

321075-02

영농형
태양광
활용
식량작물
재배기술,
생육
모니터링
및
생산성
예측
시스템
개발

2022

농림축산식품부
농림식품기술기획평가원

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()발간등록번호(O)
농업에너지 자립형산업모델 기술개발 2022년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-004395-01

영농형 태양광 활용 식량작물 재배기술, 생육 모니터링 및 생산성 예측 시스템 개발

2023. 6. 2.

주관연구기관 서울대학교
협동연구기관 순천대학교/
(재)국가농림기상센터/
솔라팜(주)

농림축산식품부
(전문기관)농림식품기술기획평가원

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “영농형 태양광 활용 식량작물 재배기술, 생육 모니터링 및 생산성 예측 시스템 개발”(개발기간 : 2021. 04. 01. ~ 2022. 12. 31.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2023. 6. 2.

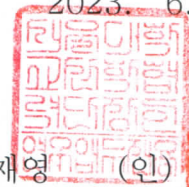
주관연구기관명 : 서울대학교 산학협력단
협동연구기관명 : 순천대학교 산학협력단
(재)국가농림기상센터
솔라팜(주)

김재영 (인)

여 현 (인)

박종호 (인)

김창한



주관연구책임자 : 서울대학교

김광수

협동연구책임자 : 순천대학교

국용인

(재)국가농림기상센터

강민석

솔라팜(주)

남재우

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

최종보고서						보안등급				
						일반[V],보안[]				
중앙행정기관명	농림축산식품부		사업명	사업명	농업에너지 자립형산업모델 기술개발					
전문기관명	농림식품기술기획평가원			내역사업명	에너지자립형 저장·관리기술개발					
공고번호	농축2021-96호		총괄연구개발 식별번호		321003-02					
			연구개발과제번호		321075-2					
기술분류	국가과학기술 표준분류	EF. 에너지/자원	50%	EF06. 신재생에너지	30%	EF0601. 태양광	20%			
	농림식품과학기술 분류	CA. 농림식품 융복합	50%	CA02. 농생명 에너지 자원	30%	CA0201. 농산에너지 생활활용	20%			
총괄연구개발명	국문	작물별 생산성을 고려한 영농형 태양광 표준모델 개발 및 실증								
	영문									
연구개발과제명	국문	영농형 태양광 활용 식량작물 재배기술, 생육 모니터링 및 생산성 예측 시스템 개발								
	영문	Development of management technologies, growth monitoring & yield prediction system for food crops on agricultural farms								
주관연구개발기관	기관명	서울대학교 산학협력단		사업자등록번호		119-82-03684				
	주소	(우)08826, 서울 관악 관악로1		법인등록번호						
연구책임자	성명		김광수		직위		교수			
	연락처	직장전화	02-880-4546		휴대전화					
		전자우편			국가연구자번호					
연구개발기간	전체		2021. 04. 01. - 2022. 12. 31.(1년 9개월)							
	단계	1단계	2021. 04. 01. - 2022. 12. 31.(1년 9개월)							
연구개발비 (단위: 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담		그 외 기관 등의 지원금				합계	연구개발비 외 지원금	
		연구개발비	연구개발비	지방자치단체		기타()				
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계
	총계	1,100,000	3,500	60,330					1,103,500	60,330
1단계	1년차	500,000		28,800				500,000	28,800	528,800
	2년차	600,000	3,500	31,500				603,500	31,500	635,000
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고				
						역할	기관유형			
	공동연구개발기관	순천대학교	국용인	교수		공동	대학			
		국가농림기상센터	강민석	부장		공동	비영리 재단법인			
	솔라팜(주)	남재우	부사장		공동	농업회사				
위탁연구개발기관										
연구개발기관 외 기관										
연구개발담당자 실무담당자	성명		박진유		직위		연구원			
	연락처	직장전화	02-880-4556		휴대전화					
		전자우편			국가연구자번호					

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

2023년 6월 2일

연구책임자: 김 광 수

주관연구개발기관의 장: 서울대학교 산학협력단
 공동연구개발기관의 장: 순천대학교 산학협력단
 (재)국가농림기상센터
 솔라팜(주)

김재영 (직인)
 여 현 (직인)
 박종호 (직인)
 김창한 (직인)

농림축산식품부장관·농림식품기술기획평가원장 귀하

< 요약 문 >

사업명	농업에너지 자립형산업모델 기술개발	총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)	321003-02				
내역사업명 (해당 시 작성)	에너지자립형 저장·관리 기술개발	연구개발과제번호	321075-2				
기술분류	국가과학기술 표준분류	EF. 에너지/자원	50%	EF06. 신재생에너지	30%	EF0601. 태양광	20%
	농림식품 과학기술분류	CA. 농림식품 융복합	50%	CA02. 농생명 에너지 자원	30%	CA0201. 농산에너지 생산활용	20%
총괄연구개발명 (해당 시 작성)	작물별 생산성을 고려한 영농형 태양광 표준모델 개발 및 실증						
연구개발과제명	영농형 태양광 활용 식량작물 재배기술, 생육 모니터링 및 생산성 예측 시스템 개발						
전체 연구개발기간	2021. 04. 01. - 2022. 12. 31.(1년 9개월)						
총 연구개발비	총 1,163,800 천원 (정부지원연구개발비: 1,100,000 천원, 기관부담연구개발비: 63,800천원)						
연구개발단계	기초[] 응용[] 개발[v] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준() 종료시점 목표()		
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)							
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)							
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	<ul style="list-style-type: none"> ○ 영농형 태양광 활용 식량작물 재배기술 및 생산성 예측 시스템 개발 - 영농형 태양광 하부 맞춤형 재배기술 개발 - 영농형 태양광 하부 식량작물 최적 환경 및 재배조건 개발 - 영농형 태양광 하부 친환경 및 스마트 재배지원 기술 개발 - 모바일 앱 기반 영농형 태양광 하부 식량작물 생산성 예측 시스템 구축 					
	전체 내용	<ul style="list-style-type: none"> □ 영농형 태양광 하부 식량작물 재배 실태 조사 및 분석 <ul style="list-style-type: none"> ○ 영농형 태양광 하부 식량작물 재배 실태 조사 및 DB 구축 ○ 영농형 태양광 하부 작물 생육 및 수량 분석 ○ 영농형 태양광 하부 식량작물 생리활성 변화 데이터 수집 및 분석 ○ 영농형 태양광 하부 식량작물 재해, 병해충 및 잡초 발생 양상 데이터 수집 및 분석 ○ 영농형 태양광 하부 식량작물 품질, 영양성분 및 안정성 평가 수행 ○ 영농형 태양광 하부 기상환경 분석 ○ 영농형 태양광 하부 식량작물 최적 환경 및 재배조건 도출 □ 영농형 태양광 하부 맞춤형 식량작물 재배기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> ○ 벼 재배 실험 <ul style="list-style-type: none"> - 벼 재식밀도별 생육 및 수량 변화 구명 - 벼 시비방법별 생육 및 수량 구명 ○ 감자 재배 실험 <ul style="list-style-type: none"> - 감자 재식시기별 생육 및 수량 변화 구명 - 감자 재식시기별 생육 및 수량 변화 구명 ○ 스마트 식량작물 재배지원 장비 관리 					

<p>연구개발 목표 및 내용</p>	<p>전체 내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> □ 영농형 태양광 활용 친환경 식량작물 재배지원 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> - 영농형 태양광 하부의 물 소비 특성 구명을 위한 센서 및 시설 체계 구축 및 분석 - 영농형 태양광 하부의 토양 탄소 및 온실가스 배출량 관측 체계 구축 및 분석 - 영농형 태양광 하부 작물의 생리·생육 관측 자료 수집 및 분석 □ 영농형 태양광 활용 스마트 식량작물 재배지원 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> - 영농형 태양광 하부 작물의 생리·생육 관측 자료 수집 및 분석 - 작물생육모형 구동 지원을 위한 영농형 태양광 시설 하부 관측자료 수집 및 분석 □ 3D 모델을 이용한 영농형 태양광 하부 수광량 예측 <ul style="list-style-type: none"> - 수광량 관측 및 기상자료수집 - 3D 모델을 이용한 수광량 예측 시스템 개발 - 영농형 태양광 시설에 대한 수광계수 개발 □ 영농형 태양광 설비 하부 작물 생육 예측 지원 모바일 앱 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 기상자료 수집 가공 모듈 개발 - 작물생육모형 모듈 구현 - 물 관리 최적화 지원을 위한 의사결정 지원 모듈 개발 - 영농형 태양광 설비 하부 작물 생육 예측 지원 모바일 앱 모듈 개발 및 통합 □ 영농형 태양광 통합 플랫폼 연동을 위한 자료교환 인터페이스 분석 및 설계 <ul style="list-style-type: none"> - 미기상 및 작물 생육 관측 하드웨어 구성 - 센서 관측 자료 관리 소프트웨어 구성 - 자료 수집 및 제공 소프트웨어 구성
-------------------------	--------------	---

<p>연구개발성과</p>	<ul style="list-style-type: none"> □ 영농형 태양광 하부 식량작물 재배 실태 조사 및 분석 <ul style="list-style-type: none"> - 영농형 태양광 하부 식량작물 재배지 18개소에 대한 실태조사 및 데이터베이스 구축 - 감자에서 수량 감소 없는 재배 가능성 확인, 벼 콩, 참깨의 경우 수량이 13-30% 감소됨을 확인 - 엽록소, 광합성 반응, 토양 및 식물체 유기 양분에 대한 데이터 수집 분석 - 재해, 병해충 및 잡초 발생 양상에 대한 데이터 수집 분석 - 영농형 태양광 하부 식량작물의 품질, 영양성분 및 안전성 평가결과, 관행재배에 비한 유의한 부정적인 영향이 없음을 확인 - 영농형 태양광 하부에서 일사량과 기온, 지온이 대체로 감소하는 것을 확인 □ 영농형 태양광 하부 맞춤형 식량작물 재배기술 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 관행재배 대비 태양광 하부 벼 초장의 신장 현상 확인 - 관행재배 대비 재식밀도에 따른 벼 초장의 유의한 차이가 없음을 확인 - 태양광 하부에서 벼 생육지연 현상 발견 - 대조구 대비 태양광 하부 감자의 초장의 신장 현상 확인 - 대조구 대비 태양광 모듈에 형태에 상관 없이 수량 감소 확인
---------------	---

연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> □ 영농형 태양광 활용 친환경 식량작물 재배지원 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> - 파주 논 미니 라이시미터 설치 - 오창 밭 강수계와 토양수분계 설치, 자료 수집 및 데이터 품질 관리 - 파종과 수확 전·후의 토양 탄소 저장능을 조사: 표토 채취 후 유기물 함량과 용적밀도 측정, 챔버를 이용한 논 토양 온실가스 배출량 관측 - 영농형 태양광 하부의 토양 탄소 및 온실가스(이산화탄소, 메탄) 배출량 관측 체계 구축 - 영농형 태양광 하부 작물의 생리·생육 관측 자료 수집 및 분석 □ 영농형 태양광 활용 스마트 식량작물 재배지원 기술개발 <ul style="list-style-type: none"> - 표면온도센서와 다중분광센서 등 활용 균락온도와 작물생장(NDVI, EVI, NIRv, LAI) 관측 및 데이터 수집 - 파주와 오창 시험지에서 상/하향 단파 및 장파 복사, 산란일사, 광합성 유효복사 센서와 온/습도, 풍향/풍속, 수온, 지온, 강수량, 토양수분 센서 설치 후 자료 수집 □ 3D 모델을 이용한 영농형 태양광 하부 수광량 예측 <ul style="list-style-type: none"> - 영농형 태양광 시설의 3D 모델과 Ray tracing 기법을 이용한 수광량 예측시스템 개발 - 작물 모델 적용을 위한 영농형 태양광 시설에 대한 수광계수 개발 □ 영농형 태양광 설비 하부 작물 생육 예측 지원 모바일 앱개발 □ 영농형 태양광 통합 플랫폼 연동을 위한 자료교환 인터페이스 분석 및 설계
--------	---

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<ul style="list-style-type: none"> □ 활용방안 <ul style="list-style-type: none"> - 영농형 태양광발전시설 하부 작물의 적정 재배기술을 통한 안정적인 작물 생산 - 영농형 태양광의 지역별 작목별 재배방법 개발을 통한 기술지도 자료로 활용 - 영농형 태양광 하부 작물 생산성 및 환경 영향 평가 자료의 정책 참고자료로 활용 - 기후변화 시대에 지속가능한 농업을 위한 영농형 태양광의 활용 가치 - 영농형 태양광 하부 작물의 생육 및 스트레스 반응 기반의 영농형 태양광 패널 각도 조절 알고리즘 제작 - 모바일 앱을 작물모델 교육등에 활용 □ 기대효과 <ul style="list-style-type: none"> - 영농형 태양광 정책보급을 위한 식량작물 영농허가 기준 활용 - 영농형 태양광 하부 식량작물 재배방법 개발을 통한 농가소득 증대에 기여 - 영농형 태양광 하부 작물 안정생산을 통한 「재생에너지 3020」 계획의 '30년 발전용량 10GW 목표 달성 기여 - 기존의 농업과 융합한 에너지 개발로 기존 산업 성장 지원 및 활성화에 기여 - 지속가능한 미래농업으로서 영농형 태양광의 가치판단 자료에 기여할 것으로 기대
---------------------	---

연구개발성과의 비공개여부 및 사유												
연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화학물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	3.2					1						
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
국문핵심어 (5개 이내)	영농형태양광		생산성예측		식량작물		재배기술		스마트 농업			
영문핵심어 (5개 이내)	Agrophotovoltaic		Productivity estimation		Food crops		Cultivation technology		Smart farming			

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요	6
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	12
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	59
4. 목표 미달 시 원인분석	147
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	149
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	150
별첨 자료 (참고 문헌 등)	151

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발 개요 및 배경

- 영농형 태양광(Agrophotovoltaic, APV)은 농작물 재배지 상부에 태양광 패널을 설치함으로써 작물 재배와 함께 태양광 발전을 수행하여 농산물과 전기를 병행 생산하는 개념임.
 - 주간 동안 일사량이 단일 잎의 광합성 광포화점을 훨씬 초과하기 때문에 작물이 흡수하지 않은 광을 '잉여 태양광'이라고 정의하고, 그것을 전기 생산에 사용한다는 것이 영농형 태양광의 일반적 개념임.
 - 실제 작물 생육에서는 잉여 태양광이 존재하지 않는데, 작물 초관이 흡수한 광량이 증가하면 작물 성장률(crop growth rate, g/m²/day)은 거의 선형적으로 높아지므로, APV의 차광 효과에 따른 작물 생산량 감소는 필연적인 것으로 예상됨.
- 정부는 2017년 12월에 '재생에너지 3020 이행계획'을 발표하였으며, 2017년 7% 수준인 재생에너지 발전 비중을 2030년까지 20%로 확대할 계획임.
 - 지금까지 화석연료를 기반으로 한 에너지 소비 증가가 급속한 경제성장을 이루어 온 것은 사실이나, 이로 인해 지구온난화뿐만 아니라 미세먼지와 같은 사회적 문제가 발생하고 있음.
 - 지구환경을 보호하고, 또 후세대에 부담이 없는 신재생에너지의 사용이 점진적으로 대세가 되어가고 있음.
 - 이 계획에 따르면 태양광 발전량은 2017년 5.7GW에서 2030년에는 36.5GW까지 확대됨.
- 농림축산식품부는 영농형 태양광 보급을 위한 작물 재배 연구 필요성을 제기함.
 - 작목별·지역별 재배방법 개발, 영농형 태양광 하부 일조특성 등 환경분석 필요
 - 과거에도 차광에 따른 생육 차이를 실험한 연구는 다수 진행되었지만, APV는 완전 차광이 아니라 부분적 차광이라는 점을 고려할 때, 작물 생육에 대한 APV 효과를 직접 예단하기는 어려움.
- 농지 이용 방식에 따라 영농형 태양광 시설 확산에 대한 상반된 요구들이 제기되고 있음.
 - 2019년 7월1일 개정 시행된 농지법의 핵심 내용 중 하나는 재배가 곤란하거나 생산성이 낮은 염해농지에 태양광 설치가 가능하도록 일시사용허가를 8년에서 20년으로 연장하였으나, 염해농지 외 농업진흥구역 내 일시사용기간 연장(8년→20년)을 통해 영농형태양광 확산을 요구하고 있음.

*농업진흥구역에 영농형 태양광을 허용하는 개정안 발의 ('20.6 박정의원, '21.1 김승남)
- 우리나라에서는 '16년 솔라팜(민간 영농법인)에서 도입 이후, 구조 안전성과 경제성 여부 등을 검증하기 위한 실증연구와 시범사업이 진행 중임.
 - 농기평 R&D 과제로 민간에서 실증연구('16.12~'19.12, 솔라팜)를 진행하였으며, 농작물(벼) 생산량 감수율은 약 7~23% 였음.
 - 산업부 주관으로 '18~'19년간 영농형 태양광 시범사업(8개소) 추진하였음.
 - 영농형 태양광 수익성(259만원/300평)은 일반 노지작물 보다는 높으나, 시설 초기 투자비용이 높아 일반태양광이나 시설재배 채소보다는 낮은 상황임.
- 논에서는 고온조건에서 상대적으로 많은 양의 메탄이 배출되기 때문에, 영농형 태양광 시설이 설치될 경우, 메탄 배출량이 감소될 수 있어 친환경적인 재배법 개발 기대됨.
 - 영농형 태양광 설비는 논으로 입사하는 태양복사의 일부를 차단하며 이로 인해 태양복사에 의한 지면의 가열이 줄어들어 논 생태계의 온도를 낮추어 폭염 등으로 인한 고온에서의 생산량 감소를 막는 효과가 기대됨.
 - 메탄 배출량은 유기물 분해에 따른 메탄 생산량에 비례하여 증가하며, 메탄 생산량은 온도

- 증가에 지수함수적으로 증가 (보통 10°C 증가할 때 마다 생산량(분해율)이 두 배씩 증가) 함
- 영농형 태양광 설비의 부수적인 효과인 논 생태계 냉각 효과로 인한 메탄 배출량 저감 효과 역시 기대할 수 있음.
 - 농지정책과 조화를 이루며 농업인 소득증진에 도움이 되는 방향으로 정책이 추진될 수 있도록 영농형 태양광에서의 적정품목, 영농방법(농기계 등) 실증 및 표준모델 개발을 위해 재배모델 실증을 지원하는 연구사업이 필요함.
 - 우리나라의 APV 사업의 시작은 산업체와 민간 주도로 수행되고 있어, 연구의 대부분이 태양광 발전량의 관점에 치우쳐 있음.
 - APV 하부의 태양광 유입량 변화에 따른 경작지 미기상 변화를 체계적으로 이해하고 농업·경제적 관점에서 영농형 태양광의 핵심은 태양광 발전량 가치보다 작물 수확량 손해가 크지 않아야 함.
 - APV 하부에서 태양광 에너지 유입 감소로 대표되는 미기상 변화를 올바르게 이해하고 그에 따른 생산량 감소 정도를 작물과 기후에 따라 구분 지어 정확히 파악할 필요가 있음.
 - 작물 생산량과 전기 발전량 사이의 경제적·농업적·산업적 대립 관점에서 탈피하여 농업 물이용효율, 농지의 토양 탄소 저장능, 작물 생육 스트레스 실험을 통해 기후변화 시대에 영농형 태양광이 지속가능한 농업에 기여할 수 있는 방법을 모색할 필요가 있음.
 - 영농형 태양광 하부에서는 경작지에 입력되는 광 에너지가 적기 때문에 전작에서는 토양수분을 상대적으로 오래 보유하며, 수도작에서는 논물 증발량을 줄일 수 있는 장점이 예상되므로, 실제로 영농형 태양광 하부에서 농업용수가 어느 정도 절약되는지 구체적인 실증 연구가 필요함 .
 - 경작지 토양 탄소 저장능은 농업분야 이산화탄소 배출 감소 구체적인 실천 방안으로서, 토양온도에 따라 크게 좌우되는 토양호흡량이 영농형 태양광 하부 경작지 토양 탄소에 어떤 영향을 미치는지 조사할 필요가 있음.
 - 주간 동안의 강한 광 조건에서 작물 광합성은 광저해(photoinhibition)를 받게 되는데, 영농형 태양광과 같은 부분 차광 조건에서 광저해 완화에 따른 광합성 상승과 광량 저감에 따른 광합성 하락의 정도를 생리생태적으로 평가할 필요가 있음.
 - 실제 실험을 대신하여 재배관리 방식 변화에 따른 생산성의 변화를 예측하기 위해 작물모형이 사용될 수 있음.
 - 작물모형은 기상 조건, 토양 특성 및 재배관리 등이 작물에 미치는 영향을 수식화하여 농작물의 생장 과정 및 수확량 등을 모의함.
 - 작물모형을 활용하여 파종시기, 추비시기, 관수방법, 광조건 등 재배관리 및 환경조건이 수량 변화에 미치는 영향을 파악하기 위한 연구가 수행되었음(Lee et al., 2012; Lee and Suh, 2009).
 - Kim et al. (2013)은 기후변화 환경하에서 벼, 보리, 콩 등의 수량 감소 피해의 최소화를 위해, 파종일 변경에 따른 수량 영향 정도를 작물모형을 활용하여 모의하고, 최적의 파종일을 제안하였음.
 - 작물모형을 사용하여 영농형 태양광 시설 하부에서 작물의 단위면적당 생산량 변화를 추정할 수 있음.
 - Dupraz et al. (2011)은 태양광 설비 하부에서 재배되는 밀의 생산성 변화를 추정하기 위해 작물 생육의 생물리학적 과정을 모의하는 STICS 모형을 사용하였음. 특히, 영농형 태양광 설비 하부에서 발생하는 공간적 변이를 모의하기 위해 5개 지점에서 작물생육을 모의하였음.
 - 작물모형을 사용하여 영농형 태양광 설비 하부에서 재배되는 작물의 수량 뿐만 아니라 광

사용효율 및 기관별 동화산물의 배분 양상과 같은 생육 특성을 이해하기 위한 정보를 제공할 수 있음.

- 국내에서는 개별 농가 단위에서 노지에서 재배되는 작물의 생산성을 예측할 수 있는 작물 모형들이 사용되고 있음.
 - 국내에서 식량작물을 대상으로 DSSAT 및 Oryza2000 작물 모형 등이 주로 사용되고 있음
 - 이들 모형들은 개별 농가별로 토지, 기상, 농작물 관리 등에 관한 정보를 모형에 입력하여 일별 생체중, 출수기 및 잠재수량 등을 예측함(Bouman et al., 2001; Jones et al., 2003; Hoogenboom et al., 2010; Kim et al., 2012).
- 작물의 품종 및 재배 관리 방식에 따라 동일한 환경조건에서도 생산성의 차이가 발생할 수 있기 때문에, 해외 연구 사례를 따르기보다 국내 조건을 고려한 작물 생산성 예측 시스템을 구축하는 것이 필요함.
 - 국내 환경조건에서 영농형 태양광 시설 설치 조건에 따라 작물의 생산성 변화를 예측할 수 있는 시스템을 구축할 경우, 영농형 태양광 시설 설치에 대한 의사결정을 지원할 수 있음
 - 영농형 태양광 시설 하부에서 국내에서 주로 재배되고 있는 작물을 대상으로 진행된 연구 사례가 보고된 경우가 적음.
 - 5G 시대에 핵심적인 기술 요소로 모바일 엣지 컴퓨팅 기술이 발전하고 있으며, 이러한 기술적 변화를 고려하여 모바일 환경에서 원활하게 작동할 수 있는 작물 생육 예측 시스템을 구축하는 것이 유리함.



<그림 1> 영농형 태양광의 중요성과 주요 이슈 사항 (출처: 연구진 작성)

2) 연구개발 대상 기술의 국내외 현황

(1) 국내현황

- 등숙기 일조부족에 따른 벼 품종간 생육반응 연구('18, 식량원)
 - 현미중 감소: 칠보(0.6%)<드래찬(22.9%), 등숙비율 감소: 칠보(1.3%)<드래찬(20.0%)
 - 도복 정도: (강) 동안, 드래찬, 호품, (중) 칠보, 삼광 등, (약) 소비, 고시히까리 등
- 벼 등숙기 차광(50%, 70%) 처리에 의한 수량 및 품질 변화('14, 충남대)
 - 차광이 강해질수록 천립중 감소, 단백질 함량 증가, 완전미율 감소 등 영향
- 벼 생육시기별 차광정도가 수량 및 수량구성요소에 미치는 영향('94, 식량원)
 - 생식생장기+등숙기 차광시기와 85% 차광정도에서 수량 77% 감소
- 주요 생육시기별 차광정도가 보리 결실에 미치는 영향 구명('84, 충남도원)
 - 출수기~20일후 32~33%, 유수형성기~수잉기 23-33%, 수잉기~출수기 16-19% 수량 감소
 - 55% 차광정도는 수량 17% 감소, 성숙기 2일 지연, 결실비율 2.3% 감소
- 일조방해로 인한 과수피해 평가방법 및 피해산정기준에 관한 연구('10, 원예원)
 - 과수(사과, 배, 포도, 복숭아) 일조방해 시간이 증가에 따라 수량, 착색, 당도 감소

(2) 국외현황

- Agrophotovoltaic(APV)의 최초 개념은 1982년 독일 Fraunhofer 연구소의 Goetzberger and Zastrow (1982) 논문에서 제안하였으며, 고정식 패널의 높이를 2m 이상으로 하고 간격을 높이의 3배 이상으로 이격시 연간 직접 및 산란 복사량을 분석한 결과 약 2/3의 태양에너지를 농업에 이용 가능한 것으로 계산하였음
 - 독일의 Fraunhofer ISE 연구소는 APV-RESOLA (Agrophotovoltaics Resource-Efficient Land Use) 프로젝트를 2015년에 구성하였으며, 다양한 농작물 정량적, 정성적 효과 분석, APV의 환경 및 생물다양성에 대한 영향 평가, 균일한 농작물 성장을 보장하는 PV 모듈의 최적 방향 검증, 농사 작업과 PV 모듈 설치시스템의 양립성 정량화, 사회적 수용성 평가, 에너지 사업의 정치적, 경제적 측면 평가 등에 관해 연구함
 - APV 기술의 최초 개념은 1980년대에 독일에서 제안되었으나 지붕형 태양광을 중심으로 태양광 보급이 이루어졌고, 최근에는 APV 실용화 시도를 하고 있음
- 프랑스에서 영농형 태양광을 구체화한 것은 INRA (Institut national de la recherche agronomique) 연구소의 농학자 Christian Dupraz이며, 2010년 Montpellier에 처음으로 agrivoltaic farm을 실험(Marrou et al., 2013)하였음
 - 프랑스의 Optimal Tracker사는 Sun`Agri R&D Program을 운영 중이며, 영농형 태양광과 스마트팜을 접목한 다양한 형태를 구현하고 있음
 - 대부분 연구 성격으로서 사업화에 이르지 못하는 못하였으나 최근 실용화에 대한 노력을 하고 있음
- 일본에서는 2003년 Aki Nagashima가 Solar Sharing 개념을 제안하며 논, 밭을 대상으로 소규모 실증이 이루어졌고, 1MW 이상의 유틸리티 규모도 운영하고 있음
 - 기존의 농업 생산성을 저해하지 않는 영농형 태양광 개념으로서 연도별 생산량이 80% 이하로 감소하면 태양광 발전을 허용하지 않는 등 설계 및 운영기준을 수립하여 운영하고 있음
 - 후쿠시마 원전사고 이후로 본격적인 확대 적용이 시도되어 1MW 급 단지까지 개발되었고, 설치 구조물 공급업체까지 출현하는 등 상용화 단계에 있으며, 여러 가지 작물에 대해 민간

중심으로 실증이 시도되고 있으며, 일부 제도화에 기여하고 있음

- 미국 및 유럽의 농업 공존형 태양광은 목초지 및 가축 방목장을 대상으로 이루어지고 있음
 - 미국의 NREL(National Renewable Energy Laboratory)은 2013년 Overview of Opportunities for Co-location of Solar Energy Technologies and Vegetation에서 태양광과 식생 재배의 공존, 농업 유휴지를 활용, 목초지를 대상으로 공존형 가능성을 검토하였음
- 농업과 공존하는 태양광에너지 기술 분야 특허는 중국과 일본이 다수를 차지하며, 미국, 유럽 등은 태양광에너지를 활용한 농업 및 재배 기술 관련 특허가 주를 이루고 있음
 - 영농형 태양광 분야 특허는 태양에너지를 활용한 농업 관련 특허가 다수이고 지지구조는 온실(Green house) 관련 특허가 다수임
- (품종: IR 747-B2-6) 일조방해(25~75%)에 따른 수량에 미치는 영향('76, 국제미작연구소)
 - 일조방해 시기별 수량감소: 생식성장기 37%, 등숙기 27%, 영양성장기 8%
 - 시기별 수량감소 요인: 생식성장기 m²당립수 감소 43%, 등숙기 등숙률 감소 25%
- 영농형 태양광 하부 벼 생육특성 연구('17, 일본 동경대)
 - 강차광: 이삭수 감소 35%, 단백질 함량 증가 1.3%, 완전미율 감소 9%
- 일본은 영농형 태양광 정책시작('13) 이후 증가 추세('17, 1269건 허가, 346ha)
 - 허가 농지면적은 1000m² 이하 65%, 1000~3000m² 24%로 대부분 작은 규모
- 영농형 태양광 시설의 차광율에 따라 식량 작물의 단위면적당 생산량이 낮아질 것으로 예상됨
 - Dupraz et al. (2011) 은 태양광 설비 하부에서 일사량의 75% 감소할 경우, 작물의 생육이 상당히 저해받을 것으로 제시하였음
 - Marrou et al. (2013)은 부분적으로 영농형 태양광 패널을 설치했을 때, 상추의 생산성이 노지 조건과 비교하여 약 80%에서 99% 수준의 수량을 얻은 것으로 보고하였음. 그러나, 포장 전체에 대해 패널을 설치하였을 때에는 60%에서 80% 정도의 수량을 얻을 수 있었음
- 영농형 태양광 시설 하부에서의 작물 생육은 작물과 환경과의 복잡한 상호작용에 의한 결과이기 때문에, 동일한 차광율 조건에서도 작물 생산성에 차이가 발생할 수 있음
 - Dupraz et al. (2011) 은 일사량이 부족한 조건에서는 다른 스트레스 요인을 완화하여 생산성의 감소가 최소화될 수 있을 것으로 예상하였음
 - Amaducci et al. (2018)은 작물 생육 예측 결과를 토대로 차광율이 20-25% 수준일 경우, 옥수수가 영농형 태양광 시설 하부에서 재배되더라도 노지에서의 수량과 유사하였고, 관개가 없는 조건에서는 오히려 영농형 태양광 하부에서 재배된 옥수수의 수량이 노지 조건보다 높았던 것으로 보고하였음
- Dinash and Pearce (2016; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024>)는 영농형 태양광 설비 하부에서 재배되는 상추의 수량이 노지조건에 비해 봄철에는 20% 정도의 수량이 감소하였으나 여름철에는 약 42% 가량 감소하여 계절에 따라 생산성의 차이가 발생할 수 있다는 것을 보고하였음
- 영농형 태양광 발전량과 작물 생산성 사이의 관계를 파악하여 태양광 발전 시설을 구축할 경우, 토지 이용 효율을 높일 수 있음
 - Trommsdorff et al. (2021)은 태양광 설비의 설치 각도, 높이 및 간격에 따른 태양광 발전량과 작물의 생산량을 추정하여 남향으로 약 30° 정도로 기울기를 가진 패널이 설치될 경우, 단위 토지 면적당 작물 생산성과 발전량을 동시에 높일 수 있을 것으로 보고하였음
- Feistel et al. (2021)은 영농형 태양광 시설 하부와 외부에서 라이시미터를 이용해 물소비량

을 관측한 결과 (1) 성장기에는 패널 아래 영역에서 받는 일사량을 크게 감소시켜 음영이 없는 대조구 영역보다 토양 온도와 증발산을 낮추지만 (2) 겨울에는 패널은 나가는 태양 복사를 가두어 토양 온도를 상승시켜 대조구 보다 패널 아래에서 더 높은 증발산을 초래함을 밝혔음

- Barron-Gafford et al. (2019)는 영농형 태양광이 식물 가뭄 스트레스 감소, 식량 생산 증가 및 태양광 패널 열 스트레스 감소를 포함하여 여러 부가적 및 시너지 효과를 제공한다는 것을 발견했으며, 폭염 및 가뭄과 관련된 환경 스트레스가 증가할 것으로 예상되는 미래에 식량 및 에너지 시스템의 탄력성 구축을 위해 활용될 수 있음을 주장함

3) 연구개발의 중요성

- “영농형 태양광 발전” 보급 정책은 태양광 발전에 의한 전기생산과 농촌 소득 증대에 따른 농촌공동화를 억제할 수 있는 사업
 - 농가는 FTA 비준에 의한 값싼 농산물의 해외발 유입, 50%가 넘는 농작물인 쌀의 소비감소 등에 따라 농촌의 경영상태는 날로 열악해지고 있는 실정으로 새로운 소득사업으로 적합
- 영농형 태양광 시험사업 추진되고 있으며, 정책 시행을 위해서 수량 및 품질 변화 기준, 영농 가이드, 기술지도 등 표준자료 마련 필요
 - 영농형 태양광 발전사업은 이제 겨우 걸음마를 내딛는 분야로 실용화를 위한 해결사항 많음
 - 특히 빛 부족으로 인한 농작물 생산성 감수를 보상하는 여러 가지 시스템 개발이 절대적으로 필요함
- 본 과제를 통해 영농형태양광 식량작물 시설유형별 적정 재배방법, 기존설치장소 실태조사, 지역.시설유형별 생산성 예측시스템, 친환경.스마트 재배기술 개발하고자 함

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

가. 영농형 태양광 하부 식량작물 재배 실태 조사 및 분석(2공동과제 : 순천대)

□ 영농형 태양광 하부 식량작물 재배 실태 조사 및 DB 구축

- 영농형태양광 하부 식량작물 재배 실태조사는 파루, 국립식량과학원, 한국전력 등에 의해 전국에 설치된 영농형 태양광을 대상으로 하여 태양광 유형(고정형, 고정가변형, 추적형 등), 설치 차광율, 설치규모, 재배 작물(벼, 발작물 등) 등을 조사하였고, 기타 재배방법(파종방법, 재식거리, 멀칭 등)과 작부체계 유형 등은 작물 생육조사 연구에서 조사하였음.
- 실태조사지의 영농형태양광 설치년도, 설치기관/업체명, 주소, 위도 및 경도는 표 1과 같으며, 또한 조사한 18개 지역의 태양광 유형과 각 시스템에 대한 자료를 구축함.

<표 1> 영농형 태양광 하부 식량작물 재배 실태 조사지

NO.	설치연도	기관/업체명	주소	위도	경도
1	2018	솔라팜(주)	충북 청주 오창읍 오창제방길	127°27'42"	36°41'55"
2	2018	전남농업기술원	전남 나주시 산포면	126°49'31"	35°01'41"
3	2018	순천동아태양광	순천시 승주읍 월계리	127°24'36"	35°01'37"
4	2019	전남농업기술원	전남 나주시 산포면	126°49'31"	35°01'41"
5	2019	전남농업기술원차산업연구소	전남 보성군 보성읍 용문리	127°05'58"	34°44'31"
6	2019	남동발전	경남 고성군 하이면 덕호리	128°07'22"	34°56'00"
7	2019	남동발전	경남 하동군 금남면 계천리	127°48'33"	34°59'49"
8	2019	남동발전	경남 함안군 군북면 명관리	128°20'16"	35°13'42"
9	2019	한국수력원자력	영광 흥농읍 진덕리	126°26'26"	35°24'38"
10	2019	동서발전	파주시 적성면 객현리	126°56'33"	37°58'16"
11	2019	보성농협조합장(개인)	보성군 보성읍 옥암리	127°02'55"	34°44'14"
12	2019	김○영	파주군 적성면 객현리	126°56'29"	37°56'49"
13	2019	김○영	파주군 적성면 객현리	126°56'29"	37°57'40"
14	2020	솔라팜	충북 청주 오창읍	127°27'14"	36°41'48"
15	2020	전남농업기술원	전남 나주시 산포면	126°49'31"	35°01'41"
16	2020	류○걸(개인)	괴산군 사리면 중흥리	127°38'10"	36°48'48"
17	2020	파주군농업기술센터	파주군 파평면 덕천리	126°52'43"	27°04'25"
18	2020	화성시농업기술센터	화성시 장안면 독정리	126°52'04"	37°55'48"

□ 영농형 태양광 하부 작물 생육 및 수량 분석

- 위의 영농형태양광 하부 실태조사에서 식량작물 감자와 참깨는 각각 1개, 콩은 2개, 벼는 3개 태양광 시설하에서 작물 생육 및 수량 연구를 수행하였으며, 영농형태양광 시설 조사지역의 설치연도 등의 구체적인 정보는 표 2와 같음.

<표 2> 본 연구 사용된 영농형 태양광 하부 작물생육 및 수량 분석 지역

설치연도	기관/업체명	주소	재배 작목
2018	솔라팜(주)	충북 청주 오창읍 오창제방길	감자
2018	순천동아태양광	순천시 승주읍 월계리	벼
2019	보성(개인)	보성군 보성읍 옥암리	벼
2020	전남농업기술원	전남 나주시 산포면	벼
2019	김○영(개인)	파주군 적성면 객현리	콩
2019	한국수력원자력	영광 흥농읍 진덕리	콩
2020	류○걸(개인)	괴산군 사리면 중흥리	참깨

- 영농형 태양광 하부 감자 생육 및 수량 연구에 사용된 시설은 위의 표와 같이 충주에 위치한 시설(차광율 31.6%, 발전량 99kW, 개별분산형, 모듈 일반형 36cell, 3×12타입)하에서 2021년 3월 29일 감자(품종; 수미)를 검정비닐로 멀칭된 포장에 20 × 100cm 재식거리로 파종하였으며, 다른 재배 방법은 농촌진흥청 표준재배법에 준하여 실시하였음.
 - 파종 후 수확은 2021년 6월 21일에 하였으며, 수확 후 초장, 줄기수, 경직경, 엽수, 엽장 및 엽폭을 조사하였고, 또한 주당 괴경수와 괴경중을 조사하였으며, 괴경중을 30g 이하와 이상으로 나누어 감자의 품질을 조사하였음.
 - 위의 조사항목을 관행구(미설치된 태양광 포장)에서 동일하게 조사하여 생육 및 수량 차이를 비교하였으며, 수량에 연차변이를 알아보기 위하여 2022년에도 2021년과 동일한 태양광 시설하에서 감자를 3월 24일에 파종하고 6월 21일에 수확량을 조사하였으며, 그 밖의 재배 방법은 2021년과 동일하게 수행하였음.
- 영농형 태양광 하부 참깨 생육 및 수량 연구에 사용된 시설은 위의 표와 같이 충북 괴산에 위치한 시설(차광율 31.6%, 발전량 99kW, 개별분산형, 모듈 일반형 36cell, 3×12타입)하에서 2021년 4월 28일 참깨(품종; 안산)를 배색무공비닐로 멀칭된 포장에 100 × 20cm 재식거리로 파종하였으며, 다른 재배 방법은 농촌진흥청 표준재배법에 준하여 실시하였음.
 - 파종 후 수확은 2021년 8월 10일에 하였다. 파종 후 7월 5일에 초장, 엽수 및 분지수를 조사하였고, 수확기에 줄기 길이, 줄기 직경, 분지수, 유효분지수, 삭길이, 넓이와 수와 삭당 종자수, 1,000립중, 1m²당 무게 등을 조사하였음.
- 영농형 태양광 하부 콩 생육 및 수량 연구에 사용된 시설은 위의 표와 같이 파주에 위치한 시설(발전량 150kW, 개별분산형, 모듈 일반형 32cell, 4×8타입)과 영광에 위치한 시설(발전량 97kW, 지주형, 모듈 일반형 72cell× 4개, 6×12타입)하에서 수행하였음.
 - 콩은 파주와 영광 태양광하부에 대원콩을 기계를 이용하여 파종하였으며, 파주 태양광의 경우 2021년 6월 9일에 재식거리 80 × 10cm로 파종하였고, 영광의 경우는 2021년 7월 3일에 재식거리 70 × 10cm로 파종하였음.
 - 파주와 영광 태양광 시설하에서 콩 파종 후 7월 20일과 8월 5일에 주경의 엽수와 절수와 줄기 직경을 조사하였고, 수확기에 주당 꼬두리 수와 종자수, 주당 무게, 100립중, 수량 등을 조사하였으며, 수량에 연차변이를 알아보기 위하여 2022년에도 2021년과 동일한 파주 태양광 시설하에서 동일한 방법으로 수행하였음.
- 영농형 태양광 하부 벼 생육 및 수량 연구에 사용된 시설은 위의 표와 같이 나주에 위치한 시설(발전량 107kW, 고정형, 모듈 72cell, 6×12타입), 보성에 위치한 시설(발전량 99kW, 가변식수동형, 모듈 일반형 36cell, 12×3타입)과 승주에 위치한 시설(발전량 100kW, 양축추적형, 모듈 일반형 119cell, 7×17타입)하에서 수행하였음(그림 2).



순천시 승주읍



보성군 보성읍



나주시 산포면

<그림 2> 영농형 태양광 시설 논 시험지

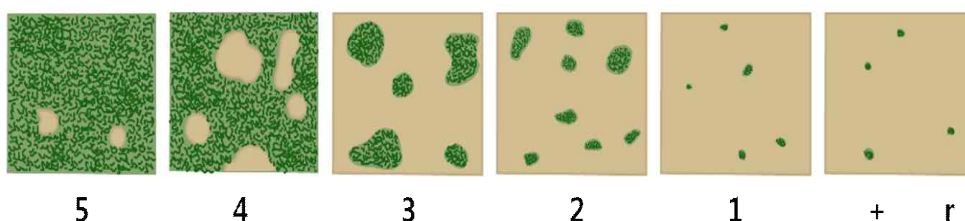
- 승주 태양광의 경우는 2021년 5월 26일에 파종 후 15일된 벼(cv. Saecheongmu) 유묘를 30 × 15 cm 재식거리로 기계이앙하였고, 보성 태양광의 경우는 2021년 5월 31일에 파종 후 18일된 벼(cv. 청무) 유묘를 30×15cm 재식거리로 기계이앙하였으며, 나주 태양광의 경우도 2021년 6월 15일에 15일 된 벼(cv. Ilmibyeo) 유묘로 30 × 16 cm 재식거리로 이앙하였음.
- 승주와 보성과 나주 태양광의 N-P2O5-K2O 시비는 각각 1ha당 60-30-40kg와 90-45-57kg 수준으로 시비하였음.
- 초장과 분얼수는 승주와 보성의 경우는 2021년 7월 9일에 나주 경우는 2021년 7월 26일에 조사하였다. 수확기 벼의 수량구성요소 주당 수수, 주당 영화수, 등숙율 및 천립중을 조사하였고, 수량은 각 시험구 크기(1m²)로 수확하여 조사하였으며, 병충해 및 잡초 방제를 위해 관행에 준하여 농약을 사용하였다. 수량에 연차변이를 알아보기 위하여 2022년에도 2021년과 동일한 방법으로 수행하였음.

□ 영농형 태양광 하부 식량작물 생리활성 변화

- 영농형태양광 하부에 엽록소 함량과 광합성 효율 실험을 위해 벼의 경우는 승주 태양광 시설하에서 콩은 파주 태양광 시설하에서 수행하였음.
 - 엽록소 함량은 SPAD-502 Plus meter (KONICA MINOLTA Co., Ltd., Tokyo, Japan)를 사용하여 SPAD값으로 측정하였다. 벼의 경우는 이앙 후 10일, 20일, 7월 7일, 8월 9일, 9월 9일에 측정하였고, 콩의 경우는 7월 4일, 8월 30일, 9월 27일에 측정하였음.
 - 광합성 효율(Fv/Fm, ETR)은 PAM-2500(Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Germany)을 사용하여 이앙 후 10일, 20일 및 80일에 측정하였음.
- 영농형태양광 하부에 토양 및 식물체에 양분변화는 벼의 경우는 나주, 승주 및 보성 태양광 시설하에서 콩과 감자의 경우는 각각 파주와 충주 태양광 시설에서 조사되었음.
- 벼, 감자 및 콩 태양광 하부 토양에 pH, 총질소, 유기물, 유효인산, 치환성 칼륨, 칼슘 및 마그네슘과 CEC 함량은 유묘기, 성숙기 및 수확기로 나누어 조사하였으나, 식물체에 이들 무기양분은 성숙기와 수확기로 나누어 조사하였음.
 - 토양 및 식물체 무기성분 분석은 한국농업기술진흥원에 의뢰하여 농촌진흥청의 토양 및 식물체 분석법(RDA 2011)에 준하여 분석하였음.

□ 영농형 태양광 하부 식량작물 재해, 병해충 및 잡초 발생 양상

- 영농형 태양광 하부에 잡초 발생은 벼의 경우 나주, 승주, 보성에서 콩과 감자는 각각 파주와 청주에서, 병 발생은 벼의 위의 3지역과 감자 청주에서 조사하였으며, 낙수 피해는 콩 태양광 시설하에서 조사되었음.
 - 잡초발생의 경우 벼는 7월 8일, 8월 9일 및 9월 19일, 콩은 7월 4일, 8월 30일, 9월 29일, 감자는 4월 19일, 5월 26일 및 6월 20일에 잡초의 초장, 생체중 및 잡초발생량(아래 그림 참조)을 조사함.



<그림 3> 잡초발생량 조사방법 r: 매우드물 / -1: 드물 / 1: 5%미만 / 2: 5~25% / 3: 25 ~ 50 / 4: 50~75 / 5: 75~100

- 병 발생의 경우 벼는 7월 8일, 8월 9일 및 9월 19일에 잎도열병, 키다리병 및 깨씨무늬별 등을 조사하였고, 감자의 경우는 5월 23일과 6월 20일에 진딧물과 더듬이 등을 조사하였으며, 콩 태양광 하부 강우에 의한 낙수 피해를 두둑 피해 등을 6월 23일에 조사함.

□ 영농형 태양광 하부 식량작물 품질, 영양성분 및 안정성 평가

- 승주, 보성 및 나주 영농형 태양광 하부에서 수확한 쌀 품질을 조사하기 위해 쌀의 백도, 취반미 윤기 등을 조사하였고, 외관 품위를 조사하기 위해서 완전미율, 분상질율, 쇠립율 및 피해립율을 조사함.
- 벼는 승주, 보성 및 나주, 콩은 파주와 영광, 감자는 청주 영농형 태양광 하부에서 수확한 쌀, 콩 및 감자에 조단백질, 조지방, 수분, 조회분 및 탄수화물을 한국농업기술진흥원에 의뢰하여 분석하였으며, 이들 쌀, 콩 및 감자에 Ca, Cu, K, Fe, Mg, P, Na, S 등 무기물 함량도 조사함.
- 이차화합물의 경우 총페놀, 총플라보노이드 및 DPPH radical 소거능력을 성숙기 식물체와 수확한 감자, 콩 및 쌀에 대해 분석하였으며, 영농형태양광 하부에서 수확한 농산물의 안전성을 평가하기 위하여 이들 종자에 함유된 중금속 비소, 카드뮴, 납 및 크롬을 한국농업기술원에 의뢰하여 분석함.

□ 영농형 태양광 하부 기상환경 분석

- 2021년 승주와 보성 벼 영농형 태양광 하부에 한달 동안 일사량과 PAR을 조사하였고, 1일 일사량, PAR, 기온 및 지온을 조사하였으며, 또한 시간별로 음영변화를 조사함.
- 2022년 경우는 파주 콩 영농형태양광 하부에 1일과 한 달동안 온도, PAR, 일사량 및 강수량을 조사함.
 - 영농형 태양광 하부 대기 온도는 온도 스마트 센서(S-THC-M002, Onset Co., MA, USA)를 땅위에 1.2m 높이 설치하였고, 토양 온도는 12비트 온도 스마트 센서(S-TMB-M0002, Onset Co., MA, USA)를 3cm 깊이에 설치하여 측정함.
 - 광합성 유효 방사(PAR, $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)는 PAR 스마트 센서(S-LIA-M003, Onset Co., MA, USA)를 사용하였고, 일사량은 Silicon Pyranometer 스마트 센서(S-LIB-M003, Onset Co., MA, USA)를 사용하여 측정하였다. 장비에 의해 측정된 모든 데이터는 10분 간격으로 기록됨.

□ 영농형 태양광 하부 식량작물 최적 환경 및 재배조건 도출

- 본 연구를 위해 벼의 경우 나주, 승주 및 보성, 감자 청주 및 콩 파주 영농형 태양광 하부에 2021년과 2022년에 유사한 재배조건으로 작물을 재배하여 생육 및 수량감소 정도를 조사하여 영농형 태양광 하부에 적합한 작물과 재배조건을 도출 및 적절한 태양광 시설 설계 방향을 제시하였음.

□ 통계분석

- 자료는 각 태양광 하부 포장률 3등분으로 나누어 조사하여 수집하였고, 관행구는 동일포장 내에 태양광이 설치되지 않은 포장으로 하였으며, 자료는 t-test($p=0.05\%$)로 분석하여 유의성 유무를 판단함.

나. 영농형 태양광 하부 맞춤형 식량작물 재배기술 개발(1공동과제 : 솔라팜)

□ 벼 재배 실험 : 벼 재식밀도별 생육 및 수량 변화 구명

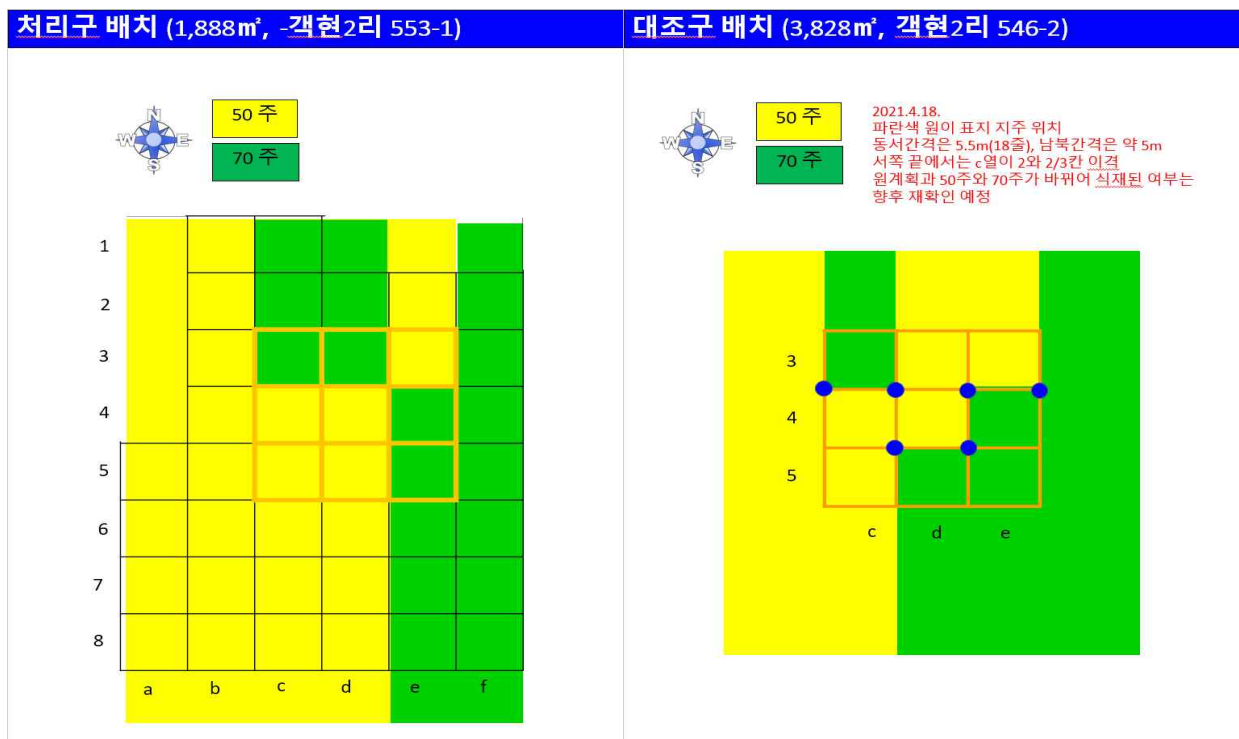
- 경기도 파주 적성면 객현 2리에 위치한 영농형 태양광 시설(분산고정형 (모듈 고정식), 표 3) 하부에 삼광벼를 이용하여 5월 18일에 기계이앙하였음.

<표 3> 파주 영농형태양광 시설 정보

구분	발전량 (kWh)	면적 (㎡)	시설차광률 (%)	모듈종류	모듈크기 (m)	기둥간격 (m)	활용시기
논	49.6	1,030	30	일반 32셀	1.35×0.68	5.0×5.0	1년차

- 재식밀도는 기존 계획 60, 37주/3.3㎡ 에서 70, 50주/3.3㎡로 변경하였음.

- 처리구의 경우 주변 환경의 영향을 최소화하기 위해 중앙부근의 9칸을 조사 대상으로 선정 하였으며, 대조구의 경우 구조물이 없으므로 별도의 지주를 설치하여 구분하여 실험구를 배치 하였음(그림 4).



<그림 4> 파주 벼 처리구 및 대조구 배치

- 시비방법 : N-P2O5-K2O는 9.0-4.5-5.7kg/10a로 시비하였으며, 질소 시비는 50(기비)-20(분얼비)-30(수비) 분시하였음.
- 다른 재배 방법은 농촌진흥청 표준재배법에 준하여 실시하였음.
- 작물 생육 조사는 주요 생육시기별 초장, 분얼수와 출수기, 성숙기를 생육조사 하였음.
- 수량 및 수량구성요소 조사 : 10월 26일 각 구획별 1㎡를 3반복으로 표본 추출하였음.



<그림 5> 파주 벼 처리구 및 대조구 모내기

□ 벼 재배 실험: 벼 시비방법별 생육 및 수량 구명

○ 1년차 실증단지의 부지 협소로 대조구 별도 운영 문제가 있었으므로, 실증단지를 처리구와 대조구를 동일한 부지에서 실증 가능한 곳으로 이동하기 위해 아래와 같이 변경하였음.

- 1년차 : 경기도 파주 적성면 객현 2리 553-1 (50kW)
- 2년차 : 경기도 파주 적성면 객현 2리 613-1 (100kW)

<표 4> 파주 영농형태양광 시설 정보

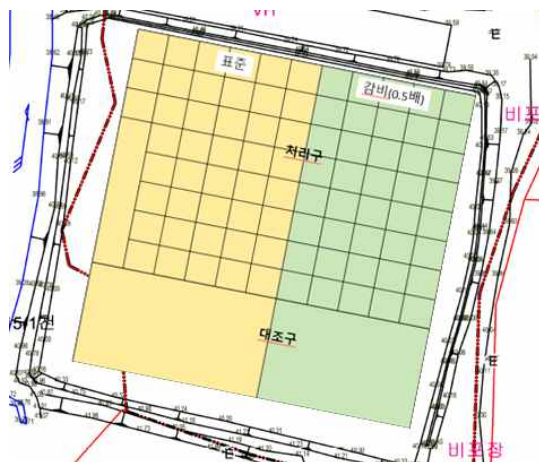
구분	발전량 (kWh)	면적 (m ²)	시설차광률 (%)	모듈종류	모듈크기 (m)	기둥간격 (m)	활용시기
논	49.6	1,030	30	일반 32셀	1.35×0.68	5.0×5.0	1년차
논	99.2	2,082	30	일반 32셀	1.35×0.68	5.0×5.0	2년차

○ 경기도 파주 적성면 객현 2리에 위치한 영농형 태양광 시설(분산고정형 (모듈 고정식)) 하부에 삼광벼를 이용하여 5월 10일에 기계이앙하였음.

○ 시비처리는 2 수준으로 하였음 : 표준, 감비(질소 0.5배)

– 표준시비량 : N-P2O5-K2O=9.0-4.5-5.7kg/10a,
질소 분시비율 50(기비)-20(분얼비)-30(수비)

○ 실험구 배치 : 표준 시비 구역과 감비 구역과 구분이 되도록 두둑을 쌓았으며, 논물의 유입·유출 또한 별도로 하여 비료 성분이 섞이지 않도록 하였음.



<그림 6> 파주 벼 처리구 및 대조구 배치

- 다른 재배 방법은 농촌진흥청 표준재배법에 준하여 실시하였음.
- 작물 생육 조사는 주요 생육시기별 초장, 분얼수와 출수기, 성숙기를 생육조사 하였음.
- 수량 및 수량구성요소 조사 : 10월 26일 각 구획 별 생육 모니터링 조사분 6포기를 3반복으로 표본 추출하였음.



<그림 7> 파주 모내기 (2년차)



- 감자 재배 실험 : 감자 재식시기별 생육 및 수량 변화 구명
- 실험위치 : 충북 청주시 청원구 오창읍 탑리 187-1
- 실험 대상 품종으로 수미를 이용함.
- 정식시기 : 기존 계획은 8월 20일 (표준), 8월 10일(조기)이었으나 8월 10일 (표준), 8월 1일 (조기)로 변경하였으며, 20cm 간격으로 재식함
- 실험구 배치는 그림 8과 같이 배치함.



<그림 8> 오창 감자 처리구 및 대조구 배치

- 재배방법 : 농촌진흥청 표준재배법에 준한 재배방법
- 생육조사 : 출현율, 생육시기별 초장 및 줄기수
- 수량조사 : 비상품성 50mm 이하 (소 무게, 개수), 상품성 50~64mm (중 무게, 개수), 특대 64mm 이상 (대 무게, 개수)
- 영농형태양광 시설 : 분산고정형 (모듈 가변식)

<표 5> 오창 영농형태양광 시설 정보

									
		일반형				투과형			
구분	발전량 (kWh)	면적 (㎡)	시설차광률 (%)	모듈종류	모듈크기 (m)	기둥간격 (m)	활용시기		
밭	97	2,810	31.6	일반 36셀 투과 36셀	1.98× 0.52	4.2×6.0	1-2년차		



<그림 9> 오창 감자밭 영농형 태양광 시설

□ 감자재배실험: 감자 재식시기별 생육 및 수량 변화 구명

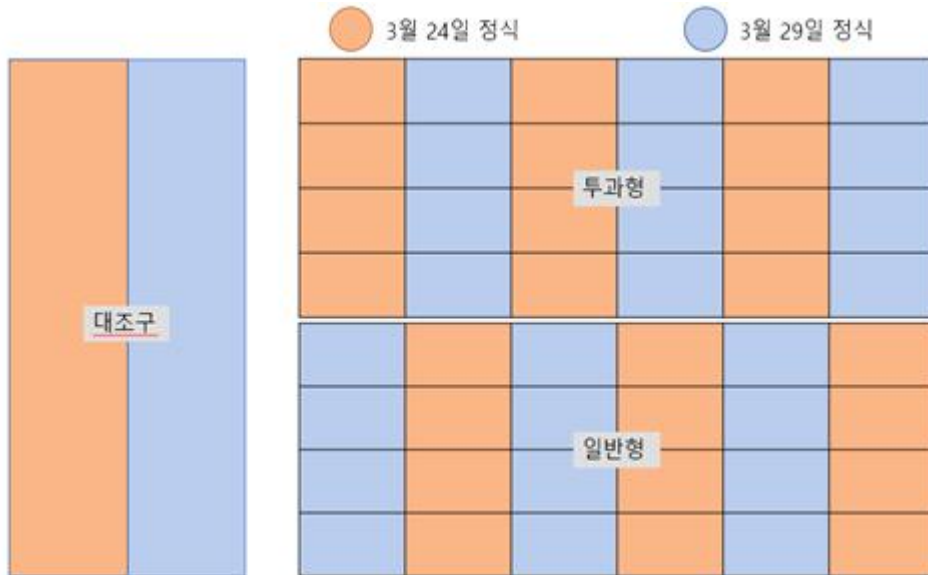
○ 위치 : 충북 청주시 청원구 오창읍 탑리 187-1

○ 품종 : 수미

- 정식시기 : 기존 계획은 3월 20일 (표준), 3월 10일(조기)이었으나 3월 29일 (표준), 3월 24일 (조기)로 변경하였음.

- 재식밀도 : 20cm

- 실험구 배치 : 그림 10과 같이 배치하였음.



<그림 10> 오창 감자 처리구 및 대조구 배치

- 재배방법 : 농촌진흥청 표준재배법에 준한 재배방법

- 생육조사 : 출현율, 생육시기별 초장 및 줄기 수

- 수량조사 : 비상품성 50mm 이하 (소 무게, 개수), 상품성 50~64mm (중 무게, 개수), 특대 64mm 이상 (대 무게, 개수)

- 영농형태양광 시설 : 분산고정형 (모듈 가변식)



<그림 11> 오창 감자밭 영농형 태양광 시설

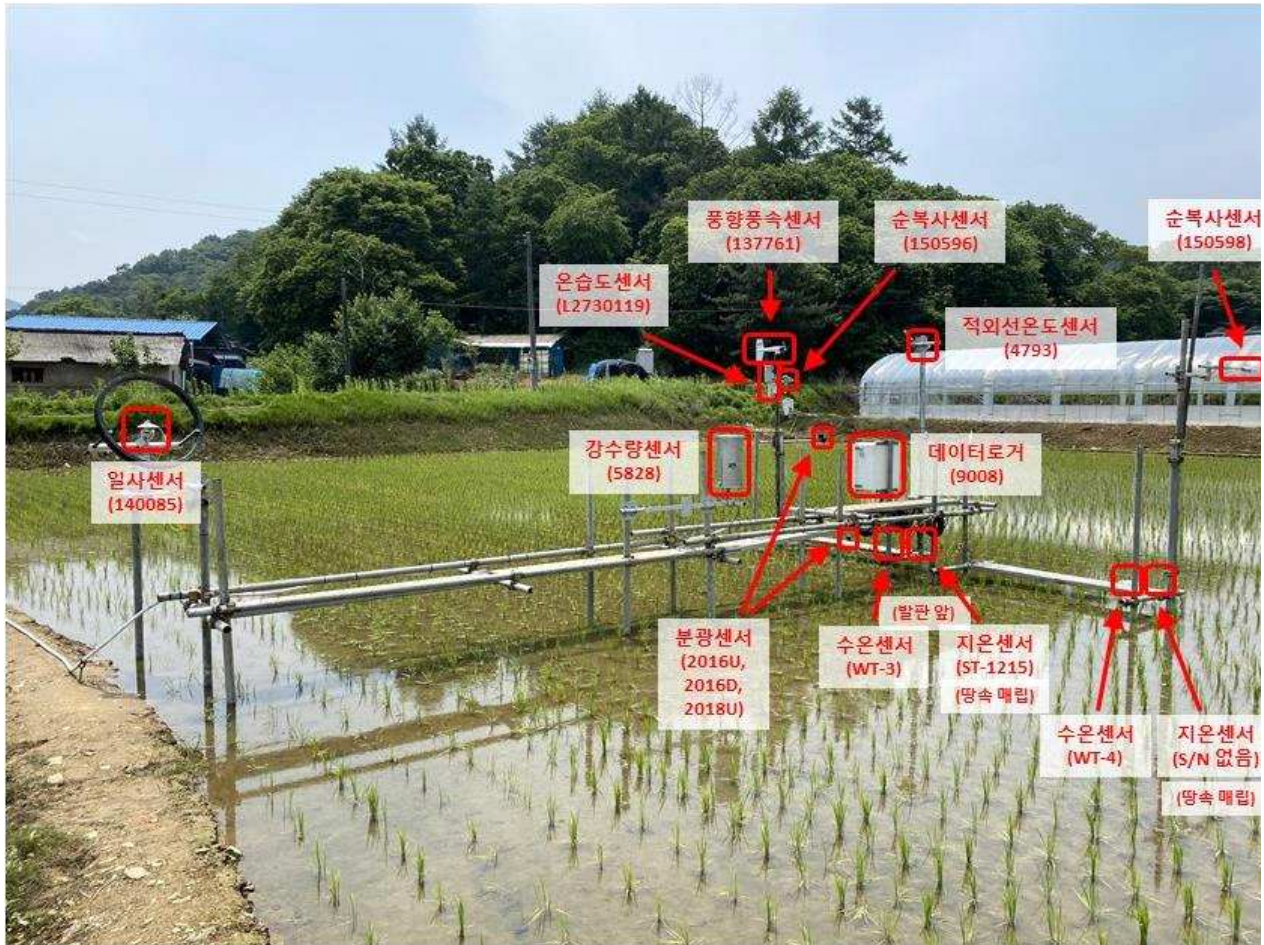
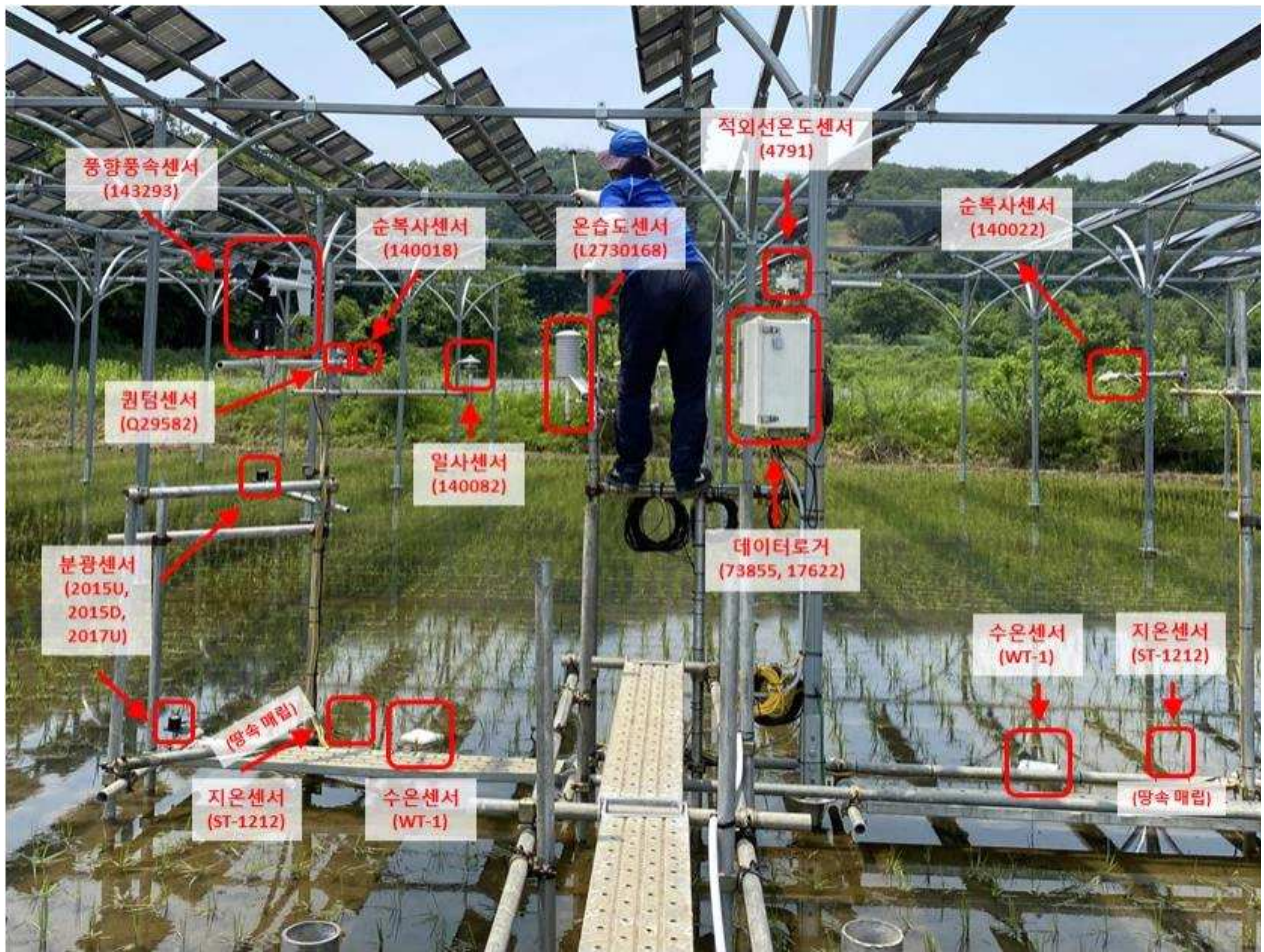
□ 스마트 식량작물 재배지원 장비 관리

○ 스마트 식량작물 재배지원 장비설치 및 관리 일정

- 설치 : 2021년 6월
- 관리 : 2021년 6월 ~ 10월
- 생육 모니터링(일주일에 약 1~2회) 후 정상작동 확인

<표 6> 1년차 설치 장비목록

설치장소	구분	센서명	Serial No.	비고	
파주 처리구 (태양광 하부)	데이터로거	CR1000	73855		
		AM16/32B	17622		
	순복사센서	CNR4		140018	
				140022	
				140082	
	일사센서	CMP3		140083	
				140084	
	퀀텀센서	Li-190	Q29582		
	온습도센서	HMP155	L2730168		
	수온센서	TCAV-L		WT-1	
				WT-2	
	지온센서	107-L		ST-1212	
				ST-1213	
	풍향풍속센서	05103-L		143293	
				2015U	
분광센서	SD-500		2015D		
			2017U		
적외선온도센서	SI-111	4791			
파주 대조구	데이터로거	CR3000	9008		
	순복사센서	CNR4		150596	
				150598	
	일사센서	CMP3	140085		
	퀀텀센서	Li-190	Q50201		
		PQS1	140517		
	온습도센서	HMP155	L2730119		
	수온센서	TCAV-L		WT-3	
				WT-4	
	지온센서	107-L	ST-1215		
			(없음)		
	풍향풍속센서	05103-L		137761	
				2016U	
	분광센서	SD-500		2016D	
				2018U	
적외선온도센서	SI-111	4793			
강수량센서	WDR-200				



<그림 12> 1년차 처리구 및 대조구 센서 설치 사진

□ 스마트 식량작물 재배지원 장비 관리

○ 스마트 식량작물 재배지원 장비설치 및 관리 일정

– 설치 : 2022년 6월

– 관리 : 2022년 6월 ~ 10월

생육 모니터링(일주일에 약 1~2회) 후 정상작동 확인

<표 7> 2년차 설치 장비목록

설치장소	구분	센서명	수량	비고
파주 처리구 (태양광 하부)	데이터로거	CR1000	1	
		AM16/32B	1	
	순복사센서	CNR4	2	
	일사센서	CMP3	3	
	퀀텀센서	Li-190	1	
	온습도센서	HMP155	1	
	수온센서	TCAV-L	2	
	지온센서	107-L	2	
	풍향풍속센서	05103-L	1	
	분광센서	SD-500	3	
	적외선온도센서	SI-111	1	
파주 대조구	데이터로거	CR3000	1	
	순복사센서	CNR1	1	
		CNR4	1	
	일사센서	CMP3	1	
	퀀텀센서	Li-190	1	
		PQS1	1	
	온습도센서	HMP155	1	
	수온센서	TCAV-L	2	
	지온센서	107-L	2	
	풍향풍속센서	05103-L	1	
	분광센서	SD-500	3	
적외선온도센서	SI-111	1		
강수량센서	WDR-200	1		

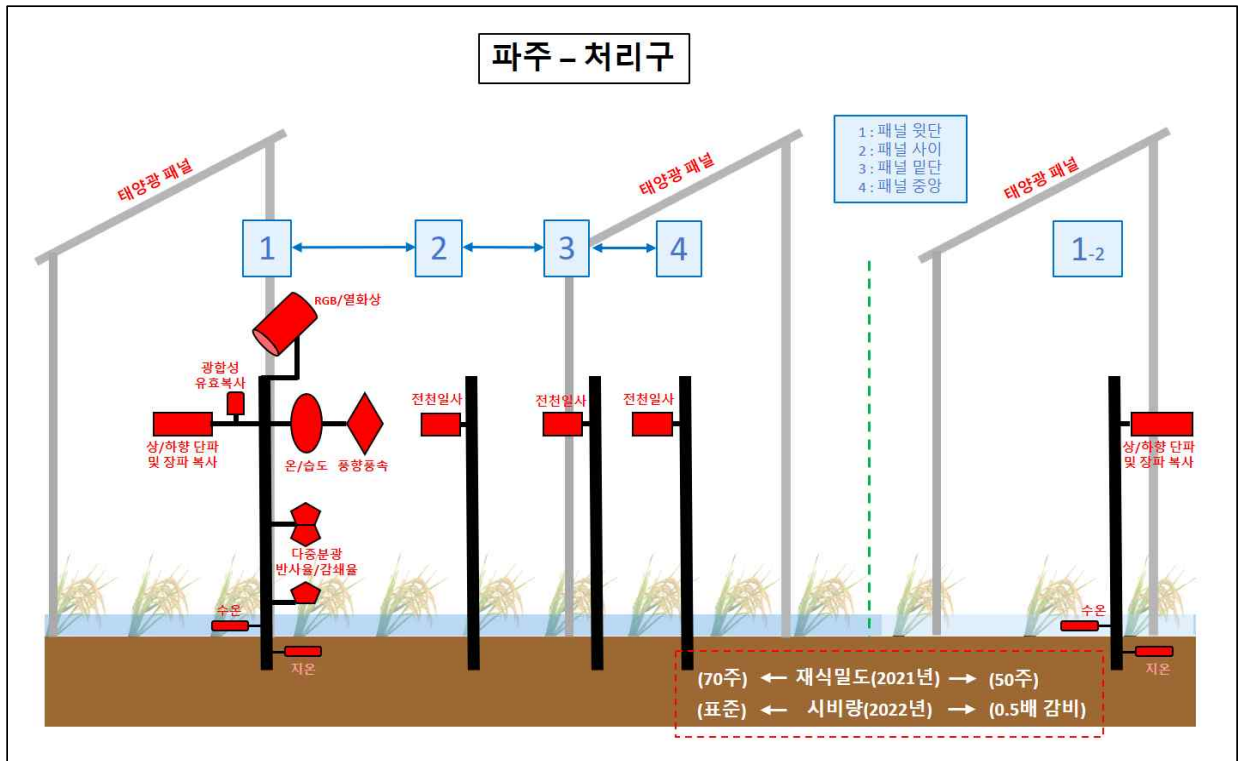


<그림 13> 2년차 처리구 및 대조구 센서 설치 사진

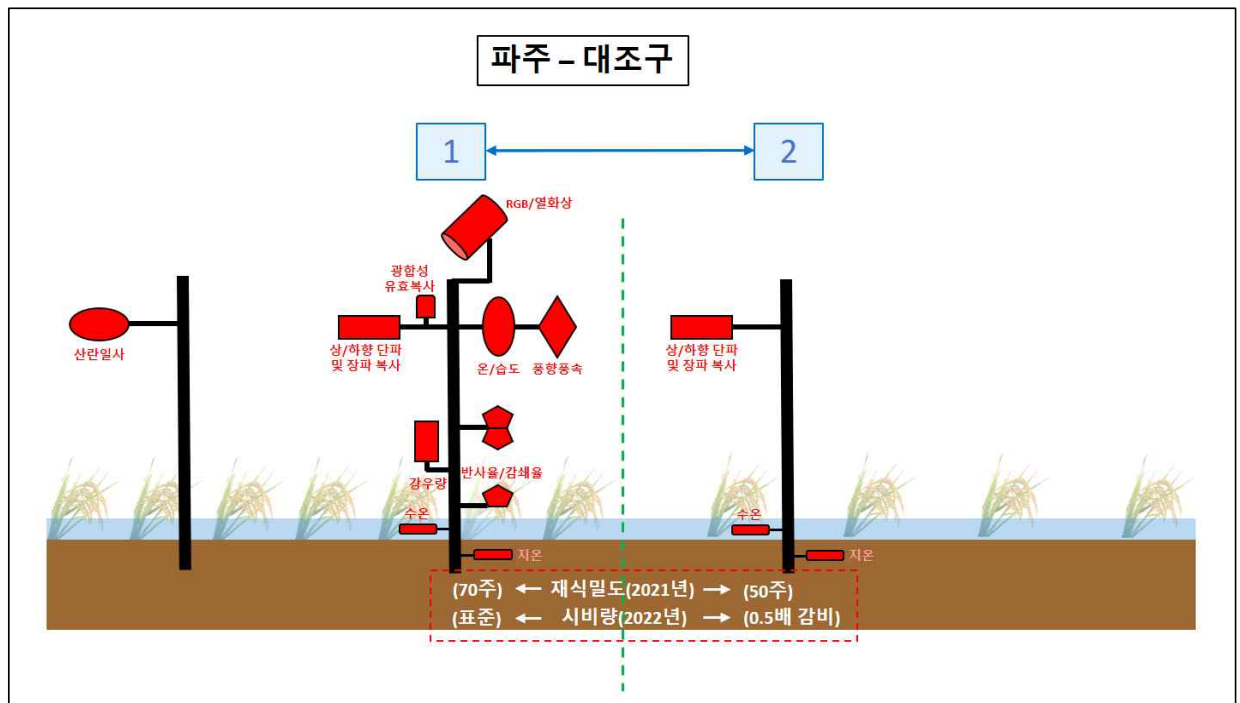
다. 영농형 태양광 활용 친환경 식량작물 재배지원 기술개발

(3공동과제 : 국가농림기상센터)

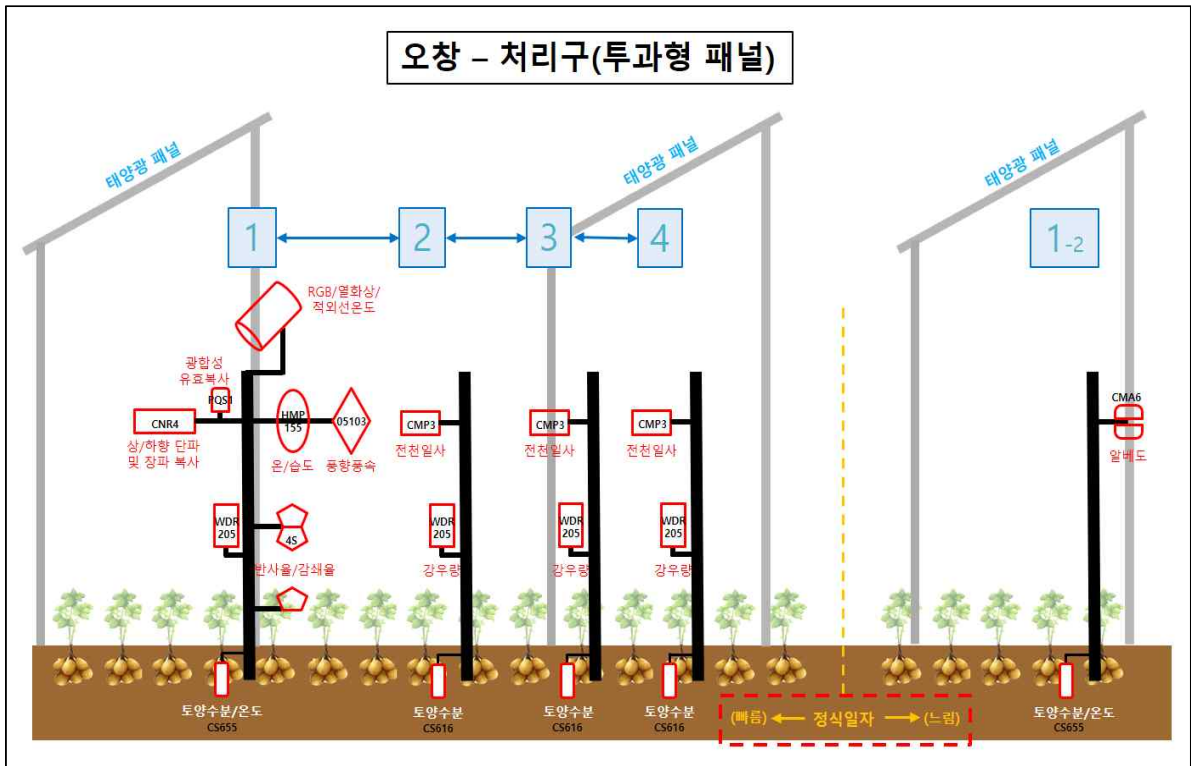
- 관측사이트: 2021년 시험지로 선정한 파주 논 영농형 태양광 시설은 경기도 파주시 객현2리 553-1 소재의 약 600평 면적의 50kW급 영농형 태양광 시설에 패널 형태는 일반형(3X12)으로 시험구가 구성되어 있으며, 이로부터 동쪽으로 50m 떨어진 위치에 약 600평 면적으로 대조구가 구성되어 있으며, 시험구의 재식밀도는 각각 70주, 50주로 구분되어 있으며 대조구 또한 동일하게 구분되어 있음.
- 2022년 시험지로 선정한 파주 논 영농형 태양광 시설은 경기도 파주시 객현2리 613-1 소재의 약 800평 면적의 100kW급 영농형 태양광 시설에 패널 형태는 일반형(3X12)으로, 본 필지 내 시험구, 대조구가 모두 포함되어 있으며, 시험구의 비료투입은 표준시비 구역과 감비 구역으로 구분되어 있으며 대조구 또한 동일하게 구분되어 있음.
- 청주 발 영농형 태양광 시설은 충북 청주시 청원구 오창읍 탑리 187-1 소재의 약 600평 면적의 100kW급 영농형 태양광 시설에 패널 형태는 3가지로 일반형(3X12), 양면투과형(3X12), 경량투과형(3X12)으로 구성되어 있으며, 본 필지 내 시험구, 대조구가 모두 포함되어 있음.
- 청주 발 영농형 태양광 시설은 충북 청주시 청원구 오창읍 탑리 187-1 소재의 약 600평 면적의 100Kw급 영농형 태양광 시설로 패널 형태는 3가지로 일반형(3X12), 양면투과형(3X12), 경량투과형(3X12)으로 구성되어 있다. 본 필지 내 시험구, 대조구가 모두 포함되어 있다.
- 자동기상관측장비: 영농형 태양광 시설 하부 논·밭(처리구) 및 외부 논·밭(대조구)에서의 농업환경을 연속적으로 측정하기 위해 자동기상관측시스템을 각각 두 곳에 설치하였으며 관측요소는 아래와 같음.
 - 상/하향 장/단파복사(Model CNR4, Kipp and Zonen B.V., Delft, Netherlands)
 - 온습도(Model HMP155, Vaisala Oyj., Helsinki, Finland)
 - 풍향 및 풍속(Model 05103-L, R.M. Young Company, Traverse City, MI, USA)
 - 수온(Model TCAV-L, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA), 지온(Model 107_L, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA) 등을 포함하고 있음.
- 자료기록기(Models CR3000 and CR1000, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA)를 통해 30초당 1회씩 측정되며 측정값은 10분 평균하여 저장되며, 일반적인 관측값을 얻기 위해, 논 안쪽으로 들어갈 수 있는 발판을 설치하고 이를 이용해 관측 장비를 설치하여 논 내부의 환경을 측정하도록 하였음.
- 일사의 경우 태양광 패널 위치에 따른 시설 하부의 공간 비균질성을 파악하기 위해 패널 윗단, 사이, 밑단, 중앙 바로 아래쪽에서 관측을 수행하였음.



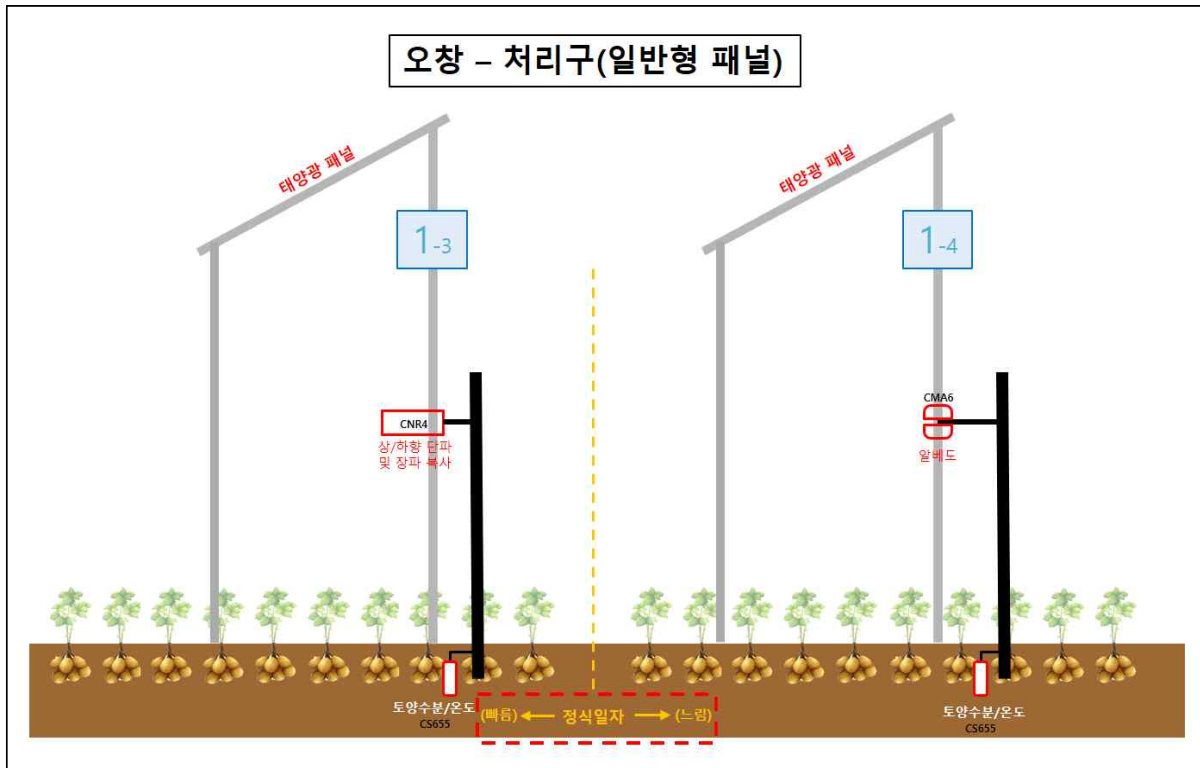
<그림 14> 파주 처리구 관측시스템 구성도



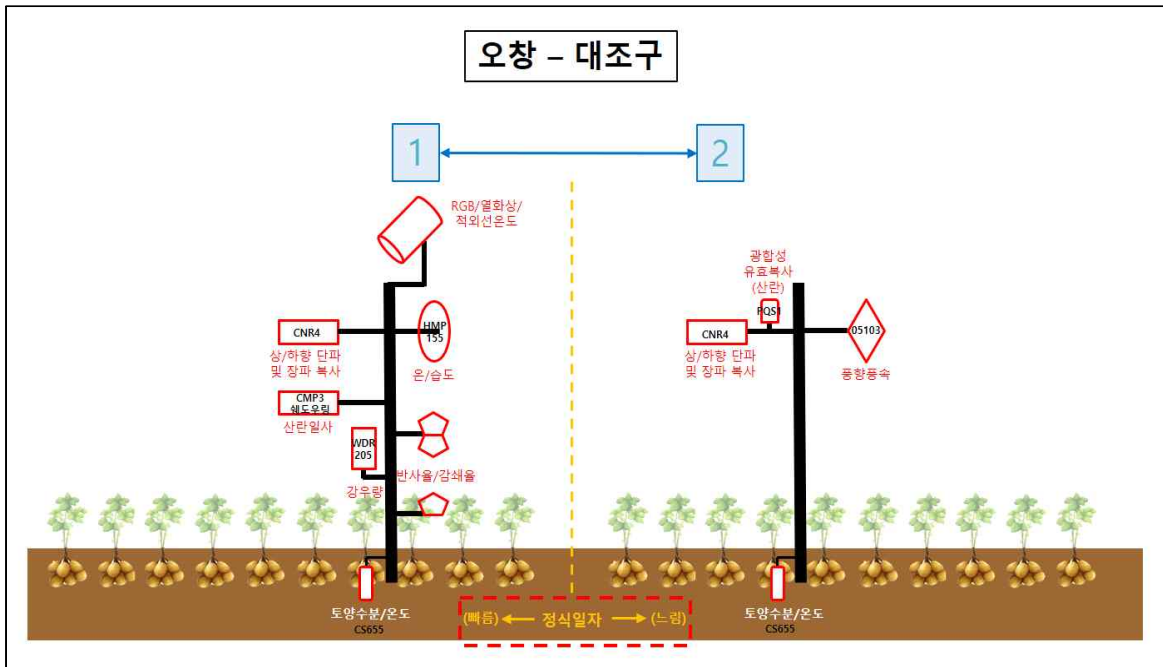
<그림 15> 파주 대조구 관측시스템 구성도



<그림 16> 오창 처리구 관측시스템 구성도(투과형 패널)



<그림 17> 오창 처리구 관측시스템 구성도(일반형 패널)



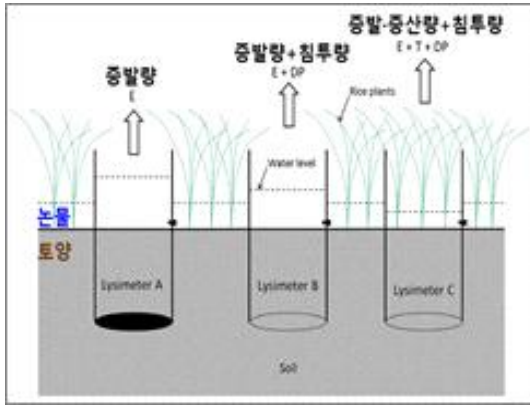
<그림 18> 오창 대조구 관측시스템 구성도

- 에디 공분산 시스템: CO₂/H₂O/CH₄ 플렉스 관측을 위해 시험구와 대조구의 경계에 에디 공분산 기반의 관측시스템을 구축하였다. 장비 구성은 초음파 3차원 풍향 풍속계(Model CSAT3, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, USA), CO₂/H₂O 분석기(Model LI-7500, LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA), CH₄ 분석기(Model LI-7700, LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA) 등으로 구성되어 있으며 1초당 10회 주기로 측정을 수행하였음.



<그림 19> 파주 관측지에 설치된 에디 공분산 시스템

- 영농형 태양광 하부의 물 소비 특성 구명을 위한 센서 및 시설 체계 구축 및 분석
- 라이시미터: 물 소비량을 구성하는 각 수문요소(증발, 증산, 침투)를 파악하기 위해 눈에 최적화된 미니 라이시미터를 설치하고 유입/유출량, 물수위 모니터링을 수행하였음.
- 세 가지 타입을 한 세트로 구성하여 실험구(자세한 내용은 다음 장의 관측 구역의 분할 참고)마다 1세트씩 총 4세트를 설치하였음.
- 볼밸브를 부착하고 평상시 열린 상태로 두어 눈물이 라이시미터 내부로 통하게 했으며, 측정시에는 잠근 상태를 유지하고 수위 변화량을 육안으로 관측하여 기록하였음.



<그림 20> 세 가지 타입 미니 라이시미터



<그림 21> 미니 라이시미터 설치 모습

□ 영농형 태양광 하부의 토양 탄소 및 온실가스 배출량 관측 체계 구축 및 분석

- 스마트 챔버: 논에서 발생하는 온실가스 배출량을 구명하기 위해 미국 Licor 사의 8200-1S 스마트 챔버와 LI-7810 휴대용 기체분석기를 조합하여 측정이 이루어졌으며, 관측된 데이터의 관리 및 플럭스 계산에는 SoilFluxPro 소프트웨어가 활용되었음.



미국 Licor 사의
Soil Gas Flux Systems



8200-1S Smart Chamber

- 직경 : 20 cm
- 챔버 부피 : 4244.1 cm³
- 관측 면적 : 317.8 cm²
- 온도센서(-20 to 50 °C), 기압센서(50 to 110 kPa)
- GPS, Wifi 내장



LI-7810 CH₄/CO₂/H₂O Trace Gas Analyzer

- 측정 방식 : OF-CEAS (Optical Feedback – Cavity Enhanced Absorption Spectroscopy)
- 측정 속도 : 1 sample per second (1 Hz)
- CH₄ 측정 범위 : 0 to 100 ppm
- CO₂ 측정 범위 : 0 to 10,000 ppm
- H₂O 측정 범위 : 0 to 60,000 ppm

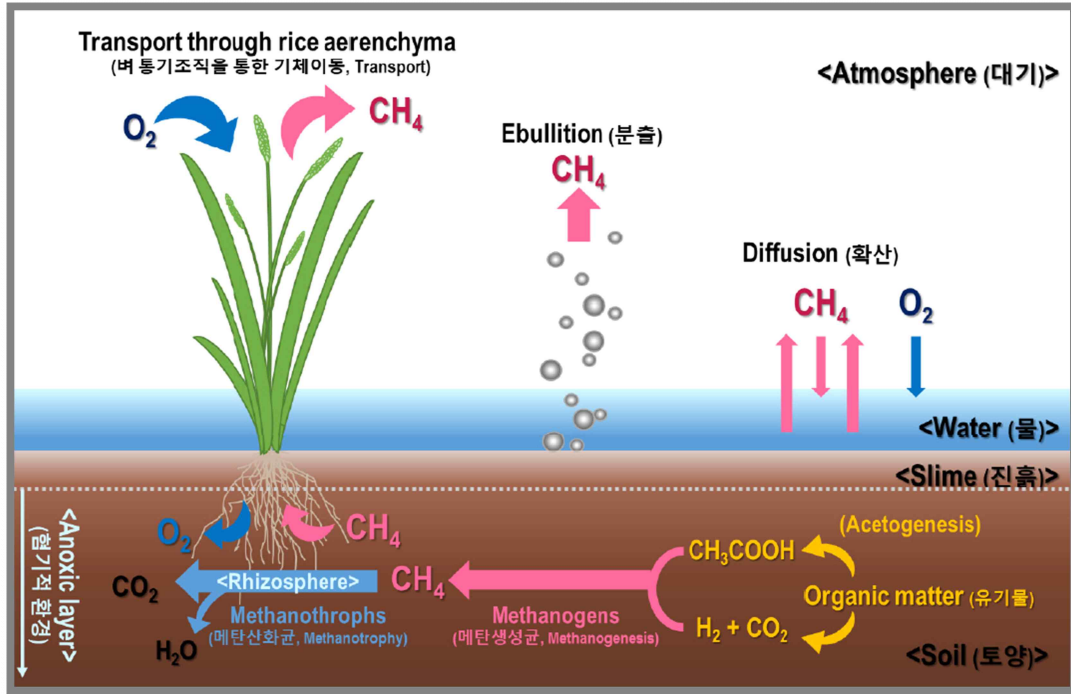


SoilFluxPro™
The Ultimate in Data Processing Simplicity

관측 데이터의 관리 및 플럭스 계산에 활용된 소프트웨어

<그림 22> 관측에 사용된 장비 및 소프트웨어

- 메탄 생성균은 산소가 부족한 환경에서 유기물을 분해하여 메탄을 생성하며, 벼를 재배하는 담수 논은 대표적인 산소 부족 환경으로 메탄의 주요 배출 경로는 벼의 통기조직을 통한 이동, 분출(ebullition), 지면과 수면에서의 확산(diffusion) 등으로 나타났음.



<그림 23> 벼 재배 논에서의 메탄 생성 및 배출 (권효숙 외, 2022)

- 성장하는 벼 높이에 맞춰 관측이 이루어질 수 있도록 별도의 투명아크릴 collar를 제작하여 활용하였으며, 이 collar는 상단과 하단으로 분리되며, 상단부는 직경 213.5 mm, 길이 1 m의 원통형으로 내부에는 공기의 원활한 순환을 위해 3쌍의 팬을 부착하였음.
- 하단부는 벼 뿌리의 생장에 지장이 없도록 다수의 타공을 한 후 논바닥에 매설하였음.



<그림 24> 관측에 사용된 아크릴 collar의 형태와 현장 설치 모습

- 영농형 태양광 시설 설치 유무와 시비량에 따라 다음과 같이 파주 관측지를 4개의 구역으로 나눈 뒤, 구역마다 챔버 관측을 위해 4개의 관측구(collar)를 매립하였으며, 이 중 3개는 벼가 심어진 상태, 하나는 비어있는 상태로 구성하였음.



<그림 25> 관측 구역의 분할

- 재배 전·후(파종·수확)의 토양 탄소 저장능을 조사하기 위해 표층으로부터 10 cm 깊이에서 토양 시료를 채취하여 유기물 함량(%)과 용적밀도(g/cm^3)를 측정하였으며, 토양 시료는 각 구역별로 3개씩 채취한 후, 서울대학교 농생명과학공동기기원에 의뢰하여 분석하였음.

라. 영농형 태양광 활용 스마트 식량작물 재배지원 기술개발

(3공동과제 : 국가농림기상센터)

□ 영농형 태양광 하부 작물의 생리·생육 관측 자료 수집 및 분석

○ 자동생육관측장비: 본 연구는 RGB 카메라를 이용하여 작물의 생육을 준실시간으로 관측하고 열화상 카메라를 이용해 태양광 하부와 대조구에서 자라는 작물의 표면온도를 표준시아 범위에서 관측하였음.

– RGB 카메라(Raspberry Pi Camera V2.1)

– FLIR 사의 Lepton 3.5 모델(FLIR Systems Inc., Boston, MA, USA)

– 열화상 카메라는 초소형 컴퓨터(Model Raspberry Pi 4, Raspberry Pi Foundation, Cambridge, UK)에 부착해 사용하였음.

○ 라즈베리 파이는 매일 06~19시(지방시) 사이에 1시간 간격으로 실행되어 RGB와 열화상 이미지를 촬영하도록 하였으며, 또한 전력 소모를 최소화하기 위해 전원관리보드(Witty Pi 3, UUGear, Czech Republic)를 추가로 장착하여 전원이 부족한 환경에서도 사용할 수 있도록 하였음.

관측용 카메라 구성 및 사양 정보 (표)



- Raspberry Pi3 Model B+ (Raspberry Pi Foundation, Cambridge, UK)

·Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC @1.4GHz

·1GB LPDDR2 SDRAM

·2.4GHz and 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE

·4 USB 2.0 ports

·5V/2.5A DC power input

- Camera module v2.1, Raspberry Pi

·Still resolution: 8 Megapixels

·Sensor: Sony IMX219

·Sensor resolution: 3280 × 2464 pixels

·Optical size: 1/4"

- FLIR Lepton 3.5, FLIR Systems Inc.

·Thermal spectral range: 8 μm – 14 μm

·Scene temperature range: -10 – 140°C

- PureThermal 2, GroupGets LLC.

- Witty Pi 3 (UUGear, Prague, Czech Republic)

·Micro controller: ATtiny841

·Realtime clock: DS3231SN

<그림 26> 작물생육 관찰용 카메라 정보

- 작물생육모형 구동 지원을 위한 영농형 태양광 시설 하부 관측자료 수집 및 분석
- 작물 생육 기간 중 분광반사·흡수 특성 관측을 위해 4파장대(Red, Blue, Green, Near infra-red) 빛의 세기를 측정할 수 있는 SD-500(Soldan) 센서를 설치하였음.
- 각 처리구 별로 1쌍의 센서가 작물 위에 상향, 하향 방향으로 설치되어 작물 표면에서의 파장대별 반사도를 측정하도록 설치하였으며, 추가적으로 작물 아래 부분에 상향 방향으로 1개의 센서를 설치하여 작물에 의한 파장대별 빛의 흡수도를 측정하였음.
- 설치에 앞서 동일한 광조건에서 모든 센서가 같은 값으로 측정하도록 센서 보정 작업을 진행하였으며, 작물 위쪽 상향 센서를 기준으로 하향 및 작물 하부 센서 값을 일치시키는 보정식을 로거 프로그램 내에 포함시켜 자동으로 보정된 값을 출력하도록 설정하였음.
- 모든 센서는 10분 간격으로 측정되지만 분석에서는 30분 간격의 데이터를 사용하였으며 빛이 없는 야간 측정값을 제외하기 위해 오전 8시부터 오후 5시 30분 자료만을 분석에 사용한 뒤 평균하여 일평균 반사도 및 흡수도를 산출하였음.
- 이렇게 일평균된 반사도는 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI), 개량식생지수(Enhanced Vegetation Index, EVI), 적외반사식생지수(NIRv)와 같은 식생지수와 함께, 최근 총일차생산량과 높은 상관성을 보인다고 보고된 NIRvP를 계산하는데 사용되었으며, 계산식은 아래와 같음.

$$NDVI = \frac{NIR_{Ref} - Red_{Ref}}{NIR_{Ref} + Red_{Ref}}$$

$$EVI = 2.5 \times \frac{NIR_{Ref} - Red_{Ref}}{NIR_{Ref} + 2.4 \times Red_{Ref} + 1}$$

$$NIRv = NIR_{Ref} \times NDVI$$

$$NIRvP = NIRv \times PAR$$

- 광합성 측정기: 작물의 광합성 특성 관측을 위해 LI-6400 휴대용 광합성 측정 시스템(LI-COR)을 이용하였으며, 생육기간 중 광합성 특성의 변화 경향 분석을 위해, 처리구별로 1년 차에는 2-3회에 걸쳐, 2년 차에는 처리구별로 6-7회에 걸쳐 광합성 특성을 측정하였음.
- 측정은 처리구별 3-5개체를 선정하여, A-Ci 곡선 및 광반응(light response) 곡선을 측정하였으며, R 언어의 plantecophys 패키지를 사용하여 최대카르복실화율(Vcmax), 최대전자전달속도(Jmax) 및 최대 광합성율(Amax)를 계산하였음.

마. 3D 모델을 이용한 영농형 태양광 하부 수광량 예측(주관과제 : 서울대)

□ 수광량 관측 및 기상자료수집

- 광추적 기반 수광량 예측 시스템 검증을 위해 전주에 위치한 실험농장(35.50°N, 127.02°E)에 설치된 영농형 태양광 시설에서 일사량을 측정하였음.
 - 영농형 태양광 시설은 2019년 5월 10일에 설치되었고, 15개 블럭으로 구성되어 있으며, 시설 크기는 18m x 42m 임.
 - 영농형 태양광 시설은 남쪽 방향으로 30oC 방향으로 설치되어 있으며, 태양광 패널은 31oC의 각도로 4m 높이에 설치되었음.
 - 수광량 예측값의 검증을 위해 영농형 태양광 시설 하부에 지상에서 1.2m 높이, 15개 지점에 설치된 Quantum 센서(SQ-110, Apogee instruments Inc., UT, USA) 일사량을 수집하였음.
 - 센서를 이용하여 측정한 일사량은 광합성 유효 광량자속밀도 (PPFD, Photosynthetic Photon Flux Density)이기 때문에 예측 시스템에서 사용되는 전천일사량(global irradiation, GPV)으로 아래와 같은 방법으로 변환하였음(Jones 2014, 3rd edition; plant and microclimate):

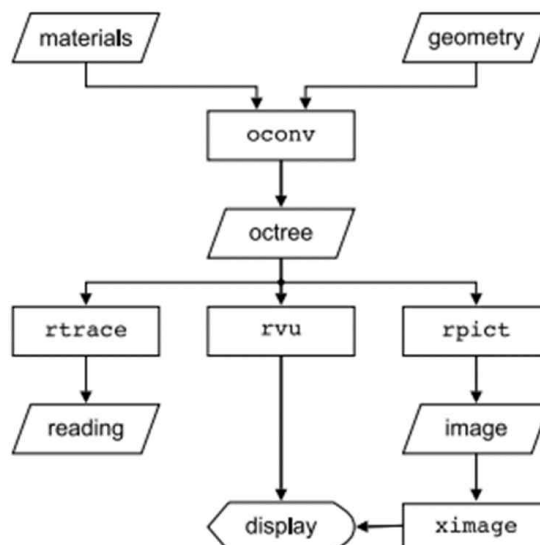
$$GPV = \frac{PPFD}{4.57} \times 3600 \times 10^{-6} \times 2$$

- 광 추적 시스템에 사용되는 입력자료인 전천일사량, 기온, 상대습도, 및 강수량은 영농형 태양광 시설 인근에 위치한 기상청 종관기상 관측소에서 수집하였음.

□ 3D 모델을 이용한 수광량 예측 시스템

- 광추적 모의 도구 Radiance

- 본 연구에서는 광추적 도구로 역광선 추적 기법(backward ray tracing)을 활용하여 가상환경에서 실내외 조도(global illumination)를 계산 할 수 있는 툴인 Radiance (Ward, 1984)를 이용하였음.

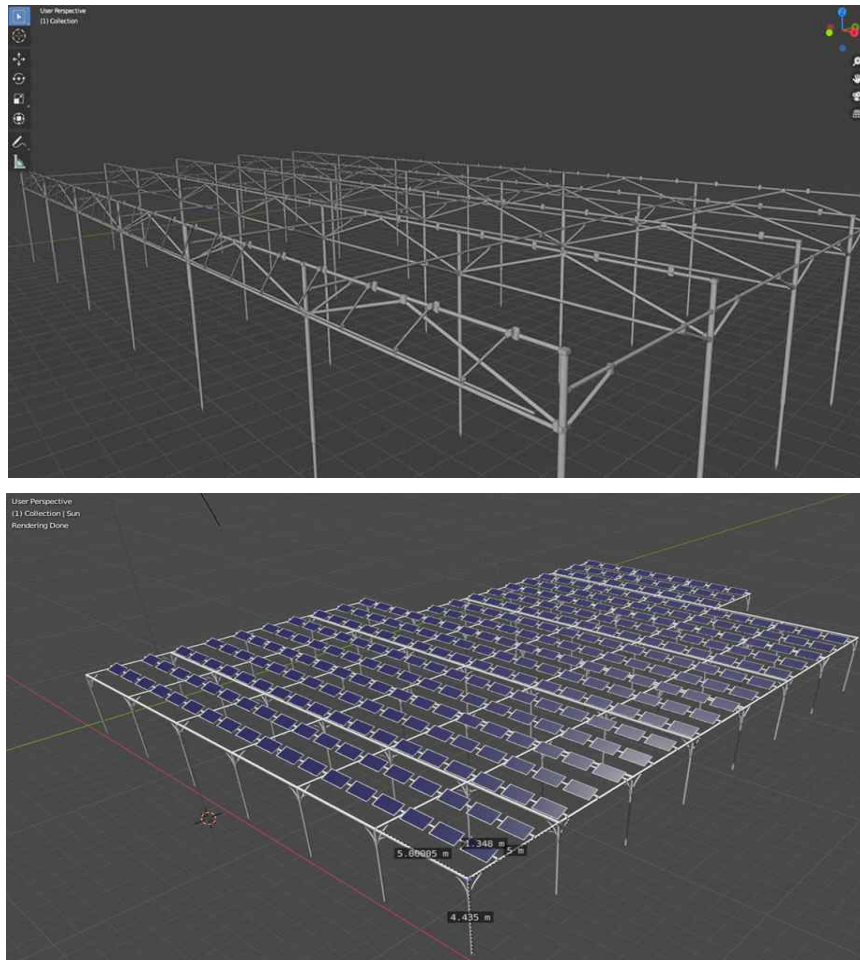


<그림 27> Radiance rendering system의 메인 구성 시스템 (Jacobs, 2012)

- Radiance은 아래와 같은 도구들로 구성되어 있음.
- Obj2rad 도구는 3D 묘사에 일반적으로 사용되는 Wavefront 파일(obj 형식)을 Radiance 씬 묘사 파일 (Radiance scene description, rad 형식)로 변환
- Oconv 도구는 Radiance 씬 묘사 파일(rad 형식)를 팔진트리(octree) 파일을 변환
- Epw2wea 도구는 표준 EnergyPlus(EPW) 형식의 파일을 읽고 직선광과 산란광을 추출하고 gendaymtx 도구의 입력 파일(wea 형식)을 생성
- Perez sky model을 기반으로 구현되어 있는 gendaymtx 도구를 사용하며 wea파일을 이용하여 mtx파일을 생성
- rfluxmtx 도구는 가상 환경의 하늘 밝기(sky brightness) (Ward & Shakespeare, 2003) 광자의 이동을 예측하기 위해 사용
- 가상공간에서 조도를 계산하기 위한 rcontrib 등의 개별적인 도구들이 포함
- contrib tool은 가상공간에서 외부 조도(Ambient illumination)를 공헌 계수(contribution coefficients)를 계산하는데 사용

○ 영농형 태양광 3D모델

- 애니메이션, 시각적 효과, 예술, 3D 프린터 모델, 모션 그래픽, 인터랙티브 3D, 가상현실, 게임 등에 이용되는 오픈소스 3D 모델 프로그램 Blender를 이용하여서 영농형 태양광 시설을 3D 형태로 구현하였음.



<그림 28> 영농형 태양광 시설 3D 모델

- 본 연구에서는 영농형 태양광 시설에 대한 설계도를 이용하여 태양광 패널의 방향과 각도 등을 고려하여 3D 모델을 구축하였으며(그림 28), 복잡한 형태의 영농형 태양광 설비를 가상 환경에서 구축하기 위해 태양광 패널과 지지대를 나타내는 3D 모델들을 각각 생성하였음.
- 개별 구성요소들을 나타내는 3D 모델들은 일반적으로 3D 정보를 저장하기 위해 사용되는 wavefront 형식의 파일로 생성되었음.
- 개별 구성요소를 나타내는 3D 모델들을 공간적으로 배치하여 복잡한 형태의 구조물을 가상 환경에서 구축할 수 있으며, 영농형 태양광 설비를 구성하는 태양광 패널과 지지대를 나타내는 개별적인 rad 파일들을 가상 공간에서 배치하여 본 연구에 사용되는 영농형 태양광 시설을 구축하였음.

○ 수광량 예측 시스템

- 영농형 태양광 시설에 대한 3D 모델과 ray tracing을 결합하여 영농형 태양광 시설 하부의 광량을 모의 할 수 있는 수광량 예측 시스템을 구축하였음.
- Ray tracing 오픈소스 모델인 Radiance가 결합된 광량 예측 시스템을 이용하여 영농형 광 시뮬레이션은 벼의 생육 기간인 6월 중순으로부터 10월 중순까지 하였으며, 산란광을 예측을 하는 것은 중요함.
- Trommsdorff et al. (2021)는 영농형 태양광 아래에서 태양 일사량을 계산 하기 위해서 직 달일사와 산란일사를 입력 값으로 사용을 하였다. 하지만 산란일사 자료를 항상 이용 할 수 없는 경우에서 사용 할 수 있기 때문에 전천 일사를 이용하여서 산란일사를 계산하는 것은 이점이 있음.
- 시간별 산란광 평가는 Boland et al. (2008)에 의해 제안된 경험적 모델을 사용함.
- 시간별 산란일사(hourly diffuse radiation, f_t) 아래 식을 통해서 계산

$$f_t = G \times D_t$$

- G 는 기상대에서 측정된 전천 일사(global irradiation, D_t)의 산란광 부분을 의미함
- D_t 의 값은 아래 식을 이용하여 계산(Boland et al. 2008):

$$D_t = \frac{1}{1 + e^{-5.00 + 8.6Kt}}$$

- Kt 는 시간별 청명도 계수(hourly clearness index) 이며 아래와 같이 결정됨.

$$K_t = \frac{G}{H_o}$$

H_o 는 대기 외 일사량(extraterrestrial solar radiation)(Al-Rawahi et. al., 2011) :

$$H_o = \frac{24 \times 3600 \times I_{sc}}{\pi} \left[\left(1 + 0.033 \times \cos\left(\frac{360 \times day}{365}\right) \right) \left(\cos\phi \times \cos\delta \times \sin Ws + \frac{\pi \times Ws}{180} \sin\phi \times \sin\delta \right) \right]$$

- ϕ 는 위도, δ 는 태양의 적위, Ws 는 일몰시 태양의 시간각, I_{sc} 는 태양상수 1367 W/m².
- 시스템 가상환경의 하늘은 패치들로 나누어 졌있으며, 총, 144 패치들을 밝기 계산하기 위해서 사용됨.
- 대기에 대한 추정은 영농형 태양광 하부 광 모의시 정확도에 심대한 영향을 줌
- 전천 조도 상태는 대기 수분(precipitable water)를 잘 고려 할 때 더욱 잘 모의를 할 수 있으며, Radiance 프로그램은 대기 수분을 예측 할 때 이슬점 온도 계수 값에 의존하므로 이로 인하여 예측시 왜곡이 일어 날 수 있으므로, Radiance의 소스코드를 전천일사와 이슬점 온도를 이용하여 태양일사를 추측하기 위해서 수정함.

- epw2wea 도구는 전청조도 계산을 위한 직접 및 확산 광 대신 전청일사를 사용 할 수 있게 수정되며, 출력파일에 시간별 이슬점 온도(Dew point temperature)도 포함 할 수 있게 수정이 됨.
- gendaymtx 툴도 epw2wea 툴에 의해 생성된 기상파일에 포함된 이슬점 온도 자료를 읽기 위해 수정됨.
- 주어진 ft 값들을 결정하는 도구 또한 시간별 전청 일사자료를 이용해서 수정됨.
- 일사(Solar radiation)는 조명에서 태양복사 또는 발광효율(luminous efficacy)로의 변환계수를 이용하여 측정됨.
- 원래의 Radiance에서 발광 효율은 와트당 179 루멘으로 고정되어 있다. 발광 효율의 값은 날씨 조건에 따라 다를 수 있으며, 이는 태양 복사 추정치의 신뢰성에 영향을 미침.
- 본 연구에서는 직사광선과 확산방사선의 추정치를 이용하여 하늘 밝기를 계산한 때 시간마다 유효성을 측정하였으며, gendaymtx 도구의 소스 코드가 시간별 발광 효율 값을 내보내도록 수정되어 조명을 radiance으로 변환 할 수 있음.

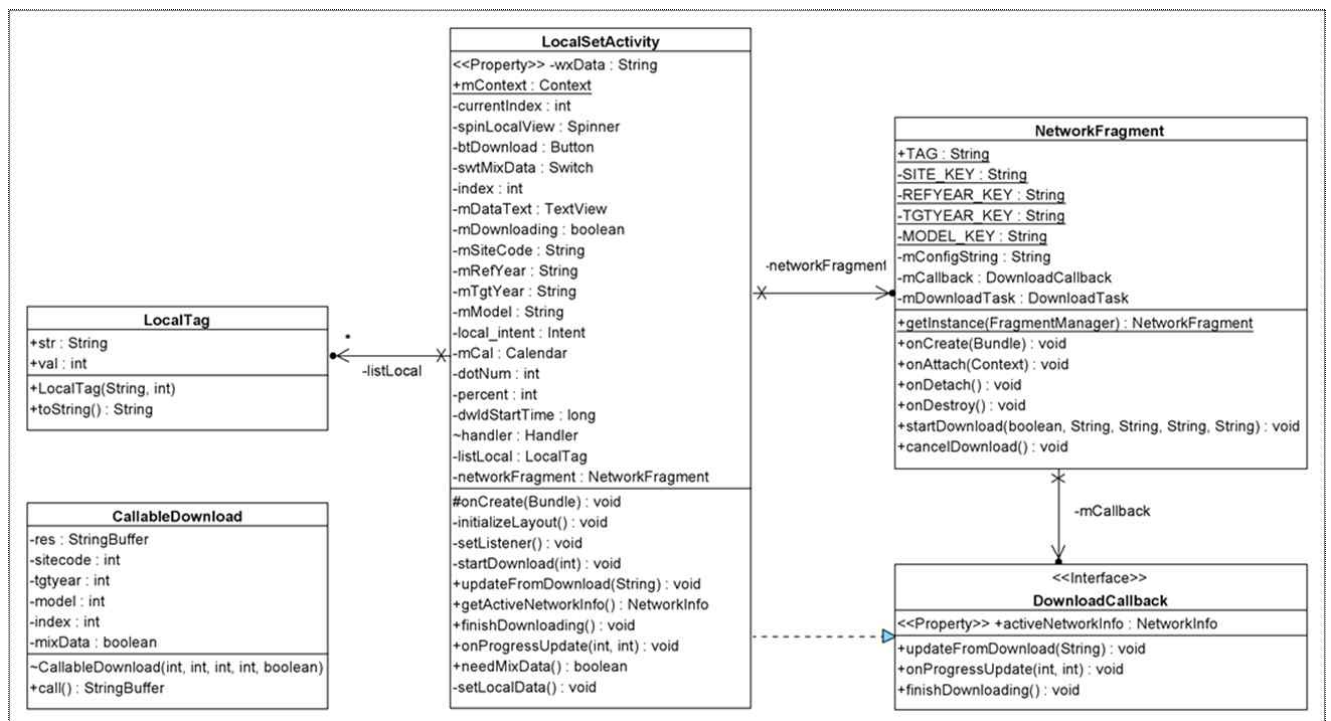
○ 수광계수

- 모바일 플랫폼은 컴퓨팅 리소스의 한계가 있기 때문에 ray tracing으로 매번 수행을 할 수 없기 때문에 태양광 시설 구조와 연관된 계수를 만드는 것이 필요함.
- 수광량 예측 시스템에 의해 계산된 영농형 태양광 시설 하부에 수광량을 작물 모델을 간단하게 적용하기 위해 영농형 태양광 시설에 차광율을 수광계수로 정의함.
- 차광율은 시설내 여러 위치에 설치된 광센서에 측정된 값과 시설외의 일사량을 비교하고 이 차광율과 가장 유사한 값을 가지는 모의조건인 차광율로 정의함.

바. 영농형 태양광 설비 하부 작물 생육 예측 지원 모바일 앱개발(주관 : 서울대)

□ 기상 자료 모듈

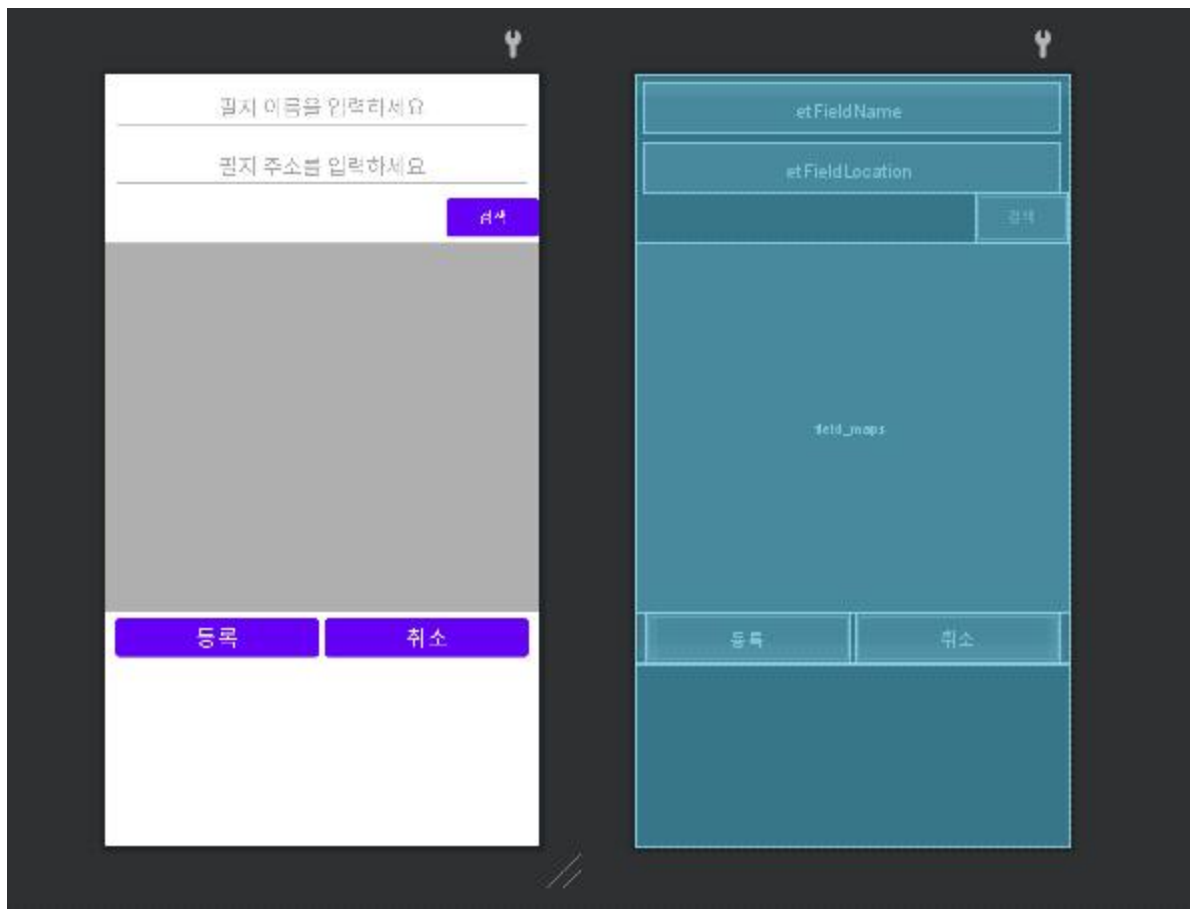
- 영농형 태양광 하부에서 작물의 생육 예측하기 위해 과정기반 작물모형이 사용되어야 함.
- 일반 노지 조건에서 작물 재배관리 방식에 따라 작물의 생육 및 수량을 추정할 수 있는 과정기반 작물 모형들은 상당수의 모수들을 입력값으로 사용하며, 포장별 기상과 토양 특성을 나타내기 위해 고유한 형식의 입력자료들이 사용되지만, 이러한 입력자료들을 일반 사용자가 준비하기는 어려움이 있음.
- 본 연구에서는 사용자의 편의를 위해 지도 기반으로 기상자료를 수집 및 가공하는 모듈을 구성하였음(그림 29).
- 이 모듈은 관심지역의 위치를 기반으로 기상청 종관기상관측소(asos)에서 기상자료를 수집을 하는 부분과 수집된 기상자료를 작물모델 모듈 구동에 적합한 형식으로 변형하는 부분으로 구성하였음.
- 기상자료를 자동으로 다운로드 받기 위해 다수의 클래스들이 설계되었음.
 - 우선, NetworkFragment 클래스는 인터넷의 기본 프로토콜인 HTTP를 사용하여 실제 기상자료를 수집하는 기능을 가짐.
 - NetworkFragment에서 수행되는 네트워크 관련 함수들이 호출되기 위해서는 추가적으로 Callback 클래스가 사용되어야 하며, 본 연구에서는 DownloadCallback 클래스를 구성함.
 - CallableDownload 클래스는 DownloadCallback 클래스에서 비동기적으로 요청할 때 사용되는 클래스임.
 - 이러한 클래스들을 사용하여 기상자료를 다운로드 받을 때, 주요 기능들을 작동시키고 사용자 요청사항을 반영하기 위해 LocalSetActivity 클래스가 사용됨.



<그림 29> 기상입력자료 수집 모듈 클래스 다이어그램

○ 지도기반 기상자료 수집 모듈

- 지도기반 기상자료 수집 모듈은 Google Map API를 활용하여 개발되었음.
- 사용자가 영농형 태양광 설비를 설치하고자 하는 관심지역을 국내 어디에서도 선택할 수 있도록 특정 도시를 검색하여 설치 대상 지역을 선정하고 특정 지점을 직접 선택할 수 있도록 지도 화면을 구성하였음.
- 또한, 선택된 지역에서 기상자료를 다운로드 받을 수 있도록 최근린 종관기상관측소를 자동으로 찾아 지정하는 기능들이 수행하는 모듈들을 개발하였음.



<그림 30> 지도 주소 기반 기상자료 수집 모듈 디자인 개발

- 모바일 앱에서 관심지역을 검색하기 위해, 기본적인 주소를 입력할 수 있는 박스들을 사용자 인터페이스에 추가하였다. 또한, 지도에서 손을 사용하여 직접 위치를 선택할 수 있도록 인터페이스를 설계하였음(그림 30).
- 영농형 태양광 설비는 특정 지점에 설치되는 것을 가정할 수 있으므로, 지점을 선택할 때, 태양광 설비의 차광율을 같이 설정하도록 화면을 구성하였음.
- 지도 기반으로 대상 지역을 선택하기 위한 모듈을 구성하기 위해 두 종류의 클래스를 사용하는 것으로 설계하였음.
- APVSelectionFragment는 영농형 태양광 설비의 차광율과 지점들을 선택하고 특성을 설정하는 기능을 가짐.
- 또한, 설정된 지점 정보가 LocalSetActivity와 같이 다른 기능을 하는 모듈들로 전달될 수 있도록 FieldInformationViewModel 클래스를 사용하였음.

FieldInformationViewModel
-mField : MutableLiveData<FieldRecord>
-mFieldName : MutableLiveData<String>
-mRecord : FieldRecord
+FieldInformationViewModel()
+setFieldName(name : String) : void
+getFieldName(name : String) : LiveData<String>
+setField(record : FieldRecord) : void
+getField() : LiveData<FieldRecord>
+getRecord() : FieldRecord

APVSelectionFragment
-binding : FragmentApvSelectionBinding
+onCreateView(inflater : LayoutInflater, container : ViewGroup, savedInstanceState : Bundle) : View
+onViewCreated(view : View, savedInstanceState : Bundle) : void

<그림 31> 지도 클래스 다이어그램

- 모바일 앱에서 현재 및 미래 기상자료를 수집하여 작물모형을 구동할 경우, 모형으로 예측된 작물 생산성 값의 불확도가 높을 수 밖에 없으므로, 이를 대신하여, 본 연구에서 개발된 앱에서는 과거 5년간의 기상자료를 자동으로 수집하여 작물 생산성을 추정하였음.
- 이러한 방식을 사용하였을 때, 이미 사용자가 생산성에 대해 알고 있는 경우도 있을 수 있어, 작물모형이 가지고 있는 불확도를 감안하여 의사결정을 할 수 있도록 하였음.

```

if (mWxDBType == WxDB.KMA_WISED_DOWNLOADER) {
    WeatherDataManager kma = new WeatherDataManager();
    id = kma.searchNearest(mFieldRecord.mLatitude, mFieldRecord.mLongitude);
    if (id < 100) {
        mFieldRecord.mKMACode = "0";
        mFieldRecord.mKMACode += Integer.toString(id);
    } else {
        mFieldRecord.mKMACode = Integer.toString(id);
    }

    System.out.println(mFieldRecord.mKMACode);
}

```

<그림 31> 종관관측소 탐색 소스코드

- 영농형 태양광 설비가 설치될 것으로 예상되는 지점을 Google Map API를 이용하여 설정하였을 때, 지도에서 선택된 지점과 가장 가까운 종관관측소를 탐색하기 위한 함수가 사용되며, 해당 관측소에서 과거 5년간 기상자료를 자동으로 수집하는 모델이 사용되었음(그림 31).

```

@Override
protected void onPostExecute(Void result) {
    super.onPostExecute(result);
    binding.etFieldLocation.setText(mAddress);

    mFarmPoint = new LatLng(mLatitude, mLongitude);
    mCoordinateString = mLatitude.toString().substring(0, 6)
        + "," + mLongitude.toString().substring(0, 7);
    binding.etFieldLocation.setText(mAddress);

    mFieldRecord.mLatitude = mLatitude.floatValue();
    mFieldRecord.mLongitude = mLongitude.floatValue();

    // 마커 추가
    mOptions.position(mFarmPoint);
    mOptions.snippet(mCoordinateString);
    mMap.clear();
    mMap.addMarker(mOptions);
}

```

<그림 32> 종관기상자료 다운로드 소스코드

– 영농형 태양광 하부에 광환경을 모델구동에 반영하기 위해 수집된 기상자료에서 일사량을 차광율을 설정하여 광조건을 고려한 작물 생육을 모의할 수 있으며, 본 연구에서는 특정 차광율 조건에서 누적일사량을 계산하여 실제 조건과 차광율을 설정한 조건에서 유사한 수준의 식량작물 생산성 예측값을 얻을 수 있도록 작물생육을 모의하고자 함.

○ 격자 기반 작물모형-기상모형 연계 알고리즘 설계 및 모듈 구현

– 국가농림기상센터에서 기상청에서 제공하고 있는 기상관측자료에 지형보정 수치기상 모형 기반의 격자 형태의 분포도를 제작하였으며, 생산변수는 총 7종으로 기온(최고, 최저, 평균), 강수량, 일사량, 상대습도, 평균풍속으로하고, 시간해상도는 일 단위이며, 공간해상도는 1km 임.

– 자료제공 속성정보

- 생산변수: 최고기온, 최저기온, 평균기온, 강수량, 일사량, 상대습도, 평균풍속
- 시간범위: 2016-2021년
- 시간해상도: 일 자료
- 공간해상도: 1km
- 단위: 기온 °C, 일사 MJ/m², 강수량 mm, 상대습도 %, 평균풍속 m/s

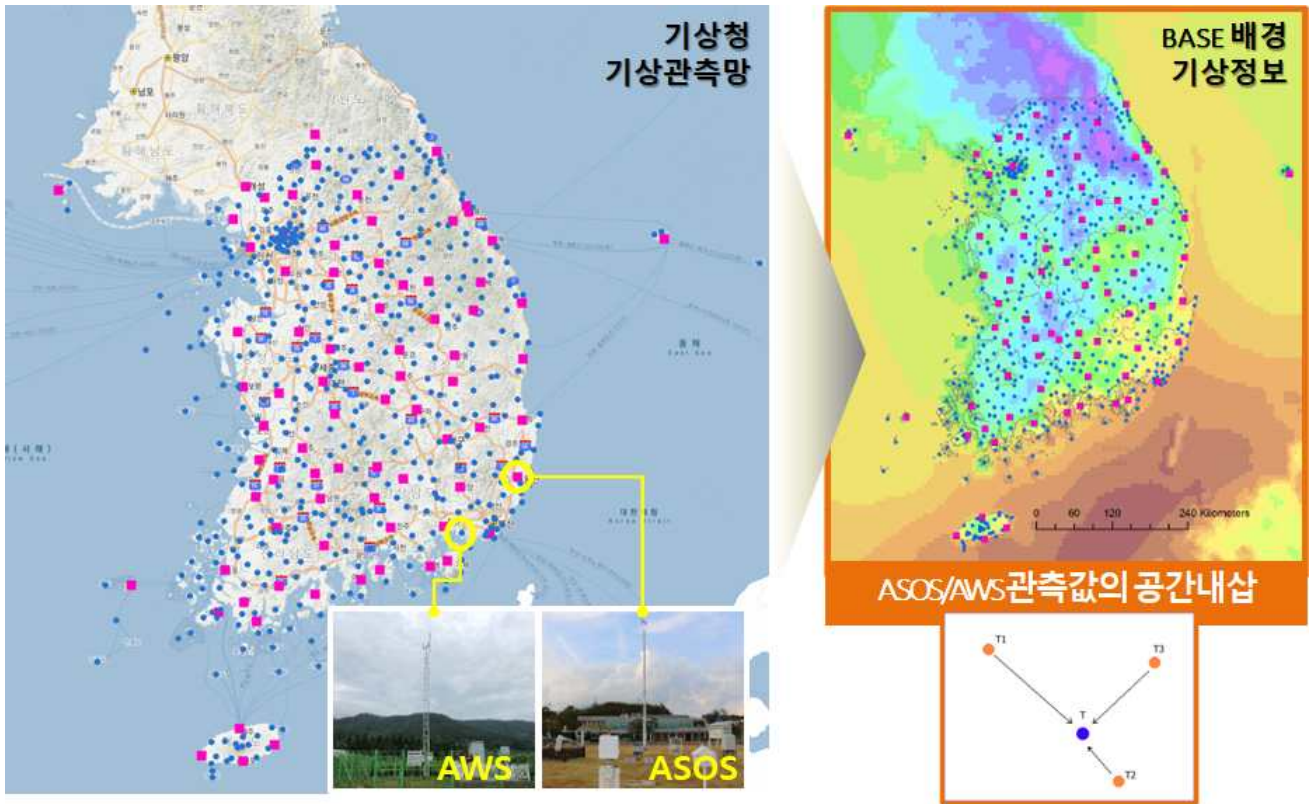
– 본 연구에서 제작된 모든 격자 단위의 상세 기상 분포지도는 기상청에서 제공하고 있는 ASOS(Automated Synoptic Observing System, 종관기상관측)와 AWS (Automatic Weather System, 방재기상관측) 관측값을 이용하여 제작되었음.

– 매년 정상적으로 관리·운영되고 있는 기상관측장비에서 수집되는 관측값을 활용하며, 지점수는 대략 2020년 기준으로 ASOS 100개, AWS 798개 지점임(기상청 기상자료개방포털 메타데이터 관측지점 정보 기준).

- 각 관측소 지점으로부터 수집된 일 기상관측값을 사용하여 배경 분포도를 제작함.
- 이를 위해, 관측지점 고도값으로부터 거리역산 가중법(IDW, Inverse Distance Weighted)을 사용하여 생성된 가상지형의 해발고도(A_i)와 실제 지형과의 해발고도(A_e)를 비교하여 그 차이만큼 발생하는 기온오차를 기온감률(Γ)을 반영하여 다음과 같이 보정함:

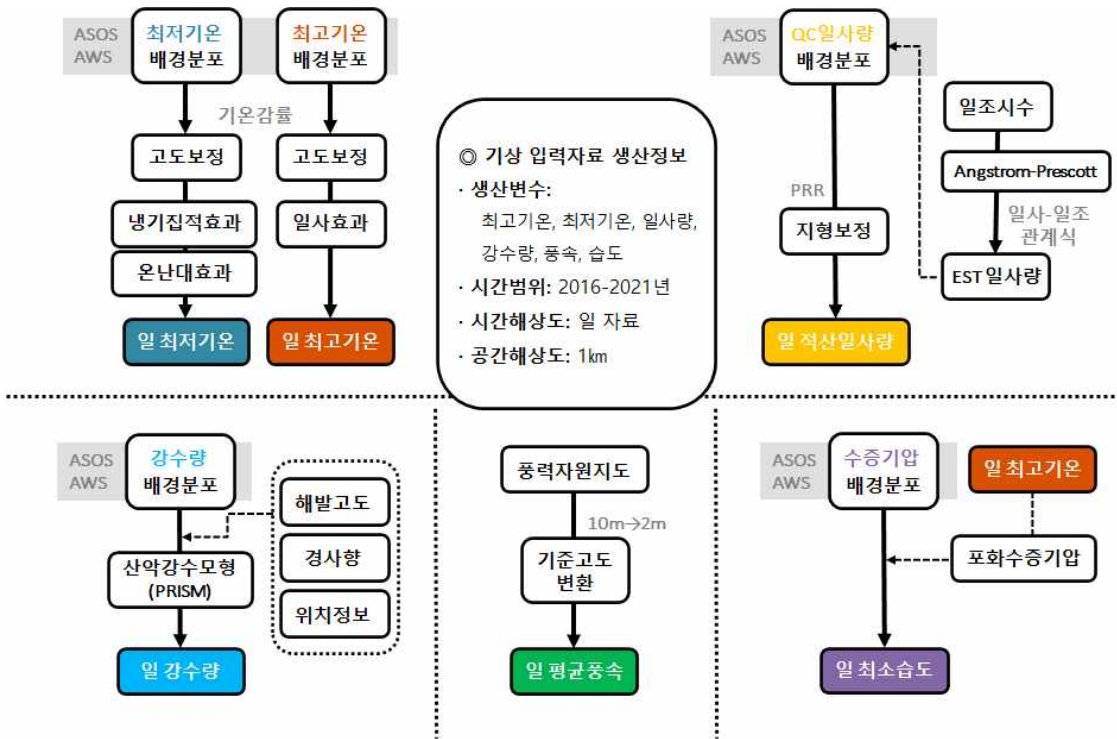
$$T_e = T_i + \Gamma \cdot (A_i - A_e)$$

여기서 T_e 와 T_i 는 각각 실제 지점과 가상지형에서의 온도를 나타냄.



<그림 33> 기상청 기상관측망 및 공간내삽 알고리즘

- 생산된 배경 분포도를 활용하여 온도관련 기상요소별로 지형 보정 수치기상 모형을 적용하였음(그림). 최저기온의 경우 찬공기가 사면을 타고 흘러내림을 모의하는 냉기집적효과와 맑고 바람이 없는 날에 주로 발생하는 기온역전현상에 따른 사면온난대 효과 등을 모의하여 반영하였다. 최고기온의 경우, 일사량에 따른 기온의 영향을 고려하여 최종 추정값이 산출되었음.
- 온도 이외의 변수들은 각 변수별로 지형효과를 고려하는 방식들이 적용됨 (그림 33). 강수량의 경우 산악강수모형으로 알려져 있는 PRISM 모형을 사용하여 상세화되었으며, DEM, 경사방향, 격자 정보 등이 입력자료로 사용되었음.
- 일사량을 추정하기 위해, 수평면이 아닌 사면에 따른 일조시수와 일사-일조량 관계식을 적용하여 보정하였으며, 평균풍속은 기상청에서 생산한 풍력자원지도의 10m 기준을 2m 기준으로 변환하였음.
- 상대습도를 추정하기 위한 수증기압을 계산할 때에는 포화수증기압 계산식을 역추정하여 산출하는 방식으로 계산되었음.

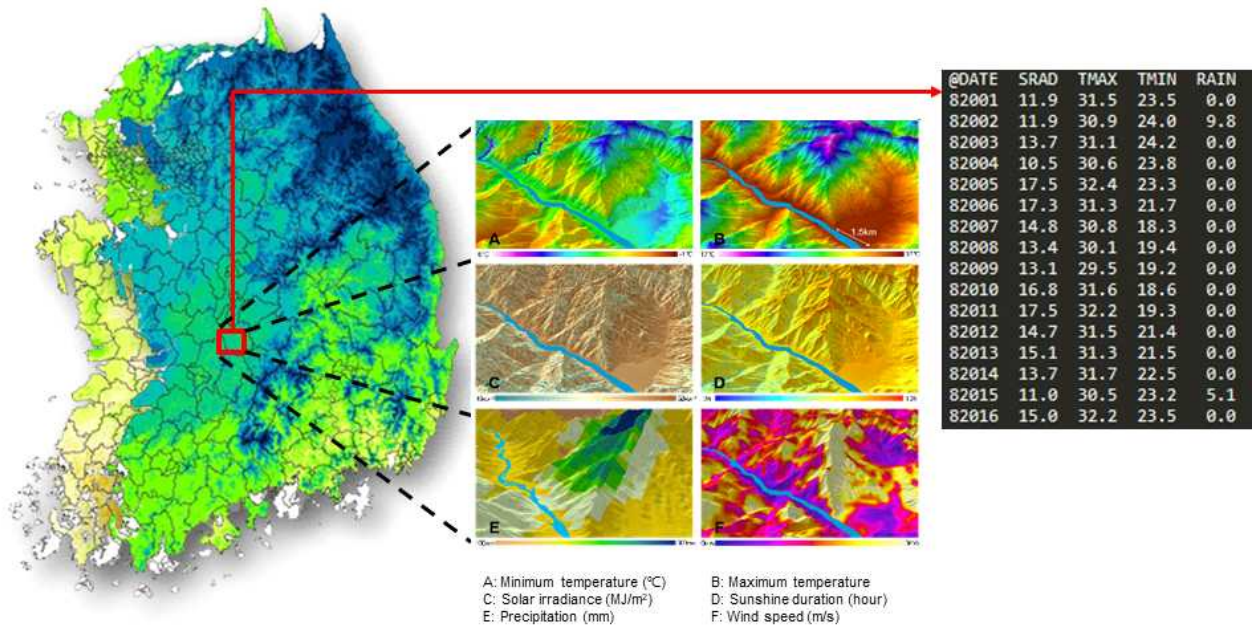


<그림 34> 격자 단위 상세 기상 분포지도 요소별 제작 알고리즘

- 격자형 기상자료들은 2016-2021년 기간동안 일자료를 제작하였다 (표 8 기상변수 설명). 총 생산된 격자자료의 수는 기상요소별로 2200개의 개별적인 파일로 저장되었으며, 격자자료의 투영정보(Projection)은 WGS84 (EPSG:4326)이었으며, GeoTIFF 형식으로 생산됨.

<표 8> 기상요소별 격자자료 기간 및 개수

명 칭	설 명
일 최고기온(Tmax)	일 최고기온 (1월 1일-12월 31일, 365일 × 6세트)
일 최저기온(Tmin)	일 최저기온 (1월 1일-12월 31일, 365일 × 6세트)
일 평균기온(Tavg)	일 평균기온 (1월 1일-12월 31일, 365일 × 6세트)
강수량(Prcp)	일 적산강수량 (1월 1일-12월 31일, 365일 × 6세트)
일사량(Srad)	일 적산일사량 (1월 1일-12월 31일, 365일 × 6세트)
상대습도(Hmdt)	일 평균 상대습도 (1월 1일-12월 31일, 365일 × 6세트)
평균풍속(Wspd)	일 평균 풍속 (1월 1일-12월 31일, 365일 × 6세트)



<그림 35> 격자형 기상자료에서 작물모형 입력자료 형태로의 변환 처리(예시)

– 위와 같은 방식으로 격자형 기상자료를 활용한 서버를 구축하였으나 모바일 플랫폼 환경에서 격자자료의 가용도가 상대적으로 낮아 개발후 배포용 버전에서 기능을 사용하지 않았으나 향후 개선 후 적용할 예정임.

○ 작물모델 기상모델 연계 모듈

- 기상 모듈을 사용하여 수집된 기상자료를 작물모형에 호환되는 형식으로 전환하기 위해 기상모델 연계 모듈을 개발하였음.
- 기상청으로부터 수집된 자료와 격자형 자료 모두 작물모형이 요구하는 기상자료 형식을 만족시키지 못하며, 특히, 이들 기상자료는 개별 변수별로 수집되었기 때문에, 하나의 텍스트 파일에 여러 기상변수들을 저장하는 기능들이 구현되어야 함.
- 본 연구에서는 기상자료 수집단계에서 자동으로 작물모형의 기상입력자료를 생성할 수 있도록 작물모형의 기상입력 생성 모듈과 기상자료 생산 모듈을 연계할 수 있는 모듈을 설계하였음.
- 모듈 설계 전 예비작업으로 작물 재배 기간인 2021년 6월부터 10월까지 일별 자료를 영농형 태양광 시설 인근 기상관측소인 파주 및 오창 종관기상관측소의 자료(일사량, 최고기온, 최저기온, 강수량, 상대습도, 풍속)를 수집 후 각 작물생육모형의 기상입력형식에 맞추어 일별 기상자료를 생성하였음(그림 36).

DSSAT

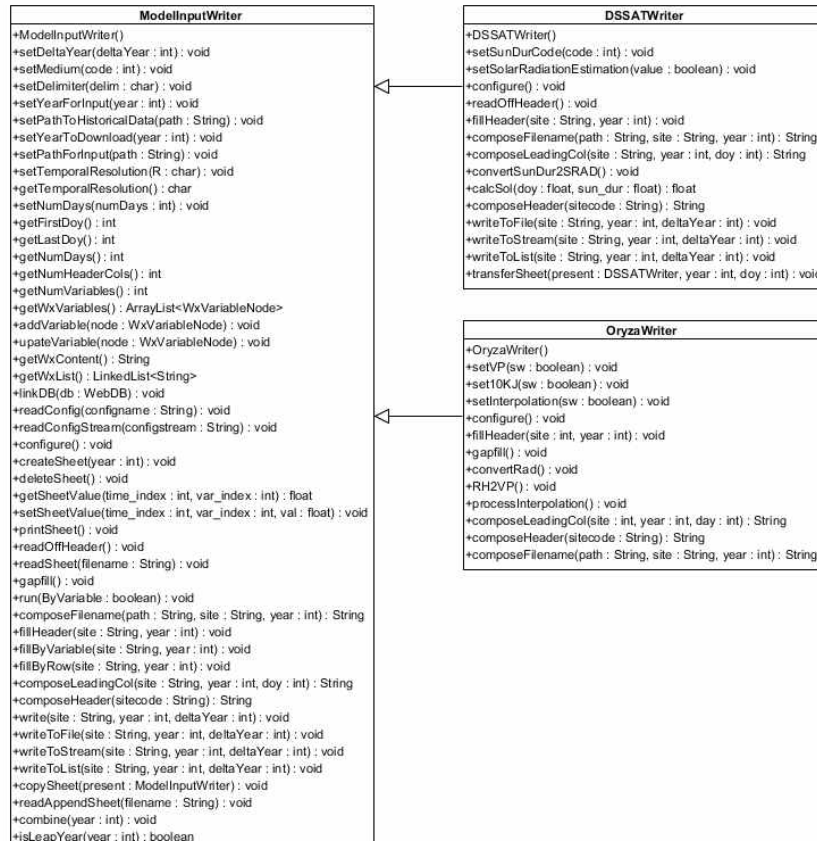
```
*WEATHER DATA : X131
*SOLAR RADATION DATA WAS ESTIMATED USING A-P MODEL.
@ INSI      LAT      LONG  ELEV  TAV  AMP  REFHT  WNDHT
  X131      36.6    127.4  57.2  14.5  27.9 -99.0 -99.0
@DATE  SRAD  TMAX  TMIN  RAIN
19001   6.7   0.3  -5.5   0.0
19002  10.8   1.5  -7.2   0.0
19003  10.9   3.9  -8.1   0.0
19004   7.9   3.8  -7.2   0.0
19005  10.9   3.0  -4.3   0.0
19006  10.0   3.9  -7.1   0.0
19007  10.4   3.9  -6.9   0.0
19008  11.1   2.3  -5.5   0.0
19009  10.4   1.5  -8.6   0.0
19010   3.3   1.4  -3.4   0.0
19011   7.4   6.7  -1.9   0.0
19012   7.2   8.5   1.7   0.0
```

ORYZA

```
127.4,36.6,57.2,0.18,0.55
131,2019,1,4.2,-5.5,0.3,0.3,1.4,0
131,2019,2,8.6,-7.2,1.5,0.3,1.4,0
131,2019,3,8.7,-8.1,3.9,0.2,0.9,0
131,2019,4,5.4,-7.2,3.8,0.3,0.8,0
131,2019,5,8.6,-4.3,3,0.3,1.5,0
131,2019,6,7.6,-7.1,3.9,0.3,1.1,0
131,2019,7,8,-6.9,3.9,0.3,1.2,0
131,2019,8,8.7,-5.5,2.3,0.3,1.8,0
131,2019,9,7.9,-8.6,1.5,0.2,1.1,0
131,2019,10,0.3,-3.4,1.4,0.3,0.9,0
131,2019,11,4.7,-1.9,6.7,0.4,1.1,0
131,2019,12,4.5,1.7,8.5,0.5,1.2,0
131,2019,13,8.7,-3.4,8,0.4,0.9,0
131,2019,14,2.5,-1.8,4.7,0.5,1,0
131,2019,15,2.8,-5.3,4,0.4,1.9,0.1
131,2019,16,8.2,-7.2,-0.4,0.2,1.5,0
131,2019,17,4.1,2.4,4.8,0.4,1.5,0
```

<그림 36> 수집된 오창 실증 사이트 기상입력자료

- 기상청 자료에서 수집된 자료들을 사용하여 작물모형의 입력자료를 자동으로 생성하는 연계 모듈을 개발하기 위해 ModelInputWriter 클래스를 설계하였음.
- ModelInputWriter 클래스는 DSSATWriter 클래스와 OryzaWriter 클래스의 부모 클래스로, 기상청에서 수집된 자료들이 각 개별 모형의 입력자료로 전환하기 위해 필요한 공통적인 기능을 가지며, 기상자료를 다운로드 받기 위한 HTTP 관련 Request 메시지를 생성하고, 이를 위한 전반적인 기능들을 포함함; 예를 들어, 사용자로부터 기상자료 수집을 위한 기간을 입력받은 후 기상청 서버에 전달하기 위해 자료를 처리하는 함수와 각 작물모형의 기상입력 파일에 헤더부분을 작성하는 함수들이 포함되었음.
- 사용자가 지정한 지점에서 특정 작물모형과 호환되는 형식을 갖춘 기상입력파일을 생성하는 모듈을 개발하였음.
- 개발된 모듈들이 다양한 작물모형을 지원할 수 있도록 본 연구에서 사용되는 DSSAT 뿐만 아니라 ORYZA2000 모형의 작물모형과 호환되는 기상자료를 생산할 수 있도록 설계하였으며, 이를 위해 DSSATWriter 클래스와 OryzaWriter 클래스를 설계함. 기존 연구 (Hyun et al. 2021)에서 개발된 OryzaWriter 클래스를 개선하고 이를 DSSAT 모형과 호환될 수 있도록 DSSATWriter를 설계하였다. 각각의 클래스들은 개별 작물모형의 기상입력 형식에 따라 기상변수의 배치와 단위를 변환할 수 있는 기능들이 포함되도록 설계되었음.
- 모바일 앱에서는 DSSAT 모형이 탑재되었기 때문에 DSSAT 모형에서 사용되는 기상변수들인 일사량, 최고 기온, 최저 기온, 강수량, 상대습도, 풍속 등을 사용하여 DSSAT 모형의 기상입력 파일 형식인 WTH 파일 형식으로 변환하는 DSSATWriter 클래스의 인스턴스가 생성되도록 설계하였음.



<그림 37> 작물모델 기상모델 연계 모듈 클래스 다이어그램

□ 작물생육모형 모듈 구현

○ 데스크탑 환경에서 구동되도록 개발된 DSSAT 모형을 모바일 앱에서 구동될 수 있도록 시스템을 설계하였으며, 이를 지원하기 위해 ModelRunner 클래스와 DSSATModelRunner 클래스를 설계하였음.

– ModelRunner 클래스는 일반적인 작물모형의 입력자료들을 생성하고 이를 구동하기 위한 속성과 함수들로 구성되며, 작물모형은 특정 지점에서 구동되기 때문에, 구동이 필요한 지점에 대한 위치정보와 작물모형 구동이 요구되는 기간정보들을 관리하기 위한 속성이 정의되었음.

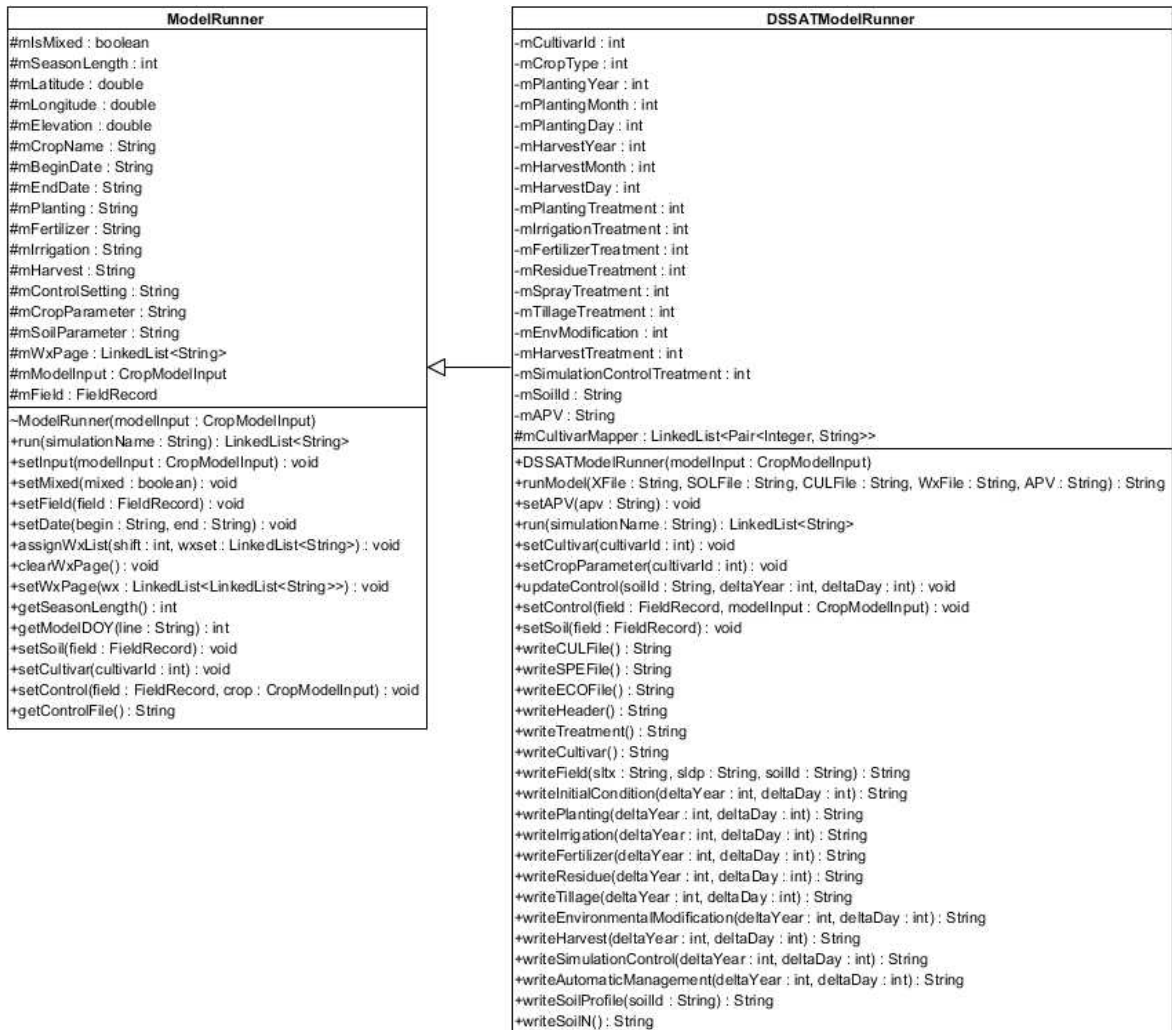
– 또한, 재배관리에 따른 작물생육을 모의하기 위해 품종, 시비 및 파종 조건들을 설정할 수 있는 속성변수들이 ModelRunner 클래스에 포함되었음.

– DSSATModelRunner 클래스는 ModelRunner 클래스의 주요 속성과 기능을 상속받도록 설계되었음.

- 일반적인 작물모형과 달리 DSSAT 모형의 고유한 특성을 고려하여 작물모형의 입력자료 생성과 구동에 필요한 속성과 함수들이 추가되었음.

- 특히, 영농형 태양광 하부에서 작물 생육을 모의하기 위해, 차광율 관련 정보를 저장하고 관리하기 위한 속성과 함수들이 포함되었음.

- 예를 들어, mAPV 멤버변수는 사용자가 지정한 지점에서의 영농형 태양광 설비의 차광율을 저장하며, 특히, mAPV 값이 고정되어 있지 않고 사용자가 지정한 값이 설정될 수 있기 때문에, 차광율 조건에 따라 작물 생산성의 변화를 모의할 수 있고, 이를 활용하여 태양광 설비 구축을 위한 의사결정에 활용할 수 있음.



<그림 38> 작물생육모형 모듈 클래스 다이어그램

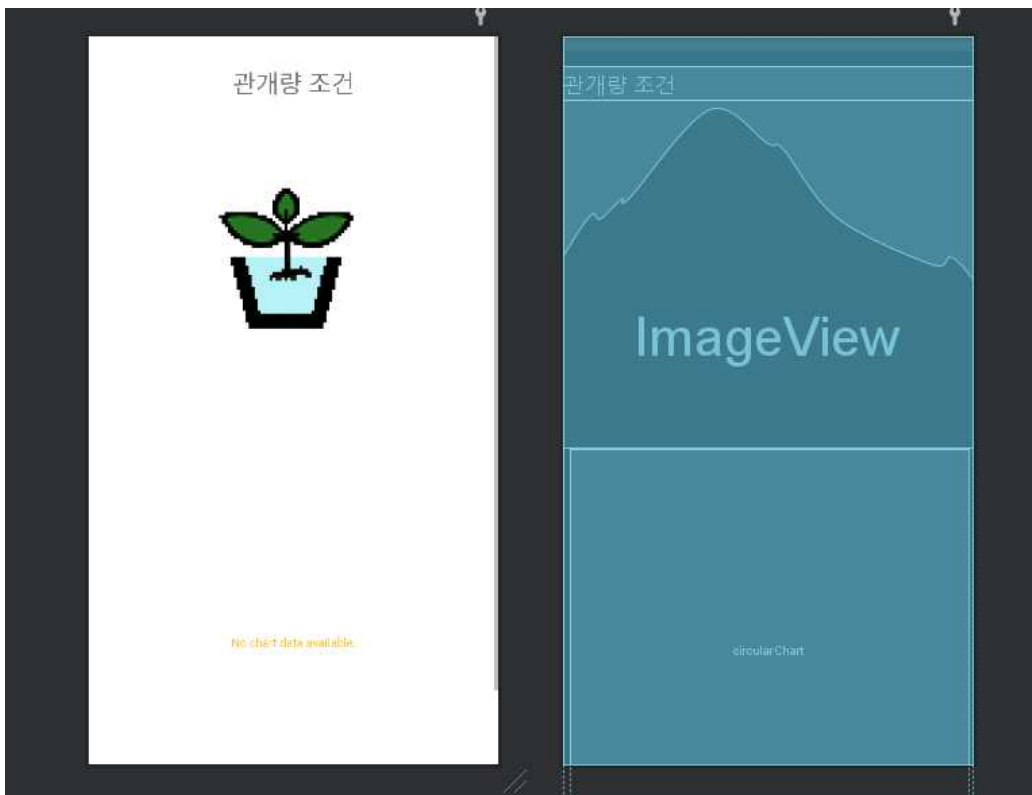
○ 물 관리 최적화 지원을 위한 의사결정 지원 모듈 개발

- 상대적으로 저광 조건인 영농형 태양광에서 물이용 효율은 토양 증발산량 감소로 영농형 태양광 하부에서 향상 될 수 있으며(Amaducci et al., 2018; Adeh et al., 2018), 기상자료, 토양자료, 작물 자료 및 관개 시나리오 자료들을 이용하여서, 관개 시나리오에 따른 증발산량 및 관개 요구량을 출력하여 관개량에 따른 단위면적당 생산량을 계산할 수 있음.
- 본 연구에서는 영농형 태양광 시설에서 물관리를 최적화 하기 위해서 관개량을 모의 할 수 있는 모듈을 개발하였음.
- 관개량은 관행재배시 관수량과 사용자가 설정한 조건에서의 관개량을 비교할 수 있도록 설계하였으며, 의사결정 지원 시스템은 작물이 재배되고 있는 기간 동안 일상적인 물관리를 지원하기 위해 사용될 수 있음.
- 또한, 의사결정 지원 시스템을 사용하여 영농형 태양광 설비가 구축되기 전에 최적의 물관리 방안을 검토할 수 있다. 본 연구에서는 후자의 경우를 상정하여 물관리 지원 의사결정 지원 모듈을 설계하였음.
- 의사결정 지원 모듈은 과거 5년의 최대, 최소 및 평균 수량을 제시하여 사용자가 지정한 물관리 방식에 따라 수량 차이가 변화하는 정도를 평가할 수 있도록 설계하였음.
- 물관리의 궁극적인 목적은 최대 수량을 얻기 위한 것이기 때문에, 이를 지원하기 위한 기능을 포함하였다. 또한, 해외와 달리 국내에서는 관개수에 대한 비용이 없기 때문에 수량을 중심으로 의사결정을 할 수 있도록 모듈을 설계하였음.

- 수량 중심으로 의사결정을 하더라도 관개수를 최소화 하는 것이 지속가능한 농업에서 필수적인 재배관리 조건이기 때문에, 이를 지원할 수 있는 기능들을 포함하였음.
- 우선, 물 이용효율을 계산하는 기능을 포함하였으며, 작물모형에서는 일단위로 작물 재배에 사용되는 관개량이 계산되기 때문에, 작기 동안의 관개량을 계산하는 기능을 포함하였음.
- 또한, 영농형 태양광 하부와 노지 조건과의 비교를 위해 상대적인 관개량을 계산하는 기능을 추가하였으며, 이러한 정보를 표출하기 위해 원 그래프를 사용하는 것으로 설계하였음.



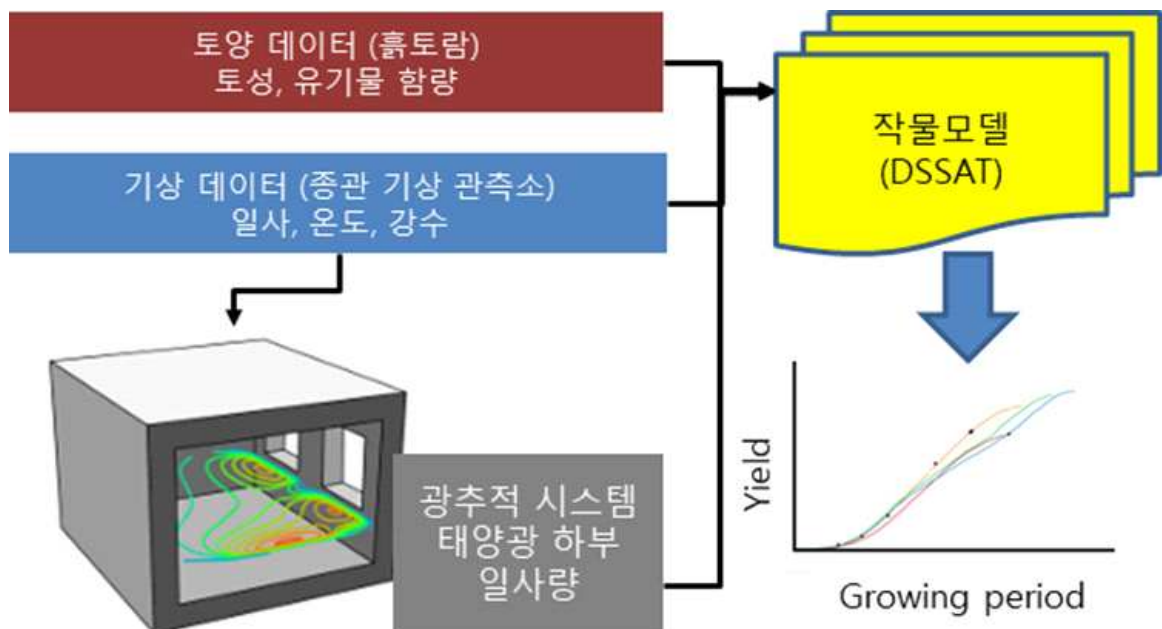
<그림 39> 모바일 앱 수량 출력창 디자인 개발



<그림 40> 모바일 앱 관개량 출력창 디자인 개발

□ 영농형 태양광 설비 하부 작물 생육 예측 지원 모바일 앱 모듈 개발 및 통합

- 본 연구에서는 DSSAT 모형 중 벼의 생육을 모의할 수 있는 CERES-Rice 모형을 다양한 재배 관리 조건에서 구동하고 이들의 결과를 표출하기 위한 사용자 인터페이스를 구성하였으며, 특히, 물관리의 관점에서 최적의 생산량을 얻을 수 있는 조건들을 탐색하는 인터페이스들을 구성하였음.
- 데스크탑 운영체제 기반의 기존의 작물모형을 모바일 운영체제에서 구동을 하기 위해서는 여러가지 고려가 필요하며, 특히 모바일 플랫폼에서는 간단한 입출력 인터페이스를 설계하는 것이 중요하므로, 모바일 환경에서 작물모형을 구동할 수 있는 시스템을 구축하기 위해 작물모형의 구동 및 표출과정을 단순화하는 방식으로 개발을 수행하였음.
- 기상자료를 수집하기 위한 모듈을 단순화하였음.
 - 기존 작물모형을 사용할 때에는 개별 사용자가 지정한 지점에 대해 기상자료를 제공하는 서비스를 통해 직접 다운로드 받아 수동으로 수정하는 과정을 거쳤으나, 모바일 환경에서는 이러한 작업을 하는 것은 상당히 어렵기 때문에 모바일 환경에서 제공되는 위치 기반 자료를 활용하여 기상자료를 수집할 수 있도록 설계하였음.
- 모바일 환경에서는 화면 크기의 제약 때문에 다양한 재배관리 조건을 설정하기 어려움이 있음; 예를 들어, 기존 작물모형을 사용하기 위해서는 토양, 관개, 품종, 시비, 주요 재배일등 재배에 관련된 조건을 입력하여야 함.
- 이러한 입력 요구도를 낮추기 위해, 모바일 기반 시스템에서는 주요 재배 조건이 입력되면 이를 연계하여 다른 조건들이 설정되도록 환경을 설계하였음; 예를 들어, 경운 날짜가 설정되면, 이 날짜가 관개와 기비 시비가 시작된 날짜로 자동으로 설정되었음.
- DSSAT 모형을 구동하면 다수의 출력파일이 생성되어 이들을 분석하는 것에 상당한 전문지식과 노력이 요구되므로, 모바일 환경에서는 이들 출력파일들로부터 필수적인 정보만을 추출하여 사용자에게 전달할 수 있도록 결과값 출력 인터페이스를 단순화 하였음.
- 우선, 그래픽을 활용하여 결과를 표시하여 기존 작물 모델의 다양한 출력 변수 중 모바일 앱의 목적에 맞는 변수들을 중심으로 사용자가 인지하기 쉬운 방식으로 출력할 수 있도록 하였음.



<그림 41> 작물 생육 예측 시스템

- 재배관리 시나리오에 따른 수량 및 물 사용량을 파악할 수 있도록 출력화면을 구성하였음. 출력 화면에는 분석되는 변수의 종류에 따라 탭으로 구분하여 제공되도록 설계하였음. 이러한 방식을 통해 개별 화면에서는 사용자가 원하는 정보만을 전달하고, 다양한 종류의 정보들이 동시에 제공할 수 있는 장점이 있음.
- 수량의 경우, 이양일별로 과거 5년간의 수량 최대, 최소 및 평균값을 제시하여 의사결정을 할 때 하나의 고정된 값 대신에 일정 범위 내에서 발생할 수 있는 수량값을 참고할 수 있도록 설계하였음.
- 측정값이 과거 기상자료를 사용하더라도 작물모형이 가지고 있는 불확도와 토양자료의 한계 때문에 불가피하게 수량 추정값에 오차가 발생하기 때문에, 이러한 문제점들을 궁극적으로 해결하기 위해서는 대량의 관측자료를 활용한 품종모수의 개선 및 작물모형 자체에 대한 보완이 필요하나, 이를 위해 별도의 연구가 필요함.
- 본 연구에서는 기존의 작물모형을 사용하여 작물의 수량을 추정하는 것을 목표로 하였기 때문에, 불확도를 감안한 예측 결과를 제시하기 위해 일정 범위에서의 수량을 제시하는 것으로 출력화면을 설계하였음.
- 영농형 태양광 하부에서 작물모형을 구동하여 얻어진 결과물을 노지조건과 비교하기 위한 화면을 결과 화면에 추가하였음.
- 영농형 태양광을 설치할 때, 의사결정의 주요한 판단 기준중의 하나는 노지 조건 대비 수확량이므로, 비록 영농형 태양광 하부에서 일사량의 부족으로 생산성이 감소되는 것을 막을 수 없으나 이를 최소화하는 재배관리 방식을 탐색하는 것이 유리함.
- 특히, 작물모형은 주어진 환경조건에서 작물을 실제로 재배하지 않고도 최적의 조건을 탐색할 수 있어 영농형 태양광 하부조건에서 발전량과 생산량을 동시에 높일 수 있는 재배관리를 파악할 수 있음.

□ 사례연구 재료 및 방법

- 모바일 앱 및 작물 모델 모의 설정
 - DSSAT에 포함된 CERES-Rice를 이용하여 영농형 모바일 앱의 결과와 비교를 하였음.
 - 재배 대상 지역 : 영농형 태양광 시설이 설치된 파주지역(37.58.17.02 N 126.56.32.05 E, 고도 30m)을 대상으로 설정
 - 품종은 경기 북부지역에서 주로 재배하는 벼 조생종으로 설정을 하였으며, 2023/05/05일을 경운일로 설정을 하였고, 시비량은 앱 복합비 기준, 기비, 분얼비, 수비 각각 5월 20kg 5/10, 10kg 5/30 10kg 8/5)로 설정.
 - 이양일은 2023/5/11로 설정을 하였고 이양시 엽수 주당 3본으로 설정을 하였음. 다양한 재배 조건에서 비교하기 위해 벼의 재식밀도는 벼의 재식밀도는 평당 45, 60, 75, 90, 70주로 하였다. 수분관리는 천수, 수동, 자동으로 각각 설정을 하였고, 이양깊이는 5cm로 설정을 하였음.

○ 물 이용효율 분석

- 물관리 최적화 지원 모듈의 하기 위해서 물이용효율(Water use efficiency, WUE)에 대한 추상적인 의미는 아래의 수식과 같음.

$$WUE = \frac{\text{Crop yield (usually the economic yield)}}{\text{Water used to produce the yield}}$$

- 생산하기 위해 사용된 물의 단위 량으로 생산된 작물의 경제적 가치가 있는 부위의 수량 (Crop yield)을 물 이용효율으로 정의됨.

- WUE의 구체적인 계산 법은 아래와 같이 정의하였음 (Howell, 2001).

$$WUE = \frac{\text{Yield (usually the economic yield)}}{Pe + I + SW}$$

- Pe 유효강우, I 는 관개량, SW 재배기간동안 뿌리층에서 토양수분 사용
- 유효강수 "Pe"는 같은 기상자료를 사용하였으며 "SW"는 논 담수조건이 이므로 증발산량만을 이용하여서 WUE을 계산하였음.

사. 영농형 태양광 통합 플랫폼 연동을 위한 자료교환 인터페이스 분석 및 설계

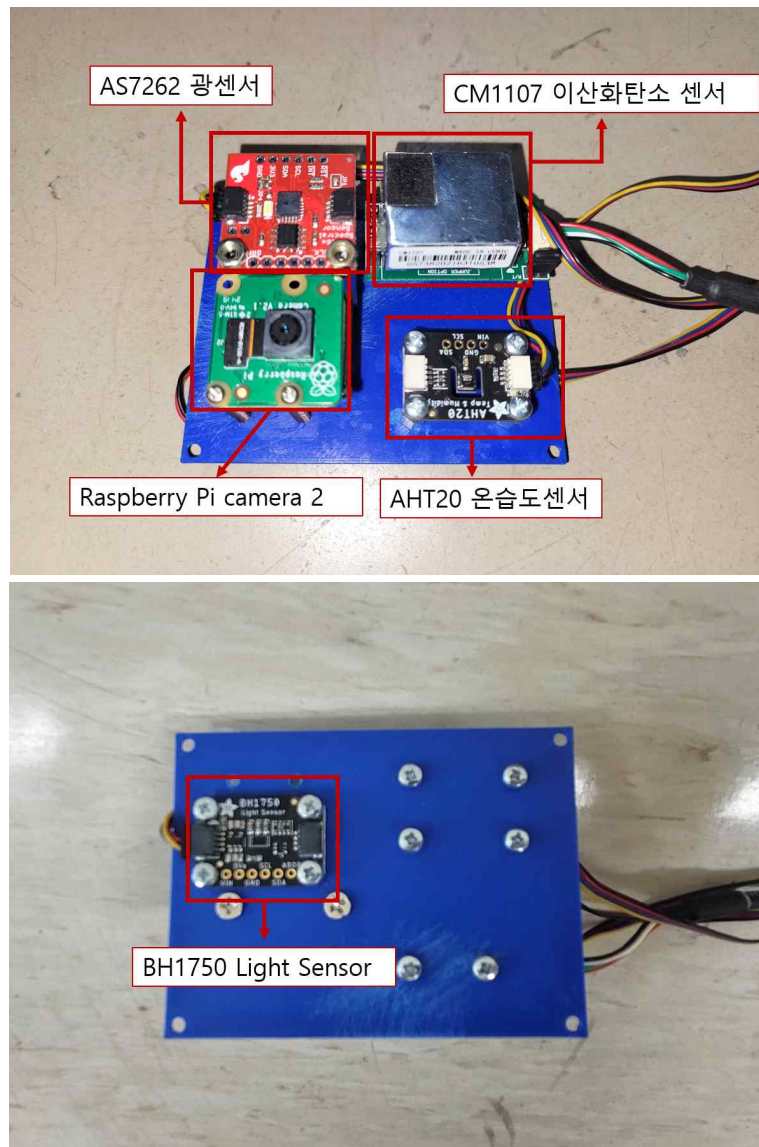
□ 미기상 및 작물 생육 관측 하드웨어 구성

- 영농형 태양광 하부에서 미기상과 작물 생육을 감시하기 위한 시스템은 마이크로 컴퓨터와 센서로 구성된 하드웨어와 자료 수집 및 관리를 위한 소프트웨어가 포함됨.
- 야외조건에서 작물 균락을 감시하기 위한 센서들은 신뢰도가 높은 고가의 장비들이 사용되지만, 본 연구에서는 감시 시스템의 구축비용을 절감하기 위해 IoT 기기에서 주로 사용되는 저가형 센서들을 활용함.
- 본 연구에서는 저가의 영상 센서와 함께 온도, 습도, 조도를 측정하기 위한 센서들로 구성된 관측 하드웨어를 개발하였으며, 사용된 센서는 아래 표에 정리함.

<표 9> 태양광센서 스펙

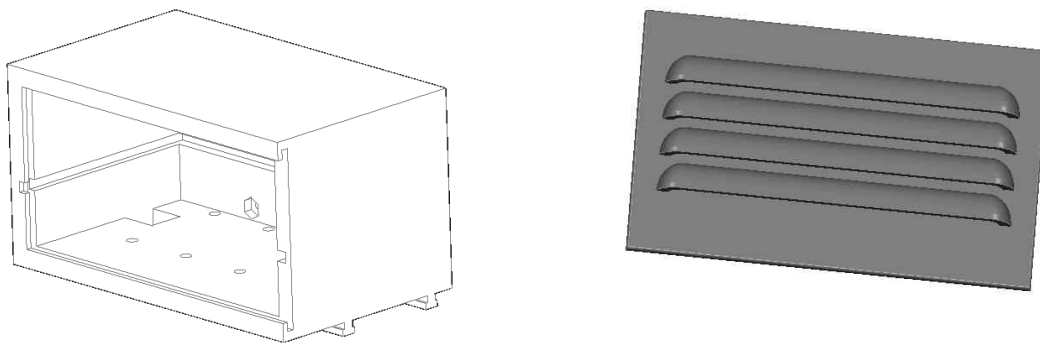
분류	모델명	측정범위
온습도센서	AHT20	temp: -40~80℃, hum: 0~100%
조도센서	BH1750	0~65535 lux
근적외선센서	SEN-14351	6 near-IR channels: 610nm,680nm,730nm,760nm,810nm and 860nm, each with 20nm FWHM
CO2센서	CM-1107N	0~5000ppm
카메라	RPI 8MP CAMERA BOARD	

- 일사량을 측정하는 센서들은 일반적으로 고가 장비이기 때문에, 이를 대신하여 가격이 저렴한 조도 센서를 활용하여 영농형 태양광 하부에서 일사량을 추정할 수 있도록 하였음.
- 시스템의 메인보드를 구성하기 위해 라즈베리 파이 4 마이크로 컴퓨터를 사용하였음. 라즈베리 파이 4는 라즈베리 파이 재단에서 개발한 작은 크기에 싱글보드 컴퓨터의 최신 버전임.
- 라즈베리 파이는 리눅스 기반의 컴퓨터로 다양한 키보드, 마우스, 모니터 등 주변기기를 연결할 수 있으면 아두이노와 같이 다양한 센서들의 신호도 받을 수 있고 와이파이에도 연결하기도 용이하여 다양한 분야에서 사용되고 있으므로 본 연구에서도 채택하였음.
- 작물 생육 관측 하드웨어를 포함하는 하우징을 제작하기 위해 3D 프린터를 활용하였음.
 - 본 연구에서는 상세한 출력물 제작이 가능한 LFS 프린터를 사용하였음; LFS 프린터는 UV를 조사하여 액체상태의 레진을 경화시켜 출력물을 생성하기 때문에 정밀한 제작물을 생성할 수 있음. 특히, 미기상을 관측하는 센서들이 작물의 생육을 방해하는 정도를 최소화하기 위해 센서 하드웨어를 크기를 최소화하는 것이 유리함.



<그림 43> 센서 헤드

- 본 연구에서는 4개의 센서로 관측 센서 헤드를 구성하고 이들 센서들이 데이터 로거 기능을 하는 본체로 연결되는 형태로 관측 센서 하드웨어를 설계함.
- 센서 헤드 부위에는 온습도 센서가 내부에 위치하였으며 조도와 영상 자료를 수집하기 위한 센서가 각각 윗면과 아래면을 향하도록 배치됨(그림 43).
- 센서들을 로거에 연결하기 위한 케이블을 정리하기 쉽도록 각 센서와 연결된 케이블을 하나의 묶음으로 만들었다. 또한, 이들 케이블이 센서 헤드에서 본체로 연결될 때, 비에 의한 피해를 방지하기 위해 아래 면으로 케이블이 연결되도록 관측 센서 헤드를 구성함.
- 센서 본체에는 데이터 로거 기능을 하는 메인보드와 배터리로 구성됨. 또한, 본체를 태양광 설비에 직접 연결할 수 있도록 VESA 방식의 마운트 설치가 가능하도록 설계함.
- 본체의 크기는 대용량 리튬 배터리를 수용하기 위해 비교적 큰 크기를 가지도록 설계하였다. 배터리는 일반적으로 구매 가능한 대용량 보조배터리를 활용할 수 있도록 하였으며, 2000 Wh 용량의 배터리의 경우, 24시간 정도의 지속시간을 보이는 것으로 확인함. 외부 전원이 가능할 경우, 보조 배터리에 전원을 연결하여 지속적인 관측이 가능하도록 설계함.



<그림 44> 3D 설계도

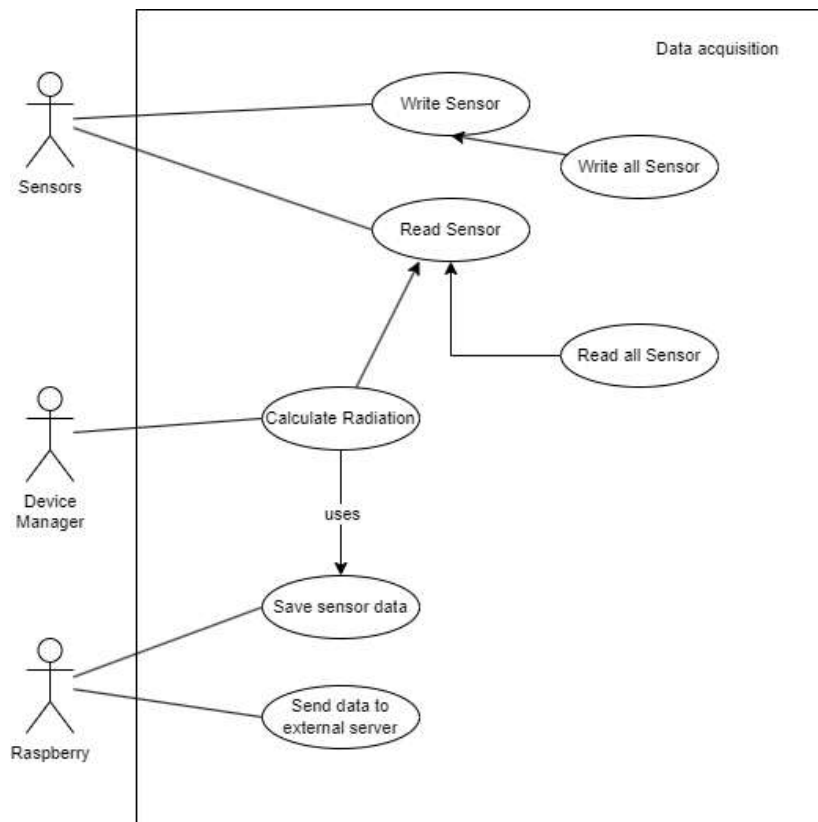
- 센서 헤더부 쉴드 조도센서를 위한 천공이 있으며, 하부는 분광센서를 위한 천공을 디자인 하였음.
- 오류 방지와 외기온과 습도를 정확히 측정하기 위해서 환기가 가능한 형태로 디자인하여 3D 프린터로 출력함.
- 설치의 용이성을 위해서 메인 모듈과 센서쉴드의 결합은 20x20mm 표준 알루미늄 프레임을 사용하여 길이 조절이 가능하게 설계하였고, 나사를 통한 체결이 가능하도록 함.
- 센서 쉴드 외부 벽을 처마식으로 설계하여 외부와의 공기순환이 가능하면서 강우 시 센서 쉴드 내부로의 수분 진입을 차단함.
- 광경화성 수지를 빛으로 굳혀 만드는 SLA(Stereo Lithography Apparatus)방식은 빛을 이용하여 레진을 굳히기 때문에 출력시간이 상대적으로 FDM보다 빠르고 정밀도가 25 μ m로 높다는 특성이 있음.
- 재료를 녹여 적층식으로 쌓아 올려 제작하는 FDM(Fused Deposition Modeling) 방식의 출력은 옥수수 전분을 주 소재로 한 생분해성 수지(PLA)를 사용하여 안전하고 10배이상 저렴함.
- FDM 방식의 정밀도는 0.2mm로 SLA 방식에 비해 상대적으로 낮지만 출력물 제작에는 충분하며, 경제적이라 판단되어 FDM 프린터를 사용하여 전 부품을 출력하였음.



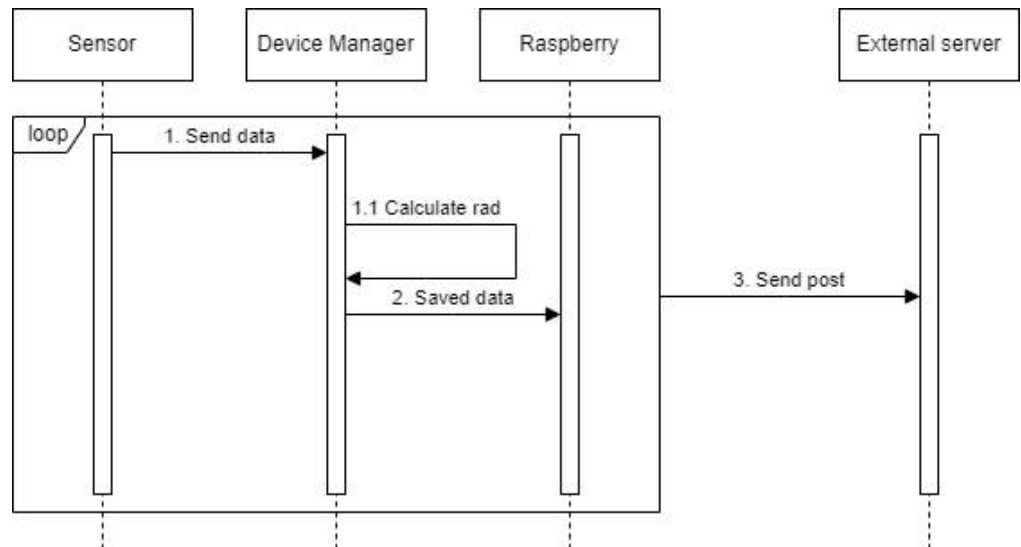
<그림 45> 센서 헤드 및 본체 쉴드

□ **센서 관측 자료 관리 소프트웨어 구성**

- 센서로 측정된 관측값들을 관리하기 위한 소프트웨어를 설계하였음.
- 우선 센서로부터 측정값을 읽어 들이는 프로그램들을 구성하였음.
- 개별 센서별로 데이터들 요청하고 받아들이는 방식에 차이가 있음; 예를 들어, AHT20의 경우 adafruit 라이브러리를 이용하여 i2c 방식으로 데이터를 읽어 들이며, BH1750, CN1107N의 경우 i2c 방식으로 채널을 연 후 측정 주소의 값을 각각 2byte, 5byte 만큼 읽어 들임. SEN-14351의 경우 AS7263 파이썬 라이브러리를 이용하여 내장함수를 이용하여 값을 읽어 들임.
- 센서로부터 얻어진 측정값을 저장장치에 기록하고 및 일단위로 통계적 처리를 하는 기능들을 수행하기 위한 프로그램을 개발하였음; 이러한 소프트웨어 설계를 위해 다이어그램들을 작성하였음.
- 우선, 측정 자료 수집과 관련한 시나리오를 구성하여 Use Case Diagram을 작성하였음. 개별적인 기능들을 제어하기 위한 메인 프로그램과 각 기능을 담당하는 모듈 사이의 통신체계를 설계하기 위해 Sequence Diagram을 작성하였음.



<그림 46> Use Case Diagram



<그림 47> Sequence Diagram

- 일조센서를 사용하여 관측된 일조시간으로부터 일사량을 추정하기 위해 AP 모델이 사용됨.
- 일조량과 일사량이 비례한다는 가정 하에 일별 일사량으로부터 시간단위 일사량을 추정하며 이는 구름이 없는 조건에서 얻을 수 있는 시간별 일사량을 일사량 추정모델인 Spectral2 모델을 사용하여 계산함.
- 시간별 일사량 추정값으로부터 일조량으로 전환하기 위해 전환계수를 적용하며, 시간단위로 측정된 일조량과 Sdur값을 비교하여 구름 조건을 고려한 시간별 전천일사량을 계산함

□ 자료 수집 및 제공 소프트웨어 구성

- 관측자료를 인터넷을 통해 원활히 수집할 수 있도록 지원하는 REST 기반의 API를 활용하여 시스템을 설계하였음.
- REST는 네트워크 상에서 자원을 정의하고 자원에 대한 주소를 지정하는 방법에 대한 원리를 제공함(Fielding, 2000).
- HTTP를 통해 자료를 전송할 때, 과거에는 SOAP과 같은 별도의 전송 계층이 사용되었음 (Mumbaikar and Padiya, 2013).
- 반면 REST는 추가적인 전송 계층없이 자료전송을 지원할 수 있는 간단한 인터페이스이며 (Mumbaikar and Padiya, 2013). 특히, REST와 호환되는 방식으로 인터넷을 통해 전달되는 메시지를 구성하면 간단한 HTTP 인터페이스를 사용하더라도 자료교환이 가능해짐, 이러한 원리를 따르는 시스템들은 RESTful이라고도 함.
- REST의 장점으로는 별도의 인프라를 구축하지 않더라도 자료교환을 지원한다는 점이며, 특히, HTTP 프로토콜의 인프라를 기반으로 자료교환을 수행할 수 있기 때문에 HTTP 프로토콜의 표준을 따르는 모든 플랫폼에서 활용 가능함.
- 또한, API에 전달되는 메시지를 명확히 제시하기 때문에 서비스를 디자인할 때 오류를 최소화 할 수 있음; 예를 들어, 서버의 url이 <http://ssmssoft.iptime.org:31188/api/> 이고 전달되어야 하는 데이터들을 application/json 형태로 POST 해야 하는 경우, 아래 표와 같이 Request의 Body 부분에 들어가야 할 파라미터들을 정의하여 보내줄 수 있음.

<표 10> Reqeust Body example

Header Parameter	포맷	필수여부	설명
UUID	String	Y	사용자 식별 아이디 : (예:4ed94148-fd9e-4c52-b23b-07f8d4cb5bf5)
PLACE_ID	String	Y	데이터 수집 지역 구분 아이디 : (예: 1, 2)
Parameter	포맷	필수여부	설명
SENSING_TYPE	String	Y	데이터 타입 : 태양광 01, 환경 02, 생육 03
STATUS_ID	String	N	상태정보 아이디(에러코드 참조)
prmtId	String	Y	파라미터아이디
prmtNm	String	Y	파라미터명
time	String	Y	시간(연월일시간분초)
val	String	Y	값

- REST가 기존의 인프라에 의존하기 때문에 여러 단점이 존재함.
 - 자료교환에 특화된 표준이 존재하지 않아 동일한 기능을 가진 시스템이라도 다양한 형태로 구현될 수 있음.
 - 자료 전송을 위한 별도의 계층을 사용하지 않기 때문에 사용할 수 있는 HTTP Method 형태가 제한적임.
 - HTTP Header에 REST를 따르는 메시지가 작성되기 때문에 URL을 통해 전달하는 것보다 개발이 어려운 것처럼 보임.
 - 또한, REST를 지원하는 웹 브라우저들이 최근에 배포되었기 때문에 구형 시스템에서는 정상적으로 작동하지 않을 수 있음.
 - 또한, PUT 및 DELETE 등 자료 교환 및 관리를 위한 추가적인 기능을 사용할 수 없음.
 - 이러한 단점에도 불구하고 REST를 사용하였을 때, 다양한 클라이언트를 사용할 수 있기 때문에 다양한 형태로 자료교환 시스템을 분리 및 통합할 수 있음.
- 이는 스마트폰과 IoT 디바이스와 같이 전통적인 PC의 범주에 포함되지 않는 기기에서도 통신을 할 수 있도록 함.
- 특히, 5G 시대에 핵심적인 기술 요소로 모바일 엣지 컴퓨팅 기술이 발전하고 있어, 최근의 기술적 변화를 고려하여 모바일 환경에서 원활하게 작동할 수 있는 자료교환 시스템을 구축하는 것이 유리함.
- 시스템에 기록된 센서 측정값을 외부에서 가져오거나 지정된 자료 수집 서버에 전달하기 위한 소프트웨어를 개발하기 위해 cURL을 활용하였음.
- cURL은 client URL의 약자로 다양한 통신 프로토콜을 이용하여 데이터를 전송하기 위한 라이브러리와 커맨드 라인 도구를 제공하는 컴퓨터 소프트웨어 프로젝트임.
 - 무료 오픈소스이며 수많은 프로토콜을 지원.
 - 데이터를 서버에 전송하기 위해 cURL 커맨드라인 툴을 사용하였음.
- 외부에서 인터넷으로 자료 제공 요청을 받았을 때, 이에 대응하기 위해 Flask 기반의 웹서비스를 제공하는 시스템을 구축하였음. Flask는 파이썬으로 작성된 마이크로 웹 프레임워크의 하나로 간단한 웹서버 구축에 많이 이용됨; 예를 들어, Hyun et al.(2021)은 Flask 를 사용하여 작물 모형의 품종모수를 추정하기 위한 분산처리 시스템을 개발하였음.
- 데이터 교환을 위해 웹서버를 구축하였다. Post 방식으로 데이터 제공함.
- 시스템의 운영체제는 라즈비안을 사용하였다. 원격 관리를 위해 vnc 서버를 구축하였음.
- 자료전송을 위한 소프트웨어도 설치하였다. Zip 형태로 cron 설정으로 작동함.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

가. 영농형 태양광 하부 식량작물 재배 실태 조사 및 분석 (2공동과제 : 순천대)

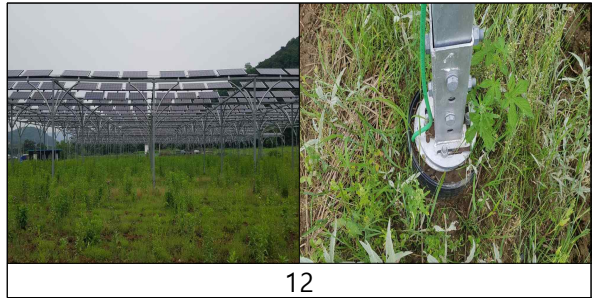
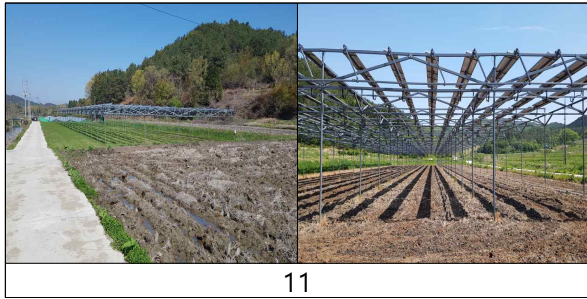
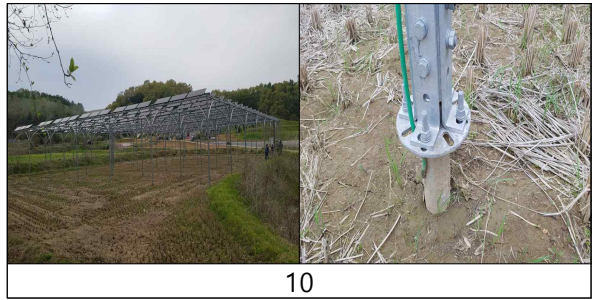
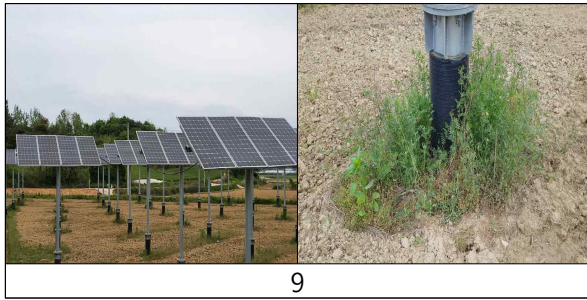
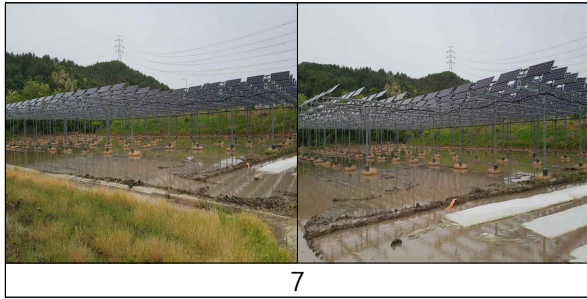
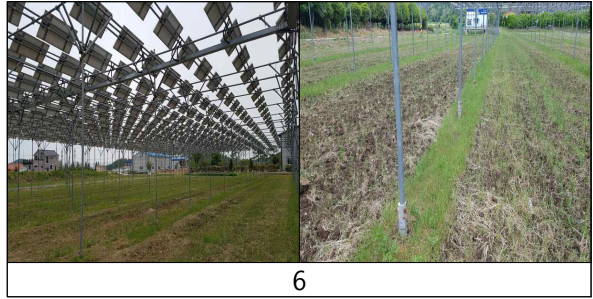
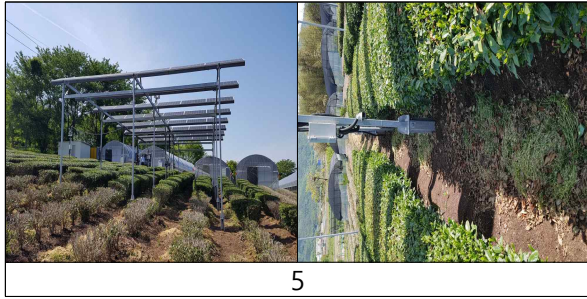
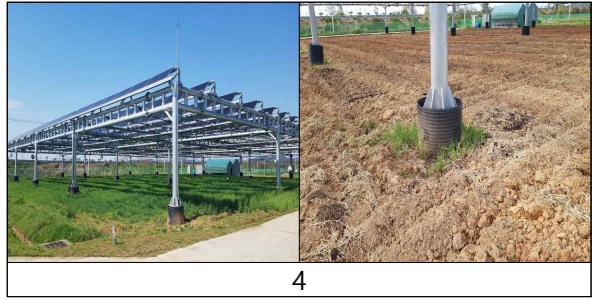
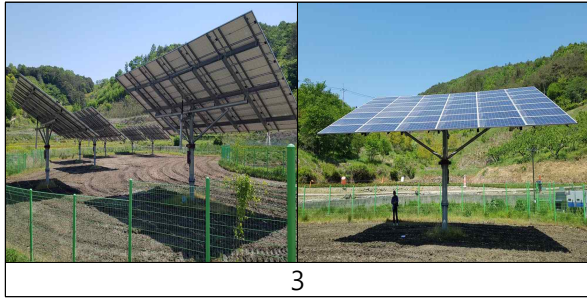
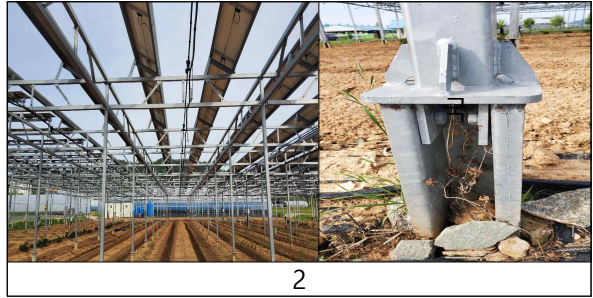
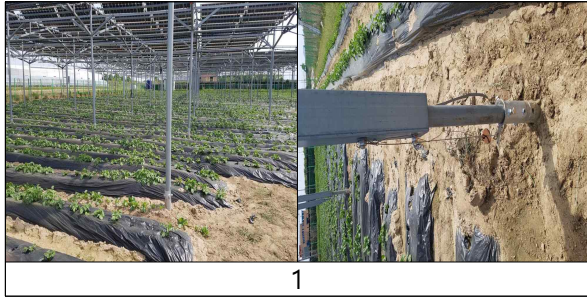
□ 영농형 태양광 하부 식량작물 재배 실태 조사 및 DB 구축

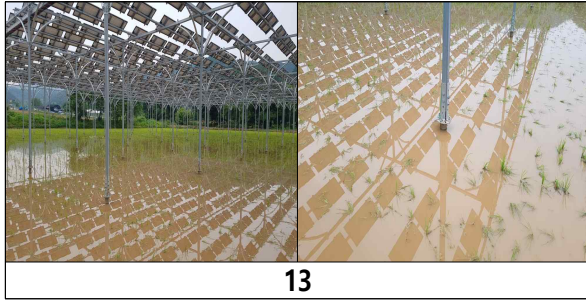
○ 솔라팜, 한국수력원자력, 남동발전 등에 의해 전국에 설치된 영농형 태양광 18개를 조사하였음.

- 조사한 18개 영농형 태양광의 형식은 추적식, 고정식 및 가변식이 있었음 (표 11).
- 설치 지형은 논과 밭에 설치되었고 그 밖의 설치면적, 발전량, 모듈크기/모듈수, 셀수/1모듈, 셀형태(단면, 양면, 투과형), 출력, 패널각도, 차광율, 기동수, 기동간격 (m), 기동높이 (m), 기동형태, 재배작물 등을 조사하여 DB로 구축하였으며(표 10, 그림 43), 또한 각 영농형태양광이 설치된 지역을 지도상에 표기하였음(그림 46).
- 18개 조사된 영농형태양광 중 발전규모별로 볼 때 266KW 1개소, 150KW 1개소, 99KW 11개, 70KW이하 5개소 있었음(표 12).
- 영농형 태양광 각도 조절별로 볼 때 추적형 1개소, 고정가변형 5개소, 고정형 12개소이었고, 영농형 태양광 형태는 분산형이 16개로 대부분이었고, 지주형은 단지 2개소에 불과하였음.
- 영농형 태양광 하부 재배작물은 8개소가 벼를 재배하였고, 콩 3개소, 참깨 1개소, 기타 6개소로 조사되었음.

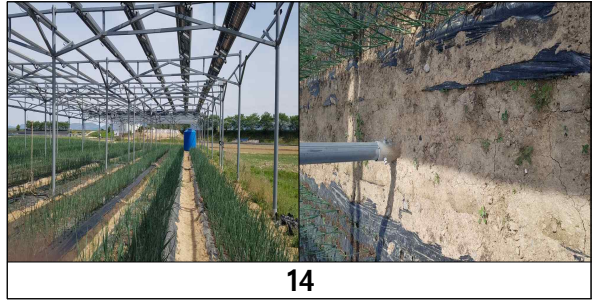
<표 11> 영농형 태양광 하부 식량작물 재배 실태조사

NO	형식 (추적식/고정식/ 가변식)	지형	면적(m ²)	발전량 (KW)	모듈크기 (모듈수)	셀수/모듈	셀형태	출력 (wp)	패널 각도	차광율 (%)	방위 각	기동 설치 형태				재배작물	
												기동수 (개)	간격 (m)	높이 (m)	모형	202 0	202 1
1	고정 수동가변식	전	1,980	99.9	550	36(12*3)	단면, 양면, 투과형	185	수동형 10~60	31.6~ 33.6	180		6*4.3	4	원형	감 자	감 자
2	고정 수동가변형	전	1180	99.9	308	36(9*4)	단면	160	수동형	32	180	88	4*4	4	사각 (8*8)		수 국
3	양축추적형	답	800	100	294	119(7*17)		160	450	25	142	142	4	원형 350	콘크리트	벼	
4	고정형	전	3,267.5	266	308	72(6*12)	단, 양 면, 투명	405	35	21.25 .32	228	20	15*25(15)	4.5	원형		콩
5	고정식	전	128	10	1.5*2.5 42	36(9*4)	단	160		32	161	15개		3	사각 10*4	차	차
6	고정식	답	750	99.84	768	32(4*8)	일반	160		30	180	165	5*3.6	4	원형	벼	벼
7	고정식	답		99.0	616	32/8*4	일반	160		32	210	93	6*4.3	4	파일		
8	고정식	답	3,005	97.28	608	32/8*4	단면	160		32	186		3.4*7	4	사각 10*10	벼	벼
9	고정식	답	2800	97	240	72(6*12)+4	단면	400	30	28	180	64	6	4	원형	콩	콩
10	고정식	답	1,030	49.6	310개	24(8*4)	단면	160		32	180	51개	5*5	4	사각	벼	벼
11	고정식 (가변식수동형)	답(잡종) 2,867	2,145	99	2.0*0.5 632	36(12*3)	일반	160	가변식	31.6	229	110	6.0*4.2	4	원형	벼	벼
12	고정식	전	3,300	150	959	32(8*4)	일반	160			191	150	5*5	4.5	사각	콩	콩
13	고정식	답		100	740	32(8*4)	일반	160			195	103	5*5	4.5	사각	콩	벼
14	고정 수동가변식	전	990	52.3	384	36(12*3)	단면, 양면	160	수동형	31.6	220	56	6*4.3	4	원형	양 파	배 추
15	고정형	답	1120	107	308	72(6*12)	단, 양 면	405	35	32	214	12	15*25	4.5	원형	보 리	벼
16	고정식 수동가변형	밭	1,815	99.16	536	36(3*12)	단면	185	10~50	32	221	319개	6*4.5	4	원형	고 구 마	참 깨
17	고정식 수동가변형	밭	996	51.8	280	36(3*13)	단면	185	40	30	75	48	4*6.4	4	원형	마 늘	옥 수수
18	고정식	논	2840	49.6	310	32(4*8)	단면	160	230	30	166	60	5*5	4.5	사각		콩





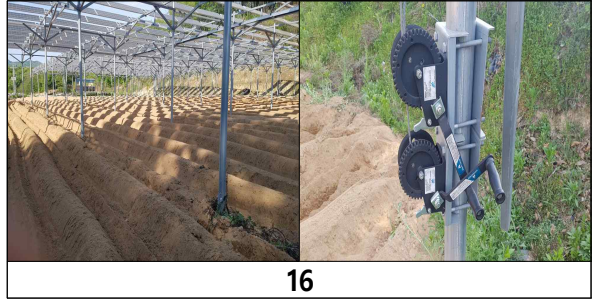
13



14



15



16

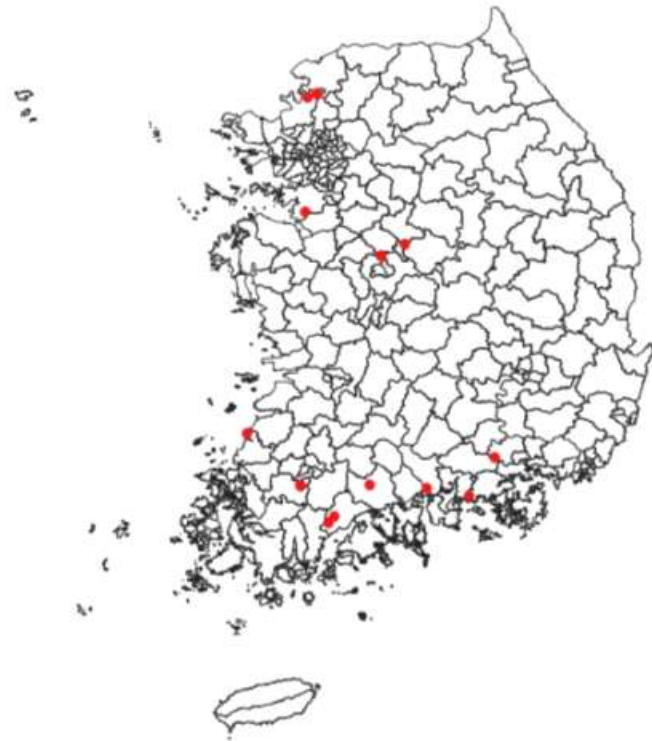


17



18

<그림 48> 영농형태양광 하부 구조 및 작물재배 방법 (태양광 순서: 표 10과 동일)



<그림 46> 영농형태양광 설치지역

<표 12> 영농형 태양광 및 식량작물 실태조사 결과(18개소)

• 영농형 태양광 발전규모별(개)

250KW 이상	150KW	99kw	70kw 이하	비교
1	1	11	5	

• 영농형 태양광 각도 조절별(개)

추적형	고정 가변형	고정형	비교
1	5	12	

• 영농형 태양광 형태(개)

분산형	지주형	비교
16	2	

• 영농형 태양광 하부 재배작목(개)

벼	콩	참깨	기타
8	3	1	6

□ 영농형 태양광 하부 작물 생육 및 수량 분석

○ 영농형 태양광 하부 감자 생육 및 수량

- 2021년 청주 영농형 태양광 하부에 감자 재배시 태양광하부 경우 초장은 대조구에 비해 유의적으로 컸으나 그 밖의 줄기수, 경직경, 엽수, 엽장 및 엽폭에서는 유의적이 차이가 없었음(표 13).
- 또한 수확기에 포기당 괴경수와 중량을 상품성과 비상품성을 구분하여 비교하였을 때 태양광하부와 대조구간에 유의적인 차이가 없었음(표14, 그림 50).
- 주당 지상부 생체중, 괴경 및 뿌리 생체중의 경우도 태양광하부와 대조구간에 유의적인 차이가 없었으며, 상품성 수량과 총수량에서 태양광 하부에서 대조구에 비해 13% 감소하였으나 유의적인 차이는 없었음.
- 영농형태양광 하부에 감자 생육 및 수량에 대한 연차변이를 알아보기 위하여 2021년과 유사한 재배조건으로 2022년에 감자를 재배하고 생육 및 수량을 조사한 결과 태양광 유무에 상관없이 차이가 없어 감자의 경우는 영농형태양광 하부에 의해 수량감소 없이 재배가 가능한 작물로 사료됨(표 15).

<표 13> 영농형 태양광 하부 감자 생육

Condition	Plant Height (cm)	Stem Number /Plant	Stem Diameter (mm)/Plant	Leaf Number /Plant	Leaf Length (cm)/Plant	Leaf Width (cm)/Plant
APV	41.2 *	1.7	11.0	13.0	24.9	16.3
Control	24.9	2.1	10.8	11.6	24.9	17.4

*significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).

<표 14> 영농형 태양광 하부 감자 수량(2021)

Condition	Tuber Number per Hill		Tuber Weight per Hill (g)		Shoot FW. per Hill (g)	Tuber FW. per Hill (g)	Root FW. per Hill (g)	Yield of Good Quality (kg/ha)	Total Yield (kg/ha)
	Good Quality	Poor Quality	Good Quality	Poor Quality					
APV	4.6	1.1	427.0	10.4	124.7	437.4	7.3	21,130	21,650
Control	5.9	1.3	491.0	12.2	140.7	503.2	8.2	24,303	24,907

FW., fresh weight. A t-test result showed non-significant difference.

<표 15> 영농형 태양광 하부 감자 생육 및 수량(2022)

Condition	Plant Height	Stem Number	Leaf Number	Tuber Weight per Hill (g)		Yield of Good Quality (kg/ha)	Total Yield (kg/ha)
				Good Quality	Poor Quality		
APV	32.6	1.5	12.0	472.4	19.9	20,995	21,879
Control	24.9	2.3	12.2	529.4	14.2	23,313	24,089

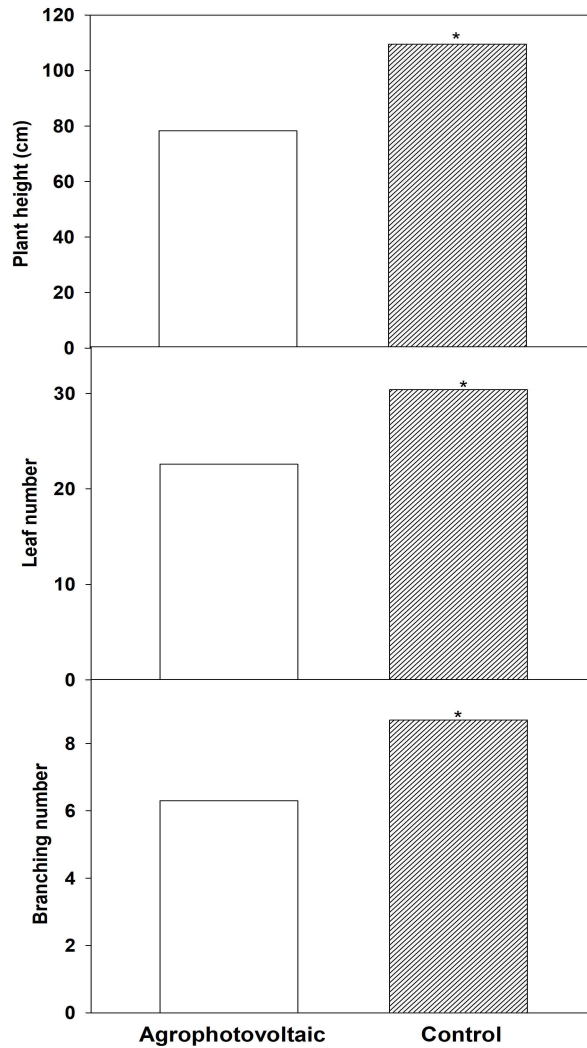
A t-test result showed non-significant differences.



<그림 50> 영농형태양광 감자 생육지(왼쪽) 및 수량성(오른쪽)

○ 영농형 태양광 하부 참깨 생육 및 수량

- 영농형 태양광 하부 참깨 재배시 태양광하부 경우 초장은 다른 작물과 다르게 오히려 대조구에 비해 유의적으로 감소하였고, 엽수와 분지수도 태양광하부에서 대조구에 비해 유의적으로 감소하였음(그림 51).
- 수확기에도 영농형 태양광 하부의 경장(자료 미제시)은 초장과 유사하게 대조구에 비해 감소하였으나, 경직경(자료 미제시), 분지수, 유효분지수, 유효분지비율, 삭장, 삭폭, 삭수, 종실수와 종실중은 영농형 태양과 하부와 대조구간에 유의적인 차이가 없었음(표 16, 그림 49).
- 10a당 종실 수량은 태양광 하부에서 대조구에 비해 19% 유의적으로 감소하였으며, 이러한 태양광 하부의 수량 감소는 천립중에 의해 기인되는 것으로 사료되었음.



<그림 51> 영농형 태양광 하부 참깨 생육(7월 5일 조사)

*significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).

<표 16> 영농형 태양광 하부 참깨 생육 및 수량

Condition	Effective Branching Number	Ratio of Effective Branching (%)	Capsule Length (mm)	Capsule Width (mm)	Capsule Number per Hill	Seed Number per Capsule	1000 Seed Weight (g)	Seed Weight (g/m ²)	Yield (kg/ha)
APV	4.3	86.0	28.8	7.7	60.0	57.5	2.02	143	429
Control	5.1 *	86.4	29.4	7.6	68.2	60.9	2.24 *	176	528 *

*significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).



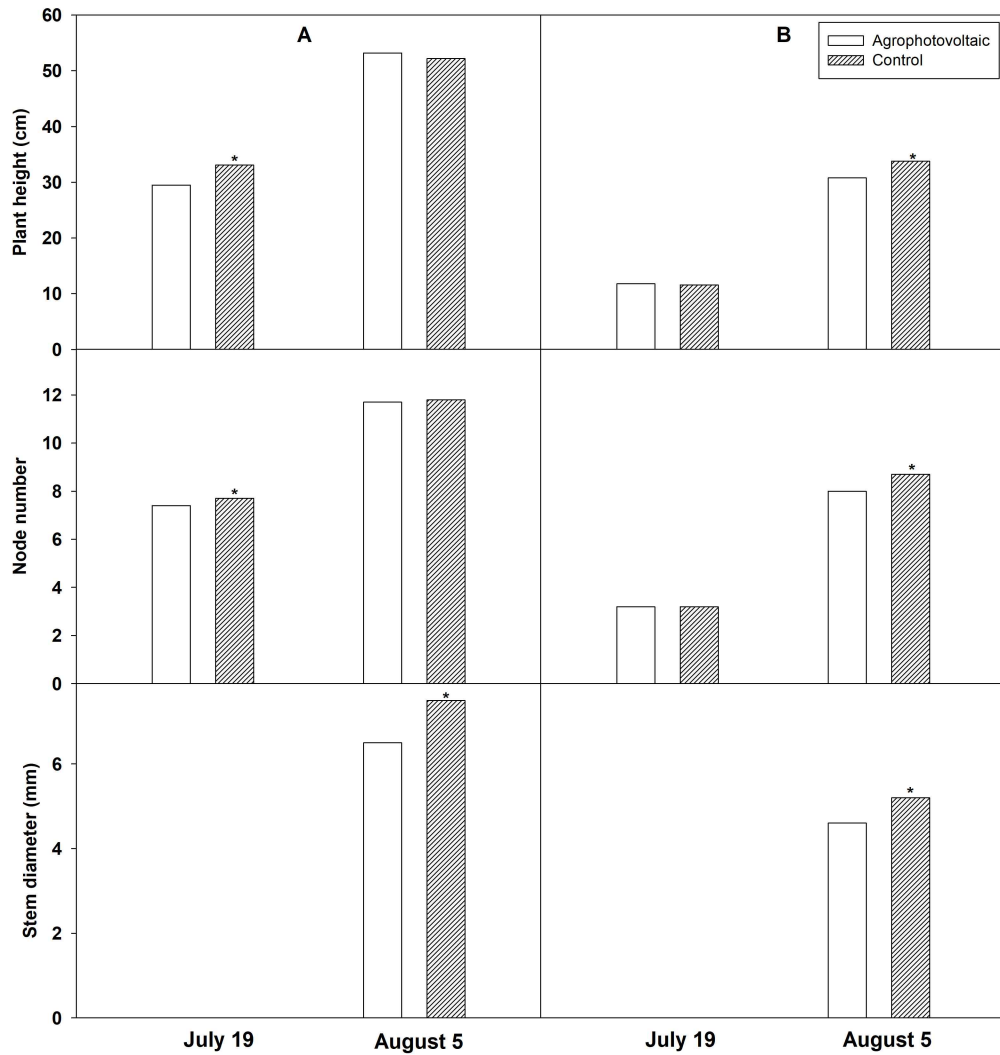
<그림 52> 참깨 파종방법, 생육기 및 수확기(괴산)

○ 영농형 태양광 하부 콩 생육 및 수량

- 영농형 태양광 하부 콩 재배시 7월 19일 파주 조사의 경우 경장과 주경절수(개)는 태양광하부에서 대조구에 비해 유의적으로 적었지만(그림 53, 그림 54), 8월 5일 조사의 경우 경장과 주경절수는 태양광하부와 대조구간에 유의적인 차이가 없었지만, 줄기직경은 태양광 하부에서 대조구에 비해 유의적으로 적었음.
- 7월 19일 영광 태양광 조사의 경우 경장과 주경절수는 태양광하부와 대조구간에 유의적인 차이가 없었다. 그러나 8월 5일 조사의 경우 경장은 태양광하부에서 대조구에 비해 컸으나 주경절수와 줄기직경은 유의적으로 적었음.
- 수확기 파주의 태양광 하부 개체당 협실중, 개체당 협수, 개체당 입수, 개체당 입중, 100립중, 1m²당 개체수 및 리터중는 태양광하부와 대조구간에 유의적인 차이가 없었지만(표 17, 그림 53). 수량은 태양광하부에서 대조구에 비해 18% 유의적으로 감소하였으며, 이러한 감소는 대조구에 비해 미숙립비율이 유의적으로 높아서 기인되는 것으로 사료되었음.
- 영광의 태양광하부 개체당 협실중, 개체당 협수, 개체당 입수, 100립중 및 1m²당 개체수는 태양광하부와 대조구간에 유의적인 차이가 없었지만, 수량은 태양광하부에서 대조구에 비해 20% 유의적으로 감소하였으며, 이러한 감소는 대조구에 비해 개체당 입중이 유의적으로 적고 미숙립 비율이 높아서 기인되는 것으로 사료되었음.
- 파주 영농형태양광 하부에 콩 생육 및 수량에 대한 연차변이를 알아보기 위하여 2021년과 유사한 재배조건으로 2022년에 콩을 재배하고 생육 및 수량을 조사한 결과 영농형 태양광 조건하에서 콩 태양광의 경우 관행이 비해 수량이 31% 유의적으로 감소하였고, 주당협수, 협실중, 종실중, 등숙율, 100립중이 유의적으로 감소하였으며(표 18), 특히 2022년에 수량 감소가 컸던 것은 흉수로 인하여 포장 등이 낙수 등의 피해로 유실되고 식물체 절손 등으로 기인되는 것으로 사료되었음.



<그림 51> 영농형 태양광별 콩 생육지(위쪽 파주, 아래쪽 영광)



<그림 50> 영농형 태양광별 하부 콩 생육(A, 파주; B, 영광)

*significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).

<표 17> 영농형 태양광 하부 콩 생육 및 수량

Area	Condition	Pod Weight (g)	Pod Number per Plant	Seed Number per Plant	Grain Weight per Plant (g)			Ungrained Ratio	100 Seed Weight (g)	Plant Number (m ²)	Liter Weight (g/L)	Yield (kg/ha)
					Grain Weight	Ungrained Weight	Total					
Paju	APV	20.1	34.9	55.8	14.8	0.2	15.0	1.8 *	25.2	14.0	755.9	2029
	Control	24.8	40.9	64.7	16.9	0.3	17.2	0.8	25.9	16.0	732.1	2463 *
Youngkwang	APV	20.1	26.9	41.8	13.3	0.4	13.7	3.1 *	32.7	13.5	756.9	1665
	Control	27.2	33.5	53.4	18.7 *	0.4	19.1*	1.6	35.8	12.3	732.1	2092 *

* significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).



파주(왼쪽, 태양광; 오른쪽 대조구)

영광(왼쪽, 태양광; 오른쪽 대조구)

<그림 55> 영농형 태양광별 콩 수확기

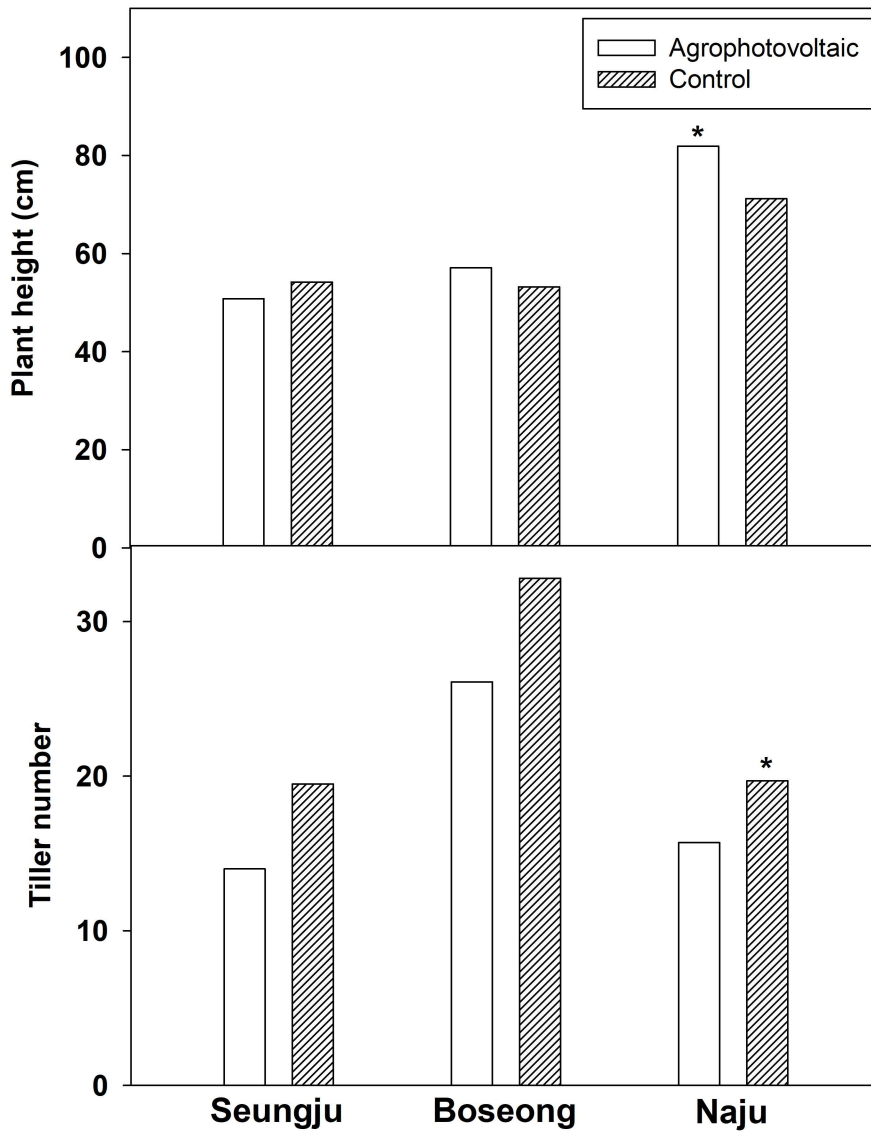
<표 18> 영농형태양광 조건하에서 콩 수량 변화(2022년 연구)

처리	경장 (cm)	분지수 (개/주)	협수 (개/주)	미등숙협 수 (개/주)	협실중 (g/주)	종실중 (g/주)	등숙율 (%)	100립중 (g)	수량 (kg/10a)
태양광	36.9	4.8	47.3	6.1	26.9	20.4	88.5	21.6	122.5
관행	37.1	5.6	72.2*	6.5	41.2*	29.6*	91.7*	23.5*	177.3*

*significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).

○ 영농형 태양광 하부 벼 생육 및 수량

- 영농형 태양광 하부 벼재배시 태양광하부 초장의 경우 승주 태양광 하부는 대조구에 비해 유의적으로 감소하였으나, 나주의 경우 초장은 태양광하부에서 대조구에 비해 유의적으로 컸으나, 보성의 경우 초장은 태양광하부와 대조구간에 유의적인 차이가 없었음(그림 53).
- 나주 태양광 하부 경수는 대조구에 비해 유의적으로 감소하였으나, 승주와 보성 경수는 유의적인 차이가 없었음.
- 수확기 태양광 하부 간장은 대조구에 비해 보성과 나주태양광에서 유의적으로 컸으나, 승주 태양광에서는 유의적인 차이는 없었음(표 19, 그림 57).
- 수장은 영농형 태양광의 시설에 상관없이 대조구에 비해 유의적인 차이가 없었다. 승주태양광의 경우 주당 수수는 태양광 하부에서 대조구에 비해 유의적으로 감소하였으나, 보성과 나주태양광은 유의적인 차이가 없었음.
- 주당립수에서도 승주태양광의 경우 태양광하부와 대조구간에 유의적인 차이가 없었으나, 보성과 나주 태양광 하부는 대조구에 비해 유의적으로 감소하였음.
- 승주와 나주의 등숙률은 태양광 하부와 대조구에 비해 유의적인 차이가 없었으나, 보성의 등숙률은 태양광 하부에서 대조구에 비해 유의적으로 감소함.
- 천립중은 태양광 시설에 상관없이 태양광 하부에서 대조구에 비해 유의적으로 감소함.
- 1ha당 수량은 승주, 보성 및 나주 태양광 하부에서 각각의 대조구에 비해 13%, 14% 및 30% 감소하였으며, 이러한 수량 감소는 수량구성 요소 요인 중 주당수수, 수당립수, 등숙률과 천립중에 의해 기인되는 것으로 사료되었음.
- 영농형태양광 하부에 벼 수량에 대한 연차변이를 알아보기 위하여 2021년과 유사한 재배조건으로 2022년에 벼를 재배하고 수량을 조사한 결과 영농형 태양광 조건하에서 승주, 보성 및 나주 태양광의 경우 관행에 비해 각각 30%, 28% 및 14% 수량이 감소하였고, 이들 감소는 간장, 수장, 수당입수, 천립중 등의 감소에 기인되는 것으로 사료됨(표 20).
- 본 연구 결과로 볼 때 연차간에 태양광의 위치에 따라 수량차이를 보였다. 이러한 이유는 재배시 환경조건 차이에 기인되는 것으로 판단되었음.



<그림 56> 영농형 태양광별 하부 벼 생육

* significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).

<표 19> 영농형 태양광 하부 벼 생육 및 수량

Area	Condition	Culm Length (cm)	Panicle Length (cm)	Panicle Number per Hill	Spikelet Number per Panicle	Ripen Grain (%)	1000 Seed Weight (g)	Yield (kg/ha)
Seungju	APV	69.8	17.2	11.8	75.0	81.0	26.7	5248
	Control	68.6	16.6	13.8 *	77.8	86.2	27.4 *	6037 *
Boseong	APV	88.2 *	17.8	17.2	70.0	77.3	26.4	5537
	Control	78.8	18.4	18.1	75.4 *	87.1 *	27.8 *	6464 *
Naju	APV	81.2 *	19.2	14.0	94.3	86.1	27.0	6040
	Control	75.3	19.5	15.8	104.8 *	91.6	27.8 *	8580 *

*significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).



승주(오른쪽 사진 대조구와 태양광하부)



보성(오른쪽 사진 대조구와 태양광하부)



나주(오른쪽 사진 대조구와 태양광하부)

<그림 57> 영농형태양광 하부 벼 생육 및 수확기 벼 속기

<표 20> 영농형태양광 조건하에서 벼의 수량 변화(2022년 연구)

지역	구 분	간 장 (cm)	수 장 (개)	주당수수 (개)	수당립수 (개)	등숙률 (%)	현미천립 중 (g)	정조수량 (kg/10a)
승 주	태양광	71.3*	89.7	12.1	69.4	91.7	23.4	315.0
	관행	68.7	88.2	12.7	74.2	92.4	24.5	451.0*
보 성	태양광	85.6*	97.6	13.4	65.1	83.4	23.7	462.9
	관행	75.3	95.1	11.9	85.3*	87.3	24.4	641.9*
나 주	태양광	78.8*	98.7*	11.5	105.4	94.3	21.9	572.9
	관행	71.7	93.7	11.6	110.0	92.3	23.3*	669.5*

* significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).

□ 영농형 태양광 하부 식량작물 생리활성 변화

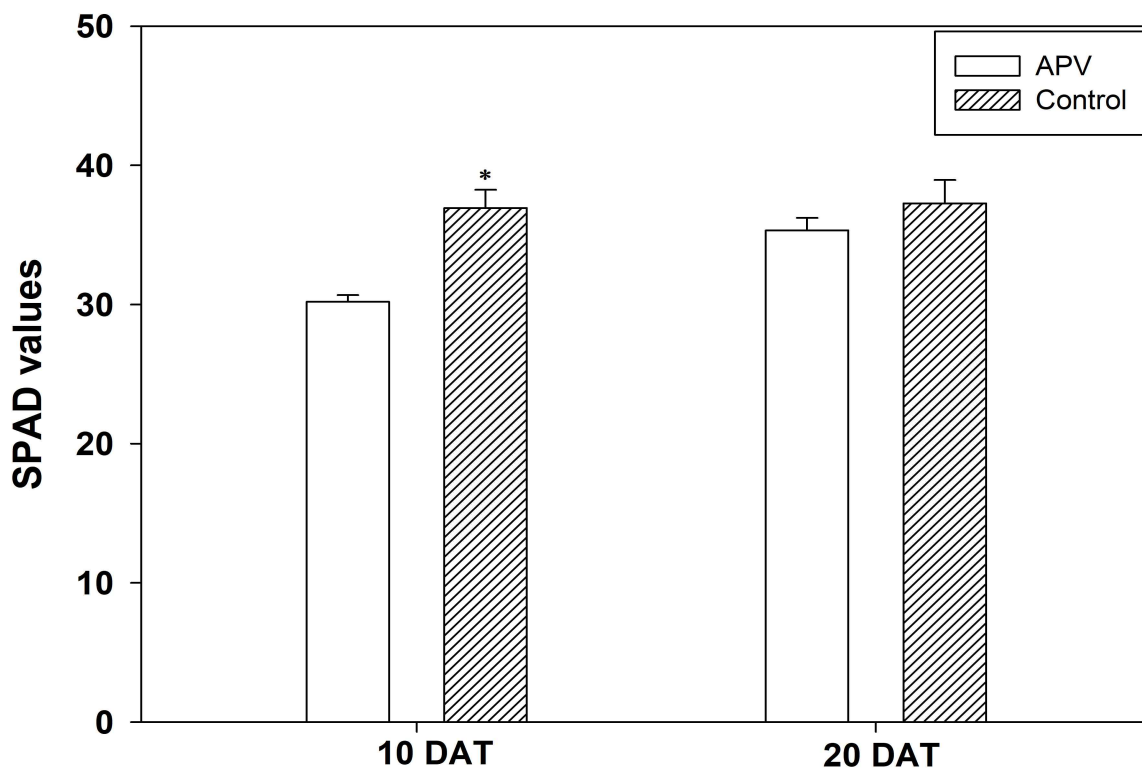
○ 영농형태양광 하부 엽록소 및 광합성 함량 변화

- 승주 영농형태양광 하부에 벼 이앙 후 10일에 SPAD 값(엽록소 함량)은 관행조건에 비해 유의적으로 감소하였으나, 이앙 후 20일째에는 영농형태양광 하부와 관행간에 유의적인 차이가 없었으나(그림 58), 7월 7일, 8월 9일 및 9월 9일에 엽록소 함량은 승주 영농형태양광 하부에서 관행에 비해 유의적으로 높았음(그림 59).
- 이러한 결과는 태양광 하부에 차광으로 인하여 관행구에 비해 벼의 성숙이 지연되는 영향에 의해서 기인되는 것으로 판단됨.
- 영농형태양광 하부에 벼 이앙 후 10일에 Fv/Fm(광합성 효율)과 ETR(전자전달 효율)은 관행조건에서 유의적으로 높았으나, 이앙 후 20일째에는 영농형태양광 하부와 관행간에 유의적인 차이가 없었고(그림 60, 그림 61), 영농형 태양광하부에서 이앙 후 80일에 Fv/Fm(광합성 효율)과 ETR(전자전달 효율)은 벼의 초기 이앙 후 10일 결과와 달리 태양광 조건에서 유의적으로 높았으나, 이것도 앞의 엽록소 함량과 유사하게 태양광 하부에 성숙 지연에 따른 결과로 해석됨(그림 62).
- 영농형 태양광 하부에 콩 파종 후 7월 4일, 8월 30일 및 9월 27일에 엽록소 함량은 벼처럼 영농형태양광하부에서 관행에 비해 유의적으로 높았음(그림 61).

○ 영농형태양광 하부 토양 및 식물체 무기 양분 변화

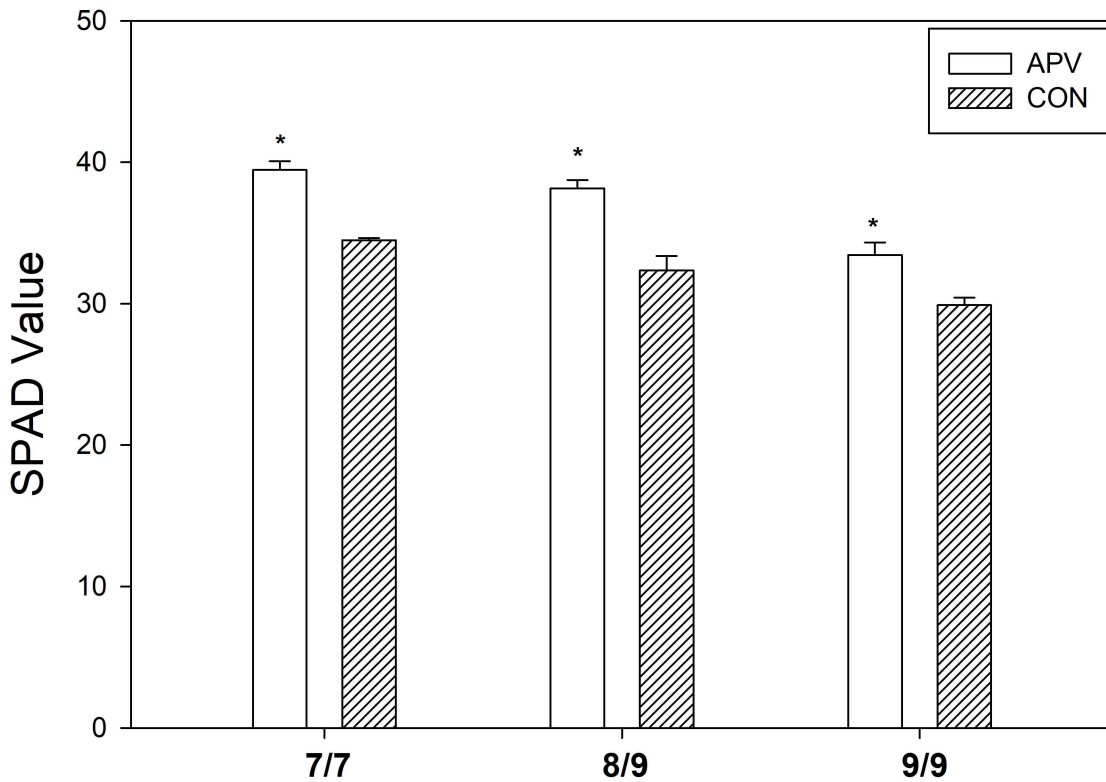
- 영농형태양광 하부에 벼 유묘기, 성숙기 및 수확기별로 나누어 토양을 채취한 후 무기양분을 분석한 결과 pH는 유묘기와 성숙기 보성 관행구에서 태양광보다 유의적으로 높았으나, 반대로 성숙기 승주와 나주 태양광의 경우는 관행에 비해 유의적으로 높았음(표 14).
- 총질소는 유묘기, 성숙기, 수확기 승주 관행구에서 태양광에 비해 유의적으로 높았다. 유기물은 유묘기 승주와 나주, 성숙기 승주, 수확기 보성 관행구에서 태양광에 비해 높았으나, 유묘기 보성, 성숙기 보성과 나주, 수확기 나주 태양광에서 관행구에 비해 높았음.
- 유효인산의 경우 유묘기 승주와 나주, 성숙기 승주, 수확기 승주의 관행구에서 태양광에 비해 유의적으로 높았고, 반면에 유묘기 보성, 성숙기 보성과 나주, 수확기 보성 태양광에서 관행구에 비해 유의적으로 높았음.
- 치환성 칼륨은 유묘기 보성과 나주, 성숙기 승주, 수확기 보성 관행구에서 태양광에 비해 유의적으로 높았고, 반면에 성숙기 보성과 나주, 수확기 승주와 나주 경우는 태양광에서 유의적으로 높았음.
- 치환성 칼슘은 유묘기 보성, 성숙기 승주, 수확기 승주 관행구에서 태양광에 비해 높았고, 유묘기, 성숙기, 수확기 나주에서는 태양광에서 관행구에 비해 유의적으로 높았음.
- 치환성 Mg의 경우는 유묘기 보성, 성숙기와 수확기 승주와 나주 관행구에서 태양광에 비해 유의적으로 높았음.
- CEC 함량은 유묘기, 성숙기, 수확기 승주에서 관행구에서 태양광에 유의적으로 높았고 유묘기와 성숙기 보성에서는 태양광에서 관행구에 비해 유의적으로 높았다. 전반적으로 볼 때 총질소와 치환성 Mg의 경우만 관행구에서 태양광에 비해 유의적으로 높았을 뿐 다른 무기 성분에는 태양광과 관행구간에 일관성이 없었음.
- 영농형태양광 하부에 콩 유묘기, 성숙기, 수확기별로 토양 무기양분을 분석한 결과 pH는 유묘기와 성숙기 태양광의 경우 관행에 비해 유의적으로 높았고, 반대로 수확기 pH는 관행구에서 태양광에 비해 유의적으로 높음.
- 유기물, 유효인산, 치환성 칼륨과 칼슘, CEC는 관행구에서 태양광에 비해 유의적으로 높았고, 치환성 Mg는 태양광에서 관행구에 비해 유의적으로 높았음(표 15).

- 영농형태양광 하부에 감자 유묘기, 성숙기, 수확기별로 토양 무기양분 중 총질소, 유기 물, 유효인산, 치환성 칼륨, 칼슘 및 마그네슘은 관행구에 비해 유의적으로 감소하였음(표 16).
- 영농형태양광 하부에 벼, 콩 및 감자 성숙기 및 수확기별로 식물체 무기양분 분석한 결과(표 17, 표 18, 표 19), 벼의 경우 승주 태양광을 제외하고 성숙기와 수확기 모든 태양광에서 질소 함량이 관행에 비해 높았고, 칼륨 함량도 성숙기 승주, 수확기 승주와 보성 태양광에서 관행에 비해 높음(표 17).
- 칼슘은 성숙기 승주, 수확기 보성과 나주 관행구에서 태양광에 비해 유의적으로 높았다. 붕소의 경우도 성숙기와 수확기 승주 관행구에서 태양광에 비해 높았으며, 나트륨과 망간은 태양광 위치와 생육단계에 따라 상반되는 경향을 보였음.
- 콩의 경우 성숙기 태양광에서 질소, 인산, 칼륨, 칼슘, 마그네슘, 붕소 및 망간 대부분이 관행에 비해 유의적으로 높았으나(표 18), 수확기에는 질소, 인산, 칼슘과 마그네슘은 관행에서 태양광에 비해 유의적으로 높았음.
- 감자의 경우는 나트륨의 경우 성숙기와 수확기에서 관행에 비해 태양광에서 유의적으로 높았을 뿐 그 밖의 성분은 성숙기와 수확기간에 일정한 경향이 없었음(표 19).

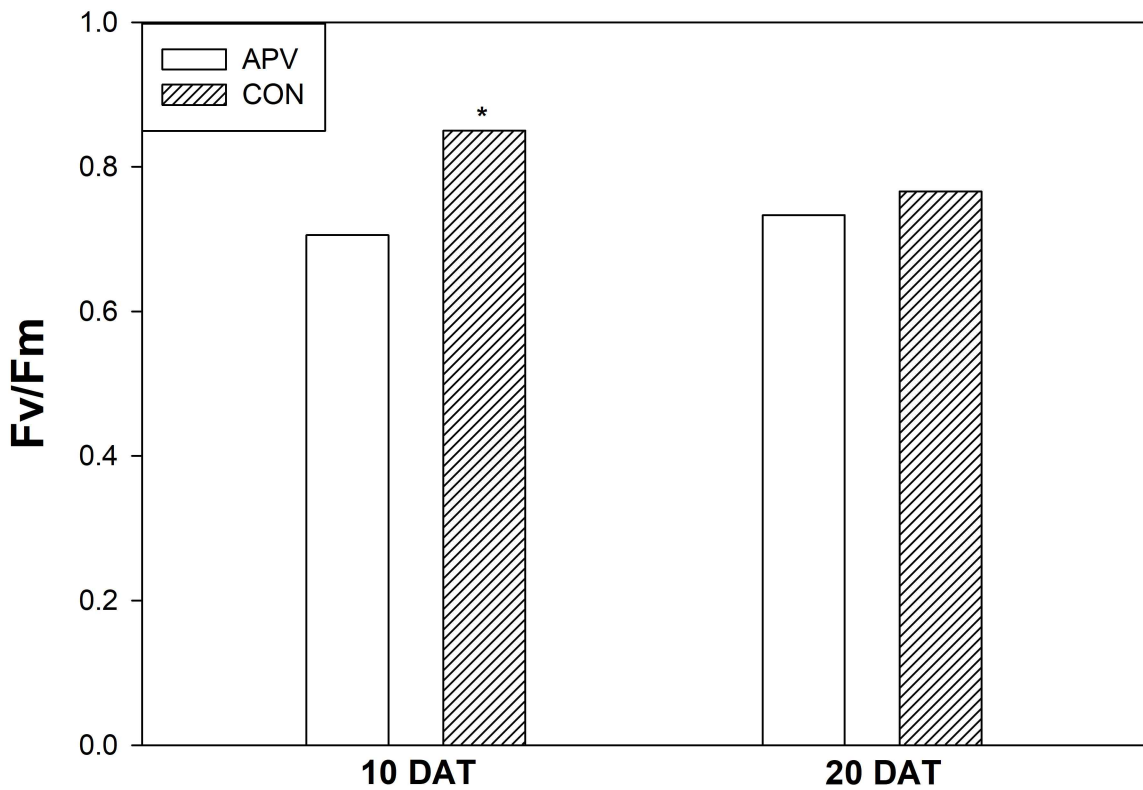


<그림 58> 승주 영농형태양광 조건하에서 벼 이앙 후 10일(DAT)과 20일(DAT)에 SPAD 값(엽록소 함량)

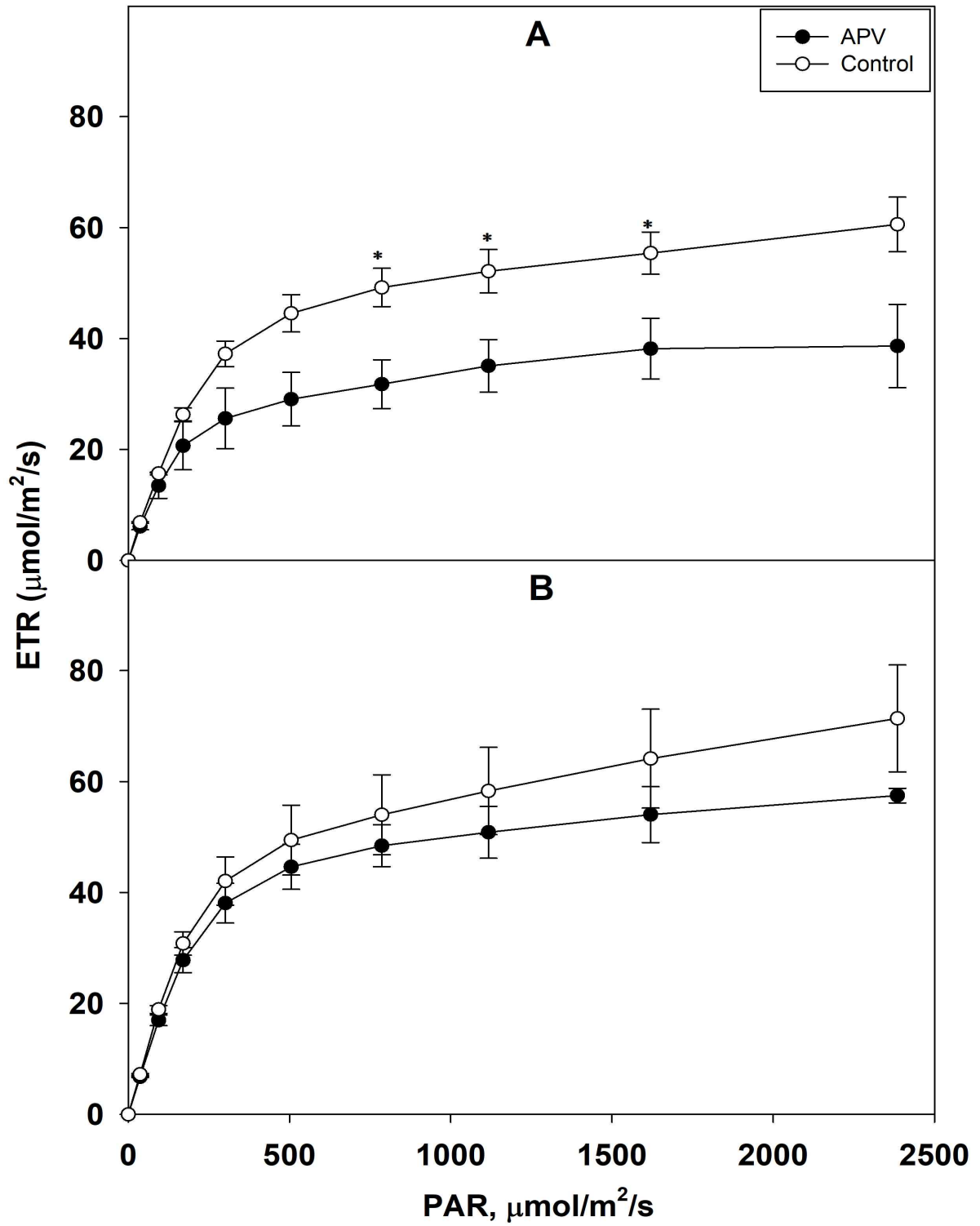
*significantly different between APV system and control plot at different investigation dates using a t-test ($p = 0.05$).



<그림 59> 승주 영농형태양광 조건하에서 벼 이앙 후(7월 7일, 8월 9일 및 9월 9일)에 SPAD 값(엽록소 함량)
 *significantly different between APV system and control plot at different investigation dates using a t-test ($p = 0.05$).



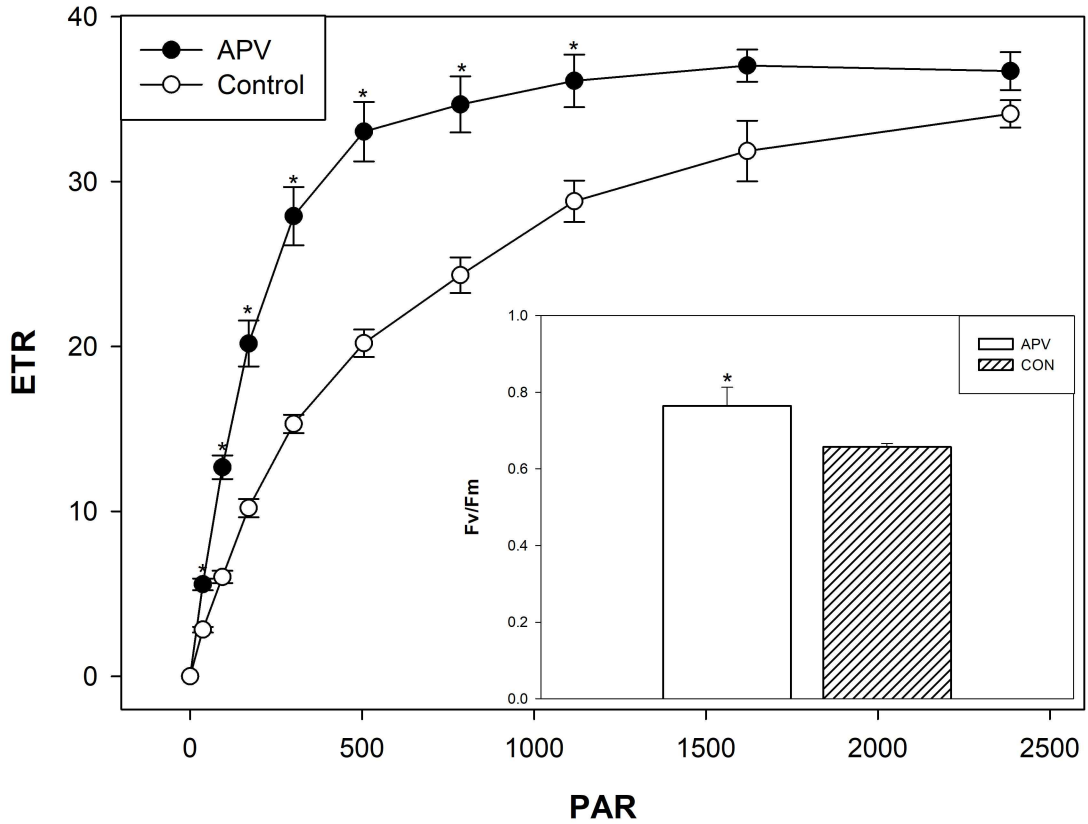
<그림 60> 승주 영농형태양광 조건하에서 벼 이앙 후 10일(DAT)과 20일(DAT)에 Fv/Fm (광합성 효율)
 *significantly different between APV system and control plot at different investigation dates using a t-test ($p = 0.05$)



<그림 61> 승주 영농형태양광 조건하에서 벼 이앙 후 10일(A)과 20일(B)에 광량별 ETR(전자전달효율) 변화

Error bars represent standard deviation (n=3)

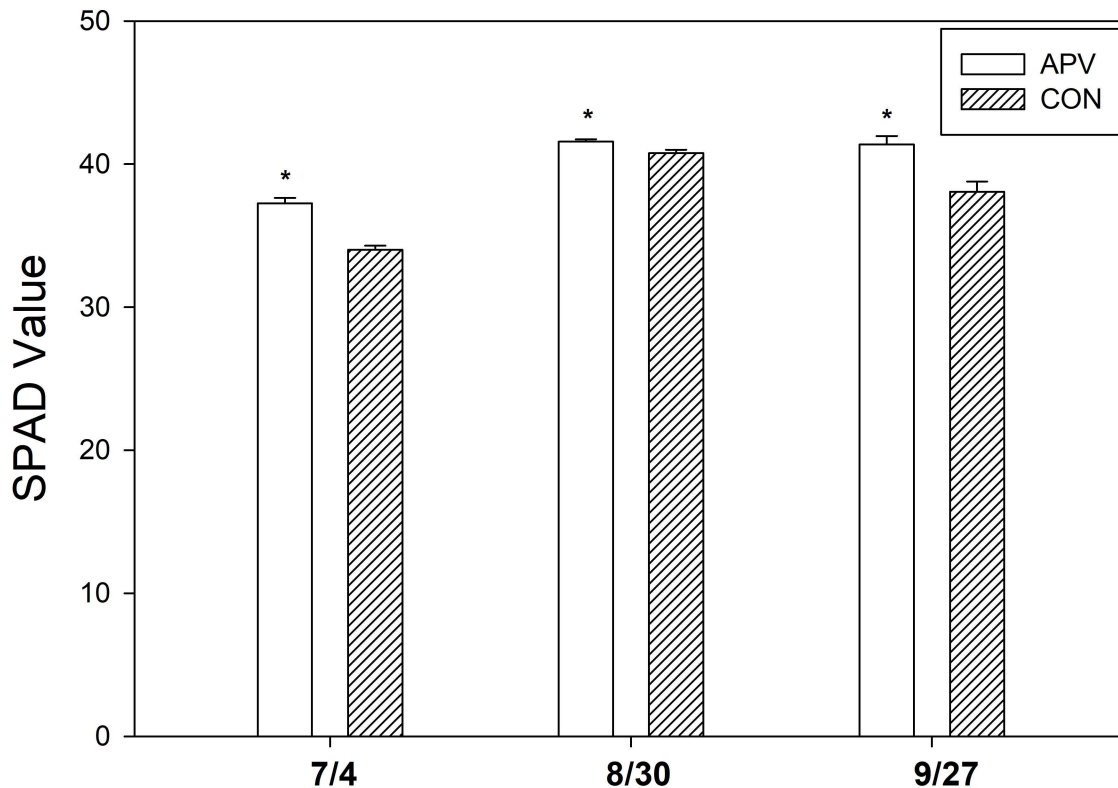
*significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).



<그림 62> 승주 영농형태양광 조건하에서 벼 이앙 후 80일에 광량별 Fv/Fm과 ETR) 변화

Error bars represent standard deviation (n=3)

*significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).



<그림 63> 파주 영농형태양광 조건하에서 콩 파종 후(7월 4일, 8월 30일 및 9월 27일)에 SPAD 값(엽록소 함량)

*significantly different between APV system and control plot at different investigation dates using a t-test ($p = 0.05$).

<표 14> 다양한 영농형태양광 조건하에서 벼 생육기별 토양 양분 변화

생육 단계	태양광 위치	처리	pH (1:5)	T-N	OM (g/Kg)	Av.P ₂ O ₅ (mg/Kg)	치환성 (cmol ⁺ /Kg)			CEC (cmol ⁺ /Kg)
							K	Ca	Mg	
유묘기	승주	태양광	5.7	0.16	40.74	182.41	0.51	3.95	0.97	15.79
		관행	5.6	0.20*	46.95*	208.05*	0.50	4.06	0.99	17.13*
	보성	태양광	5.5	0.22	49.08*	169.80*	0.28	3.66	0.62	18.12*
		관행	5.7*	0.21	47.70	156.02	0.31*	3.88*	0.69*	16.00
	나주	태양광	6.3*	0.10	21.89	52.06	0.36	5.47*	1.85	15.81
		관행	6.2	0.10	23.45*	67.27*	0.43*	5.18	1.81	15.63
성숙기	승주	태양광	5.7*	0.15	36.72	171.38	0.48	3.69	0.83	15.27
		관행	5.6	0.20*	47.75*	234.56*	0.53*	4.27*	0.91*	18.00*
	보성	태양광	5.4	0.24	53.56*	197.12*	0.31*	3.71	0.78*	18.64*
		관행	5.5*	0.22	49.82	160.64	0.29	3.79	0.71	17.18
	나주	태양광	7.0*	0.10	20.75*	88.54*	0.46*	6.43*	1.95	15.31
		관행	6.5	0.09	18.45	53.46	0.40	6.25	2.05*	16.33
수확기	승주	태양광	5.4	0.16	37.07	182.19	0.34*	3.28	0.64	16.17
		관행	5.5	0.17*	37.07	206.59*	0.30	4.27*	0.84*	18.26*
	보성	태양광	5.4	0.23	49.88	170.16*	0.25	3.84	0.65	17.95
		관행	5.4	0.23	53.68*	130.56	0.27*	3.79	0.63	17.98
	나주	태양광	6.5	0.36	20.75*	63.30	0.39*	5.97*	1.67	15.95
		관행	6.5	0.08	16.49	31.21	0.37	5.52	1.87*	16.22

*significantly different between APV system and control plot at different investigation dates using a t-test ($p = 0.05$).

<표 15> 영농형태양광 조건하에서 콩 생육기별 토양 양분 변화

생육 단계	태양광 위치	처리	pH (1:5)	T-N	OM (g/Kg)	Av.P ₂ O ₅ (mg/Kg)	치환성 (cmol ⁺ /Kg)			CEC (cmol ⁺ /Kg)
							K	Ca	Mg	
유묘기	파주	태양광	7.1*	0.15	23.85	600.28	0.37	6.95	1.88*	15.86
		관행	7.0	0.15	24.08	674.48*	0.43*	7.46*	1.64	18.41*
성숙기	파주	태양광	7.1*	0.11	16.93	689.29	0.42	6.44	1.77*	16.15
		관행	6.9	0.19*	29.02*	732.95*	0.75*	7.10*	1.30	19.78*
수확기	파주	태양광	6.9	0.12	17.99	599.98*	0.33	6.89	1.81*	16.16
		관행	7.0*	0.12	21.15*	500.29	0.35	7.18	1.50	17.59*

*significantly different between APV system and control plot at different investigation dates using a t-test ($p = 0.05$).

<표 16> 영농형태양광 조건하에서 감자 생육기별 토양 양분 변화

생육 단계	태양광 위치	처리	pH (1:5)	T-N	OM (g/Kg)	Av.P ₂ O ₅ (mg/Kg)	치환성 (cmol ⁺ /Kg)			CEC (cmol ⁺ /Kg)
							K	Ca	Mg	
유묘기	청주	태양광	7.3	0.14	21.83	503.65	0.48	6.08	1.52	11.95
		관행	7.5*	0.17*	22.30	516.93*	0.67*	6.43*	1.69*	12.69*
성숙기	청주	태양광	5.3	0.13	28.68	52.91	0.34	2.88	1.17	13.61
		관행	5.3	0.15*	29.71*	62.84	0.34	3.02*	1.21*	13.86
수확기	청주	태양광	7.4	0.08	14.34	498.15	0.53	4.29	1.15	14.01
		관행	7.4	0.21*	26.55*	514.34*	0.74*	6.89*	1.79*	13.69

*significantly different between APV system and control plot at different investigation dates using a t-test ($p = 0.05$).

□ 영농형 태양광 하부 식량작물 재해, 병해충 및 잡초 발생 양상

○ 영농형태양광 하부 잡초발생 양상

- 승주 벼 영농형 태양광 하부에서 7월 8일, 8월 9일, 9월 19일 잡초발생의 경우 일반적으로 잡초 초장은 관행에 비해 컸으나, 1개체당 생체중은 관행에 비해 적었음(표 21). 또한 태양광 하부에서 한련초와 물달개비 발생이 관행에 비해 적었으나, 다른 잡초종 발생은 태양광과 관행간에 유사하였음.
- 보성 벼 영농형 태양광 하부에서 7월 8일, 8월 9일, 9월 19일에 자귀풀, 한련초, 도깨비바늘이 발생하였으나 관행에서는 발생하지 않았으며, 나주 벼 영농형 태양광 하부와 관행 재배지에서 전 조사시기에 잡초발생은 없었음.
- 파주 콩 영농형 태양광하부에서 일반적으로 잡초종 초장은 관행에 비해 적었으나, 주당 생체중은 영농형 태양광 하부에서 높았음(표 20). 관행구와 다르게 영농형태양광하에서 쑥, 개갓냉이, 쇠비름은 발생하지 않았음. 전반적으로 잡초발생량은 태양광하부와 관행간에 유사하였음.
- 감자 영농형태양광하에서 발생 잡초종은 명아주, 바랭이, 깨풀이었고, 관행구의 잡초발생종의 경우는 명아주, 쇠비름, 깨풀로서 다소 차이를 보였음(표 22).

○ 영농형태양광 하부 병 발생 양상

- 승주, 보성 및 나주 벼 영농형태양광하에서 잎도열병, 깨씨무늬병 등 병발생은 조사시기와 상관없이 관행구와 차이가 없었음(표 23). 청주 감자 영농형태양광하에서 해충 진딧물, 더듬이병 발생도 관행구와 차이가 없었음(표 24).

○ 영농형태양광 하부 재해(낙수) 발생 양상

- 6월 23일 심한 강우에 의해 콩 태양광 판넬 아래 10~13cm 토양 파임으로서 고랑이 파이고 콩 식물체 절손 등의 현상이 야기되어 결과적으로 수량감소에 영향을 미친 것으로 사료됨(그림 18).

<표 20> 콩 영농형태양광 조건하에서 잡초 생육 및 발생량 변화

태양광 위치	조사일	잡초명	초장(cm)		생체중(g/plant)		잡초발생량	
			태양광	관행	태양광	관행	태양광	관행
파주	7. 4	명아주	7.2	-	8	-	-1	-
		메꽃	14	13	10	10	-1	1
		깨풀	5.8	5.2	4	4	1	1
	8. 30	명아주	21	68	54	50	-1	r
		메꽃	86	73	46	32	r	r
		개비름	51.8	76	250	110	r	r
		한련초	36.7	40.6	30	30	r	1
		까마중	58.8	53	130	120	r	r
		쑥	-	24.8	-	18	-	r
		개갓냉이	-	18.8	-	27	-	-1
	9. 29	명아주	40	76	86	56	-1	r
		메꽃	93	95	67	47	r	r
		개비름	84	92	310	140	-1	r
		한련초	41	56	38	41	r	1
		까마중	63.2	69	157	130	r	r
개갓냉이	23	26	30	31	r	-1		
쇠비름	25	30	30	40	r	r		

잡초발생량 r: 매우드뎠 / -1: 드뎠 / 1: 5%미만 / 2: 5 ~ 25% / 3: 25 ~ 50 / 4: 50~75 / 5: 75 ~ 100

<표 21> 다양한 벼 영농형태양광 조건하에서 잡초 생육 및 발생량 변화

태양광 위치	조사일	잡초명	초장		생체중(g/plant)		잡초발생량	
			태양광	관행	태양광	관행	태양광	관행
승주	7.8	벼풀	28	36	25	35	r	r
		미국가막사리	35	30	20	20	r	r
		한련초	22	26	18	15	r	-1
		물달개비	26	21	20	20	r	r
		알방동사니	19	23	15	15	r	r
		개구리밥	1	1	1	1	1	1
	8.9	벼풀	30	29	28	36	r	r
		미국가막사리	74	63	52	68	r	r
		한련초	38	23	33	86	-1	2
		물달개비	40	43	46	54	r	-1
		알방동사니	59	61	63	53	r	r
		개구리밥	1	1	2	2	3	3
	9.19	벼풀	47	40	32	45	r	r
		미국가막사리	80	77	63	83	r	r
		한련초	50	36	67	42	-1	2
		물달개비	31	45	35	62	-1	1
		알방동사니	55	40	40	80	r	r
		피	140	130	130	230	r	r
보성	7.8	자귀풀	17	발	10	발	r	발
		한련초	7		5		r	
		도깨비바늘	32	생	125	생	r	생
	8.9	자귀풀	91		105		r	
		한련초	48		54		r	
		도깨비바늘	66	없	82	없	r	없
9.19	자귀풀	15				r		
	도깨비바늘	34	음	25	음	-1	음	
나주		잡초발생 없음						

잡초발생량 r: 매우드뎠 / -1: 드뎠 / 1: 5%미만 / 2: 5 ~ 25% / 3: 25 ~ 50 / 4: 50~75 / 5: 75 ~ 100

<표 22> 감자 영농형태양광 조건하에서 잡초 생육 및 발생량 변화

태양광위 치	조사일	잡초명	초장(cm)		생체중(g/plant)		잡초발생량	
			태양광	관행	태양광	관행	태양광	관행
청주	4.19	명아주	3	4	1	2	r	r
		깨풀	3	3	1	1	1	1
	5.26	관리기 배토 작업으로 잡초가 없음						
	6.20	명아주	11	12.8	18	15	1	1
		바랭이	9	-	12	-	-1	-
		별꽃	20	-	15	-	r	-
쇠비름		-	20.4	-	27	-	r	
		깨풀	-	6.0	-	8	-	r

잡초발생량 r: 매우드뎠 / -1: 드뎠 / 1: 5%미만 / 2: 5 ~ 25% / 3: 25 ~ 50 / 4: 50~75 / 5: 75 ~ 100

<표 23> 다양한 벼 영농형태양광 조건하에서 병 발생

작물	태양광 위치	조사일	앞도열병		키다리병		깨씨무늬병	
			태양광	관행	태양광	관행	태양광	관행
벼	승주	7월 8일	-	-	-	-	-	-
		8월 9일	-	-	-	-	소	소
		9월 19일	-	-	-	-	소	소
	보성	7월 7일	-	소	소	소	-	-
		8월 9일	-	소	-	-	소	소
		9월 19일	-	-	-	-	소	소
	나주	7월 7일	-	-	-	-	-	-
		8월 9일	-	-	-	-	-	-
		9월 19일	-	-	-	-	-	-

<표 24> 감자 영농형태양광 조건하에서 해충 및 병 발생

작물	태양광 위치	조사일	진딧물		더듬이	
			태양광	관행	태양광	관행
감자	청주	5월 23일	소	소	-	-
		6월 20일	-	-	극소	극소

날짜 (년-월-일)	평균기온(°C)					강수량(mm)		
	금년		전년		편차	금년	전년	
	평균	최고	최저	평균				
2022-06-20	22.2	28.6	18.3	20.07	2.15	0	0	
2022-06-21	22.7	29.9	17.5	21.42	1.24	0	0	
2022-06-22	22.2	28.3	18.8	20.61	1.59	0	0	
2022-06-23	20.6	24.2	17.8	20.81	-0.25	112.5	0	
2022-06-24	21.1	25.2	18.7	21.46	-0.34	0.5	0	
2022-06-25	23.2	29.2	18.5	21.42	1.77	0	0	
2022-06-26	24	26.1	22	20.28	3.7	0	0	
2022-06-27	24.1	27.5	21.7	22.54	1.53	8.5	0	
2022-06-28	24.1	25.8	22.6	22.11	1.99	5	0	
2022-06-29	22.5	24.6	19.5	21.69	0.77	48.5	1.5	
2022-06-30	20.1	22.4	18.3	22.25	-2.13	43	0	
2022-07-01	24.5	29.8	19	23.63	0.88	0	0	

태양광 패널 아래 10~13cm 파임

태양광 이랑 12~15cm 파임

6월 23일 강수량



대조구



대조구

<그림 64> 콩 영농형태양광 하부 강우에 의한 낙수 피해 정도

□ 영농형 태양광 하부 식량작물 품질, 영양성분 및 안정성 평가

○ 영농형태양광 하부 작물 품질 및 일반성분

- 영농형 태양광 조건하에서 단백질 함량은 나주 태양광에서 관행에 비해 유의적으로 높았고, 그 밖의 보성과 승주 태양광에서도 유의적인 차이는 없으나 높은 경향을 보였음(표 25).
- 그 밖의 아밀로스, 백도, 취반미 윤기치는 관행과 태양광간에 차이가 없었음. 또한 완전미율, 분상질립율, 쇠립율, 피해립율과 같은 외관 품위도 관행과 태양광간에 차이가 없어서 태양광 시설에 벼재배시 벼 품질에는 부정적인 영향은 없는 것으로 사료됨.
- 감자의 경우 태양광조건에서 조단백질과 조회분 함량이 관행에 비해 감소하였고, 반면에 벼의 경우 보성과 나주 태양광에서 조단백질 함량이 관행에 비해 높았으며(표 26), 그 밖의 일반성분은 태양광과 관행간에 유의적인 차이가 없었음. 또한 콩의 일반성분은 태양광과 관행에 차이가 없었음.
- 태양광 조건에서 수확한 감자의 경우 Ca, K, Mg 함량은 감소하였고, 나주 태양광에서 수확한 쌀의 경우 K, Na 함량은 감소하였음(표 27).
- 반면에 파주 태양광에서 수확한 콩의 경우는 Fe과 Mg 함량 증가하였고, 영광 태양광 콩에서는 Na 함량이 증가하였고, 나주 태양광 쌀의 경우는 Ca과 S 함량이 증가하였음. 그 밖의 무기물 함량은 태양광과 관행간에 차이 없었음.

○ 영농형태양광 하부 이차화합물과 중금속 양상

- 영농형태양광 하부의 감자 식물체 경우 총 페놀, 총 플라보노이드 및 DPPH 라디컬 소거 능력은 관행에 비해 유의적으로 감소하였고, 벼의 경우 총 페놀 함량은 보성과 나주 태양광 조건하에서 관행에 비해 유의적으로 감소하였음(표 28). 콩은 태양광과 관행간에 이차화합물에 차이가 없었음.
- 영농형태양광 하부의 종자 이차화합물의 경우는 작물의 종류와 태양광 유무에 상관없이 차이가 없었고, 다만 DPPH 라디컬 소거 능력은 보성 태양광의 경우 관행에 비해 유의적으로 감소하였다. 작물별 영농형 태양광 하에서 수확한 종자의 경우 중금속 비소, 카드뮴, 납, 크롬은 검출되지 않았음(표 29).

<표 25> 영농형 태양광 조건에서 쌀 품질 특성 변화

지역	처리	단백질 (%)	아밀로스 (%)	백도	취반미 윤기치	외관 품위(%)			
						완전미율	분상질립율	쇠립율	피해립율
보성	관행	5.3	20.3	44.4	78.6	85.0	4.0	10.0	0.9
	태양광	6.3	20.3	43.0	76.0	80.6	9.1	9.1	1.2
승주	관행	5.9	20.2	43.5	81.3	84.8	6.0	8.1	1.0
	태양광	6.4	20.7	42.1	75.7	85.4	5.1	8.7	0.8
나주	관행	5.5	18.5	43.8	73.4	78.9	18.7	1.4	1.0
	태양광	7.8*	18.5	41.1	60.2	81.4	15.5	2.0	1.0

* significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).

<표 26> 영농형 태양광 조건에서 작물별 일반성분 변화

작물	지역	처리	조단백질 (%)	조지방 (%)	수분 (%)	조회분 (%)	탄수화물 (%)
감자	청주	관행	2.14*	0.20	78.07	1.26*	18.32
		태양광	1.91	0.18	79.94	1.09	16.88
콩	파주	관행	34.02	12.59	8.86	5.28	39.25
		태양광	34.48	11.96	8.37	5.32	39.87
	영광	관행	35.46	12.06	9.21	5.18	38.08
		태양광	34.83	13.56	10.48	5.28	35.85
벼	승주	관행	6.23	0.67	9.29	0.40	83.41
		태양광	6.68	0.79	9.41	0.40	82.72
	보성	관행	5.59	0.50	9.49	0.41	84.02
		태양광	6.60*	0.46	9.83	0.41	82.69
	나주	관행	5.43	0.51	10.90	0.43	82.74
		태양광	8.21*	0.57	10.58	0.38	80.27

* significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).

<표 27> 영농형 태양광 조건에서 작물별 무기물 함량 변화

작물	지역	처리	Ca (mg%)	Cu (mg%)	K (mg%)	Fe (mg%)	Mg (mg%)	P (mg%)	Na (mg%)	S (mg%)
감자	청주	관행	9.43*	0.00	284.29*	2.18	25.39*	52.41	9.16	37.93
		태양광	6.77	0.00	234.84	1.85	21.02	48.34	8.64	51.12
콩	파주	관행	209.97	0.42	1570.79	5.89	205.15	885.59	12.76	22.64
		태양광	223.57	0.49	1550.75	6.50*	225.31*	925.95	13.14	38.47
	영광	관행	231.10	0.75	1564.92	7.36	245.97	819.40	10.54	62.55
		태양광	253.31	0.98	1574.82	7.87	247.68	869.90	16.04*	58.06
벼	승주	관행	11.16	0.23	113.85	1.42	28.95	139.46	18.04	40.51
		태양광	10.40	0.23	128.91	1.59	29.86	148.46	17.53	31.37
	보성	관행	10.63	0.38	132.43	1.42	29.56	147.18	15.80	39.96
		태양광	11.52	0.22	150.30	1.31	31.81	160.75	13.61	54.85
	나주	관행	9.31	0.09	155.54*	0.74	26.82	144.70	20.85*	68.34
		태양광	11.12*	0.05	126.13	0.94	27.70	137.27	15.46	77.32*

* significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).

<표 28> 영농형 태양광 조건에서 작물별 이차화합물 함량 변화

작물	지역	처리	식물체			종자		
			Total Phenol (mg/g)	Total Flavonoid (mg/g)	DPPH (%)	Total Phenol (mg/g)	Total Flavonoid (mg/g)	DPPH (%)
감자	청주	관행	1.15*	1.97*	64.6*	7.95	2.60	20.3
		태양광	0.36	1.46	57.0	7.98	2.61	13.3
콩	파주	관행	1.13*	1.95	61.2	1.36	0.49	9.3
		태양광	0.97	2.04	59.0	1.36	0.45	13.8
	영광	관행	-	-	-	1.34	0.45	12.0
		태양광	-	-	-	1.33	0.47	13.4
벼	승주	관행	0.14	1.37	67.8	1.27	0.42	9.5
		태양광	0.13	1.34	70.5	1.27	0.42	5.8
벼	보성	관행	0.53*	1.49	67.4	1.27	0.42	11.5*
		태양광	0.45	1.55	65.9	1.27	0.42	5.7
벼	나주	관행	0.45*	1.52	64.9	1.27	0.41	9.4
		태양광	0.40	1.49	54.3	1.27	0.41	9.7

* significantly different between APV system and control plot using a t-test ($p = 0.05$).

<표 29> 영농형태양광 조건하에서 작물별 종자에 중금속 함량

작물	처리	비소(As)	카드뮴(Cd)	납(Pb)	크롬(Cr)
벼	태양광	불검출	불검출	불검출	불검출
	관행	불검출	불검출	불검출	불검출
콩	태양광	불검출	불검출	불검출	불검출
	관행	불검출	불검출	불검출	불검출
감자	태양광	불검출	불검출	불검출	불검출
	관행	불검출	불검출	불검출	불검출

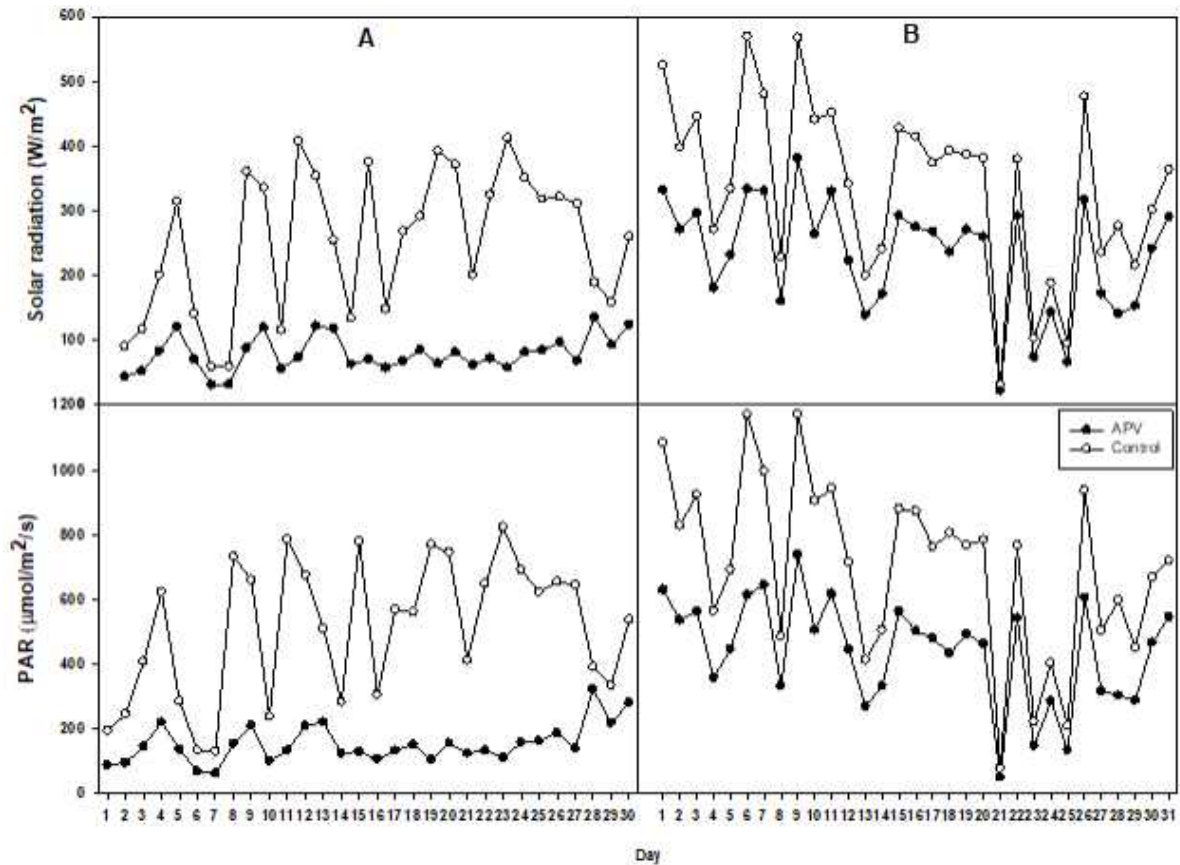
□ 영농형 태양광 하부 기상환경 분석

○ 벼 영농형 태양광하부 기상환경 분석

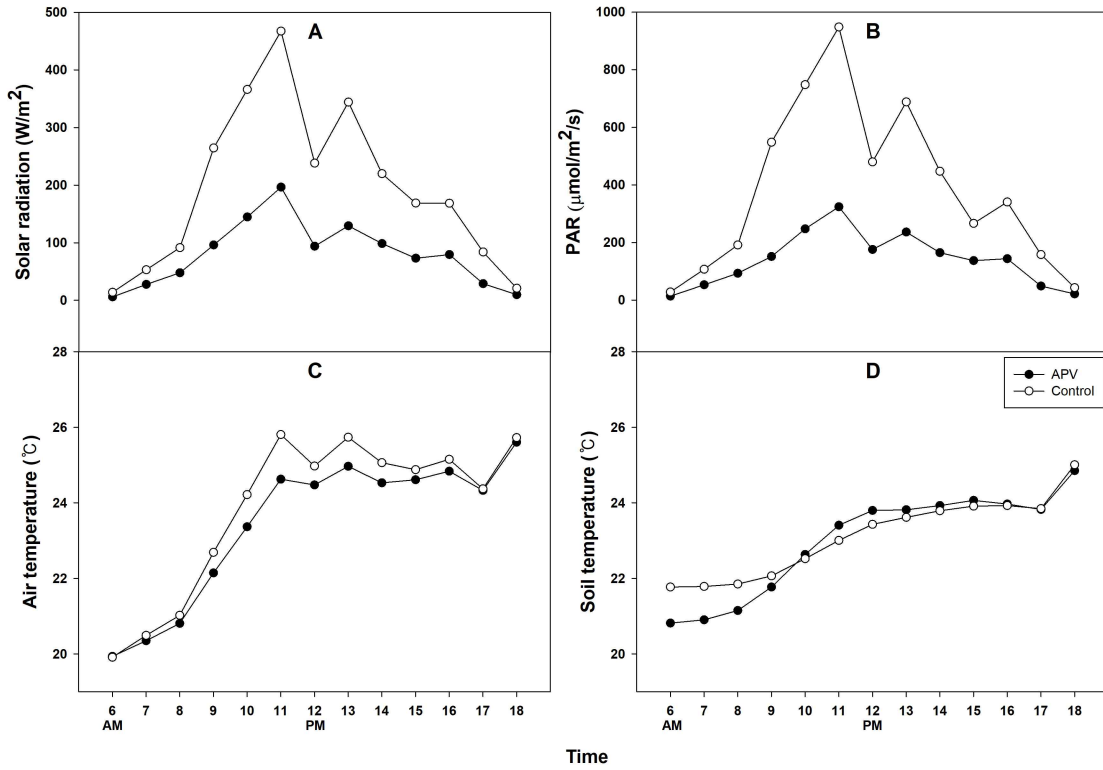
- 벼 승주 영농형 태양광 경우 9월 일사량은 대조구에 비해 감소하였으며, 태양광의 PAR값도 대조구에 비해 감소하였음(그림 65). 유사하게 벼 보성 영농형 태양광 경우도 8월 일사량은 대조구에 비해 감소하였으며, PAR값도 낮았음.
- 승주 영농형 태양광 경우 9월 3일 1일 일사량과 PAR을 시간별로 볼 때 대조구에 비해 감소하였고, 기온도 태양광에서 대조구에 비해 감소하였으나 지온의 경우는 아침 6시부터 8시까지 태양광하부에서 낮았으나 그 이후 시간에는 태양광하부와 대조구간에 큰 차이가 없었음(그림 66).
- 보성의 영농형 태양광 경우도 9월 3일 1일 일사량과 PAR을 시간별로 볼 때 대조구에 비해

감소하였고, 기온은 태양광하부와 대조구간에 큰 차이가 없었으나, 지온은 대조구에서 다소 높았다(그림 67).

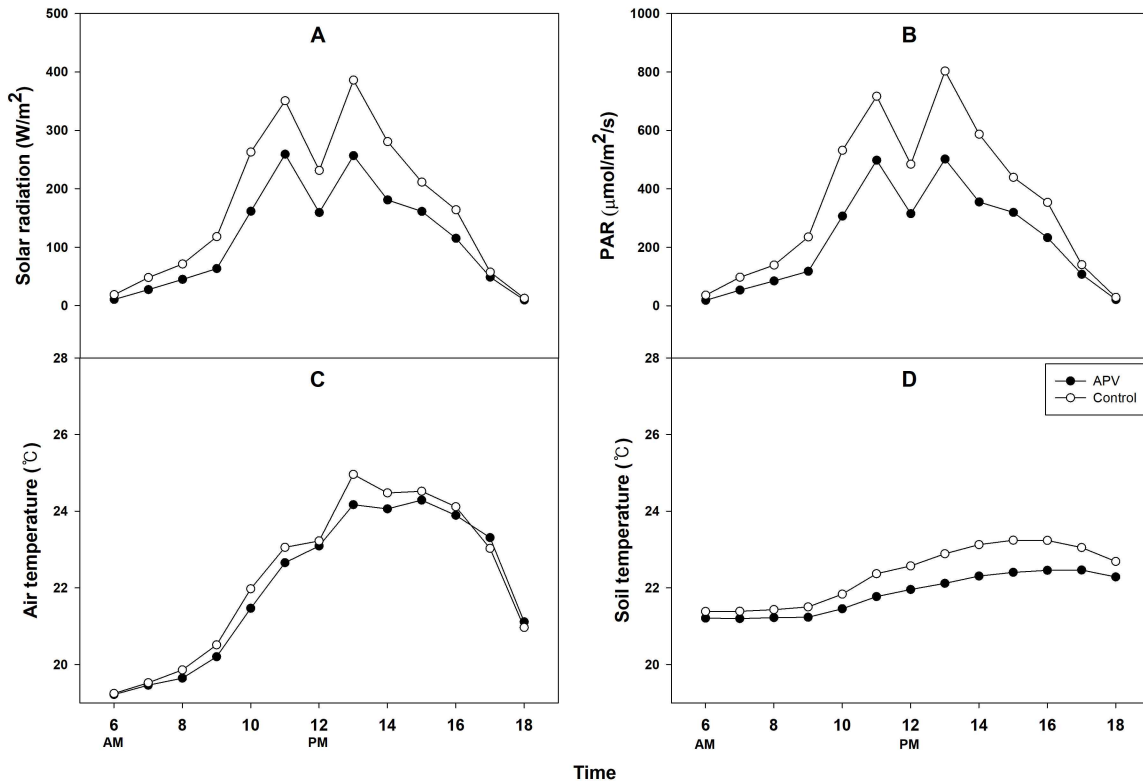
- 또한 영농형태양광 하부 시간별로 음영 변화를 본 결과 음영의 정도는 태양광 시설에 따라 다른 것을 알 수 있었음.
- 즉 승주(그림 68)의 경우는 보성(그림 66)의 경우 보다 음영이 큰 것으로 나타났으며, 즉 나주 태양광 경우는 차광율이 25%이고 보성 태양광의 경우는 32% 차광율을 보이지만, 두 태양광 모두 햇빛이 비치는 동안 음영이 발생하는 것을 볼 수 있었음.



<그림 65> 승주(A, 9월)와 보성(B, 8월) 영농형태양광조건하에서 일사량과 PAR



<그림 66> 승주 영농형태양광에서 9월 3일 6:00부터 18:00까지 일사량 (A), PAR (B), 기온 (C), 및 지온 (D)



<그림 67> 보성 영농형태양광에서 9월 3일 6:00부터 18:00까지 일사량 (A), PAR (B), 기온 (C) 및 and 지온 (D)



10시



11시



12시



13시



14시



15시



16시



17시



18시

<그림 68> 태양광 하부 시간별 음영 변화(승주)



07시



08시



09시



10시



11시



12시



13시



14시



15시



16시

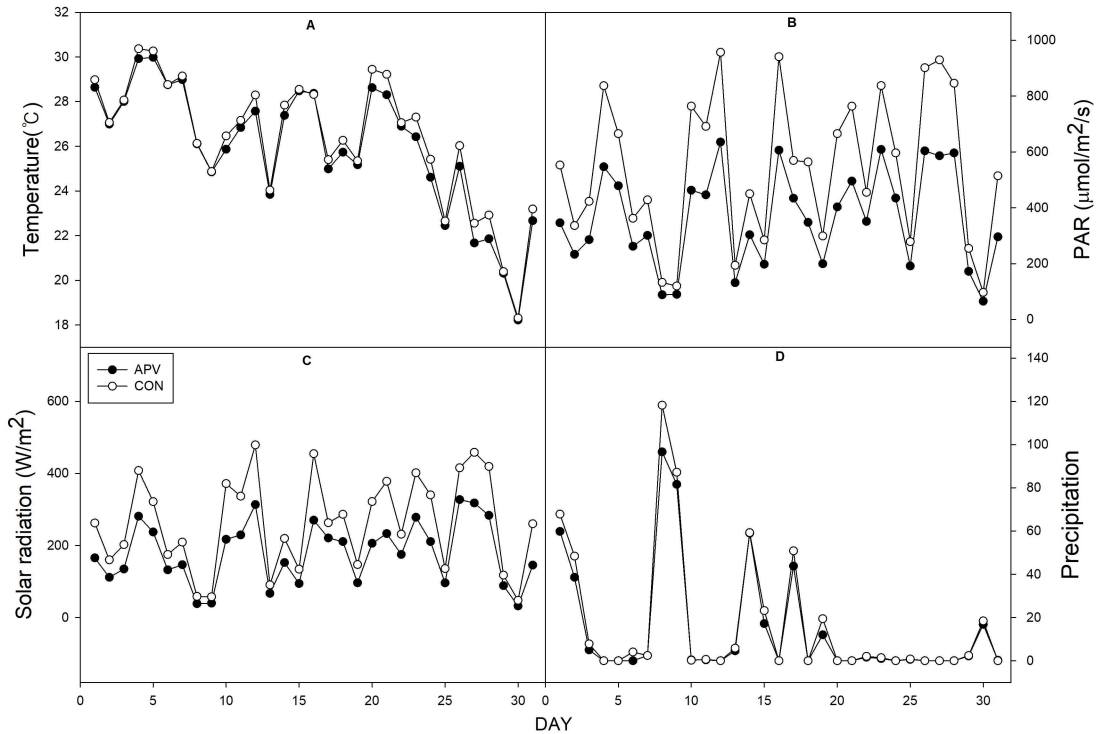


17시

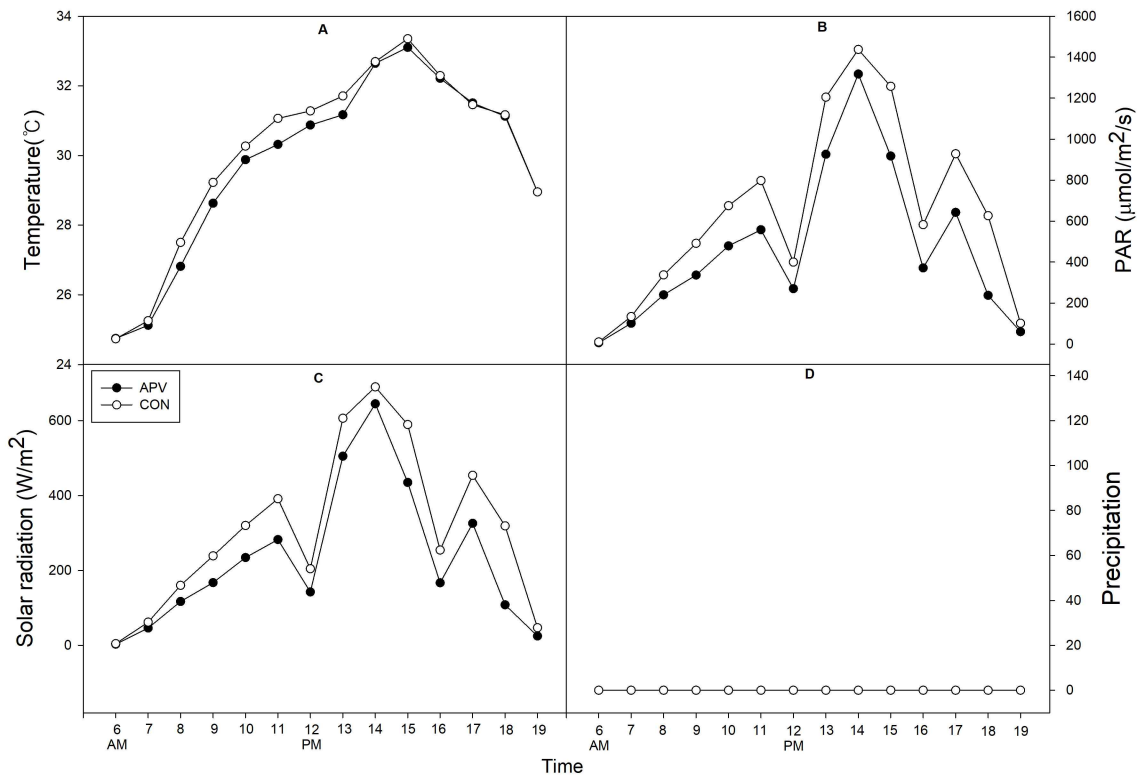
<그림 69> 태양광 하부 시간별 음영 변화(보성)

○ 콩 영농형 태양광하부 기상환경 분석

– 파주 콩 영농형태양광 하부 8월 기온과 강수량은 관행구에 비해 큰 차이가 없었으나, PAR과 일사량의 경우는 태양광하부에서 관행구에 비해 낮았음(그림 67). 또한 1일 기온의 경우도 일부시간대에 태양광하부에서 낮았으나 전반적으로 차이가 없었음(그림 68). 그러나 1일 PAR과 일사량에서도 태양광하부에서 관행구에 비해 낮았음.



<그림 70> 파주 콩 영농형태양광에서 8월 온도 (A), PAR (B), 일사량 (C) 및 강수량 (D)



<그림 71> 파주 콩 영농형태양광에서 8월 5일 6:00부터 19:00까지 온도 (A), PAR (B), 일사량 (C) 및 강수량 (D)

□ 영농형 태양광 하부 식량작물 최적 환경 및 재배조건 도출

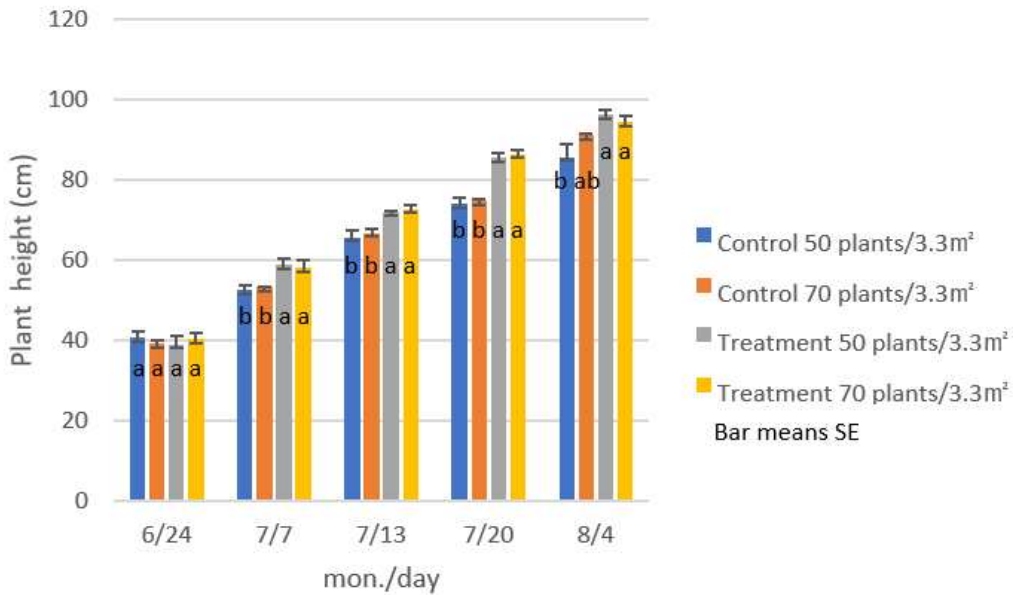
- 2021년과 2022년 영농형태양 하부 감자 재배 경우 퇴비 1,500kg/10a, 무비료, 검정비닐멀칭, 품종 수미, 파종일 4월 20일, 재식거리 20X100cm 또는 25X90cm, 수확 6월 21일 재배조건하에서 대조구와 비교하여 수량 감소없이 재배가 가능하였음.
- 또한 태양광 시설은 차광률 31.6%, 발전량 99kW, 개별분산형, 모듈은 일반형 36 cell, 3X12 타입이었다. 따라서 감자의 경우는 위의 태양광 시설과 재배조건에서 안정적으로 재배할 수 있을 것으로 판단됨.
- 2021년과 2022년 영농형 태양광 하부 콩 재배 경우 시비량(N-P-K, kg/10a) 4.8-4.8-5.4, 품종 대원콩, 파종량 6kg/10a, 6월 9일 기계파종, 재식거리 80X20cm, 80X10cm, 수확 11월 10일 재배조건하에서 대조구에 비해 수량이 18~20% 감소하였음. 또한 이들 태양광 시설은 차광률 32%, 발전량 150kW, 개별분산형, 모듈은 32 cell, 4X8 타입으로서 이들 조건하에서는 콩 수량 감소가 불가피하기 때문에 재배조건과 태양광 시설(예, 차광률 조정) 설계가 필요하다고 판단됨.
- 2021년과 2022년 나주, 승주 및 보성 영농형태양광 하부 벼 재배 경우 품종 새청무, 청무벼, 일미벼, 파종량 180~250g/상자, 육묘기간 15일, 18일, 시비량(N-P-K, kg/10a) 6-3-4, 9-4.5-5.7, 재식거리 15X15cm, 이앙일 5월 26일, 5월 31일, 6월 15일 기계이앙 재배조건하에서 대조구에 비해 수량이 13~30% 감소하였고, 동일 태양광 시설하에서도 연차별로 수량차이를 보여 재배조건과 환경조건 차이에 기인되는 것으로 판단됨.
- 또한 이들 시설들은 차광률 25%, 32%, 발전량 100kW, 107kW, 고정형, 추적형, 모듈 72 cell, 6 x 12 타입, 119 cell, 7X17 타입, 36 cell, 12X3타입이었음. 따라서 벼와 콩 영농형태양광 하부에서 수량 감소를 줄이기 위해서는 시비량, 재식밀도와 같은 재배조건 조절뿐만 아니라 태양광 시설의 차광율, 일사량, 기온, 지온 등의 감소를 줄일 수 있는 최적 환경이 도출될 수 있는 영농형 태양광 시설 설계가 필요하다고 판단됨.

나. 영농형 태양광 하부 맞춤형 식량작물 재배기술 개발(1공동과제 : 솔라팜)

□ 벼 재배 실험 : 벼 재식밀도별 생육 및 수량 변화 구명

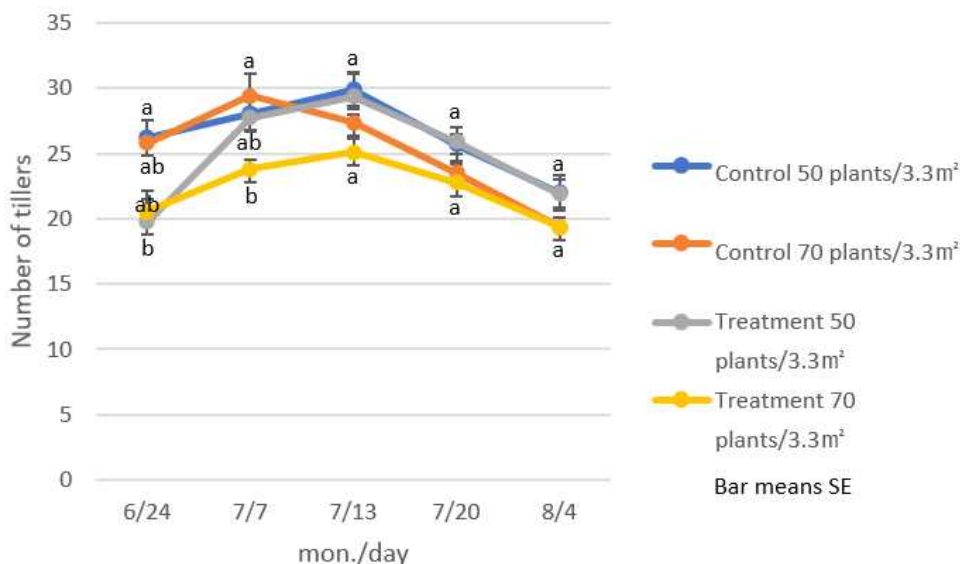
○ 시계열 모니터링 결과

– 초장의 경우 처리구가 대조구에 비해 5~11cm 컸으며, 재식밀도간 차이는 유의미한 차이를 보이지 않았음(그림 72).



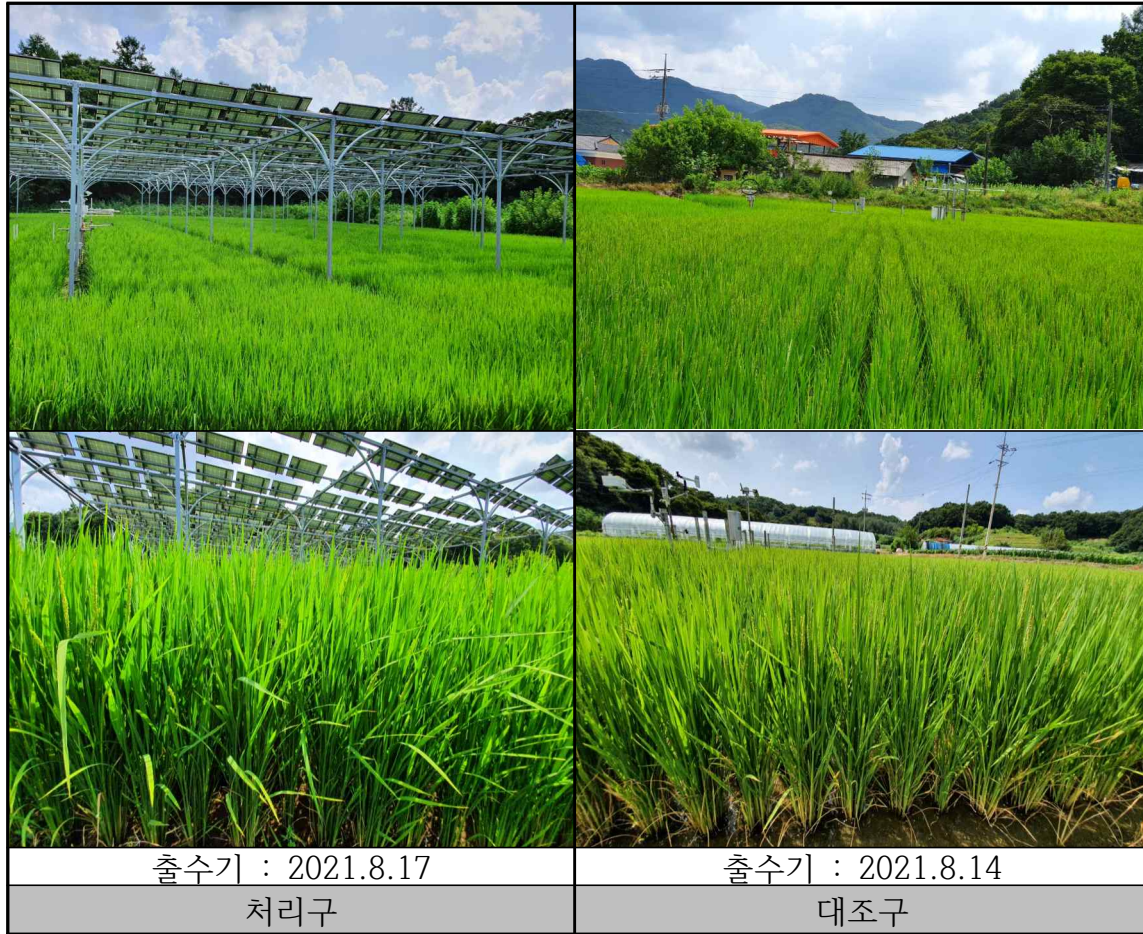
<그림 72> 초장의 시계열 변화

- 분얼수의 시계열 변화를 살펴본 결과, 초기생육기간(이앙 후 55일 까지, 7월 13일)에는 대조구가 처리구에 비해 분얼 증가수가 많았으나, 이앙 후 62일(7월 20일) 이후에는 분얼수가 비슷해지는 경향을 보였음 (그림 73).
- 처리구와 대조구간 유효경 비율은 처리구 35.8%, 대조구 36.3%로 대조구가 약간 높은 경향을 보였으며, 재식밀도 간 유효경 비율은 50주/3.3m²구가 44.8%, 70주/3.3m²구가 28.0%로 유효경 비율은 50주/3.3m²구가 70주/3.3m²구에 비해 16.8% 높았음.



<그림 73> 포기당 분얼수의 시계열 변화

- 출수기는 처리구가 대조구에 비해 3일 늦음 (그림 74).



<그림 74> 처리구와 대조구의 출수기 차이

○ 생육 및 수확량 분석 결과

- 초장은 처리구가 102.7cm로 대조구의 94.9cm에 비해 7.8cm가 컸으며, 이는 태양광 모듈 설치에 따른 차광으로 처리구가 도장했을 것으로 판단되며, 재식밀도 간에는 50주/3.3㎡구가 99.1cm, 70주/3.3㎡구가 98.5cm로 큰 차이가 없었음(표 10).
- 간장은 초장과 같은 경향으로 처리구가 85.0cm, 대조구가 77.5cm로 처리구가 7.5cm 컸으며, 재식밀도 간에는 50주/3.3㎡구가 80.7cm, 70주/3.3㎡구가 79.8cm로 큰 차이가 없었음.
- 수장은 처리, 대조구간, 재식밀도 간에 통계적 유의성이 인정되지 않았음.
- 3.3㎡당 이삭수는 대조구 70주/3.3㎡구가 283.0개로 가장 많았으며, 다음은 대조구 50주/3.3㎡구가 278.7개로 많았으며, 처리구 70주/3.3㎡구에서 254.0개로 가장 적었으며, 처리구 및 대조구간 평균을 보면 처리구가 256.7개, 대조구가 280.9개로 대조구가 24.2(8.6%)개가 많았으며, 재식밀도간에는 50주/3.3㎡구가 평균 269.0개로 70주/3.3㎡구의 평균 268.5개와 큰 차이가 없었음.
- 수당립수, 등숙률 및 천립중은 처리구 및 대조구간, 재식밀도간에 유의적인 차이가 인정되지 않았음.
- 10a당 수량은 대조구 50주/3.3㎡구가 715.1kg으로 가장 높았으며, 처리구 70주/3.3㎡구가 550.0kg으로 가장 낮았고, 50주/3.3㎡구의 처리구 및 대조구 간에는 처리구가 558.1kg으로 대조구 715.1kg에 비해 157kg(21.95%) 낮았으며, 70주/3.3㎡구의 처리구 및 대조구 간에는

- 처리구가 550kg으로 대조구 644.6kg에 비해 94.6kg(14.68%) 낮았음.
- 대조구, 처리구간 10a당 평균 수량은 대조구가 679.5kg이었으며, 처리구가 554.1 kg으로 처리구가 대조구에 비해 18.5%(125kg/10a) 수량이 낮았음.
 - 대조구, 처리구간 재식밀도별 평균은 50주/3.3m²구가 636.3kg/10a이었으며, 70주/3.3m²구가 595.3kg/10a으로, 70주/3.3m²구가 50주/3.3m²에 비해 6.5%(41.3kg/10a) 수량이 낮았음.

<표 30> 벼의 생육 및 수량 특성

처리	초장 (cm)	간장 (cm)	수장 (cm)	이삭수 /3.3m ²	수당 립수	등숙률 (%)	천립중 (g)	수량 (kg/10a)
대조구50	96.1ab ^z	77.3b	18.6a	278.7a	119.8a	85.0a	25.7a	715.1a
대조구70	93.7b	77.6b	19.5a	283.0a	114.6a	83.0ab	24.7ab	644.6b
처리구50	102.0a	85.0a	19.3a	259.3b	116.5a	82.4ab	24.0b	558.1c
처리구70	103.3a	85.0a	18.1a	254.0b	111.0a	80.6b	23.6b	550.0c
Pr>F	* ^y	**	NS	*	NS	NS	NS	**
LSD	7.6385	5.6411	2.6377	50.574	63.28	3.964	2.5304	13.827

^zMeans with the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to DMRT.

^yNS, *, **, Nonsignificant and significant at p=0.05, 0.01, respectively.

○ 노지와 태양광 하부에서 초장, 분얼경수, 출수기 수량에서 차이가 있음.

- 초장은 처리구가 대조구에 비해 약 7.8cm 컸으며, 이는 태양광 모듈설치로 인한 차광에 의한 도장으로 판단되며, 따라서 등숙기에 도복이 우려됨으로 이에 대한 재배관리가 요망됨.
- 분얼경수 전체적으로 이앙 후 55일까지 초기 생육 기간에는 대조구가 처리구에 비해 분얼경 증가속도가 컸으나, 이앙 후 62일 이후에는 분얼경수가 비슷해지는 경향임.
- 최고분얼기는 이앙 후 55일(7/13일)로 판단되며, 처리구 대조구간에 최고분얼기 차이는 차이가 없는 것으로 판단되며, 최고분얼수는 처리구가 27.3개, 대조구가 29.7개로 대조구가 2.4개 많았음.
- 출수기는 처리구가 대조구에 비해 3일 늦어졌으며, 이는 차광으로 인한 생육 더딤으로 판단됨.
- 벼의 경우 태양광 모듈 설치 시 대조구에 비해 처리구가 차광으로 18.5% 수량이 감소하였기 때문에 기존 연구와 마찬가지로 벼의 경우 태양광 모듈 설치 시 일사량 감소에 의한 일정량의 수량감소가 불가피하다고 판단되며, 재식밀도간에는 70주/3.3m²구와 50주/3.3m²구와의 차이가 크지 않았지만 태양광 모듈에 의한 차광영향이 있으므로 이상기후에 대응하기 위해서는 밀식보다는 소식이 유리할 것으로 사료됨.

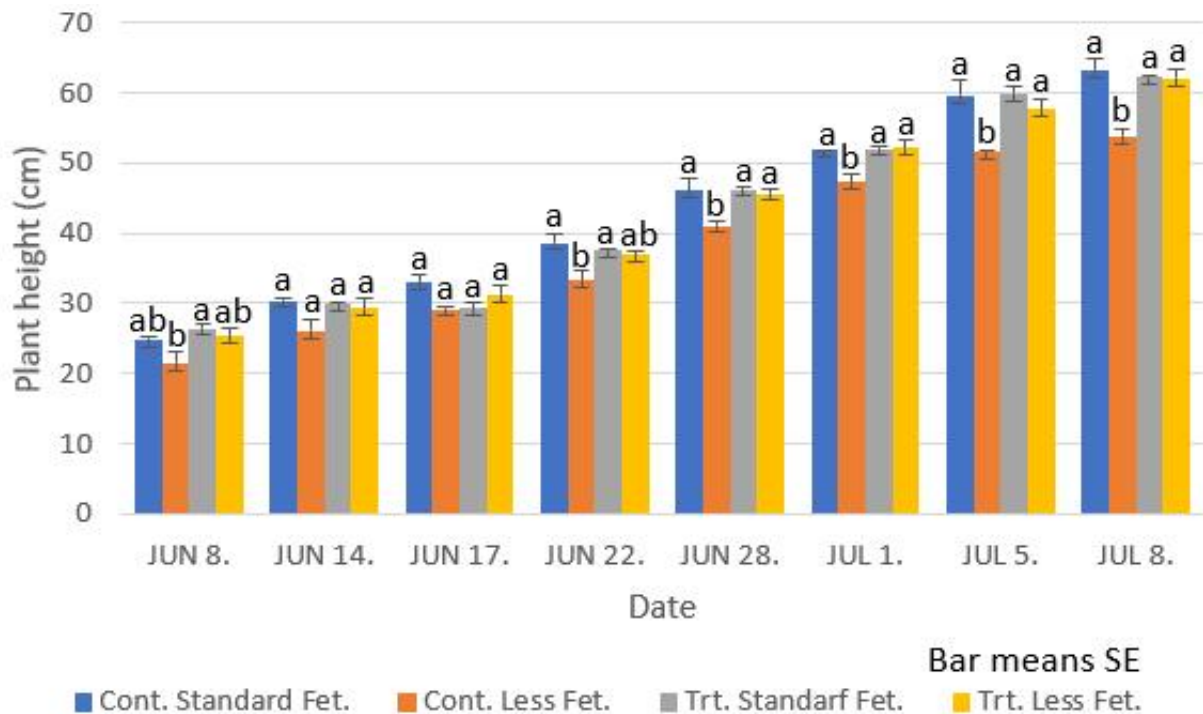
□ 벼 시비방법별 생육 및 수량 구명

○ 시계열 모니터링 결과

- 대조구와 처리구(태양광 모듈) 초장은 이앙 후 6월 8일(이앙 후 29일) 조사에서는 대조구에 비해 처리구가 평균 약 2.7cm 컸으며, 최고분얼기가 가 지난 7월 8일(이앙 후 59일)에는 3.2cm 컸음. 이는 태양광 모듈에 의한 차광으로 인하여 노지에 비해 일사량 부족으로 인한

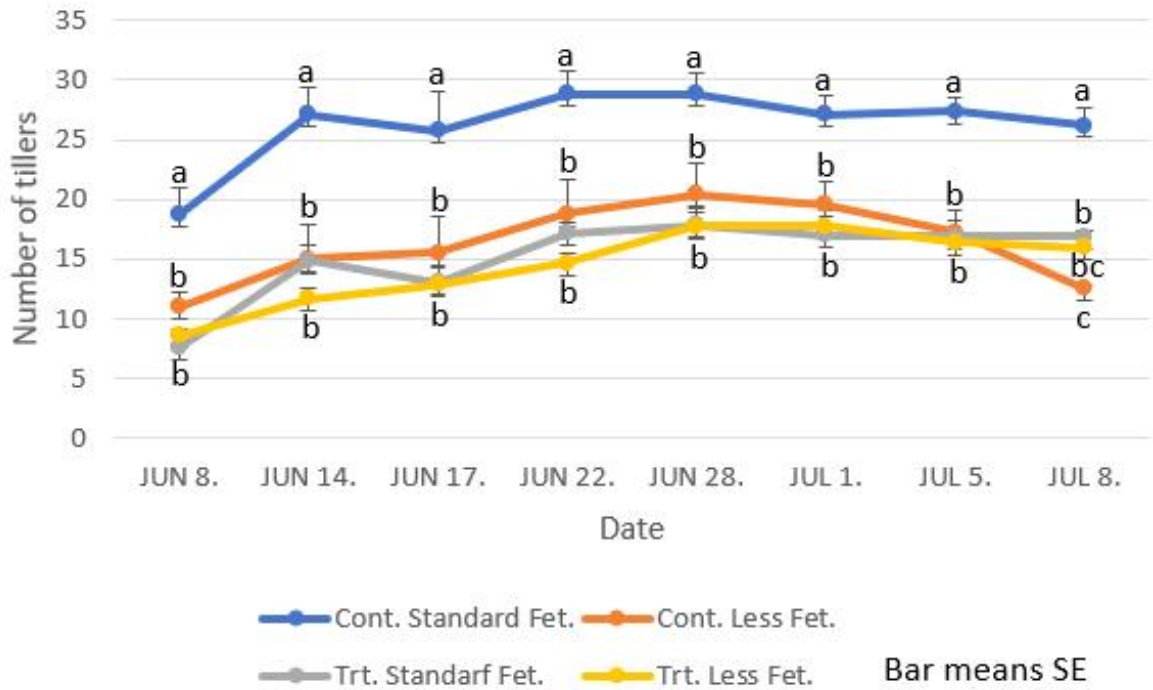
도장으로 판단됨(그림 75).

- 표준구와 소비구의 초장은 이앙 후 6월 8일(이앙 후 29일) 조사에서는 표준구가 소비처리구가 평균 약 2.3cm 컸으며, 최고분얼기가 지난 7월 8일(이앙 후 59일)에는 4.8cm 컸음. 이는 소비구가 시비량이 적어 성장량이 감소한 것으로 판단됨(그림 72).
- 7월 8일(이앙 후 59일)에는 조사한 초장은 평균 60.4cm이었으며, 대조구의 표준구(63.3cm), 처리구의 표준구(62.3cm)와 소비구(62.1cm)는 큰 차이가 없었으나, 대조구의 소비구는 53.8cm로 초장이 가장 작았음(그림 72). 이 역시 비료 양분의 부족 때문으로 판단됨.



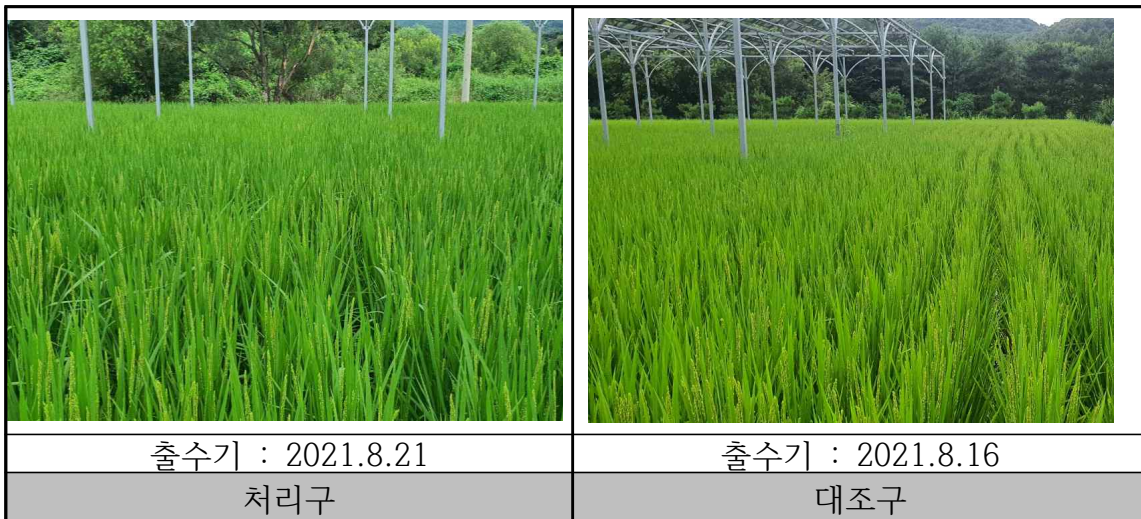
<그림 75> 초장의 시계열 변화

- 분얼경수의 경시적 변화는 전체적으로 이앙 후(5/10)~34(6/14)일까지 급속히 증가하였으며, 그 후 완만하게 증가하는 경향을 보였음. 분얼경수는 대조구의 표준구에서 이앙 후 48일 28.8개의 가장 많았으며, 처리구의 소비구에서 17.8개로 가장 작았음. 전체적으로 대조구의 표준시비구가 분얼경수가 가장 많았으며, 대조구 소비구, 처리구의 표준시비구 및 소비구는 큰 차이가 없었음. 이는 태양광모듈 하부에서의 차광과 시비량의 부족으로 인하여 생장이 부진했다고 판단됨.
- 최고분얼기는 대조구 및 처리구 모두 이앙 후 48일(6/28)에 분얼경수가 가장 많았으며, 따라서 이앙 후 48일이 최고분얼기로 판단됨. 최고분얼기의 분얼경수는 대조구의 표준시비구가 28.8개로 가장 많았으며, 대조구의 소비구, 처리구의 표준시비구, 소량시비구는 큰 차이가 없었음(그림 76). 본시험에서의 분얼경수는 일반 포장에서의 분얼경수에 비해 적은 편으로 시험포장이 숙성되지 않은 논으로 비옥도가 낮기 때문으로 생각됨.



<그림 76> 포기당 분얼수의 시계열 변화

- 출수기는 처리구가 대조구에 비해 5일 늦음 (그림 77)



<그림 77> 처리구와 대조구의 출수기 차이

○ 생육 및 수확량 분석결과

- 간장은 처리구(태양광모듈)가 평균 74.2cm로 대조구의 72.3cm에 비해 약 2cm 길었으나, 유의성이 없었음. 이는 태양광모듈 설치에 따른 차광으로 처리구가 도장했을 것으로 판단됨. 시비 구간에는 표준구가 73.7cm, 소비구가 72.8cm로 표준구가 약 1cm 컸으나 유의성이 인정되지 않았음.
- 수장은 처리구가 16.2cm로 대조구의 18.3cm보다 약 2cm 짧았으며, 통계적 유의성이 인정되었음. 이 역시 간장과 마찬가지로 차광에 의해 처리구의 수장이 짧아진 것으로 판단됨.
- 포기당 이삭 수는 처리구와 대조구가 각각 12.2이삭, 13.2이삭으로 큰 차이가 없었음. 그러나 시비 구간에는 표준구가 14.5이삭으로 소비구의 10.8이삭에 비해 3.7이삭 많았음. 이는

시비량의 차이에 의한 결과로 판단되며, 소비구는 표준구에 비해 양분 공급이 부족했다고 판단됨.

- 수당립수는 처리구, 대조구간에 표준구, 소비구간에 차이가 없었음.
- 1000립중은 처리구가 24.1g, 대조구가 24.8g으로 대조구가 처리구에 비해 0.7g 높았으며, 유의적인 차이가 인정되었으며, 시비구간에 표준구와 소비구간 큰 차이가 없었음.
- 등숙율은 처리구와 대조구간, 표준구와 소비구간에 유의성이 없었음.
- 10a당 수량은 처리구가 472.4kg, 대조구가 497.9kg을 나타내었음. 표면적으로는 처리구에 비해 대조구가 약 25.5kg/10a 높았으나, 통계적으로는 유의성이 인정되지 않았음. 시비구간에는 표준구가 501.5kg, 소비구가 468.8kg으로 표준구가 32.7kg 높았으며 유의성이 인정되었음(표 31).

<표 31> 벼의 생육 및 수량 특성

처리	비료량	초장 (cm)	수장 (cm)	이삭수 /3.3m ²	수당 립수	천립중 (g)	등숙률 (%)	수량 (kg/10a)	수량지수 (%)
대조구	표준구	72.17a ²	17.77ab	16.70a	63.03b	24.13b	95.27a	520.20a	100
	소비구	72.40a	18.77a	9.63b	83.37a	25.43a	94.43ab	475.63a	91
	평균	72.29	18.27	13.17	73.2	24.78	94.85	497.92	
처리구	표준구	75.13a	16.33b	12.20b	76.33ab	24.07b	94.20b	482.80a	92
	소비구	73.20a	16.10b	12.03b	72.87ab	24.23b	93.00b	462.00a	88
	평균	74.17	16.22	12.12	74.6	24.15	93.6	472.4	
TRT(A)	NS ^y	*	NS	NS	*	†	NS		
Fertilizer(B)	NS	NS	*	†	NS	NS	*		
A × B	NS	NS	*	*	*	NS	NS		
Block	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS		
LSD		5.4653	2.214	4.2669	14.127	0.6601	1.929	32.778	

²Means with the same letter are not significantly different at 0.05 probability level according to DMRT.

^yNS, *, **, Nonsignificant and significant at p=0.05, 0.01, respectively

○ 태양광 하부 벼 생육 특성 반응

- 분얼수 : 전체적으로 대조구의 표준시비구가 분얼경수가 가장 많았으며, 처리구의 소비구가 가장 적은 경향이었음. 이는 태양광모듈 하부에서의 차광과 시비량이 적은 구가 생장이 부진했다고 판단됨.
- 최고분얼기 : 최고분얼기는 대조구 및 처리구 모두 이앙 후 48일(6/28)에 분얼경수가 가장 많았으며, 따라서 이앙후 48일이 최고분얼기로 판단됨.
- 출수기 : 출수기는 대조구가 8월 16일, 처리구가 8월 21일로 처리구가 5일 늦게 출수하였다. 이 역시 태양광모듈 하부에서 차광에 의하여 생육 진전이 약 5일 정도 늦었던 것으로 판단됨.

- 태양광 하부 벼 수확 반응

- 7조곡 10a당 수량은 대조구 표준구가 520.2kg으로 가장 높았으며, 평균적으로는 처리구가 472.4kg으로 대조구 평균에 비해 4.9%(약 25.5kg/10a) 낮았음. 이는 차광에 의한 수량감수로 판단됨.
- 시비구간에는 소비구가 표준구 501.5kg에 비해 6.5%(32.7kg) 낮았으며, 이 역시 충분한 양분 공급이 이루어지지 않은 때문으로 판단됨.
- 삼광벼의 쌀 수량은 정조 600~660kg/10a(국립식량과학원, 2011) 569kg/10a(충남농업기술원, 2012)으로 도정율 25%를 감안하면, 70% 정도의 벼 수량으로 보임. 이는 시험포장이 숙성되지 않은 논으로 비옥도가 낮은 것이 원인으로 보임.

□ 감자 재배 실험 : 감자 재식 시기별 생육 및 수량변화 구명

- 감자싹의 출현은 보통 약 15~20일 사이에 이루어지만, 감자싹이 1개월이 지나도 나타나지 않아 감자 수확을 기대할 수 없다고 판단하였음.
- 감자 생육이 감자 식재를 한 8월 이상기후(평년에 비해 많은 강우일수)와 흑백 멀칭 필름(필름에 의한 증발산 억제)을 이용한 멀칭에 의한 습해로 인해 감자싹이 나지 않은 것으로 추정됨.



8월 10일 처리구



8월 10일 대조구



9월 10일 처리구



9월 10일 대조구



9월 17일 처리구



9월 17일 대조구



9월 17일 농업 전문가 확인



9월 17일 농업 전문가 확인



10월 21일 처리구



10월 21일 대조구



11월 14일 처리구



11월 14일 대조구

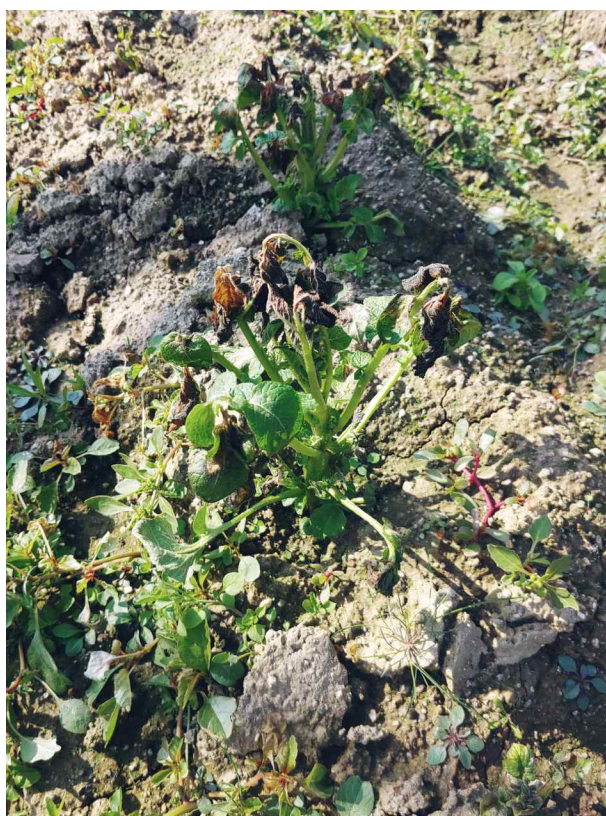
<그림 78> 시기별 감자 생육상태

○ 영농형태양광 서리피해 방지 효과

- 생육 모니터링 중 주목할 만한 사례로 청주지방에서는 10월 18일에 첫서리가 관측되었으며 이후 감자 생육 모니터링을 위해 방문했을 때 처리구 아래에는 서리피해가 거의 없었으며 대조구만 서리피해를 받은 것을 확인하였음(그림 79).
- 감자 재배를 마친 11월 14일까지 처리구와 대조구 모두 감자 수확은 할 수 없었지만, 상부 앞의 경우 처리구의 경우 대부분 온전히 유지된 것에 비교해 대조구의 경우 대부분 고사하였음.
- 이는 김우람 등 (2021)의 연구에서 영농형태양광 상부 모듈이 서리 일부를 차단한다는 결과를 뒷받침하는 추가 사례로 보임.



10월 21일 처리구(서리 피해 없음)



10월 21일 대조구(서리 피해)

<그림 79> 영농형태양광 서리피해 방지 효과

□ 감자 재식 시기별 생육 및 수량변화 구명

- 감자의 초장은 대조구 10.6cm와 처리구(일반형, 투과형) 평균 10.2cm로 차이가 인정되지 않았음.
- 정식 후 30일 초장은 3월 24일 정식구가 평균 11.3cm로 3월 29일 정식구의 9.5cm보다 1.8cm 컸으며, 유의성이 인정되었음.
- 정식 후 50일 초장도 대조구 31.7cm, 2개 처리구(일반형, 투과형) 평균 33.7cm로 대조구 및 처리구 평균은 차이가 없었으며 유의성이 인정되지 않았음. 이는 생육 초기에 처리구에 비해 대조구가 생장이 빨랐음을 알 수 있었음. 정식 후 50일 정식구간의 초장은 3월 24일 정식구가 평균 33.3cm로 3월 29일 정식구의 33.8cm 와 거의 같았음.
- 정식 후 30일 포기당 줄기 수는 대조구 1.9개, 처리구(일반형, 투과형) 평균 1.8개로 차이가 인정되지 않았음.

- 정식기간 정식 후 30일 포기당 줄기 수는 3월 24일 정식구가 평균 2.0개로 3월 29일 정식구의 1.6개에 비하여 0.4개가 많았으며, 유의성이 인정되었음.
- 정식 후 50일 포기당 줄기 수는 대조구 1.9개, 2개 처리구(일반형, 투과형) 평균 1.8개로 대조구 및 처리구 평균은 차이가 없었으며 유의성이 인정되지 않았음. 정식 후 50일 정식구간의 줄기 수는 3월 24일 정식구가 평균 2.4개로 3월 29일 정식구의 2.3개로 차이가 없었음.

<표 32> 태양광 모듈형 및 정식기에 따른 감자의 초장 및 줄기 수

구분	초장(cm)		줄기 수		
	정식기 (월/일)	정식 후 30일	정식 후 50일	정식 후 30일	정식 후 50일
대조구	3/24	11.55a ^y	31.30a	2.11a	2.55ab
	3/29	9.66ab	32.11a	1.66ab	2.77a
일반형	3/24	11.11ab	34.06a	1.89ab	2.22ab
	3/29	9.66ab	36.36a	1.66ab	2.22ab
투과형	3/24	11.11ab	34.41a	2.00ab	2.55ab
	3/29	9.05b	32.83a	1.44b	1.78b
모듈(A)		NS ^z	NS	NS	NS
정식기(B)		**	NS	**	NS
A x B		NS	NS	NS	NS
LSD		2.13	37.851	0.5277	0.8107

^z: Significant at p = 0.05, 0.01 respectively; ns: non-significant at 0.05 probability level

^y: Means with the same letter are not significantly different at the 5% level by DMRT

- 정식된 감자의 입모율은 96~99%로 거의 출현이 되어, 태양광 모듈 간, 정식기간에는 차이가 없었으며, 입모율이 양호하였음.
- 2022년 6월 20일 수확한 감자의 초장은 대조구가 42.9cm로 가장 낮았으며, 처리구(일반형, 투과형) 평균 49.7cm로 처리구가 6.8cm 초장이 컸으며, 유의한 차이가 인정되었음.
- 포기당 줄기 수는 대조구 2.4개, 처리구(일반형, 투과형) 평균 2.1개로 차이가 없었음.
- 경직경은 대조구 8.8mm, 처리구(일반형, 투과형) 평균 8.8mm개로 차이가 없었으나 정식기간에는 3월 24일 정식구가 8.6mm, 3월 29일 정식구가 9.0mm로 약간 굵었음.
- 포기당 상품성 괴경수는 대조구가 3.6개, 처리구(일반형, 투과형) 평균 3.1개로 차이가 없었음. 그러나 총 괴경수는 대조구가 7.0개, 처리구(일반형, 투과형) 평균 5.6개로 대조구가 0.4개 많았으며, 유의한 차이가 인정되었음.
- 포기당 상품성 괴경 중량은 대조구가 372.4g, 처리구(일반형, 투과형) 평균 342.1g으로 대조구가 30.3g 높았으며 유의한 차이를 보였음.
- 10a당 상품성수량은 대조구가 1,878.6kg, 처리구(일반형, 투과형) 평균 1724.6kg으로 대조구가 154kg(9%) 높았으며 유의한 차이를 보였음. 태양광 모듈형 간에는 일반형이 1,699.4kg, 투과형이 1,749.9kg으로 50.5kg 높았음. 정식기간에는 3월 24일 정식기가 1,828.1kg/10a, 3월 29일 정식기가 1,723.7kg/10a로 3월 24일 정식기가 약간 높았으나, 유의적인 차이는 없었음.
- 10a당 총수량은 대조구가 2,559.6kg, 처리구(일반형, 투과형) 평균 2,292.7kg으로 대조구가 266.7kg(10.5%) 높았으며 유의한 차이를 보였음. 태양광 모듈형 간에는 일반형이 2,287.7kg, 투과형이 2,297.8kg으로 차이가 없었음.
- 정식기간에는 3월 24일 정식구가 2,429.1kg/10a, 3월 29일 정식구보다 2,334.3kg/10a로 3월 24일 정식구가 약간 높았으나, 유의적인 차이는 없었음(표 33).

<표 33> 태양광 모듈형 및 정식기에 따른 감자의 감자의 생육 및 수량 특성

구분		입 모 율 (%)	초장 (cm)	줄기 수	경직 경 (mm)	포기당 괴경수		총괴경 수	포기당 감자중량(g)		총수량 /포기당 (g)	상품성 수량 (kg/10 a)	총수량 (kg/10 a)
모 듈 형	정식기 (월/일)					상품 성	비상 품성		상품 성	비상품 성			
대 조 구	3/24	99	42.46 d ^y	2.40a	8.86 ab	4.06 a	3.53 a	7.60a	394.6 7a	131.33 a	526.00a	1,989.7 a	2,656.3 a
	3/29	97	43.26 cd	2.46a	8.76 ab	3.13 a	3.20 ab	6.33a b	350.2 0b	137.53 a	487.73b	1,767.5 b	2,462.9 b
일 반 형	3/24	96	48.63 ab	2.20a	8.60 ab	3.06 a	1.93 ab	5.00b	339.3 3b	98.40 b	437.73c	1,712.0 b	2,206.9 b
	3/29	97	53.73 a	2.20a	9.25 a	3.13 a	3.00 ab	6.13a b	334.5 3b	135.27 a	469.80b	1,686.7 b	2,368.5 b
투 과 형	3/24	98	49.0a b	2.29a	8.36 b	3.00 a	3.33 ab	6.26a b	353.6 0b	126.93 a	480.53b	1,782.7 b	2,424.0 b
	3/29	96	47.83 bc	1.80a	9.00 ab	3.13 a	1.80 b	4.93b	340.8 0b	89.87 b	430.67b	1,717.0 b	2,171.5 c
모듈(A)		NS	** ^z	NS	NS	NS	NS	*	*	*	*	*	*
정식기(B)		NS	NS	NS	†	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
A x B		NS	NS	NS	NS	NS	*	*	NS	NS	NS	NS	NS
LSD		0.4 756	4.931	0.672 9	0.77 65	1.22 79	1.48 99	1.560 3	35.21	23.61	38.67	220.75	210.98

^z: Significant at p = 0.05, 0.01 respectively; ns: non-significant at 0.05 probability level

^y: Means with the same letter are not significantly different at the 5% level by DMRT

○ 영농형 태양광 하부에서 초장은 증가 하였으며 수량은 감소 하였으나 모듈형 간의 차이는 관찰되지 않음.

– 감자의 초장은 처리구(일반형, 투과형 평균)가 대조구에 비해 6.8cm 컸음. 이는 태양광 모듈에 의한 차광으로 도장으로 보임. 향후 식물체 도장에 의한 도복 대책이 필요할 것으로 보임.

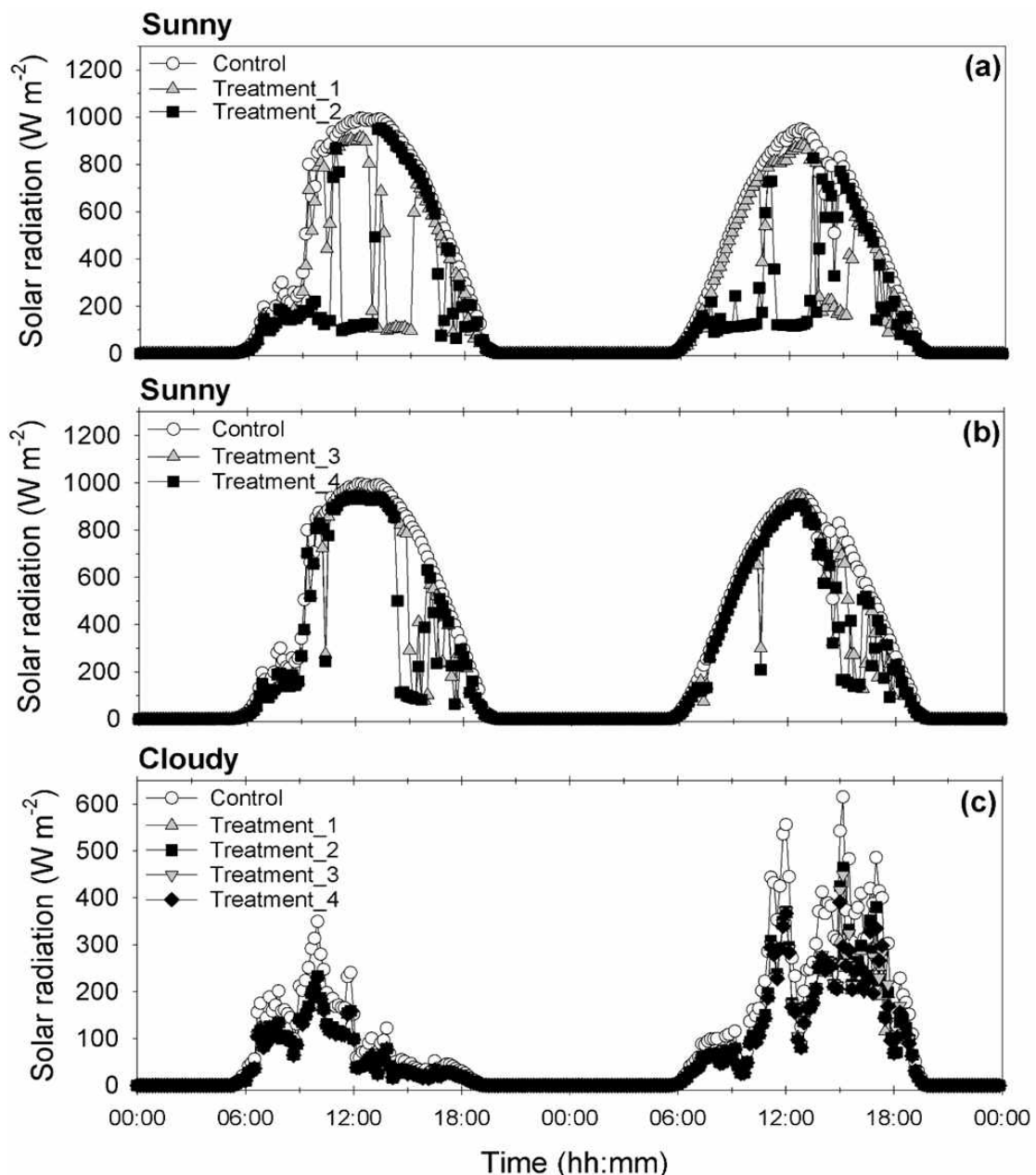
– 10a당 상품성 수량은 대조구에 비해 처리구(일반형, 투과형 평균)가 9%(154kg/10a) 낮았음. 태양광 모듈형 간에는 투과형이 일반형에 비해 약 3%(50.5kg/10a) 높았으나, 유의적인 차이는 없었음. 2개 정식기간에도 유의적인 차이는 없었으나, 3월 24일 정식구가 3월 29일 정식구보다 상품성 수량이 약간 높으므로 태양광 하부에는 조기 정식이 유리할 것으로 판단됨.

– 10a당 총수량은 대조구에 비해 처리구(일반형, 투과형 평균)가 13.7%(266.7kg/10a) 낮았음. 태양광 모듈형 간에는 일반형과 투과형이 차이가 없었음. 정식기간에는 3월 24일 정식구가 3월 29일 정식구에 비해 수량이 약간 높았으나, 유의적인 차이는 없었음.

다. 영농형 태양광 활용 친환경 식량작물 재배지원 기술개발
(3공동과제 : 국가농림기상센터)

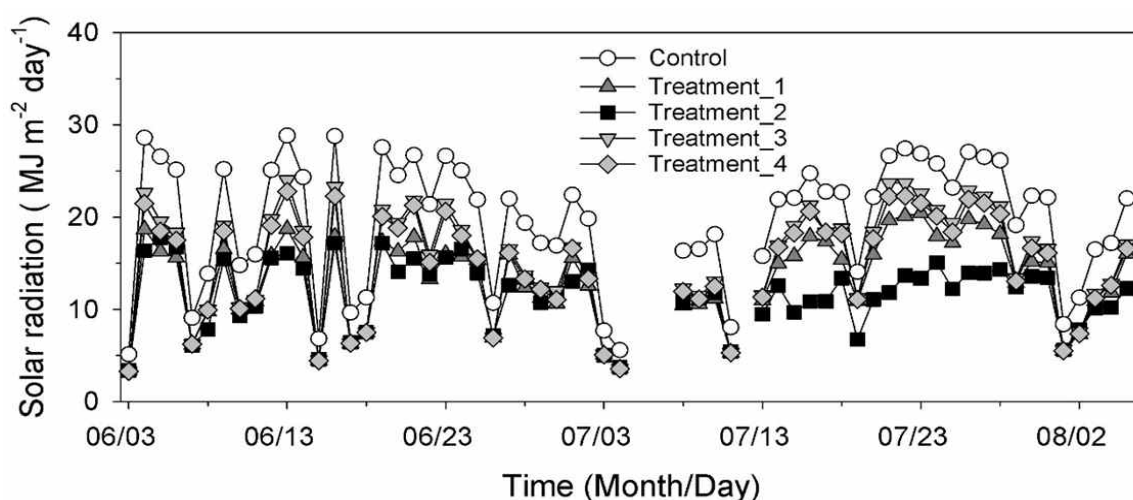
□ 미기상 환경

- 아래 그림은 파주(2021년) 영농형 태양광 시설 외부(대조구, 노지 논)와 하부(처리구, 태양광 패널 하부 논, 패널 윗단(1번 지점), 패널 사이(2번 지점), 패널 밑단(3번 지점), 패널 중앙(4번 지점))에서 관측된 일적산 전천일사량의 시계열을 보여주었음.
- 태양광 패널에 의해 태양복사가 차단된 만큼 시설 하부의 일사량이 노지에서 관측된 값보다 작으며, 관측 기간(2021년 6월 3일부터 8월 5일까지) 평균을 보면 시설 하부의 일사량은 노지 일사량의 약 70%이었음. 직달광보다 산란광이 우세한 흐린 날은 시설 하부의 지점 간 일적산값 차이가 크지 않았지만 맑은 날에는 지점 간에 명확한 차이가 존재하였음.



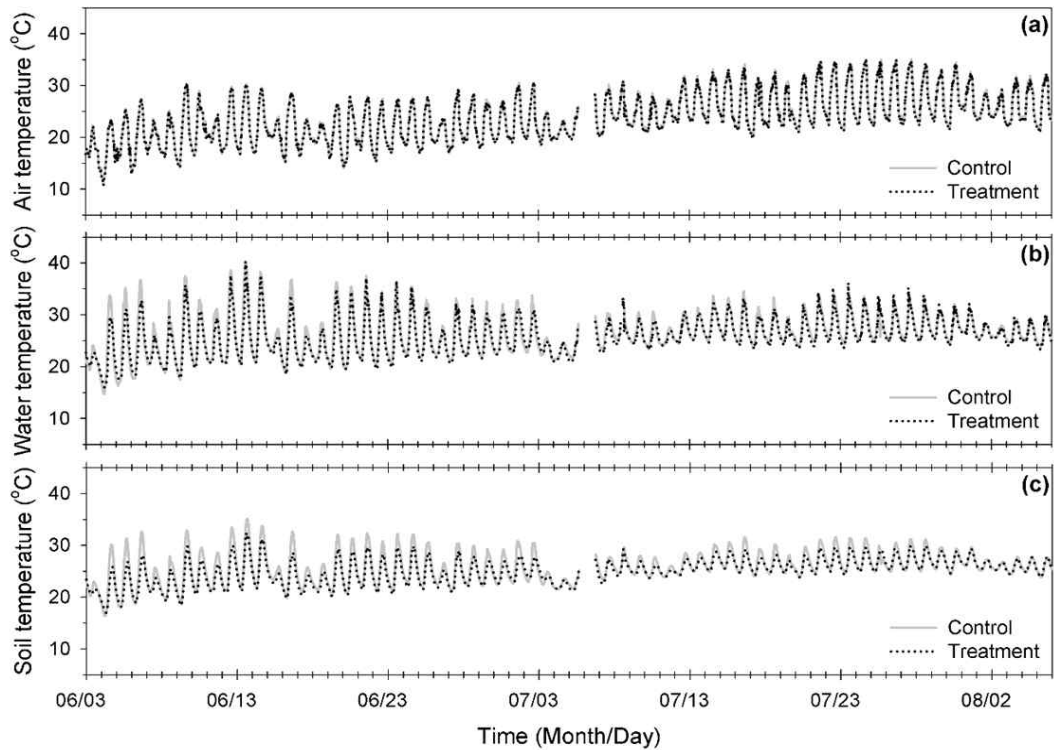
<그림 80> 맑은 날과 흐린 날 대조구(노지 논)와 처리구(영농형 태양광 시설 하부) 10분 평균 일사량의 일변동

- 이러한 차이를 구체적으로 아래와 같이 살펴보고자 맑은 날(6월 4일과 7월 23일)과 흐린 날(6월 3일과 8월 2일)에 10분 간격으로 관측된 일사량의 시계열을 살펴보았음.
- 맑은 날의 전천 일사가 어떻게 시설 하부를 통과했는지 보면 관측 지점에 따라 감쇄되는 시간과 정도가 다른 것을 확인하였음.
- 태양광 패널 윗단(차광률: 29%), 패널 밑단(19%), 패널 중앙(22%)의 경우, 오전에는 잠깐 일사가 차단되며 오후에 한 시간 이상 차단되는 시점이 존재하였음.
- 패널 사이의 경우 오전에는 대부분의 일사가 차단되며, 결과적으로 전체 일사의 절반만이 통과하였음(차광률: 46%).
- 이러한 차이는 태양 방위각과 천정각의 변화에 따라 패널에 의해서 차단되는 일사량이 달라지기 때문인 것으로 보임. 흐린 날의 경우 지점별 차광률 차이는 크지 않았으며(32 ~ 35%), 평균 차광률은 흐린 날이 34%로 맑은 날(29%)에 비해 높았음.



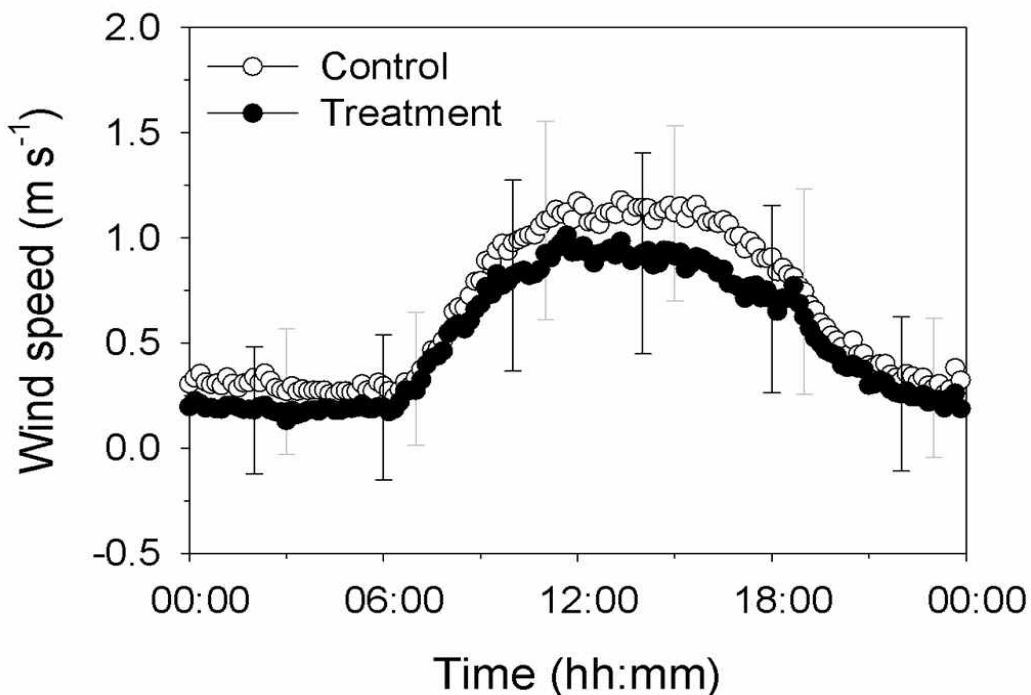
<그림 81> 대조구(노지 논)와 처리구(영농형 태양광 시설 하부)에 관측된 일적산 일사량 시계열

- 아래 그림은 파주(2021년) 영농형 태양광 시설 외부 논과 하부 논 의 기온, 수온(물이 없을 때는 지상 온도), 지온의 시계열을 보여주었음.
- 시설 하부 논과 노지 논에서 기온은 거의 차이가 없지만, 수온과 지온은 명확한 차이가 확인되었으며, 이러한 차이는 논으로 입사하는 태양복사의 차이가 나타나는 낮에 주로 나타나며, 밤에는 그 차이가 줄어들어 최저 온도는 둘 간의 거의 차이가 없었음.
- 그러나 낮 동안의 차이도 벼가 자라면서 지면이 식생으로 충분히 덮이는 과정에서 줄어들었음. 실제로 관측 기간을 21일씩 나눠(6월 3일부터 23일, 6월 24일부터 7월 14일, 7월 15일부터 8월 5일) 일 최고 지온(수온)의 평균값을 계산하고 대조구와 처리구 간의 차이를 보면 2.6(1.2)°C, 1.3(0.6)°C, 1.1(0.4)°C로 줄어드는 것을 확인할 수 있었음.



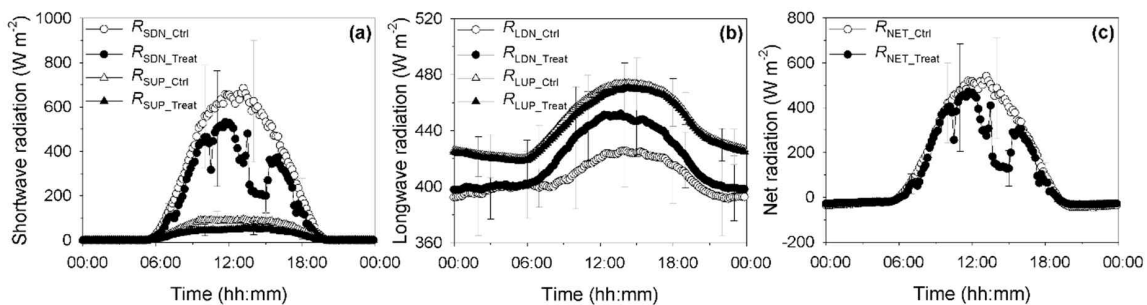
<그림 82> 대조구(노지 논)와 처리구(영농형 태양광 시설 하부)에서 10분 평균 기온, 수온, 지온의 시계열

- 파주(2021년) 영농형 태양광 시설 하부 논에서 측정된 풍속이 대조구 논에서 측정된 것보다 20% 정도 약하였음(평균 풍속 각각 0.65 m s^{-1} 와 0.52 m s^{-1}).
- 처리구와 대조구의 풍속의 차이가 시간과 식생 계절 변동에 관계없이 비슷하게 나타나는 것으로 보아, 이러한 차이가 주로 태양광 시설물에 의해 바람이 막혀 생기는 것으로 유추해 볼 수 있음.



<그림 83> 관측기간동안 대조구(노지 논)와 처리구(영농형 태양광 시설 하부)의 풍속의 평균 일변동

- 아래 그림은 파주(2021년) 영농형 태양광 시설 외부 논과 하부 논의 관측 기간 동안 평균 지면 복사 수치를 보여주며, 영농형 태양광 시설 하부의 복사 수치 관측은 앞선 일사량 분석에서 언급했던 1번 지점(영농형 태양광 패널 윗단 아래)에서 이루어짐.
- 먼저 단파 복사의 지면 알베도를 보면 노지 논(0.164)이 시설 하부(0.137)보다 높았는데, 이는 시설 하부에서 태양광 시설로 인해 지면으로 입사하는 빛의 산란광 비중이 노지 논보다 높았기 때문으로 생각되며, 이러한 차이는 대조구와 처리구의 식생지수가 유사할 때에도 동일하게 나타남.
- 상향 장파 복사의 경우 지온과 수온이 더 높았던 노지 논에서 기대했던 대로 더 컸으나, 상향 장파 복사의 차이보다는 하향 장파 복사의 차이가 훨씬 두드러졌으며, 이러한 차이는 태양광 시설이 태양복사를 차단함으로써 데워지고, 데워진 만큼 장파 복사 방출을 일으키기 때문 사료됨.
- 태양광 시설 하부 논은 낮은 알베도와 시설에서 방출되는 하향 장파 복사로 인해, 실제 대조구와 처리구의 순복사 차이(대조구: $13.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, 처리구: $9.5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, 처리구/대조구: 0.73)는 태양광 시설에 의해 차단되어 발생하는 하향 단파 복사(일사) 차이(대조구: $19.6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, 처리구: $13.1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$, 처리구/대조구: 0.68)보다 적었음.



<그림 84> 관측기간동안 대조구(노지 논)와 처리구(영농형 태양광 시설 하부)의 상/하향 장/단파 복사 및 순복사 에너지의 평균 일변동

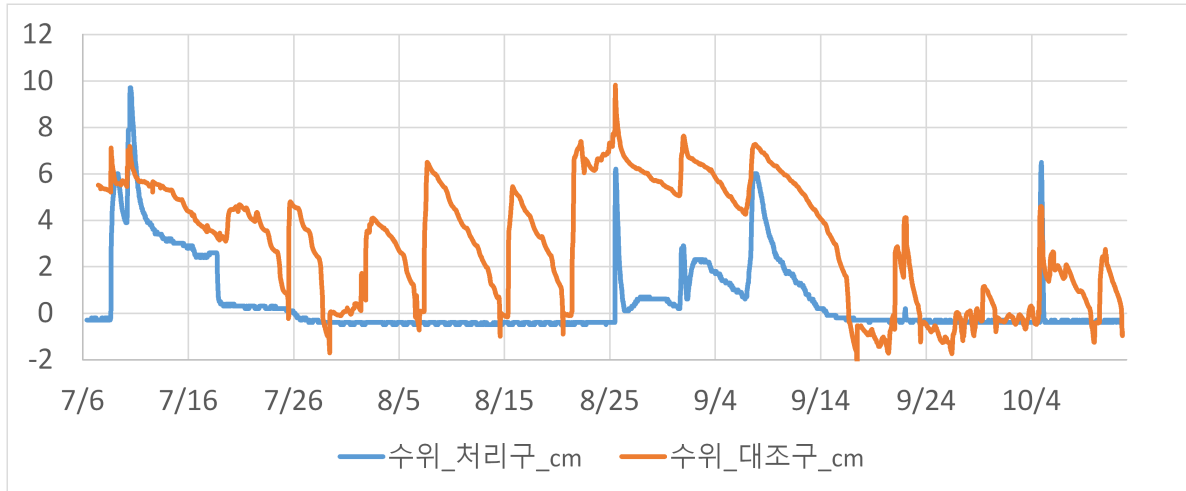
- 물 소비량의 경우, 일반 노지 논보다 30% 정도 작은 순복사 에너지, 20% 정도 약한 풍속, 한낮에 1°C 이상 낮은 수온을 이유로 영농형 태양광 시설 하부 논은 증발산량이 더 적어질 것으로 예상되며, 이러한 사실은 다음 장에서 좀 더 자세히 다루도록 하겠음.
- 메탄 배출량의 경우, 더 낮은 수온과 지온으로 인해 메탄 생성이 줄어들고, 결과적으로 메탄 배출량 또한 적어질 가능성이 있으며, 이러한 사실은 뒤에 메탄 배출량 관측 부분에서 다루도록 함.
- 위에서 확인한 영농형 태양광 시설 하부와 외부의 환경 차이는 2022년도에 새롭게 옮긴 논 관측지에서도 동일하게 나타났으며, 오창 감자밭의 경우, 일반형과 투과형 패널이 존재하여 두 패널 간의 차광율 차이를 알아볼 수 있었는데, 관측 자료 분석 결과, 하루 이상의 긴 시간 규모에서 둘 간의 차이는 크지 않았음.

□ 수분 수치

- 앞서 확인한 환경 변수들 외에 물 소비량과 온실가스 배출량에 큰 영향을 미칠 수 있는 요소가 바로 물 수위(낙수 시에는 토양수분)임.
- 지면에 가용한 물의 양에 따라 보웬비(현열 플럭스와 잠열 플럭스의 비)가 달라질 수 있음

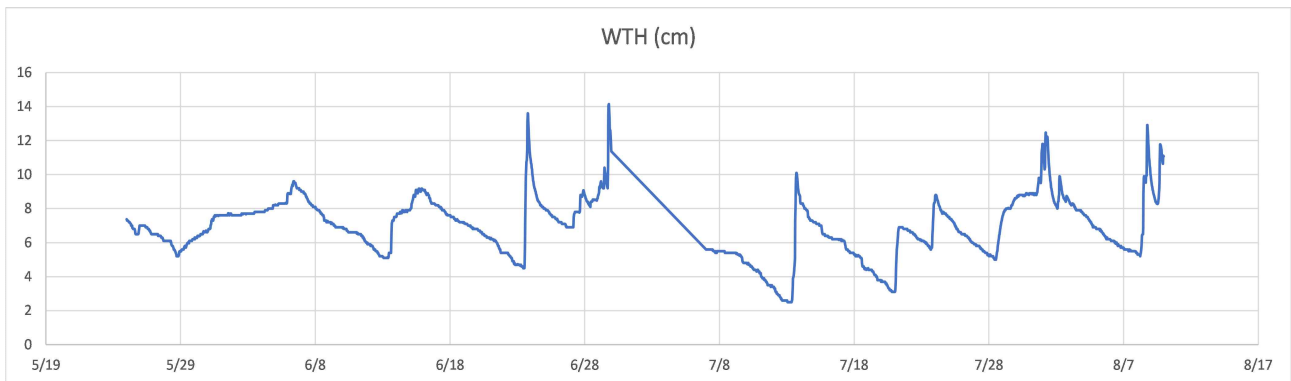
며, 토양이 물에 잠겨 있지 않은 경우 메탄 생성은 현저히 줄어듬.

- 대조구와 처리구가 같은 필지 안에 있지 않는 경우라면, 물 수위 제어에 세심한 주의를 기울여야 물 소비 및 온실가스 배출 감소량 평가를 위한 신뢰성 있는 플럭스 자료 획득이 가능할 것이며, 실제로 2021년 파주 관측지의 경우, 대조구와 처리구가 같은 필지 내에 있지 않아 아래와 같이 두 필지 간의 물 수위 차이가 나타났음.



<그림 85> 대조구(노지 논)과 처리구(영농형 태양광 시설 하부)에서 논 물 수위의 시계열, 2021년 파주

- 차년도에는 물 수위 차이에 따른 물 소비량과 메탄 배출량의 영향을 줄이고자 대조구와 처리구가 같은 필지에 위치한 논으로 관측지를 이전하였으며, 아래의 수위자료에 따르면 중간 낙수 기간에도 논물이 완전히 빠지진 않았던 것으로 확인되었음.

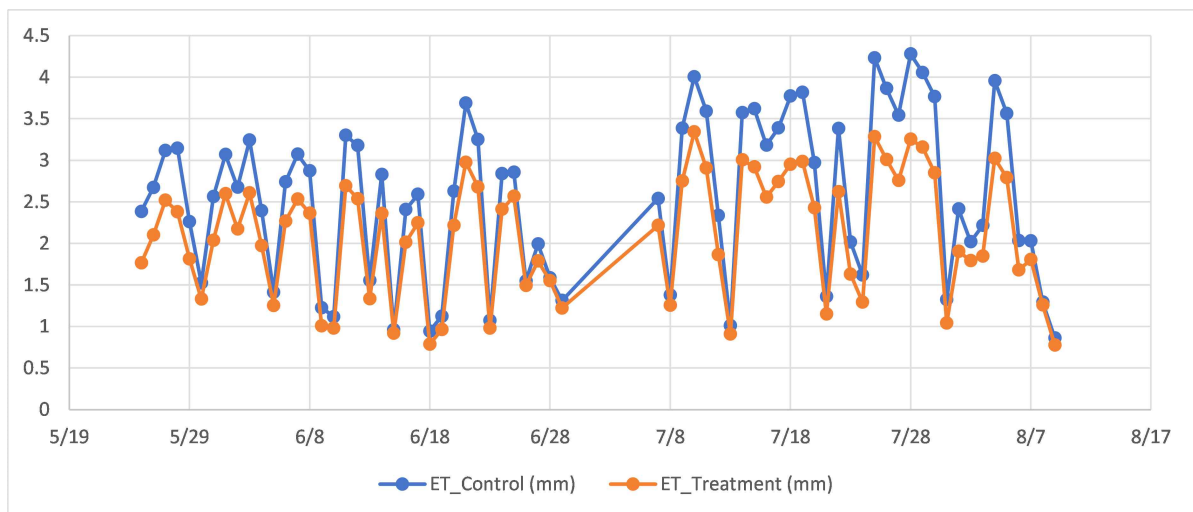


<그림 86> 파주 논(2022년) 표준 시비 구역의 논 물 수위 시계열

- 에디 공분산 관측과 기계학습 모델을 이용하여 영농형 태양광 하부에서 증발산이 얼마나 감소되는지 추정하였음.
- 에디 공분산 방법을 이용한 증발산 및 온실가스 플럭스 관측은 넓은 영역의 필지를 필요로 함. 따라서 지금과 같은 소규모의 영농형 태양광 시설에서는 에디 공분산 시스템으로 태양광 시설 하부와 외부의 논을 구분하여 관측하기는 쉽지 않았음.
- 먼저 관측대상지역 전체(대조구 및 영농형 태양광 시설 하부)의 증발산을 감시하는 에디 공분산 시스템에서 측정한 증발산 및 미기상 관측자료(대조구 및 태양광 시설 하부 평균 자료)와 기계학습 모델 중에 하나인 랜덤포레스트를 이용하여 논 증발산을 추정하는 모델을

구축하였음.

- 구축한 랜덤포레스트 모델에 대조구와 태양광 시설 하부 미기상 관측 자료를 각각 입력자료로 하여 대조구의 증발산과 태양광 시설 하부 증발산을 아래 그림과 같이 추정하였음.
- 테스트 기간 동안의 대조구와 처리구 간 증발산 차이를 확인한 결과, 영농형 태양광 시설로 인한 증발산(물소비량)의 감소 효과는 18% 정도로 일사량이 감소되는 정도(약 30%) 보다는 작았음.
- 이러한 이유로 증발산은 지면으로 입사하는 에너지(일사) 뿐만 아니라 대기가 건조한 정도(atmospheric demand)에도 영향을 받는데, 대조구와 처리구의 기온과 습도가 거의 차이가 없고 따라서 대기가 건조한 정도를 나타내는 수증기압 포차(vapor pressure deficit) 역시 차이가 거의 없기에 이러한 결과가 나온 것으로 파악됨.



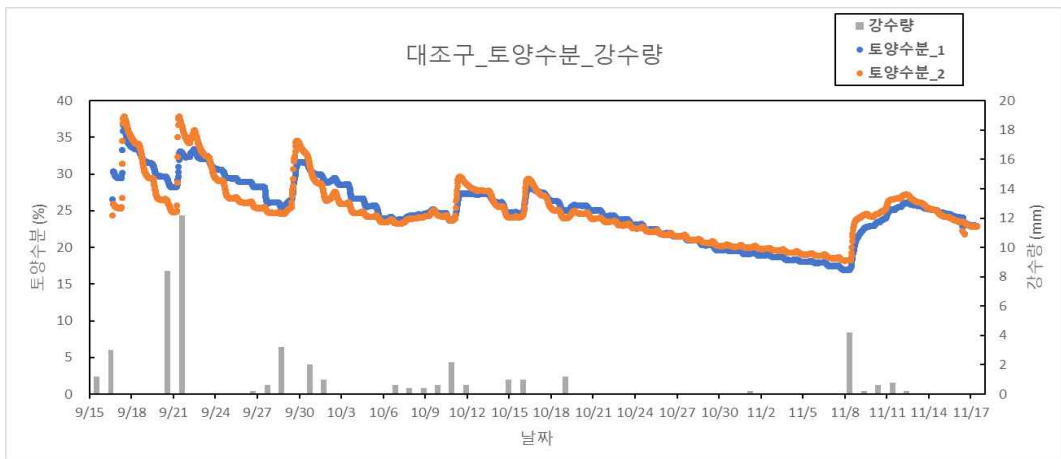
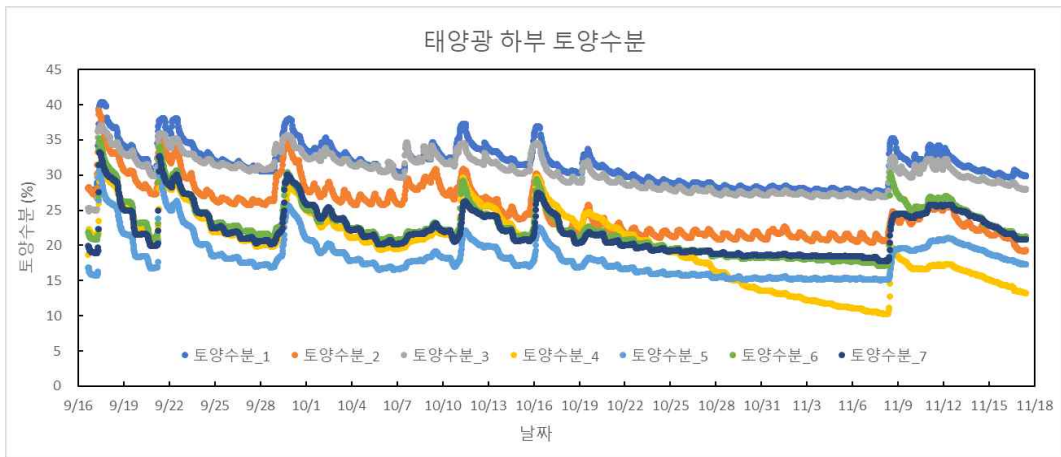
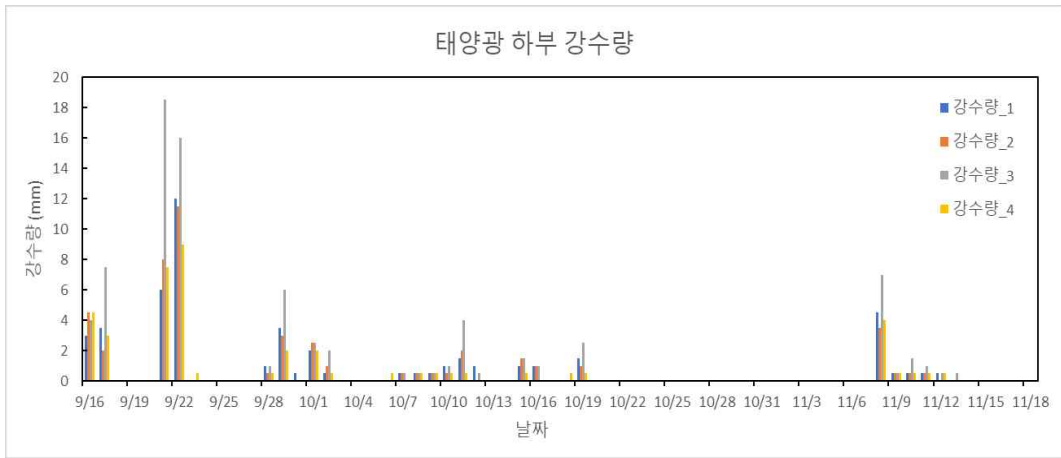
<그림 87> 파주 논(2022년) 증발산 추정 결과

- 표 34에 따르면 24시간 주기 라이시미터 별 증발(Evaporation), 투수(Deep Percolation), 증산(Transpiration) 변화량을 보여주었음.
- 바닥이 막힌 A타입과 비교했을때 바닥이 뚫린 B,C타입에서 수위 변화가 확연히 많았고, 버가 있는 라이시미터에서의 물소비가 미세하게 많은 것을 확인하였음.
- 수위변화의 차이로 계산한 증발과 증산이 음의 값을 보이는 등의 문제가 발생했음.
- 해당 논외의 경우 자갈의 함량이 많아 물 빠짐과 수평적인 흐름이 존재하여 침투가 과다 추정되는 현상 때문인 것으로 파악되었으며, 해당 사이트에서 라이시미터를 이용하여 추정한 증발산량은 대조구와 처리구 간 물소비량 비교에는 적합하지 않은 것으로 판단됨.

<표 34> 처리구와 대조구 24시간 주기 라이시미터 증발, 투수, 증산 변화량

구분	처리구 표준			처리구 감비			대조구 표준			대조구 감비		
	E	DP	T	E	DP	T	E	DP	T	E	DP	T
06.02	0.3	1.6	0.3	0.4	1.9	-0.5	0.2	-	-	0.6	1.2	0.5
06.03	-0.5	2	-0.1	0.3	1.7	-1.1	0.5	2.3	-	0.1	1.3	0.4
06.08	1.4	0.4	-0.4	0.8	1.1	-0.5	0.6	0.7	0	0.6	0.7	0.5
06.09	0.1	1	0.1	0	1.6	-0.9	0.2	0.9	0	0.2	1	-0.6
06.21	0.4	0.9	0.7	-	-	-	1.1	0.4	-0.2	0.3	1	1.1
06.22	0.3	0.6	0.5	-	-	-	0.3	1.3	-	0.3	-	-
07.19	1.3	-0.9	1.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-
08.10	0	0.7	0.5	0	0.3	-	-	-	-	-	-	-
08.11	0.4	0.7	0.3	0.3	-0.4	-	-	-	-	-	-	-
09.14	0	0.5	0.3	0.5	-0.1	-	-	-	-	-	-	-

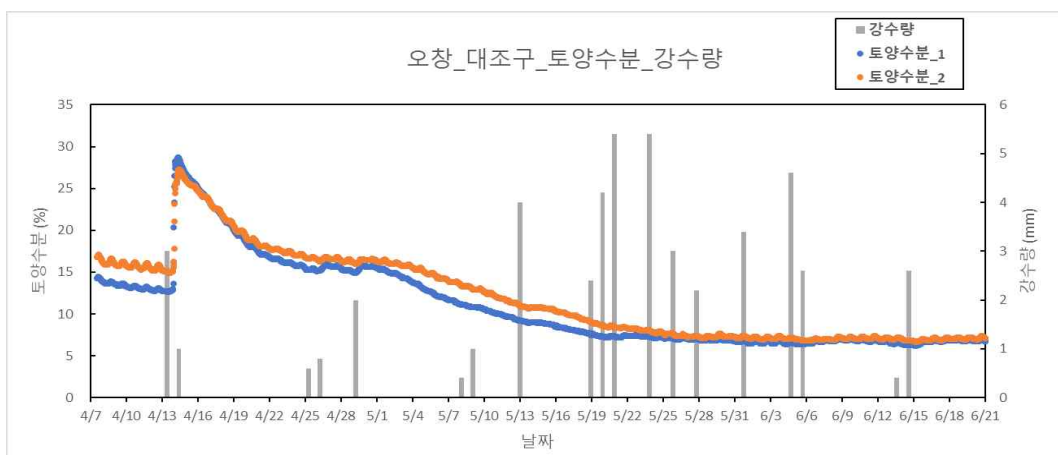
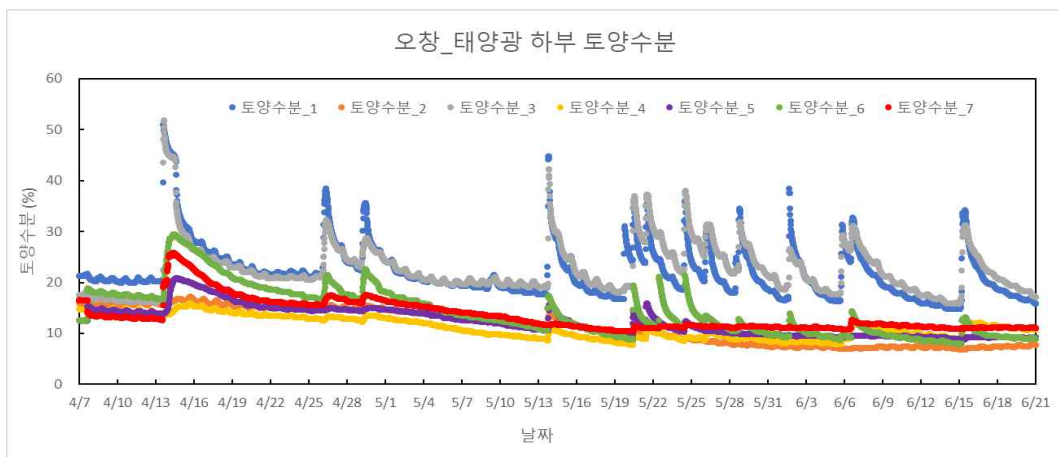
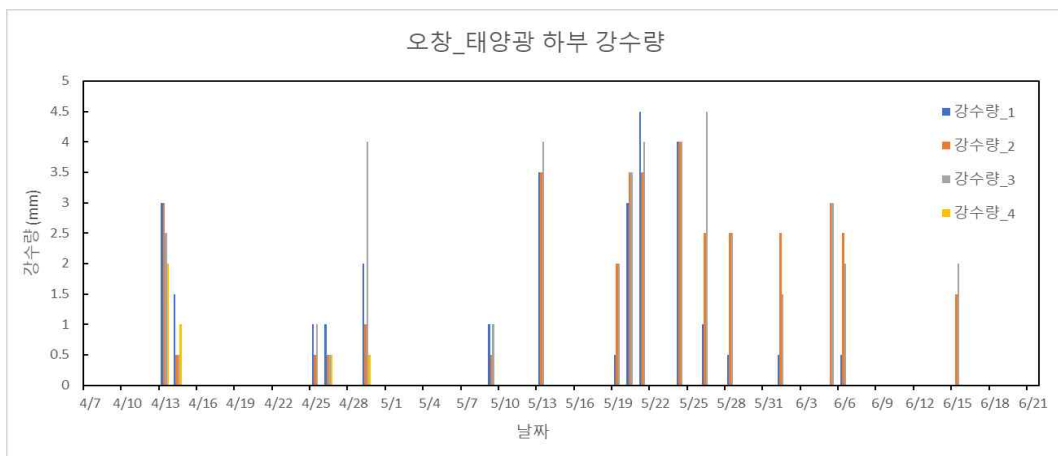
- 오창 관측지의 물수지를 파악하기 위해 태양광 하부와 대조구에 강수계와 토양수분계를 설치하였음.
- 태양광 하부의 강수계는 모두 투과형 패널의 패널 사이 노출 공간(1번), 패널 경사 하단부(2번), 패널 경사 상단부(3번), 정식 시기가 다른 위치의 패널 하단부(4번)에 각각 설치되었음.
- 토양수분 측정 센서의 경우, 투과형 패널의 패널 사이 노출 공간(1번), 패널 경사 하단(2번), 패널 경사 상단(3번)에 CS 616 모델이, 정식 시기에 따라 투과형 패널의 하단(4번과 5번) 및 일반형 패널의 하단(6번과 7번)에 CS 655 모델이 각각 설치됨. 이 중 1번과 3번 센서를 제외하고 모두 멀칭에 의해 피복된 상태에서 관측이 이루어졌다. 대조구에도 정식시기에 따라 CS 655 모델(1번과 2번)이 설치되었음.
- 오창 관측지에서 2021년 관측된 강수량 및 토양수분 데이터는 아래의 그래프와 같음. 태양광 하부와 대조구 모두 강수 시기에 토양수분의 함량이 증가하는 패턴이 나타나 센서 자체의 오류는 나타나지 않은 것으로 판단되었음. 태양광 하부에 설치된 여러 강수계들의 측정 결과를 살펴보면, 전체적으로 대조구의 노출된 상태의 강수량과 큰 차이를 보이지 않았으나 패널 경사 상단부의 아래에 설치된 3번 강수계의 강수량이 지속적으로 과다 측정되는 경향이 나타났음. 이는 해당 부위에서 구조물의 틈새로 빗물이 모여 떨어진 결과로 보임.
- 토양수분의 관측 결과를 살펴보면, 태양광 하부와 대조구 모두 약 20%에서 40% 사이의 값을 나타냈으며, 태양광 하부에서는 CS 616 센서의 측정값(1번부터 3번)이 CS 666 센서(4번부터 7번)보다 높은 값을 일관되게 보여주는 것으로 볼 때 센서 간의 감도 차이를 예상할 수 있었음. 투과형 태양광 패널 하단(4번, 5번)의 토양수분이 일반형 패널 하단(6번, 7번)보다 더 낮은 값을 나타내는 경향이 나타났으며, 이는 패널의 투명도가 입사광의 강도에 영향을 주어 수분의 증발에 차이를 가져온 것으로 해석할 수 있음.



<그림 88> 오창 관측지 태양광 하부와 대조구의 강수량 및 토양수분 시계열(2021년)

- 오창 관측지에서 2022년 관측된 강수량 및 토양수분 데이터는 아래의 그래프와 같음.
- 태양광 하부에서는 특히 멀칭이 되어 있지 않은 1번과 3번 센서에서 강수가 발생할 때마다 토양수분의 함량이 증가하는 패턴이 나타나며, 대조구는 최초 강수 이후 토양수분이 증가한 뒤 이후 점차 감소하는 형태가 나타났는데, 멀칭으로 인해 강수가 차단된 효과로 판단됨.
- 태양광 하부에 설치된 여러 강수계들의 측정 결과를 살펴보면, 전체적으로 대조구의 노출된 상태의 강수량보다 약간 낮게 나타났으며(1 mm 내외), 이는 태양광 구조물에 의한 강수 차단의 결과로 보임.
- 또한 패널 경사 하단부의 아래에 설치된 3번 강수계의 강수량이 일부 과다 측정되는 경우가 나타났는데, 이는 해당 부위로 빗물이 모여 떨어진 결과로 보임.

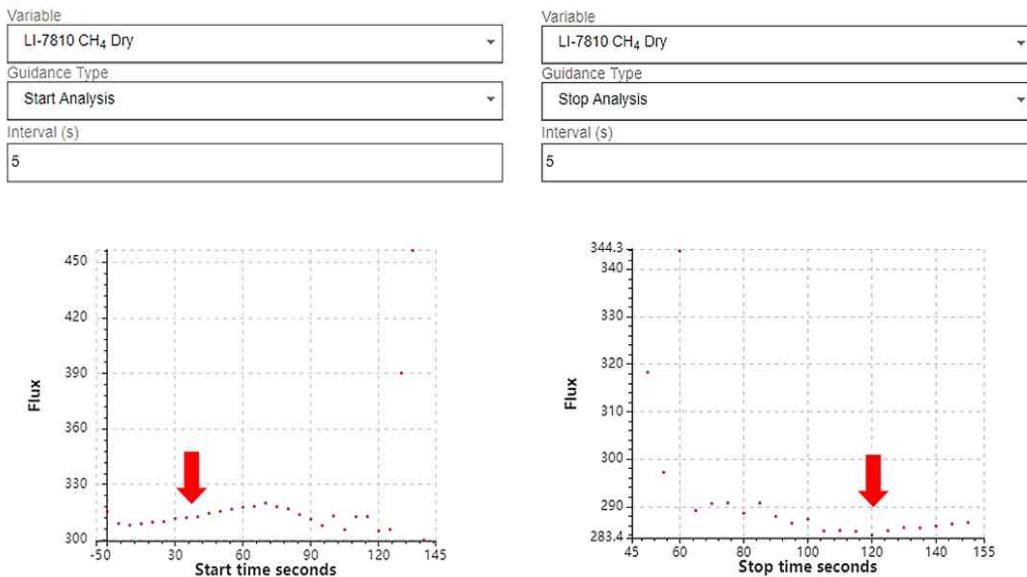
- 토양수분의 관측 결과를 살펴보면, 태양광 하부는 약 10%에서 50% 사이, 대조구는 6%에서 30% 사이의 값을 관측하였음.
- 투과형 패널의 경우 패널 사이 노출 공간(1번)과 패널 중앙(3번)에서 측정된 값이 패널 경사 하단(2번)에서 측정된 값보다 지속적으로 높은 결과를 보이고 있는데 멀칭이 되어 있지 않아 강수가 직접 유입된 것이 주요 요인이며, 패널의 설치 각도와 직사광선의 차단 유무와도 관련이 있는 것으로 판단됨.
- 투과형 태양광 패널 하단(4번, 5번)의 토양수분이 일반형 패널 하단(6번, 7번)보다 더 낮은 값을 나타내는 경향이 나타났으며, 이는 패널의 투명도가 입사광의 강도에 영향을 주어 수분의 증발에 차이를 가져온 것으로 해석할 수 있음.



<그림 89> 오창 관측지 태양광 하부와 대조구의 강수량 및 토양수분 시계열(2022년)

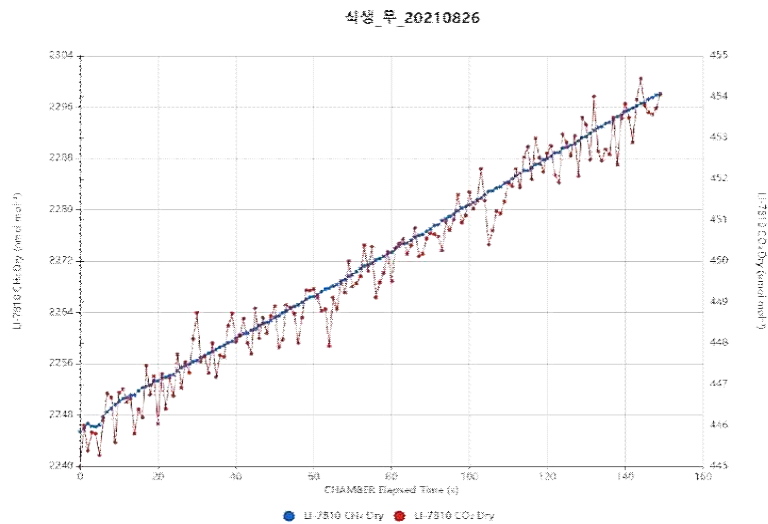
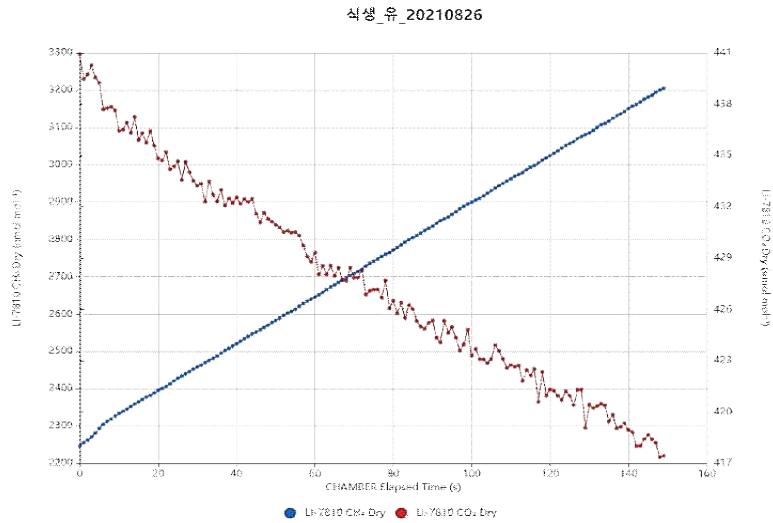
□ 온실가스 인벤토리

- 2021년 관측 장비의 도입 이후, 운영 방식을 확정하기 위한 테스트 관측을 진행하였으며, SoilFluxPro 소프트웨어의 start analysis와 stop analysis 기능을 활용하여 적절한 플럭스 계산에 필요한 관측 시간을 설정하였음.
- Start analysis는 관측 시작 시간의 함수로 플럭스를 보여줌으로써 신호가 안정되기까지 대기해야 하는 dead band의 위치를 식별할 수 있는데 40초로 정하였음.
- Stop analysis는 관측 정지 시간의 함수로 플럭스를 보여줌으로써 관측 시간이 충분한지를 파악할 수 있는데 120초로 정하였음.



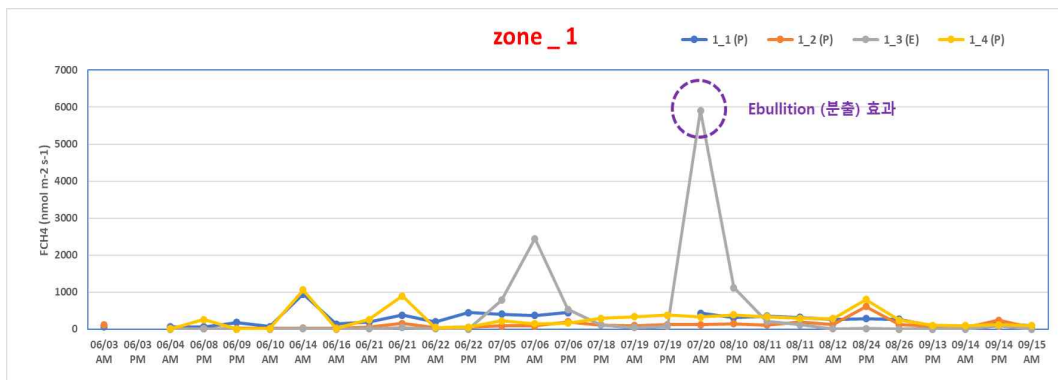
<그림 90> start analysis와 stop analysis를 이용한 적절한 관측 시간의 결정

- 챔버 관측을 통해 얻게 되는 통상적인 온실가스 농도의 변화는 챔버 내부의 식생 유무에 따라 아래와 같이 나타났음.
- 챔버 내에 식생(벼)이 존재하는 경우에는 관측이 진행됨에 따라 벼의 통기조직을 통해 배출되는 메탄이 계속 누적되어 그 농도가 지속적으로 증가하며, 이산화탄소는 광합성을 통해 소모되면서 감소하는 추세가 나타났음.
- 벼 포기 사이의 빈 공간을 관측하는 경우에는 토양 또는 수면에서 직접 배출되는 메탄에 의해 농도가 아주 소량 증가하며, 이산화탄소 역시 토양 호흡 등을 통해 아주 미세하게 증가하는 경향이 나타났음.

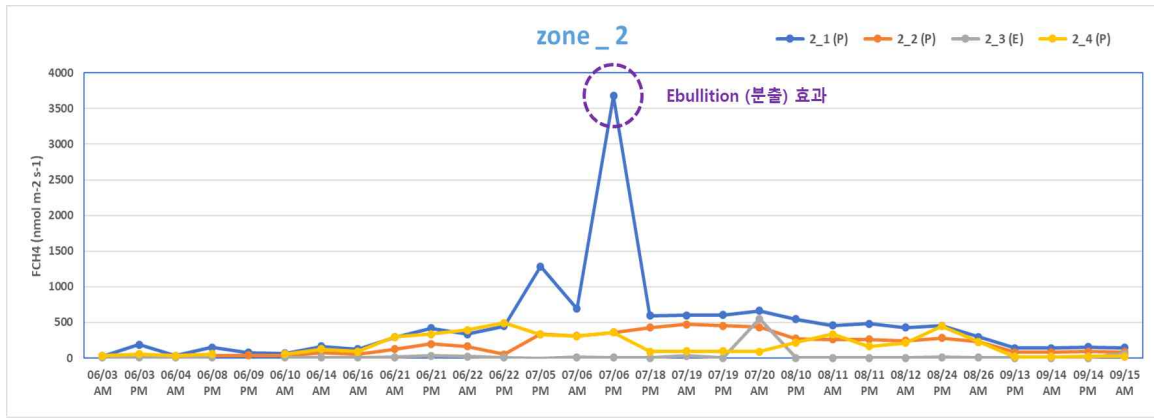


<그림 91> 챔버 내 식생의 유무에 따른 온실가스 농도의 변화

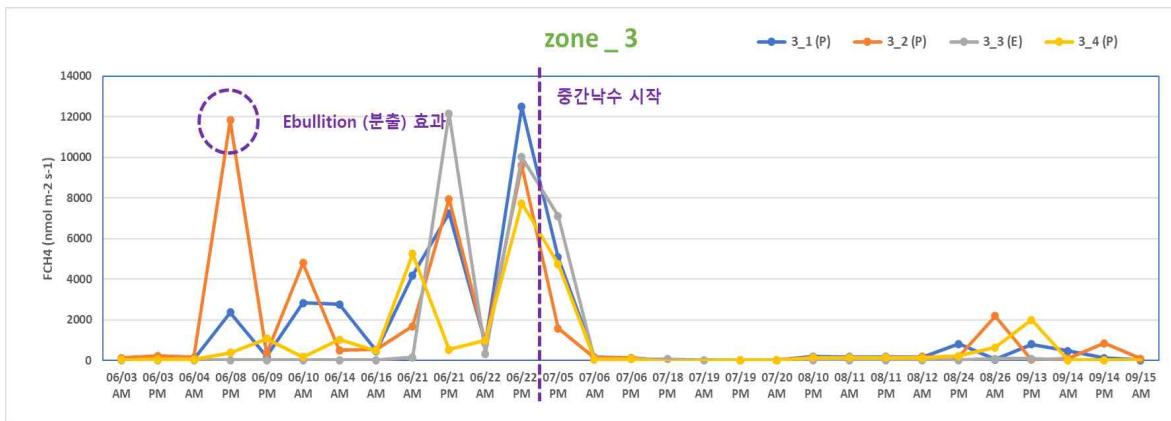
- 그림 92는 2022년 파주 관측지의 각 구역별 메탄 플럭스 챔버 관측 결과 임.
- 시기와 관계없이 임의로 발생하는 분출 효과로 인해 벼의 통기조직을 통해 이동하는 메탄의 배출량을 제대로 파악하기 어려운 현상이 발생하였으며, 분출로 배출되는 메탄의 양은 수 천배에 달할 수 있으며, 중간낙수의 메탄 배출 저감 효과는 분명하게 나타났음.



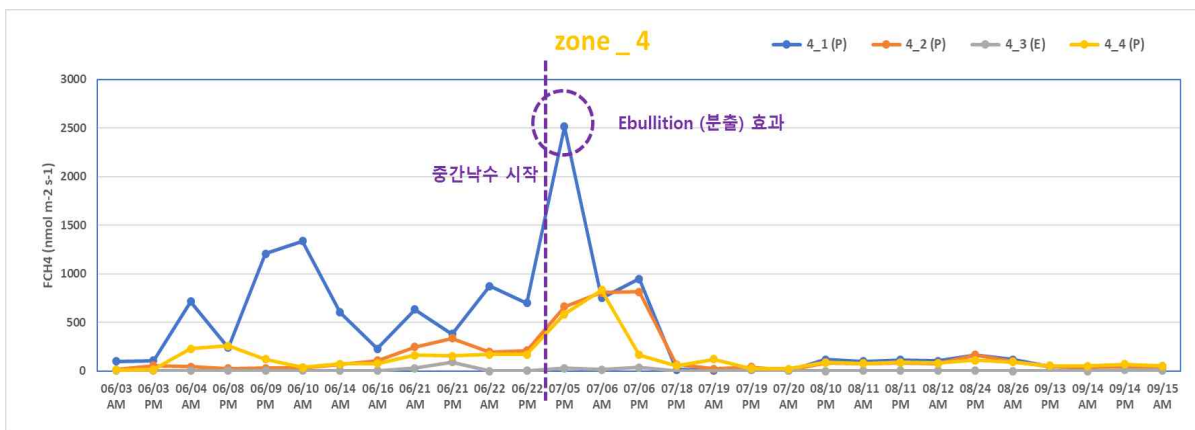
<그림 92> 1구역(태양광 하부, 표준 시비)의 메탄 플럭스 챔버 관측 결과



<그림 93> 2구역(대조구, 표준 시비)의 메탄 플럭스 챔버 관측 결과

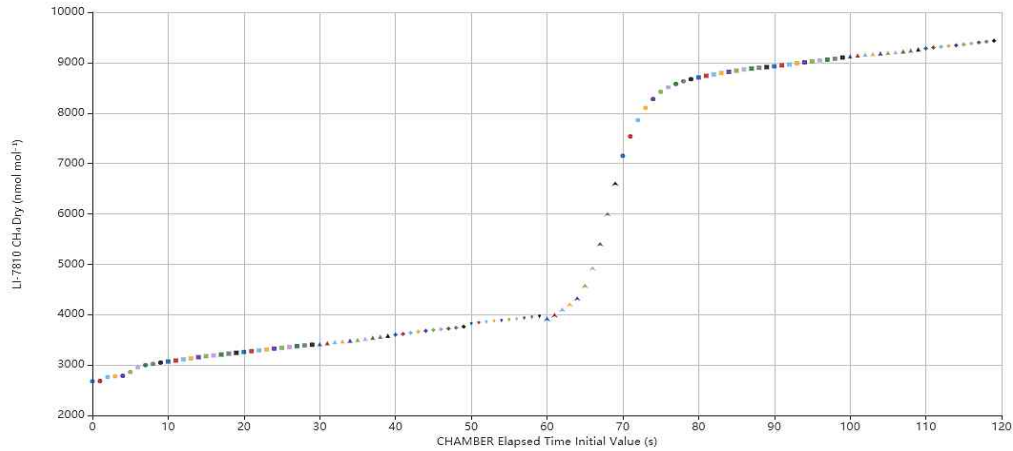


<그림 94> 3구역(대조구, 감비)의 메탄 플럭스 챔버 관측 결과



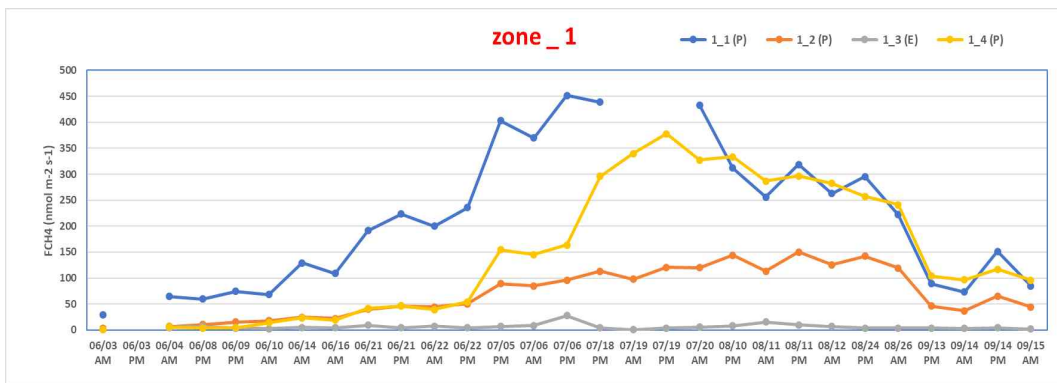
<그림 95> 4구역(태양광 하부, 감비)의 메탄 플럭스 챔버 관측 결과

- 상당량의 메탄을 일시에 배출하는 분출 현상으로 인해 벼의 통기조직을 통한 이동으로 배출되는 메탄의 양을 파악하기 어려우며, 태양광 하부의 직사광선 차단 영향에 의한 메탄 배출 감소 효과를 분석하기 위해 각각의 측정 결과로부터 분출에 의한 메탄 배출량을 제외하고 새롭게 플럭스를 계산하였음.

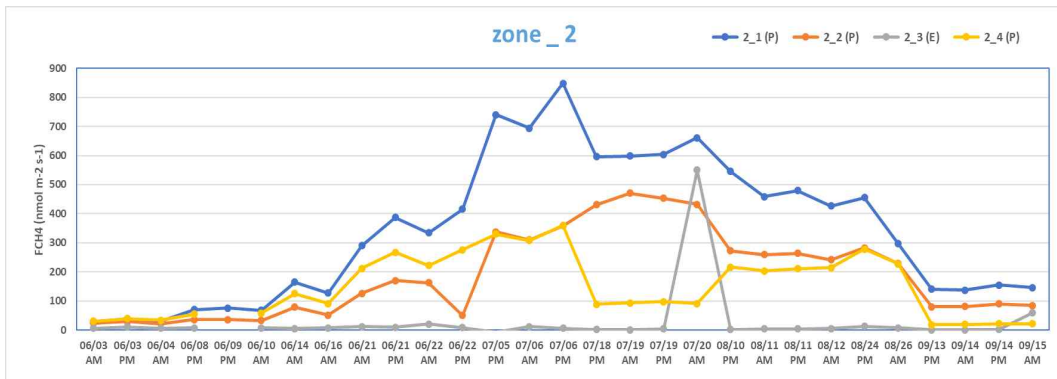


<그림 96> 분출 효과로 인해 챔버 내의 메탄 농도가 급격하게 증가하는 모습(60~80초 사이)

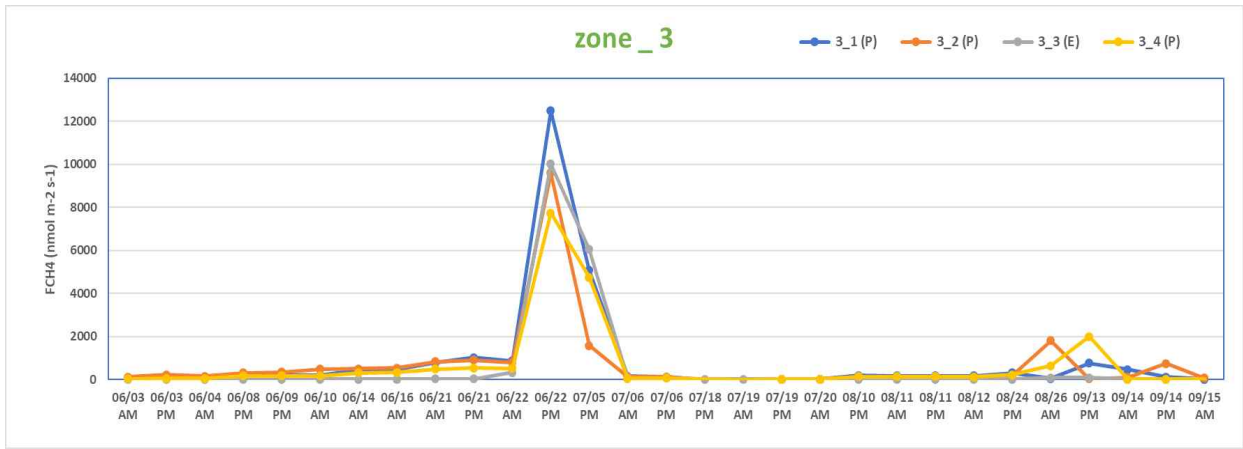
- 분출 효과를 제외하고 새롭게 계산된 각 구역별 메탄 플럭스 관측 결과는 그림 94와 같이 나타났음. 벼가 성장하면서 메탄 배출량이 점차 증가하다가 6월 말에서 7월에 정점에 도달하고 그 후 다시 감소하는 추세가 나타남.
- 중간낙수가 이루어진 3구역과 4구역은 메탄 배출이 확연히 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 또한 식생이 없는 관측구(각 구역별로 3번 collar)에서는 메탄 배출량이 $10 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-2}$ 이하로 아주 미미하게 나타나고 있다. 6월 22일과 7월 6일 사이에 나타나는 3구역과 4구역의 피크는 분출 효과를 제거해도 남은 것으로 이유가 명확하지 않음.



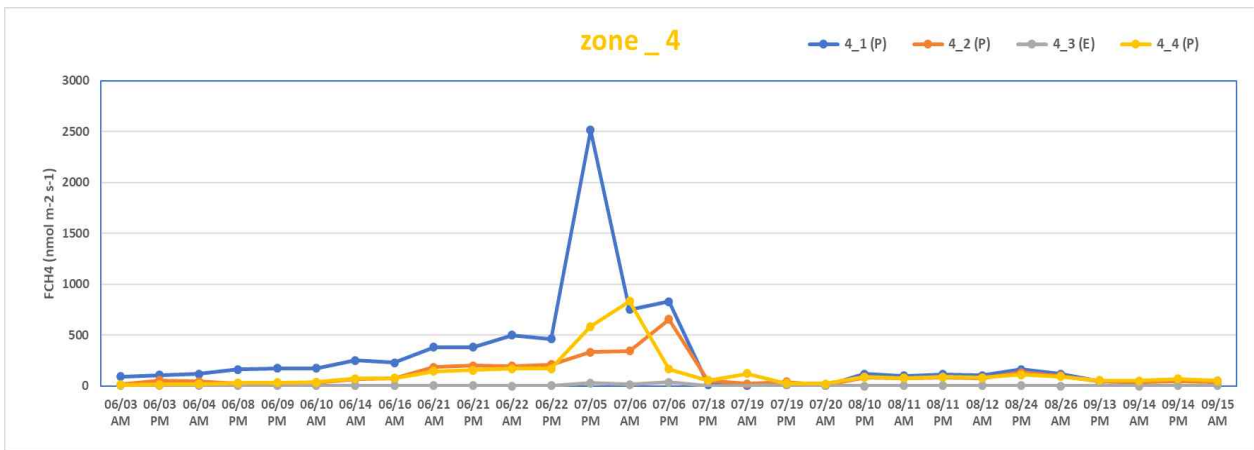
<그림 97> 분출 효과를 제외한 1구역(태양광 하부, 표준 시비)의 메탄 플럭스 챔버 관측 결과



<그림 98> 분출 효과를 제외한 2구역(대조구, 표준 시비)의 메탄 플럭스 챔버 관측 결과

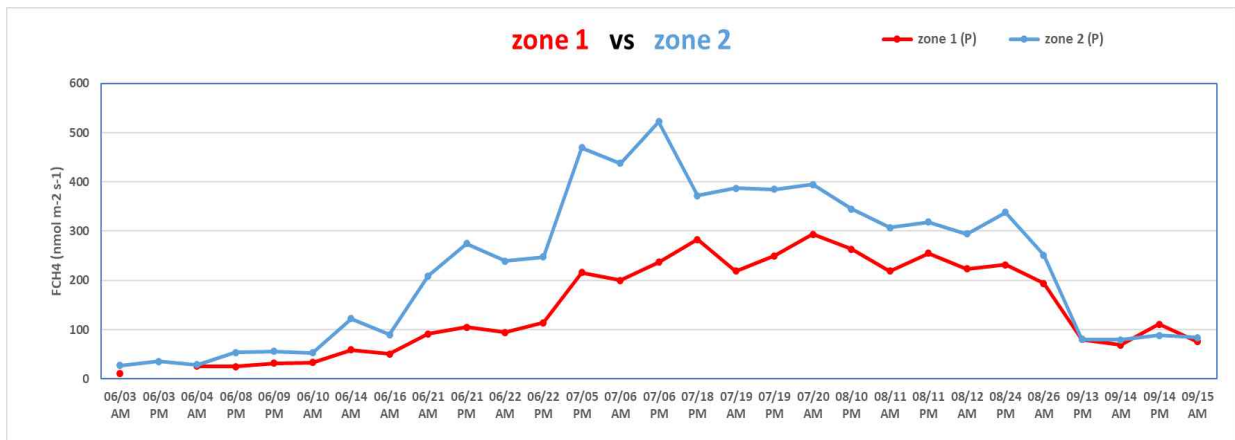


<그림 99> 분출 효과를 제외한 3구역(대조구, 감비)의 메탄 플럭스 챔버 관측 결과

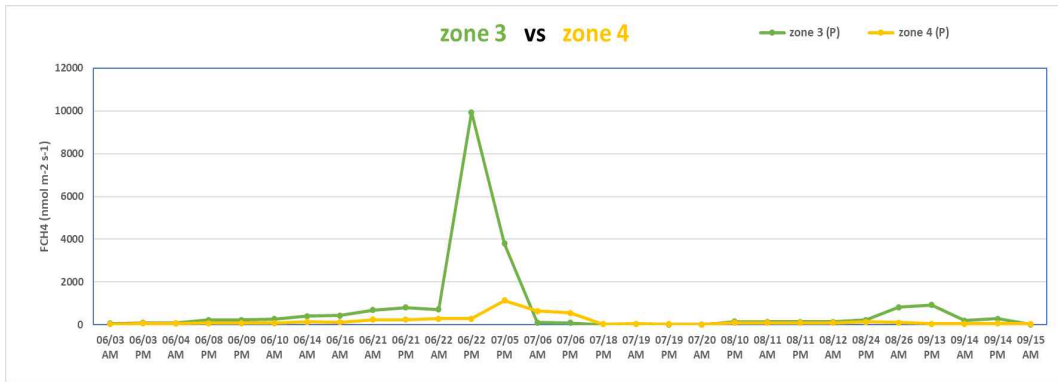


<그림 100> 분출 효과를 제외한 4구역(태양광 하부, 감비)의 메탄 플럭스 챔버 관측 결과

○ 표준 시비 구역에서 태양광 하부(1구역)와 대조구(2구역), 감비 구역에서 태양광 하부(4구역)와 대조구(3구역)의 메탄 플럭스를 비교한 결과 태양광 하부의 메탄 플럭스가 지속적으로 대조구보다 낮게 계산되어 태양광 패널의 직사광선 차단으로 인한 냉각 효과가 영향을 주고 있음을 확인하였음.

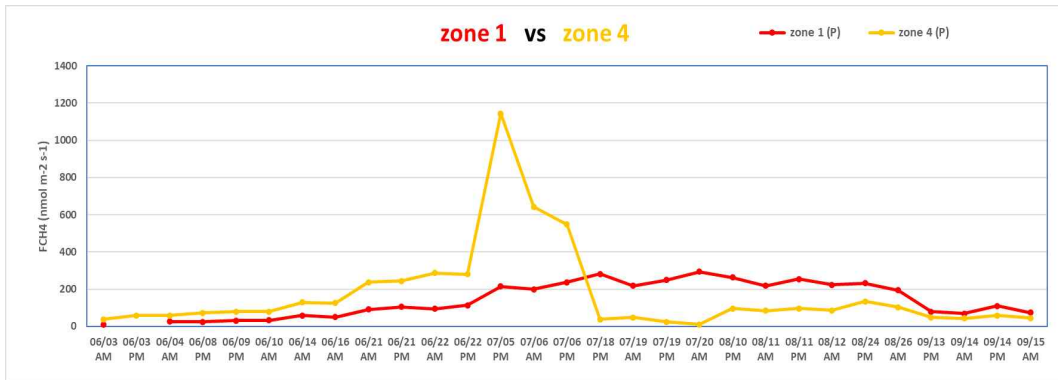


<그림 101> 표준 시비 구역에서 태양광 하부(1구역)와 대조구(2구역) 메탄 플럭스 비교

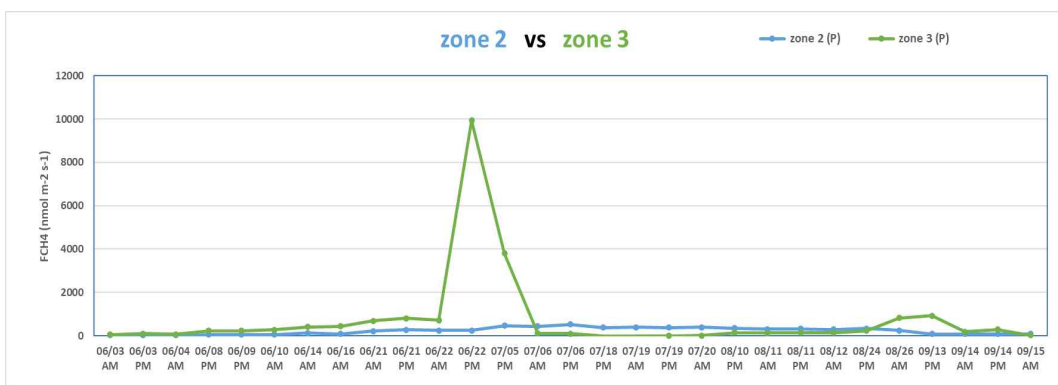


<그림 102> 감비 구역에서 태양광 하부(4구역)와 대조구(3구역) 메탄 플럭스 비교

- 태양광 하부와 대조구에서 시비량에 따른 메탄 플럭스를 비교한 결과, 관측 전에는 표준 시비 구역보다 감비 구역에서 더 적은 메탄 플럭스가 나타날 것으로 예상했으나, 실제 관측에서는 감비 구역의 메탄 플럭스가 더 크게 나타남.
- 후반부에는 반대의 경향이 나타나지만 중간낙수가 실질적으로 감비 구역에서만 실시되었기 때문에 명확한 결과를 도출하기는 어려움.



<그림 103> 태양광 하부에서 표준 시비(1구역)와 감비(4구역) 구역의 메탄 플럭스 비교



<그림 104> 대조구에서 표준 시비(2구역)와 감비(3구역) 구역의 메탄 플럭스 비교

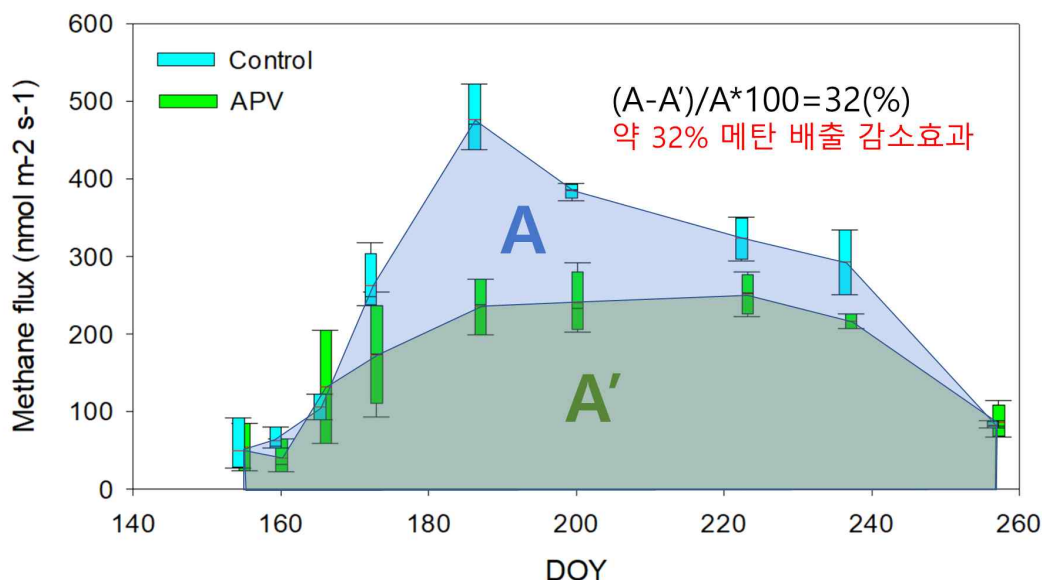
- 파주 관측지의 토양 시료 분석 결과는 아래 표와 같다. 논으로 이용되는 파주 지역의 유기물 함량은 전국 평균인 2.5%와 유사하였으며, 태양광 하부와 대조구 모두 용적밀도는 감소하고 유기물 함량은 증가하는 경향을 보였으나 관측지 이전으로 2021년과 2022년의 결과를 직접 비교할 수는 없었음.

○ 용적밀도의 감소 이유로는 경작을 시작하며 논갈이를 위해 로터리 작업을 시행함으로써 토양 입자들 사이에 틈이 커진 탓으로 판단됨. 2022년도 파주 관측지의 유기물 함량을 절대량으로 환산해 보면, 1구역은 경작 전 37.91 g/L에서 수확 후 32.71 g/L, 2구역은 경작 전 39.02 g/L에서 수확 후 27.35 g/L, 3구역은 경작 전 34.54 g/L에서 수확 후 25.09 g/L, 4구역은 경작 전 28.6 g/L에서 수확 후 33.18 g/L로 나타났으며, 4구역을 제외한 나머지 구역 모두에서 감소하는 경향이 나타났음.

<표 35> 파주 관측지 구역별 토양 시료 분석 결과

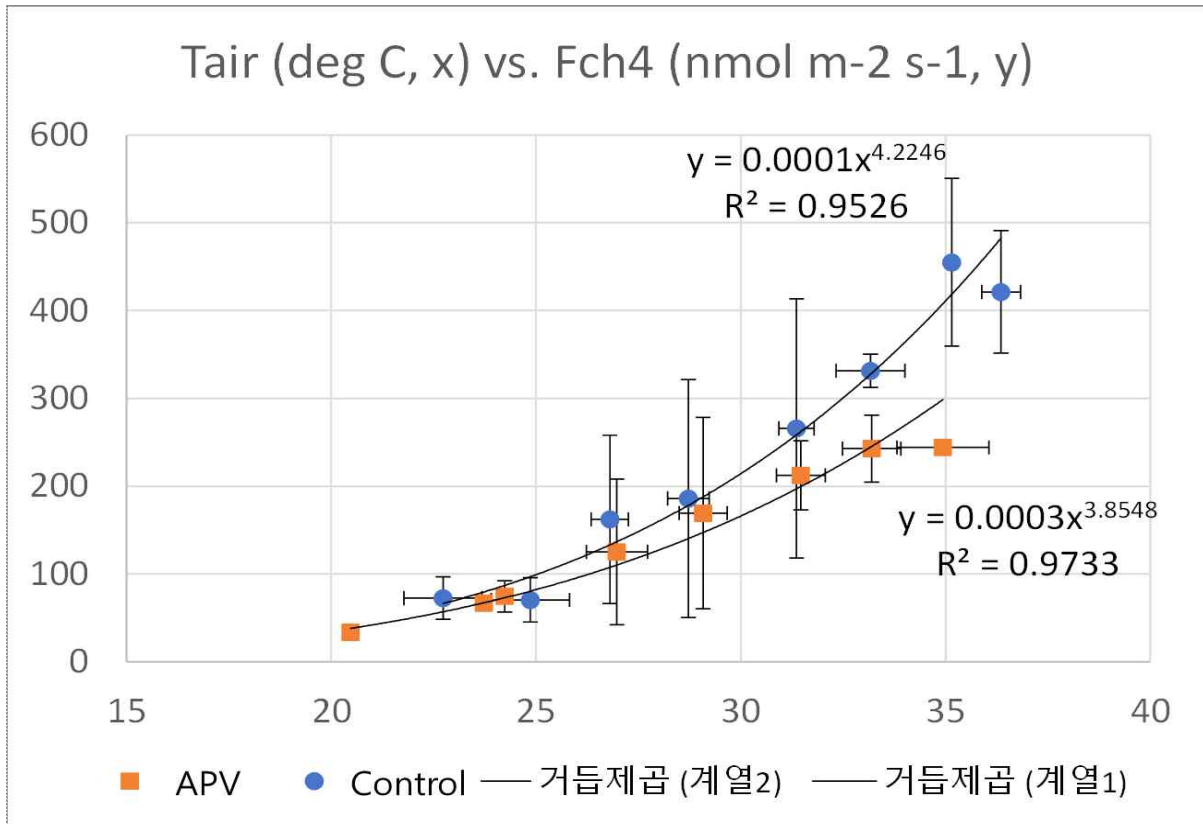
관측지			2021				2022			
			경작 전		경작 후		경작 전		경작 후	
			용적밀도 (g/cm ³)	유기물 함량 (%)	용적밀도 (g/cm ³)	유기물 함량 (%)	용적밀도 (g/cm ³)	유기물 함량 (%)	용적밀도 (g/cm ³)	유기물 함량 (%)
파주	태양광 하부	1	1.48	2.54	1.29	3.03	1.56	2.43	1.55	2.11
		4					1.30	2.20	1.58	2.10
	대조구	2	1.40	2.22	1.20	2.76	1.53	2.55	1.41	1.94
		3					1.57	2.20	1.28	1.96

○ 태양광 시설의 메탄 배출 저감 효과를 두 가지 방법으로 정량화하였다. 먼저 분출 효과를 제외한 표준시비구역의 관측 자료를 태양광 하부(APV)와 대조구(control)로 평균한 값을 이용하여 전체 벼 재배기간(5/10 - 10/20)중 6/4부터 9/14일까지의 결과를 그래프로 나타낸 후, A와 A'의 면적을 계산하고 그 차이를 통해 메탄 배출 감소량을 정량화하였음.



<그림 105> 표준시비 구역의 대조구(A)와 태양광 하부(A')의 메탄 플럭스 면적을 이용한 배출 감소량 정량화

○ Box plot은 평균값의 분포를 나타내며 측정 당시 두 구역 간의 온도 차이는 크지 않았기에 직접 비교가 가능함. 위 방법의 경우 아래의 그림과 같이 파주 논(2022년)의 영농형 태양광 시설은 약 32%의 메탄 배출 감소 효과를 가지는 것으로 평가되었음.



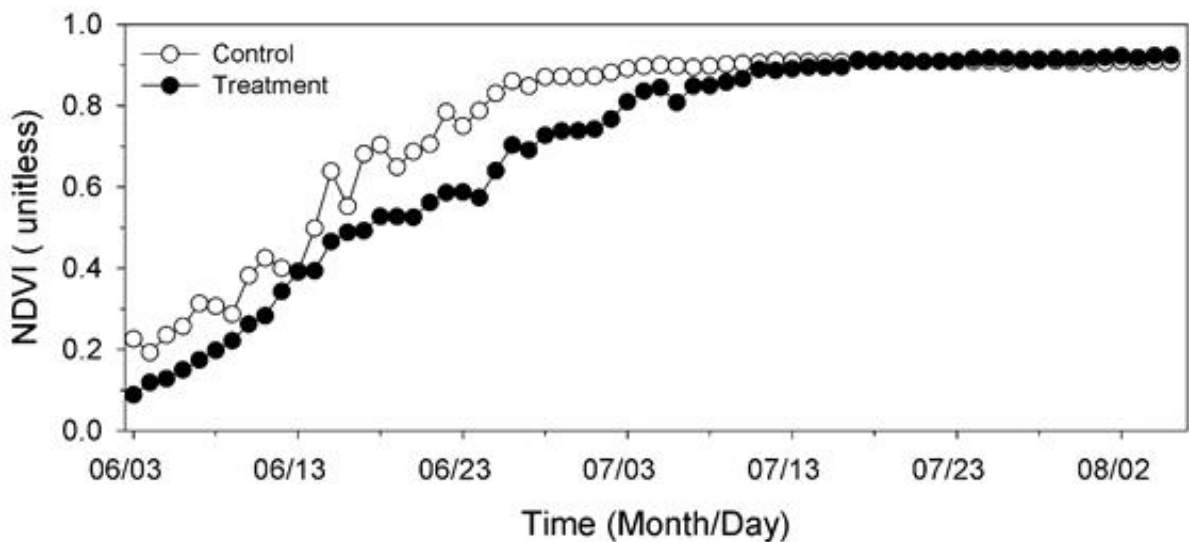
<그림 106> 관측된 메탄 플럭스의 온도 반응 곡선을 이용하여 추정된 배출 감소량 정량화

○ 위의 자료를 측정 당시의 기온으로 나타낸 온도 반응 곡선을 구성하고 온도 관측 데이터를 넣어 추정해 보면, 같은 기온 조건에서 대조구보다 태양광 시설 하부가 더 낮은 지온으로 인해 약 18% 정도 더 낮은 메탄 배출량을 보이는 것으로 조사됨.

라. 영농형 태양광 활용 스마트 식량작물 재배지원 기술개발
(3공동과제 : 국가농림기상센터)

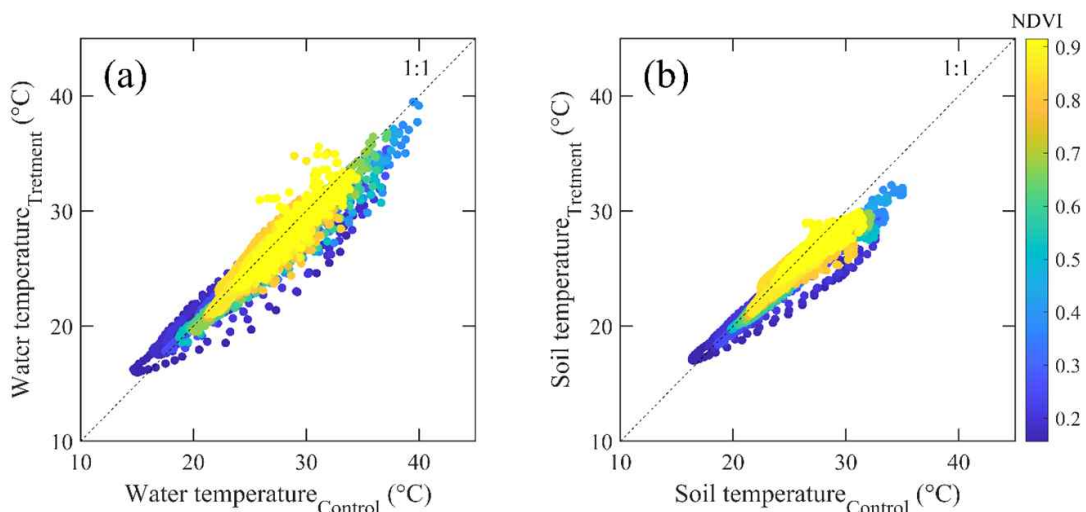
□ 하부 미기상 환경

- 하부 미기상환경에서 확인한 30% 정도의 차광률은 벼 생장에 영향을 미쳤음.
- 영농형 태양광 시설 하부와 외부 논외의 벼 생장의 차이를 자동으로 관측하기 위해 카메라를 이용한 영상 촬영과 함께 다중분광센서로 식생지수인 NDVI를 연속적으로 측정하였음.
- 파주 논(2021년)에서 촬영한 영상으로 대조구인 노지와 처리구인 시설 하부 모의 생장을 보면, 초기(모내기는 5월 18일 실시)에는 육안으로 처리구의 생장이 느린 것을 확인할 수 있지만 7월 초중순부터는 그 차이를 확인하기 어려웠음. 아래 NDVI의 시계열을 보면 NDVI가 포화되기까지 시설 하부와 노지 간 일주일에서 열흘 정도되는 벼 생장의 시간 차이가 존재하는 것을 확인할 수 있었음.



<그림 107> 파주 논(2021년)의 대조구와 처리구의 식생지수 NDVI 시계열

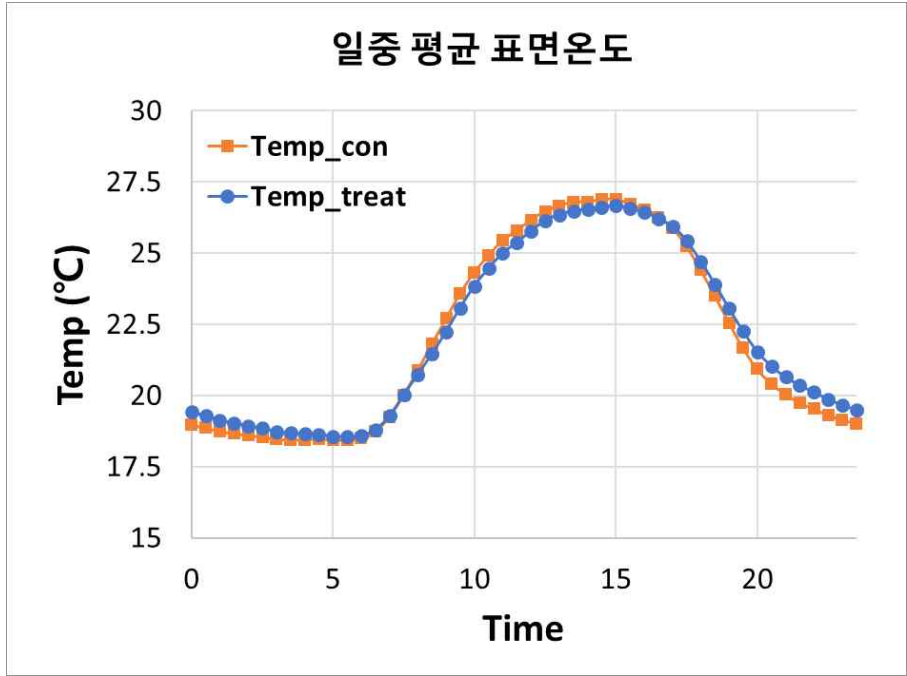
- 모의 생육에 따라 영농형 태양광 시설 하부 논과 노지 논 간 지온과 수온의 차이가 달라지는데, 아래 그림과 같이 둘 간의 차이는 지면이 벼로 덮일수록(NDVI가 증가할수록) 줄어드는 것을 확인하였음.



<그림 108> NDVI별 수온과 지온의 대조구(노지 논)-처리구(영농형 태양광 시설 하부)간 비교, 파주 논(2021년)

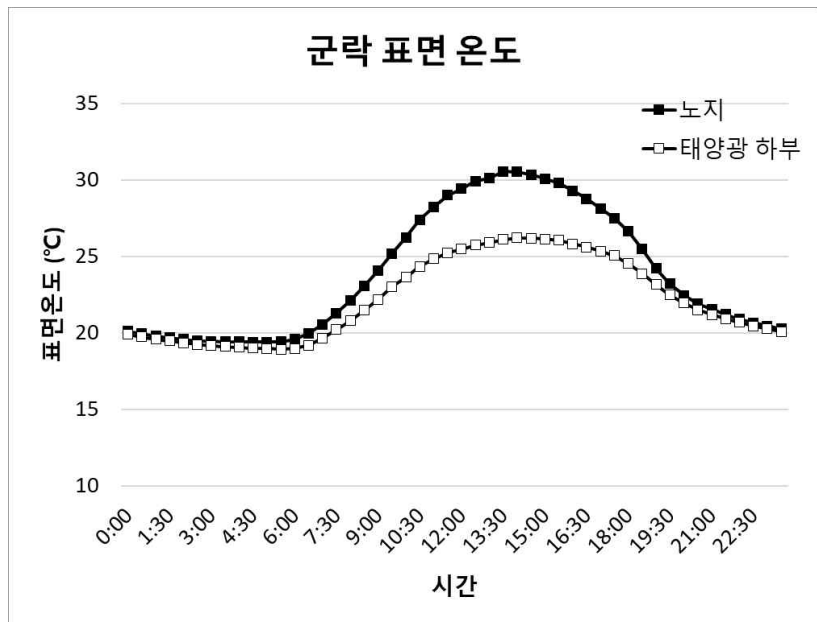
□ 생육관측

- 2021년 파주 관측지의 식생 표면온도 관측 결과 관측 기간 동안 영농형 태양광 시설 하부의 평균 표면온도(22.12°C)는 노지의 평균온도(22.02°C)와 비교해 큰 차이가 나지 않았지만 ($p = 0.27$), 최대값과 최소값의 일변동 폭은 대조구가 처리구에 비해 더 높았음.



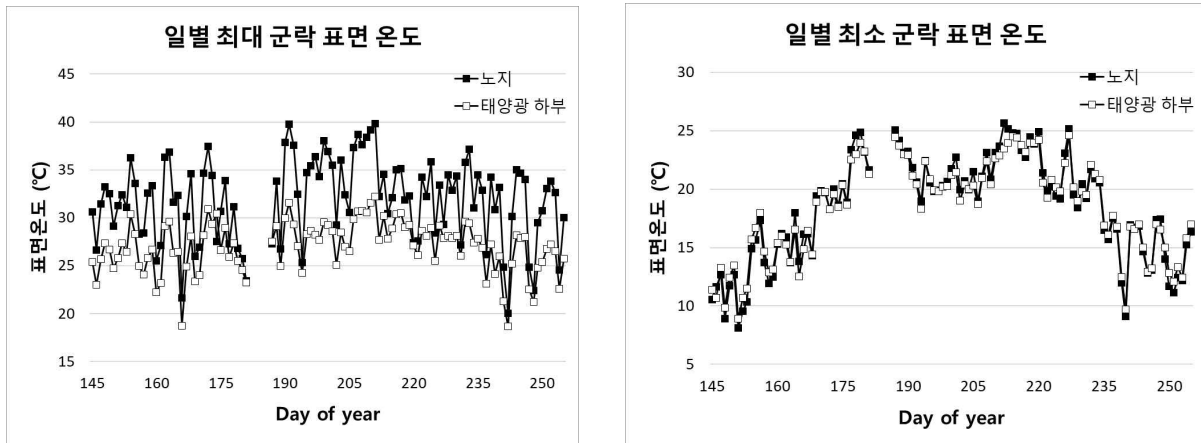
<그림 109> 노지와 영농형 태양광 시설 하부의 일중 평균 표면온도 일변동

- 마찬가지로 2022년 파주 관측지의 식생 표면온도 관측 결과(기간: 2022년 5월 25일-2022년 9월 12일) 영농형 태양광 시설 하부의 평균 표면온도(22.20°C)가 노지의 평균온도(23.86°C)와 비교해 약 1.5°C 더 낮았고($p < 0.001$), 그 차이의 경향은 태양복사 에너지의 일 중 변화와 비슷하게 해가 뜬 후부터 누적되어 오후 1시 30분쯤 최대가 된 후 점차 감소함을 보였음.



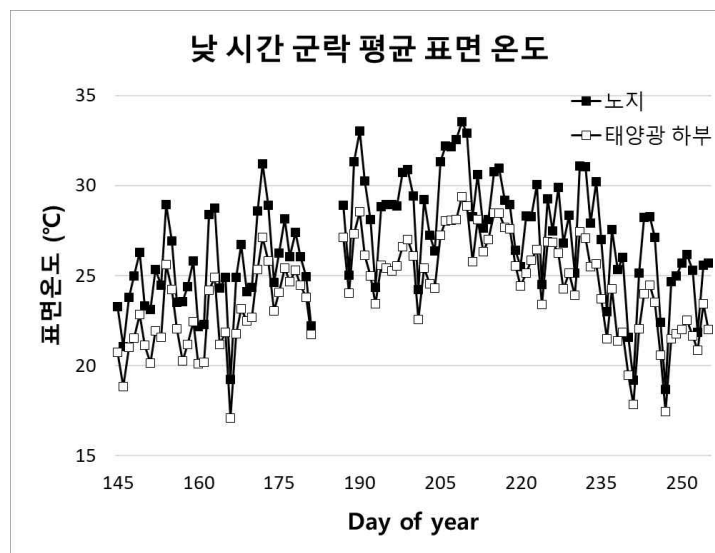
<그림 110> 적외선 온도센서를 이용한 표면온도의 일평균변동

- 동일 기간 동안 일별 균락 표면온도의 최대값을 비교해 보면 영농형 태양광 시설 하부의 평균 최대 식생 표면온도는 27.02°C로 노지의 평균 최대 온도 31.89°C와 비교해 평균 약 4.9°C 더 낮았지만($p < 0.001$), 균락 표면온도의 최소값은 영농형 태양광 시설 하부(18.32°C)와 노지(18.37°C)가 큰 차이가 없었음($p = 0.93$).



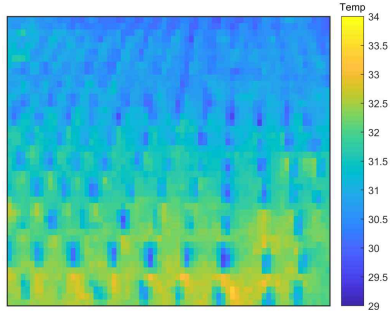
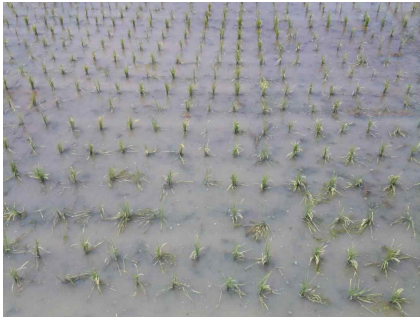
<그림 111> 적외선 온도센서를 이용한 표면온도의 일별 최대값과 최소값

- 낮 시간의 균락 평균 표면온도는 영농형 태양광 시설 하부가 24.08°C로 노지의 평균온도 26.86°C와 비교해 평균 약 2.78°C 더 유의하게 낮았음 ($p < 0.001$).

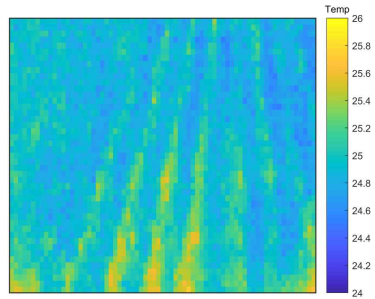
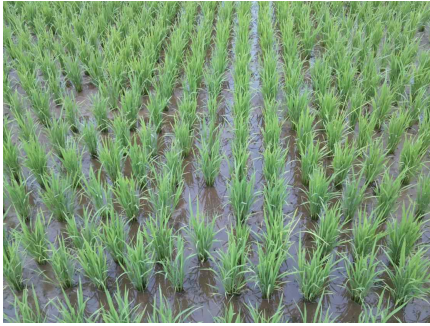


<그림 112> 적외선 온도센서를 이용한 낮 시간의 균락 평균 표면온도

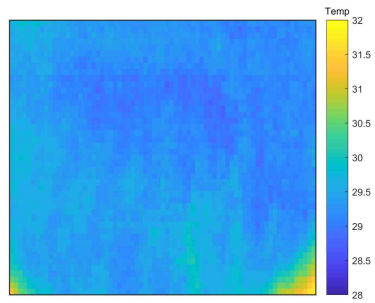
- 같은 균락의 표면온도를 열화상 카메라로 관측한 표면온도와 비교한 결과 적외선 온도센서의 결과와 마찬가지로 영농형 태양광 시설 하부가 노지보다 낮았고, 그 차이는 평균 약 1.0°C로 나타났음. 동일 기간 RGB 이미지와 표면온도 이미지를 같이 분석한 결과 식생이 작을 때 노지의 담수 온도가 태양광 시설 하부보다 높음을 확인할 수 있었고, 태양광 시설 하부가 패널에 의한 그림자의 영향으로 온도가 낮아지는 것이 확인되었음. 이러한 결과를 미루어 볼 때 태양광 하부의 식생이 대조구의 것과 비교해 구조물에 의한 차광효과로 인해 더 낮은 온도 환경에 노출되는 것을 확인할 수 있었음.



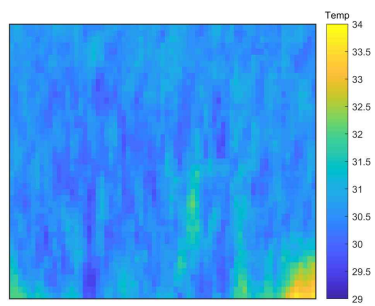
2022-05-23



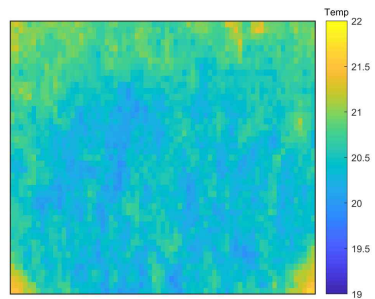
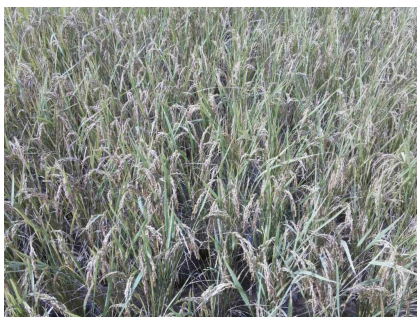
2022-06-23



2022-07-23



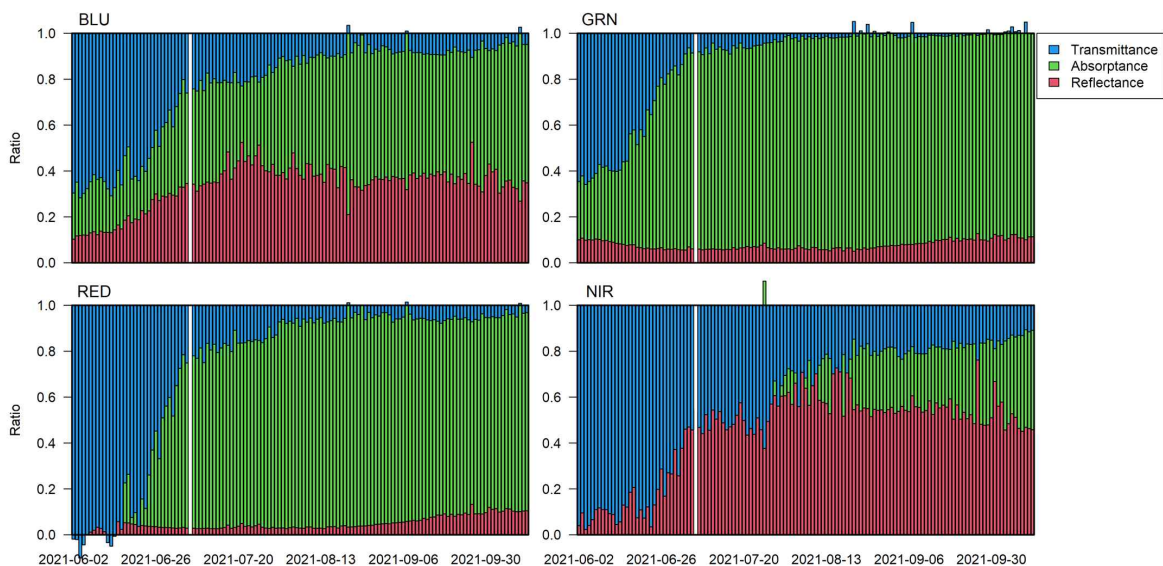
2022-08-23



2022-09-23

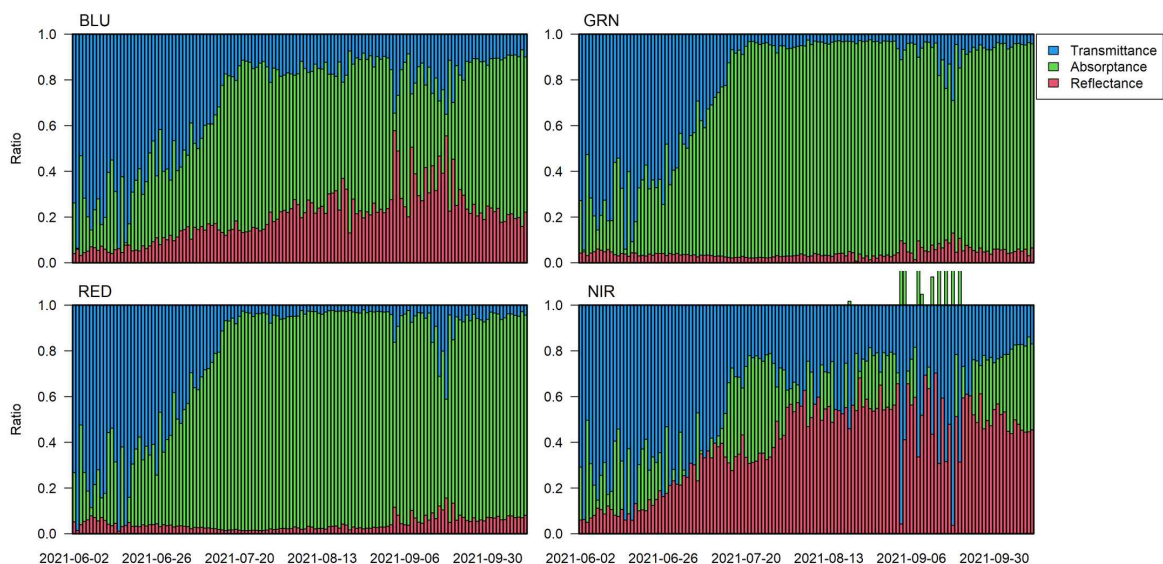
<그림 113> 노지 작물 군락 표면온도 관측 지점의 RGB 카메라(좌)와 열화상 카메라(우) 이미지

- 대조구의 분광 특성 분석 결과, 모내기 직후에는 모든 파장대(R, G, B, N)에서 투과율이 높게 나타나지만 벼의 생장에 따라 흡수율이 높아지면서 투과율이 낮아지는 경향을 보였음. R, G, B의 가시 영역대의 경우, 7월부터 대부분의 빛이 벼에 의해 흡수되는 반면, 근적외 영역대의 반사율은 식생의 성장과 함께 증가하는 경향을 보였음.



<그림 114> 대조구의 파장대별 반사율, 흡수율, 투과율 시계열 변화

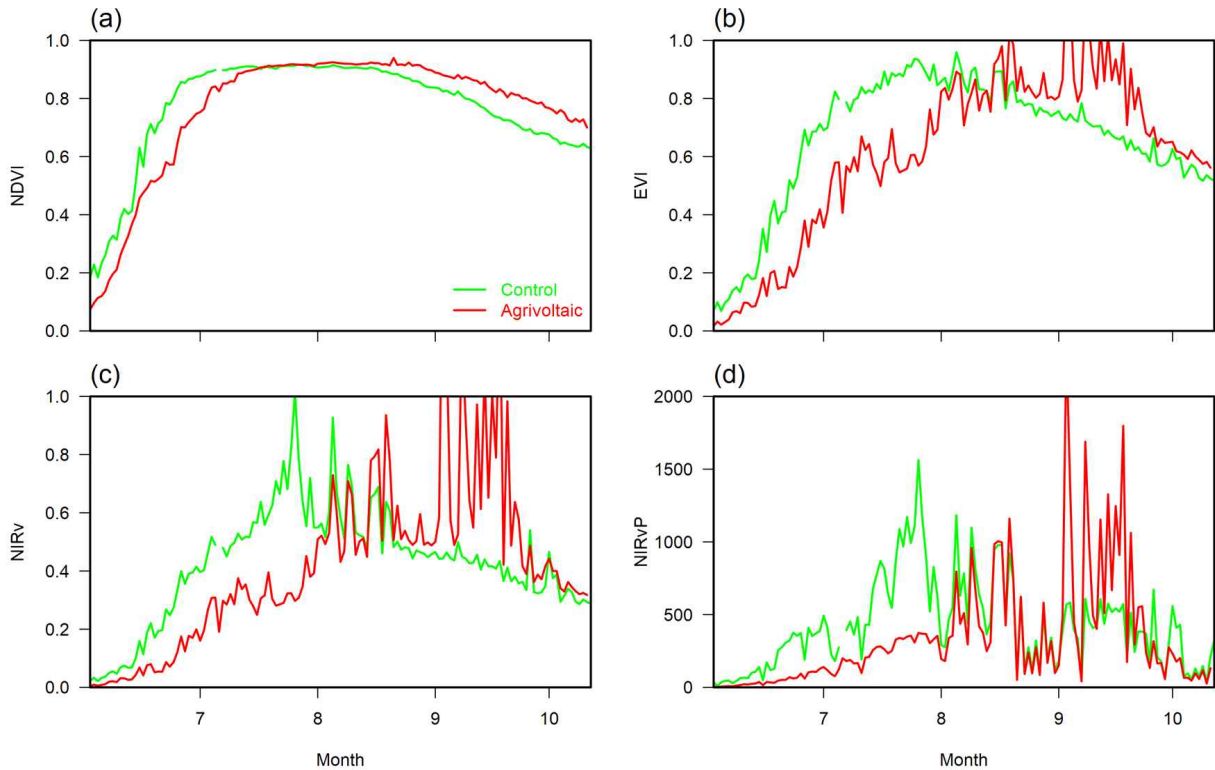
- 태양광패널 설치구의 분광 특성 역시 대조구와 비슷한 시계열 변화를 보였으며, 벼가 성장하면서 대부분 가시광선 영역대의 흡수율이 높아지는 반면, 근적외 영역대의 반사율은 증가하는 경향을 보였음.



<그림 115> 태양광 패널 설치구의 파장대별 반사율, 흡수율, 투과율 시계열 변화

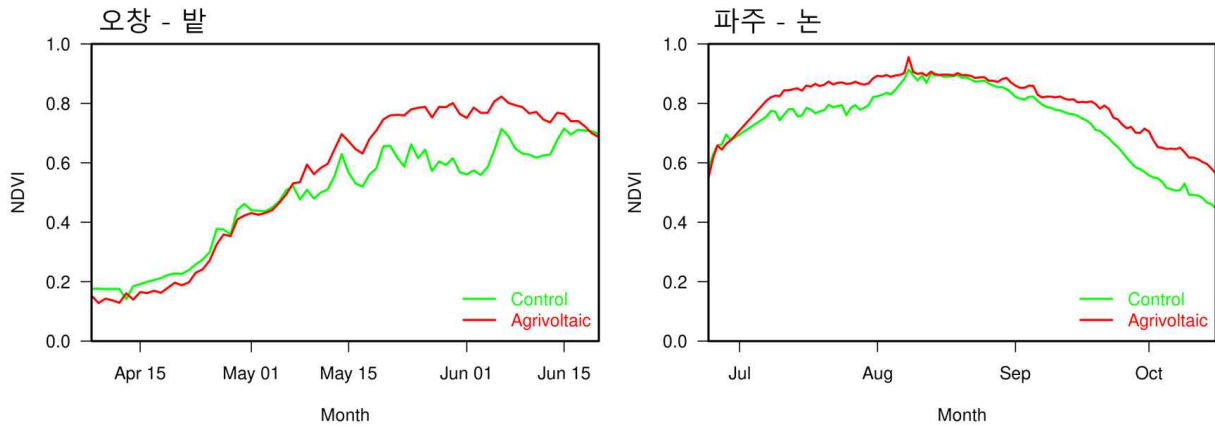
- 모든 식생지수에서 대조구와 태양광 하부에 비해 빨리 증가하는 반면, 감소가 시작되는 시기 역시 빠르게 나타났음. NDVI의 경우 태양광 하부는 대조구에 비해 늦게 증가하였으며, 7월 중순부터 8월 중순까지 대조구와 태양광 하부 사이에 큰 차이를 보이지 않았음.
- 그러나 그 이후에는 태양광 유무에 따라 식생지수 감소 시점에 차이가 발생하였음. 대조구에서는 8월 중순부터 감소가 시작되는 반면, 태양광 하부에서는 9월 이후 감소가 시작되었으며 추수 직전까지 대조구에 비해 높은 값을 보였음.

- 이러한 경향은 EVI에서 더욱 두드러지게 나타나 대조구에서는 8월 초에 최대값에 도달한 뒤 감소가 시작되는 반면, 태양광 하부에서는 8월 말과 9월 중순 사이에 최대값에 도달한 뒤 감소하였음. NIRv와 NIRvP의 경우 EVI와 비슷한 시계열 변동 특성을 보였으며 대조구에서는 7월 말에 최대값에 도달하는 반면 태양광 하부에서는 9월에 최대값에 도달하는 경향을 보였음.



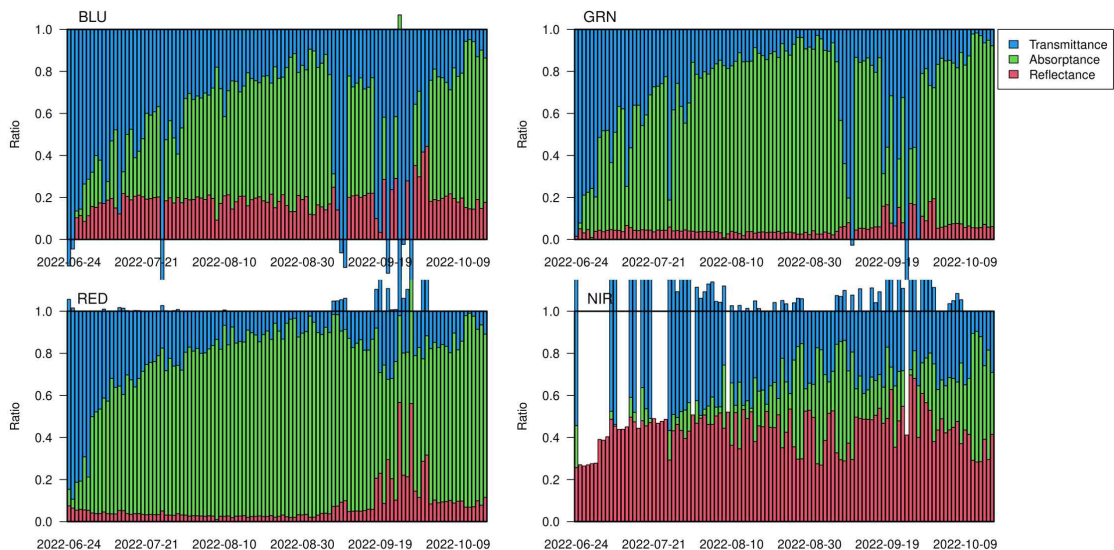
<그림 116> 대조구(Control, 녹색)과 태양광 하부(Agrivoltaic, 빨강)의 식생지수 시계열 변화, (a) NDVI, (b) EVI, (c) NIRv, (d) NIRvP

- 오창 감자밭의 경우, 대조구의 NDVI가 태양광 하부에 비해 빨리 증가했지만, 5월 중순 이후는 반대로 태양광 하부의 NDVI가 더 높은 경향을 보였음.
- 이는 파주 논에서 대조구와 태양광 패널 아래 NDVI가 증가하는 시기의 차이가 나타나지 않은 결과와는 다르지만, 모내기 시점과 분광 관측 시점 사이의 시차로 인해 생육 초반의 차이를 관측하지 못한 원인으로 판단됨.
- 측정 기간 내내 태양광 하부의 NDVI가 대조구에 비해 높았으며 NDVI가 감소하는 시기 역시 대조구에 비해 태양광 하부가 더 늦은 경향을 보여주었으며, 이는 태양광 하부에 위치한 식물들이 더 오랜 기간동안 활력도를 유지하고 있음을 보여주었음.



<그림 117> 오창 밭과 파주 논의 대조구(Control, 녹색)과 태양광 하부(Agrivoltaic, 빨강)의 식생지수 시계열 변화

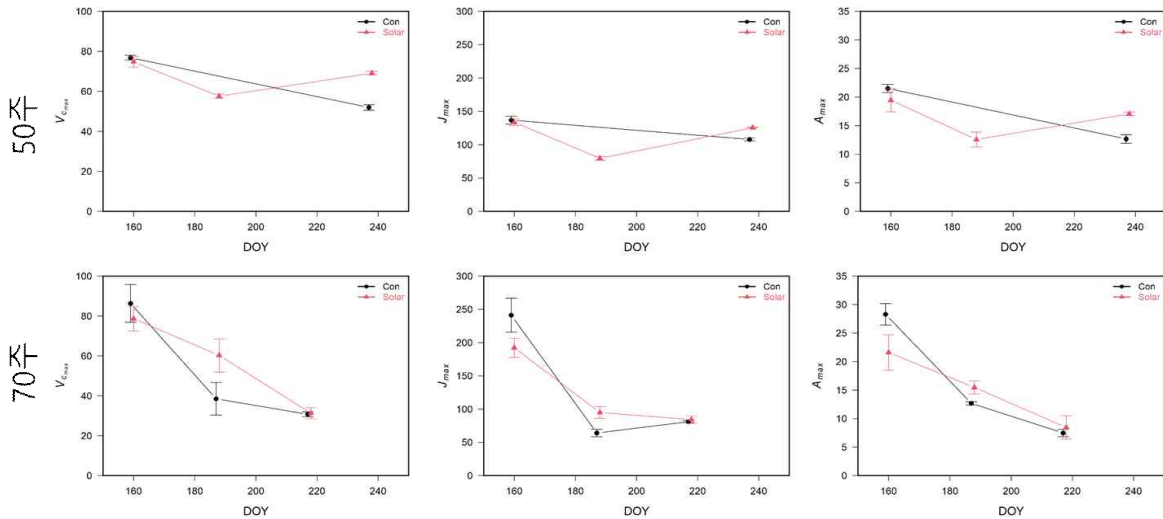
- 2년차에 관측지를 옮긴 파주 논을의 경우, 대조구의 분광 특성 분석 결과, 모내기 직후에는 모든 파장대(R, G, B, N)에서 투과율이 높게 나타나지만 벼의 성장에 따라 흡수율이 높아지면서 투과율이 낮아지는 경향을 보였음.
- R, G, B의 가시 영역대의 경우, 7월 중순 이후부터 대부분의 빛이 벼에 의해 흡수되며, 9월 이후 흡수율이 감소하는 경향을 보였음.
- 반면 근적외 영역대의 반사율은 식생의 성장과 함께 증가하다 9월부터 감소하는 경향을 보였음.
- 태양광 하부의 경우, 전반적인 변화 경향은 대조구와 비슷한 경향을 보였지만, 태양광 구조물에 의한 빛의 교란이 발생하였음.
- 특이하게도 이러한 교란의 영향은 주로 식생 아래 설치된 분광 센서에 나타났으며, 측정값이 식생 상부에 설치된 분광센서 측정값보다 높은 날이 많이 나타나서 흡수율 및 투과율 추정엔 큰 오차가 발생하였음.
- 파장대별로도 다른 특성이 나타나 짧은 파장 대인 청색광과 녹색광은 식생하부 센서 측정값이 크게 증가하여 투과율이 높게 계산되는 반면, 적색광의 경우 오히려 반사율이 높게 나타나는 결과를 보였음.



<그림 118> 파주 논 태양광 패널 아래 파장대별 반사율, 흡수율, 투과율 시계열 변화

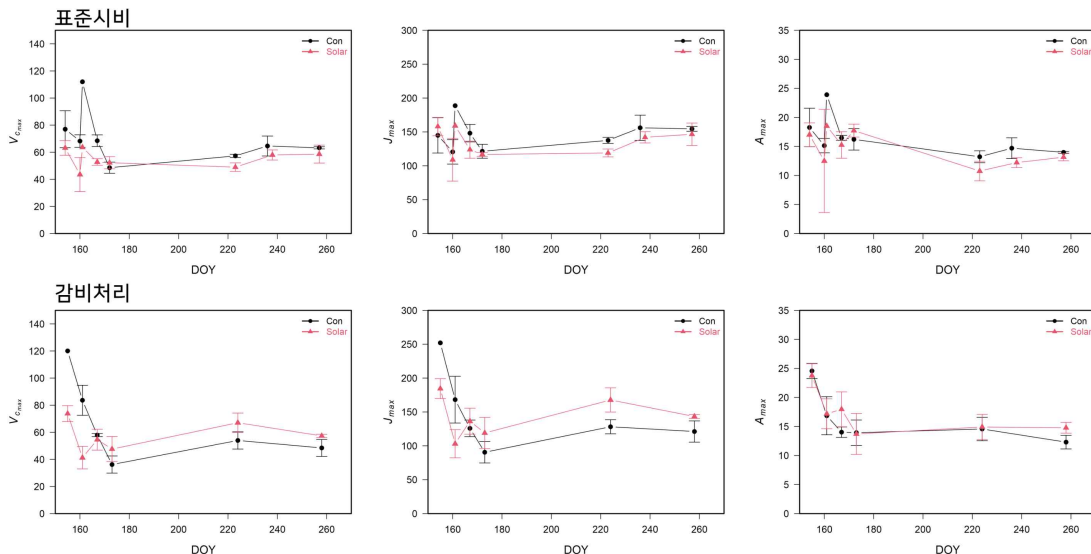
□ 생리관측

- 1년 차 파주 논외의 경우, 재식밀도 및 태양광 패널 처리에 따른 광합성 특성의 차이를 확인할 수 있었다. 70주에서는 생육초기 대조구의 광합성 효율이 태양광 하부에 비해 높았으나 생육 중기에는 반대로 태양광 하부의 광합성 효율이 높았으며 8월 중순에는 태양광 패널 유무에 따른 차이를 보이지 않았음.
- 반면, 재식밀도 50주 처리구에서는 생육 초기의 광합성 효율에는 큰 차이를 보이지 않았으나, 태양광 하부에서는 광합성 효율이 8월 말까지 유지되는 반면 대조구에서는 생육 초기에 비해 감소하는 경향을 보였음.



<그림 119> 재식밀도(50주, 70주) 및 태양광 패널 유무(대조구(검정)와 태양광 하부(빨강))에 따른 광합성 특성 시계열 변화 차이

- 2년 차에는 재식밀도의 차이가 아닌, 시비처리 강도에 따른 광합성 특성의 차이를 관측하였다. 표준 시비처리구에서는 생육초기 대조구의 광합성 효율이 태양광 하부에 비해 높았으며 생육 중기에는 그 차이가 감소하였지만, 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 감비 처리구에서는 생육 초기 대조구의 광합성 효율이 높았으나 생육 중기부터 태양광 하부의 광합성 효율이 대조구에 비해 높은 경향을 보였음.

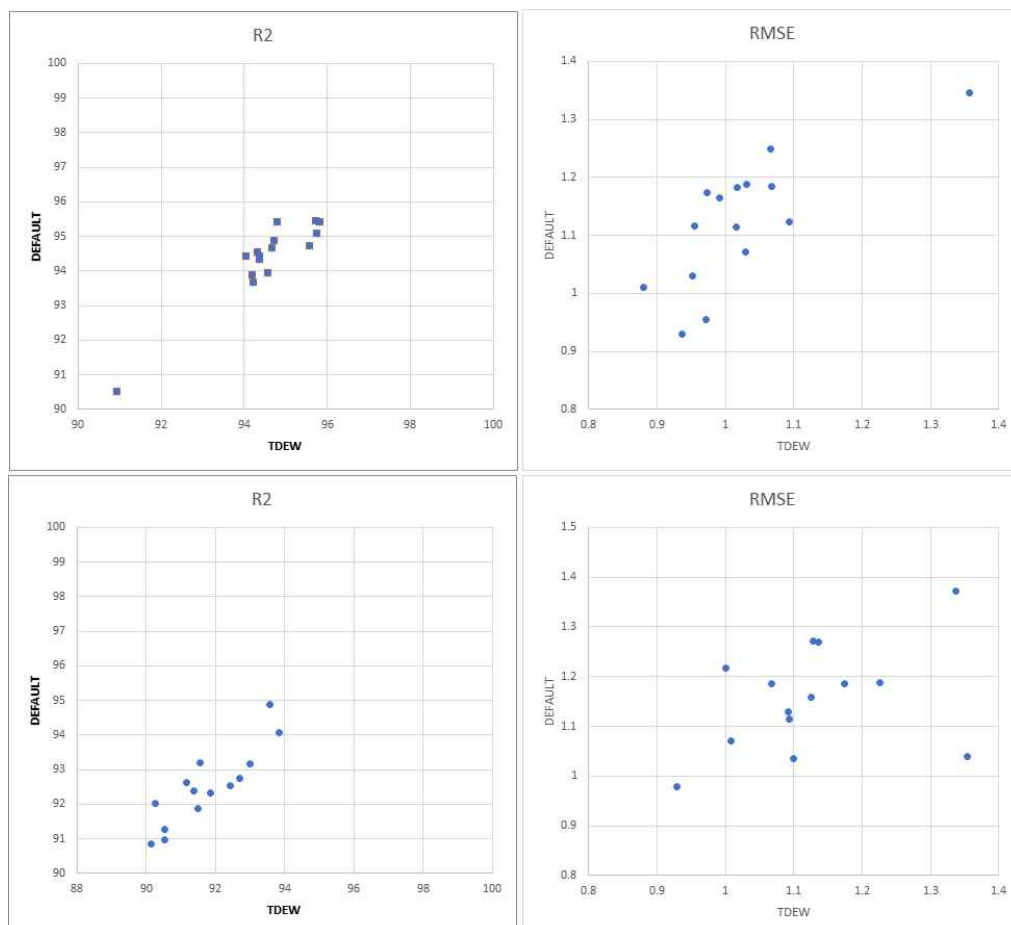


<그림 120> 시비강도(표준시비, 감비처리) 및 태양광 패널 유무(대조구(검정)와 태양광 하부(빨강))에 따른 광합성 특성 시계열 변화 경향 차이

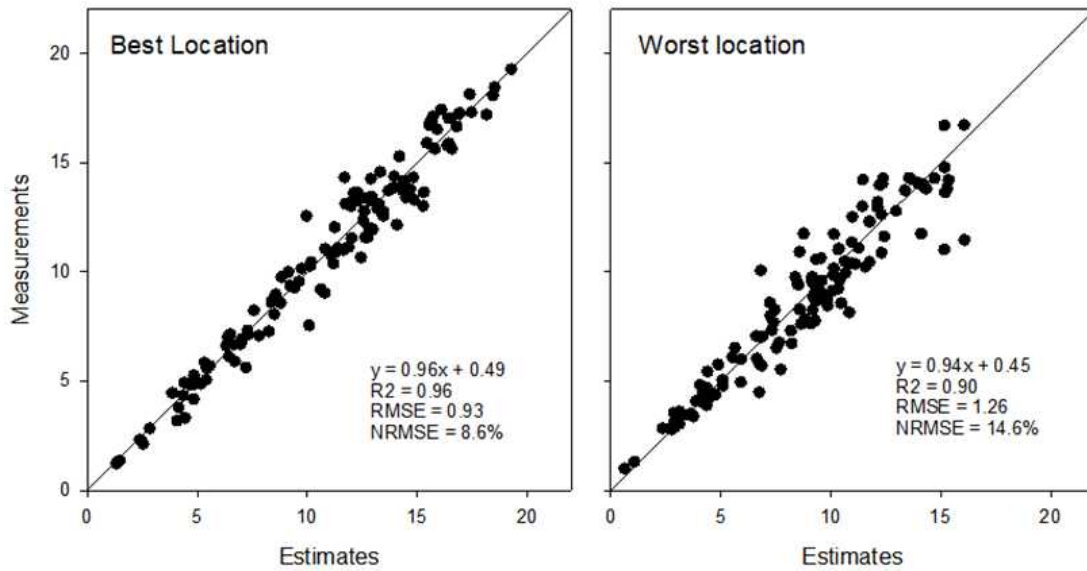
마. 3D 모델을 이용한 영농형 태양광 하부 수광량 예측

□ 수광량 예측 시스템 검증

- 영농형 태양광 수광량 예측 시스템 하에서의 일별 태양복사 추정값은 2019, 2020년 관측값의 90% 이상 설명 할 수 있게 추정하였음(2019년 전체 수광량의 RMSE, NRMSE는 각각 약 $1 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 과 9%).
- 추정을 하는 동안 몇몇 기간동안 태양 복사의 추정치가 관측치와 비교할 때 과대추정 하는 경우가 있었음.
 - 추정된 큰 오차값은 센서 유지관리 작업, 먼지등 광센서의 일시적인 오염으로 인한 것 일 수 있음.
- 광추적 일사량 예측 시스템은 시간별 수광량 예측 보다는 일별 수광량을 더 잘 모의 하였으나 기존 작물 모델이 주로 일별 기상자료를 사용하므로 현재 수광량 예측 시스템으로 작물 모델에 적용하기에는 적합함.
- 이슬점온도를 반영하여 일사량을 추정하였을 때, 기존의 광추적 시스템을 사용한 것보다 오차가 감소하는 경향이 있었음.
- 기존 시스템과 이슬점 온도를 반영한 시스템 모두 결정계수가 0.9 이상의 값이 얻어졌으며 두 시스템 사이에 큰 차이는 없었음. 반면, RMSE 값은 이슬점 온도를 적용하였을 때, 상대적으로 많은 일사량 관측 지점에서 낮은 RMSE값이 얻어졌다. 특히, 80%의 관측 센서 지점에서 이슬점온도를 반영한 일사량 추정값이 기존 방식으로 얻어진 추정값보다 RMSE가 작았음.

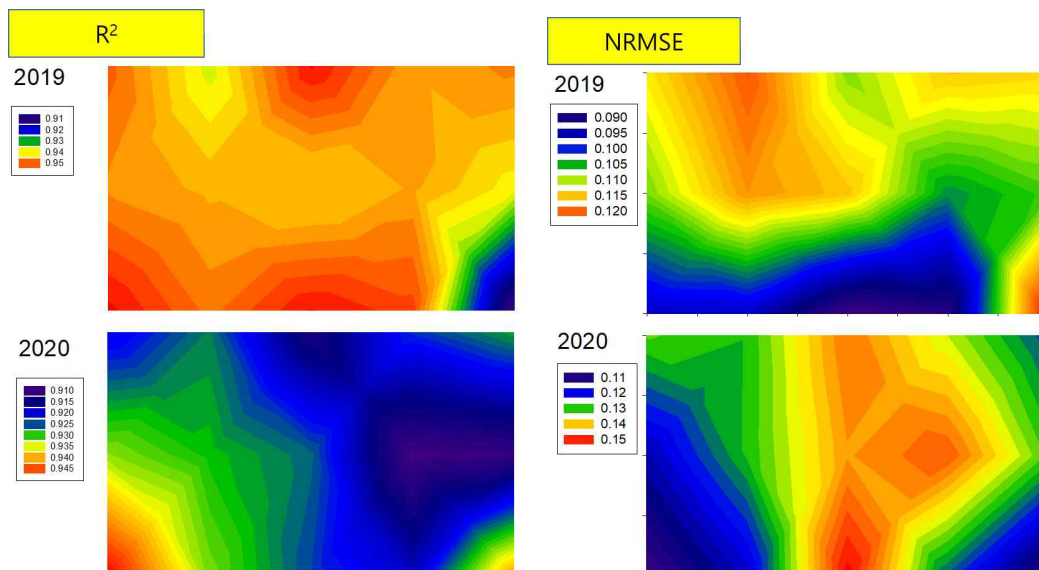


<그림 121> 2019년 (상) 및 2020년 (하) 기간 동안 이슬점온도를 반영한 광추적 시스템과 기존 광추적 시스템을 활용하여 추정된 일사량의 오차 비교



<그림 122> 수광량 모의 및 관찰 값 비교

- 영농형 태양광 시설 하부의 공간적 위치에 따라 일치도 통계량에 차이가 있었으나, 추정값의 오차가 큰 차이를 보이지는 않았음.
- 시설 하부에 센서 위치별로 가장 예측이 잘 된 위치는 일사량 변이의 96%를 설명 할수 있었으며, 그 기울기도 0.96 이었으며, 가장 잘 예측을 하지 못하는 센서 위치 또한 일사량 변이의 90% 설명하는 할 수 있었고 기울기 또한 0.94 였음(그림 120).
- 영농형 시설 위치에 따라 태양광 패널 및 기둥의 위치에 따라 추정의 정확도에 차이가 발생할 수 있으나, 본 연구 결과에 따르면 이러한 구조물의 영향보다는 태양복사가 입사하는 위치에 따라 오차에 차이가 발생하는 것으로 보임; 예를 들어, 영농형 태양광 하부에서 결정계수의 공간적 분포는 태양광 설비 바깥쪽에서 상대적으로 오차가 큰 것으로 나타났음.
- 반면, 이러한 경향은 2019년과 2020년에 차이를 보여 직달복사량과 산란복사량의 차이에 의해 광추적 시스템의 오차에 차이가 발생하는 것으로 보임.

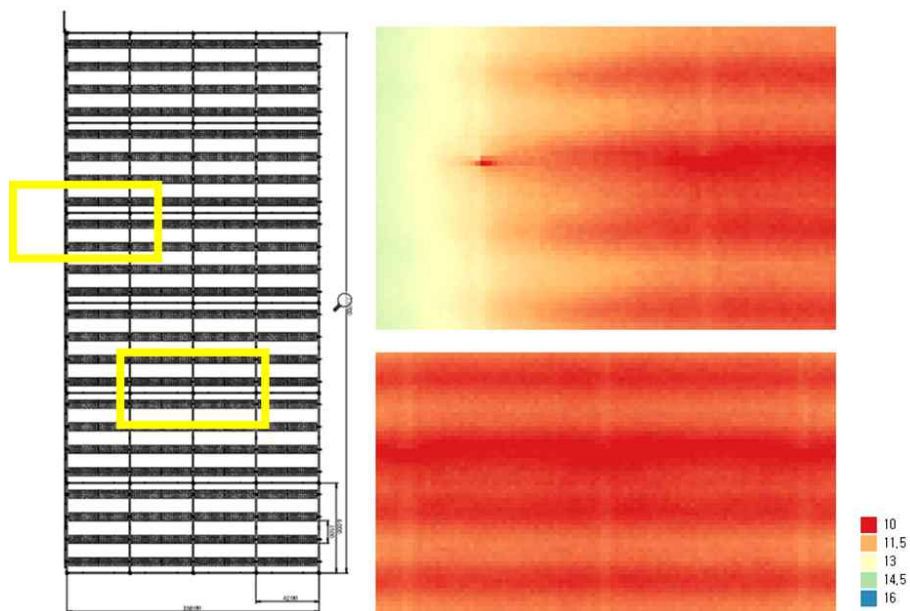


<그림 123> 시설 하부의 모의의 신뢰도

- 맵을 이용한 값을 볼 때 R2의 값은 영농형 태양광 하부에 위치에 상관없이 2019, 2020년 모두 0.9 이상의 값을 보이며, NRMSE 값은 2020년에 약간 더 크기는 하지만 그래도 15%이하의 준수한 예측을 보였음.
- 영농형 태양광 시설 하부내 수광량 예측시 시설로 인한 차광 여부에 따른 수광량을 잘 예측하는 것이 관건이기 때문에 영농형 시설(태양광 패널, 기둥 등)에 따른 위치간 예측을 정확도를 분석을 하였으나, 시설 유무와 예측도 간에 관계가 관찰되지 않았음(그림 120).
- 2019년과 2020년에 예측도가 높은 위치와 낮은 위치 간에 관계 및 패턴이 없고 상대적으로 예측도 값이 높으므로 태양광 시설 하부에 위치에 따른 수광량 예측의 취약점은 관찰되지 않았음.

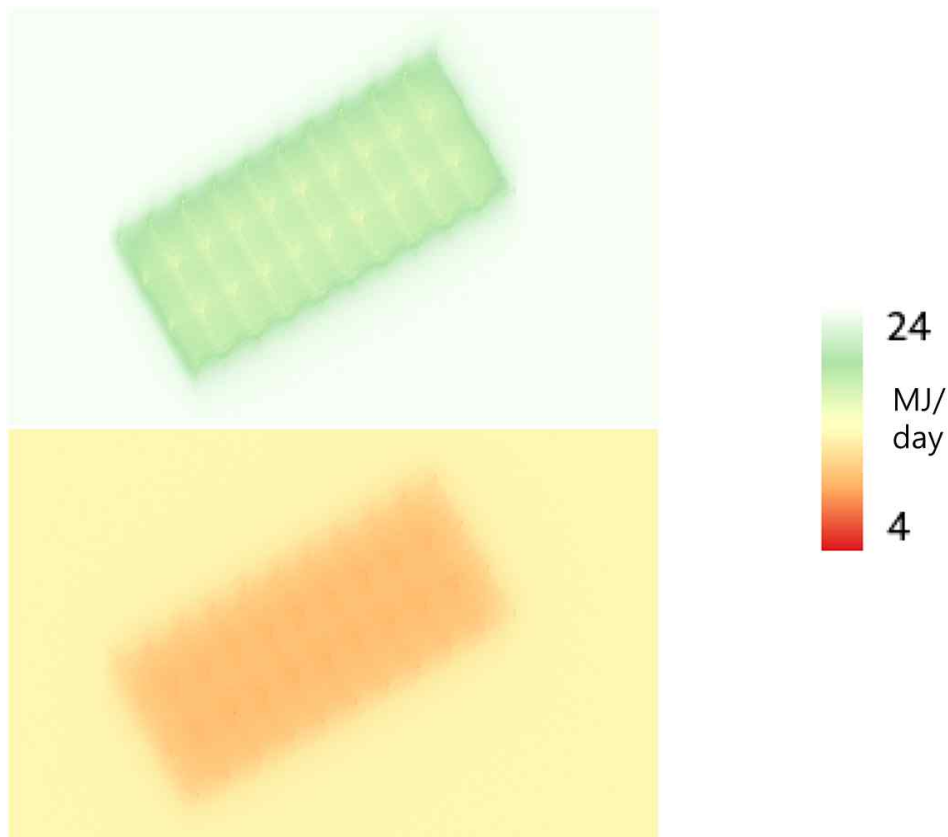
□ 3D 모델을 이용한 수광량 예측

- 시간별 관측 일사량을 입력자료로 사용하여 태양광 시설 하부 공간적 수광량 예측 수행함 (그림 121).
- 특히 영농형 태양광 시설에 경우 태양광 패널로 하부를 완전 차광하는 것이 아니기 때문에 시설 하부 수광량의 공간적 변이를 예측을 하는 것이 중요함.
- 수광량 예측 시스템을 이용한 예측에서는 그늘지는 부분과 그렇지 않은 부분을 명확하게 모의 할 수 있었으며 기존 상식과도 부합하는 결과를 보임.
- 시간별 관측자료를 입력자료로 사용하여 태양광 시설 하부 공간적 차광율 및 일사량을 추정된 결과, 직달복사량과 산란복사량에 따라 태양광 하부의 일사량에 공간적 변이가 다른 양상으로 나타남을 확인하였음.
- 태양광 패널과 기둥의 주변은 상대적으로 누적 일사량이 적은 것으로 추정되었으며, 이에 따라, 직달복사량이 많을 경우, 상대적으로 시설 하부 일사량의 공간적 변이가 크고 산란복사가 많은 날은 공간적 변이가 적을 것으로 추정됨.
- 태양광 패널 아래 지역에는 비교적 적은 일사량이 추정되었으나 산란복사량이 많은 조건에서는 이러한 변이가 크게 나타나지 않았음.



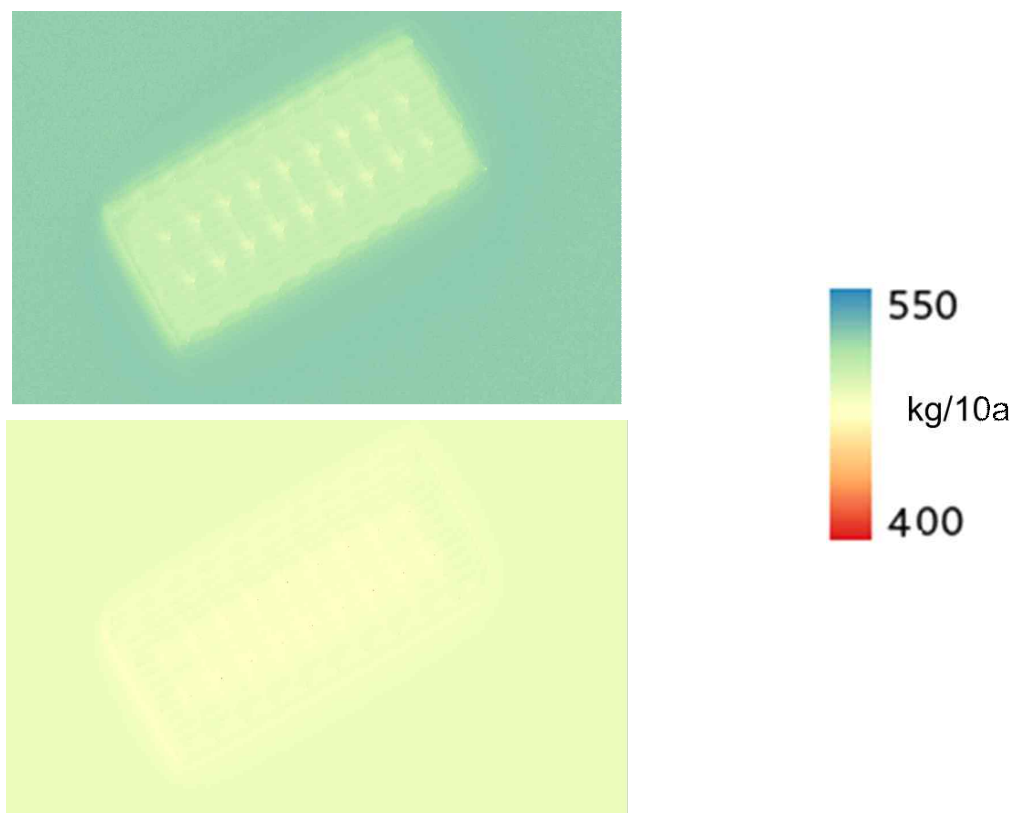
<그림 124> 영농형 태양광 시설 하부 지점별 일사량 추정

- 날씨가 맑은 날에는 태양광 하부의 일사량의 공간적 변이가 크지만 흐린날에는 산란광에 의해 태양광 시설 하부 일조량 공간적 변이가 작아졌음(그림 122).
- 특히 맑은 날에는 태양광 패널과 기둥들 시설 주변과 다른 위치간의 일 누적 일사량 차이가 흐린날에 비해 커지는 것으로 예측되며, 이는 맑은 날에 상대적으로 공간적 변이가 큰 직달 일사량의 비율이 높기 때문으로 사료됨.
- 반하여 상대적으로 산란 복사 비율이 높은 흐린날에는 수광량의 공간적 변이가 적을 것으로 예측됨.
- 광추적 시스템을 사용하여 시설 내의 구조물로 인한 공간적 위치에 따른 변이를 모의할 수 있음.
- 본 연구에서 사용된 영농형 태양광 시설은 포장 전체를 모두 사용하는 것은 아니기 때문에 패널로 인해 그늘지는 부분과 그렇지 않은 부분이 명확하게 나타났음.
- 영농형 태양광 외부 지점과 내부 지역에 따라 일사량 추정값에 큰 차이가 있었으며 일별로 누적하였을 때 급격한 일사량의 변화가 모의되었음.
- 반면, 영농형 태양광 설비 하부에서는 외부조건과 비교하였을 때에는 일사량의 차이가 작은 경향이 있었으며, 특히, 산란복사량이 많았던 날에는 공간적 변이가 상당히 작은 것으로 수광량이 모의되었음.
- 직달복사량이 많아 일중 수광량이 높은 날에는 태양광 시설의 구조물에 영향을 받아 일사량이 상당히 감소하는 지역들이 존재하였으나 전체적인 면적은 태양광 설비 면적을 고려할 때 넓은 수준은 아니었음.
- 특히, 수광량이 낮은 지역들은 태양광 설비 기둥 인근에 위치하고 있어 작물이 재배될 가능성은 작은 것으로 보임.



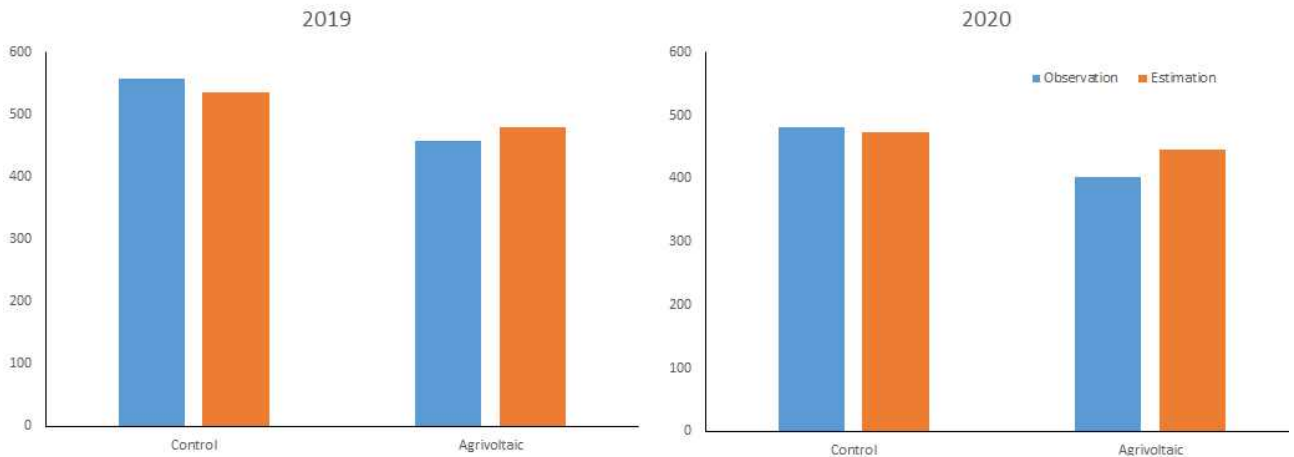
<그림 125> 공간적 변이와 기상 조건에 따른 일사량 예측 결과의 비교

- 수광량 예측 시스템은 시설 하부에 수광량의 공간적 변이를 정밀하게 잘 예측을 할 수 있으므로 설계시와 작물 재배시 이를 이용 할 수 있음.
- 설계시에는 재배시 작물간 광경합이 적은 위치(군락의 가장 자리 등)에 패널을 밀집하여 설계를 하거나 패널간 거리조절 혹은 태양광 패널의 크기, 각도 조절을 이용하여 전체 광 이용효율을 증가시키는데 수광량 예측 시스템을 이용할 수 있음.
- 작물 재배시에는 수광량 예측 시스템을 이용한 시설하부의 수광량 분포를 이용 하여 재식 거리 및 위치 등을 조절하여 작물 재배를 향상 시킬 수 있음.
- 수광량 예측 시스템을 더욱 고도화 할 경우 시설에 반사도 등에 따른 수광량 변화와 광해 등 예측을 할 수 있음.
- 광추적 시스템을 사용하여 시설 내의 구조물로 인한 공간적 위치에 따른 변이를 모의할 수 있었다. 본 연구에서 사용된 영농형 태양광 시설은 포장 전체를 모두 사용하는 것은 아니기 때문에 패널로 인해 그늘지는 부분과 그렇지 않은 부분이 명확하게 나타났음.
- 영농형 태양광 외부 지점과 내부 지역에 따라 일사량 추정값에 큰 차이가 있었으며 일별로 누적하였을 때 급격한 일사량의 변화가 모의되었음.
- 반면, 영농형 태양광 설비 하부에서는 외부조건과 비교하였을 때에는 일사량의 차이가 작은 경향이 있었음. 특히, 산란복사량이 많았던 날에는 공간적 변이가 상당히 작은 것으로 수광량이 모의되었음.
- 직달복사량이 많아 일중 수광량이 높은 날에는 태양광 시설의 구조물에 영향을 받아 일사량이 상당히 감소하는 지역들이 존재하였으나 전체적인 면적은 태양광 설비 면적을 고려할 때 넓은 수준은 아니었음. 특히, 수광량이 낮은 지역들은 태양광 설비 기둥 인근에 위치하고 있어 작물이 재배될 가능성은 적은 것으로 보였음.



<그림 126> 기상조건에 따른 태양광 하부 수량 모의

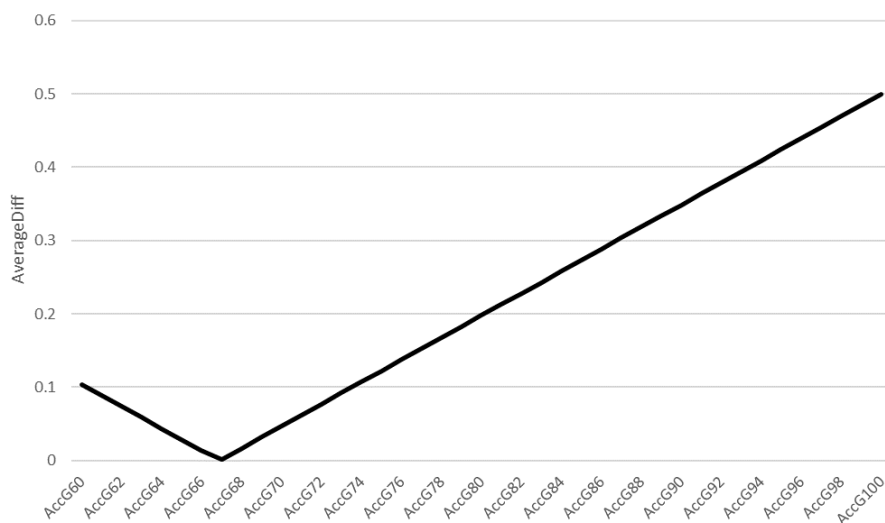
- 수광량 예측 시스템을 이용하여 모의된 일사량과 기존 작물 모델을 이용하여 영농형 태양광 하부에 벼 수량은 모의하였음(그림 127).
 - 2019년 대조구: 536 kg/10a 영농형 태양광: 480 kg/10a
 - 2020년 대조구: 473 kg/10a 영농형 태양광: 446 kg/10a
- 2019년에 비하여 2020년의 수량은 낮게 모의 되었으며, 태양광 시설로 인한 수량 감소는 2019년도가 56kg/10a, 2020년 7kg/10a로 2019년이 상대적으로 컸음.



<그림 127> 설치구 대조구 수량 관측치 예측치 비교

- 작물 모델은 수량의 변화는 잘 모의하였으나, 상대적으로 수량의 변화를 상대적으로 덜 민감하게 모의하였음.
- 작물 모델 구동시 수광량 변화만을 고려 하였기 때문에 수량의 변화를 충분히 예측하지 못하였으나 그 변화의 경향성은 잘 예측하였으므로, 시설로 인한 환경요인(온도, 습도, 풍속 등) 변화를 작물 모델 구동시 고려하거나, 작물 모델의 고도화로 인하여 예측성을 향상 시킬 수 있음.

□ 작물모델 구동을 위한 수광계수 예측



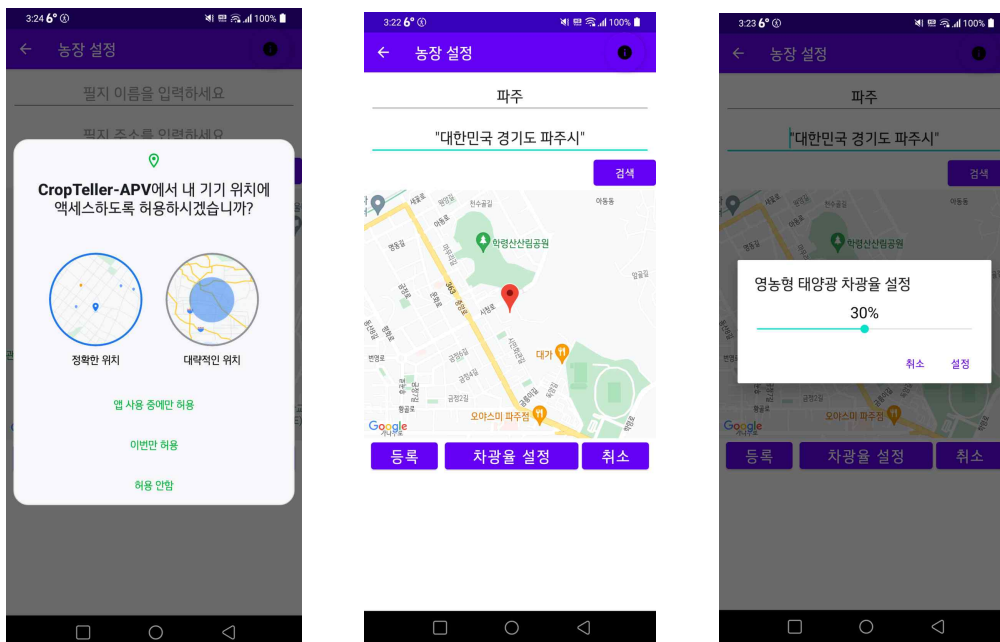
<그림 128> 기상조건에 따른 태양광 하부 수량 모의

- 작물모델 특히 모바일 앱환경에서 태양광 하부의 생육 수량을 모의하기 위해 수광계수를 정의 추정하였음.
- 수광 계수는 2019년, 2020년도 전주 사이트에서 시설내 15개 지점(광센서)에 대해 광추적 모델에 의하여 예측된 수광량과 고정된 광감소 계수(차광율) 비교하였음.
- 본 연구에서 대상이 된 시설의 경우 차광값 34%에서 수광량 예측 시스템으로 예측된 수광량과 차광율을 이용하여 오차가 가장 작기 때문에 수광계수로 대상 시설에 대한 수광계수로 결정되었음.
- 구해진 차광율은 수광계수로 결정되어 기존 작물모델에 차광율로 적용하여 작물 모델을 구동 할 수 있음.
- 시설의 구조에 따라 수광계수를 다시 모의 하였음.
- 모바일 앱에서 태양광 하부 조건을 반영하여 작물모형으로 생육 및 수량을 추정하기 위해 사용되는 수광계수가 33%로 산출됨.
- 광추적 시스템을 활용하여 영농형 태양광 하부의 일사량을 추정할 경우, 상세한 결과값을 얻을 수 있었으나 상당한 전산자원이 소요되었음.
- 이를 대신하여 광추적 모의를 통한 일별 일사량을 작기 기간 동안 누적하여 광추적 모의값과 유사한 결과를 얻을 수 있는 수광계수를 결정하여 효과적으로 영농형 태양광 하부의 일사량 감소 양상을 추정할 수 있었음.
- 이는 영농형 태양광 설비의 3D 모델을 활용하여 광추적을 통한 일사량 추정값을 누적하여 이와 유사한 값을 얻을 수 있는 차광율을 결정할 경우, 일사량 관측값 없이 작물모형에 적용 가능한 수광계수를 확보할 수 있음을 나타냄.

바. 영농형 태양광 설비 하부 작물 생육 예측 지원 모바일 앱개발

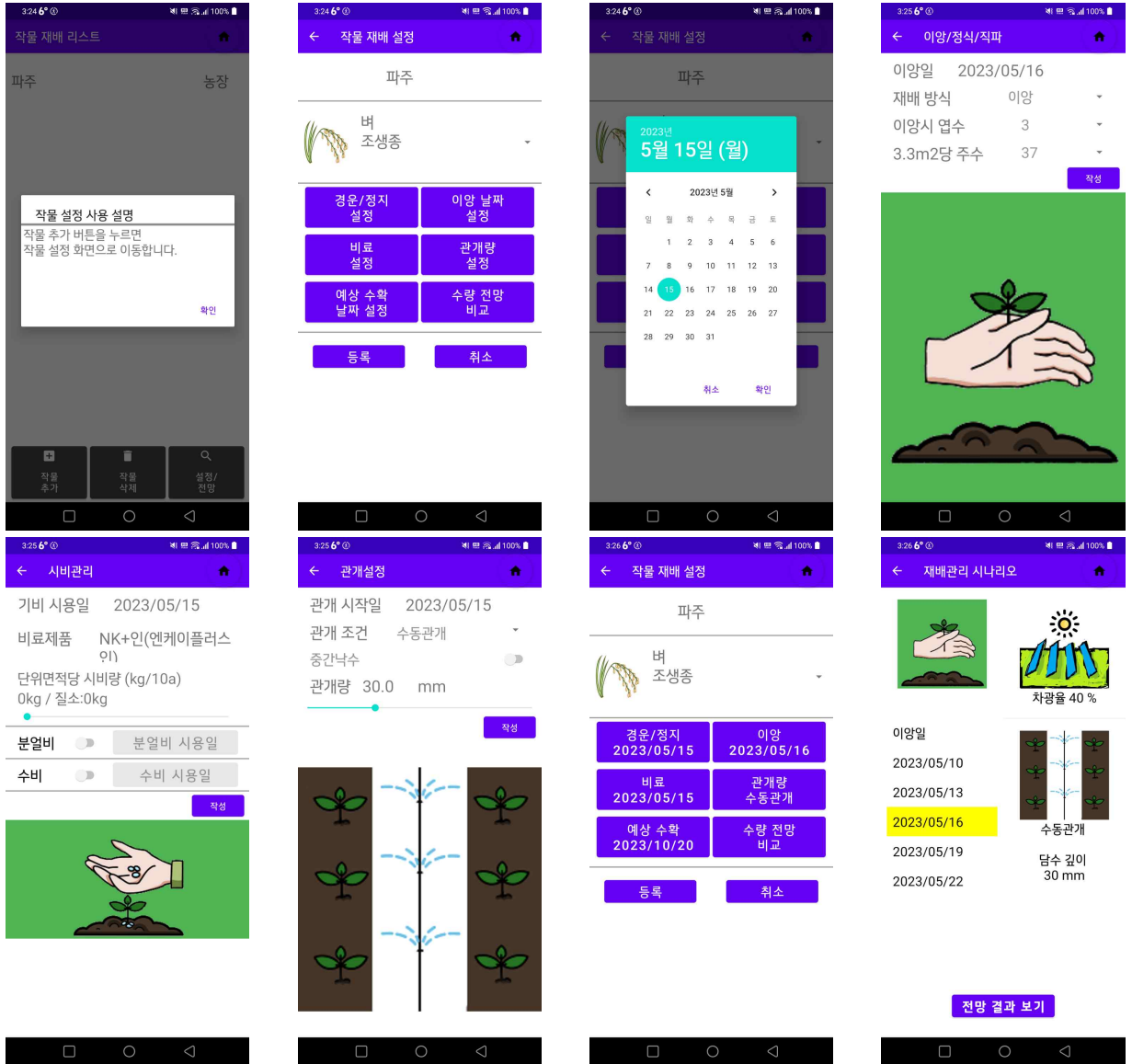
□ 작물생육모형 구동 지원을 위한 기상관측소 자료를 활용한 기상입력자료 생성 및 영농형 태양광 설비 하부 작물 생육 예측 지원 모바일 앱 모듈 개발

- 본 연구에서는 비전문가도 쉽게 사용을 할 수 있는 태양광 설비 하부 작물 생육 지원 모바일 앱을 개발하였음.
- 이 앱의 작물 모듈은 DSSAT 패키지 안에 포함된 CERES-rice을 기반으로 개발하였음.
- 개발된 모바일 앱이 다른 작물 모델과 구분되는 것은 아래와 같음.
 - GUI 기반으로 사용자가 특히 비전문가가 직관적으로 작물 모델의 설정을 할 수 있게 하였음.
 - 자료의 양이 많고 가공도 어렵기 때문에 준비하기 힘든 기상자료를 지도 및 주소 기반(기상 관측소)으로 사용 할 수 있게 하였음.
 - 태양광 하부조건을 예측을 하기 위해 차광율을 작물 모델 구동에 반영 시킬수 있는 기능을 추가하였음.



<그림 129> 모바일 앱 농장 설정 부분

- 모바일 앱을 구동시키기 위해서는 농장 설정을 아래와 같은 방법을 수행하도록 하였음.
 - 원하는 농장 이름을 필지 이름에 입력함.
 - 주소를 이용하여서 원하는 지점을 선택 할 수 있음. 주소선택시 지도가 반응함.
 - 지도를 이용하여 원하는 지점을 선택 할 수 있음. 지도에서 선택시 주소가 반응함.
 - 차광률을 20-40% 범위에서 선택을 할 수 있음.



<그림 130> 모바일 앱 작물재배 설정

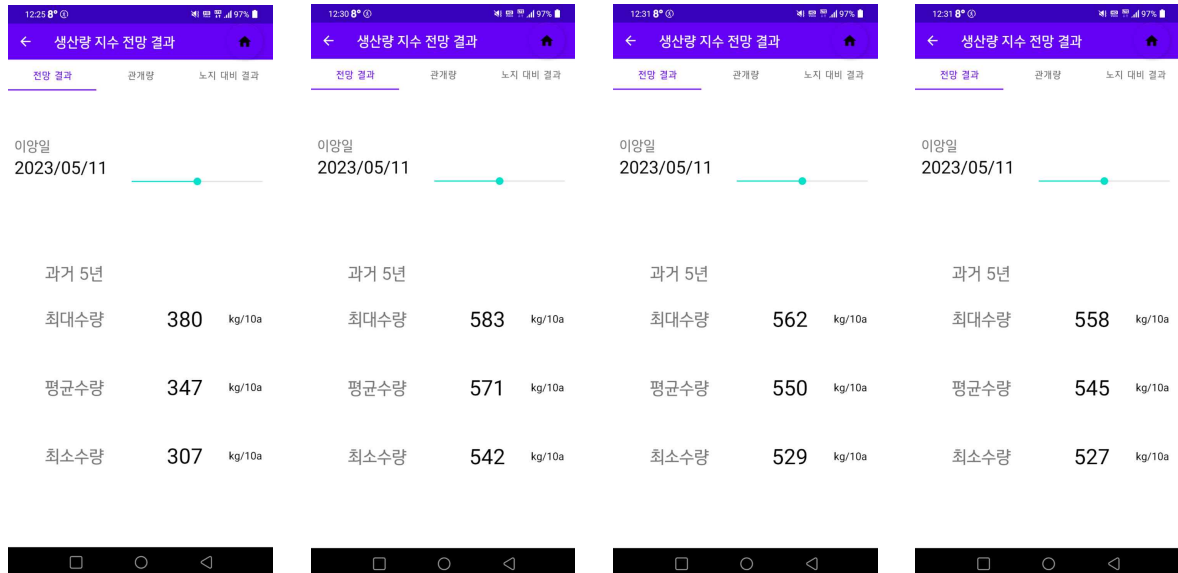
- 농장설정 이후에 작물 재배 설정을 하여야 함.
 - 벼 품종을 조생종과 중만생종을 선택을 할 수 있음.
 - 경운/정지설정에서는 캘린더를 이용해서 경운일을 설정하며, 무경운과 경운/정지와 경운 깊이를 설정을 할 수 있음.
 - 이앙 날짜 설정에서는 캘린더를 이용하여 이앙일을 설정하며, 이앙을 선택시 재배방식, 이앙시 엽수, 단위면적당 주수등을 설정 할 수 있으며 직파재배를 설정시 재식방법, 주간간격, 파종량을 선택 할 수 있음.
 - 비료 설정에서는 3차례에 나누어서 시비를 할 수 있음. 분얼비와 수비날짜는 설정을 할 수 있으며 일반적 모델에서 사용하는 N, P, K 량에 따른 선택이 아니라 시판된 복합비료제품을 선택 할 수 있음.
 - 관개량 설정에서는 3가지 종류에 관개방법 즉 천수, 수동, 관행관개에서 선택 할 수 있으며 중간낙수 여부와 시행을 선택을 할 수 있음.
 - 예상 수확일을 캘린더를 이용해서 선택 할 수 있음.
- 수량전망비교는 3가지 탭을 이용하여 비교 할 수 있음.
 - 5년간 자료를 이용해서 최대 평균 최소 수량을 출력하면 선택한 이앙일 근처의 값도 비교

할 수 있음.

- 관개량 탭에서는 최적조건에 대비하여 설정에 된 조건에서의 관개량을 비교함.
- 노지 대비 결과 탭에서는 이양일에 따라 수량을 상대적 량으로 비교함.

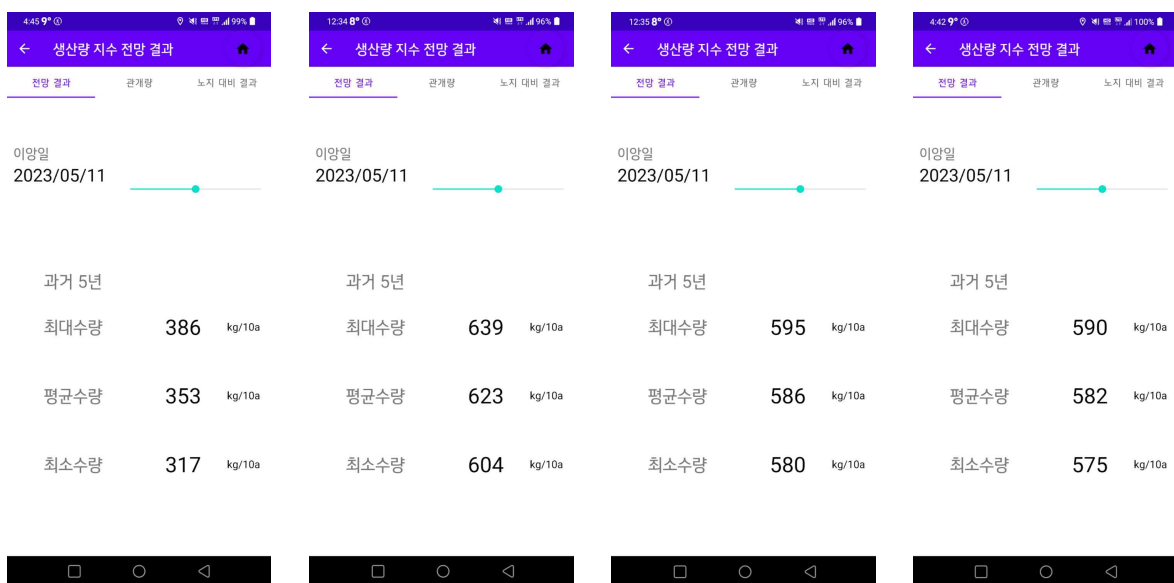
□ 사례연구1 (모바일 앱 관개 및 차광조건에 따른 결과 비교 및 평가)

○ 모바일 앱의 결과를 평가하기 위해 작물모델 구동 결과와 비교하였음.



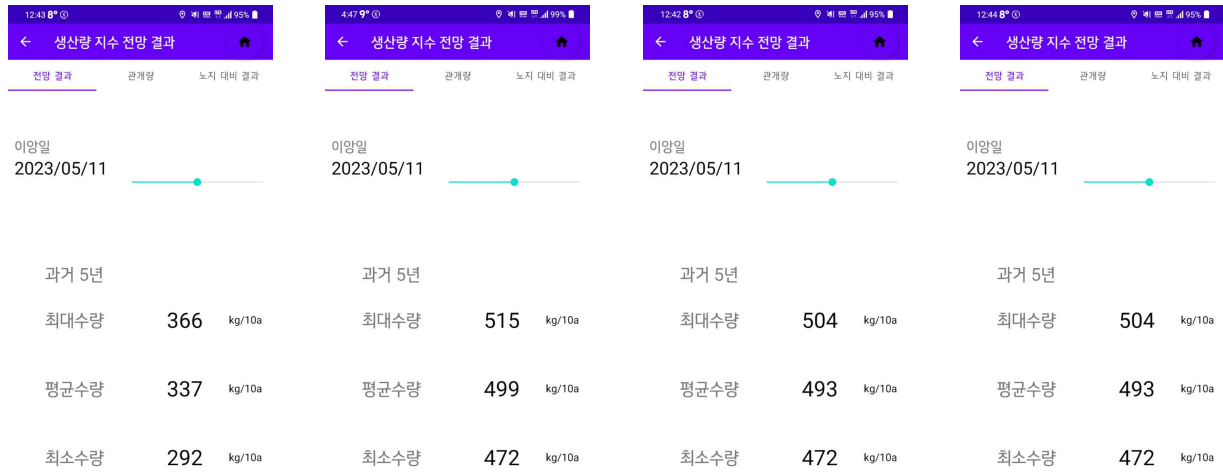
30% / 천수관개 30% / 5mm 30% / 관행(80mm) 30% / 100mm
 <그림 131> 모바일 앱을 이용한 관개 조건에 따른 수량 비교 (30% 차광율)

○ 30% 차광조건에서 관개 조건 간 천수 관개시 수량이 가장 낮았으며, 그 변동성(최대-최소 수량 차이)이 73kg/10a로 가장 컸고 관개 조건에서는 31-41kg/10a 변동성의 큰 차이가 없었음.



20% / 천수관개 20% / 5 mm 20% / 80mm 20% / 100mm
 <그림 132> 모바일 앱을 이용한 관개 조건에 따른 수량 비교 (20% 차광율)

○ 20% 차광조건에서도 천수관개에서 그 수량의 변동성이 가장 컸으며(69kg/10a), 30% 관개 조건과 비교 할 때 수량은 대체적으로 높으나 변동성은 작아짐.



40% / 천수관개

40% / 5mm

40% / 80mm

40% / 100mm

<그림 133> 모바일 앱을 이용한 관개 조건에 따른 수량 비교 (40% 차광율)

○ 40% 차광 조건에서는 천수관개에서 그 수량의 변동성이 가장 컸으며(74kg/10a), 다른 관개 조건에서는 수량 변동성인 32 - 43kg 으로 일정하였음

○ 40% 차광조건에 수량은 30% 차광조건 보다 대체적으로 낮았으나 수량의 변동성에는 큰 차이가 없음.

○ 모든 차광조건에서 천수관개조건과 관개조건 간의 수량차이는 컸으나 관개시 관개 조건간의 수량은 큰 차이를 보이지 않음.

○ 관개 조건에 5mm 관개시 가장 높은 수량을 보이고 더 높은 관개조건(80, 100mm)에서는 수량이 근소하게 감소함.



30% / 천수관개

30% / 5mm

30% / 80mm

30% / 100mm

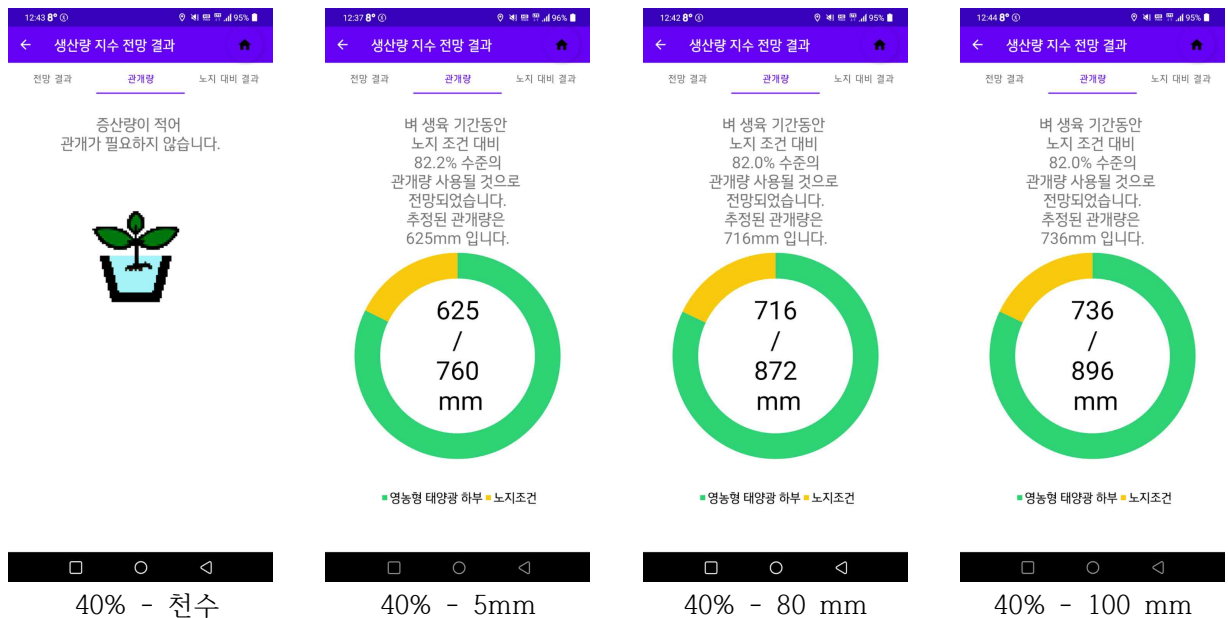
<그림 134> 모바일 앱을 이용한 관개량 비교 (30% 차광율)

- 천수조건에서는 무관개 조건이므로 관개량이 표시되지 않음.
- 30% 차광조건에서 1mm 관개 수위를 높이려면 관개량을 1.21 mm(m² 당 약 1.21L) 높여야 하며 논이 마르지 않는 조건(관개수위 0mm)을 위해서는 655mm의 관개량이 필요할 것으로 예상됨.



<그림 135> 모바일 앱을 이용한 관개량 비교 (20% 차광율)

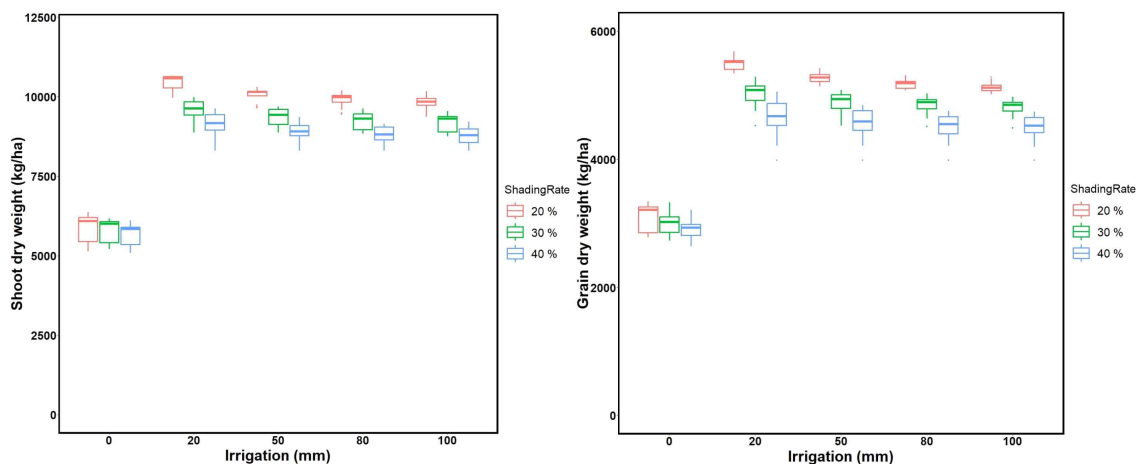
- 20% 차광조건에서 1mm 관개 수위를 높이려면 관개량을 1.24 mm 높여야 하며, 논이 마르지 않는 조건(관개수위 0mm)을 위해서는 690mm의 관개량이 필요할 것으로 예상되므로 높은 차광 조건에 비해서 재배시 요구수량이 증가 할 것으로 예상됨.



<그림 136> 모바일 앱을 이용한 관개량 비교 (40% 차광율)

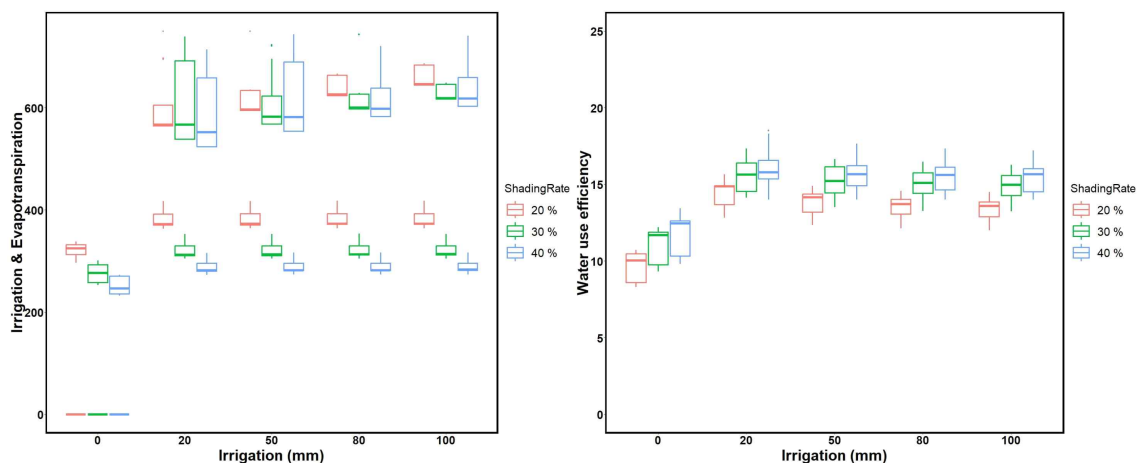
- 40% 차광조건에서 1mm 관개 수위를 높이려면 관개량을 1.10 mm 높여야 하며, 논이 마르지 않는 조건(관개수위 0mm)을 위해서는 620mm의 관개량이 필요할 것으로 예상됨.

- 기존 작물모델을 구동시 차광율이 증가함에 따라 지상부 및 수확 수량이 감소하는 경향을 보였으며, 관개량을 증가시키는 경우 천수관개를 하지 않은 경우 약간 감소하는 경향을 보였음
- 차광율과 관개조건 모두 수확지수(Harvest index)에는 의미있는 영향을 주지 않았음.



<그림 137> 관개 조건과 차광율에 따른 벼 지상중과 종자중

- 관개량은 관개수위가 높아질수록 증가 하였으나, 증발산량에는 천수관개 조건을 제외하고 그 차이가 작았음.
- 작물 모델 결과에서 수확량을 증발산량으로 나눈 값을 물 이용효율로 사용을 하였으며, 물 이용 효율은 차광율이 높아 질수록 감소하였음.



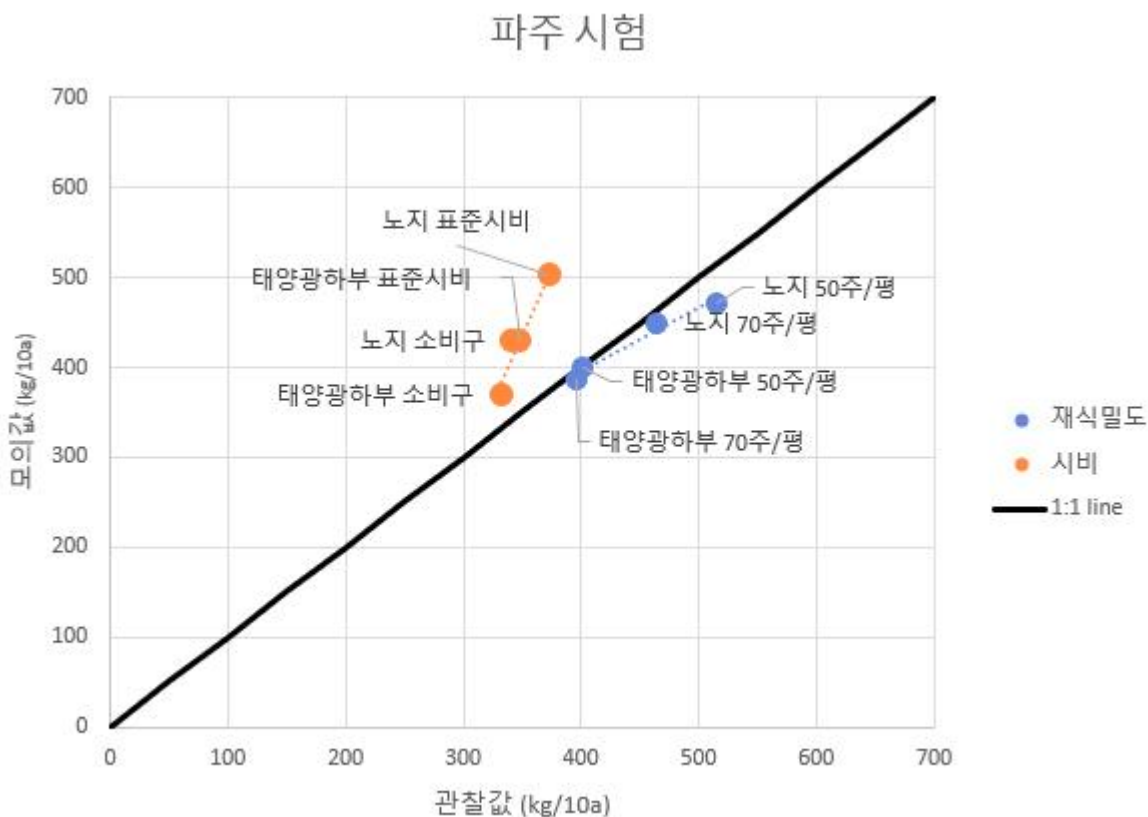
<그림 138> 관개 조건에 따른 관개량과 물 이용효율

- 관개량이 증가 시 수량감소가 기존 작물모델과 모바일 앱 모두에서 관찰이 되었는데 과도한 관개나 높은 관개로 수위로 인하여 비료성분의 leaching 이나 runoff 가 쉽게 일어나서 이로 인한 비료 이용효율이 감소가 수량이 감소의 원인이 된 것으로 추정됨.
- 모바일 앱은 기존의 작물 모델에 결과와 유사한 결과를 보였음.
- 모바일 앱을 영농형 태양광으로 인한 수량 변동성의 증가를 작물 모델과 같이 예측을 하였음.

- 모바일 앱을 이용하여서도 작물 모델의 결과와 같이 영농형 태양광 설치시 이수량 감소를 예측 할 수 있으며, 특히 최적에 관개량을 결정하는데에 도움을 줄 수 있음.
- 모바일 앱에서도 작물 모델의 결과와 같이 과다한 관개로 인한 수량 감소를 예측할 수 있으므로 모바일 앱을 이용 하여서도 영농형 태양광 시설에 대한 의사 결정시 도움을 줄 것으로 사료됨.
- 모바일 앱은 기존 작물 모델(Ceres-Rice)을 기반으로 제작되어 있으므로 작물 생육 모의에 대한 전반은 작물 모델에 신뢰성에 의존은 하여 기존 모델의 개선이 있을시 업데이트를 통해 반영을 할 수 있으며, 영농형 태양광 환경의 반응에 대한 검증은 필요함.

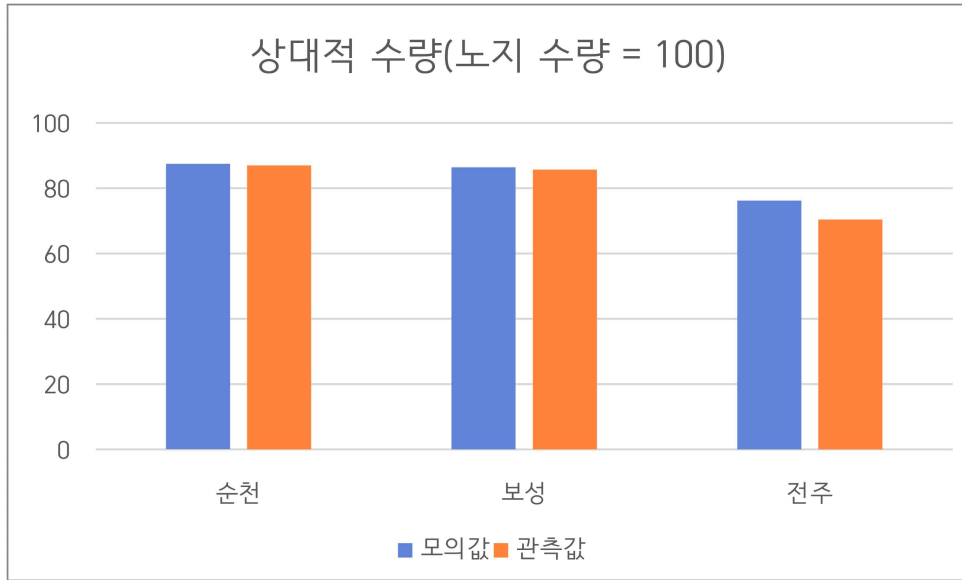
□ 사례연구2 (모바일 앱과 실증사이트 결과값 비교)

- 모바일 앱의 검증을 위해서 본 연구에서 수행한 지역을 대상으로 모바일 앱을 검증을 위해 모의 하였음.



<그림139> 파주지역 실증값과 모의값 비교 (실험 결과에서 정미율 72% 곱한 결과임)

- 모바일 앱은 재식밀도 실험의 반응을 잘 모의하였으나, 시비에 따른 수량의 반응은 과대 모의함(그림 139).
- 재식밀도 실험의 경우 작물 개체에 도달하는 수광량에 밀접하게 관련되어 있으므로 모바일 앱은 광조건에 대한 모의를 잘 하는 것으로 사료됨.
- 과대 모의된 시비반응은 기존 모델(Ceres-Rice)의 개선 및 모바일 앱에 반응, 토양 모듈 추가 및 개선 등으로 개선 될 수 있음.

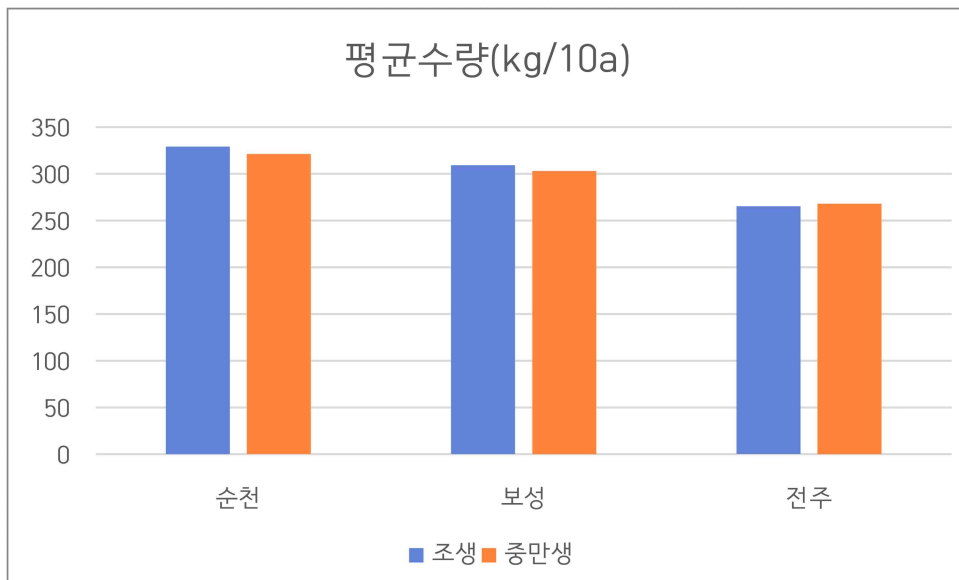


<그림 140> 영농형 태양광 하부 벼 상대 수량

○ 그림 140은 노지와 영농형 태양광 하부간에 반응을 묘사 한것이며, 이는 모바일 앱이 영농형 패널 하부에서 벼 수량 반응을 잘 묘사함을 알 수 있음.(그림 140).

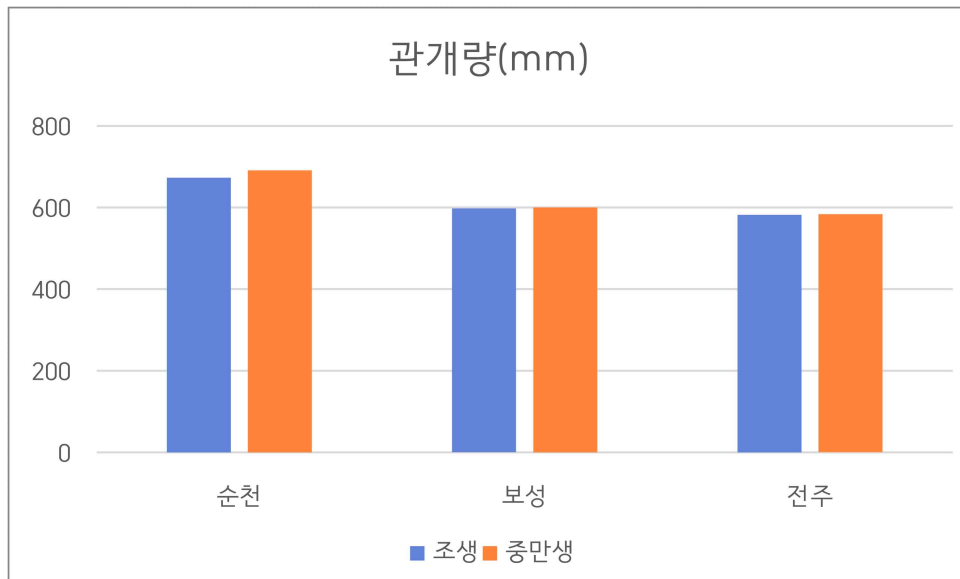
□ 사례연구3 (모바일 앱 작물품종모수(parameter)에 따른 결과값 비교)

○ 실험 지역(순천, 보성, 나주) 재배조건을 모바일 앱의 입력 변수로 하여, 품종 모수 차이에 따른 수량 및 관개량 비교함.



<그림141> 품종모수에 따른 수량 비교

○ 순천과 보성의 경우 조생종의 수량이 중만생종에 비하여 약간 높고 전주의 경우 약간 낮으나 그 차이는 미미함.



<그림142> 품종모수에 따른 관개량 비교

- 품종 모수에 따른 관개량의 변화는 미비하였으며, 순천지역의 경우 중만생종 관개량이 요구됨 하지만 보성과 나주의 경우 차이가 적음.
- 모바일앱에 내재된 두 모수의 경우 품종간의 반응의 차이가 크지 않았지만, 모바일 앱에 더 많은 모수를 추가 할 경우 의사결정에 도움이 될 수도 있음.

사. 영농형 태양광 통합 플랫폼 연동을 위한 자료교환 인터페이스 분석 및 설계

□ 미기상과 작물 생육을 감시하기 위한 시스템

○ 미기상과 작물 생육을 감시하기 위한 시스템을 그림 143 과 같이 구현하여 수원에 위치한 영농형 태양광 시설 아래에서 구현함.



센서부



라즈베리 파이 & 배터리



영농형 태양광 시설 하부
<그림 143> 미기상과 작물 생육을 감시하기 위한 시스템

○ 센서에 의해 수집된 기상자료는 그림 144과 같이 수집됨.

date	co2	lux	temp	hum	rad
2023-02-08 15:50	217.1	14467.3	9.72	32.23	4.14
2023-02-08 16:00	217.7	13582.8	8.39	35.43	3.88
2023-02-08 16:10	211.4	12038.8	7.78	35.22	3.44
2023-02-08 16:20	207.3	10943	7.32	35.12	3.13
2023-02-08 16:30	210.3	10181.5	7.42	35.87	2.91
2023-02-08 16:40	210.1	9188.8	7.32	38.45	2.63
2023-02-08 16:50	211.5	8766.6	7.33	39.63	2.51
2023-02-08 17:00	209.4	7184.1	6.94	40.46	2.05
2023-02-08 17:10	209.8	5265	5.75	41.96	1.51
2023-02-08 17:20	210.6	4070.3	5.03	43.59	1.16
2023-02-08 17:30	211.5	2867.6	4.4	44.99	0.82
2023-02-08 17:40	211.6	1957.2	3.95	45.74	0.56
2023-02-08 17:50	208.7	900.5	3.49	45.73	0.26
2023-02-08 18:00	209.9	346.3	3.11	45.5	0.1
2023-02-08 18:10	208.8	89.8	2.97	44.54	0.03
2023-02-08 18:20	206.5	16.5	2.61	45.75	0
2023-02-08 18:30	203	7.1	1.98	48.06	0
2023-02-08 18:40	201.8	6	1.64	49.49	0
2023-02-08 18:50	198.2	6	1.02	51.59	0
2023-02-08 19:00	196.9	6	0.55	53.12	0

<그림 144> 미기상과 작물 생육을 감시하기 위한 시스템에 의해 수집된 기상 자료

- 구현된 미기상과 작물 생육 감시 시스템은 구동을 하였고 자료도 자동적으로 수집 정상되었음.
- 하지만 야외 조건에서 센서와 라즈베리파이에 대한 안정성에 대한 검증이 필요하며, 전력소모량을 줄이는 등 외부 전원에 독립적으로 설치 할 수 있는 방법에 대한 연구도 필요함.

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

< 정량적 연구개발성과표 >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명		연도	1단계 (2021~2022)	계	가중치 (%)
전담기관 등록·기탁 지표 ¹⁾	저작권 (소프트웨어)	목표(단계별)	1	1	30
		실적(누적)	1	1	
	논문(SCI)	목표(단계별)	1	1	
		실적(누적)	1.2	1.2	
	논문(비SCI)	목표(단계별)	4	4	
		실적(누적)	2	2	
학술발표	목표(단계별)	6	6	10	
	실적(누적)	10	10		
연구개발과제 특성 반영 지표 ²⁾	제품화	목표(단계별)	1	1	30
		실적(누적)	1	1	
	정책활용	목표(단계별)	1	1	10
		실적(누적)	1	1	
	홍보전시	목표(단계별)	1	1	10
		실적(누적)	3	3	
	기타(타연구 활용 등)	목표(단계별)	3	3	10
		실적(누적)	1	1	
계	목표(단계별)				
	실적(누적)				

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

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

가. 과학적 성과

논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	영농형 태양광 시설 하부 논에서의 농업환경 관측 및 시설 외부 환경과의 비교	한국농림기상학회지	강민석	23	한국	한국농림기상학회	비SCIE	2021-09-30	1229-5671	100
2	작물모델 입력자료용 일사량 추정을 위한 지역 특이적 AP계수 평가	한국농림기상학회지	조영상	24	한국	한국농림기상학회지	비SCIE	2022-12-30	2288-1859	100
3	Crop Cultivation Underneath Agro-Photovoltaic Systems and Its Effects on Crop Growth, Yield, and Photosynthetic Efficiency	Agronomy	이효진	12	스위스	MDPI	SCIE	2022-08-04	2073-4395	100
4	On securing continuity of eddy covariance flux time-series after changing the measurement height: Correction for flux differences due to the footprint difference	Agricultural and Forest Meteorology	강민석, 강남구	331	네덜란드	ELSEVIER	SCIE	2023-01-31	0168-1923	20

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국농림기상학회	김광수	2021-08-27	온라인(서울대학교 농업생명과학대학교)	한국
2	한국농림기상학회	강민석	2021-08-27	온라인(서울대학교 농업생명과학대학교)	한국
3	한국농림기상학회	국용인	2021-08-27	온라인(서울대학교 농업생명과학대학교)	한국
4	2021 한국작물학회 정기총회 및 추계학술대회	김영옥, 황인택, 이효진, 국용인	2021-10-21	경북대학교 와성홀	한국
5	한국농림기상학회	한상훈	2022-12-16	경주 더케이호텔	한국
6	한국농림기상학회	조영상	2022-07-01	평창 용평리조트 그린피아 콘도	한국
7	한국농림기상학회 동계학술대회	최성원	2022-12-16	경주 더케이호텔	한국
8	AsiaFlus 2022	최성원	2022-09-21	Kuching, Malaysia	말레이시아
9	2022년 한국작물학회 춘계학술대회	박현화	2022-04-15	충남대학교	한국
10	한국잡초학회 40주년 및 2022년 추계학술대회	김예건	2022-10-26	소노캄 제주	한국

나. 기술적 성과

□ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율
1	Agri Photovoltaic System Mapper(영농형 태양광 일사량 매핑 시스템)	2022.10.17	서울대학교 산학협력단	2022.10.31	114371-0009224	서울대학교 산학협력단	100

다. 경제적 성과

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식 ¹⁾	사업화 형태 ²⁾	지역 ³⁾	사업화명	내용	업체명	매출액 ⁴⁾		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		
1	자기실시	신제품 개발	국내	영농형 태양광 설비 하부 작물 생육 예측 지원 앱(APV) 사업	영농형 태양광 설비 하부 작물 생육 예측 지원 앱(APV) 출시 및 운영	서울대학교 산학협력단	0	0	0	-

* 1) 기술이전 또는 자기실시

* 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등

* 3) 국내 또는 국외

* 4) 앱마켓에 모바일 어플리케이션을 무료 배포 하였으므로 매출액이 발생하지 않음.

라. 사회적 성과

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용
1	제안	재생에너지 확대 및 탄소중립 제고를 위한 영농형 태양광 구축 지원	농림축산식품부		

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비
1	농림식품기술기획평가원	농업에너지자립형 산업모델 기술개발	영농형 태양광 적용 SW 개발 및 통합 플랫폼 구축	(주)에스엠소프트	330,000,000

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	중앙전문지	Ai타임스	이전 기사 Ai타임스 [특집 PVMI 2022] 강민석 국가농림기상센터 부장, 태양광 하부 미기상 관측 시스템 연구결과 발표 SNS 기사보내기 SNS 기사보내기페이스북(으)로 기사보내기 트위터(으)로 기사보내기 카카오톡(으)로 기사보내기 네이버블로그(으)로 기사보내기	2022-04-13
2	기타	농식품 R&D 유망기술 발표회	영농형 태양광 작물 재배 의사결정 지원 모바일 앱	2022-11-29
3	기타	한국농림기상학회 동계 학술대회	모바일 앱 기반 영농형 태양광 하부 식량작물 생산성 예측 시스템 구축	2022-12-15

2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
○ 영농형 태양광 활용 식량작물 재배기술 및 생산성 예측 시스템 개발	- 광범위한 범위의 실험 수행으로 영농형 태양광 시설에서 작물 및 환경에 반응을 수집 및 분석하였고, 수광량 예측 시스템과 작물 수량 모의를 위한 모바일 앱을 개발하였음.	○ 100%
○ 영농형 태양광 하부 맞춤형 식량작물 재배기술 개발(1공동) - 영농형 태양광 하부 식량작물 재배시기, 시비 방법 및 재식밀도에 따른 생산성 변화 관측 - 스마트 식량작물 재배 지원 데이터 수집을 위한 장비 운영 및 관리	- 영농형 태양광 하부에서 재식밀도와 시비실험을 수행하여 수량 및 작물 성장 데이터를 수집하여 생산성 변화를 관측 분석함. - 설치된 센서 등 장비 운영 및 관리함	○ 100%
○ 영농형 태양광 하부 식량작물 최적 환경 및 재배조건 개발(2공동) - 식량작물 재배 실태조사, 작물생리, 재배관리, 농산물 안정성 영향 평가 - 영농형 태양광 하부 최적 재배 조건 분석	- 태양광 하부에 식량작물 재배 실태조사하여 DB를 구성하였으며, 작물생리, 재배관리, 농산물 안정성에 대한 실험을 수행해 영향 평가함. - 작물별로 다양한 측면에서 연구결과로 최적 재배조건을 분석함	○ 100%
○ 영농형 태양광 활용 친환경 및 스마트 식량작물 재배 지원 기술 개발 (3공동) - 영농형 태양광 물관리 스마트팜 기술 개발을 위한 물소비, 온실가스 배출 특성 구명 - 영농형 태양광에서의 작물 생리·생육 모니터링 스마트팜 기술 개발	- 라이시미터, 에디공분산 분석등을 기법 이용하여 영농형 태양광 조건에서 물소비, 온실가스 배출 데이터를 수집 및 분석함. - 작물에 대한 다양한 생육지표를 이용하여 영농형 태양광에서의 작물 생리·생육 모니터링을 수행 하여며 수집된 데이터를 분석함,	○ 100%
○ 모바일 컴퓨팅 기반 영농형 태양광 시설 하부 식량작물 생산성 예측 시스템 구축(주관) - 통합 플랫폼 연동 모바일 앱 기반 영농형 태양광 시설 하부 작물 생육 예측 시스템 개발 - 작물 생육 예측 기반 재배관리 의사결정 지원 체계 구축	- 3D모델과 레이트레이싱 기법을 활용 영농형 태양광 하부에 수광량 예측 시스템을 개발 및 모델에 적용함. - 영농형 태양광에서 의사결정을 도울수 있는 작물 모델 기반 모바일 앱을 개발 출시함.	○ 100%

4. 목표 미달 시 원인분석

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 1년차 연구 수행중 작물 생육 불량으로 기한내 논문 작성을 위한 충분한 데이터 확보가 어려워 비 SCI논문 작성 일정이 지연되었음.
- 반도체 대란으로 인해 센서 구입 일정이 지연되어 센서 제작 및 포장에서의 관측 일정 지연되었으므로 논문 작성 일정이 지연되었음.

2) 자체 보완활동

- 일사량 관련 국내 논문을 발표하였으며(아래 그림), 이번 연구를 통해 제작된 센서 시스템 관련 논문 작성 중임.

한국농림기상학회지, 제25권 제1호(2023) (pISSN 1229-5671, eISSN 2288-1859)
 Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 25, No. 1, (2023), pp. 28-36
 DOI: 10.5532/KJAFM.2023.25.1.28
 © Author(s) 2023. CC Attribution 3.0 License.

34 Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 25, No. 1

천리안 2A호와 히마와리 8호 기반 일사량 추정값과 종관기상관측망 일사량 관측값 간의 비교

강대균¹, 조영상², 현신우³, 김광수^{2,3,4*}
¹서울대학교 원동과정 농림기상학, ²서울대학교 식물생산과학부,
³서울대학교 농림생물자원학부, ⁴서울대학교 농업생명과학연구원
 (2023년 02월 07일 접수; 2023년 03월 08일 수정; 2023년 03월 28일 수락)

Comparison between Solar Radiation Estimates Based on GK-2A and Himawari 8 Satellite and Observed Solar Radiation at Synoptic Weather Stations

Dae Gyeon Kang¹, Young Sang Joh², Shinwoo Hyun³, Kwang Soo Kim^{2,3,4*}
¹Interdisciplinary Program in Agricultural and Forest Meteorology, Seoul National University
²Department of Plant Science, Seoul National University
³Department of Agriculture, Forestry and Biosources, Seoul National University
⁴Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University
 (Received February 07, 2023; Revised March 08, 2023; Accepted March 28, 2023)

기 위해 중요한 지표로 활용되는 변수이다(Mohammadi et al., 2016). Olatomiwa et al.(2015)은 태양광 발전 설비를 설계할 때 일사량이 주요 기상변수라고 제안하였다. 신뢰도가 높은 일사량 추정 자료를 확보하는 것은 상당한 재정적 투자가 요구되는 태양광 설비 구축 시 대상지역 선정에 관한 의사결정에 사용될 수 있을 것이다. 따라서, 본 연구에서 나타난 결과를 기반으로 히마와리 8호 위성 자료를 활용하여 태양광 발전량과 함께 작물의 생산성을 예측할 때, 영농형 태양광 설비를 구축하였을 때 기대되는 에너지와 식량 생산성을 추정할 수 있을 것이다. 또한, 영농형 태양광 설비가 설치되면 20년 이상 사용될 수 있기 때문에 미래기후변화 시나리오 자료를 사용하여 에너지와 식량 생산성에 대한 체계적인 분석으로 최적 대상 지역을 선별하기 위한 연구가 추진되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업에너지자립형 산업모델개발사업의 지원을 받았습니다(321075-02-1-SB 010).

REFERENCES

Antonopoulos, V. Z., D. M. Papamichail, V. G. Aschonitis, and A. V. Antonopoulos, 2019: Solar radiation estimation methods using ANN and empirical models. *Computers and Electronics in Agriculture* **160**, 160-167.
 Bessho, K., K. Date, M. Hayashi, A. Ikeda, T. Imai, H. Inoue, Y. Kumagai, T. Miyakawa, H. Murata, T. Ohno, A. Okuyama, R. Oyama, Y. Sasaki, Y. Shimazu, K. Shinji, Y. Sumida, M. Suzuki, H. Taniguchi, H. Tsuchiyama, D. Uesawa, H. Yokota, and R. Yoshida, 2016: An introduction to

적 요

- 이번 연구를 통해 얻어진 영농형 태양광 하부 최적 재식밀도 및 관개량에 대한 영농활용 각각 작성중.

영농기술 정보

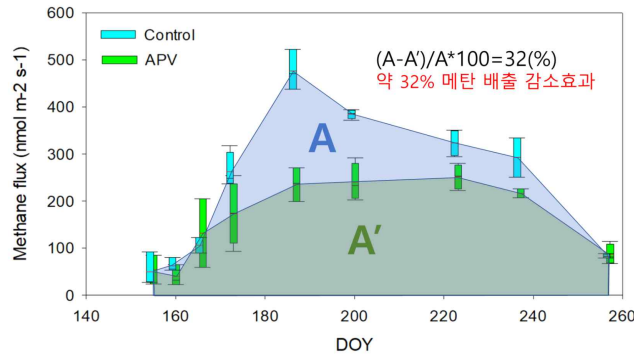
제 목	영농형 태양광 하부 벼 재배시 최적 재식밀도
활용 분야	벼
검색어	벼, 모바일 앱, 영농형태양광, 최적 재식밀도
	<input type="checkbox"/> 배경 ○ 영농형 태양광 하부에서 벼 재배시 노지와는 다른 기상 환경이 조성되며, 특히 다른 광환경이 나타날 것으로 사료됨. ○ 최대수량 확보 및 도복위험 감소를 위하여 재식밀도를 조절할 수 있음. <input type="checkbox"/> 개발된 영농기술정보 ○ 영농형 태양광 하부 벼 재배를 위한 최적 재식밀도 - 조장은 처리구가 대조구에 비해 약 7.8cm 컸으며, 이는 태양광 모듈설치로 인한 차광에 의한 도장으로 판단되며, 따라서 등숙기에 도복이 우려됨으로 이

영농기술 정보

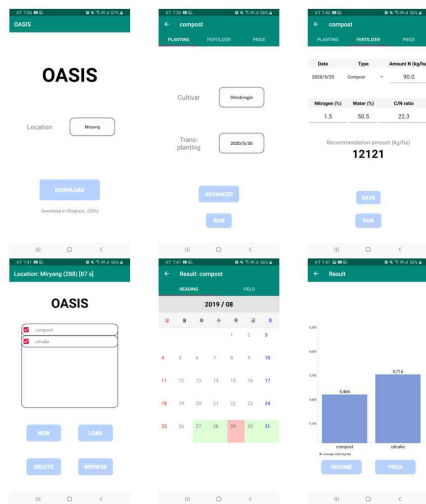
제 목	영농형 태양광 하부 벼 재배시 최적 관개량
활용 분야	벼
검색어	벼, 모바일 앱, 영농형태양광, 최적 관개량
	<input type="checkbox"/> 배경 ○ 영농형 태양광 하부에서는 노지에 대비 상대적으로 낮은 광과 풍속으로 인하여 작물 재배에 대한 관개량이 달라질 것으로 사료됨. ○ 기후변화에서 가뭄등에 재배에 대비할 하기 위해서 수자원의 효율적인 활용하기 위해 최적의 관개량을 이용하여 요구량이 높은 벼를 재배하는 것이 필요함. <input type="checkbox"/> 개발된 영농기술정보 ○ 영농형 태양광 하부 벼 재배를 위한 최적 관개량 - 영농형 하부에서는, 최소의 관개 조건에서는 벼의 수량을 유지 하면서, 관개량을 감소할 수 있음.

3) 연구개발 과정의 성실성

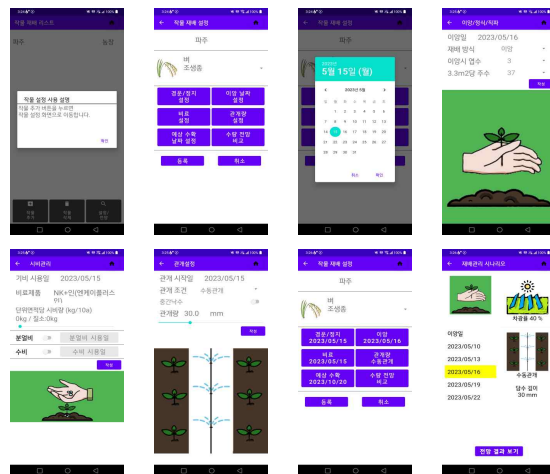
- SCI논문을 추가 달성 하였으며, 학술발표 성과는 목표대비 1.67배 달성함
- 영농형 태양광 하부에 대한 광범위한 범위(작물, 토양, 기상 등)에 대한 연구를 수행을 하여 많은 데이터를 축적 하였으며, 특히 영농형 태양광 조건에서 메탄 배출량 분석 등의 성과가 있음.
- 영농형 수광량 분석을 위해 3D모델과 ray tracing을 이용하여 수광량을 추정하고 이를 작물 모델에 적용하는 방법을 연구함.
- 모바일 앱은 기존에 앱에서 인터페이스를 대폭 개선 하였으며, 인터페이스뿐만 아니라 지도 기반 농장 설정, 차광을 반영 및 관개량 분석 등 기능적으로도 대폭 개선함.



표준시비 구역의 대조구(A)와 태양광 하부(A')의 메탄 플럭스 면적을 이용한 배출 감소량 정량화



앱 인터페이스 개선전



앱 인터페이스 개선후

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 국내외에서 영농형 태양광 하부 특히 식량작물에 대한 연구가 많이 수행 되지 않았으나, 본 연구는 작물, 대기, 토양, 병충해, 안전성 등 다양한 측면에서 벼, 콩, 감자, 참깨 등 여러 작물을 대상으로 실험 분석 한 연구가 없기 때문에 추후 영농형 태양광 연구에서 중요한 기초 연구가 될 것으로 생각됨.
- 영농형 태양광 하부에서 재배조건에서 메탄 배출 감소의 관찰은 이론적 가능성을 실험으로 뒤 받침한 결과이며, 이는 온실가스배출 절감 정책 결정 및 연구에서 대한 기초자료로 이용 할 수 있을것으로 사료됨.
- 모바일 플랫폼에서의 작물 모델은 국내외로 거의 사례가 없으며 특히 이번 연구에서 그 모바일 앱의 완성도를 높였고, 영농형 태양광 의사 결정에 사용이라는 목적지향으로 개발 되었으므로, 추후 모바일 플랫폼에서 구동하는 작물모델 개발시 구조 및 인터페이스에서 참고 자료로 사용 할 수 있을 것으로 사료됨.

(단위 : 백만원, %)

총괄과제명	세부과제명	기관명	유형	총 연구 개발비 (A)	정부지원 연구개발비 (B)	정부지원 연구개발비 비율 (C=B/A)	성과 유형	기술기여도	
								산정 근거	비율
영농형 태양광 활용 식량작물 재배기술, 생육 모니터링 및 생산성 예측 시스템 개발	모바일 앱 기반 영농형 태양광 하부 식량작물 생산성 예측 시스템 구축	서울대학교	대학 (비영리)	255.00	255.0	100.00	신규 기술개발	해당 없음	-
	영농형 태양광 하부 식량작물 재배 실태 조사 및 분석	순천대학교	대학 (비영리)	255.00	255.0	100.00	신규 기술개발	해당 없음	-
	영농형 태양광 활용 친환경 및 스마트 식량작물 재배지원 기술 개발	국가농림기상센터	재단법인 (비영리)	335.00	335.0	100.00	신규 기술개발	해당 없음	-
	영농형 태양광 하부 맞춤형 식량작물 재배기술 개발	슬라팜(주)	농업회사 법인 (영리)	318.75	255.0	80.00	신제품	①-①	80.00%
계				1,163.75	1,100	-	-	-	-

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- 본 연구로 수집 분석된 영농형 태양광 하부 작물 생육, 환경 데이터를 이용하여 추가 논문 작성 (활용계획표)
- 모바일 앱 개발 중 나온 성과로 추가 소프트웨어 등록.
- 태양광 시설 하부에 재배적합 작물 선정에 활용
- 영농형 태양광 시설 하부 병충해 발생 양상, 작물 생리 및 수량 반응, 시비와 재식밀도간 반응등의 연구자료를 이용하여 시설 하부 작물의 적정 재배기술을 개발
- 본 연구에서 관찰된 영농형 하부에서 조건에서 메탄등 온실가스에 대한 반응연구로 기후 변화 시대에 지속가능한 농업을 위한 영농형 태양광의 활용
- 영농형 태양광 하부 작물 생산성 및 환경 영향 평가 자료의 정책 참고자료로 활용
- 영농형 태양광 하부 작물의 생육 및 스트레스 반응 기반의 영농형 태양광 패널 각도 조절 알고리즘 등 영농형 태양광 시설 설계시 효율적 설계를 위한 참고자료로 활용
- 본 연구로 개발된 영농형 태양광 모바일 앱을 작물 모델 교육시 교육 자료로 활용
- 모바일 앱을 앱마켓(원스토어)에 등록하였으나 무료버전이므로 매출 등이 발생 하지 않을 것으로 사료됨(매출액 : 0원)
- 기술료는 아래와 같음.

0원 (당해연도 매출액) x 0.05(중소기업 기술요율 5%) x 79.99%(기술기여도) x 0.2(과제참여 감면율 80%) x 0.7(일시납 감면율 30%) = 0원

< 연구개발성과 활용계획표 >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내				
		2023	2024	2025	2026	2027
국외논문	SCIE					
	비SCIE					
국내논문	SCIE					
	비SCIE	2				
기타 (타 연구 활용 등)		2				

○ 기타 (타 연구 활용 등) 2건은 영농활용 2건임

< 별첨 자료 >

별첨 자료
1) 참고문헌
2) 자체평가의견서
3) 연구성과 활용계획서
4) 성과 증빙 자료

7. 별첨 자료 (참고 문헌 등)

참고 문헌

- 권효숙, 최은정, 이선일, 이형석, 이종문, & 강성수. (2022). 벼 재배 논토양에서 메탄의 생성 및 배출: 리뷰. *Journal of Climate*, 13(1), 117-134.
- 김우람, 남재우, 김근호, 김덕성, & 임철현. (2021). 영농형 태양광 구조물 활용 고부가가치 작물의 이상기후 영향 분석. *Current Photovoltaic Research*, 9(2), 45-50.
- Fielding, R. T. (2000). *Architectural styles and the design of network-based software architectures*. University of California, Irvine.
- Mumbaikar, S., & Padiya, P. (2013). Web services based on soap and rest principles. *International Journal of Scientific and Research Publications*, 3(5), 1-4.
- Amaducci, S., Yin, X., & Colauzzi, M. (2018). Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. *Applied energy*, 220, 545-561.
- Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., ... & Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2(9), 848-855.
- Bouman, B. A. M., Kroff, M. J., Tuong, T. P., Wopereis, M. C. S., ten Berge, H. F. M., & van Laar, H. H. (2001). *ORYZA 2000: Modeling lowland rice*. (International Rice Research Institute: Los Baños, Philippines).
- Dinesh, H., & Pearce, J. The potential of agrivoltaic systems. 2018. *Renewable and Energy Reviews*, 54(299-308).
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable energy*, 36(10), 2725-2732.
- Hoogenboom, G., Jones, J. W., Wilkens, P. W., Porter, C. H., Boote, K. J., Hunt, L. A., ... & Koo, J. (2010). *Decision support system for agrotechnology transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]*. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Howell, T. A. (2001). Enhancing water use efficiency in irrigated agriculture. *Agronomy journal*, 93(2), 281-289.
- Goetzberger, A., & Zastrow, A. (1982). On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 55-69.
- Lee, C. K., Kim, J., Shon, J., Yang, W. H., Yoon, Y. H., Choi, K. J., & Kim, K. S. (2012). Impacts of climate change on rice production and adaptation method in Korea as evaluated by simulation study. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 14(4), 207-221.
- Lee, E., & Suh, J. (2009). Effect of watering control on growth and bulb size of plug seedling in onion (*Allium cepa* L.) set production. *Korean Journal of Horticultural Science & Technology*, 27(2), 167-173.
- Marrou, H., Guilioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., & Wery, J. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels?. *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 117-132.
- Jacobs A. Radiance Tutorial. http://www.jaloxa.eu/resources/radiance/documentation/docs/radiance_tutorial.pdf 2012.
- Jones, J. W., Hoogenboom, G., Porter, C. H., Boote, K. J., Batchelor, W. D., Hunt, L. A., ... & Ritchie, J. T. (2003). The DSSAT cropping system model. *European journal of agronomy*, 18(3-4), 235-265.
- Kim, H. Y., Ko, J., Kang, S., & Tenhunen, J. (2013). Impacts of climate change on paddy rice yield in a temperate climate. *Global change biology*, 19(2), 548-562.

- Kim, D. J., Kim, S. O., Moon, K. H., & Yun, J. I. (2012). An outlook on cereal grains production in South Korea based on crop growth simulation under the RCP8.5 climate change scenarios. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 14(3), 132-141.
- Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., ... & Oberfell, T. (2021). Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110694.
- Liu, Y., Wang, Q., Zhuang, M., & Zhu, Y. (2008, July). Reengineering legacy systems with restful web service. In *2008 32nd Annual IEEE International Computer Software and Applications Conference* (pp. 785-790). IEEE.
- Hyun, S., Kim, T. K., & Kim, K. S. (2021). Comparison of the Weather Station Networks Used for the Estimation of the Cultivar Parameters of the CERES-Rice Model in Korea. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 23(2), 122-133. <https://doi.org/10.5532/KJAFM.2021.23.2.122>

자체평가의견서

1. 과제현황

		과제번호		321075-2	
사업구분	농업에너지 자립형산업모델 기술개발				
연구분야				과제구분	단위
사업명	에너지자립형 저장·관리 기술개발				주관
총괄과제	기재하지 않음			총괄책임자	기재하지 않음
과제명	영농형 태양광 활용 식량작물 재배기술, 생육 모니터링 및 생산성 예측 시스템 개발			과제유형	(기초,응용,개발)
연구개발기관	서울대학교			연구책임자	김광수
연구기간 연구개발비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	2021. 04. 01 - 2021. 12. 31	500,000	28,800	528,800
	2차년도	2022. 01. 01 - 2022. 12. 31	600,000	35,000	635,000
	3차년도				
	4차년도				
	5차년도				
	계				
참여기업					
상대국	상대국연구개발기관				

※ 총 연구기간이 5차년도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 : 2023년 2월 20일

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
서울대학교	교수	김광수

4. 평가자(연구책임자) 확인 :

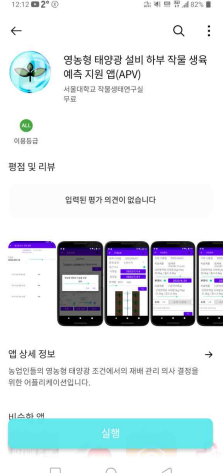
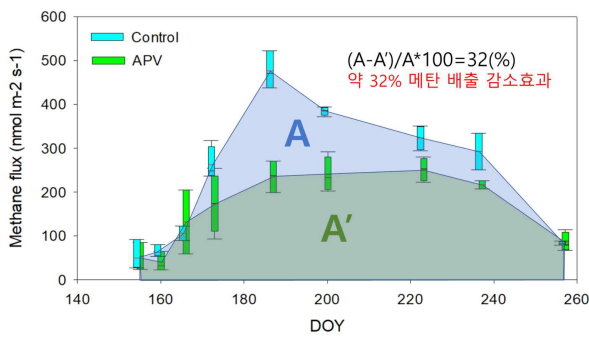
본인은 평가대상 과제에 대한 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 본 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

확약	
----	--

I. 연구개발실적

1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

	 <p style="text-align: center;">표준시비 구역의 대조구(A)와 태양광 하부(A')의 메탄 플럭스 면적을 이용한 배출 감소량 정량화</p>
<p>영농형 태양광 설비 하부 작물 생육 예측 모바일 앱 영농형 태양광 하부에 작물 생장이나 토양 등 환경 변화에 대한 기초적인 데이터가 부족하므로, 광범위한 데이터를 수집 하였으며, 특히 영농형 태양광 시설이 온실가스(메탄)가 감소 할 수 있다는 가능성을 확인 하였고, 작물모델 기반의 모바일 앱을 개발함.</p>	

2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

영농형 태양광 하부 작물 생육, 대기, 토양, 병충해, 안전성 등에 대한 광범위한 연구가 없기 때문에 중요한 영농형 태양광 하부 기초 연구 역할을 할 것으로 고려됨.
 영농형 태양광 하부에서 조건에서 메탄 배출 감소의 관찰은 온실가스배출 절감 정책 결정에 대한 정책자료로 사용 할 수 있음.
 모바일 플랫폼에서의 작물 모델은 추후 모바일 플랫폼에서 구동하는 작물모델 개발시 구조 및 인터페이스에서 참고 자료로 사용 할 수 있을 것으로 사료됨.

3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

태양광 시설 하부에 재배적합 작물 선정에 활용
 탄소 중립 정책시 정책자료로 활용
 영농형 태양광 하부 작물 생산성 및 환경 영향 평가 자료의 정책 참고자료로 활용
 영농형 태양광 시설 설계시 효율적 설계를 위한 참고자료로 활용
 본 연구로 개발된 영농형 태양광 모바일 앱을 작물 모델 교육시 교육 자료로 활용

4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

영농형 태양광 하부에 작물, 대기, 토양, 병충해, 안전성 등 다양한 측면에서 벼, 콩, 감자, 참깨등 다양한 작물을 대상으로 수행하여 데이터를 수집 하였으며, 수광량 예측 시스템을 개발 하였고, 작물 모델 기반 모바일 앱을 개발함.

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

SCI, 비 SCI 논문, 및 국내외 학술 발표 등을 하였으나 비 SCI 논문의 목표량을 채우지 못함.
 하지만 이미 출판 직전에 있는 논문(자세한 내용)들이 있으며, 모바일 앱개발 프로그램 등록 학술 발표등을
 하였고 연구자료를 이용 추가로 논문을 작성 예정임.

II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
영농형 태양광 하부 맞춤형 식량작물 재배기술 개발 (1공동)	15	100%	영농형 태양광 하부에 재식밀도와 시비 조건에 대한 반응을 실험 분석함.
영농형 태양광 하부 식량작물 최적 환 경 및 재배조건 개발 (2공동)	25	100%	영농형 태양광 하부에 작물, 환경의 반 응에 대한 데이터를 시험을 이용하여 수집 분석함.
영농형 태양광 활용 친환경 및 스마트 식량작물 재배 지원 기술 개발 (3공동)	30	100%	영농형 태양광 하부에 작물, 환경의 관 측 자료에 대한 데이터를 수집 분석함.
모바일 컴퓨팅 기반 영농형 태양광 시 설 하부 식량작물 생산성 예측 시스템 구축(주관)	30	100%	영농형 수광량 예측 시스템, 모바일 앱 을 개발함.
합계	100점		

III. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

영농형 태양광 조건에서 작물, 환경등에 대한 광범위한 연구로 향후 영농형 태양광에 대한 의사 결정시 참고
 할 가치가 있으며, 영농형 태양광 조건에서 재배가 메탄 절감으로 정책 자료로 참고 가능하며, 개발된 수광
 량 모의 시스템과 작물모델기반 모바일 앱 개발은 다양한 응용 가치가 있음.

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

현재 국내외적으로 연구가 잘 되어 있지 않은 영농형 태양광 하부에서 작물, 토양, 기타 환경 반응 대한 광범
 위한 자료수집과 메탄 절감 등을 실험적으로 관찰 또한 비전문가도 사용가능한 작물모델기반 모바일 앱의
 개발하여 작물 모델의 이용층을 넓힐수 있는 것에 대한 가치를 고려해야 함.

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

실험으로 수집 분석된 데이터를 영농형 태양광 조건에서 재배기술 향상, 정책 자료 활용을 해야 하며, 모바
 일 앱을 작물 모델에 대한 교육자료로 활용 할 수 있음.

IV. 보안성 검토

○ 연구책임자의 보안성 검토의견, 연구개발기관 자체의 보안성 검토결과를 기재함

※ 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	농림식품 융복합 > 농생명 에너지 자원 > 농생명 에너지 자원		
연구과제명	영농형 태양광 활용 식량작물 재배기술, 생육 모니터링 및 생산성 예측 시스템 개발				
주관연구개발기관	서울대학교		주관연구책임자	김광수	
연구개발비	정부지원 연구개발비	기관부담연구개발비	기타	총연구개발비	
	1,100,000,000	63,880,000	0	1,163,880,000	
연구개발기간	2021.04.01. ~ 2022.12.31				
주요활용유형	<input 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
①영농형 태양광 하부 맞춤형 재배기술 개발	벼 및 감자에 대한 재식 밀도, 파종일, 물관리 조건에 따른 영농형 태양광의 생육 영향이 규명됨.
②영농형 태양광 하부 식량작물 최적 환경 및 재배 조건 개발	태양광 설비 유형 등 벼 및 감자 주요 식량 작물에 대한 영농형 태양광 최적 재배 조건을 도출하였음.
③영농형 태양광 하부 친환경 및 스마트 재배지원 기술 개발	영농형 태양광 하부 작물 재배시 물 소비, 토양 탄소, 온실가스 배출 특성을 파악하여 기후변화 저감 및 수자원 이용 효율 증대 조건이 분석됨.
④모바일 앱 기반 영농형 태양광 하부 식량작물 생산성 예측 시스템 구축	영농형 태양광 시설의 차광률을 기반으로한 작물 생육 모의 및 의사결정 지원 정보를 제공하는 모바일 앱기반 시스템이 구축되었음.

* 결과에 대한 의견 첨부 가능

3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표								
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				기술인증	학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용·홍보		기타 (타 연구활용등)
	특허출원	특허등록	품종등록	S M A R T	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출		투자유치	논문 SCI	논문 비SCI			논문 평균평인 F	학술발표	
단위	건	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	명	건	건	
가중치		30					30							10			10	10	10
최종 목표		1					1					1	4		6		1	1	3

당해 년도	목표	1				1					1	4		6			1	1	3
	실적	1				(1)	0				1	2		10			1	3	1
달성률 (%)		100				100					100	50		100			100	100	33

210mm×297mm[(백상지(80g/m²) 또는 중질지(80g/m²)]

[별첨 2]

(22쪽 중 21쪽)

4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	영농형 태양광 하부 메탄 발생 저감 벼 재배 기술
②	모바일 앱 기반 영농형 태양광 하부 식량작물 생산성 예측 시스템
③	

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)	현장애로 해결	정책 자료	기타
①의 기술	○								○	
②의 기술	○							○		
③의 기술										
·										
·										

* 각 해당란에 v 표시

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	영농형 태양광 도입을 통한 벼 재배 시 메탄 발생 저감 효과를 통한 기후변화 저감 정책 지원
②의 기술	모바일 어플리케이션을 통한 영농형 태양광 도입 농가 교육 및 재배관리 의사결정 지원에 활용
③의 기술	

7. 연구종료 후 성과창출 계획

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				기술 인증	학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용·홍보		기타 (타연구 활용비)	
	특허 출원	특허 등록	품종 등록	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	논 문				학 술 발 표	정 책 활 용		홍 보 전 시
											SCI		비 SCI	논 문 평 균 I F						
단위	건	건	건	건	건	건	백만원	백만원	백만원	명	백만원	건	건		건	명	건	건		
가중치																				
최종목표		1					1					1	4		6			1	1	3
연구기간내 달성실적		1					1	0				1.2	1		10			1	3	1
연구종료후 성과창출 계획								0					2							

210mm×297mm[(백상지(80g/m²) 또는 중질지(80g/m²)]

[별첨 2]

(22쪽 중 22쪽)

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

핵심기술명 ¹⁾			
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	천원
이전방식 ²⁾	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타()		
이전소요기간		실용화에상시기 ³⁾	
기술이전시 선행조건 ⁴⁾			

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

성과 증빙 자료

한국농림기상학회지, 제23권 제3호(2021) (pISSN 1229-5671, eISSN 2288-1859)
Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology, Vol. 23, No. 3, (2021), pp. 141-148
DOI: 10.5532/KJAFM.2021.23.3.141
© Author(s) 2021. CC Attribution 3.0 License.



영농형 태양광 시설 하부 논에서의 농업환경 관측 및 시설 외부 환경과의 비교

강민석^{1*}, 손승원¹, 박주한¹, 김종호¹, 최성원¹, 조성식^{1,2}

¹국가농림기상센터, ²서울대학교 협동과정 농림기상학전공
(2021년 9월 3일 접수; 2021년 9월 27일 수정; 2021년 9월 29일 수락)

Agro-Environmental Observation in a Rice Paddy under an Agrivoltaic System: Comparison with the Environment outside the System

Minseok Kang^{1*}, Seungwon Sohn¹, Juhan Park¹, Jongho Kim¹,
Sung-Won Choi¹, Sungsik Cho^{1,2}

¹National Center for AgroMeteorology, 1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, South Korea

²Interdisciplinary Program in Agricultural & Forest Meteorology, Seoul National University,

1, Gwanak-ro, Gwanak-gu, Seoul 08826, South Korea

(Received September 3, 2021; Revised September 27, 2021; Accepted September 29, 2021)

ABSTRACT

Agrivoltaic systems, also called solar sharing, stated from an idea that utilizes sunlight above the light saturation point of crops for power generation using solar panels. It is expected that agrivoltaic systems can realize climate smart agriculture by reducing evapotranspiration and methane emission due to the reduction of incident solar radiation and the consequent surface cooling effect and bring additional income to farms through solar power generation. In this study, to evaluate that agrivoltaic systems are suitable for realization of climate smart agriculture, we conducted agro-environmental observations (i.e., downward/upward shortwave/longwave radiations, air temperature, relative humidity, water temperature, soil temperature, and wind speed) in a rice paddy under an agrivoltaic system and compared with the environment outside the system using automated meteorological observation systems (AMOS). During the observation period, the spatially averaged incoming solar radiation under the agrivoltaic system was about 70% of that in the open paddy field, and clear differences in the soil and water temperatures between the paddy field under the agrivoltaic system and the open paddy field were confirmed, although the air temperatures were similar. It is required in the near future to confirm whether such environmental differences lead to a reduction in water consumption and greenhouse gas emissions by flux measurements.

Key words: Agrivoltaic system, Rice paddy, Micrometeorology, Automated Meteorological Observing System (AMOS), Radiation balance



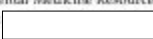
* Corresponding Author: Minseok Kang

Article

Crop Cultivation Underneath Agro-Photovoltaic Systems and Its Effects on Crop Growth, Yield, and Photosynthetic Efficiency

Hyo Jin Lee, Hyun Hwa Park, Young Ok Kim and Yong In Kuk * 

Department of Oriental Medicine Resources, Sunchon National University, Suncheon 57922, Korea

* Correspondence: 

Abstract: Agro-photovoltaics (APV) could be the optimal means of sustainable development in agricultural areas once a few challenges are overcome, perhaps the greatest of which is the constant shading from APV structures. This study examined how the growth and yield of rice, potato, sesame, and soybean crops could be optimized when grown underneath different APV systems. The solar radiation, shading levels, and temperatures during crop cultivation were measured. In addition, the photosynthetic efficiency was measured at different growth stages. Adjacent to the APV systems were the control plots with full sun. In these studies with potato crops grown under APV systems, most growth and yield parameters were similar to those grown in the control plot except for the plant height. On the other hand, sesame crops grown underneath the APV systems had a lower stem length, effective branching number, 1000 seed weight, and a reduced yield of 19% compared to the crops from the control plot. In two distant locations (Paju and Youngkwang), soybean crops grown underneath APV systems at both sites showed increased ungrained ratios per pod and a reduced yield of 18–20% compared to the control plot. Finally, rice crops cultivated underneath the APV systems had a lower panicle number per hill, spikelet number per panicle, 1000 seed weight, and yield reduction of 13–30% compared to the control plot. Overall, crops grown underneath the APV systems had a greater plant height and stem length. Moreover, the solar radiation and PAR underneath the APV systems were also lower than in the control plots. The photosynthetic efficacy in rice plants grown underneath the APV systems was lower than in the control plots. The photosynthetic efficacy may help lower the crop yield when cultivation is underneath an APV system.

Keywords: agro-photovoltaic; crop; photosynthesis; weather factor; yield



Citation: Lee, H.J.; Park, H.H.; Kim, Y.O.; Kuk, Y.I. Crop Cultivation Underneath Agro-Photovoltaic Systems and Its Effects on Crop Growth, Yield, and Photosynthetic Efficiency. *Agronomy* **2022**, *12*, 1842. <https://doi.org/10.3390/agronomy12081842>

Academic Editor: Xiangruan Li

Received: 7 July 2022

Accepted: 28 July 2022

Published: 4 August 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Fossil fuels are heavily relied upon as energy sources and are still the largest source of greenhouse gas emissions in the power generation sector [1,2]. On the other hand, to comply with the Paris Agreement and meet its objective of limiting global warming, the demand for establishing an alternative energy supply in the world has led to the use of renewable energy, which has favorable mitigating effects on carbon dioxide with minimal environmental impact [3–5]. Common renewable energy sources include biomass, hydropower, geothermal, wind, and solar. Furthermore, the development of renewable energy sources for replacing fossil fuels has become one of the major societal challenges in solving the energy and climate change crisis.

Among the renewable energy technologies available, photovoltaic power generation requires a huge land area which can no longer be used for agricultural applications. Photovoltaic systems have been adapted to reduce their negative effects on agriculture. The concept of the agro-photovoltaic (APV) system was introduced by Goetzberger and Zastrow [6] more than three decades ago. Since then, APV systems have become an innovative facility to encompass photovoltaic power production and crops in the same agricultural fields [4]. The Korean government is implementing APV systems in rural areas as part of

제 C-2022-042367 호



저작권 등록증

- | | |
|-----------------|---|
| 1. 저작물의 제호(명칭) | Agri Photovoltaic System Mapper (임농형태양광 열사광 매핑 시스템) |
| 2. 저작물의 종류 | 컴퓨터프로그램저작물>응용프로그램>과학기술>시뮬레이션 S/W |
| 3. 저작자 성명(법인명) | 서울대학교 산학협력단
서울특별시 관악구 관악로 |
| 4. 생년월일(법인등록번호) | 114371-0009224 |
| 5. 창작연월일 | 2022년10월17일 |
| 6. 공표연월일 | - |
| 7. 등록연월일 | 2022년10월31일 |
| 8. 등록사항 | 저작자 : 서울대학교 산학협력단,
창작 : 2022.10.17 |

「저작권법」 제53조에 따라 위와 같이 등록되었음을 증명합니다.

2022년 11월 02일

한국저작권위원회



3D 모형을 사용한 영농형 태양광 하부에서의 일사량 추정

김광수^{1,2*}, 박진유², 김태정¹, 김근효¹, 현신우¹

¹서울대학교 농업생명자원학부, ²서울대학교 농업생명과학연구원

Estimation of global solar radiation under the agrivoltaic system using a three dimensional model

Kwang Soo Kim^{1,2*}, Jin Yu Park², Tae Kyung Kim¹, Kunhyo Kim¹, Shinwoo Hyun¹

¹Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University,

²Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

국내 에너지 자립과 탄소중립을 지원하기 위해 영농형 태양광 설비가 농경지에 설치되고 있다. 태양광 설비 하부에 도달하는 일사량은 노지보다는 적기 때문에, 이를 파악할 경우 작물의 생산성을 추정할 수 있다. 본 연구에서는 태양광 설비의 3D 모형을 활용하여 작물 근각 상부에 도달할 수 있는 일사량을 추정하였다. 일사량 관측자료는 식량과학원 실험 포장에서 2019년과 2020년에 걸쳐 이루어졌다. 태양광 설비 하부의 15개 지점에서 측정된 일사량 값을 사용하여 시간별 평균값을 계산하였다. 또한, 태양광 상부에서 측정된 일사량 값을 사용하여 직달복사량과 산란복사량을 추정하였다. 태양광 설비 하부의 일사량을 추정하기 위해, 식량과학원에 설치된 태양광 설비의 3D 모형을 구축하였다. 이를 위해, 광추적 모의 모형인 *radiance*를 사용하였다. 시간별로 추정된 일사량을 작물모형이 구동되는 단위인 일별 일사량으로 계산하여 관측값과 비교한 결과, 상당히 낮은 수준의 오차가 얻어졌다. 각 하부 지점별 RMSE는 0.55~2.88 MJ 범위이었다. 결정계수의 경우, 대부분 0.9 이상의 값이 얻어졌다. 또한, 작물 생육에 영향을 줄 수 있는 작물재배 기간의 총 일사량값을 비교한 결과, 결속값이 많았던 지점을 제외하였을 때, 3D 모형을 사용하여 계산된 추정값이 관측값 변이의 약 69.5%를 설명하였다. 또한, 작물재배 기간 동안 계산된 RMSE와 NRMSE는 각각 17 MJ과 2.6% 이었다. 태양광 상부 관측값을 사용하여 태양광 하부 일사량을 추정하였기 때문에, 상당히 높은 신뢰도가 얻어졌으나, 대부분의 태양광 설비에서는 일사량이 측정되지 않고 있다. 따라서, 온도와 강수와 같은 일반적인 기상요소를 사용하여 추정된 일사량을 사용하여 태양광 하부 일사량을 추정하기 위한 기법이 개발되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업에너지자립형 산업모델 기술개발 사업의 지원을 받아 연구되었음 (321075-02-1-SB010)

* Correspondence to :

영농형 태양광 하부에 감자 및 콩 재배시 생육 및 수량 차이

국용인*, 김영옥, 황인택, 이효진
순천대학교

Differenes in Growth and Yield of Potato and Soybean under Agrophotovoltaic

Yong In Kuk^{*}, Young Ok Kim, In Taek Hwang, Hyo Jin Lee

Department of Oriental Medicine Resources, Suncheon National University, Suncheon 57922, Republic of Korea

영농형 태양광(Agrophotovoltaic, APV)은 농작물 재배지 상부에 태양광 패널을 설치함으로써 작물 재배와 함께 태양광 발전을 수행하여 농산물과 전기를 병행 생산하는 개념이다. 작물 초판이 흡수한 광량이 증가하면 작물 생장률(crop growth rate)은 거의 선형적으로 높아지므로, APV의 차광 효과에 따른 작물 생산량 감소는 필연적인 것으로 예상된다. 따라서 본 연구는 영농형 태양광 하부에 작물을 재배시 생육과 수량 감소 정도를 알아보기 위하여 수행되었다. 본 연구에 사용된 영농형 태양광은 감자 경우 충북 청주시에 설치된 99.9KW 고정식수동가변식과 분산형으로 차광율은 31%이었다. 콩의 경우 경기도 파주에 150KW 고정식 분산형이고(콩1), 또 다른 곳은 전남 영광에 97KW 고정식 지주형이다(콩2). 감자 품종은 수미, 재식거리 10 x 100cm, 검정비닐멀칭을 하였다. 콩1의 품종은 장단콩, 재식거리는 40 x 20cm, 기계파종하였다. 콩2의 품종은 내원콩, 재식거리는 70x 10cm, 기계파종하였다. 감자의 경우 영농형태양광 하부에서 초장은 대조구에 비해 1.6배 있으나 그 밖의 줄기수, 경직경, 염수, 열장 및 열폭은 큰 차이가 없었다. 포기당과경수와 포기당중량은 대조구에 비해 각각 22%와 13% 감소하였고, 총수량도 13% 감소하였다. 콩1의 경우 경장은 대조구에 비해 적었고, 질수는 유사한 경향이었다. 콩2의 경우에는서는 경장과 질수 모두 유사한 경향을 보였다. 추후 수확기에 수량 조사를 실시 할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 농림식품기술기획평가원 지원에 의해 수행됨(과제번호 321075021HD020)

REFERENCES

Sekiyama, T., and A. Nagashima, 2019: Solar sharing for both food and clean energy production: performance of agrivoltaic systems for corn, A typical shade-intolerant crop. *Environments* 6, 65.
Stephan, S., T. Maximilian, S. Albert, O. Tabea, G. Bopp, C. Reise, C. Braun, A. Weselek, A. Bauerle, P. Högy, A. Goetzberger, and E. Weber, 2020: Implementation of agrophotovoltaics:

* Correspondence to :

영농형 태양광 시설 하부 논에서의 농업환경 관측 및 시설 외부 환경과의 비교

강민석*, 손승원, 박주한, 김종호, 최성원, 조성식
국가농림기상센터

Agro-Environmental Observation in a Rice Paddy under an Agrivoltaic System: Comparison with the Environment outside the System

Minseok Kang*, Seung-Won Sohn, Juhan Park, Jongho Kim, Sung-Won Choi, Sunsik Cho
National Center for Agrometeorology, Seoul, South Korea

신재생에너지의 확산, 온실가스 감축 등의 내용을 포함하는 탄소중립을 위한 한국형 그린뉴딜이 현재 추진 중에 있으며, 농업분야도 예외는 아니다. 그린뉴딜, 탄소중립과 연관된 농업기상학분야의 최근 화두는 1) 지속가능한 생산력 및 소득의 증대, 2) 기후변화에 적응하는 탄력 구축, 3) 온실기체 배출의 감축을 동시에 추구하는 기후 스마트 농업의 실현으로, 세 가지 목표가 시너지를 낼 수도 있지만 보통은 트레이드-오프 인 관계로 현실에서 세 마리 토끼를 동시에 잡기란 쉽지 않다. 솔라 셰어링이라고도 불리는 영농형 태양광은 작물의 광보화질 이상의 태양광을 솔라 패널을 이용한 발전에 활용하는 개념으로, 밀려 태양광 차단에 따른 지면에 입사하는 태양복사 에너지의 감소로 인해 증발산량도 감소하고, 지면 냉각 효과로 벼단 배출량도 감소하는 효과를 가져올 수 있어 기후 스마트 농업을 구현할 수 있는 기술로 기대되고 있다. 본 연구에서는 과주 영농형 태양광 시설 하부 및 외부 논에 상/하향 정/단과 복사, 기온, 습도, 지온, 풍향, 풍속 등을 관측하는 자동기상관측장비를 설치하여 시설 하부와 외부의 농업환경을 비교함으로써, 영농형 태양광이 농가에게 태양광 발전을 통한 부가적인 수입을 안기면서 제세 시 발생하는 물 소비와 벼단 배출을 줄이는 기후 스마트 농업 실현에 적합한 농법인지를 평가해보았다. 예비 관측 결과를 보면, 연구 기간 동안 영농형 태양광 시설 하부의 평균 일사량은 논지 일사량의 약 65% 정도였으며, 영농형 태양광 시설 하부 논과 논지 논에서 기온의 차이는 거의 없지만 수온, 지온, 표면온도는 명확한 차이가 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부 농업에너지자립형 산업모델 기술개발사업(과제번호: 321075-02-1-CG000)의 지원으로 수행되었습니다.

* Correspondence to

PA-19

영농형 태양광 하부 기상환경 및 벼 생육 및 수량 분석

김영욱¹, 황인택¹, 이효진¹, 크윤인^{1*}

¹전라남도 순천시 중영로 순천대학교 생명산업과학대학 바이오한약자원학과

[서론]

영농형 태양광(Agrophotovoltaic, APV)은 작물 재배지 상부에 태양광 패널을 설치함으로써 작물 재배와 함께 태양광 발전을 수행하여 농산물과 전기를 병행 생산하는 개념이다. 작물이 성장하면서 흡수한 광량이 증가하면 일반적으로 작물 성장률(crop growth rate)은 거의 선형적으로 높아진다. 그러나 APV의 하부에 차광 효과에 따른 작물 생산량 감소가 예상된다. 따라서 본 연구는 영농형 태양광 하부에 작물을 재배시 생육과 수량 감소와 이들 생육과 수량 차이가 기상환경과 관련성을 알아보고자 하였다.

[재료 및 방법]

본 연구에 사용된 영농형 태양광은 전남 보성군 보성읍에 설치된 99KW, 개별분산형, 차광율 31.6%와 전남 순천시에 설치된 100KW, 저주형, 차광율 25% 및 전남 나주시에 설치된 107KW, 분산형, 차광율 32%를 보인 시설하에서 수행되었다. 보성은 5월 31일 청무늬, 순천은 5월 26일 새청무늬, 나주는 일미벼를 6월 15일 기계이앙하였다. 이앙 후 40일에 벼의 초장과 경수를 조사하였고 수확기에 수확기성요소와 수량을 분석할 예정이다. 그 밖의 재배방법은 표준재배법에 준하여 실시하였다. 태양광 하부에 기상환경은 8월에 태양방사, PAR, 대기온도, 수온 등을 측정하여 분석하였다.

[결과 및 고찰]

승주, 보성 및 나주에 설치된 영농형 태양광 하부에 벼 기계이앙 후 40일째에 초장과 분얼수를 조사하였다. 승주 영농형 태양광 하부에 초장은 대조구에 비해 6% 컸으나, 분얼수는 55% 감소하였다. 보성 영농형 태양광 하부에 초장은 대조구에 비해 7% 컸으나, 분얼수는 29% 감소하였다. 나주 영농형 태양광 하부에서도 초장은 대조구에 비해 13% 컸으나, 분얼수는 25% 감소하였다. 수확기에 수확기성요소 및 수량을 산출해 보아야 할 수 있겠지만 영농형 태양광 하부에서 벼의 분얼수는 태양광 조건에 따라 다소 차이를 보이지만 25-55% 감소하였다. 이러한 생육감소의 원인을 분석하기 위하여 기상환경을 조사한 결과 보성 영농형 태양광 하부에 태양방사(W/m²)는 대조에 비해 감소하였고, PAR도 영농형 태양광 하부에서 대조에 비해 감소 정도가 컸다. 그러나 대기온도와 수온은 영농형 태양광 하부와 대조구간에 차이가 없었다. 승주 영농형 태양광 하부에서도 보성과 유사하게 영농형 태양광 하부에서 대조구에 비해 태양방사와 PAR이 높았고, 기온과 수온에서는 차이가 없었다.

[사사]

본 논문은 농림식품기술기획평가원 공동연구사업(과제번호: 321075021HD020)의 지원에 의해 이루어진 것임.

*교신저자

[Redacted box]

영농형 태양광 하부 벼 재배 의사결정 지원을 위한 모바일 앱 개발

한상훈¹, 김광수^{1,2,3*}, 원신우², 강현구³, 서범석⁴

¹서울대학교 농업생명과학연구원, ²서울대학교 농업생명자원학부, ³서울대학교 식물생산과학부,

⁴국가농림기상센터

Development of a mobile application to aid decision-making on rice management under agrivoltaic systems

SangHoon Han¹, Kwang Soo Kim^{1,2,3*}, Shinwoo Hyun², Hyungu Kang³, Beomsook Seo⁴

¹Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, ²Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University, ³Department of plant science, Seoul National University, ⁴National Center for Agro Meteorology

동경지에 태양광 발전 설비가 설치되는 영농형 태양광은 식량과 에너지를 동시에 생산하여 토지 이용 효율을 높일 수 있다. 태양광 발전으로 농가 소득을 높일 수 있는 장점이 있으나 일사량 감소에 의해 작물 생산성이 감소하는 단점이 있다. 본 연구에서는 영농형 태양광 설비 하부에서 벼 생산성을 유지하기 위한 재배관리 의사 결정 지원을 위해 안드로이드 기반의 모바일 어플리케이션을 개발하는 것을 목표로 하였다. 영농형 태양광 하부에서 재배 지원을 위한 벼 생육 정보 시스템(ORYZa INformation System for AgriVoltaics: ORYZINS-AV)로 이름지어진 모바일 앱은 작물모델인 CERES-Rice를 기반으로 개발되었다. ORYZINS-AV는 사용자가 입력한 재배관리와 관련된 값들로부터 입력자료를 생성하고 작물 모델을 구동하여 주어진 조건에서 단위 면적당 생산량을 추정한다. 특히, 실시간 생육 모의를 수행하기 위해 사용자가 지정한 농장에서 최근일에 위치한 종관 기상관측소에서 관측된 기상자료를 기상청에서 수집한다. 특히, 현재와 과거 5년간의 기상자료를 다운로드받아 생육 모의에 활용한다. ORYZINS-AV의 사용자 인터페이스를 통해 관개 및 시비와 관련된 설정이 가능하다. 또한, 영농형 태양광의 차광율을 설정하여 태양광 설비 하부에서 일사량이 감소된 조건에서 작물 생육 모의를 수행할 수 있도록 개발하였다. 모바일 앱을 이용하여 전주지역을 대상으로 재식밀도와 중간낙수 시행에 따른 변화를 모의한 결과, 밀식 조건(90주/3.3m²)에서의 수량이 관행 조건(60주/3.3m²)의 수량보다 낮은 것으로 모의 되었다. 이러한 결과는 영농형 태양광 시설에 의한 낮은 광량에 더욱 민감하게 반응한 것으로 생각할수 있다. 중간낙수를 설정하였을 때, 재식밀도에 상관없이 1% 이내의 수량 감소가 발생하였다. 이러한 결과는 육묘 비용과 물관리에 대한 의사 결정 과정에 ORYZINS-AV 앱이 활용될 수 있음을 시사하였다. 작물 모델 기반의 모바일 앱이 보급된다면, 영농형 태양광 조건에서 작물 재배 노하우가 축적되어 있지 않은 다수의 농업인들이 비용 절감과 생산성 향상을 위한 재배관리 관련 의사결정을 지원받을 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업에너지자립형 산업모델 기술개발 사업의 지원을 받아 연구되었음 (321075-02-1-SB010)

* Correspondence to :

작물모형 입력자료용 일사량 추정을 위한 지역 특이적 AP 계수 평가

조영삼¹, 현신우², 김준환¹, 김광수^{1,2,4}

¹서울대학교 식물생산과학부, ²서울대학교 농업생명자원학부, ³국립한국농수산대학교, ⁴서울대학교 농업생명과학연구원

Assessment of region specific Angstrom-Prescott coefficients on uncertainties of crop yield estimates using CERES-Rice model.

Young Sang Joh¹, Shin Woo Hyun², Jun Hwan Kim³, Kwang Soo Kim^{1,2,4}

¹Department of Plant Science, Seoul National University,

²Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University,

³Korea National University of Agriculture and Fisheries,

⁴Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

작물 생산성을 예측하기 위해 일사량 측정값들을 대신하여 일조시간으로부터 추정된 값들이 사용되어 왔다. 이러한 추정값들은 DSSAT과 같은 작물모형의 입력자료로 사용하였을 때 생산성 예측값의 불확도를 높일 수 있다. 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 Angstrom Prescott 계수와 지역 특이적인 계수를 사용하여 추정된 일사량들을 비교하고, 이들을 입력자료로 사용하였을 때 얻어지는 작물 생육 모의값의 불확도를 비교하고자 하였다. 우선, 일사량 관측값(S_{obs})과 지역 특이적 모수(S_{reg}) 및 기후 특이적 모수(S_{reg})를 사용하여 일조시간으로부터 추정된 일사량을 비교하였다. 이들 자료를 입력자료로 하여 3개의 품종과 5개의 이앙일에 대하여 비의 생산성을 모의하였다. 일사량 관측값으로부터 얻어진 생산성 모의값(Y_{obs})과 일사량 추정값에서 얻어진 생산성 모의값을 비교한 결과 통계적으로 유의미한 차이가 발견되지 않았다. 예를 들어, S_{obs} 를 사용하여 얻어진 모의값 (Y_{obs})과 S_{reg} 로부터 얻어진 모의값(Y_{reg})들은 각각 Y_{obs} 와 유사한 값을 가졌다. 또한, Y_{obs} 와 Y_{reg} 간 NRMSE는 1% 미만으로 상당히 유사한 것으로 분석되었다. 지역특이적 AP 계수는 일정 지역의 장시간의 일사량 관측 자료를 통해 도출한 기후적인 특성을 반영하여 얻어지는 값이기 때문에, 시간적인 범위에 따라 변화할 수 있다. 보편적 AP 계수를 통한 추정이 지역특이적 AP 계수를 통한 추정과 불확도의 차이가 드러나지 않았다. 이러한 결과는 보편적 AP 계수를 사용하여 추정된 일사량이 작물모형에 대한 입력 자료로서 충분히 활용 가능하다는 점을 시사한다. 이는 국내외 복잡한 지형과 다양한 환경에서의 작물모형 구동의 난이도를 낮출 수 있을 것이라 기대한다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 제원으로 농림식품기술기획평가원의 농업에너지저장형 산업모델 기술개발 사업의 지원을 받아 연구되었음. (321075-02-1-SB010)

* Correspondence to:

영농형 태양광 시설이 논에서 발생하는 메탄 배출에 미치는 영향

최성원¹, 강민석¹, 김종호¹, 손승원¹, 조성식¹, 박주환¹

¹국가농림기상센터

Effects of Agrivoltaic Facilities on Methane Emissions from Rice Paddies

Sung-Won Choi^{1*}, Mirseok Kang¹, Jongho Kim¹, Seungwon Sohn¹, Sungsik Cho¹, Juhan Park¹

¹National Center for Agro-Meteorology

최근 영농 환경을 유지하면서 동시에 농가 소득의 증대를 도모할 수 있는 영농형 태양광 시설이 크게 늘고 있다. 농업 분야의 주요 온실가스 배출원인 논외의 경우, 영농형 태양광 시설이 구축되면서 일여 태양광 차단에 따른 태양복사 에너지의 감소로 인해 지면이 냉각되어 메탄 배출을 줄이는 효과를 가져올 수 있을 것으로 기대된다. 이 연구에서는 과주시 적성면 객현리의 영농형 태양광 시설이 갖춰진 논을 대상으로 시설의 하부와 외부에서 며 제재 기간 전체에 걸쳐 주기적으로 메탄 플럭스를 관측하여 그 효과를 분석하였다. 관측에는 미국 Licor사의 8200-1S 스마트 펌프 및 LI-7810 휴대용 기체분석기와 함께 자체 제작한 1m 높이의 투명 아크릴 원통이 사용되었으며, 측정 데이터는 SoilFlux Pro 소프트웨어를 이용하여 분석이 이루어졌다.

모내기가 끝난 6월 3일부터 추수 직전의 10월 18일까지 30여 회의 관측 결과를 살펴보면, 벼의 초기 생육 기간에 메탄 플럭스가 점차 증가하다가 7월 중순 중간낙수 이후에는 지속적으로 감소하는 패턴이 나타났다. 또한 임의의 분출(ebullition) 형태로 배출되는 메탄이 전체 플럭스에서 차지하는 비중이 매우 큰 것으로 나타나 벼의 통기조직을 통해 배출되는 메탄 플럭스만을 별도로 분리하여 최종 분석에 활용하였다. 영농형 태양광 시설의 하부와 외부의 대조구에서 각각 측정된 메탄 플럭스를 비교한 결과, 태양광 시설 하부의 메탄 배출량이 약 18 - 32% 정도 더 적은 것으로 산정되어 영농형 태양광 시설의 태양광 차단 효과가 메탄 배출의 감소로 이어지고 있음이 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 농림축산식품부의 재원으로 농림식품기술기획평가원의 농업에너지자립형 산업모델 기술개발사업(과제번호: 321075-02-1-HD030)의 지원을 받아 수행되었습니다.

* Correspondence to

Observation of Greenhouse Gas Emissions from a Rice Paddy under an Agrivoltaic System using a Closed Chamber

Sun-Won Choi ^{1*}, Minseok Kang ¹, Jongho Kim ¹, Seangwon Sohn ¹, Juhan Park ¹ and Sunguk Cho ¹

¹ National Center for Agro-Meteorology, Seoul, SOUTH KOREA

Contact: [Redacted]

INTRODUCTION

- Agrivoltaic systems, also called solar sharing, are based on the concept of adding sunlight above the light sensitive part of crops for power generation using solar panels.
- Due to the reduction of incident solar radiation and the subsequent surface cooling effect, it is expected that agrivoltaic systems can reduce climate smart agriculture by reducing soil respiration and methane emission.
- Methane is produced by methanogens in oxygen-poor environments, such as irrigated rice paddies.



¹ Agrivoltaic system in Paju, Korea
² Conceptual diagram: Impact of methane emission from rice paddy (modified from Kim et al., 2015)

METHODS

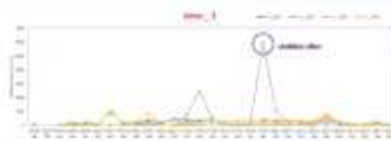
- A greenhouse gas (GHG) flux observation system was established for the rice paddy under and outside the agrivoltaic system in Paju, South Korea.
- It was designed to observe GHG fluxes using a portable gas analyzer (LI-7000 CH₄/CO₂/H₂O Trace Gas Analyzer, LI-COR, Inc., USA) and a closed chamber (RCX-13 Smart Chamber, LI-COR, Inc., USA).
- Since rice paddies primarily emit methane via diffusion within plant aerenchyma, a long cylindrical chamber with 6 fans for air circulation that can contain water that was separately manufactured.



³ GHG flux observation using a closed chamber in rice paddy

RESULTS & DISCUSSION

- Changes in methane emissions for each site according to the growth and development of rice



1 Under the agrivoltaic system, reduced fertilizer application

2 Under the agrivoltaic system, standard fertilizer application



¹ Single observation point (SOP)



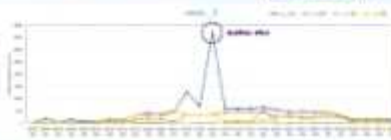
² Setting of observation sites: single observation point (SOP) and double observation point (DOP)



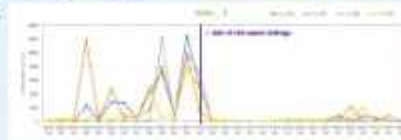
3 Under the agrivoltaic system, standard fertilizer application

4 Under the agrivoltaic system, reduced fertilizer application

³ Double observation point (DOP)



- Comparison of methane emissions between under and outside the agrivoltaic system



- Comparison of methane emissions according to the amount of fertilizer applied



SUMMARY

- The observation result over the entire rice cultivation period shows that the methane emission under the agrivoltaic system is lower than that outside the system.
- Initially, the methane flux in the reduced fertilization zone was high unexpectedly, but after the mid-season drainage, the flux in the standard fertilization zone tends to be higher.
- It has been demonstrated once again that mid-season drainage decreases methane emission from an irrigated rice paddy (Kim et al., 2015), and methane emissions from rice are still high can be up to several thousand times greater than those released through rice aerenchyma.

PA-35

다양한 영농형 태양광 하부와 관행 벼재배지에서 쌀 생산 및 품질 비교

박현화¹, 김영옥¹, 장인백¹, 국용인^{1*}

¹전라남도 순천시 중앙로 순천대학교 생명산업과학대학 바이오한약자원학과

[서론]

영농형 태양광(Agrophotovoltaic, APV)은 작물 재배지 상부에 태양광 패널을 설치함으로써 작물 재배와 함께 태양광 발전을 수행하여 농산물뿐만 아니라 전기를 생산할 수 있다. 작물은 흡수한 광량이 증가하면 일반적으로 생장은 증가하나 APV의 하부에서는 20-35% 직광으로 인하여 작물 생산량 감소가 예상된다. 따라서 본 연구는 다양한 영농형 태양광 하부의 벼 재배지에서 쌀 생산량과 품질을 관행 벼 재배지와 비교하고자 수행하였다.

[재료 및 방법]

본 연구에 사용된 영농형 태양광은 전남 보성에 설치된 99KW, 개별분산형, 차광율 31.6%와 전남 순천에 설치된 100KW, 지주형, 차광율 25% 및 전남 나주에 설치된 107KW, 분산형, 차광율 32%를 보인 시설향에서 수행되었다. 보성은 5월 31일 청무벼, 순천은 5월 26일 새청무벼, 나주는 일미벼를 6월 15일 기계이앙하였다. 수확기에 벼의 수량구성요소와 도정 후 쌀 품질 특성을 조사하였다. 그 밖의 재배방법은 표준재배법에 준하여 실시하였다.

[결과 및 고찰]

수확기 영농형 태양광 하부 간장은 대조구에 비해 보성과 나주 APV에서 유의적으로 컸으나, 승주에서는 차이가 없었다. 수량은 영농형 태양광의 시설에 상관없이 대조구와 유의적인 차이가 없었다. 승주의 경우 주당 수수는 태양광 하부에서 유의적으로 감소하였으나, 보성과 나주는 유의적인 차이가 없었다. 주당 입수에서도 승주의 경우 APV 하부와 대조구간에 유의적인 차이가 없었으나 보성과 나주 APV 하부는 대조구에 비해 유의적으로 감소하였다. 승주와 나주의 등숙률은 APV 하부와 대조구에 비해 유의적인 차이가 없었으나, 보성의 등숙률은 APV 하부에서 대조구에 비해 유의적으로 감소하였다. 전립중은 모든 APV 하부에서 유의적으로 감소하였다. 10a당 수량은 승주, 보성 및 나주 APV 하부에서 각각의 대조구에 비해 13%, 14% 및 30% 감소하였으며, 이러한 수량 감소는 수량구성 요소에 의해 기인되는 것으로 사료된다. 단백질 함량은 모든 APV 하부에서 대조구에 비해 다소 높았으나 취반미 윤기치는 떨어지는 경향을 보였다. 그 밖의 아미노스, 백도, 외관품질은 대조구와 차이가 없거나 일정한 경향이 없었다. 따라서 APV 하부에서 쌀 생산량 감소와 일부 품질에 부정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

[사사]

본 논문은 농림식품기술기획평가원 공동연구사업(과제번호: 321075022HD020)의 지원에 이루어진 것임

*Corresponding author

Weed Occurrence Patterns Underneath Agro-Photovoltaic Systems in Rice, Sesame, and Soybean Fields

Ye Geon Kim, Young Ok Kim, Yong In Kuk*

Department of Bio-oriental Medicine Resources, Suncheon National University,
Suncheon 57922, South Korea


Agro-photovoltaics (APV) could be the optimal means of sustainable development in agricultural areas once a few challenges are overcome, perhaps the greatest of which is the constant shading from APV structures. Although APV technology is being applied worldwide, there is very little accompanying scientific research to examine its impacts on agronomic parameters, such as weed occurrence. Thus, this study examined weed occurrence underneath APV systems in rice, sesame, and soybean fields. For this study, potato (Chungwon) and sesame (Paju) crops were planted at one facility each, whereas rice were planted at three APV facilities (Bosung, Naju, and Seungju). The shading rates of the APV used in this study ranged from 25% to 32%. In areas growing potato, three weed species were observed under the APV system and in the control plots at harvest. Of these weeds observed, one weed species (common lambsquarter) grew at a similar growth rate both under the APV system and in the control plots, whereas the other two species were different depending on their location. In soybean fields, 5 weed species were observed under APV systems and 8 weed species in the control plots. Furthermore, weeds growing in both APV systems and control plots had similar growth rates. In rice fields in Seungju, 6-7 weed species were observed in both APV systems and control plots. However, shoot fresh weight of *Sagittaria trifolia*, *Bidens frondosa*, *Eclipta prostrata*, *Monochoria vaginalis* and *Ottelia alismoides* in the control plots was higher than under APV systems. In rice fields in Bosung, *Ottelia alismoides*, *Eclipta prostrata*, *Bidens frondosa* were observed under APV systems, but were not observed in control plots. In rice fields in Naju, weed species were not observed in both APV system and control plots. This result means the occurrence of weed species varied depending on APV facilities.

Acknowledgements: This work was carried out with the support of "Cooperative Research Program for Agriculture Science & Technology Development (Project No. 321075022HD020)" Rural Development, Republic of Korea.

```
2023-01-01-19:00
insolation : 0.0
air temperature : 21.25
humidity : 21.66
/home/pi/Sensor/output/Images/2023-01-01/2023-01-01-19:00.jpg
b'post_ok'
2023-01-01-20:00
insolation : 0.0
air temperature : 21.18
humidity : 21.71
/home/pi/Sensor/output/Images/2023-01-01/2023-01-01-20:00.jpg
b'post_ok'
2023-01-01-21:00
insolation : 0.0
air temperature : 21.14
humidity : 21.38
/home/pi/Sensor/output/Images/2023-01-01/2023-01-01-21:00.jpg
b'post_ok'
2023-01-01-22:00
insolation : 0.0
air temperature : 21.85
humidity : 25.37
/home/pi/Sensor/output/Images/2023-01-01/2023-01-01-22:00.jpg
b'post_ok'
2023-01-01-23:00
insolation : 0.0
air temperature : 21.85
humidity : 25.37
/home/pi/Sensor/output/Images/2023-01-01/2023-01-01-23:00.jpg
b'post_ok'
pi@rasmaster:~/Sensor $ █
```


<첨부3>

농림축산식품 연구개발과제 제품출시 확인서

과제명	영농형 태양광 활용 식량작물 재배기술, 생육 모니터링 및 생산성 예측 시스템 개발			
주관연구기관	서울대학교	참여기관	서울대학교	
연구책임자	김광수	연구기간	21년 04월 - 22년 12월(총 2년)	
총 정부출연금	140,000,000 원			
해당 기술의 제품출시 유형				
시제품(제품출시 예정)	()	기존 제품 공정개선	()	
신제품(제품출시 완료)	(○)	기 타	()	
제품 출시 실적				
제품명	제품사진	제품용도	제품 출시일	해당 기술의 제품출시 기여율(%)
영농형 태양광 설비 하부 작물 생육 예측 지원 앱(APV)		영농형 태양광 설비 하부 작물 생육 예측 지원	23.02.14	100%
<p>• 첨부 : 당해연도 제품출시 여부를 확인할 수 있는 자료(제조년월일 표기사진, 제품등록번호 등) **식품R&D는 품목제조보고서 제출 필수</p> <p style="text-align: center;">상기와 같이 R&D 기술을 제품화한 실적을 보고합니다.</p>				

2023년 2월 21일

연구책임자 : 김광수 (서명  인)



On securing continuity of eddy covariance flux time-series after changing the measurement height: Correction for flux differences due to the footprint difference

Minseok Kang^{a,*}, Sungsik Cho^{a,b,1}, Jongho Kim^a, Seungwon Sohn^a, Youngryel Ryu^c,
Namgoo Kang^{d,e,1,*}

^a National Center for Agro Meteorology, Seoul DBS26, South Korea

^b Interdisciplinary Program in Agricultural and Forest Meteorology, Seoul National University, Seoul DBS26, South Korea

^c Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering, Seoul National University, Seoul DBS26, South Korea

^d Measurement Instrument and Data Verification Research Team, Advanced Measurement Instrumentation Institute, Korea Research Institute of Standards and Science, Daejeon 34113, South Korea

^e Major of Precision Measurement, KRISST School, University of Science and Technology, Daejeon 34113, South Korea

ARTICLE INFO

Keywords:

Flux
Eddy covariance
Long-term monitoring
Measurement change
Comparative observation

ABSTRACT

During long-term flux monitoring, we occasionally encounter situations where the existing measurement setup must be changed. Considering that one of the main purposes of long-term flux monitoring is identifying long-term variability and trends, which are relatively small, it is important to understand or correct for flux differences caused by the measurement setting changes. In this study, before changing the flux measurement height of the CRK (Cheorwon Rice paddy, Korea) site from 10 m to 5 m, we installed another eddy covariance system at 5 m and compared the sensible and H₂O/CO₂/CH₄ fluxes at both heights from April 2020 to April 2021. Although random errors could explain substantial portions of the flux differences between the two heights, it was confirmed that systematic errors also existed because the means of the flux differences were not zero, and the distributions of the flux differences were also significantly skewed. Further analysis showed that the primary cause of these systematic errors was the footprint differences rather than the difference in turbulent transport between the two heights. Based on the results, we proposed a strategy for securing the continuity of the flux time-series, which is necessary to understand the long-term variability using all data before and after a measurement change, and discussed the necessity of such a comparative observation.

1. Introduction

The measurement design for agricultural and forest meteorological observations can be changed with the observation's purposes, targets, and conditions. We may occasionally encounter situations where the existing measurement setup needs to be changed, particularly in long-term monitoring sites. For example, in the case of forests, the measurement heights for meteorological variables (e.g., air temperature and humidity, precipitation, and leaf wetness) may change depending on the canopy height and crown that change along with the growth of the stands. For flux measurement using the eddy covariance (EC) system, the following cases need consideration; (1) the type of gas analyzer may

be changed from an open-path EC system to a closed-path EC system to improve data retrieval rates during the wet season (e.g., Kang et al., 2019), (2) the measurement height of an EC system may be adjusted as the canopy height changes (e.g., Reumann et al., 2018) or lowered to narrow the flux footprint as the fetch is shorter due to land-use and land-cover changes (LULCC). Due to the aging tower structure during long-term monitoring, a new tower may be constructed around the site, and the EC system may be moved to a new location.

For a long-term monitoring site, one of the procedures that should be followed after changing the measurement design is to ensure the continuity of the time-series data. One of the greatest validity of long-term observations of ecosystem-atmosphere fluxes is to identify trends and

<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109339>

Received 27 April 2022; Received in revised form 16 January 2023; Accepted 20 January 2023

Available online 31 January 2023

0168-1923/© 2023 Elsevier B.V. All rights reserved.

작물모형 입력자료용 일사량 추정을 위한 지역 특이적 AP 계수 평가

조영상¹, 정재민¹, 현신우², 김광수^{1,3*}

¹서울대학교 식물생산과학부, ²서울대학교 농림생물자원학부, ³서울대학교 농업생명과학연구원
(2022년 9월 16일 접수; 2022년 11월 28일 수정; 2022년 12월 14일 수락)

Assessment of Region Specific Angstrom-Prescott Coefficients on Uncertainties of Crop Yield Estimates using CERES-Rice Model

Young Sang Joh¹, Jaemin Jung¹, Shinwoo Hyun², Kwang Soo Kim^{1,3*}

¹Department of Plant Science, Seoul National University

²Department of Agriculture, Forestry and Bioresources, Seoul National University

³Research Institute of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University

(Received September 16, 2022; Revised November 28, 2022; Accepted December 14, 2022)

ABSTRACT

Empirical models including the Angstrom-Prescott (AP) model have been used to estimate solar radiation at sites, which would support a wide use of crop models. The objective of this study was to estimate two sets of solar radiation estimates using the AP coefficients derived for climate zone (AP_{Tzone}) and specific site (AP_{Csite}), respectively. The daily solar radiation was estimated at 18 sites in Korea where long-term measurements of solar radiation were available. In the present study, daily solar radiation and sunshine duration were collected for the period from 2012 to 2021. Daily weather data including maximum and minimum temperatures and rainfall were also obtained to prepare input data to a process-based crop model, CERES-Rice model included in Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT). It was found that the daily estimates of solar radiation using the climate zone specific coefficient, S_{Tzone} , had significantly less error than those using site-specific coefficients S_{Csite} ($p < 0.05$). The cumulative values of S_{Tzone} for the period from march to September also had less error at 55% of study sites than those of S_{Csite} . Still, the use of S_{Tzone} and S_{Csite} as inputs to the CERES-Rice model resulted in slight differences between the outcomes of crop growth simulations, which had no significant difference between these outputs. These results suggested that the AP coefficients for the temperate climate zone would be preferable for the estimation of solar radiation. This merits further evaluation studies to compare the AP model with other sophisticated approaches such as models based on satellite data.

Key words: Angstrom-Prescott coefficient, Solar radiation, DSSAT, AP model, NRMSE



주요 키워드

승가가

[특집 PVMI 2022] 강민석 국가농림기상센터 부장, 태양광 하부 미기상 관측 시스템 연구결과 발표

AI타임스 기자 | 2022년 06월 17일 17:53 | 0 댓글 | 0 좋아요



강민석 국가농림기상센터 부장, PVMI서 강연
'영농형 태양광 하부 작물 관측 결과' 소개
'하부 비 성장속도, 노지 대비 7~10일 느려'



강민석 국가농림기상센터 부장이 13일 2022년 영농 마켓 인사이트(PVMI 2022)에서 태양광 하부 작물 관측 결과를 주제로 강연하고 있는 모습 (사진=AI타임스)

강민석 국가농림기상센터 부장은 13일 '2022 태양광 마켓 인사이트(PVMI 2022)'에서 태양광 하부 미기상 관측 시스템 구축을 주제로 강연했다. 강 부장은 이날 강연에서 국가농림기상센터의 '영농형 태양광 하부 작물의 생리·생육 관측 및 분석 결과'를 상세히 소개했다.

강 부장은 "현재 진행 중인 영농형 태양광 연구단지에는 경기도 파주시에 위치한 백 논과 충북 청주 오창에 있는 김자 밭 등 2곳이 있다"며 "이 곳에서 여러 기후를 조사하고 있다"고 말했다.

논의 경우 불 수위와 풍부한 관측, 밭의 경우 갈수계와 토양수분계를 설치해 연구하고 있다는 것이 강 부장의 설명이다. 강 부장은 "연구결과 영농형 태양광 하부의 일사량은 노지의 일사량의 70% 정도로 관측된다"고 말했다.

식생계절변동 연구결과도 참석자들의 관심을 끌었다. 강 부장은 "센서를 이용해 확인해본 결과 영농형 태양광 시설 하부의 생육은 노지보다 확실히 느리다는 것을 확인할 수 있었다"며 "비 성장속도는 7~10일 정도 느린 것으로 분석됐다"고 밝혔다.



[특집 PVMI 2022] 강민석 국가농림기상센터 부장, 태양광 하부 미기상 관측시스...

주간 인공지능



주간 인공지능
멀티모달로 무장한 책꽂이
출판하나

국내 최대 인공지능 빅데이터 비즈니스
AI & BIG DATA
2023 인공지능대회
28th Jun - 30th June
장기업체 모

그래픽



인공지능 공공 서비스 시장, 연
장 예측

포토





영농형 태양광 작물 재배 의사결정 지원 모바일 앱

기술보유기관 : 서울대학교
 연구자 정보 : 김광수 교수
 기술이전 상담 및 문의:



앱 사용 예시

기술 개요

- 본 기술은 영농형 태양광 설비가 설치되었거나 설치 예정인 농가를 대상으로 인근 기상관측소에서 측정된 과거 기상자료를 자동으로 다운로드 받아 태양광 설비 하부의 미기상 조건을 반영하여 작물의 생산성을 예측하는 기술임

기술개발 배경

- 농업인들의 의사결정을 지원하기 위해 손쉽게 사용할 수 있는 스마트 기기를 활용할 수 있는 작물 생산성 예측 기술 개발이 필요
- 다양한 재배관리 조건을 반영할 수 있고 사용이 편리한 사용자 인터페이스 구성이 필요

기술완성도

TRL 5단계 : 시제품 제작/성능평가

TRL1	TRL2	TRL3	TRL4	TRL5	TRL6	TRL7	TRL8	TRL9
개념의 타당성	실험목적 아이디어/특성명칭	연구실 규모의 실험 계획	연구실 규모의 실험 시스템 검증 평가	시제품 제작/성능평가	TRL5단계 시제품 상용평가	TRL6단계 시제품 신뢰성 평가	시제품 인증/표준화	사업화

기술의 특징점

- 과거 5년간의 기상자료를 농장 인근 기상관측소로부터 기상청을 통해 자동 수집
- 재배관리 설정 메뉴를 통해 작물의 주요 재배관리에 대한 모델 입력자료 구축
- 과거 5년간의 생육 추정 결과의 비교 결과 자동 생성
- 어플리케이션 주요 구성
 - 농장 선택 및 경운/이랑 설정
 - 비료 관리 설정
 - 관개 및 수확 관리 설정
 - 작물 생산량 추정





양 식	정책건의/시행	※ 정부시책, 법령개정, 매뉴얼(지침), 시스템 반영 등	
과제명	영농형 태양광 활용 식량작물 재배기술, 생육 모니터링 및 생산성 예측 시스템 개발 (321075-02-2-SB010)		
건의명	재생에너지 확대 및 탄소중립 제고를 위한 영농형 태양광 구축 지원		
주관부처 (담당자)	농림수산식품부 농촌정책국 농촌재생에너지팀	건의일자 (제출일)	2022년 12월 09일
시책명		시행일 (시행예정일)	년 월 일
주요내용 요약	<ul style="list-style-type: none"> ○ 친환경 직불금 지급 요건 중 영농형 태양광 지원을 위한 항목 추가 • 농지의 형상 및 기능 유지 조건에 영농형 태양광 하부에서 작물 재배 항목 추가 • 농지면적 제한 항목에서 영농형 태양광 설치면적을 제외 • 친환경 직불금을 영농형 태양광 발전에 따른 소득으로 대체 <ul style="list-style-type: none"> - 농업·농촌 공익기능 증진 직접지불제도 운영에 관한 법률 시행령 [시행 2022. 8. 18.] [대통령령 제32635호, 2022. 5. 9., 타법개정] ○ 재생에너지 목표 및 NDC 달성을 위한 발전량 및 온실가스 모니터링 및 예측 • 실증 농가 대상으로 발전량 및 온실가스 배출량 모니터링 • RE100 기업 대상 발전량 및 온실가스 배출량 예측 및 전망 		
기대효과	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 영농형 태양광 보급으로 논에서의 메탄 발생량 감축 및 NDC 목표 달성 ◦ 영농형 태양광을 통한 발전 소득으로 농가 소득 향상 ◦ 영농형 태양광 하부에서의 물 사용량 감소로 수자원 관리 효율화 ◦ 재생에너지 확대에 기업체 RE100 달성 지원 		
증빙자료 1 (하단별첨)	※ 제출 공문 및 건의내용		
증빙자료 2 (하단별첨)	※ 정부시책 및 법령(개정) 결과물 등		

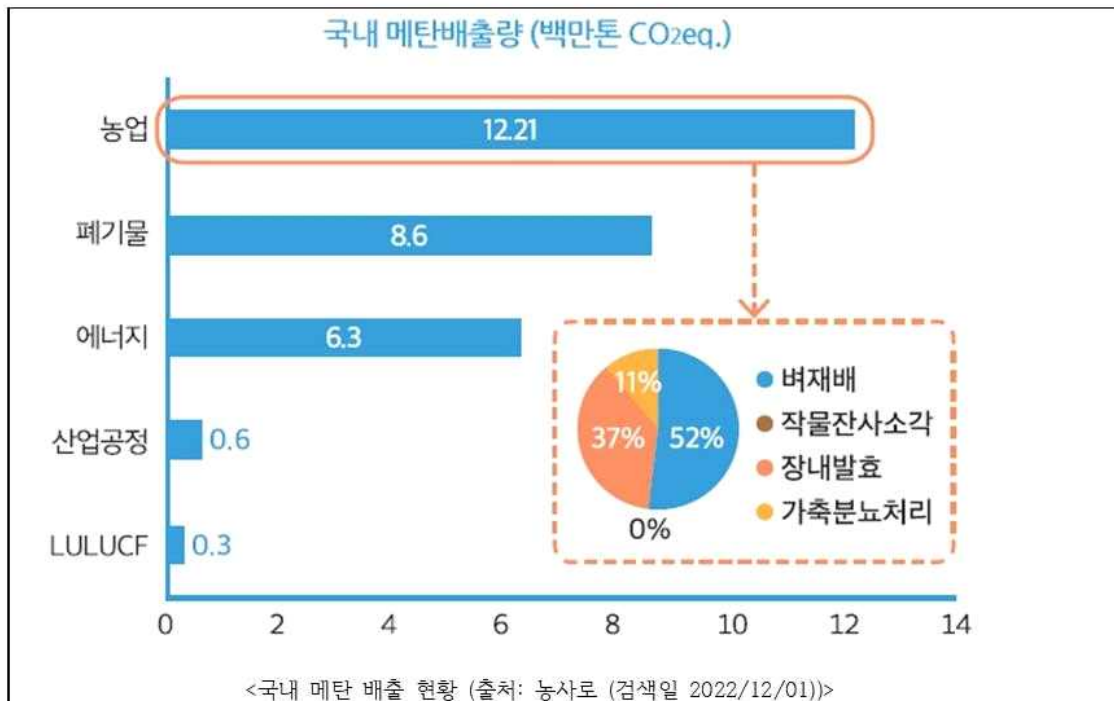
<증빙자료 1>

건의내용	
정책자료	
제목	재생에너지 확대 및 탄소중립 제고를 위한 영농형 태양광 구축 지원
활용가능부서	농림수산식품부 농촌정책국 농촌재생에너지팀
건의분야	벼
제안내용요약	<ul style="list-style-type: none"> • 국내 메탄 배출량의 20%가 벼 재배로 인해 발생하고 있음. • 적절한 관개 관리와 시비 관리를 통해 메탄 발생량을 저감할 수 있음. • 영농형 태양광은 태양광 발전과 식량 생산을 동시에 수행할 수 있어 토지 이용 효율을 높일 수 있는 장점이 있음. • 농림수산식품부 지원을 받아 연구를 수행한 결과 영농형 태양광 하부에서 메탄 발생이 33% 감소될 수 있음을 확인하였음. • 관개 관리와 시비관리와 함께 영농형 태양광을 확산할 경우 우리나라가 국제 메탄 서약에 가입하며 약속한 메탄 방출량을 감축을 실현할 수 있음. • 영농형 태양광을 단순히 재생에너지 확대뿐만 아니라 메탄 발생 감축 및 수자원 효율화의 측면에서 고려되어야 함. • 영농형 태양광을 통한 온실가스 감축을 위해 설치를 위한 정책자금 지원이나 벼 재배 시 친환경 직불금과 같은 지원을 제안함. • 영농형 태양광 하부에서의 온실가스 감축 및 물 사용량 감축과 관련한 과학적인 근거를 확보하기 지속적인 관측 및 예측 관련 R&D 확대를 제안함.
연구개발자	서울대학교 농림생물자원학부 김광수 (전화 : 010-2927-5609, e-mail : luxkwang@snu.ac.kr)



1. 제안 배경

- (온실가스 감축 서약) 유엔기후변화협약(UNFCCC)이후 국내 사정을 고려하여 온실가스 감축을 국제적으로 약속하였음
- (40% 온실가스 감축 목표) 2021년 10월 영국 글래스고에서 개최된 COP26에서 우리나라는 2030년까지 2018년 대비 40%를 감축하는 목표를 발표하였음.
- (농업에서 메탄 배출의 44% 발생) 국내 온실가스 배출량 중 메탄의 경우 발생량의 44%는 농업 분야에서 발생함.
- (국내 농업분야 메탄 배출의 52%는 벼 재배에서 발생) 농업 분야에서 발생하는 메탄의 52%는 담수조건에서 벼를 재배하여 발생함.
- (토지 이용효율 제고를 위한 영농형 태양광) 영농형 태양광은 농경지 상부에 태양광 발전 패널을 설치하여 전력생산과 식량생산을 동시에 수행할 수 있어 토지 이용 효율을 높일 수 있음.

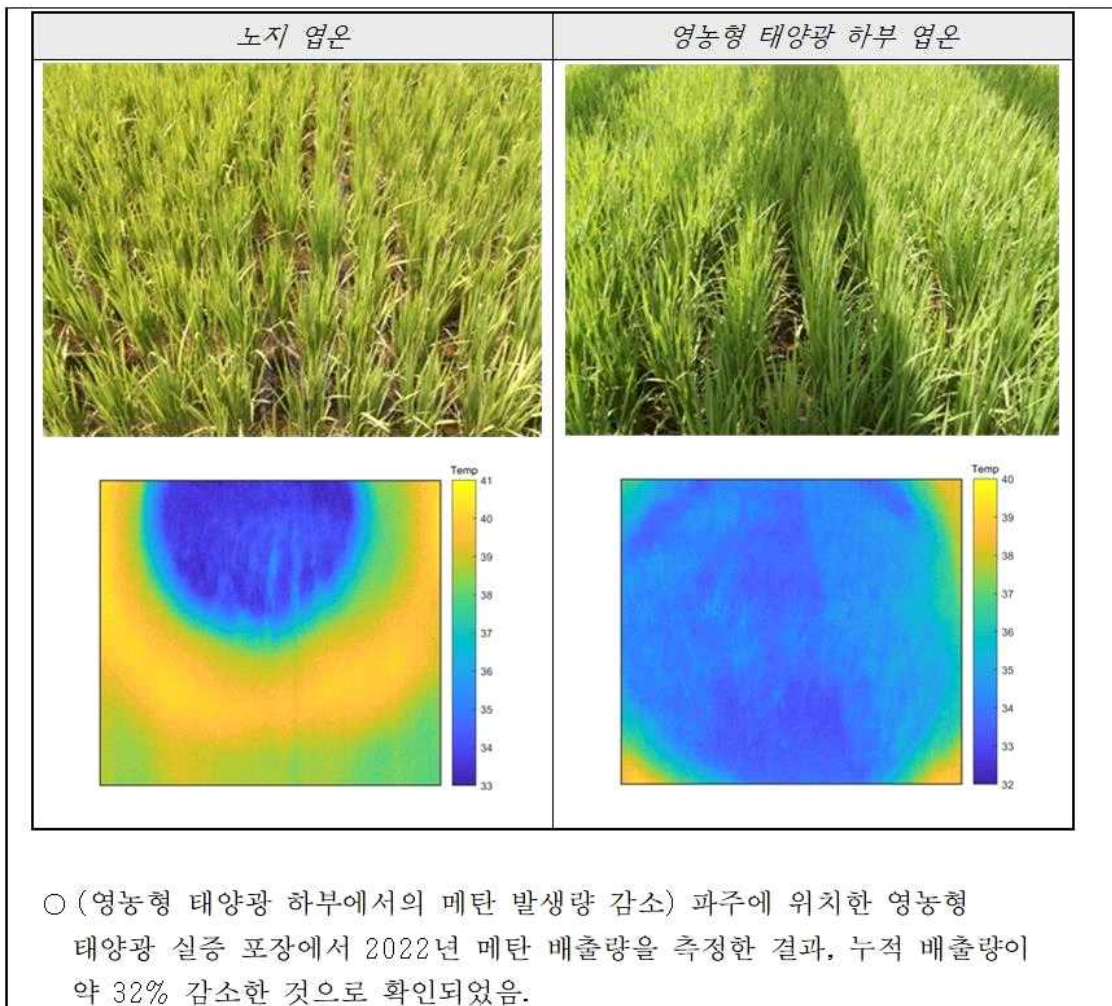


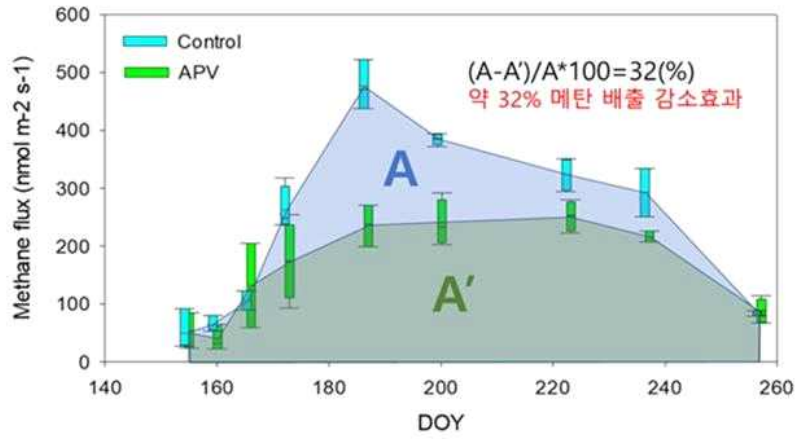
2. 제안 내용

- 친환경 직불금 지급 요건 중 영농형 태양광 지원을 위한 항목 추가
 - 농지의 형상 및 기능 유지 조건에 영농형 태양광 하부에서 작물 재배 항목 추가
 - 농지면적 제한 항목에서 영농형 태양광 설치면적을 제외
 - 친환경 직불금을 영농형 태양광 발전에 따른 소득으로 대체
 - 농업·농촌 공익기능 증진 직접지불제도 운영에 관한 법률 시행령 [시행 2022. 8. 18.] [대통령령 제32635호, 2022. 5. 9., 타법개정]
- 재생에너지 목표 및 NDC 달성을 위한 발전량 및 온실가스 모니터링 및 예측
 - 실증 농가 대상으로 발전량 및 온실가스 배출량 모니터링
 - RE100 기업 대상 발전량 및 온실가스 배출량 예측 및 전망

3. 연구결과

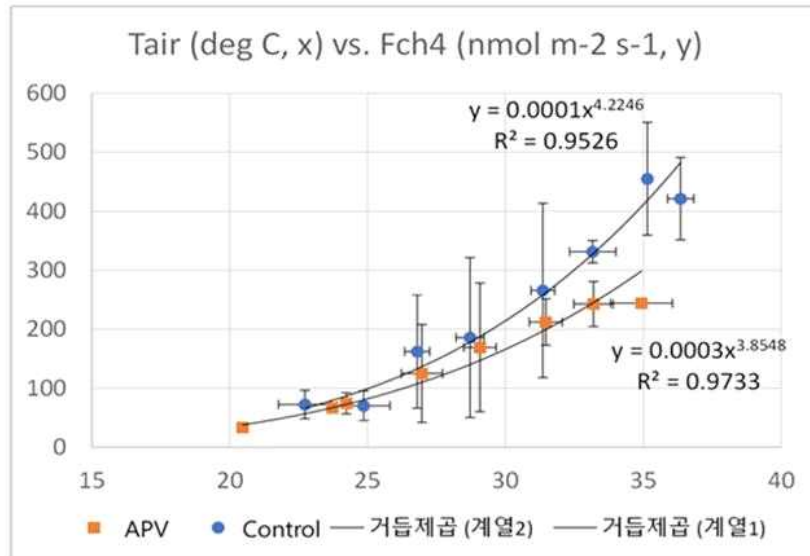
- (영농형 태양광 하부의 미기상 변화) 영농형 태양광 하부에서 발생하는 일사량 감소는 지온, 수온 및 엽온이 낮아지는 등 미기상 변화를 초래함





< 표준시비 구역의 대조구(A)와 태양광 하부(A')의 메탄 플럭스 면적을 이용한 배출 감소량 정량화 >

○ (온도조건에 따른 메탄 발생량 감소) 기온 온도별로 영농형 태양광 하부와 노지 조건에서의 메탄 배출량을 비교한 결과, 온도가 높아짐에 따라 영농형 태양광 하부에서의 배출량 감소가 확연하게 나타났음.



< 관측된 메탄 플럭스의 온도 반응 곡선을 이용하여 추정된 배출 감소량 정량화 >

4. 파급효과

- 영농형 태양광 보급으로 논에서의 메탄 발생량 감축 및 NDC 목표 달성
- 영농형 태양광을 통한 발전 소득으로 농가 소득 향상
- 영농형 태양광 하부에서의 물 사용량 감소로 수자원 관리 효율화
- 재생에너지 확대로 기업체 RE100 달성 지원

5. 연구개발과제정보

건의제목	재생에너지 확대 및 탄소중립 제고를 위한 영농형 태양광 구축 지원
활용부서 및 담당자	농림수산식품부 농촌정책국 농촌재생에너지팀
연구개발과제명	영농형 태양광 활용 식량작물 재배기술, 생육 모니터링 및 생산성 예측 시스템 개발 (321075-02-2-SB010)
연구개발자	서울대학교 농림생물자원학부 김광수
공동개발자	국가농림기상센터 계측관리부 강민석, 한국농수산대학교 작물산림학부 김준환

모니터링 및 예측 과제 예산 산출 내역

(단위: 천원/년)

관	항	세목	금 액	산 출 근 거
직접비	인건비	내부 인건비 및 학생인건비	469,786	대학교1: 내부인건비 68,973, 학생인건비 57,200 대학교2: 내부인건비 120,000, 학생인건비 7,500 관측기관1: 내부인건비 129,673 영농법인1: 86,440
	연구장비·재료비	연구장비	235,850	워크스테이션: (5,600) 작물 재배 모니터링 센서: 60,250 에디 공분산 관측 장비 (85,000) x 2 * 관측장비가 시스템당 2억으로 3년 분할 계상
	연구활동비		145,133	여비: 24,672 수용비 및 수수료: 8,707 전문가 활동비: 14,513 시험 분석비: 65,309 논문게재료: 7,256 세미나 개최비: 17,415 클라우드 사용비: 7,256
	연구수당	연구수당	104,571	인건비 x 20% 이내
간접비	간접비	간접비	172,122	직접비 x 27.84%
계			1,127,462	3년간 연구 수행시 3,382,386 천원 소요

From To Cc	Reply Reply All Forward Archive Junk Delete More	2022-12-09 오전 11:53
Subject: 영농형 태양광 매단 관측 관련 정책제안 자료		
<p>안녕하세요 정세희 사무관님,</p> <p>어제 (12월 8일) 회의에서 사용한 자료 수정 보완한 자료 보내드립니다.</p> <p>말씀드린 것 처럼 영농형 태양광 하부에서 메탄발생이 감소되는 것으로 관측되어서 이를 근거로 시행할 수 있는 친환경 직불금 관련 정책에 대해 제안드립니다.</p> <p>아직까지는 1개 사이트에서 1년 관측 자료이기 때문에 과학적인 근거가 부족하기 때문에 추가적인 관측에 대한 내용을 정책제안에 포함하였고, 관련 예산 근거 자료도 첨부하였습니다.</p> <p>감사합니다.</p> <p>김광수 드림.</p>		
> 1 attachment: 매단_정책자료_제출본.hwp 1.0 MB Save		

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 농업에너지 자립형산업모델 기술개발 사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 농업에너지 자립형 산업모델 기술개발 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다