

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

농식품연구성과후속지원사업 2021년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-003553-01

이온 센서 기반의 생약원료 식물 재배용 정밀 양액 및 식물 관리시스템 개발

2021. 05. 04.

주관연구기관 / (주)넥스트온

농림축산식품부
(전문기관)농림식품기술기획평가원

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “이온 센서 기반의 생약원료식물 재배용 정밀 양액 및 식물 관리 시스템 개발”(개발기간 : 2019.09.30. ~ 2020.12.31.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2021. 05. 04.

주관연구기관명 : 농업회사법인 (주)넥스트온 (대표자) 최재빈 (인)



주관연구책임자 : 도 기 석

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

<보고서 요약서>

보고서 요약서

과제고유번호	819035-2	해 당 단 계 연 구 기 간	2020.05.01 — 2020.12.31	단 계 구 분	2020.05.01 — 2020.12.31/2019. 09.30 — 2020.12.31
연구사업명	단 위 사 업	농식품기술개발사업			
	사 업 명	농식품연구성과후속지원사업			
연구과제명	대 과 제 명	(해당 없음)			
	세부 과제명	이온 센서 기반의 생약원료식물 재배용 정밀 양액 및 식물 관리 시스템 개발			
연구책임자	도기석	해당단계 참여연구원 수	총: 명 내부: 명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부: 천원 민간: 천원 계: 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 9명 내부: 9명 외부: 명	총 연구개발비	정부:144,000천원 민간: 36,000천원 계:180,000천원
연구기관명 및 소속부서명	농업회사법인 (주)넥스트온			참여기업명	농업회사법인 (주)넥스트온
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명: 서울대학교 산학협력단			연구책임자: 김학진	

※ 국내외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반, 국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정」 제24조의4(분류기준) 제1항에 해당하는 사항 없음
-------------------------	--

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											

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

<p>요약(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 양액 내 질산, 칼륨, 칼슘에 반응하는 감지물질을 선별하였으며 이를 기반으로 이온선택성전극 제작 - 개발 또는 상용 이온선택성전극을 활용하여 양액 내 주영양분들을 측정하고 이를 기반으로 필요한 양분만을 적정량 투입하는 정밀 비료 투입 알고리즘을 개발 - 이온 선택성전극과 정밀 비료 투입 알고리즘을 적용하여 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 1차 시작기 개발 - 양액 내 주요 양분 이온인 질산, 칼륨, 칼슘에 대한 선택적인 감지 및 보충 동작을 통해 10% 내외의 정확도 수준으로 주어진 설정 농도에 맞추어 양액 관리 성능 확인 - 실제 식물공장 환경에서 즉각적으로 요구되는 양액 요구량을 조성하여 공급하기 위해 비례밸브를 이용하여 양액을 조제 및 공급할 수 있는 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 2차 시작기를 구성 - 식물공장 환경에서 재배 중인 작물을 실시간 모니터링하고 영상 정보를 수집 및 관리할 수 있는 영상 모니터링 시스템 개발 	<p>보고서 면수</p> <p>50</p>
---	-------------------------

<요약문>

<p align="center">연구의 목적 및 내용</p>	<p>○ 이온 농도를 기반으로 한 양액 내 이온 균형 및 작물 생육 조절을 위한 시스템과 원격식물 생육 영상 모니터링 시스템 개발</p>				
<p align="center">연구개발성과</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 양액 내 질산, 칼륨, 칼슘에 반응하는 감지물질을 선별하였으며 이를 기반으로 이온선택성전극 제작 - 개발 또는 상용 이온선택성전극을 활용하여 양액 내 주영양분들을 측정하고 이를 기반으로 필요한 양분만을 적정량 투입하는 정밀 비료 투입 알고리즘을 개발 - 이온 선택성전극과 정밀 비료 투입 알고리즘을 적용하여 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 1차 시작기 개발 - 양액 내 주요 양분 이온인 질산, 칼륨, 칼슘에 대한 선택적인 감지 및 보충 동작을 통해 10% 내외의 정확도 수준으로 주어진 설정 농도에 맞추어 양액 관리 성능 확인 - 실제 식물공장 환경에서 즉각적으로 요구되는 양액 요구량을 조성하여 공급하기 위해 비례밸브를 이용하여 양액을 조제 및 공급할 수 있는 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 2차 시작기를 구성 - 식물공장 환경에서 재배 중인 작물을 실시간 모니터링하고 영상 정보를 수집 및 관리할 수 있는 영상 모니터링 시스템 개발 				
<p align="center">연구개발성과의 활용계획 (기대효과)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 비료, 물 이용 효율 향상으로 수경재배 농가 경영비 절감 - 환경 부담 절감 - 순환식 수경재배 시스템 실용화 기여 - 개별 이온 센서의 측정 모듈 개발에 따른 정밀양액제어 가능 				
<p align="center">국문핵심어 (5개 이내)</p>	<p align="center">순환식 수경재배</p>	<p align="center">식물공장</p>	<p align="center">이온선택성전극</p>	<p align="center">양액관리시스템</p>	<p align="center">영상카메라</p>
<p align="center">영문핵심어 (5개 이내)</p>	<p align="center">Closed hydroponics</p>	<p align="center">Plant factory</p>	<p align="center">Ion-selective electrode</p>	<p align="center">Nutrient solution management system</p>	<p align="center">Crop monitoring system</p>

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	6
1-1. 연구개발 목적	6
1-2. 연구개발의 필요성	6
1-3. 연구개발 범위	9
2. 연구수행 내용 및 결과	10
2-1. 양액 내 주요 개별 이온농도 센서 및 센서 관리 기술 개발	10
2-2. 순환식 수경재배 양액 내 개별 이온 농도 제어기 개발	16
2-3. 양액 내 개별 이온 농도 균형 유지 시스템 적용	28
2-4. 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 수정	32
2-5. 작물 재배관리용 모니터링 시스템 개발	35
2-6. 생육 영상 기반 관수 제어 기술	38
2-7. 사업화성과 및 매출실적	45
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	46
3-1. 목표	46
3-2. 목표 달성여부	46
3-3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등) ...	47
4. 연구결과의 활용 계획 등	48
4-1. 실용화·산업화 계획	48
4-2. 특허, 논문 등 지식재산권과 학술성 확보계획	48
붙임. 참고 문헌	49

<별첨> 주관연구기관의 자체평가의견서

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구개발 목적

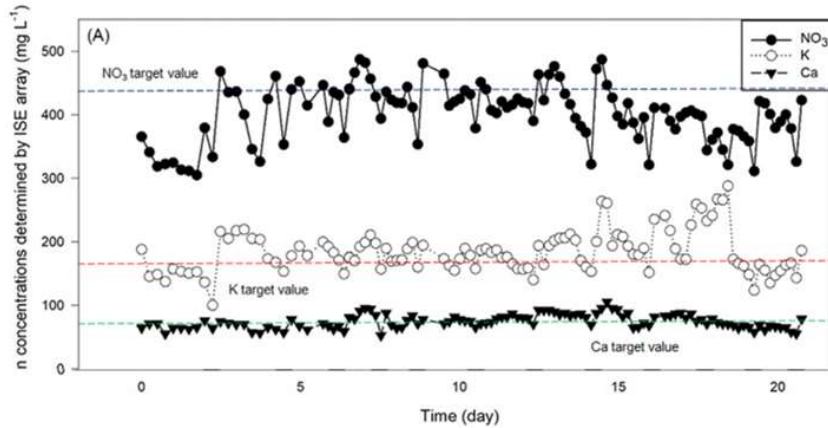
- 이온 농도를 기반으로 한 양액 내 이온 균형 및 작물 생육 조절을 위한 시스템과 원격식물 생육 영상 모니터링 시스템 개발
 - 양액 내 주요 개별이온농도 센서 및 센서 관리 기술 개발
 - 순환식 수경재배 양액 내 개별이온 농도 제어기 개발
 - 생약원료식물 수확 및 상태 관리 결정을 위한 영상 모니터링 시스템 구축
 - 양액 내 개별 이온농도 제어 시스템 개발

1-2. 연구개발의 필요성

- 필요성
 - 세계적으로 고령화 사회에 따른 만성질환, 퇴행성질환 등이 증가하면서 식물자원이 천연물신약 개발의 핵심소재로 의약품 시장에서의 산업적 가치가 급부상하며 지속적으로 그 시장 규모가 성장하고 있다.
 - 식물공장은 통제된 시설 하에서 식물을 생육하여 기후 변화나 지리적 조건에 대한 영향이 적고 ICT기술의 접목을 통해 환경관리 및 재배관리를 적은 인력과 노동으로 수행할 수 있어 생약원료식물을 안정적으로 생산할 수 있을 것으로 기대하였다.
 - 그러나 현재 식물공장에서 식물 생산을 위해 사용되는 재배 방식인 순환식 수경재배의 경우 양액 관리는 전적으로 전기전도도 (EC)와 pH 센서를 이용하며 EC센서를 통해 양액 내 존재하는 총 이온의 전하량에 의한 전기전도도를 측정하여 고정된 EC값에 기반한 양액관리 방식으로 구성되어 있어 비료와 물이 과투입되는 경향이 있고 양액을 재사용하는 과정에서 양액 내 개별이온을 직접 측정하는 방식이 아니기 때문에 양액 내 이온의 균형이 일정하게 유지되지 못하여 양액의 폐기로 인한 손실이 발생하고 있으며 생약원료식물의 유용 약용 성분물질 생성을 유도하거나 증진시키기 위해서는 영양 이온 성분기반의 정밀한 영양관리가 필수적일 것이라고 판단되었다.
 - 한편 특정 계절이 아닌 연중생산을 수행하는 식물공장 특성상 재배 중인 식물의 생육 상태를 실시간으로 분석하여 수확 및 출하시기를 검토해야 하는데 이를 인력에 의존하여 수행하는 경우 시간적, 인적 자원 소모가 비효율적이다.
 - 이에 비파괴적으로 분석하여 상품성 및 수확시기를 진단할 수 있는 영상 모니터링 기술을 개발 및 도입하면 기존의 인력 기반의 수확 및 출하 스케줄 관리보다 효율적인 관리를 수행하여 생산성을 증대시킬 수 있을 것으로 기대되었다.
 - 특히 약용성분의 함유량이 존재하거나 높은 생약원료식물의 형태적 특성이 알려져 있고 형태적 특징으로 상품성을 판별할 수 있는 인간전문가가 거의 없는 것이 실정에서 약용성분의 함량과 형태적 특성간의 상관관계를 바탕으로 상품성을 진단할 수 있는 영상모니터링 시스템의 개발 및 도입은 일반 작물에 비해서 더 생산성 증대 효과가 클 것으로 기대되었다.
 - 따라서 작물의 생육조건 및 단계와 개별적으로 이온을 측정할 수 있는 센서 기술을 확립하여 EC기반의 양액 관리가 아닌 이온별 양액 농도 관리 및 작물 생육 관리를 수행할 수 있는 영상 기반 생체중 공간 맵핑 시스템의 개발이 필요하였다.
- 국내 관련 기술 수준 및 시장 현황
 - 최근 KIST 강릉분원에서는 영상 시스템을 통해 온실 재배 중인 토마토의 생육 상태를 분석하

여 식물을 파괴하지 않고 식물의 생리상태 및 질병상태 등을 자동으로 분석하여 작물 재배 및 관리의 편의성을 증대시킬 수 있는 기술을 보고하였다.

- 서울대학교 연구팀에서는 단기간 동안 이온선택성전극을 기반으로 순환식 수경재배 환경에서 상추 재배 양액 내 질산, 칼륨, 칼슘 이온 농도 균형을 유지하는 기술을 개발하여 보고하였다 (Jung et al., 2019).

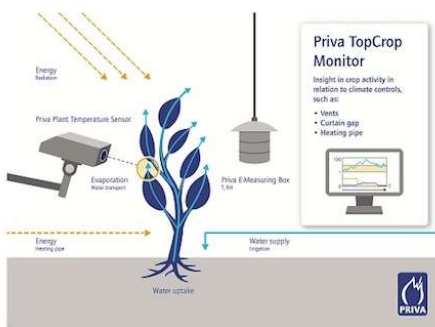


<이온센서 기반의 수경재배 재사용 양액 내 이온 균형 유지 (Jung et al., 2019)>

- 그러나 현재까지 양액 내 주요 이온들을 전반적으로 관리하는 기술의 도입 및 활용은 이루어지지 않은 실정으로 식물공장 환경에서 장기간 사용되는 재사용 양액 내의 이온 불균형이 심화되는 문제가 있어 이를 측정하고 관리할 수 있는 기술 개발이 필요하였다.

○ 해외 관련 기술 수준 및 시장 현황

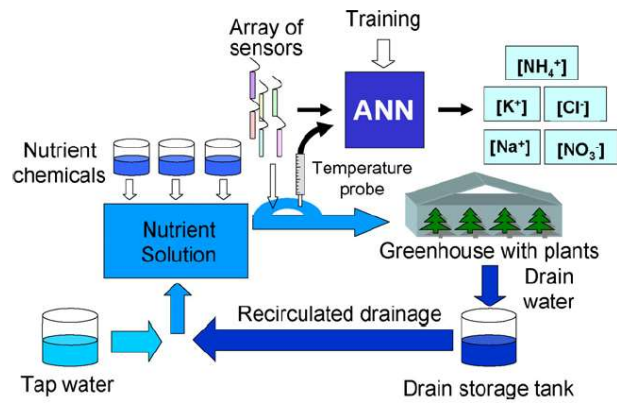
- 네덜란드 PRIVA사의 경우 작물의 생육상태와 환경을 모니터링하고 일중 작물에 필요한 수준에 맞는 양분상태로 관리함으로써 양분 투입을 최적화하고 생산성을 증가시킬 수 있는 플랫폼을 개발하여 활용하고 있음
- 네덜란드 HortiMax의 경우 CroopView 시스템을 도입하여 생산자로 하여금 특정 위치의 작물에 대해 실시간으로 영상을 수집 및 상태를 분석하여 제공함으로써 작물 관리의 편의성을 높임



<(좌) PRIVA 생육 모니터링 시스템 (우) HortiMax CropView 시스템>

- 스페인 바르셀로나 대학 연구팀에서는 이온선택성전극과 인공지능망 기법에 기반하여 양액 내 암모늄, 칼륨, 나트륨, 염소, 질산 이온을 측정하여 수경재배 양액 내 개별이온 농도 측정의 가능성을 보였으나 지속적인 측정에서 생기는 드리프트에 의한 문제점을 발견하여 이를 보완하기

위한 기술 개발의 필요성을 보고하였음 (Gutierrez et al., 2007).



< 수경재배 재사용 양액 내 이온 농도 측정 시스템 개요도 (Gutierrez et al., 2007)>

- (기술적, 산업적 제약) 이온 모니터링 기술은 상용화되어 시장에 출시되어 있으나, 고농도의 여러 이온들이 동시에 존재하는 수경재배 농가 현장과 같은 가혹 사용조건에서 성능의 유지 및 관리하는데 기술적 제약이 존재하며, 또한 단일 비료 농축액 내에서도 양이온과 음이온이 서로 짝지어져 있기 때문에 특정 이온 성분만을 공급하기 어려워 불필요한 이온 성분이 따라 들어가는 것을 최소화하기 위한 양분 관리 알고리즘의 개발이 시급한 실정임

1-3. 연구개발 범위

○ 연차별 연구 범위와 관련 연구 내용은 다음과 같다.

구분	연구개발목표	연구개발 내용 및 범위
1차 년도 (2019)	양액 내 주요 개별 이온농도 센서 및 센서 관리 기술 개발	- 양액 측정 센서 (EC, pH, Ca, NO ₃ , K 등) 적용 - 이온센서 자동 관리 기술 구현
	순환식 수경재배 양액 내 개별 이온 농도 제어기 개발	- 주요 이온 성분 보충을 위한 개별 염 농축액 주입 시스템 구성
	영상 모니터링 시스템 구축	- 작물 생육 상태 모니터링을 위한 영상 시스템 구성 요소 선발
2차 년도 (2020)	양액 내 개별 이온농도 균형 유지 시스템 적용	- 측정 이온 농도 기반 적정 범위값으로 농도 제어가 가능한 시스템 구현 - 재배 배드 적용 및 사용 성능 평가
	양액 내 개별 이온농도 균형 유지 시스템 개선	- 측정 이온 외 주요이온에 대한 관리 알고리즘 설계 식물공장 적용에 대한 시스템 피드백 및 개선
	식물 생육 영상 분석 시스템 적용	- 영상 자동 수집 및 분석 시스템 구성

2. 연구수행 내용 및 결과

2-1. 양액 내 주요 개별 이온농도 센서 및 센서 관리 기술 개발

○ 센서 선발

양액 내 주요 이온 성분인 NO_3 , K, Ca 측정을 위한 센서로 Nernst equation (식 1)에 기반한 이온선택성전극 (Ion selective electrode, ISE)를 선발하였다. 이온선택성전극은 용액 속의 특정 이온에 대해 선택적으로, 그리고 정량적으로 반응하여 이온 활동도에 따라 일정한 수준의 전위를 형성하는데, 서로 농도가 다른 용액 사이에 선택적으로 반응하는 막전극이 있을 때, 두 용액의 서로 다른 활동도에 의해 막 양쪽 표면에서는 서로 다른 막전위를 형성하게 되며 이에 의한 전위차를 통해 미지의 용액 내의 측정 이온을 정량적으로 측정할 수 있다. 이온선택성전극은 특히 통상의 이온 크로마토그래피 또는 유도결합플라즈마법과 같은 측정 방법에 비해 시료 전처리나 특수 용기 같은 것 없이 간단하게 사용할 수 있으며 분석하고자 하는 이온에 대해 직접적인 측정이 가능하고 상대적으로 저렴하면서 작은 부피로 구현이 가능하고, 일반적으로 사용되는 양액 내 주요이온농도들에 대해 측정 가능한 적용 범위를 가지고 있어 활용하고자 하는 목적에 부합된다고 판단하였다.

$$E = E_o + \frac{RT}{Z_A F} \log [a_i] \quad (\text{식 1})$$

E_o = Cell constant (mV)

E = Cell potential (mV)

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

T = Temperature (K)

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

Z_A = Charge number of response ion

a_i = Activity of response ion

○ 센서 멤브레인 조성

문헌 탐색을 통해 논문에서 보고된 감지물질 및 조성들 중 양액 수질 범위에 적합한 조성들을 선발하여 표 1과 같이 선발하였다.

표 1. K, NO₃, Ca 이온선택성 막 조성표

측정 이온	K	NO ₃	Ca
Ionophore (감지물질)	Valinomycin 2.0%, 4mg	TDDA (Tetradodecylammonium nitrate) 4.0%, 8mg	Calcium ionophore II 1.0%, 2mg
Plasticizer (가소제)	Dos (Bis(2-ethylhexyl) sebacate) 64.7%, 129.4mg	NPOE (2-nitrophenyl octylether) 67.75%, 135.5mg	NPOE 65.6%, 131.2mg
Matrix/Polymer (재질)	PVC (Polyvinyl chloride) 32.8%, 65.6mg	PVC 28.25%, 56.5mg	PVC 32.8%, 65.6mg
Additive (보조물질)	KTpClPhB (potassium tetrakis (p-chloroph- enyl)borate) 0.5%, 1mg	-	-
Inner filling solution (내부충진용액)	0.01M KCl	0.01M NaNO ₃ +0.01M NaCl	0.01 M CaCl ₂
Conditioning (전극막 관리 용액)	0.01M KCl	0.01M NaNO ₃	0.01M CaCl ₂
용매	dissolved in tetrahydrofuran(THF) 2ml and stirred		
참고문헌	Knoll et al., 1994	Jung et al., 2015	Asadnia et al., 2017

표 1을 기반으로 한 전극의 제작은 아래와 같이 수행되었다.

- 1) 우선 표 1에 나타낸 조성으로 시약들을 혼합한 뒤 THF에 녹인 이온선택성 막 용액을 직경 24 mm의 유리 링에 부어 하루 동안 건조하여 막을 제작
- 2) 이후 건조 제작된 이온선택성 PVC 막을 직경 6 mm의 크기로 펀치해서 외경 8mm, 길이 52mm에 내경 3mm의 주문제작한 PVC 전극몸체 끝단에 접착
- 3) 전극 내부에는 은/염화은(Ag/AgCl)전극 및 각 이온선택성 막에 적합한 내부 충전 용액을 주입하고 전극의 안정화를 위해 사용 전 표1에 나타낸 전극막 관리 용액에 담금

선발 상용 전극 및 제작 전극에서 발생하는 기전력 (EMF)을 측정하기 위한 기준전극으로는 Orion사의 이중접합전극 기준전극 (Cat.900200, Orion, USA)을 사용하였으며, 아래 그림 1에 제작된 이온선택성전극 및 기준전극을 나타내었다.

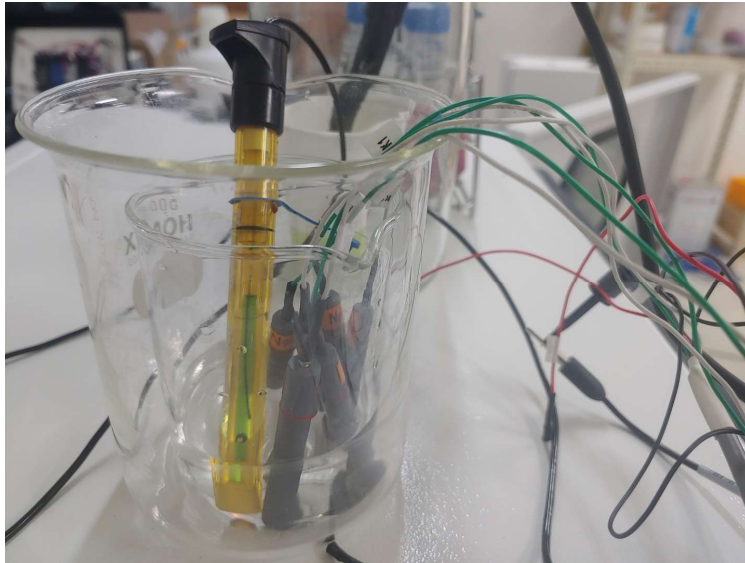


그림 1. 제작된 이온선택성전극 및 기준전극

○ 이온센서의 양액 환경 적용성 시험

선발한 이온센서에 대해 센서의 드리프트 보상 및 센서 어레이 적용에 따른 전극 편차 보정을 위해 Kim et al. (2007)이 제시한 2점 정규화 보정을 적용하였다 (그림 2). 간략히, 2점 정규화는 농도값을 알고 있는 두 개의 용액이 주어졌을 때, 저농도 (X1) 용액에 대해 얻은 전극 신호 (Y1o) 와 고농도 (X2) 용액에 대해 얻은 전극 신호 (Y2o)에 대해 사전에 다수의 용액들로 획득하여 정의한 이온센서별 기준식에 수치를 대입하여 얻은 Y1n, Y2n을 이용하여 보정 감도비 및 오프셋을 결정하고 이를 샘플에 대해 취득한 신호에 적용하여 보정된 신호를 기준식에 대입함으로써 수행 된다.

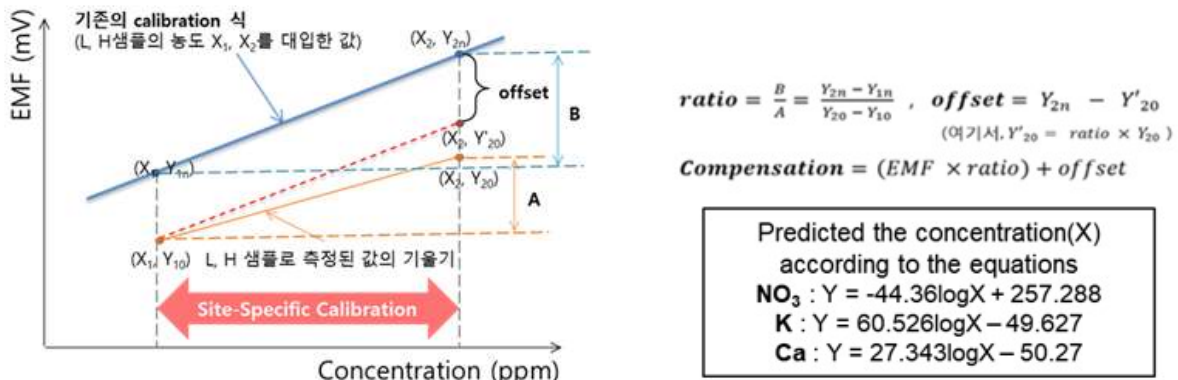


그림 2. 2점 정규화 보정식의 원리 (좌) 및 기준식 (우)

양액 환경에서의 선발한 조성에 기반하여 제작한 이온선택성전극들의 적용성 평가를 위해 먼저 표2에 나타난 것과 같이 야마자키 상추 양액 조성 (1982)을 기반으로 NO_3 기준 농도 50~1,000 mg/L, K 기준 농도 40~500 mg/L, Ca 기준 농도 20~300 mg/L 수준으로 양액 샘플을 제작하여 나이섬 (National Instrumentation Center for Environmental Management [NICEM], Seoul, Korea)에 표준분석기를 활용한 농도 측정을 의뢰하고 이에 의해 결정된 실제값 대비 이온센서에 의한 농도 측정값을 아래 식 (2)와 같이 비교하여 측정 정확도를 평가하였다.

$$\text{측정 상대오차 (\%)} = \frac{|\text{실제농도} - \text{측정농도}|}{\text{실제농도}} \times 100 (\%) \quad (\text{식 2})$$

표 2. 야마자키 상추 양액 조성표 (1982)

Yamazaki's lettuce nutrient solution		Concentration (mg/L in DI)
A	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	236
	Fe-EDTA	16
B	KNO ₃	404
	MgSO ₄ · 7H ₂ O	123
	NH ₄ H ₂ PO ₄	57
	H ₃ BO ₃	16
	MnCl ₂ · 4H ₂ O	0.72
	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0.09
	CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.04
	(NH ₄) ₂ MoO ₄	0.01

측정 결과, 표준분석법으로 분석된 이온 농도 대비 NO₃, K, Ca 전극의 양액 측정값은 표 3 및 그림 3과 같이 나타났다.

표 3. 이온 센서 양액 측정 결과 (단위: mg/L)

양액 샘플	NO ₃				K				Ca			
	실제값	rep1	rep2	rep3	실제값	rep1	rep2	rep3	실제값	rep1	rep2	rep3
1	46.41	50.07	49.19	52.7	25.12	29.3	20.14	17.22	15.92	15.18	13.25	14.2
2	92.82	100.53	89.48	94.03	50.24	48.85	50.8	50.8	31.84	30.96	31.1	31
3	284.6	263.6	307.83	293.25	125.6	133.27	124.52	119.68	78.54	79.3	78.6	79
4	569.2	554.38	571.8	633.6	251.2	234.7	254.9	223.1	157.1	range out	-	-
5	1138.4	1131.8	1342.6	1392.8	502.4	486.2	377.3	428.6	314.2	range out	-	-
평균측정오차 (%)	6.1±3.7				9.2±5.9				4.6±4.4			

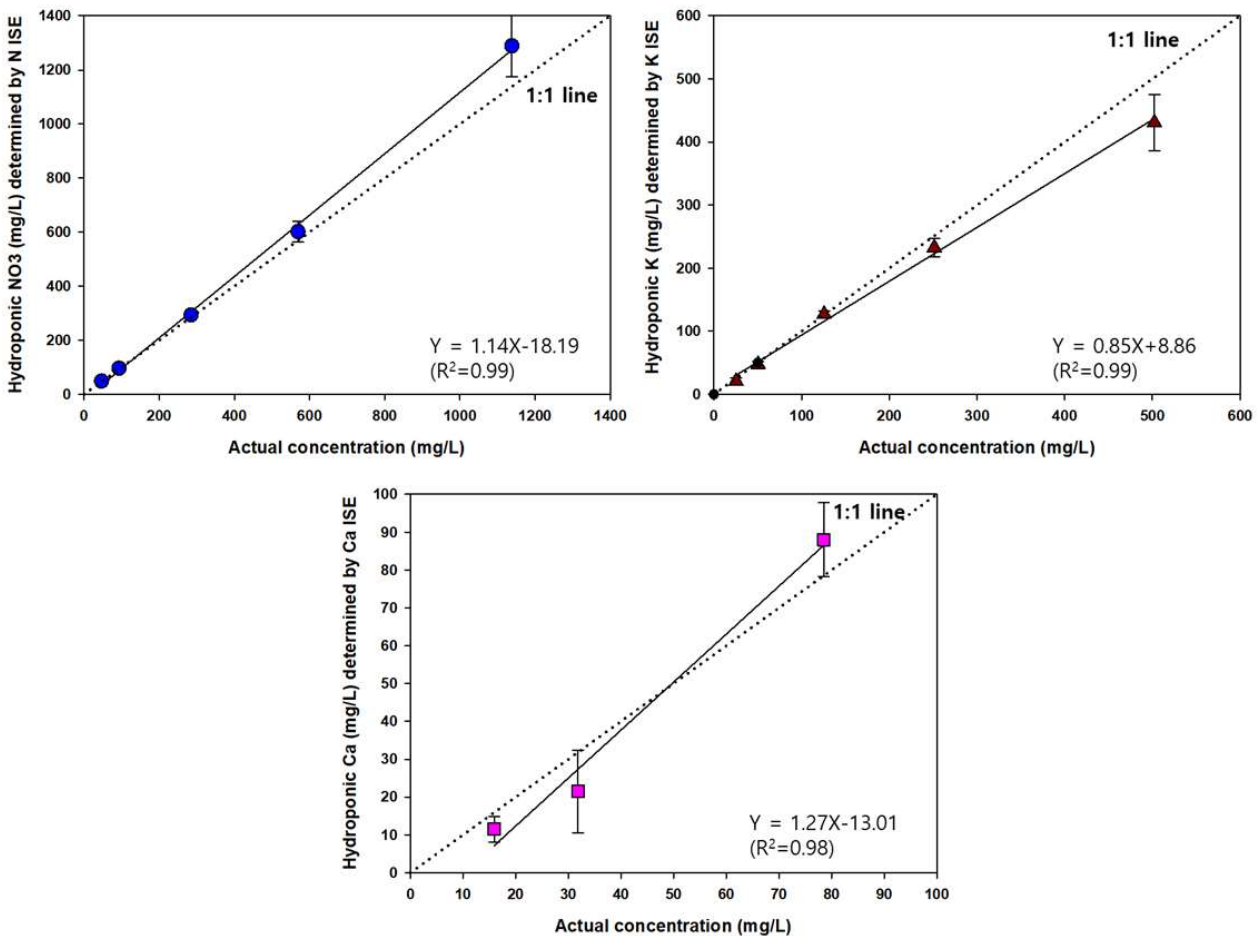


그림 3. 표준분석법에 의한 이온별 농도값 대비 제작 이온센서에 의한 농도 측정값: (a) NO₃, (b) K, (c) Ca. 에러바는 3반복 측정에 대한 표준편차를 의미함.

측정 비교 결과에서, NO₃와 K 전극의 경우 표준분석법 대비 결정계수 (R^2)가 0.99 이상에 기울기가 1에 가까운 선형회귀식을 보여 높은 선형성, 즉 양액 측정 성능이 우수함을 확인하였으며 이때 측정 정확도 오차는 각각 $6.2 \pm 3.7\%$, $9.2 \pm 5.9\%$ 수준이었다. Ca의 경우 150 mg/L 이상의 높은 농도 대역에서는 낮은 예측값을 보였으나 일반의 양액이 갖는 Ca 농도 범위인 100 mg/L 아래의 농도에 대해서는 높은 정확도와 (오차 <5%) 선형성 ($R^2=0.98$)을 보여 적용성을 기대하였다. 다만 상용화 수준에 이르기까지는 전극 생산 공정의 자동화가 요구되나 이를 수행하기 위한 기반 시설을 갖춘 곳이 없어 시스템 운용 및 테스트에서는 측정하고자 하는 이온인 NO₃, K, Ca에 대해 범용성을 가지고 제작된 해외 업체의 제품들을 선별하여 혼용하였다 (표 4).

표 4. 선발 상용 전극

측정 이온	K	NO3	Ca
제조사	Orion	Orion	Orion
제품 번호	9319BN	9307BNWP	9320BN
측정범위	$1 \times 10^{-6} - 1.0 \text{ M}$	$7 \times 10^{-6} - 1.0 \text{ M}$	$5 \times 10^{-7} - 1.0 \text{ M}$

○ 이온센서의 양액 환경 내구성 시험

전극들의 사용에 있어 또 한가지 중요한 성능 지표 중 하나는 센서의 내구성, 즉 수명이다. 일반적으로 전극들은 사용시간이 늘어날수록 단순히 신호 드리프트가 생기는 것 이외에도 멤브레인의 내구성이나 측정 샘플 내 이온들의 간섭 및 축적, 전극 바디의 누수 등에 의하여 감도가 떨어지는 것이 알려져 있으며, 감도가 일정 수준 아래로 떨어지면 예측 성능이 급격히 떨어지게 된다. 이에 개발 및 선발 전극을 지속적으로 용액에 담가놓고 2-3일 간격으로 감도 및 드리프트 경향을 살펴보았다.

전극은 각 전극을 1개씩 사용하였으며 측정 용액으로는 0.01M KNO₃ 용액 (Low)과 0.1M KNO₃ 용액(High)을 준비하여 측정하였으며 측정하지 않을 때에는 0.01M KNO₃ 용액에 지속적으로 담가두었다. 이러한 실험을 3개월 동안 진행하였으며 그 결과는 다음 그림 4와 같았다. 결과에서 초기 네른스트 이론 기울기 값인 60 mV/dec의 기울기 크기가 시간이 경과함에 따라 점차 줄어드는 것을 확인할 수 있었으며 3개월 경과 후에는 47 mV/dec 정도의 기울기가 나타나 감도가 약 78.3% 수준으로 감소하였음을 확인하였다. 그러나 농도 변화에 대응하여 여전히 신호 세기의 변화가 나타난다는 점, 그리고 신호의 재현성이 있다는 점에서 선발 전극을 사용할 때 기대할 수 있는 수명은 3개월 이상일 것으로 판단하였다.

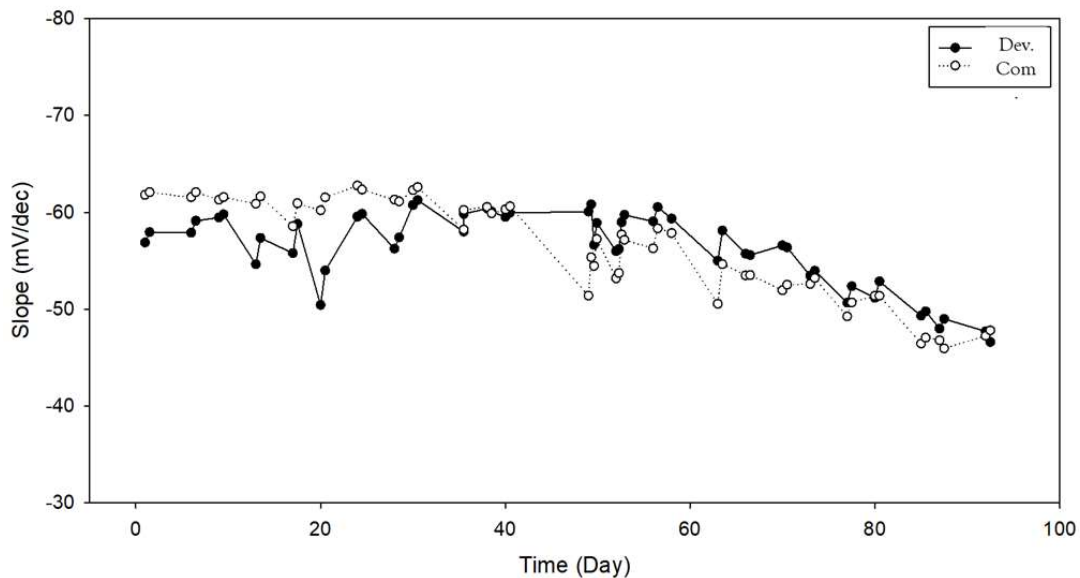


그림 4. 양액 조건에서 전극 감도 변화. Dev.: 개발 전극, Com: 상용 오리온 사 전극.

2-2. 순환식 수경재배 양액 내 개별 이온 농도 제어기 개발

○ 수경재배 양액 조성 분석 및 2점 정규화 용액 조성 도출

개발 시스템을 적용할 주관기관 (넥스트온)에서 활용 중인 수경재배 양액의 조성은 아래 표 5와 같으며 이때 양액 1배액의 농도는 Ca: 100 mg/L, K: 311.2 mg/L, NO₃: 930 mg/L 수준으로 나타났다.

표 5. 넥스트온 수경재배 양액 조성표 (1배액 기준)

넥스트온 양액 조성		Concentration (mg/L in DI)
A	5Ca(NO ₃) ₂ ·NH ₄ NO ₃ ·10H ₂ O	540
	KNO ₃	286.67
	NH ₄ NO ₃	40
	Fe-EDTA	21.67
	KNO ₃	440
B	KH ₂ PO ₄	105
	MgSO ₄ ·7H ₂ O	136
	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	232
	H ₃ BO ₃	2.94
	MnSO ₄ ·H ₂ O	2
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.87
	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.16
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.01	

투입되는 비료의 조성과 양액의 이온 농도를 고려하여 표 6과 같이 2점 정규화 용액 중 고농도에 해당하는 용액의 조성을 결정하였으며, 저농도 용액은 고농도 용액을 10배 희석하여 제작하였다. 제작되는 2점 정규화 용액은 Ca: 30-300 mg/L, K: 50-500 mg/L, NO₃: 153-1532 mg/L의 농도 범위를 갖게 되며 이는 사용 중인 수경재배 양액의 이온 농도 범위에 대해서 감지 가능한 영역대를 포함하게끔 설계되었다.

표 6. 2점 정규화 용액 조성 (고농도 1배액 기준)

2점 정규화 용액 (고농도) 조성		Concentration (mg/L in DI)
A	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	1768
	KNO ₃	21.055
	Fe-EDTA	117
B	KCl	867.11
	NH ₄ H ₂ PO ₄	57.53
	MgSO ₄ ·7H ₂ O	246.48
	H ₃ BO ₃	1.43
	MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.905
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.11
	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.01
	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.01

○ 개별 이온 농도 관리를 위한 비료종 선발 및 투입량 결정 알고리즘 개발

활용 중인 수정재배 양액의 비료 조성을 기반으로, 측정 항목인 Ca, NO₃, K와 주요 양액 성분인 Mg, P에 대해 양액 관리를 수행할 수 있는 염은 5Ca(NO₃)₂·NH₄NO₃·10H₂O, KNO₃, NH₄NO₃, MgSO₄·7H₂O, Mg(NO₃)₂·6H₂O, KH₂PO₄가 있는데 이 중 K와 P에 대해서 독립된 이온 보충 수행이 가능하도록 비료로 활용 가능한 NH₄H₂PO₄와 K₂SO₄를 KH₂PO₄ 대신 이용하고, NH₄NO₃와 중복되는 조합을 가진 5Ca(NO₃)₂·NH₄NO₃·10H₂O 대신 Ca(NO₃)₂·4H₂O을 이용하여 사용 중인 수정재배 양액에 대한 주입 비료를 결정하였다. 이때 선발된 비료에 의한 이온 보충량은 아래 관계식과 같은 관계를 갖는다 (그림 5).

$$\begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} \text{Ca} \\ \text{K} \\ \text{NO}_3 \\ \text{Mg} \\ \text{H}_2\text{PO}_4 \end{array} \right] \\ \text{이온 주입량} \end{array} = \begin{array}{c} \left[\begin{array}{cccccc} \frac{40.1}{236.15} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{39.1}{101.1} & 0 & \frac{78.2}{174.26} & 0 & 0 \\ \frac{124}{236.15} & \frac{62}{101.1} & 0 & 0 & 0 & \frac{124}{256.4} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{24.3}{246.5} & \frac{24.3}{256.4} \\ 0 & 0 & \frac{97}{115.03} & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \\ \text{이온 성분비} \end{array} \begin{array}{c} \left[\begin{array}{c} \text{Ca(NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O} \\ \text{KNO}_3 \\ \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4 \\ \text{K}_2\text{SO}_4 \\ \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} \\ \text{Mg(NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} \end{array} \right] \\ \text{양분 투입량} \end{array}$$

그림 5. 선발 비료와 주요 이온 성분 간의 상관관계도

그림 5에 나타난 투입 양분과 주입되는 이온 성분 간의 상관관계를 기반으로, 다음과 같이 보충량 결정식을 구성하였다. 이때 투입되는 염 내에 이온 간 상관관계가 존재하므로 한쪽 이온이 부

족하더라도 결속된 다른 이온은 과다하게 공급될 수 있으며, 이를 관리되는 양액의 초기성분 수준을 고려하여 이온의 우선 순위를 $Ca > NO_3 = K$ 로 부여하였고, Mg와 P의 경우 독립보충이 가능하게 설계하여 재배 중 흡수되는 Ca와 NO_3 와의 관계에 기반한 비례식으로 투입되도록 설계하였다. 또한, 실제 비료 주입의 경우 고체 상태로 이루어지는 것이 아닌 액비로 이루어지기 때문에 이에 대한 농축액의 농도와 이를 운반하는 펌프의 수송 능력을 고려하여 펌프의 구동 시간으로 환산하도록 식을 설계하였다. 전체적인 계산 과정은 다음과 같다 (그림 6).

먼저, 이온센서를 이용하여 사용 후 회수된 양액 내 NO_3 , K, Ca의 농도를 측정하면 재배자가 설정한 최적 양액 조성으로 이를 다시 조정하기 위해 필요한 NO_3 , K, Ca의 양을 계산한다. 이때, Ca 필요량을 기반으로 $Ca(NO_3)_2$ 농축액의 주입량을 계산한다. Ca의 경우 NO_3 와 결합된 형태 외의 비료가 없으므로 가장 우선적으로, NO_3 초과 여부와 상관없이 투입한다. $Ca(NO_3)_2$ 농축액 투입에 의해 들어간 NO_3 량을 고려했을 때, KNO_3 의 주입이 필요할지를 판단한다. 이후 NO_3 의 추가투입이 필요하여 KNO_3 를 주입하였을 때 K의 공급량이 필요한 K양보다 많은지 진단하여 다음과 같이 두 가지 경우로 나누어 연산을 수행한다.

- K 보충 필요량보다 적은 경우:

추가적인 K 투입을 위해 K_2SO_4 의 필요량을 먼저 계산한다. 다음에 NO_3 필요량에 기반하여 P의 비례투입을 위해 요구되는 $NH_4H_2PO_4$ 공급량을 계산한다. 마지막으로 Ca 필요량에 기반하여 Mg의 비례투입을 위해 요구되는 $MgSO_4$ 공급량을 계산한다. 이 경우 $Mg(NO_3)_2$ 는 사용되지 않는다.

- K 보충 필요량보다 많은 경우:

KNO_3 주입에 의한 K 초과량을 최소화하기 위해 먼저 Ca 필요량에 기반하여 Mg의 비례투입을 위해 요구되는 $Mg(NO_3)_2$ 를 공급한다. $Mg(NO_3)_2$ 에 의해 보충된 NO_3 양을 고려하여 KNO_3 공급량을 재계산한다. 마지막으로 KNO_3 공급에 의해 공급된 K양을 고려하여 K_2SO_4 공급량을 계산한다. 이 경우 $MgSO_4$ 는 사용되지 않는다.

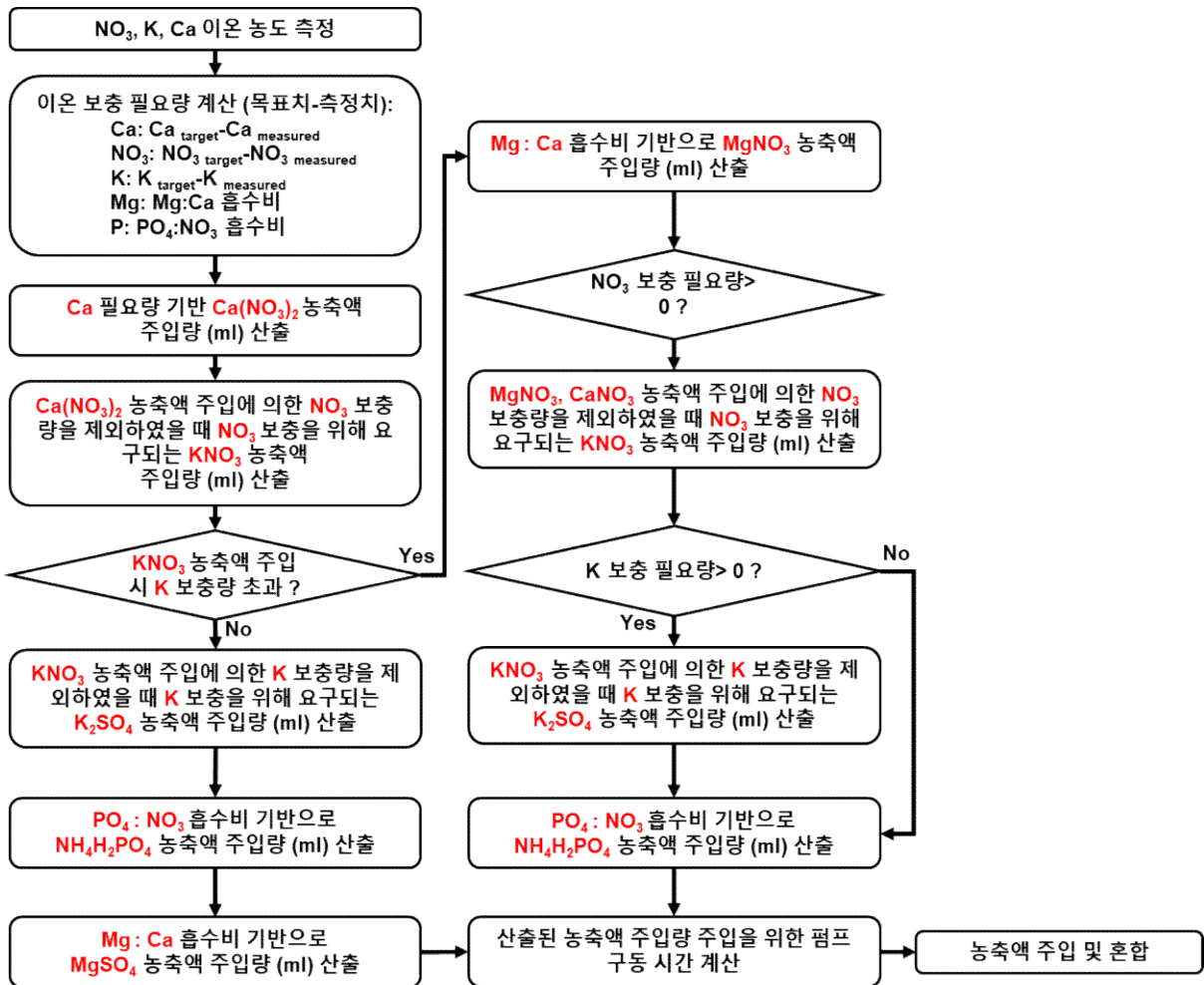


그림 6. 염 보충 계산식

○ 이온 센싱 기반 양액 정밀 관리 시스템 구성안 수립

수립한 염 보충량 계산식을 적용하여 실제 양액 관리를 수행하기 위해서는 농축액 외에도 현재의 이온 농도를 측정하기 위한 동작 및 이용하고 있는 양액의 총량 확인 등의 작업이 수반되어야 하며 이러한 작업은 작물 재배베드에 양액을 순환시키는 일과 충돌하지 않도록 설계되어야 한다. 이에 아래와 같이 양액 내 개별이온농도를 측정하고 관리하여 농축액을 주입하는 동작 순서도를 구성하였다 (그림 7).

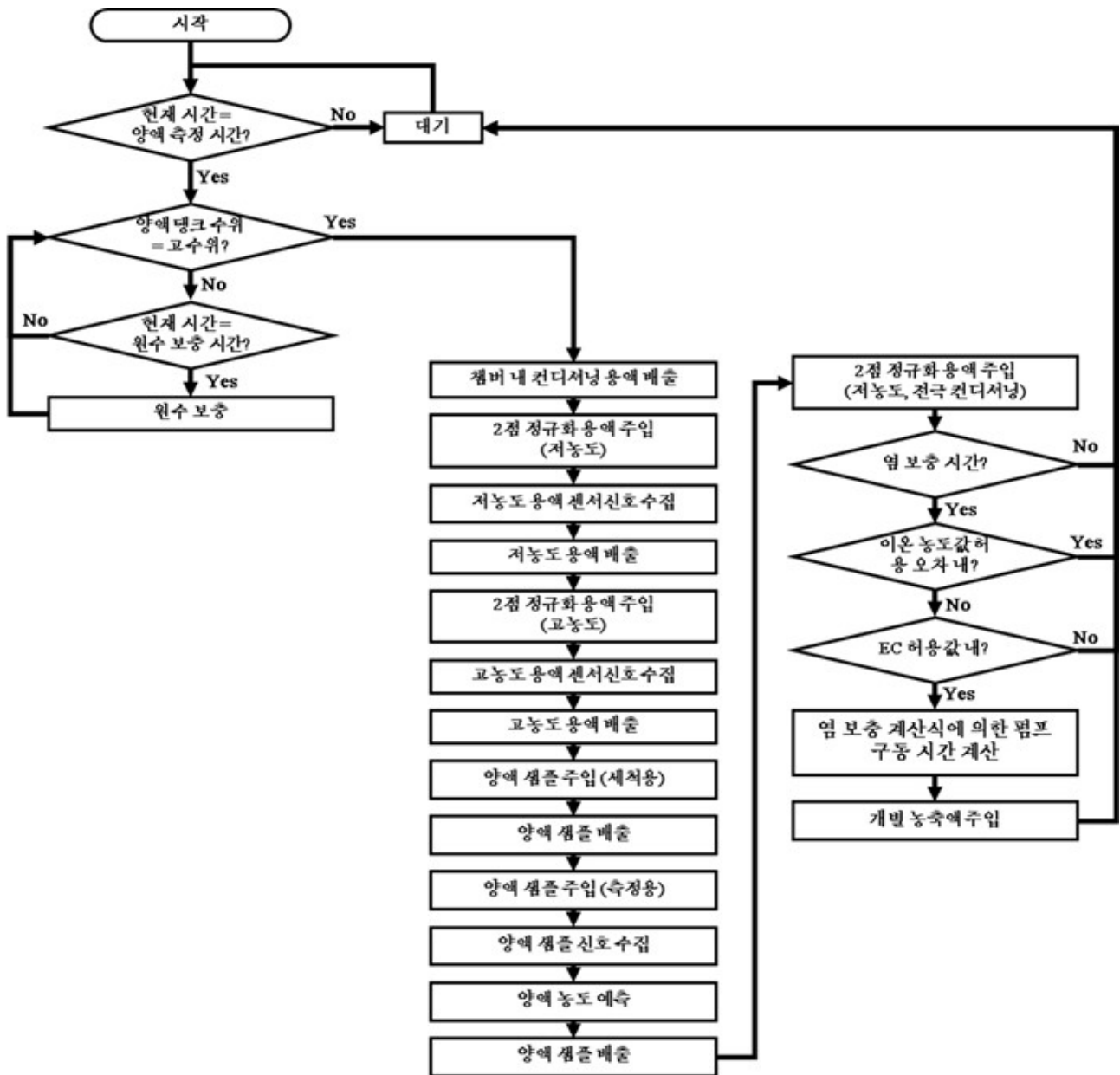


그림 7. 개별이온농도 기반 정밀 양액 관리 시스템 동작 순서도

구성안에서는 첫 번째 단계로 양액 혼합탱크에 설치된 수위센서를 기반으로 설정 수위까지 원수 보충을 수행한다. 이후 이온 농도 상태 분석을 위하여 이온 성분 분석을 수행하는데 이때 센서 챔버에는 센서 측정 대기를 위하여 2점 정규화 용액 중 저농도 용액이 채워져 있는 상태이므로 이를 배출하고, 신선한 상태의 2점 정규화 용액 중 저농도 용액을 다시 채운 뒤 60초 동안 센서 안정화를 거친 후 센서 신호값을 수집한다 (Low EMF). 이후 저농도 용액을 배출한 뒤 2점 정규화 용액 중 고농도 용액을 챔버에 채우고 마찬가지로 60초 동안 센서 안정화를 거친 후 센서 신호값을 수집한다 (High EMF). 측정 후 고농도 용액을 배출한 뒤 양액 탱크에서 챔버로 양액을 샘플링하여 세척 후 배출한다. 그 뒤 두번째로 양액을 샘플링하여 양액성분을 측정한다 (Sample EMF). 측정된 양액 성분값을 기반으로 앞서 개발한 염 보충식 계산을 통해 농축액별 펌프 구동 시간을 계산 후 릴레이 구동에 의해 각 펌프별 구동 시간 동안 동작을 수행하여 양액을 재조성한다. 이후 전극의 표면이 마르는 것을 방지하기 위해 2점 정규화 용액 중 저농도 용액을 센서 챔

버에 주입한 뒤 대기 상태로 돌아가며, 해당 대기 시간 동안에는 혼합탱크에 적용되어 있는 임펠러 또는 혼합기를 이용하여 양액 내 성분 균질화를 수행한다. 이후 혼합된 양액은 주어진 시간이 되면 작물을 재배하는 베드로 공급하는 것으로 관리 사이클 1회를 마감하도록 설계되었다.

○ 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 시작기 하드웨어 설계 및 제작

양액 제어기는 다습하고 주변부의 양액 및 원수에 의한 영향을 받기 쉬운 식물공장 환경에서 운용되므로 본 장비는 습기와 물로부터 내부 센서 및 기기들을 보호할 수 있도록 치밀하게 밀폐되도록 할 수 있어야 하며 센서신호수집부 및 센서 챔버, 임베디드컴퓨터 모듈 등을 내부에 적재하였을 때 측정과 이동, 운용을 안정적으로 할 수 있어야 하고 제어 모듈 및 전원을 공급하는 전장부가 요구되었다. 이에 본 과제에서는 해당 용도를 충족시킬 수 있도록 외부 설계 의뢰를 통하여 양액 제어기 외함 및 임베디드 컴퓨터 모듈화를 수행하였다. 구성된 양액기 구성은 그림 8과 같다.

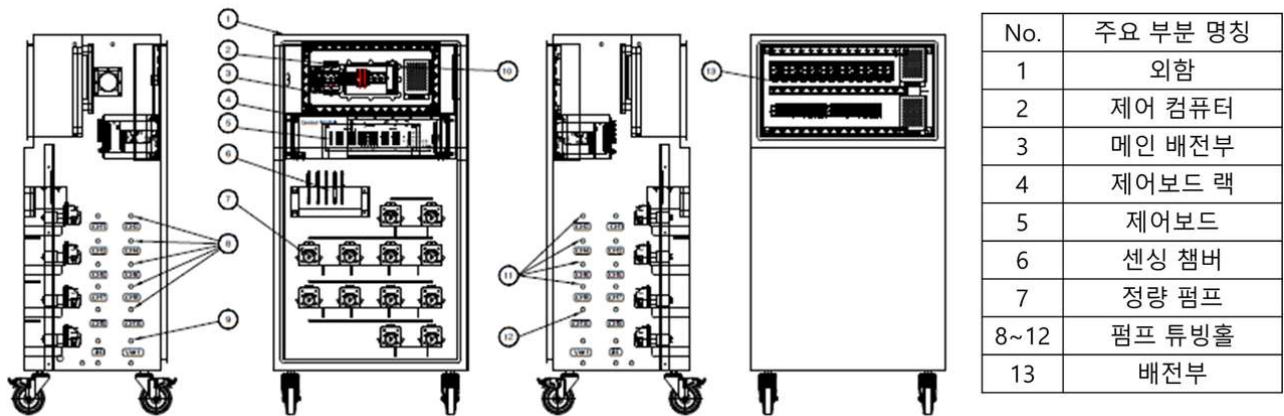


그림 8. 이온 센싱 기반 순환식 양액 관리 시스템 구조도

또한 이온선택성전극의 경우 화학적 반응에 기반한 패시브 센서로 발생 기전력이 작고 외부 영향을 쉽게 받기 때문에 신호처리회로가 필수적으로 요구된다. 이에 우선 Working전극과 Reference전극 사이의 갖고 있는 전위차 값을 잃게 되는 것을 방지하기 위해 입력임피던스가 큰 op-amp를 선정하였으며, 입력단에 1차 LPF 필터를 구성하여 60Hz노이즈가 유입되는 것을 방지하였고, 이후 원신호 (Raw Signal)에 최대한 영향을 주지 않고 노이즈를 제거하기 위해서는 2차 Active Salley-key 필터를 그림 8과 같이 구성하여 적용하였다 (Q-factor: 0.71, Gain: 1 V/V (0 dB), Allowable PassBand Ripple: 1 dB, Passband Frequency: 16.4Hz, Corner Frequency Attenuation: -3 dB).

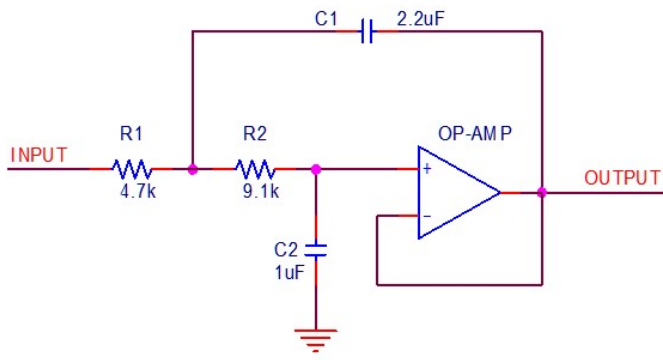


그림 9. 2차 Sallen-key filter topology (좌) 및 실제 제작 구성된 PCB 회로 필터 (우)

센서 회로에 대해, 동작 여부 및 신호 수집 등의 처리를 위해서는 Atmel사의 AVR계열의 디바이스를 MCU(Micro Control Unit)를 선정하였다. 이 디바이스에는 GPIO, USART, SPI, TWI, Timer, PWM 기능뿐만 아니라 EEPROM과 Flash, SRAM이 내장된 One-Chip구조이므로 외부에 별도의 주변소자 (EEPROM, SRAM 등등) 가 필요 없어 복잡한 시스템이 아닌 포터블 또는 핸드헬드 형태의 소형장치에 적용하기에 적합하여 본 센서 측정모듈에 적용하였다 (그림 10).

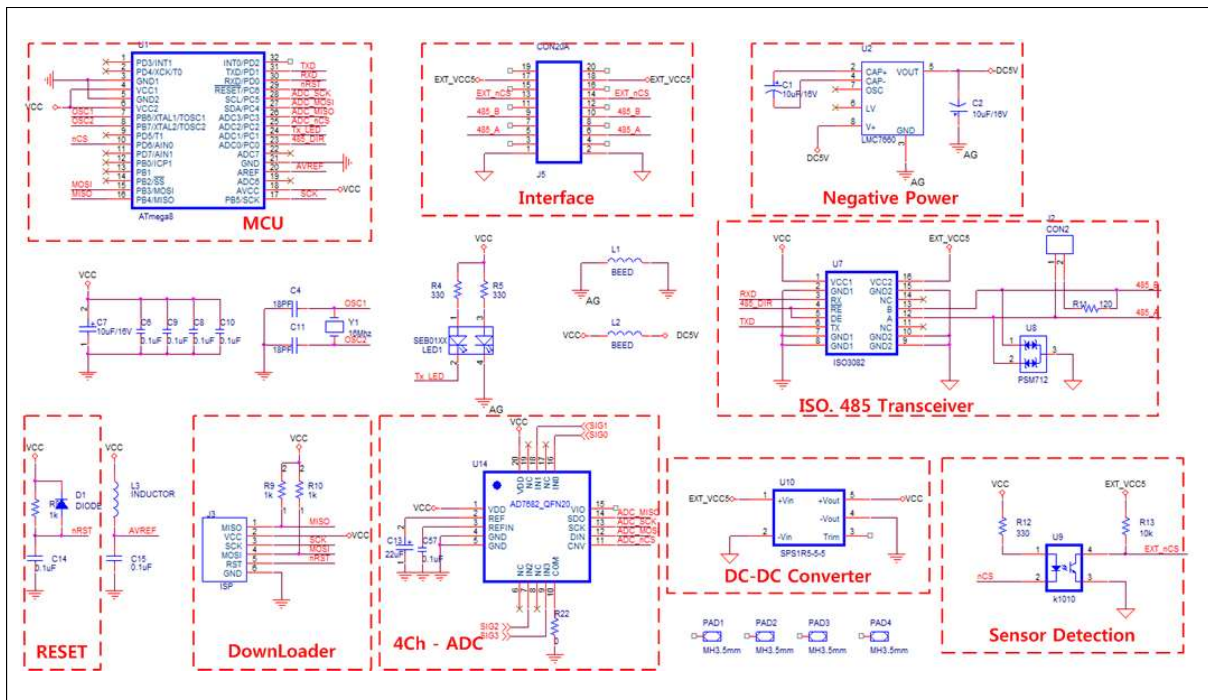


그림 10. Sensor Module MCU

펌프의 제어 및 관리를 위한 릴레이 제어 보드의 경우, 2점 정규화 용액용 2개, 양액 샘플링용 1개, 샘플 배수용 펌프 1개, 농축액 주입용 펌프 6개로 총 10개의 펌프가 요구되었으며 추가로 수위센서 릴레이 신호에 의한 원수 공급 펌프 1개 및 향후 pH 조절을 고려한 pH용 펌프 1개를 예비로 구성하여 총 12대의 펌프를 제어할 수 있게 설계하였다 (그림 11).

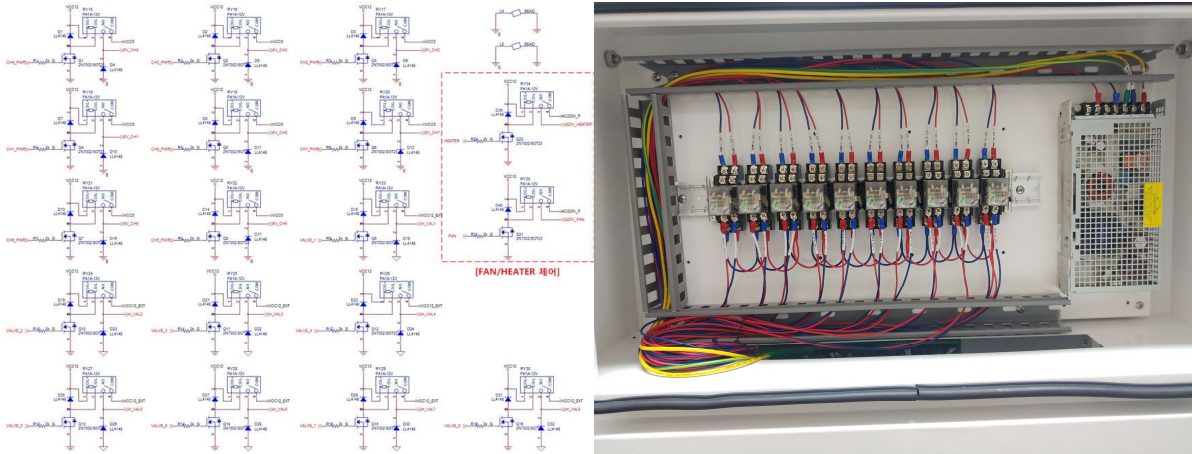


그림 11. 양액 시스템 릴레이 제어부 도면 (좌) 및 실제 적용도 (우)

시스템에 구성된 주요 동작 기능을 체크하여 비정상인 경우 사용자로 하여금 상태 이상을 확인할 수 있도록 알람을 내는 릴레이 알람 회로도 적용하였다 (그림 11). 릴레이가 고장난 경우, 정확한 측정이 되지 않으므로 주로 염이온 제어 밸브나 펌프의 정상동작과 순환펌프, 샘플링 펌프 등등 19가지의 제어요소를 감시할 수 있으며, 그림 12에 나타난 회로 보드는 1채널에 해당하는 것으로, 시스템에는 여분의 릴레이 회로를 포함하여 펌프 릴레이 및 밸브 릴레이 총합 19가지의 제어요소를 감시하기 위해 19개의 모듈을 적용하였다.

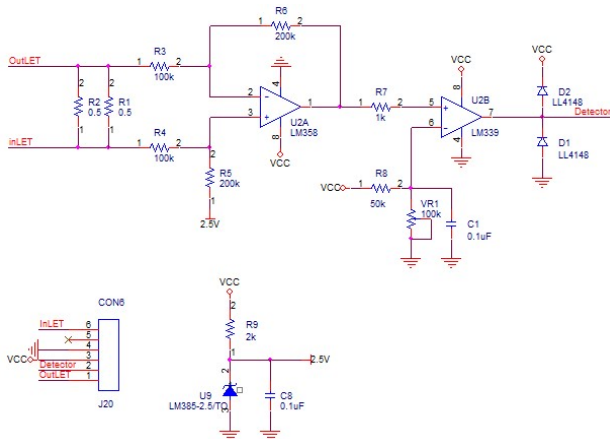


그림 12. Relay 동작감시용 알람 보드

양액 측정을 위한 센서 어레이 구성은 NO₃, K, Ca ISE를 각 3개, EC 1개, 그리고 pH 1개를 적용할 수 있는 어레이 타입으로 설계하였으며 이를 안정적으로 체결할 수 있는 집게형 핀을 선별하여 챔버를 제작하였다 (그림 13).

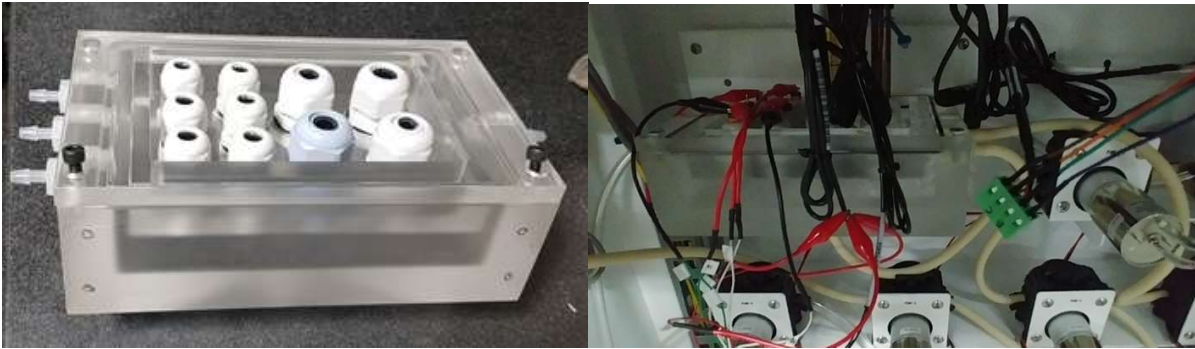


그림 13. 센서 챔버 (좌) 및 센서어레이가 적용된 시스템 내부 장착 사진 (우)

최종적으로 구성된 양액 관리 시스템 구성은 그림 14과 같으며, 시스템의 제원은 표 6에 제시하였다.

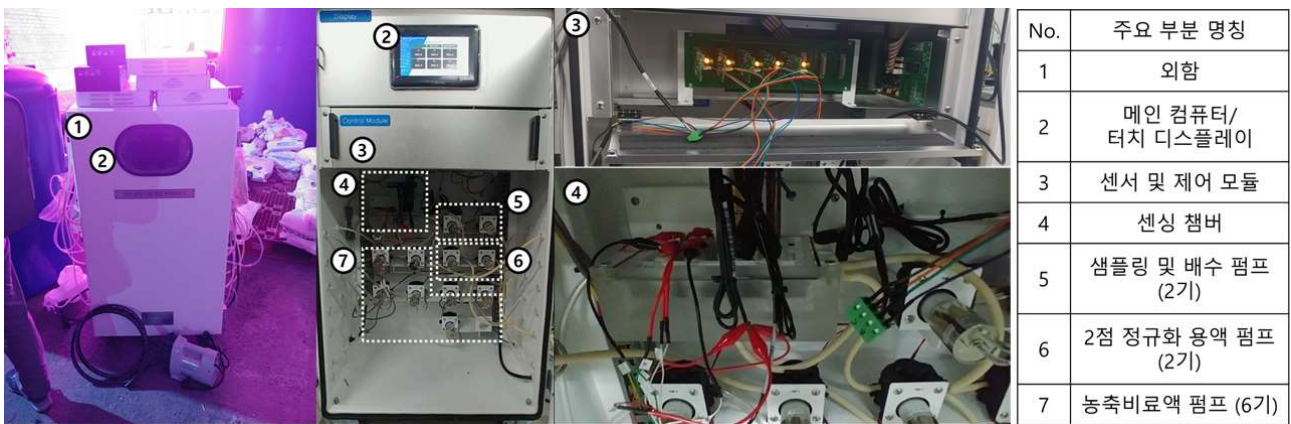


그림 14. 제작된 양액 정밀관리 시스템 시작기 구성

표 7. 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 제원

Component	Specification
MCU	IEC1000 (HNS, Korea)
CPU (WinCE system)	Cortex A8 - 1GHz
Cache	64KB(L1), 512KB(L2)
RAM	514MB(DDR2)
Data slot	SD/SDHC card
Display	Touch/7-inch LCD display
OS	WinCE 6.0
Sampling chamber	Sensor array installment
Sampling & drainage pump (2ea)	Flow rate: 0.525 L/min (15QQ, BOXER, Germany)
Concentrated nutrient solution injection pump (8ea)	Flow rate: 0.525 L/min (15QQ, BOXER, Germany)
Two-point normalization solution pump (2ea)	Flow rate: 0.525 L/min (15QQ, BOXER, Germany)
Water replenishment pump	Flow rate: 20 L/min (PF-065M, WILO, Germany)
Water level sensor	3-pole electrode holder (KFS-ES3, KOINO, Korea)

○ 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 시작기 GUI 화면 구성
 사용자들이 보다 직관적으로 이해하면서 활용하기 쉽도록 터치식 디스플레이와 그래픽유저인터

페이스 (GUI)를 도입하여 시작기의 조작을 수행할 수 있도록 하였다. 먼저, 시스템을 부팅하면 그림 15a와 같이 날짜 및 농도 측정 결과값을 확인할 수 있는 메인화면이 나타난다. 메인 화면 중 MENU 버튼을 누를 경우 Calibration, setting 기능 버튼이 나타나는데, 이중 calibration 버튼을 누를 경우 그림 14b와 같이 시스템에 연결할 수 있는 센서 채널들 별로 2점 교정 용액을 찍어 센서의 감도가 정상적인 수준인지를 확인할 수 있도록 하였다. 실제 운용에서는 자동으로 2점 정규화가 수행되게 하여 수동 관리에 의한 불편함을 없도록 하였다. 단, 드리프트가 적고 장기 운용 안정성이 높은 pH와 EC 전극의 경우 해당 메뉴에서 직접 교정을 수행하여도록 하였다.

메인 화면 중 Setting을 클릭할 경우, 첫 번째로는 활용할 농축염의 농도값 및 교정용액, 샘플링, 배수 펌프의 동작 시간을 입력하여 호스 길이 조정에 따른 적정 동작 시간을 입력할 수 있도록 구성하였다. 또 우측 하단에는 NO₃, K, Ca에 대한 목표 농도를 입력하여 양액 관리값을 설정할 수 있도록 하였다. 우측 상단에는 측정시간과 대기시간 입력칸이 존재하는데, 이는 각각 이온센서 값의 측정 과정 중 신호 안정화를 위해 부여할 측정 대기시간과 양액 모니터링 및 보충 동작 시퀀스 수행 후 다음 시퀀스를 수행하기까지 부여할 시스템 대기시간에 해당한다 (그림 15c). 이 상태에서 화면 위쪽의 Setting을 한 번 더 터치할 경우 그림 15d와 같이 시스템에서 고려하게 될 측정 기간 및 보충 작업 수행 기간을 설정할 수 있으며, 또 안정값을 위해 비료 농축액 펌프의 최대 가동 시간이나 페루프 제어를 수행할 이온 농도 허용 오차값 (%), 그리고 과도한 염 보충을 방지하기 위해 보조적인 수단으로 활용하는 EC 허용값 (uS/cm)을 입력할 수 있게 하였다. 현장에 따라 활용하는 비료염의 종류가 달라질 수 있는데, 그런 경우 다음 설정창으로 넘어가 그림 15e와 같은 창에서 바꾼 비료염 종류에 따라 주입 계산식을 변경할 수 있도록 설계하였다.

메인 화면 중 Measurement를 클릭할 경우, 그림 14h와 같이 2점 정규화 용액의 NO₃, K, Ca 농도를 설정할 수 있으며, 각 개별펌프들에 대한 동작을 터치 버튼을 통해 수동으로 조작하여 펌프의 동작 상태를 확인할 수 있도록 하였다.

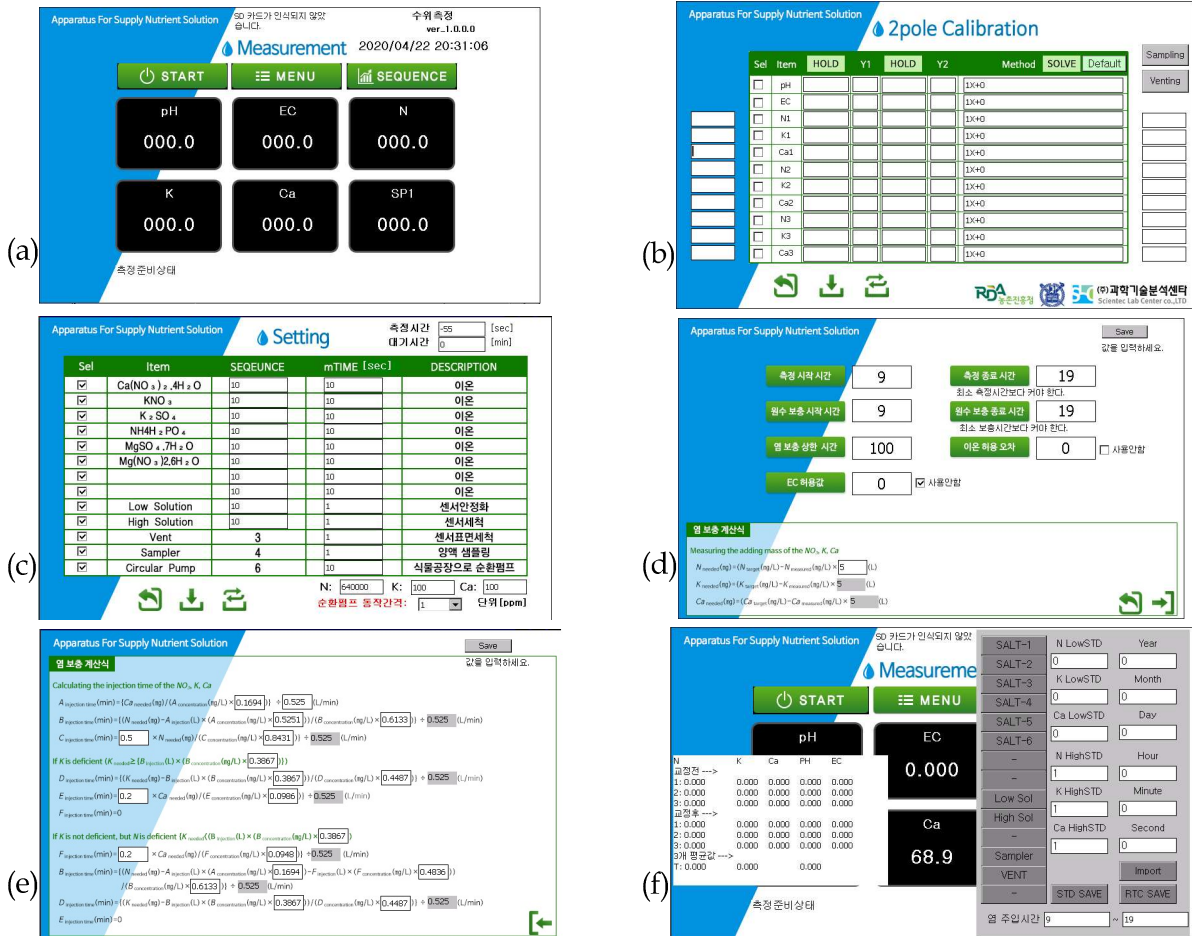


그림 15. 정밀 양액제어기 시작기 GUI 구성: (a) 메인화면, (b) 센서 교정 화면, (c) 비료액 농도 설정창, (d) 시스템 운영 시간 설정창, (e) 비료 조성비 설정창, (f) 2점 정규화 용액 농도 및 펌프 수동 제어창

○ 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 시작기 보충 동작 테스트

개별 이온 농도 (NO₃, K, Ca) 측정에 기반한 양액 보충식의 동작 점검 및 보충 성능을 테스트하기 위하여 저농도부터 고농도까지 5단계의 개별 이온 농도 목표값을 설정하고 이에 대한 측정 및 보충 작업 경과를 확인하였다. 이때 염보충 동작을 위해 EC, 이온 농도 허용범위 설정은 OFF로 설정하여 테스트를 진행하였으며 2점 정규화 용액의 조성은 표 5와 동일하게 제작되었다.

보충 동작 테스트에서의 1~5단계까지의 이온별 목표 설정값은 표 8과 같이 설정되었다.

표 8. 시작기 염 보충 성능 테스트를 위한 농도 추종 단계

Step	Target ion concentration (mg/L)			Target water volume (L)
	Ca	NO ₃	K	
Initial	40	250	80	5
1st	60	280	120	5
2nd	90	350	160	5
3rd	90	350	160	4
4th	120	800	240	4
5th	200	1500	500	6

이때, Ca-Mg, N-P 환산 주입비는 각 0.2, 0.5로 부여하여 주입 시간이 산출되도록 설정되었는데 이는 Choi 등 (2015)에 의해 제시되었던 비율을 참고하여 넣은 것으로 향후 실제 식물공장 환경에서의 작목에 따른 흡수비를 반영하여 자유롭게 조정할 수 있다.

내장된 계산식 동작 결과값의 검정을 위하여 엑셀 (v.2019, Microsoft, USA)를 이용하여 그림 5의 염 보충 계산식을 적용하여 주어진 추종 농도와 센서값을 입력하였을 때 나온 펌프 동작 시간 계산 결과값을 비교하였다 (표 9).

표 9. 염 보충 펌프 동작 시간 비교 검증 결과

Step 농축액 종류	1st		2nd		3rd		4th		5th		동작 시간 오차* (%)
	Excel	시스템	Excel	시스템	Excel	시스템	Excel	시스템	Excel	시스템	
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	3.29	4	5.79	6	0.98	1	5.26	6	24.65	25	5
KNO ₃	0	0	0	0	0	0	11.3	11	20.2	20	-2
NH ₄ H ₂ P O ₄	0.44	1	0	0	0	0	6.3	7	15	15	6
K ₂ SO ₄	1.99	2	2.99	3	1.53	2	0	0	8.57	9	6
MgSO ₄ · 7H ₂ O	1.13	2	1.99	2	0.34	1	0	0	8.47	9	17
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0	0	0	0	0	0	1.88	2	0	0	6

* 동작시간오차는 전체 시험에 대해 "(실제 시스템에 의한 동작 시간) / (계산에 의한 총 요구 동작 시간) - 1"으로 산출하였음

동작 시간 결과에서 시스템의 경우 동작 시간 릴레이 구동의 최소 단위가 '초'로, 1st step과 2nd step의 경우 주어진 결과값에 대해 양액 내 이온 농도의 경우 약간 높게 유지되는 것이 양분 공급의 개념에서는 더 적합할 것으로 판단되어 이를 소수점 올림으로 적용되게 설정을 변경하였다. 실제로, 3rd step부터는 소수점 부분을 올림처리하여 동작된 결과가 확인되었으며 시스템 계산 결과 수행된 농축액 주입에 의한 이온별 보충 효과는 그림 15와 같이 나타났다. 결과에서 펌프 동작 시간의 최소 시간 단위나 타 이온과 연계되어 주입되기에 단독 보충이 어려웠던 경우 (1st 및 3rd step에서 NO₃, 4th step에서 K)를 제외하면 전반적으로 요구된 이온량에 맞추어 주입이 이루어졌음을 확인하였다. 특히 이론상 가장 정확한 계산 결과에 의한 총 동작 시간 대비 개발 시스템의 실제 주입 동작 시간의 비율로 확인한 제어 성능에서는 비종별로는 MgSO₄·7H₂O가 가장 많이 초과 주입된 것으로 나타났는데, 다량 원소 중 비교적 농도가 낮은 비료 농축액을 사용하므로 초과 주입에 의한 실질 이온 초과 투입량은 크지 않을 것으로 생각되었으며, 평균 약 7% 정도의 동작 시간 오차를 보여 개발된 이온 기반 양액 제어기 시작기가 설계한 동작 알고리즘에 대응하여 정확하게 비료 농축액을 투입할 수 있음을 확인하였다.

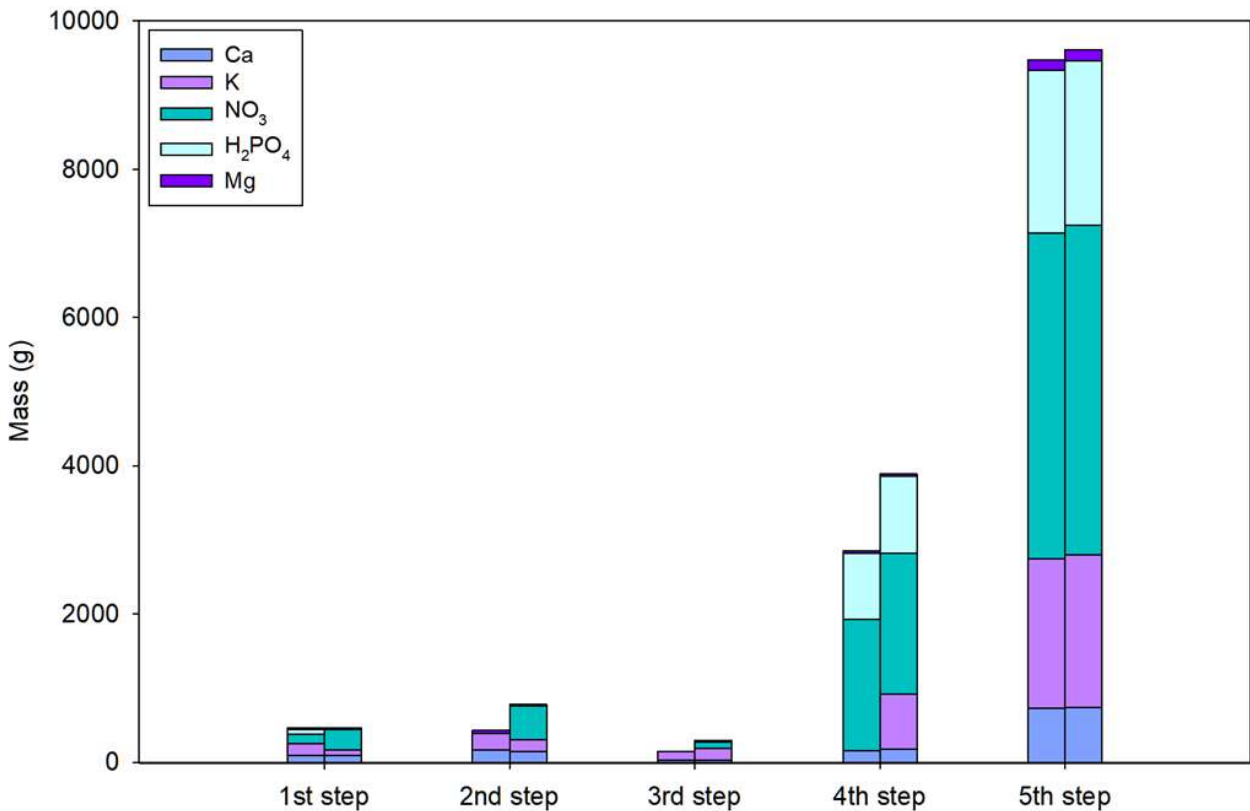


그림 15. 농축액 주입에 의한 이온 농도 보충 기대치. 왼쪽 막대는 설정된 농도와 측정된 농도를 기반으로 산출된 요구 이온량을 의미하며 오른쪽 막대는 시스템 계산 결과에 의해 주입된 이온량을 의미

또한 보충 작업 이후 혼합된 용액을 샘플링하여 시스템에 의해 측정된 NO₃, K, Ca 이온별 농도는 그림 16과 같이 나타났으며, 세부적인 수치들은 표 10에 제시하였다. KNO₃의 경우, 3rd step에서 측정치에 맞추어 계산값대로 주입되었으나, 측정된 값은 기대보다 다소 낮은 값이 나왔는데 이는 적은 주입량으로 비료 농축액 펌프의 동작 시간이 짧아 열 주입 펌프에 의한 혼합 효과가 약하여 제대로 섞이지 않은 상태에서 제조 결과 용액을 측정하였기 때문으로 보인다. 실제로 재측정 후 투입을 수행한 4th step에서는 비교적 목표치에 가까운 농도값으로 접근한 것을 볼 수 있으며 이는 양액을 지속적으로 회수하여 재사용하고자 하는 시스템의 성격상, 페루프 구조의 양액 순환 이용에서 단기적으로는 이온 농도값이 다소 흔들리더라도 장기적으로는 안정적으로 목표 이온 농도 수치를 유지할 수 있음을 보여주었다.

최종적으로는 3rd step의 NO₃나 3rd step에서의 K, 그리고 앞서 테스트 결과와 유사하게 고농도 대역에서 낮게 예측된 5th step에서의 Ca 전극의 거동 등에도 불구하고 전반적으로 평균 10% 오차 내에서 목표 이온 농도의 양액을 조제한 것을 확인하여 제작한 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 시작기는 목표치인 10% 내의 성능으로 효과적으로 NO₃, K, Ca 개별이온농도를 측정하고, 이에 대해 주어진 상황에 맞추어 이온 농도에 기반한 양액 관리가 가능할 것으로 기대하였다.

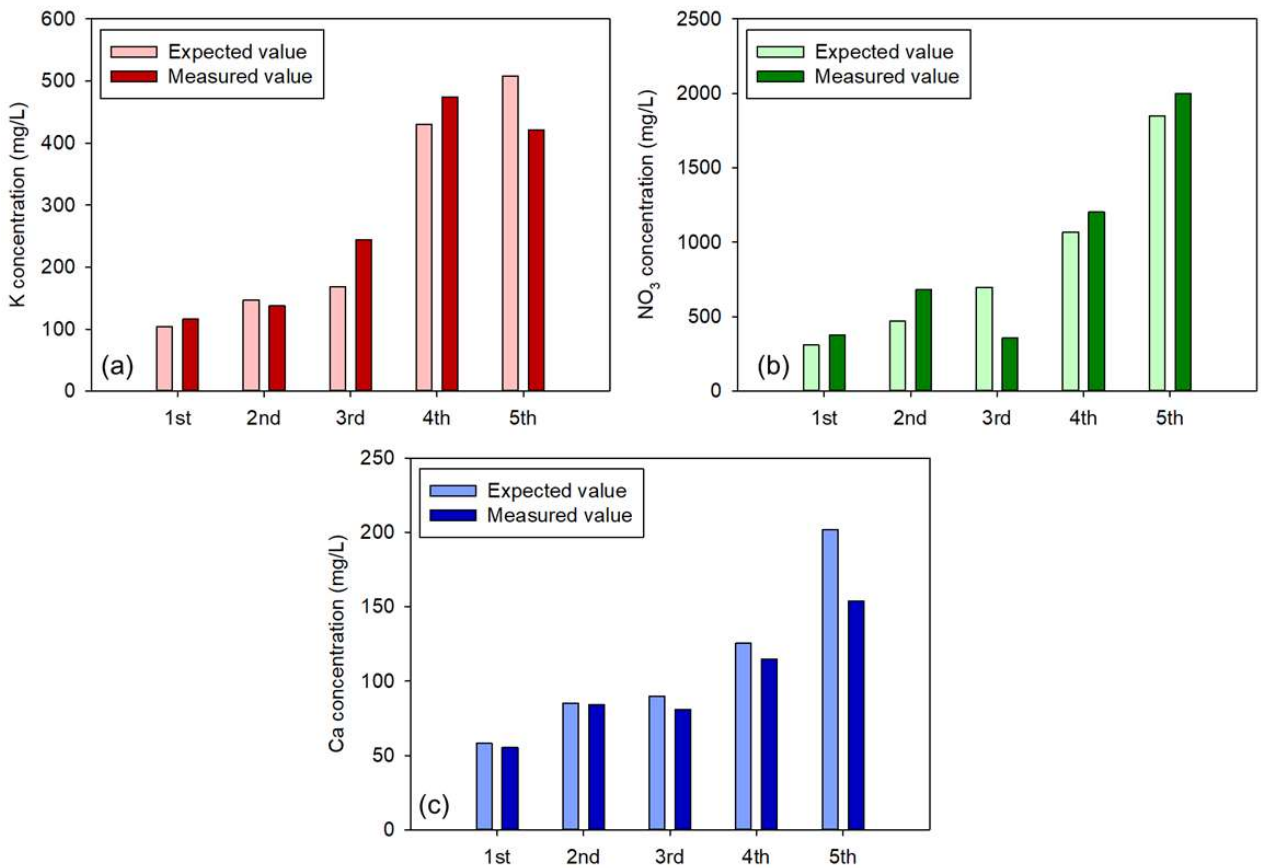


그림 16. 농축액 주입에 의한 기대 농도 대비 시스템에 의해 측정된 이온 농도:
(a) K, (b) NO₃, (c) Ca.

표 10. 개발 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 단계적 양액 조제 시험 결과 (단위: mg/L)

관리 이온	1단계	2단계	3단계	4단계	5단계	평균 오차율 (%)*	
K	목표	104.5	147.3	168.9	430.4	507	7.5
	수행 결과	115.9	137.5	244.3	454.3	421.27	
NO ₃	목표	309.1	469.7	699.1	1068.6	1847.8	10.4
	수행 결과	327.8	480.7	556.1	1164.9	2000.5	
Ca	목표	58.3	85.2	90.1	125.5	202	-7.7
	수행 결과	55.5	84.2	81	115	174	

* 평균오차율은 전체 시험에 대해 “(수행 결과값 - 목표값) / (목표값)”을 산출하여 평균하였음

2.3. 양액 내 개별 이온 농도 균형 유지 시스템 적용

○ 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 시작기 식물공장 테스트베드 적용

사전 답사를 통해 파악한 넥스트온의 식물공장 환경을 고려하였을 때 시스템의 설치 적용은 아래 그림과 같이 구상하였다 (그림 17). 이후 현장 양액탱크에 대해 양액 측정 및 보충을 수행할 수 있도록 농축양액 및 교정액 등을 이온기반 양액 제어기에 연결하고 탱크에 수위센서 및 농축

액 주입/샘플링 호스를 구성하여 그림 18과 같이 설치하였다.

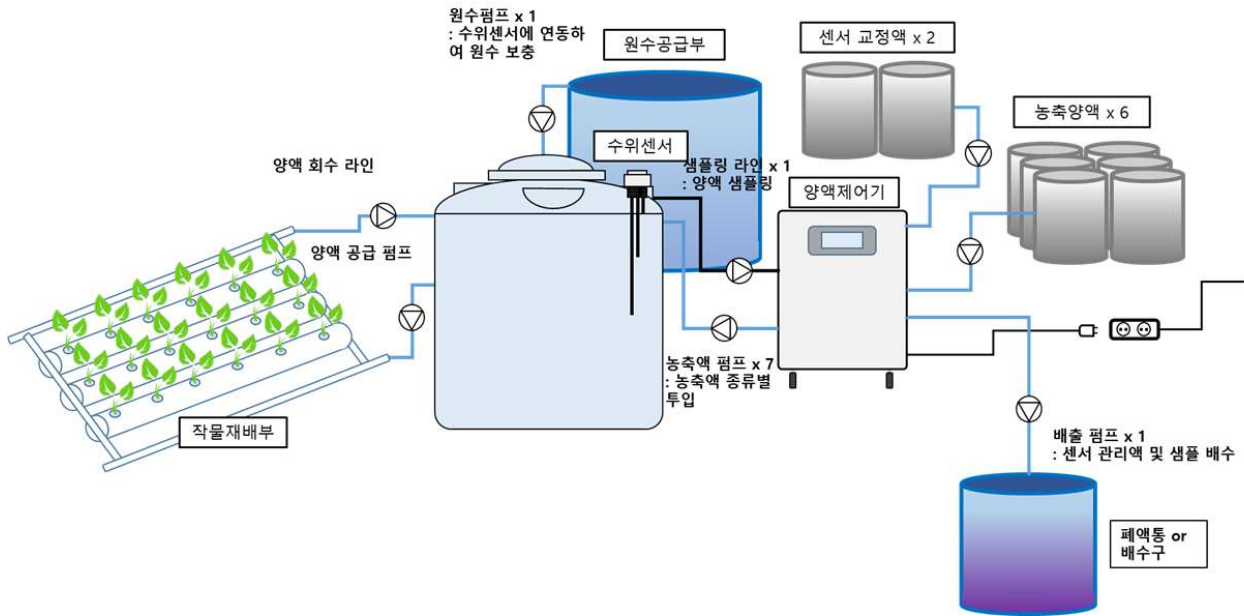


그림 17. 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 적용 구성도

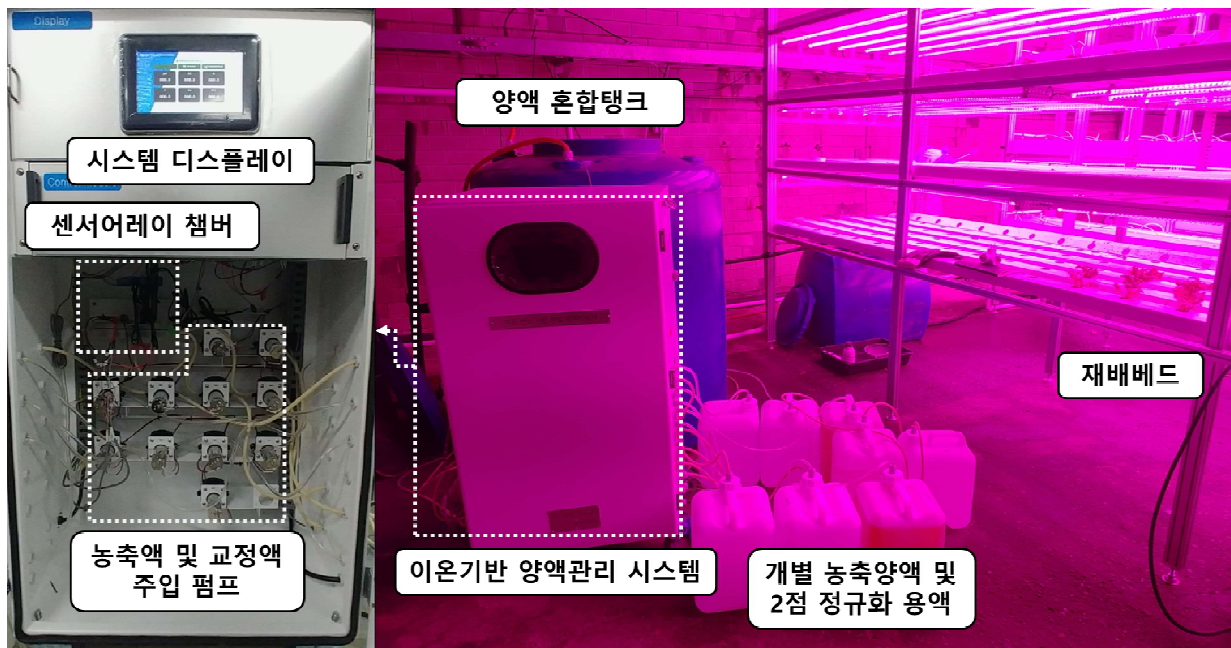


그림 18. 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 설치 사진

○ 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 시작기 양액 제조 테스트

설치된 시작기를 사용하여 다음과 같이 넥스트온에서 활용하는 양액에 대한 관리 성능 테스트 수행하였다. 먼저, 1톤 수위선까지 원수를 공급하였으며 시스템에 연결된 수위센서가 수위에 따라 저수위/중수위/고수위(보충 수행 대기 상태) 로 출력하는 것을 확인하였다. 이후 넥스트온측에서 사전 제공한 조성표 (표 4)에 기반하여 센서 교정액 및 개별농축액 준비한 것과 시스템을 연결하

였다. 초기 양액으로의 제작 진행 시 제작된 20,000mg/L 농축액 기준 약 5리터 투입이 요구되며 이는 적용된 펌프 유량 기준 (0.525 L/min) 1시간 이상의 동작 필요. 시범 운행 소요 시간을 고려하여 별도의 A/B 농축액을 투입 후 교반 및 샘플링을 수행하였다 (초기양액).

초기 양액에 대한 시스템 측정값은 그림 19에 표시하였다.



그림 19. 초기 양액에 대한 시작기 측정값 디스플레이

시스템의 설정된 목표 농도는 Ca 100 ppm, K 220 ppm, NO₃ 968 ppm으로 Ca가 낮게 나타난 상황이었으며 NO₃의 3개 전극 중 하나의 상태가 좋지 않아 시스템 측정값에서 NO₃값이 높게 나타난 것을 확인하여 해당 전극은 여분 전극으로 교체하였다. 측정 결과에서 시스템 설정값 대비 측정된 농도 수준이 NO₃, K에 대해서는 설정값보다 높게 나타났으므로 이에 대한 주입은 없었으며, Ca에 대한 보충이 수행되었다. 이때 요구된 펌프 동작시간은 약 34분이나 시스템에 펌프 오작동 및 과도한 주입 상황을 경계하여 설정한 펌프 동작 제한 시간이 10분이었기에 10분 동안 농축액 주입이 일어났으며 10분 간의 주입에 의해 예상되는 Ca의 농도는 약 60 ppm으로 기대되었다.

$$* \text{예상 Ca 농도 결과값} = [43.6(\text{현재 Ca농도}) \times 1000\text{L} + 20,000\text{ppm} (\text{Ca 포함 비료용 농축액 농도}) \times 0.16 (\text{Ca비료 중 Ca 비율}) \times 5.25\text{L} (10\text{분 동작에 의한 주입량})] / 1000\text{L} (\text{양액 용량})$$

보충이 수행된 후 다시 수집 및 측정된 양액 농도는 아래와 같이 예상과 유사하게 55.5 mg/L의 측정값을 출력하였으며, K의 경우 값이 약간 줄어들었는데 이는 농축액 주입에 의한 희석 또는 ISE 측정 변동으로 추정하였다. NO₃의 경우도 값이 줄어들었으나 이는 전극을 교체하였기 때문으로 정상화된 값이 출력된 것으로 확인되었으며 전체적으로 농축액 주입에 의한 EC 증가 및 Ca 농도 증가가 나타났음을 확인하여 개발한 시작기가 정상적으로 현장에서 양액의 관리를 수행하는

것을 확인하였다 (그림 20).



그림 20. 보충 후 양액에 대한 시작기 측정값 디스플레이

2.4. 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 수정

○ 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 하드웨어 구성 변경

개발된 시작기의 운용에서 pH의 경우 단순 주입량 비례식에 의한 별도 투입이 이루어졌으며 이는 지하수를 원수로 활용하는 환경에서는 pH가 적정 범위 내로 도달하지 못 하는 경우가 있어 주관기관측 요청에 의해 실시간으로 pH를 관리할 수 있는 종래의 양액기와 같은 운용이 요구되었다. 그러나 이 경우, 양액 탱크에서 조제된 양액을 샘플링하여 분석 후 추가 보충을 수행하는 양액기의 운용 동작으로 조정하기에 긴 시간이 소요되어 이를 보완할 수 있는 시스템 개선이 필요하였다.

이에 고려하게 된 것은 기존의 개별 펌프 제어 릴레이를 활용하는 방식이 아닌 하나의 펌프에 벤추리 밸브를 적용하여 실시간으로 혼입량을 제어하는 비례밸브형 제어 방식의 시스템이었으며 이는 정밀도가 높으나 토출량이 낮은 정량펌프를 활용한 방식에 비해 높은 유량을 확보할 수 있어 제어 시간이 훨씬 짧다는 장점이 있다.

이러한 요구에 맞추어 제품 제작 의뢰를 수행한 코믹스 측에서는 그림 21과 같이 EC와 pH에 대해 관리 밸브 제어를 통해 신속하게 값을 조정하면서 양액 재사용에 따른 NO₃, K, Ca의 농도 변화에 대해서는 샘플링을 통해 정밀하게 농도 관리를 수행할 수 있는 형태의 2차 양액기를 제안 하였으며, 이를 채택하여 수정된 양액 제어기를 구성하였다.

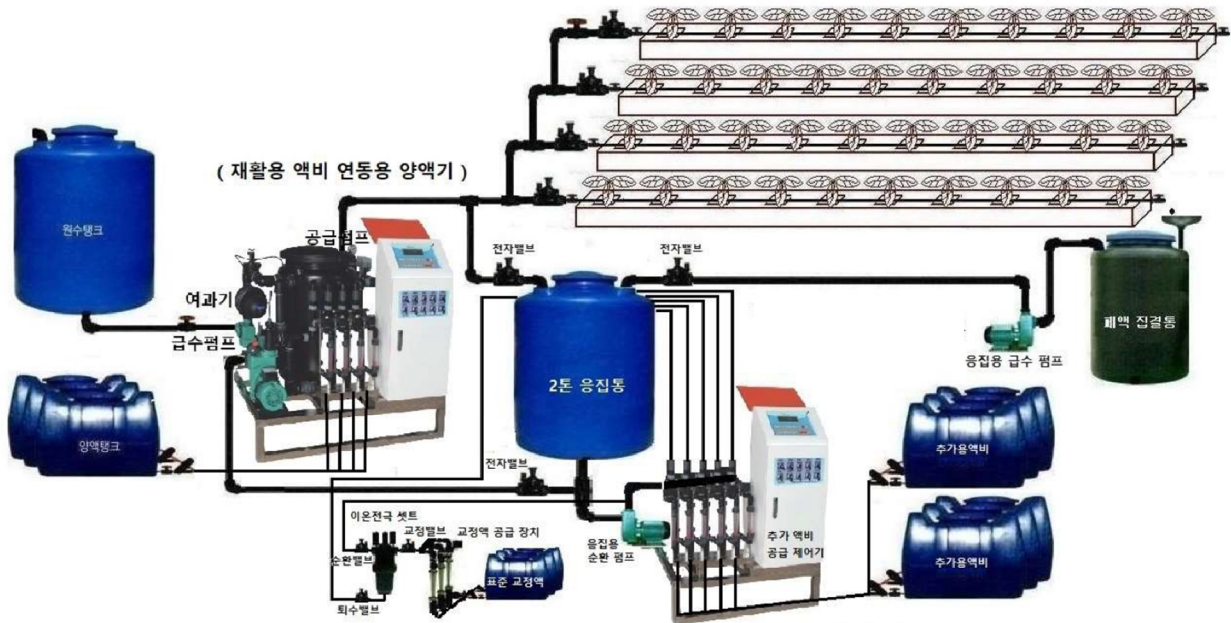


그림 21. 2차 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 구성도

○ 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 운용 순서도 (2차)

2차 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기의 운용 순서도는 그림 22와 같이 설계하였다. 간략히, 재사용할 배액이 없는 첫 운용 시 기존처럼 EC 센서와 pH 센서값을 기반으로 농축 비료가 혼합되어 있는 A액과 B액, 그리고 산 용액이 들어있는 C액을 실시간으로 조정해가면서 설정되어 있는 EC/pH 값에 맞게 양액을 조제한다. 이때, 이온센서부에는 농도를 알고 있는 2점 교정액을 이용하여 센서를 교정하고, 조제된 양액을 보내어 측정된 값을 설정 목표값으로 업데이트한다. 이후 관수 시간이 될 때까지 대기하다가 관수 시간이 되면 조제된 양액을 재배베드에 공급하고 배액은 회수하여 집결통에 모은다. 관수가 종료되면 집결통의 배액을 응집통으로 보내고 교반 후 시료를 채취하여 분석 및 설정값이 되도록 NO₃, K, Ca 기반 농축 단비를 투입한다. 이온센서에 의한 양액 조정이 완료된 후 응집통에 있는 양액 잔량을 수위센서로 확인하여 부족한 양들은 EC 센서와 pH 센서값을 기반으로 A, B, C액을 이용하여 보충한다. 이후 다시 관수 스케줄에 기반한 관수를 수행한다. 이온센서의 경우, 드리프트를 보상해주기 위해 운전 전마다 표준액을 이용하여 보정을 수행한다.

수정된 운용 알고리즘은 1차 버전에 비해 이온 센서에 대한 의존도를 줄이고, 기존의 EC, pH 센서 및 보충 방식에 기반하여 운용되기 때문에 이온 농도에 대한 보충 정확도 및 비료 투입의 정밀성은 부족할 수 있으나, 현장에서 운용할 때 중요한 시스템 반응 속도 및 pH 조절의 용이성 면에서 우수할 것으로 기대하였다. 이에 대해서는 향후 실제 식물공장 재배베드 적용을 통해 Mg, P에 대한 비례계수 관리의 효용성이나 이온 센서에 대한 시스템 관리 안정성 등에 대한 상세 검토가 필요할 것으로 판단된다.

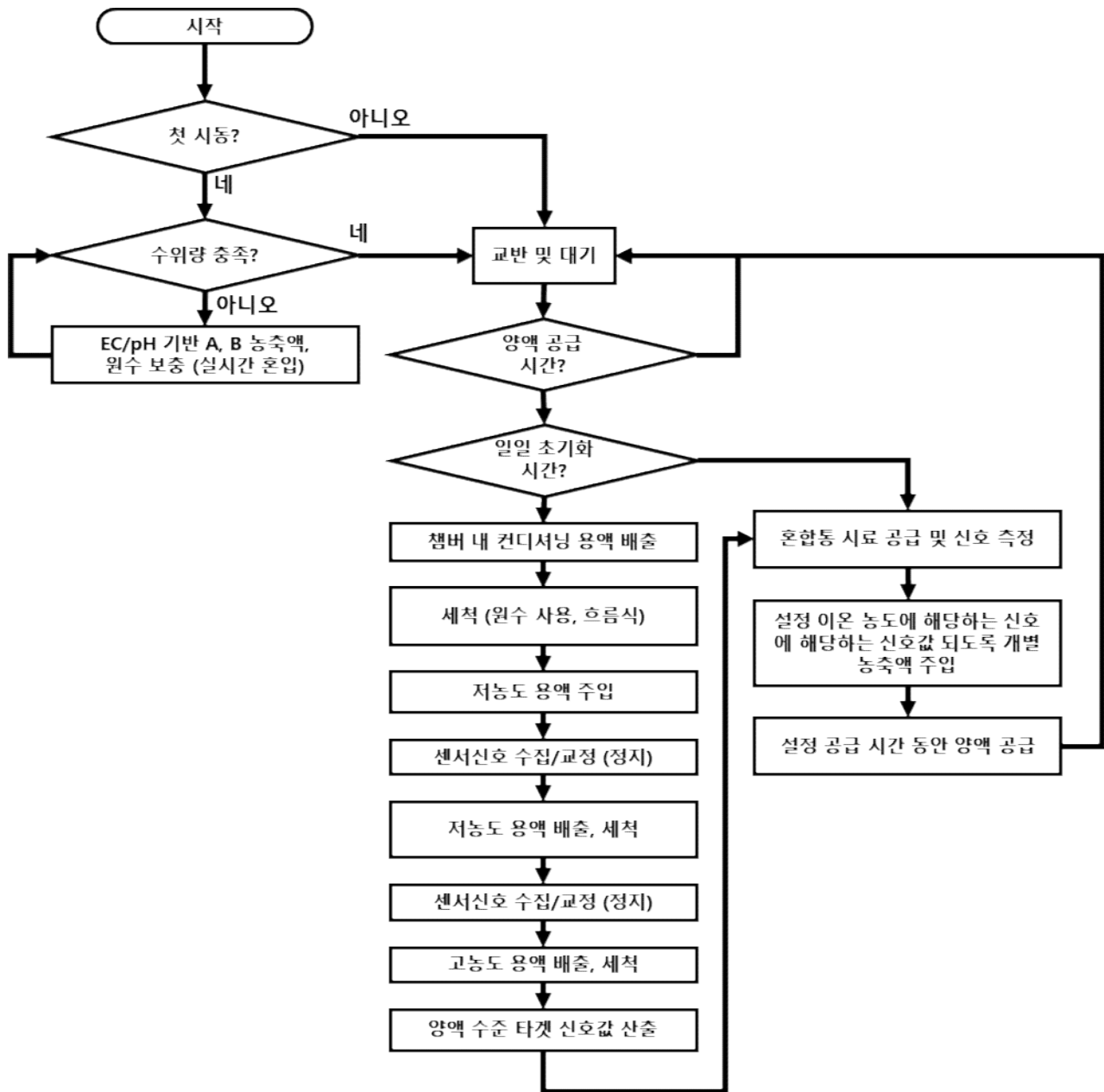


그림 22. 2차 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 운용 순서도

○ 2차 정밀 양액 제어기 설치

최종적으로, 설정된 식물공장 환경 및 요구사양에 맞추어 그림 23과 같이 각각 이온 센싱 기반 양액 보충기 및 NO₃, K, Ca의 단비 농축액 통, 센서 교정액 통 2개, 그리고 혼합통과 통상의 EC, pH 기반 관리기 및 A, B, C통으로 하여 2차 정밀 양액제어기를 구성하였으며, 설치한 양액제어기를 기반으로 그림 24와 같이 1차년도보다 확장된 수직형 재배베드에 대해 적용되었다.



그림 23. 2차 정밀 양액 제어기 설치 사진: 이온 센싱 챔버 및 단비 주입부 (좌), 제어기 전체 설치도 (우)



그림 24. 2차 양액제어기 적용 수직형 식물공장 재배베드

2.5. 작물 재배관리를 위한 모니터링 시스템 개발

○ 모니터링 시스템 구성요소 선발 및 구성

식물공장 환경에서 작물의 실시간 생육 정보를 얻기 위해서는 생육을 저해하지 않는 작은 사이즈와 고온다습한 환경에도 대응할 수 있는 강인성이 요구되었다. 이에 가격이 낮아 교체가 용이하며 식물공장 환경에서도 운용할 수 있는 라즈베리 파이 3 B+를 이용하여 실시간 모니터링 시스템을 구축하였다. 영상 센서로는 적외선 필터가 없어 식물공장의 저조도 환경에서 영상 취득에

유리한 RPI NOIR 카메라 V2 모듈을 사용하였다. 고온다습한 환경에 대한 보호를 위해 그림 25와 같이 전원박스 내 제작한 영상 모니터링 시스템을 배치하여 강인성을 높였다.



그림 25. 모니터링 시스템 (a) 내부 및 (b) 외관 모습

○ 웹 기반 유저 인터페이스 구성

제작한 모니터링 시스템에 대해, 재배자의 접근성과 활용성을 높이기 위하여 무선 인터넷망을 통해 URL 입력으로 영상 모니터링 시스템에 접근할 수 있도록 하고 이에 대한 웹 기반 유저 인터페이스를 구성하였다. 포트포워딩 방식을 통해 외부 IP로부터 모니터링 시스템 페이지에 접속을 할 수 있는 권한을 부여할 수 있도록 하였으며, 이를 통해 식물공장 내외부에서 휴대폰, 노트북, 데스크탑 등을 활용하여 어디서든 영상 모니터링 시스템에 접속하여 현재 재배 중인 작물 상태를 확인할 수 있도록 하였다.

그림 26a는 모니터링 시스템의 메인 화면을 보여주는데, 이때 영상 모니터링 시스템에 의해 보여지는 영상 디스플레이 외에 record video start, record image, timelapse start, motion detection start, stop camera, Download Videos and Images, Edit motion settings, Edit schedule settings 버튼이 있어 다음과 같은 기능을 수행할 수 있도록 하였다.

- record video start : 영상을 동영상으로 저장하기 위한 버튼이다. 버튼을 한번 클릭하면 네모칸이 파란색에서 주황색으로 바뀌면서 녹화가 시작된다. 버튼을 다시 클릭하면 주황색 버튼이 파란색으로 바뀌면서 녹화가 중지된다. 해당 영상은 mp4형태로 저장된다.
- record image : 현재 촬영영상을 사진으로 저장해주는 버튼이다. 버튼을 클릭하면 네모칸이 파란색에서 주황색으로 바뀌고 recording image라는 표시가 1초간 표시 된다. 사진은 jpg파일로 저장된다.
- timelapse start : 송출되는 영상을 여러 개의 이미지 묶음으로 저장해주는 버튼이다. 버튼을 클릭하면 네모칸이 주황색으로 바뀌며 timelapse stop이라는 글자가 나타난다. 마찬가지로 다시 클릭하면 영상 촬영이 멈추고 gif 파일로 사진 이미지가 저장된다.
- motion detection start : 모션 디텍션 시작 버튼을 클릭해 두면 움직임이 감지되면 그 순간 자동으로 동영상을 촬영하는 버튼이다. 움직임이 멈추면 자동으로 영상 촬영이 중지된다.
- stop camera: 이 버튼은 카메라 송출을 멈추기 위한 버튼이다.

- Download Videos and Images : 지금까지 저장했던 사진 및 영상 이미지를 확인하고 외부에서 다운받을 수 있는 공간이다 (그림 26b).
- Edit motion settings : 모션 디텍션에 관련한 세팅을 설정하기 위한 공간이다.
- Edit schedule settings: 메모리 관리, 사진 촬영, 이미지 촬영 등을 스케줄링을 통해 자동화 시킬 수 있다 (그림 26c). 여기서 Select Mode를 Fixed Times로 변경하게 되면 요일별로 사진을 찍는 시간을 최대 12개까지 지정할 수 있다 (그림 26d). Period 칸에 영상 저장할 시간을 적고 Day-Su-Sa 체크박스에 일요일부터 토요일중 원하는 날에 해당 명령이 실행되도록 체크하면 된다. Period Start란에 im 커맨드를 입력하면 자동으로 사진을 촬영하는 명령이 시작된다.

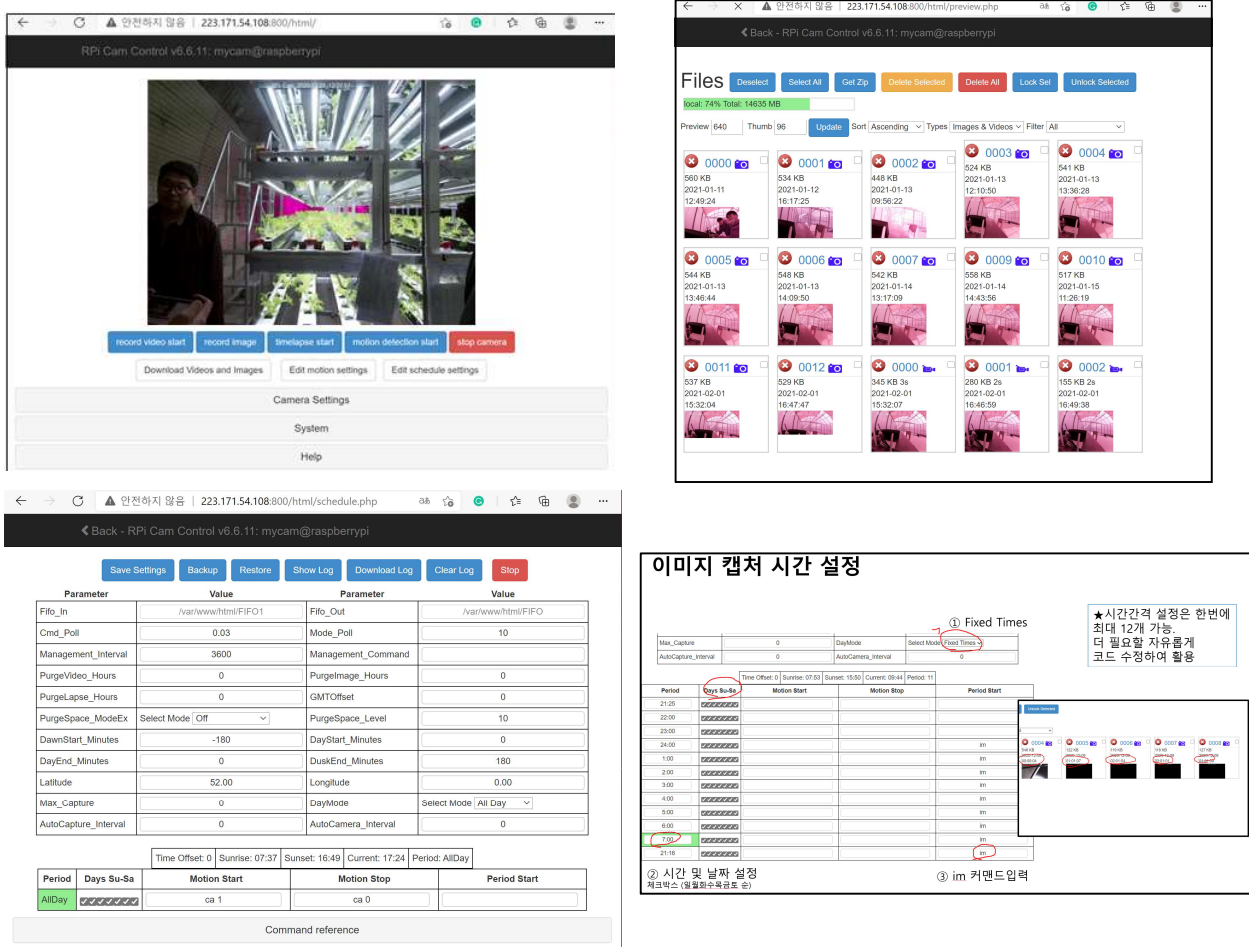


그림 26. 모니터링 시스템 웹페이지: (a) 메인 화면, (b) Download Videos and Images 세부 화면, (c) Edit Schedule settings, (d) 스케줄 설정 화면

또한 Edit Schedule Setting 창에서는 메모리 관리를 위해 저장된 영상들을 지우는 주기를 설정해 줄 수 있는데, 구성된 영상 모니터링 시스템의 경우 메모리 용량 관리를 위해 일주일이 지난 영상들은 자동으로 삭제하도록 세팅하였다.

개발한 영상 모니터링 시스템을 통해 그림 27과 같이 식물공장 내에서 자라는 작물 영상을 상시 모니터링할 수 있음을 확인하였다.



그림 27. 온천 넥스트온 재배베드 모니터링 영상

2.6. 생육 영상 기반 관수 제어 기술

○ 작물 생육 영상 모니터링 기술 테스트 베드 구축

온천 넥스트온에 구성된 영상 모니터링 시스템을 기반으로 활용할 수 있는 방향 중 하나로, 실시간으로 수집한 생육 정보를 기반으로 작물의 물 요구량을 산정하고 이를 기반으로 양액의 공급량을 제어하는 방식을 구상하였다. 작물 생육의 경우, 동일 베드 내에서도 미소한 온, 습도의 차이나 흐름식에 의한 양액 구배 차이 등에 의하여 차이가 날 수 있으므로 재배 베드 전역에 대한 작물 영상을 수집하여 이를 기반으로 제어의 기준이 되는 대표 생육지수를 산정할 필요가 있으며, 이를 위해서는 구획별로 영상 모니터링 시스템을 설치하거나 이동형 프레임을 구축하여 재배 베드에 대한 전역 영상을 수집하는 것이 요구되었다. 본 실험에서는 생육 영상 기반의 작물 양액 공급량 제어 방식에 대한 가능성을 확인하기 위하여 서울대학교에 설치된 실험용 재배베드를 기반으로 강길송 등 (2018)에 의해 제시되었던 XY축 이동형 영상 모니터링 시스템을 기반으로 그림 28과 같이 RGB 카메라를 활용한 영상 모니터링 시스템을 구축하였다.

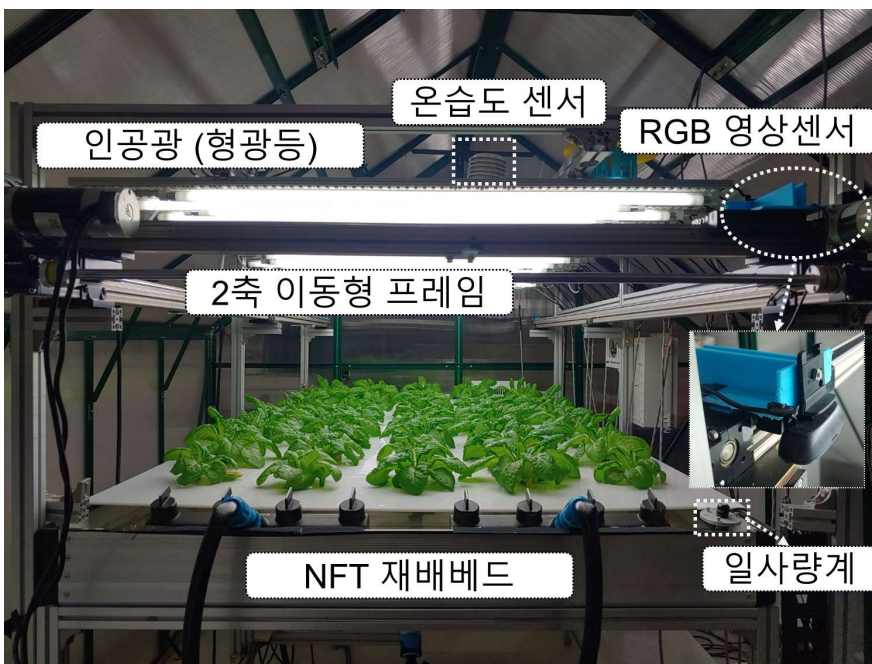


그림 28. 2축 이동형 영상 모니터링 시스템

○ 작물 생육 영상 모니터링 기반 물 요구량 예측

본 실험에서는 구성된 모니터링 시스템을 통해 작물 생육 영상을 수집하고, 이를 기반으로 양액 공급량과 높은 상관관계를 갖는 작물 물 요구량을 측정하고자 하였다. 이때, Baille 등 (1994)에 의해 제시된 수정된 Penman-Monteith 방정식에 의하면 작물 생육지수 중 엽면적지수 (leaf area index, LAI)와 작물에 대한 입사광량 (RAD_{in} , W/m^2), 그리고 수증기압포차 (VPD, kPa)에 대해 작물 물 요구량에 해당하는 증산량 (E_t , $g\cdot h^{-1}$)이 아래와 같은 관계를 갖는 것으로 보고되었다.

Modified Penman-Monteith equation (Baille et al., 1994):

$$E_t = a * (1 - e^{-k*LAI}) * RAD_{in} + b * LAI * VPD$$

여기서, $a(g\cdot J^{-1}\cdot m^2)$ 와 $b(g\cdot h^{-1}\cdot kPa^{-1})$ 는 특정 작물 및 환경에 의해 결정되는 회귀계수이며 k 의 경우 광 손실계수이다.

또한 LAI의 경우, 수집한 작물 영상에 대한 수직투영면적과 높은 선형성을 갖는 것으로 보고되었으며 (Escarabajal-Henarejos 등, 2015), k 의 경우 Nobel 등 (1993)에 의해 아래와 같은 식으로 산출할 수 있을 것으로 기대되었다.

$$k * CC = \ln(RAD_{Top} / RAD_{Bottom})$$

여기서 RAD_{TOP} , $RAD_{BOTTOM}(W/m^2)$ 은 각각 빛을 조사한 작물엽의 상부와 하부의 광량이며, CC 는 작물의 수직투영면적이다.

VPD의 경우, 생육 대기환경의 온도 (T , $^{\circ}C$)와 습도 (RH , $\%$)를 기반으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$VPD = 0.611 * \exp\left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3}\right) * \left(1 - \frac{RH}{100}\right)$$

○ 작물 수직 투영 면적 산출 알고리즘 개발

수집한 작물 영상에 대해 작물의 수직투영면적 (CC)를 얻기 위해서는 먼저 배경과 작물을 분리하여 작물부만을 취하고, 이를 촬영한 면적 전체에 대한 비율로의 환산이 필요하였다. 먼저, 수집한 작물 영상에 대해 R, G, B 색상지수를 이용하여 ExG값으로 환산하고, 여기에 대해 otsu 방식을 적용하여 작물과 작물이 아닌 배경 영역의 분리를 위한 기준값을 계산하였다. 이후 계산된 기준값을 기반으로 작물 부분에 해당하는 마스크를 생성하고, 이를 적용하여 취득한 영상에 대해 작물부만을 얻었다. 이렇게 얻어진 작물부에 대해, 영상의 취득 면적을 산입하여 작물이 차지하고 있는 면적 비율을 환산하였다. 이러한 과정을 전체 베드에 대해 수행하여 재배베드에 생육 중인 작물의 평균 수직투영면적비를 얻고, 이를 대표 작물 생육지수값으로 활용하였다 (그림 29).

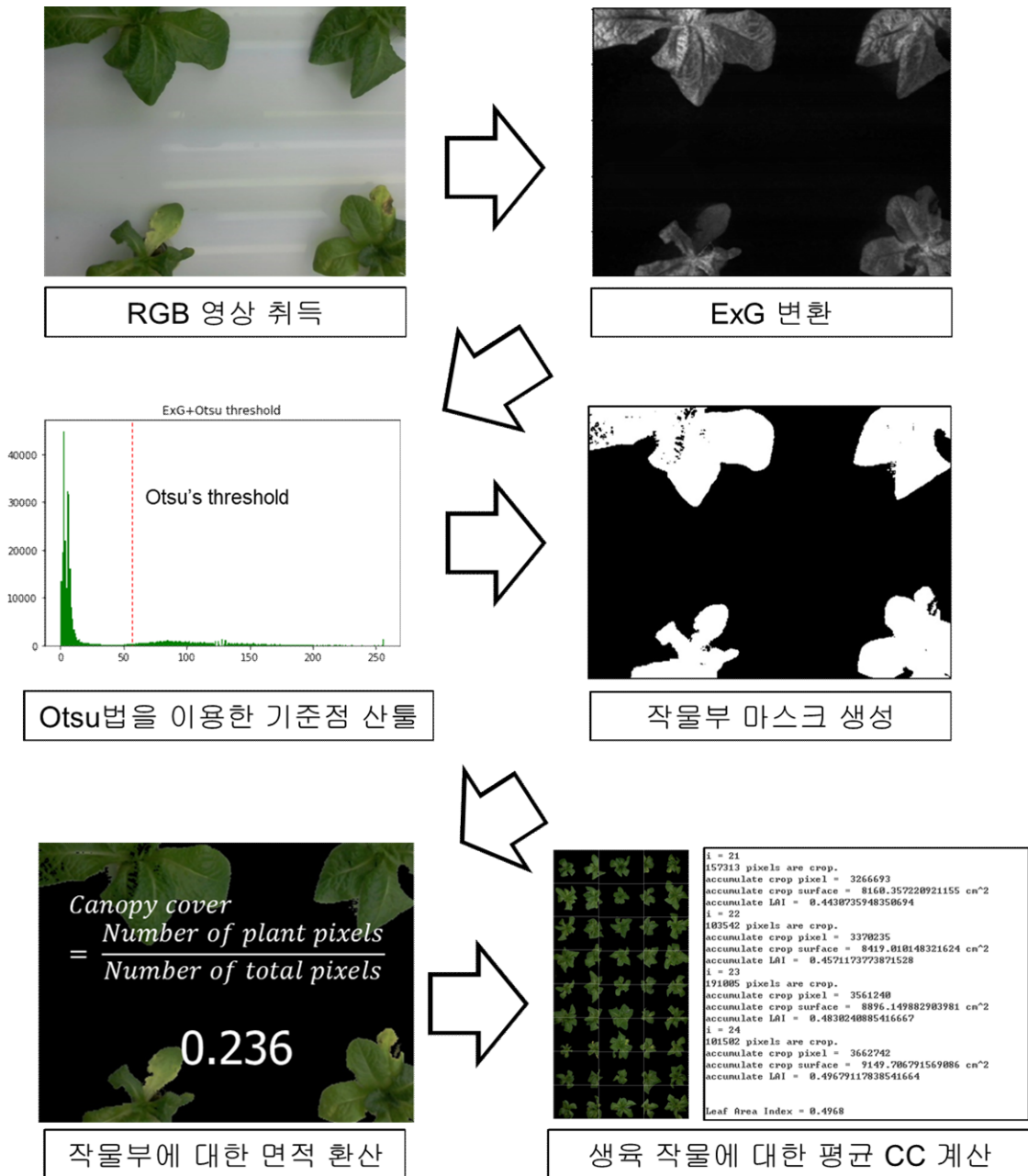


그림 29. 작물 평균 CC 산출을 위한 영상 처리 순서도

○ 작물 수직 투영 면적 산출 알고리즘 성능 확인

개발 알고리즘에 의한 작물 CC 산출 알고리즘의 정확도를 평가하기 위해 작물 영상을 직접 사람이 보고 작물 영역으로 판단되는 부분을 상용 이미지 처리 소프트웨어인 엔비 (ENVI v5.4, L3Harris Geospatial, CO, USA)를 이용하여 추출한 것과, 제시한 알고리즘에 의해 추출한 것을 비교하여 그 정확도를 평가하였다.

작물 사진은 청상추를 그림 28에 제시하였던 베드에서 수확기까지 약 27일 동안 재배한 기간 동안 수집한 데이터들을 사용하였다.

각기 사람에 의한 작업을 manual, 제시 알고리즘에 의한 분리를 ExG+Otsu로 하여 그 결과를 그림 30에 나타내었다. 결과에서 작물이 생장 중인 생육기 동안에는 전체적으로 제시 알고리즘이 실제 결과와 거의 유사한 수준으로 정확하게 작물 영역만을 분리하는 것을 확인하였으나, 수확기

에 접어들고부터는 실제보다 낮게 예측하는 것으로 나타났는데, 이는 작물이 수확기 수준으로 자라면 영상 수집 때 화면 전체가 거의 작물로 인식되나 Otsu법은 이를 강제로 이분화시키기 때문에 배경이 없음에도 이를 생성하여 나누는 식이기 때문으로 확인되었다 (그림 31). 때문에 정확도 개선을 위해서는 향후 영상 처리 알고리즘에서 특정 시기, 또는 특정 비율을 넘어선 작물 CC에 대해서는 이를 Otsu법에 의한 기준점이 아닌 그 자체를 작물 영역으로 인지하는 적응형 기준점 생성 알고리즘의 활용이 필요할 것으로 판단된다.

생성한 작물 생육지수를 기반으로, 베드 내 생육 분포도를 그림 30 (우)와 같이 얻을 수 있는데, 이를 통해 수확기에 접어든 구역이 어디인지, 혹은 부족한 생육이 나타나고 있어 문제점 진단이 필요한 구역이 어디인지를 상용 식물공장에서 파악하는데 용이하여 작물 관리에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대하였다.

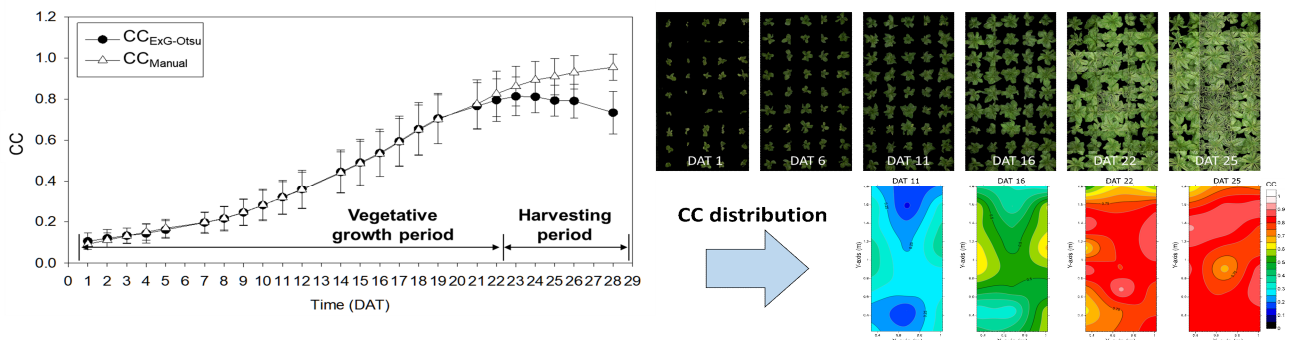


그림 30. 작물 추출 성능 비교 결과 (좌) 및 생육 동안 수집한 작물 영상과 분포도 (우)

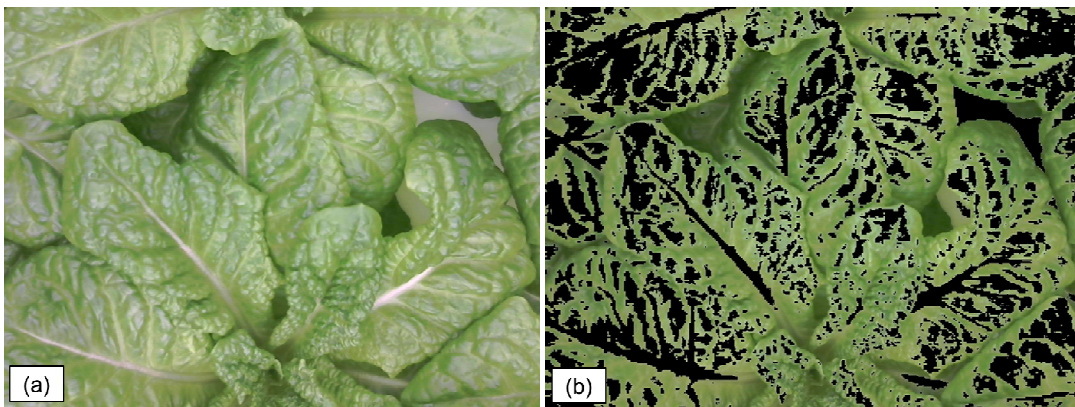


그림 31. 수확기의 상추 영상 (a) 및 작물 추출 알고리즘 적용 결과 (b)

○ 영상 기반 작물 물 요구량 산출 정확도 확인

개발한 작물 영상 처리 알고리즘으로 얻은 CC값과 환경 센서를 통해 얻은 광량, 온도, 습도값을 기반으로 modified Penman-Monteith 식 (P-M식)에 이를 대입하여 산출한 물 요구량의 정확성을 진단하기 위해, 상추를 재배하면서 매일 재배베드에서 3개씩의 상추를 임의로 선발하여 1시간 동안 양액에 담가놓았을 때의 무게 변화를 증발산량으로 추정하고, 이를 P-M식에 의한 결과와 비교하였다 (그림 32). 증발산량을 증산량으로 보정하기 위해 1시간 동안 양액만을 떠서 재배환경에 두었을 때의 무게 변화량을 증발량으로 산정하고, 이를 증발산량에서 감하였다. 이러한 과정을 통

해 P-M식에 의한 증산량 예측값과 무게 변화를 이용하여 계측한 증산량을 비교한 결과는 아래 그림 33에 나타내었다.

전체적으로, 약 27일 동안의 재배 기간 동안 상추의 증산량 변화 양상과 유사한 경향을 확인하였으며 (그림 33a), 무게 변화에 의한 증산량값과 영상 기반의 증산량 예측 결과에 대한 1:1 회귀 결과 기울기 0.91, 결정계수 R^2 가 0.9 수준으로 높은 선형성을 보이는 것을 확인하여 (그림 33b) 제시한 영상 모니터링 기반 작물 물 요구량 예측이 가능할 것으로 확인하였다.

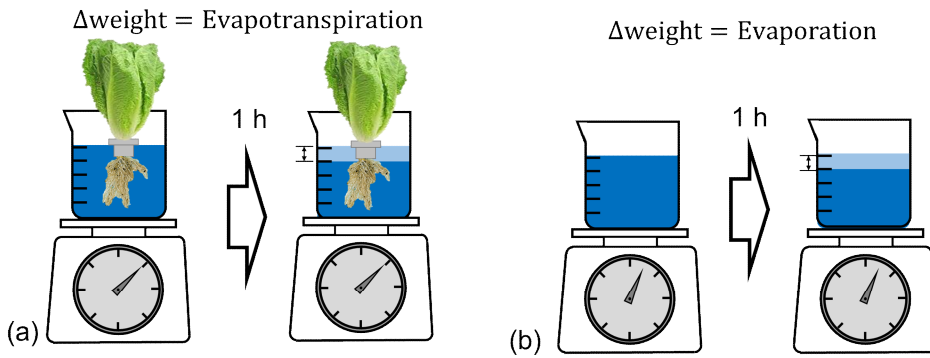


그림 32. 무게 변화량 기반 증발산량 (a) 및 증발량 (b) 산출 방식 모식도

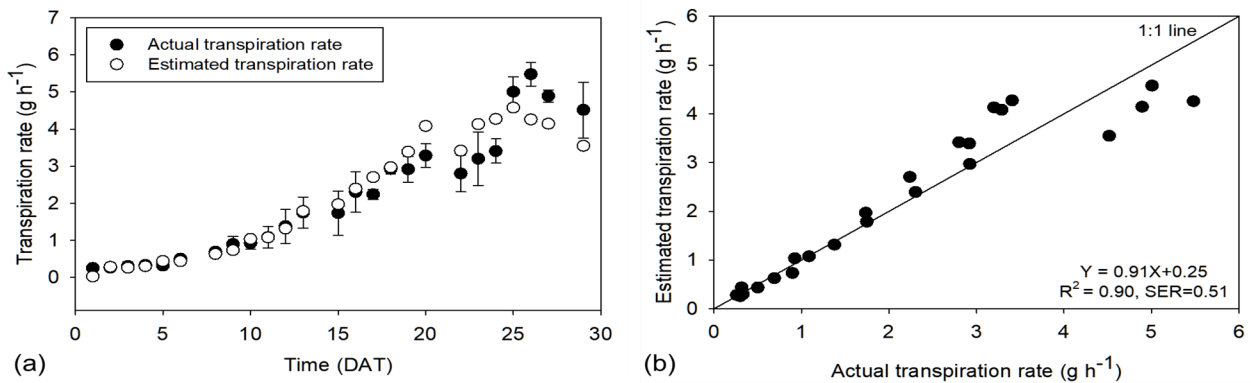


그림 33. 실제 증산량 (무게 변화 기반)과 P-M식 기반 예측 증산량 비교 결과 (a) 및 1:1 회귀 결과 (b)

○ 생육 영상 기반 관수 제어 성능 실험

구성한 생육 모니터링 시스템에 의해 작물 물 요구량을 예측한 값을 기반으로 상추를 생육하며 양액 공급을 제어하여 이것이 관행의 타이머 기반 양액 관수 제어보다 효율적인지 테스트하였다. 먼저, 구성된 베드를 이용하여 양액을 3분 공급하고, 7분간 휴지기를 갖도록 하는 타이머 기반 제어로 상추를 키우고, 이후 예측한 작물 물 요구량만큼만 양액 공급이 이루어질 수 있도록 펌프 유량을 기반으로 하여 공급 시간과 휴지 시간을 조정하는 생육 영상 기반 양액 공급 제어로 상추를 재배하였다. 이때, 작물의 물 흡수가 공급한대로 이루어지는 것은 아니기 때문에 사전에 양액 공급 시간에 따른 양액 공급량과 양액 배수량의 차이를 산출하여 이를 기반으로 작물의 물 흡수 계수를 선별하여 사용하였다.

환경 조건의 경우, 온도는 일중 약 22도, 밤중에는 13도 수준에서 관리되었으며 광주기는 형광등

을 이용하여 낮 12시간, 밤 12시간으로 광을 공급하였다.

두 양액 공급 방식에 의한 양액 공급량 추이는 그림 34와 같이 전체적으로 타이머 기반 공급량이 생육 영상 기반 공급 방식보다 높게 나타났다. 특히 생육 영상 기반 양액 공급의 경우, 성장도가 낮아 물 요구량이 낮은 생육 초기에는 공급량이 적고 작물의 생육이 증가함에 따라 점차 공급량도 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

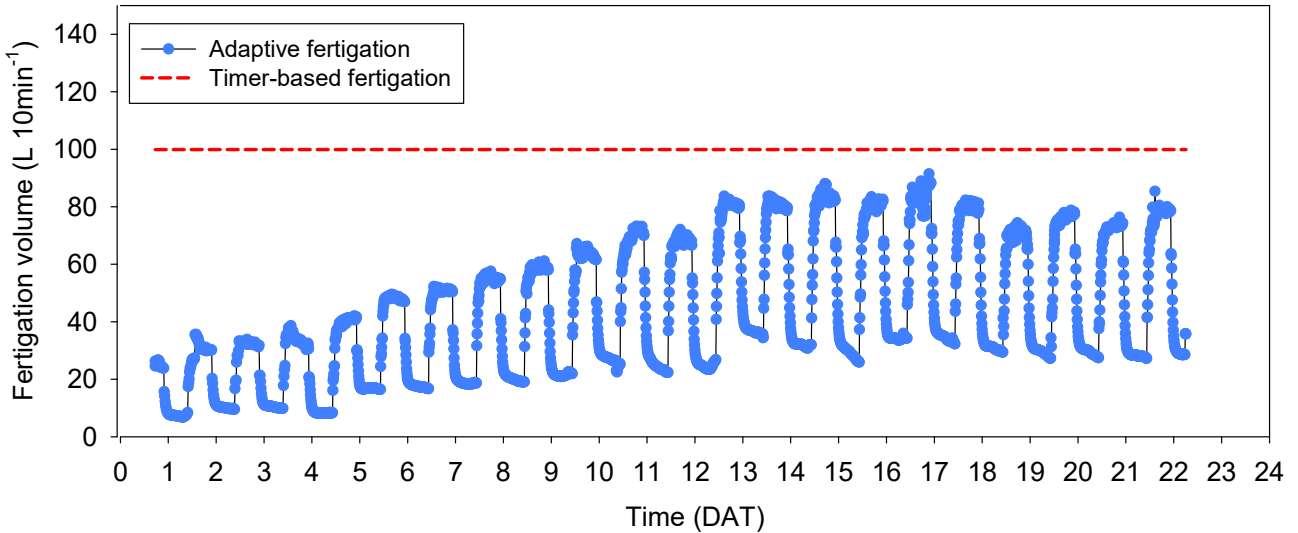


그림 34. 생육 영상 기반의 관수량 제어 방식 (adaptive fertigation)과 타이머 기반 제어 방식 (timer)에 의한 재배 기간 중 양액 공급량

재배 기간 중, 21일차에 해당하는 일중 데이터를 확인하였을 때, 양액 공급량의 변화는 그림 35와 같이 나타났다. 타이머 기반 방식은 주어진 3분 공급/7분 휴지 사이클에 맞추어 일정한 양의 양액이 공급되었던 것에 비해 생육 영상 기반 관수의 경우, 광 공급에 따라 광합성 및 대사가 활발해지는 낮 기간에 공급량이 증가하였으며, 이에 의해 전체적으로 양액의 변량 공급이 수행되었음을 확인하였다. 이에 따라 일중 총 양액 공급량은 영상 기반 제어 방식이 2.06리터로, 타이머 기반 관수 방식에 의한 4.84리터에 비해 훨씬 낮게 공급됨을 확인하였다. 이때, 수위센서를 기반으로 총 양액 공급량 대비 양액 배수량을 제외한 것을 증발 및 실제 작물에 의한 소비량으로 간주할 수 있는데, 이 값은 1.92리터로 나타나 영상 기반 공급 방식이 보다 효율적으로, 실제 요구량에 맞게 공급이 수행되었음을 확인하였다. 이에 비해 타이머 기반 방식의 공급은 해당 수치보다 2배 넘게 과잉 공급된 것으로 나타났으며 이는 비록 양액을 회수하여 재사용한다 하더라도 작물에 대한 비효율적인 물 공급, 펌프의 과다 동작을 유발할 수 있으므로 영상 기반의 관수 방식이 작물 재배에 보다 효과적인 방식으로 판단하였다.

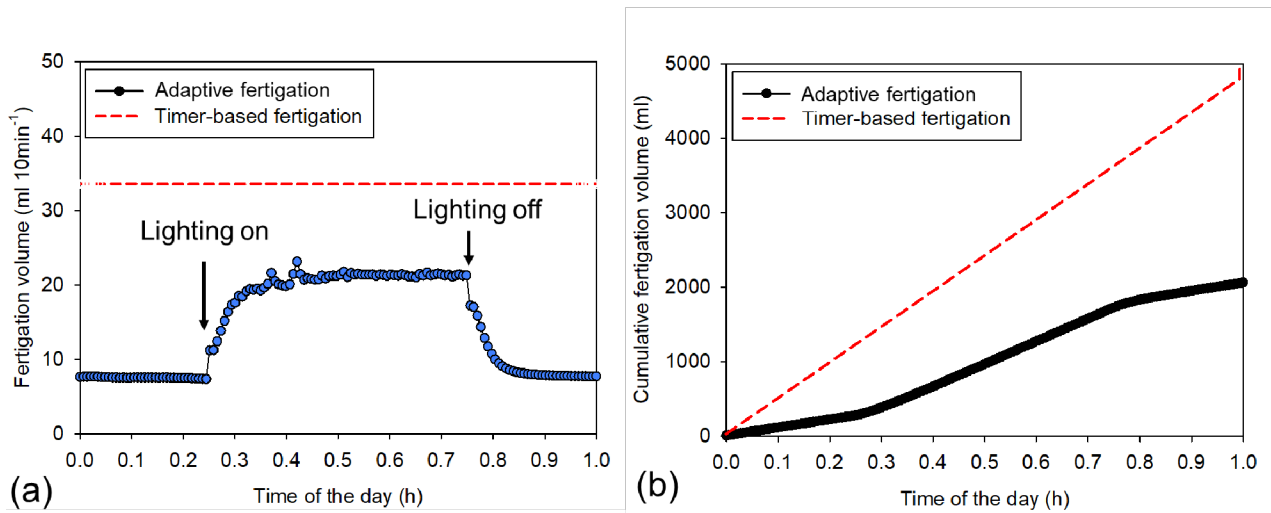


그림 35. 일중 양액 공급량 (a) 및 누적 양액 공급량 (b)

또한 타이머 기반 양액 관수로 상추를 재배하였을 때와 생육 영상 기반 양액 관수로 상추를 재배하였을 때의 생육 양상을 영상 기반으로 수집한 투영면적비 (CC)는 그림 36과 같이 나타났으며, CC값이 약 0.8에 도달하였을 때를 수확기로 보았을 때, 생육 영상 기반 양액 관수 방식이 보다 빠르게 수확기에 도달한 것으로 나타난 것을 확인하였다. 이러한 결과들로 보았을 때, 개발한 영상 모니터링 시스템을 이용하여 식물공장 내 재배 작물에 대한 물 요구량 예측 알고리즘을 적용하고, 이를 기반으로 양액 공급 제어를 수행한다면 보다 효율적인 양액 시스템 운용 및 생산량 증대가 가능할 것으로 기대하였다.

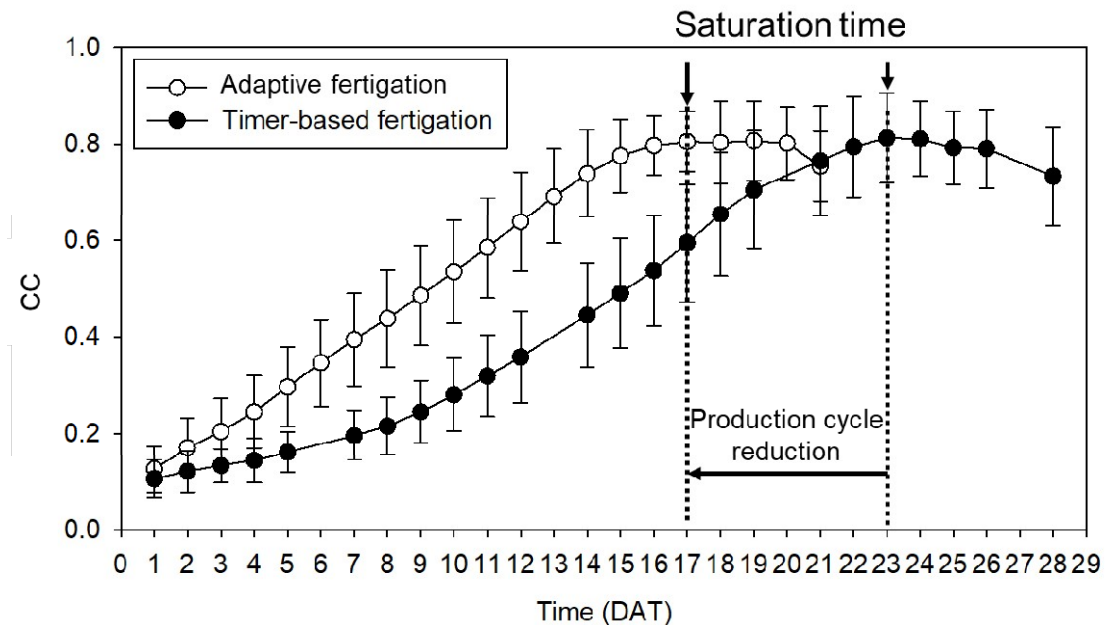


그림 36. 타이머 기반 양액 공급 및 생육 영상 기반 양액 공급에 의한 생육 비교

2.7. 사업화성과 및 매출실적

- 사업화 성과

항목	세부항목			성 과	
사업화 성과	매출액	개발제품	개발후 현재까지	(0.8억원-양액기 본체)	
			향후 3년간 매출	4억원	
		관련제품	개발후 현재까지	3.3원	
			향후 3년간 매출	16억원	
	시장 점유율	개발제품	개발후 현재까지	국내 : - % 국외 : - %	
			향후 3년간	국내 : 5% 국외 : 1%	
		관련제품	개발후 현재까지	국내 : - % 국외 : - %	
			향후 3년간	국내 : 5% 국외 : 1%	
	세계시장 경쟁력 순위	현재 제품 세계시장 경쟁력 순위			- 위
		3년 후 제품 세계 시장경쟁력 순위			50위

* 매출은 개발품이 포함된 시스템 매출 1건을 평균 2억으로 사업화된 개발품의 가격을 0.5억으로 산정하여 2021 1건, 2022 1건, 2023년 2건 발생 목표로 산정함

- 사업화 계획 및 매출 실적

항 목	세부 항목		성 과		
사업화 계획	사업화 소요기간(년)		1.5		
	소요예산(백만원)		300		
	예상 매출규모 (억원)		현재까지	3년후	5년후
			0.8	2	5
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년후	5년후
		국내	-	10	20
국외		-	1	3	
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획		미정			
무역 수지 개선 효과	(단위: 억원)	현재	3년후	5년후	
	수입대체(내수)	-	-	-	
	수 출	-	0.5	2	

3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

3-1. 목표

구분	내용
최종목표	이온 농도 기반 양액 내 이온 균형 및 작물 생육 조절 및 관리를 위한 영상 모니터링 시스템 구축
세부목표	<ul style="list-style-type: none"> - 양액 내 주요 개별이온농도 센서 및 센서 관리 기술 개발 - 순환식 수경재배 양액 내 개별이온 농도 제어기 개발 - 생약원료식물 수확 및 상태 관리 결정을 위한 영상 모니터링 시스템 구축 - 양액 내 개별 이온농도 제어 시스템 개발

3-2. 목표 달성여부

연차	세 부 목 표	연구개발 내용 및 범위	달성도 (%)
1차년도 (2019.09.01- 2020.04.30)	양액 내 주요 개별 이온농도 센서 및 센서 관리 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 양액 측정 센서 (EC, pH, Ca, NO₃, K 등) 적용 - 이온센서 자동 관리 기술 구현 	100
	순환식 수경재배 양액 내 개별 이온 농도 제어기 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 주요 이온 성분 보충을 위한 개별 염 농축액 주입 시스템 구성 	100
	영상 모니터링 시스템 구축	<ul style="list-style-type: none"> - 작물 생육 상태 모니터링을 위한 영상 시스템 구성 요소 선발 	100
2차년도 (2020.05.01- 2020.12.31)	양액 내 개별 이온농도 균형 유지 시스템 적용	<ul style="list-style-type: none"> - 측정 이온 농도 기반 적정 범위값으로 농도 제어가 가능한 시스템 구현 - 재배 베드 적용 및 사용 성능 평가 	100
	식물 생육 영상 분석 시스템 적용	<ul style="list-style-type: none"> - 영상 자동 수집 및 분석시스템 구성 	100

3-3. 목표 미달성 시 원인(사유) 및 차후대책(후속연구의 필요성 등)

- 양액 내의 질산태 질소, 칼륨, 칼슘과 같은 주요 양분 이온을 정량 측정하고 이를 기반으로 개별 농축 비료를 정밀하게 투입하여 불필요한 비료의 주입을 줄이고 작물 생육에 적합한 조성으로의 관리가 용이한 순환식 양액재배 시스템을 개발하였으나 개발 과정 중 이온 센서 기반 양액 측정 및 관리 시스템의 핵심 구성요소들 (센서 컨버터, 이온 센서류 등)의 국내 수급 불안정으로 시작기 제작 일정이 지연되어 재배베드 테스트 기간이 다소 부족하였다. 이에 개발한 양액기의 보급 전 장기간, 다양한 작물들에 대해 적용 테스트를 수행하여 이온 센싱 기반 염 투입 알고리즘의 효용성을 평가하고, 미측정 요소들에 대한 관리 기술을 보강하여 개별 이온 농도 기반 양액 제어 시스템의 기술 안정성을 개선하는 것이 필요하다.

4. 연구결과의 활용 계획 등

4-1. 실용화·산업화 계획

- 양액 내 개별 이온을 선택적으로 반응하는 이온선택성 전극을 적용한 양액 관리 시작기를 개발하였으며, 이를 통해 식물공장 환경에서 양액을 재사용할 때 보다 효율적으로 양분을 투입 및 관리할 수 있는 기술 토대를 마련하였다.
- 개발 양액 시작기를 대량 생산하기에 앞서서 다양한 작물(기능성 새싹작물, 헴프 등의 건기식 및 약용 작물 포함)을 대상으로 현장 실험을 수행하여 개발 기술을 보완하고 실용적인 운용안을 마련하여 기술을 안정화시킬 예정이다.
- 개발한 이온 농도 기반의 배양액 조정 알고리즘을 실제 순환식 양액재배 현장에서 활용하면서 안정성을 확인하고 문제점을 보완할 예정이다.
- 영상 모니터링 시스템을 통해 웹 기반으로 시간, 공간적 제약 없이 생육 상태를 진단하고 관리할 수 있는 기술을 구성하여 활용할 예정이다.

4-2. 특허, 논문 등 지식재산권과 학술성 확보계획

- 해외 SCIE급 저널에 관련 연구 내용을 기반으로 논문을 심사 중이며 최종적으로 이를 게재하고자 한다.
- 개발한 배액 내 이온 성분을 근거로 한 양액 재사용 기술에 대하여 특허 출원을 추진하고 있다.

붙임. 참고문헌

- Asadnia, M., Myers, M., Umana-Membreno, G. A., Sanders, T. M., Mishra, U. K., Nener, B. D., et al. (2017). Ca²⁺ detection utilising AlGa_N/Ga_N transistors with ion-selective polymer membranes. *Analytica Chimica Acta*, 987, 105-110.
- Baille, M., Baille, A., & Laury, J. C. (1994). A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Scientia Horticulturae*, 59(3-4), 217-232.
- Choi, G. L., Cheong, J. W., Yeo, K. H., Rhee, H. C., Lee, S. c., Kang, N. J., et al. Control of Mg and P Ion Using only N, K, and Ca Ion Sensor in Closed Hydroponics. In *Korean Society For Horticultural Science*, 2015 (pp. 82-83, Vol. 1): Korean Society For Horticultural Science
- Escarabajal-Henarejos, D., Molina-Martínez, J., Fernández-Pacheco, D., Cavas-Martínez, F., & García-Mateos, G. (2015). Digital photography applied to irrigation management of Little Gem lettuce. *Agricultural water management*, 151, 148-157.
- Gutierrez, M., Alegret, S., Caceres, R., Casadesus, J., Marfa, O., & del Valle, M. (2007). Application of a potentiometric electronic tongue to fertigation strategy in greenhouse cultivation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 57(1), 12-22, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2007.01.012>.
- Jiang, J.-s., Kim, H.-J., & Cho, W.-J. (2018). On-the-go image processing system for spatial mapping of lettuce fresh weight in plant factory. *IFAC-PapersOnLine*, 51(17), 130-134.
- Jung, D.-H., Kim, H.-J., Cho, W.-J., Park, S. H., & Yang, S.-H. (2019). Validation testing of an ion-specific sensing and control system for precision hydroponic macronutrient management. *Computers and Electronics in Agriculture*, 156, 660-668, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.025>.
- Jung, D. H., Kim, H. J., Choi, G. L., Ahn, T. I., Son, J. E., & Sudduth, K. A. (2015). Automated Lettuce Nutrient Solution Management Using an Array of Ion-Selective Electrodes. *Transactions of the ASABE*, 58(5), 1309-1319, doi: <https://doi.org/10.13031/trans.58.11228>
- Kim, H.-J., Hummel, J. W., Sudduth, K. A., & Motavalli, P. P. (2007). Simultaneous analysis of soil macronutrients using ion-selective electrodes. *Soil Science Society of America Journal*, 71(6), 1867-1877.

Knoll, M., Cammann, K., Dumschatt, C., Borchardt, M., & Högg, G. (1994). Microfibre matrix-supported ion-selective PVC membranes. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 20(1), 1-5.

Nobel, P., Forseth, I., & Long, S. (1993). Canopy structure and light interception. In *Photosynthesis and production in a changing environment* (pp. 79-90): Springer.

<별첨작성 양식>

[별첨 1]

연구개발보고서 초록

과 제 명	(국문) 이온 센서 기반의 생약원료식물 재배용 정밀 양액 및 식물 관리 시스템 개발				
	(영문) Development of precise hydroponic nutrient solution and plant management system for medicinal plants using ion sensors				
주 관 연구 기관	농업회사법인 (주)넥스트온		주 관 연 구 책 임 자	(소속) 농업회사법인 (주)넥스트온	
참 여 기 업	농업회사법인 (주)넥스트온			(성명) 도기석	
총 연구개발비 (180,000천원)	계	180,000,000	총 연 구 기 간	2019.09.30. ~ 2020.12.31.(1년4개월)	
	정부출연 연구개발비	144,000,000	총 참 여 연 구 원 수	총 인 원	9
	기업부담금	36,000,000		내부인원	9
	연구기관부담금	-		외부인원	-
<p>○ 연구개발 목표 및 성과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 양액 내 주요 개별이온농도 센서 및 센서 관리 기술 개발 - 순환식 수경재배 양액 내 개별이온 농도 제어기 개발 - 생약원료식물 수확 및 상태 관리 결정을 위한 영상 모니터링 시스템 구축 - 양액 내 개별 이온농도 제어 시스템 개발 <p>○ 연구내용 및 결과</p> <p>양액 내 질산, 칼륨, 칼슘에 반응하는 감지물질을 선별하였으며 이를 기반으로 제작한 이온선택성전극, 또는 상용 이온선택성전극을 활용하여 양액 내 주영양분들을 측정하고 이를 기반으로 필요한 양분만을 적정량 투입하는 정밀 비료 투입 알고리즘을 개발하였음. 식물공장 환경에서 이를 운용한 결과 주요 양분 이온인 질산, 칼륨, 칼슘에 대한 선택적인 감지 및 보충 동작을 통해 10% 내외의 정확도 수준으로 주어진 설정 농도에 맞추어 양액을 관리하는 것을 확인하였으며, 실제 식물공장 환경에서 보다 즉각적으로 요구되는 양액 요구량을 조성하여 공급하기 위해 비례밸브를 이용하여 양액을 조제 및 공급할 수 있는 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 시작기를 구성하여 적용하였음. 다만 주요 부품의 국내 수급 불안정성 및 상용 식물공장 작물 재배 스케줄 문제로 보다 다양한 작물 품종에 대한 관리 능력 검증 및 개별 이온 보충 알고리즘의 적용성 강화를 위해서 추가적인 현장 실험이 필요하다고 판단됨.</p> <p>○ 연구성과 활용실적 및 계획</p> <ul style="list-style-type: none"> - 식물공장에 적합한 순환식 수경재배 기술의 실용화 수행 - 비료 이용 효율 향상으로 수경재배 농가 경영비 절감 기대 - 환경 부하 최소화에 기여 - 저렴한 순환식 수경재배 시스템 실용화 - 개별 이온 센서의 측정 기반의 양액기 개발에 따른 정밀양액제어 가능 					

[별첨 2]

자체평가의견서

1. 과제현황

		과제번호		819035-2	
사업구분	농식품연구성과후속지원사업				
연구분야	-			과제구분	단위
사업명	농식품연구성과후속지원사업				주관
총괄과제	기재하지 않음			총괄책임자	기재하지 않음
과제명	이온 센서 기반의 생약원료식물 재배용 정밀 양액 및 식물 관리 시스템 개발			과제유형	개발
연구기관	(주)넥스트온			연구책임자	도기석
연구기간 연구비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차연도	2019.09.30.-2020.04.30.	72,000	18,000	90,000
	2차연도	2020.05.01.-2020.12.31.	72,000	18,000	90,000
	3차연도				
	4차연도				
	5차연도				
	계	2019. 09. 30 - 2020. 12. 31	144,000	36,000	180,000
참여기업	농업회사법인 (주)넥스트온				
상대국		상대국연구기관			

※ 총 연구기간이 5차연도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 : 2021. 5. 4.

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
(주) 넥스트온	수석연구원	도기석

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)

- 실제 식물공장 환경에서 즉각적으로 요구되는 양액 요구량을 조성하여 공급하기 위해 1비레벨브를 이용하여 양액을 조제 및 공급할 수 있고 1차 시작기에서 부족한 pH 조절 및 양액 공급량 조절 기능을 보완하여 실 양산환경에 추가 구성품 없이 적용 가능한 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 2차 시작기를 개발·제작함

2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : (아주우수, **우수**, 보통, 미흡, 불량)

- 비료, 물 이용 효율 향상으로 수경재배 농가 경영비 절감
- 환경 부담 절감
- 순환식 수경 정밀 재배 시스템 실용화 기여
- 개별 이온 센서의 측정 모듈 개발에 따른 정밀양액제어 가능

3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : (**아주우수**, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 이온 농도 센서 또는 자료 변환 모듈의 이상으로 인해 문제 상황 발생을 예방하기 위해서 이온 농도 기반 양액 관리 작업 후에 pH, EC 센싱하고 이상 유무를 판단하여 제어 가능
- 현재 상품으로 판매중인 pH, EC 기반의 양액관리기를 대체하여 설치 운영 가능하도록 고안하여 제작됨 (이온 농도기반 양액 조절 기능을 off하고 pH, EC 기반의 양액관리기로도 사용이 가능함)
- 양액 관리 시스템의 정상 운영 및 식물 생육 상태를 직관적으로 확인하기 위한 영상 모니터링 시스템도 같이 구축하여 현장 활용성을 높임.

4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : (아주우수, **우수**, 보통, 미흡, 불량)

- 연차별 개발목표 및 내용에 적합하게 연구개발이 수행되었음
- 2차 시작기는 1차 시작기의 기능 개선품으로만 개발되어지지 않고 실제 재배 생산 현장에 적용성을 높이기 위해 상용으로 판매되고 있는 양액 관리기에 적용된 기술들을 적용하여 외형적으로나 기능적으로나 차별성이 있음

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : (아주우수, **우수**, 보통, 미흡, 불량)

- 특허 출원 1건, 학술발표 2건의 목표로 달성
- 비SCI 논문 1건 목표로 하였으나 SCIE 논문으로 게재 추진 중임
- 특허 출원 1건 진행중 (5월말 출원 목표 1건)

II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
양액 내 주요 개별이온농도 센서 및 센서 관리 기술 개발	20	20	양액 측정 센서 (EC, pH, Ca, NO ₃ , K) 적용하고 이온센서 자동 관리기 술 구현
순환식 수경재배 양액 내 개별이온 농 도 기반 제어기 개발	40	40	주요 이온 성분 보충을 위한 개별 염 농축액 주입 시스템 구성함
양액 내 개별 이온농도 제어 시스템 개발	30	30	측정 이온 농도 기반 적정 범위값으 로 농도 제어가 가능한 시스템 구현 하여 재배 베드 적용 및 사용 성능 평가함 측정 이온 외 주요이온에 대한 관리 알고리즘 설계 적용함
생약원료식물 수확 및 상태 관리 결정 을 위한 영상 모니터링 시스템 구축	10	10	영상 자동 수집 및 분석 시스템 구 성함(선정 평가시의 의견을 수용하 여 영상모니터링 시스템 관련 개발 비중을 줄었음)
합계	100점	100점	

III. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

양액 내 질산, 칼륨, 칼슘에 반응하는 감지물질을 선별하였으며 이를 기반으로 제작한 이온선택성전극, 또는 상용 이온선택성전극을 활용하여 양액 내 주영양분들을 측정하고 이를 기반으로 필요한 양분만을 적정량 투입하는 정밀 비료 투입 알고리즘을 개발하였음. 식물공장 환경에서 이를 운용한 결과 주요 양분 이온인 질산, 칼륨, 칼슘에 대한 선택적인 감지 및 보충 동작을 통해 10% 내외의 정확도 수준으로 주어진 설정 농도에 맞추어 양액을 관리하는 것을 확인하였으며, 실제 식물공장 환경에서 보다 즉각적으로 요구되는 양액 요구량을 조성하여 공급하기 위해 비례밸브를 이용하여 양액을 조제 및 공급할 수 있는 이온 센싱 기반 정밀 양액제어기 시작기를 구성하여 적용하였음. 다만 주요 부품의 국내 수급 불안정성 및 상용 식물공장 작물 재배 스케줄 문제로 보다 다양한 작물 품종에 대한 관리 능력 검증 및 개별 이온 보충 알고리즘의 적용성 강화를 위해서 추가적인 현장 실험이 필요하다고 판단됨

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

주요 부품의 국내 수급 불안정성과 현장 활용성을 높이기 위한 시작품의 성능목표를 도전적으로 설정함으로 인해서 시작품 제작기간 및 난이도가 증가되어 제작된 시작품을 사용하여 충분한 현장시험을 진행하지는 못했음.

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 이온 농도 기반 양액 관리 시스템 현장 적용을 통한 약용식물 생산 사업화
 - 넥스트온의 고효율 LED 인공광 식물재배 시스템에 이온 농도 기반의 양액 관리 시스템을 통합시키고 영상 인식 기반의 생육 정보 획득시스템을 구현하여 적용함으로써 다양한 약용식물을 최적 조건으로 재배 가능한 시설을 구현할 것임
 - 이온 농도 기반 양액 정밀 관리를 통해 기술 고도화 및 품질 최적화를 하여 시장성을 가진 약용 식물의 상품화 수행
 - 특정 성분 강화를 통한 상품성 증대 및 판매 차별화

IV. 보안성 검토

-

[별첨 3]

연구성과 활용계획서

1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input checked="" type="checkbox"/> 자유응모과제 <input type="checkbox"/> 지정공모과제		분 야	
연구과제명	이온 센서 기반의 생약원료식물 재배용 정밀 양액 및 식물 관리 시스템 개발			
주관연구기관	농업회사법인 (주)넥스트온		주관연구책임자	도 기 석
연구개발비	정부출연 연구개발비	기업부담금	연구기관부담금	총연구개발비
	144,000,000	36,000,000		180,000,000
연구개발기간	2019. 09. 30 - 2020. 12. 31 (14개월)			
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
① 양액 내 주요 개별이온농도 센서 및 센서 관리 기술 개발	양액 측정 센서 (EC, pH, Ca, NO ₃ , K) 적용하고 이온센서 자동 관리기술 구현함
② 순환식 수경재배 양액 내 개별이온 농도 기반 제어기 개발	주요 이온 성분 보충을 위한 개별 염 농축액 주입 시스템 구성함
③ 양액 내 개별 이온농도 제어 시스템 개발	측정 이온 농도 기반 적정 범위값으로 농도 제어가 가능한 시스템 구현하여 재배 베드 적용 및 사용 성능 평가함 측정 이온 외 주요이온에 대한 관리 알고리즘 설계 적용함
④ 생약원료식물 수확 및 상태 관리 결정을 위한 영상 모니터링 시스템 구축	영상 자동 수집 및 분석 시스템 구성함(선정 평가 시의 의견을 수용하여 영상모니터링 시스템 관련 개발 비중을 줄였음)

* 결과에 대한 의견 첨부 가능

3. 연구목표 대비 성과

성과 목표	사업화지표										연구기반지표								
	지식 재산권			기술 실시 (이전)		사업화					기술 인증	학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용·홍보		기 타 (타 연구 활용 등)
	특 허 출원	특 허 등록	품 종 등록	건 수	기 술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출	투 자 유 치		논문		학 술 발 표			정 책 활 용	홍 보 전 시	
												SC I	비 SC I						
단위	건	건	건	건	백 만 원	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	건	명	건	건			
가중치	10			10		30	20		10				10		10				
최종목표	1			1		1	110		4			1		2		2			
연구기간내 달성실적	0			1		2	80		4			0		2		2			
달성율(%)	0			100		200	72.7		100			0		100		100			

4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	이온 센싱 기반 양액 정밀 관리시스템
②	
③	

5. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)				
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복 제	외국기술 소화·흡수	외국기술 개선·개량	특허 출원	산업체이전 (상품화)	현장에로 해 결	정책 자료	기타
①의 기술		v				v	v			
②의 기술										
③의 기술										
·										

* 각 해당란에 v 표시

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	- 이온 농도 기반 양액 관리 시스템 현장 적용을 통한 약용식물 생산 사업화 - 비료, 물 이용 효율 향상으로 수경재배 농가 경영비 절감 - 환경 부담 절감 - 순환식 수경재배 시스템 실용화 기여 - 개별 이온 센서의 측정 모듈 개발에 따른 정밀양액제어 가능
②의 기술	
③의 기술	
:	
:	

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		SCI	비SCI	논문평균IF			학술발표	정책활용	
단위	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	명				
가중치	10			10		30	20		10				10		10				
최종목표	1			1		1	110		4			1		2		2			
연구기간내 달성실적	1			1		2	80		4			0		2		2			
연구종료 후 성과창출 계획	1			0			1,000		10			1	0	0		0			

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

핵심기술명 ¹⁾	이온 센싱 기반 양액 정밀 관리시스템		
이전형태	<input checked="" type="checkbox"/> 무상 <input type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	천원
이전방식 ²⁾	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input checked="" type="checkbox"/> 기타(자체 기술 실시-노하우)		
이전소요기간	-	실용화예상시기 ³⁾	2021. 11. 30
기술이전시 선행조건 ⁴⁾			

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 농식품연구성과후속지원사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 농식품연구성과후속지원사업의 연구 결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.