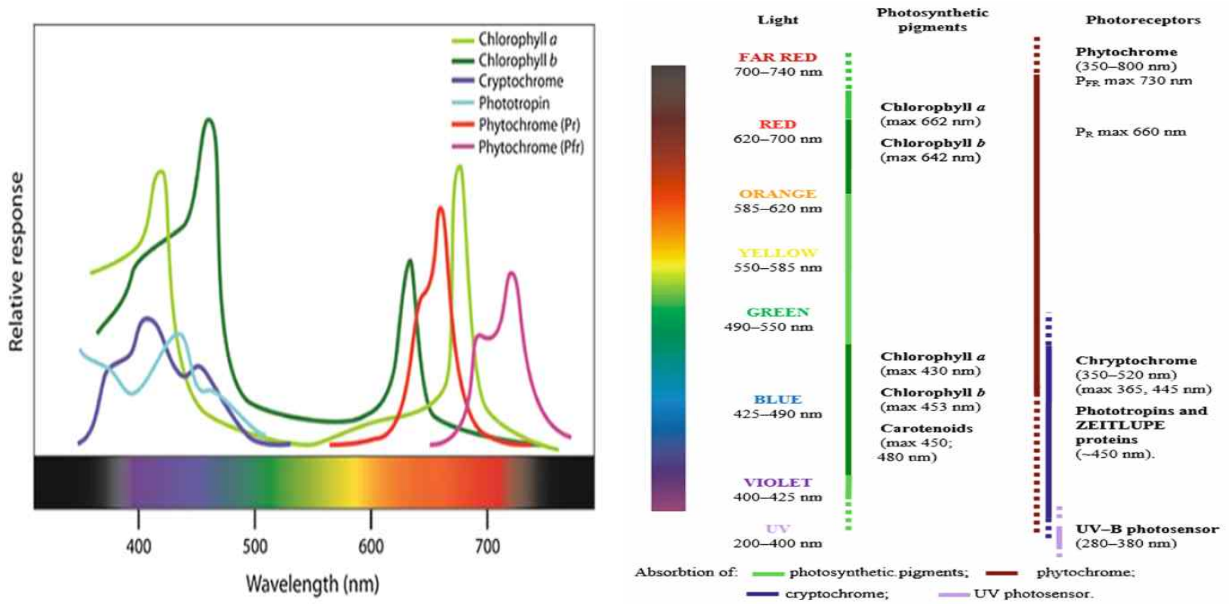
#### (2) 광에 의한 작물의 생리 반응

식물은 광합성 작용을 통하여 동화 산물을 생산하며, 이를 통하여 생육·성장·발달 과정이 진행된다. 광합성 작용에는 온도, 광, CO<sub>2</sub>가 관여하며 광합성을 최대화하는 생육 환경 조성을 통한 수량 증진, 품질 향상이 가능하다.

<표 2.2.1> 파장별 작물에 미치는 영향(Gupta & Agarwal, 2017)

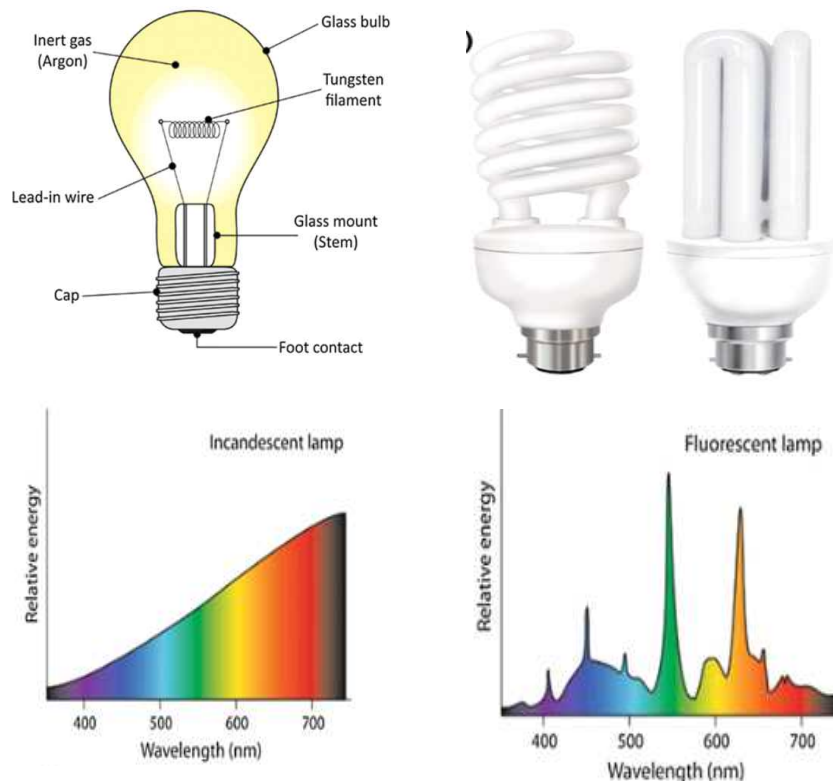
명칭	영역	효과
UV-C	200~280	강한 에너지로 인하여 작물에 해로운 영역. 대부분의 UV-C는 오존층에 의하여 흡수되어 지표면에 도달하지 않음.
UV-B	280~315	작물에 큰 피해를 입히지는 않으나 과잉 공급될 경우 착색을 저해하고 부족할 경우 세포 비대증을 유발함
UV-A	315~380	작물에 긍정적이지도 부정적이지도 않은 영역
UV/Vis	380~400	식물 색소체(클로로필, 카로티노이드 등)에 흡수되기 시작하는 영역
Visible Light	400~520	보라색, 청색, 초록색을 포함하는 영역으로 클로로필에 의하여 흡수되는 영역으로 광합성에 중요한 역할을 하며 충분할 경우 영양생장이 촉진됨
	520~610	초록색, 노란색, 주황색을 포함하는 영역으로 다른 가시광선 영역에 비하여 상대적으로 적게 흡수되는 것으로 알려져 있음.
	610~720	빨강색을 포함하는 영역으로 식물에 가장 많이 흡수되는 것으로 알려져 있으며 식물의 발달의 전 과정(발아, 성장, 개화)과 광합성을 촉진시킴.
Far-red/ infrared	720~1000	화아분화(꽃눈형성)에 및 개화에 관여하는 영역
Infra-red	>1000 nm	열선 영역으로 빛에너지보다는 열로 식물체에 영향을 줌

광원별 작물에 미치는 영향에는 차이가 있는데 이는 식물 체내에 있는 엽록소가 서로 다른 광을 흡수하기 때문이다. 적색광 청색광은 엽록소 a, b에 가장 많이 흡수되는 영역으로 광합성에 큰 영향을 주는 파장으로 식물 생육에 반드시 필요하다고 알려져 있다. 작물별 최적 파장 구명을 위한 연구는 전 세계적인 규모로 진행되어 왔으며, 이에 따라 다양한 연구 결과가 보고되고 있다. 발광다이오드(Light emitting diode, LED)는 기존 고압나트륨등(High pressure sodium lamp, HPS lamp)에 비하여 광전환 효율이 우수하고, 발열이 적고 사용자가 광의 파장을 자유롭게 조절할 수 있어서 식물공장에 많이 이용되고 있다. 청색광(300~400), 적색광(610~720)의 비율이 2:8일 때 작물 생육에 적합하다고 알려져 있으나, UV, 적외선 등을 추가하여 작물의 숙기를 조절하거나 당도, 기능성 물질 함량등을 증진시키는 연구들이 진행되고 있다.

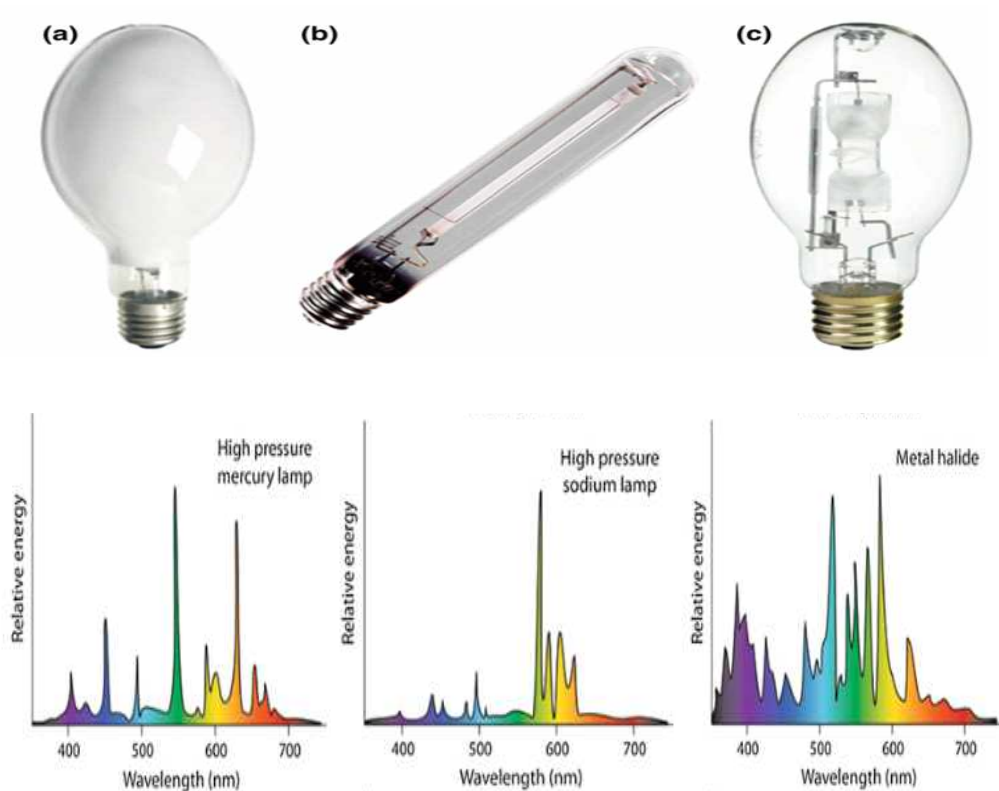


<그림 2.2.1> 엽록소별 흡수 파장

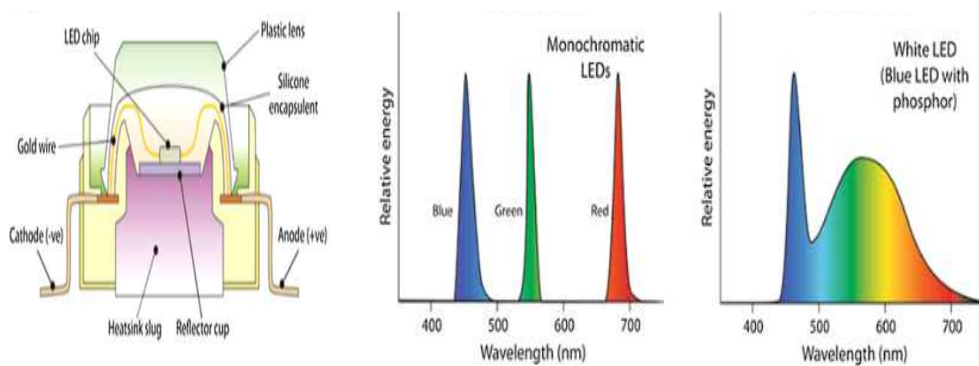
시설재배에서 가장 많은 수출액을 차지하는 파프리카는 8~10월 중에 정식하여 다음 해 6~7월까지 재배하는 연중재배를 가장 많이 실시하고 있다. 이는 첫 화방이 저온·약광기인 12월에 발생하게 되는데, 초기 생육 환경 불량으로 인하여 생육·착과가 지연되거나 낙화 현상이 발생하기 때문에 작물의 초기 생육 환경을 개선하는 것은 매우 중요하다. 시설 내에는 피복재, 먼지, 골조 등으로 인하여 입사되는 태양광의 양이 감소하게 된다. 광 환경 개선을 위하여 온실 내 보광 시설을 설치하는 사례가 증가하고 있으며, 광원의 종류와 특성이 다양하기 때문에 사용하려는 목적에 따라서 다른 조명 장치를 설치하여야 한다.



<그림 2.2.2> 백열등 및 형광등의 구조 및 분광특성

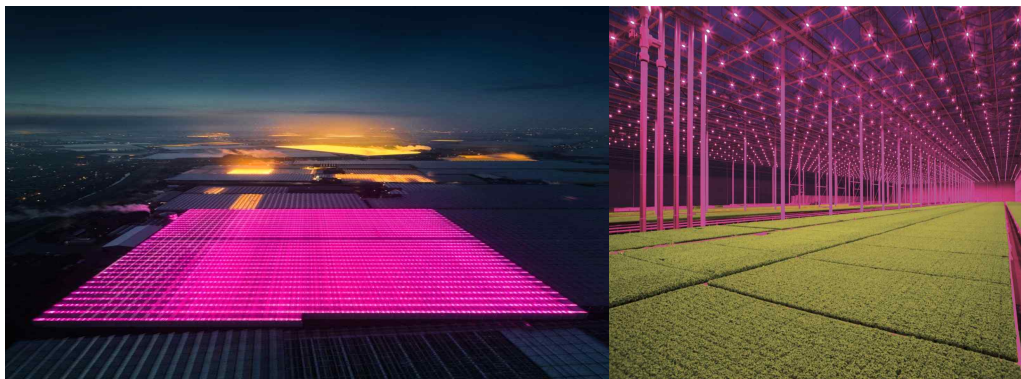


<그림 2.2.3> 수은등(a), 나트륨등(b), 메탈할라이드(c)의 형태 및 분광 특성



<그림 2.2.4> LED 구조 및 분광특성(청색, 녹색, 적색광 및 백색 LED)

네덜란드에서는 10~3월 시설 내 보광을 적극적으로 활용하고 있으며, 주로 고압나트륨등, LED를 사용하고 있으며 보광 기술 선도국 자리를 유지하고 있다.

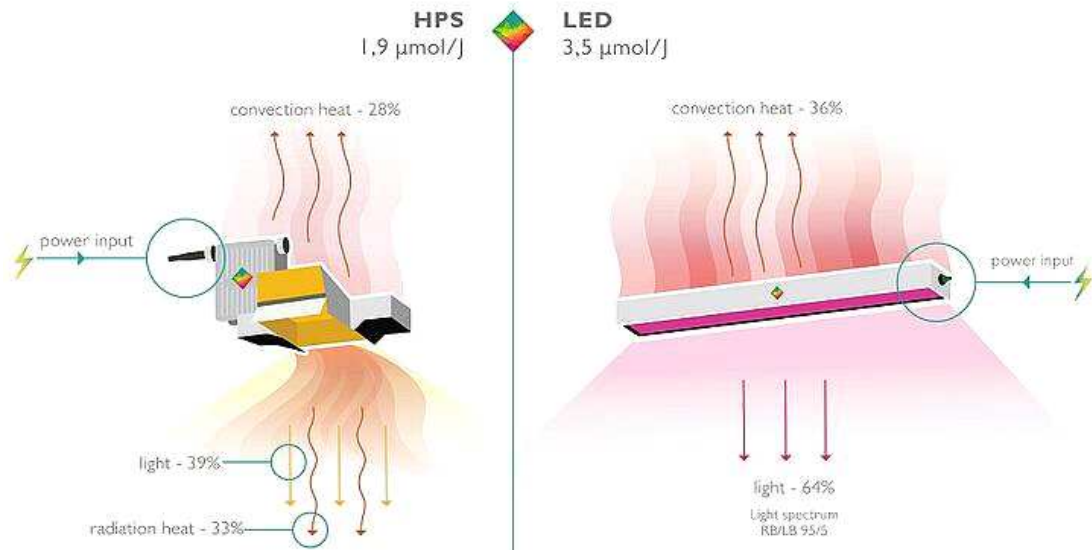


<그림 2.2.5> LED 조명 온실적용 사례(네덜란드)

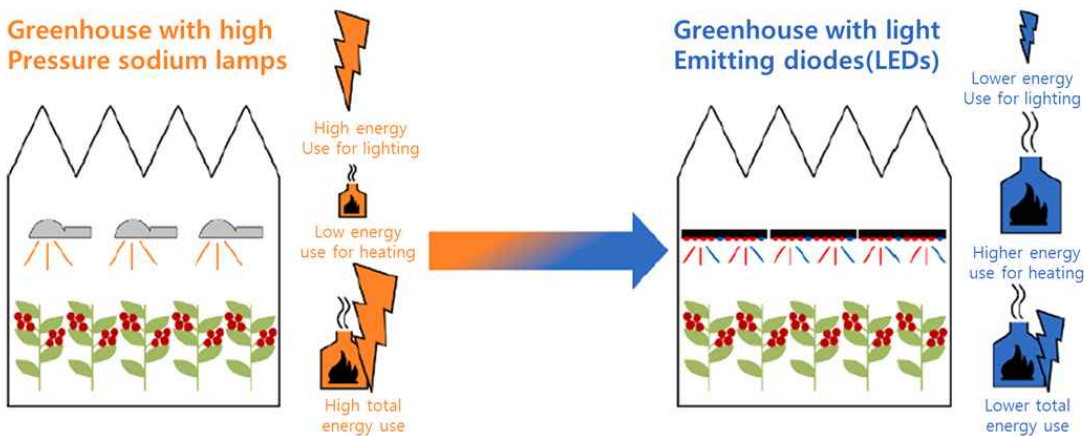


(3) 보광에 따른 온실 내 열 균형

조명기구는 작동에 따라서 열, 빛이 동시에 발생하는데, 이 때 발생한 열은 온실 내부에서 공급되어 가온이 필요한 겨울철에 작물에 도움을 줄 수 있다. 열선이 다량 발생하는 고압나트륨등의 경우 작물의 성장점, 앞에 직접적인 온도 전달이 가능하여 겨울철 돌발성 저온 피해 예방책으로 사용될 수도 있다. 이처럼 보광 시설을 보조 에너지원으로 사용하는 것은 가능하나 다른 가온장치(온수, 온풍, 방열 등)에 비하여 열전환 효율이 떨어지므로 사용에 주의가 필요하다.



<그림 2.2.6> 고압나트륨등과 LED의 열 균형(Hortibiz.com)



<그림 2.2.7> 고압나트륨등, LED 보광에 따른 에너지 소비량 변화(Katzin, 2021)

LED등을 이용할 경우 동일한 광을 공급하는데 필요한 에너지량은 40% 감소하나 보온을 위한 에너지가 9~49%가량 증가하며, 전체 에너지 투입량은 10~25% 가량 감소하는 것으로 보고된 바 있으나(David Katzin, 2021) 국내에서 보광 시설 사용에 따른 온실 내 에너지 균형 및 경제성 분석은 진행된 바 없어서 추가 연구가 필요하다.

(4) 재료 및 방법

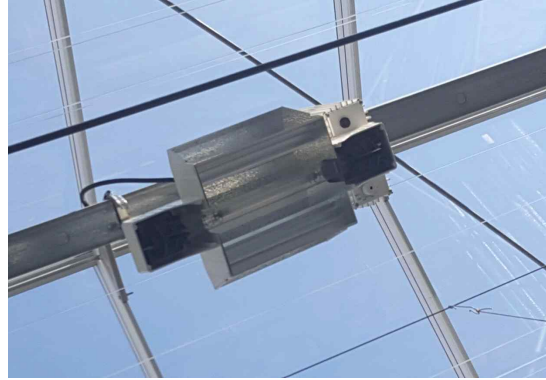
가. 현장 실증 온실 구축

○ 실험 온실

보광 광원별 줄기유인 주수에 따른 작물 재배효과를 비교하기 위하여 10월 26일부터 2021년 5월 25일까지 경상남도 함안에 위치한 국립원예특작과학원 시설원예연구소 (35.2°N, 128.4°E)의 벤로형 유리온실(폭 8.4m, 길이 20m, 높이 5.5m)에서 수행되었다.



천창 자동 개폐 장치



보광 장치(고압 나트륨등, 1000W)

<그림 2.2.8> 온도 제어를 위한 천창 자동 개폐 장치 및 보광 장치



<그림 2.2.9> 파프리카 재배 온실

<표 2.2.2> 재배 온실의 규격 및 작물 재식 밀도

재배 작목	폭 × 길이(m)	높이(m)	작물 재식 밀도
파프리카(2동)	8 × 35	5.6	3.5 plants·m <sup>-2</sup>





○ 온실 내 환경 정보 측정 및 수집

온실 내 환경 측정은 표 3-3에 따라 진행하였으며 각각의 센서는 온실 내부 중앙에 고정 한 뒤 재배 기간 동안 상시 측정하였다. 센서값의 안정화를 위하여 상시전원을 공급하였으며, 전력 차단에 의한 데이터 손실을 방지하기 위하여 각 센서 및 데이터 로거의 전원 장치에 무정전 전원 공급장치(Uninterruptible Power Supply system, UPS)를 설치하였다.

<표 2.2.3> 온실 환경 측정 항목

측정 항목		상세 항목	측정 간격
광( $W \cdot m^{-2}$ )		최대/최소/평균 내·외부	측정 간격 : 실시간 저장 간격 : 10분, 1시간, 1일
온도( $^{\circ}C$ )	기온	최대/최소/평균	
	지온	최대/최소/평균	
상대습도(%)		최대/최소/평균	
CO <sub>2</sub> (ppm)		최대/최소/평균	
전력 소모량(J)		측정값	

<표 2.2.4> 온실 환경 정보 측정용 센서

측정 항목	주요 사양		제조사
 온·습도센서 (111N&222N)	온도	범위: $-40-60^{\circ}C$ 오차: $\pm 0.3^{\circ}C$ ( $-20-40^{\circ}C$ ) $\pm 0.5^{\circ}C$ ( $-40-60^{\circ}C$ )	JIC
상대 습도	범위: 0-100% 오차: $\pm 3\%$ (0-90%) $\pm 5\%$ (90-98%)		
 일사량 센서(CMP11)	파장: 285-2800nm 일사량: $0-4000 W \cdot m^{-2}$ 감도의 온도영향: $<1\%$ ( $-10-40^{\circ}C$ )		Kipp&Zonen
 CO <sub>2</sub> 센서(GMT222)	측정범위: 0-2000ppm 오차: $\pm(1.5\% \text{ of range} + 2\% \text{ of reading})$		Vaisala
 광센서(LI190R)	파장: 400-700nm 선형성%: $0-10,000 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 오차: $\pm 5\%$		Campbell Scientific -LICOR

온실 내 환경 센서의 오차 범위 및 오류값을 확인 한 후 검·교정 절차를 실시하였으며, 검·교정이 불가능한 경우는 새로운 센서로 대체하여 실시하였다. 생육 환경 데이터(온·습도, 광, CO<sub>2</sub>)의 수집 및 저장은 CR1000(Campbell scientific, USA)을 이용하였으며, 5초에 1회 측정된 평균값을 10분, 60분, 1일 간격으로 연구소 내 별도의 서버에 저장하였다.

○ 온실 내 환경 제어

온실 환경 제어는 온실 내 설치된 온도센서(111N&222N, Jaunterting Int., Taiwan)를 기준으로 주간(06-18시)의 경우 천창 개폐 설정 온도(25/15°C)에서 ±0.5°C 이상 차이가 있을 경우 천창의 10%가 개폐되고, 60초 대기후 다시 온도를 측정하여 5%씩 추가로 개폐되도록 설정하였다, 야간(18-06시)의 경우 해충 유입을 방지하기 위하여 항상 닫힌 상태를 유지하였다. 동절기 난방의 경우 온실 내 온도가 설정온도(20°C)에서 2°C 이하로 떨어졌을 때 온수 난방을 120초 실시한 후 60초 대기한 후 다시 작동하도록 설정하였으며, 별도의 냉방 시설을 가동하지 않았다.

<표 2.2.5> 온실 환경 제어 방식

제어 항목	제어 내용	비고
천창	설정 기온 >Δ 5°C ON / OFF 5% ON/OFF 동작 후 120초 대기	24h 중 주/야 모드 설정하여 야간 냉해 방지
차광 스크린		
보온 스크린		
측면 스크린		
난방 벨브	설정 배관 온도 대비 ON / OFF	

환경 모니터링 시스템을 이용하여 설정 온도에서 5°C 이상 차이가 날 경우 별도로 기록하였으며, 갑작스러운 우천, 돌풍을 대비하여 긴급 천창 폐쇄 기능을 구비하였다. 온실 내에 설치된 천창, 차광, 보온, 측면, 난방 시스템은 설정값에 따라 자동으로 동작하였으며, 동작/정지 기록은 별도의 서버에 기록하였다.



<그림 2.2.10> 온실 환경 모니터링 · 제어 프로그램

관수제어는 소량 정밀관수가 가능한 Aqua-Z(신한에이텍, 대한민국)를 설치하였으며, 급액관, dri퍼는 새로 설치한 후 무작위 20개 dri퍼를 선정하여 회당 급액량 차이가 ±10ml 내외가 되도록 조정하였다.



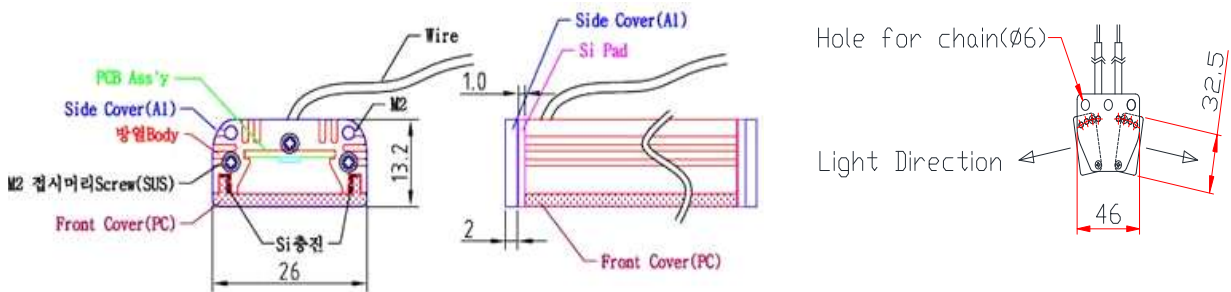
<그림 2.2.11> 파프리카 양액 제어기 및 공급 장치

○ 보광 장치(HPS, LED 설치)

온실 주요 보광 장치는 고압나트륨등(HPS)이 주류를 이루고 있으나, 열로 손실되는 에너지 양이 너무 많고, 조명기구의 단가가 비싸기 때문에 상대적으로 에너지 효율이 좋고 설치 비용이 저렴한 LED으로 교체되는 추세이다. 온실 내에 설치되는 조명 장치 중 전조용 장치는 5-20W정도의 출력을 보이며 보광용 장치는 350-1,000W 정도로 고출력을 요구한다. 2015년도 이후로 500W 이상의 고출력 LED장치가 상용화되면서 온실 내 조명기구로 사용되기 시작하였다. LED 조명 기구의 장점은 다양하지만 그 중 무게가 가볍고 출력 조절이 용이한 점을 이용하여 식물체와 가깝게 위치시켜 높은 광을 공급하는 군락 내 보광이 시도되고 있다.



<그림 2.2.12> 온실용 보광 기구(LED(좌), 고압나트륨등(우))



<그림 2.2.13> 군락 내 보광용 LED 설계도

하지만 국내에는 군락 내 보광을 위한 LED 조명 장치와 설치 기술이 상용화되지 않았기 때문에 온실 보광에는 HPS를 이용한 보광 장치 혹은 전조용 LED 장치가 사용되고 있다. 군락 내 보광용 조명기구를 개발하고자 국내 LED 조명 업체를 통해 군락 내부 보광용 조명기구를 제작하였다. 개발한 군락 내 보광 장치에는 92W 평판형 LED가 양방향으로 배치되어 있다. 보광 장치는 온실 내에 와이어를 통해 거치할 수 있도록 제작하였으며, 작물의 생장점 높이에 맞춰 움직일 수 있도록 높이 조절 장치를 설치하였다.

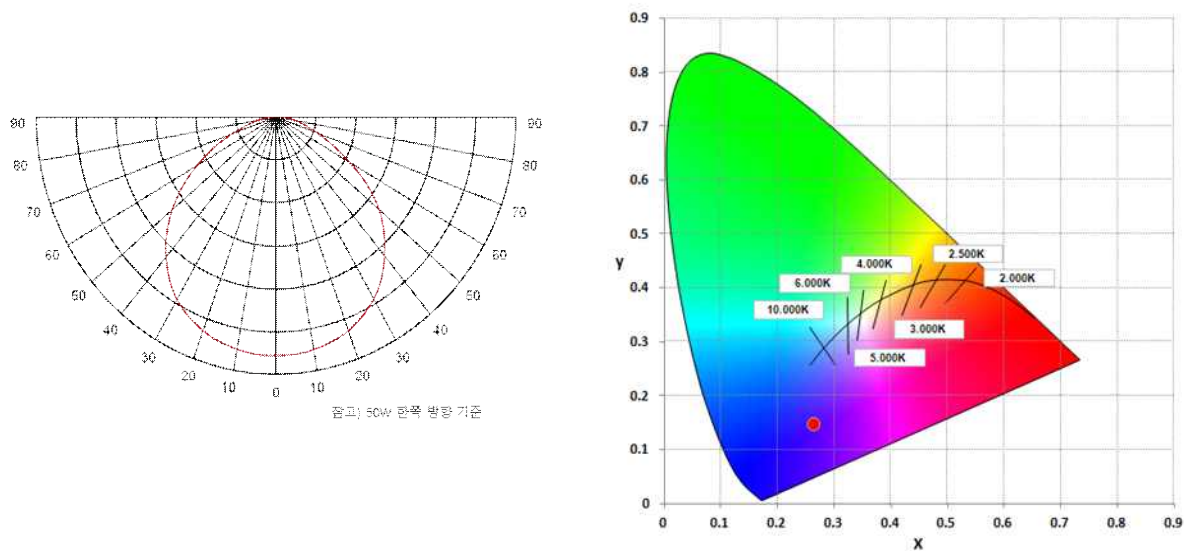
<표 2.2.6> 군락 내 보광용 조명 광원의 상세 사항

Model (Part No.)		-	H100Q		
Classification		Unit	SPECIFICATIONS		
General	Power Consumption	Wdc	92		
	Dimension	mm	1200(L)x46(W)x46(H)		
	Weight	kg	1.48		
	Working Temp.	oC	-25 ~ +40		
	Storage Temp.	oC	-30 ~ +80		
	Working Humidity	RH	20 ~ 95%		
	Storage Humidity	RH	10 ~ 95%		
	IP Rate / IK	-	IP66		
Optical	1) Efficacy	μmol/J	1.92		
	1) PPF	μmol/s	176.64		
	Beam Angle	FWHM	110o		
Electrical	Voltage Range	Vdc	75		
	Current Range	Adc	1.25		
Usage		-	Horticulture		

PPFD&PPD (μmol/m <sup>2</sup> /s)					
측정 거리	100mm	200mm	300mm	400mm	500mm
PPFD(400~700nm)	897.03	425.16	279.60	214.39	150.28
PFD(350~800nm)	905.80	428.27	281.81	215.85	151.57

조명의 파장은 백색 LED는 전체 출력의 50%, 나머지는 청색:적색 8:2로 방사되도록 설정 하였으며, LED칩은 3줄로 하여 각 색상이 서로 교차로 배열하여 균일한 광파장이 나타나도록 하였다. LED는 별도의 SMPS안정기를 설치하였으며 안전사고 방지를 위하여 배지 하단 부에 설치하여 조명과 연결하였다.

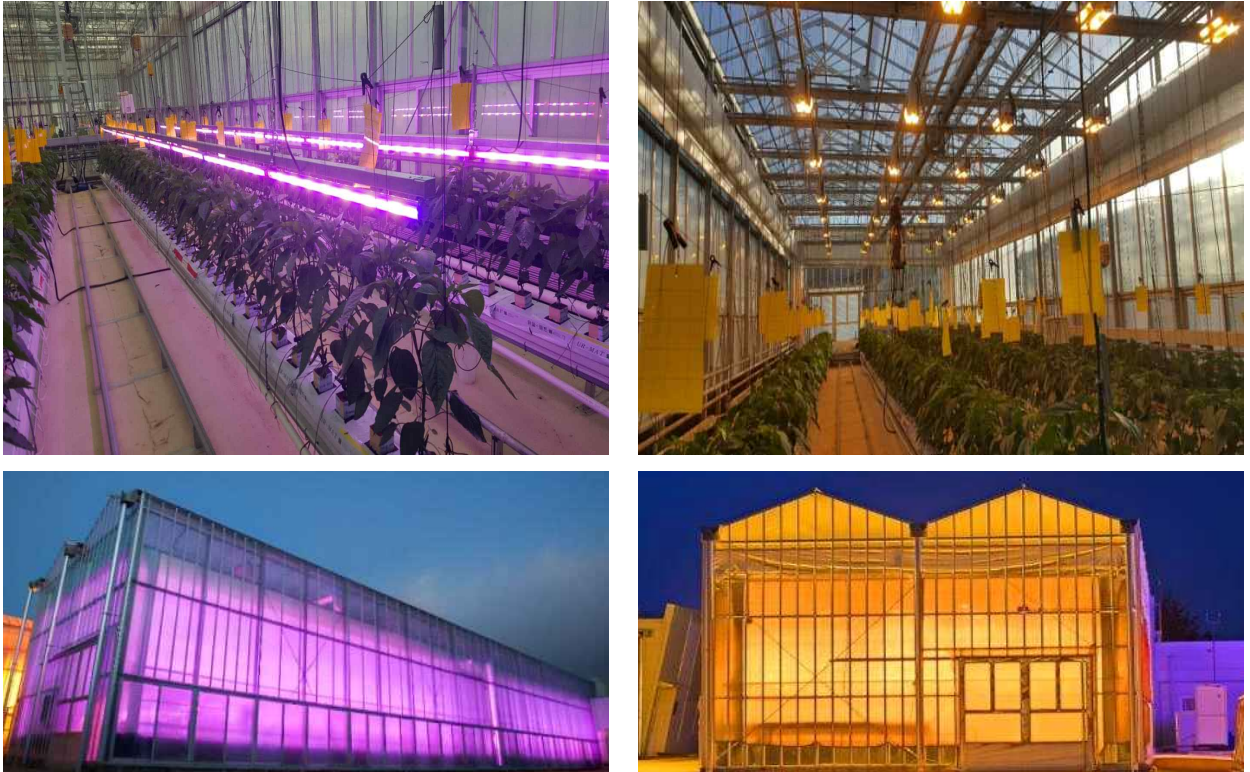


<그림 2.2.14> 군락 내 보광용 조명 광원의 배광 곡선 및 CIE 색상

고압나트륨등(HPS)는 상용 나트륨 조명(1000W DE, Dutch Lighting Innovations, Aalsmeer, The Netherlands)를 이용하였으며, 나트륨등은 측고 부분에 고정형으로 설치하였다. 온실 크기 및 광 분포 시뮬레이션 결과를 토대로 4\*8로 배치하였다. HPS의 안정기는 반사갯에 내장되어 있으며 조명 실시에 따른 순간전압강하 방지를 위하여 전압 강하보상장치를 설치하였다.



<그림 2.2.15> HPS 조명 및 반사갓



<그림 2.2.16> LED, HPS 보광 온실

나. 작물 재배 및 생육 조사

○ 작물 재배 조건

육묘실에서 4주간 재배한 파프리카(*Capsicum annuum* L., cv. Scirocco)를 전기전도도 (electrical conductivity, EC)  $1.8\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 의 표준 양액으로 포습된 암면 배지(SV75151/9, Hankuk URmedia, Seoul, Kor)에 4개체씩 정식하였으며, 온실 내 재식밀도는  $3.5\text{ plant}\cdot\text{m}^{-2}$ 였다. 작기 중 온실 내부의 일평균온도는  $20.9^{\circ}\text{C}$ , 상대습도는 40% 였다.

<표 2.2.7> 파프리카 육묘 세부 사항

파프리카(시로코)		규격	일자
배지	파종	암면 파종판(20*27mm, 240공, UR암면)	9월 15일
	육묘-가식	암면 큐브(60*60*55mm, UR암면)	
	정식	암면 매트(100*150*1000mm, UR암면)	10월 26일
육묘 위치		시설원예연구소 내 육묘 온실(8m*12*6.5, 유리)에서 자연광을 이용	

양액 관리는 08~15시 30분까지 90분 간격으로 5회/일(250ml/회) 급액 하였으며, 정식~

착과기에는 EC 1.8, 1그룹 착과 이후에는 EC 1.8에서 2.5까지 점진적으로 증가시켰다. 재배 기간 동안 유인, 적심, 병해충 방제 등의 관리 작업을 주기적으로 실시하였다. 작물 재배에 사용된 양액은 네덜란드 파프리카 배양액(Glasshouse Crops Research and Experiment Station, Naaldwijk, NO<sub>3</sub>-N-NH<sub>4</sub>-N-P-K-Ca-Mg = 215-17.5-38.4-254-162-33(mg/L))을 사용하였으며, 아래와 같은 성분비로 A, B액을 준비하여 양액기를 이용하여 급액 하였다. 여분의 드리퍼 3개의 급액량을 별도로 측정하여 일 총 급액량 모니터링을 실시하였다.



<그림 2.2.17> 파프리카 파종-육묘-가식

**【수경재배 배양액 처방서】**

<b>운영팀:</b> 논산시수경재배컨퍼런스	<b>문의전화:</b> 041-733-5959
<b>담당자:</b> 박종대	<b>팩스:</b> 041-733-9591
<b>농가명:</b> 김진현 님	<b>재배작물:</b> 파프리카
<b>주소:</b> 0	<b>생육시기:</b> 재배초기
<b>연락처:</b> 0	<b>배양액명:</b> 파프리카 배양액(PBG암면)
<b>재배방식:</b> 암면	<b>배양액 pH:</b> 5.5~6.5

**■ 검정결과** 단위 : ppm(mg/l)

구분	EC	pH	다량원소					미량원소					중탄산		
			NO <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub>	P	K	Ca	Mg	Fe	B	Mn	Zn		Cu	Mo
설정농도	2.15		217	17.5	38.6	254	190	36.5	0.84	0.32	0.55	0.33	0.05	0.05	
원수농도	0.41	7.8	2.4		0.2	0	28.7	3.8							0.0
시비농도			215	17.5	38.4	254	162	33	0.84	0.32	0.55	0.33	0.05	0.05	

**■ 배양액 조성결과 [ 1톤 100배 농축액 ]**

A 액		B 액	
질산칼륨	30.0 kg	질산칼륨	30.0 kg
질산칼슘(10수염)	88.1 kg	제1인산칼륨	17.0 kg
질산암모늄	3.6 kg	황산칼륨	
킬레이트철	0.7 kg	제1인산암모늄	
FE-DTPA(6%)	1.1 L	황산마그네슘	33.4 kg
		질산마그네슘	
		미량원소	
		붕산	186 g
		황산망간	173 g
		황산아연	148 g
		황산구리	20 g
		몰리브덴산나트륨	13 g
질산(60%)	1.0 kg ( 0.7 l )	질산(60%)	1.0 kg ( 0.7 l )

○ 본 배양액조성표는 금번에 의뢰한 원수 분석치에 한하며 임의적인 조제 및 변경을 절대 삼가하십시오.  
○ 정기적으로 배지(근권)의 산도 및 염농도를 점검한후 이상시 새로이 교정된 배양액을 공급하십시오.  
○ 기타 의문사항은 담당자에게 연락 바랍니다.

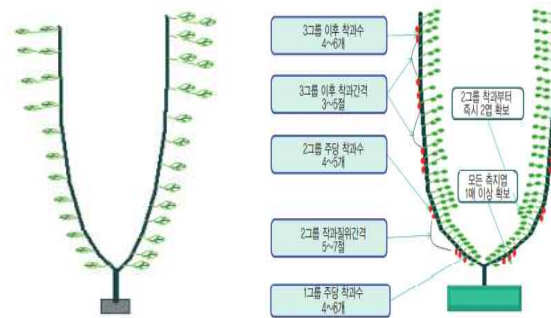
**제공 : 논산시 수경재배 컨퍼런스**

<그림 2.2.18> 수경재배 배양액 처방서



○ 작물 재배 방법

정식 후 분지된 줄기를 식물체당 2줄기, 3줄기 방식으로 유인하였다. 유인 처리에 따른 줄기 밀도는 2, 3줄기 처리구에서 각각 6.4, 9.6 stem·m<sup>-2</sup> 였다. 2줄기 유인 처리구는 관행 방식에 따라 2개의 줄기가 “V”자 형태의 수관을 나타내도록 전정하였으며(Jovicich 등 2004), 3줄기 처리구의 경우 분지된 줄기가 3개일 경우 3개의 줄기를 그대로 유인하였고, 2개일 경우 분지의 바로 다음 마디에서 분지된 줄기를 또 다른 주지로 하여 3줄기 형태로 유인하여 개체당 주지의 개수를 일정하게 유지하였다. 각 주지별로 정식 후 영양생장을 유지하기 위해 분지 위로 2번째 마디까지 화방을 적심했으며, 분지 위 3번째 마디부터 화실을 유지하였다.



<그림 2.2.19> 파프리카 유인 및 착과 방법

○ 작물 생육 측정

작기 중 생육 조사는 3주에 1회(총 7회), 과실 조사는 4주에 1회(총 5회) 실시하였으며, 과실 수확은 매주 1회 실시하였고 처리구별 적산 수량은 과실 조사 내용에 반영하였다. 파괴 조사는 1회에 10개체씩 실시하였으며. 연구소 내 3년 이상 작물재배 경력을 가진 연구원이 생육조사를 실시하였다. 조사 항목은 엽수, 엽면적, 초장의 비파괴조사 항목과 잎, 줄기, 과실의 생체중과 건물중의 파괴조사 항목으로 나누어 측정하였다. 과실 수확은 80% 이상 착색된 과실을 매 3일마다 수확하였고, 과실 생체중은 수확 직후 측정하였다. 과실 건물중은 자연순환식 건조기(HB503LF, Hanbaek Sci., Bucheon, Kor)를 통해 80℃에서 72시간 동안 건조 후 측정하였다. 수확한 과실은 상품과와 비상품과로 분류하였는데, 무게 100g 미만의 과실, 배꼽썩음과, 병과, 열과 및 기형과를 비상품과로 구분하여 분류하였다. 과실의 당도는 수확한 과실의 과피에서 태좌, 종자를 제거한 후 즙을 낸 후 휴대용 당도계(PAL-1, ATAGO, Tokyo, Japan)를 통해 3회 반복 측정하여 평균값을 취하였다.

<표 2.2.8> 생육정보 조사 내용 및 측정 기준

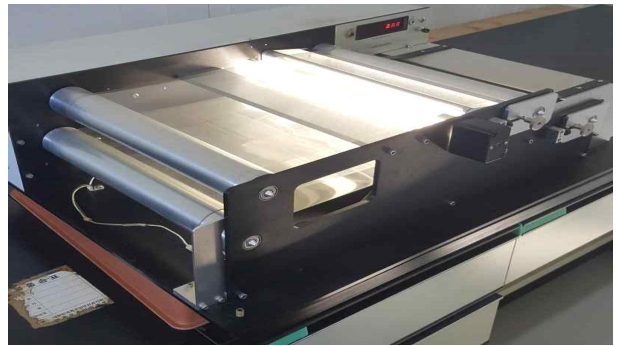
기초조사 항목(3 항목)			
	재식밀도	슬라브당 줄기 수	적심 절위

생육조사 항목(파괴조사, 14 항목)			
생육특성	초장	경경	엽장
	엽폭	엽수	절간수
	엽면적	생체중(엽중, 경중)	건물중(엽중, 경중)
과실특성	화방수	과중(생체중, 건물중)	개화수
	착과수	적과수	



드라이오븐(건물중 측정, 한백과학)



엽면적계(Li-3100, Li-COR)



당도계(PAL-1, ATAGO)



색차계(CR-400, Konica Minolta)



광합성 측정기(Li-6800, Li-COR)



EC, pH metmer(HI 9813-6, HANNA)

<그림 2.2.20> 생육조사를 위한 조사 장치

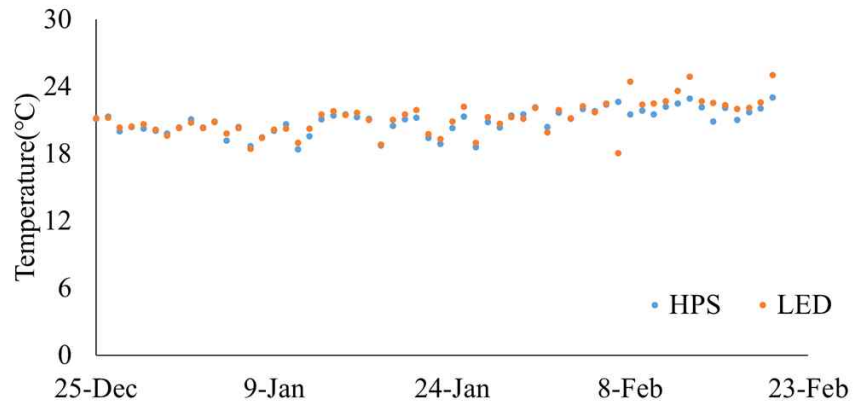
<표 2.2.9> 생육정보 조사 내용 및 측정 기준

측정항목	측정기준	단위	비고
재식밀도	1m <sup>2</sup> 면적당 작물의 재식주수	주/m <sup>2</sup>	
슬라브당 재식 주수	슬라브당 재식 주수	주/슬라브	
슬라브당 줄기 수	슬라브당 줄기 수	줄기수/슬라브	
초장	가장 긴 줄기의 길이 (근권에서 선단까지의 길이)	cm	
절간수	주당 절간의 수	개/주	
엽수	주당 잎의 수	개/주	
엽면적	주당 엽면적	cm <sup>2</sup> /주	
최대 엽장	각 샘플 주에서 가장 큰 잎의 길이	cm	
적엽량	1회 적엽시 주당 적엽량	g/주	
적심 절위	지면에서 적심한 부분까지의 절간수	번째	
주당 화방수	주당 화방의 수	개/주	
평균 과중	과일(상품과)의 평균 무게	g/개	
상품 과중	수확한 과실 중 상품과의 중량	kg/m <sup>2</sup>	
수확량	m <sup>2</sup> 당 수확량	kg/m <sup>2</sup>	
입에 부정아 발생 여부	입에 부정아 발생시 1로, 발생하지 않았을 경우 0으로 표기	0, 1	
화방번호	화방 형성 순서	번째	화방별 측정
착화절위	지면에서 화방이 생긴 부분까지 절간 수	번째	
경경	첫 화방 바로 아래 줄기 굵기 측정	mm	
화방별꽃수	한 화방에 핀 꽃의 개수	개/화방	
생장점에서 화방 거리	생장점에서 가까운 개화 화방까지의 거리 측정	cm	
착과수	화방에 열매가 달린 개수	개/화방	
적과수	화방에서 적과한 열매 개수	개/화방	

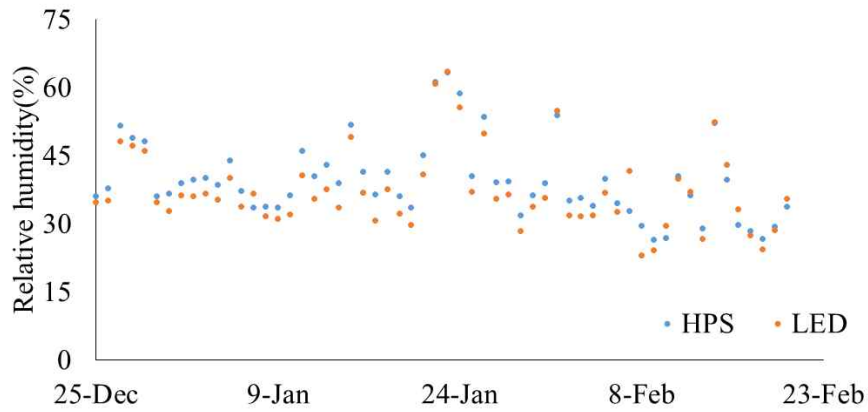
(5) 실험 결과

가. 파프리카 재배 온실 환경

일 평균 온도, 습도는 균일하게 관리하였으며, 재배 기간 동안 온실 외부 평균 일적산광량은 13.68 mol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>였다. 보광은 고압나트륨등을 이용하여 6시부터 22시까지 16시간의 광주기로 2020년 12월 1일부터 실험 종료일까지 처리하였다. 보광등에서 조사된 유효광합성광양자속밀도(photosynthetic photon flux density, PPFD)는 온실 바닥에서부터 1.0m 높이에서는 55.4 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 2.0 m 높이에서는 179.4 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>이었으며, 보광 처리 하에서 일사량과 보광량을 합한 일적산광량은 2.0 m 높이 기준 측정 시 가장 높은 날과 낮은 날 각각 29.2 와 11.7 mol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>으로 유지되었다.



<그림 2.2.21> 처리구별 온실 내 온도 변화



<그림 2.2.22> 처리구별 온실 내 습도 변화

나. 생육 조사 결과

생육 조사(7회), 과실조사(5회)는 아래와 같은 양식으로 처리구별(대조구, LED, HPS)로 진행되었으며, 각 생육조사는 동일한 날, 동일한 조사원에 의하여 실시되었다.

<표 2.2.10> 생육 조사 결과(2차, 2.8.)

A4-대조구, 2줄기 유인															
	경경 (mm)	초장 (cm)	전엽장 (cm)	엽장 (cm)	전비 (cm)	개화수 (개)	착과 (개)	엽면적 (mm <sup>2</sup> )	생체중				건물중		
									측지1 엽수 (개)	측지2 엽수 (개)	경중 (g)	과중 (g)	엽 (g)	경중 (g)	과중 (g)
1	19.53	172	13	24	13	6	3	10215.45	269.8	220.2	454.2	29.8	75.3	83.5	2.1
2	17.42	153	13	22	13	7	3	9855.88	201.6	190.9	364.3	32.9	60.1	63.9	2.2
3	18.42	139	16	23	14	5	2	8001.32	207.3	138.7	272.8	54.3	47.3	45.2	3.1
4	16.75	158	14	22	13	5	5	9782.79	224.5	162.4	308.4	182.5	54.6	52.8	17
5	19.37	151	12	22	13	7	2	10757.46	231.1	250.1	397.2	221.4	78.5	74.2	21.2
6	16.43	154	11	22	12	8	7	9381.37	197.9	153.1	301.2	631.3	55.1	51.4	51
7	18.53	143	11	22	13	5	5	9084.75	100.9	157.9	340.5	29.3	62.9	64	2.6
8	16.33	151	14	22	13	4	4	7389.29	167.5	205.2	236.9	483.4	40.8	37.1	43.5

A4-나트륨등, 2줄기 유인															
	경경 (mm)	초장 (cm)	연평균 (cm)	연면적 (cm)	피면적 (cm)	개화수 (개)	착과 (개)	엽면적 (mm <sup>2</sup> )	생체중				건물중		
									측지1 엽수 (개)	측지2 엽수 (개)	경중 (g)	과중 (g)	엽 (g)	경중 (g)	과중 (g)
1	20.01	142	11	25	14	6	5	8012.6	207.5	178	352.1	122.3	65.7	70.2	10.1
2	20.52	140	11	26	14	6	5	8375.18	192.7	262.8	428.2	97	72.8	89	8.3
3	20.22	145	12	21	12	7	5	8643.18	113.7	198.9	441.7	121	76.7	94.5	10.6
4	19.22	142	16	23	12	9	8	8582.78	194	194.9	445.7	83.7	74.1	95.1	7.5
5	19.6	142	12	26	15	7	4	7975.66	186.5	192.2	365.4	299.2	64.3	75.8	23.3
6	21.01	141	12	27	16	7	7	9234.65	221.7	226.1	440.7	141.9	83	87.7	10.5
7	21.3	143	12	24	15	8	7	8645.37	233.2	117.5	454.3	94.5	78.6	98.7	8.5
8	21.46	142	11	24	15	7	7	9076.24	206	227.4	446.3	174.6	79.2	90.2	14.6

<표 2.2.11> 과실 조사 결과(3차, 4.3.)

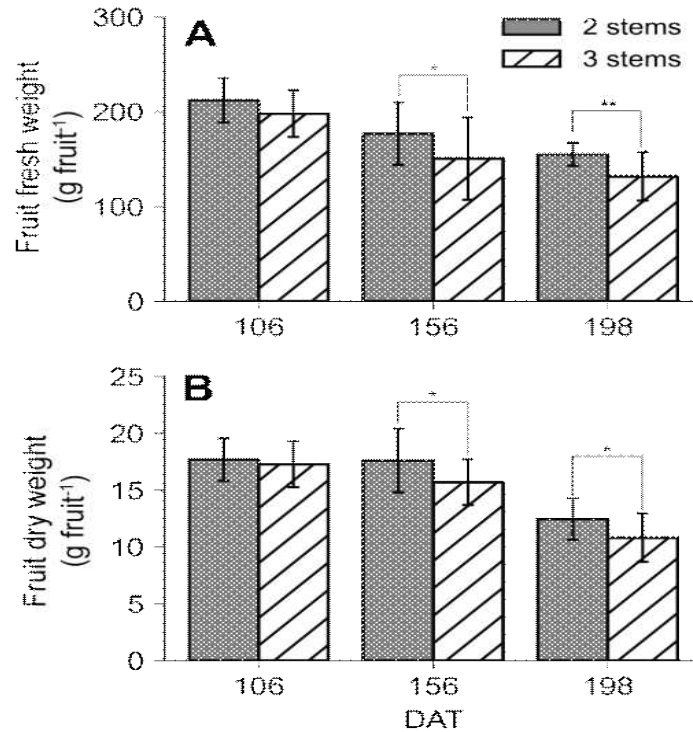
A4-나트륨등 2줄기 유인 과실조사						A4-대조구, 2줄기 유인 과실조사					
	과고 (cm)	과폭 (cm)	당도 (brix)	과중 (g)	건물중 (g)		과고 (cm)	과폭 (cm)	당도 (brix)	과중 (g)	건물중 (g)
1	84.16	86.54	8.4	240.2	17.9	1	86.12	77.16	9.2	191.9	15
2	74.43	77.64	7.5	171.1	19.7	2	79.18	67.15	8.4	149.5	18.7
3	85.48	82.25	8.2	239.2	15.3	3	90.2	77.31	8.2	198.3	18.9
4	88.92	68.96	7	165.4	17.6	4	95.27	66.74	8.6	151.2	18.4
5	87.18	88.8	8.7	237	21.8	5	75.56	75.96	8.2	172.9	22
6	81.93	82.78	7.9	176	21.7	6	93.42	74.95	8.6	235	16.9
7	93.43	87.76	8.6	243.4	14	7	97.43	70.57	8.4	186.9	18.9
8	81.68	75.98	7.8	191	13.9	8	83.44	66.22	8.3	136.6	16.8
9	81.58	72.96	8.2	159.3	21.6	9	93.95	76.91	8.2	200	19.3
10	85.48	80.03	7.4	233.3	19.3	10	111.56	72.95	7.8	202.4	15.7
11	85.85	82.45	7.1	198.2	22.3	11	91.7	82.34	8.5	226	12.4
12	88.09	73.52	8.1	152.2	18.9	12	98.53	83.25	8.4	235.4	17.2
13	81.13	77.16	7.5	201.8	20.9	13	91.34	82.96	8.3	216.4	20.9
14	82.69	77	7.9	186.3	15.9	14	85.66	72.48	7.7	174.6	17.1
15	99.68	75.84	7.6	194.3	17.9	15	92.71	79.06	7.3	215.8	16.9
16	78.71	70.81	7.1	140.7	13.4	16	97.74	72.67	7.7	185.7	17.8
17	88.75	80.45	7.1	230.2	15.1	17	85.88	75.51	8.8	187.1	14.1
18	72.04	74.97	8	154.9	16.1	18	82.65	72.89	8.9	192.3	16.7
19	76.45	75.87	8	175.6	15.8	19	91.87	77.72	8.2	228.5	20.2
20	76.25	75.47	7.9	148.6	13.5	20	81.26	73.94	7.9	163	12.3
전체	수확 주수	전체수	전체 무게	비상품과 수	비상품과 무게	전체	수확 주수	전체수	전체 무게	비상품과 수	비상품과 무게
	102	218	33.3				52	94	16.66		

다. 재배 시험 결과

초장은 2줄기 유인 처리구에 비해 3줄기 유인 처리구에서 유의적으로 짧았고 마디수 및 엽수는 2줄기 유인 처리구에 비해 3줄기 유인 처리구에서 유의적으로 증가했다. 엽면적 및 기관별 건물중은 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 과실 생체중 및 건물중은 모든 처리구에서 생육단계에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 3줄기 유인 처리구가 2줄기 유인 처리구에 비해 낮은 수치를 보였다. 3줄기 유인 처리구의 상품과율은 95.4%로 2줄기 유인 처리구의 93.6%에 비해 높았다. 총 수확량은 3줄기 유인 처리구에서 30.2% 높게 나타났다. 결론적으로 온실 파프리카의 3줄기 유인 재배는 적정 수준의 영양생장을 유지함으로써 과실 생산량에 긍정적인 영향을 미쳤다고 할 수 있다.

<표 2.2.12> 줄기 유인 처리에 따른 건물중

처리	건물중 (g)			
	잎	줄기	과실	전체
2 줄기유인	126.68±36.61	158.3±27.34	102.38±12.74	387.37±71.47
3 줄기 유인	109.06±12.99	142.03±12.68	100.75±15.32	351.85±22.44
유의성	ns	ns	ns	ns

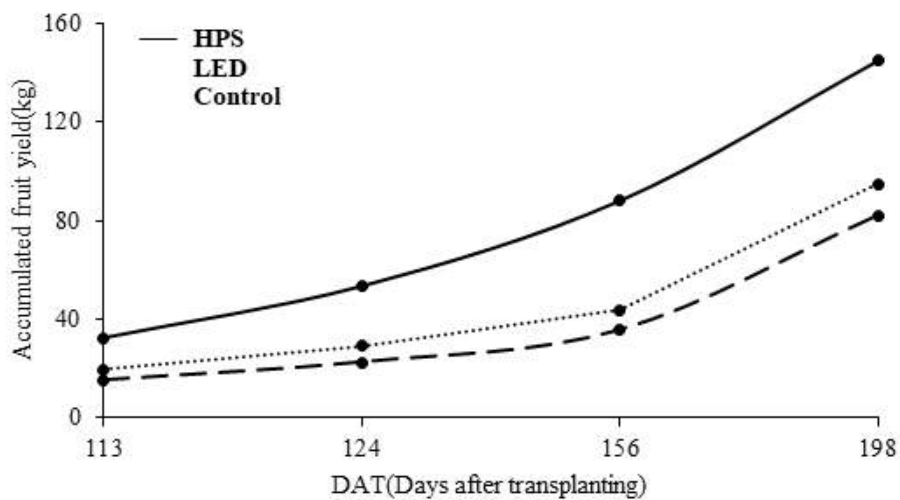


<그림 2.2.23> 줄기 유인 처리에 따른 파프리카 과실의 건물중

보광 처리에 따른 수량의 증가는 조명기구에 따라 차이가 있었는데, 대조구 3줄기에서 가장 낮은 단위 면적당 생산량(82.07kg)을 보였으며, 그 이후로 LED 2줄기(85.06), 대조구 2줄기(86.69), LED 3줄기(94.67), 나트륨등 3줄기(144.92), 나트륨등 2줄기(146.8) 순으로 나타났다. 나트륨등에서 무처리 대비 78.9%의 우수한 수량 증가 효과를 보였으며, 생육 후기로 갈수록 단위 면적당 수량의 편차는 점점 커지는 추세를 보였다.

<표 2.2.13> 보광 처리구에 따른 누적 수량 변화

단위면적당 수확량 (kg/m <sup>2</sup> )		정식 후 일수(일)				
처리구		113일	124일	156일	198일	수량 대비 (%)
대조구	2줄기	16.66	21.65	31.67	86.69	+5.6
	3줄기	15.2	22.52	35.59	82.07	-
나트륨등	2줄기	33.3	65.06	80.18	146.8	+78.9%
	3줄기	32.4	53.45	88.11	144.92	+76.9%
LED	2줄기	17.3	30.09	42.94	85.06	+3.6%
	3줄기	19.72	29.06	43.63	94.67	+15.4%



<그림 2.2.24> 보광 광원별 누적 수량 변화

2) 보광에 따른 작물 수량 증가량 및 시설비·운영비 산정을 통한 경제성 분석

(1) 경제성 분석

각 광원별 전기 사용량을 단위면적당 일 전력 소모량으로 환산하였을 때 1m<sup>2</sup> 당 일일 전력 소모량은 2.257 kWh·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup> (HPS), 0.405 kWh·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup> (LED)로 HPS가 LED에 비하여 5.5배의 전력이 소비되는 것으로 확인 되었으며, 이를 농업용(갑) 전기요금으로 환산하였을 경우 각각 10a 당 1개월에 1,455,460원, 261,140원이 발생할 것으로 예상된다.

<표 2.2.13> 광원별 전기 사용량 및 전기요금

광원	단위면적당 일 전력 소모량 (kWh·m <sup>-2</sup> ·day <sup>-1</sup> )	10a당 월 전기 사용량 (kWh·10a <sup>-1</sup> ·month <sup>-1</sup> )	10a 당 전기요금 (W·10a <sup>-1</sup> ·month <sup>-1</sup> )
HPS	2.257	67,730	1,455,460
LED	0.405	12,150	261,140

전기요금 : 농업용(갑)

가. 경제성 분석(LED 3줄기 유인, 면적: 10a, 단위: 원)

<표 2.2.14> LED 내부 보광을 이용한 파프리카 3줄기 유인 재배 시 경제성 분석  
(면적: 10a, 단위: 원)

투입되는 요인(A)		산출되는 요인(B)
시설비 : 13,000,000원		
조명 기구 : 100,000*50	5,000,000	
설치 비용 : 8,000,000	8,000,000	
운영비 : 3,133,680원/년		매출 증가액 : 5,007,065원/년
전기 사용료 : 3,133,680	3,133,680	
총합 (B-A) : 1,873,385원/년		

\* 농축산물소득자료집(2019) 파프리카 소득 기준(1년) : 33,380,434원

나. 경제성 분석(HPS 3줄기 유인, 면적: 10a, 단위: 원)

<표 2.2.15> HPS 상부 보광을 이용한 파프리카 3줄기 유인 재배 시 경제성 분석  
(면적: 10a, 단위: 원)

투입되는 요인(A)		산출되는 요인(B)
시설비 : 22,000,000원		
조명 기구 : 500,000*20	10,000,000	
설치 비용	12,000,000	
운영비 : 17,465,520원		매출 증가액 : 25,669,554원/년
전기 요금	17,465,520	
총합 (B-A) : 8,204,033원/년·10a		

\* 농축산물소득자료집(2019) 파프리카 소득 기준(1년) : 33,380,434원

이를 바탕으로 보광 시설에 대한 경제성 분석을 실시한 결과 LED의 경우 1,873,385원/년·10a, 고압나트륨등의 경우 8,204,033원/년·10a의 경제적 이익을 도출하는 것으로 나타났다. 각각 항목에 시설에 투입되는 투자비를 회수하는 데에 걸리는 시간은 LED의 경우 4.5년, 고압나트륨등의 경우 1.6년이 걸릴 것으로 예상된다.

<표 2.2.16> 보광 시설 운영비 대비 매출증가 비 (천원)

	운영비(A)	매출증가액(B)	보광 효율 (B/A)
HPS	17,465	25,669	1.47
LED	3,133	5,007	1.60

보광 시설을 가동하기 위하여 투입되는 운영비(전기요금) 대비 매출 증가비율은 고압나트륨등이 1.47, LED의 경우 1.60으로 나타났으며, 넓은 면적에 적용할수록 누진 단계를 넘기기 쉽기 때문에 넓은 면적에 보광 시설을 설치할 경우 LED 조명기구의 보광 효율은 더 증가할 것으로 생각된다.



(6) 사용자에게 따른 작물별 보광 제어 방법

○ 온실 환경 모니터링 및 자동 제어 시스템

보광 시설을 효율적으로 운영하기 위해서는 현재의 작물 생육단계, 기상환경, 재식밀도에 따라 다르게 관리가 필요하다. 이를 인력 관리, 조절하기 위해서는 많은 노력과 시간이 투입되어야 하므로 원격 온실 환경 모니터링 시스템과 원격 제어 시스템이 구축되어야 한다. 현재 과채류 온실의 환경 관리는 대체적으로 온·습도를 중심으로 모니터링되고 있으며 온실 내 제어는 천창 개폐, 온수 배관 작동/정지 등에 집중되어 있어 시설 내 광환경 조절을 위한 제어 요소의 활용은 저조한 상태이다. 따라서 사용자가 온실 환경에 대하여 정확히 진단할 수 있는 모니터링 시스템이 개발되어야 하며, 이에 따른 온실 내 광환경 제어 프로토콜 및 이를 위한 조절 장치들이 보급되어야 온실 내 최적 광환경 조절이 가능할 것이다. 이와 더불어 시설과채류 작물의 생육단계별 적정 누적일사량, 적정 보광 수준 등의 지표가 같이 제시되면 효율적인 온실 내 작물 관리가 가능할 것이다.

2-3. 제 2 협동과제: 보광 광원 처리에 따른 작물 생산성 향상 생리 반응 구명

1) 보광 처리에 따른 파프리카의 생리 반응 규명

(1) 보광 처리에 따른 작물 광 환경 및 엽 광학적 특성 분석

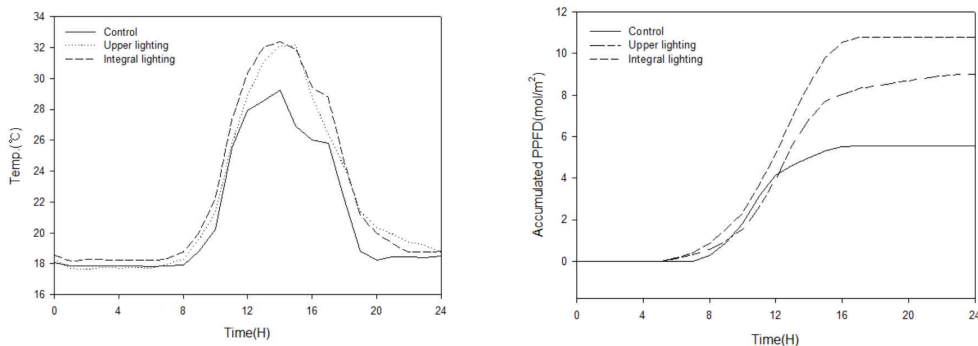
가. 작물 재배 조건

- 보광에 의한 파프리카의 생리 반응 규명을 위해 백색 LED를 대상 광원으로 선정하였음
- 보광 방식은 군락 상부 보광, DLI 보광, 군락 내부 보광의 세 가지로 하였음
- 군락 상부 보광은 광원으로부터 1.0m 지점에서 평균  $100\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  의 광도를 갖도록 설치하였으며 군락 내부 보광은 파프리카 성장점의 양 옆에서 광이 조사되도록 설치하였음
- 군락 상부 보광과 내부 보광은 06:00부터 23:30까지 외부 광도가  $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  미만일 때 작동되도록 설정하였음
- DLI 제어에 의한 보광은 06:00부터 보광을 시작하여 일중 목표 누적 광량인  $10\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$ 을 만족할 때 종료되며, 외부 광도가  $100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  미만일 때 작동되도록 설정하였음

<표 2.3.1> 보광 처리별 보광 처리 조건.

보광 방식	시작 시간	종료 시간	작동 조건1(외부 일사)	작동 조건2(누적광량)
상부 보광	06:00	23:30	$100\cdot\text{m}^{-2}$ 미만	-
DLI 보광	06:00	목표 광량 충족 시	$100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 미만	$10\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$ 의 일누적광량까지 작동
내부 보광	06:00	23:30	$100\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 미만	-

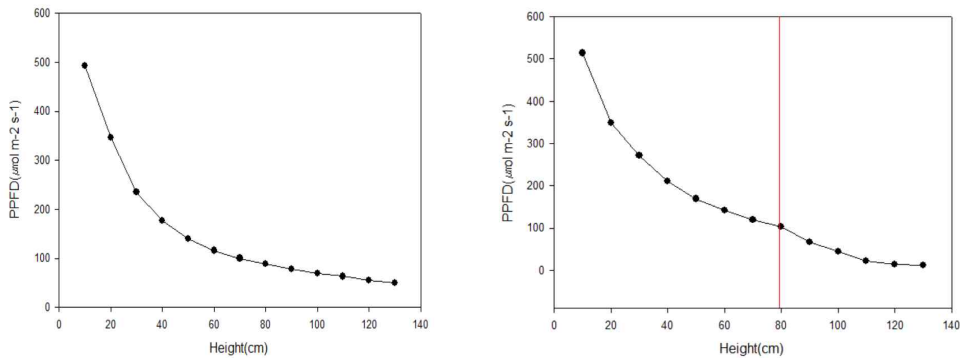
- 보광 시 상부 보광과 DLI 보광 처리구의 온도는 대조구에 비해  $3\sim 4^{\circ}\text{C}$  정도 높았으며 하루 적산광량은 대조구는  $5.58\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$ , 상부 보광은  $9.00\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$ , DLI 보광은  $10.8\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$ 였음
- 대조구와 DLI 보광 처리구는 일몰 이후, 또는 목표 광량을 달성한 이후로는 더 이상 적산 광량이 증가하지 않지만, 상부 보광 처리구는 보광 처리 종료 시간인 23:30까지 적산 광량이 증가함



<그림 2.3.1> 보광 방식에 따른 온실 내 일중 온도(왼쪽)과 적산광량(오른쪽) 변화(2021.03.11)

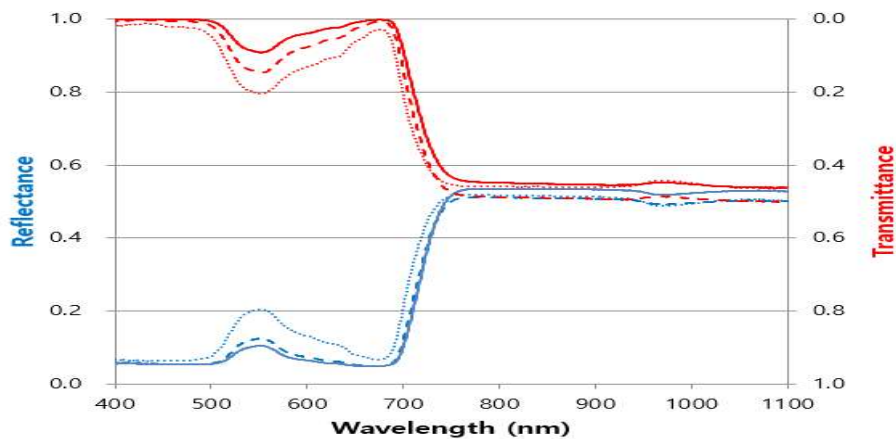
나. 보광 방식(상단부)에 따른 수관 내 광 환경 수직 분포

- 광원에서부터 멀어지면 거리에 비례하여 PPFD 값은 감소하기 때문에 작물의 높이를 고려하여 광원을 설치하는 것이 중요함.
- 작물이 없을 때 상부 보광시  
 $y = -19.6 + (9057.1/x) + (-39149.8/x^2)$ 와 같은 식을 얻을 수 있음( $R^2=0.99$ )
- 작물이 있을 때 상부 보광시 작물의 전까지  
 $y = -1.6 + (8289.9/x) + (-41462.6/x^2)$ 의 값을 가지고( $R^2=0.99$ )  
 작물부터는  
 $y = 83.6 + (-27576.9/x) + (2335247.6/x^2)$ 의 식을 가짐( $R^2=0.99$ )



<그림 2.3.2> 작물이 없는 경우(왼쪽)와 있는 경우(오른쪽)의 상부 보광 광원으로부터의 거리에 따른 광량

다. 보광 처리에 따른 엽위별 엽 광학적 특성 분석



<그림 2.3.3> 파프리카 잎의 광학적 특성 분석(실선-상위엽, 중간점선-중위엽, 점선-하위엽).

- 잎 흡광도 그래프를 활용하여 보광에 의한 잎 광학적 특성 해석이 가능함.
- 310~1100nm에서의 반사율은 하위엽, 중위엽, 상위엽 순으로 낮아지고, 투과율과 흡수율은 상위엽, 중위엽, 하위엽 순으로 높아짐
- 400~700nm인 광합성 유효 파장 영역에서 상위엽 90.3%, 중위엽 86.8%, 하위엽은 77.8%의 흡수율으로 나타났으며 상위엽에서 흡수율이 가장 높은 것을 알 수 있음

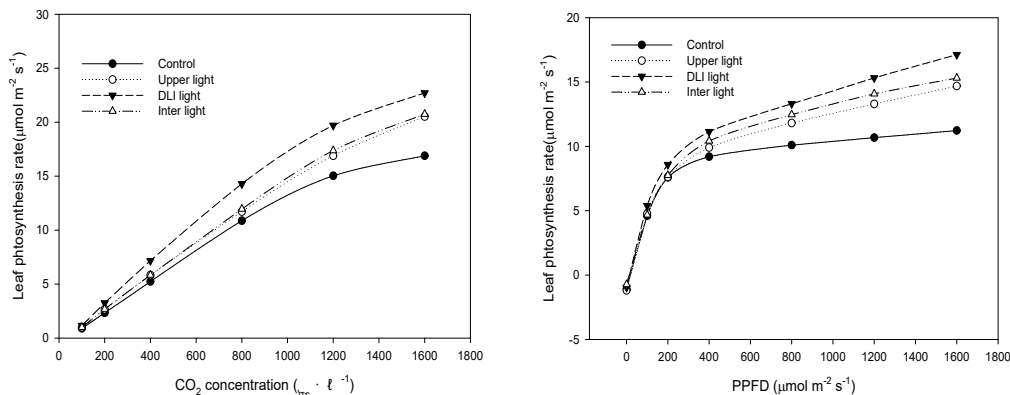
<표 2.3.2> 파프리카 엽의 위치별 파장별 광학적 특성.

파장	광특성	하단	중단	상단
330-1100nm	반사율	35.7±0.5	33.2±0.4	34.1±0.1
	투과율	32.0±0.5	31.9±0.5	27.1±1.7
	흡수율	32.3±0.1	34.9±0.9	38.7±1.7
330-400nm	반사율	5.5±0.3	5.4±0.1	5.1±0.1
	투과율	1.4±0.6	0.4±0.1	0.4±0.1
	흡수율	93.1±0.9	94.2±0.1	94.5±0.1
400-700nm	반사율	11.8±0.4	7.2±0.4	6.5±0.1
	투과율	10.4±1.5	6.0±0.7	3.2±1.7
	흡수율	77.8±1.9	86.8±1.2	90.3±1.0
700-1100nm	반사율	49.4±1.0	48.0±0.4	49.8±0.1
	투과율	44.4±0.1	46.7±0.3	42.6±2.2
	흡수율	6.2±1.1	5.3±0.8	7.6±2.1

(2) 보광 처리에 따른 엽 광합성 변화 분석

가) 보광 처리에 따른 파프리카 광합성 분석

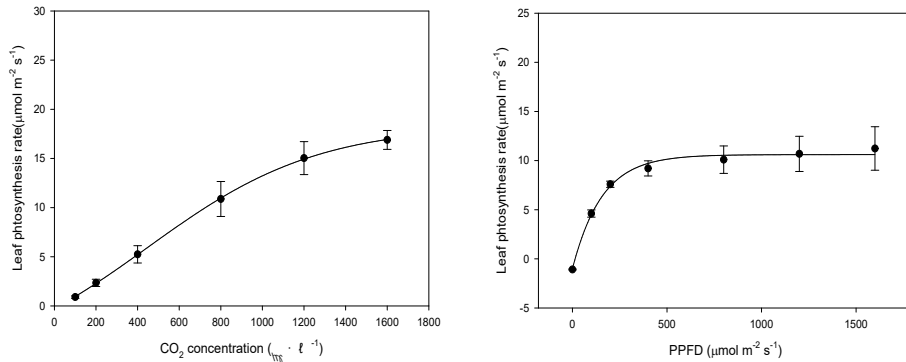
- 보광처리에 따른 파프리카의 광합성 반응은 광합기 측정기(Li-6800, Li-Cor., USA)를 이용하여 A-CO<sub>2</sub> (assimilation)반응과 A-Light 곡선을 도출하였음.
- CO<sub>2</sub> 반응 광합성곡선은 온도 25°C, 상대습도 50~60%, PPFD 1000μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 성장점 기준 5~7번째 사이의 완전 전개한 엽을 대상으로 하여 100, 200, 400, 800, 1600μmol·mol<sup>-1</sup>의 이산화탄소 농도로 측정함
- 광반응 광합성곡선은 온도 25°C, 상대습도 50~60%, CO<sub>2</sub> 농도 800μmol·mol<sup>-1</sup>, 성장점 기준 5~7번째 사이의 완전 전개한 엽을 대상으로 하여 PPFD 0, 100, 200, 400, 800, 1200, 1600μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>의 광도로 측정함
- CO<sub>2</sub> 반응 광합성 곡선에서 대조구에 비해 보광 처리구의 광합성효율이 좋은 것을 확인할 수 있고 보광 처리구 안에서는 DLI 보광, 군락 내 보광, 상부 보광 순으로 좋았지만 군락내 보광과 상부 보광은 유사하였음
- 광반응 광합성 곡선은 CO<sub>2</sub> 반응 광합성 곡선과 유사한 경향을 보였으나 대조구에서 상승이 더디어지는 구간이 빨리 관찰됨



<그림 2.3.4> 보광 종류에 따른 CO<sub>2</sub> 농도(좌)와 광(우)에 따른 파프리카 광합성 속도

나. 보광 미적용 대조구의 작물 광합성 분석

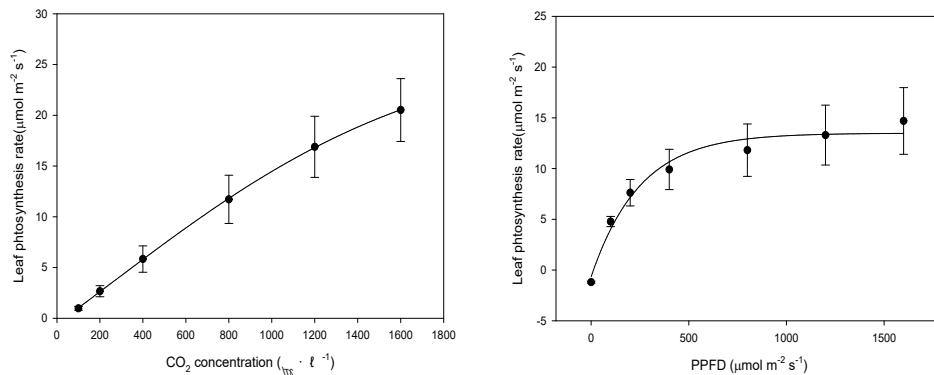
- 보광 미적용구에서의 광합성은 CO<sub>2</sub> 농도 1200 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 에서 15.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 을 가짐
- 보광 미적용구에서의 광합성은 광도 1600 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 11.2 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 을 가짐
- 보광 미적용 대조구의 CO<sub>2</sub> 반응 광합성 곡선은  
 $y = -6.6 + 24.9 / (1 + e^{-(x-444.0)/410.7})$ 의 값을 얻음(R<sup>2</sup>=0.99)
- 보광 미적용 대조구 광반응 광합성 곡선은  
 $y = -35493.3 + 35503.9 / (1 + e^{-(x+1251.8)/156.0})$ 의 값을 얻음(R<sup>2</sup>=0.99)



<그림 2.3.5> 보광 미처리 대조구의 CO<sub>2</sub> 농도와 광에 따른 파프리카 광합성 속도.

다. 상부 보광에 따른 작물 광합성 분석

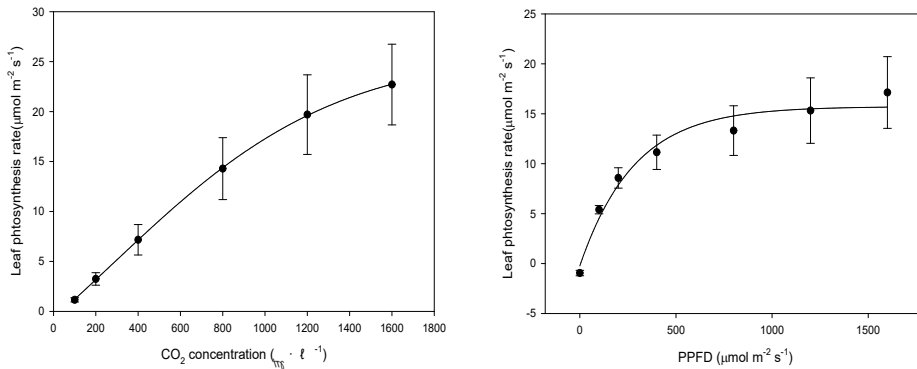
- 상부 보광에서의 광합성은 CO<sub>2</sub> 농도 1,200 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 에서 16.9 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 대조구에 비해 12% 높았음
- 상부 보광에서의 광합성은 광도 1600 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 14.7 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 대조구에 비해 31% 높았음
- 상부 보광 CO<sub>2</sub> 반응 광합성 곡선은  
 $y = -20.7 + 48.1 / (1 + e^{-(x-244.6)/753.4})$ 의 값을 얻음(R<sup>2</sup>=0.99)
- 상부 보광 광반응 광합성 곡선은  
 $y = -46208.1 + 46221.6 / (1 + \exp^{-(x+2011.7)/248.6})$ 의 값을 얻음(R<sup>2</sup>=0.99)



<그림 2.3.6> 상부 보광 처리의 CO<sub>2</sub> 농도와 광에 따른 파프리카 광합성 속도.

라. DLI 보광에 따른 작물 광합성 분석

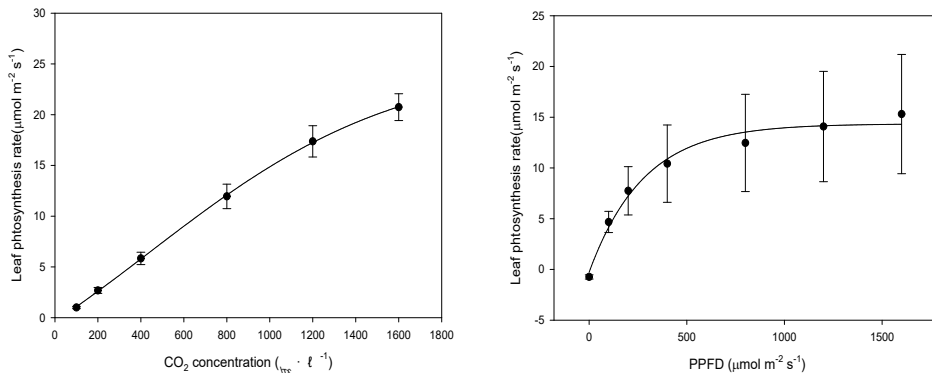
- DLI 보광에서의 광합성은 CO<sub>2</sub> 농도 1,200 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 에서 19.7 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 대조구에 비해 31% 높았음
- DLI 보광에서의 광합성은 광도 1600 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 14.7 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 대조구에 비해 52% 높음
- DLI 보광 CO<sub>2</sub> 반응 광합성곡선은  $y = -16.6 + 42.7 / (1 + e^{-(x-278.4)/535.5})$ 의 값을 얻음 ( $R^2=0.99$ )
- DLI 보광 광반응 광합성곡선은  $y = -56540.8 + 56556.6 / (1 + e^{-(x+2308.5)/282.5})$ 의 값을 얻음 ( $R^2=0.99$ )



<그림 2.3.7> DLI 보광 처리의 CO<sub>2</sub> 농도와 광에 따른 파프리카 광합성 속도.

마. 군락 내부 보광에 따른 작물 생육 및 광합성 분석

- 군락 내 보광에서의 광합성은 CO<sub>2</sub> 농도 1200 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 에서 17.4 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 대조구에 비해 16% 높음
- 상부 보광에서의 광합성은 광도 1,600 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 14.7 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 대조구에 비해 36% 높음
- 군락 내 보광 CO<sub>2</sub> 반응곡선은  $y = -12.5 + 37.9 / (1 + e^{-(x-438.9)/585.3})$ 의 값을 얻음 ( $R^2=0.99$ )
- 군락 내 보광 처리구의 광 반응 곡선은  $y = -43025.7 + 43040.1 / (1 + \exp^{-(x+2218.0)/277.7})$ 의 값을 얻음 ( $R^2=0.99$ )



<그림 2.3.8> 군락 내 보광 처리의 CO<sub>2</sub> 농도에 따른 파프리카 광합성 속도.

마. 보광 방법에 따른 작물 생육에 미치는 효과 분석

- 보광은 광합성에 필요한 광을 보충해 줌으로써 작물 생육보다 파프리카 생산량 증진의 효과를 볼 수 있었음
- 초장을 제외한 줄기직경, 엽수, 엽면적, 생체중, 건물중에서 유의미한 차이를 보이지 않았음

<표 2.3.3> 보광 방식에 따른 작물의 생육 차이.

Treatment	Plant height (cm)	Stem diameter (mm)	No. of leaves (ea)	Leaf area (cm <sup>2</sup> )	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
Control	179 <sup>a*</sup>	17.7 <sup>a</sup>	27.8 <sup>a</sup>	2775 <sup>a</sup>	658 <sup>a</sup>	100 <sup>a</sup>
Upper L	151 <sup>ab</sup>	19.9 <sup>a</sup>	30.6 <sup>a</sup>	2409 <sup>a</sup>	654 <sup>a</sup>	112 <sup>a</sup>
DLI L	152 <sup>b</sup>	18.4 <sup>a</sup>	28.8 <sup>a</sup>	2575 <sup>a</sup>	642 <sup>a</sup>	105 <sup>a</sup>
Inter L	166 <sup>b</sup>	18.3 <sup>a</sup>	32.0 <sup>a</sup>	2559 <sup>a</sup>	589 <sup>a</sup>	97 <sup>a</sup>

\* Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

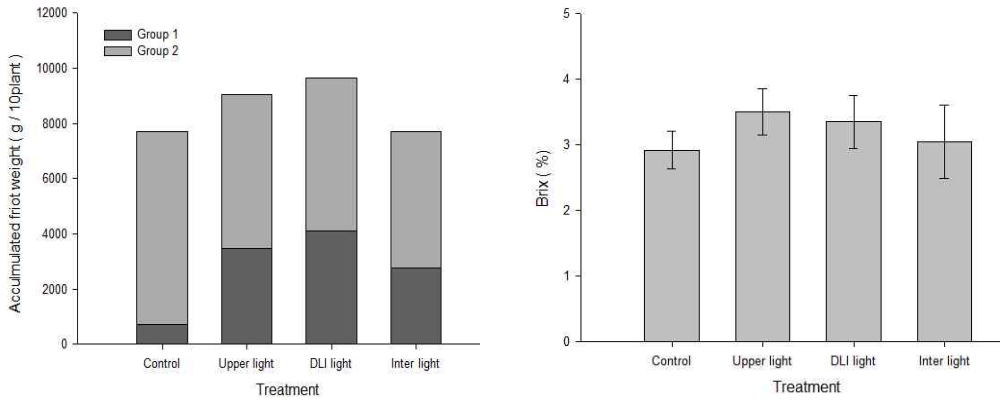
- 보광 처리구는 보광 종류와 상관없이 착과 1그룹에서 수확량이 3~4배 증가하였고, 이는 온실 내 광량 증가와 온도 상승의 효과를 통해 착과에 영향을 미쳤을 것으로 판단됨.
- 착과 2그룹에서는 대조구의 수확량이 가장 높았음
- 전체 수확량은 목표 광량을 채우지 못했을 때 추가 보광을 통한 안정적인 광합성이 가능했던 DLI 보광이 가장 높았으며 대조구와 군락 내 보광은 유의한 차이를 보이지 않았음

<표 2.3.4> 보광 방식에 따른 작물 수확량.

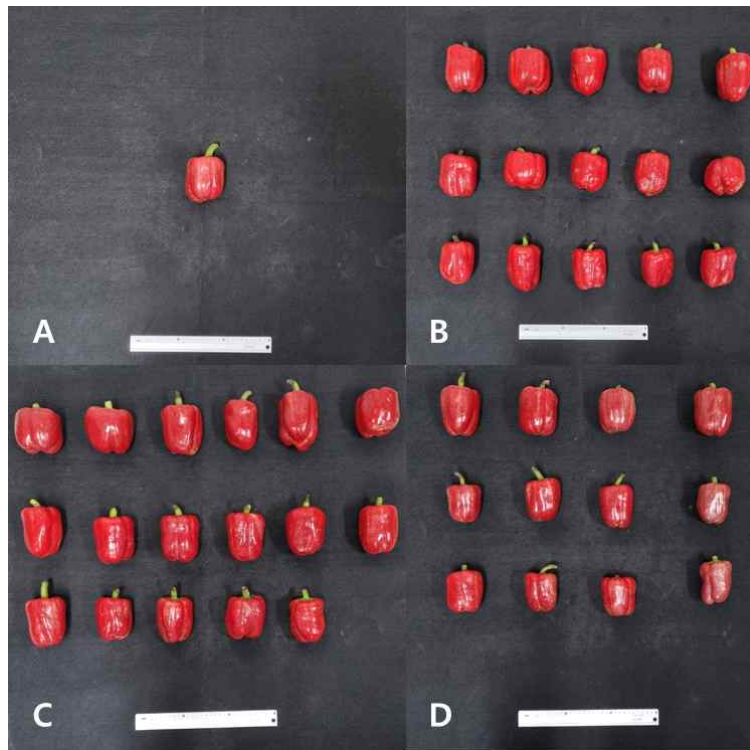
Treatment	Group1	Group 2	Sum
Control	0.70 <sup>d*</sup>	6.99 <sup>a</sup>	7.69c
Upper L	3.48 <sup>b</sup>	5.58 <sup>b</sup>	9.06b
DLI L	4.09 <sup>a</sup>	5.54 <sup>c</sup>	9.63a
Inter L	2.76 <sup>c</sup>	4.93 <sup>d</sup>	7.69c

\* Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at 5% level.

- 과실의 당도는 보광 처리구가 대조구에 비해 유의한 차이를 보이지는 않았지만 상부 보광, DLI 보광, 내부 보광, 대조구 순으로 높았으며 이는 광량 증가를 통한 광합성 동화산물 증가의 영향으로 생각됨
- 보광 시 대조구에 비해 4~18%의 과실 당도 향상을 할 수 있어 과실 품질 향상에 효과적일 수 있다.



<그림 2.3.9> 보광 방식에 따른 파프리카 수확량(왼쪽)과 당도(오른쪽)



<그림 2.3.10> 저온기 보광 방식에 따른 파프리카의 Group 1 수확량(A: Control; B: Upper light; C: DLI light; D: Inter light).

2) 보광 처리에 따른 과실 착색 분석

(1) 보광 광원 미적용 대조구의 과실 착색 모델 작성

- 대조구는 8단계에서 착색하기 시작하여 10단계에서 완전히 착색하였음

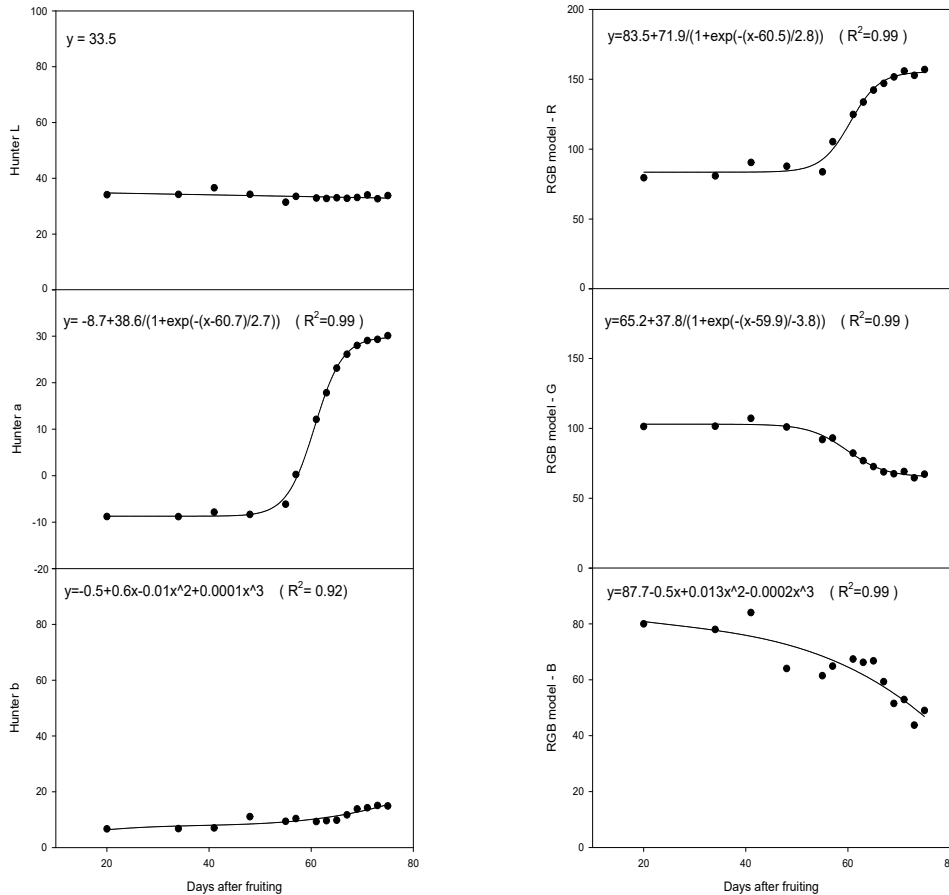


<그림 2.3.11> 보광 미적용 대조구 파프리카의 착색단계에 따른 구분.

- 보광 미적용구의 Hunter Lab 중 Hunter L은 측정 기간 중 유의한 변화를 보이지 않아 상수로 처리하였고, 적색을 의미하는 Hunter a는 시간이 지남에 따라 상승 후 측정 a값이 28 이상이 되면 큰 상승은 없었고, Hunter b는 소폭 상승하였음



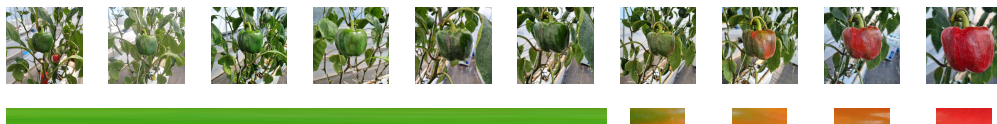
- 보광 미적용구의 RGB 모델은 R값이 시간이 지남에 따라 증가하였고, 적색의 증가에 따라 녹색을 의미하는 G값은 감소하였음



<그림 2.3.12> 보광 광원 미적용시 과실의 착색 변화(Hunter Lab 와 RGB model).

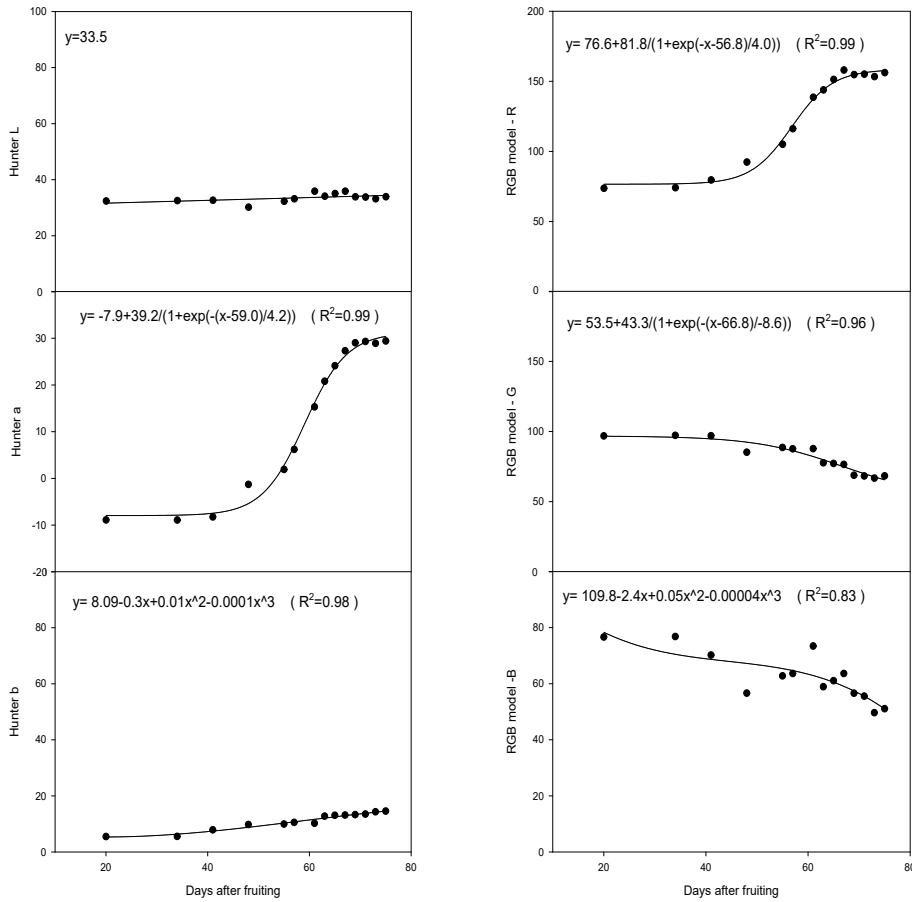
(2) 상부 보광에 따른 과실 착색 모델 작성

- 상부 보광은 7단계에서 착색하기 시작하여 9단계에서 수확이 가능한 정도의 착색수준을 가짐



<그림 2.3.13> 상부 보광 파프리카의 착색단계에 따른 구분

- 상부 보광의 Hunter Lab 중 Hunter L은 대조구와 동일하게 측정기간 중 유의한 변화를 보이지 않아 상수로 처리하였고 Hunter a는 시간이 지남에 따라 상승 후 대조구와 같이 측정값이 28 정도를 달성하는 시기가 2일 빨랐고 Hunter b는 소폭 상승하였음
- 보광 미적용구의 RGB 모델은 R값이 시간이 지남에 따라 증가하여 수치 150이 되는 시기가 대조구에 비해 4일 빨랐고 그에 따라 G 값은 감소하여 70이 되는 시기가 대조구에 비해 2일 빨랐음



<그림 2.3.14> 상부 보광 시 과실의 착색 변화(Hunter Lab 와 RGB model).

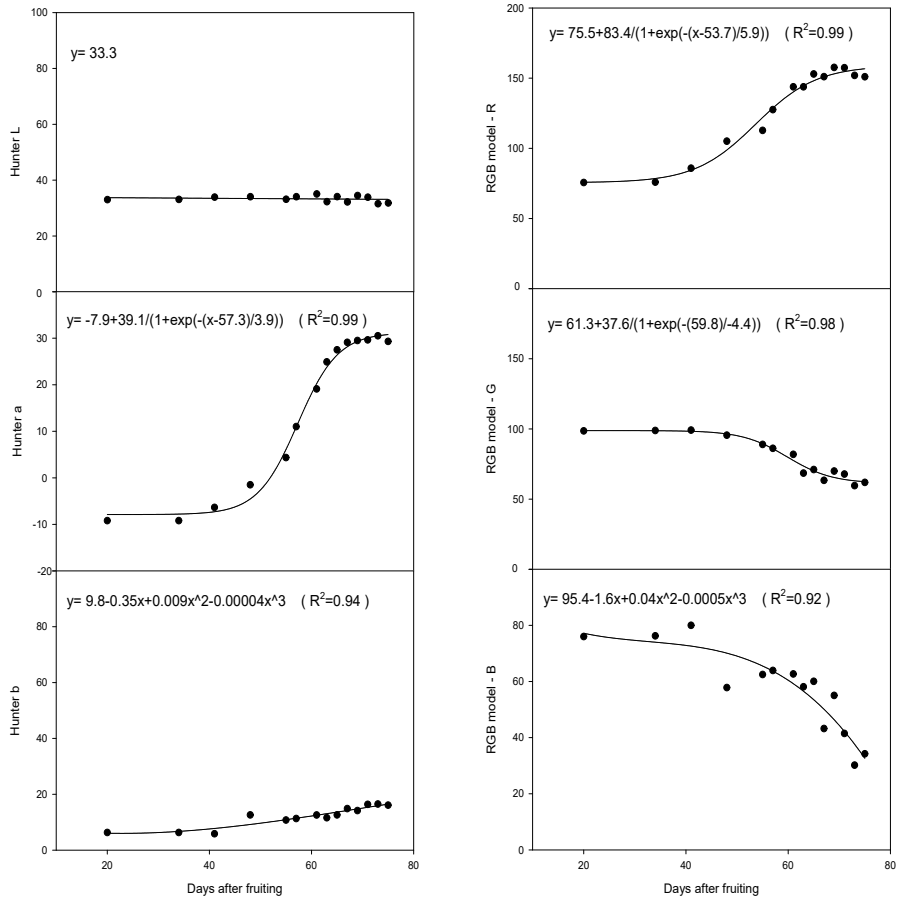
(3) DLI 보광에 따른 과실 착색 모델 작성

- DLI 보광은 5단계에서 착색하기 시작하여 9단계에서 수확이 가능한 수준의 착색수준을 가짐



<그림 2.3.15> DLI 보광 파프리카의 착색단계에 따른 구분.

- DLI 보광의 Hunter Lab 중 Hunter L은 대조구와 동일하게 측정기간 중 유의한 변화를 보이지 않아 상수로 처리하였고 Hunter a는 시간이 지남에 따라 상승 후 대조구와 같이 측정 값이 28 정도를 달성하는 시기가 4일 빨랐고 Hunter b는 소폭 상승하였음
- DLI 보광의 RGB 모델은 R값이 시간이 지남에 따라 증가하여 수치 150 이 되는 시기가 대조구에 비해 4일 빨랐고 그에 따라 G 값은 감소하여 70이 되는 시기가 대조구에 비해 1일 빨랐음
- DLI 보광을 통해 4~5일 정도 수확시기를 당길 수 있음



<그림 2.3.16> DLI 보광 시 과실의 착색 변화(Hunter Lab 와 RGB model).

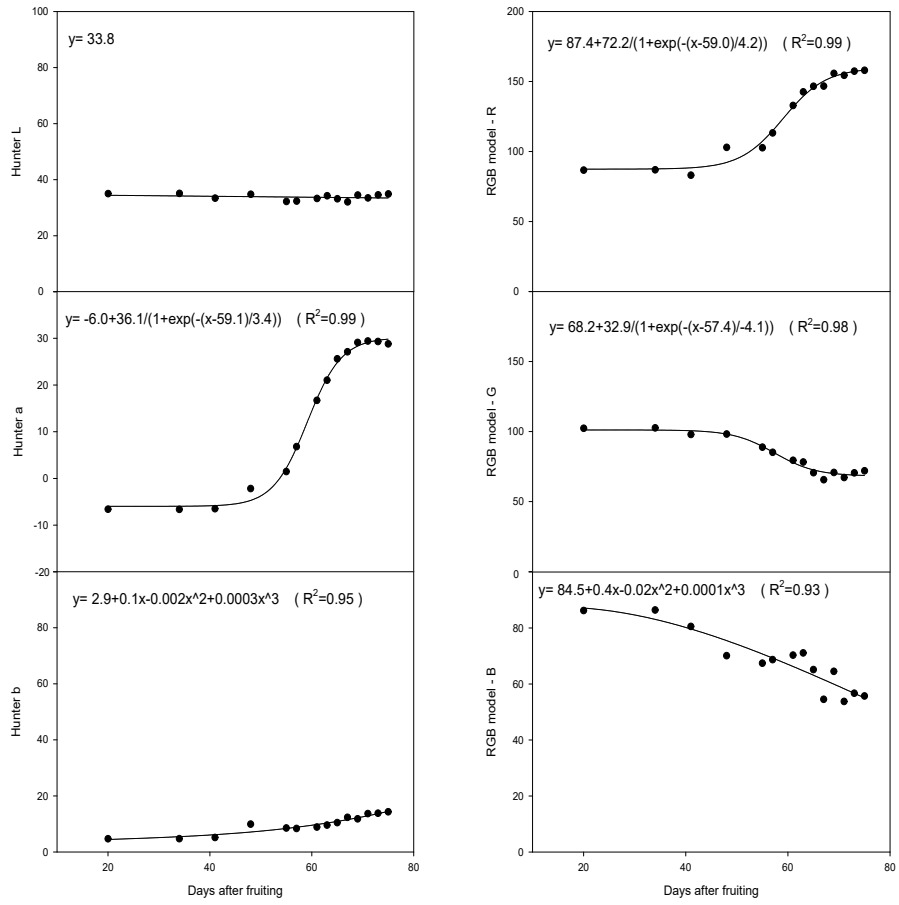
(4) 군락 내부 보광에 따른 과실 착색 모델 작성

- 군락 내부 보광은 7단계에서 착색하기 시작하여 9단계에서 수확이 가능한 정도의 착색수준을 가짐



<그림 2.3.17> 군락 내부 보광 파프리카의 착색단계에 따른 구분.

- DLI 보광의 Hunter Lab 중 Hunter L은 대조구와 동일하게 측정기간 중 유의한 변화를 보이지 않아 상수로 처리하였고 Hunter a는 시간이 지남에 따라 상승 후 28근처의 값을 달성하는 시기가 2일 빨랐고 Hunter b는 소폭 상승하였음
- 군락 내부 보광의 RGB 모델은 R값이 시간이 지남에 따라 증가하여 150이 되는 시기가 대조구에 비해 1일 빨랐고 동시에 G 값은 감소하여 70이 되는 시기가 대조구과 동일하여 차이를 보이지 않음



<그림 2.3.18> 내부 보광 시 과실의 착색 변화(Hunter Lab 와 RGB model).

## 2-4.제 3 협동과제: 보광 광원의 시설과채류 온실 적용을 위한 보광 매뉴얼 작성

### 1) 보광 기술 매뉴얼 작성 항목 결정 및 조사 분석

국내외 보광 현황과 기술 보급 관련 매뉴얼 작성을 위해 아래와 같이 크게 4가지 항목으로 매뉴얼 목차를 구성함

- (1) 시설과채류 온실 보광 기술 현황
- (2) 시설과채류 온실 보광 기술 이론
- (3) 3차원 시뮬레이션 기반 조명 설계 기준
- (4) 보광에 따른 시설 과채류 작물 생육 사례 분석

#### (1) 시설과채류 온실 보광 기술 현황

- 국내, 외 시설과채류 온실 보광 현황에 대한 내용을 자료 수집과 분석을 통해 정리함
- 보광 관련 시설원에 전반의 국내 스마트팜 시장 규모와 현재 보광이 실시되고 있는 현황을 위주로 내용을 정리함
- 보광 시장 관련 내용은 광원의 제조사와 보광 시장 동향 및 현 보광 시장의 확대를 위한 과제를 정리 기술함

#### (2) 시설과채류 온실 보광 기술 이론

- 시설과채류 온실 보광기술 이론은 보광 방식, 보광광원, 광환경과 작물 생육, 보광에 따른 시설 과채류의 생육 효과에 대해 문헌과 사례 및 실험 결과를 정리함
- 보광광원에 대한 물리적, 광학적 특성을 정리하고 실제 보광 적용을 위한 보광 방법 및 보광 광원의 배치에 대한 가이드를 제시할 수 있도록 자료를 정리 기술함
- 광환경과 작물의 생육은 광의 본질과 시설 내 작물이 수광하는 광환경 특성을 위주로 자료를 정리하였으며, 특히 저광 조건에서 식물의 생육을 사례 위주로 정리함으로써 보광에 대한 필요성과 당위성을 제고함
- 국내 지역별, 계절별 광환경을 데이터로 제시함으로써 보광 적용을 위한 기준으로 활용할 수 있도록 자료를 정리하였으며 주요 시설과채류에 대하여 보광에 대한 효과를 정량화하여 제시함
- 보광에 따른 시설 과채류 작물의 광합성, 광형태형성 및 생산성과 품질 증진에 대한 내용을 사례와 실험 결과를 중심으로 정리함

#### (3) 3차원 시뮬레이션 기반 조명 설계 기준

- 3차원 시뮬레이션 기법을 활용하여 조명 설계 시 고려해야 될 기준을 정리하여 제시함
- 온실 형태(지붕 형태, 온실 방향)에 따른 시설 내 광환경에 대한 데이터를 제시함
- 계절에 따른 시설 내 광환경 변화에 대한 기초 데이터를 3차원 시뮬레이션 기법을 활용하여 입체적으로 해석하고 데이터를 제시함
- 보광 설계를 위하여 작물의 생육과 외부 광환경을 고려하여 다양한 조건에서 시뮬레이션 결과를 제시함
- 작물생육과 관련된 변수로 작목(토마토, 파프리카) 및 재식에 대한 다양한 조건에서 보광 방법을 제시함
- 3차원 수광 해석을 통하여 상부 보광과 균락 내 보광 전략 수립을 위한 기초적인 자료를 제시함

(4) 보광에 따른 시설 과채류 작물 생육 사례 분석

- 보광에 따른 시설 과채류 작물의 생육을 사례 위주로 분석하고 경제성 분석 결과를 제시함
- 보광 광원의 현장 설치사례를 제시하였으며 보광 조건별 작물 재배 사례를 재배 조건, 생산성, 경제성 분석으로 구분하여 제시함
- 재식 및 보광 처리에 따른 작물 생산성 비교 분석을 실시하였으며 전력 소모량을 기준으로 생산성과 비교한 보광의 경제성 분석 결과를 제시함

(상세 내용은 별첨 3의 보광 매뉴얼 원문 참조)

(매뉴얼 목차)

1. 시설과채류 온실 보광기술 현황 .....	3
가. 국내외 시설과채류 온실 보광 현황 .....	3
1) 시설과채류 보광 기술 .....	3
2) 국내외 스마트팜 시장 규모 .....	5
3) 온실 보광기술 적용 .....	6
4) 보광 시장규모 .....	8
2. 시설과채류 온실 보광기술 이론 .....	13
가. 보광 방식 및 보광 광원 .....	13
1) 보광 광원의 특성 .....	13
2) 보광 방식 .....	17
3) 보광 광원 배치 .....	19
나. 광환경과 작물 생육 .....	26
1) 시설작물 광 생리 .....	26
2) 국내 지역별, 계절별 광환경 .....	41
다. 보광에 따른 시설 과채류 작물 생육 효과 .....	50
1) 보광에 따른 작물별 광합성 증진 및 광형태형성 변화 사례 .....	50
2) 보광에 따른 작물별 생산성 및 품질 증진 사례 .....	53
3) 보광 광원의 적정 파장에 대한 연구 결과 .....	57
3. 3차원 광환경 해석 기반 조명 설계 기준 .....	62
가. 온실 내 광 환경 .....	62
1) 온실 형태에 따른 온실 내 광환경 .....	62
2) 계절에 따른 온실 내 광환경 .....	68
나. 외부 광 조건에 따른 보광 방법 .....	71
1) 일적산광량(DLI)기반 온실 보광 .....	71
2) 외부 일사 감응에 의한 온실 보광 .....	75
3) 생육단계에 따른 온실의 보광 효율 .....	77
4) 작물 수광량 기반 보광 효율 분석 .....	82
다. 작물 재식 밀도에 따른 온실 보광 방법 .....	87
1) 광 조건별 작물 재식 밀도에 따른 보광 효율 .....	87
4. 보광에 따른 시설 과채류 작물 생육 사례 분석 .....	90
가. 보광 광원 현장 설치 사례 .....	90
나. 보광 조건별 작물 재배 사례 .....	92
1) 재배 조건 .....	95
2) 재배 결과 .....	96
3) 경제성 분석 .....	99

### 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

#### 1) 연구수행 결과

##### (1) 정성적 연구개발성과

세부 과제	당초 목표	가중치(%)	개발 내용	달성도(%)
3차원 작물모델링 기반 시설과채류 보광 기술 개발 (1세부)	3차원 수광해석을 위한 온실 광환경 분석 기반 구축	20	3차원 파프리카, 온실, 등기구 모델링 및 시뮬레이션 환경에 적용	100
	3차원 수광해석을 이용한 보광 광원의 최적 위치 및 개수 선정	20	군락 상부 및 내부 보광 광원 배치에 따른 온실 내 광분포 및 작물 수광량 변화 비교 분석함	100
	보광 강도 및 위치에 따른 작물의 광 이용 효율 및 군락 광합성 분석	30	군락 상부 및 내부 보광 방식에 따른 작물 생육 단계별 광 이용 효율 및 광합성량을 분석함	100
	작물 생육 단계 및 재배 형태에 따른 최적 보광 방법 도출	30	파프리카의 생육 단계, 줄기 유인 방식, 재식 밀도에 따른 보광 방식별 수광량, 광합성량 및 광 이용 효율을 분석함	100
장기재배용 보광 광원의 온실 현장 실증(1협동)	보광 광원의 종류에 따른 보광 효과 비교 분석	30	HPS 상부 보광 및 LED 내부 보광에 따른 온실 파프리카의 생육 및 수확량을 비교 분석함	100
	작물 생육 단계에 따른 보광 효과 비교 분석	30	작물 생육 단계별로 상부 및 내부 보광에 따른 효과를 비교 분석함	100
	보광에 따른 작물 수량 증가량 및 시설비·운영비 산정을 통한 경제성 분석	40	HPS 상부 보광 및 LED 내부 보광에 따른 작물 수확량 증가량과 시설비, 운영비 산정을 바탕으로 경제성 분석을 실시함	100
보광 광원 처리에 따른 작물 생산성 향상 생리 반응 구명(2협동)	상부 및 수관 내부 보광 방식에 따른 수관 내 광 환경 수직 분포 정규화	20	보광 광원의 유무에 따른 작물 수관 내 수직 광환경을 수치화하여 분석함	100
	보광 처리에 따른 엽위별 엽 광학적 특성 분석	20	보광 처리에 따른 작물 상, 중, 하단부 엽의 광학적 특성을 비교, 분석함	100
	상부 및 수관 내부 보광 광원의 종류에 따른 작물 생육 및 광합성 분석	20	상부, 내부 보광 방식에 따른 작물 생육 및 광합성의 변화를 비교, 분석함	100
	상부 및 수관 내부 보광 광원의 종류에 따른 과실 착색 모델 작성	40	상부 및 내부 보광 방식에 따른 과실 착색 변화를 분석하고 이를 Hunter Lab 값으로 수치화하여 나타냄	100
보광 광원의 시설과채류 온실 적용을 위한 보광 매뉴얼 작성 (3협동)	보광 광원의 광원별 광도 및 파장, 에너지 효율 특성 조사 분석	20	보광광원의 물리적, 광학적 특성을 정리하고, 보광 적용을 위한 보광 방법 및 보광 광원의 배치에 대한 가이드를 제시함	100
	과채류 작물의 광합성 특성 조사 분석	20	보광 방식, 보광광원, 광환경과 작물 생육, 보광에 따른 시설 과채류의 생육 효과에 대해 문헌과 사례 및 실험 결과를 정리함	100
	국내 지역 및 계절, 일중 시간에 따른 일사량 분포도 작성	20	국내 지역별, 계절별 광환경을 데이터로 제시함으로써 보광 적용을 위한 기준으로 활용할 수 있도록 자료를 정리하여 제시함	100
	보광 광원의 선정, 조명 방식 및 배치, 광이용 효율 기반 보광 매뉴얼 작성	40	시설과채류 온실 보광 현황, 보광 기술 이론, 3차원 시뮬레이션 기반 조명 설계 기준, 보광에 따른 시설 과채류 작물 생육 사례 분석을 포함한 보광 매뉴얼을 작성함	100



(2) 정량적 연구개발성과(해당 시 작성하며, 연구개발과제의 특성에 따라 수정이 가능합니다)

< 정량적 연구개발성과표 >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명		연도		1단계 (2020-2021)	계	가중치 (%)
		2020	2021			
전담기관 등록·기탁 지표 <sup>1)</sup>	논문[SCIE]	목표(단계별)		1	1	-
		실적(누적)		1	1	-
	논문[비SCIE]	목표(단계별)		1	1	-
		실적(누적)		1	1	-
	특허 출원	목표(단계별)		1	1	30
		실적(누적)		1	1	30
	학술 발표	목표(단계별)		3	3	20
		실적(누적)		6	6	20
연구개발과제 반영 지표 <sup>2)</sup>	정책 활용	목표(단계별)		1	1	20
		실적(누적)		1	1	20
	기타[보광 매뉴얼]	목표(단계별)		1	1	30
		실적(누적)		1	1	30
계				8	8	100
				11	11	100

\* 1) 전담기관 등록·기탁 지표: 논문[에스시아이 Expanded(SCIE), 비SCIE, 평균Impact Factor(IF)], 특허, 보고서원문, 연구 시설·장비, 기술요약정보, 저작권(소프트웨어, 서적 등), 생명자원(생명정보, 생물자원), 표준화(국내, 국제), 화합물, 신제품 등을 말하며, 논문, 학술발표, 특허의 경우 목표 대비 실적은 기재하지 않아도 됩니다.

\* 2) 연구개발과제 특성 반영 지표: 기술실시(이전), 기술료, 사업화(투자실적, 제품화, 매출액, 수출액, 고용창출, 고용효과, 투자유치), 비용 절감, 기술(제품)인증, 시제품 제작 및 인증, 신기술지정, 무역수지개선, 경제적 파급효과, 산업지원(기술지도), 교육지도, 인력양성(전문 연구인력, 산업연구인력, 졸업자수, 취업, 연수프로그램 등), 법령 반영, 정책활용, 설계 기준 반영, 타 연구개발사업에의 활용, 기술무역, 홍보(전시), 국제화 협력, 포상 및 수상, 기타 연구개발 활용 중 선택하여 기재합니다 (연구개발과제 특성별로 고유한 성과지표를 추가할 수 있습니다).

< 연구개발성과 성능지표(예시) >

평가 항목 (주요성능 <sup>1)</sup> )	단위	전체 항목에서 차지하는 비중 <sup>2)</sup> (%)	세계 최고		연구개발 전 국내 성능수준	연구개발 목표치		목표설정 근거
			보유국/보유기 관	성능수준	성능수준	1단계 (YYYY~YYY Y)	n단계 (YYYY~YYY Y)	
1								
2								

\* 1) 정밀도, 인장강도, 내충격성, 작동전압, 응답시간 등 기술적 성능판단기준이 되는 것을 의미합니다.

\* 2) 비중은 각 구성성능 사양의 최종목표에 대한 상대적 중요도를 말하며 합계는 100%이어야 합니다.

(3) 세부 정량적 연구개발성과(해당되는 항목만 선택하여 작성하되, 증빙자료를 별도 첨부해야 합니다)

[과학적 성과]

논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Evaluation of the light profile and carbon assimilation of tomato plants in greenhouses with respect to film diffuseness and regional solar radiation using ray-tracing simulation	Agricultural and forest meteorology	신지용 (제1저자) 손정익 (교신저자)	296	미국	Elsevier	SCIE	2021.01.15	0168-1923	100%
2	Effect of Stem Number on Growth, Fruit Quality, and Yield of Sweet Peppers Grown in Greenhouses under Supplemental Lighting with High Pressure Sodium Lamps in Winter	Journal of Bio-Environment Control	윤승리 (제1저자) 손정익 (교신저자)	30 (3)	대한민국	(사)생물환경조절학회	비SCIE	2021.07.27	1229-4675	100%

국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국원예학회 112차 추계학술발표회	김재우	2020-11-05	Web conference	대한민국
2	한국원예학회 112차 추계학술발표회	황인하	2020-11-05	Web conference	대한민국
3	한국원예학회 112차 추계학술발표회	신지용	2020-11-05	Web conference	대한민국
4	2021년 (사)한국생물환경조절학회 춘계학술발표회	윤승리	2021-05-06	Web conference	대한민국
5	2021 한국원예학회 제113차 춘계학술발표회	권성민	2021-05-21	Web conference	대한민국
6	International Symposium on Light in Horticulture	김동필	2021-06-02	Web conference	스웨덴

기술 요약 정보

연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용여부	허용방식

보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호

생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		
1	3차원 수광 해석에 기반한 작품의 보광 방법	대한민국	서울대학교산학협력단	2021-08-31	10-2021-011582-5	1-2007-050924-2				100%	기술이전

○ 지식재산권 활용 유형

※ 활용의 경우 현재 활용 유형에 √ 표시, 미활용의 경우 향후 활용 예정 유형에 √ 표시합니다(최대 3개 중복선택 가능).

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	기타
1						√				

저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율

신기술 지정

번호	명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증 번호		

210mm×297mm[(백상지(80g/m<sup>2</sup>) 또는 중질지(80g/m<sup>2</sup>)  
(22쪽 중 8쪽)]

표준화

○ 국내표준

번호	인증구분 <sup>1)</sup>	인증여부 <sup>2)</sup>	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류 <sup>3)</sup>	제안/인증일자

- \* 1) 한국산업규격(KS) 표준, 단체규격 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.
- \* 2) 제안 또는 인증 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- \* 3) 신규 또는 개정 중 해당하는 사항을 기재합니다.

○ 국제표준

번호	표준화단계구분 <sup>1)</sup>	표준명	표준기구명 <sup>2)</sup>	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식 <sup>3)</sup>	제안자	표준화 번호	제안일자

- \* 1) 국제표준 단계 중 신규 작업항목 제안(NP), 국제표준초안(WD), 위원회안(CD), 국제표준안(DIS), 최종국제표준안(FDIS), 국제표준(IS) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- \* 2) 국제표준화기구(ISO), 국제전기기술위원회(IEC), 공동기술위원회1(JTC1) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- \* 3) 국제표준(IS), 기술시방서(TS), 기술보고서(TR), 공개활용규격(PAS), 기타 중 해당하는 사항을 기재합니다.

[경제적 성과]

시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황

\* 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등

□ 사업화 투자실적

번호	추가 연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계	투자 자금 성격*

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식 <sup>1)</sup>	사업화 형태 <sup>2)</sup>	지역 <sup>3)</sup>	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

- \* 1) 기술이전 또는 자기실시
- \* 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등
- \* 3) 국내 또는 국외

□ 매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
합계					

210mm×297mm[(백상지(80g/m<sup>2</sup>) 또는 중질지(80g/m<sup>2</sup>)]  
(22쪽 중 9쪽)

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과				
사업화 계획	사업화 소요기간(년)			
	소요예산(천원)			
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후
		단위(%)	현재까지	3년 후
	시장 점유율	국내		
	국외			
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획				
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후
	수출			

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			yyyy년	yyyy년	
합계					

□ 고용 효과

구분		고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력
		생산인력
	개발 후	연구인력
		생산인력

□ 비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

□ 경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수)	기타
해당 연도							
기대 목표							

□ 산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원

□ 기술 무역

(단위: 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	기 징수액	총 계약액	해당 연도 징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

□ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용
1	제안	온실 내 보광시설(LED, 고압나트륨등) 사용에 따른 파프리카 수확량 증가	농식품부 농촌정책국 원예경영과	2023	

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황											
			학위별				성별		지역별					
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타	

산업 기술 인력 양성

번호	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비

국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

연구시설·장비

구축기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

\* 「과학기술기본법 시행령」 제42조제4항제2호에 따른 연구시설·장비 종합정보시스템을 의미합니다.

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)

---



---

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성합니다)

---



---

## 2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도 (%)
○3차원 수광해석을 위한 온실 광환경 분석 기반 구축	○3차원 파프리카, 온실, 등기구 모델링 및 광추적 시뮬레이션 환경에 적용	100
○3차원 수광해석을 이용한 보광 광원의 최적 위치 및 개수 선정	○군락 상부 및 내부 보광 광원 배치에 따른 온실 내 광분포 및 작물 수광량 변화를 비교 분석함	100
○보광 강도 및 위치에 따른 작물의 광 이용 효율 및 군락 광합성 분석	○군락 상부 및 내부 보광 방식에 따른 작물 생육 단계별 광 이용 효율 및 광합성량을 분석함	100
○작물 생육 단계 및 재배 형태에 따른 최적 보광 방법 도출	○파프리카의 생육 단계, 줄기 유인 방식, 재식 밀도에 따른 보광 방식별 수광량, 광합성량 및 광 이용 효율을 분석함	100
○보광 광원의 종류에 따른 보광 효과 비교 분석	○HPS 상부 보광 및 LED 내부 보광에 따른 온실 파프리카의 생육 및 수확량을 비교 분석함	100
○작물 생육 단계에 따른 보광 효과 비교 분석	○작물 생육 단계별로 상부 및 내부 보광에 따른 효과를 비교 분석함	100
○보광에 따른 작물 수량 증가량 및 시설비·운영비 산정을 통한 경제성 분석	○HPS 상부 보광 및 LED 내부 보광에 따른 작물 수확량 증가량과 시설비, 운영비 산정을 바탕으로 경제성 분석을 실시함	100
○상부 및 수관 내부 보광 방식에 따른 수관 내 광환경 수직 분포 정규화	○보광 광원의 유무에 따른 작물 수관 내 수직 광환경을 수치화하여 분석함	100
○보광 처리에 따른 엽위별 엽 광학적 특성 분석	○보광 처리에 따른 작물 상, 중, 하단부 엽의 광학적 특성을 비교, 분석함	100
○상부 및 수관 내부 보광 광원의 종류에 따른 작물 생육 및 광합성 분석	○상부, 내부 보광 방식에 따른 작물 생육 및 광합성의 변화를 비교, 분석함	100
○상부 및 수관 내부 보광 광원의 종류에 따른 과실 착색 모델 작성	○상부 및 내부 보광 방식에 따른 과실 착색 변화를 분석하고 이를 Hunter Lab 값으로 수치화하여 나타냄	100
○보광 광원의 광원별 광도 및 파장, 에너지 효율 특성 조사 분석	○보광 광원의 물리적, 광학적 특성을 정리하고, 보광 적용을 위한 보광 방법 및 보광 광원의 배치에 대한 가이드를 제시함	100
○과채류 작물의 광합성 특성 조사 분석	○보광 방식, 보광광원, 광환경과 작물 생육, 보광에 따른 시설 과채류의 생육 효과에 대해 문헌과 사례 및 실험 결과를 정리함	100
○국내 지역 및 계절, 일중 시간에 따른 일사량 분포도 작성	○국내 지역별, 계절별 광환경을 데이터로 제시함으로써 보광 적용을 위한 기준으로 활용할 수 있도록 자료를 정리하여 제시함	100
○보광 광원의 선정, 조명 방식 및 배치, 광이용 효율 기반 보광 매뉴얼 작성	○시설과채류 온실 보광 현황, 보광 기술 이론, 3차원 시뮬레이션 기반 조명 설계 기준, 보광에 따른 시설 과채류 작물 생육 사례 분석을 포함한 보광 매뉴얼을 작성함	100

#### 4. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 시설과채류 온실 내 보광 광원 적용 시 3차원 수광해석을 기반으로 한 보광 기술로 작물 생산량 증대 및 과실의 품질 향상에 기여할 수 있음.
- 3차원 수광해석을 통한 보광 최적화를 통해 보광을 이용한 온실 시설과채류 재배 시 에너지 절감에 기여할 수 있음.
- 보광 기술 현황, 보광 적용을 위한 보광 방법 및 보광 광원의 배치에 대한 가이드와 국내 지역별, 계절별 광환경 분석 자료를 포함한 보광 매뉴얼 개발함으로써 관련 산업체에 기술 제공이 가능하며 보광 기술 관련 산업화 촉진에 기여할 수 있음.

#### 5. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

< 연구개발성과 활용계획표 >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내	
국외논문	SCIE	1	
	비SCIE		
	계	1	
국내논문	SCIE		
	비SCIE	1	
	계	1	
특허출원	국내		
	국외		
	계		
특허등록	국내	1	
	국외		
	계	1	
인력양성	학사		
	석사		
	박사		
	계		
사업화	상품출시		
	기술이전	1	
	공정개발		
제품개발	시제품개발		
비임상시험 실시			
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상	
		2상	
		3상	
	의료기기		
진료지침개발			
신의료기술개발			
성과홍보			
포상 및 수상실적			
정성적 성과 주요 내용			

#### < 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	별첨 자료
1.	1) 참고 문헌 2) 자체평가의견서 3) 연구성과 활용계획서
2.	1) 2)



## 6. 참고 문헌

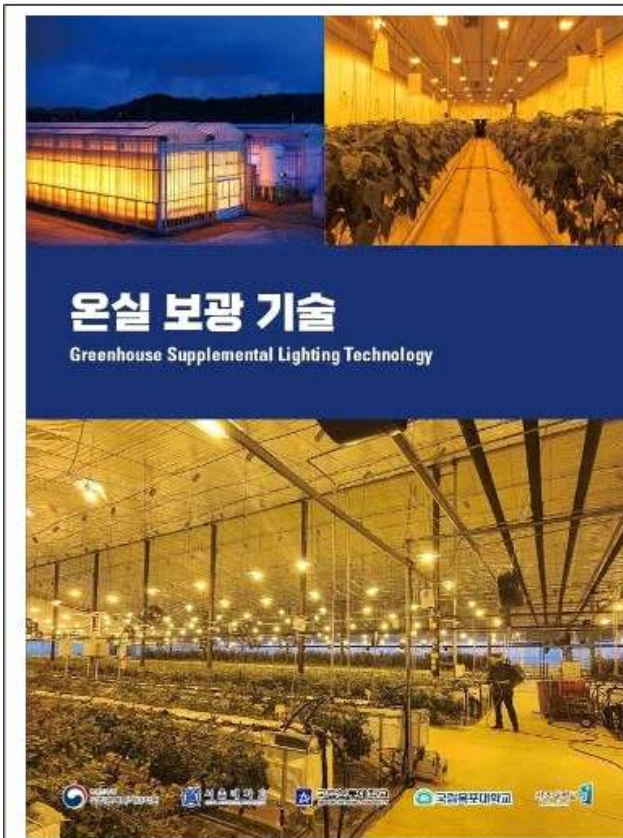
- Demers D.A., and A. Gosselin 1999, Supplemental lighting of greenhouse vegetables: limitations and problems related to long photoperiods. *Acta Hort*, 481:469– 473
- Demers D.A., and A. Gosselin 2002, Growing greenhouse tomato and sweet pepper under supplemental lighting: optimal photoperiod, negative effects of long photoperiod and their causes. *Acta Hort*, 580:83–88
- Deram P., M. Lefsrud, V. Orsat 2014, Supplemental lighting orientation and red-to-blue ratio of light-emitting diodes for greenhouse tomato production. *Hortscience*, 49:448–45
- De-Visser P.H.B., G.H. Buck-Sorlin, V. Heijden 2014, Optimizing illumination in the greenhouse using a 3D model of tomato and a ray tracer. *Front Plant Sci*, 5:48
- Dueck T.A., J. Janse, B.A. Eveleens, F.L.K. Kempkes, L.F.M. Marcelis 2012, Growth of tomatoes under hybrid LED and HPS lighting systems. *Acta Hort*, 952:335–342
- García-Caparrós P., R.M. Chica, E.M. Almansa, A. Rull, L. Rivas, A. García-Buendía, F.J. Barbero, M.T. Lao 2018, Comparisons of Different Lighting Systems for Horticultural Seedling Production Aimed at Energy Saving. *Sustainability*, 10:3351
- Gómez-García M.D.R., N. Ochoa-Alejo 2013, Biochemistry and molecular biology of carotenoid biosynthesis in chili peppers (*Capsicum* spp.). *International Journal of Molecular Sciences* 14:19025–19053
- Gómez C., C. Mitchell 2013a, Supplemental lighting for greenhouse-grown tomatoes: intrac canopy led towers vs. overhead HPS lamps. *Acta Hort*, 1037: 855–862
- Gomez C., R.C. Morrow, C.M. Bourget, G.D. Massa, C. Mitchell 2013b, Comparison of intrac canopy light-emitting diode towers and overhead high-pressure sodium lamps for supplemental lighting of greenhouse-grown tomatoes, *HortTechnology*, 23: 93–98
- Gómez C., and C. Mitchell 2016a, In search of an optimized supplemental lighting spectrum for greenhouse tomato production with intrac canopy lighting. In VIII International Symposium on Light in Horticulture 1134, 57–62
- Gomez C., and C. Mitchell 2016b, Physiological and productivity responses of high-wire tomato as affected by supplemental light source and distribution within the canopy. *J Am Soc Hortic Sci*, 141:196–208
- Gupta, S.D., Agarwal, A. 2017, Artificial lighting system for plant growth and development: Chronological advancement, working principles, and comparative assessment. In *Light emitting diodes for agriculture*, Singapore
- Heo J.W., H.H. Kim, K.J. Lee, J.B. Yoon, J.K. Lee, Y.S. H, K.Y. Lee 2015, Effect of Supplementary Radiation on Growth of Greenhouse-Grown Kales. *Kor J Environ Agric*, 34:38–45
- Hernández R., and C. Kubota 2015, Physiological, morphological, and energy-use efficiency comparisons of LED and HPS supplemental lighting for cucumber transplant production. *HortScience*, 50:351–357
- Heuvelink E., M.J. Bakker, L.Hogendonk, J. Janse, R.C. Kaarsemaker, R.H.M. Maaswinkel 2006, Horticultural lighting in the Netherlands: new developments. *Acta*

Hortic, 711:25–33

- Hovi-Pekkanen T., and R. Tahvonon 2008, Effects of interlighting on yield and external fruit quality in year-round cultivated cucumber. *Sci Hortic*, 116:152–161
- ISO, 2004, Spatial Distribution of Daylight-CIE Standard General Sky. International Organization for Standardization (ISO), Geneva
- Jovicich, E., Cantliffe, D.J., Stoffella, P. J. 2004, Fruit yield and quality of greenhouse-grown bell pepper as influenced by density, container, and trellis system. *HortTechnology*, 14:507–513
- Kaiser E., T. Ouzounis, H. Giday, R. Schipper, E. Heuvelink, L. F. M. Marcelis 2018, Adding Blue to Red Supplemental Light Increases Biomass and Yield of Greenhouse-Grown Tomatoes, but Only to an Optimum. *Front Plant Sci*, 9:2002.
- 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*, 34:84–93.
- Kang W.H., I. Hwang, D.H. Jung, D.P. Kim, J. Kim, J.H. Kim, K.S. Park, J.E. Son 2019, Time change in spatial distributions of light interception and photosynthetic rate of paprika estimated by ray-tracing simulation. *J. Bio-Env Cont* 28:279–285.
- Kalaitzoglou P., W. van Ieperen, J. Harbinson, M. V. Meer, S. Martinakos, K. Weerheim, C.C.S. Nicole and L. F. M. Marcelis 2019, Effects of Continuous or End-of-Day Far-Red Light on Tomato Plant Growth, Morphology, Light Absorption, and Fruit Production. *Front Plant Sci*, 10:322.
- Kaukoranta T., L.E. Särkkä, K. Jokinen 2017, Energy efficiency of greenhouse cucumber production under LED and HPS lighting. *Acta Hortic*, 1170:967–972
- Kim H.J., M.Y. Lin, C. Mitchell 2019, Light spectral and thermal properties govern biomass allocation in tomato through morphological and physiological changes, *Environ Exp Bot*, 157:228–240
- Kim H.J., T. Yang, S. Choi, Y.J. Wang, M.Y. Lin, A.M. Liceaga 2020, Supplemental intracanopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes. *Sci Hortic*, 261:1–9
- Kim J.H., J.W. Lee, T.I. Ahn, J.H. Shin, K.S. Park, J.E. Son 2016, Sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) canopy photosynthesis modelling using 3D plant architecture and light ray-tracing. *Front Plant Sci*, 7:1–10
- Kwon J.K., I.H. Yu, K.S. Park, J.H. Lee, J.H. Kim, J.S. Lee, D.S. Lee 2018, Supplemental Lighting by HPS and PLS Lamps Affects Growth and Yield of Cucumber during Low Radiation Period. *J Bio-Env Cont*, 27, 400–406
- Kumar K. G. S., X. Hao, S. Khosla, X.Guo, N. Bennett 2016, Comparison of HPS lighting and hybrid lighting with top HPS and intra-canopy LED lighting for high-wire mini-cucumber production. *Acta Hortic*, 1134:111–118
- Lee J.W., H.C. Kim, P. H. Jeong, Y-G Ku, J. H. Bae 2014, Effects of supplemental lighting of high pressure sodium and lighting emitting plasma on growth and productivity of paprika during low radiation period of winter season. *Kor J Hort Sci Technol*, 32:346–352

- Lu, N., T. Maruo, M. Johkan, M. Hohjo, S. Tsukagoshi, Y. Ito, T. Ichimura, and Y. Shinohara (2012). Effects of supplemental lighting with light-emitting diodes (LEDs) on tomato yield and quality of single-truss tomato plants grown at high planting density. *Environ Control Biol*, 50: 63–74
- Park K.S., D.Y. Kwon, J.W. Lee, J.E. Son 2018a, Comparing photosynthesis, growth, and yield of paprika (*Capsicum annuum* L. 'Cupra') under supplemental sulfur plasma and high-pressure sodium lamps in growth chambers and greenhouses. *J. Bio-Env Cont*, 27:332–340
- Paponov M., D. Kechasov, J. Lacek, M.J. Verheul, I.A. Paponov 2019, Supplemental Light-Emitting Diode Inter-Lighting Increases Tomato Fruit Growth Through Enhanced Photosynthetic Light Use Efficiency and Modulated Root Activity. *Front Plant Sci*, 10:1656
- Pettersen R.I., S. Torre, H. R. Gislerød 2010, Effects of intracanalopy lighting on photosynthetic characteristics in cucumber. *Sci Hortic*, 125:77– 81
- Pham M.D., H. Hwang, S.W. Park, M. Cui, H. Lee, C. Chun 2019, Leaf chlorosis, epinasty, carbohydrate contents and growth of tomato show different responses to the red/blue wavelength ratio under continuous light. *Plant Physiol Biochem*, 141:477–486
- Pinho P., T. Hytönen, M. Rantanen, P. Elomaa, L. Halonen 2013, Dynamic control of supplemental lighting intensity in a greenhouse environment. *Light Res Technol*, 45:295–304
- Tewelde F.T., N. Lu, K. Shiina, T. Maruo, M. Takagaki, T. Kozai, W. Yamori 2016, Nighttime supplemental LED inter-lighting improves growth and yield of single-truss tomatoes by enhancing photosynthesis in both winter and summer. *Front Plant Sci*, 7:448
- Trouwborst G., J. Oosterkamp, S.W. Hogewoning, J. Harbinson, W. van Ieperen 2010, The responses of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. *Physiol Plant*, 138:289–300
- Watson R.T., M. Boudreau, M.W.V. Iersel 2018, Simulation of greenhouse energy use: An application of energy informatics. *Energy Informatics*, 1:1–14

# 보광 매뉴얼 원문



## 온실 보광 기술

Greenhouse Supplemental Lighting Technology

저술대학교 손정미  
 국립원예특작과학원 시설원예연구소 이종근  
 국립원예특작과학원 시설원예연구소 김원현  
 안동대학교 신종화  
 목포대학교 박경석  
 전주대학교 이준우  
 서울대학교 황인하

국립원예특작과학원 시설원예연구소  
 농림축산식품부·농업식품기술기획평가원

온실 보광 기술  
 Greenhouse Supplemental Lighting Technology

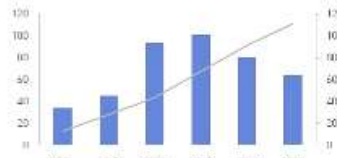
### 목 차

1. 시설과채류 온실 보광기술 현황	3	3. 3차원 광환경 해석 기반 조명 설계 기준	75
가. 국내외 시설과채류 온실 보광 현황	3	가. 온실 내 광 환경	75
1) 시설과채류 보광 기술	3	1) 온실 형태에 따른 온실 내 광환경	75
2) 국내외 스마트팜 시장 규모	4	2) 계절에 따른 온실 내 광환경	83
3) 온실 보광기술 적용	6	나. 외부 광 조건에 따른 보광 방법	86
4) 보광 시장규모	9	1) 일차산광량(DLI) 기반 온실 보광	86
2. 시설과채류 온실 보광기술 이론	15	2) 외부 일사 강도에 의한 온실 보광	91
가. 보광 방식 및 보광 원리	15	3) 생육단계에 따른 온실의 보광 효율	93
1) 보광 광원의 특성	15	4) 작물 수광량 기반 보광 효율 분석	99
2) 보광 방식	19	다. 식물 재식 밀도에 따른 온실 보광 방법	105
3) 보광 광원 배치	22	1) 광 조건별 작물 재식 밀도에 따른 보광 효율	105
나. 광환경과 작물 생육	29	4. 보광에 따른 시설 과채류 작물 생육 사례 분석	109
1) 시설작물 광 생리	29	가. 보광 광원 현상 설치 사례	109
2) 국내 지역별, 계절별 광환경	47	나. 보광 조건별 작물 재배 사례	112
다. 보광에 따른 시설 과채류 작물 생육 효과	59	1) 재배 조건	115
1) 보광에 따른 작물별 광합성 증진 및 광량비율성 변화 사례	59	2) 재배 결과	116
2) 보광에 따른 작물별 생산성 및 품질 증진 사례	64	3) 경제성 분석	119
3) 보광 광원의 적정 파장에 대한 연구 결과	68		



〈표 1.6〉 연도별 보광시설 지원 면적과 지원 금액

연도별	2014	2015	2016	2017	2018	2019	총합
수	34	45	34	101	82	64	418
면적 (ha)	12,89	15,06	15,72	23,89	23,73	10,90	111,15
연차별 누적	12,88	27,94	43,66	67,46	91,19	111,15	-
지원금액 (백만원)	577,90	615,49	494,90	690,88	542,58	699,51	3824,07



〈그림 1.1〉 연도별 보광 시설 수 및 액액 변화

〈표 1.7〉 지역별 보광시설 지원 면적과 지원 금액

지역별	광명	경기	강원	충청	전남	전북	제주	충남	충북	총합
수	28	103	25	54	128	37	1	28	14	418
면적 (ha)	7	28	7	11	31	14	0	6	5	109
지원금액 (백만원)	259	1,581	174	92	474	578	12	259	198	3625



〈그림 1.2〉 지역별 보광 시설 지원 면적 비율

◆ 주요 보광 적용 대상 작목

〈표 1.8〉 최혜유 지역별 보광시설 지원 면적과 지원금액

작목별	광명	경기	충청	전남	전북	제주	충남	충북	총합
수	134	97	46	8	3	24	2	1	275
면적 (ha)	46,93	10,19	9,89	2,26	1,37	5,30	0,19	0,30	77,26
지원금액 (백만원)	1827,59	402,29	487,11	116,19	30,08	320,67	10,43	7	3201,36
전년대비 변화(%)	247	-	-	91	-	354	163	47	842

〈표 1.9〉 재조합 작목별 보광시설 지원 면적과 지원금액

재조합	경기	도야도	전남	전북	전남	경기	전북	기타	총합
수	118	14	3	2	2	1	1	1	143
면적(ha)	26	6	1	1	1	0	0	0	34
지원금액 (백만원)	152	251	6	8	3	1	2	0	421
전년대비 변화(%)	6,421	5,706	-	728	0,031	3,488	1,486	-	26,580

4) 보광 시장규모

◆ 보광 광원 제조사

광장 조명 시장에는 Signify Holding(네덜란드), OSRAM(독일), Gavita(네덜란드), Valoya(핀란드), California Lightworks(미국), HeliSpectra AB(스웨덴), LumiGrow Inc.(미국), Hortilux와 같은 주요 기업이 있다. 또한 Schröder(네덜란드), Eye Hortilux(미국), ILLUMINAR Lighting(미국), GE Current, A Daintree Company(미국), PARsource(미국), GE Lighting, A Savant Company(미국), Hubbell(미국) 및 Agrolux(네덜란드) 등의 회사는 아시아 태평양, 유럽, 북미의 다양한 국가에 제조 시설과 본사를 두고 있다. 이러한 회사에서 제조한 다양한 광장 조명은 여러 가지 목적과 애플리케이션을 위해 다수의 이해 관계자가 구입하여 이용된다.

COVID-19는 다양한 조명 제조업체의 운영에 영향을 미칠 뿐만 아니라 공급 업체 및 유통 업체의 비즈니스에도 영향을 미쳤다. COVID-19 이전 수준과 비교하여 수출 총액과 감소와 시장 조정에 대한 국내 수요 둔화로 단기적으로 조명 시장 수요에 부정적인 영향을 미치고 약간 침체될 것으로 예상된다.

◆ 세계 보광 시장 동향

증가하는 식물 공급. 지속 가능한 개발의 필요성, 도시 농업의 증가는 현재 성장 조명 시장의 촉매제이며 신장하고 영향이 있는 요소. 아름다운 꽃꽂이, 향기로운 허브 등의 수요가 꾸준하다. 전자 상거래가 보편화 되고 빠른 하나로 주문이 가능한 시대가 되면서 이러한 수요는 더욱 증가할 전망이다.

이 분야에서 실내 농업은 작물 생산에 있어 고효율의 식물 재배용 조명 의존도가 높아 보광 시설의 큰 부분을 차지한다. 전 세계적으로 농업 회사의 증가는 업계에서 기술 제공 업체에 대한 글로벌 투자를 주도하고 있으며, 수직 농업과 같은 첨단 농업 솔루션에 대한 경향 또한 이러한 투자 유치에 큰 부분을 차지한다.

수요를 충족시키기 위해 농업 산업은 실내 농업, 수직 농업, 상업 온실, 도시 농업 등의 형태로 기술 변화에 대응하고 있다. 이러한 기술은 점점 더 편안해지고 있으며, 이는 미래 농업 기술에 대한 수요를 주도하고 있다. 보광 관련 제품의 개발과 기술의 발달과 함께 전 세계 정부는 농업인들이 재배 방법을 혁신할 수 있도록 돕고, 또한 이러한 장비의 채택을 촉진하기 위해 보조금을 지급하고 있다.

최근의 잦은 이상기후와 지구 온난화는 이러한 수직 농업 방법과 같은 혁신적인 농업 기술의 개발이 진행되고 있으며, 이러한 결과로 광장 조명 시장도 같이 성장하고 있다. 하지만 높은 열치, 옥외 보수 비용은 시장 성장을 방해하고 있다.

식물 성장 조명 중 고효율의 LED 조명은 농업생산 비용을 줄이는 데 도움이 될 것으로 예상되며, 전 세계의 농업 회사의 LED 기반 조명 솔루션 수요는 꾸준히 증가하고 있다. 스프링클러의 수직 농업 기술 회사인 IGS(Intelligent Growth Solutions)는 LED 광장 조명 효율을 높이고 식물 생산을 향상시키는 수직 농업 솔루션을 개발하고 있다.

⑤ 상당한 시장 점유율을 차지할 것으로 예상되는 실내 농업

대규모 이루어지는 실내 농업에는 직사광선을 모방하여 완전히 대체할 수 있는 재배 조명이 필요하다. 일부 응용 분야에서는 햇빛보다 성능이 높은 광원이 등장하기도 하였다.

다, 실내 재배 조명은 식물이 크고 견강하며 강하게 자라도록 최적의 적색 및 적외선 파장으로 구성된다. 식물이 붉은빛을 감지하면 특별한 광수용체를 사용하여 임플라스트 분해되는 것을 막는 호르몬을 방출하기도 한다. 따라서 붉은 빛은 꽃과 씨앗, 과일을 재배하는 능력 외에도 크고 견강한 식물을 생산하는데 필수적이다. 반대로 적색광이 너무 많으면 쇠약하고 가시가 많은 식물이 발달 가능성이 있으므로 적외선 조절 또한 필요하다. 콜로리다 대학 환경과학(2019년 8월)의 연구자들은 명스, 핑크의 장(노르의 빛, 10초의 어둠) 조사로 30% 에너지를 감소하여 작물 생산이 가능함을 보였다.

#### ② 성장 조명 소프트웨어 및 서비스의 확대

성장 조명 소프트웨어 및 서비스 부문의 시장은 하드웨어 부문보다 훨씬 성장할 것으로 예상된다. 다양한 종류의 소프트웨어 솔루션은 성장 조명 시스템에 사용되어 플랜트 품질을 개선하고 플랜트마다 다양한 조명 요구 사항을 충족하며 생산을 극대화하는데 필요한 최적의 조명 환경을 만들고 유지한다. 성장 조명 시장에서 운영되는 회사는 소프트웨어와 함께 유지 보수 및 수리 서비스도 제공한다.

#### ③ 인터라이팅(Inter-lighting)

인터라이팅 기술은 조명 유행병으로 가장 심각한 보일 것으로 기대한다. 인터라이팅은 보통 광을 충분히 받지 못하는 캐노피의 중간 또는 하부의 하부에서 수광율을 향상시킨다. 인터라이팅은 디라이팅보다 높은 조명 효율을 제공하며 작물 생산량 증대에 더 효과적이다. 인터라이팅에는 주로 LED 조명이 많이 사용되며, 보이모와 오이 재배를 위한 온실 수의 증가는 인터라이팅 시장의 성장을 주도 할 것으로 예상된다.

#### ④ 수직농업

수직농업은 세계 여러 지역에 설치되고 있다. 특히, 유럽, 중국, 한국, 일본 및 한국은 수직농업 프로젝트의 리더 그룹이다. 2018년 5월 Signify(네덜란드)는 Truvaglini Spa

(이탈리아)의 새로운 사업부인 Truvaglini FarmTech와 공동으로 밀라노에 이탈리아 최초의 수직농장 식물 연구소를 개발한다고 발표했다. 또한 Toshiba Corporation(일본)과 Panasonic Corporation(일본)은 재배자들이 세계 여러 지역에 수직농장을 설립하기 위해 재정 및 기술 지원을 제공하기 시작했다. 성장 조명 시스템의 주요 공급자인 General Electric Company(US)는 일본의 여러 도시에 수직농장 체인을 구축하기 위해 Mirai, Inc.(일본)과 협력하고 있다. 수직 농업의 이러한 발전은 향후 몇 년 동안 재배 조명에 대한 수요를 높일 가능성을 제시한다.

#### ⑤ 대마 생산 사업의 확대

대마초 산업의 시장은 더욱 가속화되고 있다. 높은 RoI, 대마초 합법화, 새로운 수직농장 및 온실 건설을 위한 자금 증가는 전 세계적으로 LED 성장 조명에 대한 수요를 증가시키는 요인이다. 대마 식물 재배를 위한 광 스펙트럼은 전체 수확량과 품질의 안정성을 담보하기 위해 꾸준히 연구되고 있다. 가시광선 영역 외의 대마 식물의 돌진 할당에 관여하는 광선에 대한 연구와 이를 위한 성장 조명의 개발이 요구되는 상황이다.

#### ⑥ 아시아 태평양 지역 보광 시장의 성장

아시아 태평양 지역은 성장 조명이 가장 빠르게 성장하는 지역 중 하나이다. 수직농업, 시설 하우스 및 생산성과 같은 도시 농업의 급격한 증가는 이 지역의 성장 조명에 대한 수요를 촉진하고 있다. 한국, 일본, 대만, 중국과 같은 국가는 이 지역의 성장 조명 수요의 주요 원천이며 다른 많은 국가는 유지되거나 확대될 것으로 예상된다.



#### ◆ 보광 시장 과제

조명 기술 산업에서 LED, 인디언 및 칩리스아와 같은 신기술에 대한 제품 품질 평가를 위한 표준 테스트 기준의 부재가 일반적인 주요 과제이다. 미국의 경우, 에너지부(DOE)는 ANSI(American National Standards Institute), NEMA(National Electrical Manufacturers Association) 및 IES(Illuminating Engineering Society of North America)를 포함한 다양한 표준 조직과 협력하여 SSL 표준을 개발하고 있다. 출력, 광량과 작동 수명의 검증이 제품 품질의 주요 평가 기준이다. LED 성장 조명 제조업체는 수년간의 연구와 테스트를 통해 제품의 리용 수명이 30,000시간에서 50,000시간 사이로 향상되었다고 주장한다. 하지만 제조업체마다 자체 LED 제조 기술이 다르고 테스트 방법도 다르다. 결과적으로 LED 성장 조명의 수명을 정확하게 검증하기가 어렵고 제조업체가 제품에 대해 허위 주장을 할 가능성이 있다. 따라서 제품 품질을 객관적으로 평가하기 위한 표준 테스트 기준의 설정이 중요하다.

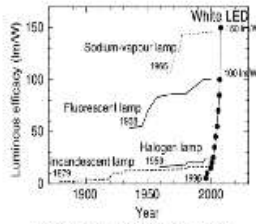


가. 보광 방식 및 보광 광원

1) 보광 광원의 특성

◆ 보광 광원의 특성

① 에너지 이용 효율



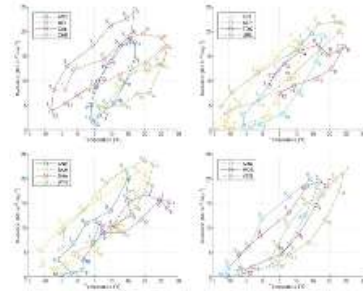
〈그림 2.1〉 다양한 광원 기술의 발전 효율 비교

여러 가지 광원 중 LED는 최신의 광원 기술이며 다른 광원에 비해 발전의 속도가 매우 빠른 특징을 보인다.

16 온실 보광 기술, Greenhouse Supplemental Lighting Technology

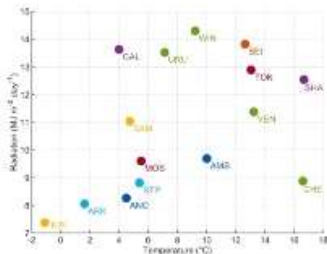
〈표 2.1〉 광원성 분석을 위한 15개 선정 지역 목록

지역	국가	위도(°N)	경도(°E)	국경(°m)
AMS	Amsterdam, The Netherlands	52.30	4.77	-2
ANC	Anchorage, Alaska, USA	61.22	-148.85	42
ARK	Arkhangelsk, Russia	64.53	40.37	13
BEI	Beijing, China	39.80	116.47	31
CAL	Calgary, Canada	51.12	-116.02	1084
CHI	Chengdu, China	30.67	104.05	506
KRI	Kiruna, Sweden	67.82	20.33	492
MOS	Moscow, Russia	55.75	37.63	156
SAM	Samara, Russia	53.25	50.45	44
SHA	Shanghai, China	31.40	121.45	6
STP	St. Petersburg, Russia	59.97	30.20	4
TDK	Tokyo, Japan	36.18	140.42	35
URU	Urumqi, China	43.78	87.85	935
VEN	Venice, Italy	45.50	12.33	6
WIN	Windsor, Canada	42.27	-82.97	180

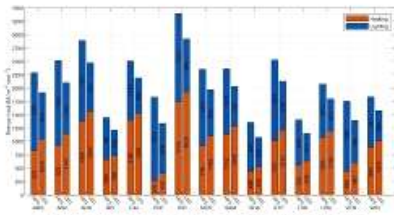


① 온실 평균 값을 나타낸 숫자, ② 온도는 한 척의 값을 나타냄  
〈그림 2.2〉 고적온 15개 지역의 연간 전 지구 일사량 및 실제 기온주기

02 시설과채류 온실 보광기술 이론 17



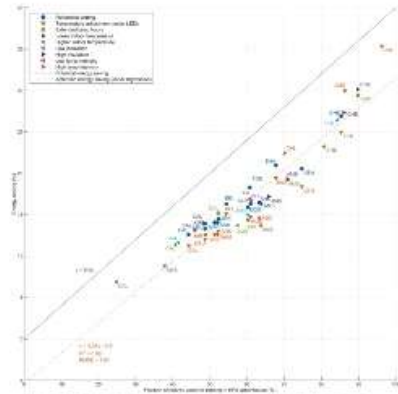
〈그림 2.3〉 고적 온 15개 지역의 연간 평균값 및 실제 기온 평균



〈그림 2.4〉 선정지역에서의 HPS와 LED 온실의 보광/보온 요구량 비율

에너지 요구량은 세계 위치에 따라 크게 다르나 모든 위치의 LED 온실은 HPS 온실보다 더 많은 난방을 필요로 한다.

16 온실 보광 기술, Greenhouse Supplemental Lighting Technology



〈그림 2.5〉 전 세계 15개 지역에서의 HPS와 LED 에너지 요구량 비교  
① 온실 난방 요구량에 투입되는 에너지의 절감량 시뮬레이션

HPS 및 LED 조명의 효율은 각각 1.6과 3.0 μmol·J<sup>-1</sup>이다. 광학적 에너지 전환율은 LED로의 전환이 난방 요구를 증가시키지 않는 경우의 에너지를 절약할 수 있는 것으로 나타난다. 위의 시뮬레이션 결과에 따라 LED로의 전환에 따라 온도 설정값이 1°C 올라갈 때 이다 예상 에너지 절약률이 1.5% 감소한다. LED로 전환 시 예상되는 상대적 에너지 절약량과 HPS 온실에서 조명에 투입되는 에너지 값을 간에는 양의 선형 상관관계를 보인다. 또한 HPS 램프에서 LED로 전환하면 온실의 난방 수요가 증가하여 총 에너지 사용량을 절약할 수 있다. 세계의 다양한 기후와 여러 온실 조성상 대부분의 경우에서



LED로 전환 시 조광을 위한 전기 투입은 40%가량 절약할 수 있지만 이에 따른 단광 수요가 9~49% 증가할 수 있다. 이에 따라 기의 또는 하우스에서 온 에너지 투입량이 LED로 변경 시 10~25% 절약될 수 있다.

## 2) 보광 방식

### ◆ 상부 및 하부 보광 방식의 이론과 형태

온실 재배에 보광을 도입하는 데 있어서 가장 일반적인 방식은 HID (High-intensity discharge)를 활용한 상부 보광이다. 이러한 HID 등은 대부분 사방이 비능직임을 위해 사방하도록 설계되었으나 그 중 고압 나트륨등 (HPS)는 현재 개발된 HID 중 식물의 성장을 위해 가장 적절한 스펙트럼을 제공하는 가장 경제적으로 대량 생산되는 광원이기 때문에 온실 보광에 널리 적용되고 있다. 이러한 HPS를 활용한 상부 보광은 저광량 광합성 유도 방식(PAR)을 제공하기에 가장 유용하고 고효율을 나타내는 광원일 뿐만 아니라 광원에서 발생하는 과도한 열에너지는 온실 내 공기 및 작물의 온도를 증가시키는 부가적인 효과가 있다. Braut 등<sup>3)</sup>은 고압나트륨등을 활용하여 온실에서 보광할 경우 전체 난방 부하의 25~41%를 절감으로부터 보충할 수 있는 것으로 보고하였다. 이러한 HID를 활용한 상부 보광에서는 일반적으로 광원의 작을 작물로 유도하기 위해 반사판을 필요로 하므로 반크러스는 광 반사와 효율성을 제공하지만 백광 입사량이 농작물에 도달하는 것을 막는 부작용이 있다. 또한, 광원에서 발생하는 상당량의 열이 파이프, 작물의 조직에 해를 입히는 것을 방지하기 위해 작물과 광원 사이의 상당한 열의 격리를 필요로 한다.

이러한 전통적인 상부 보광 방식의 경우 작물 근방 상단부에서 주로 광을 흡수하게 되는데 이 경우 상호 음영이 발생하므로 중립 PAR이 근방 하단부로 전달되지 못한다. 하부 보광은 작물 근방 내부로 직접 조광을 적용하여 방사 효율을 높이기 위한 목적으로

3) Braut, D., Gayraud, C., Billy, R., & Gosset, A. (1988). Contribution of HPS lighting to the heating requirements of a greenhouse. Paper-American Society of Agricultural Engineers (ASAE).

적용된다. 이러한 하부 보광 방식은 상대적으로 광을 적지 발생하고 에너지 전환 효율이 우수한 LED를 주로 활용하고 있다.

이러한 LED는 원하는 특정 스펙트럼을 인위적으로 조성하는 것이 용이하기 때문에 작물 생육에 적합한 스펙트럼을 설계하는 과정에서 이점을 갖고 있다. 하부 보광은 작물의 생산성을 향상시킬 수 있을 뿐 아니라 에너지를 절약하는데 유용한 것으로 나타났다. 그러나 하부 보광 방식의 에너지 효율의 이점은 광원에 따라 광원에 개별 광원을 공급할 수 있다는 점에 있다. 이는 드라도, 피르리가 등과 같은 대형 파이프를 지배하는 데 있어서 작물의 생장 단계에 따라 보광을 맞춰서 적절한 보광을 제공할 수 있게 한다.



〈그림 2.5〉 상부 보광 및 하부 보광 설치 예시

### ◆ 하부 보광 방식의 효과 선행 연구

Gomez 등(2013)은 도마도 재배농가에 상부 및 하부 보광 처리 효과를 비교한 결과 전반적으로 유사하게 반응하는 것으로 보고하였다. 두 방식의 보광 조건은 보광하지 않은 대조군과 비교하여 초기 3개월 생장을 유도했다(상부 보광의 경우 26일, 하부 보광의 경우 24일). 마디 수, 과실 수, 총 과실중량도 보광에 대응하여 증가하였다. 그러나 두 개의

4) Gomez, C., Moreno, R. C., Borrero, C. M., Maso, G. D., & Mitchell, C. A. (2013). Comparison of miniature light-emitting diode (LED) and traditional high-pressure sodium lamps for supplemental lighting of greenhouse-grown tomatoes. HortTechnology, 23(1), 95-98.

보광 방식 사이에 어떤 차이도 관찰되지 않았다.

〈표 2.2〉 온실 내 보광 처리에 따른 토마토 성장 및 수확 현황

보광 처리	수확 시기	과실 수	수확량 (kg/㎡)	수확량 (kg/구)
HPS+CHL	68 a	46 a	57 a	14,150 a
LED+CHL	66 a	45 a	94 a	13,406 a
대조군	44 b	35 b	67 b	0,067 b

p < 0.05

에너지 소비 측면에서 상부 보광에 비해 하부 보광은 사용한 에너지 절약량의 효과를 나타냈다. 상부 보광 처리의 하부 평균 에너지 소비량은 129kWh로 하부 보광 처리의 하부 평균 소비량보다 훨씬 높았다. 수확 과실의 동일 소비 에너지당에 대한 결과는 하부 보광의 과실중량으로의 전기 전환 효율이 상부 보광의 전기 전환 효율보다 75% 더 높았다. 따라서 상부 보광 아래에서 지배되는 평균 크기의 과일당 조광 비용은 하부 보광을 사용하는 것보다 60% 더 높았다.

〈표 2.3〉 보광 처리에 따른 전기 에너지 소비량, 비용 및 토마토 수확 자료

작물 자료	대조군	HPS+CHL	LED+CHL
최소 에너지 소비량(kWh)	-	129 a	31 b
최대 에너지 소비량(kWh)	-	19,578	4,697
시들당 최대 소비량(kWh/㎡)	-	1,224	294
전체 시들당 과실 수확량(kg)	0,067,10 b	14,159,20 a	13,406,00 a
과실 생산량당 에너지 소비량(kWh/kg)	-	0,08	0,02
에너지 효율(kg/kWh)	-	0,06	0,06
에너지 효율(kg of fruit)	-	0,004	0,001
평균 과실 생산량(kg)	135,00 a	144,90 a	142,04 a
평균 비용(kg/㎡)	-	0,58	0,15
보광 비용(kg/㎡)	-	61,18	14,68

p < 0.05

## 3) 광추적 시뮬레이션 기반 보광 광원 배치에 따른 온실 광환경 분석

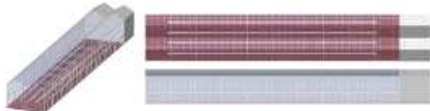
### ◆ 근방 상부 보광 광원 배치에 따른 온실 내 광환경

근방 상부 보광 광원 배치에 따른 온실 내 광환경에 대해 분석하기 위해 온실 및 보광 광원을 3차원 모델링하였다. 온실은 완전 시뮬레이션구조에 위치한 영도농 온실의 신속 작물 배양으로 구축하였다. 온실 규격은 폭 7.2m 길이 45.0m 높이 4.0m이며, 총 4 열의 작물 재배 라인이 150cm의 열간 간격으로 배치되어 있다. 온실을 구성하는 바닥, 골조, 커터, 스탠드, 배치, 피복 유리 등의 자재는 광학의 특성을 신속하여 시뮬레이션에 적용해 주었다.

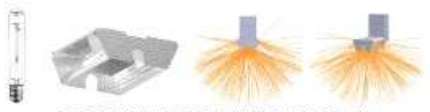
온실 내 상부 보광 광원은 Dutch lighting innovation사의 1000W 고압 나트륨등(HPS)을 기준으로 하여 3차원 모델링하였다. 광원과 반사각의 실제 형태를 반영하였으며, 광원의 광학 특성을 광추적 시뮬레이션 소프트웨어를 통해 적용해 주었다. 이후 광원에서의 거리별 광도를 신속하여 시뮬레이션 결과와 1:1 비교함으로써 3차원 HPS 광원 모델의 정확성을 확인하였다. 일반적으로 작물 상부에 HPS 보광 광원을 설치할 경우 광중심이 발생할 수 있도록 보광 광원을 적지 형태로 배치하는 것이 일반적이다. 따라서 광추적 시뮬레이션을 위한 광원 배치 결정 과정에서 근방 상부 보광 광원이 적지 형태로 배치되도록 하였다. 이후 두 가지 조건에 따라 상부 보광 광원의 배치를 조절하였다. 첫 번째로 광원과 작물 재배 라인의 위치에 따라 광원을 작물 재배 라인 바로 위에 위치시키는 것과 작물 재배 열 사이에 위치시키는 방식으로 나누었다. 두 번째로는 같은 재배 열 내 광원 사이의 간격을 4.0, 5.0 m의 두 가지 경우로 설정하며, 총 네 가지의 상부 보광 광원 배치에 따른 온실 내 광환경을 분석하였다.

광추적 시뮬레이션을 통하여 상부 보광 광원 위치에 따른 온실 내 높이별 광도분포가 계산되었다. 모든 광원 배치에서 온실 내의 높이별 광도는 광원에서부터의 거리가 멀어질수록 따라 급격히 감소했다. 특히 온실 최하단부인 50cm 구간의 경우 75μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 미만의 낮은 광도를 보였다. 광원을 작물 재배열 사이에 놓을 경우 온실의 가운데 구역은 높은 광도 분포를 보였다. 온실의 가장자리 부분은 광도는 비교적 낮은 값을 보였다. 광

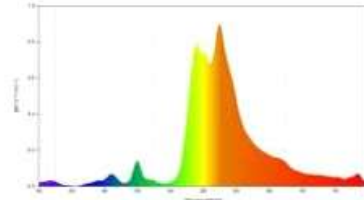
원을 작을 제때릴 바로 위에 놓을 경우 2.0m 높이에서 높은 평균 광도를 보였다. 광원 사이의 간격이 좁을수록 광원과 광원 사이에 위치한 구역의 광도 분포는 균일해진다. 5.0m 간격으로 광원을 배치할 경우 광원의 바로 아래 지점에서 광도는 4.0m 간격 배치와 큰 차이가 나타나지 않았으나, 광원 사이의 공간에서의 광도는 급격하게 낮아졌다. 광원과 광물 캐비 라인의 위치, 그리고 광원 사이의 거리가 광 분포에 미치는 영향은 같은 개수의 광원을 배치할 3×8과 4×6 배치의 비교로 알 수 있었다. 3×8 배치에서는 광원 아래의 광도는 4×6 배치에 비해 낮았으나, 광원 사이에서 더 높은 광도를 보이는 것을 알 수 있었다.



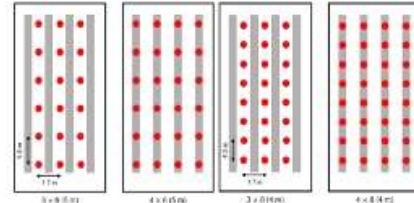
(그림 2.7) 광유체 시뮬레이션에 사용된 3차원 렌더링 은실 모듈



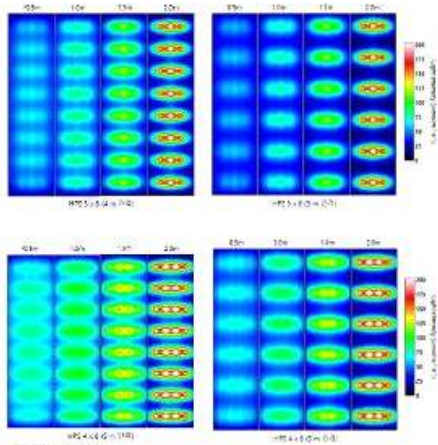
(그림 2.8) HPS 광원 및 방사체의 설치 형태와 3차원 HPS 광원 모델



(그림 2.9) HPS 광원 광원의 분광 특성



(그림 2.10) 은실 내 HPS 광원 배치를 위한 배치 모드



(그림 2.11) 은실 내 HPS 광원 배치를 위한 배치에 따른 조명량 분포

(표 2.4) 은실 내 HPS 광원 배치를 위한 배치에 따른 광원 아래 및 광원 사이 지점의 조명량 분포 (단위: umol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)

광원 배치	HPS 광원 아래				HPS 광원 사이			
	1.0 m	1.5 m	2.0 m	2.5 m	1.0 m	1.5 m	2.0 m	2.5 m
3×8	56±8.2	64±13.6	76±25.6	95±48.8	50±6.4	53±9.4	53±15.7	46±21.0
3×6	48±8.1	57±13.3	70±25.4	87±48.6	37±4.5	37±6.2	33±9.5	24±9.7
4×8	71±9.3	82±13.6	97±26.1	121±49.7	65±7.1	69±10.7	68±18.7	60±23.2
4×6	61±8.2	73±13.0	89±27.0	117±49.6	47±5.3	47±7.6	42±11.8	31±11.2

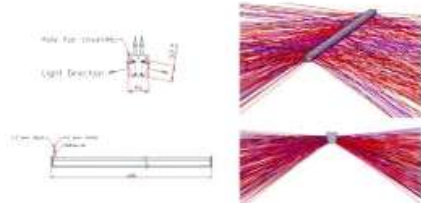
±: 은실 내 조명량의 표준 편차

◆ 은실 내부 조명 광원 배치에 따른 은실 내 광환경

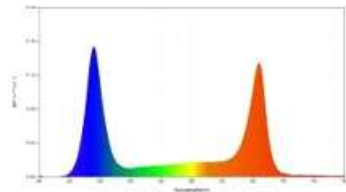
은실 내부 LED 보광 광원 역시 설치밀도를 바탕으로 3차원 모델을 구축하였다. LED 광원 및 조사 각도를 반영하였으며, LED 광원의 분광 특성을 광유체 시뮬레이션 소프트웨어를 통해 적용해 주었다. 은실 내부 보광 방식은 주로 작물 중단부에 수직적인 광을 공급하기 위해 보광 광원이 작물 은실 내부에 가로지르도록 설치되는 은실 상부 보광 광원에 비해서 광원 배치가 작물 제배 라인과 큰 별관이 없으며, 은실 내에서 수평적인 위치에 의한 영향보다는 수직적인 위치에 따른 영향이 더 크다고 할 수 있다. 따라서 은실 내부 보광 광원의 경우 은실 내 수직적인 위치의 변화에 따른 광 환경 차이를 분석하는 데 초점을 맞추었다. 이에 따라 은실 내부 보광 광원으로부터 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m 거리의 광 분포를 분석하여 은실 내부 보광 광원 설치 시 은실 내 높이별 광 분포의 변화를 확인하였다.

HPS 상부 보광 광원에 의한 광분포와 다르게 LED 보광 광원으로 인해 발생하는 광선 또는 직사 광선점을 따라서 일광했으며, 제배 라인 사이 공간에서 눈에 띄는 차이를 보였다. 은실 가운데에 위치한 두 개의 제배 라인의 경우 광원이 가까운 거리에서는 높은 광도를 보였으나, 광원과 거리가 멀어짐에 따라 급격히 광도가 낮아지는 것을 볼 수 있었다. 다만 실제 작물 은실 내부에 LED 광원을 설치할 경우 광원으로부터 발생하는 빛을

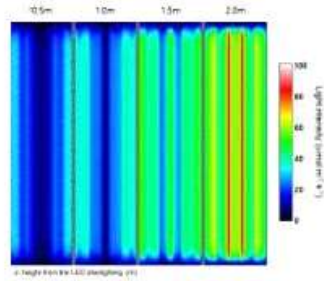
대부분 주변 개체의 옆에 흡수되는 양상용 보이기 때문에, 작물이 충분히 생육했을 경우 본 결과와 비슷한 광 분포는 크게 나타나지 않을 것이다. 다만 초기 생육 단계에서 작물의 초장이 이리 근위 내부 보광 광원의 설치 높이까지 닿지 않았을 경우에는 본 시뮬레이션 결과와 비슷한 광 분포 양상이 나타날 수 있을 것이다.



〈그림 2.12〉 LED 광원의 설계 형태(좌측)와 3차원 LED 광원 모델(오른쪽)



〈그림 2.13〉 LED 도광 광원의 분포 특성



〈그림 2.14〉 LED 보광 광원으로부터 거리에 따른 온실 내 광분포

나. 광환경과 작물 생육

1) 시설직접 광 생리

㉑ 광의 분포

광은 전자기파로 에너지의 한 형태이다. 식물에게 있어서 광은 물과 이산화탄소를 당과 산소로 바꾸는 광합성을 위한 에너지를 제공한다. 광은 또한 식물의 생장, 형태 형성, 착색, 개화 등 식물의 생장시 동안 일어나는 다양한 생리적 과정에 영향을 미친다. 식물에게 영향을 주는 주요한 광의 특성은 광량(광상 또는 파장 분포), 광질(광도 또는 에너지 밀도), 광주기(일장) 등이 있다.

◆ 광의 종류

전자파 중에는 파장이 짧은 것에서 긴 순으로 우추선(파장 10-15nm), γ선, X선, 자외선, 가시광선, 적외선, 마이크로파, 단파, 장파(파장 수 km)로 구분된다. 전자파의 에너지 세기는 파장에 반비례하고 진동수에 비례하며 파장이 긴 전파라는 에너지가 작고 짧은 파는 에너지가 크다.

자연광은 태양으로부터 지구에 도달한 것으로 여러 파장의 전자기파들의 혼합체이다. 태양으로부터 지표면에 도달하는 전자기파 파장은 주로 300-3,000nm이다. 이를 전자파 중 380nm 이하 파장인 자외선(UV)과 770nm 이상 파장인 적외선이 있고, 그 사이 380-770nm 범위의 파장의 전자기파가 바로 인간이 볼 수 있는 가시광선에 해당한다. 일반적으로 태양광이라고 하면 여러 파장의 전자기파 중 가시광선과 자외선과 적외선 일부를 포함한 전자기파를 의미한다.

가시광선은 파장에 따라 자외광, 청색광, 녹색광, 황색광, 주황색광, 적색광, 적외선으로 구분하며, 적외선은 770-2,500nm 사이의 근적외선과 2,500nm 이상의 원적외선으로 구분하며, 자외선 또한 파장의 범위에 따라 UV-A(320-380nm), UV-B(280-320nm), UV-C(100-280nm)로 구분한다.

식물생리학적 관점에서 300-800nm 영역이 전자기파가 식물의 광합성, 광주성, 굴광성, 광형태형성 등 다양한 생리의 영향을 주기 때문에, 이러한 파장 영역을 생리의 유효 범주라고 한다. 또한 이중에서도 400-700nm 영역의 광이 광합성에 활용되기 때문에 이를 광합성 유효 범주(photosynthetically active radiation, PAR)라 한다.

◆ 광도와 광량

광의 세기는 빛의 생육과 발달에 있어 결정적인 영향을 미친다. 이러한 광의 세기는 일사량, 온도, 광합성 유효 광량자속 밀도 등으로 표현한다. 일사량이란 단위시간당 단위 면적에 도달하는 복사에너지를 의미하며 단위는  $Wm^{-2}$ 나  $kcalm^{-2}$  등을 주로 사용한다. 조도란 사람의 눈이 인식하는 밝기 정도를 의미한다. 사람의 눈은 550 nm의 녹색광에 대해 비시감도가 가장 높으며 이러한 사람 눈의 비시감도가 반영된 광의 세기가 조도이다. 이러한 녹색광은 적외광 또는 청색광에 비해 광합성 효율이 상대적으로 낮기 때문에 식물 재배 관점에서 조도를 사용하는 것은 적절하지 않다. 식물의 광합성 효율은 엽록소에서 흡수되는 400-700 nm 범위의 광양자의 개수에 밀접한 관계가 있으므로 광합성 유효 광량자속 밀도(photosynthetic photon flux density, PPFD) 단위의 광의 세기가 식물 재배 관점에서 가장 적절하며, 이러한 광합성 유효 광량자속 밀도의 단위는  $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ 를 주로 사용한다.

지표면에서의 광의 세기는 태양의 고도에 영향을 주는, 위도와 경도, 계절과 시간, 분나나와 지역이나 작물의 군락 등에 영향을 받는다.

〈표 2.5〉 위도에 따른 일사량의 변화(단위:  $cal/cm^2$ )

위도	1월 평균	7월 평균	1월 평균	위도	1월 평균	7월 평균	1월 평균
0°	880	809	863	40°	694	1,051	326
15°	852	834	887	50°	601	1,015	181
20°	830	898	821	60°	500	1,002	51
30°	773	998	477				

\*) 참고: 시뮬레이션, 2021, 손영익 외, 향문사

이러한 광의 세기는 주로 1초 단위의 짧은 시간 동안의 순간적인 광을 표시하기 때문  
에 하루 중 시시각각 그 값이 변할 수 있다. 따라서 순간적인 광의 세기를 하루 단위로  
적산한 개념인 적산인사량 (daily light integral, DLI)을 사용하는 것이 과를 재배에 있  
어서 광 환경을 설정하기에 적합하다.

(표 2.5) 작목별 최적 생육을 위한 DLI 요구량

작목	DLI 요구량( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ )
요리채(기)	6~10
요리채(과)	10~15
엽채식물	6~10
낙엽채물	6~10
구근류	6~15
결구류	112
관상류	112
관목류	112
실용류	115
과채류	115

(표 2.7) 주요 시설재배작목의 최대, 최소 보광 광도, 최적 일장 및 최적 DLI

작목	최소 보광 광도 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	최대 보광 광도 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	최적 일장 (h)	최적 DLI ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ )
모리	120	350	18~20	20~30
마트리카	120	300	18~20	20~30
가지	150	300	20	20~30
도마도	170	350	18~20	22~30

조도 및사량, PPFD 간에는 반관이 가능하지만, 변환하기 위한 환산계수는 광원의 광  
질에 따라 달라지게 된다.

☞ Light management in controlled environments, 2017, Report 2, Akshay Mehta

(표 2.8) PPFD 기준 광원별 광 측정 단위의 변환

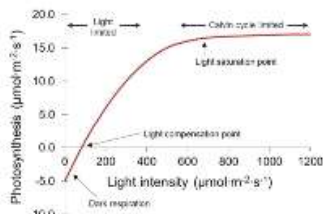
단위	특정 광원	이론 변환	1 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PAR의 변환					
			Sun	PPFD	MM	Cvt	INC	LED
혹광(foot-candle)	가시광선시각	신입(파라)	5,000	7.82	6.80	6.87	4.05	0.01
Lux	가시광선시각	신입(유일)	54	87	71	74	50	0.01
$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PAR	양자(Quantum)	원래 연구(인원)	1	1	1	1	1	1
$\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ PAR	DLI	원래 연구(인원)	평균 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\times 60\text{ s}\cdot\text{min}^{-1}\times 60\text{ min}\cdot\text{h}^{-1}\times 24\text{ h}\cdot\text{day}^{-1}\times 10^{-6}$					
$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (PAR)	PAR 에너지	공학	4.57	4.38	4.59	4.59	5.00	0.01
$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ (total)	총에너지	공학	0.51	0.56	0.59	0.54	2.98	0.01

PAR: 광합성 유효 방사(photoynthetically active radiation)  
Sun, 표준(Standard) PPFD, 고온-저온(High-temperature/low-temperature) PAR, 비광합성(Non-photosynthetic)  
Cvt, 광원(quantum) (Quantum) INC, 적산광량(daily light integral, DLI)

☞ 광과 작물 생육

작물이 생육하는 데 광이 영향을 주는 요인은 광합성, 광주기성, 광형태형성 등이 있으  
며, 이러한 영향에는 광량, 광리, 일장이 단독 또는 복합적으로 영향을 미친다.

일반적으로 PPFD로 표현하는 광도값과 DLI로 표현하는 광량은 일차적으로 광합성량  
에 직접적인 영향을 준다. 광도가 증가하면 광포화점까지는 광합성률이 증가하여, 이러한  
광합성은 작물의 종류 및 품종, 생육 기간 등에 따라 달라진다. 일반적으로 광포화점을  
기준으로 높은 광을 선호하는 호광성 식물과 낮은 광에서도 생육할 수 있는 호음성 식물  
로 구분한다.



(그림 2.15) 광도가 광합성에 미치는 효과의 예

광도가 광포화점 이상이 되면 광도가 증가하여도 광합성률은 증가하지 않아 광도의 생  
육에 크게 기여하지 않으며, 특히 높은 광도 조건에서 광조사 시간이 짧으면 생육량이 감  
소하게 된다. 또한, 광포화점 이하에서는 광합성량보다 호흡량이 높기 때문에 생육이 저  
해된다.

광도는 작물의 구조 및 형태에도 영향을 준다. 높은 광도 조건에서 작물은 엽이 작고  
두꺼우며, 진한 녹색을 띠며 절간 길이가 짧고 굵어진다. 낮은 광도 조건에서 작물은 반대  
로 잎이 넓어지고 두께가 얇아지며, 절간이 길어지는 도광현상이 나타날 수 있다. 저하부  
의 근경도 약재에서는 가늘고 결구리와 뿌리털의 발달이 감소한다. 그리고 무, 당근, 비  
프와 같은 작근류의 경우 동화산물이 감소하여 뿌리의 비대가 억제되고 당의 축적이 크  
게 감소한다. 광도가 낮으면 마늘과 양파의 인경 비대 또한 불량해진다.

생식기관의 발달 역시 광도에 영향을 받는다. 겨울철 약용 조건에서 작물은 광합성량  
이 충분하지 않기 때문에 동화산물의 생성이 적고 극저 발생과 알물 발달이 감소하여 과  
실의 비대가 불량해진다.

◆ 광질과 생육

광원은 작물의 생육 반응에 영향을 미치는 주요한 요인이다. PAR 영역의 광을 생육에  
가장 큰 영향을 미치는데, 특히 600~700nm의 적색광은 광합성과 개화 및 광형태형성  
에 크게 관여하는 영역이다. 적색광과 원적색광의 비율(R:FR ratio)은 파이토크롬  
(phytochrome)에서 감지되는데 R:FR 비율이 낮아질수록 식물이 도장하는 침지외의  
반응을 나타낸다. 이러한 침지외적 반응에는 녹화광도 관여하는 것으로 알려져 있다. 또  
한 절묘 식물의 경우 높은 FR 비율에서 개화가 지연된다. 적외선 영역 중 UV-A는 식물  
의 초장을 짧게 하고 열육을 두껍게 한다. 적외선은 인도시마닌계 식물 발현을 촉진하여  
산물의 품질을 향상시킬 수 있다. 800nm 이상의 적외선은 열선으로 작용하여 식물체에  
해로운 높이는 효과를 낸다.

◆ 일장과 생육

하루 중 낮의 길이인 일장 역시 작물 생육에 큰 영향을 미친다. 이러한 일장의 효과를  
경우성이라고 하는데 식물은 약한 광도의 경우에도 신호로 감지하여 일장에 반응한다.  
광주성에서 기준이 되는 일장을 한계일장이라고 한다. 한계일장보다 긴 조건에서 개화하  
는 식물을 일성식물, 한계일장보다 짧은 조건에서 개화하는 식물을 단일식물(short-day  
plant)이라고 하며, 일장에 무관하게 개화 반응이 나타나는 식물을 중성식물  
(day-neutral plant)이라고 한.

일장은 개화만을 뿐 아니라 기관의 분화와 발달, 휴면 등에도 크게 영향을 끼친다. 명  
구를 형성하는 채소류의 경우 일장이 짧을수록 적밀성이 높아지며 연구 행성이 촉진된  
다. 무는 단일조건에서 지상부 발육은 억제 되지만 저하부 비대가 촉진되며 생산성이 높  
아지며, 광원에서는 이와 반대로 반응한다. 마늘과 양파는 저온기를 거친 후 고온 광일  
조건이 주어지면 인경 형성이 촉진된다. 감자 및 구근베고니아, 달리아 등의 재배는 단일  
조건에서 형성 및 비대가 촉진된다.

㉔ 시설 내 환경경 특성

◆ 광질의 변화

시설 내 피복재로 주로 사용되는 자재는 알루미늄, 폴리스틱 필름 등이 있는데 이러한 피복재의 가시광선 투과율은 파장에 따라 거의 유사하기 때문에 가시광선에 있어서는 큰 차이에 차이가 나타나지 않는다. 하지만 자외선과 적외선은 각 물성에 따라 크게 다르기 때문에 시설 내 광질은 노지와는 다르게 된다. 일반적으로 PC의 경우 자외선과 적외선 투과율이 높다. 영화마린의 경우 자외선을 잘 투과시키지만 함께 첨가되는 가스제, 자외선 흡수제 등에 의해 투과율이 떨어진다. 일렉유피는 자외선과 적외선을 잘 투과시키지 못하며 유리섬유 강화 경질판은 유리의 비슷한 파장에 따른 투과율 특성을 보인다. 자외선 투과율이 낮은 유리온실, 멀칭이농온실의 경우 작물의 도장이 유발되며, 일부 피복재의 경우 파장의 밀도가 불균형하게 되어 작물의 작태가 잘 안되는 경우가 있다.

◆ 광량의 감소

① 골격재에 의한 차광

골격재에 의한 차광은 시설의 종류, 구조, 사용 자재에 의해 달라지게 된다. 온실의 골격물은 목공의 경우 철강 시설에 비해 높으며 플라스틱 온실에 비해 유리의 온실이 높은 편이다. 유리 온실이라고 하는데도 시설의 규모가 확장될 때면 온실 단지의 경우 골격물이 낮아질 수 있다. 플라스틱 온실의 골격재 중 마미프를 사용하면 차광률이 낮아질 수 있다.

② 피복재의 흡수와 반사

일반적으로 온실을 피복하는 자재인 유리, 폴리스틱 필름, 폴리스틱 필름의 광 투과율은 80~90%로 높은 수치를 가지고 있지만, 각 자재들의 관리에 따라서 낮아질 수 있다.

〈표 2〉의 온실 외부 소재의 특성\*

종류	광 투과율(%)	수명(년)	가연성
유리	90	30	비가연성
PC필름	85	20	불연
플러가코티드	82	10~15	불연
폴리제틸렌	80	3~4	불연

③ 피복재의 오염과 노화

피복재에 먼지, 흡수성분, 결빙을 등이 부착되면 광선투과율이 감소된다. 가스계가 첨가된 멀칭비닐은 먼지 등이 부착되기 쉬운 광선투과율이 급격히 감소할 수 있다. 유리, PE, PC, EVA 필름, 아크릴, 수지판 등은 먼지가 잘 부착되지 않는다. 폴리스티렌 필름은 물방울이 맺히기 쉬운 시설 내 광량을 감소시킨다. 추막하우스는 침윤이 많이 함유된 지하수를 사용할 경우 피복재가 심하게 오염시켜 광투과율을 크게 낮출 수 있다.



〈그림 2,16〉 새로운 마크필 투과율32mm 세로홀, 지두 20인 PC 필름(16mm 세로홀, 4)

◆ 광분포의 불균일

골격재의 광차단으로 생기는 그늘과 피복재의 입사각의 차이로 생기는 불균형인 광량의 감소로 인해 시설 내 광분포는 위치에 따라 달라지게 된다. 일반적으로 동서쪽 온실의 적외선 투과율이 남북쪽 온실에 비해 높다. 하지만 동서쪽 온실의 경우 골격재에 의한 차광되는 영역이 넓고 북쪽 지붕 입사각이 커서 약광도가 발생하여 북쪽부가 불균형하게 된다. 남북쪽 온실은 차광면으로 들어오는 태양광이 시간에 따라 이동하여 광투과율이 달라지게 되기 때문에 하루 평균으로 동서동보다는 불균형하게 된다.

① 지붕 조건에서의 식물 생육

일 제노라에 의한 그늘 조건은 주로 광합성용량 스펙트럼(400~700nm)에서의 광 스펙트럼 감소시켜 빛의 양과 스펙트럼 구성의 변화를 일으킨다.

◆ 생장속도, 순동화율, 건물중에 대한 입연적 비율에서의 효과

음지에서 자라는 식물은 일반적으로 상대적으로 더 많은 광합성 산물과 여러 자원들을 투자한다. 이러한 식물들은 더 높은 LAR(Leaf Area Ratio, 전체 생육량 또는 생체중에 대한 입연적 비율)을 가진다. 음지에서 자라는 식물의 밀은 상대적으로 낮으며 높은 SLA(Specific Leaf Area)와 낮은 잎 밀도를 가진다. 이는 상대적으로 단의 면적당 작고 작은 palisade mesophyll cell(핵상 엽육 세포)과 연관이 있다. 이러한 일은 단위 생체중 대비 높은 엽록소 함량을 보이는데, 이는 결과적으로 양자에서의 밀과 비교하여 단위 면적당 엽록소 함량이 비슷하다. 하지만 이러한 일은 단위 엽록소당 적은 단면적을 가지고 있다.

*Fagus cremata*의 생태형(일본 너도밤나무)과 같은 북분류는 두 개의 세포층을 포함한 두꺼운 핵상조직을 가진 양자잎(leaf)을 만들어낸다. 핵상 조직 내 세포층의 수는 조저층에 밀이 펼쳐지기 전 겨울의(winter buds)에서 관찰된다. 어린잎이 전개된 양자에서 가지에 유지 광량이 주어지면 그 잎들은 중간 특성을 보인다. 이러한 잎들은 두 개

의 세포층으로 이루어진 핵상 조직을 가지고 있지만, 핵상 조직의 높이는 양자에서 완전히 전개된 잎에 비해 낮다(Tereshima et al., 2006). 이러한 양상은 양자 잎의 핵상조직을 펼칠 때는 여러 다른 신호가 작용한다는 것을 의미한다. 일년생 허브인 *Cheopodium album*(청명아주름) 여러가지 방법으로 유지 조건에 두었을 때, 상숙한 잎을 높은 광량에 노출시켰을 경우 이전의 광자과 관계없이 발달하는 잎들이 두 개 세포층의 핵상조직을 만든다. 반면에 상숙한 잎이 유지 조건에 있을 경우 한 개 층의 핵상 조직을 만든다. 이러한 결과는 상숙한 잎의 광 환경이 새롭게 발달하는 잎의 핵상 조직 세포 층의 수를 결정한다는 것을 보여준다. 상숙한 잎에서 발달하는 잎으로 신호를 전달하는 신호 전달 시스템(signal-transduction system)이 있음을 알려준다. 상숙한 잎에서 신호는 세포 분열 방향을 조절한다. 미래의 양자 잎(양자에서 발달할 잎)에서 신호는 이에도 유사 분열과 더불어 핵상 분열을 유도하며, 반면에 유지 조건에서의 상숙한 잎은 유사 분열만을 유도한다. 이러한 신호는 광합성 산물의 풍부한 정도일 수 있다.

(표 2.10) 양지재 적용된 *Dactylis glomerata*와 음지재 적용된 *Dactylis polygama*의 성장 변수에 대한 상대적 총대(오차 범용), 일생량(100%)은 두 종 모두 동일한  $1.67 \times 10^4 \text{ g m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$  기준이다.<sup>7)</sup>

성장 변수	상대적인 양형			
	100	30	20	9.9
상대적 성장률(Relative growth rate, $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{day}^{-1}$ )				
<i>Dactylis glomerata</i>	98	88	88	36
<i>Dactylis polygama</i>	98	98	100	29
순일수(Net assimilation rate, $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$ )				
<i>Dactylis glomerata</i>	13.2	7.5	6.9	1.5
<i>Dactylis polygama</i>	8.6	5.9	5.0	0.7
엽면적 비율(leaf area ratio, $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ dry mass)				
<i>Dactylis glomerata</i>	7.4	11.7	12.7	38.0
<i>Dactylis polygama</i>	11.2	15.0	17.0	38.8
엽면적(Specific leaf area, $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ dry mass)				
<i>Dactylis glomerata</i>	28.8	36.4	33.7	66.6
<i>Dactylis polygama</i>	31.7	35.4	40.4	74.9
잎 질량 비율(leaf mass ratio, $\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ )				
<i>Dactylis glomerata</i>	0.26	0.34	0.37	0.57
<i>Dactylis polygama</i>	0.36	0.41	0.42	0.52
잎 질량 밀도(leaf mass density, $\text{kg} \cdot \text{dry mass} \cdot \text{m}^{-2}$ )				
<i>Dactylis glomerata</i>	217	217	217	142
<i>Dactylis polygama</i>	247	248	244	155
뿌리 길이 비율(root length ratio, $\text{m} \cdot \text{g}^{-1}$ dry mass)				
<i>Dactylis glomerata</i>	141	105	102	59
<i>Dactylis polygama</i>	110	92	88	96
뿌리 길이(Specific root length, $\text{m} \cdot \text{g}^{-1}$ dry mass)				
<i>Dactylis glomerata</i>	287	282	303	416
<i>Dactylis polygama</i>	278	277	279	407

7) Hyde, P., & Lick, I. (2000). Consequences of phenotypic plasticity vs. interspecific differences in leaf and root traits for acquisition of aboveground and belowground resources. *American Journal of Botany*, 87(3), 402-411.

표 2.10은 지평도에 대한 형태학적인 순회와 적응 결과를 요약한 것이다. 음지 회피 식물인 *Dactylis glomerata*의 음지 조건에서 생장에 의한 상대생장을 감소시키는 증가는 *Dactylis polygama*에 비해 적다. 이는 보다 *Dactylis polygama*의 음지에서의 LAR(엽면적 비율) 증가가 보다 강했기 때문이다. LAR의 상대적으로 강한 증가는 SLAR(엽면적)의 높은 증가와 LMR(잎 질량 비율)의 낮은 증가 때문이다. LAR 증가의 조건은 아마도 *Chenopodium album*을 통해 고탈량 신호 전달(signaling)과 연관되어 있을 것이다. LAR 증가는 음지 조건에서 보다 많은 생장을 제한하는 요소(growth-limiting resource)를 포함하는 데 기여한다. 위 또는 잎과 뿌리 사이의 물질 할당에 대한 균형을 보여주고 있다. 전체적인 맥락은 음지에 대한 반응으로 할당과 및 형태의 변화가 생장-제한 요소(들)의 포기를 최대화한다는 것을 알려주며, 이러한 음지에 대한 순회는 음지 적응 식물에서 더 극명하다.

덜정한 균아 아래에서와 같은 아주 낮은 광량 조건에서, 많은 음지 회피 식물들은 물은 광량 실험에서 확인하였을 때 긍정적인 상대생장율(RGR)을 보일 수 있음에도 불구하고 생장하지 못한다. 따라서 양지 적응 식물과 음지 적응 식물의 분포를 설명하는 추가적인 요소들이 있을 것이다. 미세 잎의 수명이 중요하다. 내구성 식물은 보다 오랫동안 광을 유지하는 경향이 있으며, 따라서 잠재적인 광합성 수치를 증가시킨다. 음지에서 생장하였을 때 빠르게 생장하는 열대 나무들은 천천히 자라는 나무들과 비교하여 보다 높은 지시 물을 관한 마나라 높은 LAR과 낮은 RMR을 보인다(Kiillima, 1994). 내구성 식물들은 또한 음지 회피 식물과 비교하여 백린균이나 초저성 생물에 대하여 최적화된 방어에 보다 많은 할당을 할으로써 잎 손상을 최소화한다. 더불어, 증가한 줄기 신장 속도는 음지 회피 식물을 막아줄 수 있다.

◆ 음지에 대한 적응

특정 광 조건에 대한 순회와 더불어 특정 허용도 있다. 즉, 특정 광 기구에 스스로 분포를 제한하는 유전적 구조를 가진 식물들이 있다. 간단히 말해 세 가지 식물 전략이 있다.

1. 음지를 회피하는 식물, 또는 절대적 양지 식물(obligate sun plants)
2. 음지에 내성이 있는 식물, 또는 조건적 양지 또는 음지 식물(facultative sun or shade plants)
3. 음지를 요구하는 식물, 또는 절대적 음지 식물(obligate shade plants)

많은 경우종과 대부분의 작물은 절대적 양지 식물이다. 절대적 음지 식물은 열대 우림의 여러 이끼류, 양치식물, 적응, 일부 관다발 식물들을 포함한다(예를 들어 *Monstera*와 *Philodendron* 속 식물들), 관다발 식물들 중에서 온대 지역의 침엽의 음지 식물은 드물며, 이 경우는 여기에서 다루지 않는다. 대부분의 하등 식물들은 절대적 음지 식물보다는 조건적(facultative) 식물이다.

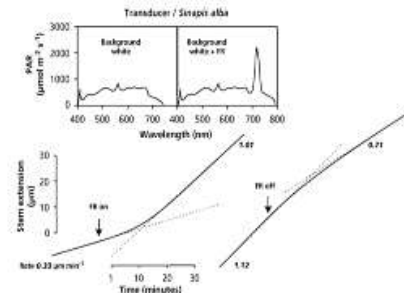
◆ 줄기와 엽병 신장 및 찾기

음지 조건에서 음지 회피 식물의 줄기와 엽병 신장은 굉장히 증가되며, 가지 분열(branching)은 감소되고(결어우새상 증가), 줄기면적과 잎 두께 정도는 낮으며, SLA는 증가한다. 잎 굴곡 그들의 효과는 광량 감소 효과와 직역/횡적역의 비율에 의한 효과도 구분될 수 있다.

음지 조건에 내성이 있는 식물은 줄기 신장이 증가하는 반응을 나타내지 않으며, 대신 엽면적을 증가시킨다. 음지 회피 식물에 비해 잎의 두께는 감소하며, 단위 엽면적당 엽록소의 함량은 증가한다. 이러한 엽록소 함량의 증가는 *Azadirachta* spp.(아이비)나 열대 우림의 하층 식물들과 같은 여러 식물들이 암록색(dark-green)어게 한다. 음지에 대한 내성이 덜 강한 식물들도 단위 생체중당 엽록소 함량을 증가시킨다. 하지만, SLA이 동시에 증가하기 때문에 단위 면적당 엽록소의 함량은 증가하지 않으며 암록색으로 보이지도 않는다.

적색/외적색 비율(R/FR)은 655-665nm와 725-735nm 방사 조도( irradiance)의 비율이다. 열린 자생지(open habitats)에서의 식물과 닫힌 자생지(closed habitats, 숲의

하층부 음지에서의 식물의 비교는 양지에 적응한 식물의 줄기 신장이 음지 식물에 비해 R/FR에 좀 더 길하게 반응하는 것을 보여준다. R/FR의 변화에 대한 줄기 신장에서의 효과는 10분에서 15분 이내에 기록될 수 있다(예를 들어 *Sinapis alba*, 백지자).



(그림 2.7) 위치(공간) 민감도변환기(location-sensitive transducer)에 의한 줄기 신장 속도(초 단위) 측정. 위에서 붉은색(white fluorescent light)이 초산 변형기가 무제한 또는 불완전 측정 소스를 거쳐 원격성을 보인다. 원격변환은 표시한 결과 같이 커지고 커졌다. 실선은 실측된 줄기 신장을 보여주며, 점선은 가장 잘 맞아떨어지는 초기와 마지막 신장 속도(실) 값의 재시되는 곱셈을 보여준다. 덧붙임 그림들은 원격변환이 있거나 없는 백지 빛의 반응 조성을 보여준다.<sup>8)</sup>

8) Smith H 1981. Adaptation to shade. In: Johnson GB ed. Morphological Processes Limiting Plant Productivity. London: Butterworths, 189-173

◆ 피어트크롬의 역할

R/FR의 감지는 피어트크롬 시스템과 연관이 있다. *Ligna straelens*(cowpea, 동북의 R/FR에 대한 줄기 신장 반응은 지베렐린에 대한 반응과 비슷한다. 삼체로 빛에 의한 줄기 신장 억제에 지베렐린에 대한 조직 반응성의 감소와 연관이 있다. 지베렐린 그리고/또는 피어트크롬의 작용이 영향을 받은 여기상태 돌연변이는 피어트크롬 반응의 완전한 발현을 위해서는 완전히 지베렐린 시스템이 완전히 기능을 해야한다는 것을 보여준다. 이러한 피어트크롬 반응은 줄기 신장의 반응 및 반응이 생장에 대한 직접적인 반응이기보다는 호르몬이 억제되어 있다는 것을 명확하게 보여준다.

(표 2.11) 백화점(bleached) *Phaseolus sativus*(문두콩) 요 줄기의 체내 세포벽 특성제 대한 인종, 직육면체, 형질량의 효과\*\*

	Dark	Red light	Blue light
Elongation rate, $\mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	9.2	3.3	3.0
Turgor potential, MPa	0.53	0.59	0.58
Osmotic potential, MPa	0.84	0.82	0.83
Yield threshold(Y), MPa	0.05	0.15	0.33
Yield coefficient(C), $\text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	19.1	7.8	15.8

\*일과 생장속도 차이는종과 R: 백화점(bleached)은 R: 백화점(bleached).

◆ 피어트크롬과 크립토크롬: 세포벽 탄성 변수에 대한 영향

적색광과 청색광 모두 줄기 신장을 억제한다. 크립토크롬 광수용체는 청색광의 인지와 연관이 있다. 적색광과 청색광 모두 세포의 삼투 투과성이나 팽창 리텐션 보다는 세포벽 특성에 영향을 준다(표 2.11). 줄기 신장은 세포 신장의 결과이며(RV x L). 이것은 세포벽 탄성계수, 팽창, 삼투 함지점과 연관이 있다. 적색광은 주로 세포벽 탄성계수(S)의

50 Kigel, J., & Cogoli, D. J. (1997). Photoinhibition of stem elongation by blue and red light affects osmolytic and cell wall properties. *Plant physiology*, 154(4), 1049-1056.

감소를 통해 세포 신장을 억제하는 반면 청색광은 주로 생장 억제점(Y)을 높이는 것을 통해 영향을 한다. 이것은 음지 조건이 광합성 산물의 직접적인 공급을 통해 생장에 영향을 주기보다는 피드포워드 반응(현상이 일어나기 전에 결함을 예측하고 반응을 조절하는 반응)을 통해 영향을 준다는 것을 의미한다.

◆ 총 광량의 영향

총 광량은 음지 외의 식물의 LAR과 SLA를 결정하는 주요 요인이며, 생식단계의 구공 포함 및 잎 사용에서 영향을 준다. 음지 최대 사용은 음지 조건에서 구공 잎의 질량 비율을 희생하면서 줄기 신장을 증가시켜 스템드립 구상에 반응한다.

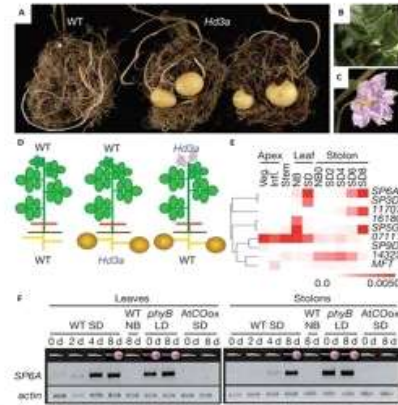
세 종의 온대성 음지 내성 목본류(*Acer pseudoplatanus*(갈타나무), *Fagus sylvatica*(유럽너도밤나무), *Fraxinus excelsior*(구주물푸레나무))가 청 변화도에 반응하는 것을 비교하였을 때 유럽너도밤나무는 다른 두 종과 비교하였을 때 가지에 좀 더 많은 생체물량을 할당하였고 증가에는 크게 합당하였다. 모든 종의 RGR과 LMA는 광 변화도가 증가할수록 증가한 반면, LAR은 감소하였다. NAR 또한 광 이용도에 따라 증가하였다. 이 연구는 세 종의 식물이 빛에 따라 달라지는 반응을 보여주며, 음지 내성과 관련 하여 종 간의 광적인 구별을 허용한다(구주물푸레나무<유럽너도밤나무><유럽너도밤나무>). 광량에 대한 반응은 단 광지 시스템을 설계로 하는 반응이다

◆ 일점의 영향

일점의 길이는 광점과 단일 식물의 개화 반응에 영향을 주며, 생식경량에 직접적으로 변하는 않는 영향뿐만 아니라 광점 형질(예를 들어 *Solanum tuberosum* 감자에서도)도 영향을 준다. 이러한 효과는 피어트크롬 시스템을 설계로 하여 식물이 받는 총 광량이 따라 달라지는 변화들로 인해 달라진다. 단에 같이 감자가 절단되었을 때 개화가 유도된 당(*Alcotiana tuberosum* 일이 감자(*Solanum tuberosum*))의 광점 형상을 유도한다는 것은 흥미롭다. 언더월스 피어트크롬 B 감자가 광점 형성이 있어 피어

트크롬 B의 역할의 증가를 제시한다.

빛의 길이는 빛을 통해 감지되며, 잎은 개화 유도나 과실 형성을 위해 줄기 꼭대기나 지하부 줄기로 이동하는 이동성이 있는 신호를 받는다. 이동성이 있는 *FLOWERING LOCUS T1(T1)* 단백질은 먼 거리 가는 11origen(플로리겐) 또는 개화 호르몬의 주요 요소이다. 감자에서 *FT orthologue*(동원체인 *Hd3a* 유전자)는 광일 환경에서 과실 형성을 위해 일정한 단일성 감자 도입을 유도한다. 과실 유도는 결박을 통해 전달될 수 있으며, *Hd3a* 단백질은 결박 식물의 기는 줄기(stolon)에서 발견되며 이 단백질의 수송이 과실 형성과 연관되어 있음을 보여준다. 이러한 감자의 개화와 과실 형성으로의 전환은 독립적인 환경 신호에 반응하는 두 개의 *FT-like* 이원체(*SST3D*와 *SST6A*)에 의해 조절되고, *CONSTANT7*와 연관이 있는 오토릴레이(autorelay) 메커니즘이 과실 형성 조절 *SST6A* 유전자의 발현을 조절한다는 것을 보여준다.



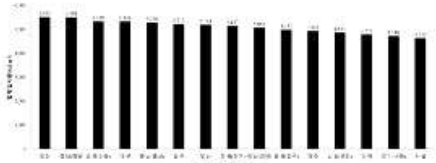
(그림 2.10) 감자에서의 개화 형성. (A) *Hd3a* 계통(7일간의 오토월스)은 야생형(*h1*-type 원종)과 다르게 초기 개화 시기를 결정한다. (B) C) 야생형과 관련된 초기 개화 *Hd3a* 계통. (D) *Hd3a* 기증(donor, 오른쪽)이나 자형(recv, 왼쪽)에 의해 형성된 야생형 식물의 감자와의 과실 유도. 야생형은 감수가 과실을 형성하지 못하도록 조절한다(왼쪽). 빨간 줄은 압출 부위를 의미한다. (E) *FT*-에 *FT-like* 유전자의 상대적인 발현. *FT1*, *FT2*, *FT3*, *FT4*, *FT5*, *FT6*, *FT7*, *FT8*, *FT9*, *FT10*, *FT11*, *FT12*, *FT13*, *FT14*, *FT15*, *FT16*, *FT17*, *FT18*, *FT19*, *FT20*, *FT21*, *FT22*, *FT23*, *FT24*, *FT25*, *FT26*, *FT27*, *FT28*, *FT29*, *FT30*, *FT31*, *FT32*, *FT33*, *FT34*, *FT35*, *FT36*, *FT37*, *FT38*, *FT39*, *FT40*, *FT41*, *FT42*, *FT43*, *FT44*, *FT45*, *FT46*, *FT47*, *FT48*, *FT49*, *FT50*, *FT51*, *FT52*, *FT53*, *FT54*, *FT55*, *FT56*, *FT57*, *FT58*, *FT59*, *FT60*, *FT61*, *FT62*, *FT63*, *FT64*, *FT65*, *FT66*, *FT67*, *FT68*, *FT69*, *FT70*, *FT71*, *FT72*, *FT73*, *FT74*, *FT75*, *FT76*, *FT77*, *FT78*, *FT79*, *FT80*, *FT81*, *FT82*, *FT83*, *FT84*, *FT85*, *FT86*, *FT87*, *FT88*, *FT89*, *FT90*, *FT91*, *FT92*, *FT93*, *FT94*, *FT95*, *FT96*, *FT97*, *FT98*, *FT99*, *FT100*. (F) *SPT6A* 발현의 반 상향적인 RT-PCR 분석. 시스콘 2일 형성이 유도되지 않은 개는 줄기 또는 과실을 보여준다.

100 Naruno, C., Abou-Saada, J. A., Chu-Oi, F., Giallari, C. A., Taniuchi, S., Sato, J., ... & Imai, S. (2010). Control of flowering and storage organ formation in potato by FLOWERING LOCUS T. *Nature*, 470(7367), 119-122.

2) 국내 지역별, 계절별 광환경

㉑ 지역별 광환경

○ 우리나라의 주요 도시의 면 평균 누적 일사량은 대전, 경남(창원), 경북(안동), 대구, 충남, 광주 순이며, 가장 높은 일사량을 나타내는 대전을 100%로 하였을 때 제주 도는 89.55, 강원도는 88.39, 서울은 84.14 정도로 나타난다.



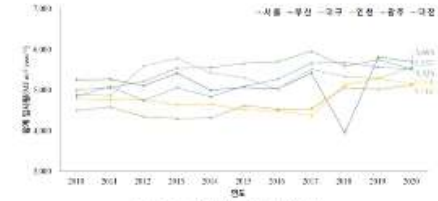
〈그림 2.19〉 지역별 누적 일사량<sup>1)</sup>

○ 우리나라에 도입하는 연간 합제일사량은 지난 10년간 지역에 따라 증가 혹은 감소하였는데, 5대 광역시의 경우 2010년에 비하여 8.51(부산)~15.81(서울)%(가량) 증가하였으며, 주요 사도 중 전남(경진), 경남(창원)은 감소하였으며 나머지 충북(청주), 경북(경주), 경기(수원), 경북(안동)은 연간 누적 합제일사량이 2.6(제주)~16.5(충주)% 증가하였다. 이는 태양 복사에너지량이 10년마다 0.05%가량 증가할 것으로 예측한 것(NASA, 2003)에 비하여 매우 큰 수치이다.

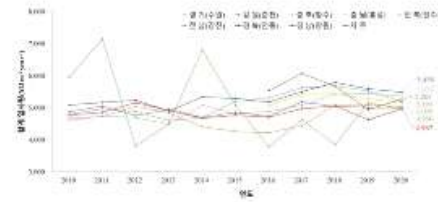
○ 따라서 저구에 도달하는 일사량은 증가하고 있지만, 온실 내에 도달하는 광량은 피복재, 구조물, 식물체에 의하여 차단되기 때문에 실제 온실 내에 투과되는 광은

1) 기상청 기상자료재포장팀

50~70%에 불과하다(Son, 2013). 이 때문에 작물 생육에 이용되는 일사량은 여전히 부족한 실정이며, 특히 주요 시설 과채류인 토마토, 파프리카의 경우 온실 내부에서 2~3m 높이의 균락을 이루게 되어 광 부족현상은 더욱 심화된다.



〈그림 2.20〉 광역시의 연간 합제일사량<sup>1)</sup>

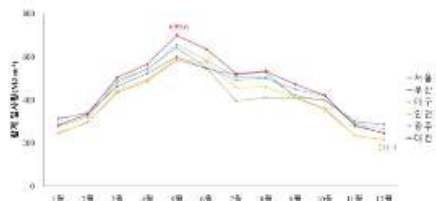


〈그림 2.21〉 주요 시도의 연간 합제일사량<sup>1)</sup>

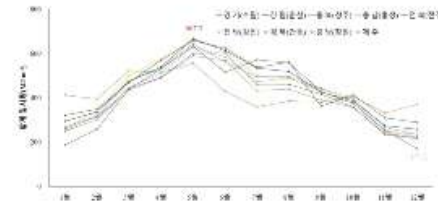
㉒ 계절별 광환경

○ 우리나라는 사계절이 뚜렷하여 여름철(하지~추분)에 일광이 길어지면서 단위 시간 당 일사량이 증가하며, 반대로 겨울철(동지~춘분)에는 일광이 짧아지고 단위 시간 당 일사량이 감소하는 것으로 알려져 있다. 실제 월별 합제 일사량이 가장 높은 시기는 5월이며, 가장 낮은 시점은 12월로 나타났으며, 두 시기의 월 합제 일사량 차이는 평균 381.1MJ·m<sup>-2</sup>였다.

○ 12월 월 합제일사량이 가장 적은 지역은 제주도(171.2 MJ·m<sup>-2</sup>)였으며, 그 뒤로는 인천(372.3), 강원(383.4), 서울(366.7) 순으로 나타났다.



〈그림 2.22〉 광역시의 월별 합제일사량<sup>1)</sup>



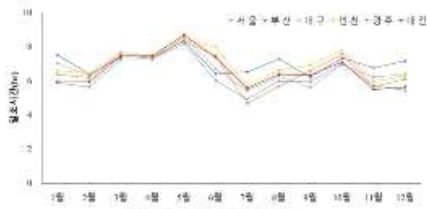
〈그림 2.23〉 주요 시도의 월간 합제일사량<sup>1)</sup>

○ 계절에 따라서 일조시간(일광)도 변화하는데, 앞서 언급했던 계절성 기후를 고려한다면 겨울철에 가장 일조시간이 낮아 하지만 여름철 장마 기간으로(7월~9월)도 인하여 7월의 일조시간이 5.3시간으로 가장 짧게 나타났다. 평균 일조시간은 5월(8.0시간)에 가장 길었다.

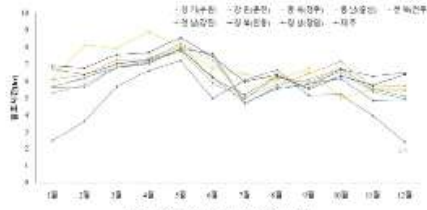
○ 긴 일조시간을 보인 지역은 충남(8.9시간), 경북(8.6), 대전(8.4) 순이었으며, 일조시간이 짧은 지역은 제주(2.4시간), 서울(4.5), 경기(4.6) 순으로 나타났다.

○ 일조시간의 편차는 제주(4.8시간)에서 가장 컸으며, 부산(1.8)에서 가장 적은 것으로 나타났다.





(그림 2.24) 상악시의 월별 일조시간<sup>11)</sup>

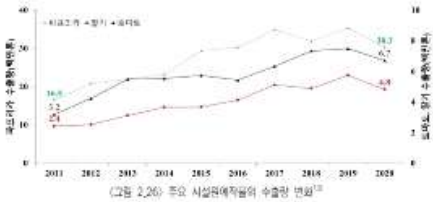


(그림 2.25) 주요 시도의 월별 일조시간<sup>11)</sup>

(표 2.13) 주요 시설원예 작물의 수출 금액<sup>1)</sup>

작물명/연도	1995	2000	2005	2010	2015	2020	비율(%)
파프리카	14,407	49,700	68,770	92,184	134,361	160,611	
파프리카	-	-	53,146	59,302	85,213	86,437	53.8
딸기	4,856	9,530	4,406	26,125	33,027	53,747	33.5
토마토	3,523	22,949	8,828	6,642	12,932	15,721	8.8
오이	5,532	9,886	1,361	163	753	613	0.4
수박	-	2,379	270	530	492	594	0.4

○ 파프리카의 수출량은 30.3백만톤(11)→16.5백만톤(20)으로 1.83배 증가하였으나, 딸기는 1.98배, 토마토는 2.1배 증가하였다. 파프리카의 경우 99%가 일본으로 수출되고 있으며 토마토는 일본(64%), 러시아(19%)이다. 최근 대일 관계가 악화됨에 따라 시설 과채류 수출량이 감소하였으나, 점차적으로 회복됨 것으로 전망하고 있다.



(그림 2.26) 주요 시설원예작물의 수출량 변화<sup>12)</sup>

11) 농림수산식품진흥법, <https://www.lsi.go.kr/>

③ 주요 시설 과채류 생산자의 작업 환경

- 시설 안에서 재배되는 작물은 양치류, 과채류의 비율이 매우 높으며(87%), 과채류 중 수박, 딸기, 토마토, 풋고추 순으로 재배면적이 크다.
- 그 중 토마토와 파프리카는 연중재배가 가능하여 단위면적당 생산량이 높으며, 지장실이 우수하여 주요 수출 작물로서 각광 받고 있다. 또한 복합환경 제어온도(장·양수분 등)를 통한 생산량 증수 효과가 우수하여 스마트팜 주요 품목이다.

(표 2.12) 시설원예 작물별 재배 온도 및 과채류 생산량<sup>1)</sup>

작물	재배면적 (ha)	생산량 (1,000톤)	과채류	과채류 면적 (ha)	생산량 (톤)	면적당 생산량 (톤/ha)
총합	54,443	2,441	수박	9,329(24.1%)	391,340	41.97
			딸기	6,421(16.8%)	233,281	36.33
근거지	556	24	토마토	5,700(14.7%)	358,980	62.84
업태	9,031	261	풋고추	4,256	175,843	41.32
			오이	3,963	324,815	81.96
과채류	38,676 (71.0%)	1,934 (79.2%)	참외	3,488	147,040	42.16
			포도	3,060	166,716	54.16
양념채소	2,669	73	양배	1,488	39,551	26.62
			파프리카	728	80,770	110.56
기타	3,478	166	가지	243	17,603	72.44

○ 1990년대에는 오이, 토마토, 딸기가 수출의 주요 작목이었으나, 오이 수출이 점차적으로 줄어들고 파프리카, 딸기, 토마토 등을 중심으로 수출 시장이 개편되었다. 시설원예작물의 수출액은 68,770억원(2020)으로 2015년에 비해 19.5% 증가하였다.

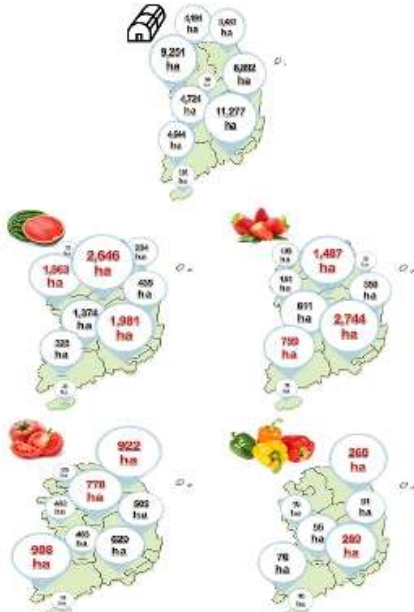
12) 시설원예 과실생산 및 채소와 생산실적, 2019

(표 2.14) 파프리카, 토마토 수출 국가<sup>2)</sup>

수출국	수출액 (백만 달러)	금액 (천만 달러)	도매율	평균 (달러)	금액 (천만 달러)
일본	30,211 (69.8%)	86,211	일본	4,135 (64%)	11,887
홍콩	29	136	러시아	1,233	1,564
대한	25	89	중국	897	1,060
중국	3	12	몽골	89	464
러시아	0	2	필리핀	78	145

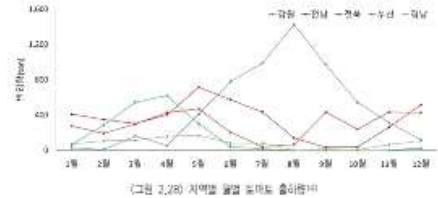
○ 지역별 시설원예 분포를 살펴보면 경남(11,277ha), 충남(9,251ha), 경북 (6,892ha) 순으로 분포되어 있으며, 주요 시설 과채류의 재배지역 분포는 (그림 2.27)과 같다.

○ 토마토 재배면적은 강원도(922ha), 전라남도(908ha), 충청북도(778ha), 경상남도 (629ha) 순이며 파프리카의 경우 경상남도(269ha), 강원도(260ha)에 집중되어 있다.



□그림 2.27) 지역별 시설 과채류 재배 면적 분포<sup>12)</sup>

○ 도미도의 페프리카의 주 생산지인 강원도에서는 여름 수확 작형을 주로 실시하고 있는데, 이는 남부지역에서 작물재배가 불가능한 휴식기(7~8월)에 강원도 지역에서는 무냉장 혹은 보그냉장을 통한 생산이 가능한 점을 이용한 것이다.

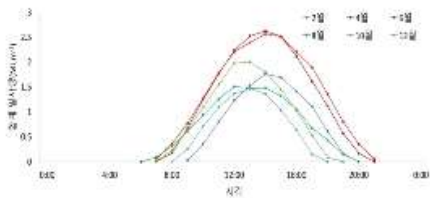


□그림 2.28) 지역별 월별 월평균 온도 추이<sup>13)</sup>

○ 강원도(춘천) 지역의 여름 수확 작형은 일사량이 증가하는 5월부터 수확이 이루어 지는데, 일사량이 높은 환경에서 수확을 지속하기 때문에 겨울 수확 작형에 비해 수확이 우수한 것으로 알려져 있다.

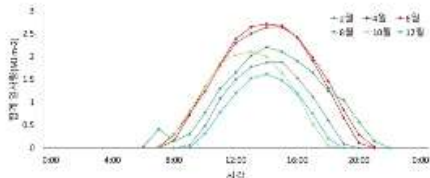
○ 2020년도의 경우 8월달 긴 장미로 인하여 일사량이 급격히 감소하였고 이 때문에 보야도의 꽃형성 및 과자가 불량하여 이에 대한 대책으로 보정 시설을 도입하고자 논의하는 농가가 늘어나고 있다.

13) 기상청, 2020



□그림 2.29) 계절별 월중 일사량<sup>14)</sup>(춘천, 2020)

○ 경상남도(창원) 지역은 겨울 수확 작형을 주로 실시하여 6~7월달에 육묘하여 7월 말~8월 중순에 정식하여 재배한다. 작과기간 10월부터 일사량이 점차 감소하기 때문에 여름 수확 작형에 비하여 초기 생육, 화가가 느리다는 단점이 있다. 결국 후기(4~5월)에는 강한 장파 높은 온도로 인하여 일소와 발생을 방지하기 위하여 차광스크린을 이용한다.



□그림 2.30) 계절별 월중 일사량<sup>14)</sup>(강릉, 2020)

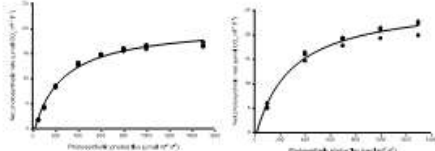
(표 2.15) 국내 주요 시설과재배 생산 지역의 월별 평균 DLI<sup>15)</sup>(2010-2020년의 평균)

지역	[592 mol·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> ]											
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
서울	16.2	22.7	28.8	30.5	38.8	37.6	26.2	27.3	28.2	24.0	16.0	14.5
수원	20.8	25.7	30.7	35.8	39.8	37.4	34.3	26.1	28.2	26.5	20.7	19.0
인천	20.5	26.2	32.7	37.2	43.6	40.0	33.7	33.7	29.8	26.4	20.0	17.6
용주	16.5	22.5	29.5	34.0	39.1	35.3	30.4	30.5	28.2	23.4	16.1	14.4
대전	18.5	24.5	31.5	37.3	42.6	37.7	32.7	33.3	30.9	27.8	19.7	16.2
충청	18.8	25.5	33.5	38.7	45.4	43.6	34.6	35.5	32.4	28.0	19.2	16.4
충천	16.7	22.9	28.8	33.6	39.2	38.9	28.2	29.2	26.7	23.2	16.4	14.6
전주	17.2	24.0	29.4	33.8	39.8	41.4	30.6	30.6	28.6	23.8	16.1	14.4
광주	16.5	23.0	29.6	35.2	41.9	40.0	31.5	32.6	29.4	25.1	17.0	15.0
경안	17.5	25.6	33.2	39.3	43.9	42.2	33.2	34.2	30.2	25.5	17.1	15.7
대구	17.8	24.3	31.5	36.6	42.7	38.6	32.8	32.9	30.4	26.4	19.2	15.7
안동	21.4	30.2	34.7	35.3	38.8	39.5	23.8	25.6	26.1	25.9	22.7	24.6
부산	19.6	25.6	31.6	37.0	44.3	42.1	35.5	34.4	29.2	25.7	18.8	17.1
창원	21.3	26.6	31.2	38.1	43.7	42.8	35.7	37.3	24.8	21.4	21.3	19.2
제주	12.5	19.7	29.2	36.4	42.0	35.4	38.0	37.1	29.4	25.0	17.4	11.4

## 다. 보광에 따른 시설 과채류 작물 생육 효과

## 1) 보광에 따른 작물 광합성 증진 및 광형태형성 변화 사례

## II) 보광에 따른 작물별 광합성 증진 효과



(그림 2.31) 토마토(과피와 과육의 경우)의 광형태에 따른 광합성 속도 그래프

○ 광합성 증진으로의 보광의 효과: 보광이란 광량이 부족한 조건에서 작물의 광합성 증진을 목적으로 인공광을 조사하는 것을 의미한다. 보광은 일조시간의 연장, 요일 남의 주간조명 및 야간조명의 3가지 방식을 통해서 작물의 총 동화산물 생산량을 늘리는 것을 목적으로 한다. 일조 연장은 일출 전, 일출 후 또는 야간 중의 일정한 시간에 보광을 실시한다.

○ Red(660nm):Blue(450nm)=7.5:2.5 LED를 이용하여  $144\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 6시간 보광하는 토마토에 대해 추가적으로 far-red(735nm)를  $43\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  추가 투광 보광해주었을 때 전체 식물의 바이오매스가 9~16% 증가함<sup>15)</sup>.

○ 600W HPS 및 Red(627nm), Red(627nm):far-red(770nm)=100:41, Red(627nm):Blue(450nm)=61:39 LED를 이용하여  $230\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 토마토에 투광

15) Zhang, Y. T., Zhang, Y. Q., Yang, Q. C., & Yan, L. (2019). Overhead supplemental far-red light stimulates tomato growth under incandescent lighting with LEDs. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(1), 62-69.

보광하였을 때 SPAD 값, 직육의 열면적과 엽 건물중이 증가하였으며 이 중 600W HPS 보광의 경우 광합성 속도가 증가하였으며 Red(627nm):Blue(450nm)=61:39 LED의 경우 열면적에는 차이가 없었으나 엽 건물중이 증가함<sup>16)</sup>.

○ Red(670nm):Blue(435nm) LED를 이용하여  $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 토마토에 6시간 보광하였을 때 하단 열육의 기공 밀도 및 하단 엽육과 중단 엽육의 기공 크기, 기공 전도도, 엽육 전도도가 증가하였으며  $V_{\text{cmax}}$ ,  $J_{\text{max}}$ , 카복실화 효율 (CE) 등의 광합성 지표가 증가함<sup>17)</sup>.

○ Red(670nm):Blue(435nm) LED를 이용하여  $200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 토마토에 6시간 보광하였을 때 잎의 건물중이 증가함<sup>18)</sup>.

○ Red(632nm):Blue(440nm)=4:1 LED를 이용하여 요일 남의 조건에서  $220\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 토마토에 6시간 보광하였을 때 엽면적의 엽록소 함량 및 광합성 속도, 광포화점이 증가하였으며 지상부 건물중을 증가시킴<sup>19)</sup>.

○ cool white 및 warm white, Red를 조합하여  $17\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 의 DLID 상측에 보광하였을 때 건물중, 엽록소 함량, 크기가 증가함<sup>20)</sup>.

16) Kim, H. J., Liu, M. Y., & Mitchell, C. A. (2019). Light spectral red thermal properties govern biomass allocation in tomato through morphological and physiological changes. *Environmental and Experimental Botany*, 157, 229-240.

17) Li, Q., Liu, Y., Tian, S., Jiang, X., Li, S., Li, Y., & Zhang, D. (2019). Effect of supplemental lighting on water transport, photosynthetic carbon gain and water use efficiency in greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae*, 250, 108604.

18) Li, Q., Liu, Y., Tian, S., Jiang, X., Li, S., Li, Y., & Zhang, D. (2019). Effect of supplemental lighting on water transport, photosynthetic carbon gain and water use efficiency in greenhouse tomato. *Scientia Horticulturae*, 250, 108604.

19) Terasaki, T. T., Shino, K., Muray, T., Takagaki, M., Kawai, T., & Yano, W. (2016). Supplemental LED (incandescent) lighting components for a shortage of light for plant growth and yield under the lack of sunlight. *Plant sci*, 130(1), 6026692.

20) Wenzler, G., & van Iersel, M. W. (2010). Longer photoperiods with adaptive lighting control can increase growth of greenhouse-grown tomato (*Glycinecystis esculenta* var. *marmande*). *HortScience*, 50(4), 573-580.

○ 400W HPS를 이용하여  $65\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 토마토에 보광하였을 때 광합성 속도, 엽록소 함량이 증가함<sup>21)</sup>.

○ 400W HPS를 이용하여 6시간에서 생육 시기에 따라 65~350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 보광 효과가 있었으며, 이에 상응하여 건물중 및 엽록소 함량이 증가하였음<sup>22)</sup>.

○ 400W HPS를 이용하여 6시간 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 6시간 보광하였을 때 증산량이 증가하였으며, 보광을 통해 일정을 연장시켜주었을 때 광합성량이 증가하였음<sup>23)</sup>.

○ 100% Red LED를 이용하여 60  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (50% duty ratio) 광도로 6시간 유묘에 보광하였을 때 광합성 속도 및 엽록소 함량이 증가함<sup>24)</sup>.

○ white LED를 이용하여 약 350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 말기에 보광하였을 때 광합성 속도, 식량에 높이, 열면적, 지상부와 과실의 건물중이 증가함<sup>25)</sup>.

○ 400W HPS를 이용하여 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  내외의 광도로 저출력 황색단교주에 3시간 보광하였을 때 식물의 키가 증가하고 과실수가 증가하였음<sup>26)</sup>.

21) Eshoul, B. M., Gossett, A., Hsu, X., Papadopoulos, A. P., & Dorais, M. (2013). Greenhouse covering materials and supplemental lighting affect growth, yield, photosynthesis, and leaf carbohydrate contents of tomato plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 123(5), 819-824.

22) Hsu, X., & Papadopoulos, A. P. (1998). Effects of supplemental lighting and cover materials on growth, photosynthesis, biomass partitioning, early yield and quality of greenhouse cucumber. *Scientia Horticulturae*, 80, 1-18.

23) Turcato, G., & Gossett, A. (1999). Influence of continuous and discontinuous supplemental lighting on the daily variation in stomatal exchange in greenhouse cucumber. *Scientia Horticulturae*, 40(9-12), 1037-1059-692.

24) Hernandez, B., Dragunsky, A., & Kubota, C. (2014). Pruning effects of supplemental LED lighting on cucumber seedlings growth and morphology in greenhouse. *Acta Horticulturae*, 1037, 879-892.

25) Ishida, K., Iino, K., Iwanaga, H., Miyoshi, Y., Takayama, T., Sureshchandra, K., Saito, M., & Okamura, M. (2013). Effect of supplemental lighting from different light sources on growth and yield of strawberry. *Environmental Control Biology*, 51(1), 41-47.

26) Kim, Y. B., Lee, J. H., & Park, M. H. (2011). Effects of supplemental lighting on growth and

○ HPS를 이용하여 120 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 토마토와 착색단교주에 보광하였을 때 일생 연장 효과를 통해 생체중 및 건물중이 증가하였으며, 24시간 연속 보광하였을 때 많은 광합성 동화산물이 과실로 이동하였음<sup>27)</sup>.

○ MEH를 이용하여 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 교주에 야간(17:00-5:00) 동안 보광하였을 때 지상부 및 지하부 건물중이 증가하고 열면적이 증가하였음<sup>28)</sup>.

II) 보광에 따른 작물별 광형태형성 변화

○ 형태형성 지표(열면적, 줄기 직경, 열면적, 열면적 등)은 작물의 천안적인 생육 상태를 나타내며, 열면적과 생식생장 수준을 나타내며, 열면적은 지질적으로 광합성 생산과 관련되어 있으며, 열면적 및 열면적 등의 형태형성은 육질적으로 과실의 수량과 연지체므로 그 변화는 분석할 필요가 있다.

○ White LED를 이용하여 외부일사 강도 제외 100W·m<sup>2</sup> 이하의 광도일 때 100  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 미브러기에 보광하였을 때 줄기 직경이 증가하였고 줄기의 길이와 마디가 증가함

○ White LED를 이용하여 최소 광량 제어를 통해 하루 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 를 충족시켜 과실수가 증가하였을 때 줄기 직경이 증가하였고 줄기의 길이는 차이가 없었으나 마디길이가 증가함

○ R(640nm):B(450nm)=75:25 LED를 이용하여 144 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 6시간 보광하는 토마토에 대해 추가적으로 근적외선(735nm)을 43 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  추가

yield of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) in hydroponic culture under low levels of natural light in winter. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*, 29(4)517-525.

27) Dorais, M., Yele, S., & Gossett, A. (1999). Influence of extended photoperiod on photosynthesis partitioning and export in tomato and pepper plants. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 24(1), 29-37.

28) Masuda, M., Yoshida, Y., Murakami, K., Nakata, K., & Katsuta, T. (2006). Leaf injury and dry mass production in eggplant and pepper plant as affected by overnight supplemental lighting. *Environmental Control Biology*, 44(1), 285-291.

두상 보광해주었을 때 식물의 줄기의 길이가 9.7~12.8% 증가하였으며 열형매엽 장/넓적이 증가함<sup>39)</sup>.

- 600W HPS를 이용하여 230 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 도마토에 두상 보광해주었을 때 식물의 줄기의 길이는 차이가 없었으나 줄기의 마디 수가 증가함 (마디당 길이 감소)<sup>39)</sup>.
- 1000W HPS 및 R(627nm):B(450nm):95:5 LED를 이용하여 9 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 의 DLI로 도마토에 두상 보광 및 측면 보광해주었을 때 줄기의 마디 수가 증가함<sup>41)</sup>.
- 100% Red LED를 이용하여 60 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ (50% duty ratio) 광도로 오이 주요 에 보광하였을 때 태축과 상비축길이 감소하고 줄기 직경과 열면적이 증가함<sup>42)</sup>.
- 600W HPS를 이용하여 130 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 딸기에 보광해주었을 때 열형의 길이 및 열면적이 증가하였음<sup>43)</sup>.

29) ZHANG, Y. T., ZHANG, Y. Q., YANG, Q. C. & TAO, L. L. (2019). Overhead supplemental far-red light stimulates tomato growth under intermediate lighting with LEDs, *Journal of Integrative Agriculture*, 18(1), 52-59.

30) Kim, H. I., Liu, M. Y., & Mitchell, C. A. (2019). Light spectral and thermal properties govern biomass allocation in tomato through morphological and physiological changes, *Environmental and Experimental Botany*, 157, 229-240.

31) Gomez, C., Merino, K. C., Bourget, C. M., Maso, G. J., & Mitchell, C. A. (2018). Comparison of amaranth light-emitting diode towers and overhead high-pressure sodium lamps for supplemental lighting of greenhouse-grown tomatoes, *HortTechnology*, 28(1), 93-98.

32) Hernández, R., Dragoluzes, A., & Kobay, C. (2014). Tuning effects of supplemental LED lighting on cucumber seedlings: growth and morphology in greenhouse, *Acta Horticulturae*, 1037, 875-880.

33) Van Den, T., Nishi, F., Sestini, K., Vanderbruggen, K., & Bacs, W. (2016). Advancing the ardenroy season in Belgian greenhouses with supplemental illumination lighting, *Acta Horticulturae*, 1134, 147-154.

2) 보광에 따른 작물별 생산성 및 품질 증진 사례

III 보광에 따른 작물별 생산성 증진 효과

- 네덜란드의 경우 도마토 보광과 탄산가스 시비를 통해 평균 생산량을 55% 증수한 다는 보고가 있었음<sup>30)</sup>.
- 외부 일사량이 100W·m<sup>-2</sup> 이하일 조건에 고압나트륨등이 커져 120 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  을 보광하고 탄산가스 시비를 병치해 할 경우 도마토 수량의 45% 증수되고 단위 면적당 생산 효율이 높다는 보고가 있었음.
- 백색 LED를 이용하여 외부일사 강을 제어시 100W·m<sup>-2</sup> 이하의 광도일 때 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  의 광도로 파프리카에 보광하였을 때 과실의 수확량이 18% 증가함
- 백색 LED를 이용하여 확산 광원 제어(LED)를 통해 하루 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}$ 를 총괄시켜 파프리카에 보광하였을 때 과실의 수확량이 25% 증가함
- R(640nm):B(450nm)=7.5:2.5 LED를 이용하여 144 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  의 광도로 보광하는 토마토에 대해 추가적으로 근적외선(735nm)을 43 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  추가 보광해주었을 때 과실의 수확량이 7.6~12.6% 증가함<sup>31)</sup>
- 600W HPS, R(627nm) 및 R(627nm):far-red(700nm)=100:41, R(627nm):Blue(450nm)=61:39 LED를 이용하여 230 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  의 광도로 도마토에 보광하였을 때 과실 수확 시기가 앞당겨졌으며 과실수, 과실 건물중이 증가함<sup>32)</sup>
- R(670nm):Blue(435nm) LED를 이용하여 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  의 광도로 도마토

34) Marcián, L.J.M., Maas, J.M., Houtzink, H. (2002). The latest developments in the lighting technologies in Dutch horticulture, *Acta Horticulturae*, 590, 35-42.

35) ZHANG, Y. T., ZHANG, Y. Q., YANG, Q. C. & TAO, L. L. (2019). Overhead supplemental far-red light stimulates tomato growth under intermediate lighting with LEDs, *Journal of Integrative Agriculture*, 18(1), 62-69.

36) Kim, H. I., Liu, M. Y., & Mitchell, C. A. (2019). Light spectral and thermal properties govern biomass allocation in tomato through morphological and physiological changes, *Environmental and Experimental Botany*, 157, 229-240.

에 측면 보광하였을 때 과실의 건물중이 증가함<sup>33)</sup>.

- R(632nm):Blue(440nm)=4:1 LED를 이용하여 흐린 날씨 조건에서 220 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  의 광도로 도마토에 측면 보광하였을 때 수확량이 증가함<sup>34)</sup>
- 1000W HPS 및 R(627nm):B(450nm):95:5 LED를 이용하여 9 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 의 DLI로 도마토에 두상 보광 및 측면 보광해주었을 때 수확 시기가 연장되었으며, 과실수 및 과실의 생체중이 증가함<sup>35)</sup>
- 400W HPS를 이용하여 65 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 도마토에 보광하였을 때 과실 수, 과실중이 증가함<sup>36)</sup>.
- 400W HPS를 이용하여 250 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  내외의 광도로 겨울철 착색단고추에 3 시간 보광하였을 때 과실 생산량이 증가하였고, 해뜨기 직전 또는 직후 3시간 보광하였을 때 광채 소독이 증가하였음<sup>37)</sup>
- 400W HPS를 이용하여 110 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 보광하여 일광을 연장시켜주었을 때 착색단고추에서 과실의 무게 및 수량이 증가하였음<sup>38)</sup>.

37) Li, Q., Liu, Y., Tian, S., Jiang, Z., Li, S., Ji, Y., ... & Zhang, D. (2019). Effect of supplemental lighting on water transport, photosynthetic carbon gain and water use efficiency in greenhouse tomato, *Scientia Horticulturae*, 256, 106600.

38) Tewelde, F. T., Shima, K., Masuo, T., Takagaki, M., Kozai, T., & Yamori, W. (2018). Supplemental LED (near-lighting) compensates for a shortage of light for plant growth and yield under the lack of sunshine, *PLoS one*, 13(11), e0206992.

39) Gomez, C., Merino, K. C., Bourget, C. M., Maso, G. J., & Mitchell, C. A. (2018). Comparison of amaranth light-emitting diode towers and overhead high-pressure sodium lamps for supplemental lighting of greenhouse-grown tomatoes, *HortTechnology*, 28(1), 93-98.

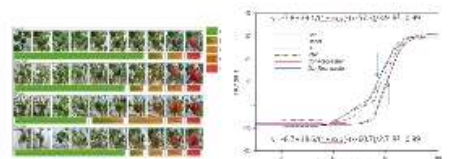
40) Ehteshami, B. M., Gonzalez, A., Hsu, X., Papadopoulos, A. P., & Dorais, M. (2002). Greenhouse coverline materials and supplemental lighting affect growth, yield, photosynthesis, and leaf carbohydrate synthesis of tomato plants, *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127(5), 819-824.

41) Kim, Y. R., Seo, J. H., & Park, M. H. (2011). Effects of supplemental lighting on growth and yield of sweet pepper (*Capiscum annuum* L.) in hydroponic culture under low levels of natural light in winter, *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*, 29(1), 97-105.

42) Dorais, D. S., Gausman, A., & Weng, H. C. (1998). Effects of supplemental light duration on greenhouse sweet pepper plants and fruit yields, *Journal of American Society for Horticultural Science*, 128(2), 202-207.

III 보광에 따른 작물별 품질 증진 효과

- 백색 LED를 이용하여 외부일사 강을 제어시 100W·m<sup>-2</sup> 이하의 광도 조건에서 파프리카에 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 을 보광할 때 당도가 12% 증가함
- 표준 도마토 감마자르를 활용하여 차세대 단계를 구분하고 있음<sup>34)</sup>
- 파프리카의 수확시기를 착색자료를 활용하여 구분하였고 백색 LED를 이용하여 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  광도로 파프리카를 보광하였을 때 과실의 적색도 색상이 3~4일 앞났으며 수확 시기가 앞당겨짐



□ 표 2-30 미라리키의 보광에 따른 작물 지름 비교 및 착색 속도 증진

- R(632nm):Blue(440nm)=4:1 LED를 이용하여 흐린 날씨 조건에서 220 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  의 광도로 도마토에 측면 보광하였을 때 과실 당도가 증가함<sup>34)</sup>
- 400W HPS를 이용하여 65 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 도마토에 보광하였을 때 (유급 과실의 비율이 증가함<sup>35)</sup>

43) Ulras, A., Broshäuser, A.G.M., Videman, J.A., Haner, H. (2004). The Relation between Physiological Maturity and Color of Tomato Fruit, *Acta Horticulturae* 664, 97-104.

44) Tewelde, F. T., Shima, K., Masuo, T., Takagaki, M., Kozai, T., & Yamori, W. (2018). Supplemental LED (near-lighting) compensates for a shortage of light for plant growth and yield under the lack of sunshine, *PLoS one*, 13(11), e0206992.

- 백색 LED를 이용하여 약 350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 병기에 보광하였을 때 과실의 당도가 증가하였음(46/7)
- 국내 광원장에서 수관 내부 보광 효과를 비교하기 위해, 겨울철 및 여름철의 두 조건에서 적외선(660nm), 청색(450nm) 4:1 비율의 수관 내부 보광 LED를 활용하여 서늘이형고 실험온실에서 진행하였다.
- 겨울철과 여름철 모두 약 71 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광도로 파프리카에 보광하였으며 겨울철에는 적외, 청색 보광에 의해 총 수량은 26%, 여름철에는 10% 증수가 이루어졌다. 동절 극한에서는 과실의 당량은 겨울철 및 여름철 모두 4%, 가장 증가하였음(unpublished).



(그림 2.33) 청색광 및 적색광 보광에 의한 파프리카의 과실 착색 촉진효과

45) Ehtesh, B. M., Gowdie, A., Han, X., Papadopoulos, A. P., & Doran, M. (2002). Glucosinolate catabolic pathway and supplemental lighting affect growth, yield, photosynthesis, and lipid carbohydrate synthesis of *strawberry*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127(5), 819-824.

46) Hidaka, K., Dai, K., Imamura, H., Mitsu, Y., Takayama, T., Sureshima, K., Kitano, M., & Okimura, M. (2013). Effect of supplemental lighting from different light sources on growth and yield of strawberries. *Environmental Control Biology*, 51(1), 41-47.

47) Hidaka, K., Dai, K., Imamura, H., Mitsu, Y., Takayama, T., Sureshima, K., & Okimura, M. (2015). Variety comparison of effect of supplemental lighting with LED on growth and yield in forcing culture of strawberries. *Environmental Control Biology*, 53(9), 185-193.

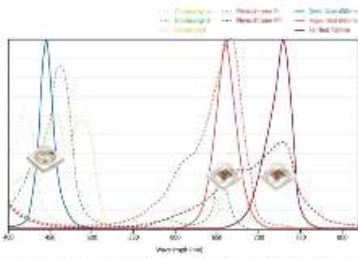
48) Xu, Haowei, et al. (2020). Supplemental blue and red light promote lycopen synthesis in tomato fruits. *Journal of Integrative Agriculture*, 19(3): 590-596.

- 온실 토마토에서 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 청색 430nm 및 적외광 660nm 파장을 추가하였을 경우 토마토 과실의 숙기가 보다 빠르게 진행되고(그림 2.33), 라이코펜(Lycopene)의 함량이 측정될 수 있는 것으로 보고되었다. 본 연구에서는 청색광이 적색광보다 메틸카로틴 및 라이코펜 합성에 높은 효과가 있을 수 있다고 보고함.
- 온실 토마토 재배에서 적외광 환경에서 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 적색광(660nm) 추가로 보광하여 주었을 경우 토마토 과실의 숙기가 촉진되고, 라이코펜(Lycopene)과 라이코펜(Lycopene)의 함량 증가가 보고되었다.

3) 보광 광원의 적정 파장에 대한 연구 결과

- 보광 광원으로 단파장 및 백색 LED를 이용하게 되면서, 전통적으로 이용되었던 HPS 또는 MH 외에도 보광 광원의 파장의 다양성이 확보되게 되었다.
- 그러나 보광 광원의 적정 파장을 결정하는 것은 식물의 반응 뿐만 아니라, 에너지 효율 또는 LED의 초기 구매 단가까지 많은 부분을 고려해서 결정해야 하는 부분이므로 결정에 어려움이 있다. 대표적으로 이용되어온 LED 보광 광원은 적색, 청색, 백색광이다. 원칙적으로는 식물 생리적 반응을 유도하는 역할이니 추후 논의하도록 하고, 우선 적색과 청색광의 적정 수준에 대해서 먼저 논의하겠다.

49) Zhang, J., Zhang, Y., Song, S., Su, W., Han, Y., & Liu, H. (2020). Supplementary red light results in the earlier ripening of tomato fruit depending on chlorophyll production. *Environmental and Experimental Botany*, 175, 104664.



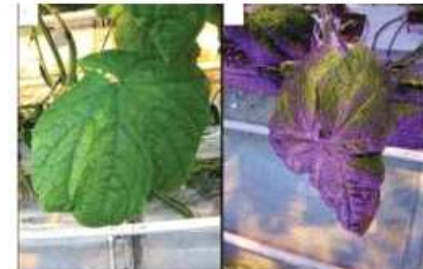
(그림 2.34) 대표적으로 보광에 이용되는 가장 중요한 3가지 단파장 LED(적색, 청색, 적외선)

III. 적색광과 청색광의 적정 비율

- 적색광과 청색광은 엽색소 a, b의 높은 흡수율을 나타내며, 광합성 양자수율이 높은 파장대역이기에 대표적인 보광 파장으로 이용되었다.
- 초기에는 가장 양자수율이 높은 적색광만을 단일 파장으로 이용하였는데, 이 경우에 방사적인 증상을 발해하여, 잎이 과도하게 두꺼워지며, 엽맥의 형상이 저해되고 광합성 효율이 떨어지는 적색광 증후군('red light syndrome')이 보고되었다(49).
- 또한 수관 내부 보광 연구에서는 적색, 청색 및 청색광을 혼합하여 사용하였는데, 높은 청색광 비율은 오이와 같이 형태형성에 민감한 과실에서는 잎의 비정상적인 발달을 나타내기도 하였다(그림 2.35). 이러한 비정상적인 형태형성은 잎의 정상

50) Tsumoto, G., Hagenweber, S. W., van Kooten, O., Hofmann, J., & van Ieperen, W. (2016). Plasticity of photosynthesis after the red light syndrome in cucumber. *Environmental and Experimental Botany*, 121, 75-82.

적인 수율을 방해하는 요인이 된다(50). 따라서 최근 적정 수준의 적색과 청색광 비율이 연구되었다.



(그림 2.35) LED 보광에 의한 오이 잎의 형태형성 차이 (사태(좌)와 적색, 청색, 백색 혼합 보광(우))

- 자연광에서는 어느 정도 수준의 청색광이 존재하므로, 적색광과 청색광의 비율을 100:0에서 76:24까지 청색광의 비중을 조금씩 늘리면서 실험하였다. 그 결과 6-12% 정도의 청색광이 적절한 수준의 식물 생육을 나타내는 것으로 확인되었다. 일 광합성 같은 경우는 24%의 청색광을 사용한 높은 청색광 처리에서 높게 나타났지만, 이러한 결과는 생육 및 수확량과는 일치하지 않았으며, 마찬가지로 0%의 청색광에서도 생육 및 수확량은 6-12% 보다는 더 크게 나타났다. 따라서 적정 수준의 청색광 비중(6-12%)으로 광원을 설계하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

51) Tsumoto, G., Oosterkamp, J., Hagenweber, S. W., Hofmann, J., & Van Ieperen, W. (2016). The response of light interception, photosynthesis and fruit yield of cucumber to LED-lighting within the canopy. *Physiologia Plantarum*, 158(3), 389-398.

### ㉑ 원적색광 추가 보광의 배경

- 원적색광 파장이 식물에게 보내는 가장 중요한 신호는 그늘 회피 반응(shade avoidance response)이다. 이것은 피노르름이라는 광 수용체에 의해서 낮과 밤을 인지한다. 660nm의 적색광에서만 지라게 되면 항상 밝은 곳에 있다고 느껴졌지만, 730nm의 원적색광의 비율이 높아질수록 근처 다른 식물에게 빛이 차단된 것으로 인식하게 된다. 따라서 식물이 위쪽으로 더 크게 자라려고 하는 형태형성적 변화를 유도하게 된다.
- 기존에도 알레루 호르몬으로 원적색광은 자주 이용되었는데, 대표적으로 피레티칼에서 원적색광은 세균의 병충을 방지 않고 온실에서 개화 추기를 조절하는데 사용되었다. 피노르름의 두가지 형태인 P 및 I<sub>1</sub>의 비율 조절은 현상용 파해작용에서 개화 조절을 더 정밀하게 하는데 큰 효과를 나타냈다.
- 최근 일부 연구에서 기존의 보광 파장으로 이용되는 적색(660nm), 청색(450nm), 또는 백색 LED에 원적색광(far-red, 730nm)을 추가하였을 경우 토마토 작물의 생육이 개선되고 수확량이 증대될 수 있음이 보고되었기에 간단히 소개하고자 한다.

### ㉒ 원적색광 파장 보광에 따른 작물 생육, 수확량 및 형태형성 변화

- 작물 상부에서 백색 광색 149  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  에 원적색광을 54, 119, 154  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  의 3개의 서로 다른 광도 하에서 재배한 결과, 원적색광 비율 증가에 의해 식물의 초장, 엽면적이 증가하고, 엽면적은 단순 적색, 청색 보광보다 증가하였다. 또한 작물 총 건물중 역시 원적색광 세기가 119 및 154  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  일 때 가장 높게 나타났다.

52) Kalatzoglou, I., Van Keulen, W., Hatzimiri, J., van der Meer, M., Martinis, S., Worrich, K., & Marcelli, L. F. (2019). Effects of continuous or on/off-day far-red light on tomato plant growth, morphology, light absorption, and fruit production. *Frontiers in plant science*, 10, 322.

- 적색, 청색 144  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  의 수관 내부 보광에 작물 상부에서 원적색광을 43  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  보광한 결과 토마토의 줄기가 상대적으로 10%가량 길어지고, 잎장, 엽폭비가 증가하여 더 길어진 잎의 형태를 나타냈다<sup>53)</sup>.
- 수관 내부 보광 처리에 71  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  4:1 비율의 적색(red, 660nm), 청색(blue, 450nm)에 40  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 원적색광(far-red, 730nm)을 추가하였을 경우 적색, 청색만 사용한 프락라기에 비해 수량은 17% 증가하였으며, 거엽 과실 생체중은 5%, 건물중은 8% 가량 증가하였음(unpublished).

### ㉓ 원적색광 파장 보광에 따른 과실로의 동화산물 분배 증가 및 품질 변화

- 최근 연구들에 의하면 원적색광 파장을 기존 사용하던 적색, 청색 파장 보광에 사용할 경우 발달 과정에서 동화산물의 생식생장 승진 효과가 있는 것으로 보고되었다<sup>54)</sup>.
- 토마토에서 백색광에 30  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  의 원적색광을 더한 결과 15%의 과실로의 동화산물 분배 증가가 보고되었으며, 적색의 청색광 파장에 30  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  의 원적색광을 더했을 때는 17%, 50  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  의 원적색광에서는 35%의 과실로의 동화산물 분배가 증가하였다. 다만 높은 수준의 원적색광 처리에서는 젓빛곰팡이 병의 발생 시 병변의 크기가 상대적으로 더 크게 나타나는 것으로 관찰되었으며, 이러한 결과는 생식생장 증가에 의한 생육과 식물 발아 기작 사이의 trade-off가 있을 수 있음을 의미한다<sup>55)</sup>.

53) ZHANG, Y. T., ZHANG, Y. Q., YANG, Q. C., & TAO, L. L. (2019). Overhead supplemental far-red light stimulates tomato growth under trapezoidal lighting with LEDs. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(1), 62-69.

54) Kim, H. J., Liu, M. Y., & Mitchell, C. A. (2019). Light spectral and thermal properties govern biomass allocation in tomato through morphological and physiological changes. *Environmental and Experimental Botany*, 157, 228-240.

55) Ji, Y., Oomura, Y., Gorbler, S., Kober, U., Neuner, P. T., Schuster, H. J., & Heintz, E. (2019). Far-red radiation increases dry mass partitioning to fruits but reduces *Sclerotinia sclerotiorum* resistance in tomato. *Environmental and Experimental Botany*, 168, 103889.

- 토마토에서 R100에 FR41의 원적색광 파장을 추가한 경우 R100의 경우와 비교 해서 당도(TSS) 12% 및 산도(Thrumable acidity)가 5% 증가하였음. 과실 색에서는 유의미한 차이를 보이지 않았으나, 과실 내의 나프롤, 칼륨, 마그네슘, 칼슘 등의 미네랄 영양분이 증가하였으며 페널 및 테스트 겔과 단맛과 쓴맛, 신맛 등이 더 높게 나타나는 것으로 보고되었음<sup>56)</sup>.

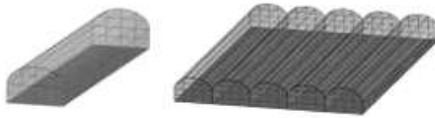
56) Kim, H. J., Yang, Y., Choi, S., Wang, Y. J., Liu, M. Y., & Kizawa, A. M. (2020). Supplemental trapezoidal far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 261, 109386.

# 03 3차원 광환경 해석 기반 조명 설계 기준

## 가. 온실 내 광환경

### 1) 온실 형태에 따른 온실 내 광환경

온실의 형태에 따른 온실 내 광환경에 대해 분석하기 위해 3가지의 온실 지붕 형태와 단면, 연동 방식에 따라 총 다섯 종류의 온실 내 광환경을 분석하였다. 온실 지붕 형태는 가지 많이 이용되는 둥근지붕형, 양지붕형, 배요형 온실을 대상으로 분석하였으며, 연동 방식으로 운영되는 벨로렐을 제외한 둥근지붕형과 양지붕형 온실은 단면 및 연동 조건별 온실 광환경을 함께 분석하였다. 분석에 사용된 온실의 형태는 아래 그림과 같으며, 각 온실의 단면 기준 규격은 <표 3.1>과 같았다. 온실 리브재는 둥근지붕형 온실은 PE 필름, 양지붕형과 벨로렐 온실은 투명 유리를 사용하는 것을 기준으로 하여 분석하였다. 광주적 시뮬레이션에 사용된 PE 필름과 투명 유리의 태양광 투과율은 각각 90%, 95%로 설정하였다.



<그림 3.1> 둥근지붕형 단면(좌) 및 두(우) 온실의 3차원 모델

## 76 온실 보조 기술, Greenhouse Supplemental Lighting Technology



<그림 3.2> 양지붕형 단면(좌) 및 두(우) 온실의 3차원 모델



<그림 3.3> 벨로렐 연동 온실의 3차원 모델

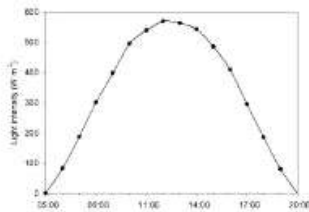
<표 3.1> 광환경 분석 대상 온실의 규격

지붕 형태	온실 크기(m)			
	폭	길이	높이(단면)	높이(연동형)
둥근지붕형	7.00	45.00	4.70	7.20
양지붕형	9.00	45.00	6.50	4.30
배요형	3.20	45.00	4.80	4.00

## 03. 3차원 광환경 해석 기반 조명 설계 기준 77

### ◆ 온실 지붕 형태에 따른 온실 내 광환경

온실 지붕 형태에 따른 온실 내 광환경 차이를 알아보기 위해 다섯 가지 형태의 3차원 온실 모형의 바닥면의 광도를 분석하였다. 광환경 분석은 경상남도 함안군(동경 128.24°, 북위 35.23°)의 위치를 기준으로 하였으며, 날짜는 하계인 2020년 6월 21일로 설정하였고, 9시, 12시, 15시의 일중 시간대에서의 온실 내 광환경을 분석하였다. 온실 방향은 남북동 배치를 설정하였으며, 연동 온실의 경우 5연동 온실을 기준으로 가운데에 위치한 온실의 내부 광분포를 측정하였다. 분석 대상 온실 내 리브재는 존재하지 않는 것으로 가정하였다. 3차원 공간 내 광 분포를 구현하는 과정에서는 원구의 광 분포를 나타낼 수 있는 대표적인 모델 중 하나인 CIE sky model (CIE, 2005; ISO, 2004)을 이용하여, 가장 실재는 비, 안개, 짙은 구름 등의 기상학적 요인이 크게 존재하지 않는 맑은 날을 대변하도록 설정하였다. 시뮬레이션 소프트웨어 상에서 설정된 위치, 경도, 날짜, 시간의 변수에 따라 태양의 위치 및 태양광 분포가 계산되어 구현되었다. 광주적 시뮬레이션을 이용하여 계산된 광환경 분석 대상 지역의 2020년도 6월 21일 일중 광도는 <그림 3.4>와 같다.



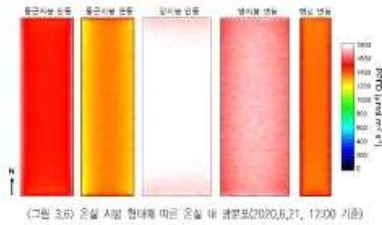
<그림 3.4> 광주적 시뮬레이션을 통해 계산된 광환경 분석 대상 지역(경상남도 함안군)의 03시(2020.6.21)에서의 일중 광도

## 78 온실 보조 기술, Greenhouse Supplemental Lighting Technology

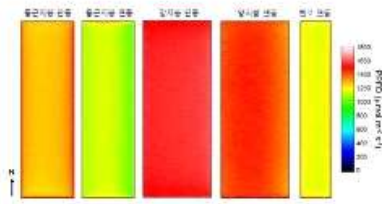
지붕 형태에 따른 온실 내 시간대별 광분포는 <그림 3.5-3.7>와 같았다. 각 시간대별 온실 내 평균 광도는 온실 지붕의 형태 및 연동 방식에 의해 상이한 결과를 보였다. 전체적인 온실 평균 광도는 양지붕형 단면 온실에서 가장 높은 값을 보였다. 이는 투과율이 높은 유리를 피복재로 사용한 것과 함께 단면 형식으로 인의 주변에서 들어오는 광의 차단이 적은 점, 그리고 높은 등고에 의한 결과라고 생각된다. 반면 벨로렐 연동 온실의 경우 모든 일중 시간대에서 가장 낮은 평균 광량을 나타냈다. 연동 방식으로 운영되는 벨로렐 온실의 특성과 더불어 좁은 온실 폭으로 인해 들어난 철골 밀도가 매우 광 투과에 영향을 미쳤을 것으로 생각된다. 특히 벨로렐 온실의 내부 광 분포를 보면 온실 가장자리 지역의 광도가 안쪽 온실과 공유하는 철골 구조에 의해 감소하는 형태를 띠는 것을 볼 수 있다. 둥근지붕형 온실의 경우 단면에서는 양지붕형 단면 온실에 비해 낮은 평균 광도를 나타냈고, 연동에서는 양지붕형 연동 온실과 벨로렐 연동 온실의 중간 수준의 광도를 나타냈다. 둥근지붕형 온실의 경우 재옥 차폐를 유리 대신 PE 필름으로 설정하였는데, 태양광에 대해 95%의 투과율을 보이는 투명 유리에 비해, 90%의 투과율을 보이는 PE 필름의 광학적 특성에 의해 양지붕형 온실보다 낮은 평균 광도를 보인 것으로 생각된다.



<그림 3.5> 온실 지붕 형태에 따른 온실 내 광분포(2020.6.21, 08:00 기준)



(그림 3.6) 온실 지붕 형태에 따른 온실 내 광분포(2020.6.21, 12:00 기준)



(그림 3.7) 온실 지붕 형태에 따른 온실 내 광분포(2020.6.21, 15:00 기준)

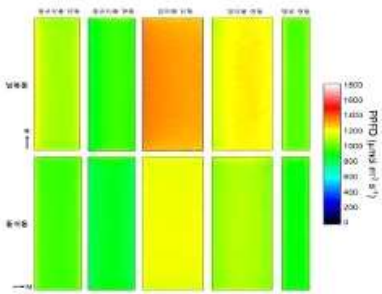
(표 3.2) 온실 지붕 형태에 따른 일출 시간별 온실 내 평균 광도

온실 지붕 형태	온실 내 평균 광도( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )		
	09:00	13:00	16:00
동근지붕형 단열	1341,7	1545,8	1355,0
동근지붕형 단열	968,2	1361,5	1169,3
단열외형 단열	1350,1	1840,5	1617,1
단열외형 단열	1235,5	1730,7	1480,5
단열외형 단열	1051,7	1461,8	1262,3

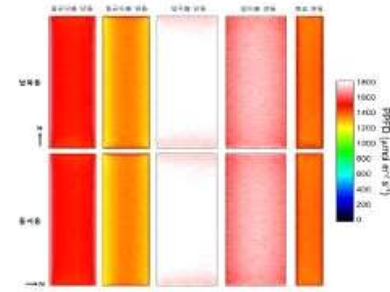
◆ 온실 방향에 따른 온실 내 광환경

온실 방향에 따른 온실 내 광환경의 변화에 대해 분석하기 위해 다섯 가지 형태의 온실 모델을 각각 남북동과 동서동으로 위치시킨 후 광추적 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 조건은 앞선 분석 내용과 동일하게 위치는 경상남도 함안군(동경 128,24도, 북위 35,23도)을 기준으로 하였으며, 날짜는 위치한 2020년 6월 20일로 설정하였고, 9시, 12시, 15시의 일출 시간에서의 온실 내 광환경을 각각 분석하였다. 모든 형태의 온실에 있어 온실 내 광분포와 평균 광도는 정오에서 남북동, 동서동 배치에 따라 큰 차이를 보이지 않았다. 대부분의 온실 광환경 차이는 오전 9시와 오후 3시에서 발생하였는데, 동근지붕형 온실의 경우 오전 9시에 남북동 배치의 경우 온실 서쪽 벽면의 광도가 높게 나타났고, 동서동 배치는 온실 내 광 분포가 전체적으로 고른 것을 볼 수 있었다. 단열외 단열 모두 오후 3시에 온실 방향에 따른 차이가 가장 크게 나타났으나, 광 분포의 차이는 단열외 온실에서 더 뚜렷했다. 오후 3시 기준 동근지붕 단열 온실의 평균 수평광은 남북동이 동서동에 비해 10.6% 가량 높게 나타났다. 온실 내 광분포는 남북동 배치의 경우 태양 방향인 온실 동쪽 벽면에서의 광도가 높게 나타난 반면, 동서동 배치의 경우 온실 서쪽을 제외한 온실 가장자리 부분의 광도가 고루 높게 나타났다. 반면 단열외 온실의 경우 일출한 온실이 방향적으로 인해 온실 벽면의 광도가 비교적 낮게 나타났다. 양자방향 온실의 경우

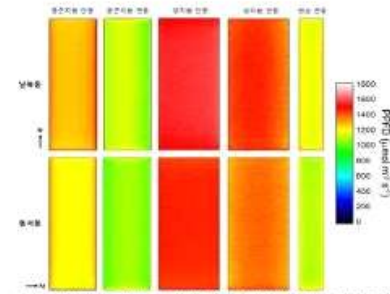
단열 온실에서는 일출과 오후 3시에는 온실 방향에 따른 광분포 및 평균 광도에 차이가 나타나지 않았고, 단열 온실에서는 오후 3시에 동서동에서 남북동에 비해 낮은 광도를 보였다. 오전 9시에는 단열, 단열외 온실 모두에서 남북동에 비해 동서동 배치 온실에서 평균 광도가 10.1% 가량 낮았다. 단열외 온실은 동서동 배치 시 오전 9시와 오후 3시에 단열 온실에 의한 온실 가장자리의 광도 차이가 일출 위치되는 경향을 보였으나, 온실 내 평균 광도는 남북동 배치에 비해 낮은 값을 나타냈다.



(그림 3.8) 온실 지붕 형태 및 방향에 따른 온실 내 광분포(2020.6.21, 09:00 기준)



(그림 3.9) 온실 지붕 형태 및 방향에 따른 온실 내 광분포(2020.6.21, 12:00 기준)



(그림 3.10) 온실 지붕 형태 및 방향에 따른 온실 내 광분포(2020.6.21, 15:00 기준)



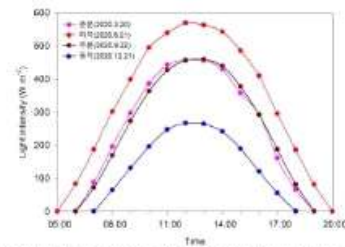
(표 3.3) 온실 지붕 형태 및 방향에 따른 일중 시간별 온실 내 평균 광도

온실 지붕 형태	일중 시간별 온실 내 평균 광도(Lux·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )					
	남향형			동서형		
	09:00	12:00	15:00	09:00	12:00	15:00
동서방향형 단층	1141.7	1545.8	1355.0	1031.9	1503.3	1287.9
동서방향형 단층	988.2	1361.5	1169.3	897.1	1375.0	1127.0
동서방향형 단층	1360.1	1849.5	1617.1	1232.1	1870.0	1539.5
동서방향형 단층	1239.5	1730.7	1489.5	1142.1	1748.3	1433.9
편방향 단층	1051.7	1461.8	1262.3	968.8	1476.2	1213.0

2) 계절에 따른 온실 내 광환경

◆ 계절별 온실 내 광환경

계절에 따른 온실 내 광환경 변화를 알아보기 위해 사계절을 대표하는 춘분, 하지, 추분, 동지 네 시점에서의 온실 내 광 분포를 알아보았다. 서울레이저 조건은 집안 시설면적연구(서경경 128.24도, 북위 35.23도) 위치를 기준으로 하였으며, 날짜는 각각 2020년 3월 20일(춘분), 6월 21일(하지), 9월 22일(추분), 12월 21일(동지)로 설정하였으며, 9시, 12시, 15시의 일중 시각에서의 온실 내 광환경을 각각 분석하였다.



(그림 3.11) 광우의 시뮬레이션을 통해 계산한 광환경 분석 대상 지역(경상남도) 일중 광도 분포. 춘분, 하지, 동지에서 일중 광도

(표 3.4) 계절에 따른 일중 시간별 동서방향형 단층, 편향 온실 내 평균 광도

계절	일중 시간별 온실 내 평균 광도(Lux·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )					
	동서방향형 단층			편방향형 단층		
	09:00	12:00	15:00	09:00	12:00	15:00
춘분(2020.3.20)	794.8	1277.8	1088.8	674.1	1175.5	939.6
하지(2020.6.21)	1141.7	1545.8	1355.0	968.0	1361.7	1169.3
추분(2020.9.22)	854.5	1273.3	1039.3	732.8	1121.0	896.0
동지(2020.12.21)	381.2	760.7	556.4	323.3	670.3	480.2

(표 3.5) 계절에 따른 일중 시간별 동서방향형 단층, 편향 온실 내 평균 광도

계절	일중 시간별 온실 내 평균 광도(Lux·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )					
	동서방향형 단층			편방향형 단층		
	09:00	12:00	15:00	09:00	12:00	15:00
춘분(2020.3.20)	947.0	1528.9	1299.4	850.2	1430.8	1190.8
하지(2020.6.21)	1360.1	1849.5	1617.1	1232.1	1730.7	1489.5
추분(2020.9.22)	1029.6	1503.7	1240.4	935.3	1425.8	1142.3
동지(2020.12.21)	454.1	910.4	604.2	412.4	851.0	611.8

(표 3.6) 계절에 따른 일중 시간별 편향형 단층 온실 내 평균 광도

계절	일중 시간별 온실 내 평균 광도(Lux·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )		
	편향형 단층		
	09:00	12:00	15:00
춘분(2020.3.20)	732.4	1208.1	1014.1
하지(2020.6.21)	1051.7	1461.8	1262.3
추분(2020.9.22)	796.3	1204.2	968.2
동지(2020.12.21)	351.2	719.5	518.4

나. 외부 광 조건에 따른 보광 방법

1) 일직선광량(DLI)기반 온실 보광 방법

◆ DLI에 근거한 기준 광도 및 광원의 평균 광도 산출

온실 보광의 최종 목표는 자연광으로 달성하지 못하는 작물 최적 생육에 필요한 광량을 인공광원을 통해 보충하는 것이다. 작물별 최적 생육에 적합한 온실 내 일직선광량(DLI)에 의거하여 보광 수준을 결정한다. 보광을 통해 달성하고자 하는 목표 DLI(mol·m<sup>-2</sup>·day<sup>-1</sup>)가 결정되면 이를 일조시간(h)으로 나누어 기준광도를 결정한다. 이는 다음과 같은 간단한 수식으로 나타낼 수 있다.

$$\text{기준광도}(\text{Lux}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}) = 277.78(\text{와인치수}) \times \frac{\text{목표 DLI}(\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1})}{\text{일조시간}(\text{h})}$$

$$\text{광원의조명광도}(\text{Lux}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}, \text{PPFD}) = \frac{\text{기준광도}(\text{Lux}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}, \text{PPFD}) \times \text{광원수}}{\text{재배면적}(\text{m}^2)}$$

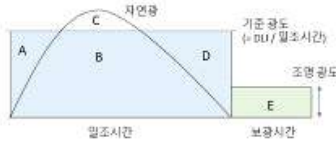
◆ DLI에 근거한 필요 보광량 산출

일중 필요 보광량은 목표 DLI에서 자연광에 의한 DLI를 제외한 값으로 나타낼 수 있으며, 온실 광투과율(장파손률)을 고려한 경우에 필요 보광량에 광투과율을 곱하거나 조명광도에 광투과율의 역수를 곱하여 외부 광도에 상당하는 내부 보광 광도를 결정할 수 있다. 만약 필요 보광량이 0보다 클 경우 보광을 실시하여 부족한 광을 보충하고, 필요 보광량이 0보다 작을 경우에는 보광을 실시하지 않는다. 이는 다음과 같이 간단히 나타낼 수 있다.

$$\text{필요보광량} = \text{목표 DLI} - \text{측정 DLI} > 0(\text{보광실시})$$

$$\text{필요보광량}(\text{Lux}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}) = \text{광원의조명광도}(\text{Lux}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}) \times \text{보광시간}(\text{s})$$

$$\Delta(\text{필요보광량}) = A + B - C$$

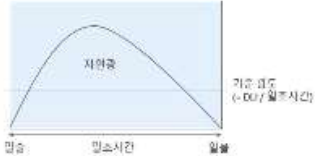


〈그림 3.12〉 DLI에 의한 보광 방법의 개요

◆ 보광 처리 방법

① 보광이 필요하지 않은 경우

〈그림 3.13〉과 같이 자연광만으로 목표 DLI를 달성할 경우 보광을 실시하지 않는다.



〈그림 3.13〉 DLI가 목표 보광량보다 많은 경우 온실 내 일조 광도의 변화 양상

② 일출 또는 일몰 보광이 필요한 경우

일출 자연광만으로 목표 DLI를 충족하지 못할 경우 보광을 통한 광 보충이 필요하다. 일출 이후에 보광을 실시할 경우 0 부근의 광도에서 다시 보광을 실시하게 되므로 작용의 생육 증진 효과가 낮고 보광 필요 시간이 길어지는 문제가 있다. 따라서 태양광이 평균 기준 광도보다 낮아지는 시점에 보광을 실시할 필요가 있다. 이는 보광 시간이 일출 이전일 경우(그림 3.14)와 일출 이후일 경우(그림 3.15)로 구분할 수 있다.



〈그림 3.14〉 일출 이전에 보광을 실시하는 경우의 온실 내 일조 광도의 변화 양상

〈그림 3.14〉의 경우, 평균 기준 광도와 현재 광도가 교차되는 시점에서 일출 시간에 직선으로 연결하여 그 사이의 격차 광량을 추정한다(정확성 향상을 위해서 평균 일사량 곡선을 사용하는 것을 권장). 이때 일출 직전광이 어느 정도 충분히 주어질 경우, 보광 시간이 일출 시간까지의 시간보다 작으므로 일출 시간 이전을 기준으로 보광 시간을 산출한다. 이 때 온실의 필요 보광시간은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

필요 보광시간 = 일출 보광시간

$$\text{필요 보광시간}(s) = \frac{\text{필요 보광량}(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2})}{\text{조명광도}(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})}$$

(시간은 s → h, m으로 환산 가능)



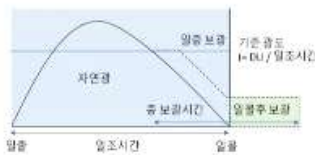
〈그림 3.15〉 일출 이후에 보광을 실시하는 경우 온실 내 일조 광도의 변화 양상

〈그림 3.15〉의 경우, 평균 기준 광도와 현재 광도가 교차되는 시점에서 일출 시간에 직선으로 연결하여 그 사이의 격차 광량을 추정한다. 이때 보광 시간이 일출 시간까지의 시간보다 길 경우에는 현재의 광도에 보광 광도가 평균 기준 광도를 넘지 않는 시간부터 보광을 시작한다. 이 때 온실의 필요 보광시간은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

필요 보광시간 = 일출 보광시간 + 일출 후 보광시간

$$\text{필요 보광시간}(s) = \frac{\text{필요 보광량}(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2})}{\text{조명광도}(\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})}$$

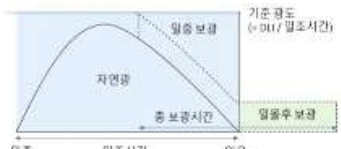
이 때, 조명의 출력을 조절하여 보광 광도의 조절이 가능할 경우 일출 광도가 평균 기준 광도에 도달하는 지점부터 순차적으로 보광 광도를 증가시키며 보광을 실시한다(그림 3.16).



〈그림 3.16〉 조광의 출력을 조절 가능한 경우 온실 내 일조 광도의 변화 양상

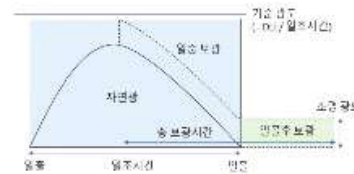
③ 일출과 일출 후 보광이 필요한 경우

외부 기상 조건으로 인해 일출 최고 광도(11~13시 부근)가 평균 기준 광도에 미치지 못하는 경우 최대 광도 시점에서부터 목표 DLI를 충족할 때까지 보광을 실시한다.



〈그림 3.17〉 일출 최고 광도 + 조명 광도 > 평균 기준 광도일 경우 온실 내 일조 광도의 변화 양상

일출 최고 광도 + 조명 광도 > 평균 기준 광도 일 경우, 보광 정원 조사 시 평균 기준 광도를 만족할 수 있는 시점부터 목표 DLI를 충족하는 시점까지 보광을 실시한다(그림 3.17).



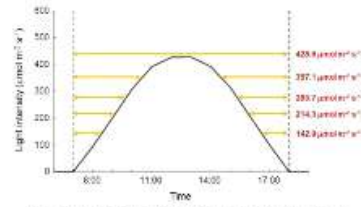
〈그림 3.18〉 일출 최고 광도 + 조명 광도 < 평균 기준 광도일 경우 온실 내 일조 광도의 변화 양상

일출 최고 광도 + 조명 광도 < 평균 기준 광도 일 경우 일출 최고 광도가 지난 시점부터 목표 DLI를 충족하는 시점까지 보광을 실시한다(그림 3.18).

2) 외부 일사 감응에 의한 보광 분석

온실 보광 시 일출 태양광이 작을 경우 생육에 필요한 광도에 미치지 못할 경우 부족한 광량을 보충하기 위해 외부 일사량을 기준으로 일출 시간 내 보광을 실시하기도 한다. 이를 외부 일사 감응 보광이라 하는데, 일반적으로 특정한 외부 광도를 기준으로 정한 후 일출 광도가 기준치 아래로 낮아졌을 경우 보광 광원을 켜는 방식을 이용한다. 실제로 온실 광두과용(광합소용)을 고려할 경우, 필요 보광량에 광두과용을 감하거나 조영광도에 광두과용의 역수를 곱하여 외부 광도에 상당하는 내부 보광 광도를 결정할 수 있다.

장주적 시뮬레이션 결과를 기반으로 일사 감응 보광의 기준 광도에 따라 일출 직할 수 광량 및 광합성량이 어떻게 변화하는지 분석하였다. 일사 감응 보광은 대체로 낮은 외부 광도를 보이는 시기에 실시하므로, 파프리카와 토마토의 140 DAT 개체를 대상으로 1월의 광 조건에서 분석을 진행하였다. 일사 감응 보광의 기준 광도는 작물 상단부에서의 광합율 기준으로 100, 150, 200, 250, 300  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 다섯 가지를 선정하였다. 그러나 외부 일사 감응 기준 광도를 설정할 때에는 온실 내, 외부의 광도 차이를 고려해야 한다. 실제 온실 내부의 광도는 온실 벽면재와 광조의 영향으로 인해 외부 광도의 약 60~70% 수준을 보인다. 그러므로 외부 광도를 기준으로 일사 감응 기준 광도를 설정할 경우 실제 온실 내부도 도달하는 광량은 그보다 적기 때문에 정확한 일사 감응 보광 효과를 나타내기 힘들다. 따라서 온실 내, 외부의 일사 감응 기준 광도는 온실 내부로 투과되는 광 감소율을 나타내는 계수를 곱하여 계산할 수 있다. 본 분석에서는 온실 내 광도가 외부 광도의 70% 수준이라고 가정하여 외부 일사 감응 기준치를 보정하였다. 온실 내, 외부 광도 차이를 반영한 일사감응 광도 기준치는 차례대로 142.0, 214.3, 285.7, 357.1, 428.6  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 이었으며, 각 기준치에 따른 보광 장치의 일출 작동 시간은 순서대로 90, 240, 300, 360, 660분이었다. 장주적 시뮬레이션 결과를 바탕으로 파프리카와 토마토의 일사 감응 보광 광도 기준치에 따른 보광 방식별 일출 누적 수광량과 광합량은 **표 3.7~3.10**과 같다.



(그림 3.10) 140 DAT에서의 일사 감응 광도 기준치에 따른 보광 방법

(표 3.7) 140 DAT에서의 일사 감응 광도 기준치에 따른 보광 방식별 파프리카의 일출 시간 동안의 누적 수광량

보광 방식	일사 감응 기준 광도( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )					
	보광 안함	142.9	214.3	285.7	357.1	428.6
내부 보광(LED)	5.57	5.71	5.90	6.09	6.27	6.46
상부 보광(HPS)	5.52	5.76	5.99	6.23	6.47	6.71
상부+내부 보광	5.52	5.94	6.27	6.80	7.23	7.65

(표 3.8) 140 DAT에서의 일사 감응 광도 기준치에 따른 보광 방식별 파프리카의 일출 시간 동안의 누적 광합량

보광 방식	일사 감응 기준 광도( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )					
	보광 안함	142.9	214.3	285.7	357.1	428.6
내부 보광(LED)	1.83	1.86	1.86	1.88	1.90	1.92
상부 보광(HPS)	1.83	1.88	1.90	1.99	2.04	2.09
상부+내부 보광	1.83	1.90	1.96	2.04	2.12	2.19

(표 3.9) 140 DAT에서의 일사 감응 광도 기준치에 따른 보광 방식별 토마토의 일출 시간 동안의 누적 수광량

보광 방식	일사 감응 기준 광도( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )					
	보광 안함	142.9	214.3	285.7	357.1	428.6
내부 보광(LED)	9.84	10.04	10.24	10.44	10.65	10.85
상부 보광(HPS)	9.84	10.83	11.82	12.80	13.79	14.78
상부+내부 보광	9.84	11.09	12.22	13.41	14.60	15.79

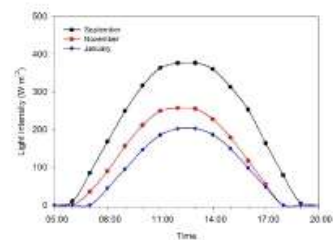
(표 3.10) 140 DAT에서의 일사 감응 광도 기준치에 따른 보광 방식별 토마토의 일출 시간 동안의 누적 광합량

보광 방식	일사 감응 기준 광도( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )					
	보광 안함	142.9	214.3	285.7	357.1	428.6
내부 보광(LED)	1.96	2.04	2.11	2.18	2.26	2.34
상부 보광(HPS)	1.86	2.07	2.22	2.37	2.51	2.65
상부+내부 보광	1.96	2.16	2.37	2.60	2.81	3.02

3) 생육단계에 따른 온실의 보광 효율

장주적 시뮬레이션을 기반으로 생육 단계에 따른 시설과채류 온실의 보광 효율을 분석하였다. 대상 작물로는 주요 시설과채류인 파프리카와 토마토를 선정하였다. 파프리카와 토마토의 생육 단계를 정식 후 생육기, 착과기, 성숙기의 3 가지로 분류하였고, 분석에는 각 생육 단계를 대표하는 정식 후 30, 90, 140일 후의 파프리카, 토마토 3차원 모델을 이용하였다. 생육 단계에 따른 외부 광 조건은 정식 후 생육기는 9월, 착과기는 11월, 성숙기는 1월로 설정하였다. 분석 위치는 경성남도 함안군으로 설정하였으며, 분석 대상 온실은 멜로형 온실로 결정하였다. 장주적 시뮬레이션을 이용하여 계산된 월별 외부 광합량은 **그림 3.20**과 같다.

파프리카와 토마토 3차원 모델은 4구 슬러브 작위를 기준으로 3.5 plants·m<sup>2</sup>의 개체 밀도로 배치하였고, 장주적 시뮬레이션을 통해 근라 상부 및 내부 보광의 생육 단계별, 시간대별 효율에 대해 분석하였다. 보광 작위구로는 HPS 광원을 이용한 근라 상부 보광과 LED 광원을 이용한 근라 내부 보광을 설정하였다. 근라 상부 HPS 광원은 온실 바닥에서부터 3.5m 높이에 가로 1.6 m, 세로 4.0 m 칸격으로 배치하였고, 작인 조사 시 작물 상단부 기준면의 평균 광도는 약 210  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 였다. LED 근라 내부 광원은 작물이 완전히 성장하였을 경우 중단부에 위치하도록 파프리카는 밑면에서부터 60cm, 토마토는 90cm 높이에 위치하였다.

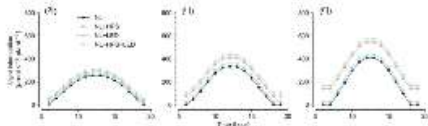


(그림 3.20) 장주적 시뮬레이션 대상 지역(경성남도 함안군)에 계절별 일출 광도

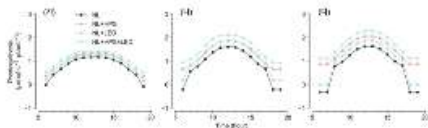
◆ 토마토



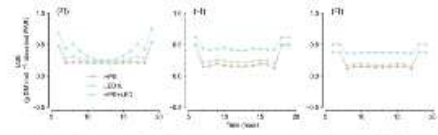
(그림 3,21) 시뮬레이션에 이용된 토마토 3차원 스캔 모델, 왼쪽으로부터 각각 30(생육기), 90(개화기), 140(성숙기) DAT의 식물



(그림 3,22) 토마토의 생육 단계별 보광 방식에 따른 일중 시간대별 적광 수량량 (왼쪽부터 30, 90, 140 DAT)



(그림 3,23) 토마토의 생육 단계별 보광 방식에 따른 일중 시간대별 적광 광이용량 (왼쪽부터 30, 90, 140 DAT)



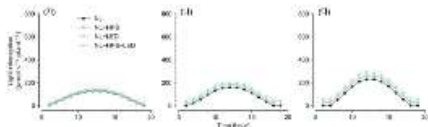
(그림 3,24) 토마토의 생육 단계별 보광 방식에 따른 일중 시간대별 적광 광이용효율 (왼쪽부터 30, 90, 140 DAT)

경주적 시뮬레이션은 이용하여 생육 단계와 외부 광도, 보광 방식에 따른 일중 시간대 별 토마토의 수광량과 광합성량을 계산할 수 있었다. 토마토의 수광량은 생육 단계에 따라 증가하는 양상을 보였으나, 생육이 전환되고 동시에 외부 광도 감소의 영향으로 인해 생육 단계별로 큰 차이가 나타나지는 않았으며, 광합성량도 이와 비슷한 양상을 보였다. 보광 방식에 따른 작물 수광량 및 광합성량의 경우 LED 내부 보광보다 HPS 상부 보광에 의한 증가량이 더 많았으며, 상부, 내부 보광을 동시에 실행했을 경우에 가장 높은 값을 보였다. 일중 시간대별로 보광에 의한 작물 수광량 증가량에 대한 작물 생합성 증가량을 나타내는 LUE(light use efficiency, 광이용효율)는 일출과 일몰 부근에서 대체로 높은 값을 보였다. 30 DAT 작물의 경우 일출 최고 광도를 보이는 남중시각 구간에서 가장 낮은 광이용효율을 보였으나, 90, 140 DAT 작물의 경우 일출 시간 내내 비교적 일정한 LUE를 유지하는 것을 볼 수 있었다. 이는 생육 단계가 진전됨에 따라 외부 광도가 낮아지기 때문에 나타나는 현상으로 생각된다.

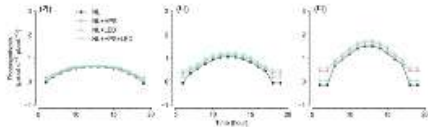
◆ 파프리카



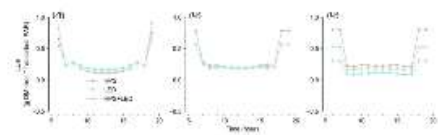
(그림 3,25) 시뮬레이션에 이용된 파프리카 3차원 스캔 모델, 왼쪽으로부터 각각 30, 90, 140 DAT 식물



(그림 3,26) 파프리카의 생육 단계별 보광 방식에 따른 일중 시간대별 적광 수광량 (왼쪽부터 30, 90, 140 DAT)



(그림 3,27) 파프리카의 생육 단계별 보광 방식에 따른 일중 시간대별 적광 광이용량 (왼쪽부터 30, 90, 140 DAT)



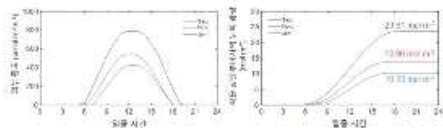
(그림 3,28) 파프리카의 생육 단계별 보광 방식에 따른 일중 시간대별 적광 광이용효율 (왼쪽부터 30, 90, 140 DAT)

토마토와 마찬가지로 파프리카에서도 동일한 분석을 수행하였다. 작물 수광량과 광합성량은 생육 단계에 따라 증가하는 양상을 보였고, 외부 광도 감소의 영향으로 인해 생육 단계별로 큰 차이가 나타나지는 않았다. 그러나 토마토에 비해 수광량과 광합성량은 낮은 절대값을 보였는데, 이는 비교적 작은 입면적으로 인한 결과로 생각된다. 보광 방식에 따른 작물 수광량 및 광합성량은 LED 내부 보광보다 HPS 상부 보광에 의한 증가량이 더 많았으며, 상부, 내부 보광을 동시에 실행했을 경우에 가장 높은 값을 보였다. 일중 LUE는 토마토와 마찬가지로 일출과 일몰 부근에서 높은 값을 보였다. 그러나 토마토와 비교해 보았을 때 파프리카는 일출, 일몰 구간에서 상당히 높은 LUE를 나타낸 반면, 일출 시간 동안에는 보광으로 인한 LUE 증가량이 매우 적었다. 이는 토마토에 비해 비교적 작은 파프리카의 수광으로 인한 영향일 것으로 생각된다. 실제로 90 DAT에서는 보광 방식에 따른 일중 LUE 차이가 거의 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 위 결과를 통해 파프리카는 일출 시간 내에서의 보광보다 일출과 일몰 시점에서의 보광이 더 높은 효율을 낸다는 것을 알 수 있다.

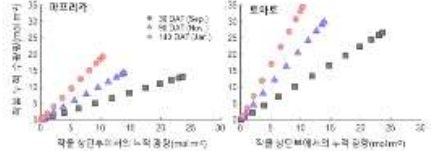
4) 직물 수광량 기반 보광 효율 분석

◆ 직물 상단부 일주직광량에 의한 보광

광추의 시뮬레이션으로 구해진 작물 상단부에서의 월별 일중 광도와 이를 누적함으로써 나타낸 것은 (그림 3,29)와 같다. 9, 11, 1월 순으로 일주직광량은 23,61, 13,90, 10,30 mol·m<sup>-2</sup>와 같았다. 예를 들어 파프리카와 토마토의 일중 목표 DLI를 25 mol·m<sup>-2</sup>로 설정하였을 경우 보광을 통해 이를 만족하기 위해서는 월별로 각각 1,39, 11,10, 14,70 mol·m<sup>-2</sup>의 누적 광량이 필요하다고 할 수 있다. 보광을 통해 부족한 광량을 보충하기 위해서는 보광 광원의 조사에 따른 누적 광량을 알아야 한다. 시뮬레이션 분석에 사용된 HPS 일주 보광 광원 배치에서 광원 조사 시 작물 상단부에서의 순간 광량은 약 211 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>이다. 이를 바탕으로 광원 조사 시간에 따른 누적 수광량을 계산하면, HPS 광원을 1시간 동안 켜둘 경우 0,76 mol·m<sup>-2</sup>만큼의 DLI를 보충할 수 있다는 결과를 도출할 수 있다(그림 3,30). 이를 바탕으로 목표 DLI를 보충하기 위한 HPS 광원의 필요 작동 시간을 (표 3,11)과 같이 나타낼 수 있다. 시뮬레이션 결과에서의 목표 DLI인 25 mol·m<sup>-2</sup>를 만족하기 위해 필요한 HPS 광원의 필요 조사 시간은 차례대로 110분, 877분, 1162분이다.



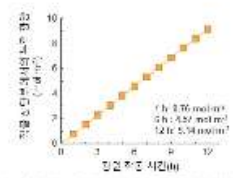
(그림 3,29) 광추적 시뮬레이션 대상 작물(당근상추) 월간광량과 월별 누적 광량(목표 광량)을 누적함으로써 나타낸 결과이다.



(그림 3,31) 광추적 시뮬레이션을 이용해 계산된 파프리카와 토마토 상단부에서의 누적 광량과 목표 광원 표면의 누적 광량 비교

(표 3,12) DLI 1 mol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>에 상응하는 파프리카, 토마토의 생육단계별 누적 수광량

작물	생육 단계(DAT)	DLI 1 mol·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> 에 상응하는 작물 누적 수광량 (mol·m <sup>-2</sup> )
파프리카	30	0,58
	90	1,33
	140	1,96
토마토	30	1,13
	90	2,19
	140	3,35



(그림 3,30) HPS 광원 보광의 조사시간에 따른 작물 상단부에서의 누적 광량

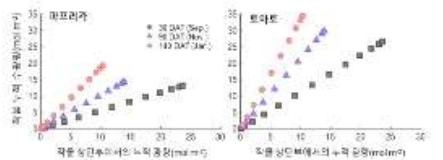
(표 3,11) 목표 DLI 보충을 위한 HPS 광원의 추가 조사 시간

보광 방식	목표 DLI									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	1:18	2:37	3:56	5:15	6:34	7:52	9:11	10:30	11:48	13:08

◆ 직물 수광량 기반 보광 효과 분석

앞서 계산한 것처럼 직물 상단부에서의 누적광량을 계산하면 작물 최적 생육을 유지하기 위해 얼마만큼의 보광이 필요한지에 대해 계산해 볼 수 있다. 일반적으로 이용되는 근라 광부 보광 방식은 DLI를 이용하여 보광 필요량을 손쉽게 계산할 수 있으나, 근라 내부 보광의 경우 작물 중, 하단부에 광이 조사되기 때문에 DLI를 기반으로 한 보광 필요량 계산이 어렵다. 따라서 작물 상단부에서의 누적 수광량이 아닌 작물 표면의 수광량을 기반으로 한 보광 필요량 계산이 필요하다. DLI 및 보광 방식에 따른 작물 수광량을 수치화하여 나타내기 위해 광추적 시뮬레이션을 이용해 계산된 월별 누적 광량과 작물 표면의 누적 광량을 비교해 보았다. 작목별, 생육단계별로 변화 양상에는 차이가 있었으나, 작물 상단부에서의 누적 광량과 작물 누적 수광량은 선형적인 관계를 보였다(그림

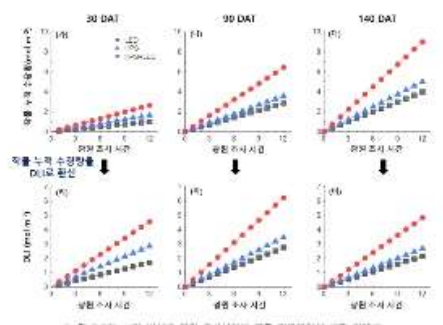
3,31). 이를 바탕으로 작목별, 생육단계별 DLI 1에 상응하는 작물 누적 수광량을 계산한 결과는 (표 3,12)와 같다. 상기 결과를 바탕으로 보광 처리 시 보광 방식에 따른 작물의 누적 수광량이 얼마만큼의 DLI에 상응하는지를 계산할 수 있다. 광추적 시뮬레이션 상에서 얻은 근라 상부 및 내부 보광에 따른 생육단계별 파프리카와 토마토 작물의 누적 수광량을 위 변환 계수에 따라 DLI 총량으로 변환하여 나타낸 것은 (그림 3,32~3,33)과 같으며, 이를 기반으로 (표 3,13~3,18)과 같이 파프리카와 토마토의 생육 단계 및 보광 방식에 따른 목표 DLI를 충족을 위한 필요 보광시간을 계산할 수 있다.



(그림 3,32) 광추적 시뮬레이션을 이용해 계산된 파프리카와 토마토 상단부에서의 누적 광량과 목표 광원 표면의 누적 광량 비교

(표 3,12) DLI 1 mol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>에 상응하는 파프리카, 토마토의 생육단계별 누적 수광량

작물	생육 단계(DAT)	DLI 1 mol·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> 에 상응하는 작물 누적 수광량 (mol·m <sup>-2</sup> )
파프리카	30	0,58
	90	1,33
	140	1,96
토마토	30	1,13
	90	2,19
	140	3,35



(그림 3,33) 보광 방식에 따른 조사시간에 따른 파프리카의 생육 단계별 누적 수광량(가-다)과 이를 DLI로 환산한 결과(라-재)

(표 3,13) 30 DAT 파프리카의 목표 DLI 보충을 위한 보광 방식에 따른 추가 조사 시간

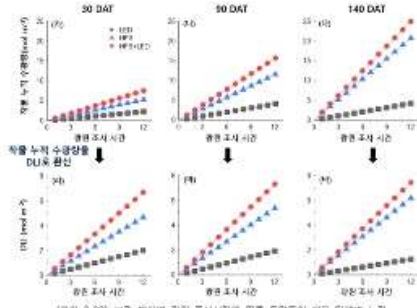
보광 방식	필요 DLI 보충을 위한 목표 광원 조사 시(20h:min)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	4:12	8:25	12:38	16:51	21:04	1:17	5:30	9:43	13:56	18:09
LED	7:01	14:02	21:03	28:04	35:05	42:06	49:07	56:08	63:09	70:10
HPS+LED	2:38	5:16	7:54	10:32	13:10	15:48	18:26	21:04	23:42	26:20

(표 3,14) 90 DAT 파프리카의 목표 DLI 보충을 위한 목표 광원 조사 시(20h:min)

보광 방식	필요 DLI 보충을 위한 목표 광원 조사 시(20h:min)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	3:27	6:55	10:22	13:50	17:18	20:46	24:14	27:42	31:10	34:38
LED	4:20	8:41	13:01	17:22	21:42	26:03	30:24	34:44	39:05	43:26
HPS+LED	1:55	3:51	5:46	7:42	9:37	11:33	13:29	15:24	17:20	19:15

(표 3.15) 140 DAT 파프리카의 필요 DLI 보충을 위한 필요 보광 명시별 광원 추가 조사 시간

보광 명시	필요 DLI 보충을 위한 필요 보광 명시 조사 시간(h:mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	4:27	8:55	13:23	17:51	22:19	2:46	7:14	11:42	16:10	20:38
LED	5:36	11:13	16:50	22:27	4:04	8:41	13:18	20:54	26:31	32:08
HPS+LED	2:29	4:58	7:27	8:56	12:25	14:54	17:24	18:53	22:22	24:51



(표 3.16) 30 DAT 토마토의 필요 DLI 보충을 위한 필요 보광 명시별 광원 추가 조사 시간

보광 명시	필요 DLI 보충을 위한 필요 보광 명시 조사 시간(h:mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	2:33	5:03	7:41	10:15	12:49	15:23	17:57	20:30	23:04	25:38
LED	5:58	11:56	17:54	23:53	5:51	11:49	17:47	23:46	5:44	11:42
HPS+LED	1:47	3:35	5:22	7:10	8:58	10:45	12:33	14:21	16:08	17:56

다. 작물 재식 밀도에 따른 온실 보광 방법

1) 광 조건별 작물 재식 밀도에 따른 보광 효율

① 피프리카, 토마토 재식 밀도에 따른 보광 효율

재식 밀도에 따른 시설과채류 온실 내 보광 효율을 분석하기 위해 파프리카와 토마토의 최종 생육 단계에서의 재식 밀도 변화에 따른 보광 효율을 분석하였다. 실제 재배가 이루어지는 정식 140일 후의 파프리카와 토마토 3차원 모형을 3구, 4구, 5구 슬라브 형태로 배치한 후 광추적 시뮬레이션을 통해 재식 밀도가 변화함에 따라 근막 상부 및 내부 보광의 효율에 대해 각각 분석하였다. 분석에 사용된 3, 4, 5구 슬라브의 재식 밀도는 각각 2.6, 3.5, 4.4 plants·m<sup>-2</sup>였다. 근막 상부의 HPS 광원 모형은 온실 바닥에서부터 3.5 m 높이에 가로 1.6 m, 세로 4.0 m 간격으로 배치하였고, LED 근막 내부 광원은 개체가 완전히 성장하였을 경우 근막 중간에 위치하도록 파프리카는 양면 배치로부터 60cm, 토마토는 90cm 높이에 배치하여 분석하였다.

(표 3.19) 최종 생육 단계에서의 재식 밀도에 따른 온실 토마토의 보광에 따른 일 총 수광량 및 수광량 분석

재식 밀도	수광 (mol·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )				광합성 (gCO <sub>2</sub> ·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )			
	보광 없음	HPS	LED	HPS+LED	보광 없음	HPS	LED	HPS+LED
3구 슬라브	10,87	17,71	12,53	19,37	1,823	3,233	2,270	3,480
4구 슬라브	9,841	18,28	11,15	17,57	1,811	3,062	2,338	3,581
5구 슬라브	9,398	15,44	10,38	16,32	1,245	2,843	1,866	3,057

(표 3.20) 최종 생육 단계에서의 재식 밀도에 따른 온실 파프리카의 보광에 따른 일 총 수광량 및 수광량 분석

재식 밀도	수광 (mol·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )				광합성 (gCO <sub>2</sub> ·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )			
	보광 없음	HPS	LED	HPS+LED	보광 없음	HPS	LED	HPS+LED
3구 슬라브	7,057	9,991	8,669	11,80	2,017	3,015	2,292	3,199
4구 슬라브	5,517	7,184	6,843	8,509	1,733	2,263	1,943	2,547
5구 슬라브	4,933	6,722	5,993	7,683	1,404	2,050	1,806	2,270

(표 3.17) 90 DAT 토마토의 필요 DLI 보충을 위한 필요 보광 명시별 광원 추가 조사 시간

보광 명시	필요 DLI 보충을 위한 필요 보광 명시 조사 시간(h:mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	2:13	4:27	6:40	8:54	11:08	13:21	15:35	17:49	20:02	22:16
LED	6:14	12:28	18:42	0:56	7:11	13:25	19:39	1:53	8:08	14:22
HPS+LED	1:36	3:16	4:56	6:33	8:12	9:50	11:29	13:07	14:46	16:24

(표 3.18) 140 DAT 파프리카의 필요 DLI 보충을 위한 필요 보광 명시별 광원 추가 조사 시간

보광 명시	필요 DLI 보충을 위한 필요 보광 명시 조사 시간(h:mm)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HPS	1:56	3:52	5:48	7:45	9:41	11:37	13:33	15:30	17:26	19:22
LED	5:31	10:02	4:33	14:04	23:35	9:06	18:37	4:08	13:39	23:10
HPS+LED	1:38	3:13	4:49	6:26	8:03	9:39	11:16	12:52	14:29	16:06

파프리카 및 토마토에서 재식 밀도에 따른 수광량 및 수광효를 분석한 결과, 토마토와 파프리카 모두 재식 밀도가 증가함에 따라 수광 및 광합성이 감소하였다. 파프리카의 경우 토마토보다 재식 밀도에 따라 훨씬 크게 수광량이 감소하였는데, 짧은 줄간 및 덜 드 높은 형태의 수관이 이러한 결과를 가져온 것으로 사료된다.

② 파프리카의 줄기 유인 방식에 따른 보광 효율

시설 파프리카 재배 시 일반적으로 2줄기 유인 방식을 이용하여 파프리카의 수관이 V자 형태가 되도록 유도한다. 그러나 단위 면적당 생산량 증대를 목적으로 파프리카를 3줄기 유인 방식을 이용하여 재배하기도 한다. 파프리카의 3줄기 유인 시 보광 효율에 대해 분석하기 위해 2줄기, 3줄기 유인 방식으로 재배된 파프리카의 최종 생육 단계에서의 줄기 유인 방식에 따른 보광 효율을 분석하였다. 파프리카 3차원 모형을 4구 슬라브 재배를 기준으로 하여 3.5 plants·m<sup>-2</sup>의 재식밀도로 3차원 형태로 온실 모델 내에 배치한 후 광추적 시뮬레이션을 통해 근막 상부 및 내부 보광의 효율에 대해 각각 분석하였다. 근막 상부의 HPS 광원 모형은 온실 바닥에서부터 3.5 m 높이에 가로 1.6 m, 세로 4.0 m 간격으로 배치하였고, LED 근막 내부 광원은 개체가 완전히 성장하였을 경우 근막 중간에 위치하도록 양면 배치로부터 60cm 높이에 배치하여 분석하였다.

(표 3.21) 최종 생육 단계에서의 재식 밀도에 따른 온실 파프리카의 보광에 따른 일 총 수광량 및 수광량 분석

줄기 유인 방식	수광 (mol·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )				광합성 (gCO <sub>2</sub> ·plant <sup>-1</sup> ·day <sup>-1</sup> )			
	보광 없음	HPS	LED	HPS+LED	보광 없음	HPS	LED	HPS+LED
2줄기 유인	5,517	7,184	6,843	8,509	1,733	2,263	1,943	2,547
3줄기 유인	6,156	8,380	7,359	9,581	1,752	2,611	1,955	2,712

개체 총 열면적은 2층기 페르라키와 3층기 페르라키에서 각각 평균 0.71, 0.88㎡였으며, 높은 입면적으로 인해 수평광 및 광합성은 3층기 유인 개체에서 다소 높게 나타났다. 보광을 하지 않은 경우 특히 2, 3층기 유인에서의 광합성 값이 차이가 거의 나지 않았으나 HPS보광 시에는 3층기 유인에서 계획된 광합성이 크게 증가하였다. 본 시뮬레이션 결과로 미루어 보아, 3층기 유인의 경우 HPS 상부 보광이 내부 보광보다 더 효율적일 수 있다.



가. 보광 광원 현장 설치 사례

- 보광 광원을 이용한 과채류 재배는 유럽에서 먼저 실시되어 국내에 도입되었으며 토마토, 오이, 딸기 등 다양한 작목에서 우수한 효과가 입증되었다.
- 이와 더불어 과채류에서는 결과 수량을 증가시키고, 빛의 조질을 개선하는 효과가 있으며, 과채류에서는 당도, 2차 대사산물 함량을 증가시키고, 착색 시기를 앞져 출하시기를 조절하는 효과가 있는 것으로 알려져 있다.



<그림 4.1> 보광시설을 이용한HPS, LED) 시설 재배

○ 보광용 광원으로서는 고압나트륨등(고압Na)과 플루오라이드(LED)가 가장 널리 사용되고 있으며, 다국적 회사(필립스, 삼성, OSRAM 등)에서 작물재배용 조광기구 시장이 뛰어나고 있다.



(그림 4.2) 다국적 기업에서 출시되는 작물 재배용 조광장치

○ 국내에서는 파래차, 열대야채의 파아조광 및 건조용으로 백열등, 형광등이 널리 사용 되어 왔으며, 최근에는 LED를 이용한 다단계 식물성장 시스템 및 식물재배기 등이 개발되어 활용되고 있다.



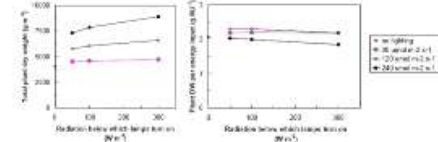
(그림 4.3) 다단계 식물재배 시스템(경기, 서울재배기모)

(표 4.1) 광원의 식물성에 적용된 파장은 범람<sup>98)</sup>

광원	파장	파장 조광	작물
저장량 + 작물	630nm	특이파장(630nm) 조광시엔 식재 개선	상목(Lactuca sativa L.) 표 (Mammoth extra L.)
	650nm	대부분의Photoperiod의 영향을 어느 정도	상목(Lactuca sativa L., cv. Red Cross)
	660nm	민초에서는 진해할 뿐만 아니라 수확량을 증가시킨다	민초(Lycopersicon esculentum L., cv. Minorette/Minorette)
	650nm+660nm	표준조광(650nm, 660nm)보다 수확량 증가	상목(Lactuca sativa L., cv. Wenzelco)
추수량	630nm + 650nm	4주간 (650nm, 630nm) 시판지 (Sensation abstract) 및 (Mammoth extra) 생산량 증가 (58.2%, 52.1%)	상목 (Lactuca sativa L.)
	660nm + 725nm	태양광 및 수조조광을 위한 증가	상목(Lactuca sativa L.)
	660nm + 730nm	식물의 광계 활성(leaf water potential 증가)과 광합성(photosynthesis) 증가	상목 (Lactuca sativa L.)

나. 보광 조건별 작물 재배 사례

- 보광이란 작물의 광합성 증진을 목적으로 인공광으로 조사하는 것을 말한다. 보광 방법으로는 일조 시간 연장, 흐린 날 주간 조명 및 야간 조명의 3가지가 있다. 일조 연장은 일출 전, 일출 후 또는 야간 중의 일정 시간에 광합성 또는 성장 촉진을 목적으로 온실 내에서 증명한다.
- 보광 조건별 작물 재배사례는 매년 보고되고 있으며, 그 중 일부를 표 4-1에 정리 하여 표기하였다. 네덜란드의 경우 토마토 보광과 인산가스 시비를 통해 연중 생산량을 55% 증가한다고 알려져 있다.



(그림 4.4) 토마토의 보광 조명 및 묘사영양 파란 보광 시험실 실험에 따른 수확량과 단위 에너지 투입에 따른 건물용 변화<sup>99)</sup>



(그림 4.5) 네덜란드 고압나트륨등 보광과 야간 형광 LED 보광

98) March, L., Li, M., Mao, J.M., Houtchek, L. 2000. The latest developments in the lighting technologies in Dutch horticulture, in IV International 1995 Symposium on Artificial Lighting, 983-95-1.

114 보광 보광 기술(Greenhouse Supplemental Lighting Technology)

광원	파장	파장 조광	작물
저수확량	640 ~ 660nm	민초에서는, 생산량 증가, 연초 증가	민초(Lactuca sativa L.)
	660 ~ 680nm	600~630nm에 비하여 재배시기를 저조	상목(Coturniculus guineensis L.)
	660 ~ 680nm	표준조광 C, 열매수 함량 증가(58.9%)	상목(Lactuca sativa L.)
수확량	660 ~ 725nm	표준조광(660nm, 725nm)보다 수확량 증가	상목(Lactuca sativa L.)
	660 ~ 730nm	식물의 광계 활성(leaf water potential 증가)과 광합성(photosynthesis) 증가	상목 (Lactuca sativa L.)
	660 ~ 730nm	식물의 광계 활성(leaf water potential 증가)과 광합성(photosynthesis) 증가	상목 (Lactuca sativa L.)

99) Koca, L. 2016. Why LED Lighting for extra applications? In LED Lighting for extra applications, pp. 1-14



1) 재배 조건

○ 보광광원별 출기유인 주수에 따른 작물 재배효과를 비교하기 위하여 10월 26일부터 2021년 5월 25일까지 경상남도 함안에 위치한 국립원예특작과학원 시설안개연구사(35.2°N, 128.4°E)의 베히베히 유리온실(폭 8.4m, 길이 20m, 높이 5.5m)에서 수행되었다. 육묘상에서 4주간 재배한 캡사이킨(*Capsicum annuum* L., cv. Scirocco)를 전기전도도(EC, electrical conductivity) 1.8dS·m<sup>-1</sup>의 표준 양액으로 포습된 일반 배지(SV75151/9, Hankuk URmedia, Seoul, Kor)에 4개체씩 정식하였으며, 온실 내 재식밀도는 3.2 plant·m<sup>2</sup>였다. 온실의 온도는 온실 중앙에 위치한 온도센서(111N&222N, Jaumteting Int., Taiwan)를 이용하여 낮에는 환기 시작온도를 25°C로 설정하여 환량이 10%의 개방되도록 설정하였으며, 밤에는 온실 내 기온이 20°C 이하일 경우 온수난방장치가 가동되도록 관리하였다. 작기 중 온실 내부의 일평균온도는 20.9°C, 상대습도는 40%였다. 양액 관리는 08~15시 30분까지 90분 간격으로 5회/일(250ml/회) 급액하였으며, 정작기부터 취라기까지는 EC 1.8을 유지하였고, 1그룹 취라 이후에는 EC를 1.8에서 2.5까지 점진적으로 증가시켰다. 재배 기간 동안 유인, 적실, 병해충 방제 등의 관리 작업을 주기적으로 실시하였다.

○ 정식 후 분지된 줄기를 식분당 2줄기, 3줄기 방식으로 유인하였다. 유인 처리에 따른 줄기 밀도는 2, 3줄기 처리구에서 각각 6.4, 9.6 stem·m<sup>-2</sup>였다. 2줄기 유인 처리구는 관행 방식에 따라 2개의 줄기가 "V"자 형태의 수관을 나타내도록 선정하였으며(Ovichik 등 2004), 3줄기 처리구의 경우 분지된 줄기가 3개일 경우 3개의 줄기를 그대로 유인하였고, 2개일 경우 분지의 바로 다음 마디에서 분지된 줄기를 또 다른 주기로 하여 3줄기 형태로 유인하며 개체당 주지의 개수를 일정하게 유지하였다. 각 주지별로 정식 후 영양생장을 유지하기 위해 분지 위로 2번째 마디까지 화형을 작성했으며, 분지 위 3번째 마디부터 화실을 유지하였다.

○ 작기가 끝나는 정식 후 212일(212 DAT, days after transplanting)에 처리구 당 8개체씩 과채과수를 실시하였다. 조사 항목은 일수, 일면적, 초장의 비과과조사 항목과 일, 줄기, 과실의 생체중과 건물중의 과과조사 항목으로 나누어 측정하였다. 과실 수확은 80% 이상 착색된 과실을 채 3일마다 수확하였고, 과실 생체중은 수확 직후 측정하였다. 과실 건물중은 자연순환식 건조기(1H503LF, Hanbaek Sci., Bucheon, Kor)를 통해 80°C에서 72시간 동안 건조 후 측정하였다. 수확한 과실은 상용과와 비상용과로 분류하여 100g 미만의 과실, 비감액과, 병과, 열과 및 기형과를 비상용과로 구분하여 분류하였다. 과실의 당도는 수확한 과실의 과피를 같이 굵을 낸 후 휴대용 당도계(DAL-1, ATAGO, Tokyo, Japan)를 통해 측정하였다.

○ 재배 기간 동안 온실 피복 평균 밀적산광량은 13,68mol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>였으며, 보광은 고탄 나트륨등(1000W DE, Dutch Lighting Innovations, Aalsmeer, The Netherlands)을 이용하여 6시부터 22시까지 16시간의 광주기로 2020년 12월 1일부터 실험 종료일까지 처리하였다. 보광등에서 조사된 유효광합성광양자속밀도(photosynthetic photon flux density, PPFD)는 온실 바닥에서부터 1.0m 높이에서는 55.4μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>, 2.0m 높이에서는 179.4μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>이었으며, 보광 처리 하에서 일사량과 보광량을 합한 일적산광량은 2.0m 높이 기준 측정 시 가장 높은 값과 낮은 값 각각 29.2와 11.7mol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>으로 유지되었다.

2) 작물 재배 결과

○ 초경은 2줄기 유인 처리구에 비해 3줄기 유인 처리구에서 유의적으로 짧았고 낙차 수 및 일수는 2줄기 유인 처리구에 비해 3줄기 유인 처리구에서 유의적으로 증가했다. 일면적 및 기관별 건물중은 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 과실 생체중 및 건물중은 모든 처리구에서 생육단계에 따라 감소하는 경향을 보였으며, 3줄기 유인 처리구가 2줄기 유인 처리구에 비해 낮은 수치를 보였다. 3줄기 유인 처리

리구의 상용과율은 95.4%로 2줄기 유인 처리구의 93.6%에 비해 높았다. 총 수확량은 3줄기 유인 처리구에서 30.2% 높게 나타났다. 결론적으로 온실 파프리카의 3줄기 유인 재배는 적정 수준의 영양생장을 유지함으로써 과실 생산량에 긍정적인 영향을 미쳤다고 할 수 있다.

표 4.2. 줄기 유인 처리에 따른 건물중

처리	건물중 (kg)			
	일	2줄기	과실	전체
2 줄기유인	126.68±36.61	158.3±27.34	102.38±12.74	387.37±71.47
3 줄기 유인	109.06±12.99	142.03±12.68	100.75±15.32	351.85±22.44
유역성	ns	ns	ns	ns

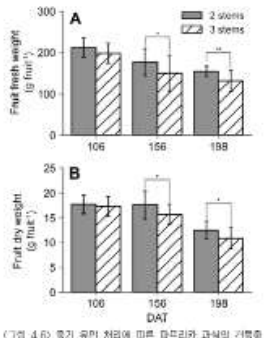


그림 4.6. 줄기 유인 처리에 따른 파프리카 과실의 건물중

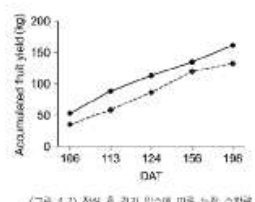
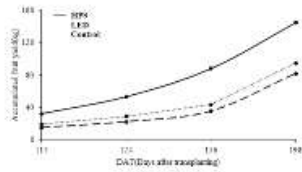


그림 4.7. 정식 후 경과 일수에 따른 누적 수확량

○ 보광 처리에 따른 수량의 증가는 조밀기구에 따라 차이가 있었으며, 대조구 3줄기에서 가장 낮은 단위 면적당 생산량(82.07kg)을 보였으며, 그 이후로 LED 2줄기(85.06), 대조구 2줄기(86.68), LED 3줄기(94.67), 나트륨등 3줄기(144.92), 나트륨등 2줄기(146.8) 순으로 나타났다. 나트륨등에서 무처리 대비 78.9%의 우수한 수량 증가 효과를 보였으며, 생육 후기로 갈수록 단위 면적당 수량의 면차는 점점 커지는 추세를 보였다.

표 4.3. 보광 처리구에 따른 누적 수량 변화

처리구	건물중 수확량 (kg·m <sup>-2</sup> )	DAT				수량 증감 (%)
		119	154	198	198	
대조구	2줄기	16.66	21.65	31.67	86.09	+5.0
	3줄기	16.2	22.62	35.59	82.07	-
나트륨등	2줄기	33.3	65.06	80.18	146.8	+78.9%
	3줄기	32.4	53.45	88.11	144.92	+76.9%
LED	2줄기	17.3	30.08	42.84	85.06	+3.6%
	3줄기	18.72	29.06	43.63	94.67	+15.4%



(그림 4.8) HPS와 LED의 누적 수확량 변화

3) 경제성 분석



(그림 4.9) 고압나트륨등(좌)과 LED(우) 보급 사례

○ 각 광원별 전기 사용량을 단위면적당 일 전력 소모량으로 환산하였을 때 1㎡당 일일 전력 소모량은 HPS가 2,257 kWh·m<sup>2</sup>·day<sup>-1</sup>, LED가 0,405 kWh·m<sup>2</sup>·day<sup>-1</sup>로 HPS가 LED에 비하여 5.5배 높은 전력 소비량을 가지는 확인 되었으며, 이를 농업 용(급) 전기요금으로 환산하였을 경우 각각 10a 당 1개월에 1,455,460원, 261,140원이 발생할 것으로 예상된다.

표 4.3. 광원별 전기 사용량 및 전기요금

전기요금 : 200원/㎾h

광원	일일 면적당 일 전력 소모량 (kWh·m <sup>2</sup> ·day <sup>-1</sup> )	10a당 일 전기 사용량 (kWh·10a <sup>-1</sup> ·month <sup>-1</sup> )	10a당 전기요금 (₩·10a <sup>-1</sup> ·month <sup>-1</sup> )
HPS	2,257	67,730	1,455,460
LED	0,405	12,150	261,140

표 4.4. LED 내부 보급을 이용한 작목리커 3분기 유인 체제 시 경제성 분석<sup>\*)</sup>

(단위: 10a, 단위 천)

투입되는 요인(A)		산출되는 요인(B)
시설비 : 13,000,000원		
조분 가루 : 100,000*50	5,000,000	
일차 비료 : 8,000,000	8,000,000	
총경비 : 3,133,680원/년		매출 총가액 : 5,007,066원/년
전기 사용료 : 3,133,680	3,133,680	
		총합 (B-A) : 1,873,386원/년

표 4.5. HPS 내부 보급을 이용한 작목리커 3분기 유인 체제 시 경제성 분석<sup>\*)</sup>

(단위: 10a, 단위 천)

투입되는 요인(A)		산출되는 요인(B)
시설비 : 22,000,000원		
조분 가루 : 500,000*20	10,000,000	
일차 비료 : 12,000,000	12,000,000	
총경비 : 17,465,500원		매출 총가액 : 25,690,554원/년
전기 요금 : 17,465,500	17,465,500	
		총합 (B-A) : 8,204,033원/년-10a

\*) 농촌진흥청(2016년), 작목리커 소수 기준(면적 33,380㎡/10a)

○ 이쯤 바탕으로 보급 시점에 대한 경제성 분석을 실시한 결과 LED의 경우 1,873,385원/년, 10a 고압나트륨등의 경우 8,204,033원/년, 10a의 경제의 이익을 도출하는 것으로 나타났다. 각각 항목에 시점에 투입되는 투자비를 회수하는 데에 걸리는 시간은 LED의 경우 6.9년, 고압나트륨등의 경우 2.6년이 걸릴 것으로 예상 된다.

# 자체평가의견서

## 1. 과제현황

		과제번호		320081-1	
사업구분	1세대 스마트 플랜트팜 산업화 기술개발 사업				
연구분야	1세대 스마트 플랜트팜 산업화 기술개발		과제구분	단위	
사업명	1세대 스마트 플랜트팜 산업화 기술개발 사업			주관	
총괄과제	기재하지 않음		총괄책임자	기재하지 않음	
과제명	시설과채류 3D 구조모델링 기반 스마트온실 보광 효과 검증		과제유형	응용	
연구개발기관	서울대학교 산학협력단		연구책임자	손정익	
연구기간 연구개발비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	2020.07.03. - 2021.07.02	617,000		617,000
	2차년도				
	3차년도				
	4차년도				
	5차년도				
	계				
참여기업					
상대국			상대국연구개발기관		

※ 총 연구기간이 5차년도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 : 2021. 9. 3.

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
서울대학교	교수	손정익

4. 평가자(연구책임자) 확인 :

본인은 평가대상 과제에 대한 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 본 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

확약	손정익
----	-----

## I. 연구개발실적

※ 다음 각 평가항목에 따라 자체평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

### 1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

지금까지 국내외적으로 온실 작물 보광 연구는 단순한 외부/내부 광도 설정 개념에서 실시되었지만, 본 연구에서는 3차원 작물 구조모델 및 3차원 수광해석 기반으로 균락의 수광, 광합성 해석 및 이에 근거한 정교한 작물 보광 기술을 개발하였음

### 2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

3차원 수광해석에 기반하여 작물 반응을 고려한 정교한 보광 기술을 통하여 보광시 에너지 절감, 작물 생산량 증대 및 과실의 품질 향상에 기여할 수 있으며, 보광 매뉴얼을 통한 체계적인 기술 보급을 통하여 작물 보광 분야의 산업화 촉진에 기여할 수 있음.

### 3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

3차원 수광 해석을 기반으로 한 작물 수광량 기반 보광 기술과 보광 매뉴얼은 온실 보광 및 수직 농장 등의 기술 자료로 활용 가능하고, 또한 관련 기술의 산업체 이전을 통하여 작물 보광/인공광 이용 분야의 산업 발전을 위한 자료로 활용 가능함

### 4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

본 연구는 서울대학교를 중심으로 농촌진흥청 시설원예연구소, 목포대학교, 안동대학교의 연구진이 유기적으로 정보를 교환하면서 연구를 수행하여 연구 기간이 1년임에도 불구하고 기술 개발 및 매뉴얼 작성 등의 소기의 목표를 달성하였음

### 5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

본 연구과제의 정량적 성과 목표/실적은 특허출원 1/1건, 학술발표 3/6(국제1건 포함)건, 정책제안 1/1건, 매뉴얼 1/1건이며, 정성적 성과 목표/실적은 SCI 1/1건(IF 5.734), 비SCI 1/1건으로 당초에 설정한 성과 목표를 달성하였음

## II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
온실 상부, 수관 내부 보광 광원 선정 및 최적 배치 방식 결정	20	100	목표를 달성함
3차원 작물 모델을 이용한 보광 광원의 온실 적용 방식 설계	30	100	목표를 달성함
보광 광원의 온실 적용 후 성능 평가 및 재배 생리적 효과 실증	30	100	목표를 달성함
광 처리에 따른 작물 생산성 향상 생리 반응 구명	20	100	목표를 달성함
합계	100점		

## III. 종합의견

### 1. 연구개발결과에 대한 종합의견

본 연구의 목표는 3차원 수광 해석을 기반으로 한 작물 수광량 기반 보광 기술 제시 및 3차원 수광 해석 기반의 보광 기술을 포함한 시설과채류 보광 매뉴얼 개발임. 국내외적으로 온실 작물 보광 연구는 단순한 외부/내부 광도 설정 개념에서 실시되었지만, 본 연구에서는 3차원 작물 구조모델 및 3차원 수광해석 기반으로 균락의 수광, 광합성 해석 및 이에 근거한 정교한 작물 보광 기술을 개발하였음. 또한 본 연구의 정량적/정성적 성과 목표를 달성하였음.

### 2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

### 3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

3차원 수광 해석을 기반으로 한 작물 수광량 기반 보광 기술과 보광 매뉴얼은 온실 보광 및 수직 농장 등의 기술 자료로 활용 가능하고, 또한 관련 기술의 산업체 이전을 통하여 작물 보광/인공광 이용 분야의 산업 기술로 활용이 가능함

## IV. 보안성 검토

○ 연구책임자의 보안성 검토의견, 연구개발기관 자체의 보안성 검토결과를 기재함

※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성함.

1. 연구책임자의 의견

--

2. 연구개발기관 자체의 검토결과

--



⑬과채류 작물의 광합성 특성 조사 분석	보광 방식, 보광 광원, 광환경과 작물 생육, 보광에 따른 시설 과채류의 생육 효과에 대해 문헌과 사례 및 실험 결과를 정리함
⑭국내 지역 및 계절, 일중 시간에 따른 일사량 분포도 작성	국내 지역별, 계절별 광환경 데이터를 이용하여 보광 적용을 위한 기준으로 활용할 수 있도록 자료를 정리하여 제시함
⑮보광 광원의 선정, 조명 방식 및 배치, 광이용 효율 기반 보광 매뉴얼 작성	시설과채류 온실 보광 현황, 보광 기술 이론, 3차원 시뮬레이션 기반 조명 설계 기준, 보광에 따른 시설 과채류 작물 생육 사례 분석을 포함한 보광 매뉴얼을 작성함

\* 결과에 대한 의견 첨부 가능

### 3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				기술 인증	학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용·홍보		기타 (타연구활용예)	
	특허출원	특허등록	품종등록	S M A R T	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용 창출		투자유치	논문 SCI	비SCI			논문평판 I F	학술 발표		정책 활용
단위	건	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	명	건	건	건	
가중치	30													20			20		30	
최종 목표	1	1			1									2	2		3		1	1
당해 년도	목표	1												1	1		3		1	1
	실적	1												1	1		6		1	1
달성률 (%)	100													100	100		100		100	100

### 4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	3차원 수광 해석을 기반으로 한 작물 수광량 기반 보광 기술 제시
②	3차원 수광 해석 기반의 보광 기술을 포함한 시설과채류 보광 매뉴얼 개발

### 5. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)				
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복제	외국기술 소화·흡수	외국기술 개선·개발	특허 출원	산업체이전 (상품화)	현장애로 해결	정책 자료	기타
①의 기술	v					v				
②의 기술		v							v	v



6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	3차원 수광해석을 통한 작물 수광량 기반의 보광 방식을 제시함으로써 온실 보광 시 에너지 절감에 기여하고, 온실 내 보광 광원 적용에 따른 작물의 생산량 증대 및 과실의 품질 향상에 기여할 수 있음.
②의 기술	시설과채류 보광 현황, 보광 기술 이론, 3차원 시뮬레이션 기반 조명 설계 기준, 보광에 따른 시설 과채류 작물 생육 사례 분석을 포함한 보광 매뉴얼을 개발함으로써 관련 산업체에 기술 제공이 가능하며 보광 분야의 산업화 촉진에 기여할 수 있음.

7. 연구종료 후 성과창출 계획

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표								
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				기술 인증	학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용·홍보		기타 (타 연구 활용 등)
	특허 출원	특허 등록	품종 등록	S M A R T	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용 창출		투자유치	논문 SCI	논문 비SCI			논문 평판 I-F	학술 발표	
단위	건	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	명	건	건	
가중치	30													20			20		30
최종목표	1	1			1							2	2		3			1	1
연구기간내 달성실적	1											1	1		6			1	1
연구종료후 성과창출 계획		1			1							1	1						

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

핵심기술명 <sup>1)</sup>	3차원 수광 해석에 기반한 작물의 보광 방법		
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input checked="" type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	100,000 천원
이전방식 <sup>2)</sup>	<input checked="" type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타( )		
이전소요기간	1년 이내	실용화에상시기 <sup>3)</sup>	2023년
기술이전시 선행조건 <sup>4)</sup>	기술지도(3차원 작물모델링 및 광환경 해석)		

- 1) 핵심기술이 2개 이상일 경우에는 각 핵심기술별로 위의 표를 별도로 작성
- 2) 전용실시 : 특허권자가 그 발명에 대해 기간·장소 및 내용을 제한하여 다른 1인에게 독점적으로 허락한 권리  
통상실시 : 특허권자가 그 발명에 대해 기간·장소 및 내용을 제한하여 제3자에게 중복적으로 허락한 권리
- 3) 실용화에상시기 : 상품화인 경우 상품의 최초 출시 시기, 공정개선인 경우 공정개선 완료시기 등
- 4) 기술 이전 시 선행요건 : 기술실시계약을 체결하기 위한 제반 사전협의사항(기술지도, 설비 및 장비 등 기술이전 전에 실시기업에서 갖추어야 할 조건을 기재)

## 주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 1세대 스마트 플랜트팜 산업화 기술개발사업 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 1세대 스마트 플랜트팜 산업화 기술개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.