

보안 과제( ), 일반 과제( O ) / 공개( O ), 비공개( )발간등록번호( O )  
스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업 2023년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-004720-01

# 시설 과채류 작물 생육·수확량 예측 기반 온실환경 모델링 및 시뮬레이션 SW 개발

2024. 5. 28.

주관연구기관 / 시설원에연구소  
공동연구기관 / 서울대학교 산학협력단  
공주대학교 산학협력단  
국립목포대학교 산학협력단  
경북대학교 산학협력단

참여기업 / 글피  
본시스템즈

농림축산식품부  
과학기술정보통신부  
농촌진흥청  
(전문기관)농림식품기술기획평가원  
스마트팜연구개발사업단



최종보고서							보안등급						
							일반[✓], 보안[ ]						
중앙행정기관명		농림축산식품부 과학기술정보통신부 농촌진흥청		사업명	사업명		스마트팜 다부처 패키지 혁신기술 개발사업						
전문기관명 (해당 시 작성)		농림식품기술기획평가원 (재)스마트팜연구개발사업단			내역사업명 (해당 시 작성)		스마트팜 실증· 고도화 연구사업						
공고번호		제농축 2021-45호		총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)		421001032CG000							
				연구개발과제번호		421001032CG000							
기술분류	국가과학기술 표준분류		LB0203	35	LB0805	35	LB0804	30 %					
	농림식품과학기술분류		AA0203	35	AA0204	35	RC0102	30 %					
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문	시설 과채류 작물 생육·수확량 예측 기반 온실환경 모델링 및 시뮬레이션 SW 개발										
		영문	Development of greenhouse environment modeling and simulation SW based on prediction of growth and yield of fruit vegetables										
연구개발과제명		국문	시설 과채류 작물 생육·수확량 예측 기반 온실환경 모델링 및 시뮬레이션 SW 개발										
		영문	Development of greenhouse environment modeling and simulation SW based on prediction of growth and yield of fruit vegetables										
주관연구개발기관		기관명	국립원예특작과학원		사업자등록번호		622-83-00614						
		주소	(52054) 경남 함안군 진함로 1425		법인등록번호		-						
연구책임자		성명		정호정		직위		농업연구관					
		연락처	직장전화				휴대전화						
			전자우편				국가연구자번호						
연구개발기간		전체		2021. 04. 07. - 2023. 12. 31.( 2년 9개월)									
		(해당 시 작성)	1단계	2021. 04. 07. - 2022. 12. 31.( 1년 9개월)									
			2단계	2023. 01. 01. - 2023. 12. 31.( 1년 개월)									
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비		기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금 지방자치단체 기타( )		합계	연구개발비 외 지원금				
		현금	현금	현물	현금	현물	현금			현물	현금	현물	합계
		총계		2,600,000	18,500	166,500					2618500	166500	2785000
		1단계	1년차	800,000							800,000	-	800,000
			2년차	900,000	9,250	83,250					909,250	83,250	992,500
2단계	1년차	900,000	9,250	83,250				909,250	83,250	992,500			
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고						
		역할	기관유형										
공동연구개발기관		서울대학교 산학협력단	안태인	교수			과제 책임자	대학					
		공주대학교 산학협력단	최효길	교수			과제 책임자	대학					
		국립목포대학교 산학협력단	박경섭	교수			과제 책임자	대학					
		경북대학교 산학협력단	김성겸	교수			과제 책임자	대학					
위탁연구개발기관		제주대학교 산학협력단	조영열	교수			과제 책임자	대학					
연구개발기관 외 기관		글피	김정원	팀장			과제 책임자	기업					
		본시스템즈	이정훈	기획이사			과제 책임자	기업					
연구개발과제 실무담당자		성명		김진현		직위		농업연구사					
		연락처	직장전화				휴대전화						
			전자우편				국가연구자번호						

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



---

2024 년 2 월 6 일

주 관 연 구 책 임 자 : 정 호 정 (인)

주관연구개발기관의 장: 국립원예특작과학원 김 기 영 (직인)  
시설원예연구소

공동연구개발기관의 장: 공주대학교 산학협력단 김 송 자 (직인)

국립 목포대학교 산학협력단 임 한 규 (직인)

서울대학교 산학협력단 김 재 영 (직인)

경북대학교 산학협력단 공 성 호 (직인)

위탁연구개발기관의 장: 제주대학교 산학협력단 이 영 돈 (직인)

참여기업의 장: 글 피 유 봉 수 (직인)

본 시 스 템 즈 김 창 현 (직인)

---

농림축산식품부장관 과학기술정보통신부장관 농촌진흥청장 농림식품기술기획평가원장 귀하



제출문

## 제 출 문

농림축산식품부 장관·과학기술정보통신부 장관·농촌진흥청장 귀하

본 보고서를 “시설 파채류 작물 생육·수확량 예측 기반 온실환경 모델링 및 시뮬레이션 SW 개발”(개발기간 : 2021.04.07 ~ 2023.12.31)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2024.05.28.

주관연구기관명 : 국립원예특작과학원 시설원예연구소 (대표자) 김 기 영 (인)

공동연구기관명 : 공주대학교 산학협력단 (대표자) 김 승 작 (인)

국립목포대학교 산학협력단 (대표자) 김 건 불 (인)

서울대학교 산학협력단 (대표자) 김 광 복 (인)

경북대학교 산학협력단 (대표자) 홍 성 호 (인)

위탁연구기관명 : 제주대학교 산학협력단 (대표자) 강 철 용 (인)

참 여 기 업 명 : 글 과 (대표자) 유 봉 수 (인)

본시스템즈 (대표자) 김 창 현 (인)

주관연구책임자 : 국립원예특작과학원 시설원예연구소 정훈영

공동연구책임자 : 공주대학교 최효길

국립목포대학교 박정섭

서울대학교 안태인

경북대학교 김성겸

위탁연구책임자 : 제주대학교 조영열

참여기업책임자 : 글 과 김정원

본시스템즈 유성호

「국가연구개발혁신법」 제17조에 따라 보고서 열람에 동의 합니다.





## < 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명		스마트팜다부처패키지혁신기술개발			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)		421001032CG000	
내역사업명 (해당 시 작성)		스마트팜 실증·고도화 연구			연구개발과제번호		421001-03	
기술 분류	국가과학기술 표준분류	LB0203	35	LB0805	35	LB0804	30%	
	농림식품 과학기술분류	AA0203	35	AA0204	35	RC0102	30%	
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		시설 과채류 작물 생육·수확량 예측 기반 온실환경 모델링 및 시뮬레이션 SW 개발						
연구개발과제명		시설 과채류 작물 생육·수확량 예측 기반 온실환경 모델링 및 시뮬레이션 SW 개발						
전체 연구개발기간		2021. 04. 07. - 2023. 12. 31( 2년 9개월)						
해당단계		2021. 04. 07. - 2022. 12. 31( 1년 9개월)						
총 연구개발비		총 2,618,500 천원 (정부지원연구개발비 : 2,600,000천원, 기관부담연구개발비 : 18,500천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)						
해당단계		총 1,709,250 천원 (정부지원연구개발비 : 1,709,250천원, 기관부담연구개발비 : 83,250천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)						
연구개발단계		기초[ <input checked="" type="checkbox"/> ] 응용[ <input type="checkbox"/> ] 개발[ <input type="checkbox"/> ] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[ <input type="checkbox"/> ]			기술성숙도 (해당 시 작성)		착수시점 기준( ) 종료시점 목표( )	
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)								
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)								
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		네덜란드 수준의 복합환경 관리를 위한 작물의 생육·생리·수확량 예측 고도화 모델 개발 수직형 작물에 대한 3차원 작물 생육과 온실 환경 시뮬레이션 SW 개발 및 디지털 재배관리 최적화					
	전체 내용		<b>기개발 생육 예측모델 및 환경 빅데이터를 활용한 성장 및 수확량 예측 모델 고도화</b> - 작물별 성장·수확 예측 및 온실환경 모델 개발을 위한 데이터 수집·표준화 - 작물생육 단계별 온실환경 모델 개발 - 작물별 생육모델 고도화를 위해 기 개발된 국외 모델 함수식 검증 및 보완 - 빅데이터 기반의 환경조건을 고려한 성장·수확량 모델 함수식 개발 <b>작물생육 단계별 3차원 구조모델 DB 구축</b> - 3차원 작물 생육·온실환경 모델 개발을 위한 생육 이미지 수집·표준화 - 스마트팜 및 식물공장 주요 작물의 환경·재배 조건에 따른 생육 단계별 모델 구축 - 작물 성장 모델과 연동되는 작물 생육모델 시각화 <b>개발·보완된 모델의 스마트팜 실증</b> - 환경 및 생육조건을 활용한 작물별 성장 및 수확량 예측 모델 검증 <b>3차원 작물 생육·온실환경 시뮬레이션 SW 개발</b> - 구축된 빅데이터 모델을 기반으로 재배기간·발육단계·작물별 특징 등을 고려한 작물 생육모델 시각화·3차원 시뮬레이션 SW 개발					
	1단계 (해당 시 작성)	목 표	특허출원1, SCI 1건, 비SCI 6건, 학술발표 10					
		내 용	- 고도화된 토마토, 파프리카 및 오이 생육모델 논문게재 - 과채류 생육 및 환경 관리 방법 특허 등록					
	2단계 (해당 시 작성)	목 표	SCI 5건, 비SCI 1건, 특허 등록 3건, 기술이전(유상) 2건, 기술이전(무상) 2건, 표준DB 구축 3, 소프트웨어 저작권 3					
	내 용	- 개발 생육 모델 검증 논문 게재 - 작물별 생육·환경정보 표준 DB 구축 - 작물 생육 모델 및 예측 SW → 소프트웨어 저작권 및 기술이전(유상, 무상)						



연구개발성과	<b>연구개발성과</b> <b>(논문게재)</b> 시설 과채류 생리활성 및 생육량 예측 논문게재(SCIE, 8건, 비SCI 6) <b>(학술발표)</b> 국내, 국제 심포지엄 학술발표(39건) <b>(인력양성)</b> 원예연구를 위한 연구 인력 양성(13건)												
연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<b>연구개발성과의 활용 계획 및 기대효과</b> <b>(표준 DB구축)</b> 농가 수집 생육·환경 정보의 표준 생육정보 수집 <b>(모델 국산화)</b> 국내 주요 시설 재배 작목에 대한 생육·수량 모델 확대 <b>(논문게재)</b> 시설 과채류 모델링 분야 후속 연구 진행												
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	
	14	5	1			3							
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)	작물구조모델		생장 모델		수확량 예측		시각화		빅데이터				
영문핵심어 (5개 이내)	Crop structure model		Growth model		Yield prediction		Visualization		Big data				



## < 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획



# 1. 연구개발과제의 개요

## 1) 연구개발과제의 필요성

### □ 시설 과채류 작물 생육·수확량 예측 기반 온실환경 모델링 및 시뮬레이션 SW 개발

- 국내 시설원에 면적은 10년 사이에 2배 이상 증가(25.5천ha(1990) → 52.2천ha(2000)) 하였으며 그 이후로는 완만하게 증가하여 2019년도 54.4천ha 정도임
- 우리나라 농업인구는 약 224만명(2019)으로 전체 인구 중 비율은 전년도에 비하여 1.3% 감소한 4.3%이며 그 중 65세 이상의 경영주가 46%를 차지하고 있는데, 고령화율이 가장 높은 일본(68.5%)에 이어 전 세계에서 2번째로 높음(한국농촌경제연구원, 2020)
- 정부에서는 노동력 부족을 해소하고, 농산물 가격을 안정화하기 위하여 스마트팜을 보급하고 있음
- 시설재배 경우 정식 시기, 재배방법 및 환경관리 방법에 따라 농산물의 출하시기가 결정되며, 가격변동성이 높은 농산물의 경우 시설 내부의 환경(광, 온도, CO2)을 관리를 통한 재배 관리가 필요함
- 주요 시설 과채류인 토마토, 파프리카, 오이는 연중생산이 가능하기 때문에 스마트팜 주요 작목으로 여겨지는데 재배면적과 생산량은 각 토마토 5,706ha(358,580톤, 14%), 파프리카 728ha(80,770톤, 1.8%), 그리고 오이 3,963ha(324,815톤, 10%)이며 그 중 토마토와 파프리카는 주요 수출 농산물로써 각광받고 있음(농림축산식품부, 2019)
- 정밀 생육·환경관리를 위해서는 외부 요인(환경, 재배방법 등)에 따른 작물의 변화를 지속적으로 관찰 기록한 정보가 필요하며, 이를 객관화하여 수치로 나타낸 것을 작물 생육 모델(Plant growth model)이라 함
- 생육 모델을 통하여 현재 작물의 상태를 정확히 진단함으로써 향후 작물의 상태 및 생육량을 예측할 수 있고, 노하우로 여겨지던 기존의 기술 및 정보를 수치화·일반화하여 생산자들에게 제공함으로써 국내 농업 기술 수준을 제고하고 농산물의 생산성 및 품질을 향상시켜 농가의 소득 향상과 생산의 안정성을 제고함
- 생육 예측 시뮬레이션 프로그램을 적용하여 정밀 생산 환경관리에 활용함으로써 작물의 정밀 생육, 온도, 이산화탄소 농도 그리고 노동력 등 여러 재배관리 요소들에 대한 전략의 수립 및 생산자의 의사결정을 지지 할 수 있는 도구로 활용 가능함
- 이에 토마토, 파프리카 및 오이 등의 작물 재배 온실 내의 광, 온도, CO2 환경 등을 모니터링 하고, 기 개발된 생육 모델을 검증하고 보정하여 효과적인 적용 모델을 만들 필요성이 큼
- 동적 생육 변화량을 모니터링하고 누적된 자료의 결과(농가의 요인) 값을 시뮬레이션 모델과 연동시켜 농가간의 예측 변이를 최소화함으로써 생육모델의 예측 정밀도와 신뢰도를 확보할 수 있음
- 생산관리에 필요한 생산자의 기초자료, 주기적인 생산관리 자료 수집 및 분석, 특정 환경요인의 조절에 의한 생육모델의 예측값과 조합한 정밀생산관리를 최적화함으로써 생산성을 지속적으로 유지하고 품질을 향상시켜 농가의 소득증대를 실현할 것임
- 본 연구에서는 생육관리를 위해 재배되는 작물의 주요 생육정보를 모니터링하고, 입력된 자료와 저장된 환경자료(광량, 평균온도, 주야간 평균온도)값의 상호관계를 분석하게 되며, 그 결과는 생산자에게 환류되어 농장의 환경조절에 필요한 의사결정의 기초자료로 제시하게 됨
- 또한 본 연구를 통해서 마련되는 주요 시설 과채류 생육 모델을 확립하고, 국가적차원에서 중장기적으로는 지속적인 자료 업데이트를 통해서 예측 정밀도를 향상시킬 수 있는 초석을 마련하고자 함

## 2) 연구개발과제의 목표 및 내용

### □ 연구개발과제의 최종 목표

- 네덜란드 수준의 복합환경 관리를 위한 작물의 생육·생리·수확량 예측 고도화 모델 개발
- 수직형 작물에 대한 3차원 작물 생육 및 온실 환경 시뮬레이션 SW 개발 및 디지털 재배관리 최적화

### □ 연구개발과제의 단계별 목표

단계	연차	단계별 목표
1	1 (9개월)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 작물별 생장·수확 예측 및 온실환경 모델 개발을 위한 데이터 수집·표준화                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- (생육모델) 작물별 생장·수확 예측 및 온실환경 모델 개발을 위한 데이터 수집·표준화</li> </ul> </li> <li>○ 작물생육 단계별(육묘·정식·착과·성숙기) 온실환경 모델 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 3차원 작물 생육·온실환경 모델 개발을 위한 생육 이미지 수집·표준화</li> </ul> </li> </ul>
	2 (1년)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 기 개발 생육 예측모델 및 환경 빅데이터를 활용한 생장 및 수확량 예측 모델 고도화                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 작물별 생육모델 고도화를 위한 기 개발된 국외 모델 함수식 검증 및 보완</li> <li>- 빅데이터 기반의 환경조건을 고려한 생장·수확량 모델 함수식 개발</li> </ul> </li> <li>○ 작물생육 단계별(육묘·정식·착과·성숙기) 3차원 구조모델 DB 구축                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 스마트팜 및 식물공장 주요 작물의 환경·재배 조건에 따른 생육 단계별 모델 구축</li> </ul> </li> </ul>
2	1 (1년)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 개발·보완된 모델의 스마트팜 실증                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 환경 및 생육조건을 활용한 작물별 생장 및 수확량 예측 모델 검증</li> </ul> </li> <li>○ 작물생육 단계별(육묘·정식·착과·성숙기) 3차원 구조모델 DB 구축                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 작물 생장 모델과 연동되는 작물 생육모델 시각화(엽면적, 초장, 생육량, 착과수 등)</li> </ul> </li> <li>○ 3차원 작물 생육·온실환경 시뮬레이션 SW 개발                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 구축된 빅데이터 모델을 기반으로 재배기간·발육단계·작물별 특징 등을 고려한 작물 생육모델 시각화·3차원 시뮬레이션 SW 개발(작물의 생육, 온실 환경)</li> </ul> </li> </ul>



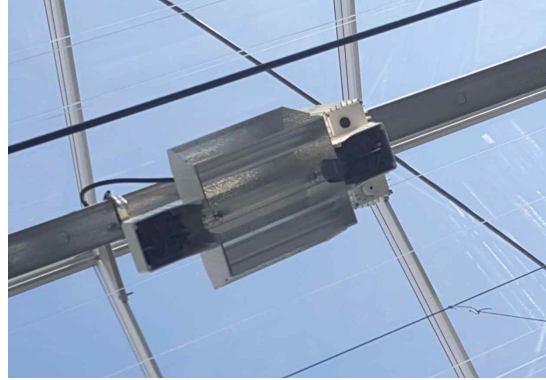
## 2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

### 1) (1공동)파프리카 생육·수확 예측 및 온실 환경 모델 개발을 위한 데이터 수집

- 파프리카 생육 모델링 구축을 위하여 경상남도 함안에 위치한 국립원예특작과학원 시설원예연구소(35.2°N, 128.4°E)의 벤로형 유리온실(폭 8.4m, 길이 20m, 높이 5.5m)에서 작물재배를 실시하였다.



천창 자동 개폐 장치



보광 장치(고압 나트륨등, 1000W)

그림 2-1-1. 온도 제어를 위한 천창 자동 개폐 장치 및 보광 장치



그림 2-1-2. 파프리카 재배 온실

표 2-1-1. 재배 온실의 규격 및 작물 재식 밀도

재배 작목	폭 × 길이(m)	높이(m)	작물 재식 밀도
파프리카(2동)	8 × 35	5.6	3.2 plants·m <sup>-2</sup>


□ 온실 내 환경 정보 측정 및 수집

- 온실 내 환경 측정은 표 <1.1.2>에 따라 진행하였으며 각각의 센서는 온실 내부 중앙에 고정된 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 2-1-2. 온실 환경 측정 항목

측정항목		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 2-1-3. 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: $<1\%$ ( $-10 \sim 40^{\circ}C$ )		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 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 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 LoggerNet(Campbell scientific, USA)을 사용하였다. 온실 내 설치된 온도센서(111N&222N, Jaunterting Int., Taiwan)를 기준으로 주간(06-18시)의 경우 천창 개폐 설정 온도(25/15°C)에서  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  이상 차이가 있을 경우 천창의 10%가 개폐되고, 60초 대기후 다시 온도를 측정하여 5%씩 추가로 개폐되도록 설정하였다, 야간(18-06시)의 경우 해층 유입을 방지하기 위하여 항상 닫힌 상태를 유지하였다. 동절기 난방의 경우 온실 내 온도가 설정온도(20°C)에서  $2^{\circ}\text{C}$  이하로 떨어졌을 때 온수 난방을 120초 실시한 후 60초 대기한 후 다시 작동하도록 설정하였으며, 별도의 냉방 시설을 가동하지 않았다.

표 2-1-4. 온실 환경 제어 방식

제어 항목	제어 내용	비고
천창	설정 기온 $> \Delta 5^{\circ}\text{C}$ 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 밸브	설정 배관 온도 대비 ON / OFF	

- 환경 모니터링 시스템을 이용하여 설정 온도에서  $5^{\circ}\text{C}$  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 2-1-3. 온실 환경 모니터링 · 제어 프로그램

- 관수제어는 소량 정밀관수가 가능한 Aqua-Z(신한에이텍, 대한민국)를 설치하였으며, 급액관, 드리퍼는 새로 설치한 후 무작위 20개 드리퍼를 선정하여 회당 급액량 차이가  $\pm 10\text{ml}$  내외가 되도록 조정하였다.



그림 2-1-4. 파프리카 양액 제어기 및 공급 장치

□ 작물 재배 및 생육 조사

표 2-1-5. 생육정보 조사 내용 및 측정 기준

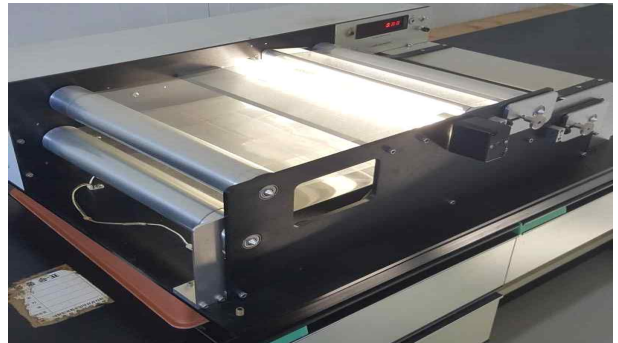
기초조사 항목(3 항목)			
	재식밀도	슬라브당 줄기 수	적심 절위

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, 한백 과학)



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 2-1-5. 생육조사를 위한 조사 장치

□ (위탁)파프리카 생육·수확 예측 및 온실 환경 모델 개발을 위한 데이터 수집

○ 농가 재배 현황

- 조사 농가 (새파란 영농조합법인, 혼디 영농조합법인)
- 새파란 영농조합법인 : 대표자 김봉석(약 40년 경력), 연동 벤로형 유리온실, 여름 작기 형태, 환경제어장치(프리바 제품), 암면재배 2줄 재배(6주/슬라브), 하우스 길이 250m, 폭 90m
- 혼디 영농조합법인 : 총괄이사 채석건(약 40년 경력), 연동 벤로형 유리온실, 여름 작기 형태, 환경제어장치(마그마제품), 암면재배 1줄 재배(5주/슬라브), 하우스 길이 120m, 폭 96m

표 2-1-6. 실증농가 기본 정보

	농가명	사진	파프리카 조사	측정 주기
1	영농조합법인 새파란유리온실 (제주시 애월읍 천덕로 369-13)		파종일: 2021.06.24 정식일: 2021.07.22 샘플링: 2021.07.28~ 품종 : 미푸코종자 불리다노 미푸코종자 시로코	6개체, 1회/1주
2	영농조합법인 혼디 (제주시 첨단동길 77)		파종일: 2021.04.09 정식일: 2021.05.24 샘플링: 2021.07.30~ 품종 : 신젠타 지나	5개체, 1회/1주

○ 생육 조사 항목과 조사 방법

표 2-1-6. 생육정보 조사 내용 및 측정 기준

항 목	단위	조사 방법
초 장	mm	지표면에서 생장점까지 길이
엽 수	개/주	개화 화방 기준 아래 완전 전개된 엽수
엽 장	mm	착과된 파프리카의 바로 위 엽장 혹은 맨 위에
엽 폭	mm	개화 화방에서 3번째 아래 있는 길이, 폭
엽면적	cm <sup>2</sup>	조사기기 (LI-3100)
전체 마디수	마디	분지 후 생장점까지의 전체 마디수
분지수	분지	분지 개수
줄기굵기	mm	개화화방(생장점 첫 화방) 바로 아래의 줄기 굵기
화방높이	mm	생장점에서 개화 화방까지의 거리(낙화된 경우 추정하여 계산)
개화마디(개화화방)	마디	현재 꽃이 피는 위치(마디) (낙화된 경우 추정하여 계산)
착과마디(착과화방)	마디	과일이 보이고(씨방이 보이면) 착과로 간주
수확마디(수확화방)	마디	파프리카를 수확한 위치
착과수	개	1줄기에서 화방의 착과에서 수정된 상태(열매가 맺은 상태)에서의 개수(분지 1/2/3)
열매수	개	1줄기에서 열매가 달려 있는 개수(착과 제외)
수확수	개	수확한 개수(단 개수)
과폭	mm	착과된 파프리카의 과폭, 높이
과고	mm	
생체중/ 건물중	g	수확한 파프리카의 과실 중량
		엽중량
		줄기 중량

## 2) (2공동)3차원 작물모델링 기반 시설과채류 작물 생육, 온실 환경 모델링

### □ 작물 생육, 온실환경 모델 개발을 위한 3차원 작물 생육 이미지 수집, 표준화를 위한 3차원 작물 생육 이미지 수집

○ 스마트팜 시설과채류 작물 3차원 구조 모델 구축(파프리카, 토마토, 오이)

#### - 파프리카 3차원 모델링

- \* 파프리카의 3차원 구조 모델 구축은 경상남도 함안군의 실증 농가에서 재배된 ‘지나’ 품종 파프리카를 대상으로 수행하였음.
- \* 파프리카는 2200평 규모의 동근지붕형 비닐 온실에서 재배되었으며, 5구 코코피트 슬라브에 2021년 7월 22일 정식하였음.
- \* 파프리카의 3차원 구조 모델 구축은 2021년 10월 18일과 11월 8일 두 시기에 걸쳐 다섯 개체를 대상으로 수행하였으며, 해당 시기는 정식 후 각각 13, 16주차였음.
- \* 3차원 스캐닝을 통해 얻은 스캔 메쉬는 역설계 소프트웨어(Geomagic Design X)을 이용하여 수정하였으며 추후 광추적 시뮬레이션이 가능하도록 3차원 파라메트릭 모델로 변환되었음.



그림 2-2-1. 경상남도 함안군 소재 파프리카 실증 온실(왼쪽)와 재배 중인 파프리카(오른쪽)

#### - 토마토 3차원 모델링

- \* 토마토의 3차원 구조 모델 구축은 충청남도 논산시의 실증 농가에서 재배된 ‘데프니스’ 품종 토마토를 대상으로 수행하였음.
- \* 토마토는 2500평 규모의 벤로형 유리 온실에서 재배되었으며, 3구 압면 슬라브에 2021년 8월 24일 정식하였음.
- \* 토마토의 3차원 구조 모델 구축은 2021년 10월 20일과 11월 24일 두 시기에 걸쳐 다섯 개체를 대상으로 수행하였으며, 해당 시기는 정식 후 각각 8, 12주차였음.
- \* 3차원 스캐닝을 통해 얻은 스캔 메쉬는 역설계 소프트웨어(Geomagic Design X)을 이용하여 수정하였으며 추후 광추적 시뮬레이션이 가능하도록 3차원 파라메트릭 모델로 변환되었음.



그림 2-2-2. 충청남도 논산시 소재 토마토 실증 온실(왼쪽)와 재배 중인 토마토(오른쪽)

- 오이 3차원 모델링

- \* 오이의 3차원 구조 모델 구축은 경상북도 상주시의 실증 농가에서 재배된 ‘한강맛(흑침계)’ 품종 오이를 대상으로 수행하였음.
- \* 오이는 3000평 규모의 둥근지붕형 비닐 온실에서 재배되었으며, 검은 비닐로 멀칭한 토양에 2021년 10월 15일 정식하였음.
- \* 오이의 3차원 구조 모델 구축은 2021년 11월 11일과 11월 25일 두 시기에 걸쳐 다섯 개체를 대상으로 수행하였으며, 해당 시기는 정식 후 각각 4, 6주차였음.
- \* 3차원 스캐닝을 통해 얻은 스캔 메시는 역설계 소프트웨어(Geomagic Design X)을 이용하여 수정하였으며 추후 광추적 시뮬레이션이 가능하도록 3차원 파라메트릭 모델로 변환되었음.



그림 2-2-3. 경상북도 상주시 소재 오이 실증 온실(왼쪽)와 재배 중인 오이(오른쪽)

○ 식물공장 작물의 환경 및 재배 조건에 따른 3차원 구조 모델 구축(케일)

- 케일 3차원 모델링

- \* 케일 3차원 구조 모델 구축은 서울대학교 소재 식물공장에서 재배된 ‘만추콜라드’ 품종 케일을 대상으로 수행하였음.

- \* 케일은 2021년 7월 1일에 파종하여 식물공장 내 육묘실에서 4주의 육묘 기간을 거친 후 2021년 8월 2일에 스펀지 큐브에 정식하였음.
- \* 케일 3차원 구조 모델 구축은 2021년 8월 16일과 8월 24일, 8월 30일, 9월 8일 네 차례에 걸쳐 수행하였으며, 해당 시기는 정식 후 각각 15, 23, 29, 38일 후였음.
- \* 3차원 스캐닝을 통해 얻은 스캔 메쉬는 역설계 소프트웨어(Geomagic Design X)을 이용하여 수정하였으며 추후 광추적 시뮬레이션이 가능하도록 3차원 파라메트릭 모델로 변환되었음.



그림 2-2-4. 서울대학교 소재 식물공장(왼쪽)과 재배 중인 케일(오른쪽)

### 3) (3공동)토마토 생육·수확 예측 및 온실 환경 모델 개발을 위한 데이터 수집·표준화

#### ○ 농가실증연구(충남 논산 광석면 이서주 농가)

- 본 연구는 토마토의 생육·수확 예측 및 온실 환경 모델 개발을 위한 데이터 수집·표준화 과제로서 토마토의 재배 시간 경과에 따른 생육 (잎, 줄기), 수량 (과실)의 정보를 온실환경 데이터를 수집·분석과 관련한 생장을 해석하고 데이터를 수집, 표준화하기 위한 자료를 확립하고자 수행하였다.
- 본 연구를 수행하기 위해서 논산시 광석면 명제로 200번길 6에 소재한 이서주 농가의 벤노형 온실을 실증실험하기 위하여 계약하였다. 이서주 농가 온실의 규모는 면적 9,900m<sup>2</sup>이며, 실 재배면적 8,745m<sup>2</sup>이다. 2020년 작기 기준으로 토마토 24,000주를 정식하였고, 매출액은 928,233,600원으로 식물체 주당 평균 38,680원의 소득이 발생하였다. 하우스의 설치 방향은 동남향으로 축고는 6.5m의 유리온실이다. 2021년 본 연구수행을 위해 농가에서 선택한 토마토 대과종 품종은 레드250 품종이며, 재식밀도 8주/3.3m<sup>2</sup>로 8월 25일 그림 2-3-1과 같이 정식하였다. 본 농가에서는 priva connext 환경 제어시스템을 이용하였으며, CO<sub>2</sub>는 환기 전까지 800 ppm으로 시비하며, 양액은 EC 2.5~3.0 dS/m, pH 5.8~6.0으로 관리하였고, 일사량을 이용하여 타이머를 제어하여 식물체 당 하루 1L~2L의 양액을 생육정도에 따라 달리 공급하였다. 친환경 재배 농가로 주 1회 친환경 물질을 살포하였다. 온실환경 데이터는 토마토 정식일인 2021년 8월 25일부터 2021년 11월 30일까지 온실기온, 온실상대습도, 광도, 온실 CO<sub>2</sub> 농도 등을 1시간 간격으로 저장하여 수집하였다. 토마토 생육데이터는 2021년 8월 25일부터 본 보고



서를 작성하기 전까지인 2021년 11월 18일까지 2주 간격으로 현재 7회에 걸쳐 줄기를 절단하여 파괴 조사하였으며, 초장, 엽수, 엽면적, 잎 건물중, 과실 생체중, 과실 건물중 등을 측정하였고, 월별로 1회 엽록소 함량과 광합성을 측정하였다. 이후 2021년 12월 16일까지 조사를 진행할 계획이다.



레드250(8월 25일 정식)



레드250(10월 14일)

그림 2-3-1. 논산 농가 재배 온실

#### ○ 공주대학교 토마토 재배 실험

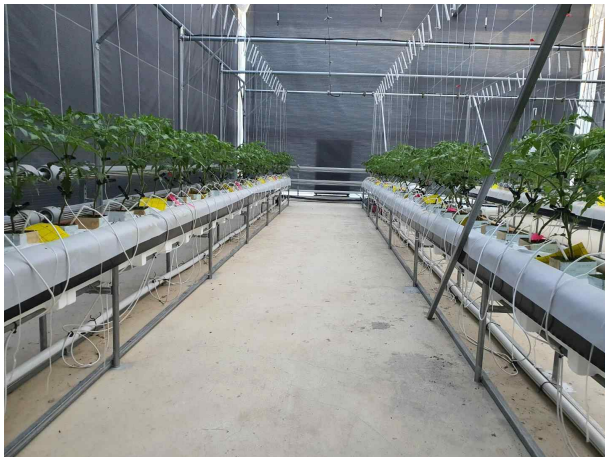
- 본 연구를 수행하기 위해서 공주대학교 원예학과의 가로(8m), 세로(20m), 측고(4.5m) 크기인 온실에서 토마토 244 품종과 데프니스 품종을 각각 8월 31일 그림 2와 같이 정식하였다. 정식 후 9월 20일에 위의 사진과 같이 244 토마토 품종은 급성 시들음병이 발병되고, 데프니스 품종은 바이러스 병이 발병하여 정상적으로 실험을 수행하기 부적절하다고 판단되어 토마토 식물체 및 코이어 배지를 철거하였다. 온실 전체를 소독한 후, 코이어 배지를 새롭게 설치하고, 9월 29일에 레드칸 대과종 토마토 품종을 코이어 배지(4주/slab)에 약 25cm, 재식밀도 8.8주/3.3m<sup>2</sup>로 정식하였고, 11월 30일 현재 사진과 같이 병해 없이 성장하고 있다. 난방설정은 15℃ 이하로 떨어질 때 온풍기 작동 설정하였다. 양액은 PBG 배양액을 이용하여 EC 2.5~3.0 dS/m, pH 5.8~6.0으로 관리하였고, 타이머를 이용하여 식물체 당 하루 1L~1.5L의 양액을 생육정도에 따라 달리 공급하였다. 온실환경 데이터는 토마토 정식일인 2021년 9월 28일부터 2021년 11월 30일까지 온실 기온, 온실상대습도, 광도, 온실 CO<sub>2</sub> 농도 등을 1시간 간격으로 저장하여 수집하였다. 토마토 생육데이터는 2021년 9월 29일부터 2021년 11월 30일까지 2주 간격으로 5회에 걸쳐 줄기를 절단하여 파괴 조사하였으며, 초장, 엽수, 엽면적, 잎 건물중, 과실 생체중, 과실 건물중 등을 측정하였고, 월별로 1회 엽록소 함량과 광합성을 측정하였다. 공주대학교 실험은 2022년 1월 16일까지 조사를 진행할 계획이다.



244토마토(8월 31일 정식)



데프니스(8월 31일 정식)



레드칸(9월 28일 정식)



레드칸(11월 27일)

그림 2-3-2. 공주대학교 토마토 재배 온실

#### 4) (공동)환경요인에 따른 토마토 생육 수확 예측 및 온실 환경 모델 개발을 위한 데이터 수집표준화

○ (1단계) 환경요인에 따른 토마토 생육·수량 예측 및 온실 환경 모델 개발을 위한 데이터

- 처리사항

- \* 보광 : 무처리구, 보광 처리구(LED 사용  $100 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  설정)
- \* CO<sub>2</sub> 시비 : 무처리구, CO<sub>2</sub> 시비 처리구(액화탄산가스 사용 500ppm, 800ppm 설정)
- \* 냉방 : 무처리구, 냉방 처리구(공기열 히트펌프,차광사용 25℃ 설정 )

- 환경요인 (데이터로거 이용 자동수집) : 온습도, 광, 이산화탄소 농도

- 생육조사 (2주 1회) : 초장, 줄기직경, 생체중, 건물중, 마디, 엽수, 엽면적, ACI-curve, Light response curve

- 조사 장소 및 조사 개체 수 : 2농가(농가당 5개체)

○ 토마토 생육데이터 수집

- 토마토 장기재배 시 생육 변화 데이터 수집

- \* 토마토는 장기재배가 가능한 작물이지만, 장기간 생육하면 생산량이 감소하는 경향이

있어 일정 주기로 재정식하여 균일한 생산량을 유지함.

- \* 실험에 사용된 벤로형 온실은 측고가 높아 미기상 변화가 적고, 온도 유지에 유리하고 저철분 산란광 유리를 사용해 온실 내 광량 유입을 높임.
- \* 본 실험에서는 벤로형 온실에서 장기재배 시의 토마토 실제 수확량과 모델을 통해 예측한 수확량을 비교하여, 작물 수확에 관한 정보를 시각적으로 나타내었음.



그림 2-4-1. 벤로형 온실과 토마토 재배 환경

- CO<sub>2</sub> 시비에 따른 토마토 생육 변화 데이터 수집

- \* 이산화탄소는 광합성에 필요한 중요한 요소 중 하나이지만, 온도 조절을 위해 환기를 최소화하는 겨울철에 고갈될 수 있음. 또한, 일출 이후 환기가 시작되기 전에 고농도의 이산화탄소를 사용하면 광합성 속도 증진에 효과가 있음.
- \* 이산화탄소 시비는 다양한 방법이 사용되고 있지만, 고갈 시 목표로 하는 농도를 맞추기 위해 조절 가능한 액화탄산가스를 사용하였음.
- \* 본 실험은 이산화탄소 시비가 토마토 생육과 생산량 증가에 미치는 영향을 구명하고, 모델에 적용하여 예상 수확량과 실제 수확량을 비교하였음.



그림 2-4-2. 실험장소 및 액화탄산가스

- 보광처리시 생육 변화 데이터 수집

- \* 사계절이 뚜렷하다는 특징을 가진 국가에서 겨울철은 일조시간이 감소하여 작물이 흡수할 수 있는 광량이 감소함.
- \* 광량은 에너지원으로 사용되기 때문에 부족할 경우 생육저하 및 생산량 감소가 나타날 수 있음.
- \* 작물 보광에서 고압나트륨등은 대표적인 광원이며 PAR이 약 30%정도 분포하고 에너지 효율이 높은 특징을 가짐.
- \* 본 실험은 고압나트륨등 사용이 저일조 환경에서 고압나트륨등 사용이 토마토의 생육과 생산량을 증진시키는지를 구명하기 위해 수행하였음.



그림 2-4-3. 실험온실 및 보광 사용

- CO<sub>2</sub> 시비와 보광 복합처리시 생육 변화 데이터 수집

- \* CO<sub>2</sub> 시비와 보광은 겨울철 작물 생육을 촉진하기 위해 자주 사용되는 재배 기술임.
- \* 고농도의 이산화탄소에 장시간 노출되면 장애를 일으킬 수도 있어, 목표 농도를 정밀하게 맞추기 위해서 액화탄산을 이용하였음.
- \* 일출 전과 일몰 후에 보광을 통해 작물의 원활한 생육에 부족한 광량을 채워주어 생리 장애를 극복할 수 있으며, 낙화와 낙과와 같이 생산량 감소와 직결되는 현상을 방지할 수 있음.
- \* 본 실험을 통해 무처리구와 CO<sub>2</sub> 시비구 및 보광 처리를 비교할 뿐 아니라 복합 처리 시에 상승효과를 확인하기 위해 수행하였음.

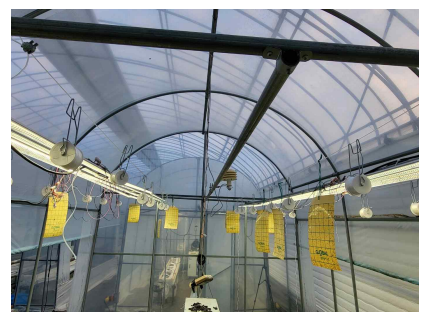
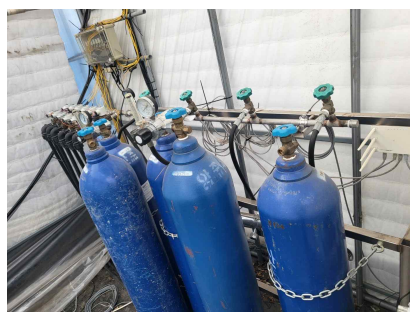
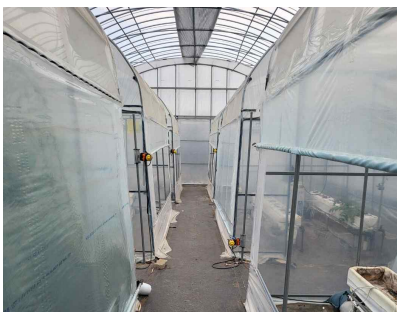


그림 2-4-4. 온실 내부, 액화탄산가스 제어 시스템 및 내부 LED 보광 시설

○ 작물생육모델 사용

- Cropbox

- \* 본 실험은 Julia 프로그래밍언어를 기반으로 제작된 Cropbox를 사용하였음.
- \* Cropbox로 작성된 다양한 모델 중 국립공주대학교에서 가지과 작물에 맞게 제작한 Nightshade.jl을 사용하였음.
- \* 과제 수행 기간 동안 수행하였던 토마토의 장기재배 실험, 이산화탄소 시비 실험, 보광 처리 실험, 그리고 이산화탄소와 보광 복합처리 실험 데이터를 작물 모델에 적용하여 얻은 예측 수확량과 실제 수확량 간에 비교를 수행하여 예상 수확량에 미치지 못하거나 예상보다 많은 양을 생산한 경우와 같은 상황을 실험 수행하는 동안 발생한 일과 결합하여 설명하였음.

○ 광합성 속도 및 잎의 물리적특성 조사 방법

- 광합성속도 측정 및 잎 관련 데이터 수집

- \* 실험은 국립목포대학교 부속농장 고척고 벤로형 스마트 유리 온실 실습장에서 수행됨.
- \* 연중 원예 실습을 위한 고척고 벤로형 스마트 유리 온실은 전체 24×16×7.2m으로 2개의 Ebb&flow 구역과 1개의 고설베드 구역으로 구성된 벤로형 유리온실로 천창에는 AR 코팅유리, 측면 피복재로는 폴리카보네이트를 사용하였음.
- \* 실험 장소의 크기는 8×16×7.2m이며 AR 산란광 강화유리를 사용하여 94.5%의 광 투과율을 가짐.
- \* 사용한 환경제어 프로그램은 Hortimax(CX500 and Multima, Ridder, Netherlands)을 이용하여 제어되었고, 외부의 광량, 기온, 풍량, 풍향을 측정하였고, 내부 기온, 상대습도, CO<sub>2</sub> 등을 기록하였음.
- \* 천창은 Rack and pinion 방식으로 풍향에 맞춰 역방향의 천창을 열어줌으로써 해충의 유입을 최소화하였음.
- \* 저온기 온도 저하를 막기 위해 지열난방 방식을 주로 사용하며 전기 이중 덕트로 구성된 보조 난방기로 사용하였음.



그림 2-4-5. 벤로형 온실 및 이중 덕트 난방기

- \* 광합성 측정은 휴대용광합성측정기(Portable Photosynthetic measurement, Li-6800, Li-cor, Ne, USA)을 이용하여 CO<sub>2</sub> response를 측정하였고 조건으로 공기유량 500  $\mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ , 엽온 25°C, 상대습도 55%, 광량 1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , CO<sub>2</sub>농도 50, 100, 200, 400, 600, 800, 1200, 1600  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 을 처리하였음.
- \* 1st(상위엽)은 광합성측정기 헤드에서 측정할 수 있는 가장 작은 크기인 1×3cm 이상의 잎을 측정하였음.
- \* 단엽의 엽록소 지수를 구하기 위해 비파괴 엽록소 측정기(SPAD-502plus, Konica Minolta, Japan), 광학적 특성은 엽맥을 피하여 분광계(CI-710, CID Bio-Science, USA), 그리고 엽록소 형광을 측정하기 위해 엽록소 형광 측정기(FP100, PSI, Czech Republic)를 이용하여 측정하였음.
- \* 조사 위치는 성장점 기준으로 2, 10, 20, 31번째 잎을 측정하였음.

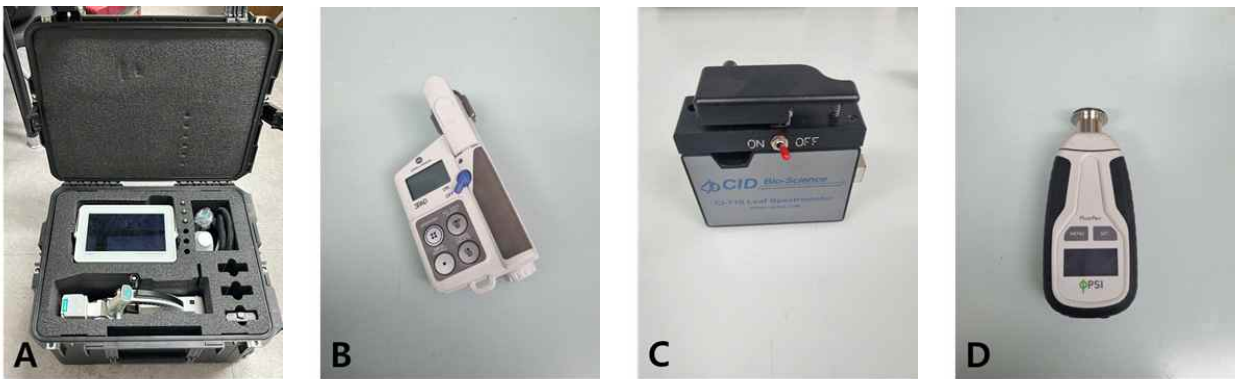


그림 2-4-6. A: 광합성 측정기; B: 엽록소 측정기; C:분광계; D: 엽록소 형광반응 측정기

### ○ 과실 비대 및 착색 조사

#### - 과실 비대 관련 데이터 수집 방법

- \* 토마토 과실의 과장과 과폭과 같은 외적인 특성을 이용해 과실 중량을 예측하는 모델을 개발하고자 수행됨.
- \* 과실의 발달 단계를 10단계로 나누어 1-6단계까지 미숙과, 7-10단계까지 성숙과로 구분하였음.
- \* 과실의 착색 상태에 따라 미숙과와 착과과로 구분하여 단계에 따른 회귀식을 구하였음.

#### - 토마토 과실 착색 데이터 수집

- \* 완숙기까지 착색이 되면 과실 크기와 당도에서 이점이 있지만 식물조직의 연화가 빨라져 운송 시에 품질 저하가 일어날 수 있음.
- \* 외수용과 내수용에 따라 수확 시기가 다르나 과실의 유통을 위한 차이임.
- \* 본 기관은 RGB를 이용하여 파프리카 과실의 착색모델로 착색 수준을 이용해 수확 시기를 예측하였고 예상 수확 시기가 국내 파프리카 출하 기준과 유사한 것을 알 수 있다는 개념으로 특허 등록한 적이 있음.
- \* 착색 정도는 CR-400(Konica Minolta, Japen)의 Hunter Lab를 측정하여 RGB로 변환하

는 방식을 사용함.

- \* 토마토 과실을 촬영할 때 ColorChecker Passport Photo 2(Calibrite, USA)를 사용하여 정확한 이미지를 재현하는 기준으로 사용하였음.



그림 2-4-7. 색채색차계 및 컬러차트

## 5) (5공동)토마토 생육·수확 예측 및 온실 환경 모델 개발을 위한 데이터 수집·표준화

### ○ 생육 및 환경 데이터 수집

- 경북대학교 스마트 첨단 온실 이용 오이 생장 및 환경 데이터 수집

- \* 오이 생장 예측 및 온실환경 모델 개발을 위한 경북대학교 스마트 첨단 온실(폭: 8m, 길이: 20m, 동고: 7.4m)은 측면 형태는 폴리카보네이트 소재로 측창이 없으며, 천창은 온실용 유리(AR 유리 및 White 코팅 강화유리)로 구축되었음(그림 2-5-1).



온실 전경

온실 내부

그림 2-5-1. 경북대학교 스마트첨단 온실 전경

- 오이 생장 데이터 수집 및 분석

- \* 오이 생장 및 환경데이터 수집은 21년도 작기(2021.02.23.-2021.09.13., DAT '203')는 백다다기/흑침계 오이 접목묘 '굿모닝'을 사용하여 수집되었고, 21-22년도 작기(2021.10.19.-2022.05.02., DAT '195')는 백다다기/흑침계 오이 접목묘 '한강맛'을 사용하여 총 2회 수행되었고, 22-23년도 작기(2022.10.08.-2023.04.27., DAT '201')는 백다다기/흑침계 오이 접목묘 '한강맛'을 사용하여 수행함. 23-24년도 작기는 2023.10.16에 백다다기/흑침계 오이 접목묘 '한강맛'을 정식 후 재배관리 진행중.
- \* 온실 내 환경 데이터 수집 항목으로는 온·습도, 광, CO<sub>2</sub> 농도, VPD 등이 있으며, 복합환경 제어 시스템(Ridder HortiMaX CX500)을 통해 실시간으로 환경 및 배양액 제어가 가능함.
- \* 오이 생장 조사는 경기도농업기술원의 오이 생장 조사 표준 메뉴얼에 근거하여 21년도, 12-22년도에 주 1회(21년도 작기 32개체, 21-22년도 작기 24개체), 22-23년도에 주 2회 (18개체) 수행되었음.
- \* 오이 생장 데이터 수집 항목으로는 마디수(마디), 초장(cm), 절간장(cm), 줄기직경(mm), 엽장(cm), 엽폭(cm), 엽수(개), 열매상태(개), 암꽃수(개), 과실수(개), 과장(cm), 과폭(cm), 과중(g)이 조사되었음(표. 2-5-1).
- \* 수확된 과실은 품질관리원의 표준 규격에 따라 상품과 및 비상품 과실을 구분하였으며, 곡률 계산은 선행연구(Pham et al., 2019)의 계산식을 활용하여 계산되었음(식 2-5-1.).

$$R = \frac{4h^2 + w^2}{8h} \quad (\text{식. 2-5-1})$$

\*h: 과장, w: 과폭 (상품과: 곡률 7°미만)





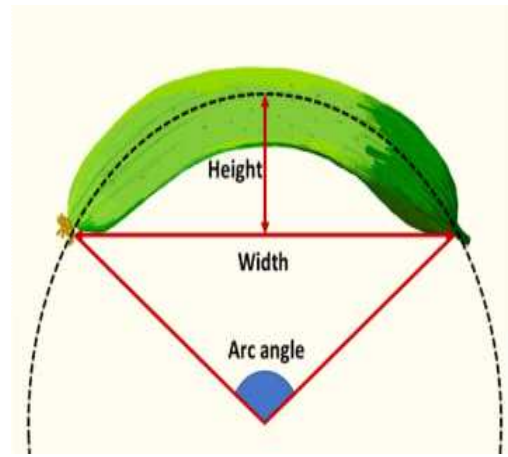
오이 생육조사



오이 광합성 측정



수확 과실



곡률 계산식

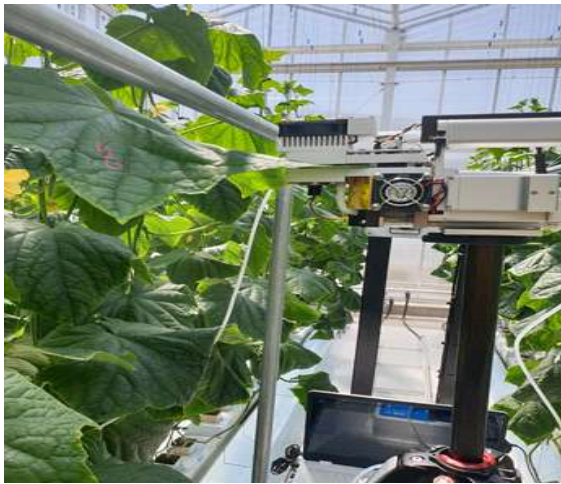
그림 2-5-2. 오이 성장 데이터 수집

표 2-5-1. 생육조사 항목

항목	측정방법	단위
초장	생육초기 : 지표면에서부터 식물의 최상단(생장점)까지 측정(절간장 측정이전)	cm
	생육중기 : 매주 측정하는 절간장의 합이 초장이 됨(절간장 측정)	
마디수	절간장이 2cm 이상인 마디까지 유효한 마디수로 측정	마디
절간장	마디와 마디 사이 길이를 측정	cm
줄기직경	엽장, 엽폭을 측정하는 아랫부위 줄기의 굵기 측정	cm
	생육중기 : 생장점 아래로 10번째마다 2cm 아래부위	
엽장	생육초기 : 완전히 전개된 잎 중에서 생육이 가장 왕성한 잎의 길이	cm
	생육중기 : 생장점에서 아래로 10번째 마디 아랫잎의 길이	
엽폭	생육초기 : 완전히 전개된 잎 중에서 생육이 가장 왕성한 잎의 너비	cm
	생육중기 : 생장점에서 아래로 10번째 마디 아래 잎의 너비(엽장, 엽폭)	
엽수	엽장이 3cm 이상 전개된 잎의 개수	개
열매 상태	열매 상태를 숫자로 표기 (성숙과=1, 수꽃=0)	개
암꽃수	개화한 꽃의 형태를 숫자로 표기 (암꽃 = 1, 수꽃 = 0)	개
과장	성숙과 : 직선 길이와 뒷부분 곡선 부위 길이	cm
	미성숙과 : 과일의 직선길이	
과폭	백다다기 : 꽃지 부위로부터 과일의 2/3 부위 꼭지의 녹색 부위	cm
	취청오이 : 과일의 1/2(가장 넓은 부위)	
과중	1주당 수확한(상품) 열매의 합계 측정	g
열매수	1주당 수확한(상품) 열매의 수	개

- 오이 수직적 엽 위치별 광합성 측정

- \* 수직적 엽 위치별 오이의 광합성 속도를 분석하기 위해 휴대용 광합성 측정 장치 (LI-6400XT, LI-COR, Lincoln, NE, USA)를 사용하였음(그림 2-5-3).
- \* 오이 광합성 모델의 매개 변수를 분석하기 위해 다양한 CO<sub>2</sub> 농도(0, 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) 및 광도 (0, 50, 250, 500, 800, 1000, 1500  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 조건에서 측정되었음(각 주 1회).
- \* 광합성 측정은 식물의 낮잠 현상을 고려하여 오전 08:00~13:00 사이에 수행되었으며, 적외선 CO<sub>2</sub> 가스분석기(6400XT-02B, LI-COR, Lincoln, NE, USA)의 조건은 온도 25°C, 습도 60-70%, Flow 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{ms}^{-1}$ 에서 제어되었음.



광합성 측정

잎 광합성 속도 측정의 수직적 위치

그림 2-5-3. 수직적 엽 위치별 오이 광합성 측정

- 상주 현장 실증 농가의 생육 및 환경데이터 수집

- \* 2021년 5월 3일 스마트팜 오이 농가 현장 데이터 수집을 위한 농가 2곳(A 농가: 경상북도 상주시 사벌면 두릉리 694, B 농가: 경상북도 상주시 사벌면 두릉리 788-1)을 섭외하였음(그림 2-5-4).
- \* 오이 성장 예측을 위하여 상주에 위치한 현장 실증 농가(A농가, B농가)의 오이(백다다기/흑침계 오이 접목묘 '한강맛')를 대상으로 파괴적 생육 조사를 실시하였고, 조사항목은 경기도농업기술원의 오이 성장 조사 표준 메뉴얼에 근거하여 수행하였음.
- \* 생육기간은 A농가는 2021.10.5.-2022.05.17.(DAT '224'), B농가는 2021.10.15.-2022.05.17.(DAT '214')로 각각 정식 전 초기 묘 생육 조사 후 2021.11.10.부터 1회/2주(10개체), 총 14번의 파괴적 생육조사를 수행하였음.
- \* 22-23년도 생육기간은 A농가는 2022.10.8.-2023.05.8.(DAT '212'), B농가는 2022.10.15.-2023.05.8.(DAT '205')로 각각 정식 전 초기 묘 생육 조사 후 2022.11.8.부터 1회/2주(10개체), 총 14번의 파괴적 생육조사를 수행하였음.



환경제어 시스템



현장 실증 농가



파괴조사



엽면적 측정

그림 2-5-4. 현장 실증 농가

- (안동대) 백다다기 오이 과실의 비파괴 과중 추정 모델 개발

- \* 백다다기 오이 과실의 비파괴 과중 추정 모델 개발을 위해 경상북도 안동에 위치한 안동대학교 생명과학대학 자동제어 연구온실(36.5°N, 128.8°E, 이중 피복, PO필름 ; 폭 25m ; 길이 24m ; 높이 9.6m)에서 2022년 3월 24일부터 2022년 6월 30일까지 작물 재배를 실시하였음(그림 2-5-5).



그림 2-5-5. 안동대학교 소재 연구온실과 재배중인 오이 작물

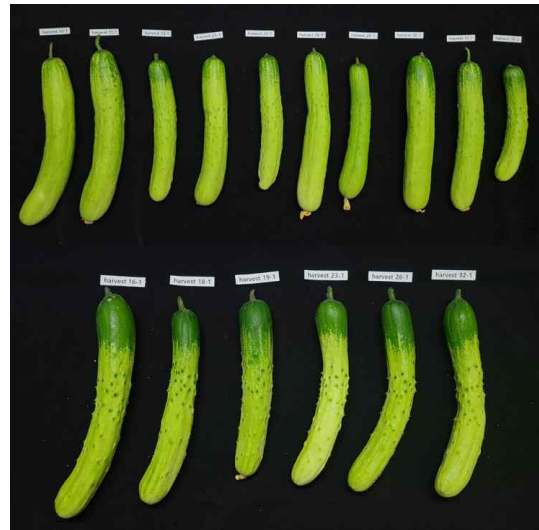


그림 2-5-6. 오이 과실 성장 데이터 수집

- 오이 과실 형태학적 변수 데이터 수집

- \* 오이 과실의 성장 데이터 수집을 위해 2022년 3월 24일부터 2022년 6월 30일까지 백다다기/백침계 오이 품종 ‘대명’ 사용하여 실시하였음(그림 2-5-5).
- \* 오이 과실의 성장 데이터 수집은 수확된 과실 260개를 활용하여 오이 과실의 과장(mm), 직경(mm), 둘레(mm), 과중(mm)을 조사하였음(그림 2-5-6).

- \* 수확된 과실은 품질관리원의 농산물 표준 규격에 따라 상품과 과실을 분석하였음.
- \* 오이 과중 추정 모델의 개발에 사용된 식은 선행연구(Marcelis, 1992)의 계산식과 Gaussian 식을 활용하였음(표 2-5-2).

표 2-5-2. 과실의 무게 추정모델 개발에 사용되는 식

	Equation
Marcelis(1992)	$\left(\frac{LC^2}{4\pi}\right)/1000$
Gaussian	$a \times \exp\left\{-0.5\left(\left(\frac{x-d}{b}\right)^2 + \left(\frac{y-e}{c}\right)^2\right)\right\}$

\*L: 과장(mm) C: 둘레(mm)

- (안동대) 온실 내 백다다기 오이의 생육단계에 따른 흡광계수 변화 모델 개발

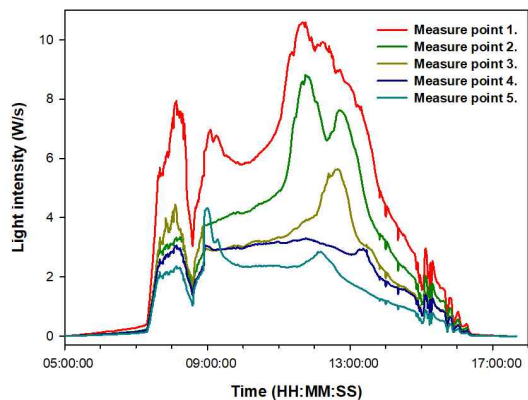
- \* 백다다기 오이의 생육단계에 따른 흡광계수 변화 모델 개발을 위해 경상북도 안동에 위치한 안동대학교 생명과학대학 자동제어 연구온실(36.5°N, 128.8°E, 이중 피복, PO필름 ; 폭 25m ; 길이 24m ; 높이 9.6m)에서 작물 재배를 실시하였음(그림 2-5-5).
- \* 흡광계수 측정: 자체 제작한 장치를 이용하여 작물의 초장을 5구획으로 나누었으며, 각각의 5지점에서 일사량계를 설치 후 광량을 측정하였음.
- \* 온실 내 구조물에 의한 그림자, 기상환경에 의한 광환경 변화는 실시간으로 일어나며, 이를 반영하기 위해 일 누적광량 기준으로 흡광계수(k)값을 구하였음(그림 2-5-7, B).
- \* 높이별 측정된 광량은 식 2-5-2을 사용하여 흡광계수(k)로 계산되었음.

$$I = I_0 e^{(-k \cdot LAI_f)} \quad (\text{식. 2-5-2})$$

\* I: 균락내 광도(W/m<sup>2</sup>), I<sub>0</sub>: 균락내 최상단 광도(W/m<sup>2</sup>), k: 흡광계수, LAI<sub>f</sub>: 엽면적지수(m<sup>2</sup>·m<sup>2</sup>)



A. 높이에 따른 광도 측정



B. 높이에 따른 일중 광도 변화

그림 2-5-7. 흡광계수 측정 장치 및 일중 광도 변화

○ 온실 환경 모델 개발을 위한 3차원 온실 구축 및 온실 환경 시뮬레이션

○ 재배 현황

- \* 2021.07.28 ~10.8까지 11 주차 데이터 샘플링

### 3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

#### 1) 연구수행 결과

##### (1) 정성적 연구개발성과

□ (1공동) 파프리카 생육·수확 예측 및 온실 환경 모델 개발을 위한 데이터 수집

○ 재배 현황

- \* 2021.07.28 ~10.8까지 11 주차 데이터 샘플링
- \* 구역별 급액/배액 수집 ( 급액 : 4구역 / 배액 : 1구역)
- \* 정식 후 4주차 이후 2 stem분지 정리
- \* 배액은 샘플링 7주차 이후부터 발생함


	1주차	3주차	5주차	8주차	10주차
영농조합법인 새파란					
	정식	1주차	6주차	8주차	10주차
영농조합법인 후디					

그림 3-1-1. 실증농가 주차별 온실 생육 모습

○ 생육 조사 및 환경 변화(2021년)

\* 영농조합법인 새파란 : 샘플링 3주차 이후 2 stem분지 정리, 6주차 이후 과실 발생




	3주차	4주차	5주차	6주차	7주차
영농조합 법인 새파란					
	8주차	9주차	10주차	11주차	
영농조합 법인 새파란					

그림 3-1-2. 실증농가(새파란) 주차별 생육 조사

\* 환경 변화(새파란, 2021년)

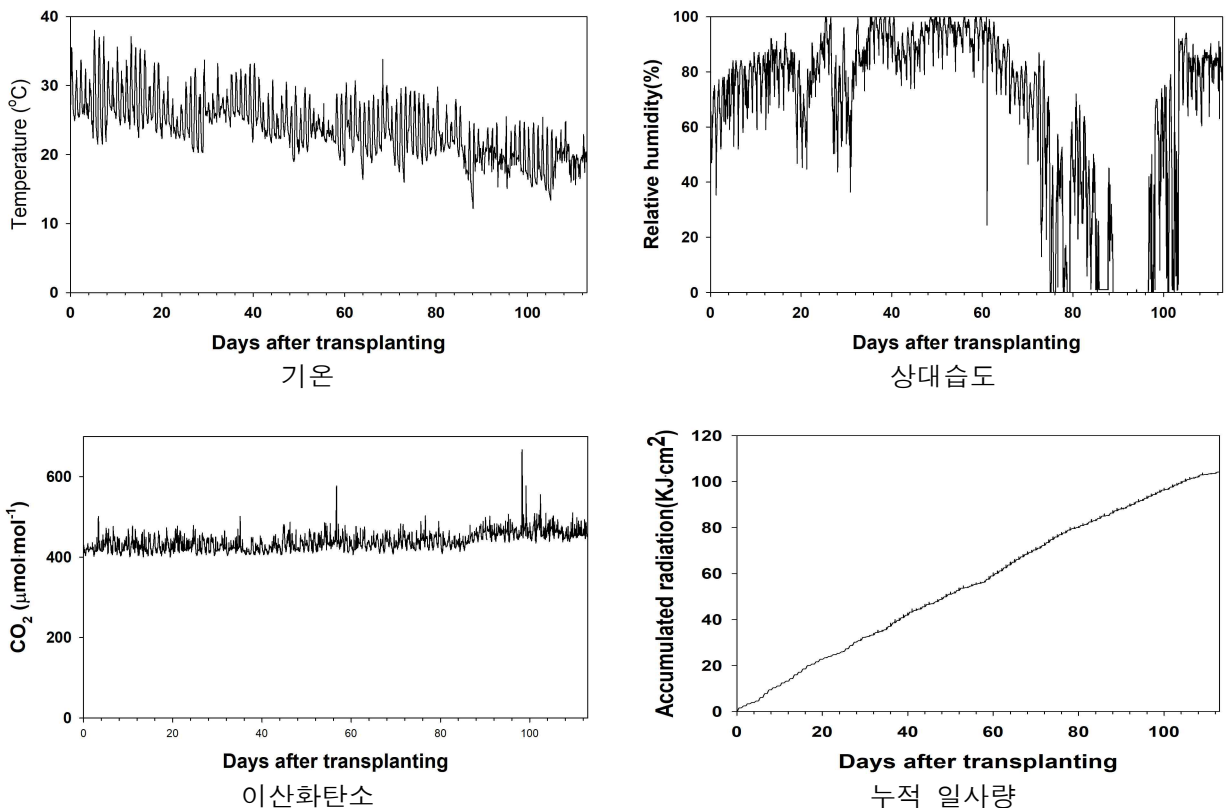


그림 3-1-3. 정식 후 일수별 실증농가 환경 변화(새파란)

\* 영농조합법인 혼디 : 정식 후 4주차 이후 3 stem 분지 정리, 8주차 이후 과실이 과숙되어 조기 수확 후 생육 조사

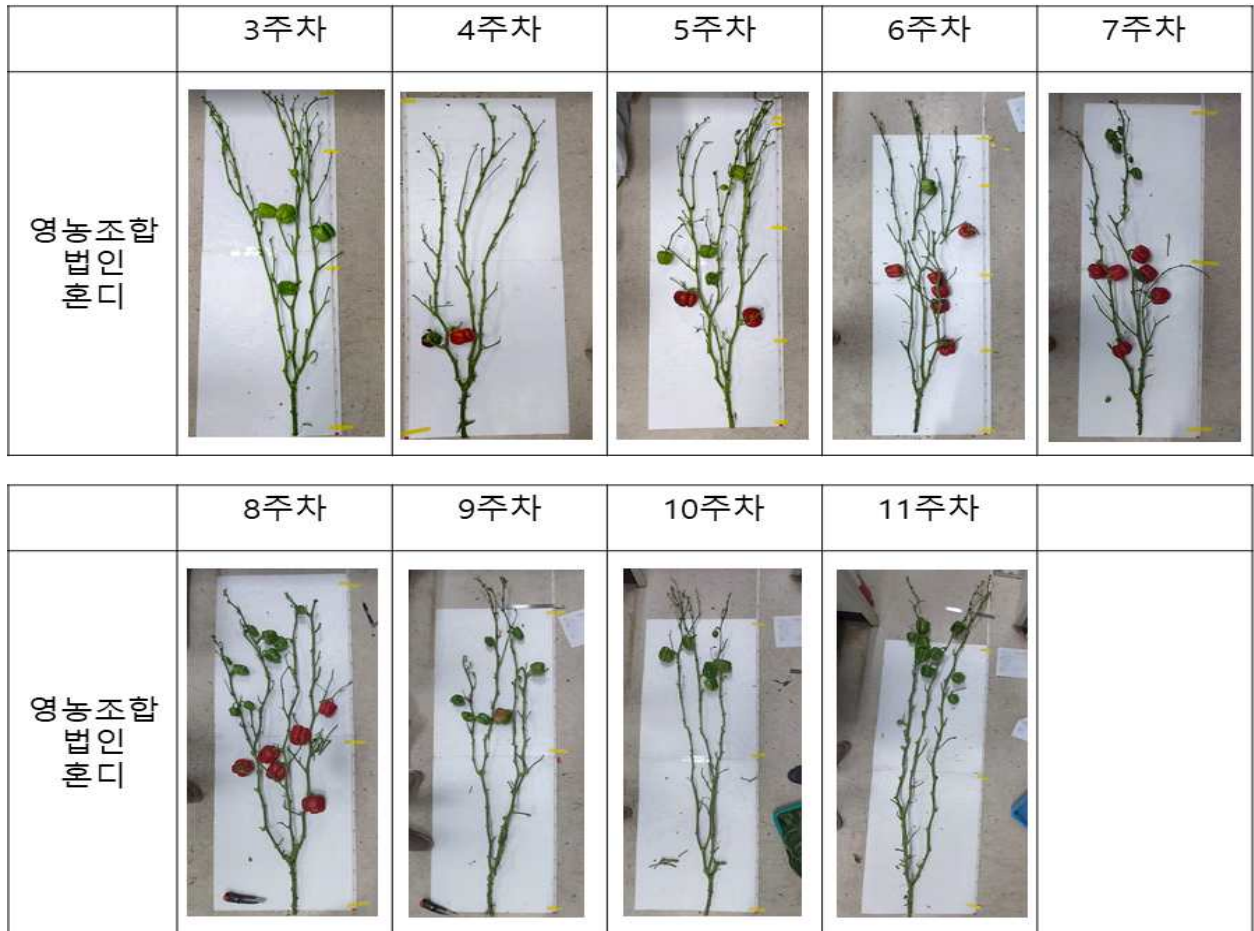


그림 3-1-4. 실증농가(혼디) 주차별 생육 조사

\* 환경 변화(혼디, 2021년)

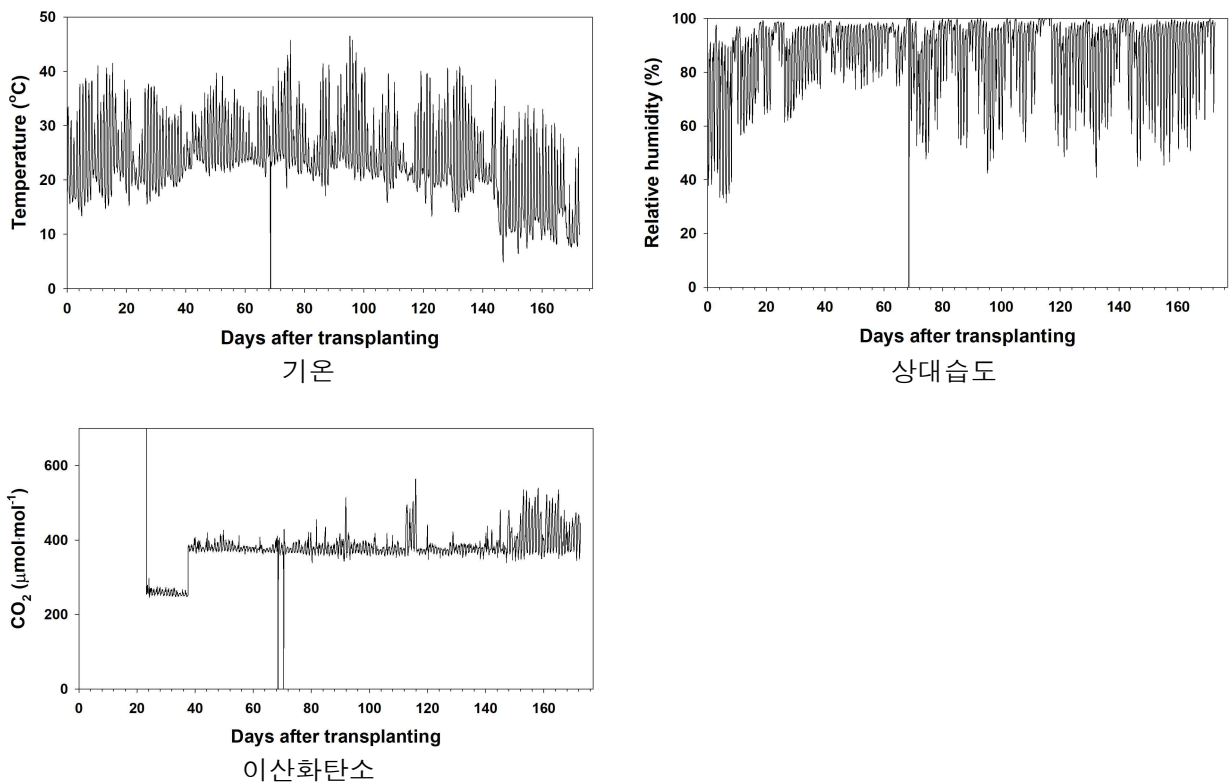


그림 3-1-5. 정식 후 일수별 실증농가 환경 변화(혼디)

○ 생육 조사 결과

\* 새파란 영농조합법인은 2021년도에는 2줄기, 2022년도에는 3줄기 재배를 혼디 영농조합법인은 3줄기 재배를 선택했으며, 이에 따라 생육 변화가 있을 것으로 판단된다.

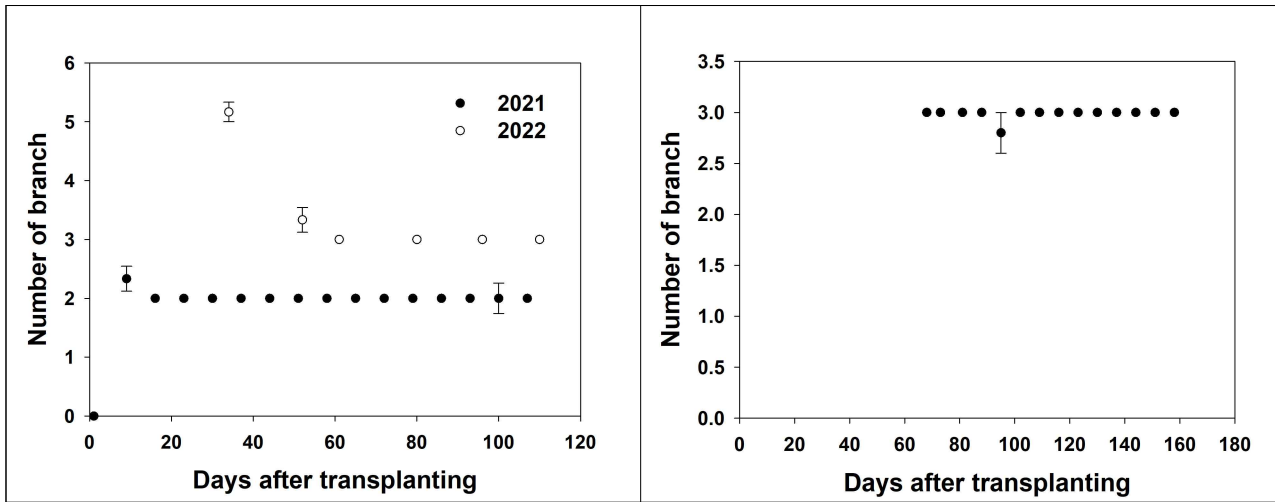


그림 3-1-6. 정식 후 일수별 분지수 변화((좌) 새파란, (우) 혼디)

\* 초장에 있어서 새파란과 혼디 영농조합법인들의 파프리카는 직선적으로 증가하는 경향을 보였다. 초장에 있어서 새파란 영농조합법인이 빠르게 성장하는 경향을 보였다. 새파란 영농조합법인에서 초장변화는 2021년도가 높은 것을 알 수 있었다.

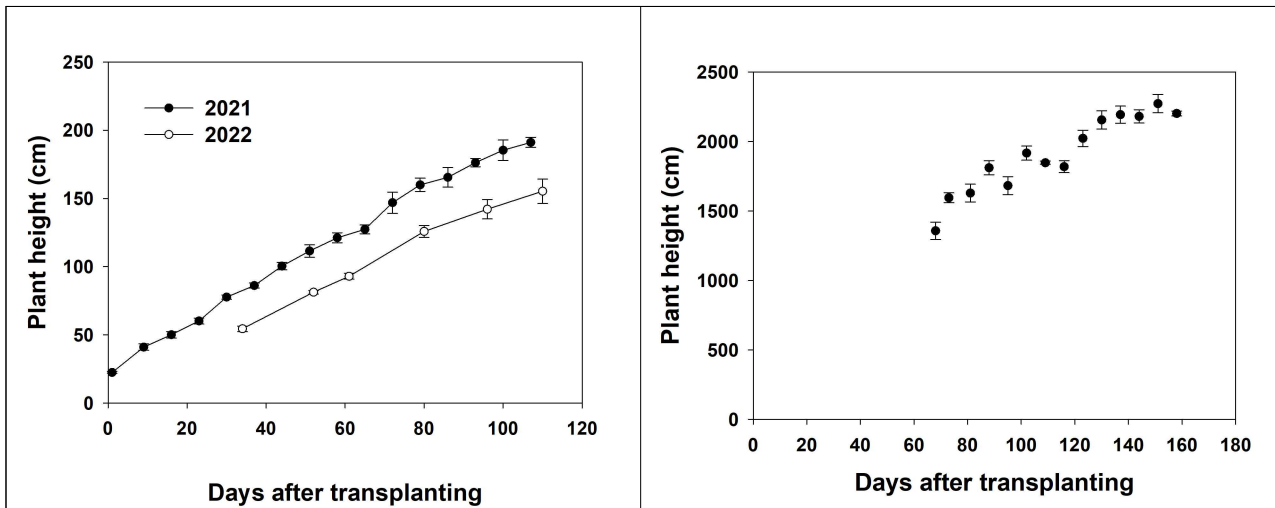


그림 3-1-7. 정식 후 일수별 초장 변화((좌) 새파란, (우) 혼디)

\* 엽수 변화에 있어서는 적엽 부분들이 있어 적엽시 감소, 이후 증가하는 경향을 보였다. 혼디 보다 새파란의 엽수가 적었다.



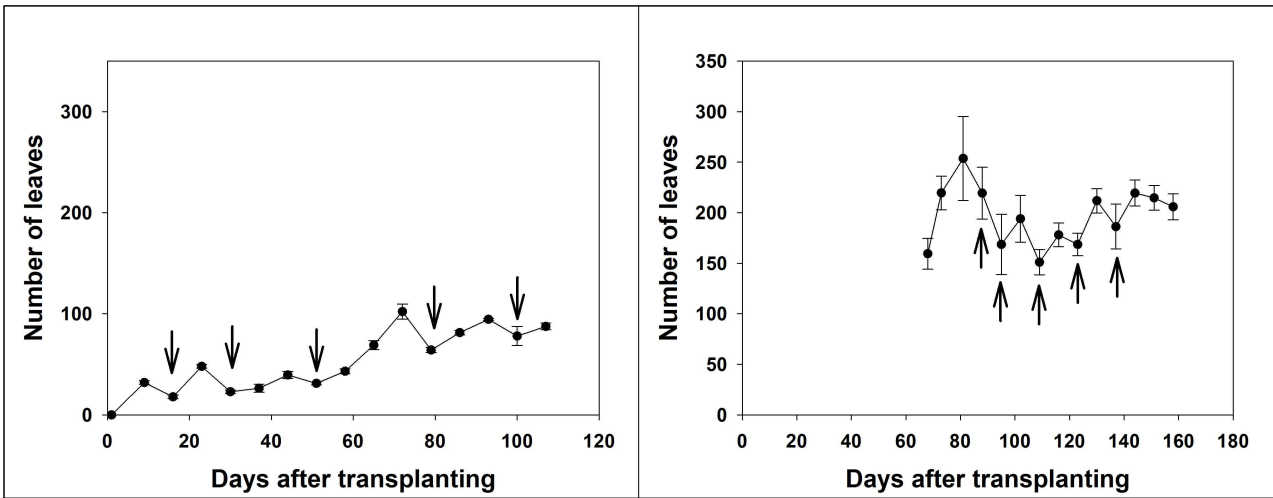


그림 3-1-8. 정식 후 일수별 엽수 변화((좌) 새파란, (우) 훈디)

\* 엽장과 엽폭 변화에 있어서 새파란과 훈디는 유사한 경향을 보였으며, 두 영농조합법인 간의 커다란 차이는 보이지 않았다.

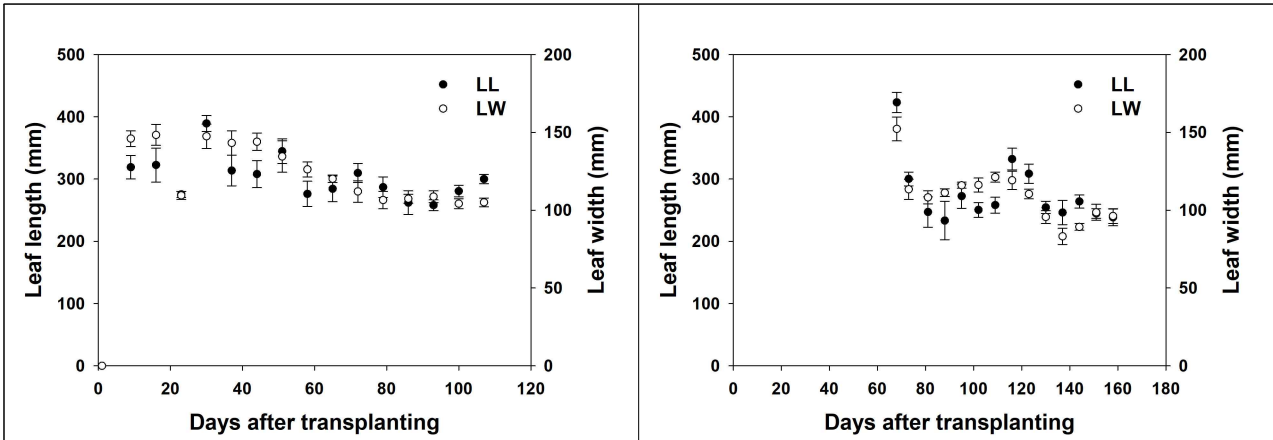


그림 3-1-9. 정식 후 일수별 엽장과 엽폭의 변화((좌) 새파란, (우) 훈디)

\* 먼저 파종한 훈디에서 엽수가 많은 이유로 엽면적 또한 높게 나타났다. 새파란 영농조합법인의 년도별로 엽면적을 살펴보면, 2022년도가 높게 나타났는데, 그 이유는 3줄기 재배로 인한 것으로 판단되었다.

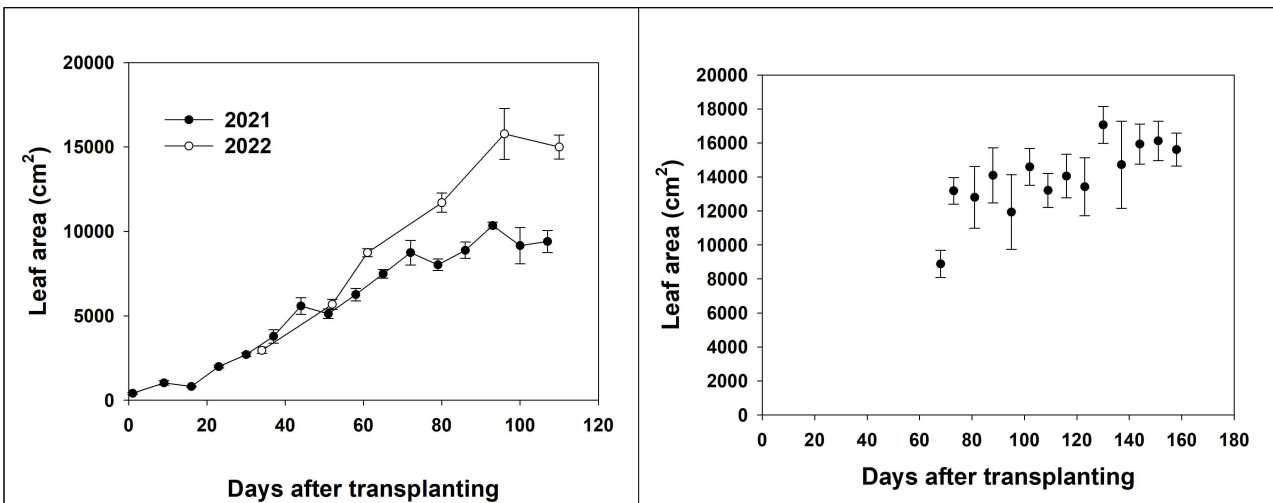


그림 3-1-10. 정식 후 일수별 엽면적 변화((좌) 새파란, (우) 훈디)

\* 새파란에서 파프리카의 과폭과 과고 변화는 시그모이드 형태를 보였다. 다만, 혼디에서 과폭이 작아지는 경향을 보였다.

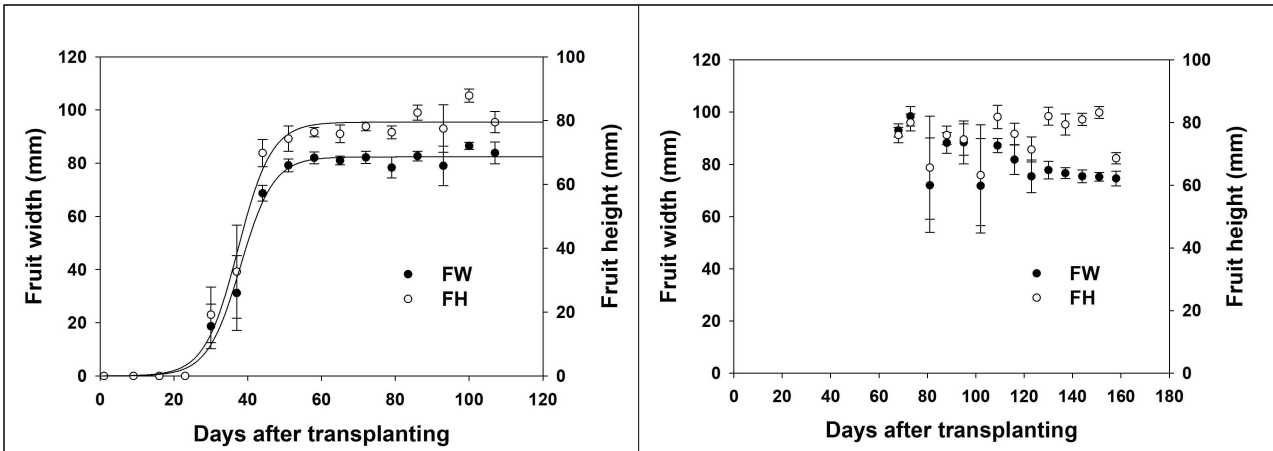


그림 3-1-11. 정식 후 일수별 과폭과 과고의 변화((좌) 새파란, (우) 혼디)

\* 마디수는 모든 영농조합법인에서 직선적으로 증가하는 경향을 보였다.

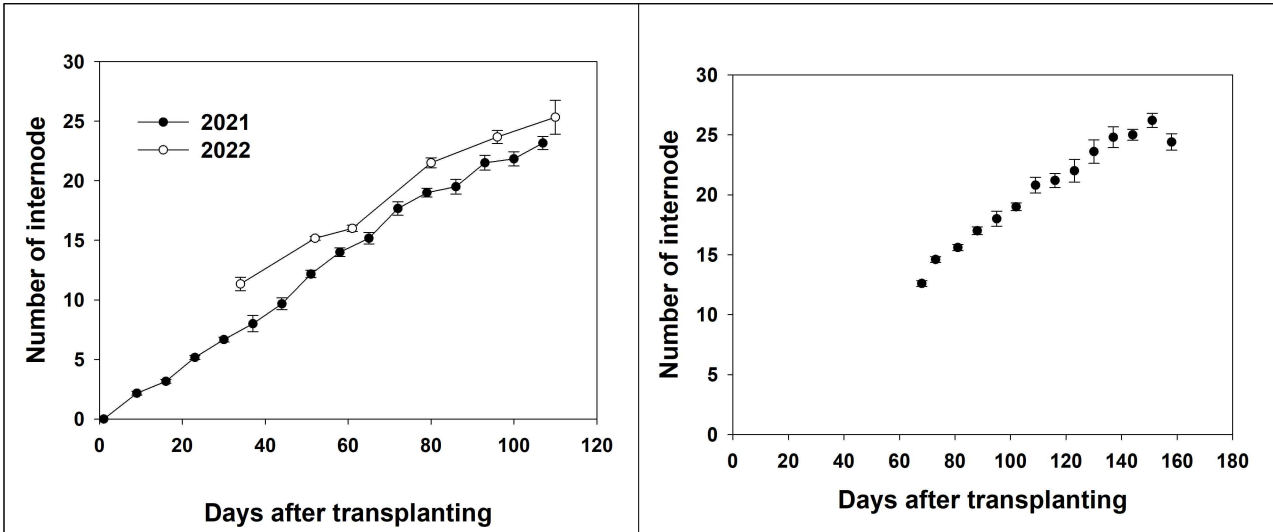


그림 3-1-12. 정식 후 일수별 마디수 변화((좌) 새파란, (우) 혼디)

\* 줄기지름은 두 영농조합법인 모두 증가하다가 감소하는 경향을 반복적으로 보였다

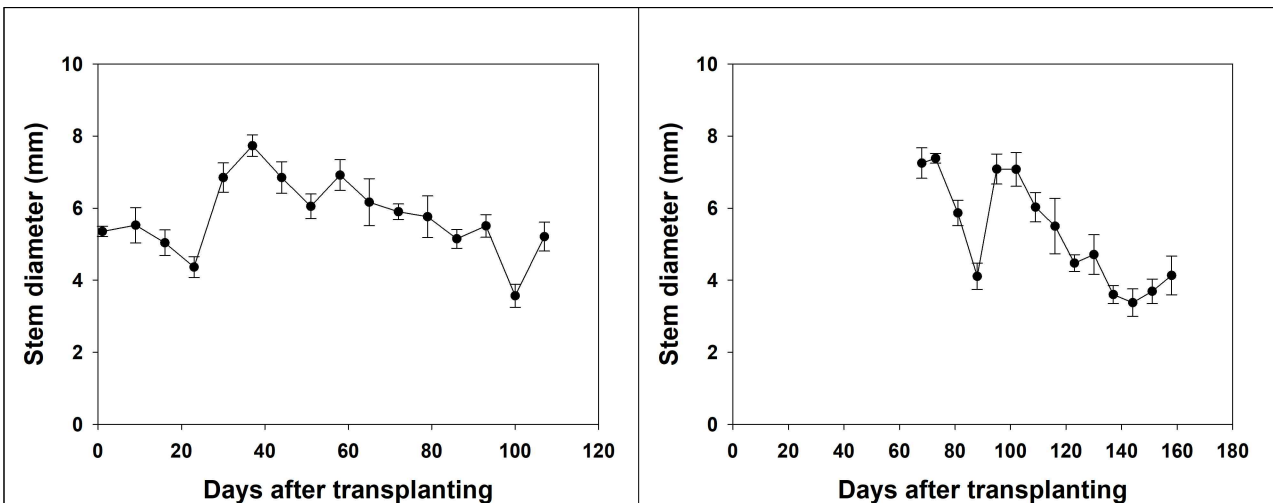


그림 3-1-13. 정식 후 일수별 줄기지름의 변화((좌) 새파란, (우) 혼디)

\* 화방높이는 두 영농조합법인 모두 증가하다가 감소하는 경향을 반복적으로 보였다

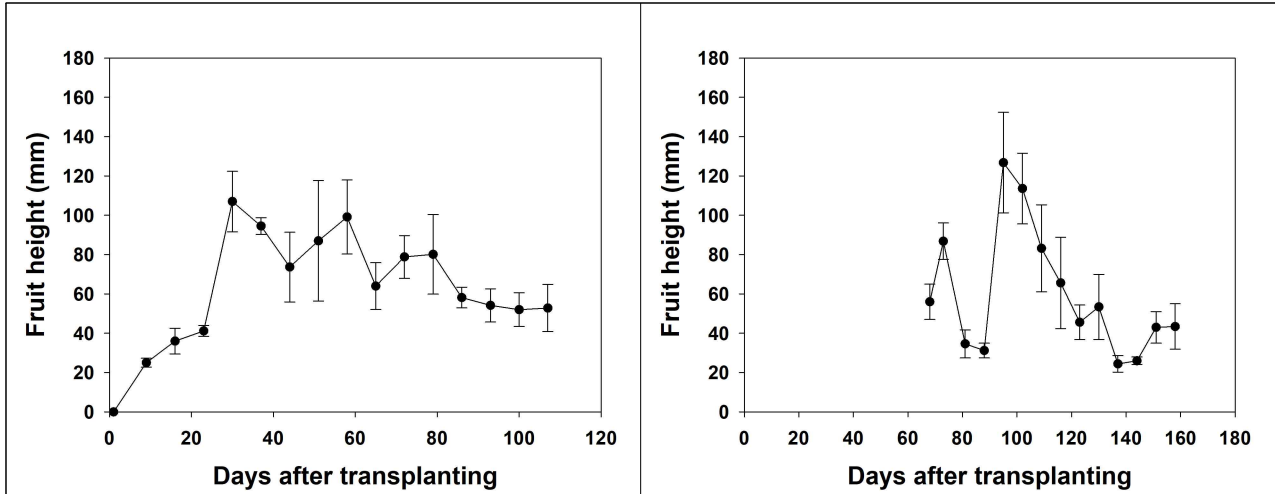


그림 3-1-14. 정식 후 일수별 화방높이의 변화((좌) 새파란, (우) 혼디)

\* 개화마디는 두 영농조합법인 모두 직선적인 경향을 보였다. 혼디에서의 생육 후반기의 감소는 환경 영향에 기인한 것으로 판단된다.

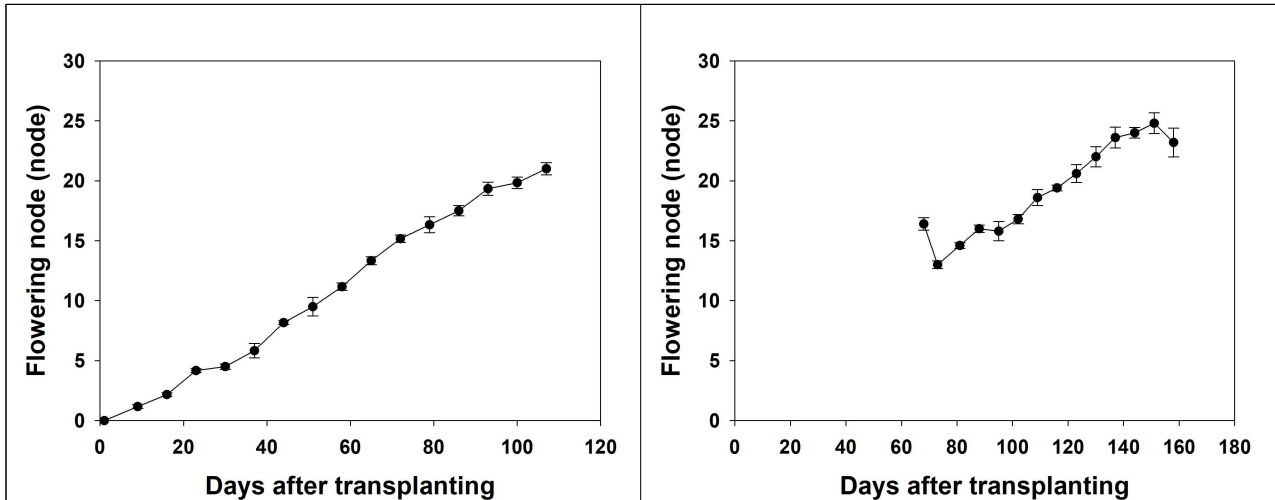


그림 3-1-15. 정식 후 일수별 개화마디의 변화((좌) 새파란, (우) 혼디)

\* 착과마디는 두 영농조합법인 모두 직선적인 경향을 보였다. 혼디에서의 생육 후반기의 감소는 환경 영향에 기인한 것으로 판단된다.

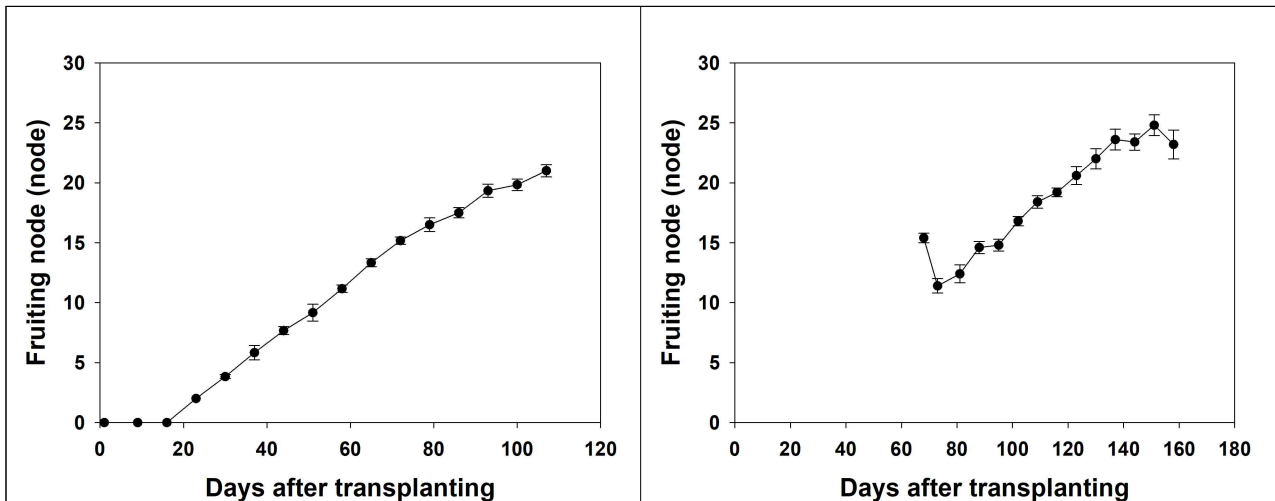


그림 3-1-16. 정식 후 일수별 착과마디의 변화((좌) 새파란, (우) 혼디)

\* 수확마디는 두 영농조합법인 모두 직선적인 경향을 보였다. 훈디에서의 생육 후반기의 감소는 환경 영향에 기인한 것으로 판단된다.

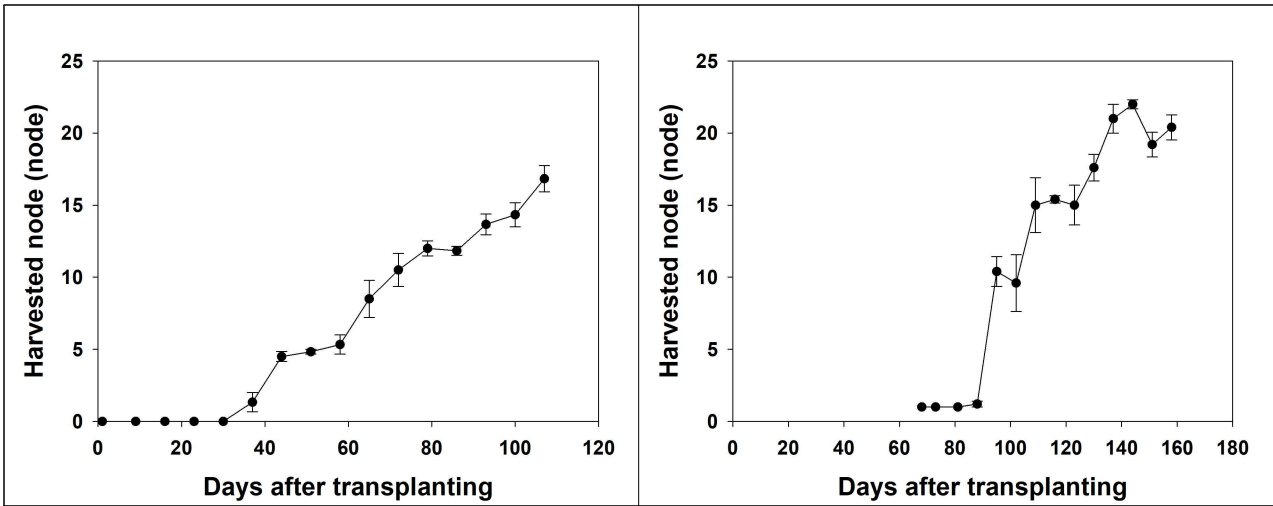


그림 3-1-17. 정식 후 일수별 수확마디의 변화((좌) 새파란, (우) 훈디)

\* 착과수는 두 영농조합법인 모두 증가하다가 감소하는 경향을 반복적으로 보여주었다.

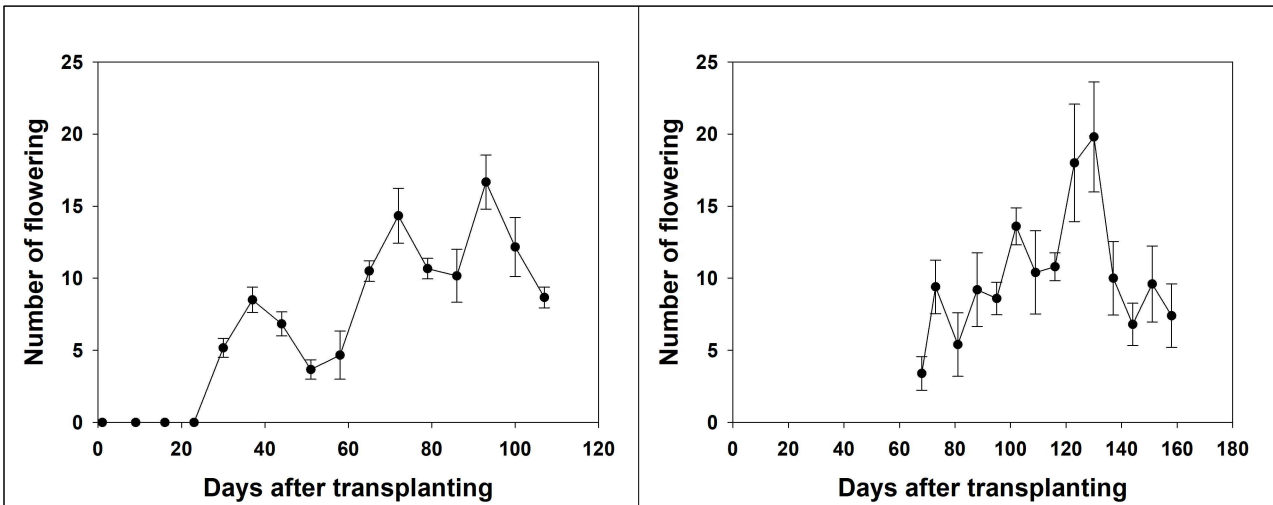


그림 3-1-18. 정식 후 일수별 착과수의 변화((좌) 새파란, (우) 훈디)

\* 열매수는 두 영농조합법인 모두 증가하다가 감소하는 경향을 반복적으로 보여주었다.

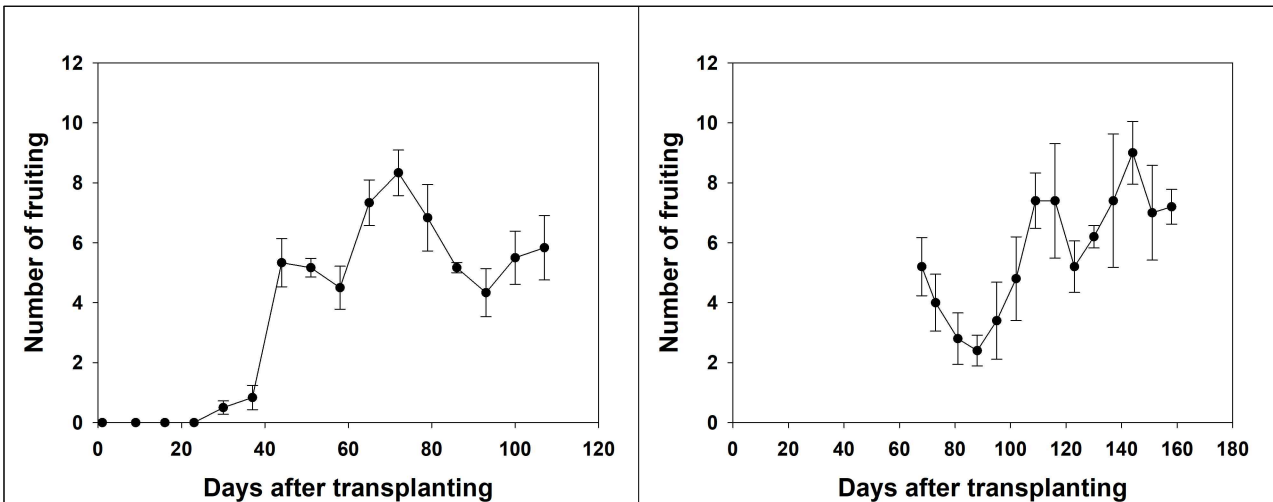


그림 3-1-19. 정식 후 일수별 열매수의 변화((좌) 새파란, (우) 훈디)

\* 수확수는 새파란은 80일 이후에 수확하였으며, 혼디는 60일 이후에 수확한 결과를 보였다. 빠른 정식이 빠른 수확을 이끈 것으로 판단되었다.

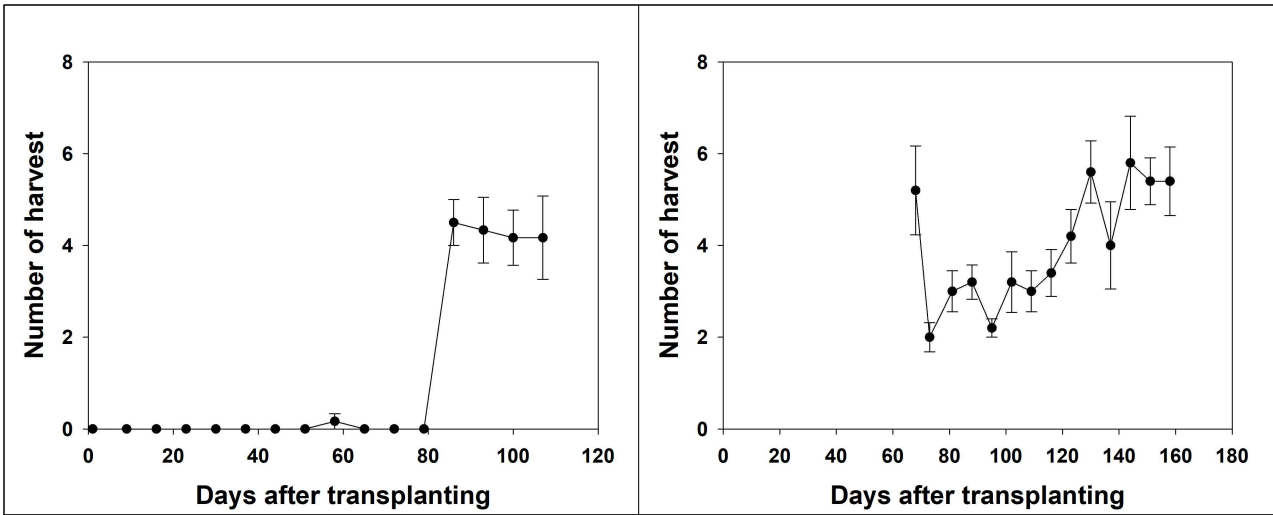


그림 3-1-20. 정식 후 일수별 수확수의 변화((좌) 새파란, (우) 혼디)

\* 생체중과 건물중 모두 시그모이드 경향을 보였으며, 생육이 진전됨에 따라 각 기관의 생체중 비중과 건물중 비중은 차이가 보이는 것으로 판단되었다.

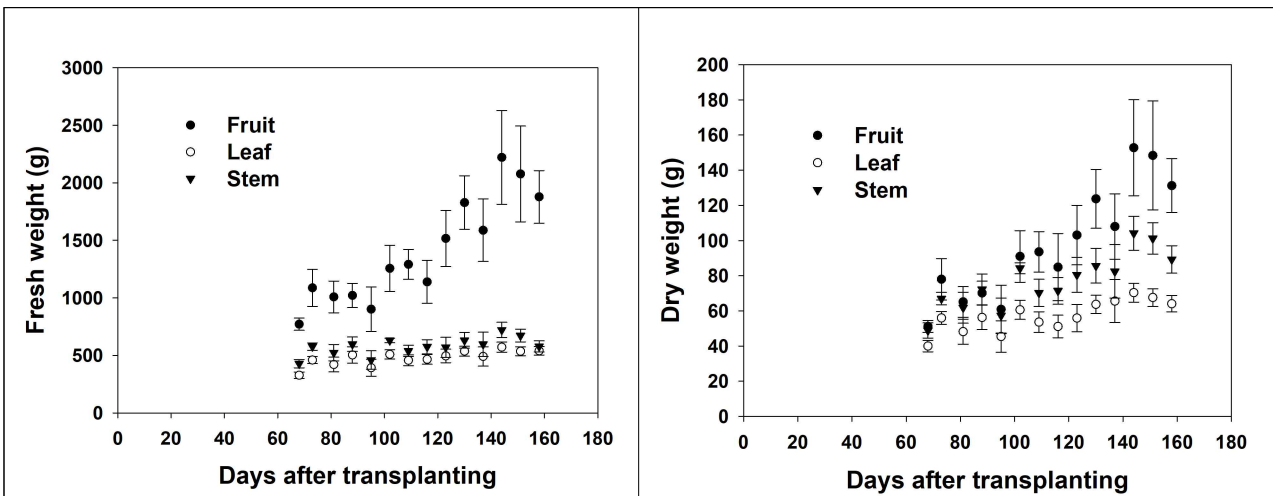


그림 3-1-21. 정식 후 일수별 생체중, 건물중의 변화(혼디)

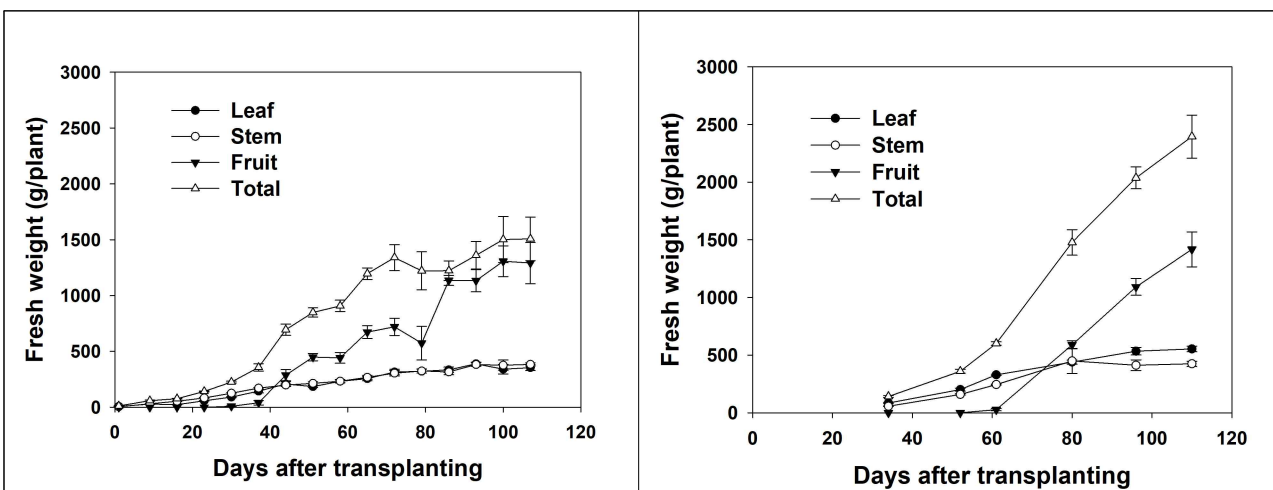


그림 3-1-22. 정식 후 일수별 생체중의 변화(새파란, (좌) 2021, (우) 2022)

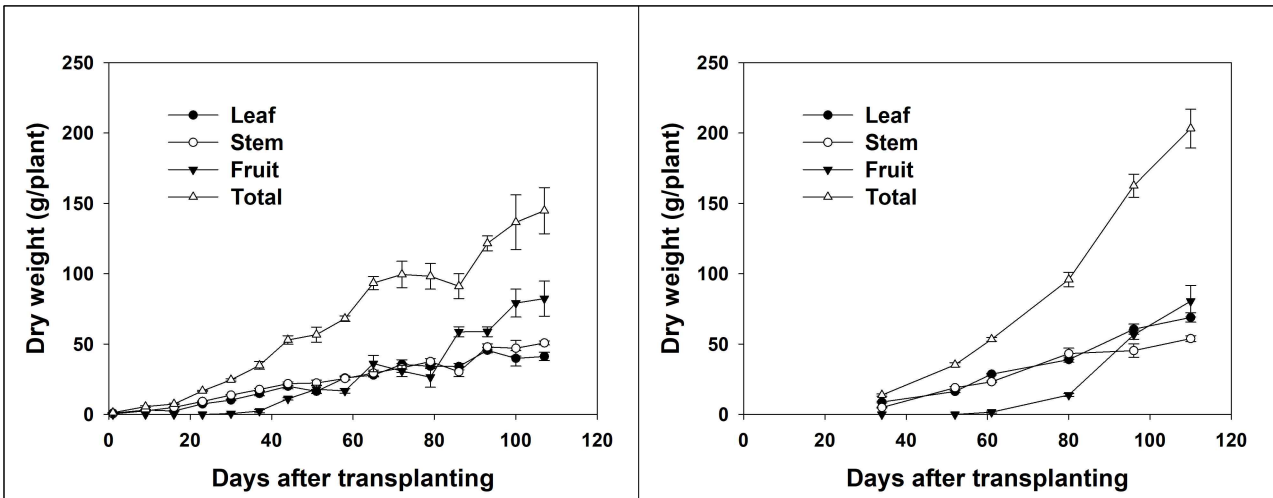


그림 3-1-23. 정식 후 일수별 건물중의 변화(새파란, (좌) 2021, (우) 2022)

\* 초기 생체률과 건물률은 잎이 대략 60%, 줄기가 대략 40%를 보였지만, 과실 생성으로 인해 생체률은 잎이 대략 25%, 줄기가 대략 15%, 과실이 대략 60%를 보였다. 건물률은 초기에는 잎이 64%, 줄기가 대략 36%였지만, 과실 생성으로 인해 잎이 대략 35%, 줄기가 대략 25%, 과실이 대략 40%를 보였다.

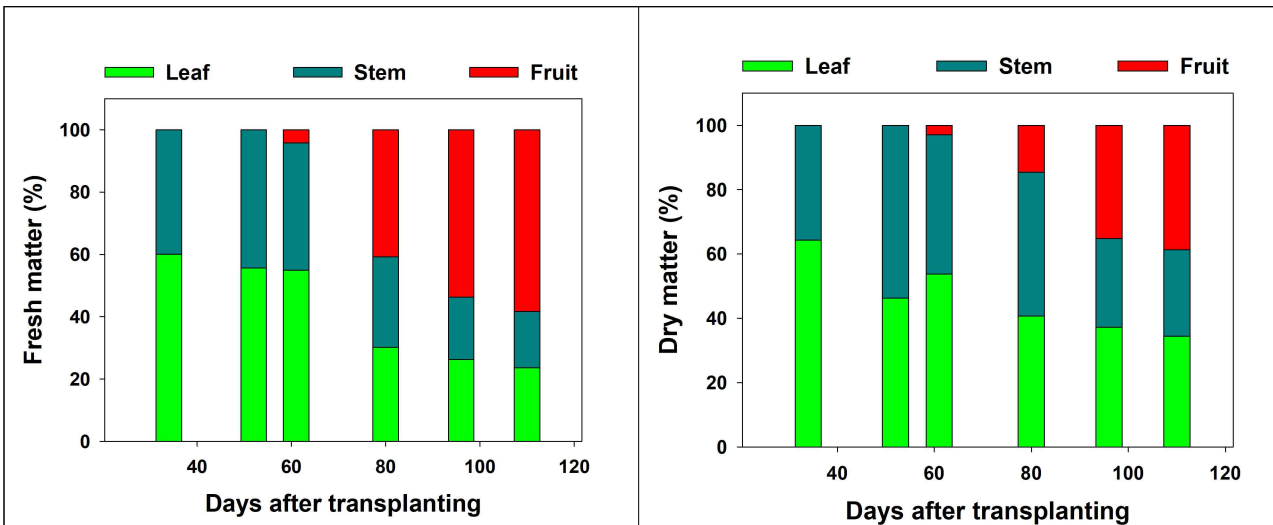


그림 3-1-24. 정식 후 일수별 기관별 생체중, 건물중의 변화(새파란, 2022)

### □ 시설과채류 온실 환경 모델링을 통한 교육용 시뮬레이션 설계

○ 온실 환경 모델 개발을 위한 3차원 온실 구축 및 온실 환경 시뮬레이션

- 3차원 시뮬레이션을 위한 시설과채류 3차원 구조 온실 구축(벤로형 유리온실, 연동형 비닐 온실)
- 파프리카 온실 3차원 모델링 및 환경 데이터 수집

\* 3차원 구조 온실 구축은 시설원예연구소에 위치한 벤로형 유리온실 및 연동형 비닐 온실을 대상으로 하였다(그림 3-1-25).

\* 표준 기상 데이터는 2021년 함안군 시설원예연구소 소재 전체 기상자료와 평년값 자료를 토대로 대표성을 갖는 월별 데이터를 가공 처리하여 활용. 온실 내 환경 분포를 보기 위해 기온, 상대습도, 광도 센서를 유리온실 4개 지점, 비닐 온실 9개 지점에 설치하였다.

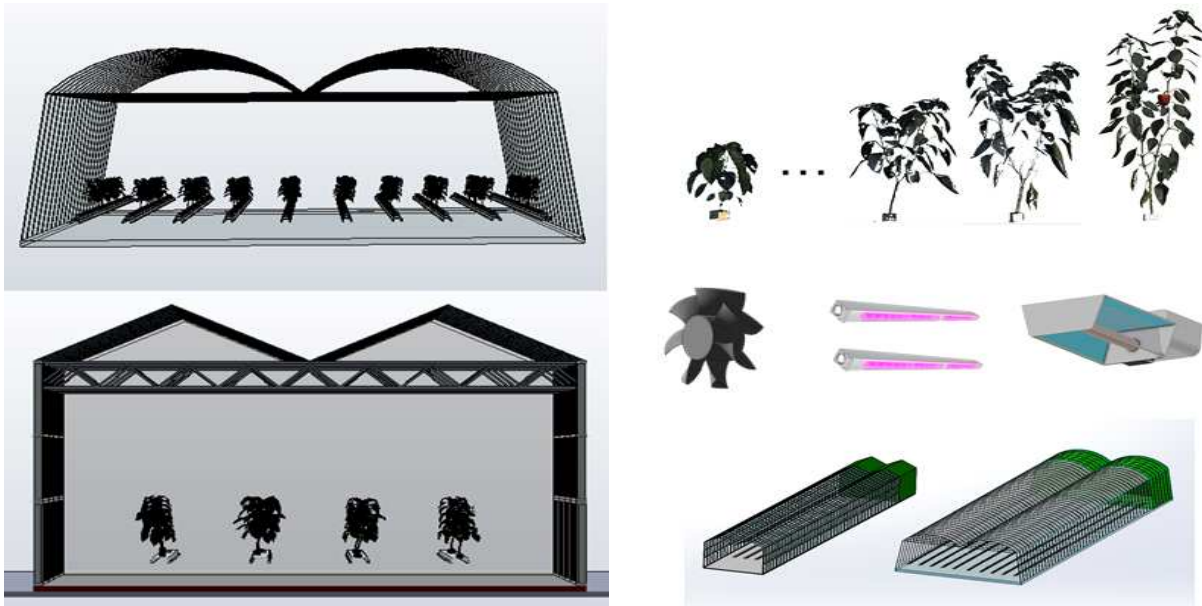


그림 3-1-25. 3차원 스캔 파프리카가 배치된 연동형 비닐온실, 벤로형 유리온실(왼쪽)과 생육단계에 따른 3차원 스캔 파프리카, 3차원 환경 제어 설비, 3차원 온실(오른쪽)

○ 온실 환경 제어 모델 기반 에너지 교환 및 시뮬레이션

- 수치해석(에너지 및 물질 수지 방정식)을 이용한 유리 및 비닐온실 내 환경 시나리오 도출
- \* 모델식: 에너지 수지 밸런스, 증산량 추정 모델, 온습도, 난방부하, 환기율 및 탄산시비량 추정 모델
- \* 연동형 벤로 온실 내에서 온실 제어(천창 개폐 및 냉난방, 포그 가동)에 따른 온실 내 환경을 시뮬레이션하였다.
- \* 수치 주요 계산식 및 알고리즘은 그림 3-1-26에 나타내었다.

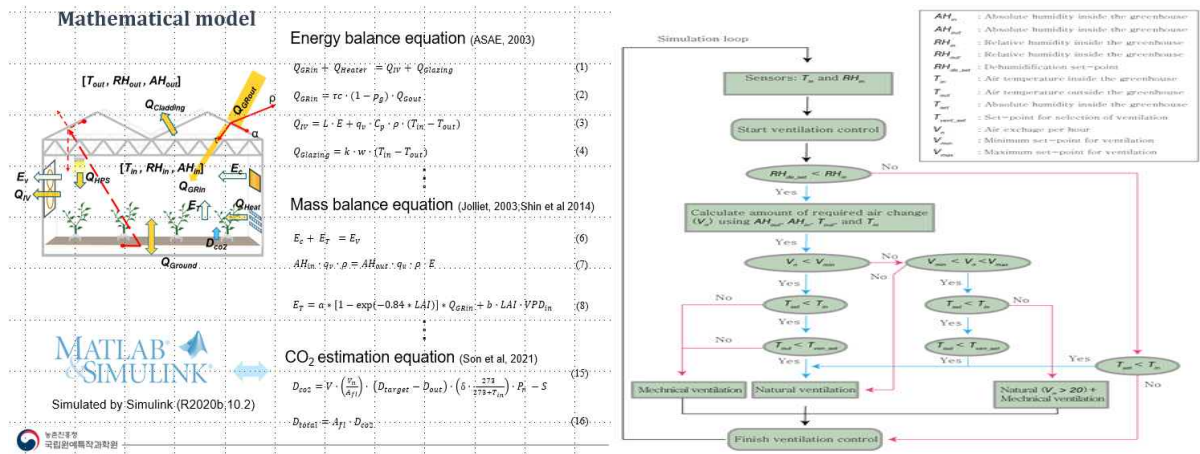
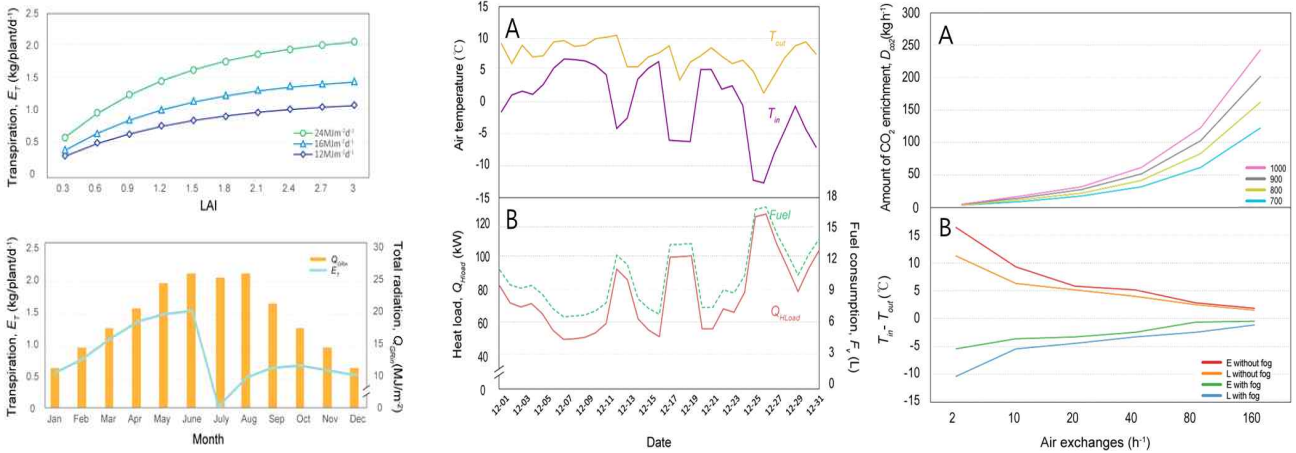


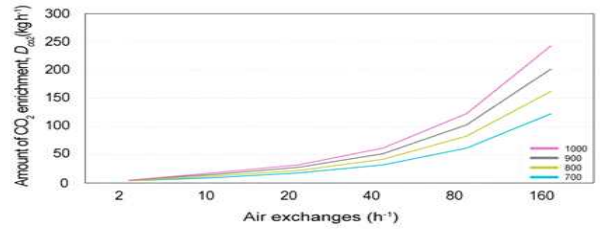
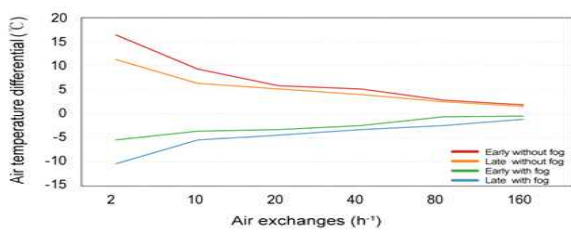
그림 3-1-26. 환경 제어 모델 수치해석 방법(왼쪽)과 환기 제어를 위한 시뮬레이션 프로세스(오른쪽)

- 시나리오별 시뮬레이션

- \* 그림 3-1-27과 같이 시뮬레이션을 통하여 온실 온·습도, 환기율 등이 기본적인 온실 환경과 계절별 냉·난방부하, 탄산 시비시 온실 내 잔류량, 포그 냉방 시 온도 변화 기댓값, 작물의 증산량 추정에 따른 적정 관수량 산출 등 온실 제어에 활용할 수 있는 분석이 가능하다.



계절별 일사량 및 증산량 시나리오 온실 기온 및 난방부하 시나리오 탄산 시비 및 포그 냉방 시나리오



Air Exchange per hour (h <sup>-1</sup> )	Ventilation rate (m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
<i>N</i>	Glasshouse	Plastic house
2	0.003	0.003
10	0.014	0.013
20	0.038	0.026
40	0.058	0.052
80	0.117	0.105
160	0.235	0.210

Air Exchange per hour (h <sup>-1</sup> )	Optimal CO <sub>2</sub> enrichment (kg·h <sup>-1</sup> )	
<i>N</i>	Glasshouse	Plastic house
2	2.4	5.8
10	8.4	20.1
20	15.9	37.9
40	31.1	73.5
80	61.2	144.7
160	121.6	287

포그냉방 및 환기를 추정 시나리오

탄산시비량 추정 시나리오

그림 3-1-27. 시나리오별 온실 내 환경 변화 시뮬레이션

– 교육용 스마트팜 환경 시뮬레이션 서비스

\* 피복재의 특성, 차광 스크린 및 천창 개폐 정도, 보광 및 탄산시비의 능동적인 환경제어에 따른 온실 내 환경 변화를 시뮬레이션하여 환경제어에 대한 정보를 제공하고 이에 따른 작물의 반응(증산량, 광합성량 등)값을 함께 제시하여 최적 환경 제어 방법을 도출할 수 있다(그림 3-1-28).

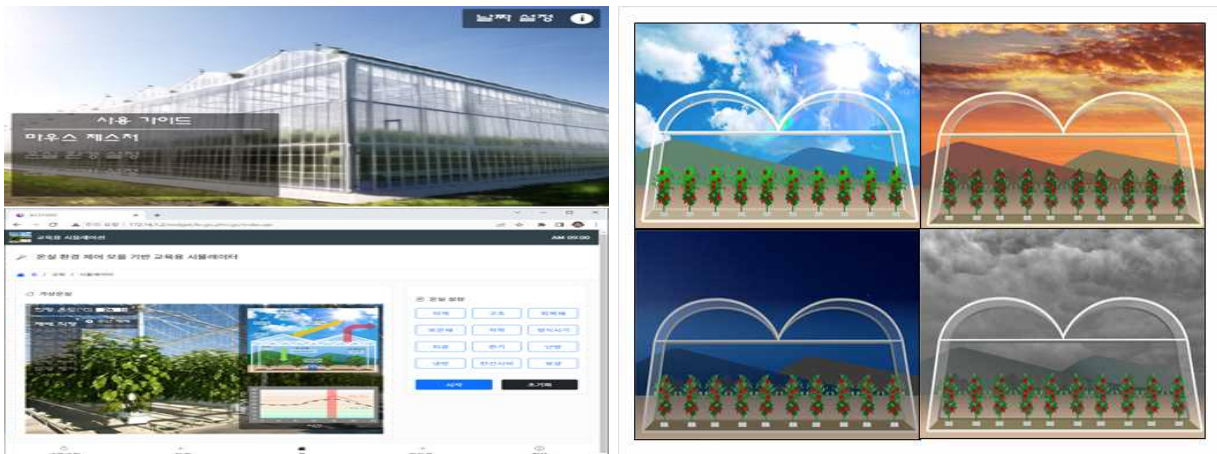


그림 3-1-28. 교육용 스마트팜 시뮬레이션 개발(왼쪽)과 다양한 환경 조건 반영(오른쪽)



## □ 파프리카 상품과 및 비상품과 이화학적 특성, 항산화능 및 카로티노이드 비교

### ○ 과실 부가가치 향상을 위한 상품과-비상품과의 영양성과 생리활성 조사 평가

- 상품과는 평균 과중이 180g 이상으로 외부 상처가 없으며, 과형이 좋은 형태인 것으로 하였으며, 비상품과는 시장 가격 책정 시 등급외 판정을 받는 배꼽썩음과와 기형과를 선정하였다(그림 3-1-29).

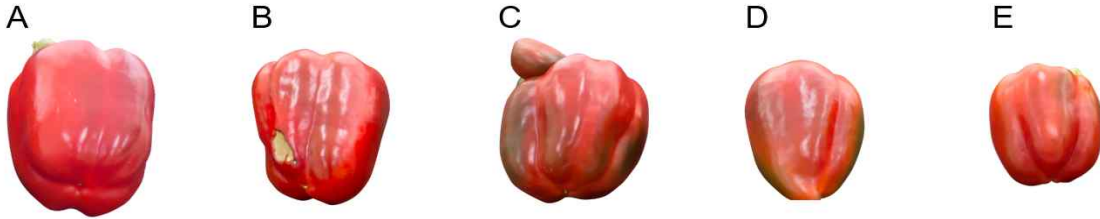


그림 3-1-29. 파프리카 상품과(A) 및 비상품과(B~E)

### - 파프리카 성분분석 항목

- \* 일반성분(수분함량, 조지방, 조단백질, 탄수화물) 분석, 무기물 분석(Ca, Mg, Fe, Zn, K, Na, P)
- \* 총폴리페놀(TPC), 항산화물질(DPPH, APTS 라디칼 소거능)
- \* 카로티노이드 5종 (지아잔틴, 네오잔틴, 루테인, 베타카로틴, 비올라잔틴) HPLC분석

### - 성분분석 결과

- \* 무기물 함량과 총페놀은 상품과에서 유의적으로 높게 나타났으나, 항산화능의 경우, DPPH 라디칼 소거활성은 시료 간에 유의적 차이 없었다. 반면 ABTS 라디칼 소거활성은 100, 1,000 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$  농도에서 상품과가 높은 활성을 보였다.
- \* 카로티노이드의 경우, 상품과와 비상품과 간에 통계적으로 유의한 차이가 없었다
- \*  $\beta$ -Carotene를 포함한 주요 활성성분이라 예상되는 카로티노이드의 함량은 상품과와 비상품과에서 각각  $29.3\pm 2.6$ 과  $31.9\pm 2.9$  mg/g이었으며, 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 이에 따라 파프리카 과실은 외관상 품질에 따른 영양성, 항산화능 및 카로티노이드 조성 차이가 미미하거나 없으므로 파프리카 비상품과 과실은 상품과와 마찬가지로 좋은 기능성 식품의 소재로 활용 가능성을 확인하였다(그림 3-1-30).

### - 성분분석 결과의 모델화 및 활용

- \* 측정된 값을 바탕으로 수량 예측값에 따른 무기물 및 기능성 성분의 양 추정 모델 개발을 할 예정이며, 시뮬레이션 시 이를 반영할 예정이다.

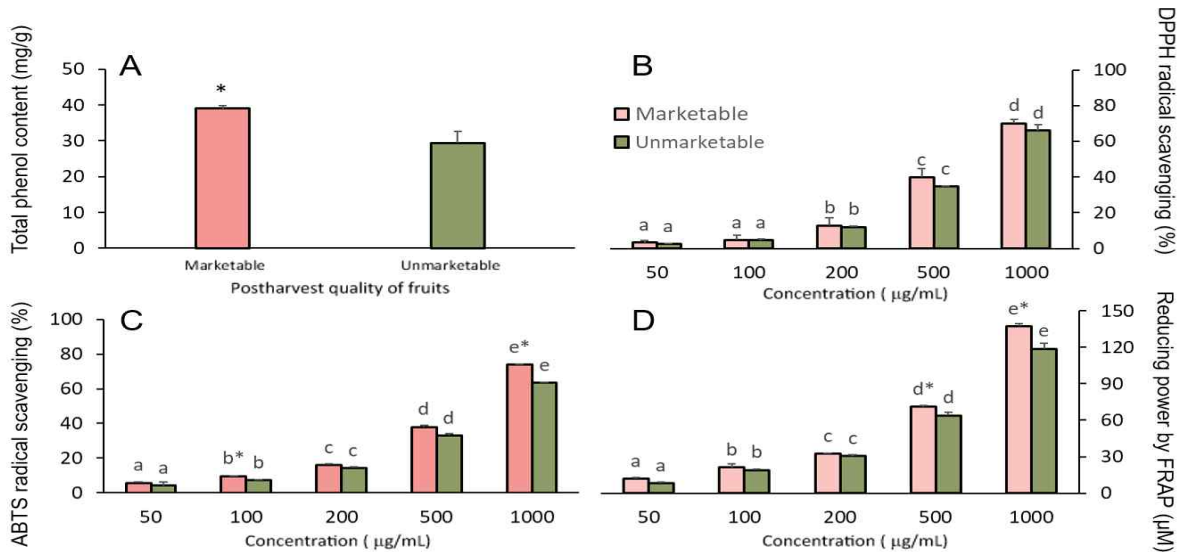


그림 3-1-30. 상품과 및 비상품과의 총페놀 및 항산화성분 비교

### □ 시설 채소 작물 모델링 매뉴얼 및 SW개발

- 기체교환 모델을 기반으로한 Cropbox 모델링 툴은 메카니즘적 설명이 가능하도록 구조화, 기능화 되어있으나 이를 활용하기 위하여 프로그래밍 전문지식을 필요로하고 모델링 후 고도화 및 보완하기 위해서는 Cropbox 모델에 대한 전반적인 이해를 필요로하기 때문에 널리 활용되기 어렵다는 단점이 있다.

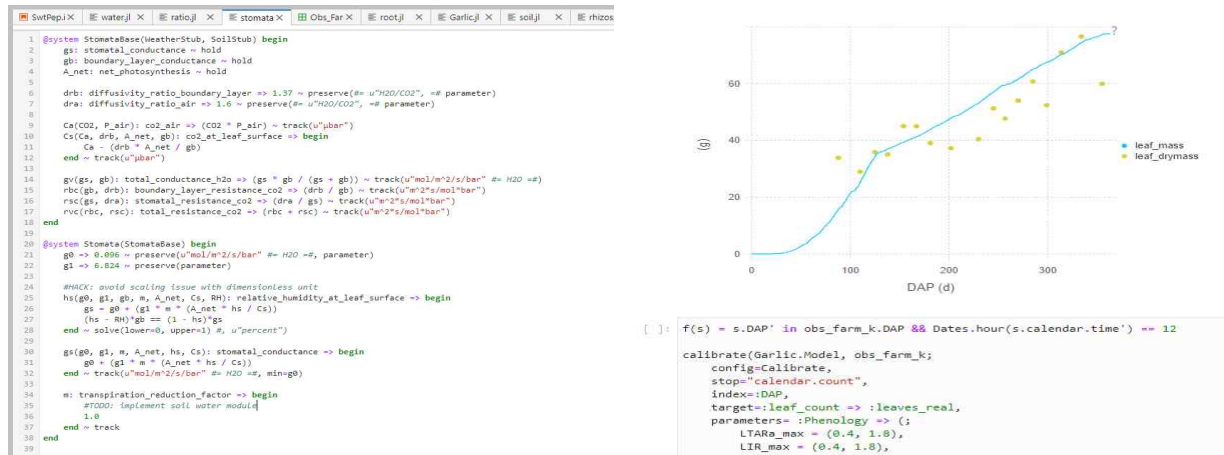


그림 3-1-31. Cropbox 모델링 툴 및 분석 후 수정

- 작물의 모델링 및 데이터 분석의 편의성을 위하여 기존 코딩 방식을 개선하여 프로그램화하고 이에 대한 매뉴얼 개발을 위하여 선도 의사결정지원 프로그램(DSSAT, 미국)을 분석하였다.
  - DSSAT은 2003년 서비스를 시작한 농업 의사결정지원 프로그램(Decision Support System for Agrotechnology Transfer, DSSAT)으로 현재 42개 작물에 대한 모델링 DB를 보유하고 있으며, 실험 데이터 관리, 시각화, 시뮬레이터를 겸한 프로그램이다.
  - DSSAT은 소스코드까지 무료로 공개되어 상업적 활용이 가능한 프로그램으로 2021년까지 업데이트 및 관리되고 있으며, 매년 DSSAT Training Workshop을 진행하고 있다.
  - 작물시뮬레이션 입력 요소로 ① 토양 환경, ② 기상환경, ③ 유전형, ④ 농작업을 받아서 출력값으로 ① 작물 생육, ② 작물 발달, ③ 수량을 추정하는 방식은 Cropbox와 동일하나, DSSAT은 투입되는 유지 관리비용 및 생산비를 고려하여 순이익을 계산해주는 경제

적 분석 기능을 보유하고 있다(그림 3-1-32).

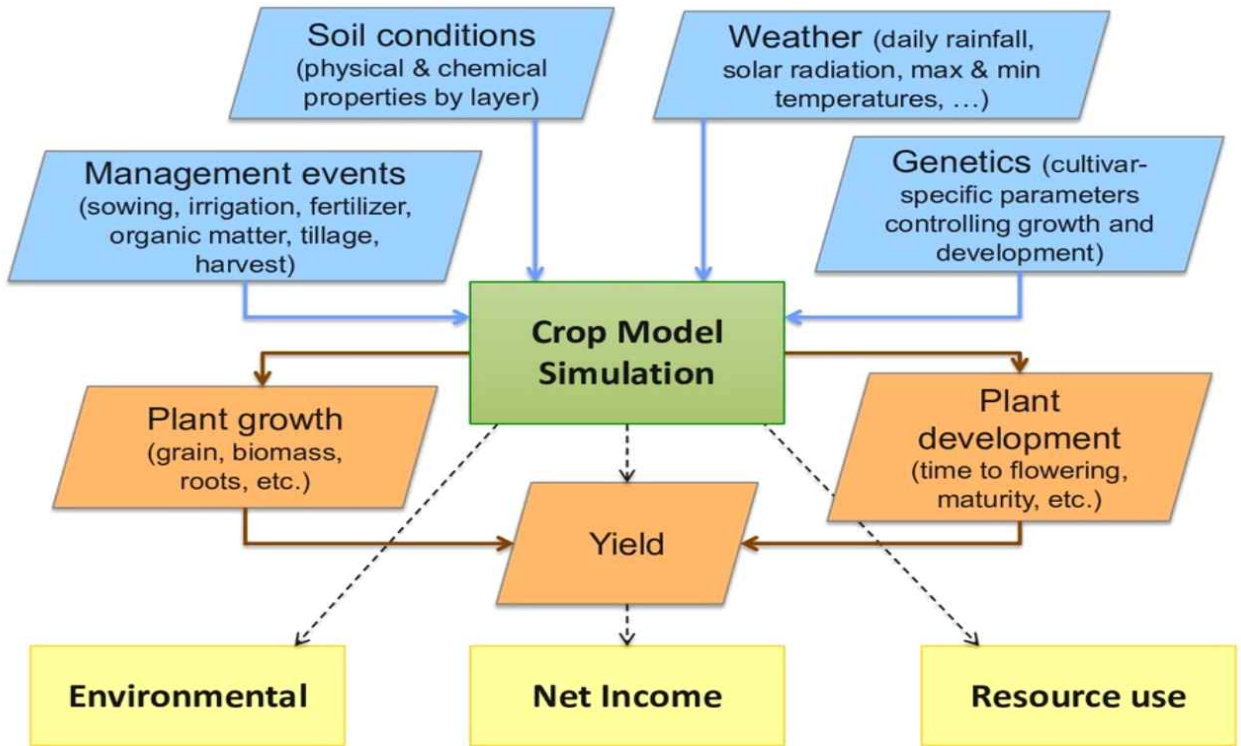


그림 3-1-32. DSSAT 작물 시뮬레이션 데이터 흐름도

- 작물의 광합성량, 호흡량, 분배량을 계산하여 작물의 성장량을 추정하고 이를 통한 수확량을 예측하는 것은 동일하나 DSSAT에서는 유전자형에 따른 데이터 분석도 가능하고, 각각의 분석 데이터를 후속 연구에 활용할 수 있는 DB관리 기능을 포함하고 있다(그림 3-1-33).

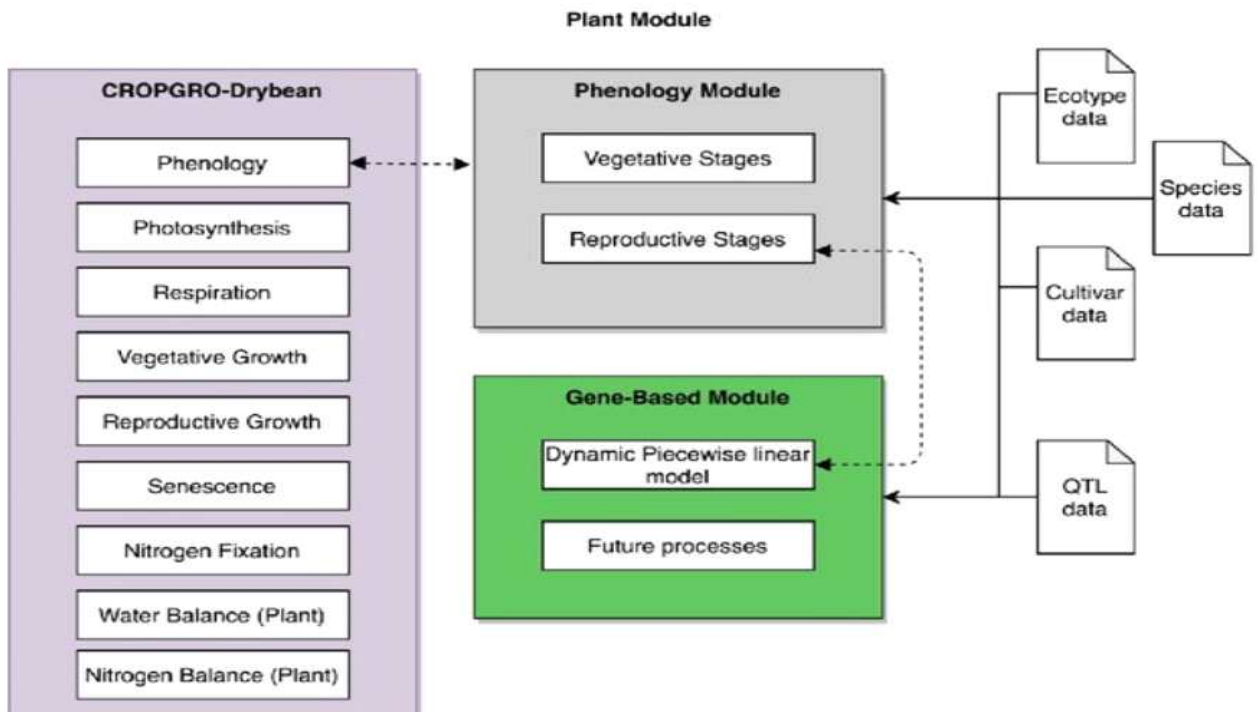


그림 3-1-33. DSSAT의 Module 구조 및 데이터 관리 체계

- 이처럼 DSSAT과 Cropbox는 유사한 논리체계를 바탕으로 구축되었으며, DSSAT에서 제공하는 편의성, 기능들을 겸비한다면 모델링 툴로 활용이 가능할 것이다.

- DSSAT은 검증된 연구논문의 데이터를 기반으로 다양한 환경, 토양조건에 따른 작물의 수량 예측 정보를 제공하며, 계절별 혹은 작형 선정에 따른 분석도 가능하다(그림 3-1-34).

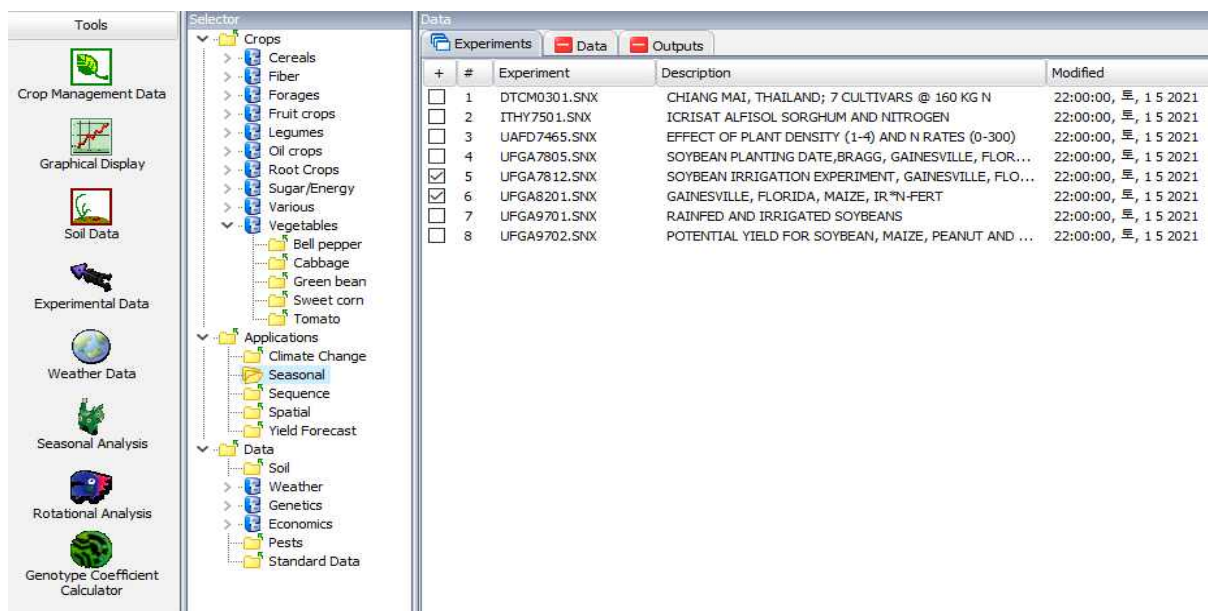


그림 3-1-34. DSSAT 기능 및 작목별 생육 및 환경 데이터베이스

- 사용자가 환경, 생육에 대한 정보를 순차적으로 입력할 수 있도록 General(일반정보)-Field(재배지역 정보)-Initial Condition(직전 재배 작물)-Surface profile(토양환경)-Environmental Modification(기후 정보)-Cultiva(품종)-Planting(정식 방법 및 재식밀도)-Irrigation(관수)-Fertilizers(비료)-Treatment(처리) 10단계로 구성하여 순서대로 데이터를 입력하도록 하고 있다(그림 3-1-35).

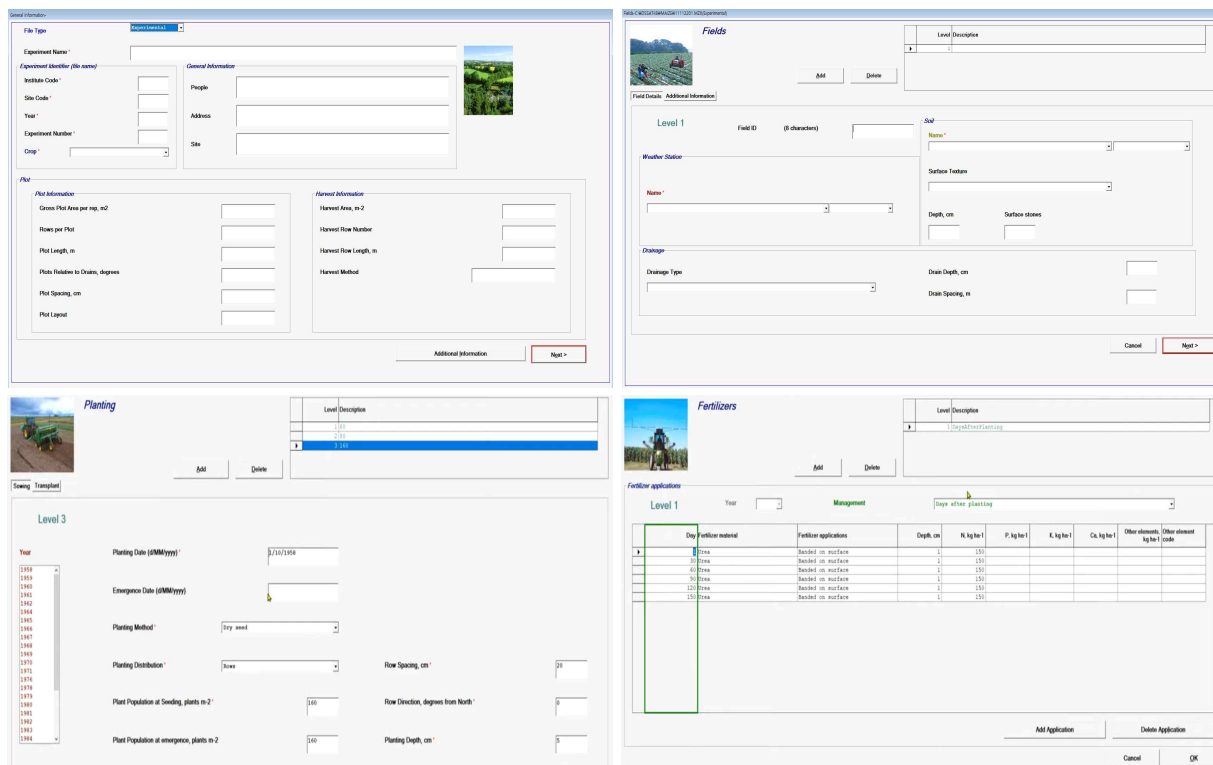


그림 3-1-35. 단계별 데이터 입력 화면

- 데이터의 입력은 입력상자에 숫자 혹은 테스트로 직접 입력을 하거나 정형화된 데이터셋이 있을 경우 항목 중 선택하는 방식을 차용하였다. 각 항목들은 사용자 정의를 통해 프리셋을 설정하거나 기본값을 자동 입력하는 방식으로 편의성을 개선할 수 있다(그림 3-1-36).

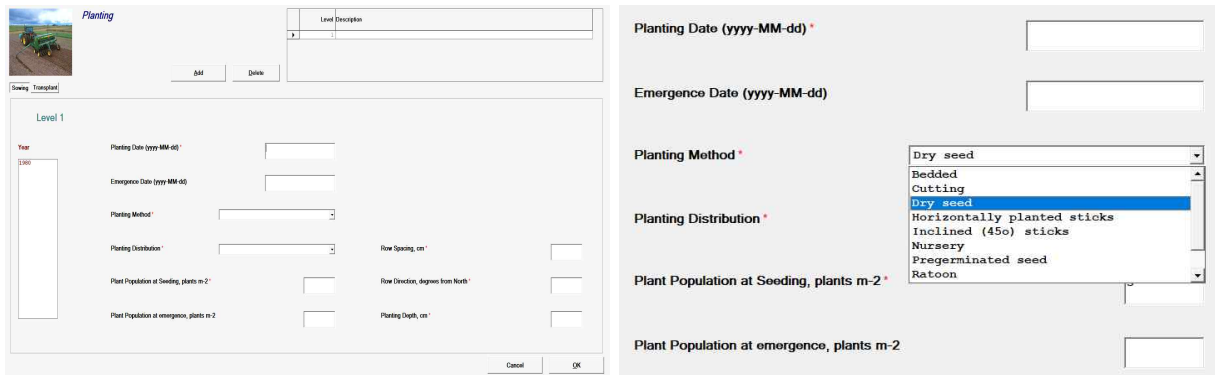


그림 3-1-36. 데이터 유형별 입력 방식

- 토양정보, 기후정보와 같이 데이터베이스에서 불러올 경우 사용가능한 데이터 리스트를 제시하고 그 중 시뮬레이션하고자 하는 항목을 선택하여 적용할 수 있으며, 연차별 분석 결과를 비교하는 형식으로 시뮬레이션도 가능하다(그림 3-1-37).

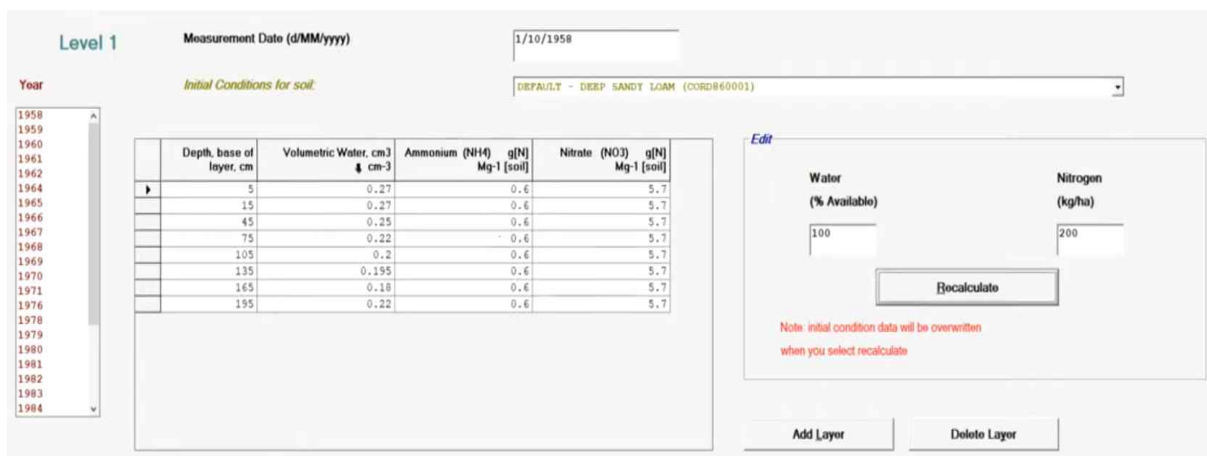


그림 3-1-37. 데이터베이스 연동을 통한 입력 정보 선택

- 분석 항목 중 비교하고자 하는 요인을 체크박스로 선택하여 그래프를 출력할 수 있으며 결과값을 내보내기하여 다른 시각화툴에서 분석값을 활용할 수 있다(그림 3-1-38).

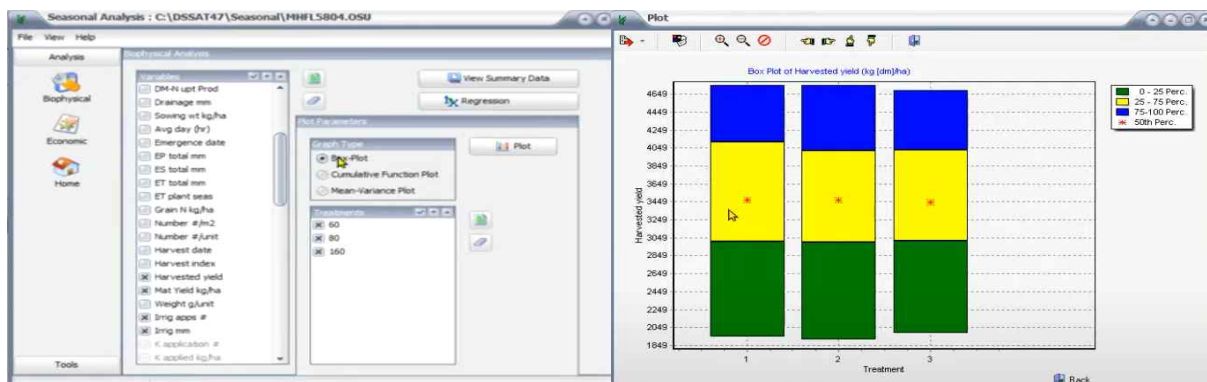


그림 3-1-38. Cropbox 모델링 툴 및 분석 후 수정

○ 시설멜론의 최적 광합성 엽온 예측

- 광합성은 온도에 매우 민감한 과정으로, 최적 온도( $T_{opt}$ )까지 순 광합성 속도( $A_{net}$ )가 급격히 증가하기 때문에 변화무쌍한 환경에서는 측정하기 어렵다. 대기 조건에서 기공 전도도( $g_s$ )를 엽단위로 신속히 측정하면 LI-6800의 측정 시스템과 같은 통제된 조건에 비해 작물의 생리와 스트레스 반응에 더 신속하게 대응할 수 있다. 그러나 이러한 관계에 대한 작물별 분석은 아직 부족하며, 특히 재배 환경에서 고온 조건에 자주 노출되는 멜론의 경우 더욱 최적 광합성 온도를 예측하는 것이 필요하다.

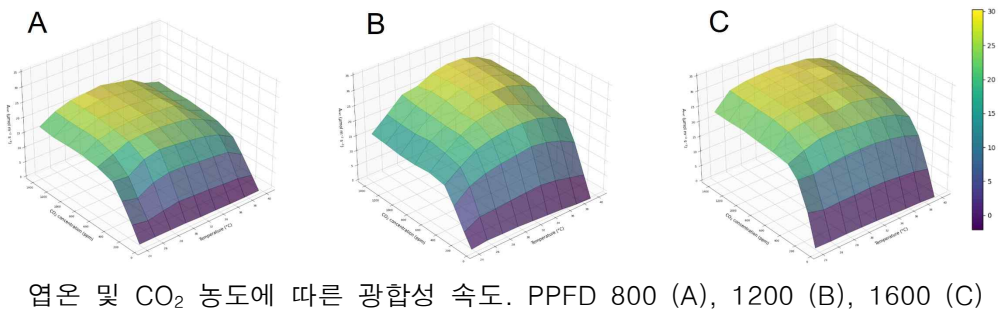
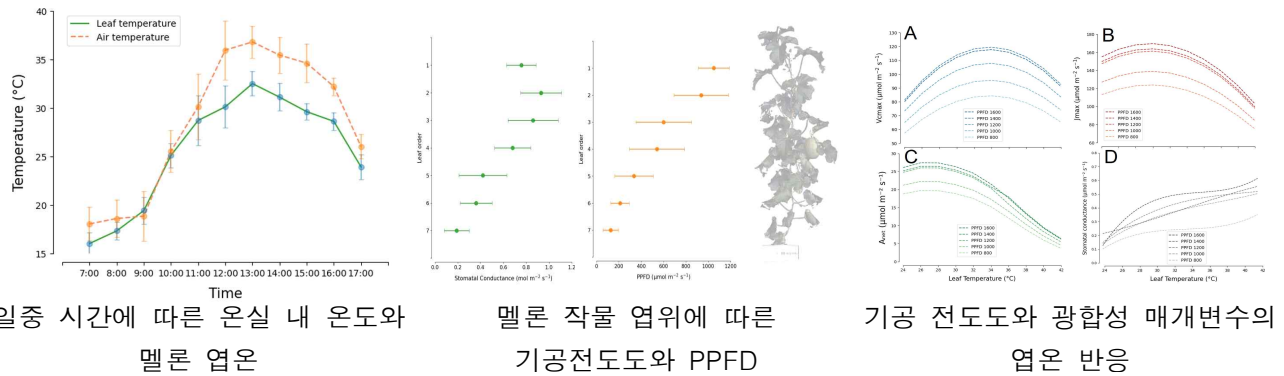


그림 3-1-39. 최적 광합성 엽온 예측

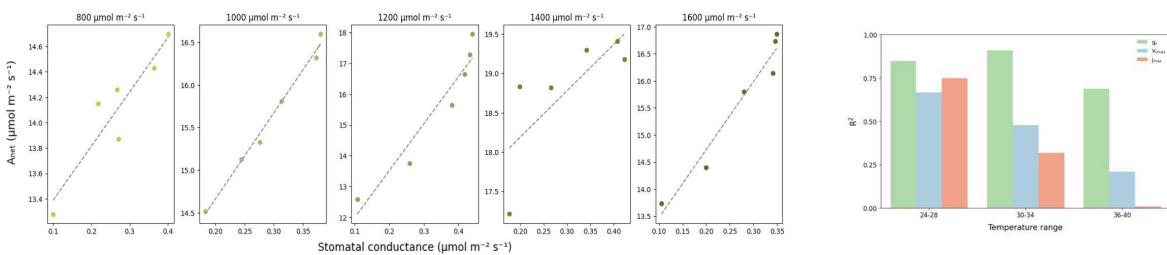


그림 3-1-40. 광도에 따른 기공전도도와 최적 엽온의 관계 (왼쪽)와 예측 결과 (오른쪽)

- \*  $V_{cmax}$ 와  $J_{max}$ 에 의해 결정된  $A/C_i$  반응의 기울기는 온도 피크 이후 급격히 감소하므로 각 파라미터는 최적 엽온 이상으로 예측력이 감소한다. 실험 결과, 기공전도도는 멜론 식물의 최적 광합성 엽온을 예측하는 가장 우수한 단일 예측 변수로 밝혀졌으며, 최적 엽온에서 광합성 속도와 기공전도도 간에 유의미한 양의 상관 관계와 다양한 광도에서의 변화를 보여주었다(그림 3-1-39).

○ 파프리카 실증농가 데이터 분석 결과

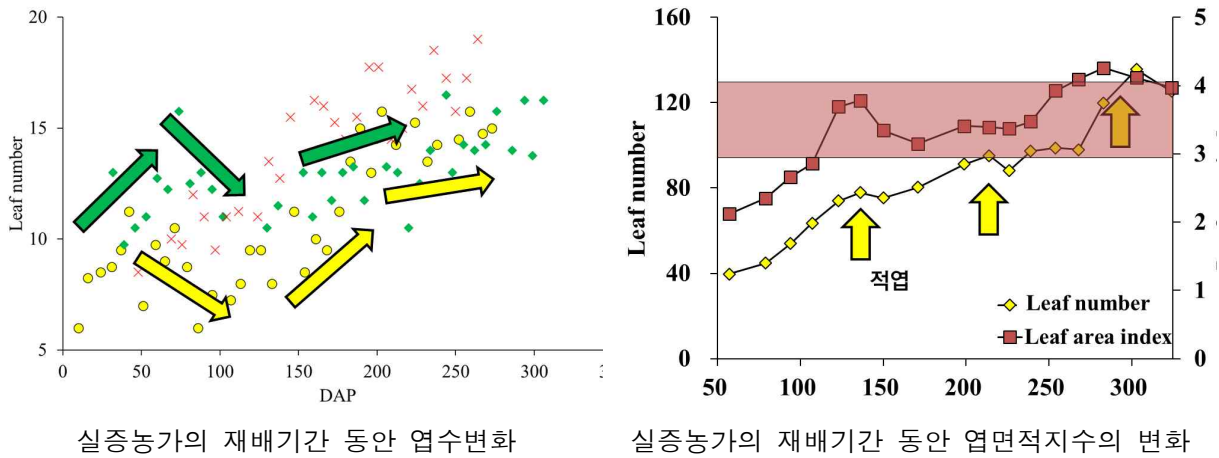


그림 3-1-40. 실증농가의 생육 특성 변화

- 실증농가의 파프리카 엽수의 경우 파프리카의 적정 엽면적 지수(Leaf area index, LAI)인 3~4를 유지하기 위하여 주기적으로 관리되었다(그림 3-1-40).

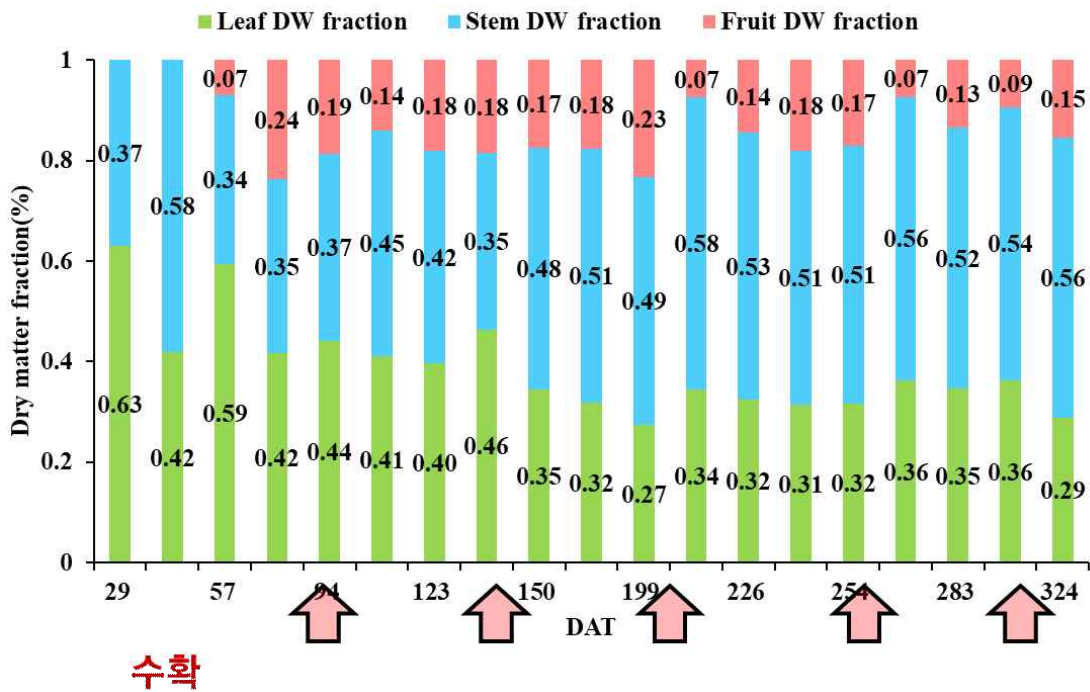


그림 3-1-41. 실증농가의 재배기간 건물중 분배율 변화

- 건물중 분배율의 경우 수확 작업에 따라서 7~24%범위에서 변화하였으며, 수확 직후 급격히 감소하였다가 다음 수확기까지 증가하였다(그림 3-1-41).

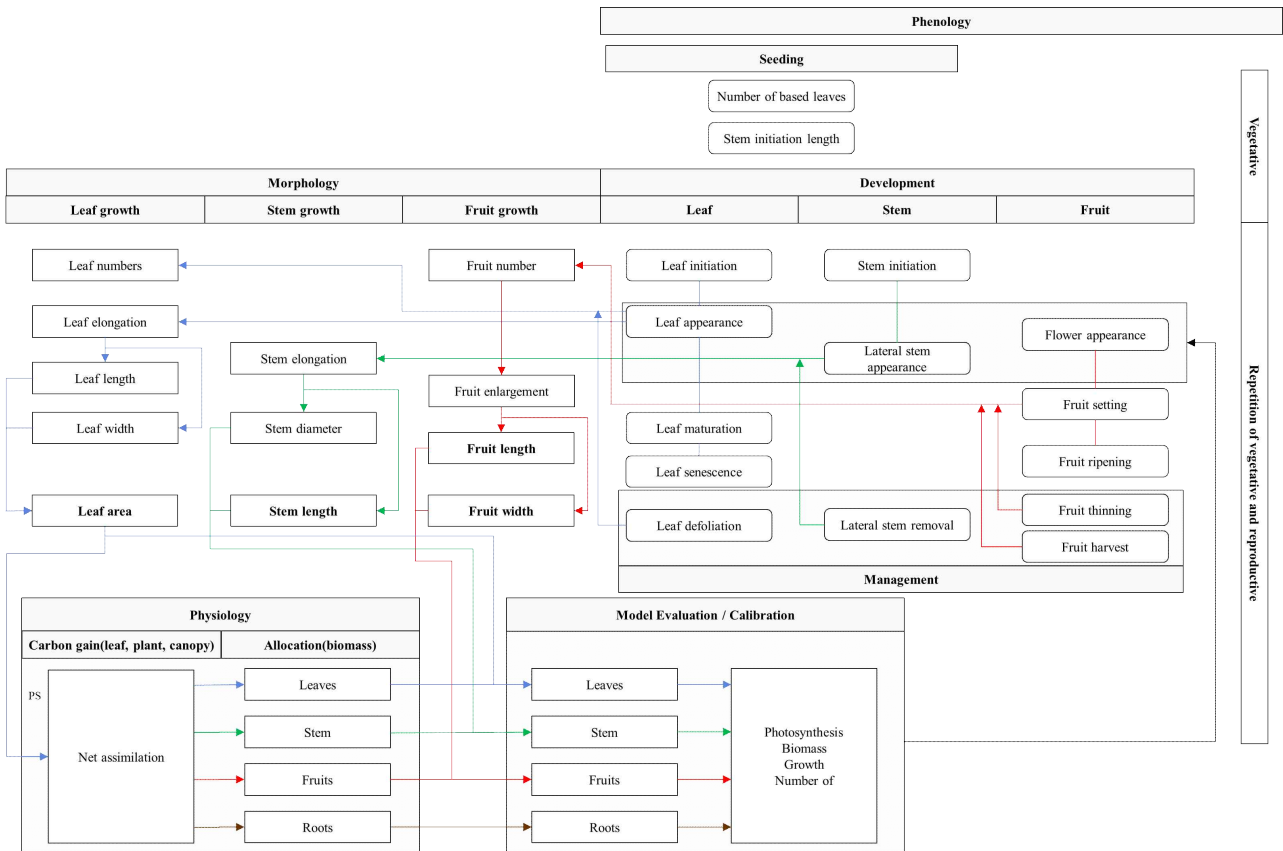


그림 3-1-42. 파프리카 Cropbox 모델링 흐름도

- 파프리카의 생육·생리·형태학적·작물재배 모듈을 반영하여 모델링 흐름도를 설계하였으며 이를 토대로 파프리카 생육 모델링 시뮬레이션을 실시하였다(그림 3-1-42).

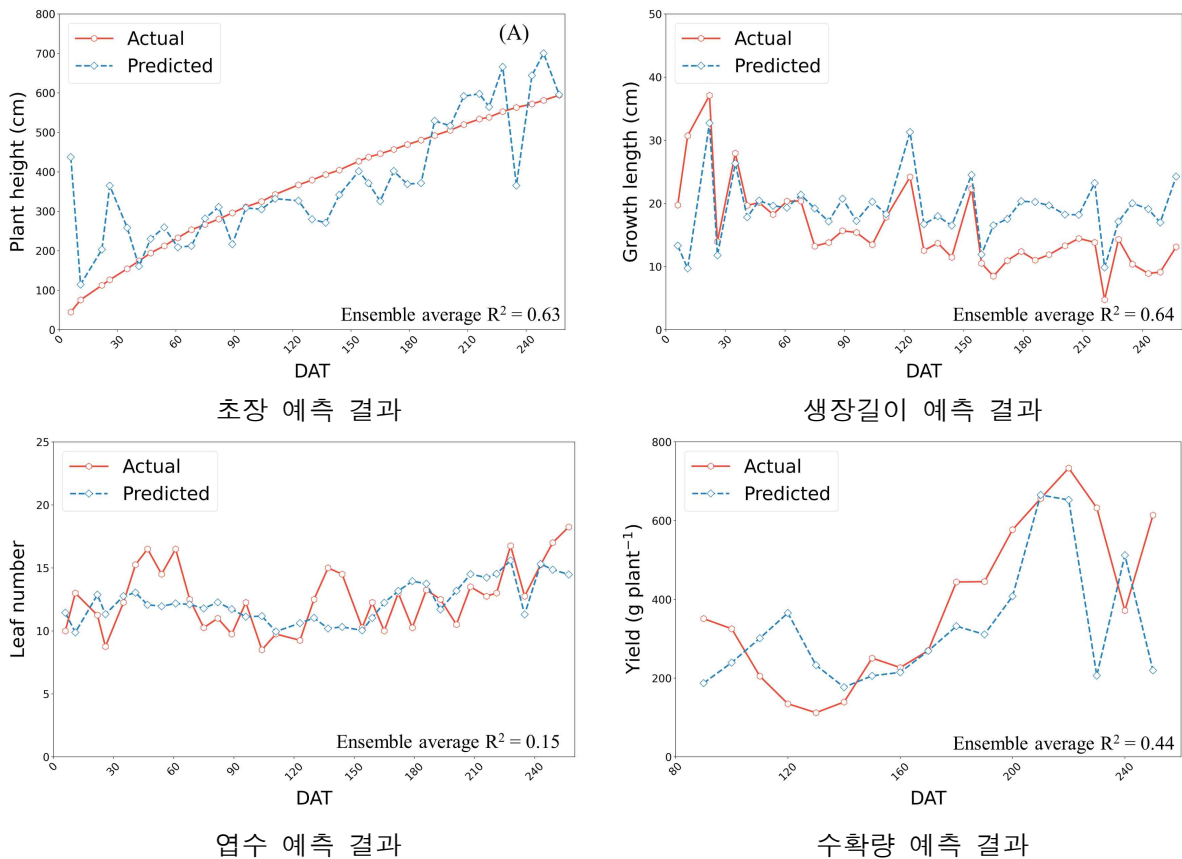


그림 3-1-43. 모델링 예측 결과



- 생육요인의 정확도(R<sup>2</sup>) 초장은 0.63, 생육길이는 0.64, 수확량은 0.44를 보였으나, 엽수의 경우 0.15로 매우 낮았다(그림 3-1-43).
- 엽수의 경우 적엽 모듈을 반영하였을 때 0.72로 향상되었으며 수확량의 경우 모델에서는 0.37로 낮았으나 수확 모듈을 반영 후 0.44로 향상되었다.

○ 시설 과채류 모델링 SW 개발

- 모델링 효율화를 위하여 데이터 전처리, 모델링 데이터셋 산출 SW를 개발하였다.

표 3-1-1. 모델링 데이터셋 일반정보

대분류	항목			코드			단위
	중분류	소분류	대분류	중분류	소분류		
일반정보 (General information)	위치	Location		GI	LO		
			위도	GI	LO	LA	
			경도	GI	LO	LO	
			고도	GI	LO	EL	
		형태	Shape				0: 단동형 1: 연동형 2: 양지붕형 3: 벤로형 4: 컨테이너형
		구조	Structure				
			폭	GI	ST	WI	m
			등고	GI	ST	RH	m
			측고	GI	ST	EH	m
			길이	GI	ST	LE	m
			동수	GI	ST	MS	
			방향	GI	ST	DI	
		품목	Crop Name	GI	CN		
		품종	cultiVar Name	GI	VN		
		재배면적	Cultivated Area	GI	CA		m <sup>2</sup>
		주수	Number of Plants	GI	NP		
		파종일	Sowing Date	GI	SD		
		정식일	Transplanting Date	GI	TD		
		적심일	Pinching Date	GI	PD		
		종료일	End Date	GI	ED		
		방식	Cultivation Method	GI	CM		0: 수경 (배지경) 1: 토경
		재식밀도	Plant Desntiy	GI	PD		plant/m <sup>2</sup>
		배지	Growing Substrate	GI	GS		0: 암면 1: 코이어
			종류	GI	GS	TY	
			폭	GI	GS	WI	cm
			높이	GI	GS	HE	cm
			길이	GI	GS	LE	cm
			구	GI	GS	HO	-
			칩 비율	GI	GS	CR	%
			더스트 비율	GI	GS	DR	%

표 3-1-2. 모델링 데이터셋 날씨모니터링

대분류	항목				코드			단위
	중분류	소분류	대분류	중분류	소분류			
날씨 모니터링 (Weather Monitoring)	건구온도	Dry bulb Temperature			WM	DT		°C
			최고	Highest (Maximum)	WM	DT	H*	°C
			최저	Lowest (Minimum)	WM	DT	L*	°C
			평균	Mean (Average)	WM	DT	M*	°C
			적산	Integrated	WM	DT	I*	°C
	습구온도	Wet bulb Temperature			WM	WT		°C
			최고	Highest (Maximum)	WM	WT	H*	°C
			최저	Lowest (Minimum)	WM	WT	L*	°C
			평균	Mean (Average)	WM	WT	M*	°C
			적산	Integrated	WM	WT	I*	°C
	상대습도	Relative Humidity			WM	RH		%
			최고	Highest (Maximum)	WM	RH	H*	%
			최저	Lowest (Minimum)	WM	RH	L*	%
			평균	Mean (Average)	WM	RH	M*	%
	절대습도	Absolute Humidity			WM	AH		g/m <sup>3</sup>
			최고	Highest (Maximum)	WM	AH	H*	g/m <sup>3</sup>
			최저	Lowest (Minimum)	WM	AH	L*	g/m <sup>3</sup>
			평균	Mean (Average)	WM	AH	M*	g/m <sup>3</sup>
	일사량	Solar Radiation			WM	SR		W/m <sup>2</sup>
			최고	Highest (Maximum)	WM	SR	H*	W/m <sup>2</sup>
			적산	Integrated	WM	SR	I*	W/m <sup>2</sup>
			평균	Mean (Average)	WM	SR	M*	W/m <sup>2</sup>
	이산화탄소	Carbon Dioxide			WM	CD		ppm
			최고	Highest (Maximum)	WM	CD	H*	ppm
			최저	Lowest (Minimum)	WM	CD	L*	ppm
			평균	Mean (Average)	WM	CD	M*	ppm
	풍속	Wind Speed			WM	WS		m/s
			최고	Highest (Maximum)	WM	WS	H*	m/s
			최저	Lowest (Minimum)	WM	WS	L*	m/s
			평균	Mean (Average)	WM	WS	M*	m/s
	돌풍	Wind Gust			WM	WG		m/s
	풍향	Wind Direction			WM	WD		°
		평균	Mean (Average)	WM	WD	M*	°	
		16 방위	16 Cardinal Directions	WM	WD	CD		
강우	RainFall	적산	Integrated	WM	RF	I*	mm	
		감우	Rain Detection	WM	RF	RD		
적설	ShowFall	적산	Integrated	WM	SF	I*	cm	
대기압	Atmospheric Pressure			WM	AP		kPa	

표 3-1-3. 모델링 데이터셋 생육 및 농작업 모니터링

항목				코드			단위	
대분류	중분류	소분류	대분류	중분류	소분류			
생육 모니터링 (Growth Monitoring)	초장	Plant Height		GM	PH		cm	
	생장길이	Length of Elongation		GM	LE		cm	
	마디수	Number of Main-stem Nodes		GM	NM		ea	
	줄기	Stem		GM	ST			
			직경	Diameter	GM	ST	DI	mm
			절간장	Internode Length	GM	ST	IL	cm
			생체중	Fresh Weight	GM	ST	FW	g
			건물중	Dry Weight	GM	ST	DW	g
	관주	Crown			GM	CR		
			직경	Diameter	GM	CR	DI	mm
			생체중	Fresh Weight	GM	CR	FW	g
			건물중	Dry Weight	GM	CR	DW	g
	잎	Leaf			GM	LE		
			엽수	Number of	GM	LE	NO	ea
			엽장	Length	GM	LE	LE	cm
			엽폭	Width	GM	LE	WI	cm
			엽병장	Petiole Length	GM	LE	PL	cm
			엽면적	Area	GM	LE	AR	cm2
			건물중	Dry Weight	GM	LE	DW	g
			생체중	Fresh Weight	GM	LE	FW	g
	꽃	Blossom (Flower)			GM	BL		
			화방높이	Cluster Height	GM	BL	CH	cm
			개화군	Cluster Group	GM	BL	CG	ea
			개화마디	Position of Cluster	GM	BL	PC	ea
			꽃수	Number of	GM	BL	NO	ea
			건물중	Dry Weight	GM	BL	DW	cm
			생체중	Fresh Weight	GM	BL	FW	cm
	과실	Fruit			GM	FR		
			착과군	Fruit Setting Group	GM	FR	SR	ea
			수확군	Fruit Harvested Group	GM	FR	VR	ea
			착과마디	Position of Fruit Setting	GM	FR	PS	ea
			수확마디	Position of Harvested Fruit	GM	FR	PH	ea
			착과수	Number of Fruiting	GM	FR	NI	ea
			수확수	Number of Fruit Harvested	GM	FR	NH	ea
			열매수	Number of Fruits	GM	FR	NO	ea
			과폭	Fruits Width	GM	FR	Wy	cm
			과고	Fruits Height	GM	FR	Hy	cm
			과중	Fruits Weight	GM	FR	Ey	cm
			건물중	Dry Weight	GM	FR	Dy	g
			생체중	Fresh Weight	GM	FR	Fy	g
품질	Quality			GM	QA			

			당도	Brix	GM	QA	BR	bx
			총당량	Total sugar	GM	QA	TS	g/100g
농작업 모니터링 (Management Monitoring)	적엽	Pruning			MM	PR		
			적엽일	date	MM	PR	DA	
			적엽수	number	MM	PR	NO	ea
	적화	Flower Thinning (Blossom)			MM	BT		
			적화일	date	MM	BT	DA	
			적화수	number	MM	BT	NO	ea
	적과	Fruit Thinning			MM	FT		
			적과일	date	MM	FT	DA	
			적과수	number	MM	FT	NO	ea
	적심	Pinching			MM	PI		
			적심일	Date	MM	PI	DA	
			적심마디	Stem	MM	PI		ea
	방제	Pesticide Management			MM	PM		
			방제일	Date	MM	PM	DA	
수확	Harvest			MM	HA			
		수확일	date	MM	HA	DA		
		수확량	Yield	MM	HA	Yi	kg	

- 모델링에 필요한 데이터를 4개의 카테고리로 분류하여 하위 항목, 요인을 작성하여 체계적인 데이터 수집을 실시하였다.

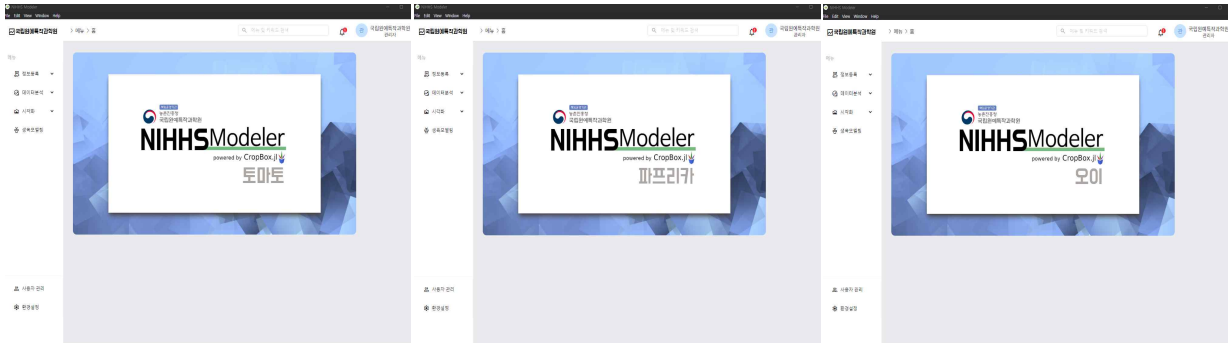


그림 3-1-44. 시설 과채류 생육 모델링 SW

- 크롭박스 모델링 데이터셋 및 프로세스를 자동화하기 위하여 소프트웨어 내 해당 환경, 생육 데이터 관리, 알고리즘 구축, 데이터 분석 영역을 구현한 SW를 개발하였다 (그림 3-1-44).

그림 3-1-45. 온실 및 작물 재배 기본정보 입력

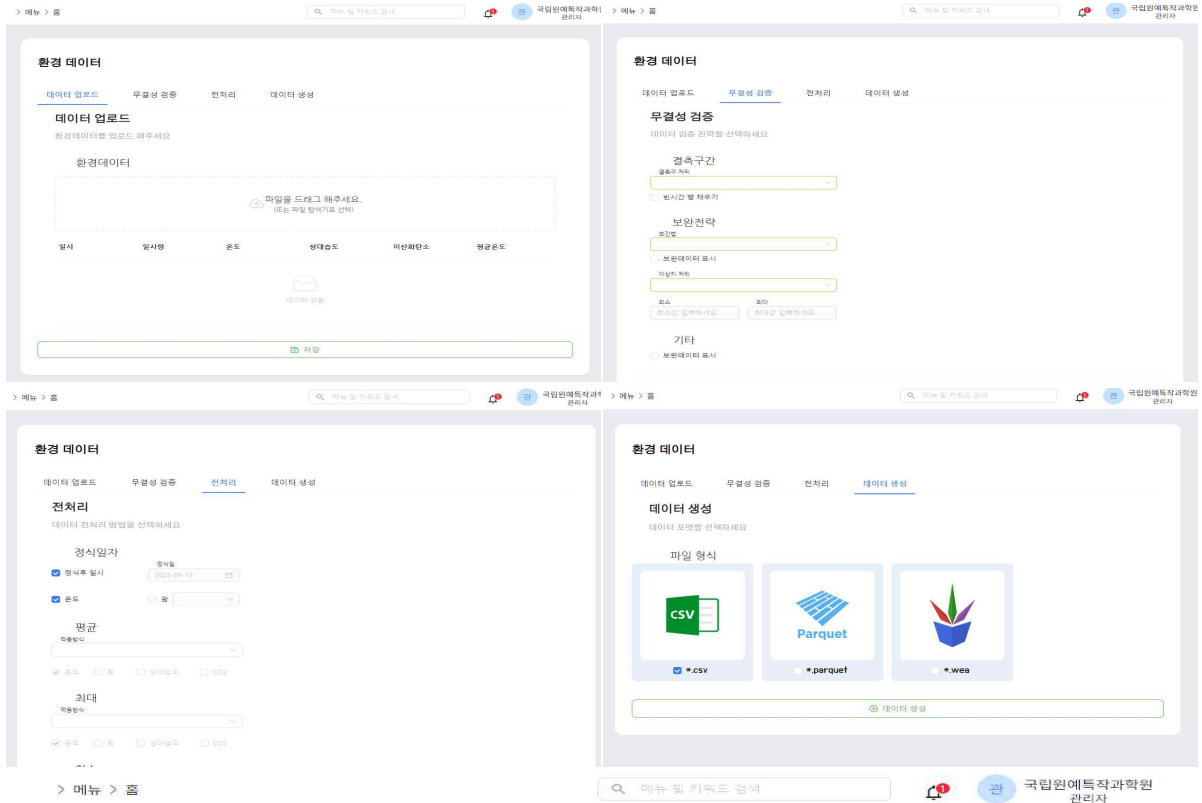
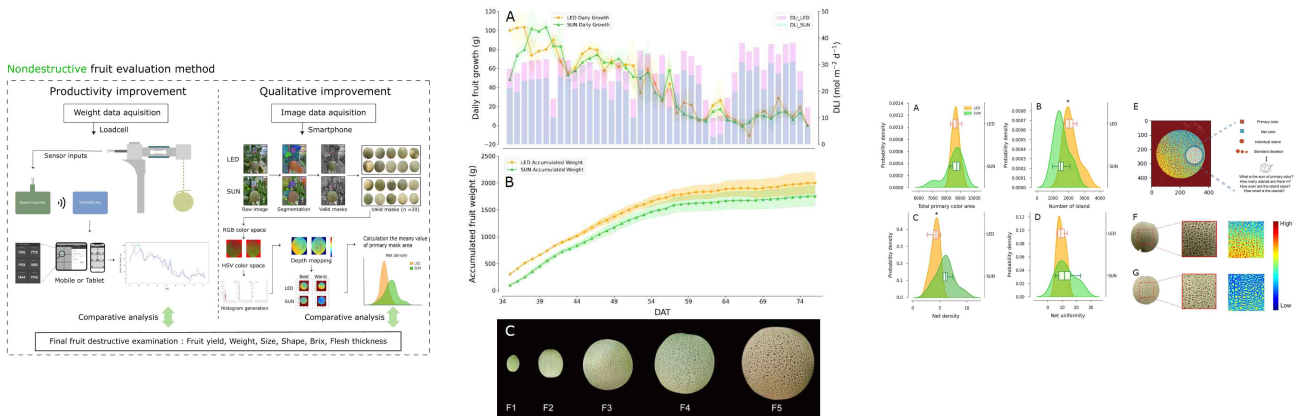


그림 3-1-46. 온실 및 생육정보 업로드, 무결성검증, 전처리, 모델링 데이터셋 생성

- 소프트웨어 내 온실 및 재배 정보 관리가 가능하고 환경·생육 정보를 업로드하여 전처리 (평균, 대푯값 산출), 무결성검증, 결측구 수정 등 이 가능하다. 또한 모델링에 바로 활용 할 수 있는 형태의 파일을 생성이 가능하다. SW 내 데이터 분석을 위한 시각화, 모델링 알고리즘 수정 등이 가능하도록 설계하여 이후 작물 모델링 영역에서 활용할 계획이다. (그림 3-1-44).

○ 컴퓨터비전을 이용한 네트 멜론의 품질 분석 및 정량화

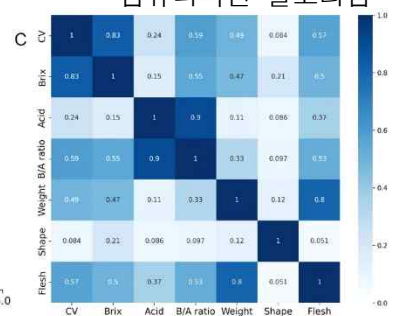
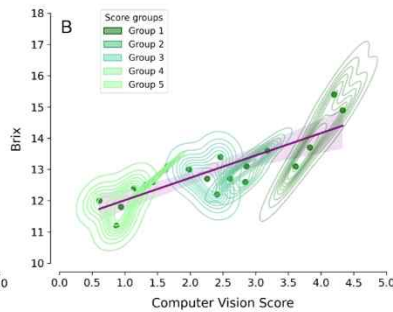
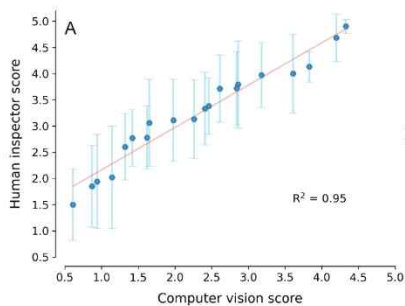
- 이미지 분석 및 센싱 기술을 사용하여 식물 수확량과 품질 향상에 대한 정량적 평가를 비파괴적으로 검증할 수 있다. 머스크멜론의 경우, 과실중과 네트는 주요 특성을 나타내며 과일 생장에 대한 직접적인 통찰력을 제공하고 제품 시장 가치에 큰 영향을 미친다. 그러나 머스크멜론의 수확량과 외형적 품질을 모두 향상시킬 수 있는 정량적 연구는 부족한 실정이다.



로드셀과 컴퓨터 비전을 이용한 네트 멜론의 품질 증진 예측 프로세스

과실 생장에 따른 과실 중의 변화

네트 품질 정량화를 위한 컴퓨터비전 알고리즘



컴퓨터 비전과 인간의 네트 평가 점수 상관관계 (A), 당도와의 상관관계 (B), 과실 품질과의 상관 관계 (C)

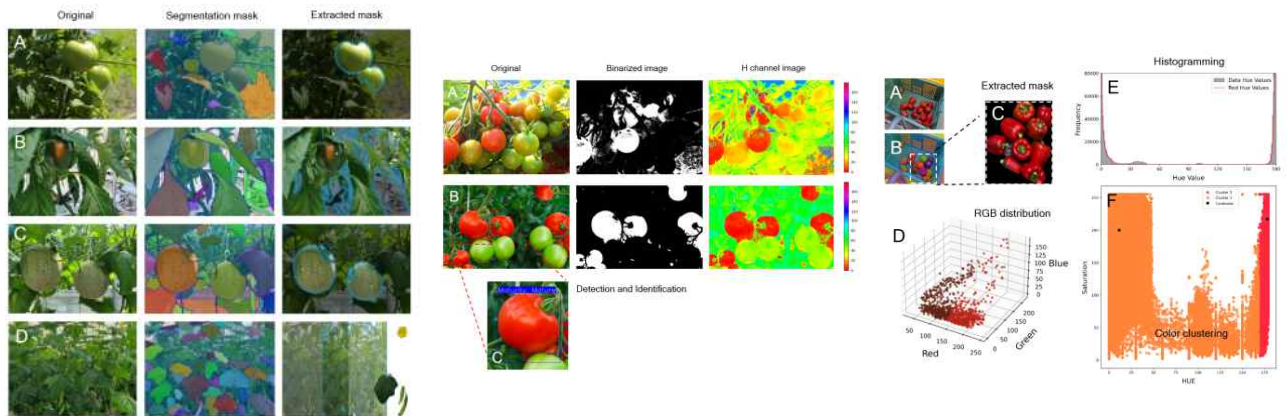
그림 3-1-45. 네트 멜론의 외적 품질 정량화 프로세스

- \* LED 보조 조명을 통해 과일 간 생육과 품질 차이를 유도하고, 네트 멜론의 생육과 품질을 비파괴적으로 평가할 수 있는 방법을 개발하였다. 로드셀 시스템을 통해 조명 처리에 따른 멜론 작물의 형태 형성 및 과실 생육 변화를 설명할 수 있다. 컴퓨터 비전 기술을 사용하여 이러한 변화가 그물망 멜론의 외부 및 내부 품질에 어떤 영향을 미치는지 보여주고 이러한 품질을 정량적으로 평가했다. 그 결과, CV에 의한 그물망 외부 품질 평가는 사람의 평가와 0.95의 높은 상관관계를 보였고, 당도와는 0.83의 상관관계를 보였다. 종합해보면, 이 결과는 과일의 수확량과 품질을 균형 있게 향상시키는 평가 방법을 뒷받침한다.

○ 컴퓨터비전을 이용한 시설과채류 표현형 특성화

- 컴퓨터 비전(computer vision)은 모든 종류의 이미지에서 시각 데이터를 수학적으로 분석하여 디지털 이미지, 비디오 및 기타 시각적 입력에서 의미 있는 정보를 추출하는 인공지능 분야이다. 정보 과학이 빠르게 성장함에 따라 컴퓨터 비전 기반 패턴 인식 및 이미지 처리는 농업 분야에도 광범위하게 연구되고 있으나, 시설 과채류 농산업 적용 및 연구자들을 위한 간단한 프로세스가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 컴퓨터 비전 기술을 이용하여 토마토, 파프리카, 오이 및 멜론의 표현형을 특성화하고, 이에 사용된 코드를

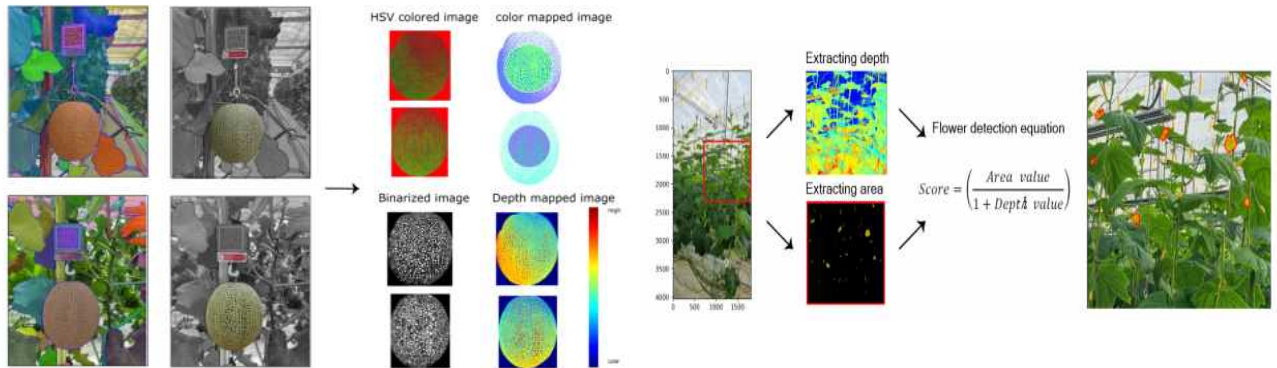
공개하여 많은 학생 및 연구자들이 어려움 없이 활용해볼 수 있도록 공유하였으며, 농산  
업에 컴퓨터 비전이 효과적으로 적용되기 위한 방향을 고찰하였다.



컴퓨터 비전을 이용한 과채류  
마스크 추출 방법(과실, 잎, 화방)

토마토 검출 및 숙기 판별  
알고리즘

수확기 파프리카 색상 분포  
시각화 및 분류



네트 멜론의 다양한 네트 품질 분석 방법 (왼쪽), 오이 작물의 화방 검출 프로세스 (오른쪽)

그림 3-1-46. 시설과채류 토마토, 오이, 파프리카 멜론의 표현형 특성화

- \* 이 연구의 결과로, 해당 컴퓨터 비전 기술들이 시설과채류의 생장 모니터링, 숙성 및 품질 평가 등에서의 유효성을 확인하였다. 농산업에서 컴퓨터 비전의 효과적 적용을 위해, 후속 연구자나 개발자들이 재배 생리와 연관된 지표를 기반으로 이 기술들을 보완할 경우, 실제 농업 현장 및 연구에서 널리 활용될 가능성이 크다.

□ (2공동)3차원 작물모델링 기반 시설과채류 작물 생육, 온실 환경 모델링

○ 3차원 작물 이미지 구축 방법

- 3차원 스캔은 기준점과 측정 대상의 거리를 측정하여 구조 정보를 획득하는 방식이며 이렇게 획득된 위치좌표의 집합을 점구름(Point cloud)이라 함(그림 3-2-1).

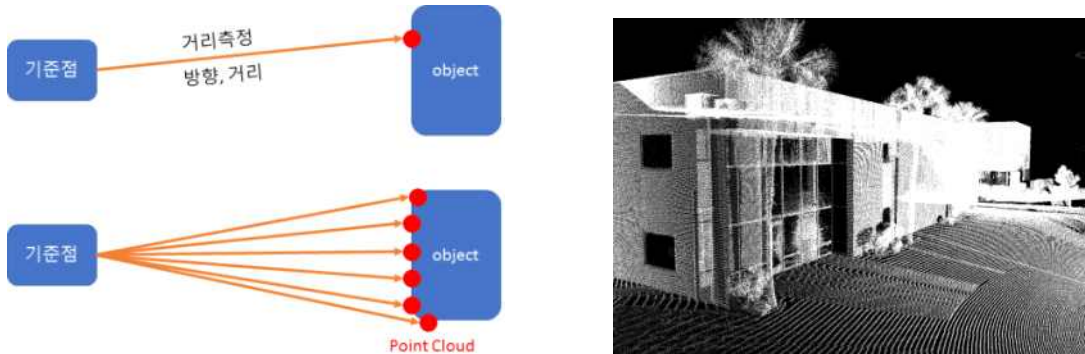


그림 3-2-1. 3차원 스캔의 기본 원리 도식(좌) 및 점구름 구조모델의 예(우)

- 3차원 스캔은 측정 방식에 따라 시간영역 반사측정(Time-Domain Reflectometry; TDR), 시차 측정(Parallax), 초점거리 측정(Focal ranging), 삼각측정(Triangulation), 구조광 방식(Structured light) 등이 있음.
- 식물은 복잡한 구조로 앞이 서로를 가리는 경우(occlusion)가 많아 측정이 어려우므로 측정의 위치자유도가 높은 핸드헬드 방식이 적절하며 가시광선을 흡수하여 확산-산란시키는 광학적 특성상 고성능의 스캐너를 필요로 함.
- 3차원 스캔은 광학적 측정이므로 재질 영향이 크며 재질에 따라 파우더나 프라이머 등으로 전처리 할 수 있음. 그러나 재배현장에서의 작물 측정은 비파괴적이어야 하므로 탈부착이 가능한 포지셔닝 타겟을 사용하였음(그림 3-2-2).



그림 3-2-2. 포지셔닝 타겟의 형태(왼쪽) 및 작물 부착 모습(오른쪽)

- 모든 측정 각도에서 연속적인 측정이 가능하도록 포지셔닝 타겟을 부착한 후, <그림 3-2-3>와 같이 아래에서 위로, 작물 전체를 돌아가면서 데이터가 비는 곳이 없도록 방향을 바꾸어 가면서 스캐닝을 수행함.
- 작물의 크기가 클 경우 여러 부분을 나누어 스캔한 후 후처리 과정에서 하나의 모델로 합쳐주는 기능을 이용할 수 있음.
- 스캔 시 대상 작물 외의 주변 부분이 같이 스캔되며 흔들림에 의한 중첩 및 중복 데이터가 존재할 수 있으므로 스캔 후 제거하는 과정이 필요함.





그림 3-2-3. 함안 시설원에연구소 온실 내 파프리카 개체 스캐닝 예시

- 잘못 스캔되거나 중복된 데이터들은 아래 <그림 3-2-4>와 같이 작은 조각으로 존재하므로, 수작업 또는 스캔 소프트웨어 상의 자동 인식기능으로 제거할 수 있음.



그림 3-2-4. 원본 스캔 데이터의 불필요한 데이터 예시

- 3차원 스캔 과정에서 최대한 주의를 기울여더라도 작물이 크고 복잡한 구조를 가지고 있기 때문에 많은 경우 측정된 데이터 상에 불완전한 부분이 존재함.
- 대부분의 스캔 소프트웨어에서 이를 자동으로 인식하여 보완하는 기능이 지원되나 일반적으로 3차원 스캔은 식물체에 비해 보다 단순한 구조를 가지는 산업용 부품에 최적화되어 있어 식물에 적용할 경우 오히려 데이터가 손상되는 경우가 발생할 수 있음.
- 3차원 스캔 된 작물의 구조 데이터에서 개별 부위를 별도로 분리하여 구조를 단순화시킨 후 자동 보완기능을 사용할 경우 유효하게 사용할 수 있음.

#### ○ 파프리카 3차원 구조 모델

- 파프리카의 3차원 구조 모델 구축은 경상남도 함안군의 실증 농가에서 재배된 지나 품종 파프리카를 대상으로 수행하였음.
- 파프리카는 2200평 규모의 등근지붕형 비닐 온실에서 재배되었으며, 5구 코코피트 슬라브에 2021년 7월 22일, 2022년 7월 18일에 정식하였음.
- 2021년 10월 18일부터 12월 13일까지 총 세 번의 생육 단계에 걸쳐 다섯 개체를 대상

으로 파프리카의 3차원 구조 모델을 구축하였으며, 해당 생육 단계는 정식 후 각각 13, 16, 21주차였음.

- 2022년 8월 2일부터 9월 21일까지 총 세 번의 생육 단계에 걸쳐 다섯 개체를 대상으로 파프리카의 3차원 구조 모델을 구축하였으며, 해당 생육 단계는 정식 후 각각 2, 5, 8주차였음.
- 3차원 스캐닝을 통해 얻은 스캔 메쉬는 역설계 소프트웨어(Geomagic Design X)을 이용하여 수정하였으며 추후 광추적 시뮬레이션이 가능하도록 3차원 파라메트릭 모델로 변환되었음.



그림 3-2-5. 정식 후 2주차(2022. 8. 2.)의 파프리카 3차원 구조 모델



그림 3-2-6. 정식 후 5주차(2022. 9. 1.)의 파프리카 3차원 구조 모델



그림 3-2-7. 정식 후 8주차(2022. 9. 21.)의 파프리카 3차원 구조 모델



그림 3-2-8. 정식 후 13주차(2021.10.18.)의 파프리카 3차원 구조 모델



그림 3-2-9. 정식 후 16주차(2021.11.08.)의 파프리카 3차원 구조 모델



그림 3-2-10. 정식 후 21주차(2021. 12. 13.)의 파프리카 3차원 구조 모델

○ 토마토 3차원 구조 모델

- 토마토의 3차원 구조 모델 구축은 충청남도 논산시의 실증 농가에서 재배된 데프니스 품종 토마토를 대상으로 수행하였음.
- 토마토는 2500평 규모의 벤로형 유리 온실에서 재배되었으며, 3구 암면 슬라브에 2021년 8월 24일, 2022년 8월 22일에 정식하였음.
- 2021년 10월 20일부터 12월 22일까지 총 세 번의 생육 단계에 걸쳐 다섯 개체를 대상으로 토마토의 3차원 구조 모델을 구축하였으며, 해당 생육 단계는 정식 후 각각 8, 12, 16주차였음.
- 2022년 9월 6일부터 9월 19일까지 총 두 번의 생육 단계에 걸쳐 다섯 개체를 대상으로 토마토의 3차원 구조 모델을 구축하였으며, 해당 생육 단계는 정식 후 각각 2, 4주차였음(스캔 데이터 저장 과정 중 정식 후 2주차의 토마토 3차원 구조 모델 1개체가 유실되었음).
- 3차원 스캐닝을 통해 얻은 스캔 메쉬는 역설계 소프트웨어(Geomagic Design X)을 이용하여 수정하였으며 추후 광추적 시뮬레이션이 가능하도록 3차원 파라메트릭 모델로 변환되었음.



그림 3-2-11. 정식 후 2주차(2022. 9. 6.)의 토마토 3차원 구조 모델



그림 3-2-12. 정식 후 4주차(2022. 9. 19.)의 토마토 3차원 구조 모델



그림 3-2-13. 정식 후 8주차(2021.10.20.)의 토마토 3차원 구조 모델



그림 3-2-14. 정식 후 12주차(2021.11.24.)의 토마토 3차원 구조 모델



그림 3-2-15. 정식 후 16주차(2021. 12. 22.)의 토마토 3차원 구조 모델

○ 오이 3차원 구조 모델

- 오이의 3차원 구조 모델 구축은 경상북도 상주시의 실증 농가에서 재배된 한강맛(흑침계) 품종 오이를 대상으로 수행하였음.
- 오이는 3000평 규모의 둥근지붕형 비닐 온실에서 재배되었으며, 검은 비닐로 멀칭한 토양에 2021년 10월 15일 정식하였음.
- 2021년 11월 11일부터 12월 23일까지 총 네 번의 생육 단계에 걸쳐 다섯 개체를 대상으로 오이의 3차원 구조 모델을 구축하였으며, 해당 생육 단계는 정식 후 각각 4, 6, 8, 10주차였음.
- 3차원 스캐닝을 통해 얻은 스캔 메쉬는 역설계 소프트웨어(Geomagic Design X)을 이용하여 수정하였으며 추후 광추적 시뮬레이션이 가능하도록 3차원 파라메트릭 모델로 변환되었음.



그림 3-2-16. 정식 후 4주차(2021.11.11.)의 오이 3차원 구조 모델



그림 3-2-17. 정식 후 6주차(2021.11.25.)의 오이 3차원 구조 모델



그림 3-2-18. 정식 후 8주차(2021. 12. 9.)의 오이 3차원 구조 모델



그림 3-2-19. 정식 후 10주차(2021. 12. 23.)의 오이 3차원 구조 모델



- 케일 3차원 구조 모델

- \* 케일 3차원 구조 모델 구축은 서울대학교 소재 식물공장에서 재배된 만추콜라드 품종 케일을 대상으로 수행하였음.
- \* 케일은 2021년 7월 1일에 파종하여 식물공장 내 육묘실에서 4주의 육묘 기간을 거친 후 2021년 8월 2일에 스펀지 큐브에 정식하였음.
- \* 케일 3차원 구조 모델 구축은 2021년 8월 16일과 8월 24일, 8월 30일, 9월 8일 네 차례에 걸쳐 수행하였으며, 해당 시기는 정식 후 각각 15, 23, 29, 38일 후였음.
- \* 3차원 스캐닝을 통해 얻은 스캔 메쉬는 역설계 소프트웨어(Geomagic Design X)을 이용하여 수정하였으며 추후 광추적 시뮬레이션이 가능하도록 3차원 파라메트릭 모델로 변환되었음.



그림 3-2-20. 정식 15일 후(2021.8.16.)의 케일 3차원 구조 모델



그림 3-2-21. 정식 23일 후(2021.8.24.)의 케일 3차원 구조 모델



그림 3-2-22. 정식 29일 후(2021.8.30.)의 케일 3차원 구조 모델



그림 3-2-23. 정식 38일 후(2021.9.8.)의 케일 3차원 구조 모델

○ 3차원 작물 생육 이미지 표준화

- 표준화 대상 작물 생육 지표 결정 및 작물 생육 단계별 생육 지표 분석

- \* 각 실증 농가에서 수집된 작물 생육 분석 결과에 따라 작목별로 구축된 3차원 구조 모델로부터 추출할 수 있는 작물 생육 지표를 결정하였음.
- \* 파프리카는 시설원예연구소(주관1)의 생육 분석 결과를 토대로 초장, 엽수, 엽면적, 마디 수, 마디 길이를 분석 대상으로 하였음,
- \* 토마토의 경우 공주대학교(공동1)의 생육 분석 결과를 토대로 총장, 엽수, 엽면적, 마디 수, 마디 길이, 엽장, 엽폭을 분석 대상으로 하였음.
- \* 오이의 경우 경북대학교(위탁2)의 생육 분석 결과를 토대로 초장, 엽수, 엽면적, 마디 수, 마디 길이, 엽장, 엽폭을 분석 대상으로 하였음.
- \* 케일의 경우 엽수, 엽장, 엽폭, 엽면적을 분석 대상으로 하였음.
- \* 작목별 생육 지표는 그림 3-2-20와 같이 3차원 작물 구조 모델로부터 계산되었음.



그림 3-2-24. 3차원 구조 모델을 이용한 파프리카, 토마토, 오이, 케일 생육 지표 분석 과정

표 3-2-1. 3차원 구조 모델을 통해 계산된 파프리카의 생육 단계(weeks after transplant, WAT)에 따른 생육 지표

생육 단계(WAT)	초장(m)	엽수	마디수	엽면적(m <sup>2</sup> )
2	0.10±0.01	7.60±1.14	3.00±0.00	0.02±0.00
5	0.46±0.02	24.00±2.24	11.00±1.58	0.27±0.04
8	0.79±0.05	32.80±1.30	15.20±0.84	0.38±0.03
13	0.85±0.17	35.80±10.71	16.75±4.27	0.54±0.20
16	1.18±0.16	61.20±4.55	20.36±1.47	0.61±0.12
21	1.59±0.10	70.80±8.81	26.20±1.30	0.71±0.12

표 3-2-2. 3차원 구조 모델을 통해 계산된 토마토의 생육 단계(weeks after transplant, WAT)에 따른 생육 지표

생육 단계(WAT)	초장(m)	엽수	마디수	엽면적(m <sup>2</sup> )
2	1.13±0.04	13.00±0.82	14.50±0.58	0.20±0.02
4	1.65±0.03	18.00±2.24	19.20±2.28	0.39±0.07
8	2.49±0.11	20.00±1.87	26.67±2.49	0.76±0.13
12	3.59±0.40	17.80±1.48	33.73±1.98	0.72±0.07
16	4.57±0.07	15.60±1.34	48.20±2.28	0.77±0.08

표 3-2-3. 3차원 구조 모델을 통해 계산된 오이의 생육 단계(weeks after transplant, WAT)에 따른 생육 지표

생육 단계(WAT)	초장(m)	엽수	마디수	엽면적(m <sup>2</sup> )
4	0.53±0.04	7.60±0.89	6.40±0.89	0.28±0.03
6	1.16±0.03	14.0±0.71	12.4±0.55	0.71±0.02
8	1.88±0.08	18.20±0.84	21.20±0.84	1.05±0.04
10	1.81±0.03	17.20±0.84	27.20±0.71	0.84±0.05

표 3-2-4. 3차원 구조 모델을 통해 계산된 케일의 생육 단계(days after transplant, DAT)에 따른 생육 지표

생육 단계(DAT)	엽수	엽장(cm)	엽폭(cm)	엽면적(m <sup>2</sup> )
15	8.50±0.56	69.76±28.07	63.02±22.25	373.18±33.56
23	11.00±0.82	107.30±50.77	97.76±44.17	1157.07±246.29
29	13.50±0.58	151.62±49.12	128.47±42.01	2032.83±331.23
38	18.25±0.50	181.04±51.14	153.63±35.02	3395.26±233.40

○ 생육 단계별 3차원 작물 구조모델 DB 구축

- 각 실증농가에서 수집된 3차원 스캔 데이터를 기반으로 파프리카(6가지 생육 단계, 총 30 개체), 토마토(5가지 생육 단계, 총 24 개체), 오이(4가지 생육 단계, 총 20 개체), 케일(4가지 생육 단계, 총 16개체)에 대한 3차원 작물 구조모델 DB를 구축하였음.
- 작목별 생육 단계에 따른 생육지표 추출 과정에서 구축된 3차원 구조모델을 엽, 줄기, 과실, 꽃 등 각 기관으로 분류한 3차원 구조모델 DB를 구축하였음.

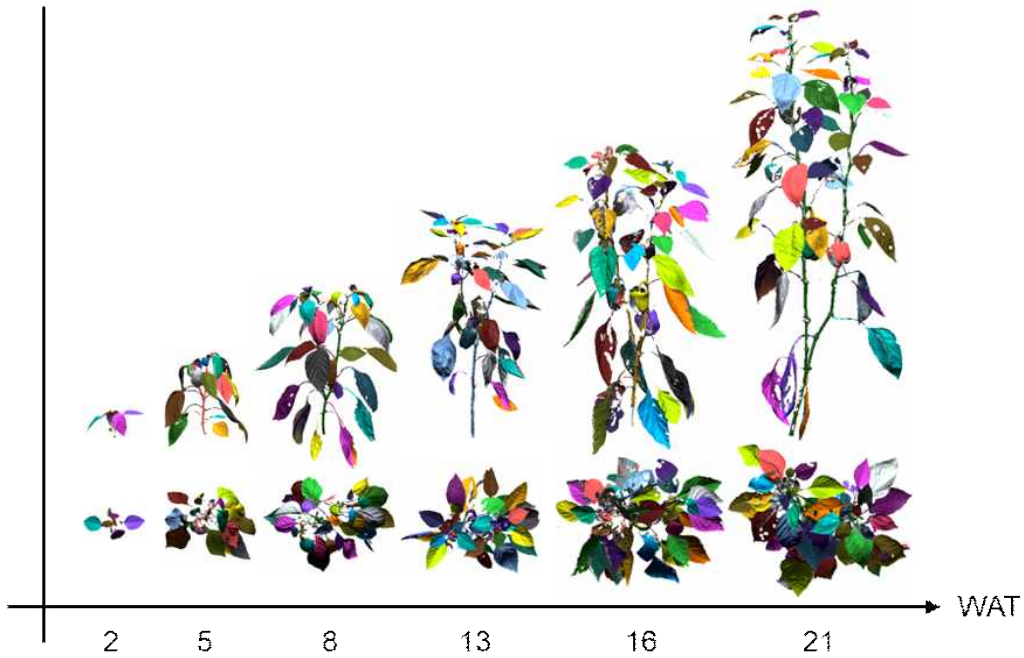


그림 3-2-25. 수집된 3차원 스캔 데이터로부터 구축된 파프리카의 생육 단계에 따른 기관별 구조모델

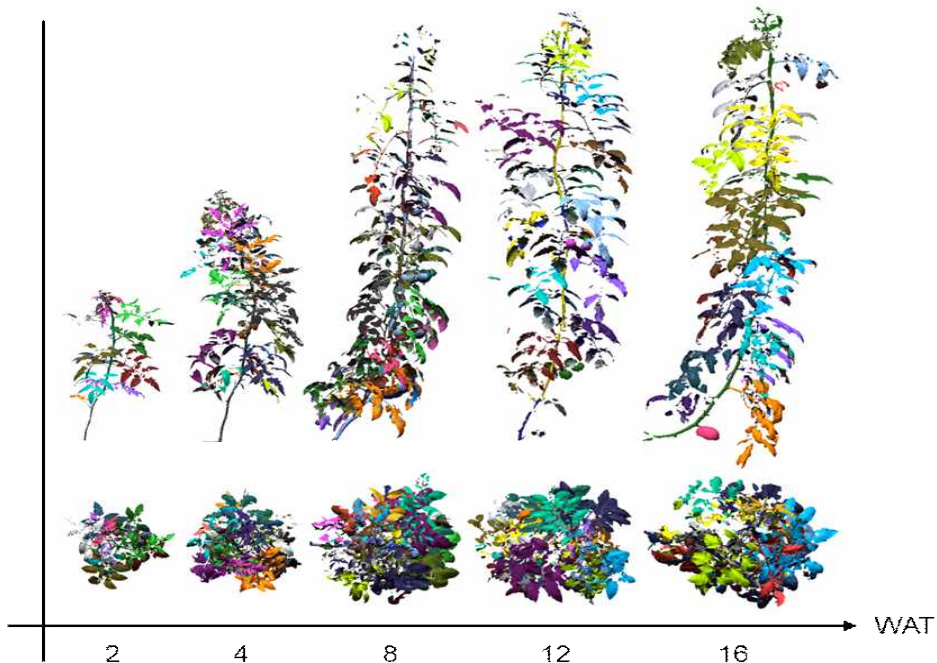


그림 3-2-26. 수집된 3차원 스캔 데이터로부터 구축된 토마토의 생육 단계에 따른 기관별 구조모델

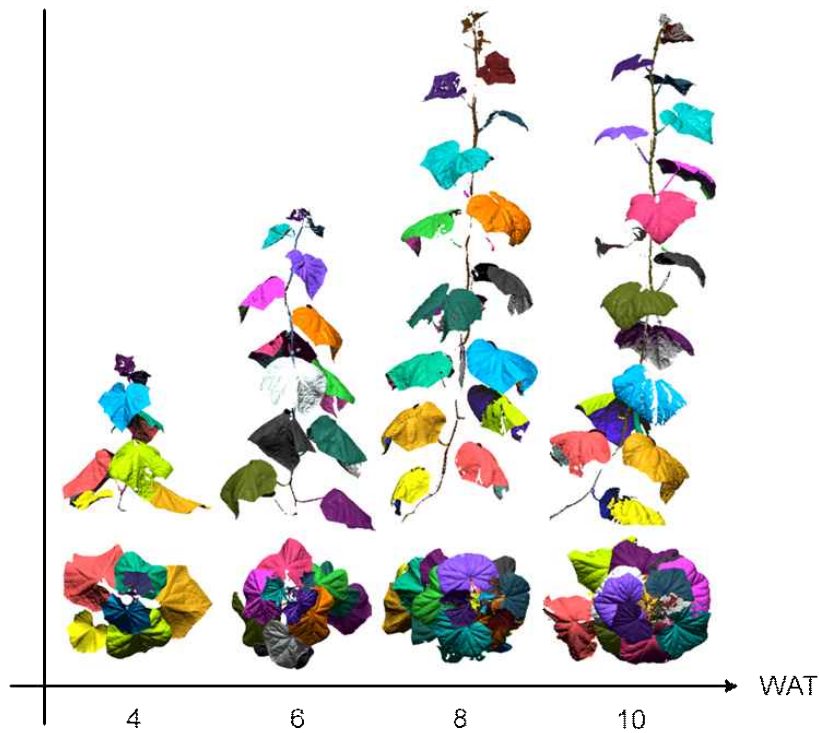


그림 3-2-27. 수집된 3차원 스캔 데이터로부터 구축된 오이의 생육 단계에 따른 기관별 구조모델

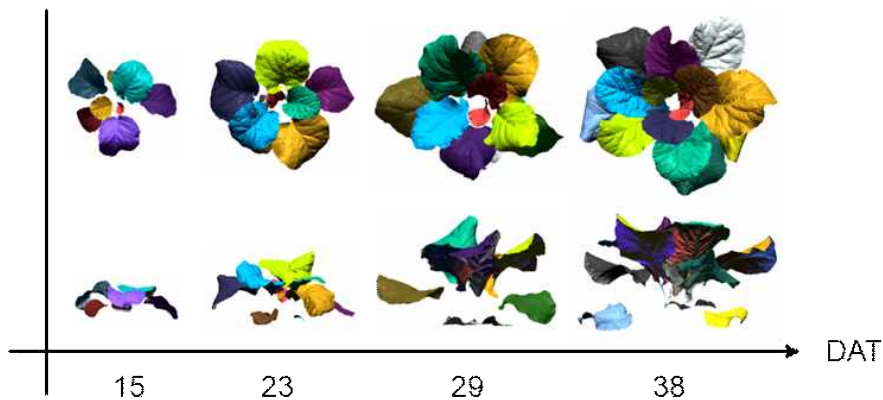


그림 3-2-28. 수집된 3차원 스캔 데이터로부터 구축된 케일의 생육 단계에 따른 기관별 구조모델

○ 작물 생육 단계별 광합성 능력 측정 및 모델링

- 작물 광합성 모델링 과정

- \* 생육 단계에 따른 작목별 광합성 능력의 변화를 모델링하기 위해 작목별 엽 광합성 속도를 측정하였음.
- \* 엽 광합성 속도 측정에는 휴대용 광합성 측정기(LI-6400XT&LI-6800, LI-COR, Lincoln, NE, USA)를 이용하였으며, 완전히 전개된 상단부와 중단부 엽을 3반복 측정하였음.
- \* LED 챔버를 이용하여  $1,800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 의 포화광 조건에서  $\text{CO}_2$  농도를 조절해 가며( $50, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 1200, 1400, 1800 \mu\text{mol mol}^{-1}$ ) A/Ci curve를 측정하였고, 이 때, LED 챔버 내부는 엽온  $25^\circ\text{C}$ , 상대습도 60-70%가 유지될 수 있도록 설정해 주었음.

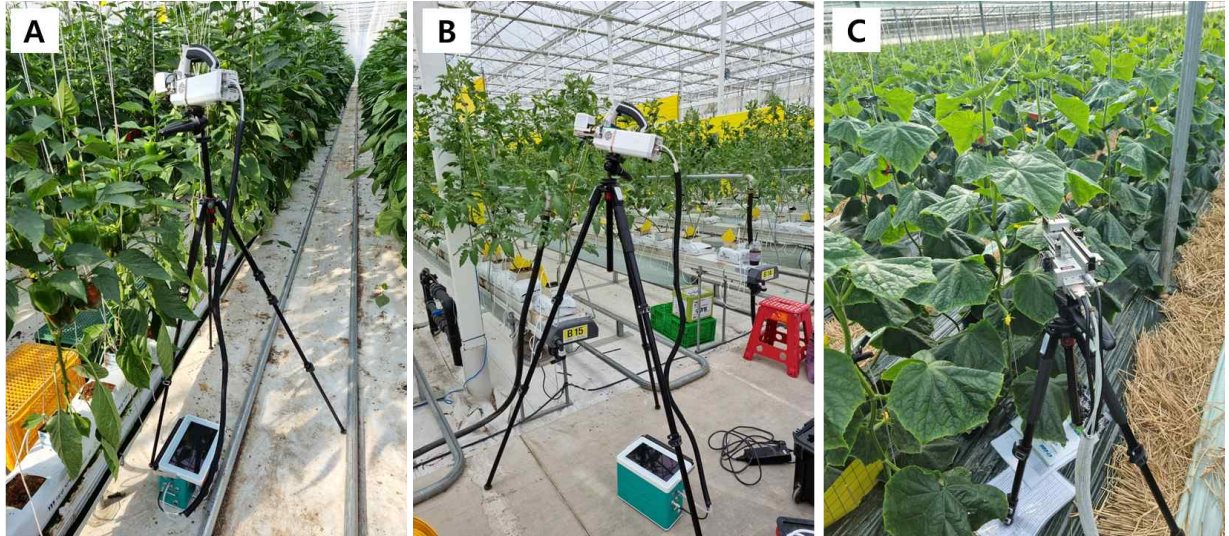


그림 3-2-29. 광합성 측정기를 이용한 파프리카(A), 토마토(B), 오이(C)의 엽 광합성 측정

- \* 이후, 측정된 엽 광합성 속도를 기반으로 작물의 생리·화학적 반응을 고려하여 개발된 Farquhar, von Caemmerer and Berry (FvCB) 모델을 이용하여 작목별, 생육 단계별 엽 광합성 능력을 모델링하였으며, 해당 모델 수식은 다음과 같음:

$$P = \min(A_c, A_j)$$

$$A_c = \left( \frac{V_c(C_i - \gamma^*)}{C_i + K_c \left(1 + \frac{O}{K_o}\right)} \right) - R_d$$

$$V_c = V_{cmax} \left( \frac{31 + \left( \frac{69}{1 + e^{-0.009 \times (PAR - 500)}} \right)}{100} \right)$$

$$A_j = \left( \frac{J(C_i - \gamma^*)}{4C_i + 8\gamma^*} \right) - R_d$$

$$J = \left( \frac{\alpha PAR + J_{max} - \sqrt{(\alpha PAR + J_{max})^2 - 4\theta J_{max} \alpha PAR}}{2\theta} \right)$$

- \* 이 때,  $P$ 는 엽 광합성 속도( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $A_c$ 와  $A_j$ 는 각각 Rubisco 제한구간 및 RuBP 재생 제한 구간에서의 광합성 속도( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $V_c$ 는 특정 광도에서의 카르복실화 능력( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $V_{cmax}$ 는 최대 카르복실화 용량( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $R_d$ 은 비광호흡 호흡률( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $J$ 는 특정 광도에서의 전자 수송 속도( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $J_{max}$ 는 최대 전자 수송 속도( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $PAR$ 은 광합성유효광량( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $C_i$ 는 엽육세포 내  $\text{CO}_2$  농도( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ),  $\Gamma^*$ 는  $\text{CO}_2$  보상점( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )을 의미함.
- \*  $\text{CO}_2$ 와  $\text{O}_2$ 농도에 대한 루비스코의 Michaelaelis-Menten 상수( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )를 의미하는  $K_c$ 와  $K_o$ 는 각각 406.1과 276.9  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ , 입사광 기준 광에너지 변환 효율인  $\alpha$ 는 0.42  $\text{mol mol}^{-1}$ ,  $J$ 의 빛 반응 곡률인  $\theta$ 는 0.25(단위없음)의 값을 이용하였음.

- \* 광합성 모델에 대한 회귀분석 및 모델 파라미터( $V_{cmax}$ ,  $J_{max}$ ,  $R_d$ ) 추정은 R software의 Plantecophys package(Duursma 등, 2015)를 이용하여 분석 및 계산하였음.

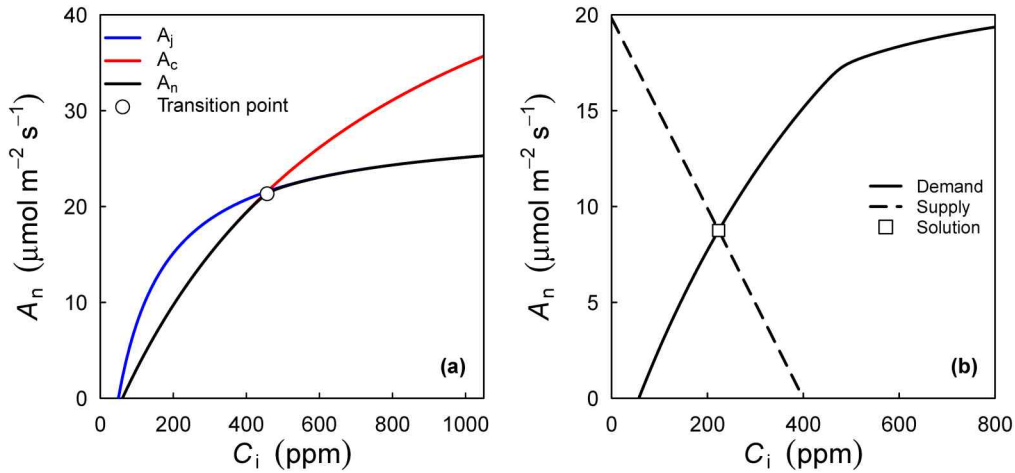


그림 3-2-30. Plantecophys package내 FvCB 모델 기반 엽 광합성 기본 모형(왼쪽)과 광합성의 공급과 수요 곡선의 교차점(오른쪽) (Duursma 등, 2015).

- 파프리카 엽 광합성 측정 및 모델링

- \* 파프리카의 엽 광합성 능력 측정은 정식 후 5, 8, 16, 21 주차에 대해 수행되었으며 측정된 엽 광합성 속도는 다음과 같았음(그림 3-2-31).
- \* 생육 단계별로 계산된 FvCB 모델 파라미터는 표 3-2-5와 같았으며, 해당 매개변수를 이용하여 계산된 파프리카의 생육 단계별 엽 광합성 능력을 실측값과 1대1 비교한 결과  $r^2=0.9694$ 로 높은 일치도를 보이는 것을 확인할 수 있었음 (그림 3-2-32).

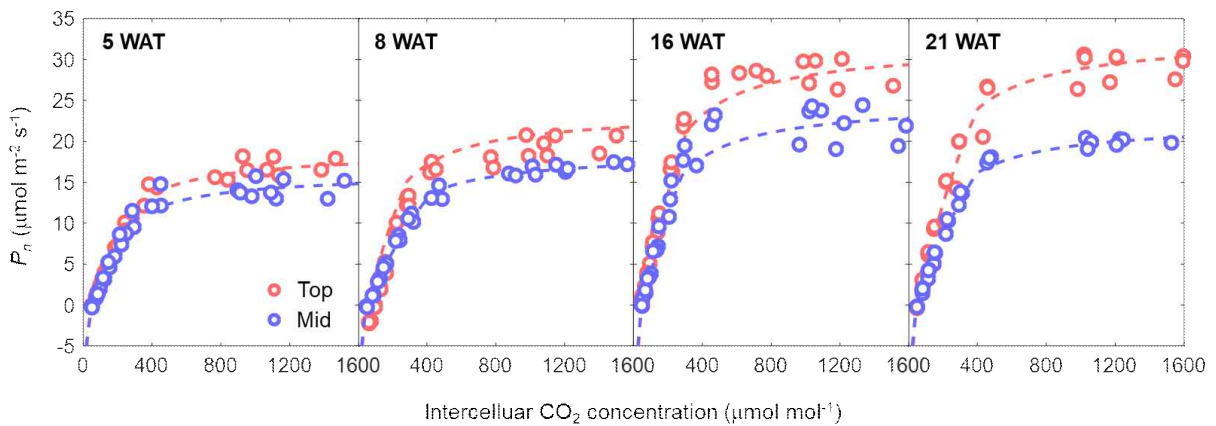


그림 3-2-31. 파프리카의 생육 단계별 엽위별 광합성 능력 변화

표 3-2-5. 파프리카 엽의 생육 단계별 최대 광합성 속도( $P_{max}$ ) 및 FvCB 모델 파라미터( $V_{cmax}$ ,  $J_{max}$ ).

생육 단계(주차)	상단부			중단부		
	$P_{max}$	$V_{cmax}$	$J_{max}$	$P_{max}$	$V_{cmax}$	$J_{max}$
5	16.8±0.6	46.7±1.9	81.7±1.6	14.0±0.7	45.9±3.4	70.4±2.3
8	19.7±0.6	68.4±3.0	102.9±4.4	17.1±0.2	44.5±1.3	80.9±1.2
16	28.3±1.4	87.4±5.4	140.1±4.0	22.0±1.4	71.9±7.3	108.1±4.6
21	29.3±0.9	79.0±5.0	144.7±4.6	20.1±0.1	54.9±1.6	97.0±1.4

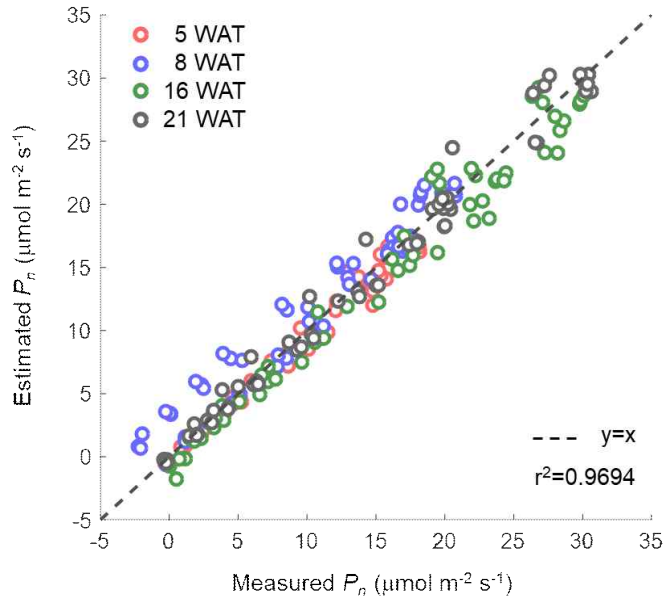


그림 3-2-32. FvCB 모델을 이용하여 계산된 파프리카의 생육 단계별 엽 광합성 속도 예측값과 실측값의 1대1 비교

- 토마토 엽 광합성 측정 및 모델링

- \* 토마토의 엽 광합성 능력 측정은 정식 후 4, 8, 12, 16 주차에 대해 수행되었으며 측정된 엽 광합성 속도는 다음과 같았음(그림 3-2-33).
- \* 생육 단계별로 계산된 FvCB 모델 파라미터는 표 3-2-6과 같았으며, 해당 매개변수를 이용하여 계산된 파프리카의 생육 단계별 엽 광합성 능력을 실측값과 1대1 비교한 결과  $r^2=0.9878$ 로 높은 일치도를 보이는 것을 확인할 수 있었음(그림 3-2-34).

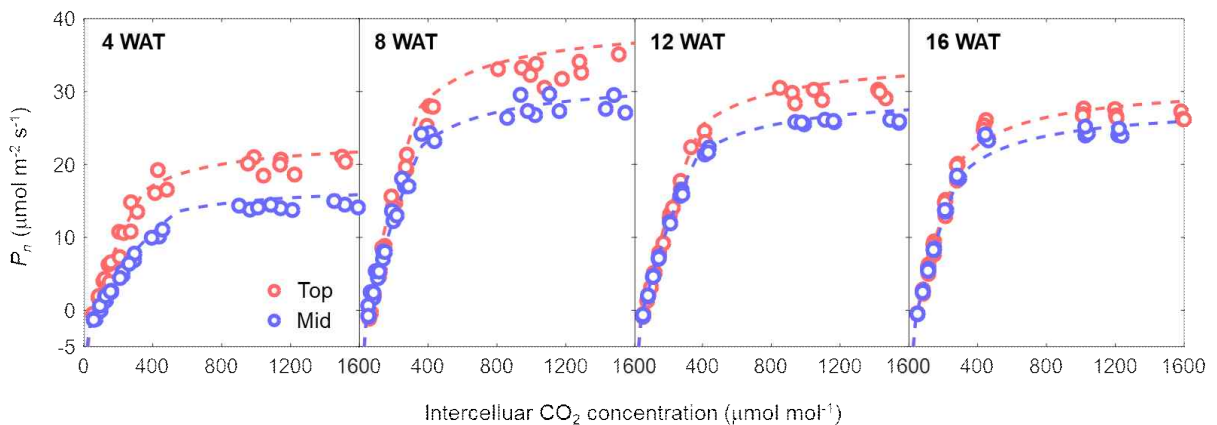


그림 3-2-33. 토마토의 생육 단계별 엽위별 광합성 능력 변화

표 3-2-6. 토마토 엽의 생육 단계별 최대 광합성 속도( $P_{max}$ ) 및 FvCB 모델 파라미터( $V_{cmax}$ ,  $J_{max}$ ).

생육 단계(주차)	상단부			중단부		
	$P_{max}$	$V_{cmax}$	$J_{max}$	$P_{max}$	$V_{cmax}$	$J_{max}$
4	20.2±0.3	61.5±4.1	102.7±3.5	14.5±0.3	37.1±0.8	75.2±2.1
8	34.0±0.7	101.4±3.6	177.8±3.3	28.1±0.7	80.6±3.9	140.4±3.3
12	29.9±0.1	84.6±2.2	154.3±2.1	26.0±0.1	74.8±1.1	130.7±1.0
16	27.1±0.3	84.9±4.1	136.6±3.4	24.5±0.3	79.6±5.1	122.9±3.4



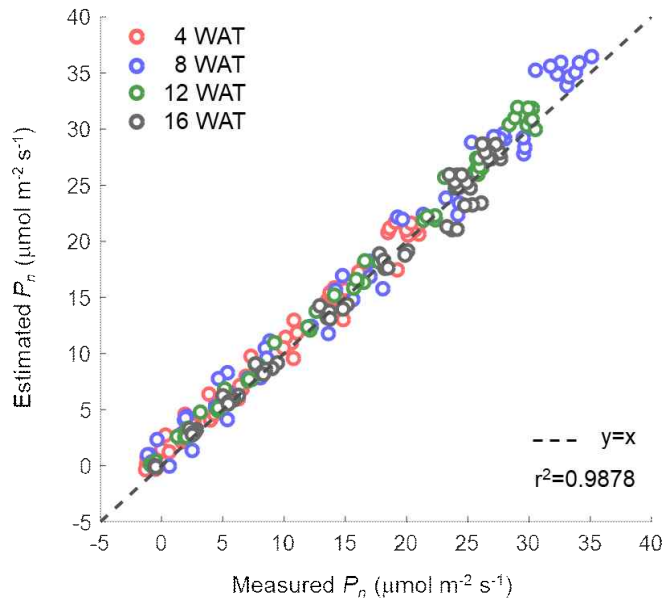


그림 3-2-34. FvCB 모델을 이용하여 계산된 토마토의 생육 단계별 엽 광합성 속도 예측값과 실측값의 1대1 비교

- 오이 엽 광합성 측정 및 모델링

- \* 오이의 엽 광합성 능력 측정은 정식 후 5, 8, 16, 21 주차에 대해 수행되었으며 측정된 엽 광합성 속도는 다음과 같았음(그림 3-2-35).
- \* 생육 단계별로 계산된 FvCB 모델 파라미터는 표 3-2-7과 같았으며, 해당 매개변수를 이용하여 계산된 파프리카의 생육 단계별 엽 광합성 능력을 실측값과 1대1 비교한 결과  $r^2=0.9881$ 로 높은 일치도를 보이는 것을 확인할 수 있었음(그림 3-2-36).

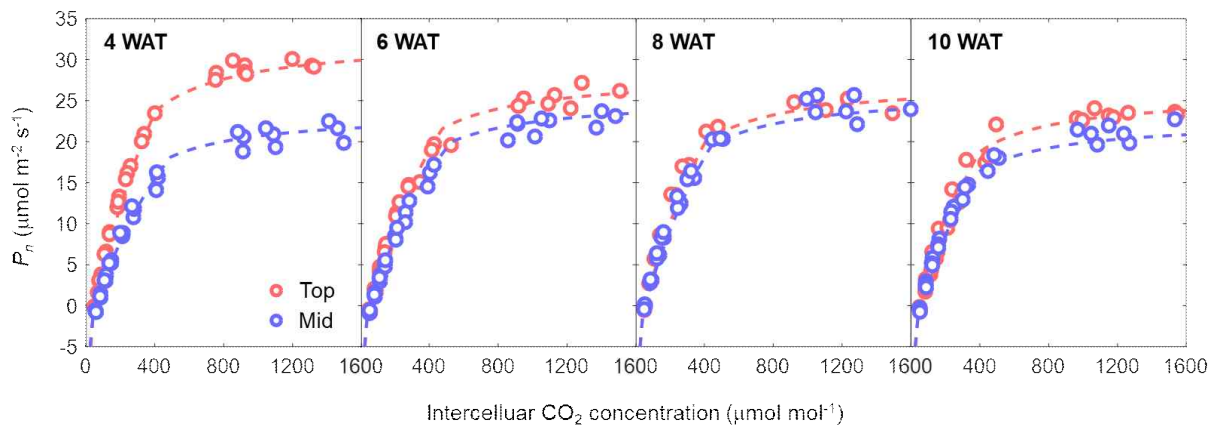


그림 3-2-35. 오이의 생육 단계별 엽위별 광합성 능력 변화

표 3-2-7. 오이 엽의 생육 단계별 최대 광합성 속도( $P_{max}$ ) 및 FvCB 모델 파라미터( $V_{cmax}$ ,  $J_{max}$ ).

생육 단계(주차)	상단부			중단부		
	$P_{max}$	$V_{cmax}$	$J_{max}$	$P_{max}$	$V_{cmax}$	$J_{max}$
4	29.5±0.3	78.8±1.6	142.9±1.6	23.0±1.0	52.4±1.8	102.7±2.1
6	26.0±0.7	63.2±2.2	123.5±2.5	22.9±0.6	54.6±1.5	111.2±1.7
8	25.2±1.0	66.1±3.2	119.5±3.0	24.1±1.5	60.7±3.1	113.7±3.0
10	23.4±0.1	63.3±3.2	112.8±2.9	21.1±0.9	56.9±2.2	98.6±2.0

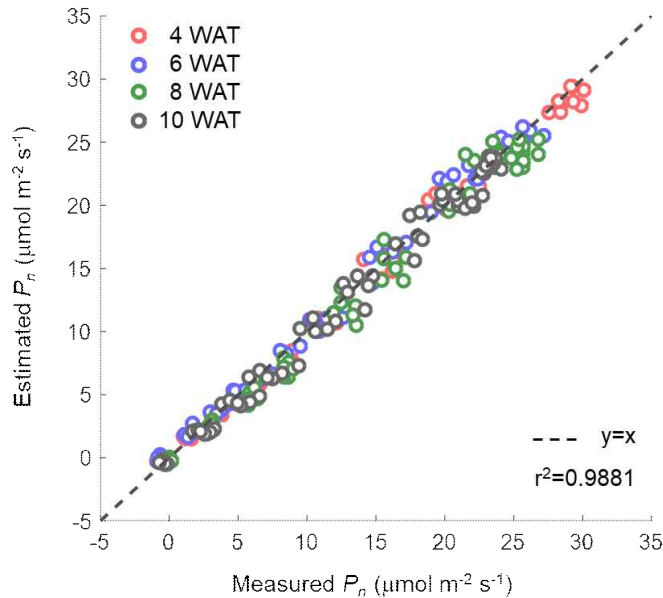


그림 3-2-36. FvCB 모델을 이용하여 계산된 오이의 생육 단계별 엽 광합성 속도 예측값과 실측값의 1대1 비교

- 작물 수직 광합성 능력 모델의 3차원 수광해석 적용

- \* 3차원 수광해석 과정에서 작물 캐노피 내 엽령에 대한 엽 광합성 능력을 연속적으로 표현하기 위해 FvCB 모델 매개변수인  $V_{cmax}$ 와  $J_{max}$ 를 엽령에 따른 Rubisco 함량을 나타내는 다음 로지스틱 커브에 피팅하였음(Irving and Robinson, 2006).

$$FvCB_{Aleaf} = de^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln \frac{t}{g}}{f} \right)^2}$$

- \* d는 캐노피 내 FvCB 모델 파라미터  $V_{cmax}$ 와  $J_{max}$ 의 최댓값(상단부 엽에서 측정된 광합성 능력), t는 엽령(일), g는 d에서의 엽령, f는 곡선 폭의 측정값(단위 없음)을 의미함.
- \* 본 연구에서 측정된 파프리카, 토마토, 오이 세 작목 모두 온실 내에서 수직으로 유인하여 재배하는 작형을 가지기 때문에 해당 분석 과정에서 앞의 수직 위치가 엽령을 대변한다고 가정하였음.

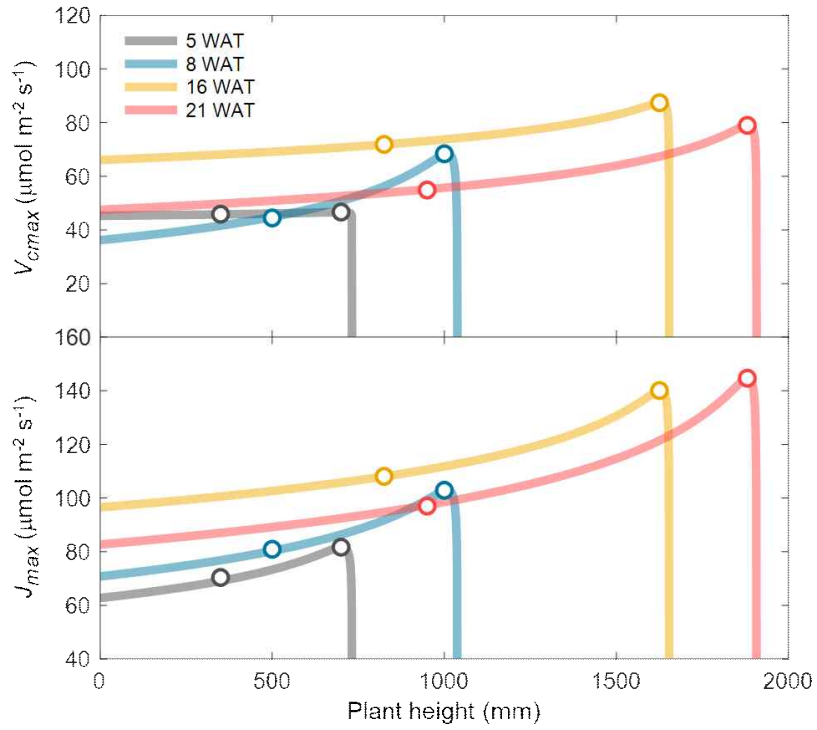


그림 3-2-37. 파프리카의 생육 단계에 따른 엽위별 FvCB 파라미터( $V_{cmax}$ ,  $J_{max}$ )의 연속적 분포

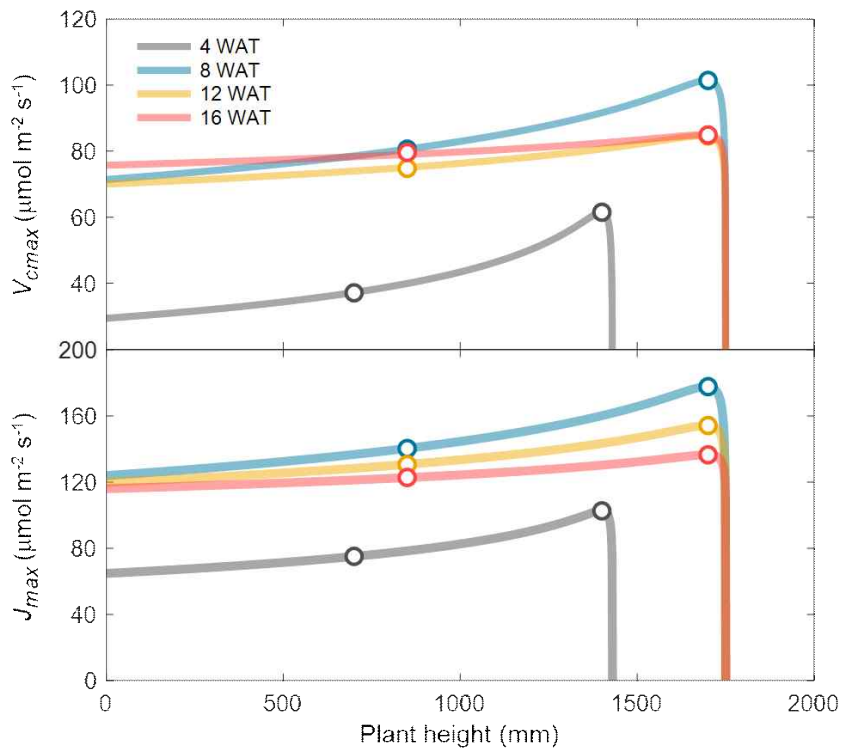


그림 3-2-38. 토마토의 생육 단계에 따른 엽위별 FvCB 파라미터( $V_{cmax}$ ,  $J_{max}$ )의 연속적 분포

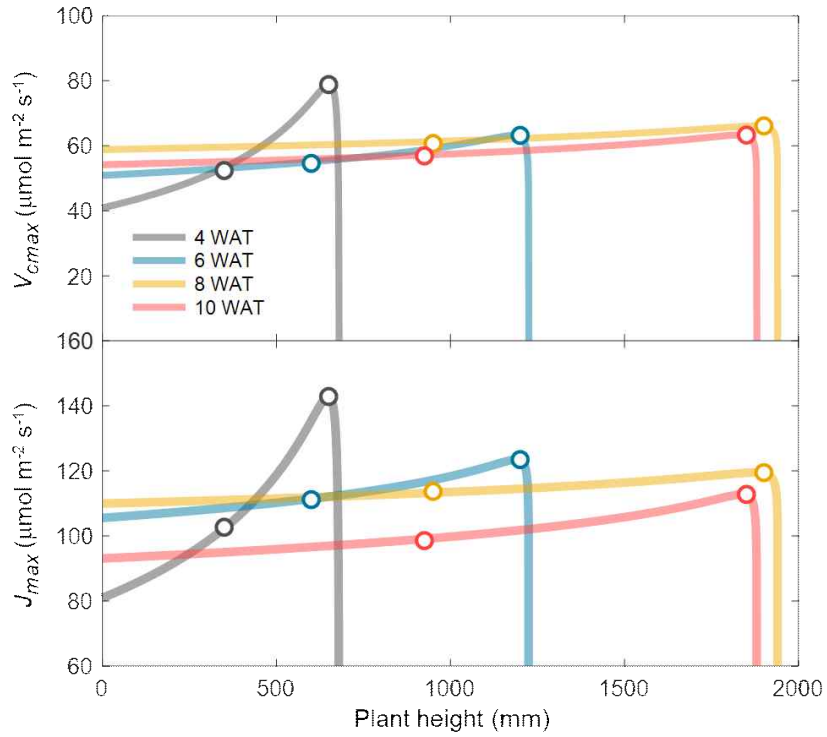


그림 3-2-39. 오이의 생육 단계에 따른 엽위별 FvCB 파라미터( $V_{cmax}$ ,  $J_{max}$ )의 연속적 분포

- 온도에 따른 FvCB 광합성 모델 매개변수의 변화 반영

- \* FvCB 모델 매개변수인  $V_{cmax}$ 와  $J_{max}$ 의 온도 의존성은 다음과 같이 변형 아레니우스 함수에 의해 표현하였음(Medlyn et al., 2002; Qian et al., 2012; Shin et al., 2021)

$$FvCB_{leaf} = FvCB_{25} \left( \frac{1 + \frac{S - H_d}{e^{(25+273.15)} R}}{\frac{S - H_d}{e^{(T_{leaf}+273.15)} R}} \right) e^{\frac{H_a(T_{leaf}-25)}{(25+273.15)RT_{leaf}}}$$

- \* S는 엔트로피 계수( $J K^{-1} mol^{-1}$ ),  $H_a$ 와  $H_d$ 는 각각 활성화 및 비활성화 에너지( $J mol^{-1}$ ), R은 기체 상수( $J K^{-1} mol^{-1}$ ),  $T_{leaf}$ 는 엽온( $^{\circ}C$ )을 의미함.
- \* 선행 연구를 바탕으로  $V_{cmax}$ 와  $J_{max}$ 의 활성화 에너지( $H_a$ )는 각각 91,185과 79,500  $J mol^{-1}$ , 비활성화 에너지( $H_d$ )는 각각 202,900와 201,000  $J mol^{-1}$ 로 설정하였고, 기체 상수 R과 엔트로피 계수 S는 각각 8.314  $J K^{-1} mol^{-1}$  및 650  $J K^{-1} mol^{-1}$ 로 설정하였음(Harley et al., 1992).

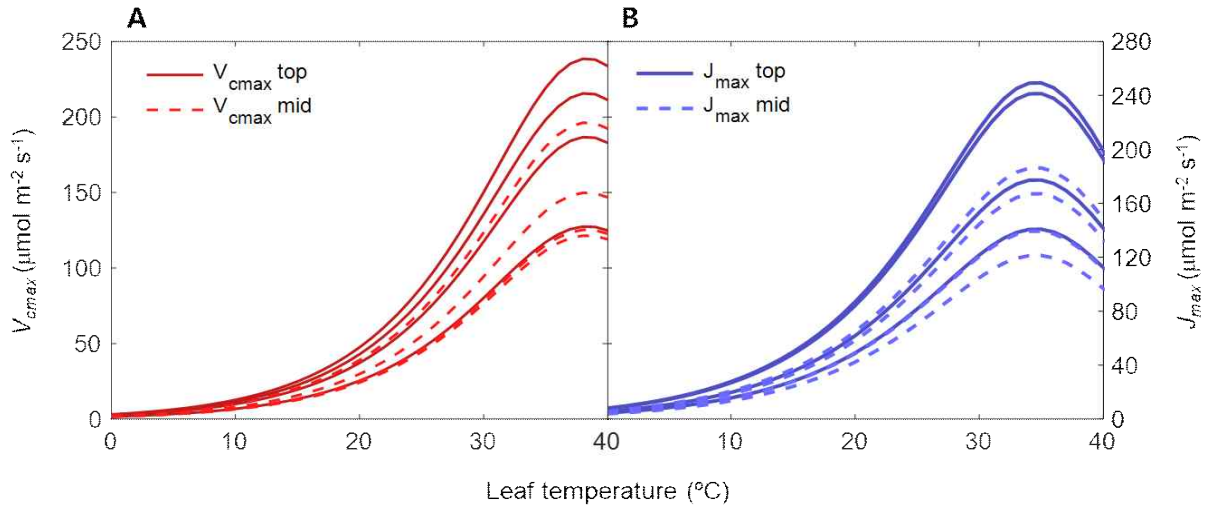


그림 3-2-40. 엽온에 따른 상단부, 중단부 엽의 FvCB 모델 파라미터( $V_{cmax}$ ,  $J_{max}$ ) 값의 변화(파프리카 기준)

\* 위와 마찬가지로  $CO_2$ 와  $O_2$ 의 Michaelis-Menten 상수( $K_c$ 와  $K_o$ ),  $CO_2$  보상점( $\Gamma^*$ ), 호흡률( $R_d$ )의 온도 의존성은 다음과 같이 표현하였음(Bernacchi 외, 2001; Medlyn 외, 2002).

$$K_c = 404.9e^{\frac{79430(T_{leaf}-25)}{(25+273.15)(T_{leaf}+25)R}}$$

$$K_o = 278.4e^{\frac{36380(T_{leaf}-25)}{(25+273.15)(T_{leaf}+25)R}}$$

$$\Gamma^* = 42.75e^{\frac{37830(T_{leaf}-25)}{(25+273.15)(T_{leaf}+25)R}}$$

$$R_d = e^{\frac{46390(T_{leaf}-25)}{(25+273.15)(T_{leaf}+25)R}}$$

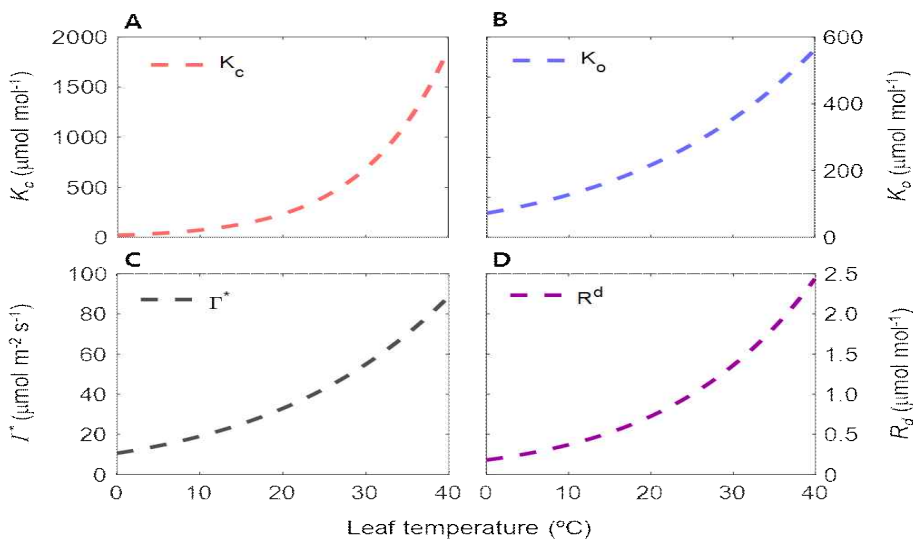


그림 3-2-41. 엽온에 따른  $CO_2$ 와  $O_2$ 의 Michaelis-Menten 상수( $K_c$ ,  $K_o$ ),  $CO_2$  보상점( $\Gamma^*$ ), 호흡률( $R_d$ )의 변화.

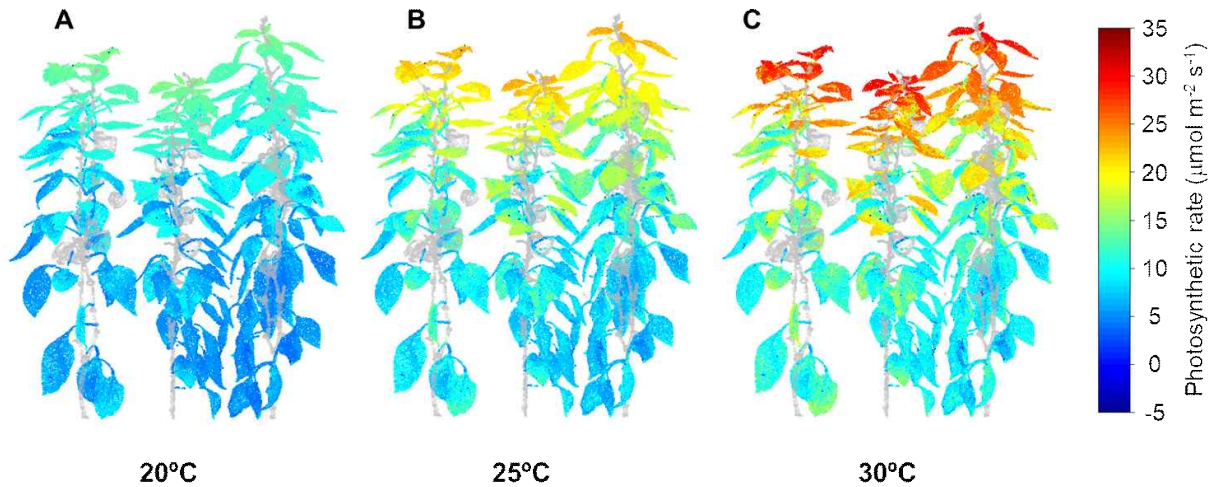


그림 3-2-42. 엽위별 광합성 능력 및 엽온을 반영한 광합성 분포 계산  
(정식 21주차 파프리카, CO<sub>2</sub> 농도 400 μmol mol<sup>-1</sup>)

○ 3차원 수광해석을 이용한 균락 수광 및 광합성 예측

- 작물 생육 모델 연동을 위한 3차원 수광해석

- \* 환경 변수에 따른 정확한 작물 균락 수광 및 광합성량 계산을 위해 파프리카, 토마토, 오이의 생육 단계별 3차원 수광해석을 수행하였음.
- \* 각 작목별, 생육 단계별로 실제 작물의 재배 형태와 동일하게 CAD 소프트웨어의 3차원 공간 내에 3차원 작물 모델을 배치한 후 수광해석을 진행하였음.
- \* 3차원 수광해석 시뮬레이션의 기본 설정 중 위도와 경도는 작목별 3차원 스캔이 수행된 농가의 위치와 동일하게 설정하였고, 날짜는 각 3차원 작물 스캔 모델 구축 시기, 시간은 일출부터 일몰까지 한 시간 간격으로 수행하였음.
- \* 작물, 온실 피복재와 구조물, 온실 바닥, 재배 배지의 광학적 특성을 적용해 주었고, 광추적 시뮬레이션은 Monte carlo 법칙 기반으로 랜덤하게 생성된 10억 개의 광선이 3차원 공간 내로 조사되는 1 giga-rays로 수행되었음.

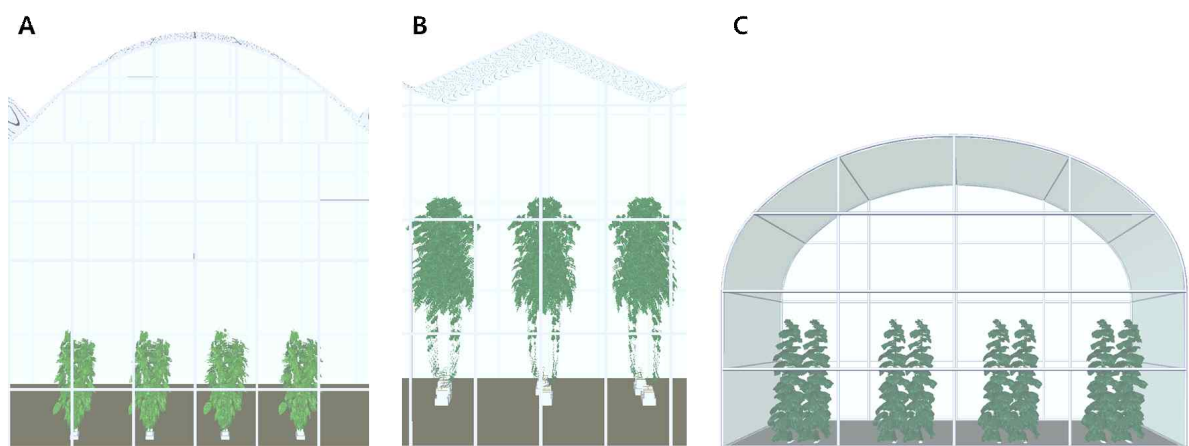


그림 3-2-43. 파프리카(A), 토마토(B), 오이(C)의 3차원 수광해석 시뮬레이션  
(각각 정식 후 21, 16, 10 주차)

- \* 광추적 시뮬레이션 결과 대상 3차원 작물 모델의 표면에 해당하는 3차원 좌표(x, y, z)와 각 좌표에 해당하는 수광량(W m<sup>-2</sup>)을 얻을 수 있음.

- \* FvCB 광합성 모델과의 연계를 위해 태양광 스펙트럼의 변환 계수를 적용하여 수광량 단위를 PPFD( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )로 수정해 주었음.
- \* 이후 해당 시뮬레이션 시점(작물 3차원 스캔 수행 시점)에서의 온실 환경 변수(온도, 습도,  $\text{CO}_2$  농도)와 작물 표면 수광량을 입력 변수로 하여 선행 분석된 작목별, 생육 단계별 FvCB 광합성 모델 파라미터를 적용하여 3차원 광합성 속도 분포를 계산하였음.

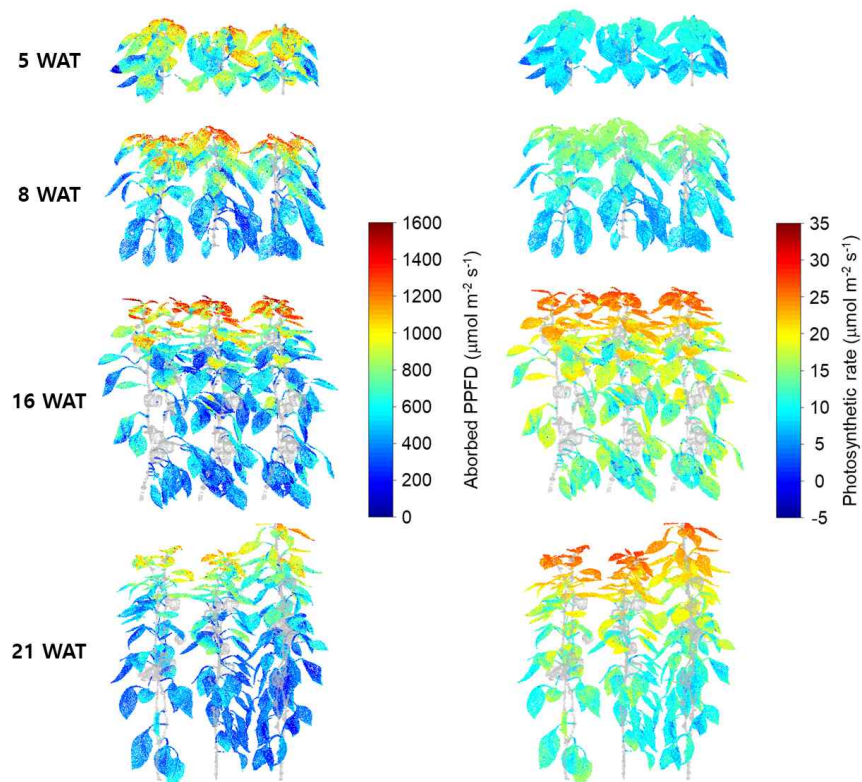


그림 3-2-44. 파프리카의 생육 단계별 3차원 수광 분포(왼쪽)및 광합성 분포(오른쪽) 계산 결과(정오 기준)

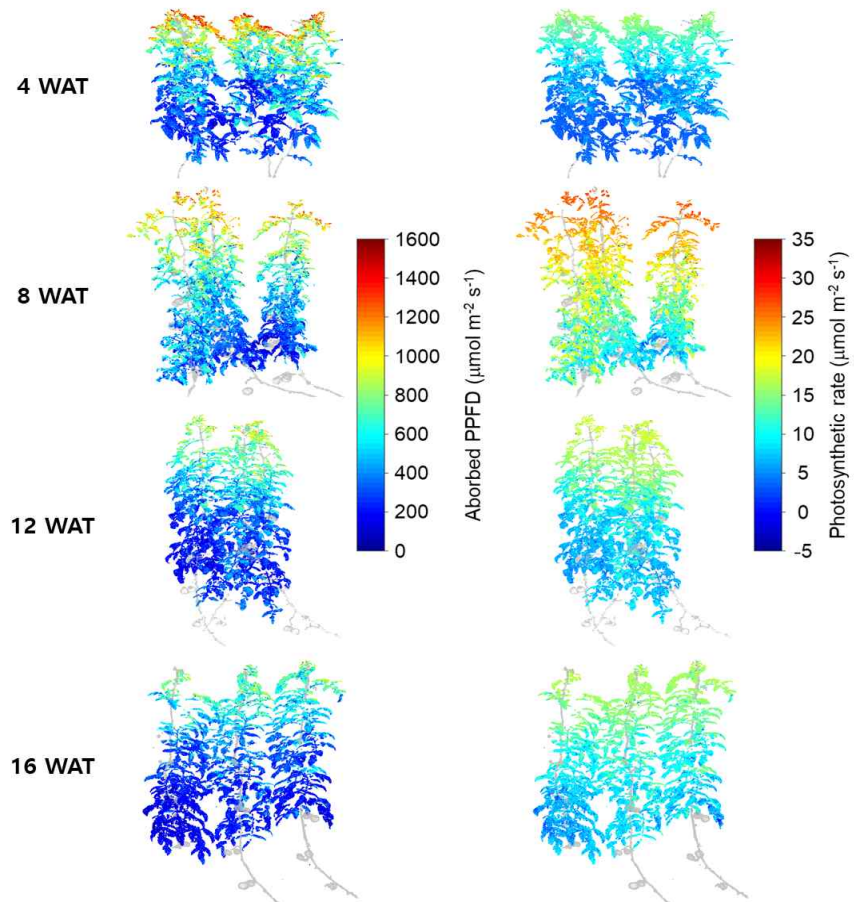


그림 3-2-45. 토마토의 생육 단계별 3차원 수광 분포(왼쪽) 및 광합성 분포(오른쪽) 계산 결과(정오 기준)

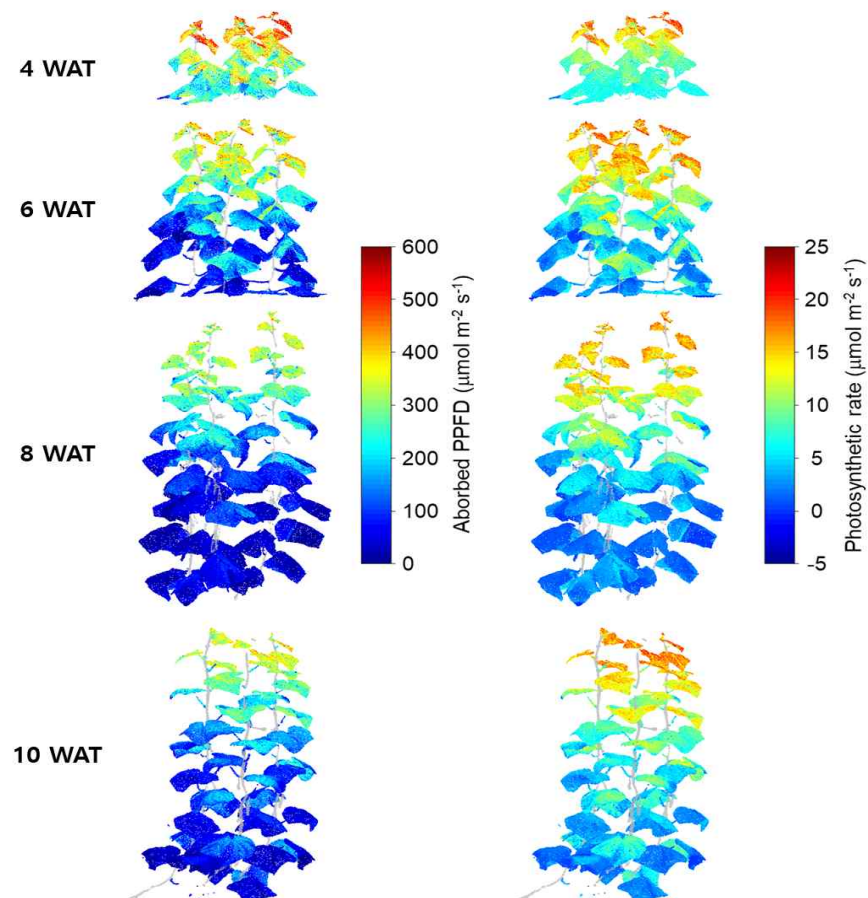


그림 3-2-46. 오이의 생육 단계별 3차원 수광 분포(왼쪽) 및 광합성 분포(오른쪽) 계산 결과(정오 기준)



- 3차원 수광해석 기반 작목별 군락 광합성량 계산 과정

- \* 3차원 수광해석 결과를 바탕으로 전체 작기에 걸친 작물 군락 수광량 및 광합성량을 계산하기 위해 군락 광합성량, 호흡량, 온실 내 기온, 광도, 상대습도, CO<sub>2</sub> 농도를 이용하여 아래 수식을 통해 작물 군락 광합성량을 계산하였음.

$$P_{crop} = P_{leaf}LAI$$

$$P_{leaf} = \min(A_c, A_j) - R_d$$

- \* P<sub>crop</sub>은 단위 면적당 군락 광합성 속도(μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), P<sub>leaf</sub>는 단위 엽면적당 광합성 속도(μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), A<sub>c</sub>와 A<sub>j</sub>는 각각 Rubisco 제한구간 및 RuBP 재생 제한구간에 서의 광합성 속도(μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), R<sub>d</sub>는 비광호흡 호흡률(μmol CO<sub>2</sub> m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>), LAI는 엽면적지수(단위 없음)을 의미함.

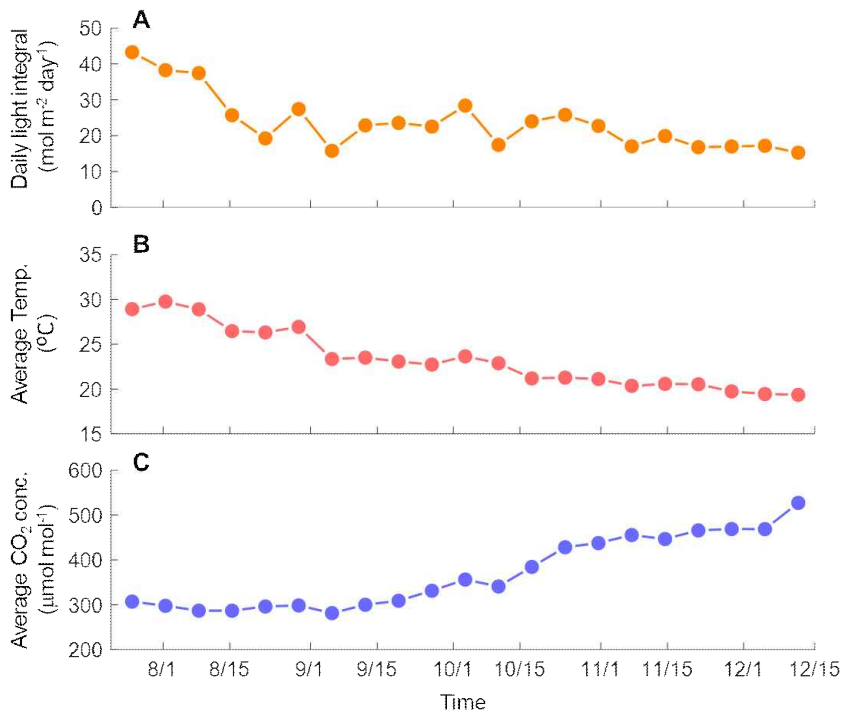


그림 3-2-47. 2021.7.22.부터 2021.12.15까지 파프리카 농가의 평균 환경 데이터(A: 광도, B:온도, C:CO<sub>2</sub>농도)

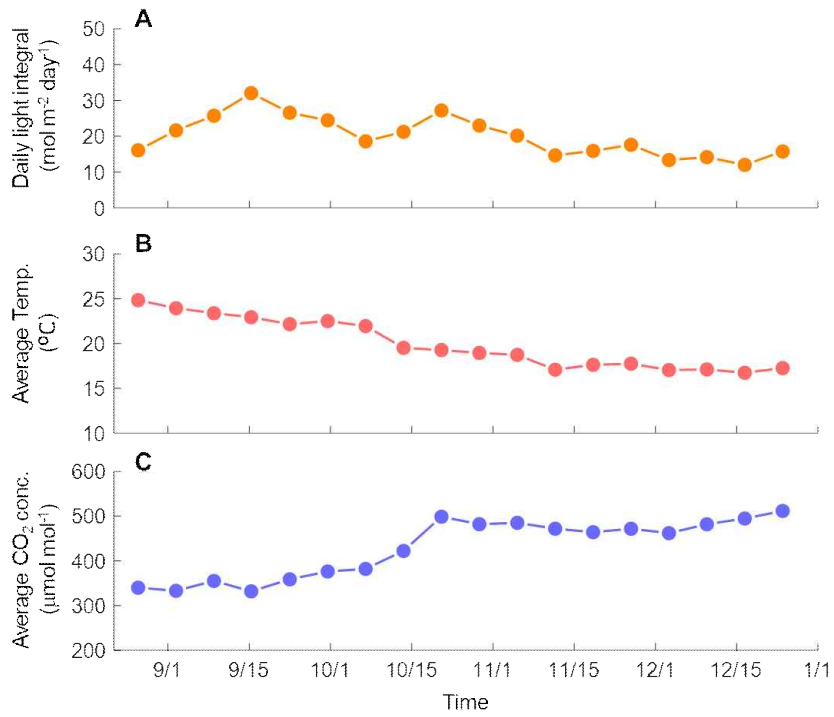


그림 3-2-48. 2021.8.24.부터 2022.1.1까지 토마토 농가의 평균 환경 데이터(A: 광도, B:온도, C:CO<sub>2</sub>농도)

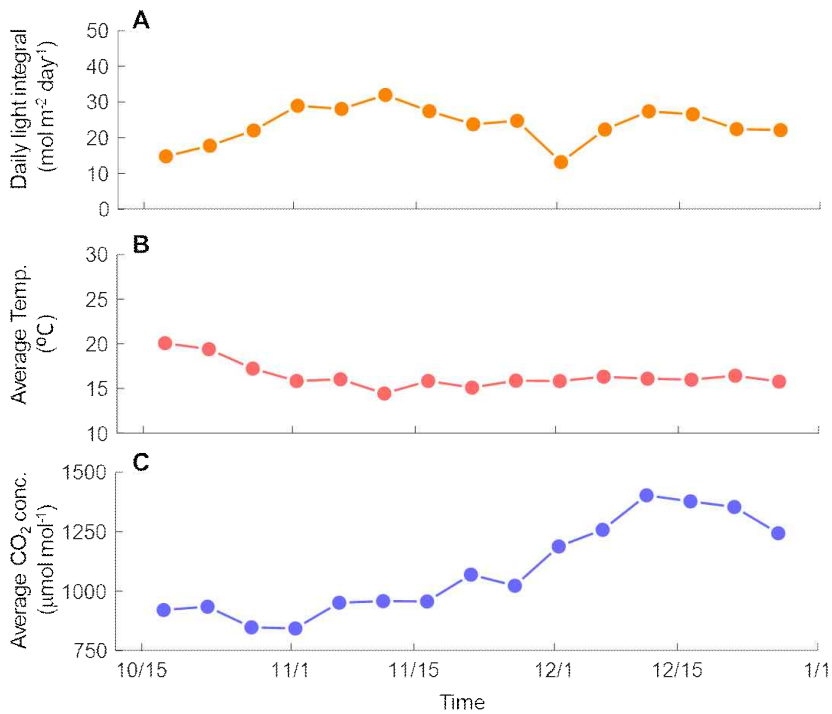


그림 3-2-49. 2021.10.15.부터 2022.1.1까지 오이 농가의 평균 환경 데이터(A: 광도, B:온도, C:CO<sub>2</sub>농도)

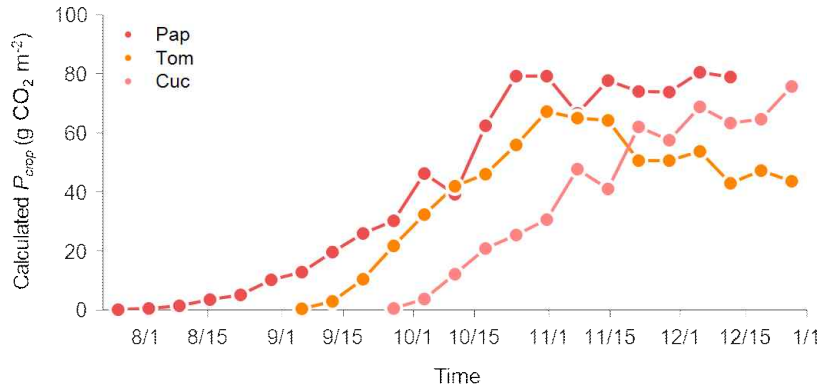


그림 3-2-50. 온실 내 환경변수를 이용하여 계산된 재배 기간에 따른 파프리카, 토마토, 오이의 균락 광합성량( $P_{crop}$ ).

- \* 계산된 균락 광합성량( $P_{crop}$ )은 작목별, 생육 단계별 3차원 수광해석 결과를 이용하여 보정하였음.
- \* 온실 내 환경변수를 이용하여 계산된 균락 광합성량( $P_{crop}$ )은 작물 최상단부의 광량을 기준으로 하는 계산 방식으로 인해 작물 균락 내부에서의 광 차단을 반영하지 못하며, 이에 따라 실제 균락 수광해석 결과에 비해 과대평가되는 경향을 보임.
- \* 이에 따라 수식을 통해 계산된 균락 광합성량( $P_{crop}$ )을 동일한 시기의 3차원 수광해석 결과와 대응시켜 비교해 보았음.

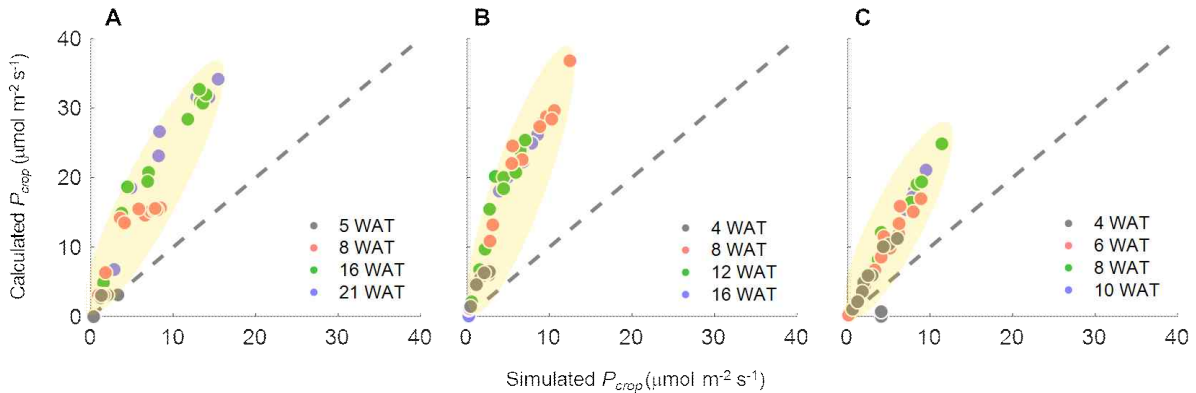


그림 3-2-51. 온실 내 환경변수를 이용하여 계산된 균락 광합성량( $P_{crop}$ )과 수광해석 결과의 일대일 비교(A: 파프리카, B: 토마토, C: 오이)

- \* 계산된 균락 광합성량( $P_{crop}$ )과 3차원 수광해석 결과를 비교해 본 결과 작목별, 생육 단계별로 과대평가되는 비율에는 차이가 있었으나 일정한 범위 내에서 선형적인 분포를 보이는 것을 확인할 수 있었고, 이에 따라 두 계산 결과의 비율을 일반화하여 표현할 수 있을 것으로 판단하였음.
- \* 작목별로 상이하게 나타나는 균락의 형태나, 재배 시기, 재식 밀도, 광합성 능력 등에 크게 영향을 받지 않으면서도 위 결과에서의 차이를 표현할 수 있는 변수를 선정하고자 하였으며, 균락 수광량 및 광합성량에 크게 영향을 미치는 태양광의 입사 각도와 밀접한 관련을 가지는 일중 태양 고도의 변화를 기준으로 하여 계산된 균락 광합성량( $P_{crop}$ )과 3차원 수광해석 결과의 비율을 비교해 본 결과 선형적인 관계를 보이는 것을 확인할 수 있었으며, 해당 선형 수식을 기반으로 계산된 균락 광합성 결과를 보정해 주었음.

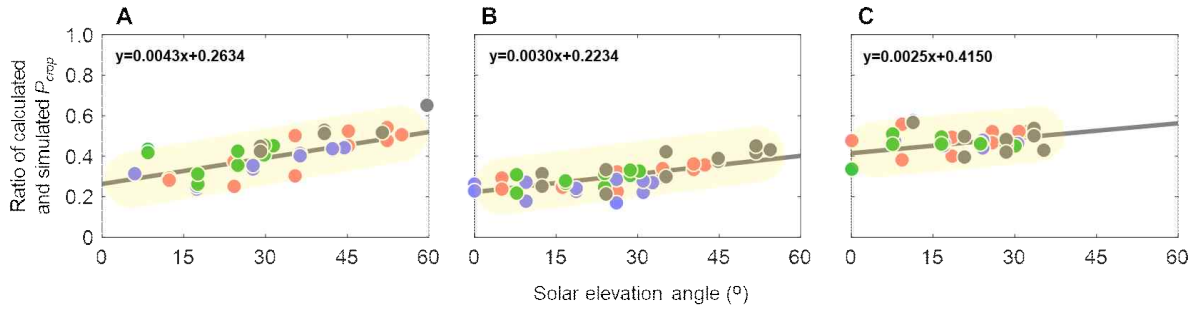


그림 3-2-52. 온실 내 환경변수를 이용하여 계산된 균락 광합성량( $P_{crop}$ )과 수광해석 결과의 비율을 태양 고도에 따라 정렬한 결과(A: 파프리카, B: 토마토, C: 오이)

\* 이후 작목별 보정 계수를 이용하여 온실 내 균락 광합성량과 호흡량을 계산할 수 있었으며, 일중 광합성량 및 호흡량을 모두 반영한 온실에서의 순  $CO_2$  동화량을 계산할 수 있었음.

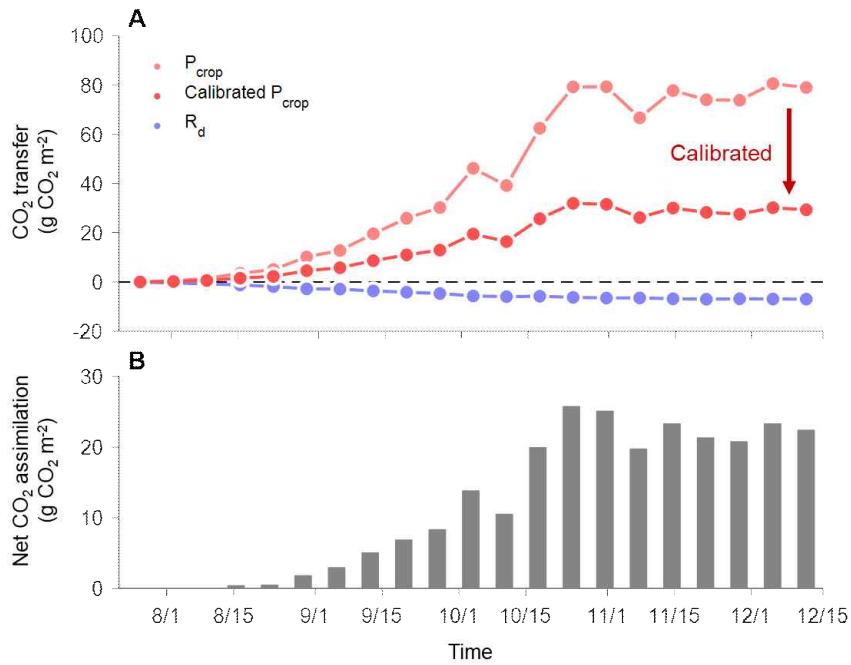


그림 3-2-53. 수광해석 결과를 통해 보정된 2021.7.22.부터 2021.12.15.까지의 파프리카 온실 균락 광합성량 및 호흡량(A)과 순 이산화탄소 동화량(B).

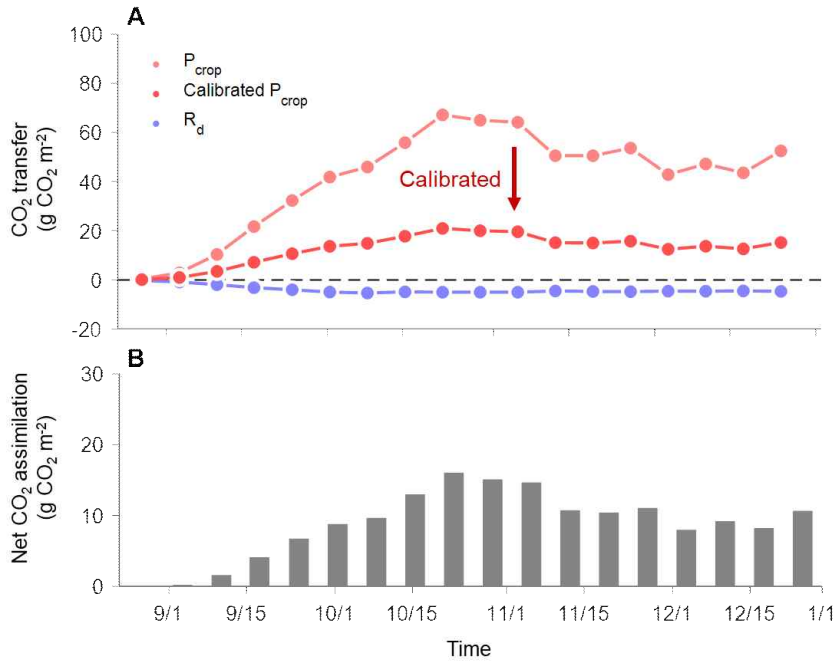


그림 3-2-54. 수광해석 결과를 통해 보정된 2021.8.24.부터 2022.1.1.까지의 토마토 온실 군락 광합성량 및 호흡량(A)과 순 이산화탄소 동화량(B).

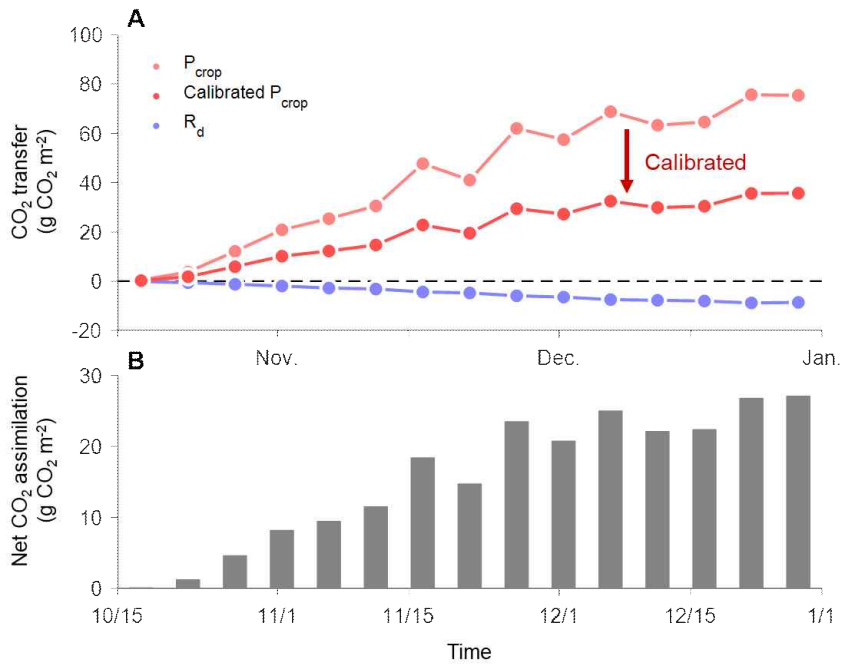


그림 3-2-55. 수광해석 결과를 통해 보정된 2021.10.15.부터 2022.1.1.까지의 오이 온실 군락 광합성량 및 호흡량(A)과 순 이산화탄소 동화량(B).

□ (3공동)토마토 생육·수확 예측 및 온실 환경 모델 개발을 위한 데이터 수집·표준화

○ 토마토 농가 재배 실증 실험(논산시 광석면 이서주 농가)

- 온실 미기상 환경 조사 내용

\* 토마토 실증 장소인 이서주 농가 온실의 환경데이터는 2021년 8월 25일부터 2021년 11월 30일까지 월평균 미기상 환경을 표 1에 나타내었다. 온실의 온도 관리는 야간에 15°C로 내려가지 않도록 관리였으며, CO<sub>2</sub> 농도는 해 뜨고 나서 환기하기 전까지 800 ppm으로 관리하였으며, 온실의 상대습도는 40%이하로 떨어지지 않도록 주간에는 포그시스템을 이용하여 습도를 관리하였으며, 이러한 관리로 인하여 표 1과 같은 평균 미기상 환경변화를 관찰할 수 있었다.

표 3-3-1. 논산시 광석면 소재 이서주 농가의 온실 미기상환경 데이터

월별	평균외기온 (°C)	평균온실기온 (°C)	평균온실습도 (%)	일평균 누적광량 (J/cm <sup>2</sup> )	평균CO <sub>2</sub> 농도 (ppm)
8	25.2	26.3	76.7	890.6	332.4
9	21.8	22.9	80.2	923.3	345.2
10	14.7	20.3	81.2	855.7	439.1
11	7.7	17.8	82.2	628.1	474.3

\* 그림 3-3-1A는 9월부터 11월 30일까지 농가 온실 내부의 온도 일 변화를 나타낸 것으로 점진적으로 온실의 온도가 하강하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3-3-1B와 같이 농가 온실 내부에 투광되는 주간 광도는 흐린 날을 제외하고는 600  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 을 넘는 것으로 조사되었다. 그림 3-3-1C은 농가 온실 내부의 상대습도 변화를 나타낸 것으로 야간에는 거의 포화된 상태였고, 주간에는 상대습도가 40% 이하로 떨어지지 않는 것으로 확인할 수 있다. 그림 3-3-1D는 농가 온실 내부의 CO<sub>2</sub> 농도 변화를 나타내는 것으로 주간에 토마토 식물체의 광합성이 왕성할 때, 200ppm 이하로 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 이하로 떨어지지 않는 것으로 확인할 수 있다.

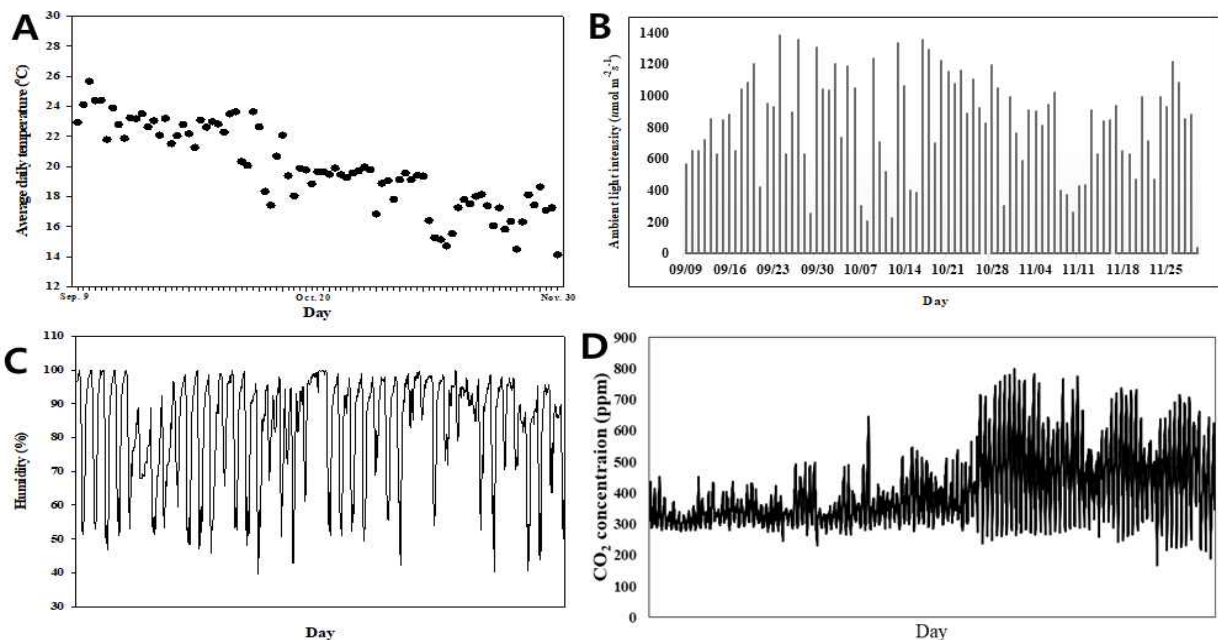


그림 3-3-1. 농가 온실 내부의 미기상 환경. A, 일일 평균 온도 변화; B, 일일 광량 변화; C, 일일 상대 습도 변화; D, 일일 이산화탄소 변화

- 농가 토마토 생육상황

\* 농가의 토마토 조사 기간 동안 초장, 엽면적, 엽수, SLA의 변화는 그림 3-3-2와 같다. 그림 3-3-2A는 초장을 나타낸 것으로 30cm정도의 크기에서 정식된 토마토가 약 86일 후에는 360cm까지 약 10배 이상 크게 자라는 것을 확인하였다. 그림 3-3-2B는 토마토의 엽면적으로 정식 당시 45cm<sup>2</sup> 정도에서 30일 후에는 10,000cm<sup>2</sup> 까지 증가되었다. 다만, 그림 3-3-2C와 같이 엽수를 화방당 3만 남기고 농가에서 적엽하므로 6화방으로 관리하고 있었기 때문에 엽수는 대체로 18에서 16매 정도로 제한되어서 관리되었다. 따라서 엽 면적을 잎의 건조 중량으로 나눈 SLA 값 (그림 3-3-2D)도 대체로 6화방을 동시에 착과와 개화로 생육이 진행될 때, 3,500정도의 값을 나타내는 것을 확인하였다.

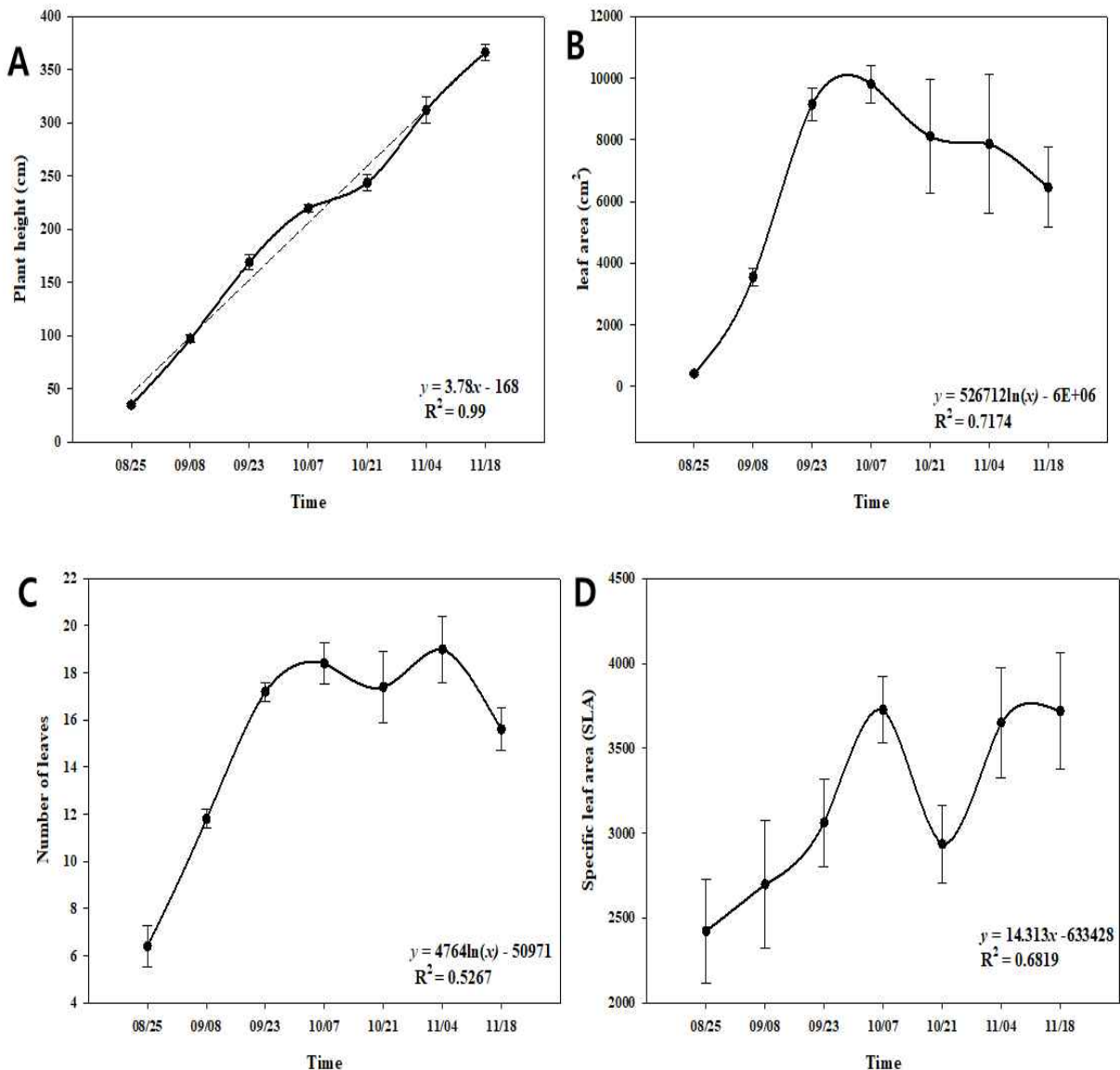


그림 3-3-2. 레드250 토마토의 재배기간 중 초장, 엽면적, 엽수, SLA 변화

\* 그림 3-3-3은 농가에서 재배한 토마토 식물체의 과일, 꽃, 줄기, 잎의 파괴조사 시기별 건물 중량을 조사한 것이다. 토마토 잎은 정식 후 30일간 시간에 비례하여 식물체 당 50g까지 증가하다가 적엽 이후부터 무게가 감소하였고, 10월부터 온실 내 평균 온도의 감소와 함께 생육이 저하되었다. 줄기의 건물중은 점진적으로 증가하지만, 11월 4일 이후 무게의 증가는 크게 이루어지지 않았다. 꽃의 건물중은 전체 식물체에서 갖는 비중

은 아주 미미하였기 때문에 무게를 조사하는 것은 큰 의미가 없을 것이라 판단되고, 이후 꽃은 개화시기와 몇 개의 꽃이 피었는지 정도의 조사를 실시하는 것이 더욱 효율적이라 판단된다. 과일의 무게 증가는 정식 2주 동안은 거의 이루어지지 않았으며, 2주 이후부터 30일 동안 건물중이 130g으로 급속하게 증가하였다. 이는 이 기간 5화방까지 착과되어 과일무게가 급격하게 비대되었기 때문이고, 11월 4일 정체하다 11월 18일 다시 무게가 증가된 것은 11월 4일에 2화방까지 수확이 완료되었기 때문이다.

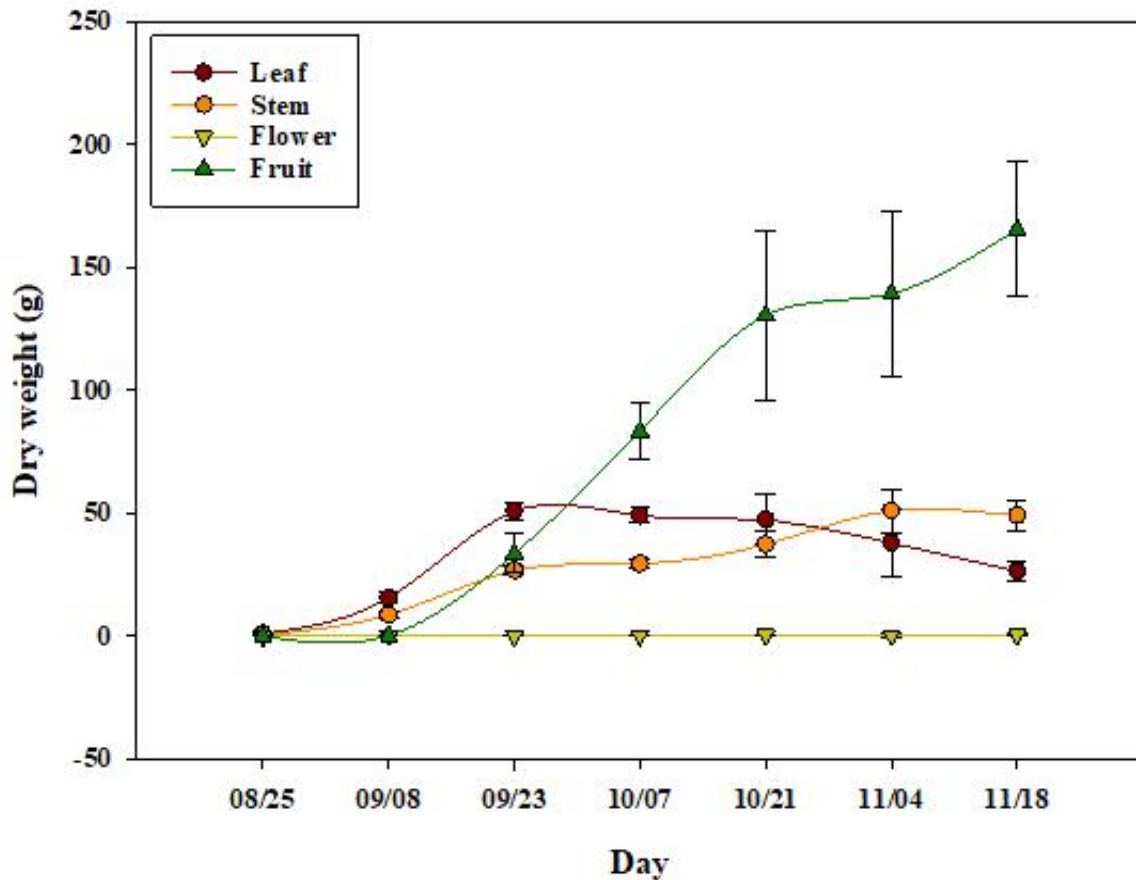


그림 3-3-3. 레드250 토마토 식물체 부위별 시간 흐름에 따른 건물 중량 변화

- \* 그림 3-3-4는 토마토의 잎 착생 높이별로 9월, 10월, 11월에 광도  $0\sim 1,200\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 각각 광합성을 측정하는 것이다. 본 측정은 LI-6800 측정기를 이용하였고, 이산화탄소 농도는 400ppm으로 조정하였고, 챔버 내부의 온도는  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 유지하면서 측정되었다. 대체로 광량이  $600\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 에서 거의 포화에 가까운 값으로  $12\sim 15\text{ CO}_2\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광합성 고정 값을 나타내었다. 그림 3-3-4B에서 보듯이 11월까지 온실 내의 광도가 맑은 날은  $600\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 광량을 넘기 때문에 온실 내에서 광합성을 위한 광량은 11월까지 충분한 것으로 판단된다. 결국 실험 1년 차인 올해 농가 실증 결과 값을 토대로 고찰할 때, 온도와 습도 관리를 어떻게 하는지가 토마토의 생육에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.



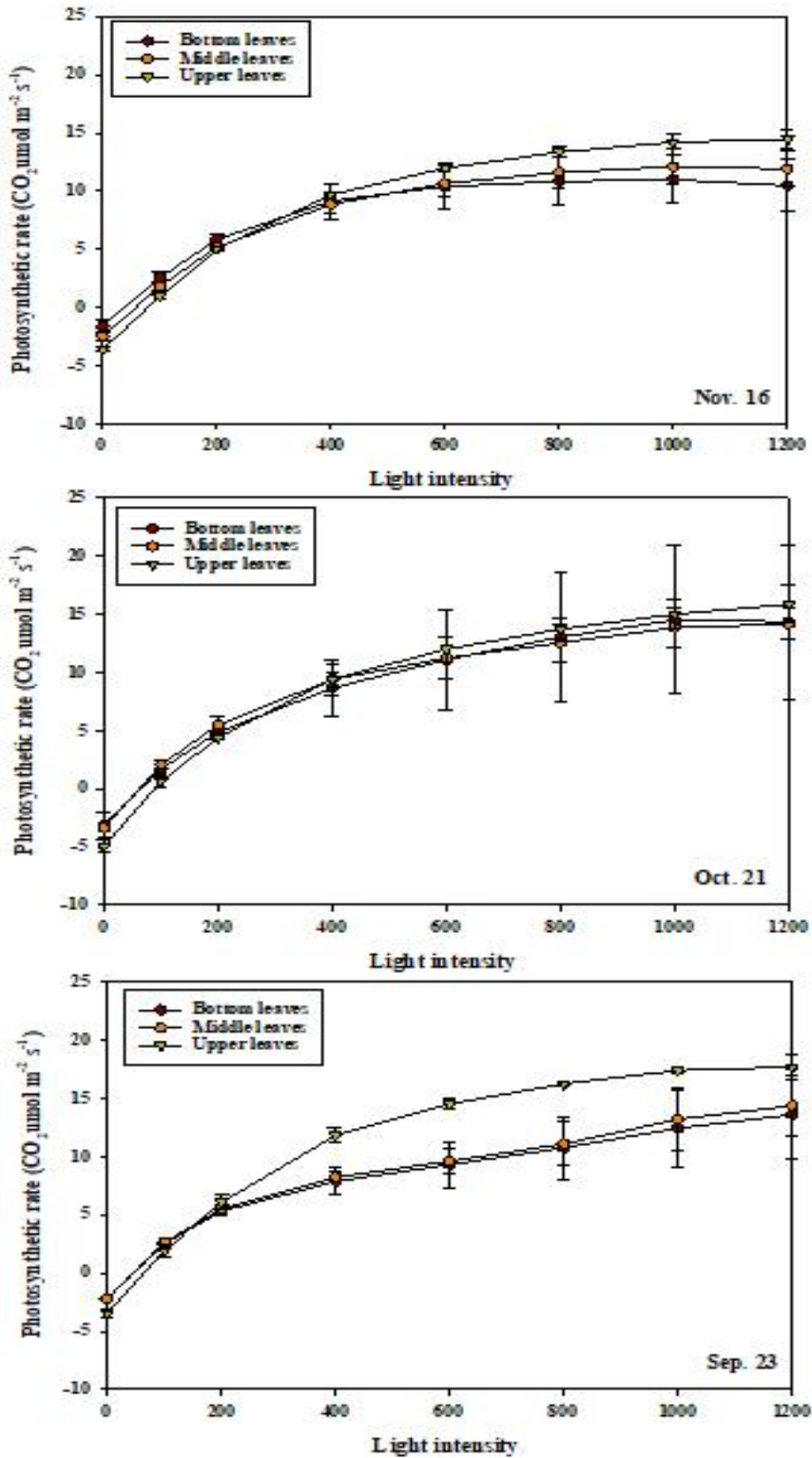


그림 3-3-4. 레드250 토마토의 식물체의 상, 중, 하 위치별 광합성량

\* 그림 3-3-5는 토마토의 잎의 엽록소 함량을 나타낸 것으로 상대적으로 광량과 온도가 높았던 8월과 9월은 Chl<sub>b</sub>의 함량이 높았으나, 10월 이후에는 Chl<sub>b</sub>의 함량이 크게 줄어들었다. 반면에 Chl<sub>a</sub>의 함량은 광량이 상대적으로 줄어든 10월에 높아지는 경향을 나타내었다. 카로티노이드는 고광에서 식물체 잎을 광저해로부터 손상을 막는 보호색의 역할을 하는 것으로 알려져 있듯이 10월 이후 광량이 줄어들면서 그 함량이 낮아지는 경향을 나타내었다. 결국 10월의 광량은 광합성에도 충분하며, 광손실도 줄어드는 정도의

광 강도를 보였다. 또한 Chl a의 함량은 개체별 편차가 크지 않았으나, Chl b의 함량은 개체별로 편차가 크게 나는 것으로 나타났는데, 이는 Chl a에 비하여 엽록소 b가 좀 더 개체별 환경에 따른 적응성이 크기 때문인 것으로 판단된다.

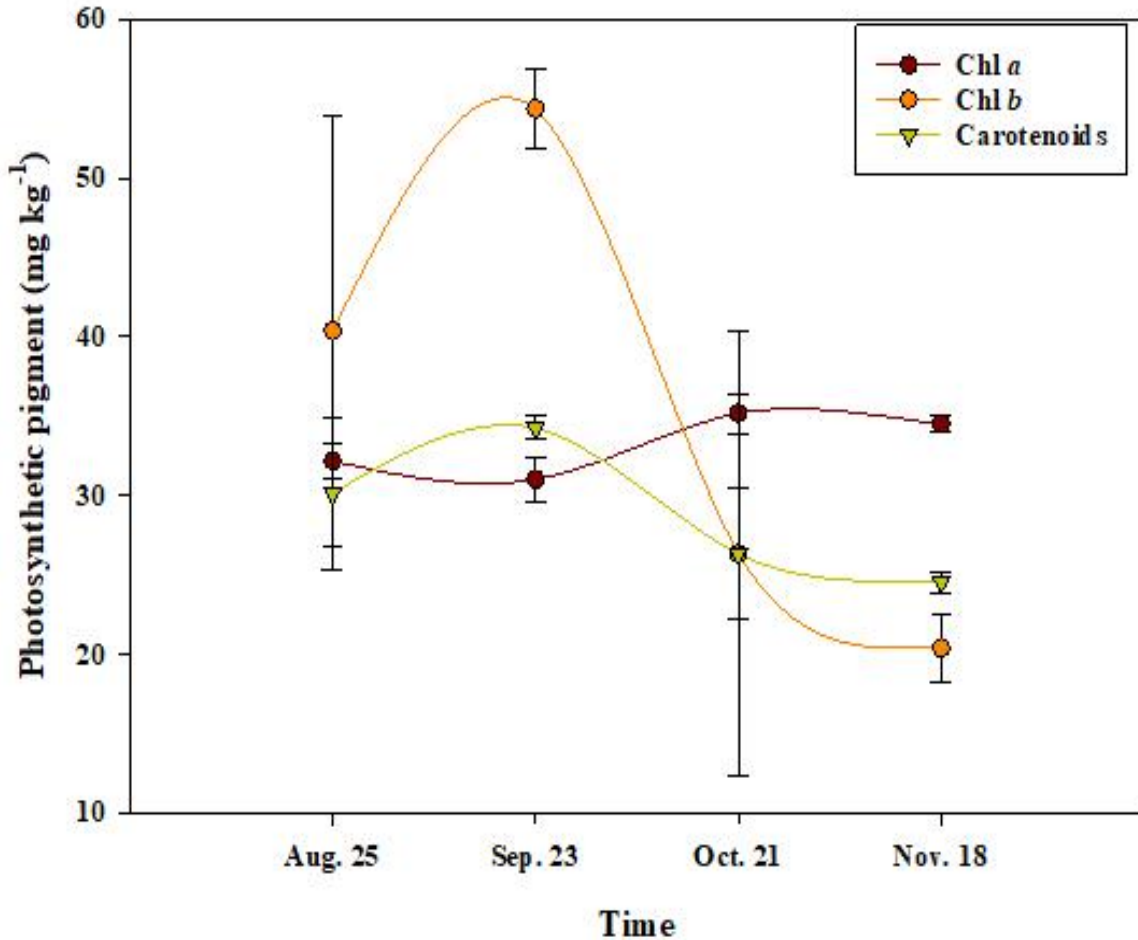


그림 3-3-5. 레드250 토마토 잎의 엽록소 함량 변화

○ 공주대학교 토마토 재배 실험(공주대학교 원예학과 온실)

- 온실 미기상 환경 조사 내용

\* 공주대학교 온실의 미기상환경 데이터는 9월 28일부터 11월 30일 현재까지의 값을 표 2에 나타내었다. 9월부터 11월까지 온실 외부의 기온은 급급하게 떨어지는 것을 알 수 있으며, 온실의 평균 기온도 4 °C씩 낮아졌다. 대체로 평균온실 상대습도는 70%에서 60% 수준으로 나타났고, 일평균 누적 광량은 9월과 10월은 130 100mol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>로 높았으나, 11월은 77.2100mol·m<sup>-2</sup>·d<sup>-1</sup>로 약 40% 정도 광량이 줄어드는 것을 알 수 있다.

표 3-3-2. 공주대학교 온실 미기상환경 데이터

일별	평균외기온 (°C)	평균온실기온 (°C)	평균온실습도 (%)	일평균 누적광량 (mol·m <sup>-2</sup> ·d <sup>-1</sup> )	평균CO2농도 (ppm)
9	21.6	24.1	71.9	130.4	414.3
10	14.6	20.3	67.5	131.0	429.6
11	7.2	16.9	62.2	77.2	823.1

\* 그림 3-3-6은 공주대학교 온실의 미기상 환경의 일일 변화를 나타낸 것으로 9월부터 11월까지 온도가 급격하게 떨어지는 것을 알 수 있다. 하루 광도 누적량이  $50\ 100\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  이상이면, 11월 온실의 햇빛 투과 시간을 8시간으로 가정할 때, 초당 약  $625\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$  정도의 광량을 평균적으로 받는 것을 알 수 있다. 습도관리를 따로 하지 않았기 때문에 이서주 농가에 비하여 상대습도는 매우 낮은 것으로 확인할 수 있다. 특히 10월 10일 이후부터는 상대습도가 30% 이하로 떨어질 때가 많은 것을 알 수 있다. 반면에 이산화탄소의 농도는 11월부터 야간온도가 낮을 때,  $\text{CO}_2$ 가 나오는 온풍난방기를 사용한 관계로 야간의  $\text{CO}_2$  농도가 약 3,000ppm까지 높아졌다. 하지만 주간에는  $\text{CO}_2$  농도가 식물체의 광합성으로 인하여 400ppm 이하로 떨어졌다.

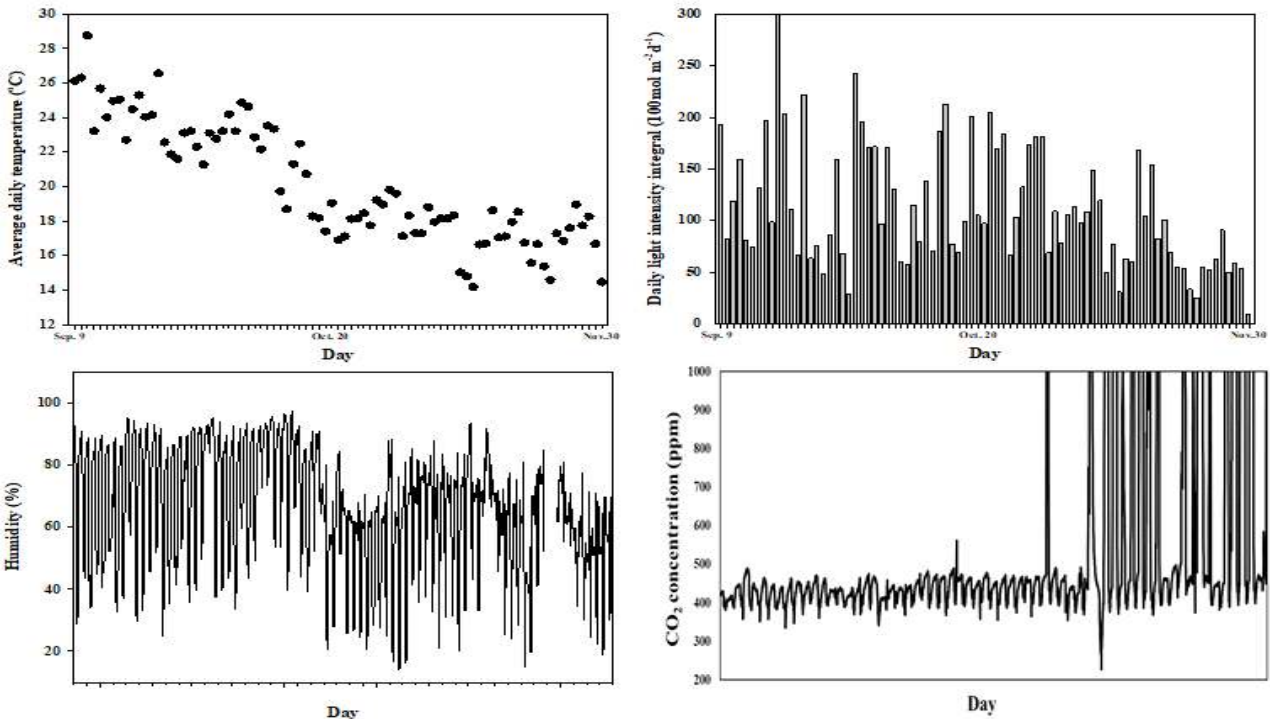


그림 3-3-6. 공주대학교 온실 내부의 미기상 환경. A, 일일 평균 온도 변화; B, 일일 광량 변화; C, 일일 상대 습도 변화; D, 일일 이산화탄소 변화

- 공주대학교 온실 재배 토마토 생육상황

\* 공주대학교 온실에서 재배 중인 레드칸 토마토의 조사 기간 동안 초장, 엽면적, 엽수, SLA의 변화는 그림 3-3-7과 같다. 공주대학교 온실에서 재배는 8월 말부터 시작하였으나, 바이러스 병과 급성 시들음병으로 인하여 데프니스와 244토마토 품종을 제거하고, 9월 28일부터 레드칸 품종을 정식하여 재배하였기 때문에 이서주 농가와 비교하여 33일 정도 늦게 실험이 시작되었고, 아직 실험이 끝나지 않은 상태이다. 그림 3-3-7A는 초장을 나타낸 것으로 20cm정도의 크기에서 정식된 토마토가 약 56일 후에는 166cm까지 약 8배 이상 크게 자라는 것을 확인하였다. 다만, 농가에서 재배된 것보다는 생육이 저조하였는데, 이는 고온기가 지나고 저온기로 접어들면서 생육 효율이 떨어진 것으로 판단된다. 그림 9B는 토마토의 엽면적으로 정식할 당시  $30\text{cm}^2$  정도에서 30일 후에는  $4,000\text{cm}^2$ 까지 증가되고 다시 30일 후에는 급격하게 증가되어  $14,000\text{cm}^2$ 까지 넓어졌다. 레드칸 품종의 엽면적은 농가에서 재배하는 레드250보다 40% 이상 넓었다. 엽수는 레드칸과 레드250의 수를 유사하게 유지하였다. 엽의 개수가 비슷한데 반하여, SLA 지수는 레드칸이 4,800정도에서 유지되는데 반하여, 레드250은 3,800 정도를 유지하는 것으로 나타났다. 품종특성상 레드칸의 SLA 면적이 레드250 보다 높았다. 이는 품종별 차이가 존재하므로 최적의 작물 SLA 상태를 유지하기 위한 품종별 기준이 필요하다.

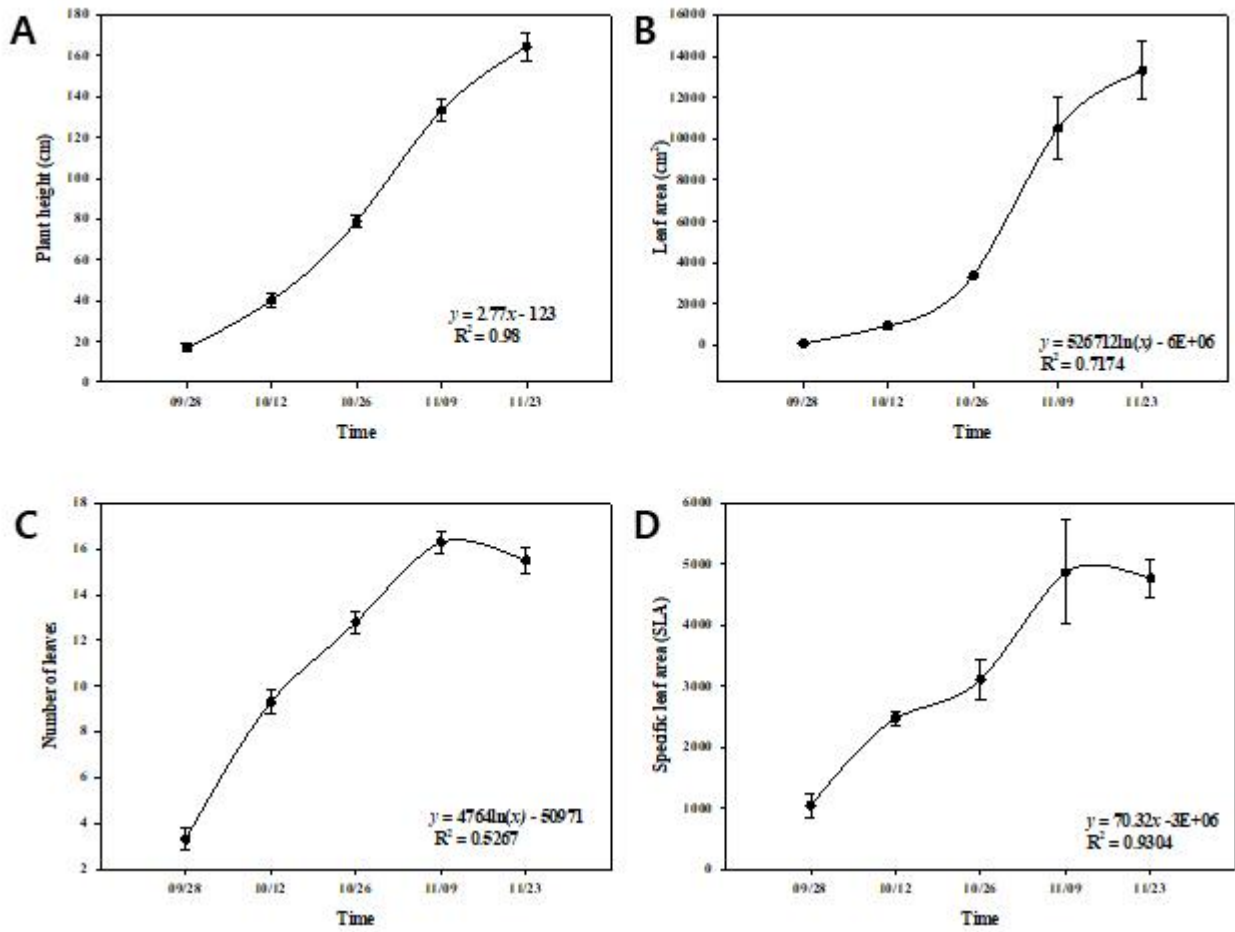


그림 3-3-7. 레드칸 토마토의 재배기간 중 초장, 엽면적, 엽수, SLA 변화

\* 그림 3-3-8은 공주대학교의 유리온실에서 재배 중인 토마토의 부위별 시간 흐름에 따른 건물 중량 변화를 나타낸다. 정식 후 8주 동안의 토마토 부위별 변화를 보면, 8주 동안 잎의 성장은 S 곡선을 나타내며 증대되었고, 줄기는 계속해서 무게가 증가되는 것을 알 수 있다. 화방의 건물중 변화는 거의 없었고, 과일의 건물중은 정식 후 6주 후부터 급급하게 증가되었다. 농가의 레드250과 비교하였을 때, 레드칸은 정식 시기가 33일 늦었는데, 8월 25일에 정식된 레드250은 9월 28일에 정식된 레드칸 보다 온도나 습도 등의 환경 조건이 양호하여 생육이 월등히 좋았다. 특히, 잎의 건물 중 정체기가 레드250은 정식 후 4주에서 나타났지만, 늦게 정식된 레드칸은 잎의 건물 중 정체기가 정식 후 8주에 나타났다. 생육에 있어 온도의 영향은 절대적인 것을 확인 할 수 있었다. 또한 레드250을 재배하는 동안 낮의 상대습도는 40%이상 유지되었는데 비하여 레드칸은 20%이하로 떨어지는 날이 많았다. 이는 레드칸이 레드250에 비하여 증산 작용이 원활하지 않았을 것으로 추론된다. 레드칸과 레드250은 정식 시기의 차이로 인한 재배 환경 변화가 발생되어 생육의 속도에서 차이는 보였지만, 대체로 식물체 각 부위별 발달 단계에 따른 건물 중의 변화 패턴은 유사하게 진행되는 것을 확인하였다. 레드칸 품종 또한 12월 말까지 분석하여, 그 결과를 다시 레드250과 비교하여 토마토 대과종의 잎, 줄기, 과실의 생육이 진행됨에 따른 변화 양상을 비교할 예정이다.

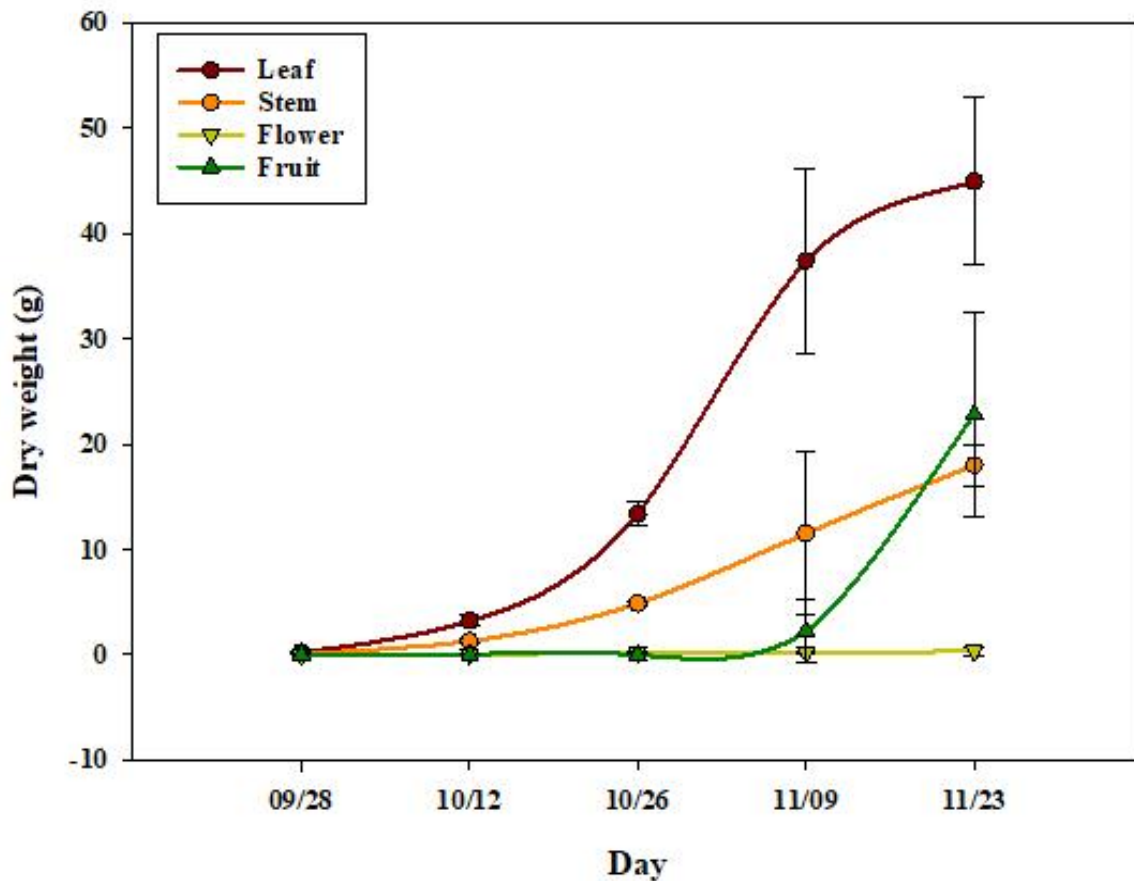


그림 3-3-8. 레드칸 토마토의 부위별 시간 흐름에 따른 건물 중량 변화

- \* 그림 3-3-9는 레드칸 품종의 광합성 효율을 나타냈다. 정식 초기 10월 18일에 측정된 광합성량은 식물체의 잎 착생 부위의 상, 중, 하에 따른 광합성의 차이가 유의하게 나타나지 않았다. 즉, 식물체 잎이 균락을 이루지 않았기 때문에 전반적으로 유사한 패턴의 광합성 효율을 나타내었다. 반면에 11월 18일에 측정된 광합성 효율은 식물의 아래쪽에 착색된 잎의 광합성 효율이 떨어졌고, 중간부위와 상층부위에 착색된 잎의 광합성 효율은 유사하게 나타났다. 또한 레드칸과 레드250을 비교하였을 때, 두 품종 모두 광량이  $600 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  정도이면 광합성에 충분한 자연광량에 도달되는 것으로 나타났다. 따라서,  $800 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  까지 광량을 올리면 광합성율은 올라갈 수 있겠지만, 인공광을 이용하면서까지 광량을 높일 필요성이 있는지에 대한 고민은 더욱 많은 실험을 통해서 생산성에 비추어 판단해야 할 것이다.

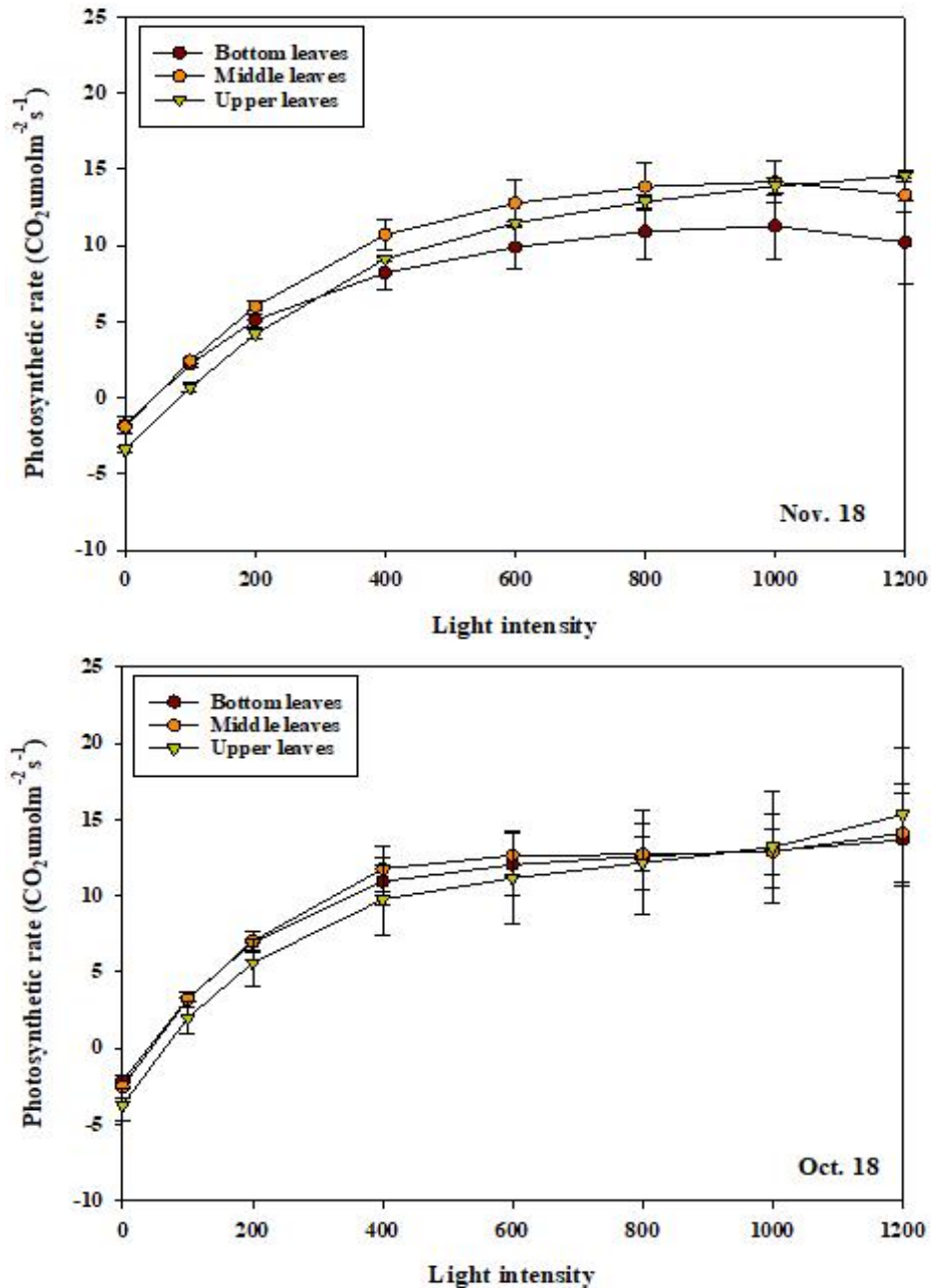


그림 3-3-9. 레드칸 토마토의 식물체의 상, 중, 하 위치별 광합성량

\* 그림 3-3-10은 레드칸 품종의 엽록소 함량 변화를 나타낸 것이다. 레드250과 유사하게 초기에는 Chl**b**의 함량이 높았지만 11월 이후 감소하였다. 반면에 11월 이후 광도가 줄어들면서 광포집의 효율성을 높이기 위해서 식물체가 Chl**a**의 함량을 높게 유지한 것으로 판단된다. 식물체는 Chl**a**와 Chl**b**형의 엽록소를 갖는데, 엽록소의 포르피린 고리의 탄소 중 CH<sub>3</sub>로 환원형이면 Chl**a**이고, CHO로 산화형이면 Chl**b**이다. 단순 분자의 차이지만, Chl**a**와 Chl**b**의 함량 변화는 광량에 따라 함량 변화가 크고 뿐만아니라, 광포집하는 주요한 광파장 영역의 차이가 존재한다. 일반적으로 엽록소 함량을 측정하기 위해서 간이 측정기인 SPAD를 많이 이용하지만 Chl**a**와 Chl**b**로 구분하지 않기 때문에 식물의 생리적 분석하기에 어렵다고 판단된다. 따라서 식물체의 모델링 시 파괴 조사에 따른 이화학적 분석을 통한 엽록소 함량 분석이 아닌 간이 SPAD 값을 이용하는 것은 적절하지 않다고 사료된다.

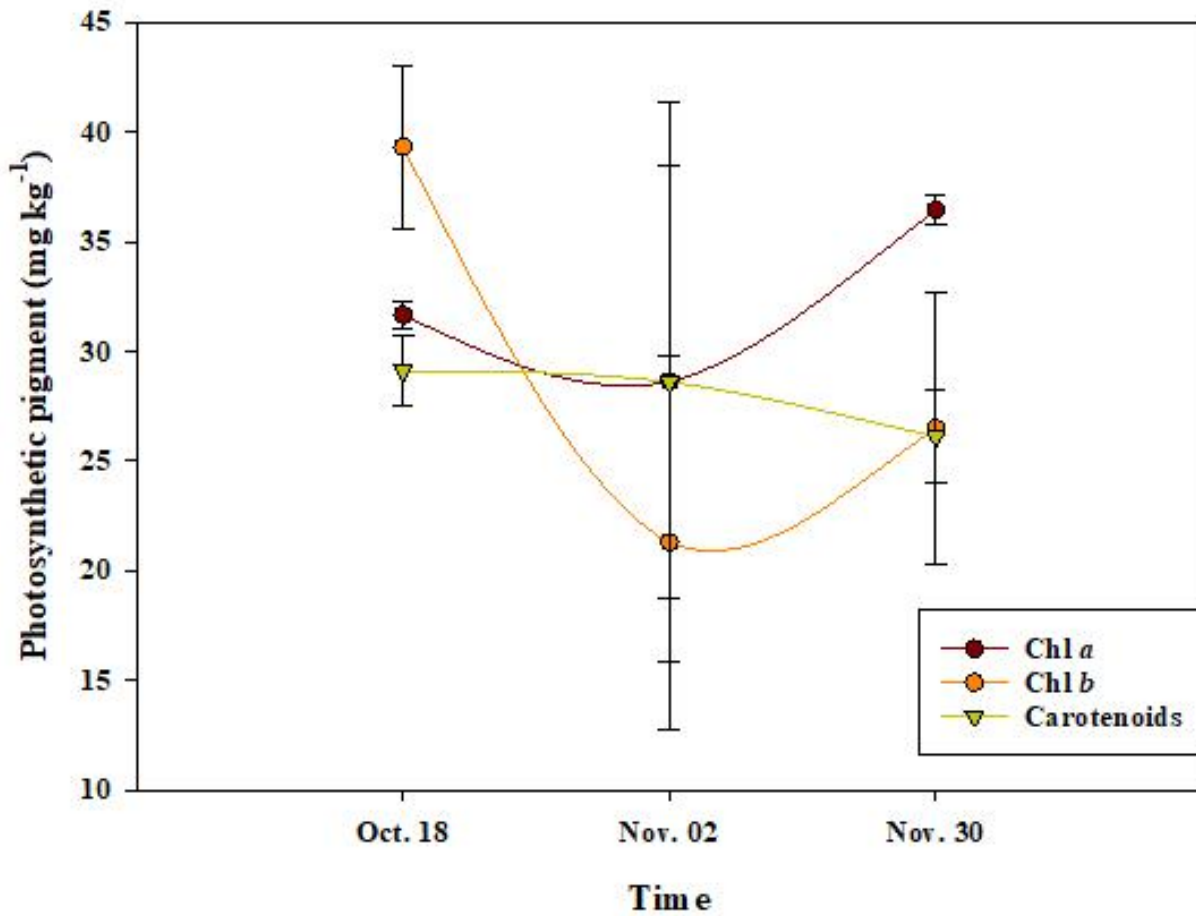


그림 3-3-10. 레드칸 토마토 잎의 엽록소 함량 변화

\* 2021년 실험은 보고서 제공 일보다 실험 종료일이 늦어지기 때문에 레드칸의 식물체 부위별 분배율이나 재배 환경 조건이 다른 레드칸과 레드250의 1화방 또는 2화방 수확기까지의 특성을 비교를 실험 종료 후 실시할 예정이다.

○ 토마토 레드250 품종 생육데이터 기반 모형

- 2021년 농가 데이터를 기반으로 모형화를 수행하였으며, 모형화를 위한 기초적인 환경조건은 온도를 기준으로 하였다. 아래의 그림과 같이 프로세스 바탕 모형 구조를 구성하였다. 본 모형에서는 잎, 줄기, 뿌리의 형태적 변화와 시간적 변화에 따른 토마토 생육 변화 특성을 기반으로 나누어서 토마토 프로세스 기반 모형의 틀을 구성하였다.

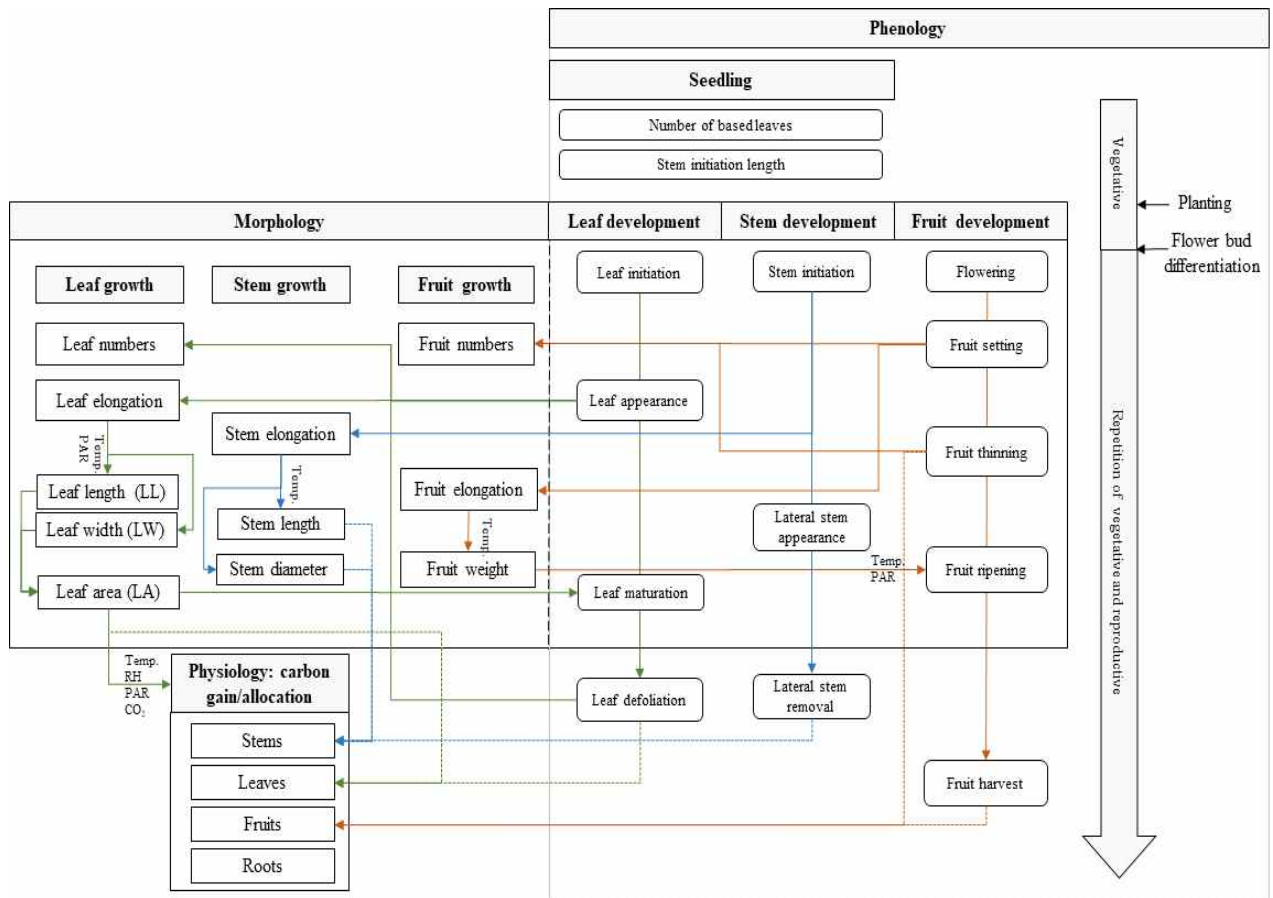


그림 3-3-11. 토마토 프로세스 기반 모델

- 위의 프로세스 기반 모형의 각 모듈을 기준으로 Cropbox의 마늘 모형에 변형하여 모형을 코딩하였다. 마늘의 경우 구근이 비대하는 원예작물로 과일은 존재하지 않으며, 적엽의 개념도 없으므로, Cropbox를 이용하여 기존의 마늘 모형에 토마토의 특성에 맞도록 연속적인 적엽, 착과, 적과, 수확 등의 개념을 추가하여 그림과 같이 토마토 모형을 작성하였다.

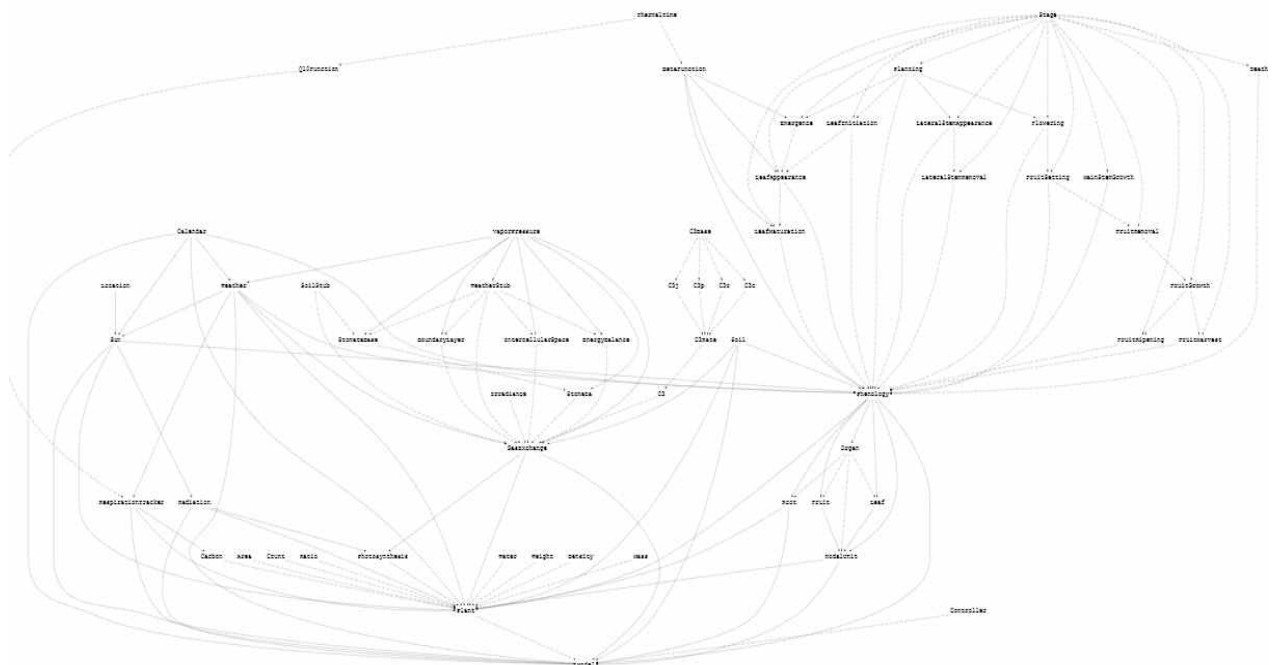


그림 3-3-12. Cropbox를 이용한 토마토 모형의 각 모듈 간의 관계



- 2021년 8월 25일부터 정식부터 2021년 12월 14일까지 9회 파괴 조사한 실측값과 모형값을 비교하였다. 그 결과 식물체의 초장의 경우는 실측값과 모형값을 비교하였을 때, 모형의 결정계수 R<sup>2</sup>값이 0.991로 매우 높은 예측으로 모델의 적합도가 높았다.

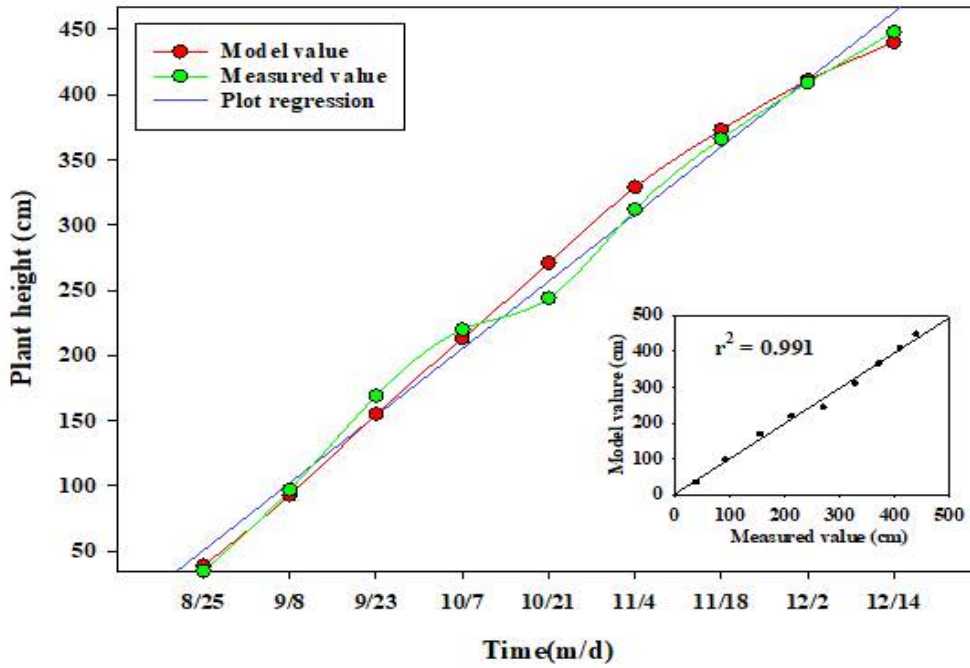


그림 3-3-13. 토마토 레드 250 품종의 실측값과 모형값의 초장

- 토마토의 발생된 잎수의 경우도 실측값과 모형값을 비교하였을 때, 모형의 결정계수 R<sup>2</sup> 값이 0.991로 역시 높은 모델의 적합도를 보였다.

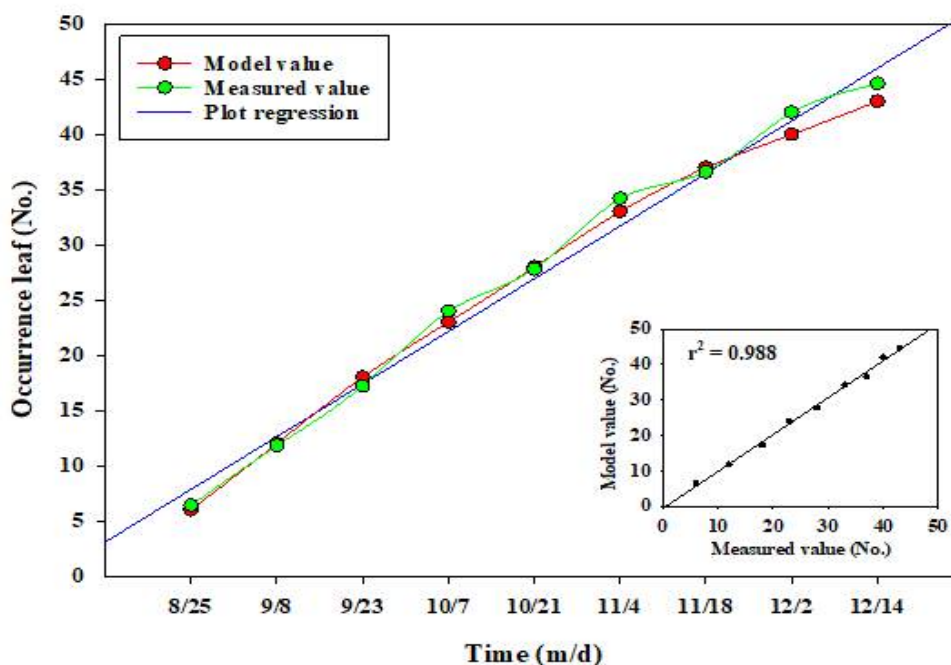


그림 3-3-14. 토마토 레드 250 품종의 실측값과 모형값의 발생 엽수

- 토마토의 적엽 경우도 실측값과 모형값을 비교하였을 때, 모형의 결정계수  $R^2$ 값이 0.974로 역시 높은 모형의 적합도를 보였다. 다만, 실측값보다 모형값이 재배 초기에는 적엽을 늦게 시작하였지만, 재배 중기 이후부터 적엽의 수가 많아졌다. 이는 온실의 작업자들이 부정기적으로 적엽작업을 하는 것보다 온도 값에 따라 제어하는 것으로 좀 더 효율적이라고 판단된다.

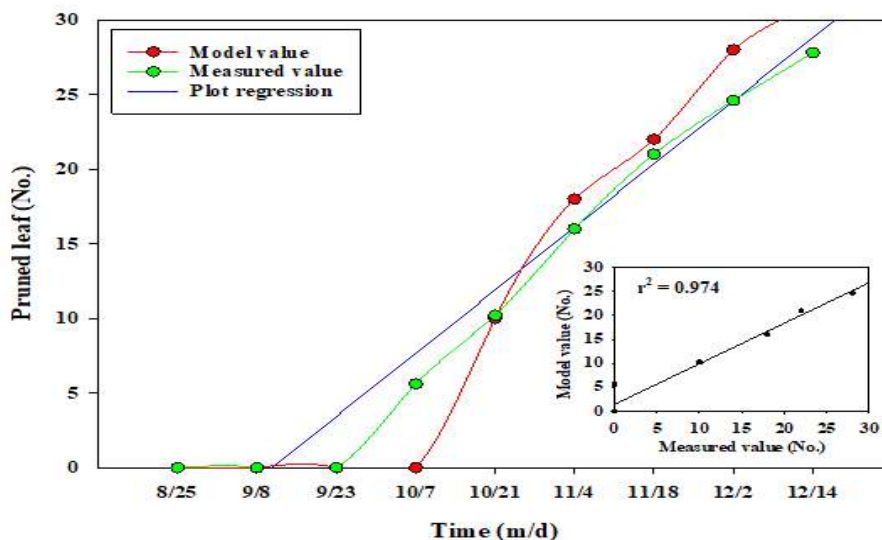


그림 3-3-15. 토마토 레드 250 품종의 실측값과 모형값의 적엽수

- 실질적으로 광합성에 이용하기 위해서는 엽면적이 중요하다. 본 연구 결과에서 엽면적 실측값과 모형값의 결정계수  $R^2$ 값이 0.592로 차이가 컸다. 비록 차이가 있지만, 농가에서 날씨가 더욱 떨어지는 12월 말일부터는 잎 수를 약 12장으로 관리하는 것으로 조사되었다. 따라서, 농가보다는 온도에 반응하여 적엽을 하도록 설계된 모형이 추위가 좀 더 빨리 시작된 12월 초부터 적엽을 강하게 실시하도록 하여 약 12장 유지하도록 한 것이 농가보다 더욱 효율적인 관리 방법일 것으로 판단된다.

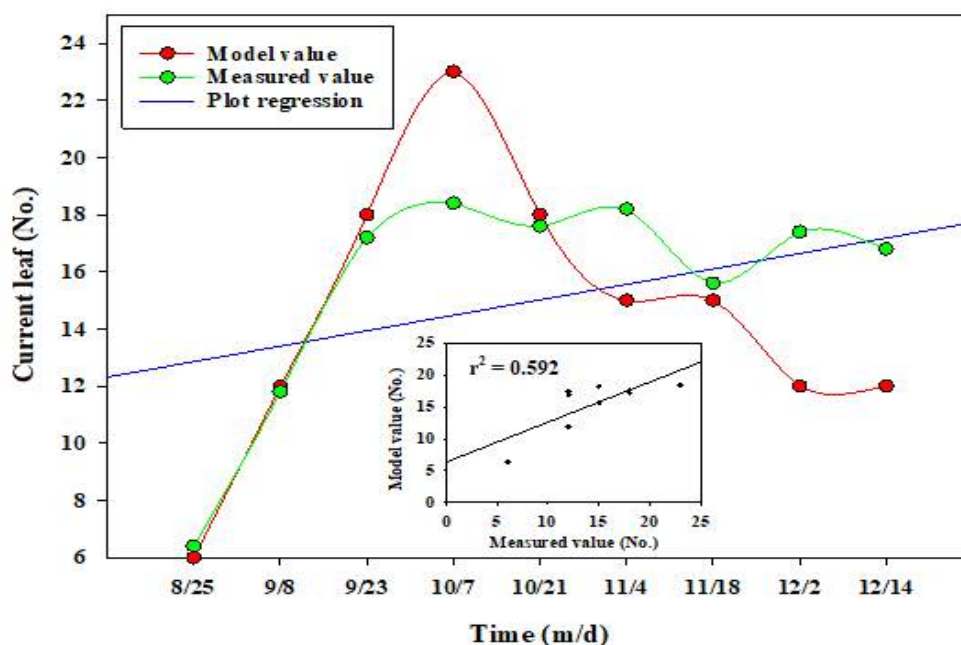


그림 3-3-16. 토마토 레드 250 품종의 실측값과 모형값의 현재 엽수

- 하지만, 현재 달린 잎 수에서는 모형의 결정계수  $R^2$ 값이 0.758로 엽수보다는 일치도가 높게 나타났다. 일반적으로 온도가 내려가고 광량이 줄어드는 겨울철에는 과일도 햇빛을 받으면서 광합성을 좋게 하기 위해서 엽수를 제한하여 엽면적이 대체로 줄어드는데, 농가에서 엽면적 관리를 들쭉날쭉하게 관리한 경향이 있는 것으로 파악된다.

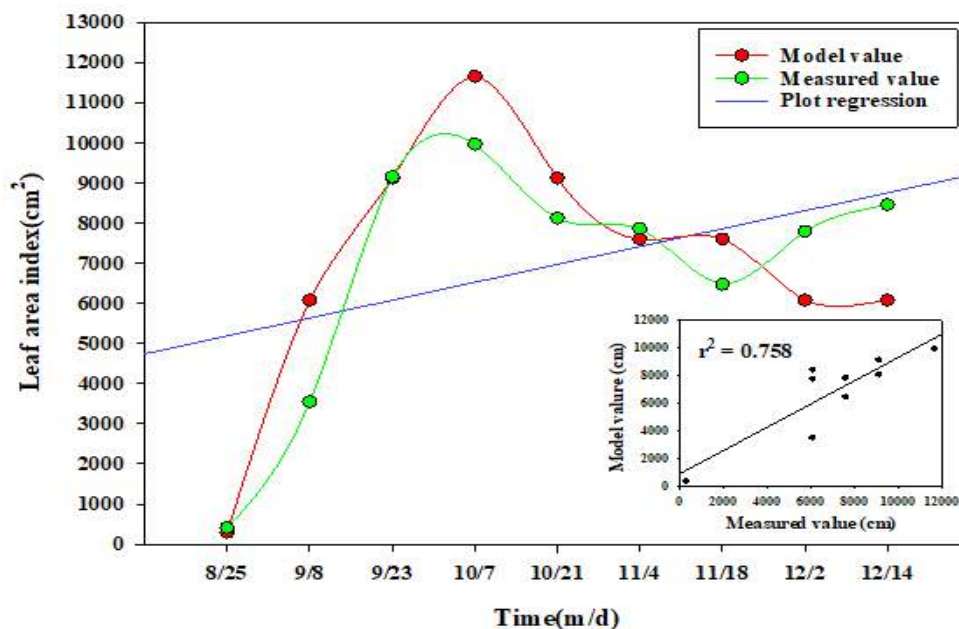


그림 3-3-17. 토마토 레드 250 품종의 실측값과 모형값의 엽면적

- 하지만, 토마토 화방의 발생에 대한 모형화 결과 실측값과 모형값의 결정계수  $R^2$ 값이 0.998로 매우 높은 예측도를 나타내었다. 실측값과 모형값 모두 12월 14일 정식 8주 후에는 대략 화방이 13개 발생하는 것으로 나타났다.

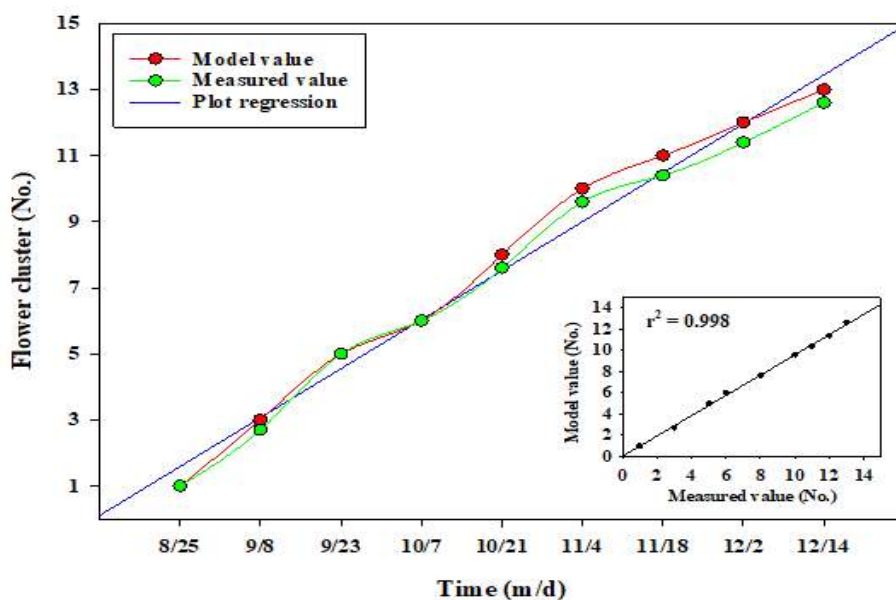


그림 3-3-18. 토마토 레드 250 품종의 실측값과 모형값의 화방 발생

- 2021년 12월 14일까지의 파괴 조사를 통하여 토마토 식물체에 달린 과실의 무게를 확인한 결과, 실측값과 모형값의 결정계수  $R^2$ 값이 0.934로 높은 예측도를 나타내었다.

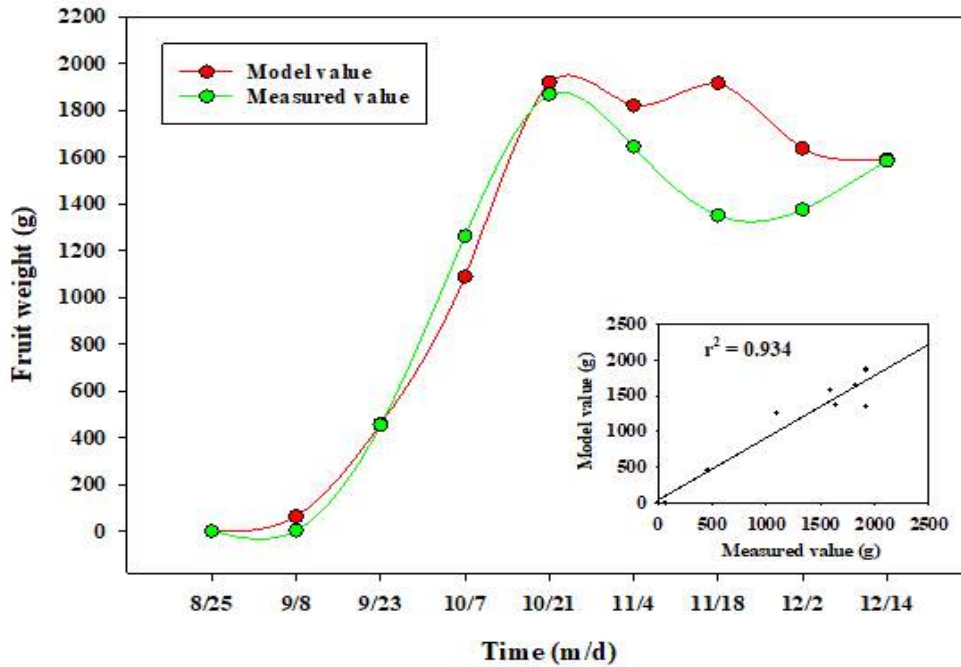


그림 3-3-19. 토마토 레드 250 품종의 실측값과 모형값의 달린 과실 무게

- 2021년 12월 14일까지의 수확된 과실의 무게를 분석한 결과, 실측값과 모형값의 결정계수  $R^2$ 값이 0.976으로 달려있는 과실의 무게보다는 수확한 무게의 예측도의 정확성이 높았다.

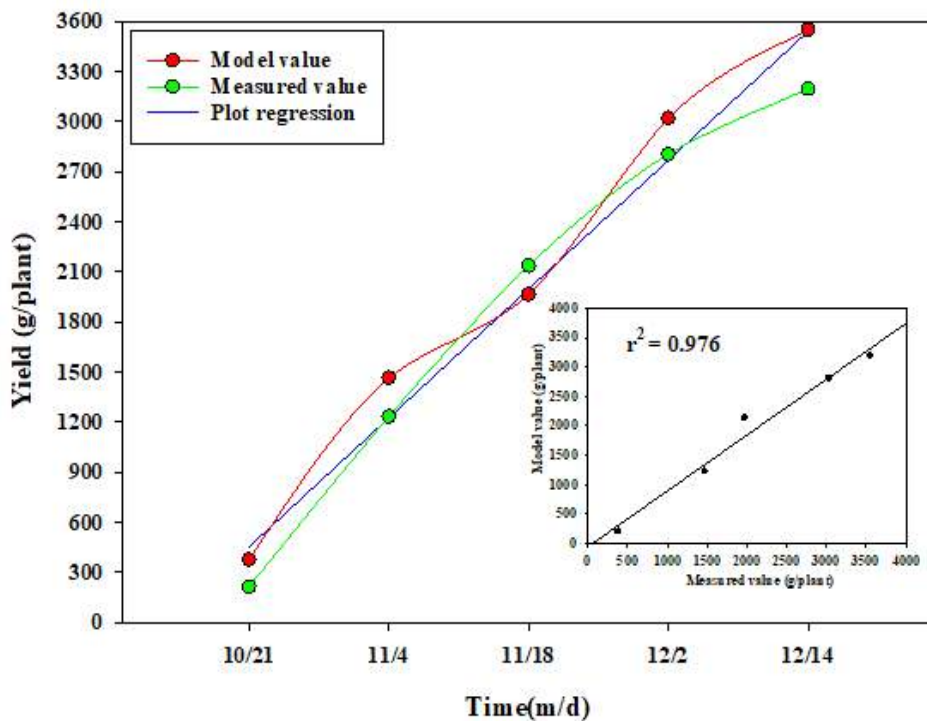


그림 3-3-20. 토마토 레드 250 품종의 실측값과 모형값의 수확량

- 2021년 8월 25일 정식부터 2022년 5월 11일까지 실제로 수확된 실측값과 본 연구를 통하여 작성한 모형값을 비교하였을 때, 수확량에 있어 실측값과 모형값의 결정계수  $R^2$ 값이 0.987로 매우 높았다. 실측된 수확량은 식물체당 약 9.8kg이었고, 모형값은 10.5kg

으로 예측되었다. 모형값이 실측값보다 약 0.7kg 많게 예측되었는데, 이는 약 7% 많게 예측된 것이다.

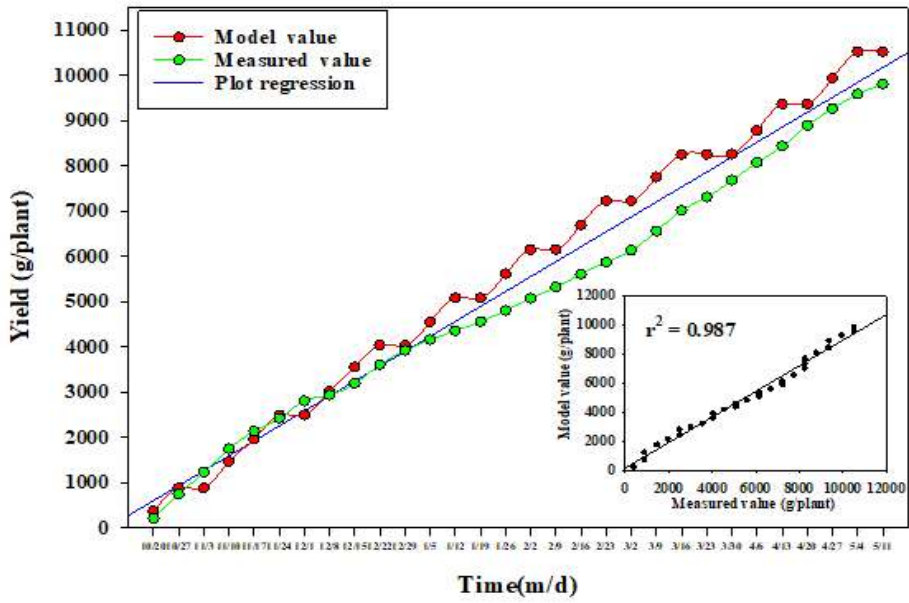


그림 3-3-21. 2021년 작기 토마토 레드 250 품종의 수확량

- 2021년 환경데이터와 작물 파괴조사한 데이터를 기반으로 만든 연구 모형에 2020년도 환경데이터로 모형값을 산출한 결과 농가에서 제공한 2020년 토마토 작기 수확량을 비교한 결과, 결정계수  $R^2$ 값이 2021년보다 높은 0.993이 나왔다, 본 모형이 레드250 품종의 생육과 수확량 예측에 적합하게 설계된 것을 확인할 수 있었다.

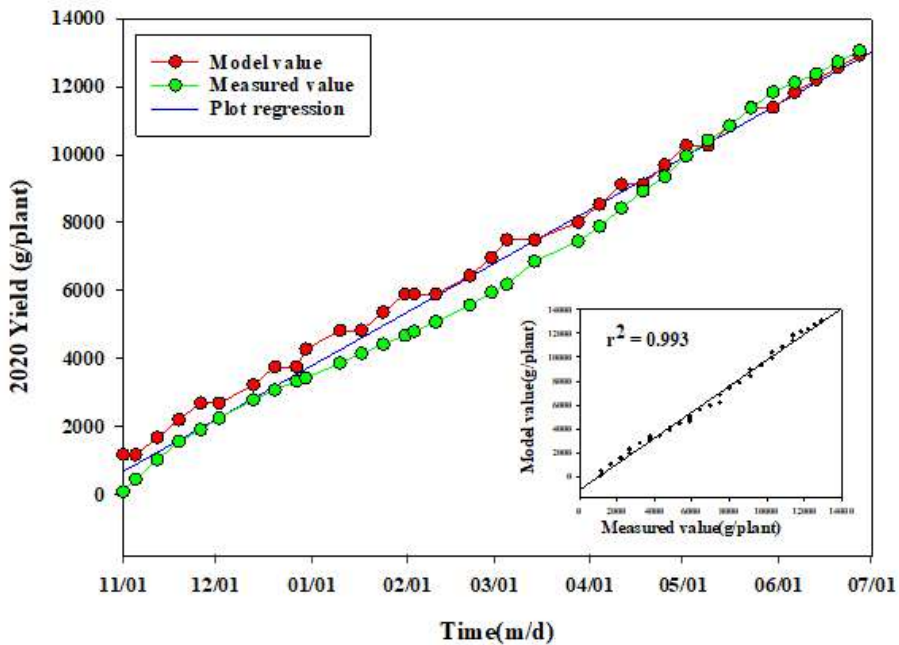


그림 3-3-22. 2020년 작기 레드 250 품종의 수확량

○ 토마토의 프로세스 기반 모형의 소프트웨어 프로그램 작성

- 토마토의 프로세스 기반 모형의 소프트웨어 프로그램은 기본적으로 5가지 검색 탭을 기반으로 데이터 입력(Data input), 식물현재 상태(State), 식물 생육환경(Environment), 식물생육(Growth), 마지막으로 수확(Product)로 구성하였다.

\* 소프트웨어 프로그램 Intro-view를 그림과 같이 구성하였다.



그림 3-3-23. 소프트웨어 프로그램 intro-view 탭

\* 데이터 입력 탭은 그림과 같이 구성하였다.

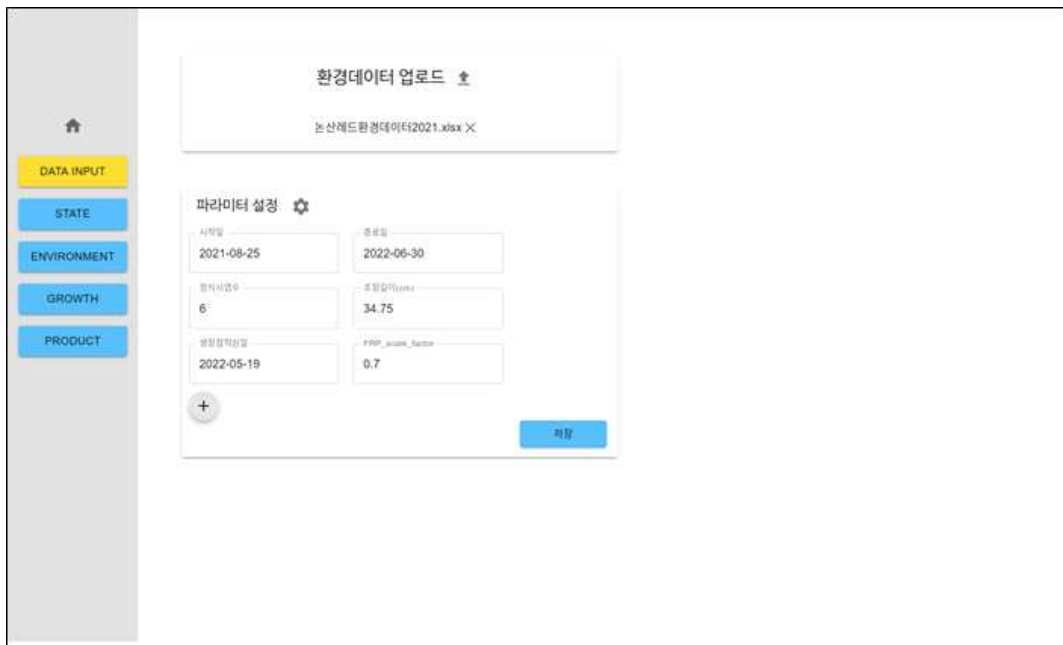


그림 3-3-24. 소프트웨어 프로그램 데이터 입력 탭

- \* 식물체 상태를 나타내는 탭으로 bar를 움직여서 식물체의 생육 상태를 확인할 수 있도록 구성하였다. 생육 정도가 길어지면 탭이 밑으로 내려가면서 생육을 확인할 수 있도록 구성되었다.

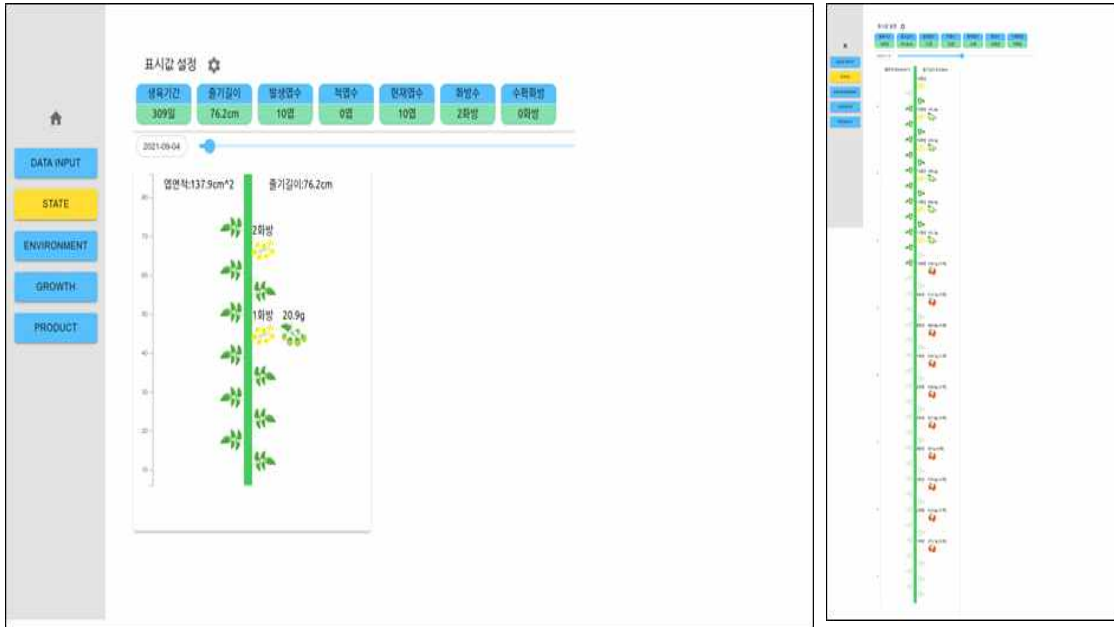


그림 3-3-25. 소프트웨어 프로그램 식물 상태 탭

- \* 작물의 생육 환경을 날짜별로 확인할 수 있는 환경 변화 탭을 구성하였다.

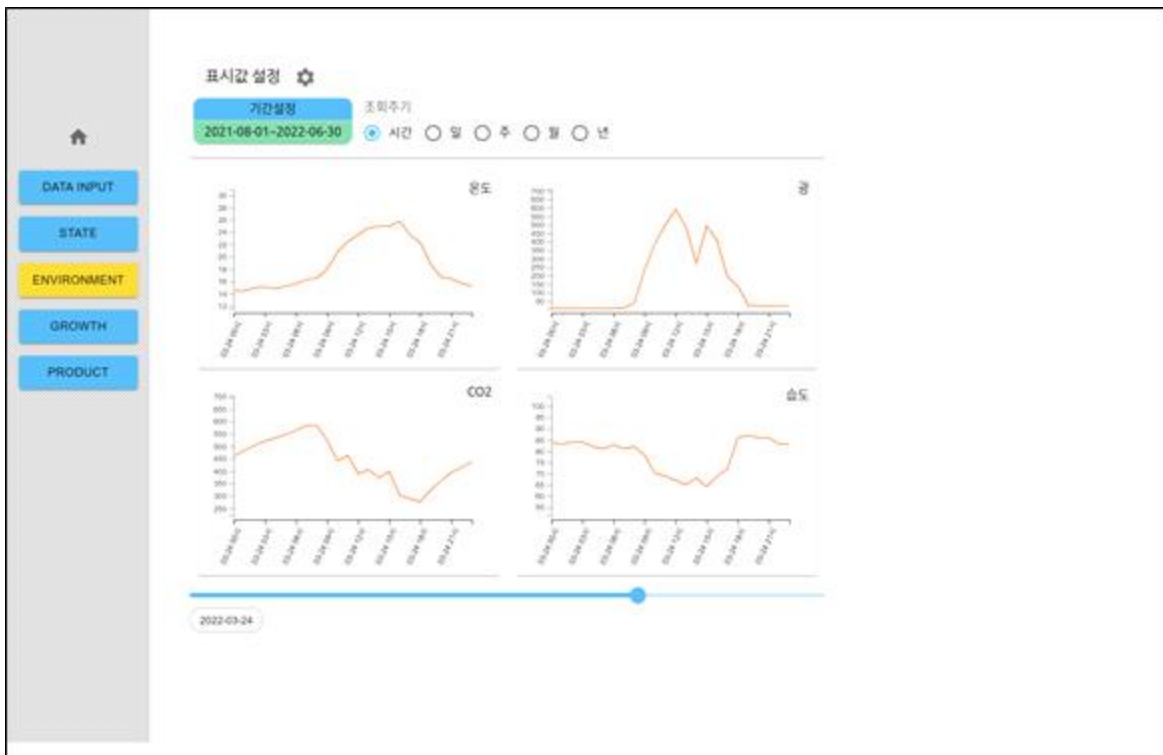


그림 3-3-26. 소프트웨어 프로그램 생육 환경 탭

- \* 작물의 시간 변화에 따른 온실의 평균 온도 변화와 함께 엽, 화방수, 과실무게, 엽면적, 초장 등의 변화를 나타내는 탭을 구성하였다.

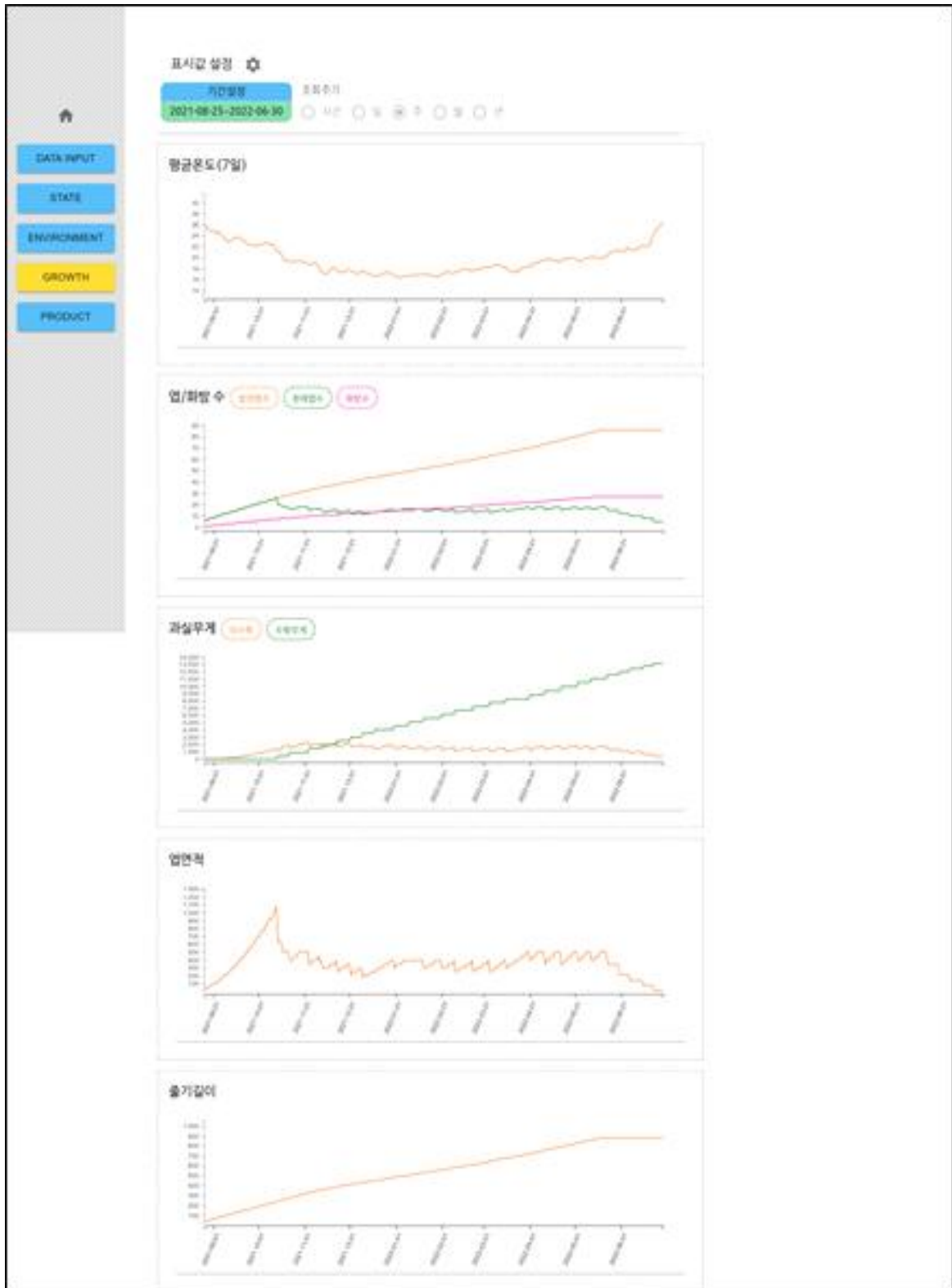


그림 3-3-27. 시간 변화에 따른 작물의 생육 상태 확인 탭

- \* 작물의 시간 흐름에 따른 수확량을 확인하는 탭은 현재 프로그램을 작성 중이다.



○ 토마토 성숙 연구

- 토마토 과실의 부피 성장이 완료된 직후 과실을 수확하여 성장상에서 광과 온도로 조합된 환경 4처리에서 성숙과정을 확인하였다. 그 결과 STL처리 하에서 성숙된 과일의 평균 성숙 일수는 8일이고, STD에서는 15일이고, WTL에서는 12일이고, WTD에서는 21일이 소요되었다. 일반적인 겨울철 주·야간의 온도조건에 비하여 여름철 주·야간의 온도조건에서 성숙된 과일이 성숙에 필요한 소요일수가 급격하게 줄었다. 즉, 온도는 과실의 성숙에 주요한 원인인 것을 확인할 수 있었다. 또한 광의 경우도, 암조건에서 성숙된 과일에 비하여 광조건에서 성숙된 과일의 성숙 일수가 그제 줄었다. 이는 광 또한 토마토 과일 성숙에 주요한 원인이라고 설명할 수 있다. 또한 본 연구에서는 온도에 비하여 광의 유·무가 더 크게 토마토의 성숙에 관여하는 것을 확인할 수 있었다. 이로 미루어 보아 겨울철 광량이 부족할 때, 토마토의 아래쪽 마지막 화방의 성숙을 촉진하기 위해서 마지막 화방 위쪽 부분의 잎도 적엽하여 과실이 충분히 광을 받아 빠르게 성숙할 수 있도록 유도하는 것이 토마토 식물의 소수의 싱크로의 분배에 대해 더욱 효율적이라 판단된다.

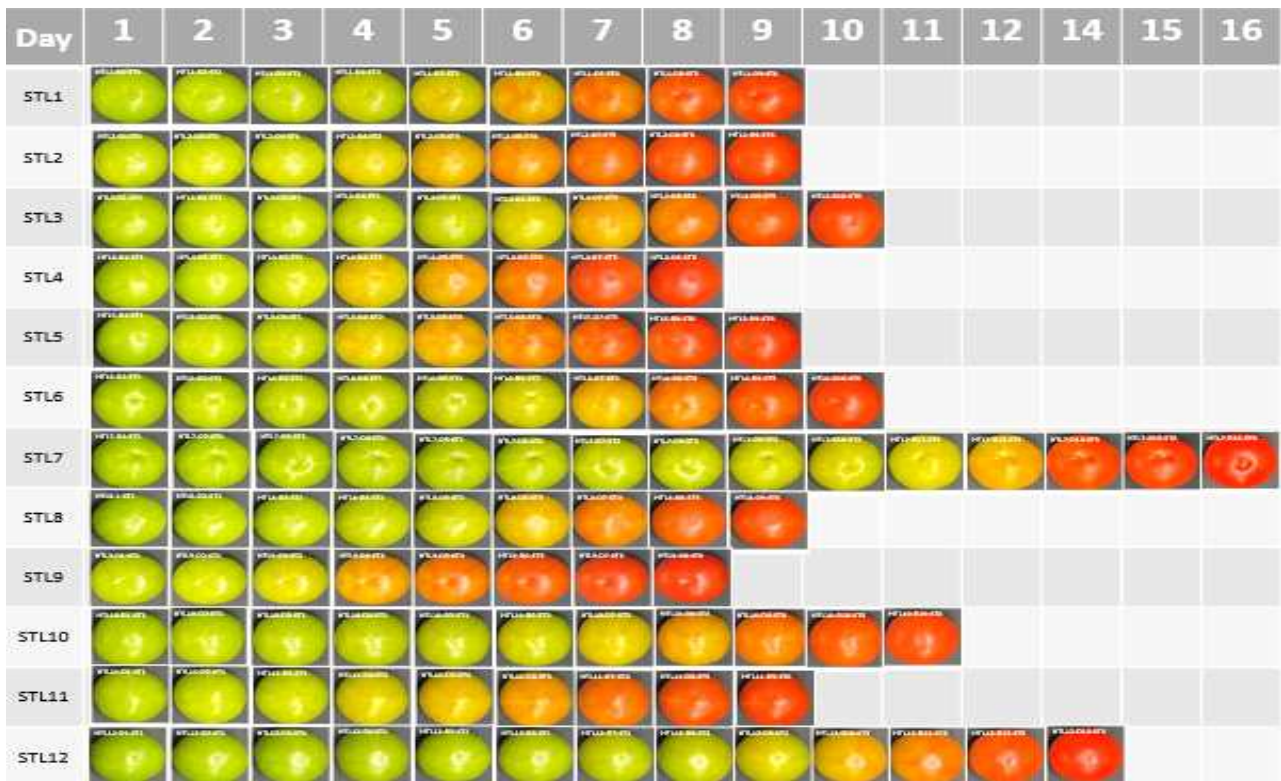


그림 3-3-28. STL처리에서 토마토 성숙 과정



그림 3-3-29. STD처리에서 토마토 성숙 과정

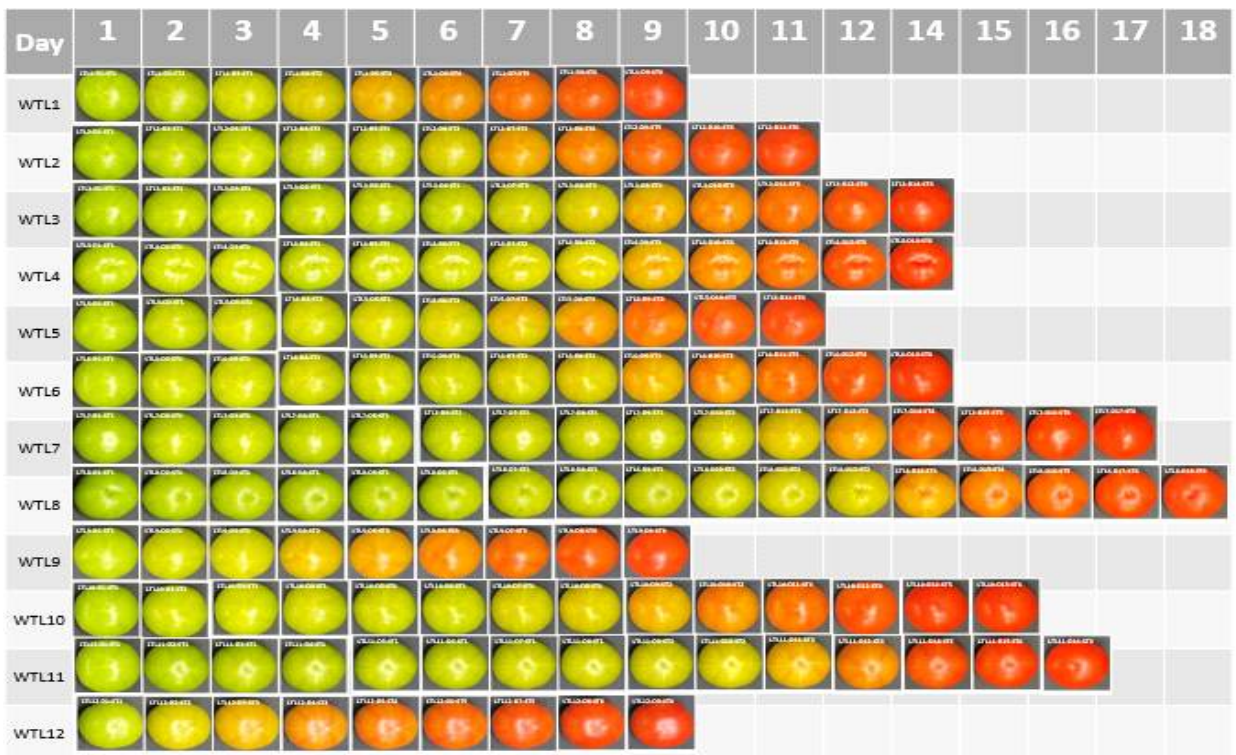


그림 3-3-30. WTL처리에서 토마토 성숙 과정

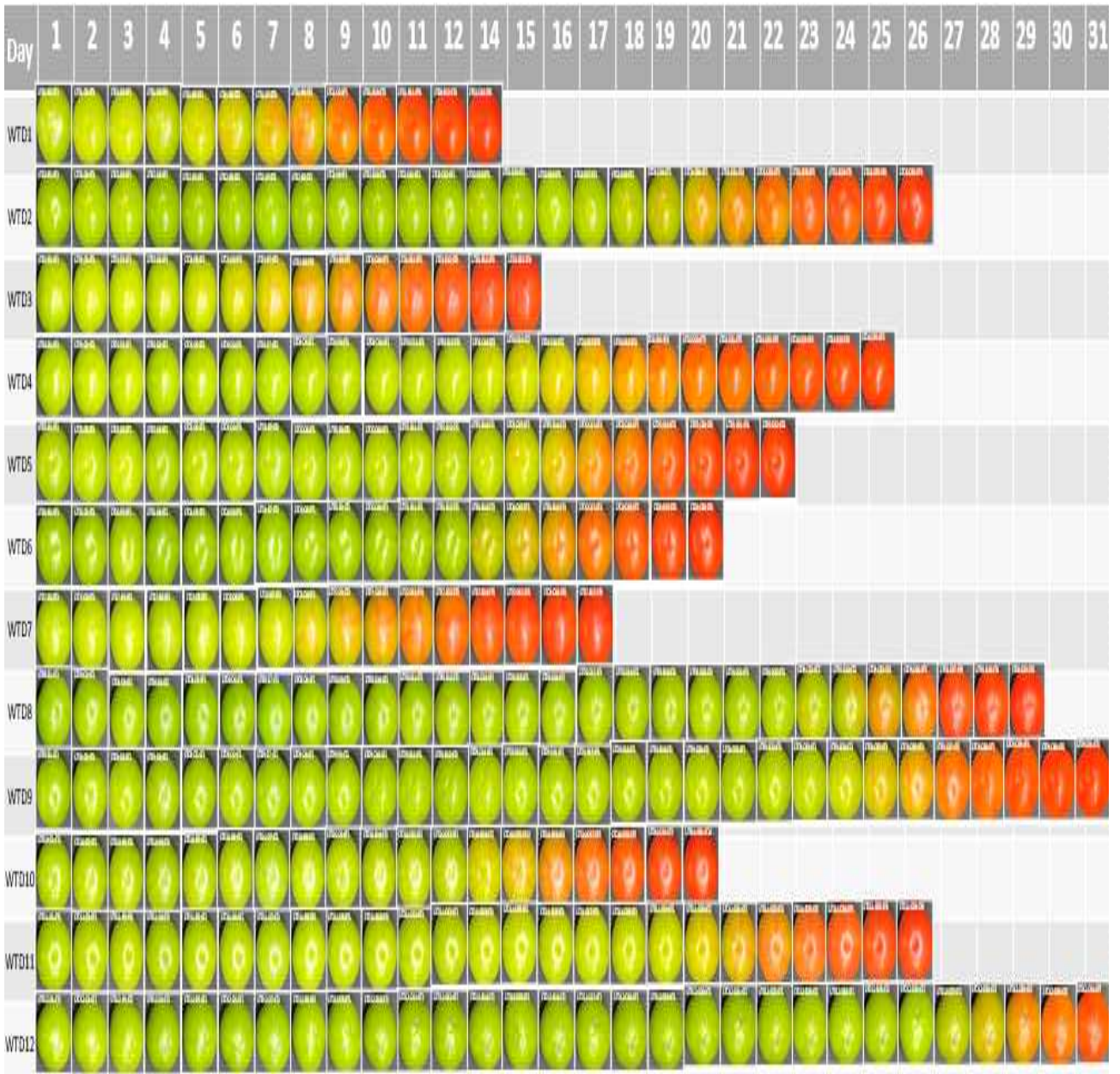


그림 3-3-31. WTD처리에서 토마토 성숙 과정

- 토마토 과실의 성숙 과정에 대한 엽록소 형광 반응을 분석한 결과, 토마토 성숙 6단계로 나눈 Green - Breaker - Turning - Pink - Light red -Red의 단계에서 뚜렷한 변화 반응을 나타내었다. 특히  $Q_Y$ 와  $R_{FD}$ 의 형광 촬영 영상에서 뚜렷한 차이가 나타났다.  $Q_Y$ 에서는 Green과 Breaker, Turning과 Pink, 그리고 Light red와 Red로 두 단계별로 구별이 확실하게 나타났다. 또한  $R_{FD}$ 에서는 Breaker와 Turning 단계가 유사하게 나타났고, Light red와 Red가 유사하였다. 하지만  $R_{FD}$ 에서는 Green과 Pink는 각각 독립적인 형상을 나타내었다.

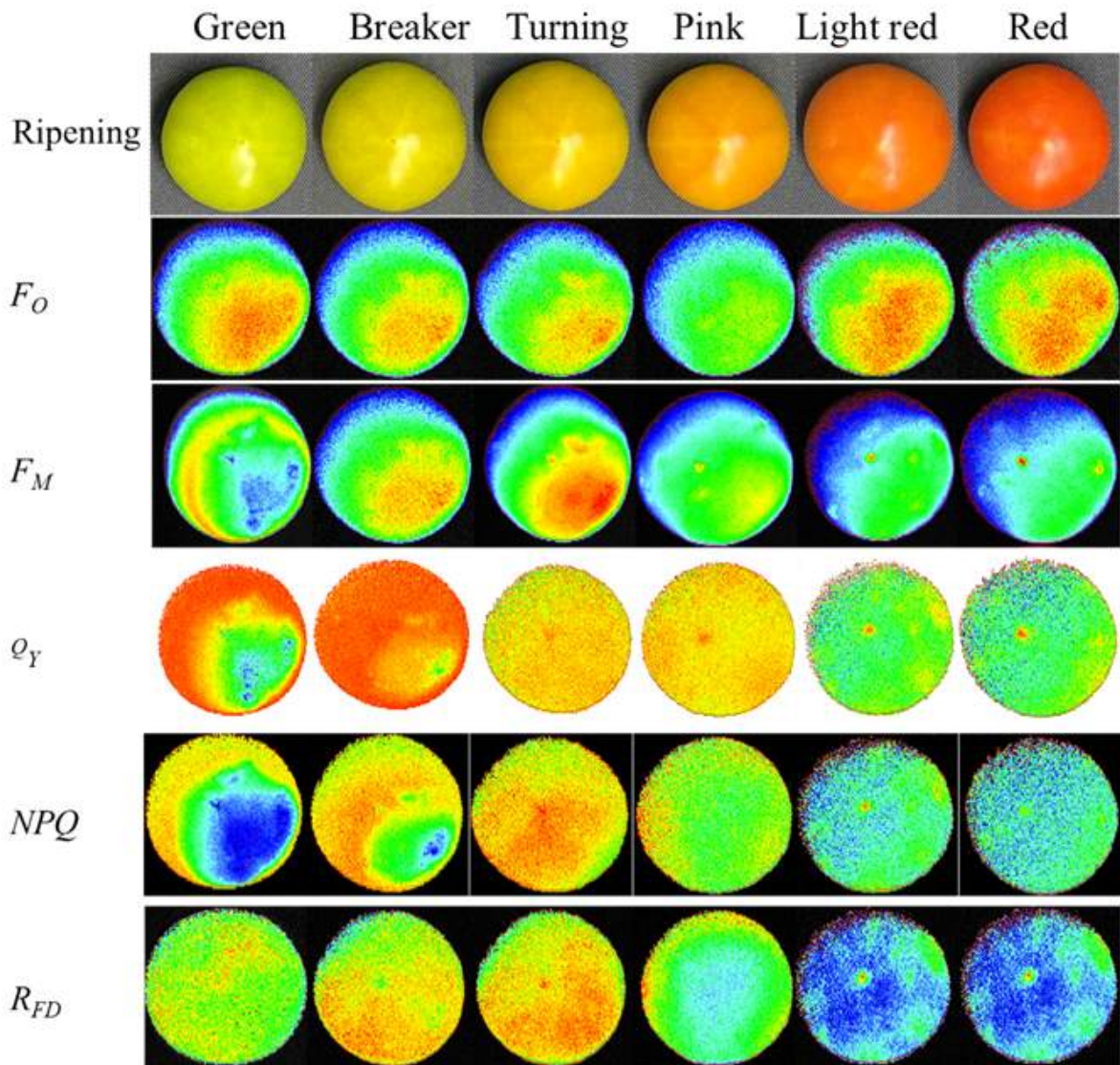


그림 3-3-32. 토마토 성숙 과정에서 형광 반응 파라메타 별 특성

- 토마토 과실의 성분을 분석한 결과, 환경 변화에 따른 당함량은 변화는 크게 나타나지 않았지만, 대체로 암처리보다는 광처리한 환경에서 생육된 과실의 당함량이 증가하였다. 반면에 산도의 경우는 온도가 높을 경우는 광을 조사한 환경에서, 온도가 낮을 경우에는 암처리 환경에서 성숙한 토마토의 산도가 높은 것으로 나타났다. 페놀함량의 경우는 높은 온도와 광을 모두 처리한 환경에서 성숙된 과실에서 높았고, 나머지 환경에서 성숙된 과실에서는 유의한 차이가 없었다. 토마토 과실의 중요한 2차 대사산물인 라이코펜의 경우는 높은 온도와 광조건에서 성숙된 과실이 월등하게 높았고, 낮은 온도와 암처리한 조건에서 성숙된 과실에서 아주 낮게 나타났다. 이로 미루어보다 토마토 과실의 성숙에서 광처리는 성숙을 앞당길뿐만 아니라 라이코펜과 같은 2차 대사산물의 합성에도 효율적인 것으로 나타났다.

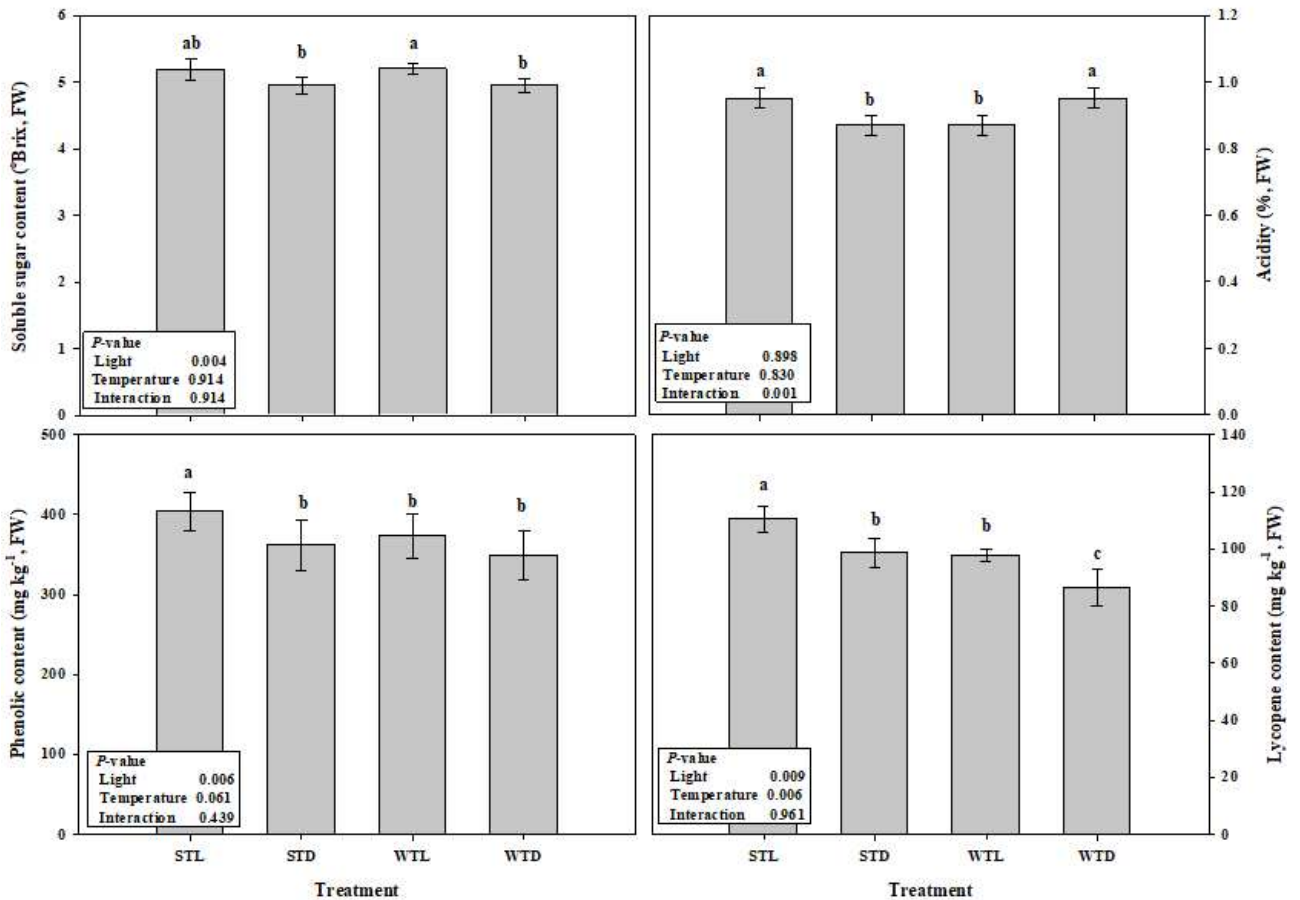


그림 3-3-33. 토마토 환경 처리에 따른 완숙된 토마토 과실의 기능성 물질 변화

○ 비파괴를 위한 엽면적 측정 연구

- 토마토 생육 모형을 만들기 위해서 광합성의 주요한 조직인 잎의 엽면적 측정은 중요한 조사 요소이다. 동일한 잎의 주기적인 생육 조사를 위해서는 비파괴적인 방법으로 엽면적을 산출할 수 있어야 하기 때문에 옆쪽, 엽장, 그리고 엽병장을 이용하여 잎의 엽면적을 추정하였다. 본 연구결과 토마토 엽면적을 산출하기 위하여 엽신과 엽폭을 이용한 방정식 ( $LA=a+b(La^2+W^2)$ )을 이용하면 동일한 잎에서 엽면적 측정기와 같은 고가의 장비 필요 없이 비파괴적으로 토마토 엽면적을 동일한 식물체를 대상으로 연속적으로 추정할 수 있어 연구에 효율적이다.

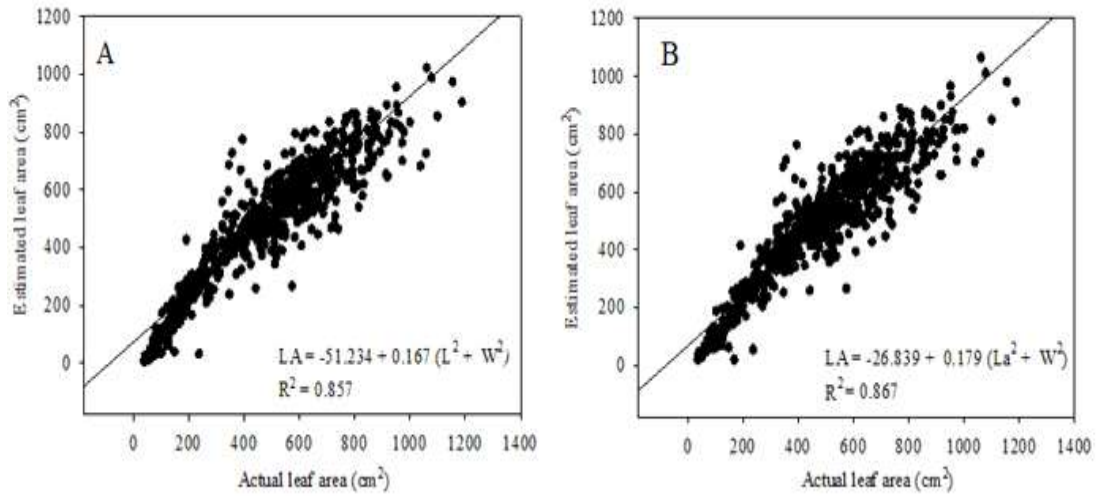


그림 3-3-34. 토마토 엽면적 실측값과 예측값의 관계

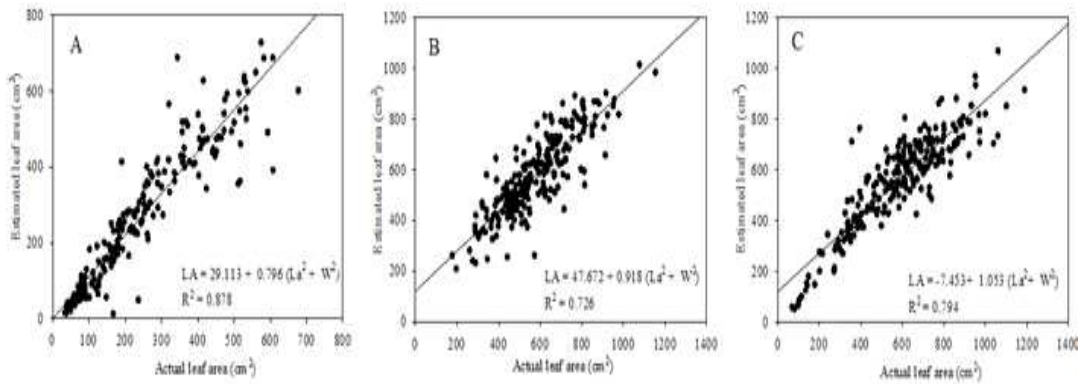


그림 3-3-35. 토마토 상, 중, 하위의 엽면적 실측값과 예측값의 관계

○ 고흡수성 수지를 이용한 토마토 양액 절약

- 고흡수성 수지를 배지로 이용하여 토마토를 재배한 공주대학교 원예학과 유리온실의 재배기간의 환경은 그림으로 나타내었다.

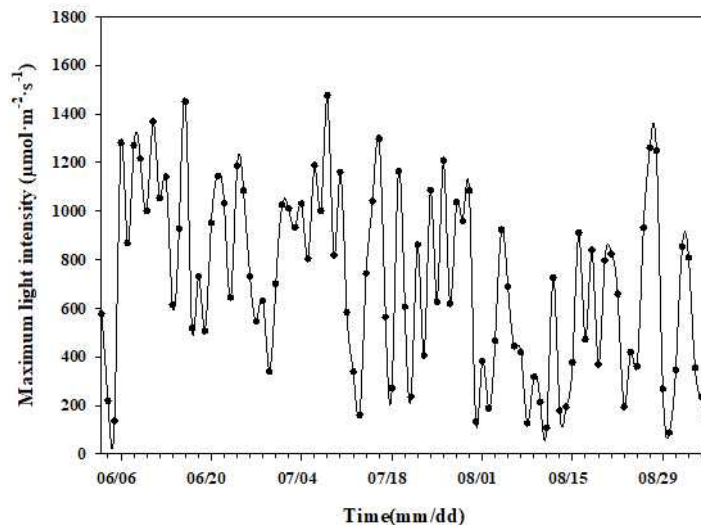


그림 3-3-36. 공주대학교 온실 내 광량 변화

- \* 고흡수성수지를 이용한 배지 실험에서 공주대학교 온실 내의 재배 기간의 최대광량 변화를 나타낸 것으로 7월과 8월에 장미기간이 길어지면서 흐른 날이 많았다.

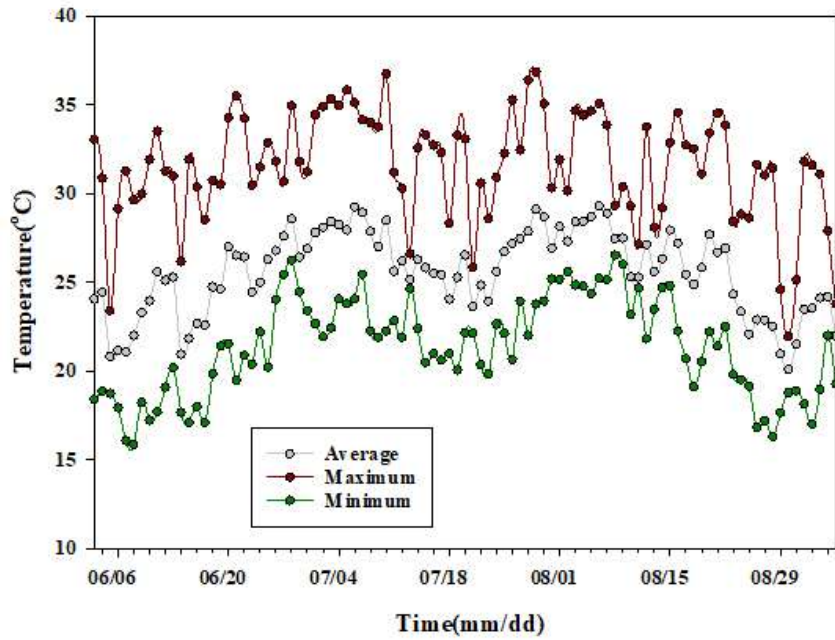


그림 3-3-37. 공주대학교 온실 내 온도 변화

- \* 고흡수성수지를 이용한 배지 실험에서 공주대학교 온실 내의 재배기간의 여름철 토마토 식물체에 스트레스를 최대한 줄이기 위해서 최고 온도가 37°C를 넘지 않도록 포그를 공중 분무하고 차광하였다.

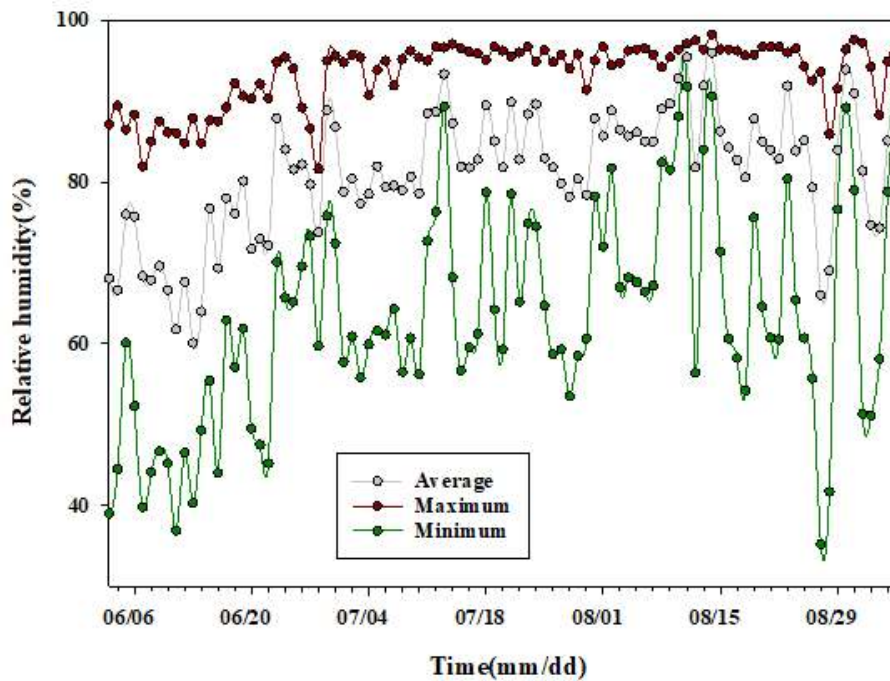


그림 3-3-38. 공주대학교 온실 내 상대습도 변화

- \* 고흡수성수지를 이용한 배지 실험에서 공주대학교 온실 내의 재배기간 중 6월에는 낮동안 상대습도가 40% 이하로 떨어져 토마토의 증산이 원활하지 못하여 40% 이하로 떨어질 때는 포그 시스템을 이용하여 상대습도를 40% 이상으로 유지했다.

표 3-3-3. 고흡수성수지(SAP)를 이용한 토마토 배지의 급액량과 배액량

날짜	7/7	7/12	7/14	7/19	7/21	7/26	7/29	8/2	8/4	8/9	8/11	8/16	8/18	8/23	8/26	8/30	9/2	9/6	9/9	9/13	9/16	9/20	9/23		
급액	100%	1.20	1.05	1.50	1.50	1.50	1.50	1.98	1.98	1.98	1.08	1.80	1.98	1.98	1.50	1.65	1.26	1.50	1.50	1.95	1.50	1.80	1.50	1.50	
배액	75%	0.90	0.79	1.13	1.13	1.13	1.49	1.49	1.49	0.81	1.35	1.49	1.49	1.13	1.24	0.95	1.13	1.13	1.46	1.13	1.35	1.13	1.13	1.13	
(L)																									
배액	S100	0.16	0.37	0.83	0.28	0.69	0.29	0.60	1.04	0.92	0.65	0.86	1.07	0.99	0.86	0.78	0.57	0.48	0.61	0.70	0.83	0.93	0.43	0.63	
배액	C100	0.16	0.36	0.87	0.41	0.67	0.23	0.59	1.01	0.86	0.61	0.86	1.03	0.94	0.87	0.62	0.60	0.40	0.62	0.69	0.86	0.96	0.44	0.67	
배액	C75	0.00	0.00	0.09	0.40	0.31	0.00	0.15	0.76	0.47	0.43	0.68	0.49	0.50	0.55	0.30	0.48	0.14	0.39	0.21	0.37	0.24	0.11	0.30	
(L)	C75	0.00	0.00	0.03	0.18	0.45	0.00	0.24	0.81	0.50	0.45	0.70	0.48	0.48	0.60	0.13	0.43	0.01	0.33	0.03	0.44	0.05	0.01	0.19	

- \* SAP 배지(S)와 코이어 배지(C)를 이용하여 관행적인 급액량 100%와 75%로 각각 관수했고, 배액량은 일주일에 2번 확인하여 표3-3-3의 결과를 얻었다. 재배기간 동안 배액량을 확인한 23일 동안 급액량은 100%의 경우 토마토 식물체당 36.69L 공급되었고, 75%는 27.52L 공급되었다. 이 때, SAP 배지에 100% 공급한 처리(S100), 코이어 배지에 100% 공급한 처리(C100), SAP 배지에 75% 공급한 처리(S75), 코이어 배지에 75% 공급한 처리(C75)의 배액량은 각각 15.51L, 15.23L, 7.3L, 6.5L로 나타났다.

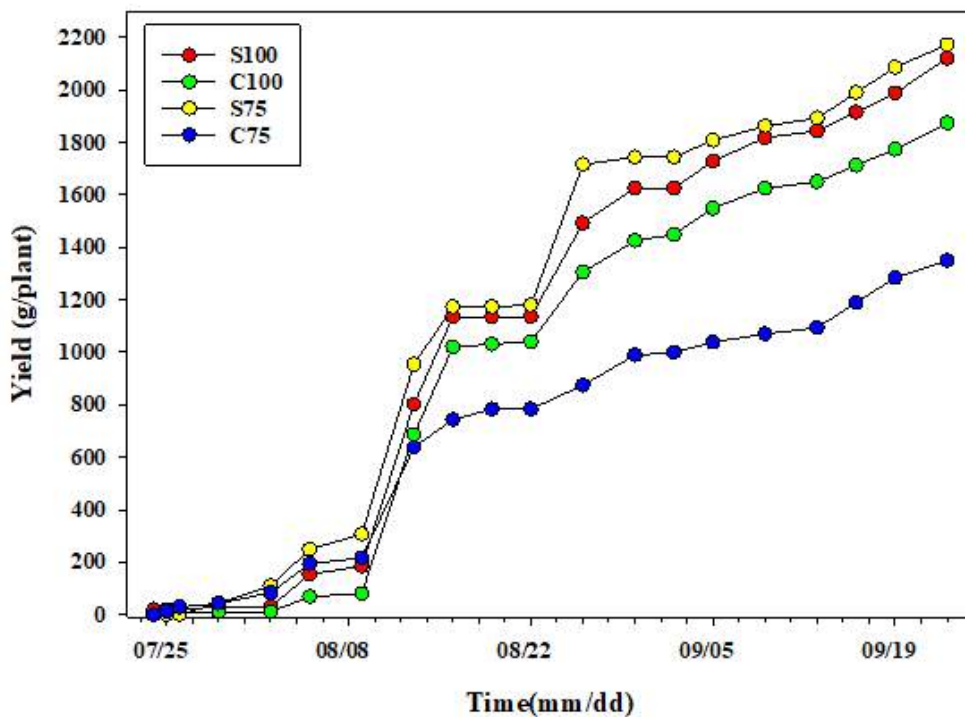


그림 3-3-39. SAP 배지 이용 토마토 생산량

- \* SAP 배지 및 코이어 배지를 이용하여 6월 3일에 정식하여 9월 24일까지 수확한 토마토의 생산량을 비교하였을 때, 7월 25일을 전·후로 모든 처리에서 수확이 시작되었고, 물량에 관계없이 SAP 배지가 코이어 배지보다 수확량이 높았다. 9월 24일까지 누적된 수확량을 보면, S75 처리에서 식물체당 약 2,173g, S100이 2,122g, C100이 1,874g,



C75가 1,351g 각각 수확되었다. S75 처리를 100%로 보면, S100이 98%, C100이 86%, C75가 62%로 나타났다. 본 실험의 결과 SAP 배지를 이용하여 75%만 급액하였을 때, 기존의 관수량보다 약 25%의 물을 절약하면서, 배액량 50% 절감하였다. 반대로 생산성은 코이어 배지에서 100% 급액한 토마토 처리구 보다 약 14% 높았다. 이로 미루어 SAP를 사용하면 물사용량을 획기적으로 줄일 수 있으면서, 생산성은 높일 수 있을 것으로 기대된다.

표 3-3-4. 논산 토마토 농가 온실 내부의 미기상 환경 데이터

월	일평균 누적광량 (J/cm <sup>2</sup> )			일평균 온도 (°C)			일평균 습도 (%)			일평균 CO <sub>2</sub> 농도 (ppm)		
	21-22	22-23	23-24	21-22	22-23	23-24	21-22	22-23	23-24	21-22	22-23	23-24
8	881.7	1186.8	1233.3	24.8	23.5	26.0	83.2	81.9	80.5	345.0	353.1	348.4
9	1281.6	1494.9	1315.2	23.0	23.1	24.0	80.2	79.8	82.6	345.2	366.1	367.1
10	1171.9	1268.8	1270.0	20.3	20.1	18.9	81.2	82.5	80.9	439.0	420.3	445.2
11	842.4	905.0	863.6	17.8	17.7	17.3	82.0	83.1	82.7	474.3	448.1	483.8
12	702.9	715.3	627.6	16.9	16.4	15.7	79.9	81.8	83.4	487.6	545.8	506.1
1	807.3	827.8		16.8	16.6		77.7	81.9		539.8	551.1	
2	1097.0	1063.1		17.7	17.2		78.3	82.7		528.2	466.1	
3	1148.9	1448.7		18.1	18.5		80.5	78.6		444.0	441.9	
4	1716.8	1475.1	-	19.6	18.9	-	76.2	76.8	-	412.2	399.8	-
5	2034.9	1625.9		20.4	20.5		74.4	76.9		379.6	375.5	
6	1579.9	1780.8		23.6	23.6		80.0	79.2		339.2	350.3	

○ 토마토 농가 재배 데이터 수집

- 온실 내부 미기상 환경 데이터 수집

\* Cropbox 기반 프로세스 모델에 입력 데이터로 사용하기 위해 2021년 8월 25일 - 2022년 6월 30일, 2022년 8월 22일 - 2023년 7월 5일, 2023년 8월 25일 - 2023년 12월 31일까지 3작기에 걸친 환경 변수 데이터를 수집하였다.

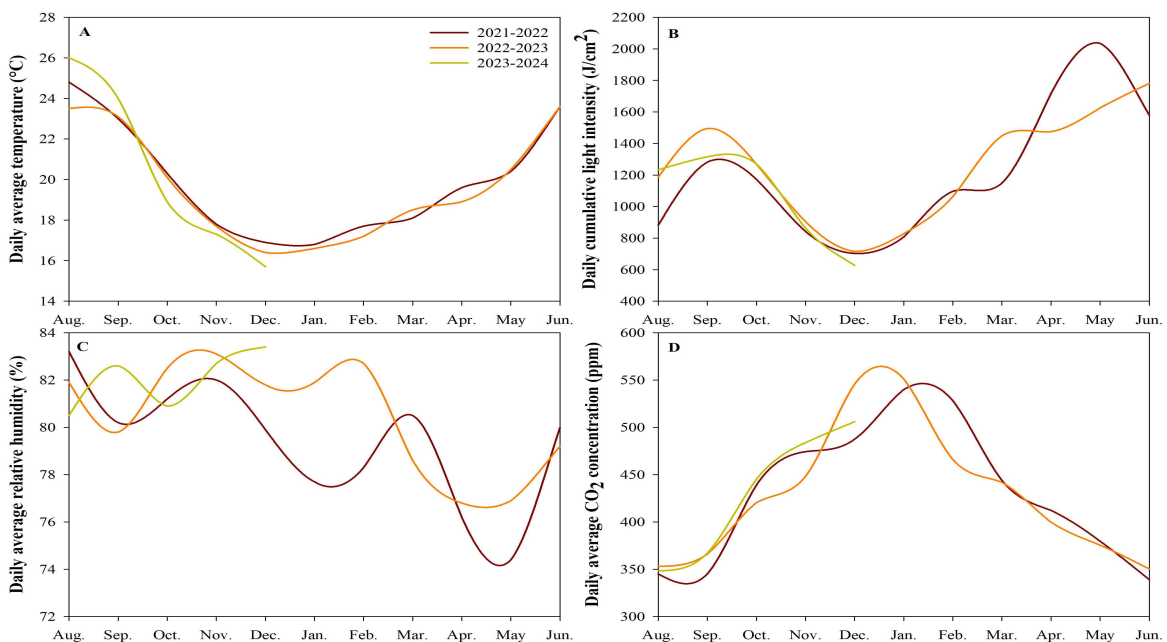


그림 3-3-40. 토마토 재배 작기 동안 온실 내부의 미기상 환경 변화. A, 일평균 온도; B, 일누적 광량; C, 일평균 상대습도; D, 일평균 이산화탄소 농도.

\* 그림 3-3-40에서 온실 내부 일평균 온도는 최고 26℃(8월), 최저 15℃(12월)로 관리되고 있었다. 일누적 광량은 12월에 700J/cm<sup>2</sup> 정도로 낮은 광량을 보이다가, 최고 광량인 5월까지 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 일평균 상대습도는 평균 80%로, 환기가 이뤄지지 않는 야간에는 거의 포화를 이루다가 주간에 습도는 떨어지고, 광량이 증가하는 시기에 상대 습도는 떨어지는 특징이 나타났다. 일평균 이산화탄소 농도는 난방이 이루어지는 겨울철 500ppm 이상의 높은 값을 나타내는 상태를 보였다.

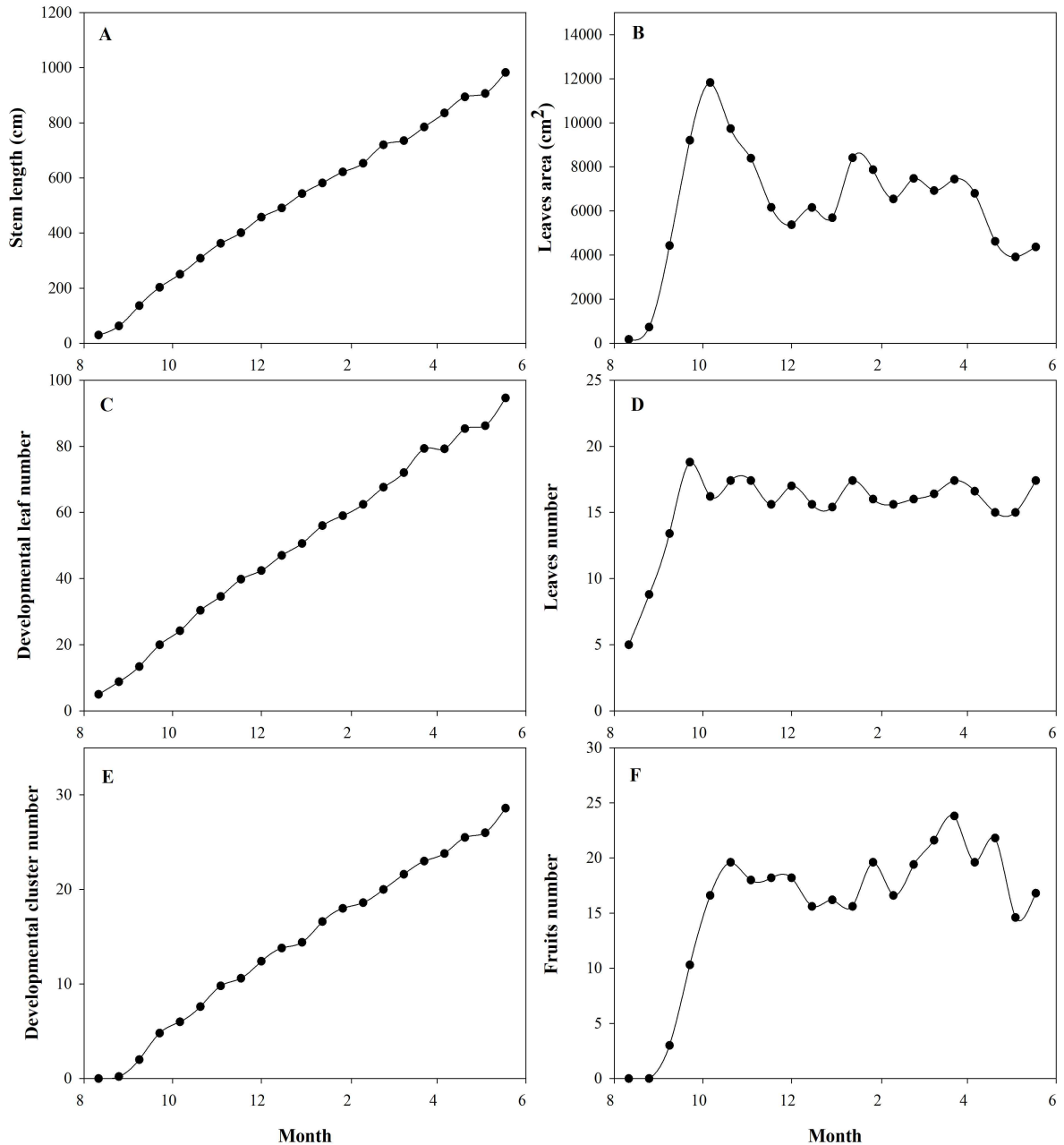


그림 3-3-41. 온실에서 재배된 토마토의 초장, 엽면적, 엽 수, 화방 수 등 생육 변화

- 온실 재배 토마토 생육 및 수확량 데이터 수집

\* 2022년 8월 11일 가정식일부터 2023년 5월 18일까지 토마토 재배동안 2주 간격으로 생육조사를 수행하였다. 초장(그림 3-3-41A)은 정식 초기 약 30cm부터 정식 후 280일 지난 시점에는 약 980cm로 33배 정도 증가하였다. 작물 전체 엽면적(그림 3-3-41B)은 엽이 발달됨에 따라 증가하다가, 적엽이 시작된 2022년 10월 18일 이후

에는 약 6,800cm<sup>2</sup> 정도로 관리되었고, 재배 후기에는 약 4,300cm<sup>2</sup>로 엽면적이 줄어들 수 있었다.

- \* 토마토 작물의 발생 엽 수(그림 3-3-41C)는 정식 초기 5매에서 정식 280일 후에 90매 증가하였고, 적엽을 통해 16매에서 18매 사이로 관리되었다. 토마토 화방(그림 3-3-41E)은 약 28-29 화방까지 전개되다가 적심 이후에는 남은 화방의 과실 발달과 성숙이 이루어졌다.

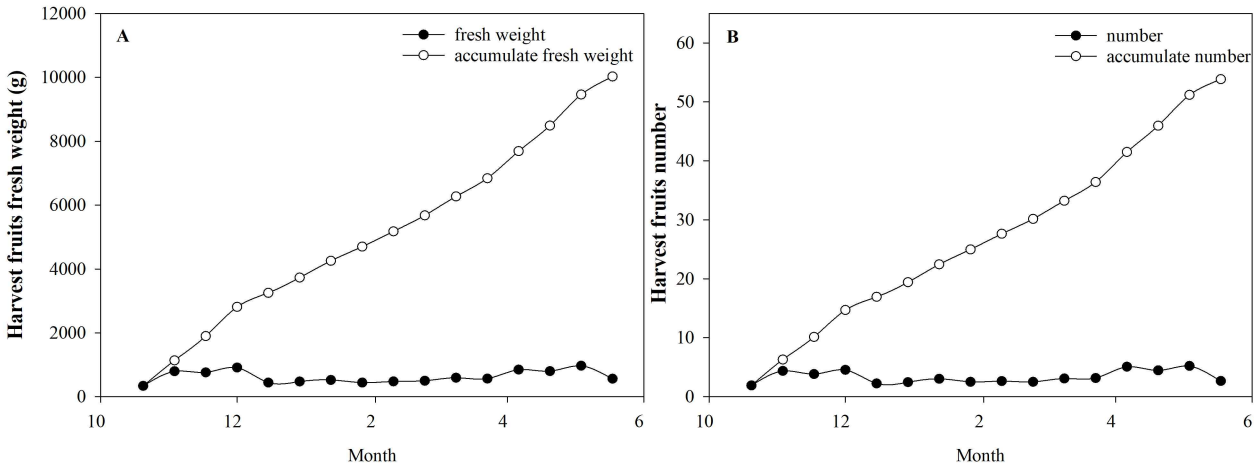


그림 3-3-42. 수확된 토마토 과실의 생체중 및 개수

- \* 토마토 수확이 시작된 2022년 10월 18일부터 2주 간격으로 수확된 과실의 개수와 생체중을 조사하였다. 작물체 당 총 과실 수확 개수는 약 53개였고, 총 수확량은 약 10,026g로 조사되었다.

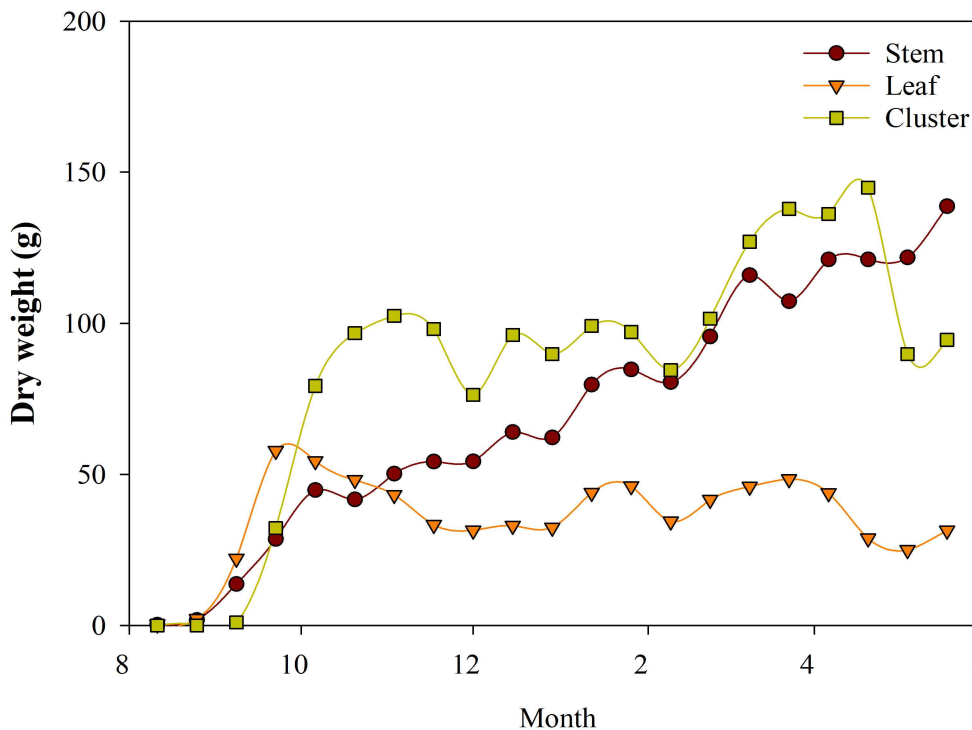


그림 3-3-43. 온실 재배 토마토 식물체의 부위별 건물중량 변화

- \* 그림 3-3-43은 2022년-2023년 작기에 재배된 토마토의 식물체 기관별 건물중 변화를 나타낸 그래프이다. 토마토 줄기 건물중은 정식 시 0.2g부터 작기 후반에는 138.7g까

지 꾸준히 증가하였다. 토마토 엽의 건물중은 적엽 시행 전인 10월 초까지 증가하다가 이후에는 평균 41g으로 엽 건물중을 조절하였다. 토마토 화방의 건물중은 10월 중순 수확 전까지 증가하다가 평균 95g를 유지하였고, 그림 3-3-41F와 같이 3월부터 4월에는 과실 수의 증가로 인해 화방 무게가 증가한 것으로 판단된다.

- 온실 재배 토마토의 월별 광합성량 변화

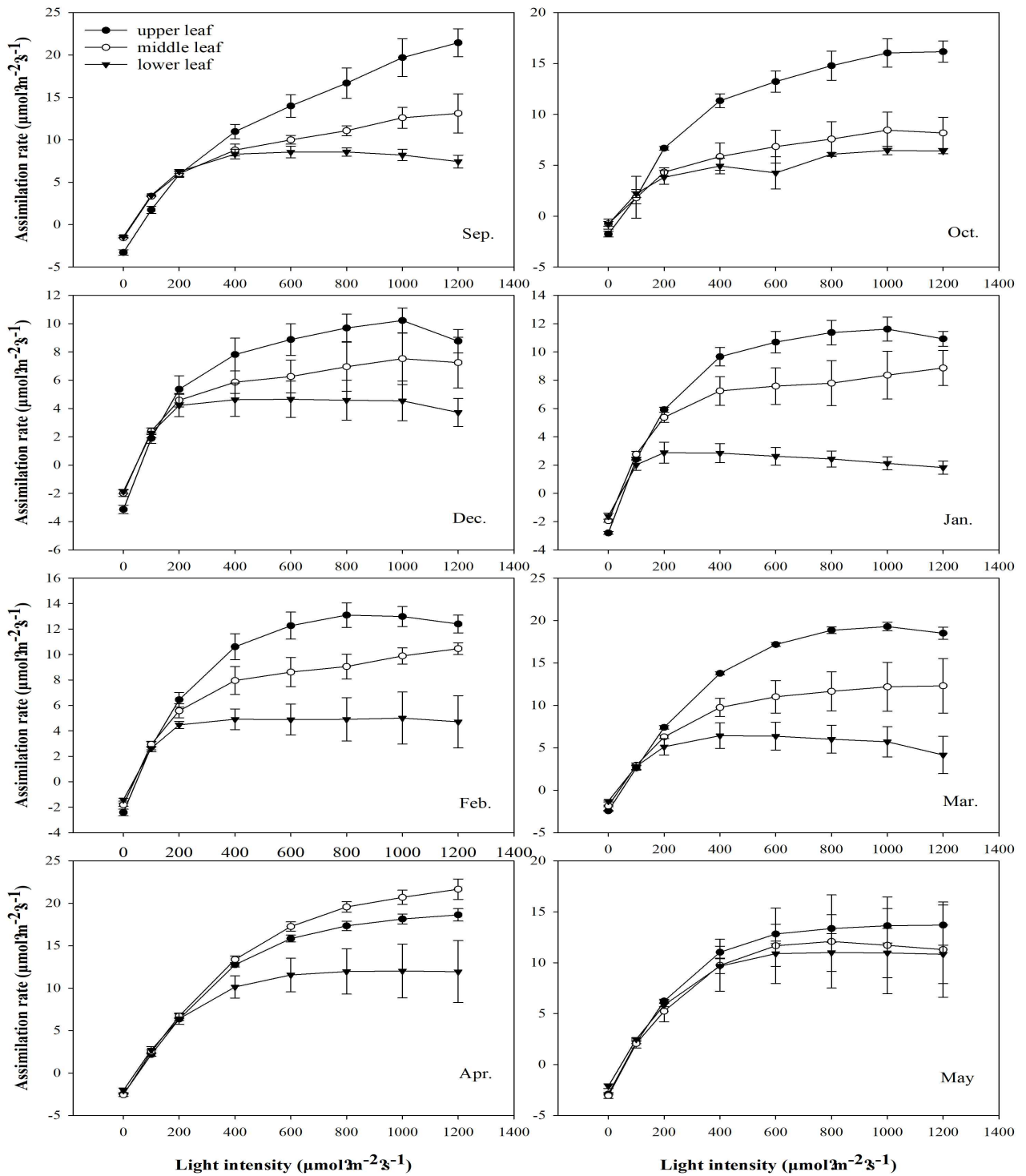


그림 3-3-44. 온실 재배 토마토 식물체의 착엽 위치별 광합성량 변화

\* 그림 3-3-44는 온실 재배 토마토의 식물체의 착엽 위치별 광합성량 변화를 나타낸 것

으로 상위엽에 비하여 하위엽의 광합성효율은 월등히 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 미루어 보아 저광기인 겨울로 접어들수록 광량과 온도 환경이 나빠지기 때문에 하위엽은 강하게 적엽을 실시하여 관리하는 것이 전반적으로 효율적인 토마토 관리 방법으로 판단된다.

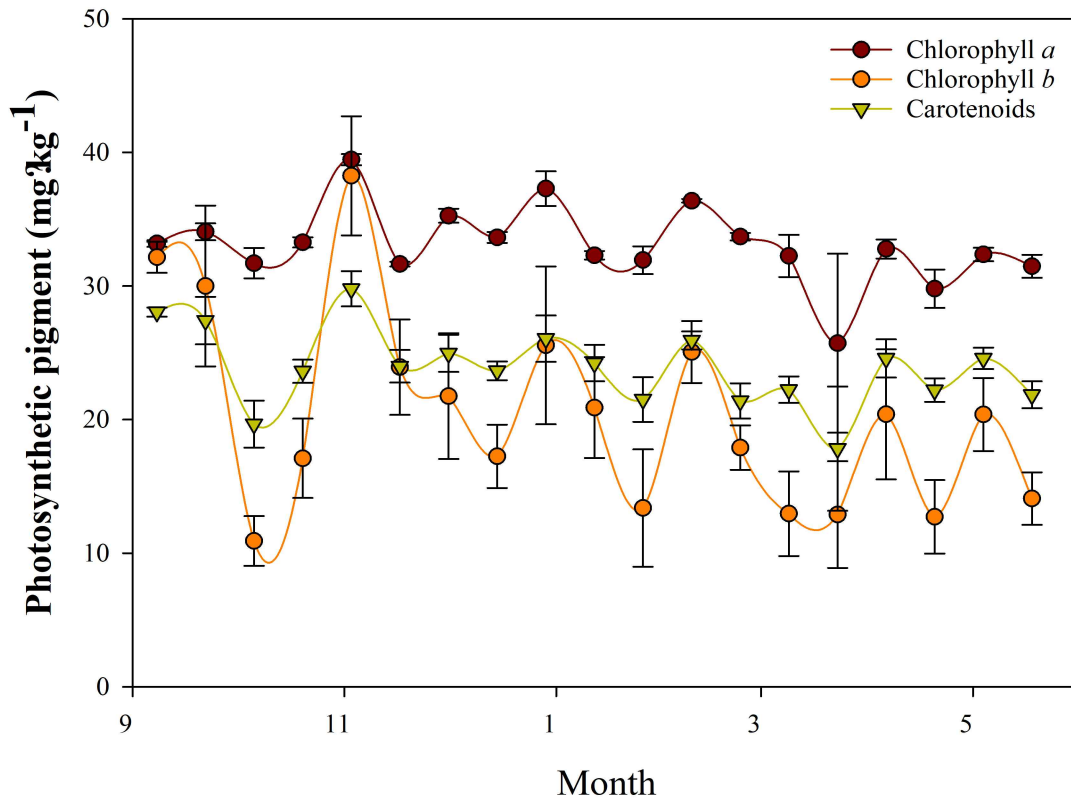


그림 3-3-45. 온실 재배 토마토 잎의 엽록소 함량 변화

\* 그림 3-3-45는 9월부터 6월 사이의 토마토 잎의 엽록소 함량 변화에 대한 것이다. 광합성에 실질적으로 가장 많은 영향을 미치는 엽록소 a의 경우는 월별에 따른 변화가 크지 않았지만, 엽록소 b의 경우는 전반적으로 겨울에 그 함량이 크고 더운 여름에는 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 카로티노이드의 경우도 추운 겨울철에 함량이 조금 더 늘어나는 것으로 판단된다.

○ Cropbox 기반 모델링

- 생육변수, 환경변수 및 광합성률과 상관분석

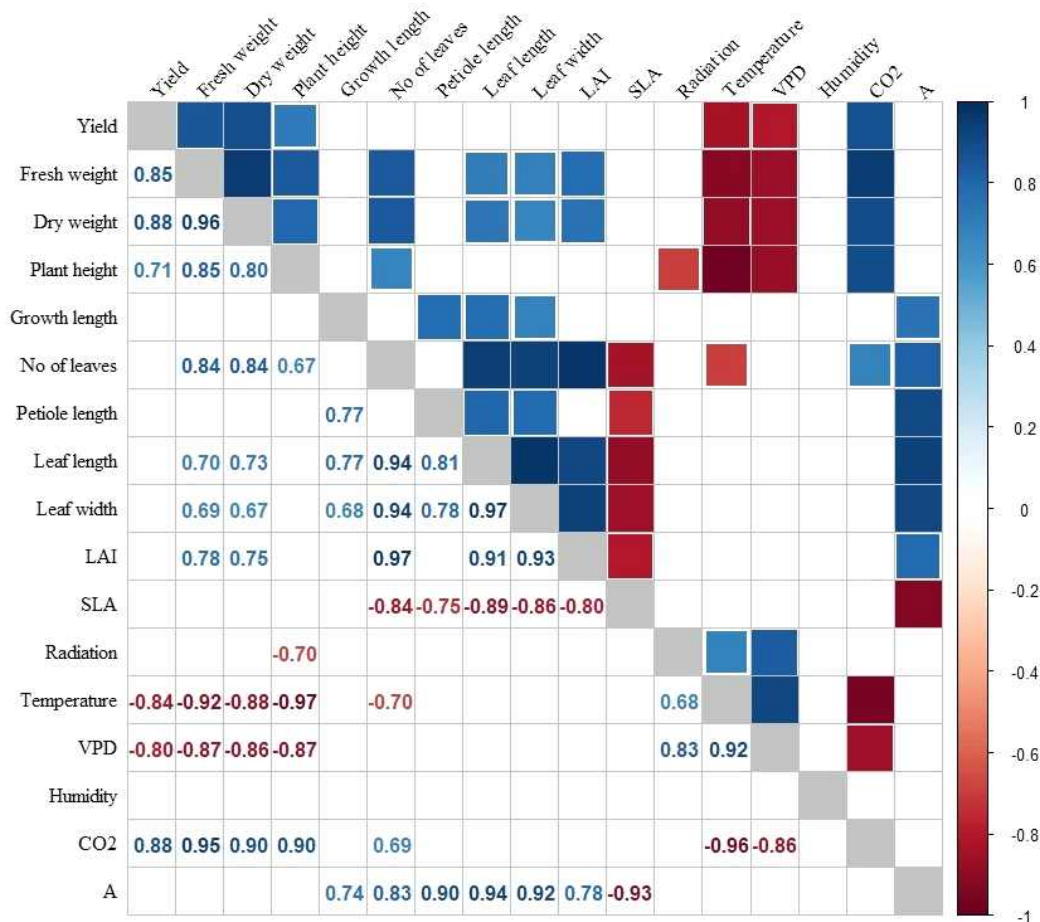


그림 3-3-46. 온실 재배 토마토의 생육 변수, 환경 변수 및 광합성량 간의 상관분석

\* 그림 3-3-46은 피어슨의 상관관계를 이용하여 토마토의 생육 변수, 온실 내부 환경 변수 및 광합성 변수 간의 상관관계를 나타내었다. 그 결과 온실 내부의 온도가 수확량 ( $r=-0.80$ ), 생체중량( $r=-0.92$ ), 건물중량( $r=-0.88$ ), 초장( $r=-0.97$ ), 엽 수( $r=-0.70$ )와 높은 음의 상관관계를 가지는 것을 확인하였다. 또한 온도와 높은 양의 상관관계를 가지는 VPD도 앞의 생육 변수들과 높은 음의 상관관계를 가졌다. CO<sub>2</sub>는 수확량, 생체중량, 건물중량, 초장, 엽 수와 높은 양의 상관관계를 보였는데, 이는 온실 내부의 온도가 떨어지면 난방을 통해 관리하여 CO<sub>2</sub> 농도가 높아졌고, 온도( $r=-0.96$ )와 높은 음의 상관관계를 가졌기 때문으로 해석된다. 따라서 토마토 작물 생육에 가장 큰 영향을 주는 환경 변수는 온도 조건이라는 결과를 얻었다.

- 프로세스 기반 모델 코딩 작성

\* 그림 3-3-12에서 작성한 Cropbox를 기반으로 한 토마토 모형의 관계도를 기반으로 각 모듈이 작물체 기관의 발달과 생장을 표현하도록 코딩을 작성하였다. 생육 변수와 환경 변수의 상관관계 분석을 통해 생육 변수에 가장 큰 연관성을 가진 온도 변수를 이용한 조건문으로 각 모듈의 상태 변화가 일어나도록 코딩을 작성하였다.

```
@system StemGrowth begin
  weather ~ hold
  calendar ~ hold
  cut_date ~ hold
  initial_stem ~ hold
  T ~ hold

  SGR(T, dt=calendar.time, stem_length, cut_date):stem_growth_rate => begin
    if stem_length < 400u"cm"
      sgr = 29.0/7
    else
      sgr = 23.0/7
    end
    if T < 18u"°C"
      sgr = 17.0/7
    end
    if dt > cut_date
      sgr = 0
    end
    sgr
  end ~ track::float(u"cm/d")

  stem_length(SGR): length => SGR ~ accumulate::float(u"cm",
  init=initial_stem)
end
```

그림 3-3-47. 토마토 모델링 중 줄기 성장 관련 모듈

- \* 그림 3-3-47에서는 줄기의 성장에 관련한 모듈을 작성하였다. 연속 성장을 하는 무한성장형 토마토는 어느정도 일정한 성장률을 가지는데, 이 모델에서는 줄기 길이가 400cm 이하일 때 일주일 동안 줄기 생장은 29.0cm이고, 화방 기관이 더욱 발달되고 줄기의 양분 수송 속도가 느려지는 작기 중반기인 400cm 이후에서는 일주일 동안 23.0cm가 성장하도록 구성하였다. 또한 온도가 낮아질수록 초장의 성장도 느려지기 때문에 온도가 18°C 이하로 떨어지는 11월부터 2월까지의 일주일간 17.0cm가 성장하도록 설정하였고, 적심 이후의 성장률은 0으로 제한하였다. 초기 줄기 길이에 줄기의 성장률을 일마다 반복하여 누적하도록 하여 줄기 길이모듈을 구성하였다.

```

@system Leaf(Organ) begin
  node_tracker ~ ::NodeTracker(override)
  total_leaf_length(fd=node_tracker.first_deleaf, dap=pheno.DAP) => begin
    week = Cropbox.deunitfy(dap) / 7.0
    l = 39
    if !fd
      l=(139.32*week-18.778)/24.0
    end
    if l < 0
      l = 0
    end
    l
  end ~ track::float(u"cm")

  total_leaf_width(fd=node_tracker.first_deleaf, dap=pheno.DAP) => begin
    week = Cropbox.deunitfy(dap) / 7.0
    w = 38
    if !fd
      w=(148.37*week-80.465)/24.0
    end
    if w < 0
      w = 0
    end
    w
  end ~ track::float(u"cm")

  leaf_area(l=total_leaf_length, w=total_leaf_width) => begin
    a = -26.8u"cm^2" + 0.18(l^2 + w^2)
    if a < 0u"cm^2"
      a = 0u"cm^2"
    end
    a
  end ~ track(u"cm^2")
end

```

그림 3-3-48. 토마토 모델링 중 엽면적 관련 모듈

- \* 그림 3-3-48은 엽면적 추정에 관한 모듈인데, 엽면적 모델링을 위해 엽장과 엽폭을 먼저 추정하였다. 'node\_tracker' 모듈을 이용해 override된 엽 수를 사용하였고, 첫 적엽일을 기준으로 엽 수가 제한되었다. 초기 모델은 모델링 간격을 일주일 단위로 하여 실측치와의 비교를 위해 엽 성장의 변화 폭을 줄이고자 하였다. 엽장과 엽폭은 적엽 전 초기 생육 단계에서는 간단한 식을 이용하다가, 첫 적엽이 이뤄진 다음부터는 임의의 상수값을 엽장(39cm)과 엽폭(38cm)으로 사용하였다. 엽면적은 생육조사를 통해 얻은 실측치로 회귀분석을 통해 엽장과 엽폭을 변수로한 식을 만들어서 사용하였다.



```

@system NodeAppearance begin
  weather ~ hold
  T_avg(weather.T_avg) ~ track(u"C")

  NAR(T=weather.T_avg):node_appearance_rate => begin
    winkler = ustrip(T) * 7
    if winkler > 160
      3.0/7
    elseif 160 >= winkler > 150
      2.7/7
    elseif 150 >= winkler > 140
      2.5/7
    elseif 140 >= winkler > 130
      2.3/7
    elseif 130 >= winkler > 120
      1.8/7
    else
      1.6/7
    end
  end ~ track(u"d^-1")
end

```

그림 3-3-49. 토마토 모델링 중 엽 발생 관련 모듈

- \* 그림 3-3-49는 엽 발생과 관련한 모듈로 입력 데이터로 얻은 온도를 통해 일주일간의 적산온도를 만들어 이용하였다. 적산온도가 160°C 이상일 경우 3매의 엽이 출현되고, 온도 조건에 따라 차등을 두었다. 120°C 미만의 적산온도에서는 1.6매의 엽이 출현되도록 하였다.

```

@system FruitSetting begin
  winkler ~ hold
  num_fruits(winkler) => begin
    num = 2.4
    if winkler > 150u"K*d"
      num = 2.2
    elseif winkler > 145u"K*d"
      num = 2.3
    elseif winkler > 140u"K*d"
      num = 2.8
    elseif winkler > 130u"K*d"
      num = 3.0
    elseif winkler > 120u"K*d"
      num = 2.6
    elseif winkler > 110u"K*d"
      num = 2.4
    end
    num
  end ~ track::float
end

```

그림 3-3-50. 토마토 모델링 중 화방당 과실 수 관련 모듈

- \* 그림 3-3-50은 화방당 과실 수의 세팅에 관한 모듈이고, 이 모듈에서는 적과의 개념이 포함되어 있어, 농가의 적과 관리 방법에 큰 영향을 받는다. 실험을 수행한 농가에서는 일주일의 적산온도가 130°C일 때 화방당 과실 수가 많았고, 적산온도가 150°C 이상일 때 화방당 2.2개의 과실을 수확하도록 설정하였다.

```

using Unitful
include("fruitsetting.jl")

@system FruitGrowth(FruitSetting) begin
    winkler ~ hold
    default_limit => 200 ~ preserve::float(parameter, u"g")
    FGR: fruit_growth_rate => 200/7/7 ~ preserve::float(parameter, u"g/d")
    FGL(l0=default_limit, winkler): weight_limit=>begin
        lim = l0
        if winkler > 150u"K*d"
            lim = 160
        elseif winkler > 145u"K*d"
            lim = 170
        elseif winkler > 140u"K*d"
            lim = 180
        elseif winkler > 130u"K*d"
            lim = 190
        elseif winkler > 120u"K*d"
            lim = 200
        elseif winkler > 110u"K*d"
            lim = 220
        else
            lim = 224
        end
        lim
    end ~ track::float(u"g")
end

```

그림 3-3-51. 토마토 모델링 중 과실 무게 관련 모듈

- \* 그림 3-3-51는 과실의 무게 성장에 관련된 모듈로, 적산온도가 높아지면 과실의 제한 생체중이 줄어드는 특징을 가진다. 이 모듈은 수확 시기의 환경별로 과실의 중량을 다르게 해 수확량의 변화가 생기게 한다.

```

@system FruitRipening begin
    winkler ~ hold

    m => 0.10256 ~ preserve::float
    b => 24.41 ~ preserve::float
    ratio => 0.14 ~ preserve::float

    FCR: fruit_color_rate => 100 / 1 / 7 ~ preserve::float(u"d^-1")

    total_period(winkler, m, b) => begin
        if winkler > 160u"K*d"
            tp = 8
        elseif winkler < 102u"K*d"
            tp = 14
        else
            tp = m * ustrip(winkler) + b
        end
        tp * 0.7
    end ~ track(u"d")

    FRP(tp=total_period, ratio): ripe_period => (1-ratio) * tp ~ track(u"d")
    FCP(tp=total_period, ratio): color_period => ratio * tp ~ track(u"d")
end

```

그림 3-3-52. 토마토 모델링 중 과실 성숙 시기 관련 모듈

```

@system Peduncle(Organ) begin
  order ~ ::int(override) # preserve
  last_node ~ ::int(override) # preserve

  fruit_weight(r=phenology.FGR, fruit_grown) => begin
    if fruit_grown
      0
    else
      r
    end
  end ~ accumulate::float("g", init=0.0)

  fruit_grown(w=fruit_weight, lim=phenology.FGL) => begin
    if w >= lim
      true
    else
      false
    end
  end ~ flag

  fruit_color_perc(r=phenology.FCR, fruit_grown, fruit_colored) => begin
    if !fruit_grown || fruit_colored
      0
    else
      r
    end
  end ~ accumulate::float(init=0.0)

  fruit_colored(fc=fruit_color_perc) => begin
    fc >= 100
  end ~ flag

  harvested(fruit_colored) => fruit_colored ~ flag

  num_fruits(n=phenology.num_fruits) => n ~ track::float

  total_weight(w=fruit_weight, num_fruits) => w*num_fruits ~
  track::float("g")

  unripe_weight(harvested, total_weight) => begin
    if !harvested
      total_weight
    else
      0
    end
  end ~ track::float("g")

  harvest_weight(w=fruit_weight, harvested, num_fruits) => begin
    if !harvested
      0
    else
      w*num_fruits
    end
  end ~ remember::float("g", when=harvested)
end

```

그림 3-3-53. 토마토 모델링 중 과실 생산량 관련 모듈

\* 그림 3-3-53은 과실 생산량을 계산하는 모듈이다. 3엽이 출현하면 1화방이 발달하는 형태학적인 구조를 따라 화방의 번호를 추정하였다. 토마토 과실 무게 모듈에서 설정한 제한 생체중만큼 과실 생장이 이루어지면, 2022년 토마토 성숙 시기에 관한 연구와 같이 적산온도에 따라 과실의 성숙 시기가 조절되도록 하였다(그림3-3-52). 과실이 성장과 성숙을 마친 시기에 수확이 이루어지고, 화방당 과실 수와 과실의 제한 생체중의 영향을 받아 총 토마토 과실 생산량과 개수를 추정하도록 구성하였다.

○ Cropbox 기반 토마토 모델 검증

– 모델링 결과

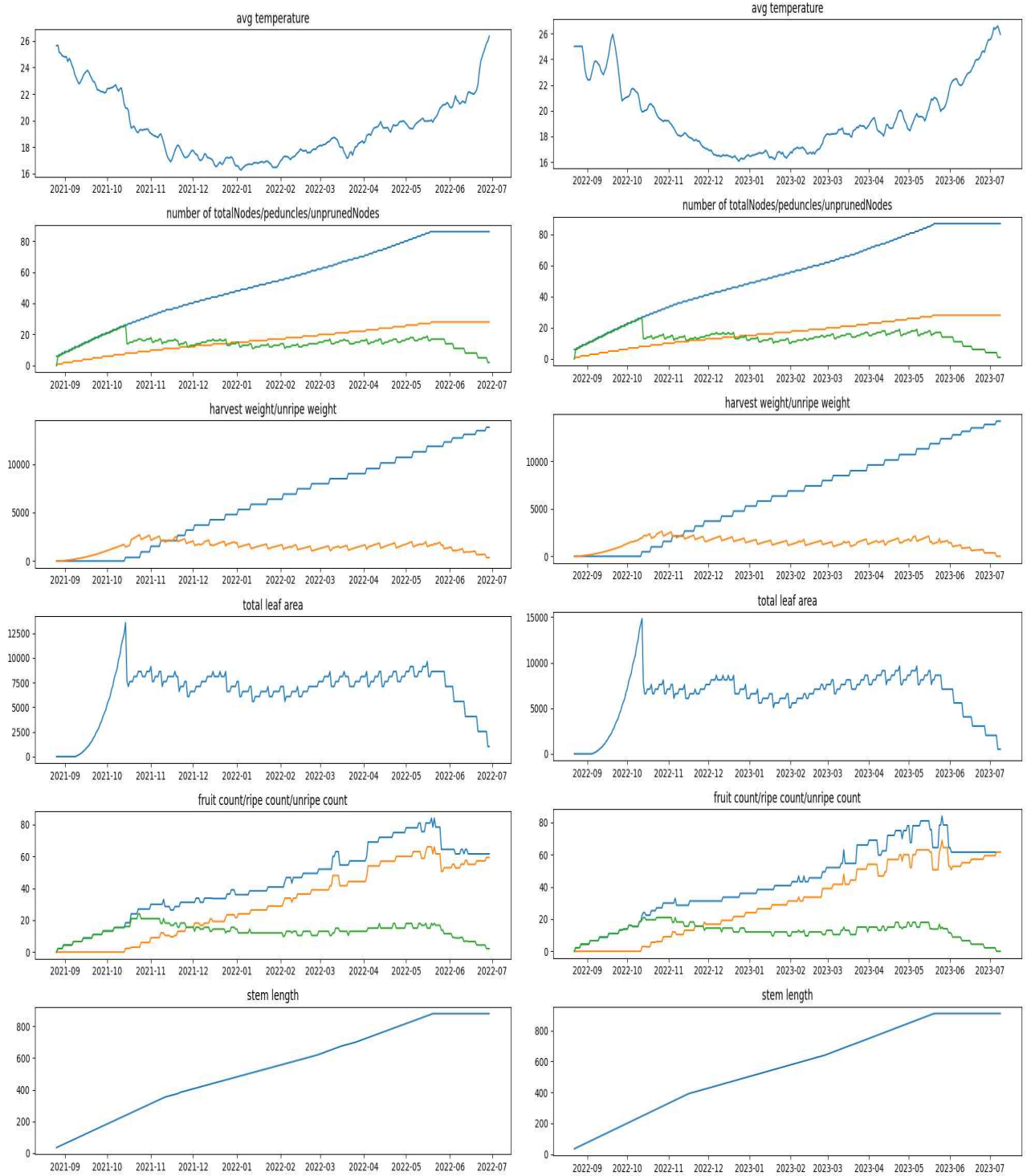


그림 3-3-54. 2021-2022년, 2022-2023년 작기 토마토 모델링 결과

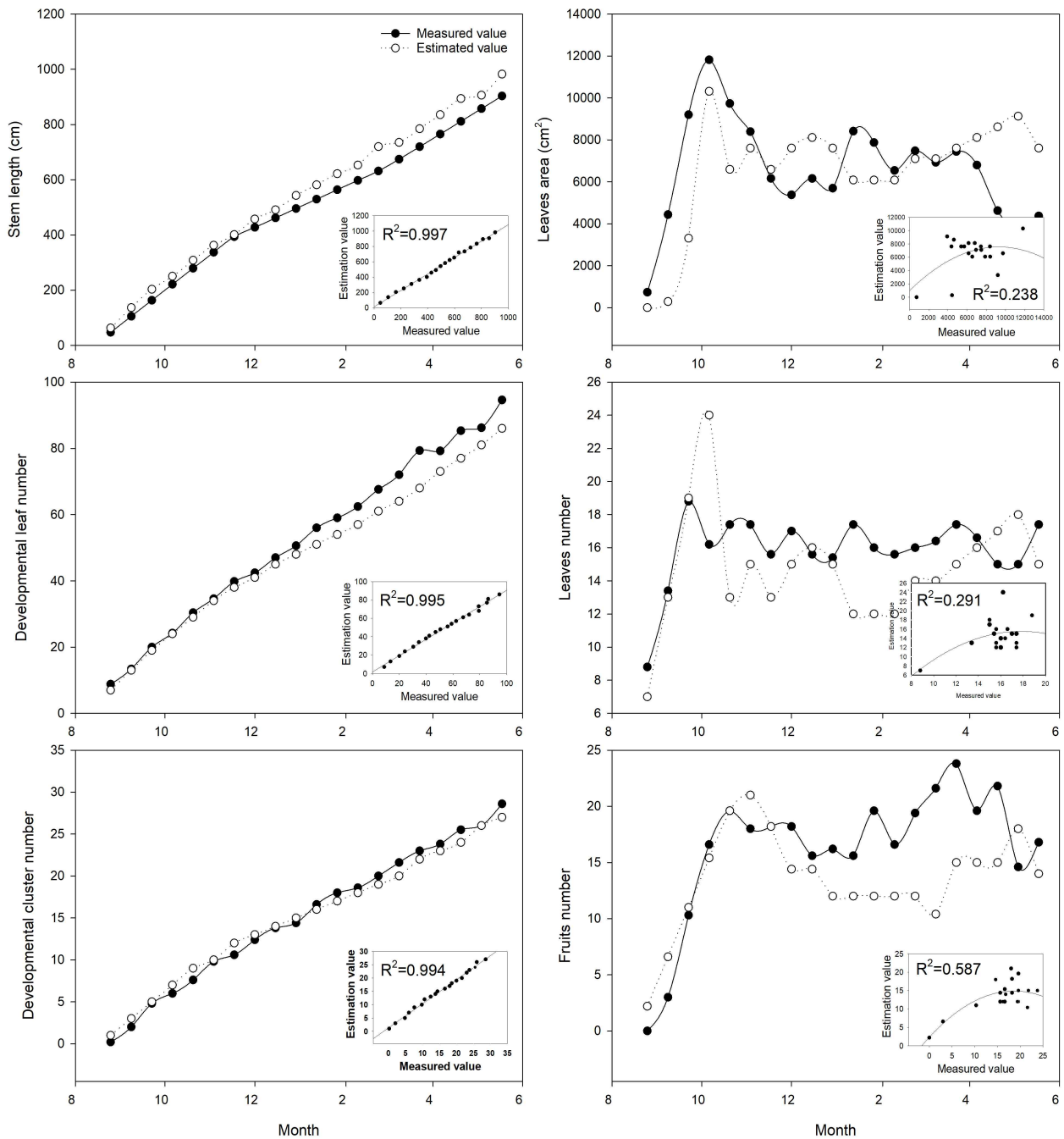


그림 3-3-55. 2022-2023년 작기 토마토 생육 변수의 모델링 추정치와 실측치 비교

– 생육 변수 결정계수

\* 그림 3-3-55는 Cropbox 기반 토마토 모델의 생육 변수 결과와 실제 측정치를 비교하여 단순회귀분석한 결과이다. 줄기 길이( $R^2=0.997$ ), 발생 엽 수( $R^2=0.995$ ), 발생 화방 수( $R^2=0.994$ )는 회귀직선 형태를 띄며 높은 결정계수를 나타냈지만, 수확 시점 이전의 엽면적이 과소 평가되어 낮은 결정계수 값을 나타냈다. 엽 수의 경우 모델 결과의 시간 간격을 일주일로 설정하여, 적엽 시점 적용이 늦어졌고, 엽이 24매 발달될 때까지 적엽이 이루어지지 않은 결과를 보였다. 또한 적산온도가  $120^{\circ}\text{C}$  이하인 겨울철에 엽 수와 과실 수 모두 모델 결과가 낮은 값을 나타냈다.

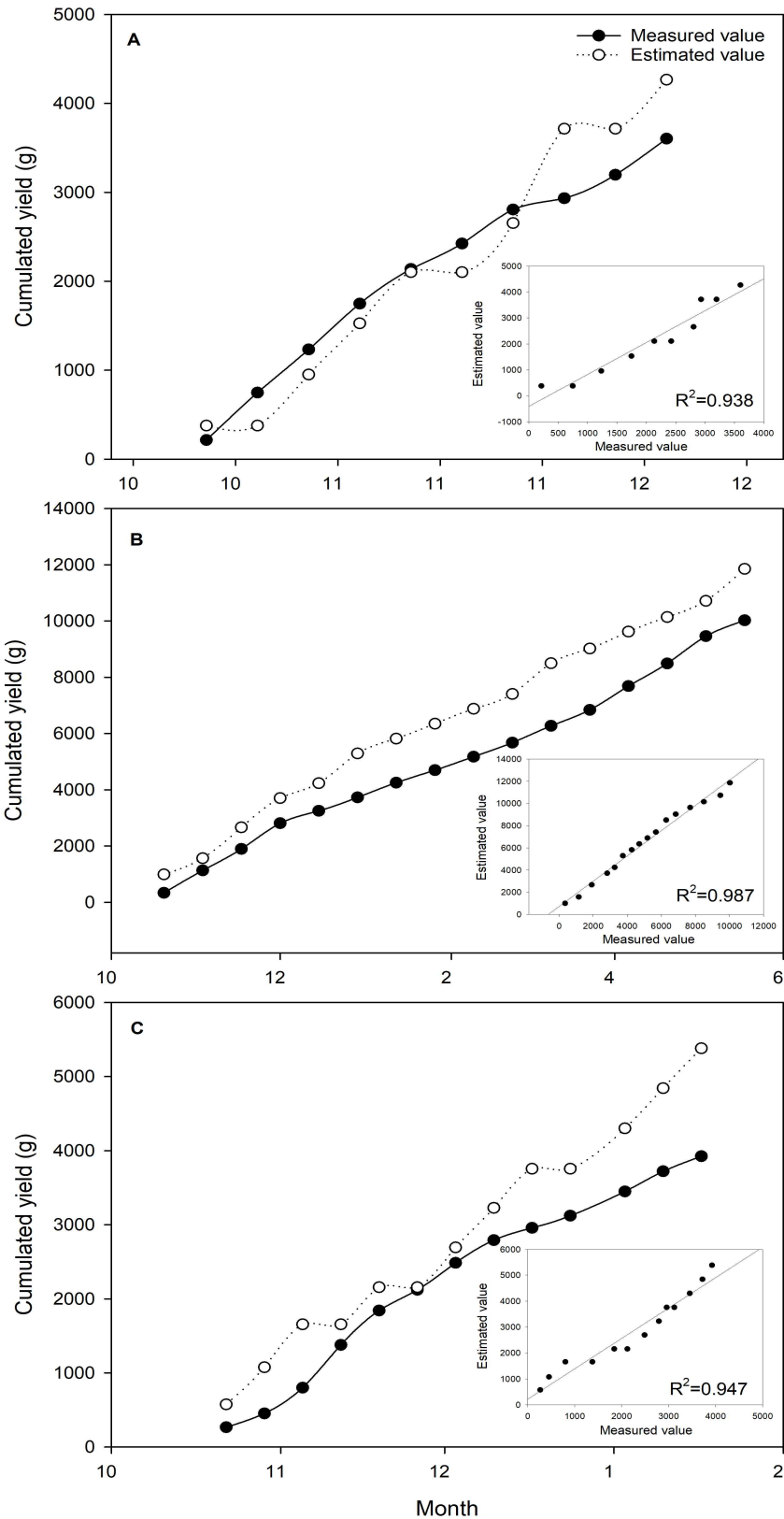


그림 3-3-56. 토마토 수확량의 모델링 추정치와 실측치 비교.

A 2021-2022년 토마토 재배 작기; B 2022-2023년 토마토 재배 작기; C 2023-2024년 토마토 재배 작기

\* 3 작기의 토마토 과실 수확량을 비교한 결과, 2022-2023년 재배 작기의 결정계수가 0.987로 제일 높은 것으로 나타났다.

□ (4공동)환경요인에 따른 토마토 생육·수확 예측 및 온실 환경 모델 개발을 위한 데이터 수집·표준화

○ 토마토 장기재배시 성장분석 및 작물 모델링

- 환경 및 토마토 생육 분석

- \* 외부 광량은 일조시간이 짧아지는 11월부터 3월까지 감소하였다가 다시 증가하였음.
- \* 이산화탄소 시비는 2022년 10월에는 액화탄산을, 2023년 4월부터는 연소형 이산화탄소 발생기를 사용하여 제어하였으나, 각 장비의 설치 초기에는 농도 유지에 안정적인 관리가 되지 않았음. 그러나 겨울철 이산화탄소 시비 기간에는 농도를  $500\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 에서  $600\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  사이로 유지하였음.
- \* 온실 내 기온은 낮에 증가하고 저녁에 감소하는 양상을 반복하였는데, 11월에 난방기를 설치한 후 난방개시온도를  $16^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였음.
- \* 상대습도는 온도 변화가 적은 겨울철에는 비교적 안정적이었지만, 주야간 온도 편차가 커질수록 상대습도의 변동성이 커졌음.

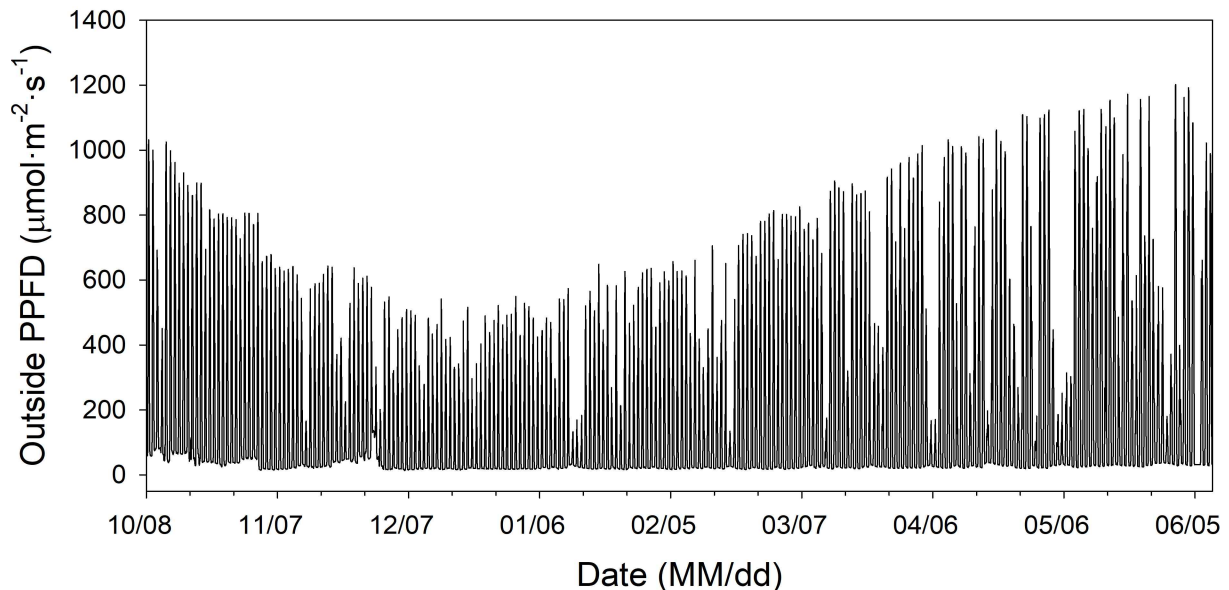


그림 3-4-1. 토마토 장기재배 중 벤로형 온실의 외부 광량 변화

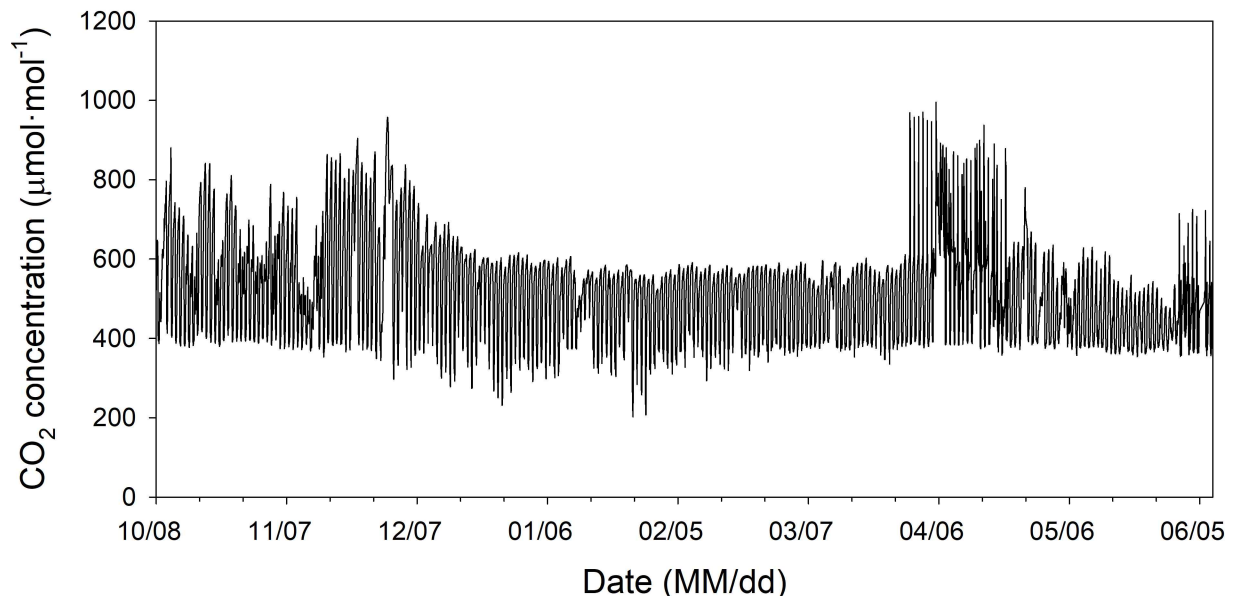


그림 3-4-2. 토마토 장기재배 중 벤로형 온실 내부 이산화탄소 변화

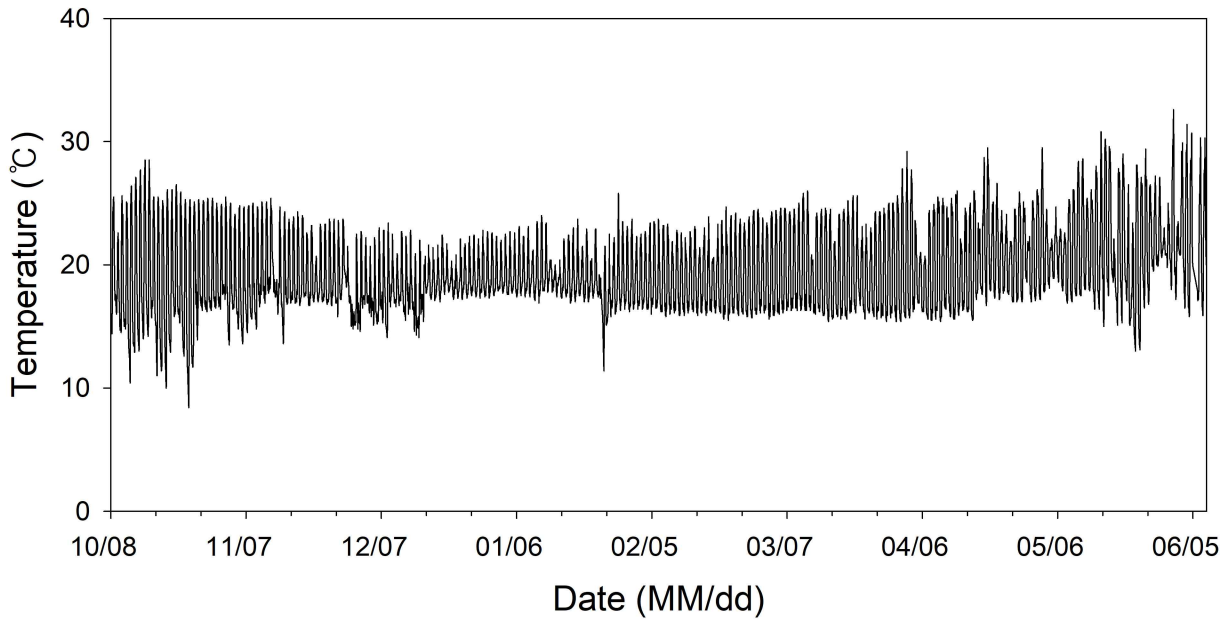


그림 3-4-3. 토마토 장기재배 중 벤로형 온실 내부 온도 변화

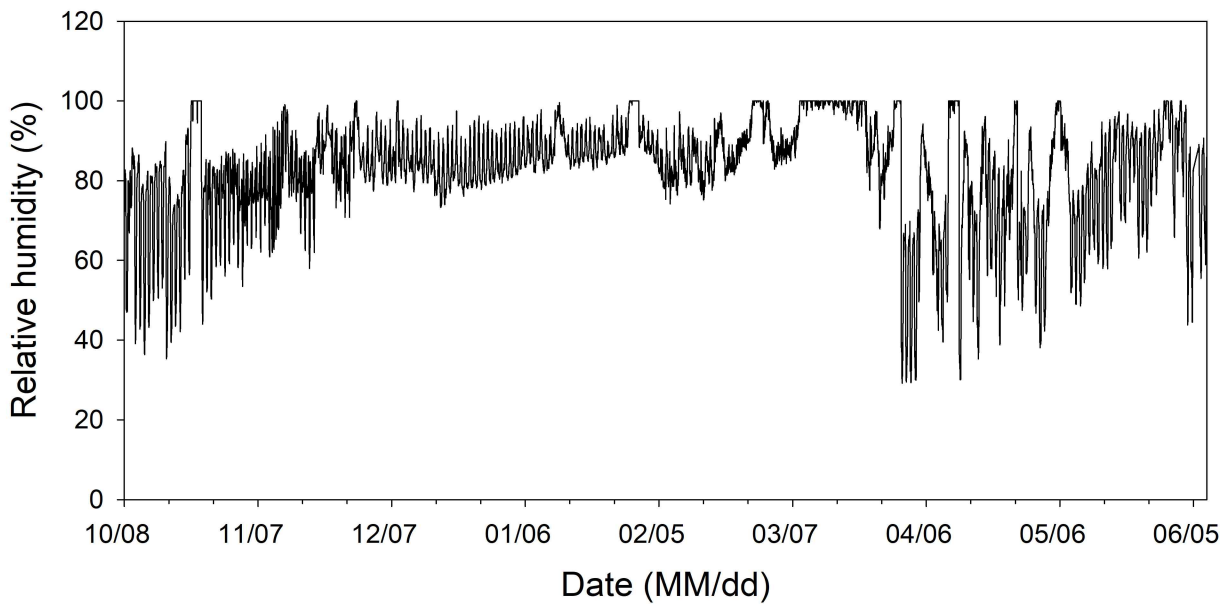


그림 3-4-4. 토마토 장기재배 중 벤로형 온실 내부 상대습도 변화

- \* 장기재배에 따른 토마토 엽면적 지수의 변화를 보면 정식 후 100일까지 상승하고 이후 감소하는 경향을 보였는데, 이는 적엽을 통해 잎을 조절하여 작물의 Sink와 Source의 균형을 맞추기 때문으로 보임. 건물중은 적엽을 시작한 시점에 잠시 감소했다가 이후 다시 증가했는데, 이는 잎의 수를 조절하더라도 줄기 무게가 증가하기 때문으로 보임.



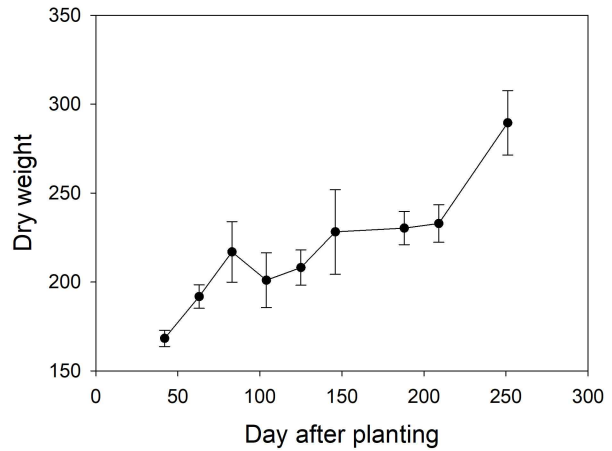
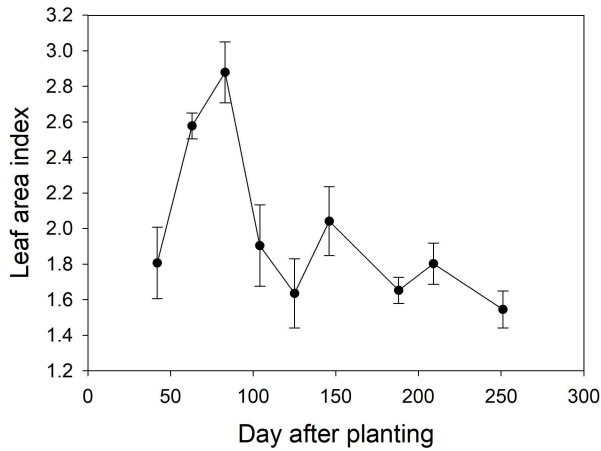


그림 3-4-5. 토마토 장기재배시 예측 수확량과 실제 수확량 비교

\* 토마토 수확은 2022년 12월 08일부터 2023년 06월 06일까지 29번 진행되었으며, 8개 체에서 총 97.3kg를 수확하였음. 개체당 수확량으로 환산할 경우, 6개월 동안 1개체당 평균 12.16kg을 수확한 것으로 나타남.

표 3-4-1. 벤로온실 내 토마토 장기재배시 총 수확량, 누적수확량 및 1개체당 수확량, 누적수확량

Date	Gross		Yield (g·plant <sup>-1</sup> )	Accumulated yield (g·plant <sup>-1</sup> )
	Yield (g)	Accumulated yield (g)		
2022.12.08	1,220	1,220	152	152
2022.12.13	3,580	4,800	447	600
2022.12.15	5,246	10,046	655	1,255
2022.12.20	2,654	12,700	331	1,587
2022.12.25	899	13,599	112	1,699
2022.12.31	2,080	15,679	260	1,959
2023.01.10	2,120	17,799	265	2,224
2023.01.13	1,264	19,063	158	2,382
2023.01.17	2,486	21,549	310	2,693
2023.01.24	1,359	22,908	169	2,863
2023.01.28	1,550	24,458	193	3,057
2023.02.03	728	25,186	91	3,148
2023.02.07	752	25,938	94	3,242
2023.02.14	1,773	27,711	221	3,463
2023.02.28	2,632	30,343	329	3,792
2023.03.07	3,008	33,351	376	4,168
2023.03.14	1,197	34,548	149	4,318
2023.03.21	1,983	36,531	247	4,566
2023.03.28	3,076	39,607	384	4,950
2023.04.04	5,432	45,039	679	5,629
2023.04.11	7,422	52,461	927	6,557
2023.04.18	5,654	58,115	706	7,264
2023.04.25	6,109	64,224	763	8,028
2023.05.02	6,535	70,759	816	8,844
2023.05.09	5,551	76,310	693	9,538
2023.05.16	5,810	82,120	726	10,265
2023.05.23	6,355	88,475	794	11,059
2023.05.30	6,295	94,770	786	11,846
2023.06.06	2,530	97,300	316	12,162

- 토마토 생육모델 사용 시 수확량 비교

- \* Cropbox 모델 중 토마토에 적용가능한 Nightshade를 사용하였을 때 예상 수확량을 산출하였음.
- \* 모델에서 예측한 첫 수확일은 2023년 12월 3일이었지만, 실제 첫 수확일은 2023년 12월 8일이었습니다. 이는 1화방에서 착과수를 제한한 결과로 보임.
- \* 실제 수확량은 생육 후기로 갈수록 감소했으며, 2023년 4월 10일을 기점으로 수확량이 더 많아졌고, 최종 수확량은 예측값보다 많았음.
- \* 실험을 6월에 종료하기 위해 4월 초에 적심을 한 것이 탄소동화산물을 과실로 더 많이 전환시켜 더 많은 생산을 가능하게 한 것으로 보임.

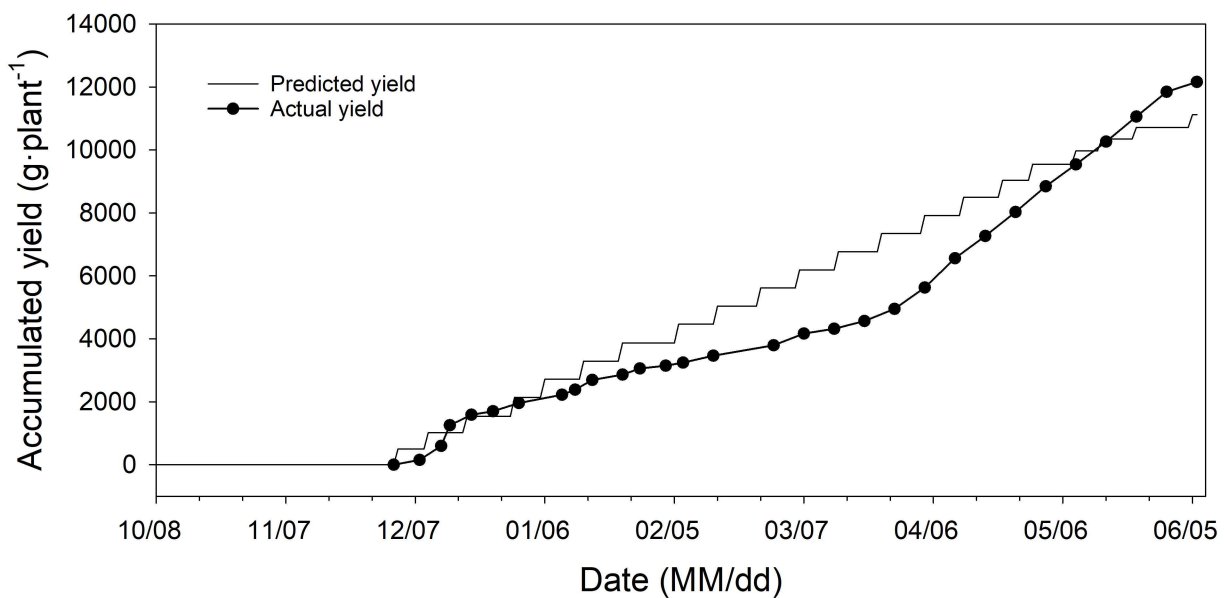


그림 3-4-6. 토마토 장기재배시 예측 수확량과 실제 수확량 비교

- \* 본 실험을 통해 장기재배한 토마토에 대한 Cropbox 모델은 수확량 예측면에서 실제로 매우 유사한 것을 알 수 있었음. 하지만 재배자의 기술에 따라 예측 수확량보다 낮은 수확량을 얻을 수 있고 작물 관리 방법에 따라 충분히 변동됨. 따라서 모델을 통한 수확량 예측자료는 농장경영주가 작물 재배 방식을 자체 평가자료로 사용하는데 가치가 높을 것으로 보임.

○ CO<sub>2</sub> 시비에 따른 토마토의 생장분석 및 작물 모델링

- 환경 및 토마토 생육 분석

- \* 실험 기간 동안의 외부 광량은 큰 편차를 보이지 않았지만, 온실 내 평균 온도는 8월에 가까워질수록 증가하였음. 상대습도는 낮에는 최대 60%까지 감소하였다가 온실 내 온도가 감소하는 야간에는 100%에 가까운 수치를 보임.

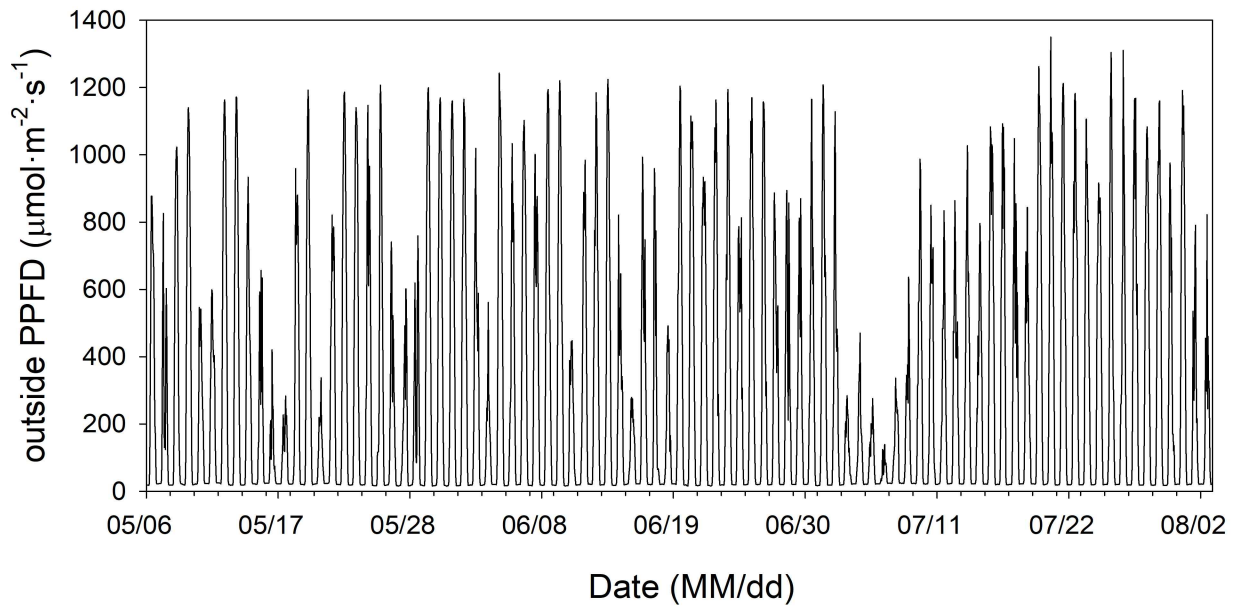


그림 3-4-7. CO<sub>2</sub> 시비 실험 중 외부 광량 변화

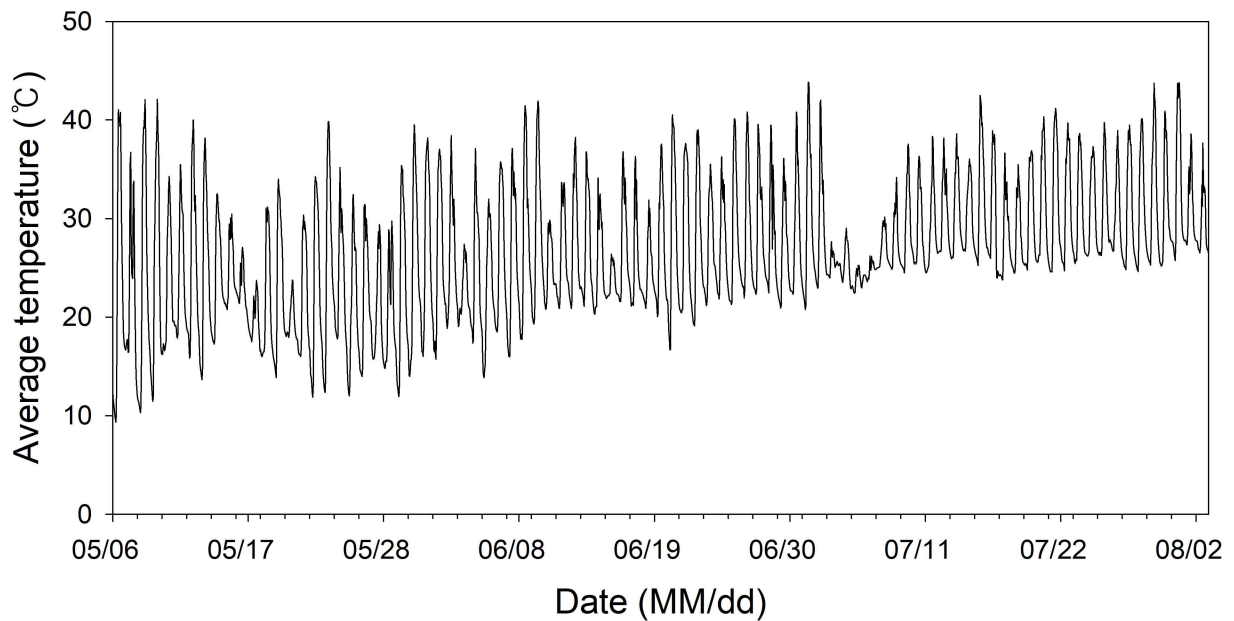


그림 3-4-8. CO<sub>2</sub> 시비 실험 중 평균 온도 변화

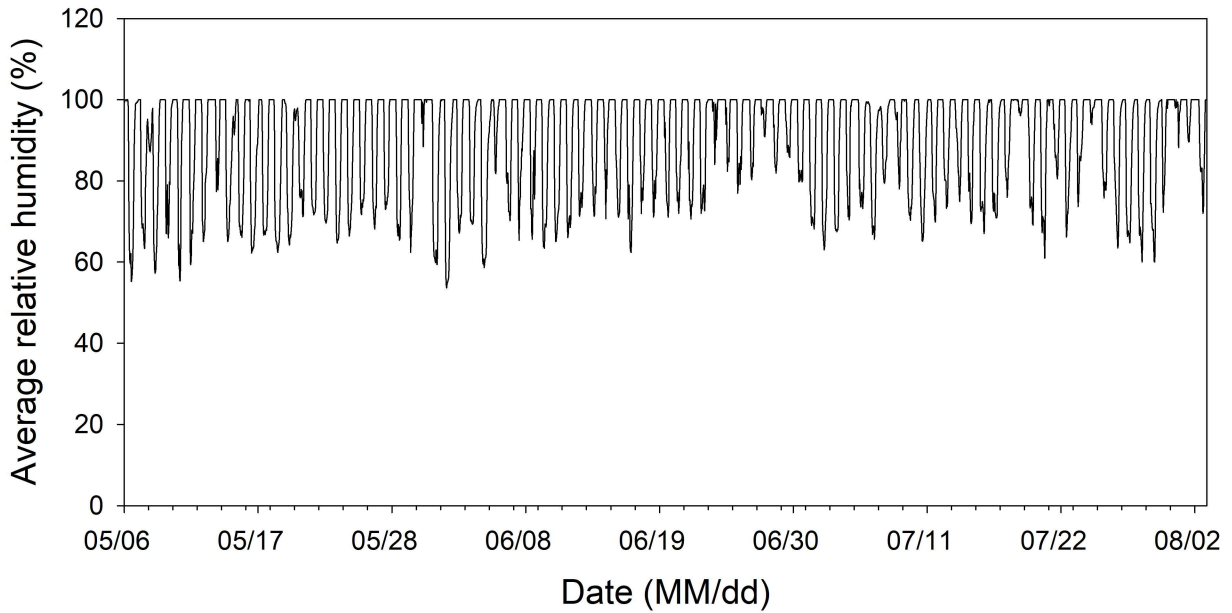


그림 3-4-9. CO<sub>2</sub> 시비 실험 중 평균 상대습도 변화

- \* 2023년 6월 18일 실험 처리 설정 이후 온실별 CO<sub>2</sub> 농도 변화를 보면, 일출 전부터 시비를 시작하여 농도가 빠르게 상승하지만 환기 이후에 자연대류로 인해 수치가 감소하는 것으로 보임.
- \* 온실 내 광량에서 일일 최고 광량은 비슷하지만 시기가 달랐는데 온실 위치에 의한 차이로 보임.

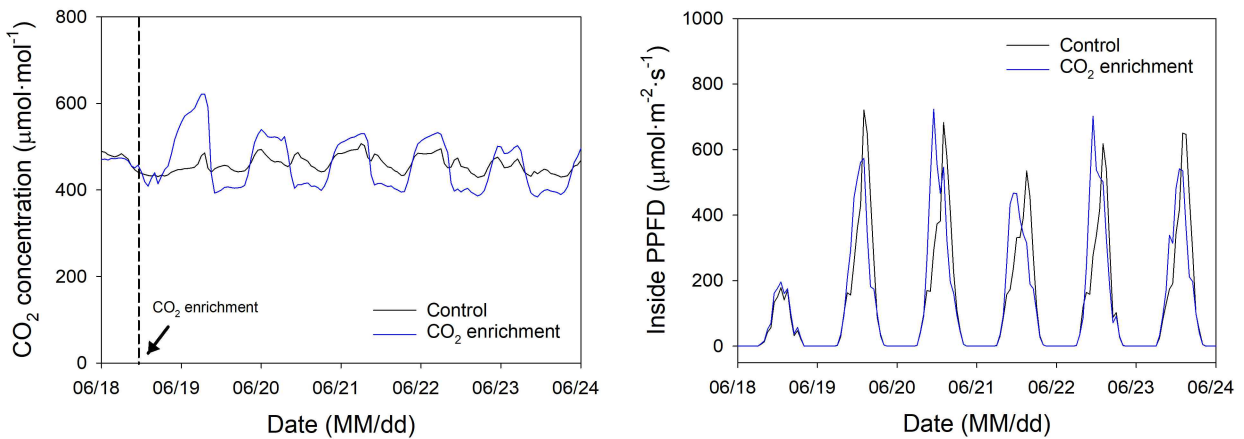


그림 3-4-10. 실험 중 CO<sub>2</sub> 시비 전·후 온실별 CO<sub>2</sub> 및 내부광량 변화

- \* 이산화탄소 시비 처리에 따른 생육 데이터에서 엽면적을 제외하고 다른 데이터에서는 유의한 차이를 보이지 않았으며, 엽면적은 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 에서 더 작았음.
- \* 이산화탄소 시비 처리에 따라 상대성장률(RGR)과 작물성장률(CGR)은 큰 차이를 보이지 않았지만, 순동화율과 과실의 관점에서 작물성장률을 분석하였을 때 대조구, 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  순으로 높았음.

표 3-4-2. CO<sub>2</sub> 시비처리에 따른 토마토 생육데이터

Treatment	Plant	Stem	No. of	Leaf area (cm <sup>2</sup> )	Weight(g)	
	height (cm)	Diameter (mm)	node (ea)		Fresh	Dry
Control	306	9.68	37.0	6092	791	77.1
800μmol·mol <sup>-1</sup>	339	9.62	36.5	4310	710	68.3

표 3-4-3. CO<sub>2</sub> 시비 처리에 따른 토마토 성장해석

Treatment	RGR	CGR	NAR
Control	0.044	1.86	0.69
800μmol·mol <sup>-1</sup>	0.042	2.54	0.95

- \* 토마토 과실 수확은 2021년 06월 29일부터 2021년 08월 03일까지 총 6번 수행하였고, 수확은 두 처리 각각 9개체씩 사용되었음.
- \* 무처리구의 총 누적수확량은 17kg, 1주당 수확량은 1.90kg이지만, 이산화탄소 시비구의 총 누적 수확량과 1주당 수확량은 23.1kg과 2.57kg으로, 무처리구 대비 총 누적수확량은 약 35.88%, 1주당 수확량은 약 35.26% 증가하였음.

표 3-4-4. CO<sub>2</sub> 무처리구의 총 수확량, 누적수확량 및 1개체당 수확량, 누적수확량

Date	Gross		Yield (g·plant <sup>-1</sup> )	Accumulated yield (g·plant <sup>-1</sup> )
	Yield (g)	Accumulated yield (g)		
2021.06.29	1,840	1,840	204	204
2021.07.06	2,940	4,780	327	531
2021.07.13	1,000	5,780	111	642
2021.07.20	4,890	10,670	543	1,186
2021.07.27	3,550	14,220	394	1,580
2021.08.03	2,870	17,090	319	1,899

표 3-4-5. CO<sub>2</sub> 시비구의 총 수확량, 누적수확량 및 1개체당 수확량, 누적수확량

Date	Gross		Yield (g·plant <sup>-1</sup> )	Accumulated yield (g·plant <sup>-1</sup> )
	Yield (g)	Accumulated yield (g)		
2021.06.29	2,000	2,000	222	222
2021.07.06	4,920	6,920	547	769
2021.07.13	5,700	12,620	633	1,402
2021.07.20	3,630	16,250	403	1,806
2021.07.27	2,810	19,060	312	2,118
2021.08.03	4,050	23,110	450	2,568

- 토마토 생육모델 사용 시 수확량 비교

- \* 토마토의 1화방이 나왔을 때, 작물 생육이 좋지 않아 화방을 제거하고 2화방부터 수확하여, 모델에 의한 예상 수확량보다 실제 수확량이 초기에 낮은 것으로 보임.
- \* 환경 데이터 기반으로 산출한 예상 수확량보다 무처리의 수확량은 더 낮았고, CO<sub>2</sub> 시비구는 예상 수확량과 유사하거나 약간 더 높았음.

- \* 무처리구의 엽면적, 생체중, 그리고 건물중이 시비구에 비해 더 높게 나타났으며, 이러한 영양생장 관련 지표의 증가가 오히려 수확량 감소를 초래하며, 무처리구의 상대적으로 낮은 수확량의 주된 이유로 보임.

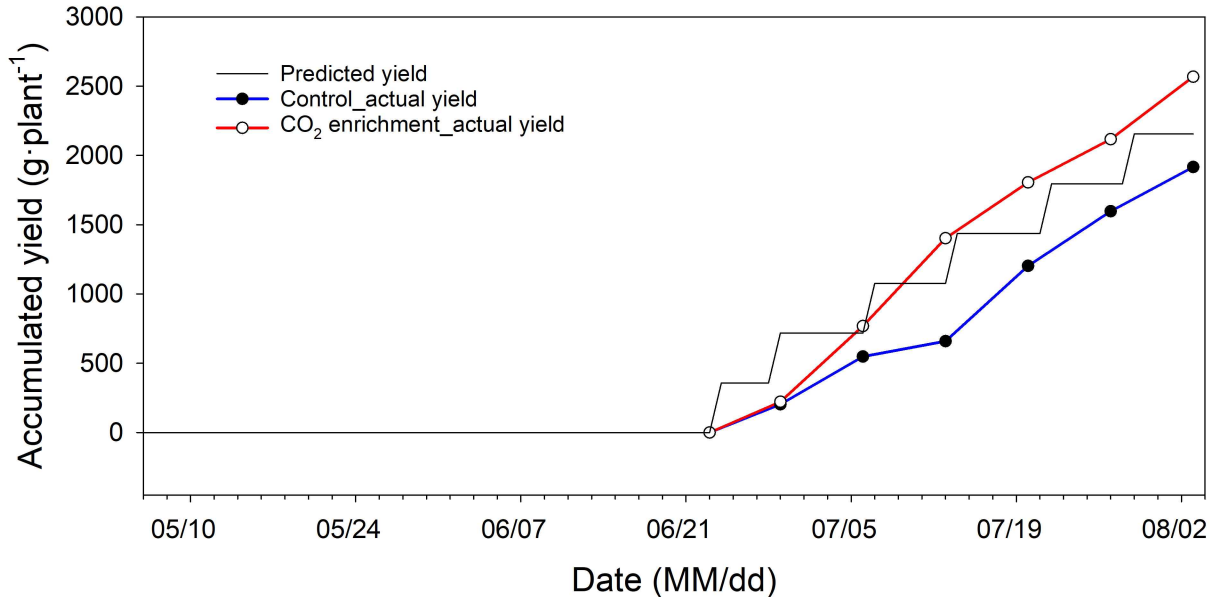


그림 3-4-11. CO<sub>2</sub> 시비에 따른 예상 수확량과 실제 수확량 비교

- \* 본 실험을 통해 이산화탄소 시비가 작물의 생육을 촉진하고 생산량을 증진시키는 데 효과가 있음을 알 수 있었음. 토마토 모델을 통해 예측한 수확량과의 비교에서, 생육 초기에 두 처리구 모두 예상 수확량보다 낮은 결과를 보였는데, 이는 2화방부터 착과를 유도했기 때문으로 분석됨. 그러나 후기에 이산화탄소 시비구의 실제 수확량이 예상 수확량보다 19% 높게 나타났으며, 이는 일출 후 짧은 시간 동안 이산화탄소를 사용하는 것만으로도 여름철에 생산량 증진에 효과가 있음을 시사함.

○ 보광처리가 토마토의 성장분석 및 작물 모델링

- 환경 및 토마토 생육 분석

- \* 외부 광량은 9월에 가장 높았다가 10월부터 점차 감소하였고 이산화탄소 농도는 300~500 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  수준을 유지하였음.
- \* 온실 내 기온은 9월동안 높았지만, 10월부터 안정되어 야간은 18 $^{\circ}\text{C}$ 이상 그리고 주간은 30 $^{\circ}\text{C}$ 이하로 유지하였고 상대습도는 온도 변화가 컸던 9월을 제외하고 비교적 안정적이었음.

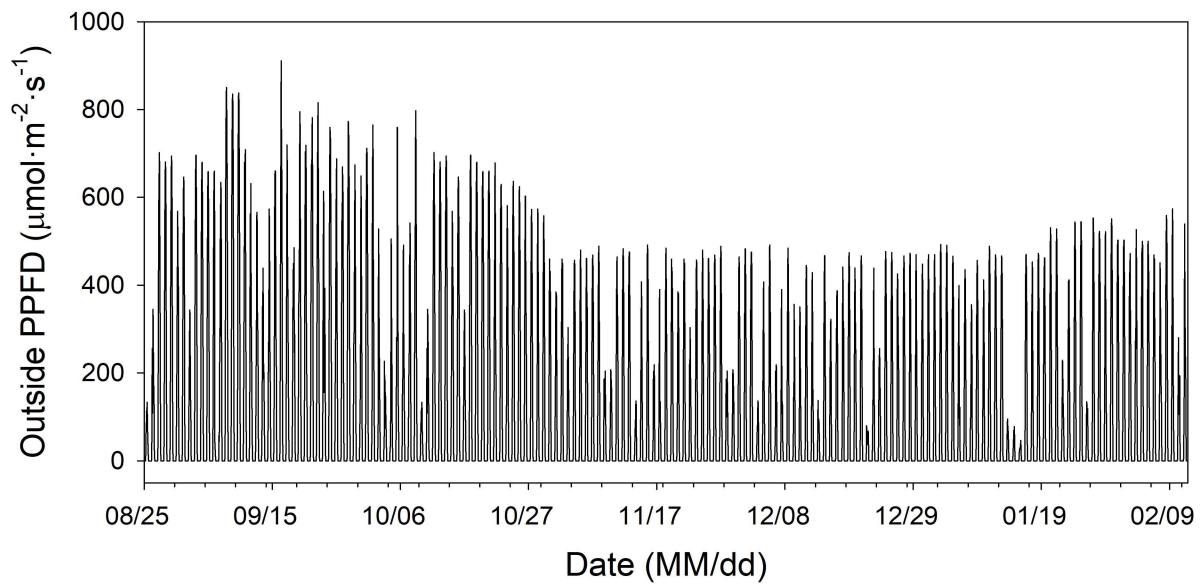


그림 3-4-12. 보광처리 온실의 외부광도 변화

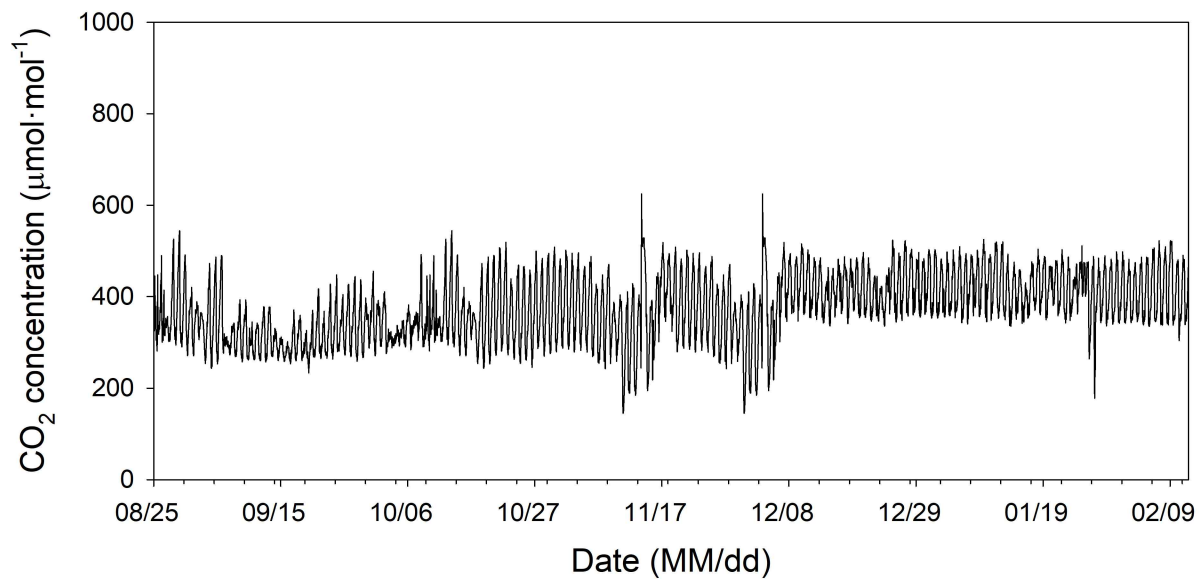


그림 3-4-13. 보광처리 온실의 평균  $\text{CO}_2$  농도 변화

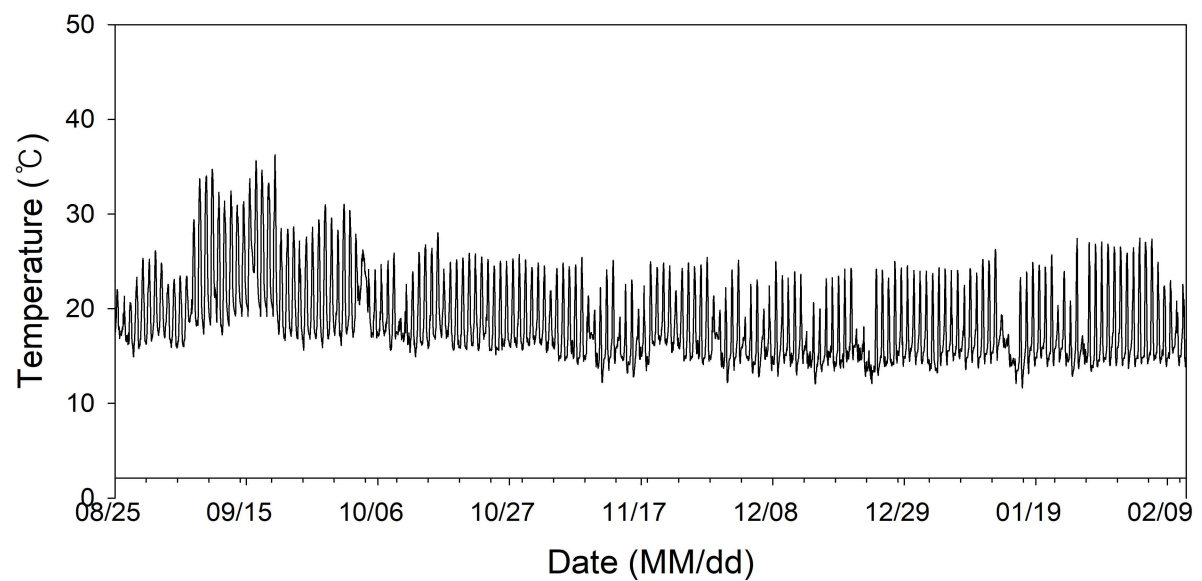


그림 3-4-14. 보광처리 온실의 평균 온도 변화

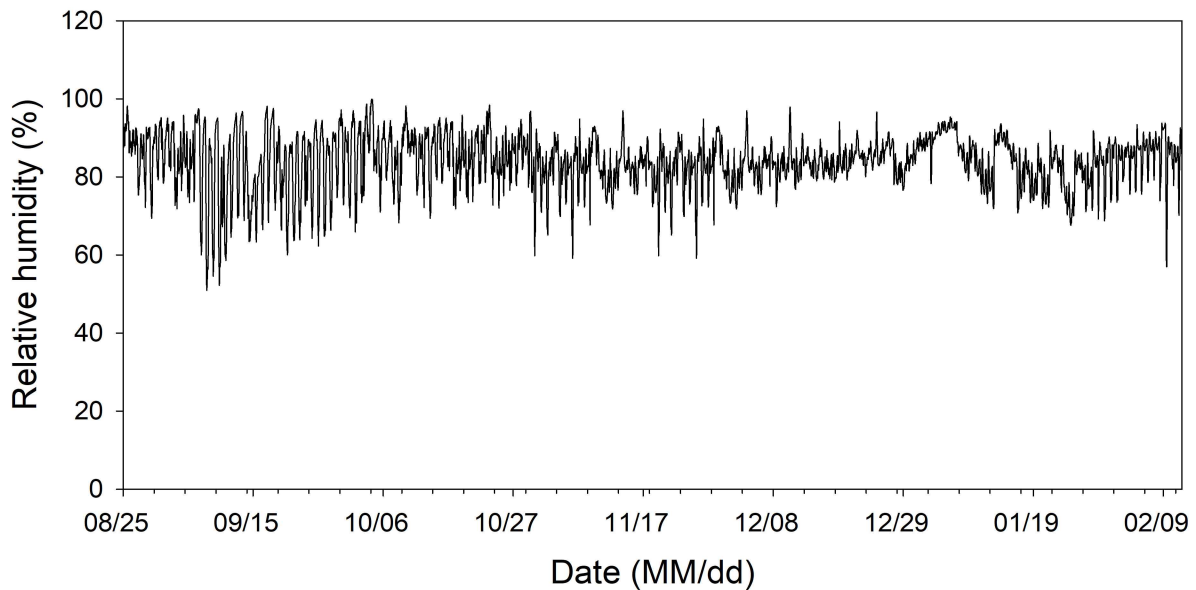


그림 3-4-15. 보광처리 온실의 상대 습도 변화

- \* 보광 처리 전 실증농가의 작물의 경향을 파악하기 위해 생장길이, 줄기굵기, 개화수, 개화 수준의 비파괴 생육조사를 진행함.
- \* 생장길이, 줄기굵기, 개화수준은 생육초기에 높은 생육속도를 가지다 점차 감소하였음.
- \* 결정계수가 0.398, 0.689, 0.453으로 낮았지만 토마토는 과실 착과 이후 생육 성장이 더디어진다는 선행연구와 유사한 결과임.

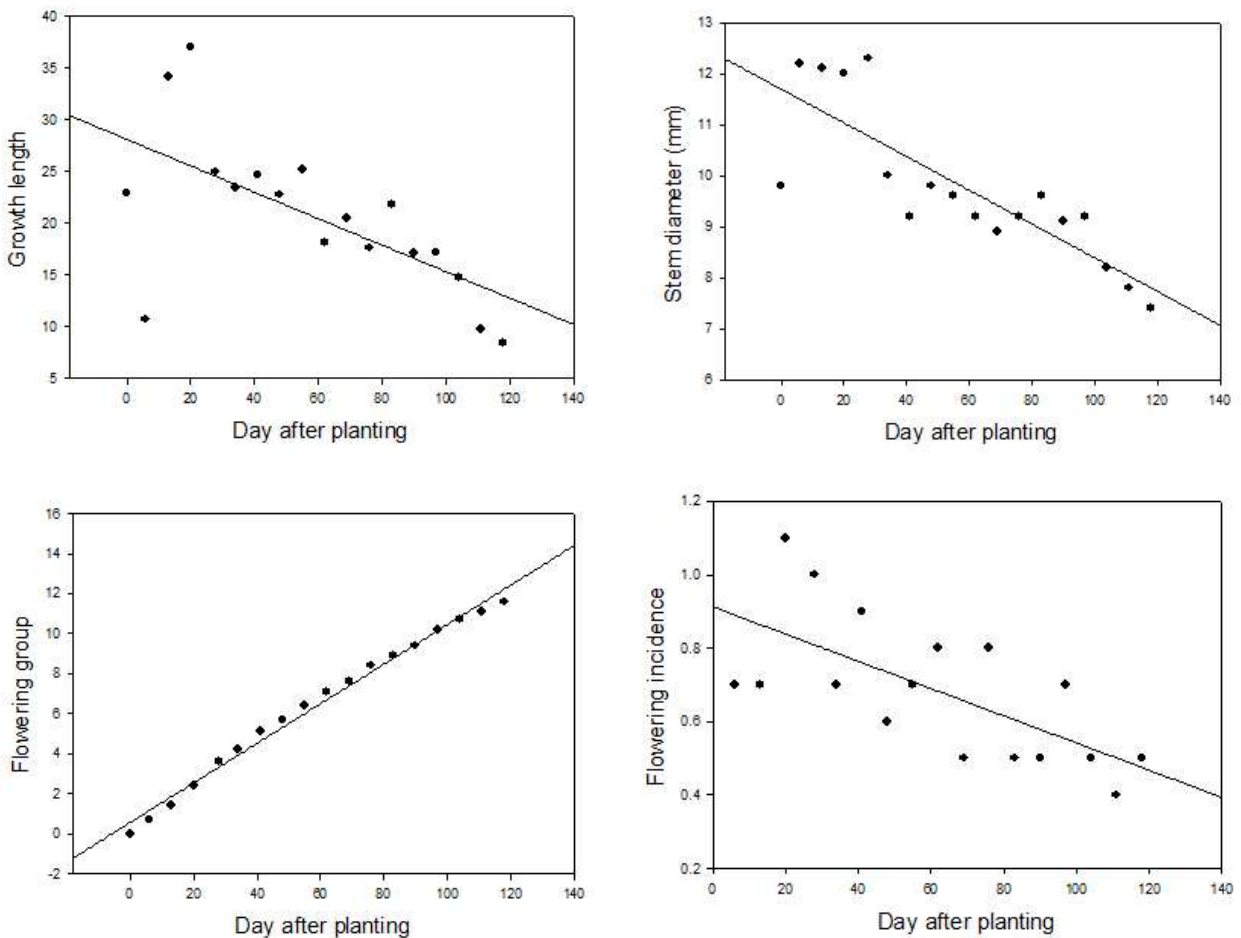


그림 3-4-16. 실험 처리 전 작물 생장



표 3-4-6. 실증농가 비파괴 생육 데이터 회귀식 및 결정계수

	Equation	R <sup>2</sup>
Growth length	GL = 28.1 - 0.13x	0.398
Stem diameter	SD = 11.7 - 0.03x	0.689
Flowering group	FG = 0.568 + 0.10x	0.990
Flowering incidence	FI = 0.91 - 0.004x	0.453

- \* 실험 처리당 개체수는 3,500주이며 과실 수확은 2022년 11월 04일부터 2023년 02월 10일까지 총 44회 수확하였으나 작물 모델의 결과와 비교하기 위하여 1주일 단위로 변환하였음.
- \* 대조구의 총 누적 수확량은 23,722kg, 1주당 수확량은 6.78kg이었고, 고압나트륨등 처리구에서는 총 누적 수확량은 27,185kg, 1개체당 수확량은 7.77kg으로 대조구 대비 14.6% 수확량이 증가하였음.

표 3-4-7. 보광 무처리시 토마토의 총 수확량, 누적수확량 및 1개체당 수확량, 누적수확량

Date	Gross		Yield (g·plant <sup>-1</sup> )	Accumulated yield (g·plant <sup>-1</sup> )
	Yield (kg)	Accumulated yield (kg)		
2022.11.04	543	1834	155	524
2022.11.11	462	3735	132	1068
2022.11.18	694	5272	198	1507
2022.11.25	479	7841	137	2241
2022.12.02	169	8596	48	2456
2022.12.09	395	9551	113	2729
2022.12.16	570	11387	163	3253
2022.12.23	419	13215	120	3776
2022.12.30	353	14486	101	4139
2023.01.06	424	15959	121	4559
2023.01.13	529	17591	151	5025
2023.01.19	809	18795	231	5369
2023.01.27	381	20640	109	5896
2023.02.03	510	22321	146	6377
2023.02.10	411	23722	118	6778

표 3-4-8. 보광처리시 토마토의 총 수확량, 누적수확량 및 1개체당 수확량, 누적수확량

Date	Gross		Yield (g·plant <sup>-1</sup> )	Accumulated yield (g·plant <sup>-1</sup> )
	Yield (kg)	Accumulated yield (kg)		
2022.11.04	418	1,990	119	568
2022.11.11	505	3,587	144	1,024
2022.11.18	265	4,717	76	1,347
2022.11.25	703	6,907	201	1,973
2022.12.02	418	8,514	119	2,431
2022.12.09	502	9,610	144	2,744
2022.12.16	418	11,283	120	3,223
2022.12.23	386	12,920	110	3,691
2022.12.30	519	14,497	148	4,141
2023.01.06	507	16,208	145	4,630
2023.01.13	673	18,484	192	5,280
2023.01.19	1,033	20,230	295	5,779
2023.01.27	621	22,903	178	6,543
2023.02.03	740	25,256	211	7,215
2023.02.10	568	27,185	162	7,766

- 토마토 생육모델 사용 시 수확량 비교

- \* 실제 수확일인 2022년 11월 04일과 예상 수확일인 2022년 10월 18일은 16일간의 차이가 있었는데 1화방에서의 착과수 조절에 의한 차이로 보임.
- \* 수확 중간까지 대조구와 보광처리구간의 수확량 차이를 보이지 않았지만 2023년 1월 이후의 생산량은 보광처리구가 높았는데, 이는 일조시간감소로 인한 광량 감소를 고압 나트륨등이 보충해주었기 때문으로 보임.
- \* 예상 수확량과 실제 수확량을 비교하면 무처리구는 모델에서 예측한 수치와 유사하게 나타났고 보광처리구는 예상 수치보다 10% 높게 나타났음.

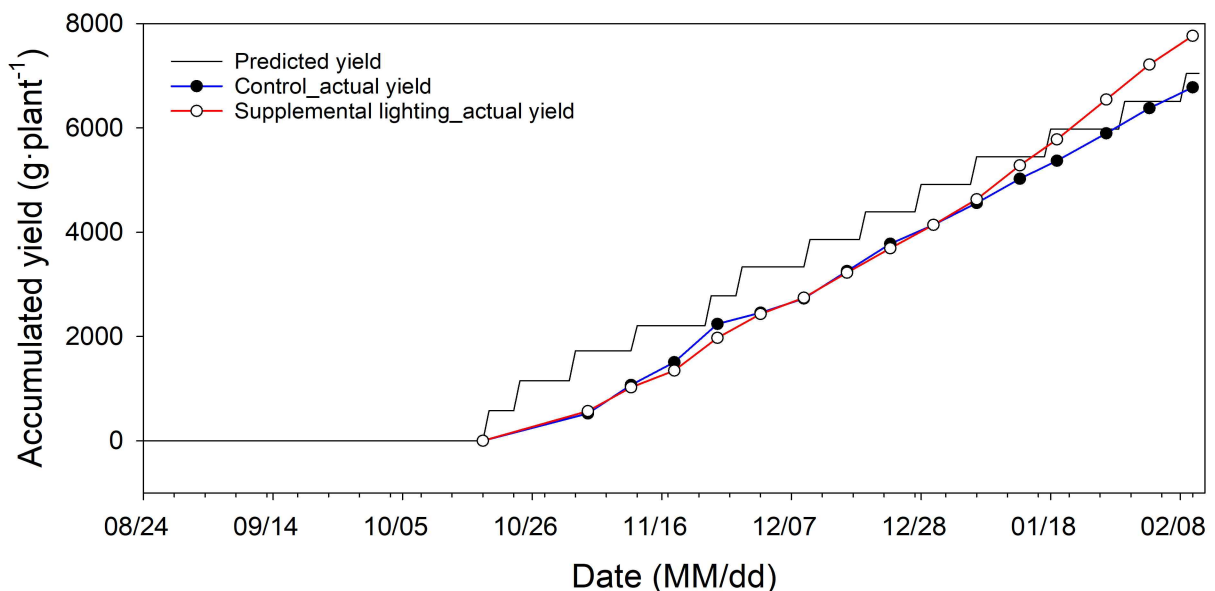


그림 3-4-17. 보광처리 시 예상 수확량과 실제 수확량 비교

- \* 본 실험을 통해 겨울철에 발생할 수 있는 작물의 생육 부진을 보광을 통해 완화시킬 수

있음을 알 수 있었음. 또한 Cropbox 모델을 통해 구한 예측 수확량과 비교하였을 때, 대조구의 수확량과 예측 수확량과 비슷한 수치를 가져 모델의 신뢰성을 입증하였음. 그러나 실제 수확일이 예상일보다 늦었던 것을 보면 초기 생육을 안정적으로 유지하는 것이 생산량 확보에 유리함을 알 수 있음. 이를 통해 적은 시간이라도 일출 전과 일몰 후에 광을 조사하는 것이 작물의 안정적인 광합성 효도에 효과가 있음을 알 수 있었음.

○ CO<sub>2</sub> 및 보광 등 복합 처리 시 토마토의 성장분석 및 작물 모델링

- 환경 및 토마토 생육 분석

\* 외부광량은 실험 초기부터 후기까지 천천히 상승하였고, 야간온도는 난방개시온도인 18℃로 유지되었으며 낮동안의 평균온도는 날씨에 따라 상이하였지만 대부분 28℃ 수준을 유지한 것으로 보이며, 온실 내 상대습도는 30%~90%로 크게 변화하였는데 이는 날씨에 의한 영향으로 보임.

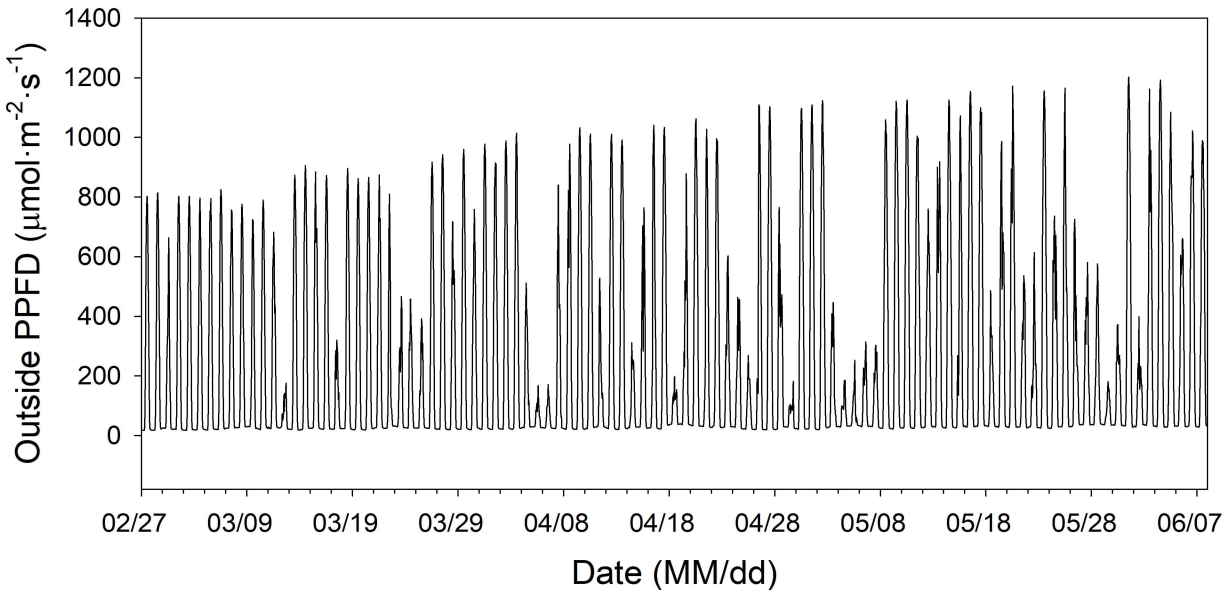


그림 3-4-18. 실험 기간 중 환경 그래프

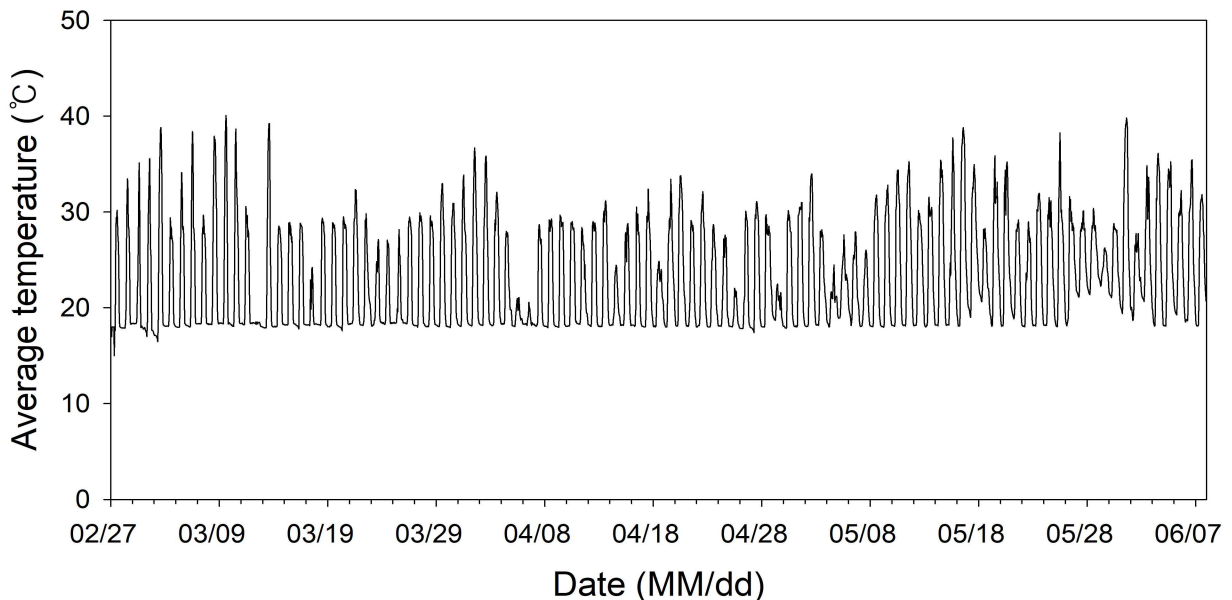


그림 3-4-19. 실험 기간 중 환경 그래프

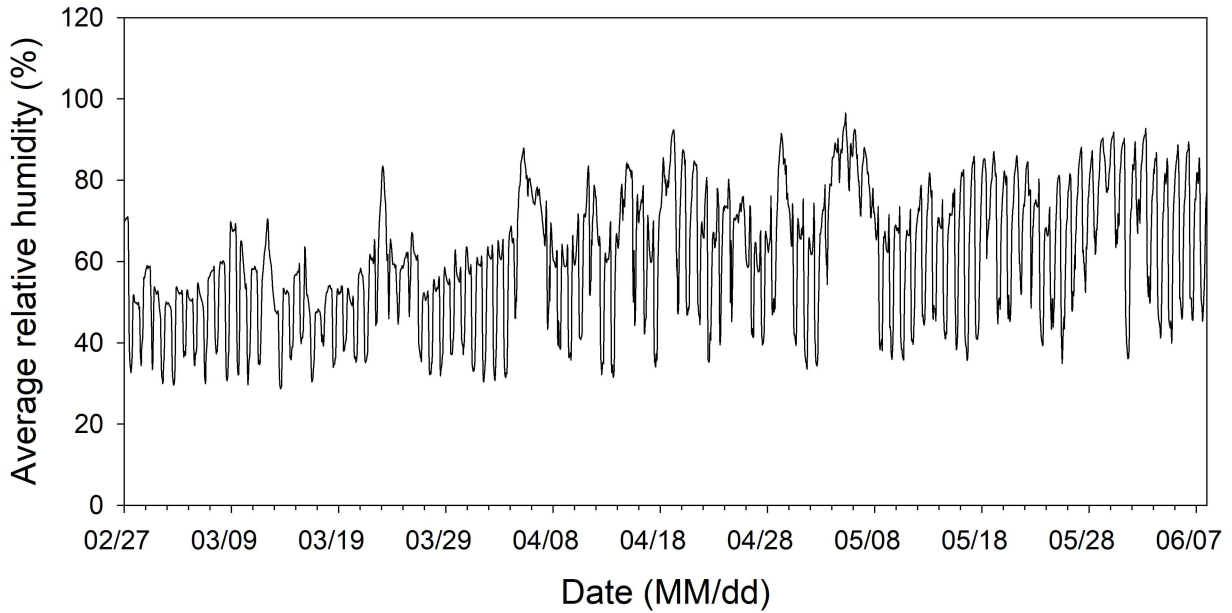


그림 3-4-20. 실험 기간 중 환경 그래프

- \* 실험 처리는 2023년 02월 27일에 정식한 이후 약 1개월 후 2023년 03월 21일부터 시작하였음.
- \* 온실별 CO<sub>2</sub> 농도를 비교하였을 때, 무처리구와 보광처리구가 비슷한 농도를 유지하였고, CO<sub>2</sub> 처리구와 복합처리구는 일출 후 약 600 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 을 유지하였음.
- \* PAR 센서를 온실 내부에 설치하여 처리별 광량을 조사하였을 때, 무처리구와 CO<sub>2</sub> 처리구는 유사한 일일 광변화를 보였으며, LED처리구와 복합처리구 역시 비슷한 경향을 보였음.

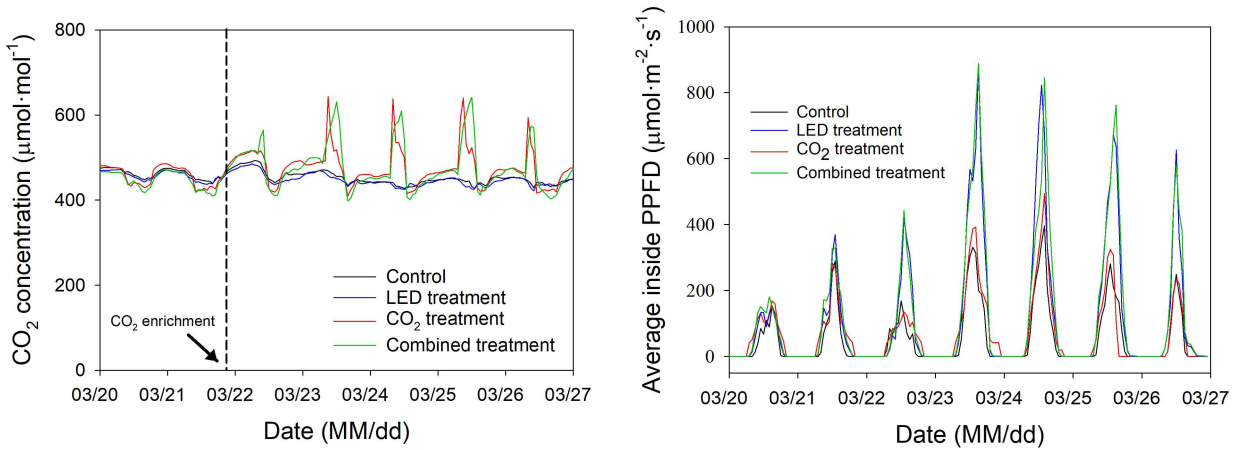


그림 3-4-21. 실험 처리별 온실 내 CO<sub>2</sub> 및 내부광량 변화

- \* 처리별 엽면적 지수의 변화를 보면, CO<sub>2</sub>를 시비한 처리구는 높은 수치를 보였으며, 보광 단독 처리구는 큰 변화를 보이지 않았습니다. 하지만 대조구는 초기에 빠른 상승세를 보이다가 후기에는 가장 낮은 엽면적률을 보였는데, 이는 영양생장과 생식생장의 균형이 깨져 나타난 결과로 보임.
- \* 건물중은 조사 기간 동안 실험 처리 간에 큰 차이를 보이지 않았지만, 조사 기간 중 마지막 생육조사에서 무처리구와 보광처리구가 비슷하게 감소하였으며, CO<sub>2</sub> 처리와 복합처리구는 유사하게 상승하였음.

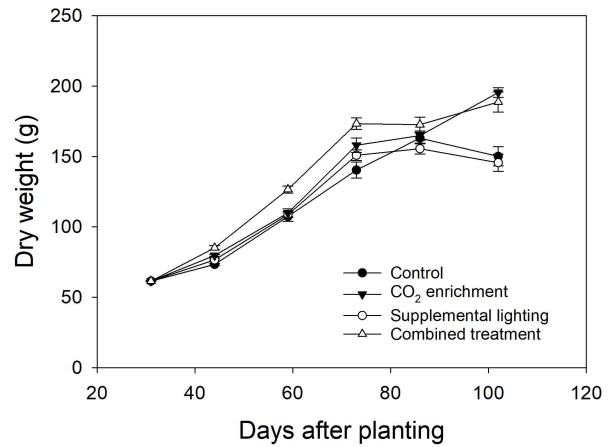
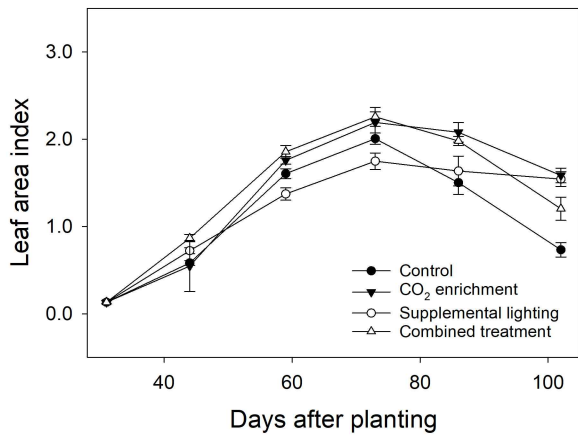


그림 3-4-22. 실험 처리에 따른 엽면적지수(LAI) 및 수확량 비교

- \* 과실 수확은 2023년 04월 17일부터 2023년 06월 06일까지 총 6회 수행되었음.
- \* 총 수확량은 복합처리구, 보광처리구, CO<sub>2</sub> 처리구, 대조구 순으로 높았으며 1개체당 누적수확량도 동일하였음.
- \* 수확량은 대조구에 비해 CO<sub>2</sub> 처리구는 약 17.2%, 보광처리구는 약 26.9%, 그리고 복합처리구는 약 40% 증가하였음.

표 3-4-9. 무처리구 토마토의 총 수확량, 누적수확량 및 1개체당 수확량, 누적수확량

Date	Gross		Yield (g·plant <sup>-1</sup> )	Accumulated yield (g·plant <sup>-1</sup> )
	Yield (kg)	Accumulated yield (g)		
2023.04.17	2,104	2,104	526	526
2023.04.27	2,184	4,288	546	1,072
2023.05.07	1,780	6,068	445	1,517
2023.05.17	1,704	7,772	426	1,943
2023.05.27	924	8,696	231	2,174
2023.06.06	884	9,580	221	2,395

표 3-4-10. CO<sub>2</sub> 처리구의 총 수확량, 누적수확량 및 1개체당 수확량, 누적수확량

Date	Gross		Yield (g·plant <sup>-1</sup> )	Accumulated yield (g·plant <sup>-1</sup> )
	Yield (kg)	Accumulated yield (g)		
2023.04.17	1,644	1,644	411	411
2023.04.27	2,740	4,384	685	1,096
2023.05.07	2,588	6,972	647	1,743
2023.05.17	2,440	9,412	610	2,353
2023.05.27	1,212	10,624	303	2,656
2023.06.06	608	11,232	152	2,808

표 3-4-11. 보광처리 시 토마토의 총 수확량, 누적수확량 및 1개체당 수확량, 누적수확량

Date	Gross		Yield (g·plant <sup>-1</sup> )	Accumulated yield (g·plant <sup>-1</sup> )
	Yield (kg)	Accumulated yield (g)		
2023.04.17	2,524	2,524	631	631
2023.04.27	2,076	4,600	519	1,150
2023.05.07	3,504	8,104	876	2,026
2023.05.17	2,320	10,424	580	2,606
2023.05.27	932	11,356	233	2,839
2023.06.06	800	12,156	200	3,039

표 3-4-12. 복합처리구 토마토의 총 수확량, 누적수확량 및 1개체당 수확량, 누적수확량

Date	Gross		Yield (g·plant <sup>-1</sup> )	Accumulated yield (g·plant <sup>-1</sup> )
	Yield (kg)	Accumulated yield (g)		
2023.04.17	2,376	2,376	594	594
2023.04.27	3,624	6,000	906	1,500
2023.05.07	3,136	9,136	784	2,284
2023.05.17	1,968	11,104	492	2,776
2023.05.27	1,320	12,424	330	3,106
2023.06.06	1,028	13,452	257	3,363

- 토마토 생육모델 사용 시 수확량 비교

- \* Cropbox를 이용하여 토마토의 예상 수확량을 산출하였을 때 첫 수확일은 2023년 04월 18일로 실제 수확일과 동일하였음.
- \* 초기 수확량은 모든 처리구에서 예상 수확량보다 많았으며, 무처리구의 수확량은 생육이 진행될수록 모델을 통해 예측한 수확량보다 적게 나타났다. 또한, CO<sub>2</sub> 단독 시비구의 실제 수확량은 예상 수확량과 비슷한 수준으로 나타남.
- \* 그러나 LED 보광 처리구와 복합처리구의 실제 수확량은 Cropbox 모델을 이용하여 예상한 수확량보다 많이 나타남.
- \* 이러한 결과는 실험장소의 위치적 특성이 주변이 산으로 둘러싸여 있는 지리적 특성의 영향으로 일조시간이 상대적으로 적으며, 피복재 장기 사용으로 인해 광 투과율에 영향을 미친 것으로 예상되며, 이러한 이유로 광량을 보충하였을 때 수확량이 더 높은 것으로 보임.

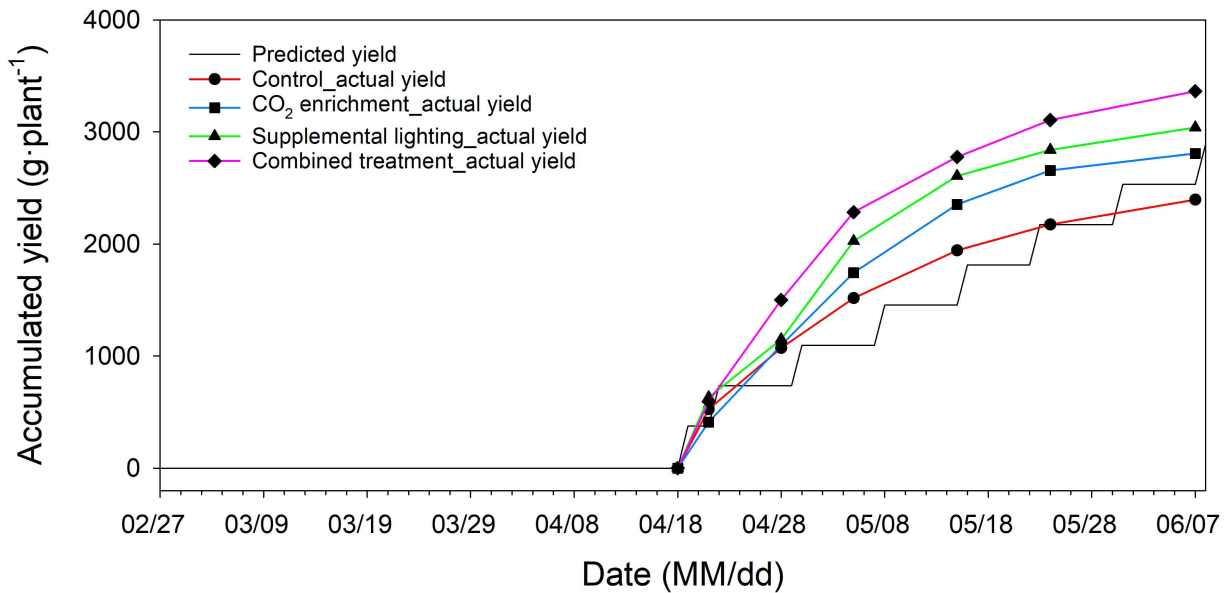


그림 3-4-23. 이산화탄소, 보광, 그리고 복합처리에 따른 예상 수확량과 실제 수확량 비교

- \* 본 실험을 통해 CO<sub>2</sub> 단독 처리, 보광 단독 처리, CO<sub>2</sub>와 보광 복합 처리가 무처리구에 비해 생육 및 생산량 증진에 효과가 있는지 조사하였음. 무처리구의 생산량과 예상 수확량과 비교하였을 때, 초기에는 수확량이 더 높았지만 후기에는 예상량보다 낮게 수확되었음. 그렇지만 CO<sub>2</sub> 단독 처리와 보광 단독 처리는 초기에 예상 수확량보다 높은 생산량을 얻었지만 후기에는 생산량이 감소하여 예측값과 유사한 수준이었음.
- \* CO<sub>2</sub> 단독 처리와 보광 단독 처리를 비교하였을 때, CO<sub>2</sub>를 시비하여도 온실의 위치상 짧은 일조시간으로 인해 광합성량 증가에 크게 기여하지 못한 것으로 판단되며, 보광 단독 처리에서는 일출 전부터 광을 조사하여 대조구에 비해 광합성작용이 많이 이루어졌으나 온실 내 CO<sub>2</sub>가 고갈되어 대조구와 유사한 양의 동화작용이 이루어진 것으로 보임.
- \* 복합 처리구의 수확량은 예측 수확량보다 472g 많이 수확되었는데, 이는 일출 전 보광을 통해 광합성을 빠르게 시작함과 동시에 CO<sub>2</sub> 시비를 통해 광합성에 필요한 충분한 양의 이산화탄소 농도가 유지되었기 때문으로 보임.
- \* 이산화탄소 시비와 LED 보광 기술 적용은 설치 및 소모비용이 발생하기 때문에 광합성 작용 증가에 필요한 요소가 부족한 경우 광합성 효율 증진 및 시설 투입 대비 소득에 상대적인 영향을 미침.
- \* 그러므로 온실 환경에 맞지 않는 과잉 사용을 지양하며, 온실에서 부족한 부분을 파악 후 두 기술을 적절하게 사용하는 것이 중요할 것으로 보임.

○ 토마토 광합성 분석

- 엽위별 토마토 광합성속도 비교

- \* 토마토 잎의 노화가 진행될수록 저농도에서의 기율기가 완만해지며 CO<sub>2</sub> 포화점도 낮아짐.
- \* 토마토 잎의 노화가 진행될수록 C<sub>i</sub> 수치가 낮아지며 이는 잎의 엽육 내 CO<sub>2</sub>를 수용할 수 있는 능력에 차이가 생기는 것을 알 수 있음.

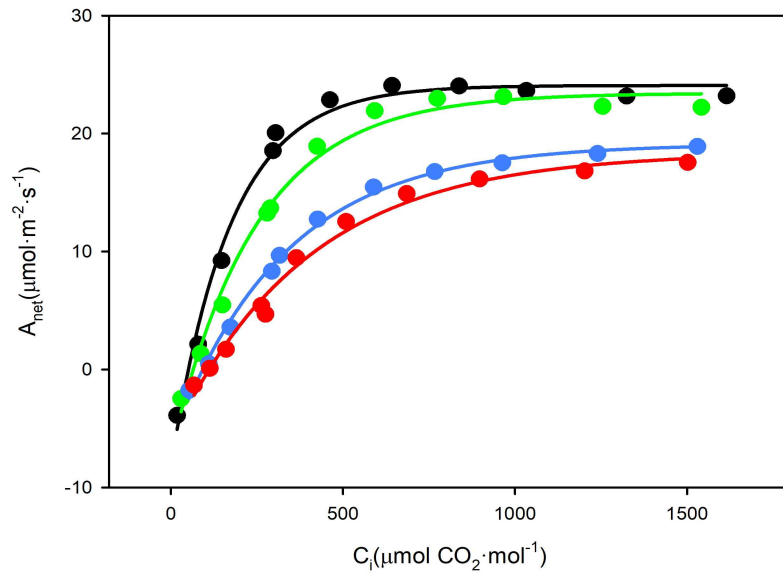


그림 3-4-24. 토마토 엽위에 따른 광합성능력 비교(Black: 신엽; Green: 중간엽1; Blue: 중간엽2; Red: 노엽)

- 광합성과 잎의 특성 간의 관계 분석

- \* 실험 온실은 4개의 재배 라인이 있으며 22년 11월 02일 오전 11시 측정 기준 평균 751 ± 17.9 μmol·m⁻²·s⁻¹을 가져 산란광 유리의 효과인 골재에 의한 그늘 감소에 효과적임.

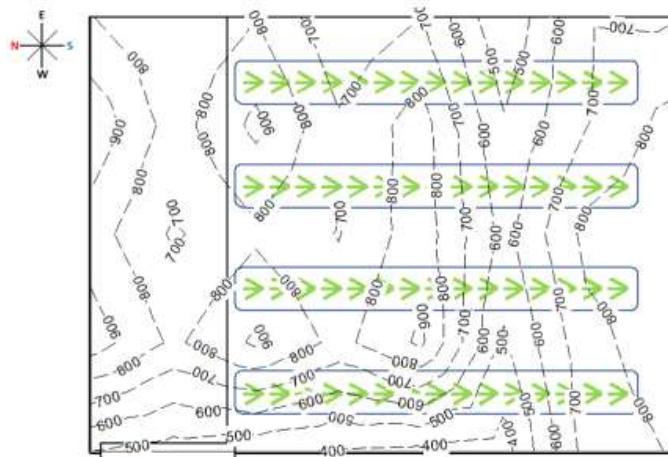


그림 3-4-25. 온실 골격 및 광 분포맵

- \* 광합성속도는 잎의 전개 이후 상승하기 시작하여 잎의 완전 전개 때 가장 높은 속도를 보이고 감소함.
- \* 연구에서는 완전 전개까지 속도가 올라가다 이후 일정 수준을 유지하였음.
- \* 광합성속도는 온실환경과 측정 조건에 따라 다르기 때문에 수치 비교에 절대적인 기준을 마련하기 어려움.



- \* 하지만 타 연구에서 DAP 26일 때 약  $16\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 속도를 가지는 반면 본 실험에서는 DAP 35일 때  $22\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 속도로 차이가 있음을 알 수 있음.(Kim et al, 2013)
- \* 이는 피복재로 사용한 산란광 유리의 효과로 작물 중위엽까지 고르게 광이 조사되어 나타난 결과로 보임.

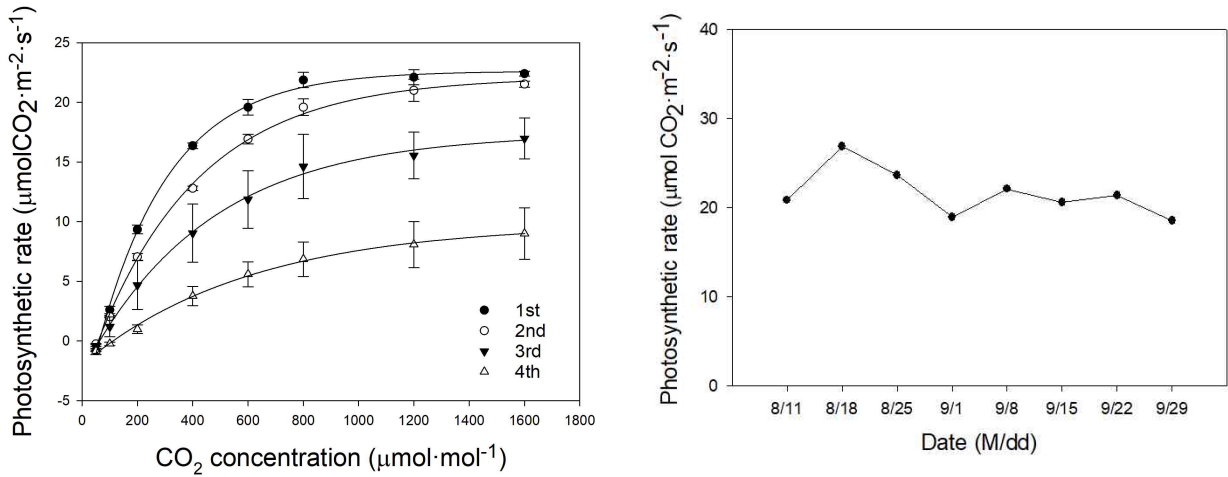


그림 3-4-26. 엽위와 출엽 후 시간에 따른 광합성 속도

- \* 앞에 조사된 빛 중 반사되고 투과된 양을 제외한 수치를 흡수율이라 계산하였음.
- \* 400~600nm에서 75~88%, 600~800nm에서 44~52%의 흡수율을 가졌음. 이는 Chlorophyll a와 Chlorophyll b의 흡수 스펙트럼과 유사한 경향을 보였음.

$$Absorbance = 1 - (Reflectance + Transmittance)$$

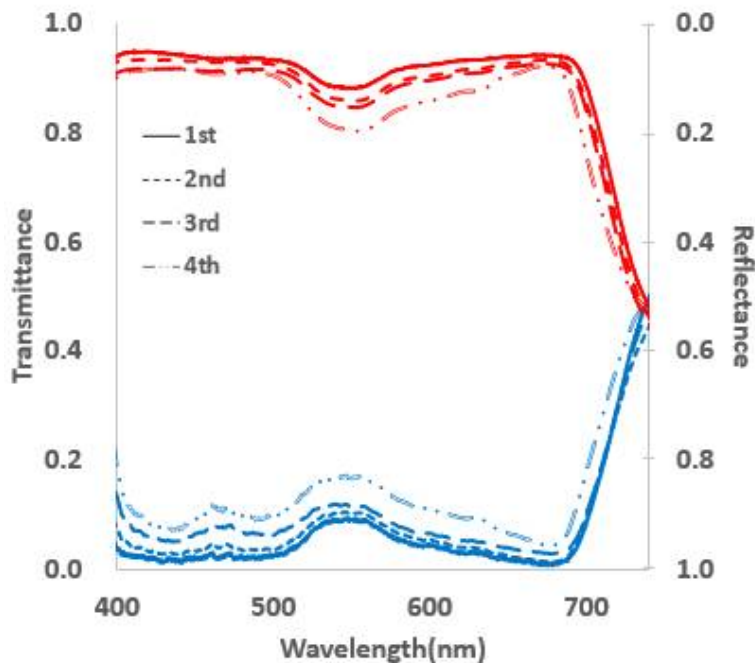


그림 3-4-27. 엽위에 따른 토마토 잎의 광학적 특성

표 3-4-13. 파장에 따른 잎의 광학적 특성

Wavelength	Items(%)	1st	2nd	3rd	4th
400-800nm	Reflectance	17.8±0.22*	19.4±0.55	20.7±0.98	22.0±1.02
	Transmittance	14.6±0.36	14.2±1.13	16.5±0.76	20.1±0.42
	Absorptance	69.5±0.43	67.3±0.46	64.7±0.50	59.3±0.82
400-600nm	Reflectance	7.8±0.22	9.3±0.83	10.6±1.04	12.6±1.09
	Transmittance	4.3±0.85	5.7±1.36	8.1±0.40	11.9±0.18
	Absorptance	88.0±0.77	85.1±0.70	81.4±0.74	75.5±0.95
600-800nm	Reflectance	27.2±0.23	29.0±0.31	30.1±0.92	30.8±0.95
	Transmittance	24.2±1.03	22.1±0.92	24.4±1.29	27.7±0.64
	Absorptance	52.1±0.24	50.7±0.31	49.0±0.51	44.0±0.85

\*Mean±Standard Error

- \* 관행농업은 토마토 잎을 15~18매로 유지하여 군락 호흡량을 감소시킴으로써 광합성 효율을 증가시키고 과실을 광에 노출시켜 착색을 촉진시킴.
- \* 측정 마디의 엽령은 1번 잎(5일), 2번 잎(35일), 3번 잎(57일), 4번잎(77일) 임.
- \* 엽위에 따라 광합성, 엽록소 지수는 감소하였고 두께는 증가하였음.
- \* 두께는 광합성에 의한 전분 누적에 의해 두꺼워진 것으로 보임.

표 3-4-14. 엽위별 단엽의 물리적 특성

Measuring position	Leaf thickness (mm)	A <sub>max</sub> (μmol CO <sub>2</sub> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	SPAD	Fv/Fm
1st	0.573 <sup>b*</sup>	22.4 <sup>a</sup>	57.7 <sup>a</sup>	0.775 <sup>a</sup>
2nd	0.647 <sup>ab</sup>	21.5 <sup>a</sup>	59.6 <sup>a</sup>	0.795 <sup>a</sup>
3rd	0.703 <sup>ab</sup>	17.0 <sup>b</sup>	50.5 <sup>ab</sup>	0.809 <sup>a</sup>
4th	0.723 <sup>a</sup>	9.0 <sup>c</sup>	41.4 <sup>b</sup>	0.668 <sup>b</sup>

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

- \* 광합성, 잎의 두께, 엽록소 지수, 엽록소 형광반응, 투과율과 반사율에 대해 피어슨 상관분석을 진행함.
- \* 엽록소 형광반응 수치를 제외한 항목에서 순수한 상관계수를 가졌지만 엽록소 지수, 400-600nm의 투과율에서 매우 높은 상관 관계를 가져 이를 활용할 예정.

표 3-4-15. 광합성과 잎의 특성 간의 상관분석 결과

	Leaf thickness	SPAD	Fv/Fm	Transmittance		Reflectance	
				400-600nm	600-800nm	400-600nm	600-800nm
A <sub>max</sub> (μmol CO <sub>2</sub> ·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> )	-0.64*	0.87***	0.50	-0.85***	-0.72**	-0.73**	-0.63*

\*p<0.05; \*\*p<0.01, \*\*\*p<0.001.

- 토마토의 광합성과 잎의 물리적 특성 간의 모델

- \* 상관계수가 높았던 SPAD, 광흡수율, 광투과율, 두께에 대한 광합성의 관계식을 작성한 결과, 잎 두께를 제외한 나머지 항목들은 선형 회귀분석을 하였을 때 가장 높은 결정계수를 가짐.
- \* 항목에 관한 회귀식과 결정계수는 표3-4-16에 표기함.

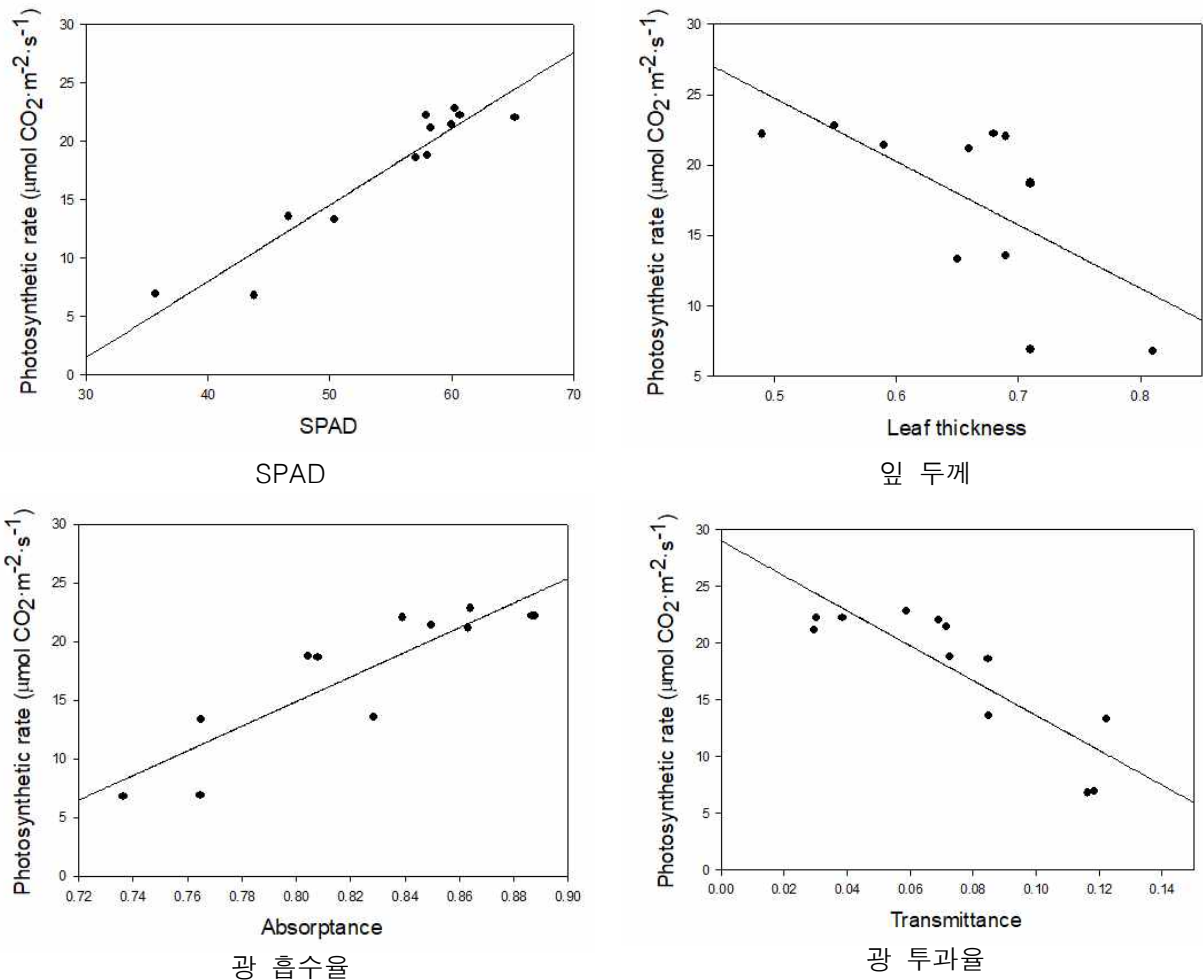


그림 3-4-28. 잎 특성과 광합성의 관계

표 3-4-16. 광합성과 잎의 특성 회귀식 및 결정계수

	Equation	R <sup>2</sup>
SPAD	PR* = -18.2 + 0.65x	0.900
Leaf thickness	PR = 47.3 - 45.0x	0.413
Absorbance	PR = -69.1 + 105.0x	0.785
Transmittance	PR = 29.0 - 153.7x	0.722

\*Means leaf photosynthetic rate

- \* 본 실험을 통해 벤로형 온실에서 광합성과 관련성이 높은 잎의 특성을 조사하였음.
- \* 산란광 유리 이용은 온실 골재로 인한 그늘을 줄이고 높이에 따른 광 소멸 계수가 낮은 장점이 있어 광 분포 개선 효과로 인해 생산성을 높이는 효과가 있음.

- \* 잎은 동화작용에 의해 전분이 누적되고 두꺼워지며 고농도의 CO<sub>2</sub>는 이를 촉진시키며 두꺼워진 잎은 광학적 특성이 변화할 뿐 아니라 광합성속도가 낮아짐.
- \* 엽록소는 빛 에너지를 흡수하면서 이산화탄소를 동화시키기 때문에, 엽록소 지수는 광합성과 양의 상관관계를 가짐. 그러나 투과률이 높은 잎은 빛 에너지 흡수가 원활하지 않아 광합성과 음의 상관관계를 가지는 것으로 보임. 그렇지만, 잎의 두께와 광 흡수율도 광합성과 관계가 있는 요소들이며, 노엽과 같이 광합성 속도가 떨어지는 잎들도 분석에 포함되었기 때문에 이러한 결과가 나온 것으로 보임. 또한, 엽록소 형광은 작물의 활력 상태를 나타내는 수치로 사용되며, 광합성과 큰 관계가 없음을 알 수 있었음(표 3-4-15).

○ 토마토 과실의 비대 모델 개발

- 토마토 비대 모델 개발 결과

- \* 토마토 무게를 예측하기 위해 과장과 과폭을 곱한 값과 실제 과실 무게와 비교하였음.
- \* 과실 단계에 따라 미숙과 초기의 과중은 과장×과폭에 비해 천천히 증가하였지만, 과실 성숙단계에서는 직선의 형태를 가짐.

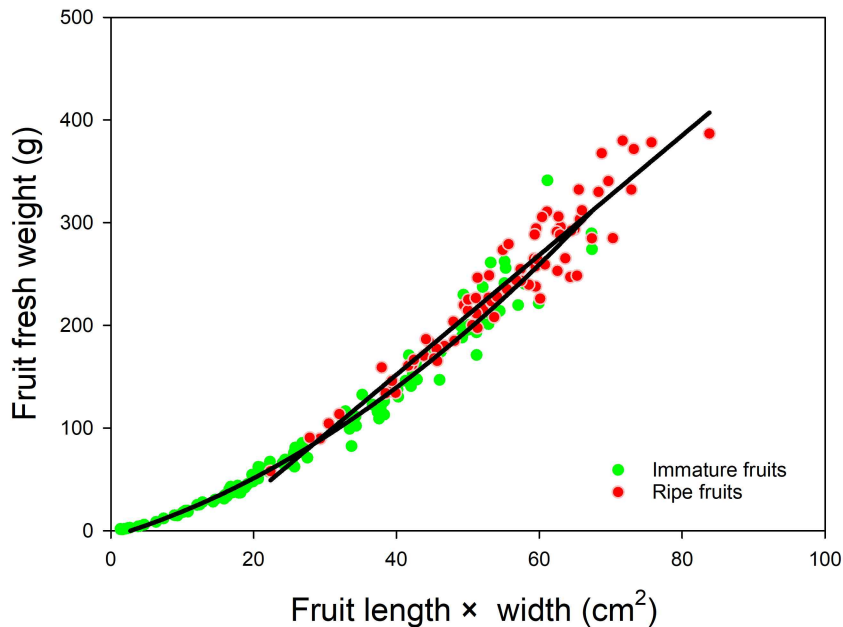


그림 3-4-29. 과장, 과폭을 이용한 중량 예측 모델

- \* 미성숙과는 과장과 과폭을 곱한 값이 0부터 30cm<sup>2</sup> 사이에 분포하였지만, 성숙과는 30cm<sup>2</sup> 이상으로 나타남.
- \* 회귀분석 결과 미숙과는 R<sup>2</sup> = 0.972, 성숙과는 R<sup>2</sup> = 0.920의 높은 결정계수를 가짐.
- \* 과실 단계에 따른 회귀식과 결정계수는 표 3-4-17에 표기함.

표 3-4-17. 미숙과와 성숙과의 회귀식과 결정계수 (x=FL×FW)

	Range of x	Equation	R <sup>2</sup>
Immature fruits	0 < x < 30	FW = -5.97 + 2.07x + 0.04x <sup>2</sup>	0.972
Ripe fruits	30 ≤ x	FW = -81.0 + 5.83x	0.920

- \* 본 실험을 통해 미숙과일 때 과실의 크기보다 낮은 중량을 가질 수 있지만, 성숙과는 외부적 크기와 중량이 직선적인 관계를 갖는 것을 알 수 있음. 이를 통해, 미숙과일 때는 과실의 비대가 이루어지고, 성숙이 되어가면서 수분이 채워지며 중량이 증가하는 것으로 예상됨.

○ 토마토 과실의 착색 모델 개발

- 토마토 착색 모델 개발 결과

- \* 토마토의 착색 단계에 따른 과실의 표면의 색 변화를 조사하였음.
- \* ColorChecker를 이용해 촬영된 이미지를 실제와 같이 나타냈으며, 토마토 과실은 옅은 초록색에서 주황색을 거쳐 붉게 변화하며 과숙할 경우, 표피의 색이 어두워짐.

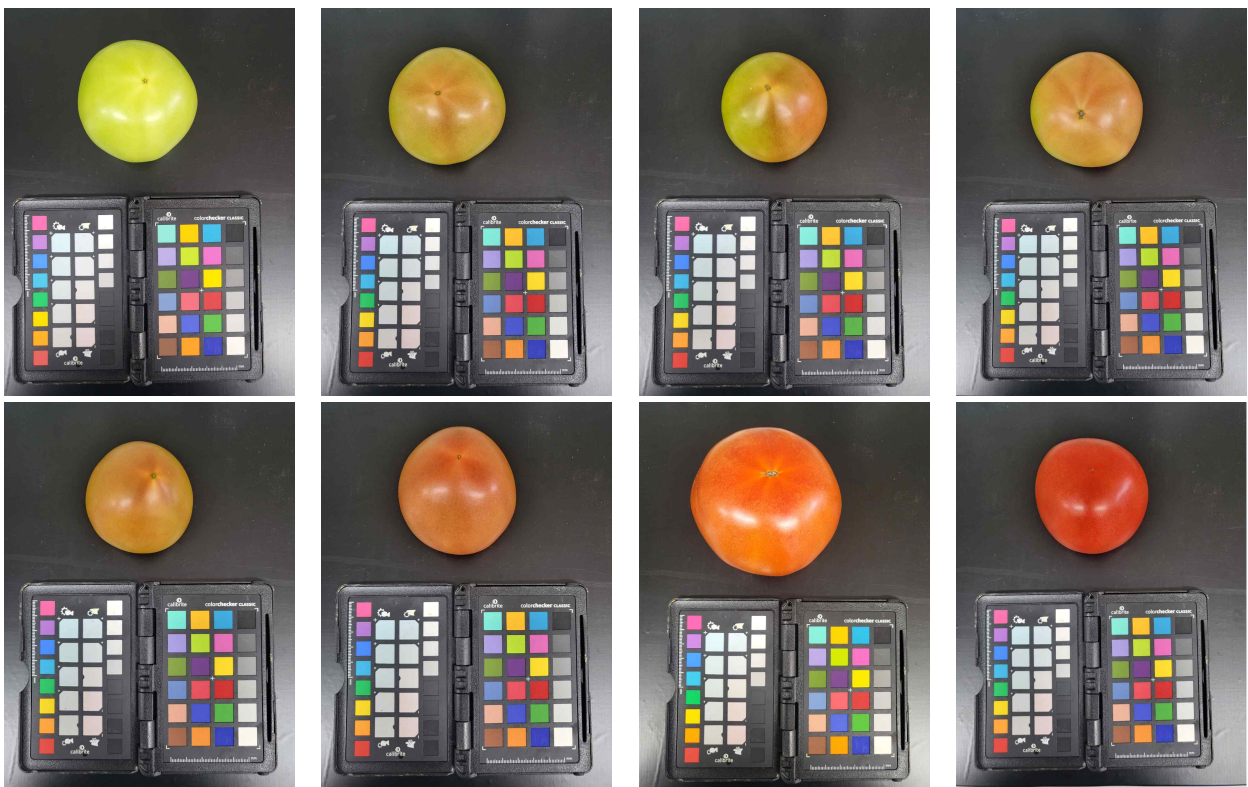


그림 3-4-30. 토마토 착색 변화

- \* Hunter L\* 값은 밝기를 나타내는 수치인데 완숙에 가까워질수록 수치가 낮아짐을 알 수 있음. 이는 미숙과에 비해 완숙과가 더 어두운 색을 가진다는 의미임.
- \* Hunter a\* 값은 음수는 초록색이며, 양수는 빨강과 보라를 나타내고, 적색 착색을 하는 토마토에서 가장 많은 수치 변화를 보였음.
- \* Hunter b\* 값은 음수와 양수, 각각 파랑과 노랑을 의미하지만, 토마토 과실은 착색에도 큰 차이를 보이지 않음.

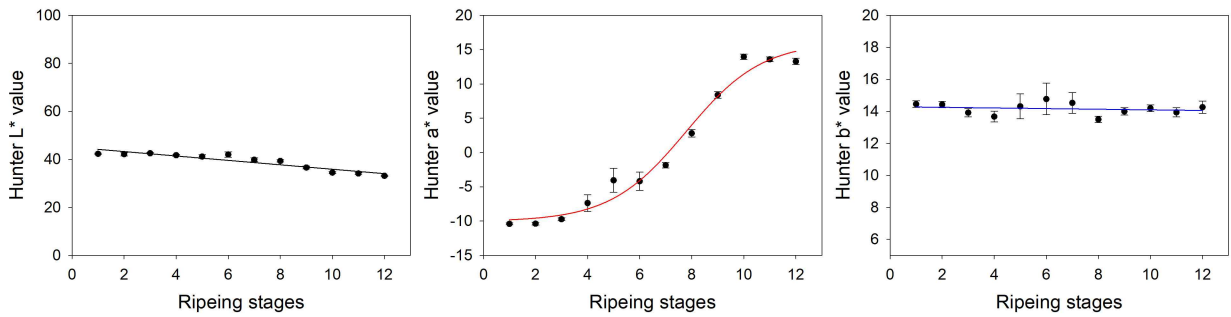


그림 3-4-31. 착색단계에 따른 토마토 과피의 Hunter Lab 변화

- \* 색차계를 활용해 얻은 색좌표인 Hunter Lab는 익숙하지 않을 수 있어, 일상생활에서 많이 사용하는 RGB 색좌표로 변화하여 착색에 따른 색 변화를 나타냄.
- \* R\* 값은 Hunter L\* 과 마찬가지로 적색을 나타내는 수치이기 때문에 착색이 진행됨에 따라 수치가 증가하였음.
- \* G\* 값과 B\*값은 과실의 성숙과정에서 수치가 감소하였는데, 이는 적색이 높아짐에 따라 보색 영역에 속하는 색들이 감소하였기 때문으로 보임.

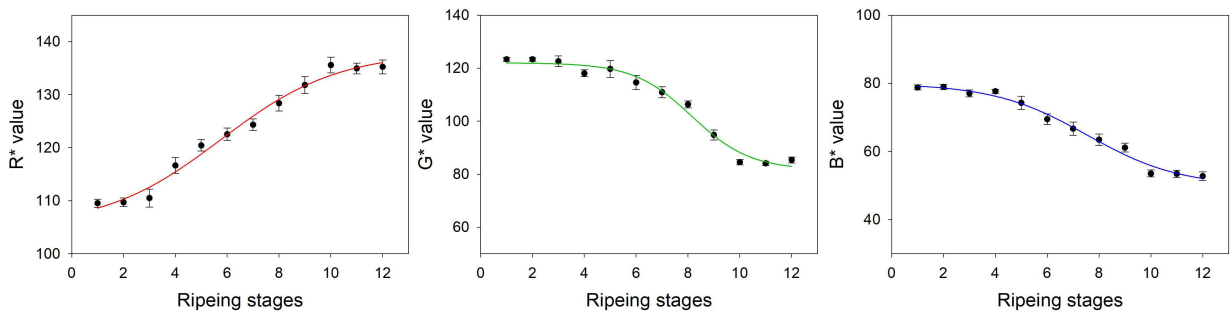


그림 3-4-32. 착색단계에 따른 토마토 과실 표피의 RGB 변화

- \* 본 실험을 통해 성숙에 따른 과피의 색 변화가 나타나는 과실의 표면을 RGB와 같은 색의 좌표로 표현함으로써 색을 수치화할 수 있었음.
- \* 토마토는 호흡급등형 과실로 수확 이후에 성숙을 통해 색 변화 및 연화가 이루어지기 때문에 정확한 수확 시기를 판별하는 기술이 요구됨. 이러한 연구 결과를 통해 영상 기술 분야에서 과실의 색을 측정하여 수확하는 자동 수확기의 판단 기준으로 활용될 수 있을 것으로 보임.

□ (5공동) 오이 성장 예측 및 온실환경 모델 개발을 위한 데이터 수집·표준화 및 모델 실증

(1) 생육 및 환경 데이터 수집

① 오이 성장 데이터 수집 및 분석

○ 21년도 작기 영양생장(그림 3-5-1)

- 재배기간 동안 엽수는 영양생장과 생식생장의 강도와 속도의 균형을 이루기 위해 하부엽 적엽을 주 2회 실시하여, 15-18매 범위에서 유지되었음.
- 마디수는 생육단계별로 선형적으로 증가하였고, 실험이 종료되는 시점에는 150마디에 도달하였음.
- 경경은 재배기간 동안 평균 8.70mm였으며, 생육 초·중반보다 후기에 경경이 감소하는 패턴을 나타냄.
- 절간장 평균은 2021년 3월 31일에 13.4cm로 가장 길었으며, 8월 4일에 8.1cm로 가장 짧았음.

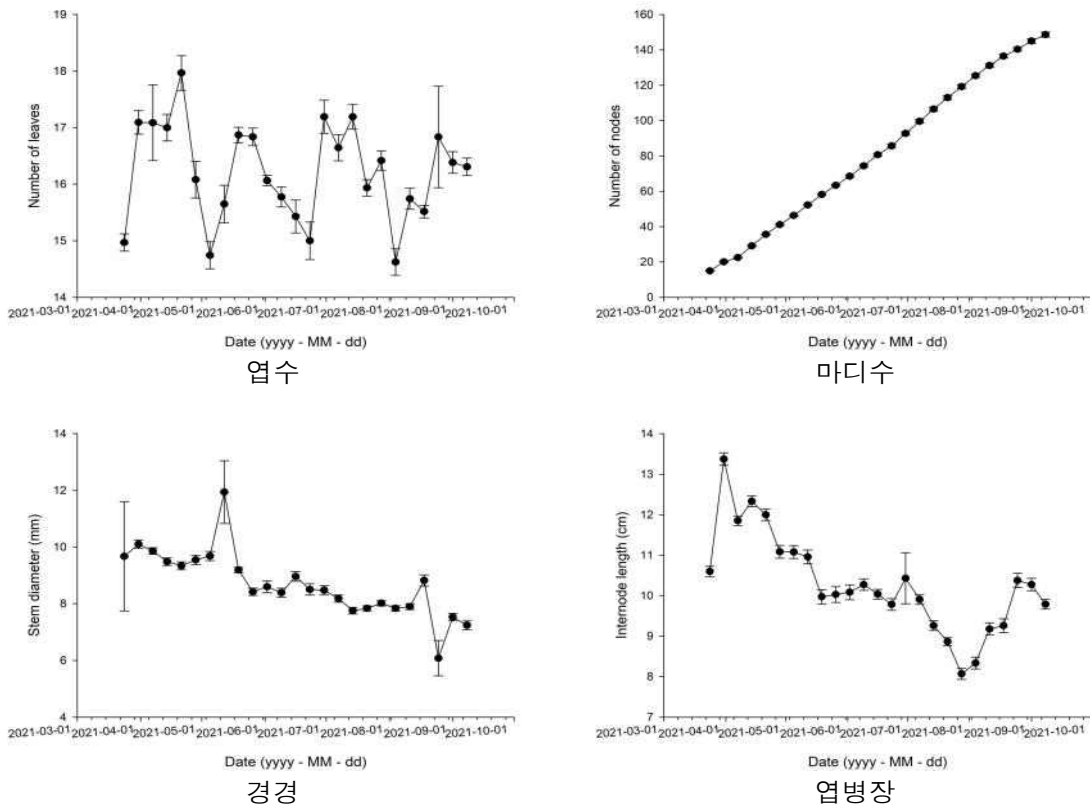
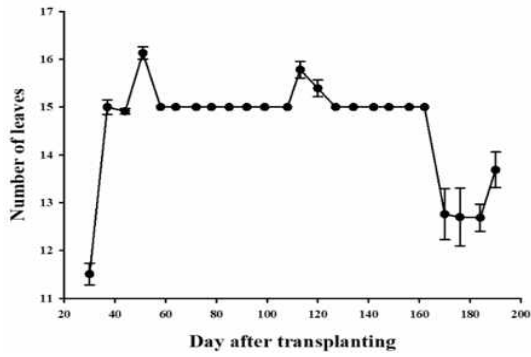


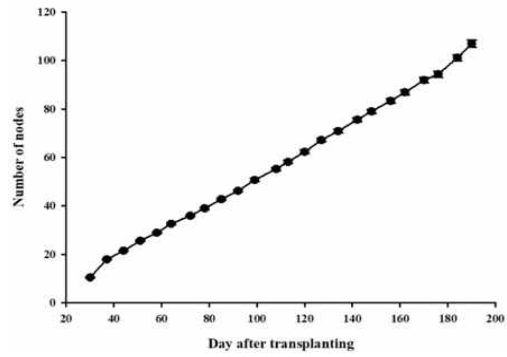
그림 3-5-1. 오이 영양생장

○ 21-22년도 작기 영양생장(그림 3-5-2)

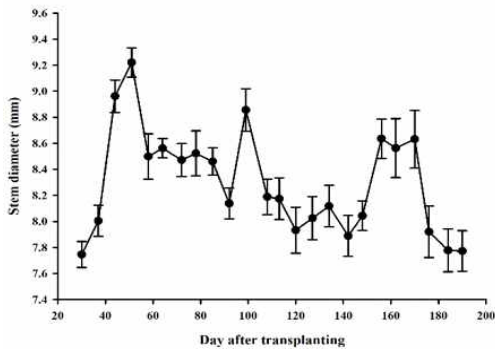
- 재배기간 동안 엽수는 21년도 작기와 동일하게 하부엽 적엽을 주 2회 실시하여, 15매가 유지되었음.
- 마디수는 재배가 종료되는 시점에는 106마디에 도달하였고, 경경은 재배기간 동안 평균 8.30 mm였으며, 절간장 평균은 11.1cm였으며, 생육초기보다 생육후기에 감소하는 경향을 보였음.



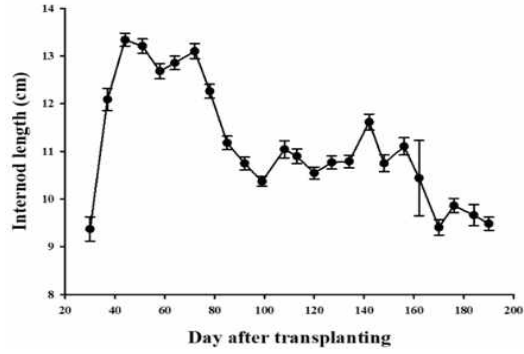
엽수



마디수



경경

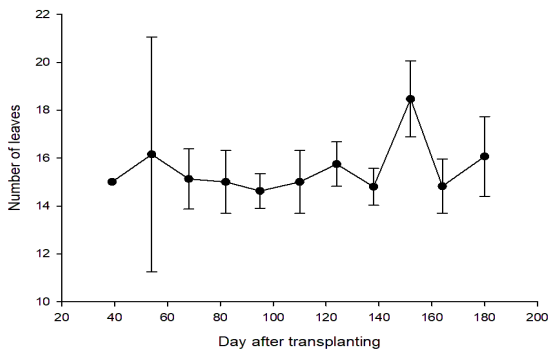


엽병장

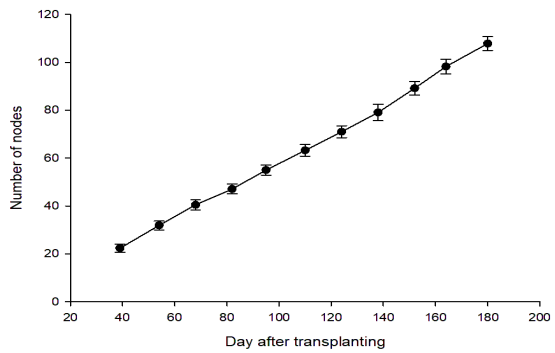
그림 3-5-2. 오이 영양생장

○ 22-23년도 작기 영양생장(그림 3-5-3)

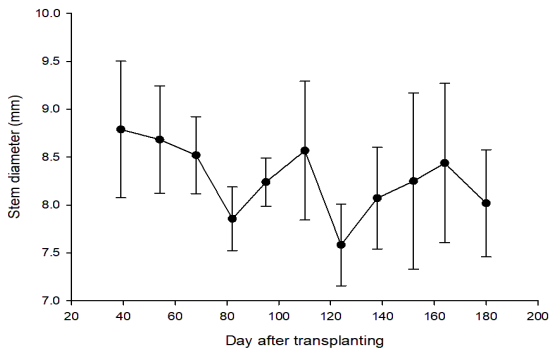
- 재배기간 동안 엽수는 하부엽 적엽을 주 2회 실시하여, 15-18개 로 유지되었음.
- 마디수는 재배 종료 시점에 107마디에 도달하였고, 작기 동안 경경과 절간장 평균은 각각 8.3mm, 10.89cm였고, 생육후기로 갈수록 감소하는 경향을 보였음.



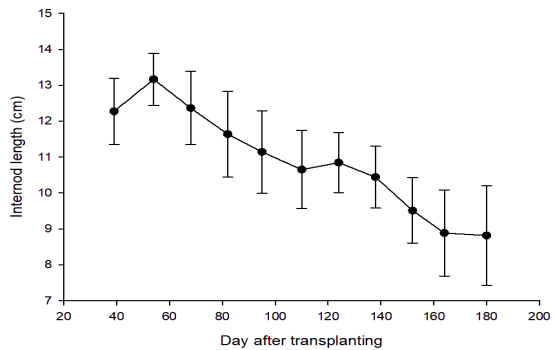
엽수



마디수



경경



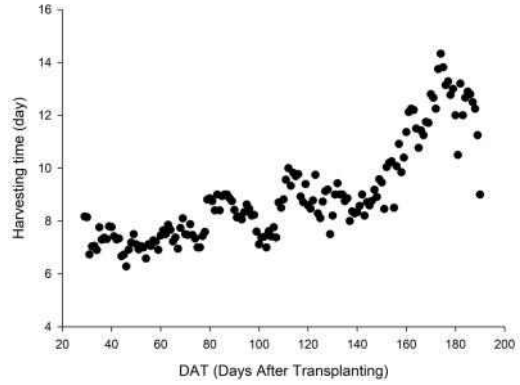
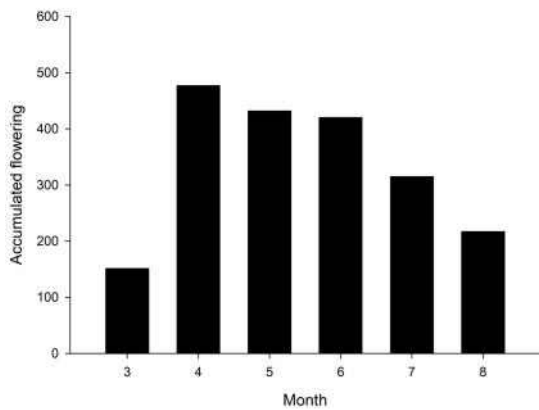
절간장

그림 3-5-3. 오이 영양생장



○ 21년도 작기 생식생장 및 과실 생산성(그림 3-5-4)

- 재배기간 동안 월별 조사개체(n=32)의 누적 개화수는 3월 151개, 4월 477개, 5월 432개, 6월 420개, 7월 315개, 8월 217개로 4월에 가장 개화수가 많았음.
- 개화 후 과실 수확 소요 일수는 DAT '30-100'에는 평균 6.7일, DAT '100-160'에는 평균 9.6일, DAT '160-195'에는 평균 12.3일이 소요되었음.

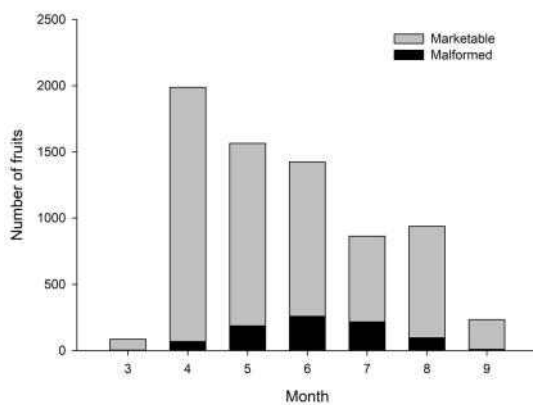


월별 누적 개화수

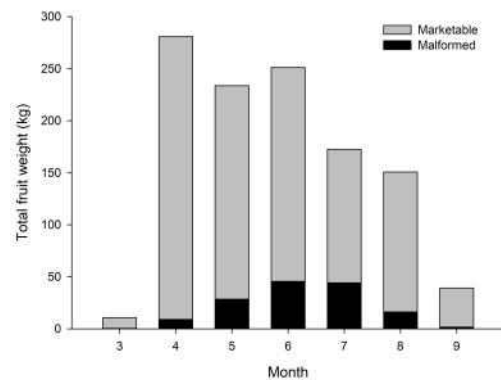
개화 후 과실 소요일수

그림 3-5-4. 오이 생식생장

- 재배기간 동안 150개체에서 오이 상품과는 7,098개가 생산되었고, 비상품과는 834개로 기형과 비율은 11.75%였음(그림 3-5-5).
- 총 과실 무게는 상품과 1.14t, 비상품과는 0.14t으로 총 1.28t이 생산되었음(그림 3-5-5).



과실 수

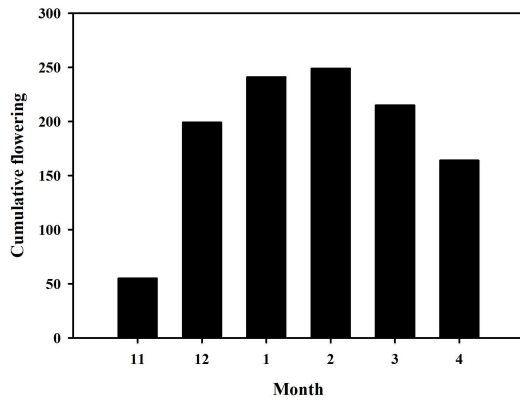


과실 무게

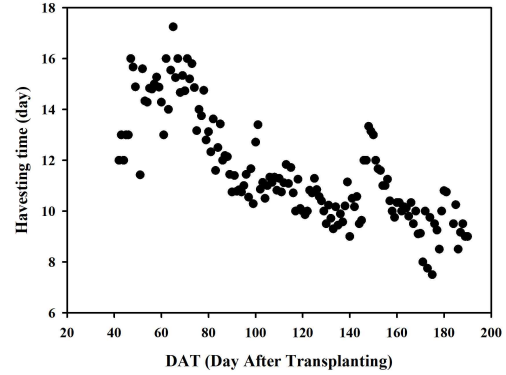
그림 3-5-5. 오이 과실수 및 과실 무게

○ 21-22년도 작기 생식생장 및 과실 생산성

- 재배기간 동안 월별 조사개체(n=24)의 누적 개화수는 11월 55개, 12월 199개, 1월 241개, 2월 249개, 3월 215개, 4월 164개로 2월에 가장 개화수가 많았음(그림 3-5-6).
- 개화 후 과실 수확 소요일수는 평균 11일이었고, 생육 후기로 갈수록 평균 개화 후 수확 소요일수는 감소하였음(그림 3-5-6).



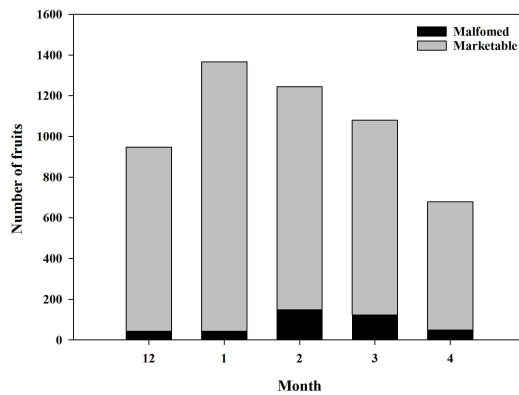
월별 누적 개화수



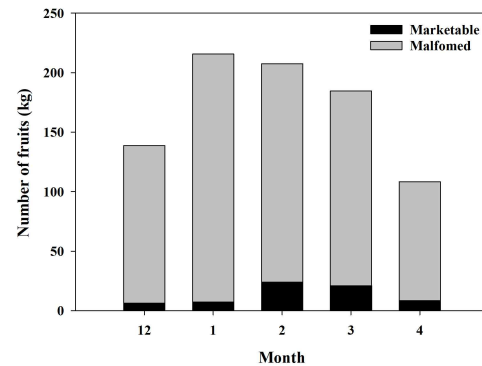
개화 후 수확 소요일수

그림 3-5-6. 누적 개화수 및 개화 후 수확 소요일수

- 재배기간 동안 169개체에서 오이 상품과는 4,913개가 생산되었고, 비상품과는 404개로 기형과 비율은 8.22%였음(그림 3-5-7).
- 재배기간 동안 169개체에서 총 과실 무게는 상품과 787.74kg, 비상품과는 13.41kg으로 총 801.15kg이 생산되었음(그림 3-5-7).



과실 수

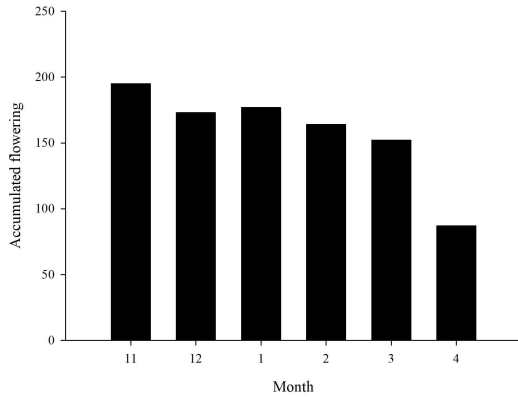


과실 무게

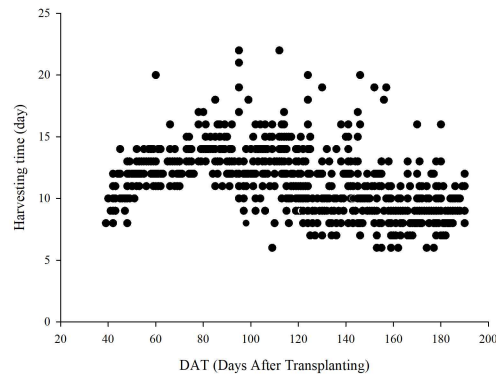
그림 3-5-7. 오이 과실수 및 과실 무게

○ 22-23년도 작기 생식생장 및 과실 생산성

- 재배기간 동안 월별 조사개체(n=18)의 누적 개화수는 11월 195개, 12월 173개, 1월 177개, 2월 164개, 3월 152개, 4월 87개로 11월에 가장 개화수가 많았음(그림 3-5-8).
- 개화 후 과실 수확 소요 일수는 DAT '30-100'에는 평균 13일, DAT '100-160'에는 평균 11일, DAT '160-190'에는 평균 9일이 소요되었음(그림 3-5-8).



월별 누적 개화수



개화 후 과실 소요일수

그림 3-5-8. 오이 생식생장

○ 21년도 작기의 일중 평균 온도에 따른 오이 특성(그림 3-5-10)

- 재배 기간 동안 일중 평균온도에 따른 과실 수를 회귀분석한 결과, 일중 평균 온도가 21℃로 유지되었을 때 47.78개로 가장 많은 생산성을 보였고, 온도가 증가할수록 평균 과실수가 감소하였음(그림 3-5-9A).
- 재배 기간 동안 일중 평균온도에 따른 총 과실 무게를 회귀분석한 결과, 일중 평균 온도가 23℃로 유지되었을 때 7.6kg으로 가장 높았으며, 25℃보다 증가하면 유의적으로 과실 무게가 감소하였음(그림 3-5-9B).
- 일중 평균 온도에 따른 과실 소요 일수는 19℃ 9일, 20~21℃ 8일, 22~27℃ 10일로 일중 평균온도가 20~21℃로 유지될 경우 과실 수확시기가 19℃보다 1일, 22~27℃보다 2일 단축되었음(그림 3-5-9C).

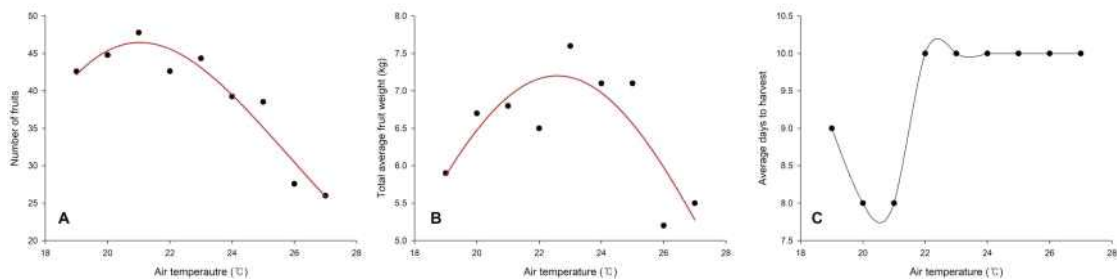


그림 3-5-10. 일중 평균온도에 따른 과실 특성

② 오이 농가 현장 데이터 수집

- 현장실증 데이터 수집을 통해 오이의 성장단계에 따라 각 기관별 건물중의 분배를 계산할 수 있으며, 수집된 환경 데이터를 활용해 우리나라 작형 및 환경조건에 맞는 오이 생육·수확량 모델 개발이 가능함(그림 3-5-11).
- 21-22년도 작기는 2021년 11월 10일 1차 생육데이터 수집을 진행하였으며, 2022년 5월 31일 16차 생육조사 데이터를 수집 하였음.
- 22-23년도 작기는 2022년 11월 8일 1차 생육데이터 수집을 진행하였으며, 2023년 5월 8일 15차 생육조사 데이터를 수집 하였음.

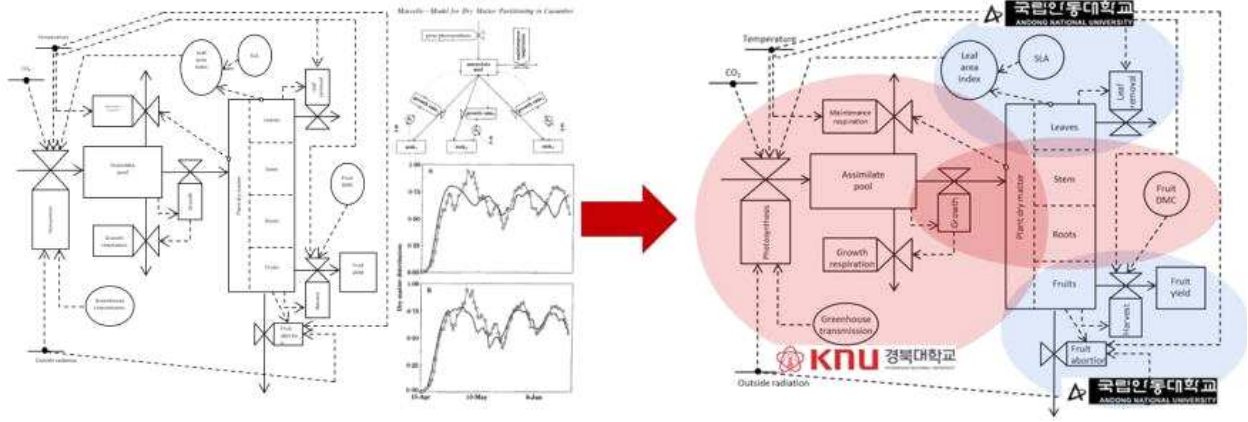


그림 3-5-8. 오이 건물중 분배 모델(Marcelis, 1994)

- 생육데이터 수집항목으로는 엽수(개), 마디수(마디), 초장(cm), 경경(mm), 엽생체중 및 견체중(g), 줄기생체중 및 견체중(g), 엽면적지수(LAI)를 수집하였고, A가와 B농가의 재배 기술이나 정식시기 차이로 인하여 생육양상이 상이하였음.
- 수집된 데이터는 오이 성장 모델의 보정 및 검증에 활용될 계획임.

표 3-5-1. 21-22년도 작기 A농가 생육 데이터 수집

A 농가	엽수 (개)	마디수 (마디)	초장 (cm)	경경 (mm)	엽생체중 (g)	엽견체중 (g)	줄기생체중 (g)	줄기견체중 (g)	엽면적지수 (LAI)
10/5	3±0.0	3±0.0	5.5±1.3	39±02	3.1±0.2	0.2±0.0	1.4±0.1	0.4±0.0	0.03±0.002
11/10	14±0.3	13±0.3	115.9±2.9	76±018	167.7±11.3	16.4±1.3	65.5±3.6	4.2±3.6	1.54±0.10
11/25	22±0.3	21±0.3	193.9±3.0	80±02	305.±17.2	21.4±1.4	110.8±4.8	6.1±0.3	2.88±0.14
12/9	17±0.4	27±0.4	253.5±2.4	63±02	296.2±11.0	25.6±0.9	143.5±3.0	9.9±0.2	3.20±0.09
12/23	20±0.1	32±0.4	283.1±3.5	74±03	229.7±10.6	25.2±0.6	148.1±5.0	9.6±0.4	3.10±0.11
1/6	16±0.1	37±0.4	324.2±8.6	74±03	252.3±11.5	22.1±1.1	167.8±7.7	11.6±0.4	3.17±0.17
1/20	18±0.2	42±0.4	366.0±11.0	71±02	236.2±13.4	22.9±1.1	197.1±7.3	14.2±0.5	2.92±0.13
2/3	18±0.4	47±0.5	368.7±10.0	65±02	117.4±5.3	16.7±0.6	178.1±7.7	13.2±1.0	2.12±0.06
2/17	19±0.4	52±0.4	403.3±14.5	69±02	290.0±13.4	31.2±1.5	196.7±9.1	16.0±0.7	3.34±0.17
3/3	16±0.5	58±0.5	527.4±11.9	130±58	328.5±19.9	36.4±2.2	280.9±7.1	22.1±0.4	3.83±0.21
3/17	16±0.3	65±0.7	533.0±6.4	71±0.1	255.0±10.2	25.1±1.2	267.6±7.8	20.6±4.5	3.00±0.15
3/31	16±0.7	71±0.9	628.0±21.7	70±0.2	200.5±11.4	23.7±1.1	297.4±15.0	24.3±1.2	2.25±0.13
4/14	13±0.3	77±0.8	632.9±8.1	59±0.6	228.6±7.6	26.2±1.4	319.7±6.0	24.9±0.5	2.55±0.07
4/28	13±0.3	85±1.0	727.4±8.7	74±0.3	190.8±11.6	-	353.8±9.9	-	1.89±0.12

표 3-5-2. 21-22년도 작기 B농가 생육 데이터 수집

B 농가	엽수 (개)	마디수 (마디)	초장 (cm)	경경 (mm)	엽생체중 (g)	엽건체중 (g)	줄기생체중 (g)	줄기건체중 (g)	엽면적지수 (LAI)
10/15	2±0.2	1.2±0.2	6.2±0.1	34±0.1	1.3±0.1	0.1±0.01	0.7±0.03	0.03±0.02	0.02±0.01
11/10	7±0.2	6.5±0.7	54.1±6.0	70±0.5	69.0±14.3	7.3±1.5	26.5±4.6	1.2±0.4	0.84±1.46
11/25	16±0.2	15±0.2	99.0±3.2	88±0.2	1444±100	16.1±1.6	55.9±2.8	3.1±0.2	1.6±0.09
12/9	18±0.4	21±0.2	173.3±1.8	9.1±0.2	2745±133	24.3±1.4	113.3±3.1	7.2±0.4	3.19±0.11
12/23	17±0.3	27±0.2	259.6±3.7	82±0.2	2594±138	26.9±0.6	147.6±3.7	9.1±0.3	3.22±0.14
1/6	19±0.4	33±0.2	300.4±11.1	75±0.3	165.3±3.6	19.6±0.7	165.3±3.6	9.96±0.3	3.09±0.10
1/20	19±0.1	39±0.3	342.7±3.9	70±0.2	180.8±5.8	15.6±0.6	117.8±3.0	11.2±0.3	2.32±0.07
2/3	18±0.3	44±0.6	432.9±7.1	77±0.2	240.7±5.0	23.6±0.3	248.2±4.3	16.9±0.4	2.33±0.08
2/17	17±0.2	51±0.2	399.4±14.5	77±0.2	304.8±13.4	25.9±0.8	199.6±9.1	19.2±0.6	2.33±0.09
3/3	17±0.7	56±0.2	519.1±19.7	80±0.2	252.4±9.3	30.9±1.1	315.2±13.1	23.4±1.0	2.4±0.09
3/17	16±0.2	62±0.2	571.3±4.1	79±0.2	227.9±8.9	24.5±1.2	349.4±6.0	26.4±0.3	1.82±0.08
3/31	16±0.4	68±0.3	664.0±21.7	75±0.1	213.1±11.4	30.4±1.1	326.3±15.0	29.7±0.7	2.41±0.13

표 3-5-3. 22-23작기 A농가 생육 데이터 수집

A 농가	엽수 (개)	마디수 (마디)	초장 (cm)	경경 (mm)	엽생체중 (g)	엽건물중 (g)	줄기생체중 (g)	줄기건물중 (g)	엽면적지수 (LAI)
10/8	2±0.0	2±0.0	14.28±0.50	25±0.4	1.3±0.2	±0.0	2.4±0.3	±0.0	0.02±0.002
11/8	11±0.8	14±0.7	109.0±6.2	79±0.6	145.8±18.1	17.0±2.3	64.9±7.6	3.7±0.5	1.52±0.18
11/23	14±1.3	23±1.0	194.7±9.5	94±0.5	247.4±45.5	19.9±3.4	133.4±15.8	8.8±1.2	2.54±0.52
12/6	15±0.5	25±1.7	221.6±14.4	86±0.7	187.4±30.5	32.7±3.1	122.5±40.2	26.3±1.2	2.20±0.30
12/20	14±1.1	29±9.8	283.6±10.5	73±0.4	177.7±15.1	14.3±2.7	184.6±18.6	12.6±1.2	2.22±0.28
1/3	15±0.6	36±1.3	327.1±10.1	74±0.6	151.6±13.7	14.7±1.3	204.0±20.5	14.1±1.6	1.85±0.22
1/17	15±0.7	40±2.0	355.6±32.0	75±0.7	125.2±15.9	10.4±1.5	180.2±65.5	13.1±2.3	1.60±0.20
2/1	14±1.3	44±1.2	364.3±15.4	63±0.3	96.4±9.08	10.4±2.0	228.2±17.6	16.9±1.4	1.33±0.13
2/14	15±0.3	50.3±2.3	421.2±27.0	7.1±0.5	119.8±10.8	11.7±2.3	267.6±11.7	19.2±1.0	1.49±0.14
2/27	15±0.0	53±1.6	444.5±19.0	69±0.4	128.0±14.3	15.4±2.3	292.6±20.6	22.6±1.8	1.53±0.17
3/15	15±0.3	55±1.5	456.7±18.5	66±0.5	123.2±14.8	17.4±2.0	253.0±89.6	22.1±1.5	1.62±0.13
3/27	15±0.3	64±2.3	531.9±31.0	63±0.3	111.8±11.6	13.1±1.2	299.1±30.3	22.7±1.7	1.27±0.10
4/10	15±0.6	74±1.3	662.2±21.6	63±0.5	120.0±14.4	14.3±1.9	337.6±11.5	28.0±1.2	1.36±0.12
4/24	15±0.6	77±4.4	665.5±51.4	65±0.4	128.6±20.1	16.4±2.7	356.0±35.3	31.0±3.0	1.36±0.21
5/8	15±0.4	91±4.2	805.3±55.0	79±0.6	151.8±33.3	16.8±1.5	427.2±43.5	37.1±1.3	1.8±0.17

표 3-5-4. 22-23작기 B농가 생육 데이터 수집

B 농가	엽수 (개)	마디수 (마디)	초장 (cm)	경경 (mm)	엽생체중 (g)	엽건물중 (g)	줄기생체중 (g)	줄기건물중 (g)	엽면적지수 (LAI)
10/15	2±0.0	2±0.0	14.68±0.73	2.6±0.5	1.3±0.2	0.1±0.0	2.8±0.4	0.1±0.0	0.02±0.004
11/8	7±1.1	8±1.1	47.3±3.4	6.6±0.5	45.6±13.36	5.1±1.4	19.8±5.8	0.5±0.3	0.48±0.12
11/23	12±2.3	15±1.6	106.0±13.6	8.2±0.8	167.2±48.4	19.5±5.8	70.6±19.0	4.9±1.2	1.45±0.39
12/6	14±0.3	20±1.3	161.3±11.9	9.1±0.4	226.4±28.2	35.3±11.3	105.6±11.3	24.6±0.8	2.08±0.23
12/20	15±0.3	26±1.1	227.7±16.6	8.3±0.4	170.2±22.3	16.9±2.3	133.2±13.3	9.0±1.3	1.61±0.21
1/3	15±0.7	32±1.5	281.8±17.7	7.3±0.6	132.8±22.1	14.8±2.0	172.6±19.1	11.9±1.5	1.38±0.24
1/17	15±0.0	33±2.4	335.9±29.8	7.5±0.4	128.2±16.2	12.1±2.2	224.8±24.6	14.4±1.9	1.40±0.16
2/1	15±0.7	42±1.6	384.3±15.3	6.8±0.5	114.4±8.8	13.0±1.1	250.0±16.5	18.6±1.2	1.30±0.10
2/14	15±0.0	49±1.2	469.2±10.9	7.0±0.6	140.4±14.9	17.7±2.0	294.0±17.0	22.0±1.0	1.49±0.10
2/27	15±0.7	52±3.4	506.7±19.7	7.8±0.4	106.4±5.72	22.8±1.9	362.3±12.34	27.2±1.7	1.38±0.11
3/15	15±0.3	56±4.7	526.1±38.9	7.0±0.5	123.0±4.66	24.2±3.0	315.0±27.1	27.3±3.7	1.29±0.15
3/27	15±0.0	63±4.2	614.5±42.0	6.9±0.3	143.2±11.8	20.1±4.1	339.6±33.0	28.3±2.6	1.30±0.09
4/10	15±0.3	78±2.2	666.6±29.1	7.5±0.7	124.6±17.3	19.4±3.3	380.6±30.8	33.2±2.5	1.09±0.12
4/24	15±0.0	82±2.6	809.1±29.6	7.2±0.9	155±11.8	21.0±1.8	466.9±40.2	41.0±3.4	1.34±0.09
5/8	15±0.0	85±3.9	833.1±0.9	7.8±0.7	148.8±13.9	36.9±2.0	467.2±50.1	61.0±2.9	1.6±0.85

③ 경북대학교 스마트 첨단 온실 오이 환경 데이터 수집 및 분석

○ 21년도 작기 환경 데이터(그림 3-5-12)

- 재배기간 동안 온실 내 수집된 환경 데이터는 평균 온도(22.70℃), 습도(76.81%), VPD(0.72 kPa), 누적광량(1.70 MJ·m<sup>2</sup>)로 제어되었음(그림 3-5-12)
- 수집된 환경데이터는 작물 재배 기간 동안 온실 내 복합환경관리제어에 활용되었으며, 작물 생육 모델링의 매개변수로 적용되었음.

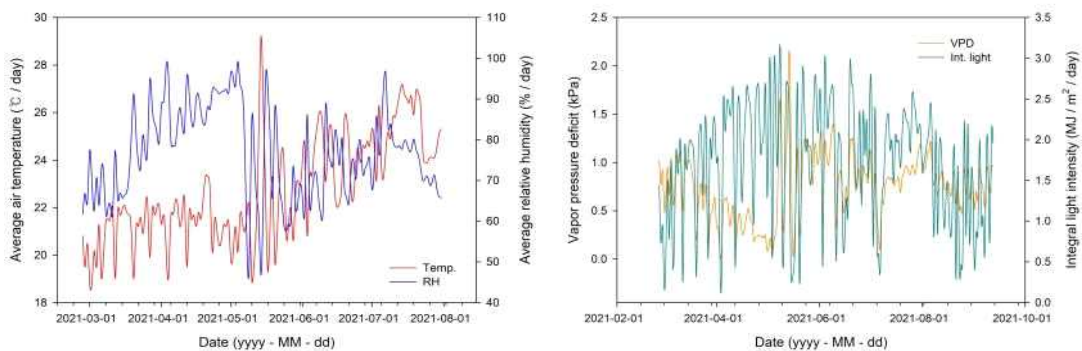


그림 3-5-12. 온·습도, 수증기압포차 및 누적광량

○ 21-22년도 작기 환경 데이터(그림 3-5-13)

- 재배기간 동안 온실 내 수집된 환경 데이터는 평균 온도(16.3℃), 습도(73.6%), 누적광량(1.29 MJ·m<sup>2</sup>), CO<sub>2</sub> 농도(553ppm)로 적절한 환경조건이 유지되었음(그림 3-5-12)

- 수집된 환경데이터는 작물 재배 기간 동안 온실 내 복합환경관리제어에 활용되었으며, 작물 생육 모델링의 매개변수로 사용되었음.

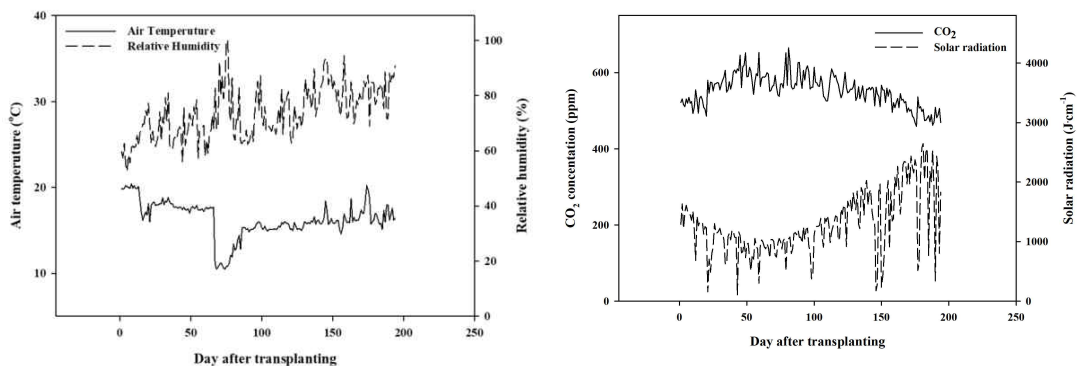


그림 3-5-13. 온·습도, 수증기압포차 및 CO<sub>2</sub> 농도

○ 22-23년도 작기 환경 데이터(그림 3-5-14)

- 재배기간 동안 온실 내 수집된 환경 데이터는 평균 온도(20.4°C), 습도(86.5%), 수증기압 포차(0.37 kPa), 누적광량(1.27 MJ·m<sup>2</sup>)로 적절한 환경조건이 유지되었음(그림 3-5-12)

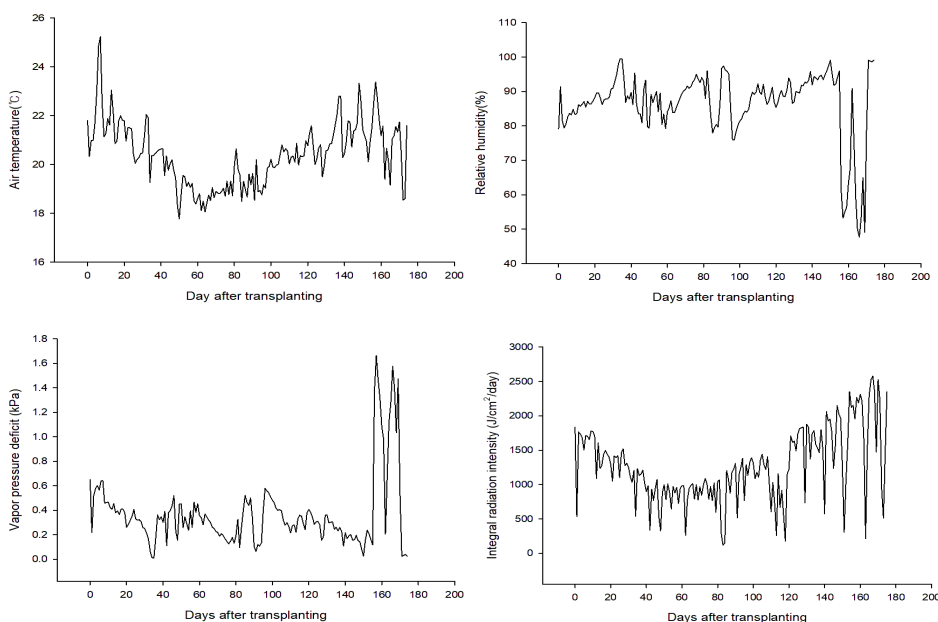


그림 3-5-14. 온·습도, 수증기압포차 및 누적광량

(2) 수직적 엽 위치별 오이 광합성 분석

① 21년도 작기 수직적 엽 위치별 오이 광합성 측정

- 21년도, 21-22년도 작기 동안 5번째, 10번째, 15번째 엽을 휴대용 광합성 측정 장치 (LI-6400XT, LI-COR, Lincoln, NE, USA)를 사용하여 다양한 CO<sub>2</sub> 농도(0, 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 μmol·mol<sup>-1</sup>) 및 광도(0, 50, 250, 500, 800, 1000, 1500 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>) 조건에서 광합성을 측정하였음(주 1회).
- 22-23년도 작기 동안 5번째, 10번째, 15번째 엽을 휴대용 광합성 측정 장치(LI-6400XT, LI-6400, LI-COR, Lincoln, NE, USA)를 사용하여 3가지 광도 (400, 800, 1500

$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 조건에서 다양한  $\text{CO}_2$  농도(0, 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) 및 3가지  $\text{CO}_2$  농도 (400, 800, 1500  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) 조건에서 다양한 광도(0, 50, 250, 500, 800, 1000, 1500  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 에 따른 광합성 속도를 측정하였음.

## ② 오이 광합성 모델 분석 및 검증

- 다양한  $\text{CO}_2$  농도 및 광도에 따른 잎 광합성 속도를 표현하기 위한 첫 번째 모델은 직각쌍곡선모델(Kaitala et al., 1982)로 표현되었음(식 3-5-1).

$$P = \left( \frac{\alpha \times PPF D \times \beta \times C_i}{\alpha \times PPF D + \beta \times C_i} \right) - R \quad (\text{식. 3-5-1})$$

- 직각쌍곡선 모델에서는 정식 후 생육일수(DAT)의 변화가 잎의 광합성 속도에 미치는 영향을 반영하기 어렵기 때문에 DAT 변수를 추가한 수정된 Thonley's 모델을 사용하였음(식 3-5-2, 3-5-3, 3-5-4).

$$P = \left( \frac{\alpha \times PPF D \times \beta \times C_i}{\alpha \times PPF D + \beta \times C_i} \right) - R \quad (\text{식. 3-5-2})$$

$$P = p \times e^{-q \times DAT} \quad (\text{식. 3-5-3})$$

$$P = \frac{P_1 \times P_2 \times e^{-(q_1 + q_2) \times DAT} \times PPF D \times C_i}{p_1 \times e^{-q_1 \times DAT} \times PPF D + p_2 \times e^{-q_2 \times DAT} \times C_i} + p_3 \times e^{-q_3 \times DAT} \quad (\text{식. 3-5-4})$$

\*  $P$  : 엽 광합성 속도( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $\alpha$  : 광화효율( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ),  $\beta$  : 카르복실화 전도도( $\text{s}^{-1}$ ),  $PPFD$  : 광합성유효광량( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $C_i$  : 엽육세포( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ),  $R$  : 호흡( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $p$  and  $q$  : 회귀상수,  $DAT$  : 정식 후 생육일수

- 직각쌍곡선 및 수정된 Thonley's 모델은 작물의 생리·화학적 반응을 고려하지 않기 때문에, 이를 고려하는 Farquhar, von Caemmerer and Berry (FvCB) 모델은 다음과 같이 계산되었음(식 3-5-9).
- 광합성 모델에 대한 회귀분석은 SPSS(Statistical Package for Social Science, IBM, SPSS statistics Version 26, USA) 통계 프로그램을 이용하여 분석 및 검증되었음.

$$P = \min(A_c, A_j) \quad (\text{식. 3-5-5})$$

$$A_c = \left( \frac{V_c^* (C_i - \gamma^*)}{C_i + K_c \times \left( 1 + \frac{O}{K_o} \right)} \right) - R \quad (\text{식. 3-5-6})$$



$$V_c = V_{cmax} \times \left( 31 + \left( \frac{69}{1 + e^{-0.009 \times (PPFD - 500)}} \right) \right) \quad (\text{식. 3-5-7})$$

$$A_j = \left( \frac{J \times (C_i - \gamma^x)}{4C_i + 8\gamma^x} \right) - R \quad (\text{식. 3-5-8})$$

$$J = \left( \alpha \times PPFD + J_{max} - \sqrt{(\alpha \times PPFD + J_{max})^2 - 4\theta \times J_{max} \times \alpha \times PPFD} \right) / 2\theta \quad (\text{식. 3-5-9})$$

\*  $P$  : 엽 광합성 속도( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $A_c$  : Rubisco 제한구간 광합성 속도( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $A_j$  : RuBP 재생 제한 구간 광합성 속도( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $V_c$  : 특정 광도에서의 카르복실화 능력( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $K_c$  :  $\text{CO}_2$  농도에 대한 루비스코 Michaelis-Menten 상수( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ),  $\theta$  : 광 반응 곡선의 곡률(0.85)  $O$  :  $\text{O}_2$  농도( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ),  $V_{cmax}$  : 최대 카르복실화 용량( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $J$  : 특정 광도에서의 전자 수송 속도( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $J_{max}$  : 최대 전자 수송 속도( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $\alpha$  : 입사광 기준 광에너지 변환 효율( $0.42 \text{ mol}\cdot\text{e}^- \cdot \text{mol}^{-1} \text{ photon}$ ),  $PPFD$  : 광합성유효광량( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $C_i$  : 엽육세포( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )

### ③ $\text{CO}_2$ 농도 및 광도에 따른 광합성 속도 분석

- 다양한  $\text{CO}_2$  농도 및 광도 조건에 따른 광합성 속도는 수직적 엽 위치별로 포화점이 다르게 나타남(그림 3-5-15).
- $\text{CO}_2$  포화점은 상부  $700 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 중간  $650 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ , 하부  $600 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 였으며, 광포화점은 상부  $750 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 중간  $700 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , 하부  $500 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  순서로 포화되었음

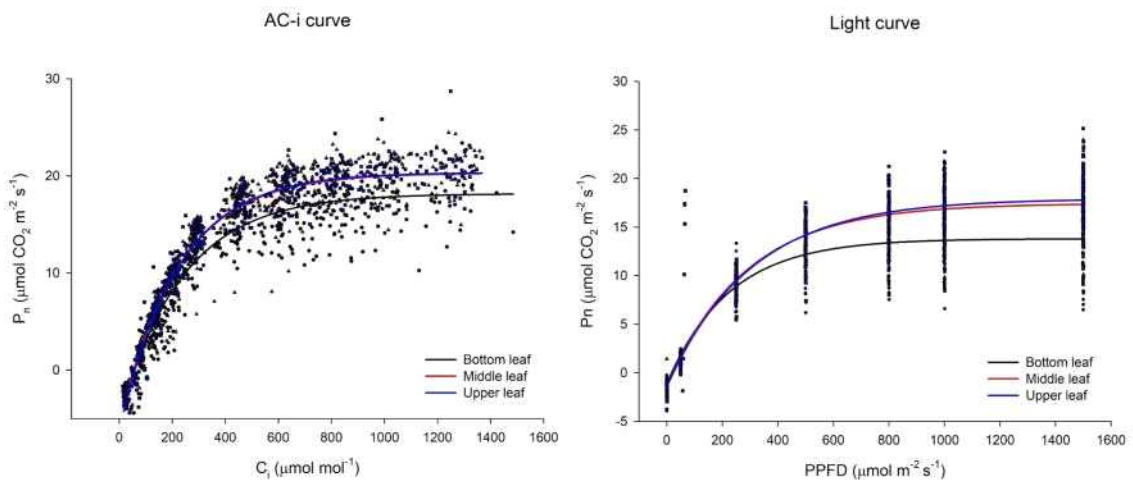


그림 3-5-15. 수직적 엽 위치별 AC-i 및 Light 커브

### ④ 광합성 모델 비교 및 검증

- AC-i curve 분석
  - 생육단계별 수직적 엽 위치별 최대 광합성 속도( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $\text{CO}_2$  보상점( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ),  $\text{CO}_2$  포화점( $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ )은 (표 3-5-5)와 같으며, 최대 광합성 속도 및  $\text{CO}_2$  포화점은 생육 전 기간동안 하부엽에서 가장 낮았음.

표 3-5-5. 생육단계에 따른 수직적 엽 위치별 최대광합성속도, CO<sub>2</sub>보상점 및 CO<sub>2</sub> 포화점

Leaf position	DAT	Maximum canopy photosynthesis rate ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ )	CO <sub>2</sub> compensation point ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )	CO <sub>2</sub> saturation point ( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
Bottom	43-73	22.60	60	600
	78-105	21.22	48	600
	112-140	21.94	52	600
Middle	43-73	22.89	60	650
	78-105	22.05	45	650
	112-140	24.46	49	650
Upper	43-73	22.54	58	700
	78-105	22.45	58	650
	112-140	28.71	58	700

○ 광합성 모델 계수

- 생육단계에 따른 수직적 엽 위치별 추정된 광화학효율( $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ), 카르복실화 전도도 ( $\text{s}^{-1}$ ), 암호흡( $\mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )은 다음과 같음(표 3-5-6).

표 3-5-6. 생육단계별 하부엽 광화학효율, 카르복실화전도도 및 암호흡 회귀분석

DAT	Photochemical efficiency ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ )	Carboxylation conductance ( $\text{S}^{-1}$ )	Dark respiration ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	R <sup>2</sup>
43	0.070	0.118	-5.845	0.92
50	0.080	0.116	-6.672	0.96
57	0.074	0.108	-6.995	0.82
64	0.076	0.105	-5.431	0.94
73	0.070	0.102	-5.716	0.93
78	0.073	0.149	-5.998	0.95
85	0.063	0.17	-6.196	0.96
92	0.069	0.166	-5.695	0.98
98	0.058	0.179	-5.675	0.96
105	0.063	0.17	-6.196	0.96
112	0.071	0.148	-6.040	0.97
119	0.072	0.134	-5.528	0.97
126	0.083	0.173	-7.037	0.99
133	0.076	0.172	-6.493	0.90
140	0.070	0.155	-6.633	0.89

표 3-5-7. 생육단계별 중부엽 광화학효율, 카르복실화전도도 및 암호흡 회귀분석

DAT	Photochemical efficiency ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ )	Carboxylation conductance ( $\text{S}^{-1}$ )	Dark respiration ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	R <sup>2</sup>
43	0.091	0.155	-7.811	0.96
50	0.087	0.149	-7.465	0.97
57	0.084	0.162	-8.118	0.96
64	0.087	0.204	-8.699	0.97
73	0.082	0.171	-7.094	0.97
78	0.085	0.180	-7.151	0.98
85	0.072	0.186	-6.342	0.97
92	0.073	0.215	-7.007	0.97
98	0.069	0.207	-6.947	0.95
105	0.072	0.186	-6.342	0.97
112	0.089	0.178	-6.911	0.99
119	0.082	0.202	-7.218	0.98
126	0.084	0.177	-6.820	0.98
133	0.091	0.147	-6.426	0.95
140	0.096	0.375	-14.824	0.96

표 3-5-8. 생육단계별 상부엽 광화학효율, 카르복실화전도도 및 암호흡 회귀분석

DAT	Photochemical efficiency ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \mu\text{mol}^{-1}$ )	Carboxylation conductance ( $\text{S}^{-1}$ )	Dark respiration ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	R <sup>2</sup>
43	0.091	0.237	-9.953	0.99
50	0.092	0.209	-9.599	0.99
57	0.089	0.266	-10.704	0.95
64	0.086	0.189	-8.775	0.97
73	0.083	0.207	-8.218	0.95
78	0.085	0.219	-8.607	0.99
85	0.080	0.170	-8.596	0.95
92	0.078	0.211	-7.847	0.98
98	0.084	0.194	-8.249	0.97
105	0.080	0.170	-8.596	0.95
112	0.082	0.157	-7.004	0.97
119	0.080	0.186	-6.933	0.99
126	0.103	0.156	-9.084	0.96
133	0.088	0.171	-7.373	0.99
140	0.074	0.125	-5.273	0.90

○ 직각쌍곡선 모델 및 수정된 Thronley's model 회귀분석 및 검증

- 수직적 엽 위치별 CO<sub>2</sub> 농도(0, 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ) 및 PPFD(400  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 조건에 따른 광합성 속도를 직각쌍곡선 모델로 다중회귀분석 한 결과 모델의 결정계수 값은 다음과 같이 나타남(그림 3-5-16, 표 3-5-9).

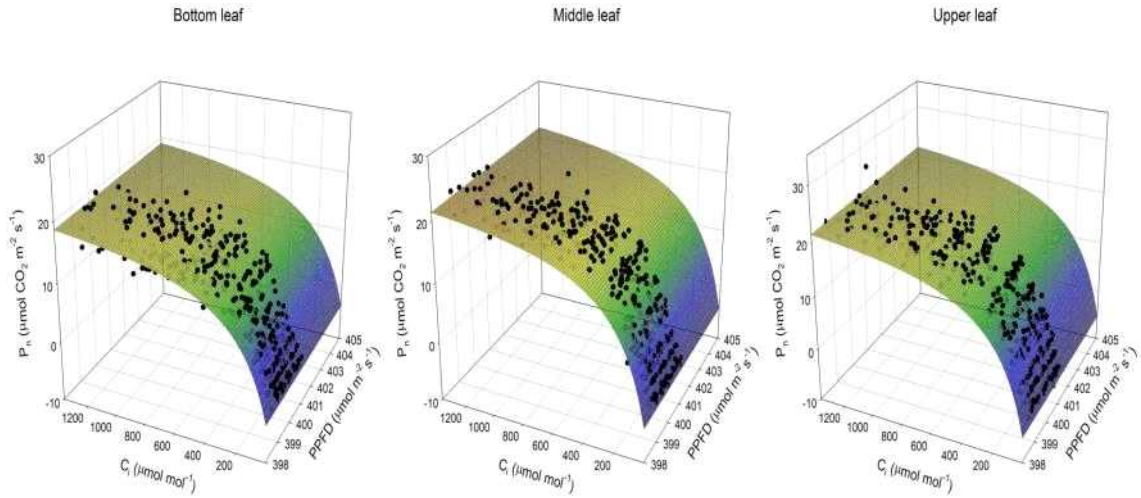


그림 3-5-16. 다양한 CO<sub>2</sub> 농도에 따른 수직적 엽 위치별 직각쌍곡선 모델

표 3-5-9. 수직적 엽 위치별 직각쌍곡선모델 회귀 상수, 결정계수(R<sup>2</sup>), 평균제곱근오차(RMSE)

Leaf position	a	b	R	R <sup>2</sup>	RMSE
Upper	0.084	0.186	-8.200	0.95	1.857
Middle	0.081	0.176	-7.087	0.95	1.789
Bottom	0.071	0.137	-5.963	0.91	2.140

- 수직적 엽 위치별 CO<sub>2</sub> 농도(0, 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ ) 및 정식 후 생육일수(DAT)에 따른 광합성 속도를 수정된 Thonley's 모델로 다중회귀분석 한 결과 모델의 결정계수 값은 다음과 같이 나타남(그림 3-5-17, 표 3-5-10).

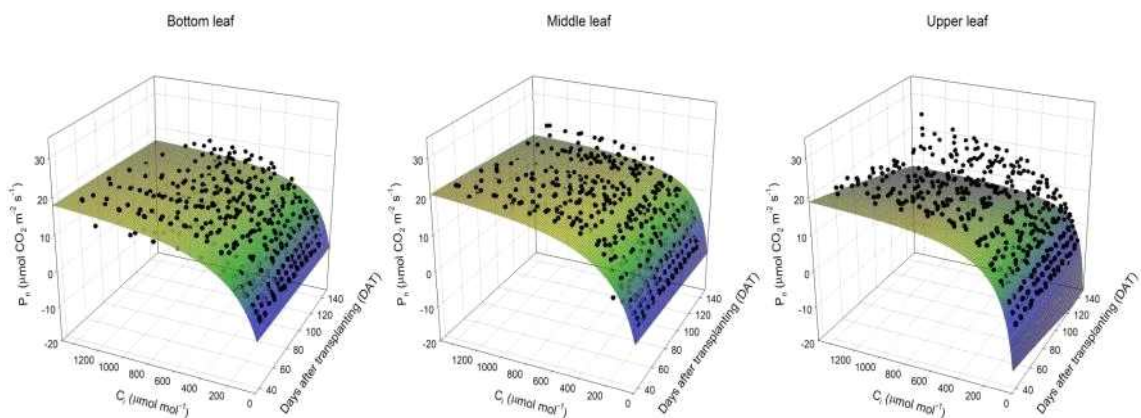


그림 3-5-13. 다양한 CO<sub>2</sub> 농도 및 DAT에 따른 수직적 엽 위치별 수정된 Thonley's 모델

표 3-5-10. 수직적 엽 위치별 수정된 Thonley's 모델 회귀 상수, 결정계수(R<sup>2</sup>)

Leaf Position	p <sub>1</sub>	q <sub>1</sub>	R <sup>2</sup>	p <sub>2</sub>	q <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	p <sub>3</sub>	q <sub>3</sub>	R <sup>2</sup>
Upper	0.09	0.001	0.61	0.295	0.005	0.65	-12.023	0.004	0.62
Middle	0.081	0.001	0.40	0.124	-0.005	0.47	-6.221	-0.002	0.57
Bottom	0.072	0.001	0.40	0.098	-0.004	0.46	-5.758	-0.001	0.43

- 수직적 엽 위치별에 따른 추정된 직각쌍곡선 및 수정된 Thonley's 모델의 광합성 속도를 실제 측정된 광합성 속도와 1:1 회귀선으로 비교하여 모델의 성능을 평가하였음(그림

3-5-18).

- 수직적 엽 위치별 직각쌍곡선 모델의 결정계수( $R^2$ )는 상부 0.95, 중부 0.95 및 하부엽 0.91로 하부엽에서 다소 낮은 추정치를 보였음.
- 수직적 엽 위치별 수정된 Thonley's 모델의 결정계수( $R^2$ )는 상부 0.87, 중부 0.95 및 하부엽 0.92로 상부엽에서 다소 낮은 추정치를 보였음.

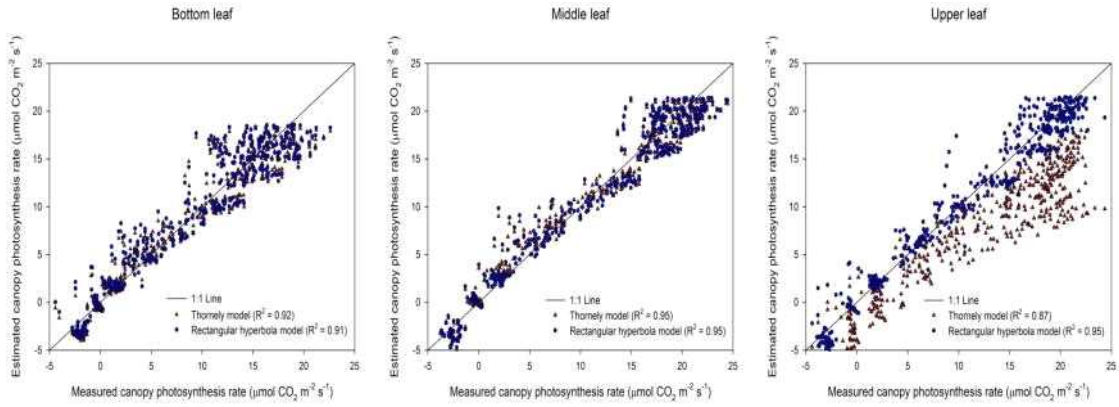


그림 3-5-18. 실측된 광합성 속도와 직각쌍곡선 및 수정된 Thonley's 모델 검증

○ 다양한  $CO_2$  및 PPFD 조건에서의 다중회귀분석 광합성 모델 분석 및 검증

- 수직적 엽 위치별  $CO_2$  농도(0, 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500  $\mu mol \cdot mol^{-1}$ ) 및 PPFD(0, 50, 250, 500, 800, 1000, 1500  $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ )조건에 따른 광합성 속도를 직각쌍곡선 모델로 다중회귀분석 한 결과 모델의 결정계수 값은 다음과 같이 나타남(그림 3-5-19, 표 3-5-11).

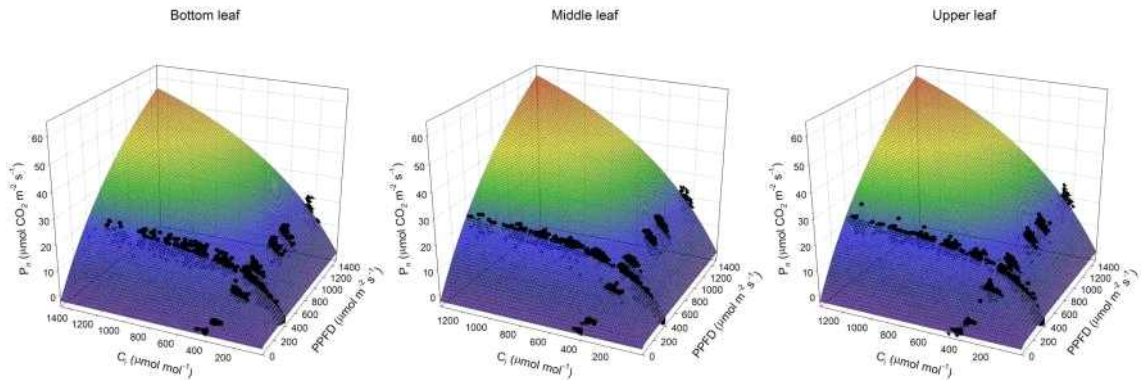


그림 3-5-19. 다양한  $CO_2$  농도 및 광 조건에 따른 수직적 엽 위치별 직각쌍곡선 모델

표 3-5-11. 수직적 엽 위치별 직각쌍곡선모델 회귀 상수, 결정계수( $R^2$ ), 평균제곱근오차(RMSE)

Leaf position	a	b	R	$R^2$	RMSE
Upper	0.078	0.102	-2.912	0.88	2.830
Middle	0.078	0.103	-2.799	0.90	2.481
Bottom	0.071	0.087	-2.691	0.89	2.289

- 실측된 광합성 속도와 직각쌍곡선모델로 추정된 광합성 속도를 1:1 라인에서 검증하였을 때 결정계수( $R^2$ )는 상부 0.91, 중부 0.93 및 하부엽 0.89로 나타났으며, 평균제곱근오차 (RMSE)는 상부 2.430, 중부 2.118 및 하부엽 2.263으로 나타남(그림 3-5-20)

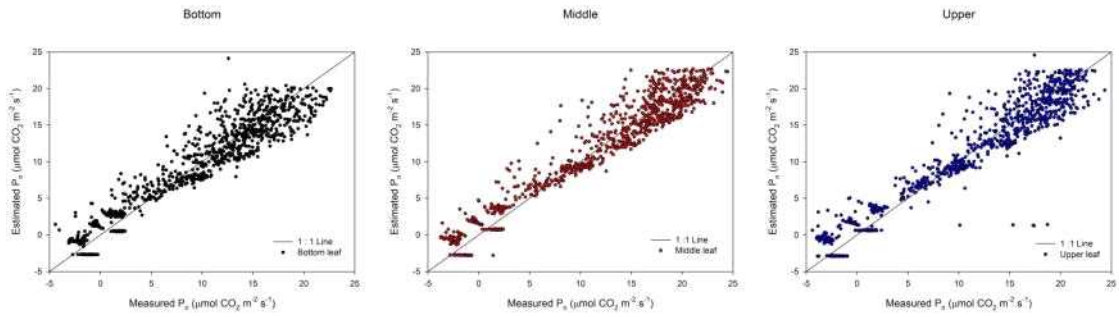


그림 3-5-20. 실측된 광합성 속도와 추정된 직각쌍곡선 모델 검증

- 수직적 엽 위치별 CO<sub>2</sub> 농도(0, 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 μmol·mol<sup>-1</sup>) 및 PPFD(0, 50, 250, 500, 800, 1000, 1500 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)조건에 따른 광합성 속도를 FvCB 모델로 다중회귀분석 한 결과 모델의 결정계수 값은 다음과 같이 나타남(그림 3-5-21, 표 3-5-12).

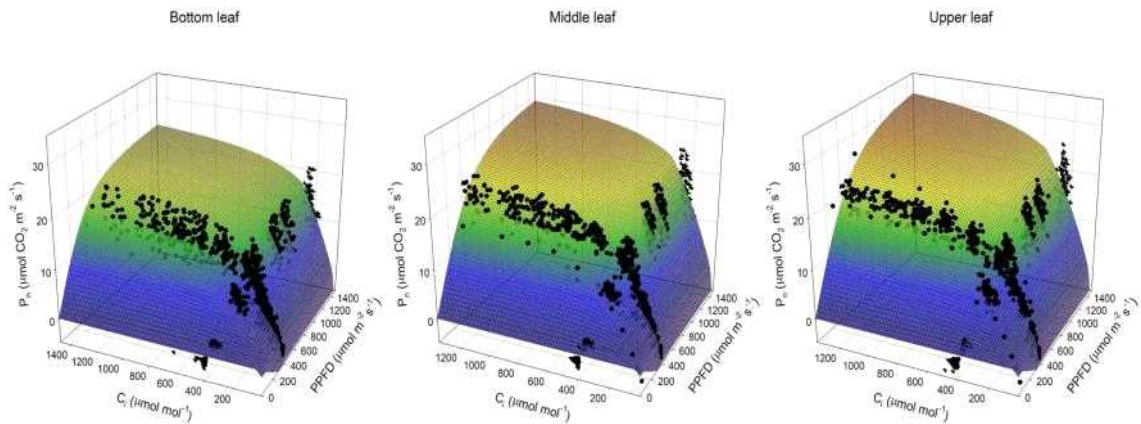


그림 3-5-21. 다양한 CO<sub>2</sub> 농도 및 광 조건에 따른 수직적 엽 위치별 FvCB 모델

표 3-5-12. 수직적 엽 위치별 FvCB 모델 최대 카르복실화 용량, 최대 전자수송속도 추정 및 평가

Leaf position	$V_{cmax}$	$R^2$	RMSE	$J_{max}$	$R^2$	RMSE
Upper	79.342	0.76	4.078	150.546	0.87	2.934
Middle	79.455	0.78	3.793	140.376	0.89	2.711
Bottom	69.876	0.76	3.457	113.116	0.88	2.401

- 실측된 광합성 속도와 FvCB 모델로 추정된 광합성 속도를 1:1 라인에서 검증하였을 때 결정계수( $R^2$ )는 상부 0.87, 중부 0.89 및 하부엽 0.89로 나타났으며, 평균제곱근오차 (RMSE)는 상부 3.200, 중부 2.958 및 하부엽 2.251로 나타남(그림 3-5-22).

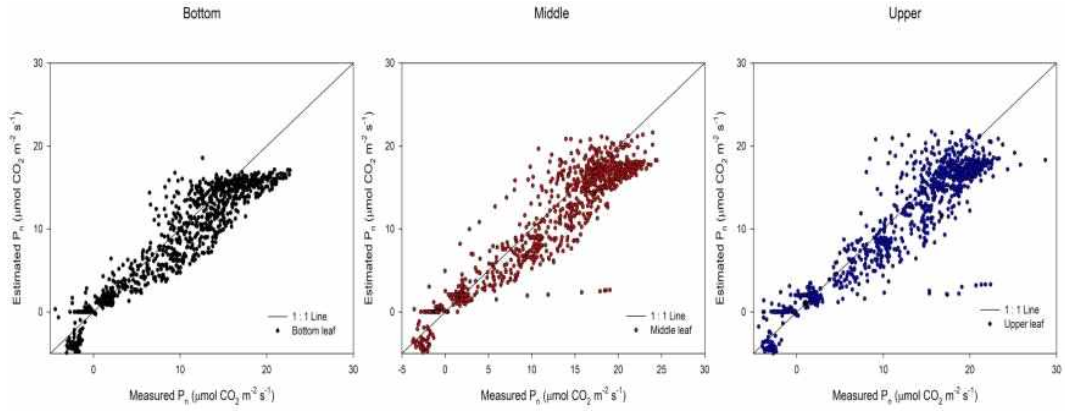


그림 3-5-22. 실측된 광합성 속도와 추정된 FvCB 모델 검증

⑤ 21-22년도 작기 광합성 모델 비교 및 검증

- FvCB 모델을 사용하여 다양한 CO<sub>2</sub> 및 PPFD 조건에서의 작기별 다중회귀분석 광합성 모델
  - 직각쌍곡선모델은 광합성을 과대 추정하기 때문에 FvCB모델을 이용하여 21-22년도 작기의 광합성을 추가로 분석하였음.
  - 동일한 방법으로 수직적 엽 위치별 CO<sub>2</sub> 농도(0, 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 mmol·mol<sup>-1</sup>) 및 PPFD(0, 50, 250, 500, 800, 1000, 1500 mmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)조건에 따른 광합성 속도를 FvCB 모델로 다중회귀분석 한 결과 모델의 결정계수 값은 다음과 같음 (그림 3-5-23, 표 3-5-13).

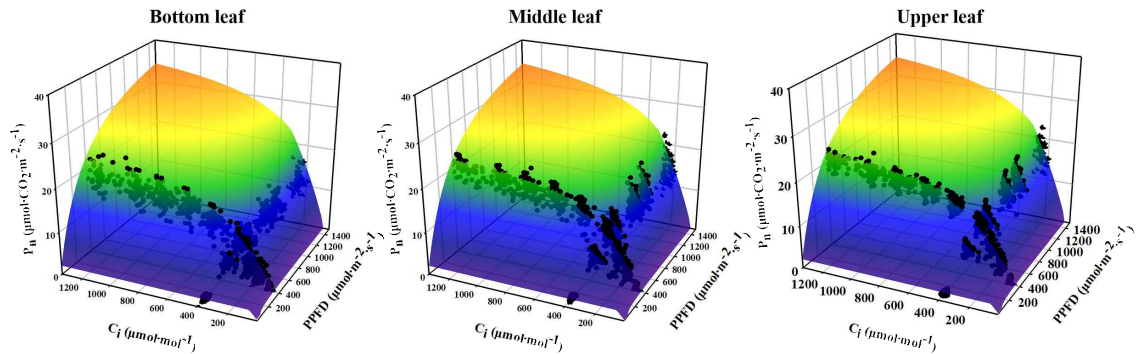


그림 3-5-23. 다양한 CO<sub>2</sub> 농도 및 광 조건에 따른 수직적 엽 위치별 FvCB 모델

표 3-5-13. 수직적 엽 위치별 FvCB 모델 최대 카르복실화 용량, 최대 전자수송속도 추정 및 평가

Leaf position	$V_{cmax}$	$R^2$	RMSE	$J_{max}$	$R^2$	RMSE
Upper	84.425	0.82	8.910	184.565	0.95	3.409
Middle	77.054	0.75	10.008	171.891	0.92	5.566
Bottom	60.467	0.72	7.447	132.631	0.89	5.459

- 실측된 광합성 속도와 FvCB 모델로 추정된 광합성 속도를 회귀분석한 결과 결정계수( $R^2$ )는 상부 0.92, 중부 0.88 및 하부엽 0.85로 나타났으며, 평균제곱근오차(RMSE)는 상부 5.121, 중부 7.591 및 하부엽 7.259로 나타남(그림 3-5-24).

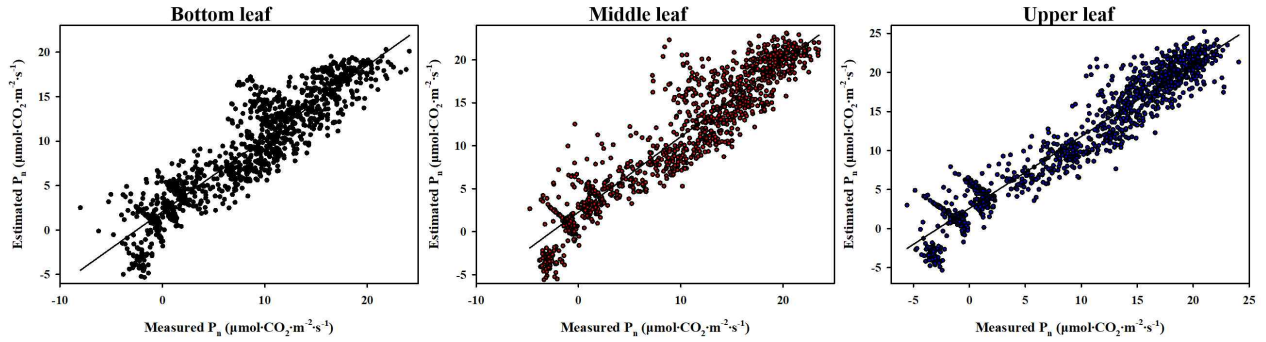


그림 3-5-24. 실측된 광합성 속도와 FvCB 모델로 추정된 광합성 속도 검증

- 21년 작기와 21-22년작의 광합성 데이터를 토대로 개발된 오이 FvCB모델을 활용한다면, CO<sub>2</sub> 농도와 PFFD를 이용하여 오이의 광합성 속도 예측이 가능할 것으로 판단됨.

⑥ 여름작기, 겨울 작기별 광합성 모델 비교 및 검증

○ FvCB 모델을 사용한 겨울작기와 여름작기 광합성 모델

- FvCB 모델을 사용하여 10월에 정식하여 여름을 거치지 않는 겨울작기와, 정식을 2월에 정식하여 여름을 거치는 여름작기의 수직적 엽 위치별 광합성 모델을 비교하였음.
- 각 작기에서 수집한 엽 위치별 CO<sub>2</sub> 농도(0, 50, 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 mmol·mol<sup>-1</sup>)조건에 따른 광합성 속도를 ‘Plantecophys’ R 패키지 (Duursma RA, 2015)를 이용하여 분석한 결과는 다음과 같음 (그림 3-5-25, 표 3-5-14).

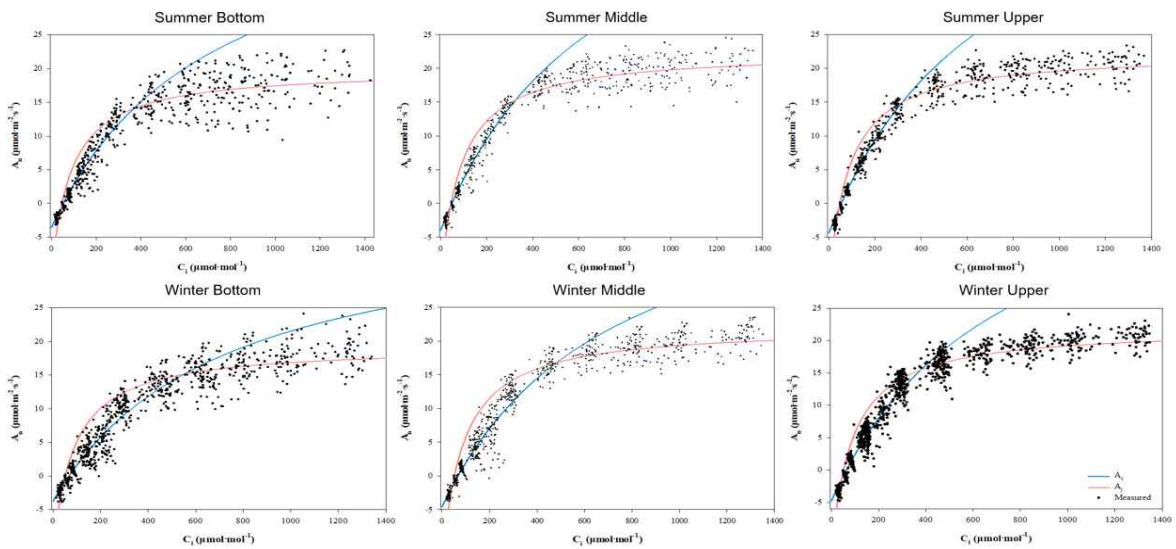


그림 3-5-25. 작기에 따른 수직적 엽 위치별 FvCB 모델

표 3-5-14. 작기별, 수직적 엽 위치별 최대 카르복실화 용량, 최대 전자수송속도, 광호흡량 추정 및 평가

Season	Leaf position	$V_{cmax}$	$J_{max}$	Rd	R <sup>2</sup>	RMSE
Summer	Upper	58.9	177.4	0.82	0.98	1.3
	Middle	57.8	175.4	0.55	0.96	1.4
	Bottom	48.7	139.9	0.63	0.92	1.9
Winter	Upper	55.0	182.6	1.48	0.97	1.5
	Middle	49.9	187.7	1.59	0.96	1.6
	Bottom	40.8	141.6	1.32	0.94	1.8



- 작기별, 엽위치별 FvCB 모델 분석 결과, 최대 카르복실화 용량( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )은 여름작기가 겨울작기보다 높고, 상부엽에서 하부엽으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였으며, 최대 전자 수송 속도( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )는 겨울작기가 여름작기보다 높았으며, 상부엽에서 하부엽으로 갈수록 낮아지는 경향을 보였음(표 3-5-14).

⑦ 여름작기, 겨울 작기별 광합성 모델 이용 일일 순 광합성량 시뮬레이션

○ 겨울작기와 여름작기 FvCB 모델을 이용한 작기별 일일 순 광합성량 시뮬레이션

- 작기별 FvCB 모델과 기공전도도 모델(Fick's law)을 결합하고, 환경데이터 (온도, 습도, 광도, CO<sub>2</sub>)를 이용하여 겨울작기에 해당하는 20-21년도 예비실험(Experiment 1), 22-23년도 작기(Experiment 3)와 여름작기에 해당하는 21년도 작기(Experiment 2)의 엽위치별 일일 순 광합성량을 시뮬레이션하였음, 기공전도도 식과 모델의 모식도는 다음과 같음(식 3-5-10, 그림 3-5-26)

$$P = \frac{g_{sw}}{1.6}(C_a - C_i) \quad (\text{식. 3-5-10})$$

$$g_{sw} = \frac{1}{\frac{1}{g_{tw}} - \frac{k_f}{g_{bw}}} \quad (\text{식. 3-5-11})$$

$$g_{tw} = \frac{E(1000 - \frac{W_l - W_s}{2})}{W_l - W_s} \quad (\text{식. 3-5-12})$$

$$W_l = \frac{e(T_l)}{PAP} \times 1000 \quad (\text{식. 3-5-13})$$

$$e(T_l) = 0.61365 \times e^{\frac{17.502 T_l}{240.97 + T_l}} \quad (\text{식. 3-5-14})$$

$$g_{bw} = F^{2(-0.00006755)} + 0.0292302 \times F \quad (\text{식. 3-5-15})$$

- \*  $P$  : 엽 광합성 속도( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $g_{sw}$  : H<sub>2</sub>O에 대한 기공 전도도( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $C_a$  : 대기중 이산화탄소 농도( $\mu\text{mol CO}_2\text{mol air}^{-1}$ ),  $C_i$  : 세포 내 이산화탄소 농도( $\mu\text{mol CO}_2\text{mol air}^{-1}$ ),  $g_{sw}$  : H<sub>2</sub>O에 대한 기공전도도( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),  $g_{tw}$  : H<sub>2</sub>O에 대한 총 전도도( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),  $E$  : 증발량( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1} = 0.005$ ),  $W_l$  : 엽 내부 H<sub>2</sub>O의 물분율( $\text{mmol H}_2\text{O mol air}^{-1}$ ),  $W_s$  : 대기의 H<sub>2</sub>O의 물분율( $\text{mmol H}_2\text{O mol air}^{-1}$ ),  $T_l$  : 엽온( $^{\circ}\text{C} \approx a$  기온),  $PAP$  : 대기압(kPa),  $g_{bw}$  : 엽 경계층의 H<sub>2</sub>O에 대한 전도도 ( $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),  $F$  : 대기의 물 유량( $\mu\text{mols}^{-1} = 300$ ),  $k_f$  : 엽 한쪽에서 다른 쪽까지의 기공전도도 비율의 추정치 k에 기초한 계수= 0.5

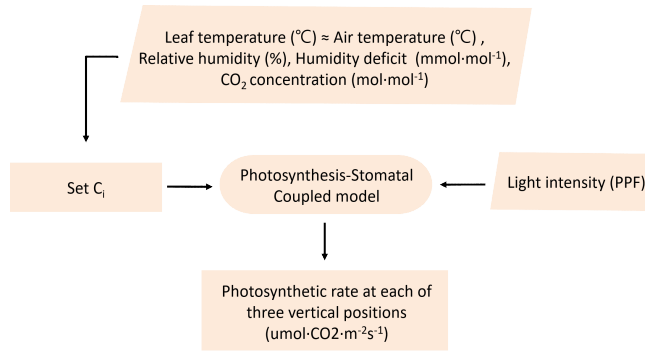


그림 3-5-26 . 환경에 의한 광합성 속도 시뮬레이션 모식도

- 각 작기 및 엽 위치별 광합성 속도를 시뮬레이션하여 모든 엽 위치의 속도의 하루 순 광합성량을 누적한 작기별 광합성 속도의 계산함. 그 결과는 다음과 같음(그림 3-5-26).

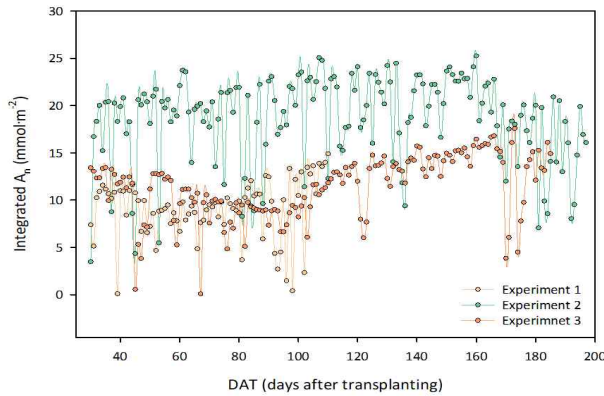


그림 3-5-27 . 작기별 일일 순 광합성량 시뮬레이션 결과

- 위 시뮬레이션 결과는 추후 생육데이터와 결합하여 분배 모델 및 수확량 예측에 기초자료로 쓰일 것으로 사료됨.

### (3) 오이 성장 및 수확량 예측 모델 개발

- ① 오이 과실 무게 예측
- 수집된 과실의 과장, 과폭 데이터를 활용하여 생육단계별 과실무게를 선형 방정식(식 3-5-10)으로 추정 및 검증하였음(그림 3-5-21).

$$Fruit\ weight\ (g) = a * Fruit\ length\ (cm) + b * Fruit\ diameter\ (mm) - c \quad (\text{식. } 3-5-16)$$

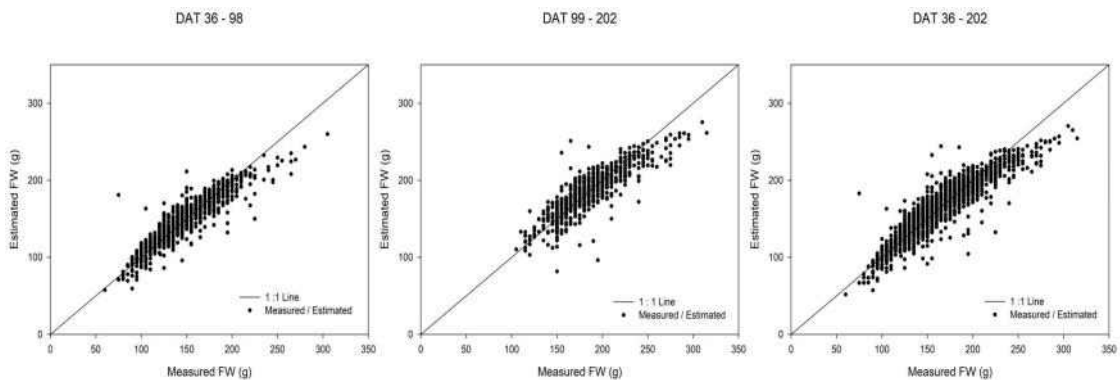


그림 3-5-28. 과실 무게 예측 선형 방정식 검증

- 과실 무게 예측 방정식의 회귀상수, 결정계수(R<sup>2</sup>) 및 평균제곱근오차(RMSE)는 다음과 같음(표 3-5-15).

표 3-5-15. 과실 무게 예측 모델의 계수 및 결정계수(R<sup>2</sup>), 평균제곱근오차(RMSE)

구분	a	b	c	R <sup>2</sup>	RMSE
DAT 36-98	11.30	9.79	10.26	0.83	14.47
DAT 99-202	3.84	6.79	5.23	0.76	16.30
DAT 136- 202	237.74	308.06	260.83	0.83	15.71

○ 백다다기 오이 과실의 비파괴 과중 추정 모델 개발

- 과실 비파괴 과중 추정 모델 개발

- \* 전체 과실의 수에서 무게범위에 따른 비율은 150~250g 범위에서 전체 분포의 58% 이상을 차지하였음(그림 3-5-29).
- \* 과장(L), 둘레(C), 직경(D)을 오이과 오이 과실 무게의 관계는 Gaussia식에서 높은 상관 관계를 나타냄(그림 3-5-30).
- \* 오이 과실의 형태학적 변수인 길이와 둘레, 직경의 변화에 과중이 비례적으로 증가하지 않았음.
- \* 따라서 Gaussian 모델식에서 과실의 형태학적 변수에 따른 무게 변화를 잘 표현하였다고 사료됨(표 3-5-16).

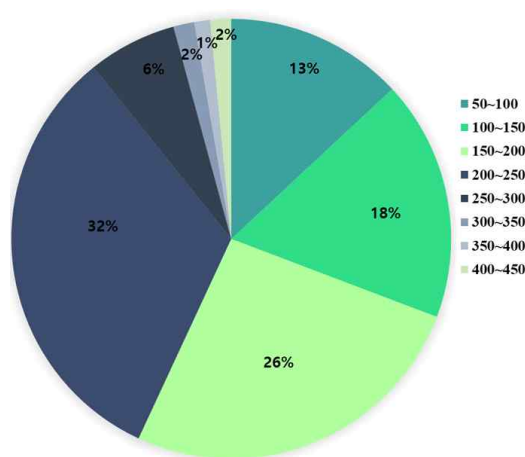


그림 3-5-29. 분석에 사용된 오이 과실의 무게 분포

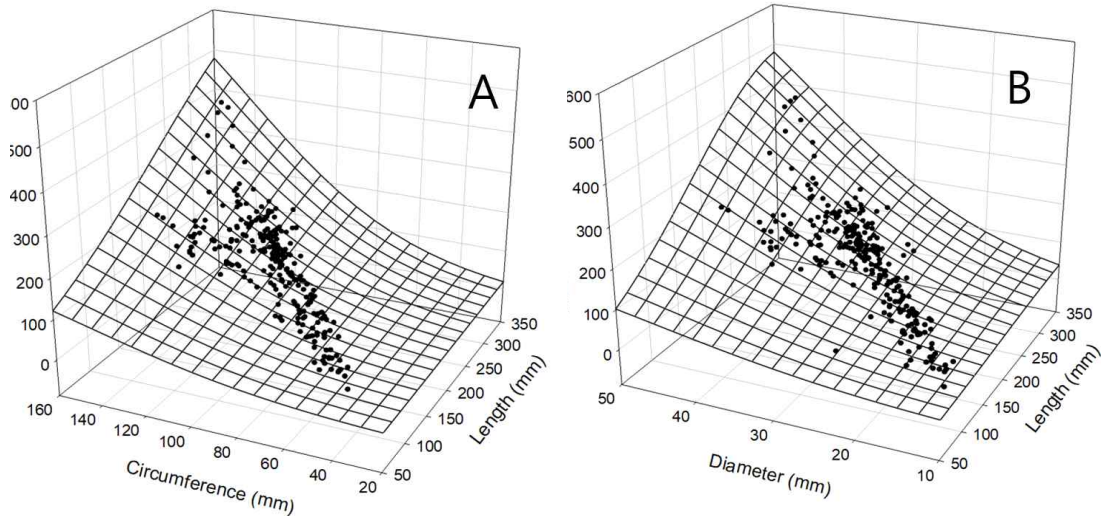


그림 3-5-30. 오이 과장과 둘레(L+C), 과장과 직경(L+D)과 과중(FW)간의 관계

표 3-5-16. 오이 과중 추정을 위해 사용된 모델식.

Model	Equation	Coefficient of determination ( $R^2$ )
Marcelis (1992)	$Fw = \frac{\left(\frac{LC^2}{4\pi}\right)}{1000}$	0.958
L+C (Gaussian)	$Fw = 745.7937 \times \exp\left\{-0.5\left[\left(\frac{L-487.836}{250.8729}\right)^2 + \left(\frac{C-216.5404}{74.0162}\right)^2\right]\right\}$	0.958
L+D (Gaussian)	$Fw = 665.1262 \times \exp\left\{-0.5\left[\left(\frac{L-370.482}{181.9515}\right)^2 + \left(\frac{D-70.3542}{25.3702}\right)^2\right]\right\}$	0.971

\* Fw: 오이 과중 L: 과장(mm), C: 둘레(mm), D: 직경(mm)

- 모델의 검증

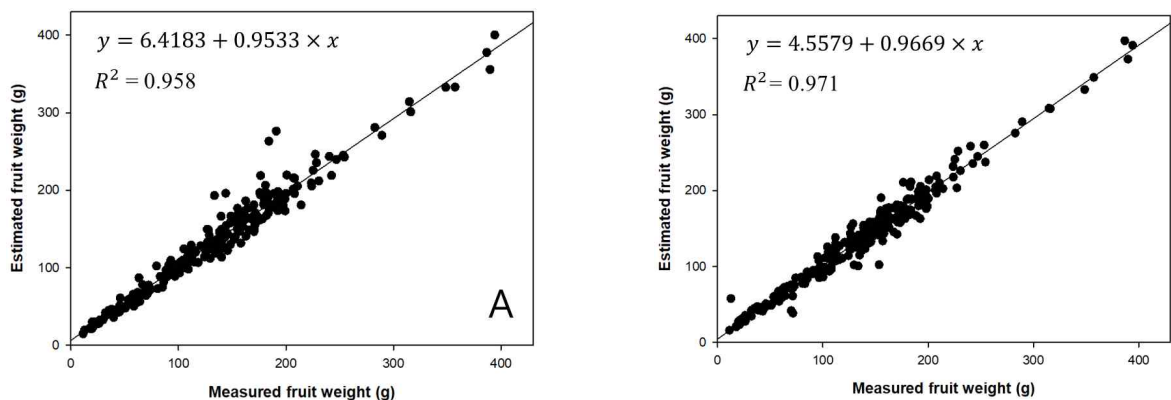


그림 3-5-31. 오이의 측정 및 추정된 과실 무게 비교. A: L+C model, B: L+D model

\* 또한, 측정 및 추정 데이터를 활용하여 개발된 모델(L+C,L+D)에서 결정계수( $R^2$ )가 0.95 이상으로 측정값에 대해 높은 정확도를 보였음(그림 3-5-31).

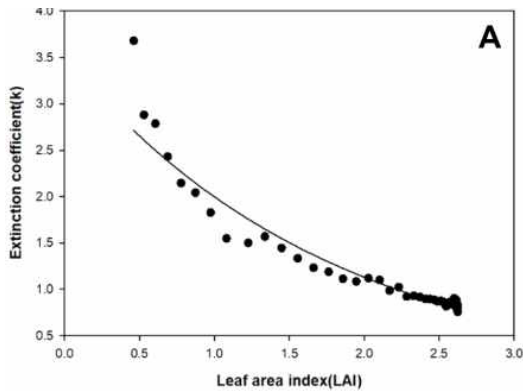
\* 본 실험을 통해 직경이 평면적 형태를 나타낼 수 있는 변수로서 과중 추정이 가능함을

확인하였음.

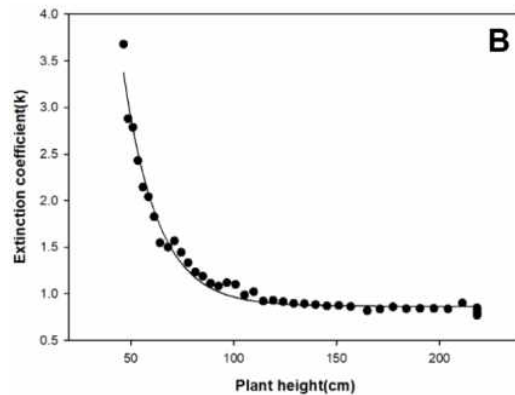
○ 온실 내 백다다기 오이의 생육단계에 따른 흡광계수 변화 모델 개발

- 생육변수와 흡광계수의 관계 분석

- \* 엽면적지수(LAI)와 흡광계수의 관계는 LAI 0.462일 때 k값이 3.678로 가장 높았으며, LAI가 2.621일때는 k값이 0.773으로 가장 낮았음.
- \* 작물의 초장은 23.49cm와 96.74cm 구간에서는 흡광계수가 급격하게 감소하는 경향을 보였음. 두 생육요소 모두 Exponential decay한 형태를 나타내었음.
- \* 엽면적지수(LAI)와 흡광계수 및 초장(H)과 흡광계수와의 관계는 모두 Exponential decay한 형태를 나타내었음(그림 3-5-32).
- \* LAI의 증가는 상단부에서 하단부로 갈수록 엽에 의한 차광을 증가시킨 것으로 판단되며, 일정수준 이상의 초장 증가는 주변 작물에 음영을 만들어 다른 개체 최하단부 광흡수에 영향을 미쳤을 것으로 사료됨.



A. 흡광계수와 엽면적지수(LAI)의 관계



B. 흡광계수와 초장과의 관계

그림 3-5-32. 생육변수와 흡광계수와의 관계

- 흡광계수 모델 개발 및 검증

- \* 엽면적지수와 초장이 감소함에 따라 흡광계수는 감소하는 경향을 보였음(그림 3-5-33)
- \* 3차원 모델에서 변수들간의 관계는 Paraboloid 식에 적합하였으며, 결정계수( $R^2$ )는 0.968로 가장 높았다. 또한 평균 제곱근 편차(RSME)는 1.340으로 가장 낮았음(표 3-5-17).
- \* 도출한 모델식을 이용하여 생육단계에 따른 오이 작물의 흡광계수를 추정할 수 있었음.

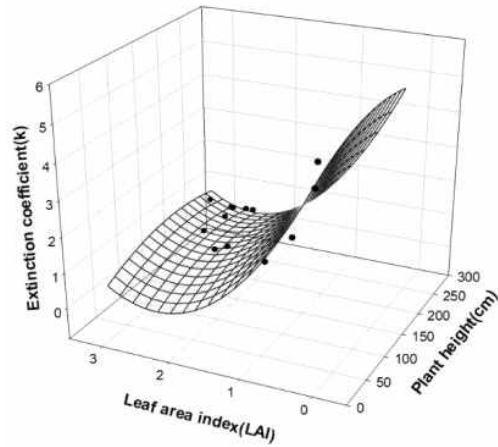


그림 3-5-33. 엽면적지수(LAI), 초장 흡광계수와의 관계

표 3-5-17. 엽면적지수(LAI), 초장 및 흡광계수간 회귀상수 및 결정계수( $R^2$ ), 평균제곱근오차(RMSE)

Funtion	Regression Equation	$R^2$	RMSE
Paraboloid	$k = 4.6933 + 0.0093 \times height + (-4.0347 \times LAI) + (-0.000028544 \times height^2) + (0.8815 \times LAI^2)$	0.968	1.340
Plane	$k = 4.0247 + (0.0037 \times LAI) + (-1.5992 \times height)$	0.842	1.800
Gaussian	$k = 155685.0123 \times exp\left(-0.5 \times \left(\frac{height - 75458.8746}{5.620312199363}\right)^2 + \left(\frac{LAI + 27.92}{6.1236}\right)^2\right)$	0.951	4.180
Lorentzian	$k = \frac{511.0151}{\left(1 + \left(\frac{height + 78.3521}{9.1961}\right)^2\right) \times \left(1 + \left(\frac{LAI - 133.4609}{14087469.1176}\right)^2\right)}$	0.902	4.599

② 오이 Cropbox(그림 3-5-33)

- Cropbox는 작물 모델 개발을 위해 설계된 모델링 Frame work로 작물을 구현하는 사용자가 모델 구현 방식보다 모델의 구조 파악에 초점을 맞춤.
- Jupyter 공간을 활용하여 Julia 언어를 기반으로 코드를 입력하는 원리로 기존의 식을 Julia 언어에 맞춰 사용자가 편리하게 구성되어 있으며, 시뮬레이션을 통해 최종적인 출력값을 확인함.
- 입력데이터는 환경 데이터(온도, 습도, 광, VPD) 및 실측된 생육데이터(2020.10.23. - 2021.2.23)를 활용하여 프로세스 기반(기존의 생육모델 방정식, 매개변수, 건물분배 등)의 출력 값을 계산하였음(그림 3-5-34).

매개변수 데이터

매개변수 코드

변수 보정

시각화

```
@system Leaf(Organ, LeafColdInjury) begin
    rank ~ ::int(override) # preserve

    LDR: leaf_detaching_rate => 30 ~ preserve::int(parameter)

    initiated => begin
        # no explicit initialize() here
        true
    end ~ flag

    appeared(rank, l=pheno.leaves_appeared) => (rank <= 1) ~ flag

    growing(appeared, mature) => (appeared && !mature) ~ flag

    mature(elongation_age, GD, area, potential_area) => begin
        elongation_age >= GD || area >= potential_area
    end ~ flag
```

```
detached(l=pheno.leaves_appeared, LDR, mature, rank) => begin
    (1 - rank) >= LDR && mature
end ~ flag

aging(mature, physiological_age, SG, maturity) => begin
    # for MAIZSIM
    #active_age >= stay_green_duration
    # for garlic
    mature && physiological_age > SG * maturity
end ~ flag

dead(senescence_ratio) => begin
    #senescent_area >= area
    senescence_ratio >= 1
    #senescence_age >= senescence_duration?
end ~ flag

dropped(mature, dead, detached) => (mature && dead && !detached) ~ flag
```

그림 3-5-34. 오이 Cropbox 시뮬레이션 과정(적엽에 관한 코드 수정)

- 2020년 작기의 실측된 데이터를 기반으로 광합성속도, 엽수, 엽면적지수(LAI)를 Cropbox 모델로 시뮬레이션한 결과는 다음과 같음(그림 3-5-35)
- 시뮬레이션 결과 광합성속도는 실측된 데이터와 유사하게 피팅이 되었으나, 엽수는 과대 추정을 하였음.
- Cropbox Frame work는 마늘 모델을 기반으로 적용되었기 때문에, 오이 작형에 맞는 매개 변수 수정이 필요하며 더 많은 실측데이터를 기반으로 지속적인 모델 개발이 요구됨.

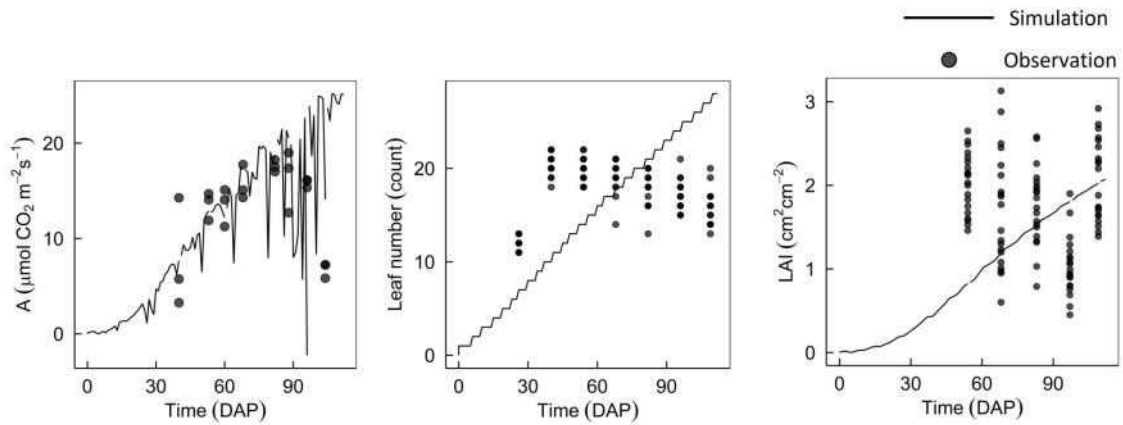


그림 3-5-35. 1차 오이 Cropbox 모델 구동 시뮬레이션 결과

- 2차 오이 Cropbox 모델에서는 적엽에 대한 변수가 추가되어 잎 출현, 잎 발달을 추정하고 최종적으로 적엽을 통해 유지되는 엽수를 잘 표현하였음 (그림 3-5-36).
- 건물중 데이터를 활용하여 잎, 뿌리, 총 바이오매스를 생육단계별로 시뮬레이션한 결과 뿌리보다 잎에서 바이오매스 생산이 더 높았음.

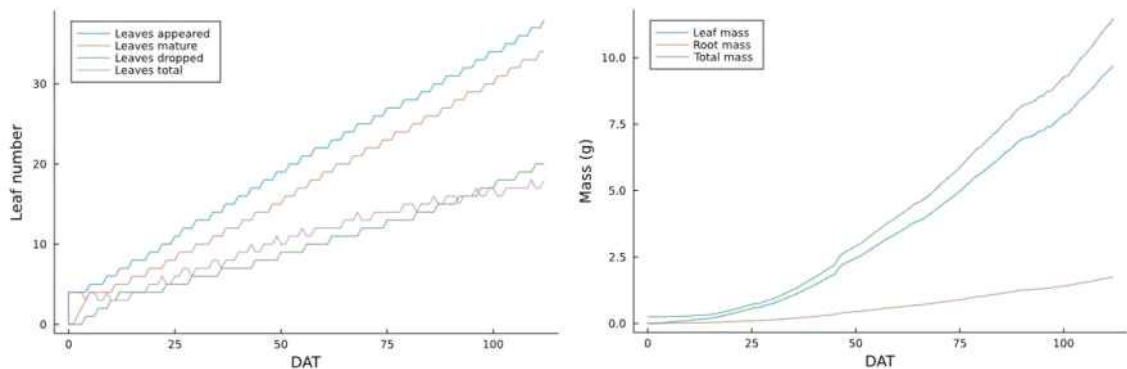


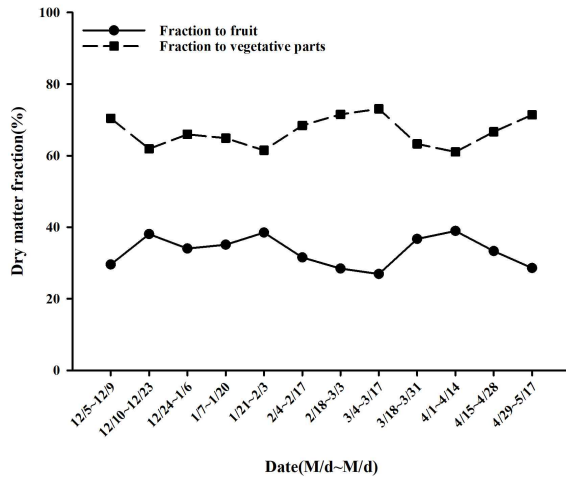
그림 3-5-36. 2차 오이 Cropbox 모델 구동 시뮬레이션 결과

### ③ 오이 동화산물 분배 모델 개발

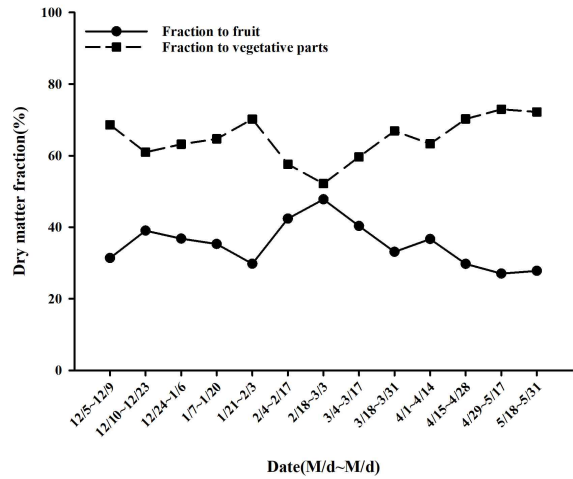
- 상주현장실을 통하여 수집된 오이의 생육데이터를 토대로 오이의 영양기관과 생식기관의 동화산물 분배 양상을 분석함.
- A농가의 경우 과실로 분배된 평균 동화산물의 비율은 상품과 약 26.9%, 미숙과 약 6.4%를 보였고, 재배 기간별로 약 27-39%의 변화를 보였음.
- B농가의 경우 과실로 분배된 평균 동화산물의 비율은 상품과 약 30.0%, 미숙과 약 5.2%를 보였고, 재배 기간별로 약 27-48%의 변화를 보였음.



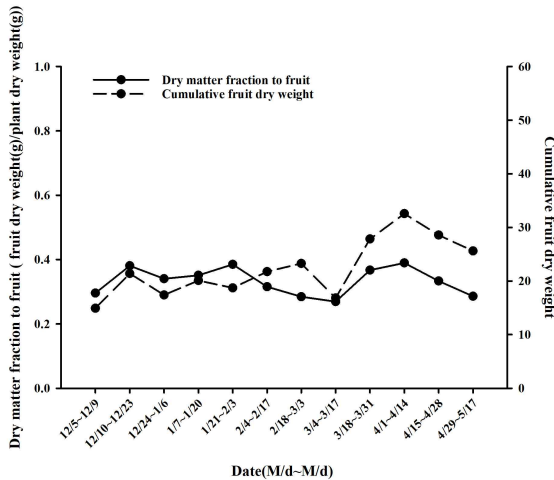
- 두 농가의 정식일과 재배자 성향차이(촉성, 반촉성재배)로 인하여 동화산물의 비율이 상이한 것으로 판단됨.
- 분석된 동화산물 분배 비율과 광합성 속도 측정값을 토대로 분배모델을 개발할 예정임.



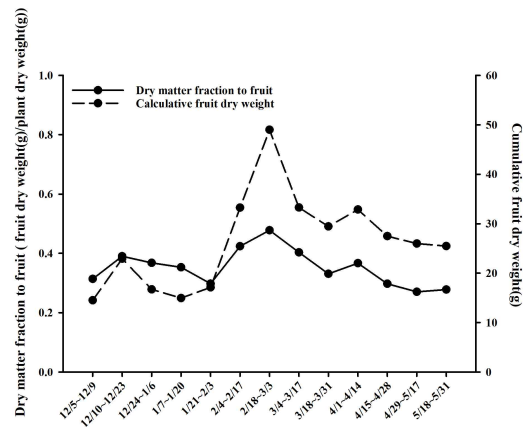
A농가 영양기관과 생식기관의 건물 비율



B농가 영양기관과 생식기관의 건물 비율



A농가 과실 건물 분배율과 누적 과실 건물중



B 과실 건물 분배율과 누적 과실 건물중

그림 3-5-37. 상주현잘실증 농가의 동화산물 분배 비율

④ 오이 수확량 예측 모델

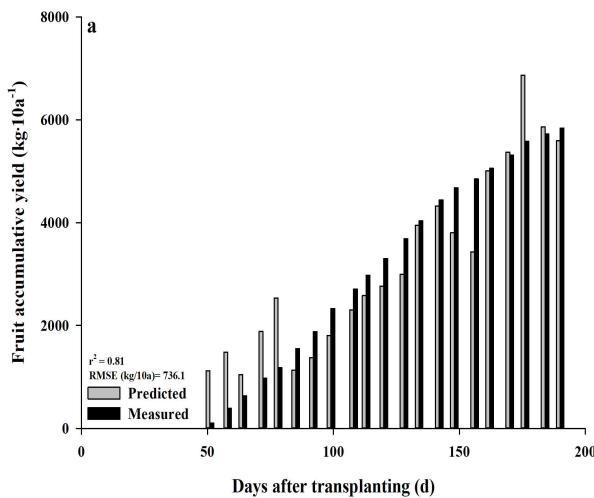
- 경북대학교 스마트 첨단 온실 오이 환경 및 생육 데이터(2021.05.02.-2022.10.19.)를 기반으로 환경을 이용하여 생육을 예측하고, 예측된 생육데이터를 이용하여 수확량 예측을 시도함.
- 기온, 습도, CO<sub>2</sub>농도, 광량을 이용하여 엽수, 경경, 엽장, 엽폭, 절간장을 예측하였을 때, 엽장과 엽폭의 결정계수(R<sup>2</sup>) 값이 가장 높았음.
- 환경데이터를 기반으로 예측된 생육데이터와 환경데이터를 사용하여 과실 수확량을 예측하였고, 결정계수(R<sup>2</sup>) 값이 각각 0.81, 0.80을 보였음.

표 3-5-18. 환경 데이터를 기반으로 한 오이 식물의 성장 반응에 대한 회귀 모델

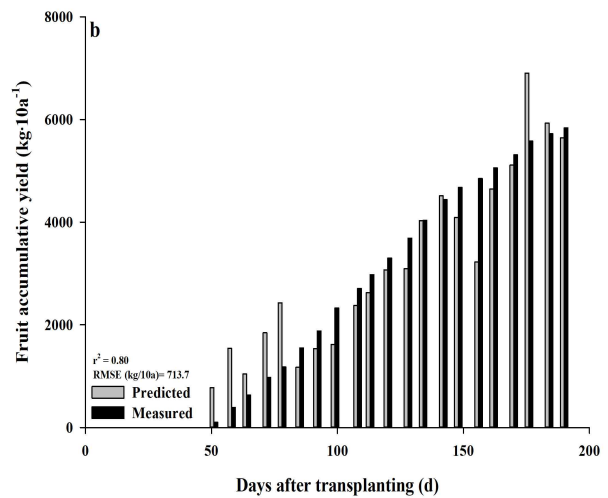
구분	회귀 모델식	R <sup>2</sup>	RMSE
엽수	-10.1-0.006*기온+0.07*습도+0.03*CO <sub>2</sub> 농도+0.08*광량	0.52	0.62
경경	1.9+0.02*기온+0.02*습도+0.009*CO <sub>2</sub> 농도 -0.007*광량	0.33	0.29
엽장	-15.7-0.1*기온+0.08*습도+0.07*CO <sub>2</sub> 농도 -0.008*광량	0.62	1.46
엽폭	-30.6-0.2*기온+0.2*습도+0.1*CO <sub>2</sub> 농도 +0.09*광량	0.65	1.87
절간장	-5.7+0.07*기온+0.03*습도+0.03*CO <sub>2</sub> 농도 -0.06*광량	0.50	0.60

표 3-5-19. 환경 및 생육 데이터를 기반으로 한 오이 식물의 과일 수확량에 대한 회귀 모델

	사용 데이터	회귀 모델식	R <sup>2</sup>	RMSE
수확량 (kg·10a <sup>-1</sup> )	환경데이터	7358.4+91.6*기온+55.1*습도-21.6*CO <sub>2</sub> 농도+16 7.9*광량	0.81	736.1
	예측된 생육데이터	14438.2+1356.8*엽수-657.8*경경-2585.8*엽장 +892.3*엽수+756.5*절간장	0.80	713.7



환경데이터를 이용한 과일 수확량 예측



예측된 생육데이터를 이용한 수확량 예측

그림 3-5-38. 환경데이터와 생육데이터를 이용한 오이 과일 수확량 예측

#### (4) 정밀관수제어를 위한 오이 증산모델 개발

- 증산량 측정 장치는 증량 센서를 기반으로 한 배지 함수율 측정 장치(RMFarm, IReis, Korea)을 이용하였음(그림 3-5-39A).
  - 측정항목으로는 작물 무게 변화, 급배액량, 배지온도, 배액 EC 및 pH가 있으며, 1분 간격으로 서버에 데이터가 수집됨(그림 3-5-39B).
  - 수집된 데이터를 분석하여 작물의 실제 증산률은 10분 간격의 무게 변화를 통해 다음과 같은 식을 통해 계산되었음(식 3-5-17).
- 배지에서 일어나는 증발량은 미미하므로 모델의 개발에서 고려되지 않았음(Shin et al., 2014).

$$Tr = \sum [\Delta Gr - \Delta(Ir + Dr) - \Delta(Pr + Harv)] \quad (\text{식. 3-5-17})$$

\*  $Tr$  : 증산( $g \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ ),  $Gr$  : 총 중량 (g),  $Ir$  : 급액량(g),  $Dr$  : 배액량(g),  $Pr$  : 측지제거(g),  
 $Harv$  : 과실 수확으로 인한 무게 감소 (g)

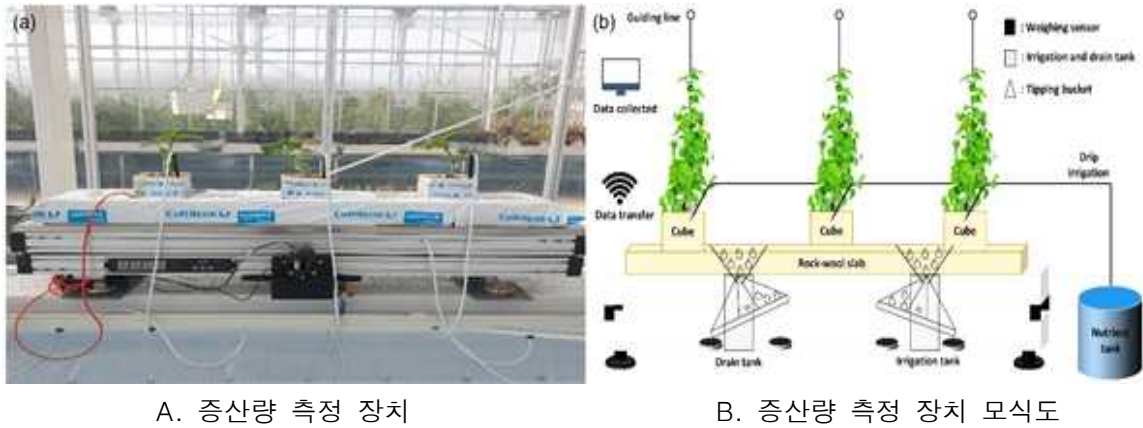


그림 3-5-39. 증산량 측정 장치 및 모식도

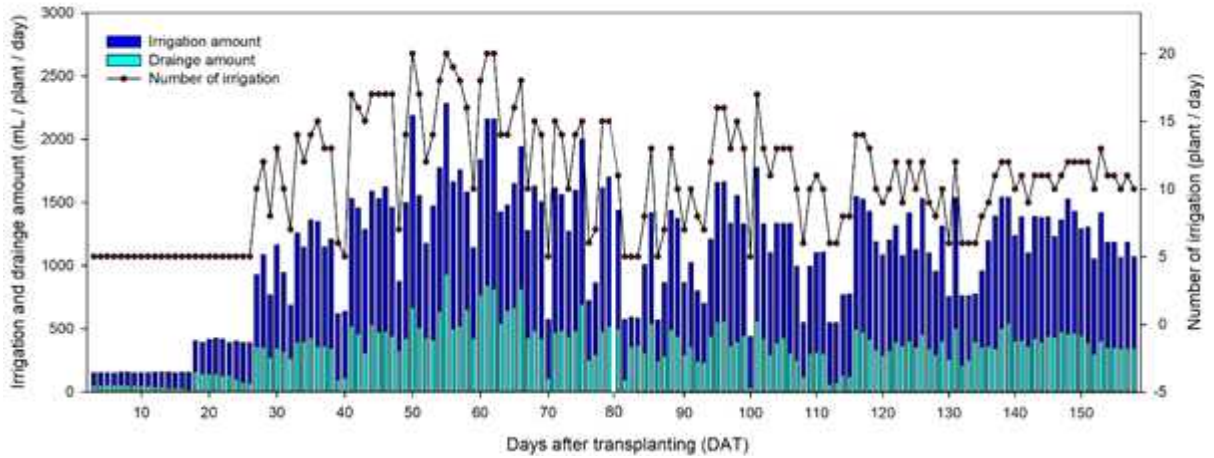


그림 3-5-40. 재배 중 관수량, 배수량 및 관수 횟수

## ② 증산모델 개발 및 검증

- 모델식에 의한 증산량을 추정하기 위해 Penman-montieth 방정식에서 파생되어 온실 내 환경조건에 맞게 변형된 식(Baille et al., 1994)을 사용하여 오이의 증산량을 추정하였음 (식 3-5-18).

$$Tr = a * (1 - e^{(-K * LAI * VPD) * RAD} + b * LAI * VPD) \quad (\text{식. 3-5-18})$$

\*  $Tr$  : 증산( $g \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ ),  $a, b$  : 회귀상수,  $K$  : 흡광계수,  $LAI$  : 엽면적지수( $m^2 \cdot m^{-2}$ ),  $VPD$  : 수증기압포차(kPa),  $Rad$  : 광도( $W \cdot m^{-2}$ )

- 오이 증산모델은 기존의 식에서 실제 작물의 증산률과 환경 매개변수(광도 및 VPD) 간의 관계를 보완하여 개발되었음(식 3-5-19).

$$Tr = a * (1 - e^{(-K * LAI * VPD) * RAD'} + b * LAI * VPD') \quad (\text{식. 3-5-19})$$

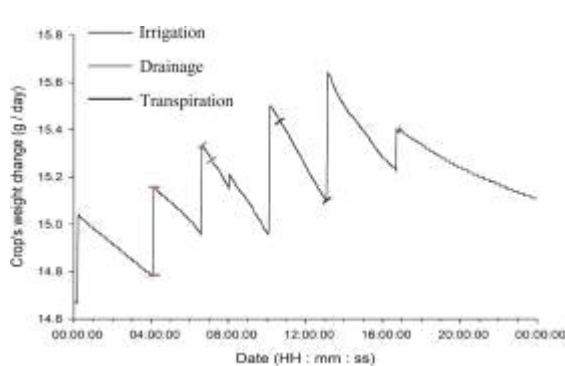
\*  $Tr$  : 증산( $g \cdot 10 \text{ min}^{-1}$ ),  $a, b$  : 회귀상수,  $K$  : 흡광계수,  $LAI$  : 엽면적지수( $m^2 \cdot m^{-2}$ ),  $VPD'$  : 보정된 수증기압포차(kPa),  $Rad'$  : 보정된 광도( $W \cdot m^{-2}$ )

- 증산모델의 비선형회귀분석 및 각 계수의 통계량 비교는 SPSS(Statistical Package for Social Science, IBM, SPSS statistics Version 26, USA) 통계 프로그램을 이용하여 분석 및 검증되었음.

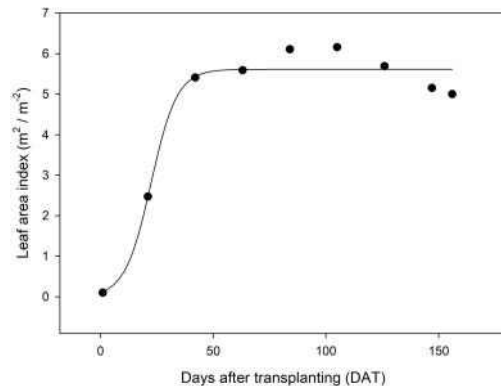
### ③ 엽면적지수 변화 및 환경 매개변수 분석

- 증산 계산 및 엽면적지수(LAI) 변화

- 오이의 실제 증산율은 10분 간격의 무게 변화를 통해 증산량을 연속적으로 계측하였으며 관수 및 배액 발생과 식물관리 및 수확에 따른 장치의 무게 변화는 배제하였음(그림 3-5-41A)
- 재배 기간동안 엽면적지수의 변화는 영양생장기에 빠르게 증가하다가 생식성장 전환기에 포화된 후 감소하는 경향을 나타냄 (그림 3-5-41B).



A. 증산량 계산



B. 재배기간 동안 엽면적지수 변화

그림 3-5-41. 증산량 계산 및 엽면적지수 변화

- 증산모델 개발을 위해 정식 후 생육일수(DAT)에 따른 엽면적지수의 변화를 Sigmoid 식으로 모델을 만들었으며, 결정계수( $R^2$ )는 0.98로 나타남(식 3-5-20)

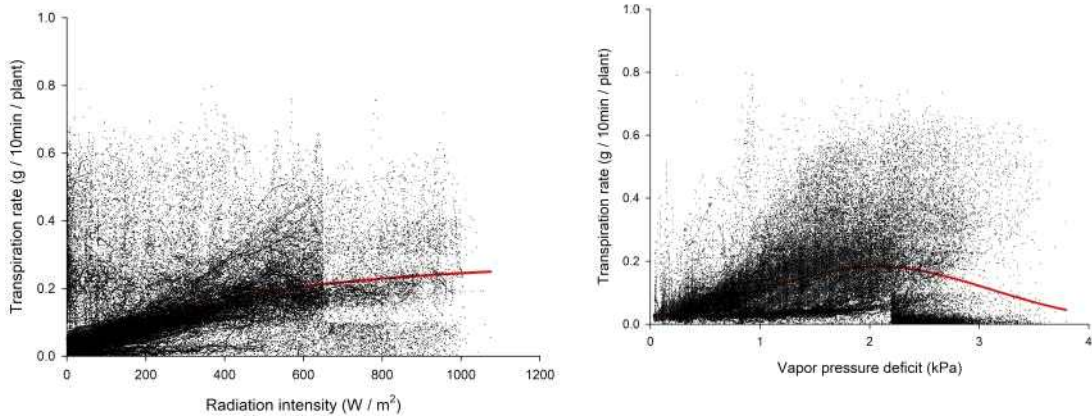
$$LAI = \frac{5.7547}{1 + \exp\left(\frac{22.4160 - DAT}{5.6138}\right)} \quad (\text{식. 3-5-20})$$

- 광도 및 VPD에 따른 증산률 변화

- 광도에 따른 증산률의 변화는 광량이 증가할수록 증산량이 증가하는 경향을 보였으나  $600W/m^2$  이상의 광 조건에서는 선형적인 관계를 보이지 않았음(그림 3-5-42A).
- 이러한 관계를 적용하기 위하여 광도 보정식을 작성하고 Exponential rise to maximum 방정식으로 피팅하였고 모델 계수의 결정계수( $R^2$ )는 0.65로 나타남(식 3-5-21)
- VPD에 따른 증산률 변화는 초기 낮은 VPD에서 서서히 증가하다가 0.5 - 2.0 kPa 구간

에서 빠르게 증가한 후 다시 낮아지는 패턴을 보였음 (그림 3-5-42B).

- 이러한 관계를 적용하기 위해 VPD 보정식을 작성하고 Gaussian fitting peak 방정식으로 피팅하였고 모델 계수의 결정계수(R<sup>2</sup>)는 0.61로 나타남(식 3-5-22)



A. 광도 변화에 따른 증산률 변화

B. VPD 변화에 따른 증산률 변화

그림 3-5-42. 광도 및 VPD에 따른 증산률 변화

$$Rad' = 0.0066 + 0.1572 * (1 - \exp^{-0.0073 * Rad'}) \quad (\text{식. 3-5-21})$$

$$VPD' = \frac{0.1559 * \exp(-0.5 * (VPD - 0.9993)^2)}{0.5327} \quad (\text{식 3-5-22})$$

#### ④ 증산모델 비교 및 검증

##### ○ 증산모델 개발

- 증산모델은 기존의 Penman-Monteith 방정식의 변형식을 기본으로 작성하였으며, 개발된 증산모델은 보정 광도식 및 VPD 보정식을 적용하여 개발되었음
- 증산모델의 a, b 계수는 비선형 회귀방정식을 이용하여 산출되었으며, 각 계수에 대한 통계량은 다음과 같았으며 광도와 VPD 보정식을 적용한 모델에서 모델의 계수를 잘 표현하였음(표 3-5-20).

표 3-5-20. 기존의 증산모델과 보정된 증산모델의 각 계수의 통계량 및 결정계수(R<sup>2</sup>) 비교

	Estimated Tr	Estimated Tr (Rad' cal.)	Estimated Tr (VPD' cal.)	Estimated Tr (Rad' and VPD' cal.)
a	0.0001	0.137	0.001	0.476
b	0.042	0.027	0.213	0.102
R <sup>2</sup>	0.70	0.75	0.73	0.76

- 'DAT 153' 동안 오이의 실제 증산률은 9198g, 기존 추정식 = 10462.51g, 광도 보정식 = 8840.499, VPD 보정식 = 8846.85, 개발된 보정식 = 8961.01로 나타남(표 3-5-20).
- 추정식의 결정계수(R<sup>2</sup>)를 비교한 결과 기존 추정식(R<sup>2</sup>=0.97), 광도 보정식(R<sup>2</sup>=0.99), VPD 보정식(R<sup>2</sup>=0.99), 광도 및 VPD 보정식(R<sup>2</sup>=0.99)로 높은 수준에서 실제 증산률을 추

정하였음.

- 추정식의 평균제곱근오차(RMSE)를 비교한 결과 기존 추정식(702.55), 광도 보정식(222.60), VPD 보정식(252.04), 광도 및 VPD 보정식(142.27)로 광도와 VPD가 모두 보정된 개발식에서 가장 평균제곱근오차(RMSE)가 낮았음.
- 기존의 증산모델에 의해 추정된 누적증산량은 실제 측정된 누적증산량 보다 과대 추정을 하였으며, 이는 증산률과 환경조건(광도 및 VPD)의 관계가 반영되지 않았기 때문임.
- 기존의 증산모델에서 작물의 실제 증산률과 온실 내 환경변수(광도 및 VPD)의 관계를 고려하여 보정된 방정식을 적용하는 것이 정확한 증산률 추정에 있어서 중요한 요인임.

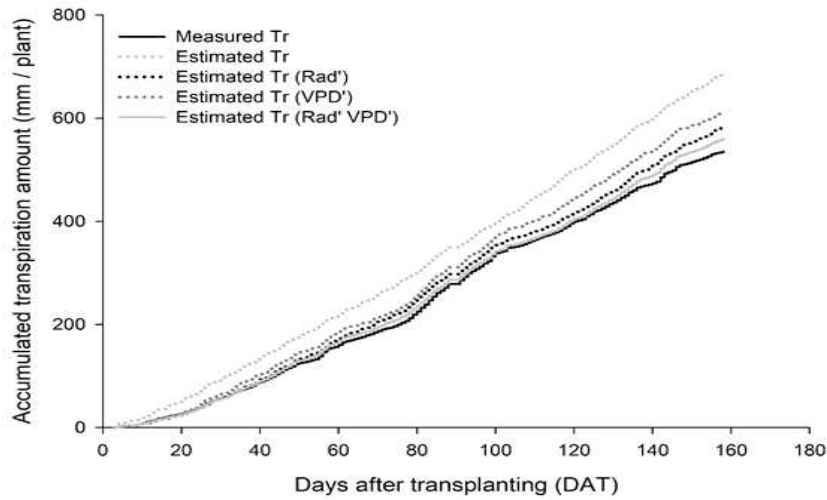


그림 3-5-43. 측정 및 추정된 증산량 비교

표 3-5-21. 실제 누적증산량과 모델에 의한 추정 누적 증산량 비교

Measured Tr (9198.21g)	Estimated Tr	Estimated Tr (Rad' cal.)	Estimated Tr (VPD' cal.)	Estimated Tr (Rad' and VPD' cal.)
Accumulated transpiration amount (g)	10462.51	8846.85	8840.50	8961.01
R <sup>2</sup>	0.97	0.99	0.99	0.99
RMSE	702.55	222.60	252.04	142.27

○ 반개방형 균락광합성 측정 시스템의 측정값 보정

- 광합성 측정 시스템의 경우 챔버의 부피가 커질수록 측정값의 오차는 커지고, 안정화 시키는데 오래 걸리기 때문에 측정값의 보정을 통해 빠른 측정 방법의 개발이 필요함.
- 따라서, 다음의 식을 이용하여 챔버 내 측정값들을 보정하였음(식 3-5-28)

$$Rampin = C_{r(t)} \times \frac{flow_i \times 22.4}{10^6 \times V_{chamber}} \quad (\text{식 3-5-23})$$

$$Rampout = C_{r'(t-1)} \times \frac{flow_i \times 22.4}{10^6 \times V_{chamber}} \quad (\text{식 3-5-24})$$

$$Rampchamber = Rampin - Rampout \quad (\text{식 3-5-25})$$

$$C_{r't} = C_{r'(t-1)} + Rampchamber \text{ (식 3-5-26)}$$

$$flow_a = \frac{22.4 \times (flow_{out} \times C_s - flow_{in} \times C_r)}{10^6 \times Vchamber \times (C_a - C_r)} \text{ (식 3-5-27)}$$

$$A = \frac{flow_i \times (C_r' - C_s)}{100 \times La} - C_s \times E + \frac{flow_a \times (C_a - C_s)}{100 \times La} \text{ (식 3-5-28)}$$

② 반개방형 군락광합성 측정 시스템 평가

○ 반개방형 군락광합성 측정 시스템의 정밀도

- 정밀도 평가는 챔버 내 CO<sub>2</sub> 농도를 세 수준으로 두어, 안정화 되었을 때 유량에 제어의 오차범위를 측정하여 확인하였음.
- 최대 오차가 10%를 넘지 않았으며, 이는 유량제어 및 측정값의 신뢰도에 있어서 크게 문제 되지 않는다고 판단하였음.

○ 반개방형 군락광합성 측정 시스템의 정확도

- 정확도 평가는 챔버 내 CO<sub>2</sub> 농도를 원하는 수준으로 설정하였을 때 얼마나 정확한 수치로 제어되는지 확인하였음.
- 정확도는 목표농도에 대해 실제 측정농도의 오차범위는 1% 내외로 비교적 정확한 것을 확인하였음.

③ 반개방형 군락광합성 측정 시스템과 휴대용 광합성 측정 시스템의 비교

- 두 측정 시스템을 이용하여 실제로 군락 수준에서 측정된 광합성 속도와 잎 수준에서 측정된 광합성 속도를 비교하였음(표 3-5-22).

표 3-5-22. 휴대용 광합성 측정 시스템과 반개방형 군락광합성 측정 시스템의 비교

Reference CO <sub>2</sub>	System type					
	0	200	400	600	800	1000
Portable leaf chamber system	-2.8	2.8	7.3	10.0	11.5	12.7
Whole-canopy chamber A	-2.4	3.1	7.6	9.4	10.8	11.8
Whole-canopy chamber B	-2.1	3.3	7.2	9.1	10.7	11.9

- 군락광합성 속도는 CO<sub>2</sub> 농도가 높아지면서 잎광합성 속도와 유의적인 차이가 나타나는 것을 확인하였음.
- 이는 CO<sub>2</sub> 농도가 400ppm 이상인 범위서부터 전자 수송 속도에 의한 차이로 수광률을 반영한 차이라고 판단하였음.

④ RACiR 측정 방법 평가

○ 생화학적 광합성 모델을 통한 RACiR 측정 방법 평가

- 광합성의 생화학적 특성을 반영한 FvCB 모델의 모수 추정을 통해 개발 방법의 측정 성능을 평가하였음(표 3-5-23).
- 앞의 측정결과와 같은 경향으로 CO<sub>2</sub> 농도에 의해 광합성 속도가 제한되는 구간에서는 모수의 유의적인 차이가 없었으며, 그 이상의 구간에서 모수의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있었음.
- 추정된 모수를 이용한 모델의 추정치 또한 휴대용 광합성 측정 시스템과 비교하였을 때 설명력의 유의한 차이가 보이지 않았기에 군락 광합성 측정 장치 내 개발된 측정 방법을 이용한다면 신속하고 정확한 광합성 데이터를 수집하는데 활용할 수 있다고 판단하였음.

표 3-5-23. RACiR 방법을 이용한 FvCB 모델 추정된 모수 비교

Measurement type	V <sub>Cmax</sub>	J <sub>max</sub>	RMSE <sup>y</sup>
Portable photosynthesis system	33.9 b <sup>z</sup>	99.6 d	0.3 e
Standard	30.6 cd	83.5 g	1.1 de
0 to 1000	27.6 e	97.2 de	2.7 bc
Chamber A 0 to 800	32.7 bc	114.9 c	6.9 a
0 to 500	41.9 a	122.5 b	7 a
800 to 400	33.9 b	89 f	1.9 cd
Standard	31.7 bcd	82.5 g	1.6 cde
0 to 1000	23.6 f	74.5 h	3.9 b
Chamber B 0 to 800	29.8 de	100.3 d	4.2 b
0 to 500	42.5 a	134.1 a	7.4 a
800 to 400	33.9 b	94.6 e	2.7 bc



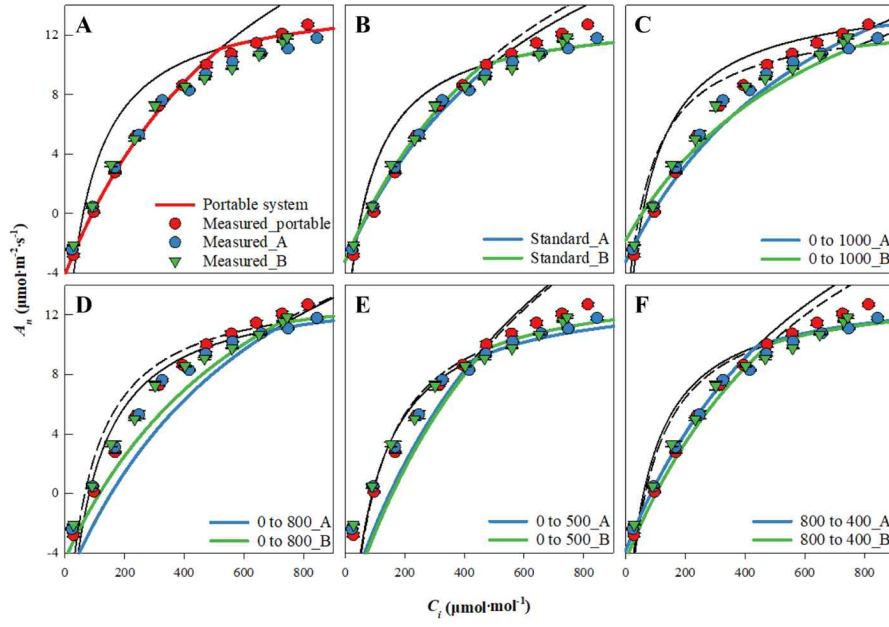


그림 3-5-44. FvCB 모델 측정값과 모델값 비교 및 검증

(2) 정량적 연구개발성과(해당 시 작성, 연구개발과제의 특성에 따라 수정 가능합니다)

< 정량적 연구개발성과표 >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명	연도		1단계	2단계	종료 후	종료 후	계	가중치 (%)
			(2021~2022)	(2023)	1년차 (2024)	2년차 (2025)		
전담기관 등록·기탁 지표 <sup>1)</sup>	논문(SCI)	목표(단계별)	1	5			6	
		실적(누적)	5	1			6	
	논문(비SCI)	목표(단계별)	6	1			7	
		실적(누적)	4	1			5	
	특허 출원	목표(단계별)	3				3	10
		실적(누적)	2	2			4	
	특허 등록	목표(단계별)		1	1	1	1	10
		실적(누적)		1			1	
	저작권 (소프트웨어)	목표(단계별)		5			5	10
		실적(누적)		3			3	
연구개발과제 특성 반영 지표 <sup>2)</sup>	기술이전 (건수)	목표(단계별)		4			4	10
		실적(누적)		3			3	
	기술이전 (기술료)	목표(단계별)		2,000			2,000	10
		실적(누적)		3,000			3,000	
	학술대회	목표(단계별)	10	5			15	25
		실적(누적)	18	11			29	
	표준화	목표(단계별)		2			2	10
		실적(누적)		0			0	
	인력양성	목표(단계별)	7	0			7	15
		실적(누적)	6	4			13	
계								

\* 1) 전담기관 등록·기탁 지표: 논문[에스시아이 Expanded(SCIE), 비SCIE, 평균Impact Factor(IF)], 특허, 보고서원문, 연구시설·장비, 기술요약정보, 저작권(소프트웨어, 서적 등), 생명자원(생명정보, 생물자원), 표준화(국내, 국제), 화합물, 신 품종 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, 투자 유치), 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 기재 합니다

(연구개발과제 특성별로 고유한 성과지표를 추가할 수 있습니다).

평가 항목 (주요성능 <sup>1)</sup> )	단위	전체 항목에서 차지하는 비중 <sup>2)</sup> (%)	세계 최고수준 보유국/보유기관	연구개발 전 국내 수준	연구개발 목표치		목표 설정 근거
			성능수준	성능수준	1단계(21~22)	2단계(23)	
온실 내 광환경 예측 정확도	%	10	예측값-실측값의 오차범위 ±15%	예측값-실측값의 오차범위 ±15%	오차범위 ±13%	오차범위 ±10%	관련 논문 (Kim, 2020 <sup>1)</sup> )
3차원 광합성 예측	%	15	오차범위 ±15%	오차범위 ±15%	오차범위 ±13%	오차범위 ±10%	관련 논문 (Kim, 2020 <sup>1)</sup> )
동화산물 분배 예측 정확도	%	15	오차범위 ±20 %	-	오차범위 ±30 %	오차범위 ±15 %	관련 논문
생육 예측 정확도	%	15	오차범위 ±20 %	-	오차범위 ±30 %	오차범위 ±15 %	관련 논문
수확 예측 정확도	%	15	오차범위 ±20 %	-	오차범위 ±30 %	오차범위 ±15 %	관련 논문
2차원 모델, 3차원 모델, 통합 모델의 성능	%	30	모델 생육 및 생산량 예측값이 실측값의 ±10%	모델 생육 및 생산량 예측값이 실측값의 ±10%	기존 2차원 모델의 생육 및 생산량 예측값보다 높은 예측 정확도	기존 2차원 모델의 생육 및 생산량 예측값보다 높은 예측 정확도	관련 논문 (Kim, 2020 <sup>1)</sup> )

\* 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	Correlation among phenotypic parameters related to the growth and photosynthesis of strawberry (Fragaria x ananassa Duch.) grown under various light intensity conditions	frontiers in Plant Science	최효길	12	스위스	Frontiers Media	SCIE	2021.6.10.	1664-462X	100
2	Effect of TiO2 Nanoparticles on the Yield and Photophysiological Responses of Cherry Tomatoes during the Rainy Season	Horticulture	최효길	7	스위스	MDPI	SCIE	2021.12.09	2311-7524	100
3	The Fruit Proteome Response to the Ripening Stages in Three Tomato Genotypes	Plants	최효길	11	스위스	MDPI	SCIE	2021.2.19.	2223-7747	100
4	Yield, Flower Quality, and Photo-Physiological Responses of Cut Rose Flowers Grafted onto Three Different Rootstocks in Summer Season	Agronomy	최효길	12	스위스	MDPI	SCIE	2021.6.18.	2073-4395	100
5	Waning advantages of CO2 enrichment on photosynthesis and productivity due to accelerated phase transition and source-sink imbalance in sweet pepper	Scientia Horticulture	신지용	301	네덜란드	ELSEVIER	SCI	2022.7.27.	0304-4238	100
6	아두이노와 무선통신을 이용한 온실 환경 제어 시스템 설계	한국생물환경조절학회지	성보현	31	한국	한국생물환경조절학회	비SCI	2022.10.31	1229-4675	100
7	파프리카 상품과 및 비상품과의 양산화 및 카로티노이드 함량 비교	한국생물환경조절학회지	윤승리	31	한국	한국생물환경조절학회	비SCI	2022.10.31	1229-4675	100
8	교육용 시뮬레이션 설계를 위한 온실 환경 제어 모델 활용 방안	한국생물환경조절학회지	윤승리	31	한국	한국생물환경조절학회	비SCI	2022.10.31	1229-4675	100
9	엽장 엽폭 엽신장을 이용한 토마토의 엽면적 추정	한국생물환경조절학회지	이재면	31	한국	한국생물환경조절학회	비SCI	2022.10.31	1229-4675	100
10	고압나트륨등 보광 및 온실의 열적 거동 및 업무 분석	한국생물환경조절학회지	윤승리	32	한국	한국생물환경조절학회	비SCI	2023.1.31.	1229-4675	100
11	Evaluation of the effects of supplemental lighting and stem number on greenhouse sweet pepper growth and yield via ray-tracing simulation with 3D plant models	Biosystems Engineering	황인하	226	영국	ELSEVIER	SCI	2023.1.31	1537-5110	100
12	Effect of fogging on survival rate and photophysiological response during the initial growth period of strawberries in a greenhouse	Acta Horticulture	최효길	1372	벨기에	ISHS	scopus	2023.7.13	0567-7572	100
13	Ripening process of tomato fruits postharvest: impact of environmental conditions on quality and chlorophyll a fluorescence characteristics	horticulture	최효길	9	스위스	MDPI	SCIE	2023.7.14.	2311-7524	100
14	Development of a semi-open chamber system for the gas exchange measurement of whole-canopy under steady and unsteady states in cucumber seedlings	Plant Methods	문유현	19	독일	SPRINGER	SCI	2023.8.7.	1746-4811	100
15	과피색이 다양한 풋고추 과실의 성숙단계에 따른 생리활성물질 변화	한국생물환경조절학회지	최효길	32	한국	한국생물환경조절학회	비SCI	2023.10.31	1229-4675	100
16	컴퓨터 비전과 과실 모델링을 이용한 멜론 과실 성장과 네트워크 분석	한국생물환경조절학회지	윤승리	32	한국	한국생물환경조절학회	비SCI	2023.10.27	1229-4675	100
17	컴퓨터 비전을 활용한 토마토, 파프리카, 멜론 및 오이 작물의 표현형 특성화	한국생물환경조절학회지	윤승리	33	한국	한국생물환경조절학회	비SCI	2024.1.29.	1229-4675	100

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2021년 한국원예학회 추계 학술발표회	조원준	2021.10.21. ~ 2021.10.27.	온라인	대한민국
2	2021년 한국생물환경조절학회 추계 학술발표회	조원준	2021.10.07. ~ 2021.10.13.	온라인	대한민국
3	AGHPF 2021	황인하	2021.12.11.	온라인	대한민국
4	AGHPF 2021	심시은	2021.12.11.	온라인	대한민국
5	2022 한국생물환경조절학회 춘계 학술발표회	김유진	2022.5.12.	전주	대한민국
6	2022 한국생물환경조절학회 춘계 학술발표회	조원준	2022.5.12.	전주	대한민국
7	2022 한국생물환경조절학회 춘계 학술발표회	안태인	2022.5.12.	전주	대한민국
8	2022 한국생물환경조절학회 춘계 학술발표회	황인하	2022.5.12.	전주	대한민국
9	2022 한국생물환경조절학회 춘계 학술발표회	문태원	2022.5.12.	전주	대한민국
10	2022 한국원예학회 춘계 학술발표회	조원준	2022.5.25.	대전	대한민국
11	2022 한국원예학회 춘계 학술발표회	이재면	2022.5.26.	대전	대한민국
12	2022 한국원예학회 춘계 학술발표회	윤하민	2022.5.27.	대전	대한민국
13	2022 한국원예학회 춘계 학술발표회	김재우	2022.5.27.	대전	대한민국
14	2022 한국원예학회 춘계 학술발표회	김동필	2022.5.27.	대전	대한민국
15	2022 한국원예학회 춘계 학술발표회	윤효인	2022.5.27.	대전	대한민국
16	IHC 2022	최효길	2022.8.16.	온라인	프랑스
17	IHC 2022	황인하	2022.8.16.	온라인	프랑스
18	IHC 2022	황인하	2022.8.16.	온라인	프랑스
19	2022 한국생물환경조절학회 추계 학술발표회	심하선	2022.10.27.	대전	대한민국
20	2022 한국생물환경조절학회 추계 학술발표회	신하랑	2022.10.27.	대전	대한민국
21	2022 한국원예학회 추계 학술발표대회	구희웅	2022.11.2.	제주	대한민국
22	2022 한국원예학회 추계 학술발표대회	신하랑	2022.11.2.	제주	대한민국

23	2023 한국생물환경조절학회 춘계 학술발표대회	조영열	2023.4.20.	부여	대한민국
24	2023 한국생물환경조절학회 춘계 학술발표대회	신하람	2023.4.20.	부여	대한민국
25	2023 한국생물환경조절학회 춘계 학술발표대회	문유현	2023.4.20.	부여	대한민국
26	2023 한국생물환경조절학회 춘계 학술발표대회	윤승리	2023.4.20.	부여	대한민국
27	2023 한국생물환경조절학회 춘계 학술발표대회	윤승리	2023.4.20.	부여	대한민국
28	2023 한국생물환경조절학회 춘계 학술발표대회	윤하민	2023.4.21.	부여	대한민국
29	2023 한국원예학회 춘계 학술발표회	이재면	2023.5.24	대전	대한민국
30	2023 한국원예학회 춘계 학술발표회	문유현	2023.5.25.	대전	대한민국
31	2023 한국원예학회 춘계 학술발표회	신하람	2023.5.26.	대전	대한민국
32	2023 한국원예학회 춘계 학술발표회	조영열	2023.5.26.	대전	대한민국
33	2023 한국원예학회 춘계 학술발표회	윤승리	2023.5.26.	대전	대한민국
34	HORCHIMODEL 2023	신하람	2023.6.28.	알메리아	스페인
35	AHC 2023	황인하	2023.8.29	도쿄	일본
36	2023 생물환경조절학회	신하람	2023.9.22.	시흥	대한민국
37	2023 생물환경조절학회	윤승리	2023.9.22.	시흥	대한민국
38	2023 생물환경조절학회	윤승리	2023.9.22.	시흥	대한민국
39	2023 생물환경조절학회	김진현	2023.9.22.	시흥	대한민국
40	2023 한국원예학회 추계 학술발표회	최효길	2023.10.18	군산	대한민국
41	2023 한국원예학회 추계 학술발표회	정재연	2023.10.18	군산	대한민국
42	2023 한국원예학회 추계 학술발표회	황인하	2023.10.19	군산	대한민국
43	2023 한국원예학회 추계 학술발표회	신하람	2023.10.19	군산	대한민국
44	2023 Greensys	윤승리	2023.10.24	칸쿤	멕시코
45	2023 Greensys	김진현	2023.10.24	칸쿤	멕시코
46	2023 Greensys	문유현	2023.10.24	칸쿤	멕시코

47	2023 Greensys	윤승리	2023.10.25	칸쿤	멕시코
48	2023 한국식물학회 학술발표대회	최효길	2023.10.25	소노캄 여수 호텔	대한민국

**[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	양액 절약이 가능한 양액 재배용 베드	대한민국	공주대학교 산학협력단	2022.3.3.	10-2022 -0027674					100	
2	착색 모델에 의한 수확정보의 예측방법	대한민국	목포대학교 산학협력단	2022.10.26.	10-2022 -0139375					100	
3	절차 기반 작물 모델링 장치 및 방법	대한민국	서울대학교 산학협력단	2023.6.19.	10-2023 -0077826					100	
4	착색 모델에 의한 수확정보의 예측방법	대한민국				목포대학교 산학협력단	2023.7.31	10-2563315		100	
5	반밀폐 온실용 에틸렌 분해 및 살균용 장치	대한민국	목포대학교 산학협력단	2023.12.13.	10-2023 -0181118					100	
6	과채 줄기 덮개 장치 및 이를 구비하는 과채 재배 시스템	대한민국	경북대학교 산학협력단	2023.8.1.	10-2023 -0100690					100	

저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율
1	오이 생육 모델러	2023.12.11.	최효길, 윤중섭, 정호정, 김진현, 윤승리, 신민주, 정재연, 이재면	2023.12.18.	C-2023-060788	공주대학교 산학협력단	100
2	토마토 생육 모델러	2023.12.11.	최효길, 윤중섭, 정호정, 김진현, 윤승리, 신민주, 정재연, 이재면	2023.12.18.	C-2023-060789	공주대학교 산학협력단	100
3	파프리카 생육 모델러	2023.12.11.	최효길, 윤중섭, 정호정, 김진현, 윤승리, 신민주, 정재연, 이재면	2023.12.18.	C-2023-060790	공주대학교 산학협력단	100

**[경제적 성과]**

기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황
1	독점적 통상실시권	저작재산권 독점적 이용허락 계약서(오이생육모델러)	영리법인 뉴팜에이지	2023.12.29.	1,000,000	
2	독점적 통상실시권	저작재산권 독점적 이용허락 계약서(토마토생육모델러)	영리법인 뉴팜에이지	2023.12.29.	1,000,000	
3	독점적 통상실시권	저작재산권 독점적 이용허락 계약서(파프리카생육모델러)	영리법인 뉴팜에이지	2023.12.29.	1,000,000	

\* 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등

**[사회적 성과]**

전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황											
			학위별				성별		지역별					
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타	
1	농림수산학	2021		2			1	1		1			1	
2	농림수산학	2022		7			5	2	2	2	2		1	
3	농림수산학	2023	2	2			1	3		3	1			

**[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)**

- 온실 환경 데이터베이스 및 생육모델 구축
- 파프리카, 토마토, 오이의 환경-생육-광합성 DB
  - 온실 내 에너지 밸런스 예측 시뮬레이터 개발
  - 시설 과채류 생육단계별 3차원 DB

## 2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도 (%)
○ 작물별 생장·수확 예측 및 온실환경 모델 개발을 위한 데이터 수집·표준화	○ 온실 환경 측정 및 생육조사 방법과 관련된 국내외 표준안 및 매뉴얼을 검토하여 표준화된 데이터 수집 방법을 수립하였음	100
○ 작물생육 단계별(육묘·정식·착과·성숙기) 온실환경 모델 개발	○ 작물 생육 단계에 따른 온실 환경 및 에너지 밸런스 예측 모델을 개발하여 온실 내 환경을 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였음. - 작물 생육모델 및 온실 환경 통합 시뮬레이터 개발을 위한 기반기술 확보	100
○ 기 개발 생육 예측모델 및 환경 빅데이터를 활용한 생장 및 수확량 예측 모델 고도화	○ 국내 기 개발 생육 모델을 활용하여 생육지표(엽면적, 초장, 생체중 등) 및 생리지표(광합성 등)의 추정 정확도를 고도화하였으며 이를 바탕으로 작물의 수확량 예측 모델을 개발 및 고도화하였음	100
○ 작물생육 단계별(육묘·정식·착과·성숙기) 3차원 구조모델 DB 구축	○ 작목별 생육 단계별 3차원 모델을 구축하였으며, 3차원 모델에서 생육량을 역추정할 수 있는 기법을 개발하였음.	100
○ 개발·보완된 모델의 스마트팜 실증	○ 개발된 모델의 성능 검증을 위하여 국립원에 특작과학원 내 유리온실, 공동 과제 기관 소속 스마트팜을 통하여 실증을 진행하였음.	100
○ 작물 생장 모델과 연동되는 작물 생육모델 시각화(엽면적, 초장, 생육량, 착과수 등)	○ 동적모델과 연동하여 작물의 생육을 예측, 시각화 할 수 있는 모델을 개발하였으며, 이를 통하여 예측된 생육값을 보다 직관적으로 보여줄 수 있는 기술을 개발하였음	100
○ 3차원 작물 생육·온실환경 시뮬레이션 SW 개발	○ 작목별 작물 생육·온실 환경 시뮬레이션 SW를 개발하여 기술이전을 실시하였음.	100

## 4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성합니다)

### 1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

---

### 2) 자체 보완활동

---

### 3) 연구개발 과정의 성실성

---



## 5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 작물 모델링을 위한 환경 및 생육 데이터를 표준화하고 환경-생육-광합성 정보를 통합하여 데이터베이스화 함으로써 객관적이고 재현가능한 농업 연구 기반을 마련함.
- 온실 환경 및 작물 모델링 연구 분야에서 다수의 학술발표 및 연구논문을 게재하여 기술 개발 및 분야 확장을 선도하였으며, 모델링 분야의 지속적인 발전을 위한 전문 연구인력 양성에도 기여하였음.
- 세계적인 수준의 작물 스캐닝 기술 및 생육 추정 기술을 구축하였으며, 생육단계별 시각화모델을 개발하여 농업 및 작물재배에 대한 이해도를 향상시킴
- 작물 및 온실의 3차원 모델은 농업 메타버스 구축에 필수적인 요소로서 향후 한국형 스마트팜 메타버스 구축을 위한 기반기술로서 활용될 수 있음

## 6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- 개발된 온실 환경 및 생육모델을 바탕으로 환경 및 생육 예측 SW를 개발하고, 온실 제어에 활용할 수 있는 농가 의사결정지원SW를 개발하여 사업화 예정
- 지속적인 연구 및 전문 연구인력 양서인력양성 및 모델링,

< 연구개발성과 활용계획표 >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내
국외논문	SCIE	3
	비SCIE	
	계	3
국내논문	SCIE	
	비SCIE	5
	계	5
특허출원	국내	
	국외	
	계	
특허등록	국내	2
	국외	
	계	2
인력양성	학사	
	석사	
	박사	
	계	
사업화	상품출시	1 (스마트팜 의사결정지원 시스템)
	기술이전	
	공정개발	
제품개발	시제품개발	
성과홍보		
포상 및 수상실적		
정성적 성과 주요 내용		

< 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	별첨 자료
1. IRIS 등록 별첨자료	1) 자체평가의견서
	2) 연구성과 활용계획서
2.스마트팜연구개발사업단 요청 별지자료	1) 사업화계획서
	2) 실증 성과보고서
	3) 빅데이터 플랫폼 연계 활용계획서

# 자체평가의견서

## 1. 과제현황

		과제번호		421001-03	
사업구분	스마트팜 다부처 패키지 혁신기술 개발사업				
연구분야	-			과제구분	-
사업명	스마트팜 실증·고도화 연구사업				-
총괄과제	기재하지 않음			총괄책임자	기재하지 않음
과제명	시설 과채류 작물 생육·수확량 예측 기반 온실환경 모델링 및 시뮬레이션 SW 개발			과제유형	(기초)
연구개발기관	국립원예특작과학원			연구책임자	정호정
연구기간 연구개발비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	2021.4.7. ~ 2021.12.31.	800,000		800,000
	2차년도	2022.1.1. ~ 2022.12.31.	900,000	92,500	992,500
	3차년도	2023.1.1. ~ 2023.12.31.	900,000	92,500	992,500
	계		2,600,000	185,000	2,785,000
참여기업	글피, 본시스템즈				
상대국	상대국연구개발기관				

※ 총 연구기간이 5차년도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 : 2024.2.29.

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
국립원예특작과학원	농업연구관	정호정

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	
----	--

## I. 연구개발실적

### 1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : 우수

본 연구과제를 통하여 개발된 시설 작물 생육 모델 및 3차원 모델은 세계적인 수준이며, 이를 바탕으로 생육 모델링 연구 분야의 선도 그룹으로 자리 잡았음. 실제와 같은 수준의 3차원 모델은 세계 최초로 시도되었으며 이를 동적모델과 연동한 사례 또한 세계 최초임. 우리나라에서 개발된 모델은 주로 노지채소 위주였으며, 생육 모델을 기반으로한 의사결정지원 시스템을 최초로 서비스, 상용화한 사례로 볼 수 있음. 향후 농촌진흥청 후속과제 발굴을 통하여 지속적으로 연구개발을 실시할 예정임.

### 2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : 우수

본 연구과제의 주요 개발성과인 의사결정지원SW는 농업 분야에서 가장 현장 요구도가 기술임. 해당 기술은 의사결정지원서비스 및 온실 운영을 위한 컨설팅 개발을 위한 기반 기술로써 농가의 경제적 부담을 덜어주는 것은 물론 농가의 생산성 및 소득을 향상시킬 수 있는 주요한 요소임. 동적 모델과 연동된 3차원 작물모델의 지속적인 연구개발을 통하여 국제적 경쟁력이 있는 모델을 개발하면 시설원에 선진국 대열에 진입하고 중앙아시아, 유럽 등의 시설원에 국가의 수출 시장을 개척할 수 있음.

### 3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : 우수

주요 시설 작물 3종 및 식물공장 엽채류 1종에 대한 모델링 방법론 및 모델링 데이터 셋 확립하여 다양한 시설 작물 및 스마트팜, 식물공장, 수직농장 분야에 활용할 수 있음. 주요 농업 기술인 의사결정지원 서비스 및 스마트팜 온실 경영 서비스 분야 적용하여 농가의 생산성 및 소득을 향상시킬 수 있으며 지속가능·회복가능한 농업 기술 개발 및 탄소중립 실현을 위한 농업 기술 개발에 활용 가능함. 본 연구과제에서 개발된 환경·작물생육 시뮬레이션 기술은 우주농업 분야의 국제적 기술 선점에 큰 도움이 될 것으로 판단됨.

### 4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : 우수

시설원에 작물 모델 개발을 위하여 참여 공동 과제 산하 스마트팜을 적극적으로 활용하여 작물 재배를 실시하였음. 이와 더불어 모델의 정확도 향상을 위하여 지역 선도농가와 협력하여 일주일 단위 생육 조사 및 환경정보 수집을 실시하여 시설 표준 데이터베이스를 구축하였음. 과제 성과달성 및 충실한 연구를 위하여 매달 연구과제 책임자·실무자 회의를 실시하고 본 과제의 성과물을 지속적으로 개발하고자 국제 연구자 컨소시엄 합류 및 국제 공동과제 기획을 추진하고 있음

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

■ 등급 : 우수

논문의 경우 당초 비SCI 목표를 SCI로 상향 조정하여 연구개발 성과의 질을 향상시켰으며, 특히 SCI논문의 경우 농업·시설원예분야 중 영향력지수가 높은 국제 저널에 다수 출판하였음. 지적재산권의 경우 작물모델링 분야 뿐만아니라 시설원에 전반에 사용할 수 있는 특허를 출원·등록하였음. 특히 학술발표의 경우 국내 학술발표를 통해 우리나라 연구진의 모델링 수준을 향상시켰으며 국제 학술발표를 통하여 본 연구과제 성과물의 국제적인 경쟁력을 검증하였음.

## II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
○ 작물별 생장·수확 예측 및 온실환경 모델 개발을 위한 데이터 수집·표준화	10	100	○ 온실 환경 측정 및 생육조사 방법과 관련된 국내외 표준안 및 매뉴얼을 검토하여 표준화된 데이터 수집 방법을 수립하였음
○ 작물생육 단계별(육묘·정식·착과·성숙기) 온실환경 모델 개발	20	100	○ 작물 생육 단계에 따른 온실 환경 및 에너지 밸런스 예측 모델을 개발하여 온실 내 환경을 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하였음. - 작물 생육모델 및 온실 환경 통합 시뮬레이터 개발을 위한 기반기술 확보
○ 기 개발 생육 예측모델 및 환경 빅데이터를 활용한 생장 및 수확량 예측 모델 고도화	10	100	○ 국내 기 개발 생육 모델을 활용하여 생육지표(엽면적, 초장, 생체중 등) 및 생리지표(광합성 등)의 추정 정확도를 고도화하였으며 이를 바탕으로 작물의 수확량 예측 모델을 개발 및 고도화하였음
○ 작물생육 단계별(육묘·정식·착과·성숙기) 3차원 구조모델 DB 구축	15	100	○ 작목별 생육 단계별 3차원 모델을 구축하였으며, 3차원 모델에서 생육량을 역추정할 수 있는 기법을 개발하였음.
○ 개발·보완된 모델의 스마트팜 실증	15	100	○ 개발된 모델의 성능 검증을 위하여 국립원예특작과학원 내 유리온실, 공동 과제 기관 소속 스마트팜을 통하여 실증을 진행하였음.
○ 작물 생장 모델과 연동되는 작물 생육모델 시각화(엽면적, 초장, 생육량, 착과수 등)	15	100	○ 동적모델과 연동하여 작물의 생육을 예측, 시각화 할 수 있는 모델을 개발하였으며, 이를 통하여 예측된 생육값을 보다 직관적으로 보여줄 수 있는 기술을 개발하였음
○ 3차원 작물 생육·온실환경 시뮬레이션 SW 개발	15	100	○ 작목별 작물 생육·온실 환경 시뮬레이션 SW를 개발하여 기술이전을 실시하였음.
합계	100		

## III. 종합의견

### 1. 연구개발결과에 대한 종합의견

우리나라 원예시장 중 큰 부분을 차지하고 있는 시설원예, 스마트팜 분야의 발전 및 생산성 향상을 위한 작물 모델링 기반 연구 의사결정지원시스템 개발은 반드시 필요함. 본 과제에서는 외국에서 개발된 모델을 변형한 모델이 아닌 우리나라 연구자의 기술 및 연구성과로 개발된 모델을 상업적인 서비스를 실시하고자 하였음. 지난 10년은 스마트팜의 시설 및 장비가 발전하면서 국내 농업 생산량을 향상시켰다면 앞으로의 10년은 스마트팜 운영 및 관리 분야의 개발이 국내 농업 발전에 중요할 것임. 기존 수식 기반 모델들의 한계를 넘어 3차원 모델과 접목한 모델의 파급력은 여러 국제 학술대회를 통하여 입증되었음

## 2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

세계적으로 널리 사용되고 있는 작물, 환경 모델들의 경우 최소 5년 이상 장기적인 연구개발이 이루어졌으며 상용화, 보급되기까지 10여년 소요되는 경우가 다수였음. 본 연구과제는 기획 당시 2단계로 구성되어 1단계(21~24)에서는 모델 개발, 2단계(25~27)에서 상용화를 위한 소프트웨어 개발이 목표였으나 다부처사업 예비타당성 조사 및 스마트팜연구개발사업단 이관 과정에서 모델개발에서부터 소프트웨어개발까지 3년에 실시하는 내용으로 변경되었음. 그럼에도 불구하고 본 연구팀에서는 과제제안 요구서(RFP)상 목표를 최대한 달성코자 하였으며 정성적 성과는 모두 달성하였음.

## 3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

본 연구과제의 결과물을 통하여 국내 작물 모델링 분야를 선도하고 3차원 모델링 분야의 세계적인 기술력을 확인하였음. 작물모델링 연구 고도화를 위하여 본 연구의 결과물을 바탕으로 한 후속과제를 농촌진흥청 주관 공동연구과제를 기획하여 지속적인 연구개발을 실시할 예정임.

## IV. 보안성 검토

※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성함.

### 1. 연구책임자의 의견

### 2. 연구개발기관 자체의 검토결과

## 연구성과 활용계획서

### 1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input type="checkbox"/> 자유응모과제 <input checked="" type="checkbox"/> 지정공모과제	분 야	-	
연구과제명	시설 과채류 작물 생육·수확량 예측 기반 온실환경 모델링 및 시뮬레이션 SW 개발			
주관연구개발기관	국립원예특작과학원		주관연구책임자	정호정
연구개발비 (천원)	정부지원 연구개발비	기관부담연구개발비	기타	총연구개발비
	2,600,000	185,000		2,785,000
연구개발기간	2021. 04. 07. ~ 2023. 12. 31.( 2년 9개월)			
주요활용유형	<input checked="" type="checkbox"/> 산업체이전 <input checked="" type="checkbox"/> 교육 및 지도 <input type="checkbox"/> 정책자료 <input type="checkbox"/> 기타(            ) <input type="checkbox"/> 미활용 (사유:            )			

### 2. 연구목표 대비 결과

당초목표	당초연구목표 대비 연구결과
① 작물별 생장·수확 예측 및 온실환경 모델 개발을 위한 데이터 수집·표준화	○ 온실 환경 측정 및 생육조사 방법과 관련된 국내외 표준안 및 매뉴얼 수립
② 작물생육 단계별(육묘·정식·착과·성숙기) 온실환경 모델 개발	○ 작물 생육 단계에 따른 온실 환경 및 에너지 밸런스 예측 모델을 개발하여 온실 내 환경을 예측할 수 있는 알고리즘 개발 - 작물 생육모델 및 온실 환경 통합 시뮬레이터 개발을 위한 기반기술 확보
③ 기 개발 생육 예측모델 및 환경 빅데이터를 활용한 생장 및 수확량 예측 모델 고도화	○ 국내 기 개발 생육 모델을 활용하여 생육지표(엽면적, 초장, 생체중 등) 및 생리지표(광합성 등)의 추정 정확도를 고도화하였으며 이를 바탕으로 작물의 수확량 예측 모델을 개발 및 고도화
④ 작물생육 단계별(육묘·정식·착과·성숙기) 3차원 구조모델 DB 구축	○ 작물별 생육 단계별 3차원 모델을 구축하였으며, 3차원 모델에서 생육량을 역추정할 수 있는 기법을 개발
⑤ 개발·보완된 모델의 스마트팜 실증	○ 개발된 모델의 성능 검증을 위하여 국립원예특작과학원 내 유리온실, 공동 과제 기관 소속 스마트팜을 통하여 실증
⑥ 작물 생장 모델과 연동되는 작물 생육모델 시각화(엽면적, 초장, 생육량, 착과수 등)	○ 동적모델과 연동하여 작물의 생육을 예측, 시각화 할 수 있는 모델을 개발하였으며, 이를 통하여 예측된 생육값을 보다 직관적으로 보여줄 수 있는 기술을 개발
⑦ 3차원 작물 생육·온실환경 시뮬레이션 SW 개발	○ 작물별 작물 생육·온실 환경 시뮬레이션 SW를 개발하여 기술이전을 실시

\* 결과에 대한 의견 첨부 가능

### 3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표											연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화					표준 화		학술성과			교육지도	인력양성	정책 활용· 홍보		기타 (타연구 활용비)
	특허출원	특허공보	SW저작권	SMART	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출	투자유치	국내	국제	논문		학술발표			정책 활용	홍보 전시	
														SCI	비SCI		논문 평균 IF				
단위	건	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	건	명	건	건	건	
가중치	10	10	10		10	10					10					25		15			
최종 목표	3	1	5		4	2					2			6	7	15		7			
1단계 실적	2													5	4	18		6			
2단계 실적	2	1	3		3	3								1	1	11		4			
달성률 (%)	100	100	60		75	100					0			100	100	100		100			

### 4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	작물 광합성·증산량 예측 기술
②	작물 생육·수확량 모델링 기술
③	3차원 작물 생육 모델
④	작목별 시설원에 의사결정지원 SW

### 5. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)				
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복제	외국기술 소화·흡수	외국기술 개선·개량	특허 출원	산업체이전 (상품화)	현장으로 해결	정책 자료	기타
①의 기술					○	○				
②의 기술		○					○			
③의 기술	○					○				
④의 기술					○		○			

\* 각 해당란에 v 표시

### 6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	③, ④ 기술 고도화를 위하여 작목별, 복합환경 요인별 검증 및 고도화
②의 기술	③, ④ 기술 고도화를 위하여 작목별, 복합환경 요인별 검증 및 고도화
③의 기술	작목 및 품종 확대를 통한 모델 다양화 및 보급
④의 기술	추가 현장 실증 및 검증을 통한 개발 및 보급



7. 연구종료 후 성과창출 계획

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표											연구기반지표								
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				표준 화		학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용·홍보		기타 (타연구활동등)
	특허 출원	특허 등록	S W 저 작 권	S M A R T	건 수	기술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출	투 자 유 치	국 내	국 제	논문				학 술 발 표	정 책 활 용	
														S C I	비 S C I	논 문 평 균 I F				
단위	건	건	건	건	건	백 만 원	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	건	건	명	건	건	건	
가중치																				
최종목표		2																		
연구기간내 달성실적		1																		
연구종료후 1년차		1																		
연구종료후 2년차		1																		

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

핵심기술명 <sup>1)</sup>	작목별 시설원에 의사결정지원 SW		
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input checked="" type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	10,000천원
이전방식 <sup>2)</sup>	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input checked="" type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타( )		
이전소요기간	1년	실용화예상시기 <sup>3)</sup>	2025년
기술이전시 선행조건 <sup>4)</sup>	자체 혹은 연동가능한 복합환경 제어기술 보유		

- 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) 실용화예상시기 : 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)

## 사업화 계획서

연구개발과제명	시설 과채류 작물 생육·수확량예측 기반 온실환경 모델링 및 시뮬레이션 SW 개발			과제번호	421001-03		
주관연구개발기관	국립원예특작과학원 시설원예연구소			주관연구책임자	정호정		
공동연구개발기관	서울대학교 공주대학교 목포대학교 경북대학교 제주대학교			공동연구책임자	안태인 최효길 박경섭 김성겸 조영일		
제품명	시설원예 환경제어 시뮬레이터			제품 형태	H/W	S/W	○
관련 선행기술	종류 (해당 시)	특허명 (등록번호)	-				
		기술이전명	-				
사업화 종류	구분	수입품 대체	신규시장 창출	○	기존 상품 개선		
	내용	시설원예 환경제어 알고리즘 및 환경 시뮬레이터					
개발 제품 주요 경쟁력	목표 수요처	시장규모	컨설팅 시장 규모 : 1,200억원/년 (*시설원예 농가 수 126,350가구*80만원/월)				
		기술개발 필요성	- 기업체 주도 농가 경영 컨설팅이 실시되고 있으나 객관적인 자료보다는 관행 노하우 수준의 정보를 옮기는데 그침 - 농가 컨설팅 시 활용할 수 있는 시뮬레이터나 시각화 자료가 필요함				
		목표 시장 예상 점유율	15				
	기술 차별성	구분	비용 절감 이익 증대	○	기술 고도화 기타	○	
타사 제품 비교	제품명	LETS GROW		농가 경영 컨설팅			
	단가	50만원/월		80만원/월			
예상 매출액 (백만원)	구분	2021	2022	2023	2024		
	연구개발계획서						
	수출액			20	100		
생산계획	생산능력	SW 개발 전문 프로그래머 1인 및 서버 관리 1인					
	양산 체계 구축 계획	-					
판매전략	판로확보 방안	- 각 도 농업기술원 및 농업기술센터 협조 - 작목별 작목반 및 생산조합 연계					
	마케팅 전략	- 현장평가회 및 사용자 교육 실시(1회/년)					
	기타 부가설명						

사업화 계획을 위와 같이 제출합니다.

2022 년 11 월 16 일

주관연구개발기관 : 국립원예특작과학원 시설원예연구소  
주관연구책임자 : 정 호 정

## 실증 성과보고서

연구개발과제명	시설 과제류 작물 생육·수확량예측 기반 온실환경 모델링 및 시뮬레이션 SW 개발			과제번호	421001-03					
주관연구개발기관	국립원예특작과학원			주관연구책임자	정호정					
공동연구개발기관	서울대학교 공주대학교 목포대학교 경북대학교 제주대학교			공동연구책임자	안태인 최효길 박경섭 김성겸 조영열					
실증개요	실증성과명	작물 광합성 모델 검증			구분	H/W	S/W	○		
	실증장소	제3자농장	해당	미해당	실증장소유형	스마트팜혁신밸리				
		장소명	시설원예연구소			일반(법인)농가				
		실증면적(㎡)	255㎡*2개소			정부출연·지자체			○	
		주소	경남 함안군 진함로 1425			기타				
실증현황	실증품목(종)	파프리카, 오이								
	실증조건	필수기자재	작물재배 시설, 광합성 측정 장치, 광합성 예측 모델							
		기타필수조건	정상적인 작물 재배가 가능한 환경 및 인력							
	실증목적	구분	성과물 성능에 대한 검·인증	트랙레코드·실증데이터 확보						
		내용	목표 환경 신뢰성·재현성 검증	○	제품서비스 시연(시범농가)					
	실증방법	활용기술	인공지능		빅데이터		사물인터넷			
			지능형로봇		신재생에너지		기타	○		
		수집데이터	환경데이터	○	생육데이터	○	제어데이터	○		
			경영데이터		기타					
	실증방법	내용	작물의 생육 및 수확량을 예측하기 위하여 작물의 생리활성 지표(광합성, 증산량 등)와 생장 지표(엽면적, 초장, 생체중 건물중 등)예측 모델을 개발하고 모델 예측 정확성을 측정하기 위하여 작물 재배를 실시한 후 실제값과 비교							
실증결과	내용	광합성 모델의 경우 정확도( $R^2$ )가 0.82~0.95(1단계 목표 0.87 이상)이었으며, 생육 모델의 경우 정확도가 0.82~0.97(1단계 목표 0.70 이상)로 확인되어 향후 2단계 목표 달성을 위한 기반 기술 확보하였다.								

결과를 위와 같이 제출합니다.

2024 년 2 월 6 일

주관연구개발기관 : 국립원예특작과학원 시설원예연구소  
주관연구책임자 : 정 호 정



## 스마트팜 R&D 빅데이터 플랫폼 연계/활용 계획서

연구개발 과제명	시설 과채류 작물 생육·수확량예측 기반 온실환경 모델링 및 시뮬레이션 SW 개발	과제번호	421001-03
주관연구개발기관	국립원예특작과학원 시설원예연구소	주관연구책임자	정호정
<b>기본 정보</b>			
데이터 용량(MB)	정형	영상	음향
	23		
		이미지	3D
			141,207
		분광 데이터	
		기타	
<b>수집</b>			
구분	양식명	유형	부류·품목
1	시설 오이 생육 데이터(장엽적생종 등)	정형	오이
2	시설 오이 환경 데이터(온습도, 광 등)	정형	오이
3	시설공장 케일 환경 데이터(온습도, 광 등)	정형	오이
4	시설공장 케일 생육 데이터(장엽적생종 등)	정형	케일
5	시설 토마토 생육 데이터(수확량)	정형	토마토
6	시설 토마토 환경 데이터(온습도, 광 등)	정형	토마토
7	시설 토마토 생육 데이터(장엽적생종 등)	정형	토마토
8	시설 파프리카 생육 데이터(수확량)	정형	파프리카
9	시설 파프리카 환경 데이터(온습도, 광 등)	정형	파프리카
10	시설 파프리카 생육 데이터(장엽적생종 등)	정형	파프리카
11	시설 파프리카 생육 단계별 3차원 DB	3D	파프리카
12	시설 파프리카 수확량 단계별 3차원 DB	3D	파프리카
13	시설 토마토 생육 단계별 3차원 DB	3D	토마토
14	시설 오이 생육 단계별 3차원 DB	3D	오이
15	시설공장 케일 생육 단계별 3차원 DB	3D	케일
	용량(MB)		
			69,427
			40,448
			31,232
			100
	수집 시작일		
			22.06.
	수집 종료일		
			23.07.
	등록일시(예정)		
			23.11.06.
			23.11.06.
			23.9.23
			23.9.23
			23.9.15.
			23.9.23.
			23.9.15.
			23.9.15.
			23.09.25.
			23.09.25.
			23.09.25.
			23.09.25.
			23.09.25.
			23.09.25.
<b>분석</b>			
	정상 파일 수	타입오류	범위오류
	22	-	-
<b>모델</b>			
구분	양식명	유형	운영체제
1	시설 파프리카 3D 생육 예측 모델	데이터모델	Windows
2	시설 파프리카 3D 수확량 예측 모델	데이터모델	Windows
3	시설 토마토 3D 생육 예측 모델	데이터모델	Windows
4	시설 오이 3D 생육 예측 모델	데이터모델	Windows
5	시설 케일 3D 생육 예측 모델	데이터모델	Windows
6	시설 오이 생육 예측 모델	데이터모델	Windows
7	시설 토마토 생육 예측 모델	데이터모델	Windows
8	시설 토마토 수확량 예측 모델	데이터모델	Windows
9	시설 파프리카 생육 예측 모델	데이터모델	Windows
10	시설 파프리카 수확량 예측 모델	데이터모델	Windows
			Julia 1.8 / python 3.8
			labelimg
			수확량예측 오차 0.406 R 0.962 장엽적생종 오차 0.406
			23.12.
			Windows
			Julia 1.8
			-
			Nashimoto / 0.86 / RMSE / 262.85
			23.12.
			Windows
			Julia 1.65.2 / python 3.8 / R 4.3
			-
			R2 score / 0.962
			23.12.
			Windows
			Julia 1.8 / python 3.8
			-
			R2 score / 0.64
			23.12.
<b>활용</b>			
구분	양식명	유형	대분류
1	시설원예 작물생육 예측 시뮬레이션 소프트웨어 개발	파일과채류	생육
			사이트 URL
			동영상 URL
			등록일시(예정)
			2024.1.3.
<b>기타 부가설명</b>			
(수집) 데이터 수집 목표는 15개였으나 작물별 광합성 데이터를 생육데이터에 포함시키고 3차원 데이터로 통합하여 최종 12개 데이터를 수집하였음			
(모델) 모델 개발 목표는 10개였으나 수확량 예측을 별도로 구축하고 3차원 모델을 작물별로 개발할 계획이었으나 결과 활용 과정에서 모델을 통합하는 것이 적당하다고 판단하여 최종 4개의 모델로 통합하였음			

결과를 위와 같이 제출합니다.

2024년 2월 6일

주관연구개발기관 : 국립원예특작과학원  
 시설원예연구소  
 주관연구책임자 : 정호정

