

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

발간등록번호

11-1543000-004721-01

스마트 온실의 순환식 수경재배 시스템 개발

2024. 5. 28.

주관연구기관 / 시설원예연구소
공동연구기관 / 경기도농업기술원
한국과학기술연구원
서울대학교 산학협력단
(주)신한에이텍

농림축산식품부
과학기술정보통신부
농촌진흥청
(전문기관)농림식품기술기획평가원
스마트팜연구개발사업단

최종보고서										보안등급		
										일반[<input checked="" type="checkbox"/>], 보안[<input type="checkbox"/>]		
중앙행정기관명		농림축산식품부 과학기술정보통신부 농촌진흥청			사업명	사업명		스마트팜 다부처 패키지 혁신기술 개발사업				
전문기관명		농림식품기술기획평가원 (재)스마트팜연구개발사업단				내역사업명		스마트팜 실증 및 고도화 연구사업				
공고번호		제농축 2021-45호			총괄연구개발 식별번호							
					연구개발과제번호		421006-03					
기술분류	국가과학기술 표준분류	LB0203	60%	LB0805	30%	LB0904	10%					
	부처기술분류	AA0203	40%	CA0301	30%	RC0102	30%					
총괄연구개발명		국문	스마트 온실의 순환식 수경재배 시스템 개발									
		영문	Development of Recycling Hydroponic Cultivation System for Smart Greenhouse									
연구개발과제명		국문	스마트 온실의 순환식 수경재배 시스템 개발									
		영문	Development of Recycling Hydroponic Cultivation System for Smart Greenhouse									
주관연구개발기관		기관명	국립원예특작과학원 시설원예연구소			사업자등록번호		622-83-00614				
		주소	경남 함안군 함안면 진함로 1425			법인등록번호						
연구책임자		성명		최경이		직위		농업연구사				
		연락처	직장전화				휴대전화					
			전자우편				국가연구자번호					
연구개발기간		전체		2021. 04. 07 - 2023. 12. 31(2년 9개월)								
		단계)	1단계		2021. 04. 07 - 2022. 12. 31(1년 9개월)							
			2단계		2023. 01. 01 - 2023. 12. 31(1년 개월)							
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계		연구개발비 외 지원금	
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물		합계
총계		1,750,000	8,680	114,820					1,758,680	114,820	1,873,500	
1단계	1년차	550,000		36,700					550,000	36,700	586,700	
	2년차	600,000	4,340	39,060					604,340	39,060	643,400	
2단계	1년차	600,000	4,340	39,060					604,340	39,060	643,400	
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명		책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고		
										역할	기관유형	
공동연구개발기관		경기도농업기술원		황지은	연구사					공동	정부부처	
		한국과학기술연구원		이주영	책임연구원					공동	정부출연연	
		서울대학교 산학협력단		김학진	교수					공동	대학	
		(주)신한에이텍		장재욱	연구소장					공동	중소기업	
위탁연구개발기관		(주)두인바이오텍		남희섭	대표					위탁	중소기업	
연구개발담당자 실무담당자		성명		최경이		직위		농업연구사				
		연락처	직장전화				휴대전화					
			전자우편				국가연구자번호					

제 출 문

농림축산식품부 장관 · 과학기술정보통신부 장관 · 농촌진흥청장 귀하

본 보고서를 “스마트 온실의 순환식 수경재배 시스템 개발”(개발기간 : 2021. 4. ~ 2023. 12.) 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2024. 5. 28.

주관연구기관명 : 국립원예특작과학원 시설원예연구소 김강철 (인)

공동연구기관명 : 경기도농업기술원

한국과학기술연구원

서울대학교 산학협력단

㈜신한에이텍

위탁연구기관명 : ㈜두인바이오텍

주관연구책임자 : 최경이

공동연구책임자 : 황지은, 이주영, 김학진, 장재욱

위탁연구책임자 : 남희섭

「국가연구개발혁신법」 제17조에 따라 보고서 열람에 동의 합니다.

< 요약 문 >

사업명		스마트팜 다부처패키지 혁신기술개발사업			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)			-
내역사업명 (해당 시 작성)		스마트팜 실증 및 고도화 연구사업			연구개발과제번호			421006-03
기술 분 류	국가과학기술 표준분류	LB0203	60%	LB0805	30%	LB0904	10%	
	부처기술분류 (해당 시 작성)	AA0203	40%	CA0301	30%	RC0102	30%	
총괄연구개발명 (해당 시 작성)								
연구개발과제명		스마트 온실의 순환식 수경재배 시스템 개발						
전체 연구개발기간		2021. 04. 07 - 2023. 12. 31(2년 9개월)						
총 연구개발비		총 1,873,500 천원 (정부지원연구개발비: 1,750,000천원, 기관부담연구개발비 : 123,500천원)						
연구개발단계		기초[] 응용[<input checked="" type="checkbox"/>] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]			기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준(5) 종료시점 목표(8)	
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)								
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)								
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		<ul style="list-style-type: none"> ○ ICT 기반 순환식 수경재배의 양액관리 기술 개발 및 실증 <ul style="list-style-type: none"> • 농가의 기존 기술인프라(EC 기반) 활용 이론적·기술적 호환성(순환식 수경재배 양분 제어의 이론적 체계 구축), 범용성, 확장성(이온 모니터링 기술)을 갖춘 복합적 양분관리 기술체계 구축 • 지속가능한 친환경 수경재배 구현을 위하여 비순환식 체계를 대체할 수 있는(농가 기술수용저항요인 최소화) 순환식 배액 살균 및 양분 관리 기술 개발 필요 					
	전체 내용		<ul style="list-style-type: none"> ○ 순환식 수경재배 배액 살균 및 양분 균형관리의 이론, 기술, 실증, 산업화, 보급화 <ul style="list-style-type: none"> • 선행연구 및 보유기술을 바탕으로 기존 기술과 인프라를 활용 이론적·기술적 호환성, 범용성 그리고 기능 고도화를 위한 확장성을 갖춘 복합적 기술체계를 구축하여 환경 친화적인 순환식 수경재배 배액 살균 및 양분관리를 위한 연구개발 ○ 이온 모니터링 유지관리 성능 최적화 ○ 이온센서 신뢰도·안정성 제고 및 이온선택성 전극 대량생산 프로토콜 구축 ○ 제품화 수준의 UV 살균 시스템 운용관리체계 구축 ○ 복합 양분 관리 플랫폼 기반 제어체계 구축 ○ 순환식 수경재배 시스템 현장 실증 					
	1단계	목표	○ 순환식 수경재배시스템 산업화 전환을 위한 기술 체계화 단계로 양액 모니터링 및 순환식 수경재배 시스템 개발					
		내용	○ 순환식 수경재배 시의 양분 변화, 식물 생육 데이터 모니터링					

			<ul style="list-style-type: none"> • 과채류 및 엽채류의 순환식 수경재배시 양분변화 양상 분석 및 양분의 변화와 작물의 생육연계성 분석 ○ 복합 양분관리 플랫폼 구축 <ul style="list-style-type: none"> • 여러 양분 분석 데이터 소스(분석의뢰(EC기반)-주단위/배액 양분 빅데이터(EC기반)/이온센서-실시간)에 따라 양분 관리가 가능한 순환식 수경재배 양분 관리 플랫폼 구축 ○ ISE 센서와 임베디드 보드 기술을 활용한 양액 및 배액 내 이온 농도 실시간 모니터링 기술 최적화 <ul style="list-style-type: none"> • Na 및 특정 이온 성분 축적 시 환경 부담 최소화를 위한 염 보충량 제어 및 양액 재사용 비율 조정 알고리즘 개발 • 퍼지제어를 통한 정밀 비료 공급 알고리즘 개발 • 장기 사용 조건에서의 기술 개선점 도출 및 유지관리 요인 선발 ○ UV 살균 시스템 운용관리체계 구축
	2단계	목표	○ 양액 모니터링 및 순환식 수경재배 시스템 실증 및 산업화
		내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 1단계를 통해서 구축된 기술체계를 바탕으로 산업화 기술로 연계될 수 있도록 실증과 산업화에 초점을 맞추어 진행 ○ 순환식 수경재배 농가 장기사용체계 및 이온선택성 전극 대량생산 프로토콜 구축 ○ 제품화 수준의 UV 살균 시스템 운용관리체계 구축 ○ 복합 양분 관리 플랫폼 제어체계 구축 ○ 순환식 수경재배 시스템 현장 실증

연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 순환식 수경재배 시의 양분 변화, 식물 생육 데이터 모니터링 <ul style="list-style-type: none"> • 순환식 수경재배 과채류(토마토, 파프리카) 및 엽채류(로메인, 카이피라) 재배 기간의 이온변화 분석 • 개발 순환식 양분 균형제어 알고리즘 적용 적합성 검증 • 양분균형제어 알고리즘 적용 실증 재배 및 생산성 연계성 분석 • 엽채류(2작목) 작물별 순환식 수경재배 시스템 현장 실증 ○ 복합 양분관리 플랫폼 구축 <ul style="list-style-type: none"> • 배지 이온 집적량 변화, 양분 흡수 매커니즘, 필수원소 정상상태 제어 시뮬레이션 통합 모델 구축 • 배액 양분 빅데이터 기반 작물별 화학량론적 특성 추출 및 양분제어 알고리즘 개발 • 배액 재사용률별 시스템의 양분 균형 제어 알고리즘 컨버전 및 플랫폼 탑재 • 여러 양분 분석 데이터 소스(분석의뢰(EC기반)-주단위/배액 양분 빅데이터(EC기반)/이온센서-실시간)에 따른 순환식 수경재배 양분 관리 플랫폼 구축 ○ ISE 센서와 임베디드 보드 기술을 활용한 양액 및 배액 내 이온 농도 실시간 모니터링 기술 최적화 <ul style="list-style-type: none"> • 이온선택성 전극 센싱 정밀도 고도화 • 임베디드 시스템형 이온 모니터링 플랫폼 설계 및 시스템 구축 • 인공지능 기반 정밀 비료 공급 알고리즘 개발 • 순환식 수경재배 플랫폼 적용 검증 실험 장치 개발 ○ UV 살균 시스템 운용관리체계 구축 <ul style="list-style-type: none"> • UV 살균시스템 여과모듈의 적정 역세척 시간 산정 및 운영 소프트웨어 반영
--------	---

	<ul style="list-style-type: none"> UV 살균시스템의 장기 사용 조건의 유지관리요인 조사 및 관리 알고리즘 개발 와류형 UV 살균시스템 장기 사용 조건에서의 유지관리 기술 최적화 및 체계화
연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 활용계획 <ul style="list-style-type: none"> (혁신밸리사업 연계) 양분균형관리 및 양액제어기술이 탑재된 순환식 수경재배 시스템 개발을 통한 경남/경북/전북스마트팜혁신밸리 연계를 통해 실증과 산업화를 진행할 예정 (빅데이터 연계) 순환식 수경재배 적용 테스트베드 및 혁신밸리에서 체계적으로 수집된 실시간 이온정보, 급배액정보, 근권부환경데이터 등을 농축산식품부 빅데이터 플랫폼과 연계하여 온실관리서비스 지원 예정 (정책 연계) 순환식 수경재배 보급을 위한 농식품부 농산업정책과의 연계하여 저비용·고효율 제품 보급 및 활성화 방안 마련 ○ 기대효과(기술적 측면) <ul style="list-style-type: none"> 안전한 살균시스템과 양액균형제어 기술 확보로 한국형 순환식 수경재배 및 디지털 농업기술 보급 확산에 기여 개발 시스템 및 제어알고리즘 적용으로 생리장해 대응 기술 확보 양액 재이용 기술 적용을 통한 스마트 온실에서 지속가능성 확보 ○ 기대효과(경제사회적 측면) <ul style="list-style-type: none"> 고도화 순환식 수경재배 시스템에 대한 기능 및 추가적인 혁신서비스 아이디어 발굴 및 사업화 유도로 산업 활성화 가능 양액 재이용 및 양분 균형을 통한 고품질 농산물 생산을 통한 농가 수익성 강화 순환식 수경재배 시스템 및 관련 장비 국산화로 국내 산업 육성 및 국제경쟁력 확보 배액으로 인한 환경 오염문제 해결과 물과 비료 절감 효과(30~40%)

연구개발성과의 비공개여부 및 사유

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
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)	스마트팜		수경재배		순환식		배액		정보통신기술			
영문핵심어 (5개 이내)	Smart farm		Hydroponics		Recycling		Drainage		ICT			

〈 목 차 〉

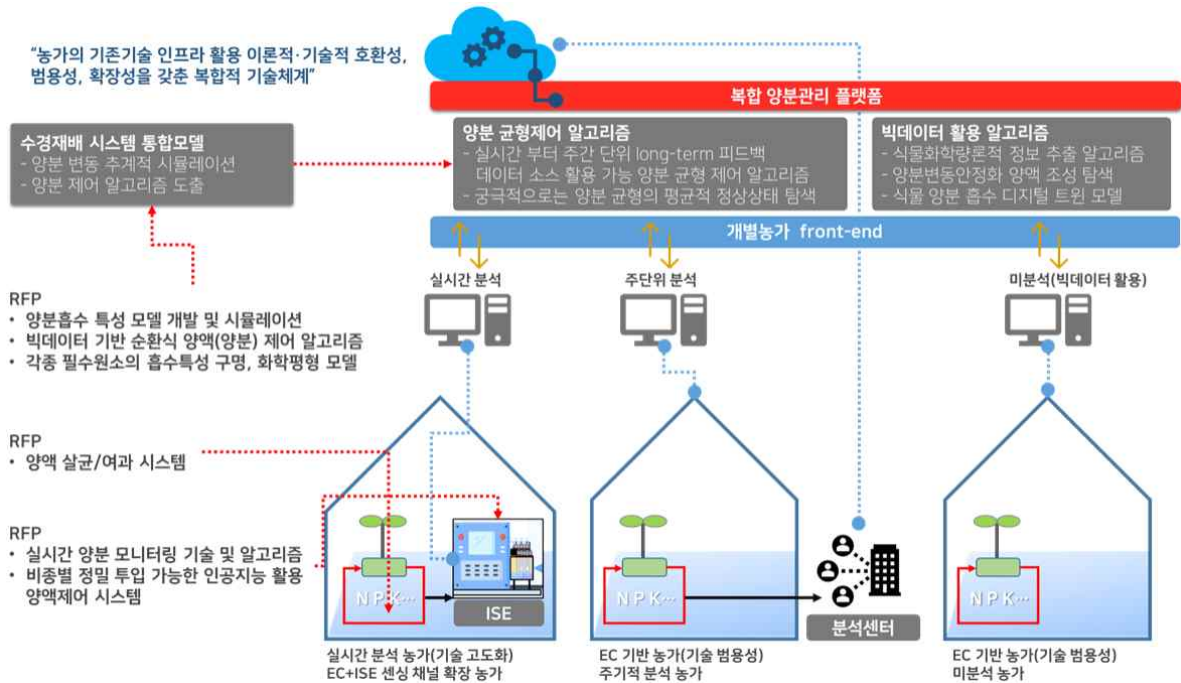
1. 연구개발과제의 개요	1
1) 연구개발의 목적	1
2) 연구개발의 필요성	2
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용	12
1) 스마트 온실용 순환식 수경재배 시스템 개발	12
2) 엽채류 재배용 순환식 수경재배 시스템 현장 실증	28
3) 복합 양분관리 플랫폼 및 제어체계 구축	40
4) 이온농도 측정 센서 활용 양액재배 양분 실시간 모니터링 및 순환식 양액제어 알고리즘 개발	71
5) 인공지능 기반 정밀 비료 공급 알고리즘 개발	91
6) UV 살균 시스템 운용관리체계 구축	105
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	118
1) 연구수행 결과	118
2) 목표 달성 수준	132
4. 목표 미달 시 원인분석	133
1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용	133
2) 자체 보완 활동	133
3) 연구개발 과정의 성실성	133
5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도	134
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	135
참고문헌	137
별첨자료	140

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발의 목적

(1) 연구개발과제의 최종 목표

- ICT 기반 순환식 수경재배의 양액관리 기술 개발 및 실증
 - 1단계: 양액 모니터링 및 순환식 수경재배 시스템 개발
 - 2단계: 양액 모니터링 및 순환식 수경재배 시스템 실증 및 산업화



〈그림〉 연구개발과제의 체계도

(2) 연구개발과제의 단계별 목표

- 1단계(기술체계화) - 양액 모니터링 및 순환식 수경재배 시스템 개발
 - 순환식 수경재배 시의 양분 변화, 식물 생육 데이터 수집
 - 순환식 수경재배 시의 양액의 양분 변화 및 작물 성장 양상 분석
 - 작물 맞춤형 순환식 수경재배 양액조성 개발
 - 복합 양분관리 플랫폼 구축
 - 여러 양분 분석 데이터 소스(분석의뢰(EC기반)-주단위/배액 양분 빅데이터(EC기반)/이온센서-실시간)에 따라 양분 관리가 가능한 순환식 수경재배 양분 관리 플랫폼 구축
 - 배액 재사용률 100% 시스템의 양분 균형 제어(이온의 평균적 정상상태 조건 탐색 알고리즘) 알고리즘 컨버전 및 플랫폼 탑재
 - 배액 재사용률 100% 미만 시스템의 양분 균형 제어 알고리즘 컨버전 및 양분관리 플랫폼 탑재
 - 시뮬레이션 분석을 통한 미량원소 제어 알고리즘 개발
 - 배액 양분 빅데이터 기반 작물별 화학량론적특성 추출 및 양분 제어 알고리즘 개발
 - 배지 이온 집적량 변화, 양분 흡수 매커니즘, 필수원소 정상상태 제어 시뮬레이션 통합 모델 구축
 - 이온 모니터링 유지관리성능 최적화
 - ISE 센서와 임베디드 보드 기술을 활용한 양액 및 배액 내 이온 농도 실시간 모니터링 기술 최

적화

- 퍼지제어를 통한 정밀 비료 공급 알고리즘 개발
- 장기 사용 조건에서의 기술 개선점 도출 및 유지관리 요인 선별
- Na 및 특정 이온 성분 축적 시 환경 부담 최소화를 위한 염 보충량 제어 및 양액 재사용 비율 조정 알고리즘 개발
- UV 살균 시스템 운용관리체계 구축
 - UV 살균 시스템의 여과모듈의 적정 역세척 시간 산정 및 운영 소프트웨어 반영
 - 수류형 UV 살균 시스템의 장기 사용 조건에서의 유지관리기술 최적화 및 체계화
 - UV 살균 시스템의 장기 사용 조건에서의 유지관리요인 조사 및 관리 알고리즘 개발
- 2단계(산업화) - 양액 모니터링 및 순환식 수경재배 시스템 실증 및 산업화
 - 순환식 수경재배 농가 장기사용체계 및 이온선택성 전극 대량생산 프로토콜 구축
 - 현장 및 장기 사용 조건에서 도출된 개선점 보완
 - 이온선택성 전극 대량생산 프로토콜 구축
 - 제품화 수준의 UV 살균시스템 운용관리체계 구축
 - UV 살균시스템의 운용관리체계 제품화 수준으로 최적화
 - 복합 양분 관리 플랫폼 제어체계 구축
 - 복합 양분 관리 플랫폼 양액혼합기기 연계 양분 제어체계 구축
 - 순환식 수경재배 시스템 현장 실증
 - 순환식 수경재배 기술 실증(토마토, 파프리카, 엽채류 2종)
 - 실증을 통한 환경 규제에 따른 양액 환경 오염 해결방안 제시

2) 연구개발의 필요성

(1) 연구의 배경

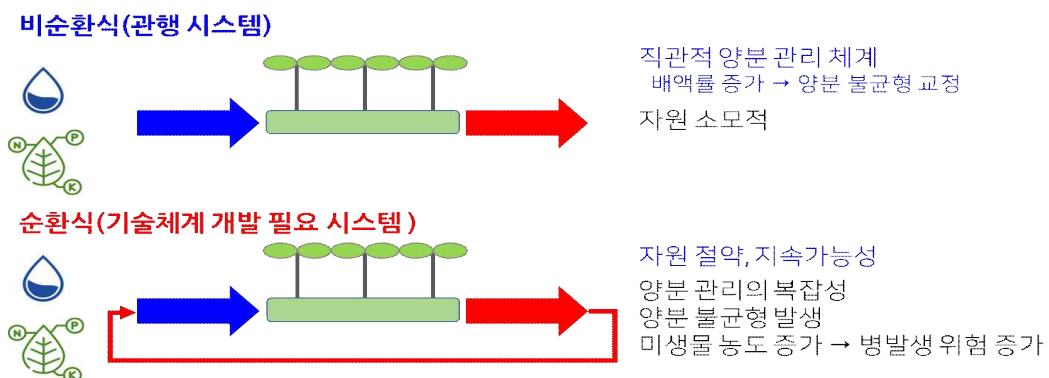
- (수경재배 배액 방류 문제) 지속적인 양수분 관리 없이는 수경재배 작물의 생육에 유의적인 양분 변동 발생, 관행적으로 이러한 변동은 주기적 배액 방류를 통해 관리(비순환식 수경재배)
 - 노지재배 대비 수경재배 농가의 면적은 상대적으로 작지만, 자원 사용 형태는 굉장히 집약적(국내 비순환식 수경재배 농가의 ha 당 연간 비료 사용량은 약 7,200kg(Cho 등, 2000), 국내 연간 화학비료 사용량(약 270kg/ha, e-나라지표, 2019)을 상회하는 수준), 방류된 배액 내 고농도의 질소, 인은 심각한 지하부 환경오염원으로 작용
 - 비료 가격의 상승 추세와 함께 관행의 비순환식 양수분 관리 체제는 농가경영수익의 하락 문제를 동반(비료비는 농가 경영비 중 3순위로 17% 차지, RDA, 2017)
- (수경재배 시장의 급성장) 스마트 농업을 기반으로 한 농업 생산기술의 고도화, 수직농장 및 도시농업 생산모델의 활성화에 따른 수경재배 시장 및 면적 증가 추세
 - 수경재배 시장은 2020년 95억 달러에서 2026년 179억 달러로 연평균 11.3%까지 크게 성장할 것으로 전망(MarketandMarkets, 2020)
 - 국내 수경재배 면적은 2000년 700ha에서 2019년 3,785ha로 5배 이상 증가(RDA, 2021)
- (배액 재사용 기술의 수용률 저조) 수경재배 시장의 전 세계적 급증 추세와 함께 배액 재사용 기술의 개발요구도 증가, 그러나 농가의 순환식 수경재배기술 수용률은 매우 저조

- 스페인 최대 시설원에 지역인 알메리아의 경우, 3,000ha의 알메리아 수경재배 농가 중 12%의 농가만이 순환식 수경재배시스템을 운용
 - 네덜란드의 경우 순환식 수경재배 전환을 법제화하여 배액 재사용 기술 보급률은 95%에 이르나, 아직 완전한 재사용은 달성하지 못하였으며 2027년까지 배액 방류 제로화 목표
 - 우리나라는 아직 양액 배출에 대한 세부 기준이 마련되지 못한 상태로, 국내 수경재배 농가 중 5% 정도만이 순환식 수경재배 시스템을 운용(Lee와 Kim, 2019)
- (비순환식 → 순환식 양분관리 기술체제전환의 난점) 순환식 수경재배 기술수용저항에는 초기투자비용과 효과, 식물 병·양분 불균형 발생에 대한 농가의 우려가 복합적으로 작용
- 1920년대 수경재배의 도입 이래 순환식 수경재배 연구 꾸준히 수행, 그러나 아직 '지배적 설계(domestic design)'로서의 비순환식 양분관리체제를 완전히 대체할 순환식 양분관리기술 부재
 - 네덜란드와 같은 순환식 수경재배 기술선도국가의 기술(주로 살균기술)도 국내와 같은 배출규제가 없는 시장에서는 기술 확산에 제약
 - 순환식 시스템 도입이 농가에게 매몰비용으로 인식되는 한, 제도적 장치의 도움 없이는 농가의 순환식 수경재배기술 수용을 견인할 동력 부족

요 약	
비순환식 양분관리체제를 대체 가능한 순환식 수경재배 기술의 개발	
<ul style="list-style-type: none"> • 기본적으로 미생물·양분관리 기술의 유용성과 용이성 측면에서 기존의 비순환식 체계를 대체할 수 있는(농가 기술수용저항요인 최소화) 순환식 미생물·양분 관리 기술 개발 필요 • 그동안 전용 양액개발, EC 관리, 모델링 등 여러 단일기술 접근이 있었으나, 비순환식 → 순환식 양분관리 기술체제전환에는 한계 • 장기간 구축된 비순환식 양분관리체제를 순환식으로 전환하려면 기술인프라·농가 현장을 고려한 이론적·기술적 호환성과 확장성을 갖춘 복합적 기술체제 구축 필요 	

(2) 순환식 수경재배의 국내외 기술 및 연구 현황

○ 순환식 수경재배 기술 연구 분야의 개요



적절한 기술체제 없이는 양분관리-자원이용효율은 trade-off 관계



〈그림〉 순환식 수경재배의 기술적 과제 개요

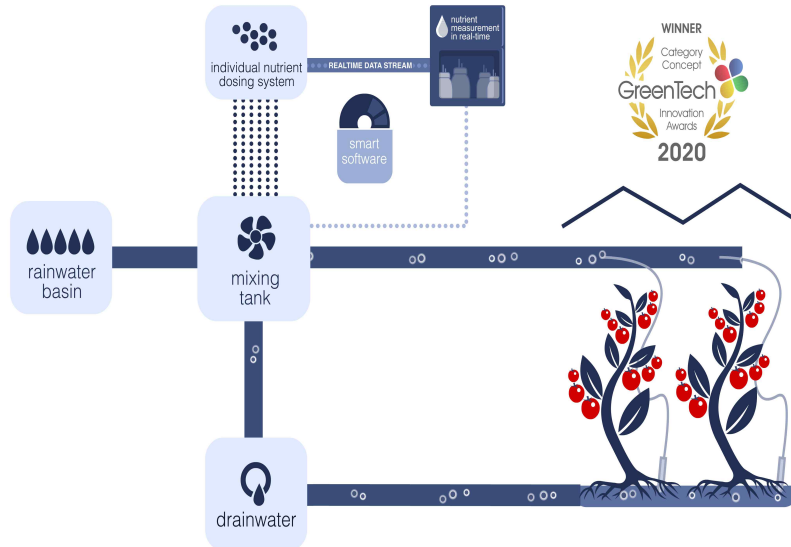
- 순환식 수경재배 시스템은 양분 간의 불균형, 미생물 농도 증가에 따른 병발생 위험의 증가와 같이 재배 안정성에 영향을 줄 수 있는 문제를 동반
- 양분 간의 불균형 발생은 식물 양분흡수농도의 동적 변화가 주요 원인이며, 미생물의 농도 증가는 배액의 외부 배출이 제약된 조건에서 반복된 배액 재사용 과정에 따른 미생물 증식이 주요 원인
- 순환식 수경재배 기술의 연구 영역은 크게 '양분 변동의 관리'와 '미생물 농도 관리'로 구분될 수 있으며, 특히 양분 변동을 관리하기 위한 기술 기반에 따라 '전기전도도(Electrical Conductivity, EC) 기반'과 '실시간 이온 센싱 기반' 체계로 분리
- 수경재배에서 비순환식 양분관리체계를 대체할 적절한 기술의 부재 상황에서는 양분관리를 통한 작물생산성 향상과 양분재사용을 통한 자원이용효율의 향상은 trade-off 관계

○ 순환식 수경재배 양분 변동의 관리 기술-EC 기반

- EC는 양액 내 전이온농도를 대변하는 지표로 양분의 전체 농도 변동에 대한 정보 제공
- 그러나 순환식 수경재배 시스템에서는 개별 양분의 변동 관리가 어려우며, EC 기반 순환식 시스템에서는 개별 양분 변동 관리에 불안요인 존재
- EC 기반 순환식 수경재배 시스템에서의 안정재배기술을 개발하기 위해 양액 재사용 적정기간 구명(Ko 등, 2013), EC 관리(Signore 등, 2016), 예측 모델 이용 재사용 배액 방류 전략 수립(Massa 등, 2011), 양액조성변경(Hao와 Papadopoulos, 2002), 저면, 점적 등 관수 시스템의 차이의 효과(Zekki, 1996) 등 여러 기술적 접근 시도
- 네덜란드는 양액(배양액)분석 및 조제 시스템을 산업화하여 현재는 전문 분석업체가 활발히 활동하여 분석을 끝마치는데 드는 총 소요시간은 1~1.5일, 전자메일을 통해 분석결과를 통보하는 시스템을 갖추고 있으며, 생육단계별(0~4단계) 양액조성이 가능한 과채류 전용 순환식 양액이 개발되어 이에 대한 관리 설명서 보급
- (기술적 제약) 그러나 EC 기반 순환식 수경재배 양분관리연구 대부분의 기술적 접근은 대조실험을 통해 경험적으로 검증 → 실험지역 외 타지역에서의 기술 호환성, 확장성, 범용성과 같은 기술체계화 특성 확보 및 기술상용화에 한계

○ 순환식 수경재배 양분 변동의 관리 기술-실시간 이온 모니터링 기반

- 이온선택성전극 (ISE, Ion-selective electrode)은 물, 식품, 제약, 환경, 생물학적 시료 등 이온 분석이 필요한 모든 분야에서 응용이 가능하며 상용화된 기술시장 존재
- ISE를 이용한 측정은 다른 분석법과는 달리 여과나 증류와 같은 시료의 전처리 과정이 필요 없이 그대로 측정할 수 있어 간편하고 신속한 수단으로 많은 연구개발에서 주목
- 네덜란드 CE-LINE BV사는 자연 유입 시 환경 파괴로 이어질 수 있는 배액을 관리하기 위해 양액 내 개별 이온 농도를 측정하고 양액의 효율적인 재사용 관리를 위한 자동화 시스템의 개발을 수행하고 있으며 이에 ISE를 활용하는 연구 프로젝트를 제시
- 미국의 Thermo Fisher Scientific사 및 유럽의 Mettler Toledo 등에서는 비록 주요 양분 성분인 Mg와 P는 아직 개발되지 않았으나, F, Cl, CN, Ag₂S, Pb, Br, Cd, CuO, I, SCN, NO₃, K, Ca, NH₄, Na 등의 이온들을 측정할 수 있는 이온 선택성 전극들을 개발 및 패키징한 상용 제품 출시
- (기술적, 산업적 제약) 이온 모니터링 기술은 상용화되어 시장에 출시되어 있으나, 고농도의 여러 이온들이 동시에 존재하는 수경재배 농가 현장과 같은 가혹 사용조건에서 성능의 유지 및 관리하는데 기술적 제약 존재, 또한 EC 센서와 같이 개별 농가 단위의 양분관리기술로 보급하는데 유지관리비용 측면의 한계 존재



〈그림〉 CE-Line BV에서 제시한 개별 이온 농도 모니터링 및 제어 시스템
(<https://www.celine.fr/>)

○ 미생물 농도 관리-배액살균기술

- 수경재배에서 오염된 배액의 재사용은 병원성 박테리아와 곰팡이류 등을 빠르게 확산시키는 요인이 될 가능성이 크기 때문에 위생적 배액 살균설비는 필수적 요건
- 살균설비는 가열(Heating), 자외선(UVC), 필터, 오존 등 이용 가능
- 자외선 살균설비는 현재 국내외에서 가장 널리 사용되는 순환식 수경재배 설비로써 UVC(200-280 nm)를 이용해서 병원균 DNA를 손상해 살균하는 방식으로, UVC를 이용하여 잔류 독성 없이 단시간에 살균이 가능한 장점
- 네덜란드의 Priva, Hoogendroon, Hortimax 등은 UV-Lamp 양액살균장치 기반 순환식 수경재배 배액혼합시스템과 운용 소프트웨어를 출시하였으며, 국내 일부 대규모 온실에서는 네덜란드 회사의 외산 제품을 사용하고 있는 것으로 파악
- (산업적 제약) UV 유수살균기술은 네덜란드의 순환식 수경재배 상업농가에서 널리 사용되는 기술로 설치 및 유지관리 체계가 잘 구축되어 있으나, 설치에 고가의 비용 소요, 국내와 같은 배출규제가 없는 조건에서는 몇몇 대형농가를 제외하고는 시장 내 기술수용 저조



〈그림〉 외산 UV 유수살균제품군(출처:이승윤 및 김유창, 2019.)

(3) 연구의 필요성

- 현재 국내외 순환식 수경재배 시스템의 양분 관리 분야는 확산 가능한 기술체계가 없는 상태에 있음.
 - 네덜란드의 경우 “Hydrion-line” 프로젝트를 통해 개별 양분의 실시간 측정 기반의 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템을 구축하기 위한 시도를 하였으나, 기술 확산까지는 연결되지 못하였으며, 최근 CE-LINE BV 사의 개별 이온 농도 모니터링 기반 순환식 수경재배 기술 개발 프로젝트를 기획 및 수행 중.
 - 그러나 차세대 순환식 수경재배 양분 관리 기술 시장은 현재 비순환식 양분 관리방식을 대체할 만한 지배적 설계의 부재 상태임.
- 본 연구 컨소시엄은 비순환식 양수분관리체제를 순환식으로 전환하는데 있어 산업적·기술적 제약사항에 대해 면밀하게 검토하였으며, 이를 유의미한 기술개발 연계하기 위해 적절한 문제정의를 도출함.
 - 또한, 본 연구 컨소시엄은 순환식 수경재배 미생물·양분변동관리의 이론, 기술, 실증, 산업화, 보급화에 대해 각각 체계적·선도적인 연구를 수행해왔으며, 농가의 기존기술인프라를 활용 이론적·기술적 호환성, 범용성 그리고 기능 고도화를 위한 확장성을 갖춘 복합적 기술체계를 구축하여 관행 비순환식 양분관리체제를 유연하게 대체하기 위한 연구개발과제의 추진전략 및 방법을 계획함.
 - 비순환식 양수분관리체제를 완전히 대체 가능한 순환식 수경재배 산업화 기술개발을 목적으로 본 연구과제를 준비하였으며, 안정적이며 경제적인 양액 재사용 시스템의 산업화와 함께 순환식 수경재배 양분 관리 기술의 고도화를 달성할 경우 ‘지속성강화’성능이 요구되는 차기 농업 기술 시장의 선점에 유리한 위치를 확보할 수 있을 것으로 기대.

(4) 순환식 수경재배의 문제 정의

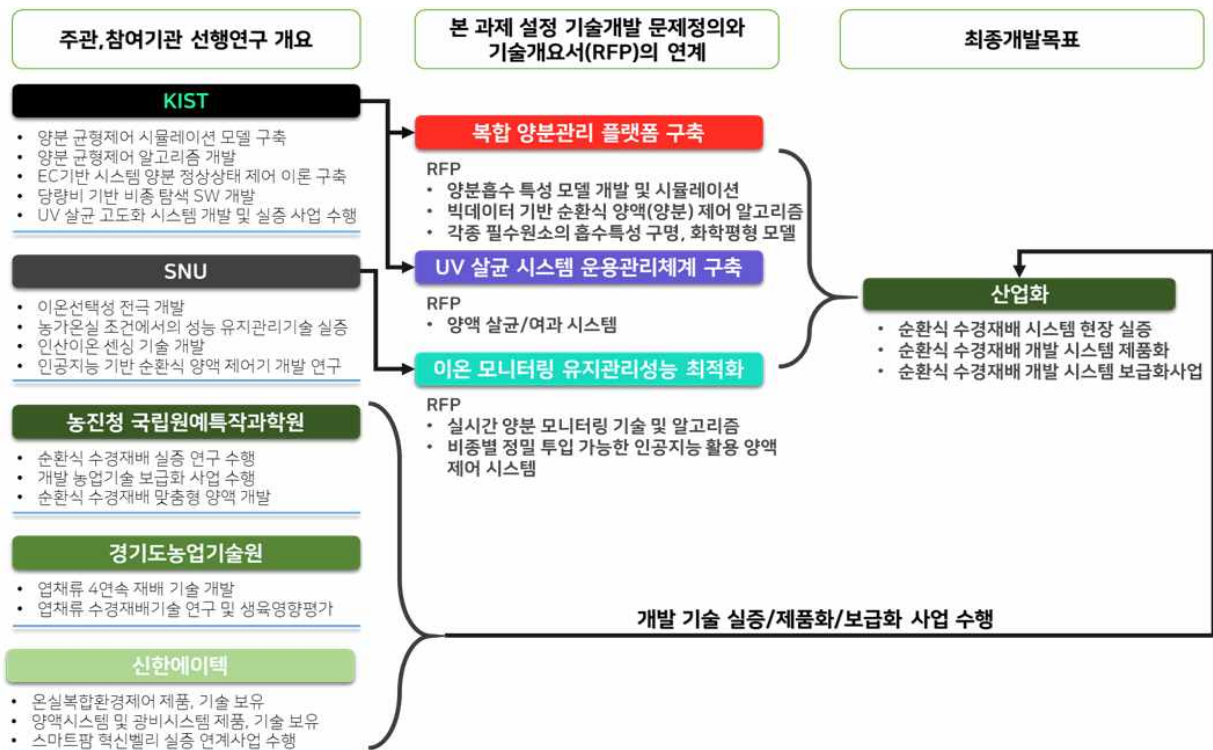
- EC 기반의 양분 제어체계 구축 문제
 - EC 기반 체계는 보급에 유리하나 아직 실질적으로 양분 균형을 관리하는데 이론적, 기술적으로 체계화된 순환식 수경재배 양분관리기술은 제시되지 못함.
- 이온 모니터링 기반의 농가 현장 보급성 확보 및 유지관리 문제
 - 이온 모니터링 시스템은 관행 기술체계에 보급된 EC 센서와는 달리 개별 수경재배 농가 단위의 필수기술구성요인으로써 보급하는 데는 유지관리비용 측면에서 기술적, 산업적 한계 존재함.
- UV 살균기술의 경제성 확보 문제
 - 기존 상용화된 외산 제품의 설치에 고가의 비용 소요, 국내와 같은 배출규제가 없는 조건에서는 몇몇 대형농가를 제외하고는 시장 내 기술수용 저조함.

문제정의

관행 비순환식 양수분관리체제를 대체 가능한 순환식 수경재배 기술개발을 위한
본 연구팀의 문제정의

- 농가의 기존기술인프라(EC 기반) 활용 이론적·기술적 호환성(순환식 수경재배 양분 제어의 이론적 체계 구축), 범용성, 확장성(이온 모니터링 기술)을 갖춘 복합적 기술체계 구축 필요
 - 농가의 기존 EC 기반 이론적·기술적 호환성과 확장성 갖춘 양분관리 플랫폼 구축 필요
 - 이온모니터링 기술의 현장 유지관리기능 향상 및 양분관리 플랫폼의 확장성 확보 필요
 - 가격경쟁력이 확보된, 외산 기술 대체 가능한 UV 살균 시스템 운영관리체계 구축 필요

(5) 연구주체별 선행연구와 연구내용의 연계



〈그림〉 과제 연구기관의 선행연구, 개발 문제정의, 본 과제 기술개요서와의 연계

□ (주관) 농촌진흥청 국립원예특작과학원

○ 선행연구

- 주요 수경재배 작물별 맞춤형 순환식 양액 조성 개발
- 배액 재사용을 위한 배액 제어 및 여과살균 시스템 개발
- 간이 배액제어시스템(비순환식 농가): 배액 모니터링, 배액/원수 혼합 데이터 수집
- 배액 여과살균시스템 개발 및 성능평가: 전기살균, 분리여과막살균시스템
- 배액 재사용 실험 및 데이터 수집시설 구축: 배액 희석농도, 혼합률 설정 가능

○ (선행연구-개발과제 연계) 순환식 수경재배 시스템 현장 실증 및 보급화 사업

- 농촌진흥청 국립원예특작과학원의 수경재배 실증 실험시설, 그동안의 개발 농업 기술의 보급화 사업 수행 경험을 바탕으로 개발 기술이 보급될 때의 농가의 기술수용 저항요인을 검토하고 최소화하기 위한 기술 보급 전 실증재배실험 수행
- 실증 실험 이후 개발된 기술의 농가 보급화 사업 수행

□ 경기도농업기술원

○ 선행연구

- 순환식 수경재배시 무기성분의 불균형으로 작물의 생육 불량, 근권 병원균이 확산될 우려가 있어 한국형 양액여과 시스템 개발하여 상추 4연속 재배 기술 개발
- 환경보전 및 자원절감을 위한 순환식 양액재배 양액재활용 방법과 Cu·Zn 등의 미량원소의 과잉흡수를 경감시키기 위한 유기물 처리효과 시험 수행

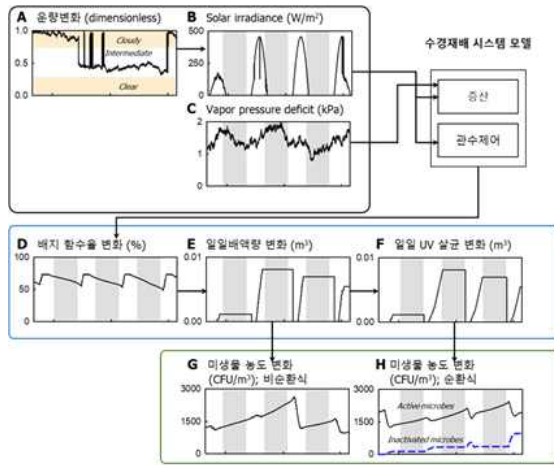
○ (선행연구-개발과제 연계) 순환식 수경재배 시스템 현장 실증

- 주요 엽채류의 순환식 수경재배 기술 개발, 엽채류 수경재배 실험 및 재배 안정성 평가 시설을 활용, 개발 기술의 농가 도입 시 재배 안정성에 대해 사전 실증 실험 수행

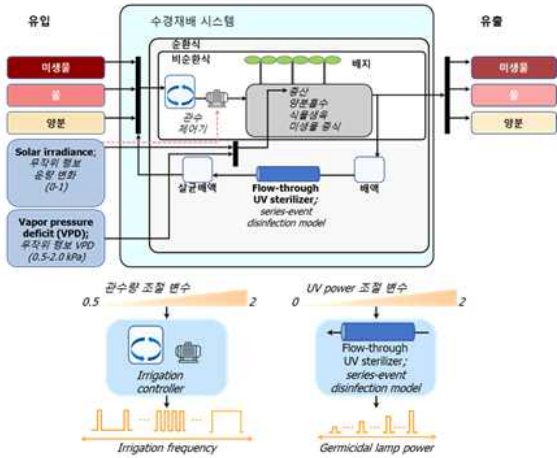
□ 한국과학기술연구원(KIST)

○ 선행연구

- 일사비례기반 자동 관수 시스템, 식물 양분 흡수, 증산, 식물 생육 증가, UV 살균시스템의 통합 시뮬레이션 모델을 구축 순환식 수경재배 시스템에서의 미생물 및 양분변동 특성을 해석
- 수경재배 시스템 통합 모델 활용 추계적 시뮬레이션을 통한 EC 기반 순환식 수경재배 시스템에서의 당량 농도 기반 양분 균형 제어 알고리즘 도출 및 특허 출원
- 양분 균형제어를 위한 농가 농축양액 조제용 비중 최적화 탐색 소프트웨어 개발
- 수류형 UV 배액 살균 장치를 개발하여 실제 재배 농가에서 1차 실증, 장기간 운용 조건에서 95% 이상의 살균효율 검증, 외산 기술대비 가격 경쟁력 확보된 국산 기술 개발

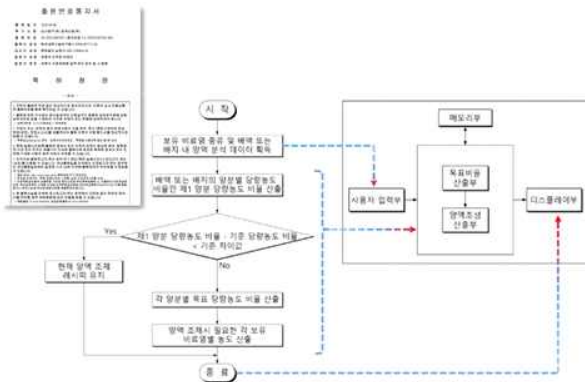


환경-식물-수경재배 시스템 통합 시뮬레이션
단기적 시스템 복합반응 관계 검증

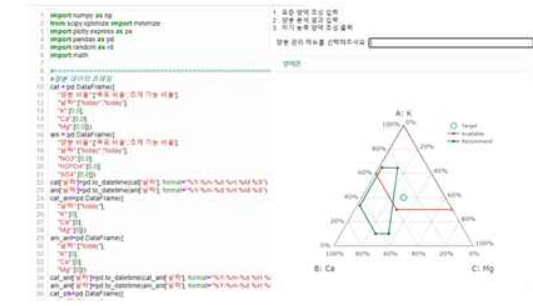


비순환식, UV 살균기 적용 순환식 수경재배
시스템 CFU 변화 특성 분석 시나리오 적용

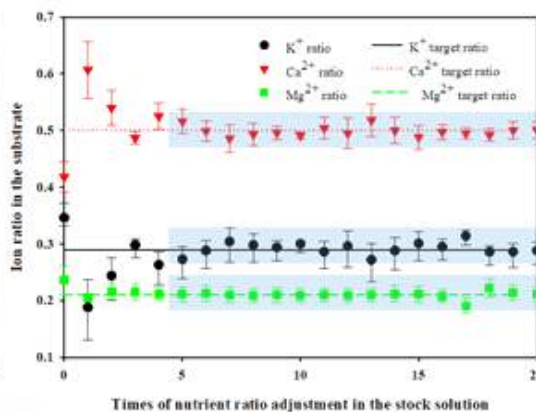
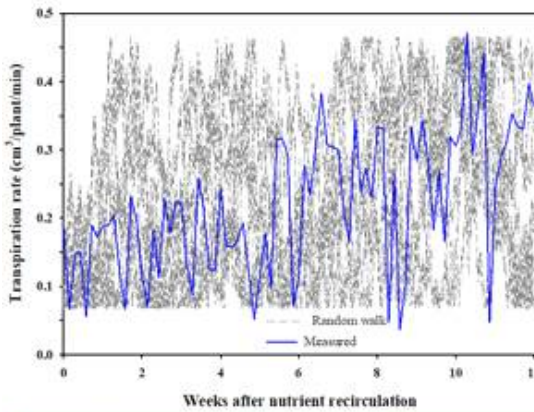
〈그림〉 환경-식물-수경재배 시스템(양분관리, UV 살균) 통합 모델 구축



양분 균형제어 알고리즘의 절차도
(특허 출원)



양분 균형제어 알고리즘
python 기반 프로그램에 반영



Random walk transpiration rates
Disturbance in the uptake concentrations

Long-term feedback control → Stabilized nutrient ratio

〈그림〉 Long-term feedback 기반 순환식 수경재배 양분 균형제어 알고리즘

○ (선행연구-개발과제 연계) EC 기반 양분관리 플랫폼 구축

- 기존 개발 양분 균형제어 알고리즘과 시뮬레이션 모델을 기반으로 여러양분 분석 데이터 출처(분석의뢰-주단위/배액 양분 빅데이터/이온센서-실시간)의 입력이 가능한 EC 기반 순환식 수경재배 양분관리 플랫폼 구축

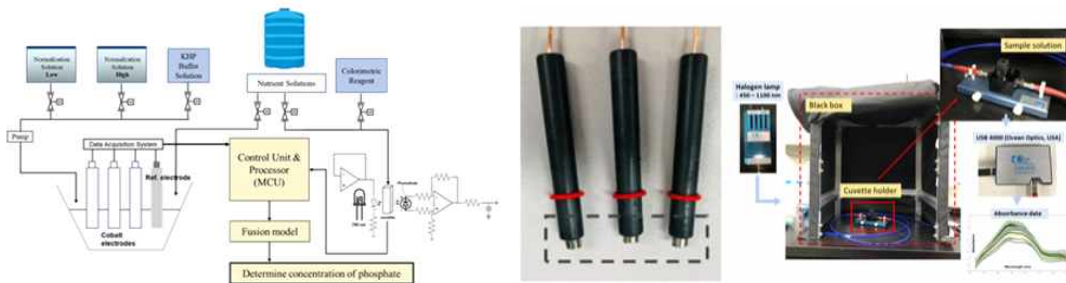
○ (선행연구-개발과제 연계) UV 살균 시스템 운용관리체계 구축

- 기존 개발 수류형 UV 살균 장치의 운용 및 유지관리 체계를 상용제품에 준하는 수준으로 최적화 계획

□ 서울대학교

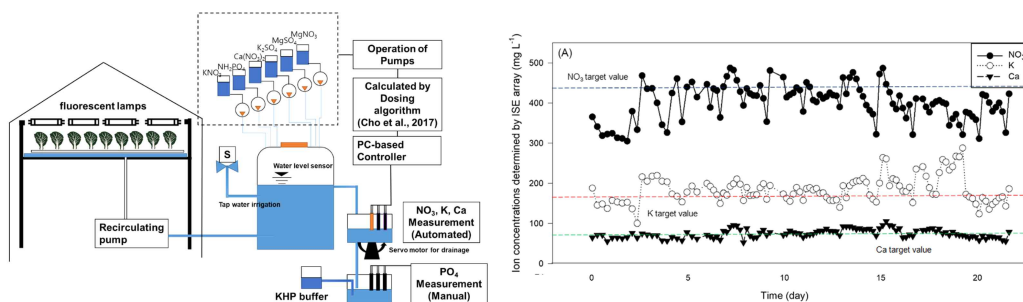
○ 선행연구

- 양액 내 주요 양분 측정을 위한 이온선택성 전극 연구개발
- 양액 내 주요이온 센서 및 모니터링/제어시스템 개발, 농가 조건에서 유지관리성능 검증
- 이온 분석을 위한 개별이온 모니터링 시스템 및 인공지능 기반 순환식 양액 제어기 개발
- 코발트전극과 비색법을 이용한 양액 중 인산이온 센싱 기술개발



- 양액 내 인산 측정을 위한 코발트 전극 개발 및 적용성 실험
- 양액 샘플에 대한 인산 측정 반응 시약 구성 및 유효 파장대역 선별
- 인산 검출을 위한 센서 제작 및 비색법 융합 기법 개발

<그림> 코발트전극과 비색법을 이용한 양액 중 인산이온 센싱 기술개발



- 이온선택성 전극을 사용한 개별 염보충 방식의 박막식 순환식 수경재배 연구
- 양액내 이온들의 목표농도 유지 연구를 위한 염보충 알고리즘 개발

<그림> 이온 분석을 위한 개별이온 모니터링 시스템 및 인공지능 기반 순환식 양액 제어기 개발

○ (선행연구-개발과제 연계) 이온 모니터링 유지관리성능 최적화

- 지금까지 구축된 이온 센싱 기술과 농가 현장 조건에서의 유지관리성능을 바탕으로 산업화를 위한 기술 최적화 수행, 산업화를 대비한 이온전극 대량생산 프로토콜 구축 및 EC 기반 순환식 수경재배 양분관리 플랫폼의 기능 고도화를 위한 양분 데이터 수집 채널 확장 기술개발을 계획

□ 신한에이텍

○ 선행연구

- 신한에이텍(주)는 온실환경제어시스템과 양액공급시스템, 폐양액 살균처리에 대한 국내 등록특허를 확보함.
- 신한에이텍(주)는 대규모 및 중/소규모 온실 적용이 가능한 스마트팜 기자재를 판매 중.
- 온실환경제어시스템과 다양한 양액기 제품군을 생산 및 판매하고 있으며, 양액재처리 시스템(UVC-Lamp를 이용한 살균시스템)을 확보함.



대규모 온실적용 제품
(Aqua-S)

대규모 온실적용 제품
(Aqua-M)

중/소 온실 적용 제품
(SH-2000)

중/소 온실 적용 제품
(SH-1700A)

〈그림〉 신한에이텍 생산 및 판매 양액공급 시스템

○ (선행연구-개발과제 연계) 순환식 수경재배 개발 시스템 실증 및 제품화

- 수경재배 개발 기술의 제품화, 판매, 사후관리 경험과 관련 인프라를 바탕으로 본 과제에서 개발한 기술의 제품화(제품화 설계, 하우징, 패키징)에 노하우와 기술 지원과 관련 기술의 실증을 계획

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 스마트 온실용 순환식 수경재배 시스템 개발

(1) 순환식 수경재배 토마토 양분 균형제어 S/W 개발을 위한 배액 이온변화 분석

○ 스마트 온실에서 대과종 7품종에 대한 순환식 수경재배 시 배액 이온변화를 분석

- 폭이 8m 길이가 25m인 유리온실에 길이 21.5m인 행잉거트를 4줄로 설치하고 7m마다 막음막을 설치하여 구역을 설정. 4처리 3반복으로 구역별로 관수관을 따로 설치하였고 배수는 3개 처리가 합쳐져 1개의 배수통에 집수되도록 하여 배액의 무기이온은 단구제로 조사함. 각 구역에 코이어 슬라브 7개를 배치하였으며, 구역당 29개의 점적핀을 설치하여 토마토 1주당 1개씩 꽃고 남은 1개의 핀은 급액조사에 이용.
- 토마토는 대과종 Pink계 4품종('TY 메가톤', '케이팝', '랑데뷰', 'TY 샤르망'), Red 3품종('레드피아', 'TS 맥스', '대프니스')을 이용하였으며, 순환식으로 양액 공급할 경우 급액 EC는 1.5, 2.0, 2.5 mS/cm로 처리하였고 비순환식 EC 2.0 mS/cm로 진행하여 비교함.
- 2021년 1월 9일 파종하여 2월 22일에 정식하였으며 3월 3일부터 급액 EC 처리를 개시하여 시험 종료하는 7월 27일까지 처리하였으며, 양액조성은 원예원 토마토 배양액을 이용함.

배양액 조성	무기이온농도(me/L)						
	NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	Ca	Mg	S
원예원	9	0.67	2.1	5	4	2	2

- 배지는 20×10×100cm 코이어 슬라브로 칩과 더스트가 50:50으로 혼합된 것을 이용하여, 드리퍼당 1회 100~134mL로 공급. 급액은 누적광량을 기준으로 정식 후 200 J/cm²에서 정식 후 8주경에는 90 J/cm²으로 작물의 생육과 일사량을 고려하여 배액이 20~30%가 유지되도록 변경하며 관리.
- 급액제어는 타이머와 일사비례제어 혼합방식으로, 12-2월은 9시에 첫 급액이 되도록 하였으며 그 외의 달은 일출 후 2시간-2시간 30분 사이에 급액되도록 매월 1일에 첫 급액시간을 변경. 마지막 급액시간을 일몰 전 2시간으로 설정하여 이후에는 누적일사량에 관계없이 급액이 되지 않도록 하였음. 목표 누적일사량에 도달하여도 급액 후 30분 이내에는 급액이 되지 않도록 하였고, 목표 일사량에 도달하지 않아도 3시간에 1회씩은 급액이 되도록 함.
- 배액의 음이온(NO₃⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻)은 IC(DX-500, Dionex, USA)의 유속을 0.7mL/min으로 고정하여 용리액 및 재생액을 흘려보내면서 기준선을 안정화 시킨 후 혼합 표준액을 이용하여 NO₃⁻와 SO₄²⁻는 0, 5, 10, 20 mg/L, PO₄³⁻, 10, 20, 40 mg/L 표준 검량선을 작성하여 이용.
- 양이온(K, Ca, Mg)은 ICP(ICAP7400, Thermo Scientific, USA)를 사용하여 분석하였으며, 표준액을 이용하여 K, Ca는 0, 25, 50, 100 mg/L, Mg는 0, 12.5, 25, 50P.P.M.mg/L의 표준 검량선을 작성하여 분석치에 희석배수를 곱하여 이온농도를 계산함.

○ 동양계 토마토 품종의 급액 EC에 따른 생육

- 동양계는 초장, 경경, 엽수, 마디수 등 생육요소의 처리간 차이가 나지 않았으나, 유럽계는 EC 1.5 mS/cm처리에서 다른 처리에 비하여 초장이 짧았음

〈표〉 동양계 토마토 품종의 급액 EC에 따른 생육

방식	급액 EC (mS/cm)	초장 (cm)	경경 (mm)	엽수 (매/주)	마디수 (절/주)	1화방 착과마디 (과/주)
순환식	1.5	209.3	11.1	26.6	33.0	8.9
	2.0	205.5	10.9	25.4	32.2	8.8
	2.5	212.5	10.8	26.4	33.1	8.8
비순환식	2.0	206.4	10.6	26.3	33.0	8.9

〈표〉 유럽계 토마토 품종의 급액 EC에 따른 생육

방식	급액 EC (mS/cm)	초장 (cm)	경경 (mm)	엽수 (매/주)	마디수 (절/주)	1화방 착과마디 (과/주)
순환식	1.5	191.6	11.0	27.0	33.7	8.5
	2.0	197.1	10.5	25.9	32.4	8.7
	2.5	196.9	11.4	26.9	33.7	8.8
비순환식	2.0	203.1	11.2	26.6	33.4	8.7

○ 토마토 품종의 급액 EC에 따른 품질 및 수량

- 동양계는 EC 2.5 mS/cm처리에서 과경, 과고, 과중이 작아 수량이 다른처리보다 적었고, 순환식 과 비순환식을 비교했을때 처리간 차이가 없었음.
- 유럽계는 EC 1.5 mS/cm처리에서 과경, 과고, 과중이 커 수량이 다른 처리보다 많았고, 생육이 부진한데 수량이 많았던 것은 착과하여 수확까지는 통상적으로 50~70일가량이 소요되기 때문에 부진한 생육이 수량으로까지 연계되지 않은것으로 판단됨. 따라서 더 장기적으로 수확하는 경우 생육부진이 수량에 영향을 미칠수 있을 것으로 사료됨.

〈표〉 동양계 토마토 품종의 급액 EC에 따른 품질 및 수량

방식	급액 EC (mS/cm)	과경 (mm)	과고 (mm)	평균과중 (g/과)	당도 (obrix)	과수 (과/주)	수량 (g/주)
순환식	1.5	85.0	61.8	231.6	4.2	27.8	6640.3
	2.0	84.8	60.8	219.0	4.4	28.4	6411.7
	2.5	82.7	58.9	204.1	4.4	27.4	5775.2
비순환식	2.0	86.3	60.9	225.9	4.4	28.6	6528.9

〈표〉 유럽계 토마토 품종의 급액 EC에 따른 품질 및 수량

방식	급액 EC (mS/cm)	과경 (mm)	과고 (mm)	평균과중 (g/과)	당도 (obrix)	과수 (과/주)	수량 (g/주)
순환식	1.5	78.2	63.5	206.7	4.02	27.8	5810.4
	2.0	76.8	61.5	193.2	4.07	27.2	5329.1
	2.5	76.3	60.6	189.7	4.30	28.2	5334.7
비순환식	2.0	77.3	60.9	197.3	4.03	27.2	5342.3

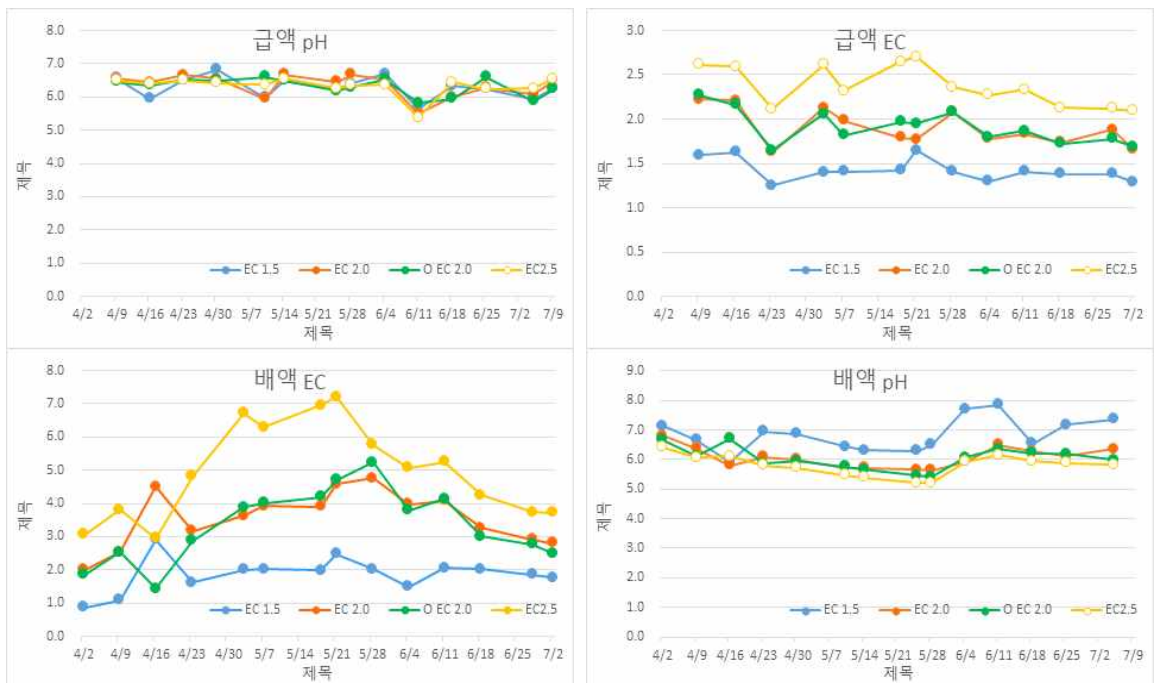
○ 급액 EC에 따른 급액, 배액 및 흡수량

- 급액량이 모든 처리에 동일한 조건에서 급액량에서 조사된 배액량을 차감한 주당 일평균 흡수량은 1,175~1,225mL로 나타났는데 급액 EC가 2.5 mS/cm로 높은 처리에서 흡수량이 적어 다른 처리보다 배액률이 높았음.

〈표〉 급액 EC에 따른 급액, 배액 및 흡수량

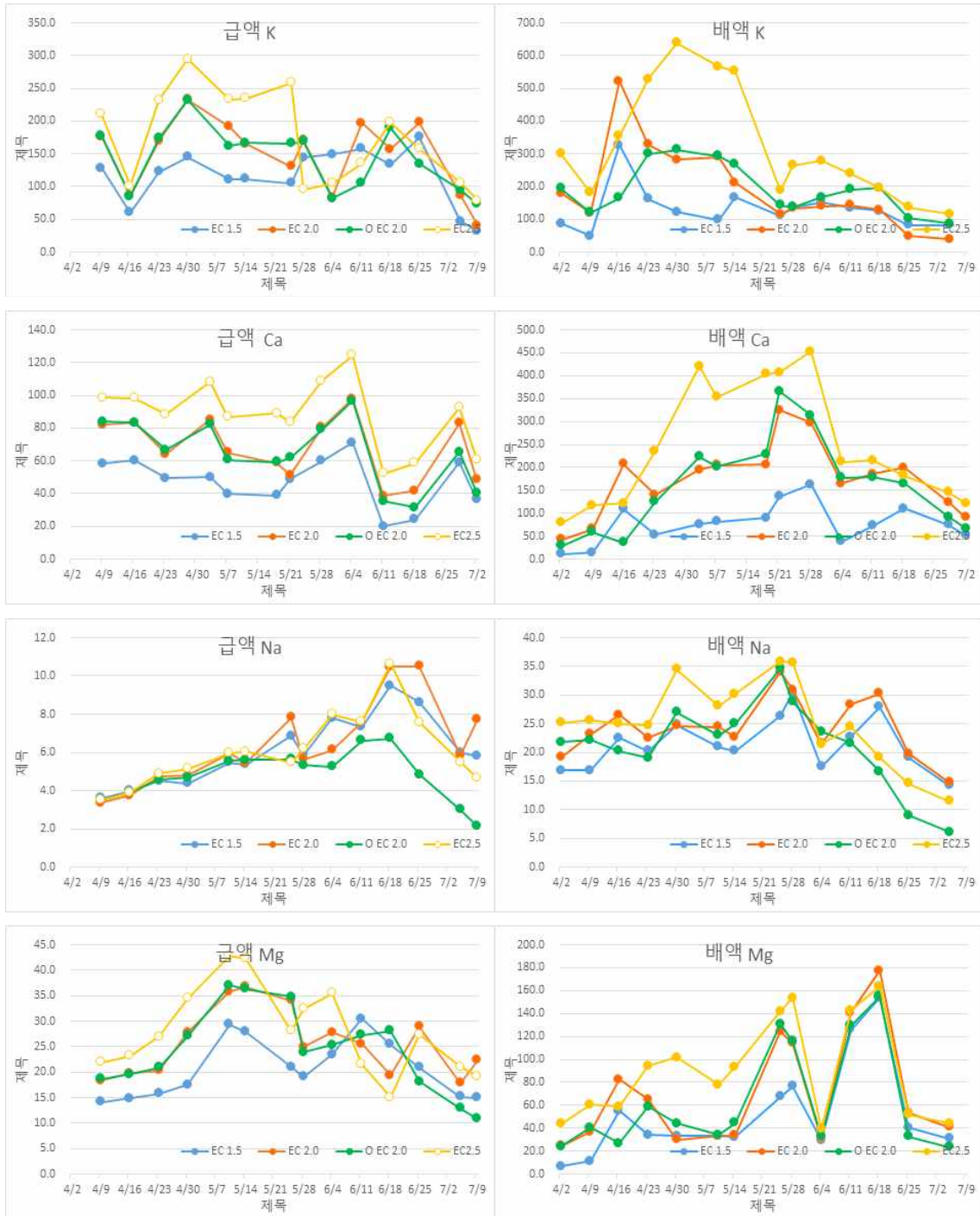
방식	급액 EC (mS/cm)	급액량 (mL/주/일)	배액량 (mL/주/일)	흡수량 (mL/주/일)	배액률(%)
순환식	1.5	1,467	243	1,224	16.7
	2.0	1,467	241	1,225	16.0
	2.5	1,467	292	1,175	20.1
비순환식	2.0	1,467	262	1,205	17.8

○ 급액 EC에 따른 무기이온의 변화

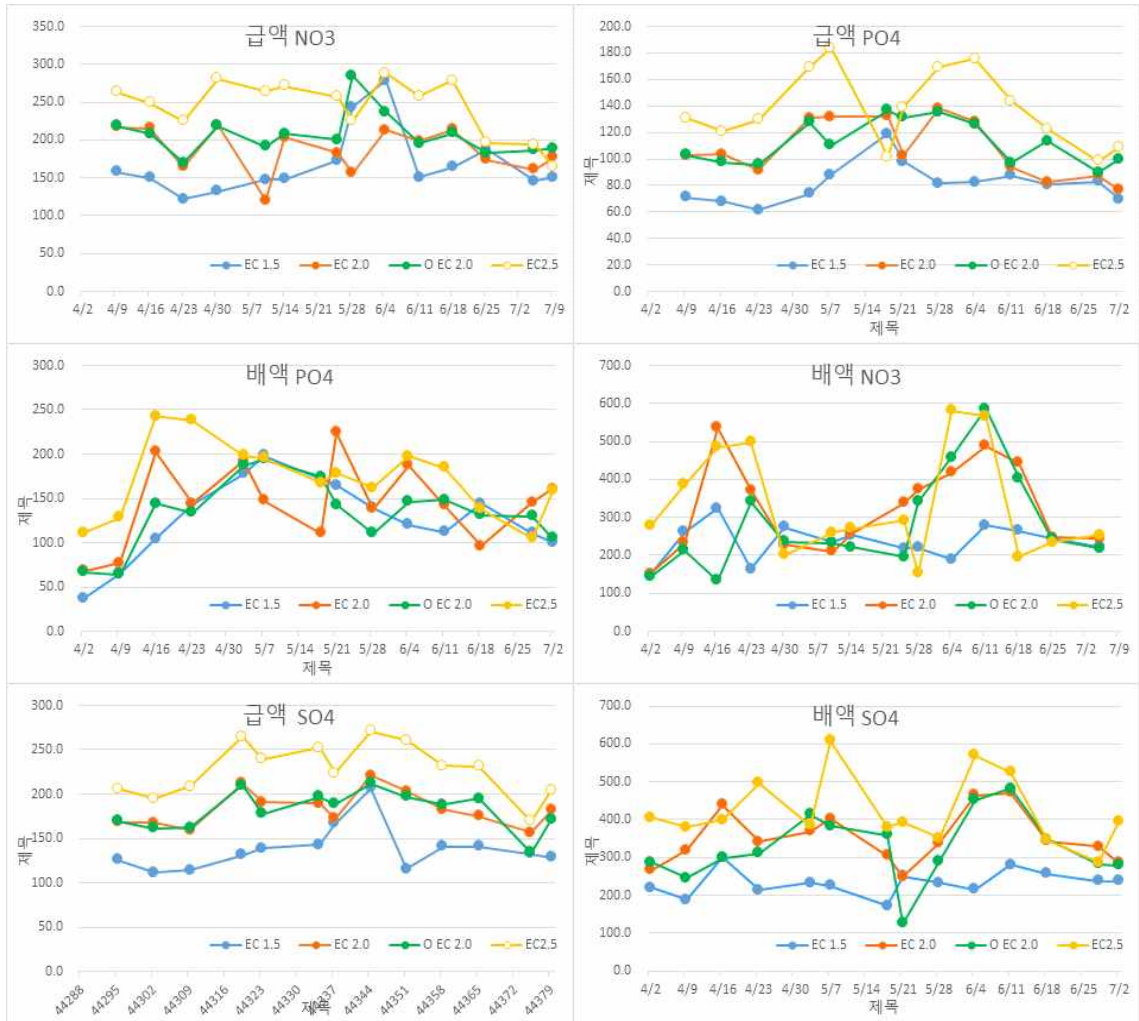


〈그림〉 급액 EC에 따른 pH와 EC의 변화

- 코이어 배지를 이용한 수경재배에서 급액 EC를 달리 공급하였을 때 배출된 배액의 EC 및 pH를 분석한 결과, 급액 EC에 따른 배액의 EC는 고농도 급액구에서 높았음. 배액의 pH는 재배기간이 경과할수록 낮아지는 경향을 나타내었는데 급액의 EC가 낮은 처리에서 다른 처리보다 pH가 높았음. 수경재배에서는 pH 5.5-6.5가 가장 적정하나 5.0-7.0까지는 허용 가능하다고(Adams, 2002) 하였는데 EC 1.5dS·m⁻¹에서 pH의 상한범위를 벗어나는 경우가 발생하기도 하였음. 근권의 pH가 적정범위를 벗어날 때 특히 양분의 균형적인 흡수를 방해하는데 pH가 높은 경우 Fe, P, Ca의 흡수가 저해되는 것으로 알려져 있으나 토마토의 생육 과정에서 가시적인 양분결핍 증상은 나타나지 않았음.



〈그림〉 급액 EC에 따른 양이온의 변화



〈그림〉 급액 EC에 따른 음이온의 변화

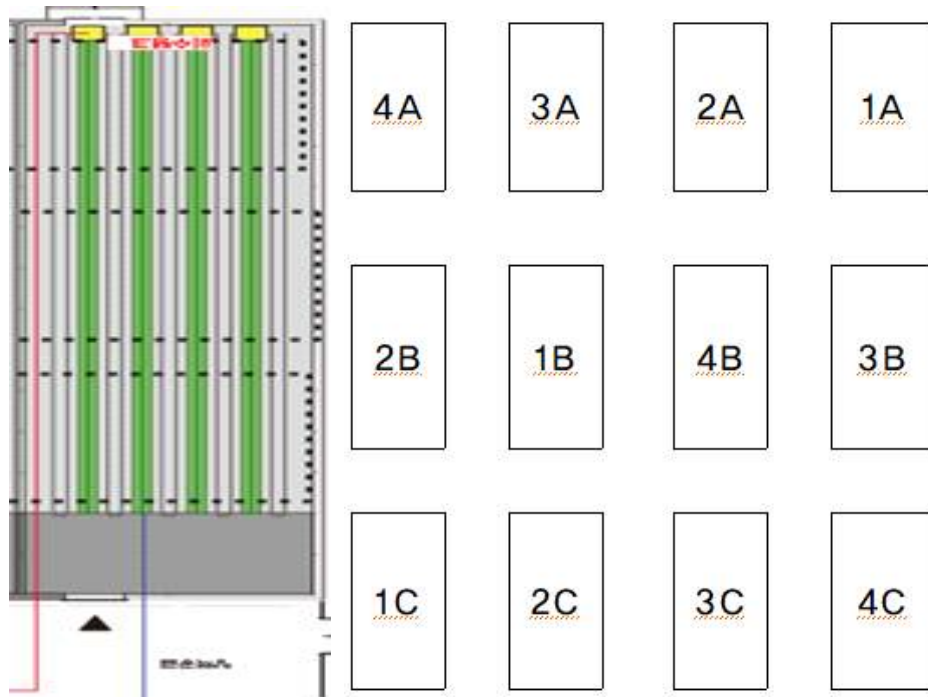
- 급액 EC를 달리 공급하였을 때 배출된 배액의 무기이온이 농도를 조사한 결과. 급액 EC가 높을수록 배액내 이온들의 농도도 높아지는 경향을 나타내었으나 동일한 EC 조건에서 순환식과 비순환식간의 농도차이는 뚜렷하지 않았음. 순환시킨 급액의 농도는 배액의 농도에 영향을 받아 주기적인 등락을 나타내었는데 작물의 양분요구와 연계하여 분석할 필요가 있는 것으로 나타나, 차년에 토마토 품종 1품종만 이용하여 정밀 분석할 필요가 있었음.

(2) 개발 순환식 양분 균형제어 알고리즘 적용 적합성 검증

- 본 시험은 국립원예특작과학원 시설원예연구소(함안)의 유리온실에서 수행함. 폭이 8m길이가 25m인 유리온실에 길이 21.5m인 행잉거터(hanging gutter)를 4줄로 설치하고 7m마다 막음막을 설치하여 구역을 나눔. 배지는 코코넛 코이어 배지(시판용, 100×15×7.5cm)를 사용하였으며, 슬라브당 4주를 정식하였고, 주당 1회 관수량은 100~133mL, 배액률은 20~40%로 조절.



<그림> 토마토 재배실증 온실 전경



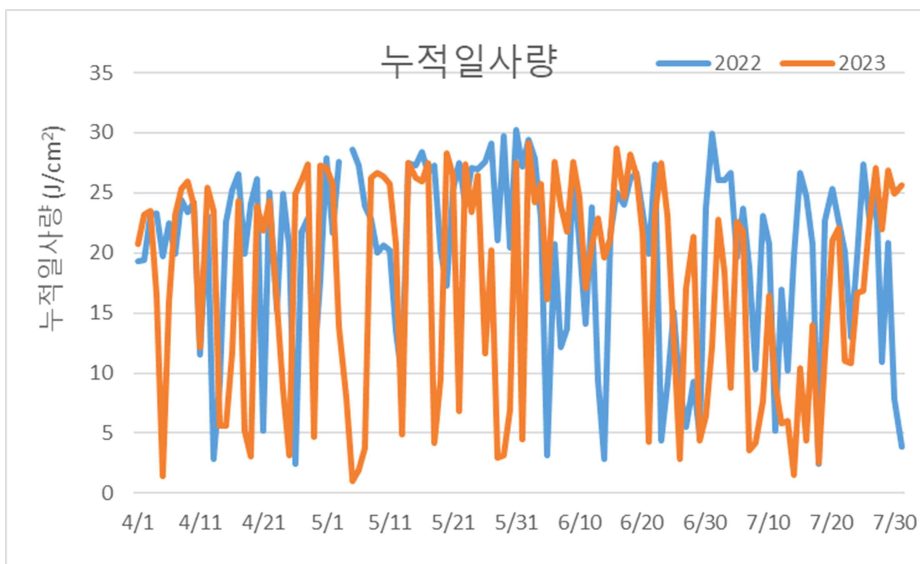
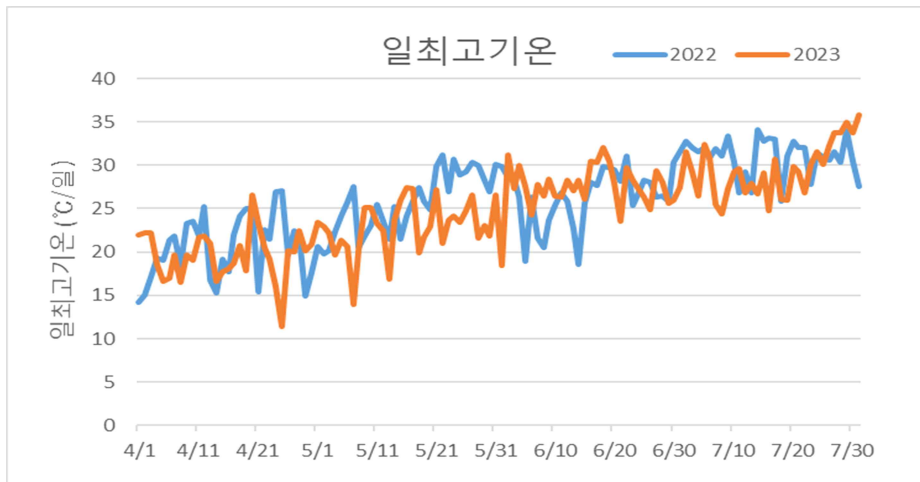
<그림> 시설내 시험구 배치(난괴법 3반복)

- 1년차 시험품종 중 생육과 수량면에서 우수한 특성을 나타내었던 Red계 품종 '레드피아'를 이용.
- 2022년 첫 번째 검증은 순환식 방식으로 급액 EC는 1.5, 2.0, 2.5dS·m⁻¹로 처리하였고 비순환식 EC 2.0dS·m⁻¹과 비교. 1월 25일 파종하여 3월 3일에 정식하였으며 3월 3일부터 급액 EC 처리를 개시하여 시험 종료하는 8월 18일까지 처리.
- 순환식 양분균형제어 알고리즘은 순환식 3처리에 대하여 5월부터 적용하였고 비순환식 처리는 계속 비순환식으로 운영. 1~2주 간격으로 배액을 채취하여 민간 분석센터를 통해 분석하여 KIST에서 개발된 알고리즘을 적용. 급액은 1년차 방법에 준하여 관리.
- 2023년 2번째 검증은 무보정 순환, 보정 순환, 비순환 방식으로 처리하여 비교. 급액 EC는 2.0dS·m⁻¹로 동일하게 공급함. 3월 28일 정식하여 8월 7일까지 수확조사.

- 무보정 순환식 처리는 정식 후 7일부터 배액을 순환시켰고, 보정 순환식 처리는 정식후 7일부터 배액을 순환시켜 집수 후 4월 28일부터 양분균형제어 알고리즘을 적용하여 보정 후 공급하고, 비순환식 처리는 계속 비순환식으로 운영. 1~2주 간격으로 배액을 채취하여 민간 분석센터를 통해 분석하여 보정 후 순환 처리는 KIST에서 개발된 알고리즘을 적용하여 보정. 급액은 1년차 방법에 준하여 관리.
- 양액 조성은 토마토 전용 배양액으로 1차 검증에서는 국내용인 원예연 양액을 이용하였고, 2차 검증에서는 Red계 품종임을 감안하여 네덜란드 PBG 양액조성을 이용.

배양액 조성	무기이온농도(me/L)						
	NO ₃ -N	NH ₄ -N	P	K	Ca	Mg	S
원예연	10.75	0.5	1.25	6.5	5.5	2	2
PBG	13.2	1.2	4.5	8	9.6	4.8	8.8

- 1차(2022년) 및 2차(2023년) 검증 시험 기간 중 재배시기의 일최고기온과 누적일사량은 아래 그림과 같음



<1차 순환식 양분 균형제어 알고리즘 적용 적합성 검증>

○ 급액 EC와 수경재배 방식에 따른 작물재배 효과 분석

- 초기 생육은 급액 EC나 수경재배 방식에 따른 토마토 개체간 차이가 없었음.

〈표〉 처리별 토마토의 초기 생육 (조사시기, 2022년 3월 18일)

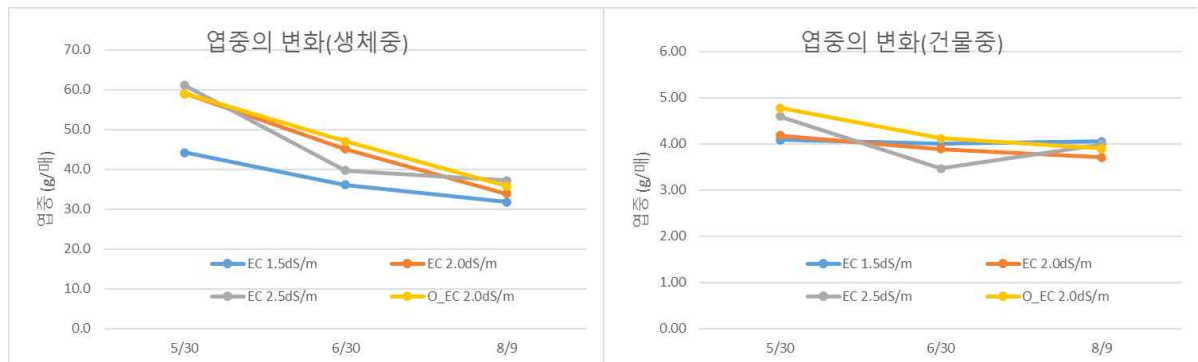
방식	급액 EC (mS/cm)	초장 (cm)	경경 (mm)	엽수 (매/주)	마디수 (절/주)
순환식	1.5	52.4 a	5.76 a	8.4 a	9.3 a
	2.0	49.7 a	5.80 a	8.4 a	9.4 a
	2.5	49.1 a	5.81 a	8.6 a	9.6 a
비순환식	2.0	52.6 a	5.51 a	8.8 a	9.8 a

- 급액방식과 급액 EC에 따른 시험종료시 토마토의 생육을 나타냄. 급액 EC가 낮은 처리에서 초장, 경경, 마디수 발생이 우수하였음. 순환식과 비순환식 EC 2.0 mS/cm 간에 비교했을 때 상부의 경경이 비순환식 굵었음. 일반적으로 상부 경경은 토마토의 생육상황을 판단하는 중요한 요소가 되고 대과종 토마토의 경우 10~15mm를 적정범위로 보고 있기 때문에 순환식이 7.6mm로 작은 것은 배액 순환의 영향이 미쳤을 가능성이 있다고 판단됨. 그 외 생육 요소는 큰 차이는 없었음.

〈표〉 처리별 시험종료시 토마토 생육(조사시기, 2022년 8월 17일)

방식	급액 EC (mS/cm)	초장 (cm)	경경(mm)		마디수 (절/주)	화방수 (매/주)
			하부	상부		
순환식	1.5	514.2 bc	14.5 b	8.4 ab	87.4 b	20.2 a
	2.0	525.3 ab	15.0 a	7.8 bc	91.5 ab	21.3 a
	2.5	496.1 c	15.1 a	7.6 c	90.4 ab	21.0 a
비순환식	2.0	550.2 a	15.9 a	9.1 a	93.6 a	20.6 a

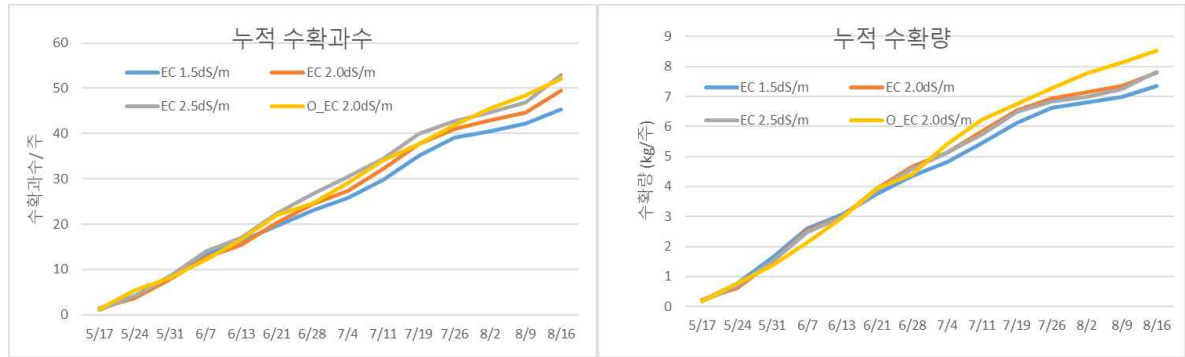
- 생육초기 엽중은 EC 1.5mS/cm처리를 제외하고 엽 1매당 생체중이 약 60g였으나 점진적으로 감소하여 생육후기 40g이하로 감소하였다. 비순환식과 순환식 간에는 큰 차이가 없었음. EC 1.5mS/cm는 생육초기에는 뚜렷하게 엽중이 작았으나 후기에는 다른 처리와 큰 차이가 없어졌음. 시험종료시 경중은 비순환 처리가 순환 처리에 비하여 무거웠으며, 순환식 EC 처리 중에서는 2.0mS/cm이 가장 우수하였음.



〈그림〉 처리별 1엽의 생체중 변화

- 수확과수는 EC 2.5, 2.0, 1.5mS/cm처리 순으로 급액 EC가 높을수록 많았고 비순환식이 순환식 보다 많은 경향이였음. 수확량은 비순환식이 가장 많았고 순환식 EC에 따른 차이는 없었음. 처리간

차이가 발생하기 시작하는 시기는 7월 이후로 처리 후 약 4개월 경과 이후인 것으로 나타났음.



〈그림〉 처리별 누적 수확과수 및 수확량 변화

〈표〉 처리별 최종 수량

방식	급액 EC (mS/cm)	수확과수 (개/주)	수량 (kg/주)
순환식	1.5	45.3 b	7.35 b
	2.0	49.5 a	7.79 ab
	2.5	53.0 a	7.83 ab
비순환식	2.0	52.0 a	8.52 a

- 과경, 과고, 과중은 급액 EC가 높을수록 작은 경향을 나타내었는데 특히, EC 2.5mS/cm 처리에서는 뚜렷한 차이를 나타내었고 순환식에 비하여 비순환식이 과실이 큰 경향을 나타내었음. 당도는 EC 2.5mS/cm 처리는 높고 다른 처리는 큰 차이가 없었음.

〈표〉 처리별 토마토 과실 특성

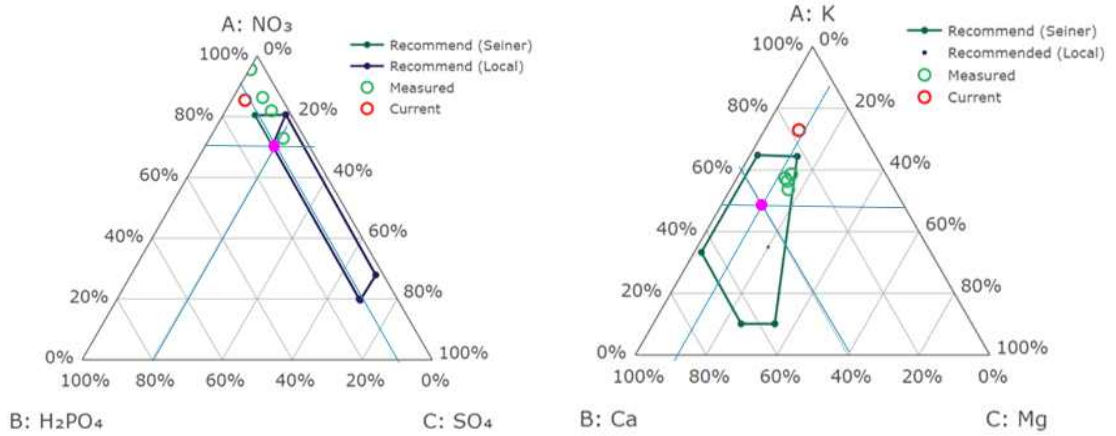
방식	급액 EC (mS/cm)	과경 (mm)	과고 (mm)	평균과중 (g/과)	당도 (obrix)
순환식	1.5	68.02 a	59.59 a	166.00 a	4.28 ab
	2.0	68.73 a	58.47 a	166.20 a	4.19 b
	2.5	66.43 b	55.74 b	148.47 b	4.39 a
비순환식	2.0	69.75 a	58.18 a	173.49 a	4.14 b

○ 양분균형제어 알고리즘 적합성 검증

〈표〉 Steiner의 이온균형 이론에 기반한 양액 균형제어의 이온별 제어 기준

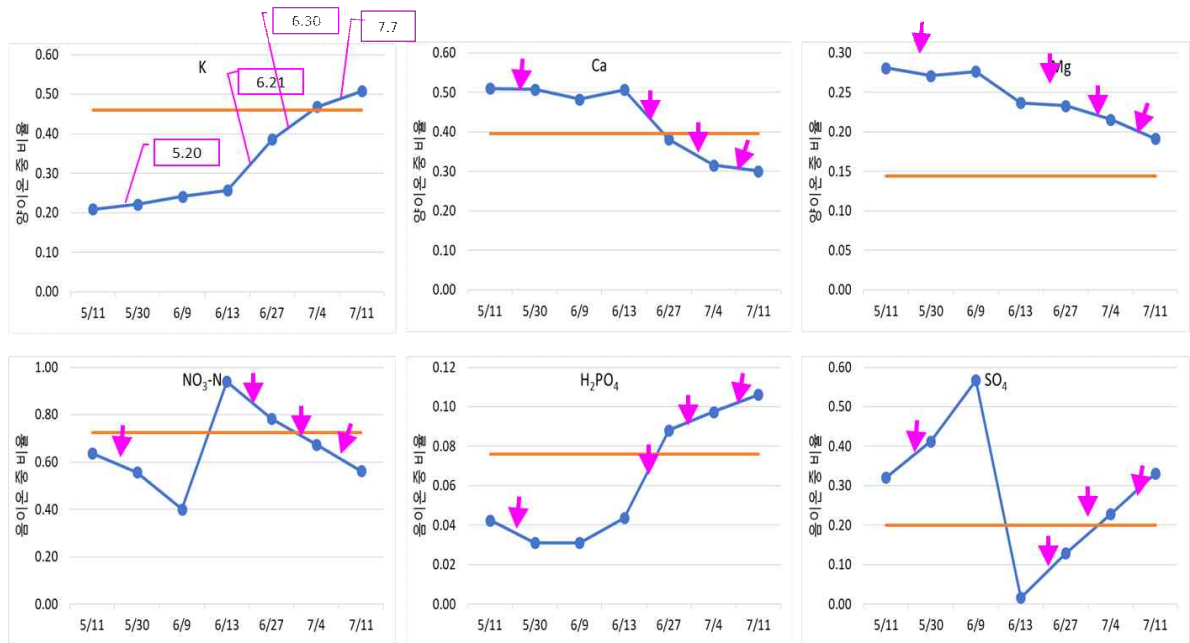
구분	무기이온농도(me/L)					
	K	Ca	Mg	NO3-N	H2PO4	S
양액조성	6.5	5.5	2	10.75	1.25	3
이온비율	46	40	14	72	8	20

- 투입량 기준으로 이온을 균형 기준을 설정하고 양이온과 음이온의 목표 비율을 설정하여 분석된 배액의 이온을 목표치로 조정.



〈그림〉 양액 균형제어를 위한 제어 기준점

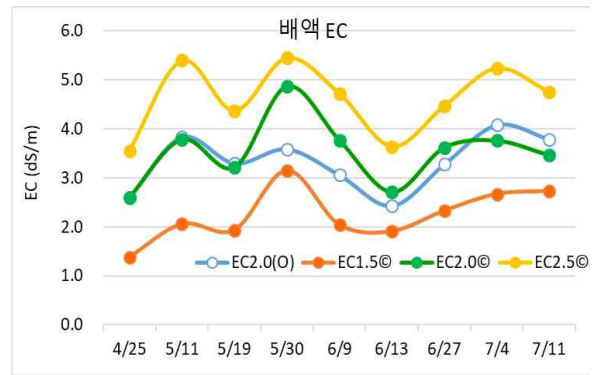
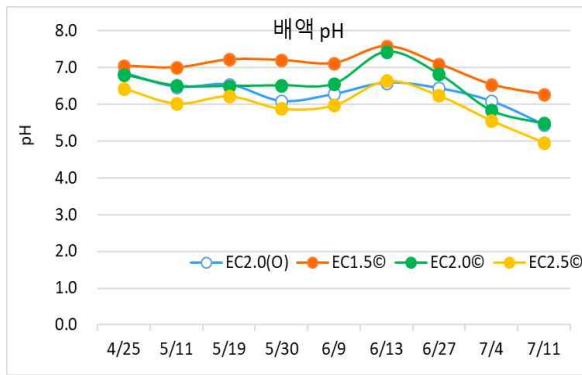
- 양분 균형 알고리즘이 적용되기 전에 양이온은 K가 기준비율 46%에 비해 20%로 낮았고, Ca, Mg는 기준 비율 40%, 14%에 비하여 50%, 28%로 각각 높았으나 균형제어 알고리즘을 적용하여 점적으로 기준 비율에 수렴하였음. 그러나 음이온의 경우 기준비율에 대한 조정에 대한 편차가 심하게 발생하였고 양이온에 비하여 정확도가 낮았음.



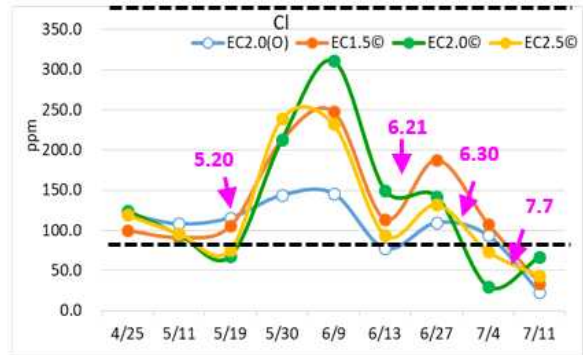
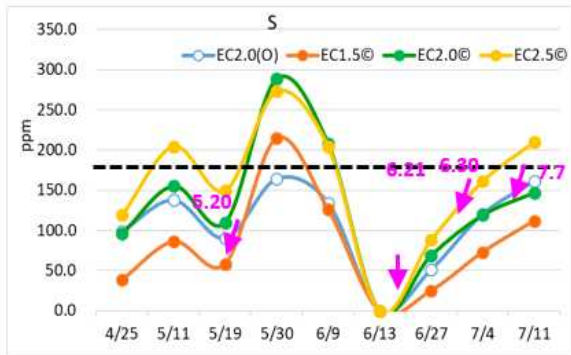
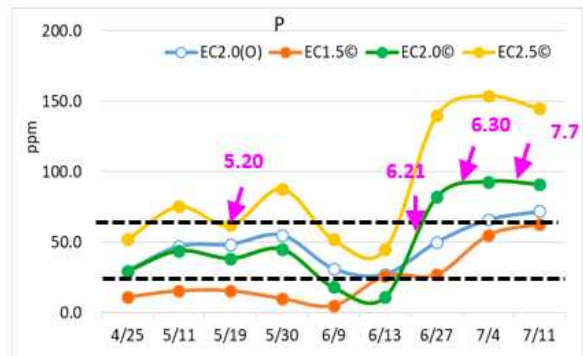
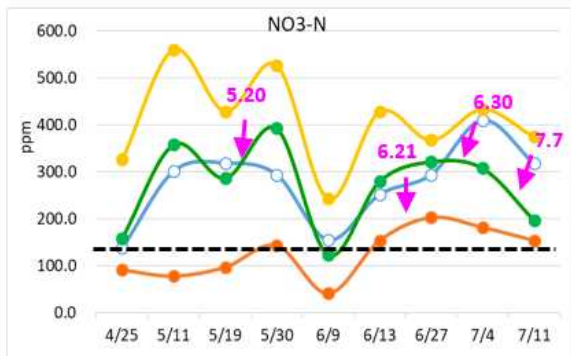
〈그림〉 양액 균형제어 알고리즘 적용 및 적합성 검증

○ 양분 균형제어 알고리즘이 적용된 조건에서 급액 EC 및 수경재배 방식에 따른 양분변화

- 배액의 pH는 급액 EC가 높은 조건에서 낮아져 시험종료시에는 EC 2.5mS/cm 처리에서는 5.0이하로 떨어지는 반면에 EC 1.5mS/cm 처리는 6.3으로 높았다. 그러나 생육 전반을 통하여 심각하게 작물 생육을 저해할 만한 pH 조건은 발생하지 않았음. 6월 일부 기간에 순환식 처리의 pH 상승이 일어나 차이가 발생한 것을 제외하고 순환식과 비순환식간에 차이는 없었음. 이 시기를 전후하여 배액의 EC도 차이가 발생하는 것으로 미루어 볼 때 급액관리의 차이가 발생했던 것으로 추측됨.

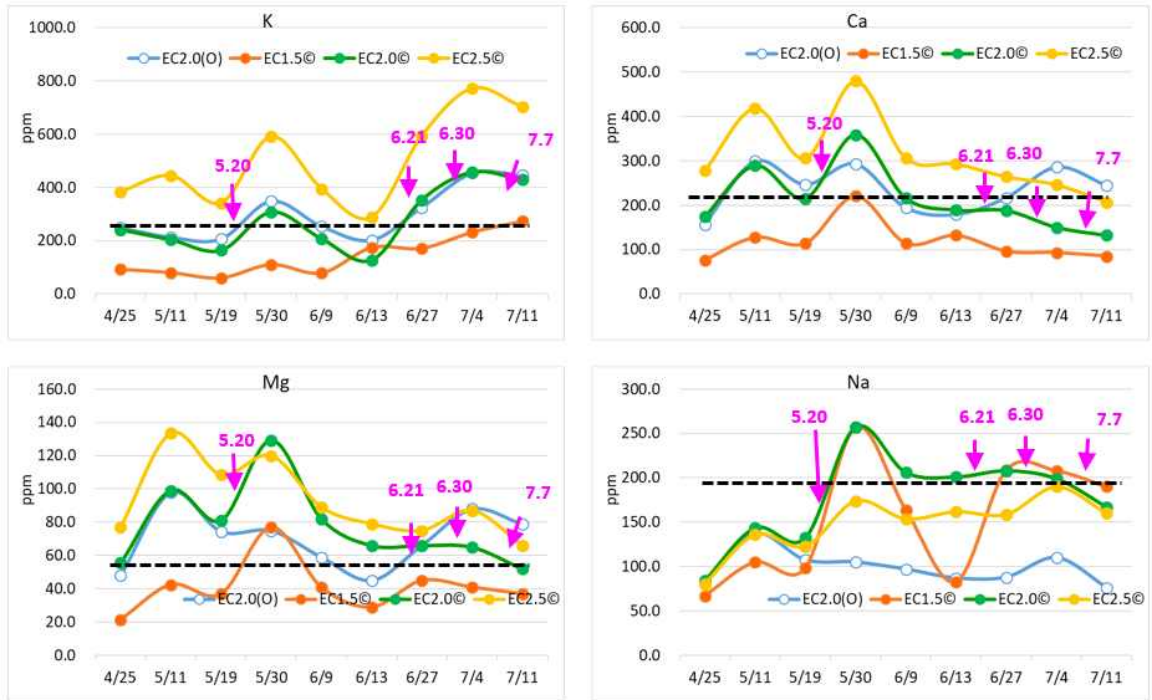


〈그림〉 급액 EC 및 수경재배 방식에 따른 배액의 변화



〈그림〉 배액내 음이온의 변화

- 음이온의 양액 균형제어 알고리즘 적용하여 실제 양액으로 공급을 시작한 것을 5월 11일 분석된 결과를 바탕으로 5월 20일이었는데 이 때 비율 상승을 위해 조정된 NO₃-N 이온은 1주일 후까지 배액내 농도가 상승하였다가 2주차에 다른 처리들과 동일하게 감소함. P는 비율 증가 적용 효과가 뚜렷하게 배액내 농도로 나타나지 않고 6월부터 오히려 감소함. S는 비율을 낮추어 공급하였음에도 적용 이후 6월 초까지 적용시점 보다 높았다가 6월 13일에는 모든 처리에서 함량이 검출되지 않음. 이것은 분석에 오류가 있었거나 양액의 침전 등 시험 외적인 오류가 발생했을 가능성이 있었기 때문이라고 판단됨. 1차 적용의 결과에서는 배액 분석 결과와 알고리즘 적용 및 다음 알고리즘 적용 기간이 길었는데 이런 모든 요인에 대한 보완이 필요하다고 판단됨.
- 2차 적용은 6월 13일 분석자료를 기준으로 6월 21일에 NO₃-N을 낮추고 S를 높이는 양액을 조성하여 공급함. 3차부터는 주 1회 분석하여 바로 양액조성에 반영함.



〈그림〉 배액내 양이온의 변화

- 양이온의 1차 양액 균형제어 알고리즘 적용은 K를 높이고 Ca와 Mg의 비율을 낮춘 양액을 공급하였고 1주일 동안 양액의 농도가 증가하였으나 이후 감소하여 2차 조정시기까지 감소함. Ca와 Mg는 비율을 낮추어 공급하였음에도 배액내에서는 농도는 증가하였는데 배지는 사용하는 배지 경재배에서 배지의 완충능을 고려할 때 이후의 감소가 알고리즘 적용효과가 반영된 것으로 이해할 수 있을 것임. 다만 배액내 무기이온의 농도가 급액량에 의해 영향을 크게 받기 때문에 배액내 배액량의 증감에 따라서 전체적인 농도가 감소하거나 증가할 수 있기 때문에 통합적으로 판단할 필요가 있음.
- 모든 처리의 급액량을 동일하게 공급하였을 때 총급액량은 주당 272.6였는데, 배액량은 토마토 생육 상태에 따라서 흡수량이 많은 경우 배액이 감소함. 따라서 수분흡수량은 비순환식이 가장 많아서 배액률이 20.9%로 낮았고, 순환식 처리는 27.9~29.7%로 높음.
- 순환식을 72일간 적용하여 비료 절감율을 조사하였을 때 배액을 재사용하므로써 비순환식에 비해 비료 사용량을 52.2% 절감 할 수 있었음.

〈표〉 재배기간 총급액, 배액, 흡수량(133일)

방식	급액 EC (mS/cm)	급액량 (L/주)	배액량 (톤/주)	흡수량 (톤/주)	배액률(%)
순환식	1.5	272.6	79.5	193.6	27.9
	2.0	272.1	85.1	187.4	29.7
	2.5	272.1	82.1	190.3	28.5
비순환식	2.0	274.7	61.4	213.5	20.9

〈표〉 비료 투입량 비교

방식	비료투입량 (kg/ha)	비료 투입율 (A/B×100)
순환식(A)	2,532.6	47.8
비순환식(B)	5,299.7	100

<2차 순환식 양분 균형제어 알고리즘 적용 적합성 검증>

○ 배액 순환 방식 및 비순환 재배 따른 작물재배 효과 분석

- 생육후기 배액 순환 방식 및 비순환 재배에 따른 초장, 경경, 엽수, 마디 발생의 차이가 없었음
- 엽의 생체중은 처리간 차이가 없고 건물중은 무보정 순환 처리구가 보정 순환처리나 비순환에 비하여 작았음. 경중은 생체중에서 비순환식과 보정구는 차이가 없었으나 비순환은 작았고, 건물중과 건물율은 차이가 없었음

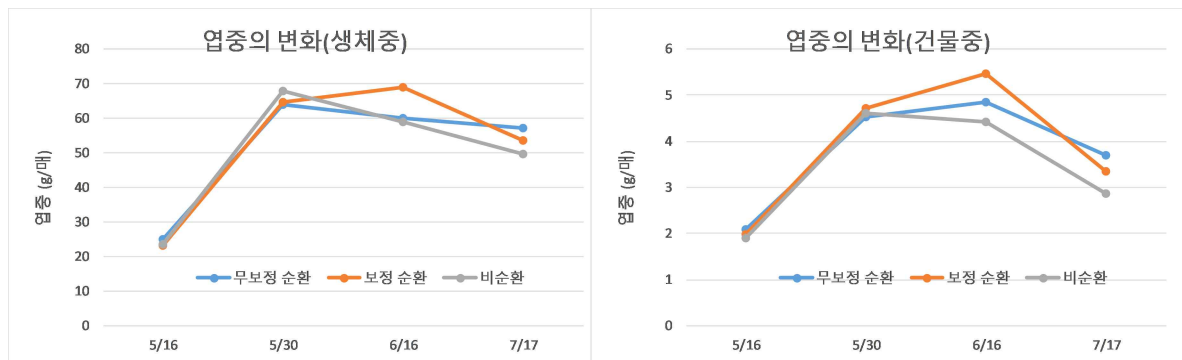
<표> 처리별 토마토의 후기 생육 (조사시기, 2023월 7월 20일)

방식	방식	초장 (cm)	상부 경경 (mm)	엽수 (매/주)	마디수 (절/주)
순환식	무보정	356.2 a	6.77 a	42.27 a	11.47 a
	보정	360.7 a	6.37 a	42.73 a	11.87 a
비순환식		360.3 a	6.40 a	42.93 a	11.67 a

<표> 처리별 토마토의 후기 생육 (조사시기, 2023월 8월 14일)

방식	방식	엽중(g/주)			경중(g/주)		
		생체	건물	건물율	생체	건물	건물율
순환식	무보정	1706.6 a	150.6 b	8.81 a	690.7 b	77.31 a	11.20 a
	보정	1751.9 a	157.4 a	8.98 a	704.1 ab	78.68 a	11.16 a
비순환식		1789.9 a	158.7 a	8.84 a	716.0 a	78.71 a	10.99 a

- 생육기간 중 엽중의 변화를 분석하였을 때, 생육초기 엽중은 처리간 차이가 없었으나 6월 20일 조사에서 양분을 보정한 순환식 재배구가 다른 처리에 비하여 무거웠고 무보정 순환과 비순환은 차이가 없었음. 7월의 엽중은 모든 처리에서 작아졌는데 이것은 생육기간의 경과에 따른 초세 둔화와 고온 스트레스에 의한 것이었으며, 처리간 차이는 없었음.



<그림> 처리별 1엽의 생체중 변화

- 수확과수는 양액성분 보정을 하지 않은 순환처리에서 적고, 보정처리구가 가장 많았음. 그러나 주당 수량은 비순환식 처리구의 토마토 평균과중이 컸기 때문에 총 수량은 보정처리구와 비순환식 간에 차이가 없었음
- 2023년의 생산량은 2022년에 비하여 상당히 적었는데 이것은 재배기간이 36일이 짧았을 뿐 아니라 재배기간 중 흐리거나 비오는 날이 많아 일조량이 상당히 적었던 것이 영향을 미쳤다고 판단됨. 특히, 2023년에는 1일 누적일사량이 500J/cm² 이하인 날이 20일로써 2022년 9일에 비하여 많았고 5월과 7월에 연속적으로 희린 날이 많아서 착과와 과실비대에 영향을 미침

〈표〉 처리별 수확과수

방식	방식	수확과수 (개/주)	수량 (kg/주)
순환식	무보정	22.8 b	5.22 b
	보정	25.3 a	5.69 a
비순환식		23.8 b	5.69 a

- 과경, 과고, 과중 및 당도는 처리에 따른 차이가 없었음

〈표〉 처리별 토마토 과실 특성

방식	방식	과고 (mm)	과경 (mm)	평균과중 (g/과)	당도 (obrix)
순환식	무보정	61.9 a	79.0 a	228.3 b	3.8 a
	보정	61.3 a	77.6 a	225.6 b	3.9 a
비순환식		62.6 a	80.4 a	240.6 a	3.8 a

○ 양분균형제어 알고리즘 적합성 검증

〈표〉 Steiner의 이온균형 이론에 기반한 양액 균형제어의 이온별 제어 기준

구분	무기이온농도(me/L)					
	K	Ca	Mg	NO ₃ -N	H ₂ PO ₄	S
양액조성	8	9.6	4.8	13.2	4.5	8.8
이온비율	35.7	42.9	21.4	49.8	17.0	33.2

○ 배액 분석치를 기준으로 공급한 양액 조성(5/18)

Select Farm/Zone/Node

(FARM2 - ZONE13 - NODE15) 시설원예연구소 - 2023년 준

SELECT FARM/ZONE/NODE

Tank A Volume: 1000.0 L , Enrichment Factor: X100.0

NO	FORMULA	AMOUNT	UNIT
A1	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	114.103	kg
A2	KNO ₃	0.0	kg
A3	NH ₄ NO ₃	16.599	kg
A4	Fe-EDTA 13%	40.588	mL

Select Date

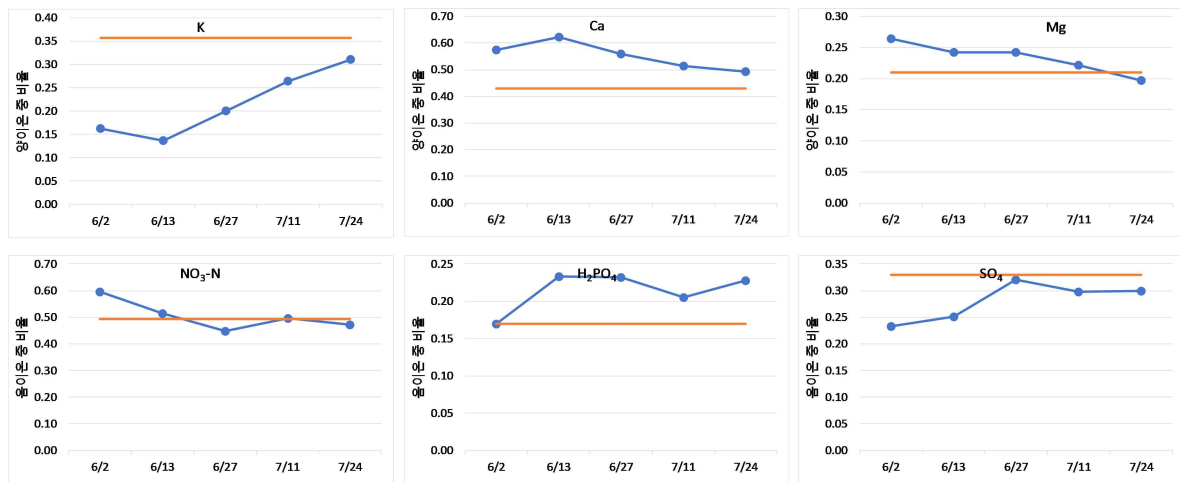
2023-05-18

SELECT DATE

Tank B Volume: 1000.0 L , Enrichment Factor: X100.0

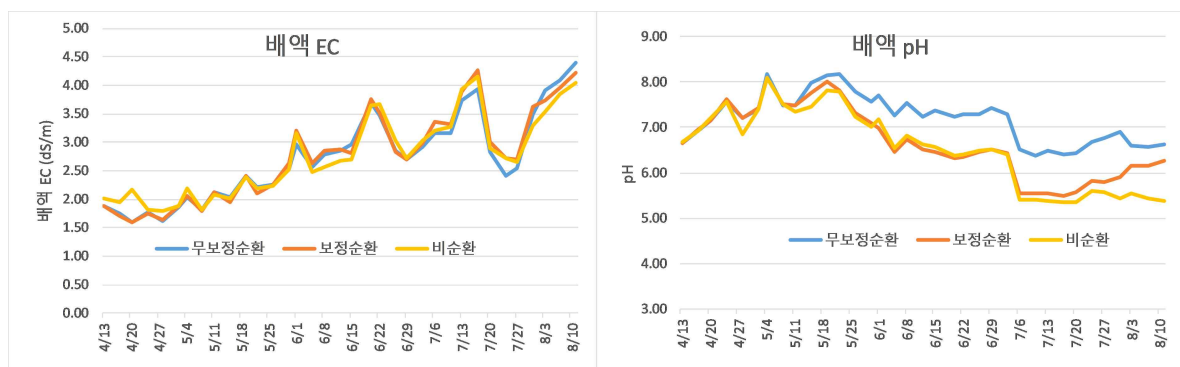
NO	FORMULA	AMOUNT	UNIT
B1	K ₂ SO ₄	42.872	kg
B2	KH ₂ PO ₄	26.874	kg
B3	MgSO ₄ ·7H ₂ O	59.982	kg

- 배액 분석치를 기준으로 양액을 달리 공급하였는데 배액 채취후 분석센터로부터 결과 받아 2~3일 후부터 새로운 양액조성으로 공급하였음. 새로운 양액조성 공급시기가 5월18일, 6월 2 일, 6월 16일, 6월 30일, 7월 14일, 7월 28일, 8월 8일로 대략 2주일 간격으로 변경하였음
- 양분 균형 알고리즘이 적용되기 전에 양이온은 K가 기준비율 36%에 비해 16%로 낮았고, Ca, Mg는 기준 비율 43%, 21%에 비하여 57%, 26%로 각각 높았으나 균형제어 알고리즘을 적용하여 점진으로 기준 비율에 수렴하였음. 음이온의 경우 기준비율에 대한 조정 효과도 1차 검증에 비하여 우수하였음. 다만, 연구소 내 실증 시설의 면적이 작아서 배액의 양이 적었고, 배액 순환을 위한 배액집수 기간이 길어져 1, 2차 검증 모두 정식 후 상당 기간이 경과한 후 양분 균형알고리즘 적용 하였기 때문에 균형이 심하게 깨진 상태에서 기준비율에 수렴하는데 상당한 시간이 소요 되었으나 1차 검증에 비하여 2차 검증에서 훨씬 안정적으로 보정되었음



〈그림〉 양액 균형제어 알고리즘 적용 및 적합성 검증

- 배액의 EC는 처리에 따른 차이없이 관리되었고, pH는 무보정 순환처리구가 높고 보정한 순환 처리는 비순환처리와 거의 유사하게 관리 되었음



〈그림〉 배액의 EC, pH 변화

- 재배기간 119일동안 모든 처리의 급액량을 동일하게 공급하였을 때 총급액량은 주당 203~207L로 1 일 평균 1.7L가 공급되었음. 배액량, 흡수량, 배액률은 처리에 따른 차이가 없었음

〈표〉 재배기간 총급액, 배액, 흡수량(119일)

방식	방식	급액량 (L/주)	배액량 (톤/주)	흡수량 (톤/주)	배액률(%)
순환식	무보정	207.2	54.2	142.7	30.1
	보정	203.1	53.2	139.7	30.5
비순환식		206.9	52.9	141.2	29.8

- 순환식을 119일간 적용하여 비료 절감율을 조사하였을 때 배액을 재사용하므로써 비순환식에 비해 비료 사용량을 약 50% 절감 할 수 있었음. 이것은 1차 검증시기와 비슷한 값이지만 1차 검증에 비하여 급액량이 적고 배액의 EC도 낮은 생육 초기부터 적용된 것으로 생육후기 기간이 더 길게 포함될 경우 비료 절감율이 높아질 가능성이 있음

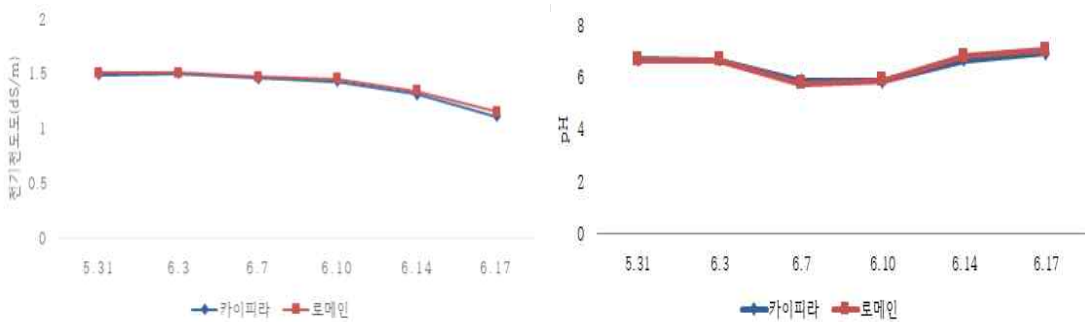
〈표〉 비료투입량 비교

방식	방식	비료투입량 (kg/ha)	비료 투입율 (A/B×100)
순환식(B)	무보정	5211.5	50.4
	보정	5142.6	49.7
비순환식(A)		10,345.0	100

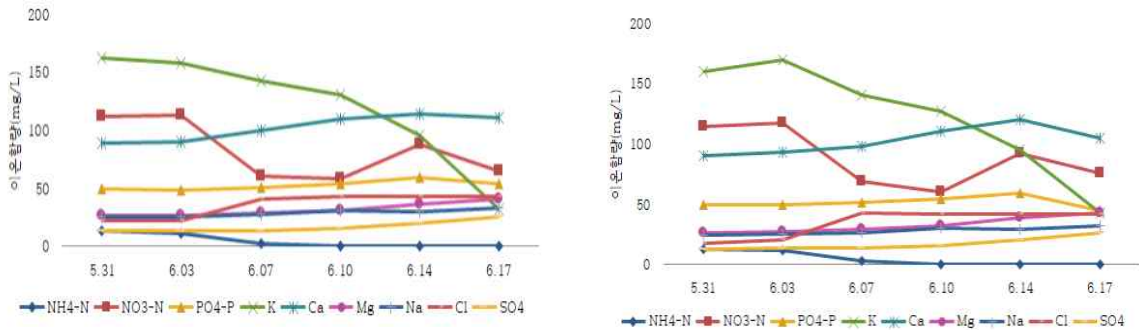
2) 엽채류 재배용 순환식 수경재배 시스템 현장 실증

(1) 엽채류 순환식 수경재배 시 재배기간 동안의 양액 내 무기이온 흡수패턴 분석

- 엽채류 순환식 수경재배시 벤로형 유리온실(330㎡)에서 구역당 212주씩 카이피라, 로메인 2품종을 정식하였고 일반적으로 농가에서는 양액통 내 양액이 줄어든 수위만큼 배액을 원수로 희석하여 다시 EC, pH 농도만 보정하여 공급하기 때문에 본 시험에서도 양액 EC 1.6 ~ 2.0dS/m, pH 5.5 ~ 6.5 농도로 맞춰 순환하였음. 양액 보충 없이 한 작기 동안 순환시켰을 때의 무기이온 흡수 양상을 보기 위해 2021년 5월 31일 정식하여 6월 17일에 수확하였음.
- 양액만 순환시켰을 때의 카이피라와 로메인 두 품종의 pH, EC, 이온 변화가 유사한 경향을 보였음.
- NH₄-N, NO₃-N, P, K, Fe은 농도가 감소하였고 Ca, Mg은 축적된 것으로 보아 NH₄-N, NO₃-N, P, K, Fe의 요구량이 더 높은 것으로 보임.



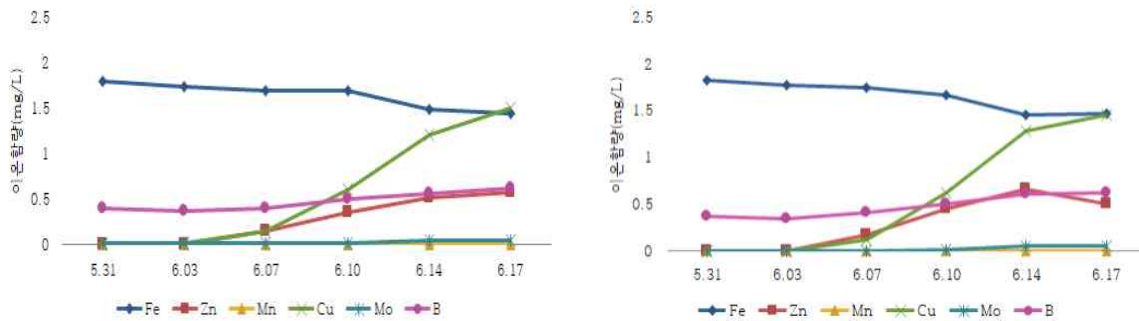
〈그림〉 EC와 pH 변화



카이피라

로메인

〈그림〉 다량원소 변화



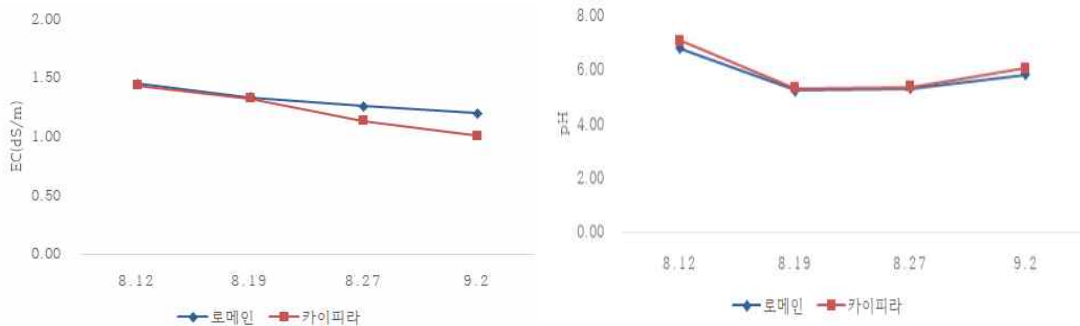
카이피라

로메인

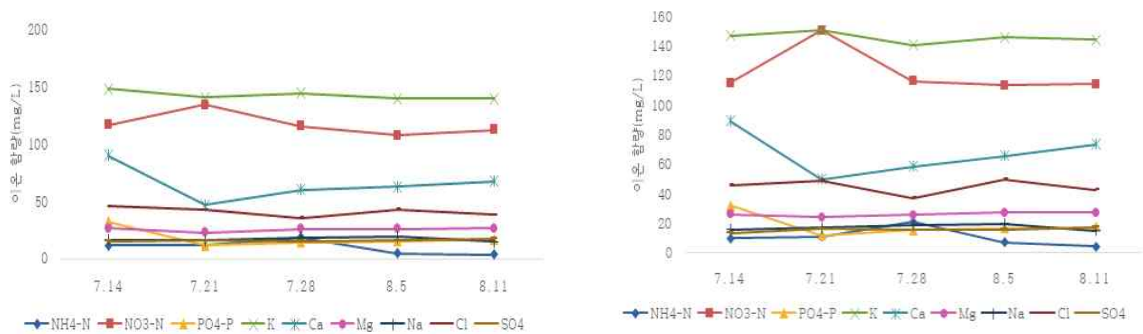
〈그림〉 미량원소 변화

- 흡수된 양액 양만큼 증류수를 보충하여 좀 더 정밀한 무기이온 흡수 양상을 분석하고자 하였음.

두 작기 연속으로 재배하였으며 2021SUS 7월 14일에 정식하여 8월 11일 수확 후 연이어 8월 12일에 정식하여 9월 2일 수확하였음. 그 결과 한 작기 동안 양액이 줄어든 만큼 증류수를 보충하였을 때 NH₄-N, P, K, Ca, Fe 감소, Na, Zn, Cu는 축적되었으며 나머지는 변화가 미미하였음.



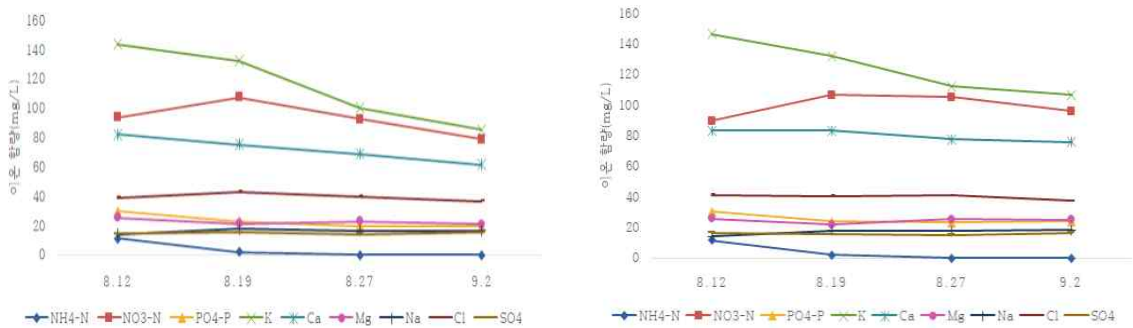
〈그림〉 EC와 pH 변화



카이피라

로메인

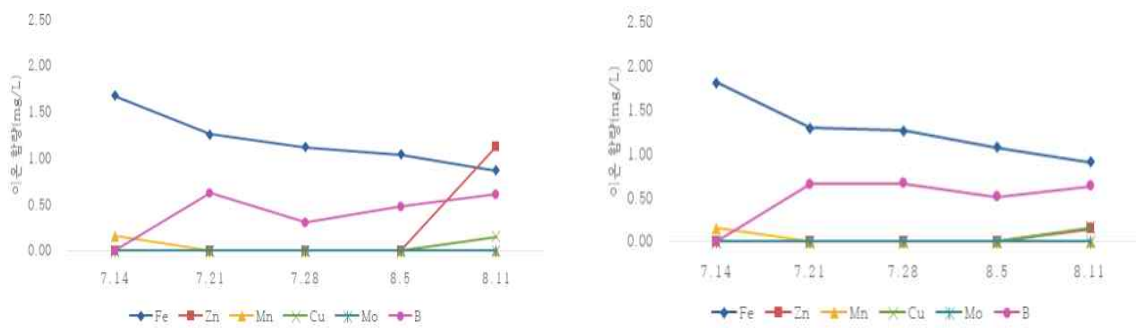
〈그림〉 다량원소 변화(7.14 ~ 8.11)



카이피라

로메인

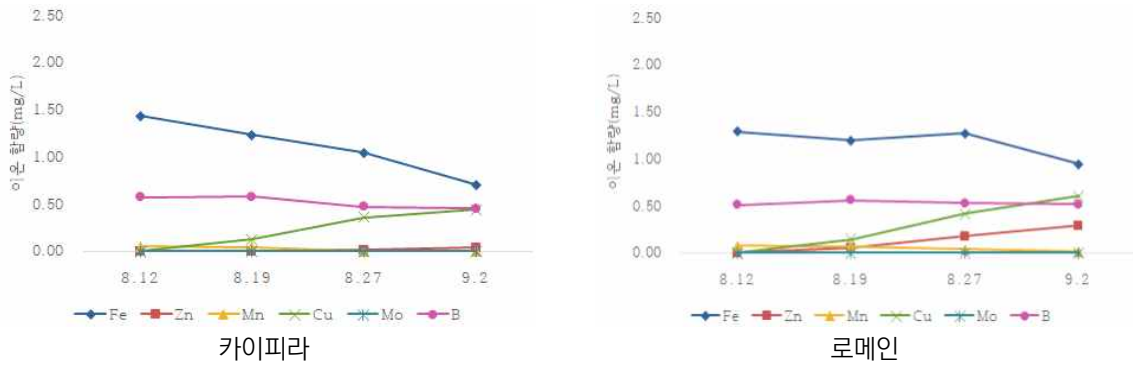
〈그림〉 다량원소 변화(8.12 ~ 9.2)



카이피라

로메인

〈그림〉 미량원소 변화(7.14 ~ 8.11)



〈그림〉 미량원소 변화(8.12 ~ 9.2)

- 양액만 순환시킬 때 보다 증류수를 보충했을 때 이온 변화 폭이 좀더 두드러졌으며 공통적으로 Na는 식물체가 흡수하지 않아 축적되고 NH₄-N, K, Fe의 무기이온 요구도가 높은 것으로 보임.
- 한 작기만 보았을 때 변화가 미미하거나 축적되는 무기이온은 다음 작기때 추가 보충하지 않아도 될 것으로 판단됨.
- 주요 무기이온들의 변화를 분석하였을 때 양액 순환보다 증류수 보충시 이온 농도 변화 폭이 컸음.
- 두 번째 작기 때부터 양액 순환처리 시 대부분의 무기이온들이 증류수 보충보다 함량이 더 많았음.
 - 로메인, 카이피라 두 작목의 공통된 무기이온 변화로는 NO₃-N, Ca, Mg에서 축적되는 양이 많았으며 P, Fe은 정식때보다 수확 시 축적되지 않고 줄어드는 경향을 보임.
 - K은 로메인 재배시 흡수양상이 미비하였으나 되었으나 카이피라 재배 시 감소하였고 Fe은 감소율이 높았음.
- 두 번째 작기 때 양액 순환처리 시 생체증과 엽폭이 감소하였으나 증류수 보충 시 오히려 생체중이 높았는데 엽채류는 영양요구도가 낮아 증류수만 보충하여도 두 번 연속 재배하여도 생육이 좋다는 걸 보여줌.

〈표〉 양액 내 무기염 변화(로메인)

이온	처리	1기작(mg/L)		2기작(mg/L)	
		정식	수확	정식	수확
NO ₃ -N	양액 순환	92.0	90.0	81.0	110.0
	증류수 보충	85.0	63.0	36.0	56.0
NH ₄ -N	양액 순환	1.4	1.4	1.4	1.4
	증류수 보충	1.4	1.4	1.4	1.4
P	양액 순환	18.0	13.0	19.0	15.0
	증류수 보충	17.0	10.0	9.0	9.0
K	양액 순환	174.0	154.0	179.0	174.0
	증류수 보충	166.0	111.0	90.0	91.0
Ca	양액 순환	61.0	50.0	55.0	83.0
	증류수 보충	59.0	62.0	57.0	47.0
Mg	양액 순환	23.0	22.0	27.0	43.0
	증류수 보충	23.0	14.0	12.0	21.0
Fe	양액 순환	1.45	1.19	1.52	1.00
	증류수 보충	1.46	0.94	0.90	0.82
pH	양액 순환	5.78	7.15	7.10	7.48
	증류수 보충	6.04	7.26	7.40	7.19
EC	양액 순환	1.68	1.48	1.70	1.48
	증류수 보충	1.68	1.21	1.20	0.76

〈표〉 양액 내 무기염 변화(카이피라)

이 온	처리	1기작(mg/L)		2기작(mg/L)	
		정식	수확	정식	수확
NO ₃ -N	양액 순환	87.0	83.0	76.0	133.0
	증류수 보충	94.0	63.0	70.0	75.0
NH ₄ -N	양액 순환	1.4	1.4	1.4	1.4
	증류수 보충	1.4	1.4	16.0	1.4
P	양액 순환	18.0	15.0	19.0	15.0
	증류수 보충	19.0	11.0	11.0	7.0
K	양액 순환	168.0	147.0	153.0	157.0
	증류수 보충	171.0	113.0	97.0	85.0
Ca	양액 순환	60.0	48.0	45.0	77.0
	증류수 보충	60.0	60.0	58.0	56.0
Mg	양액 순환	22.0	20.0	22.0	39.0
	증류수 보충	22.0	13.0	12.0	24.0
Fe	양액 순환	1.42	1.16	1.30	0.89
	증류수 보충	1.48	0.93	0.94	0.49
pH	양액 순환	6.21	7.12	7.2	7.45
	증류수 보충	6.27	7.05	7.2	7.77
EC	양액 순환	1.68	1.48	1.7	1.48
	증류수 보충	1.73	1.21	1.2	0.90

〈표〉 처리별 생육조사

작 목	처 리	생체중(g/주)		엽장(g/주)		엽폭(g/주)	
		1기작	2기작	1기작	2기작	1기작	2기작
로메인	양액 순환	83.0a	80.7b	24.6a	25.0a	10.7a	9.3a
	증류수 보충	81.6a	95.3a	25.3a	25.2a	11.0a	10.2a
카이피라	양액 순환	87.4a	81.7b	19.9a	18.7a	17.0a	14.0a
	증류수 보충	87.4a	97.3a	19.6a	18.8a	16.8a	13.8a

(2) 엽채류 작물별 순환식 수경재배 시스템 현장 실증

○ 연속재배에 따른 양액 흡수 양상 조사

- 엽채류를 여러 작기 동안 순환하여 연속재배 했을 때 양액 내 무기이온 변화와 작물의 생육 이상 반응을 보이는지 분석하고자 수행함. 시험작목은 카이피라, 로메인 2품종을 대상으로 하여 2021년 11월 24일부터 2022년 3월 16일까지 4차 연속재배를 하였음. 그 결과 카이피라와 로메인의 양액 내 무기이온 변화는 비슷한 경향을 보였음. NO₃-N, P, K은 2차 재배까지 흡수 양상이 높다가 3차 재배부터 정식할 때 보다 수확시 축적되는 양상을 보였으며 Ca, Mg은 2차 재배부터 축적되는 양상을 보였음.

〈표〉 양액 내 다량원소 변화 (단위: mg/L)

성분	1차 재배		2차 재배		3차 재배		4차 재배	
	정식시	수확시	정식시	수확시	정식시	수확시	정식시	수확시
NO ₃ -N	116.5	84.5	131.0	110.0	98.0	111.5	110.0	126.0
NH ₄ -N	<1.4	7.2	2.9	<1.4	14.7	<1.4	3.2	<1.4
P	23.0	4.5	30.0	29.5	66.0	68.5	65.5	73.5
K	157.5	84.5	148.0	96.5	191.5	161.5	164.0	185.0
Ca	121.5	61.0	102.0	131.0	88.0	102.5	109.0	122.0
Mg	35.0	22.0	34.5	41.0	26.5	29.5	31.5	34.5
S	31.0	42.0	36.5	47.0	30.0	32.0	33.5	36.0

〈표〉 양액 내 미량원소 변화 (단위: mg/L)

성분	1차 재배		2차 재배		3차 재배		4차 재배	
	정식시	수확시	정식시	수확시	정식시	수확시	정식시	수확시
Fe	1.03	0.40	0.63	0.21	2.03	0.68	0.71	0.36
Mn	0.08	<0.01	0.03	0.01	0.24	0.23	0.24	0.27
Zn	0.06	0.06	0.08	0.05	0.18	1.09	0.92	1.28
B	0.15	0.16	0.17	0.25	0.51	0.58	0.59	0.67
Cu	<0.01	0.03	0.05	0.30	0.03	0.87	0.93	1.04
Mo	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02

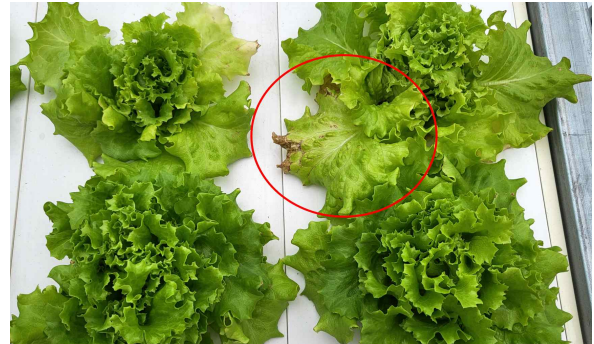


〈그림〉 연속재배에 따른 양액 내 무기염 변화 그래프

- 또한 3차 재배부터 K 결핍 증상과 뿌리가 활착되지 못하고 갈변되는 등 생리 장애가 발생하여 2차 재배까지만 연속재배가 가능한 것으로 보이며 이때 양액 교체가 필요한 것으로 판단됨.



< 카이피라 >



< 로메인 >

<그림> 칼륨 결핍 증상



카이피라



로메인

<그림> 뿌리 생육 불량

○ 연속재배에 따른 작물 재배 생육 분석

- 4차 재배 때 로메인의 엽장 11.9cm, 엽폭 10.3cm로 1차 재배보다 엽장 39%, 엽폭은 25% 감소하였고 카이피라의 경우 엽장 18.2cm, 엽폭 14.1cm로 1차 재배보다 엽장 52%, 엽폭은 36% 감소하였음.

<표> 연속재배시 생육특성(로메인)

재배시기	엽 장 (cm)	엽 폭 (cm)	SPAD	생체중 (g)
1차	27.4a	11.7b	43.8a	97.4b
2차	25.5b	12.3ab	37.2b	97.4b
3차	25.8b	11.4b	37.9ab	83.5c
4차	19.6c	9.3c	35.8b	104.9a

↓ DMRT at 5% level

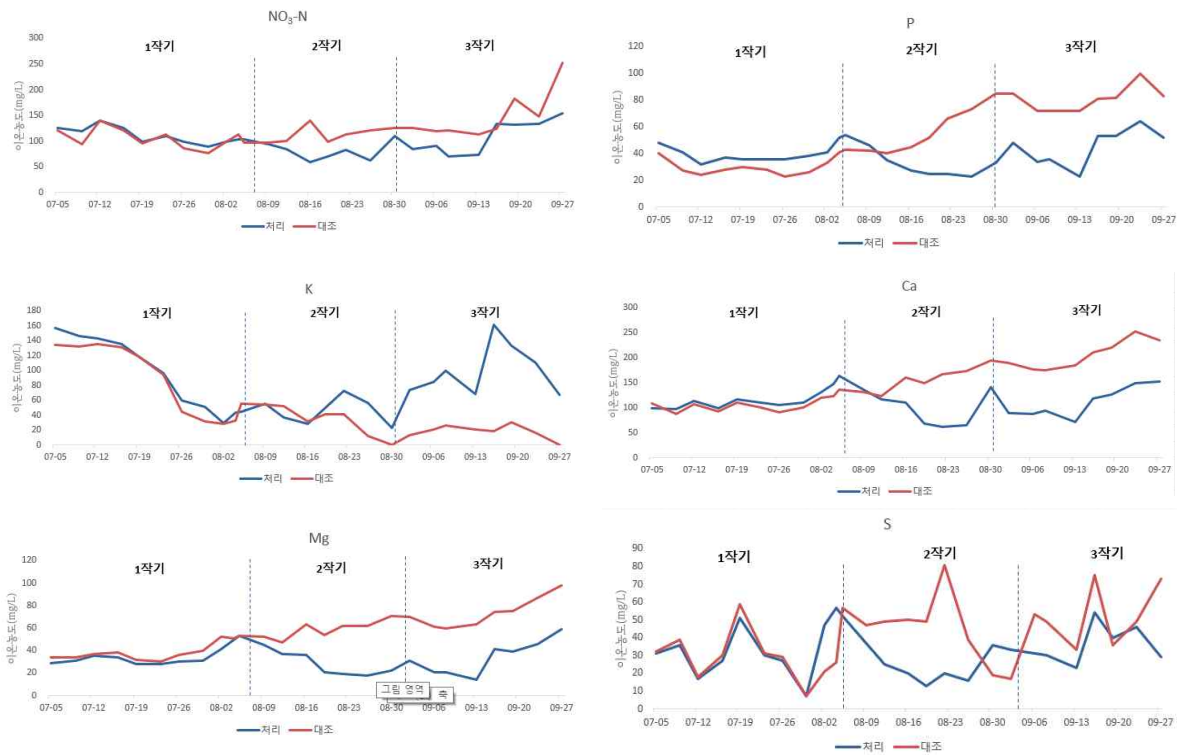
〈표〉 연속재배시 생육특성(카이피라)

재배시기	엽 장 (cm)	엽 폭 (cm)	SPAD	생체중 (g)
1차	18.2a	14.1a	26.1a	88.8a
2차	16.9a	14.7a	22.5a	110.5a
3차	17.5a	14.0a	24.9a	109.4a
4차	11.9b	10.3b	25.7a	91.6a

J DMRT at 5% level

○ 대조구 대비 이온선택전극 기반 자동 이온 보충 시스템 현장 실증

- 2022년 7월 5일부터 이온선택전극 기반 자동이온보충 시스템 실증 추진 중 양분복합플랫폼의 알 고리즘 및 순환식 수경재배 시스템 기계 이상, 모니터링 시스템 오류 등이 발생하여 계속 보완하며 연속재배 추진함.
- 연속 3차까지 재배시 대조에서 3번째 작기부터 이온이 축적되는 경향을 보였으며 앞서 시험한 4 연속 재배시와 동일한 양분 결핍 증상을 보였고 생체중이 낮게 조사됨.
- 처리구에서는 UV살균기 및 수경재배 시스템 오작동, 센서 이상 등으로 비료 공급이 원활하지 못하여 무기이온 농도가 낮게 유지되거나 높아지는 모습을 보임.



〈그림〉 양액 내 무기염 변화 그래프

- 1차 재배시에는 처리구와 대조구 간의 초장, 엽장 등 유의한 차이가 없었으나 2차 재배시 처리구의 EC농도가 낮게 유지되어 대조구의 생체중이 처리구보다 높았음. 3차 재배시 앞선 시험과 동일하게 처리구보다 대조구의 엽장, 엽폭이 작았음. 이러한 이온 농도 축적은 엽채류의 생육을 불량하게 만들며 반복 실험을 통해 양액 내 적정 이온 농도 유지 가능 여부 및 엽채류의 이상반응 유무 검토가 필요.

〈표〉 연속재배시 생육특성

재배시기	초 장 (cm)		엽 장 (cm)		엽 폭 (cm)		SPAD		생체중 (g)	
	처리	대조	처리	대조	처리	대조	처리	대조	처리	대조
1차	26.4a	24.3b	18.0a	18.4a	14.6b	15.9a	22.5a	23.8a	107.8a	107.2a
2차	26.5a	26.7a	19.3a	18.5a	14.4a	13.9a	21.5a	20.5a	159.9b	170.1a
3차	37.2a	34.7a	28.9a	25.3b	13.9a	10.6b	28.1a	28.1a	222.4a	178.2b

J DMRT at 5% level

- 시스템 보완 후 현장실증을 다시 추진하였으며 2023년 7월 6일에 정식하여 10월 4일 최종 수확까지 3연속 재배를 통해 양액 내 양분 특성 및 생육 조사를 수행함. 그 결과 K은 대조구 경우 1차 정식시 172mg/L에서 3차 수확시 77mg/L으로 크게 감소한 반면 처리구에서는 116mg/L에서 3차 수확시 167mg/L으로 처리구에서 일정 범위로 유지되는 경향을 보임. 처리구의 P의 경우 2차 재배시부터 대조구보다 투입량이 적어 양액 내 함량이 적었으나 다른 무기이온 농도는 대조구에 비해 처음 정식 때와 같이 안정적인 경향을 보임.

〈표〉 양액 내 무기염 변화(다량원소)

(단위 : mg/L)

성분		1차 재배		2차 재배		3차 재배	
		정식시	수확시	정식시	수확시	정식시	수확시
NO ₃ -N	처리	143	137	157	195	188	193
	대조	170	186	171	191	181	187
NH ₄ -N	처리	2	<1.4	9	<1.4	<1.4	<1.4
	대조	<1.4	<1.4	<1.4	<1.4	<1.4	<1.4
P	처리	68	39	35	36	28	24
	대조	80	77	76	68	34	31
K	처리	116	96	177	119	99	111
	대조	172	116	130	43	34	28
Ca	처리	153	138	140	190	213	188
	대조	158	201	222	243	214	205
Mg	처리	22	48	47	55	57	52
	대조	18	51	59	80	81	83
S	처리	31	66	60	64	57	51
	대조	27	66	51	62	56	56

〈표〉 양액 내 무기염 변화(미량원소)

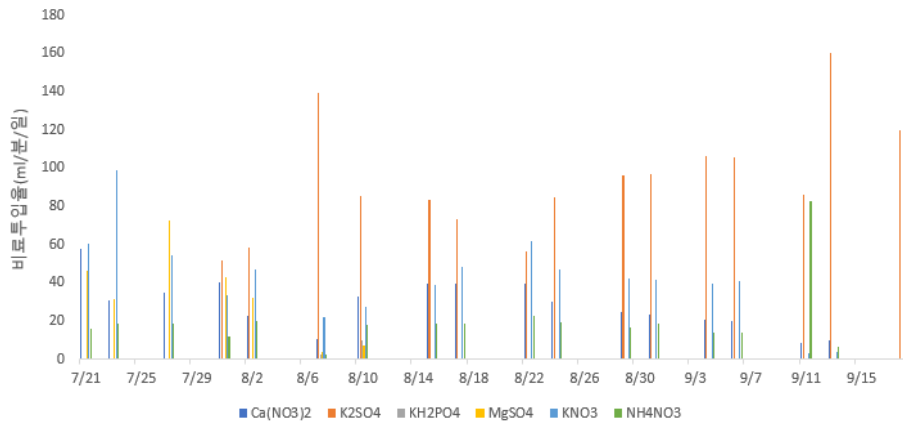
(단위 : mg/L)

성분		1차 재배		2차 재배		3차 재배	
		정식시	수확시	정식시	수확시	정식시	수확시
Fe	처리	0.25	0.61	0.47	0.15	0.06	0.06
	대조	0.43	0.62	0.45	0.23	0.20	0.42
Mn	처리	0.02	<0.01	0.08	0.03	<0.01	<0.01
	대조	0.03	0.09	0.09	<0.01	0.01	<0.01
Zn	처리	0.13	0.13	0.12	0.29	0.18	0.12
	대조	0.09	0.21	0.19	0.17	0.01	0.09
B	처리	0.26	0.25	0.24	0.28	0.23	0.26
	대조	0.25	0.39	0.39	0.55	0.49	0.40
Cu	처리	0.23	0.13	0.09	0.61	0.57	0.52
	대조	0.16	0.36	0.36	0.74	0.60	0.37
Mo	처리	<0.02	0.02	0.08	<0.02	<0.02	0.11
	대조	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	0.09



〈그림〉 양액 내 이온 변화 그래프

- 일일 이온별 투입량을 조사하였고 같은 양이 동시에 들어가는 대조구와 비교시 처리구에서 매일 다른 농도로 공급되었음. 재배기간 동안 비료 총 투입량 조사시 처리구는 3,600mg, 대조구는 7,680mg으로 약 1.5배 비료를 절감할 수 있었음.



〈그림〉 알고리즘에 의한 비료별 투입 비율

〈표〉 비료별 총 비료 투입량

구 분	Ca(NO ₃) ₂	K ₂ SO ₄	KH ₂ PO ₄	MgSO ₄	KNO ₃	NH ₄ NO ₃	총 투입량 (mg)
처리	494	1,659	12	236	821	379	3,600
대조	1,800	180	1,800	1,800	1,800	301	7,681

- 3차 작기때부터 대조구의 앞에서 잎이 노랗게 되는 K결핍 증상을 보였으며 엽 분석 결과 카이피라, 로메인 두 품종에서 카이피라의 경우 3차 재배시 처리구의 K함량이 10.27%, 대조구는 8.26%였고 로메인은 처리구 9.99%, 대조구 8.25%로 대조구에서 더 낮은 수치를 보여 대조구의 K 흡수가 저조한 것으로 결과로 판단됨. 또한 K 뿐만 아니라 대조구에서 처리구 대비 P, Ca 등 함량도 낮은 결과를 보임.

〈그림〉 칼륨 결핍 증상(대조)



〈 로메인 〉



〈 카이피라 〉

〈표〉 3연속 재배시 식물체(잎) 내 무기이온 함량(카이피라)

(단위 : %)

성분		2차 재배	3차 재배
N	처리	3.78	3.56
	대조	3.60	4.15
P	처리	1.66	1.50
	대조	1.72	1.33
K	처리	9.33	10.27
	대조	9.39	8.26
Ca	처리	2.18	1.82
	대조	2.01	1.75
Mg	처리	0.194	0.670
	대조	0.193	0.740
Na	처리	0.12	0.13
	대조	0.13	0.12
Mn	처리	0.0049	0.0006
	대조	0.0060	0.0011
Fe	처리	0.0046	0.0057
	대조	0.0091	0.0049

〈표〉 3연속 재배시 식물체(잎) 내 무기이온 함량(로메인)

(단위 : %)

성분		2차 재배	3차 재배
N	처리	3.50	4.2
	대조	3.48	1.48
P	처리	1.60	1.66
	대조	1.54	1.48
K	처리	9.45	9.99
	대조	9.36	8.25
Ca	처리	1.69	1.62
	대조	1.95	1.47
Mg	처리	0.191	0.64
	대조	0.198	0.60
Na	처리	0.100	0.0660
	대조	0.110	0.097
Mn	처리	0.0061	0.0006
	대조	0.0052	0.0005
Fe	처리	0.0084	0.0086
	대조	0.0098	0.0047

- 식물체 생육 특성은 3차 재배시 카이파리의 경우 초장에서 처리간 유의한 차이를 보였으며 생체중은 처리구 134.3g으로 대조구 97.7g 대비 1.4배 높았음. 로메인의 경우 초장, 엽장 등에선 처리간 유의한 차이를 보이지 않았으나 생체중은 처리구가 131.7g으로 대조구 77.6 대비 1.7배로 가장 큰 차이를 보였음.

- 현장 실증 추진 결과 무기이온 변화 및 작물 생육 안정화 검증을 통해 실효성이 있는 것으로 판단되며 여러 현지 농가 상황에 따른 문제 등을 적용하여 보완시 농가 적용 및 보급이 가능할 것으로 보임.

〈표〉 3연속 재배시 식물체 생육특성(카이피라)

구분	초 장 (cm)			엽 장 (cm)			엽 폭 (cm)			SPAD			생체중 (g)		
	1차	2차	3차	1차	2차	3차	1차	2차	3차	1차	2차	3차	1차	2차	3차
처리	21.0a	37.6a	39.0a	17.5a	24.2a	25.8a	14.5a	10.6a	10.1a	20.3a	31.4a	30.5a	87.8a	100.9a	134.3a
대조	21.7a	35.3a	33.4b	18.1a	23.8a	23.1a	15.3a	11.3a	9.3a	28.0a	29.9a	26.6a	99.2a	103.2a	97.7b

↓ DMRT at 5% level

〈표〉 3연속 재배시 식물체 생육특성(로메인)

구분	초 장 (cm)			엽 장 (cm)			엽 폭 (cm)			SPAD			생체중 (g)		
	1차	2차	3차	1차	2차	3차	1차	2차	3차	1차	2차	3차	1차	2차	3차
처리	47.1a	28.4a	21.3a	23.3a	19.0a	19.8a	10.5a	16.1a	15.9a	31.9a	20.7a	20.1a	123.6a	144.5a	131.7a
대조	44.5a	22.4a	18.5a	23.6a	16.7a	16.3a	10.0a	14.9a	12.3a	29.1a	17.6a	16.7a	97.7a	139.8a	77.6b

↓ DMRT at 5% level

〈그림〉 처리별 생육 비교 사진



〈 처리(로메인) 〉



〈 대조(로메인) 〉



〈 처리(카이피라) 〉



〈 대조(카이피라) 〉

3) 복합 양분관리 플랫폼 및 제어체계 구축

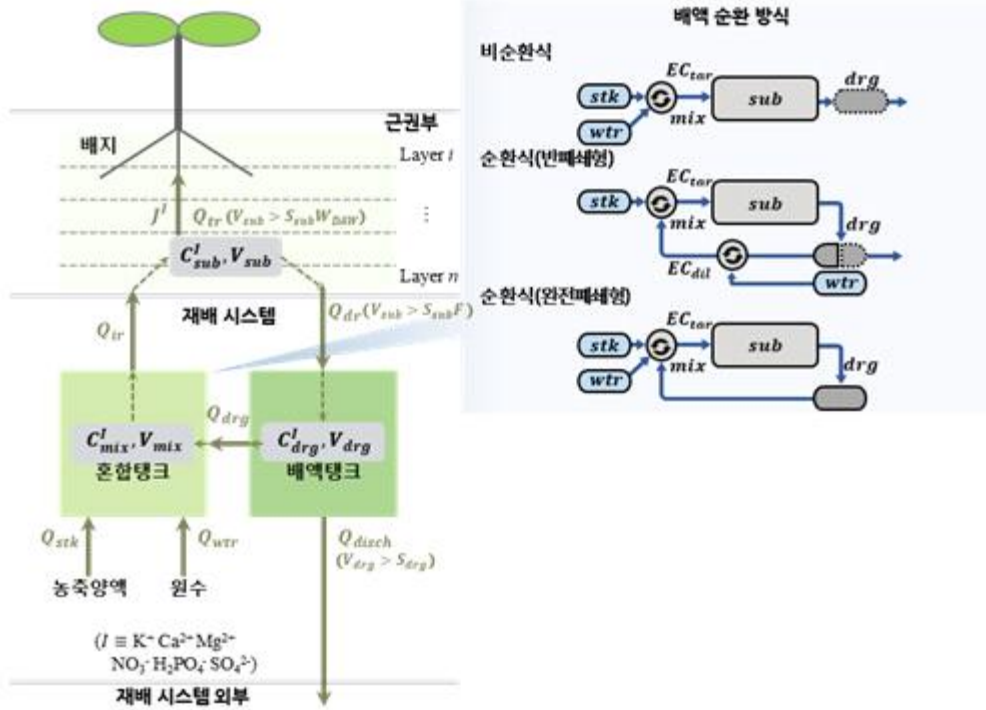
(1) 배지 이온 집적량 변화, 양분 흡수 메커니즘, 필수 원소 정상상태 제어 시뮬레이션 통합 모델 구축

○ 양분제어 알고리즘 연계를 위한 시뮬레이션 입력 변수 선별

- 본 연구팀의 통합 시뮬레이션 모델 구축의 목적은 순환식 수경재배시스템 양분 변화 특성을 해석하고 이를 바탕으로 순환식 수경재배 양분 관리 핵심 기술의 이론적 기반을 도출하는 데 있음.
- 현재 상업 농가에서 폭넓게 사용되고 있는 수분 관리 체제는 적산 일사량을 기반으로 하고 있으며, 적산 일사량 관수체계는 작물의 증산량과 일사량과의 상관관계를 기반으로 운용됨.
- 또한 수경재배 시스템에서는 무기양분과 원수의 혼합액인 양액이 관수에 사용됨.
- 수경재배 시스템의 배지 내 양분 상태는 식물의 흡수 현상과 더불어 사용자의 수분 관리에 따라 동적으로 변화함.
- 즉, 수경재배 시스템 근권부의 양분 변화는 각 농가가 처한 환경과 작물의 생육 상태, 재배자의 수분관리 방향에 따라 광범위하게 분포할 수 있음.
- 현장의 변수 범위가 상대적으로 넓게 분포하는 농가 생산 현장의 특성상, 특정 조건에서만 분석된 시뮬레이션은 설명 범위에 제약이 있을 수 있음.
- 강인성을 갖춘 순환식 수경재배 양분 관리 기술을 도출하기 위해서는 다양한 환경, 시스템, 식물 요인의 조합을 기대할 수 있는 추계적 시뮬레이션을 분석에 활용하는 것이 적합함.
- 먼저 태양 고도에 따른 지표면 입사 광량의 변화 모델을 활용하여 구름이 없을 때(운량=0)의 기준 광량을 도입함.

$$K^+ = K_0^+(1 + bN^c)$$

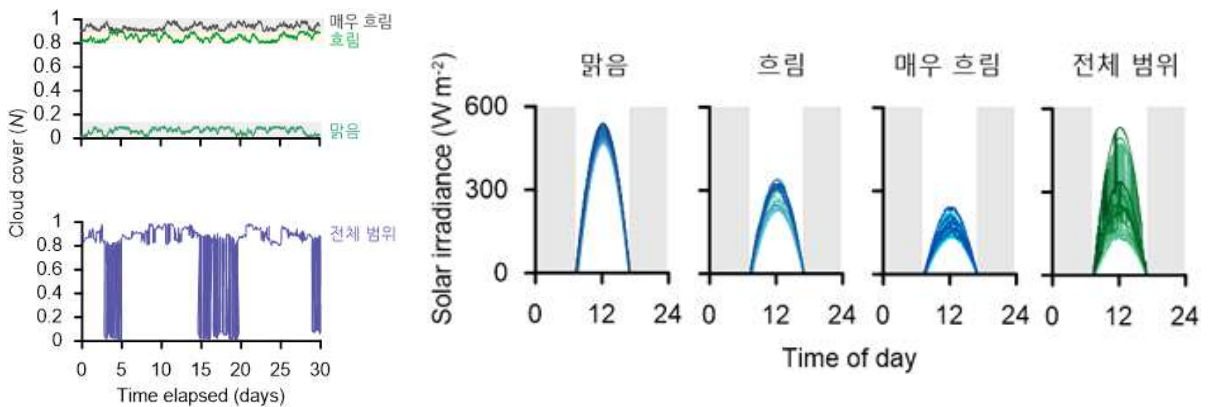
- 여기서 K^+ 는 전체 구름량(W/m^2)에 의해 감소된 태양 복사이며, K_0^+ 는 맑은 하늘(W/m^2) 아래 지면 수준에서 들어오는 태양 복사이며, 이는 계절적 시간 변화에 따른 태양 고도에 의해 결정됨.
- b 및 c 는 경험적 계수이며, N 은 정규화된 운량 비율이며 0과 1 사이의 값을 나타냄.
- N 은 0에 가까울수록 맑은 날, 1에 가까울수록 흐린 날에 해당하며, K_0^+ 는 Holtslag 및 Van Ulden (1983)의 수치적 절차에 따라 추정되었음.
- 또한 수경재배 시스템의 양분 관리 체제는 기본적으로 전기전도도(EC) 측정값을 바탕으로 구축됨.
- 따라서 본 연구에서 구축한 시뮬레이션 모델은 EC 시뮬레이션 값을 기반으로 양액 혼합을 수행하였으며, 배지로의 관수 양액 또한 혼합 탱크 내의 EC 시뮬레이션 값을 기반으로 혼합이 이루어질 수 있도록 모델을 구축함.



〈그림〉 상업 농가 수경재배 시스템의 양수분 변동 모델 개요

○ 추계적 일사량 변화 적용 배지 함수율, 배지양분집적, 양분 흡수량 변화 통합 시뮬레이션 모델 구축

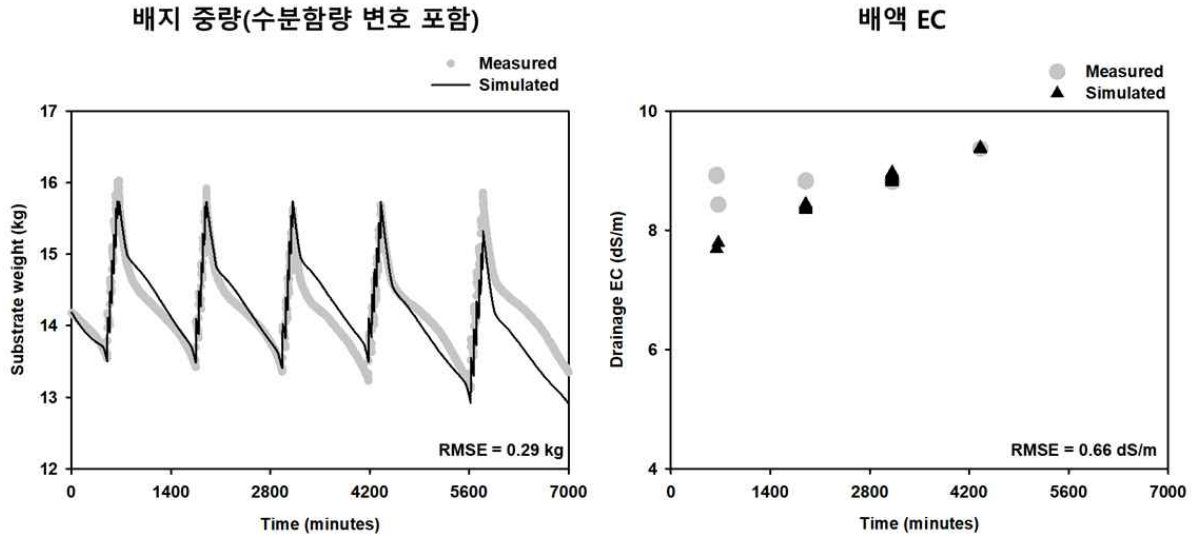
- 일사량의 추계적 변화는 운량 파라미터 N에 무작위 행보를 적용하여 구현하였으며, 적용 결과 운량 파라미터의 맑음, 흐림, 매우 흐림 등의 다양한 패턴을 구현할 수 있었으며 이에 따라 일사량 변화 패턴도 형성되었음.



〈그림〉 운량 변화(N)에 따른 일사량 변화 변화 패턴

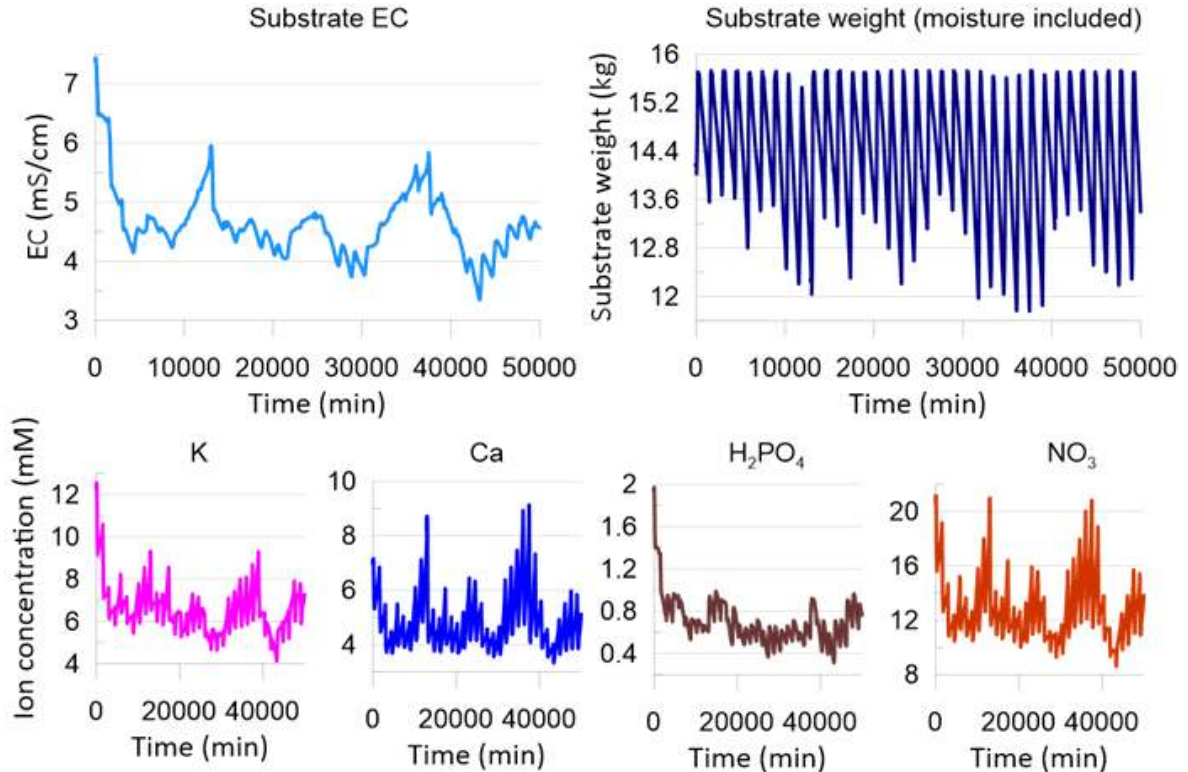
- 배지에서 양수분 수송은 다공성 매질에서의 질량 유동 및 확산 모델이 적용되었음 (Shackelford and Daniel, 1991; Corwin 등, 1993; Snape 등, 1995).
- 식물의 양분 흡수는 기본적으로 Michaelis-Menten 방정식 기반 모델을 사용함.
- 일반적인 상업농가의 수경재배 시스템 구조에서의 양수분 거동을 분석 하기 위해 시뮬레이션 모델의 영역을 혼합탱크, 배액탱크, 배지 영역을 구분하였으며, 비순환식 및 순환식(반폐쇄형, 완전폐쇄형) 수경재배 조건에서의 양액 혼합 방식을 반영하였음.
- 개별 양분 흡수 매개변수의 경우 기존 문헌을 참고하여 활용하였으며, 식물의 증산 매개변수는 KIST 강릉분원의 실증 온실(T-farm)의 배지 중량 변화 데이터를 활용하여 progress curve analysis를 통해 오차가 최소화될 수 있는 값을 추정하였음.

- 증산, 배지 EC 변화 시뮬레이션 결과의 정상 범위 출력에 대한 평가는 KIST 강릉분원의 실증 온실의 환경 데이터 플랫폼에서 배지 중량과 직접 계측한 배액 EC 변화 값을 활용하여 수행하였음.
- 통합 모델의 시뮬레이션은 관수, 증산, 양분 흡수, 배출 등의 요인 간의 복합적인 작용의 결과인 배지 중량 변화 및 배액 EC 변화를 정상적으로 표현하는 것을 확인함.



〈그림〉 수경재배 시뮬레이션 출력값 검증

- 구축된 수경재배 시스템에서의 추계적 일사량 입력 결과, 배지 EC, 배지 중량 변화(일중 수분 공급에 따른), 배지 내 집적 양분 농도의 변화를 시뮬레이션 할 수 있었음.

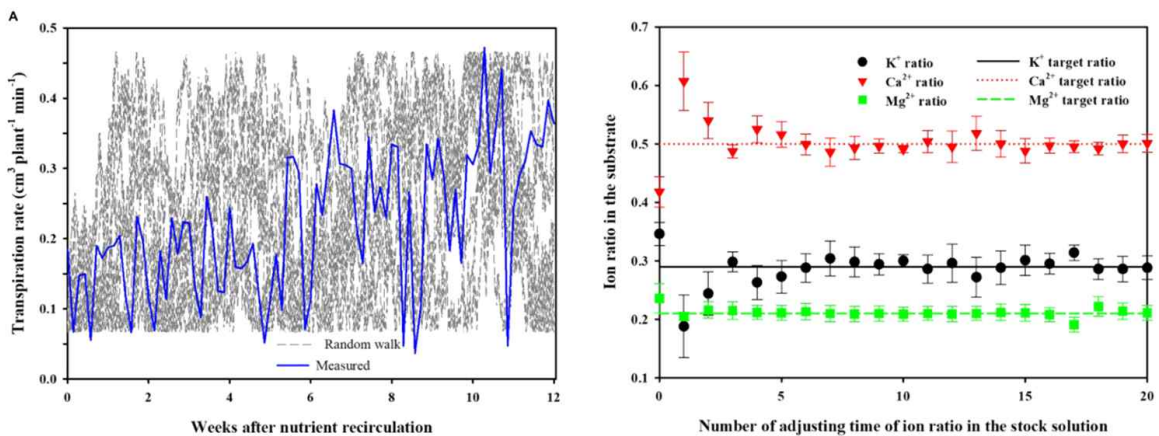


〈그림〉 수경재배 시뮬레이션 결과

(2) 배액 양분 빅데이터 기반 작물별 화학량론적 특성 추출 및 양분제어 알고리즘 개발(미량원소 포함)

○ 양분 비율 기반 관리 체계의 이론적 기반 수립

- 수경재배 배액에는 식물 양분 흡수의 영향이 반영됨. 그러나 배액의 양분 농도는 근권부 함수율 변화에 영향을 받으며, 근권부 함수율에 지배적인 영향을 미치는 작물의 증산 현상은 환경 조건에 따라 매우 동적으로 변화함. 식물의 양분 흡수 정보를 담고 있는 배액의 양분 농도는 배액 재사용 측면에서 핵심적인 데이터로 활용될 수 있는 잠재성을 가지고 있으나, 환경 변동의 영향을 여과없이 반영하고 있는 배액의 양분 농도를 바로 활용하는 것은 기술적인 어려움이 따름.
- 예로써, 재배 중에 점진적으로 발생하는 공급 양액 EC와 배액 EC 간의 편차와, 배액의 재사용을 위한 전처리 과정에서의 희석에 따른 농도 변화, 13종에 달하는 필수양분들에 관리 체계 및 이론 수립의 어려움 등이 있을 수 있음. 이를 해소하기 위해 그동안 배액의 EC 관리, 배액 방류 관리, 주기적인 양분 분석 후 부족 양분의 보충과 같은 접근들이 수행된 바 있음. 이러한 접근들이 제한적 조건에서의 양분관리 사례를 제시할 수는 있었으나, 현실적으로 일부 기술은 재배자의 물관리 체계, EC 관리와의 기능적 충돌을 감안해야 하는 등의 보급성·범용성 측면에서 한계가 존재.
- 그러나 최근의 연구에서 실제 재배 현장의 기술체계와 호환성을 나타낼 수 있는 양분 관리에 대한 이론적 분석 결과가 발표됨. 본 연구 컨소시엄 KIST 참여연구원의 최근 발표 논문(Ahn 등 2021)에 따르면, 배액이나 배지에서 추출한 양분 농도가 상대적인 비율(전체양분농도 대비 개별 양분의 농도)로 전환될 경우 양분 비율 데이터는 식물 자체 양분 흡수 선택성의 특성을 나타내며, 이러한 데이터는 양분 관리에 사용될 수 있음이 시뮬레이션을 통해 분석됨.



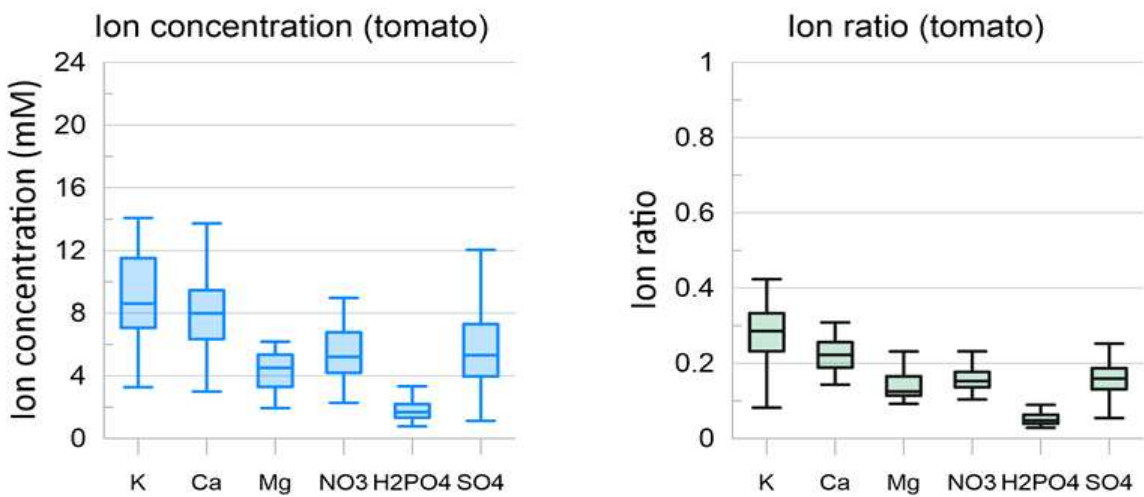
〈그림〉 무작위 횡보로 구현된 식물 양분흡수 농도 변동 조건에서 재사용 양액의 양분 비율 데이터에 기반한 양분 균형제어 시뮬레이션 결과, 위: 무작위 횡보로 구현된 증산량 변화, 아래: 장주기 양분 분석을 통한 양분 균형제어 결과 (Ahn 등, 2021)

○ 수경재배 배액 양분 농도 데이터의 수집 및 비율 데이터로 전환

- 순환식 수경재배 양분에 대한 이론적 관리 모델의 현장 적용 가능성을 파악하기 위해 파프리카와 토마토 농가로부터 여러 배액 데이터를 수집함. 식물의 양분 흡수 선택성은 식물 자체의 생리적 요구도가 주로 반영되기 때문에 농도 데이터에 비해서 환경 조건의 영향이 상대적으로 적을 수 있음을 예측해볼 수 있음.
- 총 8개 농가(파프리카, 토마토 각 4개 농가-강릉, 마산, 밀양)로부터 각 농가 당 배액 10개의 시료를 수집하여 총 80개의 시료를 수집하였음.
- 현재 순환식 수경재배 농가에서의 배액 시료 수집은 현실적으로 매우 제한적이며, 거시적인 경향을 추출할만큼 충분한 지역적 분포를 가지고 있지 않으며, 따라서 본 시료들은 비순환식 농가

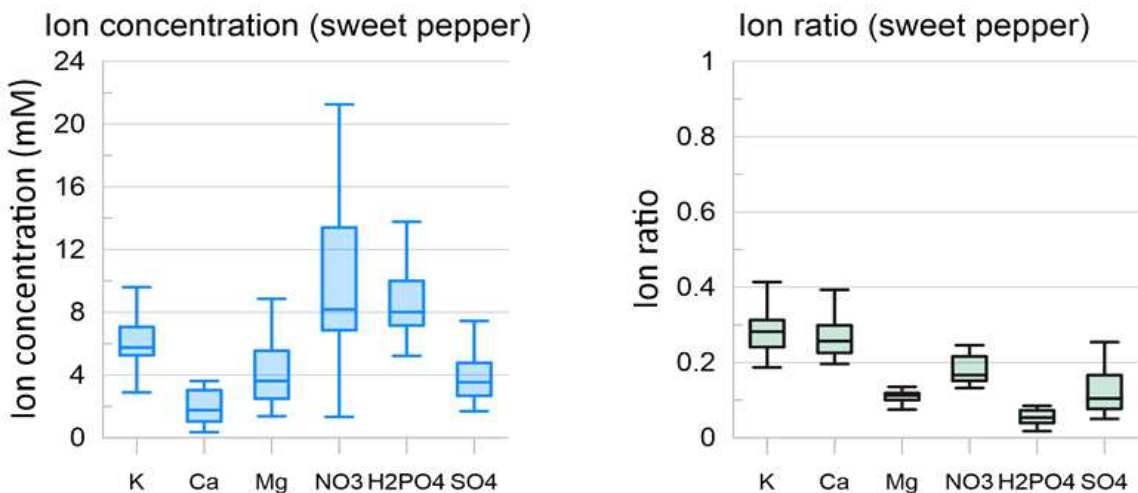
를 대상으로 수집되었음. 이 경우, 분석하고자 하는 시스템의 경계영역을 배지로 한정하게 되면 비순환식 수경재배 시스템이라 하더라도 각 농가의 배액 관리 상황 등에 따라 순환식 수경재배의 양분 변화와 이론적으로 동일한 변화 양상이 관찰될 수 있음.

- 각 농가의 지역적 환경 차이가 미치는 영향을 최소화하고, 비율 기반 관리 이론에서 예측한대로 식물 양분 선택성이 배액 시료의 양분 비율 변화에 반영되는지 확인하기 위해 수집 지역, 시기에 대한 구분 없이 무작위로 토마토, 파프리카 배액 양분 데이터 세트를 구성하였으며, 수집 배액의 EC의 경우 2.8~7.4 mS/cm, pH 의 경우 5.6~6.6 분포 범위를 나타내는 다양한 시료를 수집할 수 있었음.
- Box-plot을 이용해 파프리카와 토마토 배액 내 양분 농도의 분포를 확인하였음. 수집 시료 데이터에서 전체 양분 농도를 대변하는 EC의 범위를 통해서도 짐작할 수 있듯이, 배액 내 양분의 농도는 다양한 범위의 변화를 나타냄을 확인함. 양분 농도 데이터를 양분 간의 비율 데이터로 변환한 그래프에서는 전반적으로 변동의 범위가 감소한 것으로 보이나, 이는 단위의 변환이 있었기 때문에 동일한 비교에 제약이 존재함.



〈그림〉 토마토 수경재배 배액의 양분 농도와 비율(전체양분농도 대비 개별양분농도) 분포(4개 농가, 총 40개 샘플)

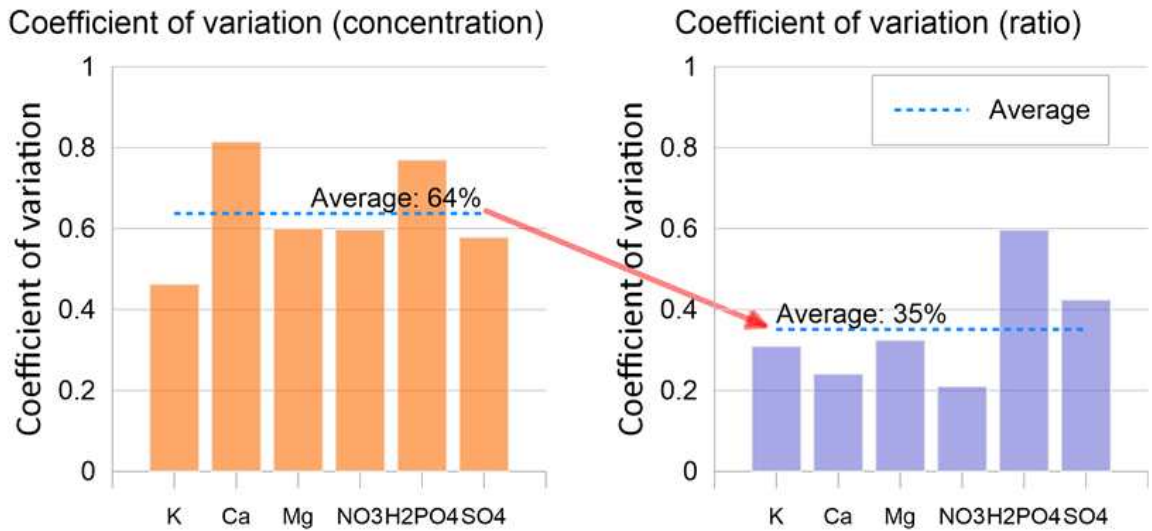
- 농도의 분포 범위와 각 양분 간 비율 분포 범위를 확인하기 위해 농도 데이터와 비율 데이터의 변동계수(coefficient of variation, CV(%))를 비교하였으며, 토마토와 파프리카 데이터 전체를 통합하여 변동계수를 비교하였을 때, 농도 데이터의 경우 전체 평균 CV 64%를 나타냈으나, 각 양분 간 비율로 전환할 경우 전체 평균 CV는 이보다 낮은 35%를 나타냄을 확인함.



〈그림〉 파프리카 수경재배 배액의 양분 농도와 비율(전체양분농도 대비 개별양분농도) 분포(4개 농가 총 40개 샘플)

- 이는 양분 비율 데이터는 식물의 증산, 그리고 그에 따른 양분 흡수 농도의 변동의 광역영향을

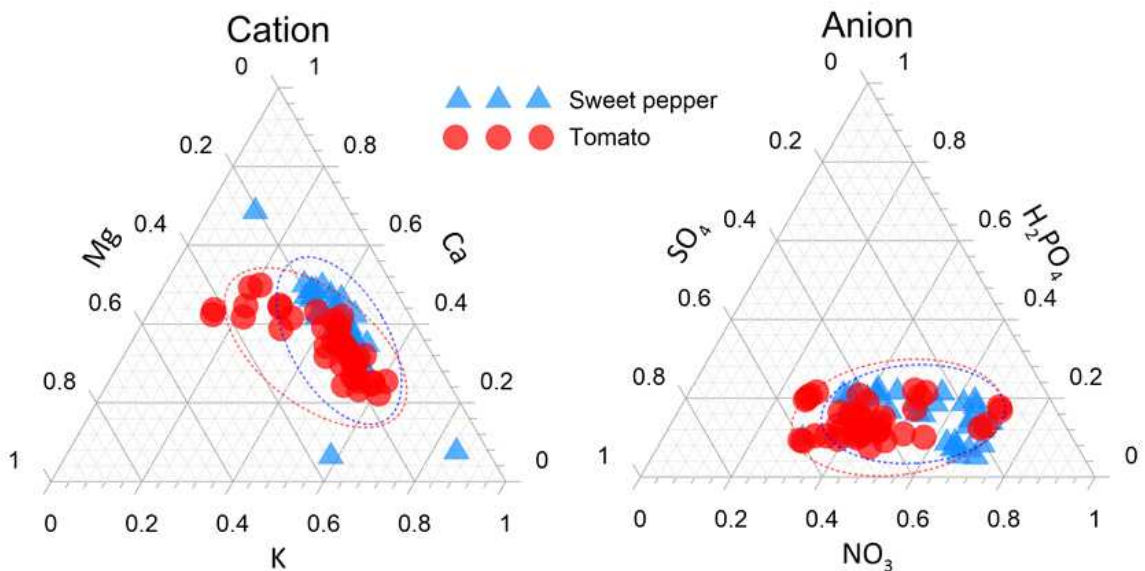
완화된 결과로 추정되며, 양분 비율 기반 관리 이론적 모델을 실험적으로 지지하는 결과를 제공함.



〈그림〉 토마토, 파프리카 수경재배 농가 수집 데이터 통합 양분 농도와 비율(전체양분농도 대비 개별양분농도)의 변동계수(표준편차/산술평균) 분포(8개 농가 80개 샘플)

○ 빅데이터 활용을 위한 수경재배 배액 데이터에서 식물 화학량론적 특성 추출

- 앞선 분석을 통해 양분 비율 데이터는 여러 농가에서 수집한 농도 데이터의 변동 범위를 감소시킬 수 있음을 확인함.
- 그러나, 비율 데이터 자체로는 거시적인 변화 경향의 확인이 어려움. 따라서 이러한 변화 경향을 확인하기 데이터의 시각화 작업을 수행함.
- 식물 화학량론은 식물의 양분 특성에 대해 척도 관계의 정보를 제공하기 위한 것으로 여러 접근법이 있을 수 있음. 본 연구에서는 양액관리, 재배 생리 측면에서 호환될 수 있는 양이온, 음이온 비율을 기반으로 배액 내 양분 비율 데이터의 변동 범위를 시각화함.

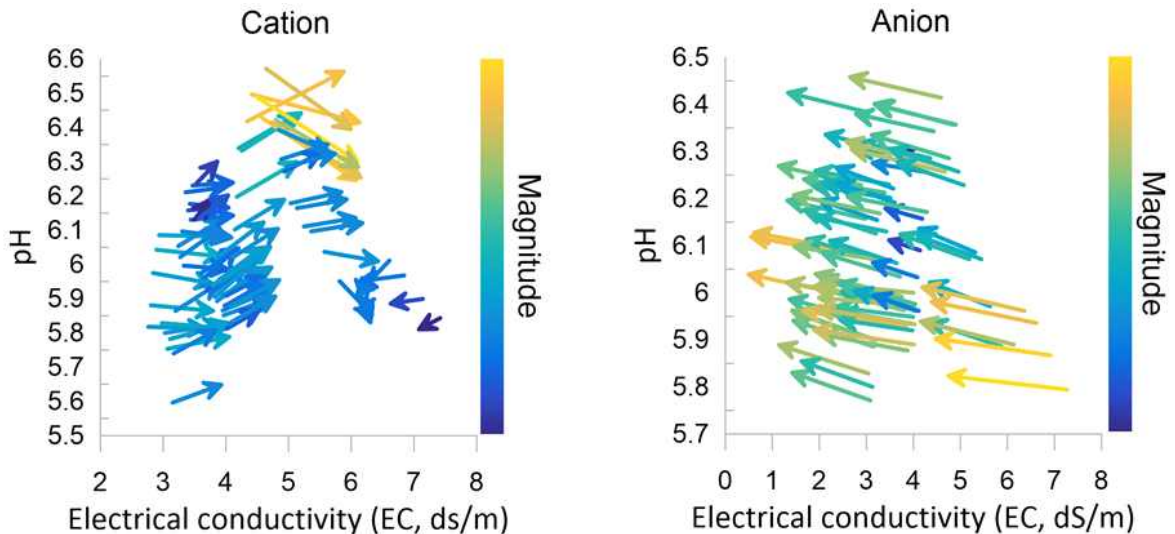


〈그림〉 파프리카와 토마토 양분 비율 변화 삼각도 그래프(좌: 양이온, 우: 음이온)

- 삼각도 그래프는 양분의 양이온, 음이온 별로 3종의 양분 비율 변화를 한점으로 표시할 수 있음. 시각화 결과, 지역 및 수집 시기에 대한 구분 없이 여러 농가에서 수집된 배액 시료의 양분 비율은

일정 영역에서 한정된 변화를 나타내는 것이 확인됨.

- 이 결과에서 토마토와 파프리카 농가 시료의 데이터 모두 유사한 범위에 분포하는 결과를 확인함. 이는 기존의 순환식 수경재배 양분관리 방식이 지역적, 환경적으로 제약된 특정 조건에서 수행하여 기술의 호환성, 보급성 측면에서 불리한 부분이 있었던 것을 극복할 수 있는 가능성을 시사함.
- 삼각도 그래프는 배액의 양분 비율 분포를 시각화하여 보여주나, 거시적인 방향성의 확인에는 한계가 있음. 그러나, 비순환식 수경재배의 배액은 배지로 공급된 표준 양액과 배지 내 잔류 중인 양액을 식물이 흡수한 결과를 반영하고 있음. 따라서, 표준양액 내 양분비를 기준점으로 배액 내 양분 비율을 비교하면 초기 조건으로부터 얼마나 변화하였는지를 추정할 수 있음.
- 또한, 시간축 없이 3개 변수의 상대적인 비율을 한점으로 표현할 수 있는 삼각도의 그래프의 특성상 초기 표준양액 조성비로부터의 이탈 정도를 모든 방향에 대한 변화를 나타낼 수 있음. 따라서, 배액 양분 조성비율과 초기 표준조성비율 사이의 직선거리와 각도를 이용하여 vector-plot을 이용한 시각화 데이터를 확보할 수 있음.
- Vector-plot은 8개 농가에서 샘플링한 80개의 데이터 세트를 통합하여 각 배액 시료의 EC와 pH에 따른 양분 균형 변화 방향과 크기를 시각화함.



〈그림〉 파프리카와 토마토 양분 비율 변화 데이터(양이온, 음이온) 시료의 EC와 pH 분포에 따른 vector-plot(좌: 양이온, 우: 음이온)

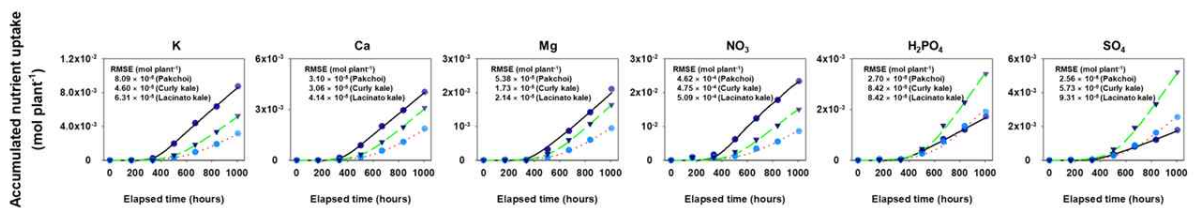
- 양이온의 경우 대부분의 시료의 변화 방향이 유사하나, EC에 따라서 전체적인 방향의 변화가 나타나는 것을 확인 할 수 있었음.
- 음이온의 경우 EC나 pH에 따른 방향 변화 경향은 관찰되지 않았으며, 대부분의 시료가 일정한 방향성을 나타내는 것을 확인함.
- 이는 양분 비율 변화 데이터가 식물의 선택성이 반영된 화학량론적 특성을 제공할 수 있는 데이터로 활용될 수 있음을 시사함. 즉, 배액 시료의 지역적, 환경적인 차이가 있다고 하더라도 배액 양분의 비율 변화 데이터는 식물의 양분 흡수 선택성에 따른 근본적인 변화 패턴을 내포하기 때문에, 상당히 결정론적인 변화 양상을 보임을 알 수 있음. 이를 기반으로 설계된 양분 관리 기술은 기술적 호환성과 보급성을 확보할 수 있음을 시사함.

○ 순환식 수경재배 양분제어 알고리즘 개발

- 식물의 양수분 흡수 현상에 따른 근권부 양분 변동에 대한 이론 및 실험적 분석 결과 근권부 경계에서 두 가지 알려지지 않은 변수 효과, 즉, 양분 흡수 농도의 변동을 제거할 수 있음을 시사

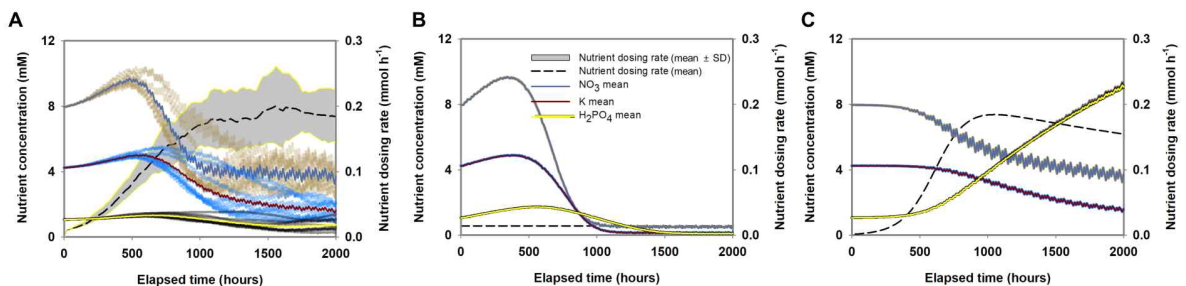
함.

- 이는 근권부 양분 역학의 변동성이 Michaelis-Menten 매개변수 비율 간의 상대적 변동 수준으로 필터링될 수 있음을 나타냄.
- 이를 바탕으로 양분제어 알고리즘을 설계하기 위해 양분 공급 방식에 따른 근권부 양분 거동에 대한 시뮬레이션 분석을 수행함.
- 우선, 비교적 짧은 재배 기간을 가지는 Brassica 엽채류 3종의 폐쇄형 수경재배 시스템 양분 흡수 데이터를 활용하여 각 작물별(청경채, 케일 2종) Michaelis-Menten 양분 흡수 파라미터를 추정하였음.
- 통합 모델의 양분 흡수량 추정 검증에서 RMSE K, $4.60 \times 10^{-5} \sim 8.09 \times 10^{-5}$ mol/plant, Ca, $3.06 \times 10^{-5} \sim 4.14 \times 10^{-5}$ mol/plant, Mg, $1.73 \times 10^{-5} \sim 5.38 \times 10^{-5}$ mol/plant, NO_3 , $4.62 \times 10^{-4} \sim 5.09 \times 10^{-4}$ mol/plant, H_2PO_4 , $2.70 \times 10^{-5} \sim 8.42 \times 10^{-5}$ mol/plant, SO_4 , $2.56 \times 10^{-5} \sim 9.31 \times 10^{-5}$ mol/plant 수준에서의 시뮬레이션 결과를 확인함.



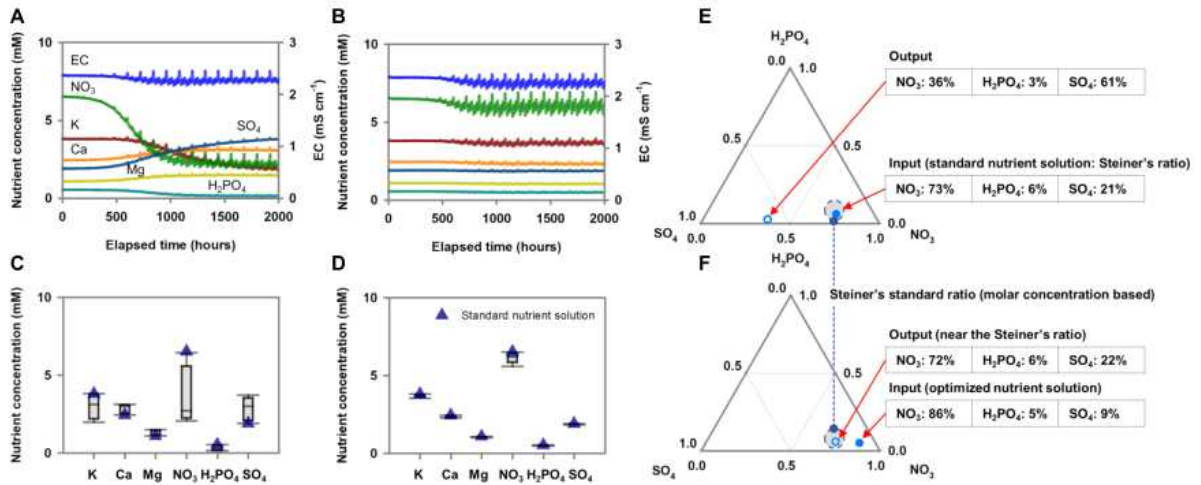
〈그림〉 Brassica 엽채류 3종(청경채, 케일 2종)의 개별 양분 흡수량 시뮬레이션 (Ahn 등, 2021)

- 추정된 양분 흡수 파라미터를 기반으로 1) 수경재배 시스템 내 양액 부피의 감소량을 기준으로 양분을 공급하는 방식, 2) 일정 시간 간격으로 양분을 공급하는 방식, 3) EC+양액 부피 기준으로 양분을 공급하는 방식에 따른 근권부 양분 거동을 분석함.
- 상기 세 종류의 방식은 EC 기반 수경재배 시스템의 기본 계측 요소를 활용하여 일반적으로 시도될 수 있는 방법들로, 시스템 구조가 다소 복잡하게 인식되는 반면, 코이어와 같은 고행배지경에서도 세 종류의 양분 보충 방식의 효과가 근본적으로 같은 원리로 적용될 수 있음.
- 추계적 시뮬레이션 분석 결과 부피 기반으로 공급되는 방식의 경우 양분 변동의 불확실성이 증가할 수 있음을 확인함.
- 일정 시간 간격, 즉 타이머 기반의 양분 공급 방식은 양분 변동의 불확실성은 감소하는 반면, 공급 간격에 따라서 다수 양분의 완전 결핍 또는 과잉으로의 치우침 현상이 발생할 수 있음을 확인함.
- 마지막으로 EC + 양액 부피 기준으로 공급하게 될 경우 최소한 전체 양분 농도는 일정 수준으로 유지될 수 있기 때문에 개별 양분 농도가 초기 표준 조건에서 이탈하기는 하나 다수 양분의 완전 결핍 현상이 발생하지 않음을 확인함.



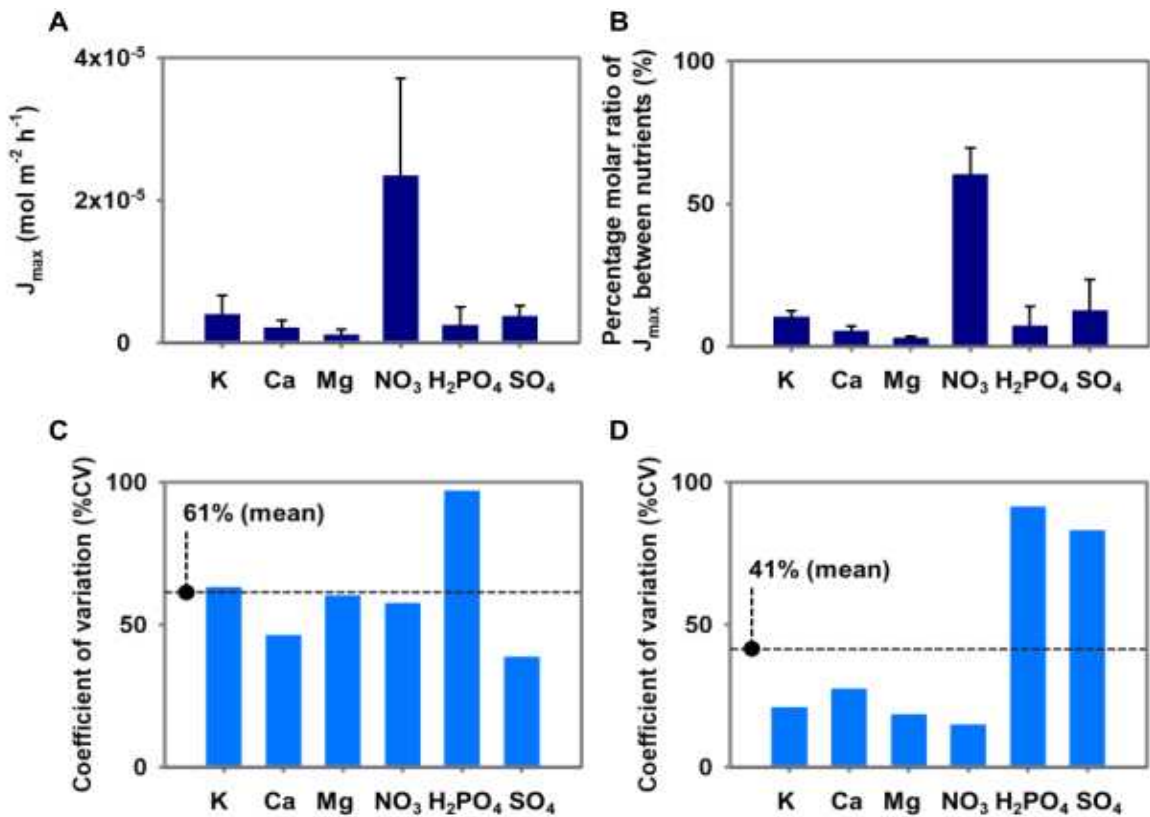
〈그림〉 양분 공급 방법에 따른 근권부 양분 농도 변화 특성: (a) 부피 기반, (b) 시간 기반, (c) EC + 부피 기반 양분 공급 방법(논문게재그림: Ahn 등, 2021)

- 근권부 양분을 목표 범위에서 유지할 수 있는 표준양액의 탐색이 가능함을 분석함.



<그림> EC+부피 기반 양분 공급 방법에서 초기 양분 조건에서 재현성이 확보된 표준 공급 양액 최적화 결과: (a) 기존의 표준양액을 공급하였을 때의 근권부 양분 농도 변화, (b) 최적화 탐색 방식으로 조성된 표준 양액을 공급했을 때의 근권부 양분 농도 변화, (c) 기존 표준 양액 공급 시의 양분 농도 분포 box-plot, (d) 최적화 탐색을 거친 표준 양액 공급 시의 양분 농도 분포 box-plot, (e) 기존 표준양액 양분 비율 입력(Steiner's ratio)의 표준 양액 공급 조건에서 백분율 몰 비율의 최종 시뮬레이션 출력, (f) 최적화된 표준양액 양분 비율 입력의 표준 양액 공급 조건에서 백분율 몰 비율의 최종 시뮬레이션 출력(논문게재그림: Ahn 등, 2021)

- 또한, 분석에 사용한 *Brassica* 3종 간의 식물 개별 양분 흡수 파라미터 변동계수(coefficient of variation, CV%)는 농도 단위를 기준으로 표현하였을 때 평균 61%에 이르는 반면, 각 양분 흡수 파라미터 간의 비율로 전환된 값을 비교하였을 때 평균 41%의 감소를 확인함.



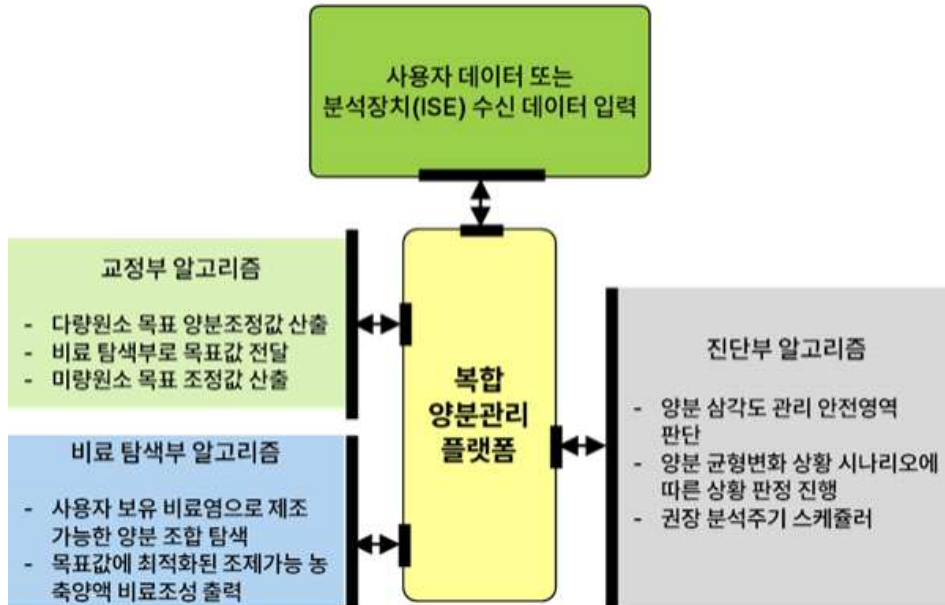
<그림> (a) *Brassica* 3종(청경채, 케일 2종)의 양분흡수 최대속도 상수 (J_{max})의 평균 \pm SD. (b) 각 양분의 J_{max} 간의 백분율 몰비. (c) *Brassica* 3종 J_{max} 간의 변동 계수. (d) *Brassica* 3종의 각 양분 J_{max} 백분율 몰비 간의 변동 계수(논문게재그림: Ahn 등, 2021)

- 결과적으로 본 연구에서 일련의 이론 및 실험적 접근으로 통해 근권부 양분 변동을 분석해보면, 환경적 요인이 지배적으로 작용하는 추계적인 증산 변동이 근권부 양분 농도 변화에 미치는 영향은 농도값을 양분 간 비율로 변환하였을 때 필터링될 수 있으며, 이러한 외란 요인을 소거하게 될 경우 잔존하는 주요 외란 요인은 식물의 생리적 요인이 될 수 있음.
- 식물 생리적 변동요인 또한 양분 흡수 파라미터의 변동 또한 비율로 전환할 경우 변동이 감소하는 것을 확인할 수 있음.
- 더불어 작기, 8개 농가, 2개 작물로부터 수집한 다양한 EC 범위를 가지는 80개 배액 분석 샘플의 vector plot을 통한 양분 비율 변화의 시각화 분석에서의 거시적인 방향성을 통해 나타난 바와 같이 양분 비율 영역에서의 기술적 안정성이 이론 및 실험적으로 지지됨을 확인할 수 있음.
- 종합하면, 순환식 수경재배 시스템은 근권부 EC 값을 일정 수준으로 유지할 수 있을 경우 양분의 개별 농도의 변동성을 대폭 감소 시킬 수 있으며, 양분 비율 및 농도의 변동을 일정 수준으로 유지할 수 있음을 의미함.
- 또한 순환식 수경재배 시스템은 농가의 수분 및 EC 관리 정책과의 우선권 충돌로 인해 양분관리 시스템이 근권부 EC 변동값을 통제할 수 없는 조건이라고 하더라도 양분 불균형은 최적화 분석을 통해 목표 균형 범위 내로 유도될 수 있는 시스템으로 정의될 수 있음을 분석함
- 최적화 분석을 통해 안정화가 가능한 시스템이라는 의미는 주기적인 양분 분석을 통해서도 양분 농도 또는 양분 균형 변화가 일정 범위 내에서 안정화 될 수 있는 시스템이라는 것을 의미함.
- 근권부 EC 값을 일정 수준으로 유지할 수 있는 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 경우, 자원 사용은 최소화하면서 생산량을 향상할 수 있는 지속성 강화형(sustainable intensification) 차세대 양분 관리 기술 체계를 수립할 수 있을 것으로 판단함.
- 그러나, 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 조건 EC값을 일정 수준으로 유지하기 위해서는 우수한 수질 조건이 전제되어야 하며, 이는 매우 낮은 수준의 Na와 Cl 농도를 가지는 원수 조건을 의미함.
- 따라서 본 과제의 개발 계획에 따라 수질 조건에 따라 완전 폐쇄형(배액 100% 재사용) 또는 반 폐쇄형(배액 재사용율 100% 미만)의 양분 관리체계를 구분하여 개발할 계획임.
- 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 양분 관리의 경우 배액 내 양분 농도 분석 데이터 (데이터 입력: 주단위 분석 의뢰 또는 실시간 이온 센서)를 양분 비율로 변환하여 목표 비율값과의 차이를 계산하고 이를 차기 농축양액 내 양분 비율 조정에 반영하는 loop로 구성됨.
- 반폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 경우 양분 분석 데이터 중 Na와 Cl의 농도에 따라 배액+원수 혼합밸브의 개도를 조절하도록 추가적인 알고리즘을 개발할 필요가 있음.
- 다량원소의 경우 조정하고자 하는 양분들이 서로 비료염에서 짝을 이루고 있으며, 개별 이온 용액을 쓰지않는 한 조절 범위에 제약이 발생함.
- 이러한 범위는 농가가 일반적으로 보유하고 있는 비료염의 종류에 따라서 결정될 수 있으며, 양분 관리 알고리즘은 현장의 현실적인 제약 요인 하에서 최대한 도달할 수 있는 목표치에서 양분 균형을 관리하는 기능을 수행할 비료염 조성 최적화 알고리즘을 추가적으로 개발할 필요가 있음.
- 미량원소의 흡수 현상도 기본적으로 다량원소의 양분 흡수 양상과 유사한 기제로 이루어지기 때문에 본 연구과제에서 수립한 다량원소의 접근 방식이랑 유사하게 미량원소간의 비율 변환 데이터를 활용하여 차기 농축양액 내 미량원소 간의 비율을 조정하는 방식으로 접근 가능함.
- 다만, 관리하고자 하는 양이온과 음이온이 비료염 형태로 항상 짝을 이루고 있어 조성 범위의 자유도에 제약이 있는 다량원소와는 달리 미량원소의 경우 공급 대상 양분이 비료염 형태로 연결되어 있지 않기 때문에 단순히 각 비료에 단일 종류로 존재하기 때문에 조절 범위에 대한 제약은 존재하지 않으며 별도의 비료염 조성 최적화 알고리즘이 요구되지 않음.

(3) 배액 재사용률별 시스템의 양분 균형 제어 알고리즘 컨버전 및 플랫폼 탑재

○ 개발된 양분균형제어 알고리즘의 파이썬 컨버전을 위한 계산 시퀀스 설계

- 복합양분플랫폼의 주요 알고리즘은 백엔드에서 파이썬 기반의 알고리즘으로 작성되었으며, 사용자의 접근성을 고려하여 웹기반 서비스로 구현되도록 계획하였음.
- 복합양분플랫폼은 세 개의 핵심 알고리즘으로 구성되며, 입력된 양분 데이터를 당량비율 데이터로 변환하고 균형제어 목표값을 제시하는 '교정부'와 사용자가 보유한 비료 조성을 통해 조합할 수 있는 양분 조합 중에서 제시된 양분교정 목표값과 가장 근접한 수준의 비료 조성을 계산하기 위한 '비료 탐색부', 그리고 양분 분석값의 변화 추이를 판단하는 '진단부'로 구성됨.



〈그림〉 복합양분관리플랫폼의 핵심 알고리즘 구성

- 이와 같은 과정은 각 알고리즘 계산 시퀀스의 데이터 연계를 통해서 진행될 수 있으며, 파이썬 컨버전을 위해서 엑셀 기반으로 전체적인 계산 시퀀스와 관련 시나리오를 정리하였음.
- 이러한 계산 시퀀스의 입출력 관계를 참고하여 파이썬 기반 알고리즘 컨버전 작업을 수행함.

○ 교정부 알고리즘의 계산 시퀀스 및 데이터 구성

- 개발된 양분 균형제어 알고리즘의 파이썬 컨버전을 위해 전체적인 계산 시퀀스를 설계함
- 계산 시퀀스는 10개 주요 단계로 구성되며, 사용자 또는 분석기기의 자동 데이터 입력 이벤트가 발생할 때마다 아래의 순서로 진행됨. 1) 사용자 분석결과 입력 → 2) 사용자 분석결과 다량원소 6종 당량비율로 변환 → 3) 표준조성 다량원소 6종 당량비율로 전환(현재조성비) → 4) 표준조성비와 현재조성비 차이 산출 → 5) 표준조성비와 현재조성비 차이를 직전의 농축양액 내 성분 조성비에 적산하여 희망 조성비 산출 → 6) 현재 보유 비료 조건에서 조제 가능한 차기 농축양액 조성비 산출 → 7) 미량원소 분석결과를 현재 미량원소 몰비율로 변환 → 8) 미량원소 표준 조성비와 현재 조성비 차이 산출 → 9) 차기 농축양액 미량원소 조성비 산출 → 10) 차기 농축양액 조제표 출력
- 1) 사용자 분석결과 입력 단계: 사용자 또는 ISE와 같은 분석장치로 부터의 데이터 수신에 따른 데이터 입력이 발생하는 단계에 해당함.
- 2) 사용자 분석결과 다량원소 6종 당량비율로 변환: 다량원소 6종의 분석 데이터 입력값을 '원소 정보' DB의 저장 변수를 활용하여 당량농도로 변환하고 양, 음이온 당량 비율로 변환함.

- 3) 표준조성 다량원소 6종 당량비율로 전환(현재조성비): '표준양액농도' DB로부터 표준 양액의 양분 농도값을 호출하여 '원소정보'의 DB를 활용하여 당량농도로 변환 후 양, 음이온 당량비율로 변환함.

2. 사용자 분석 결과 다량원소 6종은 당량비율로 변환								
	K	Ca	Mg	NO3-N	H2PO4-P	SO4-S	NH4	
→ 현재 분석결과 당량농도 변환	15.0	25.3	9.7	32.7	2.2	14.0	0.0	→ 원자가, 원자량, 현재분석결과 입력
→ 분석결과를 양, 음이온 당량 비율로 변환(현재 조성비) 양이온/(K+Ca+Mg), 음이온/(N+P+S) NH4의 경우, NH4/NO3 비율	0.30	0.51	0.19	0.67	0.05	0.29	0	→ 현재조성비 출력

〈그림〉 2) 분석결과와 당량비율 변환 예

3. 표준 조성 다량원소 6종 당량 비율로 변환								
	K	Ca	Mg	NO3-N	H2PO4-P	SO4-S	NH4	
→ 표준양액 농도값을 당량농도 변환	6.5	9.5	3.5	15.5	1.25	3.5	0.75	→ 표준조성 당량농도 출력
→ 당량비율로 변환(표준조성비)	0.33	0.49	0.18	0.77	0.06	0.17	0.05	→ 표준조성비 출력

〈그림〉 3) 표준조성 당량비율 변환 예

- 4) 표준조성비와 현재조성비 차이 산출: 상위 단계에서 계산된 표준조성비와 현재조성비의 차이를 산출함.
- 5) 표준조성비와 현재조성비 차이를 직전의 농축양액 내 성분 조성비에 적산하여 희망 조성비 산출: 표준조성비-현재조성비 차이 계산값을 직전 분석시기의 농축양액 내 성분 조성비에 적산하여 희망 조성비를 산출함.

4. 표준조성비와 현재조성비 차이 산출								
	K	Ca	Mg	NO3-N	H2PO4-P	SO4-S	NH4	
→ (표준조성비 - 현재조성비) 계산	0.03	-0.02	-0.01	0.10	0.02	-0.11	0.05	→ 조정값 출력

〈그림〉 4) 표준조성비와 현재조성비 차이 산출 예

5. 표준조성비와 현재조성비 차이 이전 농축양액 조성비에 적산하여 현시점 희망 조성비 산출								
	K	Ca	Mg	NO3-N	H2PO4-P	SO4-S	NH4	
→ 직전 시기 농축양액 조성비 불러오기	0.31	0.59	0.10	0.73	0.05	0.23	0.05	→ 직전시기 농축양액 조성비
→ 조정값 직전 시기 농축양액 조성비에 적산하여 현시점 희망 조성비 산출	0.35	0.57	0.08	0.82	0.07	0.11	0.10	→ 현시점 희망 조성비 출력

〈그림〉 5) 표준조성비와 현재조성비 차이를 직전의 농축양액 내 성분 조성비에 적산하여 희망 조성비산출 예

- 6) 현재 보유 비료 조건에서 조제 가능한 차기 농축양액 조성비 산출: '비료정보' DB에서 사용자가 보유한 비료를 기반으로 조합 가능한 양분의 조성비를 '비료 탐색부'의 알고리즘을 활용하여 탐색하며, 희망 조성비와의 오차를 최소화하면서 동시에 목표 조정값이 직전 시기 농축양액의 비율의 조정 방향성을 유지할 수 있는 조성비를 탐색함.

5. 현재 보유 비료 조건에서 조제 가능한 차기 농축양액 조성비 산출								
	K	Ca	Mg	NO3-N	H2PO4-P	SO4-S	NH4	
→ 현시점 희망 조성비 불러오기	0.35	0.57	0.08	0.82	0.07	0.11	0.10	→ 현시점 희망 조성비 입력
→ 직전시기 농축양액 조성비 불러오기	0.313653137	0.5904059	0.0959400959	0.72519084	0.049618321	0.22519084	0.052631579	→ 직전시기 농축양액 조성비 입력
→ 현재 보유비료로 조제 가능한 농축양액 조성비 산출 알고리즘에 입력 조제 가능한 조성비 산출 알고리즘은 Find NS 시트와 FindNS.ipynb 파일 참조	0.35	0.57	0.08	0.82	0.07	0.11	0.10	→ 조제 가능한 농축양액 조성비 출력

〈그림〉 6) 현재 보유 비료 조건에서 조제 가능한 차기 농축양액 조성비 산출 예

- 7) 미량원소 분석결과를 현재 미량원소 몰비율로 변환: 미량원소의 분석결과를 현재 미량원소 몰비율로 변환하여 미량원소 표준 조성비와 현재 조성비의 차이 계산 과정으로 전달.

6. 미량원소 분석결과와 현재 미량원소 몰비율로 변환							
	Fe	Zn	B	Mn	Cu	Mo	
→ ⁴ 현재 분석결과에서 미량원소 몰 농도(μM) 변환	9.7	18.9	57.2	1.8	0.3	0.2	← ² 원자량, 현재 분석결과 입력 (※ 현 버전 조정 대상에서 5는 제외)
→ ⁴ 현재 분석결과에서 미량원소 몰 농도를 현재 미량원소 몰비율로 변환 (※ 미량원소 몰비율 = 미량원소 몰 농도 / 미량원소 몰 농도 합)	0.11	0.21	0.65	0.02	0.004	0.002	← 현재 미량원소 몰비율 출력

(그림) 7) 미량원소 분석결과를 현재 미량원소 몰비율로 변환 예

- 8) 미량원소 표준 조성비와 현재 조성비 차이 산출

7. 미량 원소 표준 조성비와 현재 조성비 차이 산출							
	Fe	Zn	B	Mn	Cu	Mo	
→ ⁵ 표준 미량원소 몰비율 계산	0.245	0.082	0.490	0.163	0.012	0.008	← ¹ 표준양액 몰농도(미량원소) 입력 → ⁵ 표준 미량원소 몰비율 출력
→ ³ (표준 미량원소 몰비율 - 현재 미량원소 몰비율) 계산	0.135	-0.133	-0.159	0.143	0.009	0.006	← ⁶ 표준 미량원소 몰비율, 현재 미량원소 몰비율 입력 → ³ 미량원소 조정값 출력

(그림) 8) 미량원소 표준 조성비와 현재 조성비 차이 산출 예

- 9) 차기 농축양액 미량원소 조성비 산출: 미량원소 표준 조성비와 현재 조성비의 차이 계산값을 직전 시기 농축양액의 미량원소 조성비에 적산하여 차기 농축양액의 미량원소 조성비를 산출함.

8. 차기 농축양액 미량원소 조성비 산출							
	Fe	Zn	B	Mn	Cu	Mo	
→ ⁴ 직전 시기 농축양액 조성비(미량원소) 불러오기	0.318	0.180	0.300	0.190	0.010	0.002	← ⁴ 직전시기 농축양액 조성비(미량원소) 입
→ ³ 미량원소 조정값 직전 시기 농축양액 조성비에 ³ 미량원소 조정값을 적산하여 ¹⁰ 현시점 미량원소 농축양액 목표 조성비 산출	0.453	0.047	0.141	0.333	0.019	0.008	← ¹⁰ 현시점 미량원소 농축양액 목표 조성비

(그림) 9) 차기 농축양액 미량원소 조성비 산출 예

- 10) 차기 농축양액 조제표 출력: 최종적으로 차기 분석 후 조정시기까지의 양분 변화를 교정할 농축양액의 A, B액 조제표를 출력함. 출력된 데이터는 조제표로 변화하여 사용자에게 제공되며, 최종적으로 조제표에 활용된 차기 농축양액 내 양분의 당량 농도비율은 '양분당량비율' DB로 저장되어 차기 분석값 입력 시에 참조되도록 함.

9. 차기 농축양액 조제표 출력		농축배율 조제량 (L)						
→ * 농축양액 조제 요구량에서 농축배율 조제량 불러오기		1	10					← 조제 가능한 농축양액 조성비 입력 from WFind NS sheet
		Ca(NO3)2 (mM)	K2SO4 (mM)	KH2PO4 (mM)	MgSO4 (mM)	KNO3 (mM)	NH4NH3 (mM)	
→ #Find NS 시트에서 *표준전해당량 기준 비료조성에서 각 비료별 농도에 *농축양액 조제 요구량의 농축배율을 곱해서 불러오기		5.3	0.4	1.3	0.8	4.4	1.7	← *표준 전해당량 기준 비료 조성 입력 from WFind NS sheet ← 농축배율 입력 ← 농축배율 적용 농축양액 몰농도 출력
→ *표준양액 몰농도에서 미량원소 몰농도 합 산출 → (미량원소 몰농도 합 X 농축배율) 산출 → 미량원소 uM 농도 mM 농도 단위로 변환		0.1						← [(표준양액 몰농도(미량원소 부분)) 입력 → 미량원소 농축양액 몰농도 합 출력
		Fe-EDTA	ZnSO4	H3BO3	MnSO4	CuSO4	Na2MoO4	
(¹⁰ 현시점 미량원소 농축양액 목표 조성비 X ¹⁰ 미량원소 농축양액 몰농도 합)을 각 해당 비료에 맞게 출력		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	← ¹⁰ 미량원소 농축양액 몰농도 합 입력 ← ¹⁰ 미량원소 비료별 몰농도 출력
		Ca(NO3)2	K2SO4	KH2PO4	MgSO4	KNO3	NH4NO3	
→ 미량원소 A액 분류		5.30	0.00	0.00	0.00	4.36	1.69	← 농축배율 적용 농축양액 몰농도 입력 ← 비료DB의 A액 컬럼의 비료별 계수 입력 ← ¹² 미량원소 A액 농축양액 비료 농도 출력 ← 농축배율 적용 농축양액 몰농도 입력
→ 미량원소 B액 분류		0	0.37	1.34	0.76	0	0	← 비료DB의 B액 컬럼의 비료별 계수 입력 ← ¹¹ 미량원소 B액 농축양액 비료 농도 출력
		Fe-EDTA	ZnSO4	H3BO3	MnSO4	CuSO4	Na2MoO4	
→ 미량원소 A액 분류		0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	← ¹¹ 미량원소 비료별 몰농도 입력 ← 비료DB의 A액 컬럼의 미량비료별 계수 입력 ← ¹⁴ 미량원소 A액 농축양액 비료 농도 출력 ← ¹¹ 미량원소 비료별 몰농도 입력
→ 미량원소 B액 분류		0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	← 비료DB의 B액 컬럼의 미량비료별 계수 입력 ← ¹² 미량원소 B액 농축양액 비료 농도 출력
→ 미량원소 A액 비료 투입량 출력 (kg 단위)		0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	← 미량원소 A액 비료 투입량 출력 (kg 단위)
→ 미량원소 B액 비료 투입량 출력 (kg 단위)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	← 미량원소 B액 비료 투입량 출력 (kg 단위)
		Fe-EDTA	ZnSO4	H3BO3	MnSO4	CuSO4	Na2MoO4	
→ 미량원소 A액 비료 투입량 출력 (kg 단위)		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	← 미량원소 A액 비료 투입량 출력 (kg 단위)
→ 미량원소 B액 비료 투입량 출력 (kg 단위)		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	← 미량원소 B액 비료 투입량 출력 (kg 단위)
		Ca(NO3)2	K2SO4	KH2PO4	MgSO4	KNO3	NH4NO3	
→ 미량원소 A액 비료 투입량 출력 (g 단위)		8.69	0.00	0.00	0.00	4.40	1.35	
→ 미량원소 B액 비료 투입량 출력 (g 단위)		0.00	0.65	1.81	0.91	0.00	0.00	
		Fe-EDTA	ZnSO4	H3BO3	MnSO4	CuSO4	Na2MoO4	
→ 미량원소 A액 비료 투입량 출력 (g 단위)		0.096	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
→ 미량원소 B액 비료 투입량 출력 (g 단위)		0.000	0.005	0.005	0.031	0.002	0.001	

〈그림〉 10) 조제표 산출 예

- 상기 계산 시퀀스를 진행할 때 입출력이 발생하는 데이터베이스는 표준양액농도, 양분분석입력데이터, 비료정보, 원소정보, 양분당량비율로 구성되며 각 계산 과정별로 필요한 데이터의 호출 및 저장을 수행하며, 각 DB 별 구성 목적은 아래와 같음.
 - ‘표준양액농도’는 양분 균형제어의 기준값으로 활용되며, 복합양분관리 플랫폼의 사용자 설정 페이지에서 입력될 수 있음.
 - ‘양분분석입력데이터’는 사용자가 분석 센터를 통해 입력한 값 또는 실시간 이온센서 분석데이터를 입력받아 일자별로 저장됨.
 - ‘비료정보’는 일반적으로 농가가 구비할 수 있는 비료염의 원소 조성정보를 제공하며, 차기 농축양액 조제표 출력 시퀀스(10번 과정)에서 조합 가능한 비료조성 탐색 시 활용됨.
 - ‘원소정보’는 각 원소별 원자가와 원자량 정보를 보유하고 있으며, 수경재배의 양분분석 대상에 원소들로 구성되어 몰농도, 당량농도 계산 활용됨.
 - ‘양분당량비율’은 양분균형제어 알고리즘의 주요 계산 시퀀스에서 생성된 당량비율값들을 저장하며, 직전시기의 농축양액 내 양분의 당량비율, 조제 가능한 농축양액의 조성비율 현시점 농축양액의 조성비를 저장함.

양분 농도 DB																					
작목	종류	날짜	pH	EC	Na	Cl	HCO3	K	Ca	Mg	NO3-N	H2PO4-P	SO4-S	NH4-N	Fe	Zn	B	Mn	Cu	Mo	Si
*표준양액 물농도	파프리카	표준양액	-	-	-	-	-	6.5	4.75	1.75	15.5	1.25	1.75	0.75	15	5	30	10	0.75	0.5	

<그림> 준양액농도DB 구성 예

외부입력 DB																					
작목	종류	날짜	pH	EC	Na (mg/L)	Cl (mg/L)	HCO3 (mg/L)	K (mg/ppm)	Ca (mg/ppm)	Mg (mg/ppm)	NO3-N (mg/ppm)	H2PO4-P (mg/ppm)	SO4-S (mg/ppm)	NH4-N (mg/ppm)	Fe (mg/ppm)	Zn (mg/ppm)	B (mg/ppm)	Mn (mg/ppm)	Cu (mg/ppm)	Mo (mg/ppm)	Si (mg/ppm)
*원재 분석결과	파프리카	신탄분석	2022-02-27	5.9	5.6	128	279	12	585	505	116	458	69	324	0	0.54	1.21	0.63	0.1	0.02	0.02
작목	날짜	농축배출	조제량(L) (A, B역 등)						15.014	12.6368	4.836	32.7071	2.22769	7.00611	0						
*농축양액 조제 요구량	파프리카	2022-02-27	100	200																	

<그림> 양분분석입력데이터DB 구성 예

비료 DB											
비료 DB	K	Ca	Mg	NO3	H2PO4	SO4	NH4	A액	B액	Mol. Wt.	
Ca(NO3)2	0	1	0	2	0	0	0	0	1	0	163.9
K2SO4	2	0	0	0	0	0	1	0	0	1	173.9
KH2PO4	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	135.9
MgSO4	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	119.9
KNO3	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	101
NH4NO3	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	80.02
Fe-EDTA									1	0	344.1
ZnSO4									0	1	159.9
H3BO3									0	1	62.02
MnSO4									0	1	150.9
CuSO4									0	1	158.9
Na2MoO4									0	1	207.9

<그림> 비료정보DB 구성 예

원소 DB																
	Na	Cl	K	Ca	Mg	NO3-N	H2PO4-P	SO4-S	NH4-N	Fe	Zn	B	Mn	Cu	Mo	Si
*원자가 → 원자가	1	1	1	2	2	1	1	2	1							
*원자량 → 원자량	23.0	35.0	39.0	40.0	24.0	14.0	31.0	32.0	14.0	55.9	63.9	11.0	54.9	62.9	97.9	28.0

<그림> 원소정보DB 구성 예

양분 당량 비율 DB																
작목	종류	날짜	다량원소 당량 농도 조성비(양이온비, 음이온비, NH4의 경우 NO3/NH4 비율 의미)										미량원소 총농도 조성비			
			K	Ca	Mg	NO3-N	H2PO4-P	SO4-S	NH4-N	Fe	Zn	B	Mn	Cu	Mo	
*직전시기 농축양액 조성비	파프리카	농축양액	2022-02-20	0.31	0.59	0.10	0.73	0.05	0.23	0.05	0.318	0.18	0.3	0.19	0.01	0.002
*조제 가능한 농축양액 조성비																
from WFind NS sheet																
*현시점 농축양액 목표 조성비	파프리카	농축양액	2022-11-09	0.35	0.57	0.08	0.82	0.07	0.11	0.10	0.453	0.047	0.141	0.333	0.019	0.008
				0.31	0.59	0.10	0.73	0.05	0.23	0.05						

<그림> 양분당량비율DB 구성 예

○ 비료 탐색 알고리즘

- 비료 탐색 알고리즘은 비선형계획법을 활용하여 현재 사용자가 보유한 비료의 종류를 활용하여 조제 가능한 농축양액의 조성비를 탐색함.
- 이 과정에서 의사결정변수항은 조제 가능한 농축양액의 조성비이며, 목적함수는 '교정부 알고리즘'이 출력한 목표 조성 양분비와 비료 탐색 알고리즘이 추정된 비료 조합을 통해 생성한 조제 가능한 농축양액의 조성비의 차이이며, 이를 최소화 할 수 있는 비료 조합을 탐색하게 됨.
- 또한, 이 과정에서 적용되는 제약조건은 아래와 같음.
 - 제약조건 #1: 현시점 희망 조성비가 직전시기 농축양액 조성비 보다 큰 경우에 조제 가능한 농축양액 조성비는 최소한 직전시기 농축양액 조성비 보다는 커야함.
 - 제약조건 #2: 현시점 희망 조성비가 직전시기 농축양액 조성비 보다 작은 경우에 조제 가능한 농축양액 조성비는 최소한 직전시기 농축양액 조성비 보다는 작아야함.
 - 제약조건 #3: 새로운 비료 조성 타겟 농도(계산용,임시) 셀영역에서 양이온들의 당량농도 합과 음이온들의 당량농도 합이 서로 같아야 함.

	의사결정변수항	K	Ca	Mg	NO3	H2PO4	SO4	NH4
⁵ 조제 가능한 농축양액 조성비 →	Equivalent ratio	0.35	0.57	0.08	0.82	0.07	0.11	0.10
새로운 비료 조성 타겟 농도(계산용, 임시)	Equivalent	6.44	10.60	1.52	16.65	1.34	2.26	1.69
농축양액 조제 페이지에서 조제 양액 부피와 농축배율에 따라서 변경되므로, 임시값.	Target Ratio T	0.35	0.57	0.08	0.82	0.07	0.11	0.10
⁵ 현시점 희망 조성비 →	Target Ratio T-1week	0.31	0.59	0.10	0.73	0.05	0.23	0.05
⁴ 픽전시기 농축양액 조성비 →								

〈그림〉 비료 탐색부의 주요변수 예

제약조건(Bound)			
	좌변합계		우변상수
<i>Cation sum</i> →	20.25	=	20.25
<i>Anion sum</i> →	20.25	=	20.25
	⁶ 조제 가능한 농축양액 조성비 ↓		↓ ⁴ 픽전시.
7	K_SE	0.35 >	0.31365
		0.35 <	0
	Ca_SE	0.57 >	0
10		0.57 <	0.59041
	Mg_SE	0.08 >	0
12		0.08 <	0.09594
13	NO3_SE	0.82 >	0.72519
		0.82 <	0
	SO4_SE	0.11 >	0
16		0.11 <	0.22519
17	H2PO4_SE	0.07 >	0.04962
		0.07 <	0
19	NH4	0.10 >	0.05263
		0.10 <	0

〈그림〉 비료 탐색부의 비선형계획법의 제약조건 예

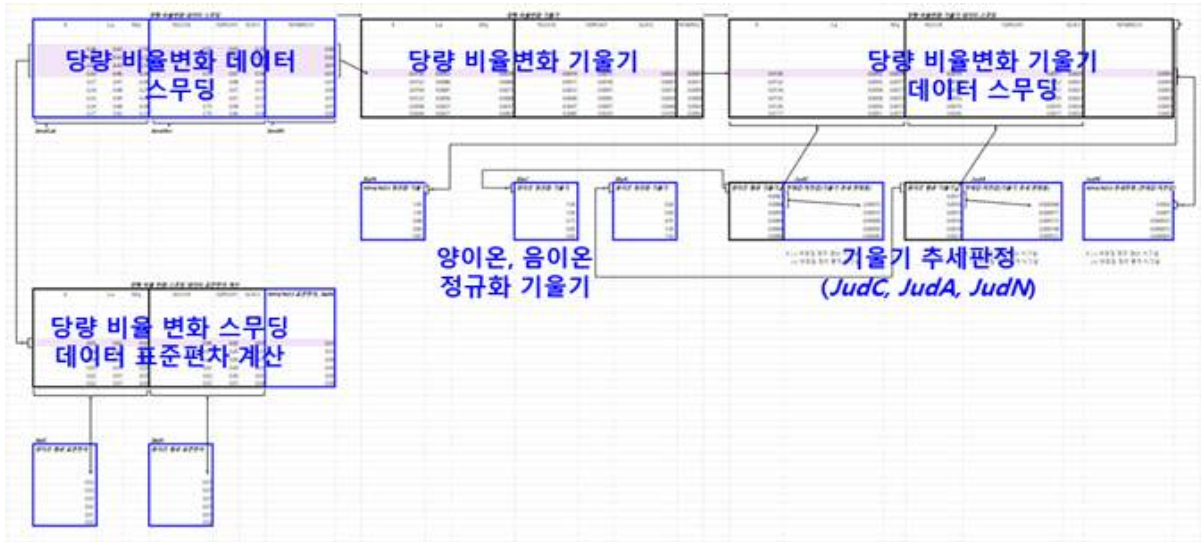
○ 진단 알고리즘 진행 절차

- 진단 알고리즘은 사용자가 입력한 분석 데이터를 바탕으로 현재 양분 균형 변화의 추세를 판정하고, 양분 균형의 조정 과정이 초기조정과정/중기조정과정/안정화 과정에 있는지를 판정하여 이를 기반으로 차기 분석주기를 결정하게 됨.

〈표〉 알고리즘 탑재 상황 시나리오 예시

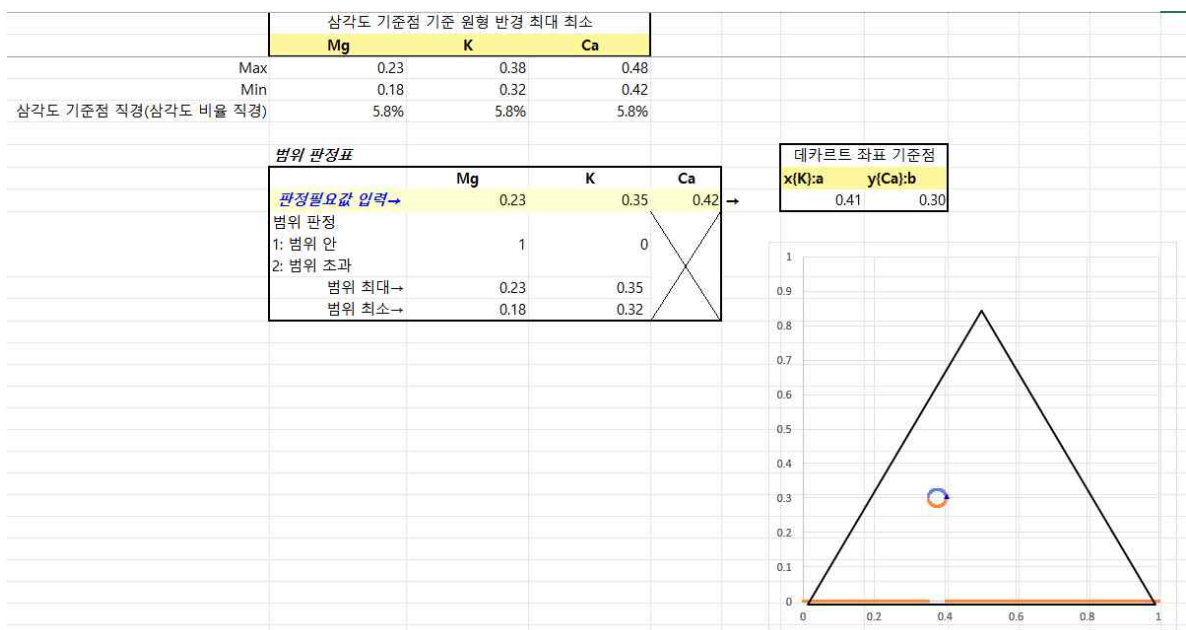
1	사용자가 분석 결과를 입력한다.	
2	차기 농축양액 조성이 교정 Algorithm(이하 Alg.)을 거쳐 출력된다.	
3	진단 Alg.는 사용자가 입력한 분석 결과를 바탕으로 양분 균형 제어 상태에 대한 진단 결과를 출력한다.	
3)	1) 진단 Alg.는 사용자가 작기 시작 후 분석결과를 최초 입력한 시점부터 4회의 데이터 입력을 받기 전까지는 판정을 보류한다. 이 단계의 진단 출력은 우측의 '출력 메시지'와 같이 출력함	
	2) 최초 입력 시점부터 4회의 데이터(약 4주 기간) 입력이 발생하면, '임시데이터당량비율변화판정용 스무딩DB' 섹션에서 계산된 일련의 데이터를 활용하여 양분균형변화판정을 진행한다. 아래의 조건에 만족하는 경우에 해당하는 진단 문구를 출력한다. ③ 양,음,NH4 비율의 추세판정용 데이터(JudC, JudA, JudM)의 각 데이터셋의 데이터 수가 3개 미만일 경우 ④ 양,음,NH4 비율의 추세판정용 데이터(JudC, JudA, JudM)의 각 데이터셋의 데이터 수가 3개 이상일 경우 ▶ 추세판정용 데이터(JudC, JudA, JudM)가 현시점 데이터 포함 과거 2개 데이터 총 3개 데이터 모두 음수일 경우 ▶ 추세판정용 데이터(JudC, JudA, JudM)가 현시점 데이터 포함 과거 2개 데이터 총 3개 데이터 모두 양수일 경우 ▶ 추세판정용 데이터(JudC, JudA, JudM)가 현시점 데이터 포함 과거 2개 데이터 총 3개 데이터 모두 양수일 경우 3) ▶ 추세판정용 데이터(JudC, JudA, JudM)의 현시점 데이터 포함 과거 +2개 데이터, 총 3개 데이터셋이 모두 음수 또는 음수 양수 혼합으로 구성되어 있음. AND ▶ 현시점 정규화 기울기(SlpC, SlpA, SlpM)가 NormJud이하값에 해당. AND ▶ 현시점 표준편차 StdC, StdA, StdN0/ StdJud이하값에 해당. AND ▶ 현시점 당량비율변화 스무딩 값이(SmdCat, SmdAni, SmdM) - SmdCat의 경우 '삼각도 원반경 (양이온용)' 시트에서 설정한 '삼각도 기준점 기준 원형 변경' 안에 위치함. - SmdAn의 경우 '다각형 스케일 조절 (음이온용)' 시트에서 설정한 '삼각도 축소 표준범위' 영역 안에 위치함. - SmdCat, SmdAn는 '삼각도원반경 (양이온용)'과 '다각형 스케일 조절(음이온용)' 시트에서 '범위 판정표' 계산에 의해서 판정될 수 있음. - SmdM의 경우 표준조성 (목표 NH ₄ /NO ₃) ± SmdJudBand안에 위치함. ⑤ 양이온 또는 음이온 비율이 Steiner 표준 영역을 이탈해 있는 경우. ※ 영역 안에 있는지는 '다각형 스케일 조절 (음이온용)' 계산 슬라이드의 판정표에서 범위 축소 전의 음이온, 양이온 영역을 기준으로 판정 가능 ⑥ 양이온과 음이온 비율이 모두 Steiner 표준 영역 안에 있는 것으로 판정되는 경우. ※영역 안에 있는 지는 '다각형스케일조절(음이온용)' 계산 슬라이드의 판정표에서 범위축소전의 음이온, 양이온 영역을 기준으로 판정 가능	
	4) 진단 Alg.는 또한 최근까지의 양분 변화 데이터를 바탕으로 차기 권장분석 일정을 출력한다.	
	1) 초기 상태에서의 권장 분석주기는 현 분석일+7일 이후로 설정 출력한다.	
	2) 모든 양이온/음이온/NH ₄ :NO ₃ 항목이 '양이온/음이온/NH ₄ :NO ₃ ← 해당 종류별로 각각) 균형이 안정화 과정 중에 있습니다.' 단계에 있을 경우	
	3) 모든 양이온/음이온/NH ₄ :NO ₃ 항목이 '양이온/음이온/NH ₄ :NO ₃ ← 해당 종류별로 각각) 균형이 안정화 과정 중에 있습니다.' 단계에 있을 경우	
	4) 양이온 또는 음이온 비율이 Steiner 표준 영역을 이탈해있는 경우	
	5) 양이온 또는 음이온 비율이 Steiner의 표준 영역 안에 있는 경우	
	5	진단 Algorithm은 최근까지의 Na, Cl 변화 데이터를 바탕으로 권장 밸브 혼합 수준을 출력한다. ※ 여기에서는 사용자의 원수 분석 결과 데이터의 입력이 요구된다. (작성 중)
	6	미량원소는 '시나리오 3'의 양이온, 음이온 비율 데이터 시나리오와 데이터 전처리 과정, 그리고 판정 과정을 동일하게 거치나, 목표 범위에 값이 들어와 있는지 판정하는 부분은 NH ₄ /NO ₃ 의

경우와 마찬가지로 판단한다.

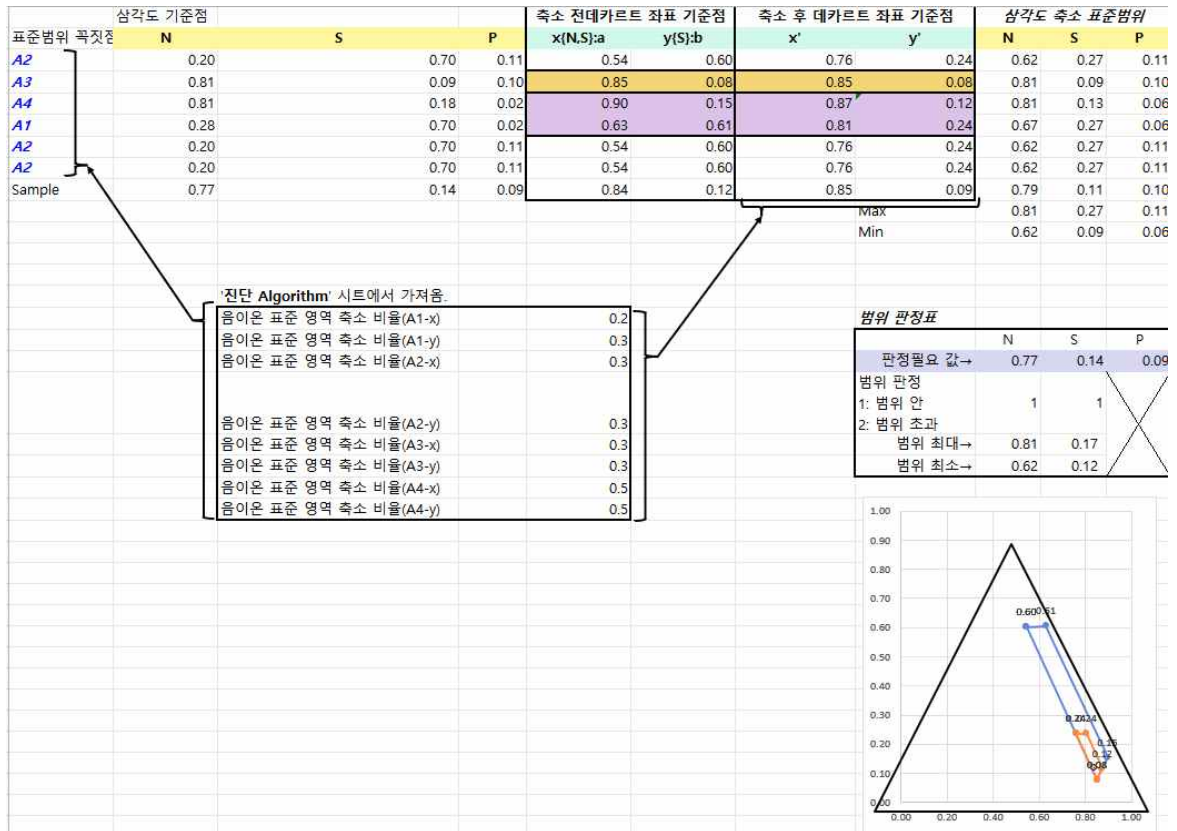


〈그림〉 알고리즘 탑재 상황 시나리오의 계산 테이블 관계도 예시

- 양분균형 변화의 판정 기준값은 양분의 삼각도를 기반으로 수행될 수 있으며, 이 경우 판정값 계산의 편의를 위해 삼각도 기준점 값에 해당하는 $Mg:K:Ca$, $NO_3:H_2PO_4:SO_4$ 의 비율값을 데카르트 좌표계에 표시하도록 변화하는 과정을 거치며 삼각도 내에서의 좌표변환 과정을 데카르트 좌표 변환을 통해 양이온, 음이온 그룹 중 한 개 양분을 x 축의 변수로, 그리고 다른 한 개 양분을 x 축의 변수를 함수로 하는 y 축의 변수로 변환함.
- 양이온의 경우 데카르트 좌표변환을 통해 변환된 값이 적정 표준 반경 안에 들어오는지를 판정하기 위해 원방정식을 사용하여 출력된 좌표값으로 반경 범위를 설정함.
- 음이온의 경우 Steiner의 삼각도 표준 영역의 축소 영역으로 설정하기 위해 데카르트 좌표 변환 후 Steiner 음이온 표준 영역의 비율 유지 축소 과정을 수행함.



〈그림〉 삼각도 표준영역 중 양이온 예시



〈그림〉 삼각도 영역판정 중 음이온 예시

(4) 다양분 분석 데이터 소스에 따라 양분 관리가 가능한 순환식 수경재배 양분관리 플랫폼 구축

○ ISE 모듈과 복합양분관리 플랫폼의 데이터 송수신 체계 구축

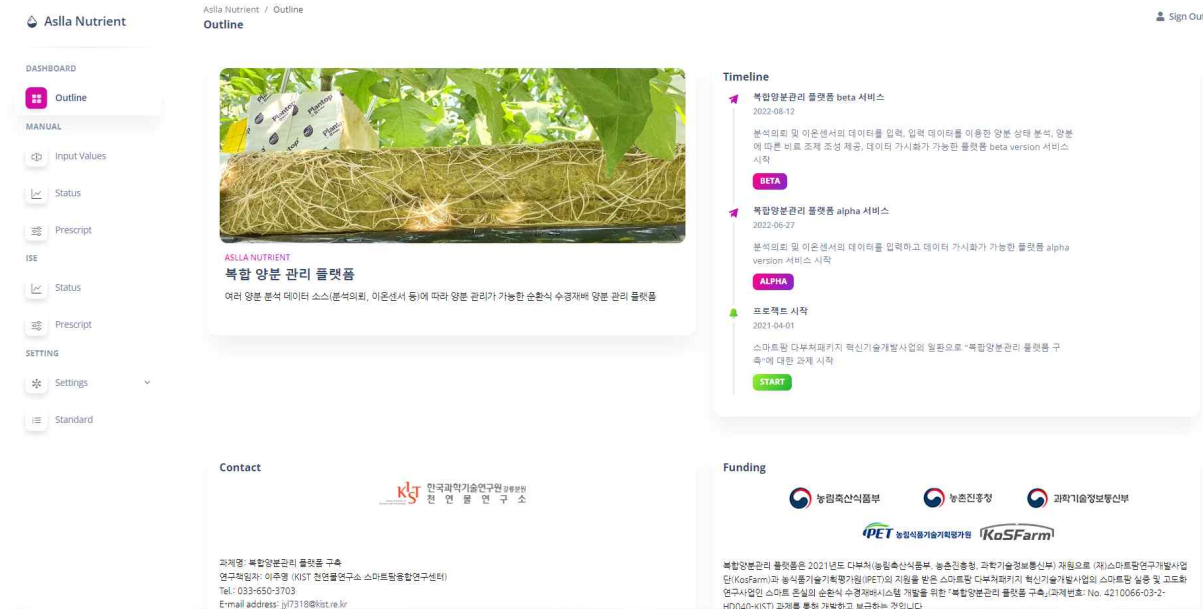
- 본 연구팀의 서울대 연구진이 개발한 ISE 모듈과 복합양분관리 플랫폼의 데이터 송수신 체계를 구축 하였음.
- KIST 측에서 REST API를 활용하여 서울대측 ISE 모듈에서 실행 시 데이터 요청 모듈로 복합 양분관리플랫폼에서 계산된 교정 비료염 처방 데이터를 송신할 수 있도록 파이썬 실행파일을 작성함.
- ISE 모듈이 현재의 배액 분석 데이터를 획득하여 파이썬 코드에 업데이트 후 파이썬 파일을 실행하게 되면 복합양분관리플랫폼으로 해당내용을 송신하며, 복합양분관리플랫폼의 교정부로 분석 데이터 입력이 이루어지며, 이후 과정은 양분 교정 알고리즘이 개시되어 최종적인 처방전 결과가 ISE 모듈 측으로 송신됨.

〈그림〉 REST API python code 예시

- 상기 코드에서 'node_id' 부분은 복합양분관리플랫폼에서 사용자의 관리 영역을 구분하는 고유 아이디 로서 다중 모듈과의 데이터 통신 시에 복합양분관리플랫폼의 양분교정 알고리즘은 node_id를 기준으로 DB 할당을 결정하여 별도 관리가 될 수 있도록 하였음.
- 상기 코드에서 'fertilizer' 부분은 양분 교정알고리즘을 거쳐 최종적으로 ISE 모듈이 수신하게 될 처방전에 해당함.

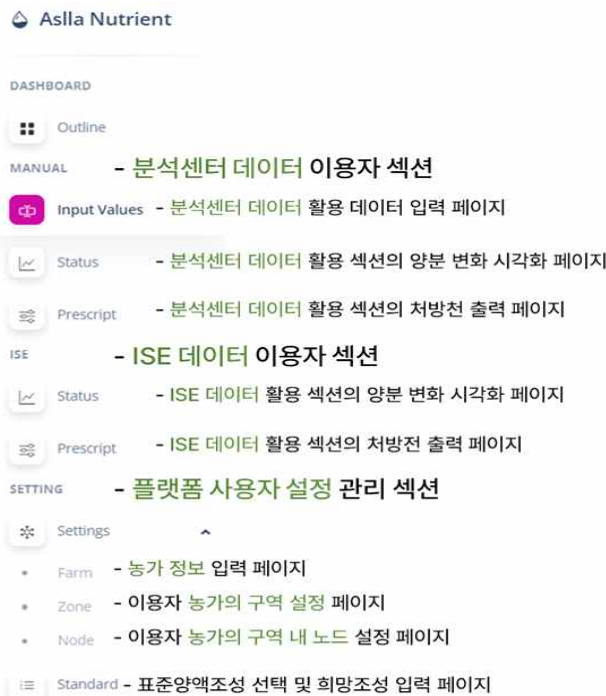
○ 양분 균형제어 알고리즘이 탑재된 순환식 수경재배 양분관리 알고리즘 플랫폼 구축

- 복합양분관리플랫폼을 Web으로 구현하여 사용자가 양분 상황을 파악할 수 있도록 진행함. 서버의 구축은 Ubuntu, Django, Postgresql을 기반으로 제작됨.
- 플랫폼 페이지 계정 로그인 후 초기 페이지 화면으로, 데쉬보드 형태의 현황판으로 활용되며, 최종 버전에서는 사용자 경험을 수집하여 주요 정보 브리핑 형태의 지면 구성



〈그림〉 양분관리 플랫폼 초기화면

- 플랫폼 페이지의 사이드 메뉴바의 구성: 여러 분석 데이터 소스에 대응하여 유연하게 활용 가능하도록 초기 메뉴를 구성하였으며 크게 ‘분석센터 데이터’ 이용자 섹션과 ‘ISE 데이터’ 이용자 섹션, 그리고 ‘플랫폼 사용자 설정’ 관리 섹션으로 구성됨.



〈그림〉 양분관리 플랫폼의 사이드바 구성

- 분석 데이터 이용자 입력 섹션: 분석센터 데이터 이용자 섹션에서 활용 데이터 입력 페이지 메뉴로 접속 시 사용자가 분석센터의 분석 결과를 입력할 수 있는 페이지가 우측 프레임에 출력됨.

Reference Farm / Manual / Input
Manual / Input Sign Out

Select Farm/Zone/Node

(FARM999 - ZONE3 - NODE4) Reference Farm - TEST구역 - TEST Node - Manual

SELECT FARM ZONE NODE

General (Unit: mS/cm (EC))

EC:

pH:

Major (Cation) (Unit: mM)

NH₄-N:

K:

Na:

Ca:

Mg:

Select Input

SELECT INPUT DATE

Major (Anion) (Unit: mM)

NO₃-N:

P:

S:

Cl:

HCO₃:

SI:

Minor (Unit: μM)

Fe:

Mn:

Zn:

B:

Cu:

Mo:

Insert/Update Information

Date:

Unit of Nutrient Ions:

INSERT / UPDATE

〈그림〉 양분관리 플랫폼의 분석 데이터 입력 구성

- 사용자가 해당 페이지의 입력창에 양분 분석 결과치를 입력하게 되면 양분 교정부의 계산 시퀀스가 수행되며 입력이 완료되면 관련 상술했듯이 관련 DB에 데이터가 생성되며 최종적으로 차기 농축양액의 처방전이 출력됨. 사용자는 입력 완료 후 처방전 페이지로 이동하여 요약된 처방전을 참고하여 차기 양분 관리를 위해 사용될 농축양액을 조제하도록 의사결정지원 정보가 제공됨.

시설원예연구소 / ISE / Prescript
ISE / Prescript Sign Out

Select Farm/Zone/Node

(FARM2 - ZONE1 - NODE2) 시설원예연구소 - 온실 - 순환식ISE

SELECT FARM/ZONE/NODE

Tank A

NO	FORMULA	AMOUNT	UNIT
A1	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	0.0	kg
A2	KNO ₃	149.154	kg
A3	NH ₄ NO ₃	0.0	kg
A4	Fe-EDTA 13%	350.874	mL

Select Date

SELECT DATE

Tank B

NO	FORMULA	AMOUNT	UNIT
B1	K ₂ SO ₄	0.0	kg
B2	KH ₂ PO ₄	0.0	kg
B3	MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.0	kg
B4	MnSO ₄ ·H ₂ O	20.355	g
B5	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	452.326	g
B6	H ₃ BO ₃	299.249	g
B7	CuSO ₄ ·5H ₂ O	7.518	g
B8	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	3.642	g

〈그림〉 양분관리 플랫폼의 처방전 출력 예시

- 또한 분석 유효기간 동안 사용자는 양분 교정 경과에 대한 정보를 시각화 페이지를 제공 받을 수 있으며, 현재 양분 관리 상태의 진단 리포트 정보를 제공 받을 수 있음.

Select Farm/Zone/Node

(FARM999 - ZONE3 - NODE4) Reference Farm - TEST구역 - TEST Node - Manual

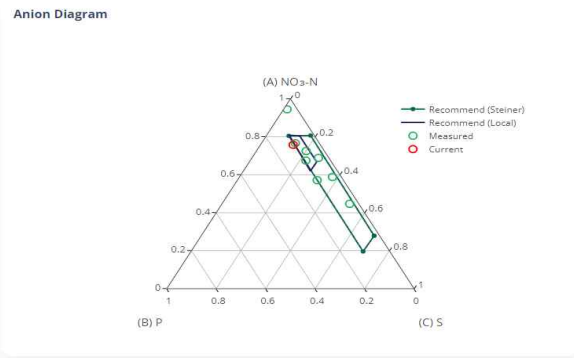
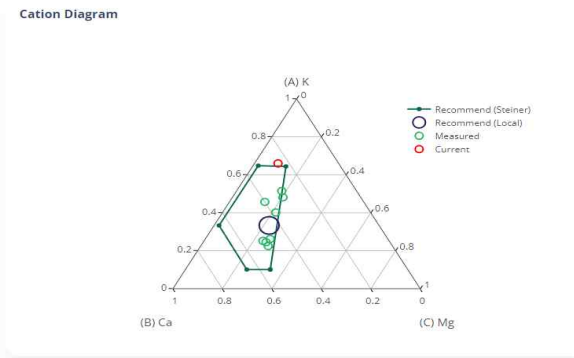
SELECT FARM_ZONE_NODE

Summary

Last Updated Date: 2022-01-01
Recommended Analysis Date: (+7 DAYS) 2022-01-08

Current Status:

- Cation: 양이온 균형 진단 초기화 중입니다.
- Anion: 음이온 균형 진단 초기화 중입니다.
- Nitrogen Ion: NH_4-N/NO_3-N 균형 진단 초기화 중입니다.
- Cation Standard: 양이온이 Steiner 표준 영역 안에서 관리되고 있습니다.
- Anion Standard: 음이온이 Steiner 표준 영역 안에서 관리되고 있습니다.



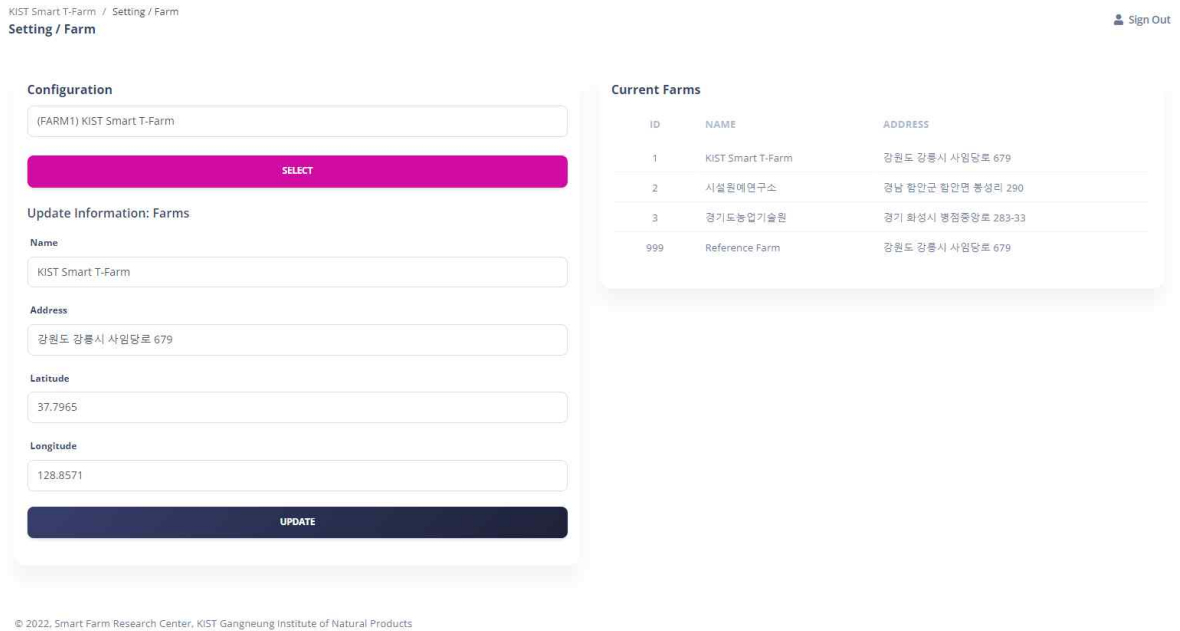
〈그림〉 양분관리 플랫폼의 양분 균형 변화 시각화 및 진단결과 예시

- 상기 알고리즘 계산 절차 항목에서 설명된 바와 같이 양분 균형제어 결과의 판정은 삼각도에서 설정된 영역을 기반으로 수행될 수 있으며, 그 시각화의 결과로 삼각도 상에서 안정 관리 영역과 권장 관리 영역이 표시되며, 현재 재사용 양액의 양분균형변화 양상이 시각화되어 사용자에게 제공됨.
- 또한 양분 농도 변화는 시계열 그래프로 시각화되어 시간 경과에 따른 변화 경향을 모니터링 할 수 있는 기능을 제공함.



〈그림〉 양분관리 플랫폼의 분 농도 시계열 변화 출력 예시

- ISE 이용자 섹션의 경우 ISE로부터 데이터 통신을 통해 자동으로 데이터 입력이 이루어지므로 분석센터의 경우처럼 사용자의 수동 입력이 요구되지 않으며 시각화 페이지와 처방전 페이지만이 출력됨.
- 또한 개별 비료염의 비율 기반 투입량 차등조절모듈을 갖춘 농가의 경우 ISE 모듈로 일단위로 발송된 분석 처방전의 데이터를 차등조절모듈의 제어 기준값으로 활용하여 분석센터이용 농가의 차기 농축양액 조제 과정을 자동화될 수 있음.



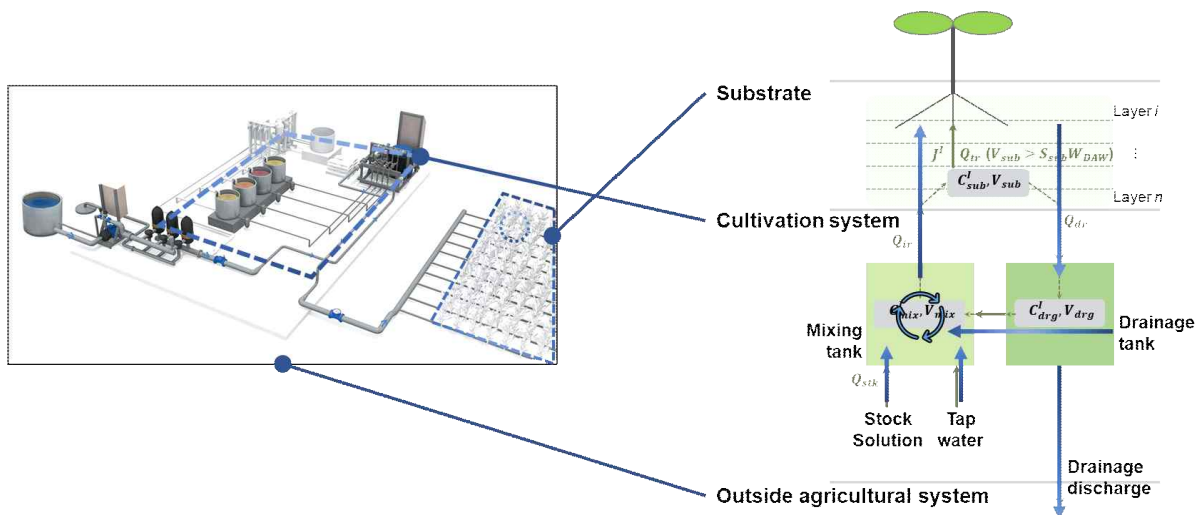
〈그림〉 양분관리 플랫폼의 농가 정보 설정 페이지

(5) 복합 양분관리 플랫폼 제어체계 구축

□ 복합 양분관리 플랫폼과 상용 양액 혼합 장치 간 결합 요인 분석

○ 상용 양액혼합기기의 시스템 경계 정의

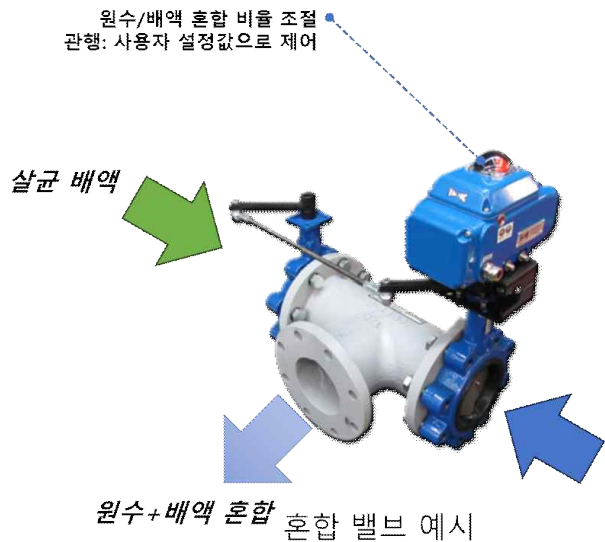
- 복합 양분관리 플랫폼의 입출력 요소와 상용 양액혼합기기의 결합요인을 정확하게 분석하기 위해, 우선적으로 양액 혼합 기기의 시스템 경계를 명확하게 정의하는 것이 중요함.
- 양액의 순환 과정: 혼합탱크에서 배지로 이송된 양액은 이후 배액탱크로 배출되고, 이 배출된 양액은 다시 혼합탱크로 회귀하는 순환 구조를 가짐.
- 비순환식(개방형) 시스템 특징: 이 시스템에서는 배액의 수집 과정이 없어 양액은 외부로 직접 배출되며, 재사용되지 않음.
- 순환식(폐쇄형) 시스템의 양액 순환: 이 시스템에서는 배액이 배액탱크에서 살균배액탱크로, 그리고 다시 혼합탱크로 이송되는 동안, 배액과 원수의 혼합 비율이 결정됨.
- 혼합 비율 조절 방식: 상업 농가 규모에서는 목표 농도를 기준으로 희석배율을 유동적으로 결정하는 방식도 있지만, 대부분의 경우 혼합밸브의 개도를 조절하여 사용자가 지정한 배액/원수 혼합 비율을 고정적으로 유지함.
- 고정된 혼합요인의 방식: 양액의 목표 공급농도와 배액의 희석배율을 유동적으로 조절하지 않는 시스템은 기본적으로 순환식이지만, 반폐쇄형 특성을 가짐.
- 반폐쇄형 시스템의 특징: 배액/원수의 희석비율이 고정된 시스템에서는 저장량을 초과할 경우 외부로 양분 유출이 발생하며, 이러한 특성으로 인해 반폐쇄형 시스템으로 분류됨.
- 수경재배의 시스템 경계: 배지, 혼합탱크, 그리고 배액탱크 사이에는 폐쇄적인 순환 구조가 형성되어 있음.
- 입출력 경계영역: 이러한 폐쇄적 순환구조는 양액 시스템의 중심적인 입출력 경계영역을 구성함.
- 수경재배 시스템 경계 유입부의 구성요소: 이 경계영역으로의 주된 유입부는 농축양액과 원수로 구성됨.
- 농축양액과 원수의 역할: 농축양액과 원수는 시스템 내에서 양액의 양분 균형과 미생물 수준을 조절하는 핵심적인 역할을 수행할 수 있음.



〈그림〉 상업규모 온실 양액혼합기기의 시스템 경계 및 입출력 요인

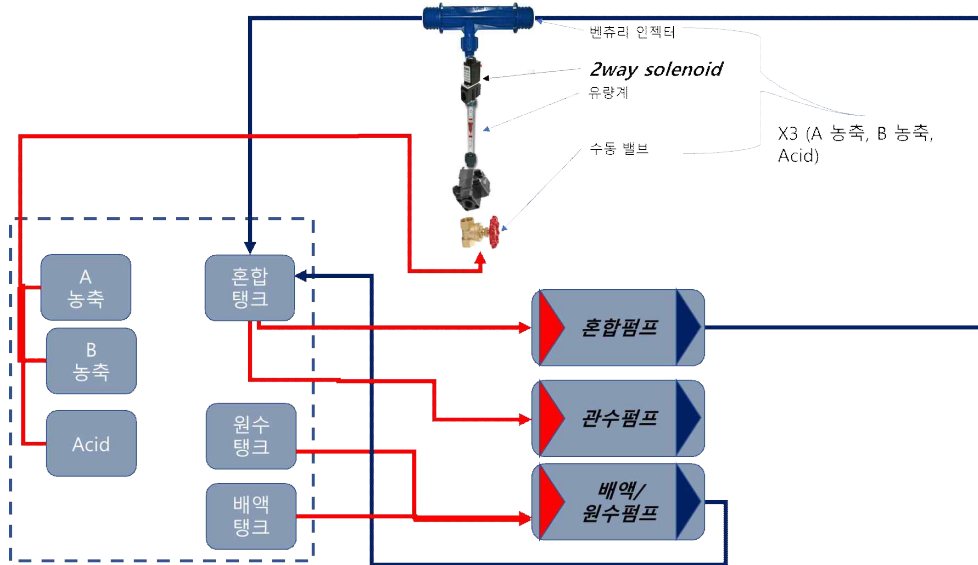
○ 상용 양액 혼합 장치와 복합양분 관리 플랫폼의 결합 요인 분석

- 이전 섹션에서 상용 양액혼합기기의 시스템 경계에 대한 정의와 분석을 진행함. 복합 양분관리 플랫폼의 사용자 편의성과 반응성을 향상시키려면, 플랫폼과 양액혼합기기 간의 시스템적 통합이 필수적임. 이러한 시스템적 통합을 통해 사용자는 더욱 빠르고 정확한 양분 관리에 대한 경험을 기대할 수 있음.
- 수경재배 시스템의 종류: 수경재배 시스템의 양액혼합기기는 크게 두 가지로 분류될 수 있음.
 - 복합환경 제어 시스템과의 연계형: 이 경우 양액혼합기기는 환경 제어 시스템에 의존적이며, 전체적인 시스템의 조화를 위해 특정 기능을 수행함.
 - 사용자 설정을 기반으로 독립적으로 작동하는 자립형
- 복합양분관리 플랫폼의 권한 범위:
 - 이미 오랜 기간에 걸쳐서 수분 관리 기술과 이와 연계된 센서, 알고리즘, 데이터 체인 등이 체계적으로 구성되어 왔음.
 - 따라서 현재로서는 복합양분관리 플랫폼이 수분 관리 기능까지 통제하는 것은 불필요함.
 - 주요 목적은 사용자의 양분 관리 편의성 증진과 시스템 경계 내부의 양분 균형 관리임.
- 시스템 경계의 입력 요인: 상기한 섹션에서 분석한 시스템의 입력 요인은 원수와 농축양액이며, 이 두 요인을 어떻게 효과적으로 연결할지가 현 기술 보급 수준에서 고려할 수 있는 연결 요인으로 볼 수 있음.



〈그림〉 상업규모 농가의 양액기기 혼합밸브의 배액+원수 혼합 방식 예

- 목표 설정: 복합양분관리 플랫폼의 권한 대체:
 - 수경재배 시스템에서 원수와 농축양액의 의사결정 권한을 복합양분관리 플랫폼에 위임하는 것을 목적으로 함.
 - 기존 관행에 대한 분석이 필요하여, 최적화된 양액 제공 방식을 구축하기 위한 정보를 제공.



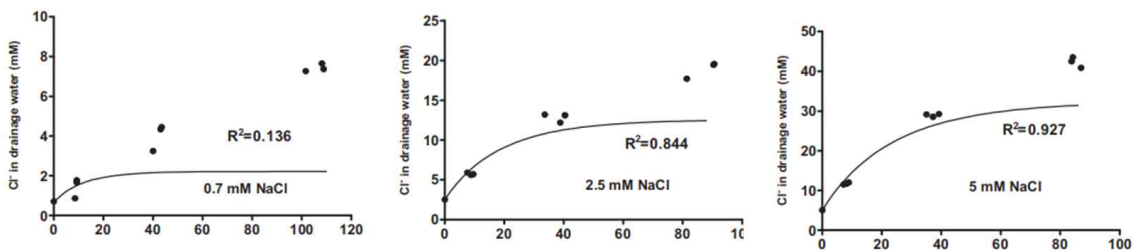
〈그림〉 상업규모 농가의 양액혼합기기의 농축양액 투입 체계

- 농축양액의 관리:
 - 혼합탱크의 순환펌프와 연결된 벤츄리관을 통해 농축양액의 흡입 유량을 조절.
 - 솔레노이드 밸브를 활용하여 ON/OFF 제어 방식으로 농축양액의 유입을 관리.
 - 일반적으로 농축양액은 A와 B 양액으로 구성되어 있으므로 독립 제어가 불가능, A측 밸브와 B측 밸브는 동시에 조절됨.
- 배액/원수 혼합밸브의 기능:
 - 배액의 재사용량과 원수의 유입을 통해 농축양액의 투입 수준을 간접적으로 조절하는 중요한 요소.
 - 원수는 Na와 Cl을 공급하는 역할을 수행. 그러나 Na와 Cl의 유입량 제어는 불가능하여 시스템 경계 외부로의 flushing 수준을 조절하는 중요한 변수가 됨.
- 관행에 따른 의사결정:
 - 현재 사용되는 수경재배 시스템에서는 자동화된 의사결정 체계가 부재.
 - 대신 사용자의 경험과 지식을 기반으로 조정하며, 이는 플랫폼의 알고리즘과의 연계를 통해 개선될 수 있음.
- 농축양액의 자동화 및 조정:
 - A/B액 체계: 현재 농축양액의 밸브는 A와 B 양액 체계로 구성되어 있음.
 - 연계성 고려: 이온센서 시스템과의 연계성을 고려하여 농축양액의 자동화 영역을 검토.
 - 사용자 입력 반영: 사용자가 양분 분석값을 입력 시, 개별 비료염(예, KNO_3 , KH_2PO_4 , $Ca(NO_3)_2$, K_2SO_4 , $MgSO_4$...)들의 혼합비를 자동으로 조정하는 기능 필요.
- 원수의 자동화 및 관리: Na와 Cl 농도 파악: 원수 내의 Na와 Cl 농도에 따른 시스템 관리가 필요.
- 시스템 개도 조절:
 - 0일 경우: 비순환식 (개방형)
 - 1일 경우: 완전 폐쇄형 순환식
 - 0초과 1미만일 경우: 반폐쇄형 순환식
- 자동화 영역: Na와 Cl의 농도에 따라 시스템의 개도를 조절하고 배액 혼합량을 결정하는 기능의 자동화 필요.

□ 양액 재순환 시스템 내 Na, Cl 농도 관리와 배액 혼합밸브 제어 기능의 결합

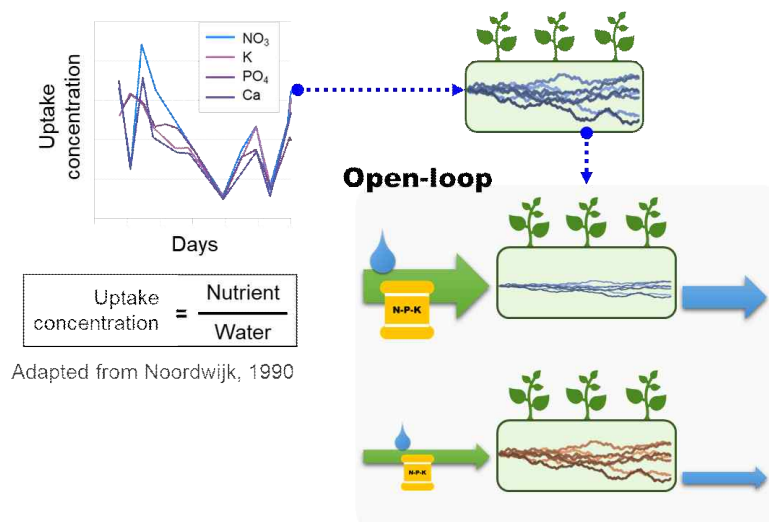
○ 순환식 수경재배 시스템 내 Na와 Cl 농도 관리의 이론체계 구축

- 수경재배 시스템, 특히 폐쇄형 순환 시스템에서는 Na와 Cl과 같은 흡수속도가 낮은 이온들이 축적되는 문제가 발생하며, 이러한 이온들의 농도가 높아지면 식물의 성장과 생산성에 부정적인 영향을 줄 수 있음. 복합양분관리 플랫폼을 통해 이러한 문제를 통합적으로 관리하는 방법이 필요함.
- 기존 연구에서는 식물의 수분 소모량(증산량)과 같은 변수를 기반으로 뿌리 환경 내의 Na와 Cl의 농도를 예측하는 모델을 제시한 바 있음. 해당 연구에서는 다양한 농도의 Na와 Cl(0.7, 2.5, 5.0 mM)를 포함한 원수를 수경재배 시스템의 양액 공급용 원수로 사용함. 그리고 식물의 증산량을 독립변수로 사용하여 양액 내 Na와 Cl의 농도 변화를 분석하였을 때, 원수의 Na와 Cl 농도에 따라 초기에 농도가 증가한 후 일정 수준에서 포화되는 현상이 관찰됨.



〈그림〉 수경재배 시스템의 원수 내 Na, Cl 농도에 따른 Cl의 배액 내 농도 변화 연구(Neocleous와 Savvas, 2016)

- Na와 Cl은 주로 원수를 통해 공급되며, 이는 비료를 통한 공급이 아님. 순환식 수경재배 시스템의 경계 영역으로의 Na와 Cl 유입 속도는 식물의 증산에 따른 수분 소모를 보충하는 원수의 유입 속도 및 원수 내의 Na와 Cl 농도에 의해 결정될 수 있음. 시스템 내 Na와 Cl의 초기 농도 증가 후 포화되는 수준은 원수 내의 Na와 Cl 농도, 원수의 유입 속도, 그리고 식물의 Na와 Cl 흡수 kinetics에 의해 결정될 수 있음.
- 이론적인 이해를 바탕으로, 복합 양분 플랫폼 내에서 Na와 Cl 및 배액/원수 혼합 밸브의 혼합 수준을 조정하는 알고리즘 개발의 필요성이 있음. 수경재배 시스템의 경계 내 양분의 거동은 개회로(비순환식), 폐회로(완전 폐쇄형 순환식), 반폐회로(반폐쇄형 순환식) 수경재배 통합적인 접근으로 해석할 수 있음.



〈그림〉 Noordwijk(1990)의 비순환식 양분 변동 관리에 대한 이론적 해석 개념도

- 주요 변수로는 시스템에 투입되는 양분, 식물에 의한 흡수, 그리고 시스템에서 배출되는 양분 등이 있음. Noordwijk (1990)에 따르면, 개회로 시스템의 양분 관리는 이론적으로 용탈률의 공식을 기반으로 유도하여 관련 변수와의 관계를 설명할 수 있음.

$$l_n = \frac{C_{tl}(1 - C_u)}{C_{tl} - C_u}$$

- 위 수식에서, 양분의 leaching fraction은 l_n 으로 표현됨. C_{tl} 은 양분의 tolerance factor로, 배지 내 해당 양분의 허용 가능한 농도 변화 범위의 상한값과 하한값 간의 비율을 나타냄. 이 tolerance factor를 기준으로 leaching fraction의 요구량이 산출됨. C_u 는 양분의 공급 농도와 흡수 농도의 비율을 나타냄. 공급 농도는 일정하나 흡수 농도는 환경조건에 따라 변동하므로 배지 내 양분 농도의 변동이 발생함. 개회로 시스템의 양분제어는 위의 이론을 바탕으로 함. 즉, 비순환식 수경재배 시스템의 실제 적정 leaching fraction은 양액의 부피만을 고려하는 배액률을 지표로 삼아서 설계됨. 무배액을 포함한 다양한 배액률을 적용하며 생육 반응과 재배 목표 수준을 고려한 실험을 통해 경험적으로 값이 결정되어 사용됨. 비순환식의 경우 시스템의 경계 영역은 배액 탱크까지 포함할 수 있으나, 실제 배액탱크의 배액이 다시 시스템으로 유입되는 경우는 없으므로 사실상 시스템의 경계 영역은 배지 자체로 생각할 수 있음.
- 비순환식 수경재배는 근권부의 양분 농도 변화에 대한 불확실성이 존재하며, 관수량을 통해 배액률, 즉 용탈률을 조절하며 따라서 근권부 영역 시스템의 열린 정도를 조정함. 이는 양분 농도 변화에 대한 피드백 없이 제어하는 방식으로, 배액의 순환구조가 없어 개회로로 즉, 비순환식 수경재배로 정의됨. 비순환식 수경재배 시스템은 순환식 수경재배 시스템에 비해서 양분관리에 대한 상대적으로 직관적인 설명이 가능하며, 재배자의 시스템 적용 용이성의 향상에 기여함. 그러나 반폐회로, 폐회로 순환식 수경재배 시스템의 경계 영역을 고려했을 때 위와 같은 직관적인 해석이 가능해질 수 있는 여지를 가지고 있음. 따라서 본 연구를 통해 Na와 Cl의 시스템 내 축적을 이와 관계 지어서 해석하고자 함.
- 수경재배 시스템에서 다른 모든 요인을 제외하고 양분의 투입, 배출 그리고 기본적인 양분 흡수 모델만으로 단순화할 경우 시스템의 양분 농도 변화 모델은 아래와 같이 단순화 할 수 있음.

$$V_{sub} \frac{dC_{sub}}{dt} = Q_{in}C_{in} - \frac{V_{max}C_{sub}}{K_m + C_{sub}} - Q_{out}C_{out}$$

- 위 수식에서, Q_{in} 은 시스템으로 유입되는 양액의 유량, V_{sub} 는 시스템 내 수분의 부피, V_{max} , K_m 은 양분 흡수 kinetics 파라미터, C_{in} 은 양액 속 특정 양분의 농도, C_{sub} 는 시스템 내 양분의 농도, Q_{out} 은 외부로 방출되는 양액의 유량에 해당함.
- 위 미분방정식 모델의 정상상태 해는 아래와 같이 정리할 수 있음.

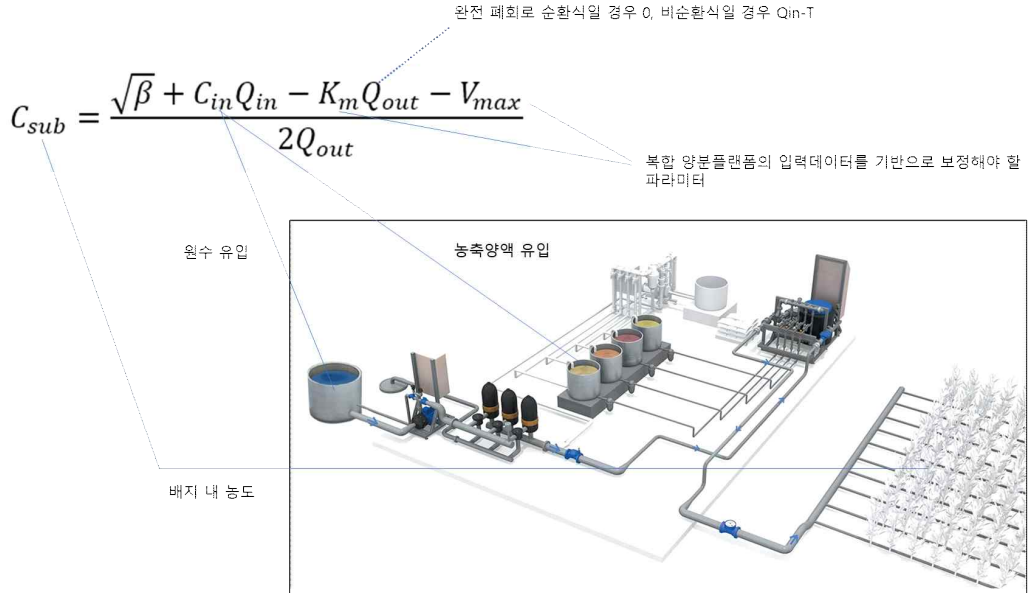
$$\beta = (K_m Q_{out} - C_{in} Q_{in} + V_{max})^2 + 4K_m C_{in} Q_{in} Q_{out}$$

$$C_{sub} = \frac{\sqrt{\beta} - (K_m Q_{out} - C_{in} Q_{in} + V_{max})}{2Q_{out}}$$

- 위 식에서 Q_{in} 과 Q_{out} 을 제외한 다른 요인들은 매개변수에 해당됨. Q_{out} 을 매개변수 가정할 경우, Q_{in} 이 무한대로 증가할 때 시스템 특정 양분의 농도에 해당하는 C_{sub} 는 C_{in} 의 값에 수렴하는 hyperbolic curve 형태를 나타내게 됨. 그러나 실제 수경재배 시스템에서 양액의 배출 Q_{out} 은 양액 공급과 증산의 증속변수로 볼 수 있음. 양액 배출은 관수량 Q_{in} 과 증산량 T의 차이, 즉 $Q_{in}-T$ 로 표현됨. 일정한 관수량에서 증산량의 변화로 인한 근권부 내 양분 농도 변화의 수렴 지점 변동은 시스템이 불안정해질 수 있음을 시사함. 식물의 증산량은 잠재 증산량의 제한을 가지며, 일정 수준 이상에서는 증가 속도가 포화될 가능성이 있음. 재배자는 다양한 방법으로 증산량을 추정하고, 실제

증산량에 비례하여 관수량을 결정함. 즉, 동적으로 변화하는 증산 속도에도 누적 양분 투입량에 대한 양분 균형 변화가 일정한 경향을 보이는 것은 위의 고찰한 부분들의 거시적인 영향을 해석될 수 있음.

○ 순환식 수경재배 시스템 내 Na와 Cl 제어와 밸브의 개도 제어 연결

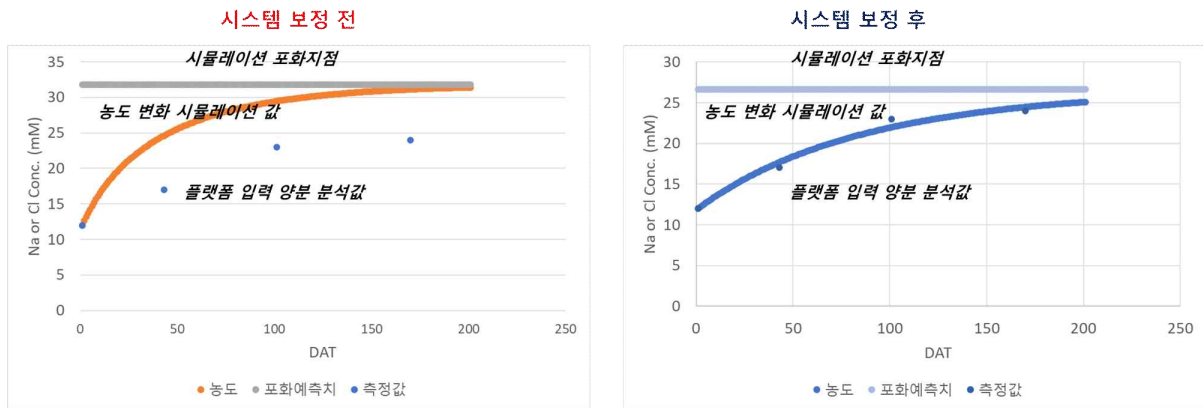


〈그림〉 양액혼합기와 수경재배 시스템 경계의 입출력과 복합양분플랫폼 탑재 계획 알고리즘의 연계 개요

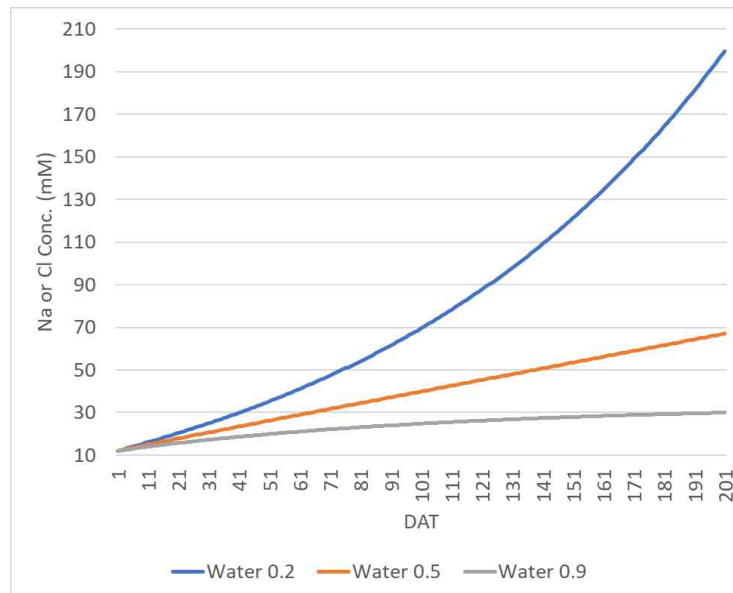
- C_{in} 과 Q_{in} 은 농축양액과 원수를 통한 양분 유입의 크게 두 가지 요인으로 구분될 수 있음. 농축양액은 양분 유입의 주요 수단으로 제어할 수 있는 자유도가 높아, 높은 양분 흡수속도를 유지함. 원수를 통한 유입은 대부분 재배자의 의도와 상관없이 이루어지며, 특히 Na와 Cl의 유입속도는 증산과 직접적으로 관련되어 있음. 증산에 따라 자동으로 유입되며 농축양액을 통해 유입되는 필수양분과는 달리 흡수 속도가 낮은 Na와 Cl은 순환식 수경재배 시스템 내에서 제어가 어렵기 때문에 관리가 중요함.
- 상기 정리한 이론적인 토대를 바탕으로, 순환식 수경재배 시스템에서 Na와 Cl의 관리 및 배액/원수 혼합 밸브의 조절 알고리즘을 통합하여 개발할 필요성이 있음. 기존에 Na와 Cl의 순환식 수경재배 시스템 내 축적 과정을 보고한 연구와 앞선 섹션에서 정리한 이론적인 토대를 바탕으로 판단했을 때, 순환식(완전 폐쇄형/반폐쇄형 포함) 수경재배 시스템의 Na와 Cl은 Q_{in} 에서 원수 유입부를 통해 유입되는 원수 내 Na와 Cl의 농도 C_{in} 에 따라서 시스템 내에서 어느정도 수준에서 Na와 Cl의 농도 증가 경향과 포화 지점을 예측할 수 있음.
- 또한, Na와 Cl의 시스템 내 포화수준을 결정하는 요인은 식물의 양분 흡수 kinetics 매개변수와 시스템 경계영역 외부로의 배출에 해당하는 Q_{out} 으로 구성되며, kinetics 매개변수가 복합양분 플랫폼을 통해 입력되는 양분 분석 데이터를 기반으로 보정될 경우 상대적으로 정확한 Na와 Cl의 포화 지점이 예측될 수 있음.
- 이러한 예측치가 재배 중인 작물의 생리적인 허용 한계치(복합양분플랫폼의 DB 기반)를 넘어설 것으로 예측되는 경우, 이를 기반으로 Q_{out} 변수를 조작하여 누적 수준을 조절할 수 있으며, 이것이 순환식 수경재배 시스템 내의 Na와 Cl 관리와 배액/원수 혼합밸브의 혼합비율 조절의 근거가 됨.
- 상기 정리한 수경재배 시스템의 양분 농도 변화의 정상상태 해에서 $K_m Q_{out}$ 항은 완전 폐쇄형 순환식일 경우 0이므로 혼합밸브 조절을 통한 관리를 할 수 없으나, 앞서 정리한 바와 같이 혼합밸브의 수준을 조정하게 되면 그에 따라 농축양액을 통한 C_{in} 의 유입량이 채울 수 있는 양분 수준

이 높아지게 되며, 그만큼 배액의 기여도는 낮아지고 결국 배액 탱크 내 배액 누적량의 증가로 시스템 외부로의 배액 방류로 이어지게 됨.

- 즉, 혼합밸브의 개도의 조절에 따른 변수를 Q_{out} 에 반영할 필요가 있으며, 비순환식의 경우 Q_{in} -증산으로 정리되는 반면, 혼합밸브 개도의 조절에 따른 변수를 추가할 경우 Q_{in} -증산-(1-원수혼합비율) \times alpha가 될 수 있음.
- 기본적으로 상기한 바와 같은 일련의 계산 과정을 복합양분관리 플랫폼에서 수행하려면, 원수의 Na Cl 농도 데이터의 입력, 재배자가 복합양분관리 플랫폼에 입력한 재사용 양액의 양분 분석 데이터, 원수 공급량 데이터, 혼합밸브의 개도 비율 데이터가 필요함.
- 또한, 복합양분관리플랫폼은 Na와 Cl의 양분 흡수 파라미터에 대한 보정 과정에 더해서 개도 조절에 따른 누적 수준 예측을 위해서 '(1-원수혼합비율) \times alpha'에서 혼합비율 조절에 따른 누적 수준 변화에 대한 보정계수인 alpha도 동시에 보정할 필요가 있음.



〈그림〉 복합양분플랫폼 탑재용 Na, Cl 추적 미분방정식 모델의 파라미터 보정 전후 시뮬레이션 (보정 전: $V_{max} = 2.7$, $K_m = 0.9$, $\alpha = 0.1$ 보정 후: $V_{max} = 1.96$, $K_m = 0.037$, $\alpha = 0.23$)



〈그림〉 혼합밸브의 원수혼합비율 20~90% 조정에 따른 Na 또는 Cl의 추적 예측치 변화

□ 복합양분관리플랫폼의 양액처방기능과 개별 농축양액 제어 기능의 결합

○ 양액 처방기능과 개별 농축양액 제어 기능 결합의 필요성

- 복합양분관리플랫폼은 제한된 양의 양이온 및 음이온 결합 비료염 내에서 작물 흡수 패턴을 고려하여 최적의 교정용 비료 조성표를 생성함. 사용자가 양분 분석 데이터를 입력하면, 이 데이터를 기반으로 해당 주기에 맞는 차기 농축양액의 비료 조성표를 출력함.
- 이 과정을 자동화하기 위해서는 농축양액의 투입 벤추리관 셋트를 각각의 비료염에 따라 조절하고, 해당 벤추리 관에 연결된 솔레노이드 밸브의 개폐 시간도 비료염별로 다르게 조절해야 함. 이러한 자동 조절 과정은 사용자의 재사용 양액 양분 분석 결과에 따라 차기 비료 조성을 자동으로 결정할 수 있게 해주며, 순환식 수경재배 시스템의 사용자 이용 용이성을 개선할 수 있음. 이런 과정을 복합양분관리플랫폼에서 지원하기 위한 제어 알고리즘 개발이 필요함.

○ 농축양액 개별제어 기능 개발

- KIST 연구팀은 해당 내용을 정리하여 서울대 및 신한 에이텍의 솔레노이드 밸브 개별제어 알고리즘의 핵심 계산 과정으로 전달하였으며, 이온센서-양액기기-농축양액투입 장치와 연계 시스템을 공동 개발하였으며, 전달한 계산 과정의 핵심은 아래와 같음.
 - 개발된 알고리즘은 개별 농축양액의 제어를 위해 각 농축 양액 탱크 내의 비료염 농도를 정할 필요가 있음.
 - 본 연구에서의 검토 결과, 모든 농축양액 탱크의 솔레노이드 밸브가 동시에 개폐되면 일반 양액의 표준 조성이 투입되도록 기준을 설정함. 예시로, 동시 개폐 시 Hoagland의 조성을 기준으로 설정 가능함.
 - 사용자는 각 비료염 별로 Hoagland의 조성에 따라 독립적으로 농축양액을 조제하여 탱크에 충전해야 함.
 - 복합양분플랫폼은 양액기와 통신하여 개별 농축양액의 농도를 알고 있음.
 - 출력된 개별비료 조성표를 기반으로 복합양분플랫폼이 양액혼합시스템에게 부피비로 변환하여 전송함.
 - 양액 혼합 시스템은 받은 정보로 각 농축 양액의 농도에 맞게 제시된 비율의 유량으로 변환하며, 이 변환값은 비선형 계획법을 통해 계산함.
 - 양액기는 혼합 탱크의 EC가 목표보다 낮아지면 농축양액의 솔레노이드 밸브를 개방함.
 - 주어진 시간 동안, 각 솔레노이드 밸브는 펄스제어를 이용하여 지정된 유량에 맞춰 제어를 수행함.

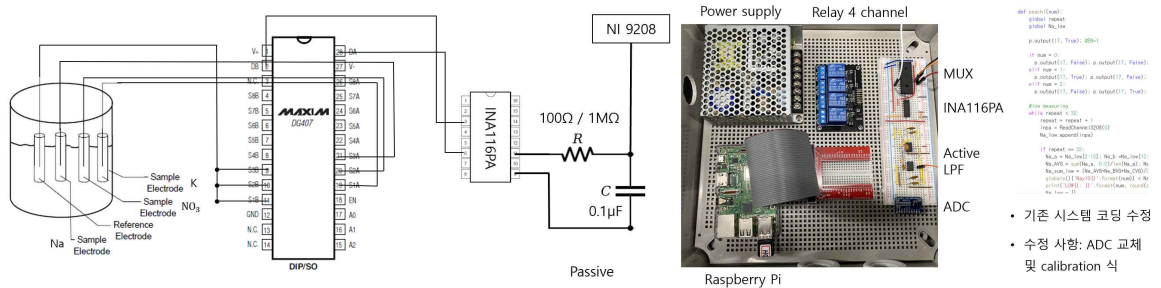
〈표〉 K, NO₃ 이온선택성 막 조성표

측정 이온	K	NO ₃
Ionophore (감지물질)	Valinomycin 2.0%, 4mg	TDDA (Tetradodecylammonium nitrate) 4.0%, 8mg
Plasticizer (가소제)	Dos (Bis(2-ethylhexyl) sebacate) 64.7%, 129.4mg	NPOE (2-nitrophenyl octylether) 67.75%, 135.5mg
Matrix/Polymer (재질)	PVC (Polyvinyl chloride) 32.8%, 65.6mg	PVC 28.25%, 56.5mg
Additive (보조물질)	KTpClPhB (potassium tetrakis (p-chlorophenyl)borate) 0.5%, 1mg	-
Inner filling solution (내부충진용액)	0.01M KCl	0.01M NaNO ₃ +0.01M NaCl
Conditioning (전극막 관리 용액)	0.01M KCl	0.01M NaNO ₃
용매	dissolved in tetrahydrofuran(THF) 2mL and stirred	
참고문헌	Jung et al., 2015	

- 개발 이온선택성전극은 빠른 응답 성능을 통해 수초 이내로 실시간 측정이 가능하며 대체로 100 ppm 이상의 고농도를 갖는 양액 내 고농도의 이온 성분에 대해 측정이 가능한 넓은 농도 측정 대역을 갖추었음.
- NO₃, K, Na 전극 모듈이 소형이고 자체 제작을 통해 기존 수입 제품 대비 10분의 1 수준으로 저렴하게 제작할 수 있어 대규모 식물공장뿐 아니라 소규모의 수경재배 온실에서도 부담없이 사용할 수 있음.

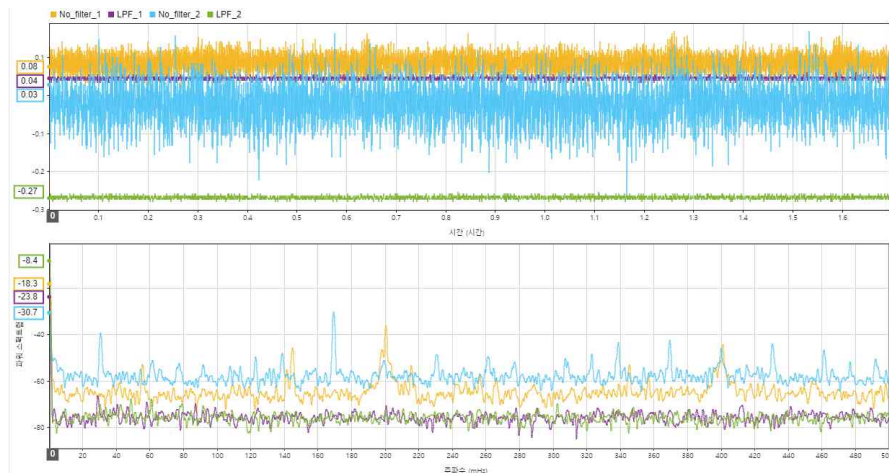
○ 이온선택성 전극 정밀 측정 계측 증폭 회로 제작

- 기준 전극과 연결된 ISE가 생성할 수 있는 기전력은 매우 약한 출력이기 때문에 ISE가 나타내는 특정 이온 성분의 농도를 파악하기 위해서는 출력 신호를 정확하게 보정하고 증폭할 수 있는 정밀 신호 처리 기술이 요구됨.
- ISE의 신호를 정확하게 측정하기 위해서는 측정부 회로가 ISE 내부 저항의 3배 정도에 달하는 큰 부하저항이 필요함.
- 외부의 high impedance는 매우 낮은 전류의 흐름을 생성하고 전극의 전압 밸런스를 유지하도록 하고 이는 polarization effect를 제거하여 정밀한 전압 신호를 계측할 수 있게 함.
- 이를 바탕으로 ISE 출력 전압을 정밀하게 측정하기 위해 1,015 Ω의 인풋 임피던스를 가진 계측 증폭기 회로 (INA116)를 ISE 출력 기전력 정밀 측정에 적용하였음.
- 계측증폭기 회로는 특정한 목적을 가진 증폭기로서, 정밀하게 신호를 측정 및 증폭에 사용되며 기준전극과 ISE전극 두 입력단에서 측정되는 신호의 공통성분인 간섭 신호를 제거하고 차동 신호는 증폭하는 역할을 수행함.



〈그림〉 (좌) ISE전용 필터 회로 구성, (우) 실험 장치 구성

- 이에 따라 위 그림과 같이 계측증폭기 회로를 제작하여 출력 신호 데이터를 취득함.
- 출력 신호는 서울대에서 개발한 PVC 고분자막 형태의 나트륨 이온전극 2개와 Orion 사의 기준 전극(900200)을 어레이 형태로 계측증폭 회로에 연결하여 테스트를 진행하였으며 출력 전압의 신호는 아래 그림과 같이 회로 적용 전과 후로 비교할 수 있으며 아래 그림에서 노란색과 하늘색 신호는 2개의 나트륨 이온선택성 전극의 필터 적용 전 출력을 나타내며 보라색과 연두색은 필터 적용 후의 출력을 나타냄.
- 출력 전압과 출력 주파수 모두에서 적용성을 확인할 수 있었고 이는 제작한 필터가 큰 입력 임피던스와 높은 동상제거비(CMRR) 성능을 보임을 확인함

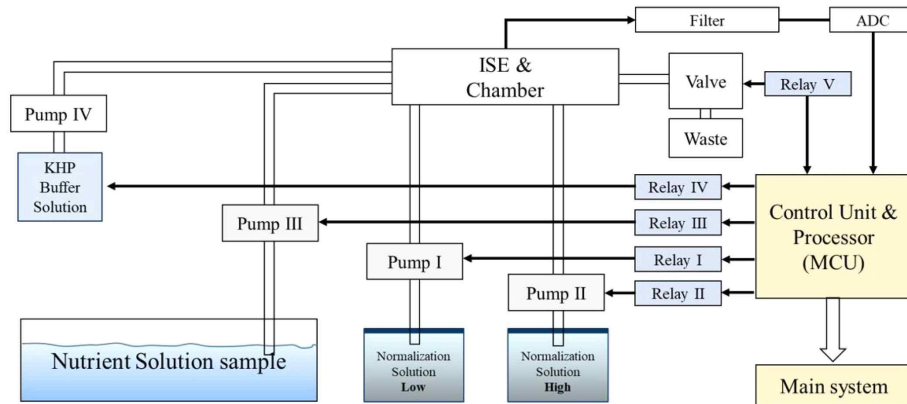


〈그림〉 계측증폭 필터 적용 전/후의 ISE 출력 전압과 주파수 변화

(2) 임베디드 시스템형 이온 모니터링 플랫폼 설계 및 적용성 평가

○ 임베디드 기반 이온 모니터링 플랫폼 설계

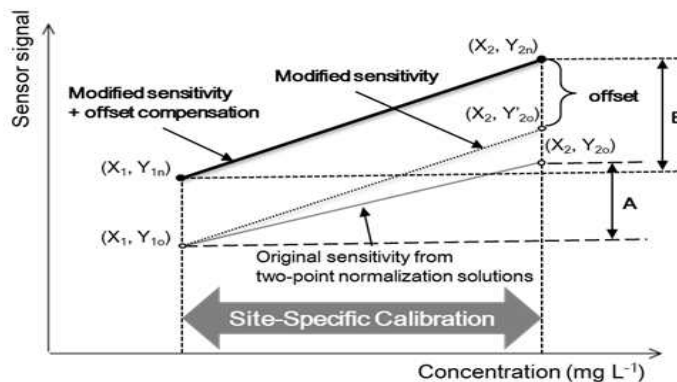
- 기존 수작업 또는 고가의 외부 시료 분석 의뢰를 통해 관리되던 순환식 수경재배 농가의 문제를 개선하고 현장에서 실시간으로 양액 성분 분석 가능.
- 이온선택성전극 (Ion-selective electrode; ISE) 신호 입력부, ISE 신호 처리 회로, 전기전도도 신호 처리 회로 등의 신호입력 파트와 ADC, MCU 등의 신호 전달 파트, 신호 출력 파트, 그리고 배터리로 구성된 임베디드 양액 분석 장치를 설계하였으며 센서를 하나로 묶어 측정할 수 있는 센서 어레이 바디를 사용하였음.
- Kim (2013) 등이 개발한 2-point normalization 방법의 캘리브레이션 방법을 적용하였으며 분석 장치 본체에는 측정 전극으로부터 전달된 전기신호에 대하여 버퍼링을 수행하고 필터를 적용하여 노이즈를 제거하는 증폭부가 구비되는 것을 특징으로 함.
- 증폭부는 연산 증폭기를 이용하여 각 측정 전극에서 생성된 전기신호별로 버퍼링을 수행하여 nA 수준의 미소전류를 mA 수준으로 증폭하는 것을 특징으로 함.



〈그림〉 임베디드 양액 분석 장치 구조도

○ 2점 정규화 기반 센서 교정 적용

- 전극 어레이를 구성하여 동시에 다양한 이온을 측정할 시 센서 간의 차이로 인한 영향으로 측정값 간에 편차가 존재할 수 있으며 이에 대해서는 Kim 등 (2007)에 의해 2점 정규화 방법을 통해 다전극 구성에서 전극 간의 반응을 표준화시키고 드리프트의 영향을 보상할 수 있음을 보고하여 본 연구에서도 2점 정규화 방법에 기반한 센서 드리프트 보상을 채택하였음.

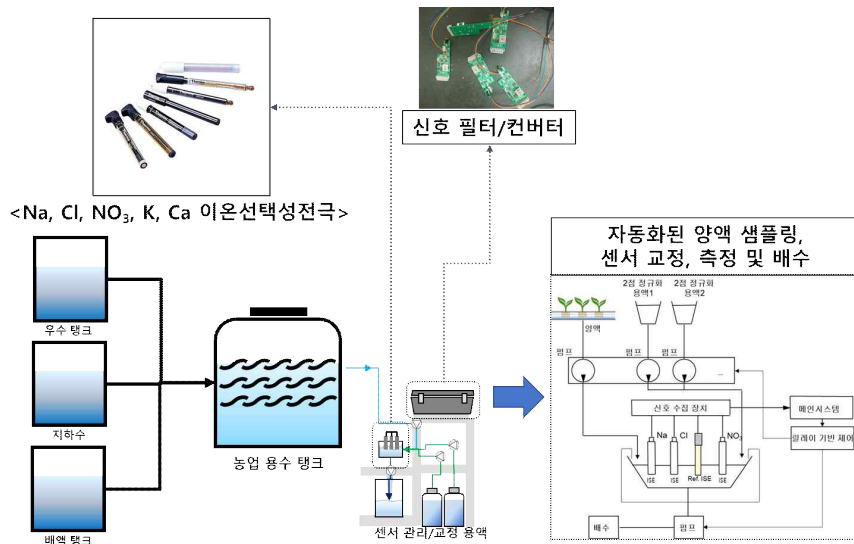


$$ratio = \frac{B}{A} = \frac{Y_{2n} - Y_{1n}}{Y_{2o} - Y_{1o}} \quad offset = Y_{2n} - Y_{2o}$$

$$Normalization = ratio \times EMF + offset$$

〈그림〉 2점 정규화 방법 개요도

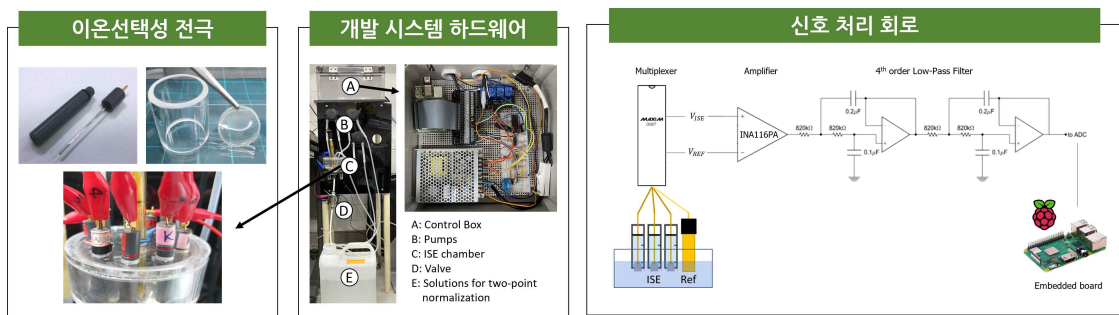
- 구성하는 센서 어레이에 대해 동일한 측정 챔버에서 측정이 이루어지기 때문에 측정하고자 하는 용액이 주입되기 전 담겨있던 용액들에 의한 간섭, 오염 문제가 있을 수 있음. 따라서 시스템 동작 순서에서 정규화 용액 및 양액 샘플을 챔버에 주입할 때 1차로 주입한 용액으로는 이전에 담겨있던 용액을 씻어 간섭을 최소화하는 세척 용도로 사용하고 이후 2차로 용액을 재주입하여 측정을 수행하도록 설계하였음.
- 제작하고자 하는 이온 모니터링 시스템은 설정된 시간에 이온 센서에 대한 교정 및 관리를 자동으로 수행하고 이후 양액을 샘플링하여 측정 및 측정값을 저장하는 동작을 수행해야함.



〈그림〉 샘플링 및 이온 센서 교정, 측정 및 교정 과정

○ 이온 모니터링 계측 증폭 필터의 임베디드 시스템 적용성 테스트

- Na 이온 선택성 전극을 이용하여 계측 증폭 필터의 임베디드 시스템 적용성을 확인하는 실험을 진행하였음.
- ISE 3개를 아래 그림의 시스템에 연결하여 동시에 측정하는 실험을 진행함, 이때 2점 정규화 방식을 사용하여 ISE의 표류 현상을 보정하여 측정 정밀도를 높이고자 함.
- 2점 정규화 용액으로는 23ppm, 212ppm을 가진 저농도 나트륨 용액과 고농도 나트륨 용액을 사용하였으며 38ppm, 96ppm, 147ppm, 194ppm의 나트륨 농도를 가진 각기 다른 Hoagland 용액에 3회 반복 실험하여 출력 전압 신호를 취득함.

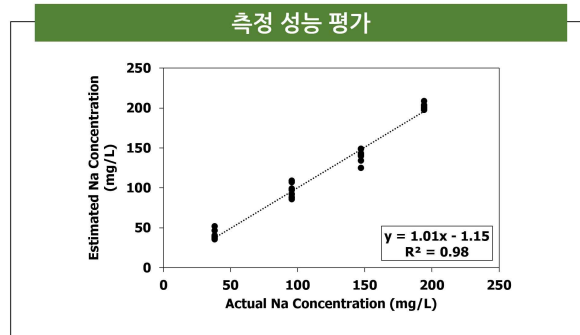


〈그림〉 (좌) 이온선택성 전극 기반 및 계측 증폭 필터 시스템, (우) 신호 처리 회로도

- 각 ISE의 출력 신호를 측정할 때 하나의 기준 전극과 여러 전극을 연결하면 생길 수 있는 신호 간섭 현상을 제거하기 위하여 멀티플렉서를 사용하여 현재 측정하는 전극만 기준 전극과 연결하는

알고리즘을 고안하였고, 최종 신호는 4차 로우패스 필터를 지나 ADC 컨버터를 통해 시스템에 저장함.

- 이온선택성 전극 측정을 위해 제작한 시스템 하드웨어는 위 그림과 같음.
- 라즈베리파이에 최종적으로 입력된 신호는 개발한 알고리즘을 통해 현재 농도로 변환되었고 서울대학교 농생명과학공동기기원(NICEM)에서 분석한 표준 분석 결과와 비교하여 측정 성능을 평가함.

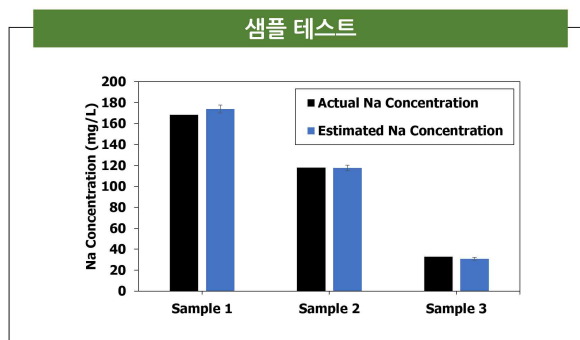


〈그림〉 계측 증폭 회로 적용 후 나트륨 이온 측정 성능 평가

- 이상적으로 어느 특정 이온에만 선택적으로 반응하는 막에 대하여 전류가 흐르지 않는 경우의 막 전위는 막을 경계로 접촉하고 있는 두 용액 사이에서 다음 관계식이 성립함.

$$EMF = const. + S \cdot \log a_x$$

- 이때 영상 25도에서 $S = 59.16/z$ [mV]이며 10배의 다른 농도 차를 가진 용액에서 발생하는 기울기를 나타내며 이는 이온선택성 전극의 정밀도를 나타내는 지표로 사용됨.
- 테스트 시스템의 나트륨 이온 측정 성능은 기울기 $Y=1.01x-1.15$, 결정계수 $R^2 = 0.98$ 의 성능을 나타냈으며 이는 이론적인 감도인 영상 25도에서 $S = 59.16/z$ [mV]에 상응하는 결과를 나타냄.
- 본 결과를 바탕으로 168ppm, 118ppm, 33ppm의 나트륨 농도를 가진 각기 다른 Hoagland 용액을 한 번에 측정하는 테스트를 수행함.



〈그림〉 양액 내 나트륨 농도 측정 결과

- 나트륨 이온 측정 성능을 바탕으로 양액 기반의 샘플 테스트 결과 평균 제곱근 오차(RMSE) 4 ppm의 정확도를 결과로 확인할 수 있었으며 본 계측 증폭 회로의 양액 적용성을 확인함.

○ 임베디드 시스템 이용 양액 내 K, NO₃, Ca 이온 실시간 모니터링

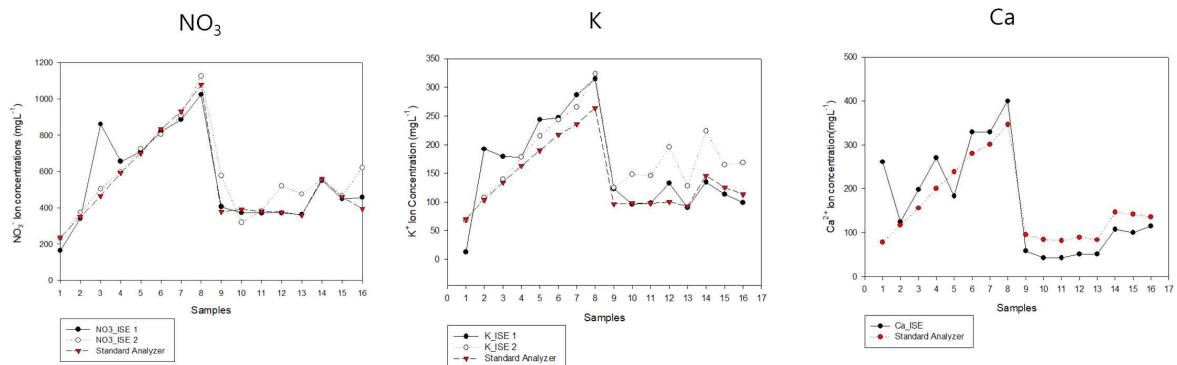
- 경기도 수원시 서울대학교 부속 농장의 단동 비닐 온실에 임베디드 시스템형 이온 모니터링 시스템을 위한 테스트 베드를 구축하였음. 암면 배지에 정식된 12주의 방울토마토를 점적 관수 방식으로 재배하면서 양액 내 K, NO₃, Ca 이온의 변화 양상을 모니터링하는 실험을 진행.

- 선행 연구 결과 제작한 K, NO₃, Ca 이온 센서를 적용하여 이온 센싱 테스트를 수행하였고 이때 칼슘 (Ca) 이온전극의 경우 Orion 사의 상용 전극을 사용하였음. 양액 내 주요 양분 성분인 NO₃, K 에 대해 선택적으로 반응하는 ISE는 아래 표와 같이 Jung 등 (2015)에서 보고한 바 있으며 K, NO₃ 이온막 조성표를 기반으로 제작하였음.



〈그림〉 (좌) 임베디드 기반 이온모니터링 시스템 시작기, (우) 이온센서 전극

- ISE의 양액 적용성 시험을 위해 양액 환경에서의 기본 센서 성능 평가를 실험하였으며, 현장에서 농도 변화 발생 시 이를 정확히 감지할 수 있는지, 안정된 신호를 측정할 수 있는지 확인하고자 함. 재배 기간 중 양액은 1일 1회 간격으로 샘플링을 수행하였으며 이를 서울대학교 NICEM에 수질 분석 의뢰하여 표준 분석 결과 값과 2개씩 연결된 각 이온 전극의 모니터링 결과 값을 비교하였음.
- K, NO₃, Ca 이온 모니터링 결과는 아래 그림과 같이 나타남.



〈그림〉 NO₃, K, Ca 이온 전극과 ICP 분석 농도 결과 비교

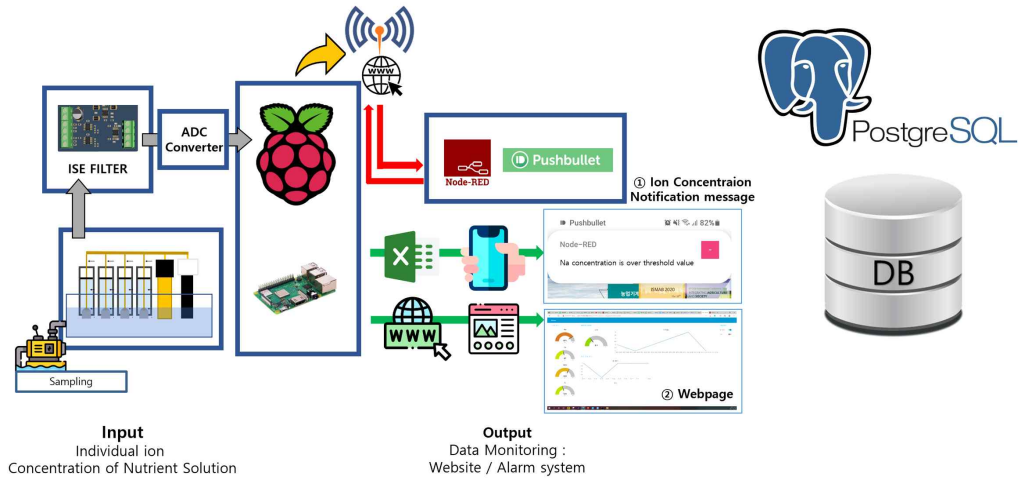
- 본 실험을 통해 현장에서의 이온 모니터링을 위한 거치식 임베디드 시스템의 측정 정확도를 확인할 수 있었으며 측정 정확도를 저하시키는 요소들에 대하여 확인할 수 있었음. 이온선택성 막 아래의 흠에 기포가 차는 현상이 측정 정확도를 낮추는 것으로 판명되어, 실증 시스템에서는 측정 정확도를 높이기 위해 물리적인 방식의 탈포조를 설치하여 정확도를 개선하는 방식을 고려하였음.

○ IoT 및 클라우드 기반 실시간 양액 온라인 모니터링 플랫폼

- 국내 순환식 수경재배 농가에서는 정기적으로 실험실에 양액 성분을 의뢰하여 필요한 성분을 보충하는 방식으로 양액의 농도를 관리하며, 실험실에서 결과를 얻기까지 길게는 2주의 시간이 소요되므로 양액의 현재 농도에 대한 적시 보상을 해주기가 어려움.
- 양액 성분의 실시간 분석을 위한 일일 양액 데이터 온라인 공유를 위한 IoT 및 클라우드 기반

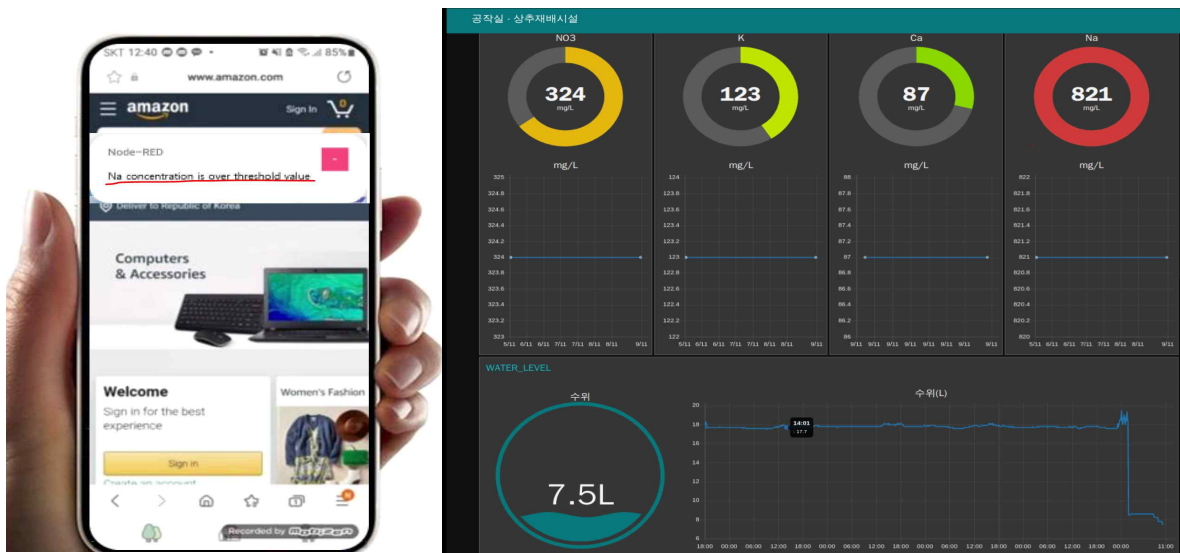
실시간 양액 온라인 모니터링 플랫폼을 고안하였음.

- 고안한 시스템의 구성도는 다음 그림과 같음.



〈그림〉 IoT 및 클라우드 기반 실시간 양액 온라인 모니터링 플랫폼 시스템 구성도

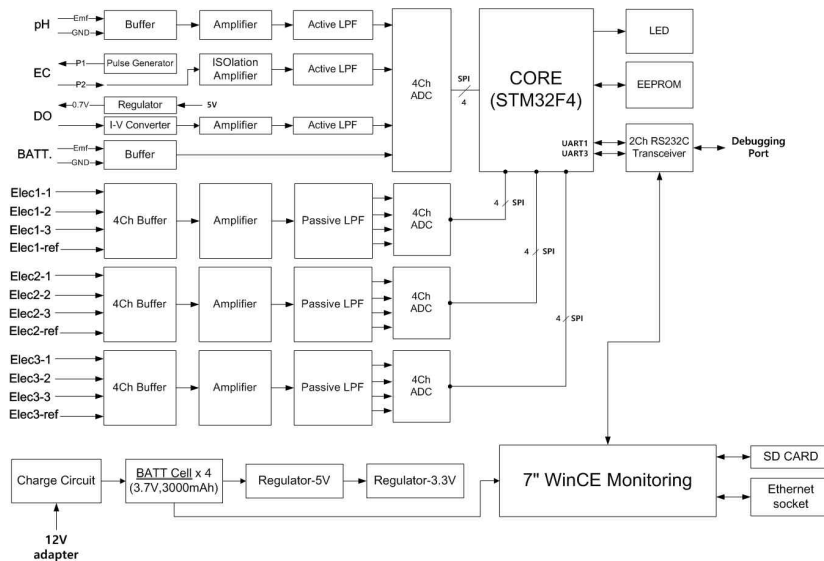
- 서울대학교에서 개발한 이온선택성 전극 기반 실시간 양액 내 성분 값이 임베디드 시스템에 저장되면 다양한 어플리케이션을 통해 온라인으로 양액 성분 데이터를 공유할 수 있으며, 스마트팜 R&D 빅데이터 포털과 연계되도록 설계하였음.
- 개발한 이온 성분 측정 기기를 통해 측정된 양액 성분 결과를 인터넷이 연결된 스마트기기(노트북, 스마트폰 등)로 알려줄 수 있는 PushBullet을 사용한 적용 방안을 고안하였음.
- 실시간 이온 모니터링 시스템의 작동사항과 양액 및 배액 내 이온 농도를 실시간으로 공유할 수 있도록 Node-Red를 통한 인터넷 공유 방식과 PostgreSQL를 사용해 데이터베이스에 데이터를 안전하게 보관하도록 양액 온라인 모니터링 플랫폼을 구성함.



〈그림〉 이온 농도 실시간 알람 시스템 및 모니터링 웹페이지

○ 임베디드 시스템 기반 휴대용 양액 분석기 설계

- 개발한 임베디드 기반 거치식 양액 모니터링 시스템을 현장에서 범용적으로 활용할 수 있도록 하기 위하여 휴대용 양액 분석기 설계.



〈그림〉 임베디드 휴대용 양액 분석기 시스템 블록 선도

- 개발한 임베디드형 휴대용 양액 분석기의 성능 테스트를 위해 NO₃ 전극 측정을 진행. KNO₃(질산 칼륨) 용액을 100 ppm, 500 ppm, 900 ppm 총 3가지 농도로 제조하여 20분 간격으로 5번 반복 측정을 진행하였으며 100 ppm과 900 ppm 2종류의 용액으로 2점 정규화를 진행하였으며, 5개의 N 전극에 대한 평균 농도와 정밀도, 정확도 판별을 진행.
- 아래 표는 각각 100 ppm, 500 ppm, 900 ppm 3 종류의 농도에 대한 측정 결과 값이고 N2 전극은 처음 시도부터 5번 측정한 결과를 보았을 때, 5배가 넘는 농도를 나타내어 전극 자체에 문제가 있는 것으로 판단함. 이외에 나머지 전극, N3, N5 측정 모두 정확한 결과를 나타내었고, N1, N4 전극도 80% 이상의 정확도를 나타냄.

〈표〉 100 ppm 농도 측정 결과

반복수	N1 전극	N2 전극	N3 전극	N4 전극	N5 전극
1	91.47	132.6	102.9	82.17	87.84
2	88.84	241.6	96.85	79.54	85.07
3	81.39	426.6	93.96	77	79.79
4	83.8	910	96.85	79*.54	82.39
5	86.28	1171	99.83	82.17	85.07
평균농도(ppm)	86.36	576.36	98.08	80.08	84.03
정밀도(%)	4.13	69.24	3.10	2.42	3.25
정확도(%)	86.36	576.36	98.08	80.08	84.03

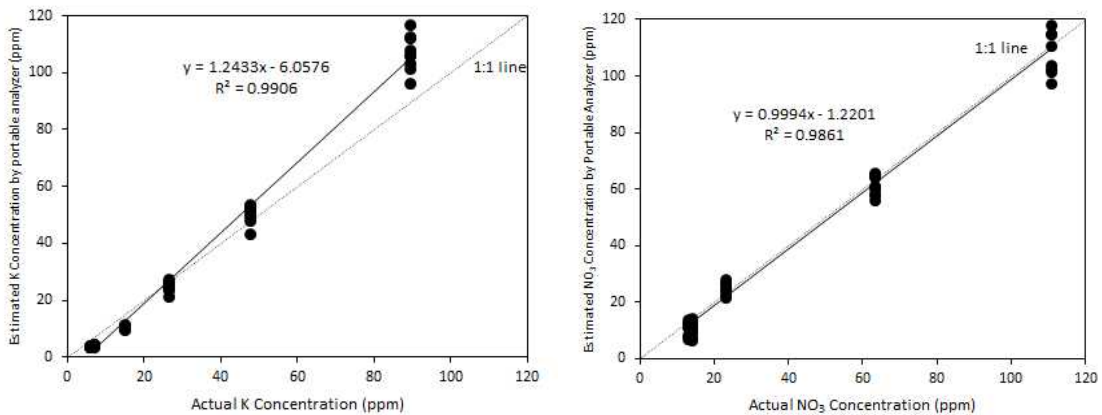
〈표〉 500 ppm 농도 측정 결과

반복수	N1 전극	N2 전극	N3 전극	N4 전극	N5 전극
1	405	729.6	454.7	444.4	449.4
2	496.7	1000	367.8	403.1	421.5
3	360.4	2068	441.2	403.1	421.5
4	360.4	3888	454.7	403.1	408.3
5	371	4553	454.7	416.4	408.3
평균농도(ppm)	398.7	2447.72	434.62	414.02	421.8
정밀도(%)	12.96	62.49	7.78	3.87	15.00
정확도(%)	79.74	489.54	86.92	82.80	84.36

〈표〉 900 ppm 농도 측정 결과

반복수	N1 전극	N2 전극	N3 전극	N4 전극	N5 전극
1	704.9	1329	834	823.4	852.5
2	684.7	1881	834	797.1	852.5
3	645.9	4142	809.1	771.6	799.6
4	645.9	7084	809.1	771.6	774.4
5	645.9	8836	834	747	799.6
평균농도(ppm)	665.46	4654.4	824.04	782.14	810.34
정밀도(%)	3.73	62.57	1.48	3.33	3.28
정확도(%)	73.94	517.16	91.56	86.90	90.04

- 임베디드 휴대용 양액 분석기의 이온측정 성능을 확인하기 위하여 NO₃ ISE와 선행 연구에서 개발한 K ISE를 추가로 장착하여 기준전극을 연결하여 각 이온의 검량선 작성 실험 및 실제 샘플 측정 실험을 진행함.
- 먼저 수돗물을 이용해 두 이온에 농도를 임의로 스파이킹 하여 그 예측 성능을 구명함.
- 센서의 캘리브레이션(검량)은 10, 100 ppm 농도의 용액을 이용, Kim et al. (2013)이 제시한 2점 정규화를 통해 수행하였으며 2점 정규화된 EMF 값을 휴대용 분석기에 내장된 검량선에 대입하여 두 이온의 농도 값을 예측함 .
- 시료의 실제 농도 값은 서울대 NICEM에서 분석하여 얻었으며 예측 값과 실제 값에 대한 선형 관계로 그 예측 성능을 분석하였음.
- 현장 시료에 대한 측정 성능을 구명하기 위하여 실험실에서 스파이킹 하여 만들어진 시료 외에도 세 개 지역(한강, 관악산 계곡물, 정선 상수도 수원지)의 물을 현장에서 채취하여 질산과 칼륨의 농도의 예측 성능을 구명함.
- 기존 수돗물을 이용하여 NO₃와 K를 0.1 ppm ~ 100 ppm 범위 내에서 각각 5개씩 샘플을 임의로 조성하여 제작하여 휴대용 수질 분석기로 측정하였고 각 시료는 모두 3 반복 측정하였으며 측정 사이에는 증류수를 이용하여 센서를 세척하였음.



〈그림〉 수돗물에서의 K, NO₃ 농도 검량선

- 질산의 경우 기울기가 1에 가까운 수치에 오프셋이 작으며, 결정계수도 0.99로 매우 높아 개발한 NO₃ 전극과 임베디드 휴대용 분석기는 실험실에서 이온크로마토 그래프를 이용한 분석 결과와 유사한 측정 성능을 보여주는 것으로 나타났음. K의 경우는 NO₃ 측정에 비해서 기울기가 1.2로 전극이 약 20% 높게 측정되는 것으로 나타났지만 결정계수가 0.99로서 이용 가능성은 높다고 판단됨.



휴대용 분석기 전면



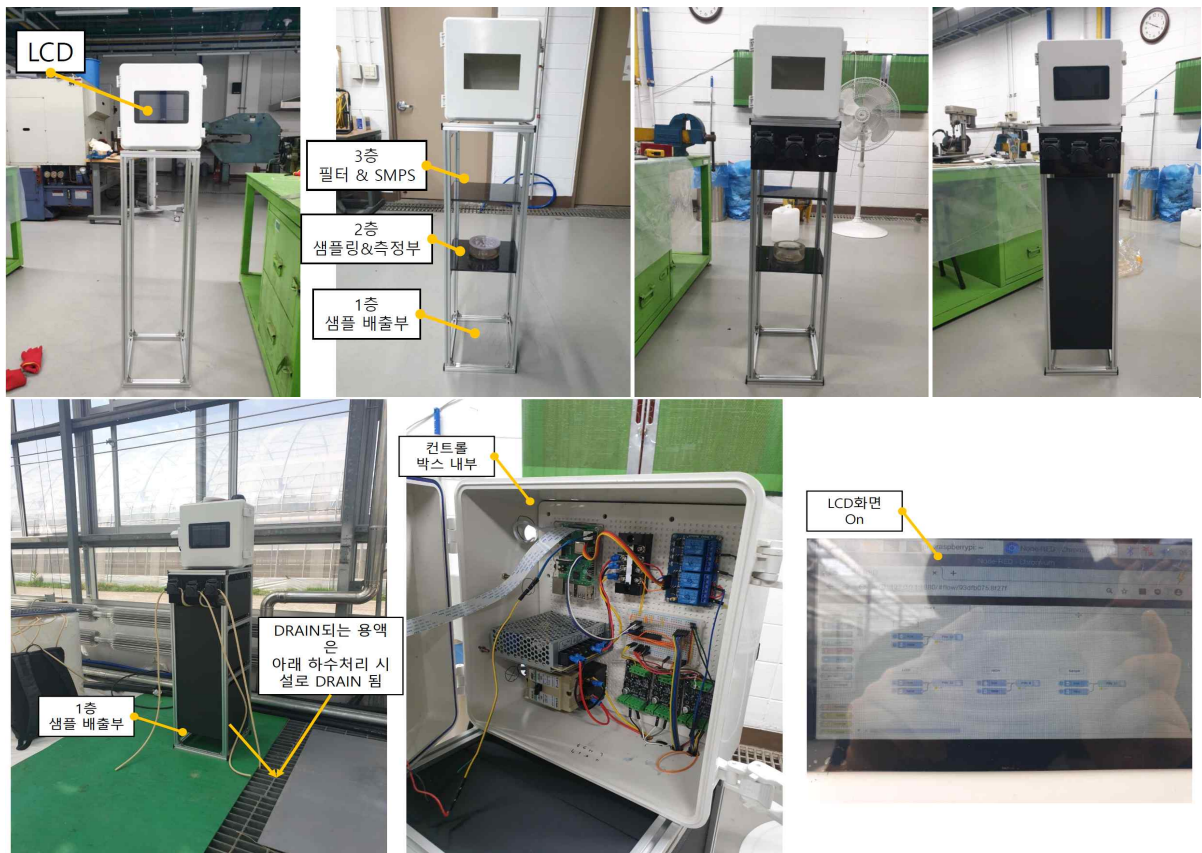
휴대용 분석기 Probe

<그림> 임베디드 휴대용 분석기 외관

(3) 검증 실험을 위한 이온 모니터링 장치 구축 및 순환식 수경재배 적용

○ 이온 모니터링 장치 설계 및 제작

- 거치식 이온모니터링 장치는 ISE 신호 입력부, ISE 신호 처리 회로 등의 신호 입력 파트와 ADC, MCU 등의 신호 전달 파트, display LCD touch module 등의 신호 출력 파트, 그리고 샘플링 펌프와 샘플링 챔버로 구성된 수질 분석 시스템으로 구성.



<그림> 거치식 이온 모니터링 장치 제작 과정

- 본 거치식 이온 모니터링 장치는 NO₃, K, Ca, Na 이온을 동시에 측정할 수 있게 구성함.
- 양액에 포함된 서로 다른 성분의 이온에 반응하여 전기신호를 생성하는 복수의 이온 선택성 측정 전극과 함께 기준전극을 하나의 집합된 형태로 구현함.

- 따라서 3개의 NO₃, K, Na 이온 선택성 전극 그리고 2개의 Ca 이온 선택성 전극을 연결하여 동시에 여러 전극이 양액 내 농도를 측정할 수 있게 시스템을 구성.
- 선발 상용 전극 및 제작 전극에서 발생하는 기전력을 측정하기 위한 기준 전극으로는 Orion사의 이중접합전극 기준전극 (Cat.900200, Orion, USA)을 선발하였음.
- ISE 신호를 균일하게 보정하기 위하여 측정전 LOW와 HIGH 용액을 사용하여 2점 정규화 캘리브레이션을 진행함.
- 향후 센싱 가능 이온 종류를 확장하기 위해 ISE 종류를 추가할 수 있도록 설계.
- 배액 모니터링 기술에서 기전력 값 수집은 전체어레이에서 수 초 이내에 수행되며 매 측정시 전극 교정 과정을 포함했을 때 10분 내외의 시간이 소요.
- 현재 1일 1회 양액 조성 변경을 목표로 하고 있으므로 10분 내외 측정 시간은 실시간 측정에 근접함.

○ 경기도 농업기술원 엽채류 순환식 수경재배 플랫폼 대상 이온 모니터링 장치 적용

- 경기도 화성 경기도농업기술원의 ICT유리온실 엽채류 플랫폼에서 코르비나, 카이피라 상추재배 실험에 이온 모니터링 장치를 설치하여 배액 모니터링을 실시함.
- 2022년 7/4~8/3, 8/5~9/1, 9/2~10/2, 10/6~11/5 4번의 작기 동안 실험을 수행.
- 배액 내 이온을 측정하고 각 이온(NO₃, K, Ca, Na) 데이터를 KIST 양액 재배 플랫폼에 송신하여 순환식 수경재배 양액 제어에 본 데이터가 활용함.
- ISE 센서는 Nernst equation에 이론적인 배경을 둬.

$$E = E_o + \frac{RT}{Z_A F} \log [a_i]$$

E_o = Cell constant (mV)

E = Cell potential (mV)

R = Ideal gas constant (=8.314 J/mol·K)

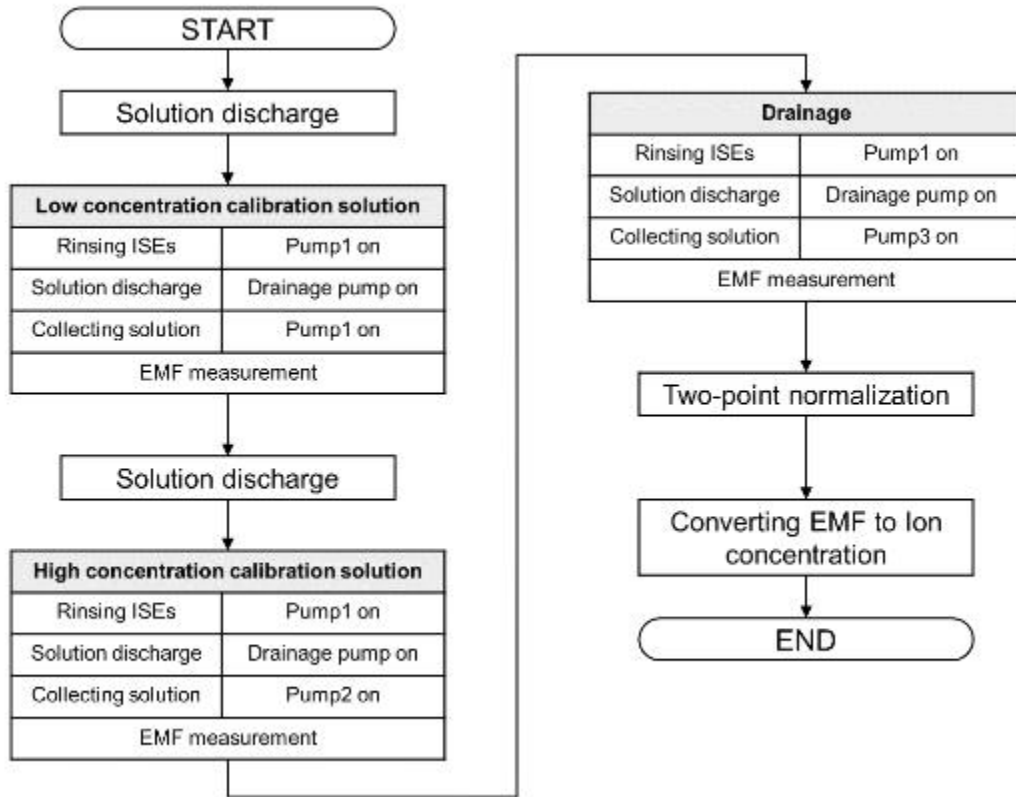
T = Temperature (K)

F = Faraday constant (=9.65 × 10⁴ C/faraday)

Z_A = Charge number of response ion

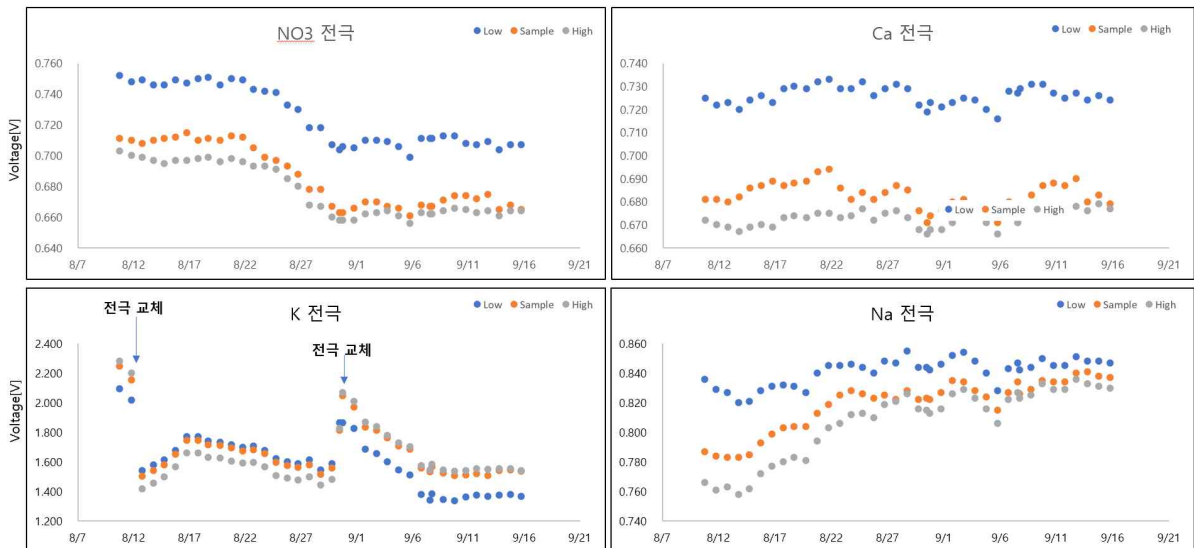
a_i = Activity of response ion

- ISE 전극의 기전력은 Nernst equation에 기반하여 이론적으로 59.16/zi, mV/decade의 변화를 보여야 하며 배액 모니터링을 진행하기 전 두 개의 다른 농도를 이온선택성 전극으로 분석하여 ISE 전극의 작동 여부를 판단함.
- ISE 전극 기전력 값을 분석함으로써 배액 모니터링 값의 분석 정확도를 판단하는 지표로 사용 가능.
- ISE 신호를 균일하게 보정하기 위하여 측정전 LOW와 HIGH용액을 사용하여 2점 정규화 캘리브레이션을 진행함.

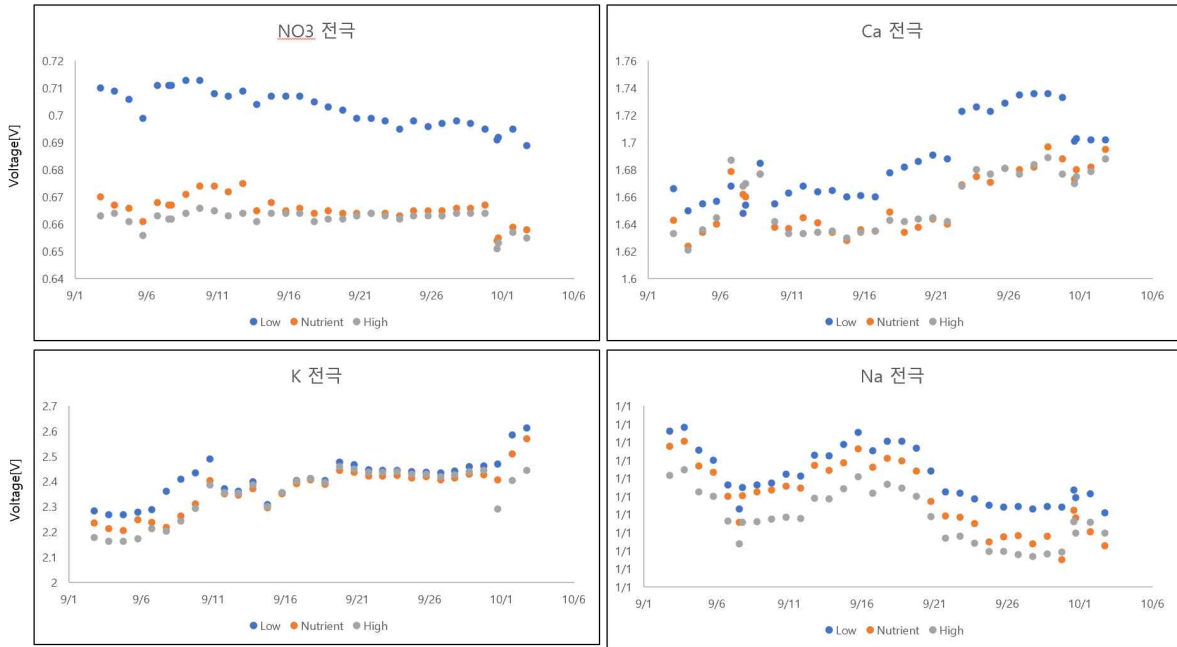


〈그림〉 2점 정규화를 통한 센서 신호 드리프트 보정 플로우 차트

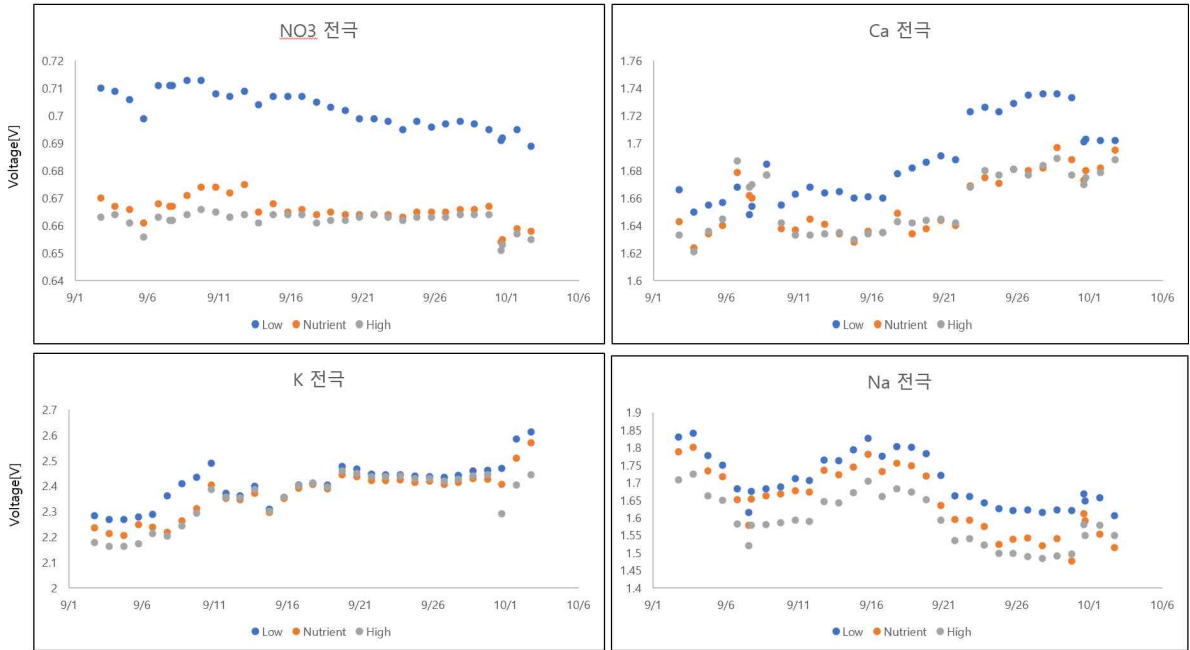
- 사용한 이온선택성은 배액 모니터링 기간 동안 대개 LOW와 HIGH용액에서 이론과 같은 차이를 보였으며 기전력을 통하여 이온선택성 전극의 교체 시기를 결정하여 필요시 전극 교체를 실시함.
- 일반적으로 샘플 배액 측정 전압은 LOW와 HIGH 사이 전압값이 나오도록 설계되었고 전압값은 농도로 환산.



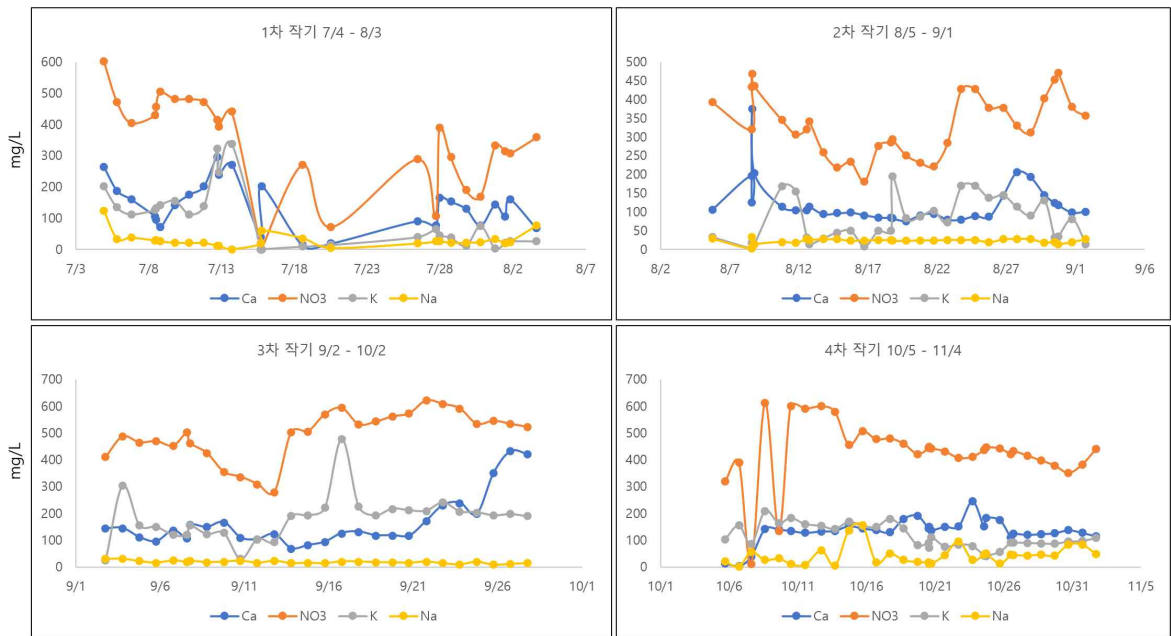
〈그림〉 2차 작기 ISE 전극 기전력 변화



〈그림〉 3차 작기 ISE 전극 기전력 변화



〈그림〉 4차 작기 ISE 전극 기전력 변화

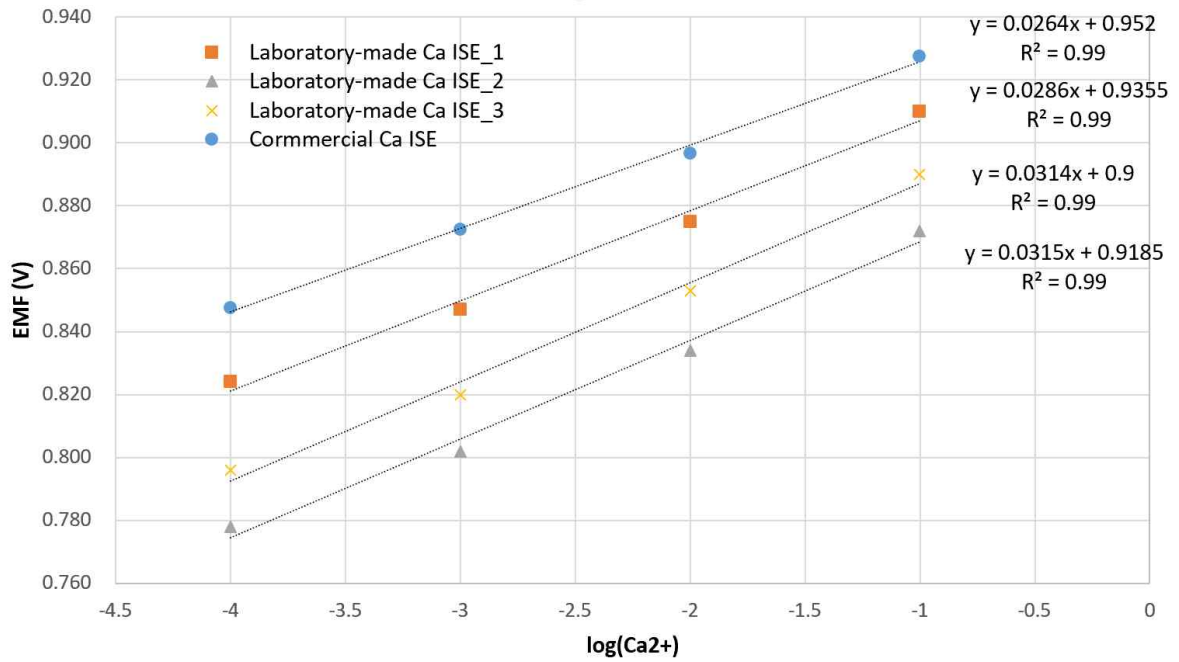


〈그림〉 4차 작기 ISE 측정 배액 농도 변화

- 측정된 배액 데이터는 KIST 양액 재배 플랫폼에 송신하여 순환식 수경재배 양액 제어에 사용.
- 다부처과제 빅데이터 R&D 플랫폼 업로드 자료로 활용.
- 이러한 ISE와 분석 데이터를 함께 사용하는 방식이 4차 작기 사전 실험에서 효과를 보였으며 23년 실증 실험을 통해 이온 균형 유지 알고리즘을 장기 사용 조건에서 평가함.

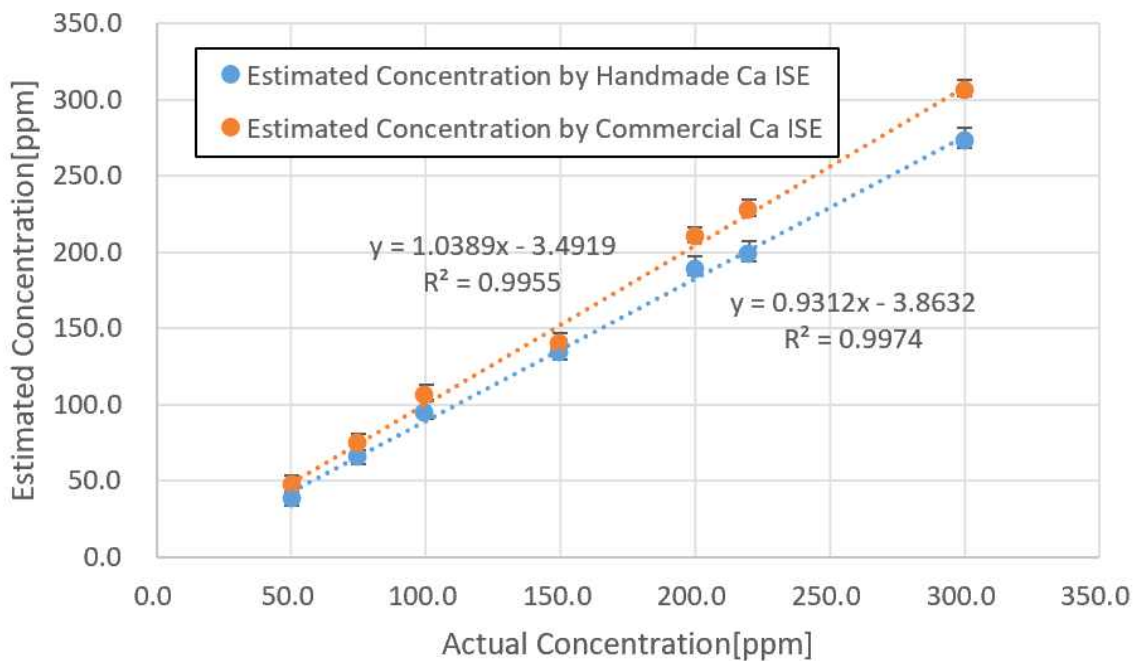
○ Ca 이온 선택성 멤브레인 선발 및 전극 제작

- 2차년도까지 적용하였던 Orion 사의 상용 Ca의 전극의 경우 현장 재배 환경에서 1~3개월의 짧은 수명과 상대적으로 고가의 비용으로 인해 안정적인 이온 모니터링에 어려움 존재.
- 따라서, 양액에 사용되는 농도 범위 내의 Ca에 효과적인 반응을 보이는 이온 선택성 멤브레인을 선 발하고 이를 기반으로 자체 Ca 전극 제작 및 테스트를 수행함.
- Calcium Ionophore IV 2 wt%, 2-Nitrophenyl octyle ether (NPOE) 68 wt%, PVC 29 wt%, Pottassium tetrakis(4-chlorophenyl) borate (KtpCIPB) 1 wt%를 2 mL tetrahydrofuran (THF) 에 완전히 용해시킨 후 23 mm 지름의 유리링에 부어 굳혀 멤브레인 제작함 (Vardar et al., 2015).
- 전극 바디는 NO₃, K 전극과 동일한 규격 및 절차로 제작함 (Cho et al., 2017).
- 로그스케일 기울기 측정을 위해 10⁻¹ M ~ 10⁻⁴ M 까지의 KNO₃, Ca₂Cl₂ 혼합 용액을 Serial dilution으로 준비하고 3개의 자체 제작 전극과 디지털 밀티미터를 사용해 EMF를 반복 측정하여 제작 Ca ISE의 EMF가 선형적인 특성을 보이는지 조사하고 기존에 사용한 Orion 상용 Ca전극과 비교함.

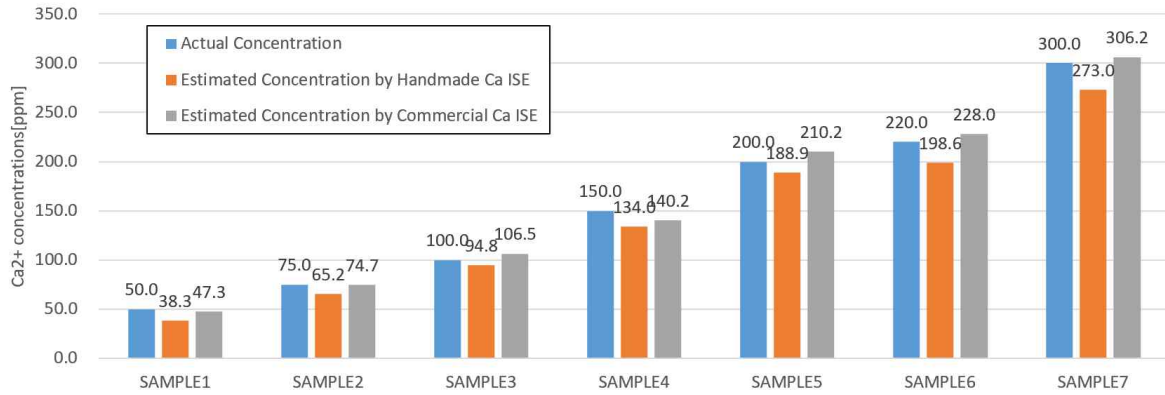


〈그림〉 자체 제작한 Ca 전극과 상용 Ca 전극의 EMF-로그 스케일 농도 특성 비교

- 실제 업체류 재배 환경에 사용된 Hoagland 양액 기반 7개의 미지 농도 샘플에 대해 Ca 농도 측정을 진행하고 3개 전극의 측정 결과를 평균하여 실제 농도와의 RMSE 비율을 측정하여 농도 예측 성능을 평가함.
- 7개의 미지 농도 샘플에 대해 RMSE 비율은 7.11%의 오차 범위 내에서 나타남. 이 때, 실제 농도에 대한 예측 농도의 수식은 $y=0.93x - 3.86$ ($R^2=0.99$). 상용 Ca 전극은 RMSE 1.62%의 오차 범위 내에서 농도를 예측해냈으며 이 때의 수식은 $y=1.04x-3.49$ ($R^2=0.99$).
- 상용 전극에 비해 RMSE는 다소 높게 나타났으나 제작 전극은 높은 수준의 선형성을 보였으며, 상용 전극의 비용을 고려하였을 때 결과는 충분히 양액 내 이온 농도 추정 적용 가능한 수준으로 나타남.



〈그림〉 자체 제작한 Ca 전극과 상용 Ca 전극의 미지 샘플 농도 예측 결과 (선형 회귀식)



〈그림〉 자체 제작한 Ca 전극과 상용 Ca 전극의 미지 샘플 농도 예측 결과

○ 경기도 농업기술원 엽채류 순환식 수경재배 플랫폼 적용 이온 모니터링 장치 고도화

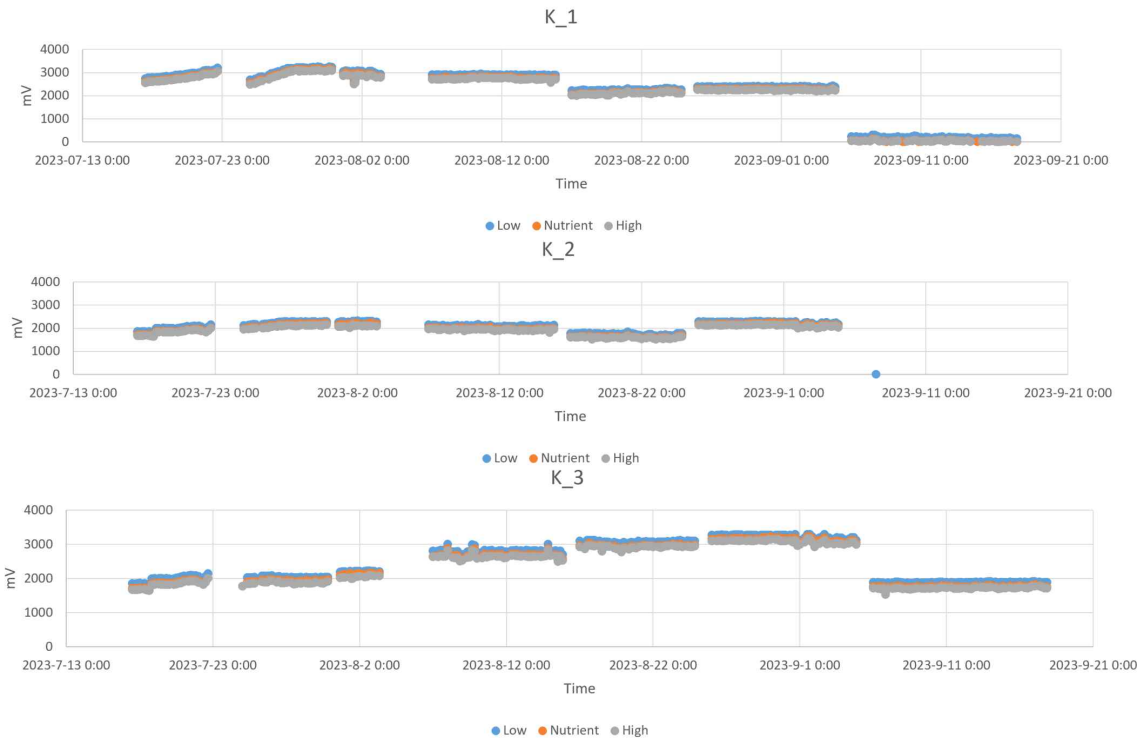
- 2개 이상 작기의 장기 사용 조건에서 ISE의 시그널의 진동과 노이즈가 증가하여 LOW와 HIGH용역을 통한 2점 정규화의 교정 범위를 벗어나는 문제를 고도화하기 위하여 추가적인 시그널 프로세서를 선별하고 적용함.
- KF 농업개발 4-20mA 트랜스미터와 MCP3208 AC-DC 컨버터를 적용.

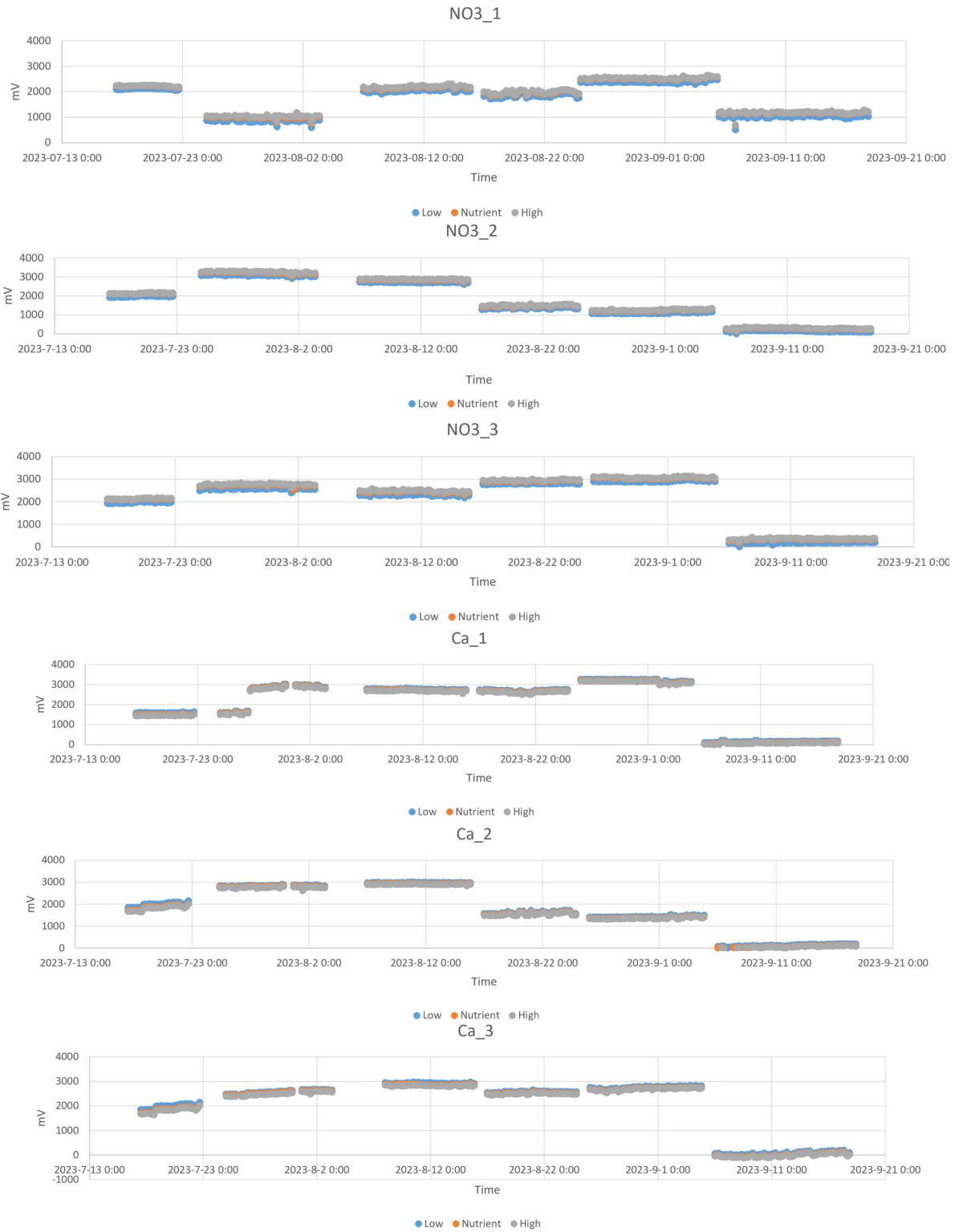


〈그림〉 이온 모니터링 시스템 고도화

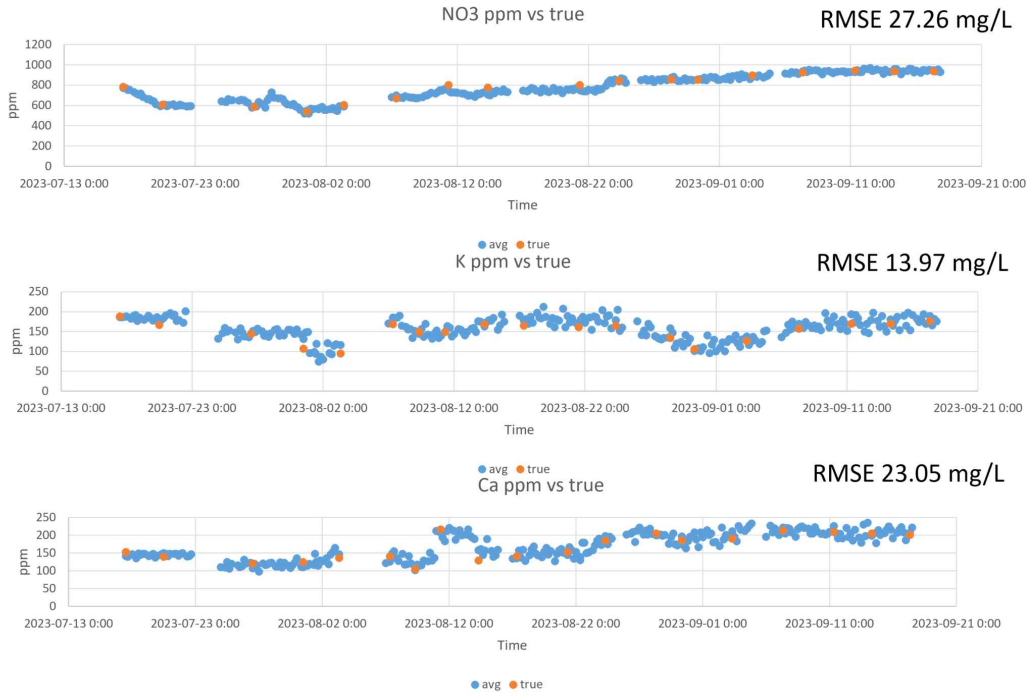
- 시그널 증폭과 4-20mA 범위의 전류 신호로 변환하는 과정을 통해 또한 전류 신호는 전압 신호에 비해서 전원 노이즈, 주변 기기에 의한 전기적 노이즈 및 전송 거리에 의한 노이즈 영향을 감소시킬 수 있음.
- 1일 5회의 배액 이온 농도 측정을 통해 샘플링 호스 공기 혼입, 전극 멤브레인에 발생한 기포 등으로 인한 이상값을 처리할 수 있도록 하여 이온 농도 측정의 정확성을 높임.
- 기존 22년도 이온 모니터링 적용 실험에서 낙뢰, 집중호우, 정전, 한파와 같은 외부 환경의 급격한 변화가 있었으며 이때, 실증 온실 내 전원 충격에 의한 장치 고장 및 측정 오류 현상이 존재하였음. 해당 현상을 방지하기 위해 무정전 전원 장치를 별도로 설치하여 모니터링 장치를 보호함.
- 이온 모니터링 장치에 사용된 배선 재료를 전체 변경하였으며 배선 길이를 줄여 이온 모니터링 노이즈를 감소시키고자 하였음. 또한, 전원 노이즈의 차단을 위해서 전원 공급부와 신호 수신부의 회로를 전기적으로 분리. 금속 스트로를 샘플링 호스 말단에 적용하여 24시간 동안 가동되는 순환 펌프로 인한 샘플링 호스의 부유 현상을 개선함.
- 2023년 7/13 ~ 9/21까지 3번의 연속 작기 동안 실험을 수행

- 실험 기간 동안 배액 샘플에 대한 EMF 측정값이 HIGH용액과 LOW용액의 측정 한계 범위 내에 안정적으로 위치함
 - 신호 사이의 비어있는 구간은 전극 교체 시기로 1일 5회 측정 데이터이기 때문에 전극 교체에 따른 미측정 기간은 1~2일 내외이며 개별 이온 제어를 위한 비료 조성 산출 주기에 영향을 주지 않음
 - 전극 교체시 전극 특성 변화에 따라 EMF 값의 변화가 존재하지만 동일 전극을 사용한 구간 내에서는 대체로 일정한 경향을 보였으며, HIGH용액과 LOW용액의 측정값으로 표현될 수 있는 전극의 측정 감도는 시간이 지남에 따라 약간 감소하였으나, NO₃, K, Ca 전극 중 전극 감도가 크게 낮아지는 전극이 발생할 경우 전체 전극을 일괄 교체하였으므로 전극의 감도는 전체 측정 기간동안 적절하게 유지되었음. 전극 교체 주기는 2주일 정도에 해당함.
 - EMF의 이상값을 배제하기 위해서 각 이온 당 3개의 전극이 사용되었으며, 매 측정시 EMF의 크기가 가장 근접한 2개의 전극의 평균값을 사용하여 EMF를 결정
 - NO₃, K, Ca 각 전극의 EMF 값은 2점 정규화 과정을 통해 최종적인 이온 농도 mg/L 값으로 변환
 - 실험 기간 동안의 이온 농도 추정값을 실제 표준 화학 분석 방법을 통한 이온 측정값과 비교하여 이온 모니터링 성능을 비교하였음. 실제 이온 측정값은 경기도농업기술원에서 (주)미래덴한에 주 2~3회 샘플 분석을 의뢰하여 얻음.
- 3개 작기 동안 이온 모니터링 결과는 실제 분석값과 유사하게 나타났음. NO₃의 RMSE는 27.26





〈그림〉 HIGH, LOW 용액 및 배액 SAMPLE의 기전력 변화
 mg/L, K의 RMSE는 13.97 mg/L, Ca의 RMSE는 23.05 mg/L 였으며, 이는 선행연구의 이온 모니터링 측정 결과와 유사한 수준이며 연속 작기동안의 현장 재배 조건을 고려했을 때 충분히 수용 가능한 결과로 보임.



〈그림〉 실제 이온 농도값과 이온 모니터링 장치를 이용한 실제값 사이의 비교

공인인증성적서 (2024, 서울대학교 농생명과학공동기기원)

시험성적서
당첨번호 : 2024-SA-0202

1. 시험명	서울대학교 마이크로분석실험실	② 시료요청서제출일	실용실험기상형
① 신청일	2024-08-01	③ 시료요청서 접수일	2024-08-01
④ 주소	서울특별시 중구 동대문로 1, 서울대학교 200-232호	⑤ 장소	-
⑥ 전화	02-880-4824	⑦ 팩스	-
2. 의뢰내용			
① 접수 번호	2024-SA-0202	② 접수 날짜	2024-08-19
③ 시료 종류	저함기(수형 17형)	④ 정량사용료	필요유
⑤ 시험 기간	2024-08-19 ~ 2024-08-21		

시험결과 (불입항목)

이 성적서는 원천자료 제공을 위한 정보이며, 무단 이의의 사용은 용허하지 않음. 오류 및 기타 불합치 사항은 즉시 연락하십시오.

보고서 : 승인자명 승인일 (인)
 승인자 : 승인일 승인일 (인)

농생명과학공동기기원 분석실험실운영에 의하여 분석 시험한 결과물
 결과 일자 : 2024년 08월 21일

서울대학교 농생명과학공동기기원
 National Instrumentation Center for Environmental Management

(41) 121-021 서울중구 동대문로 1 Tel: (02) 880-4897-8 Fax: 880-4892 http://shim.nicu.ac.kr

시험결과
당첨번호 : 2024-SA-0202

시료명	시험항목	결과	단위
KR03 10-1	질산이온(NO ₃ ⁻)	4232.1	mg/L
KR03 10-1	암모늄(NH ₄ ⁺)	4232.1	mg/L
KR03 10-2	질산이온(NO ₃ ⁻)	423.4	mg/L
KR03 10-3	암모늄(NH ₄ ⁺)	423.4	mg/L
KR03 10-3	질산이온(NO ₃ ⁻)	42.3	mg/L
KR03 10-3	암모늄(NH ₄ ⁺)	42.3	mg/L
KR03 10-4	질산이온(NO ₃ ⁻)	4.1	mg/L
KR03 10-4	암모늄(NH ₄ ⁺)	4.3	mg/L
KR03 10-5	질산이온(NO ₃ ⁻)	0.8	mg/L
KR03 10-5	암모늄(NH ₄ ⁺)	0.8	mg/L
KR03 10-6	질산이온(NO ₃ ⁻)	1.4	mg/L
KR03 10-6	암모늄(NH ₄ ⁺)	0.8	mg/L
CaCl2 10-1	암모늄(NH ₄ ⁺)	4232.8	mg/L
CaCl2 10-2	암모늄(NH ₄ ⁺)	423.7	mg/L
CaCl2 10-3	암모늄(NH ₄ ⁺)	42.1	mg/L
CaCl2 10-4	암모늄(NH ₄ ⁺)	4.2	mg/L
CaCl2 10-5	암모늄(NH ₄ ⁺)	0.8	mg/L
CaCl2 10-6	암모늄(NH ₄ ⁺)	0.7	mg/L
Sample 1	암모늄(NH ₄ ⁺)	124.5	mg/L
Sample 1	질산이온(NO ₃ ⁻)	423.4	mg/L
Sample 1	암모늄(NH ₄ ⁺)	187.8	mg/L
Sample 2	암모늄(NH ₄ ⁺)	123.8	mg/L
Sample 2	질산이온(NO ₃ ⁻)	697.1	mg/L

* NH4-N Detected(검출)된 항목에 대한 결과

서울대학교 농생명과학공동기기원
 National Instrumentation Center for Environmental Management

(41) 121-021 서울중구 동대문로 1 Tel: (02) 880-4897-8 Fax: 880-4892 http://shim.nicu.ac.kr

시험결과
당첨번호 : 2024-SA-0202

시료명	시험항목	결과	단위
Sample 1	암모늄(NH ₄ ⁺)	202.7	mg/L
Sample 1	암모늄(NH ₄ ⁺)	189.4	mg/L
Sample 1	질산이온(NO ₃ ⁻)	795.4	mg/L
Sample 4	암모늄(NH ₄ ⁺)	126.2	mg/L
Sample 4	질산이온(NO ₃ ⁻)	122.1	mg/L
Sample 4	질산이온(NO ₃ ⁻)	122.1	mg/L
Sample 4	암모늄(NH ₄ ⁺)	232.97	mg/L
Sample 2	암모늄(NH ₄ ⁺)	201.7	mg/L
Sample 2	질산이온(NO ₃ ⁻)	122.1	mg/L
Sample 2	암모늄(NH ₄ ⁺)	204.89	mg/L
Sample 2	암모늄(NH ₄ ⁺)	-	기타 기재 -

* NH4-N Detected(검출)된 항목에 대한 결과

서울대학교 농생명과학공동기기원
 National Instrumentation Center for Environmental Management

(41) 121-021 서울중구 동대문로 1 Tel: (02) 880-4897-8 Fax: 880-4892 http://shim.nicu.ac.kr

시험성적서
당첨번호 : 2024-SA-0202

1. 시험명	서울대학교 마이크로분석실험실	② 시료요청서제출일	실용실험기상형
① 신청일	2024-08-01	③ 시료요청서 접수일	2024-08-01
④ 주소	서울특별시 중구 동대문로 1, 서울대학교 200-232호	⑤ 장소	-
⑥ 전화	02-880-4824	⑦ 팩스	-
2. 의뢰내용			
① 접수 번호	2024-SA-0202	② 접수 날짜	2024-08-08
③ 시료 종류	저함기(수형 2형)	④ 정량사용료	필요유
⑤ 시험 기간	2024-08-08 ~ 2024-08-16		

시험결과 (불입항목)

이 성적서는 원천자료 제공을 위한 정보이며, 무단 이의의 사용은 용허하지 않음. 오류 및 기타 불합치 사항은 즉시 연락하십시오.

보고서 : 승인자명 승인일 (인)
 승인자 : 승인일 승인일 (인)

농생명과학공동기기원 분석실험실운영에 의하여 분석 시험한 결과물
 결과 일자 : 2024년 08월 19일

서울대학교 농생명과학공동기기원
 National Instrumentation Center for Environmental Management

(41) 121-021 서울중구 동대문로 1 Tel: (02) 880-4897-8 Fax: 880-4892 http://shim.nicu.ac.kr

시험결과
당첨번호 : 2024-SA-0202

시료명	시험항목	결과	단위
High	질산이온(NO ₃ ⁻)	1006.1	mg/L
High	암모늄(NH ₄ ⁺)	422.87	mg/L
High	암모늄(NH ₄ ⁺)	319.79	mg/L
Low	질산이온(NO ₃ ⁻)	105.4	mg/L
Low	암모늄(NH ₄ ⁺)	41.86	mg/L
Low	암모늄(NH ₄ ⁺)	31.31	mg/L
	- 기타 기재 -		

* NH4-N Detected(검출)된 항목에 대한 결과

서울대학교 농생명과학공동기기원
 National Instrumentation Center for Environmental Management

(41) 121-021 서울중구 동대문로 1 Tel: (02) 880-4897-8 Fax: 880-4892 http://shim.nicu.ac.kr

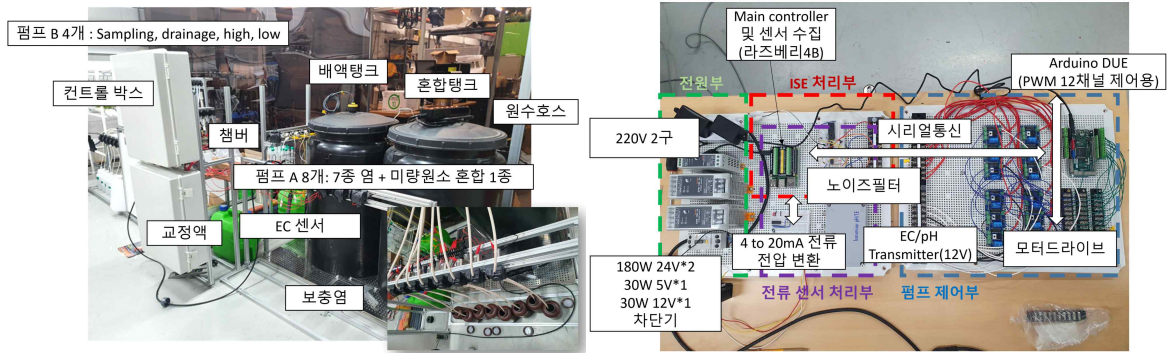
5) 인공지능 기반 정밀 비료 공급 알고리즘 개발

(1) 가변 비료 조성 공급 알고리즘 개발

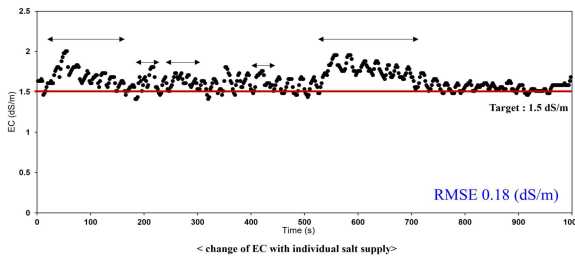
- 현재 대다수의 양액 공급 시스템은 믹싱 탱크 샘플 분석 데이터에 의해 장기간에 걸쳐 비료 조성을 수동으로 조절하며 믹싱 탱크로 급수 펌프 동작시 1초 정도의 짧은 간격으로 목표 EC에 도달하기까지 솔레노이드 개폐를 반복함. 이러한 방식에서는 적시에 작물 필요 양액을 조절하는 것이 어려움.
- 본 연구과제에서 개발한 시스템은 매일 혹은 보다 더 짧은 주기로 비료 조성을 자동 조정하고 목표 EC에 도달하기까지 각 도징채널의 솔레노이드 밸브를 서로 다른 시간동안 개폐를 반복함을 통해 믹싱 탱크 이온 균형을 효과적으로 달성하고자 함.
- 현재 배액 내 이온 농도 비율 값을 통하여 KIST 복합양분관리 플랫폼에서 6종 비료 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KH_2PO_4 , $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$, KNO_3 , NH_4NO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, K_2SO_4 에 대한 질량비를 산출 가능.
- 공급 양액 내 이온이 복합양분관리 플랫폼에서 산출된 목표 질량비와 일치되도록 실제 순환식 수경재배 시스템 및 상용 양액기 시스템에서의 가변 비료 조성 공급 알고리즘 개발.
- 6종 비료에 대한 질량비를 비선형계획법을 이용하여 부피비로 변환하고 단위 시간당 투입되는 개별 비료의 부피는 곧 개별 도징 채널의 솔레노이드 개폐 시간의 함수이므로 부피비를 통해 솔레노이드 밸브의 구동 시간을 결정할 수 있음.
- 솔레노이드 밸브의 최소 구동 시간을 0.1초로 정하고 최소 구동 시간과 부피비의 비례식을 통하여 6개 솔레노이드 밸브에 대한 동작 시간을 결정. 이 때, 양액기에서 솔레노이드 개폐에 의한 유량은 각 채널이 모두 동일해야 함. 솔레노이드 밸브의 코일 고장 문제를 예방하기 위해 솔레노이드 밸브의 열림 시간이 과도하게 길어지지 않도록 하고자 최대 솔레노이드 밸브 동작 시간은 6초로 설정하고 짧은 주기로 개폐를 반복하는 방식을 채택. 최대 솔레노이드 밸브 동작 시간은 6초를 초과하지 않도록 함.
- 고정된 비율의 미량원소가 공급되는 채널의 동작시간은 최대 동작시간의 50%가 되도록 설계하였으며 이는 상용 양액기의 A,B액 EC 제어에서 솔레노이드의 밸브 동작이 on/off를 주기적으로 반복하도록 되어있는 구조를 반영한 것.
- pH 조절을 위해서 약산인 H_3PO_4 를 사용하였으며, 산 공급 솔레노이드 밸브의 동작 시간 또한 미량 원소 공급 채널과 동일하게 적용.
- 상용 양액기의 지정된 시간과 구역 설정에 의해 믹싱탱크로 원수 급수가 일어나 펌프가 구동될 때 알고리즘이 동작하도록 개발하였으며 이 때 배관 내 설치된 상용 양액기의 EC 센서와 pH 센서 신호에 의해서 공급량을 조절할 수 있도록 함.
- 하나의 제어 프로그램을 이용하여 기존 상용 양액기의 A,B액 공급과 동일한 제어를 수행할 수 있도록 알고리즘을 구성함.
- 단비 탱크의 개별 비료 농도가 Hoagland 조성과 같이 일반적으로 활용되는 양액 조성으로 일치하는 경우 1초마다 솔레노이드 밸브를 on/off 제어할 수 있도록 개발.
- 이때, 이러한 솔레노이드 밸브 1초 on/off 제어와 시간 차등 제어를 동일한 단비 탱크 구성에서 수행하기 위해서는 특정 밸브의 동작시간이 너무 길어지게 되는 현상을 방지하기 위해 단비 탱크 간 농도 차이가 50배 이하가 되어야 함.
- 7/4 ~ 11/5 동안 경기도 화성 경기도농업기술원의 ICT유리온실 업체류 플랫폼에서 코르비나, 카이피라 상추재배 실험을 수행하는동안 솔레노이드 고장은 발생하지 않음.

(2) 임베디드 보드 기반 요인 실험 장치 및 제어 프로그램 개발

- 개발한 알고리즘을 검증하기 위해 서울대에서 실험실 규모 요인실험 장치 개발. 요인실험 장치는 알고리즘의 동작을 확인하기 위해 솔레노이드 밸브 대신 정량 펌프 기반으로 개발. 개별 정량 펌프에 대해 모터 드라이브를 PWM 제어하여 공급 유량에 차이를 부여.
- 개별 도징 채널의 공급 비료 부피비는 호글랜드 조성을 기준으로 요인 실험 진행. 목표 EC를 1.5 mS/cm로 진행하였을 때 목표 EC를 RMSE 0.15 mS/cm로 추종하는 결과를 보임. 공급되는 양액 조성의 정확도를 조사하기 위해 NO₃와 K의 비율을 분석하였을 때, 투입되는 호글랜드 조성의 NO₃, K 이온 농도비와 혼합 탱크의 NO₃, K 이온 농도비가 유사하게 나타나는 결과를 보임.



〈그림〉 정량펌프 기반 1차 요인실험장치 개발



	Hoagland x500 (mg/L)	Hoagland x1 (mg/L)	Hoagland NO ₃ /K ratio	Measured solution (mg/L)	Solution NO ₃ /K Ratio
NO ₃	218,157	436	3.72	518	3.12
K	58,588	117		166	

〈그림〉 1차 요인실험장치 제어 실험 결과

- 정량 펌프 기반 요인 실험 이후 개발 알고리즘의 현장 적용을 위해 솔레노이드 밸브 기반 시스템 및 양액 제어기를 제작.
- 이온 모니터링 장치로부터의 이온 측정 데이터 수신, 솔레노이드 밸브 제어, KIST 복합양분플랫폼과 송수신 통신을 위한 프로그램을 라즈베리파이 및 파이썬 기반으로 개발. 8채널 릴레이를 통하여 솔레노이드 밸브를 제어하였으며 원수 펌프가 동작할 때 솔레노이드 밸브가 정상적으로 시간 차등 개폐되는 것을 확인.



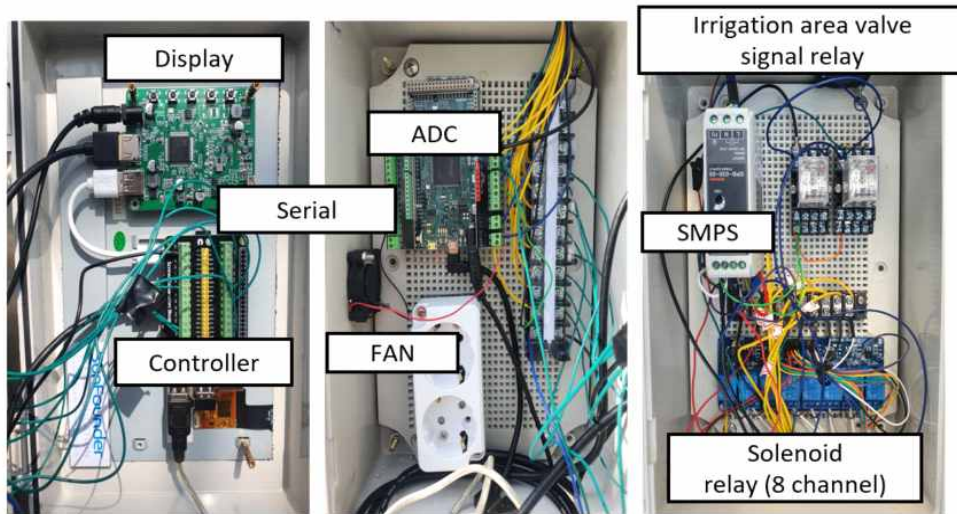
〈그림〉 솔레노이드 밸브 및 벤추리 기반 2차 요인실험장치 개발

(3) 경기도 농업기술원 순환식 수경재배 플랫폼 적용 검증 실험 장치 개발

- 요인실험 장치에서 1차적으로 테스트한 알고리즘을 경기도 농업기술원 첨단 온실 엽채류 재배 순환식 수경재배 플랫폼에 적용하여 검증하기 위하여 제어기 확장
- 신한에이텍 제어기에서 설정된 시간과 유량으로, 지정한 믹싱탱크 (처리구, 대조구)에 원수를 공급하기 위해 펌프를 가동시킬 때 펌프 제어의 시그널을 서울대 개발 제어기에 입력으로 인가. 또한 지정한 믹싱탱크에 원수를 공급하기 위한 2개의 AC24V 전자 밸브로부터 별도의 릴레이를 거쳐 개폐 시그널을 입력받음. 신한에이텍 양액기에 설치된 EC 및 pH 트랜스미터로부터 출력되는 0-5V의 신호를 입력받은 후 EC 및 pH 표준 용액을 이용하여 별도 response curve를 fitting하여 EC 및 pH 값으로 변환. 솔레노이드 밸브를 개별 제어하기 위한 3.3V 출력을 8채널 릴레이를 사용하여 220V AC 시그널로 변환한 후 신한에이텍 양액기 솔레노이드 밸브 릴레이에 연결.



〈그림〉 신한에이텍 양액기 연동 양액 공급 제어 장치



〈그림〉 양액 공급 제어 장치 구성 요소

- 배액 이온 모니터링 장치에서 ISE를 이용한 배액 측정이 완료되면 K, NO₃, Ca, Na 값을 무선 인터넷 네트워크를 통하여 양액 공급 제어기로 전송. 전송된 이온 측정값은 KIST 통신 프로토콜을 통해 복합양분관리 플랫폼으로 전송되며 플랫폼에서 계산된 6종 비료에 대한 질량비 정보를 응답으로 수신함.



〈그림〉 ISE 적용 순환식 수경재배 플랫폼 통신 흐름도

- 배액 측정은 오전 9시 및 오후 5시 1일 2회 수행되며 복합양분관리 플랫폼으로의 전송은 오후 6시 1일 1회 수행.

Fertilizer	Ca(NO ₃) ₂	K ₂ SO ₄	KH ₂ PO ₄	MgSO ₄	KNO ₃	NH ₄ NO ₃
Amount (g/L)	61	1.2	1.578	31.88	32.70	30
Tank	1	2	3	4	5	6

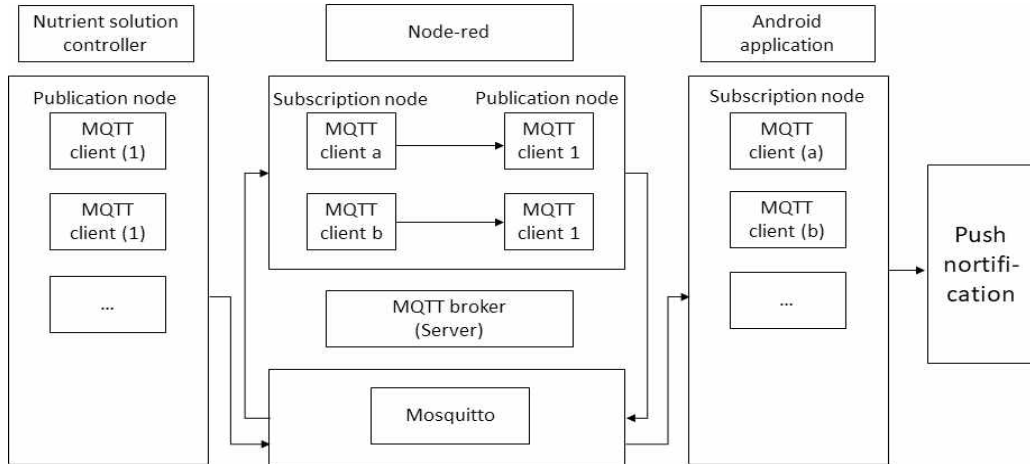
Fertilizer	H ₃ PO ₄
Amount (g/L)	2.85
Tank	7 (acid)

Fertilizer	Fe-EDTA	ZnSO ₄	H ₃ BO ₃	MnSO ₄	CuSO ₄	Na ₂ MoO ₄
Amount (g/L)	1.144	1.017	0.224	0.197	0.006	0.002
Tank	8 (micronutrient)					

〈그림〉 8개 탱크 개별 비료 조성 및 농도

- 장치 및 알고리즘, ISE의 오작동 및 지연된 복구는 작물 생육에 치명적인 장애를 일으킬 수 있으므로 고장 알림 기능을 구현. 양액 공급 장치 내 프로그램을 MQTT client로 하고 별도의 자체 MQTT 브로커 서버 및 Node-red를 구동하는 임베디드 보드를 외부망에 연결하여 고장에 대한

알림을 전송할 수 있도록 개발. MQTT로 오류 메시지가 수신되면 오픈 소스 안드로이드 푸시 어플리케이션 및 무료 푸시 서버를 통해서 안드로이드 스마트폰으로 푸시 알림 발신.



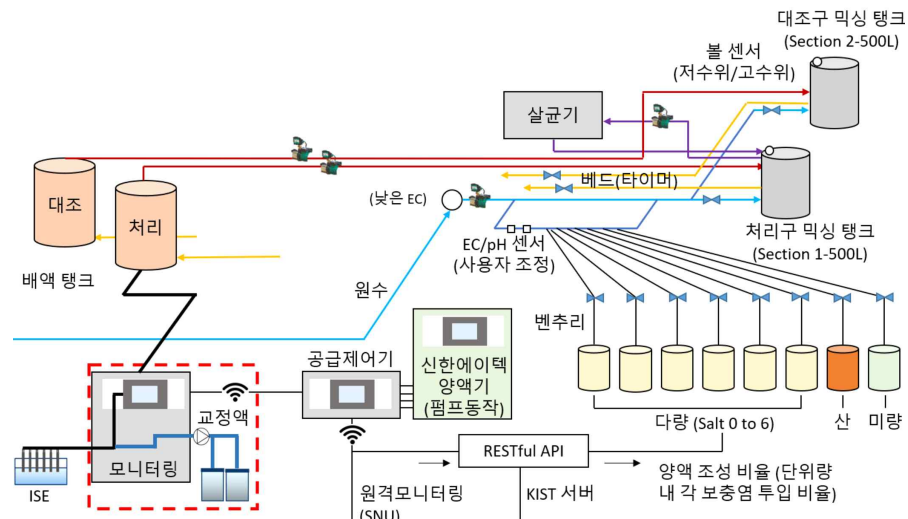
〈그림〉 MQTT 기반 고장 푸시 알림 기능 플로우 차트

- 하루 3회 정상 동작 상태 알림, KIST 복합환경플랫폼과의 통신 성공, 실패 알림, 급수 시간이 너무 짧은 경우, EC 센서 / pH 센서의 값이 너무 높거나 낮은 경우, 프로그램 종료 상황, ISE 감도 이상, ISE 범위 이탈의 경우에 오류 메시지 전송. 급수 시 파이프 내 EC 및 pH 센서 정보를 주기적으로 node-red 서버에 업로드 하여 구역 및 급수 펌프 동작상태와 함께 대시 보드에서 시각적으로 확인할 수 있도록 함.



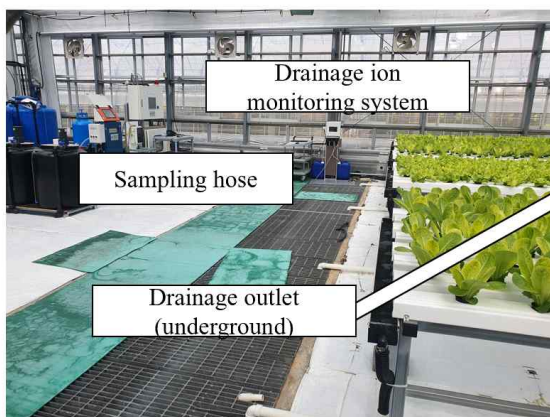
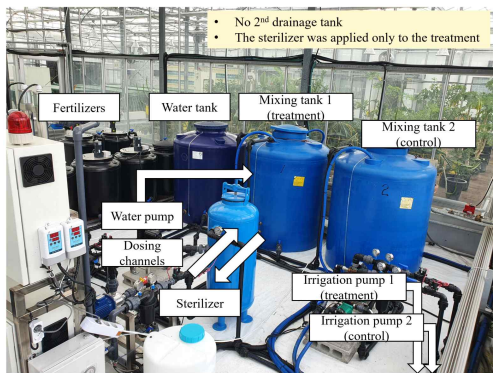
〈그림〉 EC, pH, 급수 펌프 동작 상태 및 구역 모니터링을 위한 node-red 대시보드 화면

- 검증 실험 순환식 수경재배 플랫폼 전체 구성도는 아래 그림과 같음. 개발된 시스템은 기존 시스템과는 달리 배액 측정 및 양분관리 플랫폼 간의 데이터 송수신을 기반으로 매일 비료 조성을 자동 조절하고, 서로 다른 시간동안 도징 채널을 동작시키는 방식 기존 제품 및 기술과는 차이를 보이며 상용 제어기와 연계가능한 모듈식 제어 장치로 검증을 진행하였음
- 배액 탱크는 일정 수위를 넘으면 전량 지속 순환. 믹싱 탱크는 매일 오후 2시 펌프 가동을 통해 급수하고 재배자의 판단에 의해 생육 초기에 20L 급수, 생육 후기 50L 급수. 믹싱 탱크 고수위 때 급수 (펌프 정지). NFT 적용을 위해 1000L 믹싱 탱크 사용 (500L 수위)



〈그림〉 ISE이용 이온 모니터링 및 양분 흡수 패턴 기반 양분 관리 시스템 전체 구성도

(4) 경기도 농업기술원 순환식 수경재배 플랫폼 적용 검증 실험 장치 적용



〈그림〉 ISE이용 이온 모니터링 및 양분 흡수 패턴 기반 양분 관리 시스템 실제 구성



엽채류 순환식 수경재배 시스템 현장 실증

- 연구목적: 지속가능한 친환경 수경재배 구현을 위한 양분 모니터링 및 엽채류 순환식 수경재배 시스템 개발
- 시험작물(품종): 상추(카이피라, 로메인)
- 주요내용
 - 생육시기에 따른 양액 흡수 양상 조사
 - 순환식 수경재배 시스템 현장 실증
- 조사내용: 수은, 양액 감소량, 양액분석, 생육조사 등

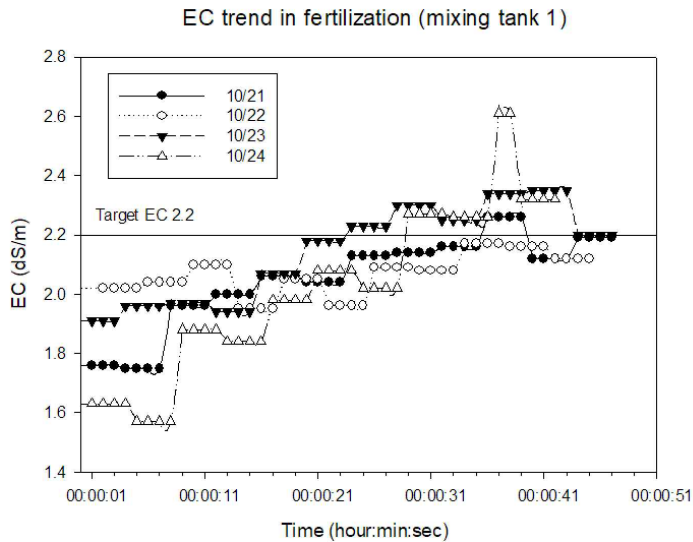
ICT 복합환경제어 첨단 연구온실

- 시설규모: 3,036㎡
 - 온실(2,045㎡): 연로형 온실(1,078㎡), 보급형 온실(967㎡)
 - 관리동(990㎡): 조사실, 식물관장동
- 주요시설 및 연구내용
 - ICT 기상관측 장비에 의한 복합환경 자동제어
 - 밀폐형 식물관장
 - 태양광(지열) 병용형 식물관장
 - 도시농업 및 아쿠아포닉스 적용기술 개발
 - 4차산업혁명 대응 및 스마트팜 집적기술 개발 등



〈그림〉 ICT 복합환경제어 첨단 연구온실 내 엽채류 실증 베드

- 하루 내 정해진 시간, 유량으로 지정된 믹싱 탱크로 급수될 때 배관 내 EC 값이 목표 값보다 낮아지면 솔레노이드 밸브를 동작시켜 개별 비료를 투입. 엽채류의 경우 혼합 탱크 내 수량이 500L의 대용량이므로 혼합 탱크 내 초기 EC 값이 목표 EC 값으로 조정된 상태에서 배관 EC를 피드백 제어해야 함. 초기 배관 내 EC 값이 낮은 상태에서 목표 EC 값에 도달하는데 지연 시간이 존재하지만 일정 시간이 지난 후에는 목표 EC 값에 근접한 EC 값이 나타남.

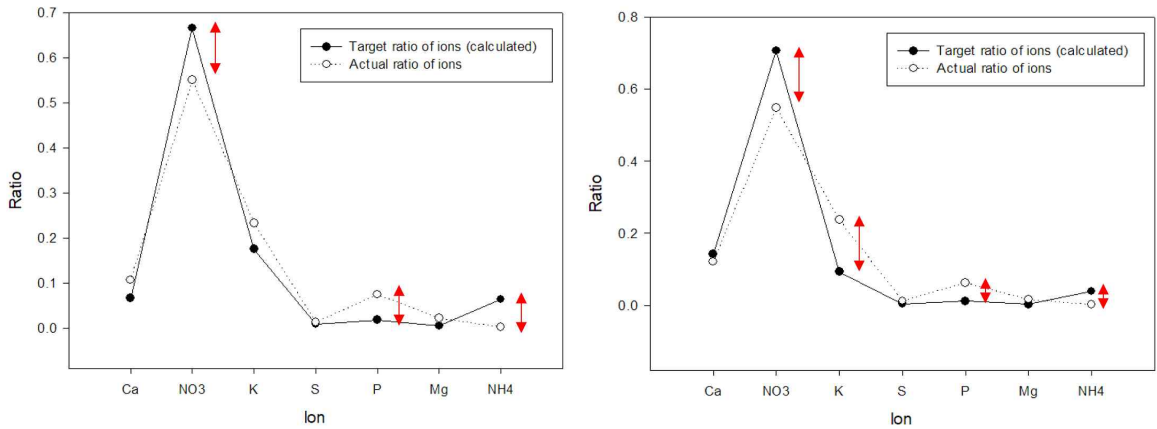


〈그림〉 EC 피드백 제어 테스트

- 요인실험 장치에서 1차적으로 테스트한 알고리즘을 경기도 농업기술원 첨단 온실 엽채류 재배 순환식 수경재배 플랫폼에 적용하여 검증하기 위하여 제어기 확장. 솔레노이드 밸브 시간 차등 제어

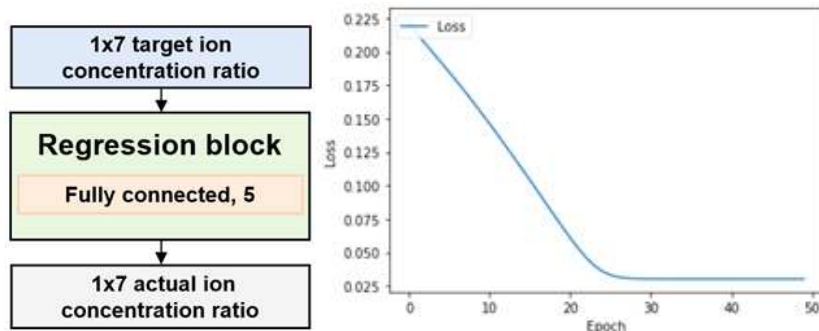
를 수행하므로 실제 공급되는 양액의 이온 농도 비율과 목표 양액의 이온 농도 비율의 차이가 존재할 수 있음.

- 재배 기간 동안 임의의 날짜에 조정된 비료 조성 양액을 원수와 비료가 혼합되어 공급되는 배관 토출부에서 10L 채취하고 50ml 샘플링한 5개 시료를 성분 분석한 결과 공급 양액 이온 농도 비율과 목표 양액 이온 농도 비율의 차이 존재. NO₃의 경우 투입되는 비율이 가장 큰 비료인만큼 오차가 크게 나타났으며 NO₃ 오차로부터 비례적으로 K, P의 오차 발생, NH₄의 경우 벤추리 이물질 추정. 재배 기간이 길어지게 되면 도징 채널에 이물질이 쌓이게 되어 최초에 수동 밸브로 조정했던 기준 투입량과 실제 비료 투입량이 달라지게 되며 본 연구에서는 이를 자동적으로 해결하고자 함. 원수 내재 이온으로 인한 오차 또한 존재. 농도 비율에 대한 RMSE는 5.54% 최대 오차는 13.52%로 나타남.

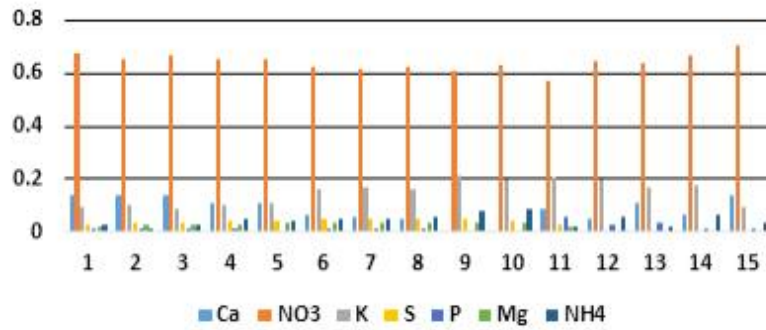


〈그림〉 목표 양액 농도 비율과 공급 양액 농도 비율의 오차

- 공급 양액 이온 농도 비율과 목표 양액 이온 농도 비율의 오차 보정을 위해 단층 인공신경망 구조를 적용하여 공급과 목표 간에 존재하는 비선형적 오차의 특성을 모델링 하고자 함. 데이터셋 구성을 위해 배관 토출부에서 10L 시료를 10월 13일부터 23일 간의 재배 기간에 추가로 채취하고 50ml 샘플링하여 10개 훈련 세트와 5개 테스트 세트 (10월 13, 15, 18, 20, 23일) 구성. Tensorflow 2.5에서 5개 노드를 갖는 1개의 완전연결층을 구조하였으며, optimizer로 SGD, 학습률 0.001, 활성화 함수로 ReLU 적용.

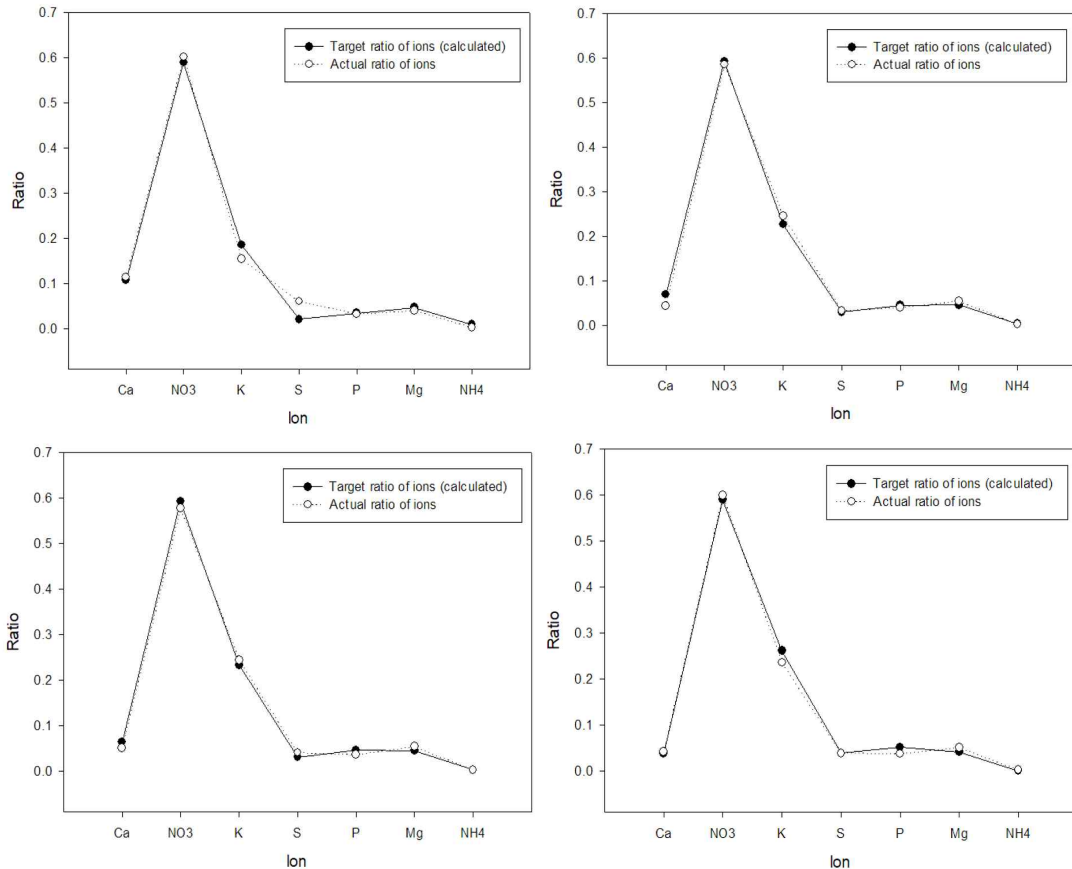


〈그림〉 공급 양액 이온 농도 비율 오차 보정을 위한 ANN 구조(좌) 및 학습 손실 그래프



〈그림〉 15개 공급 양액 시료의이온 농도 비율

- 테스트 데이터셋에서 성능 검증 결과 RMSE 1.13% 최대오차 3.15%로 오차가 감소. 모델은 현장의 양액기와 재배 시설, 작물에 맞게 새롭게 fine-tuning 되어야 함. 개발된 모델을 통해 추정되는 이온 질량비와 임의의 부피값, 목표 질량비를 이용하여 목표 양액의 이온 농도를 보정 가능하고 이온 농도를 역산하여 KIST 복합환경플랫폼에서 수신되는 비료 조성에 대한 오프셋을 결정 가능함.



〈그림〉 오차 보정 후 목표 양액 농도 비율과 공급 양액 농도 비율의 비교

시험성적서 (2024, (주)미래덴한)

(주)미래덴한
Mirae denHaan
경기도 농업기술원 순환식 수경재배 시설 (농원) 125-01-166630 / 경기도 (주)미래덴한

시험성적서

1. 시료 내용

품종명	비 과 작	양분재 조성
소재지	경기도	순환식 수경재배 시설
분석목적	계측	양분재 조성 2023년 9월 29일
시험일	양분재 조성	양분재 조성 2023년 9월 27일

귀하께서 미래덴한에 의뢰한 시료에 대한 분석결과는 다음과 같습니다.

2. 분석 결과

분석 항목	분석 항목	분석 결과	단위	분석 결과	단위
pH	ND				
전기전도도(EC)	1.8	ms/cm			
질소이온(NO ₃)	5.6	mmol/L	120	ppm(NO ₃ -N)	
염소이온(Cl)	0.8	mmol/L	29	ppm	
칼슘(Ca)	0.3	mmol/L	9	ppm	
탄산이온(HCO ₃)	0.9	mmol/L	27	ppm	
인(P)	1.42	mmol/L	41	ppm	
암모늄이온(NH ₄)	<0.1	mmol/L	<1.4	ppm(NH ₄ -N)	
칼륨(K)	4.8	mmol/L	176	ppm	
나트륨(Na)	0.9	mmol/L	21	ppm	
망간(Mn)	2.9	mmol/L	90	ppm	
마그네슘(Mg)	0.6	mmol/L	13	ppm	
구리(Cu)	0.66	mmol/L	16	ppm	
아연(Zn)	7.8	mmol/L	0.41	ppm	
붕소(B)	3.8	mmol/L	0.21	ppm	
이온성 염소(S)	1.0	mmol/L	0.97	ppm	
총칼슘(Ca)	34.8	mmol/L	0.27	ppm	
총칼륨(K)	0.6	mmol/L	0.84	ppm	
총질소(N)	<0.1	mmol/L	<0.02	ppm	

(주)미래덴한
경기도 농업기술원 순환식 수경재배 시설 (농원) 125-01-166630 / 경기도 (주)미래덴한

(주)미래덴한
Mirae denHaan
경기도 농업기술원 순환식 수경재배 시설 (농원) 125-01-166630 / 경기도 (주)미래덴한

시험성적서

1. 시료 내용

품종명	비 과 작	양분재 조성
소재지	경기도	순환식 수경재배 시설
분석목적	계측	양분재 조성 2023년 9월 29일
시험일	양분재 조성	양분재 조성 2023년 9월 27일

귀하께서 미래덴한에 의뢰한 시료에 대한 분석결과는 다음과 같습니다.

2. 분석 결과

분석 항목	분석 항목	분석 결과	단위	분석 결과	단위
pH	ND				
전기전도도(EC)	2.0	ms/cm	181	ppm(NO ₃ -N)	
질소이온(NO ₃)	22.9	mmol/L	181	ppm	
염소이온(Cl)	0.8	mmol/L	30	ppm	
칼슘(Ca)	0.4	mmol/L	13	ppm	
탄산이온(HCO ₃)	0.7	mmol/L	40	ppm	
인(P)	2.41	mmol/L	78	ppm	
암모늄이온(NH ₄)	<0.1	mmol/L	<1.4	ppm(NH ₄ -N)	
칼륨(K)	7.8	mmol/L	308	ppm	
나트륨(Na)	0.9	mmol/L	21	ppm	
망간(Mn)	2.7	mmol/L	109	ppm	
마그네슘(Mg)	0.6	mmol/L	14	ppm	
구리(Cu)	0.68	mmol/L	16	ppm	
아연(Zn)	13.8	mmol/L	0.74	ppm	
붕소(B)	8.8	mmol/L	0.82	ppm	
이온성 염소(S)	1.3	mmol/L	0.99	ppm	
총칼슘(Ca)	36.6	mmol/L	0.40	ppm	
총칼륨(K)	0.7	mmol/L	0.84	ppm	
총질소(N)	<0.1	mmol/L	<0.02	ppm	

(주)미래덴한
경기도 농업기술원 순환식 수경재배 시설 (농원) 125-01-166630 / 경기도 (주)미래덴한

(주)미래덴한
Mirae denHaan
경기도 농업기술원 순환식 수경재배 시설 (농원) 125-01-166630 / 경기도 (주)미래덴한

시험성적서

1. 시료 내용

품종명	비 과 작	양분재 조성
소재지	경기도	순환식 수경재배 시설
분석목적	계측	양분재 조성 2023년 9월 29일
시험일	양분재 조성	양분재 조성 2023년 9월 27일

귀하께서 미래덴한에 의뢰한 시료에 대한 분석결과는 다음과 같습니다.

2. 분석 결과

분석 항목	분석 항목	분석 결과	단위	분석 결과	단위
pH	ND				
전기전도도(EC)	2.8	ms/cm			
질소이온(NO ₃)	11.9	mmol/L	167	ppm(NO ₃ -N)	
염소이온(Cl)	0.9	mmol/L	31	ppm	
칼슘(Ca)	0.4	mmol/L	13	ppm	
탄산이온(HCO ₃)	0.7	mmol/L	41	ppm	
인(P)	2.82	mmol/L	63	ppm	
암모늄이온(NH ₄)	<0.1	mmol/L	<1.4	ppm(NH ₄ -N)	
칼륨(K)	7.8	mmol/L	292	ppm	
나트륨(Na)	0.9	mmol/L	22	ppm	
망간(Mn)	2.2	mmol/L	87	ppm	
마그네슘(Mg)	0.6	mmol/L	14	ppm	
구리(Cu)	0.68	mmol/L	16	ppm	
아연(Zn)	10.2	mmol/L	0.66	ppm	
붕소(B)	4.7	mmol/L	0.26	ppm	
이온성 염소(S)	1.2	mmol/L	0.88	ppm	
총칼슘(Ca)	30.8	mmol/L	0.53	ppm	
총칼륨(K)	0.6	mmol/L	0.84	ppm	
총질소(N)	<0.1	mmol/L	<0.02	ppm	

(주)미래덴한
경기도 농업기술원 순환식 수경재배 시설 (농원) 125-01-166630 / 경기도 (주)미래덴한

(주)미래덴한
Mirae denHaan
경기도 농업기술원 순환식 수경재배 시설 (농원) 125-01-166630 / 경기도 (주)미래덴한

시험성적서

1. 시료 내용

품종명	비 과 작	양분재 조성
소재지	경기도	순환식 수경재배 시설
분석목적	계측	양분재 조성 2023년 9월 29일
시험일	양분재 조성	양분재 조성 2023년 9월 27일

귀하께서 미래덴한에 의뢰한 시료에 대한 분석결과는 다음과 같습니다.

2. 분석 결과

분석 항목	분석 항목	분석 결과	단위	분석 결과	단위
pH	ND				
전기전도도(EC)	1.8	ms/cm			
질소이온(NO ₃)	7.0	mmol/L	98	ppm(NO ₃ -N)	
염소이온(Cl)	0.8	mmol/L	30	ppm	
칼슘(Ca)	0.3	mmol/L	10	ppm	
탄산이온(HCO ₃)	0.9	mmol/L	48	ppm	
인(P)	1.89	mmol/L	89	ppm	
암모늄이온(NH ₄)	<0.1	mmol/L	<1.4	ppm(NH ₄ -N)	
칼륨(K)	4.7	mmol/L	184	ppm	
나트륨(Na)	0.9	mmol/L	21	ppm	
망간(Mn)	2.1	mmol/L	86	ppm	
마그네슘(Mg)	0.6	mmol/L	16	ppm	
구리(Cu)	0.67	mmol/L	16	ppm	
아연(Zn)	10.7	mmol/L	0.89	ppm	
붕소(B)	8.0	mmol/L	0.28	ppm	
이온성 염소(S)	1.1	mmol/L	0.97	ppm	
총칼슘(Ca)	32.0	mmol/L	0.38	ppm	
총칼륨(K)	0.6	mmol/L	0.84	ppm	
총질소(N)	<0.1	mmol/L	<0.02	ppm	

(주)미래덴한
경기도 농업기술원 순환식 수경재배 시설 (농원) 125-01-166630 / 경기도 (주)미래덴한

(주)미래덴한
Mirae denHaan
경기도 농업기술원 순환식 수경재배 시설 (농원) 125-01-166630 / 경기도 (주)미래덴한

시험성적서

1. 시료 내용

품종명	비 과 작	양분재 조성
소재지	경기도	순환식 수경재배 시설
분석목적	계측	양분재 조성 2023년 9월 29일
시험일	양분재 조성	양분재 조성 2023년 9월 27일

귀하께서 미래덴한에 의뢰한 시료에 대한 분석결과는 다음과 같습니다.

2. 분석 결과

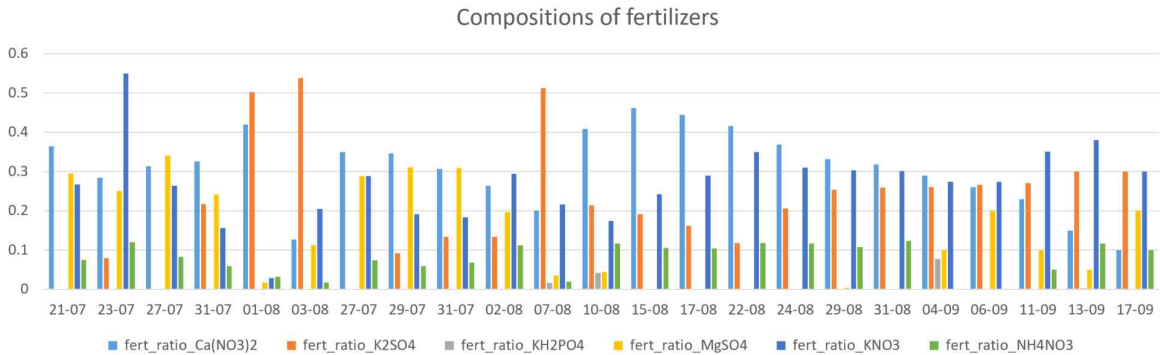
분석 항목	분석 항목	분석 결과	단위	분석 결과	단위
pH	ND				
전기전도도(EC)	1.9	ms/cm	107	ppm(NO ₃ -N)	
질소이온(NO ₃)	7.6	mmol/L	107	ppm	
염소이온(Cl)	0.9	mmol/L	30	ppm	
칼슘(Ca)	0.4	mmol/L	11	ppm	
탄산이온(HCO ₃)	0.9	mmol/L	48	ppm	
인(P)	1.78	mmol/L	84	ppm	
암모늄이온(NH ₄)	<0.1	mmol/L	<1.4	ppm(NH ₄ -N)	
칼륨(K)	6.8	mmol/L	254	ppm	
나트륨(Na)	0.9	mmol/L	22	ppm	
망간(Mn)	2.6	mmol/L	108	ppm	
마그네슘(Mg)	0.6	mmol/L	14	ppm	
구리(Cu)	0.87	mmol/L	16	ppm	
아연(Zn)	11.0	mmol/L	0.60	ppm	
붕소(B)	8.1	mmol/L	0.29	ppm	
이온성 염소(S)	1.2	mmol/L	0.88	ppm	
총칼슘(Ca)	33.3	mmol/L	0.26	ppm	
총칼륨(K)	0.6	mmol/L	0.84	ppm	
총질소(N)	<0.1	mmol/L	<0.02	ppm	

(주)미래덴한
경기도 농업기술원 순환식 수경재배 시설 (농원) 125-01-166630 / 경기도 (주)미래덴한

(5) 경기도 농업기술원 순환식 수경재배 플랫폼 적용 ISE 및 양분 흡수 패턴 기반 양분 관리 결과

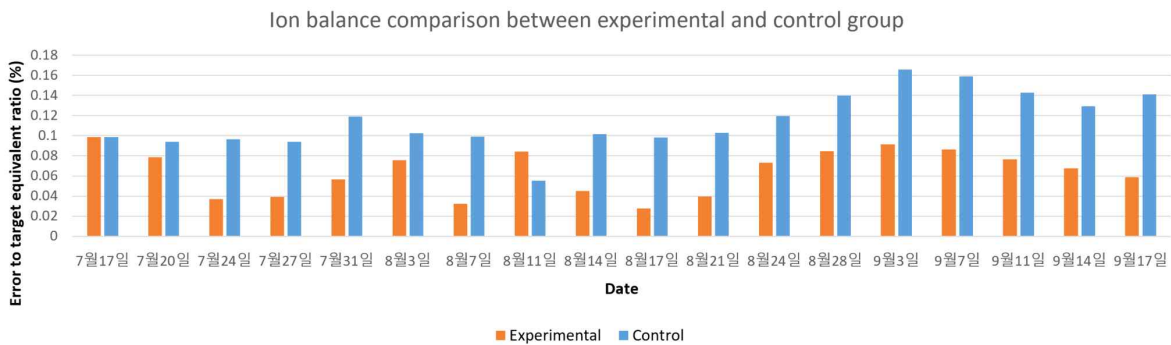
- 2023년 7/13 ~ 9/21까지 3번의 연속 작기 동안 고도화된 ISE 기반 이온 모니터링 장치를 통해 배액의 NO₃, K, Ca 농도를 측정하여 KIST 복합양분플랫폼에 무선 WIFI를 통해 전송
- 미측정 이온인 P, S, Mg의 경우 일주일 단위로 측정하여 복합양분플랫폼에 수동 업로드하는 하이브리드 형태의 시스템을 구성함. 미측정 이온이 존재하나 주요 이온에 대한 NO₃, K, Ca의 실시간 측정 및 비료 조성 알고리즘에 자동 반응이 가능하다는 점은 시료 분석에 걸리는 시간적인 오차를 줄임으로써 보다 정밀한 이온 균형 제어를 가능하게 함.
- 업로드된 배액 이온 농도는 KIST 복합양분플랫폼에 탑재된 수경 재배 모델과 양분 흡수 패턴 기반 이온 균형 유지를 위한 비료 결정 알고리즘의 입력으로 사용됨.
- 비료 조성은 3개 작기 동안 이온 균형 유지를 위해 지속적으로 변화함. Mg, S는 미측정 이온으

로 다른 이온과 달리 7일 간의 측정 딜레이가 존재하므로 이로 인해 Mg, S에 대한 비료 제어의 오버슈트가 일부 발생하였음. 이에 따라 MgSO₄의 처방은 다량과 소량을 주기적으로 반복하였음. K의 조절은 K₂SO₄와 KNO₃에 의해서 제어되었음.



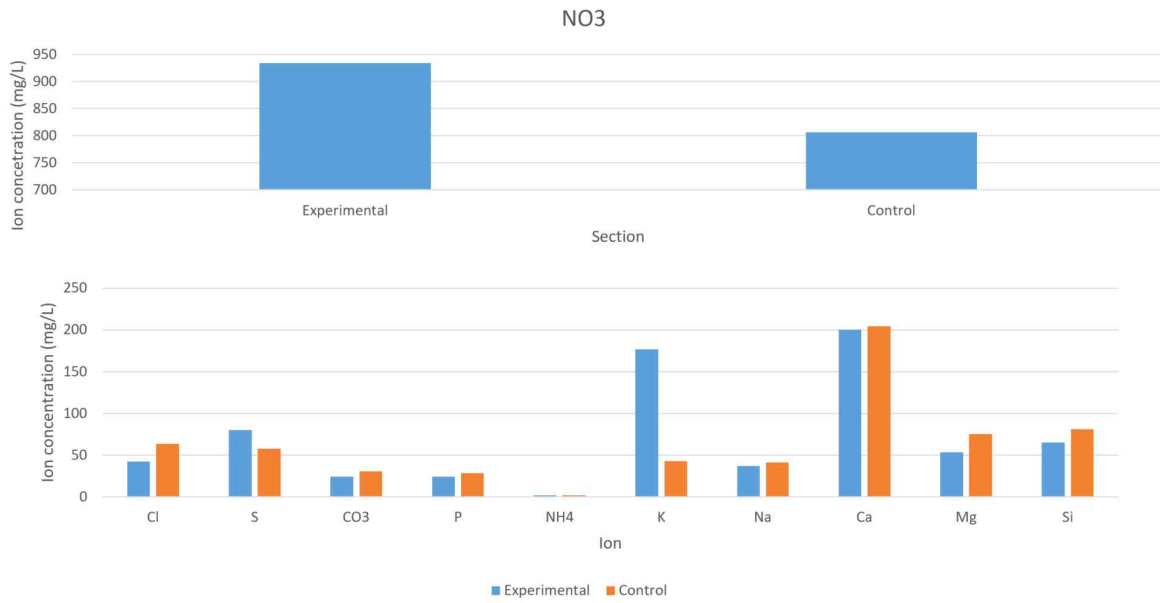
〈그림〉 개발된 시스템에서의 비료 조성 결정의 자동 변화 결과

- 알고리즘의 설계에 따라 이온 균형의 평가 지표는 이온 당량비를 기준으로 설정되었음. 사전에 정의된 목표 당량비에 근접하도록 배액 이온 농도를 유지시키는 것을 목표로 하였으며, 무배지 순환식 수경 재배의 수학적 모델에서 배액 이온 농도가 목표 당량비를 유지할 때, 혼합통의 이온 농도도 목표 당량비를 유지할 것으로 볼 수 있음.
- 목표 이온 당량비는 엽채류 수경재배에서 EC 기반 관행 재배시스템의 투입 양액으로 사용된 Hoagland 조성을 기준으로 하였음.
- 최종일 기준 본 연구에서 개발된 시스템을 적용한 실험구의 배액 이온 당량비는 목표 당량비 대비 RMSE 6% 수준이었으며 이때, 대조구인 관행 EC 기반 양액 제어 시스템의 경우 RMSE 14% 수준으로 절반 이상의 개선 효과를 나타냄.
- 개발 시스템의 이온 균형 유지 성능은 측정 시기에 따라 증감이 있었으나 대체로 재배 기간이 길어짐에 따라서 관행 시스템에 비해 그 효과가 증대되는 것으로 나타남.
- 3작기 이상의 재배에서 이온 균형 유지에 확연한 차이를 보임.



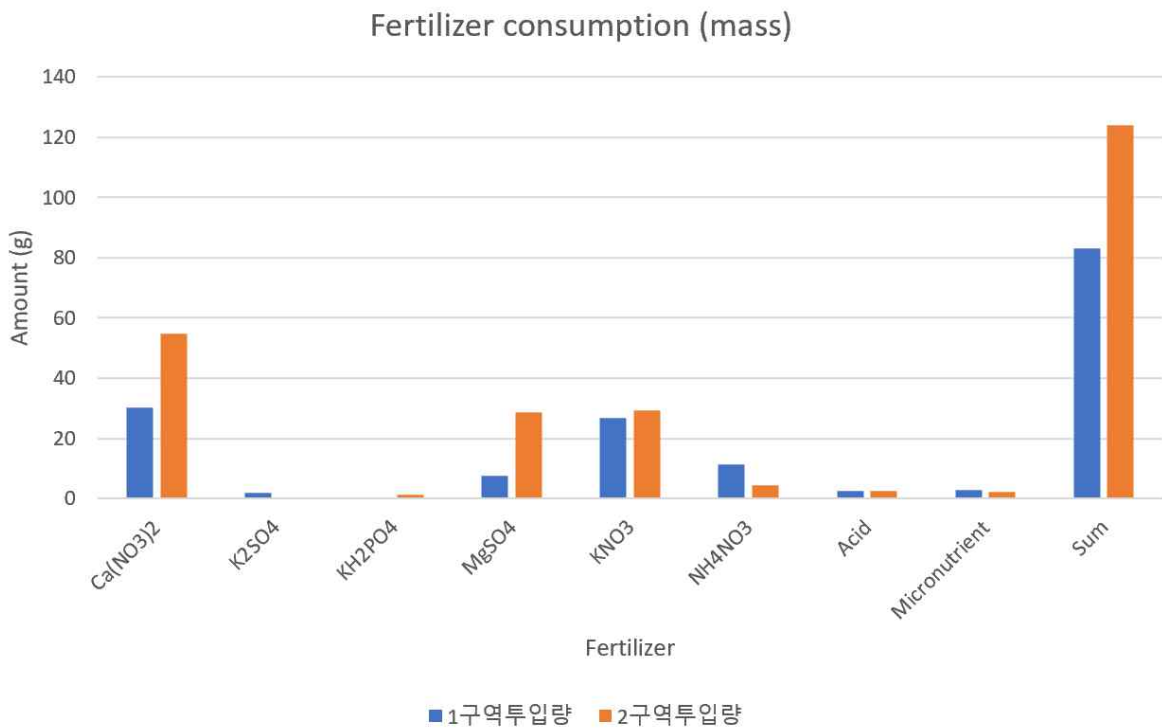
〈그림〉 개발된 시스템과 관행 EC 기반 양액 제어 시스템의 이온 균형 유지 성능 비교

- 관행 시스템의 경우 최종일 기준 배액 이온 농도에서 칼륨이 43 mg/L의 매우 낮은 수준으로 측정됨. S의 경우도 조사된 엽채류의 양분 흡수 대비 약간 낮은 수준을 보임.
- NO₃를 비롯한 나머지 이온들의 경우 대체로 처리구에서 대조구보다 다량 공급되었음.



〈그림〉 개발된 시스템과 관행 EC 기반 양액 제어 시스템의 3작기 후 배액 이온 농도 차이

- 동일 총 당량을 가정하여, EC 기반 관행 양액 제어 시스템과 개발된 양액 제어 시스템의 비료 사용량을 정량적으로 비교함. 비료의 투입 부피(L)에 대한 질량(g)으로 비교했을 때, 비료 소비량도 총량 기준 약 32% 절감되는 효과를 얻음.

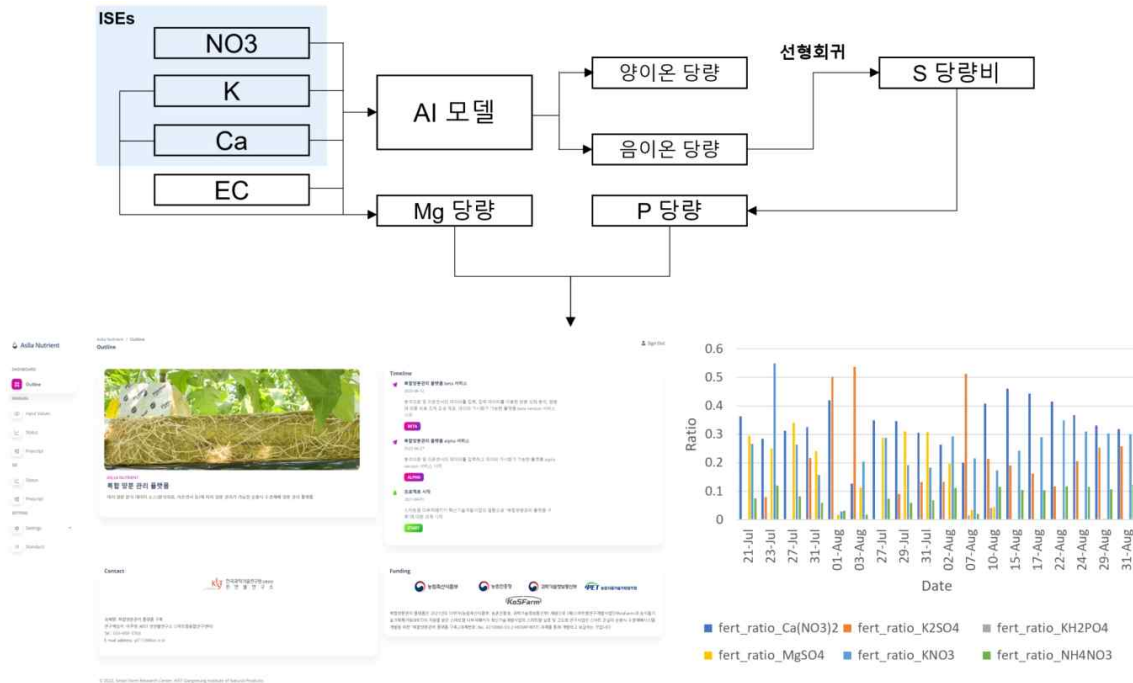


〈그림〉 개발된 시스템과 관행 EC 기반 양액 제어 시스템의 비료 소비량 비교

(6) 미측정 이온 추정을 위한 인공지능 모델 개발

○ 미측정 이온 추정을 위한 양이온, 음이온 총당량 추정 ANN 모델 개발

- 현재 개발된 ISE 이용 이온 모니터링 및 작물 양분 흡수 기반 양분 균형 관리 시스템은 Mg, S, P에 대해서는 주기적인 표준 화학 분석을 통한 이온 농도 조사 및 조사된 값을 복합양분플랫폼 상에 수동 업로드하는 작업이 필요한 하이브리드 형태임.
- 양이온과 음이온 총당량을 추정할 수 있다면 ISE로 측정가능한 NO₃, K, Ca, Na 이온의 당량비를 이용하여 미측정 이온의 당량비를 대략적으로 추정하는 것이 가능함.
- 양이온과 음이온의 총 이온 당량비는 배액 내 이온의 총량에 비례적인 지표인 EC를 통해 추정 가능함.
- 따라서 23년 7월 ~ 9월 재배 기간의 배액 EC 및 ISE 측정 데이터를 입력으로 하고 표준 분석 실험실에 의한 실제 이온 농도 데이터를 참값으로 하는 추정 모델 구현이 가능
- 인공지능망을 통해 양이온, 음이온 추정 모델을 구현 및 70%의 데이터로 학습 및 교차검증을 진행하고 30%의 데이터로 테스트를 진행함.
- R2 값은 0.8로 나타났으며 RMSE는 7.03 eq 로 나타남.
- 개발된 모델은 스마트팜 빅데이터 플랫폼에 업로드함,



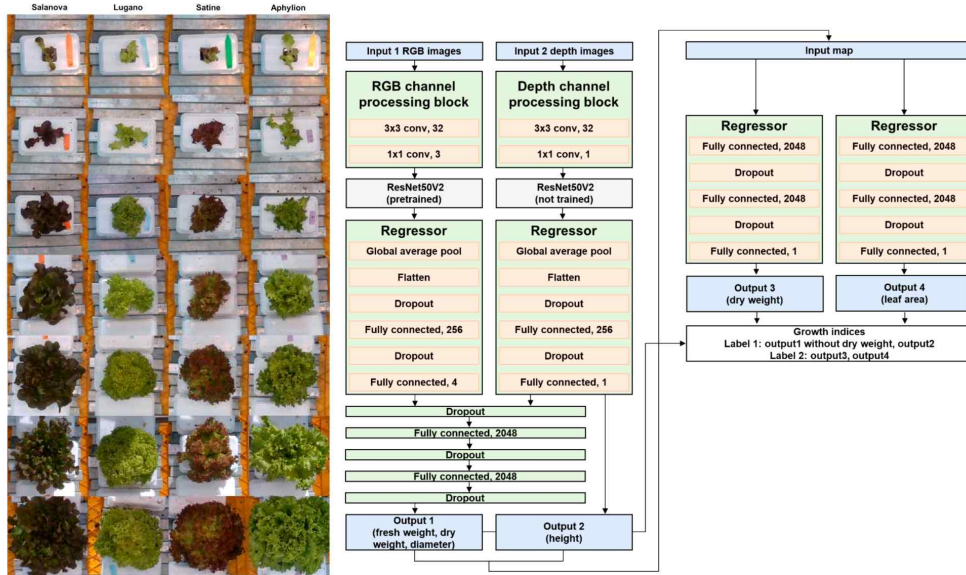
〈그림〉 양이온 및 음이온 당량 추정 인공지능 모델 개요

(7) 원수 보충량 결정을 위한 엽채류 성장 모니터링 인공지능 모델 개발

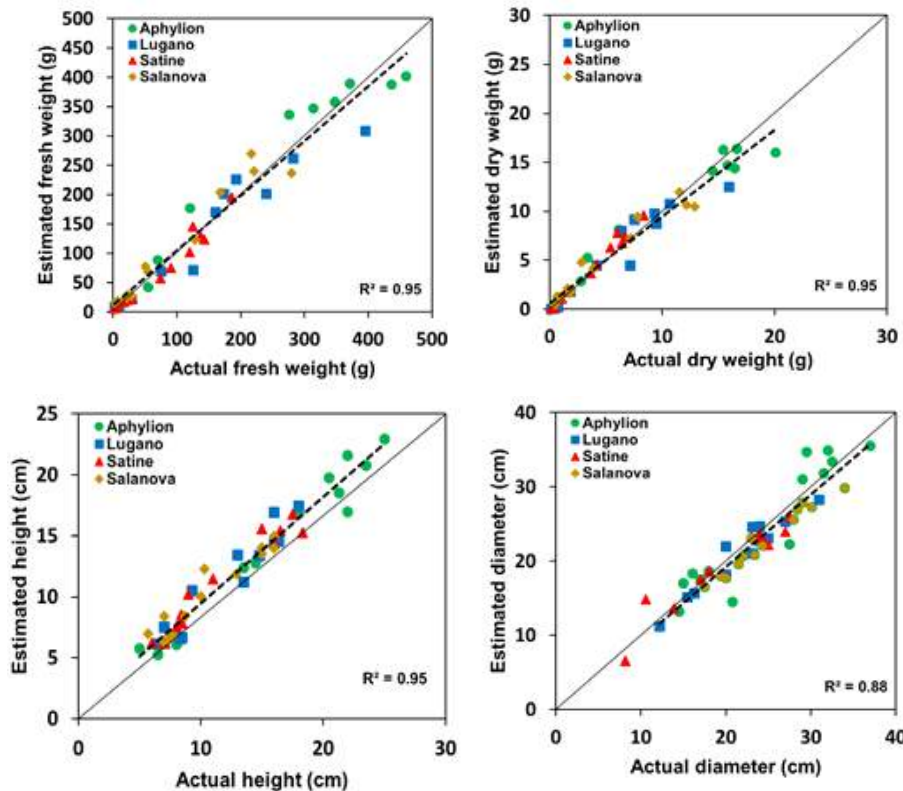
- 공급되는 양액 중에서 작물은 필요한 만큼의 양액 수량만을 흡수하므로 필요 수량을 파악할 수 있다면 불필요하게 급수되는 원수와 비료의 양을 줄일 수 있으며 수경재배 시스템 내의 양분 순환을 효과적으로 분석 가능함.
- 작물이 필요로 하는 수량은 증산량과 관계가 있으며 작물의 증산은 일사, 대기 환경 요소 뿐만 아니라 엽면적과 같은 생육 지표와 밀접한 관계가 있음. 생체중, 건물중, 높이, 직경과 같은 작물 성장 지표는 이온 균형에 의한 작물의 생육을 분석하는데도 효과적으로 사용될 수 있음. 그러나 기존의 생육 지표 측정 방법은 파괴적이고 사람의 노동력과 시간을 소모함.
- 작물의 생육 지표를 비파괴적이고 상대적으로 신속 정확하게 측정하기 위해 이미지 기반 성장

모니터링 인공지능 모델을 개발함

- Wageningen University에서 제작한 4품종의 공개 상추 데이터셋 RGB-D 이미지 데이터를 통해 생체중, 건물중, 높이, 직경, 엽면적을 추정할 수 있는 two-stage CNN 모델을 개발.
- RGB-D 데이터셋은 RealSense D415 스테레오 카메라를 통해 top-view로 90cm 위에서 촬영된 이미지 데이터로 구성.
- 성장 지표에 대해 직경 제외 0.95 이상의 결정계수 값을 얻었으며 직경의 경우 평면 사영 정보의 가로 길이로 측정되었으므로 RGB 모델의 성능이 더욱 높게 나타남. 생육 후기에 대한 RGB-D CNN 모델의 성능 향상을 정량적으로 보였음. 또한 임베디드 보드에서 개발한 모델의 실시간 응용 적용 가능성을 확인하였음.



〈그림〉 상추 공개 데이터셋 (좌) 및 성장 예측을 위한 two-stage CNN 모델 구조 (우)



〈그림〉 인공지능을 이용한 결과예측 결과

6) UV 살균 시스템 운용관리체계 구축

시스템의 여과모듈의 적정 역세척 시간 산정 및 운영 소프트웨어 반영

□ UV 살균시스템의 여과모듈의 적정 역세척 시간 산정

○ 사여과방식

- 일반적인 UV 살균시스템의 공정은 일반적으로 모래여과와 UV살균시스템 조합이 일반적임. 모래여과 방식은 가장 경제적이고, 후단의 UV 살균시스템의 성능을 오랫동안 지속적으로 유지하면서 살균효율 향상 시킬수 있는 기능을 가지고 있음.
- UV 살균시스템에 적용될 수 있는 여과모듈에는 사여과 모듈과 멤브레인 타입의 여과모듈로 나눌수 있음. 사여과모듈의 여재의 경우, 일반적으로 메쉬타입 100-120의 주문진사를 사용하여 실험을 수행하였음. 여과율 90% 이상을 위한 적정 사여과 메질(#100 주문진사) 기준으로 하였고, 사용된 압력은 약 3-5bar로 산정하여 진행함 제시된 압력은 신한에이텍이 과거 연구했던 R&D에서 나온 결과와 현재 다양한 농가에서 설치되어 있는 적정여과기에 공급되는 압력에 대한 정보를 바탕으로 함 (3-5 Bar).
- 역세척 산정기준은 다양한 종류의 배지(암면,코코피트) 발생 배액의 원수 탁질(TSS 분석) 결과를 바탕으로 여과실험을 수행하였으며 이를 통해 여과기에 걸리는 압력을 측정을 통해 폐색을 측정하고, 이를 통해 역세척 압력 (3-5 Bar)을 공급하여 회수되는 량을 측정하여 적정 역세척 시간을 산정함.
- 일반적으로 코코피트 배지에서 발생하는 배액의 경우 평균 70-200mg/L (코코피트 초기와 여름철의 경우 TSS 농도는 700mg/L- 2,000mg/L 정도)이고, 고농도인 TSS 1,000mg/L의 배액을 실험을 수행하였음
- 적정 역세척 산정은 에너지적 관점과 운영의 효율을 기준으로 하여 진행하였으며, 실제 회수율 산정(코코피트배액 대상)을 하면 일반적으로 5분정도 회수율의 증가율이 가파르게 증가하는 반면에 6분부터 8분까지 미세하게 증가하고 있기 때문에 사용 후 9-10분 정도는 역세척시간을 갖는 것이 적합한 것으로 보여짐. 따라서 에너지 효율적 측면에서는 5 Bar 압력에 8-10분(코코피트배액 대상) 정도가 가장 적합한 것으로 보여짐.
- 여과기에 대한 압력계가 설치되었을 경우에는 여과기 폐색에 의한 압력발생을 즉각적으로 해석할 수 있으나, 반대로 압력계가 설치되어 있지 않을 경우는 본 연구과제를 통해 산정한 코코피트 배액 대상 1ha 규모의 하루 60톤 여과 사용후 8-10분 정도 역세척 공정을 거치면 안정적으로 사용할 수 있을 것으로 판단됨.

〈표〉 운영소프트웨어 반영 리스트

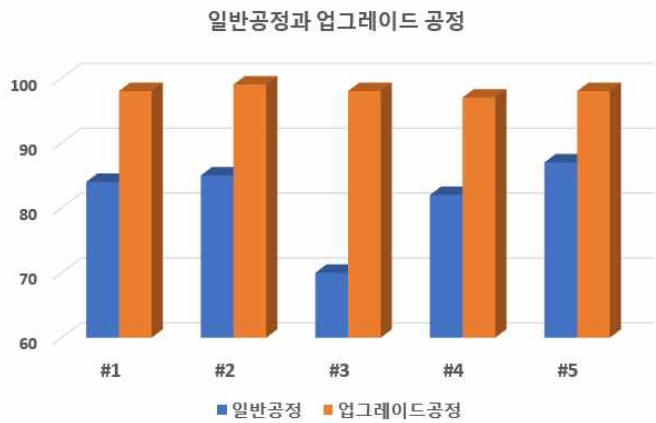
설계항목	운영소프트웨어 반영항목
처리배액량	1 ton/시간
적용가능 배지	암면배지, 코코피트 배지, 기타 농업용 배수
여과방식	모래여과
역세척 방식	모래여과 압력 계측을 통한 역세척 (시간당 1톤 처리시 역세척 시간 5분)
운영소프트웨어	PLC (신한에이텍 방식), Windows 방식 (KIST 방식)

○ 업그레이드 공정: 사여과+정밀여과 조합

- 사여과 및 정밀여과 공정의 경우는 일반적으로 여름철 양액에 의해 발생하는 조류제거를 목적으로 운영할 수 있는 공정임. 사여과만을 활용한 여름철 여과기는 배액 자체의 녹조발생과 다양한 미생물로 인해 사여과기에 미생물과 조류에 의한 EPSs 층으로 인해 여과기가 막히는 현상이 발생함. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 다음과 같은 공정이 추가가 필요함.

〈표〉 일반공정과 업그레이드 공정의 차별성

여과 및 전처리 방식	공정방식
배액 원수 수질	여름철 배액 원수 TSS 농도 700mg/L -2,000 mg/L
일반 공정	배액→사여과→UV 살균시스템→배액처리조
업그레이드 공정	배액→오토스크린→사여과→정밀여과→UV 살균시스템→배액처리조



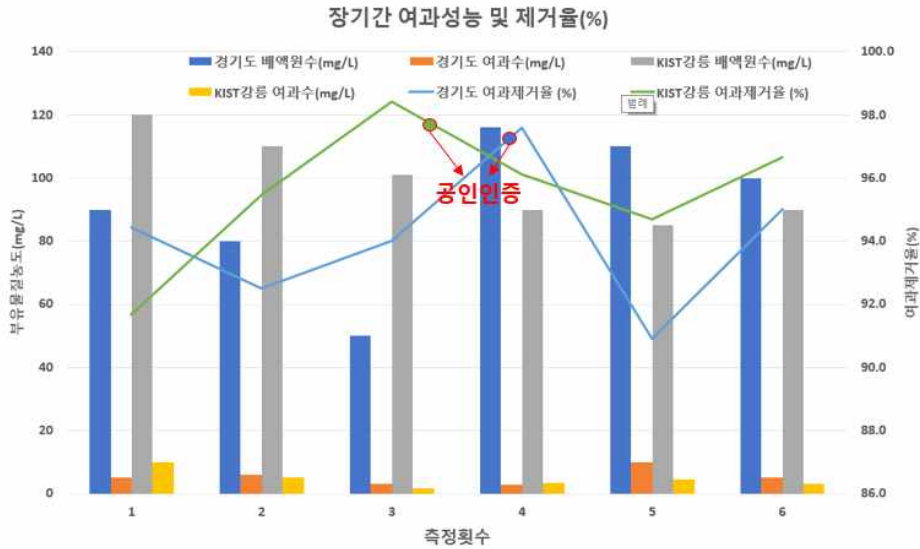
〈그림〉 업그레이드 공정의 실험 현장 및 일반공정과 업그레이드 공정의 TSS 제거율 비교

- (일반공정과 업그레이드 공정) 여름철 녹조발생직후의 배액의 TSS 농도는 700mg/L에서 2,000mg/L 이상이며, 이때의 TSS 제거율은 일반공정에서 81.6%와 업그레이드 공정에서 98% 이상의 제거능을 가지고 있음 (서울대 NICEM 시험성적서를 기반으로 계산).



<p>시험성적서(2021)</p> <p>배액원수 (TSS mg/L)</p>	<p>국제 공인성적서 (KOLAS 인증, 서울대 NICEM)</p> <p>시험성적서 발급번호 : 2021-SA-0448</p> <p>1. 신청인 ① 기관명 한국과학기술연구원 ② 대표/신청인 윤석영/이사장 ③ 주소 강원도 양구시 서당동로 879, 소재요청담당자유연희 ④ 전화 010-3284-7717 ⑤ 팩스 -</p> <p>2. 시험내용 ① 검사 번호 2021-A-0448 ② 검사 날짜 2021-08-14 ③ 시료 종류 시험자료(수질 3항) ④ 시험 기간 2021-08-14 ~ 2021-08-14 ⑤ 성적서용도 학교용</p> <p>시험결과 (붙임참조)</p> <p>이 성적서는 의견서나 재검토 시요청 제한 결과이며, 중요 이의의 사용을 위하여 정정, 고충 및 기타 합적 요청으로 사용될 수 없습니다.</p> <p>검표자: 정임영주최 (인) 승인자: 권희정 (인)</p> <p>농생명과학공동기기원 공인시험의뢰규정에 의하여 공인 시험한 결과를 위하여 붙여드립니다. 2021년 08월 20일</p> <p>서울대학교 농림생명과학대학 농생명과학공동기기원 National Instrumentation Center for Environmental Management</p> <p>(사) 121-001 서울특별시 양주시 용인로 1 Tel: 021 890-4897-8 Fax: 890-4897 http://nicem.snu.ac.kr/</p>	<p>시험결과 발급번호 : 2021-SA-0448</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>시료명</th> <th>시험항목</th> <th>결과</th> <th>단위</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>양구시(오회) 지역</td> <td>총유형질(TSS)</td> <td>1088</td> <td>mg/L</td> </tr> <tr> <td></td> <td>- 시험 지역 -</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>농생명과학공동기기원 서울대학교 농림생명과학대학 농생명과학공동기기원 National Instrumentation Center for Environmental Management</p> <p>(사) 121-001 서울특별시 양주시 용인로 1 Tel: 021 890-4897-8 Fax: 890-4897 http://nicem.snu.ac.kr/</p>	시료명	시험항목	결과	단위	양구시(오회) 지역	총유형질(TSS)	1088	mg/L		- 시험 지역 -		
시료명	시험항목	결과	단위											
양구시(오회) 지역	총유형질(TSS)	1088	mg/L											
	- 시험 지역 -													
<p>일반공정</p>	<p>시험성적서 발급번호 : 2021-SA-0444</p> <p>1. 신청인 ① 기관명 한국과학기술연구원 ② 대표/신청인 윤석영/이사장 ③ 주소 강원도 양구시 서당동로 879, 소재요청담당자유연희 ④ 전화 010-3284-7717 ⑤ 팩스 -</p> <p>2. 시험내용 ① 검사 번호 2021-A-0448 ② 검사 날짜 2021-08-14 ③ 시료 종류 시험자료(수질 3항) ④ 시험 기간 2021-08-14 ~ 2021-08-14 ⑤ 성적서용도 학교용</p> <p>시험결과 (붙임참조)</p> <p>이 성적서는 의견서나 재검토 시요청 제한 결과이며, 중요 이의의 사용을 위하여 정정, 고충 및 기타 합적 요청으로 사용될 수 없습니다.</p> <p>검표자: 정임영주최 (인) 승인자: 권희정 (인)</p> <p>농생명과학공동기기원 공인시험의뢰규정에 의하여 공인 시험한 결과를 위하여 붙여드립니다. 2021년 08월 20일</p> <p>서울대학교 농림생명과학대학 농생명과학공동기기원 National Instrumentation Center for Environmental Management</p> <p>(사) 121-001 서울특별시 양주시 용인로 1 Tel: 021 890-4897-8 Fax: 890-4897 http://nicem.snu.ac.kr/</p>	<p>시험결과 발급번호 : 2021-SA-0444</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>시료명</th> <th>시험항목</th> <th>결과</th> <th>단위</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>양구시(오회) 지역 후 81</td> <td>총유형질(TSS)</td> <td>47</td> <td>mg/L</td> </tr> <tr> <td></td> <td>- 시험 지역 -</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>농생명과학공동기기원 서울대학교 농림생명과학대학 농생명과학공동기기원 National Instrumentation Center for Environmental Management</p> <p>(사) 121-001 서울특별시 양주시 용인로 1 Tel: 021 890-4897-8 Fax: 890-4897 http://nicem.snu.ac.kr/</p>	시료명	시험항목	결과	단위	양구시(오회) 지역 후 81	총유형질(TSS)	47	mg/L		- 시험 지역 -		
시료명	시험항목	결과	단위											
양구시(오회) 지역 후 81	총유형질(TSS)	47	mg/L											
	- 시험 지역 -													
<p>업그레이드공정</p>	<p>시험성적서 발급번호 : 2021-SA-0449</p> <p>1. 신청인 ① 기관명 한국과학기술연구원 ② 대표/신청인 윤석영/이사장 ③ 주소 강원도 양구시 서당동로 879, 소재요청담당자유연희 ④ 전화 010-3284-7717 ⑤ 팩스 -</p> <p>2. 시험내용 ① 검사 번호 2021-A-0448 ② 검사 날짜 2021-08-14 ③ 시료 종류 시험자료(수질 3항) ④ 시험 기간 2021-08-14 ~ 2021-08-14 ⑤ 성적서용도 학교용</p> <p>시험결과 (붙임참조)</p> <p>이 성적서는 의견서나 재검토 시요청 제한 결과이며, 중요 이의의 사용을 위하여 정정, 고충 및 기타 합적 요청으로 사용될 수 없습니다.</p> <p>검표자: 정임영주최 (인) 승인자: 권희정 (인)</p> <p>농생명과학공동기기원 공인시험의뢰규정에 의하여 공인 시험한 결과를 위하여 붙여드립니다. 2021년 08월 20일</p> <p>서울대학교 농림생명과학대학 농생명과학공동기기원 National Instrumentation Center for Environmental Management</p> <p>(사) 121-001 서울특별시 양주시 용인로 1 Tel: 021 890-4897-8 Fax: 890-4897 http://nicem.snu.ac.kr/</p>	<p>시험결과 발급번호 : 2021-SA-0449</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>시료명</th> <th>시험항목</th> <th>결과</th> <th>단위</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>양구시(오회) 지역 후 82</td> <td>총유형질(TSS)</td> <td>8</td> <td>mg/L</td> </tr> <tr> <td></td> <td>- 시험 지역 -</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>농생명과학공동기기원 서울대학교 농림생명과학대학 농생명과학공동기기원 National Instrumentation Center for Environmental Management</p> <p>(사) 121-001 서울특별시 양주시 용인로 1 Tel: 021 890-4897-8 Fax: 890-4897 http://nicem.snu.ac.kr/</p>	시료명	시험항목	결과	단위	양구시(오회) 지역 후 82	총유형질(TSS)	8	mg/L		- 시험 지역 -		
시료명	시험항목	결과	단위											
양구시(오회) 지역 후 82	총유형질(TSS)	8	mg/L											
	- 시험 지역 -													

○ 장기여과성능

- 장기여과 성능을 위한 공정을 검증하기 위한 실험을 수행한 결과는 다음과 같음. 여과기 성능 검증을 위해 KIST 강릉분원과 경기도농업기술원에 설치된 주문진사(#100) 사용 여과재를 사용한 것을 대상으로 수행하였음.
- 2022년 1월부터 9월까지 약 6회에 걸쳐서 수행하였으며, KIST 강릉분원 실증팜은 코코피트배지, 경기도농업기술원은 순수수경에서 발생하는 배액을 대상으로 수행하였으며 평균적으로 코코피트배지 평균 93%, 순수수경 평균 95% 여과성능을 보여주는 것으로 나타남. 이는 순환식 수경재배 시스템에서 여과기능 및 적절한 역세척 기능으로 장기간에 걸쳐서 안정적으로 여과 성능을 유지하는 것으로 보여짐.



〈그림〉 장기 여과성능 및 제거율. (2022.01. ~ 2022.09. 배액원수 대상 사여과 결과)

시험성적서(2022)	공인인증성적서 (한국화학융합시험연구원)	
테스트배드	경기도농업기술원	KIST 강릉분원
백액원수 (mg/L)		
여과수 (mg/L)		

(2) UV 살균 시스템의 장기 사용 조건에서의 유지관리요인 조사 및 관리 알고리즘 개발

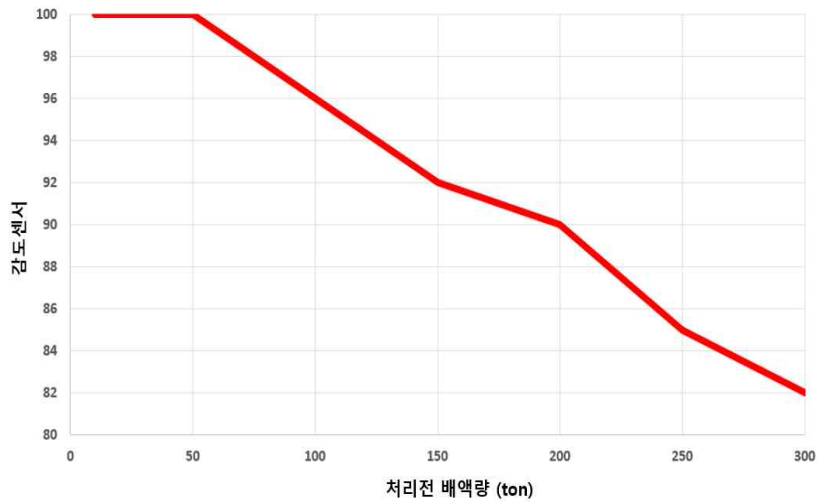
○ 살균 제어시스템 개발

- KIST와 신한에이텍(주) 공동연구를 통해 도출한 살균제어 시스템 제원은 다음과 같음

〈표〉 KIST-신한에이텍 공동연구원 전처리 모듈 실험을 위한 처리장치의 상세 특징

처리배액량	1-4 ton/m ³
적용가능 배지	암면배지, 코코피트 배지
살균 방식	UV-Lamp 수류 type Chamber (320W)
살균 효율	일반세균 90-95%, 곰팡이류 90-95%, 박테리아 95-99% (UV-Lamp)
여과방식	모래여과
역세척 방식	모래여과 압력 계측을 통한 역세척 (시간당 5톤 처리시 역세척 시간 15분)
살균기 세정	산세정 (50톤 처리시 pH 1.0의 질산 사용을 통한 15분-20분 산세정)
운영소프트웨어	Windows 방식 (KIST)와 PLC (신한에이텍)

용이 적합한 것으로 보여짐.



〈그림〉 처리유량과 석영감도센서값 변화

- UV-Lamp 챔버 내 온도상승은 일반적으로 실험기간내에는 이상온도상승의 영향을 없었으며 기본 상승 온도는 챔버내에서 약 80℃ 정도로 유지되는 것으로 나타남.
- UV-Lamp 챔버 내 수리학적 난류 발생은 처리효율을 증가시키는 요인이기 때문에 이를 통한 살균기 내부의 배액 와류현상을 적용함.
- 수류 type UV 램프 (320W) 살균효율을 보면 다음과 같음. 2021년 5월의 KIST 토마토 배액(암면 배지)과 강릉 사천 Q 파프리카(코코피트배지) 대상으로 살균효율을 분석한 결과(서울대 NICEM 시험성적서 결과 기반)는 다음과 같음.

〈표〉 배지별 살균 효율

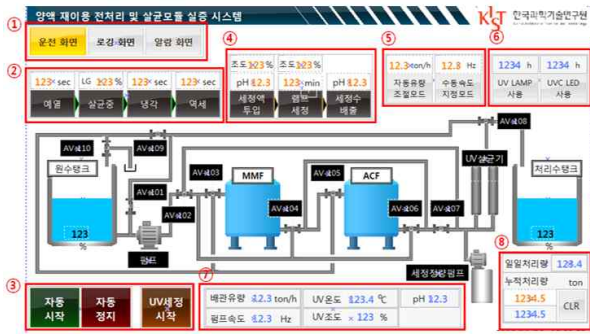
배지타입	원수 일반세균	원수 총대장균	처리 후 일반세균	처리 후 총대장균
코코피트 배지	250,000	78,000	20,000	4,680
암면 배지	160,000	59,000	750	30

※ 암면 배지 배액: KIST 강릉분원 Smart T Farm 토마토 배액(2021년도)

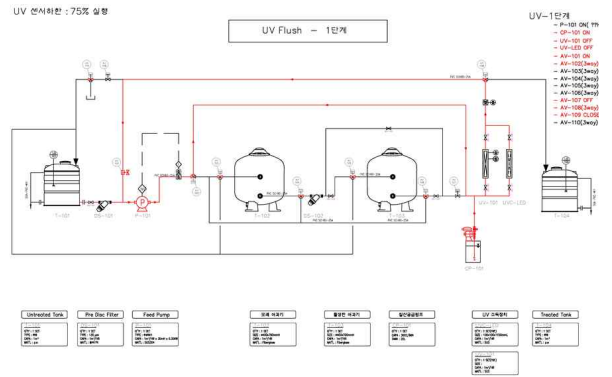
※ 코코피트 배지 배액: 강릉 연곡면 Q 농가 파프리카 배액(2021년도)

※ UV살균램프: 수류 type 320W UV 램프사용(시간당 1톤), 일반세균 (CFU/mL), 총대장균 (CFU/100mL)

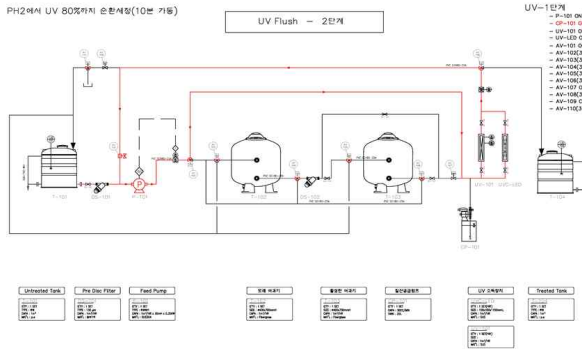
- 수류 type UV 램프 (320W) 적용을 통한 암면배지에서 살균율을 결과를 보면 배액의 정상적 특성에 의해 살균효율이 일반세균과 총대장균 모두에서 99% 제거율을 보여주고 있음.
- 수류 type UV 램프 (320W) 적용을 통한 코코피트 배지에서 살균율을 결과를 보면 일반세균은 92% 제거율과 총대장균은 94% 제거율을 보여주고 있음. 이러한 이유는 챔버 자체의 특허적 요인인 수류 type 모듈 내에서 배액이 Thin layer flow를 형성해서 UV 램프 살균을 용이하게 하기 때문에 발생하는 것임.



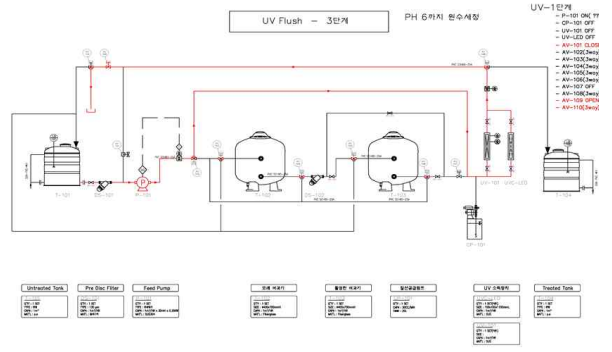
양액살균장치 시제품 구성도 및 인터페이스



UV 램프세정 75% Deadline 선정



UV램프 산세정



산세정에 배출

<그림> 산세정 절차

(3) 수류형 UV 살균 시스템의 장기 사용 조건에서의 유지관리 기술 최적화 및 체계화

□ 장기사용 성능 테스트

- 장기사용 성능 테스트를 위해서는 2곳의 사이트를 대상으로 수행하였으며, KIST 강릉분원 코코피트 배지, 경기도농업기술원 업체류의 순수수경방식에서 배출되는 배액을 대상으로 수행하였음.

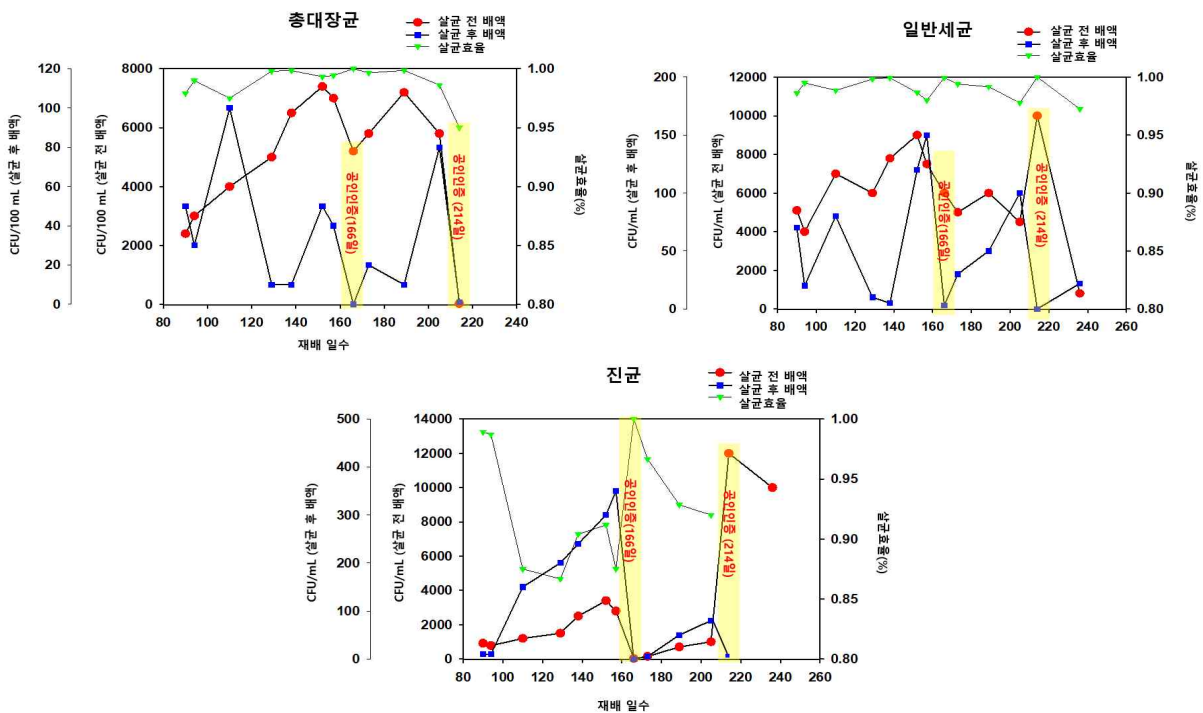


KIST 강릉분원(파프리카 | 코코피트 | 600평)

경기도농업기술원(업체류 | 순수수경 | 600평)

〈그림〉 장기사용 조건분석을 위해 활용한 현장

○ 토마토 재배에서 살균시스템 장기사용 성능 결과



〈그림〉 코코피트 배액원수 및 처리수에 관한 장기간 코코피트 배액 살균 처리성능 (UV살균기 (320W×2), 처리용량 시간당 1톤)

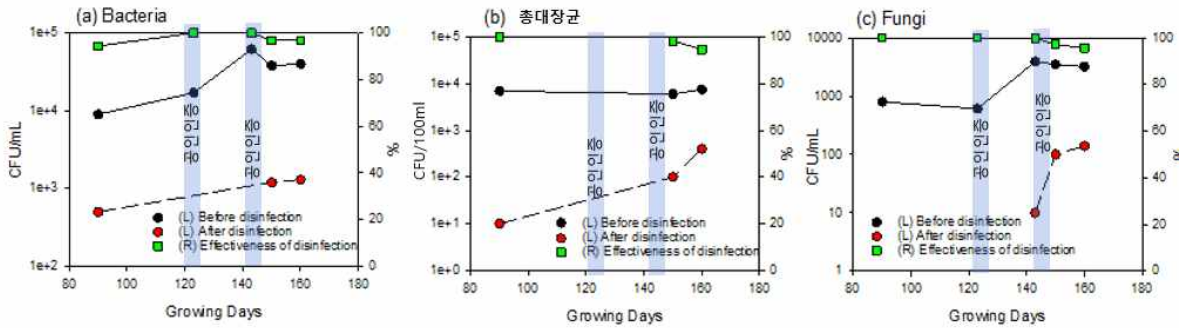
- 코코피트 배지 대상 UV 살균성능은 전반적으로 95% 이상 살균성능을 나타나는 것으로 보여지나, 암면배지와 달리 살균율에 다소 일정하지 않는 것으로 보여지고 있음. 암면배지는 배액 발생과 동시에 살균율이 95%이상 나타나는 것으로 보여지지만, 코코피트 배지의 경우는 90일 이

전 살균성능에 관한 본 보고서에는 보여주지 않았지만 살균성능이 70-80% 정도의 성능을 보여주고 있고, 일부 데이터가 살균효율이 못미치는 경우가 있는 것으로 보이는데 이러한 이유는 코코피트 배지내의 UV 살균 조사량을 방해하는 색도 및 기타 물질 등으로 인해 살균능이 떨어지는 것으로 나타나고 있음. 이를 위해서는 코코피트 배지에서는 90일 이후에는 안정적으로 살균되는 것으로 보여주고 있음.

〈표〉 장기배지사용에 따른 UV살균효율 비교

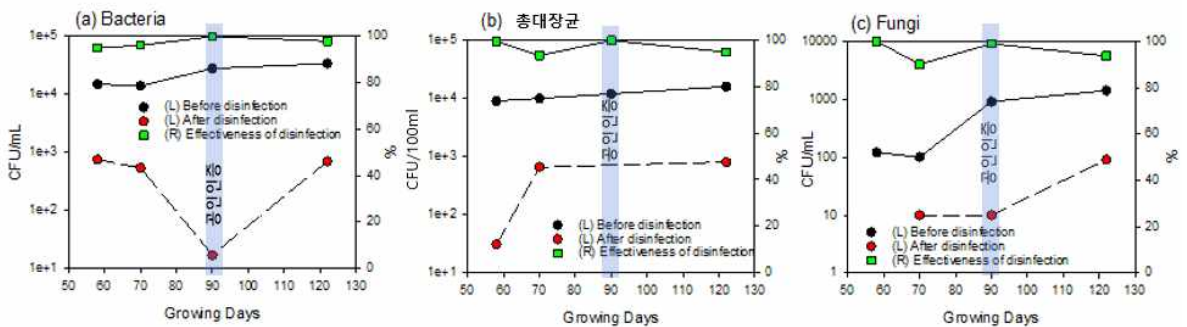
	암면배지	코코피트배지
살균에 따른 배액특성	<ul style="list-style-type: none"> • 살균효율 안정적임 • 배액발생 동시에 UV 살균가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 살균효율이 일부 불안정함 • 배액발생 90일 이후 UV 살균이 다소 안정적임(일부구간에 살균력이 떨어지는 경우 있음)

- 장기 살균 성능 테스트 결과(2023.03.09. ~ 2023.05.18.): 한국화학시험연구원의 시험성적서와 서울대 NICEM 시험성적서를 기반



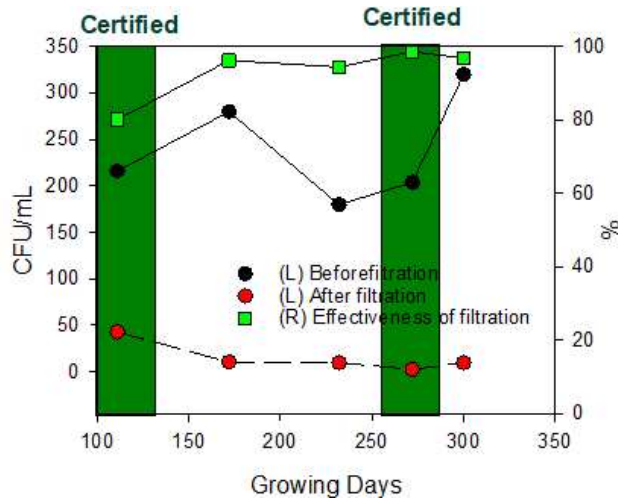
〈그림〉 장기 살균 성능 테스트 결과(2023.03.09. ~ 2023.05.18.)

- 장기 살균 성능 테스트 결과(2023.07.02. ~ 2023.10.25.): 한국화학시험연구원의 시험성적서와 서울대 NICEM 시험성적서를 기반



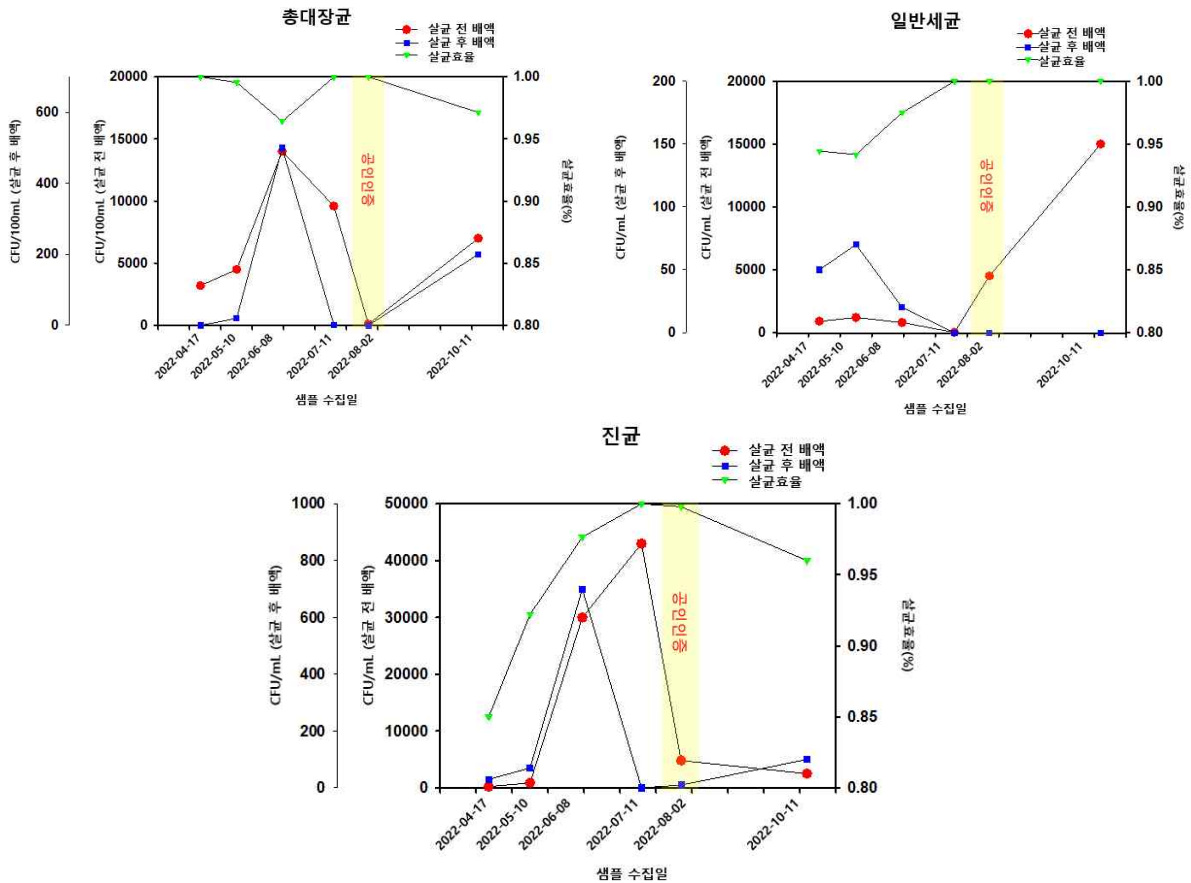
〈그림〉 장기 살균 성능 테스트 결과(2023.07.02. ~ 2023.10.25.)

- 장기 여과 성능 테스트 결과: 한국화학융합시험연구원의 시험성적서 기반 결과



〈그림〉 장기 여과 성능 테스트 결과

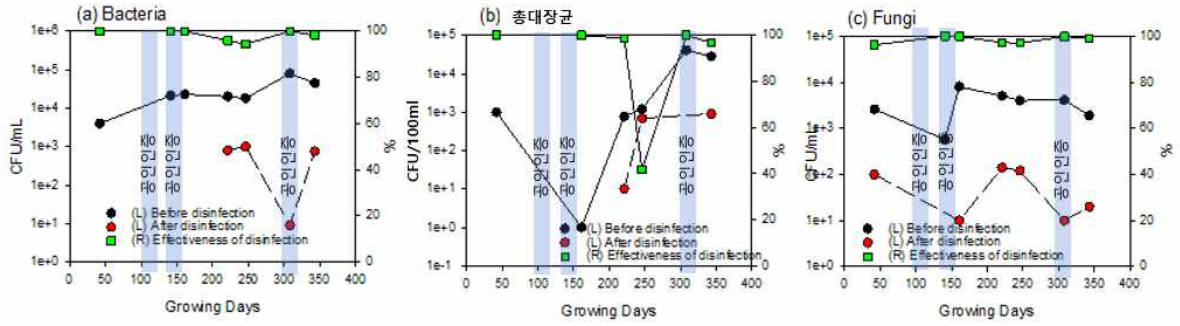
○ 엽채류 재배에서 살균시스템 장기사용 성능 결과



〈그림〉 순수수경 배액원수 및 처리수에 관한 배액 살균 처리성능 (UV살균기 (320W×2), 처리용량 시간당 1톤)

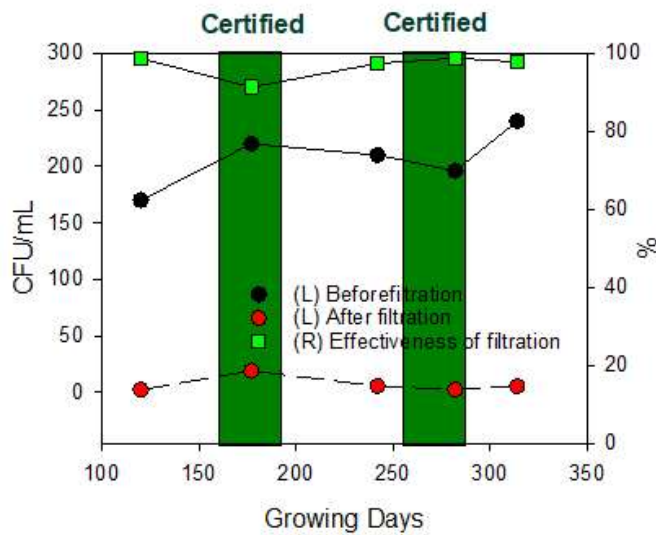
- 엽채류는 과채류에 비해 정식 이후 수확까지 기간이 40일에 불과하기 때문에 여러번의 정식과 수확을 반복하면서 수행하였으며 이에 대한 샘플을 채취 및 분석하였음
- 순수수경 상태에서 엽채류 대상 배액에 대한 UV 살균성능은 각 샘플 채취 수 동안에 95% 이상 살균 성능을 나타내는 것으로 보여지 있음.
- 장기 살균 성능 테스트 결과(2023.01.02. ~ 2023.10.30.): 한국화학시험연구원의 시험성적서와

서울대 NICEM 시험성적서를 기반



〈그림〉 장기 살균 성능 테스트 결과(2023.03.09. ~ 2023.05.18.)

- 장기 여과 성능 테스트 결과: 한국화학융합시험연구원의 시험성적서 기반 결과



〈그림〉 장기 여과 성능 테스트 결과

□ 장기성능 유지관리 최적화 및 체계화

○ 와류형 UV 살균 시스템의 장기 사용 조건에서의 유지관리 기술 최적화 및 체계화를 위해서는 장기간에 걸친 실험을 운영한 결과를 바탕으로 도출한 결과는 다음과 같음.

- 장기사용 테스트를 위해서 다음 2곳의 테스트베드 운영을 통한 결과를 통해 도출함
- 장기사용시에 발생하는 주된 성능저하 요인은 ①여과기 막힘현상으로 인한 압력상승, ②UV 살균기 석영관 주위의 침착에 의한 투과성능 저하 발생, ③ 집수조 및 배관 자체의 오염 등으로 크게 나눌 수 있음.



□ 기존 살균시스템과 본 사업의 성과 성능결과

○ 다부처 사업에서 적용되고 있는 와류형 직렬살균기와 타사업과제에서 채택하고 있는 챔버형 병렬 살균기의 차이점은 다음과 같음

- 와류형 직렬살균기는 투과성이 낮은 양액의 특성을 반영하여 제거를 극대화할 수 있는 장점을 가지고 있으나, 병렬형 살균방식은 이러한 배액의 조건을 충분히 대응하지 못하는 것으로 보여짐.

- 마산 신한에이텍(주) 실증팜에서 발생하는 코코피트 배지 대상으로 실험을 수행하였으며, 배액원수에 포함되는 원수의 성상은 총대장균 31,000 CFU/100mL, 일반세균 22,000 CFU/mL 이며, 와류형은 평균 95% 이상제거율을 나타내고 있으며, 반대로 기존 챔버형 방식은 85% 내외로 성능이 나타나는 것으로 보여짐.

〈표〉 장기사용 기술 최적화 및 체계화

시스템	장기 사용시 고려사항
	<ul style="list-style-type: none"> • (배액조/처리조) 암면배지 2회/년 청소, 코코피트배지 4회/년 청소 • (배액조/처리조) 조 하단 부산물 및 축적물 제거 필수 • (배액조/처리조) 조 측면 바이오필름 제거 필수
	<ul style="list-style-type: none"> • (사여과기) 사용배지와 계절별로 운영관리가 달라지지만 전반적인 배액 성상에 준용하여 일반적으로 사용되는 압력은 약 3-5 Bar 사이가 적합함 • (사여과기) 여과층 폐색발생이 자주 있기 때문에 매회 사용 여과 후 마지막 단계에서 5분 역세척 공정을 두어서 원활한 공정을 유지할 수 있게 반영함
	<ul style="list-style-type: none"> • (살균기) 양액조제방법/배지조건/계절에 따른 살균성능이 달라질 수 있음 • (살균기) 양액내의 Fe와 Mn 외에 기타 무기이온 등으로 인해 석영관 집적현상이 빈번히 일어나고 이로 인한 살균효율이 저하됨. 이로 인한 산세정을 통해 세정필수 (pH 1.0 수준). • (살균기-감도센서) 살균기에 감도센서가 있을 경우, UV 감도가 80% 이하일 때는 산세정 수행. 그러나 감도센서가 없는 경우는 일반 표준양액 사용과 암면배지의 경우는 100톤 사용시 산세정이 적합한 것으로 판단됨 • (살균기) 살균기 내부의 수류의 불안정으로 살균효율이 떨어질 수 있음. <p>이에 살균기 내부의 수류 안전성을 고려해서 설계해야함</p>

〈표〉 와류형 직렬살균기와 챔버형 병렬살균기

	와류형 직렬살균기(다부처사업) (320W×2)	챔버형 병렬살균방식(기존방식) (150W×4)
살균방식		

□ 살균시스템 제품화 수준의 유지관리 체계 구축

- 2단계 현장실증을 통해 얻어진 순환식 수경재배 제품화 시스템에 관한 유지관리 체계를 구축함

〈표〉 제품화 수준 순환식 수경재배 시스템 유지관리 체계

<p>공정단계</p>	
<p>원수조</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 침전물, 이물질 제거를 위한 1년 1회 청소
<p>배액조</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 사용배지에 따른 배액조 주기적 청소 (암면배지 1회/1년, 코코피트 배지 2회/1년)
<p>여과기</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 경제적 사여과 추천 및 여과기내 압력기 부재시에는 주기적 역세척 5분~10분/매회(암면배지), 10분이상/매회(코코피트배지) • 여과기내 압력기 존재시 부압력 경보 (10 bar 이상시) 수시로 역세척 혹은 모래자체 분리를 통한 세척
<p>살균기</p>	<ul style="list-style-type: none"> • (석영관) 감도센서 존재 시 UV 투과수치가 기존 대비 80% 이하시에는 산세정을 수행함 • (석영관) 감도센서 부재 시 배액 100톤 사용시 산세정 수행하며 산세정에 필요한 PH는 암면배지 사용 배액처리시 산세정 pH 1.0 수준, 코코피트 배지 사용 배액처리시 산세정 pH 0.5-0.8 수준에서 사용함
<p>배관류</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 순환식 수경재배 제품 수준에서 내부 배관은 비교적 단순화해야 하며, 정량펌프를 사용하더라도 내부 배관내 수류의 불균형으로 인한 살균효율이 떨어지는 경우가 있기 때문에 배관의 단순화를 통한 수류 안정성을 확보해야 함
<p>추가적 시스템 보완</p>	<ul style="list-style-type: none"> • UV 살균시스템을 사용하더라도 여름철 녹조발생으로 인한 처리효율이 일시적으로 떨어지는 경우가 있음. 이러한 상황에서는 일부 화학적 처리 과산화수소수 계열 화학살균제를 사용하여 살균효율을 증진시킬수 있음 • 코코피트 배지 사용 배액처리시 초기 90일 이전에 과산화수소수 계열 살균제를 사용하여 살균효율을 보완적으로 사용할 수 있음 • 최소하게 사용하지만 장기적으로 화학적 살균제 사용시 작물 근권부 손상과 생육장애 유발할 수 있음

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

기관명	연구목표	세부내용	수행결과요약	달성도 (%)
국립원예특작과학원 시설원예연구소	순환식 수경재배 시의 양분 변화, 식물 생육 데이터 모니터링	과채류(토마토) 순환식 수경재배 시의 무기이온 변화 양상 및 양분변화와 작물 생육의 연계성 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 급액 EC(1.5, 2.0, 2.5dS·m⁻¹)와 수경재배 방식(순환식/비순환식)을 달리하여 처리한 결과 배액내 무기이온의 변화 모니터링 및 처리 조건이 토마토 생산성에 미치는 영향 구명 	100%
	개발 순환식 양분 균형제어 알고리즘(시설연/KIST) 적용 적합성 검증	급액 EC와 수경재배 방식이 다른 조건에서 양분균형제어 알고리즘 적용 효과 검증	<ul style="list-style-type: none"> • 급액 EC와 수경재배 방식이 다른 조건에서 양분균형제어 알고리즘 적용 효과 및 생산성 검증 • 순환식 및 비순환식 시스템의 비료 투입량 비교 	100%
경기도 농업기술원	순환식 수경재배 시의 양분 변화, 식물 생육 데이터 모니터링	엽채류 순환식 수경재배 시의 생육 시기별 무기이온 흡수 및 식물 생육 데이터 수집	<ul style="list-style-type: none"> • 엽채류 순환식 수경재배 시의 생육 시기별 무기이온 흡수 및 식물 생육 데이터 수집 	100%
		양액 재사용시 발생하는 작물 피해양상 분석	<ul style="list-style-type: none"> • 양액 재사용시 발생하는 작물 피해양상 분석 	100%
		엽채류 순환식 수경재배 시스템 현장 실증을 통한 효과분석	<ul style="list-style-type: none"> • 시스템 실증 시험을 통한 보완사항 검토 및 보고 	100%
서울대학교	ISE 센서와 임베디드 보드 기술을 활용한 양액 및 배액 내 이온 농도 실시간 모니터링 기술 최적화	이온선택성 전극 센싱 정밀도 고도화 작업	<ul style="list-style-type: none"> • 이온선택성 전극 자체 제작 • 이온선택성 전극 정밀 측정 계측 증폭 회로 제작 • 센싱 성능 향상을 위한 자동 데이터 수집 장치 설계 	100%
		임베디드 기반 양액 및 배액 이온 농도 실시간 모니터링 기술 고도화 작업	<ul style="list-style-type: none"> • 순환식 양액 재배를 위한 이온 선택성 전극 기반의 이온 모니터링 임베디드 시스템 개발 • Na 및 Ca 전극 개발 및 모니터링 기술 개발 • 양액 내 K, NO₃, Ca 이온 실시간 모니터링 기술 개발 • IoT 및 클라우드 기반 실시간 양액 온라인 모니터링 플랫폼 개발 	100%
		현장 검증 실험을 위한 순환식 수경재배 이온 모니터링 장치 구축 및 적용	<ul style="list-style-type: none"> • 경기도 농업기술원 엽채류 순환식 수경재배 적용 임베디드 기반 이온 모니터링 장치 구축 • 엽채류 재배 과정에서 양액 내 K, NO₃, Ca 이온 모니터링 수행 및 데이터 수집 	100%
		인공지능 기반 정밀 비료 공급 알고리즘 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 가변 비료 조성 공급 알고리즘 개발 	<ul style="list-style-type: none"> • 배액 이온 측정을 통해 복합양분플랫폼으로부터 갱신되는 개별 비료의 질량비를 바탕으로 비료 공급을 수행 • 비료 공급을 위한 시간 차등 슬

기관명	연구목표	세부내용	수행결과요약	달성도 (%)
			레노이드 밸브 제어 수행	
		임베디드 보드 기반 정밀 양액 공급 제어 장치 및 제어 프로그램 개발	<ul style="list-style-type: none"> 임베디드 보드 기반 가변 비료 조성 공급 알고리즘 탑재 제어 장치 개발 요인 실험 장치 개발 경기도 농업기술원 업체류 순환식 수경재배 적용 장치 구축 	100%
		인공지능 기반 정밀 비료 공급 알고리즘 개발	<ul style="list-style-type: none"> 목표 양액 이온 농도 비율과 실제 공급 양액 이온 농도 비율의 오차를 보정하기 위한 인공지능경망 모델 개발 이온 모니터링 및 양분 흡수 패턴 기반 양분 관리를 통한 이온 균형 개선 미측정 이온 추정을 위한 인공지능 모델 개발(빅데이터 플랫폼 업로드) 원수 보충량 결정을 위한 업체류 성장 모니터링 모델 개발 	100%
	장기 사용 조건에서의 기술 개선점 도출 및 유지관리 요인 선별	장기 사용 조건을 고려한 이온 모니터링 장치 고도화	<ul style="list-style-type: none"> 실증용 이온 모니터링 장치 신호 처리 회로 및 전원 노이즈 감소를 위한 하드웨어 고도화 	100%
KIST	복합 양분관리 플랫폼 구축	배지 이온 집적량 변화, 양분 흡수 메커니즘, 필수원소 정상상태제어 시뮬레이션 통합모델 구축	<ul style="list-style-type: none"> 일사량 변화의 추계적 변화 입력과 그에 따른 농가의 자동관수 체제의 시뮬레이션이 가능한 통합시뮬레이션 구축완료. 	100%
		배액 양분 빅데이터 기반 작물별 화학량론적 특성 추출 및 양분 제어 알고리즘 개발	<ul style="list-style-type: none"> 이론 및 실험적 분석을 통해 순환식 수경재배 시스템의 양분 변동성을 해석하였으며, 비율 기반 복합양분 관리 플랫폼에 컨버전될 양분관리 알고리즘 이론적 기반을 구축함. 	100%
		시뮬레이션 분석을 통한 미량원소 제어 알고리즘 개발	<ul style="list-style-type: none"> 본 과제에서 구축한 통합 모델의 시뮬레이션 분석 결과 및 실험적 분석결과에 기반하여 다량이온과 동일한 제어 원리 적용 결론. 	100%
		여러 양분 분석 데이터 소스에 따라 양분 관리가 가능한 순환식 수경재배 관리 플랫폼 구축	<ul style="list-style-type: none"> 웹기반의 백엔드 알고리즘과 프론트 앤드 UI를 디자인하여 시범 운용 중이며, 분석센터 데이터, ISE 데이터의 복합 활용 가능하며, ISE 데이터의 경우 RESTful API를 기반으로 데이터 송수신을 수행. 	100%
		배액 재사용률 100% 시스템의 양분 균형 제어 알고리즘 컨버전 및 플랫폼 탑재	<ul style="list-style-type: none"> 기 개발된 양분 균형제어 알고리즘을 파이썬 기반으로 컨버전하였으며 플랫폼의 백엔드에서 가동될 수 있도록 설계하였음. 	100%
		배액 재사용률 100% 미만 시스템의 양분 균형 제어 알고리즘 컨버전 및 플랫폼 탑재	<ul style="list-style-type: none"> 기 개발된 양분 균형제어 알고리즘을 파이썬 기반으로 컨버전하였으며 플랫폼의 백엔드에서 가동될 수 있도록 설계하였음. 	100%

기관명	연구목표	세부내용	수행결과 요약	달성도 (%)
		복합양분관리 플랫폼 제어체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> 현장실증 통한 복합양분 플랫폼 제어체계구축 	100%
신한 에이텍	UV 살균 시스템 운용관리체계 구축	UV 살균 시스템의 여과모듈의 적정 역세척 시간 산정 및 운영 소프트웨어 반영	<ul style="list-style-type: none"> 본 과제에서 당해연도 구축된 결과를 바탕으로 여과모듈종류와 적정역세척시간 산정 및 운영소프트웨어에 반영하였음. 	100%
		UV 살균 시스템(수류 살균기포함)의 장기 사용 조건에서의 유지관리요인 조사 및 관리 알고리즘 개발	<ul style="list-style-type: none"> 본 과제에 시작과 동시에 당해연도부터 2차년도까지는 암면, 코코피트배지를 대상으로 장기 테스트 수행하고 있으며 현재까지 유지관리 부분 checklist 작성과 알고리즘 개발부분은 지속적으로 수행하고, 당해연도는 완료하였음. 암면배지의 경우는 목표는 기본적으로 95%이상 살균율을 보이고 있으나, 파프리카 배지의 경우는 배액발생초기에는 이러한 살균률 보여주지 못하고 있음. 이는 유기성배지에서 발생하는 UV조사량을 방해하는 색도물질과 유기성물질로 인한 것으로보임 	100%
		순환식 수경재배 시스템 현장실증	<ul style="list-style-type: none"> 수류형 UV 살균시스템 제품화 수준의 유지관리체계 구축 	100%

(2) 정량적 연구개발성과

< 정량적 연구개발성과표 >

(단위 : 건, 백만원)

성과지표명		연도	1단계 (2021~2022)	2단계 (2023)	계	가중치 (%)
전담기관 등록·기탁 지표 ¹⁾	특허출원	목표(단계별)	3	-	3	10
		실적(누적)	4.53	0.5	5.03	
	특허등록	목표(단계별)	1	1	2	10
		실적(누적)	0	1	1	
	논문(SCI)	목표(단계별)	3	2	5	
		실적(누적)	5	2	7	
	논문 (비SCI)	목표(단계별)	3	2	5	
		실적(누적)	1	1	2	
	저작권 (소프트웨어)	목표(단계별)	1	1	2	
		실적(누적)	2	0	2	
	학술발표	목표(단계별)	4	2	6	10
		실적(누적)	12	6	18	
연구개발과제 특성 반영 지표 ²⁾	기술실시 (이전)	목표(단계별)	2	-	2	20
		실적(누적)	2	-	2	
	기술료	목표(단계별)	40	-	40	
		실적(누적)	40	-	40	
	제품화	목표(단계별)	1	-	1	10
		실적(누적)	1	-	1	
	매출액	목표(단계별)	100		100	10
		실적(누적)	100		100	
	교육지도	목표(단계별)	4	2	6	10
		실적(누적)	7	3	10	
	인력양성	목표(단계별)	-	-	0	
		실적(누적)	2	1	3	
	홍보	목표(단계별)	0		0	10
		실적(누적)	1	2	2	
	정책활용	목표(단계별)	0	1	0	10
		실적(누적)	0	0	0	
계	목표(단계별)	162	10	172	100	
	실적(누적)	182.3	20.8	203.1	87.5	

< 연구개발성과 성능지표 >

평가 항목 (주요성능 ¹⁾)		단위	전체 항목에서 차지하는 비중 ²⁾ (%)	세계 최고		연구개발 전 국내 성능수준	연구개발 목표치		목표설정 근거
				보유국/보유기관	성능수준	성능수준	1단계 (2021~2022)	2단계 (2023~2023)	
1	양액절감률	%	40	네덜란드	40%양액 절감	기존시스템 대비 30%양액 절감	35	40<	비순환식의 배액 관리 연구문헌의 적정 배액률(30~40%) 기준
2	살균성능 (암면배지, 코코피트배지, 순수수경)	%	10	네덜란드/ Hortimax	TRL 7	TRL 5	TRL 7	TRL 8 (암면, 순수수경)	국내수질공정시험법 및 ISO 표준 살균효율 근거 혹은 미국수질공정시험법 기준
3	여과성능	%	10	네덜란드/ Hortimax	TRL 8	TRL 6	TRL 8	TRL 9	국내수질공정시험법 및 ISO 표준 살균효율 근거 혹은 미국수질공정시험법 기준
4	개별이온선택 성전극정밀도	%	10	미국 / Orion	10%	15%	4.82	<5	세계기술 수준
5	개별이온선택 성전극오차율	%	10	미국 / Orion	10%	15%	6.63	<5	세계기술 수준
6	정밀 비료 공급 제어 알고리즘 정밀도	%	10	네덜란드 / Priva	15%	15%	10	<15	세계기술 수준
7	ISE 모듈과 양분관리 플랫폼 간 데이터 수집 건수	건/작기	10	없음	없음	없음		15<	2일 간격 배액 측정 기준

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Inter-lighting and defoliation in a soilless culture system require more dynamic water management for improving the yield-promotion effect	Scientia Horticulturae	Tae In Ahn	293		Elsevier	SCIE	2022.02. (Available online: 2021.10.)	0304-4238	50%
2	Nutrient dosing framework for an emission-free urban hydroponic production	Frontiers in Plant Science	Tae In Ahn	12		Frontiers Media	SCIE	2021.11.	1664-462X	50%
3	Stone Wool Substrate Cover Incision Impacts on the Root-Zone Water Content, Temperature, and Yield of Tomato Cultures	Frontiers in Plant Science (IF6.63)	Tae In Ahn	13		Frontiers Media	SCIE	2022.06.	1664-462X	40%
4	Translating CO2 variability in a plant growth system into plant dynamics	Scientific Report	Tae In Ahn	12		Nature Publishing Group	SCIE	2022.08.	2045-2322	40%
5	장기 수경재배에서 급액량의 차이가 토마토 생육과 수량 특성에 미치는 영향	한국생물환경조절학회지	최경이	31	한국	한국생물환경조절학회	비SCI	2022.10.	2765-3641	70%
6	Estimation of Greenhouse Lettuce Growth Indices Based on a Two-Stage CNN Using RGB-D Images	Sensors	Min-Seo k Gang	22		MDPI	SCIE	2022.07.	1424-8220	50%
7	Closed Hydroponic Nutrient Solution Management Using Multiple Water Sources	Journal of Biosystems Engineering	JooShin Kim	48		Scopus	SCIE	2023.05.	2234-1862	50%
8	On-site algae harvesting system using tailored bubble flotation	Desalination and Water Treatment	이주영	307		Desalination and Water Treatment	SCI	2023.11.	1944-3994	50%
9	Pentaene macrolides AB023a and takanawaene C produced by Streptomyces xanthocidicus strain S3 for controlling pepper anthracnose	Applied Biological Chemistry	전병준	66		Applied Biological Chemistry	SCI	2023.08.	2468-0842	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	제목
1	2021년 (사)한국생물환경조절학 회 추계학술발표회	이주영, 안태인 외 4	2021.10.08.-14.	온라인	A Study on the Change in Sterilization Efficiency for the Drainage Temperature of the Circulating Hydroponic System
2	2021년 (사)한국생물환경조절학 회 추계학술발표회	이주영, 안태인 외 4	2021.10.08.-14.	온라인	Analysis of Effects of Ions in Nutrient Solution Drainage According to UVC Irradiation Dose
3	2021년 (사)한국생물환경조절학 회 추계학술발표회	이주영, 안태인 외 4	2021.10.08.-14.	온라인	UV Chamber Design Study for the Used Nutrient Solutions Treatment
4	2021년 (사)한국생물환경조절학 회 추계학술발표회	이주영, 안태인 외 4인	2021.10.08.-14.	온라인	Performance Study of UVC-LED Based Circulating Hydroponics System
5	2021년 (사)한국생물환경조절학 회 추계학술발표회	이주영, 안태인 외 4인	2021.10.08.-14.	온라인	Comparison of Performance of Series and Chamber Type UV Lamp based Systems in Circulating Hydroponics System
6	2021년 추계 한국농업기계학회 학술대회	김용현	2021.10.29.	제주 소노벨	순환식 양액재배를 위한 이온선택성 전극 기반의 Na 이온 모니터링 임베디드 시스템 개발
7	2022년 (사)한국생물환경조절학 회 춘계학술발표회	이주영, 안태인 외	2022.05.13.	국립원예특작과학원	Hydrodynamic UV Chamber Study to Improve Sterilization in Circulation Hydroponics System
8	2022년 (사)한국생물환경조절학 회 춘계학술발표회	황지은 등 5명	2022.05.12.	국립원예특작과학원	엽채류 순환식 수경재배에 따른 무기이온 흡수 특성
9	한국농업기계학회 2022년 춘계학술대회	김용현	2022.04.29.	국립농업과학원 농업공학부 강당(6층)	수경재배를 위한 순환 전압전류법 기반의 인산염 농도 측정 기술
10	생물환경조절학회 2022년 추계학술대회	강민석	2022.10.28.	대전 KT인재개발원	순환식 수경재배 시스템의 가변 조성 비료 공급을 위한 솔레노이드 밸브 제어 알고리즘 개발
11	한국농업기계학회 2022년 추계학술대회	강민석	2022.11.03.	대구 엑스코 컨벤션 센터	순환식 수경재배 시스템을 위한 가변 조성 비료 공급 제어
12	생물환경조절학회 2023년 춘계학술대회	강민석	2023.04.20.	롯데리조트 부어	순환식 수경재배 시스템에서의 이온 균형 유지를 위한 이온 선택성 전극 기반 양분 관리 시스템 개발
13	한국농업기계학회 2023년 춘계학술대회	이상현	2023.04.27.	KT대전인재개발원	순환식 수경재배 이온선택성전극 관리를 위한 고장 진단 알고리즘
14	한국농업기계학회 2023년 춘계학술대회	박찬민	2023.04.27.	KT대전인재개발원	이온 선택성 전극을 활용한 순환식 수경재배의 양액 내 칼슘 이온 농도 측정
15	생물환경조절학회 2023년 추계학술대회	강민석	2023.09.22.	서울대학교 시흥캠퍼스	양액의 양분 흡수 모니터링 기반 정밀 양액 관리 시스템의 현장평가
16	GreenSys2023	강민석	2023.10.24.	멕시코 칸쿤 Iberostar Selection Cancun	Development of an Ion Selective Electrode-based Nutrient Management System to Maintain Ionic Balance in Closed Hydroponic Solutions
17	한국농업기계학회 2023년 추계학술대회	이상현	2023.11.03.	여수 히든베이 호텔	휴대용 이온 분석기를 이용한 양액 내 Ca 이온 선택성 전극 성능 및 수명 평가
18	2022년 (사)한국생물환경조절학 회 춘계학술발표회	최경이 등 4명	2022.05.12.	국립원예특작과학원	코이어 배지를 이용한 토마토 순환식 수경재배에서 배액 혼합 수준이 양액 내 이온 변화 및 토마토 생육에 미치는 영향
19	2023년 춘계 한국농업기계학회 학술대회	이상현	2023.04.27.	KT대전인재개발원	순환식 수경재배 이온선택성전극 관리를 위한 고장 진단 알고리즘
20	2023년 생물환경조절학회 추계학술대회	강민석	2023.09.22.	서울대학교 시흥캠퍼스	양액의 양분 흡수 모니터링 기반 정밀 양액 관리 시스템의 현장평가

□ 기술 요약 정보

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

□ 보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

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

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록 인	등록 일	등록 번호		
1	소형 수경재배기의 급액 관리 장치 및 그 방법	대한민국	KIST	21.09.14.	제10-2021-0122673호					50	활용
2	순환식 수경재배 시스템의 급액 제어 장치 및 그 방법	대한민국	KIST	21.08.30.	제10-2021-0114951호					50	활용
3	살균장치 (Sterilizer Apparatus)	대한민국	KIST	22.07.20.	제10-2022-0089802호					50	활용
4	온실용 공기조화장치	대한민국	KIST	22.07.22.	제10-2022-0090826호					50	활용
5	온실용 공기조화시스템 및 그 제어방법	대한민국	KIST	22.07.28.	제10-2022-0093746호					50	활용
6	소형식물재배기용 여과살균모듈	대한민국	KIST	22.09.07.	제10-2022-0113798호					33	활용
7	식물근권부 냉난방 기능을 갖는 식물 재배시스템	대한민국	KIST	22.09.08.	제10-2022-0114176호					50	활용
8	수경재배용 살균 시스템 및 이를 이용한 살균방법	대한민국	KIST	22.11.03.	제10-2022-0145363호					50	활용
9	다열 자외선 살균장치	대한민국	KIST	21.11.11.	제10-2021-0154653					50	활용
10	순환식 수경재배의 양액 다량이온 추정 장치 및 이를 이용한 순환식 수경재배의 양액 다량이온 추정 방법	대한민국	KIST	23.01.25.	제10-2023-0009592					100	활용
11	순환식 수경재배 시스템의 급액 제어 장치 및 그 방법	대한민국	KIST	24.01.09.	제10-2624724					100	활용

○ 지식재산권 활용 유형

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

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

저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율
1	양분균형변화 안정화 판정 알고리즘	2022.08	이주영 외	2022.09.28.	C-2022-036821	한국과학기술연구원	100
2	수경재배 양분균형 교정 프로그램	2022.08	이주영 외	2022.09.28.	C-2022-036822	한국과학기술연구원	100

신기술 지정

번호	명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

기술 및 제품 인증

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

표준화

국내표준

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

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

국제표준

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

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

[경제적 성과]

시제품 제작

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

□ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황
1	노하우	자외선 램프를 활용한 배액재처리 기술	㈜일곰	2022.11.	40,000천원	
2	노하우	환경부하최소화 기술알고리즘이 탑재된 직렬형 양액재이용시스템	신한에이텍	2021.10.		

□ 사업화 투자실적

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

* 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식 ¹⁾	사업화 형태 ²⁾	지역 ³⁾	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		
1	자가실시	기존제품개선	국내	경북스마트 혁신밸리 실증온실 순환식수경재배시스템 설치	순환식수경재배시스템	화신 농건	50,000		2021	순환식수경재배기술

* 1) 기술이전 또는 자기실시 중 해당하는 사항을 기재합니다.

* 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.

* 3) 국내 또는 국외 중 해당하는 사항을 기재합니다.

□ 매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
경북스마트혁신밸리 실증온실 순환식수경재배시스템설치	2021	50,000		50,000	
스마트 온실의 순환식 수경재배 시스템 개발	2022	50,000		50,000	
합계		100,000		100,000	

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)	3			
	소요예산(천원)	375,38050			
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후	
		50,000	300,000	500,000	
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내	3	5	10
국외		0	0.5	1	
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획		없음			
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
		50,000	300,000	500,000	
	수출	0	50,000	100,000	

□ 고용 창출

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

□ 고용 효과

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

□ 비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

□ 경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

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

□ 산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원
1	3차 6차산업제주국제박람회 수경재배기술	2021.08.27.	제주도농업인 및 해외 농업인 대상	제주국제컨벤션센터 세미나실	200
2	노지형/도시형 디지털 스마트팜 최신분석과 사업전략 및 성공사례	2021.08.24.	과기부 및 산업부 공무원들 및 전문연구원들	산업교육원 화상강의	50
3	2022년 강원진로교육원 길뜸 3기 순환식 수경재배연구	2022.07.27.	강원지역 연구자들 대상	강원도진로교육청	50
4	캄보디아 스마트팜 ODA프로젝트 관련 캄보디아 공무원 대상 수경재배 세미나	2022.09.06.	캄보디아공무원	화상강의	20
5	아쿠아포닉스시스템에서 순환식 수경재배 식물의 재배 기술	2022.09.02.	아쿠아포닉스 농가	수산과학원	30
6	스마트팜 기자재 활용개론	2023.5.2	전문자 대상	Zoom 회의	30
7	농업환경대응 미래농업 전략수립과정	2023.6.2	CEO 대상	Zoom 회의	30
8	스마트팜 세대교체를 위한 개선방향 도	2023.7.21	전문자 대상	Zoom 회의	30
9	스마트 팜 물(재)이용 기술개발과 실증사례	2023.9.13	기업엔지니어 대상	경기벤처산업센터	10
10	농촌진흥청공무원 전문연수 멘토링	2023. 2~11월	농업전문가	시설원예연구소	1

□ 기술 무역

(단위: 천원)

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

[사회적 성과]

□ 법령 반영

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

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

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

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	시설연	21	1				1	1			1		
2	서울대	22		1			1		1				
3	서울대	23		1			1		1				

□ 산업 기술 인력 양성

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

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1~13	(국내) TV, 일간지 등	KBS TV 등	순환식 수경재배 홍보	2021.04.28.~2023.12.13.
14~16	(국외) 저널, 뉴스	Eureka! 등	Eco-friendly smart farms based on nutrient solution recirculation	2021.6.15
17	전시	2023상주농기계박람회	순환식수경재배시스템 양액 및	2023.4.4.~4.7
18	전시	순천국제농업박람회	순환식수경재배시스템 양액 및	2023.10.12.~10.22

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

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

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

[그 밖의 성과]

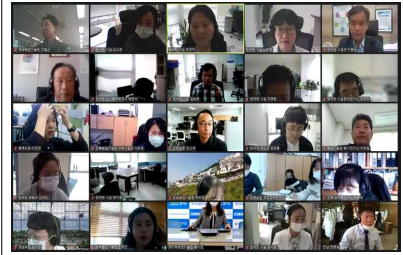
- 순환식 수경재배 현장 실용화 방안 마련을 위한 행사 개최
 - 순환식 수경재배 현장간담회('21, 국립원예특작과학원장님, 시설연 등 9명)
 - 순환식 수경재배 현장 실용화 방안 전문가 협의회('21, 내외부 전문가 14명)
 - 수경재배 발전방향 워크숍('21, Zoom 이용, 원예원·도원·특광역시센터 45명)
 - 현황 발표(8개 도원), 발전방안 토론(정책제안, 제도개선, 연구개발, 협력체계)



현장간담회(8.25)



전문가 협의회(9.16)



발전방향 워크숍(10.21)

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항

2) 목표 달성 수준

추진목표	달성내용	달성도(%)
〈시설원예연구소〉 순환식 수경재배 시의 양분 변화, 식물 생육 데이터 모니터링 KIST 개발 순환식 양분 균형제어 알고리즘 적용 적합성 검증	<ul style="list-style-type: none"> 과채류(토마토) 순환식 수경재배 시의 무기이온 변화 양상 및 양분변화와 작물 생육의 연계성 분석 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 급액 EC와 수경재배 방식이 다른 조건에서 양분균형제어 알고리즘 적용 효과 검증 	100
〈경기도농업기술원〉 순환식 수경재배 시의 양분 변화, 식물 생육 데이터 모니터링	<ul style="list-style-type: none"> 엽채류 순환식 수경재배 시의 생육 시기별 무기이온 흡수 및 식물 생육 데이터 수집 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 양액 재사용시 발생하는 작물 피해양상 분석 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 엽채류 순환식 수경재배 시스템 현장 실증을 통한 효과분석 	100
〈서울대학교〉 ISE 센서와 임베디드 보드 기술을 활용한 양액 및 배액 내 이온 농도 실시간 모니터링 기술 최적화 인공지능 기반 정밀 비료 공급 알고리즘 개발 장기 사용 조건에서의 기술 개선점 도출 및 유지관리 요인 선별	<ul style="list-style-type: none"> 이온선택성 전극 센싱 정밀도 고도화 작업 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 임베디드 기반 양액 및 배액 이온 농도 실시간 모니터링 기술 고도화 작업 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 현장 검증 실험을 위한 순환식 수경재배 이온 모니터링 장치 구축 및 적용 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 가변 비료 조성 공급 알고리즘 개발 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 임베디드 보드 기반 정밀 양액 공급 제어 장치 및 제어 프로그램 개발 인공지능 기반 정밀 비료 공급 알고리즘 개발 및 현장실증 적용 	100
<ul style="list-style-type: none"> 이온 모니터링 장치 신호 처리 회로 고도화 및 전원 노이즈 절감을 위한 하드웨어 개선 	100	
〈KIST〉 복합 양분관리 플랫폼 구축	<ul style="list-style-type: none"> 배지 이온 집적량 변화, 양분 흡수 메커니즘, 필수원소 정상상태제어 시뮬레이션 통합모델 구축 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 배액 양분 빅데이터 기반 작물별 화학량론적 특성 추출 및 양분 제어 알고리즘 개발 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 시뮬레이션 분석을 통한 미량원소 제어 알고리즘 개발 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 여러 양분 분석 데이터 소스에 따라 양분 관리가 가능한 순환식 수경재배 관리 플랫폼 구축 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 배액 재사용률 100% 시스템의 양분 균형 제어 알고리즘 컨버전 및 플랫폼 탑재 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 배액 재사용률 100% 미만 시스템의 양분 균형 제어 알고리즘 컨버전 및 플랫폼 탑재 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 복합양분 플랫폼 제어체계 구축 	100
〈신한 에이텍〉 UV 살균 시스템 운용관리체계 구축	<ul style="list-style-type: none"> UV 살균 시스템의 여과모듈의 적정 역세척 시간 산정 및 운영 소프트웨어 반영 	100
	<ul style="list-style-type: none"> UV 살균 시스템(수류형 살균기포함)의 장기 사용 조건에서의 유지관리요인 조사 및 관리 알고리즘 개발 	100
	<ul style="list-style-type: none"> 현장실증 통한 순환식 수경재배 시스템 실증 및 장기성능을 통한 제품화 	100

4. 목표 미달 시 원인분석

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 특허등록 : 출원된 특허가 등록되는 기간이 소요되고 있는 것이므로 과제 완결 후 성과 달성될 것임
- 정책제안 : 순환식 수경재배 필요성에 대한 공감대가 형성된 상태이고 현장 보급을 확대하기 위한 정책 발굴이 필요한 단계하고 판단됨. 과제에서 순환식 수경재배의 비료 절감효과를 분석하여 '순환식 수경재배 적용 농가를 탄소중립직불금 지원사업에 추가'에 대한 정책을 제안하였으나 사업예산 항목 조정에 따른 자료 보완 후 제출 요청을 받아 성과로 인정받지 못하였으므로 자료 보완 후 정책제안을 다시 시도할 예정임

2) 자체 보완활동

- 특허등록 : 출원된 특허가 등록되는 기간이 소요되고 있는 것이므로 과제 완결 후 특허등록을 위한 노력을 기울일 예정임
- 정책제안 : 순환식 수경재배 필요성에 대한 공감대가 형성된 상태이고 현장 보급을 확대하기 위한 정책 발굴이 필요한 단계하고 판단됨. 과제에서 순환식 수경재배의 비료 절감효과를 분석하여 '순환식 수경재배 적용 농가를 탄소중립직불금 지원사업에 추가'에 대한 정책을 제안하였으나 사업예산 항목 조정에 따른 자료 보완 후 제출 요청을 받아 성과로 인정받지 못하였으므로 자료 보완 후 정책제안을 다시 시도할 예정임

3) 연구개발 과정의 성실성

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 개발 시스템 및 기술을 현장 적용하여 개발기업의 사업화 단계 발생가능한 문제를 선제적으로 해결하고 농업현장 투입될 제품과 기술을 충분히 검증하여 시행착오를 방지하여 현장 실용화 기반을 조성함
- 순환식 수경재배 기술의 핵심적인 문제인 이온 균형 유지관리에 대한 정밀한 수준의 솔루션을 제시함으로써, 궁극적으로 대부분의 농가에 적용되고 있는 비순환식 수경재배 시스템 뿐만 아니라 일부에서 적용되고 있는 관행 EC기반 순환식 수경재배 방식 대비 자원 사용의 효율성을 극대화할 수 있는 기술적 토대를 마련
 - 짧은 주기의 양액 조성 조절 및 가변 비료 공급 제어를 통해 오버슈트 없이 이온 균형을 효과적으로 달성 가능한 기술 제시로 순환식 수경재배 발전에 기여
 - 재배 기간동안 양액의 성분 분석을 수행할 경우 분석에 소요되는 시간에 의해 이온 균형에 대한 정밀한 관리에 한계가 존재하지만 이온선택성 전극을 이용할 경우 양액 내 이온을 실시간 측정하여 이온 균형을 보다 짧은 주기로 관리할 수 있으므로 소모되는 비료의 낭비를 더욱 줄일 수 있으며 결과적으로 순환식 수경재배 기술의 발전 및 보급에 기여
 - 이온 모니터링과 작물의 양분 흡수 패턴에 기반한 양분 관리 시스템은 관행 EC 기반 양액 제어 시스템 대비 장기간 재배 조건에서 이온 균형을 효과적으로 개선시킴에 따라 관행 시스템의 문제로 제기되어 온 이온 불균형에 따른 생육 저해에 대응 가능
- 현장 실증을 통한 양분복합플랫폼 및 이온모니터링 유지관리 성능 등 문제점 발생과 해결을 통한 실효성 검증을 가능케 함
 - 이온선택성 전극 고도화 연구를 통해 고비용의 해외 제품과 비교하여 상대적으로 저비용에 정확한 성능을 보일 수 있는 성과를 제시하여 순환식 수경재배 분야 이온선택성 전극 적용의 효용성을 높임
 - Ca 및 Na 전극을 자체 개발하여 상용 전극의 적용 및 유지 관리에 필요한 비용을 최소화하였으며 신호처리회로의 고도화를 통해 이온선택성 전극의 실제 적용성을 향상시킴.
 - 휴대용 및 거치식 임베디드 기반 이온 모니터링 시스템은 그 활용 및 설치를 간소화할 수 있어 이온 모니터링 기술 및 순환식 수경재배 기술의 도입을 용이하게 함
 - 해외 선진사의 시스템은 정밀 전자 밸브를 적용하여 개별 비료를 공급하고 있으나 본 연구에서는 솔레노이드 밸브 제어를 통해 개별 비료 제어를 실현하였으며 이를 통해 기존 순환식 수경재배 양액 제어 방식 발전에 기여
 - 모듈 형태의 개발과 벤추리 도징 채널을 이용하는 양액 공급 제어 알고리즘을 개발하여 기존의 하드웨어와 소프트웨어의 변경이 최소화되므로 상용 양액기에 대한 적용이 용이하고 기술 보급에 기여
- 국내 순환식 수경재배 시스템은 아직까지 연구개발 단계로 현행 순환식 수경재배 시스템도 대부분 EC 기반 시스템을 적용하고 있어 순환식 수경재배에 대한 집중적이고 지속적인 연구의 확대를 필요로 함. 본 연구과제의 연구성과는 이러한 순환식 수경재배 시스템을 고도화 하는 연구의 토대를 제시

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- 순환식 수경재배 시스템을 농가 단위에 맞게 적용하도록 추진 예정
 - 개발된 순환식 수경재배시스템 및 제어 알고리즘을 구현한 프로그램 및 장치 최적화 지속
 - 개발된 순환식 수경재배시스템 및 제어 알고리즘을 다양한 하드웨어 및 작물 재배 조건에 호환될 수 있도록 고도화
 - 농가 단위로의 연구 성과 적용 확대를 통해 실제 상용 재배 환경에서의 성능 평가

- 순환식 수경재배 시스템의 제품화
 - 양분 균형 관리 알고리즘은 웹 기반으로 구현되었으며 다양한 환경에서 손쉽게 데이터를 업로드할 수 있어 재배 및 연구 목적 등 범용적인 활용이 가능함
 - 본 과제에서 이온 모니터링 장치 및 개별 솔레노이드 밸브 가변 제어 장치는 모듈식 임베디드 장치로 구성되었으며, 상용 양액기 제품에 간단하게 결합될 수 있음. 또한, WIFI 기반 네트워크를 통해 데이터를 효과적으로 관리할 수 있음. 따라서, 추후 별도 제품화가 가능
 - 이온선택성전극을 기반으로 한 이온 모니터링 장치는 상용 제품 대비 저비용에 실시간 양분 측정 가능성이 가능하다는 장점이 있으며, 모니터링 장치의 별도 제품화가 가능

- 이온 균형 유지 성능 개선 및 자원 사용 절감을 위한 순환식 수경재배 시스템 연구 지속성 확보
 - 과채류를 대상으로 이온 선택성 전극을 통한 이온 모니터링 및 양분 흡수 기반 양분 관리 시스템 개발을 통해 순환식 수경재배 연구를 지속
 - 6개월~1년 이상의 장기 실험 조건에서의 개발 시스템의 이온 균형에 대한 성능 평가 수행
 - 동일 당량을 가정했을 때, 개발된 시스템은 관행 EC 양액 제어 시스템 대비 비료 사용량에 있어서도 차이를 보임. 해당 결과에 대한 이론적 배경에 대한 추가적인 연구 예정
 - 원수 공급량 산출과 결합하여 비료 사용량 및 원수 절감에 대한 후속 연구 예정
 - 이온선택성 전극 고도화 연구 성과는 이온선택성 전극 미측정 이온인 Mg, S, P 및 미량 원소 대응 기술을 개발하는 토대로 활용할 수 있음

- 순환식 수경재배 시스템 적용 대상 작물 확대 추진 예정
 - 개발된 순환식 수경재배시스템 및 제어 알고리즘 적용하는 작물을 시험작물(토마토, 상추)외 파프리카, 딸기, 멜론 등 확대 추진

< 연구개발성과 활용계획표 >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내	
국외논문	SCIE		
	비SCIE		
	계		
국내논문	SCIE		
	비SCIE	1	
	계	1	
특허출원	국내		
	국외		
	계		
특허등록	국내		
	국외		
	계		
인력양성	학사		
	석사		
	박사		
	계		
사업화	상품출시		
	기술이전		
	공정개발		
	매출액(원)	100,000,000	
제품개발	시험제품개발		
비임상시험 실시			
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상	
		2상	
		3상	
	의료기기		
진료지침개발			
신의료기술개발			
성과홍보			
포상 및 수상실적			
정성적 성과 주요 내용			
교육지도			

참고문헌

Ahn, T.I., and Son, J.E. (2019). Theoretical and experimental analysis of nutrient variations in electrical conductivity-based closed-loop soilless culture systems by nutrient replenishment method. *Agronomy* 9, 649. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100649>

Ahn, T.I., Shin, J.H., and Son, J.E. (2021a). Theoretical and experimental analyses of nutrient control in electrical conductivity-based nutrient recycling soilless culture system. *Front. Plant Sci.* 12, 656403. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.656403>

Ahn, T.I., Park, J.E., Jung, J.H., Kim, S.M., Yoo, G., Kim, H.S., and Lee, J.Y. (2021b). Nutrient dosing framework for an emission-free urban hydroponic production. *Front. Plant Sci.* 12, 768717. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.768717>

Cho, W.J., Kim, H.J., Jung, D.H., Kim, D.W., Ahn, T.I., and Son, J.E. (2018). On-site ion monitoring system for precision hydroponic nutrient management. *Comput. Electron. Agric.* 146, 51-58. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.01.019>

Cadogan, A. M., Diamond, D., Smyth, M. R., Deasy, M., McKervey, M. A., & Harris, S. J. (1989). Sodium-selective polymeric membrane electrodes based on calix arene ionophores. *Analyst*, 114(12), 1551-1554. <https://doi.org/10.1039/AN9891401551>

Jung, D.H., Kim, H.J., Choi, G.L., Ahn, T.I., Son, J.E., and Sudduth, K.A. (2015). Automated lettuce nutrient solution management using an array of ion-selective electrodes. *Trans. ASABE* 58(5), 1309-1319. <https://doi.org/10.13031/trans.58.11228>

Jung, D.H., Kim, H.J., Cho, W.J., Park, S.H., and Yang, S.H. (2019). Validation testing of an ion-specific sensing and control system for precision hydroponic macronutrient management. *Comput. Electron. Agric.* 156, 660-668. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.025>

Kim, H.J., Kim, W.K., Roh, M.Y., Kang, C.I., Park, J.M., and Sudduth, K.A. (2013). Automated sensing of hydroponic macronutrients using a computer-controlled system with an array of ion-selective electrodes. *Comput. Electron. Agric.* 93, 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.01.011>

Kim, J., Kim, H.J., Gang, M.S., Kim, D.W., Cho, W.J., and Jang, J.K. (2023). Closed hydroponic nutrient solution management using multiple water sources. *J. Biosyst. Eng.*, 1, 10. <https://doi.org/10.1007/s42853-023-00182-0>

Ko, M.T., Ahn, T.I., Cho, Y.Y., and Son, J.E. (2013). Uptake of nutrients and water by paprika (*Capsicum annuum* L.) as affected by renewal period of recycled nutrient solution in closed soilless culture. *Hortic. Environ. Biotechnol.* 54, 412-421. <https://doi.org/10.1007/s13580-013-0068-0>

Le Bot, J., Adamowicz, S., and Robin, P. (1998). Modelling plant nutrition of horticultural crops: a review. *Sci. Hortic.* 74, 47-82. [https://doi.org/10.1016/s0304-4238\(98\)00082-x](https://doi.org/10.1016/s0304-4238(98)00082-x)

Neocleous, D., and Savvas, D. (2018). Modelling Ca²⁺ accumulation in soilless zucchini crops: physiological and agronomical responses. *Agric. Water Manag.* 203, 197-206. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.017>

Richa, A., Fizir, M., and Touil, S. (2021). Advanced monitoring of hydroponic solutions using ion-selective electrodes and the internet of things: a review. *Environ. Chem. Lett.* 19(4), 3445-3463. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01233-8>

Rouphael, Y., Raimondi, G., Caputo, R., and De Pascale, S. (2016). Fertigation strategies for improving water use efficiency and limiting nutrient loss in soilless *Hippeastrum* production. *HortScience* 51, 684-689. <https://doi.org/10.21273/hortsci.51.6.684>

Savvas, D. (2002). Automated replenishment of recycled greenhouse effluents with individual nutrients in hydroponics by means of two alternative models. *Biosyst. Eng.* 83, 225-236. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(02\)00152-6](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(02)00152-6)

Sonneveld, C., Voogt, W., Sonneveld, C., and Voogt, W. (2009). Nutrient solutions for soilless cultures. *Plant nutrition of greenhouse crops* (Berlin, GER: Springer), pp. 257.

Vardar, G., Alt ı katođlu, M., Ortaç, D., Cemek, M., and Iş ı ldak, İ. (2015). Measuring calcium, potassium, and nitrate in plant nutrient solutions using ion-selective electrodes in hydroponic greenhouse of some vegetables. *Biotechnol. Appl. Biochem.* 62(5), 663-668. <https://doi.org/10.1002/bab.1317>

Zekki, H., Gauthier, L., and Gosselin, A. (1996). Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 121, 1082-1088. <https://doi.org/10.21273/jashs.121.6.1082>

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부·농촌진흥청·과학기술정보통신부에서 시행한 스마트팜다부처 패키지혁신기술개발사업 「스마트 온실의 순환식 수경재배 시스템 개발」 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부·농촌진흥청·과학기술정보통신부(전문기관 농림식품기술기획평가원·(재)스마트팜연구개발사업단)에서 시행한 스마트팜다부처패키지혁신기술개발사업연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.

자체평가의견서

1. 과제현황

		과제번호		421006-03	
사업구분	스마트팜 다부처 패키지 혁신기술 개발사업				
연구분야				과제구분	단위
사업명	스마트팜 다부처 패키지 혁신기술 개발사업				주관
총괄과제	기재하지 않음			총괄책임자	기재하지 않음
과제명	스마트 온실의 순환식 수경재배 시스템 개발			과제유형	응용
연구개발기관	Development of Recycling Hydroponic Cultivation System for Smart Greenhouse			연구책임자	최경이
연구기간 연구개발비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	2021	550,000	36,700	586,700
	2차년도	2022	600,000	43,400	643,400
	3차년도	2023	600,000	43,400	643,400
	4차년도				
	5차년도				
	계		1,750,000	123,500	1,873,500
참여기업					
상대국	상대국연구개발기관				

2. 평가일 : 2024. 2.

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
국립원에특작과학원 시설원에연구소	농업연구사	최경이

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.

최 경 이

확 약

I. 연구개발실적

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

1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

우수

순환식 수경재배가 농가현장에서 적용될 수 있도록 양액공급· 배액제어 및 배액살균시스템에 대한 개발과 작물재배 실증 효과를 분석하였음

2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

우수

순환식 수경재배가 농가현장에서 적용될 수 있도록 양액공급· 배액제어 및 배액살균시스템에 대한 개발과 작물재배 실증 효과를 분석하여 순수수경 뿐만아니라 배지경 재배 현장에 적용할수 있는 기술로 발전시켰음

3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

우수

수경재배 면적이 급격히 증가하고 있어 수경재배에 의한 환경오염 문제에 대한 대응을 위하여 꼭 필요한 기술이므로 활용가능성이 매우 높음
순환식 수경재배가 농가현장에서 적용될 수 있도록 양액공급· 배액제어 및 배액살균시스템에 대한 개발과 작물재배 실증 효과를 분석하여 순수수경 뿐만아니라 배지경 재배 현장에 적용할수 있는 기술로 발전시켰음

4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

우수

우수한 논문과 실용적인 산업재산권, 사업화 등 성과를 도출하였으며 연구개발 수행에 성실히 노력하였음

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

우수

우수한 논문과 실용적인 산업재산권, 사업화, 홍보 등 성과를 도출하였으며 연구개발 수행에 성실히 노력하였음

II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
특허출원 (3건)	10	144.3	초과 달성
특허등록 (2건)	10	50.0	특허등록 소요기간이 김
SW 저작권 (2건)		100	달성
기술실시 (2건)	20	100	달성
기술료 (20백만원)		100	달성
제품화 (1건)	10	100	달성
매출액(100백만원)	10	100	달성
논문 (SCI 5/비SCI 6) (건)		907	초과 달성
학술발표 (5건)	10	283.3	초과 달성
교육지도(6건)	10	116.7	초과 달성
정책활용 (1건)	10	-	미달성
홍보전시 (1건)	10	200	초과 달성
합계	100		

III. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

순환식 수경재배 시스템의 개발과 운용 기술을 연구하였고, 개발 기술을 적용하여 작물재배 실증을 통해 효과를 검증함으로써 실용적인 기술의 발전시키는 단계의 연구를 진행하였음. 따라서 관련 농업기술과 산업발전과 더불어 기술의 수출경쟁력 향상에 기여하였음

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

본 과제는 단순히 순환식 수경재배 관련 시스템 개발 혹은 순환식 수경재배를 적용한 작물재배 효과를 분석한 것에 거치지 않고 개발된 시스템이 순환식 수경재배 농가(농업)나 산업으로 성장할수 있도록 실용적인 연구를 수행하였음.

순환식 수경재배의 비료 절감효과를 분석하여 '순환식 수경재배 적용 농가를 탄소중립직불금 지원사업에 추가'에 대한 정책을 제안하였으나 사업예산 항목 조정에 따른 자료 보완 후 제출 요청을 받아 성과로 인정받지 못하였음

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

개발 기술을 기반으로 순환식 수경재배가 현장에 보급될수 있도록 사업화에 노력을 기울이고, 현장 의 애로기술을 모니터링하여 기술에 대한 완성도를 높여갈 계획임

IV. 보안성 검토

○ 해당없음

※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성함.

연구성과 활용계획서

1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input type="checkbox"/> 자유응모과제 <input checked="" type="checkbox"/> 지정공모과제	분 야		
연구 과제 명	스마트 온실의 순환식 수경재배 시스템 개발			
주관연구개발 기관	Development of Recycling Hydroponic Cultivation System for Smart Greenhouse		주관연구책임자	최경이
연구 개발비	정부지원 연구개발비	기관부담연구개발비	기타	총연구개발비
	1,750,000	123,500		1,873,500
연구개발기간	2021. 04. 07 - 2023. 12. 31(2년 9개월)			
주요활용유형	<input checked="" type="checkbox"/> 산업체이전 <input checked="" type="checkbox"/> 교육 및 지도 <input type="checkbox"/> 정책자료 <input type="checkbox"/> 기타() <input type="checkbox"/> 미활용 (사유:)			

2. 연구목표 대비 결과

당초목표	당초연구목표 대비 연구결과
① 복합 양분관리 플랫폼 구축	복합 양분관리 플랫폼 구축 후 검증 완료
② UV 살균 시스템 운용관리체계 구축	UV 살균 시스템 운용관리체계 구축 및 성능 검증
③ 이온농도 측정 센서 활용 양액재배 양분 실시간 모니터링 및 인공지능 기반 정밀 비료 공급 알고리즘 개발	이온농도 측정 센서 활용 양액재배 양분 실시간 모니터링 및 인공지능 기반 정밀 비료 공급 알고리즘을 작물재배 실증으로 검증

* 결과에 대한 의견 첨부 가능

3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표											연구기반지표										
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화					표준화		학술성과			교육지도	인력양성	정책 활용·홍보		기타 (타연구활용등)	
	특허출원	특허등록	SW저작권	SMART	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출	투자유치	국내	국제	논문 SCI	비SCI	논문평판 F			학술발표	정책활용		홍보전시
단위	건	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건		건	명	명	건	건	건
가중치	10	10			20		10	10									10	10		10	10	
최종목표	3	3	2		2	40	1	100						5	6	1.0	5	6				
1단계 실적	4.53		2		2	40	1	100						5	1	4.77	12	3	1		0	
2단계 실적	0.5	1													1		6	4	1		2	
달성률 (%)	167	50	100	100	100	100	100	100						100		907	300	166			200	

4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	복합 양분관리 플랫폼 구축
②	UV 살균 시스템 운용관리체계 구축
③	이온농도 측정 센서 활용 양액재배 양분 실시간 모니터링 및 인공지능 기반 정밀 비료 공급 알고리즘 개발

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 표시

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	복합 양분관리 플랫폼 구축을 활용한 순환식 수경재배 시스템 및 양분 관리
②의 기술	UV 살균 시스템 운용관리체계 구축을 통한 살균 성능 향상 및 농가 현장 운영기술 설정
③의 기술	이온농도 측정 센서 활용 양액재배 양분 실시간 모니터링 및 인공지능 기반 정밀 비료 공급 알고리즘을 적용한 단비 공급 순환식 수경재배 기술 발전

7. 연구종료 후 성과창출 계획

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표											연구기반지표									
	지식 재산권				기술실시 (이전)		사업화				표준화		학술성과			교육지도	인력양성	정책 활용·홍보		기타 (타연구활용액)(이)	
	특허출원	특허비율	SW저작권	SMART	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출	투자유치	국내	국제	논문 SCI	비SCI			논문평균-I/F	학술발표		정책활용
단위	건	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건		건	명	건	건	건
가중치	10	10			20		10	10									10	10		10	10
최종목표	3	3	2		2	40	1	100						5	6	1.0	5	6		1	1
연구기간내 달성실적	5.0	1	2		2	40	1	100						7	2	9.0	18	10			2
연구종료후 성과장출 계획								100							1					1	

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		실용화예상시기 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) 실용화예상시기 : 상품화인 경우 상품의 최초 출시 시기, 공정개선인 경우 공정개선 완료시기 등

4) 기술 이전 시 선행요건 : 기술실시계약을 체결하기 위한 제반 사전협의사항(기술지도, 설비 및 장비 등 기술이전 전에 실시기업에서 갖추어야 할 조건을 기재)

실증 성과보고서

연구개발과제명	스마트 온실의 순환식 수경재배 시스템 개발		과제번호	421006-3				
주관연구개발기관	시설원예연구소		주관연구책임자	최경이				
공동연구개발기관	시설원예연구소		공동연구책임자	최경이				
실증개요	실증성과명	스마트 온실의 순환식 수경재배 시스템 개발		구분	H/W	S/W	√	
	실증장소	제3자농장	해당	미해당	실증장소유형	스마트팜혁신밸리		
		장소명	국립원예특작과학원 시설원예연구소			일반(법인)농가		
		실증면적(㎡)	220㎡			정부출연·지자체		√
주소	경남 함안군 함안면 1425		기타					
실증현황	실증조건	실증품목(종)	토마토					
		필수기자재	수경재배 시설, 배액순환시스템(양액공급기, 3-way 밸브) 등					
		기타필수조건						
	실증목적	구분	성과물 성능에 대한 검·인증		트랙레코드·실증데이터 확보			
			목표 환경 친화성·제한성 검증	√	제품서비스 시연(시범농가)			
	내용							
	실증방법	활용기술	인공지능		빅데이터	√	사물인터넷	
			지능형로봇		신재생에너지		기타	
		수집데이터	환경데이터	√	생육데이터	√	제어데이터	√
	경영데이터			기타				
실증방법	내용	<ul style="list-style-type: none"> - 순환식 수경재배 시스템을 구축하여 과채류(토마토) 재배 - 월 2회 배액 이온변화 분석치 데이터 생성 - 배액의 이온변화에 대한 분석 데이터를 기반으로 kist에서 개발한 양분복합플랫폼 알고리즘을 통해 최적화된 양액을 조성하여 공급 						
		내용	<ul style="list-style-type: none"> - 배액의 이온 중 목표이온의 비율(다량요소)을 설정하여 목표치가 유지되도록 알고리즘 적용 - 적용효과에 대한 생산성(생육, 수량)의 영향 분석 					
실증결과	내용	<ul style="list-style-type: none"> - 배액의 이온 중 목표이온의 비율(다량요소)을 설정하여 목표치가 유지되도록 알고리즘 적용 - 적용효과에 대한 생산성(생육, 수량)의 영향 분석 						

결과를 위와 같이 제출합니다.

2024 년 2 월 29 일

주관연구개발기관 : 시설원예연구소

주관연구책임자 : 최경이 

실증 성과보고서

연구개발과제명	스마트 온실의 순환식 수경재배 시스템 개발	과제번호	421006-03					
주관연구개발기관	국립원예특작과학원 시설원예연구소	주관연구책임자	최경이					
공동연구개발기관	경기도농업기술원	공동연구책임자	황지은					
실증개요	실증성과명	엽채류(주목) 직분별 순환식 수경재배 시스템 현장 실증		구분	H/W √ S/W			
	실증장소	제3자농장	해당	미해당	√	실증장소유형		
		장소명	경기도농업기술원 첨단온실				스마트팜혁신밸리	
		실증면적(㎡)	330				일반(법인)농가	
		주소	경기도 화성시 병점중앙로 283-33				정부출연·지자체	
				기타	√			
실증현황	실증조건	실증품목(종)	엽채류(카이피라, 로메인)					
		필수기자재	복합 양분관리 플랫폼, 순환식 수경재배 시스템, 이온선택전극기반센서					
		기타필수조건						
	실증목적	구분	성과물 성능에 대한 검인증	√	트랙레코드실증데이터 확보	√		
		내용	시스템 실증 시험을 통한 효과 분석 및 검증					
	실증방법	활용기술	인공지능		빅데이터		사물인터넷	√
			지능형로봇		신재생에너지		기타	
		수집데이터	환경데이터		생육데이터	√	제어데이터	√
			경영데이터		기타			
		내용	1) 시험작목 : 상추 2품종(카이피라, 로메인) 2) 양액조성 : 호글랜드 엽채류 범용 조성 3) 처리 방법 - 처리 : 순환식 수경재배 자동 양분공급 시스템 실증 (순환식 수경재배 시스템(신한에이텍) + 양분복합플랫폼(KIST) + 이온선택전극기반센서(서울대)) - 대조 : EC만 보정하여 양액 순환 4) 양액 pH 및 EC농도 : 5.5 ~ 6.5, 1.6 ~ 2.0dS/m 5) 조사항목 : 양이온, 음이온 등 양액 성분, 엽장, 엽폭 등 생육특성					
실증결과	내용	- 2차 작기부터 K이 관행인 대조구에서 처리구 대비 2배이상 크게 감소하는 반면 처리구에서 일정 범위로 유지되는 경향을 보임 - 3차 작기때부터 대조구의 앞에서 K 결핍증상을 보였으며 엽 분석결과 K 함량이 처리구보다 낮았음 - 식물체 생육 특성은 3차 재배시 카이피라의 경우 초장에서 유의한 차이를 보였으며 생체중은 처리구가 대조구 대비 카이피라 1.4배, 로메인 1.7배 더 높았음 - 재배기간 동안 비료 총 투입량 비교시 처리구는 3,600mg, 대조구는 7,680mg으로 약 1.5배 비료를 절감할 수 있었음						

결과를 위와 같이 제출합니다.

2024 년 2 월 29 일

주관연구개발기관 : 시설원예연구소

주관연구책임자 : 최경이

스마트팜 R&D 빅데이터 플랫폼 연계/활용 계획서

연구개발 과제명	스마트 온실의 순환식 수경 재배 시스템 개발			과제번호	421006-03		
주관연구 개발기관	국립원예특작과학원 시설원예연구소			주관연구 책임자	최경이		
기본 정보							
데이터 용량(MB)	정형	영상	음향	이미지	3D	분광데이터	기타
	305.0						200
수집							
구분	양식명	유형	분류-품목	용량	수집 시작일	수집 종료일	등록일시(예정)
1	엽채류 급액-양액정보데이터	정형	상추	100	21.04.	23.12.	21.04.
2	토마토 급액-양액정보데이터	정형	토마토	100	21.04.	23.12.	21.04.
3	어온선택성 전극 배액 측정 전압 및 농도	정형	상추	5	22.10.	23.12.	22.12.
4	파프리카 급액-양액정보데이터	정형	파프리카	100	21.04.	23.12.	21.04.
5	배액 시료 분석 레퍼런스	기타	상추	100	22.10.	23.12.	23.06.
6	금수 이력 및 솔레노이드 밸브 제어 이력	기타	상추	100	22.10.	23.12.	23.06.
분석							
정상 파일 수		타입오류		범위오류			
12		0		0			
모델							
구분	양식명	유형	운영체제	개발언어	라벨링도구	성능지표/결과	등록일시(예정)
1	순환식 수경재배 양분관리 및 배액 공급 알고리즘	시드랩(주장/예측)	ubuntu 18.04	python 3.8	-	정밀재배 / 04, 0402 / 7.04	23.12.
2							
3							
4							
5							
활용							
구분	양식명	유형	대분류	사이트 URL	동영상 URL	등록일시(예정)	
1	수경재배복합양분관리플랫폼	웹/플랫폼 개발	제어	http://nutriadll.com/	—————	23.12.	
2							
3							
기타 부가설명							

결과를 위와 같이 제출합니다.

2024 년 02 월 29 일

주관연구개발기관 : 국립원예특작과학원 시설원예연구소

주관연구책임자 : 최경이 (인)