

319029-01
-1-CG000

보급형 순환식 수경재배 시스템 개발 최종 보고서

2020

농림식품기술기획평가원
농림축산식품부

(건고덕
17p)

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

1세대 스마트 플랜트팜 산업화연구개발사업 2020년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-003223-01

보급형 순환식 수경재배 시스템 산업화

2020.07

주관연구기관 / 신한에이텍(주)
협동연구기관 / 한국과학기술연구원

농림축산식품부

(전문기관) 농림식품기술기획평가원

(건고덕 20p)

제출문

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “보급형 순환식 수경재배시스템 산업화”(개발기간 : 2019.1.22 ~ 2020.1.21)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2020.07.31

주관연구기관명 : 신한에이텍(주) (대표자) 김형규(인)

협동연구기관명 : 한국과학기술연구원 (대표자) 윤석진(인)



주관연구책임자 : 장 재 욱

협동연구책임자 : 양 중 석

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의 합니다.

<보고서 요약서>

보고서 요약서

과제고유번호	319029-01-1-CG000	해 당 단 계 연 구 기 간	2019.01.22. - 2020.01.21.	단 계 구 분	(1차년도/ (1차년도)
연구사업명	단 위 사 업	농림축산식품연구개발사업			
	사 업 명	1세대 스마트 플랜트팜 산업화 사업			
연구과제명	대 과 제 명	(해당없음)			
	세부 과제명	보급형 순환식 수경재배 시스템 산업화			
연구책임자	해당단계 참여연구원 수	총: 15명 내부: 15명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부:500,000천원 민간:167,000천원 계:667,000천원	
	총 연구기간 참여연구원 수	총: 15명 내부: 15명 외부: 명	총 연구개발비	정부:500,000천원 민간:167,000천원 계:667,000천원	
연구기관명 및 소 속 부 서 명	주관연구기관: 신한에이텍(주) 협동연구기관: 한국과학기술연구원			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위 탁 연 구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

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

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 ·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명정 보	생물자 원	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(연구개발성과를 중심으로 개조식으로 작성하되, 500자 이내로 작성합니다)

- 수비료 및 물 절약을 위한 1세대 스마트팜 순환식 수경재배 고도화 시스템 개발 및 산업화를 위하여 보급형 양액살균장치에 포함된 순환식 양액살균 시스템 개발
- 개발한 보급형 순환식 수경재배시스템 성능검증을 위하여 살균처리능에 영향을 미치는 전처리(모래여과 등)에 대한 수량과 압력에 따른 적정 역세척 시간 규명하고, 양액살균방식(UV-Lamp/UVC-LED)에 대한 살균력 테스트 진행
- 양액재이용에 따른 이온불균형 해소를 위한 양배액관리 및 제어프로그램 개발하고 순환식 양액공급시스템에서 기계학습을 이용한 pH 및 EC 조절 기술을 개발함
- 보급형 순환식 수경재배시스템의 시제품을 만들고 영농현장에서 실증을 진행

보고서 면수

74면

보고서 요약서

과제고유번호	319029-01-1-CG000	해 당 단 계 연 구 기 간	2019.01.22.- 2020.01.21	단 계 구 분	1/1
연구사업명	단 위 사 업	농식품기술개발사업			
	사 업 명	1세대 스마트 플랜트팜 산업화 사업			
연구과제명	대 과 제 명	(해당 없음)			
	세 부 과 제 명	보급형 순환식 수경재배시스템 산업화			
연구책임자	장재욱	해당단계 참여연구원 수	총: 15명 내부: 15명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부:500,000천원 민간:167,000천원 계:667,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 15명 내부: 15명 외부: 명	총 연구개발비	정부:500,000천원 민간:167,000천원 계:667,000천원
연구기관명 및 소 속 부 서 명	주관연구기관: 신한에이텍(주) 협동연구기관: 한국과학기술연구원			참여기업명	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	

위탁연구	연구기관명:	연구책임자:
------	--------	--------

※ 국내외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

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

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설 ·장비	기술요약 정보	소프트 웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명정 보	생물자 원	정보	실물
등록·기탁 번호	N	Y	Y	N	Y	Y	N	N	N	N	N

요약

- 수비료 및 물 절약을 위한 1세대 스마트팜 순환식 수경재배 고도화 시스템 개발 및 산업화를 위하여 보급형 양액살균장치가 포함된 순환식 양액살균 시스템 개발
- 개발한 보급형 순환식 수경재배시스템 성능검증을 위하여 살균처리능에 영향을 미치는 전처리(모래여과 등)에 대한 수량과 압력에 따른 적정 역세척 시간 규명하고, 양액살균방식(UV-Lamp/UVC-LED)에 대한 살균력 테스트 진행
- 양액재이용에 따른 이온불균형 해소를 위한 양배액관리 및 제어프로그램 개발하고 순환식 양액공급시스템에서 기계학습을 이용한 pH 및 EC 조절 기술을 개발함
- 보급형 순환식 수경재배시스템의 시제품을 만들고 영농현장에서 실증을 진행

보고서 면수
74

<요약문>

<p>연구의 목적 및 내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 수비료 및 물 절약을 위한 1세대 스마트팜 순환식 수경재배 고도화 시스템 개발 및 산업화 <ul style="list-style-type: none"> - 보급형 양액살균장치 및 배액관리 및 양액제어 프로그램이 포함된 순환식 양액살균 시스템 개발 - 보급형 순환식 수경재배시스템 영농실증 및 산업화 ○ 보급형 순환식 수경재배시스템 성능검증 <ul style="list-style-type: none"> - 살균처리능에 영향을 미치는 전처리(모래여과 등)에 대한 수량과 압력에 따른 적정 역세척 시간 규명 및 알고리즘 반영 - 작물별/배지별(암면, 코코피트) 복수의 양액살균방식(UV-Lamp/UVC-LED)에 대한 살균력 테스트(박테리아, 곰팡이류 등의 살균효율 95% 이상), 순환식 수경시스템 수류의 안전성 검증을 위한 UV Chamber 내 수류안전성 검증 테스트 병행 및 처리저류조 내 살균효율 검증) ○ 보급형 순환식 수경재배시스템 고도화를 위한 순환식 배액관리 및 양액 제어프로그램 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 양액제이용에 따른 이온불균형 해소를 위한 양배액관리 및 제어프로그램 개발 - 순환식 양액공급시스템에서 PID 및 기계학습을 이용한 pH 및 EC 조절 기술 ○ 보급형 순환식 수경재배시스템 영농실증 및 산업화 <ul style="list-style-type: none"> - 경제성, 안전성, 안정성 등이 반영되고 양배액관리 및 제어프로그램 탑재된 시제품 개발 - 영농현장에 직접 실증을 통한 평가 				
<p>연구개발성과</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 보급형 순환식 수경재배시스템 보고서 1건 ○ 공급양액 pH 및 EC 고도화 1건, 이온불균형 해소 위한 양배액관리 프로그램 1건 ○ 보급형 수경재배시스템 시제품 개발 2건, 기술이전 2건, 영농실증활용 2건, 고용창출 2명 				
<p>연구개발성과의 활용계획 (기대효과)</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 양액 무단배출로 인한 수생태계 보존과 수질관리를 위한 사회적 비용절감 ○ 수비료 절감을 통한 농가 고정비용 절감효과 ○ 고도화되고 경제성을 갖춘 보급형 순환식 수경재배시스템 개발을 통한 해외시장 판로 개척과 수출경쟁력 확대 				
<p>국문핵심어 (5개 이내)</p>	순환식	수경재배	산업화	스마트팜	관수
<p>영문핵심어 (5개 이내)</p>	Recycling	Hydroponics	Industrialization	Smart Farm	Irrigation

※ 국문으로 작성(영문 핵심어 제외)

〈 목 차 〉

1장 연구개발과제의 개요	1
1. 연구개발 배경	1
2. 연구개발 대상의 현황	1
가. 순환식 수경재배시스템의 기술 현황	1
나. 순환식 수경재배시스템의 연구 동향	5
3. 연구개발의 목표 및 범위	6
2장 연구수행 내용 및 결과	7
1. UV램프 기반의 양액살균장치 시제품 개발	7
가. 양액살균장치 시제품 개발(하드웨어)	7
나. 양액살균장치 시제품 개발(소프트웨어)	9
다. 양액살균장치 시제품 적용	14
2. 시설온실에 순환식 수경재배시스템을 적용하여 시제품의 성능 및 안정성을 평가	16
가. 실증온실에서의 시제품의 성능 및 안정성 평가	16
나. 순환식 수경재배시스템의 시스템 경제성 평가 및 구성비용 분석	25
3. 순환식 수경재배시스템 전처리 모듈의 적정 역세척 시간 산정 및 프로그램에 반영	27
가. 배지별 배액에 존재하는 부유고형물 농도	28
나. 모래여과를 이용한 부유고형물 제거	29
다. 모래여과시 역세척 공정의 효능 파악	30
4. 순환식 수경재배시스템 살균모듈의 안정성 검증	33
가. 살균효율 안정성 평가를 위한 양액의 특성 평가	33
나. UV 살균모듈 전후 살균효율 안정성 평가	39
다. 연속운전에 따른 순환식 수경재배시스템의 살균효율 안정성 평가	47
5. 순환식 배액관리 및 제어프로그램 개발	49
가. 양액제어 및 배액관리에 연계된 온실환경 데이터 획득 시스템 구축	49
나. 배액의 특성평가	50
다. 양액 특성 기반 순환식 배액관리	55
라. 폐양액 최소화 알고리즘 개발	59
마. 배액의 특성 고려 양액 제조 알고리즘 개발	62
바. 양액의 양분 농도 제어 기술	67
3장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	70
1. 목표 달성도	70
2. 관련분야 기여도	71
4장 연구결과의 활용 계획	72

1. 연구개발 결과의 활용 계획	72
2. 기대성과 및 파급효과	72
가. 기대성과	72
나. 파급효과	73
붙임 .참고문헌	74
〈별첨〉 주관연구기관의 자체평가의견서	

1장 연구개발과제의 개요

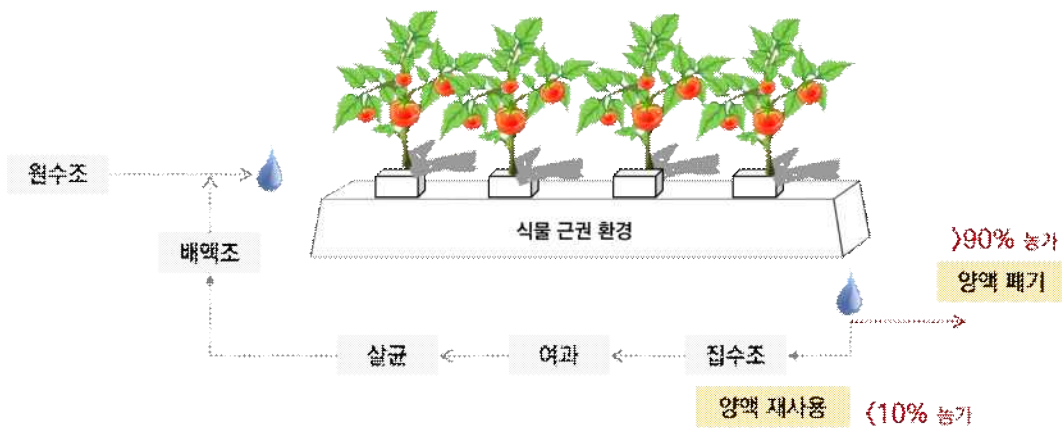
1. 연구개발 배경

순환식 수경재배 방식은 온실에서 배액의 외부방출을 억제함으로써 환경을 보호하고, 배액을 재활용 함으로써 비료값 절감, 수자원 절감 등의 효과를 거둘 수 있어서 국내뿐만 아니라 다른 농업 선진국에서도 관심을 많이 가지고 있다. 순환식 수경재배 방식의 장점은 상품 생산성이 높고, 고품질의 작물을 생산할 수 있는 장점이 있지만, 초기 투자비용이 비싸다는 단점을 가진다. 선진국 중 하나인 네덜란드의 재활용 권장(Encouraging recycling), 잔여 배출물의 오염제거(Decontaminating any remaining discharge), 의무적인 폐양액 재활용 등이 법제화되어 관리되는 것과는 달리 국내 대부분의 수경재배 농가는 식물 재배에서 사용된 양액을 다시 사용하지 않고 곧바로 폐기하는 방식을 채택하고 있다. 최근 국내에서도 배액의 외부방출로 인한 환경오염이 심각해지고, 농가 경영수익의 하락으로 인한 수비료 절감에 관한 관심이 높아지고 있는 상황에서 자발적, 강제적 순환식 수경재배시스템 도입에 대한 요구가 증대되고 있는 상황이다.

2. 연구개발 대상의 현황

가. 순환식 수경재배시스템의 기술 현황

순환식 수경재배시스템은 온실에서 토마토, 파프리카, 딸기 등 작물을 재배하면서 발생하는 배양액을 재사용하는 수경재배시스템이다. 작물에 이용하고 남은 영양액은 배출되는 데 이를 배양액(또는 배액)이라 한다. 배양액 회수 및 전처리 설비는 사용된 배양액을 집수조에 모으거나 혹은 살균 전 배액 회수조에 모아 배액에 남아있는 불순물과 병원성 미생물을 전처리하는 장치를 말한다. 후단에 배치된 살균 설비를 통해 살균 처리된 배액은 원수, 농축비료액과 양액제어프로그램에 의하여 적절한 비율로 혼합되어 다시 작물에 공급되게 된다.



[그림 1.1] 비순환식 수경재배시스템과 순환식 수경재배시스템의 모식도

순환식 수경재배시스템에서 고려해야 할 주요사항은 병충해 저감과 배양액의 이온 불균형 해소이다. 온실 및 식물주위에는 다양한 박테리아, 바이러스 등 병해충이 존재하여 이를 포함한 배양액을 바로 이용할 경우 온실 병충해 발생을 확대할 우려가 있으므로 살균을 통하여 이를 줄이는 기술이 필수적으로 필요하다. 또한, 식물이 양액에 존재하는 영양분을 모든 이온 및 원소별로 동등하게 흡수하지 않기 때문에 배양액에 존재하는 이온의 비율이 공급되는 양액 내 이온의 비율과 달라지며 이온의 불균형이 발생한다. 따라서 배양액을 바로 재이용할 때는 재배자가 원하는 이온 및 원소의 비율과 다르게 공급이 된다. 이를 해결하기 위하여 배양액에 존재하는 이온의 농도에 따른 양액 제어를 진행할 필요성이 있다.

네덜란드 온실은 환경오염 유발과 과도한 에너지 소비의 주범으로 인식이 좋지 않았으나 이후 화석연료, 물, 비료, 농약, 등의 사용을 최소화하고 친환경적인 에너지 사용을 높여가는 노력으로 국민적 지지를 얻고 있다. 네덜란드의 순환식 수경재배 관리기술 및 서비스 인프라는 2015년을 기준으로 보급 완료 단계라고 보아도 무방하며, 1998년 이후 네덜란드는 수경재배에서 발생한 폐액의 재사용과 온실 ha당 500 m³의 빗물 수집을 의무화하여 수자원의 친환경적 이용을 촉진하고 있는데 이 영향으로 순환식 수경재배기술이 발달하였다.

양액분석 및 조제 시스템을 자체적으로 구축하여 서비스 인프라를 갖추어 수경재배 폐양액의 90% 이상을 절감하고 있다. 양액(배양액)분석 및 조제 시스템을 산업화하여 현재는 전문 분석업체가 활발히 활동하여 분석을 끝마치는데 드는 총 소요시간은 1~1.5일이며 전자메일을 통해 분석 결과를 통보하는 시스템을 갖추고 있을 뿐만 아니라 역삼투 수질 정화 시스템과 배액 살균시스템 기술개발 및 개선에 지속적으로 투자를 하고 있으며 생육단계별(0~4단계) 양액조성이 가능한 과채류 전용 순환식 양액이 개발되어 이에 대한 관리 설명서가 보급되고 있다. 네덜란드 순환식 수경재배시스템 연구로 Hydrion-line project는 실시간 작물계측센서, 작물의 양분요구도 예측 모델 개발, 양액 공급조절 통합 체계 구축 등에 대한 실용적 연구가 수행되고 있다.

유럽과 북미 선진국을 대상으로 1990년부터 작물별 양액조성, 폐양액 재활용 기술 및 시스템 개발 연구를 활발히 진행하였고, 1992년에 네덜란드 온실작물연구소를 중심으로 채소·화훼작물 양액조성표를 제작하여 활용하기 시작하였다. 양액공급시스템과 양액 여과 및 살균장치 개발에 관한 연구도 1990년부터 활발히 연구가 진행되었다.

현재의 순환식 수경재배시스템의 보급화는 네덜란드 정부가 1994년 사용된 양액을 회수 한 뒤 저장탱크에 재저장하였다가 다시 사용하는 순환식 방식으로 전면적인 전환을 법제화하고, 2004년 이후 시행된 이 법의 핵심내용으로 재활용 권장, 잔여배출물의 오염제거, 의무적인 폐양액 재활용들 공식적으로 의무화함으로써 보급화되기 시작하였다. 현재 스마트팜 순환식 수경재배시스템의 보급모델은 2015년을 기점으로 네덜란드는 보급완료 단계이다.

네덜란드의 세계적인 Priva사, Hoogendroon사, Hortimax사 등은 UV-Lamp 양액살균장치 기반 순환식 수경재배시스템과 소프트웨어를 개발하고 있고, 양액분석 및 조제 시스템을 자체적으로 구축하여 서비스 인프라를 갖추었고 이 결과 수경재배 폐양액의 90% 이상을 절감하고 있는 단계이고 현재도 계속해서 업데이트 제품을 시판 중이다.

국내에서는 양액 재배면적이 증가하고 있음에도 불구하고 아직까지 완전한 순환식 양액재배시스템이 사용되는 사례는 대규모 온실을 제외하면 거의 없는 실정이다. 국내의 일부 대규모 온실에서는 순환식 수경재배시스템을 사용하고 있으며 네덜란드의 Priva사, HortiMax사, Hoogendoorn

사 등 외산 제품을 사용하고 있는 것으로 파악된다. 일부 순환식 양액재배 장비를 갖춘 곳에서도 회수된 배액에 EC(Electric Conductivity, 전기전도도)를 기준으로 미리 조성된 양액을 첨가해 일정한 농도만 유지함에 따라 양액 내 특정 성분이 저하되거나 높아져서 성분의 심한 불균형을 초래하고 있다. 무기성분의 과잉축적, 영양의 불균형 등을 해소하기 위해서는 작물의 재배환경이나 생육단계에 따라 양액 내 개별 부족 성분의 보충과 과잉 성분의 배제 등 관리가 필요하며, 이를 위해서는 배액 이온 농도의 측정이 필요하다. 하지만 국내에서는 경제적인 이유 등으로 배액분석이 잘 이루어지지 않는 실정이다.

(1) 배양액 살균

순환식 수경재배시스템의 핵심기술 중에 가장 중요하게 다루어지고 있는 기술은 살균으로, 수경재배에서 오염된 배액의 재사용은 병원성 박테리아와 곰팡이류 등을 빠르게 확산시키는 요인이 될 가능성이 크기 때문에 위생적 배액 살균설비는 필수적인 요건이다. 살균설비의 종류로는 가열(Heating), 자외선(UVC), 자외선 LED (UVC-LED), 필터, 오존 등이 있다.

가열 살균설비는 일정 시간 동안 고온의 열을 가함으로써 진균, 세균, 바이러스, 선충, 조류 등의 미생물을 제거하는 완벽한 방식이지만 설치비용과 운영비용이 높으며, 소요되는 면적이 높은 단점이 있어 국내에서 거의 사용하지 않는 방식이다.

자외선 살균설비는 현재 국내에서 가장 널리 사용되는 순환식 수경재배 설비로써 UVC(200-280 nm)를 이용해서 병원균 DNA를 손상해 살균하는 방식이다. 일반적으로 UV 램프는 석영관 내부에 위치하고 내부에 수소가스가 충전되어 있어서 여기서 발생하는 UVC를 이용하여 잔류 독성 없이 단시간에 살균이 가능한 장점이 있다. 그러나 코코피트 배지와 같은 유기배지를 이용하여 재배할 경우 배양액에 유기물 농도가 높아 살균 성능이 하락하며, 필요한 자외선 조사량을 계량하는 것 또한 어려울 뿐만 아니라 에너지 소비량이 많다는 단점이 있다. 또한, UV를 조사한 경우 Fe-EDTA와 같은 유무기복합체가 광산화로 해리되어 철과 같은 무기이온이 산화로 인하여 침전되는 현상이 발생하므로 이를 해결하기 위하여 Fe-EDTA 농축액을 양액공급시스템에서 따로 주입해주어야 하는 문제점이 있다. 최근 UVC-LED 방식의 살균처리 방식에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. LED의 장점은 열 발생이 거의 없고 UVC-Lamp와 달리 에너지 소모가 작고, 배액에 포함된 Fe과 Mn 이온이 UVC-Lamp의 고온에서 발생하는 열로 인한 석영관에 침전되어 광조사능을 저해하는 문제를 해결할 수 있는 장점이 있으며, 설치 및 유지관리가 간편한 장점이 있으나, 비용으로 인하여 상용화가 진행되지 못하고 있다.

오존 살균은 오존 산화력을 이용하여 살균하는 방식으로 살균력은 높으나 주기적으로 오존처리 전과 후의 병원균 밀도를 확인해야 하고, 설비 및 운영비용이 비싸다는 단점을 가진다.

전통적인 여과제의 대안으로 UF(Ultrafiltration, 한외여과) 사용에 관한 연구도 진행하고 있는데 비록 가격은 저렴하지만 다른 살균설비와 함께 운용해야 한다는 단점을 가진다.

[표 1.1] 순환식 수경재배의 다양한 살균기법

살균 방법	화학적 방법	오존	UVC	막여과
박테리아 살균	○	○	○	○
바이러스 살균	○	○	○	○
Toxic 부산물	THM, ClO ₂ , OCl ⁻	O ₃	×	×
지속성	○	×	×	×
독성유발여부	○	○	×	×
실용화 검증	×	△	○	×
경제성	△	△	△	×

(2) 배양액 성분 분석 및 양액 제어

순환식 수경재배시스템에서는 양액 성분분석을 주기적으로 진행하여야 하며, 이를 고려하여 양액 처방을 진행하여야 한다. 순환식 수경재배시스템에서 양배액 관리에 중요한 요소 중 하나는 양액의 성분 분석과 이를 고려한 순환식에 적합한 양액조성을 개발하고 처방을 하는 방법이다.

국내의 양액 분석기관에서는 대부분 비순환식 수경재배시스템에 적합한 양액 처방전을 발행하고 있으며, 서울시립대에서는 원수 및 배액분석과 근권목표 수준을 고려하여 파프리카 전용배양액 처방프로그램(서울시립대, 2009)를 개발하였으며, 상용화된 제품으로 HydroFeed가 앱 형태로 제공되고 있다. 네덜란드와 같은 농업 선진국에서는 순환식 수경재배시스템이 잘 갖추어져 있기 때문에 양배액의 수질을 분석하여 이를 기반으로 처방을 진행하는 프로토콜도 잘 갖추어져 있다.



<파프리카 전용 배양액 처방 프로그램>



<HydroFeed>

[그림 1.2] 양액 처방 프로그램

나. 순환식 수경재배시스템의 연구 동향

순환식 수경재배시스템에서 실용적이 측면의 국내 연구를 살펴보면 식물의 생육에 따른 양액의 조성 연구, 순환식 배양액 관리 프로그램 개발, UV 살균 시스템 개발 등이 있다.

FTA 대응 경쟁력향상 기술개발을 위한 수출 과채류의 친환경 배지를 이용한 순환식 수경재배 기술개발을 과제를 수행하였다. 국립원예특작과학원, 부산대학교, 상명대학교, 강원대학교 등을 중심으로 파프리카 순환식 유기배지경재배시 생육단계별 배양액 조성연구, 신조성 양액의 기존 양액 대비 생산성 검증, 친환경 순환식 수경재배기술의 현장 적용 및 경제성 평가, 유기배지 사용년수에 따른 증기 소독 기술개발, 과채류 유기 폐배지의 채소류 토경배지 재활용 처리기술, 유기 폐배지를 활용한 토양개량제 펠렛 비료 생산기술, 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 기준설정과 같은 주제를 대상으로 2017년까지 연구를 수행하였다. 국립원예특작원은 양액 재이용 및 생육단계에 따른 양수분 흡수특성에 대한 연구를 수행하였다.

유기배지경 재배시 양액 재이용을 위한 양수분 흡수특성 연구에서 급액, 배액 및 근권의 양분 분석을 통해 생육 단계에 따른 pH와 EC 변화 및 양분흡수를 구명하여, 순환식 수경재배를 적용할 수 있는 기초자료 연구를 수행하였다. 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 수행하였다. 관련 연구로 파프리카 대상 순환식 수경재배를 사용하여 신조성 양액을 통한 양액조성별 생육단계에 따른 파프리카의 광합성, 과실수량, 및 품질 특성에 관한 분석에 관한 연구를 수행하였다(국립원예특작원, 2017).

살균장치에 대한 연구를 살펴보면 최근 KIST 천연물연구소는 양액기 제조업체(신한에이텍(주)) 및 LED 업체((주)루코)와 협력연구를 통하여 UVC-Lamp와 UVC-LED를 이용하여 양액을 살균할 수 있는 모듈을 개발하였다.



[그림 1.3] 순환식 수경재배 시스템 세부 개념도

네덜란드는 배지의 재활용보다는 환경친화적 배지 개발에 관한 연구를 수행하고 있으며 작물별 순환식 배양액, 배액(폐양액) 재활용기술, 및 살균시스템 고도화 및 실시간 작물 계측센서, 모델에 의한 작물의 양분요구도 예측기술, 양수분 공급조절을 위한 센서(유량센서, 이온센서 등)와 작물모델의 통합체계 또는 작물 모델과 제어기의 통합체계 구축을 위한 순환식 수경재배시스템 확립하는 단계에 이른다. 또한, 개별 이온의 양액자동제어시스템 알고리즘 개발 및 적용연구를 활발히 진행하고 있으며 이를 통해 양액 내 질산태질소, 칼륨, 칼슘 등 양분의 농도를 동시에 측정하는 이온 선택성 전극(Ion-Selective Electrodes, ISEs) 등에 관한 연구를 진행하고 있다.

국내외적으로 순환식 수경재배시스템은 네덜란드, 이스라엘, 일본, 미국제품들이 있으며, 국내에서는 대부분 네덜란드 제품이 소비자들에게 많이 소개되었다. PRIVA사 경우, PRIVA VIALUX Line 모델을 출시하였으며, 처리용량과 확장성을 기반으로 3가지 형태(Vialux HD-UV+Vialux E-line module, Vialux M-Line+Vialux E-Line module, Vialux E-Line System)로 구성되어 있다.

순환식 수경재배시스템에서 양액 사용을 줄이는 방법으로는 배액의 발생을 원천적으로 줄이는 방법(양액공급량 조절이나 토양센서, 식물 줄기의 물 이동 측정센서 및 로드셀 등을 이용한 배지 환경 측정센서 등을 이용하여 배지의 함수량을 조절하여 배액의 발생을 정확 및 정밀하게 조절하는 기술, 증산량을 고려하여 양액 공급을 조절하는 기술 등을 이용), 배액을 재활용하는 방법(UV조사, 전기살균 등 발생하는 배액의 병충해 발생 가능성을 줄여 재활용하는 방법 등)이 있다.

배액의 재활용하는 방법에서는 앞서 언급한 철과 같은 무기이온의 살균 모듈에서의 침전, 식물에서 사용하는 영양분이 식물별 및 생육단계별로 달라서 배액 내 성분이 달라짐으로 인하여 공급되는 양액의 성분의 변화, 양액 재활용 비율에 따라서 재활용 비율이 낮으면 재활용되지 못하는 양액을 비워주어야 하는 문제점 등이 존재한다.

기준에 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다양한 연구가 진행되었으며, 국내의 현실과 실제 농가에 적용 가능한 1세대 스마트팜의 산업화와 고도화를 고려할 경우 농가 보급형 순환식 수경재배시스템에서는 배액을 살균하여 처리하고, 이후에 농축 양액과 처리된 배액을 적절한 비율로 공급하는 방식에서 작물에 공급되는 이온의 불균형을 최소화 할 수 있는 비율, 농축액의 성분 조절, 순환식에서 양액공급기의 EC의 조절 고도화 기술 등이 필요한 상황이다.

3. 연구개발의 목표 및 범위

본 연구개발은 작물을 재배하기 위한 온실에서 발생하는 배양액을 재이용하기 위하여, 고도화된 전처리 및 양액살균장치와 양액 재이용에 따른 이온 불균형 해소를 고려한 양액 배액관리 및 제어 프로그램이 적용된 보급형 순환식 수경재배시스템 개발을 목표로 한다.

구체적인 연구의 범위는 다음과 같다.

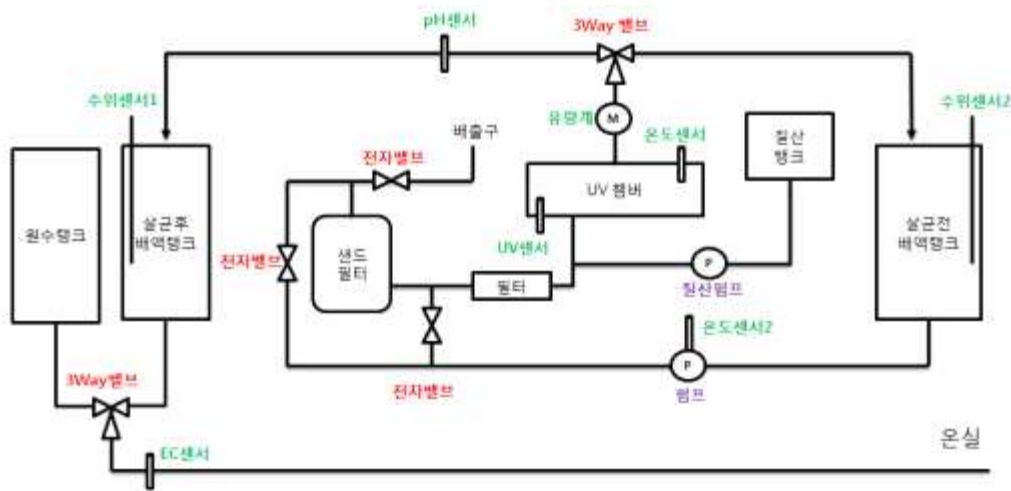
- ① UV램프 기반의 양액살균장치 시제품 개발
- ② 시설온실에 순환식 수경재배시스템을 적용하여 시제품의 성능 및 안정성을 평가
- ③ 순환식 수경재배시스템 전처리 모듈의 적정 역세척시간 산정 및 프로그램에 반영
- ④ 순환식 수경재배시스템 살균모듈의 안전성(살균효율) 검증
- ⑤ 순환식 수경재배시스템 살균모듈의 안정성 검증
- ⑥ 순환식 배액관리 및 제어 프로그램 개발

2장 연구수행 내용 및 결과

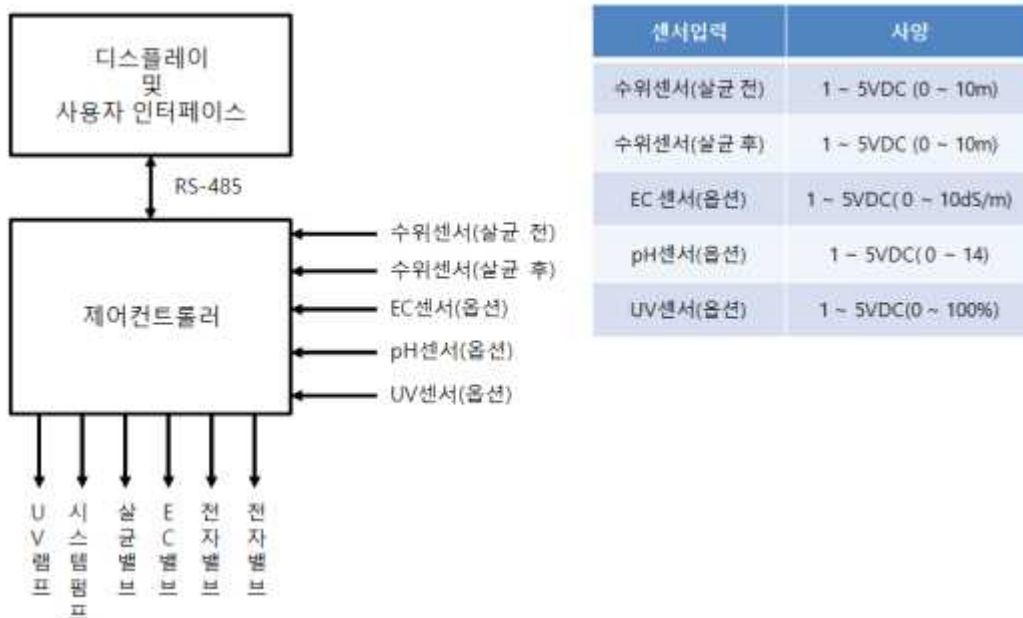
1. UV램프 기반의 양액살균장치 시제품 개발

가. 양액살균장치 시제품 개발(하드웨어)

양액살균장치 시제품은 데이터 분석을 위한 신한에이텍 내부의 테스트베드 적용을 위한 시제품과 영농실증에 필요한 시제품 개발로 이루어졌으며 두 시제품은 시스템 펌프, UV램프의 사양의 교체를 통하여 호환될 수 있도록 개발되었다.



[그림 2.1] 양액살균장치 시제품 구성도



[그림 2.2] UV램프기반의 양액살균장치 입출력 구성

(1) 양액살균장치 시제품 사양

[표 2.1] 양액살균장치 구성요소별 사양

항목	사양	사진
사용자 인터페이스 (디스플레이 및 터치입력)	터치 기반의 12 " 사용자 인터페이스 *통신: RS-232(1채널), RS-485(1채널) *전원: DC24V	
제어컨트롤러	ATmega2560기반의 하드웨어 *입력: 24채널 *출력: 18채널 *통신: RS-232(2채널), RS-485(1채널) *전원: DC24V	
UV램프 챔버	재질 : SS316 스텔링을 이용한 4개의 챔버 챔버의 중심부 석영관 자외선 강도계 센서설치	
UV램프	수입원 : USA 램프출력 : 320W/램프4EA 수명 : 10,000시간또는 18개월 형식 : 저압고출력 아말감 램프 프리히트 방식 전자식 안정기 : 4EA 램프보호용 석영관	
모래여과 필터	규격 : 36 " 스틸의 원형 모래크기 : 1MM 내외 필터의 역세척 가능한 배관설비	
시스템 펌프	시스템 펌프의 용량 : 6m³/35M 스테인레스 스틸의 임펠러 일정한 압력을 유지하기 위한 인버터 부착	
전자밸브	수입원 : 이스라엘 전자밸브 입력전압 : AC 24V 규격 : 1 "	
살균제어밸브(3Way)	입력 전압 : AC220 신호방식 : ON/OFF 방식 재질 : 스테인레스 스틸 SS304 O RING 재질 : 바이톤 또는 테프론	
EC제어 밸브(3Way)	ATmega2560기반의 하드웨어 *입력: 24채널 *출력: 18채널 *통신: RS-232(2채널), RS-485(1채널) *전원: DC24V	

나. 양액살균장치 시제품 개발(소프트웨어)

(1) 사용자 인터페이스

터치기반의 사용자 인터페이스를 통하여 사용자에게 현재의 시스템 상태의 모니터링 정보를 제공하며 시스템의 제어항목을 설정할 수 있도록 하였다.

[표 2.2] 모니터링 및 제어항목

분류	항목	기능
밸브	3WAY	시스템 동작 상태에 따라서 살균배액의 저장 tank를 선택 . Warm UP/Cool Down : 처리전 탱크 . 살균진행: 처리후 탱크
	EC밸브	EC 설정에 따라서 처리후 탱크의 살균배액과 원수의 공급비율을 자동조절
	밸브1	SandFilter flush 동작을 위한 전자밸브(NC)
	밸브2	살균처리를 위한 전자밸브 (NO)
	밸브3	SandFilter flush 동작을 위한 전자밸브(NC)
	밸브4	예비1
	밸브5	예비2
센서	처리 전 수위1	처리전 탱크의 수위 측정
	처리 후 수위2	처리후 탱크의 수위 측정
	UV센서	UV램프의 상태 및 UV챔버 세척을 위하여 UV 강도를 측정
	pH 센서	UV챔버 세척을 위하여 pH를 측정
	EC 센서	살균배액과 원수의 투입비율을 조절하기 위하여 EC를 측정
펌프	시스템 펌프	살균절차를 위한 시스템 메인 펌프
	ACID Pump	UV챔버 세척 시 질산을 투입하기 위한 펌프
필터	샌드필터	살균처리 전 배액의 불순물을 제거하기 위한 모래여과
Tank	살균 후 탱크	살균처리된 배액의 저장탱크
	살균 전 탱크	살균처리전 배액의 저장탱크
	원수 탱크	원수의 저장탱크



[그림 2.3] 사용자 인터페이스 통한 시스템 모니터링 및 제어설정 항목

① Warm UP 시간

시스템의 초기 기동 시 UV램프가 예열되는 시간동안은 살균처리가 정상적이지 않으므로 UV램프가 예열될 시간 동안(Warm UP 설정 시간동안) 처리된 배액을 처리 후 탱크로 보내지 않고 처리 전 탱크로 배액을 순환시킨다.

② Cool Down 시간

시스템의 정지 시 설정된 cool down 시간 동안 처리된 배액을 처리 후 탱크로 보내지 않고 처리 전 탱크로 배액을 순환시켜 UV 램프의 온도를 낮춘 후 시스템을 정지한다.

③ 처리속도 상한설정

처리속도는 유량계를 통하여 측정되는 살균처리 된 배액의 양으로 시스템의 이상으로 인하여 측정된 처리속도가 일정 수준(처리속도 상한설정 값) 이상일 경우 시스템 에러로 판단하며 처리속도 상한 지속시간 설정 값을 참조하여 동작한다.

④ 처리속도 상한 지속시간

처리속도 상한에러 상태가(처리속도 상한 설정 값 < 현재 측정 처리속도) 처리속도 상한 지속시간 설정 시간동안 유지되는 경우 시스템 에러로 판단하여 시스템을 정지 시킨다.

⑤ 처리속도 하한설정

처리속도는 유량계를 통하여 측정되는 살균처리 된 배액의 양으로 시스템의 이상으로 인하여 측정된 처리속도가 일정 수준(처리속도 하한설정 값) 이하일 경우 시스템 에러로 판단하며 처리속도 하한 지속시간 설정 값을 참조하여 동작한다.

⑥ 처리속도 하한 지속시간

처리속도 하한에러 상태가(처리속도 하한 설정 값 > 현재 측정 처리속도) 처리속도 하한 지속시간 설정 시간동안 유지되는 경우 시스템 에러로 판단하여 시스템을 정지시킨다.

⑦ 처리 후 탱크 시작수위

일반적으로 시스템에 문제가 없는 상태에서 시스템은 처리 후 탱크와 처리 전 탱크의 수위에 의하여 살균처리의 진행, 정지를 반복하게 된다. 처리 후 탱크의 현재수위가 처리 후 탱크 시작수위 설정 값 보다 낮을 경우 살균처리를 시작한다.

⑧ 처리 전 탱크 시작수위

일반적으로 시스템에 문제가 없는 상태에서 시스템은 처리 후 탱크와 처리 전 탱크의 수위에 의하여 살균처리의 진행, 정지를 반복하게 된다. 처리 전 탱크의 현재수위가 처리 전 탱크 시작수위 설정 값 보다 높을 경우 살균처리를 시작한다.

⑨ 샌드필터 Flush 주기

샌드필터는 모래를 이용하여 불순물을 제거하는 필터로 일정양의 배액을 필터링 한 후 내부의 불순물을 제거하기위하여 주기적으로 flush(Backwash)를 해주어야 한다. 사용자가 설정한 샌드필터 flush 주기 설정 값 (m3/h)만큼의 배액을 처리한 후 샌드필터에 대한 flush 동작을 수행한다.

* EC밸브관련 설정은 옵션으로 설치환경에 따라서 사용여부를 설정가능 하도록 개발

⑩ EC설정

EC 제어밸브의 제어를 통하여 양액기로 투입되는 살균배액+원수의 EC의 설정 값

⑪ EC밸브 대기시간

EC밸브의 1회 동작 후 대기시간 (EC밸브는 동작->대기를 반복한다)

⑫ EC밸브 동작시간

EC밸브의 0% -> 100% 열리는 동작시간 (100%->0% 닫히는 시간과 동일)

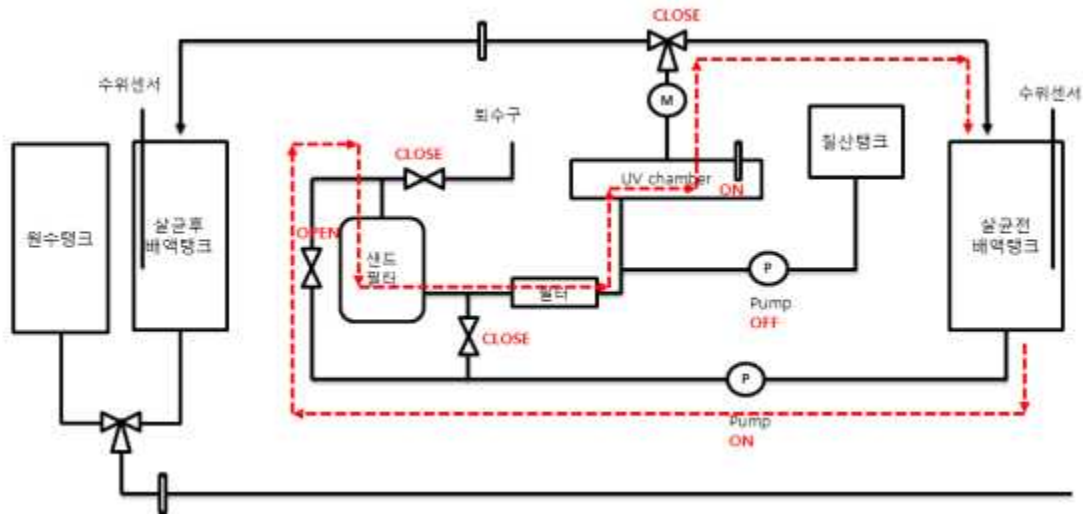
⑬ EC밸브 1회 동작범위(%)

EC밸브는 살균배액와 원수의 투입비율을 조절하여 설정된 EC를 맞추는 역할을 한다. 이를 위하여 밸브의 1회 동작범위를 설정한다.

- EC밸브 열림시간 (설정항목 19): 13초
- 1회 동작범위: 10%
- EC밸브 대기시간(설정항목 20): 10초

상기설정의 경우 EC밸브는 12초의 10%인 1.2초 동작(열림/닫힘) 후 대기시간 10초 동안 정지 EC 조건이 맞지 않을경우 다시 1.2초 동작 후 대기를 반복하여 EC 조건을 맞추는 동작을 진행한다.

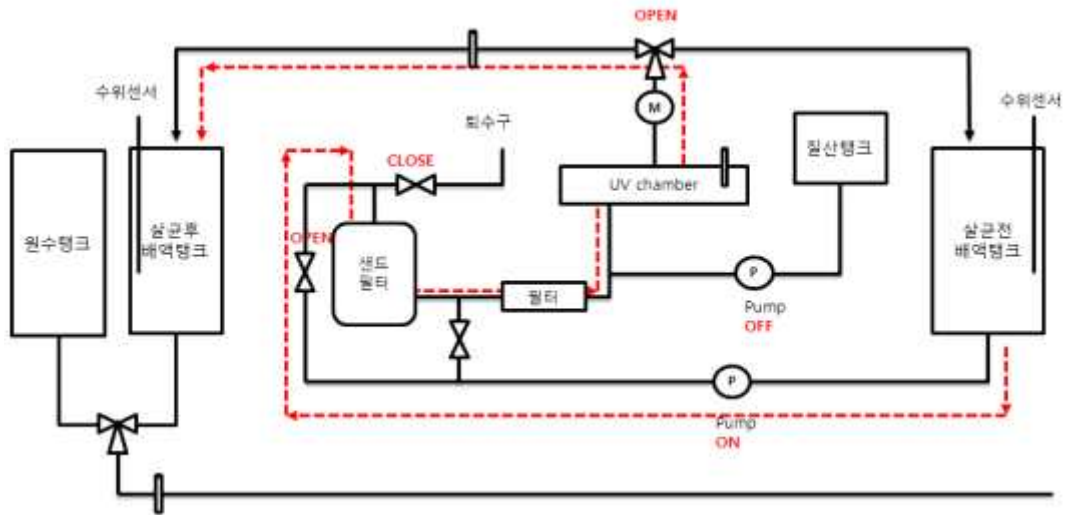
(2) 양액살균제어 알고리즘 개발



[그림 2.4] 양액 재처리 시스템 Warm up 절차

① Warm Up 절차

시스템의 시작/재시작 시 UV램프의 예열을 위하여 설정시간 동안 살균 처리된 배액을 처리 전 탱크로 다시 순환시키는 상태 (UV램프가 예열되기 전까지 배액의 살균이 완전하게 이루어지지 않음)

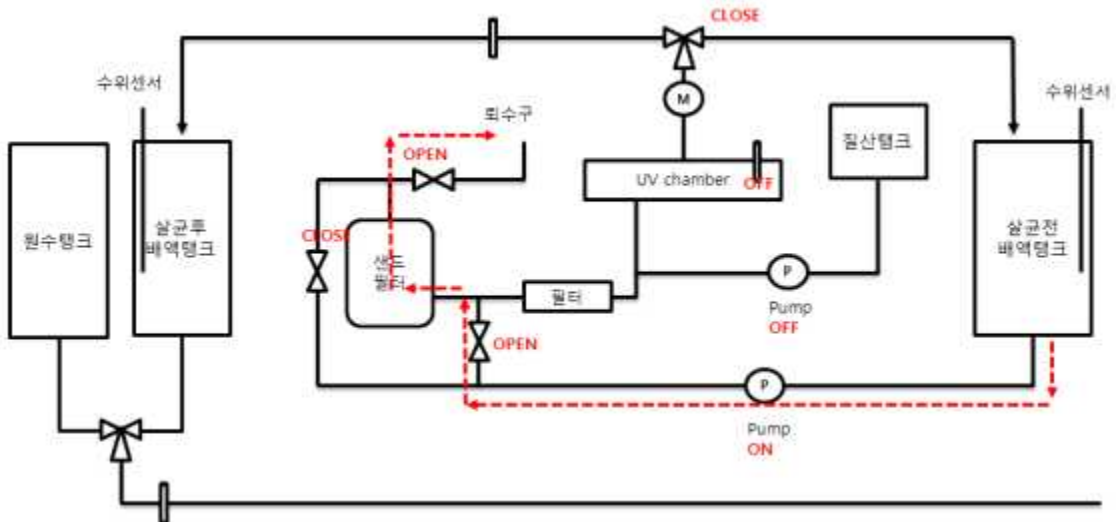


[그림 2.5] 양액 재처리 시스템 살균 절차

② 살균처리 절차

Warm Up 상태가 끝난 후 배액의 살균처리를 진행하는 상태로 살균배액을 처리 후 탱크로 저장한다

③ 모래여과 역세(Backwash) 절차

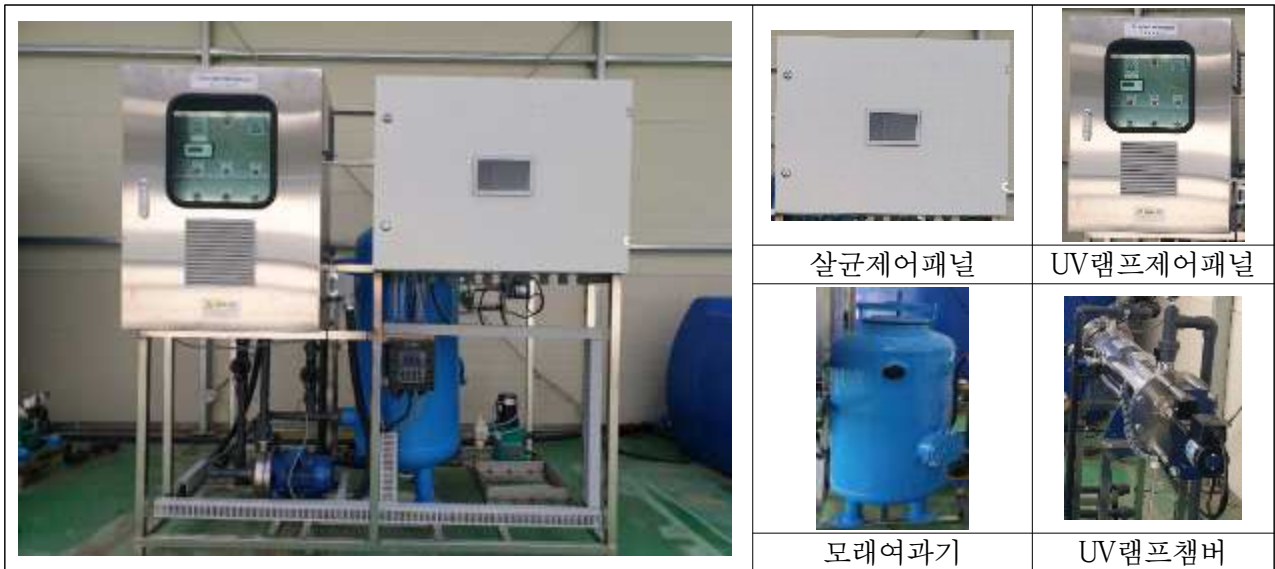


[그림 2.6] 양액 재처리 시스템 모래여과 역세절차

모래여과를 세척하는 상태로 사용자가 설정한 배액을 처리 후 세척 절차를 수행한다. 이때 시스템이 살균진행 상태일 경우 세척절차를 수행하지 않고 시스템이 정지상태일 경우 세척절차를 수행한다.

다. 양액살균장치 시제품 적용

양액살균장치 시제품은 데이터 분석을 위한 신한에이텍 테스트베드, 영농실증 현장 2곳에 적용되어 있으며 각각의 시제품은 설치 환경에 맞도록 시스템 펌프, UV램프의 사양 등이 설계하였다.



[그림 2.7] UV램프기반의 양액살균장치 시제품(사내 테스트베드 적용)



[그림 2.8] UV램프기반의 양액살균장치 시제품(농가실증 적용-2000평)



[그림 2.9] UV램프기반의 양액살균장치 시제품(농가실증 적용-6000평)

2. 시설온실에 순환식 수경재배시스템을 적용하여 시제품의 성능 및 안정성을 평가
 가. 실증온실에서의 시제품의 성능 및 안정성 평가

(1) 성능평가를 위한 현장

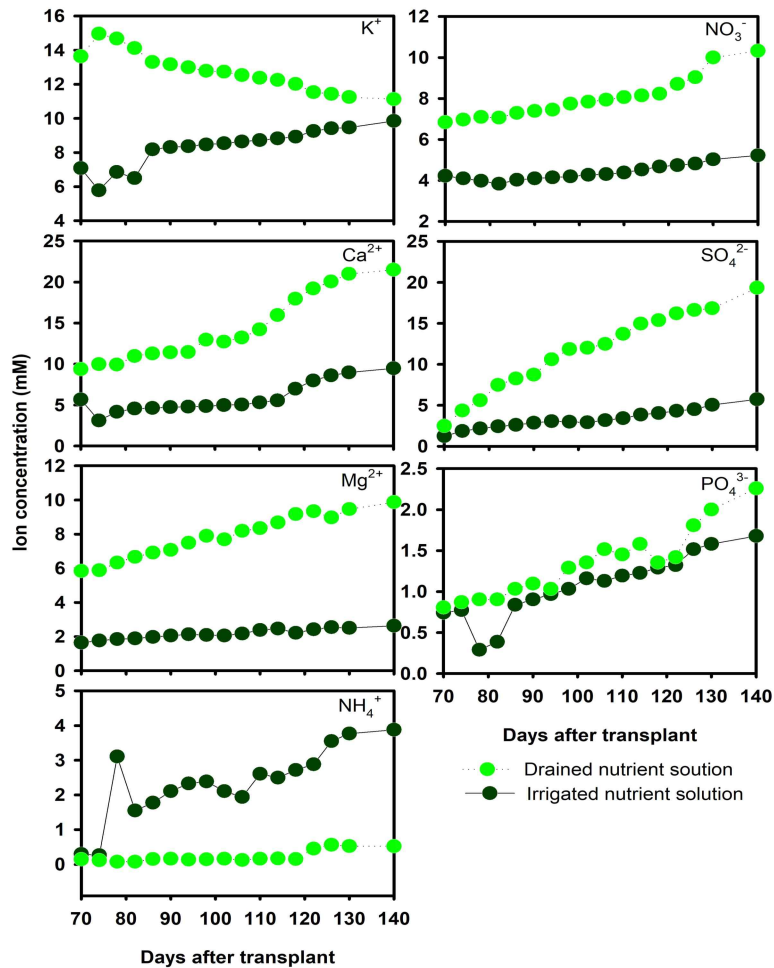
[표 2.3] 순환식 수경재배 시스템 실증 현장

	
<ul style="list-style-type: none"> ○ 현장이름: S농가 ○ 주소: 창원시 마산합포구 진북로 ○ 농장전체면적 600m² (코코피트배지) ○ 3연동 온실: 토마토, 파프리카, 딸기 수경재배 환경구축 ○ 정식: 2019년 9월-현재까지 ○ 운전방식: 순환식 수경재배시스템 ○ 살균방식: UV 램프 (320W×2, 150W×3) 	

[표 2.4] 영농실증 사이트 정보

전경	실내	정보
		<ul style="list-style-type: none"> ○농가명: P농가 ○위치: 마산합포구 진전면 P농가 ○작목: 파프리카 ○사용배지: 암면배지 ○정식일: 2019년 8월 20일 ○규모: 2000평
		<ul style="list-style-type: none"> ○농가명: K농가 ○위치: 마산합포구 진동면 K농가 ○작목: 파프리카 ○사용배지: 코코피트배지 ○정식일: 2019년 8월 10일 ○규모: 6000평

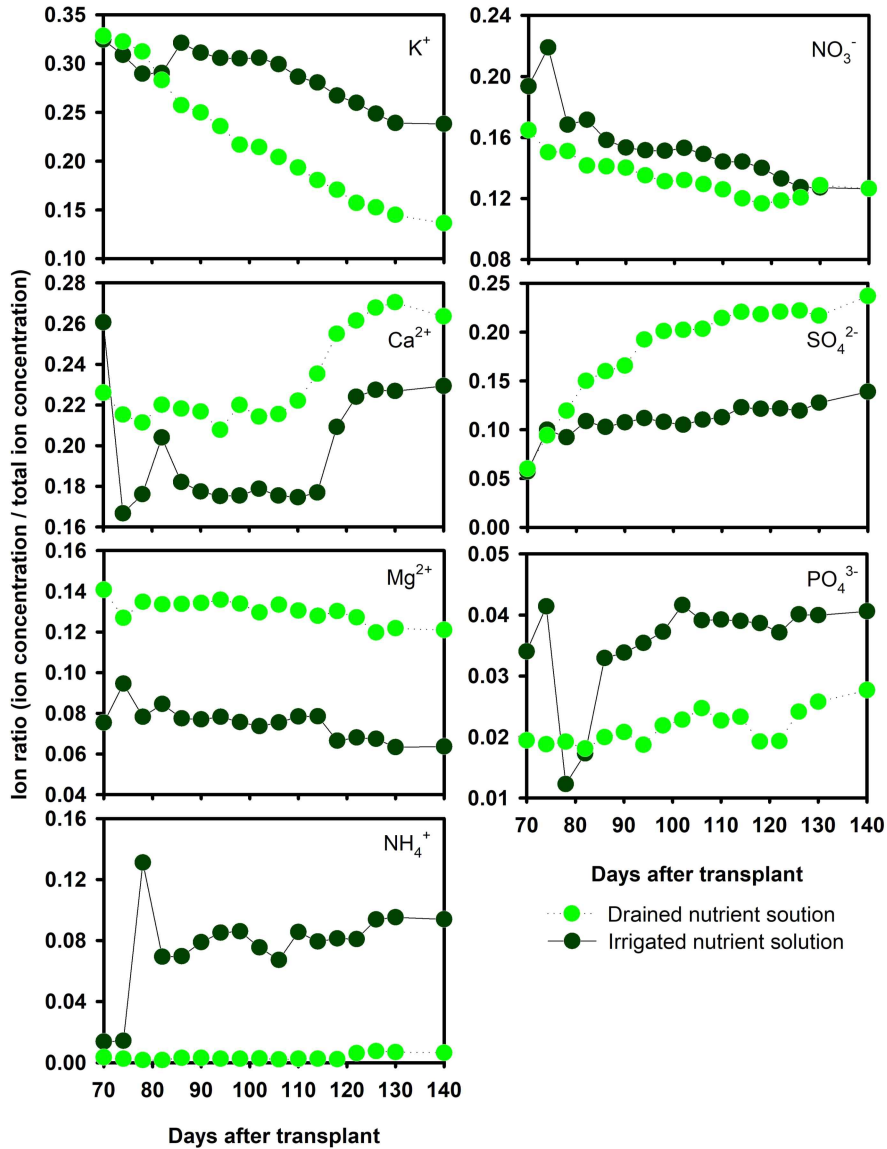
(2) 순환식 수경재배 시스템의 실증시 이온농도의 변화



[그림 2.10] 코코피트배지 및 암면배지의 혼합 배액과 공급 양액의 다량 원소 농도의 변화

본 연구의 순환식 수경재배시스템에서는 양액 재사용을 시작한 시점부터 4일 간격으로 양액 표본을(마지막 표본은 10일) 수집하였다. 표본 수집 농가(S농가)의 규모는 600평으로, 파프리카와 토마토를 혼작하였다. 배지는 코코피트를 사용하였으며, 표본의 수집 대상은 공급양액과 배액으로 하였다. 배액은 파프리카와 토마토 재배구역에서 배출되어 혼합된 상태로 수집하였다.

대부분의 다량 원소 농도는 급액 양액의 농도보다 높게 나타났으며 시간 경과에 따라 증가 경향이 관찰되었다(그림 2.10). 그러나, 칼륨의 경우 공급 양액 내 농도는 증가하였음에도 배액에서는 계속해서 감소하는 경향이 관찰되었다. 암모늄태 질소의 경우는 다른 양분들과는 다르게 배액의 농도가 계속해서 낮게 나타났다.



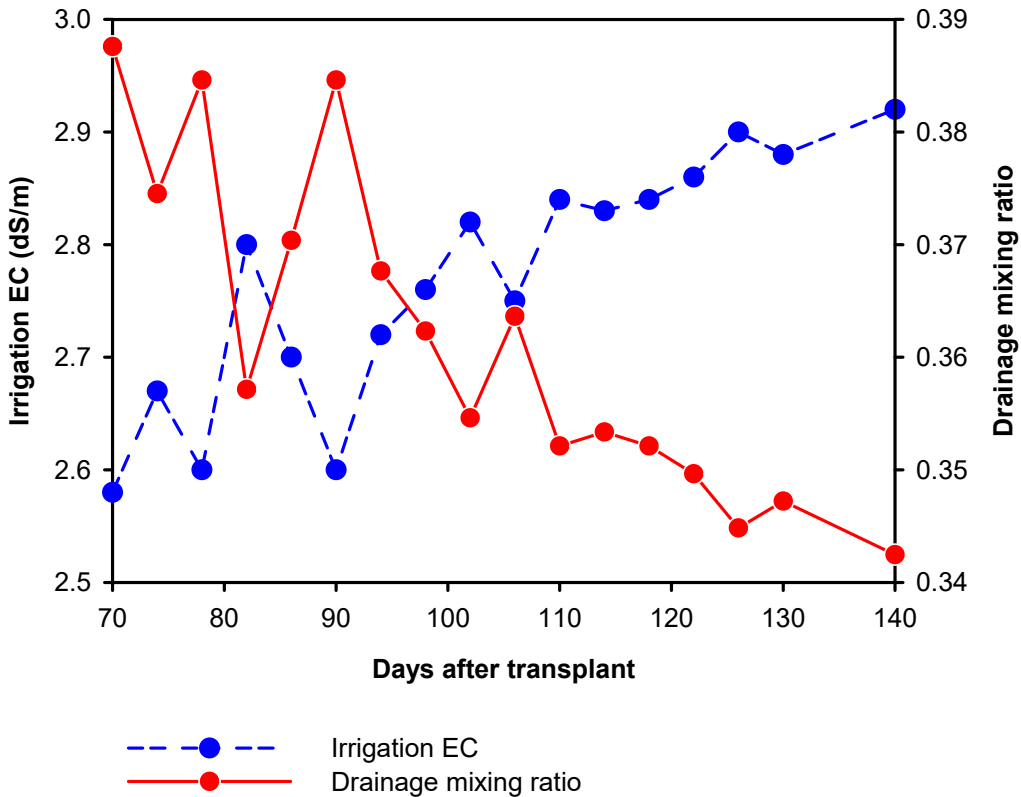
[그림 2.11] 코코피트배지 및 암면배지의 혼합 배액과 공급 양액의 다량이온 비율 변화

칼륨은 공급 양액 내 농도에서는 증가하는 경향이 관찰되었으나, 이를 양분 상대적인 비율로 나타냈을 때는 배액과 급액에서 모두 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 공급 양액 내 칼륨의 농도가 증가하였음에도 배액에서 계속해서 감소하는 경향이 관찰되었던 것은 일차적으로는 공급 양액 내 칼륨 비율 감소에 따른 결과로 해석된다. 전체 농도를 제어하는 EC 기반 수경재배시스템의 특성상 공급 양액 내 양분의 비율과 각 양분의 흡수비에 따라 시스템 내 양분의 변화 양상에 영향이 미칠 수 있다. 그러나 순환식 수경재배시스템에서 양분의 변화는 더욱 근본적으로는 공급 양액 내 양분의 비율 변화에 따라 변화하는 개별 양분의 공급 속도와 식물의 개별 양분 흡수 속도와의 차이에 의한 변화로 해석될 수 있다. 질산태 질소의 경우 공급 양액과 배액 내 양분의 비율 모두 감소하는 경향이 관찰되었으나, 공급 양액과 배액 내 양분 농도로 보았을 때는 증가하는 경향이 나타났다. 공급 양액 내 양분 비율 변화에 따라 각 양분의 상대적인 공급 속도의

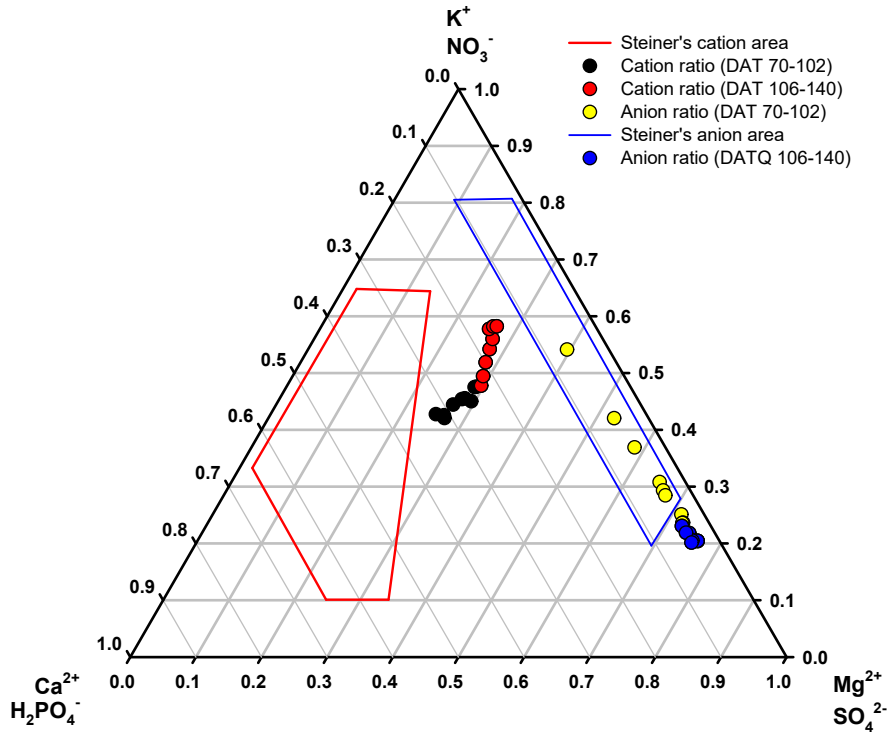
변화로 이어지며, 이에 따라 각 양분은 감소 또는 증가의 경향이 나타나는 것으로 볼 수 있다.

암모늄태 질소는 식물의 흡수 및 이용이 매우 빠른 것으로 알려져 있다. 급액 농도에서 지속적인 증가가 있었음에도 배액에서 매우 낮게 나온 것은 식물의 흡수 속도보다 공급 속도가 낮았음을 의미한다. 또한 공급 양액 내 암모늄태 질소의 변화는 비율로 변환하였을 경우에도 그 증가 폭이 크지 않음을 알 수 있다.

일부 양분의 농도 및 비율 변화는 정식 후 110일 이후부터 상대적으로 큰 폭의 변화가 관찰되었다. 이는 순환식 수경재배 시스템의 공급 EC 변화를 참고하였을 때, 배액의 희석 EC 설정값은 1.5 dS/m로 고정된 것에 반해, 공급 양액의 목표 EC는 증가되어 배액의 혼합 비율이 감소함에 따른 영향이 일부 있을 것으로 판단된다(그림 2.12).



[그림 2.12] 관수 양액의 EC와 배액의 혼합 비율 (배액 희석 EC 설정값: 1.5 mS/cm)

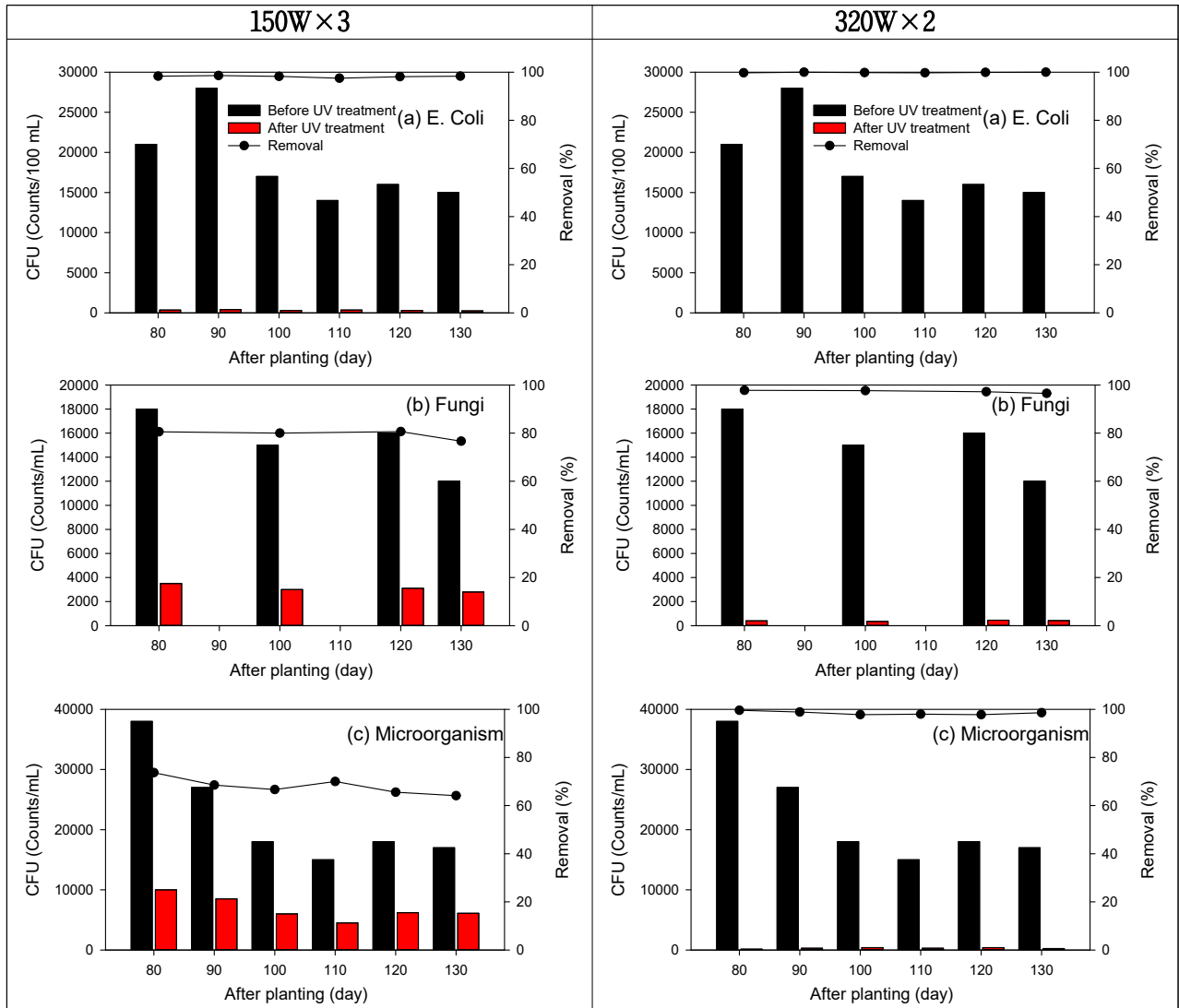


[그림 2.13] 배액 내 양이온, 음이온 당량 비율 변화 및 Steiner 양이온, 음이온 표준 비율 삼각도

전체 양분에 대한 비율과는 별도로 다량 원소의 양이온 사이와 음이온 사이의 비율은 근권부의 식물 영양학적 조건을 추정하는데 사용될 수 있다. 수경재배에서 각 양분의 재배 안정성을 판단하는 지표로 Steiner(1980)의 양분 비율 삼각도가 사용될 수 있다(그림 2.13). 본 연구에서의 양이온 또는 음이온 간의 비율에 따른 재배 안정성은 삼각도에 나타내어 추정하였을 때, 양이온의 경우 재배 안정 구간에서 이미 벗어나 있음을 확인할 수 있다. 반면 음이온의 경우는 재사용 표본 수집 기간의 전반부에는 안정 구간 안에서 유지되었으나 재사용 기간 경과에 따라 전차 불균형 구간으로 이동한 것으로 볼 수 있다. 양이온과 음이온 삼각도 내 비율 변화는 매우 급진적이거나, 무작위의 변화가 관찰되지는 않았다. 이는 순환식 수경재배 시스템에서의 양분 불균형 문제는 공급 양액 내 각 양분 간 비율 제어를 통해 각 양분의 비율 변화를 일정 구간 내로 진입시켜 관리할 수 있음을 시사하는 결과로 판단된다.

(3) 순환식 수경재배 시스템의 살균 안정성 평가

수경재배시스템에서는 다양한 배지를 사용하는데 대표적으로 암면(암면배지), 코코피트 기반 배지(코코피트) 등이 이용된다. 배지에서 발생하는 배액의 성상은 배지의 특성에 따라서 유기물이 다량 함유될 가능성이 높으며(특히 코코피트 기반 배지), 이는 살균효율에 많은 영향을 미치는 것으로 나타나고 있다. 암면배지의 경우는 UV 램프를 통한 효율은 코코피트 배지에 비하여 상당히 높은 것으로 나타나고 있다. 아래 결과는 현장실증을 위해 시제품으로 제작된 UV 램프 (320W×2, 150W×3)의 성능을 비교한 그림이다.



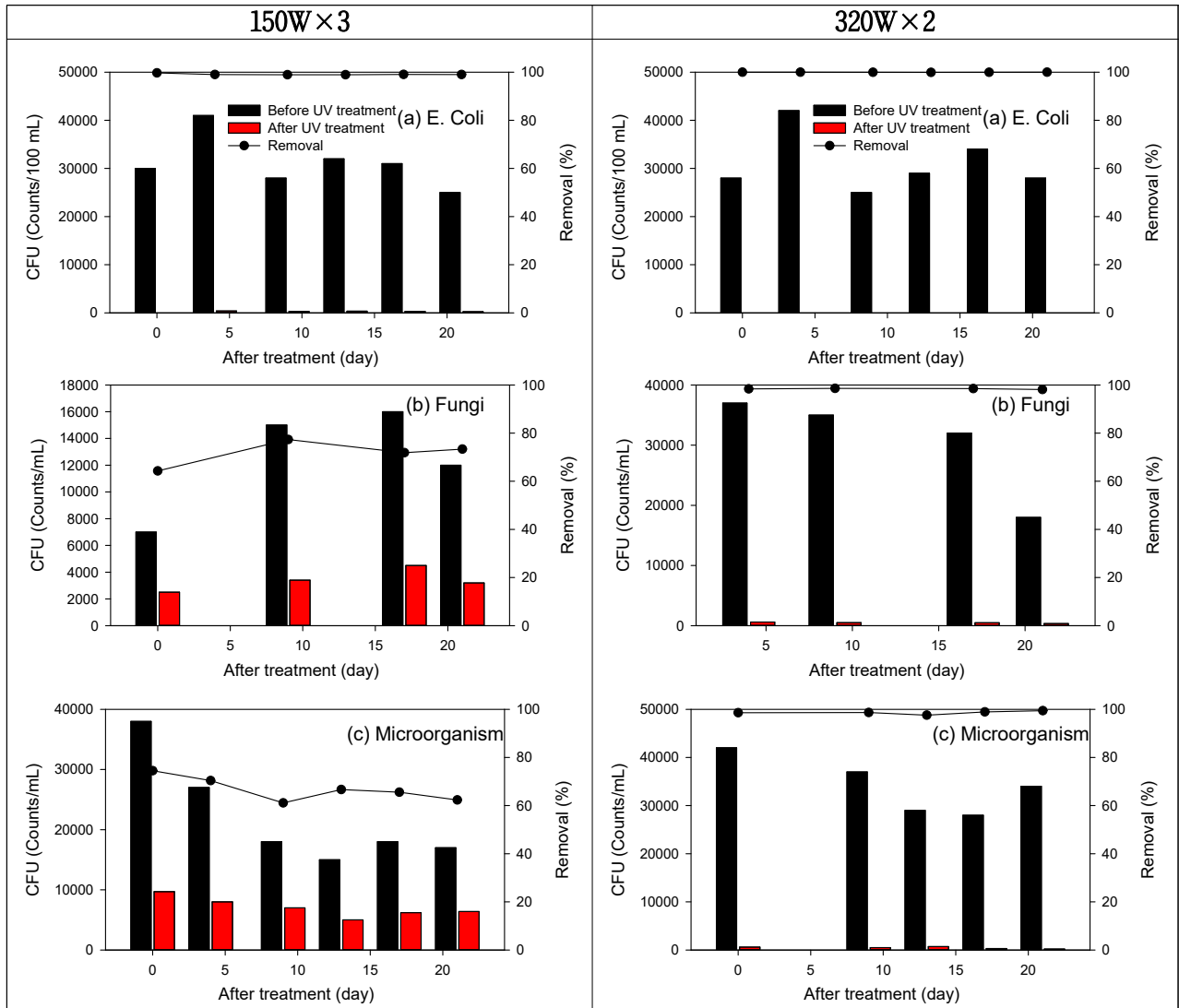
[그림 2.14] 코코피트배지 배액에서 UV 램프 처리 (320W X 2, 150W×3) 전후의 일반세균, 곰팡이 및 총대장균 처리율(S농가)

[표 2.5] 살균모듈(UV 램프와 UV LED)에 따른 살균 효능 요약(S농가)

	UV 램프	
	320W × 2	150W × 3
처리용량	1톤/h	
파장	254 nm	
출력	320W × 2	150W × 3
배지(대상작물)	코코피트배지(파프리카)	
제거율(%) 정식후 80일 (총대장균/곰팡이/일반세균)	99.9/97.3/98.4	98.1/79.4/68.1
평균 UVT (%/cm)	15	16
가격	700-800만원	400-500만원

코코피트 배지 배액의 UV램프 (320W×2) 적용 후 총대장균/곰팡이/일반세균 제거율이 99.9/97.3/98.4 등으로 관찰되었고, UV램프 (150W×3) 경우, 총대장균/곰팡이/일반세균 제거율은 98.1/79.4/68.1 등으로 관찰되었다. 기존 KIST 실증팜 암면배지로부터 유출된 배액은 UV 램프 (320W) 적용 후의 총대장균/곰팡이/일반세균 제거율이 95% 이상을 유지하며, 코코피트로부터 유출된 배액 경우 UV 램프 (320W)로 제거되는 것은 한계가 있으며, UV 램프 (320W×2)가 적용되어야지만 완벽하게 제거될 수 있는 것으로 판단된다.

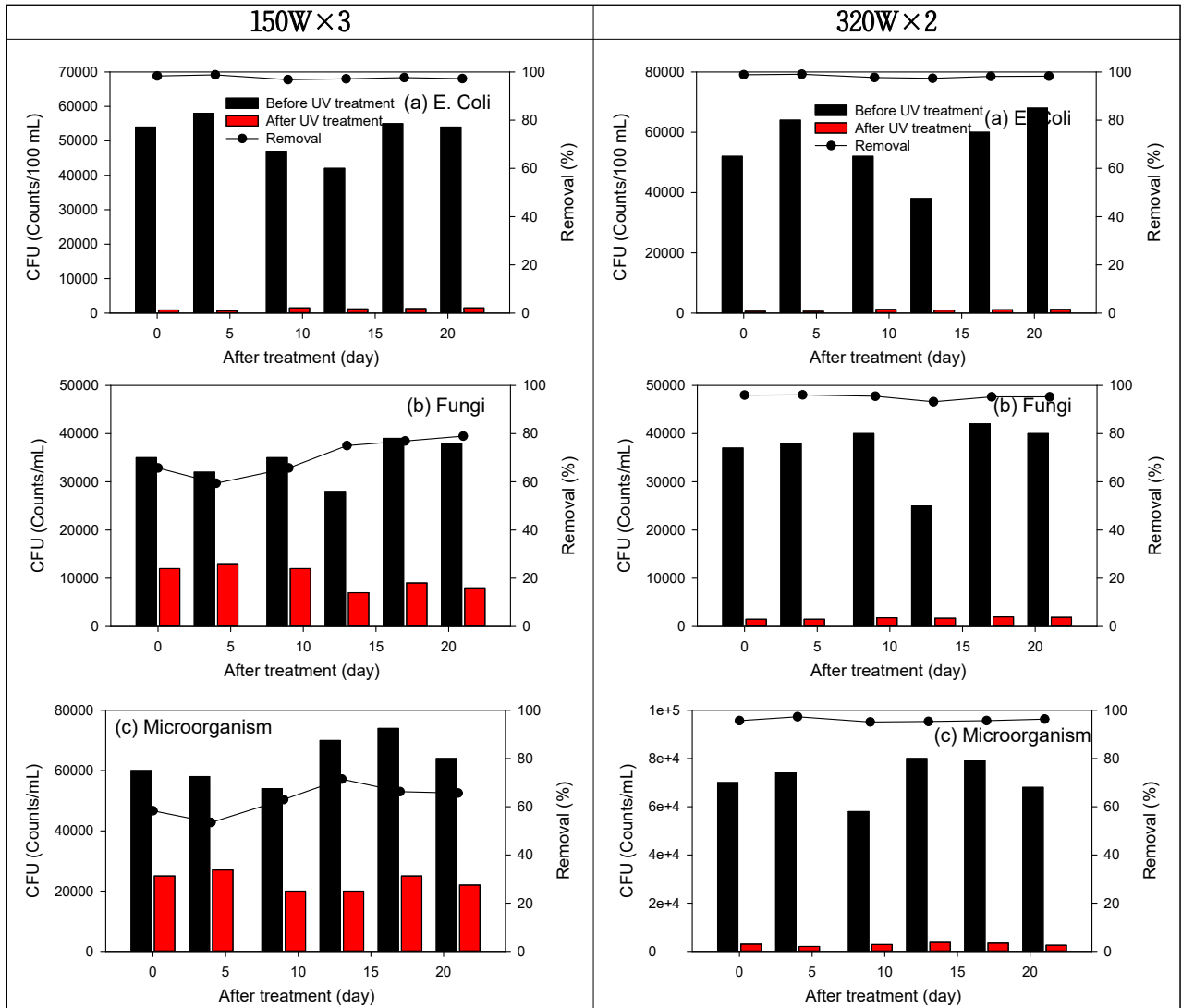
마산 진전면과 진동면에 위치한 2개 영농농가를 대상으로 하여 배액을 수집하여 총대장균/곰팡이/일반세균을 대상으로 UV 램프 (320W×2, 150W×3)를 처리하여 살균력 테스트를 수행하였다. 마산 진전면에 위치한 P농가는 2000평 파프리카를 재배하는 농가로 사용배지는 암면배지를 사용하고 있다. 또한 암면배지에서 나오는 배액의 UV 투과율은 평균 25-26 정도로 타 영농농가에서 발생하는 배액의 투과율과 유사하다. 표 1.3 결과를 보면, 총대장균/곰팡이/일반세균 제거율은 UV 램프 (320W×2) 처리 후 평균 99.9/98.4/98.6 % 제거율을 보여주고 있으며, UV 램프(150W×3) 처리 후 평균 99/73.3/62.3% 제거율을 보여주고 있다. 또한 마산 진동면에 위치한 K농가는 6000평 파프리카를 재배하는 농가로 사용배지는 코코피트배지를 사용하고 있다. 또한 코코피트배지에서 나오는 배액의 UV 투과율은 평균 18-19 정도로 타 영농농가에서 발생하는 코코피트 배액의 투과율과 유사하다. 표 1.3 결과를 보면, 총대장균/곰팡이/일반세균 제거율은 UV 램프(320W×2) 처리 후 평균 99.9/95.2/96 % 제거율을 보여주고 있으며, UV 램프(150W×3) 처리 후 평균 97/78.9/65.6% 제거율을 보여주고 있다. 두 농가의 모두 UV램프 (320W×2)에 효과적으로 처리되는 것으로 보여지나, UV램프 (150W×3)에서는 총대장균을 제외하고는 처리율이 떨어지는 것으로 나타나고 있다. 이러한 이유는 배액의 투과율이 대체로 낮기때문에 병렬로 3가지 램프가 모두 들어가 있는 살균모듈보다 직렬로 320W×2로 연결된 것이 훨씬 효과적이라는 것을 알 수 있다.



[그림 2.15] P농가 암면배지 배액에서 UV 램프 처리 (320W X 2, 150W×3) 전후의 일반세균, 곰팡이 및 총대장균 처리율

[표 2.6] P농가 살균모듈(UV 램프와 UV LED)에 따른 살균 효능 요약

	UV 램프	
	320W×2	150W×3
처리용량	1톤/h	
파장	254 nm	
출력	320W×2	150W×3
배지(대상작물)	암면배지(파프리카)	
제거율(%) 정식후 180일 (총대장균/곰팡이/일반세균)	99.9/98.4/98.6	99/71.7/66.7
평균 UVT (%/cm)	19	18
가격	700-800만원	400-500만원



[그림 2.16] K농가 코코피트배지 배액에서 UV 램프 처리 (320W X 2, 150W×3) 전후의 일반세균, 곰팡이 및 총대장균 처리율

[표 2.7] K농가 살균모듈(UV 램프와 UV LED)에 따른 살균 효능 요약

	UV 램프	
	320W×2	150W×3
처리용량	1톤/h	
파장	254 nm	
출력	320W×2	150W×3
배지(대상작물)	코코피트배지(파프리카)	
제거율(%) 정식후 180일 (총대장균/곰팡이/일반세균)	98.2/95.2/95.9	97.7/70.3/63
평균 UVT (%/cm)	25	26
가격	700-800만원	400-500만원

나. 순환식 수경재배시스템의 시스템 경제성 평가 및 구성비용 분석

연구개발의 목표인 보급형 순환식 수경재배시스템은 기존의 외산시스템 대비 낮은 가격으로 유사한 살균효율을 목표로 하고 있다. 이를 위해서 외산제품의 주요모듈과 보급형의 주요모듈을 비교하고 원가를 절감하기 위한 요소를 분석하였다.

[표 2.8] UV살균장치 구성비용

분류	세부분류	기능	비율(%)
제어모듈	사용자 인터페이스 (디스플레이 및 입력)	시스템 모니터링 정보 및 제어설정 인터페이스 제공	10%
	제어컨트롤러(PLC)	PLC 기반의 하드웨어로 UV램프를 이용한 배액의 재처리 과정의 제어소프트웨어를 동작	
UV살균모듈	UV램프 챔버	스테인리스 소재로 UV램프가 장착되어 배액의 살균처리가 가능하도록 한다.	50%
	UV램프	254nm 대역의 UV를 방출하며 사용 환경(처리량)에 따라 램프의 용량이 결정됨	
배액 전처리모듈	모래여과 필터	모래를 이용하여 배액의 불순물을 1차적으로 제거하기 위한 필터	10%
시스템모듈	시스템 펌프	배액의 살균처리를 위한 시스템 펌프로 내산성이 요구됨	30%
	전자밸브	살균처리를 위해 제어모듈에 의해 제어됨	
	살균제어밸브(3Way)	살균처리를 위해 제어모듈에 의해 제어됨	
	EC제어 밸브(3Way)	살균배액과 원수의 비율을 제어	

[표 2.9] 보급형과 외산(기존)제품의 비교

항목	보급형	외산(기존)
제어모듈	- 국산의 PLC 및 디스플레이 제품을 사용	- 지멘스 등 외산 PLC 및 디스플레이 제품을 사용
UV살균모듈	- 저압타입의 UV램프를 사용 - UV램프의 오염을 제거하기 위하여 산 (ACID) 세정 사용	- 고압타입의 UV램프를 사용 - UV램프의 오염을 제거하기 위하여 산 (ACID) 세정과 브러쉬 형태의 물리적인 장치를 사용
배액 전처리모듈	- UDI 등 외산제품을 사용	- UDI 등 외산제품을 사용
시스템모듈	- 수동밸브를 통하여 살균배액과 원수의 비율을 제어(자동제어의 경우 옵션으로 가능)	- 3Way밸브를 이용하여 살균배액과 원수의 비율을 EC 기반으로 제어

[표 2.10] 시스템 요소별 원가절감 분석

시스템요소	내용	비용절감 (%)
UV램프	- UV램프의 수명과 동작시 소모되는 전기량을 고려하여 저압타입의 UV램프를 적용 - 고압타입의 UV램프의 경우 1개의 용량이 높아 대규모의 온실에 적합한 반면 저압타입 UV램프의 경우 온실의 환경에 맞도록 램프의 개수를 선택할 수 있음	15%
UV챔버	- 실험결과 다수의 UV램프를 병렬로 사용하는 것보다 적은 수의 UV램프를 직렬로 연결하는 경우 살균효율이 높은 것으로 분석되어 직렬형태의 UV챔버를 사용 - UV램프의 오염을 방지하기 위하여 물리적인 브러쉬 형태의 장치를 이용하는 것이 큰 효과가 없는 것으로 분석되어 질산을 이용한 UV램프의 세척 방법을 적용	20%
EC제어밸브	- 양액의 조성은 살균배액의 사용 비율에 의하여 결정되는 것으로 수동밸브를 이용하여 살균배액의 비율을 조절하는 것과 EC를 기반으로 자동제어 하는 것은 동일한 효과가 있음	10%

UV살균모듈의 설계와 나머지 시스템의 구성요소를 최적화하여 외산 시스템 대비 45%정도의 비용을 절감할 수 있는 것으로 분석되었고 테스트베드 및 영농실증을 통하여 시스템의 비용이 절감되었음에도 기존 시스템 대비 90%이상의 살균성능을 보이는 것을 알 수 있다.

3. 순환식 수경재배시스템 전처리 모듈의 적정 역세척 시간 산정 및 프로그램에 반영

수경재배시스템에서는 다양한 배지를 사용하는데 대표적으로 암면(암면배지), 코코피트 기반 배지(코코피트), 펄라이트와 상토를 기반 배지(자루배지) 등이 이용된다. 배지에서 발생하는 배액의 성상은 배지의 특성에 따라서 유기물이 다량 함유될 가능성이 높으며(특히 코코피트 기반 배지), 이는 살균효능을 떨어뜨리는 중요 요인이다. 이를 해결하기 위하여 살균장치로 처리 전에 전처리 모듈을 배치하여 1차 오염물을 제거하게 된다. 연구에서는 살균처리에 영향을 끼치는 전처리 모듈(모래여과 등)에서 처리시간과 역세척 시간 등을 확인하여 전처리공정의 최적화를 진행하고자 하였다.

배액에 대한 살균효율을 일정 이상으로 유지하기 위해서는 전처리공정에서 여재에 가해지는 압력을 표준화해야 한다. 일반적으로 순환식 재이용시스템에 적용되는 여과장치의 경우 1 ha의 농장에 적용하는데 사용되는 펌프를 감안하여 최대 8 bar(120 psi)와 Head loss 0.5 bar(7.5 psi)를 초과하지 않는 조건으로 설계되어야 한다. 이러한 압력은 유량으로부터 산정이 가능하다. 특히 유량은 여재의 구조에 따라 선속도(linear velocity, v_s)로부터 구할 수 있다.

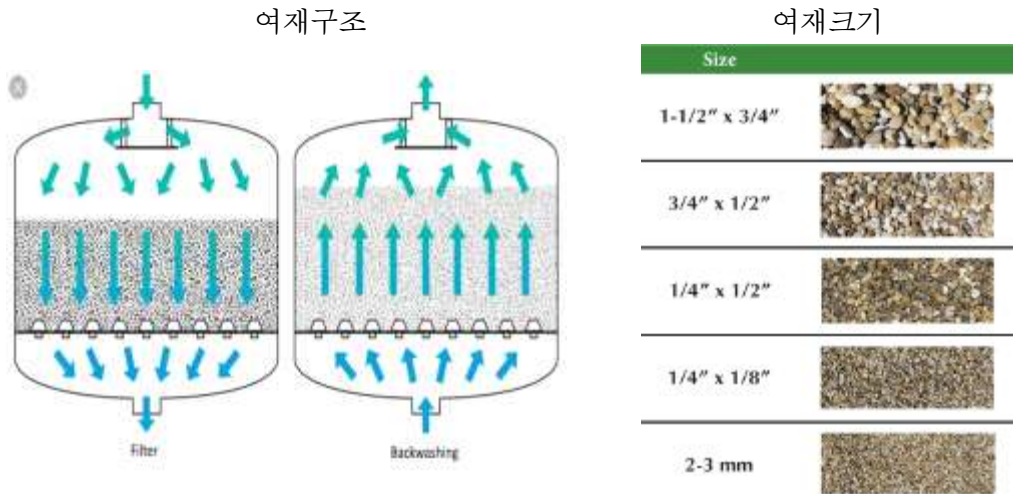
$$v_s (m^3/m^2/h, m/h) = Q/A$$

여기에서 Q는 유량(flow rate, m^3/h), A는 여재의 단면적(m^2)이다.

배지 종류에 따라 살균공정은 아래의 표와 같이 진행된다. 암면배지의 경우 배액에 유기물 함량이 낮기 때문에 모래여과만으로 전처리공정을 진행하나, 코코피트 및 자루배지의 경우에는 배액에 유기물 함량이 높기 때문에 모래여과와 더불어 활성탄여재(ACF, Activated Carbon Filter)를 추가적으로 사용할 수 있다. 살균의 전체적인 공정은 살균 공정, 역세척공정, 산세정공정이 번갈아가며 진행된다.

[표 2.11] 배지에 따른 살균공정 흐름도

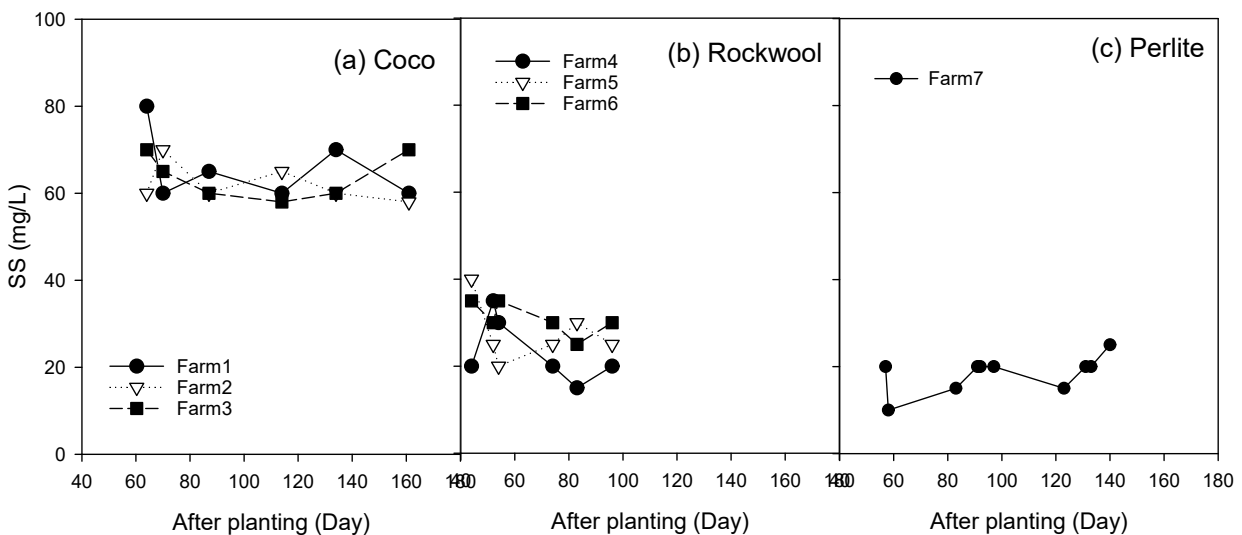
배지종류	공정
암면배지	① 원수탱크→모래여과→UV/UVC-LED→처리수 (주공정) ② 원수탱크→모래여과→원수탱크 (혹은 별도 배수구) (역세척공정) ③ 원수탱크/산탱크(질산60%)→UV램프→산세정유출탱크 (혹은 원수탱크) (산세정공정)
코코피트 자루배지	① 원수탱크→모래여과→UV/UVC-LED→처리수 (주공정) ①' 원수탱크→모래여과→ACF →UV/UVC-LED→처리수 (주공정) ② 원수탱크→모래여과→원수탱크 (혹은 별도 배수구) (역세척공정) ②' 원수탱크→모래여과(ACF)→원수탱크 (혹은 별도 배수구) (역세척공정) ③ 원수탱크/산탱크(질산60%)→UV램프→산세정유출탱크 (혹은 원수탱크) (산세정공정)



[그림 2.17] 전처리과정 중 여과공정의 여재구조와 크기

가. 배지별 배액에 존재하는 부유고형물 농도

실제 농가에서 발생하는 배액을 수집하여 부유고형물(SS, Suspended Solid)의 함량을 살펴보았다. 코코피트 배지의 경우에는 국내 D사의 배지를 이용하여 파프리카를 재배하는 농장(전남 화순 Farm1, 강원 평창 Farm2, 강원 강릉(망상) Farm3)에서 수집하였으며, 암면배지의 경우 네덜란드 G사의 배지를 이용하여 토마토를 재배하는 농장(강원 강릉 KIST 실증관 Farm4, 강원 강릉(사천) Farm5, 충남 천안 Farm6)에서 배액을 수집하였다. 자루배지의 경우 토마토를 재배하고 국내 K사의 배지를 이용하는 농장(Farm 07)에서 배액을 수집하였다.



[그림 2.18] 배지의 종류에 따른 배액의 부유고형물의 농도

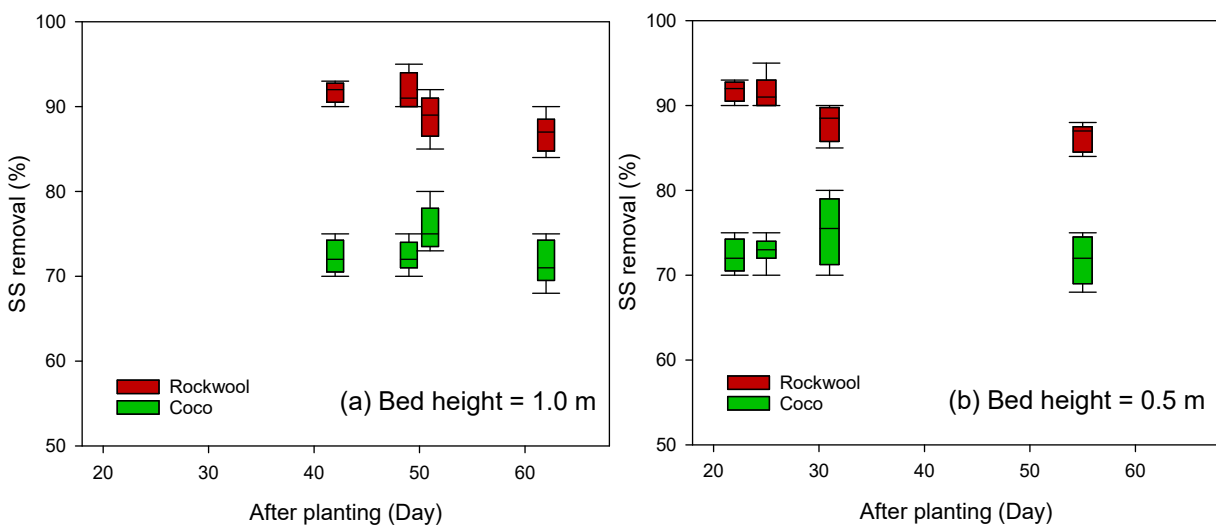
배지의 종류에 따라 배액에 존재하는 부유고형물의 농도는 차이가 컸다(그림 2.18). 부유고형물의 농도는 살균효율에 직접적인 영향을 끼치기 때문에 모래여과 등을 통해 제거가 필요하다. 코코피트 배지의 경우 정식 후 2-3주 동안은 부유고형물의 농도가 200 mg/L 이상을 유지하며, 시

간이 경과함에 따라 80 mg/L이하(정식후 60-160일사이 평균 64 mg/L)로 감소되었다. 암면배지를 사용하는 농가에서는 정식후 44-96일 사이(3주 이후) 평균 부유고형물의 농도가 27.2 mg/L였으며, 펠라이트를 주로 사용한 자루배지에서 발생하는 배액의 부유고형물의 농도는 정식 57-140일 사이 18.5 mg/L로 나타났다. 펠라이트를 이용한 자루배지는 초기에 상당히 높은 부유고형물이 존재하였으나 급격히 줄어들어 정식 5주이후에는 암면배지보다 낮은 농도를 보였다. 결과적으로 정식초기에는 암면배지, 정식후기에는 암면배지와 펠라이트 기반 자루배지에서 부유고형물이 낮게 유지되었다. 코코피트 배지의 경우에는 정식후 5개월이 지나도 암면배지에 비하여 2-3배 높게 부유고형물이 존재하였다.

배지별 부유고형물의 제거는 여과기의 성능에 따라 다르지만 궁극적으로 살균장치의 성능에도 영향을 끼치기 때문에 배지에 따른 적절한 여재의 선택 및 처리용량 설정이 중요하다. 특히 처리용량은 전체 시스템의 크기를 결정하는 요인으로 작용하기도 한다.

나. 모래여과를 이용한 부유고형물 제거

모래여과를 통하여 부유고형물의 제거효능을 알아보기 위하여 2개의 모래여과장치(UDI사의 모래여과장치-높이 1.0 m, 표면적 0.19 m², 청두사 모래여과장치-높이 0.5 m, 표면적 0.785 m²)를 이용하여 암면(Farm4)과 코코피트(Farm 5) 배지에서 발생한 배액의 처리효능을 파악하였다(그림 2.19). 일반적으로 모래여과에 사용되는 크기인 2-3 mm의 모래의 경우 수두 손실과 과압이 발생하기 때문에 이보다 큰 모래를 사용하였다. 본 연구에서는 1/4" × 1/8" 의 모래를 사용하였다. 성능의 일관성을 유지하기 위하여 한번 여과실험을 진행한 이후에 8 bar의 압력으로 역세척을 진행한 후 다시 여과실험을 진행하였다. 모래여과장치의 부유고형물 제거 성능은 비슷한 처리효율을 유지하는 경향을 나타내었다.

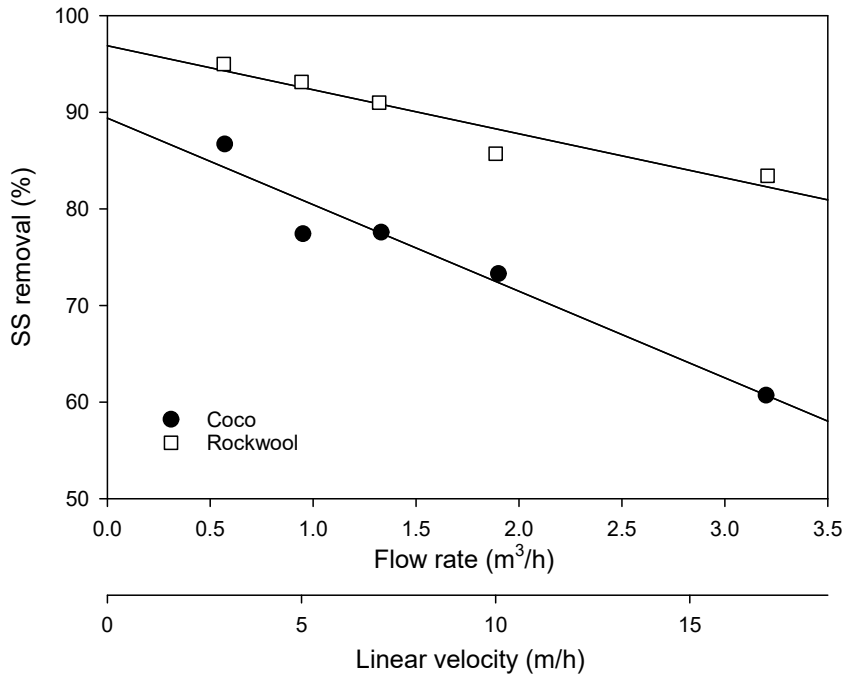


[그림 2.19] 모래여과 장치의 종류에 따른 배액의 부유고형물 제거 효능

- (a) 사용압력 3 bar, UDI사 제품, 높이 1.0 m, 표면적 0.19 m²,
- (b) 사용압력 3 bar, 청두사 제품, 높이 0.5 m, 표면적 0.785 m²

본 연구를 위해 암면배지 (Farm 4)와 코코피트배지(Farm 5) 배액을 대상으로 수행하였으며, 유

량을 조절하여 이론적인 선속도를 구하고 이를 대상으로 SS 제거 실험을 수행하였다. 이 결과에 따라 유량(선속도)에 따른 부유고형물의 처리효능을 살펴보면(그림 2.20) 유량이 증가함에 따라서 비례적으로 부유고형물의 제거율이 감소함을 확인하였다(코코피트: $SS\ removal = 89.4 - 8.96 \times flow\ rate$, 결정계수 $r^2=0.95$; 암면 $SS\ removal = 97.0 - 4.58 \times flow\ rate$, 결정계수 $r^2=0.91$). 이를 기반으로 계산하면 시간당 1톤의 배액을 처리할 경우 코코피트의 경우 부유고형물을 80.4%, 암면의 경우 92.1% 제거할 수 있는 것으로 계산되며, 유량(선속도)이 증가함에 따라 부유고형물의 제거효능이 떨어지는 것으로 파악된다.



[그림 2.20] 모래여과에서 유량(선속도)에 따른 부유고형물의 제거 효능

다. 모래여과시 역세척 공정의 효능 파악

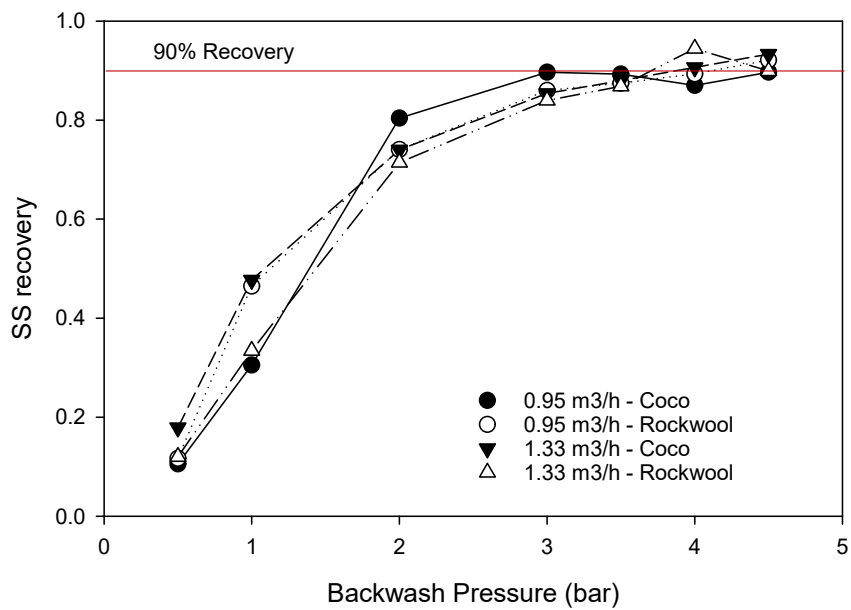
모래여과를 진행할 경우 부유고형물에 의하여 공극이 막히는 현상이 발생하기 때문에, 이를 해결하기 위하여 역세척을 진행한다. 역세척 공정은 순환식 양액공급시스템의 가용시간 연장과 연속적 살균공정의 효율을 유지하기 위하여 필수적인 공정이다. 공정의 최적화를 위하여 역세척 압력에 따라 부유고형물의 회수율을 파악하는 실험을 진행하였다.

유량은 2가지(0.95와 1.33 m³/h)로 조절하였으며, 배액은 코코피트와 암면에서 발생된 배액을 이용하여 사용하였다. 여과기는 모래층 1 m이며 표면적이 0.19 m²인 UDI사의 모래여과장치를 사용하였다.



[그림 2.21] 모래여과에서 유량에 따른 역세척 효능을 파악하는 실험 사진

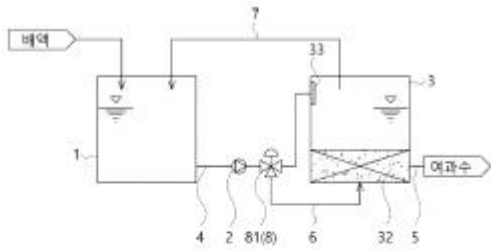
역세척의 압력이 약 3 bar 이상에서는 90%내외의 부유고형물 회수율을 나타내었다. 1 bar 이내로 진행하였을 경우 절반 이하의 부유고형물 회수율을 보였으며, 3 bar 이상으로 역세척 압력을 높여도 부유고형물의 회수율 변화는 미미하였다. 역세척 압력에 비하여 부유고형물을 회수하는데 있어 유량이나 배지의 성상에 따른 효과는 적었다. 이를 기반으로 보았을 때 1 톤/시간의 배액을 처리하는데 있어



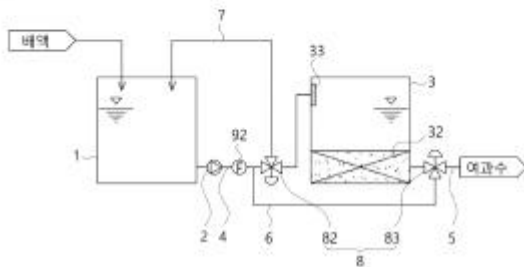
[그림 2.22] 모래여과에서 유량에 따른 역세척 효능

상기의 결과를 바탕으로 최적의 역세척시간을 구하는 방법, 순환식 수경재배시스템의 공정제어 방법 및 장치를 고안하여 특허를 출원하였다.

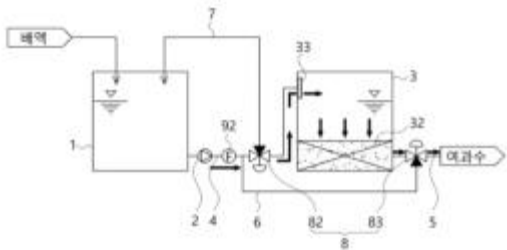
【도 2】



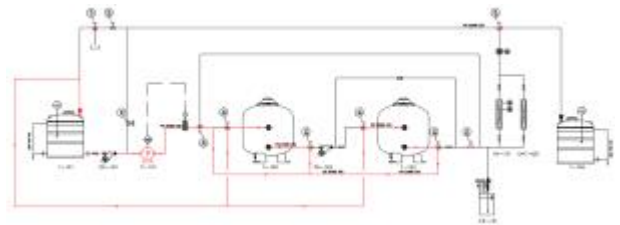
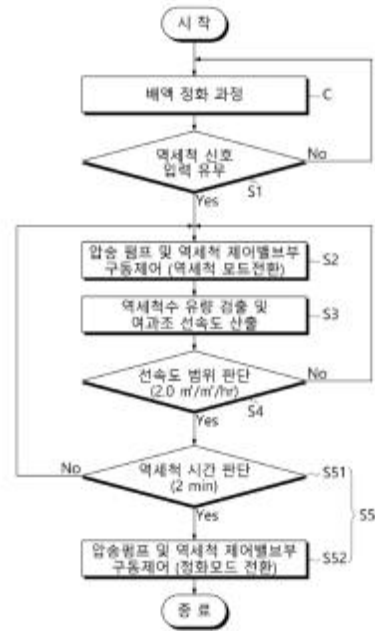
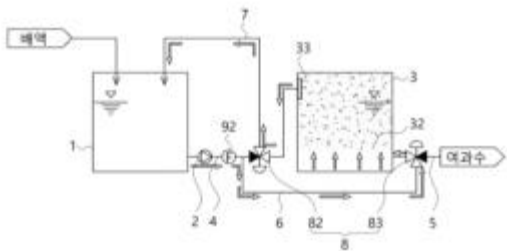
【도 3】



【도 6a】



【도 6b】



[그림 2.23] 순환식 수경재배시스템의 전처리 관련 출원 특허 도면 및 알고리즘

4. 순환식 수경재배시스템 살균모듈의 안정성 검증

가. 살균효율 안정성 평가를 위한 양액의 특성 평가

순환식 수경재배시스템의 살균 효율을 살펴보기 위하여, 먼저 배지의 종류에 따른 배액의 특성을 살펴보았다. 주 분석대상시설은 암면으로 토마토를 재배하는 시설과 코코피트 배지로 파프리카를 재배하는 시설을 연구대상으로 삼았다.

배액에서 UV 살균효율에 영향을 주는 것 중 하나는 UV 투과율(UV Transmittance, UVT (%))이다. UVT는 다음과 같이 계산된다.

$$UVT(\%) = \frac{I}{I_0} \times 100$$

여기에서 I 는 UV 254 nm의 강도이며 I_0 는 1 cm의 시료(물, 배액 등)를 통과하고 나온 UV 254 nm의 강도를 말한다. 일반적으로 증류수 및 정제수의 UVT는 90%, 해수는 70-80%, 유색음료는 5% 미만이다.

배액은 UVT 값이 작물의 생육시기에 따라 달라진다. 그림 2.25은 토마토(12월 26일 정식)와 파프리카(2월 2일 정식)의 정식일이 경과함에 따른 UVT의 변화를 나타내고 있다. 암면배지의 배액 UVT가 평균 25.9%이며, 코코피트 배지의 배액 UVT는 평균 16% 값을 보였다. 암면 배지의 경우 UVT 값이 떨어지다가 다시 상승하는 모습을 보이는데, 떨어지는 기간에 배액을 집수하는 재배단 주변에 녹조가 발생하여 다량의 유기물과 미세조류가 배액에 영향을 주는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 여름을 전후로 하여 암면배지를 이용하더라도 배액에 미세조류에 의한 UVT 저하가 발생하는 것을 고려해야 할 것으로 보인다. 코코피트 배지에서 발생하는 배액은 UVT는 초기 매우 낮은 값(10%이하)을 보이는데 이는 정식 초기 신규 코코피트 배지에 잔류하는 다량의 유기물이 5-6주간 발생하기 때문으로 판단된다. 이는 살균 효율을 현저시 떨어지게 만들기 때문에 초기의 UV를 이용한 살균효율을 낮추는데 주된 이유가 된다. 특히, 5%이하의 UVT값을 가지는 배액은 경제성을 고려할 경우 UV를 이용한 살균이 적합하지 않을 것으로 판단된다.



Farm4

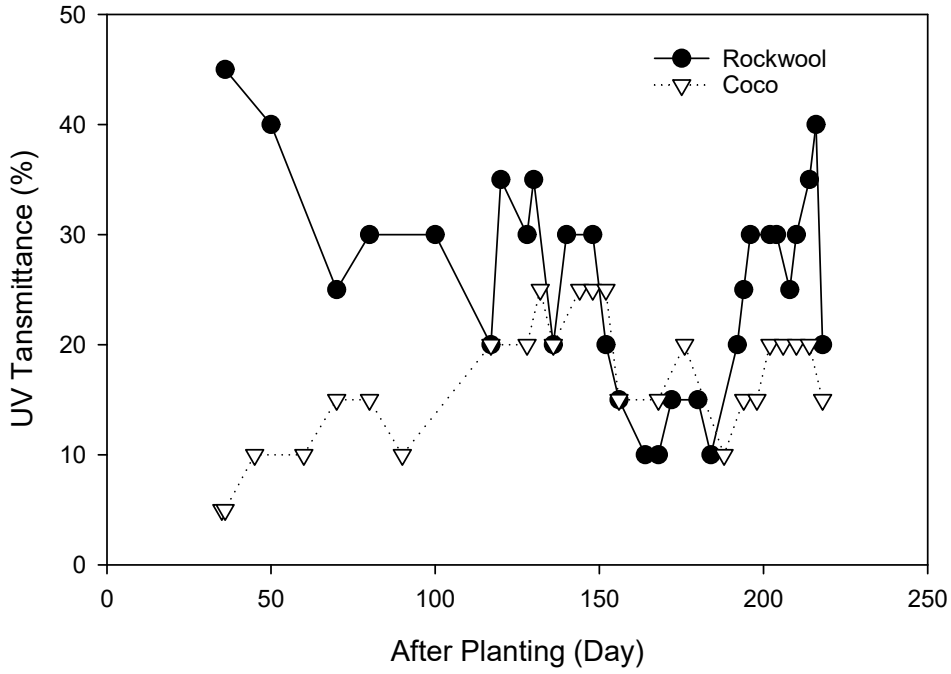
- 전체면적: 700평
- 재배작목: 토마토, 파프리카, 딸기
- 사용배지: 암면

Farm8

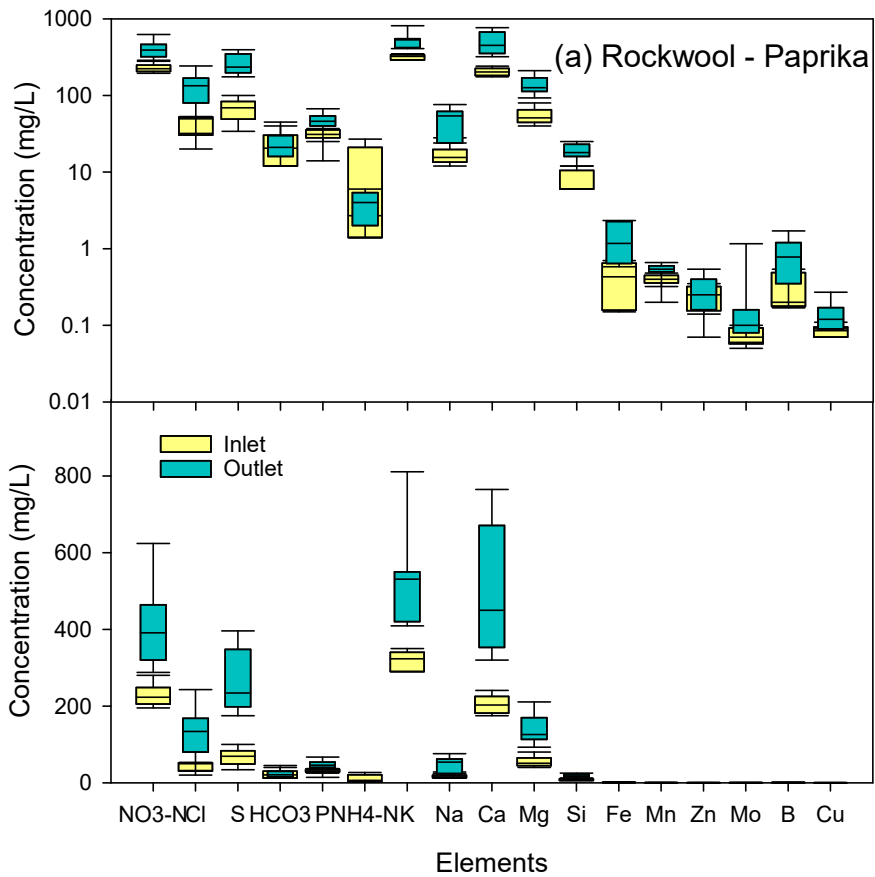
- 전체면적: 2500평
- 재배작목: 파프리카
- 사용배지: 코코피트

[그림 2.24] 시계열 배액 분석 대상 시설

양액의 화학적 구성은 음이온(질산염(NO_3^-), 염소(Cl), 황(S), 중탄산이온(HCO_3^-), 인(P)), 양이온(암모늄이온(NH_4^+), 칼륨(K), 나트륨(Na), 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg), 규소(Si))과 미량원소(철(Fe), 망간(Zn), 아연, 붕소, 구리, 몰리브덴) 등으로 구성되어 있다. 이온들의 분포를 급액과 배액 사이에 비교해 보았을 때(그림 2.26), 대부분의 이온은 농축효과(식물이 증발산을 위하여 물을 빨아들이는 양이 양분을 흡수하는 양보다 많기 때문에 배지에 남아 있는 양분이 농축되는 현상)로 인하여 급액보다 배액에서 농도가 2배이상 많으나, 특징적으로 P, NH_4 , Fe, Mn 등은 오히려 배액에서 농도가 낮게 측정되었다. 이는 식물이 인과 NH_4 를 다른 이온에 비하여 더 많은 비율로 흡수한다는 것과 Fe와 Mn의 경우에는 식물로 흡수로 볼 수도 있으나 침전과 흡착에 의한 효과로 인하여 배액에 농도가 낮아지는 것도 고려할 수 있다.

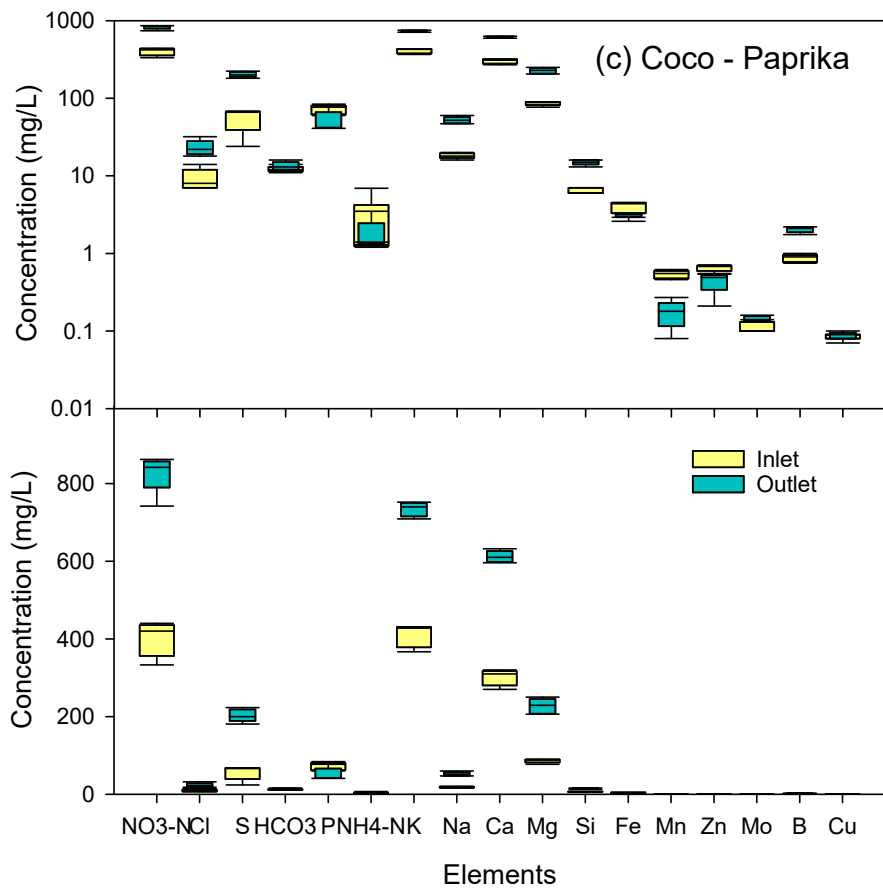
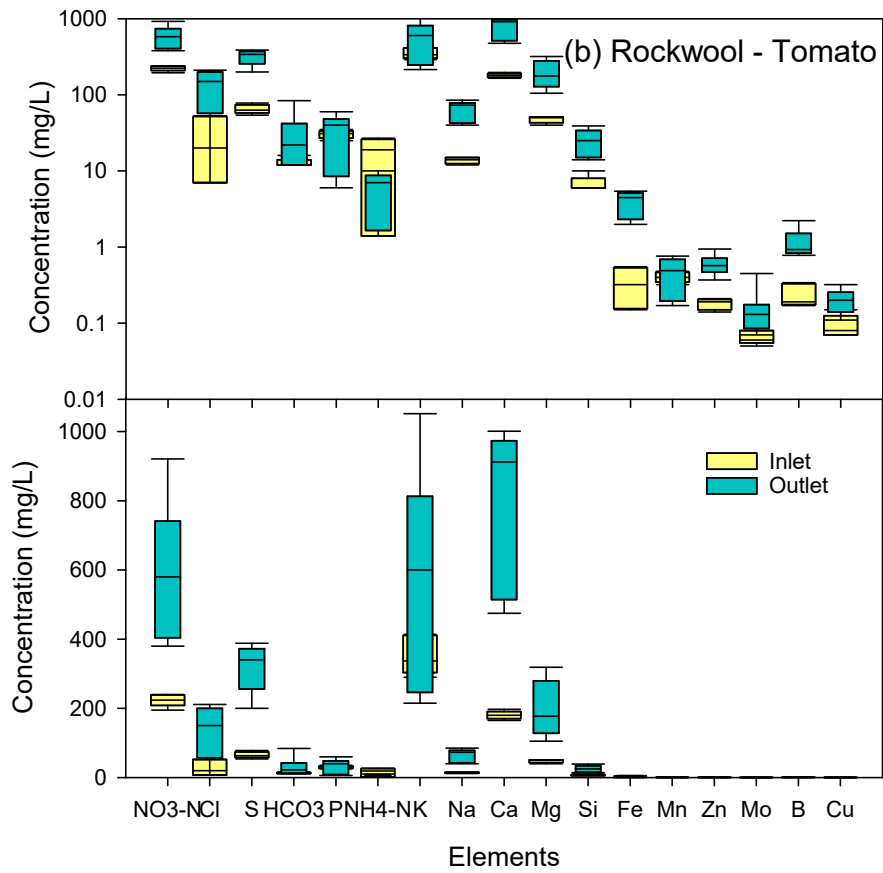


[그림 2.25] 배지에 따른 배액의 UV 투과율(%)



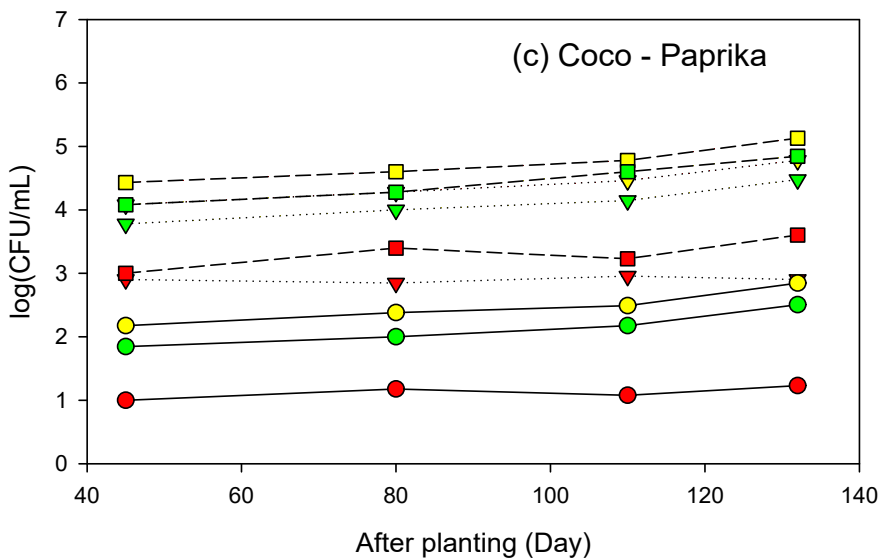
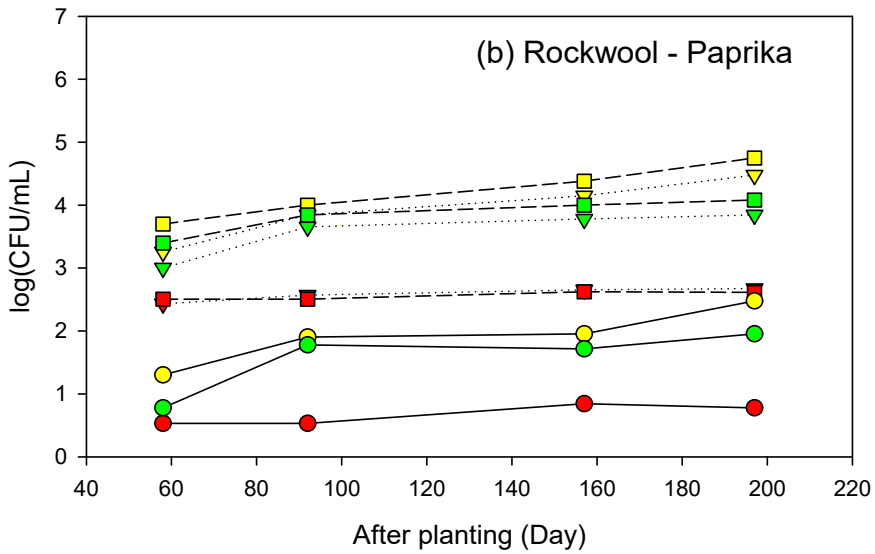
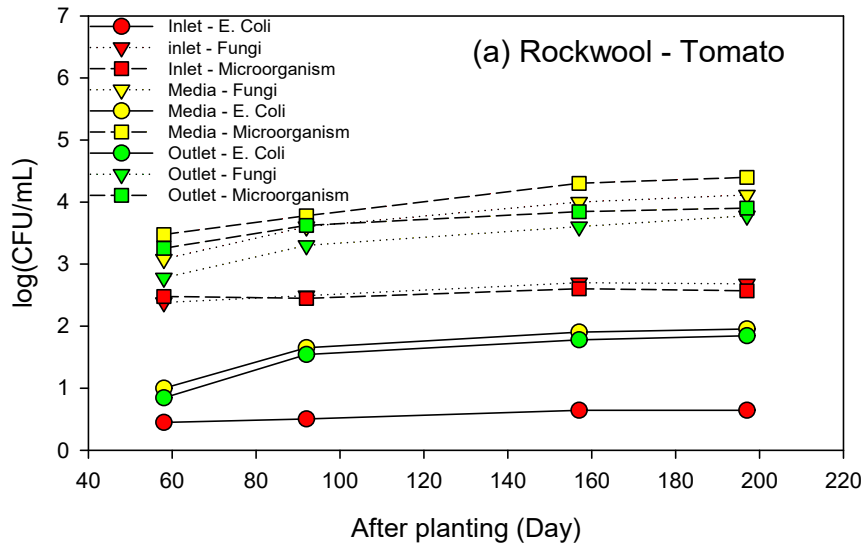
[그림 2.26] 작물과 배지에 따른 급액과 배액의 양분 조성

(a) 암면배지 파프리카 재배(Farm4), (b) 암면배지 토마토 재배(Farm4), (c) 코코배지 파프리카 재배(Farm8)
 그림의 상부는 양분의 농도가 log scale로 표시되어 있음.



배지에서의 총대장균, 곰팡이, 일반세균의 변화를 살펴보기 위하여 토마토 및 파프리카 재배를 진행하면서 급액, 배지, 배액에서 양액을 채취하여 분석하였다(그림 2.27).

총대장균, 곰팡이, 일반세균 수는 배지에서 가장 높았으며, 배액, 급액 순서로 나왔다. 이러한 결과는 배지가 병원균을 가장 많이 보관하면서 증식하는 장소로 이용되고 있음을 보여준다. 또한 시간이 지남에 따라서 비순환식 수경재배시스템에서 총대장균, 곰팡이, 일반세균 수가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 이는 배지가 지속적으로 증식 장소로 이용되고 있음을 반증할 수 있다.



[그림 2.27] 작물과 배지에 따른 급액과 배액에서의 총 대장균, 곰팡이, 일반세균의 변화
 (a) 암면배지 토마토 재배(Farm4), (b) 암면배지 파프리카 재배(Farm4), (c) 코코배지 파프리카 재배(Farm8)

나. UV 살균모듈 전후 살균효율 안정성 평가

보급형 순환식 수경재배시스템의 개발하기 위해서는 주요 모듈이 UV 살균모듈의 성능을 극대화하여야 한다. UV 살균모듈의 성능은 UV 강도(Intensity)와 배액의 체류시간(Retention time)을 중심으로 결정되어야 한다. 즉, UV 살균모듈을 설계할 경우 체류시간은 가능한 많으면서 통과하는 배액에 조사되는 UV 강도는 높게 유지하게 하여야 한다. 실제 UV 조사능은 UV의 강도와 여러 관련 인자의 함수로 결정된다.

$$\text{UV Dose } (\mu\text{Ws/cm}^2) = \text{Retention time (s)} \times \text{UV Intensity } (\mu\text{W/cm}^2)$$

$$\text{Actual UV Dose } (\mu\text{Ws/cm}^2) = \text{function}(\text{UV Dose, Factors})$$


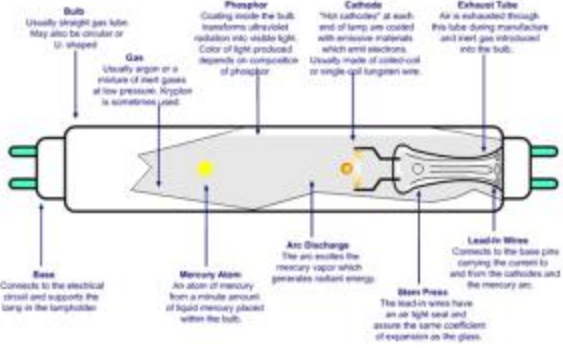

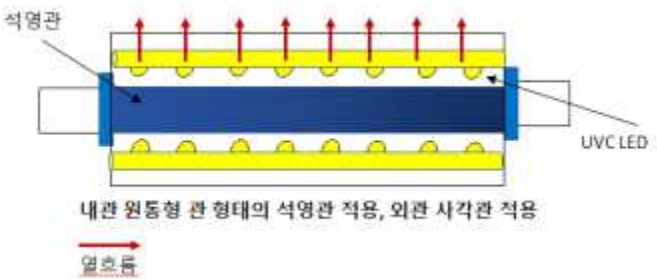
이때 관련인자(Factors)는 Temperature Factor (TF, 15-25°C), Aging Factor (AF), Quartz Transmission Factor (QTF), Mixing Factor (MF)로 구성되어 있다. 특히 UV 중 LED (UV-C LED)를 이용할 경우 위의 5개 모든 인자에 대해 효율이 높은 장점을 가진다.

본 연구에서 사용한 UV 살균모듈이 위의 인자를 고려하여 설계하여 제작하였다.

[표 2.12] 최적 UV lamp 설계 고려인자

UV Dose 계산	Fluorescence Rate Distribution 결과	설계인자
<ul style="list-style-type: none"> • 램프 파워 (W) • 램프 효율 • 램프 길이 • 모듈 길이 • 램프 Sleeve 지름 • 실린더 최대 지름 • 램프 압력 타입 	<ul style="list-style-type: none"> • FRD (mW/cm²) • FRD Value Plotted (%) • RI (Water, Quartz) • 유량 • HRT (s) • Ave. Fluorescence Rate in reactor (mW/cm²) • Fluorescence (UV Dose) (mJ/cm²) 	<ul style="list-style-type: none"> • UVT (%) • 온도인자 (%) • Aging Factor (%) • QTF (%) • Mixing Factor

[표 2.13] 순환식 양액시스템 안정성 평가에 이용된 UV lamp와 UV LED의 상세 내역

UVC 소스	내역
<p data-bbox="336 333 437 367">UV램프</p> 	<ul data-bbox="595 318 1244 448" style="list-style-type: none"> • 외관: 스테인리스 스틸 (반사율 33%) • 수은램프 (Hard type) • Low Pressure Mercury Lamp-Hot Cathode Type  <ul data-bbox="595 833 1276 1142" style="list-style-type: none"> • 살균과장 254nm, 직접살균방식 채택 • 가동 전 예열과정과 가동후 냉각과정 필수 • 전력/전압: 320 W 저압 고효율 아말감, UVC 106W • 규격: Base face-Base face L 1,554 mm, • 규격: Arc L 1,475 mm, Tube Diameter 19 mm • 제조원: Light Sources, Inc (USA) • 재질: Stainless Steel 316L
<p data-bbox="316 1162 458 1193">UV-C LED</p> 	<ul data-bbox="595 1167 1149 1243" style="list-style-type: none"> • 외관: 서스관(내부 e-PTFE) (반사율 98%) • UV-C LED  <ul data-bbox="595 1570 1220 1928" style="list-style-type: none"> • 살균과장 단과장 268 nm, 직접살균방식 채택 • 가동 전 예열과정과 가동 후 냉각과정 불필수 • 전력/전압 2.3 W (18 LED, 1 bar) • UV-C 출력 72 mW (18 LED, 1 bar) • 입력전류 60 mA (18 LED, 1 bar) • 규격: 300×30 mm (1 bar, 18 LED) • 총 LED bar: 한 면 12 bars (총 27.6 W)×4 • 제조원: (주)루멘스

UV-C를 이용하여 배액을 처리할 경우 작물의 생육시기에 따른 배액특성에서 살균효율의 안정성을 확인하기 위하여, 장기간에 발생하는 배액을 모아서 각 배액마다 UV-C lamp와 LED를 이용하여 처리하고 처리 효율을 파악하였다. UV-C LED의 경우는 한 면에 12 bar (총 27.6 W) 총 4개 면으로 구성된 살균모듈을 이용하여 처리하였으며, UV램프의 경우 320 W의 저압 고출력 아말감으로 된 램프를 이용하여 처리하였다. 처리용량은 모두 1 톤/h의 유량으로 설정하였다.

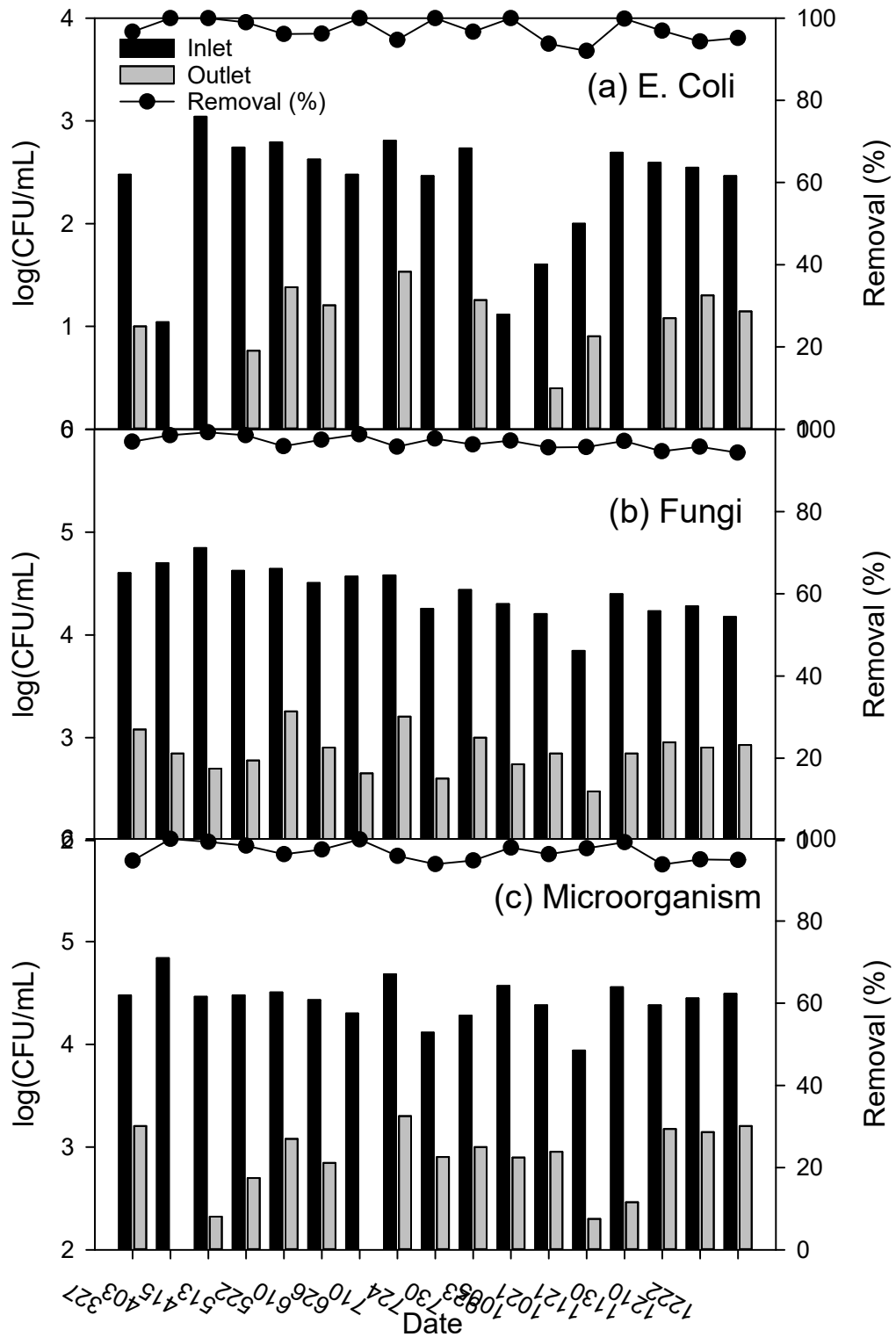
암면배지에서 토마토와 파프리카를 키우며 발생하는 배액을 UV 램프를 이용하여 처리하였을 경우, 총대장균의 평균 제거율은 97.3%, 곰팡이의 평균 제거율은 97%, 일반세균 평균 제거율은 96.9%이었다. 암면배지에서 토마토와 파프리카를 키우며 발생하는 배액을 UV-C LED를 이용하여 처리하였을 경우, 총대장균의 평균 제거율은 95.7%, 곰팡이의 평균 제거율은 95.5%, 일반세균 평균 제거율은 95.8%이었다.

코코피트 배지에서 파프리카를 키우며 발생하는 배액을 UV 램프를 이용하여 처리하였을 경우, 정식 100일 이후에 총대장균의 평균 제거율은 78.7%, 곰팡이의 평균 제거율은 79%, 일반세균 평균 제거율은 72.2%이었다. 코코피트 배지에서 파프리카를 키우며 발생하는 배액을 UV-C LED를 이용하여 처리하였을 경우, 정식 100일 이후에 총대장균의 평균 제거율은 77.2%, 곰팡이의 평균 제거율은 77%, 일반세균 평균 제거율은 78%이었다.

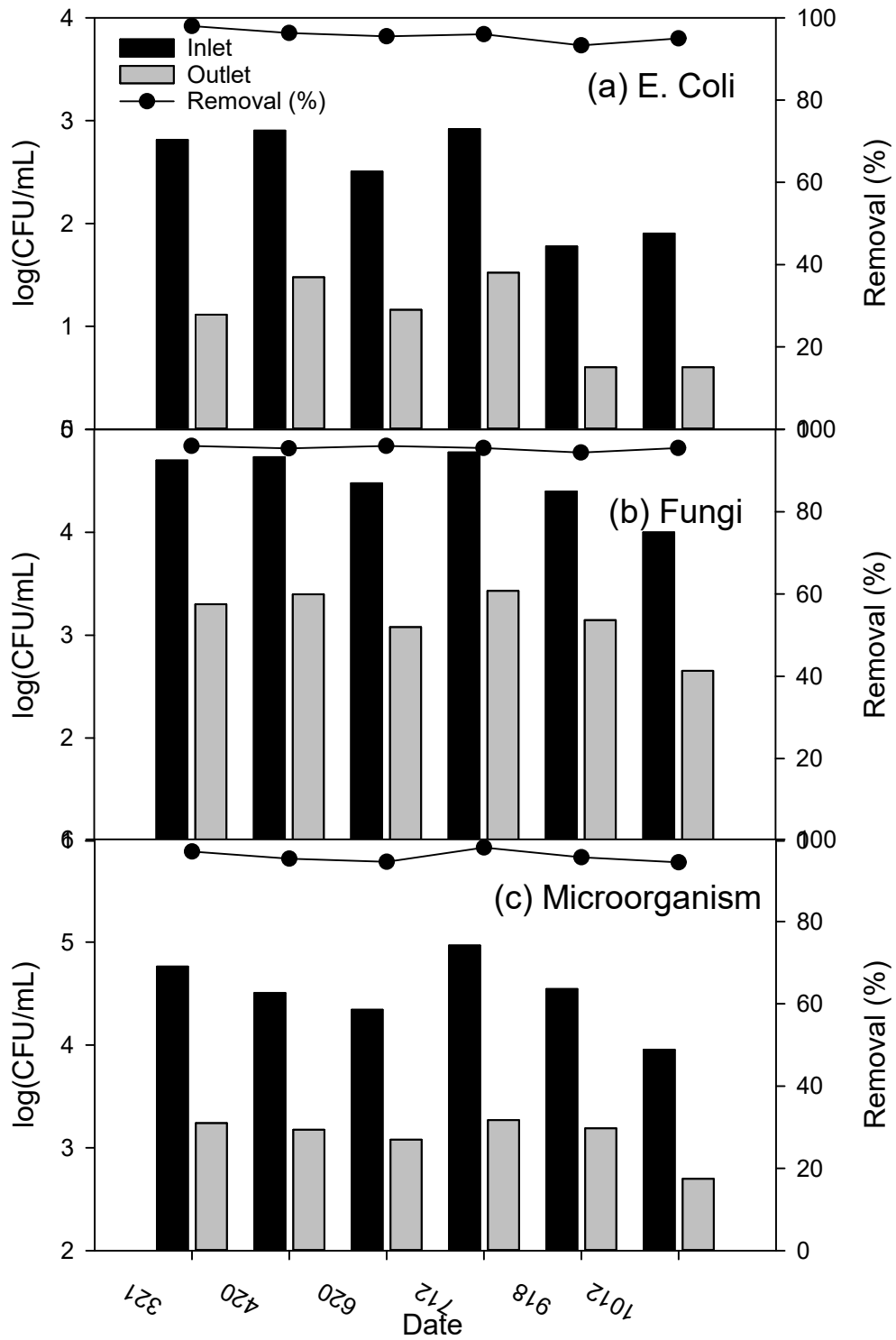
상기의 결과를 정리하여 표 2.14에 정리하였다.

[표 2.14] 살균모듈(UV 램프와 UV LED)에 따른 살균 효능 요약

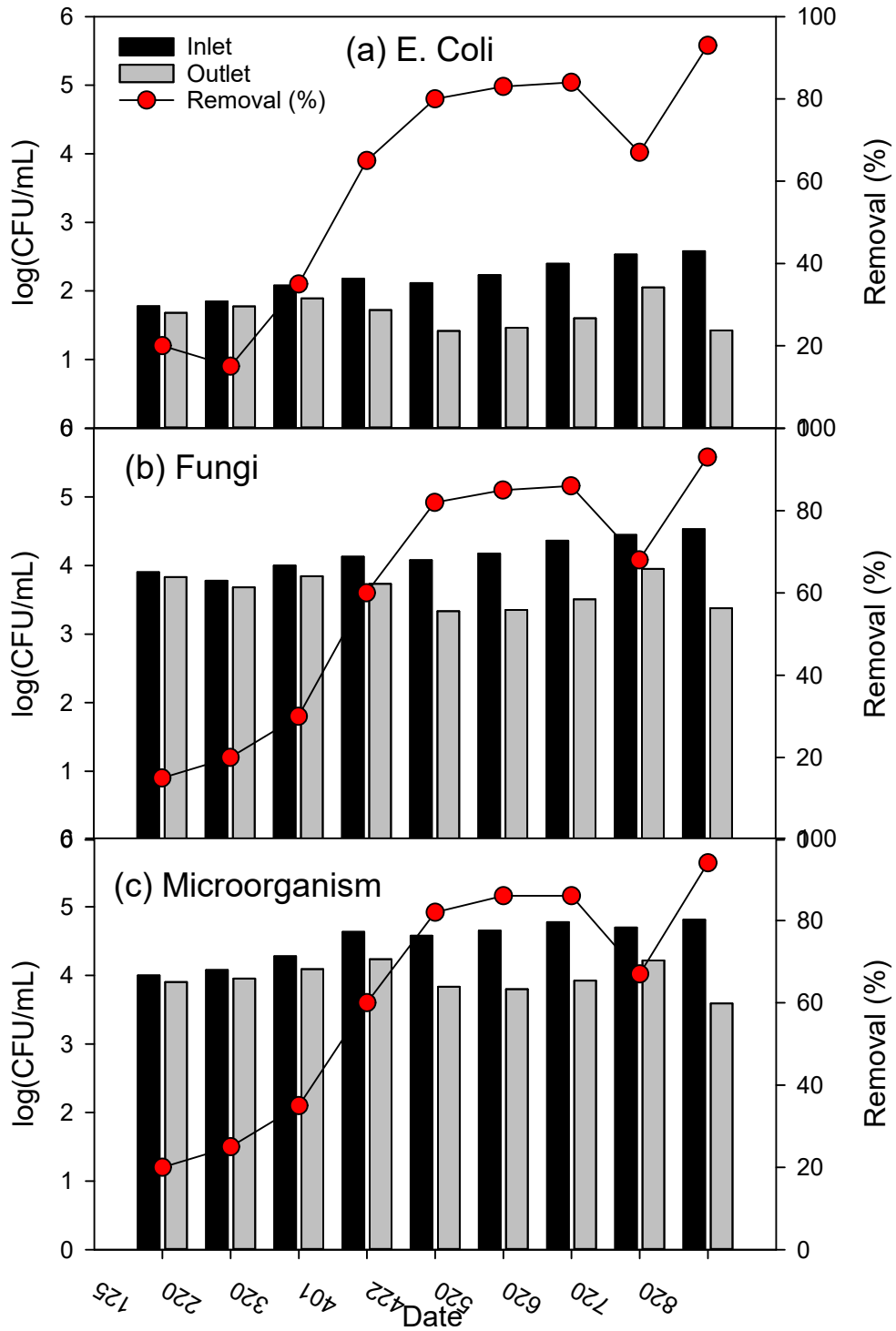
	UV 램프	UVC-LED
처리용량	1톤/h	
파장	254 nm	268 nm
출력	320W	27.3W×4
배지(대상작물)	암면배지(토마토/파프리카)	
제거율(%) (총대장균/곰팡이/일반세균)	97.3/97/96.9	95.7/95.5/95.8
배지(대상작물)	코코피트(파프리카)	
제거율(%) 정식후 100일 (총대장균/곰팡이/일반세균)	78.6/79/79.2	77.2/77/78
가격	350-400만원	500만원
유지관리	다소 불편함	간편함
제작이점	공간 제약성	공간 제약성이 덜함



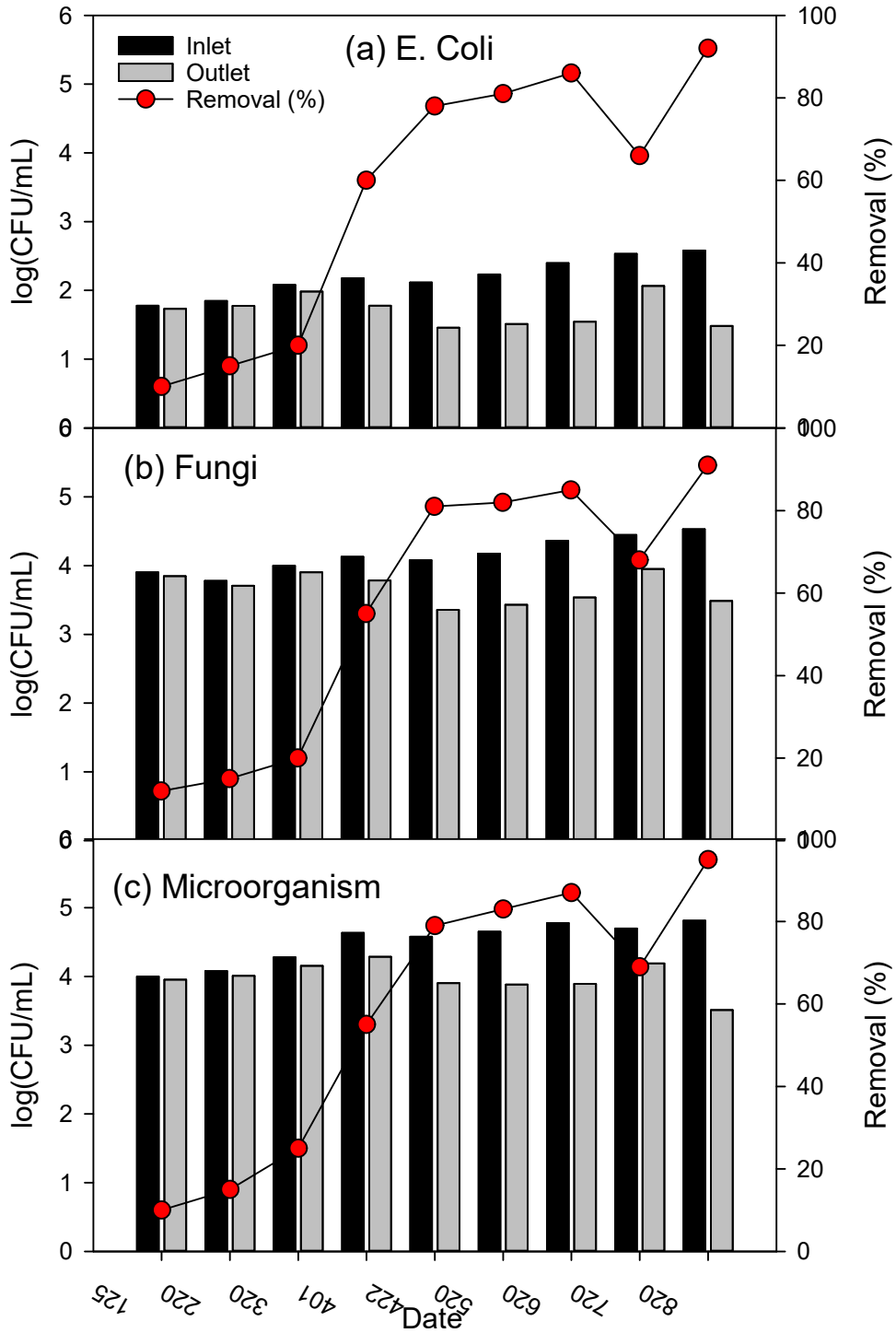
[그림 2.28] 암면배지 토마토 재배(Farm4) 배액에서 UV-C lamp 처리 전후의 (a) 총 대장균, (b) 곰팡이, (c) 일반세균의 변화 및 처리율



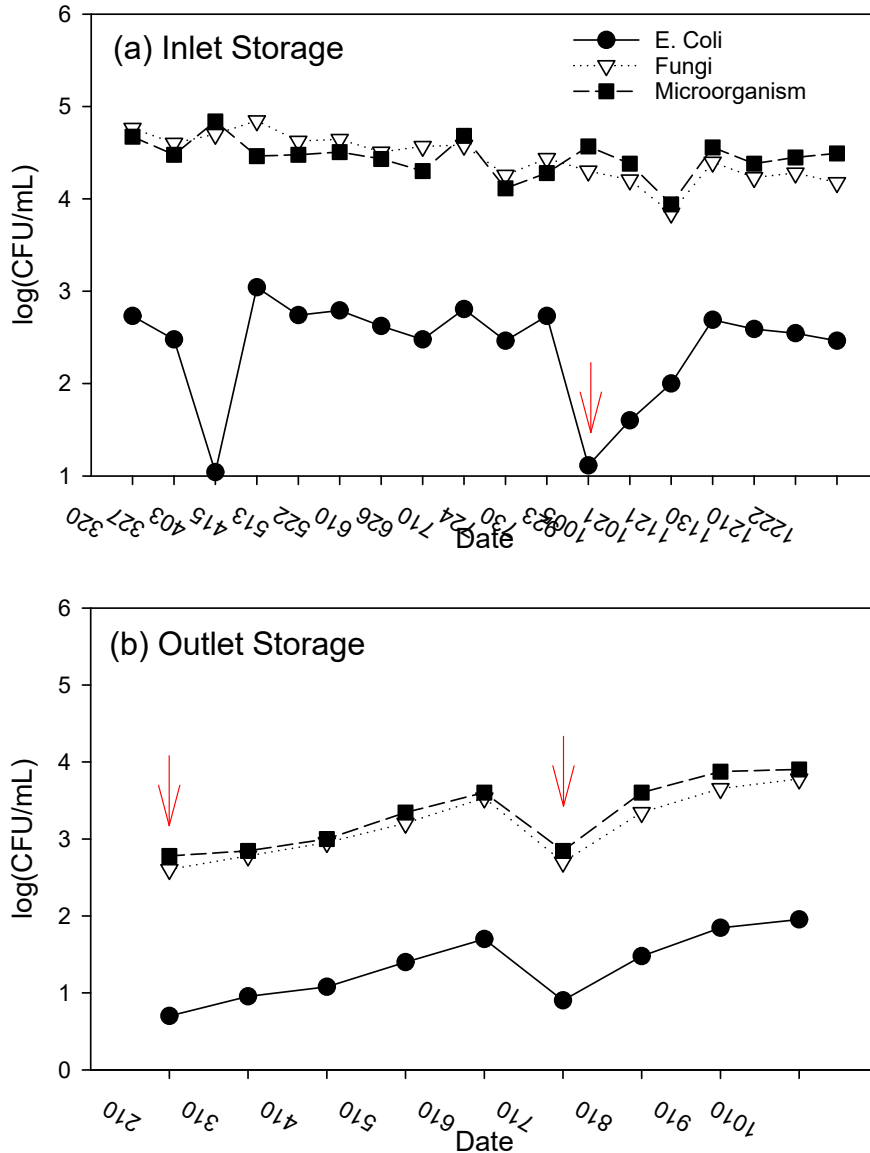
[그림 2.29] 암면배지 토마토 재배(Farm4) 배액에서 UV-C LED 처리 전후의 (a) 총 대장균, (b) 곰팡이, (c) 일반세균의 변화 및 처리율



[그림 2.30] 코코피트 배지 파프리카 재배(Farm8) 배액에서 UV-C lamp 처리 전후의 (a) 총 대장균, (b) 곰팡이, (c) 일반세균의 변화 및 처리율



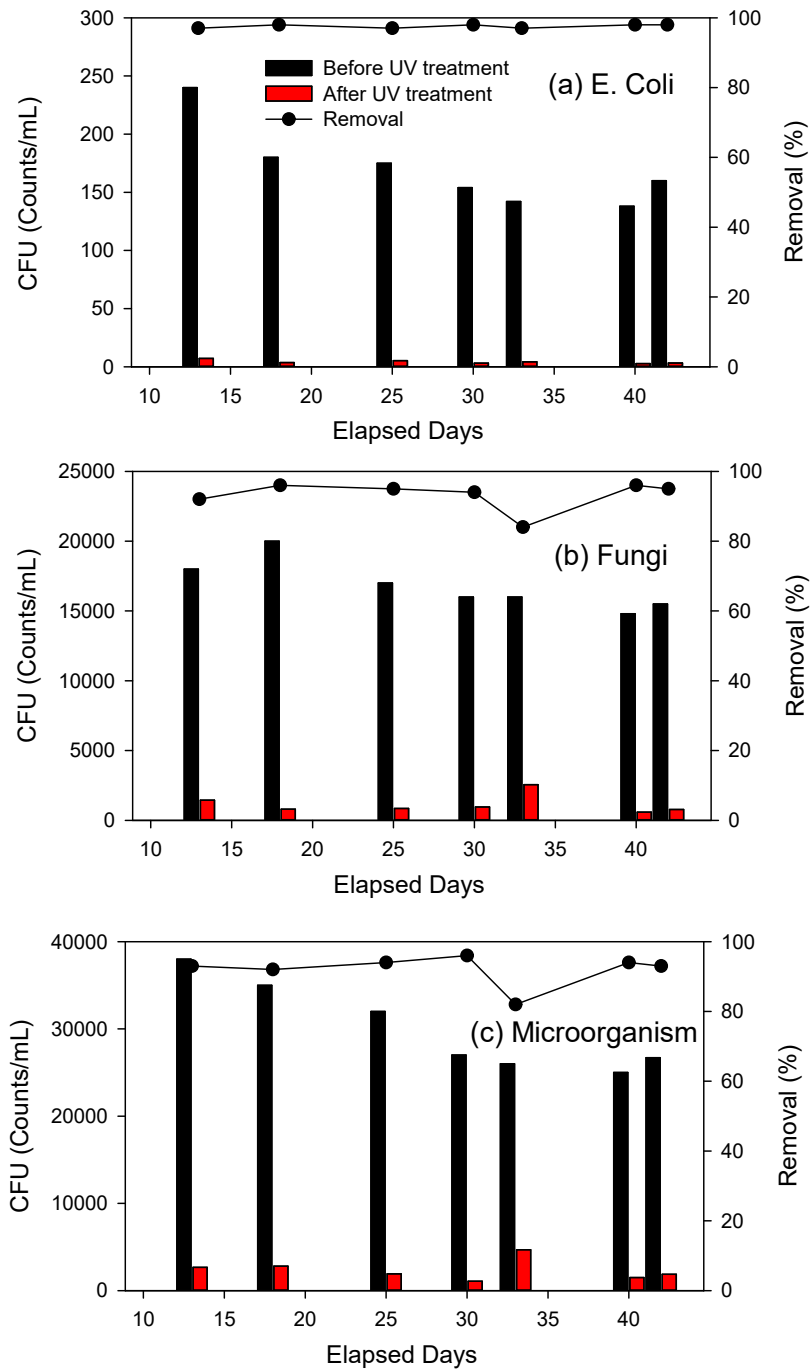
[그림 2.31] 코코피트 배지 파프리카 재배(Farm8) 배액에서 UV-C LED 처리 전후의 (a) 총 대장균, (b) 곰팡이, (c) 일반세균의 변화 및 처리율



[그림 2.32] 암면배지 재배(Farm4) 배액저장조((a) 살균처리전, (b) 살균처리후) (a) 총 대장균, (b) 곰팡이, (c) 일반세균의 변화. 화살표는 배액저장조를 청소한 날을 나타냄.

배액저장조는 배액을 처리하기 위하여 모아두는 저장공간이지만, 미생물 등이 지속적으로 배양될 수 있는 환경을 제공하기도 한다. 따라서 살균처리 전후의 배액저장조의 미생물의 수를 지속적으로 모니터링하였다(그림 2.32). 살균처리전의 배액에서의 미생물의 수는 일정하게 유지되고 있으나, 살균처리후의 배액저장조에서 미생물은 점진적으로 증가하는 추세를 보여주고 있으며, 이는 배액저장조가 미생물을 증식에 영향을 주는 공간으로 작용함을 말한다. 중간에 저장조를 청소한 경우 전반적으로 미생물의 농도가 낮아지는 경향을 보였으며, 이로 비추어 주기적인 저장조의 청소 및 세척은 순환식 양액공급시스템에서 식물에 공급되는 양액 내 미생물의 농도를 줄이는데 주요한 요인임을 확인하였다.

다. 연속운전에 따른 순환식 수경재배시스템의 살균효율 안정성 평가



[그림 2.33] 암면배지 재배(Farm4)에서 연속 순환식 수경재배 시스템에서 총대장균, 곰팡이, 일반세균의 변화

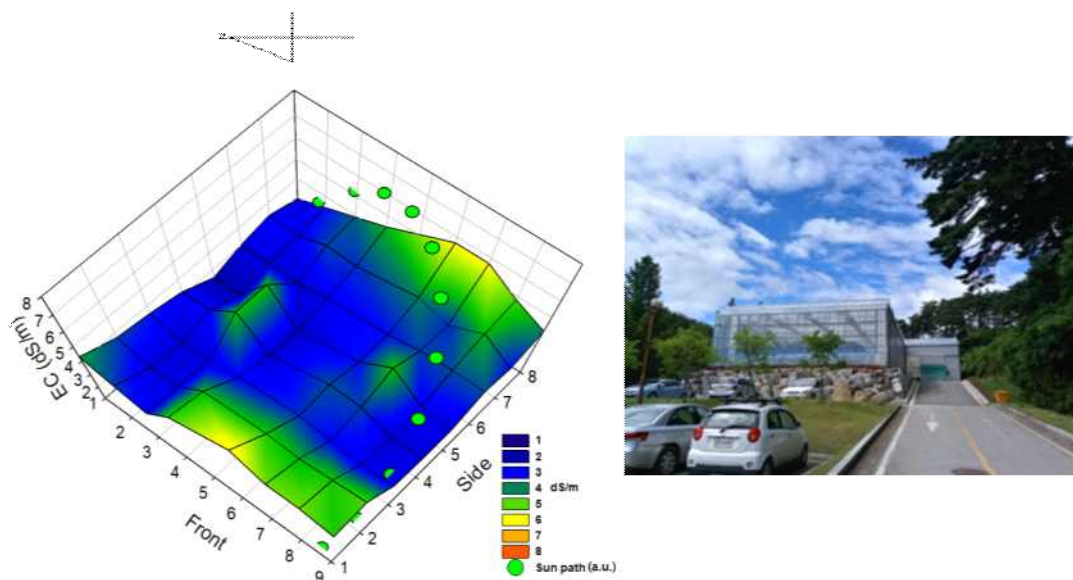
순환식 수경재배 시스템 운영을 통한 총대장균, 곰팡이, 일반세균의 분포는 점진적으로 감소되는 경향이 있는 것으로 나타내었다. 이는 순환식 수경재배를 통한 살균 처리후의 배액과 급액이 재사용율에 따라 계속적으로 사용함으로 인한 것으로 판단된다. 그러나 작기 중반부터 순환식 수경재배 시스템을 적용했기 때문에 총대장균, 곰팡이, 일반세균이 가장 많이 서식하고 있는 것으

로 보여지는 배지내에서 계속 유출되어서 나오기 때문에 감소되는데는 한계가 있는 것으로 보여진다. 전반적으로 총대장균과 곰팡이는 평균 95% 이상 제거되는 것으로 보여지며, 일반세균은 평균 92% 제거율을 보여지고 있다. 이러한 이유는 일정 조사량에서 총대장균은 쉽게 제거가 되지만 일반세균과 곰팡이의 일부는 높은 조사량을 요구하는 경우도 있기 때문에 제거율에 차이가 있는 것으로 보여진다. 특히 33일 경과 후 살균효율이 급격히 떨어지는 이유는 지속적인 호린날과 적은량의 관수 공급으로 인해 높은 배액 EC와 배액내 UV 투과율이 급격하게 떨어지는 요인에 의해 처리효율이 떨어진 것으로 판단된다.

5. 순환식 배액관리 및 제어프로그램 개발

가. 양액제어 및 배액관리에 연계된 온실환경 데이터 획득 시스템 구축

수경재배 시스템에서 배액 양분 상태의 변화는 온실 내 환경 조건에 지배적으로 영향을 받는다. 배액의 EC는 식물의 양분 흡수농도와 공급농도와의 차이가 누적된 결과로 나타난다. 배지와 배액의 EC는 흡수농도가 일반적인 공급농도보다 낮은 범위에 있으므로 적절한 관리가 동반되지 않으면 배지 내 EC의 일간 변동과 함께 장기적으로는 EC 증가 경향이 관찰된다. 온실 환경, 양액 공급 시스템, 배지, 배액은 서로 연속체로 연결되어 있으며, 따라서 순환식 수경재배에서 적절한 양분 관리를 위해서는 온실 환경이 배액에 미치는 영향을 파악할 필요가 있다. 또한 같은 재배 공간 내에서도 환경적 편차가 발생하며 그 영향이 크게 작용할 수 있기 온실 환경이 배액 관리에 미치는 영향을 파악하기 위한 접근이 필요하다.



[그림 2.34] 온실 내 배지 위치별 배지 EC 분포 및 조사 당시의 태양 고도 변화 및 조사 온실 사진
(조사 시기: 2019년 4월 9일)

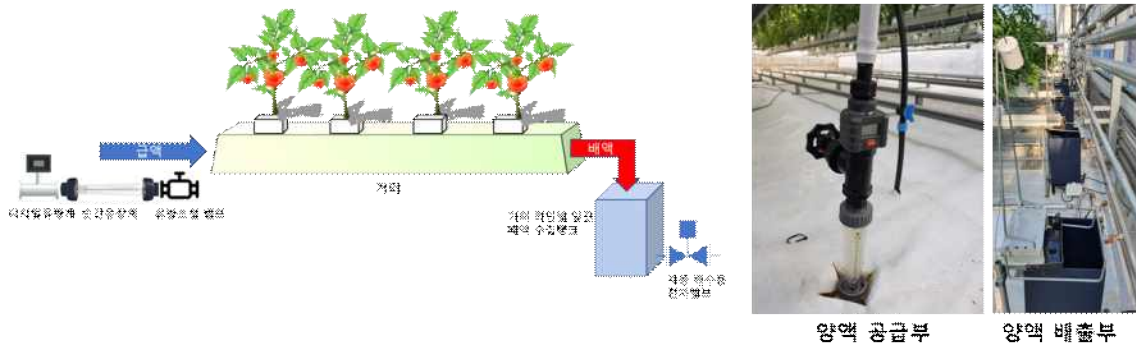
본 연구에서는 온실 내 국부환경 차이가 영향을 미치는 양상을 파악하기 위해 온실 재배 구역에서의 배지 EC 분포를 조사하였다. 조사한 온실 재배 구역의 재배작목은 토마토였으며, 행잉거터에 배치된 암면 슬라브에 재배하고, 일사비례제어 방식으로 점적 관수를 수행하였다. 조사 영역은 9열의 행잉거터에 각각 8개의 암면 슬라브로 구성되어 있다. 온실 조사 영역 내 배지 내 EC 분포를 조사한 결과, 온실 후면과 온실 전면의 암면 슬라브의 EC가 높게 분포하는 것으로 확인되었다(그림 2.34).

2019년 4월 9일의 대략적인 태양의 궤적을 참고하여 판단해보면, 온실 전면의 슬라브와 후면의 슬라브는 식물 군락으로 인한 그림자의 영향을 적게 받으며 일중 이러한 조건이 적용되는 기간이 다른 구역에 비해서 상대적으로 긴 시간 아래 있기 때문으로 추정된다. 온실 후면에 있는 경우라도 1번 레인의 8번 슬라브 같은 경우는 오히려 대부분의 샘플에 비해서도 EC가 낮은 수준으로 관찰되었는데 이는 일출 직후에는 식물 군락의 영향을 적게 받지만, 정오부터는 오히려 군락에 의한 그림자의 영향을 오래 받는 위치에 있기 때문으로 추정된다.

본 조사결과는 드립퍼를 통해 온실 내 군락으로 공급되는 양액의 속도와 재배 위치별 식물의

증산 속도의 차이가 누적되어 이러한 경향이 관찰되는 것으로 볼 수 있다. 따라서 온실환경과 배액관리의 관계 조사는 온실 내부 환경의 지역적 편차와 그 영향에 대한 특성을 고려할 필요가 있다. 결국, 온실환경에 대한 정보를 배액 관리와 체계적으로 연결하기 위해서는 환경의 균질화 조건을 조성하거나, 이것이 현실적으로 어려울 경우 지역별 편차를 고려한 데이터 수집과 모니터링을 기반으로 온실의 환경과 양액재배 시스템의 제어 입력을 결정하는 것이 타당하다.

지역별 편차를 고려한 배액 양분 상태 관리는 격자형 또는 개별 암면 슬라브 수준의 단위 지역 구분이 이상적일 수 있으나, 일반적인 온실 배관 구조를 고려할 때 현실적으로는 어렵다. 본 연구에서는 최소 관리 지역의 단위를 행잉거터 라인으로 구분하였으며, 단위 구역에서의 양수분 입출력을 모니터링하기 위한 체계를 구축하였다(그림 2.35). 단위 구역의 행잉거터로 분기된 배관의 초입에 전자 유량계(순간, 누적)와 눈금식 순간 유량계, 유량 조절 밸브를 한 조로 체결하여 설치하였다. 행잉거터의 종단에는 배액 집수용 수조와 자동 배수 장치를 설치하였으며, 일단위의 배액 상태 변화를 감시할 수 있도록 하였다.

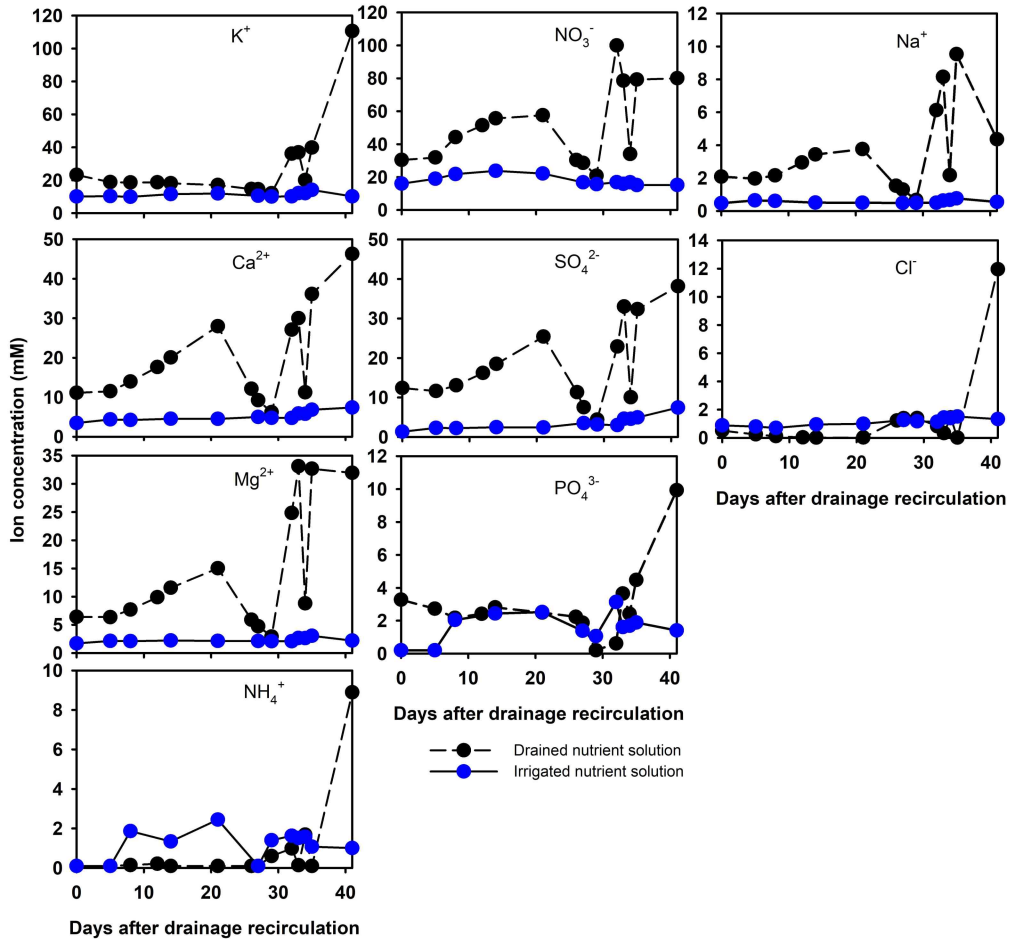


[그림 2.35] 온실 환경 기반 양액제어-배액관리 체계 수립을 위한 양수분 입출력 모니터링 체계

나. 배액의 특성평가

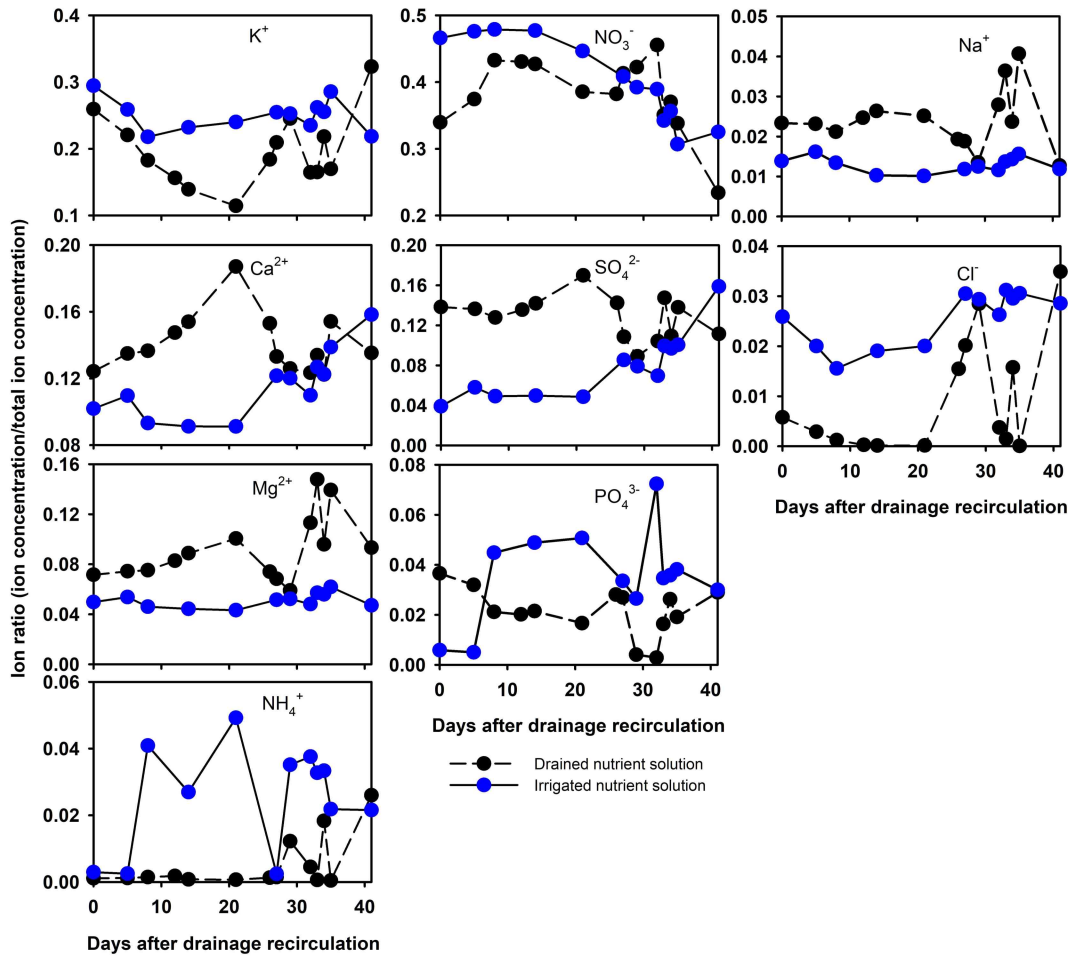
비순환식 수경재배 시스템의 경우 배액의 양분 관리는 상대적으로 직관적인 접근이 가능하다. 비순환식 수경재배에서 관수량의 증가는 표준 조성으로의 양분 교정 기능을 수행한다. 그러나 순환식 수경재배 시스템의 배액 특성 변화는 관수 조건, 식물의 생육 상태, 기상 조건, 배액의 재사용 비율 등의 변화에 영향을 받는다. 따라서 순환식 수경재배 시스템에서의 양분관리 체계화는 배액 재사용에 따른 변화의 추이에 대한 특성 평가에 기초할 필요가 있다.

정식 후 72일 경과 시기에 배액의 재사용 처리를 적용했을 때 다량원소 농도 변화는 전체적인 증가 경향이 관찰되었다(그림 2.36). 그러나 대부분 양분에서 후반부로 갈수록 증가하며, 일부 변동 구간에서 일제히 증감의 반응을 보이며, 이는 배액의 재사용에 따른 인과 관계로 해석하기보다는 관수 조작에 따른 반응으로 보는 것이 타당하다. 따라서 농도의 변화를 기반으로 한 배액 특성 조사는 순환식 수경재배 시스템의 양분 관리 지점의 파악에 어려움이 있을 수 있다. 즉, 순환식 수경재배 적용에 따른 양분 조건의 반응의 해석에 있어 고려해야 할 잡음 요인이 더 많은 것으로 볼 수 있다.



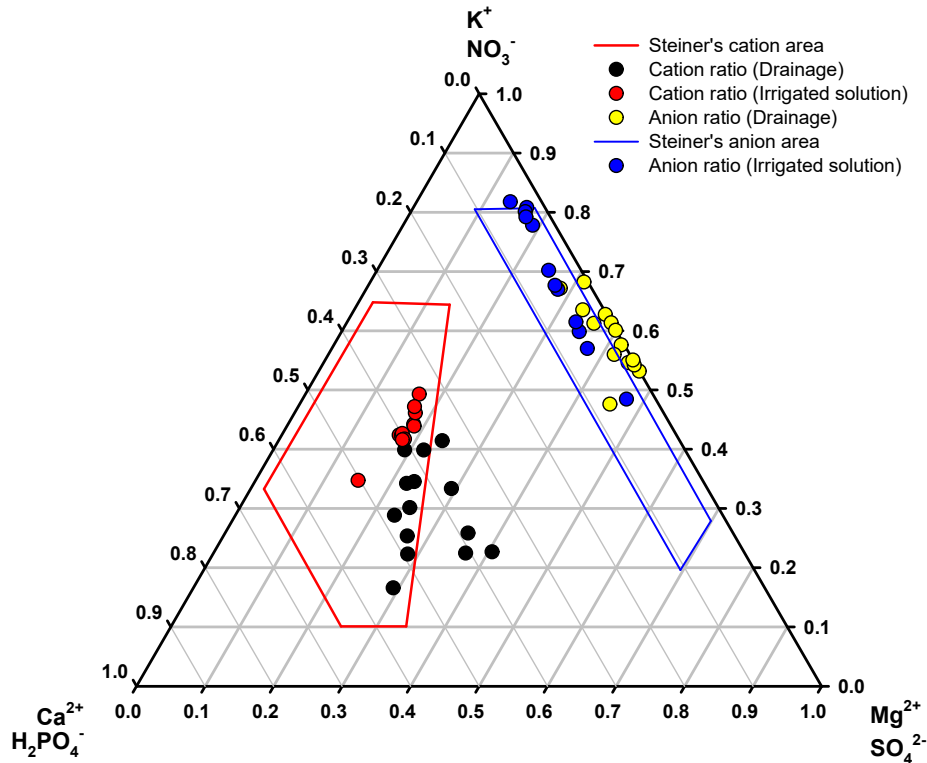
[그림 2.36] 암면배지의 배액과 공급 양액의 다량이온 농도 변화
 (배액 혼합 비율: 초기 5일 50%, 이후 30%로 하향 조정, 재사용 적용시기: 정식 후 72일)

순환식 수경재배 적용 초기 5일 동안의 배액 및 공급 양액의 양분 분석을 수행했을 때, NH_4^+ 와 PO_4^{3-} 농도가 양분 결핍의 수준으로 이미 감소하여 있는 것이 관찰되었다. 암모늄태 질소와 인은 식물의 흡수 속도가 상대적으로 높은 양분이면서, 다른 양분에 비해 저농도로 공급되기 때문에 순환식 수경재배 시스템에서는 쉽게 결핍의 조건으로 이어질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 초기 5일 이후 배액의 재사용 비율을 50%에서 30%로 하향 조정하였다. 이에 따라 암모늄태 질소와 인의 공급 양액 내 농도가 증가된 것을 확인하였다. 순환식 수경재배 시스템의 개도가 낮아질수록 배액이 시스템에 미치는 영향은 더욱 증가한다. 이는 순환식 수경재배 시스템의 폐쇄 수준(배액의 재사용률)을 증가시킬수록 배액 특성평가를 통한 재사용 양액의 양분 관리 기술이 필수적임을 시사한다.



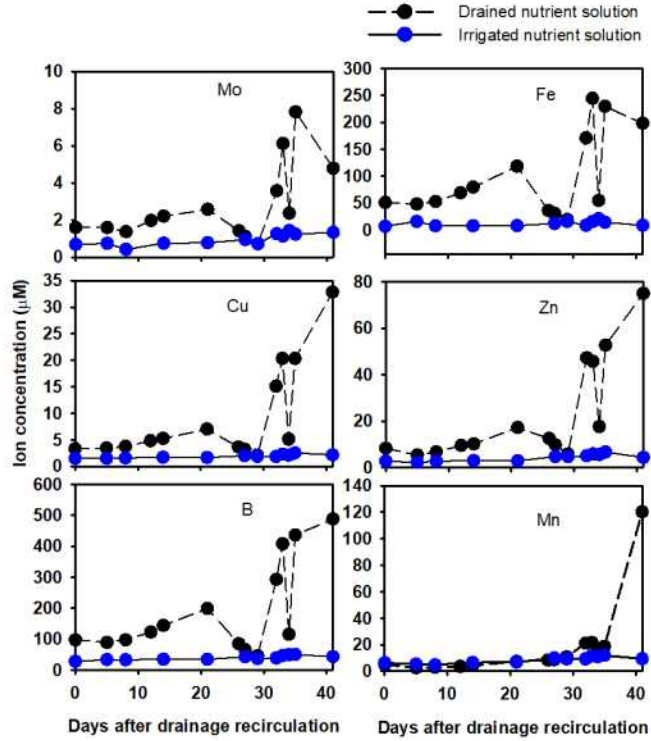
[그림 2.37] 암면배지의 배액과 공급 양액의 다량이온의 비율 변화
 (배액 혼합 비율: 초기 5일 50%, 이후 30%로 하향 조정, 재사용 적용시기: 정식 후 72일)

그림 2.37 결과의 양분 농도를 비율로 변환하여 배액 재사용 적용에 따른 영향을 평가하였다. 인의 경우 배액 농도에서는 후반부로 진행됨에 따라 증가하는 경향이 관찰되었으나, 비율상으로는 감소 경향이 관찰되었다. 양분 간의 비율 변화는 농도 변화와 마찬가지로 재사용 후 25~30일 구간에서의 증감 변동이 관찰되었다. 그러나, 칼륨, 칼슘, 황, 질소의 경우 공급 양액의 비율에 접근하는 변화가 관찰되었다. 이는 배액을 재사용하였다더라도 현 단계에서는 전량 재사용이 적용되지 않았기 때문에 비순환식예과 마찬가지로 관수 조작 등에 따른 교정 효과로 해석될 수 있다. 양분 간의 비율은 관수 조작과 증산 속도 변화에 따른 각 양분 농도의 변화를 일부 상쇄해주며, 전체적인 농도 변화를 0~1 사이에 정규화하여 보여줌으로써 배액, 급액과의 비교, 감소, 증가 경향의 판단, 교정효과의 판단 등에 유용할 것으로 판단된다.

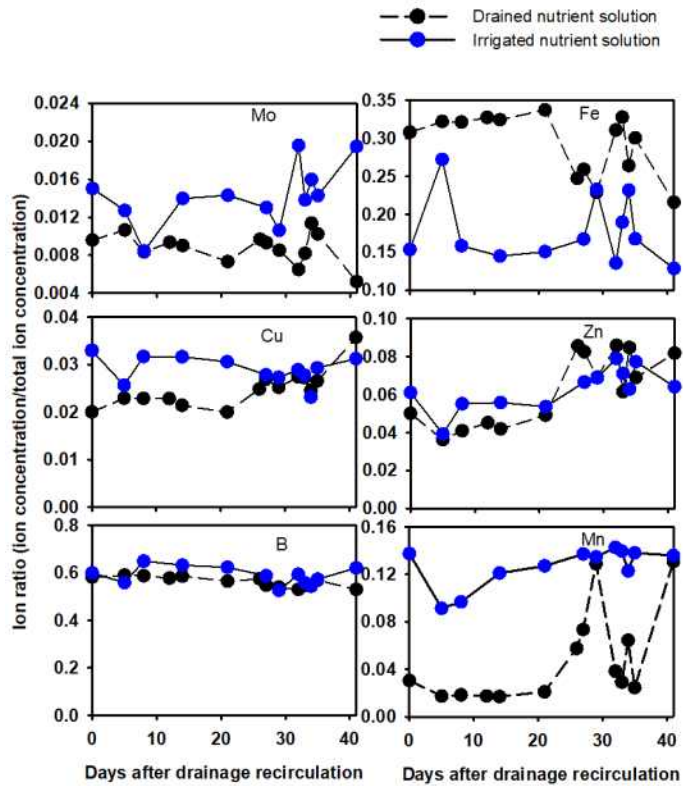


[그림 2.38] 배액 및 급액 내 양이온, 음이온 당량 비율 변화 및 Steiner 양이온, 음이온 표준 비율 삼각도

전체 양분 간의 비율 변화 외에도 양이온 및 음이온 간의 상대적인 당량 농도 또한 배액의 양분 특성 평가에 사용될 수 있다(그림 2.38). 급액의 경우 양이온과 음이온 모두 대부분 Steiner의 양이온, 음이온 표준 비율 영역 내에 들어와 있는 것이 확인되었다. 그러나 배액의 경우 일부 이탈해서 분포하는 경향이 관찰되었다. Steiner의 양이온, 음이온 삼각도 영역은 양분 선택성과 선택성을 유지하기 위한 식물의 에너지 소모, 양액 내 화학적 안정성을 고려하여 제시된 영역으로, 배액 특성 평가를 통한 순환식 수경재배 시스템의 양분 관리 체계화에 유용할 것으로 판단된다. 이를 기준으로 판단했을 때는, 비록 공급 양액의 양분 조성이 적정 영역 안에 있지만, 실제 식물 근권부의 양분 상황을 나타내는 배액의 상태는 해당 영역에서 벗어나 있으므로, 공급양액 내 비율 이동을 통해 배액 내 양분의 조성이 적정 구역으로 이동할 수 있는 처방 진단을 내릴 수 있을 것이다.



[그림 2.39] 암면배지의 배액과 공급 양액의 미량이온 농도 변화
(배액 혼합 비율: 초기 5일 50%, 이후 30%로 하향 조정, 재사용 적용시기: 정식 후 72일)



[그림 2.40] 암면배지의 배액과 공급 양액의 미량이온 농도 비율 변화
(배액 혼합 비율: 초기 5일 50%, 이후 30%로 하향 조정, 재사용 적용시기: 정식 후 72일)

본 연구에서 미량원소의 농도 변화 또한 다량원소와 유사한 변동 패턴이 관찰되었다. 미량원소의 농도는 후반부로 갈수록 전체적인 증가 경향이 관찰되었으며, 다량원소와 마찬가지로 이러한 증가 경향은 관수 조작에 따른 영향으로 볼 수 있다(그림 2.39). 비율 변화의 경우도 다량원소와 마찬가지로 일부 양분에서 25~30일 변동 구간에서 공급 양액의 비율에 근접하는 변화가 관찰되었다. 일반적으로 UV 살균 시스템이 갖춰진 시스템에서는 Mn의 흡착이나, Fe의 광산화에 따른 농도 감소 현상이 관찰된다. 그러나, 본 연구에서는 이러한 현상이 농도나, 양분 균형의 변화로 검출될 수준으로 나타나지는 않았다. Mn이나 Fe 광산화가 시스템에 미치는 영향력은 배액의 재사용 비율과 공급 양액 내 농도, UV 살균기의 제원 등에 따라 결정될 것으로 생각되며, 추후 양분 관리 기술의 심화와 체계화 과정에서 고려가 필요한 요인으로 판단된다.

다. 양액 특성 기반 순환식 배액관리

본 연구에서는 고품 배지경 조건에서의 양분 흡수량 측정 실험을 통해 흡수 속도의 수준을 측정하고, 이에 기반하여 순환식 수경재배 시스템 내에서 식물의 개별 양분 흡수 속도가 양분 변화에 미치는 영향의 수준을 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 양분 흡수 측정 실험과 시뮬레이션의 결과는 수경재배 시스템 상에서 생육단계별 양분 불균형 발생에 미치는 영향을 평가하고 근권부의 양분 변동의 평가에 활용할 수 있는 지표 개발에 활용하였다.

개별 양분 흡수 속도의 추정을 통한 재배 시스템 상의 양분 균형변화 평가

(1) 측정장치: 45 L 수조, 기포 발생기 사용(그림 2.41)

(2) 초기수량: 32 L

(3) 작물: 파프리카(시로코 품종 14·17화방)

(4) 근권부: 온실 내 균락 재배 중인 파프리카 암면 슬라브의 3등분 절단

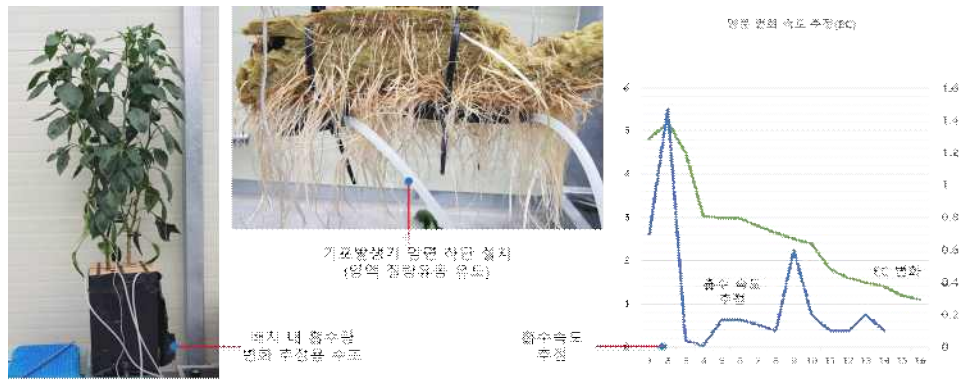
(5) 양분 흡수 속도의 추정 방식: 재배에 사용 중인 파프리카의 공급 양액 조성을 측정 수조에 배치

샘플 수집으로 인한 감소분을 제외한 증산으로 인한 수분 감소분은 3차 증류수로 보상하여 물의 부피는 일정하게 유지되도록 하였다. 그리고 공급 후 시간 경과에 따른 양분 감소분을 측정하였다.

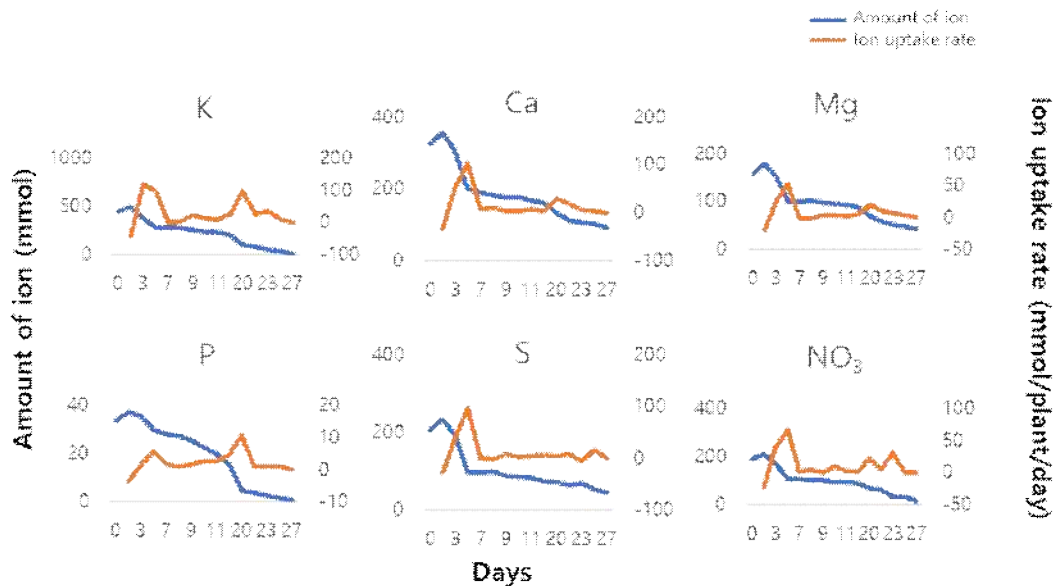
(6) 분석 주기: 일 1회 양액 샘플 수집(500mL)

(7) 양분 흡수 파라미터 추정: 감소 경향을 바탕으로 일일 흡수 속도로 변환 후 Michaelis-Menten 방정식의 양분 흡수 파라미터 추정

(8) 양분흡수 파라미터 기반 온실재배 규모에서의 양분 불균형 발생 소요시간 평가: 근권부 양수분 이동, 양분 흡수, 양액 공급시스템의 통합 시뮬레이션 이용



[그림 2.41] 암면 재배 작물의 양분 흡수 속도 평가 장치 및 방법

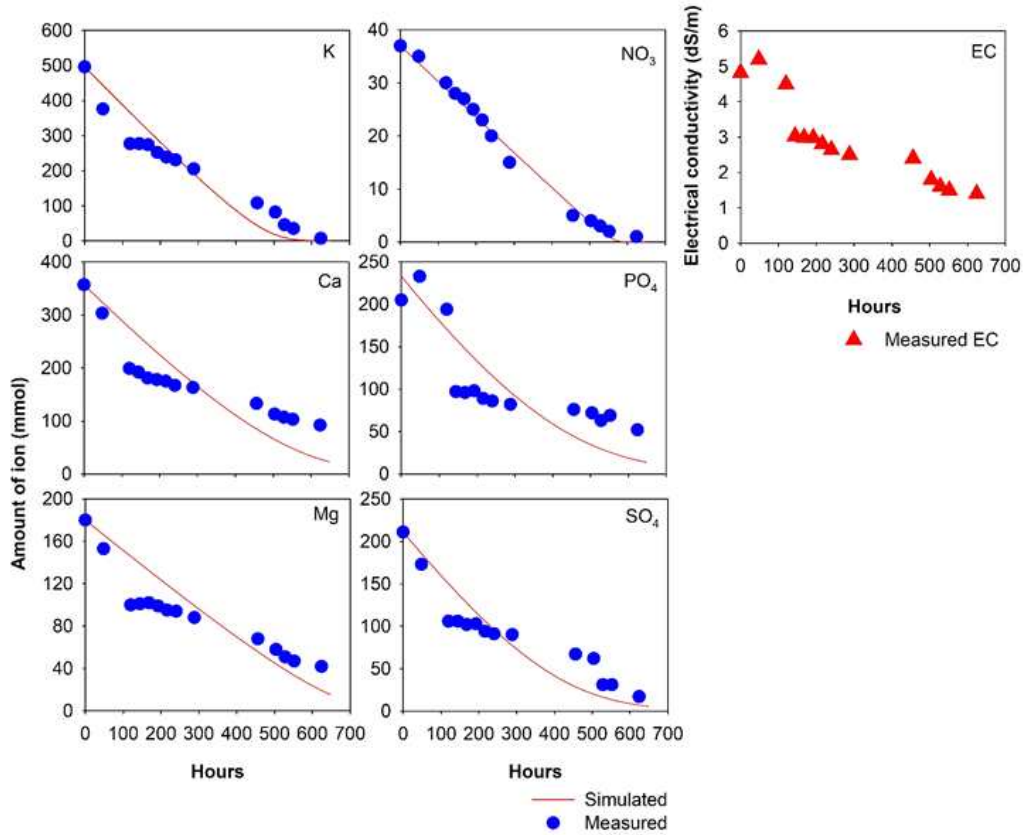


[그림 2.42] 암면 재배 파프리카의 양분 흡수 속도 평가 장치 내 각 이온의 총량 변화 및 일일 흡수 속도 변화

본 연구에서 수조 내 32 L의 초기 양액에서 수조 내 양분의 양이 14·17 화방 생육 단계 식물의 흡수로 인해 초기의 고농도에서 절반 수준으로 감소하는 데 걸리는 기간은 양분 종류에 따라 6~11일 정도로 평균 약 8일의 기간이 소요되었다(그림 2.42). 일반적인 암면 슬라브 재배에서 배지의 부피는 약 10L이며, 사용자의 관수 조작에 따라 슬라브 부피의 50~90% 사이의 수분을 변동이 있을 수 있으며, 하나의 슬라브에 3개체 이상의 재식 수준을 적용한다. 본 연구에서 추정된 양분의 흡수 속도 수준이 일반적인 암면 슬라브 재배 조건의 근권부 양분 변동에 미치는 영향은 흡수량 측정 실험에서보다 더 크게 나타날 수 있다. 그러나 순환식 수경재배 조건에서는 본 측정 실험에서와같이 증산량에 대한 수분 소모량 보상뿐만 아니라 양분의 소모량에 대한 보상도 같이 이루어지기 때문에 이를 고려한 평가가 필요하다.

관수 조작, 농축양액 공급 등의 관련 변수 및 파라미터가 더해진 상황에서의 양분 변화 수준을 평가하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 본 측정 실험에서의 양분 변화 속도를 반영하기 위해 Michaelis-Menten 방정식을 기반으로 측정 수조 조건에서의 양분 흡수 파라미터를 추정하였다. 파라미터의 추정은 Michaelis-Menten 기반의 미분방정식 모델에서 흡수 파라미터 값 대입을 통

해 측정값과 수치해석 값과의 차이를 최소화 하는 방식을 사용하는 progress curve analysis를 이용하였다(그림 2.43). 이러한 과정을 통하여 Michaelis-Menten 방정식의 양분 흡수 파라미터를 추정하였으며(표 2.15), 암면재배 기본 관수 조작 패턴, 증산, 양분흡수, 양분공급을 반영한 시물레이션의 양분 흡수 파라미터로 활용하였다.



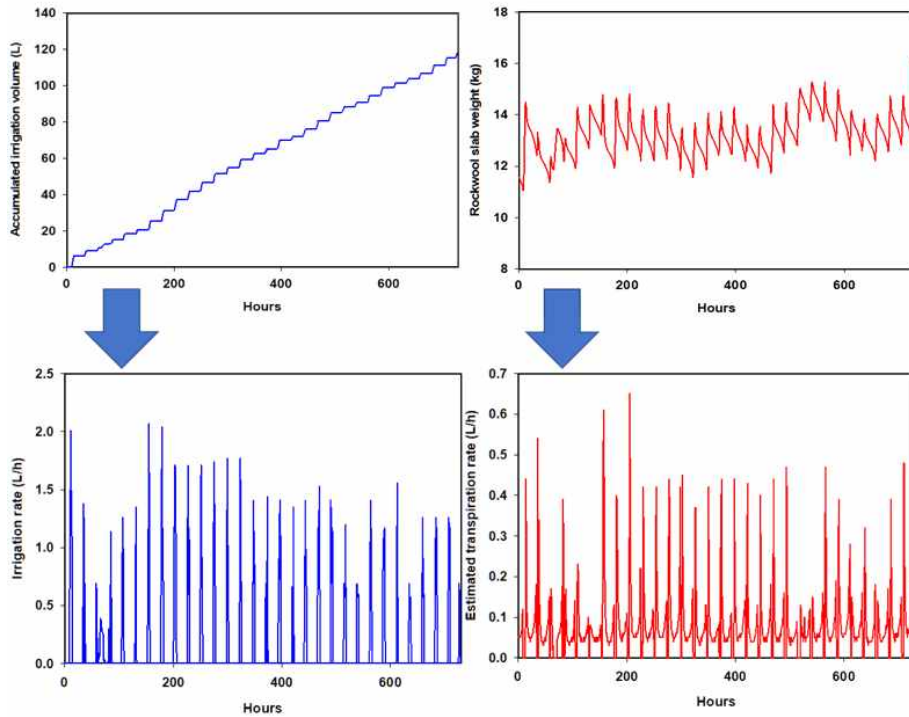
[그림 2.43] 암면 배지 파프리카 양분 흡수 추정 수조 데이터를 활용한 Michaelis-Menten 방정식 양분 흡수 모델의 Progress curve analysis 추정 파라미터 적용 시물레이션 결과

[표 2.15] Progress curve analysis를 통한 Michaelis-Menten 방정식 양분 흡수모델의 추정 파라미터

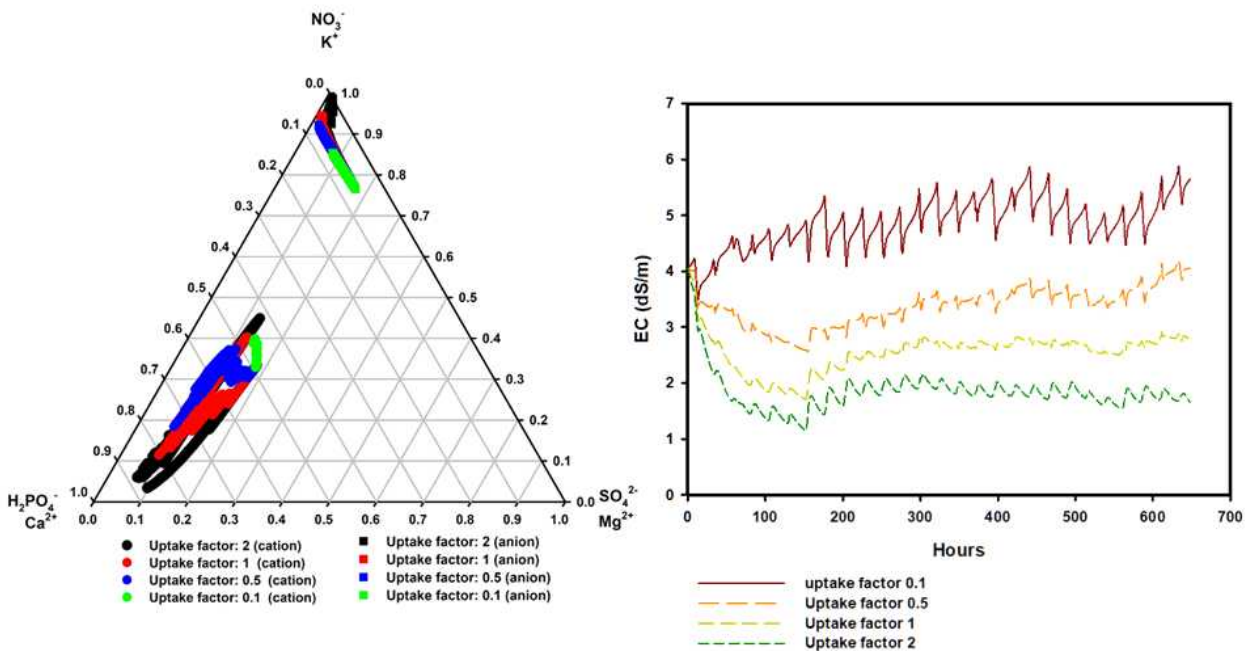
양분	V_{max} (mmol/plant/hour)	K_m (mM)
K	1.16	1.16
Ca	0.83	0.83
Mg	0.31	0.53
NO_3	0.71	2.49
PO_4	0.07	0.02
SO_4	0.79	3.68

암면재배 기본 관수 조작 패턴, 증산을 반영하기 위한 데이터는 본 연구를 수행한 온실에 설치된 배지 중량센서로 약 30일간 수집 데이터를 사용하였다(그림 2.44). 관수량의 경우 중량센서에 통합되어 있는 누적관수량 측정 센서 데이터를 활용하였다. 본 시물레이션의 시간 단위를 기준으

로 수행되었기 때문에 시간당 관수 속도 변화로 변환하여 관수 입력 데이터로 활용하였다. 증산량 변화의 경우 시간당 배지 중량 센서의 무게 감소량으로 변화하여 시간당 증산 속도로 활용하였다. 배지 중량센서의 경우 중량의 변화에는 증산에 의한 감소와 동화산물 축적에 의한 증가가 동시에 반영된 결과이기는 하나 본 시뮬레이션 기간에는 이것이 미치는 영향은 무시하였다.



[그림 2.44] 양분 흡수 영향 평가 시뮬레이션을 위한 온실 암면 재배 조건에서의 누적 관수량 및 배지 무게 변화 계측 데이터(상)의 시간당 관수 속도와 증산 속도(하) 변환



[그림 2.45] 양분 흡수 영향 평가 시뮬레이션에서 식물의 양분 흡수 배율 적용에 따른 양이온 및 음이온의 양분 균형(좌)과 배지 내 EC 변화(우)

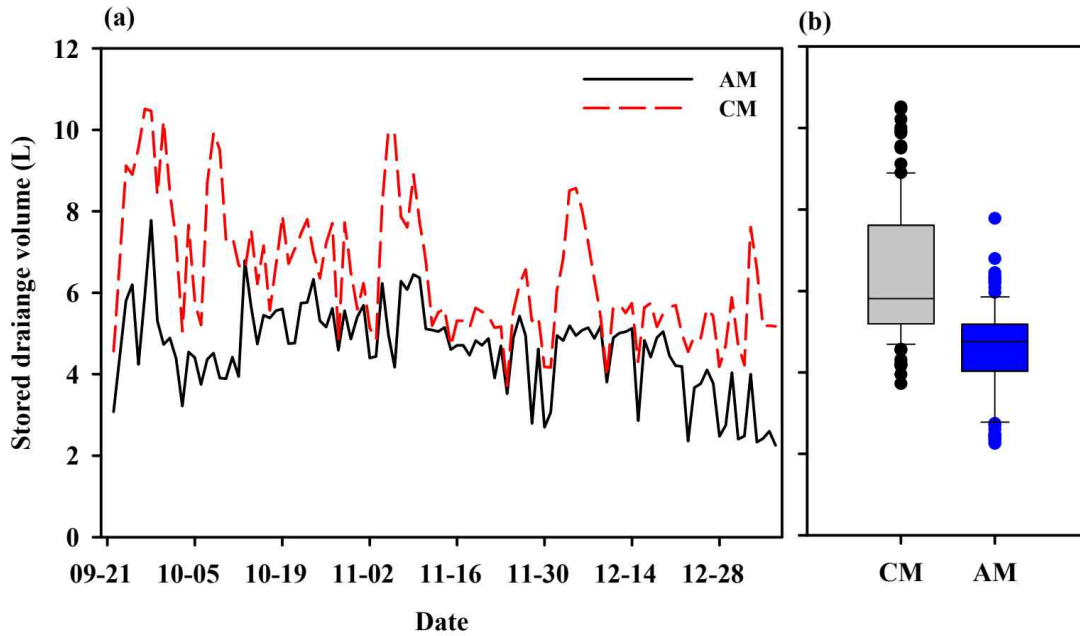
암면 배지 조건 양분 흡수 속도 측정 실험을 통해서 추정된 양분 흡수 파라미터와 암면재배 기본 관수 조작 패턴, 증산, 양분흡수, 양분공급을 반영한 시뮬레이션을 수행하였다(그림 2.45). 본 시뮬레이션에서는 양분 흡수 속도 변화가 양분 균형 변화에 미치는 영향을 평가하기 위해 양분의 최대 흡수 속도 파라미터에 배율 변화를 적용하였으며, 배액의 재사용 비율은 100%로 적용하였다. 표 2.15에서의 파라미터를 그대로 적용한 흡수 배율 1에서는 양이온의 경우 칼슘 비율 증가가, 음이온의 경우 질산태 질소 비율 증가가 큰 것으로 분석되었다. 양분 흡수 실험에 사용한 생육 수준의 파프리카가 가지는 양분 흡수 능력이 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 양분 균형 변화에 미치는 영향은 상대적으로 클 것으로 추정된다. 그러나, 양분 흡수 최대 속도 파라미터의 배율을 낮게 조정하였을 때는 양분 균형변화의 폭이 많이 감소하는 것을 확인하였다. 이는 배액의 재사용 비율에 100%인 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템에서도 양분의 흡수 속도가 빠르지 않은 생육 초기 단계의 재배 구간에서는 양분 불균형 발생의 가능성이 매우 낮을 수 있음을 의미한다. 따라서 식물의 양분 흡수 속도의 수준이 시스템 내 양분 균형 변화에 미치는 영향 변화에 착안하여 보급형 순환식 수경재배 조건에서의 양액 재사용 비율 결정 기술의 자동화·최적화에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

라. 폐양액 최소화 알고리즘 개발

일정 비율의 배액을 재사용하는 보급형 순환식 수경재배 시스템에서는 배액 탱크의 저장 용량을 초과하여 온실 외부로 폐양액이 방류되는 상황이 발생할 수 있다. 이러한 폐양액의 강제 배출 문제는 100% 미만의 배액 재사용률 적용에 따라 미사용 배액의 누적량 증가로 발생할 수 있다. 100% 미만 배액 재사용률 적용으로 인한 폐양액 배출 문제는 현재 반폐쇄형의 보급형 순환식 수경재배 시스템의 기술 단계에서는 앞에서 고찰한 바와 같이 배액 재사용률을 동적으로 제어함으로 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 이 외에, UV 살균장치가 적용된 순환식 수경재배 시스템에서는 UV 살균장치의 가동 스케줄에 의해 폐양액이 발생할 수 있는 요인이 있다.

순환식 수경재배 시스템의 배액 저장 탱크의 저장량은 관수량, 배액 EC, 배액 재사용률 등에 따라 변동할 수 있다. 그림 2.46은 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템에서의 배액 탱크 내 배액의 저장량 변화의 예를 보여준다. 배액 탱크 내 배액 저장량의 변화는 최저 약 2 L에서 최대 약 10 L의 범위에 걸쳐 변동을 보여준다. 실험 규모에서는 대용량의 배액 탱크를 설치함으로 폐양액 방출을 차단할 수 있으나, 상업 농가 규모에서는 탱크 용량의 무제한 증가에는 한계가 있다. 그러나, UV 살균 장치를 사용하는 순환식 수경재배 시스템은 살균 전 배액 저장 탱크와 살균 후 배액 저장 탱크가 있어야 한다. 따라서 단순하게는 일반 배액탱크 단위의 2배 용량을 운용할 수 있음을 의미한다. 그러나, 일반적인 UV 배액 살균 시스템의 운용 스케줄은 일단위의 처리 과정이 적용된다. 즉, 그림 2.46의 예에서 배액 탱크의 저장 용량을 5 L로 가정하면, 배액 및 살균 배액 저장 탱크의 용량에 여유가 있는 경우에도, 관수 종료 후 야간의 살균 처리가 진행되기 전까지는 5 L 이상의 저장량 변화는 모두 폐양액으로 강제 배출이 이루어져야 한다.

UV 살균장치 가동 스케줄을 원인으로 하는 폐양액 배출 문제에 대해서는 아직 기술적으로 문제가 제기되거나 논의된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 UV 살균장치 가동 스케줄이 폐양액 배출에 미치는 영향을 분석하고 이러한 영향을 최소화하기 위한 알고리즘 개발을 수행하였다.

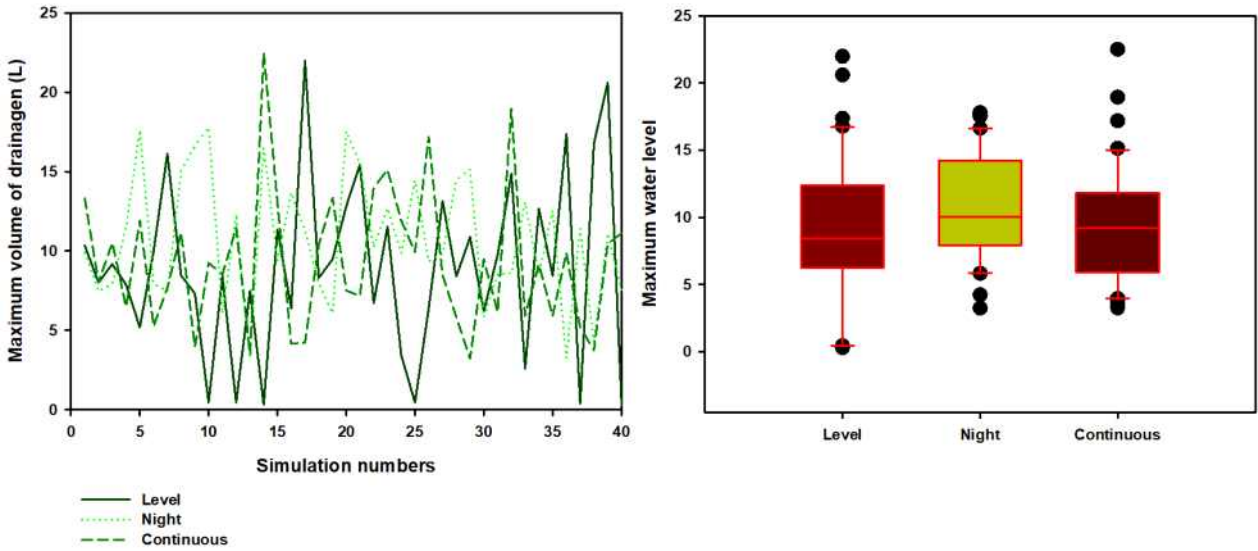


[그림 2.46] 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템에서의 배액의 저장량 변화의 예(Ahn and Son, 2019)

UV 살균장치의 운용 스케줄에 따른 배액의 저장량 변화, 폐양액 배출량 변화를 비교하기 위해 시뮬레이션 분석을 수행하였다. 본 연구의 (2.5.다)에서 사용된 순환식 수경재배 모델의 기본 구조에 UV 살균 장치가 적용되어 살균 전 배액 탱크에 더해 살균 후 배액 탱크를 추가하였다. 또한, 일반적인 관수 조건에서의 동적인 배액 저장량 변화를 반영하기 위해 임의로 시뮬레이션된 일사량 변화와 일사비례 관수 제어를 적용하여, 매회의 시뮬레이션마다 서로 다른 일사 조건 및 함수율 변화가 나타나도록 하였다.

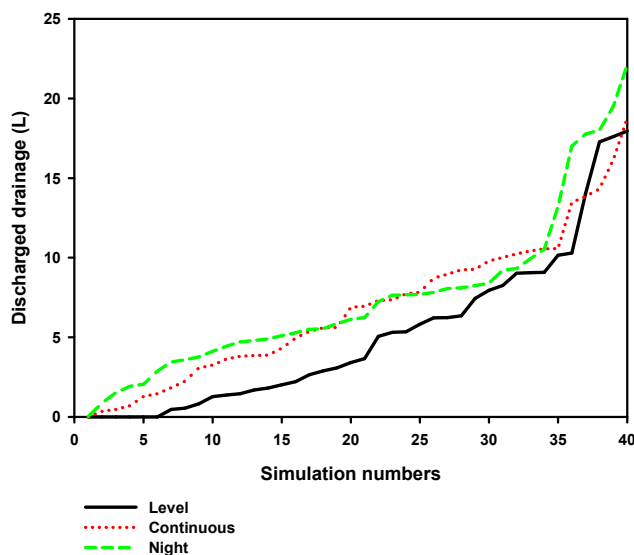
시뮬레이션을 통한 UV 살균기 가동 스케줄은 아래와 같이 3가지 수준에서 비교하였다.

- 일 단위 살균처리 방식(현행 방식)
 - 관수 종료 후 야간 살균처리
- 수위 기준 UV 살균기 가동
 - 살균 배액 탱크의 수위를 기준으로 살균기 가동
 - 살균 배액 저장조의 수위가 설정 최저 수위 이하로 감소할 경우 살균 전 배액 저장조의 펌프와 UV 살균기를 가동시켜 살균 배액 저장조로 이송시키고, 이후 살균 저장조의 부피가 설정 최고 수위 이상으로 도달 시 UV 살균기 및 펌프 가동을 중지
- UV 살균기 상시 가동
 - 배액탱크에 배액 발생 시 바로 살균 배액 저장조로 이송
 - 현실 조건에서는 적용하기 어려운 방식이나, 비교 기준으로 활용하기 위해 비교 대상에 포함



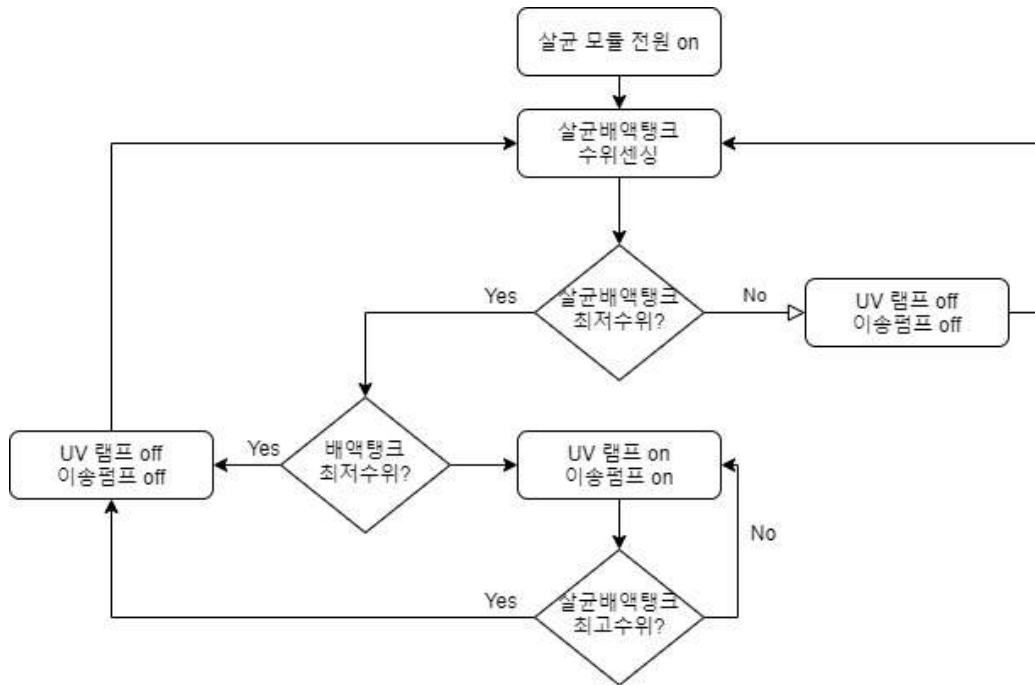
[그림 2.47] UV 살균기 가동 스케줄 별 배액 탱크 내 배액 부피 최대값 변화(좌) 및 박스플롯(우)
(시뮬레이션 횟수 40회, 시뮬레이션 기간 30일; Night: 현행, Level: 수위 기준, Continuous; 연속가동)

배액의 저장용량 제한을 두지 않고 강제 폐양액 배출이 없는 조건에서의 배액 탱크 내 저장량 최대값의 변화를 확인하였다(그림 2.47). 수경재배 시스템의 시뮬레이션 재배기간은 30일로 설정하였으며, 총 40회 시뮬레이션을 수행하였다. 현행 일 단위 처리 방식의 경우, 배액 저장량 최대값의 분포 범위는 다른 두 방식에 비해서 좁게 나타났다. 그러나 현행의 야간 처리 방식은 대부분의 최대값이 다른 두 가지 방식에 비해 높은 수준에서 분포함을 확인하였다. 다른 두 가지 방식의 경우 높은 저장량이 관찰되었던 경우는 이상치의 범위에 분포하였으며 대부분의 배액 저장량 최대값이 현행 운용 방식에 비해 낮은 범위에 분포해 있음을 확인하였다. 이는 수위 기준 방식이나 연속 가동 방식의 경우 두 저장 탱크의 배액 분산 저장에 의한 효과로 해석될 수 있으며, 폐양액 강제 배출될 가능성이 현행 야간 운용 방식에 비해 낮음을 의미한다.



[그림 2.48] UV 살균기 가동 스케줄 별 배액 탱크 및 살균 배액탱크 폐양액 배출량 비교
(시뮬레이션 횟수 40회, 시뮬레이션 기간 30일; Night: 현행, Level: 수위 기준, Continuous; 연속가동)

배액 및 살균 배액 탱크 내의 저장량 최댓값 변화에 대한 해석이 성립하는지 확인하기 위해 배액 탱크의 저장 한계량을 설정하고 동일한 조건에서 시뮬레이션을 수행하였다. 총 40회의 시뮬레이션을 통해 30일 동안의 폐양액 배출량을 기록하였으며, 이를 각 가동 스케줄 방식별로 오름차순으로 정리하였다(그림 2.48). 폐양액의 배출량은 수위 기준(level) 가동 방식이 총 40회 시뮬레이션 중 35회의 결과에서 다른 방식 대비 낮게 배출됨이 확인되었다. 또한 본 연구에서 수행한 시뮬레이션에 기반하여 살균 배액탱크 수위 기반 UV 살균기 가동 스케줄러 알고리즘을 작성하였다(그림 2.49).



[그림 2.49] 수위 기준 UV 살균기 가동 알고리즘 플로우차트

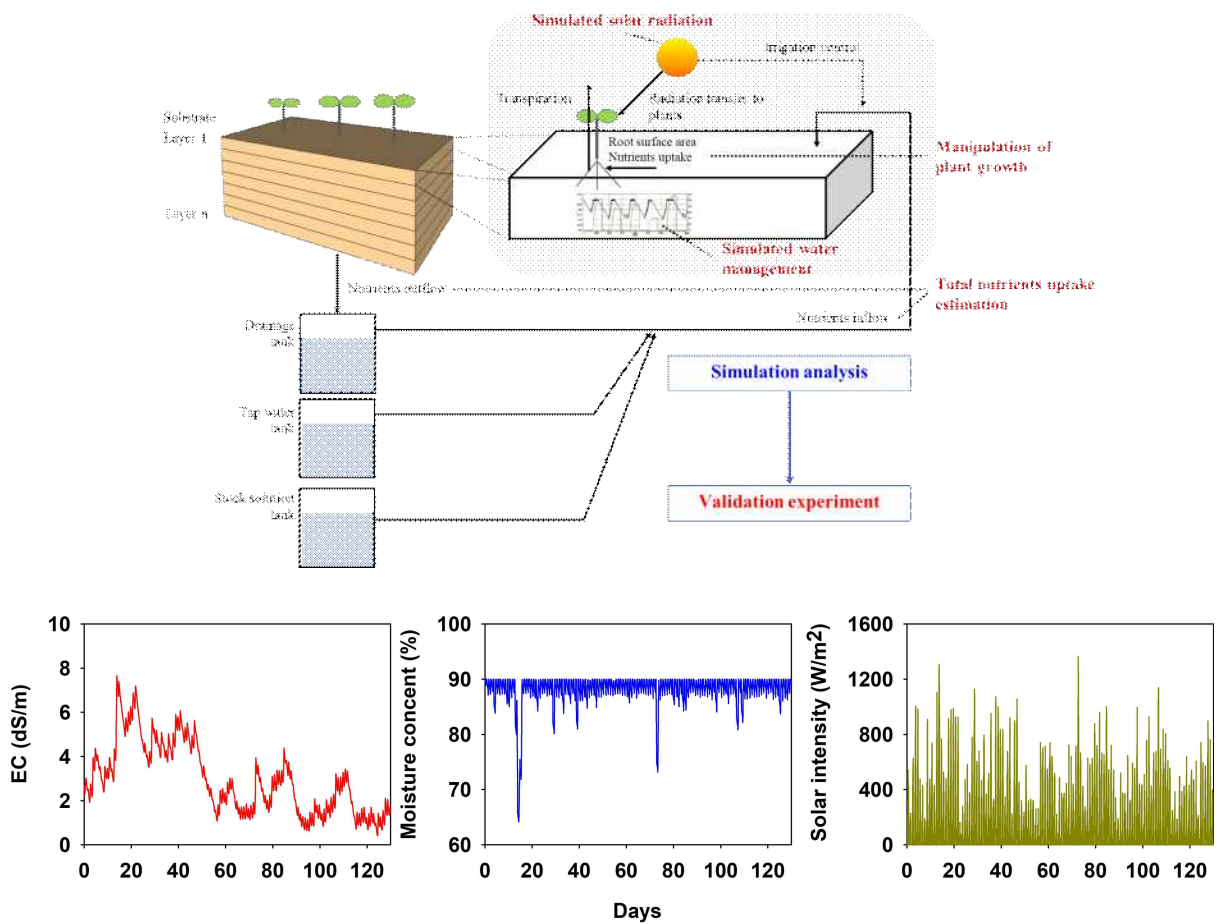
마. 배액의 특성 고려 양액 제조 알고리즘 개발

양액을 통해 식물 근권부로 공급된 양분은 시간 경과에 따라 농도의 변동이 나타난다. 근권부 양분 농도의 변동은 환경에 따라 동적으로 변화하는 식물의 양분 흡수농도로 인해서 발생한다. 토경재배에 비해 완충용량이 작은 수경재배 시스템에서는 이러한 변동을 적극적으로 관리하지 않을 경우, 이러한 농도의 변동이 양분 간의 불균형 발생으로 이어지며 식물의 생육에 유의적인 영향을 미칠 수 있다.

종래 순환식 수경재배 시스템에서의 관련 기술들의 경우 수경재배 시스템의 양분 농도를 분석하여 부족분에 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 오차없이 성립 가능한 방식이다. 그러나 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 불

확실성도 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 수정재배 시스템에서의 적합한 양분 관리의 기술은 재배 시스템의 양분 교정을 위한 적절한 양분 입력값과 그 효과를 시스템에 최대한 반영하기 위한 비료 조성의 도출이 필요하다.

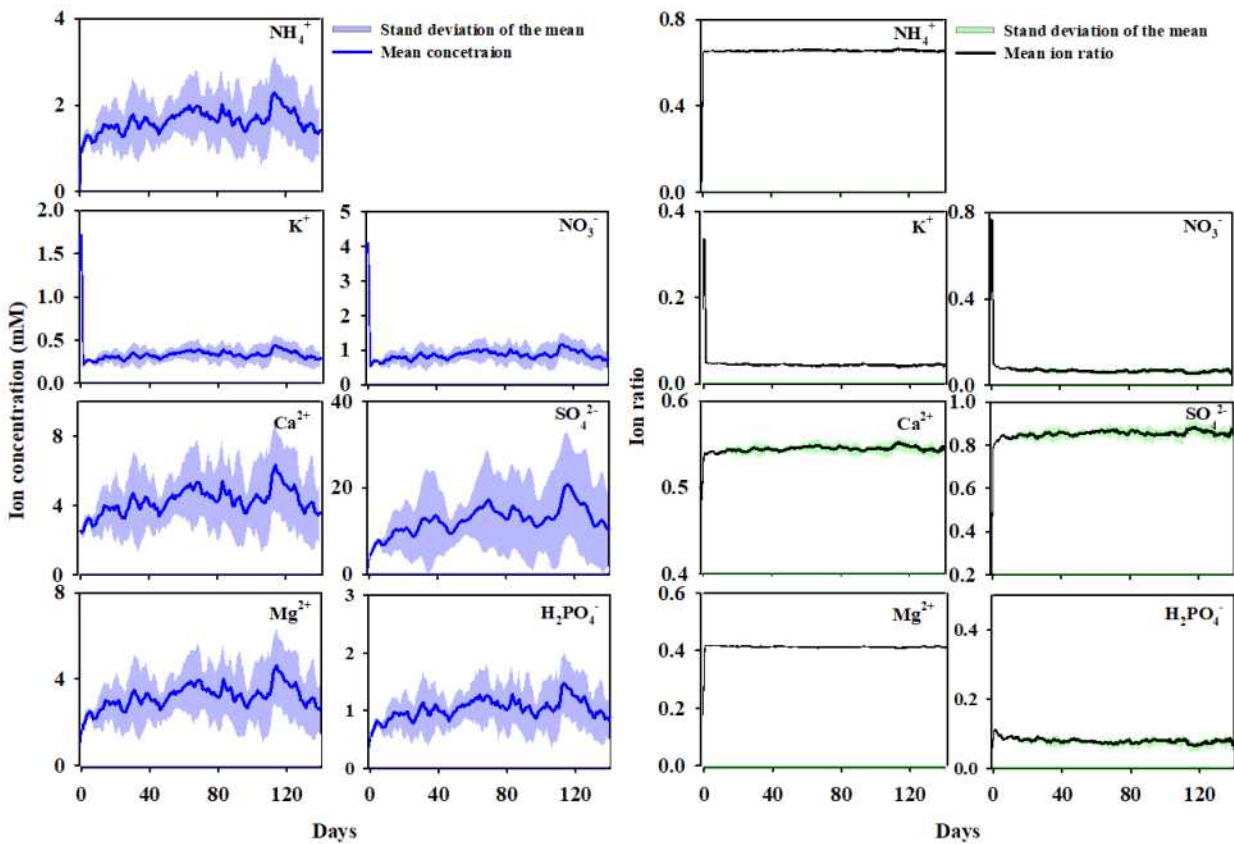


[그림 2.50] 양분 농도, 균형 변동 시뮬레이션을 위한 순환식 수정재배 모델 개요(상) 및 배지 EC, 함수율, 일사량 변화 시뮬레이션(하); 일사량 변화 패턴 구현(광량은 태양 상수 범위 내 랜덤 변화), 시뮬레이션 일사량 기반 일사비례관수 시스템 적용, 완전폐쇄형 EC 기반 순환식 수정재배 시스템 조건

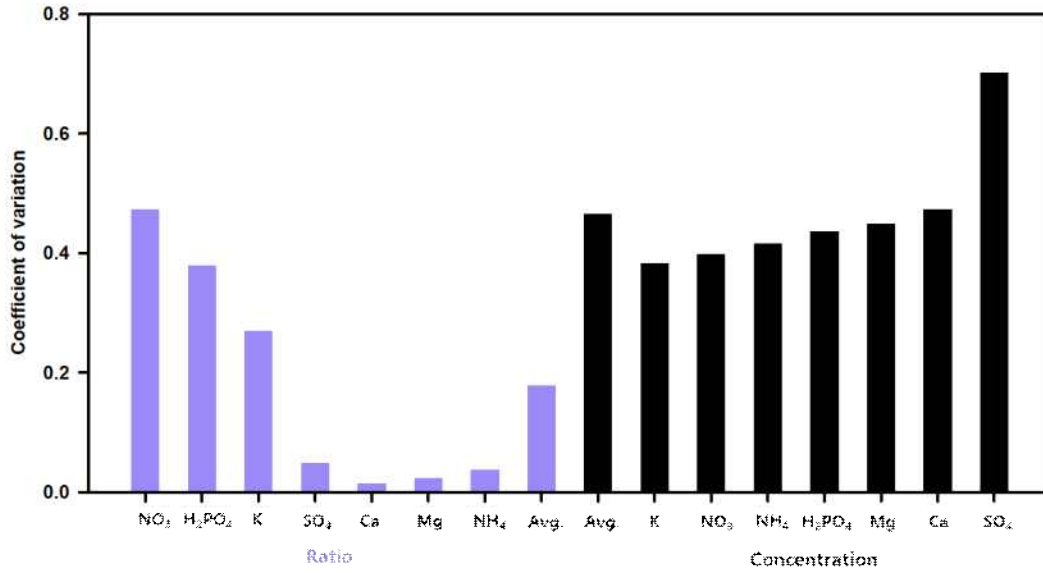
배액의 특성 고려 양액 제조 알고리즘은 상기 내용에 착안한 것으로, 주 단위 주기에서의 수정재배 시스템의 배액 또는 근권부 양분 분석을 통해 수정재배 시스템의 양분 균형을 제어하는 데 그 목적이 있다. 또한, 양액의 전기전도도 측정으로 양분의 전체 농도를 제어하는 종래의 수정재

배 시스템을 기반으로 해서 비율을 제어하여 결과적으로는 전체 양분 농도의 총합에서 각 양분 간의 적절한 균형을 유지하여 개별 양분이 결핍이나, 과잉의 조건에 있지 않고 최적 양분 균형 조건으로 제어하는데 궁극적인 목적이 있다.

일반적인 관수 시스템 조작 조건과 그에 따른(일사비례 관수 방식) 양분 농도의 변동이 주어진 순환식 수경재배 시스템에서의 양분 균형 변화를 비교하기 위해 시뮬레이션 모델을 구축하였다(그림 2.50). 일사비례제어 관수 조건에서 수경재배 시스템 시뮬레이션을 수행했을 때, 양분의 변동은 대부분 양분에서 유사한 변동 패턴과 함께 증감의 경향을 직관적으로 판단하기에 어려운 양상이 관찰되었다(그림 2.51). 반면, 양분 균형 변화로 변환했을 경우 증감의 패턴이 양분 농도에 비해서 직관적 판단에 유리함을 확인하였다(그림 2.51). 이같은 결과에서, 양분의 농도와 비율과 같이 서로 다른 단위의 변동 수준을 비교하기 위해 각 양분 별로 변동 계수(coefficient of variation)를 계산하여 비교하였다(그림 2.52). 평균 변이계수는 비율로 변환했을 때가 농도의 변동보다 더 낮은 것으로 확인되었다.

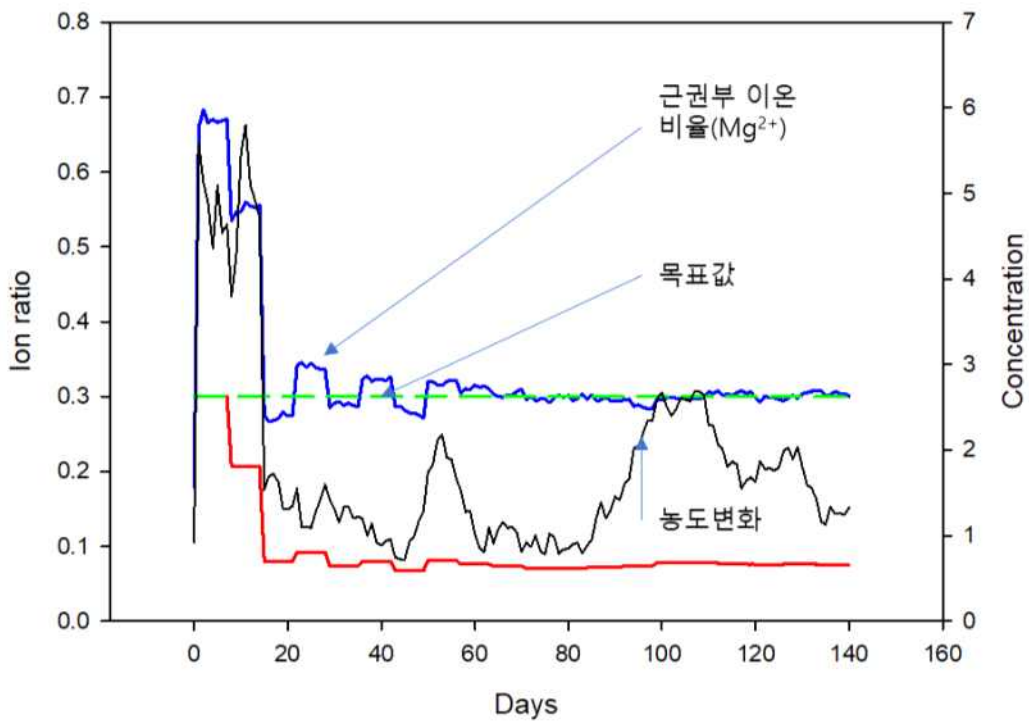


[그림 2.51] 순환식 수경재배 조건에서 양분 농도의 변동 수준(좌) 및 양분 간 비율 변화(우) 시뮬레이션 결과



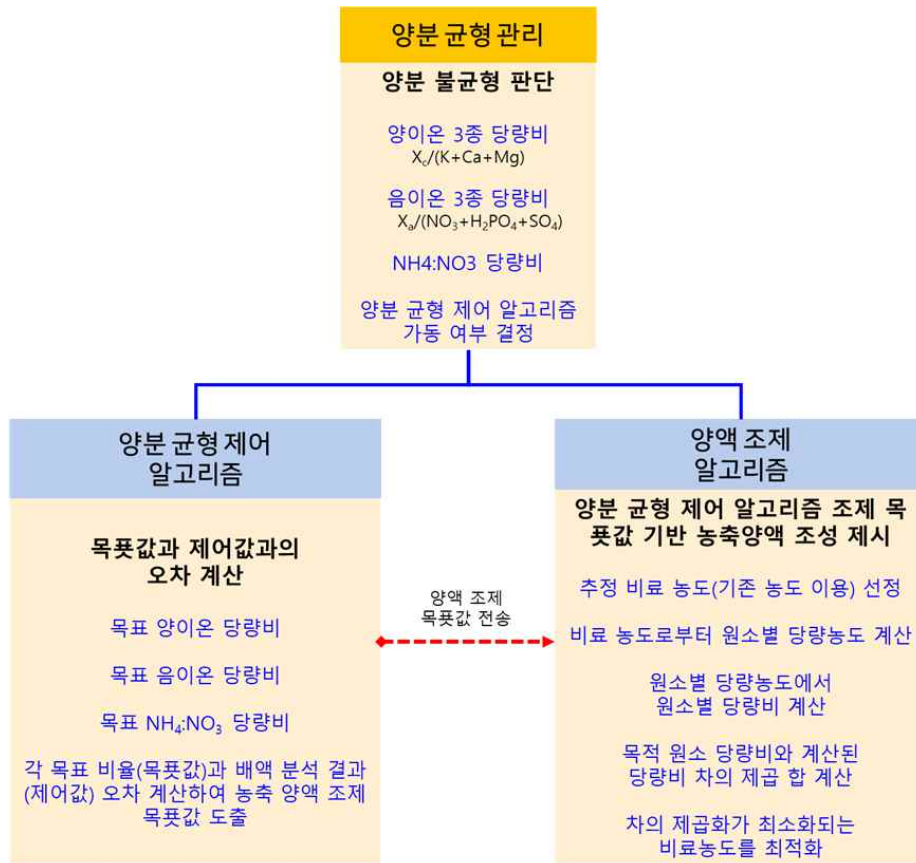
[그림 2.52] 양분 농도와 양분 비율의 변동 계수 비교

랜덤화된 광량 변화에 따른 증산량 변동, 관수 조작 변동 등의 외란이 작용한 조건에서 양분 비율 변동의 상대적 안정성에 기반하여 양분 균형 제어 개념을 도출하였다(그림 2.53).



[그림 2.53] 양분 비율 목표값과 양분 비율 측정값과의 차이를 1주일 간격으로 농축양액 조성비의 조정에 적산한 결과; Mg의 예

그림 2.53의 양분 균형 제어 개념과 같이 제어하였을 때 양분 농도의 경우 일정 수준의 변동이 있으나, 양분 비율의 경우 주 단위의 feed-back이 이루어졌을 때 목표값으로 수렴하는 결과를 확인하였다.



[그림 2.54] 순환식 수경재배 배액 특성 고려 양액 조제 알고리즘의 주요 모듈 구성

본 연구에서 개발한 배액 특성 고려 양액 조제 알고리즘은 양분 균형 제어 알고리즘과 양액 조제 알고리즘, 그리고 두 알고리즘의 가동 여부를 결정하여 사용자에게 양분 균형 관리의 의사 지원 결정 정보를 제공하는 양분 불균형 판단 기능으로 구성된다(그림 2.54). 양분 균형 제어 알고리즘은 그림 2.53의 개념과 같이 주 단위의 양분 분석 결과를 양분 당량 비로 변환하여 목표 당량 비율과의 차이를 구하고 이를 현재 농축 양액 내 양분 간 당량비에 적산한다. 따라서 농축 양액 내 양분 조성비를 조정하여 양분 균형 제어 오차의 교정 효과를 부여한다. 그러나 실제로는 양분 균형제어 알고리즘에서 제시한 비율을 농축 양액 비료 조제를 통해 정확하게 구현하기 힘든 경우가 발생한다. 이는 농가에서 일반적으로 사용하는 이온화합물 비료염의 종류가 한정되어 있기 때문인데, 양액 조제 알고리즘에서는 이러한 한계 조건을 감안한 상황에서 최대한 양분 교정 효과를 반영할 수 있는 양액 조제표를 제시하는 기능을 수행한다.

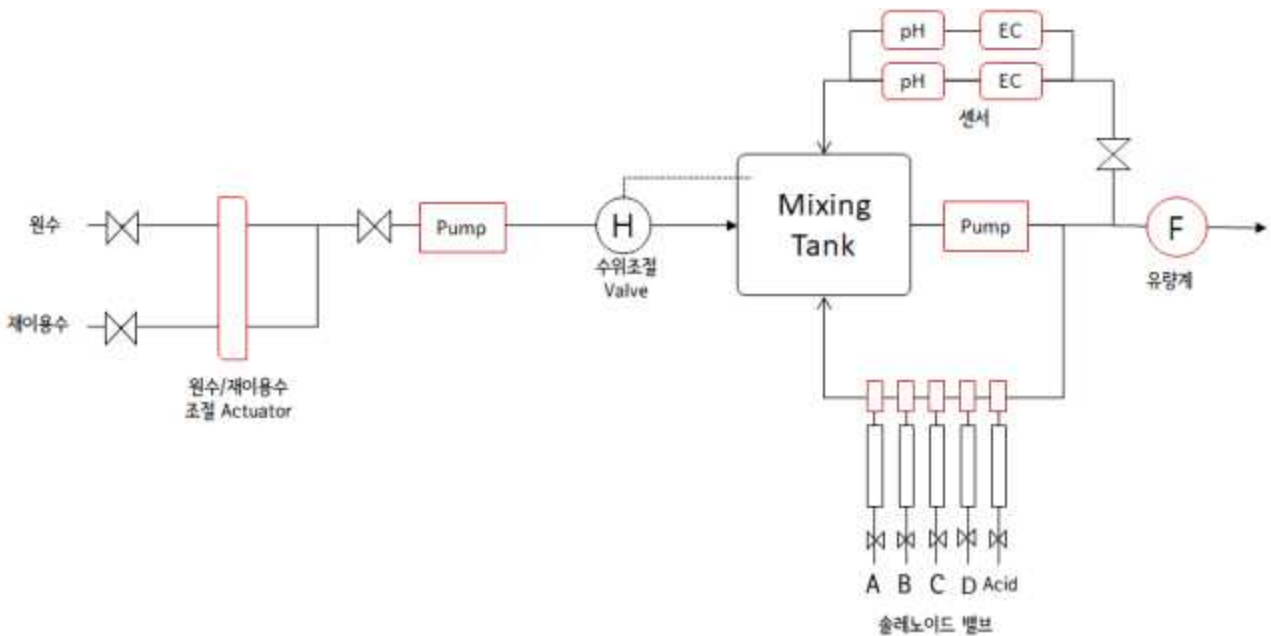
개별 양분에 대해 제시된 목표값을 비료 조성 변화로 구현하는 기존의 방법에는 역행렬 이용, 선형계획법, 탐색법 등이 있었다. 그러나, 비료 염의 값 반환, 조합 폭발 등에 있어 적절한 대응 기준이나 규칙 수립에 어려움이 있었다. 본 연구에서는 목표 비율과 비료 조제로 달성 가능한 양분 비율과의 차이를 최소화하도록 각 비료 농도를 최적화하는 비선형계획법을 수행한다. 대신 이전 조성비보다 조정된 조성비가 크면 최소한 이전 조성비보다는 크게, 그리고 조정된 조성비가 적을 경우 이전 조성비보다는 작도록, 비료 조성비를 구하는 것을 제약조건으로 둔다.

양액 조제의 계산 알고리즘의 상세는 다음과 같다.

1. 추정 비료 농도(기존 농도 이용) 선정
2. 비료 농도로부터 원소별 당량농도 계산
3. 원소별 당량농도에서 원소별 당량비 계산
4. 목적 원소 당량비와 계산된 당량비 차의 제곱 합 계산
5. 차의 제곱합이 최소화되는 비료농도를 최적화

바. 양액의 양분 농도 제어 기술

(1) 비례-적분-미분(PID) 제어를 이용한 양액의 pH 및 EC 조절 기술



[그림 2.55] 연구에 이용한 양액기의 모식도

양액기를 이용한 양액공급은 원수 및 재이용수에 농축액비, 농축산용액을 혼합하여 공급하는 방식으로 이루어진다. 양액에 혼합되는 양분의 농도는 직접적인 방법으로 측정하지 않고, 투입된 양분의 양과 양의 상관관계가 있는 양액의 전기전도도(EC)를 측정함으로써 간접적으로 유추할 수 있다. 양액의 산성도는 pH 센서를 이용하여 측정할 수 있다. 양액기에 설치된 pH센서와 EC센서로부터 실시간 양액의 EC 값을 측정하고, 혼합되는 농축액비와 농축산용액의 양을 솔레노이드 밸브를 듀티사이클(Duty cycle) 제어를 통해 조절한다. 이 때에 듀티사이클은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다. (D: 듀티사이클, T:신호가 활성화되는 시간, P: 주기)

$$D = \frac{T}{P} \times 100\%$$

공급하려는 양액의 목표 pH, EC 값과 센서에서 측정된 값을 비교하여 PID(비례-적분-미분) 제어를 적용하여 솔레노이드밸브의 일정주기마다 듀티사이클을 조절한다. PID제어는 다음과 같이 적용한다. (ΔD : 듀티사이클 변화량, t :현재 주기, $e(t)$: 해당주기에서 목표치와 실측치의 차)

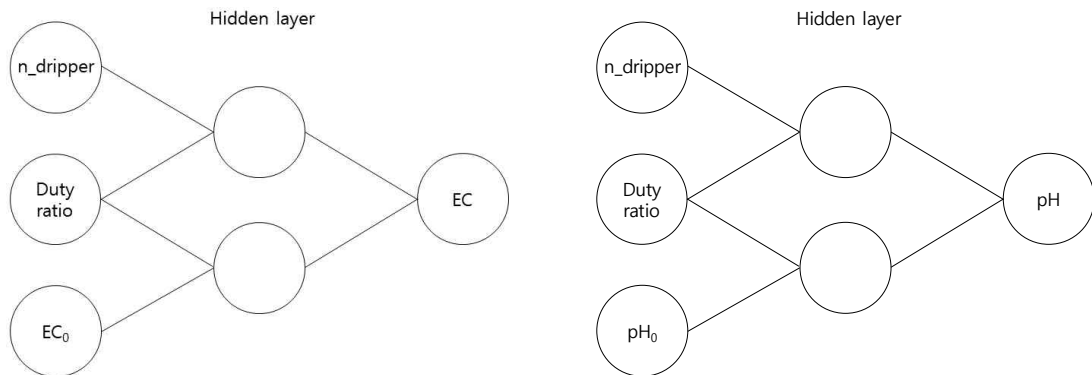
$$\Delta D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}$$

PID제어를 위하여 양액기가 가동되는 중에 매초마다 현재시간, 목표 pH, 목표 EC, 현재 pH, 현재 EC, 농축액비 조절 솔레노이드 밸브의 듀티사이클, 산용액 조절 솔레노이드 밸브의 듀티사이클, 관수구역, 해당 관수 구일역의 점적관 수를 데이터베이스에 기록한다.

관수 시작시 각 농축액비 조절 솔레노이드 밸브와 산용액 조절 솔레노이드 밸브의 듀티비는 다음과 같이 계산한다. (D_t : 초기 듀티비, D_{t-1} : 직전 듀티비, n_t : 다음 관수구역 점적관 수, n_{t-1} : 직전 관수구역 점적관 수)

$$D_t = D_{t-1} \times \frac{n_t}{n_{t-1}}$$

(2) 퍼셉트론 신경망을 이용한 EC, pH 제어 기계학습 알고리즘



[그림 2.56]퍼셉트론 신경망을 이용한 EC (좌) 와 pH (우) 모델의 구조

PID 제어를 이용하여 EC, pH를 제어할 시 구동하는 모터의 성능, 관수 파이프의 사양 및 길이, 점적단추의 종류 및 수량 등 양액기 설치 및 구동환경을 고려하여 PID 제어계수를 변경하여 설정해야만 최적관수가 이루어지는 단점이 존재한다. 이러한 단점을 개선하기위하여 양액제어소프트웨어가 구동환경에 맞게 제어 양상을 학습, 업데이트하는 기계학습 모델을 적용하여 제어 정확도 향상을 도모하였다. 기계학습 모델을 테스트하기 위하여 양액기를 구동하는데 필수 요소인 양액기의 pH 및 EC 조절 기능을 프로그램화 하는데 있어 목표값 대비 실제값의 편차가 높아 이를 줄이는 기계학습 기반 제어 알고리즘을 개발하여 적용하였다. 기계학습 모델을 적용하여 운용하였을 때 미적용하였을 때보다 오차를 줄일 수 있음을 확인하였다.

[표 2.16] 기계학습 적용 시 EC, pH 제어 정확도/정밀도 변화

구분	기계학습모델 미적용			기계학습 모델 적용		
목표 EC (mS/cm)	2.3	3.0	3.7	2.3	3.0	3.7
제어평균 EC	2.93	3.57	4.13	2.45	2.99	3.85
EC 제어에러	0.88	0.85	0.88	0.07	0.02	0.10
%에러	38.26	28.33	23.78	3.04	0.67	2.70
EC 최대치	4.6	6.0	6.2	2.92	3.36	4.59
EC 최소치	1.7	2.4	2.2	2.02	2.68	3.33

목표 pH	5.2	5.5	5.8	5.2	5.5	5.8
제어평균 pH	5.71	5.57	5.58	5.51	5.34	5.71
pH 제어에러	0.28	0.02	0.03	0.10	0.08	0.01
%에러	5.38	0.36	0.52	1.92	1.45	0.17
pH 최대치	6.0	5.8	6.0	5.70	5.72	5.79
pH 최소치	5.4	5.3	5.2	5.37	5.00	5.65

3장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

당초목표	달성도(%)	당초연구목표 대비 연구결과
① UV램프 기반의 양액살균장치 시제품 개발	100	<ul style="list-style-type: none"> 배양액의 살균을 위하여 UVC-Lamp 기반 양액살균모듈 시제품 제작 전처리를 위한 모래여과 모듈과 양액살균모듈을 결합한 양액살균장치 시제품 제작 총 2건의 양액살균장치의 기술이전 진행
② 시설온실에 순환식 수경재배시스템을 설치 적용하여 시제품의 성능 및 안정성을 평가	100	<ul style="list-style-type: none"> 시제품을 주관 및 협동기관 실증팜에 설치하여 성능 및 안정성을 평가함 제작된 시제품을 마산 진전면(2000평), 마산 진동면(6000평) 영농현장에 설치 및 시운전 중(현장의 법적, 시설적 문제로 인하여 현장테스트가 늦어짐) 배액에 특성에 따른 순환식 수경재배시스템 시제품 성능평가를 추진함 발생하는 배액을 채취하여 배액 특성을 평가함
③ 순환식 수경재배시스템 전처리 모듈의 적정 역세척시간 산정 및 프로그램에 반영	100	<ul style="list-style-type: none"> 전처리시스템(모래여과) 등에 걸리는 압력수와 역세척수 수질 분석을 통해 적정 압력을 도출함
④ 순환식 수경재배시스템 살균모듈의 안전성(살균효율)/안정성 검증	100	<ul style="list-style-type: none"> 전처리 및 살균력 모듈 성능 암면배지와 코코피트 배지 상에서 살균력 95% (총대장균, 곰팡이, 일반세균 대상) 이상 달성
⑤ 순환식 배액관리 및 제어 프로그램 개발	100	<ul style="list-style-type: none"> 배액분석을 통한 양액의 흡수패턴을 확인 순환식을 고려한 양분균형제어 및 양분제조에 대한 알고리즘을 개발 폐양액을 최소화 할 수 있는 알고리즘을 개발하여 순환식 수경재배시스템의 배액관리 방안 마련 PID와 기계학습을 통한 순환식 양액제어시 pH와 EC의 제어 프로그램 개발 및 적용
⑥ (정량목표) 영농실증 2건, 고용창출 2명, 시제품 제작 2건, 양액공급프로그램 제작 1건, 기술이전 2건	100	<ul style="list-style-type: none"> 순환식 수경재배시스템의 영농실증 2건 달성(주관 및 협동기관의 실증팜 각 1건, 마산명 2000평 및 6000평 농가 실증 각 1건) 양액공급 및 양액 처리 사업화를 위한 고용창출 2명 달성 순환식 수경재배시스템 시제품 제작 2건을 제작하여 영농실증 현장에 설치 배액을 고려한 양액공급프로그램 제작 1건 달성 기술이전 2건 (유상) 달성

2. 관련분야 기여도

연구결과물의 산업화를 위하여 2000평, 6000평 규모의 파프리카 농가를 대상으로 영농실증(농가) 사이트를 구축하고 운영하였다. 양액의 재처리를 위한 UV살균 모듈의 성능을 검증하기 위하여 실제 영농상황에서 발생하는 배액을 수집하고 재처리하여 성능을 검증하였으며, 장기간의 영농실증은 농가의 상황에 의하여 재처리된 배액을 재순환하여 영농에 적용하는 부분은 과제기간 내에 진행하지 못하였으며 이 부분은 과제가 종료된 시점에서도 지속적으로 데이터를 수집하고 분석하여 영농활용을 할 예정이다. 또한, 보급형 순환식 수경재배 시스템의 제조 및 제품의 설치를 위하여 2명의 고용을 창출하고 연구원으로 활용함으로써 고용창출에 기여하였다.

전처리 및 살균모듈 성능을 처리효율이 95%이상이 되도록 개선하였으며, 이를 통하여 경제적인 전처리 및 살균모듈을 개발하였다. 이는 국내의 영농현장이 암면뿐만 아니라 코코피트를 주로 사용하는 상황에서 외산제품에 비하여 국내현장에 특화된 제품을 개발한 것으로, 향후 성능이 높은 제품을 보급하여 영농현장의 경제성뿐만 아니라 제품성능의 우수성도 제시할 수 있을 것으로 기대된다.

배액을 이용한 양액공급 프로그램을 개발하여, 그동안 순환식 수경재배시스템의 장점이라고 할 수 있는 배액을 최소화하여 환경부하를 줄이는 것과 양액제조를 하는데 있어 비용을 절감하는 방법을 제시함으로써 경제성을 담보하였다. 추가적으로 순환식 수경재배시스템을 진행하여도 이온불균형을 최소화 할 수 있는 방안을 제시함으로써 농가의 순환식 수경재배시스템 도입의 우려를 감소할 것으로 기대한다.

4장 연구결과의 활용 계획

1. 연구개발 결과의 활용 계획

본 연구의 결과물인 순환식 수경재배시스템은 양액살균장치의 고도화, 이온불균형 해소를 위한 양액제어 프로그램적용 등을 통하여 최적의 양액관리와 환경오염 방지 등을 위해 실용화를 추진하고자 한다. 개발된 순환식 수경재배시스템에 관한 H/W, S/W 기술을 이전하여 실용화를 위한 경제성 있는 시스템을 제작하고 이를 실제 영농현장에 보급하고자 한다. 영농현장 보급과 더불어 전시회 등에 참여하여 개발된 순환식 수경재배시스템의 성능과 실용성을 참여 양액재배 관련 전문가와 농민에게 적극 홍보하여 순환식 수경재배시스템의 필요성을 역설할 예정이다.

시설원예의 스마트팜 분야의 핵심기술로 확대할 필요성이 있다. 현재 시설농업에서 수경재배가 차지하는 비중은 계속적으로 증가할 것으로 예측되고, 이 에 따라서 수경재배에서 발생하는 배액의 재처리는 환경문제 및 수자원의 절약 등의 이유로 꼭 필요한 기술이다. 본 연구를 통하여 시제품 실증평가를 통하여 순환식 수경재배시스템의 경제적, 기술적 산업화 타당성을 가늠하였다. 수행기관은 양액공급시스템 분야에서 국내 최고기술과 사업능력을 보유하고 있어 기존의 고객과 신규고객을 분석하여 순환식 수경재배시스템 사업화가 용이할 것으로 판단된다.

2. 기대성과 및 파급효과

가. 기대성과

본 연구결과는 순환식 수경재배 시스템의 기술적 안전성을 확인하였다. 양액재배 면적은 정부의 집중적인 지원과 생산성 및 품질 향상에 대한 농가의 요구로 계속해서 증가하고 있는 실정이며, 국내에서도 환경을 고려하여 순환식 수경재배 시스템 도입에 대한 기술개발과 실증화 사업이 진행되고 있다. 그러나 현재의 수경재배 시스템의 경우는 외국산 위주의 제품으로 구성되어 있으며, 이로 인한 국내 사용 농가의 부재와 국가 지원사업의 경우도 대부분은 외국산 제품 공급 위주로 되어 있다. 국내 여건에 맞는 순환식 수경재배 시스템 도입은 외국산 제품의 사용으로 인해 발생하는 지속적인 유지보수문제, 살균력/안정성/안전성 저하 등의 문제를 해결할 수 있으며 이로 인해 발생하는 비용에 문제도 해결할 수 있을 것으로 기대된다.

또한, 환경문제 해결과 수비료절감 효과가 기대된다. 증가되는 양액재배면적과 발생하는 양액을 재이용함으로써 현재 양액 배수로 인해 발생하는 지하수 수질 오염문제와 양액의 배출로 인한 하천의 녹조현상 등에 문제를 해결할 수 있다. 국내 지하수 수위가 낮아지고, 농업용 수자원 확보가 어려운 실정에서 순환식 수경재배시스템 도입을 농업용 수자원의 안정적 확보에 기여할 것으로 보여지나. 수경재배 방식에서 수비료의 남용은 농가 지출에 대한 고정비를 상승시키는 효과를 유발하며 이를 재활용 함으로써 자원회수 뿐만 아니라 농가수익 창출에 이바지 할 수 있다. 안전한 살균시스템과 이온불균형을 해소할 수 있는 프로그램 도입으로 인해 순환식 수경재배 시스템에서 발생하는 수확량 저감에 대한 불신을 해소시킴으로써 수확량 증가를 통한 농가수익에 이바지할 수 있을 것이라 판단된다.

나. 파급효과

기술적인 면에서 순환식 수경재배시스템의 개발을 통한 국산화 기술을 확보한 측면이 있다. 안전성/안정성/살균력 등의 고도화 기술을 갖춘 순환식 수경재배시스템은 작물 근권부 최적 재배환경을 제공하여 순환식 수경재배의 새로운 패러다임을 변화시킬 수 있다. 이온의 불균형 해소를 위한 프로그램 개발 및 pH와 EC 센서의 고도화를 통한 순환식 수경재배시스템의 상용화를 통한 과학적 수확량, 생육데이터를 구축하고 이는 현재 방식보다 좀 더 고도화된 기술 개발의 핵심이 될 것으로 판단된다.

경제·산업적 측면에서는 순환식 수경재배시스템 산업화는 상업작물 및 고부가가치 작물 대상으로 한 시설원예 및 ICT 산업분야 신사업 창출이 가능하다. 순환식 수경재배시스템의 산업화는 스마트팜 뿐만 아니라 식·의약 원료 생산을 위한 새로운 식물공장 농업분야 적용함으로써 관련 시장 확대에 이바지할 수 있다. 이에 따라 대규모 농장의 경우 순환식 수경재배시스템을 전담으로 관리하는 신규 인력 창출 효과를 기대된다. 또한, 고도화된 순환식 수경재배시스템 개발은 PRIVA사, Hortimax사, Hoogendoorn사 등의 외국산 제품이 대부분 점령하고 있는 관련 시장에서 수입대체효과를 유발할 수 있을 것으로 판단된다.

사회적인 측면에서 순환식 수경재배시스템의 도입으로 수자원 확보, 지하수 및 하천수 수질 오염 등으로 인한 2차 오염에 대한 막대한 사회적 간접적 손실을 해결할 수 있는 솔루션 역할을 할 수 있을 것으로 판단된다. 순환식 수경재배 재이용수의 수질적 안전성에 대한 인식제고로 인해 수경재배 농산물에 대한 안전성이 보장되어 국내 생산되는 농산물에 대한 신뢰를 높여 국내 과채류 농산물에 대한 신뢰로 이어질 수 있다. 특히 경제성 문제로 해외 수입에 의존하던 제품에 대한 대체 효과를 내어 국내 관련 시장의 확대를 일으켜 외산 제품들에 대한 국산으로 대체 효과를 볼 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- Ahn, T.I., Son, J.E., 2019. Theoretical and Experimental Analysis of Nutrient Variations in Electrical Conductivity-Based Closed-Loop Soilless Culture Systems by Nutrient Replenishment Method. *Agronomy* 9, 649. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100649>
- Steiner, A.A., 1980. The selective capacity of plants for ions and its importance for the composition and treatment of the nutrient solution. *Acta Horti* 98, 87-97.

연구개발보고서 초록

과 제 명	(국문) 보급형 순환식 수경재배시스템의 산업화				
	(영문) Industrialization of Recycling Hydroponic Cultivation System				
주관연구기관	신한에이텍(주)		주 관 연 구	(소속) 신한에이텍(주)	
참 여 기 업			책 임 자	(성명) 장재욱	
총연구개발비 (천원)	계	667,000	총 연구 기간	2019.1. ~ 2020.1.(1년)	
	정부출연 연구개발비	500,000	총 참 여 수	총 인 원	15명
	기업부담금	167,000		내부인원	15명
	연구기관부담금			외부인원	

○ 연구개발 목표 및 성과

보급형 순환식 수경재배시스템 개발을 목표로 하여, UV램프 기반의 양액살균장치 시제품 개발하였다. 이를 위하여, 전처리를 위한 모래여과 모듈과 양액살균모듈을 결합한 양액살균장치 시제품 개발하고, 양액살균모듈 및 전처리 모듈의 안정성, 안전성 효율 향상을 위한 제어프로그램 개발하였다. 개발된 시제품의 실증을 통한 최적화와 안정성을 확인하였으며, 보급형 순환식 수경재배 시스템 실용화를 위하여 영농실증을 통한 검증을 진행하였다.

○ 연구내용 및 결과

전처리를 위한 모래여과 모듈과 양액살균모듈을 결합한 양액살균장치 시제품 개발하였으며, UV의 경우 투과율이 살균성능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 모래여과 모듈을 이용하는 경우 배액의 살균성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 모래여과 모듈의 경우 모래를 통하여 물리적으로 배액의 부유고형물 등을 제거하는 방식으로 역세척 등의 방식으로 관리하면 장기간 사용할 수 있어 효율적인 방식임을 확인할 수 있었다. 양액살균장치의 핵심적인 모듈인 UV램프의 설치 방식에 따라서 살균성능에서 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 일반적으로 하나의 챔버에 다수의 UV램프를 설치하는 방식보다 다수의 UV램프를 직렬로 연결하는 방식이 살균성능이 높은 것으로 나타났다. UV램프의 성능평가를 수행한 결과 2개 이상의 UV램프를 적용할 경우 95%이상의 살균력을 나타내었다.

양액살균모듈 및 전처리 모듈의 안정성, 안전성 효율 향상을 위한 제어프로그램 개발하였다. 터치기반의 사용자 인터페이스 개발 (시스템 상태 모니터링, 제어변수 설정), UV센서, 수위센서(살균전 배액, 살균 후 배액), pH, EC 센서 등을 이용한 양액살균 모듈제어 프로그램 개발, 배액의 처리량을 기반으로 전처리 모듈의 상태를 파악하여 역세척 등의 방식을 통해 관리하기 위한 전처리 모듈 제어 프로그램 개발하였다. 또한, 작물의 양액흡수패턴을 분석하고, 배액을 고려한 양액공급프로그램을 개발하였다.

보급형 순환식 수경재배 시스템 실용화를 위하여 파프리카를 재배하는 2농가(6000평, 2000평)에 순환식 수경재배 시스템 환경 구축 및 설치하고 시스템의 운영을 통한 배액의 수집 및 살균성능 분석하여 제품의 기술적 안정성 확보하였다.

○ 연구성과 활용실적 및 계획

보급형 순환식 수경재배시스템을 기술이전 및 제품화를 진행하였으며, 보급형 순환식 수경재배 시스템은 양액공급시스템과 배액처리시스템이 통합된 것으로 두 시스템의 개별적인 사용이 가능하도록 하여 각각의 시스템이 사업화에 활용할 예정이다.

[별첨 2]

자체평가의견서

1. 과제현황

		과제번호		319029-01-1-CG000	
사업구분	농식품기술개발사업				
연구분야				과제구분	단위
사업명	1세대 스마트 플랜트팜 산업화 사업				주관
총괄과제	기재하지 않음			총괄책임자	기재하지 않음
과제명	보급형 순환식 수경재배시스템 산업화			과제유형	(기초,응용, 개발)
연구기관	신한에이텍(주)			연구책임자	장재욱
연구기간 연구비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차연도	2019.01.22-2020.01.21	500,000	167,000	667,000
	2차연도				
	3차연도				
	4차연도				
	5차연도				
	계	2019.01.22-2020.01.21	500,000	167,000	667,000
참여기업					
상대국	상대국연구기관				

2. 평가일 : 2020년 2월 21일

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
신한에이텍(주)	연구소장	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.

확 약	
-----	--

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 기술을 반영된 전처리 장치와 살균모듈을 개발함
- 국내 영농 상황에 적합하게 배지의 종류(암면, 코코피트 등)와 관계없이 모두 사용 가능한 순환식 전처리 시스템을 개발함
- 고가의 수입제품을 대체하기 위한 보급형 순환식 수경재배시스템의 시제품을 개발하고 영농실증함으로써 고가의 외산 순환식 수경재배시스템의 국산화를 진행함

2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 일부 대규모의 온실에서는 이미 순환식 수경재배시스템을 도입하여 사용하고 있으나 중소규모의 온실은 비용적인 부분으로 인해 불가능한 부분을 본 연구결과로 적용 가능할 것으로 판단됨.
- 수경재배 배액 발생으로 인한 환경문제를 해결할 수 있으며, 수경재배 농가의 비료사용량 절감과 운영비 절감에 탁월한 효과가 있을 것으로 판단됨.
- 개발한 순환식 수경재배시스템은 고가의 외산 제품의 수출대체효과가 있을 것으로 판단됨

3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 시설원에 분야에 필수적으로 도입될 것으로 예상하는 보급형 순환식 수경재배시스템의 개발과 영농실증을 통한 경제적, 기술적, 사업화 타당성을 확보
- 수경재배 농가의 대형화 및 증가로 인해 관련 기술에 대한 수요가 증가되는 상황에서 관련 산업이 활성화될 것으로 보여짐

4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 자체 테스트베드 운영을 통한 기능 및 성능검증, 협동기관과의 연구성과를 적용한 시제품 개발, 산업화를 위한 영농실증 사이트 구축 및 운영 등 체계적인 연구개발내용을 수행함
- 시스템 개발을 위하여 주관/협동기관 각각의 실증팜에서 지속적으로 연구수행을 수행하였으며, 영농실증을 위하여 2개의 사이트(2000평, 6000평 규모)에서 시제품을 설치하여 테스트 진행

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 시제품을 바탕으로 실증화 작업을 현재 수행중에 있고 이를 통해 지속적으로 성능을 검증할 예정임이며 현재까지는 성능이 우수하게 진행되고 있음
- 전처리 기술과 살균성능과 운영프로그램 관련해서 특허출원 3건을 달성
- 시제품에 관한 유상 특허 2건을 기업 2곳에 기술이전을 달성

II . 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
① UV램프 기반의 양액살균장치 시제품 개발	50	100	<ul style="list-style-type: none"> • 배양액의 살균을 위한 UV램프 기반 양액살균장치를 시제품을 개발하고 이를 바탕으로 제품화 및 기술이전을 진행함 • 시제품 2건 제작, 제품화 1건 및 매출액 5000만원 달성 • 기술이전 2건(유상, 2천만원), 고용 창출 2건
② 시설온실에 순환식 수경재배시스템을 설치 적용하여 시제품의 성능 및 안정성을 평가	20	100	<ul style="list-style-type: none"> • 주관 및 협동기관 실증팜에 시제품을 설치하여 성능 및 안정성을 평가하였으며, 실증영농현장에 설치하여 장기안정성을 평가하는 중
③ 순환식 수경재배시스템 전처리 모듈의 적정 역세척시간 산정 및 프로그램에 반영	10	100	<ul style="list-style-type: none"> • 배액을 처리하기 위하여 전처리 모듈의 최적화를 추진함 • 특허출원 3건
④ 순환식 수경재배시스템 살균모듈의 안전성(살균효율)/안정성 검증	10	100	<ul style="list-style-type: none"> • 살균모듈의 살균력이 95%이상인 것을 것을 확인하였으며, 장기적인 안정성을 확인함
⑤ 순환식 배액관리 및 제어 프로그램 개발	10	100	<ul style="list-style-type: none"> • 양액의 흡수패턴분석, 양분균형제어 개념을 도입한 양분 제조 알고리즘 개발, 폐양액 최소화 알고리즘 개발, 순환식 EC 및 pH 제어기술 개발을 통한 배액관리 및 제어 프로그램을 개발함 • 학술발표 2건
합계	100점	100	<ul style="list-style-type: none"> • 제시한 정량 및 정성목표를 100% 달성함

III . 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

- 본 연구의 궁극적 목표는 순환식 수경재배시스템의 사업화를 위하여 보급형 제품을 개발하고 영농실증을 통하여 성능을 검증하는 것임.
- 본 연구진은 고도화된 전처리 및 양액살균장치와 양액 재이용에 따른 이온 불균형 해소를 고려한 양액 배액관리 및 제어 프로그램이 적용된 보급형 순환식 수경재배시스템을 개발하여 영농 현장에 성공적으로 적용하고 사업화를 진행함

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

- 연구과제의 목표 중 하나인 영농실증의 경우 실증 농가의 사정으로 인하여 장기운영이 되지 않았으나 연구기간 외에 지속적인 노력을 통하여 운영을 진행하고 있음

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 본 연구를 통해 개발된 보급형 순환식 수경재배시스템은 별도의 고도화 작업을 진행하여 추가적인 영농실증 및 스마트팜 혁신밸리 단지에 실증운영을 진행할 예정이며, 성능 및 안정성의 검증 단계를 거친 후 기존의 사업영역과 결합하여 국내의 순환식 수경재배 시스템 시장에 진입할 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

연구성과 활용계획서

1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input type="checkbox"/> 자유응모과제 <input checked="" type="checkbox"/> 지정공모과제	분 야		
연구과제명	보급형 순환식 수경재배시스템의 산업화			
주관연구기관	신한에이텍(주)	주관연구책임자	장재욱	
연구개발비	정부출연 연구개발비	기업부담금	연구기관부담금	총연구개발비
	500,000	167,000		667,000
연구개발기간	2019.01.22. ~ 2020.01.21			
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 UV램프 기반의 양액살균장치 시제품 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 배양액의 살균을 위하여 UVC-Lamp 기반 양액살균모듈 시제품 제작 • 전처리를 위한 모래여과 모듈과 양액살균모듈을 결합한 양액살균장치 시제품 제작 • 총 2건의 양액살균장치의 기술이전 진행
② 시설온실에 순환식 수경재배시스템을 설치 적용하여 시제품의 성능 및 안정성을 평가	<ul style="list-style-type: none"> • 시제품을 주관 및 협동기관 실증팜에 설치하여 성능 및 안정성을 평가함 • 제작된 시제품을 마산 진전면(2000평), 마산 진동면(6000평) 영농현장에 설치 및 시운전 중(현장의 법적, 시설적 문제로 인하여 현장테스트가 늦어짐) • 배액에 특성에 따른 순환식 수경재배시스템 시제품 성능평가를 추진함 • 발생하는 배액을 채취하여 배액 특성을 평가함
③ 순환식 수경재배시스템 전처리 모듈의 적정 역세척시간 산정 및 프로그램에 반영	<ul style="list-style-type: none"> • 전처리시스템(모래여과) 등에 걸리는 압력수와 역세척수 수질 분석을 통해 적정 압력을 도출함
④ 순환식 수경재배시스템 살균모듈의 안전성(살균효율)/안정성 검증	<ul style="list-style-type: none"> • 전처리 및 살균력 모듈 성능 암면배지와 코코피트 배지 상에서 살균력 95% (총대장균, 곰팡이, 일반세균 대상) 이상 달성
⑤ 순환식 배액관리 및 제어 프로그램 개발	<ul style="list-style-type: none"> • 배액분석을 통한 양액의 흡수패턴을 확인 • 순환식을 고려한 양분균형제어 및 양분제조에 대한 알고리즘을 개발 • 폐양액을 최소화 할 수 있는 알고리즘을 개발하여 순환식 수경재배시스템의 배액관리 방안 마련 • PID와 기계학습을 통한 순환식 양액제어서 pH와 EC의 제어 프로그램 개발 및 적용

3. 연구목표 대비 성과

성과 목표	사업화지표										연구기반지표									
	지식 재산권			기술 실시 (이전)		사업화					기술 인증	학술성과				교육 지도	인력 양성	정책 활용·홍 보		기타 (타 연구 활용 등)
	특 허 출 원	특 허 등 록	품 종 등 록	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		
												SCI	비 SCI						논 문 평 균 IF	
단위	건	건	건	건	백 만 원	백 만 원	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	건	명	건	건			
가중치	10			10		20	20		30					10						
최종목표	1			2		1	20		2					1						
연구기간내 달성실적	3			2		1	50		2					2						
달성율(%)	300			100		100	250		100					200						

4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	보급형 순환식 수경재배 양액살균 장치 및 운영 소프트웨어 기술
②	보급형 순환식 수경재배시스템의 적정 전처리기술
③	보급형 순환식 수경재배시스템의 살균장치 운영기술
④	보급형 순환식 수경재배시스템의 배액을 고려한 양액공급 프로그램

5. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)				
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복 제	외국기술 소 화 흡 수	외국기술 개 선 개 량	특허 출원	산업체이전 (상품화)	현장에로 해 결	정책 자료	기타
①의 기술		v					v			
②의 기술	v	v				v				
③의 기술		v			v	v		v		
④의 기술		v				v				

* 각 해당란에 v 표시

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	상용제품 보급을 위한 제품의 완성도 향상에 기여
②의 기술	전처리 기술에 대한 시제품 반영, 성능향상 및 보급화에 기여
③의 기술	배지(암면, 코코피트)에 따른 배액을 반영한 시제품 반영, 성능향상 및 보급화에 기여
④의 기술	순환식 수경재배시스템 운영프로그램에 반영을 통한 제품 업그레이드 및 보급화에 기여

7. 연구종료 후 성과창출 계획

성과목표	사업화지표										연구기반지표								
	지식 재산권			기술실시 (이전)		사업화					기술인증	학술성과			교육지도	인력양성	정책 활용·홍보		기타 (타 연구 활용 등)
	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	10			10		20	20		30					10					
최종목표	1			2		1	20		2					1					
연구기간내 달성실적	3			2		1	50		2					2					
연구종료 후 성과창출 계획	1	2				2	100		2		1	2		2				2	

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

핵심기술명 ¹⁾	자외선램프를 이용한 배액 재처리 기술		
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input checked="" type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	10,000 천원
이전방식 ²⁾	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input checked="" type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타()		
이전소요기간	1개월	실용화예상시기 ³⁾	기술이전 후 6개월
기술이전시 선행조건 ⁴⁾	수경재배 시스템 판매 및 유지보수 가능		

연구개발보고서 초록

과 제 명	(국문) 보급형 순환식 수경재배시스템의 산업화				
	(영문) Industrialization of Recycling Hydroponic Cultivation System				
주관연구기관	신한에이텍(주)		주 관 연 구	(소속) 신한에이텍(주)	
참 여 기 업			책 임 자	(성명) 장재욱	
총연구개발비 (천원)	계	667,000	총 연구 기간	2019.1. ~ 2020.1.(1년)	
	정부출연 연구개발비	500,000	총 참 여 수	총 인원	15명
	기업부담금	167,000		내부인원	15명
	연구기관부담금			외부인원	

○ 연구개발 목표 및 성과

보급형 순환식 수경재배시스템 개발을 목표로 하여, UV램프 기반의 양액살균장치 시제품 개발하였다. 이를 위하여, 전처리를 위한 모래여과 모듈과 양액살균모듈을 결합한 양액살균장치 시제품 개발하고, 양액살균모듈 및 전처리 모듈의 안정성, 안전성 효율 향상을 위한 제어프로그램 개발하였다. 개발된 시제품의 실증을 통한 최적화와 안정성을 확인하였으며, 보급형 순환식 수경재배 시스템 실용화를 위하여 영농실증을 통한 검증을 진행하였다.

○ 연구내용 및 결과

전처리를 위한 모래여과 모듈과 양액살균모듈을 결합한 양액살균장치 시제품 개발하였으며, UV의 경우 투과율이 살균성능에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 모래여과 모듈을 이용하는 경우 배액의 살균성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다. 모래여과 모듈의 경우 모래를 통하여 물리적으로 배액의 부유고형물 등을 제거하는 방식으로 역세척 등의 방식으로 관리하면 장기간 사용할 수 있어 효율적인 방식임을 확인할 수 있었다. 양액살균장치의 핵심적인 모듈인 UV램프의 설치 방식에 따라서 살균성능에서 차이를 보이는 것으로 확인되었다. 일반적으로 하나의 챔버에 다수의 UV램프를 설치하는 방식보다 다수의 UV램프를 직렬로 연결하는 방식이 살균성능이 높은 것으로 나타났다. UV램프의 성능평가를 수행한 결과 2개 이상의 UV램프를 적용할 경우 95%이상의 살균력을 나타내었다.

양액살균모듈 및 전처리 모듈의 안정성, 안전성 효율 향상을 위한 제어프로그램 개발하였다. 터치기반의 사용자 인터페이스 개발 (시스템 상태 모니터링, 제어변수 설정), UV센서, 수위센서(살균전 배액, 살균 후 배액), pH, EC 센서 등을 이용한 양액살균 모듈제어 프로그램 개발, 배액의 처리량을 기반으로 전처리 모듈의 상태를 파악하여 역세척 등의 방식을 통해 관리하기 위한 전처리 모듈 제어 프로그램 개발하였다. 또한, 작물의 양액흡수패턴을 분석하고, 배액을 고려한 양액공급프로그램을 개발하였다.

보급형 순환식 수경재배 시스템 실용화를 위하여 파프리카를 재배하는 2농가(6000평, 2000평)에 순환식 수경재배 시스템 환경 구축 및 설치하고 시스템의 운영을 통한 배액의 수집 및 살균성능 분석하여 제품의 기술적 안정성 확보하였다.

○ 연구성과 활용실적 및 계획

보급형 순환식 수경재배시스템을 기술이전 및 제품화를 진행하였으며, 보급형 순환식 수경재배 시스템은 양액공급시스템과 배액처리시스템이 통합된 것으로 두 시스템의 개별적인 사용이 가능하도록 하여 각각의 시스템이 사업화에 활용할 예정이다.

[별첨 2]

자체평가의견서

1. 과제 현황

		과제번호	319029-01-1-CG000		
사업구분	농식품기술개발사업				
연구분야				과제구분	단위
사업명	1세대 스마트 플랜트팜 산업화 사업			주관	
총괄과제	기재하지 않음			총괄책임자	기재하지 않음
과제명	보급형 순환식 수경재배시스템 산업화			과제유형	(기초,응용, 개발)
연구기관	신한에이텍(주)			연구책임자	장재욱
연구기간 연구비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차연도	2019.01.22-2020.01.21	500,000	167,000	667,000
	2차연도				
	3차연도				
	4차연도				
	5차연도				
	계	2019.01.22-2020.01.21	500,000	167,000	667,000
참여기업					
상대국	상대국연구기관				

※ 총 연구기간이 5차연도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 : 2020년 2월 21일

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
신한에이텍(주)	연구소장	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 기술을 반영된 전처리 장치와 살균모듈을 개발함
- 국내 영농 상황에 적합하게 배지의 종류(암면, 코코피트 등)와 관계없이 모두 사용 가능한 순환식 전처리 시스템을 개발함
- 고가의 수입제품을 대체하기 위한 보급형 순환식 수경재배시스템의 시제품을 개발하고 영농실증함으로써 고가의 외산 순환식 수경재배시스템의 국산화를 진행함

2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 일부 대규모의 온실에서는 이미 순환식 수경재배시스템을 도입하여 사용하고 있으나 중소규모의 온실은 비용적인 부분으로 인해 불가능한 부분을 본 연구결과로 적용 가능할 것으로 판단됨.
- 수경재배 배액 발생으로 인한 환경문제를 해결할 수 있으며, 수경재배 농가의 비료사용량 절감과 운영비 절감에 탁월한 효과가 있을 것으로 판단됨.
- 개발한 순환식 수경재배시스템은 고가의 외산 제품의 수출대체효과가 있을 것으로 판단됨

3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 시설원에 분야에 필수적으로 도입될 것으로 예상하는 보급형 순환식 수경재배시스템의 개발과 영농실증을 통한 경제적, 기술적, 사업화 타당성을 확보
- 수경재배 농가의 대형화 및 증가로 인해 관련 기술에 대한 수요가 증가되는 상황에서 관련 산업이 활성화될 것으로 보여짐

4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 자체 테스트베드 운영을 통한 기능 및 성능검증, 협동기관과의 연구성과를 적용한 시제품 개발, 산업화를 위한 영농실증 사이트 구축 및 운영 등 체계적인 연구개발내용을 수행함
- 시스템 개발을 위하여 주관/협동기관 각각의 실증팜에서 지속적으로 연구수행을 수행하였으며, 영농실증을 위하여 2개의 사이트(2000평, 6000평 규모)에서 시제품을 설치하여 테스트 진행

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

- 시제품을 바탕으로 실증화 작업을 현재 수행중에 있고 이를 통해 지속적으로 성능을 검증할 예정이며 현재까지는 성능이 우수하게 진행되고 있음
- 전처리 기술과 살균성능과 운영프로그램 관련해서 특허출원 3건을 달성
- 시제품에 관한 유상 특허 2건을 기업 2곳에 기술이전을 달성

II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
① UV램프 기반의 양액살균장치 시제품 개발	50	100	<ul style="list-style-type: none"> 배양액의 살균을 위한 UV램프 기반 양액살균장치를 시제품을 개발하고 이를 바탕으로 제품화 및 기술이전을 진행함 시제품 2건 제작, 제품화 1건 및 매출액 5000만원 달성 기술이전 2건(유상, 2천만원), 고용 창출 2건
② 시설온실에 순환식 수경재배시스템을 설치 적용하여 시제품의 성능 및 안정성을 평가	20	100	<ul style="list-style-type: none"> 주관 및 협동기관 실증팜에 시제품을 설치하여 성능 및 안정성을 평가하였으며, 실증영농현장에 설치하여 장기안정성을 평가하는 중
③ 순환식 수경재배시스템 전처리 모듈의 적정 역세척시간 산정 및 프로그램에 반영	10	100	<ul style="list-style-type: none"> 배액을 처리하기 위하여 전처리 모듈의 최적화를 추진함 특허출원 3건
④ 순환식 수경재배시스템 살균모듈의 안전성(살균효율)/안정성 검증	10	100	<ul style="list-style-type: none"> 살균모듈의 살균력이 95%이상인 것을 것을 확인하였으며, 장기적인 안정성을 확인함
⑤ 순환식 배액관리 및 제어 프로그램 개발	10	100	<ul style="list-style-type: none"> 양액의 흡수패턴분석, 양분균형 제어 개념을 도입한 양분 제조 알고리즘 개발, 폐양액 최소화 알고리즘 개발, 순환식 EC 및 pH 제어기술 개발을 통한 배액관리 및 제어 프로그램을 개발함 학술발표 2건
합계	100점	100	<ul style="list-style-type: none"> 제시한 정량 및 정성목표를 100% 달성함

III. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

- 본 연구의 궁극적 목표는 순환식 수경재배시스템의 사업화를 위하여 보급형 제품을 개발하고 영농실증을 통하여 성능을 검증하는 것임.
- 본 연구진은 고도화된 전처리 및 양액살균장치와 양액 재이용에 따른 이온 불균형 해소를 고려한 양액 배액관리 및 제어 프로그램이 적용된 보급형 순환식 수경재배시스템을 개발하여 영농현장에 성공적으로 적용하고 사업화를 진행함

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

- 연구과제의 목표 중 하나인 영농실증의 경우 실증 농가의 사정으로 인하여 장기운영이 되지 않았으나 연구기간 외에 지속적인 노력을 통하여 운영을 진행하고 있음

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 본 연구를 통해 개발된 보급형 순환식 수경재배시스템은 별도의 고도화 작업을 진행하여 추가적인 영농실증 및 스마트팜 혁신밸리 단지에 실증운영을 진행할 예정이며, 성능 및 안정성의 검증 단계를 거친 후 기존의 사업영역과 결합하여 국내의 순환식 수경재배 시스템 시장에 진입할 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

3. 연구목표 대비 성과

성과 목표	사업화지표										연구기반지표									
	지식 재산권			기술 실시 (이전)		사업화					기술 인증	학술성과				교육 지도	인력 양성	정책 활용·홍 보		기타 (타 연구 활용 등)
	특 허 출 원	특 허 등 록	품 종 등 록	건 수	기 술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출	투 자 유 치		논문		논 문 평 균 IF	학 술 발 표			정 책 활 용	홍 보 전 시	
												SCI	비 SCI							
단위	건	건	건	건	백 만 원	백 만 원	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	건	명	건	건			
가중치	10			10		20	20		30					10						
최종목표	1			2		1	20		2					1						
연구기간내 달성실적	3			2		1	50		2					2						
달성율(%)	300			100		100	250		100					200						

4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	보급형 순환식 수경재배 양액살균 장치 및 운영 소프트웨어 기술
②	보급형 순환식 수경재배시스템의 적정 전처리기술
③	보급형 순환식 수경재배시스템의 살균장치 운영기술
④	보급형 순환식 수경재배시스템의 배액을 고려한 양액공급 프로그램

5. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)				
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복 제	외국기술 소 화 흡 수	외국기술 개 선 개 량	특허 출원	산업체이전 (상품화)	현장에로 해 결	정책 자료	기타
①의 기술		v					v			
②의 기술	v	v				v				
③의 기술		v			v	v		v		
④의 기술		v				v				

* 각 해당란에 v 표시

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	상용제품 보급을 위한 제품의 완성도 향상에 기여
②의 기술	전처리 기술에 대한 시제품 반영, 성능향상 및 보급화에 기여
③의 기술	배지(암면, 코코피트)에 따른 배액을 반영한 시제품 반영, 성능향상 및 보급화에 기여
④의 기술	순환식 수경재배시스템 운영프로그램에 반영을 통한 제품 업그레이드 및 보급화에 기여

7. 연구종료 후 성과창출 계획

성과목표	사업화지표										연구기반지표								
	지식 재산권			기술실시 (이전)		사업화					기술인증	학술성과			교육지도	인력양성	정책 활용·홍보		기타 (타 연구 활용 등)
	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	10			10		20	20		30					10					
최종목표	1			2		1	20		2					1					
연구기간내 달성실적	3			2		1	50		2					2					
연구종료 후 성과창출 계획	1	2				2	100		2		1	2		2				2	

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

핵심기술명 ¹⁾	자외선램프를 이용한 배액 재처리 기술		
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input checked="" type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	10,000 천원
이전방식 ²⁾	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input checked="" type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타()		
이전소요기간	1개월	실용화예상시기 ³⁾	기술이전 후 6개월
기술이전시 선행조건 ⁴⁾	수경재배 시스템 판매 및 유지보수 가능		

<뒷면지>

주 의

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