

119091-01

1세대 플랜트팜 복합환경제어기 및 순환식 양액시스템 (혁신밸리) 실증화 및 고도화

2021

농림축산식품부

농림식품기술기획평가원

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

1세대스마트플랜트팜산업화사업 2021년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-003427-01

# 1세대 플랜트팜 복합환경제어기 및 순환식 양액시스템 (혁신밸리) 실증화 및 고도화

2021.03.26.

주관연구기관 / 신한에이텍(주)  
협동연구기관 / 한국과학기술연구원

농림축산식품부  
(전문기관)농림식품기술기획평가원

<제출문>

## 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “1세대 플랜트팜 복합환경제어기 및 순환식 양액시스템 (혁신밸리) 실증 및 고도화”(개발기간 : 2019. 8. 30 - 2020. 11.29.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2021.03.26.

주관연구기관명 : 신한에이텍(주) (대표자) 김 형 규  
협동연구기관명 : 한국과학기술연구원 (대표자) 윤 석 진  
위탁연구기관명 : 경상대학교 산학협력단 (대표자) 강 상 수



주관연구책임자 : 장 재 옥  
협동연구책임자 : 이 주 영  
위탁연구책임자 : 김 현 태

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

## 보고서 요약서

과제고유번호	119091-01-1-CG000	해 당 단 계 연 구 기 간	2019. 8. 30 ~2020.11.29	단 계 구 분	1/1
연구사업명	단 위 사 업	농식품기술개발사업			
	사 업 명	1세대 스마트 플랜트팜 산업화			
연구과제명	대 과 제 명	(해당 없음)			
	세 부 과 제 명	1세대 플랜트팜 복합환경제어기 및 순환식 양액시스템 (혁신밸리) 실증 및 고도화			
연구책임자	해당단계 참여연구원 수	총: 12명 내부: 12명 외부:   명	해당단계 연구개발비	정부:400,000천원 민간:133,400천원 계:533,400천원	
	총 연구기간 참여연구원 수	총: 12명 내부: 12명 외부:   명	총 연구개발비	정부:    천원 민간:    천원 계:    천원	
연구기관명 및 소 속 부 서 명	주관연구기관: 신한에이텍(주) 협동연구기관: 한국과학기술연구원			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위 탁 연 구	연구기관명: 경상대학교 산학협력단			연구책임자: 김현태	

※ 국내외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	
-------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 ·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁 번호	N	Y	Y	N	Y	Y	N	N	N	N	N

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

- 실증 테스트베드 구축
  - 순환식 수경재배 시스템의 농가 실증 및 자체 실증 테스트 베드를 구축하고 시스템을 설치함.
- 순환식 수경재배시스템 실증현장적용, 성능평가 및 고도화
  - 자체 실증 테스트 베드 및 실증 농가 현장 적용을 통해 재사용 양액 살균기의 안전성·안정성 평가 및 규격화를 수행함.
  - 순환식 수경재배 시스템의 안정적인 배액 재사용을 위한 양분흡수 지표 개발: 시스템 상에서 실시간 수집이 가능한 관수·배액 데이터 기반의 양분흡수 지표를 개발하여 배액 재사용 비율의 동적 제어 기반을 구축함.
  - 순환식 수경재배 시스템의 안정적인 양분 관리를 위한 이온 균형 관리 프로그램의 고도화
  - 재사용 양액의 안정적인 혼합을 위한 pH 및 EC 제어: 기계학습 기반의 혼합탱크 pH 및 EC 제어 기술 적용, 배액 재사용 조건에서 관수 목표값 대비 90% 이상의 정확도 수준에서 제어 수행
- 온실환경제어시스템 성능평가 및 고도화
  - 스마트 팜 시스템 적용 실증온실 환경구축
  - 온실환경제어 시스템 제어성능평가(내부온도, 습도, Co2) 및 순환식 양액공급시스템과의 연동을 위한 제어 파라미터 및 변수 도출 및 인터페이스 개발

보고서 면수



<요약문>

<p>연구의 목적 및 내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 실증 테스트베드 구축               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 온실환경제어·순환식 수경재배 시스템의 성능 및 운용 안정성 데이터 확보를 위한 자체 테스트 베드 및 농가 실증환경의 구축</li> </ul> </li> <li>○ 순환식 수경재배시스템의 현장 성능평가 및 고도화               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 순환식 수경재배시스템의 재사용 양액 살균 기술: 자체 실증 테스트 베드 및 실증 농가에서 순환식 수경재배시스템을 실증하여 일정기간 미생물 농도 변화(비순환식과 비교), 안전성·안정성 평가 및 규격화(성능 검증)</li> <li>- 안정적인 배액 재사용을 위한 on-line 식물 양분 흡수지표 개발(배액 재사용 비율 유동적 제어 기반 구축), 재사용 양액 혼합 시 안정적인 pH·EC 제어를 위한 기계학습 기반 제어 기술 적용</li> <li>- 양액 재이용에 따른 이온불균형 해소를 위한 순환식 수경재배 시스템 이온 균형 관리 알고리즘 개발 및 프로그램화(고도화)</li> <li>- 주기적 현장샘플 분석을 통한 생육단계별 이온별(주요 및 미량원소) 패턴 분석</li> </ul> </li> <li>○ 1세대 스마트팜 온실환경제어 시스템 핵심기술의 산업화를 위한 스마트팜 혁신밸리 연계 및 현장 실증연구               <ul style="list-style-type: none"> <li>- 사용자의 제어설정에 의한 온실의 환경제어 성능평가</li> <li>- 양액공급시스템과의 연동을 위한 인터페이스 기능 개발</li> </ul> </li> </ul>				
<p>연구개발성과</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 실증 테스트베드 온실 구축 1건</li> <li>○ 스마트팜 기자재 실증시험 및 고도화 2건, on-line 식물 양분 흡수지표 개발 SCI 논문 1건, 순환식 수경재배 시스템 살균 및 양분 균형제어 특허 6건, 학술발표 3건, 네덜란드 원예산업지 (홍보소개)</li> <li>○ 제품화 2건, 매출액 150,000천원</li> </ul>				
<p>연구개발성과의 활용계획 (기대효과)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ H/W, S/W 기술의 검증을 통한 순환식 수경재배시스템 및 온실환경제어 시스템의 경제적·기술적 타당성을 확보</li> <li>○ 스마트팜 혁신밸리의 실증사업과의 연계를 통해 스마트팜 분야의 핵심 기술 개발 가속화</li> <li>○ 식물-근권부-순환식수경재배 시스템 사이의 독자적·체계적 연결 기반의 구축을 통해 차세대 수경재배 기술 시장의 지배적 기술지위 확보를 위한 기반 마련</li> </ul>				
<p>국문핵심어 (5개 이내)</p>	순환식	수경재배	온실환경제어	스마트팜	관수
<p>영문핵심어 (5개 이내)</p>	Recycling	Hydroponics	Greenhouse environmental controll	Smart farm	Irrigation

<본문목차>

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요 .....  
2. 연구수행 내용 및 결과 .....  
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 .....  
4. 연구결과의 활용 계획 등 .....  
붙임. 참고 문헌 .....

<별첨> 주관연구기관의 자체평가의견서

# 1장 연구개발과제의 개요

## 1. 연구개발 목적

- 스마트팜 기자재 산업화를 위한 스마트팜 혁신밸리 연계 스마트팜 기자재 실증환경 구축
  - 토마토 경작온실을 선정하여 온실환경제어시스템, 순환식 수경재배시스템을 적용하고 실증환경을 구축
  - 실증 데이터 수집 및 실증 기술의 스마트팜 혁신밸리 연계
- 순환식 수경재배 1세대 핵심기술의 산업화를 위한 스마트팜 혁신밸리 연계 및 현장 실증연구
  - 순환식 수경재배시스템의 재사용 양액 살균 기술: 농가에 순환식 수경재배시스템을 설치 및 실증하여 일정기간 안전성, 안정성 평가 및 규격화
  - 순환식 양액공급시스템의 pH와 EC 조절 기술 적용: 기계학습 방법을 적용하여 재사용 양액의 pH 및 EC 제어의 안정성, 정밀성 향상
  - On-line 양분흡수지표의 개발을 통한 배액 재사용 비율 동적 제어기반 확보
  - 양액 재이용에 따른 이온불균형 해소를 위한 양액제어 기술: 양액 성분 분석 및 배액량과 EC 조절을 이용한 재사용 양액 관리 및 제어프로그램
- 1세대 스마트팜 온실환경제어 시스템 핵심기술의 산업화를 위한 스마트팜 혁신밸리 연계 및 현장 실증연구
  - 온실환경제어 시스템의 농가실증을 통한 성능 평가: 농가에서 온실환경제어 시스템을 설치 및 실증하여 일정기간 성능평가 및 규격화
  - 온실환경제어 시스템 고도화: 순환식 양액공급시스템과의 연동을 위한 제어 파라미터 및 변수도출 및 인터페이스

## 2. 연구개발의 필요성

### 가. 국내 기술 현황

- 국내 스마트팜 기술 연구 현황
  - 스마트팜 농업 기술은 농업과 정보통신기술의 융합 기반을 활용하여 온실 환경 및 작물의 생육상태 등에 대한 데이터를 실시간으로 수집하고 이를 작물 재배에 활용함.
  - 국내 스마트팜의 기술 수요는 증가하고 있으나, 현 상황에서 이용되는 주요 부품이나 핵심 기술들은 주로 외산을 구매하여 시스템을 구축하는 것이 일반적임.
  - 상당수 농가가 외산 장비를 도입하여 사용하고 있으나 제품가격, 운용 및 유지보수에 대한 부담과 제품간 상호 호환성 결여로 인한 어려움을 겪고 있음.
  - 국내에서는 정부를 중심으로 스마트팜 개발, 연구 및 시범사업 등을 추진하고 있으나, 농림

수산식품부의 조사에 따르면 국내의 기술 수준은 최고기술 보유국인 네덜란드 대비 65.1% 수준으로 약 9.8년의 기술격차가 있는 것으로 평가됨.

- 국내 스마트팜 기술 세대는 스마트팜의 데이터 플랫폼을 통해 수집된 데이터의 활용 수준에 따라서 구분될 수 있음.
- 1세대는 사용자의 편의성 제공을 목적으로 주로 식물의 생육환경에 대한 정보 제공을 자동화하며, 2세대는 식물 생체 및 환경 데이터를 활용하여 사용자에게 의사결정의 자동화를 제공하며, 최종적으로 3세대에서는 로봇을 통한 농작업의 자동화와 수출 가능한 수준의 기능 수행을 목표로 하고 있음.



출처: 농촌진흥청

[그림 1.1] 세대별 한국형 스마트팜 모델

- 농촌진흥청은 2세대 한국형 스마트 온실 개발을 위해 유럽계 완숙토마토의 생육 및 수확량 예측을 위한 생육모델(2016년)과, 파프리카와 딸기에 대한 생육모델(2017년) 개발을 수행하였으며, 2018년 2세대 스마트온실(자동제어, 클라우드)인 한국형 스마트팜 모델의 현장실증을 추진하고 2020년 3세대 스마트온실의 복합환경제어, 로봇에 대한 개발을 진행 중임.

○ 국내 순환식 수경재배 기술 연구 현황(양액 살균 기술)

- 순환식 수경재배시스템의 핵심기술 중 재사용 양액의 살균 기술은 수경재배에서 오염된 배액의 내 병원성 박테리아, 세균, 및 진균류의 재배 시스템 내 확산을 억제하는데 있어 필수적인 기술에 해당됨.
- 살균설비의 종류로는 가열(Heating), 자외선(UVC), 자외선 LED (UVC-LED), 필터, 오존 등이 있음.
- 순환식 수경재배 시스템의 살균 관리 기술은 국립원예특작과학원, 부산대학교, 상명대학교, 강원대학교 등을 중심으로 다음과 같은 주제를 대상으로 최근까지 연구된 바 있음.
  - 유기배지 사용년수에 따른 증기 소독 기술개발
  - 배액의 친환경 전기살균소독시스템 실용화 기술개발
  - 순환액 알고리즘 및 순환식 배양관리프로그램 개발
  - 코이어배지 사용년수별 배액 재사용 급액체계 확립
  - 배액 재사용 기술 현장 적용시험 및 배액 재사용 기준설정
- 살균설비 중 자외선 살균장치는 현재 국내에서 가장 널리 사용되는 순환식 수경재배 설비

로써 UVC(200-280 nm)를 이용해서 병원균 DNA를 손상해 살균하는 방식임.

- KIST 천연물연구소는 양액기 제조업체(신한에이텍(주)) 및 LED 업체((주)루코)와 협력연구를 통하여 UVC-Lamp와 UVC-LED를 이용하여 양액을 살균할 수 있는 모듈을 개발함.

[표 1.1] 살균 기술의 장단점 및 설치 비용 요약

살균방식	장점	단점	초기설치비용
완속모래여과	낮은 설치비용	높은 공간요구도 미생물에 따라 제거 효율 변동	중간
가열	높은 살균성능	높은 운영비용	중간
UV	낮은 공간요구도	탁도의 영향을 받음 Fe-EDTA와 같은 미량요소에 영향	높음
멤브레인	높은 살균성능	막오염 현상	높음
염소소독	높은 살균성능	높은 운영비용 식물 생육에 영향	중간
오존	높은 살균성능	높은 운영비용 살균성능에 유기물질의 영향	높음
과산화수소	낮은 운영비용	미량원소에 영향 유기물질에 성능 영향	낮음

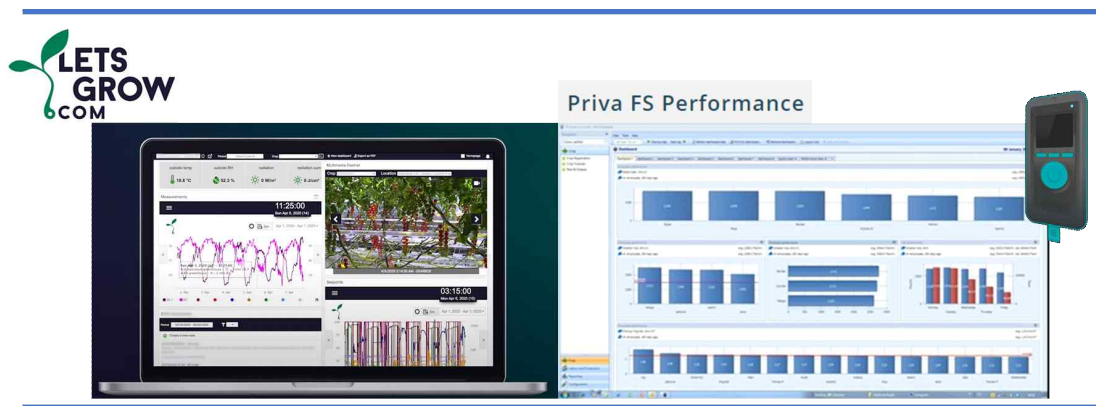
○ 국내 순환식 수경재배 기술 연구 현황(양분 관리 기술)

- 순환식 수경재배 시스템에서는 근권부 병원균 관리 기술에 더해 양분 관리 기술이 필수적으로 요구됨.
- 국립원예특작과학원은 유기배지경 재배시 양액 재이용을 위한 양수분 흡수특성 연구(2017년)를 수행하였으며, 급액, 배액 및 근권의 양분분석을 통해 생육 단계에 따른 pH와 EC 변화 및 양분흡수를 구명하고, 순환식 수경재배 양분관리의 기초 연구를 수행함.
- 또한 파프리카 순환식 수경재배시 생육단계별 급배액 및 근권분석을 통한 양수분흡수 특성을 구명하고 각 양액조성별 작물생육 및 수량을 조사하여 생육단계별 파프리카 순환식 배양액 조성을 위한 데이터 획득을 위한 연구를 수행함.
- 현재 순환식 수경재배 시스템을 도입한 농가의 양분 관리는 주기적인 양분 분석에 근거하여 이루어지고 있으나, 아직 양액 재사용 조건에서의 양분 관리 기술의 체계화는 이루어지고 있지 못하고 있음.
- 국내의 양액 분석기관에서는 대부분 비순환식 수경재배시스템에 적합한 양액 처방전을 발행하고 있으며, 서울시립대에서는 원수 및 배액분석과 근권목표 수준을 고려하여 파프리카 전용배양액처방프로그램(2009, 서울시립대) 개발하였으며, 일반 양액 처방 관련 상용화된 국내 제품으로는 HydroFeed가 있음.

## 나. 국외 기술 수준 및 시장 현황

### ○ 국외 스마트팜 기술 현황

- 세계 농업선진국인 미국, 네덜란드, 일본 등에서는 농산물 품질 및 생력화를 위한 첨단 로봇 기술 개발을 추진 중.
- 네덜란드와 일본의 경우 하드웨어나 관제제어 S/W, 재배기술 노하우 등을 종합적으로 공급하여 재배관련 전문가 시스템과 생육 진단·분석 알고리즘 분야에서 우위에 있음.



출처: LetsGrow.com, Priva.com

[그림 1.2] 네덜란드 재배 전문가 시스템 서비스(좌) 및 온실 정보 통합관리 시스템(우)의 예

- 네덜란드는 세계 수준의 온실 복합환경제어 시스템을 개발하여 세계 각국으로 수출하고 있으며 ICT, 에너지 관리 및 재해방지 기술이 결합된 표준모델에 복합환경 제어가 가능한 시스템을 구비하고 있음.
- 일본은 ICT접목 온실인 IGH(Innovation GreenHouse)에서 일본 내에서 최초로 일반토마토 재배에 있어 10a 당 50톤의 수확을 달성하였으며, 농가의 감각에 의존하던 재배방식을 ICT 기술과 융합하여 일반재배시설보다 높은 수확량을 달성하고 동시에 고품질 토마토를 생산하기 위해 연구 개발 중.

[표 1.2] 주요국가 스마트 농업 기술현황

구분	주요 내용
미국	농업에 IoT뿐만 아니라 나노, 로봇, 기술 등 융복합을 통해 기술개발 추진 구글의 경우 토양, 수분, 작물건강에 대한 빅데이터를 수집하여 종자, 비료, 농약살포에 도움을 주는 인공지능 의사결정 지원 시스템 개발 진행 중.
네덜란드	대표적 원예국가로 설치된 온실의 99%가 유리온실이며, 복합환경제어가 가능한 시스템을 구비. 수십년 간 누적된 데이터와 재배 환경 최적화 노하우를 기반으로 각종 센서 및 제어와 관련된 제어 솔루션 개발.
일본	후지쓰, NEC, NTT 등 대기업 중심으로 농업분야에 ICT 기술을 접목한 다양한 서비스 제공

○ 국외 순환식 수경재배 기술 현황(양액 살균 기술)

- 국외 순환식 수경재배 시스템의 주요 기업으로는 Priva(네덜란드), Rough Brothers(미국), Platabon(스위스) 등이 있음.
- 순환식 수경재배 관련 기술 개발의 선진국은 네덜란드로, 1999년 순환식 수경재배로의 전환을 법제화(The Waste Water Disposal Decree) 하였으며 현재 시스템의 보급률은 95%에 달함.
- Priva, Hoogendoorn, Hortimax와 같은 네덜란드 기업들은 UV-Lamp 양액살균장치 기반 순환식 수경재배시스템과 소프트웨어를 판매 및 개발하여, 상업 농가의 재사용 양액 살균 관리 기술을 체계화 하고 있음.



[그림 1.3] 네덜란드 기업의 순환식 수경재배 재사용 양액 살균 장치의 예

- Priva의 UV 살균 장치의 경우 국내의 순환식 도입 농가에서 많이 이용되고 있으며, 살균 효과에 영향을 미치는 배액의 탁도 관리를 위해 모래여과 전처리 공정을 두고 있음.
- 최근 PRIVA사 경우, PRIVA VIALUX Line 모델을 출시하였으며, 처리용량과 확정성을 기반으로 다음 3가지 형태로 구성됨.
  - Vialux HD-UV+Vialux E-line module
  - Vialux M-Line+Vialux E-Line module

- Vialux E-Line System

- Hortimax사 제품은 사용자 친화적인 HMI를 갖추고 있으며 사용법이 간편하나, 확장성에 취약하고 UV-Lamp 교체에 비용이 많이 소모되는 것으로 알려져 있음.
- Hoogendoorn 사의 순환식 수경재배용 UV 살균제품은 타사에 비해 시장의 관심도가 상대적으로 떨어지는 편이지만 전처리 기술과 살균 기술이 우수한 것으로 알려져 있음.
- 현재까지는 국내 순환식 수경재배 살균 기술은 네덜란드의 수경재배 기업들이 많이 점유하고 있음.

○ 국외 순환식 수경재배 기술 연구 현황(양분 관리 기술)

- 네덜란드의 순환식 수경재배 관리기술 및 서비스 인프라는 2015년을 기준으로 보급 완료 수준에 이르고 있음.
- 양액분석 및 조제 플랫폼이 구축되어 있으며, 관련 서비스 인프라가 잘 구비되어 폐양액의 90% 이상을 절감.
- 네덜란드의 경우 재사용 양액의 분석에 소요되는 시간은 1~1.5일이며 전자메일을 통해 분석결과를 통보하는 시스템을 갖춘.
- 생육단계별(0~4단계) 양액조성이 가능한 과채류 전용 순환식 양액을 개발하여 개발되어 이에 대한 관리 매뉴얼이 보급됨.
- 네덜란드 순환식 수경재배시스템 연구로 Hydrion-line project는 실시간 작물계측센서, 작물의 양분요구도 예측 모델 개발, 양액 공급조절 통합 체계 구축 등에 대한 실용적 연구가 수행됨.
- 네덜란드는 순환식 수경재배시스템이 잘 갖추어져 있기 때문에 양배액의 수질을 분석하여 이를 기반으로 처방을 진행하는 프로토콜도 잘 갖추어져 있으나, 아직 네덜란드도 완전한 배액 재사용 단계까지는 도달하지 못하고 있음.
- 네덜란드의 순환식 수경재배는 향후 기술 연구 지원 및 제도적인 노력을 통해 배액 재사용율을 향상시키고, 궁극적으로는 완전한 재사용을 위한 방향으로 준비되고 있음.

-

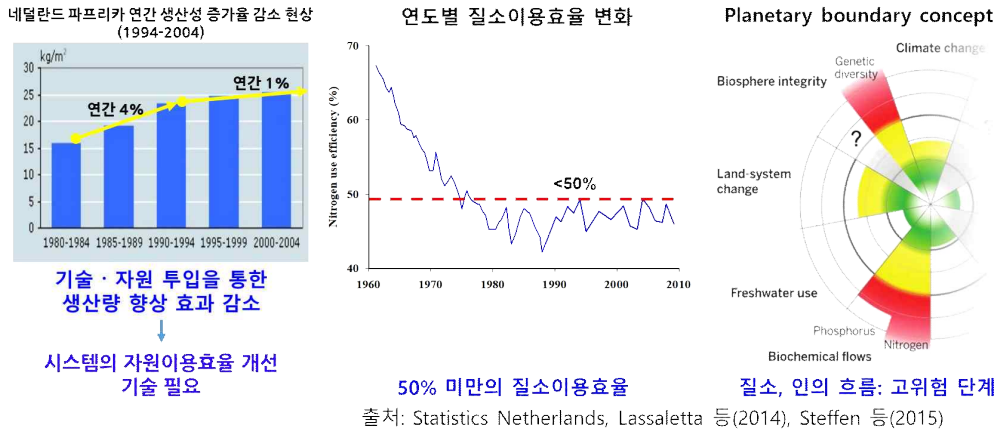
## 다. 국내 연구개발의 필요성

○ 현대 농업 생산 시스템의 당면과제

- 현재 농업 생산시스템의 생산량은 녹색혁명에서 유래한 비료, 물 관리, 농약, 육종 등의 기술적 유입을 바탕으로 지난 60년 전과 비교해 배로 증가하였으며, 전 지구적 식량 공급에 기여하였음.
- 농업 생산 시스템의 생산량 증가를 견인했던 기술과 자원의 투입 효과는 20세기 들어 점차 감소하기 시작하였으며, 현대의 농업은 자원 이용효율을 증가시키기 위한 농업 생산시스템

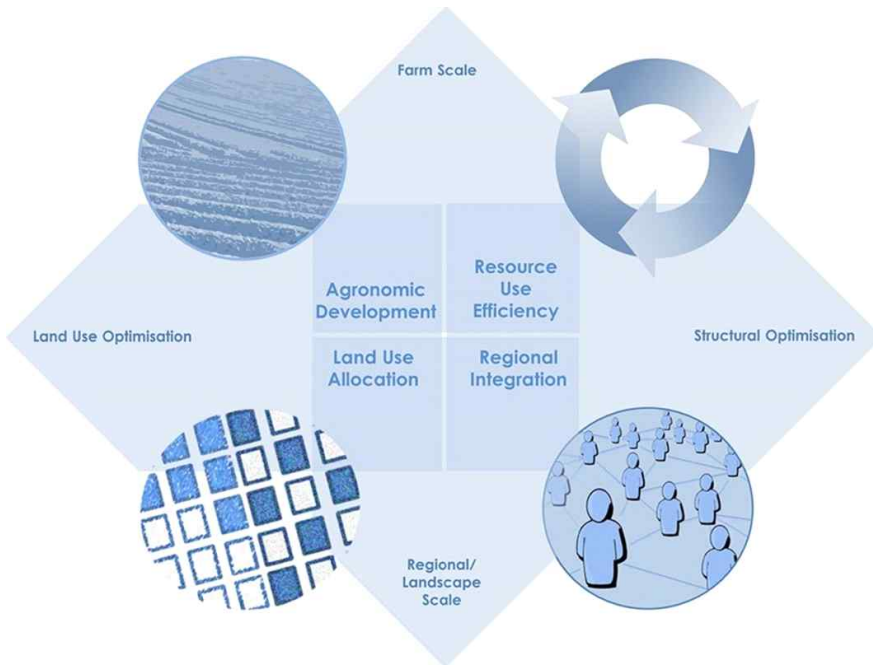


의 재설계 및 이를 위한 적절한 기술 개발에 대한 압박을 받고 있음.



[그림 1.4] 현대 농업 생산 시스템의 기술 및 자원 이용 현황

- 자원 사용량은 최소화 하면서 생산성은 향상시키기 위한 지속가능한 강화(Sustainable Intensification)은 이러한 요구에 대응하기 위한 접근법의 대표가 됨.
- 현재의 농업 생산 시스템은 자원의 손실 최소화과 그 이용 효과를 최대화하기 위한 기술 개발의 기류가 형성되어가고 있음.

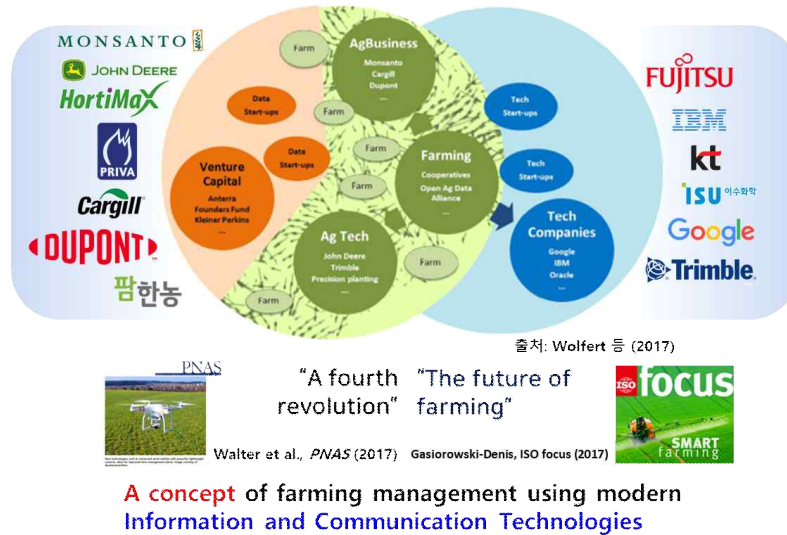


출처: Weltin 등 (2018)

[그림 1.5] 지속가능한 강화(Sustainable Intensification)의 개념도

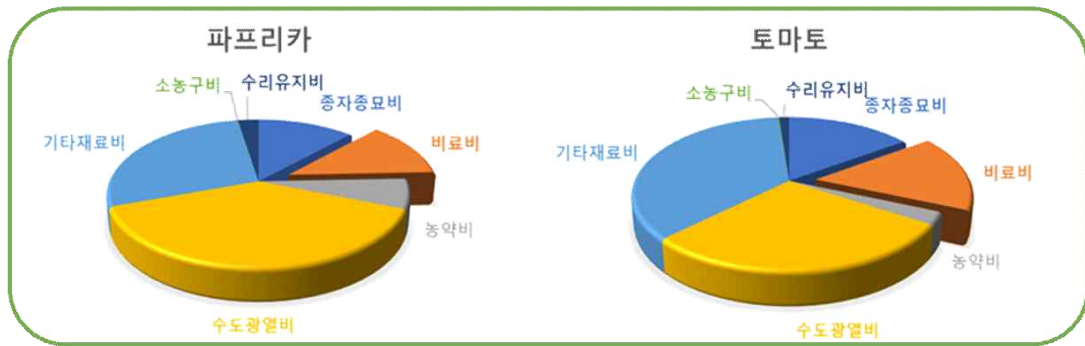
○ 스마트 농업 및 순환식 수경재배 시스템의 국내 연구 필요성

- 스마트 농업 기술은 현재 농업 생산성의 극대화를 통해 농업 생산 시스템을 혁신하는데 있어 매우 중요한 개념으로 자리잡고 있으며, 저명 학술지인 PNAS와 국제표준기구인 ISO의 발간 잡지등을 통해서도 스마트팜에 대한 기술 전망을 심도있게 다루고 있으며, 관련 요소 기술에 대한 잠재적 수요와 기업 참여가 급증하고 있음.



[그림 1.6] 스마트 농업에 대한 표준, 산업, 학술적 흐름의 현황

- 수경재배 기술은 농업 시스템의 지속가능한 강화에 대한 요구에 있어, 중요한 재배 플랫폼으로 주목을 받고 있음.
- 농업 시스템의 재설계에 대한 요구와 함께 수경재배 시스템의 활용은 지속적으로 증가해왔으며, 한국의 경우 2000년 700 ha에서 2017년에 3,355 ha 까지 증가하였으며, 미국의 수경재배 생산물의 시장 규모의 경우 2014년에 이르러 7억 9천만 달러 수준에 도달하였음.
- 수경재배 시스템 활용의 전세계적인 증가 추세에 반해, 실제 수경재배 상업 농가의 양분 및 수분 자원의 재사용 시스템 이용 비율은 네덜란드와 같은 특정 국가를 제외하면 매우 낮은 상황임.
- 순환식 수경재배 시스템의 이용 비율은 국내의 경우 5%, 스페인 수경재배 생산의 대표적인 지역인 알메리아의 경우 12%만이 순환식 수경재배 시스템을 사용하고 있음.
- 노지 재배에 비해 수경재배의 절대적인 면적은 상대적으로 작은 편이나, 수경재배 시스템의 비료 사용 강도(연간 질소 비료 사용 강도 약 2100kg/ha, 비순환식 기준)는 농업 시스템의 평균적인 사용 수준(연간 질소 비료 사용 강도 약 70kg/ha)을 훨씬 상회함.
- 국내외적으로 수경재배 시스템으로부터 배출되는 양분은 이제 실질적인 환경 문제로 주목 받고 있음.
- 환경문제와 더불어 국내 농가의 양수분 자원 손실에 따른 경제적 손실 또한 농가 경영의 실질적인 문제로 작용하고 있음.



출처: 농진청 농작산물 표준소득(2017)

[그림 1.7] 파프리카, 토마토 농가 경영비 비율

○ 국내외 관련 연구 기술적 한계

- 현재 스마트팜 기술은 1세대 스마트 팜으로 인터넷 원격모니터링 및 제어가 가능한 수준으로 전통농업에 비해 편의성을 크게 향상시켰으나 농사지식은 있지만 ICT가 익숙하지 않은 고령 농업인의 접근이 어려운 기술적 한계발생
- 실시간 수집되는 작물의 재배환경 및 생체정보를 클라우드 인공지능 시스템이 분석 처방하여 최적의 생산을 위한 의사결정을 지원하여 생산성향상하고 기계학습과 인공지능을 위해 농가가 개별적으로 고성능컴퓨터 시스템을 보유하는 대신 클라우드 시스템 활용으로 비용을 줄이고 생산성을 높이는 방법이 필요한 상태임.
- 현재 국내외 순환식 수경재배 시스템의 양분 관리 분야는 확산 가능한 체계화된 관리기술의 부재 상태임.
- 네덜란드의 경우 “Hydrion-line” 프로젝트를 통해 개별 양분의 실시간 측정 기반의 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템을 구축하기 위한 시도를 하였으나, 기술 확산까지는 연결되지 못함.
- 차세대 순환식 수경재배 양분 관리 기술 시장은 현재 비순환식 양분 관리방식을 대체할만한 지배적 기술이 부재한 상태임.
- 안정적이며 경제적인 양액 재사용 시스템의 산업화와 함께 순환식 수경재배 양분 관리 기술의 고도화를 달성할 경우 지속가능한 강화” 성능이 요구되는 차기 농업 기술 시장의 선점에 유리한 위치를 확보할 수 있을 것으로 기대됨.

### 3. 연구개발 범위

- 본 연구개발은 ① 실증 테스트베드 구축 운영, ② 순환식 수경재배시스템의 현장 성능평가 및 고도화, ③ 1세대 스마트팜 온실환경제어 시스템 핵심기술의 산업화를 위한 스마트팜 혁신밸리 연계 및 현장 실증연구를 목적으로 하며, 이를 달성하기 위한 구체적인 연구 범위는 ‘성능평가’ 영역과 ‘고도화’ 영역으로 구분됨.
- 성능평가
  - 온실환경제어·순환식 수경재배 시스템의 자체 테스트 베드 및 농가 실증환경의 구축
  - 순환식 수경재배 재사용 양액 살균기술의 농가 설치 및 실증
  - 실증데이터 수집 및 분석
- 고도화
  - On-line 양분흡수지표 개발을 통한 배액 재사용률 동적 제어 기반 구축 및 재사용 혼합양액 pH·EC의 안정적 제어
  - 양액 재이용에 따른 이온불균형 해소를 위한 재사용 양액 균형 관리 알고리즘 및 프로그램 개발
  - 온실환경제어 시스템 고도화

## 2장 연구수행 내용 및 결과

### 1. [성능평가] 온실환경제어·순환식 수경재배 시스템의 자체 테스트 베드 및 농가 실증환경의 구축실증 테스트 베드 구축 운영

#### 가. 온실복합환경제어 및 순환식 수경재배 시스템의 적용이 가능한 농가 선정

- 실험에 이용된 온실은 경남 함안지역의 파프리카 온실로 대상 온실의 상호간 직선거리는 2km 이내에 위치하여 외부 기상환경 편차가 적으며, 온실의 형태, 재배작목 및 품종이 동일하다. 특히 정식 후, 재배기간의 편차가 적어 온실 내부환경 요인 이외에 간섭 요인을 최소화 하였다. 표1은 실험대상 온실의 현황을 나타낸 것이다.

표1-1. Greenhouse status.

Classification	A greenhouse	B greenhouse	C greenhouse
Greenhouse type	8 multispans	7 multispans	9 multispans
Center height(m)	7.4	7.4	7.4
Side height(m)	5.4	5.4	5.4
Length(m)	82.5	88.4	68.8
Width(m)	64.0	56.0	72.0
Area(m <sup>2</sup> )	5,280.0	4,950.0	4,950.0
Heating	electricity	electricity	electricity
Environmental controller	SHINHAN A-TEC GK-3000	SHINHAN A-TEC GK-3000	SHINHAN A-TEC GK-3000
Culture fluid feeder	SHINHAN A-TEC SH-2000	SHINHAN A-TEC SH-2000	SHINHAN A-TEC SH-2000
Installation year	2009	2008	2007



(a) A greenhouse



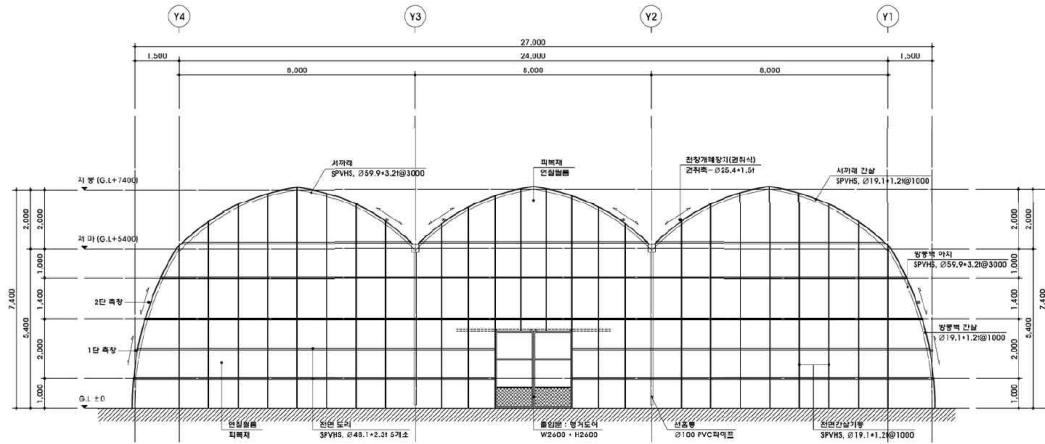
(b) B greenhouse



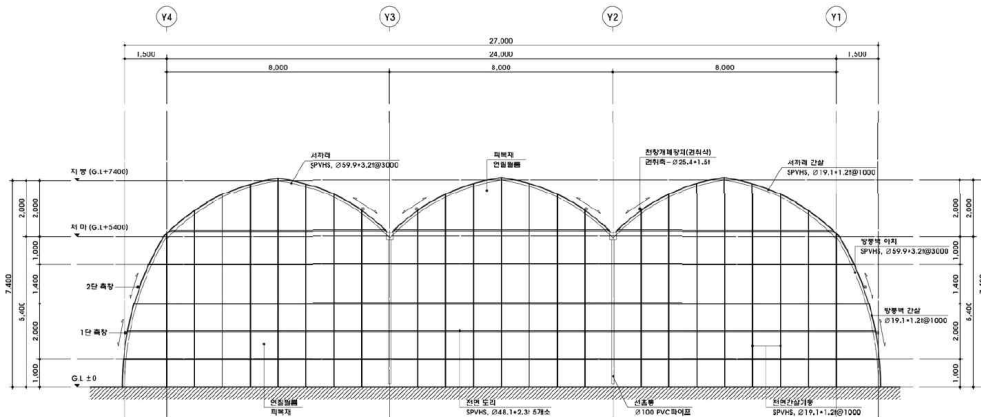
(c) C greenhouse

그림1-1. Views of experiential greenhouse.

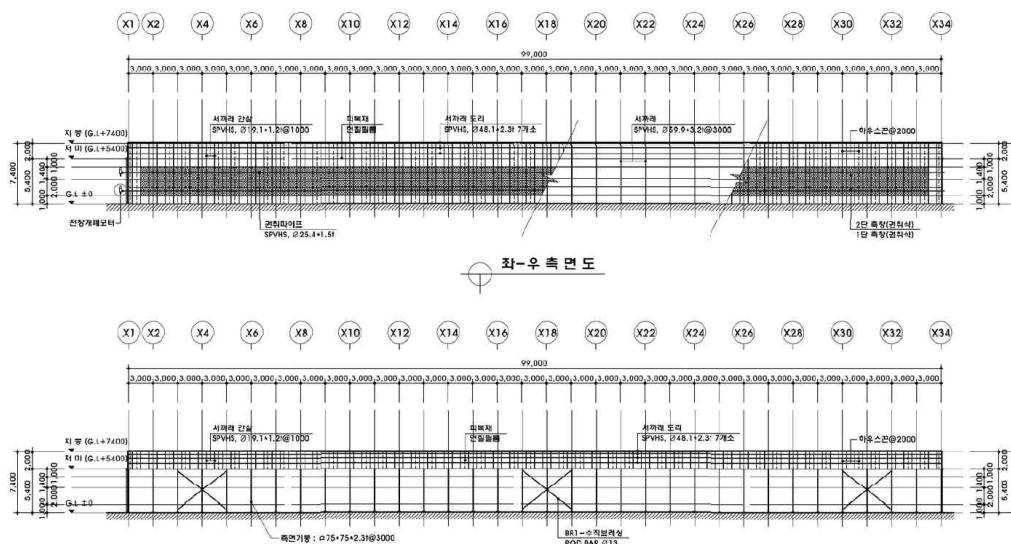
- 표 1에서 알 수 있듯이 재배면적은  $4,950.0\text{m}^2 \sim 5,280.0\text{m}^2$  정도로써 온실 간 면적에 큰 차이가 없으며, 온실 설치 방향의 경우, A 및 B 온실은 남-북 방향이고, C 온실은 동-서 방향으로 설치되어 있다.
- 대상 온실은 원예특작시설 내재해형 규격 자동화 비닐하우스(10-자동화-1형, RDA, 2011)이며, 동고가 7.4m, 측고가 5.4m로 파프리카, 토마토 등의 다단 유인재배에 용이한 형태의 온실이다. 그림 1-2는 대상 온실의 설계도면을 나타낸 것이다.



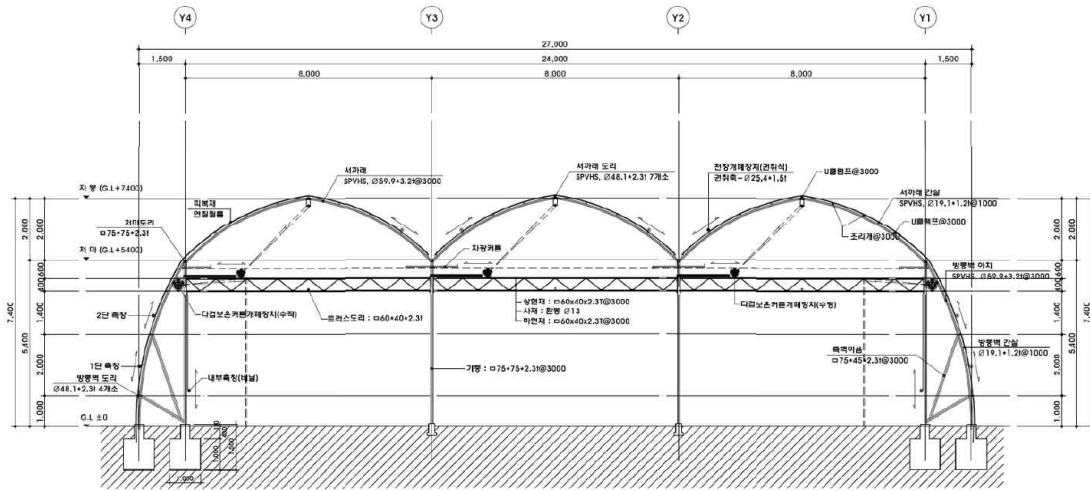
(a) Frontal design chart



(b) Rear view design chart



(c) Windproof wall inside outer wall design chart



(d) Longitudinal-cut design chart

그림1-2. Automated greenhouse design chart(RDA, 2011).

## 나. 시스템 성능평가

### 1. 환경 계측

#### 1) 계측요인

- 온실의 환경측정은 온실내부 환경 요인 중 작물생육과 관련된 3요인(일 평균 온도, 일 평균 상대습도, 일 평균 CO<sub>2</sub> 농도)를 측정하였고 환경요인의 특징과 생육 관련된 내용은 표1-2 과 같다. 그림1-3은 계측센서, 제어모니터 및 데이터 확인 과정을 나타 낸 것이다.

표1-2. Environment measurement item.

Classification	Content
Internal mean temperature	Environmental factors related to plant growth
Internal mean humidity	Factors Related to Plant Growth and Pest Development
CO <sub>2</sub> concentration	Factors associated with plant growth and photosynthesis





Controller monitor

그림1-3. Environmental measurement.

2) 복합환경제어기

- 온실 환경계측 자료는 복합환경제어기의 데이터 로거에 1분 간격으로 저장된 측정값을 조사대상일 기준으로 자료를 수집하여 사용하였으며, 조사대상 온실의 복합환경제어기 및 양액 시스템의 사양은 표1-3 및 표1-4와 같다.

표1-3. Environmental controller.

Classification	Content
Manufacturing company	SHINHAN A-TEC
Model name	GK-3000(Green Keeper)
Control zone	1 ~ 8 zone
External weather (Analog input)	Temperature, rainfall, light quantity, wind direction, wind speed
Internal environment (Analog input)	Temperature, humidity, medium temperature
Environmental control output (Digital output)	40 Output

표 1-4. Culture fluid feeder.

Classification	Content
Manufacturing company	SHINHAN A-TEC
Model name	SH-2000
control method	1. Time, 2. Interval, 3. External, 4. Moisture, 5. Light amount control
Irrigation system	Time, Flow rate
Irrigation zone	8 ~ 64 zone
Irrigation cycle	1 ~ 9 days

- 조사대상 온실에 설치된 복합환경제어기 컨트롤과 관비 시스템의 외관은 그림1-4 및 그림1-5와 같다.



그림1-4. Environmental controller.



그림1-5. Culture fluid feeder.

### 3) 환경 데이터

- 환경 데이터는 매일 1시간에 한번씩 측정된 4월 4주간의 데이터이고, 밑의 표1-5는 주 단위로 끊어 평균과 편차를 정리한 데이터를 나타낸 것이다.

표 1-5 . Environmental measurement weekly mean.

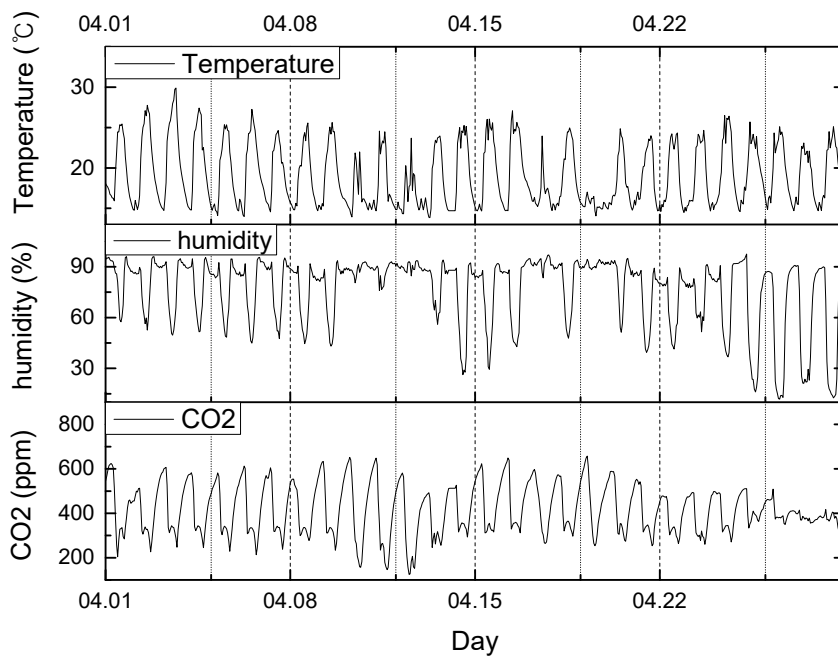
Classification	Green house	Weekly mean				Deviation		
		1	2	3	4	Min (a)	Max (b)	b-a
Mean temperature (°C)	A	21.8	20.8	20.8	22.0	18.4	22.8	±4.4
	B	20.2	18.4	18.4	19.3	15.5	21.5	±6.0
	C	23.0	22.3	22.5	22.8	20.3	23.8	±3.5
Mean relative humidity (%)	A	57.9	66.7	71.4	60.9	52.5	83.7	±31.2
	B	80.2	80.6	82.1	66.4	56.1	92.4	±36.3
	C	52.1	46.3	50.6	52.3	39.2	58.4	±19.2
Mean CO <sub>2</sub> concentration (ppm)	A	621.7	599.9	644.4	606.7	546.6	699.1	±152.4
	B	421.2	403.7	449.2	399.0	352.3	465.2	±112.9
	C	561.9	571.6	573.2	546.4	507.7	605.7	±98.0

- 표1-5에서 알 수 있듯이, 온실 내부 온도의 주 단위별 평균은 A온실은 20.8~22.0°C로 관리되었으며 일 평균온도의 최소 및 최대 값은 각각 18.4°C 및 22.8°C로써 그 편차는 ±4.4°C인 것으로 나타났다. B온실은 주 단위별 평균은 18.4~20.2°C로 관리되었으며 일 평균온도의 최소 및 최대 값은 각각 15.5°C 및 21.5°C로써 그 편차는 ±6.0°C인 것으로 나타났다. C온실은 주 단위별 평균은 22.3~23.0°C로 관리되었으며 일 평균온도의 최소 및 최대 값은 각각 20.3°C 및 23.8°C로써 그 편차는 ±3.5°C인 것으로 나타났다. 온도의 주 단위별 평균 관리수준은 C > A > B온실 순으로 관리되었고, 일 평균온도의 편차는 C < A < B온실 순으로 나타났다.
- 온실 내부 일 평균 상대습도의 주 단위별 평균은 A온실은 57.9~71.4%로 관리되었으며 일 평균 상대습도의 최소 및 최대 값은 각각 52.5% 및 83.7%로써 그 편차는 ±31.2%인 것으로 나타났다. B온실은 66.4~82.1%로 관리되었으며 일 평균 상대습도의 최소 및 최대 값은 각각 56.1% 및 92.4%로써 그 편차는 ±36.3%인 것으로 나타났다. C온실은 46.3~52.3%로 관리되었으며 일 평균 상대습도의 최소 및 최대 값은 각각 39.2% 및 58.4%로써 그 편차는 ±19.2%인 것으로 나타났다. 상대습도의 주 단위별 평균 관리수준은 B > A > C온실 순으로 관리되었고, 일 평균온도의 편차는 C < A < B온실 순으로 나타났다.
- 온실 내부 CO<sub>2</sub> 농도의 주단위별 평균은 A온실은 599.9~644.4ppm으로 관리되었으며 일 평균 CO<sub>2</sub> 농도의 최소 및 최대 값은 각각 546.6ppm 및 699.1ppm으로써 그 편차는 ±152.4ppm인 것으로 나타났다. B온실은 399.0~449.2ppm으로 관리되었으며 일 평균 CO<sub>2</sub> 농도의 최소 및 최대 값은 각각 352.3ppm 및 465.2ppm으로써 그 편차는

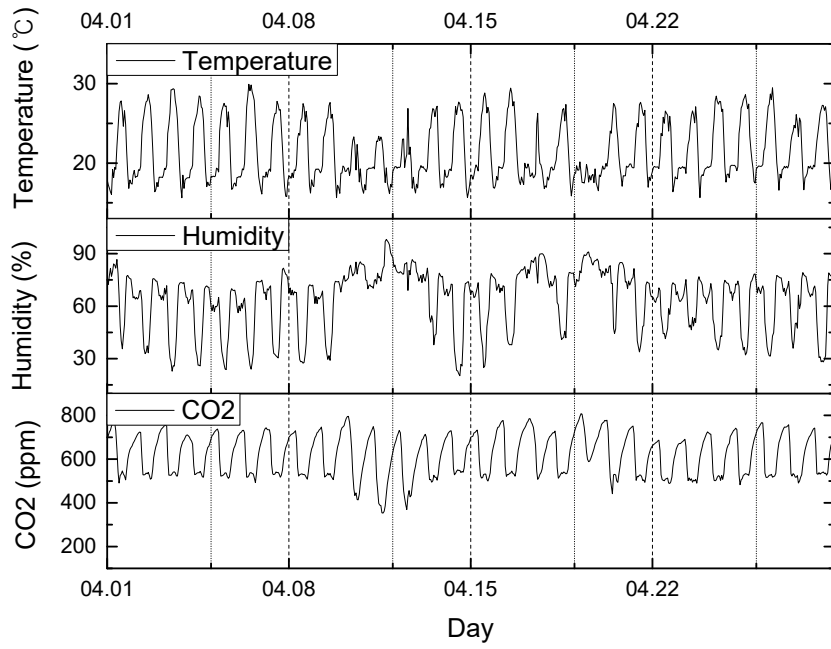
$\pm 112.9\text{ppm}$ 인 것으로 나타났다. C온실은 546.4~573.2ppm으로 관리되었으며 일 평균  $\text{CO}_2$  농도의 최소 및 최대 값은 각각 507.7ppm 및 605.7ppm으로써 그 편차는  $\pm 98.0\text{ppm}$ 인 것으로 나타났다. 일 평균  $\text{CO}_2$  농도의 주 단위별 평균 관리수준은  $A > C > B$ 온실 순으로 관리되었고, 일 평균  $\text{CO}_2$  농도의 편차는  $C < B < A$ 온실 순으로 나타났다.

- 1주 환경데이터 : 2020-04-01 ~ 2020-04-07
- 2주 환경데이터 : 2020-04-08 ~ 2020-04-14
- 3주 환경데이터 : 2020-04-15 ~ 2020-04-21
- 4주 환경데이터 : 2020-04-22 ~ 2020-04-28

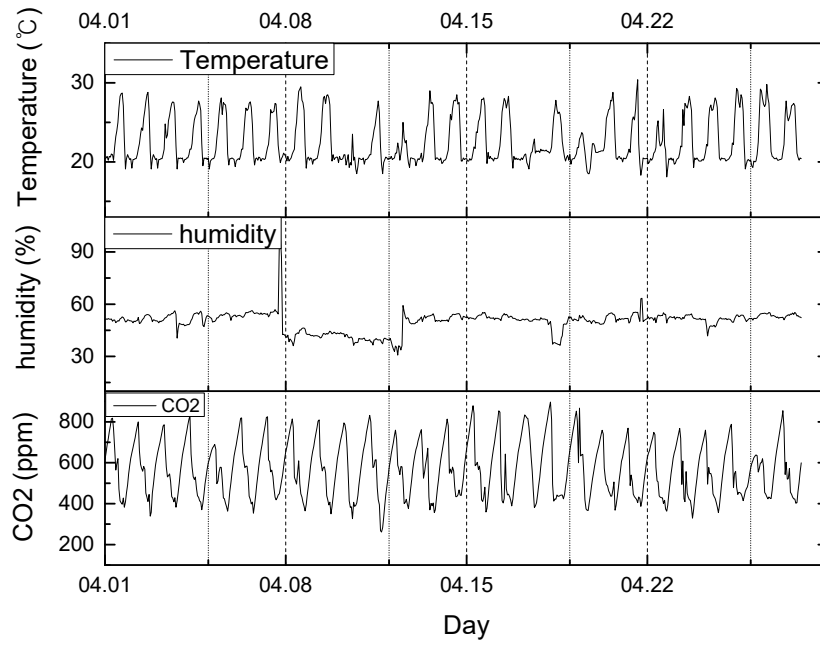
- 밑의 그림1-6은 위의 표1-5와 달리 매일 1시간에 한번씩 계측된 전체 데이터이다.



(a) A농가 환경데이터



(b) B농가 환경데이터



(c) C농가 환경데이터



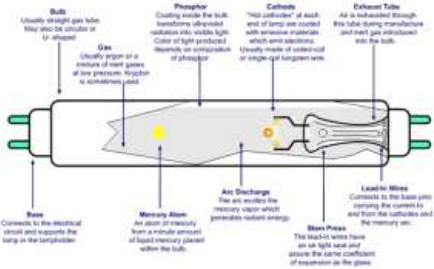

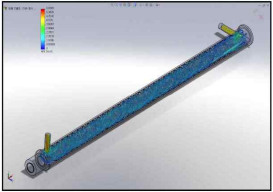
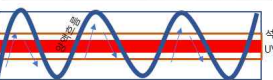
그림 1-6. 전체 환경데이터

## 2. [성능평가]순환식 수경재배 재사용 양액 살균기술의 농가 설치 및 실증

### 가. 농가 현장 실증을 통한 급배액 공급 및 배액처리에 따른 살균효율의 안전성 검증

수경재배 시스템 내 재사용 양액의 UVT(UV transmittance)는 재배자의 양액제조방법과 배지의 종류에 영향을 받으며, 이에 따라 살균효율이 달라진다. 또한, 같은 UV 램프 조사량이라도 UV 램프를 포함하는 살균 모듈의 구조적 형태에 따라 살균효율이 달라질 수 있다.

[표 2.1] 순환식 양액시스템 안정성 평가에 이용된 UV lamp 상세 내역

UVC 살균모듈 구조	내역
<p>일반 배관방식 (챔버, 직렬형)</p>  	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수은램프</li> <li>• 저압 고효율 아말감 램프사용</li> </ul>  <ul style="list-style-type: none"> <li>• 살균파장 254nm, 직접살균방식 채택</li> <li>• 전력/전압: 320 W 저압 고효율 아말감, UVC 106W</li> </ul>
<p>스월링방식</p>   	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수은램프</li> <li>• 저압 고효율 아말감 램프사용</li> <li>• 저투과성 Thin Film Layer 유로 방식</li> <li>• 유체의 터불런스를 유도하여 믹싱효율 극대화</li> <li>• 살균파장 254 nm, 직접살균방식 채택</li> <li>• 전력/전압: 320 W 저압 고효율 아말감, UVC 106W</li> <li>• UV 조사방식과 위치는 일반 석영관을 통한 UV 램프타입과 유사하지만, SWIRL 타입 내부의 강선을 따라 유체가 빠른 속도로 유입되고 여기서 형성된 강선을 따라 형성된 벽면을 따라 UV램프 조사에 의해 살균이 이루어짐</li> </ul>

본 성능평가 연구는 자체 테스트베드인 마산 신한에이텍 온실과 강릉 KIST 온실에서, 실증 농가인 마산 진동면 K 농가, 밀양 신호리 S 농가에서 각각 수행되었다. 마산 자체 테스트베드에서는 UV램프 (254nm @ 320W ×4)로 구성된 4단 살균모듈과 강릉 자체 테스트베드에서는 UV램프 (254nm @ 320W ×2)로 구성된 2단 살균모듈을 사용하였다. 1개의 살균모듈은 시간당 1톤을 처리하도록 제작되었다. 실증 농가의 UV 살균모듈 구조는 swirl 타입을(UV 254nm @ 320W ×(1~4) 적용하였으며, 처리용량은 마산 K 농가의 경우 2톤/시간, 밀양 S 농가의 경우 4톤/시간을 적용하였다. 마산은 재배배지로 코코피트를, 밀양은 암면을 사용하였다. 코코피트를 코코피트 배지에서 배출되는 저 투과성 배액은 일반적으로 UVT 값이 10 미만이기 때문에 기존의 챔버형 살균방식으로는 제대로 된 살균효과를 얻기 어렵다. Swirl 타입의 경우 UV 살균 반응조 내부에 thin film layer 유로와 vortex turbulator의 조합으로 자외선에 접촉하는 배액의 표면을 극대화하여 살균효율의 향상을 기대할 수 있다.



[그림 2.1] 순환식 양액시스템 안정성 평가에 이용된 적용된 UV 살균모듈 구조



[그림 2.2] 순환식 양액재이용 시스템 적용 현장 리스트





[그림 2.3] 강릉 자체 테스트베드 온실 현장(전체면적: 700평, 재배작목: 토마토·딸기, 사용배지: 압면, UV 살균모듈구조: Swirl 타입, 처리용량: 1톤 및 2톤/시간)



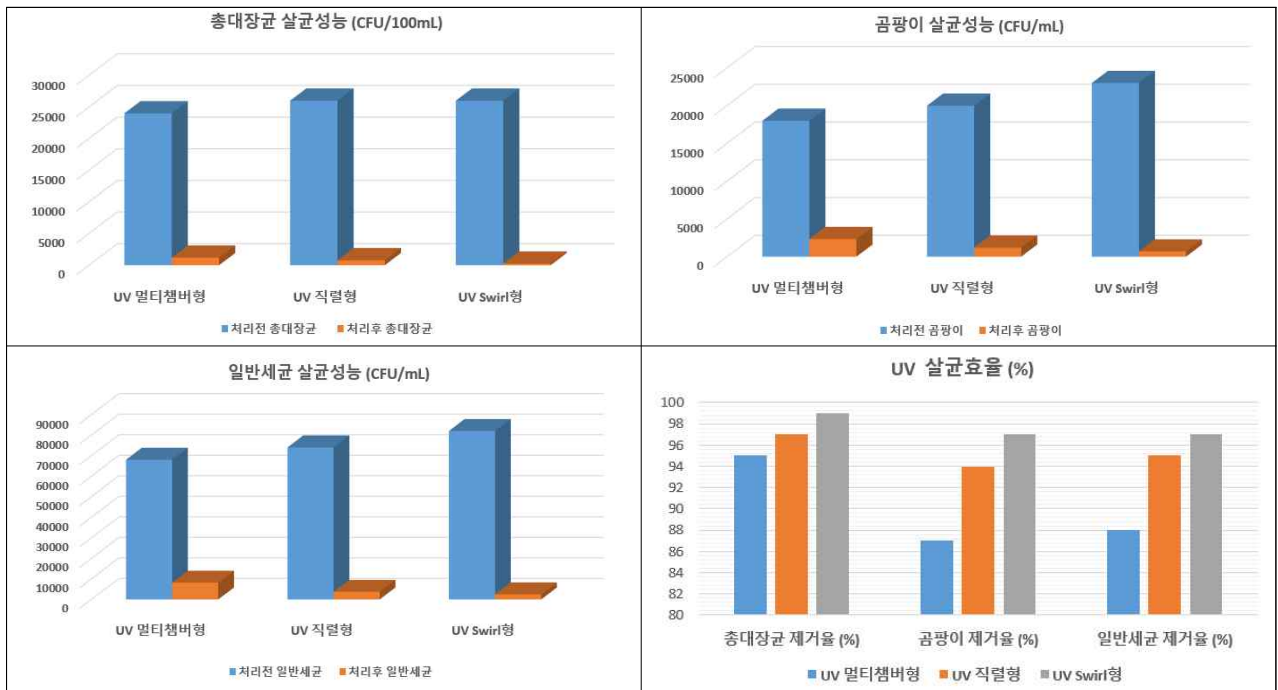
[그림 2.4] 마산 진동면 K 농가 실증현장(전체면적: 6000평, 재배작목: 파프리카, 사용배지: 코코 피트, 정식일: 2019년 8월 10일, UV살균모듈 구조: Swirl 타입, 처리용량: 2톤/시간)



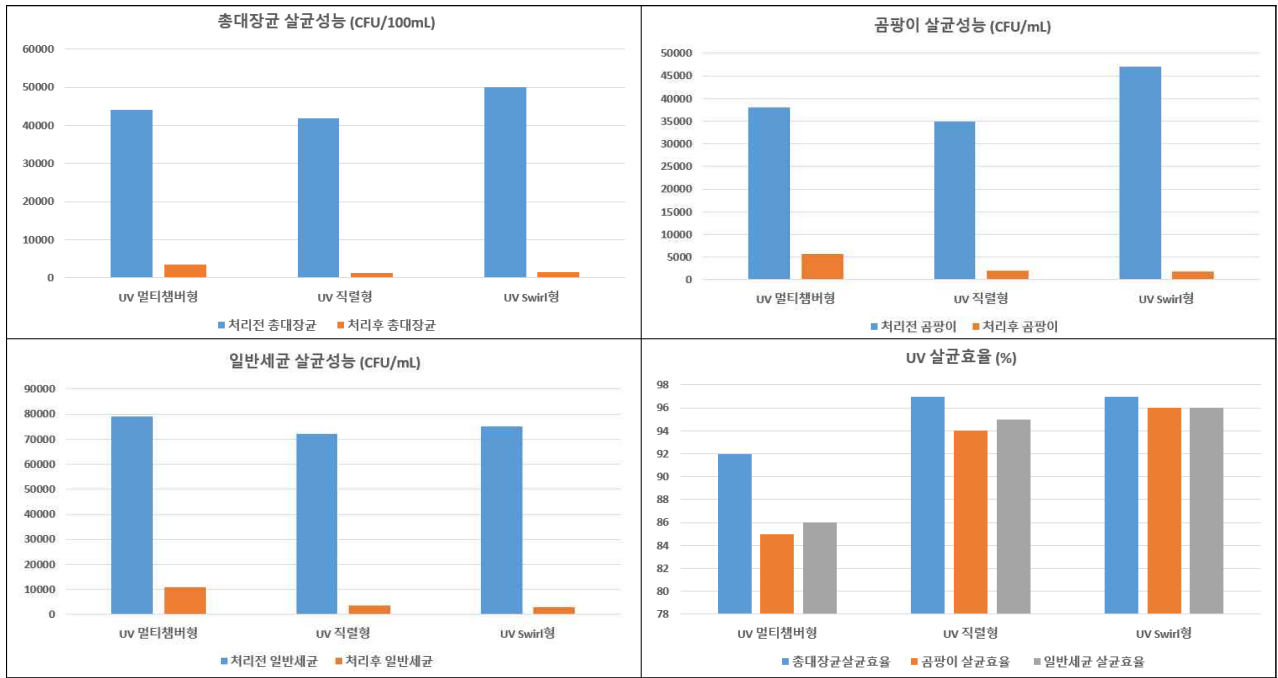


[그림 2.5] 밀양 신호리 S 농가 실증현장(전체면적: 6천 재배작목: 파프리카, 사용배지: 코코피트, 정식일: 8월6일, UV살균모듈 구조: 횡형, 처리용량: 4톤/시간) -

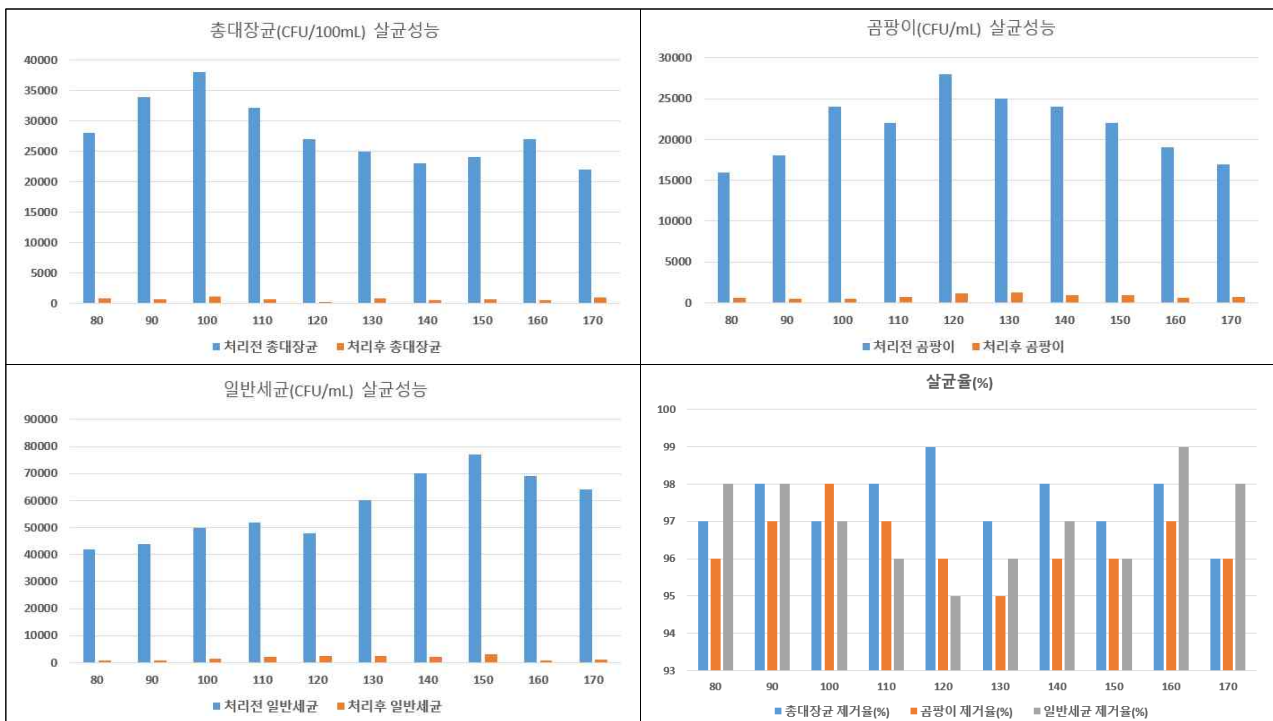
이러한 조합은 석영관 내부에서 복잡한 형상의 난류를 발생시켜 배액 표면에 강력한 자외선 조사를 통해 미생물을 연속적으로 사멸시킨다. 표 2.1과 그림 2.1의 3종류의 UV 살균모듈 구조를 이용하여 각각 암면과 코코피트 배지를 통과한 배액 발생 농가를 대상으로 성능검증 시험을 수행하였다. 암면배지 배액의 대장균 살균효율은 UV Swirl형 99% > UV 직렬형 97% > UV 멀티챔버형 95%로, 코코피트의 경우 UV Swirl형 97% > UV 직렬형 97% > UV 멀티챔버형 92%로 조사되었다. 암면배지 배액의 곰팡이 살균효율은 UV Swirl형 97% > UV 직렬형 94% > UV 멀티챔버형 87%이며, 코코피트의 경우 UV Swirl형 96% > UV 직렬형 94% > UV 멀티챔버형 85%로 조사되었다. 암면배지 배액에서 일반세균 살균효율은 UV Swirl형 99% > UV 직렬형 95% > UV 멀티챔버형 88%이며, 코코피트의 경우 UV Swirl형 96% > UV 직렬형 95% > UV 멀티챔버형 86%로 나타났다. 이처럼 UV램프를 포함한 챔버 내부의 유체 흐름은 살균효율의 성능에 영향을 미칠 수 있다. 특히 코코피트와 같이 높은 탁도의 배액이 발생하는 조건과 같은 경우, UV swirl형과 UV 멀티챔버형 사이에서 살균효율의 차이가 비교적 크게 나타났다. 이를 통해 swirl형 살균모듈의 구조적 특성을 활용하여 현장의 낮은 UVT와 같은 가혹 조건에서도 기술적으로 UV 살균장치의 한계 극복할 수 있음을 확인하였다.



[그림 2.6] UV살균모듈 구조에 따른 살균성능(재배작목: 토마토·딸기, 사용배지: 암면, 처리용량: 1톤/시간, 시료채취장소: 강릉 자체 테스트베드, 정식 후 150일 경과)

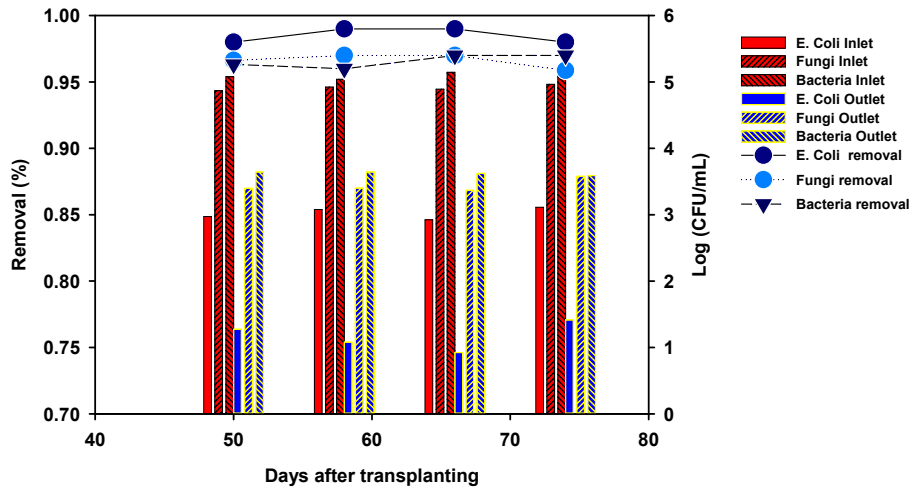


[그림 2.7] UV램프 타입에 따른 성능효과 (재배작목: 토마토·딸기, 재배배지: 코코피트, 처리용량: 1톤/시간, 시료채취장소: 마산 자체 테스트베드, 정식 후 80일 경과)



[그림 2.8] 마산 진동면 K 농가의 재배 기간별 살균성능 변화 (코코피트, 1톤/시간)

마산 진동면 실증 농가에서는, 정식 이후 80일부터 암면배지로부터 배출된 배액을 대상으로 한 조사에서 총대장균 평균 97.5%, 곰팡이 평균 96.4%, 일반세균 평균 97%의 미생물 제거성능을 보여주었다.





[그림 2.9] 밀양 신호리 S 농가의 재배 기간별 살균성능 변화 (암면, 4톤/시간)

밀양 신호리 S 농가에서는, 정식 이후 50일부터 코코피트에서 배출된 배액을 대상으로 한 조사에서 총대장균 평균 98%, 곰팡이 평균 95.6%, 일반세균 평균 95.5%의 미생물 제거성능을 보여주었다. 장기간의 사용 조건에서 안정적으로 95% 이상의 미생물 제거율이 관찰되었으며, 이를 통해 순환식 수경재배 재사용 장치의 정기적인 석영관의 산세정 기능의 장비유지관리 성과와 살균성능을 실증할 수 있었다.

[성능검증]

협동기관 KIST 검증기관은 국제공인인증시험기관(KOLAS)이나 협동기관인 관계로 추가 검증 기관으로 서울대학교 농업생명과학공동기기원(NICEM, KOLAS KT-375호)을 통해 주기적으로 추가로 검증을 받음 (2019년 9월 작기부터-2020년 6월까지 수행했으며, 2020년 3월과 4월은 시스템 업그레이드를 위해 자체 검사만으로 수행함)

시험성적서			
발증번호 : 2020-RA-0772			
1. 신청인			
① 기관명	한국과학기술연구원	② 대표/신청인	홍지영/서주영
③ 주소	강원도 양구시 사임당로 679 KISTP 장동분원		
④ 전화		⑤ 팩스	-
2. 의뢰내용			
① 검사 번호	2020-A-0723	② 검사 날짜	2020-06-11
③ 시료 종류	저장시료(수질 10점)		
④ 시험 기간	2020-06-11 ~ 2020-06-26	⑤ 성적서용도	참고용
시험 결과 (불입참조)			
<p style="color: red;">이 성적서는 의뢰자의 제공한 시료에 대한 결과이며, 용도 이외의 사용을 위하여 검정, 조종 및 기타 법적 요건으로 사용될 수 없습니다.</p>			
정보자 : 성업연구팀 김용중		(인)	
승인자 : 김희정 이준재		(인)	
<p>농생명과학공동기기원 분석시험위탁규정에 의하여 분석 시험한 결과를 취와 같이 통지합니다. 2020년 06월 29일</p>			
 서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장 National Instrumentation Center for Environmental Management			
<small>(주) 151-921 서울특별시 광화문구 광화로 1 Tel) 02) 890-4997-0 Fax) 890-4995 <a href="http://nicem.snu.ac.kr/">http://nicem.snu.ac.kr/</a></small>			

시험결과			
발증번호 : 2020-RA-0772			
시료명	시험항목	결과	단위
KIST원수	총대장균군	500000	총대장균군수/100mL
KIST원수	일련세균	1500000	CFU/mL
KIST-1ton-1만_1	총대장균군	33	총대장균군수/100mL
KIST-1ton-1만_1	일련세균	3400	CFU/mL
KIST-1ton-2만_1	총대장균군	66	총대장균군수/100mL
KIST-1ton-2만_1	일련세균	1600	CFU/mL
KIST-1ton-1만_2	총대장균군	170	총대장균군수/100mL
KIST-1ton-1만_2	일련세균	7800	CFU/mL
KIST-1ton-2만_2	총대장균군	480	총대장균군수/100mL
KIST-1ton-2만_2	일련세균	910	CFU/mL
마산원수	총대장균군	100000	총대장균군수/100mL
마산원수	일련세균	91000	CFU/mL
마산-1ton-1만_1	총대장균군	10	총대장균군수/100mL
마산-1ton-1만_1	일련세균	10	CFU/mL
마산-1ton-2만_1	총대장균군	2	총대장균군수/100mL
마산-1ton-2만_1	일련세균	250	CFU/mL
마산-1ton-1만_2	총대장균군	1	총대장균군수/100mL
마산-1ton-1만_2	일련세균	110	CFU/mL
마산-1ton-2만_2	총대장균군	ND	총대장균군수/100mL
마산-1ton-2만_2	일련세균	0	CFU/mL
	- 이하 여백 -		
* ND(Not Detected):검출한데 미만			
 서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동기기원장 National Instrumentation Center for Environmental Management			
<small>(주) 151-921 서울특별시 광화문구 광화로 1 Tel) 02) 890-4997-0 Fax) 890-4995 <a href="http://nicem.snu.ac.kr/">http://nicem.snu.ac.kr/</a></small>			

(가) 시험성적서 원수와 처리수(제거율 95% 이상) (2020년 5월-6월)

### 시험성적서

발급번호 : 2020-RA-0094

1. 신청인

① 기관명	한국과학기술연구원	② 대표/신청인	이명환/이주영
③ 주소	강원도 강릉시 사립로 679 스마트융합연구센터		
④ 전화		⑤ 팩스	-

2. 의뢰내용


① 접수 번호	2020-A-0049	② 접수 날짜	2020-01-14
③ 시료 종류	지형시료(수질 1팀)		
④ 시험 기간	2020-01-14 ~ 2020-01-29	⑤ 실적서용도	참고용

#### 시험 결과 (불입참조)

이 성적서는 의뢰자가 제공한 시료에 대한 결과이며, 용도 이외의 사용을 금하여  
신청, 조종 및 기타 법적 요건으로 사용할 수 없습니다.

검토자 : 선임연구원 김용훈 (인)  
 승인자 : 센터장 이준택 (인)

농생명과학공동연구원 분석시험위탁규정에 의하여 정식 시험한 결과를  
 위와 같이 통지합니다.  
 2020년 01월 30일


 서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동연구원

### 시험결과

발급번호 : 2020-RA-0094

(붙임 1 / 1)

시료명	시험항목	결과	단위
마산신안해역천수0113.1	총대장균군	10000	총대장균군/100mL
마산신안해역천수0113.1	일련세균	180000	CFU/mL
	- 이하역법 -		

\* ND(Not Detected):검출한계 미만


 서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동연구원  
 National Instrumentation Center for Environmental Management

### 시험성적서

발급번호 : 2020-RA-0099

1. 신청인

① 기관명	한국과학기술연구원	② 대표/신청인	이명환/이주영
③ 주소	강원도 강릉시 사립로 679 스마트융합연구센터		
④ 전화		⑤ 팩스	-

2. 의뢰내용


① 접수 번호	2020-A-0054	② 접수 날짜	2020-01-14
③ 시료 종류	지형시료(수질 1팀)		
④ 시험 기간	2020-01-14 ~ 2020-01-29	⑤ 실적서용도	참고용

#### 시험 결과 (불입참조)

이 성적서는 의뢰자가 제공한 시료에 대한 결과이며, 용도 이외의 사용을 금하여  
신청, 조종 및 기타 법적 요건으로 사용할 수 없습니다.

검토자 : 선임연구원 김용훈 (인)  
 승인자 : 센터장 이준택 (인)

농생명과학공동연구원 분석시험위탁규정에 의하여 정식 시험한 결과를  
 위와 같이 통지합니다.  
 2020년 01월 30일


 서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동연구원

### 시험결과

발급번호 : 2020-RA-0099

(붙임 1 / 1)

시료명	시험항목	결과	단위
신안취리수소양	총대장균군	ND	총대장균군/100mL
신안취리수소양	일련세균	1800	CFU/mL
	- 이하역법 -		

\* ND(Not Detected):검출한계 미만


 서울대학교 농업생명과학대학 농생명과학공동연구원

(나) 시험성적서 원수와 처리수(처리율 95% 이상) (2020년 1월)







### 시험성적서

발급번호 : 2019-RA-1371

1. 신청인			
① 기관명	한국과학기술연구원	② 대표/신청인	이병환/이주영
③ 주소	강원도 강릉시 사립앞로 679 KIST 강릉분원		
④ 전화		⑤ 팩스	-
2. 의뢰내용			
① 접수 번호	2019-A-1343	② 접수 날짜	2019-10-23
③ 시료 종류	지반시료(수질 1립)		
④ 시험 기간	2019-10-23 ~ 2019-10-28	⑤ 실적서용도	참고용

#### 시험 결과 (불입함조)

이 성적서는 의뢰자가 제출한 시료에 대한 결과이며, 용도 이외의 사용을 금하여  
신청, 조종 및 기타 법적 요건으로 사용할 수 없습니다.

검토자 : 권일영연구원 (인)     김용홍 (인)  
승인자 : 권리장 이금백 (인)

농생명과학공동기기원 분석시험위탁규정에 의하여 분석 시험한 결과를  
취화 같이 통지합니다.  
2019년 10월 30일

서울대학교 농생명과학대학 농생명과학공동기기원

### 시험결과

발급번호 : 2019-RA-1371

시료명	시험항목	결과	단위
배액처리수1(10월21일)	총대장균군	10000	총대장균군수/100mL
배액처리수1(10월21일)	일련세균	8700	CFU/mL
	- 이하 여면 -		

※ ND(Not Detected):검출한계 미만

서울대학교 농생명과학대학 농생명과학공동기기원

### 시험성적서

발급번호 : 2019-RA-1373

1. 신청인			
① 기관명	한국과학기술연구원	② 대표/신청인	이병환/이주영
③ 주소	강원도 강릉시 사립앞로 679 KIST 강릉분원		
④ 전화		⑤ 팩스	-
2. 의뢰내용			
① 접수 번호	2019-A-1345	② 접수 날짜	2019-10-23
③ 시료 종류	지반시료(수질 1립)		
④ 시험 기간	2019-10-23 ~ 2019-10-28	⑤ 실적서용도	참고용

#### 시험 결과 (불입함조)

이 성적서는 의뢰자가 제출한 시료에 대한 결과이며, 용도 이외의 사용을 금하여  
신청, 조종 및 기타 법적 요건으로 사용할 수 없습니다.

검토자 : 권일영연구원 (인)     김용홍 (인)  
승인자 : 권리장 이금백 (인)

농생명과학공동기기원 분석시험위탁규정에 의하여 분석 시험한 결과를  
취화 같이 통지합니다.  
2019년 10월 30일

서울대학교 농생명과학대학 농생명과학공동기기원

### 시험결과

발급번호 : 2019-RA-1373

시료명	시험항목	결과	단위
상급처리수1(10월21일)	총대장균군	ND	총대장균군수/100mL
상급처리수1(10월21일)	일련세균	200	CFU/mL
	- 이하 여면 -		

※ ND(Not Detected):검출한계 미만

서울대학교 농생명과학대학 농생명과학공동기기원

(마) 시험성적서 원수와 처리수(처리율 95% 이상) (2019년 10월)  
[그림 2.10] 국제공인인증기관(KOLAS) 추가 검증수행



## 나. 농가 현장 순환식 수경재배 시스템 설치 후 장시간 사용 시의 문제 발생 요인 파악

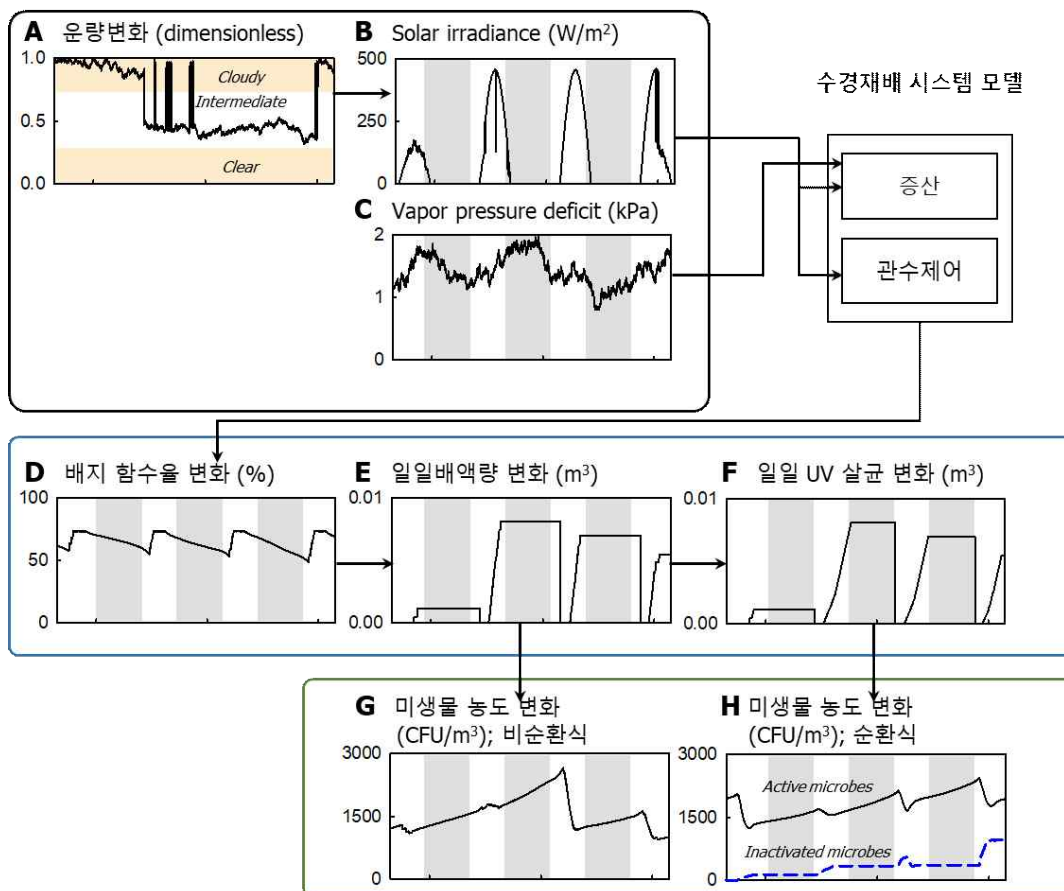
본 연구에서 자체 테스트 베드와 농가에서의 실증 과정을 통해 장기간 사용 시 성능의 유지 관리 측면에서 실질적으로 고려되어야 할 요인들을 도출할 수 있었다. 장기간의 실증 과정을 통해 1년 이상 사용 시 발생할 수 있는 성능관리 측면에서의 문제들을 각 공정을 기준으로 정리하였다. 혼합조의 경우 특별한 문제로 작용할만한 요인은 관찰되지 않았다. 대표적인 미생물 현상인 바이오필름의 형성은 장기 사용 시 집수조, 배액 처리조에서의 문제 요인으로 정리될 수 있었다. 살균 공정에서는 UV 광조사에 영향을 미칠 수 있는 석영관 침전 현상이 성능의 유지 관리에 있어 주요 문제 요인으로 정리될 수 있었다. 상세한 내용은 공정을 기준으로 표 2.2에 정리하였다. 이러한 문제 요인들은 산세정, 역세척과 같은 정기적 유지관리 기능을 통해 기기의 유의미한 성능저하로 이어질 가능성을 최소화 할 수 있다. 그러나 실사용자의 안정적인 운용과 돌발적 문제 발생 상황에 대한 원활한 대응 및 해결을 위해 체계적으로 정리되어 시스템과 함께 배포될 필요가 있다.

[표 2.2] 순환식 수경재배 시스템 장기사용시 발생하는 문제점

공정	1년이상 사용시 발생하는 문제점
혼합조	<ul style="list-style-type: none"> <li>문제발생 없음</li> </ul>
집수조	<ul style="list-style-type: none"> <li>배액집수조의 바이오필름 형성</li> <li>배액 및 다양한 집적물 발생</li> <li>집수조 자체의 정기적 육안 검사 및 청결 유지 6개월 1회</li> <li>암면배지 1년 2회, 코코배지 1년 4회 청소</li> </ul>
여과공정	<ul style="list-style-type: none"> <li>배지종류에 따른 여과조 막힘현상이 달라짐</li> <li>코코피트 배지의 경우 작은 막힘현상으로 역세척 자주해야함</li> <li>암면배지의 경우는 막힘현상이 빈번하지 않아서 가끔 역세척 필요</li> <li>여름에 막힘현상이 빈번이 일어남</li> </ul>
살균공정	<ul style="list-style-type: none"> <li>배액 성상에 따라 석영관 침적현상이 달라짐</li> <li>Fe와 Mn 농도에 따라 석영관 침적현상이 발생 빈도가 달라짐</li> <li>UV 감도센서를 통한 감도모니터링을 할 경우는 감도 센서 효율이 80% 이하로 떨어질 때 산세정이 필요함</li> <li>UV 감도센서가 없는 경우는 경험적 방법에 의해 처리유량별 산세정 방식을 채택해서 구해야 함</li> <li>1년이상 운영시에 수류에 의한 살균모듈의 떨림 등과 같은 현상이 일어나지 않으나, 시간당 4톤 이상의 경우는 살균모듈의 떨림 현상이 발생할 수 있음</li> </ul>
배액처리조	<ul style="list-style-type: none"> <li>배액 처리조내에서도 장시간 사용시 바이오필름 형성</li> <li>배액 처리조내에서도 침적물이 발생할 수 있기 때문에 청결 유지</li> <li>6개월 1회</li> </ul>

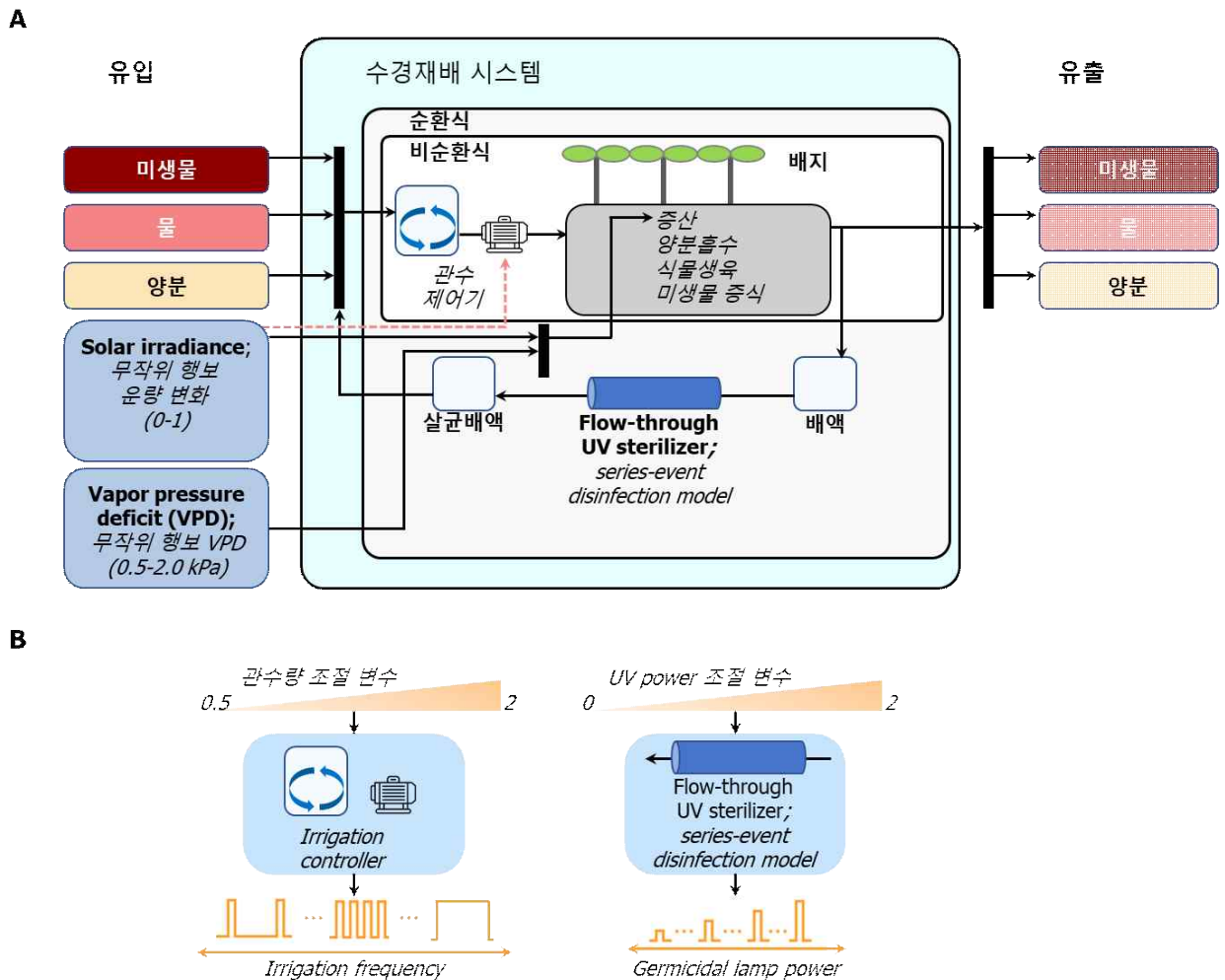
## 다. 다양한 관수 조건에서 배액수위기준 살균기 운영 시스템의 내 미생물 관리 성능의 이론적 분석

순환식 수경재배 시스템에 설치된 UV 살균기는 미생물 개체 수 증감에 동적인 영향을 미친다. 순환식 수경재배 시스템에서 양수분 공급 과정은 배액의 발생 및 살균 처리량에 영향을 미칠 수 있는 요인이다. 또한 양수분 공급은 온실 환경, 식물의 증산, 자동관수 시스템과 지속적으로 상호작용한다. 이러한 동적인 배액량의 변화에 살균 시스템이 효율적으로 대응하기 위해서는 배액 수위 또는 저장량에 따라서 살균기를 구동할 필요가 있다. 그러나 이처럼, 환경-증산-자동관수 시스템의 동적인 상호작용이 발생하는 조건에서 UV 살균기의 미생물 관리 성능에 대한 직관적 평가는 매우 어렵다. 본 연구에서는 배액수위기준 UV 살균기 운영 시의 시스템 내 미생물 농도 변화의 특성을 상대적으로 미생물적 위험요인이 매우 낮은 것으로 인식되는 비순환식 수경재배와 비교하였다. 이를 이론적으로 분석 및 평가하기 위해서 배액 재사용, 자동 관수 제어, 배액수위기준 배액 이송 및 UV 살균 모델이 통합된 시뮬레이션 모델을 구축하였다. 통합 시뮬레이션 모델의 이론적 분석을 위한 주요 기능은 ① 수경재배의 자동 수분 관리 방식, ② 추계적 환경 변화, ③ 식물 생육, ④ 배액 수위 기반 UV 살균 프로세스로 구성된다.



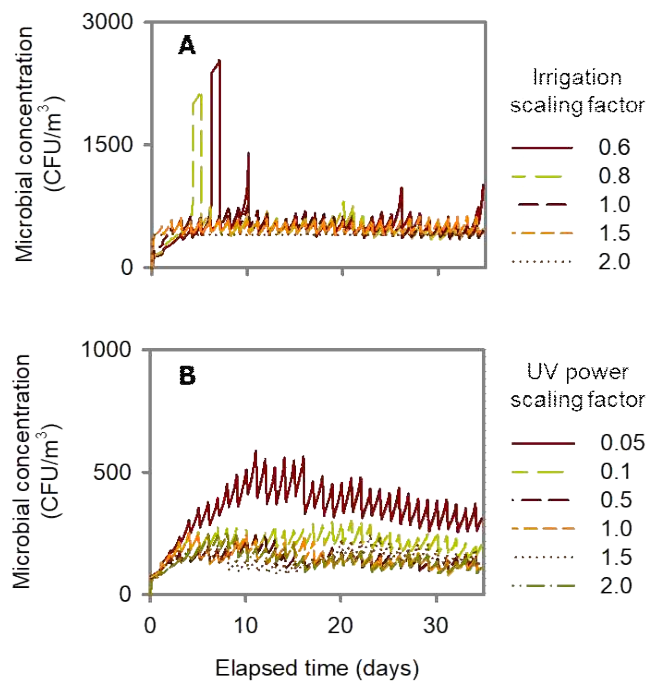
[그림 2.11] 환경변화-식물생육-수경재배 수분 관리 방식 통합 시뮬레이션 상의 단기적 시스템 복합 반응 및 관계도

환경변화-식물생육-수경재배 수분 관리 방식의 복합적 관계에 대한 시뮬레이션 모델은 수경재배의 정상적인 시스템 반응을 보여주었다. 일반적인 수경재배 시스템의 수분 관리 패턴과 그에 따른 배액 발생 패턴이 관찰되었다. 배액수위기준의 살균기 운영으로 인해 시스템의 배액 발생 패턴에 맞춰 일일 UV 살균량과 그에 따른 시스템 내 활성/불활성 미생물 농도의 동적인 변화가 관찰되었으며, 당일 발생 배액의 대부분이 재사용 양액으로 살균 처리되었다 (그림 2.9). 단기적 시스템 반응에서 비순환식 수경재배 방식의 미생물 농도 변화는 UV 살균기 가동 순환식 수경재배 시스템과 구분되는 변화가 관찰되었다. 이를 장기간의 조건에서 확인하기 위해 장기간 시뮬레이션을 수행하였다. 장기적 수경재배 시스템 반응에 대한 시뮬레이션 분석 시의 시나리오는 그림 2.10에 정리하였다. 구체적으로는 각각 관수량 조절 파라미터, UV 출력 조절 파라미터, UV 출력 · 관수량 조절 파라미터의 조절에 따른 시스템 내 미생물 농도(colony forming unit, CFU) 변화 반응 조사를 시뮬레이션 시나리오로 설정하였다.

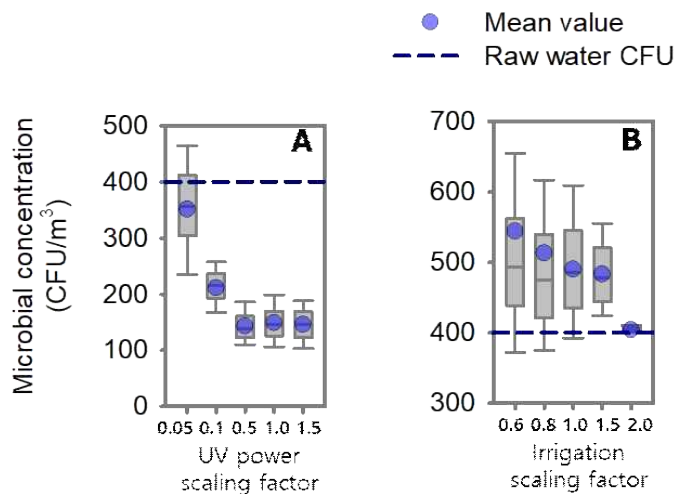


[그림 2.12] 장기간 조건에서 비순환식, UV 살균기 이용 순환식 수경재배 시스템의 미생물 농도 변화 특성에 대한 통합 시뮬레이션 관계도(A)와 이론적 분석 시나리오 (B, 관수량 조절, UV 출력 조절, 관수 · UV 출력 동시 조절)

비순환식 수경재배 시스템의 미생물 농도 변화는 관수량 조절 파라미터에 의존적인 변화 경향을 보여주었다. 낮은 관수량 파라미터가 적용된 비순환식 수경재배 시스템의 미생물 농도 변화는 간헐적으로 높은 수준의 미생물 증식이 관찰되었으며, 미생물 농도의 평균도 높게 나타났다. 비순환식 수경재배 시스템의 미생물 농도 조절 방식은 배액의 배출을 통한 제거 방식에 해당한다. 따라서 이론상 비순환식 수경재배 시스템에서 도달 가능한 가장 낮은 미생물 농도는 공급 원수에 존재하는 미생물의 농도와 같으며, 시뮬레이션에서 이러한 결과를 확인하였다. 순환식 수경재배 재배가 진행됨에 따라 미생물 농도가 점차 증가하였으며, 일정 시간의 경과 후 증가 경향은 점차 완화되어, 평균적인 정상상태 구간이 관찰되었다. 또한, 평균적 정상상태의 수준은 시스템은 UV 출력 파라미터의 조정 수준에 따라 결정되는 경향이 관찰되었다.



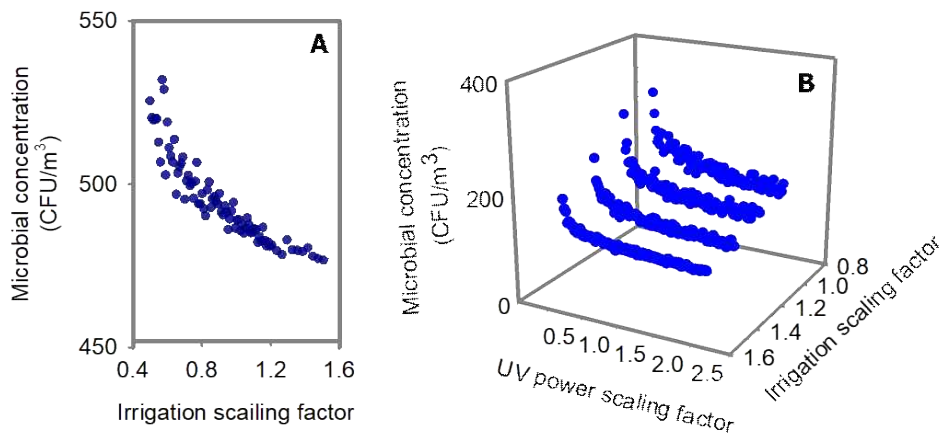
[그림 2.13] 관수량 조절에 따른 비순환식 수경재배 시스템 내 CFU 농도(A)와 UV 출력 조절에 따른 순환식 수경재배 시스템 내 CFU(B) 농도 변화



[그림 2.14] 관수량 조절에 따른 비순환식 수경재배 시스템 내 CFU 농도(A)와 UV 출력 조절에 따른 순환식 수경재배 시스템 내 CFU(B) 농도의 평균값 및 분포 변화

시뮬레이션을 통해서 순환식 수경재배 시스템에서 전체적인 미생물 농도 분포의 평균값은 UV 출력을 증가시킬수록 점차 낮아지나 일정 출력 이후로는 미생물 농도의 제거 성능의 증가 수준은 점차 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 순환식 수경재배 시스템에서 미생물 농도 제거 수준의 한계점은 관수량 조절 파라미터의 증가를 통해서 점차 낮출 수 있음을 확인하였다(그림 2.13).

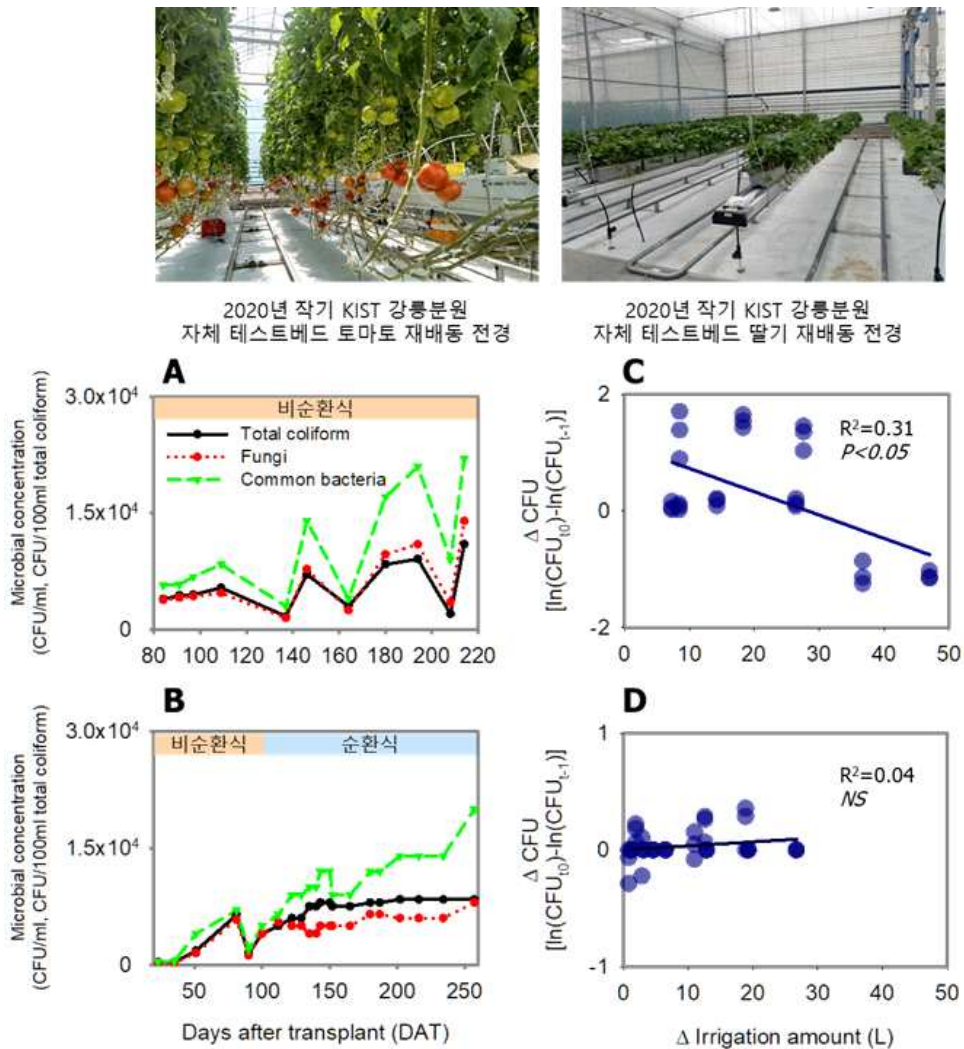
본 시뮬레이션 분석 결과는 일반적인 비순환식 수경재배 시스템의 미생물 농도 관리 수단은 배액의 배출을 통한 소모적인 특성을 나타내는 반면, 순환식 수경재배 시스템의 미생물 농도 관리 수단은 관수량, UV 살균기의 출력관리 2개 요인을 통해 오히려 비순환식에 비해 상대적으로 안정적인 관리를 수행할 수 있는 특성을 보여주었다.



[그림 2.15] 관수량 조절에 따른 비순환식 수경재배 시스템 내 CFU 농도(A)와 UV 출력 · 관수량 조절 파라미터의 동시 조절에 따른 순환식 수경재배 시스템 내 CFU(B) 농도 평균 파라미터 플롯

라. 비순환식 수경재배 시스템과 UV 살균기 운영 순환식 수경재배 시스템의 성능 비교

시뮬레이션 분석을 통해 확인한 비순환식과 순환식 수경재배 시스템의 미생물 농도 변화 특성을 실제 재배 조건에서 확인하기 위해 재배 실험에서의 미생물 농도 변화를 측정하였다. 미생물의 농도 변화 조사를 위한 샘플 수집은 비순환식과 배액수위기준 UV 살균기 운용 순환식 수경재배 시스템의 배지에서 수행되었다. 실험 측정은 암면 배지를 사용하는 토마토 재배 온실에서 2019년부터 2020년 두 작기에 걸쳐 수행되었다.



[그림 2.16] 비순환식 수경재배 시스템(A)과 순환식 수경재배 시스템(B)의 딸기 및 토마토 재배기간 경과에 따른 미생물 농도 변화와 비순환식(C)과 순환식 수경재배(D) 시스템의 관수량과 미생물 농도 증감 수준 사이의 상관분석

두 작기에 걸친 토마토 온실 재배 실험 결과에서 시뮬레이션 결과와 유사한 경향의 시스템 반응을 관찰할 수 있었다. 시뮬레이션을 통해 분석된 바와 같이, 비순환식 수경재배 시스템의 미생물 농도는 관수량의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 재배 기간 동안 미생물 농도의 변동은 상대적으로 크게 나타났으며, 이러한 변동은 관수량과의 유의적인 중의 부상관을 나타냈다. 반면, 배액기준의 UV 살균기 운영 순환식 수경재배 시스템의 경우 미생물 농도는 재배 초기 이후 점차



증가하는 경향이 관찰되었으나 그 증가폭은 작기가 진행될수록 점차 낮아지는 것이 확인되었다. 또한 미생물 농도의 변화량과 관수량과의 유의적인 상관관계는 관찰되지 않았다. 비순환식의 미생물 농도는 관수량이 적었던 구간에서 순환식 수경재배 시스템보다 오히려 더 높게 나타나는 경향 또한 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 시뮬레이션 분석 결과와 유사하게 비순환식 수경재배 시스템에 비해서, UV 살균 시스템이 적용된 순환식 수경재배 시스템의 미생물 농도의 관리 성능은 상대적으로 안정적이며 예측 가능한 변화를 나타냄을 실험적으로 보여주는 것으로 분석될 수 있다.

### 3. [성능평가] 실증데이터 수집 및 분석

#### 가. 농가 현장 검증을 통한 데이터 수집 및 분석

스마트 팜 혁신밸리 실증단지의 운영에 작물의 생육조건 설정과 데이터 수집을 적용

- 작물의 생육 데이터 수집
- 수집된 작물데이터 정리 및 분석
- 기존의 생장 데이터와 비교분석
- 빅 데이터를 통한 알고리즘 개발

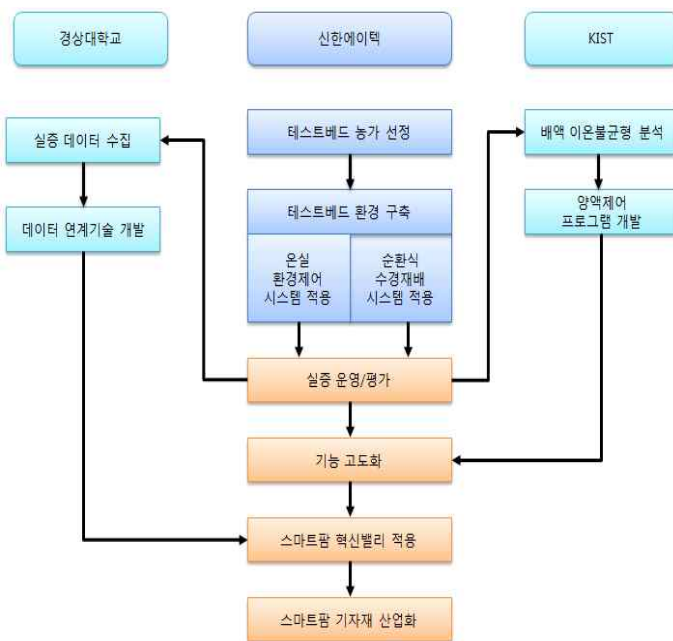


그림3-1 연구개발 협력 추진 체계도

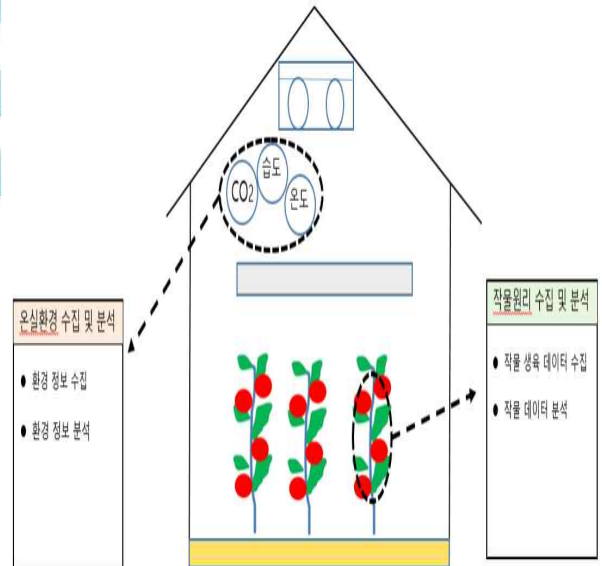


그림3-2 스마트팜 혁신밸리 실증계획 간편 그림도

#### 나. 세부내용



1) 재배작물

- 조사대상 온실에 재배되는 작물은 모두 파프리카로 동일한 품종이다. 남부지방의 경우, 시설내 파프리카 재배 작형은 일반적으로 여름인 7월 ~ 8월에 파종하고 8월말 ~ 9월상순경 정식하여 11월 ~ 이듬해 7월까지 수확하는 주년 작형(착색단고추, RDA, 2018) 형태이다. 따라서 조사대상 온실의 조사 시점은 전체 재배 기간의 2/3 정도가 경과 된 시기이며 정식 후 220±10일 전·후였다. 그리고 조사시점까지의 생육상황이 균일하다고 가정하였고, 온실내 식물체 생육 상황도 35~45마디 정도에서 개화, 결과, 수확이 진행되는 생육상황이었다. 따라서 본 연구에서는 조사 기간을 고려하여 30마디 지점을 조사기준점으로 설정하여 기준점 이상의 생육량에 대하여 조사를 진행하였다. 조사 시점에서 종료시까지 30마디(기준점)이하에서 유의미한 생육량의 변동은 없었으며, 목질화로 인하여 유의미한 위치적인 변동 또한 없었다.

2. 생육조사

1) 조사항목

- 일반적으로 작물 생육조사 항목으로 많이 활용되고, 조사대상 온실 내 작물의 생육 상황과 조사기간을 고려하여 강원도농업기술원의 생육조사 기준을 준용하였다. 즉 영양 생장과 관련된 5개 항목(초장, 엽수, 엽길이, 엽폭, 줄기굵기)과 생식 생장과 관련된 3개 항목(개화마디, 착과마디, 착과수)을 조사 대상으로 하였다. 조사항목별 상세 내용은 T표 3-1 및 표3-2와 같다.

표3-1. Nutrition growth research item.

Classification	Content
Plant body length	Length from the reference point to the outgrowth point
Leaf number	The number of leaves from the reference point to the flowering node
Leaf length	The length of the third largest leaf under the flower
Leaf width	The width of the third largest leaf under the flower
Stem thickness	Stem Thickness of 2cm Under Flower

표3-2. Reproductive growth research item.

Classification	Content
Flowering node number	Number of nodes blooming
Fruited node number	Number of nodes with fruit
Number of fruit	Number of fruit attached

## 2) 조사방법

- 생육조사는 4주간 진행하였으며, 조사대상 온실 3개소의 가로방향 중간지점(A온실 20번째 이랑, B온실 17번째 이랑, C온실 22번째 이랑), 세로방향으로 중간지점(A온실 약 40m지점, B온실 약 45m지점, C온실 35m지점), 최상위 개화 화방 높이(지면에서 약 4m)에 설치된 환경측정 센서 주변에 있는 파프리카를 대상으로 3반복 처리하였다. 그리고 조사는 6 ~ 8일 간격으로 실시하였다. 그림3-1은 조사대상온실의 환경계측 센서 설치 형태이다.



그림3-1. Environment measuring sensor.

- 조사에 사용된 도구는 줄자(STAR, 피버 글라스 테이프 10m, China), 버니어 캘리퍼스(HANDO, 애플루트 디지매틱 캘리퍼스, Korea)를 활용하였고, 생육상황을 고려하여 30마디를 기준점으로 하여 생육조사를 실시하였고 조사항목은 아래와 같다.
  - 초장(cm) : 30마디 ~ 생장점까지 길이 측정
  - 엽수(ea) : 30마디 ~ 최상부 개화된 화방까지 마디수(엽수) 측정
  - 엽길이(cm) : 최상부 화방 아래 3번째 마디 가장 큰 엽 길이 측정
  - 엽폭(cm) : 최상부 화방 아래 3번째 마디 가장 큰 엽폭 측정

- 줄기굵기(mm) : 최상부 화방 아래 2Cm지점 줄기 굵기 측정
- 개화마디(ea) : 30마디이상 개화된 마디수
- 착과마디(ea) : 30마디이상 착과된 마디수
- 착과수(ea) : 30마디이상 동전 크기 이상 착과된 과일 개수

- 파프리카 대상 조사지점은 그림3-2 ~그림3-9과 같고, 조사방법은 그림3-10 ~ 그림 3-12에 나타난 것과 같다.



그림3-2. Plant length investigation point.

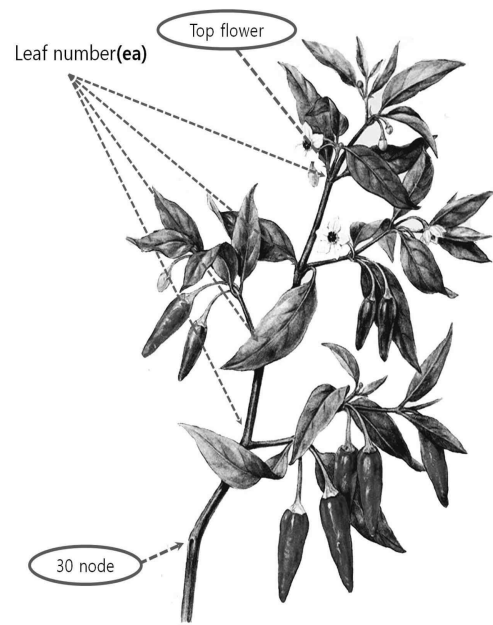


그림3-3. Leaf number investigation point.



그림3-4. Leaf length irradiation point.



그림3-5. Leaf width irradiation point.

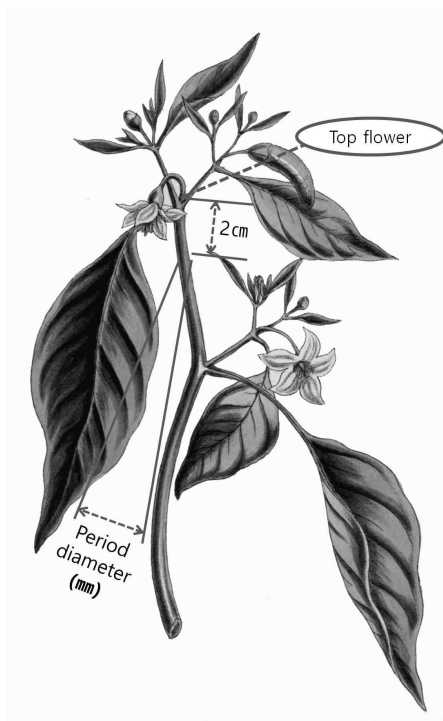


그림3-6. Stem thickness irradiation point.

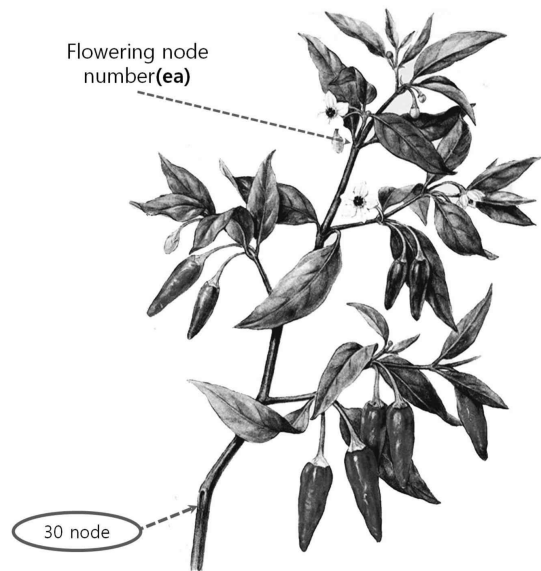


그림3-7. Flowering node irradiation point.

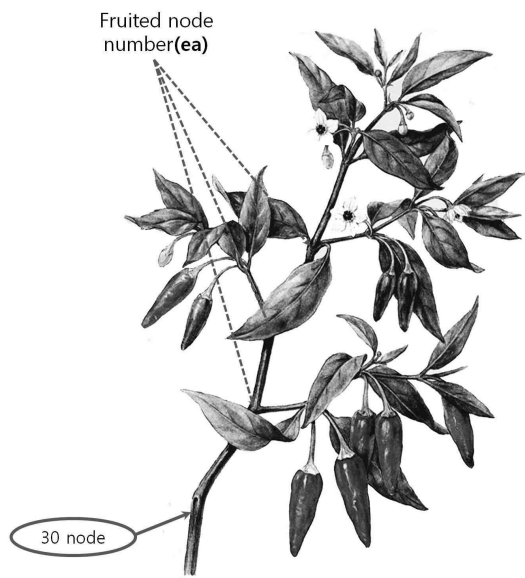


그림3-8. Fruit node irradiation point.

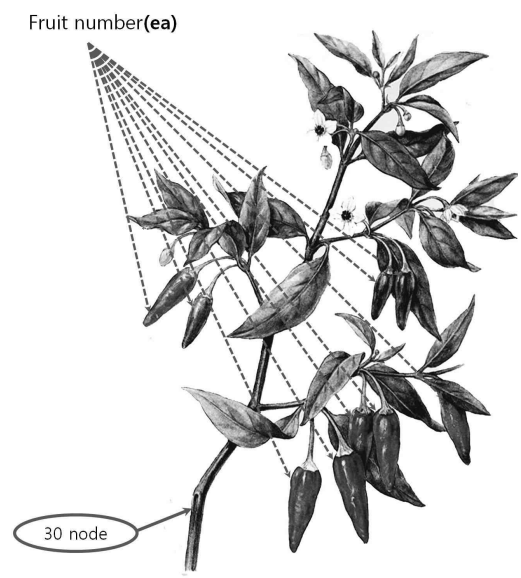


그림3-9. Fruit number investigation point.



그림3-10. Measurement of plant length and leaf number.





그림3-11. Measurement of leaf length and width.



그림3-12. Stem thickness and number of node measurement.

- 표3-3은 생육 조사 결과 값을 나타낸 것이고, Table 9에서 편차는 조사기간(4주)동안의 최소 및 최대 값의 차이를 나타낸 것이다. 생육 조사 결과를 살펴보면 다음과 같



다.

- 초장 증가의 경우, A온실은 1주차 54.3cm에서 4주차 70.3cm로 16.0cm 증가, B온실은 1주차 65.3cm에서 4주차 76.7cm로 11.4cm 증가, C온실은 1주차 74.0cm에서 4주차 97.7cm로 23.7cm 증가하여  $C > A > B$  온실 순으로 나타났다.
- 엽수 증가의 경우, A온실은 1주차 5.7개에서 4주차 10.0개로 4.3개 증가, B온실은 1주차 8.7개에서 4주차 12.0개로 3.3개 증가, C온실은 1주차 7.0개에서 4주차 12.0개로 5.0개 증가하여  $C > A > B$  온실 순으로 나타났다.
- 엽길이 편차의 경우, A온실은 최소 16.8cm, 최대 21.0cm로  $\pm 4.2$ cm의 편차를 보였고, B온실은 최소 15.8cm, 최대 19.5cm로  $\pm 3.7$ cm의 편차를 보였으며, C온실은 최소 17.3cm, 최대 19.5cm로  $\pm 2.2$ cm의 편차로  $C < B < A$  온실 순으로 나타났다.
- 엽폭 편차의 경우, A온실은 최소 8.3cm, 최대 10.8cm로  $\pm 2.5$ cm의 편차를 보였고, B온실은 최소 8.8cm, 최대 10.2cm로  $\pm 1.4$ cm의 편차를 보였으며, C온실은 최소 9.4cm, 최대 11.0cm로  $\pm 1.6$ cm의 편차로 엽폭의 편차는  $B < C < A$  온실 순으로 나타났다.
- 줄기 굵기 편차의 경우, A온실은 최소 3.8mm, 최대 5.1mm로  $\pm 1.3$ mm의 편차를 보였고, B온실은 최소 3.5mm, 최대 4.8mm로  $\pm 1.3$ mm의 편차를 보였으며, C온실은 최소 3.8mm, 최대 4.7mm로  $\pm 0.9$ mm의 편차로  $C < A = B$  온실 순으로 나타났다.
- 개화 마디수 증가의 경우, A온실은 최소 2.7개, 최대 3.0개로 1.0개 증가, B온실은 최소 1.7개, 최대 2.3개로 0.6개 증가, C온실은 최소 2.7개, 최대 4.3개로 1.6개 증가하여  $C > A > B$  온실의 순으로 나타났다.
- 착과 마디수 증가의 경우, A온실은 최소 3.7개, 최대 4.0개로 0.3개 증가, B온실은 최소 4.3개, 최대 5.0개로 0.7개 증가, C온실은 최소 2.0개, 최대 6.0개로 4.0개 증가하여  $C > B > A$  온실 순으로 나타났다.
- 착과수 증가의 경우, A온실은 최소 4.3개, 최대 4.3개로 변화가 없고, B온실은 최소 4.3개, 최대 5.3개로 1.0개 증가되었으며, C온실은 최소 2.0개, 최대 6.3개로 4.3개 증가되어  $C > B > A$  온실 순으로 나타났다.

표 3-3. Growth survey result.

Classification	Green house	Weeks				Deviation		
		1	2	3	4	Min (a)	Max (b)	b-a
Plant length (cm)	A	54.3	60.7	63.7	70.3	54.3	70.3	16.0
	B	65.3	71.0	73.3	76.7	65.3	76.7	11.4
	C	74.0	83.3	91.0	97.7	74.0	97.7	23.7
Leaf number (ea)	A	5.7	7.7	8.3	10.0	5.7	10.0	4.3
	B	8.7	9.3	9.3	12.0	8.7	12.0	3.3
	C	7.0	9.7	10.7	12.0	7.0	12.0	5.0
Leaf length (cm)	A	20.7	21.0	18.3	16.8	16.8	21.0	4.2
	B	17.5	19.5	18.5	15.8	15.8	19.5	3.7
	C	19.5	17.3	18.5	18.7	17.3	19.5	2.2
Leaf width (cm)	A	10.7	10.8	9.4	8.3	8.3	10.8	2.5
	B	10.0	10.2	9.5	8.8	8.8	10.2	1.4
	C	11.0	9.9	9.5	9.4	9.4	11.0	1.6
Stem thickness (mm)	A	5.1	5.0	3.9	3.8	3.8	5.1	1.3
	B	3.7	4.7	4.8	3.5	3.5	4.8	1.3
	C	4.7	4.1	3.8	4.3	3.8	4.7	0.9
Flowering nodes (ea)	A	2.0	2.0	2.7	3.0	2.0	3.0	1.0
	B	1.7	2.0	2.3	1.7	1.7	2.3	0.6
	C	2.7	4.3	4.3	3.3	2.7	4.3	1.6
Fruit-adjusted nodes (ea)	A	3.7	4.0	4.0	4.0	3.7	4.0	0.3
	B	4.3	4.3	4.3	5.0	4.3	5.0	0.7
	C	2.0	2.3	4.0	6.0	2.0	6.0	4.0
Fruit number (ea)	A	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	4.3	0.0
	B	4.7	4.7	4.3	5.3	4.3	5.3	1.0
	C	2.0	2.3	4.0	6.3	2.0	6.3	4.3

- 식물의 생장은 크게 영양생장과 생식생장으로 나눌 수 있는데, 영양생장은 식물체의 발생과 성숙에 이를 때 까지의 과정을 말하며, 생식생장은 식물체의 성장보다는 종자를 생산하기 위해 꽃의 발생과 종자의 성숙에 이르기까지의 과정을 말한다. 생식생장은 영양생장에서 생산된 물질을 생식기관으로 축적시키면서 전환되는데, 영양생장은 교대기를 거쳐서 생식기관에 영양분 축적에 집중하게 되는 생식생장이 일어난다(KSPB, 2020).

- 파프리카는 고온과 다습하면 착과 불량, 과실 비대 부진, 열과, 품질 저하 및 잎을 해

치는 병이 많이 발생하는 등의 특징이 있다. 생육적온은 23.0~25.0℃이며, 상대습도는 70.0~80.0%를 유지하는 것이 적합하다. 그리고 일반적으로 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도는 약 380.0~400.0ppm이다. 온실 내 파프리카 군락의 CO<sub>2</sub> 농도는 200.0ppm까지 빠르게 감소될 수 있는데 C3 식물인 파프리카는 CO<sub>2</sub> 시비를 통해 농도를 올려주면 성장과 수량이 유의성 있게 향상될 수 있다(스마트 온실환경관리 가이드라인, RDA, 2016).

- 따라서, 생육조사 결과가 A, B 및 C온실에서 일관성 있게 나타난 것이 아니라 조사 항목(초장, 엽수, 엽길이, 엽폭, 줄기 굵기, 개화마디, 착과마디, 착과수)에 따라 대상 온실 간에 큰 차이가 있었다. 예를 들어, 초장 증가의 경우 조사기간(4주)동안 A, B 및 C온실의 증가 값은 각각 16.0cm, 11.4cm, 23.7cm으로 큰 차이를 보였다. 이러한 결과는 온실 내 환경요인에 의한 것으로 판단되며, 온실의 환경요인 차이는 온실의 설치 방향과 난방 설정온도 및 변온관리, 환기정도, 유동팬 가동, CO<sub>2</sub> 시비, 일사량, 배지내 양분, 급수 정도 등 다양한 요인에 의해 차이가 발생 할 수 있다.

## 2) 생체 데이터 분석

- 엽면적지수 = {엽길이(cm)/100} x {엽폭(cm)/100} x 엽수(개)

항목	날짜	A농장	B농장	C농장
엽면적지수	1주차	0.126	0.152	0.150
	2주차	0.175	0.185	0.166
	3주차	0.143	0.163	0.188
	4주차	0.139	0.167	0.211

- 생산마디 = 개화마디(개) + 착과마디(개)

항목	날짜	A농장	B농장	C농장
생산마디	1주차	5.7	6	4.7
	2주차	6	6.3	6.6
	3주차	6.7	6.6	8.3
	4주차	7	6.7	9.3

## 3) 온도에 따른 생육 데이터 분석

- Table 12는 조사기간(4주) 동안 조사대상 온실별 내부 온도의 주단위별 평균 한 값과 생육량 변화 계측 값을 나타낸 것이다. Table 12에서 알 수 있듯이 조사기간(4주) 동안 내부 온도의 주단위별 평균 관리수준의 평균 값은 A, B 및 C온실 각각 21.3℃, 19.1℃ 및 22.6℃로써 C > A > B온실 순으로 관리되었고, 주단위별 평균온도의 편차는 A, B 및 C온실 각각 ±1.2℃, ±1.8℃ 및 ±0.7℃로써 그 편차는 C < A < B온실 순으로 나타났다.

- 이때, 초장의 증가는 A, B 및 C온실 각각 16.0cm, 11.4cm 및 23.7cm로써  $C > A > B$ 온실 순으로 이었는데, 이는 내부 온도의 주단위별 평균 관리수준 및 편차와 동일한 경향을 나타내고 있다.
- 그리고 생산마디의 증가는 A, B 및 C온실 각각 1.3개, 0.7개 및 4.6개로써  $C > A > B$ 온실 순으로 나타났고, 생산마디의 증가 값도 내부 온도의 주단위별 평균 관리수준 및 편차와 동일한 경향을 보였다.
- 엽면적의 경우, A, B 및 C온실 각각  $0.146\text{m}^2$ ,  $0.167\text{m}^2$  및  $0.179\text{m}^2$ 으로써  $C > B > A$ 온실 순으로 나타났다. 그리고 엽면적의 편차는 A, B 및 C온실 각각  $0.049\text{m}^2$ ,  $0.033\text{m}^2$  및  $0.061\text{m}^2$ 으로써  $B < A < C$ 온실 순으로 나타나, 엽면적의 변화와 내부 온도의 주단위별 평균 관리수준 및 편차는 상관관계가 낮은 경향을 나타내고 있다.
- 시설온실에서 온도의 영향은 작물은 대기로부터 흡수한 이산화탄소와 뿌리로부터 흡수한 물을 이용하여 식물체 앞에서 햇빛을 받아 동화산물을 생성하는 광합성을 한다. 이 광합성 과정에서 생성된 동화산물은 전분 및 당으로 저장되고 식물체의 구성 물질로 이용된다. 작물의 광합성은 저온 조건보다 온도가 높아지면서 급격히 증가하고 고온이 되면 호흡이 왕성해져 광합성량은 감소하며 장시간 고온 조건에 두면 고온에 의한 피해를 봐서 회복이 불가능하다. 지나친 저온 및 고온은 장해를 유발하므로 시설 내 온도 관리는 중요하다(시설원예, RDA, 2014).
- 따라서, 조사대상 온실별 생육량을 살펴보면 주단위별 평균온도 관리수준 및 편차는 식물체의 초장과 생산마디의 증가와 상관관계를 가지나, 엽면적과는 상관관계가 낮은 것으로 나타났다.

**표3-4. Growth measurement and mean temperature relation.**

Classification	Green house	Weekly mean				Total mean	Deviati on	
		1	2	3	4			
Mean temperature(°C)	A	21.8	20.8	20.8	22.0	21.3	±1.2	
	B	20.2	18.4	18.4	19.2	19.1	±1.8	
	C	23.0	22.3	22.5	22.8	22.6	±0.7	
Growth measur ement	Plant length increase (cm)	A	0.0	6.4	9.4	16.0		+16.0
		B	0.0	5.7	8.0	11.4		+11.4
		C	0.0	9.3	17.0	23.7		+23.7
	Productive node increase (ea)	A	0.0	0.3	1.0	1.3		+1.3
		B	0.0	0.3	0.6	0.7		+0.7
		C	0.0	1.9	3.6	4.6		+4.6
	Leaf area (m <sup>2</sup> )	A	0.126	0.175	0.143	0.139	0.146	±0.049
		B	0.152	0.185	0.163	0.167	0.167	±0.033
		C	0.150	0.166	0.188	0.211	0.179	±0.061

- 그림 3-13은 내부 온도의 주단위별 평균 관리수준과 초장의 증가를 도식화 한 것이다. 그림3-13에서 알 수 있듯이 주단위별 평균 관리수준이 높은 C온실의 초장이 A온실과 B온실 보다 높게 증가된 것으로 나타났다. 결론적으로, 내부 온도의 주단위별 관리수준이 높은 것이 초장의 증가에 유리한 것으로 나타났다.

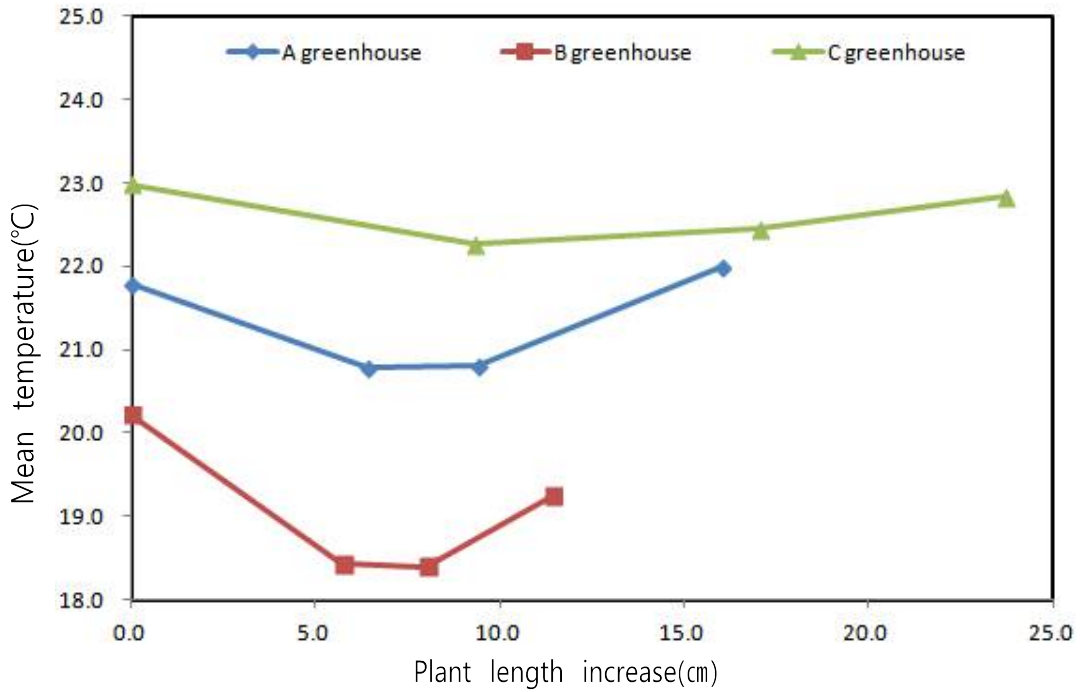


그림3-13. Plant length increase and mean temperature relation.

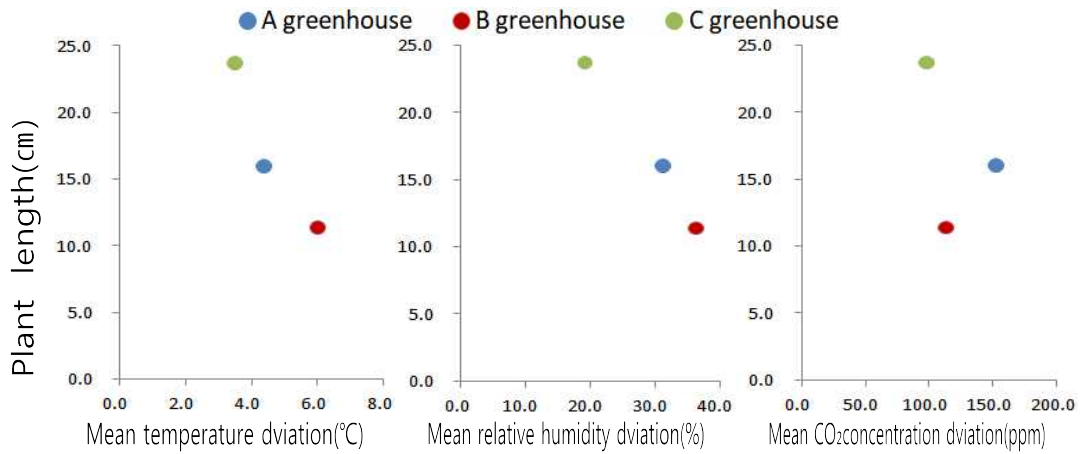
- Fig. 21은 일 평균온도의 주단위 평균 관리수준과 생산마디의 증가를 도식화 한 것이다. Fig. 21에서 알 수 있듯이 일 평균온도의 주단위 평균 관리수준이 높은 C온실의 생산마디의 증가가 A온실과 B온실 보다 높게 나타났다.
- 파프리카의 경우, 정식 후에서 화방 착과기까지의 온도는 주야간 각각 24.0~25.0℃ 및 21.0~22.0℃로 관리하다가, 착과 이후에는 주야간 각각 21.0~24.0℃ 및 18.0~20.0℃로 관리하는 것으로 알려져 있다. 그리고 근권부 온도는 18.0~20.0℃로 관리하는 것으로 알려져 있는데, 저온에서 관리하게 되면 기형화, 기형과(씨 없는 과, 귀 달린 과, 호박과, 꼬리달린 과, 착색불량과 등), 수확지연 등으로 생산성을 낮춘다(착색단고추, RDA, 2018).
- 따라서, 환경요인 중 온도관리가 파프리카의 생산마디 증가와 상관관계를 가지며 적정범위 내에서 높게 관리되는 것이 생산마디를 증가 시키는 것으로 나타났다.



Classification	Green house	Growth deviation	Green house	Environmental deviation						
				Mean temperature (°C)	Mean relative humidity (%)	Mean CO <sub>2</sub> concentration (ppm)				
Plant length (cm)	A	+16.0	A	±4.4	±31.2	±152.4				
	B	+11.4								
	C	+23.7								
Leaf number (ea)	A	+4.3								
	B	+3.3								
	C	+5.0								
Leaf length (cm)	A	±4.2					B	±6.0	±36.3	±112.9
	B	±3.7								
	C	±2.2								
Leaf width (cm)	A	±2.5								
	B	±1.4								
	C	±1.6								
Stem thickness (mm)	A	±1.3	C	±3.5	±19.2	±98.0				
	B	±1.3								
	C	±0.9								
Flowering nodes (ea)	A	+1.0								
	B	+0.6								
	C	+1.6								
Fruit-adjusted nodes (ea)	A	+0.3								
	B	+0.7								
	C	+4.0								
Fruit number (ea)	A	+0.0								
	B	+1.0								
	C	+4.3								

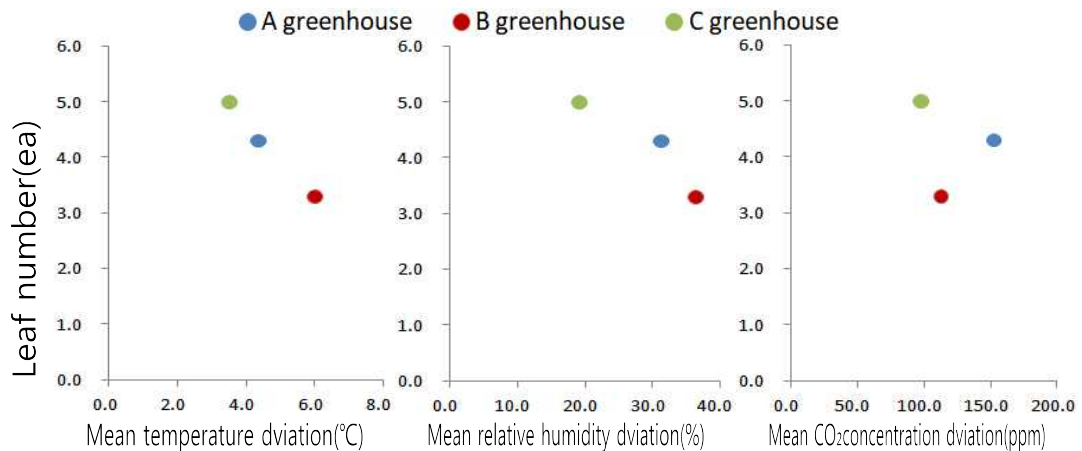
표3-5. Growth and environmental value deviation.

- 그림3-14의 (a)~(h)는 조사대상 3개 온실의 생육 계측 값의 편차와 주요 환경요인 편차의 상관관계를 도식화 한 것이다.
- (a)는 초장의 증가와 온실별 환경요인과의 관계를 도식화 한 것으로 초장의 증가는 C > A > B온실 순으로 나타났다. 이때 일 평균온도 편차는 C < A < B온실 순으로 초장의 증가와 반비례 관계를 나타내고, 일 평균 상대습도 편차도 C < A < B온실 순으로 초장의 증가와 반비례 관계를 나타내었다. CO<sub>2</sub> 농도 편차는 C < B < A온실 순으로 초장의 증가에 영향이 적은 것으로 나타났다.



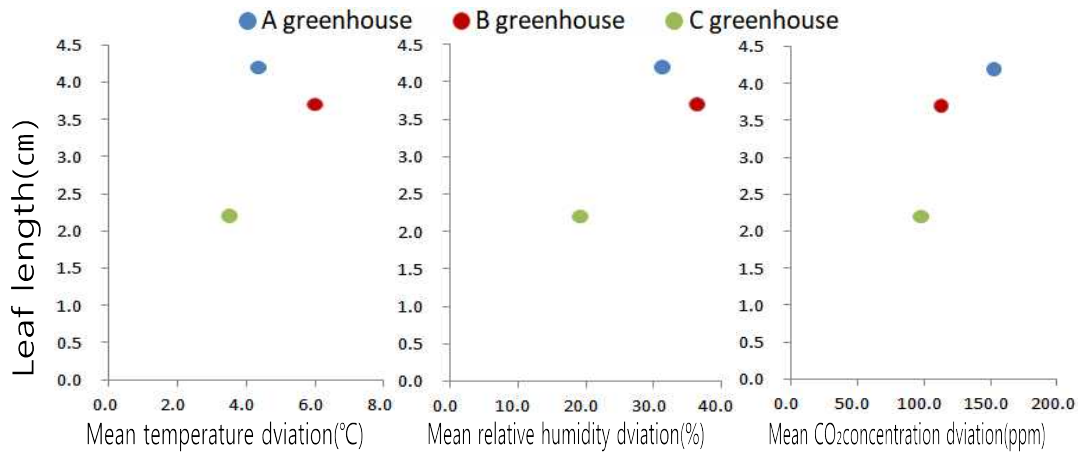
(a) Plant length and environmental value deviation

- (b)는 엽수의 증가와 온실별 환경요인과의 관계를 도식화 한 것으로 엽수의 증가는  $C > A > B$  온실 순으로 나타났다. 이때 환경요인의 변화는 (a)에서 설명한 바와 같이 일 평균온도 편차, 일 평균 상대습도 편차는 반비례 관계이고, CO<sub>2</sub> 농도 편차는 엽수의 증가와 상관관계가 낮은 것으로 나타났다.



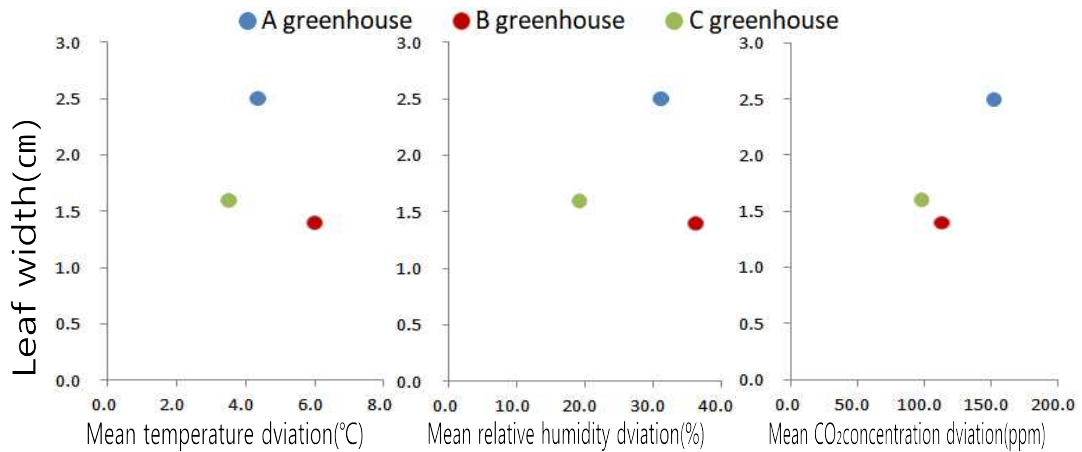
(b) Leaf number and environmental value deviation

- (c)는 엽길이의 변화와 온실별 환경요인과의 관계를 도식화 한 것으로 엽길이의 변화는  $C < B < A$  온실 순으로 나타났다. 이때 일 평균온도 및 상대습도 편차는  $C < A < B$  온실 순으로 나타나 상관관계가 낮은 것으로 판단되며, CO<sub>2</sub> 농도 편차는  $C < B < A$  온실 순으로 엽길이의 변화와 비례 관계의 영향을 나타냈다.



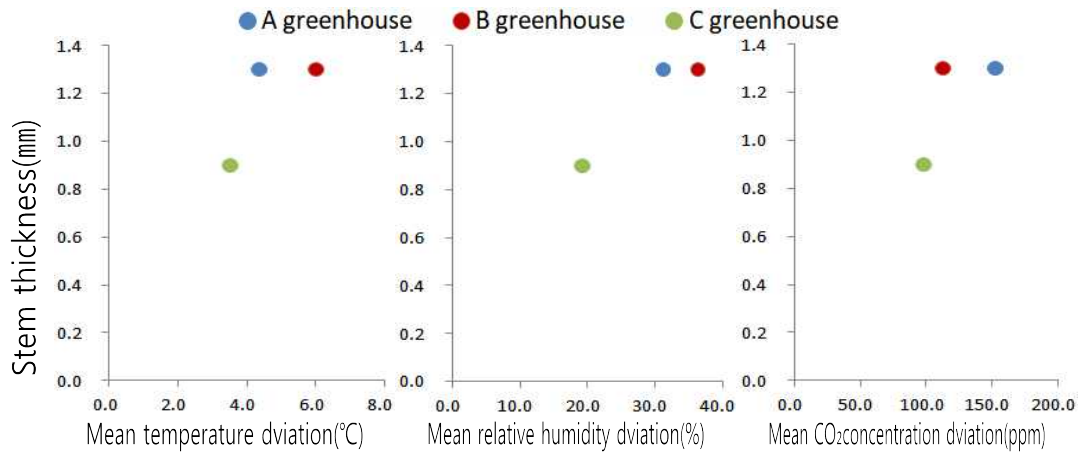
(c) Leaf length and environmental value deviation

- (d)는 엽폭의 변화와 온실별 환경요인과의 관계를 도식화 한 것으로 엽폭의 변화는 B < C < A 온실 순으로 나타났다. 이때 환경요인의 변화는 (c)에서 설명한 바와 같이 일 평균온도 및 상대습도 편차는 C < A < B 온실 순으로 상관관계가 낮은 것으로 나타났고, CO<sub>2</sub> 농도 편차도 C < B < A 온실 순으로 나타나 엽폭의 변화와 상관관계가 낮은 것으로 나타났다.



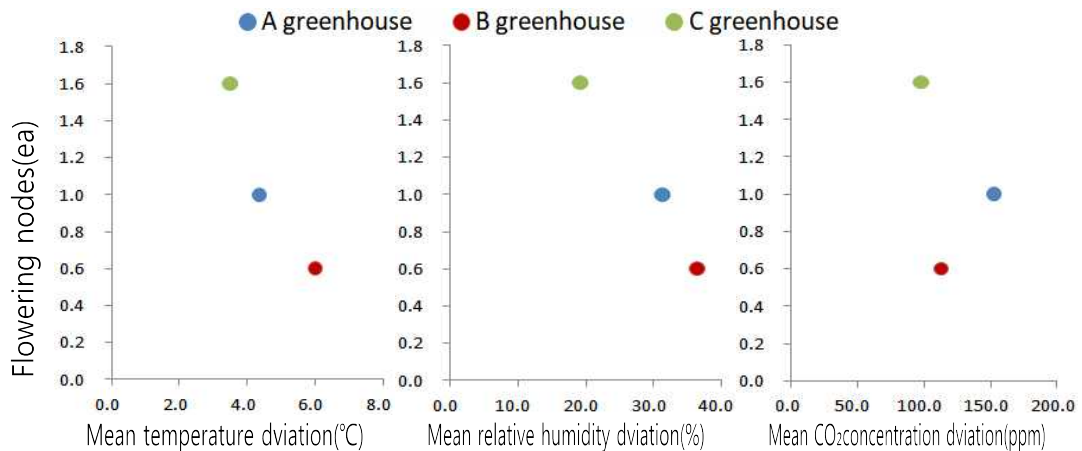
(d) Leaf width and environmental value deviation

- (e)는 줄기굵기의 변화와 온실별 환경요인과의 관계를 도식화 한 것으로 줄기굵기의 변화는 C < A = B 온실 순으로 나타났다. 이때 일 평균온도 및 상대습도 편차는 C < A < B 온실 순으로 상관관계가 낮은 것으로 나타났고, CO<sub>2</sub> 농도 편차도 C < B < A 온실 순으로 줄기굵기의 변화와 상관관계가 낮은 것으로 나타났다.



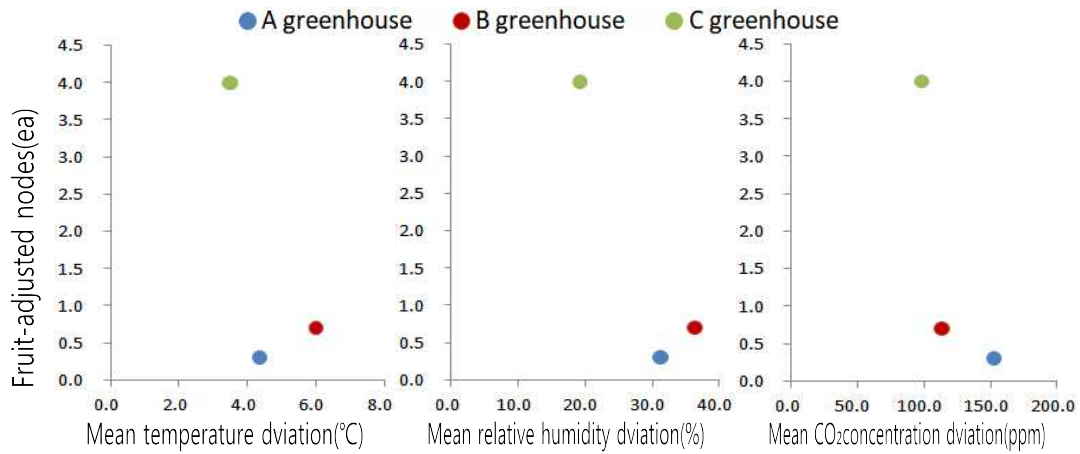
(e) Stem thickness and environmental value deviation

- (f)는 개화마디의 증가와 온실별 환경요인과의 관계를 도식화 한 것으로 개화마디의 증가는 C > A > B온실 순으로 나타났다. 이때 일 평균온도 및 상대습도 편차는 C < A < B온실 순으로 반비례 관계로 나타났고, CO<sub>2</sub> 농도 편차는 C < B < A온실 순으로 개화마디의 증가와 상관관계가 낮은 것으로 나타났다.



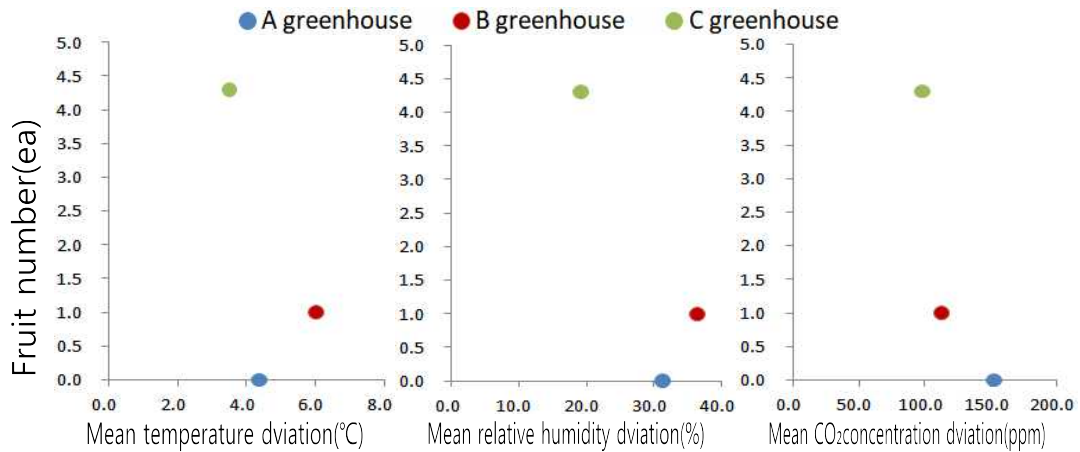
(f) Flowering nodes and environmental value deviation

- (g)는 착과마디의 증가와 온실별 환경요인과의 관계를 도식화 한 것으로 착과마디의 증가는 C > B > A온실 순으로 나타났다. 이때 일 평균온도 및 상대습도 편차는 C < A < B온실 순으로 착과마디의 증가와 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. CO<sub>2</sub> 농도 편차는 C < B < A온실 순으로 적게 나타나 착과마디와 반비례관계의 영향을 보이는 것으로 나타났다.



(g) Fruit-adjusted nodes and environmental value deviation

- (h)는 착과수의 증가와 온실별 환경요인과의 관계를 도식화 한 것으로 착과수의 증가는 C > B > A 온실 순으로 나타났다. 이때 일 평균온도 및 상대습도 편차는 C < A < B 온실 순으로 착과수의 증가와 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. CO<sub>2</sub> 농도 편차는 C < B < A 온실 순으로 적게 나타나 착과수와 반비례관계의 영향을 보이는 것으로 나타났다.



(h) Fruit number and environmental value deviation

그림3-14. Correlation between environmental factors and growth.

#### 5) 생육값과 환경요인의 관계 분석

- Table 16은 조사대상 기간(4주)의 조사대상 온실(3개소) 주요 환경요인의 계측 값과 생육 계측 값의 개별 상관관계를 알아보기 위해 단순회귀분석으로 결정계수를 구한 결과이다. 상관계수는 임의의 두 환경요인 및 생육의 관련 정도를 표시하고 상관계수의 크기는 변수에 따라 변하므로 변수의 임의적 조절이 가능할 경우에는 상관계수는 의미가 없다. 그래서 상관계수의 제곱 즉,  $r^2_{xy} = R^2$ 으로 표시되는 결정계수를 나타내어, 전체 변동 중에서 회귀로 설명할 수 있는 변동의 비율을 표시한다. 따라서 본 논

문에서는 주요 환경요인과 생육 계측 값의 상관관계를 추정하기 위해 결정계수를 구하였다.

표3-6. Growth value and Environmental factor regression analysis.

Environmental factors and growth	Mean temperature	Temperature deviation	Mean relative humidity	Relative humidity deviation	Mean CO <sub>2</sub> concentration	CO <sub>2</sub> concentration deviation	Plant length	Leaf area	Productive node
Mean temperature	1.00000	0.99960	0.96550	0.85666	0.65923	0.01165	0.23698	0.07724	0.45883
Temperature deviation	0.99960	1.00000	0.95780	0.84232	0.67811	0.00774	0.22013	0.06688	0.43888
Mean relative humidity	0.96550	0.95780	1.00000	0.95996	0.47523	0.08452	0.41035	0.20387	0.64356
Relative humidity deviation	0.85666	0.84232	0.95996	1.00000	0.28141	0.22686	0.61039	0.38554	0.81986
Mean CO <sub>2</sub> concentration	0.65923	0.67811	0.47523	0.28141	1.00000	0.24275	0.01315	0.11229	0.01453
CO <sub>2</sub> concentration deviation	0.01165	0.00774	0.08452	0.22686	0.24275	1.00000	0.84816	0.97021	0.64716
Plant length	0.23698	0.22013	0.41035	0.61039	0.01315	0.84816	1.00000	0.94944	0.94544
Leaf area	0.07724	0.06688	0.20387	0.38554	0.11229	0.97021	0.94944	1.00000	0.80088
Productive node	0.45883	0.43888	0.64356	0.81986	0.01453	0.64716	0.94544	0.80088	1.00000

- 표3-6의 각 요인 간 상관관계를 살펴보면 온도 편차, 일 평균 상대습도, 상대습도 편차, CO<sub>2</sub> 농도 편차, 초장, 엽면적, 생산마디는 다소 높은 상관관계를 보이며 일 평균 온도, 일 평균 CO<sub>2</sub> 농도는 다른 요인보다 낮은 상관관계를 보였다. 생육 값에 대한 환경요인의 상관관계는 엽면적과 CO<sub>2</sub> 농도 편차가 결정계수 0.97021로 가장 높게 나타났다. 이러한 결과로 두 요인간의 단순 회귀분석을 실시하여 표3-7과 같은 결과를 나타내었다.

표3-7. Leaf area simple regression analysis.

Y	$\beta_0$	X	$\beta_1$	P-value	R <sup>2</sup>
Leaf area	0.10723	CO <sub>2</sub> concentration deviation	-0.00049	0.11044	0.97021

- 표3-7의 결과를 살펴보면 엽면적은 CO<sub>2</sub> 농도 편차와 높은 상관관계를 보였으며, 두 요인간의 단순회귀 모델은 엽면적 = 0.10723 - 0.00049 × CO<sub>2</sub> 농도 편차(ppm)로 나타났다.
- 다른 환경요인과 생육 계측 값의 각 요인별 상관관계는 높지 않을 것으로 판단되나, 초장, 엽면적, 생산마디와 같은 생육요인이 다중의 주요 환경요인과의 상관관계를 추정하기 위해 다중회귀 분석을 실시한 결과 초장, 생산마디와 일 평균 CO<sub>2</sub> 농도, CO<sub>2</sub> 농도 편차간의 상관관계가 Table 18과 같이 도출되었다.

표3-8. Multiple regression analysis of plant length and productive node.

Y	Constant	Environmental variable		
		Mean CO <sub>2</sub> concentration	CO <sub>2</sub> concentration dviation	R <sup>2</sup>
Plant length (n=9)	7.798	0.063	-0.203	0.522
Productive node (n=9)	1.716	0.019	-0.080	0.821

- 표3-8의 결과에 따르면 초장 = 7.798 + 0.063 × 평균 CO<sub>2</sub> 농도 - 0.203 × CO<sub>2</sub> 농도 편차로 결정계수가 0.522로 나타났으며, 생산마디 = 1.716 + 0.019 × 평균 CO<sub>2</sub> 농도 - 0.080 × CO<sub>2</sub> 농도 편차로 결정계수가 0.821로 나타나 초장과 생산마디는 CO<sub>2</sub> 농도 및 편차와 회귀식과 같은 상관관계를 가지나 설명력은 높지 않았다.

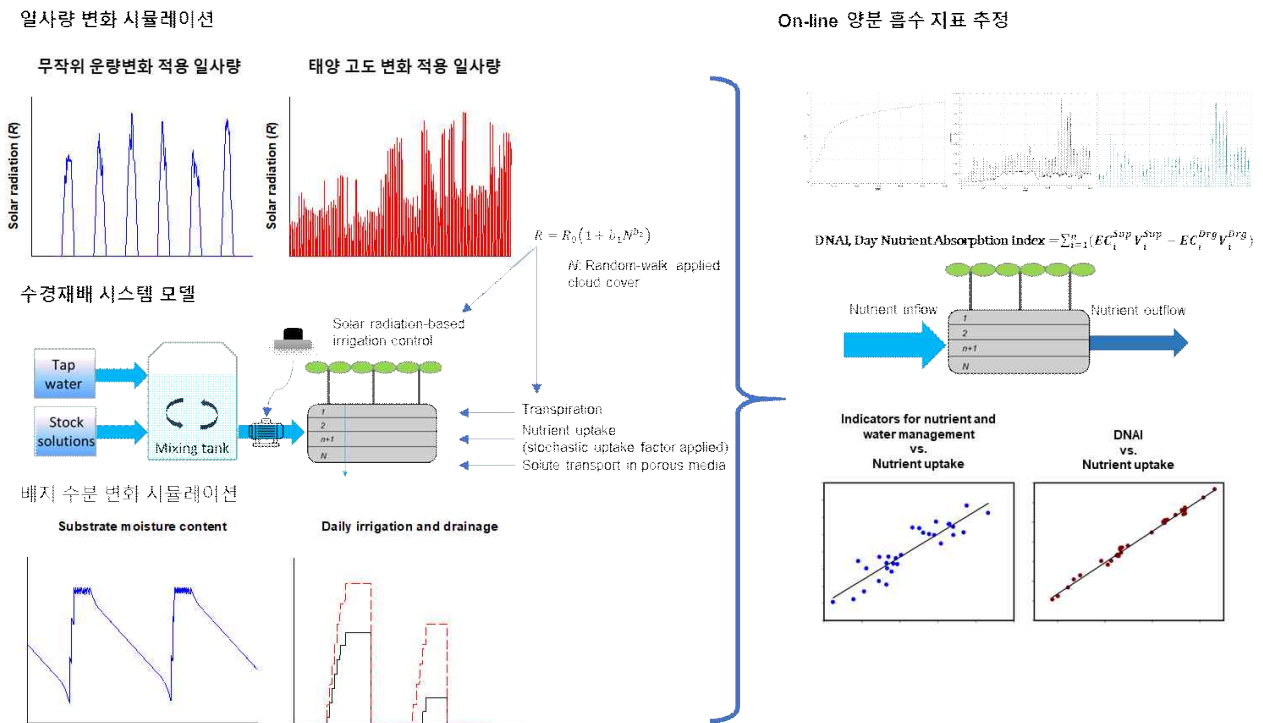
#### 4. [고도화] On-line 양분흡수지표 개발을 통한 배액 재사용률 동적 제어 기반 구축 및 재사용 혼합양액 pH·EC의 안정적 제어

##### 가. EC 기반 수경재배 시스템 상에서 실시간 획득이 가능한 양수분 데이터(급배액량 측정 유량센서, EC 센서 데이터 등) 기반의 양분흡수지표 개발을 위한 시뮬레이션 모델 구축 및 이론적 분석

식물의 양분흡수현상은 상대 생장률, 영양·생식 생장의 상태와 상관을 나타내며, 식물의 생육 관리에 중요한 정보를 가지고 있다. 전기전도도(EC) 센서는 전체 양분농도 변화의 지표로 활용되며 수경재배 시스템의 양분 관리에서 가장 기본적인 센서로 활용된다. 지금까지 수경재배 시스템에서 EC는 주로 공급 양액이나 배액의 농도 모니터링 및 제어에 주로 사용됐다. 그러나 배액의 EC는 식물의 증산 및 양분흡수 현상이 반영된 결과로, 단순 농도 외에 더 높은 차원의 정보를 기대할 수 있다. 그러나 대부분의 수경재배 시스템은 양분과 수분이 자동 관수 시스템에 의해 간헐적으로 공급이 되며, 여기에 더해 암면과 같은 배지경은 근권부 양분 분포가 불균일하다. 따라서 수경재배 상업농가의 대부분을 차지하는 배지경의 경우 양분 흡수에 관련된 정보를 시스템 on-line 상에서 획득하는데 불리한 근권부 조건을 가지고 있는 것으로 인식됐다. 그러나 이러한 오차 요인

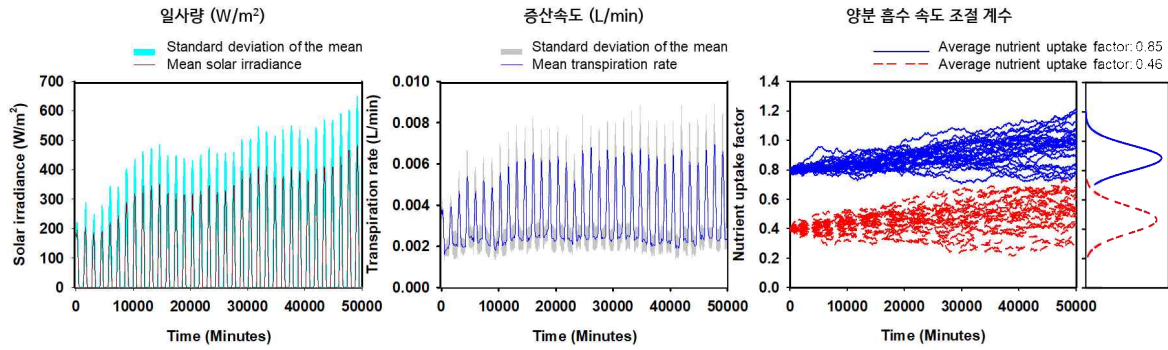


이 어떤 수준으로 영향을 미치는지, 또한 이러한 조건에서 획득된 양분흡수 관련 데이터가 시스템 상에서 지표로 활용 가능한 수준인지에 대한 체계적 분석은 시도되지 못하였다. 본 연구에서는 수경재배 시스템상에서 실시간으로 획득 가능한 관배수량 및 EC 데이터를 기반으로 양분 흡수량 관련 지표를 추출하고 이를 수경재배 시스템 관리에 활용 가능한지 평가하기 위해 우선적으로 시물레이션 분석을 수행하였다. 시물레이션은 환경 조건에 따라 동적으로 변화하는 자동관수 체계, 근권부 내 불균일한 양분분포 조건, 식물의 생육, 증산, 양분 흡수가 반영된 통합 모델로 구동되었다.

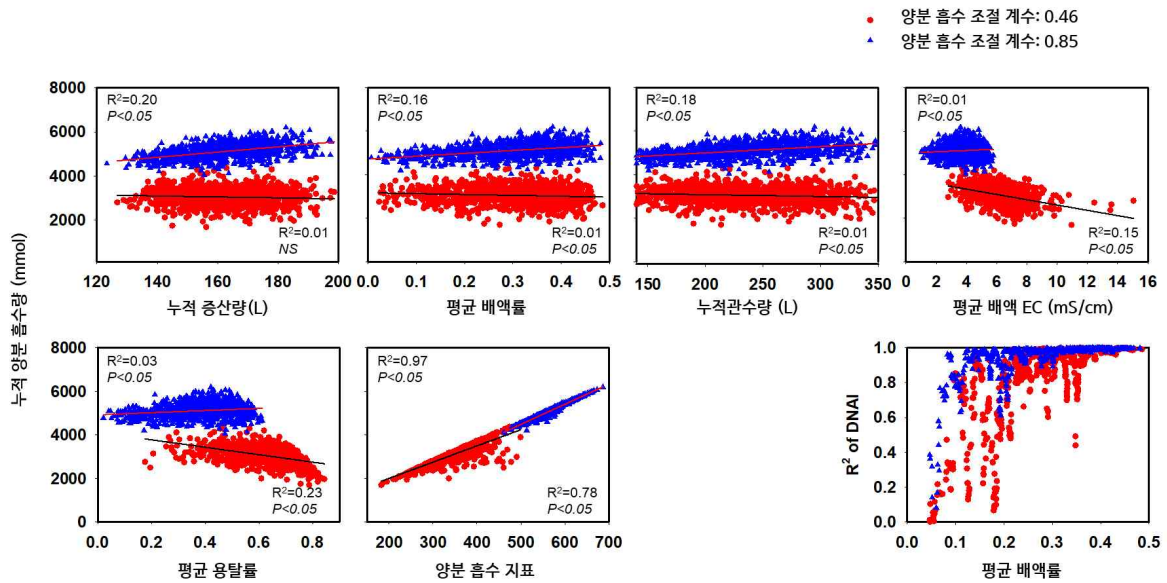


[그림 2.17] On-line 양분 흡수 지표 개발을 위한 시물레이션 분석의 개요 및 양분 흡수지표의 계산 과정

시물레이션 분석은 다양한 관수 조건에서의 양분 흡수 지표 활용성을 확인하기 위해 체계적인 접근법이 활용되었다. 체계적 환경변화 모델에는 태양의 연간 고도 변화 모델에 기반한 일사량 변화에 무작위 운량 변화(1(흐림) ~ 0(맑음)) 모델을 적용하였다. 이를 통해 다양한 일사비례 관수 환경과 그에 따른 배액량, 배액 EC 변화를 유도하였다. 이러한 조건에서 배지로 유입되는 양분의 EC와 관수량, 배지에서 배출되는 양분의 EC와 배액량의 차이를 적산하는 양분 흡수 지표관련 식을 수립하고 실제 배지 내 흡수량과 비교하였다. 또한, 이러한 데이터 기반의 양분흡수 지표의 오차에 배액률과 양분의 흡수속도가 미치는 영향을 분석하였다.



[그림 2.18] 시뮬레이션 상에서의 일사량, 증산속도, 양분 흡수속도의 추계적 변화

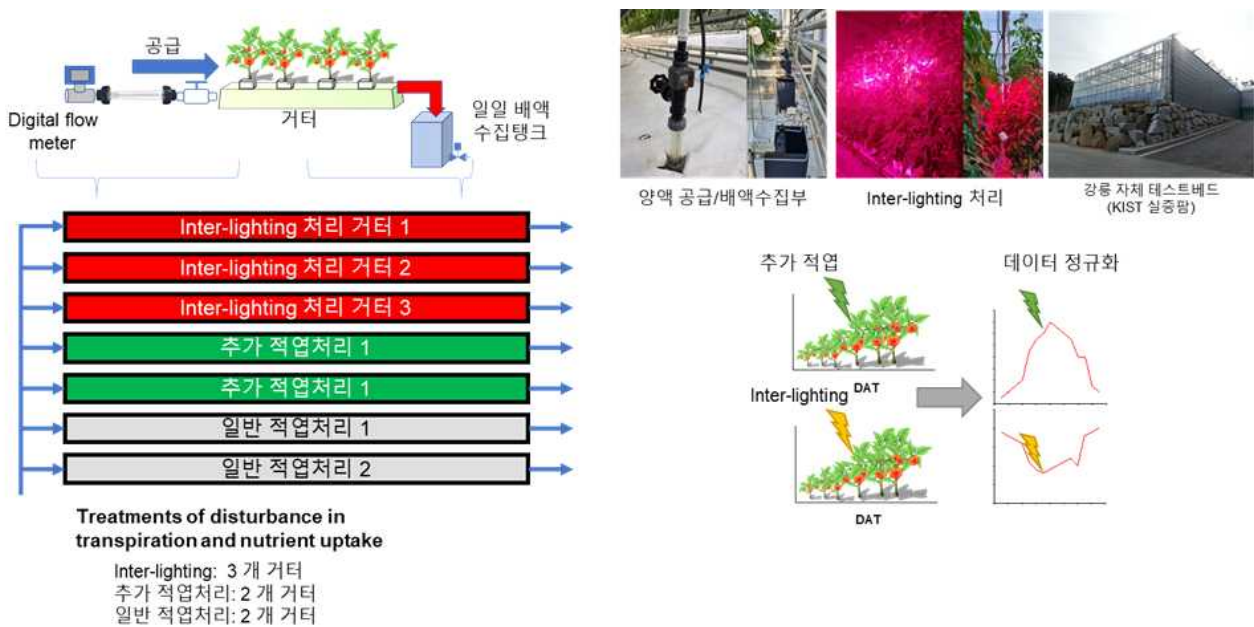


[그림 2.19] 누적 양분 흡수량과 수분 및 양분 관리 지표, 그리고 양분 흡수 지표와의 상관 관계 비교 및 배액률에 따른 양분 흡수 지표와 누적양분 흡수량과의 상관 변화

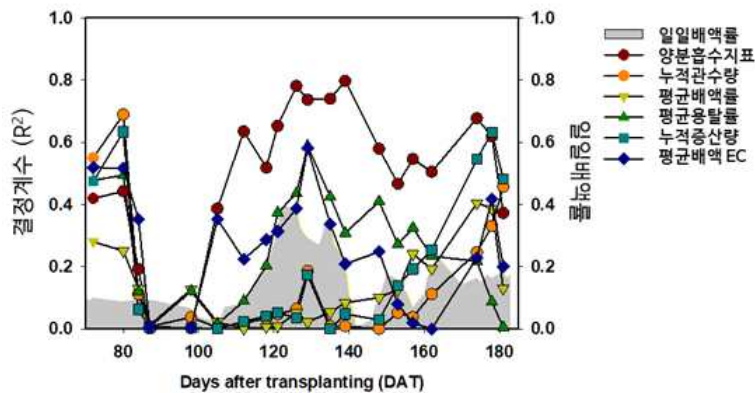
추계적인 시뮬레이션 조건에서 누적 양분 흡수량과 수분 및 양분 관리 주요 지표, 그리고 양분 흡수 지표와의 상관관계를 조사하였다. 누적 양분 흡수량과 수분 및 양분 관리 주요 지표와의 상관관계는 매우 낮게 나타났다. 반면 양분 흡수 지표의 경우 누적 양분 흡수량과 높은 정상관을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 실제 시스템의 수분 및 양분 관리 주요 지표 중에서 증산은 식물의 성장 관련 변수가 반영되어 있으며, 식물의 생장은 식물의 양분 흡수와도 상관관계에 있다. 따라서 실제 시스템에서의 수분 및 양분 관리 주요 지표는 시뮬레이션에서의 상관관계와는 다른 경향이 관찰될 수 있다. 그러나 본 시뮬레이션의 결과는 동적인 관수 조건 변화, 불균일한 양분 분포와 같은 오차 발생 조건에서도 관배액량, 배액 및 관수 EC 데이터를 기반으로 하는 양분 흡수 지표가 높은 확률로 배지 내 식물의 양분 흡수량 변화를 반영할 수 있음을 보여주었다. 또한 양분 흡수 지표와 실제 양분 흡수량과의 상관성은 배액률에 일정 제약을 받는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 매우 낮은 배액률 조건을 벗어나면 두 변수는 높은 정상관을 나타냈다.

#### 나. 실제 수경재배 시스템에서의 on-line 양분흡수지표와 식물 생육과의 상관성 조사

시뮬레이션 분석 결과를 바탕으로 관배액량, 급배액 EC의 계측 데이터 기반의 양분흡수 지표는 배지 내에서의 양분 흡수량의 변화 경향을 반영할 확률이 높은 것으로 확인되었다. 이를 실험적으로 확인하기 위해 시뮬레이션에서 사용된 주요 양수분 관리 지표(평균 배액 EC, 용탈률, 평균 배액률, 누적 증산량) 및 개발된 양분흡수 지표와 재배 작물의 생육 지표와의 상관관계를 비교할 수 있는 온실 재배실험을 수행하였다. 상기한 양수분 관리 지표들은 재배자 또는 연구자가 재배 작물의 생육 조건 관리에도 직간접적으로 연계하여 활용되는 변수들이다. 온실 실험에서는 재배 작물의 생육에 영향을 미칠 수 있는 inter-lighting과 적엽 처리구를 구성하고, 이 처리에 따른 수확량의 변화와 상기 양수분 관리 지표 그리고 개발된 양분흡수 지표와의 상관성을 조사하였다. Inter-lighting 처리의 경우 총 3회의 광 조사 시간 조정(1일몰 후 12시간→5시간→2시간)을 수행하여 이에 따른 수확량과 양분 흡수 지표의 반응을 조사하였다. 재배 작물은 토마토이며, KIST 강릉분원의 자체 테스트베드에서 수행되었다.



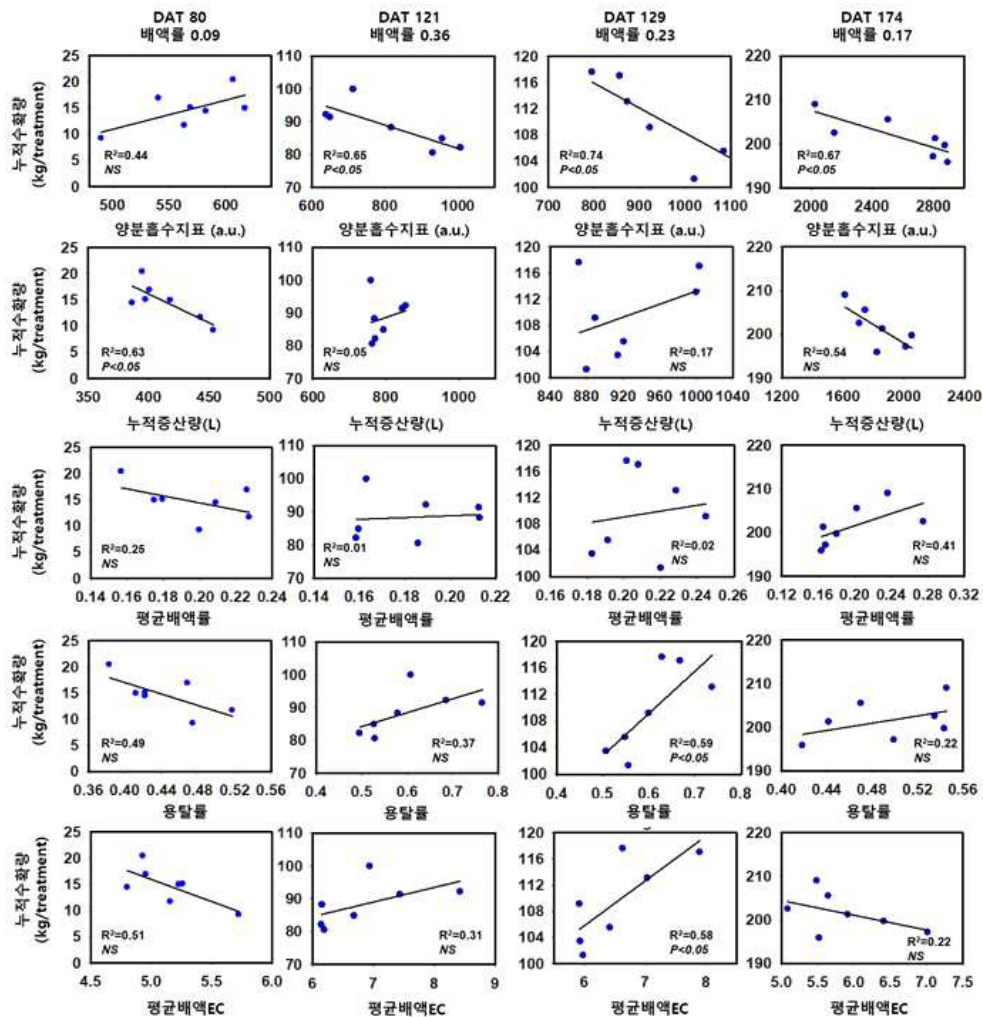
[그림 2.20] On-line 양분흡수지표와 재배 작물과 생육지표와의 상관성 파악을 위한 토마토 재배 실험 체계의 개요



[그림 2.21] 재배기간 동안의 양수분관리지표, 양분흡수지표와 토마토 수확량 간의 결정계수 변

## 화 및 일일배액을 변화

재배실험 결과 본 연구에서 개발된 양분흡수지표는 관행적인 양수분관리지표와 비교했을 때 토마토의 수확량과 높은 상관성을 유지하는 것이 확인되었다. 양수분관리지표 또한 식물의 재배수준을 평가하는데 관행적으로 사용되어온 지표다. 이 지표들과 작물생육과의 직간접적 연관성을 기반으로 재배자들과 연구자들은 작물의 양수분관리 및 연구를 수행해왔다. 그러나 본 연구에서는 역으로 식물의 양분흡수에 영향을 미칠 수 있는 처리를 식물에 적용하였을 때의 변화를 상기 지표들과 양분흡수지표의 반영 수준을 확인하였다. 양분흡수지표는 다른 관행적인 지표들에 비해 높은 상관성을 나타냈으나, 이러한 상관성은 배액률이 매우 낮은 구간에서는 함께 낮아지는 것이 관찰되었다. 이는 시뮬레이션에서의 이론적 분석과도 일치하는 결과이다. 따라서 급배액량, 급배액 EC와 같은 시스템의 on-line 상에서 자동 수집이 가능한 데이터를 기반으로 한 양분흡수지표는 순환식 수경재배 시스템 on-line 상에서의 높은 활용성을 보여주었다.



[그림 2.22] 재배기간 중의 양수분관리지표, 양분흡수지표와 토마토 수확량 사이의 상관관계 주요 데이터



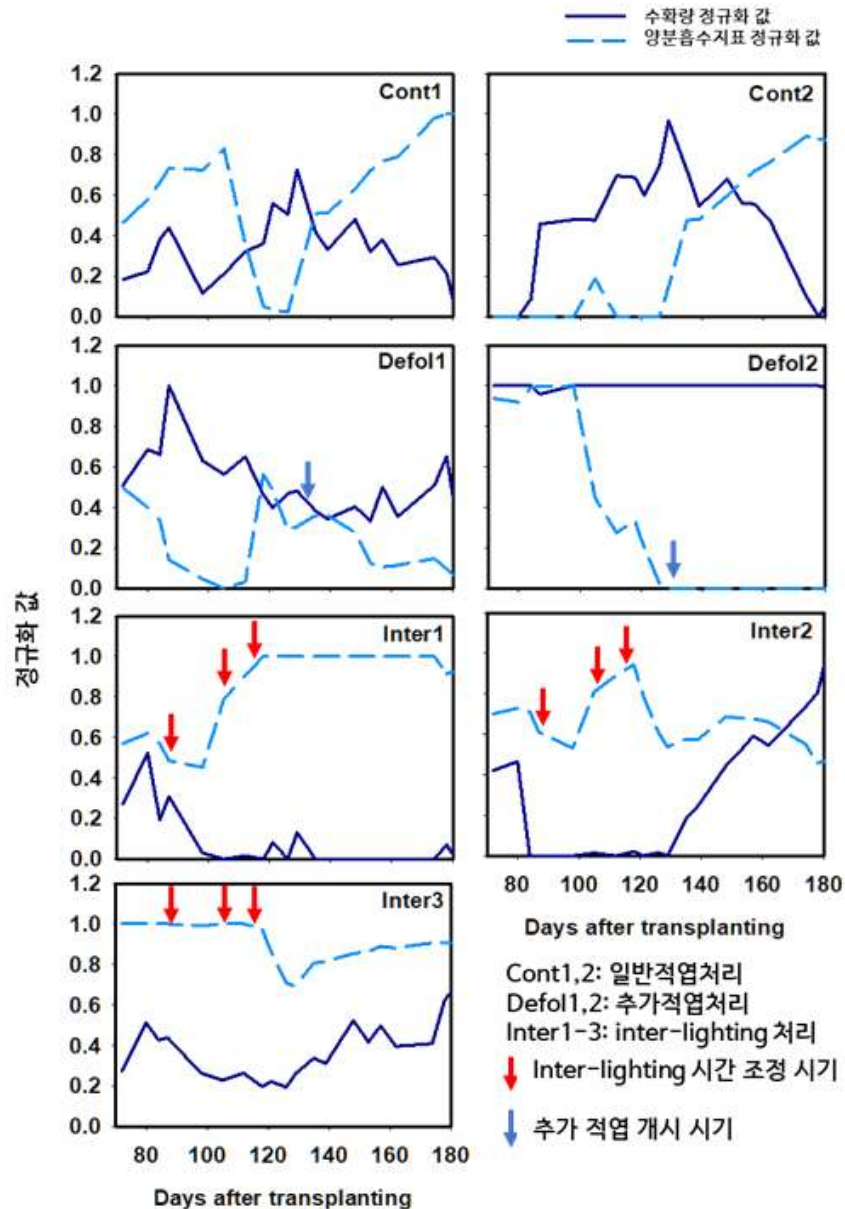
## 다. 양분흡수지표의 수경재배 시스템에서의 관수, 배액, 양액 혼합의 밸브 조절 파라미터로 활용하기 위한 정규화 분석

각 처리 간의 수확량 변화와 DNAI 지표를 상대적으로 비교하기 위해 측정값의 정규화를 수행하였으며, 정규화 변환에는 아래의 식을 이용하였다.

$$x_{nor} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} + x_{min}}$$

여기서  $x_{nor}$ 은 정규화된 값이며,  $x$ 는 정규화 할 DNAI 또는 각 처리별 수확량이다.  $x_{min}$ 은  $x$  중 가장 작은 양분흡수지표 또는 처리별 수확량이며,  $x_{max}$ 는 중 가장 큰 양분흡수지표 또는 처리별 수확량이다.

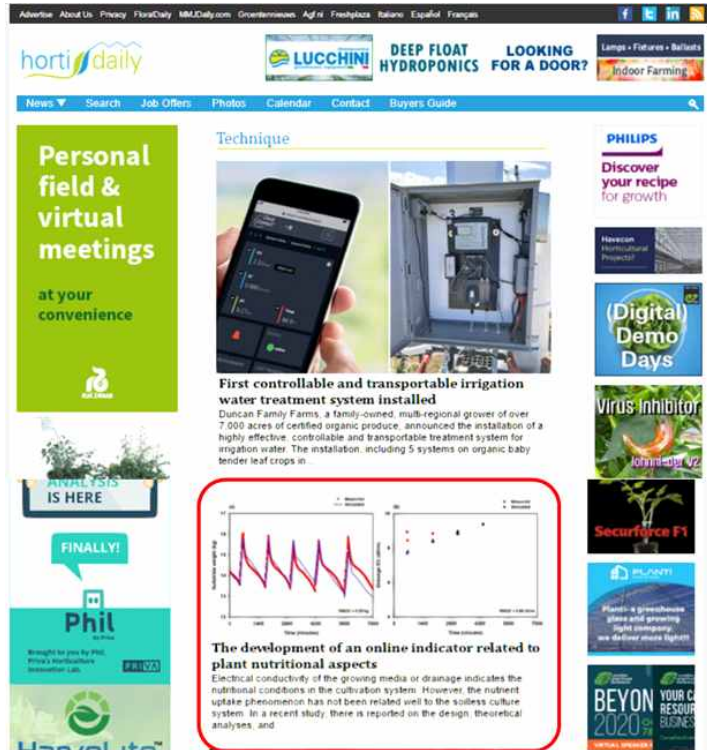
본 연구에서 증산과 양분 흡수의 외란 요인을 발생시키기 위해 적용했던 적엽과 inter-lighting 처리가 양분흡수지표와 수확량에 미치는 효과는 정규화 값을 통해서 정성적으로 확인할 수 있었다. Inter-lighting 처리의 경우 1차(12시간)와 2차(5시간) 처리가 식물의 겉보기 상 스트레스로 작용하는 것으로 판단됨에 따라 3차 처리에서 일몰 후 2시간으로 조정된 결과 Inter2,3 처리에서 양분흡수지표의 감소와 이후 수확량 정규화 값의 증가 반응이 관찰되었다. 그러나 Inter1 처리에서는 inter-lighting 조정 이후에도 DNAI의 감소 영향이 관찰되지 않았으며, 수확량의 정규화 값 또한 반응하지 않았다. 적엽 처리의 경우 Defol1에서 수확량의 상대적인 감소가 진행되다가 적엽 처리 이후 상승 경향과 함께 DNAI의 감소 경향이 확인되었다. 적엽 처리나 inter-lighting을 적용하지 않은 대조구에서는 초반 DAT 약 130일 이전의 수확을 통해서 다른 처리 대비 증가하는 수확량이 관찰되었다. 그러나 이후 DAT 약 130일 이후 부터는 다시 수확량이 감소하는 경향이 관찰되었다. 토마토의 적엽 처리의 적정 수준에 따라 수확량의 증대로 연결될 수 있으며, 적정 적엽 수준은 계절 변화에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서 Defol1에서의 적엽 이후 관찰되는 수확량의 증가 경향과 비슷한 시기 이후 감소하는 대조구의 수확량은 적정 적엽 수준의 변화와 관련되어 있을 수 있다.



[그림 2.23] 양분흡수지표 실험 기간의 양분흡수지표와 누적수확량 간의 정규화 값 변화

본 실험을 통해서 수집된 양분흡수지표 데이터는 관행의 양수분관리 지표들과 비교하였을 때 토마토의 수확량과 가장 높은 상관을 보였다. 이를 정규화하였을 때 양분흡수지표 정규화 값은 시계열 상의 수확량 정규화 값의 변화에 대해 민감한 반응을 보여주었다. 본 실험에서 정규화 값의 대상은 재배 라인 사이의 양분흡수지표, 수확량 간의 상대적인 차이를 0~1 사이의 값으로 변환하였다. 이러한 결과는 1세대 순환식 수경재배 시스템에서의 사용자의 경험에 기반하여 관리되던 배액 재이용률의 결정(배액 혼합 벨브의 개도 결정), 식물 양분흡수 수준의 추정 같은 복잡한 양수분관리도 양분흡수지표와 작물생육지표의 정규화 처리를 통해 체계화, 자동화와 같은 고도화 기반을 구축할 수 있음을 보여준다. 본 연구 결과는 종합하여 관련 SCI 저널에 게재되었으며, 또한 네덜란드 원예산업뉴스 포털인 hortidaily.com의 기술 섹션에 소개되었다.

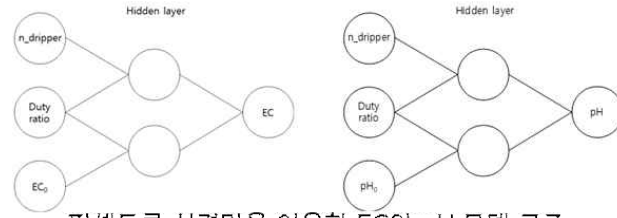




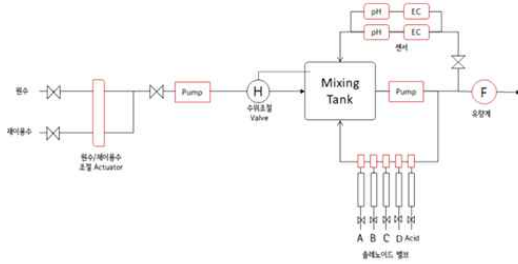
[그림 2.24] 양분흡수지표 개발 논문 네덜란드 원예산업뉴스 포털 Hortidaily.com의 2020년 9월 3일자 Technique 섹션 소개 자료

라. 재사용 양액 혼합 시 안정적인 pH·EC 제어를 위한 기계학습 기반 제어 기술 적용

기존의 PID 제어를 이용하여 혼합탱크 내 EC, pH를 제어하는 경우, 안정적인 제어를 위해서는 모터, 배관 체계, 점적단추의 종류, 수량 등과 같은 양액기의 주요 파라미터를 고려하여 PID 제어계수를 조정하는 과정이 필요하다. 비순환식 수경재배 시스템의 경우 관련 파라미터의 초기 설정 후 시스템을 규모 변경이 없는 이상은 파라미터의 변동이 크지 않기 때문에 시스템의 제어는 안정적으로 수행될 수 있다. 그러나 배액 혼합비가 동적으로 변화하는 고도화된 순환식 수경재배 시스템의 경우 원수와 배액의 혼합비율 변동이 발생하며, 혼합탱크로 공급되는 <배액+원수>의 혼합양액의 EC가 동적으로 변화하게 된다.



퍼셉트론 신경망을 이용한 EC와 pH 모델 구조



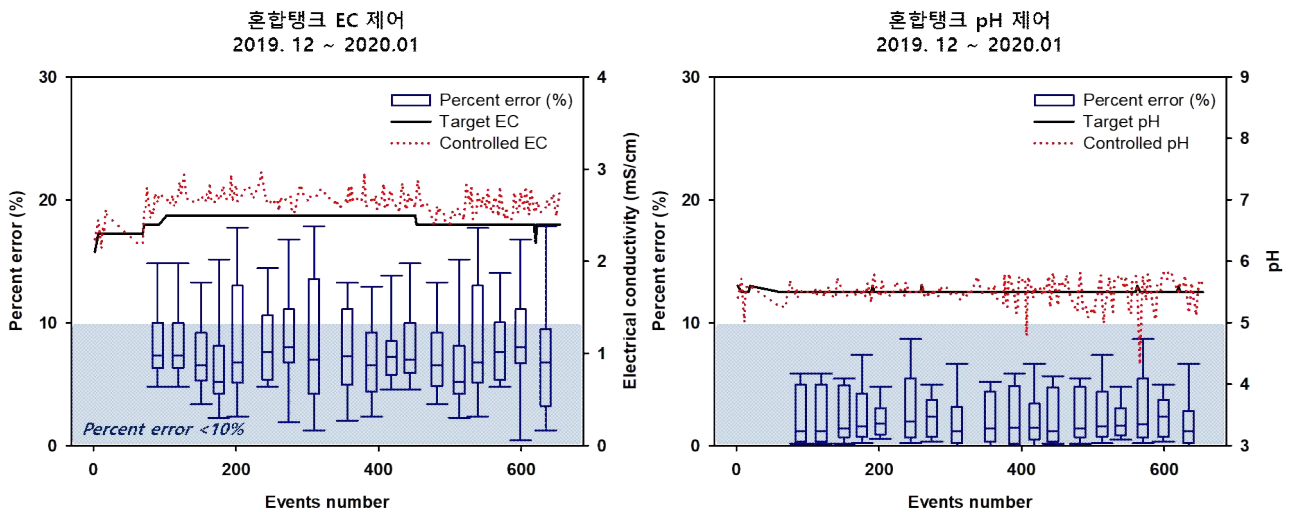
KIST 자체 테스트 베드 재사용 양액 혼합기의 모식도



KIST 자체 테스트 베드 재사용 양액 혼합기

[그림 2.25] pH, EC 제어 기계학습 알고리즘 탑재 KIST 자체 테스트 베드의 순환식 재사용 양액 혼합기

이렇게 시스템의 파라미터 변동이 큰 조건에서는 기계학습을 통한 제어가 유용하게 활용될 수 있을 것이다. KIST 자체 테스트 베드의 재사용 양액 혼합기에 탑재된 기계학습 기반 양액 혼합 제어 기계학습 알고리즘은 구동 환경에 맞게 제어 양상을 학습하고 모델을 업데이트한다.



[그림 2.26] pH, EC 제어 기계학습 알고리즘 탑재 KIST 자체 테스트 베드의 순환식 재사용 양액 혼합기의 장기간 제어 양상 및 퍼센트 에러



[그림 2.27] 재사용 양액 혼합 이벤트 발생 시 혼합탱크 내 EC 제어 양상 조사

양액 재사용 조건에서 혼합탱크 EC와 pH의 장기간 제어 결과를 정리하였다. 2019년 12월부터 2020년 1월 사이의 혼합탱크 제어 데이터를 정리하였을 때 EC와 pH의 센싱값과 제어 목표값과의 오차를 조사하였다. 제어 결과 대부분의 퍼센트 오차는 10% 이내에서 유지되었다. pH의 경우 퍼센트 오차는 EC에 비해서 상대적으로 낮은 수준에서 제어되었다. EC의 경우 pH에 비해 퍼센트 오차의 범위가 넓게 나타났으나, 대부분의 값은 10% 수준에서 유지되는 것을 확인하였다. 재사용 양액의 EC의 경우 혼합탱크 내로 유입되는 <배액+원수> 혼합액의 혼합비(배액 혼합밸브 개도)가 제어의 외란 요인으로 작용할 수 있으며, EC의 변동은 식물의 증산, 관수량에 따라 상대적으로 크게 나타나기 때문에 혼합탱크의 제어에 영향을 미칠 수 있다. 그러나 한 달가량의 제어 데이터 분석 결과 대부분의 제어 결과가 10% 이내의 오차 수준에서 유지됨을 확인하였다.

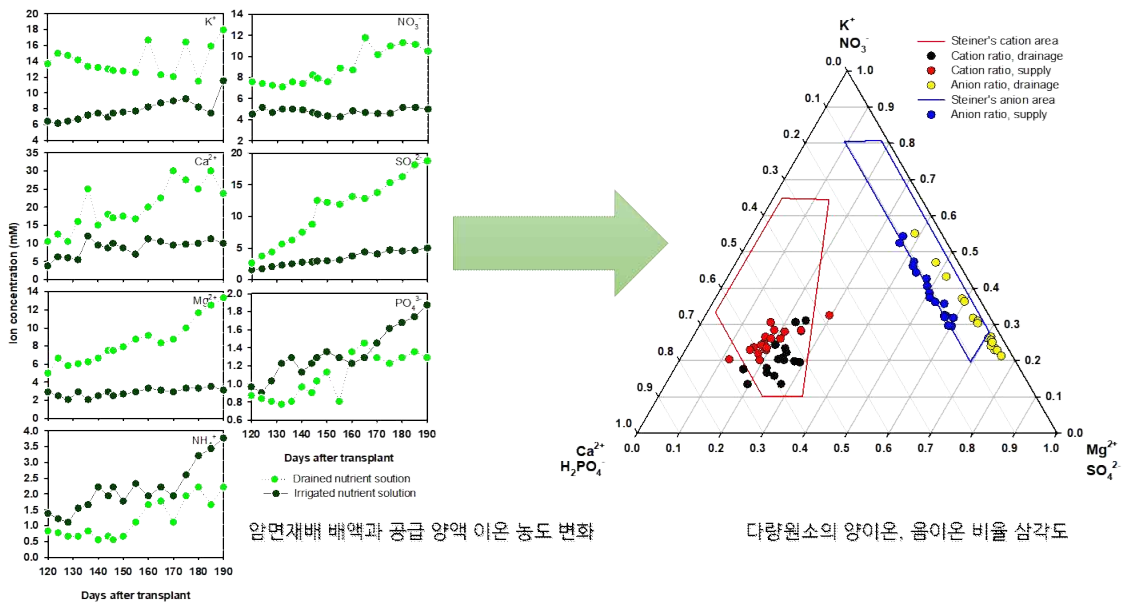
## 5. [고도화] 양액 재이용에 따른 이온불균형 해소를 위한 재사용 양액 균형 관리 알고리즘 및 프로그램 개발

### 가. 작물별 배액의 성분 분석 및 양액 특성 평가

순환식 수경재배 시스템에서의 양분 관리는 아직 기술적 체계화가 수행되고 있지 못하고 있다. 순환식 수경재배를 이미 제도화해서 수경재배 시스템으로부터의 양분 배출량을 점차적으로 감소시켜가고 있는 네덜란드는 “Hydrion-line” 프로젝트의 수행을 통해 양분 배출량을 완전 제로화를 시도한 바 있다. “Hydrion-line” 프로젝트의 궁극적인 목표는 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템에서 양분 농도를 직접 계측하고 제어할 수 있는 기술 체계를 수립하는 것에 있었으나, 개별 양분 계측의 기술적 한계로 인해 기술 확산까지는 달성하지 못하였다. 따라서 개별 양분을 관리하기 위한 기술과 기술의 확산 사이의 균형은 현재까지 trade-off 관계에 있다고 볼 수 있다.

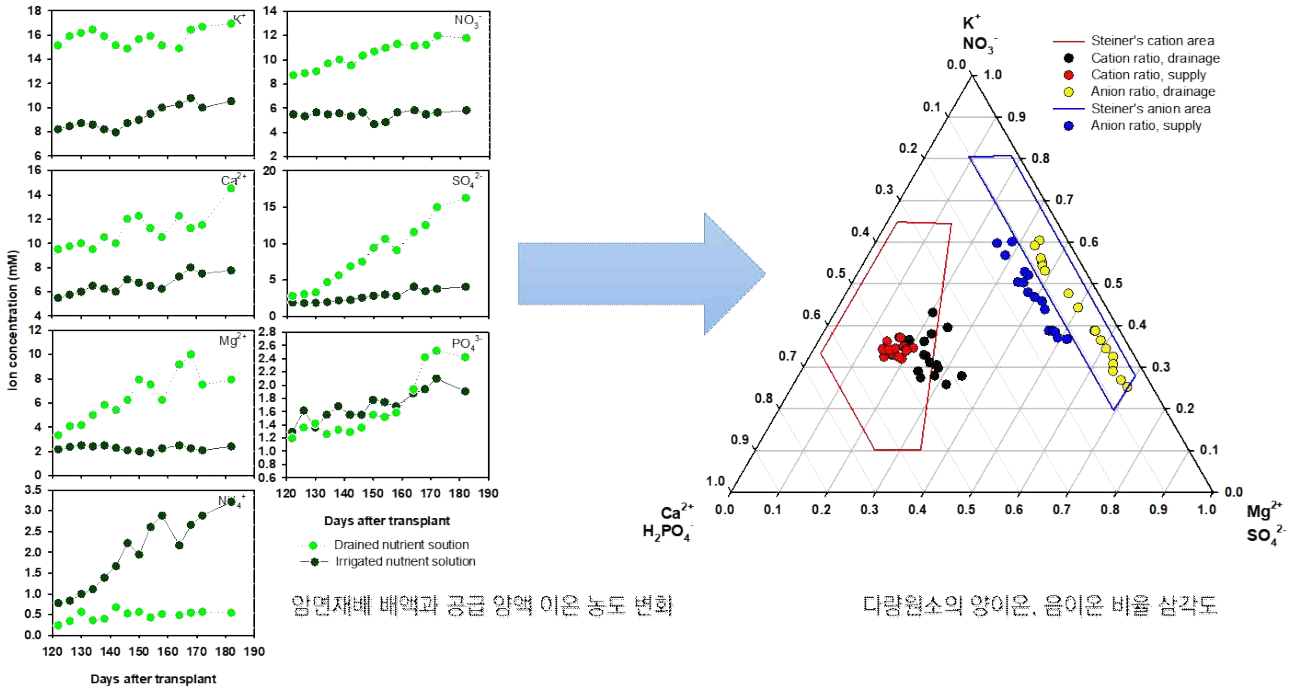
본 연구에서는 겉보기에 동적으로 변화하는 양분 농도의 변화는 식물의 양분흡수 선택성의

영향이 반영된 결과라는 식물영양학적 이론을 바탕으로 영양 관리를 위한 기술 체계를 수립하고자 하였다. 또한 식물 양분의 선택성은 식물화학량론적 접근법을 통해 해석될 수 있다. 최근 연구가 활발해지고 있는 식물화학량론적 접근법은 식물의 영양학적 특성을 척도 관계로 전환하여 일정 패턴을 도출하는 것을 목적으로 한다. 따라서 이러한 접근의 연구 결과들은 양분의 비율을 기반으로 하는 여러 계산 방식을 통해 여러 조건에서의 양분 변동을 일정 패턴으로 변환하여 해석한다. 본 연구과제에서는 이러한 접근을 순환식 수경재배 시스템의 양분 관리에도 적용 가능할 것으로 예측하고 양분 관리 기능의 고도화 연구를 설계하고 수행하였다. 식물 영양에 있어 일정 패턴이 발생한다는 것은 식물의 양분 분포에 있어 결정론적인 측면이 있음을 시사한다. 수경재배 시스템의 양분의 경우 양이온과 음이온이 전기적으로 짝을 이루어 공급된다. 따라서 총 양이온과 총 음이온 간의 1:1 당량비 변동 폭은 상대적으로 작으며, 이러한 조건에서 양이온, 음이온 내의 개별 양분들의 비율은 일정 패턴을 보여줄 수 있을 것이다. 본 연구에서는 각각 순환식 수경재배가 적용된 KIST 자체 테스트베드와 실증 농가의 공급 양액과 배액을 수집하여 농도 변화를 조사하고 이를 삼각도 기반의 양분 비율로 전환하여 변화 패턴을 분석하였다. 순환식 수경재배 시스템을 양분 농도의 변동이 척도 관계의 결정론적인 변화 패턴으로 전환 가능한 시스템으로의 정의가 가능할 경우, 기존의 실시간 개별 양분 계측에 대한 기술적 요구 수준은 주간 단위의 장주기 계측으로 완화할 수 있는 이론적 근거가 될 수 있다. 이는 이미 농가에서 일반적으로 행해지고 있는 주간 단위의 주기적인 양분 분석 관행을 활용하여 순환식 수경재배 시스템의 양분균형 제어기술로 전환할 수 있음을 의미한다. 또한, 순환식 수경재배 양분관리기술과 기술의 확산 사이에 존재하는 관행적 trade-off 관계를 해소할 수 있는 기술체계를 제시할 수 있음을 의미한다.



[그림 2.28] 순환식 수경재배 시스템의 공급 양액 농도 및 배액 농도 변화와 양이온·음이온 내 개별 이온 간 당량농도 비율(양이온 K<sup>+</sup>:Ca<sup>2+</sup>:Mg<sup>2+</sup>, 음이온 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>:SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) 변화(마산 파프리카 농가, 암면 배지, 정식 2019년 8월)





[그림 2.29] 순환식 수경재배 시스템의 공급 양액 농도 및 배액 농도 변화와 양이온·음이온 내 개별 이온 간 당량농도 비율(양이온  $K^+ : Ca^{2+} : Mg^{2+}$ , 음이온  $NO_3^- : H_2PO_4^- : SO_4^{2-}$ ) 변화(마산 실증농가, 파프리카, 코코피트 배지, 정식: 2019년 8월)

순환식 수경재배 시스템을 이용하는 파프리카 재배 농가로부터 주기적으로 공급 양액과 배액을 수집하였으며, 양분 분석을 수행하였다. 순환식 수경재배 양액 수집을 수행한 두 개 농가의 양액 샘플의 다량 원소 농도는 대부분 급액 양액의 농도보다 높게 나타났으며, 시간 경과에 따라 증가 경향이 관찰되었다. 그러나, 칼륨의 경우 공급 양액 내 농도는 증가하였음에도 배액에서는 계속해서 감소하는 경향이 관찰되었다. 암모늄태 질소의 경우는 다른 양분들과는 다르게 배액의 농도가 계속해서 낮게 나타났다. 칼륨은 공급 양액 내 농도에서는 증가하는 경향이 관찰되었으나, 이를 양분 삼각도에서 관찰했을 때는 점차 감소하는 경향이 관찰되었다. 또한 음이온의 경우 변동은 주로  $NO_3^-$ 와  $SO_4^{2-}$ 를 중심으로 발생하는 경향이 관찰되었다. 두 농가 모두 농도를 기준으로 배액의 양분 변화 패턴을 파악했을 때, 전체적인 증가의 경향에 가려져 개별 양분에 대한 패턴 파악이 어려웠다. 그러나, 이 변화를 양분 삼각도 기반 비율 변화로 전환되었을 때는 양분의 변화는 일정한 방향성을 나타내는 것을 확인할 수 있었으며, 변동의 범위도 상당수의 샘플이 Steiner의 “Universal nutrient solution” 에서 제시한 범위 안에 있는 것이 관찰되었다. 이 결과는 식물의 근권부 양분은 농도 변화 관점에서는 동적인 양상이 관찰되는 반면, 식물화학량론적 관점에서는 결정론적으로 변화하는 경향이 강함을 나타낸다. 본 연구는 이러한 양분 균형변화의 양상을 기반으로 양분 균형제어 알고리즘을 도출하였으며, 이를 차세대 순환식 수경재배 시스템의 양분 관리 기술 고도화 기반으로 제시하였다.

### 나. 재사용 양액 균형 관리 알고리즘 및 프로그램 개발

종래 수경재배 시스템에서의 관련 기술들의 경우 수경재배 시스템의 양분 농도를 분석하여 부족

분에 대한 보충량을 결정해주거나, 흡수량을 측정하여 공급량을 결정하거나, 경험적 양분 흡수 모델에 기반하여 양분 공급량을 결정하는 방식으로 본 문제를 해결하고자 하였다. 보충량 결정, 양분의 흡수량 측정과 같은 경우 단일 재배 수조로만 구성된 순수 수경재배 시스템에서는 큰 오차 없이 성립 가능한 방식이다. 그러나 과채류 수경재배의 상당 부분을 차지하는 고품배지경 이용 시스템에서는 오차가 매우 크며 기술의 목적을 달성하기 어렵다. 또한 경험적 양분 흡수 모델에 기반한 시스템의 경우 재배지 변경, 환경변화 등에 따라서 지속적으로 모델의 보정계수 탐색 작업이 요구되며, 여러 변수가 간섭하는 모델의 입력변수 범위를 벗어난 환경에 대한 외삽의 불확실성도 존재하게 된다.

또한 개별 양분의 분석 결과를 바탕으로 개별 양분의 교정치를 도출한다고 해도 각 양분은 서로 이온 화합물로 섞여 있어 실제 교정치를 달성하는데 있어서 제약이 따른다. 즉 한 양이온 양분을 증가 또는 감소시킨다고 할 때 이와 결합하여 있는 다른 음이온 양분의 증감도 동반하는 것이다. 이는 제어 시스템이나 알고리즘이 개별 양분을 교정하기 위한 결과를 출력했다고 하더라도, 개별 이온으로 분리된 용액을 사용하지 않는 이상은 실제 재배 시스템의 양분 교정에 효과를 적용하는데 제약이 있다는 것을 의미한다. 더불어, 이온 화합물 비료의 제약과 양분 목표 교정값 사이의 차이를 조정할 때 식물 생리적, 기술적으로 타당한 근거가 필요하다. 따라서 수경재배 시스템에서의 적합한 양분 관리의 기술은 재배 시스템의 양분 교정을 위한 적절한 양분 입력값과 그 효과를 시스템에 최대한 반영하기 위한 비료 조성의 도출이 필요하다.

재사용 양액 균형제어 알고리즘은 상기 내용에 착안하여 제안된 것으로, 주 단위 주기에서의 수경재배 시스템의 배액 또는 근권부 양분 분석을 통해 수경재배 시스템의 양분 균형을 제어하는데 그 목적이 있다. 또한 양액의 전기전도도 측정으로 양분의 전체 농도를 제어하는 종래의 수경재배 시스템을 기반으로 해서 비율을 제어하여 결과적으로는 전체 양분 농도의 총합에서 각 양분 간의 적절한 균형을 유지하여 각 개별 양분이 결핍이나, 과잉의 조건에 있지 않고 최적 양분 균형 조건으로 제어하는데 궁극적인 목적이 있다.

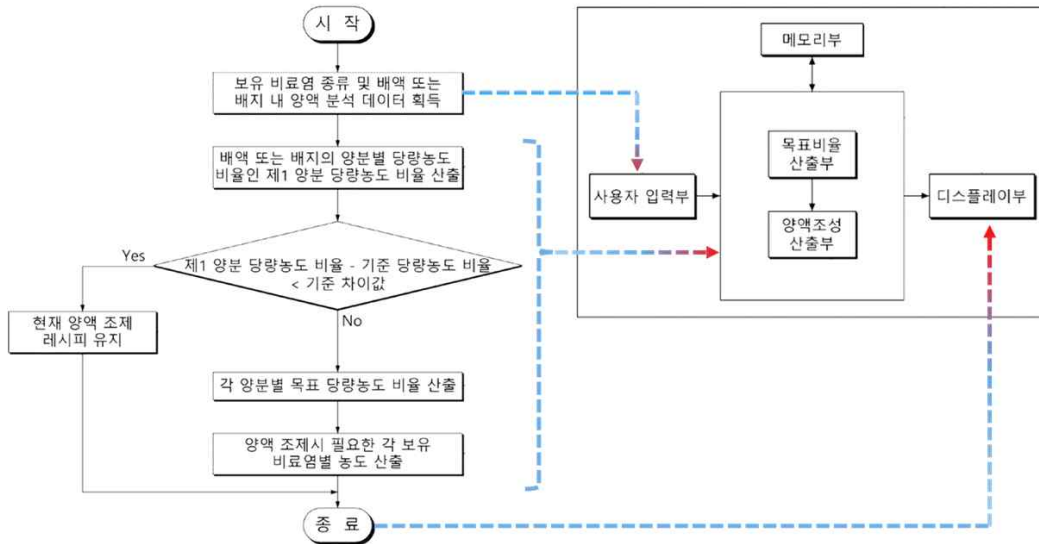
상기 목적을 달성하기 위해, 본 연구에서 개발한 순환식 수경재배 시스템에서의 양분 균형제어 알고리즘은 아래와 같은 구성을 가지며, 해당 내용을 정리하여 특허를 출원하였다.

- 식물 생육에 실제적으로 유의적인 양분 변동은 양분의 균형 변화임.
- 양분 간의 비율 변화의 경우 동적인 농도 변화에 비해 일정한 경향성이 관찰됨.
- 종래의 양분 농도 기반 제어에서 양분 비율 기반 제어로 변환.
- EC측정 기반 관행 시스템에서의 주 단위 long-term 피드백 조건에서 양분 비율 변화의 일정 구간으로의 평균적 수렴 목적으로 제어 수행.
- 본 알고리즘의 양분 제어 방식은 기존 방식과는 다르게 양분의 비율 제어를 기반으로 하고 있음.
- 전술한 바와 같이 종래의 양분 농도 기반 방식의 경우 양분의 보충을 목적으로 제어를 수행하지 않음.
- 본 알고리즘에서는 양분의 균형 변화가 안정화되는 농축 양액의 조성을 탐색하는 과정을 구현하고자 함.
- 따라서 목표 양분 비율 대비 현재 분석 양분 비율과의 차이를 현재 농축양액내 양분 비율

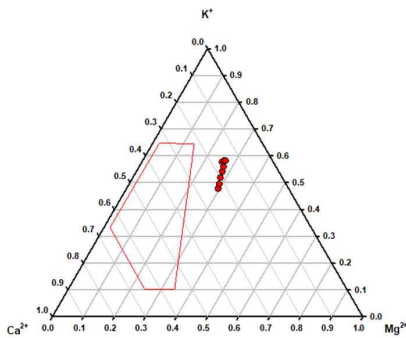


값에 적산하여 조정값을 도출하고 이를 기반으로 비료 조성값을 탐색함.

- 제시된 양분 비율에 기반한 비료 조성값의 탐색은 비선형계획법을 통해 최적해를 구하는 방식으로 수행함.



1. 양이온(K, Ca, Mg)



2. 음이온(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)



1. 농축 양액 조제 정보

항목	요구적량	조제처방
다량원소	mM	mM
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>		
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>		
K <sup>+</sup>		
Ca <sup>2+</sup>		
Mg <sup>2+</sup>		

2. 차기 농축 양액 정보

항목	A Tank, kg	B Tank, kg
KNO <sub>3</sub>		
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>		
MgSO <sub>4</sub>		
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>		

[그림 2.30] 양분 균형제어 알고리즘의 절차도 및 소프트웨어 화면 구성

상기의 알고리즘은 python을 기반으로 하여 프로그램화하였다. Python 기반의 back-end에서는 그림 2.28의 알고리즘을 기반으로 사용자에게 농도 단위의 재사용 양액 양분 분석 결과를 입력받아 현재 양분 균형 관리 상태를 삼각도 그래프 기반으로 시각화하여 출력한다. 이와 더불어, 사용자가 입력한 재사용 양액 양분 분석 결과를 바탕으로 시스템 내 양분 균형을 교정하기 위한 차기 농축 양액의 조제 정보를 출력한다. 프로그램은 사용자에게 수경재배 시스템의 영양 관리 현황과 양분 균형 제어를 위한 의사결정 정보를 제공하며, 현재 시스템의 양분 균형

변화의 안정성을 판단한다. 또한 python 기반의 back-end를 통해 사용자는 웹상의 front-end의 구축에 용이하며, 이는 추후 구축 가능한 <농가-웹 인터페이스-분석센터>의 네트워크 인프라 환경에서의 호환성 확보에도 유리할 것으로 기대된다.

```

211 #앞이온 비율 계산
212 def cat_meq_rto(x):
213     cat_fert_res_meq=[0,0,0]
214     cat_fert_meq_sum=0
215     for j in range(0,len(valency_cat)):
216         for i in range(0,len(fert)):
217             cat_fert_res_meq[j]+element_ratio_cat.iloc[i,j]*valency_cat[
218             cat_fert_meq_sum+=sum(cat_fert_res_meq)
219         for i in range(0,len(valency_cat)):
220             cat_fert_meq_rto_temp[i]=cat_fert_res_meq[i]/cat_fert_meq_sum
221         cat_fert_meq_rto=cat_fert_meq_rto_temp
222     cat_fert_meq_rto=cat_fert_meq_rto
223     cat_loc[cat_fert_meq_rto]
224     cat_fert_meq_rto=cat_fert_meq_rto
225     diff_temp_cat=[0,0,0]
226     for i in range(0,len(fert)):
227         diff_temp_cat[i]=cat_fert_meq_rto[i]-cat_fert_meq_rto[i]
228     return cat_fert_meq_rto
229
230 #출이온 비율 계산
231 def ani_meq_rto(x):
232     ani_fert_res_meq=[0,0,0,0,0,0]
233     ani_fert_meq_sum=0
234     for j in range(0,len(ani_valency_cat)):
235         for i in range(0,len(ani_fert)):
236             ani_fert_res_meq[j]+element_ratio_ani_cat.iloc[i,j]*ani_valency_cat[
237             ani_fert_meq_sum+=sum(ani_fert_res_meq)
238         for i in range(0,len(ani_valency_cat)):
239             ani_fert_meq_rto_temp[i]=ani_fert_res_meq[i]/ani_fert_meq_sum
240         ani_fert_meq_rto=ani_fert_meq_rto_temp
241     ani_loc[ani_fert_meq_rto]
242     ani_fert_meq_rto=ani_fert_meq_rto
243     diff_temp_ani=[0,0,0,0,0,0]
244     for i in range(0,len(ani_fert)):

```

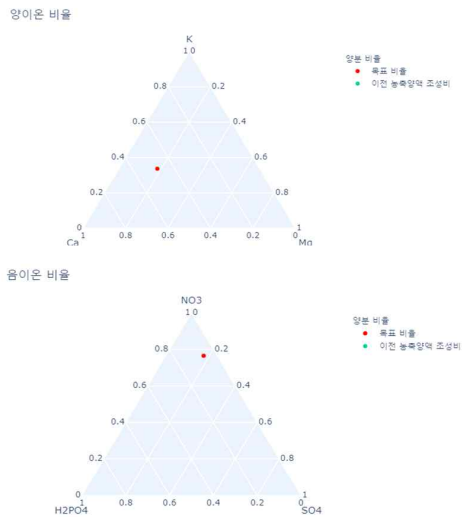
표준 양액 조성 입력 → 양분 분석 결과 입력

Python 기반 back-end 프로그램의 양분 균형 관리 데이터 입력

```

208 S04=ani_cor_tar[2]
209 ani_skt.loc[ani_skt['today']=='2021-02-03',S04]
210 ani_skt['today'].to_datetime(ani_skt['today']).format("%Y-%m-%d %H:%M:%S")
211
212 #앞이온 비율 계산
213 def cat_meq_rto(x):
214     cat_fert_res_meq=[0,0,0,0]
215     cat_fert_meq_sum=0
216     for j in range(0,len(valency_cat)):
217         for i in range(0,len(fert)):
218             cat_fert_res_meq[j]+element_ratio_cat.iloc[i,j]*valency_cat[
219             cat_fert_meq_sum+=sum(cat_fert_res_meq)
220         for i in range(0,len(valency_cat)):
221             cat_fert_meq_rto_temp[i]=cat_fert_res_meq[i]/cat_fert_meq_sum
222         cat_fert_meq_rto=cat_fert_meq_rto_temp
223     cat_loc[cat_fert_meq_rto]
224     cat_fert_meq_rto=cat_fert_meq_rto
225     diff_temp_cat=[0,0,0,0]
226     for i in range(0,len(fert)):
227         diff_temp_cat[i]=cat_fert_meq_rto[i]-cat_fert_meq_rto[i]
228     return cat_fert_meq_rto
229
230 #출이온 비율 계산
231 def ani_meq_rto(x):
232     ani_fert_res_meq=[0,0,0,0,0,0]
233     ani_fert_meq_sum=0
234     for j in range(0,len(ani_valency_cat)):
235         for i in range(0,len(ani_fert)):
236             ani_fert_res_meq[j]+element_ratio_ani_cat.iloc[i,j]*ani_valency_cat[
237             ani_fert_meq_sum+=sum(ani_fert_res_meq)
238         for i in range(0,len(ani_valency_cat)):
239             ani_fert_meq_rto_temp[i]=ani_fert_res_meq[i]/ani_fert_meq_sum
240         ani_fert_meq_rto=ani_fert_meq_rto_temp
241     ani_loc[ani_fert_meq_rto]
242     ani_fert_meq_rto=ani_fert_meq_rto
243     diff_temp_ani=[0,0,0,0,0,0]
244     for i in range(0,len(ani_fert)):
245         diff_temp_ani[i]=ani_fert_meq_rto[i]-ani_fert_meq_rto[i]
246     return ani_fert_meq_rto
247
248 #분석 결과 입력 시 단위 선택 함수
249
250 def modeunit():
251     modeunit=["표준 양액 조성 입력","양분 분석 결과 입력","차기 농액 조성 출력"]
252     present=0
253     total=0

```



양분 균형 제어 차기 표준 양액 조성 출력 → 양분 균형 관리 삼각도 출력

Python 기반 back-end 프로그램의 양분 균형 관리 데이터 출력

6. [고도화] 온실환경제어 시스템 고도화

가. 온실환경제어 시스템과 양액공급시스템의 통합운영방안의 도출 및 적용

온실의 환경제어를 위하여 환경조건만을 설정하여 제어기를 제어하는 것이 아니라 사용자가 원하는 양액공급시스템을 통합적으로 제어할수 있는 온실환경제어 시스템이 필요하지만 기존의 환경제어의 경우 독자적으로 환경제어시스템만 구동하여 온실의 환경조건만 제어하는 것이 대부분이다. 이러한 문제 때문에 환경관리를 위한 센서 값들과 물관리를 위한 센서값들의 오차로 인해 작

물의 최적의 성장조건을 적용하지 못하는 상황이다.

온실내외부의 온도, 습도 등 다양한 환경변수 및 양액시스템의 데이터를 사용자통합 운영을 하게 되면 수시모니터링이 가능하고 제어를 제어함으로써 온실내의 작물에 대한 최적의 성장환경을 유지시킬수 있는 통합시스템 개발이 가능하다.

본 연구에서는 이를 해결하기 위해 온실환경제어 시스템과 양액공급시스템간의 프로토콜을 정의 하여 온실 내외부와 외부기상대로부터 입력되는 모니터링 데이터와 제어기들의 상태를 통합적으로 관기가 가능하고 양액시스템으로부터 입력되는 모니터링 데이터와 시스템의 상태를 사용자가 한번에 확인이 가능하다

- 온실환경제어 데이터 : 외부온도, 강우, 광량, 풍향, 풍속, 내부온도, 습도, 엽면온도, 배지 온도, CO2, 배액량, 배액EC, 배액pH, 배지EC, 배지 수분, 천창, 측창, 커튼1, 커튼 2, 커튼3, 측커튼, 유동팬, 배기 팬, CO2설정, 훈증기, 냉/난방기, 난방관설정, 순환 펌프/보조난방, Way밸브설정, 스프링클러, 분무설정, 보광등등
- 양액시스템 데이터 : EC센서1, EC센서2, EC센서평균, 배액EC, PH센서1, PH센서2, PH센서평균, 배액PH, 현재광량, 총급액량, 총배액량, 1구역급액량, 1구역~10구역 급액량, 1구역~10구역 관수횟수, 1구역~10구역 EC평균, 1구역~10구역 PH평균, 이전관수시간, 급수펌프 동작현황, 관수펌프 동작현황, 1구역~10구역 관수현황, 적산광량1, 적산광량2



<독립적인 온실환경제어 시스템/양액공급시스템 개별 사용자환경>

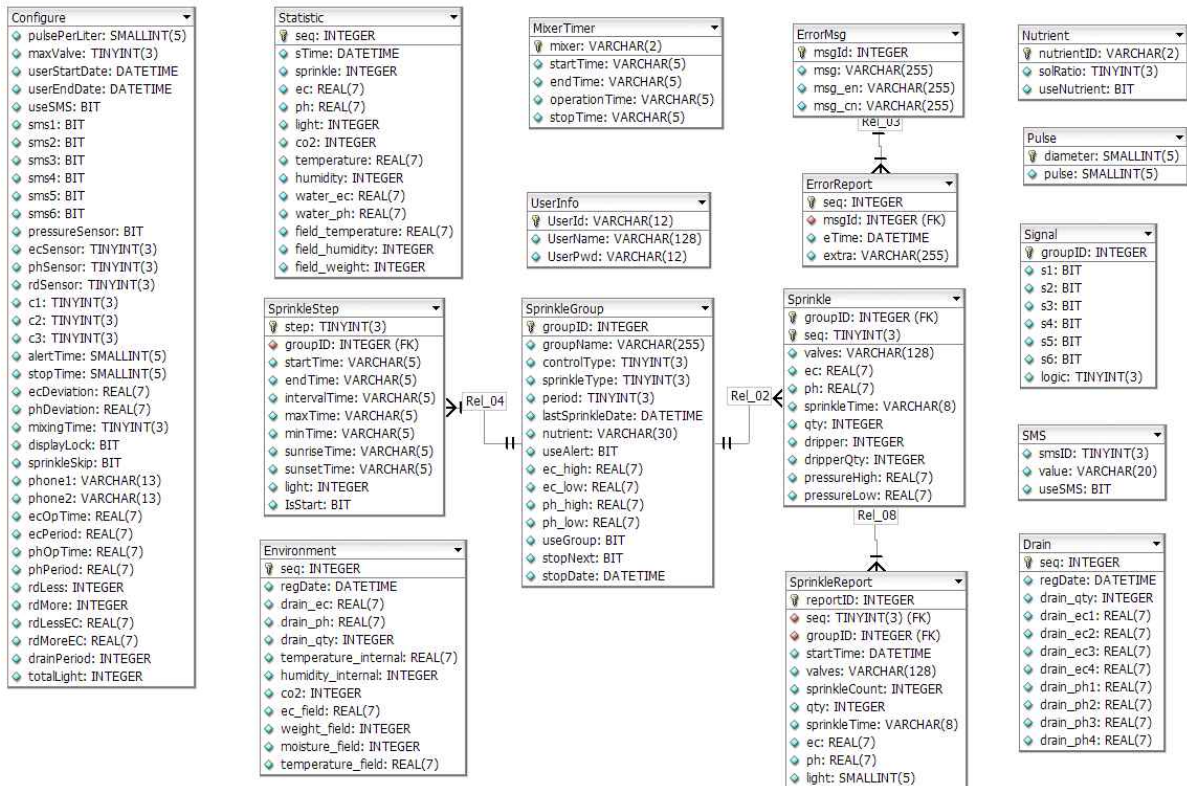
### 나. 독립적으로 운영되고 있는 온실환경제어 시스템과 양액공급시스템의 통합운영을 위한 사용자 환경개발

독립적으로 운영되고 있는 온실환경제어 시스템과 양액공급 시스템의 통합운영을 위하여 상호간 통신프로토콜을 정의하고 설계하여 온실환경제어 시스템과 양액공급시스템의 통합운영이 가능하도록 할 수 있다. 표준화된 프로토콜을 사용한다면 제어기 회사가 상이하더라도 호환이 가능하여 온실환경제어 시스템간 연결이 가능할것으로 예상된다.



### <스마트팜 기자재 통합운영>

온실환경제어 시스템과 양액공급시스템의 통합운영을 위해 데이터베이스 설계를 진행함.



### <데이터베이스 테이블 구조>



테 이 블 구 성 표					
테이블명	Configure	테이블 설명	시스템의 운영환경을 설정		
No	Column	Key	Type	NULL	Description
1	pulsePerLiter		smallint	No	리터당 펄스
2	maxValve		tinyInt	No	최대 사용 가능한 밸브수
3	userStartDate		datetime		사용자 시작일자
4	userEndDate		datetime		사용자 종료일자
5	useSMS		bit		SMS 사용여부
6	sms1		bit		관수시작
7	sms2		bit		관수종료
8	Sms3		bit		매회관수
9	Sms4		bit		에러알림
10	Sms5		bit		EC값
11	Sms6		bit		pH값
12	pressureSensor		tinyInt		압력센서
13	ecSensor		tinyInt		EC센서
14	phSensor		tinyInt		pH센서
15	rdSensor		tinyInt		광량(RD)센서
16	C1		tinyint		양액 C1(1산성, 2알칼리)
17	C2		tinyint		양액 C2(1산성, 2알칼리)
18	C3		tinyint		양액 C3(1산성, 2알칼리)
19	alertTime		Smallint		양액경보설정 경보음발생시간
20	stopTime		Smallint		양액경보설정 시스템정지시간
21	ecDeviation		real		양액경보설정 EC편차
22	phDeviation		real		양액경보설정 pH편차
23	mixingTime		tinyint		최초구역 믹싱타임
24	displayLock		bit		설정잠금
25	sprinkleSkip		bit		사용하는 곳 없음(사용안함)

온실환경제어 시스템과 양액공급시스템의 통합운영을 위해 데이터베이스 설계를 진행함.

온실환경제어 시스템에서 다양한 센서들을 통해 온실내부의 환경정보를 취득한다, 측정된 환경정보는 해당온실의 작물을 생육하기 위한 환경조건을 조절하거나, 최적의 생육 알고리즘을 도출하기 위한 기반 정보로도 사용될 수 있다. 이를 위하여 각 온실의 센서 노드 및 구동기 노드, 온실 통합 제어기 간 표준화된 방식의 프로토콜이 사용되어야 서로 다른 장치 간 상호 연동이 보장되기 때문에 센서노드와 구동기노드와 온실통합제어기 사이에 통신인터페이스의 표준을 준용하여 온실환경제어 시스템과 양액시스템을 통합운용할수 있도록 하였다.



〈스마트팜 솔루션 통합적용프로그램〉





#### 다. 온도, 습도, 광량 등의 온실 환경데이터 공유 및 제어적용

기존의 국산 환경제어 시스템은 제어기를 구동하기 위하여 시스템에서 제공하는 고정된 조건만을 사용해야한다. 하지만 현장의 농가 혹은 컨설턴트의 성향에 따라서 같은 제어기의 제어조건이 다양하여 이러한 요구사항을 효율적으로 만족시키지 못하는 면이 있기 때문에 사용자에게 원하는 제어조건을 구성하여 제어기를 구동할 수 있도록 하는 것이 목적이며, 이를 위하여 제어기의 동적인 제어조건 설정이 가능한 온실환경제어 시스템을 개발하였다

온실 내외부의 온도, 습도 등 다양한 환경변수에 따라 온실내의 작물에 대한 최적의 성장환경을 유지 시킬 수 있도록 동적인 제어조건 설정이 가능한 온실 환경제어 시스템을 개발하였다. 동적인 사용자 인터페이스 설계와 사용자의 직관적이고 친화적인 프로그램을 개발하여 사용자 인터페이스에 의해 설정된 환경설정 값을 제어기에 설정하고 온실의 센서 에 의해 측정된 상태 값을 모니터링 하여 데이터베이스에 저장하는 Agent 개발 하였다.

온실의 환경제어 상태, 출력현황, 모니터링 값 등을 숫자 및 이미지를 통해 직관적으로 표현할 수 있으며, 그래프를 통해 일정시간동안의 누적기록을 확인 가능.

- 조회조건을 입력하여 일정기간의 설정 값 및 모니터링 값에 대한 데이터를 조회하여 확인 가능.
- 사용자 선택에 따라 환경설정에 대한 상세 화면을 구성하여 동적인 제어조건 설정이 가능
- 각 제어조건 설정을 위하여 메인컨트롤러와의 통신 프로토콜을 설계 및 기능구현.

- 환기온도설정, 난방온도설정의 경우 사용자 설정에 따라 그래프 정보를 제공함.
- 일부 항목들의 경우 시간설정을 6단계 까지 설정할 수 있도록 함.
- 양액시스템과 연동하여 작물에 공급되는 양액 수치를 자동으로 조절할 수 있도록 사용자가 양액설정을 할 수 있으며, 실시간 모니터링이 가능함.(초기설정,
- 1그룹관수설정, 2그룹관수설정, 비상관수, 양액경보설정, 관수보고, 출력실험, 관리자설정)
- 온실 내외부와 외부기상대로부터 입력되는 모니터링 데이터와 제어기들의 상태를 사용자가 쉽게 확인 가능함.(외부온도, 감우, 광량, 풍향, 풍속, 내부온도, 습도, 엽면온도, 배지온도, CO2, 배액량, 배액EC, 배액pH, 배지EC, 배지수분,천창, 측창, 커튼1, 커튼2, 커튼3, 측커튼, 유동팬, 배기팬, CO2설정, 훈증기,냉/난방기, 난방관설정, 순환펌프/보조난방, Way밸브설정, 스프링클러, 분무설정, 보광등)



< 온실환경제어 소프트웨어 구조도 >

제어기의 설정 및 모니터링, 데이터저장을 위한 Agent 소프트웨어 구성

- 온실 환경제어 Agent S/W : 온실 환경제어 시스템 소프트웨어와 환경 및 양액
- 컨트롤러 제어를 위해 RS-485, TCP-IP통신 기반의 소프트웨어로서 다음과 같은 모듈로 구성 됨
- 온실 환경제어 시스템 소프트웨어와 컨트롤러로부터 수신된 데이터를 관리(저장/백업/복원 /초기화)함

동적제어 설정이 가능한 온실환경제어 시스템의 개발을 통하여 사용자에게 제어 변수를 설정하는데 있어 유연성을 제공하고 이를 제어에 반영하여 기존 시스템의 제어성능에 비하여 향상된 제어성능의 온실환경제어 시스템을 개발 하였다.



- 영향변수 동적 설사용자에게 일부 항목에 대하여 영향변수를 사용하는데 있어 필요한 부분을 임의로 추가하여 제어에 반영할 수 있도록 함

- 커튼제어방법 단계별 설정지원 커튼을 사용함에 있어 3가지의 제어방법(기본제어, 광량제어, 온/습도 제어)을 선택함에 있어 선택된 제어방법이 모든 구간(최대 6개 시간구간) 적용되는 기존시스템에 비하여 각 구간별로 제어방법을 따로 설정할 수 있도록 하여 사용자의 편의성과 제어의 성능을 향상 시켰다.

동적으로 영향변수를 사용함으로써 고정된 영향변수를 통해서 제어하는 기존의 시스템에 비하여 제어성능이 향상되었음을 확인할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 당 사내에 구축한 테스트베드 온실에 시스템을 적용하고 기존의 시스템과 개발결과물을 동시에 테스트하여 같은 기간 동안의 제어성능을 비교하였다. 제어성능을 주요한 제어 포인트인 온실내부 온도를 기준으로 하여 설정온도와 실제온도의 차이를 평균하여 비교하였다.

**커튼1**

통신 1 구역  일출 07:01 기본값읽기 기본값저장  
 사용  일몰 18:19 읽기 저장

	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	6단계
시작시간	02:11	10:46			16:49	17:29
작동조건	일출후	일출후	사용안함	사용안함	일몰전	일몰전
시작상대시간(사:분)	2 10	3 45	3 20	0 45	1 30	0 50
최대위치(%)	100	100	100	100	100	0
설정선택	온/습도제어	기본제어	광량제어	기본제어	온/습도제어	온/습도제어
	15.0 70	12.0	100	25.1	15.0 50	17.0 50
	17.5 100	130	200	201	18.0 100	21.0 100
	0 0	1.0	70	15.0	0 0	0 0
	0 0	1	300	100	0 0	0 0
	0.0	2	500	5	0.0	0.0
		60	30	50		
			700			
			0			

[ 기본제어 열림/닫힘 조건 ]

열림 OR

닫힘 AND

커튼검침위치(%) 0

[ 외부온도에 따른 열림 대기시간 설정 ]

외부온도설정(도) 10.0 ~ 25.0

대기시간설정(분) 1 ~ 2

[ 커튼 열림/닫힘 시간설정 ]

커튼열림(초) 1065

커튼닫힘(초) 1065

복합환경제어 통신 표준 관련 구동기 및 센서노드 디폴트 레지스터 맵은 KS X 3267표준을 준용하였다

- 구동기 노드 디폴트맵

주소(DEC)	의 미	길이(바이트)	Value
1	기관코드	2	0
2	회사코드	2	0
3	제품타입	2	2(구동기노드)
4	제품코드	2	0
5	프로토콜버전	2	10
6	연결장비수	2	24

(32채널의 경우 스위치 16개, 개폐기 8개 가능)

주소(DEC)	분 류	장비코드	비 고
101	장치구분(장치코드)	101	스위치 #1
102	장치구분(장치코드)	101	스위치 #2
103	장치구분(장치코드)	101	스위치 #3
104	장치구분(장치코드)	101	스위치 #4
105	장치구분(장치코드)	101	스위치 #5

106	장치구분(장치코드)	101	스위치 #6
107	장치구분(장치코드)	101	스위치 #7
108	장치구분(장치코드)	101	스위치 #8
109	장치구분(장치코드)	101	스위치 #9
110	장치구분(장치코드)	101	스위치 #10
111	장치구분(장치코드)	101	스위치 #11
112	장치구분(장치코드)	101	스위치 #12
113	장치구분(장치코드)	101	스위치 #13
114	장치구분(장치코드)	101	스위치 #14
115	장치구분(장치코드)	101	스위치 #15
116	장치구분(장치코드)	101	스위치 #16
117	장치구분(장치코드)	111	개폐기 #1
118	장치구분(장치코드)	111	개폐기 #2
119	장치구분(장치코드)	111	개폐기 #3
120	장치구분(장치코드)	111	개폐기 #4
121	장치구분(장치코드)	111	개폐기 #5
122	장치구분(장치코드)	111	개폐기 #6
123	장치구분(장치코드)	111	개폐기 #7
124	장치구분(장치코드)	111	개폐기 #8

주소(DEC)	값	길이(바이트)
201	OPID #0	2
202	노드상태	2
203	OPID #1	2
204	스위치1 상태	2
205	스위치1 남은동작시간	4
206		
207	OPID #2	2
208	스위치2 상태	2
209	스위치2 남은동작시간	4
210		
211	OPID #3	2
212	스위치3 상태	2
213	스위치3 남은동작시간	4
214		
215	OPID #4	2
216	스위치4 상태	2

주소(DEC)	값	길이(바이트)
251	OPID #13	2
252	스위치13 상 태	2
253	스위치13	4
254	남은동작시간	
255	OPID #14	2
256	스위치14 상 태	2
257	스위치14	4
258	남은동작시간	
259	OPID #15	2
260	스위치15 상 태	2
261	스위치15	4
262	남은동작시간	
263	OPID #16	2
264	스위치16 상 태	2
265	스위치16	4
266		

217	스위치4	
218	남은동작시간	4
219	OPID #5	2
220	스위치5 상태	2
221	스위치5	
222	남은동작시간	4
223	OPID #6	2
224	스위치6 상태	2
225	스위치6	
226	남은동작시간	4
227	OPID #7	2
228	스위치7 상태	2
229	스위치7	
230	남은동작시간	4
231	OPID #8	2
232	스위치8 상태	2
233	스위치8	
234	남은동작시간	4
235	OPID #9	2
236	스위치9 상태	2
237	스위치9	
238	남은동작시간	4
239	OPID #10	2
240	스위치10 상태	2
241	스위치10	
242	남은동작시간	4
243	OPID #11	2
244	스위치11 상태	2
245	스위치12	
246	남은동작시간	4
247	OPID #12	2
248	스위치12 상태	2
249	스위치12	
250	남은동작시간	4
주소(DEC)	값	길이(바이트)
501	OPID #0	2
502	노드상태	2

	남은동작시간	
267	OPID #17	2
268	개폐기1 상태	2
269	개폐기1	
270	남은 동작시간	4
271	OPID #18	2
272	개폐기2 상태	2
273	개폐기2	
274	남은 동작시간	4
275	OPID #19	2
276	개폐기3 상태	2
277	개폐기3	
278	남은 동작시간	4
279	OPID #20	2
280	개폐기4 상태	2
281	개폐기4	
282	남은 동작시간	4
283	OPID #21	2
284	개폐기5 상태	2
285	개폐기5	
286	남은 동작시간	4
287	OPID #21	2
288	개폐기6 상태	2
289	개폐기6	
290	남은 동작시간	4
291	OPID #22	2
292	개폐기7 상태	2
293	개폐기7	
294	남은 동작시간	4
295	OPID #23	2
296	개폐기8 상태	2
297	개폐기8	
298	남은 동작시간	4
주소(DEC)	값	길이(바이트)
551	스위치13 명령	2
552	OPID #13	2



503	스위치1 명령	2
504	OPID #1	2
505	스위치1 동작시간	4
506		
507	스위치2 명령	2
508	OPID #2	2
509	스위치2 동작시간	4
510		
511	스위치3 명령	2
512	OPID #3	2
513	스위치3 동작시간	4
514		
515	스위치4 명령	2
516	OPID #4	2
517	스위치4 동작시간	4
518		
519	스위치5 명령	2
520	OPID #5	2
521	스위치5 동작시간	4
522		
523	스위치6 명령	2
524	OPID #6	2
525	스위치6 동작시간	4
526		
527	스위치7 명령	2
528	OPID #7	2
529	스위치7 동작시간	4
530		
531	스위치8 명령	2
532	OPID #8	2
533	스위치8 동작시간	4
534		
535	스위치9 명령	2
536	OPID #9	2
537	스위치9 동작시간	4
538		
539	스위치10 명 령	2
540	OPID #10	2
541	스위치10 동작시간	4
542		
543	스위치11 명 령	2
544	OPID #11	2
545	스위치11 동작시간	4
546		
547	스위치12 명	2

553	스위치13	
554	동작시간	4
555	스위치14 명 령	2
556	OPID #14	2
557	스위치14 동작시간	4
558		
559	스위치15 명 령	2
560	OPID #15	2
561	스위치15 동작시간	4
562		
563	스위치16 명 령	2
564	OPID #16	2
565	스위치16 동작시간	4
566		
567	개폐기1명령	2
568	OPID #17	2
569	개폐기1 동작시간	4
570		
571	개폐기2명령	2
572	OPID #18	2
573	개폐기2 동작시간	4
574		
575	개폐기3명령	2
576	OPID #19	2
577	개폐기3 동작시간	4
578		
579	개폐기4명령	2
580	OPID #20	2
581	개폐기4 동작시간	4
582		
583	개폐기5명령	2
584	OPID #21	2
585	개폐기5 동작시간	4
586		
587	개폐기6명령	2
588	OPID #22	2
589	개폐기6 동작시간	4
590		
591	개폐기7명령	2
592	OPID #23	2
593	개폐기7 동작시간	4
594		
595	개폐기8명령	2
596	OPID #24	2
597	개폐기8	4

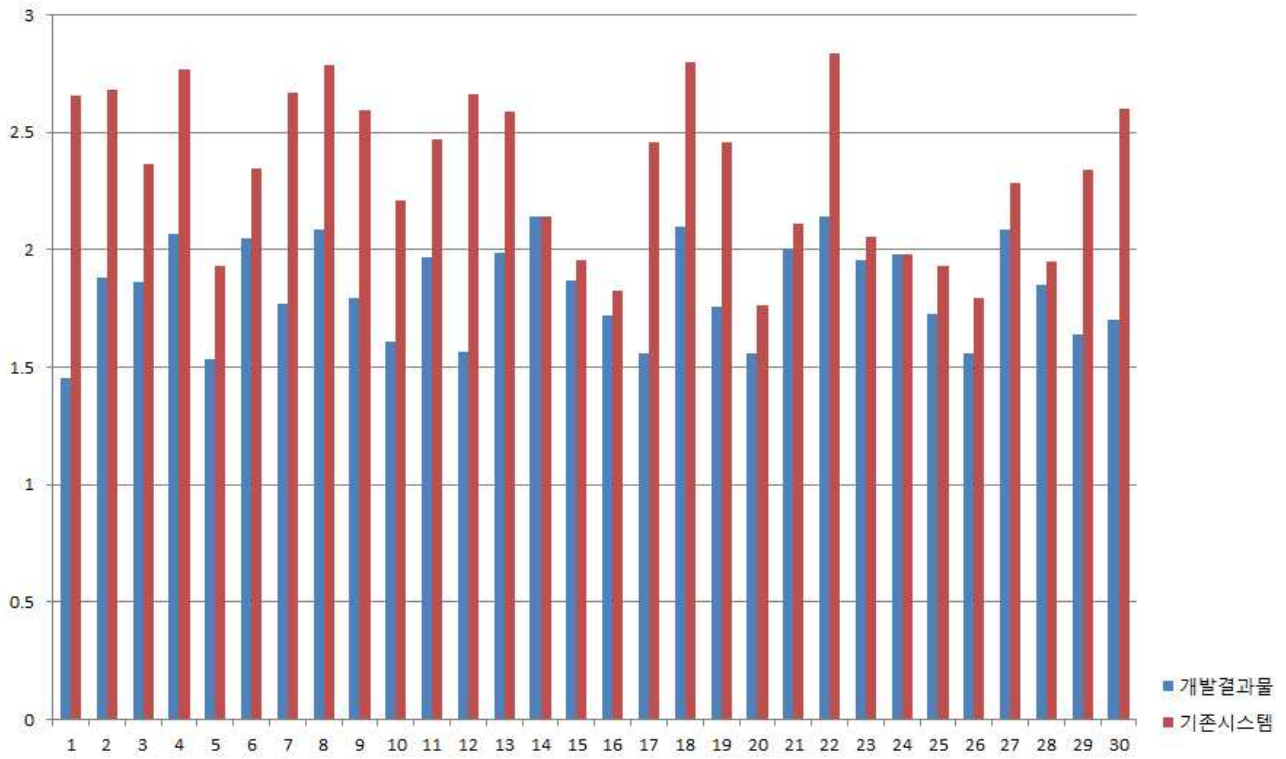
	명	
548	OPID #12	2
549	스위치12	4
550	동작시간	

598	동작시간	

주소(DEC)	분류	장비코드	비 고
101	온도1	1	
102	온도2	1	
103	온도3	1	
104	습도1	2	
105	이슬점센서	3	
106	감우센서	4	
107	유량센서	5	
108	강우센서	6	
109	일사센서	7	
110	풍속센서	8	
111	풍향센서	9	
112	전압센서	10	
113	CO2센서	11	
114	EC센서	12	
115	지습센서	13	
116	광양자센서	14	
117	토양함수율 센서	15	
118	토양수분장력 센서	16	
119	PH	17	
120	지온	18	
121	온도4	1	
122	온도5	1	
123	온도6	1	
124	온도7	1	
125	온도8	1	
126	온도9	1	
127	온도10	1	
128	습도2	2	
129	습도3	2	
130	예비	0	
131	예비	0	
132	예비	0	
133	예비	0	
134	예비	0	
135	예비	0	
136	예비	0	
137	예비	0	
138	예비	0	
139	예비	0	
140	예비	0	

주소(DEC)	값	길이(바이트)
201	노드상태	2
202	온도#1	4
203		
204	온도센서상태	2
205	온도#2	4
206		
207	온도센서상태	2
208	온도#3	4
209		
210	온도센서상태	2
211	습도#1	4
212		
213	습도센서상태	2
214	이슬점	4
215		
216	이슬점 센서상태	2
217	감우	4
218		
219	감우 센서상태	2
220	유량	4
221		
222	유량 센서상태	2
223	강우	4
224		
225	강우 센서상태	2
226	일사	4
227		
228	일사 센서상태	2
229	풍속	4
230		
231	풍속 센서상태	2
232	풍향	4
233		
234	풍향 센서상태	2
235	전압	4
236		
237	전압 센서상태	2
238	CO2	4
239		
240	CO2 센서상태	2
241	EC	4
242		
243	EC 센서상태	2
244	지습	4
245		
246	지습 센서상태	2
247	광양자	4
248		
249	광양자 센서상태	2
250	토양합수율	4
251		
252	토양합수율 센서상태	2
253	토양수분장력	4
254		
255	토양수분장력 센서상태	2
256	PH	4
257		
258	PH 센서상태	2
259	지온	4
260		
261	지온 센서상태	2

주소(DEC)	값	길이(바이트)
262	온도#4	4
263		
264	온도센서상태	2
265	온도#5	4
266		
267	온도센서상태	2
268	온도#6	4
269		
270	온도센서상태	2
271	온도#7	4
272		
273	온도센서상태	2
274	온도#8	4
275		
276	온도센서상태	2
277	온도#9	4
278		
279	온도센서상태	2
280	온도#10	4
281		
282	온도센서상태	2
283	습도#2	4
284		
285	습도센서상태	2
286	습도#3	4
287		
288	습도센서상태	2
289	예비	4
290		
291	예비	2
292	예비	4
293		
294	예비	2
295	예비	4
296		
297	예비	2
298	예비	4
299		
300	예비	2
301	예비	4
302		
303	예비	2
304	예비	4
305		
306	예비	2
307	예비	4
308		
309	예비	2
310	예비	4
311		
312	예비	2
313	예비	4
314		
315	예비	2
316	예비	4
317		
318	예비	2
319	예비	4
320		
321	예비	2



〈일자별 제어오차〉

6월의 평균오차는 기존시스템 2.3도, 개발시스템 1.8도로 제어성능이 향상된 것으로 판단된다.

### 3장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

#### 1. 목표 달성도

당초목표	달성도(%)	당초연구목표 대비 연구결과
[성능평가] 온실환경제어·순환식 수경재배 시스템의 자체 테스트 베드 및 농가 실증환경의 구축	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>온실환경제어 시스템, 순환식 수경재배 시스템의 실증환경을 구축하여 시스템 제어성능평가의 안정성을 검증함</li> <li>순환식 양액공급시스템과의 연동을 확인하고 인터페이스를 개발하여 적용함.</li> <li>다양한 환경조건에서 온실환경제어 시스템의 구동성능을 테스트하여 분석함</li> </ul>
[성능평가] 순환식 수경재배 재사용 양액 살균기술의 농가 설치 및 실증	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>농가 현장 실증을 통한 급배액 공급 및 배액처리에 따른 살균 효율의 안전성을 검증함</li> <li>농가 현장에 양액 재사용 살균장치 설치 후 장시간의 사용시 문제 발생 요인을 파악하고 정리함.</li> <li>다양한 관수 조건에서 배액수위기준 살균기 운영 시스템 내 미생물 관리 성능을 이론적으로 분석함</li> <li>비순환식 수경재배 시스템과 살균기 운영 순환식 수경재배 시스템이 미생물 농도 관리 성능 비교 수행</li> </ul>
[성능평가] 실증데이터 수집 및 분석	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>온실환경제어가 적용된 온실의 데이터를 수집하여 분석검증함.</li> <li>기존의 생장데이터와 비교 분석하여 빅데이터를 통한 알고리즘 개발</li> </ul>
[고도화] On-line 양분흡수지표 개발을 통한 배액 재사용을 동적 제어 기반 구축 및 재사용 혼합양액 pH·EC의 안정적 제어	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>EC 기반 수경재배 시스템 상에서 실시간 획득이 가능한 양수분 데이터 기반의 양분 흡수지표 개발을 위한 이론적 분석을 수행함</li> <li>실제 수경재배 시스템에서 on-line 양분흡수지표와 식물 생육과의 상관성을 조사함</li> <li>양분흡수지표를 순환식 수경재배 시스템 상에서 사용하기 위한 정규화 분석을 수행함.</li> <li>기계학습 기반 재사용 양액 EC와 pH 제어성능을 장기간의 순환식 수경재배 조건에서 안정적으로 유지되는 것을 확인함</li> </ul>
[고도화] 양액 재이용에 따른 이온불균형 해소를 위한 재사용 양액 균형 관리 알고리즘 및 프로그램 개발	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>순환식 수경재배 적용 실증 농가에서 수집된 데이터를 기반으로 양분 농도 변화 패턴을 조사함.</li> <li>재사용 양액의 양분 균형을 제어하기 위한 이론과 알고리즘을 수립하였으며, 프로그램화를 수행함.</li> </ul>
[고도화] 온실환경제어 시스템 고도화	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>순환식 양액공급시스템과의 연동을 확인하고 제어파라미터 및 변수도출 및 인터페이스를 개발하여 적용함.</li> </ul>
[정량목표] 특허출원 2건, 제품화 2건, 매출액 5000만원, 학술발표 2건	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>실증 테스트베드 온실 구축 1건 달성</li> <li>스마트팜 기자재 실증시험 및 고도화 2건, on-line 식물 양분 흡수지표 개발 SCI 논문 1건 초과달성, 순환식 수경재배 시스템 살균 및 양분 균형제어 특허 6건, 학술발표 3건</li> <li>제품화 2건, 매출액 1,50000,000원(달성)</li> </ul>

## 2. 관련분야 기여도

본 연구에서 구축한 자체 실증 테스트베드 및 농가 실증 체계를 통해 스마트팜 시장의 주요 기술인 복합환경제어 시스템과 순환식 수경재배 시스템의 성능평가를 수행하였다. 마산과 강릉의 자체 테스트베드 온실과 마산과 밀양의 실증 농가에 순환식 수경재배 시스템을 설치하였으며, 이로부터 농가 실사용에 시의 기술 안정성을 조사하였다. 또한 농가의 장기간 실사용 조건에서 발생된 문제 요인들을 종합하여 기술 운용의 안정성과 유지 관리 측면에서의 산업적 완성도를 강화하였다. 성능 평가 과정에서 동시에 수행된 이론적 분석 체계는 순환식 수경재배 시스템의 생물학적(수인성 식물병 관리) 위험 요인의 관리 특성을 도출하였으며, 비순환식 수경재배 시스템의 생물학적 위험 관리 방식과 이론적인 구분 개념을 제시하였다. 이론적 예측은 자체 실증 테스트베드에서의 실증을 통해 관찰된 실험적 결과를 통해 재연될 수 있음을 확인하였다. 온실환경제어 시스템의 양액시스템과의 연동이 가능하게 되었으며 스마트 팜 혁신밸리 시설에 연계하여 설치 적용가능할수 있는 발판을 마련하였다.

성능평가와 더불어 차세대 시스템의 경쟁력 확보를 위해 수행된 고도화 연구에서는 수경재배 시스템의 on-line 상에서 수집 가능한 양분흡수지표를 개발하였으며, 정규화를 통해 수경재배 시스템에서의 활용성을 확인하였다. 또한, 양분 균형제어의 이론적 기반 구축 및 이를 바탕으로 한 양분 균형제어 알고리즘을 통해 차기 순환식 수경재배 시스템의 시장의 지배적 기술 지위 확보를 위한 발판을 마련하였다. 고도화된 복합환경제어를 통하여 경제성을 갖춘 스마트팜 기자재의 개발을 통해 해외시장 판로개척과 수출경쟁력이 확대 될 수 있을 것이다. 종합적으로 본 연구결과물을 통해 현 보유 기술의 산업적 완성도를 강화하고 차기 시장의 기술 선점을 확보할 수 있는 체계를 구축할 수 있을 것으로 기대한다.



## 4장 연구결과의 활용 계획

### 1. 연구개발 결과의 활용 계획

- 본 연구의 결과물인 스마트팜 기자재 실증시험과 고도화를 통하여 해당 기자재의 실용화를 추진하고자 하며, 구체적인 활용계획은 다음과 같음.
  - 본 연구의 스마트팜 기자재의 실증평가를 통하여 순환식 수경재배시스템 및 온실환경제어 시스템의 경제적, 기술적 산업화 타당성을 확보.
  - H/W, S/W 기술의 기능을 검증하고 고도화하여 경제성 있는 시스템을 제작, 이를 통하여 시장경쟁력을 높임
  - 현재 추진 중인 스마트팜 혁신밸리의 실증사업과 연계하여 시설원예의 스마트팜 분야의 핵심기술로 확대 활용

### 2. 기대성과 및 파급효과

#### 가. 기대성과

- 기술적 측면
  - 주요 ICT 기기 표준화 기반 마련으로 향후 제품 간 호환성이 확보되는 등 스마트팜 산업화 기반을 더욱 공고히 하는데 기여
  - 국내외 주요 스마트팜 ICT 핵심기기 비교분석자료를 활용해 향후 한국형 스마트팜에 적합한 기기구성을 제시하는데 하나의 기준이 될 수 있을 것으로 기대됨
  - 기존 외국산제품 사용에 따른 시간적, 비용적 자원낭비 절감을 위한 기술표준화 기반 마련
  - 핵심기기 개선방안 도출로 인한 국내 ICT기기 경쟁력 강화 기반 마련
- 경제·산업적 측면
  - 작물별 스마트 온실기기의 현장성능 평가방법 제시로 국산제품의 신뢰성 제고
  - 주요 ICT 기기 현장 실증/평가용 스마트팜을 기술 확산의 전초기지로 활용하여 관련 농가에 적합한 기기를 선택하고 활용하는 맞춤형 스마트 팜 구축이 가능해질 것으로 기대됨.
  - 국산과 외국산 제품의 비교분석을 통한 국내 제품의 성능 개선방안 마련 및 국제 경쟁력 제고

## 나. 파급효과

### ○ 기술적 측면

- 스마트팜 기술개발을 통한 스마트팜 산업 분야의 국가 R&D 및 과학기술 역량 제고
- 스마트팜 운영 대상자에게 기술적 보정 및 ICT기기 간 호환성 확보용이
- 국내 환경에 적합한 ICT 융복합 스마트 온실 표준모델 연구를 통한 작물 생육 자동 측정 및 최적환경관리 모델개발방향성 제시
- 스마트팜 구성기기 인증제도 확립기반 마련
- 스마트팜 ICT기기 관련 국내기업 육성을 통한 글로벌시장 선점 기대

### ○ 경제적·산업적 측면

- 향후 국내 스마트팜 ICT 기기의 경쟁력 강화로 한국형 스마트팜 수출 활로 개척용이
- 기존 스마트팜 붐에 과학적 영농을 연계하여 해당 운영자들의 소득 안정성 확보
- 한국형 스마트팜 중심으로 생산시설·기자재 등 국산화, 수입대체 및 해외시장 진출
- 기술표준개발로의 연계를 통한 국가 경쟁력 제고 및 서비스 활성화
- 스마트 온실 통합시스템 국산화로 수입대체 및 수출 산업화 촉진
- 스마트팜 기술수요를 실제 현장적용으로 연결, 시장 확대 기반 구축
- 스마트팜 기술개발을 통한 수입대체 효과 발생

### ○ 사회적 측면

- 초고령사회 확산, 글로벌화, 기후변화 및 가치변화 등 국내·외 메가트렌드 변화에 대응하는 스마트팜 기술개발에 도전함으로써 국가적 이슈 해결에 기여
- 스마트팜의 새로운 가치창출을 통한 농촌의 삶의 질 향상과 지속가능성 확보
- 농업분야 ICT 융복합 촉진을 위한 기술적 인프라 구축
- 현장 핵심기술 수요 및 개선방안을 도출함으로써, 이를 활용한 국내 스마트팜 ICT 표준화 방향 제고

## 참고문헌

- Gasiorowski-Denis, E., 2017. The future of farming. ISO. URL <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/news/2017/05/Ref2183.html> (accessed 11.23.20).
- Lassaletta, L., Billen, G., Grizzetti, B., Anglade, J., Garnier, J., 2014. 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. *Environ. Res. Lett.* 9, 105011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/105011>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S.E., Fetzer, I., Bennett, E.M., Biggs, R., Carpenter, S.R., de Vries, W., de Wit, C.A., Folke, C., Gerten, D., Heinke, J., Mace, G.M., Persson, L.M., Ramanathan, V., Reyers, B., Sörlin, S., 2015. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science* 347. <https://doi.org/10.1126/science.1259855>
- Walter, A., Finger, R., Huber, R., Buchmann, N., 2017. Opinion: Smart farming is key to developing sustainable agriculture. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 114, 6148-6150. <https://doi.org/10.1073/pnas.1707462114>
- Weltin, M., Zasada, I., Piorr, A., Debolini, M., Geniaux, G., Moreno Perez, O., Scherer, L., Tudela Marco, L., Schulp, C.J.E., 2018. Conceptualising fields of action for sustainable intensification – A systematic literature review and application to regional case studies. *Agric. Ecosyst. Environ.* 257, 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.01.023>
- Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M., 2017. Big data in smart farming – a review. *Agric. Syst.* 153, 69-80. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.023>

## 연구개발보고서 초록

과 제 명	(국문) 1세대 플랜트팜 복합환경제어기 및 순환식 양액시스템 (혁신밸리) 실증 및 고도화				
	(영문) 1st Generation Plant Farm System Industrialization and Demonstration				
주관연구기관	신한에이텍(주)		주 관 연 구 (소속) 신한에이텍(주)		
참 여 기 업			책 임 자 (성명) 장재욱		
총연구개발비 (533,400천원)	계	533,400천원	총 연 구 기 간	2019. 8.30 ~ 20.11.29( 1년 2개월)	
	정부출연 연구개발비	400,000천원	총 참 여 자 수	총 인 원	12
	기업부담금	133,400천원		내부인원	12
	연구기관부담금			외부인원	

○ 연구개발 목표 및 성과

본 연구개발은 ① 실증 테스트베드 구축 운영, ② 순환식 수경재배시스템의 현장 성능평가 및 고도화, ③ 1세대 스마트팜 온실환경제어 시스템 핵심기술의 산업화를 위한 스마트팜 혁신밸리 연계 및 현장 실증연구를 목적으로 수행되었다. 성능평가 연구를 통해 자체 테스트 베드 및 농가 실증환경의 구축하였으며, 실증 데이터를 수집하고 정리하여 현 보유 기술의 산업적 완성도를 강화하였다. 또한 기술 고도화 연구를 통해서 on-line 양분흡수지표와 양분 균형제어 알고리즘 및 프로그램을 개발하였다.

○ 연구내용 및 결과

구축된 기술 실증 체계로부터 온실환경제어·순환식 수경재배 시스템의 성능 및 운용 안정성 확보를 위한 데이터를 수집하여, 기술의 실사용 시 발생 가능한 문제 요인을 조사하였다. 온실환경제어 시스템의 온도, 습도, Co2의 편차가 작을수록 생육에 유리하다고 판단되는 항목(엽길의 변화, 줄기 굵기의 변화)에서 가장적인 변화를 보여 환경요인의 편차가 적을수록 생육이 양호하고 균일하게 이루어 지는 것을 알 수 있었다. 순환식 수경재배시스템의 재사용 양액 살균 기술의 실증 체계를 통해 장기간의 운용 조건에서 살균성능의 변화를 확인하였으며, 장기간의 사용 조건에서 95% 이상의 살균성능이 유지되는 것을 확인하였다. 특히 swirl형 UV 살균 모듈의 경우 코코피트 농가와 같은 배액 탁도가 높은 가혹 조건에서도 95% 이상의 살균 성능을 유지할 수 있을 확인할 수 있었다.

이론적인 분석을 통해 UV 재사용 순환식 수경재배의 시스템 내 미생물 집락수 관리 특성을 도출하였으며, 자체 실증테스트 베드에서 수행된 실증 실험에서 이론적 예측과 동일하게 순환식 수경재배 시스템의 일반세균류, 진균류 집락수를 비순환식에 비해서 안정적으로 관리할 수 있음을 확인하였다. 고도화를 위한 접근으로 on-line 식물 양분 흡수지표 개발하였으며, 토마토 재배 환경에서 양분흡수지표와 수확량 간의 상관관계를 확인하고 양분흡수량을 순환식 수경재배 시스템의 관리 파라미터로 활용하기 위한 기술적 기반을 제시하였다. 양액 재이용에 따른 이온불균형 해소를 위한 순환식 수경재배 시스템 이온 균형 관리 알고리즘 개발 및 프로그램화 작업을 통해 순환식 수경재배 시스템의 양분 균형 관리 체계를 구축하였다. 또한 순환식 양액시스템과의 연동을 위한 제어파라미터를 온실환경제어시스템에 적용하였다.

○ 연구성과 활용실적 및 계획

실증테스트 베드 구축을 통해 스마트팜 혁신밸리와 연계 가능한 실증체계를 마련하였으며, 스마트팜 기술의 산업적 경쟁력 및 완성도 강화를 위한 인프라로 활용할 계획이다. 연구개발을 통해 진행된 고도화 기술은 추후 실증 테스트 베드 기반을 활용하여 차기 스마트팜 시장의 지배적 기술 지위를 선점에 기여할 수 있도록 기술성을 강화할 예정이다.

[별첨 2]

## 1장 자체평가의견서

### 1. 과제현황

		과제번호			
사업구분	1세대 스마트 플랜트팜 산업화				
연구분야			과제구분	단위	
사업명	1세대 스마트 플랜트팜 산업화			주관	
총괄과제	기재하지 않음		총괄책임자	기재하지 않음	
과제명	1세대 플랜트팜 복합환경제어기 및 순환식 양액시스템 (혁신밸리) 실증 및 고도화		과제유형	(기초,응용,개발)	
연구기관	신한에이텍(주)		연구책임자	장재욱	
연구기간 연구비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차연도	2019.8.30~2021.11.29	400,000천원	133,400천원	533,400천원
	2차연도				
	3차연도				
	4차연도				
	5차연도				
계		400,000천원	133,400천원	533,400천원	
참여기업					
상대국			상대국연구기관		

※ 총 연구기간이 5차연도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 : 2021년 1월 18일

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
신한에이텍(주)	기업부설연구소장	장재욱

4. 평가자(연구책임자) 확인 :

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

확약



## I. 연구개발실적

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

### 1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 국산 기술이 반영된 양액 재사용 장치와 살균 모듈을 테스트베드 및 농가 장기 사용 조건에서 실증함
- 순환식 양액공급시스템과의 연동을 위한 제어파라미터 및 변수도출밀 인터페이스 개발을 고도화함
- 양분흡수지표, 양분 균형 제어 이론·알고리즘·프로그램화를 수행하여 순환식 양분 관리 체계를 고도화함

### 2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- H/W, S/W 기술의 검증을 통한 순환식 수경재배시스템 및 온실환경제어 시스템의 경제적·기술적 타당성 확보
- 스마트팜 혁신밸리의 실증사업과의 연계를 통해 스마트팜 분야의 핵심기술 제공
- 식물-근권부-순환식수경재배 시스템 사이의 독자적·체계적 연결 기반의 구축을 통해 차세대 수경재배 기술 시장의 지배적 기술 지위 확보를 위한 기반 마련

### 3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 고도화-테스트베드-실증 데이터 수집 체계는 차세대 복합환경제어, 수경재배 개발 기술의 안정적 운용을 위한 S/W 기술의 최적화 기반으로 활용
- 순환식 수경재배 수경재배 농가 및 관련 기술 수요의 증가에 대응 가능한 양분·미생물 통합 관리 기술 체계로 활용될 수 있을 것으로 보여짐

### 4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 개발 기술의 경제적, 기술적, 산업적 완성도를 강화하기 위해 자체 테스트베드 장기 재배 운용 및 실증 농가 기반의 성능평가 체계를 적극적으로 활용함.
- 성능평가 및 기술 고도화를 체계적으로 수행하기 위해 이론적 모델을 구축하고 이를 기반으로 도출한 기술을 재배 실험을 통해 검증함.

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

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)



- 성능평가를 통해 장기적인 운용 조건에서의 시스템의 안정성을 확인하였으며, 현재까지는 장치의 성능을 정상적으로 유지 중임.
- 살균성능향상과 양분 균형 제어 이론 및 방법을 정리하여 관련된 특허를 6건 출원함.
- 양분흡수지표 개발 이론 및 실험 결과를 정리하여 SCI 논문을 발표함.

## II . 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
[성능평가] ① 온실환경제어·순환식 수경재배 시스템의 자체 테스트 베드 및 농가 실증환경의 구축	30	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>온실환경제어 시스템, 순환식 수경재배 시스템의 실증환경을 구축하여 시스템 제어성능평가의 안정성을 검증함</li> <li>순환식 양액공급시스템과의 연동을 확인하고 인터페이스를 개발하여 적용함.</li> <li>다양한 환경조건에서 온실환경제어 시스템의 구동성능을 테스트하여 분석함</li> </ul>
[성능평가] ② 순환식 수경재배 재사용 양액 살균기술의 농가 설치 및 실증	30	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>농가 현장 실증을 통한 급배액 공급 및 배액처리에 따른 살균 효율의 안전성을 검증함</li> <li>농가 현장에 양액 재사용 살균장치 설치 후 장시간의 사용시 문제 발생 요인을 파악하고 정리함.</li> <li>다양한 관수 조건에서 배액수위기준 살균기 운영 시스템 내 미생물 관리 성능을 이론적으로 분석함</li> <li>비순환식 수경재배 시스템과 살균기 운영 순환식 수경재배 시스템이 미생물 농도 관리 성능 비교 수행</li> <li>특허 5건</li> </ul>
[성능평가] ③ 실증데이터 수집 및 분석	10	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>온실환경제어가 적용된 온실의 데이터를 수집하여 분석검증함.</li> <li>기존의 생장데이터와 비교 분석하여 빅데이터를 통한 알고리즘 개발</li> </ul>
[고도화] ④ On-line 양분흡수지표 개발을 통한 배액 재사용률 동적 제어 기반 구축 및 재사용 혼합양액 pH·EC의 안정적 제어	10	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>EC 기반 수경재배 시스템 상에서 실시간 획득이 가능한 양수분 데이터 기반의 양분 흡수지표 개발을 위한 이론적 분석을 수행함</li> <li>실제 수경재배 시스템에서 on-line 양분흡수지표와 식물 생육과의 상관성을 조사함</li> <li>양분흡수지표를 순환식 수경재배 시스템 상에서 사용하기 위한 정규화 분석을 수행함.</li> <li>기계학습 기반 재사용 양액 EC와 pH 제어성능을 장기간의 순환식 수경재배 조건에서 안정적으로 유지되는 것을 확인함</li> <li>SCI 논문 1건</li> </ul>
[고도화] ⑤ 양액 재이용에 따른 이온불균형 해소를 위한 재사용 양액 균형 관리 알고리즘 및 프로그램 개발	10	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>순환식 수경재배 적용 실증 농가에서 수집된 데이터를 기반으로 양분 농도 변화 패턴을 조사함.</li> <li>재사용 양액의 양분 균형을 제어하기 위한 이론과 알고리즘을 수립하였으며, 프로그램화를 수행함</li> <li>특허출원 1건</li> </ul>
[고도화] 온실환경제어 시스템 고도화	10	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>실증 테스트베드 온실 구축 1건 달성</li> <li>스마트팜 기자재 실증시험 및 고도화 2건, on-line 식물 양분 흡수지표 개발 SCI 논문 1건 초과달성, 순환식 수경재배 시스템 살균 및 양분 균형제어 특허 6건, 학술발표 3건</li> <li>제품화 2건, 매출액 1,50000,000원(달성)</li> </ul>
합계	100점	100	<ul style="list-style-type: none"> <li>제시한 정량 및 정성목표를 100% 달성함</li> </ul>

### III. 종합의견

### 1. 연구개발결과에 대한 종합의견

- 본 연구는 ① 실증 테스트베드 구축 운영, ② 순환식 수경재배시스템의 현장 성능평가 및 고도화, ③ 1세대 스마트팜 온실환경제어 시스템 핵심기술의 산업화를 위한 스마트팜 혁신벨리 연계 및 현장 실증연구를 목적으로 하며, 이를 달성하기 위한 구체적인 연구 범위는 ‘성능평가’ 영역과 ‘고도화’ 영역으로 구분됨.
- 본 연구진은 보유 기술의 성능 평가를 위해 자체 실증 테스트베드 및 농가 실증 체계를 구축하였으며, 이를 통해 H/W, S/W의 기술 검증을 수행하고 기술의 경제적·산업적 타당성을 확보함.
- 기술 고도화 연구를 통해서 보유 기술을 심화하였으며, 차세대 기술 시장으로의 확장을 위한 이론적 토대를 확보함.

### 2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

- COVID 19로 인한 영농현장적용이 다소 지연되었고 현장실증 이동제한에 따른 현장실증 수행에 많은 문제점이 발생하였음.

### 3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 성능평가 데이터를 활용하여 기존 사업영역의 기술적 완성도를 강화하고 스마트팜 혁신벨리 단지의 실증 체계와 연계를 진행할 예정이며, 고도화-테스트베드-실증 데이터 수집 체계는 차세대 기술 시장 점유를 위한 복합환경제어, 순환식 수경재배 시스템 개발 기술의 안정적 운용을 위한 S/W 기술 최적화 기반으로 활용할 계획임.

#### IV. 보안성 검토

o 연구책임자의 보안성 검토의견, 연구기관 자체의 보안성 검토결과를 기재함

※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성함.

##### 1. 연구책임자의 의견

- 해당사항 없음

##### 2. 연구기관 자체의 검토결과

- 해당사항 없음

[별첨 3]

## 연구성과 활용계획서

### 1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input type="checkbox"/> 자유응모과제 <input type="checkbox"/> 지정공모과제		분 야	
연구과제명	1세대 플랜트팜 복합환경제어기 및 순환식 양액시스템 (혁신밸리) 실증 및 고도화			
주관연구기관	신한에이텍(주)		주관연구책임자	장재욱
연구개발비	정부출연 연구개발비	기업부담금	연구기관부담금	총연구개발비
	400,000천원	133,400천원		533,400천원
연구개발기간	2019. 8. 30 ~ 2020. 11. 29 ( 1년 2개월)			
주요활용유형	<input checked="" type="checkbox"/> 산업체이전 <input 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
<p>[성능평가]</p> <p>① 온실환경제어·순환식 수경재배 시스템의 자체 테스트 베드 및 농가 실증환경의 구축</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>온실환경제어 시스템, 순환식 수경재배 시스템의 실증환경을 구축하여 시스템 제어성능평가의 안정성을 검증함</li> <li>순환식 양액공급시스템과의 연동을 확인하고 인터페이스를 개발하여 적용함.</li> <li>다양한 환경조건에서 온실환경제어 시스템의 구동성능을 테스트하여 분석함</li> </ul>
<p>[성능평가]</p> <p>② 순환식 수경재배 재사용 양액 살균기술의 농가 설치 및 실증</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>농가 현장 실증을 통한 급배액 공급 및 배액처리에 따른 살균 효율의 안전성을 검증함</li> <li>농가 현장에 양액 재사용 살균장치 설치 후 장시간의 사용시 문제 발생 요인을 파악하고 정리함.</li> <li>다양한 관수 조건에서 배액수위기준 살균기 운영 시스템 내 미생물 관리 성능을 이론적으로 분석함</li> <li>비순환식 수경재배 시스템과 살균기 운영 순환식 수경재배 시스템이 미생물 농도 관리 성능 비교 수행</li> </ul>
<p>[성능평가]</p> <p>③ 실증데이터 수집 및 분석</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>온실환경제어가 적용된 온실의 데이터를 수집하여 분석검증함.</li> <li>기존의 생장데이터와 비교 분석하여 빅데이터를 통한 알고리즘</li> </ul>
<p>[고도화]</p> <p>④ On-line 양분흡수지표 개발을 통한 배액 재사용률 동적 제어 기반 구축 및 재사용 혼합양액 pH·EC의 안정적 제어</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EC 기반 수경재배 시스템 상에서 실시간 획득이 가능한 양수분 데이터 기반의 양분 흡수지표 개발을 위한 이론적 분석을 수행함</li> <li>실제 수경재배 시스템에서 on-line 양분흡수지표와 식물 생육과의 상관성을 조사함</li> <li>양분흡수지표를 순환식 수경재배 시스템 상에서 사용하기 위한 정규화 분석을 수행함.</li> <li>기계학습 기반 재사용 양액 EC와 pH 제어성능을 장기간의 순환식 수경재배 조건에서 안정적으로 유지되는 것을 확인함</li> </ul>
<p>[고도화]</p> <p>⑤ 양액 재이용에 따른 이온불균형 해소를 위한 재사용 양액 균형 관리 알고리즘 및 프로그램 개발</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>순환식 수경재배 적용 실증 농가에서 수집된 데이터를 기반으로 양분 농도 변화 패턴을 조사함.</li> <li>재사용 양액의 양분 균형을 제어하기 위한 이론과 알고리즘을 수립하였으며, 프로그램화를 수행함.</li> </ul>
<p>[고도화]</p> <p>⑥ 온실환경제어 시스템 고도화</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>실증 테스트베드 온실 구축 1건 달성</li> <li>스마트팜 기자재 실증시험 및 고도화 2건, on-line 식물 양분 흡수지표 개발 SCI 논문 1건 초과달성, 순환식 수경재배 시스템 살균 및 양분 균형제어 특허 6건, 학술발표 3건</li> <li>제품화 2건, 매출액 1,5000,000원(달성)</li> </ul>

\* 결과에 대한 의견 첨부 가능

### 3. 연구목표 대비 성과

성과 목표	사업화지표										연구기반지표								
	지식 재산권		기술 실시 (이전)		사업화				기술 인 증	학술성과		교육 인 지 도 성	정책 활용 홍보	기 타 (타 연					
	특	특	품	건	기	제	매	수		고	투				논	문	학	도	성



	허출원	허등록	종등록	수	술료	품화	출액	출액	용창출	자유치	SCI	비SCI	문평균IF	술발표	책활용	보전시	구활용등)
단위	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	명	건	건
가중치	20				40	30								10			
최종목표	2				2	50								2			
연구기간내 달성실적	6				2	150					1		2.63	3			
달성율(%)	300				100	300					100			150			

#### 4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	순환식양액시스템과 연동가능한 복합환경제어시스템
②	스윙타임 살균모듈 개발
③	수경재배 시스템의 on-line 양분흡수데이터 활용 방법
④	순환식 수경재배시스템의 양분 균형 관리 프로그램

#### 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)	현장에로 해결	정책 자료	기타
①의 기술		V						V		
②의 기술	V	V				V	V	V	V	V
③의 기술	V	V				V	V	V	V	V
④의 기술	V	V				V	V	V	V	V

\* 각 해당란에 v 표시

#### 6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	스마트팜 혁신밸리 실증단지 연계
②의 기술	살균모듈 고도화를 통한 고효율 보급형 제품 생산에 반영
③의 기술	순환식 수경재배 배액 혼합의 동적 제어에 활용, 양수분 최적 관리 기술 개발에 기여
④의 기술	순환식 수경재배 시스템의 양분

7. 연구종료 후 성과창출 계획

성과목표	사업화지표										연구기반지표								
	지식 재산권			기술실시 (이전)		사업화					기술인증	학술성과			교육지도	인력양성	정책 활용-홍보		기타 (타연구활용등)
	특허출원	특허등록	품종등록	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출	투자유치		논문		학술발표			정책활용	홍보전시	
												SCI	비SCI						
단위	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	명				
가중치	20					40	30							10					
최종목표	2					2	50							2					
연구기간내 달성실적	6										1		2.63	3					
연구종료후 성과창출 계획						1	100	20	1		1								

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

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

- 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)

주의

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