

배양액

재활용

및

극소화

수경재배시스템

개발

최종보고서

2016

농림축산식품부

첨단생산기술개발 R&D Report

배양액 재활용 및 극소화
수경재배 시스템 개발
최종보고서

2016. 12. 12.

주관연구기관 / 서울시립대학교

협동연구기관 / 서울대학교

한국방송통신대학교

국립원예특작과학원

그린씨에스(주)

(주)미래센서

농림축산식품부

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “배양액 재활용 및 극소화 수경재배시스템 개발”(개발기간 : 2013. 08. ~ 2016. 08.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2016. 10. 08.

주관연구기관명 : 서울시립대학교 (대표자) 김인철

협동연구기관명 : 서울대학교 (대표자) 김성철

한국방송통신대학교 (대표자) 이우백

국립원예특작과학원 (대표자) 허건량

참여기관명 : 그린씨에스(주) (대표자) 배임성

(주)미래센서 (대표자) 이승복

주관연구책임자 : 이용범

협동연구책임자 : 손정익

최은영

이한철

참여기관책임자 : 배임성

이승복

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제고유번호	313003	해당단계 연구기간	2015-08-26 ~ 2016-08-25	단계구분	2015-08-26~ 2016-08-25/ 2013-08-26~ 2016-08-25
연구사업명	중사업명	첨단생산기술개발			
	세부사업명	생산시스템 - 기계·설비·자재산업			
연구과제명	대과제명	배양액 재활용 및 극소화 수경재배 시스템 개발			
	세부과제명	<ul style="list-style-type: none"> - 딸기 배액 극소화 시스템 실용화 기술 개발 - 파프리카 배액 극소화 시스템 실용화 기술 개발 - 토마토 배액 극소화 시스템 실용화 기술 개발 - 무배액 수경재배 통합 급액관리 자동화 시스템 확립 - 양분 균형 안정화 및 비료 투입량 최소화 기술에 기반한 순환식 수경재배 양액 통합관리 시스템 개발 - 이온 센서를 이용한 양액 내 주요 이온의 모니터링 및 제어 알고리즘의 개발 - 범용 다기능 FDR센서 개발 			
연구책임자	이용범 손정익 최은영 이한철 배임성 이승복	해당단계 참여 연구원 수	총: 28명 내부: 28명 외부: 명	해당단계 연구개발비	정부:400,000천원 민간:133,332천원 계:533,332천원
		총연구기간 참여 연구원 수	총: 88명 내부: 88명 외부: 명	총연구개발비	정부:1,200,000천원 민간:400,000천원 계:1,600,000천원
연구기관명 및 소속부서명	서울시립대학교 서울대학교 한국방송통신대학교 국립원예특작과학원			참여기업명	그린씨에스(주) 세기교역 (주)미래센서
위탁연구	연구기관명: 서울대학교			연구책임자:	김학진
				보고서 면수	326

		코드번호	D-01
연구의 목적 및 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 배양액 재활용을 위한 순환식 수경재배 시스템 실용화 기술 개발 ○ 배액 극소화(무배액) 수경재배기술 실용화 기술 개발 		
연구개발성과	<p>제 1 절 딸기 배액 극소화 시스템 실용화 기술 개발</p> <p>1. 딸기배지경에서 근권 함수량이 급액, 배액 및 생육에 미치는 영향(1년차) Coconut coir 배지의 딸기 고설수경재배에서 FDR 수분세서를 이용하여 근권의 수분을 제어하였을 때 기존 타이머 재배에 비해 평균 일일 급액량은 27~30% 감소하였으며 배액률은 30~35% 차이를 보였다. 배지내 EC는 증가하지 않았으며 근권의 목표 수준 범위에 있었다. 또한 타이머 처리에 비해 FDR센서에 의한 45-55% 수분 제어구의 광합성, 생육 및 과실 수량에서 차이가 없었으며 배액율은 0~8%를 보였다. 이는 FDR 수분 센서 제어에 의한 급액 공급 방식이 기상환경을 반영하여 일일 공급량이 달라졌음에도 근권 EC가 안정적이고 생육 및 수량의 차이를 보이지 않아 효율적이며 친환경적 방식(무배액 수경재배)임을 확인할 수 있었다.</p> <p>2. 딸기배지경에서 근권 함수량의 적정제어 범위가 급액, 배액 및 생육에 미치는 영향(1년차) 코코넛 코이어 배지를 이용한 딸기 수경재배시에 FDR 센서를 이용, 배지내 근권부 수분 함량의 변동 범위를 조절하여 딸기 생육에 적합한 배지내 수분 조건을 구명하고자 하였다. 대조구인 Timer 처리구와 FDR센서를 이용한 근권부 수분함량 제어구를 각각 50±1 ±2 ±3 ±5 설정하여 광합성, 생육, 과실 수량, 급/배액율 등을 비교분석하였다. FDR 센서 제어에 의한 주당 하루 평균 급액량은 158~ 203ml이며, Timer 처리구 경우 225~ 300 ml로 28~ 30% 급액량이 감소되었다. 일사량 증가에 따라 급액량도 서서히 증가하는 것으로 측정되었다. 수분 함량 제어구의 배액율 중 50±1% 처리구에서 5% 이하의 가장 낮은 배액율 보였고 타이머 경우 30% 내의 배액율로 약 6배 정도 차가 나타났다. 각 처리구간 배액율과 광합성, 생육, 과실수량 등 종합적으로 비교해보았을 때 근권 수분 함량 변동범위는 ±2%가 권장할만하다.</p> <p>3. 딸기배지경에서 배지조성(chip함량)이 급액, 배액 및 생육에 미치는 영향(1년차)</p>		

코이어 배지 내 칩 함량이 증가할수록 급액량과 배액율은 증가하여 칩 50% 배지(dust :chip=50:50%)에서 가장 높았으나 2월 이후에는 10%이하의 배액을 나타냈다. 딸기 생육, 광합성 및 상품수량은 더스트 100% 또는 칩 10~30% 혼합된 코이어 배지나 시판용 신성제품 배지에서 높았다. 특히 chip 함량을 30%까지에서 배액율을 5%이하로 낮추면서도 생육과 수량에는 영향을 주지 않았고 품질 등에서는 chip 함량 30%에서 가장 높았다. 딸기 생육, 광합성 및 상품수량은 더스트 100% 또는 칩 10~30% 혼합된 코이어 배지나 시판용 신성제품 배지에서 높았다.

4. 딸기배지경에서 FDR센서를 이용한 자동급액 제어시 배양액 급액농도가 급액, 배액 및 생육에 미치는 영향(1년차)

딸기 고설수경재배에서 FDR수분센서를 이용하여 자동급액 제어시 기존 타이머 급액제어에 비해 평균 일일 배액율은 25~35% 감소하였으며 EC 1.2~1.6 처리에서는 5% 내외의 배액율을 보였다. Timer 처리에 비해 FDR센서에 의한 수분 제어 처리구의 광합성, 생육 및 수량 차이는 없었으나 다만, 식물체 광합성, 생육, 과실의 상품과 수량을 보았을 때 EC 1.2 처리구가 권장할 만하다.

5. 딸기 배액 극소화를 위한 최소대기시간 구명과 작물 생육(2년차)

2014년 12월부터 2015년 4월까지 딸기를 코이어 고설수경재배하는 동안 관행의 주당 총 급액량은 31.1L(일평균 주당 162.9mL(겨울), 269.4mL(봄))이었고, FDR센서제어의 주당 총 급액량은 관행의 40~80% (일평균 주당 30~70%(겨울), 37.5~89.1%(봄))수준이었다. 관행의 배액율은 30±5%를 유지하였다. FDR센서 제어에서는 겨울에 최소대기시간 0분을 제외한 모든 처리구에서 배액율 6% 미만을 보였고, 봄에 최소대기시간 15분에서 10% 미만의 배액율을 보였다. FDR센서 제어에서 불안정한 근권 EC변화나 근권 함수량은 관찰되지 않았고, 지상부 생육과 수량에서도 관행과 차이가 없었다. 이를 근거로 산정한 FDR센서제어의 수분이용효율은 최소대기시간 5분을 제외한 모든 처리구에서 관행의 13.8g·L·plant⁻¹보다 높았으며, 급액량이 적었던 최소대기시간 15분의 수분이용효율이 23.5g·L·plant⁻¹로 가장 높았다. FDR센서제어에서 최소대기시간을 15분으로 설정할 때 주당 투입되는 총 비료비용은 관행의 주당 총 비료비용 \$12,193.9/ha 의 63.9% 수준으로 \$7,788.1/ha 절감 가능하였다. 따라서 딸기의 코이어 고설수경재배에서 FDR센서제어 방식에서 최소대기시간을 겨울에 10분, 봄에 15분으로 설정하여 관행과 같은 수준의 높은 수분보유량을 유지하여 생육에

영향을 미치지 않으면서 배액 극소화재배가 가능하였다.

6. 딸기 배액 극소화를 위한 관수종료시각 구명과 작물 생육(2년차)

2014년 12월부터 2015년 4월까지 딸기를 코이어 고설수경재배하는 동안 관행의 주당 총 급액량은 31.1L(일평균 주당 급액량 162.8mL(겨울), 267.1mL(봄))이었고 배액율은 25~26%를 유지하였다. FDR센서제어의 주당 총 급액량은 관행의 약 30~60% 수준이었다. 겨울에 관수종료시각을 13시로 설정하였을 때와 봄에 관수종료시각을 17시로 설정하였을 때 각 배액율 10% 미만, 6% 미만으로 배액 극소화의 가능성을 보였다. 지상부 및 과실 생육 특성과 수량에서 처리 간 차이를 보이지 않았다. 이를 종합한 수분이용효율은 FDR센서제어구에서 관행의 $18.4\text{g}\cdot\text{L}\cdot\text{plant}^{-1}$ 보다 높았다. FDR센서 자동관수제어에서 관수종료시각을 17시로 설정하였을 때 높은 수분이용효율, 안정적인 수량, 높은 당도를 보였다. 따라서 딸기의 코이어 고설수경재배에서 FDR센서제어 방식에서 관수종료시각을 겨울에 13시, 봄에 17시로 설정하여 딸기의 생육과 수량에 영향을 미치지 않는 배액 극소화재배 가능하였다.

7. FDR 센서 급액제어를 이용한 고설 딸기 농가 실증 결과(2년차)

2014년 12월부터 2015년 4월까지 딸기 수경재배 하는 동안, 총급액량이 FAI 처리구의 8.7L(평균 일일 주당 급액량 57.2mL), TIMER 처리구는 14.9L(평균 일일 주당 급액량 98.9mL)였다. FAI 처리구와 TIMER 처리구간 배지 내 수분 보유량은 차이가 없으나, 배액율이 FAI 처리구에서는 13.4%인 반면, TIMER 처리구에서는 48.3%로 나타났다.

또한 재배 중 수확한 딸기의 처리간 상품수량은 차이가 없었으며, 처리 기간 중 생리장해 등 생육 차이는 관찰되지 않았다. 이를 근거로 산정한 식물체 수분이용효율이 FAI 처리구는 $69.3\text{g}\cdot\text{L}^{-1}/\text{plant}$ 였으며, TIMER 처리구는 $56.1\text{g}\cdot\text{L}^{-1}/\text{plant}$ 로 FDR 센서의 자동급액공급방식 처리에서 높았다. 따라서 본 FAI 처리인 배지의 함수량을 고려한 급액방식으로 딸기를 5 개월 동안 수경재배 했을 때, 총공급량이 적어 물과 함께 공급된 비료의 사용량은 TIMER에 비해 40% 절감되었다. 한편 식물이 필요로 하는 수분 양을 배지 내에 충분히 확보하고 있어 TIMER 처리보다 높은 수분보유량을 유지하면서도 배액율은 극소화되어 비순환식 수경재배에서의 환경 친화적 수경재배의 기초 자료로 활용도가 높으리라 생각되었다.

8. FDR 센서를 이용한 딸기 급액관리 체계화를 위한 농가 실증 결과(3년

차)

2015년 9월부터 2016년 4월까지 딸기를 코이어 고설수경재배 하는 동안 관행(타이머), FDR센서 제어, 일사량제어 세가지의 급액 방식을 이용하였으며 일일 평균 급액량, 평균 배액량, 보유량 및 배액율은 FDR 방식에서는 93.9ml, 9.9ml, 84.0ml, 10.7%, 일사량 방식에서는 131.2ml, 36.3ml, 94.9ml, 40.5%, Timer 방식에서는 85.3ml, 42.2ml, 43.1ml, 56.1%을 나타나, 1일 급액량과 배지 내 보유수분량은 일사량 방식에서 가장 많았으나 배액량과 배액율은 FDI 방식에서 가장 적었다. 재배기간 처리별 주당 과수 및 수량은 처리에 따라 차이가 없었으며 경도, 당도 색도도 처리에 따른 차이가 없었다. 이상의 결과 기존 관행 방식인 타이머 제어에 비해 FDR 방식은 작물생육에 맞게 주당 일일 급액량이 15ml 은 많게 공급되었음도 배액율은 45% 이상 감소하였고, 생육과 수량에는 차이가 없어 환경 친화적인 급액 방식이 가능함을 확인할 수 있었다.

제 2 절 파프리카 배액 극소화 시스템 실용화 기술 개발

- 한국형 시설원예에 적합한 수경재배 융합기술의 실용화
 - 환경 부하 최소화에 기여
 - 비료, 수분 이용 효율 향상으로 수경재배 농가 경영비 절감 (20% 이상 절감)
 - 저렴한 무배액 수경재배 시스템 실용화 (영농활용, 기술교육 지도)
 - FDR 센서를 이용한 농가의 자동화 및 생력화
 - FDR 센서를 이용한 농가 현장적용으로 소득증대 기여
 - FDR 센서를 이용한 수경재배기술의 타작물 확대적용에 기여

제 3 절 토마토 배액 극소화 시스템 실용화 기술 개발

수분센서를 활용한 자동관수제어 방식은 타이머나 일사량 급액제어 방식과 비교하였을 때 급액배액을 극소화하면서 적정 근권 환경을 조성하여 배액으로 인한 토양과 지하수 오염을 방지할 수 있는 기술이며, 생산성은 관행기술에 비해 감소되지 않으면서 당도가 향상된 토마토를 생산하였다. 또한 FDR 센서의 측정값에 영향을 주는 주변의 전기적 간섭을 차단하기 위한 센서와 관수제어기 사이에 노이즈 필터를 장착 후 매우 안정된 측정값을 얻을 수 있었다. 따라서 FDR 센서를 활용한 배액 극소화 수경재배 시스템은 실용화 될 수 있다.

제 4 절 무배액 수경재배 통합 금액관리 자동화 시스템 확립

본 연구는 함수율 센서를 활용한 양액 공급시스템을 개발하고 무배액 또는 극소배액 조건으로 수경재배를 함에 있어 통합 금액관리 자동화가 가능하도록 양액 시스템 프로그램을 보완하며 통합형 금액 제어시스템 개발 사업화에 따른 개선점을 반영하고 각종센서 (함수율센서, 일사센서, 유량센서, EC, PH센서, 실내온습도 센서)를 병행하여 관수방법에 이용 할 수 있도록 보다 폭넓은 양액시스템 활용 프로그램으로 개발 되었으며 센서에 의한 제어와 제어 결과 값을 텍스트파일, 엑셀파일 등으로 변환하여 볼 수 있는 PC 프로그램이 있고 그래프를 활용하여 한눈에 결과 값을 확인 할 수 있다는 점에서 양액재배의 초보자들도 설정 값에 의한 제어 결과 값을 쉽게 접근할 수 있다는 장점이 있다

상기의 결론에서 함수율센서를 모니터링 하고 일사센서를 이용하여 관수 시점과 관수량을 결정하고 사계절 동안 변경되는 일출 일몰시간을 자동으로 계산하여 관수시기와 관수종료 시점에 적용 시킴으로 보다 정밀한 통합 금액관리 자동화가 이루어 질 것으로 사료된다.

제 5 절 양분 균형 안정화 및 비료 투입량 최소화 기술에 기반한 순환식 수경재배 양액 통합관리 시스템 개발

- 종래의 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템 대비 투입 비료의 절감이 가능한 재사용 양액 혼합 기술 개발
- EC 측정 기반 순환식 수경재배 시스템에서의 양분 균형 제어 기술 개발
- 순환식 수경재배 시스템의 영양학적, 생물학적 재배 안정성 확보
- 상업 농가 규모에서 적용 가능한 EC 측정 기반 순환식 수경재배 시스템의 개발
- 순환식 수경재배 시스템의 소형화
- UV 살균 시스템에서의 Fe-EDTA 단독 공급을 통한 광산화 손실량 보상
- 양수분 통합관리가 가능한 순환식 수경재배 시스템 개발

제 6 절 이온 센서를 이용한 양액 내 주요 이온의 모니터링 및 제어 알고리즘의 개발

- 양액 내 개별이온을 측정할 수 있는 센서 개발
- 개별이온 센서의 신호 보정 및 안정성 향상 기술 개발
- 온실 현장 적용이 가능하고 센서 보정 및 샘플 측정을 자동으로 수행 할

	<p>수 있는 개별이온 모니터링 시스템 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 개별이온 모니터링을 통한 양액 재사용 효율 및 성능 평가로 순환식 수경재배 시스템 실용화 및 적용성 증대 기여 <p>제 7 절 범용 다기능 FDR센서 개발</p> <ul style="list-style-type: none"> - 칩이 많이 포함된(40%이상) 유기배지는 수분이동이 수평보다 수직으로 이동하는 특성이 있어 특정부위만 측정할수 있는 형태의 센서가 필요 - 센서부의 길이의 변화 그리고 케이블의 영향등을 고려하여 센서의 주파수를 기존 50Mhz에서 100Mhz로 변경 - 센서부의 일정한 삽입을 위하여 고정판 제작 - pH, 수분, 전기전도도, 온도 동시 측정과 데이터 저장이 가능한 디스플레이 제작 - 유기배지의 pH, 수분, 전기전도도, 온도 측정 전극부 제작 - 센서 농가 보급 				
<p>연구개발성과의 활용계획 (기대효과)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 한국형 시설원예에 적합한 수경재배 융합기술의 실용화 - 비료, 수분 이용 효율 향상으로 수경재배 농가 경영비 절감 (20% 이상 절감) - 환경 부하 최소화에 기여 - 저렴한 순환식 수경재배 시스템 실용화 - 저렴한 무배액 수경재배 시스템 실용화 (상품화, 기술이전, 기술교육 지도) - 비료 투입량 최소화를 통한 농가 생산비 절감 - 순환식 수경재배 시스템 규모의 최소화로 농가 적용성 증대 - 개별 이온 센서의 측정 모듈 개발에 따른 정밀양액제어 가능 - 국내 시설원예 자재 산업 신기술 분야 경쟁력 제고, 상품화 및 실용화(범용 다기능FDR센서, 무배액 수경재배 시스템, 순환식 수경재배시스템, 양액소독 시스템 등) 				
<p>중심어 (5개 이내)</p>	<p>순환식 수경재배</p>	<p>배양액 재활용</p>	<p>배액 극소화</p>	<p>FDR센서</p>	<p>양분관리</p>

< SUMMARY >

		코드번호	D-02
Purpose& Contents	<ul style="list-style-type: none"> ○ Development of practical hydroponic system skills for minimum drainage(non-drainage) ○ Development of practical technologies for commercialized closed soilless culture systems reusing drainage solutions 		
Results	<p>Section 1 Development of practical hydroponic system skills for minimum drainage(non-drainage) of strawberry</p> <p>1. Effect of the water content in the root zone at drainage, Irrigation, growth at strawberry culture medium</p> <p>When control root zone moisture using the FDR water processor in a strawberry highbed hydroponic strawberries of coconut coir, average daily irrigation amount was reduced 27~30% and average daily drainage amount was reduced 30~35% compared to the conventional timer. The EC had my badge was not increased in the rhizosphere target levels. EC of the medium did not increase and the target level was in the range of rhizosphere. In addition, photosynthesis, growth and fruit yield was not different in 44-55% moisture by FDR sensor compared to timer. And drainage rate was 0-8%. Irrigation system by FDR moisture sensor control. As a result, despite of daily irrigation change we knew irrigation supply by FDR moisture sensor control is efficient and environmentally friendly manner(no drainage hydroponics) because rhizosphere EC is stable and there are no different growth, yield.</p> <p>2. Effects of the water content in root zone on irrigation, drainage and growth.</p> <p>using coconut coir medium FDR used the sensors to the hydroponic strawberries, by controlling the fluctuation range of the medium section rhizosphere moisture content was to investigate the medium moisture conditions suitable for growing strawberries. It was to investigate substble moisture conditions in medium for strawberry growth using FDR sensor, controls the fluctuation range of the rhizosphere moisture content section at</p>		

strawberry hydroponics using coconut coir medium. The timer control treatment and rhizosphere moisture content control treatment using FDR sensor set respectively 50 ± 1 ± 2 ± 3 ± 5 and then it was compared to photosynthesis, growth, fruit quantity and supply / drainage rate, etc. In FDR sensor treatment, daily average irrigation amount per day was 158~203ml and In Timer treatment, daily average irrigation amount per day was 225~300ml and irrigation amount was reduced. With increasing irradiation irrigation amount was measured to be gradually increased. At drainage of water content treatment 50 ± 1 showed the lowest rate of less than 5% and in the timer, drainage rate within 30% was different about six times. When it was compared to drainage rate and photosynthesis, growth, fruit, etc. of each treatment, Rhizosphere moisture content fluctuation range deserves to be recommended by $\pm 2\%$.

3. Effects of the medium composition on irrigation, drainage and growth in strawberry medium

Irrigation and drainage rate was highest in chip 50% medium (dust: chip = 50: 50%) because chips content of the coir medium increases, the irrigation and drainage has increased. But Since February, it exhibited a drainage of 10% or less 50% at the chip 50% medium. Strawberry growth, photosynthesis and marketable yield was higher in the dust 100% or coir medium mixed chips 10-30% or commercial medium.

4. Effects of automatic irrigation control with FDR sensor on irrigation, drainage and growth in strawberry medium.

Average daily drainage rate is decreased 25~35% than conventional timer irrigation control and In EC 1.2~1.6 treatment drainage rate showed around 5%.

Photosynthesis, growth and yield in water control by FDR seonsor were not differences compare to timer treatment. But it deserves to be recommended by the EC for plant photosynthesis, growth, product and yield of fruit.

5. Least latency detection and crop growth for minimum drainage of strawberry

From December 2014 until April 2015 during coir highbed hydroponics of strawberry total irrigation per plant was 31.1L(daily average irrigation per plant: 162.9ml(winter), 269.4ml(spring)) and total irrigation per plant in FDR sensor was 40~80% of practice (daily average irrigation per plant 30~70%(winter), 37.5~89.1%(spring)). Drainage rate of practice was maintained at $30 \pm 5\%$. In the FDR sensor control drainage rate showed less than 6% in all treatments except for the minimum waiting hours, 0 minutes in the winter, and the drainage rate was less than 10% of the minimum wait time of 15 minutes in the spring. Unstable EC changes in rhizosphere by FDR sensor were not observed and also in shoot growth and yield compared to practice. The minimum possible latency was 10 minutes, if set to 15 minutes in the spring to maintain the high level of water reserves and practices affect the growth drainage minimize grown up in the winter. Water use efficiency by FDR seonsor control was higher than $13.8\text{g}\cdot\text{L}\cdot\text{plant}^{-1}$ in all treatments except for the minimum waiting time of 5 minutes and water use efficiency in the minimum waiting time of little irrigation content to 5 minutes was the highest $23.5\text{g}\cdot\text{L}\cdot\text{plant}^{-1}$. The total cost of fertilizer inputs per plant has possible savings 63.9% of fertilizer cost per of practice($\$12,193.9/\text{ha}$) as set the minimum waiting time of 15 minutes in FDR sensor controls. Therefore, minimum drainage growing was possible set minimum latency 10 minutes in winter and 15 minutes in spring and by maintaining a high level of water reserves, such as the practice.

6. Irrigation end time detection and crop growth for minimum drainage of strawberry

From December 2014 to April 2015 a total of irrigation per plant was 31.1L(daily average irrigation content per plant : 162.8mL(winter), 267.1mL(spring)) and drainage rate kept between 25 and 26% during coir highbed hydroponics of strawberry. The total irrigation content per plant was 30~60% of practice in FDR sensor control. When setting irrigation end time in 13h in winter and setting irrigation end time in 17h in spring, drainage rate was less than 10% and 6%. Shoot and fruit growth and yield did not

show any difference in treatment. Water use efficiency including this result was higher than $18.4g \cdot L \cdot plant^{-1}$ in practice in FDR sensor control. It showed water use efficiency, stable quantity, high sugar content set irrigation end time in 17h in FDR sensor control. Therefore, when irrigation end time in the winter to 13h and irrigation end time in the spring to 17h using FDR sensor control, it was possible to minimize drainage does not affect the growth and yield of strawberry cultivation in coconut coir highbed hydroponics of strawberry.

7. Strawberry farmers empirical results using irrigation control by FDR sensor

While growing hydroponic strawberries from December 2014 until April 2015, total irrigation was 8.7L of FAI treatment (daily average irrigation content per plant: 57.2mL), timer treatment was 14.9L (daily average irrigation content: 98.9mL). this was a total geupaekryang 8.7L (average daily share geupaekryang 57.2mL), TIMER treatment of FAI treatments 14.9L (average daily share geupaekryang 98.9mL). Water reserves is not different in medium between FAI treatment and timer treatment but the drainage rate in FAI treatment was 13.4%, while the drainage rate was 48.3% in TIMER treatment. Between the treatment of the harvested strawberry yield this is no difference and there was not shown growth difference during experiment. Water use efficiency calculated on the basis was $69.3g \cdot L^{-1} / plant$ in FAI treatment, $56.1g \cdot L^{-1} / plant$ in automatic irrigation of FDR sensor. Therefore water use efficiency was highest in automatic irrigation of FDR sensor. Therefore, when cultivating the strawberry in consideration of the medium water content of FAI treatment during 5 months, fertilizers were saving 40% compared to Timer. It seems to increase the utilization of environmentally friendly materials based on closed hydroponic system because plants have fully secured water content in medium and maintaining moisture reserves than Timer.

Section 2 Development of practical hydroponic system skills for

minimum drainage(non-drainage) of paprika

- Application of Korean type hydroponics in un-recycling system with minimum solution drainage
- Minimu environmental pollution in un-recycling system with minimum solution drainage
- Un-recycling system saving by 20% nutrient solution and water
- Automatic supply method of nutrient solution and save of labor and capital by using coir medium with FDR sensor in Paprika
- Income increasement of Paprika hydroponics by using coir medium with FDR sensor
- Extension in the other plants of technique using FDR sensor

Section 3 Development of practical hydroponic system skills for minimum drainage(non-drainage) of tomato

In the first experiment, until 62 days after transplant (DAT) during the autumn to winter cultivation, daily irrigation volume was in the order of 3R5F (858mL) > 5R15F (409mL) > 3R10F (306mL) treatment, and daily drainage ratio was in the order of 3R5F (44%) > 5R15F (23%) > 3R10F (14%). Between 63 and 102 DAT, daily irrigated volume was in the order of 5R15F (888mL) > 3R5F (695mL) > 3R10F (524mL) with the highest drainage ratio, 19% (± 2.6), at the 5R15F treatment. During the spring to summer cultivation, daily irrigation volume and drainage ratio per plant was higher in the 3R5F treatment than that of the 3R10F treatment. For both cultivations, a higher water use efficiency (WUE) was observed under the 3R10F treatment. Integrated all the data suggest that the optimal off-time length is 10 minutes. In the second and third experiments, In results, no significant difference in daily irrigation volume was found among the treatments until 88 days after transplant (DAT). However, during the 88 to 107 DAT, the daily irrigation volume was in the order of IR (2125 mL) > TIMER (2063 mL) > FDR (1983 mL), and during the 108 to 120 DAT, it was in the order of IR (2000 mL) > TIMER (1664 mL) > FDR (1500 mL). The lowest

drainage volume was observed in the FDR treatment with the order of IR (12~19%) > TIMER (4~12%) > FDR (0~7%) during the entire growing period. A lower irrigation volume in the FDR treatment after 88 DAT may be due to the sensor's detecting capacity for less water absorption by plant after completing fruit maturity with apical pruning and removal of lower leaves, while a higher irrigation volume in the IR treatment may be due to gradual increase in integrated solar-radiation amount as closer to summer season. There was no significant difference in plant growth and fruit yield among the treatments; however, a 11% and 18% of higher soluble sugar content was observed in the FDR than that of TIMER and IR treatment, respectively.

Section 4 Establishment of automatic irrigation management for non-drainage hydroponic system

This study developed a nutrient supply system using a water content sensor and complementary to enable integrated management Irrigation automation by hydroponics with no drainage or minimal drainage conditions. It was developed with a wide range hydroponic system utilization program reflected the improvements of the Integrated irrigation control system development commercialization and using various sensors (moisture content sensors, solar sensors, flow sensors, EC, pH sensors, indoor temperature and humidity sensors). It may also have a pc program with a view to converting the control and the control result by the sensor as a text file, an Excel file, such as by using a graph to check the result at a glance. Thus, the advantage of hydroponic beginners can also easily access the control result of the settings. It is determine the irrigation time and irrigation content monitoring the moisture rate sensor and using the solar sensor. And it applies the irrigation time and irrigation end calculated automatically the sunrise and sunset times changed during seasons. So it will be made more precise the automatic irrigation management.

	<p>Section 5 Development of an integrated nutrient management system based on stabilization of nutrient balance and minimization of fertilizer input in recycled soilless culture</p> <ul style="list-style-type: none"> - Development of nutrient solution-mixing technologies in completely-closed soilless culture systems for reducing fertilizer consumption compared to conventional systems - Development of nutrient-balance control techniques in EC-based soilless culture systems - Enhancement of plant nutritional and biological stability in closed soilless culture systems - Scale minimization of closed soilless culture systems - Reduction of photo-degradation of Fe in the nutrient solutions - Development of a closed soilless culture system capable of integrated management of nutrients and water <p>Section 6 Development of monitoring and control algorithms for the primary ions in the nutrient solution using the ion sensors</p> <ul style="list-style-type: none"> - Development of individual ion sensors - Development of calibration techniques for the individual ion sensors - Development of an individual ion monitoring system which can be applied for the greenhouse and conduct the sensor calibration and sample measurement automatically
<p>Expected Contribution</p>	<ul style="list-style-type: none"> - The practical application of hydroponics fusion technology for Korean horticulture - Fertilizer, improved water use efficiency savings hydroponic growers operating costs (20% The savings) - Contribute to minimize environmental impact - Commercialization of cheap circulating hydroponic system - Commercialization of cheap practically no drainage hydroponic system (commercialization, technology transfer, technical training map) - Reduction of farm production costs through minimizing fertilizer inputs

	<ul style="list-style-type: none"> - Increasing adaptability of the farmers to minimize the size of the circulating hydroponic system - Precise control nutrient solution can be measured in accordance with the development of the individual ion sensor module - Domestic horticulture materials industry new technology competitiveness, commercialization and commercialization (FDR universal multifunction sensor, no drainage hydroponic systems, recirculating hydroponic systems, the nutrient solution disinfection systems, etc.) 				
Keywords	Closed-loop hydroponics	re-use of nutrient solution	non-drainage	FDR sensor	nutrient management

CONTENTS

Chapter I . Introduction	
1. Research objectives	21
1. Research background and knowledge gap	21
2. Research aspects	33
Chapter II . Review of the current status of research	35
Chapter III. Results and Discussion	
1. Development of practical hydroponic system skills for minimum drainage(non-drainage) of strawberry	41
2. Section 2 Development of practical hydroponic system skills for minimum drainage(non-drainage) of paprika	85
3. Section 3 Development of practical hydroponic system skills for minimum drainage(non-drainage) of tomato	103
4. Section 4 Establishment of automatic irrigation management for non-drainage hydroponic system	152
5. Development of an integrated nutrient management system based on stabilization of nutrient balance and minimization of fertilizer input in recycled soilless culture	186
6. Development of monitoring and control algorithms for the primary ions in the nutrient solution using the ion sensors	240
7. Development of multi function FDR sensor	267
Chapter IV. Achievement of Goal and Contribution	291
Chapter V. Outcomes of research and its application	293

Chapter VI. Comparison of related overseas technologies	295
Chapter VII. Representative record of a research	302
Chapter VIII. Reference	303

〈 목 차 〉

제 1 장 연구개발과제의 개요	
제 1 절 연구개발 목적	21
제 2 절 연구개발의 필요성	21
제 3 절 연구개발 범위	33
제 2 장 국내외 기술개발 현황	35
제 3 장 연구수행 내용 및 결과	
제 1 절 딸기 배액 극소화 시스템 실용화 기술 개발	41
제 2 절 파프리카 배액 극소화 시스템 실용화 기술 개발	85
제 3 절 토마토 배액 극소화 시스템 실용화 기술 개발	103
제 4 절 무배액 수경재배 통합 금액관리 자동화 시스템 확립	152
제 5 절 양분 균형 안정화 및 비료 투입량 최소화 기술에 기반한 순환식 수경재배 양액 통합관리 시스템 개발	186
제 6 절 이온 센서를 이용한 양액 내 주요 이온의 모니터링 및 제어 알고리즘의 개발	240
제 7 절 범용 다기능 FDR센서 개발	267
제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도	291
제 5 장 연구결과의 활용계획	293
제 6 장 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보	295
제 7 장 연구개발과제의 대표적 연구실적	302

제 8 장 참고문헌 303

<별첨> 자체평가의견서

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발 목적

- 배양액 재활용을 위한 순환식 수경재배 시스템 실용화 기술 개발
 - 순환식 수경재배에서 양액의 재사용에 따른 양분 균형 변화 안정화를 위한 실용화 기술 개발
 - 순환식 수경재배시스템에서의 비료 투입량 및 시스템 규모의 최소화를 위한 실용화 기술 개발
 - 양분과 수분의 통합적 관리가 가능한 순환식 수경재배 시스템 개발 및 상용화
 - 이온 센서를 이용한 주요 이온의 모니터링 및 제어 알고리즘의 개발 (위탁)
 - 순환식 수경재배 시스템 실용화 및 실증

- 배액 극소화(무배액) 수경재배 시스템 실용화 기술 개발
 - 딸기 배액 극소화(무배액) 시스템 실용화 기술 개발 (서울시립대)
 - 토마토 배액 극소화(무배액) 시스템 실용화 기술 개발(방통대)
 - 딸기 무배액 수경재배 급액관리 기술 개발 (서울시립대)
 - 토마토와 장미 생육 단계별 무배액 급액 관리 기술 체계 확립 (서울시립대, 방통대)
 - 배액 극소화를 위한 토마토 급액 관리 통합 시스템 개발 (서울시립대, 방통대)
 - 무배액 유기배지 수경재배 적정 근권환경 조절 기술 개발 (서울시립대, 방통대)
 - 근권의 수분, EC, pH 및 온도의 실시간 계측이 가능한 범용의 FDR센서 개발 (미래센서)
 - 무배액 수경재배 시스템 실용화 및 실증 (국립원예특작과학원, 서울시립대, 방통대)

제 2 절 연구개발의 필요성

- 시설원에 산업 현황
 - 국제 사회 개방화에 따른 FTA에 대응하기 위한 시설원에 산업의 경쟁력은 자동화 · 기계화 · 정보화 및 기술력을 바탕으로 규모화 · 단지화 조성으로 농업 인프라를 구축하여 국제 경쟁력 확보를 위한 R&D 증대에 기여할 필요가 있음.
 - 규모화 · 단지화에 따른 관리비 절감 : 시설, 운영, 에너지, 자재비 등

- 안정적 계획적 대량 생산에 따른 유통 경쟁력 향상 : 선별, 포장, 물류, 선적, 브랜드 가치 등
 - 농업 인프라 구축으로 농촌 일자리 창출과 국가 가치 향상 : 과채류 · 화훼류 수출 증대
- 고품질 안정 · 안전 생산 기술을 확보하여 시설원에 경쟁력을 강화하고 수출 산업으로 발전시켜야 함.
- 복합환경 조절기술, 수경재배기술, 연중생산 작형 수립
 - 수출작물의 수경재배 비율 : 파프리카 95%, 토마토 80%, 딸기 10%, 장미 70% 이상 차지
 - 수경재배 효과 : 생산성 향상, 안정생산, 고품질 안전생산, 비료 절감, 환경친화형 재배
 - 국내 시설원예면적(채소+화훼) 51,829ha에서 수경재배 면적은 채소 2,413ha, 화훼 1,072ha 로서 전체가 3,485ha로 급증하고 있는 상태임.

▶ 국내 수경재배면적(ha) : ('90)8.2→('96) 274→('00)700 →('06)917→('11) 3,485

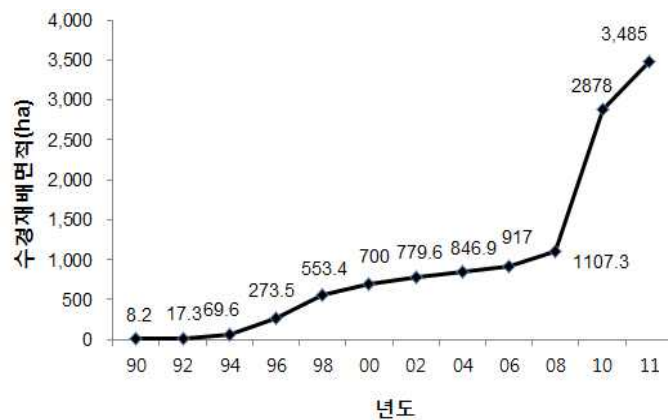


그림 1-2-1. 한국의 수경재배 면적 변화 (MIFFAF, 2012)

- 시설 원예 구성원인 농업 인구의 지속적인 감소와 농업 인구의 고령화는 시설의 현대화와 자동화가 요구됨(그림 2).



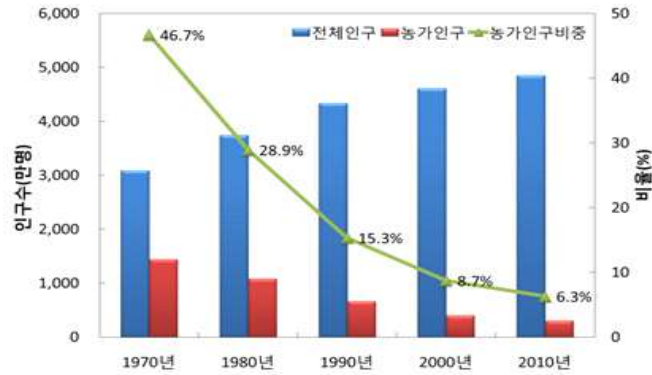


그림 1-2-2. 농가 인구 비중과 고령 인구의 증가 추이

○ 시설원예 농가 현황

○ 국내 시설 원예 면적은 51,829ha('10년)으로 이 중 채소 시설 면적은 48,835ha로 94%을 차지함.

- 94년 정부의 시설시범단지사업으로 시설원예 면적이 급격히 증가함에 따라 온실 사용연수가 15년 이상된 면적이 80% 이상을 차지(그림 3)하여 시설의 노후화가 문제로 대두됨.
- 작물별 온실 유형은 채소의 경우 단동비닐하우스 비율이 88.6%(46,031ha)이며, 화훼도 비닐하우스 비율이 90.2%임으로 볼 때 시설 원예 면적은 0.5ha 미만이 대부분을 차지함(그림 4).
- 한편 수출 과채류 첨단원예온실은 이미 규모화(2ha 이상)가 진행되고 있어 시설원예 농가 호당 경지 면적은 양극화 현상이 심화되고 있음.

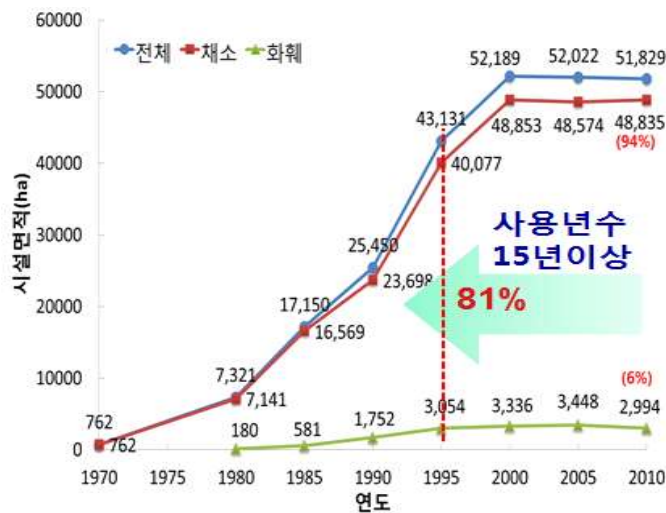


그림 1-2-3. 시설원예 면적의 변화 (MIFFAF,2012)

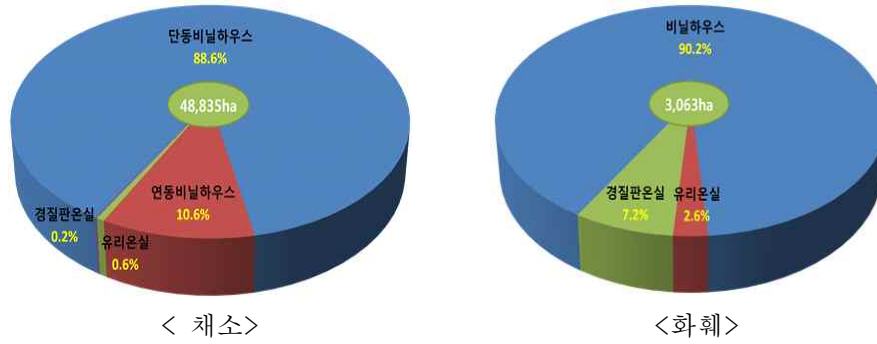


그림 1-2-4. 작물별 온실 유형(MIFFAF, 2012)

○ 현재 수경재배 농가 대부분(95% 이상)은 비순환식 시스템으로 배출되는 양액의 잔여 비료 성분으로 인한 환경오염 및 비료의 불필요한 과다 사용과 같은 문제점을 안고 있음.

▶ 비순환식 수경재배에 따른 연간 환경부하량 (300일 재배, 30% 방출시 추정) :

방출량 - 물 6,000톤/ha, 질소 10톤/ha, 인 1톤/ha, 탄소 배출량 3,285톤/ha

- 네덜란드의 경우 순환식 수경재배 시스템을 법제화(1994)하여 정부 규제를 시행(2004년)하고 있어 배양액 재활용에 필요한 분석시스템, 폐양액 관리 기술, 배액 소독 장치 등의 기술개발과 함께 실용화에 집중적인 투자를 하고 있음.

▶ 순환식 수경재배 비율 : 네덜란드 60%, 일본 25%, 한국 5% 미만

○ 수경재배 급배액 관리 기술

○ 국내 수경재배에서 고품질 생산물의 다수확은 최적의 재배 환경과 식물의 양수분 관리 기술이 선행되어야 함. 그러나 식물의 양수분 요구도를 완벽하게 알지 못하기 때문에 일중 시간대별, 일사량 별, 식물 개개의 흡수 편차 등을 고려하여 부족할 수 있는 양수분의 양을 방지하기 위해 급액량을 많게 유지 하는 약 20~50% 배액이 되도록 관리하는 현실.

○ 급액 관리는 급액량, 급액횟수, 시간대, 급액 속도 등에 따라 달라지므로 배지 내 양수분을 균일하게 관리할 수 있도록 하고 있으나, 대규모 온실은 제외하고는 타이머에 의한 제어기가 주로 이루어지고 있음.

○ 수경재배에서 배지 수분 환경 관리법을 위한 급액자동화 기술은 기상환경에 의한 관리법(시간 제어, 일사량, 증산량), 식물 수분흡수량에 의한 관리법(수액 센서), 배지 수분 측정 의한 관리법(배지 수분량, 배지 수분장력), 배액 측정에 의한 관리법(배액 중량, 배액 수위) 등이 있음.



그림 1-2-5. 배지의 함수량을 측정하는 다양한 방법들
(좌로부터 중량법, 배액전극센서, 배지수분센서)

- 급액관리 시스템은 투자비와 운영비가 적으면서, 관리 유지의 편리성, 정확성 등이 요구됨에 따라 현행 국내의 수경재배에서 수분 관리는 거의가 시간 제어 방식, 또는 일사량과 시간 제어를 겸한 관리 방식을 채택하고 있음.
- 순환식 수경 방식은 배양액의 지속적인 분석을 통한 처방, 수매전염성 병해 등의 정기적인 모니터링 등이 해결되는 않고서는 재배 위험 부담이 크기 때문에 현재 국내 시설 현황에서는 필요성에도 불구하고 시도되지 못한 실정임.
- 배지의 수분 함량을 측정하는 방법으로는 크게 중량 수분함량과 용적 수분함량으로 나눌 수 있다. 그러나 실시간으로 수분 변화량을 살펴보는 것은 채취의 어려움으로 쉽지 않기 때문에 이를 해결하기 위해 포장에서 토양 수분 함량을 직접 측정하는 다양한 센서를 개발하여 이용하고 있다. 최근 온실 내 토양이나 인공배지의 수분계측 및 제어에 이용할 수 있는 센서 계측 방식으로는 TDR(time domain reflectometry) 방식과 FDR(Frequency domain reflectometry)방식이 있으며, 대부분이 토양 수분을 측정하기 위한 센서로 개발된 것임.
- 배지경 재배에 급배액 관리 방법들은 궁극적으로 배지의 적정함수량을 유지하려고 하나, 이를 최적 수준으로 조절하지 못하고 있는 실정이기에, 가장 바람직한 것은 배지 내 함수량을 작물 생육 단계, 생육 상태(영양생장, 생식생장)에 맞게 적절하게 관리하는 기술 체계화가 필요함.
- 수경재배용 배지 이용 실태
 - 현재 수경재배용 배지로 개발 이용되고 있는 배지로는 농업용 암면(이용범, 금강암면, 1988), 입상암면과 펄라이트(이용범, 1989, 1991), 펄라이트+입상암면 혼합배지(이용범, 1994), 펄라이트+훈탄(원예연구소, 1993), 팽연왕겨(강원농진, 2003), 코코넛 코이어(이용범, 2006) 등이 개발되어 왔으며, 코코넛 코이어를 중심으로 한 유기배지가 40%, 암면과 펄

라이트가 60%(08년, MIFFA)로 사용되고 있음.

- 2011년 시설채소에서 수경재배 면적 중 배지 재배 면적에서 코코넛 코이어를 비롯한 유기배지가 46% 이며, 화훼작물에서는 56%를 차지하고 있음.

표 1-2-1. 배지별 주요 재배 작물

배지 종류	주요 재배 작물
필라이트 재배	토마토, 오이, 딸기, 장미 등
암면 재배	파프리카, 토마토, 장미 등
코이어 재배	파프리카, 토마토, 딸기, 장미 등
기타 재배(피트모스, 훈탄, 왕겨, 톱밥 등)	과채류, 화훼작물

- 최근 국내 수경재배용 배지는 암면 배지 중심에서 가격, 재활용 등을 고려한 코코넛 코이어와 같은 유기 배지 비중이 급속히 높아지고 있음.
 - 암면 배지는 판매 회사가 마켓 컨설팅과 병행하여 재배의 양수분 조절 기술을 정립하여 상용화 되었으며, 배지의 함수량 계측기 또한 암면 배지 특성에 맞게 배지 함수량을 정밀 제어할 수 있음. 그러나 암면용 센서는 수입에 의존하고 있으며, 가격 또한 국내 FDR 센서에 비해 4배 이상 비싸 재배 농가에서 구입을 꺼려하고 있음.
 - 유기 배지용 함수량 계측기는 본 연구 책임자가 지난 3년간 무배액 수경재배 기술 개발(2011~2013)에 참여한 (주)미래센서와의 공동 연구 결과로 국내 시판 중에 있다. 그러나 배지경 수경재배에서는 암면 재배 면적이 아직도 높은 비율(약 60% 내외 잠정 추정)을 차지하고 있어 유기 배지 함수량과 함께 암면에서도 측정이 가능한 범용의 센서 개발이 필요한 실정임.

○ 순환식 수경재배 시스템

- 순환식 수경재배 시스템은 이온 센서와 같은 분석 장치의 적용을 통해 직접적인 실시간 양액 분석을 통한 양분 제어 연구가 오랜 기간 수행되어 왔으나 이온센서 자체의 기기적인 한계로 인해 기술의 상용화 관점에서 아직 연구단계에 있어 이온 센서만을 기반으로 한 시스템은 기술적 보급성 측면에서 해결 과제가 많이 남아있음.
- 현재 순환식 수경재배가 활성화된 네덜란드의 시스템은 대부분 전기전도도(EC) 측정을 기반으로 하는 양액 혼합 시스템을 적용하고 있으며, 국내 소수의 농가에도 해당 기술이 적용된 사례가 있음.
- 하지만 상용화된 EC 측정 기반 순환식 수경재배 시스템의 경우 동적으로 변화하는 외부

환경에 따라 조절되는 관수량에 비해 고정된 비율로 배액을 이용하는 구조이며, 이는 배액 저장탱크 내 미사용된 배액의 누적 현상을 발생시키게 되며, 이에 따른 시스템의 자원 이용 효율의 감소를 최소화 하기 위해 배액저장 시설의 대형화를 수반하게 됨.

- 본 연구팀은 최근 기존 상용 기술의 시스템 효율 문제를 개선하기 위해 배액전량 이용형 재사용 양액 혼합 시스템의 자동화 기술을 개발하였으며, 동시에 EC 기준 순환식 수경재배 조건에서의 양분 균형 변화에 따른 영향을 최소화하기 위해 적정 분석 주기 규명을 위한 실험을 수행하고 이에 대한 실증 연구를 수행하였음.
- 기존 상용 기술은 배액 저장시설이 약 100t/ha의 규모를 필요로 하는 반면, 본 기술은 1회 관수량의 약 2배 정도인 (약 8t/ha, 파프리카 재배기준)의 규모만을 필요로 하기 때문에 소형화가 가능하며 보급성 측면에서 더 유리하고 배액을 전량 이용하기 때문에 시스템의 자원 이용 효율이 향상할 수 있는 효과가 있음.
- 또한 양액 살균에 일반적으로 이용되는 UV 조사에 따른 Fe-EDTA의 광산화로 인한 손실 분을 보충하기 위해 Fe-EDTA 농축양액을 별도로 두고 철의 과량 투입을 최소화하여 농도 제어를 할 수 있도록 구성됨.
- 기술의 고도화 및 상업화를 위한 추가 연구 필요사항(순환식 수경재배 시스템)
 - 배액전량 이용형 순환식 수경재배 시스템은 현재 이론적으로는 자원 이용 효율이 가장 우수한 방식이지만, 본 방식도 추가 연구를 통한 기술 보완 및 고도화로 시스템의 자원 이용 효율을 극대화 시킬 수 있는 기술 개발 및 보완 요소가 존재함.

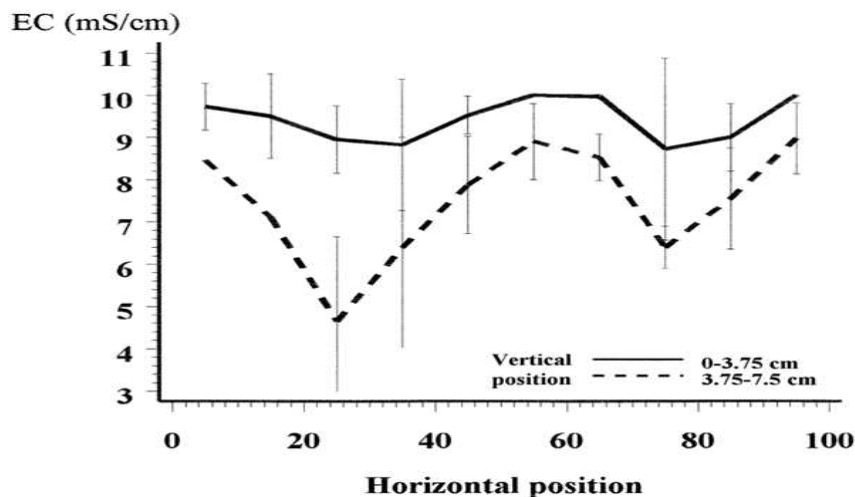


그림 1-2-6. 전기전도도로 표현된 암면 배지 내에서의 총 이온농도 분포 (Rijck, 1997)

- 수경재배에서 사용하는 인공배지의 양수분 이동 특성 상 배지 내 양분 농도의 분포가 균일하지 않으며, 위치별로 농도 차가 발생함(그림 6).
- 본 현상으로 인해 순환식 수경재배 시스템 내에서 총양분의 투입량을 결정할 때 실제

총양분의 흡수량과 오차가 발생하게 되며(그림 7), 이러한 오차의 반복으로 인해 양분의 누적 공급량과 실제 양분의 누적 흡수량과의 차이가 점점 증가하게 됨.

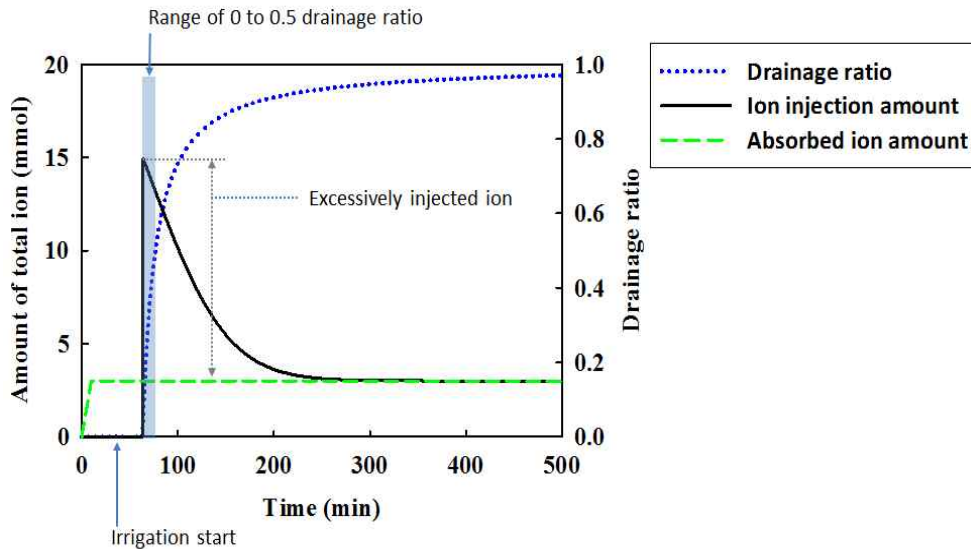


그림 1-2-7. 순환식 수경재배에서 배액물에 따른 양분 투입량(검은색 실선)과 실제 양분 흡수량(연두색 점선) 비교(손과 안, 2012)

- 순환식 수경재배 시스템 내에서 인공배지로 인해 발생하는 투입량과 흡수량과의 차이는 정상상태제어 오차로 볼 수 있으며, 이를 최소화 할 수 있는 기술을 개발할 경우 배액 전량 이용형 순환식 수경재배 시스템의 자원 이용 효율의 극대화가 가능.
- 또한 상기한 바와 같은 오차 현상으로 인해 배액 전량 이용형 순환식 수경재배 시스템 내 증가된 양분의 총량은 사용자가 관수량을 변경 시 배액 탱크 내 일시적인 누적 현상이 발생할 수 있으며, 이로 인한 배액 누출을 방지하기 위해 배액탱크에 일정 수준의 완충 용량을 반영하여 설계할 필요가 있음.
- 하지만, 본 연구 개발을 통해 오차 현상을 최소화 할 수 있을 경우 배액 탱크의 규모도 1회 관수량의 수준으로 소형화가 가능해짐.
- 주기적인 양분 분석을 통한 순환식 수경재배 시스템 내 양분 균형의 조정 또한 식물의 양분 흡수속도상수를 고려한 교정 방식을 개발할 경우 시스템 내에서 양분 균형의 안정화를 이룰 것으로 기대됨.
- 더불어, 현재 이온센서의 기술로는 모든 이온을 대상으로 한 on-line 측정이 어렵지만, 현장 적용 가능성이 높은 일부 이온에 대한 센서의 내구성이나 신호표류(drift) 등과 같은 기술적인 한계를 보완하는 연구를 수행하고 이를 순환식 수경재배 시스템의 특징 이온 모니터링과 양분 균형유지에 대한 위험 판단 도구로써 적용한다면 시스템의 상업

- 적 안정성을 한층 끌어 올릴 수 있을 것으로 기대됨.
- 상기한 바와 같은 기술들을 실현하기 위해서는 순환식 수경재배 시스템 배지 내의 총 양분의 양을 추정하는 기술의 개발이 선결되어야 하며 본 연구팀은 해당 내용에 대한 고찰을 바탕으로 개발의 가능성을 관련학회에 보고한 바 있음(손과 안, 2012).
 - 본 연구팀은 순환식 수경재배 기술의 보급에 가장 큰 제약 중의 하나로 보급성을 갖춘 안정적인 기술의 부재로 판단하고 이를 기본적인 가치로 하여 연구를 수행해왔으며, 기존 연구를 통해 확보한 기술에서의 보완을 통한 경쟁력을 갖춘 상용화 기술의 개발이 필요함.
 - 따라서 본 기술들을 개발하여 상용화 할 경우 국내 농가의 자원 이용 효율 향상에 따른 경쟁력 제고와 더불어, 상업화시에는 증가 추세에 있는 시설원에 관한 국제 기술 시장에서 차별성을 부여할 수 있을 것으로 기대됨.
- 기술의 고도화 및 상업화를 위한 추가 연구 필요사항(무기 이온 측정 기술)
- 최근 들어 양액 내 질산, 칼륨, 칼슘 등 주영양분을 동시에 측정하는 이온선택성 전극 개발연구가 진행되고 있어, 개별 이온제어를 기반으로 하는 양액 자동 제어시스템의 개발을 위한 관련 센서를 적용할 수 있는 토대가 마련되었음.
 - 양액 내 개별이온 농도 측정을 위하여 이온선택성 전극을 사용하게 되면 반응성이 빠르고 크기가 작아 다수의 전극을 어레이 형태로 설치하여 양액의 농도 변화를 실시간으로 관찰이 가능함.
 - 하지만 실제 재배 시스템의 여러 가지 재배 조건에 적용하기 위해선 센서의 신호표류(drift)와 온도에 따른 신호 변화 등을 보정해야 할 필요가 있으며 전극의 내구성을 높이기 위한 현장 적용형 전극기술이 필요함.
- 과채류 생산은 시설원예와 수경재배의 기술적 발전에 힘입어 생산성이 지속적으로 향상되었고 이는 국내 생산농가의 수익 증대에 기여하였다. 그러나 시설원예의 선진 기술 보유국인 네덜란드에서 1990년대 중반을 넘어서면서 연간 생산성이 증가하는 속도가 감소 추세가 보고된 바 있으며, 그 원인 중 하나로 기술 향상 기회의 감소로 알려져 있다(Kuipers, 2005).
- 이는 기술 투입에 따른 수확량 증가가 둔화된 수확체감(diminishing returns) 현상으로도 볼 수 있다. 현 상황에서 농가의 경쟁력 향상을 위해서는 재배 기술의 개선과 동시에 현 시스템의 효율 개선이 필요하다.
- 과채류 시설원예 및 수경재배 시스템에서 많이 재배되고 있는 파프리카 농가의 경우, 경영비 구성 항목 중 최상위에 해당하는 광열 동력비의 다음으로 비료가 10%를 차지하고 있으며 지출 비율은 점점 증가하고 있다(그림 1-2-8).



(단위: 천원), (기준: 년 1기작/10a)

구분	연도		증감률(%)
	2008	2011	
종묘비	2,199	2,048	-7
비료비	1,897	2,185	15
농약비	750	518	-31
광열동력비	8,418	10,931	30
고용노력비	2,143	2,341	9
제재료비	4,044	3,899	-4
계	19,451	21,922	13

파프리카 농가 경영비 비율 (2011년)

파프리카 농가 경영비 증감

그림 1-2-8. 파프리카 농가 경영비 비율 및 증감 항목(농촌진흥청 농축산물 표준소득; 2008, 2011)


- 이는 비료 소비량을 감소시켜 재배 시스템의 효율을 향상 시킬 경우 농가의 경쟁력 향상으로 이어 질 수 있음을 시사하며, 현재까지 이를 달성할 수 있는 이상적인 재배 시스템은 순환식 수경재배 시스템이다.
- 현재 상용화 되어 적용 가능한 순환식 수경재배 기술은 EC 측정을 기반으로 하고 있으나, 기술의 특성상 비교적 큰 규모의 시설 도입을 요구하고, 때때로 시스템의 저장 용량 초과로 인한 배액의 강제 방류를 필요로 한다.
- 또한 현 시스템에서의 양분의 균형 제어는 주기적인 분석 및 교정을 통해 이뤄지고 있으나, 분석 주기는 작물의 생육과 분석주기 간의 정량적인 관계에 대한 연구가 미비하여, 비교적 짧은 기간에서 이뤄지는 경향을 보이고 있다.
- 따라서 기존의 기술은 시스템의 자원 이용효율 및 관리 방법에 있어서 개선의 여지가 있으며, 이 두 가지 측면에서 기술의 안정화가 필요한 상황으로 볼 수 있다.
- 순환식 수경재배를 법적으로 의무화 하여 높은 적용 비율을 나타내는 네덜란드에서도 상기와 같은 기술적 개선의 필요를 인지하여 최근 복합환경제어시스템과 순환식 수경재배 방식의 결합을 통하여 ‘고품질-안정 생산’이 가능한 재배시스템의 개발을 수행한 바 있다. 이는 정부가 주도하고 산학연이 공동 수행하는 Hydrion-line’이라는 프로젝트이며 실시간 양분 농도 측정 기술을 기반으로 완전히 폐쇄적인 양수분 순환’과 동시에 재배작물의 품질과 생산량을 최대화하는 것을 목적으로 하고 있다. 그러나 이온측정 기반 기술은 아직 실제 상용화 수준의 재배에 이용하기에는 극복해야할 이온농도 측정기술 자체의 한계가 존재한다(Bratov 등, 2010; Gieling 등, 2005).
- 국내에서 순환식 수경재배 기술을 적용하는 농가의 비율이 낮은 원인 중의 하나로 기반

기술의 조성 미흡이 지적된 바 있다(남, 2004). 따라서, 국내 과채류 수출 농가의 순환식 수경재배 방식의 보급 및 안정적인 적용을 위해서는 보급성과 양수분 이용 효율이 우수한 순환식 수경재배 시스템의 개발이 필요하다.

○ 무배액 수경재배 급액 관리를 계측용 센서 기술

- 식물이 흡수하는 수분의 대부분은 증산에 이용되고 있으며, 이는 재배 환경 중 일사량, 온도, 습도 등과 밀접한 관계를 갖고 있어 작물의 급액관리 또한 배지의 함수량에 영향을 줄 수 있다.
- 무배액 수경재배 급액 관리는 작물이 증산과 성장할 수 있는 재배 환경 조건에서 배지의 함수량을 적정한 상태로 유지시킴으로써 작물이 요구하는 수분 부족이 발생하지 않으면서도 배액의 극소화를 통해 환경 친화적 재배가 가능한 기술이라 할 수 있다.
- 이를 위해서는 근권의 함수량을 계측하는 정밀한 센서가 필요함을 인식하고 (주)미래센서와 공동 연구를 통해 유기배지용(chip 함량 50%이내) 센서를 개발하였음.
- 유기배지는 원산지, 제조사에 따라 조성 비율이 달라지고, 농가에서는 근권 수분 조절을 위해 배액이 잘 이루어지는 유기 배지를 선호하고 있는 실정임. 배액이 잘 이루어지는 chip 함량이 높은 유기 배지는 근권의 공극이 높은 반면 수분은 배지 하층에 있으므로 배지의 함수량을 측정하기 위한 범용 FDR 센서 개발과 센서의 길이가 배지 하층까지 도달하는 센서 구조를 개선할 필요가 있음.
- 수분함량을 측정하는 FDR 센서는 근권 수분함량을 고주파(1MHz~90MHz)를 이용하여 측정회로 내에 걸리는 주파수의 세기 변화를 정정용량(electric capacity)변화값을 전압차로 읽는 원리로서 근권 함수량 뿐 아니라, 온도 및 배지의 EC(electrical conductivity)의 실시간 계측이 가능하여 수경재배에서 유용한 계측기로 활용이 가능하므로 보다 정밀한 근권의 전기전도도를 측정할 수 있도록 개발이 필요하다.
- 수경재배에서 급액 관리는 배지의 EC 뿐 아니라 pH가 작물의 필수 영양소의 흡수에 큰 영향을 주므로 배액의 pH와 EC를 측정, 기록하여 급액 관리를 하고 있음.
- 따라서 본 연구에서는 기존의 FDR 센서에서 계측되는 배지 함수량, EC 및 온도 외에 배지의 pH를 계측할 수 있는 센서를 개발함으로써 농가에서 보다 편리하게 급액관리에 적용하고자 함.
- 본 연구팀이 국내에서 개발한 FDR 센서는 유기배지에 적합한 것으로 압면 배지를 사용하는 농가에도 확대 보급할 수 있게 범용의 다기능 센서 개발을 목표로 함.

표 1-2-2. 수경재배에서 사용되는 배지 수분 센서의 특징

	암면용	유기배지용
센서방식	FDR (Frequency Domain Reflectometry)	FDR (Frequency Domain Reflectometry)
형태	배지 내 삽입하는 탐침형태	탐침형태
제품	암면배지용 센서(그로단)	코코피트용 센서 (미래센서)
		
구성	휴대용 수분EC지온센서	휴대용 수분EC지온센서
가격	2,300,000원	500,000 원

○ 무배액 수경재배 기술

- 최근 본 연구팀(2010~2012)은 유기 배지 함수량 조절과 관수자동화에 FDR센서를 활용한 정밀 제어 기술로 배액이 발생되지 않는 무배액 수경재배 가능성(이용범 등, 2012; 세계 최초)을 찾았으며, 이는 국내 시설원예 규모가 작은 국내농가에서는 활용 가능성이 매우 높으리라 판단하고 있음.
 - 순환식 수경재배로 전환하기 위해서는 초기 투자 비용 뿐 아니라 배양액 관리 기술, 병 발생, 생육 저하 등을 해결해야 함.
 - 특히 국내 시설원예에서 소규모 농가가 대부분임으로 고려할 때 순환식 수경재배로 전환하기에는 계속되는 농자재 상승 등, 농가의 경영 부담이 높아지고 있어 규모화 된 농가를 제외하고는 순환식 수경재배로의 전환을 위해서는 시간이 소요될 것으로 보임.
- 한편 현재 세계 최초로 개발한 무배액 수경재배를 농가에 실용화하기 위해서는 배지의 함수량을 정밀 제어할 수 있는 현행 개발한 센서의 보완과 함께 작물 생육과 수량 극대화를 위한 함수량 조절 재배 기술 보완이 필요함.
 - 무배액 유기배지 수경재배 기술 체계화를 위해 현재 개발한 FDR센서는 유기배지인 코코넛 코이어의 칩 함량이 50%이하에서는 함수량 조절과 제어가 가능하나, 칩 함량이 증가되는 경우는 함수량 제어 정밀도가 떨어짐을 확인함.
 - 따라서 국내 시설 원예 실정을 고려하여 순환식 수경재배 전환을 위한 단계로써 우선 국내 소규모 농가를 중심으로 한 배액 극소화 수경재배 시스템 실용화 기술 개발은 반드시 필요함.
 - 이는 환경 친화적 재배 기술로서 정부 정책에도 부합될 뿐 아니라 시설원예 성장을 위한 기반 기술 확립과 국제 경쟁력을 갖추는 초석이 될 것이라 판단됨.

제 3 절 연구개발 범위

- 양분 균형 안정화 및 비료 투입량 최소화 기술에 기반한 순환식 수경재배 양액 통합 관리시스템 실용화 기술 개발 (서울대학교)
 - 순환식 수경재배에서 양액의 재사용에 따른 양분 균형 변화 안정화를 위한 양분 조정 기술 개발
 - 순환식 수경재배시스템 내 비료 투입량 최소화를 위한 재사용 양액 혼합 기술 개발
 - 재사용 양액 내 양분 간 균형 안정화를 위한 양분 조정 기술 개발
 - UV 살균 시스템 적용 시 Fe-EDTA의 농도 제어 안정화 기술 개발
 - 순환식 수경재배 소형화 시스템 및 양분 균형 안정화 기술 현장 적용
 - 재사용 양액 혼합 알고리즘을 탑재한 순환식 수경재배 소형화 시스템 구축
 - 순환식 수경재배 소형화 시스템의 파프리카 재배 적용 및 분석
 - 양분과 수분의 통합적인 관리가 가능한 순환식 수경재배 시스템의 개발 및 상용화
 - 순환식 수경재배 시스템의 효율적 양수분 통합관리를 위한 UI 작성
 - 현장 적용을 통한 양수분의 제어 성능 및 재배 적용성 검증
- 이온 선택성 전극(ISE)을 사용한 주요 이온농도의 실시간 동시 측정 기술 및 효과적인 개별 이온 농도 관리 기술 구현 (서울대학교 - 위탁)
 - 센서 신호의 영향 인자 특성 규명: 양액내 K^+ , NO_3^- 측정의 정확도 확보를 전극의 신호표류(Drift) 및 온도 보정 연구
 - 현장 적용 및 내구성 확보 기술: 현장 적용 목적의 전극 내구성 향상을 위한 전극 컨디셔닝 및 관리 방법 연구
 - 현장 적용 센서 모듈 개발
- 딸기 배액 극소화(무배액) 시스템 실용화 기술 개발(서울시립대학교)
 - 무배액 수경재배를 위한 함수량 조절 및 급액 농도 구명
 - 작물 균형 생장을 위한 무배액 수경재배에서의 적정 근권범위 설정
 - 무배액 수경재배에서 작물 생육 변화
 - 무배액 수경재배 실용화
- 토마토 배액 극소화(무배액) 시스템 실용화 기술 개발 (한국방송통신대학교)

- 작물 균형 성장과 근권 최적화를 위한 급액관리기술 보완
 - 유기배지 조성 비율에 따른 무배액 급액 관리 기술 보완
 - 작물 균형생장을 위한 무배액 수경재배에서의 적정근권범위 설정
 - 토마토 무배액 시스템 실용화
- 범용 다기능 FDR센서 개발 ((주)미래센서)
- 근권내 수분, EC, pH 및 온도의 실시간 계측 기술 개발 (현행 배지 함수량 측정 센서에서는 수분함량, EC, 온도 만 계측된 것에 비해 본 연구팀에서 배지내 pH 측정 센서 개발하고자 함)
 - 배지내 pH 센서를 계측하기 위해 센서의 구조 개선 (강화유리 제작하여 파손을 방지하고, 수분 흡수율을 높이고자 수분수포집구성)
 - 센서의 구조 개선 및 보완을 통한 배지의 함수량 정밀 계측 (유기배지의 조성에 따른 배지 내 공극, 함수량 분포가 달라지므로 기존 센서를 보완하는 구조 개선)
 - 유기 배지 뿐 아니라 암면 배지에서도 함수량 정확도를 높일 수 있는 범용 센서 개발
 - 개발 센서의 편리성 제공: 인터넷, 스마트폰과의 호환이 가능한 데이터베이스 구축 및 전송
- 무배액 수경재배 통합 급액관리 자동화 시스템 확립 (그린씨에스)
- 무배액 수경재배 급액 자동화 시스템 구현
 - 작물 균형 성장을 유도하는 무배액 수경재배 통합관리 자동화시스템 보완
 - 작물별(딸기,토마토) 무배액 수경재배 급액관리 자동화 시스템 확립
- 무배액 수경재배 기술의 농가 실증 및 실용화 (원예특작과학원, 서울시립대학교, 방통대학교)
- 파프리카 순환식 수경재배 기술의 실용화 및 보급(원예특작과학원, 서울대)
 - 딸기 무배액 수경재배 기술의 실용화 및 보급(서울시립대학교)
 - 토마토 무배액 수경재배 기술의 실용화 및 보급(방통대학교)

제 2 장 국내외 기술개발 현황

○수경재배 급배액 관리 기술

현재 시설채소의 전체 면적(2013년 기준)은 63,815ha이고 생산량은 2,714,519톤이며 이중 과채류는 46,693ha이고 그 생산량은 2,164,919톤이다. 과채류 재배 면적중 토마토 재배면적은 7,070ha이고 생산량은 49,960톤에이르고 있다(MAFRA, 2014). 시설재배 전체 면적63,815ha 중 양액재배면적은 2,981ha이고 그 중 고품배지경은 2,171ha, 순수수경은810ha의 면적이다.

현재 수경재배 농가 대부분(95% 이상)은 비순환식 시스템으로 배출되는 양액의 잔여 비료 성분으로 인한 환경오염 및 비료의 불필요한 과다 사용과 같은 문제점을 안고 있다. 비순환식 수경재배에 따른 연간 환경부하량 (300일 재배, 30% 방출시 추정) : 방출량 - 물 6,000톤/ha, 질소 10톤/ha, 인 1톤/ha, 탄소 배출량 3,285톤/ha 이다(Seo, 1999).

네덜란드의 경우 순환식 수경재배 시스템을 법제화(1994)하여 정부 규제를 시행(2004년)하고 있어 배양액 재활용에 필요한 분석시스템, 폐양액 관리 기술, 배액 소독 장치 등의 기술개발과 함께 실용화에 집중적인 투자를 하고 있다. 순환식 수경재배 비율 : 네덜란드 60%, 일본 25%, 한국 5% 미만이다.

국내 수경재배에서 고품질 생산물의 다수확은 최적의 재배 환경과 식물의 양수분 관리 기술이 선행되어야 한다. 그러나 식물의 양수분 요구도를 완벽하게 알지 못하기 때문에 일중 시간대별, 일사량 별, 식물 개개의 흡수 편차 등을 고려하여 부족할 수 있는 양수분의 양을 방지하기 위해 급액량을 많게 유지 하는 약 20~50% 배액이 되도록 관리하는 현실이다.

급액 관리는 급액량, 급액횟수, 시간대, 급액 속도 등에 따라 달라지므로 배지 내 양수분을 균일하게 관리할 수 있도록 하고 있으나, 대규모 온실은 제외하고는 타이머에 의한 제어가 주로 이루어지고 있다.

수경재배에서 배지 수분 환경 관리법을 위한 급액자동화 기술은 기상환경에 의한 관리법(시간 제어, 일사량, 증산량), 식물 수분흡수량에 의한 관리법(수액 센서), 배지 수분 측정 의한 관리법(배지 수분량, 배지 수분장력), 배액 측정에 의한 관리법(배액 중량, 배액 수위) 등이 있다.

배지의 수분 함량을 측정하는 방법으로는 크게 중량 수분함량과 용적 수분함량으로 나눌 수 있다. 그러나 실시간으로 수분 변화량을 살펴보는 것은 채취의 어려움으로 쉽지 않기 때문에 이를 해결하기 위해 포장에서 토양 수분 함량을 직접 측정하는 다양한 센서를 개발하여 이용하고 있다. 최근 온실 내 토양이나 인공배지의 수분계측 및 제어에 이용할 수 있는 센서 계측 방식으로는 TDR(time domain reflectometry) 방식과 FDR(Frequency domain reflectometry)방식이 있으며(Jaria 등, 2013), 대부분이 토양 수분을 측정하기 위한 센서로 개발된 것이다. 최근 센서 간 간격과 측정위치 및 보정방법(Kim, 2014; Park 등, 2011a; 2011b; 2014), 적정 근권 수

분제어 범위 구명(Park, 2015), 급액 개시시기와 종료 시기, 배양액 관리(Yoo, 2014) 등이 연구되어 왔다. FDR 센서를 활용하여 실험한 작물은 토마토(Choi 등, 2013a; 2013b; 2014,2015), 파프리카(Yoo 등, 2014), 절화장미(Park, 2015; Farina 등, 2007) 등이 있다.

배지경 재배에 급배액 관리 방법들은 궁극적으로 배지의 적정함수량을 유지하려고 하나, 이를 최적 수준으로 조절하지 못하고 있는 실정이기때문에, 가장 바람직한 것은 배지 내 함수량을 작물 생육 단계, 생육 상태(영양생장, 생식생장)에 맞게 적절하게 관리하는 기술체계화가 필요하다.

○ 수경재배용 배지 이용 실태

현재 수경재배용 배지로 개발 이용되고 있는 배지로는 농업용 암면(이용범, 금강암면. 1988), 입상암면과 펄라이트(이용범. 1989, 1991), 펄라이트+입상암면 혼합배지(이용범, 1994), 펄라이트+훈탄(원예연구소, 1993), 팽연왕겨(강원농진, 2003), 코코넛 코이어(이용범, 2006) 등이 개발되어 왔으며, 코코넛 코이어를 중심으로 한 유기배지가 40%, 암면과 펄라이트가 60%(MIFFA, 2008)로 사용되고 있다.

2011년 시설채소에서 수경재배 면적 중 배지 재배 면적에서 코코넛 코이어를 비롯한 유기배지가 46%이며, 화훼작물에서는 56%를 차지하고 있다. 최근 국내 수경재배용 배지는 암면 배지 중심에서 가격, 재활용 등을 고려한 코코넛 코이어와 같은 유기 배지 비중이 급속히 높아지고 있다. 암면 배지는 판매 회사가 마켓 컨설팅과 병행하여 재배의 양수분 조절 기술을 정립하여 상용화 되었으며, 배지의 함수량 계측기 또한 암면 배지 특성에 맞게 배지 함수량을 정밀 제어할 수 있음. 그러나 암면용 센서는 수입에 의존하고 있으며, 가격 또한 국내 FDR 센서에 비해 4배 이상 비싸 재배 농가에서 구입을 꺼려하고 있다. 유기 배지용 함수량 계측기는 본 연구 책임자가 지난 3년간 무배액 수경재배 기술 개발(2011~2013)에 참여한 (주)미래센서와의 공동연구 결과로 국내 시판 중에 있다. 그러나 배지경 수경재배에서는 암면 재배 면적이 아직도 높은 비율(약 60% 내외 잠정 추정)을 차지하고 있어 유기 배지 함수량과 함께 암면에서도 측정이 가능한 범용의 센서 개발이 필요한 실정이다.

○ 무배액 수경재배 급액 관리를 계측용 센서 기술

식물이 흡수하는 수분의 대부분은 증산에 이용되고 있으며, 이는 재배 환경 중 일사량, 온도, 습도 등과 밀접한 관계를 갖고 있어 작물의 급액관리 또한 배지의 함수량에 영향을 줄 수 있다. 무배액 수경재배 급액 관리는 작물이 증산과 성장할 수 있는 재배 환경 조건에서 배지의 함수량을 적정한 상태로 유지시킴으로써 작물이 요구하는 수분 부족이 발생하지 않으면서도 배액의 극소화를 통해 환경 친화적 재배가 가능한 기술이라 할 수 있다.

이를 위해서는 근권의 함수량을 계측하는 정밀한 센서가 필요함을 인식하고 (주)미래센서와 공

동 연구를 통해 유기배지용(chip 함량 50%이내) 센서를 개발하였다. 유기배지는 원산지, 제조사에 따라 조성 비율이 달라지고, 농가에서는 근권 수분 조절을 위해 배액이 잘 이루어지는 유기 배지를 선호하고 있는 실정임. 배액이 잘 이루어지는 chip 함량이 높은 유기 배지는 근권의 공극이 높은 반면 수분은 배지 하층에 있으므로 배지의 함수량을 측정하기 위한 범용 FDR 센서 개발과 센서의 길이가 배지 하층까지 도달하는 센서 구조를 개선할 필요가 있다. 수분함량을 측정하는 FDR 센서는 근권 수분함량을 고주파(1Mhz~90Mhz)를 이용하여 측정회로 내에 걸리는 주파수의 세기 변화를 정정용량(electric capacity)변화값을 전압차로 읽는 원리로서 근권 함수량 뿐 아니라, 온도 및 배지의 EC(electrical conductivity)의 실시간 측정이 가능하여 수경재배에서 유용한 측정기로 활용이 가능하므로 보다 정밀한 근권의 전기전도도를 측정할 수 있도록 개발이 필요하다.

수경재배에서 급액 관리는 배지의 EC 뿐 아니라 pH가 작물의 필수 영양소의 흡수에 큰 영향을 주므로 배액의 pH와 EC를 측정, 기록하여 급액 관리를 하고 있다.

○ 무배액 수경재배 기술

유기 배지 함수량 조절과 관수자동화에 FDR센서를 활용한 정밀 제어 기술로 배액이 발생되지 않는 무배액 수경재배 가능성(이용범 등, 2012)을 찾았으며, 이는 국내 시설원예 규모가 작은 국내농가에서는 활용 가능성이 매우 높으리라 판단하고 있다.- 순환식 수경재배로 전환하기 위해서는 초기 투자 비용 뿐 아니라 배양액 관리 기술, 병 발생, 생육 저하 등을 해결해야 한다.- 특히 국내 시설원예에서 소규모 농가가 대부분임으로 고려할 때 순환식 수경재배로 전환하기에는 계속되는 농자재 상승 등, 농가의 경영 부담이 높아지고 있어 규모화 된 농가를 제외하고는 순환식 수경재배로의 전환을 위해서는 시간이 소요될 것으로 보인다.

무배액 과채류 수경재배에서 비료값이 기존 대비 1/4로 감소되어 비료 절감효과가 인정되고, 현재 세계 최초로 개발한 무배액 수경재배를 농가에 실용화하기 위해서는 배지의 함수량을 정밀 제어할 수 있는 현행 개발한 센서의 보완과 함께 작물 생육과 수량 극대화를 위한 함수량 조절 재배 기술 보완이 필요하다.

무배액 유기배지 수경재배 기술 체계화를 위해 현재 개발한 FDR센서는 유기배지인 코코넛 코이어의 칩 함량이 50%이하에서는 함수량 조절과 제어가 가능하나, 칩 함량이 증가되는 경우는 함수량 제어 정밀도가 떨어짐을 확인하였다. 배지의 안정적인 근권의 함수량을 유지하기 위해서 다점 센서 방식을 적용하여 급액하는 통합관리 시스템 확립이 필요하다. 따라서 국내 시설 원예 실정을 고려하여 순환식 수경재배 전환을 위한 단계로써 우선 국내 소규모 농가를 중심으로 한 배액 극소화 수경재배 시스템 실용화 기술 개발은 반드시 필요하다.

이는 환경 친화적 재배 기술로서 정부 정책에도 부합될 뿐 아니라 시설원예 성장을 위한 기

반 기술 확립과 국제 경쟁력을 갖추는 초석이 될 것이라 판단된다. 특히 시설원예에서 고부가 원예 작물인 파프리카, 토마토, 딸기는 목본류인 장미에 비해 상대적으로 비료 소모량과 수분 요구도가 높아 농가의 급액 대비 배액율이 30~50%로 관리하였을 때 환경 부하량이 높아지므로 원예 작물을 대상으로 한 집약 연구로 무배액 수경재배 기술 확립이 필요하다.

○ EC 기반 순환식 수경재배 시스템 분야

순환식 수경재배 분야에서 선진 기술 보유국에 해당하는 네덜란드는 1994년 ‘discharge decree glasshouse horticulture’라는 법령을 제정하여 순환식 수경재배 시스템을 의무적으로 적용하도록 하였으며, 이에 따른 저항을 최소화하기 위해서 네덜란드 정부는 순환식 수경재배에 대한 연구를 지원하였다(Van Os, 1999). 따라서 관련 기술들에 대한 많은 연구가 이루어져 있는 상황이며, 가장 기술집약적인 접근으로는 온실 내 환경, 이온센서 들과 작물모델이 통합된 완전폐쇄형 순환식 수경재배시스템 개발 프로젝트인 ‘Hydrion-line’ 프로젝트(2007)가 있다(그림 2-1). 그러나 이온 센서 단독으로는 기술적으로 연구단계에 있기 때문에(Bratov, 2010), 아직 상업 농가에서의 사용에는 제약이 있어 기술적인 대체로 나타나지는 않았다.

완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템을 구현하기 위해서는 양분 균형제어의 안정성이 필수적으로 요구되나 아직 이러한 기술 개발 사례는 보고된 바가 없다. 네덜란드에서는 상용 온실에서의 양분 유출의 완전한 제한에 대한 요구가 강해지고 있으나, 여러 제약들로 인해 양분의 유출을 완전히 제한하는 것의 목표 기한을 2027년으로 연장하였으며(Beerling, 2013), 이는 완전폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 보급 및 기술적인 안정화의 필요성을 동시에 나타내고 있다고 볼 수 있다.

본 연구 과제는 비순환식 수경재배의 양분 관리 방식에서 순환식 수경재배 시스템으로의 기술적인 전환을 이루기 위해서는 기술의 안정성과 용이성이 중요한 것으로 보고 이를 구현하는데 있어 가장 유력한 기술적인 플랫폼은 EC 측정을 기반으로 한 수경재배 시스템으로 판단하였다.

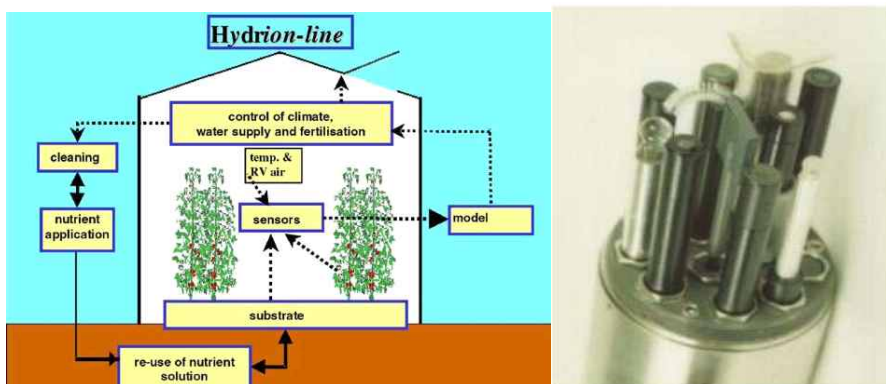


그림 2-1. Hydrion-line project의 개념도(좌)와 이온 센서(우)

EC 측정을 통한 반폐쇄형 순환식 수경재배 시스템이 상용화되어 있으나 이를 기반으로 하는 양분 제어 기술과 양분 투입기술은 아직 체계화 되어 있지 않으며 고정된 재사용 양액 혼합비를 적용하기 때문에 배액의 외부 방류가 발생하게 되며, 배액의 저장에 큰 용량이 요구되기 때문에 시스템의 규모가 증가하게 된다.

장차 국내외 완전폐쇄형 순환식 수경재배기술 시장의 현황은 비료값의 증가, 환경오염의 우려, 법적 규제 등과 같은 문제로 안정적인 기술에 대한 요구가 더욱 증가할 것으로 예상된다. 이러한 요구에 맞추어 농촌진흥청에서도 수경재배 방식의 도입 시 고려해야할 재배 기술 등에 대한 지원을 제공하고 있으나, 현재 국내의 순환식 수경재배는 잠재적으로 증가할 시장 규모에 비해 기술은 해외의 상황과 마찬가지로 안정화된 플랫폼을 갖추고 있지 않은 실정이다.

본 연구팀은 상기한 순환식 수경재배의 기술 현황을 고려하여, 기존 상용 기술 대비 보급성, 장치 이용의 용이성, 안정성 측면에서 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 모듈 및 알고리즘의 개발과 실증 연구를 통하여 기술의 상업적 안정화를 달성할 수 있도록 연구를 계획하고 수행해 왔다.

○ 이온센서 개발 분야

온실 내 순환식 양액 재배를 위하여 실시간 양분 흡수추적에 의한 자동 순환식 배액관리 시스템 용 이온 전극과 자동 제어기 개발에 관한 연구가 수행된 사례가 있으나 이온성분의 제어 성능 개선이 필요하여 실용화 기술 개발이 요구된다.

Turkey의 Yildiz Technical University의 Vardar 등(Vardar, G. et al. 2015)은 이온선택성전극 (Ion selective electrode, ISE)의 적용을 통해 오이와 토마토 수경재배에서 양액 내 NO_3 , K, Ca의 양분 흡수량을 생육주기별로 정량화하여 분석하였으며 이를 통해 수경재배가 토양재배와 비교하여 품질 저하는 줄이고 생산량을 증대시킬 수 있음을 보고하였다. 그러나 측정장비가 자동화되어 있지 않아 측정 때마다 전극을 교정하고 관리하는 작업을 요구하였으며 이는 실제 농가 적용에 있어서 접근성과 적용성이 떨어지는 문제가 있다.

개별적인 양분을 센싱하여 생육단계와 환경조건에 따라 자동적으로 양액과 배액의 농도를 조절하는 순환식 양액관리 시스템 연구가 활발히 진행되고 있으며 네덜란드에서는 Priva, Hortimax 등의 회사에서 효율적인 양액관리와 물관리를 위한 온라인 모니터링 양액자동제어 시스템을 개발하여 농가에 보급하고 있는 상황이다.



그림 2-2. Hydrion사의 양액모니터링시스템(좌)와 Priva사의 양액혼입 및 관리시스템(우)

본 연구에서 개발된 자동 개별이온 측정 장치의 경우, 기존 개별이온에 대한 측정을 자동으로 수행할 수 있으며 측정된 값을 저장 및 외부로 통신망을 통해 전송이 가능한 시스템으로 Vardar 등(Vardar, G. et al. 2015)이 이용한 장비보다 발전된 형태라고 할 수 있으며 개발한 보정 및 관리 기술을 통해 전극을 100회 이상의 측정을 수행할 수 있도록 하여 적용성이 뛰어나 향후 농가 및 수경재배 기술 연구에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

제 3 장 연구수행 내용 및 결과

제 1 절 딸기 배액 극소화(무배액) 시스템 실용화 기술 개발

1. 딸기배지경에서 근권 함수량이 급액, 배액 및 생육에 미치는 영향

○ 연구방법

대구대학교에서 육묘된 ‘설향’을 분양(크라운 $\varnothing 10\sim 11\text{mm}$, 초장 $20\sim 22\text{cm}$)받아 2013년 11월 11일 정식하여 2014년 5월까지 서울시립대학교 양지봉 온실에서 수경 재배하였다. 온실 내 온도 조절은 덕트 방식이 도입된 냉난방기(Samsung DVM-S, Samsung)를 사용하여 최저 15°C , 최고 25°C 로 설정하여 온도 관리하였다. 재배 기간 중 온실 평균 온도는 $15\sim 20^{\circ}\text{C}$, 습도는 $50\sim 60\%$ 수준으로 유지되었다(그림 3-1-1).

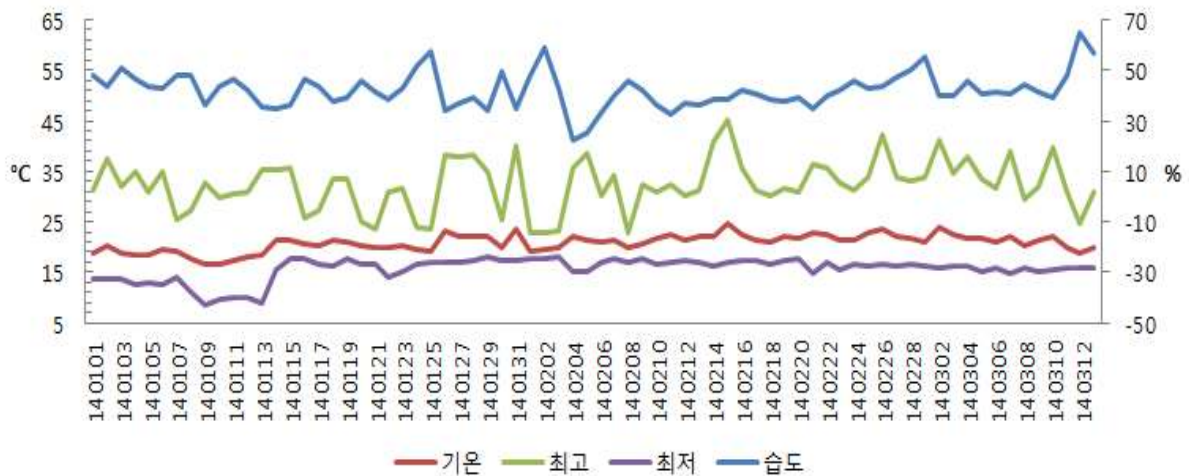


그림 3-1-1. 서울시립대학교 양지봉 온실 온 습도 (2014. 1. 1~ 3.12)

수경재배는 고설베드시스템으로 스티로폼 베드(31×102×21cm)에 코코넛 코이어 다층 배지를 조성하여 하층에는 100% Chip을 4cm 충전하고 상층부에는 혼합배지(dust:chip=7:3) 12cm로 충전하였으며 재식거리는 2수경재배용 양액 조성은 N7, P 2.1, K 4, Ca 3, Mg 1.5 $\text{me} \cdot \text{L}^{-1}$ 와 미량원소($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$: Fe 15.0, B 3.5, Mn 5.8, Zn 3.5, Cu 0.45, Mo 0.5)로 하여 조성한 후 공급 배양액의 전기전도도(EC)는 $1.2\sim 1.4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 으로 급액하였다.

배지 수분함량 제어를 위해 사용한 수분 센서는 FDR 수분센서(WT1000N, 미래센서, 한국)로 보죽한 probe(길이 9cm)를 배지에 45° 로 찌러 넣어서 배지 함수량 제어 수준범위에서 수분

함량이 부족하면 공급될 수 있도록 제어 시스템을 장착하였다. 대조구로는 타이머를 이용하여 주당 200 ~ 300ml를 5~6회로 나누어 공급하여 비교하였다.

처리 기간 동안(2013년 11월 ~ 2014년 5월) 급액량, 배액량, 광합성(model Li-6400, Li-CO, Lincoln, Nebraska, USA)과 생육 및 과실 수량을 측정 분석하였다. 통계분석은 SAS package(statistical analysis system, version 9.1, SAS Institute Inc.)를 이용하여 Duncan's multiple range test(DMRT)를 실시하여 5% 유의수준에서 각 처리간 차이의 유의성을 검정하였다.



그림 3-1-2. FDR 센서를 이용한 딸기 고설 수경재배

[실험에 사용한 데이터로거 (상 우), FDR센서 장착(하 좌), 급액량과 배액량 측정 장치 (하 우)]

FDR 센서로 근권 함수량(제어 함수량 $\pm 2\%$)을 45%, 50%, 55%, 60%, 65%를 제어하거나 타이머 급액하여 딸기 수경재배하면서 급액량과 배액율, 광합성, 생육 및 수량을 조사한 결과는 다음과 같다.

그림 3-1-3은 딸기 고설수경재배에서 FDR센서를 이용한 급액제어 수준에 따른 수분 함량변화이다. 제어 함수율 범위에 배지 내 함수율은 도달하면서 일정한 패턴을 보였으며, 처리 함수량별로 적절한 배지내 함수량이 자동 제어되고 있는 것을 보여 주었다. Timer 급액 처리구의 배지 함수량은 47~58%의 수

분함량을 보였다.

그림 4는 하루 중 배지 내 수분함량과 EC 변화로 오전 중에 제어 함수량 수준까지 도달하여 조절이 되고 있으며 급액이 종료되는 오후 4시 이후에는 배지 함수량이 감소하였다. 급액이 시작되면서 배지내 함수량이 높은 낮 시간 동안 배지 내 EC는 감소하는 경향을 나타냈었다. 함수량 제어 처리구와 Timer 처리구의 배지 EC는 $1.0 \sim 1.2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 범위를 나타내었다.

근권내 전기전도도는 모든 처리구에서 $1.0 - 1.2\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 수준의 범위에서 제어되고 있는 것을 보여 주었다. 근권내 전기전도도의 일중 변화를 보면 오전에 급액이 되면서 부터 근권의 EC가 낮아지기 시작하여 $1.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 까지 낮아졌다가 오후 흡수가 증가되면서 점차 EC가 증가하기 시작하여 급액이 종료된 이후 오후 6-8시 사이에 최고 수준에 도달된 이후 야간 식물의 흡수에 따른 근권 EC가 서서히 낮아지는 현상을 공통적으로 보여주었다.

그림 5는 딸기 고설재배 기간 동안 FDR 수분 센서와 타이머로 배양액을 공급했을 때의 급액량과 배액율을 측정 한 결과이다. FDR 센서 제어에 의한 주당 하루 평균 급액량은 $164 \sim 250\text{ml}$ 이며, Timer 처리구 경우 $225 \sim 300 \text{ ml}$ 로 $27 \sim 30\%$ 급액량이 감소되었다.

측정기간 중 FDR수분 제어 처리구의 급액량은 일사량 변화에 따라 급액량이 달라져 이는 기상 환경, 작물 증산, 생육 상태 등에 영향을 받을 수 있다. 즉, 배지내 함수량을 45-55%까지 제어를 할때 배액률 또한 0~5%내외로 거의 무배액 수준으로 감소되는 것으로 나타났다. 배지의 함수량 제어 방법은 기존의 타이머 제어에 비해 작물 생육에 보다 효과적으로 반응하는 것으로 나타났다.

표 1은 근권형성 이후 9화방 수확되는 시점에 처리별 광합성 결과로, 수분제어 65%에서 가장 높은 수치를 보였으며, Timer 처리는 55~60% 처리군과 유사한 결과값을 나타내었다. 기공 전도도와 증산율에서도 65% 처리에서 가장 높은 값을 나타내었다.

각 처리별 생육조사 보면, 60~65% 처리에서 가장 높은 결과를 보여주었으나 Timer 처리와 수분함량 제어구에서 비슷한 생육상태를 나타내었다(표 3-1-2). 주당 평균 수확량에서도 65%에서 가장 높은 수치를 보였으나 상품과 평균무게와 당도는 Timer처리구와 유사한 값을 나타냈다.

이번 연구 결과를 보면 딸기 고설수경재배에서 FDR 수분센서를 이용하여 근권의 수분을 제어하였을 때 기존 타이머 대비 배액률에서 30~35% 차이를 보였으며 배지내 전기전도도(EC) 값이 증가하지 않고 근권의 목표 수준 범위에 있었다. 또한 타이머 처리에 비해 FDR센서에 의한 함수량을 55%까지 수분 제어 처리구의 광합성, 생육 및 과실 수량에서 차이가 없었으며, 배액율은 0~8% 수준의 값을 나타냈다. 이는 FDR 수분 센서 제어에 의한 급액 공급 방식이 기상 환경을 고려하여 일일 공급량이 달라졌음에도(그림3-1-3) 근권의 EC변화에 영향을 주지 않으면서 생육 및 수량의 차이를 보이지 않는 효율적이며 친환경적인 방식(무배액 수경재배)임을

확인할 수 있었다.

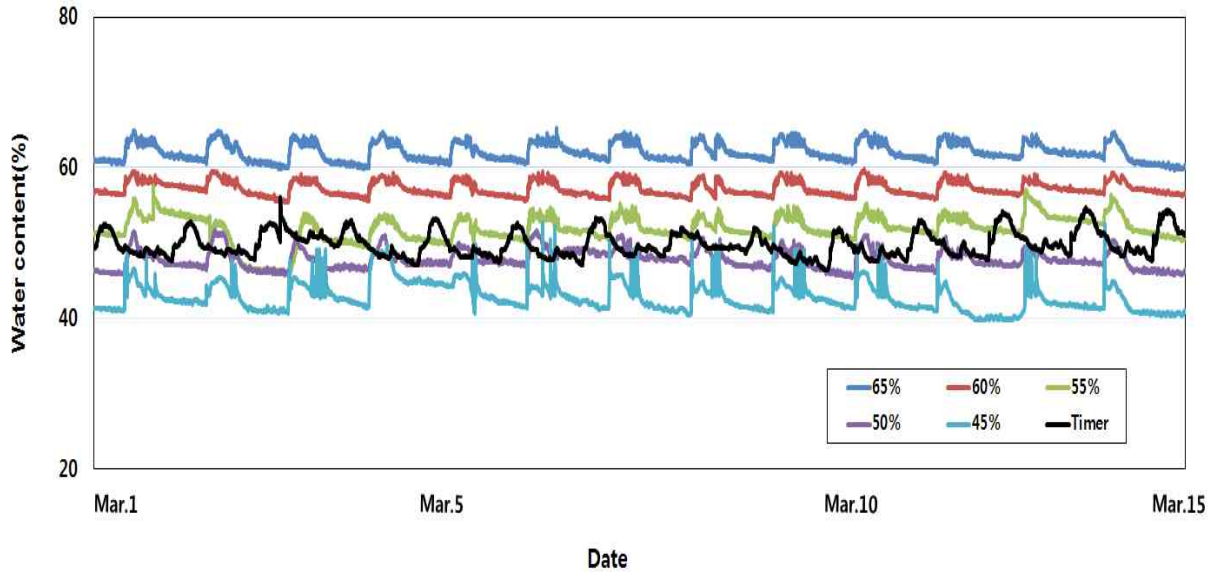


그림 3-1-3. 딸기 고설수경재배에서 FDR센서를 이용한 급액제어시 유기배지의 수분함량 변화.
(측정 기간 :2014.3.1.~3.7)

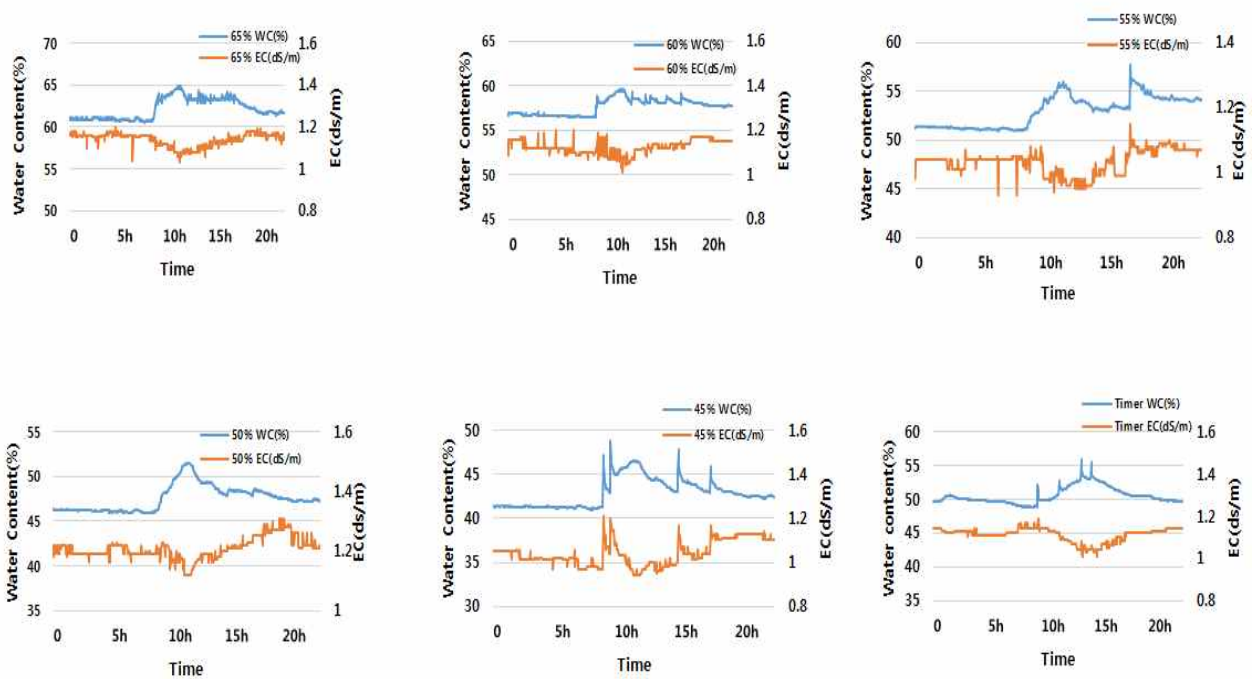


그림 3-1-4. 딸기 고설수경재배에서 FDR센서와 Timer를 이용한 급액제어시 배지 내 수분함량과 EC변화. (측정 일 : 2014.3.1. 최대 일사량 $650\sim700W\ m^{-2}$, 일평균 온도 $21^{\circ}C$)

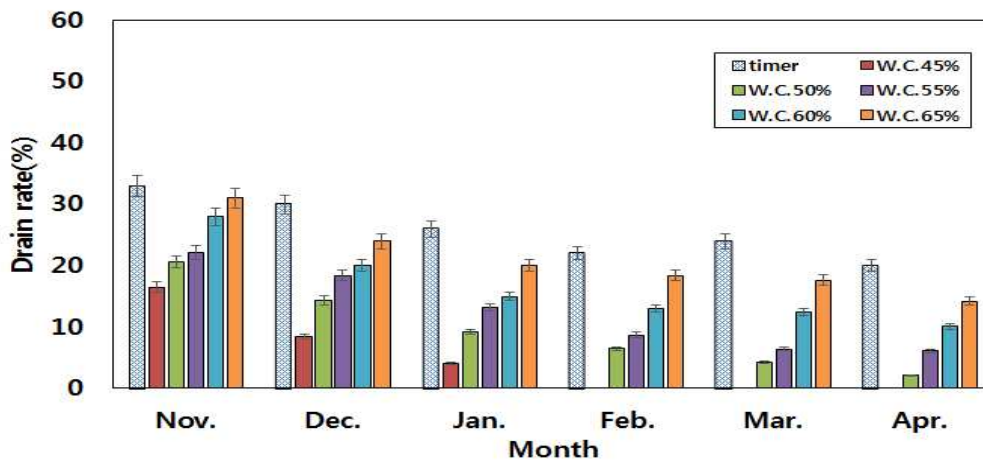
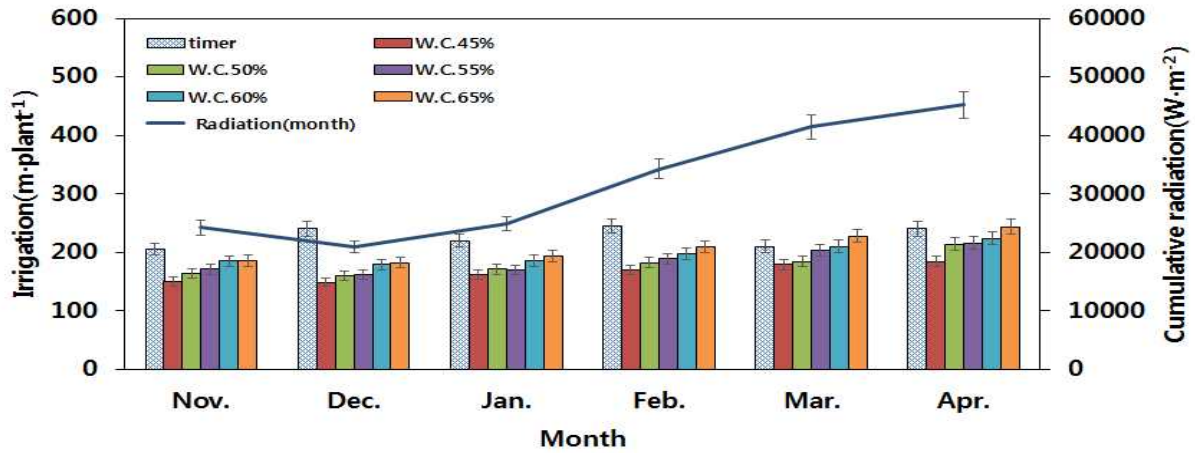


그림 3-1-5. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서와 타이머를 이용한 급액제어시 일평균 급액량(좌)과 배액율(우).

표 3-1-1. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급시 광합성, 기공전도도, 증산율에 미치는 영향

Treatments	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance ($\text{mol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Transporationrate ($\text{mmol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Timer	14.8 ab ^z	0.32 a	3.2 a
WC 45%	13.9 b	0.24 b	2.7 ab
WC 50%	14.1 b	0.28 ab	3.0 a
WC 55%	15.1 ab	0.36 a	3.0 a
WC 60%	15.2 ab	0.34 a	3.1 a
WC 65%	15.6 a	0.35 a	3.5 a

^zMean follow by different letters in the same columns are significantly different by Ducan's multiple range test($p < 0.05$)

표 3-1-2. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급에 의한 생육 비교 (2013.11-2014. 4).

Treatments	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Petiole length (cm)	Crown diameter (mm)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
Timer	10.1a ^z	19.2a	15.98a	19.8ab	21.07ab	1.7a
WC 45%	10.2a	18.7a	12.3ab	18.2b	20.65b	1.60ab
WC 50%	10.6a	18.8a	14.7a	21.3a	22.18ab	1.76a
WC 55%	9.6 a	19.4a	15.5a	21.2a	21.98ab	1.72a
WC 60%	10.5a	18.7a	15.3a	20.6a	23.17a	1.69a
WC 65%	10.1a	19.5a	16a	19.8ab	23.81a	1.65a

^zMean follow by different letters in the same columns are significantly different by Ducan's multiple range test(p<0.05)

표 3-1-3. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급에 의한 평균 과실무게, 상품과 수량, 비상품과 수량, 당도(2013.11-2014. 4).

Treatments	No. of marketable fruit	Average fruit weight(g)	Marketable yield (g/ plant/ week)	Non-marketable fruit rate (%)	Fruit sugar (°brix)
Timer	48a ^z	14.6a	18.6ab	8.1ab	9.5ab
WC 45%	46a	13.7ab	19.5a	9.1a	10.0a
WC 50%	48a	14.3a	20.4a	7.7ab	10.56a
WC 55%	42ab	14.1a	20.9a	7.2ab	9.6 ab
WC 60%	46a	15.1a	20.3a	9.8a	9.8 a
WC 65%	52a	14.5a	19.4a	9.1a	8.8ab

^zMean follow by different letters in the same columns are significantly different by Ducan's multiple range test(p<0.05)

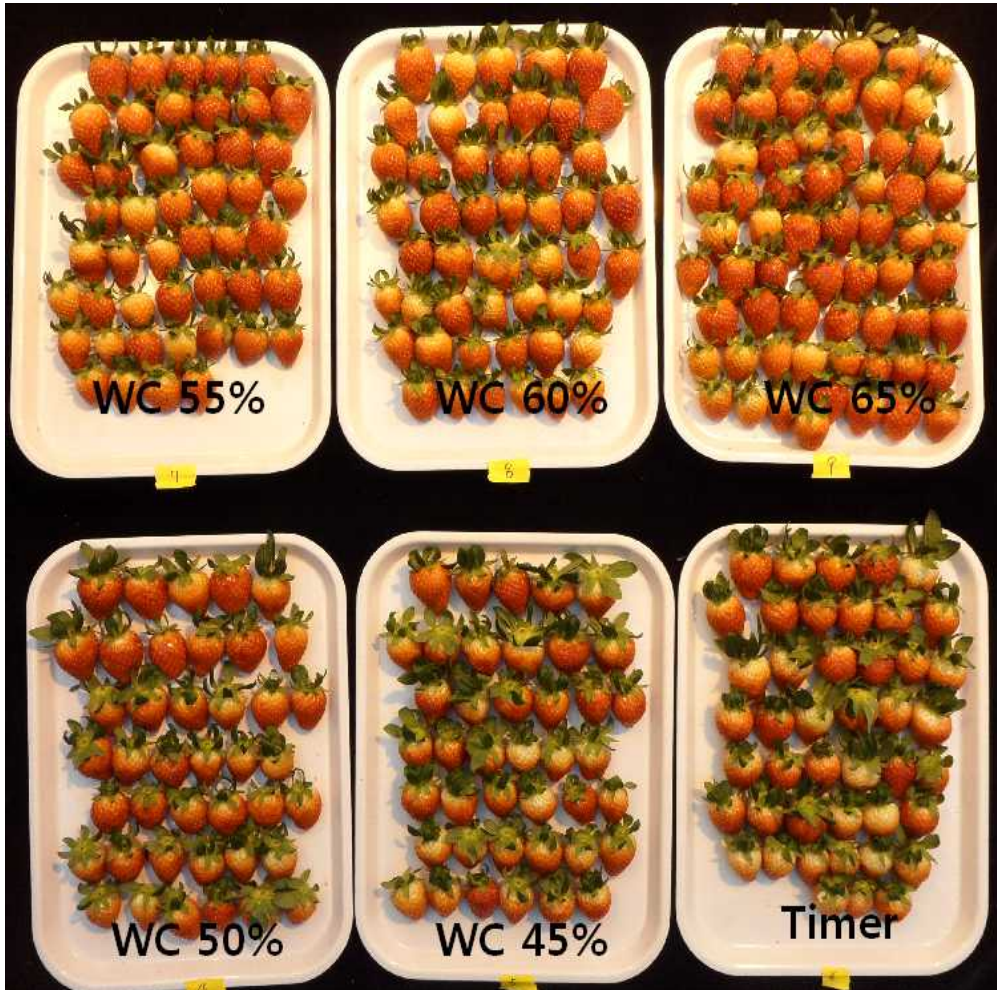


그림 3-1-6. 제어 함수량과 타이머 처리에서 수확된 딸기 (2014. 1. 15)

2. 딸기배지경에서 근권 함수량의 적정제어 범위가 급액, 배액 및 생육에 미치는 영향

딸기 고설 수경재배시 근권 함수량을 50%로 제어하였을 때 오차 범위 수준을 각각 $\pm 1\%$ (49~51%, 최고최소함수량차 2%), $\pm 2\%$ (48~52%, 최고최소 함수량차 4%), $\pm 3\%$ (47~53%, 최고최소함수량차 6%), $\pm 5\%$ (45~55%, 최고최소함수량차 10%)로 달리하여 근권 수분함량 범위에 따른 급액량, 배액율, 광합성, 작물 생육 및 수량을 조사한 결과는 다음과 같다.

딸기 고설수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동급액제어시 근권내 적정 수분함량 범위를 알아보기 위하여 6개월 동안 평균 일일 급배액량을 조사하였다(그림 3-1-7). FDR 센서 제어에 의한 주당 하루 평균 급액량은 158~ 203ml이며, Timer 처리구 경우 225~ 300 ml로 28~ 30% 급액량이 감소되었다. 일사량 증가에 따라 급액량도 서서히 증가하는 것으로 측정되었다. 수분 함량 제어구의 배액율 중 $50 \pm 1\%$, $50 \pm 2\%$ 처리구에서 10% 이하의 가장 낮은 배액율을 보였고 타이머 경우 30% 내의 배액율로 약 6배 정도 차가 나타났다.

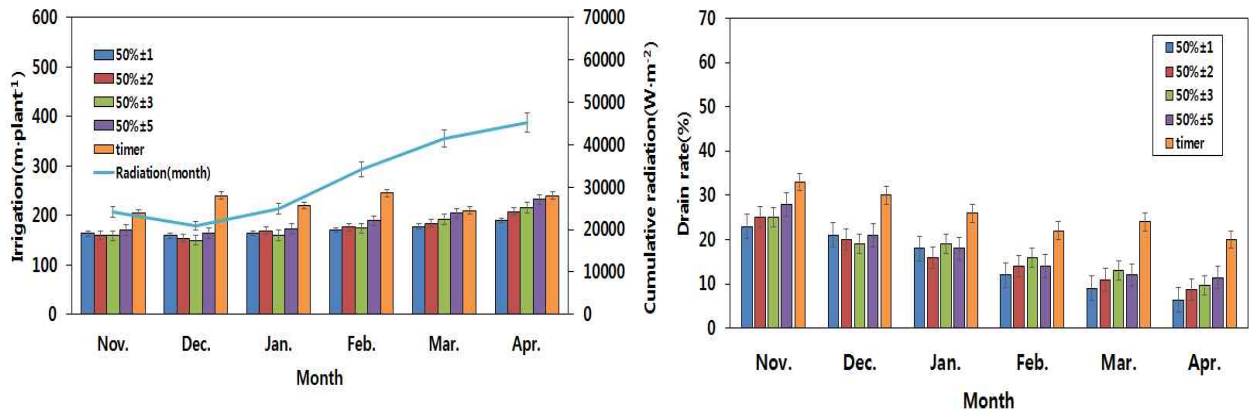


그림 3-1-7. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급시 근권 수분함량 범위에 의한 하루동안의 주당 급액량(좌)과 배액율(우).

표 3-1-4는 근권형성 이후 9화방 수확되는 시점에 처리별 광합성 결과로, 수분함량 50±2% 처리구에서 광합성을, 기공전도도, 증산율 모두 가장 높은 수치를 보였다. 대조구 Timer 처리는 50±2% 처리구와 통계적으로 유의한 결과 값을 나타내었다. 각 처리별 생육조사 보면, 50±5% 처리에서 가장 높은 생체중과 건물중을 나타냈으며 Timer 처리구와 통계적으로 유사한 생육상태를 보였다(표 3-1-5). 주당 평균 수확량과 상품과 수량 등 과실 수량에서 Timer 처리구와 수분함량 제어구 간 유의차는 없었다. 다만, 이번 처리 중 50±2%가 다른 처리에 비해 상대적으로 광합성, 생육 및 과실에서 권장할만한 측정값을 나타내었다.

이번 실험은 딸기 고설수경재배에서 FDR 수분 센서를 이용한 자동급액시 적정 근권 수분함량 범위를 구명하기 위하여 대조구인 Timer 처리구와 50±1 ±2 ±3 ±5 처리구를 설정하였다. 50±1% 처리구에서 가장 낮은 일일 평균 급액량과 배액율 나타냈으며, 배액율에서 Timer 처리구는 약 30%로 수분함량 제어구보다 4~6배 높은 배액율을 보였다.

표 3-1-4. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급시 근권 수분함량 범위가 광합성, 기공전도도, 증산율에 미치는 영향 (2013.11-2014. 4.22).

Treatments	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance ($\text{mol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Timer	14.8 ab ²	0.3 a	3.2 a
50±1%	15.62a	0.37a	2.31c
50±2%	16.09a	0.4a	3.07 a
50±3%	13.2b	0.38a	2.33bc
50±5%	13.8b	0.26b	2.87ab

²Mean follow by different letters in the same columns are significantly different by Duncan's multiple range test(p<0.05)

표 3-1-5. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급시 근권 수분함량 범위가 생육에 미치는 영향 (2013.11-2014. 4).

Treatments	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Petiole length (cm)	Crown diameter (mm)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
Timer	10.1a ^z	19.2a	15.98a	19.8ab	21.07a	1.7a
50±1%	10.4a	16.1b	17.4ab	20.5a	19.65b	1.52ab
50±2%	10.45a	17.1ab	17a	21.7a	21.3a	1.73a
50±3%	10.96 a	19.4a	18.82a	21.2a	20.4ab	1.73a
50±5%	10.5a	19.5a	17a	20.6a	21.5a	1.76a

^zMean follow by different letters in the same columns are significantly different by Ducan's multiple range test(p<0.05)

표 3-1-6. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급시 근권 수분함량 범위가 상품과 수량, 평균 과실무게, 비상품과 수량, 당도에 미치는 영향 (2013.11-2014. 4).

Treatments	No. of marketable fruit	Average fruit weight(g)	Marketable		Fruit sugar (°brix)
			yield (g/ plant/ week)	Non-marketable fruit rate(%)	
Timer	48a ^z	14.6a	18.6a	8.1ab	9.8a
50±1%	44a	13.7ab	19.1a	9.1a	9.8a
50±2%	48a	14.3a	19.4a	7.7ab	10.7a
50±3%	43a	14.1a	19.9a	7.2ab	10.6a
50±5%	46a	15.1a	19.3a	9.8a	10.6a

^zMean follow by different letters in the same columns are significantly different by Ducan's multiple range test(p<0.05)

3. 딸기배지경에서 배지조성(chip함량)이 급액, 배액 및 생육에 미치는 영향

유기 배지 조성 중 chip 비율을 각각 0%, 10%, 30%, 50% 첨가하고 dust를 충전하거나, 시판 중인 (주)Shinsung 한아름 상토2호와 (주)BVB BC2 딸기 전용상토를 충전한 베드에서 FDR 센서로 근권 함수량 50±2%로 제어하였을 때 작물 생육에 미치는 영향을 알아보려고 실험한 결과는 다음과 같다.

코이어 배지 내 칩 함량이 증가할수록 급액량과 배액율은 증가하여 칩 50% 배지(dust:chip=50:50%)에서 가장 높았다(그림 3-1-8). chip 50% 배지에서 11월과 12월 배액율은 각각 53.7%, 49.3% 였으나, 1월 이후 배액율은 30% 이하로 감소하였다. dust 100% 배지에서는 1월 평균 배액율이 12%였으며, 2월 이후 무배액이었다. 시판되는 배지에서도 11월과 12월 배액율은 31~38%에서 1월 이후 배액율이 감소하였다.

배지 내 칩 함량에 따른 딸기 생육은 엽폭을 제외한 엽장, 엽병장, 관부직경, 생체중은 chip 30~50% 함유된 배지와 시판 신선미네랄의 혼합 배지에서 높았으며, 시판 BC2 배지는 생육이 낮았다(표 3-1-7). 광합성은 칩 10~50% 함유된 배지와 시판 혼합배지 신성제품에서 높았다(표 3-1-8). 수확과수와 상품수량은 dust 100%, 칩 10~30%, 시판용 신성 배지에서 높았으며, 평균 과중은 배지 종류간 차이가 없었다(표 3-1-9). 시판배지 BC2 배지는 상품수량은 낮고 비상품 과율이 높아 생육과 수량이 낮았다. 이는 배지 조성이 가는 입자의 피트모스이지만 배지가 뭉쳐있어 배액율은 높으면서 함유량 50%로 제어 공급됨에 따라 초기 생육 저하가 재배 기간 중에 영향을 준 것으로 보인다.

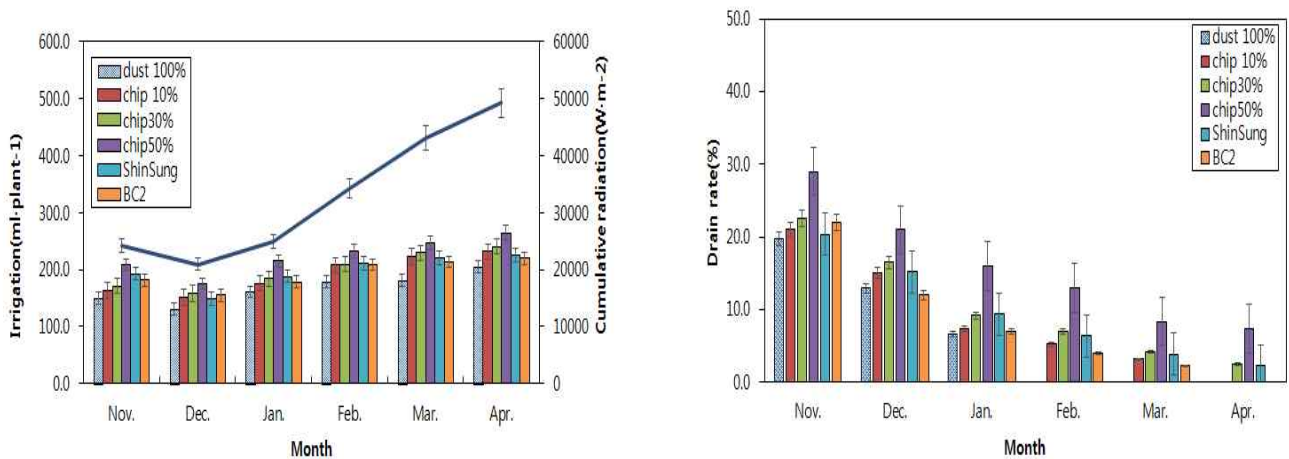


그림 3-1-8. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급시 배지 조성별 하루동안의 주당 급액량(좌)과 배액율(우).

표 3-1-7. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급시 근권 수분함량 범위가 생육에 미치는 영향 (2013.11-2014. 4).

Treatments	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Petiole length (cm)	Crown diameter (mm)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
dust100%	8.7a ^z	17.9a	14.68a	17.8ab	19.87ab	1.55ab
chip10%	8.2a	18.2a	13.3ab	17.2ab	20.65ab	1.60ab
chip30%	9.6a	18.4a	14.9a	18.7a	21.18a	1.73a
chip50%	9.0a	17.8a	14.5a	18.3a	21.98a	1.70a
Shinsung	8.9a	18.5a	14.3a	19.1a	21.98a	1.74a
BVB BC2	7.6ab	17.4a	12.8ab	15.4b	18.81b	1.45b

^zMean follow by different letters in the same columns are significantly different by Duncan's multiple range test(p<0.05)

표 3-1-8. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급시 근권 수분함량 범위가 광합성, 기공전도도, 증산율에 미치는 영향(2013.11-2014. 4.22).

Substrates	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance ($\text{mol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
dust100%	13.2 b ^z	0.2 a	2.0 b
chip10%	14.4 ab	0.3 a	2.8 a
chip30%	14.7 a	0.4 a	3.1 a
chip50%	14.7 a	0.4 a	3.5 a
Shinsung	15.6 a	0.4 a	3.7 a
BVB BC2	13.2 b	0.1 a	2.1 b

^zMean follow by different letters in the same columns are significantly different by Duncan's multiple range test(p<0.05)

표 3-1-9. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급시 근권 수분함량 범위가 상품과 수량, 평균 과실무게, 비상품과 수량, 당도에 미치는 영향 (2013.11-2014. 4).

Substrates	No. of marketable fruit/ 10weeks	Average fruit weight(g)	Marketable yield(g/plant/week)	Non-marketable fruit rate(%)
dust100%	42a	14.6a	17.6ab	8.1ab
chip10%	47a	13.7a	19.5a	9.1ab
chip30%	48a	14.1a	20.9a	8.2ab
chip50%	38ab	14.6a	18.1a	9.3ab
Shinsung	46a	13.6a	20.6a	9.7ab
BVB BC2	28b	13.1a	15.8b	12a

²Mean follow by different letters in the same columns are significantly different by Ducan's multiple range test(p<0.05)

4. 딸기배지경에서 FDR센서를 이용한 자동급액 제어시 배양액 급액농도가 급액, 배액 및 생육에 미치는 영향

근권의 수분함량을 $50 \pm 3\%$ 로 제어하면서 공급 배양액의 농도(EC)를 각각 0.8, 1.2, 1.6 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 의 수준으로 하였을 때 작물 생육과 급액량, 배액율에 미치는 영향을 조사하였다. 대조구로는 타이머에 의한 급액으로 주당 200 ~ 300ml를 5~6회로 나누어 공급하고, 공급 배양액의 전기전도도는 $1.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 였다.

딸기 고설수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동급액 제어시 전기전도도(EC) 차에 따라 생육과 배액율 그리고 과실 수량에 미치는 영향을 분석하기 위해 실험을 하였다. 전기전도도 농도에 따른 하루 동안의 월별 주당 급액량과 배액율은 그림 3-1-9와 같다. 2013년 11월에서 2014년 4월까지 측정된 누적일사량을 보면 12월을 기점으로 일사량이 증가하였는데 그에 따라 처리에 관계없이 급액양도 증가하였다. Timer 처리 경우 가장 많은 급액량과 배액율을 나타냈으며 그 외 EC처리구에서는 대체로 비슷한 수치를 나타내었다. 그 중 EC1.2~1.6 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 에서 5% 내외의 배액율을 보였으며 EC가 높아질수록 배액율이 감소하는 경향을 보였다.

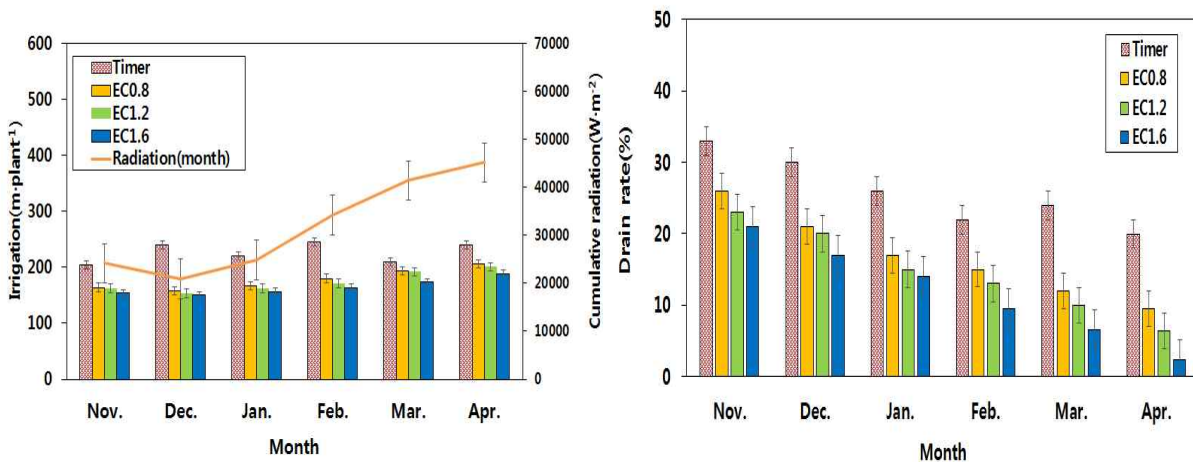


그림 3-1-9. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급시 전기전도도(EC) 농도 별 하루 동안의 주당 급액량(좌)과 배액율(우).

표 3-1-10은 근권 형성 이후 9화방 수확 시점에 측정된 결과로, 관행구인 Timer와 EC1.2 처리에서 광합성률이 가장 높았으며 기공전도도와 증산율에서는 EC 1.2처리가 가장 높았다.

FDR센서를 이용한 EC 처리와 Timer 공급간 생육은 EC1.6처리에서 가장 낮은 수치를 보

였으며 EC1.2 처리구에서 생체중과 건물중이 가장 높게 측정되었다. 대체로 EC처리구와 Timer처리에서 비슷한 생육상태를 나타내었다(표 3-1-11). 평균 과실무게에서는 Timer처리가 가장 높았으나 상품과 수량에서는 EC1.2처리가 가장 높게 나타났다(표 3-1-12).

위의 실험결과 딸기 고설수경재배에서 FDR센서를 이용하여 근권의 수분을 제어했을 때 관행구인 Timer의 배액율에 비해 25~40% 가량 감소하였으며 광합성, 생육, 과실 수량에 유의차는 없었다. 다만, EC 조건에서 보았을 때 EC 1.2 처리의 경우, 다른 처리에 비해 광합성, 생육, 과실수량에서 조금 더 양호한 결과를 보였다.

표 3-1-10. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급시 전기전도도(EC) 농도가 광합성, 기공전도도, 증산율에 미치는 영향(2013.11-2014. 4.22).

Treatments	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance ($\text{mol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Timer	14.8 a ^z	0.3 a	3.2 a
EC 0.8	13.6 b	0.3 a	3.1 a
EC 1.2	14.6 a	0.4 a	3.6a
EC 1.6	13.9 a	0.3 a	2.8 b

^zMean follow by different letters in the same columns are significantly different by Ducan's multiple range test(p<0.05)

표 3-1-11. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급시 전기전도도(EC) 농도에 따른 생육 비교(2013.11-2014. 4.22).

Treatments	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Petiole length (cm)	Crown diameter (mm)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
Timer	10a ^z	17.5a	14.1a	18.1a	22.6a	7.5ab
EC 0.8	10.9a	18.8a	15.1a	19.3a	23.5a	7.3ab
EC 1.2	10.4a	18.5a	14.6a	19.4a	23.9a	8.1a
EC 1.6	10.2a	17.6a	15.1a	16.2b	17.8b	7.0b

^zMean follow by different letters in the same columns are significantly different by Ducan's multiple range test(p<0.05)

표 3-1-12. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급시 전기전도도(EC) 농도에 따른 평균 과실무게, 상품과 수량, 비상품과 수량, 당도(2013.11-2014. 4.22).

Treatments	Average fruit weight(g)	Marketable yield (g/plant/week)	Non-marketable fruit rate(%)	Fruit sugar (°brix)
Timer	14.6a ²	17.6ab	8.1b	10.7ab
EC 0.8	13.7a	19.5a	9.1b	10.5ab
EC 1.2	14.1a	20.9a	8.2b	10.1ab
EC 1.6	13.1a	15.8b	12a	11.5a

²Mean follow by different letters in the same columns are significantly different by Ducan's multiple range test(p<0.05)

5. 딸기 배액 극소화를 위한 최소대기시간 구명과 작물 생육

○ 연구방법

논산 딸기시험장에서 육묘된 ‘설향’을 분양(크라운 Ø10~11mm, 초장 20~22cm)받아 2014년 10월 8일 정식하여 2015년 4월까지 서울시립대학교 양지봉 온실에서 코이어 수경 재배하였다. 온실 내 온도 조절은 덕트 방식이 도입된 냉난방기(Samsung DVM-S, Samsung)를 사용하여 최저 15℃, 최고 25℃로 설정하여 온도 관리하였다. 재배 기간 중 온실 평균 온도는 15~20℃로 유지되었다(그림 3-1-10).

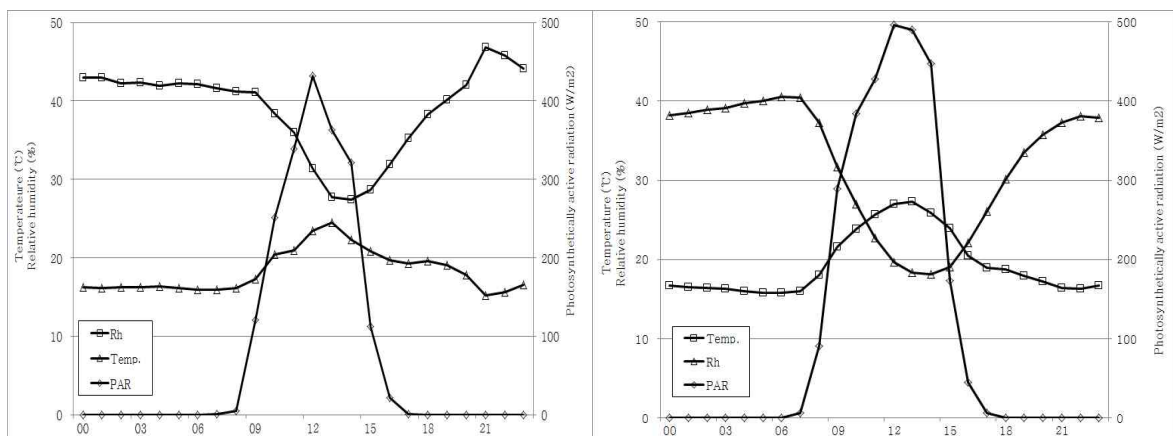


그림 3-1-10. 서울시립대학교 양지봉 온실 내 시간대별 평균 온습도 및 일사량 변화(2015. 1월(좌)와 3월(우))

수경재배는 고설베드시스템으로 스티로폼 베드(31×102×21cm)에 코이어 배지(100 x 20 x 12 cm, chip:dust=3:7, v:v)로 충전하였다. 배지 내 칩의 비율은 1차년도 결과에 따라 30%를 넘지 않는 배지로 하였다. 딸기의 수경재배에 사용된 양액 조성은 두 종류로 정식 후부터 첫 수확 전까지 N 7.9, P 2.1, K 2.5, Ca 4.5, Mg 2.5 me · L⁻¹로 조성하였고, 첫 수확 후 N 7.0, P 2.1, K 4.0, Ca 3.0, Mg 1.5 me · L⁻¹로 조성하였다. 배양액의 전기전도도(EC)는 0.8~1.2dS · m⁻¹로 딸기의 생육단계에 따라 관수하였다.

배지 수분함량 제어를 위해 사용한 수분 센서는 Frequency Domain Reflectometry(FDR) 수분센서(CoCo-300, 미래센서, 한국)로 뾰족한 probe(길이 10cm)를 배지에 45°로 찢러 넣어서 탐침의 끝이 딸기의 뿌리 밑으로 가도록 설치하였다. FDR센서를 사용한 관수조절은 배지 함수량 제어 수준범위에서 수분함량이 부족하면 공급될 수 있도록 제어 시스템을 장착하였다. 제어 함수율은 1차년도 결과를 반영하여 제어범위는 ±2%로 하고, 활착기 이후 겨울에 50±2%로 제어를 시작하여 봄에 58±2% 까지 높여 조절하였다. 대조구로는 타이머를 이용하여 주당 1회 20ml를 하루에 4(겨울)~11(봄)회로 나누어 계절에 따라 공급하여 비교하였다.

처리 기간 동안(2014년 10월 ~ 2015년 4월) 일일 급액량, 일일 배액량, 근권함수율, 근권EC, 광합성(model Li-6400, Li-CO, Lincoln, Nebraska, USA)과 생육 및 과실 수량을 측정 분석하였다. 근권함수율과 근권EC는 FDR센서와 데이터로거(WP700, 미래센서, 한국)를 사용하여 10분 간격으로 실시간 측정하였다. 통계분석은 SAS package(statistical analysis system, version 9.3, SAS Institute Inc.)를 이용하여 Duncan's multiple range test(DMRT)를 실시하여 5% 유의수준에서 검정하였다.



그림 3-1-11. FDR 센서를 이용한 딸기 고설 수경재배(상 좌), FDR센서 장착(상 우), 실험에 사용한 FDR센서 (하 좌), 실험에 사용한 데이터로거(하 우).

딸기의 코이어 수경재배에서 FDR센서를 사용하여 관수를 조절하였다. 제어함수율 범위에서 부족하여 관수가 이루어질 때, 1회 관수 후 다음 관수까지 최소대기시간을 0분, 5분, 10분, 15분, 가을에 10분-겨울에 15분-봄에 5분으로 설정하였다. 재배기간 동안 겨울(12월~1월)과 봄(2월~4월)으로 나누어 급액량과 배액율을 조사한 결과와, 광합성특성, 지상부 생육 및 수량을 조사한 결과는 다음과 같다.

일평균 주당 급액량은 겨울과 봄에 관행 타이머제어에서 각 162.9mL와 269.4mL로 가장 많았고, 관행의 배액율은 $30 \pm 5\%$ 를 유지하였다(표 3-1-13). 겨울에 FDR센서제어의 일평균 주당 급액량은 49.5mL~118.8mL로 관행의 30~70% 수준이었고, 배액율은 16%미만이었다. 최소대기시간을 5분, 10분, 15분, 10-15-5분으로 설정하였을 때 배액율 6% 미만으로 무배액 재배의 가능성을 보였다. 그 중 최소대기시간 10분의 주당 수분소모량(retained volume)은 112.2mL로 관행의 121.5mL과 수준을 보였다. 봄에 FDR센서제어의 일평균 주당 급액량은 101.0mL~240.0mL로 관행의 37.5~89.1% 수준이었고, 배액율은 20% 미만이었다. 최소대기시간을 15분으로 설정할 때 배액율 8.5%로 배액율을 최소화 할 수 있었다.

FDR센서를 사용하여 제어함수율로 근권 함수율을 제어하였을 때 근권 함수율이 관수시간과 제어함수율에 따라 일정한 패턴을 보였고, 겨울과 봄에 각각 설정된 제어함수율에 알맞은 범위로 제어되었다(그림 3-1-12). 수분요구도가 낮은 겨울보다는 온도와 일사량이 높아지는 봄에 근권 함수율변화 폭이 컸다.

최소대기시간이 짧게 설정된 처리구의 최고 근권 함수율은 정오 이전에 관찰되었고, 최소대기시간이 길어질수록 최고 근권 함수율은 정오에 관찰되었다. 최소대기시간 0분은 24시간 관수설정으로 같은 패턴을 보였으나 다른 최소대기시간 처리에 비하여 높은 근권 함수량을 유지하였다.

표 3-1-13. 딸기 코이어 고설수경재배에서 FDR센서와 timer를 사용하여 관수제어 시 최소 대기시간에 따른 일평균 주당 급액량, 배액량, 수분소모량 및 배액율.

Off-time length	Winter(December until January)				Spring(February until April)			
	Irrigation volume	Drainage volume	Retained volume	Drainage ratio	Irrigation volume	Drainage volume	Retained volume	Drainage ratio
	(mL·plant ⁻¹ ·day ⁻¹)			(%)	(mL·plant ⁻¹ ·day ⁻¹)			(%)
T0	71.9 d ^z	11.4 b	60.5 c	15.9	101.0 d	11.5 d	89.5 d	11.4
T5	98.4 c	1.6 d	96.8 b	1.6	240.0 b	41.7 b	198.3 a	17.4
T10	118.8 b	6.6 c	112.2 ab	5.6	208.7 c	39.3 b	169.5 b	18.8
T15	49.5 e	1.4 d	48.1 c	2.8	126.0 d	10.7 d	115.4 c	8.5
T10-15-5	60.8 de	0.0 d	60.8 c	0.0	126.3 d	22.5 c	103.8 cd	17.8
control	162.9 a	41.4 a	121.5 a	25.4	269.4 a	95.3 a	174.1 b	35.4

^zMeans with different letters are significantly different at P<0.05, as determined by Duncan's test.



그림 3-1-12. 딸기 고설수경재배에서 FDR센서를 이용한 급액제어시 관수 후 최소대기시간에 따른 유기배지의 수분함량 변화. (측정 기간 :2015.1.15.~1.21(위), 2015.3.13.~3.19(아래))

FDR센서제어와 관행 타이머제어의 일중 근권 EC는 큰 변화의 폭 없이 안정적으로 유지되었다(그림 3-1-13). 일중 근권 EC는 관수가 시작되면서 낮아지기 시작하여 관수 종료 후 높아지는 경향을 보였다. 그 후 야간에 식물의 양수분 흡수가 이루어지면서 근권 EC가 서서히 낮아지는 현상을 보였다. 겨울에 비하여 급액량이 더 많은 봄에 근권 EC가 더 높게 유지되었다.

딸기의 코이어 고설수경재배에서 FDR센서제어 시 최소대기시간에 따른 광합성 특성은 표 2와 같다. 평균 기공전도도와 평균 증산량은 각 $0.10\sim 0.15\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 와 $1.53\sim 2.16\text{mmol}^{-1}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 으로 관행과 FDR센서제어 간에 차이가 없었다. 그러나 광합성율은 FDR센서제어 중 최소대기시간 5분에서 $14.79\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 로 낮은 값을 보였다. 이는 지상부 생육 특성에서 최소대기시간 5분의 엽록소함량(SPAD value)이 44.7로 다른 처리구의 엽록소함량 45.8~48.6에 비하여 통계적으로 낮은 값을 보였기 때문으로 보인다(표 3-1-15). 최소대기시간 5분의 엽록소함량을 제외한 모든 처리구의 지상부 생육특성(최대엽장, 최대엽폭, 최대엽병장 및 엽록소함량)은 처리 간 차이가 없었다.

수량조사는 1월~2월에 베드 당 10주씩 이루어졌고, 3월에 생육조사를 위해 딸기 2주를 제거하고 남은 8주에서 수량조사를 하였다. 주당 총 상품수량과 평균과중은 각 $122.5\text{g}\sim 171.7\text{g}$ 과 $18.6\text{g}\sim 19.5\text{g}$ 으로 FDR센서제어와 관행에서 처리 간 차이가 없었다(표 3-1-16). 월별 주당 총 상품수량에서는 온도와 일사량이 높아지는 3월에 낮아지는 경향을 보였다.

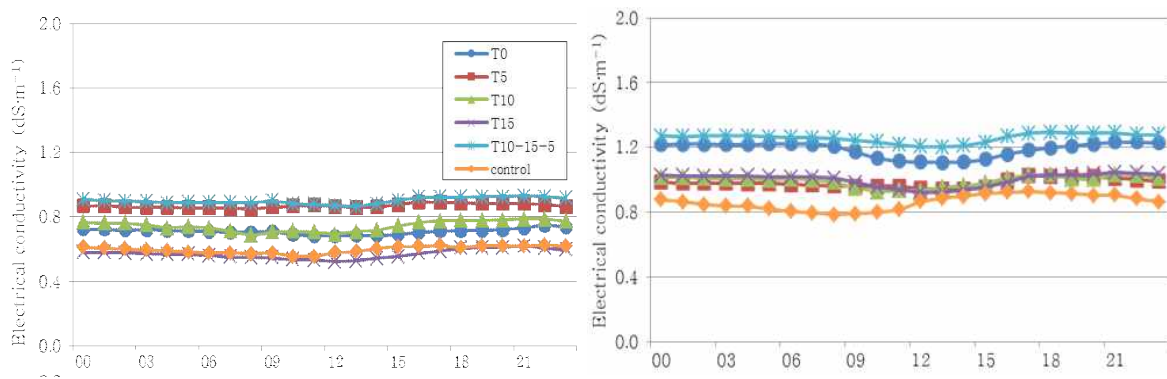


그림 3-1-13. 딸기 고설수경재배에서 FDR센서와 Timer(control)를 이용한 급액제어 시 최소대기시간에 따른 시간대별 배지 내 평균 EC변화(1월(좌), 3월(우)).

표 3-1-14. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서제어 및 Timer 제어 시 최소대기시간에 따른 광합성특성.

Off-time length	Photosynthesis rate ($\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance ($\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol}^{-1}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
T0	15.22 ab ^z	0.11 a	1.60 a
T5	14.79 b	0.10 a	1.53 a
T10	18.18 a	0.15 a	2.05 a
T15	16.72 ab	0.15 a	2.16 a
T10-15-5	18.00 ab	0.14 a	2.05 a
control	17.32 ab	0.11 a	1.70 a

^zMeans with different letters are significantly different at $P<0.05$, as determined by Duncan's test.
Data obtained from February to April 2015.

표 3-1-15. 딸기 고정수경재배에서 FDR센서제어 및 Timer제어 시 최소대기시간에 따른 생육(2015.2~2015.4)

Off-time length	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Petiole length (cm)	Chlorophyll contents (SPAD value)
T0	10.4 a ^z	9.1 a	12.0 a	45.8 ab
T5	10.8 a	9.6 a	11.9 a	44.7 b
T10	11.0 a	9.9 a	13.2 a	48.6 a
T15	10.5 a	9.3 a	12.4 a	46.7 ab
T10-15-5	10.3 a	9.3 a	12.2 a	47.3 ab
control	10.6 a	9.5 a	11.9 a	46.6 ab

^zMeans with different letters are significantly different at $P<0.05$, as determined by Duncan's test.
Data obtained from February to April 2015.

표 3-1-16. 딸기 고설수경재배에서 FDR센서제어 및 타이머제어 시 최소대기시간에 따른 평균과중(FW) 및 수량(MY).

Off-time length	January		February		March		Total yield	Total marketable yield	Average fruit weight
	MY	FW	MY	FW	MY	FW			
	(g·plant ⁻¹)		(g·plant ⁻¹)		(g·plant ⁻¹)				
T0	49.7 a ^z	24.6 a	41.0 b	17.1 a	29.7 b	15.3 c	192	122.5 a	19.0 a
T5	32.3 a	25.4 a	64.7 a	16.9 a	39.0 ab	16.2 bc	227	138.0 a	19.5 a
T10	60.4 a	23.7 a	45.2 ab	17.7 a	38.7 ab	15.7 c	203	146.3 a	19.0 a
T15	41.6 a	22.5 ab	56.6 ab	17.4 a	57.8 ab	17.9 b	219	158.0 a	19.3 a
T10-15-5	50.5 a	21.5 ab	46.2 ab	17.7 a	47.2 ab	16.2 bc	228	146.0 a	18.6 a
control	43.0 a	18.9 b	59.9 a	17.6 a	68.9 a	20.1 a	215	171.7 a	18.9 a

^zMeans with different letters are significantly different at P<0.05, as determined by Ducan's test.

FDR센서제어 시 최소대기시간에 따른 수분이용효율(water use efficiency, WUE)은 관행에서 13.8g·L·plant⁻¹ 이었다(표 3-1-17). FDR센서제어의 수분이용효율은 최소대기시간 5분을 제외한 모든 FDR센서제어에서 14.6~23.5g·L·plant⁻¹로 관행보다 높았다. 본 실험에서 수분이용효율은 처리 간에 지상부 생육과 주당 총 수량에서 통계적 유의차가 없었으므로 수량의 영향을 받지 않고, 주당 총 수분소모량의 영향을 받은 것으로 나타났다. 주당 총 수분소모량은 주당 총 급액량에서 배액량을 고려하여, 배지 내 남아있는 수분 양으로, 주당 총 급액량이 다른 처리구에 비하여 매우 적었던 FDR센서제어 중 최소대기시간 0분과 15분의 수분이용효율이 각 22.2g·L·plant⁻¹와 23.5g·L·plant⁻¹로 높게 나타났다. 최소대기시간 10-15-5분으로 설정하였을 때 수분소모량은 최소대기시간 15분 과 같지만 작물생육이 최소대기시간 15분보다 낮아 수분이용효율이 낮았다.

과실의 품질을 나타내는 당도는 8.2~9.8°Brix 으로 최소대기시간 15분으로 설정하였을 때 가장 높았다.

딸기의 코이어 수경재배에서 공급된 배양액을 기준으로 2014년 12월부터 2015년 4월까지 투입된 비료비용은 관행 타이머제어에서 \$12,193.9/ha로 가장 높았다. FDR센서제어 시 투입된 비료비용은 관행의 15.5%~63.9% 수준이었다. 따라서 FDR센서로 관수를 제어하여 자동화 할 경우 최소 \$1,888.7/ha ~ 최대 \$7,788.1/ha 절감 가능한 것으로 나타났다.

표 3-1-17. 딸기의 코이어 수경재배에서 FDR센서제어와 타이머제어 시 생체중, 당도, 주당 총 급액량, 주당 총 수분소모량 및 수분이용효율(2014년 1월~2015년 4월).

Off-time length	Plant fresh weight (g·plant ⁻¹)	SSC (°Brix)	Irrigation volume (L·plant ⁻¹)	Retained volume (L·plant ⁻¹)	WUE ^y (g·L·plant ⁻¹)
T0 ^x	217.9 ab ^w	8.2	11.2	9.8	22.2 a
T5	207.5 b	9.2	25.3	21.8	9.5 d
T10	253.7 ab	9.2	20.8	17.4	14.6 c
T15	287.6 a	9.8	13.2	12.2	23.5 a
T10-15-5	219.0 b	9.2	13.8	12.0	18.2 b
control	301.4 a	9.0	31.1	21.9	13.8 c

^wMeans with different letters are significantly different at P<0.05, as determined by Duncan's test.

표 3-1-18. 서울시립대 딸기배양액으로 사용하여 딸기를 재배하였을 때 FDR센서제어와 타이머제어 시 투입되는 비료비용 비교(2014년 12월~2015년 4월)

Fertilizers (origin)	Fertilizer cost (\$ ^z /kg)	Amounts of fertilizer (kg·1000L ⁻¹)	Fertilizer cost(\$ ^z) per ha for the entire growing period (1 Dec. 2014 to 30 Apr. 2015)					
			T0 ^x	T5	T10	T15	T10-15-5	control
[Ca(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O]	0.92	0.354	1294.6	2027.4	2133.2	911.9	1229.4	2524.0
KNO ₃	1.65	0.354	2321.8	3636.0	3825.9	1635.5	2205.0	4526.8
MgSO ₄	1.1	0.246	1075.6	1684.5	1772.4	757.7	1021.5	2097.2
K ₂ SO ₄	0.92	0.026	95.1	148.9	156.7	67.0	90.3	185.4
NH ₄ H ₂ PO ₄	2.29	0.058	528.0	826.8	870.0	371.9	501.4	1029.4
Fe-EDTA	8.26	0.012	394.0	617.0	649.2	277.5	347.2	768.2
H ₃ BO ₃	21.1	0.002	167.7	262.7	276.4	118.2	159.3	327.1
MnSO ₄ ·H ₂ O	29.4	0.001754	208.5	326.5	343.2	147.0	197.7	406.5
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	20.2	0.001539	123.6	193.5	203.5	86.9	117.2	240.9
CuSO ₄ ·5H ₂ O	29.4	0.000177	20.7	32.4	33.8	14.7	19.8	40.4
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	49.5	0.000126	24.8	38.8	40.8	17.3	23.5	48.3
Total			6254.3	9794.5	10305.2	4405.5	5939.3	12193.9

^z\$: US dollar (USD)

6. 딸기 배액 극소화를 위한 관수종료시각 구명과 작물 생육

딸기의 코이어 고설수경재배에서 FDR센서를 사용하여 관수를 조절하였다. 제어함수율 범위에서 근권 함수율이 부족할 때 관수가 이루어졌다. 관수시작시간은 9:00, 관수종료시각은 13:00, 15:00, 17:00와 24시간 관수처리를 설정하였다. 대조구는 관행 타이머제어로 관수시작시간은 9:00, 관수종료시각은 일몰 1시간 전으로 하였다. 재배기간 동안 겨울(12~1월)과 봄(2월~4월)으로 나누어 급액량과 배액율을 조사한 결과와, 광합성특성, 지상부 및 과실 생육 및 수량을 조사한 결과는 다음과 같다.

일평균 주당 급액량은 겨울과 봄에 관행 타이머제어에서 각 162.8mL과 267.1mL로 가장 많았고, 배액율은 25~26%를 유지하였다(그림 3-1-14). 겨울에 FDR센서제어의 일평균 주당 급액량은 관행의 41.3~80% 수준이었고, 배액율은 17% 미만이었다. 관수종료시각을 13시로 설정하였을 때 일평균 주당 급액량이 관행의 80% 수준, 배액율은 10% 미만으로 충분한 수분공급과 동시에 배액 극소화의 가능성을 보였다. 봄에 FDR센서제어의 일평균 주당 급액량은 관행의 37.8~67.4% 수준이었고, 배액율은 15% 이하였다. 제어함수율 범위를 이용한 FDR센서제어 시 관수종료시각은 일평균 주당 급액량에 영향을 미치지 않았다. 그러나 관수종료시각을 13시로 하였을 때 관수가 오전에 집중되어 15% 정도의 배액을 발생시켰다.

FDR센서제어 시 제어함수율 범위에 알맞은 근권 함수율 변화 패턴을 보였고, 관수종료시각에 따른 근권 함수율 변화는 관찰되지 않았다(그림 3-1-15). 일중 근권 EC는 큰 변화의 폭 없이 안정적이었고(그림 3-1-16), 관수가 시작되는 시점부터 감소하다가 관수가 종료되면 점차 증가하는 경향을 보였다. 그 후 야간에 식물의 양수분 흡수에 의하여 낮아지는 현상이 나타났다. 수분요구도가 적은 겨울에 비하여 온도와 일사량이 증가하는 봄에 급액량이 많아지면서 근권 EC도 높게 유지되었다.

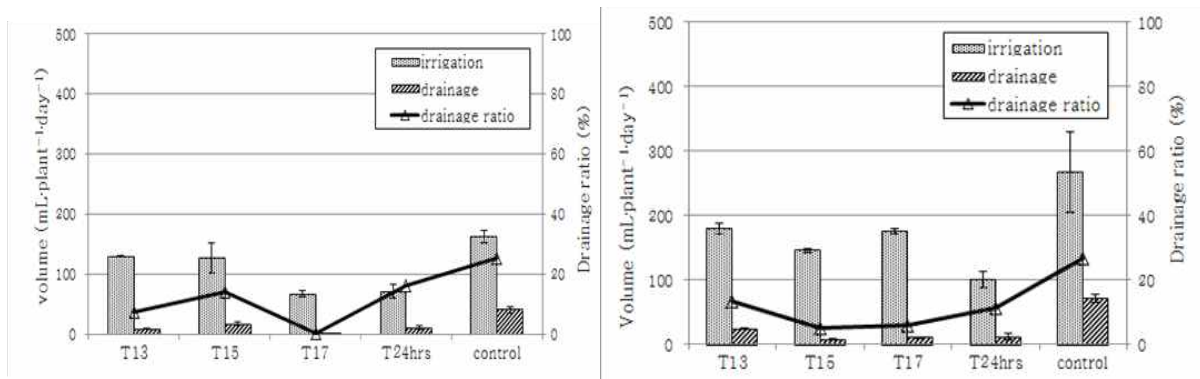


그림 3-1-14. 딸기의 코이어 고설수경재배에서 FDR센서제어 및 타이머제어 시 관수종료시각에 따른 일일 평균 주당 급액량 및 배액율(1월(좌), 3월(우))



그림 3-1-15. 딸기 고설수경재배에서 FDR센서를 이용한 급액제어시 관수종료시각에 따른 유기배지의 수분함량 변화. (측정 기간 :2015.1.15~1.21(위), 2015.3.13~3.19(아래))

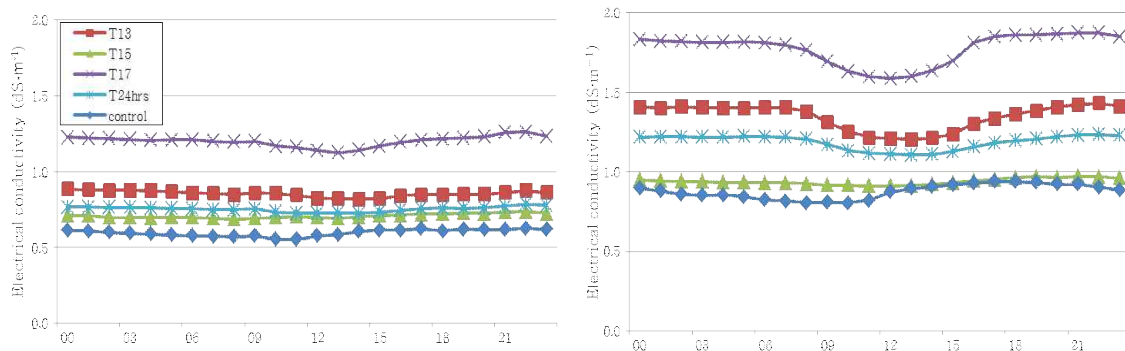


그림 3-1-16. 딸기 고설수경재배에서 FDR센서와 Timer(control)를 이용한 급액제어 시 관수종료시각에 따른 시간대별 배지 내 평균 EC변화(1월(좌), 3월(우)).

딸기의 코이어 고설수경재배에서 FDR센서제어 및 관행 타이머제어 시 관수종료시각에 따른 광합성 특성에서는 처리 간 차이가 없었다(표 3-1-19).

광합성율은 $15.19 \sim 15.88 \mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이었고, 기공전도도는 $0.09 \sim 0.11 \text{mol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 증산량은 $1.33 \sim 1.60 \text{mmol}^{-1} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 이었다. 지상부 생육특성에서는 최대엽병장을 제외한 최대엽장은 $10.4 \sim 11.1 \text{cm}$, 최대엽폭은 $9.1 \sim 9.9 \text{cm}$ 및 엽록소함량(SPAD value)은 $45.0 \sim 47.5$ 로 처리 간 차

이가 없었다(표 3-1-20).

수량조사는 1월~2월에는 베드 당 10주씩 이루어졌고, 3월○네 생육조사를 위해 딸기 2주를 제거하고 남은 8주에서 수량조사를 하였다. 주당 총 상품수량과 평균과중은 각 120.5~171.7g과 18.4~19.8g으로 처리 간 통계적 유의차이가 없었다(표 3-1-21). 관수종료시각을 13시로 설정하였을 때 1월 이후 수량이 큰 폭으로 감소하여 FDR센서 자동관수제어 시 적절하지 않은 관수종료시각으로 나타났다. 또한 24시간 관수처리의 수량은 과습한 근권 환경으로 인해 비상품과율이 높아지면서 2월에 수량에 비하여 3월에 수량에서 낮아지는 폭이 크게 나타났다(그림 3-1-17).

표 3-1-19. 딸기 고설수경재배에서 FDR 센서제어 및 Timer 제어 시 관수종료시각에 따른 광합성특성.

Irrigation off hour	Photosynthesis rate ($\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance ($\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol}^{-1}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
T13	15.19 a ^x	0.11 a	1.57 a
T15	15.27 a	0.09 a	1.33 a
T17	15.62 a	0.10 a	1.46 a
T24hrs	15.22 a	0.11 a	1.60 a
control	15.88 a	0.10 a	1.51 a

^xMeans with different letters are significantly different at $P<0.05$, as determined by Duncan's test.

Data obtained from February 2015 to April 2015.

표 3-1-20. 딸기 고성수경재배에서 FDR센서제어 및 Timer제어 시 관수종료시각에 따른 생육(2015.2~2015.4)

Irrigation off hour	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Petiole length (cm)	Chlorophyll contents (SPAD value)
T13	11.1 a ^y	9.7 a	14.0 a	47.5 a
T15	11.1 a	9.9 a	13.3 abc	45.0 a
T17	10.6 a	9.3 a	13.5 ab	46.3 a
T24hrs	10.4 a	9.1 a	12.0 bc	45.8 a
control	10.6 a	9.5 a	11.9 c	46.6 a

^yMeans with different letters are significantly different at $P<0.05$, as determined by Duncan's test.

Data obtained from February to April 2015.

표 3-1-21. 딸기 고설수경재배에서 FDR센서제어 및 타이머제어 시 관수종료시각에 따른 평균과중(FW) 및 수량(MY).

Irrigation off hour	January		February		March		Total yield (g·plant ⁻¹)	Total marketabl e yield (g·plant ⁻¹)	Average fresh weight (g·plant ⁻¹)
	MY	FW	MY	FW	MY	FW			
	(g·plant ⁻¹)		(g·plant ⁻¹)		(g·plant ⁻¹)				
T13	69.2 a ^y	21.9 ab	38.2 a	17.5 a	36.5 b	15.7 bc	206	143.8 a	18.4 a
T15	62.5 a	19.7 b	42.8 a	17.6 a	47.8 ab	17.9 ab	262	153.0 a	18.4 a
T17	38.4 a	24.2 a	57.6 a	16.6 a	46.0 ab	18.7 a	211	141.9 a	19.8 a
T24hrs	49.7 a	24.6 a	41.0 a	17.1 a	29.7 b	15.3 c	192	120.5 a	19.0 a
control	43.0 a	18.9 b	59.9 a	17.6 a	68.9 a	20.1 a	215	171.7 a	18.9 a

^yMeans with different letters are significantly different at P<0.05, as determined by Duncan's test.

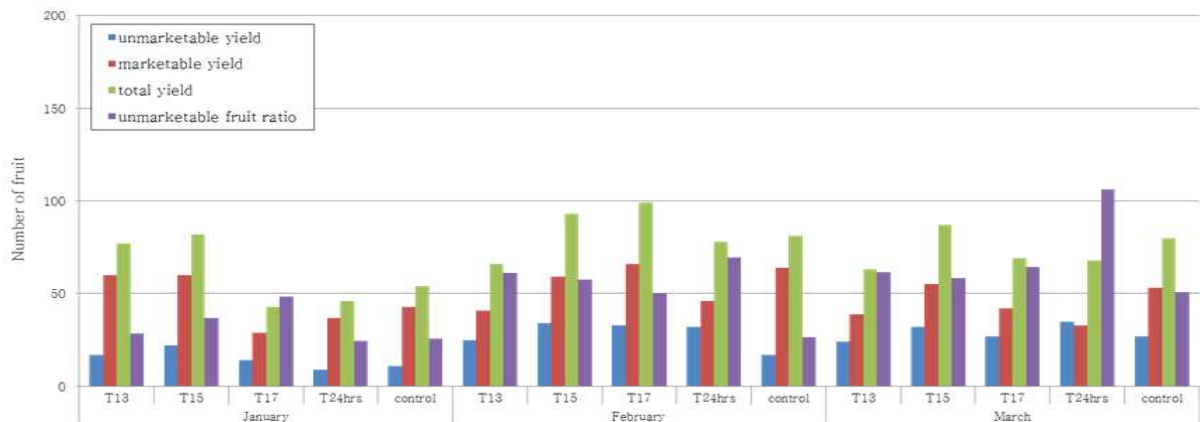


그림 3-1-17. 딸기의 코이어 수경재배에서 FDR센서제어와 타이머제어 시 관수종료시각에 따른 총 수량, 총 상품수량, 총 비상품수량 및 비상품과율.

급배액량 및 수분소모량, 지상부와 과실수량을 종합하여 수분이용효율을 산정한 결과 관행의 수분이용효율은 18.4g·L·plant⁻¹이었고, FDR센서제어의 수분이용효율은 관행보다 높은 17.8~29.1g·L·plant⁻¹이었다(표 3-1-22). 본 실험의 수분이용효율은 주당 총 급액량과 주당 총 수분소모량의 영향을 크게 받아, 주당 총 급액량과 주당 총 수분소모량이 각 11.2L와 9.8L로 가장 적은 관수 24시간처리에서 가장 높은 수분이용효율을 보였다. 그러나 관수 24시간 처리의 과실품질(당도)는 8.2로 과습한 환경으로 인하여 가장 낮았다. FDR센서 자동관수제어 시 관수 종료시각을 15시 또는 17시로 설정하였을 때 관행의 약 50% 정도의 주당 총 급액량과 약 70~80% 정도의 주당 총 수분소모량을 보여 높은 수분이용효율과 보다 안정적인 수량을 나타내었다. 과실품질은 관수종료시각 17시에서 9.9°Brix로 가장 높았다.

딸기의 코이어 고설수경재배에서 공급된 배양액을 기준으로 2014년 12월부터 2015년 4월까지 투입된 비료비용은 관행 타이머제어에서 \$12,193.9/ha로 가장 높았다(표 3-1-23). FDR센서 자동관수제어 시 관행에 비하여 주당 총 급액량을 약 30~70% 수준으로 절감함에 따라 비료비용을 최소 \$4,680.6/ha ~ 최대 \$7,198.6/ha 절감 가능하였다.

표 3-1-22. 딸기의 코이어 수경재배에서 FDR센서제어와 타이머제어 시 관수종료시각에 따른 생체중, 당도, 주당 총 급액량, 주당 총 수분소모량 및 수분이용효율(2014년 1월~2015년 4월).

Irrigation off hour	Plant fresh weight (g·plant ⁻¹)	SSC (°Brix)	Irrigation volume (L·plant ⁻¹)	Retained volume (L·plant ⁻¹)	WUE (g·L·plant ⁻¹)
T13	258.3 a ^z	9.4	20.1	17.9	17.8 c
T15	249.5 a	9.5	17.4	16.0	21.3 b
T17	246.8 a	9.9	16.5	15.9	20.1 bc
T24hrs	215.9 a	8.2	11.2	9.8	29.1 a
control	301.4 a	9.0	31.1	21.9	18.4 bc

^zMeans with different letters are significantly different at P<0.05, as determined by Duncan's test.

표 3-1-23. 서울시립대 딸기배양액으로 사용하여 딸기를 재배하였을 때 FDR센서제어와 타이머제어 시 투입되는 비료비용 비교(2014년 12월~2015년 4월)

Fertilizers (origin)	Fertilizer cost (\$ ^Z /kg)	Amounts of fertilizer (kg·1000L ⁻¹)	Fertilizer cost(\$ ^Z) per ha for the entire growing period (1 Dec. 2014 to 30 Apr. 2015)				
			T13	T15	T17	T24hrs	control
[Ca(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O]	0.92	0.354	1481.8	1555.1	1034.0	1294.6	2524.0
KNO ₃	1.65	0.354	2657.7	2789.1	1854.5	2321.8	4526.8
MgSO ₄	1.1	0.246	1231.2	1292.1	859.2	1075.6	2097.2
K ₂ SO ₄	0.92	0.026	108.8	114.2	75.9	95.1	185.4
NH ₄ H ₂ PO ₄	2.29	0.058	604.3	634.2	421.7	528.0	1029.4
Fe-EDTA	8.26	0.012	451.0	473.3	314.7	394.0	768.2
H ₃ BO ₃	21.1	0.002	192.0	201.5	134.0	167.7	327.1
MnSO ₄ ·H ₂ O	29.4	0.001754	238.9	250.6	166.8	208.7	406.5
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	20.2	0.001539	141.4	148.5	98.5	123.7	240.9
CuSO ₄ ·5H ₂ O	29.4	0.000177	23.5	25.0	16.2	20.6	40.4
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	49.5	0.000126	28.5	29.7	19.8	24.8	48.3
Total			7159.2	7513.3	4995.3	6254.6	12193.9

^Z\$: US dollar (USD)

7. FDR 센서 금액제어를 이용한 고설 딸기 농가 실증 결과

가. 재료 및 방법

2014년 9월 10일 코이어 배지(dust : chip=40%:60%, v/v, 4년 재사용)에 8.7주/m² (주간 20cm 간격)정식하여 수정재배하였다. 금액 방식은 지난 1차년도와 결과를 반영한 FDR 센서 자동금액제어 방식(이하 FAI)과 타이머(관행, 이하 TIMER) 방식으로 하였으며, 처리는 10월 18일에 시작하였다. 사용 배양액은 유기배지에 적합하게 조성된 딸기 배양액으로 금액하였다.

FDR센서 자동 금액은 (주)그린씨에스 개발한 금액시스템(Magma-1000, GreenCS Ltd., Korea)에 65mm FDR센서(미래센서)를 연결하여 제어함수율, 최소대기시간, 최대대기시간, 금액 시작 시간을 지정하여 금액할 수 있도록 하였다. 이때 1회 금액시간은 초기 3분으로 설정하였으며, 이는 관행 금액 시간에 준한 것으로 1회당 35mL가 금액 되도록 유량계를

조정하였다. 센서 위치는 작물과 작물사이로 약간 베드 위 부분을 파고 꼽아 센서의 하단부가 바닥으로부터 5cm 정도 떨어져 딸기 뿌리 주위의 함수량을 계측하여 관수에 적용할 수 있도록 설치하였다(그림3-1-18~20).



4. 일사비례관수설점 1그룹 작동조건

	1주기	2주기	3주기	4주기	
시작시간	7시 30분	0시 0분	0시 0분	0시 0분	
일출후시간	2시 0분	사용안함	사용안함	사용안함	
고정시간	사용안함	사용안함	사용안함	사용안함	질소감비
최소대기시간	0시 50분	0시 15분	0시 10분	0시 10분	사용안함
최대대기시간	4시 0분	0시 50분	3시 0분	5시 30분	사용여부
누적일사J	900J	990J	50J	50J	사용안함
함수율%	57%	10%	50%	50%	사용

그림 3-1-18. FDR센서 자동급액 시스템(상)과 설정 방식 예 (하)

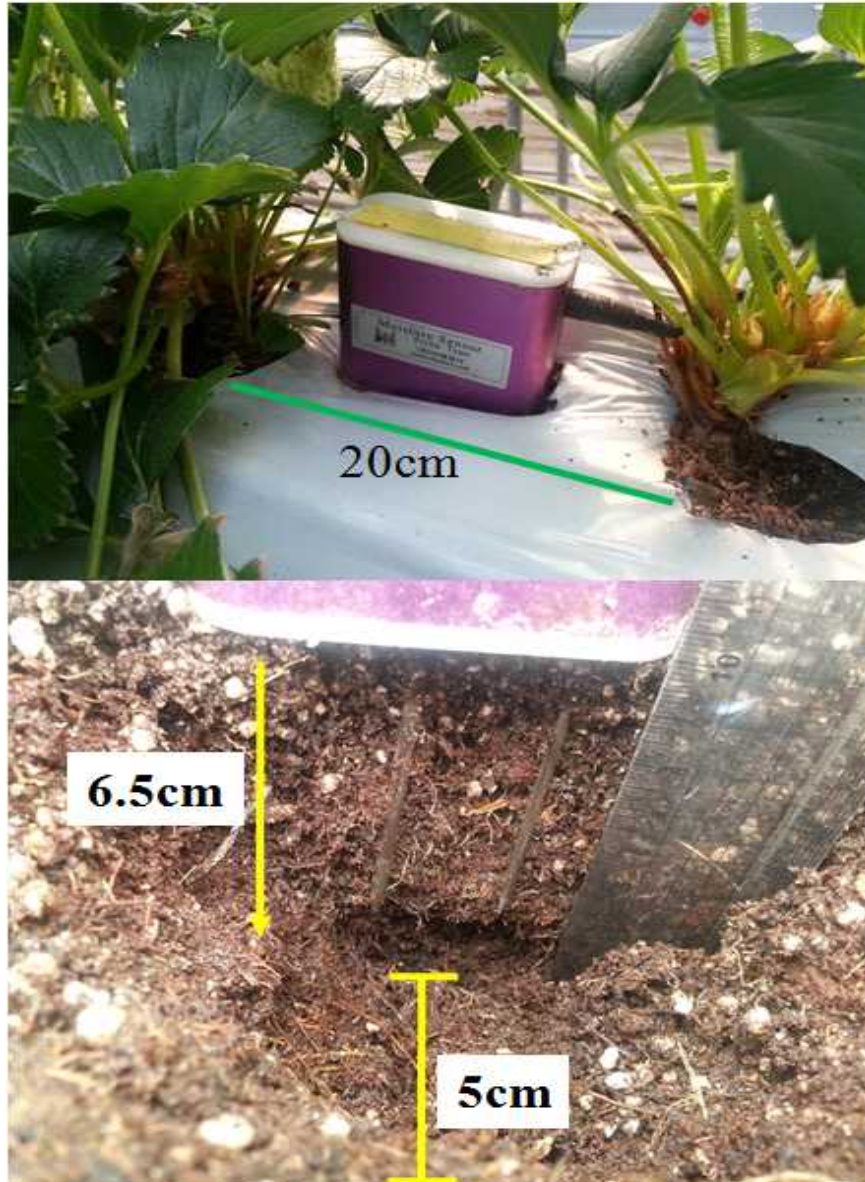


그림 3-1-19. 함수량 자동제어를 위한 FDR 센서 위치

관행 급액은 작물 상태와 날씨를 고려하여 2~8회/day, 11.6mL/회, 일출 후 2시간에 관비시스템 (Agrow-2000, HPA-2003, Hangaram, Korea) 급액을 시작하고, 일몰 전 2시간에 급액을 종료하였다. 일일 함수량, 배지내 EC, 온도는 (주)미래센서 데이터로거(WT600, Mirae Sensor)를 이용하여 10분 간격으로 저장하여 자료를 분석하였다.

측정항목은 일일 급액량과 배액 양 을 측정하였으며, 상품수량을 조사하였다. 급액량과 배액 양을 이용하여 배액율(%), retained volume (급액량 -배액량)을 산출하였다. 또한 식물의 수분 이용효율(WUE:Water use efficiency, $g \cdot L^{-1} \cdot plant$)은 2015년 5월 15일에 식물체를 수확한 후 다음 식으로 산정하였다.

$$WUE = \text{fresh weight} / \text{retained volume}$$

재배 기간 중 총 공급한 급액량을 기준으로 총 사용된 비료량을 산출하였다.

그림 3-1-20. 관행 타이머 급액에 사용한 관비시스템 (좌)과 근권 함수량 계측용



데이터로거(우)

나. 결과



그림 3-1-21. 급액방식에 따른 타이머급액(Timer)와 FDR센서 자동급액(FAI) 실험 전경



그림 3-1-22. 급액 방식에 따라 배출된 배액량 측정 (좌, TIMER, 우, FAI)

실험에 설정된 FDR 센서를 이용한 자동급액 방식 목표함수량은 다음 표와 같이 생육 상태를 고려하여 설정함수량이 변경되었으며, 기간 중 평균 일일 급액량, 배액량, 배지내 보유수분량 및 배액율은 달랐다(표 3-1-24). 12월 7일~17일 까지 설정된 목표 함수량이 60% 였을 때 평균 일일 급액량 대비 배액량이 많아 이 기간 중 배액율은 56%로 높아 대조구인 TIMER의 평균 배액율과 비슷한 수준을 보였다. 그러나 이후 목표 함수율을 낮추면서, 1회 급액시간, 최소대기 시간을 50분(초기 10분)으로 수정하였을 때 배지내 함수율은 목표 수준을 유지하면서 배액율이 적어졌다. 급액방식에 따른 주별 공급량이 FAI 처리구는 평균 370ml, TIMER 처리구는 666ml로 일평균 주당 급액량으로 환산하면 FAI 처리구는 약 53ml, TIMER 처리구는 95ml로 급액량이 TIMER 처리구에서 1.8배 높았다(그림 3-1-23). 2월 중순이후 일사량은 높아졌으며, 광량 증가에 따라 관행 TIMER 처리구에서는 급액량이 증가하였고, FAI 처리구도 광량 변화와 유사한 급액 패턴을 갖고 있어 배지내 함수율에 의한 급액 방식은 작물 증산과 생육의 주 요인 중 하나인 일사량 변화를 반영하는 것을 확인할 수 있었다. 재배 기간 중 배액량 변화를 보면, FAI 처리구에서는 주별 평균 55.8ml, TIMER 처리구에서는 주별 평균 300ml로, 일평균 주당 배액량이 FAI 처리구는 7.9ml, TIMER 처리구는 42.9ml로 FAI 처리구의 배액량은 매우 극소함을 알 수 있었다(그림 3-1-24). 수정재배 기간 중 평균 배액율은 FAI 처리구에서는 8.3%, TIMER 처리구는 48%로 설정 초기 배지내 함수율을 조정하는 기간, 또는 함수율 변동에 따른 조정 기간을 제외한 배액율을 5% 미만으로 TIMER 처리구의 배액율에 비해 매우 적었다(표

3-1-25).

표 3-1-24. FDR 센서 급액 방식에 따른 설정함수량, 평균급액량, 평균배액량, 평균보유량 및 배액율 (2014. 12.7~2015.4.30).

	WST ^z (%)	Ave. IrV	Ave. DrV	Ave. RtV	DrR
		(mL/day/plant)			(%)
FAI					
7-Dec ~	60	68.2	42.3	29.4	56.0
18-Dec ~	55	35.9	4.1	31.8	11.4
3-Feb ~	58	44.8	2.3	42.5	4.9
11-Mar ~	60	49.5	4.7	44.8	11.1
18-Mar ~	62	127.6	32.3	95.3	29.5
~ 30-Apr	59	77.7	4.3	73.4	5.5
Timer					
	SR+2 ~ SS-2	98.9	43.9	54.9	48.3

^zWST :목표 설정함수량, IrV:급액량, DrV:배액량, RtV:보유량, DrR:배액율

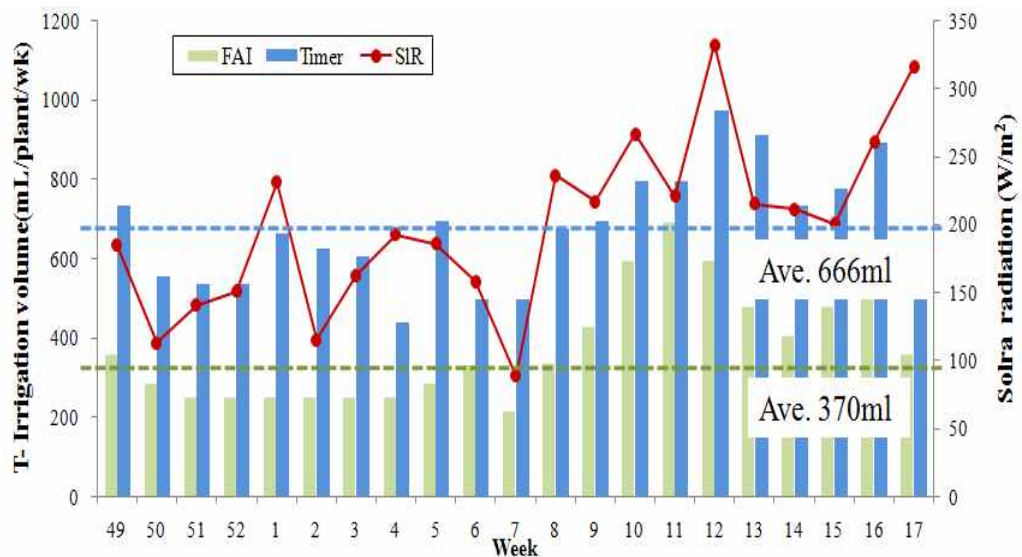


그림 3-1-23. 일사량에 따른 FAI와 TIMER 급액방식별 주당 총 공급액량 변화 (2014.12.7~2015.4.30)

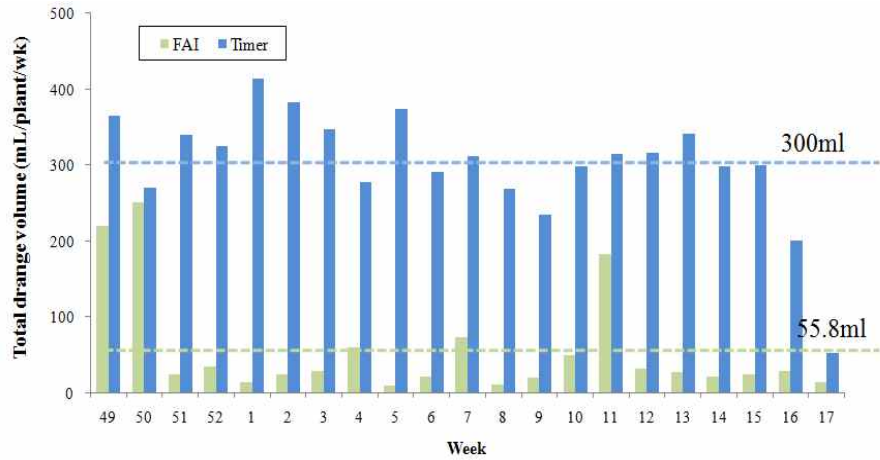


그림 3-1-24. FAI와 TIMER 급액방식별 주당 총배액량 변화 (2014.12.7.~2015.4.30)

표 3-1-25. 급액 방식에 따른 주별 평균배액율

(2014. 12.7~2015.4.30)

	49	51	1	3	5	7	9	11	13	15	17	Ave
FAI (A)	32.7	3.4	2.1	3.8	1.3	10.4	2.9	26.2	3.9	3.6	7.3	8.3
TIMER(B)	50.3	64.1	63.0	56.4	67.6	67.0	35.0	42.5	38.7	44.8	16.8	48.0
A/B ratio	65.0	5.3	3.3	6.0	2.4	15.5	8.3	61.6	10.1	8.0	43.5	18.8

FAI 처리구와 TIMER 처리구의 배지내 함수량 변화는 그림 3-1-25와 같다. FAI 처리구의 함수량은 58~62% 범위에 있었으며, TIMER 처리구의 함수량은 63~65% 범위였다. 붉은 점선은 FAI 처리구의 설정 목표함수량을 표기한 것으로, 12/20일 ~2/8일 동안 설정목표 함수량이 55% 였으나, 배지내 함수량은 60±1% 범위에 존재하였다. 이는 설정 목표 함수량에 도달하면 관수가 정지되는 제어 특성상 최대대기시간을 4시간 주기로 둠에 따라 이 기간 중 1회 공급이 이루어지고 있어 설정 목표함수량보다 높은 함수량을 나타낸 것으로 보인다. 딸기는 뿌리 특성상 세근으로 양수분 흡수가 이루어지고 있어 근계가 형성되기 까지는 배액이 높은 특성을 갖을 수 있어 1회 공급량이 작물에 효율적으로 이용되기 위해서는 1회 급액량, 대기시간 등에 관한 정확한 자료가 보완되어야 할 것으로 보였다(그림 3-1-31).

그림. 8은 배지 내 EC 변화로 붉은 점선은 공급 EC 수준을 나타내었다. FAI와 TIMER 처리구 간 차이 없이 비교적 배지내 EC는 적정범위에 있었다. 1/1~3/1 기간 중 배지 내 EC는 FAI 처리구에서 TIMER 처리구보다 다소 높은 범위에 있었는데, 이 시기 FAI 처리구의 배액율은 5% 미만으로 최소의 급액으로 최대 수분이용이 이루어짐에 따른 급액 EC가 TIMER 처리에서 보다 높은 경향을 보였으나, 적정 범위에 있었다.



그림 3-1-25. FAI와 TIMER 급액방식별 배지내 함수량 변화 (2014.12.7~2015.4.30)

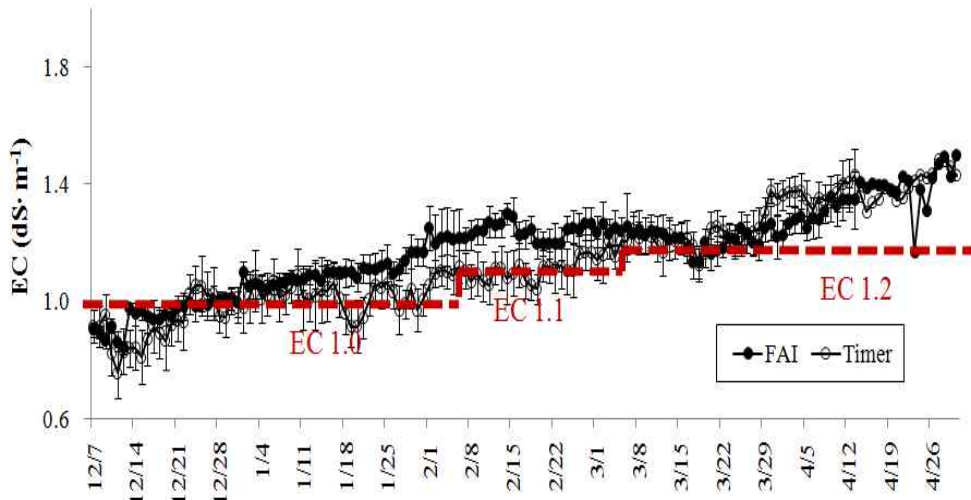


그림 3-1-26. FAI와 TIMER 급액방식별 배지내 EC 변화 (2014.12.7~2015.4.30)

(붉은 점선은 급액 EC)

그림 3-1-27 ~ 29는 재배 기간 중 일사량 변화에 따른 급액방식에 따른 일일 함수량 변화 및 Δ 함수량 편차를 알아보기 위하여 급액 회수를 표기한 것이다. 붉은 점선은 설정목표 함수량이 변화된 것을 표기하였다. 2월 9일 ~2월 11일 3일 동안의 일사량을 보면 맑은 후 흐려지는 일기가 관측되었으며, 이에 2월 9일 최대 일사량은 $530\text{W}/\text{m}^2$, 2월 10일 일사량은 $128\text{W}/\text{m}^2$, 로 낮아졌을 때 FAI 처리구의 일일 급액횟수는 2회가 관측되고, TIMER 처리구는 2/9일은 5회, 2/10일은 3회가 관측되었다. 2/11일 최대 일사량인 $398\text{W}/\text{m}^2$ 로 다시 높아졌을 때 FAI 처리구는 1회 급액되었으며, TIMER 처리구는 3회 급액되었다. 그리고 이 날 설정목표함수량은 60%로 상향되었다. 이 기간 중 FAI 처리구의 배지 내 평균 함수량은 60.2~60.9%, TIMER 처리구는

64.2~64.7%를 보였으며, 일일 함수량 편차는 FAI처리구의 경우 5.3%, 5.8%, 5.7% 였으며, TIMER 처리구는 4.7%, 6.0%, 6.0%로 적정 범위에 존재하는 것을 볼 수 있었다. 이에 따른 배지내 수분보유율이 2/9일 FAI와 TIMER 처리간 차이가 없는 반면 배액율은 FAI 처리에서는 4.4%, TIMER 처리에서는 54.7%로 컸다. 또한 2월 10일 흐린 날씨였으나 전날의 영향으로 TIMER 처리는 3회 급액됨에 따라 배액율이 70%를 나타내어 급액 횟수가 반영되어도 배액율은 매우 높은 것을 알 수 있었다. 3/ 10일 ~13일 까지 4일 동안은 광량이 비교적 계속 높았던 시기의 일일 함수량 변화로 그림 9~10 및 표 2와 같은 결과를 보였다.

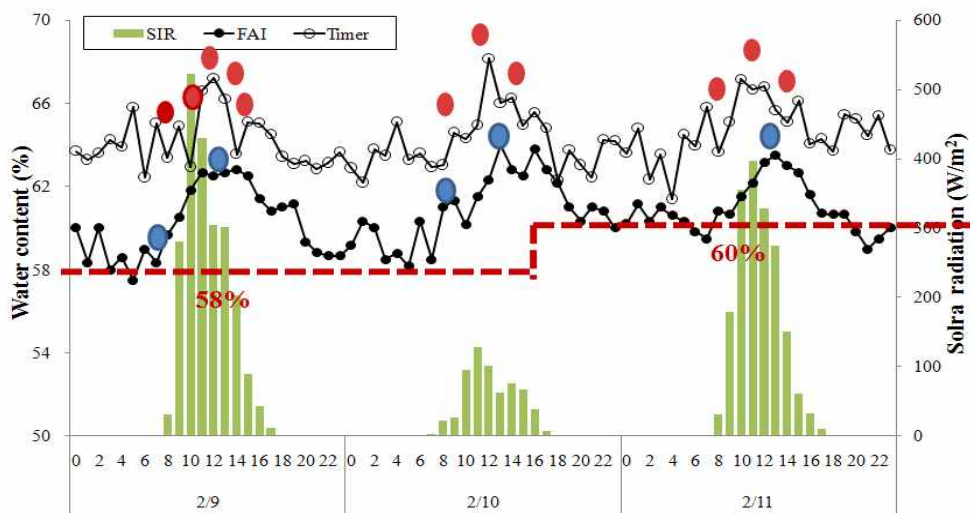


그림 3-1-27. FAI와 TIMER 급액방식별 배지내 함수량 변화 (2015.2.9~2015.2.11)

(붉은 점선은 설정 목표 함수량, 붉은점, 푸른점 급액시기)

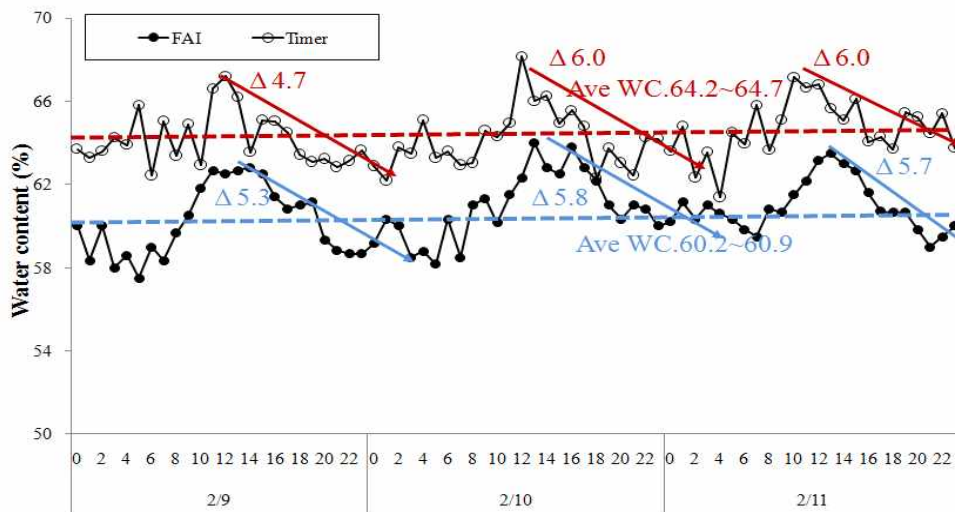


그림 3-1-28. FAI와 TIMER 급액방식별 배지 내 일일 함수량 편차 (2015.2.9~2.11)

(붉은 점선은 설정 목표 함수량)

표 3-1-26. 급액 방식에 따른 일일 급액횟수, 수분보유량 및 배액율

	2/9			2/10			2/11		
	Times	ReV (mL)	DrR (%)	Times	ReV (mL)	DrR (%)	Times	ReV (mL)	DrR (%)
FAI	2	45.9	4.4	2	42.6	10.9	1	23.9	-
TIMER	5	44.9	54.7	3	17.8	70.0	1	55.3	7.0

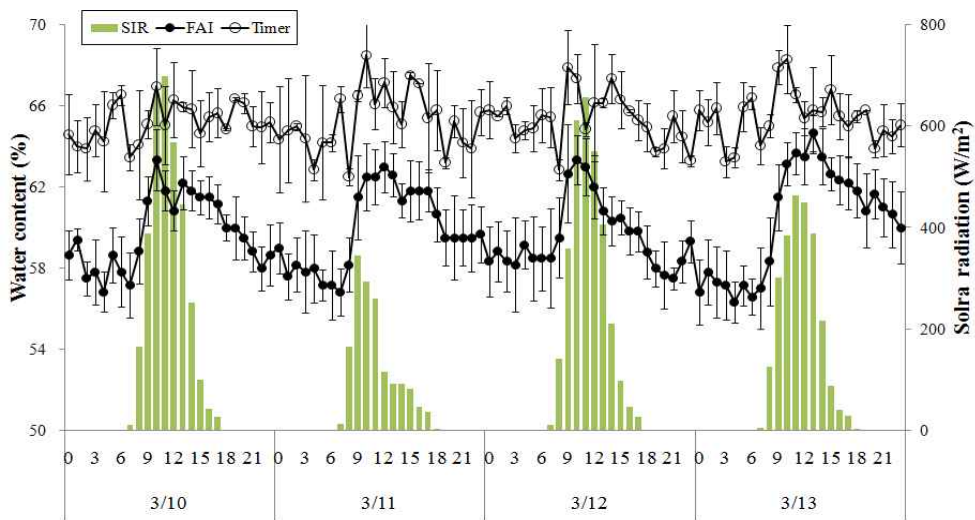


그림 3-1-29. FAI와 TIMER 급액방식별 배지내 함수량 변화 (2015.3.10~2015.3.13)

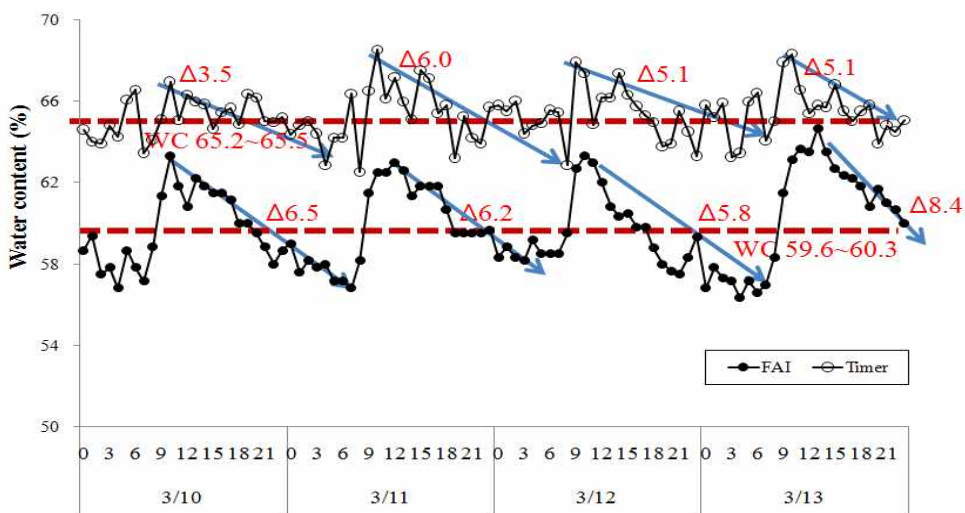


그림 3-1-30. FAI와 TIMER 급액방식에 따른 일일함수량 편차 (2015.3.10 ~3.13)

(붉은 점선은 설정 목표 함수량)

표 3-1-27. 급액 방식에 따른 일일 급액횟수, 수분보유량 및 배액율

	3/10			3/11			3/11			3/12		
	Times	ReV (mL)	DrR (%)	Times	ReV (mL)	DrR (%)	Times	ReV (mL)	DrR (%)	Times	ReV (mL)	DrR (%)
FAI	3	67.6	5.8	2	43.7	8.7	2	41.6	13.1	6	141.4	1.5
TIMER	6	69.9	41.2	4	29.3	63.1	6	31.4	73.6	6	114.7	3.5

3월 중 딸기 완전전개잎의 광합성을 측정된 결과 급액 방식 처리간 차이가 없었으며, 상품수량과 당도에서도 처리간 차이가 없었다(표 3-1-28). 이를 종합해 볼 때 12월~4월 까지 수경재배 하는 동안 급액 방식에 따라 식물 주 당 총급액량이 FAI 처리에서는 8.67L, TIMER 처리에서는 14.89L가 공급된 반면, 배지내 수분보유량은 FAI 처리에서 높은 8.25L를 보였고, 수분이용효율도 높았다. 즉, 배지내 함수량 제어 방식에 따른 급액 공급방식은 기존의 관행 급액방식에 비해 수분이용효율을 높이면서도 배액을 최소화 함에 따라 비순환식재배에서 환경친화적인 재배 방식임을 확인할 수 있었다. 또한 재배 기간 중 총 급액량으로 산출한 비료사용량 또한 FAI 처리구는 TIMER 처리에 비해 약 40% 절감되었다(표 3-1-29).

표 3-1-28. 급액 방식에 따른 딸기 광합성, 생체중, 당도, 총급액량, 배지내 수분보유량 및 수분이용효율

	Photosynthesis	Fresh weight (g/plant)		SSC	T-IrV	ReV.	WUE
	($\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Shoot	Fruit	(°Bx)	(L/plant)	(g·L ⁻¹ /plant)	(g·L ⁻¹ /plant)
FAI	13.6	112.6	402.5	9.6	8.67	8.25	69.3 *
TIMER	13.9	109.8	387.5	9.8	14.89	7.43	56.1

*Asterisk indicates significant differences (t-test, * $p < 0.05$)

표 3-1-29. 급액방식 차이에 따른 딸기 고설수경재배시 비료 급액 (2014년 12월~2015년 4월)

딸기 수경재배시 비료 급액 (원/3,300m ² /5개월)	
FAI	TIMER
403,200 원	691,200 원

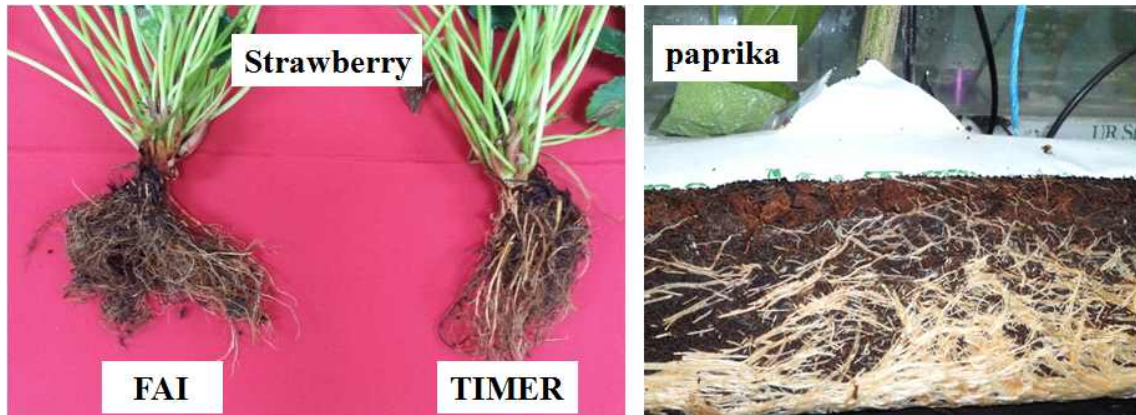


그림 3-1-31. 급액방식에 따른 딸기 근계 (좌) 및 파프리카 근계 (우)

8. FDR 센서를 이용한 딸기 급액관리 체계화를 위한 농가 실증 결과

가. 재료 및 방법

2015년 9월 5일 코이어 배지(dust : chip=40%:60%, v/v)에 8.7주/m² (주간 20cm 간격)정식하여 수경재배하였다. 급액 방식은 FDR 센서 자동급액제어 방식과 일사량을 이용한 급액제어 방식, 관행인 타이머 방식으로 하였으며, 처리는 10월 28일에 시작하였다. 사용 배양액은 유기 배지에 적합하게 조성된 딸기 배양액으로 급액하였다.

FDR센서 자동 급액은 (주)그린씨에스 개발한 급액시스템(Magma-1000, GreenCS Ltd., Korea)에 65mm FDR센서(미래센서)를 연결하여 제어함수율, 최소대기시간, 최대대기시간, 급액 시작 시간을 지정하여 급액할 수 있도록 하였다. 이때 1회 급액시간은 초기 3분으로 설정하였으며, 이는 관행 급액 시간에 준한 것으로 1회당 35mL가 급액 되도록 유량계를 조정하였다. 센서 위치는 작물과 작물사이로 약간 베드 위 부분을 파고 꼽아 센서의 하단부가 바닥으로부터 5cm 정도 떨어져 딸기 뿌리 주위의 함수량을 측정하여 관수에 적용할 수 있도록 설치하였다.

일사량을 이용한 급액은 일일 적산일사량과 작물생육 단계를 고려하여 270J/m²에서 150/m²로 급액횟수를 늘렸으며, 1회 급액시간과 급액량은 FDR 센서 공급과 동일하게 설정하였다.

관행 급액은 작물 상태와 날씨를 고려하여 2~8회/day, 11.6mL/회, 일출 후 2시간에 관비시스템(Agrow-2000, HPA-2003, Hangaram, Korea)급액을 시작하고, 일몰 전 2시간에 급액을 종료하였다. 일일 함수량, 배지내 EC, 온도는 (주)미래센서 데이터로거(WT600, Mirae Sensor)를 이용하여 10분 간격으로 저장하여 자료를 분석하였다.

측정항목은 일일 급액량과 배액 양 을 측정하였으며, 상품수량을 조사하였다. 급액량과 배양액을 이용하여 수분 보유량과 배액율(%)을 산출하였다.



그림 3-1-32. 급액 방식에 따른 실험 전경

나 . 결과 및 고찰

실험에 설정된 FDR 센서를 이용한 자동급액 방식 목표함수량과 일사량을 이용한 자동급액 방식 일사량, 타이머 시간과 횟수는 다음 표와 같이 생육 상태를 고려하여 급액 제어 설정이 변경되었으며, 기간 중 평균 일일 급액량, 배액량, 배지내 보유수분량 및 배액율은 달랐다(표 1). 일일평균 급액량, 평균 배액량, 보유량 및 배액율이 FDI 방식에서는 93.9ml, 9.9ml, 84.0ml, 10.7%, 일사량 방식에서는 131.2ml, 36.3ml, 94.9ml, 40.5%, Timer 방식에서는 85.3ml, 42.2ml, 43.1ml, 56.1%을 나타나, 1일 급액량과 배지 내 보유수분량은 일사량 방식에서 가장 많았으며 배액량과 배액율은 FDI 방식에서 가장 적었다. 타이머 방식은 급액량과 배지내 수분보유량은 FDI와 일사량 방식에 비해 적은 반면, 배액율은 높은 특징을 보였다. 타이머 급액방식은 48주~52주 초기는 FDI와 일사량 방식에 비해 공급량이 많았으나, 이후는 적게 공급되면서도 배액량이 많아 배액율이 높았으며, 작물 생육과, 온도 및 일사량이 증가하는 시기에 FDI와 일사량 공급방식에는 급액량이 점차적으로 증가된 것을 볼 수 있다(그림 2). 급액량 대비 배액량이 FDI 방식에서는 1주 이후 주별 평균 배액율이 7% 내외 였으나, 일사량구는 재배 기간 중 평균 36.1%을 보였다(그림 3).

그림 4는 배지 내 함수량 변화를 나타낸 것으로 일사량 방식에서 평균 71% 내외의 함수량을 나타내 가장 높았으며, FDI 방식은 64%를 나타냈다. 붉은 색 선은 FDI 급액 방식에서의 제어 함수량으로 함수량 제어가 비교적 잘 되고 있음을 나타냈다. 그러나 배지 내 EC는 FDI 방식에서 EC 1.4dS/m, 타이머와 일사량 방식은 EC 1.0~1.1dS/m로 나타났으나, 딸기 재배에 높

은 수준은 아닌 것으로 판단된다. 급액 방식에 따른 배액의 무기 성분 변화는 그림 5와 같이 처리와 시기에 따라 달랐으나 FDI방식에서 다량 성분인 N, K, Ca 함량은 다소 낮은 경향을 보여 기존 토마토 재배에서의 결과와 유사한 것으로 보인다.

표 3-1-30. 급액 방식에 따른 설정함수량, 평균급액량, 평균배액량, 평균보유량 및 배액율
(2015. 11.26~2016.4.11)

	PTP ^z (%)	Ave. IrV	Ave. DrV	Ave. RtV	DrR
		(mL/day/plant)			(%)
FDI					
26-Nov ~	67	42.3	18.7	23.6	47.7
9-Dec ~	59	58.3	16.6	41.7	25.0
29-Dec ~	58	35.9	0.0	35.9	0.0
30-Dec ~	57	46.8	0.2	46.7	0.4
5-Jan ~	59	47.8	0.0	47.8	0.0
6-Jan ~	60	67.8	0.5	67.2	0.7
12-Jan ~	61	87.7	0.7	87.0	0.7
15-Jan ~	62	82.6	11.6	71.1	10.8
26-Jan ~	63	95.7	11.5	84.2	11.3
28-Jan ~	64	105.2	11.8	93.4	9.6
12-Feb ~	65	112.8	15.9	96.8	13.8
19-Feb ~	66	205.0	25.7	179.3	11.9
22-Mar ~	64	232.3	14.9	217.5	6.6
평균		93.86	9.85	84.02	10.65
Solar					
	(J)				
26-Nov ~	250	47.8	25.0	22.8	52.3
27-Nov ~	270	61.8	49.8	12.0	80.5
9-Dec ~	250	67.3	25.6	41.7	37.5
2-Jan ~	150	132.5	53.2	79.4	41.8
26-Jan ~	180	147.9	26.1	121.8	19.6
22-Mar ~	150	329.7	38.2	291.5	11.5
평균		131.17	36.32	94.87	40.53
Timer					
26-Nov ~	3min-3times	89.2	56.6	32.6	63.5
29-Nov ~	3min-2times	59.5	56.3	3.2	94.6
30-Nov ~	3min-3times	89.2	54.2	35.0	60.7
2-Dec ~	3min-1times	29.7	18.8	11.0	63.1
3-Dec ~	3min-2times	59.5	43.8	15.7	73.6
4-Dec ~	3min-3times	89.2	56.9	32.2	63.9
10-Dec ~	3min-2times	59.5	52.1	7.4	87.6
11-Dec ~	3min-3times	89.2	52.8	36.4	59.2
14-Dec ~	3min-2times	59.5	54.2	5.3	91.1
15-Dec ~	3min-3times	89.2	45.8	43.3	51.4
18-Dec ~	3min-2times	59.5	34.1	25.3	57.4
22-Dec ~	3min-3times	89.2	62.5	26.7	70.1

23-Dec ~	2min-3times	59.5	44.3	15.2	74.5
25-Dec ~	2min-4times	79.3	45.8	33.4	57.8
26-Dec ~	2min-3times	59.5	56.3	3.2	94.6
27-Dec ~	2min-4times	79.3	47.4	31.9	59.8
2-Jan ~	2min-3times	59.5	46.9	12.6	78.8
4-Jan ~	2min-4times	79.3	46.0	33.2	58.1
24-Jan ~	2min-5times	99.1	62.0	37.1	62.6
28-Jan ~	2min-4times	79.3	46.4	32.9	58.5
30-Jan ~	2min-2times	39.6	9.4	30.3	23.7
31-Jan ~	2min-4times	79.3	23.7	55.6	29.8
7-Feb ~	2-1+3-3	109.0	41.7	67.3	38.2
8-Feb ~	3min-2times	59.5	44.8	14.7	75.3
9-Feb ~	3min-4times	118.9	75.0	43.9	63.1
11-Feb ~	3min-3times	89.2	35.4	53.8	39.7
12-Feb ~	3min-1times	29.7	19.8	9.9	66.6
13-Feb ~	3min-3times	89.2	66.7	22.5	74.8
14-Feb ~	3min-2times	59.5	41.7	17.8	70.1
15-Feb ~	3min-3times	89.2	31.3	57.9	35.0
16-Feb ~	3min-3times	59.5	28.1	31.3	47.3
17-Feb ~	3min-3times	89.2	7.3	81.9	8.2
20-Feb ~	3min-10tim	297.3	0.0	297.3	0.0
26-Feb ~	3min-4times	118.9	22.9	96.0	19.3
28-Feb ~	3min-2times	59.5	35.4	24.0	59.6
29-Feb ~	3min-3times	89.2	54.2	35.0	60.7
1-Mar ~	3min-4times	118.9	50.0	68.9	42.1
2-Mar ~	3min-2times	59.5	45.8	13.6	77.1
3-Mar ~	3min-4times	118.9	34.0	84.9	28.6
24-Mar ~	3min-5times	148.6	50.0	98.6	33.6
25-Mar ~	3min-4times	118.9	31.3	87.7	26.3
평균		84.50	42.51	41.97	56.84

²PTP :급액 제어 설정(Preset trigger point), IrV:급액량, DrV:배액량, RtV:보유량, DrR:배액율

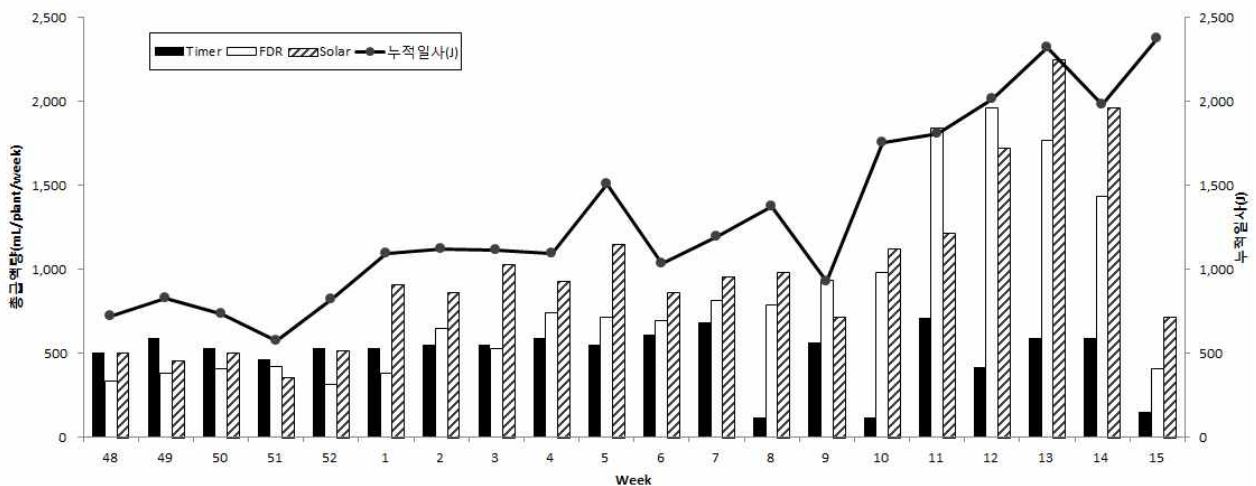


그림 3-1-33. 일사량에 따른 급액방식별 주당 총 공급액량 변화(2015.11.26.~2016.4.11.)

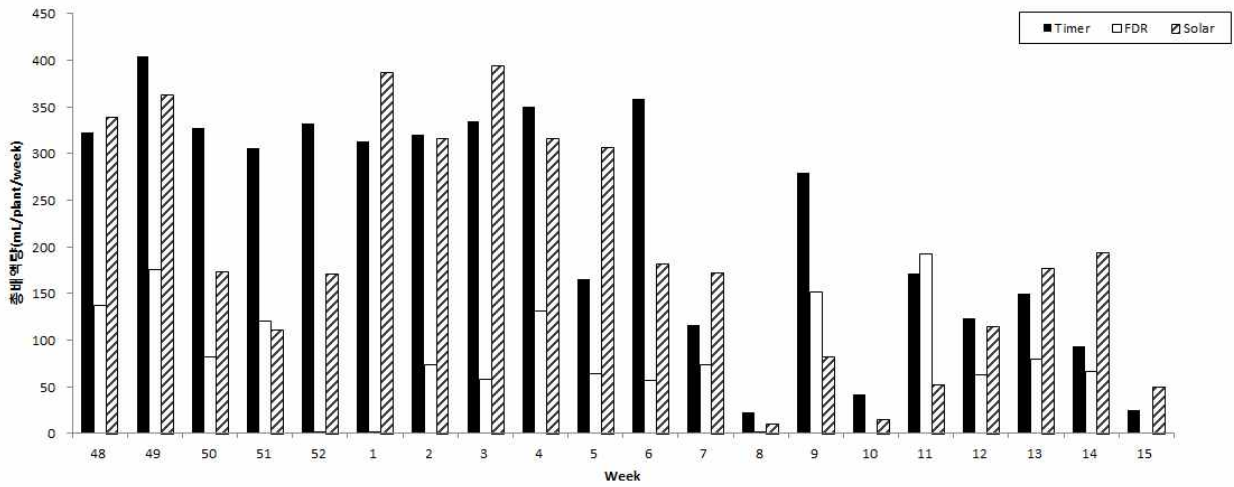


그림 3-1-34. 급액방식별 주당 총 배액량 변화(2015.11.26.~2016.4.11.)

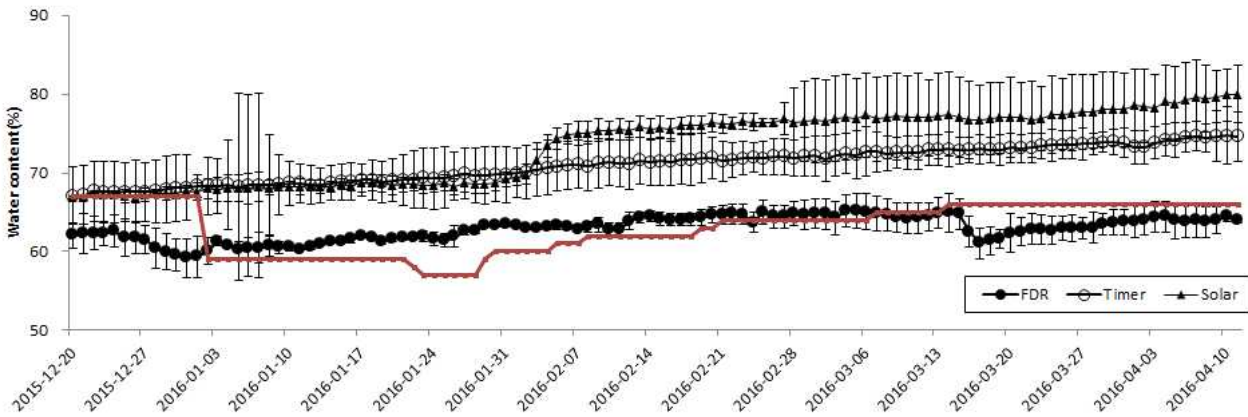


그림 3-1-35. 급액방식별 배지 내 함수량 변화(2015.12.20.~2016.4.11.)

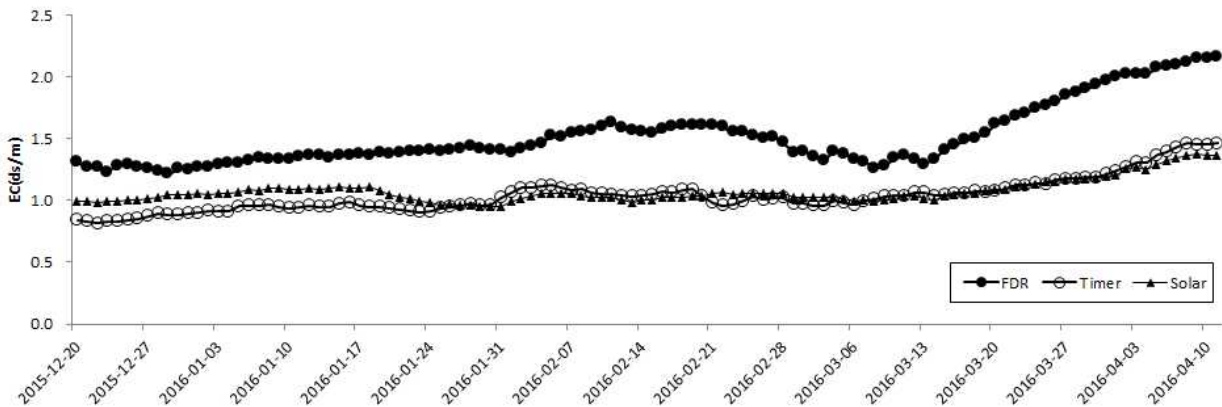
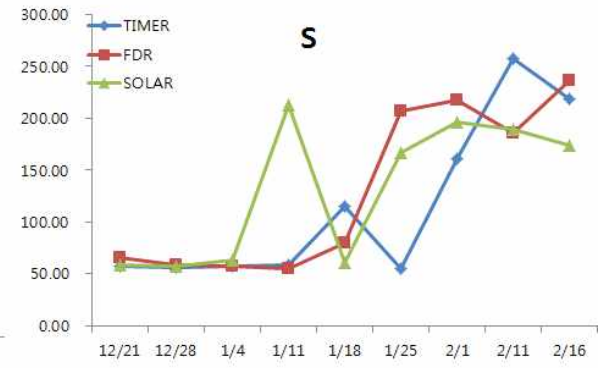
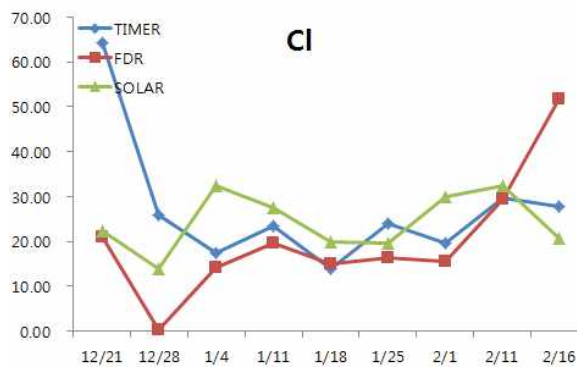
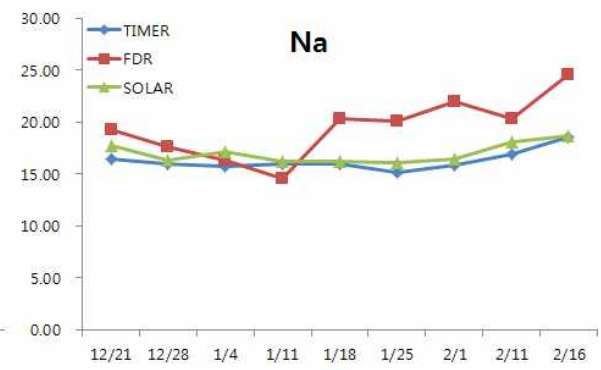
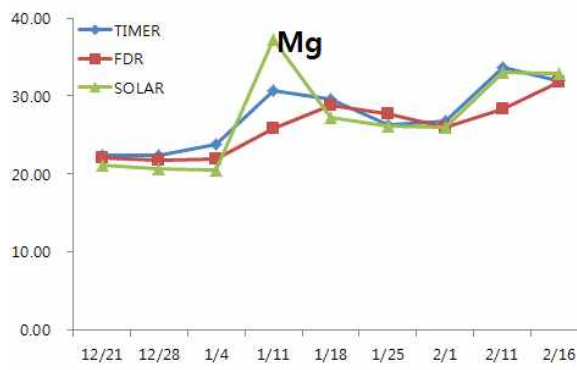
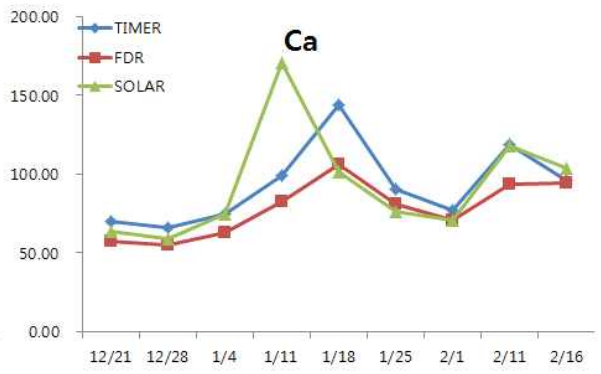
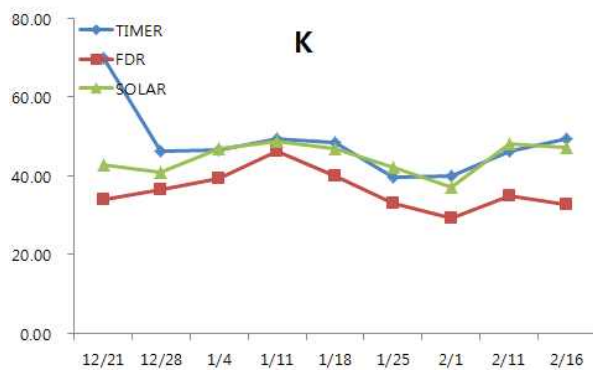
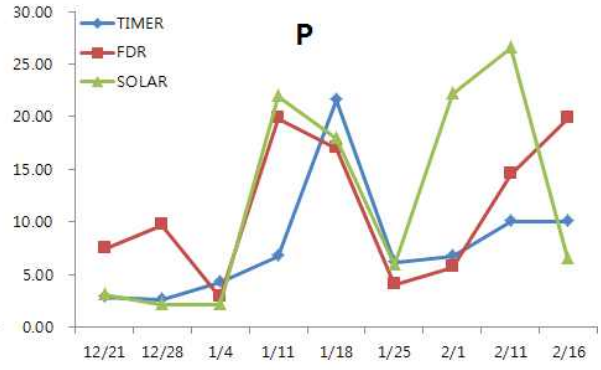
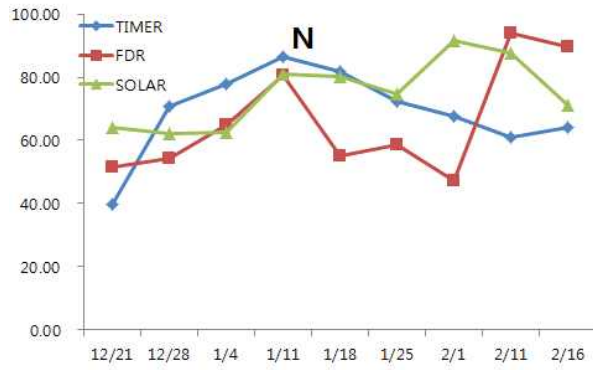


그림 3-1-36. 급액방식별 배지 내 EC 변화(2015.12.20.~2016.4.11.)



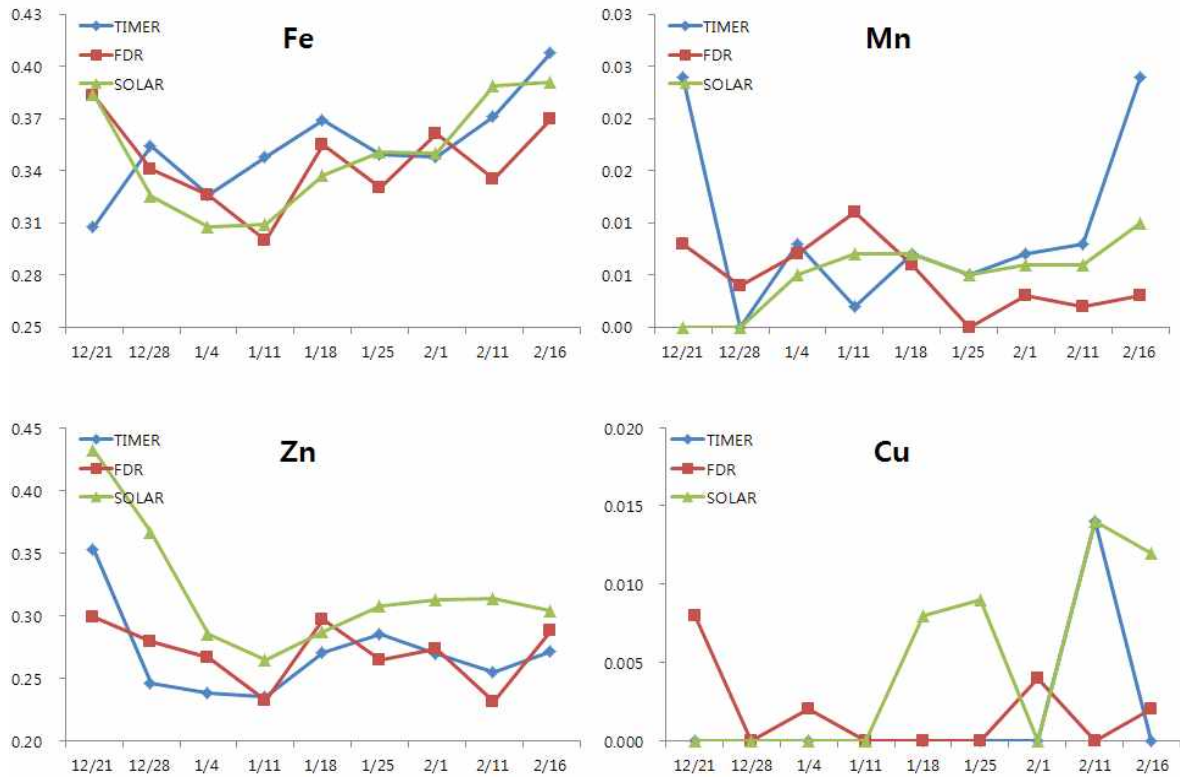


그림 3-1-37. 급액방식 별 배액 내 무기함량 변화

채배 중 12월 9일부터 다음 해 1월 30일 까지의 주별 과수 및 수량은 처리에 따라 차이가 없었으며(표 2), 경도, 당도 색도도 처리에 따른 차이가 없었다(자료 미제시). 이상의 결과 기존 관행 방식인 타이어 제어에 비해 FDI 방식은 작물생육에 맞게 주당 일일 급액량이 15ml 은 많이 공급되었음도 배액율은 45% 이상 감소하였고, 생육과 수량에는 차이가 없어 환경 친화적인 급액 방식이 가능함을 확인할 수 있었다.

표 3-1-31. 기간별 딸기 과수 및 무게

처리 기간	SOLAR(주)		TIMER(주)		FDI (주)	
	과수(ea)	무게(g)	과수(ea)	무게(g)	과수(ea)	무게(g)
2015-12-9~2015-12-31	3.0	83.2	4.1	104.9	4.4	107.5
2016-1-2~2016-1-30	3.7	77.8	2.9	55.2	2.2	45.7
계	6.7	161.0	7.1	160.1	6.6	153.2

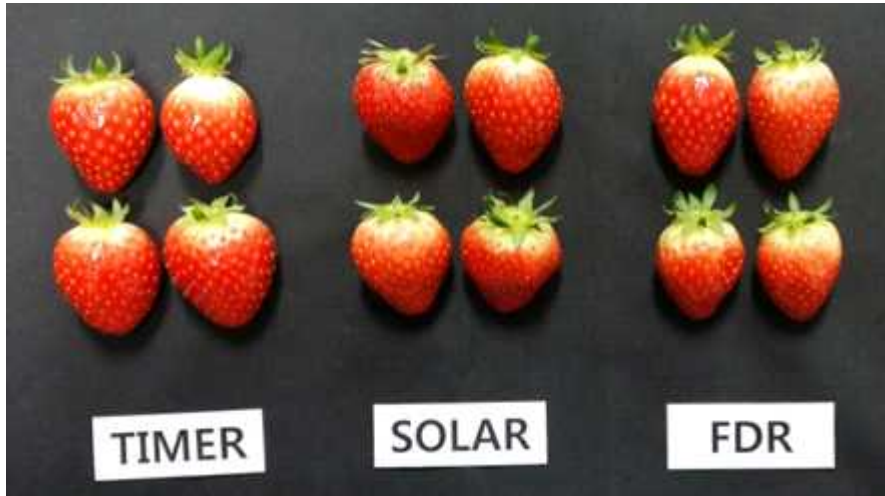


그림 7. 급액 방식에 따라 재배된 딸기 (2016.3.4.)

제 2 절 파프리카 배액 극소화(무배액) 시스템 실용화 기술 개발

1. 파프리카 코이어배지의 수경재배시 품종별 배액률 및 칩비율에 따른 생육효과

가. 재료 및 방법

본 실험은 2013에서 2014년에 시설원예시험장 유리온실에서 수행되었다. 일반파프리카 ‘쿠프라’(적색), ‘피에스타’(황색) 및 ‘미니파프리카’(적색) 3 품종(Enza Zaden, The Netherlands)을 이용하여 8월 27일에 파종하였다. 정식 시기는 파종 후 약 40~45일인 본엽 6~7매, 첫 꽃이 생성될 때를 기준으로 파프리카 양액육묘법에 준한 육묘방식을 이용하여, 10월 24일 코이어(분말 3, 칩 7)배지 슬라브(5,7.5 x 15 x 100cm)에 정식을 하였다. 배양액은 그로단표준액을 사용하였고, 정식 후 공급 양액의 EC는 2.0~2.3dS/m 정도로 육묘기의 마지막 공급 EC 보다 0.2dS/m 정도 높게 공급하였다. 착과 후의 공급 EC는 3.0~3.2, pH 5.2~5.7내외로 하였다.

배지 내 수분함량을 FDR 센서(미래센서 Co, Ltd Kor)를 이용하여 데이터 로거(CR10x, campbell Co. Ltd USA)에 연결하여 측정하면서 배액비율을 설정하였다. 배액비율은 0%, 1%, 2%, 3%, 5%, 7%로 설정하여 처리구를 두었다. 1일 급액시간은 아침 7시부터 오후 4시까지 설정하였고 제어하였다.

주요재배는 파프리카 수경재배법에 준하였고 생육, 품질 및 배꼽썩음과 발생률 등을 조사하였다.

나. 결과 및 고찰

표 3-2-1. 배액비율에 따른 평균관수량 및 총관수량

배액률 (%)	평균관수량(/ml일/주)			총관수량 (L/주)
	생육초기 (8/28~3/15)	생육중기 (3/16~5/13)	성숙기 (5.14~6/30)	
0.0	300	495	720	110.7
1.0	360	630	900	144.0
2.0	450	765	1,080	177.3
3.0	540	900	1,260	210.6
5.0	630	1035	1,440	243.9
7.0	720	1170	1,620	277.2

표 3-2-1은 배액비율에 따른 1일 평균관수량은 나타낸 것으로 생육초기에는 1일 배액량이 많을수록 공급량의 차이가 컸으며 생육중기 및 생육후기로 갈수록 1일 관수량이 적은 경향이였다. 총관수량은 배액율 0%가 110.7 L/주였고, 배액율 3.0%가 210.6L/로 배액율 0%에 비해 2배, 배액율 7%가 2.8배 많았다.

표 3-2-2. 배액비율에 따른 근권의 무기염농도(EC, dS/m)의 변화

배액률 (%)	8월	10월	12월	2월	4월	6월
0.0	2.8	2.9	3.1	3.8	3.9	3.5
1.0	2.6	2.8	3.0	3.6	3.7	3.5
2.0	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.4
3.0	2.8	2.7	2.9	3.5	3.5	3.3
5.0	2.5	2.7	2.9	3.3	3.6	3.2
7.0	2.5	2.6	2.9	3.3	3.5	3.3

표 3-2-2는 생육단계별 배액율에 따른 근권의 EC 변화를 나타낸 것으로 배액율이 많을수록 배지내 근권의 EC는 낮았고, 생육은 진행될수록 EC가 높아지는 경향이였다. 이는 배액율이 낮을수록 배지내 무기염의 증가속도가 빨라지고 생육이 진행됨에 따라 처리기간의 길어짐으로 상승효과가 있는 것으로 판단되었다.

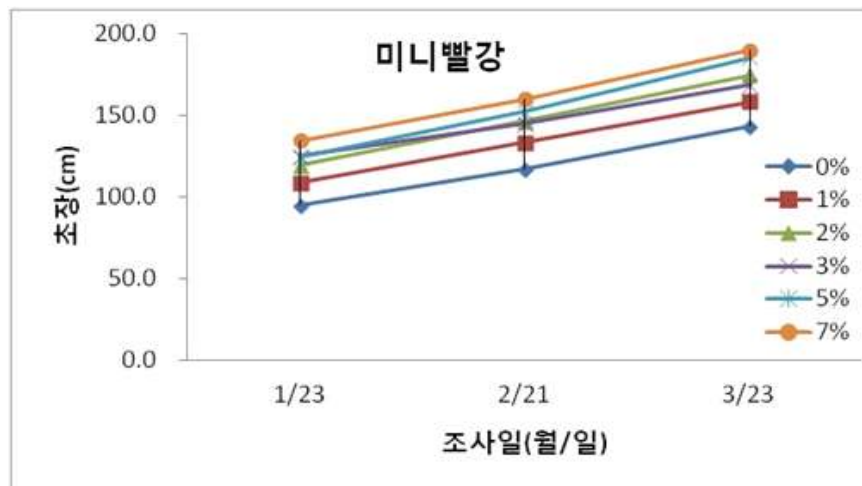
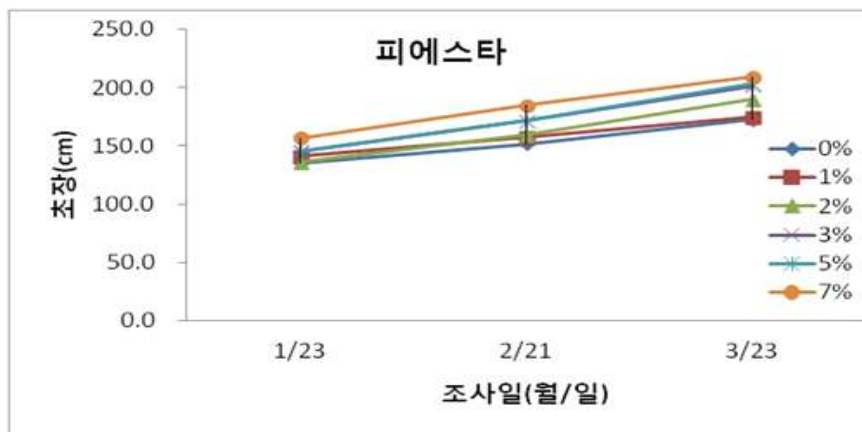
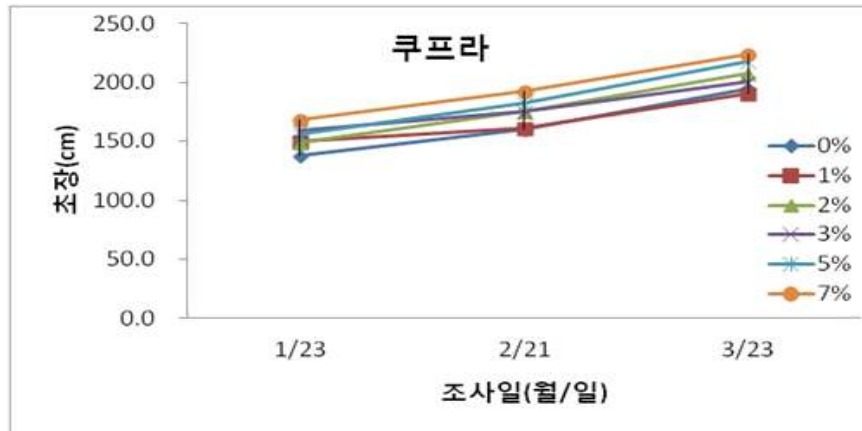


그림 3-2-1. 배액비율에 따른 시기별 초장의 변화

그림 3-2-1은 배액비율에 따른 생육단계별 초장의 변화를 나타낸 것으로 쿠프라, 피에스타, 미니파프리카 3품종 모두 생육초기에는 배액비율에 따른 초장의 차이가 적었으나 생육이 진행됨에 따라 배액비율이 적을수록 초장의 길이가 작아지는 경향이였다. 특히 미니파프리카에서 초장의 생육차이가 뚜렷하였다.

표 3-2-3. 배액비율에 따른 평균과중 및 수량

품종	배액률 (%)	평균과중 (g)	착과수 (개/주)	과중 (g/주)	수량 (kg/10a)	상품율 (%)
쿠프라	0.0	177.7 cz	18.0 a	2,132.4 c	7,037 c	65
	1.0	210.7 b	17.9 a	2,507.4 b	8,274 b	66
	2.0	249.0 a	16.5 a	2,738.7 a	9,038 a	75
	3.0	242.4 a	16.7 a	2,754.0 a	9,088 a	74
	5.0	237.7 a	18.8 a	2,737.8 a	9,035 a	76
	7.0	243.6 a	16.8 a	2,728.5 a	9,004 a	73
	m	226.9	17.4	2,599.8	8,579	71.5
피에스타	0.0	237.2 b	13.5 b	2,135.1 c	7,046 c	70
	1.0	226.9 b	21.3 a	3,222.3 b	10,634 b	75
	2.0	247.4 a	22.5 a	3,711.3 a	12,247 a	82
	3.0	242.1 a	21.9 a	3,533.7 a	11,661 a	83
	5.0	244.4 a	21.2 a	3,446.4 ab	11,373 a	82
	7.0	242.7 a	19.8 a	3,203.7 b	10,572 b	83
	m	240.1	20.0	3,208.8	10,589	79.2
미니 파프리카	0.0	42.9 c	59.0 a	1,685.4 b	5,562 b	82
	1.0	48.9 b	49.8 a	1,623.9 b	5,359 b	85
	2.0	48.4 b	56.1 a	1,808.7 a	5,969 b	86
	3.0	49.0 b	62.7 a	2,048.1 a	6,759 a	87
	5.0	50.7 b	52.1 a	1,760.4 b	5,809 b	86
	7.0	56.5 a	45.8 a	1,669.2 b	5,508 b	86
	m	49.4	54.2	1766.0	5,828	85.3

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

표 3-2-3은 배액비율에 따른 평균과중 등 수량구성요소와 수량 및 상품율을 나타낸 것이다. 평균과중은 쿠프라 및 피에스타 품종에서는 배액율이 증가할수록 무거운 경향이었으나 2%이상의 배액처리구에서는 유의차가 없었다. 미니파프리카에서는 배액비율 0% 처리구에서 평균과중이 가벼웠으나 배액비율이 증가하여도 평균과중 증가폭은 적었으며 7%배액 처리구에서는 오히려 감소하는 경향이였다. 주당 착과수는 피에스타 품종의 경우 0% 배액 처리구에서 감소하는 경향이였으나 여타 모든 처리구에서의 배액비율에 따른 유의차는 없었다. 수량은 쿠프라와 피에스타 품종은 배액비율이 1%까지는 수량이 감소하였으나 2%이상의 배액처리구에서는 배액비율간의 유의차가 없었다. 미니파프리카는 배액비율이 3%처리구에서 가장 수량이 많았다. 상품비율은 배액비율이 증가할수록 높은 경향이였으며 품종간에는 쿠프라보다는 피에스타 품종이 상품비율이 높았다. 미니파프리카는 배액비율과는 상관없이 82~87%의 높은 상품비율을 나타냈다. 낮은 배지함수량은 식물체의 생육을 억제하여 과실이 작고 평균과중이 감소되는 결과(Hayata 등, 1998; An 등, 2009)를 보였으나 주당 착과수가 많았으며 그 결과 10a당 상품수량이 증가하였다는 결과는 본연구의 배액이 적은데 수량이 증가하는 결과와 일치하였다.

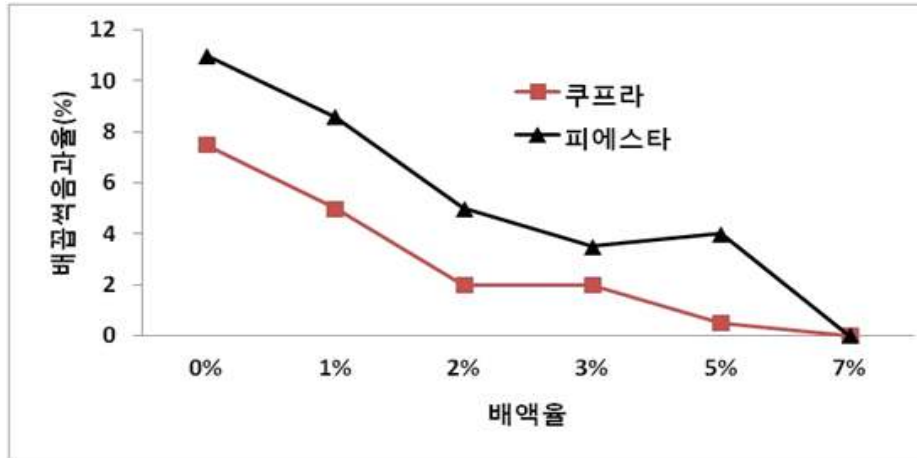


그림 3-2-2. 배액비율에 따른 과실의 배꼽썩음과 발생율

그림 3-2-2는 배액비율에 따른 파프리카 품종별 배꼽썩음과 발생율을 나타낸 것이다. 배꼽썩음과는 쿠프라, 피에스타 두 품종 모두 배액비율이 낮을수록 발생율이 높았고, 피에스타에 비해 쿠프라 품종의 배꼽썩음과 발생율이 높았다. 그러나 미니파프리카는 배액비율에 따른 배꼽썩음과가 발생하지 않았다. 배꼽썩음과(BER) 발생은 고수준보다 저수준의 관수에서 많이 발생한다는 보고(Yu 등, 2006; Dorji와 Behboudian, 2003)와 일치하였다.

표 3-2-4. 배액비율에 따른 과육두께와 당도

품종	배액률 (%)	과고 (mm)	과폭 (mm)	심실수 (개)	과육두께 (mm)	당도 (%)
쿠프라	0.0	91.7 a ²	40.8 a	2.6 a	5.8 a	10.4 a
	1.0	94.0 a	37.7 a	2.2 a	5.1 a	9.6 a
	2.0	88.2 a	39.7 a	2.2 a	5.8 a	9.7 a
	3.0	85.5 a	37.1 a	2.6 a	6.5 a	9.9 a
	5.0	91.1 a	39.2 a	2.6 a	5.7 a	10.4 a
	7.0	82.1 a	40.0 a	3.0 a	5.9 a	9.2 a
	m	88.8	39.1	2.5	5.8	9.9
피에스타	0.0	89.1 a	82.0 a	3.6 a	7.4 a	7.1 a
	1.0	89.9 a	79.3 a	3.8 a	7.0 a	7.2 a
	2.0	91.5 a	75.9 a	3.4 a	7.8 a	7.2 a
	3.0	89.6 a	82.0 a	3.6 a	7.4 a	7.2 a
	5.0	85.0 a	82.3 a	3.6 a	7.6 a	6.9 a
	7.0	84.9 a	83.1 a	4.0 a	7.7 a	6.7 a
	m	88.3	80.8	3.7	7.5	7.1
미니파프리카	0.0	91.7 a	40.8 a	2.6 a	5.8 a	10.4 a
	1.0	94.0 a	37.7 a	2.2 a	5.1 a	9.6 a
	2.0	88.2 a	39.7 a	2.2 a	5.8 a	9.7 a
	3.0	85.5 a	37.1 a	2.6 a	6.5 a	9.9 a
	5.0	91.1 a	39.2 a	2.6 a	5.7 a	10.4 a
	7.0	82.1 a	40.0 a	3.0 a	5.9 a	9.2 a
	m	88.8	39.1	2.5	5.8	9.9

²Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

표 3-2-4는 배액비율에 따른 과육두께와 당도를 나타낸 것이다. 모든 품종이 과고 및 과폭은 배액비율에 따른 유의차가 없었으며 심실수 및 과육두께도 같은 경향으로 처리간에 차이가 없었다. 과실의 당도는 배액농도 간에는 차이가 없었으나 품종 간에는 미니파프리카가 피에스타 품종보다는 높은 경향이였다.

이상의 결과에서 2~3%의 배액율에서 생육이 양호하고 수량감소가 없는 것으로 판단되었다.

표 3-2-5. 칩 비율에 따른 파프리카의 초기생육과 수량

품종	칩 비율 (칩 : 분말)	초장 (cm)	평균과중 (g)	착과수 (개/주)	과중 (g/주)	수량 (kg/10a)
쿠프라	7 : 3	147.5 a ²	248.5 a	5.4 a	1,342	4,428 a
	5 : 5	138.5 b	247.6 a	4.3 b	1,065	3,513 b
	3 : 7	139.2 b	246.8 a	3.4 b	839	2,769 c
	m	141.7	247.6	4.4	1,082	3,570
피에스타	7 : 3	135.4 a	237.7 a	5.6 a	1,380	4,555 a
	5 : 5	135.6 a	243.6 a	4.8 a	1,169	3,859 a
	3 : 7	131.3 a	226.9 a	4.6 a	1,120	3,696 a
	m	137.4	237.2	5.0	1,223	4,037
미니파프리카	7 : 3	89.4 a	256.9 a	8.8 a	372	1,228 a
	5 : 5	88.7 a	247.4 a	7.4 ab	307	1,013 a
	3 : 7	78.9 a	242.1 a	6.8 b	294	969 b
	m	85.7	244.4	7.7	324	1,070

²Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

표 3-2-5는 칩 비율에 따른 파프리카의 초기생육과 수량을 나타낸 것이다. 쿠프라는 7 : 3의 칩 비율에서 초장이 길었으나 다른 품종은 비율에 따른 차이가 없었다. 평균과중은 세 품종 모두 칩 비율에 따른 유의차가 없었다. 착과수는 세 품종 모두 칩 비율이 높을수록 많으며, 그 결과 수량도 증가하였다.

다. 결과요약

파프리카 ‘쿠프라’(적색), ‘피에스타’(황색) 및 ‘미니파프리카’(적색) 3 품종을 공시하여 코이어 배지 내 수분함량을 FDR 센서를 이용하여 배액비율을 제어하였다. 3품종 모두 생육초기에는

배액비율에 따른 초장의 차이가 적었으나 생육이 진행됨에 따라 배액비율이 낮을수록 초장의 길이가 작아지는 경향이였다. 평균과중은 쿠프라 및 피에스타 품종에서는 배액율이 증가할수록 무거운 경향이였으나 2%이상의 배액처리구에서는 유의차가 없었다. 미니파프리카에서는 배액비율 0% 처리구에서 평균과중이 가벼웠으나 배액비율이 증가하여도 평균과중 증가폭은 적었으며 7%배액 처리구에서는 오히려 감소하는 경향이였다. 주당 착과수는 피에스타 품종의 경우 0% 배액 처리구에서 감소하는 경향이였으나 여타 모든 처리구에서의 배액비율에 따른 유의차는 없었다. 수량은 쿠프라와 피에스타 품종은 배액비율이 1%까지는 수량이 감소하였으나 2%이상의 배액처리구에서는 배액비율간의 유의차가 없었다. 미니파프리카는 배액비율이 3%처리구에서 가장 수량이 많았다. 상품비율은 배액비율이 증가할수록 높은 경향이였으며 품종간에는 쿠프라보다는 피에스타 품종이 상품비율이 높았다. 미니파프리카는 배액비율과는 상관없이 82~87%의 높은 상품비율을 나타냈다. 배꼽썩음과는 쿠프라, 피에스타 두 품종 모두 배액비율이 낮을수록 발생율이 높았고, 피에스타에 비해 쿠프라 품종의 배꼽썩음과 발생율이 높았다. 그러나 미니파프리카는 배액비율에 따른 배꼽썩음과가 발생하지 않았다. 모든 품종이 과고 및 과폭은 배액비율에 따른 유의차가 없었으며 심실수 및 과육두께도 같은 경향으로 처리간에 차이가 없었다. 과실의 당도는 배액농도 간에는 차이가 없었으나 품종 간에는 미니파프리카가 피에스타 품종보다는 높은 경향이였다.

이상의 결과에서 2~3%의 배액율에서 생육이 양호하고 수량감소가 없는 것으로 판단되었다.

2. 파프리카 수경재배시 코이어배지의 칩비율과 배액율 에 따른 생육 및 품질

가. 재료 및 방법

본 실험은 2014에서 2015년에 시설원예시험장 유리온실에서 수행되었다. 일반파프리카 ‘쿠프라’(적색), 및 ‘미니파프리카’(적색)2품종(Enza Zaden, The Netherlands)을 이용하여 8월 27일에 파종하였다. 정식 시기는 파종 후 약 40~45일인 본엽 6~7매, 첫 꽃이 생성될 때를 기준으로 파프리카 양액육묘법에 준한 육묘방식을 이용하여, 10월 24일 코이어배지 슬라브(5,7.5 x 15 x 100cm)에 정식을 하였다. 코이어배지는 칩과 분말비율을 5:5 및 8:2로 처리를 두었다. 그리고 배양액은 그로단표준액을 사용하였고, 정식 후 공급 양액의 EC는 2.0~2.3dS/m 정도로 육묘기의 마지막 공급 EC 보다 0.2dS/m 정도 높게 공급하였다. 착과 후의 공급 EC는 3.0~3.2, pH 5.2~5.7내외로 하였다.

배지 내 수분함량을 FDR 센서(미래센서 Co, Ltd Kor) 를 이용하여 데이터 로거(CR10x, campbell Co. Ltd USA)에 연결하여 측정하면서 공급회수를 제한하면서 배액비율을 설정하였다. 배액비율은 0~1%, 3~5%, 7~9%로 설정하여 처리구를 두었다. 1일 급액시간은 아침 7시부터

오후 4시까지 설정하였고 제어하였다.

주요재배는 파프리카 수경재배법에 준하였고 생육, 품질 및 배꼽썩음과, 일소과 등 발생률 등을 조사하였다.

나. 결과 및 고찰

표 3-2-6은 배액비율에 따른 1일 평균관수량은 나타낸 것이다. 배액비율이 많을수록 양액공급량이 증가하였고 생육초기에비해 생육중기 및 생육후기가 양액공급량이 많았다. 배지간에는 칩비율이 높은 배지가 공급량이 증가하는 경향이였다. 생육초기에 비해 생육중기 및 생육후기에 배액비율이 증가할수록 공급량이 증가하였다.

표 3-2-6. 배액비율에 따른 평균관수량 및 총관수량

배지 (칩:분말)	배액률 (%)	평균관수량(/ml/일/주)			총관수량 (L/주)
		생육초기 (8/28~3/15)	생육중기 (3/16~5/13)	성수기 (5.14~6/30)	
5:5	0~1	320	536	750	120.7
	3~5	560	840	1,100	254.6
	5~7	650	960	1,280	280.6
8:2	0~1	430	850	1,200	180.2
	3~5	854	1260	1,650	253.9
	5~7	926	1380	1,860	320.2

총관수량은 칩비율 5:5에서 배액율 0%가 120.7 L/주였고, 배액율 3~5%가 254.6L/주, 그리고 배액율 5~7%가 280.6L/주였으며, 칩비율 8:2에서 배액율 0%가 180.2 L/주였고, 배액율 3~5%가 253.9L/주, 그리고 배액율 5~7%가 320.2L/주였다. 3~5, 5~7% 모두 배액비율의 증가는 관수량이 2배이상 증가하는 경향이였고 칩비율 8:2의 칩비율이 많은 것에서 관수량이 증가하였다.

표 3-2-7. 배액비율에 따른 근권의 무기염농도(EC, dS/m)의 변화

품종	배지 (칩:분말)	배액률 (%)	8월	10월	12월	2월	4월	6월	
‘쿠프라’	5:5	0~1	2.8	2.9	3.8	3.8	3.9	4.2	
		3~5	2.5	2.8	3.0	3.6	3.7	3.5	
		5~7	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.4	
		m	2.6	2.8	3.3	3.6	3.7	3.7	
	8:2	0~1	2.8	2.7	3.5	3.5	3.5	3.9	
		3~5	2.5	2.7	2.9	3.3	3.6	3.2	
		5~7	2.5	2.6	2.9	3.3	3.5	3.3	
		m	2.6	2.7	3.1	3.4	3.5	3.5	
	미니 파프리카	5:5	0~1	2.7	2.8	3.7	3.7	3.8	4.0
			3~5	2.6	2.7	2.9	3.5	3.7	3.5
			5~7	2.5	2.7	3.0	3.4	3.5	3.4
			m	2.6	2.7	3.2	3.5	3.7	3.7
8:2		0~1	2.7	2.7	3.4	3.5	3.4	3.8	
		3~5	2.5	2.7	2.9	3.2	3.5	3.2	
		5~7	2.5	2.6	2.9	3.3	3.5	3.2	
		m	2.5	2.7	3.0	3.3	3.5	3.4	

표 3-2-7은 생육단계별 배액율에 따른 근권의 EC 변화를 나타낸 것으로 배액율이 많을수록, 그리고 배지내 칩함량이 많은 8:2비율에서 배지내 근권의 EC는 낮았다. 쿠프라 품종의 배지 칩 비율이 5:5에서는 배액비율 0%는 생육초기인 8월에 근권EC가 2.8에서 점점 높아져 생육후기인 8월에는 EC4.2까지 증가하였다. 반면에 배액비율이 5~7% 처리구에서는 생육초기인 8월에 근권 EC가 2.5에서 점점 높아져 생육후기인 8월에는 EC3.4까지 증가하였으나 배액비율 0~1%보다는 전생육기동안 낮았다. 미니파프리카 품종에서는 쿠프라 품종과 같은 경향이였다.

미니 파프리카의 배지 칩 비율이 5:5에서는 배액비율 0%는 생육초기인 8월에 근권EC가 2.7에서 점점 높아져 생육후기인 8월에는 EC3.8까지 증가하였다. 반면에 배액비율이 5~7% 처리구에서는 생육초기인 8월에 근권EC가 2.5에서 점점 높아져 생육후기인 8월에는 EC3.2까지 증가하였으나 배액비율 0~1%보다는 전 생육기간에 낮았다.

표 3-2-8은 배액비율에 따른 생육단계별 초장의 변화를 나타낸 것이다. 초장은 쿠프라, 미니파프리카 2품종 모두 칩비율에 따른 차이는 없었으나 배액비율에 따른 차이는 컸다. 쿠프라 품종은 배액비율이 증가할수록 초장이 길었으나 3~5%와 5~7%의 처리간에는 유의차가 없었다. 배지 칩 비율이 5:5에서는 배액비율 0~1%처리에서 생육초기(10/27)에는 초장이 61cm 에서 생육이 진행됨에 따라 길어져 생육중기(2/2)에는 143cm 였다. 미니파프리카는 배액비율이 증가할수록 초장이 길어지는 경향이였으나 배액 비율 간에는 유의차가 없었다. 배지 칩 비율이 5:5에서는 배액비율 0~1%처리에서 생육초기(10/27)에는 초장이 65cm 에서 생육이 진행됨에 따라 길어져 생육중기(2/2)에는 159cm 였다.

파프리카의 생육이 진행될수록 EC가 높아지는 경향이었으며, 배액율이 낮을수록 배지내 무기염의 증가속도가 빨라지고 초장의 생육은 억제되었다.

표 3-2-8. 배액비율에 따른 시기별 초장의 변화(단위: cm)

품종	배지 (칩:분말)	배액률 (%)	10/27	12/2	1/5	2/2	
‘쿠프라’	5:5	0~1	61 b ^z	106 b	115 b	143 b	
		3~5	69 a	116 a	134 a	157 a	
		5~7	69 a	118 a	135 a	155 a	
		m	66.3	113.3	128	151.7	
	8:2	0~1	62 b	107 b	116 b	143 b	
		3~5	68 a	116 a	134 a	156 a	
		5~7	70 a	118 a	135 a	156 a	
		m	66.7	113.7	128.3	151.7	
	미니 파프리카	5:5	0~1	65 a	113 a	132 a	159 a
			3~5	66 a	115 a	130 a	156 a
			5~7	69 a	119 a	141 a	166 a
			m	66.7	115.7	134.3	160.3
8:2		0~1	65 a	113 a	131 a	159 a	
		3~5	67 a	116 a	132 a	156 a	
		5~7	69 a	119 a	141 a	165 a	
		m	67.0	116	134.7	160.0	

^zMean separation within columns by Duncan’s multiple range test at $p \leq 0.05$.

표 3-2-9는 배액비율에 따른 평균과중 등 수량구성요소와 수량 및 상품율을 나타낸 것이다. 평균과중은 쿠프라 및 미니 파프리카에서 칩비율에서는 차이가 없었고 배액율이 증가할수록 무거운 경향이었으나 3~5%이상의 배액처리구에서는 유의차가 없었다. 쿠프라 품종의 5:5 칩비율에서 평균과중은 0~1%의 배액비율은 212.2g이었으나 5~7%비율에서는 249g이었다. 그리고 미니 파프리카의 5:5 칩비율에서 평균과중은 0~1%의 배액비율은 52g이었으나 5~7%비율에서는 56.4g이었다.

주당 착과수도 평균 과중과 같이 쿠프라 및 미니 파프리카에서 칩비율에서는 차이가 없었고 배액율이 증가할수록 많은 경향이었으나 3~5%이상의 배액처리구에서는 유의차가 없었다. 쿠프라 품종의 5:5 칩비율에서 주당 착과수는 0~1%의 배액비율은 22개였으나 5~7%비율에서는 24.3개였다. 그리고 미니파프리카의 5:5 칩비율에서 주당 착과수는 0~1%의 배액비율은 62개였으나 5~7%비율에서는 72.1개였다. 수량은 쿠프라 및 미니 파프리카에서 칩비율에서는 차이가 없었고 배액율이 증가할수록 많은 경향이었으나 3~5%이상의 배액처리구에서는 유의차가 없었다. 쿠프라 품종의 5:5 칩비율에서 수량은 0~1%의 배액비율은 10,783kg/10a였으나 3~5%비율에서는

14,474kg/10a으로 가장 많았다.

표 3-2-9. 배액비율에 따른 평균과중 및 수량

품종	배지 (칩:분말)	배액률 (%)	평균과중 (g)	착과수 (개/주)	과중 (g/주)	수량 (kg/10a)	상품율 (%)
쿠프라	5:5	0~1	212.2 b ^z	22.0 a	4,668	10,783 b	64
		3~5	246.7 a	25.4 a	6,266	14,474 a	76
		5~7	249.0 a	24.3 a	6,051	13,978 a	75
		m	236.0	23.9	5,640	13,028	71.7
	8:2	0~1	210.3 b	21.7 b	4,564	10,543 b	68
		3~5	237.7 a	25.8 a	6,133	14,167 a	75
		5~7	243.6 a	26.8 a	6,528	15,080 a	73
		m	230.6	24.8	5,742	13,264	72.0
미니 파프리카	5:5	0~1	52.0 b	62.0 b	3224	7,447 b	80
		3~5	57.6 a	75.8 a	4366	10,085 a	87
		5~7	56.4 a	72.1 a	4066	9,392 a	88
		m	55.3	67.0	3885	8,974	85.0
	8:2	0~1	53.2 b	62.7 b	3,336	7,706 b	87
		3~5	57.7 a	77.1 a	4,449	10,277 a	86
		5~7	56.5 a	76.8 a	4,339	10,023 a	86
		m	55.8	72.0	4,041	9,335	86.3

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

그리고 미니파프리카의 5:5 칩비율에서 수량은 0~1%의 배액비율은 7,447kg/10a였으나 3~5%비율에서는 10,085kg/10a으로 가장 많았다.

상품비율은 배액비율이 증가할수록 높은 경향이였으나 배지의 칩비율에는 차이가 없었다. 상품비율은 쿠프라 품종은 64~76%이었으나 미니파프리카는 배액비율과는 상관없이 80~88%의 높은 상품비율을 나타냈다.

표 3-2-10는 배액비율에 따른 파프리카 품종별 배꼽썩음과, 일소과 및 기형과의 발생율을 나타낸 것이다. 배꼽썩음과는 쿠프라, 미니파프리카 모두 배액비율이 낮을수록 발생율이 높았으나 쿠프라보다 미니파프리카의 발생율은 낮았다.

쿠프라 품종의 5:5 칩비율에서 배꼽썩음과 발생율은 0~1%의 배액비율은 12.3%였으나 3~5%비율에서는 7.5%로 낮았다. 그리고 미니파프리카의 5:5 칩비율에서 배꼽썩음과 발생율은 0~1%의 배액비율은 5.6%였으나 3~5%비율에서는 3.2%로 낮았다.

표 3-2-10. 배액비율에 따른 과실의 배꼽썩음과 발생율

품종	배지 (칩:분말)	배액률 (%)	배꼽썩음과 (%)	일소과 (%)	기형과 (%)
쿠프라	5:5	0~1	12.3	3.6	13.5
		3~5	7.5	2.3	10.2
		5~7	7.2	2.3	9.8
		m	9.0	2.7	11.2
	8:2	0~1	10.2	2.8	12.5
		3~5	6.8	2.6	10.2
		5~7	7.2	2.7	8.5
		m	8.1	2.7	10.4
미니 파프리카	5:5	0~1	5.6	2.5	12.3
		3~5	3.2	2.4	11.2
		5~7	3.5	2.3	10.2
		m	4.1	2.4	11.2
	8:2	0~1	5.4	2.7	13.5
		3~5	3.6	2.6	10.2
		5~7	3.8	2.5	11.4
		m	4.3	2.6	11.7

표 3-2-11. 배액비율에 따른 과육두께와 당도

품종	배지 (칩:분말)	배액률 (%)	과고 (mm)	과폭 (mm)	심실수 (개)	과육두께 (mm)	당도 (°Bx)
쿠프라	5:5	0~1	93.0	78.0	4.0	6.6	7.2
		3~5	99.1	74.6	3.0	7.4	7.0
		5~7	98.5	77.1	3.4	7.4	7.0
		m	96.9	76.6	3.5	7.1	7.1
	8:2	0~1	89.0	72.9	3.4	6.0	8.6
		3~5	94.2	74.3	3.6	6.5	7.0
		5~7	98.7	75.2	3.2	7.4	6.9
		m	94.0	74.1	3.4	6.7	7.5
미니 파프리카	5:5	0~1	81.3	40.2	2.8	6.3	9.4
		3~5	77.7	38.7	3.0	6.1	9.6
		5~7	84.2	36.9	3.2	6.0	9.5
		m	81.1	38.6	3.0	6.1	9.5
	8:2	0~1	76.1	38.5	3.0	5.5	9.6
		3~5	78.5	38.0	2.8	6.1	9.3
		5~7	80.9	40.3	3.0	6.6	9.2
		m	78.5	38.9	2.9	6.0	9.4

²Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

일소과는 쿠프라, 미니파프리카 모두 배액비율이 낮을수록 발생율이 높았으나 쿠프라와 미니파프리카의 간에는 큰 차이가 없었다. 쿠프라 품종의 5:5 칩비율에서 일소과 발생율은 0~1%의 배액비율은 3.6%였으나 3~5%비율에서는 2.3%로 낮았다.

그리고 미니파프리카의 5:5 칩비율에서 일소과 발생율은 0~1%의 배액비율은 2.5%였으나 3~5% 비율에서는 2.4%로 낮았다. 기형과 발생은 배꼽썩음과 및 일소과와 같은 경향으로 쿠프라, 미니 파프리카 모두 배액비율이 낮을수록 발생율이 높았으나 쿠프라와 미니파프리카의 간에는 큰 차이가 없었다. 쿠프라 품종의 5:5 칩비율에서 기형과 발생율은 0~1%의 배액비율은 13.5%였으나 3~5%비율에서는 10.2%로 낮았다. 그리고 미니파프리카의 5:5 칩비율에서 기형과 발생율은 0~1%의 배액비율은 12.3%였으나 3~5%비율에서는 11.2%로 낮았다.

표 3-2-11은 배액비율에 따른 과육두께와 당도를 나타낸 것이다. 모든 품종이 과고 및 과폭은 배액비율에 따른 유의차가 없었으며 심실수 및 과육두께도 같은 경향으로 처리간에 차이가 없었다.

심실수는 쿠프라 품종은 3~4개, 그리고 미니파프리카는 2~3개였다. 쿠프라 품종의 5:5 칩비율에서 과육두께는 0~1%의 배액비율은 6.6mm 였으나 3~5%비율에서는 7.4mm로 약간 두꺼웠다. 그리고 미니파프리카의 5:5 칩비율에서 과육두께는 0~1%의 배액비율은 6.3mm였으나 3~5%비율에서는 6.1mm 였다. 과실의 당도는 배지의 칩비율과 배액율에는 차이가 없었으나 품종 간에는 미니파프리카가 피에스타 품종보다는 높은 경향이였다. 쿠프라 품종의 5:5 칩비율에서 당도는 0~1%의 배액비율은 7.2% 였으나 3~5%비율에서는 7.0% 였다. 그리고 미니파프리카의 5:5 칩비율에서 당도는 0~1%의 배액비율은 9.4%였으나 3~5%비율에서는 9.6% 였다.

이상의 결과에서 2~3%의 배액율에서 생육이 양호하고 수량감소가 없는 것으로 판단되었다.

다. 결과요약

파프리카 수경재배시 일반파프리카 ‘쿠프라’(적색), 및 ‘미니파프리카’(적색)2품종(Enza Zaden, The Netherlands)을 이용하여 배지내 칩비율에 따른 배액비율에 대한 실험결과, 총관수량은 칩비율 5:5에서 배액율 0%가 120.7 L/주였고, 배액율 3~5%가 254.6L/주, 그리고 배액율 5~7%가 280.6L/주였다. 근권의 EC는 생육초기인 8월에 2.5에서 점점 높아져 생육후기인 8월에는 EC3.4 까지 증가하였으나 배액비율 0~1%보다는 전생육기동안 낮았으며, 배액율이 낮을수록 배지내 무기염의 증가속도가 빨라지고 초장의 생육은 억제되었다.

평균과중은 쿠프라 및 미니 파프리카에서 칩비율에서는 차이가 없었고 배액율이 증가할수록 무거운 경향이였으나 3~5%이상의 배액처리구에서는 유의차가 없었다. 주당 착과수도 평균 과중과 같이 쿠프라 및 미니 파프리카에서 칩비율에서는 차이가 없었고 배액율이 증가할수록 많은 경향이였으나 3~5%이상의 배액처리구에서는 유의차가 없었다. 쿠프라 품종의 5:5 칩비율에서 수량은 0~1%의 배액비율은 10,783kg/10a였으나 3~5%비율에서는 14,474kg/10a으로 가장 많았으며, 그리고 미니파프리카의 5:5 칩비율에서 수량은 0~1%의 배액비율은 7,447kg/10a였으나 3~5%비율에서는 10,085kg/10a으로 가장 많았다.

상품비율은 배액비율이 증가할수록 높은 경향이었으나 배지의 칩비율에는 차이가 없었다. 기형과 발생은 배꼽썩음과 및 일소과와 같은 경향으로 쿠프라, 미니파프리카 모두 배액비율이 낮을수록 발생율이 높았으나 쿠프라와 미니파프리카의 간에는 큰 차이가 없었다.

이상의 결과에서 칩비율에 관계없이 2~3%의 배액율이 생육이 양호하고 수량감소가 적어 파프리카 수경재배시 가장 이상적인 배액비율인 것으로 판단되었다.

3. 파프리카 수경재배시 코이어배지의 양액공급방법에 따른 생육 및 품질

가. 재료 및 방법

본 실험은 2015에서 2016년에 시설원예연구소 유리온실에서 수행되었다. 일반파프리카 ‘쿠프라’(적색)를 이용하여 8월 27일에 파종하였다. 정식 시기는 파종 후 약 40~45일인 본엽 6~7매, 첫 꽃이 생성될 때를 기준으로 파프리카 양액육묘법에 준한 육묘방식을 이용하여, 10월 24일 코이어배지 슬라브(5,7.5 x 15 x 100cm)에 정식을 하였다. 코이어배지는 칩과 분말비율을 5:5 였고, 배양액은 그로단표준액을 사용하였으며, 정식 후 공급 양액의 EC는 2.0~2.3dS/m 정도로 육묘기의 마지막 공급 EC 보다 0.2dS/m 정도 높게 공급하였다. 착과 후의 공급 EC는 3.0~3.2, pH 5.2~5.7내외로 하였다.

양액공급방법을 FDR센서를 이용하는 자동공급방법과 농가에서 관행으로 사용하는 타이머에 의한 공급방법을 처리구로 두었다. 배지 내 수분함량을 FDR 센서(미래센서 Co, Ltd Kor)를 이용하여 데이터 로거(CR10x, campbell Co. Ltd USA)에 연결하여 측정하면서 공급회수를 제한하면서 배액비율을 설정하였다. 타이머는 1시간당 2~6분간 공급시간을 설정하여 처리구를 두었다. 1일 급액시간은 아침 7시부터 오후 4시까지 설정하였고 제어하였다.

주요재배는 파프리카 수경재배법에 준하였고 생육, 품질 및 배꼽썩음과 , 일소과 등 발생률 등을 조사하였다.

나. 결과 및 고찰

그림 3-2-3은 1월 5일부터 3월 20일까지 양액의 공급방법에 따른 일일급액량의 차이를 나타낸 것이다.

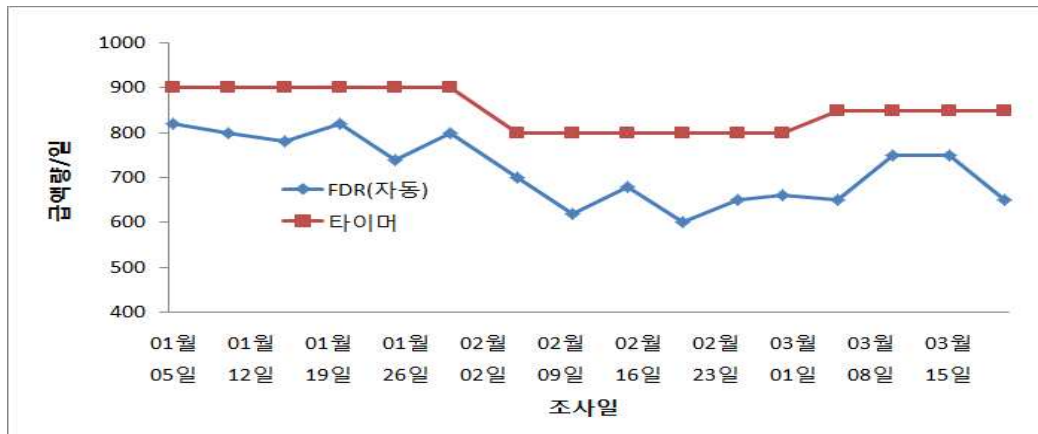


그림 3-2-3. 양액공급방법에 따른 일일급액량의 변화

농가의 관행인 타이머에 의한 양액의 급액량은 1월 5일부터 1월30일까지 1일 주당 900mL가 공급되었으며 2월 1일부터 3월 20일까지는 1일 주당 800mL가 공급되었다. 반면에 FDR 센서를 이용한 자동 급액량은 1월 5일부터 1월30일까지 800mL가 공급되다가 급액량이 점점 줄어들어 3월 5일까지는 600mL 내외로 공급되었으나 그 이후부터는 3월 15일까지 다시 700mL 내외로 공급되었다. FDR 센서를 이용한 자동급액방법은 코이어 배지가 완전히 포수되어 1월 30일 이후에는 공급량이 줄어드는 것으로 판단되었다.

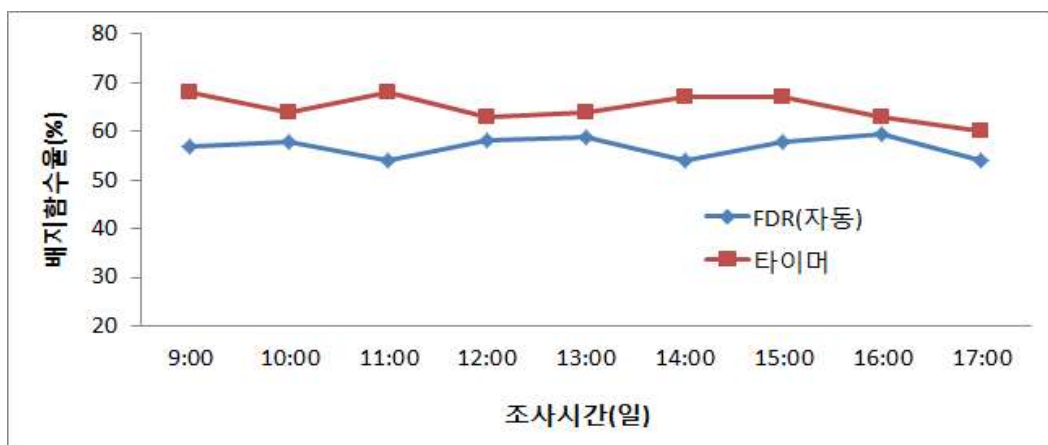


그림 3-2-4. 양액공급방법에 따른 배지내 함수량의 변화

그림 3-2-4는 1월 5일부터 3월 20일까지 양액의 공급방법에 따른 일일배지의 함수량의 차이를 나타낸 것이다. 타이머에 의한 양액의 공급방법은 오전 9시부터 오후 5시까지 배지의 함수량이 60~70%다. 반면에 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법은 오전 9시부터 오후 5시까지 배지의 함수량이 55~60%를 유지하였다. 타이머에 의한 공급방법은 배지의 함수량이 다소 높게관리되었으나 FDR 센서를 이용한 자동급액방법은 작물의 생육에 적합한 배지수분으로 관리되어 작물

의 생육이 양호하였고(그림 3-2-5) 그 결과 과실의 수량도 증가하였으며 과실의 품질도 좋은 결과를 가져온 것으로 생각된다.

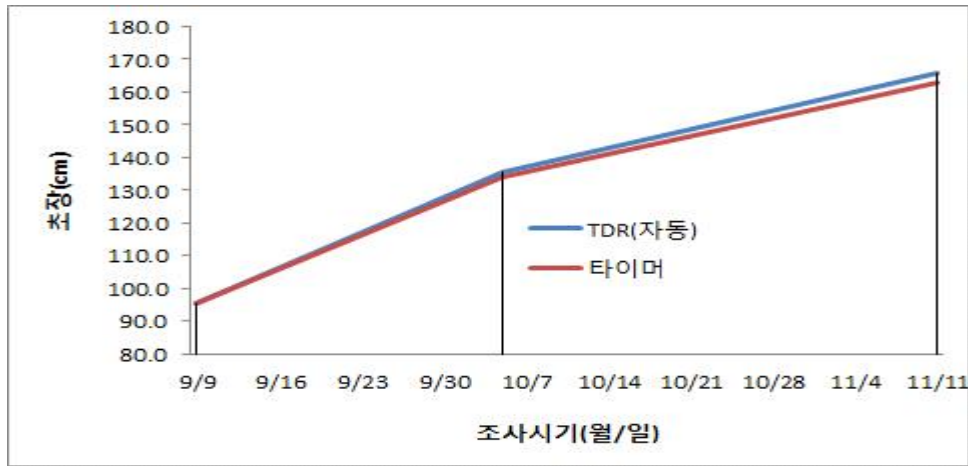


그림 3-2-5. 양액공급방법에 따른 초장의 경시적 변화

그림 3-2-5는 양액의 공급방법에 따른 영양생장기간의 초장의 초기생육을 경시적으로 나타낸 것이다. 정식수 9월 9일 초기에는 초장이 9cm 내외로 양액의 공급방법에 따른 차이가 없었다. 그러나 그 이후 처리간에 차이를 보여 10월 7일에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 136cm 로 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 2cm정도 길었으며 11월 11일에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 165cm로 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 5cm 정도 더 길었다. 이는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 배지의 함수량이 적합한 결과(그림 2)에 기인한 것으로 판단된다.

표 3-2-12. 양액공급방법에 따른 수량구성요소 및 수량

양액공급방법	평균과중 (g)	착과수 (개/주)	주당 과중 (g/주)	상품수량 (kg/10a)	상품율 (%)
FDR(자동)	170.1 a	20.4 a	3472.2 a	11,458 a	78.5
타이머	168.4 b	18.9 b	3177.0 b	10,484 b	75.4

^aMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $p \leq 0.05$.

표 3-2-12는 양액의 공급방법에 따른 파프리카의 평균과중, 착과수, 수량 및 상품률을 나타낸 것이다. 평균과중은 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 170.1g으로 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 2g 정도 더 무거웠다. 주당착과수는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 20.4개로 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 1개 정도 많았으며 그 결과 10a 당 상품수량이 FDR

센서를 이용한 자동 급액방법이 11,458kg/10a로 타이머에 의한 양액의 공급방법의 10,484kg 보다 1000kg 정도 더 많았다. 상품률은 두 처리모두 75.4~78.5%로 높은 경향이었으며 처리간에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 상품률이 높았다.

표 3-2-13. 양액공급방법에 따른 과실의 심실수 및 당도

조사일	양액공급방법	평균과중 (g)	과고 (mm)	과폭 (mm)	심실수 (개)	두께 (mm)	당도 (%)
01월 07일	FDR(자동)	156.6	82.1	78.7	4.0	7.8	8.6
	타이머	150.6	79.8	75.6	4.0	7.3	8.6
01월 21일	FDR(자동)	184.1	100.0	80.5	3.3	7.6	7.9
	타이머	182.3	98.0	79.5	3.8	7.1	7.0
02월 18일	FDR(자동)	168.3	97.6	84.1	3.6	7.4	8.1
	타이머	166.7	91.5	74.3	3.5	7.4	7.8
03월 09일	FDR(자동)	179.1	98.9	77.0	3.3	8.3	7.6
	타이머	170.6	92.6	74.9	3.2	7.9	7.3

표 3-2-13은 양액공급방법에 따른 시기별 과실의 심실수 및 당도를 나타낸 것이다.

평균과중은 생육이 진전됨에 따라 처리에 관계없이 156.0g에서 179.1g까지 무거워지는 경향이 있었으며 처리간에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 평균과중이 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 무거웠다. 과고와 과폭은 생육의 정도와 관계없이 80~100mm 내외였고 처리간에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 평균과중이 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 다소 길었다.

심실수는 진전됨에 따라 처리에 관계없이 3.2~4.0 개였으며 초기에는 4.0개로 다소 많았으나 생육후기에는 3.2개였으며 두 처리간에는 차이가 없었다.

과육의 두께는 생육시기와 관계없이 7.1~8.3mm 였고, 처리간에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 평균과중이 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 두께웠다.

과실의 당도는 생육초기에는 처리에 관계없이 8.6%로 비교적 높았으나 생육이 진전됨에 따라 다소 감소하는 경향이였다. 처리간에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법에서 당도가 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 다소 높았다. FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 과실의 당도가 높은 것은 배지의 수분함량이 적은 것에 기인되는 것으로 생각된다.

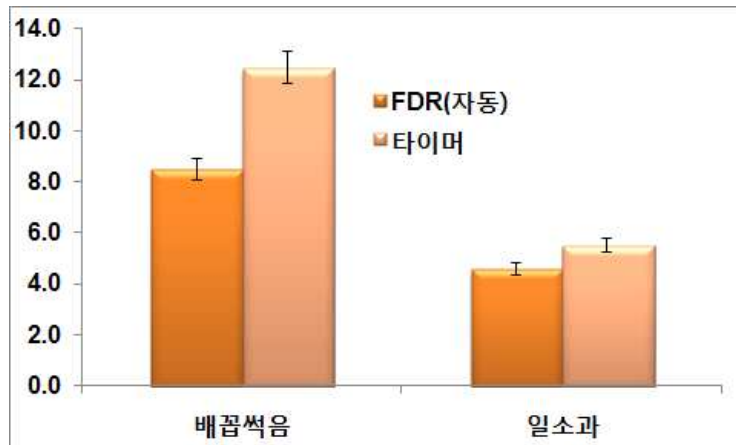


그림 3-2-6. 양액공급방법에 따른 초장의 경시적 변화

그림 3-2-6은 양액의 공급방법에 따른 과실의 배꼽썩음과 및 일소과의 생리장해률을 나타낸 것이다. 과실의 배꼽썩음과율은 8.0~12%였고 처리간에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법에서 당도가 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 다소 4.0% 낮았다. 과실의 일소과율은 4.5~5%였고 처리간에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법에서 당도가 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 다소 0.5% 낮았다.

FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 과실의 배꼽썩음과 및 일소과율이 낮은 것은 배지의 수분함량이 적은 것에 기인되는 것으로 생각된다.

다. 결과요약

양액공급방법을 FDR센서를 이용하는 자동공급방법과 농가에서 관행으로 사용하는 타이머에 의한 공급방법을 처리구로 두었다. 배지 내 수분함량을 FDR 센서(미래센서 Co, Ltd Kor) 를 이용하여 데이터 로거(CR10x, campbell Co. Ltd USA)에 연결하여 측정하면서 공급회수를 제한하면서 배액비율을 설정하였다. 타이머는 1시간당 2~6분간 공급시간을 설정하여 처리구를 두었다. 1일 급액시간은 아침 7시부터 오후 4시까지 설정하여 시험한 결과 아래와 같다.

타이머에 의한 양액의 공급방법은 오전 9시부터 오후 5시까지 배지의 함수량이 60~70%다. 반면에 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법은 오전 9시부터 오후 5시까지 배지의 함수량이 55~60%을 유지하였다.

10월 7일에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 136cm 로 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 2cm정도 길었으며 11월 11일에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 165cm로 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 5cm 정도 더 길었다.

평균과중은 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 170.1g으로 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 2g 정도 더 무거웠다. 주당착과수는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 20.4개로 타

타이머에 의한 양액의 공급방법보다 1개 정도 많았으며 그 결과 10a 당 상품수량이 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 11,458kg/10a로 타이머에 의한 양액의 공급방법의 10,484kg 보다 1000kg 정도 더 많았다. 상품률은 두 처리모두 75.4~78.5%로 높은 경향이었으며 처리간에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 상품률이 높았다.

심실수는 진전됨에 따라 처리에 관계없이 3.2~4.0 개였으며 초기에는 4.0개로 다소 많았으나 생육후기에는 3.2개였으며 두 처리간에는 차이가 없었다.

과육의 두께는 생육시기와 관계없이 7.1~8.3mm 였고, 처리간에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법이 평균과중이 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 두께웠다.

과실의 당도는 생육초기에는 처리에 관계없이 8.6%로 비교적 높았으나 생육이 진전됨에 따라 다소 감소하는 경향이였다. 처리간에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법에서 당도가 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 다소 높았다.과실의 배꼽썩음과률은 8.0~12%였고 처리간에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법에서 당도가 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 다소 4.0% 낮았다. 과실의 일소과률은 4.5~5%였고 처리간에는 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법에서 당도가 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 다소 0.5% 낮았다.

이상의 결과에서 FDR 센서를 이용한 자동 급액방법에서 당도가 타이머에 의한 양액의 공급방법보다 생육이 양호하고 수량감소가 적어 파프리카 수경재배시 가장 이상적인 양액공급방법으로 판단되었다.

제 3 절 토마토 배액 극소화(무배액) 시스템 실용화 기술 개발

1. 토마토 배액 극소화 수경재배에서 급배액 및 근권 관리 기술

가. 실험 목표

토마토 무배액 수경재배 기술의 실용화를 위해 급액 관리 기술을 세부적으로 체계화 하고자 하였다. 즉, FDR (Frequency Domain Reflectometry) 수분 센서를 적용한 급액 시스템에서 작물 균형 생장과 근권 최적화를 위해 계절별 적정한 주당 1회 관수량과 각 관수간의 시간 간격 등을 규명하고자 하였다.

나. 실험 수행 방법

(1) 생육 및 재배환경

토마토 '다복'품종 묘종을 2작기에 걸쳐 재배 및 실험을 실시하였다. 가을과 겨울 재배를 위하여 2013년 10월 11일에 정식하여 2014년 1월 21일에 실험 종료하였고 봄과 여름재배를 위하여 2014년 3월 13일에 정식하여 현재까지 재배 및 실험이 진행 중이다. 4개의 어린 묘는 각 코이어 배지 슬라브 (100cm x 20cm x 10cm, dust:chip=100:0%, Sivanthi Joy, India, Sinsung®)에 0.33m 재식간격과 1.2m의 배지간 간격으로 정식 되었다. 처리당 4개의 슬라브를 난괴법의 통계적 방법으로 충주시 건국대학교 (latitude 35°49'N and longitude 127°08'E)에 위치한 비닐 온실에 배치하였다. 토마토 배양액 (the Glasshouse Crops Research and Experiment Station at Naaldwijk in the Netherlands)을 125 L 탱크에 수돗물 100 L에 희석되어 수중모터 (55W, Hyupsin®)에 의해 급액 하였다. 가을과 겨울 재배에서는 네델란드 온실 연구소 토마토 배양액을 pH 5.8와 EC 2.0 dS·m⁻¹수준으로 전 생육기간에 공급하였고 봄과 여름 재배에서는 정식 후 50일까지는 2.0dS·m⁻¹수준으로, 정식 후 51일에서 65일까지는 1.8dS·m⁻¹수준으로, 정식 후 66일~72일까지는 1.6dS·m⁻¹수준으로, 정식 후 73일부터 그 이후로는 1.5 수준으로 공급 하였다. 재배기간 동안, 온실 내 CO₂, 온도, 상대습도, 광도 변화는 ALMEMO® 2890-9(AHLBORN, German)에 의해 30분 간격으로 측정되었다.

(2) FDR 수분 센서에 의한 자동 관수

정식 후 FDR 수분센서 급액 시스템 (WT1000N, Mirae-Sensor®, Korea)에 의한 급액을 시행 하였다. 가을과 겨울 재배에는 FRD 수분센서를 이용하여 배지 용적당 수분 함량이 정식 후 62일까지는65%에 도달 할 때 마다 정식 후 63일 부터는 60%에 도달 할 때 마다 급액 이 중지되도록 처리 하였다 (표 3-3-1). 봄과 여름 재배는 각 생육 단계별 근권 내 목표 수분 함량을 달리 하여 급액 하였고 기준은 이 전 3년간의 연구결과를 근거 하였다. 관수개시 및 종료 시간을 계절 변화에 따라 일출 1 시간 후 관수하여 일몰 3시간 전에 관수종료 하였다. 전 재배 기간 동안 근권 내 수분함량과 EC 수준은 10분 간격으로 데이터 로거 (WT600, Mirae-Sensor®, Korea)에 저장되었다.

(3) 실험 처리 (1회 급액량과 급액간 간격 처리)

가을과 겨울 재배에서 FDR 수분센서 시스템 (WT1000N, Mirae-Sensor®, Korea)에 의한 자동 급액시 1회 급액량을 3분 또는 5분으로 지정하여 3분의 경우 1회 60ml/plant 이 급액 되도록 하고 5분의 경우 1회 80ml/plant 공급하도록 하였다. 1회 급액량을 3분(60ml/plant)으로 지정한 경우 급액간의 간격은 5분 (처리: T35) 또는 10분 (처리: T310)으로 하였고 1회 급액량을 5분 (80ml/plant) 으로 지정한 경우 급액 간격을 15분 (처리: T515)으로 지정하였다.

(4) 광합성을 분석 및 생육조사

광합성 분석기기(model Li-6400, Li-CO, Lincoln, Nebraska, USA)를 이용하여 자연 CO₂와 50 - 60% 범위의 상대습도, 1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 수준의 광도(PAR) 조건으로 잎의 광합성을 (Photosynthesis rate), 증산율 (transpiration rate), 잎과 대기의 수증기압차 (VpdL), 기공전도도(stomata conductance), 세포 간 사이 내 CO₂ (Intercellular CO₂)농도를 영양생장기에서 착과기, 과실 비대기, 과실 수확기에 나누어 관찰하였다.

(5) 조사항목: 관수 제어 시작 후 매일의 총 급액 및 배액량 및 시간대별 급액량, 근권내 토양수분함량 및 EC 변화, 식물체 생육, 광합성 효율, 상품과중, 화방별 과실 수확량 등을 측정하였다.

(6) 통계분석: 결과에서 얻은 데이터는 SAS 9.2 프로그램(SAS Institute, Cary, NC)으로 ANOVA 분석하였다.

다. 실험수행 내용 및 결과

(1) 온실 환경 변화

전 재배기간 동안, 온실 내 CO₂, 온도, 상대습도, 광도 변화는 ALMEMO® 2890-9 데이터 로거(AHLBORN, German)에 의해 30분 간격으로 측정되었다. 가을과 겨울 재배기간 동안에는 낮 시간에도 CO₂ 농도가 상대적으로 높게 유지되었다. 이는 환기가 제한된 겨울 재배기에 난방기가 가동된 것과 관련 있다 (그림 3-3-1). 야간의 최저 온도는 11°C로 그 이상의 온도가 야간에 전 재배기 동안 유지되었다. 상대습도는 밤부터 새벽까지 높은 수준으로 유지되었고 정오에는 50에서 70% 정도를 유지했다. 온실 내부의 광도는 11월에 비해 12월과 1월에 낮았다. 봄과 여름 재배기간 동안 (3월~6월), 온실 내 CO₂ 농도는 최저 136ppm 에서 870 ppm 의 범위를 유지하였고 온도는 최저9.5°C 에서 37°C 가 유지되었다. 상대습도는 최저 16%에서 최고 100% 까지 유지 되었다. 광합성 유효 광도 는 최고 1122 $\mu\text{mm}^{-2}\text{s}^{-1}$ 의 범위를 보였다(그림 3-3-2). CO₂ 농도는 밤부터 새벽까지는 오전과 낮 시간에 비해 높게 유지 되었고 정오에는 최저 수준을 보였다.

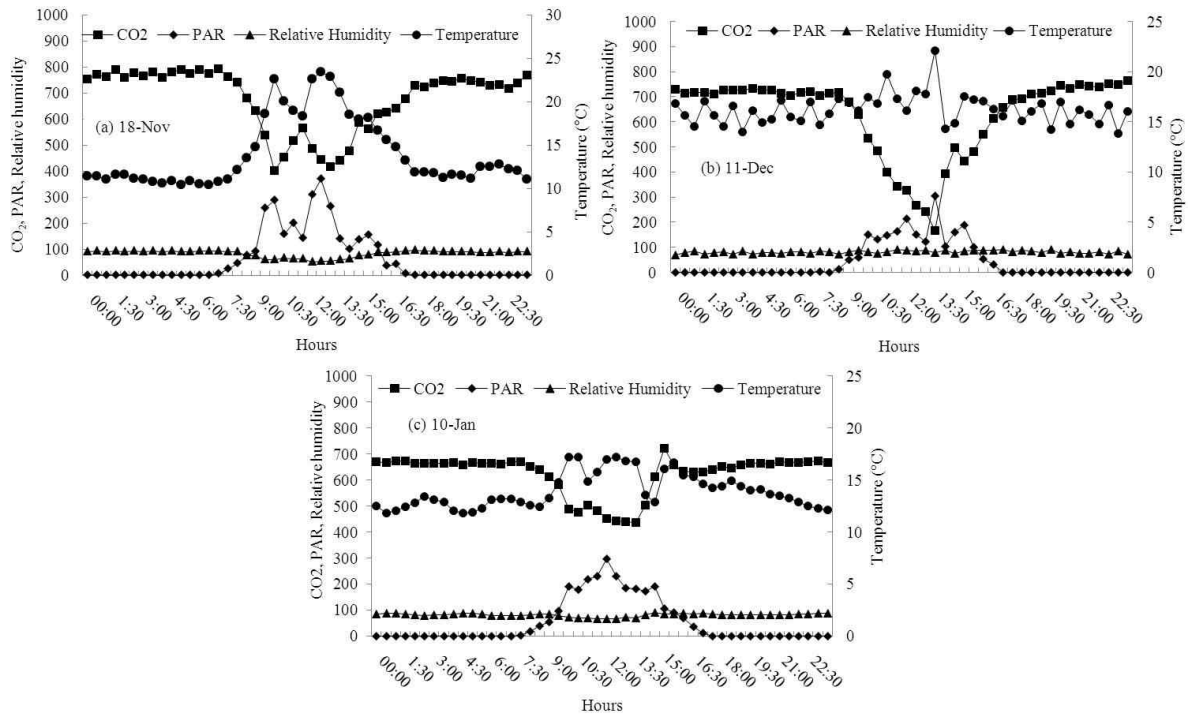


그림 3-3-1. 가을과 겨울재배 (2013년 10월11일~1월21일)의 하루 중의 플라스틱 하우스 내 이산화탄소 (CO₂, ppm), 광합성 유효광량 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), 상대습도 (relative humidity, %), 및 온도 (temperature, °C) 환경.

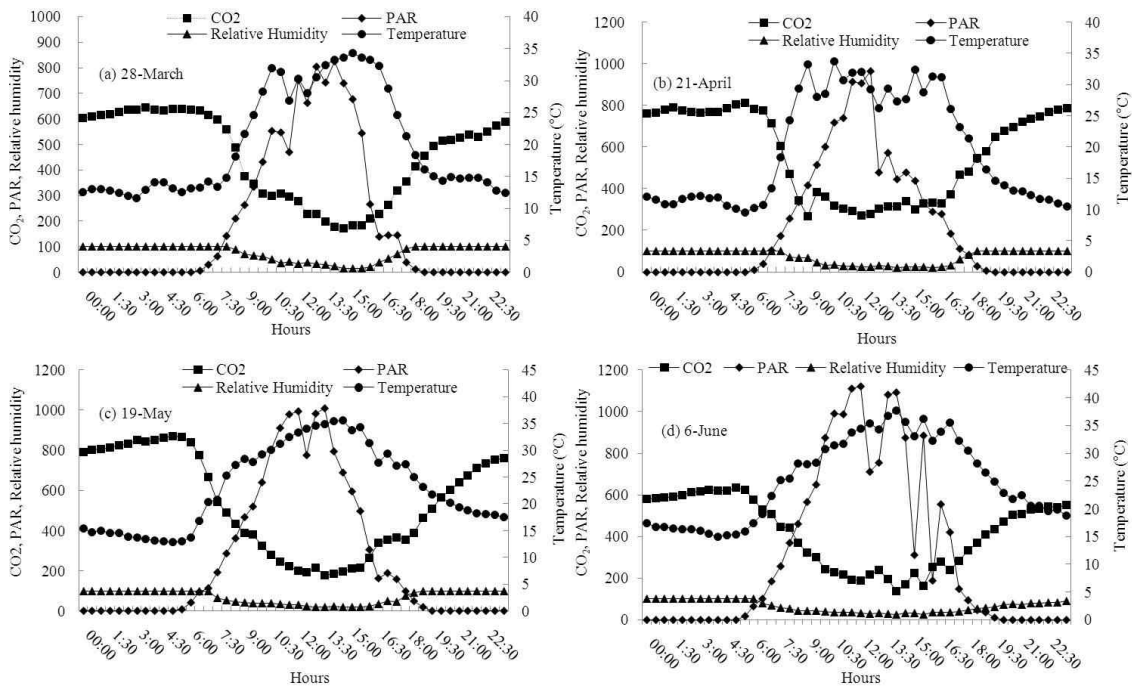


그림 3-3-2. 봄과 여름재배 (2014년 3월13일~6월30일)의 하루 중의 플라스틱 하우스 내 이산화탄소 (CO₂, ppm), 광합성 유효광량 ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), 상대습도 (relative humidity, %), 및 온도 (temperature, °C) 환경.

(2) 하루 평균 급액량 및 평균 배액률

재배 시기에 따라 생육 단계별 근권 내 목표 수분함량(%)을 달리 하며 실험 처리를 하였을 때 하루 평균 급액량 (ml/plant/day)과 평균 배액률 (%)을 관찰하였다(표 3-3-1). 가을과 겨울 재배에서 3분(60ml/plant)급액에 5분 급액간격 처리(T35)를 한 경우가 다른 처리에 비해 전 재배 기간 동안 식물체당 하루 평균 급액량이 가장 많은 것으로 나타났다(표 3-3-1, 2). T35처리에서 정식 후 62일까지 식물체당 하루 평균 급액량이 858(±64) ml/plant/day였고 3분(60ml/plant)급액에 10분 급액간격 처리(T310)에서 하루 평균 급액량이 가장 낮았다(306(±25) ml/plant/day)(표 3-3-1). 5분(80ml/plant)급액에 15분 급액간격 처리(T515)는 409(±18) ml/plant/day이 급액 되었다. 정식 후 63일부터 102일까지는 T515에서 하루 평균 식물체당 공급된 총 급액량이 888(±63) ml/plant/day로 다른 처리구에 비해 가장 많았고 T35 처리가 그 다음을 이었고(695(±33) ml/plant/day), T35가 가장 낮았다(524(±24)ml/plant/day). 정식 후 62일까지 배액률은 T35에서 정식 후 62일까지 44%로 가장 높았고 T515처리에서는 23%로 그 다음으로 높았다. T310에서는 14%로 가장 낮았다. 그러나 정식 후 63일부터 102일까지는 T35와 T310의 배액률이 각각 11%와 13%로 큰 차이가 없었고 T515에서 19%로 가장 높았다. 봄과 여름 재배시기에는 T35에서 정식 후 23일까지 하루 평균 급액량이 610(±137)ml/plant/day로 T310보다 두 배 가량 높았고 배액률이 8.7%였다. 반면 T310 처리에서는 같은 시기에 하루 평균 급액량은 333(±65)ml/plant/day 이었고 배액이 발생하지 않았다. 재배 후기, 즉 정식 후 80일 이후에 T35에서 T310보다 하루 평균 급액량이 높았는데 이는 겨울 재배에서도 같은 결과를 나타내었다. T35처리에서는 두 재배시기 모두 오전에 관수개시 후 목표 근권 수분 함량에 도달하는 동안 소요되는 시간이 T310에 비해 많이 소요되는 것으로 나타났다(그림 3-3-4~6). 이러한 특징으로 오전 10시까지 급액량이 다른 시간대에 급액량보다 많은 것으로 나타난 반면 T310처리에서는 하루 중 공급된 급액량의 분배가 고르게 된 것을 볼 수 있다(그림 3-3-7). 하지만 이러한 특징으로 생육과 광합성량(정식 후 56일까지)에 큰 영향은 주지 않은 것으로 나타났고 최종 생육은 현재 실험이 진행 중이라 더 결과를 지켜본 후 최종 결론을 지을 수 있을 것으로 생각된다.

표 3-3-1. 계절 별 생육 단계별(DAT:days after transplant) 근권 내 목표 수분함량(PWC: %) 과 실험 처리에 의한 하루 평균 급액량 (ml/plant/day)과 평균 배액률 (%/plant/day). 실험 처리는 1회 급액량을 3분(60ml/plant), 급액간의 간격을 5분(처리: T35) 또는 10분(처리: T310)으로 하였고 1회 급액량을 5분(80ml/plant), 급액 간격을 15분(처리: T515)으로 지정하였다.

Autumn to Winter DAT	PWC	T35		T310		T515	
		Irrigation volume	Drainage ratio	Irrigation volume	Drainage ratio	Irrigation volume	Drainage ratio
13-62(24Oct~12Dec)	65	858(64)	44(2.4)	306(25)	14(2.4)	409(18)	23(2.0)
63-102(13Dec~21Jan)	60	695(33)	11(1.6)	524(24)	13(1.7)	888(63)	19(2.6)
Spring to Summer DAT	PWC	T35		T310			
		Irrigation volume	Drainage ratio	Irrigation volume	Drainage ratio		
15-23(28Mar~05Apr)	68-70	610(137)	8.7(4.0)	333(65)	0.0(0.0)		
24-41(6Apr~23Apr)	68-66	1049(114)	2.9(1.4)	948(96)	1.4(1.0)		
42-50(24Apr~02May)	62-61	1226(164)	0.7(0.3)	1127(194)	1.0(0.9)		
51-65(03May~17May)	65-64	2069(115)	0.3(0.2)	2263(130)	3.4(0.6)		
66-72(18May~24May)	66-67	2593(143)	0.0(0.0)	2598(173)	0.7(0.0)		
73-80(25May~01Jun)	69-68	2686(195)	0.2(0.2)	2644(115)	0.3(0.3)		
81- (02-Jun~16Jun)	70-72	3211(341)	16.2(4)	2115(208)	0.9(0.5)		

표 3-3-2. 계절 별 실험 처리에 따른 잎, 줄기 및 상품과실의 생체중, 당도, 식물체 당 총 관수량, 총관수량에서 배액량을 뺀 근권 내 수분량 및 수분이용 효율. 실험 처리는 1회 급액량을 3분(60ml/plant), 급액간의 간격을 5분(처리: T35) 또는 10분(처리: T310)으로 하였고 1회 급액량을 5분(80ml/plant), 급액간의 간격을 15분(처리: T515)으로 지정하였다.

TRET	Leaf FW (g plant ⁻¹)	Stem FW (g plant ⁻¹)	Fruit FW (g plant ⁻¹)	SSC (°Brix)	Irrigation volume (L plant ⁻¹)	Retained ^z volume (L plant ⁻¹)	WUE ^y
Autumn to Winter (11 th October 2013 to 21 st January 2013)							
T35	684(27)	324(15)	2009(73) ^w	5.5(1.0)	68.8	47.0	64.2
T310	629(37)	383(55)	2127(46)	6.0(0.9)	36.0	32.2	97.5
T515	777(116)	320(51)	2019(135)	5.2(0.6)	55.2	40.4	77.9
Spring to Summer (11 th March 2014 to 30 th June 2014)							
T35	-	-	4266(17) ^x	5.8(0.2)	147	135	-
T310	-	-	4545(16)	6.0(0.3)	130	126	-

^z Retained volume = irrigation volume - leachate volume

^y WUE (water use efficiency = leaf, stem, and fruit fresh weight at harvest ÷ retained irrigation volume)

^w Fresh weight of fruits harvested from cluster 1 to cluster 3.

^x Fresh weight of fruits harvested from cluster 1 to cluster 4.

Data are means of four replications per treatment in a completely randomized design.

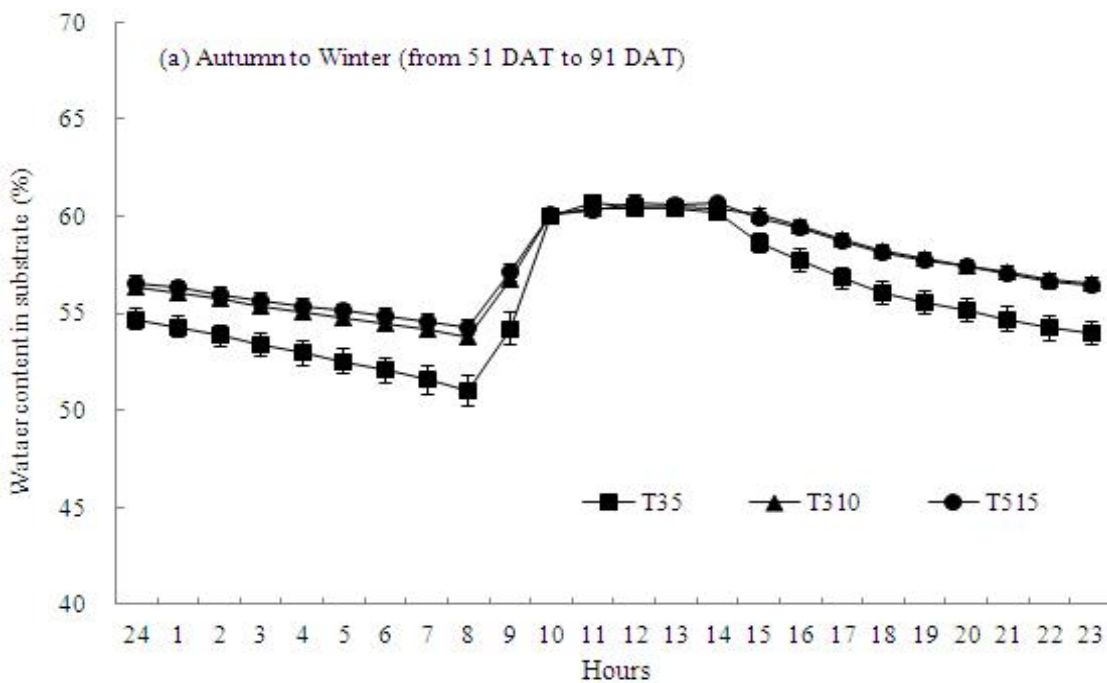
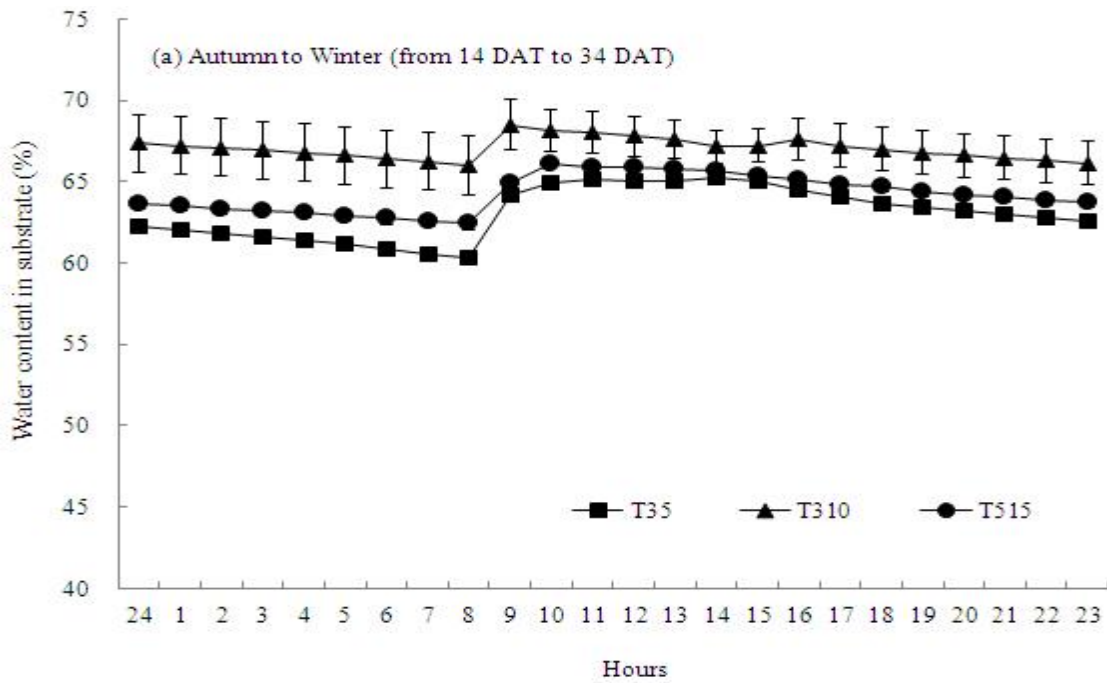


그림 3-3-3. 가을과 겨울재배에서 생육 단계별 실험 처리에 따른 근권 내 수분함량 변화. 실험 처리는 1회 급액량을 3분(60ml/plant), 급액간의 간격을 5분(처리: T35) 또는 10분(처리: T310)으로 하였고 1회 급액량을 5분(80ml/plant), 급액간의 간격을 15분(처리: T515)으로 지정하였다. Bars represent standard errors (\pm) of means for 20 replications per treatment between 14 DAT and 34 DAT (a) and 13 replications between 51 DAT and 91 DAT (b).

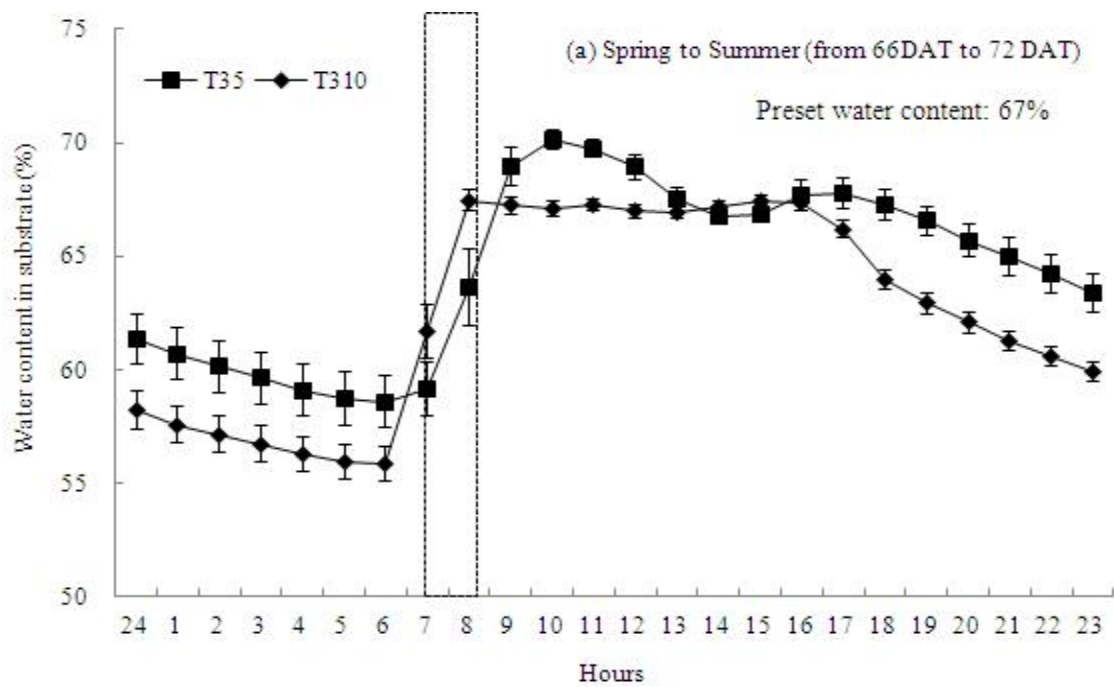
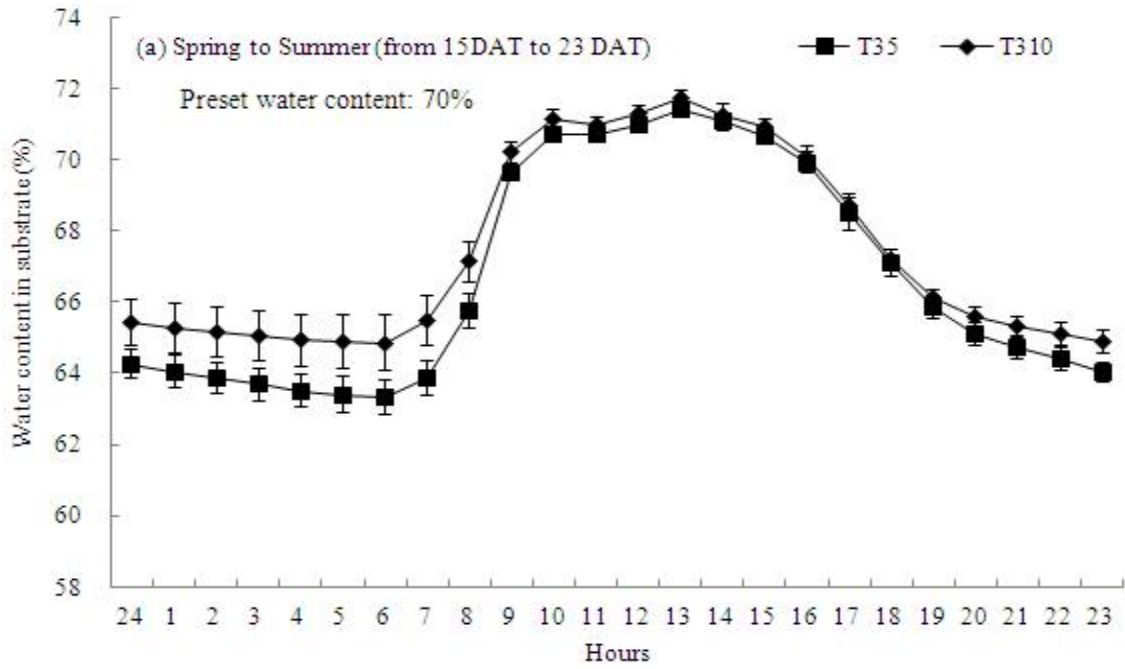


그림 3-3-4. 봄과 여름재배에서 생육 단계별 실험 처리에 따른 근권 내 수분함량 변화. 실험 처리는 1회 급액량을 3분(60ml/plant), 급액간의 간격을 5분(처리: T35) 또는 10분(처리: T310)으로 하였다. Bars represent standard errors (\pm) of means for 7 replications per treatment.

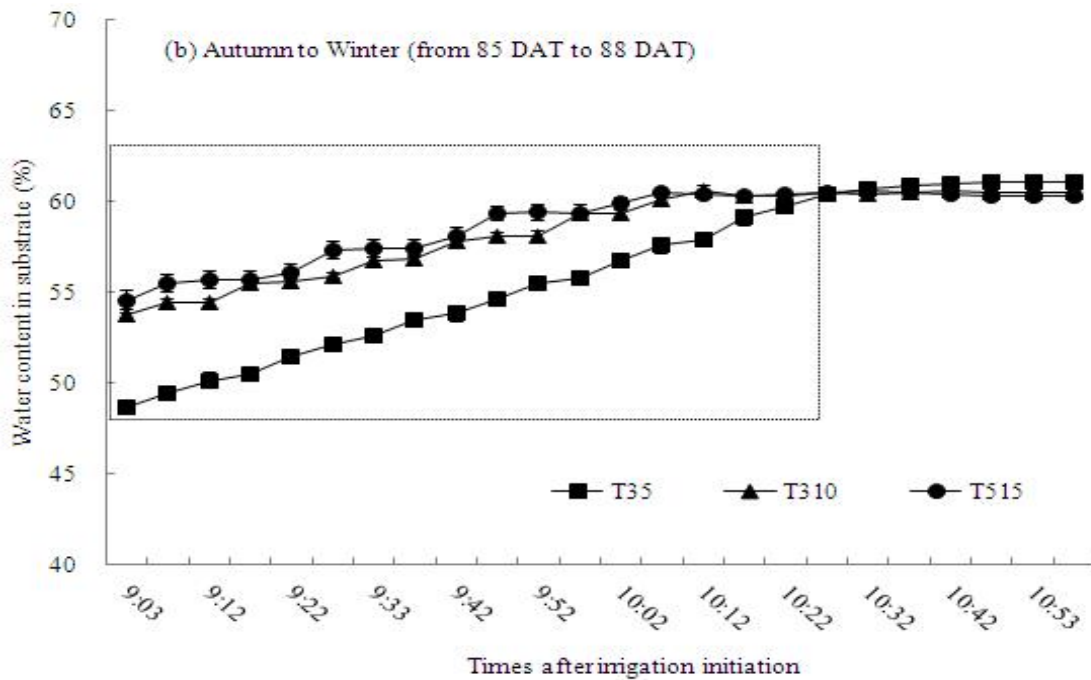
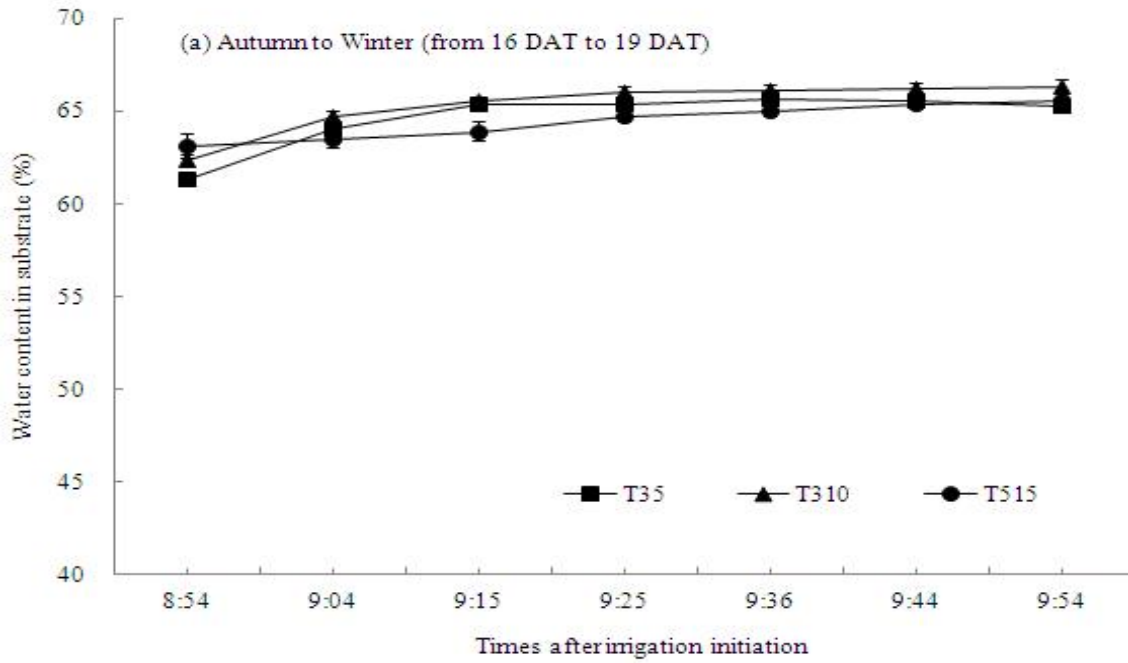


그림 3-3-5. 가을과 겨울재배에서 생육단계 별 실험 처리에 따른 급액 개시 후 1~2시간 내 근권 내 수분함량 변화. 실험 처리는 1회 급액량을 3분(60ml/plant), 급액간의 간격을 5분 (처리: T35) 또는 10분 (처리: T310)으로 하였고 1회 급액량을 5분(80ml/plant), 급액 간격을 15분 (처리: T515)으로 지정하였다. Bars represent standard errors (\pm) of means for 4 replications per treatment.

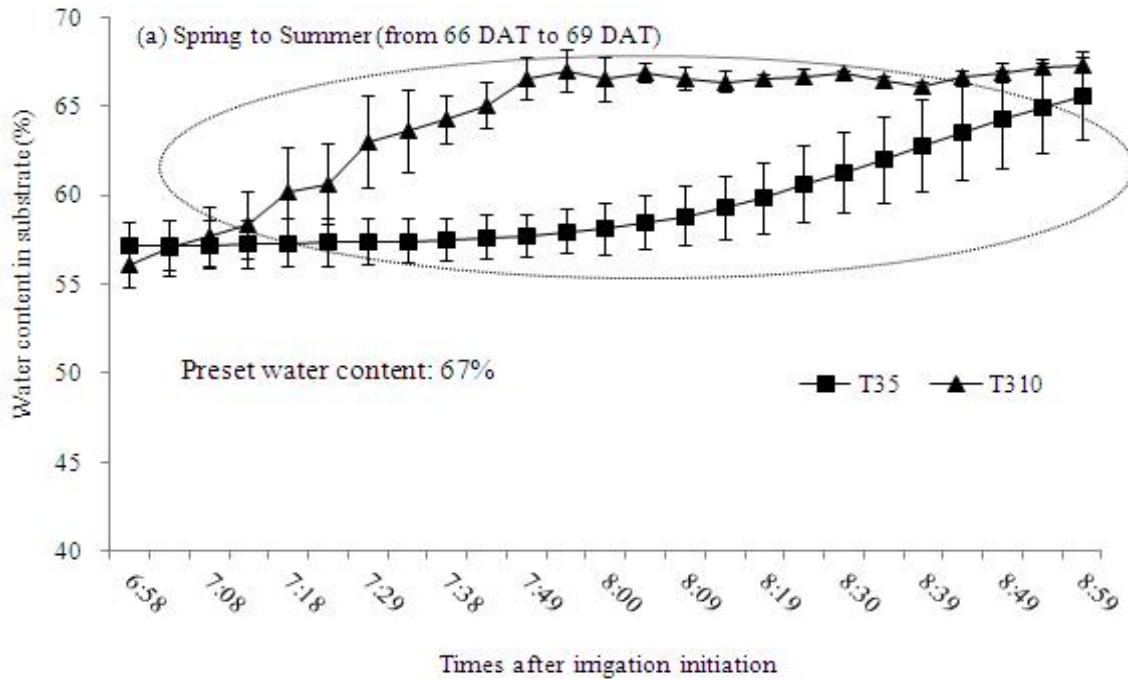


그림 3-3-6. 봄과 여름재배에서 실험 처리에 따른 급액 개시 후 2시간 내 근권 내 수분함량 변화. 실험 처리는 1회 급액량을 3분(60ml/plant), 급액간의 간격을 5분(처리: T35) 또는 10분(처리: T310)으로 하였다. Bars represent standard errors (\pm) of means for 4 replications per treatment.

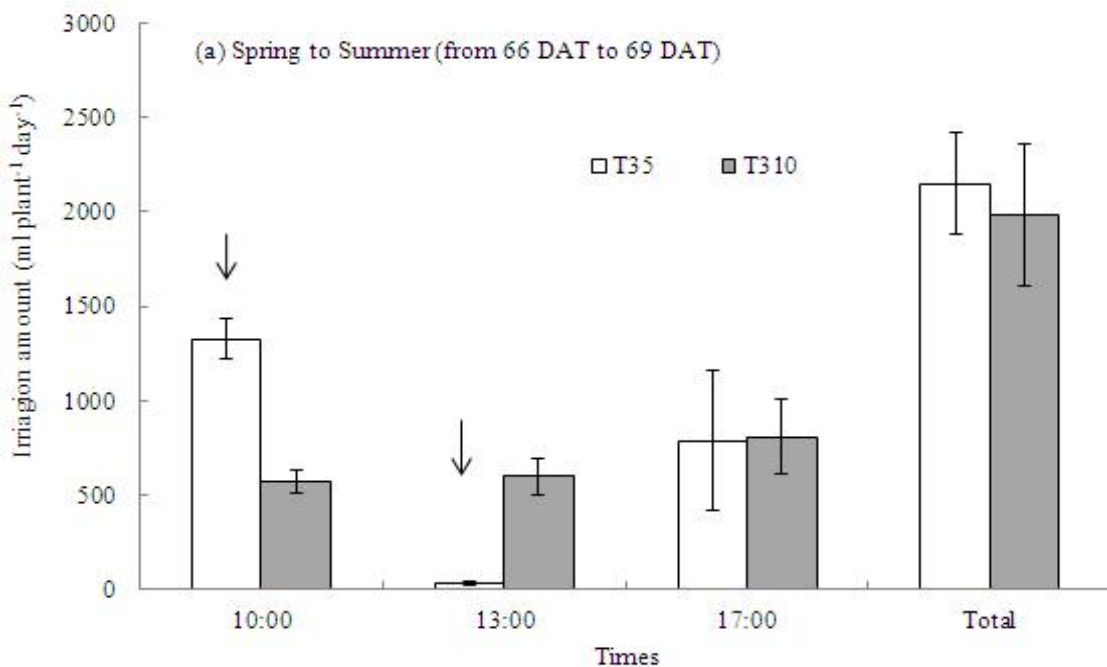


그림 3-3-7. 봄과 여름재배에서 실험 처리에 따른 하루 중 시간 대 별 급액량. 실험 처리는 1회 급액량을 3분(60ml/plant), 급액간의 간격을 5분 (처리: T35) 또는 10분 (처리: T310)으로 하였다. Bars represent standard errors (\pm) of means for 3 replications per treatment.

(3) 근권 내 EC 변화

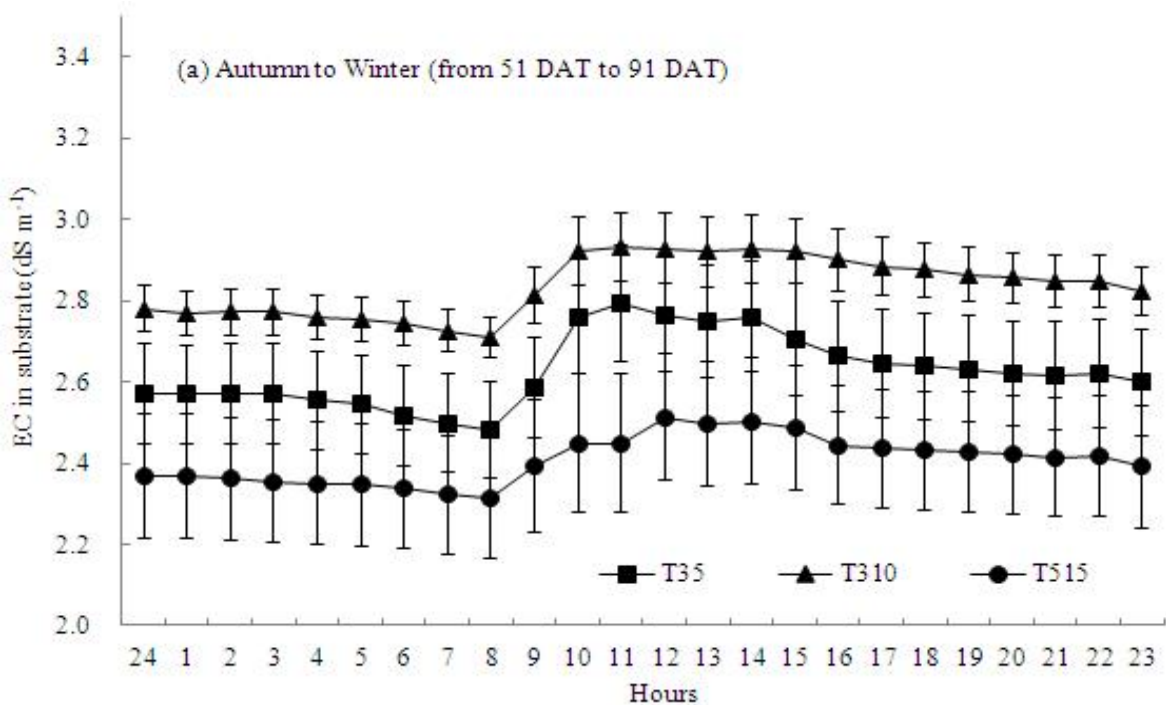
가을과 겨울 재배에서는 전 재배기간 동안 공급 배양액의 EC를 2.0 dS m⁻¹ 수준으로 처리하였고 모든 처리에서 근권 내 EC가 2.2~3.0 dS m⁻¹ 수준을 보였다 (그림 3-3-8a). 정식 후 51일에서 91일까지 관찰하였을 때 후기에 배액률이 평균 19%였던 T515처리에서 근권 EC가 2.2-2.5 dS m⁻¹ 수준으로 가장 낮았고 후기에 일일 평균 배액률이 비슷하였던 T35와 T310을 비교하면 T35에서는 2.6~2.8 dS m⁻¹ 수준을, T310에서는 2.8~3.0 dS m⁻¹ 수준을 보였다. 봄과 여름재배에서는 정식 후 66일과 72일에, 즉 공급 배양액의 EC가 1.6 dS m⁻¹ 수준일 때 근권 내 EC가 2.0~2.6 dS m⁻¹ 수준을 보였다. T35처리에서는 2.3~2.6 dS m⁻¹ 수준을 보였고 T310에서는 2.0~2.4 수준을 dS m⁻¹ 보였다.

(4) 식물체와 상품과실 생체중, 당도 및 수분이용 효율

가을과 겨울재배 시기에 잎과 줄기, 식물체당 총상품과실의 생체중 및 당도는 실험처리에 의해 통계적 유의차가 없는 것으로 나타났다. 하지만 수분이용효율 ((식물체 생체중 + 상품과실 생체중) ÷ (총급액량-배액량))은 T310 > T515 > T35 순서로 나타났다 (표 3-3-2). 이 결과는 T310처리에서 식물체와 총상품과실 생체중은 다른 처리와 차이가 없고 총급액량과 배액량이 가장 낮은 것으로 인한 것이다 봄과 여름재배에서는 아직 실험이 진행 중이지만 6월 16일까지 얻은 데이터의 결과를 보면 정식 후 7일부터 56일까지 일주일 간격으로 측정된 식물초장과 엽수는 처리간 차이가 없는 것으로 나타났다 (그림 3-3-9). 현재 까지 T310처리에서 식물체당 총상품과실의 생체중이 T35보다 높은 것으로 나타났다 (표 3-3-2). 봄과 여름 재배에서 식물체당 총관수량은 T35에서 147 L plant⁻¹이고 T310처리에서 130 L plant⁻¹ 이었다. 배액률은 T35에서 8.2%이고 T35에서 3.0% 이었다.

표 3-3-3. 광합성율(Photo: $\mu\text{mol CO}_2\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$), 기공전도도(Cond: $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$), 엽육 세포 간극의 CO_2 농도(C_i : $\mu\text{mol CO}_2\text{mol}^{-1}\text{air}$), 증산량 [Trommol: $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$], 한 엽과 대기 간의 확산압차 [VpdL: $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$]. 실험 처리는 1회 급액량을 3분(60ml/plant), 급액간의 간격을 5분(처리: T35) 또는 10분(처리: T310)으로 하였고 1회 급액량을 5분(80ml/plant), 급액간의 간격을 15분(처리: T515)으로 지정하였다.

TRET	Photo	Cond	C_i	Trommol	VpdL
Autumn to Winter (11th October 2013 to 21st January 2013) (At 39 DAT)					
T35	20.4(2.2)	0.7(0.1)	669(33)	4.2(0.2)	0.8(0.1)
T310	20.4(0.4)	0.6(0.2)	636(63)	3.8(0.4)	0.8(0.1)
T515	20.8(1.6)	0.6(0.1)	631(52)	4.1(0.2)	0.9 (0.1)
Spring to Summer (11 th March 2014 to 30 th June 2014) (At 56, 62, 72DAT)					
T35	18.2(0.7)	0.8(0.1)	226(7.4)	9.3(0.6)	1.5(0.1)
T310	19.1(0.8)	0.9(0.1)	233(7.8)	8.9(0.3)	1.2(0.1)



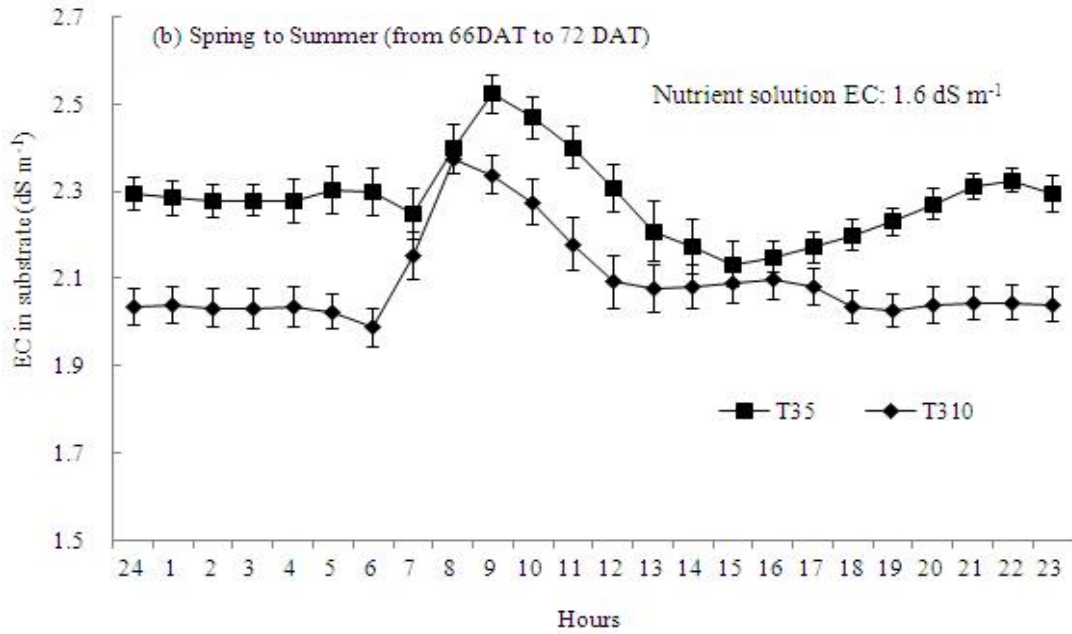


그림 3-3-8. 재배시기 별 실험 처리에 따른 하루 중 근권 내 EC 변화. 실험 처리는 1회 급액량을 3분(60ml/plant), 급액간의 간격을 5분 (처리: T35) 또는 10분 (처리: T310)으로 하였고 1회 급액량을 5분 (80ml/plant), 급액간의 간격을 15분 (처리: T515)으로 지정하였다. Bars represent standard errors (\pm) of means for 13 replications for per treatment for autumn to winter season (a) and 7 replications for spring to summer season (b).

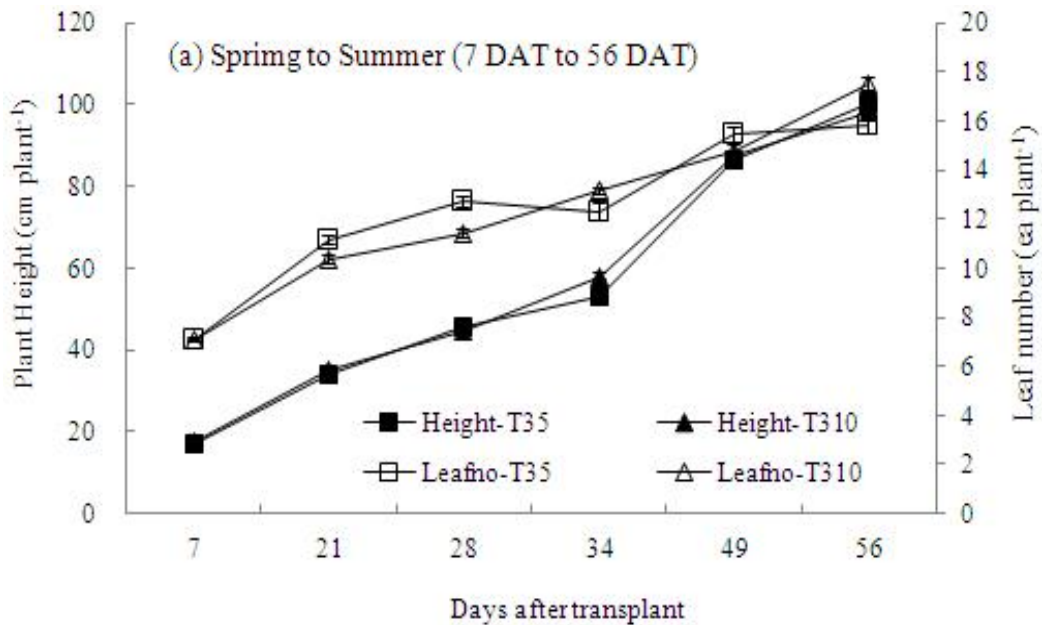


그림3-3-8. 봄과 여름재배에서 정식 후 7일부터 56일까지 생육단계 초장과 엽수 변화. 실험 처리는 1회 급액량을 3분(60ml/plant), 급액간의 간격을 5분 (처리: T35) 또는 10분 (처리: T310)으로 하였다.

Bars represent standard errors (\pm) of means for 24 replications per treatment.



그림 3-3-9. 실험 온실 내부

2. 토마토 배액 극소화 수경재배 시스템 실증 실험

©2014 ~ 2015

가. 실험 목표

토마토 수경재배에서 근권 내 적절한 수분함량을 유지하면서 다량의 배액 배출로 인한 비료 손실 및 환경오염을 감소시키고자 FDR 수분센서를 활용한 자동관수제어 방식을 농가현장에 적용시켜 기존 관행적인 타이머나 일사량 센서에 의한 비순환식 기술과 비교하고자 하였다. 이 연구를 통해 효율적인 급액으로 배액을 극소화하고 적정 근권 환경을 조성하는 기술의 실용화를 이루고자 하였다.

나. 실험 수행 방법

본 실험은 강원도 춘천시 사농동에 위치한 토마토 (*Solanum lycopersicum* L. cv. Unicon) 재배 농가에서 실시하였다. 여름~가을철 재배 실험은 2014년 7월 16일에 정식하여 2014년 11월 2일까지 실시하였고 이른 봄~여름철 재배 실험은 2015년 2월 17일에 정식하여 2015년 6월 15일까지 실시하였다. 배지는 농가에서 재활용 코이어 슬라브 (100cm x 20cm x 10cm, 대영지에스(주); dust: chip (v/v) = 50:50%)를 충분히 세척하여 사용하였다. 정식은 한 슬라브에 토마

토 유묘를 6주씩 심고 1줄기로 유인하였다.

(1) 급액처리

급액은 여름~가을철 재배의 경우 FDR 센서에 의한 방식과 비교하기 위하여 타이머 (TIMER) 제어가 관행으로 설정되었고 이른 봄~여름철재배의 경우는 FDR 수분센서에 의한 방식과 비교하기 위하여 누적일사량센서 (IR: Integrated solar radiation)와 TIMER 제어가 관행으로 설정되었다. FDR 센서에 의한 방식과 IR 센서에 의한 급액방식은 동일한 자동급액기 (WT1000N, Mirae-Sensor®, Seoul, Korea)에 의해 제어 되었고 TIMER 방식은 타이머가 장착된 자동급액기에 의해 제어되었다. FDR 센서에 의한 급액 방식은 목표한 배지 용적당 수분함량 보다 낮은 경우 급액이 되고 목표 수분함량에 도달 할 때 마다 급액이 중지되도록 처리하였다. IR 센서 제어구는 목표 누적일사량에 도달 할 때 마다 급액 되었다. FDR과 IR 센서 처리구에서 급액간의 최소대기시간은 10분으로 설정하였고 TIMER 방식은 하루에 8~11회의 급액이 40~50분 간격으로 되도록 하였다. 세 제어구 모두 1회 급액량을 생육단계에 따라 다르게 설정하여 급액 하였다(표 3-3-4). 관수개시 및 종료시간을 계절 변화에 따라 일출 1시간 후 관수하여 일몰 3시간 전에 관수종료 하였다. 처리별 1회 급액량도 생육단계에 따라 다르게 설정 하였다.

(2) 조사항목

광합성 분석기기(model Li-6400, Li-CO, Lincoln, Nebraska, USA)를 이용하여 자연 CO₂와 50 - 60% 범위의 상대습도, 1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 수준의 광도(PAR) 조건으로 잎의 광합성율 (Photosynthesis rate), 증산율 (transpiration rate), 잎과 대기의 수증기압차 (VpdL), 기공전도도(stomata conductance), 세포 간 사이 내 CO₂ (Intercellular CO₂)농도를 관찰하였다. 관수 제어 시작 후 매일의 총 급액량, 배액량, 배액률, 근권 내 함수율 및 EC (Electrical conductivity) 농도 변화, 식물체 생육, 광합성 효율, 상품과중, 및 수분이용효율을 측정 하였다. 수분이용효율 (water use efficiency)은 다음과 같이 계산되었다; $WUE = (\text{Fresh weights of leaf, stem, and fruit at harvest})/(\text{applied irrigation volume} - \text{leachate})$. 배액률 (Drainage ratio (%))은 다음과 같이 계산되었다; $\text{drainage ratio}(\%) = 100 \times (\text{daily drained water per plant}/\text{daily irrigated water volume per plant})$. 결과에서 얻은 데이터는 SAS 9.2 프로그램(SAS Institute, Cary, NC)으로 ANOVA 분석하였다.

다. 결과 및 고찰

(1) 여름~가을철 재배를 위한 무배액 수경재배 기술 농가실증시험

본 연구는 환경오염과 양수분 손실을 주는 비순환식 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 자동 관수시스템을 적용하여 효율적인 급액으로 배액을 극소화하고 적정 근권 환경을 조성하는 기술을 실용화하고자 상업적으로 토마토를 생산하는 농가에서 수행되었다 (그림 3-3-14~16).

여름~가을철 재배에서 온실 내 가장 낮은 온도는 10월 28일에 12℃이고 가장 높은 온도는 8월 20일에 27.8℃였다. 일일 누적 일사량은 8월 22일, 9월4일, 9월 29일과 9월30일에만 5500~7000 J cm⁻² 수준으로 특이적으로 매우 높게 나타났고, 그 외에는 1500~3000 J cm⁻² 수준으로 정상 범위였고 흐린날은 1000 J cm⁻² 이하로 나타났다(그림 3-3-10).

일일 식물체당 생육단계별 급액량은 정식 후 30-55일 단계에서 FDR 수분센서 제어구에서 목표함수율을 65%로 설정한 결과 TIMER 제어구에 비해 24% 감소되었다(표 3-3-4). 이 시기에 TIMER 제어구는 9.9% 배액이 발생하였고 FDR 센서 제어구는 배액이 발생되지 않았다. 따라서 배액률을 감안하면 FDR 센서 제어구에서 급액량이 10% 부족했던 것으로 판단된다. 정식 후 69-107일 단계에서는 목표함수율을 76%로 높게 설정하였음에도 TIMER 제어구에 비해 급액량이 26% 감소되었다. 이 시기에 TIMER 제어구는 10~12%의 배액이 발생하였고 FDR 센서 제어구는 배액이 발생하지 않았고 하였다. 마찬가지로, 배액률을 감안하면 FDR 센서 제어구에서 급액량이 10% 부족했던 것으로 판단된다. 따라서 전 재배기간 동안 한 식물체당 급액된 총량은 FDR 센서 제어구에서 약 18% 정도 낮았다(표 3-3-4). 이러한 목표함수량 설정은 본 과제의 기존의 연구결과를 토대로 설정한 것이나 실증연구 농가의 지역적 차이, 각 계절별 재배시기의 차이, 각 농가의 환경적 특이성 (베드 설치 방법, 베드의 공기 중 노출정도 및 배수 상황) 등에 따라 달라질 수 있다고 고찰되었다. 따라서 목표함수량 설정 시 일일 주당 급액량을 관찰하며 각 생육단계에 토마토 작물 요구 관수량과 일치되도록 목표함수량을 설정하여야 한다. 정식 후 56-68일 단계에서 목표함수율을 74%로 설정한 결과 FDR 센서 제어구의급액량은 TIMER 제어구와 유의차가 없었다. 하지만 배액은 FDR 센서 제어구에서는 4.6% 발생하였고 TIMER 제어구에서는 약 11% 발생하였다. FDR 센서 제어구에서 배액이 발생하지 않은 것은 식물체당 1회 급액량을 70 mL로 제한한 결과이다. 즉, 소량다회 방식으로 배액이 발생하지 않게 된다. TIMER 제어구는 1회 급액량을 80~110 mL로 설정하기 때문에 배액이 발생하게 된다. 일반적으로 비순환식 토마토 재배농가에서는 배액을 20~40% 배출하는 것이 관행이나 이 토마토 농가는 10~15%로 제한하고 있었다.

전 재배기간 동안 배지 함수율은 두 처리 간 큰 차이가 없었으나 (그림 3-3-11), 배지 내 EC 농도는 FDR 센서 제어구에서 정식 60일 이후부터 3.0-4.0 dS m⁻¹ 수준으로 TIMER 제어구 (2.5-3.5 dS m⁻¹) 보다 높았다 (그림 3-3-12). 이는 앞서 언급된 정식 후 69-107일 단계에서는

TIMER 제어구에 비해 급액량이 26% 감소되었고 배액률을 감안하면 FDR 센서 제어구에서 급액량이 10% 부족했던 것과 관련이 있고 또한 FDR 센서 제어구에서 급액횟수가 재배초기보다 후기에 감소된 것과 관련이 있을 것으로 판단된다 (그림 3-3-13). 이러한 결과로 FDR 센서 제어구에서 식물체당 토마토 수량이 20% 감소되었고 당도는 1.0 Brix 증가된 것으로 고찰된다 (표 3-3-5). 토마토 1050주를 500m²인 온실규모에서 재배할 때 비료값은 FDR 센서에 의해 배액을 극소화 하였을 때 186,072원이 소비된 반면 관행 급액방식은 227,1820원이 소비된 것으로 나타났다(표 3-3-6).

결론적으로 FDR 센서 제어구는 일일 주당 급액량을 관행수준으로 공급하면서 배액을 극소화를 목표로 하는 급액방식이므로 1회 공급량 및 목표함수율을 각 재배농가의 환경적 특성 및 각 계절별 재배시기에 따른 생육단계별로 작물 요구 관수량에 맞게 설정해 주어야 할 것으로 판단된다.

표 3-3-4. Comparison in irrigation volume, drainage ratio and water volume in each irrigation between FDR-automated and TIMER irrigation systems during summer to autumn growing season.

Treat-ment	Days after transplant (DAT)	Preset trigger point	Irrigation volume (mL plant ⁻¹ day ⁻¹)	Drainage ratio (%)	water volume in each irrigation (mL)	EC (dS m ⁻¹)
FDR	30-55 (17-Aug~09-Sept)	65%	879(56) ^z	0.0(0.0)	70	2.0-1.7
	56-68 (10-Sept~22-Sept)	74%	1729(279)	4.6(2.9)	70	1.7-1.5
	69-107 (23-Sep~31-Oct)	76%	723(30)	0.0(0.0)	70	1.7-1.6
TIMER	30-55 (17-Aug~09-Sept)	-	1157(68)	9.9(1.1)	80-120	2.0-1.7
	56-68 (10-Sept~22-Sept)	-	1592(34)	10.6(1.8)	90-110	1.7-1.5
	69-107 (23-Sep~31-Oct)	-	978(47)	12.1(1.6)	40-110	1.7-1.6

^z: The numbers in parentheses are standard errors.

㉟ 3-3-5. Comparison in fresh weight (FW) of fruit, soluble solid content (SSC), total irrigation volume, and retained volume between FDR-automated and TIMER irrigation systems during summer to autumn growing season.

Treatment	Fruit FW ^z (kg plant ⁻¹)	SSC (°Brix)	Total irrigation volume (L plant ⁻¹)	Total retained irrigation volume ^y (L plant ⁻¹)
FDR	1.28	6.8*	86	84
TIMER	1.62 ^{*x}	5.7	105*	94*

^z : Fresh weight of fruits harvested from cluster 1 to cluster 4.

^y :Retained volume = irrigation volume - leachate volume

^x: Asterisks indicate significant differences (t-test, p < 0.05).

㉟ 3-3-6. Comparison in fertilizer costs for growing 1050 plants in a greenhouse sized in the 500 m² where 1050 plants are grown under the FDR-automated and TIMER irrigation systems during summer to autumn growing season.

Treatment	Fertilizer costs (won/1050 plants)
FDR	186,072
TIMER	227,182

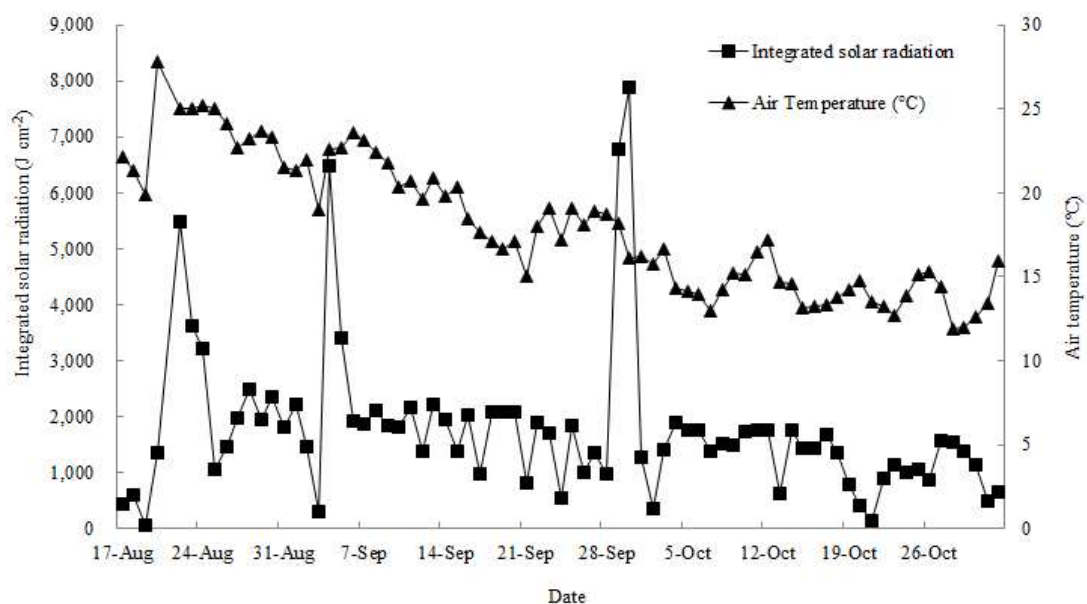


그림 3-3-10. Daily integrated solar radiation (J cm⁻²) and daily average air temperature (°C) in the experimental greenhouse between the 17th of August to the 1st of November in 2014.

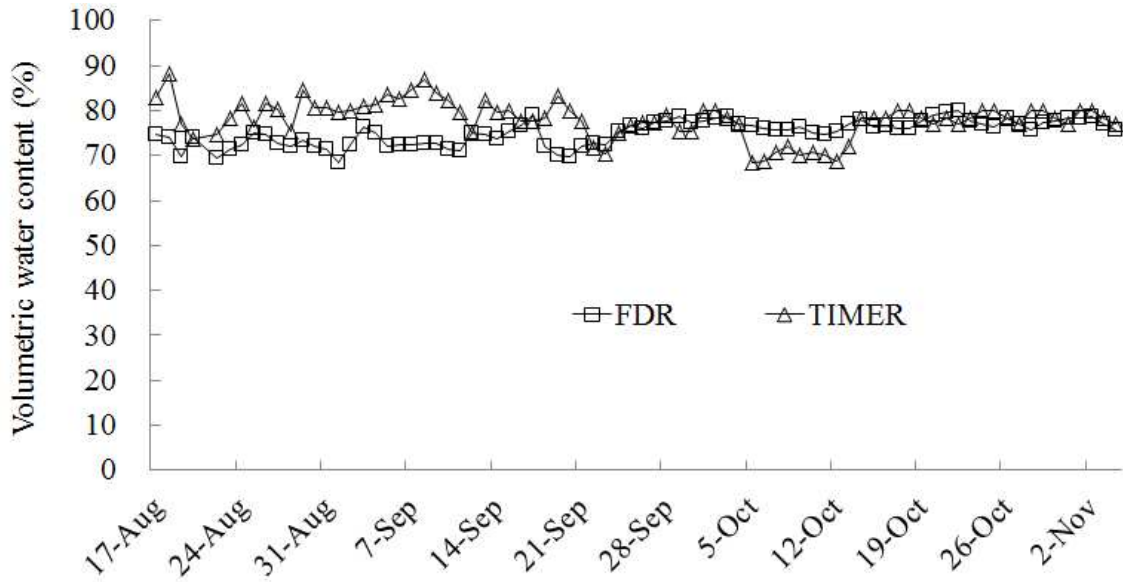


그림 3-3-11. Comparison in the volumetric water content of the substrate between FDR-automated and TIMER irrigation systems during summer to autumn growing season.

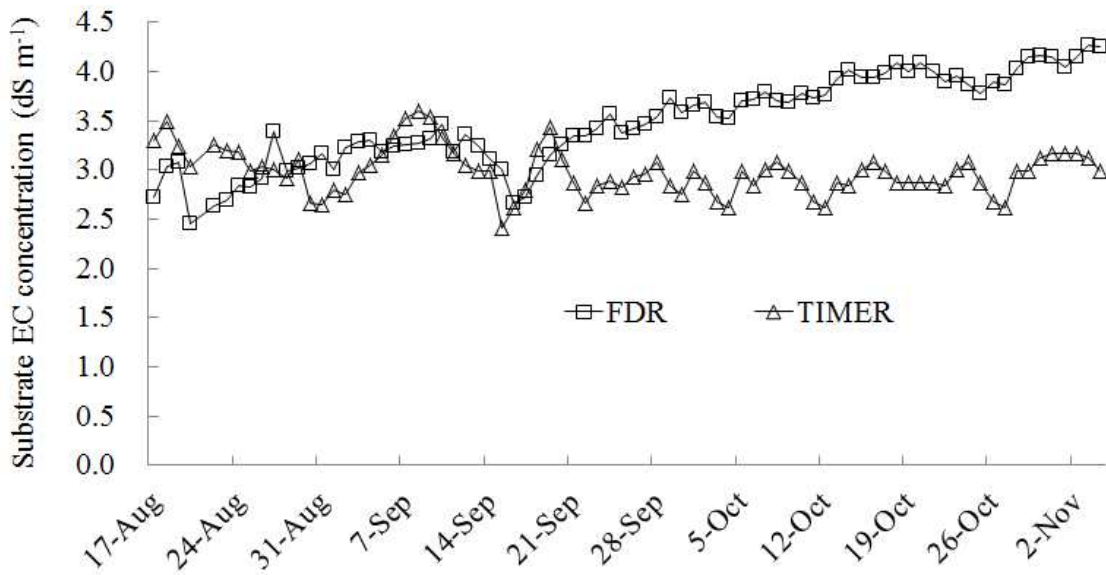


그림 3-3-12. Comparison in the substrate EC concentration between FDR-automated and TIMER irrigation system during summer to autumn growing season.

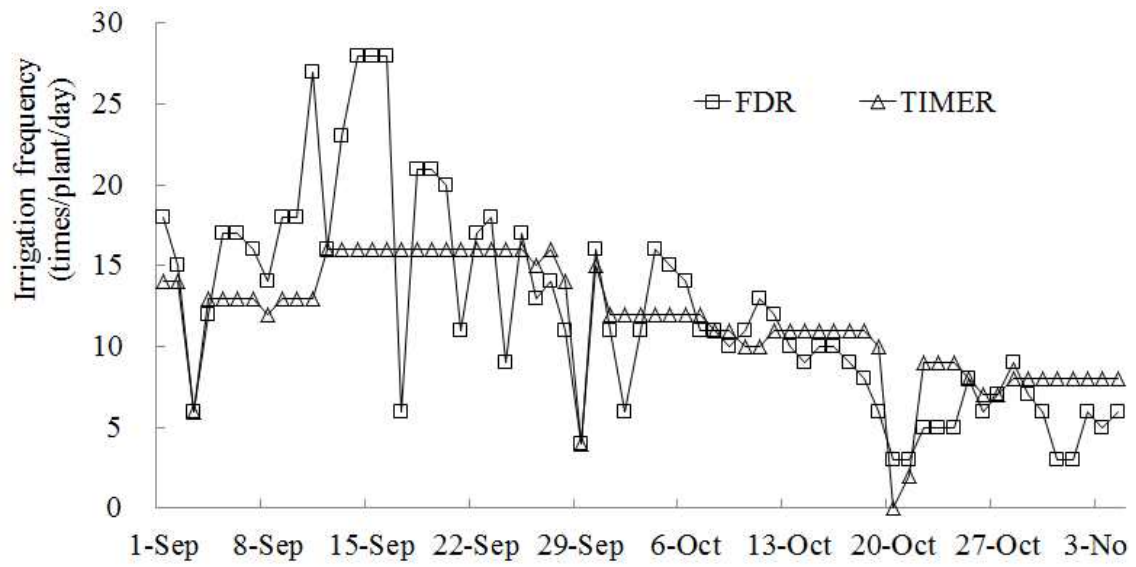


그림 3-3-13. Comparison in irrigation frequency between FDR-automated and TIMER irrigation system during summer to autumn growing season.



그림 3-3-14. Images of field experiment in the greenhouse of commercial hydroponic farm during summer to autumn growing season.

FDR

TIMER



그림 3-3-15. Images of plants grown for 56 days after transplant under FDR-automated(left) or TIMER(right) irrigation system during summer to autumn growing season.

FDR

TIMER



그림 3-3-16. Images of plants grown for 96 days after transplant under FDR-automated(left) or TIMER(right) irrigation system during summer to autumn growing season.

(2) 이른 봄~여름철 재배를 위한 무배액 수경재배 기술 농가실증시험

이른 봄~여름철 재배에서 온실 내 가장 높은 온도는 6월에 36℃이고 가장 높은 일사량은 6월 오후 1시경 942 J cm⁻² 수준이었다(그림 3-3-17). 전 재배기간 동안 근권 내 함수량은 FDR 센서 제어구에서는 52-64% 범위로 유지 되었고, TIMER 제어구에서는 3, 4월에 54%로 유지 되었고 5월에 60%, 6월에 74%로 유지되었다. IR 제어구에서는 3, 4월에 55~59%, 5, 6월에 72%로 유지 되었다. 전 재배기간 동안 근권 내 배지 EC 농도는 세 처리 모두 1.8~3.2 dS m⁻¹ 수준으로 유지되었다 (그림 3-3-18).

생육단계별 일일 식물체당 평균 급액량은 세 처리구, TIMER, FDR, 및 누적일사량(IR) 모두 정식 후 13-51일에는 600-630mL, 52-60일에는 1000-1200mL, 61-68일은 1200-1400mL, 69-78일은 1800-1860mL, 79-87일은 1820-1900mL 범위로 공급되었다(표 3-3-7). 그러나 재배 후기, 정식 후 88일 이후에는 FDR과 IR 제어구에서 일일 식물체당 평균 급액량에 있어서 상이한 결과를 보였는데 FDR 제어구는 1522mL 수준으로 공급되었던 반면 IR 제어구는 2111mL 수준으로 공급되었다(표 3-3-7, 그림 3-3-19). 이는 재배 후기 즉, 5월 이 후 누적일사량의 증가로 IR 제어구에서는 급액이 증가된 반면 FDR 센서 처리구는 적심(5월 2일)과 하엽제거 (13 마디까지) 이후에 목표 수분함량을 높이지 않고 계속 59-60% 수준으로 설정한 것과 관련이 있다. TIMER 제어구는 평균 급액량이 1873mL 수준으로 공급되었고 그 때의 배액률(4.1%)을 감안하면 FDR센서 처리구도 목표 수분함량 설정을 1~2% 높여도 될 것으로 판단된다.

전 재배 기간 동안 배액률은 TIMER 제어구의 경우 4~12%, FDR 센서 제어구의 경우 0~7%, IR 제어구의 경우 12~19% 수준으로 IR > TIMER > FDR 순이었다(표 3-3-7). 일반적으로 비순환식 토마토 재배농가에서는 TIMER나 IR 제어방식을 이용하여 배액을 20~40% 배출하는 것이 관행이나 이 토마토 농가는 TIMER 제어방식으로 10~15%로 제한하고 있어 IR 제어구는 다른 일반 농가와 유사하게 배액을 배출하는 것을 목표로 생육단계별 누적일사량을 설정한 결과 식물체당 일일 평균 급액량이 다른 처리구들과 유사하나 배액률은 목표로 하는 수준에 근접하였다. 이는 앞에서 언급한 데로 TIMER 제어구 같이 IR 제어구도 1회 급액량을 80~120mL로 설정하였기 때문에 일일 평균 급액량은 FDR 센서 제어구와 유사하다 배액률이 높게 발생하게 된다. 정식 후 60일 이후 FDR 센서 제어구에서 배액이 더 감소한 것은 식물체당 1회 급액량을 60일 이후부터 65~75mL로 제한한 결과이다(표 3-3-7, 그림 3-3-20). 정식 초기에는 FDR 센서 제어구도 TIMER 제어구와 같은 수준의 1회 급액량을 공급하여 배액이 7% 정도 발생하였다. 이는 정식 초기에 뿌리 활착과 생육발달을 위해서는 다량 소회 공급이 더 나은 것으로 판단되어 1회 급액량을 높은 수준으로 설정한 후 생육단계에 따라 수정 설정하였다.

정식 후 121일에 처리당 선정된 대표 5개 식물체에서 측정된 잎 및 줄기 생체중은 급액방식에 따른 유의차가 없었고, 또한 처리당 선정된 대표 3개 식물체의 상품과 수량(1-4화방)도 급액방식에 따른 유의차가 없었지만 당도는 FDR 센서 제어구에서 가장 높았다(표 3-3-8). 하지만 5월 11일부터 6월 19일까지 측정된 처리구당 식물체 전체(1050주)에서 수확된 토마토 무게(1화방에서 7화방까지)는 일사량구에서 다른 처리구보다 100kg 정도 높은 것으로 나타났다(표 3-3-9). 측정된 수분이용효율도 세 처리구 간의 유의차가 없는 것으로 나타났다(표 3-3-8).

이러한 결과들은 앞에서 수행된 여름~가을철 재배에서 발생한 과실 수량 차이를 극복 할 수 있다는 것을 보여 주고 있다. 이른 봄~여름 재배에서는 FDR 센서 제어구의 일일 주당 급액량을 관행수준으로 공급하면서 배액을 극소화를 목표로 1회 공급량을 생육단계별로 다르게 설정해 준 것과 관련이 있는 것으로 판단된다.

세 제어구 간의 일일 식물체당 급액량에 있어서 유사성을 비교하였는데 그 상관계수(R^2)는 FDR 센서와 TIMER 제어구 간에는 0.879, IR과 TIMER 제어구 간에는 0.836로 높은 상관관계를 나타냈고, FDR 센서와 IR 제어구 간에는 0.774로 다른 두 비교보다 낮은 상관관계를 나타냈다. 이는 흐리고 비가 오는 날과 맑은 날의 급액 패턴과 하루 시간대별 급액빈도가 FDR 센서와 IR 제어구 간에 차이가 있는 것과 관련이 있는 것으로 생각되어 앞으로 정밀 분석을 해 볼 필요가 있다. 이에 앞서 해결해야 하는 과제는 이러한 미세한 변화를 FDR 센서가 섬세하게 감지하고 자동관수기와의 통신에 있어서 원활하게 될 수 있도록, 또 재배 농민이 최소화의 시간 투자로 이 기술을 습득하고 활용하는데 오랜 시간과 에너지가 들지 않도록 기술을 안정화 시키는데 노력하여야 할 것으로 판단된다.

㉔ 3-3-7. Comparison in irrigation volume, drainage ratio, and water volume in each irrigation under the FDR-automated, TIMER and Integrated radiation (IR) irrigation systems during early spring to summer growing season.

Treat- ment	Days after transplant (DAT)	Preset trigger point	Irrigation volume (mL plant ⁻¹ day ⁻¹)	Drainage ratio(%)	water volume in each irrigation (mL)	Plant height (cm)
TIMER	13-51 (1-Mar-8-Apr)		628	10.6(2.7) ^z	65-110	149(2)
	52-60 (9-Apr-17-Apr)		1036	11.5(4.6)	85-110	170(4)
	61-68 (18-Apr-24-Apr)		1247	9.0(6.5)	70-110	194(7)
	69-78 (25-Apr-4-May)		1783	10.2(6.0)	75-115	224(4)
	78-87 (5-May-13-May)		1820	9.2(6.6)	85-110	- ^y
	88-120 (14-May-14-Jun)		1873	4.1(3.2)	85-110	-
FDR	13-51 (1-Mar-8-Apr)	58~61%	603	6.8(2.2)	60-90	153(1)
	52-60 (9-Apr-17-Apr)		1244	6.6(2.8)	90-110	179(1)
	61-68 (18-Apr-24-Apr)		1382	3.9(2.3)	65-75	198(1)
	69-78 (25-Apr-4-May)	59~60%	1863	3.2(4.1)	65-75	233(2)
	78-87 (5-May-13-May)		1883	4.3(5.2)	65-75	- ^y
	88-120 (14-May-14-Jun)		1522	0(0)	65-75	-
IR	13-51 (1-Mar-8-Apr)	350~170J	605	14.5(1.7)	70-110	156(1)
	52-60 (9-Apr-17-Apr)	150~130J	1014	11.7(0)	100-110	180(3)
	61-68 (18-Apr-24-Apr)	130J	1424	16.6(0)	100	202(4)
	69-78 (25-Apr-4-May)	130~110J	1827	14.1(0)	100-120	236(4)
	78-87 (5-May-13-May)	110~80J	1900	18.5(0)	80-90	- ^y
	88-120 (14-May-14-Jun)	80J	2111	13.5(0)	80-90	-

^z : The numbers in parentheses are standard deviation.

^y : The apex of plant was removed after the 2nd of May at 76 days after transplant.

3-3-8. Comparison in fresh weight (FW) of fruit, soluble solid content (SSC), total irrigation volume, and water use efficiency (WUE) under the TIMER, FDR and IR (Integrated radiation) irrigation systems during early spring to summer growing season.

Treatment	Leaf FW ^z (g plant ⁻¹)	Stem FW ^z (g plant ⁻¹)	Fruit FW ^y (g plant ⁻¹)	SSC (°Brix)	Irrigation volume (L plant ⁻¹)	WUE ^w
TIMER	758(64) ^v	455(25)	1889(258)	4.8(0.1)	138	26.73(0.90)
FDR	701(76)	420(35)	2430(282)	5.2(0.4)	146	28.75(0.93)
IR	761(51)	420(30)	2253(308)	4.6(0.1)	148	30.94(0.72)

^z : Measured at 121 DAT (15th of June)

^y : Fresh weights of fruits harvested from the first cluster to the fourth cluster.

^x : Drainage ratio (%) = 100 x (daily drained water per plant/daily irrigated water volume per plant)

^w: WUE = (Fresh weights of leaf, stem, and fruit at harvest)/(applied irrigation volume – leachate)

^v: The numbers in parentheses are standard errors 5 representative plants per treatment

^u: The numbers in parentheses are standard deviation 2 representative plants per treatment

3-3-9. Comparison in total and daily average weights of fruit harvested from a greenhouse sized in 500 m² where 1050 plants are grown under the TIMER, FDR and IR (Integrated radiation) irrigation systems during early spring to summer growing season.

Treatment	Total weight of fruit ^w (kg 500 m ²)	Daily average weight of harvested fruit (kg 500 m ²)
TIMER	6611	189(18)
FDR	6644	190(18)
IR	6765	193(19)

^w Fresh weight of fruits harvested from cluster 1 to cluster 7 from 84 (11th of May) to 123 DAT (19th of June).

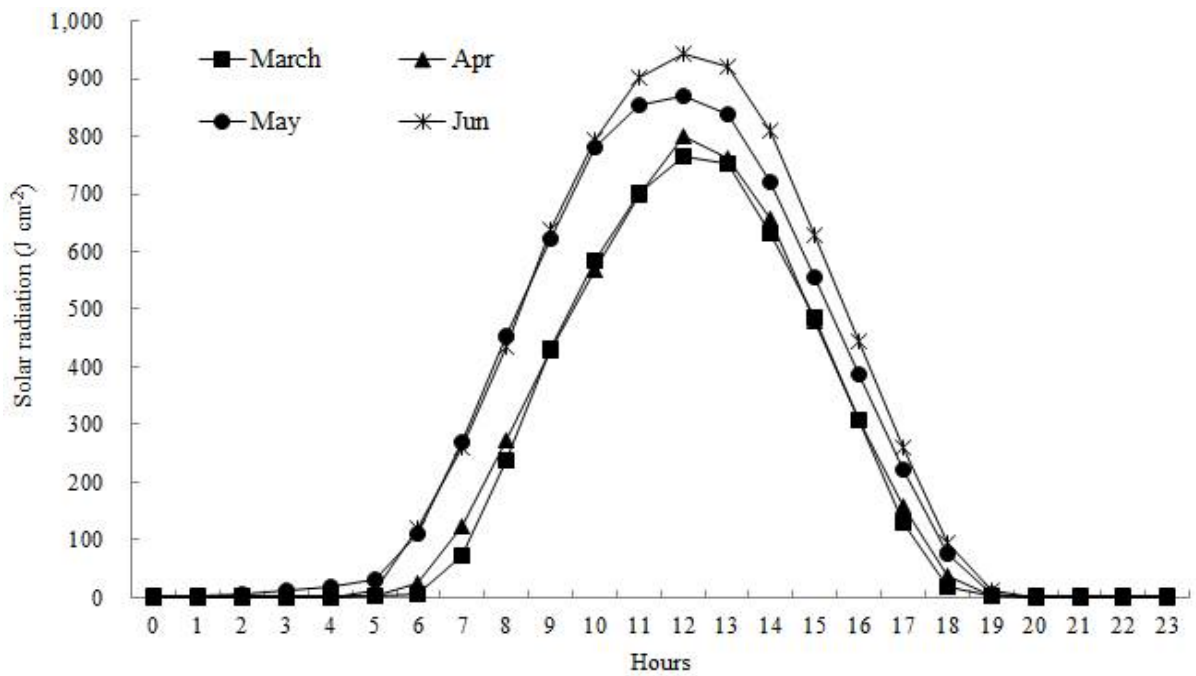
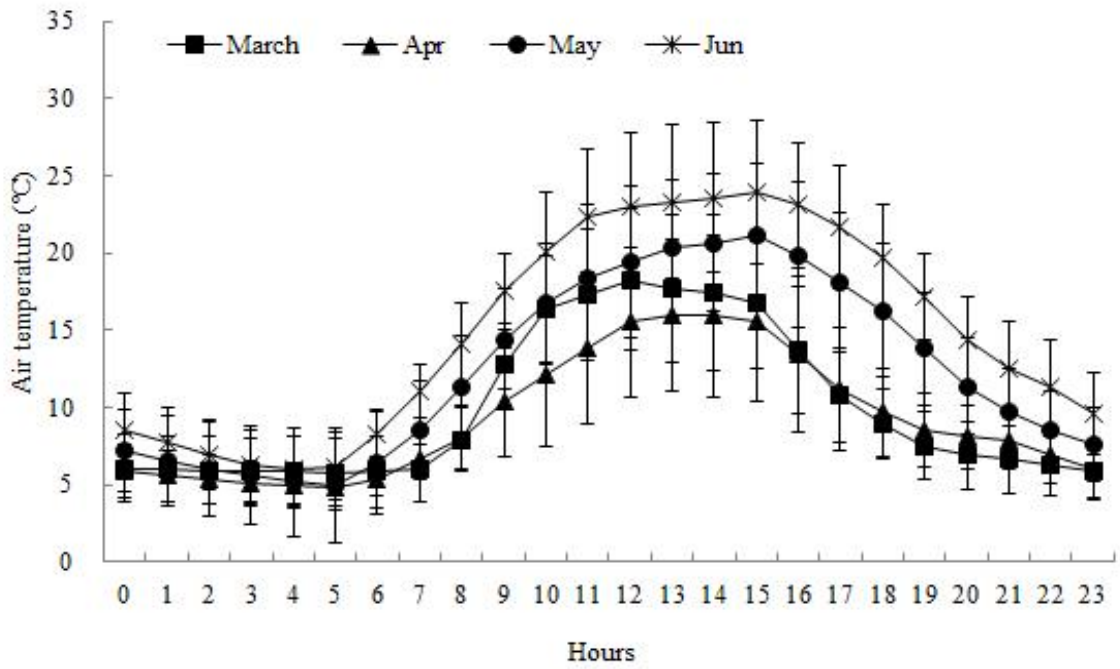


그림 3-3-17. Hourly solar radiation and average air temperature in the experimental greenhouse between March and June in 2015.

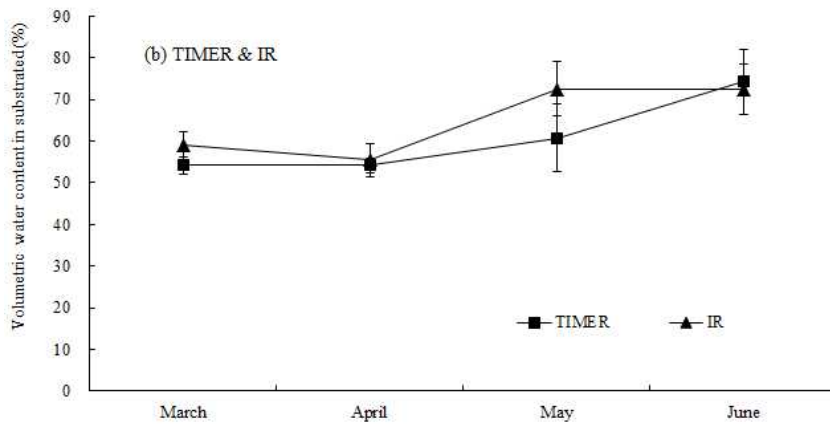
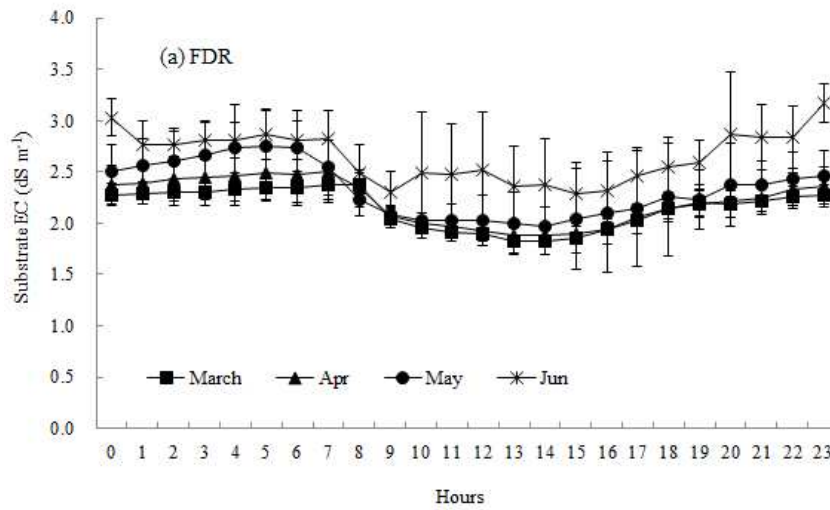
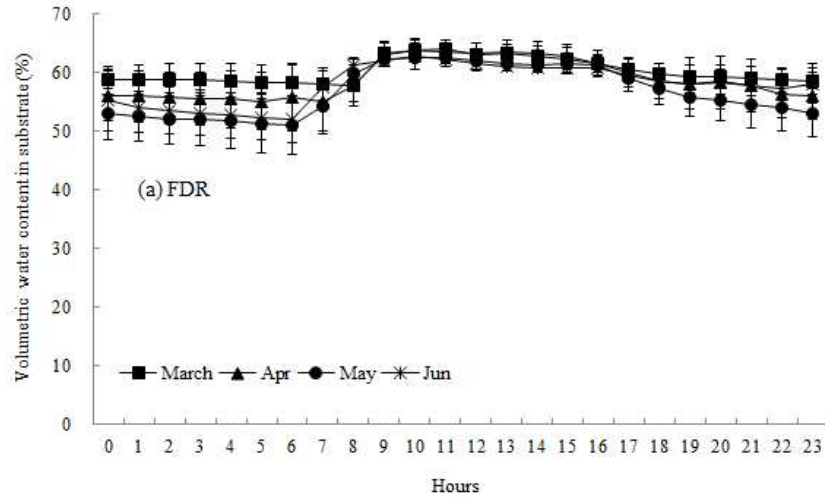


그림 3-3-18. Changes of volumetric water contents and EC concentration in coir substrate when water content was controlled by the FDR sensor, Integrated solar radiation(IR) sensor, or TIMER.

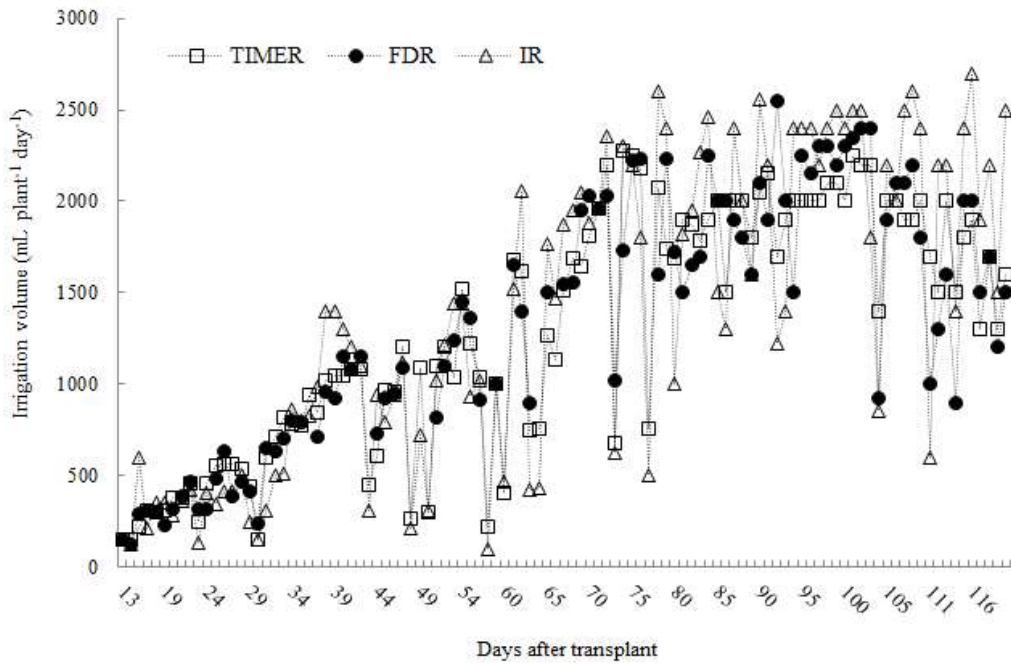


그림 3-3-19. Comparison in irrigation volume between FDR-automated, TIMER and Integrated Radiation (IR) irrigation systems during early spring to summer growing season.

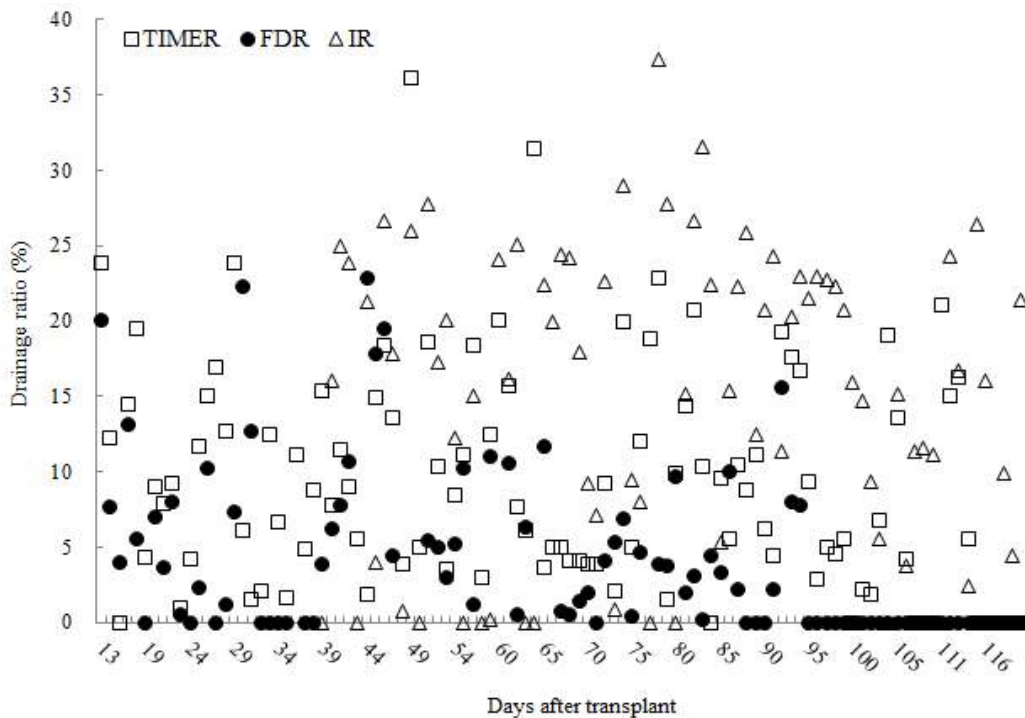


그림 3-3-20. Comparison in drainage ratio between FDR-automated, TIMER and Integrated Radiation (IR) irrigation systems during early spring to summer growing season.

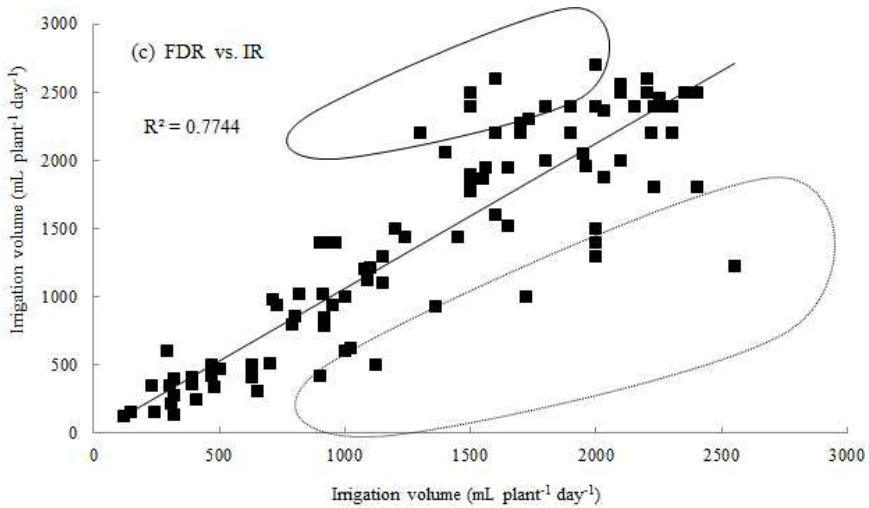
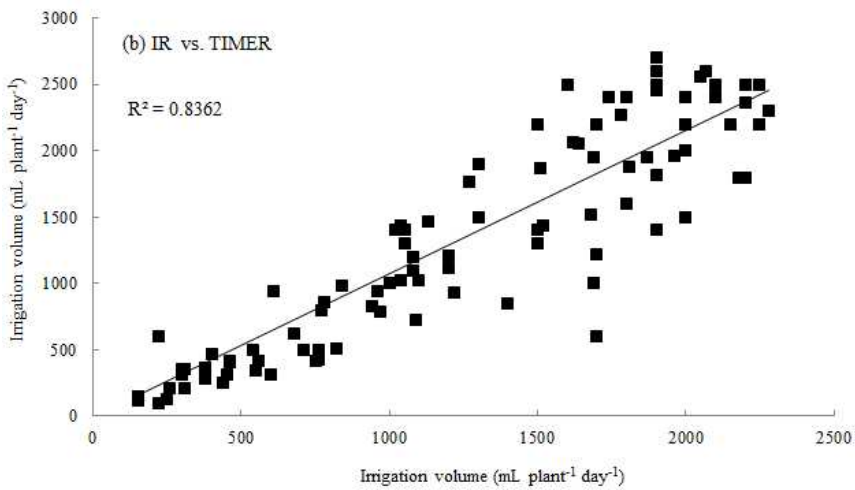
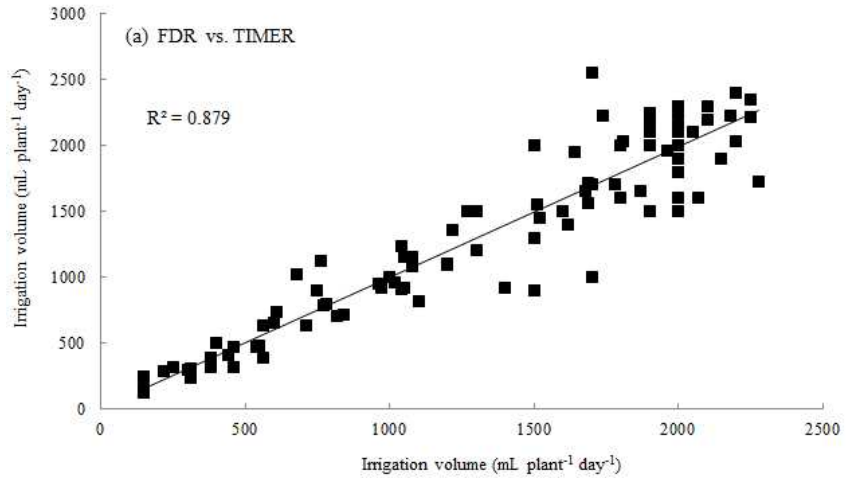


그림 3-3-21. Correlation coefficient (R^2) in irrigation volume between FDR-automated, Integrated Radiation (IR) and TIMER irrigation systems during early spring to summer growing season.



그림 3-3-22. Images of plants grown for 93(left) and 99(right) days after transplant under TIMER, FDR-automated or TIMER irrigation systems during early spring to summer growing season.

<핵심 연구 결과>

본 연구는 환경오염과 양수분 손실을 주는 비순환식 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 자동 관수시스템을 적용하여 효율적인 급액으로 배액을 극소화하고 적정 근권 환경을 조성하는 기술을 실용화하고자 상업적으로 토마토를 생산하는 농가(춘천)에서 2회, 즉 여름~가을철과 이른 봄~여름철, 실험이 수행되었다.

- 여름~가을철재배에서 전 재배기간 동안 한 식물체당 급액된 총량은 FDR 센서 제어구에서 대조구(TIMER 처리구)보다 약 18% 정도 낮았고 급액총량에서 배액량을 뺀 수분량도 11% 낮았다. 이러한 결과로 FDR 센서 제어구에서 식물체당 토마토 수량이 20% 감소되었고 당도는 1.0 Brix 증가되었다. 이 실험에서 목표함수량 설정은 본 과제의 기존의 연구결과를 토대로 설정한 것이나 실증연구 농가의 지역적 차이, 각 계절별 재배시기의 차이, 각 농가의 환경적 특이성 (베드 설치 방법, 베드의 공기 중 노출정도 및 배수 상황) 등에 따라 달

라질 수 있기 때문에 목표함수량 설정 시 일일 주당 급액량을 관찰하며 각 생육단계에 토마토 작물 요구 관수량과 일치되도록 목표함수량을 설정하여야 한다고 판단된다. FDR 센서 제어구는 일일 주당 급액량을 관행수준으로 공급하면서 배액 극소화를 목표로 하는 급액방식이므로 1회 공급량 및 목표함수율을 각 재배농가의 환경적 특성 및 각 계절별 재배 시기에 따른 생육단계별로 작물 요구 관수량에 맞게 설정해 주어야 할 것으로 고찰된다.

- 이른 봄~여름철재배에서 전 재배기간 동안 배액률은 TIMER 제어구의 경우 4~12%, FDR 센서 제어구의 경우 0~7%, IR 제어구의 경우 12~19% 수준으로 IR > TIMER > FDR 순이었다. 정식 후 121일에 처리당 선정된 대표 5개 식물체에서 측정된 잎 및 줄기 생체중은 급액방식에 따른 유의차가 없었고, 처리당 선정된 대표 3개 식물체의 상품과 수량(1-4화방)도 급액방식에 따른 유의차가 없었지만 당도는 FDR 센서 제어구에서 높았다. 측정된 수분이 용효율도 세 처리구 간의 유의차가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과들은 앞에서 수행된 여름~가을철 재배에서 발생한 과실 수량 차이를 극복 할 수 있다는 것을 보여 주고 있다. 이른 봄~여름 재배에서는 FDR 센서 제어구의 일일 주당 급액량을 관행수준으로 공급하면서 배액을 극소화를 목표로 1회 공급량을 생육단계별로 다르게 설정해 준 것과 관련이 있는 것으로 판단된다.

◎2015 ~ 2016

가. 연구배경

현재 시설채소의 전체 면적(2013년 기준)은 63,815ha이고 생산량은 2,714,519톤이며 이중 과채류는 46,693ha이고 그 생산량은 2,164,919톤이다. 과채류 재배 면적 중 토마토 재배면적은 7,070ha이고 생산량은 49,960톤에 이르고 있다(MAFRA, 2014). 시설재배 전체 면적 63,815ha 중 양액재배면적은 2,981ha이고 그 중 고행배지경은 2,171ha, 순수수경은 810ha의 면적이다. 최근 지구온난화로 인한 기온상승과 가뭄(IPCC, 2013) 등으로 인한 작물피해가 급증하여 노지재배면적이 감소되고 있는 추세이다. 따라서 세계적으로 지속 가능한 원예농업 경영을 위하여 물 소비를 줄이는 재배시스템과 품종 개발의 연구가 요구되고 있다. 다양한 양액재배의 방식 중 과채류에서는 순수수경 보다는 배지를 사용하는 고행배지경 재배면적이 높은 비율을 차지하고 있다. 국내의 고행배지경은 순환식과 비순환식(방류식)이 있으며 주로 비순환식으로 이루어지고 있다(Seo, 1999). 일반적으로 비순환식 고행배지경은 배지 내 염류축적 방지를 위해 배액율을 20~40%정도로 관리하는 것이 일반적이다. 이때 방류되는 배액으로 인하여 수분 및 비료가 손실되며, 환경오염을 유발시킬 뿐 아니라 배액의 온실 내부 방류 시 토양환경이 열악해지고 병발생의 원인이 될 수 있다(Hwang 등, 2012). 이러한 문제를 극복하기 위해 순환식 방식이 권장되지만 특정이온의 비율이 증가하고 축적되는 어려움이 있어서(Ehret 등, 2005; Zekki 등,

1996) 실용화 단계까지는 추가 연구가 필요한 실정이다. 토양과 지하수의 염류오염에 따른 환경적, 경제적 우려가 커지는 가운데(Giuffrida 등, 2003; Kim, 2014), 북미 및 유럽국가에서는 온실로부터 고농도의 화학비료 성분이 배출되지 못하도록 법적으로 규제하고 있다(Runia와 Amsing 2001). 이러한 문제를 극복하기 위하여 근권 내 함수량을 쉽게 모니터링하여 배액을 극소화하거나 배액을 전혀 방출시키지 않는 무배액 비순환식 수경재배방법이 개발되는 것이 필요하다.

비순환식 고품배지경에서 효과적인 관수제어방식으로 타이머제어법이나 적산일사량센서 제어법을 사용해 왔다(Lee 등, 2007). 하지만 두 가지 방법 모두 근권 내 수분함량을 실시간 측정하는데 어려움이 있다. 최근 비순환식 고품배지경에서 작물의 수분요구도와 배지의 수분상태를 측정할 수 있는 토양수분센서(soil moisture sensor) 개발이 이루어져왔다. 수분센서의 종류로는 Time Domain Reflectometry(TDR) 센서와 Frequency Domain Refelctometry(FDR)가 있다. TDR 센서는 고주파를 발생시켜 되돌아오는 전파속도에 근거하여 토양 내 수분을 측정하는 것이고, FDR센서는 시간에 대한 유전율의 반사측정에서 다양한 주파수범위를 이용하여 측정된 한 대역폭을 선택하여 측정하는 신속하고 실용적인 수분함량 측정기다. 최근 FDR 센서를 활용한 고품배지경에서 관수조절 및 관리(Jaria 등, 2013), 센서 간 간격과 측정위치 및 보정방법(Kim, 2014; Park 등, 2011a; 2011b; 2014), 적정 근권 수분제어 범위 구명(Park, 2015), 급액 개시시기와 종료 시기, 배양액 관리(Yoo, 2014) 등이 연구되어 왔다. FDR 센서를 활용하여 실험한 작물은 토마토(Choi 등, 2013a; 2013b; 2014, 2015), 딸기(Kim, 2015), 파프리카(Yoo 등, 2014), 절화장미(Park, 2015; Farina 등, 2007)등이 있으나 아직까지 실질적 농가활용을 위한 체계적 연구 자료의 축적은 부족한 실정이다. 따라서 본 연구는 토마토의 코이어 배지를 활용한 비순환 수경재배 시 배액 최소화를 위한 재배방식을 확립하고자 FDR, 적산일사량 센서 및 타이머의 서로 다른 관수제어 방식을 적용하고 그에 따른 급배액량, 생육 및 생산량을 비교 및 평가하였다.

나. 재료 및 방법

(1) 식물 재배

본 실험은 강원도 춘천시 사농동에 위치한 토마토 재배 농가의 단동 2중 수막하우스 3동에서 실시하였다. 면적은 처리당 500m² (150평, 1050주) 이며 총 1500m²에서 실시하였다. 춘천 육묘장에서 구입한 토마토(*Solanum lycopersicum* L. 'Samsamgu') 유묘는 2015년 2월 17일에 세척된 재활용 코이어 슬라브 (100cm×20cm×10cm 대영지에스(주); dust: chip (v/v) = 50:50%)에 6주씩 심고 1줄기로 유인 하였다. 배양액은 시립대학교 토마토 배양액을 기준으로 가감하여

사용하였다; $5[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]\text{NH}_4\text{NO}_3$ 90.8kg, KNO_3 43.9kg, NH_4NO_3 1.7kg KCl 6.8kg, KH_2PO_4 20.3kg, Fe-EDTA 860g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 68.4kg, K_2SO_4 36.7kg, $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 169g, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 104g, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 18.7g, $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ 280g, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 12.1g (1000 L 100배).

(2) 급액제어

급액은 FDR 센서(WT1000N, Mirae-Sensor, Seoul, Korea)에 의한 자동급액방식 처리와 비교하기 위하여 누적일사량센서(IR: Interated Solar Radiaion)와 타이머(TIMER) 제어구를 대조구로 정식 후부터 설정하였다. FDR 센서에 의한 방식과 IR 센서에 의한 급액방식은 동일한 자동관수제어기(Magma-1000, Green CS, Seoul, Korea)로 제어 되었고 TIMER 방식은 타이머가 장착된 자동급액기로 제어되었다. FDR센서에 의한 급액방식은 목표 배지 용적당 수분함량보다 낮은 경우 급액이 되고 목표 수분함량에 도달하였을 때 급액이 중지 되도록 처리 하였다. FDR과 IR 센서 처리구에서 급액간의 최소대기시간은 10분으로 설정하였고 TIMER 방식은 하루에 8~11회의 급액이 40~50분 간격으로 되도록 하였다. IR 센서 처리구에서는 목표 누적일사량에 도달하였을 때 급액 되도록 설정하여 전 재배기간 동안 80J~350J 범위에서 급액제어 되었다(표 3-3-11). 모든 제어구에서 1회 급액량을 생육단계에 따라 다르게 설정하였다(표 3-3-11). 관수개시 및 종료시간을 계절 변화에 따라 일출 1시간 후 관수하여 일몰 3시간 전에 관수종료 하였다.

(3) 노이즈 필터

FDR 센서와 자동관수제어기(Magma-1000, Green CS, Seoul, Korea)에 공급되는 전기에서 발생하는 전기적 노이즈를 최소화하기 위하여 전기노이즈 필터(Mirae-Sensor, Seoul, Korea)를 연결하여 사용 유무에 따른 수분함량 변화를 계측하였다(그림 3-3-23).

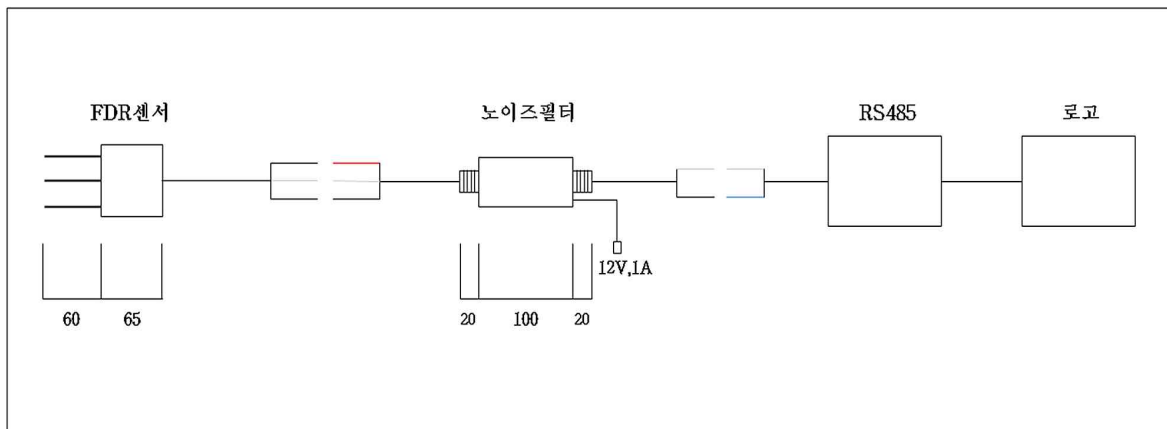


그림 3-3-23. A diagram of FDR-automated irrigation system applied with a noise filter.

(4) 조사항목

관수 제어 시작 후 매일의 주당 급액량은 각 처리구의 재배베드의 중앙에 위치한 여분의 1개 점적편에서 나오는 실제 급액량을 플라스틱 실린더에 모아 매일 측정하였다. 매일 배액량은 각 처리구의 재배베드의 중앙에 코이어 슬라브 아래에 배액 받이 PE필름을 깔아 그 필름 아래로 배액이 흐르도록 하여 플라스틱 실린더에 모아 매일 급액종료 후 측정하였고 배액의 pH 및 EC농도도 함께 측정하였다. 배액률(%)은 다음과 같이 계산되었다: 배액률(%)=100×(주당 배액량÷주당 급액량). 전 재배기간 중 FDR과 IR 처리구의 1회 급액량을 시기별로 자동관수제어기(Magma-1000, Green CS, Seoul, Korea)에 인위적으로 설정하였고 시기 별 변경된 1회 급액량은 일지에 기록하였다. 두 처리 모두 급액횟수는 센서에 의해 자동제어 되었고 그 기록도 자동관수제어기에 자동저장 되었다. TIMER 처리구의 1회 급액량과 급액횟수는 모두 인위적으로 설정되었고 그 설정 값을 일지에 기록하였다. 식물 초장은 정식 후 50일 이후(4월 8일)부터 적심일(정식 후 76일, 5월 4일)까지 7~10일 간격으로 측정하였다. 식물 생육은 최종 수확일 하루 뒤인 정식 후 121일 째(6월 15일)에 식물체를 뿌리와 분리한 후 엽 및 줄기 생체중을 측정하였다. 상품과 수량 및 당도는 각 처리구에서 3개의 식물을 선택하여 1화방에서 5화방까지 수확된 과실에서 측정되었다. 또한 5월 11일부터 6월 19일까지 각 처리구의 전체 식물체(1050주)에서 매일 수확된 상품과중(1화방에서 7화방까지)을 측정하였다. 수분이용효율(WUE: Water Use Efficiency =[(수확기 주당 잎, 줄기, 과실의 생체중) ÷ (전 재배기 동안 주당 총급액량 - 전 재배기 동안 주당 배액량)])은 수확기의 잎, 줄기, 과실을 포함한 총 지상부 생체중을 총급액량에서 총배액량을 뺀 값으로 나눈 값으로 나타냈다. 근권 내 함수율 및 EC(Electrical Conductivity)농도 변화는 FDR 처리구는 자동관수제어기(Magma-1000, Green CS, Seoul, Korea)에 의해 자동 기록되었다. 정식 100일 후 수분이용효율, 광합성 효율(photosynthesis rate), 기공전도도(stomatal conductance), 세포 내 CO₂ 농도(intercellular CO₂ concentration), 증산률(transpiration rate) 및 포차(VpdL: air vapor pressure difference)는 광합성측정기기(model 6400, Li-COR, Lincoln, Nebraska, USA)로 광합성유효광(PAR, LED: Red light emitting diode) 1500 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 이산화탄소 400 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 상대습도 50 - 60% 조건에서 실시하였다. 결과에서 얻은 데이터는 SAS 9.2 프로그램 (SAS Institute, Cary, NC)으로 ANOVA(변량분석) 분석하였다.

다. 연구결과

전 재배기간 동안 생육단계별 TIMER, FDR, IR 제어구 일일 식물체당 평균 급액량은 정식 후 19-26일에는 411-489mL 범위로 공급 되었으나 정식 후 27일부터 75일까지 평균 급액량은

TIMER(820~1467mL) > IR(720~1303mL) > FDR(615~1280mL) 순이었다(표 3-3-11, 그림 3-3-24). 정식 76일 후부터 91일까지 처리 별 급액량은 TIMER는 1924~2280mL, IR은 1933~2000mL, FDR은 1909~2000mL 범위로 세 제어구가 큰 차이를 보이지 않았다. 정식 92일 후부터 109일 까지 평균 급액량은 TIMER(1875~2003mL) > IR(1725~1886mL) > FDR(1414~1575mL) 순이었다. 정식 92일 이후부터는 FDR과 IR 제어구가 상이한 결과를 보였는데, 이는 이 시기에 누적일사량의 증가로(그림 3-3-24) IR 제어구는 급액이 증가된 반면, FDR 처리구는 정식 후 107일쯤 부터(적심 후 30일이 경과) 급액이 IR 제어구보다 주당 평균 300mL 적게 공급된 결과이다. 같은 시기에 TIMER 제어는 다른 제어구보다 급액량이 가장 높았다. 특히 정식 85일 후부터 105일까지 급액량은 일률적으로 2000~2280mL 범위로 공급되었다. 타이머 제어법은 FDR과 IR 제어법에 비해 식물의 수분 요구량이나 환경변화에 유동적이지 않다는 것을 알 수 있다. IR 제어구는 타이머 제어구와는 다르게 일사량 변동이 있을 때 급액량 변동이 발생하였다. 하지만 최근 발표된 연구결과에 의하면 IR에 의해 급액 시 오전에 해 뜨는 후 $225 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 가 되기까지 1시간이 소요되는데 반해 낮 동안에는 30분미만으로 소요된다고 하였다(Lizarraga 등, 2003). 이러한 IR 제어법과 FDR 제어법을 함께 병행하여 급액 한다면 관수 효과를 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. FDR 센서 제어법은 관수종료 후 관수개시까지 감소된 물량을 관수개시 후 바로 충족시키므로(Choi 등, 2013a, b), Yeager 등 (1997)이 언급한 관수의 의미를 잘 반영하는 방식이다.

배액률은 TIMER 제어구의 경우 5~22.4%, FDR 센서 제어구의 경우 0.26~17.5%, IR 제어구의 경우 3.81~13.66% 수준으로 TIMER > IR > FDR 순이었다(표 3-3-11, 그림 3-3-24). FDR 센서구에서는 정식 후 92일 이후에는 배액이 5%내로 극소화 되는 결과를 얻었다. 일반적으로 비순환식 수경재배 농가에서는 배지 내 염류집적 발생을 피하기 위해 배액을 20~40% 배출한다(Fricke, 1998; Schröder와 Lieth, 2002; Giuffrida 등, 2003). 본 연구의 선행연구 결과(Choi 등, 2013a; 2013b; 2014, 2015)에서는 FDR 센서에 의한 자동관수시스템에서는 근권 내 수분함량과 전기전도도(EC)를 실시간 모니터링을 통하여 배액 극소화가 가능하다는 결과를 얻었다. Bilderback(2000)은 분화재배에 있어 효율적인 관수는 배액 되고 흘러버려지는 수분량을 즉각적이고 경제적인 방법으로 감소시키는 것이라고 했다. 또한 Burnett(2008)와 van Iersel 등 (2010)은 온실이나 상업적 농원에서 수분센서를 활용하여 배지 내 수분함량을 측정함으로써 효율적인 관수가 가능하다고 보고하였다. 본 실험에서는 몇 회 반복된 선행연구 결과에서 보인 FDR 센서구의 배액률 보다 다소 높은 결과를 얻었다. 정식 후 70~90일에 FDR 처리구 배액률이 11~17% 범위로 유지되었다.

정식 초기에는 뿌리 활착과 생육발달을 위해서 FDR 센서구 배액이 7% 정도 발생하도록 1회 급액량을 설정하였지만 그 후 배액률이 10% 이상이 되었던 이유는 정식 후 80(5월 14일),

82(5월 16일), 83(5월 17일), 87일(5월 21일)에 FDR 센서구에서 급액이 가장 많이 된 것과 관련이 있는데 이는 FDR 센서와 자동관수제어기(Magma-1000, Green CS, Seoul, Korea)에 공급되는 전기에서 발생하는 전기적 노이즈로 인한 것으로 판단되었다.

배지 함수율은 FDR 센서구는 재배기간 동안 66~82% 범위로 유지 되었다(그림 3-3-25). 3월에는 65.6~72.6%(그림 3-3-25a), 4월에는 66.7~77.9%(그림 3-3-25b), 5월에는 72.3~80.0%(그림 3-3-25c) 6월에는 63.9~81.9%(그림 3-3-25d)로 유지되었다. FDR 센서로 측정되어진 배지 EC 농도는 FDR 센서구에서 3월에는 1.83~2.37, 4월에는 1.88~2.50, 5월에는 1.97~2.74, 6월에는 2.29~3.17dS·m⁻¹ 범위로 유지되었다(그림 3-3-25a,b,c,d).. 급액되는 배양액 EC를 2.0dS/m로 공급하였을 때 배액의 EC와 pH는 처리 별 유의차가 없었다(그림 3-3-26).. 배액 EC는 TIMER의 경우 3.0~6.5, FDR은 2.4~6.8, IR은 2.6~6.8dS/m 범위였고(그림 3-3-26a), pH는 TIMER는 6.0~7.65, FDR은 5.95~7.80, IR은 6.0~7.35범위로 유지되었다(그림 3-3-26b). 배지 무기이온 함량은 FDR 센서구에서 다른 두 처리구에 비해 다소 높았다(표 3-3-12).

정식 후 109일에 측정된 엽 및 줄기 생체중은 급액방식에 따른 통계적 유의차가 없었다(표 3-3-15). 상품과실 한 개당 무게는 FDR 센서구에서 재배된 식물체의 1, 3, 4화방에서 가장 낮았지만 식물체당 수확된 상품과실수는 다른 처리구보다 다소 높아 한 식물체에서 수확된 총과실 생체중은 처리 별 유의차가 없었다(표 3-3-13). 과실 당도는 모든 처리구에서 1화방 < 2화방 < 3화방 < 4화방 < 5화방 순으로 높았다. 처리 별 당도는 FDR 센서구에서 가장 높았고 TIMER 처리구와 비교하여 1, 2, 3, 4, 5화방 당도는 각각 21.8, 17.5, 27.5, 26.0% 높았다(표 3-3-14). 수분이용효율(WUE)은 통계적 유의차가 없었다(표 3-3-15). 이는 전 재배기간 중 총 급액량(total irrigation volume)은 FDR 센서구에서 가장 적었지만 배액량을 제외한 물량, 즉 배드에 함유되어 있거나 흡수되었거나 증발된 물량(total retained volume)은 처리 별 유의차가 없었던 것과 관련이 있다. FDR 센서구는 일일 주당 급액량을 관행수준으로 공급하면서 배액을 극소화를 목표로 1회 공급량을 생육단계별로 다르게 설정해 준 것과 이에 따라 급액횟수가 다른 것(표 3-3-11)과 관련이 있는 것으로 판단된다. 정식 100일 후 광합성분석기기로 측정된 수분이용효율(carbon fixed/water lost)은 FDR 센서구에서 가장 높았고, 광합성 효율, 기공전도도, 세포 내 CO₂ 농도, 증산률, 및 포차는 유의차가 없었다(표 3-3-16).

수분센서를 활용한 자동관수제어 방식은 배액을 극소화하면서 적정 근권 환경을 조성하여 배액으로 인한 토양과 지하수 오염을 방지할 수 있는 기술이며, 생산성은 관행기술에 비해 감소되지 않으면서 당도가 향상된 토마토를 생산하는 장점을 가진 기술로 판단된다.

FDR 센서와 자동관수제어기(Magma-1000, Green CS, Seoul, Korea)에 공급되는 전기에서 발생하는 전기적 노이즈를 최소화하기 위하여 전기노이즈 필터(Mirae-Sensor, Seoul, Korea)를 연결하여 사용 유무에 따른 수분함량 변화를 측정하였다(그림 3-3-23). 전기 노이즈 필터를 사

용하지 않았을 때 2016년 2월 25일 정식 후 80(5월 14일), 82(5월 16일), 83(5월 17일), 87일(5월 21일)에 일일 주당 급액량이 FDR 센서구에서 가장 높았고(그림 3-3-27a) 그 날의 배액률도 36.8, 45.8, 47.1%로 가장 높았다(그림 3-3-27b). 이는 FDR 센서와 자동관수제어기(Magma-1000, Green CS, Seoul, Korea)에 공급되는 전기에서 발생하는 전기적 노이즈로 인한 것으로 판단되었다. 2016년 7월 15일 정식 후 전기노이즈 필터를 설치한 후(그림 3-3-23) 급액량과 배액량을 측정하였을 때 변화가 많이 줄었고(그림 3-3-28), 일일 수분함량 측정값 변화가 감소되었다(그림 3-3-29b). 노이즈 필터를 활용 시 센서 측정값의 변화가 감소하는 것으로 볼 때 노이즈 필터를 추가적인 시스템으로 활용하면 보다 정밀한 측정 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되므로 측정 안정성 향상을 위해 반드시 사용할 것을 제시하는 바이다.

3-3-11. Water set point (WSP), average irrigation volume (IV), average drainage ratio (%), and irrigation volume at each irrigation (IVE), irrigation frequency (IF), and plant height under the TIMER, FDR, and Integrated-Radiation(IR) irrigation systems for days after transplant (DAT) during early spring to summer growing season.

Treatment	Days after transplant (DAT)	WSP	IV (mL/plant/day)	Drain (%)	IVE (mL)	IF (times/day)	Plant height (cm)
TIMER	19-26(14-Mar-21Mar)		489	11.1(5.4) ^z	76	6.4(0.2) ^y	74.3(1.55) ^x
	27-35(22-Mar-30Mar)		820	22.4(5.3)	105	7.8(0.5)	107(1.93)
	36-46(31-Mar-10Apr)		1175	18.8(3.0)	105	11.4(1.0)	139(1.55)
	47-54(11-Apr-18Apr)		1356	16.7(0.3)	106	13.0(0.0)	170(2.38)
	55-61(19-Apr-25Apr)		1443	14.0(1.8)	118	11.7(1.3)	186(2.83)
	62-68(26-Apr-02-May)		1564	13.3(0.2)	117	13.4(0.3)	214(2.29)
	69-75(03-May-09-May)		1467	12.6(0.6)	121	11.1(2.4)	236(1.32)
	76-84(10-May-18-May)		1924	18.9(9.6)	140	15.0(1.9)	253(1.11)
	85-91(19-May-25-May)		2280	17.0(5.5)	135	18.7(0.3)	- ^z
	92-98(26-May-01-June)		2003	11.0(3.7)	127	17.7(1.3)	-
	99-105(02-June-08-June)		2100	11.3(7.4)	126	18.3(0.4)	-
106-109(09-June-12-June)		1875	5.14(4.1)	126	17.5(1.5)	-	
FDR	19-26(14-Mar-21Mar)	58~61%	419	3.19(4.5)	67	6.3(0.4)	74.5(3.75)
	27-35(22-Mar-30Mar)	59~60%	615	2.58(3.6)	68	9.0(0.5)	102(3.80)
	36-46(31-Mar-10Apr)		861	1.31(1.8)	79	10.7(0.8)	137(4.27)
	47-54(11-Apr-18Apr)		1040	2.30(3.3)	92	7.5(1.8)	166(3.56)
	55-61(19-Apr-25Apr)		1307	7.74(3.9)	112	11.7(2.4)	181(4.23)
	62-68(26-Apr-02-May)		1336	7.49(0.3)	93	15.0(1.3)	197(3.12)
	69-75(03-May-09-May)		1280	11.3(1.5)	72	17.7(2.6)	219(5.15)
	76-84(10-May-18-May)		1909	17.5(1.0)	78	26.4(4.3)	233(2.27)
	85-91(19-May-25-May)		2000	12.2(2.6)	82	26.4(4.9)	- ^z
	92-98(26-May-01-June)		1414	3.14(2.6)	84	20.6(2.2)	-
	99-105(02-June-08-June)		1429	0.26(0.0)	84	19.7(1.8)	-
106-109(09-June-12-June)		1575	5.48(3.1)	84	20.0(4.7)	-	
IR	19-26(14-Mar-21Mar)	350~170J	411	7.8(0.8)	70	5.8(0.5)	73.8(4.73)
	27-35(22-Mar-30Mar)	150~130J	720	13.66(0.6)	88	8.2(0.5)	107(4.48)
	36-46(31-Mar-10Apr)	130J	1015	7.43(6.6)	99	10.0(1.0)	142(5.74)
	47-54(11-Apr-18Apr)	130~110J	1153	9.12(1.1)	108	7.6(1.9)	175(4.48)
	55-61(19-Apr-25Apr)	110~80J	1486	12.6(2.6)	117	12.1(1.8)	193(4.31)
	62-68(26-Apr-02-May)	80J	1464	5.34(1.1)	122	11.9(1.5)	215(4.52)
	69-75(03-May-09-May)	80J	1303	5.90(3.0)	121	10.6(2.6)	237(5.02)
	76-84(10-May-18-May)		1933	12.9(7.6)	123	15.3(1.8)	255(4.11)
	85-91(19-May-25-May)		2000	8.08(5.9)	124	15.9(1.4)	- ^z
	92-98(26-May-01-June)		1771	9.94(3.4)	125	14.4(1.9)	-
	99-105(02-June-08-June)		1886	5.28(1.4)	125	14.7(1.5)	-
106-109(09-June-12-June)		1725	3.81(0.1)	125	13.5(2.9)	-	

^z : The numbers in parentheses are standard deviation.

^y : The numbers in parentheses are standard errors.

^x : The apex of plant was removed after the 10th of May at 76 days after transplant.

⌘ 3-3-12. Total nitrate nitrogen (NO₃-N), available phosphorous (P₂O₅), and exchangeable potassium (K), calcium (Ca) and magnesium (Mg) in coir substrates of washed never-used (WNU) and of used in this experiment. Plants were grown under the TIMER, FDR-automated, and Integrated-Radiation (IR) irrigation systems during early spring to summer growing season.

Treatment	Total N (%)	Total-P (%)	Total-K (%)	Total-Ca (%)	Total-Mg (%)
TIMER	1.84(0.03)	0.97(0.05)	0.35(0.01)	2.95(0.11)	0.37(0.01)
FDR	1.96(0.00)	1.19(0.01)	0.46(0.05)	4.20(0.11)	0.46(0.05)
IR	2.06(0.06)	1.13(0.01)	0.36(0.01)	4.00(0.09)	0.36(0.01)

^z Means with different letter are significantly different.

^y The numbers in parentheses are standard errors.

⌘ 3-3-13. Fresh weight (FW) of fruit under the TIMER, FDR-automated, and Integrated-Radiation(IR) irrigation systems during early spring to summer growing season.

Treat-ment	First cluster (g/fruit)	Second cluster (g/fruit)	Third cluster (g/fruit)	Forth cluster (g/fruit)	Fifth cluster (g/fruit)	Total fruit weight (kg/plant)	Total fruit number (ea/plant)
TIMER	146ab ^y	185a	200a	208a	167a	3.97a	22.7a
FDR	135b	185a	158b	149b	136a	3.38a	25.0a
IR	163a	188a	213a	194ab	182a	3.62a	19.7a

⌘ 3-3-14. Sugar content of fruit under the TIMER, FDR-automated, and Integrated-Radiation(IR) irrigation systems during early spring to summer growing season.

Treat-ment	First cluster (g/fruit)	Second cluster (g/fruit)	Third cluster (g/fruit)	Forth cluster (g/fruit)	Fifth cluster (g/fruit)
TIMER	4.13c ^y	4.62b	5.02c	5.04c	5.50c
FDR	5.03a	5.43a	6.40a	6.35a	7.52a
IR	4.34b	4.81b	5.44b	5.80b	5.96b

⌘ 3-3-15. Fresh weight (FW) of leaf, stem and fruit, soluble solid content(SSC), total irrigation volume (TIV), total retained volume (TRV), and water use efficiency (WUE) under the TIMER, FDR-automated, and Integrated-Radiation(IR) irrigation systems during early spring to summer growing season.

Treat- ment	Leaf FW ^z (g/plant)	Stem FW (g/plant)	Fruit FW ^x (kg/plant)	TIV (L/plant)	TRV ^w (L/plant)	WUE ^u (g/L/plant)
TIMER	569a ^y	499a	3.97a	141	117(3.1) ^v	43.05a
FDR	462a	424a	3.38a	121	104(0.25)	41.57a
IR	628a	495a	3.62a	127	114(3.4)	41.59a

^z Measured at 121 DAT (15th of June).

^y Means with different letter are significantly different.

^x Fresh weights of fruits harvested from the first cluster to the fifth cluster.

^w Total retained volume = (total applied irrigation volume per plant - total drained volume per plant).

^v The numbers in parentheses are standard deviation 2 representative plants per treatment.

^u WUE = (Fresh weights of leaf, stem, and fruit per plant at harvest)/(total retained volume).

⌘ 3-3-16. Water use efficiency (WUE), photosynthesis (Photo), stomatal conductance (Cond), internal CO₂ (Ci), transpirationrate (Trmmol), air vapor pressure difference (VpdL) of tomato leaves grown for 100 days under different automated irrigation systems, TIMER, FDR and Integrated Radiation (IR).

Treat- ment	WUE	Photo (μmol $\text{CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Cond ($\text{mol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot$ $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Ci ($\mu\text{mol} \cdot \text{CO}_2 \cdot$ $\text{mol}^{-1} \cdot \text{air}$)	Trmmol ($\text{mol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot$ $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	VpdL ($\text{mol} \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot \text{m}$ $^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
TIMER	0.273b	16.850a	0.441a	284a	6.26a	1.759a
FDR	0.310a	15.861a	0.320a	268a	5.18a	1.886a
IR	0.277b	15.636a	0.387a	285a	5.71a	1.767a

^zEach value is the mean of 2 replications (\pm standard deviation).

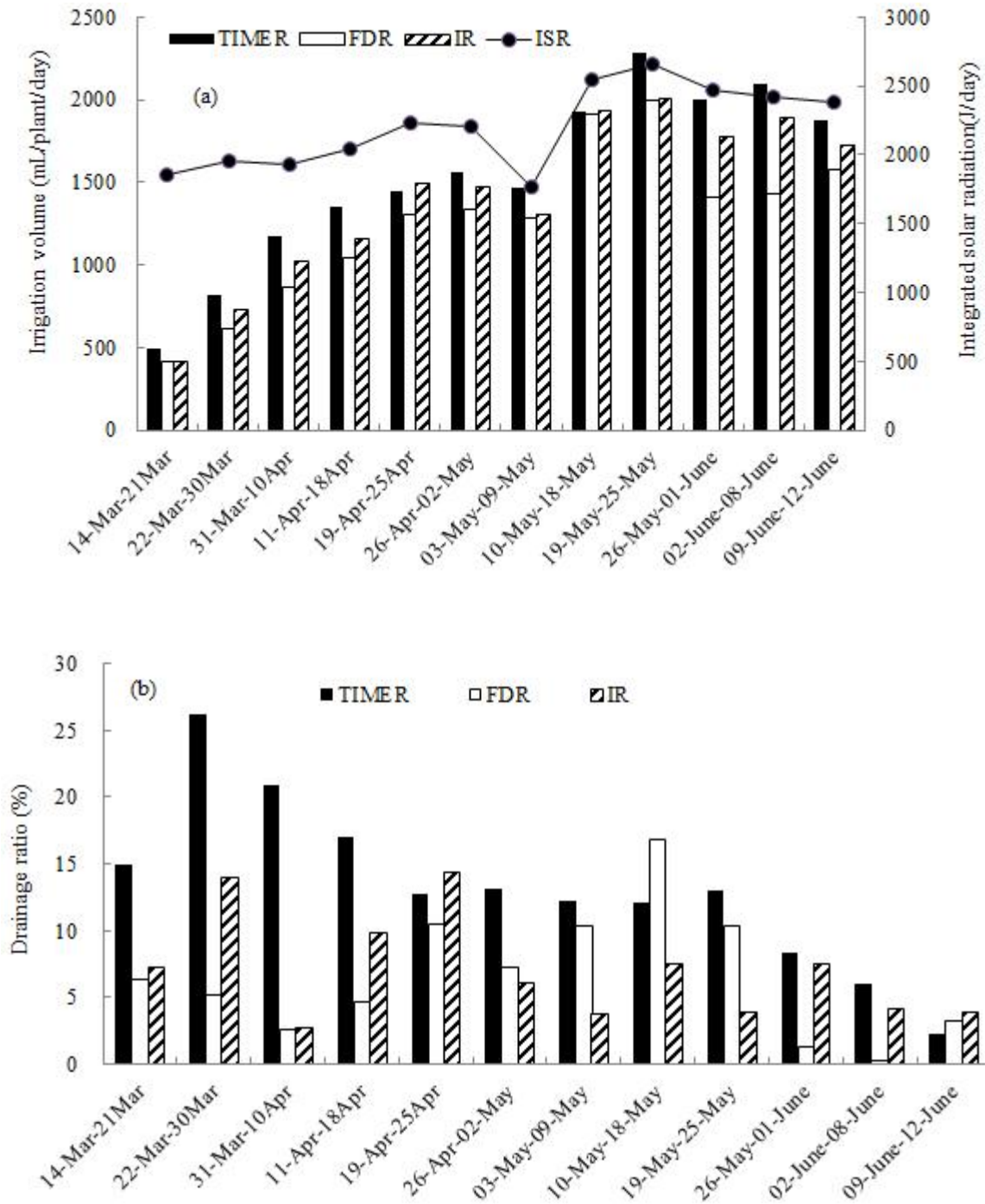


그림 3-3-24. Average irrigation volume and integrated solar radiation (ISR) (a) and drainage ratio (%) (b) under the TIMER, FDR, and Integrated-Radiation(IR) irrigation systems during early spring to summer growing season.

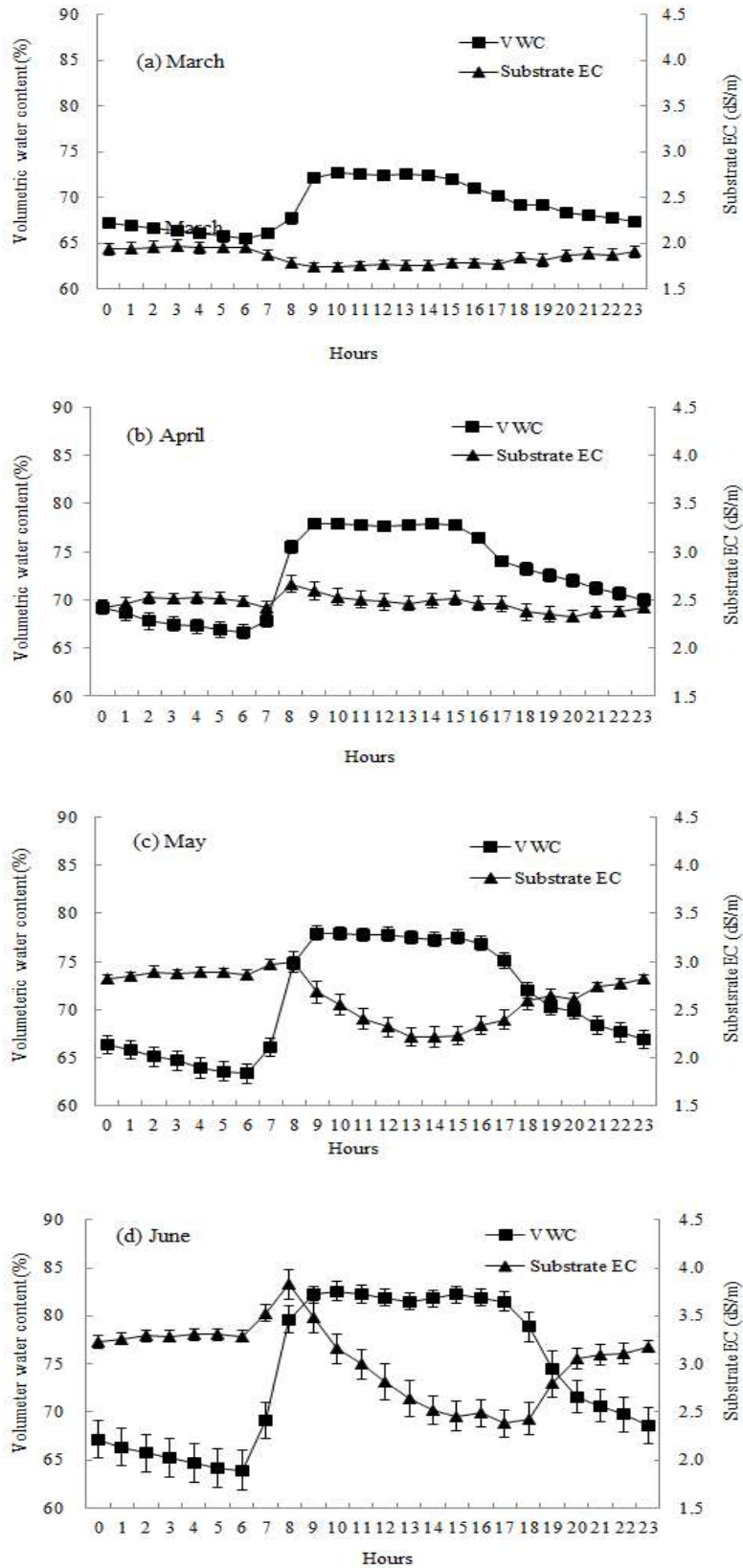


그림 3-3-25. Changes of volumetric water content(%) and substrate EC (dS/m) in substrate under the FDR-automated(a) irrigation systems in March(a), April(b), May(c) and June(d). Bars represent standard errors (\pm) for the replications (30 days or 31 days).

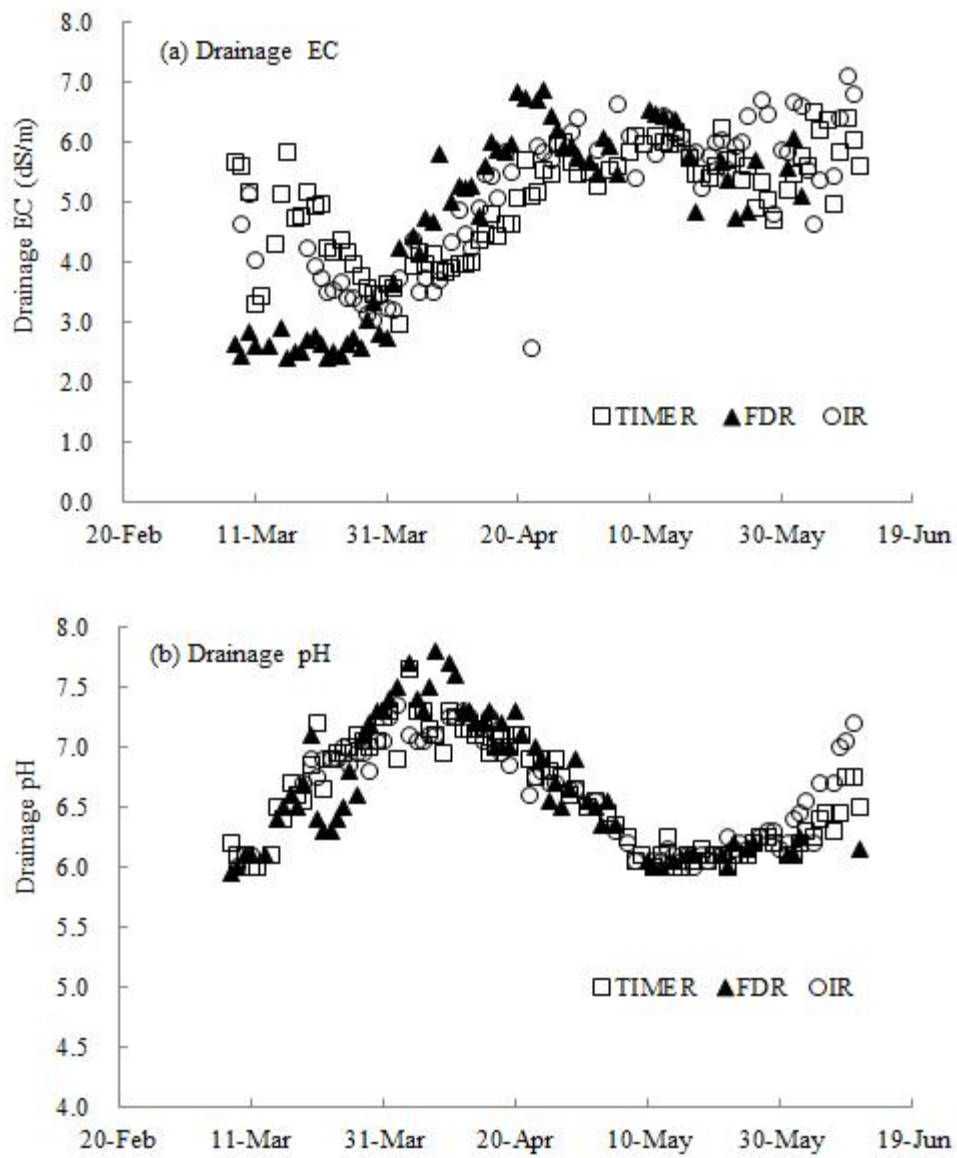


그림 3-3-26. Changes of drainage EC and pH under the TIMER, FDR, and Integrated-Radiation(IR) irrigation systems.

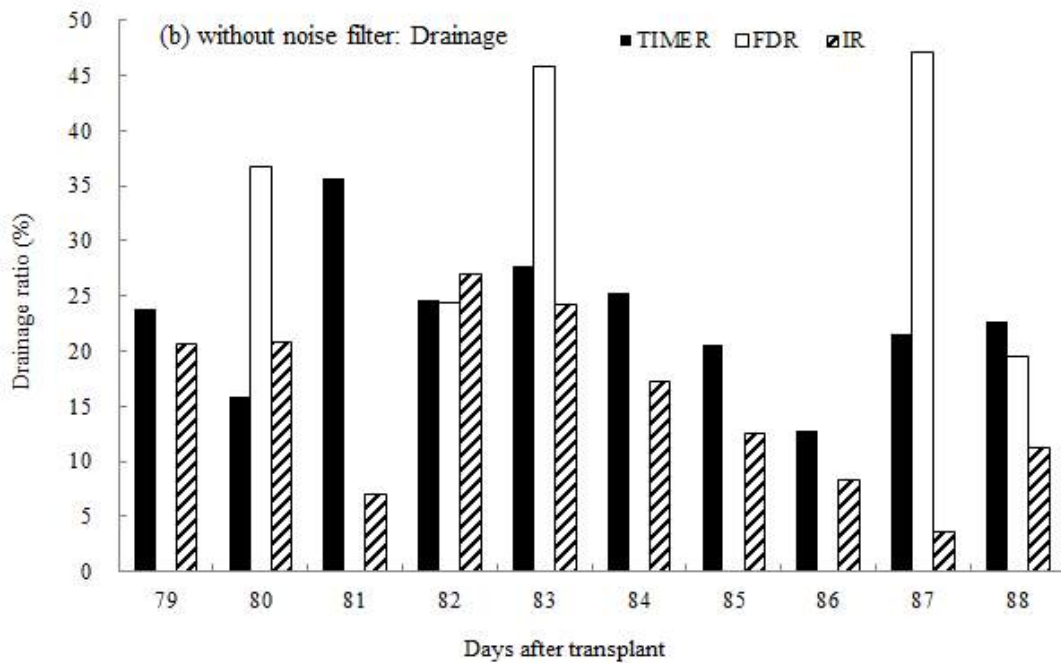
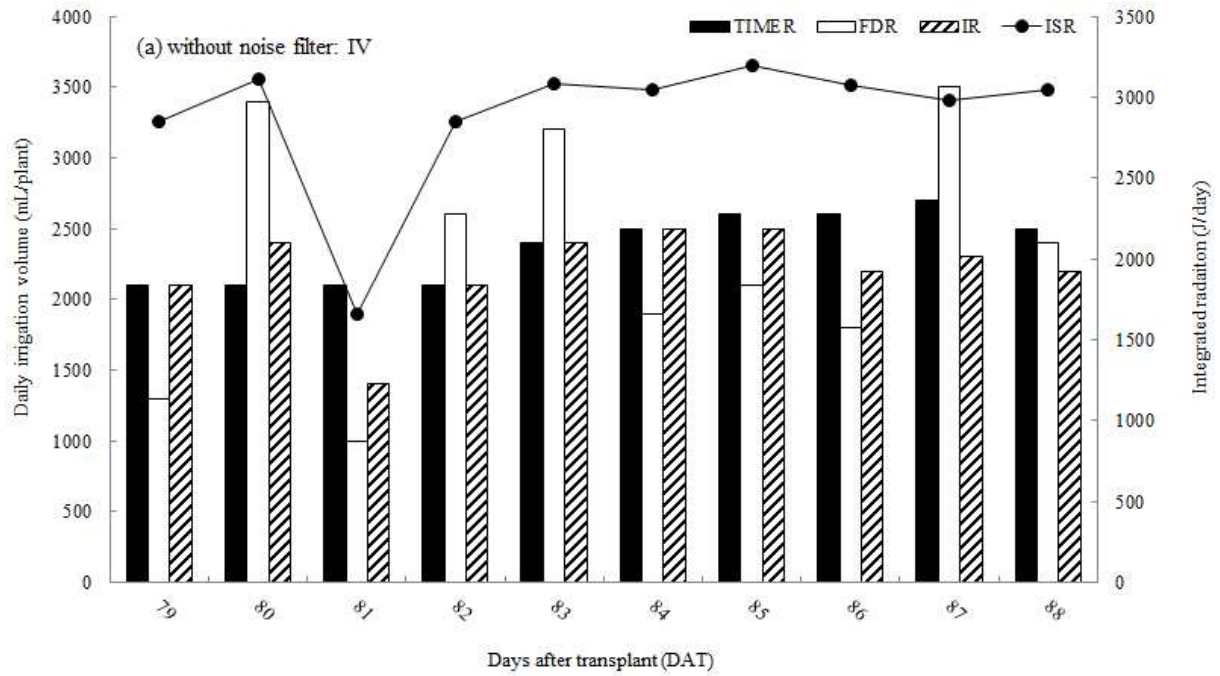


그림 3-3-27. Changes of daily irrigation volume(IV)(a) and drainage ratio(b) under the TIMER, FDR, and Integrated-Radiation(IR) irrigation systems without a noise filter for days after transplant (DAT) during early spring to summer growing season.

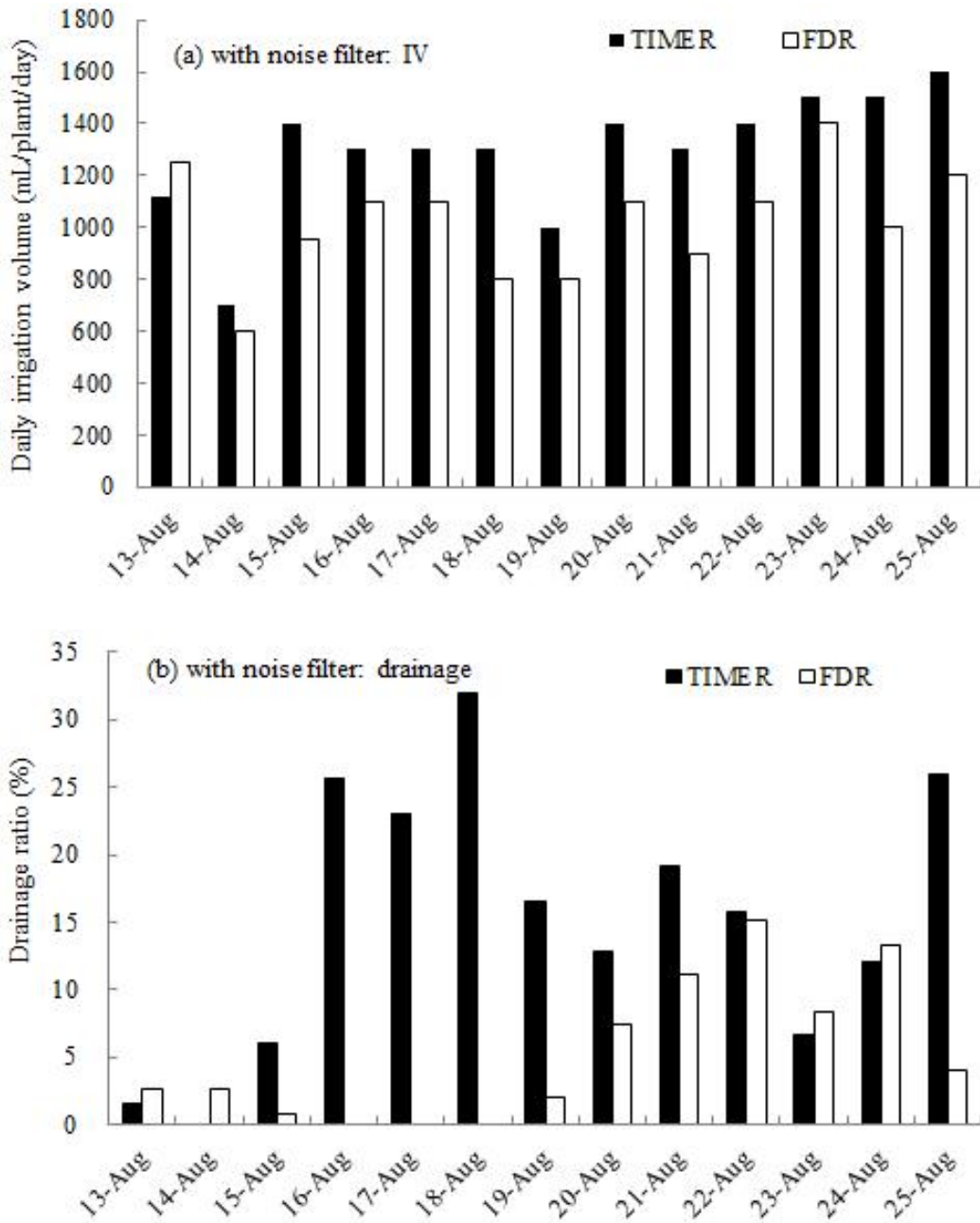


그림 3-3-28. Changes of daily irrigation volume(IV)(a) and drainage ratio(b) under the FDR automated irrigation systems applied with a noise filter and TIMER irrigation during summer to autumn growing season.

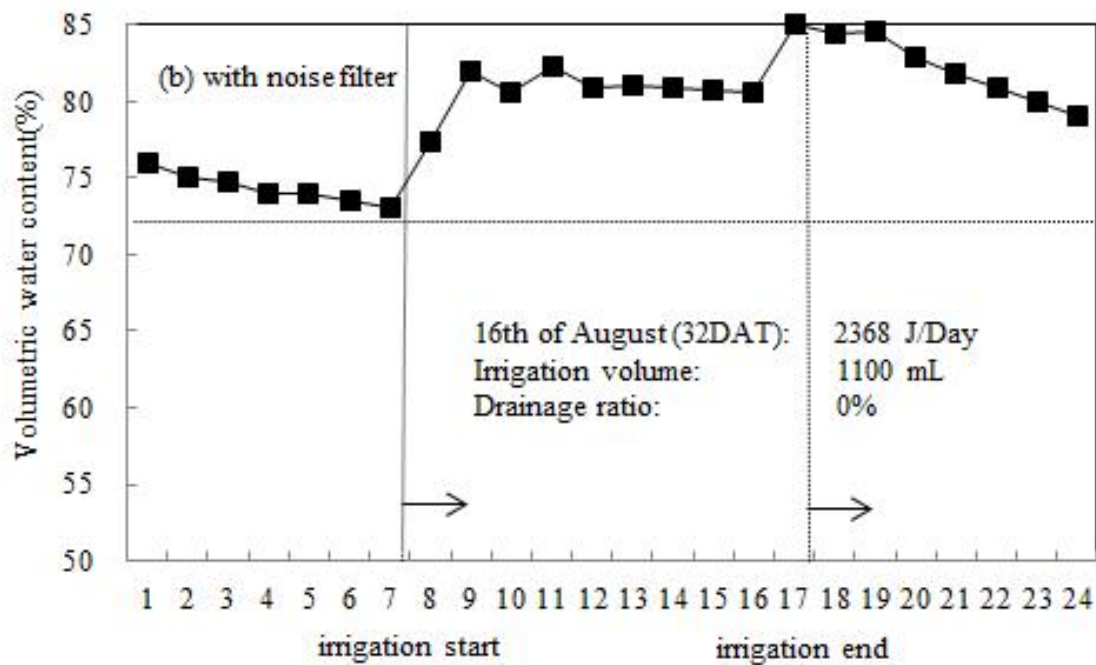
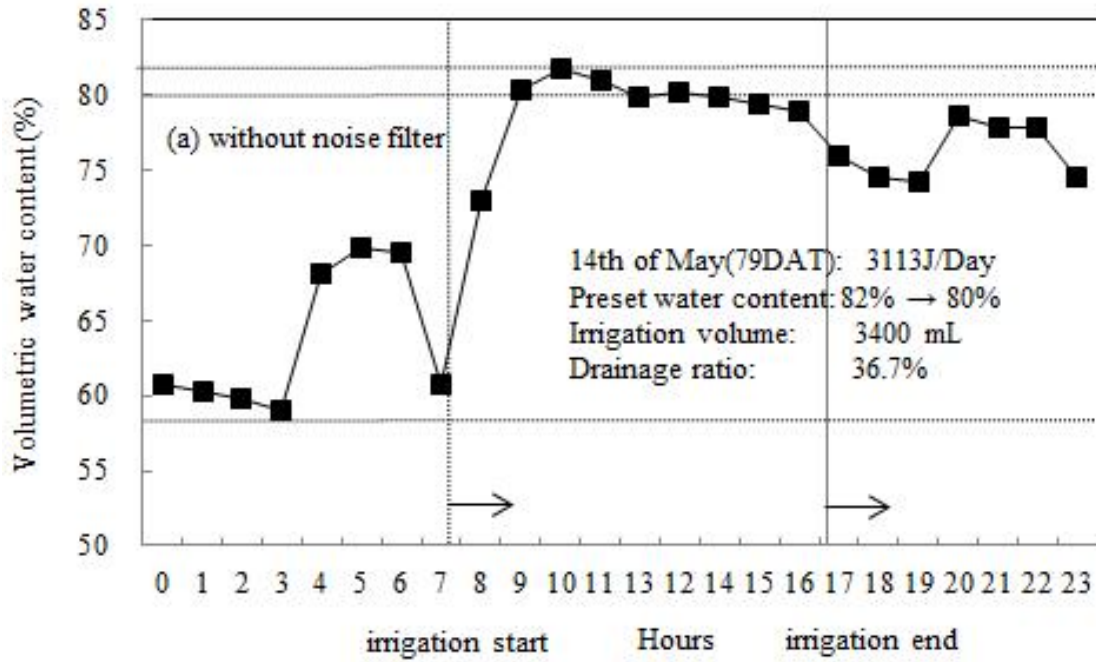


그림 3-3-29. Hourly changes of substrate water content under the FDR automated irrigation systems without (a) and with (b) a noise filter during a representative day.

제 4 절 무배액 수경재배 통합 금액관리 자동화 시스템 확립

1. 무배액 수경재배 금액 자동화 시스템 구현

가. 실험 목표

무배액 수경재배 통합 금액관리 자동화 시스템을 통하여 무배액이나 극소배액의 수경재배 조건하에서 작물의 균형생장을 유도하고 수분측정 센서인 FDR 센서와 일사센서등 각종센서를 활용하여 시스템을 보완하며 딸기, 토마토, 파프리카등 작물별 무배액 수경재배 금액관리 자동화 시스템을 확립하는데 있다

나. 연구결과

(1). 마그마 양액 제어 시스템 프로그램 화면

(가) 메인화면

1. 메인화면							
	설정량	잔여량	누적량	시작	5시23분	종료	15시0분
1구역	100cc	0cc	400cc	설정EC	2.5ds	현재EC	2.5ds/m
2구역	100cc	0cc	400cc	설정pH	5.5pH	현재pH	5.5pH
3구역	100cc	0cc	400cc	날짜	14/5/28	함수율	41%
4구역	100cc	40cc	260cc	시간	11:47:20	배지EC	2.7ds
5구역				일출시간	5:22	배지온도	24.8°C
6구역				일몰시간	19:48	실내온도	26.5°C
7구역				현재일사	956W	실내습도	80%
8구역				누적일사	593J	수분부족	5.5g/m
				그룹누적일사	86J	배관EC	2.5ds
G1: 86		G2: 0		G3: 25		J/30min: 70	
				J/Day: 500			

- 각종 설정값을 볼 수 있다
- 관수의 시작과 종료시간을 확인
- 일출시간과 일몰시간을 확인
- 관수의 설정량과 잔여량, 누적량을 확인

(나) 관수량설정

2. 관수량설정

	분:초	구역물량	CC/버튼	설정EC	설정pH	관수그룹	드리퍼용량
1구역	3:0	100L	100cc	2.5ds	5.5pH	1그룹	2L
2구역	3:0	100L	100cc	2.5ds	5.5pH	1그룹	유량계펄스
3구역	3:0	100L	100cc	2.5ds	5.5pH	1그룹	10L
4구역	3:0	100L	100cc	2.5ds	5.5pH	1그룹	종료시간
5구역	3:0	100L	100cc	2.5ds	5.5pH	사용안함	사용안함
6구역	3:0	100L	100cc	2.5ds	5.5pH	사용안함	4시0분
7구역	3:0	100L	100cc	2.5ds	5.5pH	사용안함	일몰전기준
8구역	3:0	100L	100cc	2.5ds	5.5pH	사용안함	

- 물량설정을 시간, 구역물량, 드리퍼당 CC를 설정한후 선택해서 활용가능
- 각관수 구역별로 물량, EC, PH값을 각각 설정할 수 있다
- 관수의 종료시간을 일몰기준으로 설정할 수 있다

(다) 시간별 관수 설정

3. 시간별 관수설정

		작동조건		시간(분:초)	
횟수	시간	횟수	시간	횟수	시간
1회	7시 30분	9회	11시 30분	17회	사용안함
2회	8시 0분	10회	12시 0분	18회	사용안함
3회	8시 30분	11회	12시 30분	19회	사용안함
4회	9시 0분	12회	13시 0분	20회	사용안함
5회	9시 30분	13회	13시 30분	21회	사용안함
6회	10시 0분	14회	14시 0분	22회	사용안함
7회	10시 30분	15회	14시 30분	23회	사용안함
8회	11시 0분	16회	15시 0분	24회	사용안함
				25회	사용안함
				26회	사용안함
				27회	사용안함
				28회	사용안함
				29회	사용안함
				30회	사용안함
				31회	사용안함
				32회	사용안함

- 일사비례와 관계없이 고정시간으로 관수시간을 설정
- 작동조건 설정이 시간, 물량, 드리퍼당 관수량으로 선택하여 사용한다.
- 하루를 32회까지 관수가 가능하다

(라) 일사비례관수설정

4. 일사비례관수설정 1그룹

	1주기	2주기	3주기	4주기	작동조건
시작시간	6시 22분	11시 0분	13시 0분	16시 0분	버튼 (CC)
일출후시간	1시 00분	사용안함	사용안함	사용안함	
고정시간	6시 30분	11시 0분	13시 0분	16시 0분	질소감비사용
최소대기시간	0시 30분	0시 10분	0시 10분	0시 30분	600J
최대대기시간	3시 0분	3시 0분	3시 0분	5시 30분	사용여부
누적일사J	100J	100J	100J	100J	사용
관수율%	80%	100%	110%	120%	사용

- 일사비례 관수시작시점을 고정시간과 일출후 시간으로 선택해서 설정가능
- 누적일사에 따라 각 주기별로 설정값을 달리할 수 있다
- 관수율을 조정함으로 각 주기별로 물량을 달리 설정할 수 있다

(마) 일사누적 속도에 의한 관수량 EC값 조절

7. 일사누적 속도에 의한 관수량, EC값 조절

그룹별 속성	범위1	범위2	범위3	범위4	범위5	수분부족분
J/30분 1	50J	70J	90J	120J	140J	1.0g/m 범위1
관수량조절1	80%	93%	100%	91%	75%	3.0g/m 범위2
EC값조절1	120%	110%	100%	60%	60%	5.0g/m 범위3
J/30분 2	50J	70J	90J	120J	140J	7.0g/m 범위4
관수량조절2	80%	93%	100%	91%	75%	0% 조절1
EC값조절2	120%	110%	100%	60%	60%	0% 조절2
J/30분 3	사용안함	사용안함	사용안함	사용안함	사용안함	0% 조절3
관수량조절3	사용안함	사용안함	사용안함	사용안함	사용안함	0% 조절4
EC값조절3	사용안함	사용안함	사용안함	사용안함	사용안함	

- 일사누적속도에 의해 관수량과 EC값이 자동 조절될 수 있다
- 실내온습도에 의한 수분부족분 산출로 관수량을 조절할 수 있다
- 3그룹으로 나누어서 조절이 가능하다

(바) 일반설정

8. 일반설정					
EC경보편차	2.0 ds	pH경보편차	2.0 pH	일사EC감소	0.5 ds
EC경보지연	0분 30초	pH경보지연	0분 30초	최소일사	300W
EC상한열림%	90%	pH상한열림%	50%	최대일사	500W
EC하한열림%	10%	pH하한열림%	0%	저함수율경보	30%
EC교정속도%	100%	pH교정속도%	100%	고함수율경보	80%
EC1스판	64	pH스판	173	저온경보	12°C
EC1제로	210	pH제로	210	고온경보	40°C
EC2스판	64	일사스판	1000	유량신호주기	0분10초
EC2제로	210	일사제로	0	A" 보정	100
A 보정	100	B 보정	110	B" 보정	110
				C 보정	100

- A, B액 양액통의 감소정도를 조절할 수 있다
- 일사의 정도에 따라 EC설정값을 감소 시킬수 있다
- 각종 경보값을 조절할 수 있다

(사) 화면 및 출력테스트

9. 화면선택 및 출력테스트					
항목	선택	품목	기동/정지	품목	기동/정지
1.2.8.9 기본선택		원수펌프	정지	1구역	정지
3.시간별 관수설정	사용	양액펌프	정지	2구역	정지
4. 일사비례 1그룹	사용	양액솔1	정지	3구역	정지
5. 일사비례 2그룹	사용	양액솔2	정지	4구역	정지
6. 일사비례 3그룹	사용	pH솔1	정지	5구역	정지
7. 일사누적속도	사용	양액솔3	정지	6구역	정지
10. 스케줄기능	사용	양액솔4	정지	7구역	정지
		경보	정지	8구역	정지

- 기본화면을 제외하고 화면선택을 통해 제어에 활용할 수 있다
- 양액시스템내 각종밸브의 출력을 확인할 수 있다
- 관수구역의 전자밸브 작동여부를 확인할 수 있다

(아) 스케줄기능

10. 스케줄기능

	시작일 / 기간		1.물량/EC목표		2.물량/EC목표		3.물량/EC목표	
1구간	7월 1일	10일	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2구간	사용안함	10일	100%	100%	100%	100%	100%	100%
3구간	사용안함	10일	100%	100%	100%	100%	100%	100%
4구간	사용안함	10일	100%	100%	100%	100%	100%	100%
5구간	사용안함	10일	100%	100%	100%	100%	100%	100%
6구간	사용안함	10일	100%	100%	100%	100%	100%	100%
7구간	사용안함	10일	100%	100%	100%	100%	100%	100%
8구간	사용안함	14일	100%	100%	100%	100%	100%	100%

- 물량과 EC값을 스케줄에 따라 조절할 수 있다
- 3그룹까지 그룹별로 조절이 가능하다
- 각관수 구역의 사용여부를 선택할 수 있다

(자) 출력 및 경보값 보기

11. 출력 및 경보값 보기

출력내용

월/일 - 시:분	구역	회수	물량	EC1	pH1	일사
7/23 - 19:17	1	13	100cc	2.5	5.5	2500
7/23 - 19:06	1	12	100cc	2.5	5.5	2300
7/23 - 18:55	1	11	100cc	2.5	5.5	2100
7/23 - 18:44	1	10	100cc	2.5	5.5	1900
7/23 - 18:33	1	9	100cc	2.5	5.5	1700
7/23 - 18:22	1	8	100cc	2.5	5.5	1500
7/23 - 18:11	1	7	100cc	2.5	5.5	1300

경보내용

월/일 - 시:분	경보 내용
7/20 - 19:17	저유량경보
7/20 - 19:06	저유량경보
7/20 - 18:55	저유량경보

- 양액기의 작동여부를 정리해서 보여준다
- 경보내용을 저장한다
- 상하좌우 버튼을 활용하여 100개이상의 값을 확인할 수 있다

(차) PC에서 제어 가능한 양액 프로그램 개발



- PC에서 양액컨트롤러와 같은화면으로 제어가 가능하다
- 각종 결과값을 그래프로 확인이 가능하다

다. 연구결과 요약

무배액 수경재배는 작물이 필요로하는 물과 양분을 적절히 공급하는 방법과 배지내의 EC농도를 관리 하는데 어려움이 예상됨으로 함수율센서와 일사센서를 잘 활용하는 방법을 강구하는 한편 프로그램상으로 물량과 비료량이 조절될 수 있도록 프로그램을 다양화 했음. 예를들어 일사값에 따른 EC농도 감소기능이라든지 하루를 여러주기로 나누어 시기별로 관수량을 설정하는 기능등은 무배액 또는 극소배액을 실현하는데 중요한 제어 포인트연구라고 사료되며 각 작물별 적정값은 지속적인 재배실험을 통해 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

2. 작물 균형생장을 유도하는 무배액 수경재배 통합관리 자동화시스템 보완

가. 실험 목표

무배액 또는 극소배액의 방법으로 작물을 재배할 때 급액의 시기, 급액량, 급액의간격, 급액EC농도 등이 작물의 근권 환경을 구성하는데 중요한 요인으로 작용된다.

재배작물의 최적 생육환경을 조성하면서 무배액 또는 극소배액을 이루기 위하여 함수율 측정 센서인 FDR센서의 배지내 함수율을 기본값으로 하고 일사센서에서 센싱되는 광도(W/m^2)와 누적광량(J/cm^2)을 통한 급액량, 급액간격, 급액EC농도를 조절하도록 프로그램을 보완하여 배액량을 최소화 하면서 최적생육환경을 조성 할 수 있는 양액 프로그램을 구현하는데 있다.

나. 연구결과

(1) 지상부 환경제어기와 양액기와의 일사센서 호환성 확보 프로그램 보완

제어기의 일사센서 입력이 AD 9번에 있으므로 양액기 일사센서 입력을 AD 2에서 AD 9번으로 이동함.

목표 : 양액기 일사센서를 환경제어기와 같이 사용할 경우 일정값 이상이 되면 일사값이 리셋 되는

현상이 발생.

연구내용 : 양액프로그램 AD2번에 온도 체크용 13K옴 저항이 풀업되어 있음.

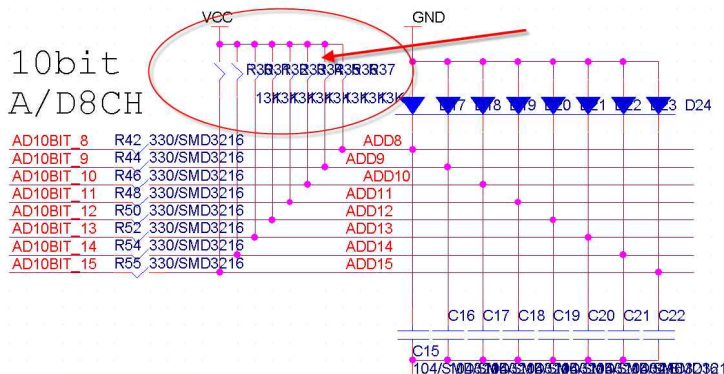


그림 3-4-1. 일사센서 AD변경 내용

(2) 출력포트 확장으로 다용도 제어 기능 확보

목표 : 양액기에 출력포트를 확장함. 보조 릴레이보드로 동시 출력하게 함.

연구내용 : 릴레이 고장 시 확장보드로 연결하여 사용할 수 있게 함.

```
#define ECPHmaxvalueopende 29
#define EC25de 15
#define PH50de 15

#define ADC_SUPTemp 0 //rs232
#define ADC_SILNETemp 1

#define ADC_ILSA 9
#define ADC_EC1 3
#define ADC_EC2 4
#define ADC_PH1 5

#define ADC_BAEGEEC 6 //rs232 - bk
#define ADC_SILNESUDO 7
#define ADC_HAMSU 8 //rs232
```

```
#define WANSU_PUMP 0
#define YANGAK_PUMP 1
#define OUT_A 2
#define OUT_B 3
#define OUT_C 4
#define OUT_D 5
#define OUT_E 6
#define ALRAM 7
```

```
#define OUT_gu1 8
#define OUT_gu2 9
#define OUT_gu3 10
#define OUT_gu4 11
#define OUT_gu5 12
#define OUT_gu6 13
#define OUT_gu7 14
#define OUT_gu8 15
```

```
#define WANSU_PUMP_ 16
#define YANGAK_PUMP_ 17
#define OUT_A_ 18
#define OUT_B_ 19
#define OUT_C_ 20
#define OUT_D_ 21
#define OUT_E_ 22
#define ALRAM_ 23
```

```
#define OUT_gu1_ 24
#define OUT_gu2_ 25
#define OUT_gu3_ 26
#define OUT_gu4_ 27
#define OUT_gu5_ 28
#define OUT_gu6_ 29
#define OUT_gu7_ 30
#define OUT_gu8_ 31
```

```
#define SIZEOF_MD (68)
#define NUMOF_ADC (16)
```



```

if(Mainview.P.ABCCHV==0)
{
  if(ABCDEplus.ABCDEplusecnt[OUT_A]>0){relay_out_1(OUT_A,1); relay_out_1(OUT_A,1);} //A
  else {relay_out_1(OUT_A,0);relay_out_1(OUT_A,0);}

  if(ABCDEplus.ABCDEplusecnt[OUT_B]>0){relay_out_1(OUT_B,1);relay_out_1(OUT_B,1);} //B
  else {relay_out_1(OUT_B,0);relay_out_1(OUT_B,0);}

  relay_out_1(OUT_D,0);
  relay_out_1(OUT_E,0);
  relay_out_1(OUT_D,0);
  relay_out_1(OUT_E,0);
}
else
{
  if(ABCDEplus.ABCDEplusecnt[OUT_A]>0){relay_out_1(OUT_D,1);relay_out_1(OUT_D,1);} //A
  else {relay_out_1(OUT_D,0); relay_out_1(OUT_D,0);}

  if(ABCDEplus.ABCDEplusecnt[OUT_B]>0){relay_out_1(OUT_E,1);relay_out_1(OUT_E,1);} //B
  else {relay_out_1(OUT_E,0);relay_out_1(OUT_E,0);}

  relay_out_1(OUT_A,0);
  relay_out_1(OUT_B,0);
  relay_out_1(OUT_A,0);
  relay_out_1(OUT_B,0);
}

if(ABCDEplus.ABCDEplusecnt[OUT_C]>0){relay_out_1(OUT_C,1);relay_out_1(OUT_C,1);} //C
else{ relay_out_1(OUT_C,0); relay_out_1(OUT_C,0);}
}

```

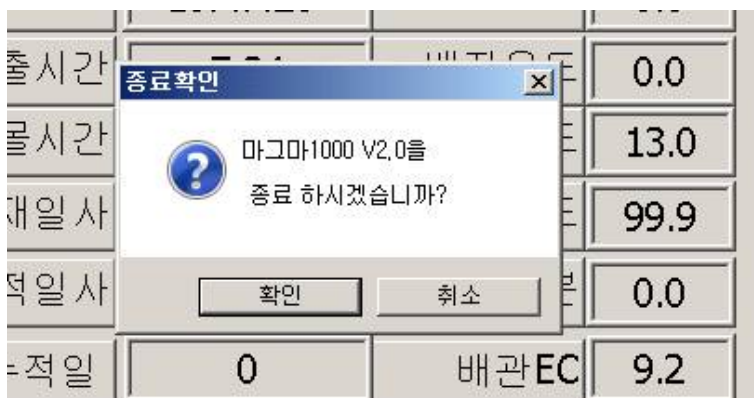
(3) PC프로그램 안정성 보완

목표 : 양액기의 PC제어에 있어 부주위에 의한 입력 값 변경을 방지하기 위한 안전조치 향상.

연구내용 :

① 양액기 프로그램 종료 시 2중으로 확인하는 메시지 삽입

- 종료확인 메시지

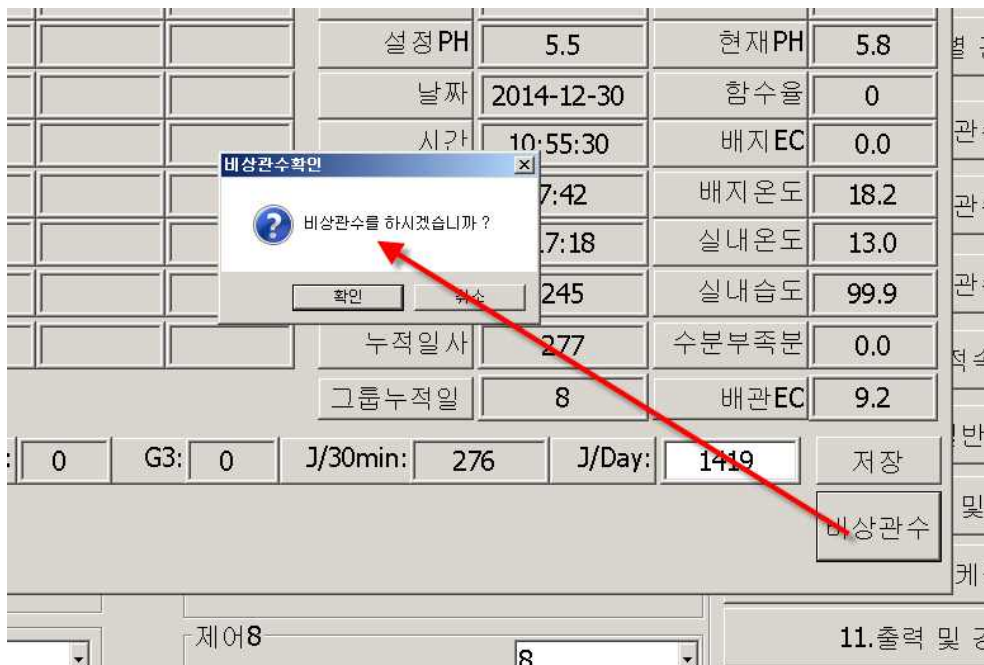


②주요화면 비밀번호 설정 후 입력 값 변경기능

: 9번 화면선택 및 출력테스트 란에 비밀번호 설정 란을 만들.

8.일반설정
9.화면선택 및 출력테스트
10.스케줄기능

③ PC프로그램에서 비상관수를 할 때 비상관수에 대한 메시지 확인 후 비상관수 신호를 보냄



- PC 조작실수에 의한 관수를 방지하기 위한 안전장치

④ 관수대기시간 안정화

- 최소 대기카운트를 관수 시작시간이후에 카운트 하고 그 외 초기화.
- 시작시간이 0:0이면 사용하지 않음.
- 시작시간 이전에는 최대 대기시간을 사용하지 않음.
- 최대 대기 시간 카운트를 15시간 이상 카운트 하지 않음.
- 최대 대기 시간을 15이상으로 설정하면 그 최대대기를 사용하지 않음으로 진행됨.

T16 gwansu2()

```
UINT16 k=0,j1,j2,iu=0,rr[3];
j1=Mainview.P.hh;
j2=Mainview.P.mi;
j1=j1*60;
j1=j1+j2;

iu=0;k=0;
if(_aDialogV4.date1[0] <= j1 && _aDialogV4.date1[0] >0)
{
    if(_aDialogV4.date1[0]>0)iu=1; //( Mainview.P.startime <= j1)
}
if(_aDialogV4.date2[0] <= j1 && _aDialogV4.date2[0] >0)
{
    if(_aDialogV4.date2[0]>0)iu=2; //( Mainview.P.startime <= j1)
}
if(_aDialogV4.date3[0] <= j1 && _aDialogV4.date3[0] >0)
{
    if(_aDialogV4.date3[0]>0)iu=3; //( Mainview.P.startime <= j1)
}
if(_aDialogV4.date4[0] <= j1 && _aDialogV4.date4[0] >0)
{
    if(_aDialogV4.date4[0]>0)iu=4; //( Mainview.P.startime <= j1)
}
rr[0]=2; rr[1]=iu; rr[2]=1;

hwmoutmode=mode;

// mincnt++;
if(Systemtime.minutes!= mincnt )
{
    if(Mainview.P._aDialogV2prockey>0) if(_aDialogV4.proc[7]<900) _aDialogV4.proc[7]++; //최대 대기시각
    if(Mainview.P._aDialogV3prockey>0) if(_aDialogV5.proc[7]<900) _aDialogV5.proc[7]++; //최대 대기시각
    if(Mainview.P._aDialogV4prockey>0) if(_aDialogV6.proc[7]<900) _aDialogV6.proc[7]++; //최대 대기시각
    //mincnt=0;
    mincnt=Systemtime.minutes;//!= mincnt
    //if(Mainview.P.timecnt<1000)Mainview.P.timecnt++;Mainview.P.keycnt=0;
    //PRINTF("\r\n Cg%d,%d(%d)",Systemtime.minutes,_aDialogV4.proc[7],Mainview.P.keycnt);
}
//PRINTF("\r\n ACT1=%d,%d",_aDialogV4.proc[7],_aDialogV5.proc[7]);
```

(4) 관수 구역별 데이터가 구분되게 프로그램을 보완함

목표 : 양액기에 PC에서 관수 설정 량 잔여 설정 량, 누적관수량은 해당 구역에 데이터가 출력되게 함.

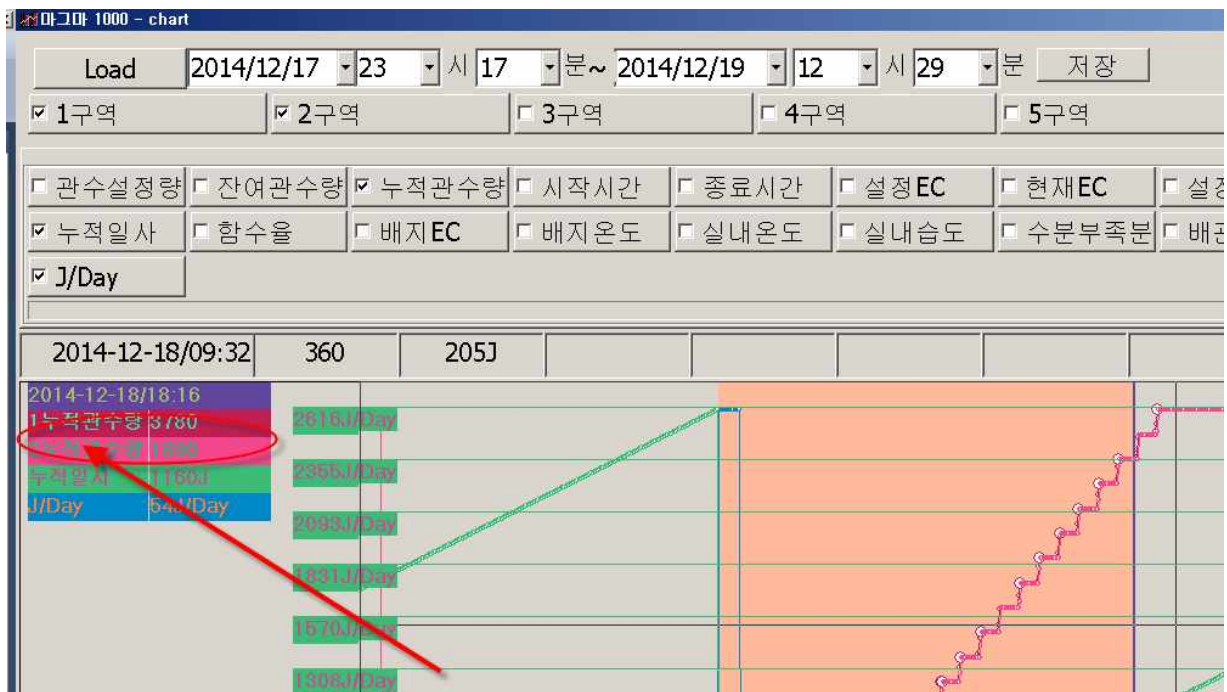
연구내용 : 위 데이터가 구역1 데이터로 공통으로 사용되고 있는 문제를 해결함.

```

JINT16 mainprocessgansu_sec(UINT16 i1,UINT16 i2, UINT16 i3)
{
    UINT16 j1,j2,k=0,iu,i;
    j1=Mainview.P.hh;
    j2=Mainview.P.mi;
    j1=j1*60;
    j1=j1+j2;
    //j3=j1;

    if( Mainview.P.endtime >j1 && Mainview.P.starttime<j1)
    {
        if(i3==1 && _aDialogV4.proc[2]==0 && _DialogV5.proc[2]==0
        {
            if(_aDialogV3.proc[5]<=j1)
            {
                if(0) //_aDialogV3.proc[3]==0)
                {
                    _aDialogV3.proc[1]=0;
                    //start time gwansu or report?
                    //seol- PRINTF("\r\n start first gwansul "); //<< "\r
                    if(Mainview.P.starttime==0){Mainview.P.starttime= i1;}
                }
            }
        }
    }
}

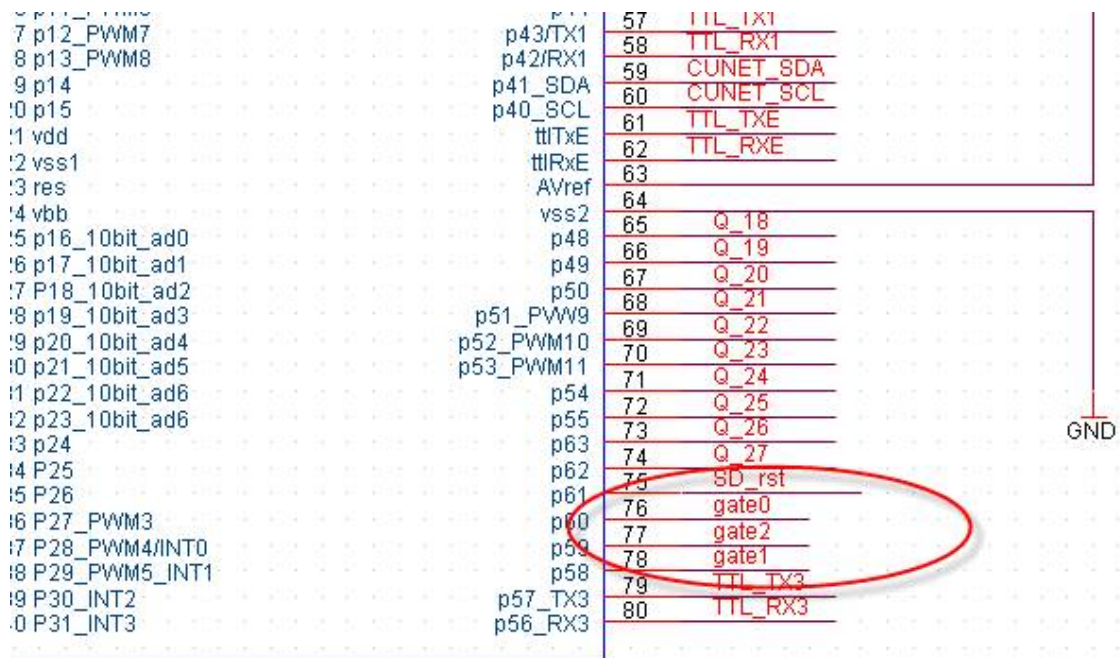
```



(5) 환경제어기 보드와의 연동시 3채널 동시 동작 되도록 프로그램을 보완함

목적 : 3채널 동시동작 기능구현.

연구내용 : 환경제어기 보드에 RS485보드 3채널이 동작되지 않는 현상에 회로 수정으로 생긴 문제.



CB405

VCC

(6) 10. 스케줄 기능 사용안할 때 일사감비 적용되지 않는 부분 보완

목표 : 10페이지 “사용안함“할 때 일사감비 적용 되도록 수정.

연구내용 : 코드를 주석처리함. 10페이지 사용안할 시 해당코드가 적용됨.

그 코드에 해당코드가 10번 페이지 일사감비일 때 적용되었던 코드를 삭제함으로 해결.

```
if(_aDialogW9.datel[5]==1)
{
    j=Mainview.P.mm;
    i=Mainview.P.dd;
    value=j*100;
    value=value+i;
    scajulproscsess(value);
    _aDialogW8.key2=1;
}
else
{
    _aDialogW8.key2=0;
    _aDialogV10.ScaleEc =100;
    _aDialogV10.ScaleGwansu=100;
    _aDialogV10.ScaleEc1 =100;
    _aDialogV10.ScaleGwansul=100;
    _aDialogV10.ScaleEc2 =100;
    _aDialogV10.ScaleGwansu2=100;
    _aDialogV10.ScaleEc3 =100;
    _aDialogV10.ScaleGwansu3=100;
    _aDialogV10.ScaleEc4 =100;
    _aDialogV10.ScaleGwansu4=100;

    // _aDialogV10.dayjul[0]=0; //dayjul[7];
    // _aDialogV10.dayjul[1]=0; //dayjul[7];
    // _aDialogV10.dayjul[2]=0; //dayjul[7];
    // _aDialogV10.dayjul[3]=0; //dayjul[7];
    // _aDialogV10.dayjul[4]=0; //dayjul[7];
    // _aDialogV10.dayjul[5]=0; //dayjul[7];
    // _aDialogV10.dayjul[6]=0; //dayjul[7];
    // _aDialogV10.ABCCHV[0]=0; _aDialogV10.ABCCHV[1]=0; _aDialogV10.ABCCHV[2]=0;
    // _aDialogV10.ABCCHV[3]=0; //1: a'b'c 0: a,b,c
    //Mainview.P.ABCCHV=0;
}
```

(7) 메뉴9 화면선택 및 출력테스트 설정 란 비밀번호 부여

목표: 화면선택 할 때 임의로 변경함을 방지.

연구내용 : 양액기 LCD프로그램에 비밀번호 입력으로 전환.

예> 메뉴+9+0+6+0+4+엔터

```
if(keyi[2]==9) //clock;
{
  if(keys[1]==3 && keys[2]==7) clockset(1,keys); //hh/mm/ss
  else if(keys[1]==3 && keys[2]==4) clockset(2,keys); //yy/mm/dd
}
else if(keyi[2]==6) //clock;
{
  i=0;
  if(keys[1]==9&&keys[2]==10&&keys[3]==6&&keys[4]==10&&keys[5]==4)
  {
    j[0]=9; i=1;
  }

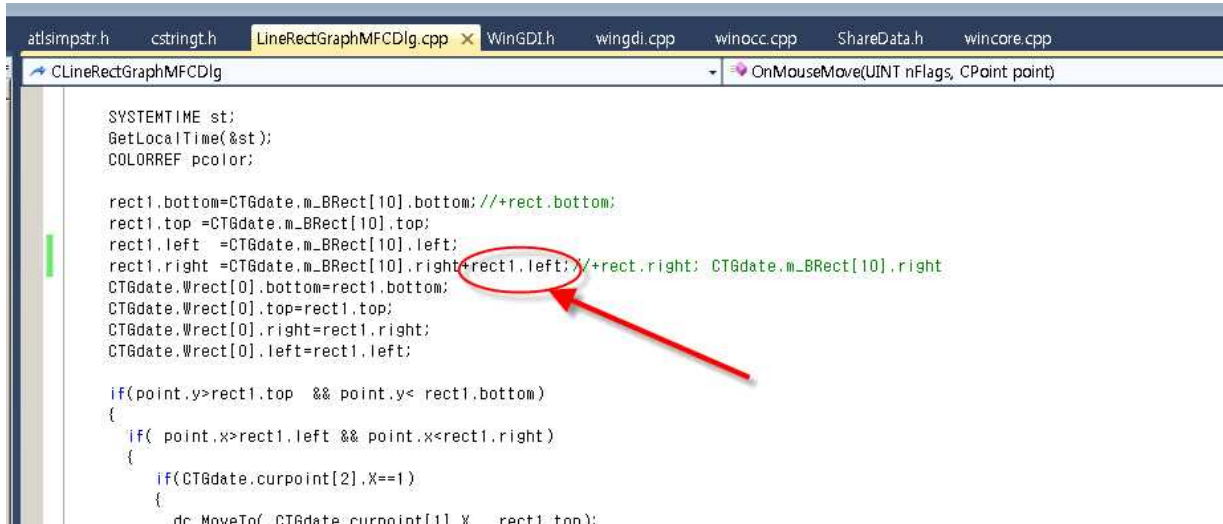
  if(i==1)
  {
    mode=j[0];
    rscm[0]=0x01;
    currset(mode);
    rscm[8] = 0x80;
    rscm[7] =mode;
    //PRINTF( "\r\n rsout mode = %d \r\n",mode);
    MBUS1_DVD_proc();
  }
}
```

(8) PC에서 차트프로그램 보완

목표: 양액기 차트프로그램에서 시간축에 마지막시간에 잘리는 문제 해결.

연구내용 : 데이터 표현갯수 대비 차트뷰어 사이즈가 맞지 않아 오버됨.

마우스 무브함수에 범위가 좁아져서 해당 범위도 같이 수정하였음.

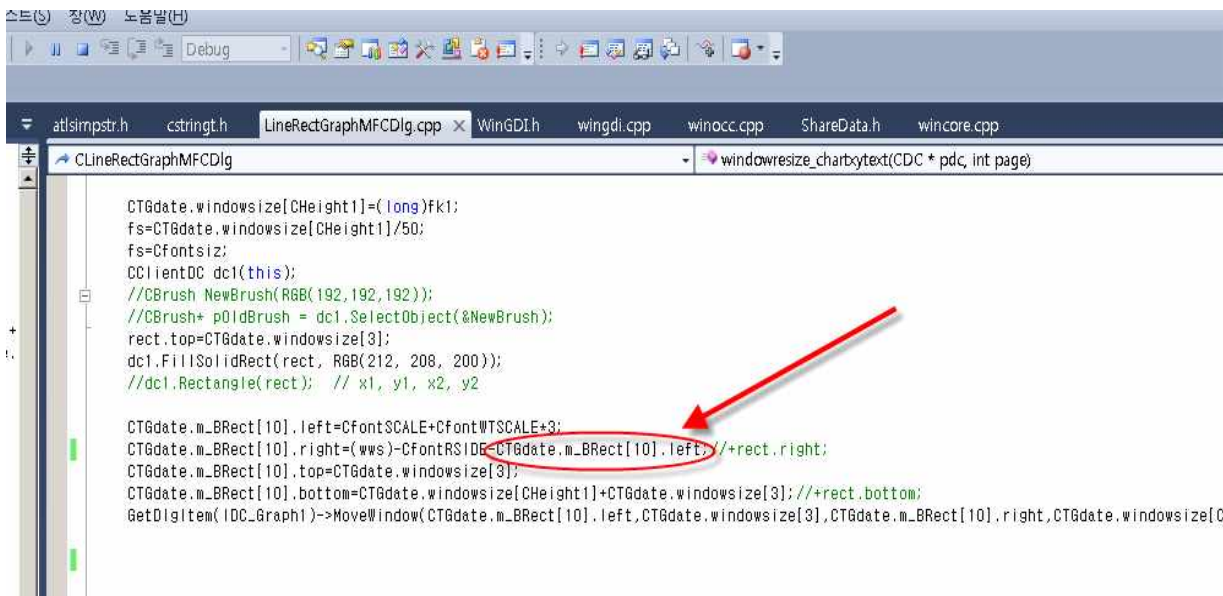


```
atlsimpstr.h  cstringt.h  LineRectGraphMFCDlg.cpp x  WinGDI.h  wingdi.cpp  winocc.cpp  ShareData.h  wincore.cpp
CLineRectGraphMFCDlg  OnMouseMove(UINT nFlags, CPoint point)

SYSTEMTIME st;
GetLocalTime(&st);
COLORREF pcolor;

rect1.bottom=CTGdate.m_BRect[10].bottom; /*+rect.bottom;
rect1.top =CTGdate.m_BRect[10].top;
rect1.left =CTGdate.m_BRect[10].left;
rect1.right =CTGdate.m_BRect[10].right+rect1.left; /*+rect.right; CTGdate.m_BRect[10].right
CTGdate.Wrect[0].bottom=rect1.bottom;
CTGdate.Wrect[0].top=rect1.top;
CTGdate.Wrect[0].right=rect1.right;
CTGdate.Wrect[0].left=rect1.left;

if(point.y>rect1.top && point.y< rect1.bottom)
{
    if( point.x>rect1.left && point.x<rect1.right)
    {
        if(CTGdate.curpoint[2].X==1)
        {
            dc.MoveTo( CTGdate.curpoint[1].X . rect1.top);
```



```
스트(S)  장(W)  도움말(H)
Debug
atlsimpstr.h  cstringt.h  LineRectGraphMFCDlg.cpp x  WinGDI.h  wingdi.cpp  winocc.cpp  ShareData.h  wincore.cpp
CLineRectGraphMFCDlg  windowresize_charbytext(CDC * pdc, int page)

CTGdate.windowSize[CHHeight1]=(long)fk1;
fs=CTGdate.windowSize[CHHeight1]/50;
fs=CfontSize;
CClientDC dc1(this);
//CBrush NewBrush( RGB(192,192,192));
//CBrush* pOldBrush = dc1.SelectObject(&NewBrush);
rect.top=CTGdate.windowSize[3];
dc1.FillSolidRect(rect, RGB(212, 208, 200));
//dc1.Rectangle(rect); // x1, y1, x2, y2

CTGdate.m_BRect[10].left=CfontSCALE+CfontWTSCALE+3;
CTGdate.m_BRect[10].right=(wms)-CfontRSIDE-CTGdate.m_BRect[10].left; /*+rect.right;
CTGdate.m_BRect[10].top=CTGdate.windowSize[3];
CTGdate.m_BRect[10].bottom=CTGdate.windowSize[CHHeight1]+CTGdate.windowSize[3]; /*+rect.bottom;
GetDlgItem( IDC_Graph1 )->MoveWindow(CTGdate.m_BRect[10].left,CTGdate.windowSize[3],CTGdate.m_BRect[10].right,CTGdate.windowSize[C
```


(9) 수분부족분에 관계되는 프로그램을 보완함

목표 : “7 일사누적속도에 의한 관수량 EC값 조절”에서 수분부족분 기능 향상 .

연구내용 : 7페이지에 수분부족분에 대한 데이터편집 시 함수사용에 대한 기능으로 인해 관수가 들어 가는 현상이 발생함.

원인:

```
함init195
함init195
KENT
W1RO (1)=1,0
함init194
함init194
함수0-10
start init 2
*****그릅1(
--> report start 구역? 1
starttime? 11/27-15:52,
2, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
W1RO (1)=1,0
W1RO (1)=1,0
W1RO (1)=1,0
W1RO (1)=1,0
W1RO (1)=1,0
W1RO (1)=1,0
W1RO (1)=1,0
```

이상 없이 진행되다가 함수 0- 10으로 0값이 나와서 해당동작이 하게됨.

해당 데이터가 mbus2_bms_r01.c소스안에서

```
j[3]=j[0]*100+j[1]*10+j[2];
Mainview.P.hamsu=j[3]/10;

j[0]=mRXD[4]-'0';
j[1]=mRXD[5]-'0';
j[2]=mRXD[6]-'0';
j[3]=j[0]*100+j[1]*10+j[2];
Mainview.P.beagiEC=j[3];

j[0]=mRXD[7]-'0';
j[1]=mRXD[8]-'0';
j[2]=mRXD[9]-'0';
j[3]=j[0]*100+j[1]*10+j[2];
Mainview.P.beagitemp=j[3];
rs232data[2].M.cccnt=10;
if(rs232data[2].M.cccnt<10)rs232data[2].M.cccnt++;
```

rs232data[2].M.cccnt가 10초 이내에 함수센서에 데이터가 통신으로 들어오지 않으면 초기화된다. 이로 인해 키를 누르는 순간 함수통신이 들어와 데이터를 놓일 경우 이문제가 발생할 수 있다.

개선: 위 같이 if(Mainview.P.hamsucnt>100) 으로 바뀌어서 초기 함수통신이 정상이 적으로 들어오면 동작하게 하는 변수를 활용하여, 데이터를 기다리는 기능으로 바꿈.

```

//번호1
if(Mainview.P.hamsucnt>100) // rs232data[2].M.cocnt>0
{
    //i= sys_md.Ad10bit_ST[ADC_BAEGETemp]; //통신으로 음
    //i=sys_md.Ad10bit[i] ; //통신으로 음
    //i=tempcal (i);
    // Mainview.P.beagitemp=0 ; //통신으로 음
    //i= sys_md.Ad10bit_ST[ADC_BAEGEEC]; //통신으로 음
    //Mainview.P.beagiEC=sys_md.Ad10bit[i] ; //통신으로 음
    //Mainview.P.hamsu=sys_md.Ad10bit_ST[ADC_HAMSU]; //통신으로 음
}
else
{
    Mainview.P.beagitemp=0 ;
    Mainview.P.beagiEC=0;
    Mainview.P.hamsu=0;
}

```

(10) 그룹별 관수에서 함수율에 의한 관수설정 프로그램 보완

목표 : 관수 설정 값 보다 배지 내 수분 함수율이 낮을 때에 관수 조건.

연구내용 : 2그룹에 함수가 설정량 보다 큰데도 관수가 들어감.

- 원인파악 준비
- UINT16 gwansu2_pt(UINT16 *pt,UINT16 *pt1,UINT16 *pt2, UINT16 iu,UINT16 *rr);
 관련프로그램에 동작 부분에 디버깅메시지를 추가함.
- >PRINTF("\r\n함수%d<%d",pt1[6],j);

```

GMS>
Cg34, 0 (0)
함수0<10
start iu= 2
*****그룹1{
---> report start 구역? 1
starttime? 11/13-13:34,
count? 1, 0
1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0,
Cg35, 1 (0)

```

확인한 결과 해당값이 작음.

해결방법

-> 프로그램에

void mainviewint(int u);에 아래 코드를 추가함.

```

_aDialogV4.proc[6]=Mainview.P.hamsu; //통신으로 음
_aDialogV5.proc[6]=Mainview.P.hamsu; // 2014/11/13추과코드

```

_aDialogV6.proc[6]=Mainview.P.hamsu; // 2014/11/13추가코드

함수 값은 통신으로 오기 때문에 통신이 안 될 경우 관수가 되지 않게 하기위해
아래 Mainview.P.hamsucnt 변수 추가하여 통신이 완료되면 Mainview.P.hamsucnt =100;
되게 함.

(11) 실내온습도 센싱값 안정화

목적 : 실내온습도 센서 센싱값 안정화 및 외부 신호 출력 비상관수 기능과 연계.

연구내용 : 온도값 이상 실내습도값 이상 현상 및 외부 비상관수 기능.

문제1 : 기존 기기 값과 5도 이하 차이가 남.

최고 값과 최소 값을 제거하는 과정에서 변수 I를 uint8에 선언하여
값이 정상적으로 평균이 되지 않음.

- 문제2: 외부비상관수입력 HCNT1가 동작하지 않음. 회로변경 후 해당 포트를 출력모드로 되어있음.

다. 연구결과 요약

본 연구에서는 양액 시스템에서 관수시기와 관수간격, 1회관수량, 공급 EC농도를 조절하는데
관여하는 센서(일사, 함수율, EC, 유량계, 실내온도, 실내습도)를 병행 활용하고 하루 관수 주기를
4개의 주기로 구분하여 각 주기마다 사용되는 센서를 달리함으로써 최적의 급액량을 산출
하는데 역점을 두었으며, 무배액 또는 극소배액이 가능하면서 배지 내 EC농도를 상승 시키지
않도록 양액 프로그램을 고도화 하고 사용자의 실수 또는 작동기기의 오작동을 최대한 방지
하도록 설계 되었다.

기존 프로그램의 한 가지 센서에 의해서 관수시기를 결정하는 시스템에 비해 훨씬 효과적인
무배액 또는 극소배액을 실현시키는 무배액 통합관리 프로그램이 될 것으로 예측된다.

```

=====
*/
UINT16 get_avg(UINT16* acm_buf, UINT16 buf_size, UINT16 new_val)
{
    UINT8 j;
    UINT32 acm_sum = 0;
    UINT16 il,i2,i;

    for (i=0; i<(buf_size-1); i++){ //shift data
        acm_buf[i] = acm_buf[i+1];
    }
    acm_buf[buf_size-1] = new_val;

    i=0;
    for (j=0;j<buf_size;j++)
    {
        if(i< acm_buf[j] )
        {
            i=acm_buf[j];
            il=j;
        }
    }

    i=0xffff;
    for (j=0;j<buf_size;j++)
    {
        if(i> acm_buf[j] )
        {
            i=acm_buf[j];
            i2=j;
        }
    }

    for (i=0; i<buf_size; i++)
    {
        if(i==il)
        {

```

3. 무배액 수경재배 금액관리 자동화 시스템 확립

가. 실험 목표

근권부의 환경을 최적으로 조성하기 위해서는 배지내 온도와 함수율 그리고 EC농도의 조절이 무엇보다 중요하며 실시간으로 변화하는 온실 내외부 상황에서 합리적인 재배조건과 보다 쉬운 작물재배 방법으로 나아가기 위해서는 배지내 함수율센서인 FDR센서 활용이 요구된다 이를 기반으로 배지내 함수율의 변화를 모니터링하고 일사센서를 활용한 일사비례 양액공급 방법과 상호 비교함으로써 FDR센서 이용을 확대하며 다소 불규칙한 농업용 전기 상황하에서 센싱의 안전성을 확보하고 1,2차년도에 개발된 양액제어 프로그램을 고도화 상용화 하는데 그목적이 있다

나. 연구결과

(1) 불규칙한 함수율센서의 센싱값 모니터링 방법 보완

- 원인 : FDR 센서로부터 불규칙적인 센싱값이 모니터링되어 양액기의 오작동이 발생

```

//-----
\n+-----
\n-----
*/
#define PORTD_INIT //7654 3210
#define PORTD_Init() (PORTD = 0xc0) //0000 0000
#define DDRD_Init() (DDRD = 0xB0) //1101 0000

#define RTC_RST (PORTD_Bit4)
#define RTC_SCL (PORTD_Bit5)
#define RTC_SDA (PORTD_Bit6)
#define RTC_SDA_READ (PIND_Bit6)
#define RTC_IO_Change(x) (DDRD_Bit6 = (x))

#define HCNT1 (PIND_Bit0)
#ifdef __OLDRS232MCU1
#define UART1_TX_Enable() (PORTD_Bit7 = 1)
#define UART1_TX_Disable() (PORTD_Bit7 = 0)
#define gate1(x) (PORTD_Bit7 = x)
#else
#define UART0_TX_Enable() (PORTD_Bit7 = 1)
#define UART0_TX_Disable() (PORTD_Bit7 = 0)
#define gate0(x) (PORTD_Bit7 = x)
#endif

// #define CUNET_SCL (PIND_Bit4)

```

○ 연구내용 : 함수을센서 (WCM) 함수을 센싱 방법 보완

○ 해결방법 : 그림과 같이 4단계에 걸친 모니터링 방법 보완

1. 센서 값이 10~90 값 사이일 때만 유효한 데이터로 사용함
2. 샘플 데이터 10개를 수집하여 평균값을 측정값으로 사용함
3. 유효데이터 15개를 받은 후 표시값을 변경한다.
4. 1.2.3.을 통한 측정값을 현재 표기값과 비교하여 크면, 현재값을 1증가하고, 작으면 1 감소한다.

```

if(mRXD[0]==65 && mRXD[18]==13 )
{
  //PRINTF( "\r\n rs232-2 ");
  //PRINTF( "\r\n rs232-2 $d,$d-len: $d",mRXD[0],mRXD[18],rs232data[2].M.CNT);
  //PRINTF( "\r\n rs232-2 $d,$d-len: $d - ",mRXD[0],mRXD[18],rs232data[2].M.CNT);
  j[0]=mRXD[1]-'0';
  j[1]=mRXD[2]-'0';
  j[2]=mRXD[3]-'0';
  j[3]=j[0]*100+j[1]*10+j[2];
  crc=j[3]/10;

  if(crc<90 && crc>=10) 1
  {
    if(Mainview.P.hamsucnt==0)
    {
      Mainview.P.hamsu=crc;
    }
    if(Mainview.P.hamsucnt<200)
    {
      Mainview.P.hamsucnt=Mainview.P.hamsucnt+50;
    }

    PRINTF( "\r\n hum "); //Mainview.P.hamsuerr=0;
    vcT= average(crc); 2
    if(iuu<15)iuu++; 3
    else
    {
      iuu=0;
      if(vcT>Mainview.P.hamsu)Mainview.P.hamsu++; 4
      else if(vcT<Mainview.P.hamsu)Mainview.P.hamsu--;
    }
  }
  else
  {
    PRINTF( "\r\n hOr "); //Mainview.P.hamsuerr=1;
    //Mainview.P.hamsucnt=50; //date1[6];
  }
}

```

(2) 설정EC값에 근접하게 되면 양액솔벤트의 증감이 멈추는 보정 기능 추가

○ 원인 : 액비 솔벤트의 과도한 증감으로 인한 설정 목표치 도착이 늦어짐

○ 연구내용

- 메인화면에 EC,PH 열림상태 표시 기능으로 실시간 변화되는 액비 솔벤트 동작확인
- 임의로 보정 사역폭을 설정하여 사역폭 범위안에 들어오면 증감 기능 현상태 유지

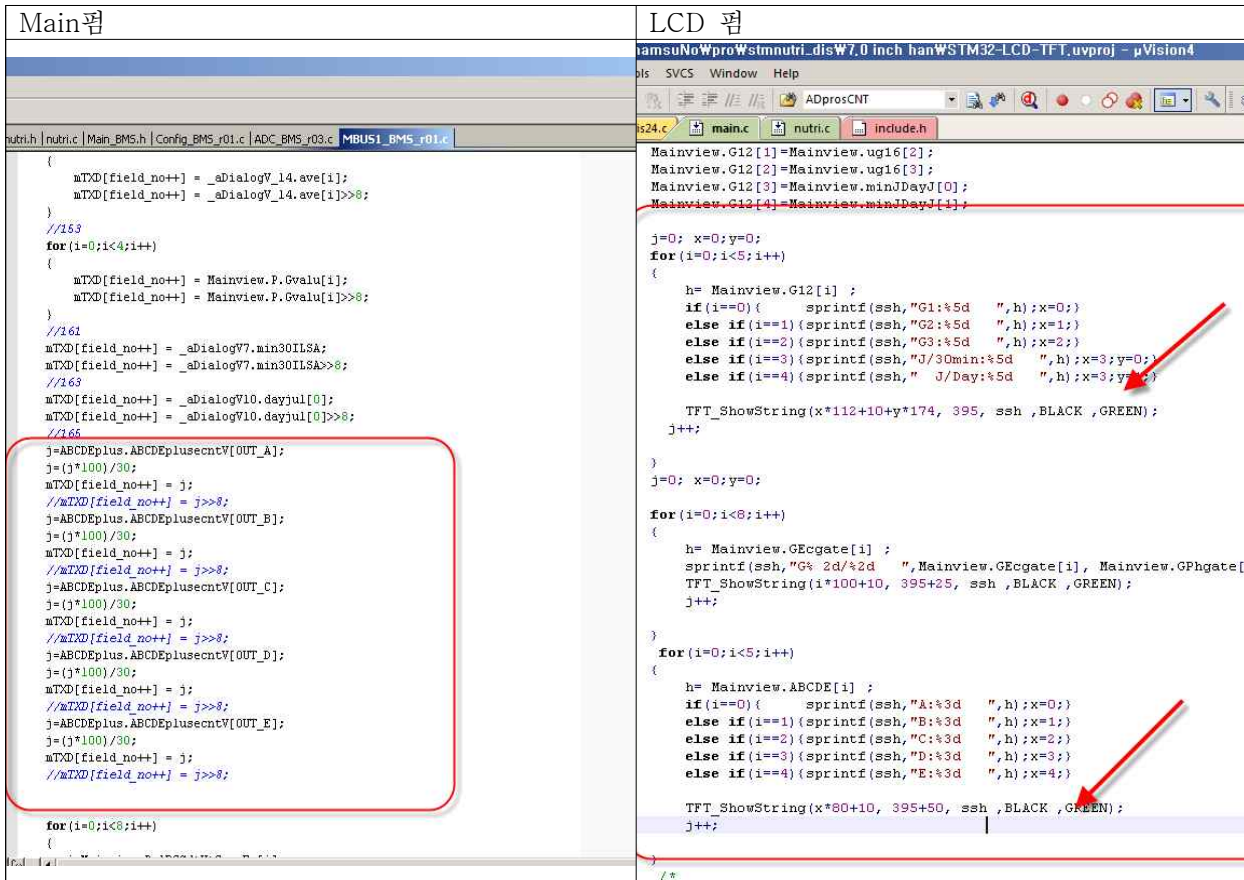
○ 해결방법 :

1. 메인 화면 기능 추가

- 내부 열림값 표기 G 90/35 ... G 90/45 (0~100%)
1구역 ~ 8구역에 해당 EC,PH열림 값 상태를 확인할 수 있는 기능
- 내부 A,B,C,D,E 열림상태 확인 (0~100%)

2. EC값 보정 기능 추가

- 8번 페이지에 교정범위 기능 교정범위 안에 들어오면 증가 , 감소기능을 멈춘다.



(3) 설정EC값에 근접하게 되면 양액솔벨브의 증감이 멈추는 보정 기능 추가

○ 원인 : 액비 솔벨브의 과도한 증감으로 인한 설정 목표치 도착이 늦어짐

○ 연구내용

- 각 그룹별 EC 교정속도, 상한,하한 값을 설정하여 EC농도 정밀제어 실현
- 낮은 일사값이 설정값 이하일 때 누적일사에 계산되지 않도록 누적일사 계산방법 개선
- 각 관수구역마다 마지막 EC, PH 계산값을 기억하여 구역별 관수가 시작될 때 기존 농도를

일정시간 유지 하여 EC, PH 변화폭을 줄이는 기능

○ 해결방법 :

- 함수을 센서없는 프로그램

1. 3시간관수, 그룹별1,2,3 EC속도, EC상한,하한 을 설정할 수 있게한다.

```

- ADprosvalue_calcEC()    static char cck1=10;
  if(Mainview.P.ECspeedidx==0) //시간관수 EC
  {
    uuk[0]=_aDialogV3.date4[5]; //EC 교정속도
    uuk[1]=_aDialogV3.date4[6]; //EC 열림 상한 %
    uuk[2]=_aDialogV3.date4[7]; //EC 열림 하한 %
  }
  else if(Mainview.P.ECspeedidx==1) //1그룹 EC
  {
    uuk[0]=_aDialogV4.date1[7]; //EC 교정속도
    uuk[1]=_aDialogV4.date2[7]; //EC 열림 상한 %
    uuk[2]=_aDialogV4.date3[7]; //EC 열림 하한 %
  }
  else if(Mainview.P.ECspeedidx==2) //2그룹 EC
  {
    uuk[0]=_aDialogV5.date1[7]; //EC 교정속도
    uuk[1]=_aDialogV5.date2[7]; //EC 열림 상한 %
    uuk[2]=_aDialogV5.date3[7]; //EC 열림 하한 %
  }
  else if(Mainview.P.ECspeedidx==3) //3그룹 EC
  {
    uuk[0]=_aDialogV6.date1[7]; //EC 교정속도
    uuk[1]=_aDialogV6.date2[7]; //EC 열림 상한 %
    uuk[2]=_aDialogV6.date3[7]; //EC 열림 하한 %
  }
  else
  {
    uuk[0]=100; //_aDialogV6.date1[7]; //EC 교정속도
    uuk[1]=60; //_aDialogV6.date2[7]; //EC 열림 상한 %
    uuk[2]=40; //_aDialogV6.date3[7]; //EC 열림 하한 %
  }

```


2. 8.일반설정에서 일사유효 와트(W)를 설정할 수 있게하여,
설정값 이상 일사 와트(W)가 발생할 때 누적 하게한다.

```
void mainviewint( int u)
    Mainview.P.cursunvlue= (int)fk[0];
    if(Mainview.P.cursunvlue>=_aDialogV8.date1[ILsaTroTle])
    {
        nugukilsaall.u32[0]= nugukilsaall.u32[0] + Mainview.P.cursunvlue;
    }
```

3. 주기별 시간 이동시 최대대기 시간 카운터를 초기화한다.

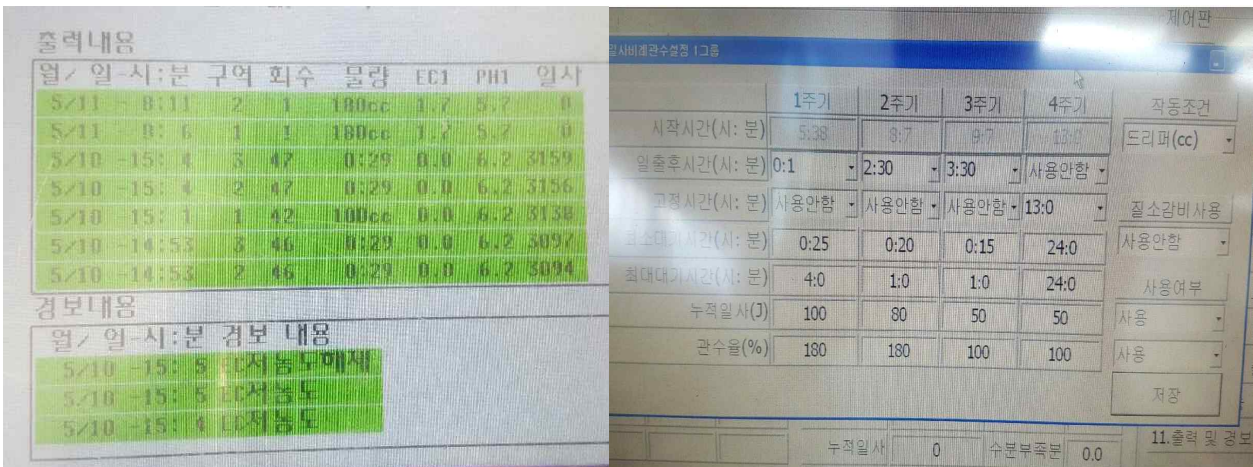
```
UINT16 gwansu2(),UINT16 gwansu3(),UINT16 gwansu4()
{
    UINT16 k=0,j1,j2,iu=0,rr[3];
    static UINT16 iuold=0;
    if( iuold !=iu)
    {
        _aDialogV4.proc[7]=0; //최대 대기 시간
        iuold =iu;
    }
```

4. 구역(1..8)별 이동시 이전 최적에 EC,PH 설정값을 20초 이후 카운팅한다.

```
void report_out1(UINT16 i1, UINT16 j)
    //2016/0513
    Mainview.P.ECPHgatecnt=20; //ECPHgatecnt
    Mainview.P.ABCSdtVt[EC_Speedv]=Mainview.P.ABCSdtVtGrupEc[j];
    Mainview.P.ABCSdtVt[Ph_Speedv]=Mainview.P.ABCSdtVtGrupPh[j];
    main() ///-----
    if( Mainview.P.ECPHgatecnt>0)Mainview.P.ECPHgatecnt--;
```

(4) 4주기인 관수 주기가 변경될 때 최대 대기시간 안정적인 확보 방안 마련

- 원인 : 주기가 변경될 때 최대 대기시간이 불규칙적으로 변경되는 현상 발견
- 연구내용
 - 각 주기가 변경될 때 최대 대기시간을 초기화하여 다시 카운팅 하도록 프로그램 변경
- 해결방법 :
 - 주기가 변경될 때 해당주기 최대대기시간 확보 프로그램 보완
 - 1그룹 1,2구역, 관수 물량 설정이 아래와 같음, 1주기 끝나고 최대 대기 시간이 도달하지 않았어도 2주기 시작과 동시에 관수 확인



- 1주기 최대 대기시간이 4시간으로 설정되어있고 2주기에 대기시간이 1시간으로 설정되어 있을 때
 - 2주기가 시작되면 최대 대기 시간과 상관없이 바로 관수가 됨.
- 다음 주기가 시작되면 최대 대기시간 카운터를 초기화하여 최대대기 시간을 다시 계산함.

(5) 누적일사 계산할 때 부정기적인 에러 발생

- 원인 : 전기적인 이유로 추정되는 특정농가 누적일사 계산값 오류발생

○ 연구내용

- 전압으로 측정하는 일사값 모니터링을 안정적으로 수집할 수 있는 방안 모색

○ 해결방법 :

- 누적일사 65565 값이 들어가는 현상 발견
- 메모리 충돌로 인한 이상한 값이 변수에 들어감을 확인하고 보완
- 농가에 별도로 프로그램을 적용, 누적일사 변수를 따로 만듦
- > 지속적인 모니터링이 필요함

```
if(pt1[0] <= j1 && pt1[0] >0)iu=1;
if(pt2[0] <= j1 && pt2[0] >0)iu=2;
if(pt3[0] <= j1 && pt3[0] >0)iu=3;
if(pt4[0] <= j1 && pt4[0] >0)iu=4;

if(iu ==1)pt5[7]=0; //pt1[3];
else if(iu ==2)pt5[7]=0; //pt2[3];
else if(iu ==3)pt5[7]=0; //pt3[3];
else if(iu ==4)pt5[7]=0; //pt4[3];
}
unsigned long nugukilsaall_K[3];
void sunnujukvaluerest()
{
    int i=0;
    Mainview.P.nujksunvlue=0;
    for(i=0;i<30;i++) _aDialogV7.min30ILSA1[i]=0;
    _aDialogV7.min30speedcnt =0;

    nugukilsaall.u32[0]=0;// nugukilsaall.u32[0] + Mainview.P.cursunvlue;
    nugukilsaall.u32[1]=0;// nugukilsaall.u32[0] + Mainview.P.cursunvlue;
    nugukilsaall.u32[2]=0;// nugukilsaall.u32[0] + Mainview.P.cursunvlue;
    nugukilsaall.u32[3]=0;// nugukilsaall.u32[0] + Mainview.P.cursunvlue;

    nugukilsaall_K[0]=0;
    nugukilsaall_K[1]=0;
    nugukilsaall_K[2]=0;

    _aDialogV4.proc[4]=0;
    _aDialogV4.proc[5]=0;
    _aDialogV5.proc[4]=0;
    aDialogV5.nrc[5]=0;
}
```

(6) 비상 관수시 부정기적인 에러 발생

○ 원인 : 설정값을 “사용안함“ 변경 후 비상관수 버튼을 눌러도 프로그램 작동이 안되는 경우가 있음

○ 연구내용

- 설정값 변경과 상관없이 비상관수가 가능하도록 프로그램 변경

○ 해결방법 :

- 비상관수가 구역1번 값을 사용한 후 “사용안함” 입력할 때 비상관수에도 자동 정지되는 현상 확인

- 비상관수 처리함수 1-0에 함수 1-1부분을 명령을 추가하여 해결

처리 함수 1-0	함수 1-1
<pre> void mainviewint(int u) { unsigned int i,j; UINT32 ii=0; float fk[6],fkl[3]; //GUI_GWANSU_INFO **gwansu unsigned int value,size,sizel,len=0; WDT_Toggle(); if(clockedit0==0) { i=Systemtime.century; i=i*100+Systemtime.year; Mainview.P.yyy=i; Mainview.P.yy=Systemtime.year; Mainview.P.mm =Systemtime.month; Mainview.P.dd =Systemtime.date; Mainview.P.hh =Systemtime.hours; Mainview.P.mi =Systemtime.minutes; Mainview.P.sec =Systemtime.seconds; } size= _aDialogCreate2[0].PgID; sizel= _aDialogCreate2[1].PgID; </pre>	<pre> i=0; _aDialogV3.proc[0]=0;_aDialogV4.proc[0]=0;_aDialogV5. mainview_l(_aDialogV2.date1, i++ ,u); mainview_l(_aDialogV2.date2, i++ ,u); mainview_l(_aDialogV2.date3, i++ ,u); mainview_l(_aDialogV2.date4, i++ ,u); mainview_l(_aDialogV2.date5, i++ ,u); mainview_l(_aDialogV2.date6, i++ ,u); mainview_l(_aDialogV2.date7, i++ ,u); mainview_l(_aDialogV2.date8, i++ ,u); mainview_l(_aDialogV2.date9, i++ ,u); </pre>

(7) PC 프로그램 입력 방법 부분 수정

- 원인 : 입력값 설정할 때 특수문자 입력 어려움 호소
- 연구내용
 - 시간입력시 시와 분을 구분하는 “:” 문자 입력방법 변경
- 해결방법 :
 - pc프로그램에 시간값을 입력하는 방법에 있어 “:” 설정 번거러움 확인
 - 프로그램에 4자리를 입력시 2자리 다음에 “ : “자동입력 되도록 프로그램 변경

처리함수1	처리함수2
<pre> id Cform4::textkeychange(int ch, int j) CString str; int i=0; if(j==0) { CEdit* pEdit = (CEdit*)GetDlgItem(ch); int nLen = pEdit->GetWindowTextLength(); pEdit->SetSel(nLen, nLen); GetDlgItemTextA(ch, str); i=str.Find(':'); if(i<0 && nLen==2) { pEdit->ReplaceSel(_T(":")); } else if(nLen>4) { str=""; pEdit->SetWindowTextA(str); } } else if(j==1) { </pre>	<pre> BOOL Cform4::PreTranslateMessage(MSG* pMsg) { // TODO: 여기에 특수화된 코드를 추가 및/또는 기본 클래스를 호 if(pMsg->message ==WM_KEYDOWN) { if(pMsg->wParam ==13) return TRUE; if(pMsg->wParam !=0) { int i, j=0; i=GetFocus()->GetParent()->GetDlgCtrlID(); j=1; if(i==0){i=GetFocus()->GetDlgCtrlID(); j=0;} switch(i) { case IDC_4COMB02: case IDC_4COMB03: case IDC_4COMB04: case IDC_4COMB05: case IDC_4COMB06: case IDC_4COMB07: case IDC_4COMB08: case IDC_4COMB09: case IDC_F4EDIT4: case IDC_F4EDIT5: case IDC_F4EDIT11: case IDC_F4EDIT12: case IDC_F4EDIT18: case IDC_F4EDIT19: case IDC_F4EDIT25: case IDC_F4EDIT26: textkeychange(i, j); </pre>

(8) 설정값 변경시 불규칙적인 버그현상 발견 보완

- 원인 : 데이터 설정값 변경후 저장중 이상한 값으로 채워지는 현상
- 연구내용

- 컨트롤러에 설정값을 입력할 때 부정기적으로 에러값으로 자동입력 되는 현상 보완
- 테스트 창에 입력값 넣고 엔터 누르면 자동 종료되는 문제 보완

○ 해결방법 :

- _aDialogVx[i] 변수에 입력 전에 인터럽트를 막음

```

{
    lh =13; // _aDialogCreate10[1].PgID ; // = 15;
    cc0=0;
}
if(cc0>0)
{
    rsintdis_en(0); //1: dis 0:enable
    field_no=5;
    for(i=0;i<lh;i++)
    {
        cc1=mRXD[field_no++];
        cc2=mRXD[field_no++];
        cc2=cc2<<8;
        _aDialogVx[i]=cc2|cc1;
    }
    saveeprom(cc0);
    rsintdis_en(0); //1: dis 0:enable
}
}
static void send_nbus_framel(void)
{
    UINT8 i,lh=0,addr=0,j;
    UINT16 cc1,cc2;
}

```

- 코드 수정 가상 메시지 함수를 추가하여 해결함

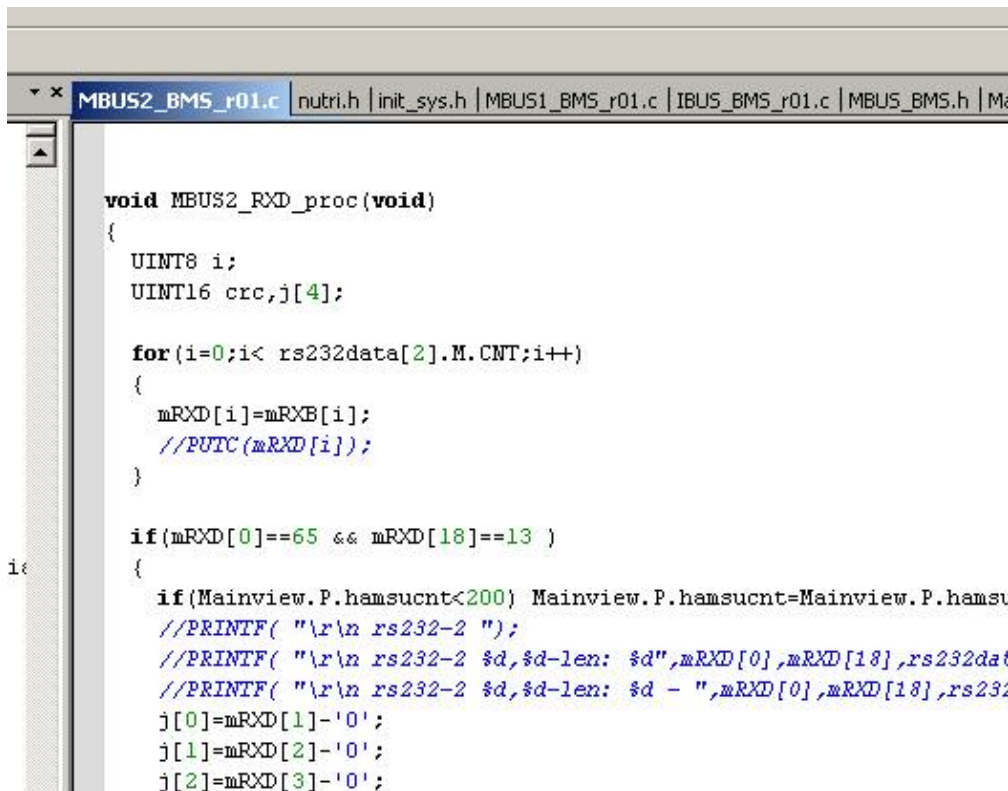
```

BOOL CgreenDlg::PreTranslateMessage(MSG* pMsg)
{
    // TODO: 여기에 특수화된 코드를 추가 및/또는 기본 클래스를
    if(pMsg->message ==WM_KEYDOWN)
    {
        if(pMsg->wParam ==13)
            return TRUE;
    }
    return CDialogEx::PreTranslateMessage(pMsg);
}

```

(9) 센서케이블의 길이에 따른 데이터 전송문제 보완

- 원인 : 주기가 변경될 때 최대 대기시간이 불규칙적으로 변경되는 현상 발견
- 연구내용
 - 함수울센서 (WCM) 에 EC PH값이 정상값이상으로 읽어들이는 문제 발생.
- 해결방법 :
 - TTL232로 50M에 길이를 사용하기에 발생한 데이터 유실현상 발견
 - 조건을 따져서 해당값이 나올수 없는 조건이면 데이터 값을 처리하지 않음으로 외에 처리 기능을 추가함



```
void MBUS2_RXD_proc(void)
{
    UINT8 i;
    UINT16 crc,j[4];

    for(i=0;i< rs232data[2].M.CNT;i++)
    {
        mRXD[i]=mRXB[i];
        //PUTC(mRXD[i]);
    }

    if(mRXD[0]==65 && mRXD[18]==13 )
    {
        if(Mainview.P.hamsucnt<200) Mainview.P.hamsucnt=Mainview.P.hamsu
        //PRINTF( "\r\n rs232-2 ");
        //PRINTF( "\r\n rs232-2 %d,%d-len: %d",mRXD[0],mRXD[18],rs232dat
        //PRINTF( "\r\n rs232-2 %d,%d-len: %d - ",mRXD[0],mRXD[18],rs232
        j[0]=mRXD[1]-'0';
        j[1]=mRXD[2]-'0';
        j[2]=mRXD[3]-'0';
    }
}
```

(10) 관수구역 8구역 --> 12구역으로 확장

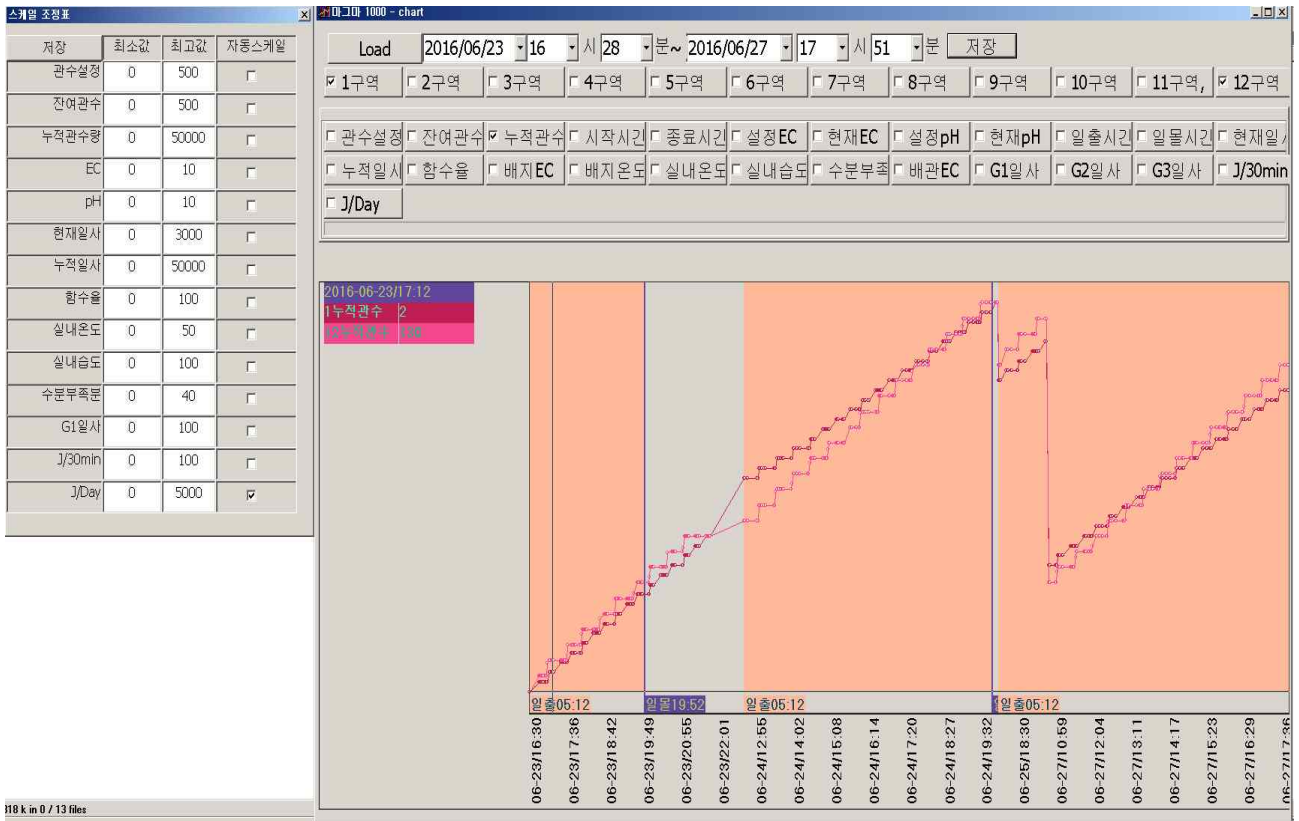
- 원인 : 대단위 면적 관수 시 양액펌프 용량 증가없이 관수구역 확장 필요

○ 연구내용

- 양액기 관수구역 12구역으로 확장
- pc프로그램 변경
- 양액기 모니터링 프로그램 수정
- pc차트 프로그램 수정
- 교정범위안에서 미세속도값 적용

○ 해결방법

- PC차트 프로그램 수정



- 관수량설정 페이지 수정

	분:초	구역물량 (L)	CC/드리퍼 (cc)	설정EC (dS)	설정PH (pH)	관수그룹	드리퍼용량
1구역	1:5	100	100	2.5	5.5	1그룹	0
2구역	1:5	100	100	2.5	5.5	1그룹	유량계펄스
3구역	1:5	100	100	2.5	5.5	1그룹	0
4구역	1:5	100	100	2.5	5.5	2그룹	종료시간
5구역	1:5	100	100	2.5	5.5	2그룹	08:00 고정시
6구역	1:5	100	100	2.5	5.5	2그룹	01:00 일물전
7구역	1:5	100	100	2.5	5.5	3그룹	저장
8구역	1:5	100	100	2.5	5.5	3그룹	
9구역	1:5	100	100	2.5	5.5	3그룹	
10구역	1:5	100	100	2.5	5.5	시간관수	
11구역	1:5	100	100	2.5	5.5	시간관수	
12구역	1:5	100	100	2.5	5.5	시간관수	

- EC, PH 교정시 일정범위 안에서 미세한 조정 속도로 센서값을 조정함

	값		값		값
EC경보편차(dS)	2.0	PH경보편차(pH)	3.0	일사EC감소	2.5
EC경보지연(분:초)	0:30	PH경보지연(분:초)	0:30	최소일사(W/m3)	100
유효일사량(W)	100	PH상한열림%	100	최대일사(W/m3)	300
EC미세속도	80	PH하한열림%	0	저함수율경보(%)	0
EC교정범위	1.0	Ph교정범위	1.0	고함수율경보(%)	100
pH미세속도	70	PH교정속도%	100	저온경보(도)	1.0
EC1스판	100	PH스판	100	고온경보(도)	40.0
EC1제로	100	PH제로	100	유량신호주기(분:초)	사용안함
EC2스판	100	일사스판	1000	A' 보정	100
EC2제로	100	일사제로	10	B' 보정	100
A 보정	100	B 보정	100	C 보정	100

저장

다. 연구결과 요약

본 연구는 함수율 센서를 활용한 양액 공급시스템을 개발하고 무배액 또는 극소배액 조건으로 수경재배를 함에 있어 통합 급액관리 자동화가 가능하도록 양액 시스템 프로그램을 보완하며 통합형 급액 제어시스템 개발 사업화에 따른 개선점을 반영하고 각종센서 (함수율센서, 일사센서, 유량센서, EC, PH센서, 실내온습도 센서)를 병행하여 관수방법에 이용 할 수 있도록 보다 폭넓은 양액시스템 활용 프로그램으로 개발 되었으며 센서에 의한 제어와 제어 결과 값을 텍스트파일, 엑셀파일 등으로 변환하여 볼 수 있는 PC 프로그램이 있고 그래프를 활용하여 한눈에 결과 값을 확인 할 수 있다는 점에서 양액재배의 초보자들도 설정 값에 의한 제어 결과 값을 쉽게 접근할 수 있다는 장점이 있다

상기의 결론에서 함수율센서를 모니터링 하고 일사센서를 이용하여 관수 시점과 관수량을 결정하고 사계절 동안 변경되는 일출 일몰시간을 자동으로 계산하여 관수시기와 관수종료 시점에 적용 시킴으로 보다 정밀한 통합 급액관리 자동화가 이루어 질 것으로 사료된다.

제 5 절 양분 균형 안정화 및 비료 투입량 최소화 기술에 기반한 순환식 수경재배 양액 통합관리 시스템 개발

1. 양분 균형 안정화 및 비료 투입량 최소화 기술개발의 추진 전략

가. 본 연구과제의 연구배경

- 식물의 양분 흡수량을 수분 흡수량으로 나눈 값을 흡수농도라고 하며, 공급농도와 흡수농도가 항상 동일할 경우 이론적으로 배지 내 농도의 변화는 없다(Noordwijk, 1990). 그러나 실제 시스템에서의 흡수농도는 환경에 따라 급변하는 증산속도의 영향으로 유동적으로 변화하게 된다(Le bot 등, 1998; Noordwijk, 1990). 따라서 완충용량이 상대적으로 작은 수경재배 시스템의 양액 이동 경로에 배액의 재사용을 위한 구조를 추가할 경우 비순환식에 비해 양분 균형제어의 불확실성이 강조되며, 시스템을 이해하는데 있어 복잡성이 증가하게 된다.
- 이를 해소하기 위하여 이온센서의 적용, 모델에 의한 예측, 전용 양액의 개발, EC 측정 기반 시스템에서의 주기적인 분석과 같은 기술적인 접근 방식들이 연구되어 왔으나(Gieling

등, 2005; Massa 등, 2011; Hao와 Papadopoulos, 2002; Savvas, 2002), 아직까지 현장에서 비순환식 수경재배의 양분 균형관리 방식을 완전히 대체할 수 있는 기술은 아직 보고된 바가 없다. 그러나 본 연구에서는 상기의 기술적인 접근 방식 중 EC 측정을 기반으로 하며 주기적인 양분 분석을 통한 양분 관리 방식이 기술적 확산 및 안정적인 플랫폼의 제공에 있어 가장 유력한 방식으로 판단하였다.

- 하지만 이 분야에 대한 기존의 연구는 극히 적은 상황이며 상업적으로 일반화되어 있는 EC 측정 기반의 순환식 수경재배시스템에서는 상기한 바와 같은 흡수 농도의 변동으로 인해 양분 균형 제어에 있어 불안정성이 강조되며, 실험 결과의 명확한 해석이 어렵다. 따라서 EC 측정 기반 순환식 수경재배시스템에서의 양분 제어에 있어 안정적인 기술을 개발하기 위해서는 이론적인 해석을 기반으로 한 기술의 도출 및 실험을 통한 기술의 실증이 필요하다.

나. 본 연구과제 기술개발의 기반 이론

- 식물의 양분 흡수 현상은 기본적으로 Michaelis-Menten 방정식을 통해 표현될 수 있으며 (Clarkson, 1985; Silberbush 등, 2005; Kim과 Lieth, 2012), 이러한 양분 흡수모델을 통해 수립된 순환식 수경재배 시스템의 간략화된 수학적모델은 그림 3-5-1과 같으며, 이 모델은 일정 조건에서 정상상태 해(steady-state solution)를 가질 수 있다.

$$V_{sys} \frac{dC_i}{dt} = \underbrace{Q_{inj} C_{inj}}_{\text{양분유입}} - \frac{J_{max} C_i}{K_m + C_i} - \underbrace{Q_{out} C_i}_{\text{양분방출}}$$

$$C_i = \frac{K_m C_{inj} Q_{inj}}{J_{max} - C_{inj} Q_{inj}}$$

양분유입 속도

수경재배 시스템 내 양분의 농도

그림 3-5-1. 순환식 수경재배 시스템의 양분 농도 변화 모델과 정상상태의 해

- 그림 3-5-1은 일반적으로 순환식 수경재배 시스템으로 투입되는 양분의 유입속도와 식물체 자체의 양분 흡수 속도가 다를 경우에 시스템내의 양분의 농도가 시간적으로 변하는 비정상상태가 되지만, 양분 농도 변화가 없을 경우는 정상상태가 된다. 따라서 순환식 수경재배에서의 양분 유입량과 양분흡수량의 분석을 통하여 시스템 내 양분 농도 및 균형의 변화를 통합적으로 해석할 수 있다.
- 본 연구에서는 EC 측정 기반 순환식 수경재배 시스템에서의 양분 농도 및 균형 제어의 문제를 각 양분 농도 변화의 수렴현상이 고려되지 않은 종래의 양분관리 방식에 의한 것으

로 정의하였으며, 목표 지점에서 양분 농도 변화의 정상 상태제어가 가능한 기술의 구현을 목적으로 하였다.

다. 연구과제의 추진체계

- 이론적이며 실험적인 분석 결과의 상호 비교 및 참조를 통해 순환식 수경재배 시스템에서의 양분 농도 및 균형 변화를 해석하여 EC 측정 기반 시스템에서의 양분 제어를 위한 연구를 수행하였다(그림 3-5-2). 이를 위해 실제 수경재배 시스템과 동일한 구조의 시뮬레이션 모델을 구축하였으며 이에 대응하는 양액공급 자동화 시스템을 제작하여 시뮬레이션 모델에서 사용하는 변수들의 자동 계측이 되도록 하여 상호 검증 및 실증이 가능한 시스템을 구축하였다.

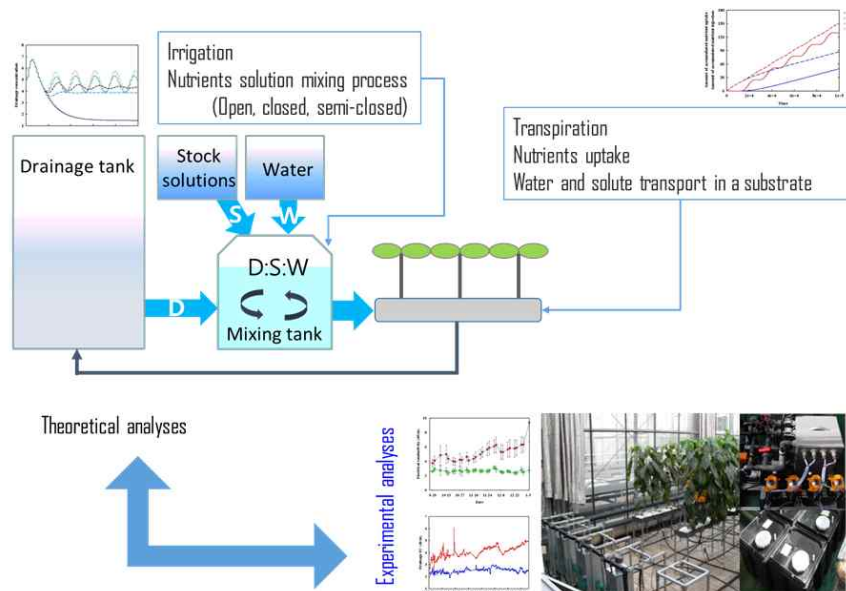


그림 3-5-2. 순환식 수경재배 시스템의 이론 및 실험적 분석을 위해 구축한 연구 체계의 개념도

- 이러한 체계를 바탕으로 이론적인 분석을 통해 EC 측정 기반 순환식 수경재배 시스템에서의 적정 제어 기술을 도출하고 이의 현장적용 가능성을 검증하기 위해 실증실험을 수행하여 이론적으로 도출한 결과를 기술화 할 수 있도록 하였다.
- 양분 균형 안정화 및 비료 투입량 최소화 기술 개발의 추진 전략은 그림 3-5-3과 같으며, EC 측정 기반 농축양액의 투입량 결정기술, 양액 혼합 시스템에서의 양분 균형제어 기술, 이를 구현하기 위한 양액 혼합 장치의 개발로 구분된다.
- 수경재배 시스템에서 양분의 투입 및 혼합과정은 기본적으로 EC 측정을 기반으로 구동되기

때문에 양분 농도 변화의 수렴을 기술적으로 구현하기 위해서는 우선적으로 EC 측정을 통해 전체 양분 투입량과 전체 양분 흡수량과의 오차를 최소화할 필요가 있다. 이는 총 양분 농도의 정상상태 제어를 가능하게 하며 개별 양분 간의 균형 변화 제어의 안정성과도 연결되어 있으므로 이를 고려하여 현장에서 적용 가능한 기술로 구현하기 위해서는 이론적인 해석과 실증실험을 필요로 한다.

- 또한 상기의 기술을 적용할 경우, 배액은 전량 사용하면서 종래의 순환식 수경재배 시스템 대비 비료 사용량의 절감을 기대할 수 있으며, 배액 저장량의 유동이 감소할 수 있으므로 이에 따라 장치의 소형화를 기대할 수 있다. 그러나 순환식 수경재배 시스템의 안정적인 운용을 위해서는 살균 기술이 적용되어야 하며, 일반적으로 사용되는 UV 유수 살균 처리와 배액의 혼합 처리는 그 과정이 서로 중복될 수 있고 이는 장치의 규모에 영향을 주는 요인으로 장치의 설계에 이러한 제약을 고려하여 각 처리의 배치를 반영할 필요가 있다. 또한 UV 살균장치의 적용 시, Fe-EDTA의 광산화 손실량이 보상될 수 있도록 설계되어야 하며, 양분 관리의 안정성을 향상시키기 위해 필요할 경우에 이온센서와 같은 부가 장치(위탁과제)의 장착이 가능하도록 확장성이 제공될 수 있어야 한다.

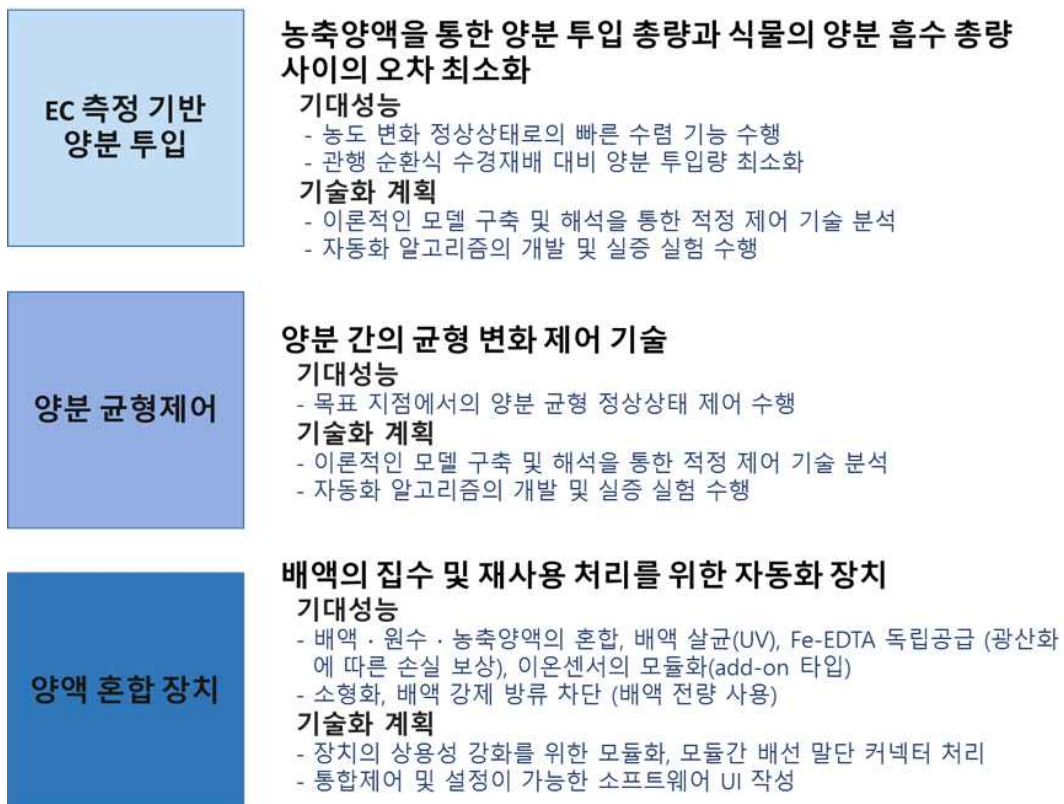


그림 3-5-3. 양분 균형 안정화 및 비료 투입량 최소화 기술 개발의 추진 전략

- 양분 균형 안정화 및 비료 투입량 최소화 기술 개발의 추진 전략은 그림 3-5-3과 같으며, EC 측정 기반 농축양액의 투입량 결정기술, 양액 혼합 시스템에서의 양분 균형제어 기술,

이를 구현하기 위한 양액 혼합 장치의 개발로 구분된다.

- 수경재배 시스템에서 양분의 투입 및 혼합과정은 기본적으로 EC 측정을 기반으로 구동되기 때문에 양분 농도 변화의 수렴을 기술적으로 구현하기 위해서는 우선적으로 EC 측정을 통해 전체 양분 투입량과 전체 양분 흡수량과의 오차를 최소화할 필요가 있다. 이는 총 양분 농도의 정상상태 제어를 가능하게 하며 개별 양분 간의 균형 변화 제어의 안정성과도 연결되어 있으므로 이를 고려하여 현장에서 적용 가능한 기술로 구현하기 위해서는 이론적인 해석과 실증실험을 필요로 한다.
- 또한 상기의 기술을 적용할 경우, 배액은 전량 사용하면서 종래의 순환식 수경재배 시스템 대비 비료 사용량의 절감을 기대할 수 있으며, 배액 저장량의 유동이 감소할 수 있으므로 이에 따라 장치의 소형화를 기대할 수 있다. 그러나 순환식 수경재배 시스템의 안정적인 운용을 위해서는 살균 기술이 적용되어야 하며, 일반적으로 사용되는 UV 유수 살균 처리와 배액의 혼합 처리는 그 과정이 서로 중복될 수 있고 이는 장치의 규모에 영향을 주는 요인으로 장치의 설계에 이러한 제약을 고려하여 각 처리의 배치를 반영할 필요가 있다. 또한 UV 살균장치의 적용 시, Fe-EDTA의 광산화 손실량이 보상될 수 있도록 설계되어야 하며, 양분 관리의 안정성을 향상시키기 위해 필요할 경우에 이온센서와 같은 부가 장치(위탁과제)의 장착이 가능하도록 확장성이 제공될 수 있어야 한다.
- 따라서 본 과제의 연구 추진전략은 양분 균형 안정화 및 비료 투입량 최소화를 위한 적합기술의 도출과 검증을 위한 이론적인 분석 과정과 실증실험, 그리고 이를 구현할 수 있는 장치의 설계 및 개발을 중심으로 구성되었다.

2. 순환식 수경재배 시스템의 양수분 이동 모델 구축 및 모델에 의한 비료 투입량 최소화 혼합방식과 종래 혼합방식의 비교 분석

가. 연구배경

- 일반적으로 식물의 건물중의 약 4% 만이 비료를 통해 공급된 원소로 이루어져 있기 때문에, 이론적으로 식물이 요구하는 적정량만을 공급한다면 식물의 생육 전 기간 중 비료의 투입량은 건물중의 4% 수준으로 절감할 수 있음을 의미한다. 현재까지는 배액을 전량 사용하는 순환식 수경재배 시스템이 수경재배 시스템의 비료 소모량을 최대로 절감할 수 있는 가장 이상적인 방식이었다.
- EC를 기반으로 하는 상업적인 순환식 수경재배 시스템에서 관행 방식으로 재사용 양액을

혼합할 경우, 완전 폐쇄형은 배액의 부피, 배액의 EC, 목표 관수량, 목표 EC를 주요 변수로 해서 배액, 원수, 농축양액의 각각의 혼합비를 자동적으로 결정하게 되며, 부분 폐쇄형은 배액과 원수의 혼합 비율을 사용자가 설정하여 설정된 고정비로 혼합이 이루어진다.

- 이러한 혼합을 제어 관점에서 고찰하면, 원수와 양분의 투입은 각각 작물의 증산과 양분의 흡수로 인해 발생한 외란(disturbance)에 대하여 제어 결과로 볼 수 있다. 따라서 작물의 양분 흡수량과 동일한 양의 양분이 투입될 경우에 시스템의 전체 양분 농도는 일정하게 된다. 관행의 순환식 수경재배 시스템에서 배액 및 배지 내 양액의 EC 증가 현상이 관찰되는 것은 투입한 농축양액 내 양분의 양과 작물의 양분 흡수량 사이의 오차 때문이다.
- 관행 순환식 수경재배 시스템에서의 오차를 줄일 수 있다면, 양분의 소모량을 감소시킬 수 있으며 결과적으로 비료 절감 효과를 극대화 할 수 있으므로 기술의 확산에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.
- 본 연구에서는 관행 순환식 수경재배 시스템의 오차 요인을 분석하고 오차 감소를 위한 재사용 양액의 혼합 기술의 개발을 목표로 하고 있다. 이를 위하여 순환식 수경재배 시스템의 양분 관리 모델을 구축 및 시스템 특성을 분석을 통하여 개선된 양액 혼합 혼합기술을 도출하고자 하였다.

나. 연구개발 목표

- 순환식 수경재배의 배지 내 양분 총량 추정 모델링 및 재사용 양액 혼합 기술 안정화
- 순환식 수경재배 배지 내 양수분 이동 및 재사용 양액 혼합 모델 구축, 시뮬레이션 및 성능 비교

다. 순환식 수경재배시스템의 양수분이동 모델 구축 및 재사용 양액 혼합방식의 분석

(1) 순환식 수경재배 시스템 모델에 적용할 식물 양분흡수 파라미터 추출

- 대상 작물 : 파프리카
- 순환식 수경재배 모델 구축
 - 수분 이동 모델

$$\frac{dV_{sb}}{dt} = Q_{ir} - Q_{dr} - Q_{tr}, Q_{dr} = Q_{ir} - Q_{tr} \text{ (배지)} \quad (\text{식 } 3-5-1 \sim 3-5-3)$$

$$\frac{dV_{drg}}{dt} = Q_{dr} - Q_{drj} \text{ (배액 탱크)}$$

$$\frac{dV_{mx}}{dt} = Q_{drj} + Q_{inj} + Q_{wtr} - Q_{ir} \text{ (혼합 탱크)}$$

Q_{ir} : 관수 유량 (L/min)

Q_d : 배액 유량 (L/min)

Q_{tr} : 증산량 (L/min)

Q_{drj} : 배액 투입량 (L/min)

Q_{inj} : 농축양액 투입량 (L/min)

Q_{wtr} : 원수 투입량 (L/min)

V_{sub} : 배지 내 수분의 양 (L)

V_{drg} : 배액 탱크 내 배액의 양 (L)

V_{mx} : 혼합탱크 내 양액 (L)

- 양분 이동 모델

$$\frac{dC_{sb}^I}{dt} = Q_{ir} C_{nmx} - Q_{dr} C_{nsb}^I - J^I \text{ (배지)} \quad (\text{식 } 3-5-4 \sim 3-5-6)$$

$$\frac{dC_{sb}^I}{dt} = Q_{dr} C_{nsb}^I - Q_{drj} C_{ndrg}^I - Q_{disch} C_{ndrg}^I \text{ (배액 탱크)}$$

$$\frac{dC_{mx}^I}{dt} = Q_{drj} C_{ndrg}^I + Q_{inj} C_{inj}^I - Q_{ir} C_{nmx}^I \text{ (혼합 탱크)}$$

C_{sb} : 배지 내 양분의 양 (mmol)

C_{drg} : 배액 탱크 내 양분의 양 (mmol)

C_{mx} : 혼합탱크 내 양분의 양 (mmol)

C_{nmx} : 혼합 탱크 내 양분 농도 (mmol/L)

C_{nsub} : 배지 내 양분 농도 (mmol/L)

- 양분 흡수(추정 파라미터) 모델

$$J^I = \frac{J_{max}^I C_{nsb}^I}{K_m^I + C_{nsb}^I} \text{ (Michaelis-Menten equation)}$$

$$J^I = \frac{J_{max}^I C_{nsb}^I}{K_m^I + C_{nsb}^I} RSA \text{ (root surface area multiplied)} \quad (\text{식 } 3-5-7)$$

J : 양분 흡수 속도 ($\text{mM}/\text{m}^2/\text{min}$)

J_{max} : 양분 흡수속도 상수 ($\text{mM}/\text{m}^2/\text{min}$)

K_m : Michaelis-Menten 상수 (mM)

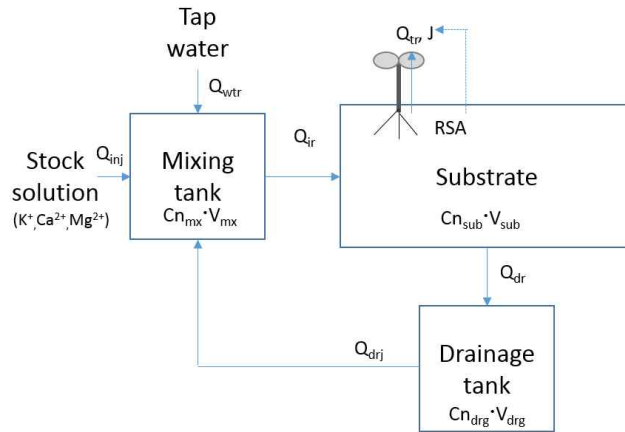


그림 3-5-4. 순환식 수경재배 시스템의 양수분 이동모델 개념

(2) 파프리카의 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 실험 데이터를 통해 양분 흡수 파라미터 추출

- Berkeley madonna S/W(Version 8.3.18, UC Berkeley, CA, USA)의 least-squares regression analysis를 이용한 curve-fitting 알고리즘을 양분 흡수 파라미터 추출에 사용

(3) 시뮬레이션을 통한 관행 순환식 수경재배 시스템의 양분 제어 방식 분석

- 상기의 모델에서 추출한 파프리카 양분 흡수 파라미터를 적용하여 관행의 순환식 수경재배 시스템의 양분 제어방식 분석에 이용
- 관행 순환식 수경재배 방식
 - 부분폐쇄형(고정식 혼합방식, fixed mixing ratio, FR): 배액의 이용 비율 고정
 - 완전폐쇄형(유동적 혼합방식, modifiable mixing ratio, MR): 배액 전량 이용

(4) 비료 투입량 최소화를 위한 양액 혼합 방법 및 투입량 제어 알고리즘 개발

- 관행 순환식 수경재배 방식의 분석 결과를 바탕으로 양분흡수량 추정 오차 요인을 최소화 할 수 있는 알고리즘의 개발
- 개발 알고리즘의 성능 파악을 위한 시뮬레이션 및 실증 실험 장치 구축
 - 재배 현장의 변수를 추가적으로 모델에 반영 및 분석에 적용
 - 파프리카 증산모델, 일사비례 제어 관수 방식, 실측 광량 데이터 이용, 배지 내 양수 분 이동 모델 적용

라. 연구수행 내용 및 결과

(1) 순환식 수경재배 시스템 모델에 적용할 식물 양분 흡수 파라미터 추출

- 본 연구팀에서 구축한 순환식 수경재배의 양액 혼합 자동화 실험 시스템에 배액을 전량 이용하는 완전 폐쇄형 혼합방식(관행)을 적용하여 새 양액의 투입량, 원수의 투입량, 관수량, 배액량 등 주요 변수를 계측하고, 이를 변수화하여 상기에서 구축한 순환식 수경재배 시스템 모델에 적용하였다.
- 배지 내 양분 간의 균형변화 시뮬레이션 데이터가 실측된 배지 내 양분 간의 균형 변화 데이터에 근사한 값을 가질 수 있도록 Berkeley Madonna의 curve-fitting 알고리즘을 이용하여 양분 흡수 파라미터를 조정하였으며, 이후의 양분 비율 변화 시뮬레이션 결과와 실측 데이터의 변화 비교는 그림 3-5-5와 같이 나타났다.
- 파라미터 추출 과정을 통해 구한 양분 흡수 모델의 변수는 표 3-5-1과 같다.
- 표 3-5-1. 파프리카의 Michaelis-Menten 모델의 양분 흡수 변수

Symbol	Description	Value	Unit
$J_{\max} K$	Ion flux parameter	4.19×10^{-4}	mM/plant/min
$J_{\max} Ca$	Ion flux parameter	4.65×10^{-4}	mM/plant/min
$J_{\max} Mg$	Ion flux parameter	3.00×10^{-4}	mM/plant/min
$K_m K$	Ion flux parameter	0.23	mM·L ⁻¹
$K_m Ca$	Ion flux parameter	6.93	mM·L ⁻¹
$K_m Mg$	Ion flux parameter	12.84	mM·L ⁻¹

- K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 각 이온 비율의 실측 데이터와 추정 결과는 유사하였으며 이는 추출된 파라미터가 적절한 수준에서 설정되었음을 의미한다.

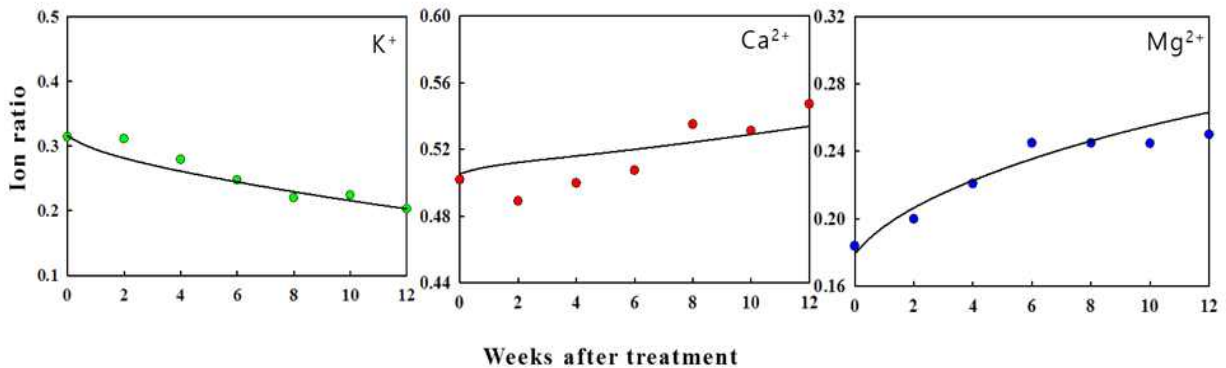


그림 3-5-5. 완전폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 배지 내 양분 균형 변화 실측 데이터와 추정 데이터의 비교(● : 실측 데이터, - : 추정 데이터)

(2) 구축된 양분관리 모델을 통한 관행 순환식 수경재배 시스템의 양분 제어 방식 분석

- 상기의 과정을 통해 추출된 파프리카의 양분 흡수 파라미터를 적용하여 부분 및 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 양분 균형 제어 성능에 대해서 분석하였다. 그림 3-5-6의 좌측 그래프의 가로축은 시스템 내 공급된 양분의 누적투입량이며 세로축은 양분(K⁺)의 균형 편차(초기비율 대비)를 나타내고 있다.
- 그림 3-5-6의 우측 그래프는 각각의 관행 순환식 수경재배 방식에서 K⁺의 이온 비율이 4%p의 비율 편차가 발생할 때까지 소요된 일수를 나타낸다(K⁺ 4%p의 비율 편차의 설정은 선행연구에서 파프리카 순환식 수경재배에서의 양분 균형 변화에 따른 파프리카 수확량 변화에 대한 연구를 참조하여 설정).
- 배액의 이용 비율이 낮을수록, 즉 완전폐쇄형에서 부분폐쇄형으로 진행할수록 이온 균형의 유지에 유리하지만, 이온의 균형 유지에 더 많은 비료의 투입을 요구하게 되므로 균형 유지 측면에서 효율을 고려할 필요가 있다.
- 완전 폐쇄형의 경우 비료의 소모량이 가장 낮은 반면 4%p의 비율 편차가 발생할 때까지 소요되는 시간은 가장 짧게 나타난다. 본 결과에는 약 20일이 소요되는 것으로 나타나며, 이는 이온 분석에 의하여 양분 균형을 제어하는 주기(기간)로 충분한 시간으로 볼 수 있다.
- 따라서 순환식 수경재배 시스템의 양수분 이용효율의 극대화는 비료 투입량은 최소화 하면서 이온의 균형을 적절하게 제어할 수 있는 순환식 수경재배 시스템의 기술적 개선 방향을 나타낸다.

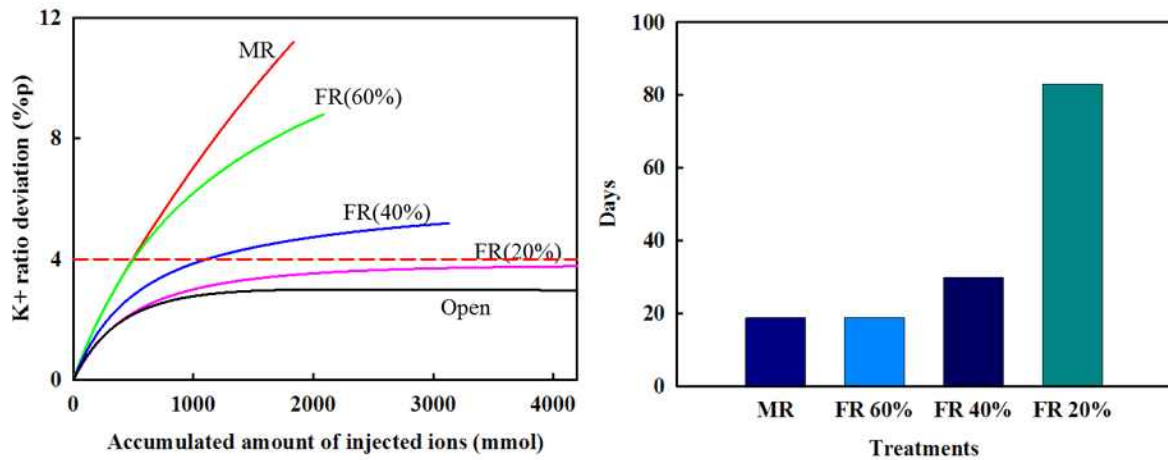


그림 3-5-6. 부분폐쇄형 및 완전폐쇄형 순환식 수경재배시스템의 양분 균형 제어 성능 (좌: 누적 양분 투입량 대비 양분 균형의 편차, 우: 4%p의 비율 편차 발생까지 소요된 시간; MR-완전폐쇄형, FR-반폐쇄형(%는 배액의 혼합비율))

- 그러나 완전폐쇄형 순환식 수경재배 방식도 관행의 혼합 방식을 적용한 경우, 양분의 흡수량 추정에 오차가 발생하며 이러한 차이는 생육 후기에 접어들어서 감소한다(그림 3-5-7). 따라서 완전폐쇄형 순환식 수경재배 시스템에서 이러한 오차를 줄이는 추가적인 요인을 적용함으로써 양수분 소모량을 보다 감소시킬 필요가 있다.

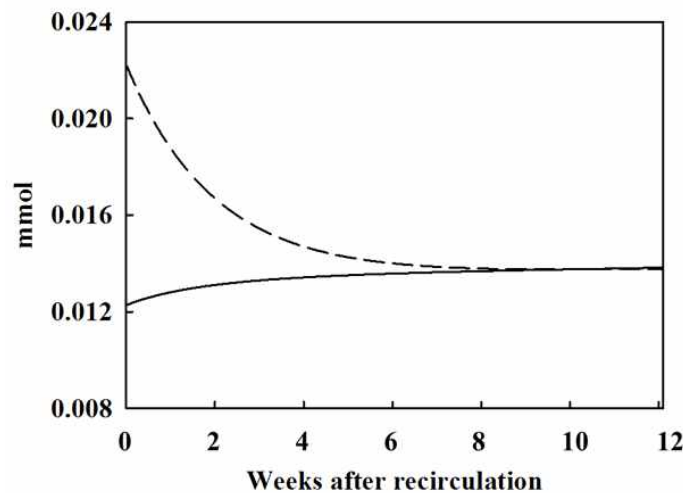


그림 3-5-7. 완전폐쇄형 순환식 수경재배 방식에서 전체 양분 투입량과 전체 양분 흡수량의 변화 (--- : 투입 양분 — : 식물에 의한 흡수 양분)

(3) 비료 투입량 최소화를 위한 양액 혼합 방법 및 투입량 제어 알고리즘 개발

- 관행의 완전폐쇄형 순환식 수경재배 시스템(그림 3-5-8)의 기본적인 양수분 투입량 결정 원리는 배액 탱크의 초기 수위와 농도를 기준으로 변화량만큼을 원수와 농축 양액으로 보상하는 방식이다.
- 실제로 배지 내에 많은 비율의 양액이 잔류하고 있으며, 배지의 수분 및 양분의 농도는 변화량을 계산하는데 포함되어 있지 않으므로 양분 조정 오차의 요인이 된다.
- 본 연구에서는 상기의 모델에 근거하여 기존의 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 양수분 소모량을 보다 감소시킬 수 있는 요인을 분석하였다. 기존의 유동 혼합 방식(MR)에서 배지의 양수분 변수를 추가하여, 확장된 유동 혼합 방식(extended modifiable mixing ratio, EMR)을 개발하였다.

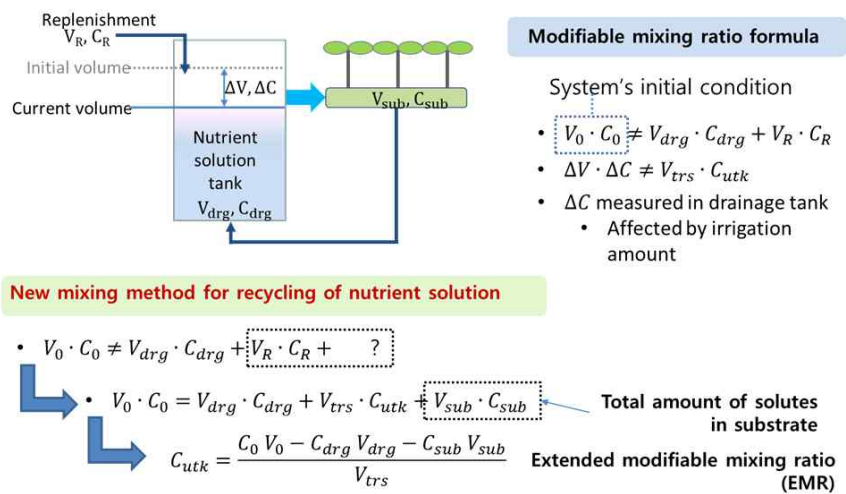


그림 3-5-8. 완전폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 관행의 재사용 양액 혼합방식

- 확장 방식(EMR)의 경우, 실제 배지의 수분 및 양분의 총량을 정확하게 측정하는 것이 기술적으로 어렵다. 본 연구에서는 배지 내 양분 농도는 배액의 농도와 유사하고, 배지 내 함수량은 배지의 포장 용수량과 유사한 것으로 가정하여 추정량을 혼합계산식의 파라미터로 추가하였다.
- 관행의 완전폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 혼합비 결정방식(MR)과 확장된 유동 혼합 방식(EMR)을 비교하였다.
- 본 연구에서는 기 구축된 순환식 수경재배 시스템 모델에 배지 내 양수분 이동 현상, 파프리카 증산모델, 일사비례 관수 제어 방식, 파프리카의 생육량 증가, 실측 광량데이터의 변수를 추가하여 최대한 실제 환경의 주요 변수들이 포함된 조건에서 시뮬레이션을 실시하였다.

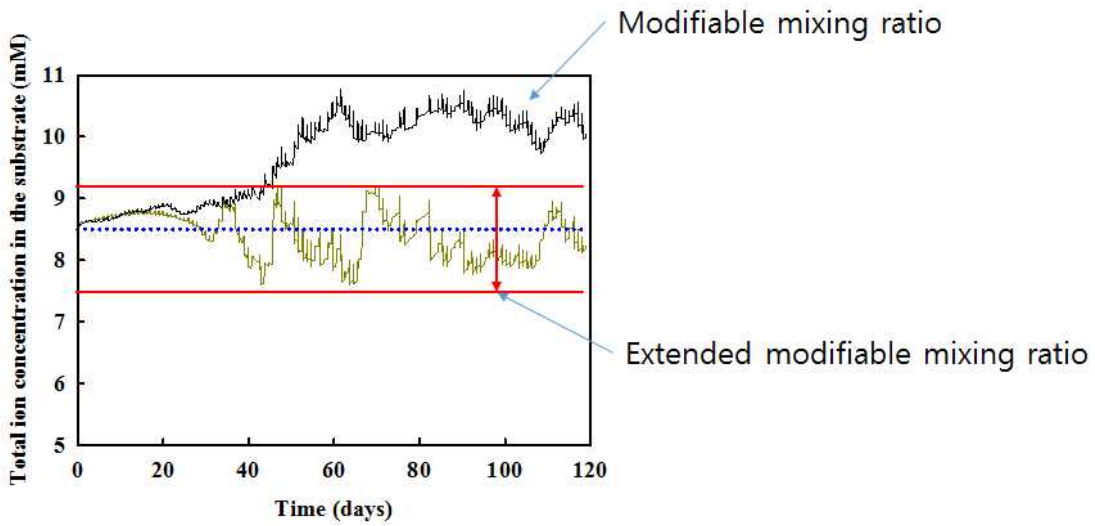


그림 3-5-9. 배액 혼합비 결정 방식에 따른 완전폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 배지 내 양분 농도 변화

- MR과 EMR 방식에서의 배지 내 양분의 농도 변화는 식물 양분 흡수량 추정에 대한 오차로 인해 발생한 이온 농도의 변화 영향은 서로 상이하게 나타났다(그림 3-5-9).
- MR 방식을 통해서 제어했을 때는 배지 내 양분 농도는 점차적으로 증가하여 포화되는 형태이었지만, EMR 방식의 경우는 일정한 상태에서 진동하는 경향을 나타냈다.
- 이는 배지 내 양수분의 총량을 추정하는 변수를 활용하더라도 변수의 실제 값과의 차이에 따라 오차가 진동하는 형태로 나타났고 이러한 접근을 통한 양분 투입량 제어가 가능함을 의미할 수 있다.

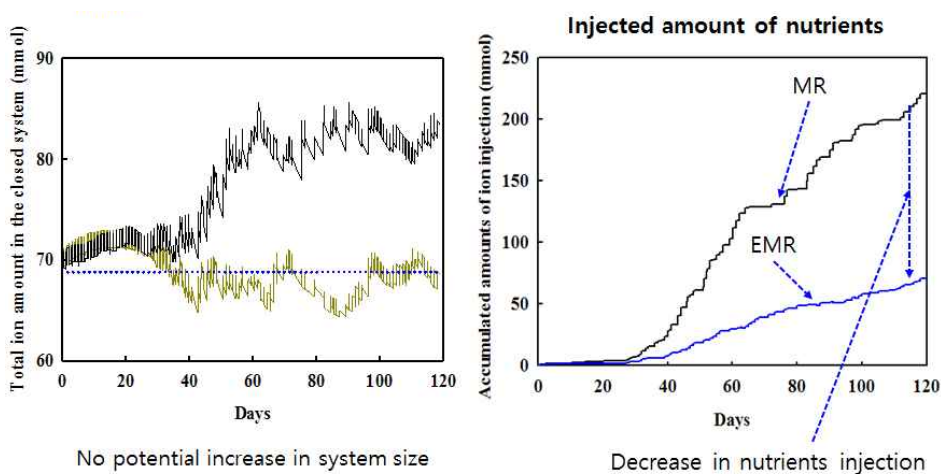


그림 3-5-10. 완전폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 재사용 양액 혼합방식에 따른 시스템 내 양분의 총량(좌: MR-상, EMR-하)과 양분의 누적 소모량(우) 비교

- 확장된 유동 혼합방식(ERM)을 이용한 경우는 양분 총량의 증가현상이 관찰되지 않았으나, 관행의 혼합방식 같은 경우 양분의 총량이 점차적으로 증가하는 현상을 보여주었다(그림 3-5-10).
- 이러한 결과는 양분 누적 소모량에도 반영이 되었으며, 확장된 혼합방식의 경우 양분의 총량이 초기값에 근접한 수준에서 유지하면서도 양분 소모량은 관행의 방법에 비해 대폭 감소했음을 확인할 수 있다.

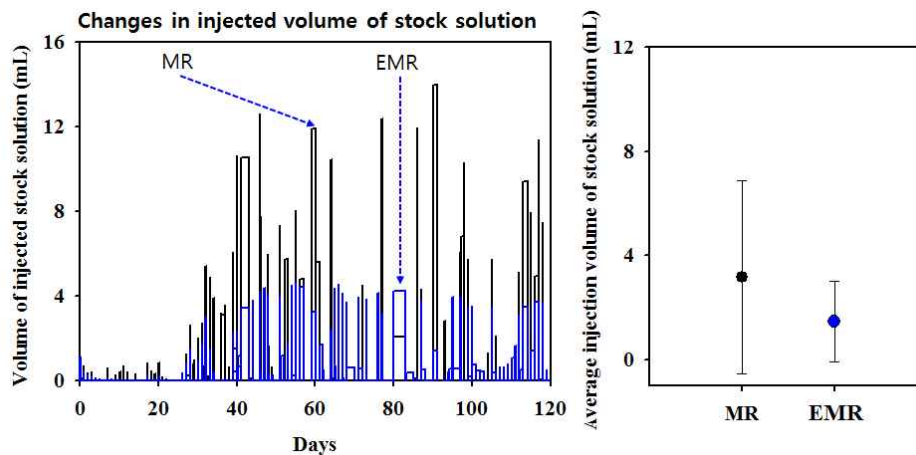


그림 3-5-11. 완전폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 재사용 양액 혼합방식에 따른 농축양액의 투입량 변화(좌) 및 투입량 간의 평균과 표준편차(우)

- EMR 방식은 농축양액의 투입량이 상대적으로 낮았으며, 투입량 간의 평균 및 편차도 MR 방식에 비하여 작게 나타났다(그림 3-5-11). 이것은 농축 양액의 투입량의 균일성을 의미하며, 농축양액의 투입을 통한 양분의 균형 제어 측면에서 유리한 부분으로 작용 할 수 있다.

3. 비료 투입량 최소화 혼합방식의 알고리즘 개발 및 실증

가. 연구배경

- 관행의 순환식 수경재배 방식은 공급 양액의 설정 농도를 제어 목표값으로 하여 양액 혼합 처리가 이루어졌다. 이러한 방식은 식물의 흡수량과 양분 투입량 사이에 오차가 지속적으로

발생하게 되며 누적된 오차는 순환식 수경재배 시스템 내의 양분 총량 증가로 나타난다.

- 이러한 경우, 관수량 변화에 따라서 시스템의 양액 저장량이 민감하게 반응하게 된다. 배액의 저장한계를 초과하게 되면 배액의 유출이 발생하게 되며 새로운 양분의 투입은 발생하지 않게 되어 양액관리 체계가 불안정하게 작동하게 된다.
- 이러한 문제를 해결할 경우, 종래의 순환식 수경재배 시스템에 비해서 양분 소모량을 절감할 수 있으며 시스템을 소형화 및 외부 환경 변화의 영향에도 배액의 외부 유출이 없는 안정적인 완전폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 개발이 가능하다.
- 네덜란드의 경우 상용 온실에서 양분유출의 완전차단 목표 기한을 2027년으로 연장하였으며 (Beerling 등, 2014), 이는 완전폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 보급 및 기술적인 안정화의 필요성을 동시에 나타내고 있다고 볼 수 있다.

나. 연구개발 목표

- 순환식 수경재배 시스템 내 비료 투입량 최소화를 이용한 재사용 양액 혼합 알고리즘의 개발
- 비료 투입량 최소화 알고리즘이 적용된 순환식 수경재배 시스템의 양분 농도 변화 실증 실험

다. 재료 및 방법

(1) 실증 실험용 모듈 제작

- 양액 혼합 알고리즘의 탑재 및 양액 혼합의 자동화가 가능한 수경재배 모듈 제작

(2) 비료 투입량 최소화 양액 혼합 알고리즘의 개발

- 시뮬레이션을 통해 구현한 확장된 유동 혼합방식(EMR)을 실제 순환식 수경재배 시스템에서 구현하기 위한 적정 제어 알고리즘을 도출

(3) 비료 투입량 최소화 알고리즘이 적용된 순환식 수경재배 시스템의 양분 농도 변화 실증 실험

- 실험장소 : 서울대학교 농생대의 부속농장 유리온실
- 공시작물 : 파프리카 (품종 : Derby)
- 실험장치

- 총 4개의 성능평가 시스템이 구축
- 관행의 혼합방식과 본 연구에서 개발한 혼합 알고리즘 적용된 혼합방식에 각각 2개의 양액 혼합 모듈 할당
- 측정항목 : 배액의 EC, 배지 EC, 양분 투입량, 이온 농도 변화 측정, SPAD, 수확량
- 실험기간 : 2014년 9월 ~ 2015년 1월

라. 연구수행 내용 및 결과

(1) 실증 실험용 모듈 제작

- 본 연구를 통해 개발된 확장된 유동식 혼합 알고리즘과 관행의 재사용 양액의 혼합방식의 구현이 가능하며, 시스템 내 비료 및 수분의 투입량의 실시간 계측이 가능한 실증 실험용 장치를 제작하였다(그림 3-12~14). 이를 통해 비료 투입량 최소화 기술을 상용화 수준의 전 단계 수준에서 실증 실험을 수행할 수 있으며, 실제 조건에서의 성능 비교와 제어 논리의 오류 검출 등이 가능하다.

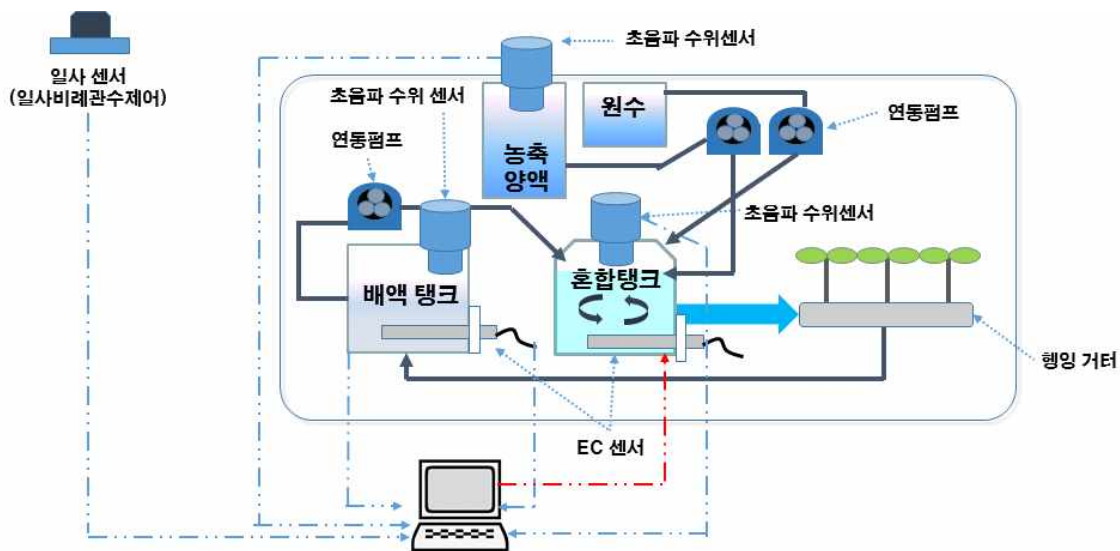


그림 3-5-12. 확장된 유동 혼합 알고리즘의 성능평가와 관행 혼합방식과의 비교 실증을 위한 양액혼합 및 계측 장치 구조도



그림 3-5-13. 확장된 유동 혼합 알고리즘 및 관행 재사용 양액 혼합 방식의 구현이 가능한 실증 실험 장치 제어부와 구동부(A: 제어반, B: 제어기, C: 양액 이송용 연동펌프 배열, D: 센서 신호 변환부)



그림 3-5-14. 실증 실험 장치의 전체적 구성(A: 농축양액 탱크, B: 작물 재배상, C: 양액 혼합부, D: 배액 수집부)

(2) 비료 투입량 최소화 양액 혼합 알고리즘의 개발

(가) 비례제어 방식으로 순환식 시스템에 양분 투입 입력을 가했을 때의 출력 응답 분석

- 그림 3-5-15는 관행 순환식 수경재배와 본 연구를 통해 개발한 순환식 수경재배 시스템의 제어 블록선도를 보여준다. 순환식 수경재배에서 양분을 투입하는 것은 식물에 의해 흡수되어 소모된 양을 보충하는 목적을 가지고 있다. 이를 결정하기 위해서는 시스템에서의 양분 감소량을 측정해야 하는데, 관행의 경우 이를 배액탱크 내의 EC와 공급양액 EC를 측정하여 투입량이 계산될 수 있다. 이는 시스템 전체를 제어대상으로 할 수 없으며, 혼합탱크 내 양액의 EC만을 총 양분 흡수량에 대한 제어로 한정한다.

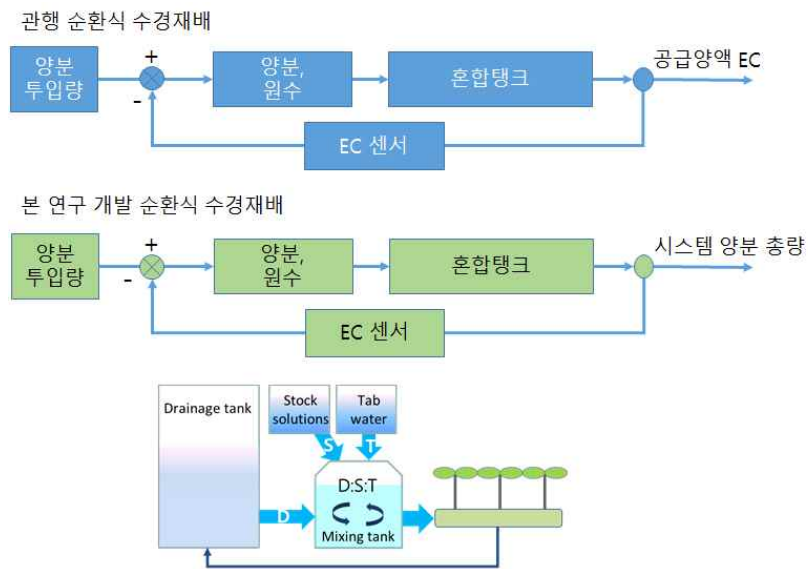


그림 3-5-15. 본 연구에서 개발된 순환식 수경재배 시스템에서의 양분 투입량 결정방식 비교
(상: 제어 블록선도, 하: 양분 혼합 제어 장치)

- 관행의 특성을 적용하여 제어할 경우에 나타나는 시스템의 제약을 분석하여 이를 최소화하기 위해 새롭게 양분 투입량의 계산 과정을 도출하였으며 아래와 같다.

$$\Delta U = V_0 C_0 - V_{drg} C_{drg} - V_{sb} C_{sb} \quad (\text{식 3-5-8})$$

ΔU : 양분의 흡수량

V_0 : 시스템 전체의 양액 초기 부피

C_0 : 시스템 전체의 양액 초기 농도

V_{drg} : 배액 부피

C_{drg} : 배액 농도

V_{sb} : 배지 내 양액 부피

C_{sb} : 배지 내 양분 농도

- V_{sb} 와 C_{sb} , V_0 와 C_0 는 실제 시스템에서는 측정하기 어려우며, 이를 잘못 추정할 경우 오히려 시스템의 안정성에 부정적으로 작용할 수 있다. 따라서 혼합장치에 적용할 때에는 다음과 같은 안정화 대책이 필요하다.
- 이를 위하여, 제어공학적인 관점에서 V_0 , C_0 를 제어 목표값으로 설정하고 입력된 제어량의 오차를 측정하여 그림 3-5-15 하단의 블록선도와 같이 제어 입력을 반복적으로 수정하였다. 상대적으로 긴 피드백 주기와 시간 응답이 느린 실제 순환식 수경재배 시스템의 제약을 고려하여 기본적으로는 P(비례) 제어 방식을 적용하였다.
- P 제어 방식의 입력량 계산은 아래와 같이 구성된다.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (\text{식 3-5-9})$$

u : 제어 입력량

K_p : 비례정수

e : 오차

- 이를 식 3-5-8을 기준으로 해석하면 오차 e (목표값-현재값) 계산에서 목표값을 $V_0 C_0$ 로 볼 수 있으며 현재값은 $V_{drg} C_{drg} - V_{sb} C_{sb}$ 로 볼 수 있다. 이는 식 3-5-8의 투입량 계산식을 비례제어 관점에서 해석할 수 있다.
- 식 3-5-8에서 양분흡수량을 정확히 보충해주기 위해서는 ΔU 와 정확히 같은 양을 양분으로 투입해주어야 한다. 따라서 ΔU 로 계산된 양을 농축양액의 투입량으로 치환해주고 이를 정확히 구현할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다.
- 그러나 식 3-5-8을 실제 조건에서 측정하여 구현하고자 했을 때 추정이 필요한 변수가 있으며, 해당 변수의 추정 오차가 컸을 경우 오히려 제어 안정성에 더욱 불리하게 작용하기 때문에 식 3-5-10와 같은 가정을 통해 근사치의 측정으로 대체하였다.

$$C_{cub} \cong C_{drg} \quad (\text{식 3-5-10})$$

- 식 3-5-10은 배지의 농도와 배액의 농도가 대략 같다는 가정으로 C_{drg} 는 배액 EC 센서로 측정이 가능하기 때문에 식 3-5-8의 식에서 C_{sb} 를 C_{drg} 로 치환하고 ΔU 를 농축

양액의 투입량으로 변경하여 식 3-5-8을 다시 정리하면 아래와 같다.

$$V_{inj} = \frac{V_0 C_0 - C_{drg} V_{drg} - C_{drg} V_{sb}}{C_{inj}} \quad (\text{식 3-5-11})$$

V_{inj} : 농축양액의 투입량

C_{inj} : 농축양액의 농도

- 식 3-5-9과 3-5-10을 구조적으로 비교하면 V_{inj} 는 시스템의 제어 입력량 u 로 볼 수 있으며, 오차량은 식 3-5-11의 초기값(목표값, $V_0 C_0$)과 측정항($C_{drg} V_{drg} - C_{drg} V_{sb}$)으로 계산된다.
- 비례제어 방식에서는 비례정수에 따라 시스템의 응답 양상이 달라지기 때문에 순환식 수경재배 시스템의 관수량, 배액율을 적용하여 시뮬레이션을 통하여 비례정수 변화에 따른 시스템 응답의 특성을 확인하였다.

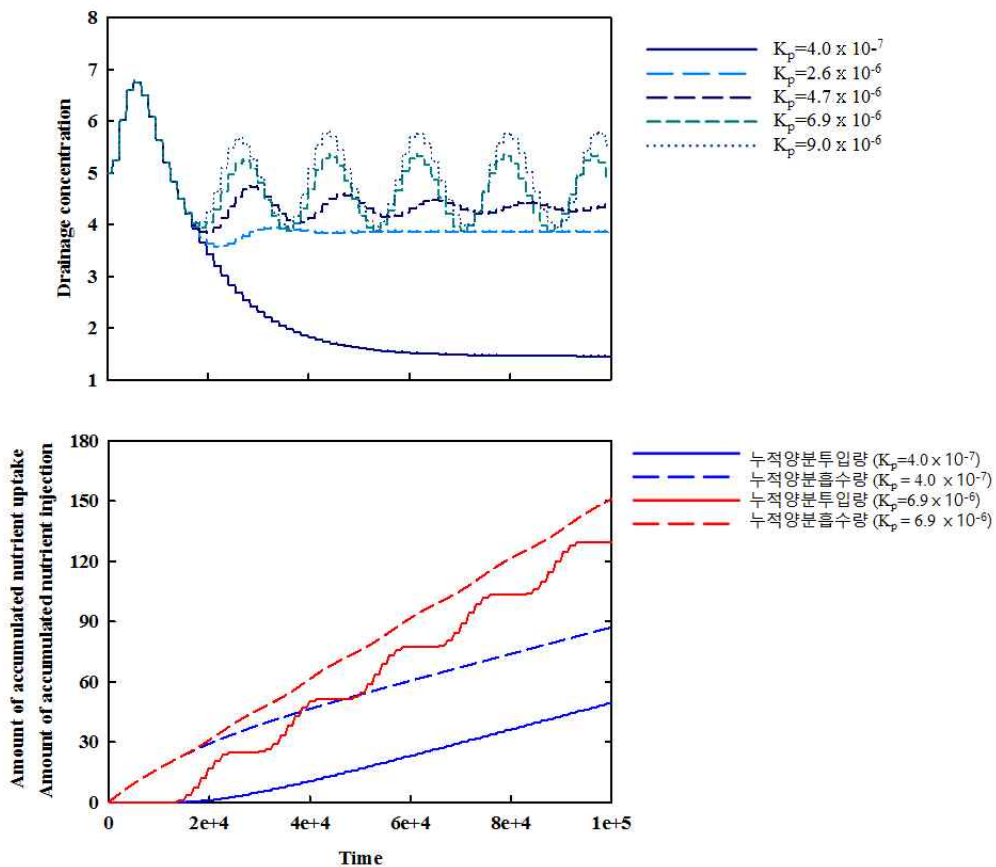


그림 3-5-16 비례정수에 따른 순환식 수경재배 시스템의 응답

(상: 배액 농도, 하: 양분 흡수량 및 양분투입량) 변화

- 비례정수가 작아질수록 오차계산에 따른 양분 투입량 또한 감소하기 때문에 정상상태 오차가 발생하였다(그림 3-5-16). 이를 양분 흡수량과 투입량의 그래프를 통해 확인하면 흡수량과 투입량의 증가 기울기는 유사하게 진행되지만 편차는 좁혀지지 않는 것을 확인할 수 있다.
- 비례정수가 커지게 되면 정상상태 오차는 사라지고 규칙적인 진동이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이를 양분 흡수량과 투입량의 그래프를 통해 확인하면 투입속도는 실제 흡수속도보다 빠르게 증가했다가 제어시스템에 의해 초과 투입이 차단되었다가 다시 빠른 투입으로 흡수량을 추적해가는 것을 확인할 수 있다.
- 실제 양액 혼합 시스템에서는 여러 변수가 있으므로 비례정수를 과도하게 증가시키면 시스템의 EC 변화가 매우 큰 폭으로 진동하게 되어 작물의 생육에 불리한 조건이 되며, 순환식 수경재배 시스템의 응답 특성 상 양분의 투입과 차단 주기가 매우 길어질 수 있어 시스템이 불안정해질 수 있다.
- 따라서 1년차에 이론적으로 도출한 혼합방식 적용에 따른 효과를 실제 시스템에서 안정적으로 구현하기 위해서, 2년차 연구에서 안정화 기술을 확립하기 위해 제어 변수의 추정 방식을 개발하였다. 이는 양분 투입량을 결정하는 지점에서 아래와 같은 순서로 진행된다.
 - 농축양액 투입량을 결정하는 식 3-11을 이용하여 공급량을 계산함.
 - 원수, 농축양액, 배액이 혼합되었을 때의 추정 EC를 계산함.
 - 추정 EC가 시스템의 EC 목표값을 초과할 경우 비례정수를 수정함.
 - EC 목표값을 초과하지 않았거나 비례정수가 조정된 경우 혼합 처리 진행.
 - 이후 발생된 배액의 농도 변화가 허용 범위를 넘어 진동할 경우에 비례정수의 과도한 추정으로 판단하여 하향 조정함.
- 상기의 추정 과정에서 초기 사용되는 비례정수는 식 3-5-8, 3-5-9, 3-5-10의 관계를 통해 분석한 내용을 바탕으로 농축양액 투입량 결정에 사용되는 식 3-5-11에서 결정된다. 이 값을 기준으로 상향조정과 하향조정, 조정값 확정의 과정이 반복 수행된다.

(2) 비료 투입량 최소화 알고리즘이 적용된 순환식 수경재배 시스템의 양분 농도 변화 실증 실험

(가) 관행과 알고리즘 탑재 순환식 수경재배 시스템의 성능 비교

- 관행의 방식으로 재사용 양액을 혼합했을 경우 배액의 EC는 상대적으로 높은 수준으로 유지되었으며, 본 연구에서 개발한 알고리즘이 탑재된 처리의 경우 배액의 EC가 공급 목표 농도인 2.6 dS/m 수준에서 유지되는 것을 확인할 수 있었다(그림 3-5-17). 시뮬레이션을 통해서 예측한대로 비례정수의 추정이 정상적으로 진행되었으며, 시스템의 전체 양분 농도에 있어 과도한 진동 없이 실험 전 기간 동안 안정적으로 운용되었음을 의미한다.

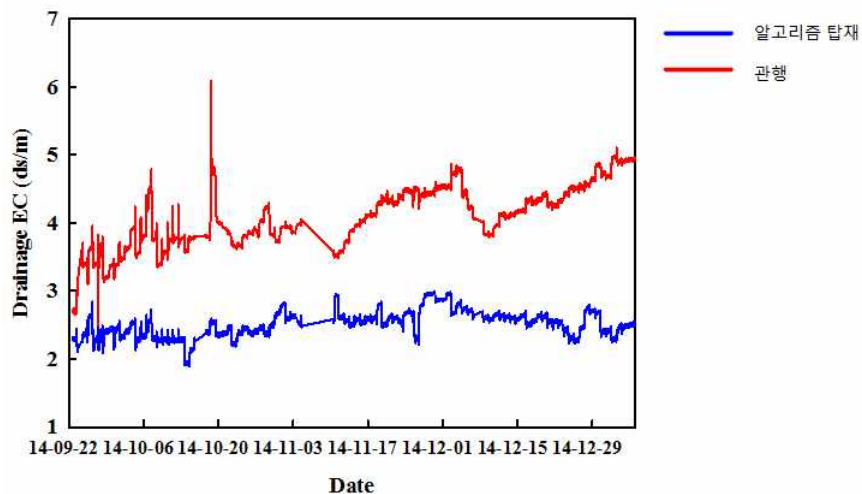


그림 3-5-17. 재배 기간 동안의 순환식 수경재배 양액 혼합 모듈의 배액 EC 농도 변화

- 농축양액 투입량은 관행에 대비해서 낮은 속도로 증가하는 것을 확인할 수 있으며 총 투입량 또한 관행에 비해 작게 투입되었다(그림 3-5-18). 이는 알고리즘이 정상적으로 작동하여 시뮬레이션을 통해서 예측되었던 비료 투입량 절감효과가 나타난 것으로 볼 수 있다.
- 배지 내 EC를 측정한 결과, 관행에 대비해서 배지 EC 유지 성능에서 안정적인 결과를 보여주었다(그림 3-5-19). 관행의 경우, 배지 내에 잔류하고 있는 양분의 양이 상대적으로 더 많다는 것을 의미하며, 이는 관수량이 증가했을 때 관행 시스템의 배액 농도를 증가시켜 새로운 농축양액의 공급 차단과 배액 탱크내 저장량의 증가로 나타나게 된다.

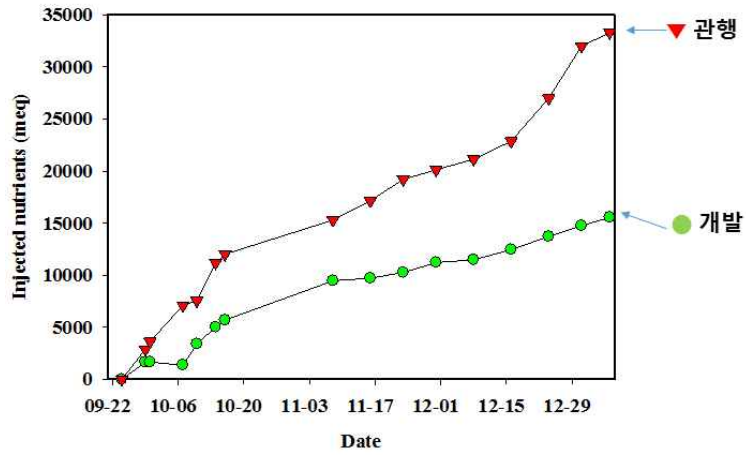


그림 3-5-18. 재배 기간 동안의 순환식 수경재배 양액 혼합 모듈의 누적 투입 양분량 비교

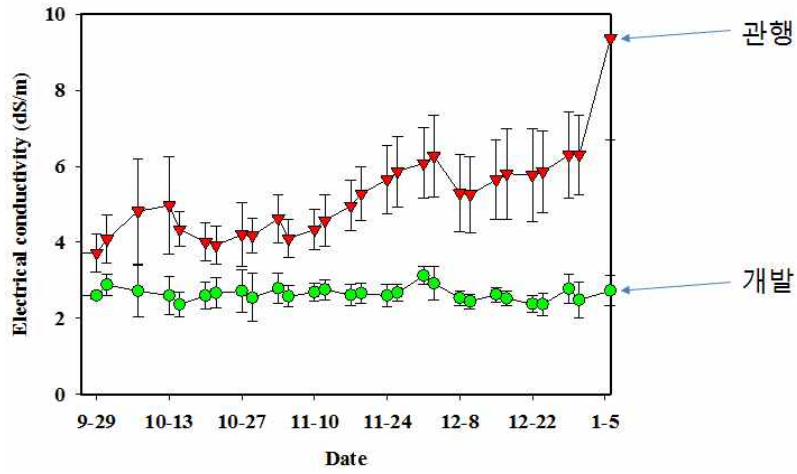


그림 3-5-19. 재배 기간 동안의 순환식 수경재배 양액 혼합 모듈의 배지 내 양액 농도 비교

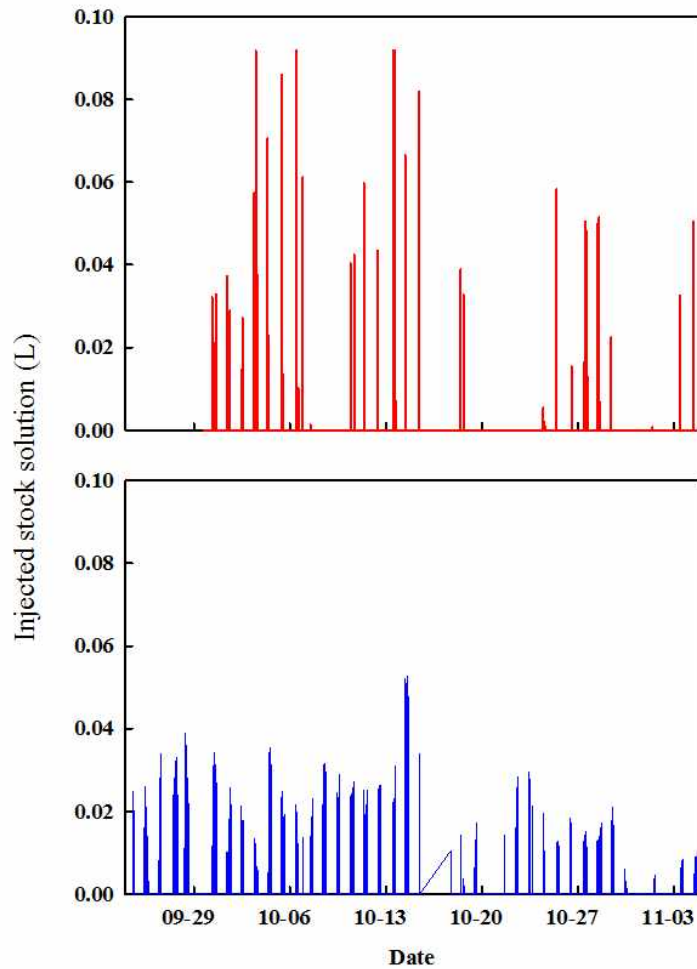


그림 3-5-20. 양액 혼합 알고리즘이 탑재된 시스템에서의 농축양액 투입량 변화
(상: 관행, 하: 알고리즘 탑재)

- 농축양액 투입량의 증가와 감소를 반복하며 시스템에 정상적으로 투입되었음을 확인할 수 있다(그림 3-5-20). 이는 양분 투입량 결정에 필요한 비례정수의 조정과정과 그에 따른 농축양액의 투입이 시뮬레이션에서와 같이 과소, 과도 추정에 따른 제어값의 상대적으로 큰 진동발생이나 목표값을 많이 벗어난 수준에서의 정상상태오차의 최소화 과정이 정상적으로 이루어졌음을 의미한다. 반면 관행의 경우는 상대적으로 짧은 구간에 많은 농축양액을 투입하고 투입이 차단되는 구간이 더욱 길게 나타나게 된다. 불규칙한 농축양액의 투입속도는 농축양액의 투입으로 시스템 내 양분교정이 이뤄지는 조건에서는 양분 균형제어에 있어 불리한 요인으로 작용하므로, 알고리즘이 탑재된 처리에서 관찰된 규칙적인 양분 투입은 관행에 비해서 양분 교정이 가능함을 의미한다.

(나) 순환식 수경재배 시스템에서의 양분 간의 비율 변화

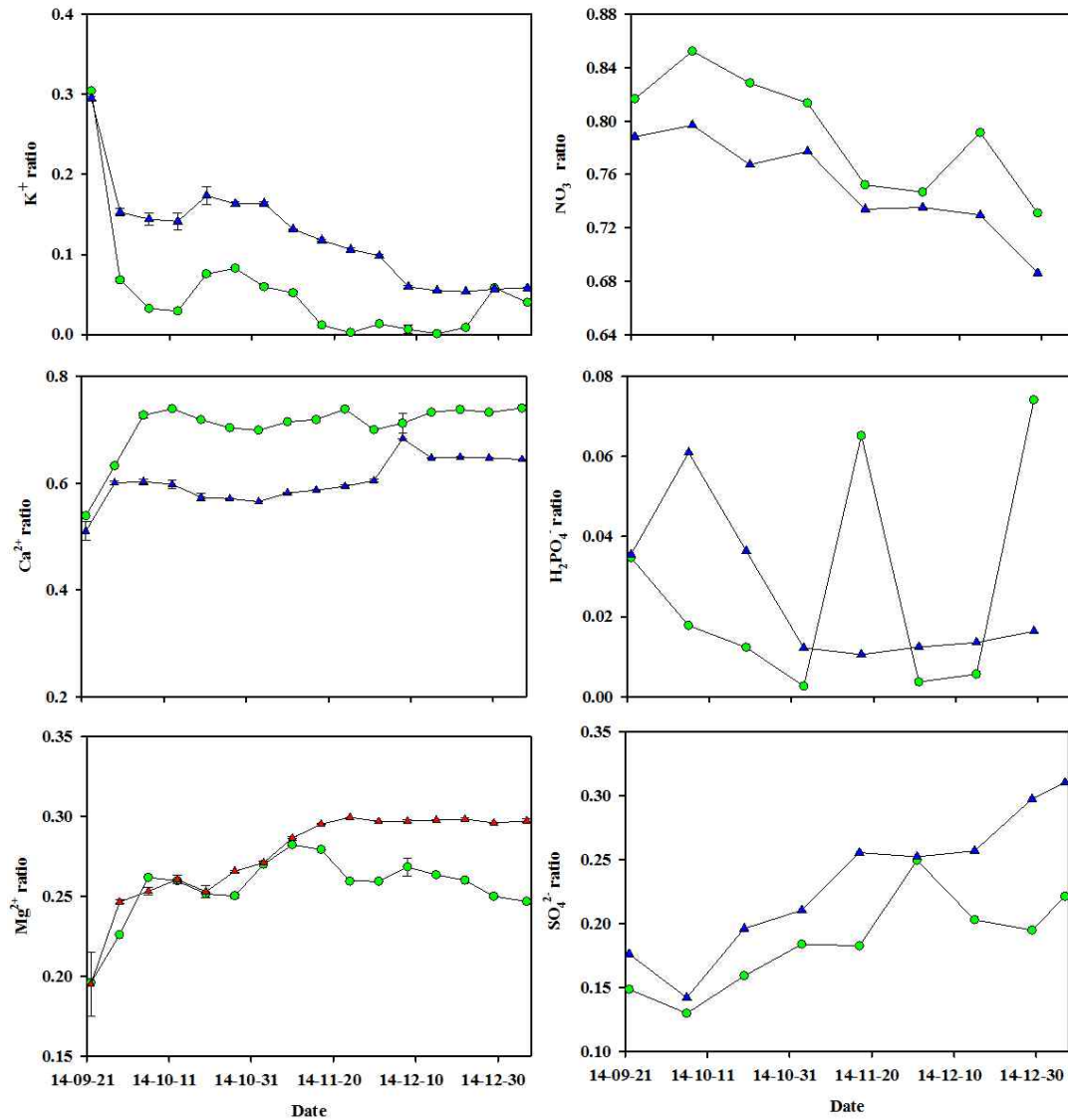


그림 3-5-21. 배지 내 양분 간 균형 변화 (▲ 관행, ● 알고리즘 탑재)

- 순환식 수경재배 시스템의 배지 내 양분의 비율 변화의 전체적인 변화 경향은 두 처리 모두 같게 나타났다(그림 3-5-21). 관찰된 비율 변화의 경향은 실험기간동안 역전되지는 않았으며, 실험기간 동안의 이는 각 양분의 흡수 속도는 환경 영향을 받아 변할 수 있지만 비율 변화의 경향을 역전시킬만한 흡수량의 급진적인 변화는 없음을 의미한다. 다만 H₂PO₄⁻와 같은 경우는 초반에 빠르게 감소하였기 때문에 양분의 투입에 따른 반응이 민감하게 나타난 것으로 판단된다. 관행과 알고리즘이 탑재된 순환식 수경재배 시스템을 비교했을 때는 양이온의 칼륨과 칼슘에서 비율변화 차이가 상대적으로 크게 나타났다.
- 이러한 결과에 대하여, 양분 흡수 패턴 변화를 기반으로 분석하기 위해 실험에 사용

한 양액혼합 시스템에서 측정된 양분 투입량과 배지 샘플링 데이터를 바탕으로 추정된 양분 흡수량을 확인하였다. 배지의 함수율과 배지에서의 양액 추출된 양액은 양분의 흡수량 계산에 사용되기 때문에 함수율의 급변으로 인한 오차 발생을 최소화하기 위해 그림 3-22와 같이 일중 오후 광량 증가에 따라 높아진 관수 빈도로 인해 배지의 함수율 변화가 일중 최소화되는 오후에 배지 내 양액 샘플을 실시하였다.

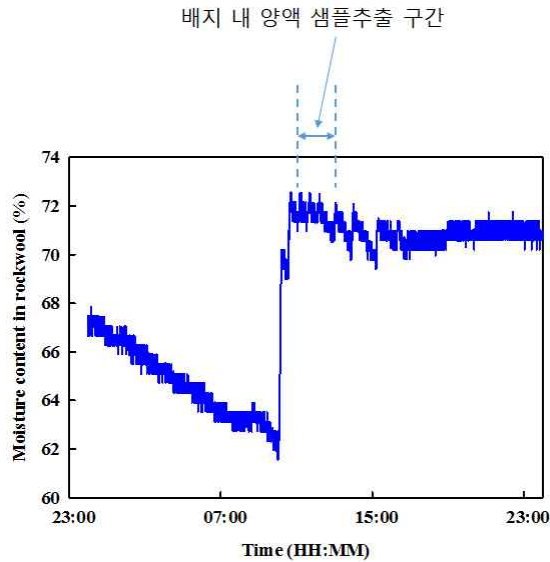


그림 3-5-22. 배지 내 양액 샘플 추출 구간 (2014.11.20의 예)

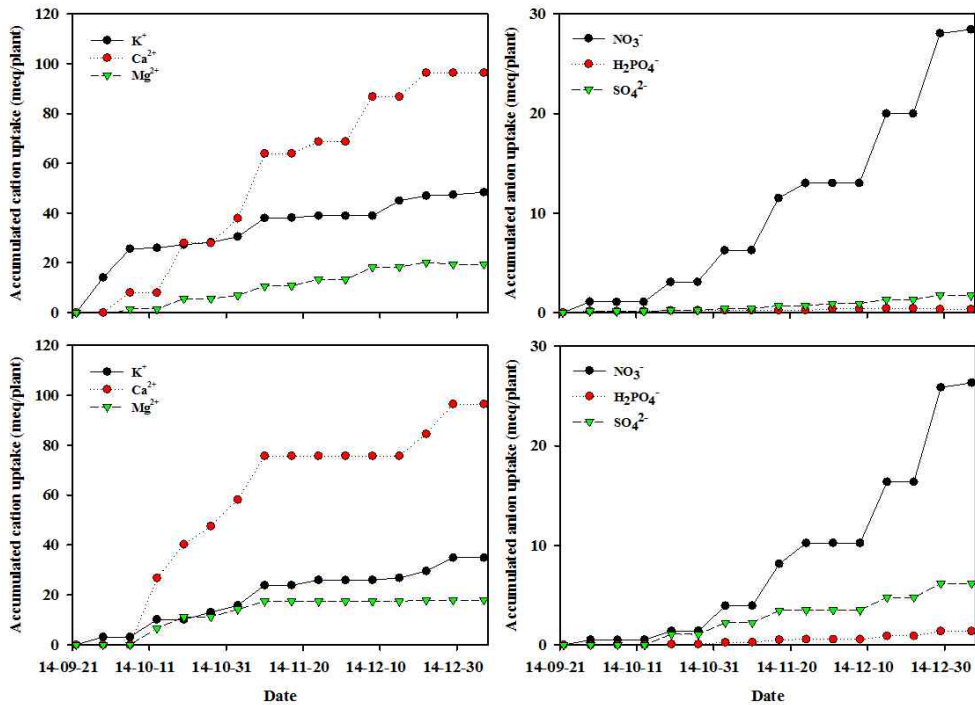


그림 3-5-23. 알고리즘 탑재 방식(상)과 관형 순환식 수경재배 시스템(하)의 누적 양분 흡수량 변화

- 알고리즘 탑재 시스템의 양이온 흡수량 변화의 경우 칼륨의 흡수량이 초반에 매우 빠르게 증가하다가 이후 기온기가 점점 일정해지는 경향을 나타냈다(그림 3-5-23). 초반에 빠른 흡수를 통해 시스템의 칼륨 양분 농도가 감소하였다가 낮은 농도로 공급됨에 따라 흡수 속도도 둔화된 것으로 판단된다. 질산태 이온의 경우 두 처리에서 모두 흡수량이 빠르게 증가하는 것으로 나타났다. 질산태 이온과 칼륨이온은 비료염으로서 동시에 제공될 수 있는 부분으로써, 이러한 흡수량의 변화는 순환식 수경재배 시스템에서 농축양액 성분 조절을 통한 양분 교정에 있어 유리하다. 나머지 이온들의 경우 흡수량에 있어서 이 두 이온들에 비해 상대적으로 낮게 나타났으며 따라서 양분 균형의 변화에 두 이온에 비해 비교적 기여도가 낮게 나타났다.
- 큰 폭으로 변하는 이온 같은 경우 주기적인 분석 또는 2가지 이온에 대해서만 실시간 측정이 가능해질 경우 시스템의 안정성에 크게 기여할 수 있음을 의미한다.

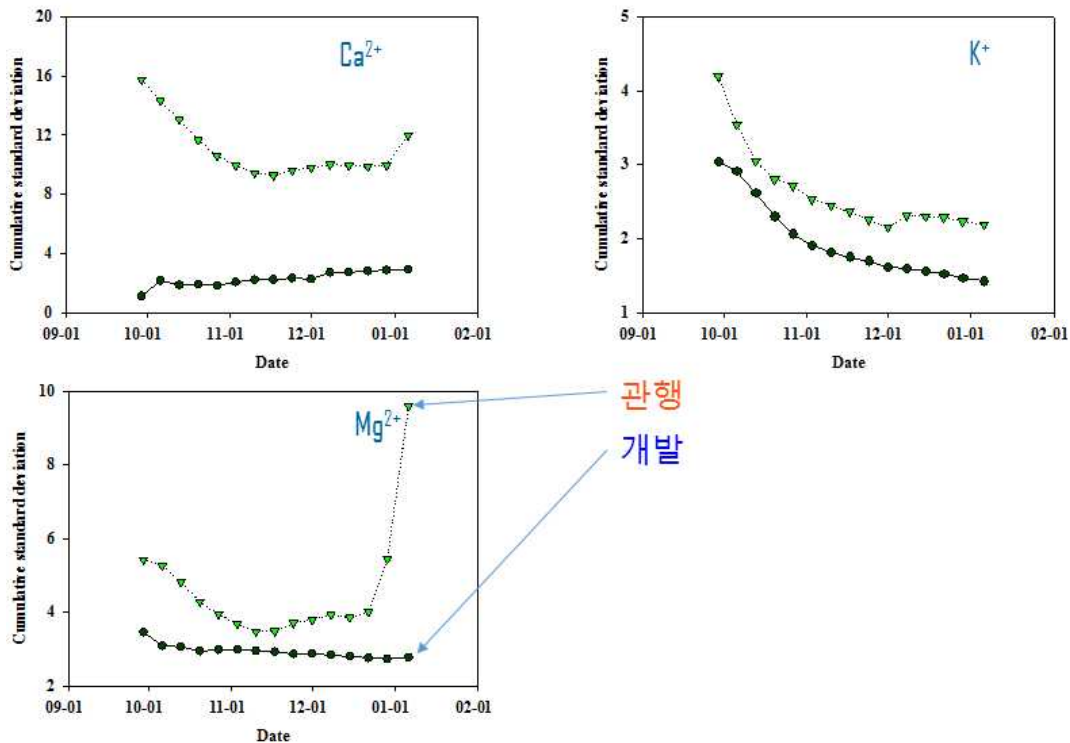


그림 3-5-24. 알고리즘 탑재 방식과 관행 방식의 수경재배 시스템의 양분 농도 간 누적 표준 편차 변화

- 양분 농도 간 누적 표준 편차의 변화는 실험 기간 동안 관행에 비해 표준 편차가 낮게 유지되는 것을 확인할 수 있으며(그림 3-5-24), 이는 개발된 알고리즘 탑재 방식이 관행에 비해 양분 농도의 변화가 상대적으로 빠르게 수렴구간으로 진입했음을 의미한다. 이는 양분 균형 변화의 제어에 있어 유리한 부분으로 작용할 수 있다.

(다) 관행과 알고리즘 탑재 순환식 수경재배 시스템의 식물 생육 비교

- 실험 재배 기간 동안 파프리카를 수확량을 기록하여 개체 당 생산량을 비교하였다(그림 3-5-25). 관행 방식의 순환식 수경재배에서의 개체당 평균 생산량은 827.5 g/plant (SD±106.5)였으며, 본 연구를 통해 개발된 알고리즘 탑재 방식의 경우 838.8 g/plant (SD±109.8)로 나타났다. 이는 본 실험에서 적용한 재식밀도인 4주/m² 와 재배실험 기간을 고려했을 때, 파프리카 연간 평균 생산량인 14.5 kg/m² (파프리카 자조회 2014년 자료 참조)에 근접하는 생산량으로 판단할 수 있다.

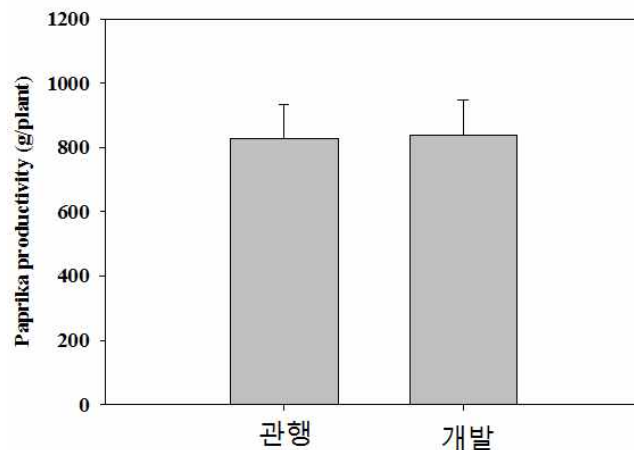


그림 3-5-25. 재배 기간 동안의 순환식 수경재배 양액 혼합 모듈에 따른 개체당 생산성

- 파프리카 상위엽의 SPAD값 측정은 실험 처리 전부터 지속적으로 수행하였으며, 실험 처리 이전에 값이 증가하다가 SPAD 값이 약 60에 이르렀을 때 증가 경향은 둔화되었다(그림 3-5-26). 이후 실험처리가 들어갔으며 두 처리 간에는 유의적인 차이가 없었다.

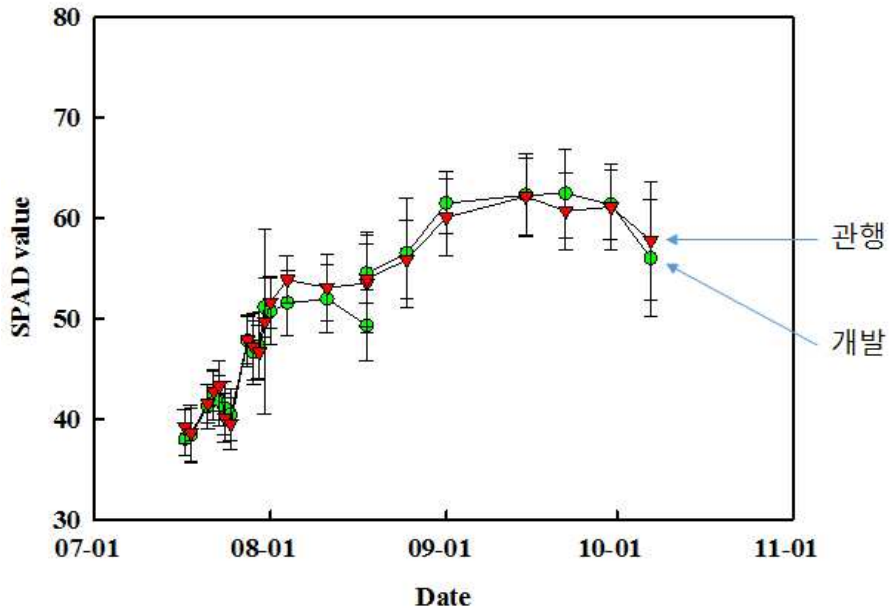


그림 3-5-26. 파프리카 상위엽의 SPAD 값 변화 (실험처리 전 - 실험 기간)

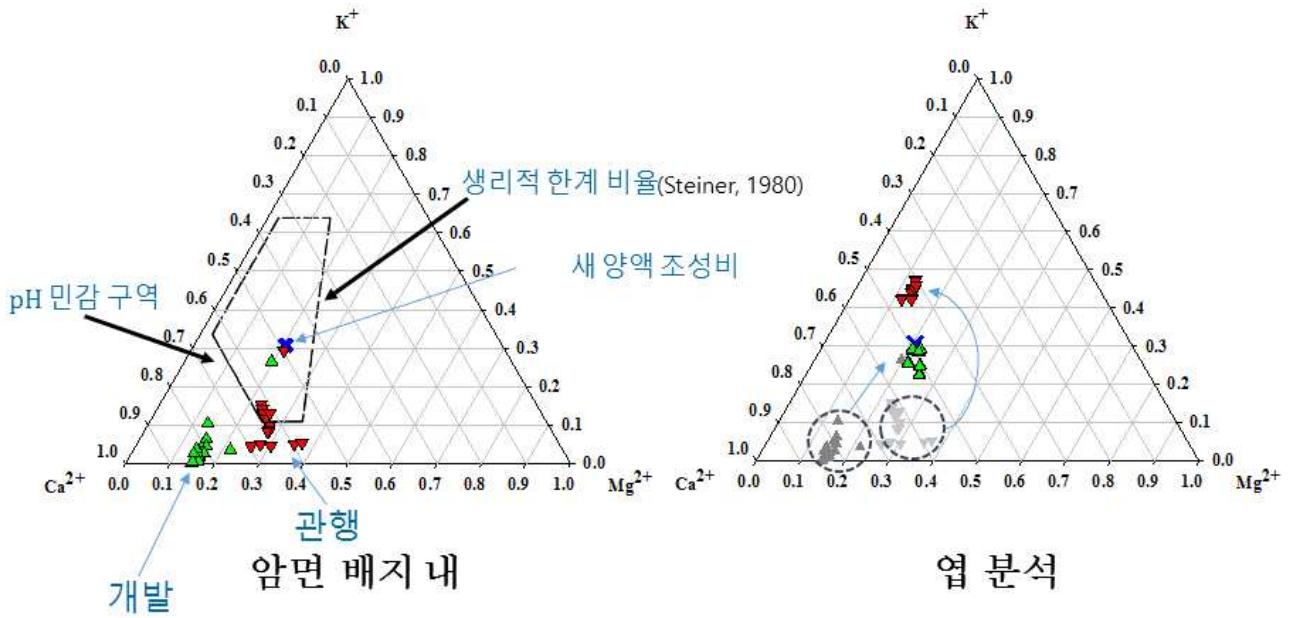


그림 3-5-27. 좌 : 실험 기간 동안의 이온 균형 변화 (점선 : 생리적 한계 비율, 실선 : pH에 따른 침전 가능 구역, Steiner(1980)의 universal solution 참조), 우 : 엽분석 결과

표 3-5-2. 관행 혼합방식과 개발된 알고리즘 적용 혼합방식의 파프리카 엽분석 결과 비교

혼합방식 처리	엽 건물중 함량 (% of dry wt.)		
	Ca	K	Mg
([†] 목표 백분율)	(1.5~3.5)	(3~6)	(0.3~5.8)
관행 혼합방식	4.06	8.21	0.74
개발 혼합방식	4.32	4.45	1.18
유의성	NS	**	**

([†]Growing greenhouse pepper (2005); P <0.01 by t-test)

- 실험 기간 동안의 배지 내 이온 균형 변화를 측정된 결과, 관행에 비해 개발된 방식이 칼슘이 집적되는 경향을 나타냈으나 Steinier의 universal solution 기준으로 봤을 때 이는 생리적인 한계 지점보다는 pH에 의한 침전에 취약한 구역으로의 이동으로 나타났다(그림 3-5-27). 이는 개발 방식처리와 관행 처리에 있어서 이온 비율의 변화가 작물에게 유의적인 생육 차이를 나타낼 만큼의 조건을 만들지는 않은 것으로 해석될 수 있다.
- 엽분석의 결과, 재사용 양액 내 양분의 비율과는 다르게 표준 양액의 비율 범위로 이동하여 흡수 선택성이 유지되었음을 확인할 수 있다(그림 3-5-27). 엽분석 결과를 백분율 농도로 비교한 표 3-5-2에서의 경우 각 처리 사이에 농도의 유의차는 관찰될 수 있었으나 재배 매뉴얼 제공 기준 대비 목표 범위에서 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 즉 개발된 알고리즘 처리구에서 특정 양분의 비율이 상대적으로 낮아지는 현상이 관찰되었으나 이것이 결핍의 영향을 주지는 않았음을 확인할 수 있다. 이는 특정 이온의 비율은 낮게 유지되었으나 개발된 알고리즘 처리구의 균일한 농축양액 공급 빈도에 따른 지속적인 공급의 영향으로 해석할 수 있다.

4. 주기적 양분 농도분석의 피드백 제어를 통한 순환식 수경재배 시스템 내 양분 균형 제어의 시뮬레이션 분석

가. 연구배경

- EC를 기반으로 하는 순환식 수경재배 시스템은 주기적인 양분 분석을 통해 농축양액의 비율

을 교정하는 방법을 이용하고 있다. 관행의 양분 균형 조정 방식의 경우 목표 농도와 현재 농도과의 편차를 구하여 편차만큼의 농축 양액 내 비율을 조정하는 것으로 양분을 제어하고 있다.

- 기존의 연구에서는 EC 기준 순환식 수경재배 시스템에서의 양분 균형 제어는 상대적으로 매우 어려운 것으로 보고되고 있으며, 목표치에 근접한 수준으로 양분의 균형을 제어하는 것에 한계가 있음이 보고된 바 있다(Savvas, 2002).
- 주기적인 분석을 통해 양분을 교정하는 순환식 수경재배 시스템은 제어 관점에서 목표값과의 오차를 비교하는 피드백 주기가 상대적으로 매우 긴 특성을 가지고 있는 시스템으로 볼 수 있다.
- 양분의 균형을 제어하는 방식은 목표값과의 오차만큼 제어량을 결정하는 비례제어 방식을 사용하고 있는 것으로 볼 수 있으며, 이러한 방식은 항상 정상상태 오차(steady-state error)의 발생 가능성을 내포하고 있다.

나. 연구개발 목표

- 대상 작물의 이온 흡수 패턴을 고려한 양분 투입비의 동적 제어기술 개발
- 주기적 이온 분석 피드백 제어를 통한 순환식 시스템 내 이온 제어 오차 최소화 기술 개발

다. 이론적 분석 방법

- 본 연구를 통해 구축한 순환식 수경재배 시스템의 모델을 이용하여 순환식 수경재배 시스템에서의 관행 양분균형 제어 방식을 적용 했을 때의 균형 제어 효과 비교 분석
- PID 제어 이론의 적용을 통한 양분 균형 제어 방식 분석

라. 연구수행 내용 및 결과

- 그림 3-5-28은 일정한 조성의 농축양액으로 재사용 양액을 혼합하다가 약 4주후 양분의 농도를 분석한 후 농축 양액 내 K^+ 양분의 비율을 조정한 결과를 보여준다. 완전 폐쇄형의 경우 초기값 대비 비율의 편차가 가장 크게 발생한 상황임에도 불구하고 제어량의 변화는 가장 작게 나타났다. 이는 관행의 양분 균형 제어 방식, 즉 비례제어방식 만으로는 완전폐쇄형 순환식 수경재배에서 목표치에 근접하게 제어하기 어렵다.

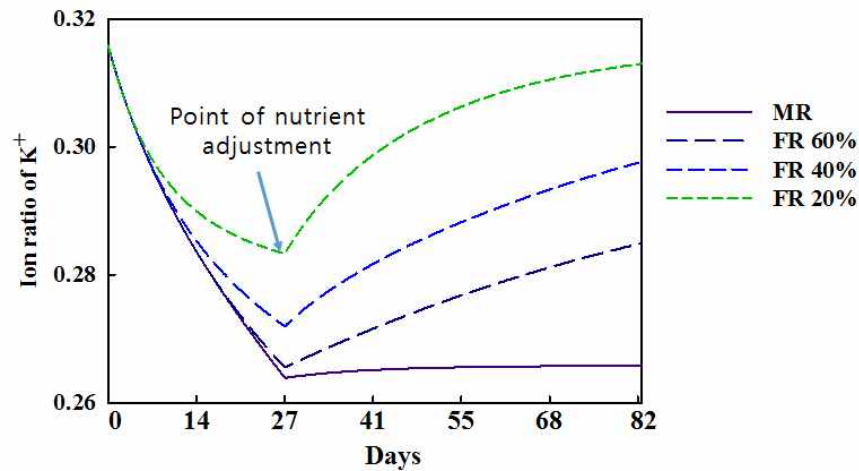


그림 3-5-28. 관행 순환식 수경재배 시스템에서의 양분 균형 제어 시뮬레이션(K^+ 의 비율 제어)

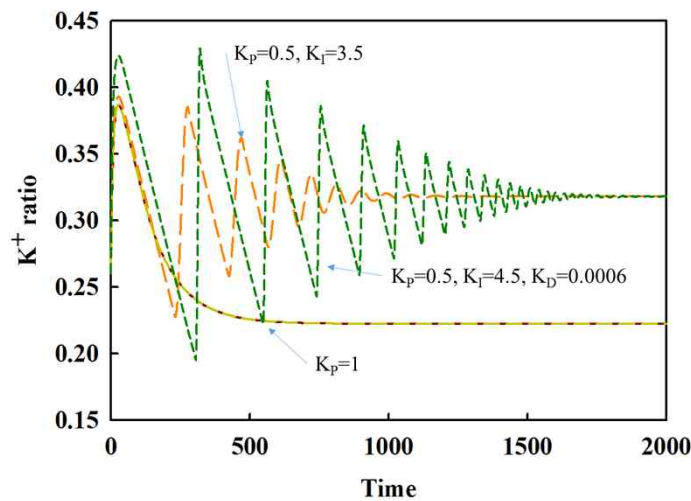


그림 3-5-29. 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 양분 균형제어에 PID 제어 적용 결과

- 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템에서 양분 균형제어에 P, PI, 또는 PID 제어 방식을 적용한 결과, 순환식 수경재배 조건에서 특정 목표값에 수렴하며 이는 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템에서도 이온 균형 제어방식에 따라 이온 균형의 정상상태의 발생지점이 달라질 수 있음을 의미한다(그림 3-5-29).
- 기존의 순환식 수경재배 연구에서도 이온 농도의 변화율이 점점 낮아져 변화가 거의 없는 현상은 관찰되지만(Savvas, 2002; Hao와 Papadopoulos, 2002), 이는 목표 수준에서 상당 부분 이탈한 범위에서 발생하였다. 식물의 양분 흡수 및 환경 변화와 같은 동적 변수들이 포함된 조건에서 이온 농도 변화의 정상상태를 관찰할 수 있다는 것은, 적절한 제어 기술을 적용하여 정상상태 발생 지점을 제어할 수 있음을 의미한다.

- PID 제어 이론의 적용 시 각 항의 계수 조정에 따라 수렴하는 과정에서 비율의 변화 폭에 영향이 있을 수 있으며, 이는 식물의 생육과 직결되어 있는 부분이므로 최소의 진폭으로 목표값으로 빠르게 수렴해갈 수 있도록 계수 조정이 필요하다.
- 상기한 내용들을 종합하면, EC 기반 완전 폐쇄형 순환식 수경재배 시스템에서 본 연구에서 개발한 재사용양액 혼합 방식을 적용하면 양분의 소모량을 줄이면서, 양분의 균형의 정상상태 제어를 통해 불균형 발생을 최소화 할 수 있다.
- Na와 Cl은 다른 이온에 비해 흡수량이 매우 적기 때문에, 약간의 투입농도로도 양액 내 누적 현상이 발생하게 된다. 그러나 이 이온들의 경우 흡수량이 매우 낮기 때문에 원수 내 농도에 따라 순환식 수경재배 시스템 내에 존재하게 될 농도를 예측 가능하다.
- 농가가 이용하는 원수의 NaCl 농도 수준에서, 파프리카의 생육에 두 이온으로 인한 영향이 나타나기까지의 작물의 누적 증산량은 아래의 식으로 추정 가능하다.

$$ET_{cum} = \frac{[V_T(I_{thr} - I_{init}) + U_I]}{I_{fw}} \quad (\text{식 3-5-12})$$

ET_{cum} : Na 또는 Cl이 독성농도에 도달하기까지 필요한 누적 증산량

V_T : 순환식 수경재배 포장 내 양액의 총 부피

I_{thr} : Na 또는 Cl의 독성 농도

I_{init} : 순환식 수경재배 양액 내 Na 또는 Cl의 초기 농도

U_I : 식물의 Na 또는 Cl 흡수 농도

I_{fw} : 원수 내 Na 또는 Cl의 농도

- 원수로부터 유입되는 Na와 Cl은 별도의 제거 기술을 사용하지 않는 한 제어할 수 있는 요인에 해당되지 않으므로, 역삼투와 같은 제거 기술의 도입이 어려울 경우에는 상기한 방법으로 재배의 한계 수준을 미리 파악할 필요가 있다.

5. 순환식 수경재배 시스템의 양분 균형제어 알고리즘의 개발 및 실증

가. 연구배경

- 일반적으로 상용화된 수경재배 시스템에서의 양분 관리는 전체 양분 농도의 간접적 지표인

양액의 EC 측정을 기반으로 수행되며, 개별 양분 농도변화의 즉각적인 확인은 어렵다. 그러나 개별 양분의 농도변화와 그에 따른 양분 간 상대적 비율의 변화는 길항작용과 침전 발생에 영향을 미치는 주요인이며, 이는 작물의 생산성과 연결되어 있다. 따라서 완충용량이 낮은 수경재배 시스템에서는 토경재배에 비해 더욱 적극적인 양분 제어가 필요하다.

- 비순환식 수경재배 방식은 시스템의 구성이 단순하며, 과량의 새 양액을 근권부로 공급하여 교체 효과를 통해 양분의 농도 변화를 제어하기 때문에 EC 측정만으로도 근권부의 양분을 적정 수준에서 관리할 수 있다. 그러나 이 방식은 경제적으로는 비료와 물의 소모량 증가와 환경적으로는 영양염류의 외부 방류로 인한 환경부하 증가 측면에서의 문제가 지적되고 있으며, 순환식 수경재배 시스템으로의 전환에 대한 요구는 지속적으로 증가하고 있다.
- 이에 따라 순환식 수경재배 시스템의 확산을 위한 안정적인 기술에 대한 요구 또한 증가하고 있으며, 이에 종래의 양분 제어 분야에서는 크게 두 방향에서의 기술적인 접근이 이뤄져 왔다. 하나는 이온센서를 이용한 시스템 상에서의 즉각적인 양액 분석 방식이며 다른 하나는 EC 측정을 기반으로 하면서 주기적인 양분 분석을 통해 양분을 관리하는 방식이다.
- 이온센서를 통한 시스템 상에서의 즉각적인 측정 방식은 가장 이상적이기는 하나 아직 실제 현장에서 안정적으로 운영되기에는 센서 자체의 내구성 및 성능 개선을 위한 연구를 필요로 하는 단계이다. EC 측정을 기반으로 주기적인 양분 분석을 통한 순환식 수경재배 양액 관리 방식은 EC 센서의 기능적인 안정성과 내구성으로 상업 농가 현장으로의 보급 및 확산에는 유리한 점이 있지만, 개별 양분의 농도 제어 측면에서는 아직 체계적인 기술이 제시된 바가 없다.
- 기본적으로 1~2주 단위의 분석을 통해 농축 양액의 조성을 변경하는 방식이 있기는 하나 (Savvas, 2002), 일반적으로는 분석 후 목표 농도값 대비 현재 농도의 차이를 계산하고 이를 농축양액의 양분 조성에 반영하는 형태를 따른다. 그러나 소모량에 대한 보충 형태를 따르기 때문에 1~2주 단위의 분석 간격의 조건에 제어 목표값에 근접하기 어려운 경우가 발생할 수 있다.

나. 연구개발 목표

- 순환식 수경재배 시스템의 양분 균형제어 알고리즘의 개발 및 실증

다. 재료 및 방법

- (1) 순환식 수경재배 시스템의 양분 균형제어 알고리즘의 개발

- 상기 연구 4의 양분 균형제어의 이론적 분석을 통해 도출한 결론을 바탕으로 양분 균형제어 알고리즘을 설계

(2) 순환식 수경재배 시스템의 양분 균형제어 알고리즘의 실증 실험

- 실험장소 : 서울대학교 농생대의 부속농장 유리온실
- 공시작물 : 파프리카
- 실험장치
 - 총 4개의 성능평가 시스템이 구축
 - 비순환식 수경재배와 개발된 양분 혼합 알고리즘과 양분 균형 제어 알고리즘이 탑재된 수경재배 방식에 각각 2개의 양액 혼합 모듈을 할당
- 측정항목 : 배지 내 이온 농도 변화 측정, 수확량, 과실 당도, 배꼽썩음과 발생률
- 실험기간 : 2016년 4월 ~ 2016년 7월

라. 연구수행 내용 및 결과

(1) 순환식 수경재배 시스템의 양분 균형제어 알고리즘의 개발

- 순환식 수경재배 시스템에서 각 양분의 농도 변화는 일반적으로 식물 양분흡수의 대표적 모델인 Michaelis-Menten 방정식으로 표현될 수 있으며 이 모델은 일정 범위의 조건에서 양분 농도의 변화가 일정한 지점 또는 범위로 수렴 가능하다는 이론적인 전제 설정한다.
- 상기의 모델로 설명되는 순환식 수경재배 시스템에서 양분 흡수와 그에 따른 양액 내 농도 변화가 목표 범위 내로 수렴될 수 있도록 제어하기 위해서는, 첫째로 해당 재배 시스템에서의 양분 흡수 모델 파라미터를 추정하고 이를 대입하여 농축양액 내 양분 간의 비율을 입력변수로 하는 시스템의 양분 흡수 모델 방정식의 해를 산출하거나 적분제어 방식의 피드백 제어를 통해 그 해에 근접해가는 것, 둘째로는 주기적인 분석으로 인해 발생하는 측정 공백 기간 동안의 변화량이 상대적으로 클 경우 이를 단기간에 목표 범위 내로 회복시키는 것이 있다.
- 이를 구현하기 위해, 양분 흡수 파라미터를 추정시 분석 시점까지의 입력 변수와 분석결과를 바탕으로 progress curve analysis(Golicnik, 2011)를 통해 재배와 동시에 추정작업이 수행될 수 있도록 하는 것; 분석결과를 통해 산출한 재배 시스템 내 양분 간의 비율을 출력

으로 하며 농축양액 내 양분 간의 비율을 입력으로 하고 적분제어 방식의 피드백 입력을 수행하는 것; 주기적인 양분 분석을 통하여 단기간에 목표 범위 내로 회복시킬 수 있도록 특정 양분에 대한 추가 투입량을 제시하는 것에 의해 달성된다.

- 재배가 시작됨에 따라 진행되는 양분의 분석과정은 기본적으로 사용자가 입력한 기간에 따라 주기적으로 수행되며, 이를 바탕으로 한 양분 농도의 교정은 배액 내 양분 농도의 분석과정과, 이를 바탕으로 농축양액 내 양분의 교정값을 산출하는 과정, 산출된 교정값을 바탕으로 현재 사용자가 보유한 비료염의 자원을 고려하여 새롭게 조성할 농축양액의 비료 투입량 계산과정으로 구성된다.
- 교정의 대상이 되는 양분의 종류는 다량원소와 미량원소로 구분하며, 다량원소는 다시 양이온과 음이온으로 구분되고, 양이온은 NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 로, 음이온은 NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} 로 구성된다. 다량원소가 함유된 수정재배용 비료는 일반적으로 이온결합화합물을 사용하므로 비료 투입량 계산 시의 효율을 위해 당량농도로 변환할 필요가 있으며 이를 위해 각각의 원자가가 프로그램에 될 필요가 있으며, NH_4^+ 는 1, K^+ 는 1, Ca^{2+} 는 2, Mg^{2+} 는 2, NO_3^- 는 1, H_2PO_4^- 는 1, SO_4^{2-} 는 2로 구성된다.
- 상기의 순환식 수정재배 시스템 내 양분 분석을 통해 획득한 개별 양분의 농도 데이터는 양분 비율 제어를 위해 각 당량농도의 상대적인 비율로 변환되며, 사용자가 입력한 각 양분의 제어 목표 농도 또한 비율로 변환된다. 이후 순환식 수정재배 시스템 내 양분 간의 비율을 제어하는 방식은 새롭게 조제할 농축양액의 조성을 변경하는 것과 특정 비료를 혼합탱크에 직접 투입하는 것으로 구성된다.
- 새롭게 조제할 농축양액의 조성을 변경하는 것의 경우 2개의 경로를 통해 수행되며, 이는 첫째, 적분제어 개념 적용 과정(Ⓐ)과 둘째, progress curve analysis를 통한 양분 흡수파라미터의 추정과 이를 대입한 방정식의 해 산출과정(Ⓑ)으로 구성된다. 첫번째 방식은 제어하고자 하는 분석 주기에 따른 반복적인 양분 분석 결과의 피드백을 통해 각 양분의 비율이 목표로 하는 범위 내에서 정상상태(steady-state)가 유지될 수 있도록 하는 기능을 수행하며, 두번째 방식은 progress curve analysis를 통해 양분 흡수 모델의 파라미터를 추정하며 이를 통해 방정식의 해를 산출하여 첫번째 방식의 피드백 횟수를 단축시키기 위한 기능을 수행한다. 상기한 특정 비료를 혼합탱크에 직접 투입하는 방식(Ⓒ)은 분석 및 교정 시점에서 특정 양분이 위험범위를 초과하였을 경우 해당 양분의 비율을 단기간에 회복시키기 위한 기능을 수행한다.
- 먼저, 다량이온의 농축양액 내 양분 비율의 조정을 통한 순환식 수정재배 시스템 내의 양분 비율 제어의 과정은 개별 양분의 질량농도 데이터를 당량농도 데이터로 변환되며 이때 식 3-5-13을 사용한다.

$$q_i = \frac{m_i}{\left(\frac{w_i}{v_i}\right)} \quad (\text{식 3-5-13})$$

- 당량농도로 변환된 다량이온은 양이온과 음이온으로 구분되어 각각의 비율로 변환되며 이때 식 3-5-14를 사용한다.

$$R_i = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^q q_i} \quad (\text{식 3-5-14})$$

$$i = Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^+, NH_4^+ \text{ 또는}$$

$$i = NO_3^-, SO_4^{2-}, H_2PO_4^-$$

- 식 3-5-13, 3-5-14를 이용하여 양분 분석 데이터에서 각 양이온의 농도는 양이온 전체 당량농도의 합에 대한 비율로 각 음이온의 농도는 음이온 전체 당량농도의 합에 대한 비율로 변환되며, 제어 목표에 해당하는 목표 양분 농도 또한 상기한 내용과 동일한 과정을 통해 상대적인 비율로 변환된다.
- 순환식 수경재배 시스템에서의 재배 시작 이후 양액의 최초 분석 시 ㉠의 방식을 이용하여 농축 양액 내 개별 양분의 양이온, 음이온별 당량농도 비율을 조정하며, 비율의 조정값은 식 3-5-15를 이용하여 구한다.

$$R_i^{cor} = R_i^{j-1} + p(R_i^{tar} - R_i^j) \quad (\text{식 3-5-15})$$

- ㉠의 방식의 경우 간략화된 순환식 수경재배 시스템의 모델을 통해 수치해석을 수행하며 이때의 기본적인 모델은 식 3-5-16~18과 같다.

$$\frac{dC_i^{sb}}{dt} = J_{irr}q_i^{mx} - \frac{V_{max}q_i^{sb}}{K_i^m + q_i^{sb}} - J_{drg}q_i^{sb} \quad (\text{식 3-5-16} \sim \text{3-5-18})$$

$$\frac{dC_i^{mx}}{dt} = J_{drg}q_i^{sb} - J_{irr}q_i^{mx} + J_{inj}q_i^{stk}$$

$$q_i^{sb} = \frac{C_i^{sb}}{V_{sb}}, q_i^{mx} = \frac{C_i^{mx}}{V_{mx}}$$

C_i^{cub} : 수경재배 시스템의 배지 내 이온 i의 총 당량(meq)

J_{irr} : 관수 유량(L/min)

q_i^{mx} : 혼합탱크 내 이온 i의 당량농도(meq/L)

q_i^{sb} : 이온 i의 배지 내 당량농도(meq/L)

J_{drg} : 배액의 유량

c_i^{mx} : 혼합탱크 내 이온 i의 총 당량(meq)

J_{inj} : 농축양액의 공급유량 (L/min)

q_i^{stk} : 농축양액 내 이온 i의 당량농도

V_{sb} : 배지의 부피

V_{mx} : 혼합탱크의 부피

V_i^{max} : 양분 흡수 모델 상수(meq/L)

K_i^m : 양분 흡수 모델 상수

- 이중에서 입력을 요하는 매개변수는 J_{irr} , J_{drg} , J_{inj} , q_i^{stk} 에 해당되며, 매개변수는 사용자가 입력한 농축 양액 내 이온 i의 농도에 해당된다.
- 실제 시스템에서의 자원 유입은 단속적으로 이루어지기 때문에 이에 따른 유입량 변화를 반영하기 위해 식 3-5-19~21을 통해 보정한다.

$$J_{irr} = \frac{(P_{day} - P_{irr})}{P_{day}} J_{irrP} - J_{irrP} \quad (\text{식 3-5-19} \sim \text{3-5-21})$$

$$J_{drg} = J_{irr} R_{drg}$$

$$J_{inj} = \frac{(P_{day} - P_{inj})}{P_{day}} J_{injP} - J_{injP}$$

P_{day} : 하루를 분단위로 변환한 시간(min)

P_{irr} : 일중 평균 관수시간(min)

J_{irrP} : 펌프의 관수시 유량 (L/min)

R_{drg} : 평균 배액률

P_{inj} : 일중 평균 농축양액 공급시간

J_{injP} : 농축양액 공급시 유량(L/min)

- 상기 모델에서 양분 흡수에 관련된 매개변수인 V_i^{max} 와 K_i^m 를 사전 요인실험 없이 획득하기 위해 재배가 진행됨과 동시에 progress-curve analysis 방식으로 추정 작업을 수행하며, 시뮬레이션을 통해 계산된 식 4의 배지 내 농도와 기기분석 의뢰를 통해 획득한 배지 내 개별 양분의 농도 데이터 간의 평균제곱근편차(root mean square error)를 최소화 할 수 있는 V_i^{max} 와 K_i^m 를 추정하며, 이는 비선형최소자승법(non-linear least squares)을 통해 수행된다. 파라미터 추정 시 양분 농도 변화 시뮬레이션의 발산을 방지하기 위해 의 추정 범위는 $q_i^{stk} \cdot J_{injP} < V_i^{max}$ 이 되도록 설정한다.
- 상기한 일련의 과정을 통해 V_i^{max} 와 K_i^m 의 수치를 획득하면, 식 3-5-16~3-5-18을 간략화한 모델의 정상상태 해에 해당하는 식 3-5-22에 대입하여 배지 내 양분 농도 변화를 목표 수준에서 유지시키기 위한 농축 양액 내 양분의 농도를 산출할 수 있다.

$$q_i^{stkT} = \frac{V_i^{max} q_i^{sbT}}{J_{injP}(K_i^m + q_i^{sbT})} \quad (\text{식 3-5-22})$$

q_i^{sbT} : 배지 내 이온 i의 목표 당량농도

- 여기에 제어 목표 농도를 대입하면 배지 내 이온i의 농도 변화가 q_i^{sbT} 에 근접한 수준에서 수렴하여 정상상태로 진입하기 위한 농축양액 내 이온 i의 당량농도를 구할 수 있다. 여기서 산출한 농축양액 내 이온 i의 당량농도는 식 3-5-6를 이용하여 비율로 변환된다.
- 재배 기간 동안의 각각의 분석 및 교정의 시점에서는 기본적으로 농축 양액 내 양분 비율 조정값을 결정할 때 ㉠와 ㉡ 방식 사이의 결정과 ㉢의 혼합탱크 내 비료 직접투입 여부의 결정과정으로 구성된다.
- 재배 시작 후 최초 1회의 분석 및 조정에서는 ㉠의 방식을 따른다. ㉡를 통해 산출한 결과의 신뢰성은 양분 측정 데이터의 수량에 영향을 받기 때문에 최소 2회의 양분 분석을 통한 양분 농도 측정 데이터의 확보 후 사용하는 것으로 한다. 따라서 재배 기간 중의 총 n차의 분석횟수에서 최초 1차의 분석에서는 ㉠의 방식으로 양분 교정을 수행하며 다음 시기인 2차 분석 시기에서는 ㉡의 방식으로 목표 양분 교정값 산출을 수행한다. 그 이후의 분석에서는 양분 비율변화의 안정화에 따라 결정되며, 안정화의 판단은 양분 분석을 통해 산출한 양분 간의 비율 데이터의 사용자 목표값 대비 일정 비율의 상하한값 초과 여부에 따라 판단될 수 있다. 이후 차기 분석에서부터는 1종 이상의 이온 비율 변화의 상하한값을 초과할

경우 ⑥의 방식을 수행하며 범위 내에 있을 경우는 ⑤의 방식으로 농축양액 내 양분 비율 조정값을 산출한다. 이후 이를 기준으로 비료 투입량이 결정된다. 대상으로 하는 수경재배 비료는 이온결합화합물이므로 이온의 단독 투입이 불가하다. 따라서 비료의 종류에 따라 조성 가능한 양분 간의 비율 범위가 결정될 수 있다. ⑤ 또는 ⑥의 방식을 통해 계산된 목표 양분 비율을 기준으로 새로 조제할 농축양액의 비료 투입량은 다음의 과정을 통해 결정될 수 있다.

- 첫번째로 사용자가 보유한 비료 종류의 입력 과정을 거친다. 그리고 이는 다량이온 중 양이온 NH_4^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 와 음이온 NO_3^- , H_2PO_4^- , SO_4^{2-} 의 조합으로 볼 수 있다. 따라서 보유 비료의 종류에 따라 각 양이온이 어떤 음이온과 연결되어 있는지 그리고 각 음이온이 어떤 양이온과 연결되어 있는지를 분류한다. 다음으로는 양이온 또는 음이온 그룹 중 하나를 선택하고 선택한 그룹의 양분 목표 비율값을 기준으로 하여 선택하지 않은 그룹의 양분 비율값의 가용 범위를 결정한다. 양이온 그룹의 비율값을 선택했을 경우의 음이온 그룹의 양분 비율값의 가용범위 결정의 예는 식 3-5-23, 3-5-24와 같다.

$$x_{\min} < R_i < x_{\max} \quad (\text{식 3-5-23} \sim \text{3-5-24})$$

$$x_{\min} = \begin{cases} \sum_{i=1}^q c_i, & z \geq 1 \\ 0, & z = 0 \end{cases}$$

$$x_{\max} = \sum_{i=1}^q c_i$$

x_{\min} : 음이온 i(또는 양이온 i) 비율 설정 범위의 최소값

x_{\max} : 음이온 i(또는 양이온 i)의 최대값

R: 음이온 i (또는 양이온 i)의 가용 비율

z: 보유 비료염에서 음이온 i(또는 양이온 i)만을 짝으로 하는 양이온 i(또는 음이온 i)의 개수

c_i : 보유 비료염에서 음이온 i (또는 양이온 i)를 짝으로 하는 양이온 i (또는 음이온 i)의 비율

- 다음으로는 ⑤ 또는 ⑥의 방식으로 산출한 목표 양분 비율값 중 음이온(또는 양이온)의 비율이 식 3-5-23~3-5-24를 통해 구한 범위의 제한에 해당되는지 비교과정이 수행된다. 음이온(또는 양이온)의 비율값이 x_{\min} 보다 작을 경우 이를 만족할 때까지 상향조정을 수행하

며 x_{\max} 보다 클 경우 조건을 만족할 때까지 하향조정을 수행한다. 모든 음이온(또는 양이온)의 비율이 상기 식의 조건을 만족할 경우 이를 만족하는 비료염의 투입량 결정이 가능해질 수 있다.

- ㉔ 방식의 사용 여부는 ㉓의 수행조건과 동일하지만 하한값 이탈 여부에 따라 결정된다. ㉔의 방식은 양분 비율변화의 하한값의 범위를 이탈한 양분에 대해서 상대적으로 단기간에 목표 범위 내로 회복시키는 것을 목적으로 하는 기능에 해당된다. 따라서 목표 양분을 포함한 비료의 일정량을 관수 대기 중인 혼합탱크에 직접 투입하여 순환식 수정재배 시스템 내의 양분을 증량 시키는 과정을 수행한다. ㉔ 방법의 경우 단일 비료의 투입만을 필요로 하므로 비율 계산을 수행하지 않으며, 양분 투입량의 계산은 식 3-5-25와 같다.

$$C_{spp}^i = q_{tar}^i v_{sb} - q_{mea}^i v_{sb} \quad (\text{식 3-5-25})$$

- 양분 투입량이 계산되면 해당 양분 이온을 포함하고 있는 비료를 선택하여 비료 투입량으로 환산하여 해당량을 관수 대기 중인 혼합탱크에 투입시켜서 시스템 내의 하한값 이하로 떨어져 있는 해당 양분을 증량시켜 목표 범위 내로 회복시킨다.

(2) 순환식 수정재배 시스템의 양분 균형제어 알고리즘의 실증 실험

- 본 실험에서 적용한 양분 균형제어 알고리즘의 실시 예는 그림 3-5-30과 같다. 본 실험에서 양분 교정 주기는 기본 4주 이상으로 적용하였으나, 양분의 변화 경향을 관찰하기 위해 1주 단위로 양분 농도 데이터를 측정하였으므로, 초기 분석 단계에 progress curve analysis 방식의 적용이 가능한 수준의 데이터 확보되었다. 따라서 이 단계의 우선 수행을 통해 양분 교정을 수행하며, 교정 지점에서 농도의 감소가 큰 양분에 대해서 단기 증량 과정을 수행하며 그 이후로는 적분제어 개념의 양분 조정이 적용된다.

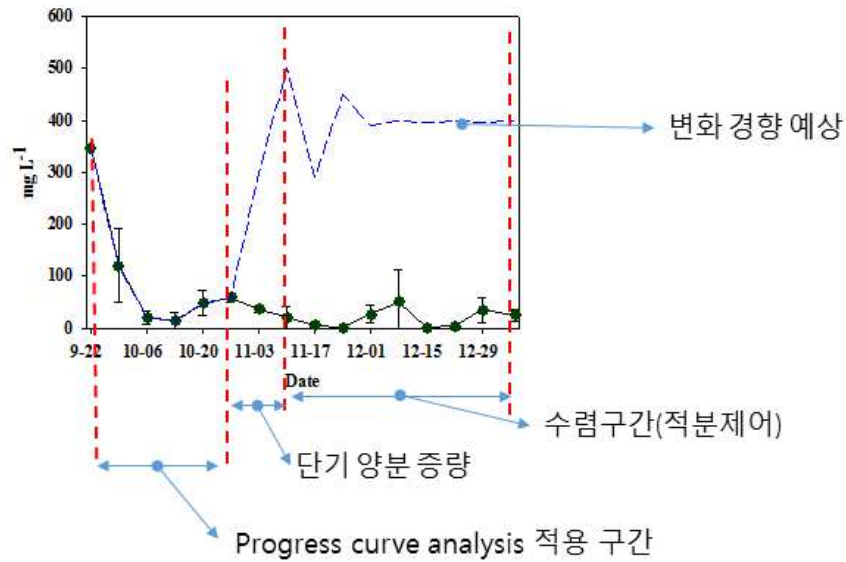


그림 3-5-30. 양분 균형제어 알고리즘의 실시 예

- 본 실증 실험에서의 양분 균형 제어 알고리즘 적용에 따른 이온 농도 변화의 결과는 그림 3-5-31과 같다. 양이온의 경우 비순환식 수경재배 시스템에서는 특정 이온의 농도가 초기 농도 대비 급격하게 감소하는 경우는 관찰되지 않았으나, 초기값 대비 유동이 크게 나타났다. 본 과제 개발 알고리즘이 적용된 순환식 수경재배 시스템에서는 K^+ 에서 조정 지점까지 빠른 감소 현상이 관찰되었다. 초기 조정 지점에서는 상기 설명된 progress curve analysis 방식에 따라 양분을 교정하였으나, 다시 초기값으로 농도를 회복하기 위해서는 장시간이 소요되기 때문에 상기의 알고리즘에 따라 양분의 단기 증량 과정을 수행하였으며 1주일 내 초기값에 근접한 수준으로 농도를 회복시킬 수 있었다. 이 이후의 기간에서는 실험 초기에 관찰되었던 K^+ 의 감소 경향을 관찰할 수 없었으며, 이는 초기 분석에서의 progress curve analysis에 따라 조정된 농축양액의 투입에 따른 효과로 해석될 수 있다.
- 다른 양이온들의 경우 비순환식에 비해 급격한 변화 없이 초기값에 근접한 수준에서 제어가 되었음을 확인할 수 있었으며, 이러한 안정성은 본 과제의 기존 연구를 통해 개발한 양분 흡수 총량과 양분 공급량 간의 오차를 최소화하는 비료 투입량 최소화 알고리즘의 적용 효과로 판단된다. 해당 연구에서 양분 농도 변화의 표준 편차가 낮게 유지되는 것을 확인할 수 있었으며, 전체 양분 흡수량과 양분 투입량과의 오차를 최소화 할 경우 개별 양분 농도변화도 빠른 속도로 수렴구간으로 접근하여 변화의 범위가 제약되는 것으로 판단된다.
- 음이온의 경우 $H_2PO_4^-$ 에서 비순환식과 순환식 수경재배 시스템에서 증가 후 상대적으로 빠른 감소 경향이 관찰되었다(그림 3-5-32). 그러나 비순환식의 경우 초기값 아래로의 감소는 나타나지 않았으며, 순환식의 경우는 조정지점 전까지 계속해서 감소하여 초기값 이

하로의 감소가 관찰되었다. 이후 양이온의 경우와 동일한 과정으로 농축 양액의 교정 및 양분 단기 증량 과정을 거쳤으며, 조정 이후 초기에 관찰되었던 감소 현상은 확인할 수 없었다. SO_4^{2-} 의 경우 증가 경향이 관찰되었으며 조정 이후 증가 경향은 완만하게 변화했다가 마지막 조정 단계에서 소폭 감소하는 경향이 관찰되었다. 이는 순환식 수경재배 시스템에서 감소한 양분의 증량은 가능하지만 양분의 증가량을 감소시키기 위해서는 식물의 흡수 속도에 의존해야 하므로 이러한 경향이 관찰된 것으로 판단된다.

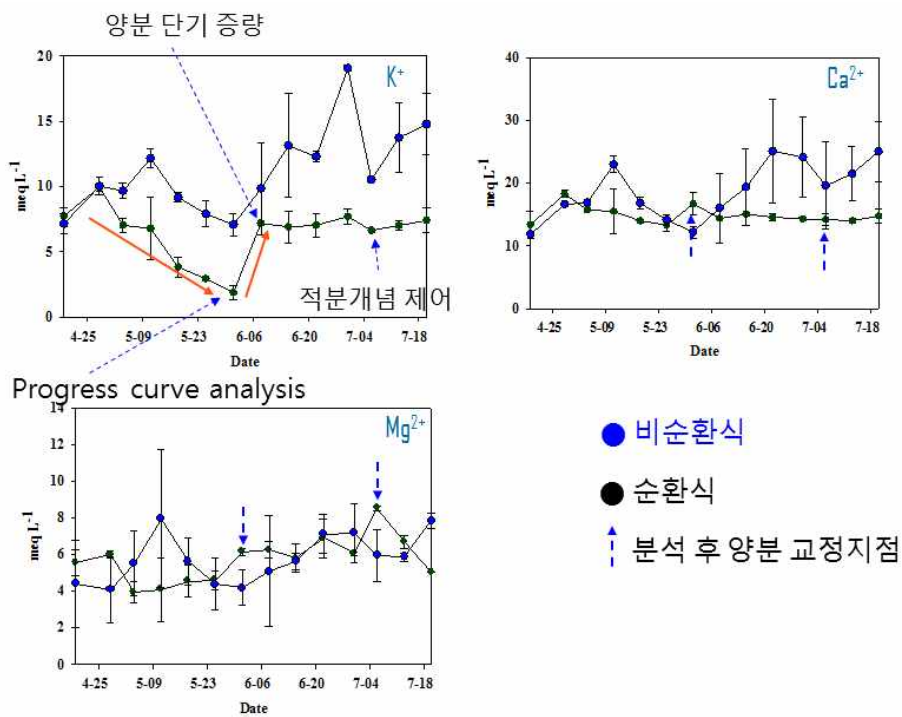


그림 3-5-31. 양분 균형 제어 알고리즘 적용 순환식 수경재배와 비순환식 수경재배 시스템의 양이온 농도 변화

- 상기의 농도 변화 데이터를 비율로 변환하여 양분의 균형 변화 경향의 비교에 대한 결과는 그림 3-5-33와 같다. 양분 농도의 경우 비순환식에서 상대적으로 큰 변동이 관찰되었으나, 양분 균형 변화로 변환하였을 때 변동 폭은 감소하는 경향이 관찰되었다. 이는 비순환식 수경재배 시스템의 배지 내 양분이 전체적으로 유사한 경향으로 변동함에 따른 결과로 판단된다. 이는 비순환식 수경재배 방식의 양분 투입량이 상대적으로 많기 때문에 관찰될 수 있는 결과로 볼 수 있다. 그러나 순환식 수경재배 시스템의 경우 시스템으로의 양분 투입량은 상대적으로 적지만 투입되는 농축양액의 조성을 조정하여 시스템 내 양분 교정을 수

행하기 때문에 초기 교정 전의 변화는 비순환식에 비해서 변화가 크게 나타나지만 교정 이후 초기 비율 지점으로 근접해가는 것을 확인할 수 있다.

- Zekki(1996), Ehret 등(2005)의 연구에 따르면 순환식 수경재배 시스템의 양분 농도 및 균형이 변화가 작물의 생육 및 수확량에 있어 유의적인 결과로 관찰될 때 까지는 일정 기간 이상이 소요되며 이는 식물의 선택적 흡수능력에 따른 완충효과로 볼 수 있다. 따라서 교정 전까지의 일정 기간 양분 농도 및 비율 변화의 노출 이후의 기간은 교정 환경이 조성되므로 식물 생육에 유의적인 영향을 주는데 제한적일 것으로 판단된다. 본 실증 실험에서는 파프리카의 생산성과 당도, 배꼽썩음과 발생률을 비교하였으나(그림 3-5-34), 통계적인 유의차를 확인할 수 없었다.

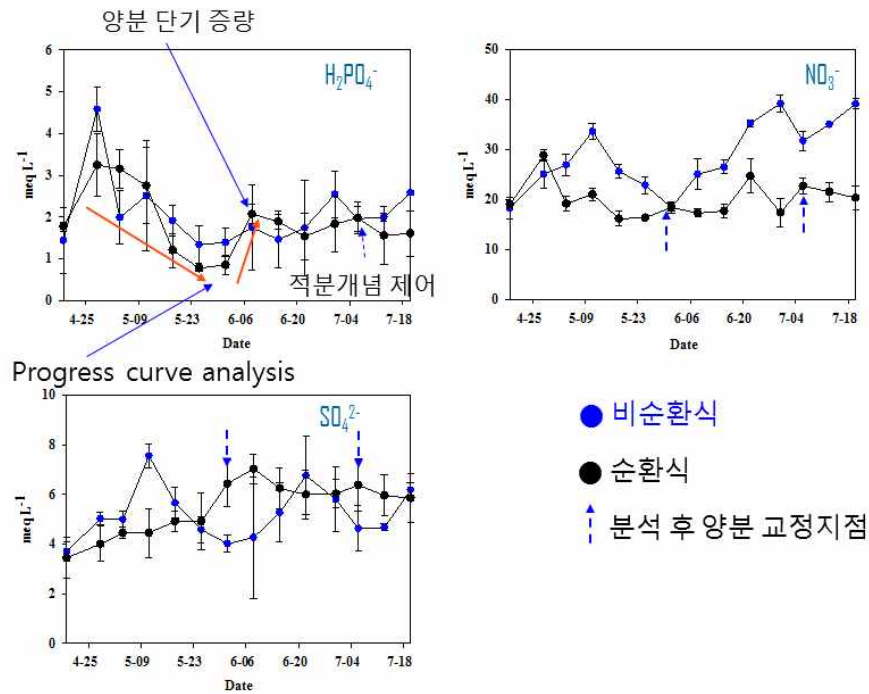


그림 3-5-32. 양분 균형 제어 알고리즘 적용 순환식 수경재배와 비순환식 수경재배 시스템의 음이온 농도 변화

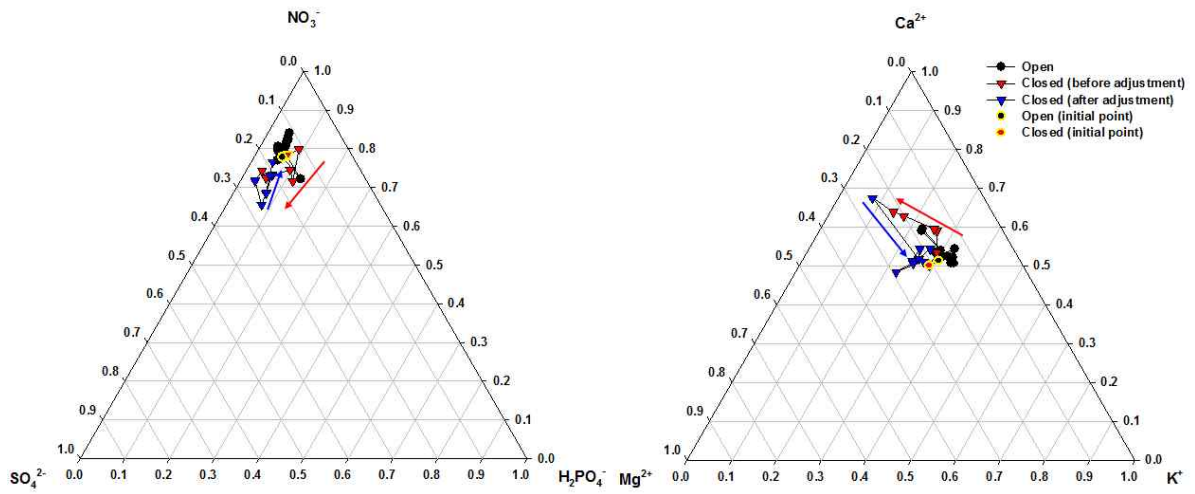


그림 3-5-33. 양분 균형 제어 알고리즘 적용 순환식 수경재배와 비순환식 수경재배 시스템의 양분 균형 변화

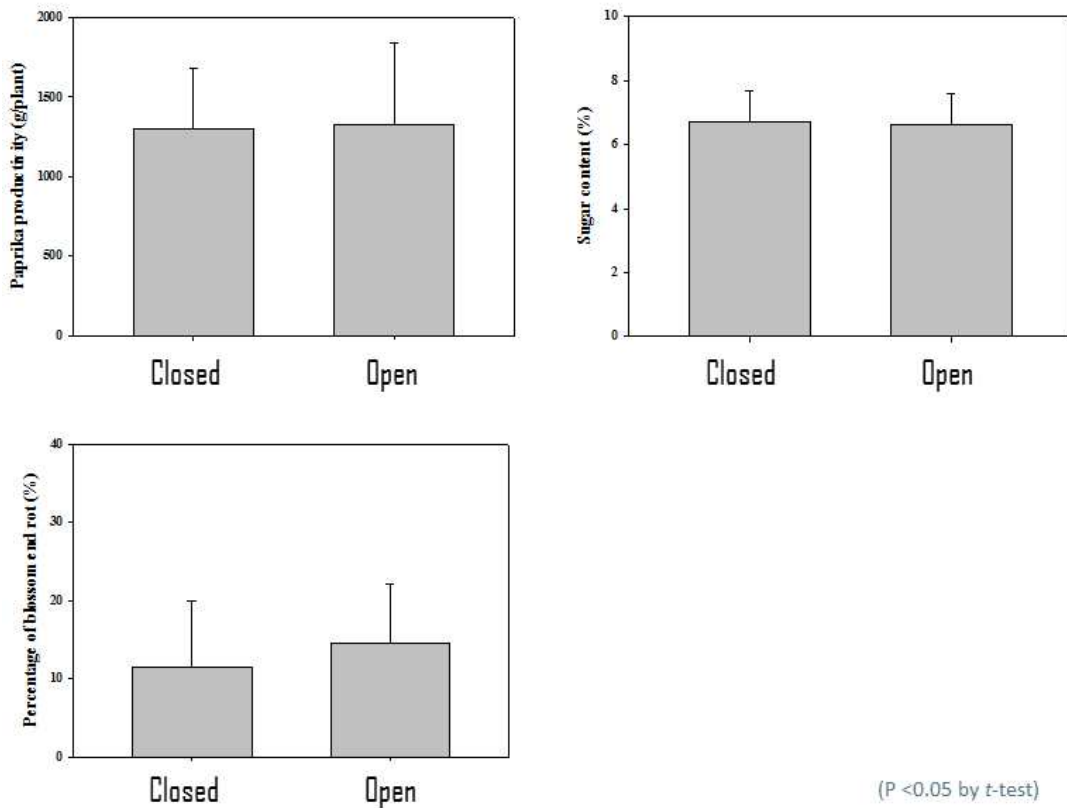


그림 3-5-34. 양분 균형 제어 알고리즘 적용 순환식 수경재배와 비순환식 수경재배 시스템의 생산성, 당도, 배꼽썩음과 발생률

7. 순환식 수경재배 양수분 통합관리 시스템 개발

가. 연구배경

- 안정적인 순환식 수경재배 시스템을 구현하기 위해서는 이를 뒷받침할 기술적 기반을 필요로 한다. 소요되는 기술은 크게 재사용 양액의 EC 제어, 양분의 교정, 병발생 억제, 관수제어, 그리고 부가적인 기능으로 이온센서 등이 있으며 이러한 기술들이 상호 충돌 없이 자동화 될 수 있는 시스템이 요구된다. 관수제어의 경우 배액률과 배액 EC 제어에 영향을 미치므로 순환식 수경재배 시스템의 안정성 개선에 고려해야할 요인이다. 순환식 수경재배 시스템의 경우 시스템 내 양수분의 이동이 관수로부터 시작되며 이는 일반적으로 단속적으로 수행되기 때문에 회분공정(batch-process)과 유사하며, 각 처리의 배치 및 이동 시점에 따라 시스템 규모에 영향을 미칠 수도 있다. 그러나 상업적 규모에서는 순환식 시스템의 규모 증가에는 제약이 있으며, 양수분 이용효율을 극대화하기 위해서는 일정 규모에서도 배액의 전량 가능한 완전폐쇄형 순환식 수경재배 시스템의 개발이 필요하다.

나. 연구개발 목표

- 본 과제에서 개발한 비료 투입량 최소화 기술, 양분의 교정, 배액의 실시간 살균, 배액의 전량 사용 및 구현이 가능한 양액 혼합 장치의 개발
- 배지 수분 및 배액률 관리의 안정성 향상을 위한 증산량 추정 기능 강화
- 관수, 양액 혼합, 양분 관리의 측면에서 사용자가 통합적으로 관리할 수 있는 사용자 UI의 작성
- 각 기능부의 모듈화를 통한 장치의 확장성이 확보된 장치 개발

다. 연구수행 내용 및 결과

- 상용화 수준에서의 실증 실증실험을 위해 상업농가인 경기도 화성의 더웰 파프리카(구 화성 21)에 설치되었으며, 장치의 구성은 그림 3-5-35에 나타난 바와 같이, 양액 저장부, 측정 및 양액 혼합부, 제어부, 재배상으로 구분되며, 장치의 확장성을 위해 각 구성부 간의 신호 및 전원 공급선 연결은 커넥터로 연결되도록 설계하여 각 구성부가 모듈화 되도록 제작하였다.

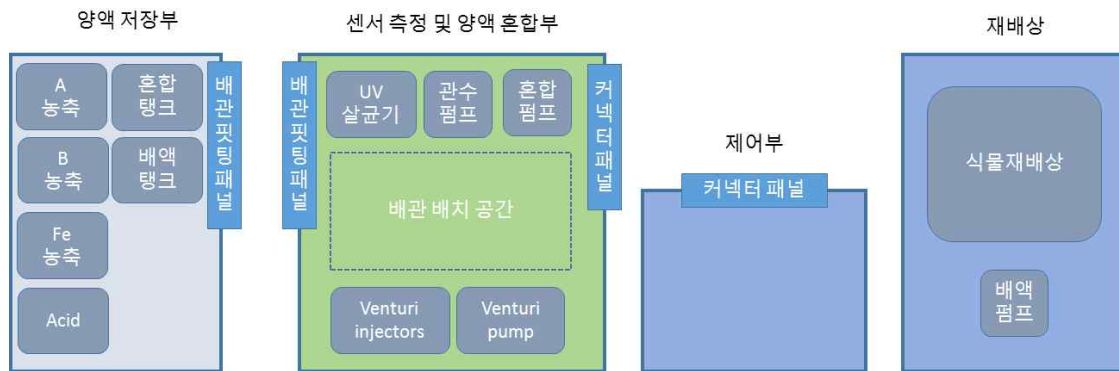


그림 3-5-35. 본 과제 개발 순환식 수경재배 장치의 구성도

(1) 장치의 세부적인 배관 연결 관계, 센서 신호 전달 및 장치 구동의 연결도

- 양액 혼합부에서 양액 혼합과정의 제어를 위한 측정장치는 혼합 양액의 EC 값을 측정하여 제어기로 전송하는 제1 EC 센서와, pH 값을 측정하여 제어기로 전송하는 제1 pH 센서, 혼합탱크의 최대 한계 수위로부터 4등분된 높이에 위치하여 양액의 수위를 제어기로 전송하는 4개의 수위센서, 관수 배관에 설치되어 관수량을 측정하는 관수유량센서를 포함한다(그림 3-5-36).
- 양액 혼합부의 구동부분은 혼합탱크 자체 순환 구조의 배관에 위치한 양액 혼합용 펌프, 작물에게 양액을 공급하기 위한 관수용 펌프, 혼합펌프와 같은 경로 상의 배관에 설치되어 공급되는 양액을 살균하는 UV 살균장치, 혼합펌프가 순환 구조의 배관 상에 발생시킨 수압을 이용해 혼합탱크로 농축양액, 산/알카리 용액을 이송하는 공급기를 포함하며, 공급기는 벤츄리 인젝터, 유량 조절 밸브, 솔레노이드 밸브의 조합으로 구성된다.
- 저장부는 필수 양분 중 혼합 용해 시에 침전할 수 있는 비료 성분을 구분하여 나눠 저장하는 농축양액 탱크 2개와, UV 살균기의 작동 시 발생하는 양액 내 킬레이트 철 공급원의 광산화에 따른 손실을 보충하기 위한 킬레이트 철 용액 단독 저장탱크와, 혼합탱크 내 양액의 pH 조절을 위한 산/알카리 용액의 저장탱크와, 혼합탱크에 원수 공급을 하기 위한 원수탱크를 포함한다. 킬레이트 철을 제외한 필수양분의 농축양액은 상기한 바와 같이 혼합탱크 자체 순환 배관에 결합된 벤츄리 인젝터 조합을 통해서 공급되며, 킬레이트 철의 농축양액은 양액 혼합 시 가동되는 UV 살균기에 의한 광산화 손실량을 최소화하기 위해 관수 배관 상에 설치된 벤츄리 인젝터 조합을 통해 공급되며, 원수는 원수펌프를 통해 혼합탱크로 공급된다.
- 배액 수집부는 관수 후 발생된 배액이 재배상의 수로를 통해 수집 저장되는 배액집수탱크

와 탱크 수위가 일정 수준에 도달 시 배액이송펌프의 전원 회로를 연결하는 수위 스위치와 혼합탱크로 배액을 이송하는 배관 상에 설치된 여과기와 배액 배관에 설치되어 배액량을 측정하는 배액 유량센서를 포함한다.

- 광 측정부는 일사량을 측정하여 제어기로 전송하는 일사센서를 포함한다. 일사센서의 순간 일사량을 적산하여 관수 명령을 전달한다.

(2) 장치 제어부의 구성

- 제어부의 모듈화를 위해 양액을 혼합하는 구동부 사이의 센서 신호전달과 전원의 연결선은 제어부의 커넥터 패널에서 정렬되며, 이후의 연결은 커넥터를 통해 이뤄진다(그림 3-5-38). 전원의 경우 사용자가 장치의 이상 작동을 감지했을 때 모든 구동을 차단하는 비상전원 스위치로 일시정지가 가능하며 센서부의 전원은 구동부 전원과는 별도의 회로로 구성되므로 비상정지에 포함되지 않는다. 제어부 컨트롤러는 Linux Real-Time OS를 기반으로 하는 NI DAQ이며, 제어부에 대한 입력 장치는 기본적으로 터치 스크린을 제공한다.
- 외부 통신을 통한 제어부로의 접속은 근거리 통신망 케이블을 통해 웹상에서 접속이 가능하며 이를 통한 장치 설정 변경 및 로깅 데이터의 송수신 기능을 제공한다.

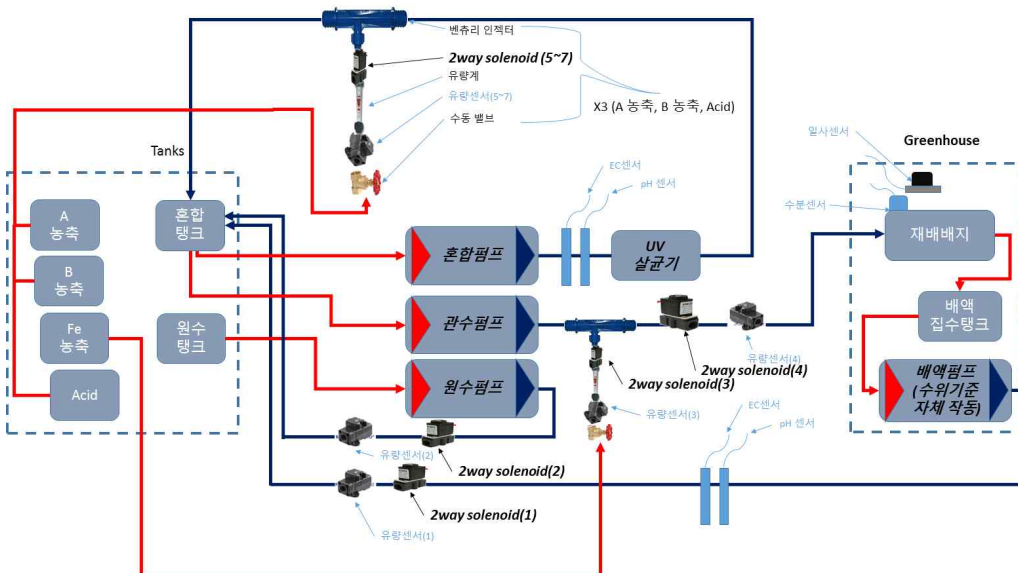


그림 3-5-36. 본 과제 개발 순환식 수경재배 장치의 배관, 센서, 구동부 연결도



그림 3-5-37. 화성 상업 농가 장치 설치 전경



그림 3-5-38. 장치 제어부 세부 구성 (A : 제어반 및 사용자 조작용 디스플레이, B : 구동부 센서 및 전원 커넥터 연결 패널, C : 제어부 센서 및 전원 커넥터 연결 패널, D : 컨트롤러)

(3) 순환식 수경재배 양수분 통합관리 시스템의 사용자 UI 구성

- 양수분 통합관리 시스템 UI는, 제어 모니터링 및 이상 작동 진단 페이지와 사용자 설정 페이지 그리고 그래프 표시 페이지로 구성된다.
- 수경재배의 제어 및 모니터링 페이지에서는 각 구동부의 작동 상황을 파악할 수 있으며 현재의 누적관수량과, 누적배액량, 배액율을 모니터링 할 수 있으며, 이온센서 모듈의 부가 확장 시 신호의 송수신 및 현재 측정값 표기가 가능하도록 통신 포트 및 화면 구성을 할당하였다. 배액 EC 변화를 확인할 수 있으며, 배지 함수율 및 EC 변화, 현재 광량을 모니터링 할 수 있다. 또한 장치의 이상 작동이나 모터 과부하와 같은 신호를 감지하여 이상 여

부에 대해서 보고하는 기능을 제공하여 사용자가 신속히 문제를 파악할 수 있도록 하고 장치의 비상정지 기능을 제공한다(그림 3-5-39).

- 사용자 설정 페이지에서는 장치의 초기 구동 시 최초 입력이 필요한 매개변수의 설정과 사용자의 관수 계획에 맞게 관수량 및 제어 목표 EC 값을 설정할 수 있다(그림 3-5-40).
- 그래프 표시 페이지에서는 시스템 내 계층값의 변화를 연속적으로 표시해주는 기능을 제공하며 사용자가 보고자 하는 계층값과 표시 기간을 설정할 수 있다(그림 3-5-41).

(4) 배지 수분 및 배액률 관리의 안정성 향상을 위한 증산량 추정 기능 강화

- 일반적으로 수경재배 시스템의 관수제어는 일정 배액률의 발생을 목표로 증산량을 추정하여 수행되지만, 추정에는 일사센서를 통해 측정된 적산광량과 누적증산량 간의 선형관계 가정에 따른 변환값이 사용된다. 그러나 실제의 적산광량과 누적증산량은 선형관계에 있지 않으며 고광도에서 그 오차가 크게 발생한다. 그리고 이러한 오차는 배액률 제어의 불안정성에 영향을 미치는 요인으로 순환식 수경재배 시스템의 제어 안정성에 관련되어 있다.
- 선형관계의 추정식은 보정될 필요가 있으며, 본 장치의 관수제어에는 본 연구팀에서 개발한 3-5-26과 같은 보정된 추정식(Shin 등, 2014;Shin과 Son, 2016)을 사용하였다.

$$RAD_C = \frac{a}{1 + \exp\left(\frac{x_0 - RAD}{b}\right)} - c \quad (\text{식 3-5-26})$$

RAD_C: 보정된 입사광량

RAD: 입사광량(센서값)

x₀, a, b, c : 보정 계수

- 장치는 일사센서를 통해 입력 받은 입사광량에 대한 변수를 식 3-5-26의 RAD에 대입시키며 이를 통해 보정된 입사광량을 구하고 이를 적산하여 관수 제어에 사용하는 과정을 거친다.

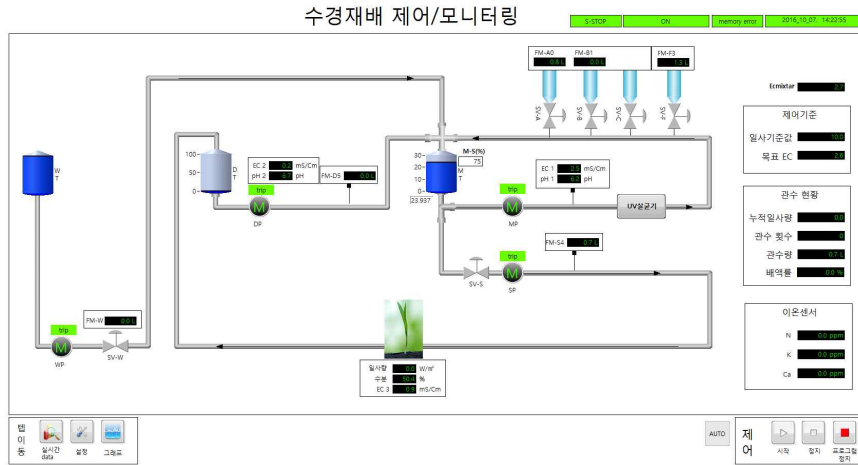


그림 3-5-39. 순환식 수경재배 양수분 통합관리 시스템의 사용자 UI(제어 모니터링 페이지)

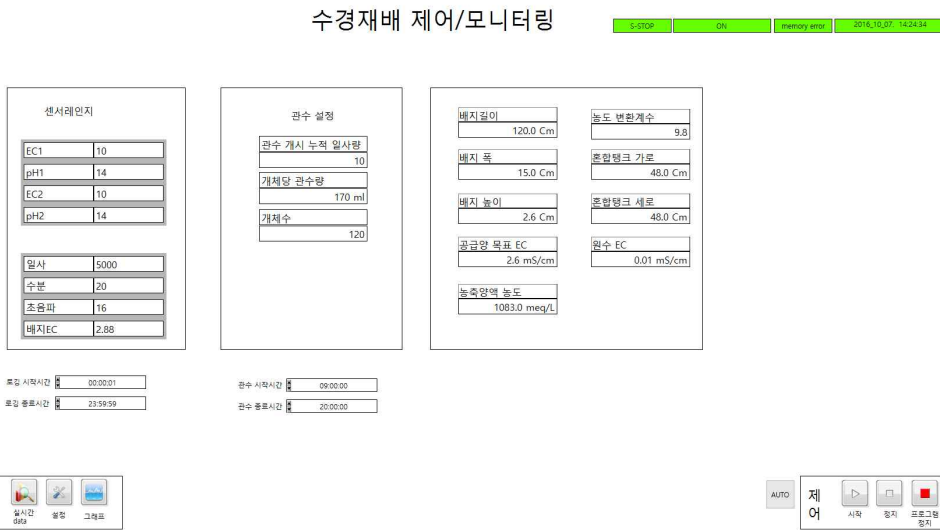


그림 3-5-40. 순환식 수경재배 양수분 통합관리 시스템의 사용자 UI(사용자 설정 페이지)

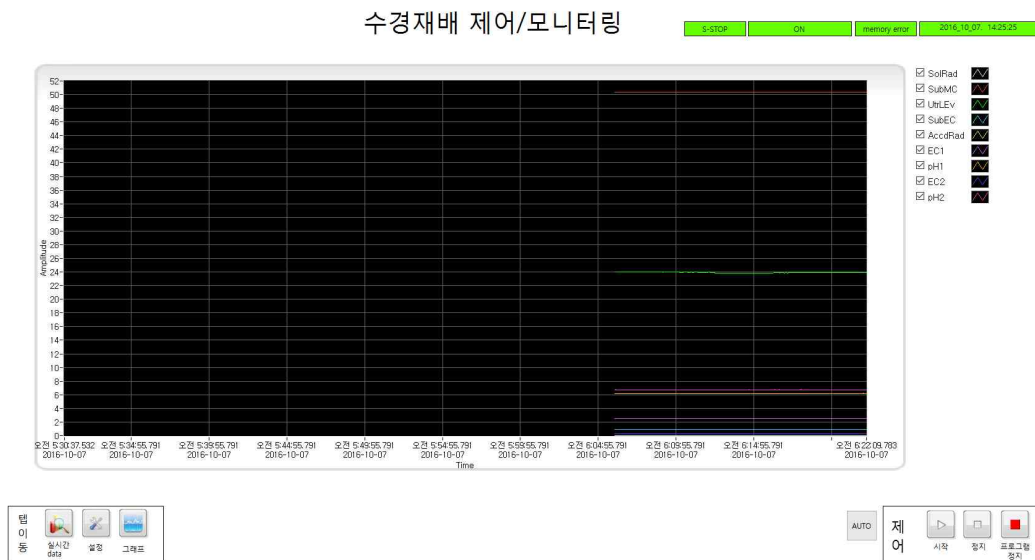


그림 3-5-41. 순환식 수경재배 양수분 통합관리 시스템의 사용자 UI(그래프 표시 페이지)

8. 순환식 수경재배 시스템의 실증(상업농가 실증 실험, UV 살균 장치의 본 연구과제 개발 순환식 수경재배 시스템 적용 및 Fe-EDTA 적정 공급 기술 적용)

가. 연구배경

- 본 과제를 통해 개발한 비료 투입량 최소화 및 양분 균형 제어 알고리즘의 경우 연구실 규모의 실험 장치를 통해 실증 실험을 수행하였으나, 실제 상업농가의 경우 규모가 증가하게 되며, 농축양액의 공급방식(연동펌프 → 벤츄리관), 살균장치의 추가, Fe-EDTA의 독립공급과 같은 기능들이 갖춰져야 하며 이러한 기능들이 상호 충돌 없이 정상적으로 수행하는지를 실증실험을 통해 검증할 필요가 있다.

나. 연구개발 목표

- 본 연구과제에서 개발한 순환식 수경재배 양수분 통합 관리 시스템의 기본적인 기능들이 상업 농가 조건에서의 정상 작동 여부 검증
- UV 살균기 장착에 따른 살균 성능과 그에 따른 Fe-EDTA의 광산화 손실을 보상하기 위한 독립 공급 방식의 농도 제어 결과(이론 분석 및 시스템 적용결과 확인)
- 양분 균형제어 및 그에 따른 작물 생육 비교

다. 재료 및 방법

- UV 살균장치 적용에 따른 살균 성능 평가 및 Fe-EDTA 농도 보상 방식에 대한 이론적 분석 및 장치 적용
- 순환식 수경재배 시스템에서의 UV 살균 및 Fe-EDTA의 광산화 시뮬레이션 모델 구축 및 이를 통한 적정 살균 및 Fe-EDTA의 공급 방식 도출
- 상업농가 실증실험 장치에 적용 및 결과 확인
- 살균 성능 평가 : 3MTM Clean-Trace™ ATP를 이용한 생물학적 오염도의 간접 평가
- Fe-EDTA의 독립 공급 결과 평가 : 비순환식 수경재배 시스템의 Fe-EDTA 농도 변화와 상대적인 비교 수행
- 양분 균형제어 및 그에 따른 작물 생육 비교
 - 실험장소 : 경기도 화성 더웰 파프리카 (구 화성 21)
 - 실험규모
 - 순환식 수경재배 시스템 : 126개체
 - 비순환식 수경재배 시스템 : 126개체
 - 실험기간 : 2016년 5월 ~ 7월
 - 측정항목 : 배지 내 이온 농도 변화, 엽 내 이온함량 분석, 과실 내 이온함량 분석

라. 연구수행 내용 및 결과

- (1) UV 살균장치에서의 Fe-EDTA 농도 보상 방식에 대한 이론적 분석 및 독립 공급방식의 장치

적용

- 순환식 수경재배에서 UV 살균기술을 적용함으로 인해 발생하는 Fe-EDTA의 손실분을 보상하기 위하여 직접 계측을 통하여 투입하는 것은 현실적으로 어렵다. 따라서 모델을 이용한 광산화로 인한 손실량을 예측하여 투입하는 방법이 적절한 대안이 될 수 있다.
- Fe-EDTA의 광산화 현상은 지수적인 감쇠의 경향으로 관찰되며, 아래와 같은 회귀식으로 표현될 수 있다.

$$C_{Fe} = C_{Fe0} e^{-kt} \quad (\text{식 3-5-27})$$

C_{Fe} : 양액 내 Fe-EDTA의 농도

C_{Fe0} : 광산화 전 Fe-EDTA의 초기 농도

k : Fe-EDTA의 광산화 속도 상수

t : 시간

- 상기의 모델은 UV의 광량에 따른 k 값과 초기 농도만 알고 있을 경우, 일정 시간이 경과된 뒤의 Fe-EDTA의 농도를 예측할 수 있다. 그러나 순환식 수경재배 시스템에서는 매번 UV 살균이 시작되는 시점의 초기농도를 알 수 없기 때문에 회귀 모델을 통한 예측이 어렵다.
- 이러한 제약 조건에서 Fe-EDTA의 농도를 목표로 하는 수준으로 제어하기 위해서는 순환식 수경재배 시스템의 특성이 결합된 모델을 구축할 필요가 있으며, 이를 기반으로 Fe-EDTA의 적정 공급 방식을 도출할 필요가 있다.

$$\frac{dC_{Fesub}}{dt} = k_{ir} Cn_{Fedrg} - \frac{V_{mx} Cn_{Fesub}}{K_m + Cn_{Fesub}} - k_{dr} Cn_{Fesub} \quad (\text{식 3-5-28})$$

$$\frac{dC_{Fedrg}}{dt} = k_{dr} Cn_{Fesub} + k_{rp} Cn_{Festk} - k_{ir} Cn_{Fedrg} - k_{ph} Cn_{Fedrg} \quad (\text{식 3-5-29})$$

C_{Fesub} : 배지의 Fe-EDTA 량

C_{Fedrg} : 배액의 Fe-EDTA 량

Cn_{Fesub} : 배지의 Fe-EDTA 농도

Cn_{Fedrg} : 배액의 Fe-EDTA 농도

Cn_{Festk} : 보정액의 Fe-EDTA 농도

- k_{ir} : 공급속도 정수
- k_{dr} : 배수속도 정수
- k_{rp} , 보정속도 정수
- k_{ph} : 광산화 속도 정수
- V_{mx} : 최대 Fe 흡수율
- K_m : Michaelis-Menten 상수

- 식 3-5-28, 3-5-29는 배액탱크에 UV 살균장치가 적용된 순환식 수경재배 시스템에서 Fe-EDTA의 이동 및 손실을 표현한 기본적인 모델이다. 상기 모델의 해석해를 구하면 Fe-EDTA의 농도 변화의 수렴지점을 정확하게 알 수 있다.

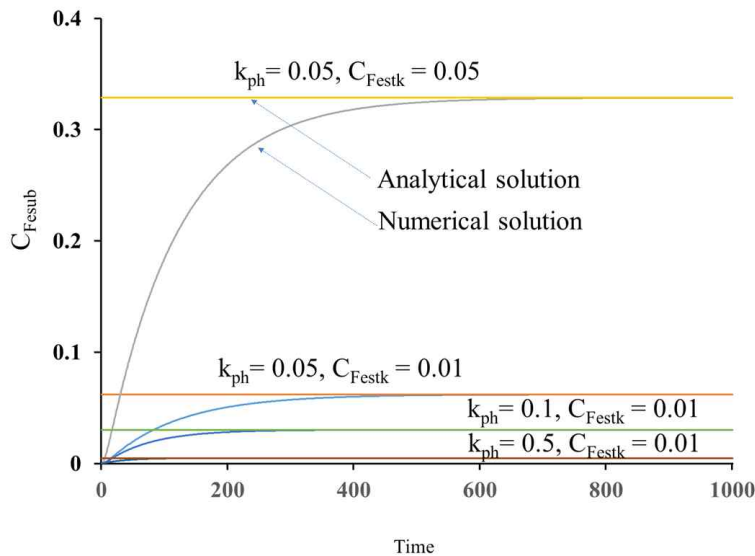


그림 3-5-42. 순환식 수경재배 시스템에서의 Fe 공급 농도, 광산화 속도 상수 변화에 따른 Fe-EDTA 농도 변화 추정

- 초기 농도를 알지 못할 경우 일정 시간 경과 후의 농도를 알 수 없는 회귀 모델과는 달리, 일정 시간 경과 후의 농도 수렴 지점을 예측할 수 있어서 이 지점을 목표로 제어를 수행할 수 있는 기반이 된다.
- 본 연구에서는 해석해와 수치해의 수렴 지점이 일치하는 것을 확인하였다(그림 3-5-42, 식 3-5-28, 3-5-29) 그러나 이는 순환식 수경재배 시스템 내 양액의 순환, UV 살균, 양분의 투입 등 연속적으로 이루어졌을 때를 추정한 것이다.
- 실제의 재배 조건에서는 지속적으로 UV 살균이 진행되지 않으며 살균기가 작동하는 시간도 다를 수 있다. 또한 관수를 통해 공급되는 Fe-EDTA의 양도 관수량이 환경 조건에

따라 유동적이기 때문에 농축양액의 투입량도 일정하지 않을 수 있다.

- 상기의 식에 사용된 속도상수 k는 변수로 볼 수 있으며, Fe-EDTA 농도 변화의 수렴 지점은 Fe의 순환식 수경재배 시스템 내에 공급되는 속도와 식물의 흡수 속도와 UV 광산화 현상으로 인해 손실되는 속도의 차이에 의해 결정될 수 있다.
- 본 연구에서는 동적인 환경 조건을 가지는 온실에서 안정적인 제어 방식은 평균값에 근거한 피드백 제어로 판단하였으며, 이를 기초로 Fe-EDTA의 투입 방식을 결정하였다.
- 연속적으로 순환하는 수경재배 시스템에서 상기 식의 Fe-EDTA의 투입속도와 UV로 인한 광산화 속도에 해당하는 k 값은, 관수 및 살균 시간의 길이에 따라 변하게 된다. 하루를 주기로 관수 시간이 길어질 경우 Fe-EDTA의 투입 속도는 상수로 수렴하며, UV 살균 시간의 경우도 시간이 길어질 경우 상수로 수렴할 수 있다. 이를 근거로 아래와 같은 속도 변화의 관계를 도출하였다.

$$k_{phm} = -\frac{(P-t_{uv})}{P}k_{ph} + k_{ph} \quad (\text{식 3-5-30})$$

$$k_{rpm} = -\frac{(P-t_{Fe})}{P}k_{rp} + k_{rp} \quad (\text{식 3-5-31})$$

k_{phm} : 보정 속도 상수(광산화)

k_{rpm} : 보정 속도 상수(Fe-EDTA 공급)

P: 기준 주기

k_{ph} : 광산화 속도 상수

k_{rp} : Fe-EDTA 공급 속도 상수

t_{uv} : 일중 UV 살균기 작동 평균 시간

t_{Fe} : 일중 평균 관수 시간

- 식 3-5-30, 3-5-31은 하루 주기에서 하루 중의 평균 관수 시간과 평균 살균 시간에 따라 속도 상수의 보정이 이루어지는 관계를 나타내고 있다. 이를 다시 모델에 반영할 경우 단속적인 관수와 살균 시간의 적용으로 인해 발생하는 오차를 보정할 수 있게 된다(그림 3-5-43).

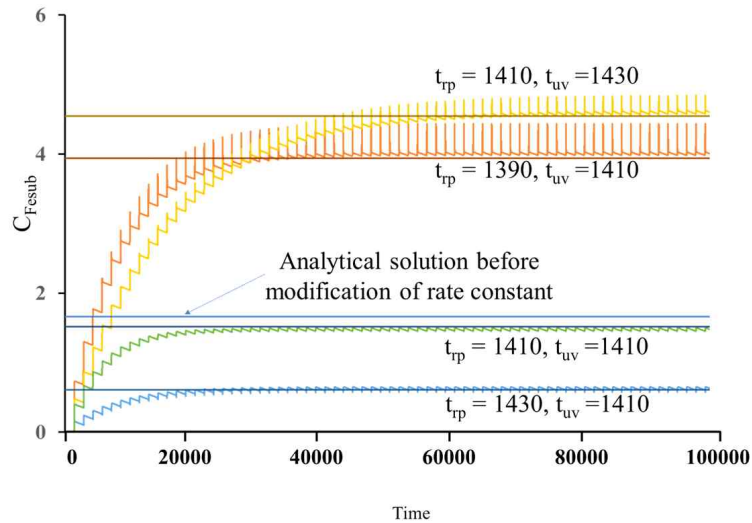


그림 3-5-43. 순환식 수경재배 시스템에서 관수 시간 및 UV 살균 시간의 적용 시 보정 모델의 Fe-EDTA 농도 변화 특성

- 살균 및 관수 시간에 따라 Fe-EDTA 농도 변화 특성이 상이함을 확인하였다(그림 3-5-43). 또한 관수 시간 및 UV 살균 시간에 따른 속도의 변화가 보정된 모델의 경우 해석해의 수렴 지점과 일치함을 확인할 수 있다. 실제로 식물의 생육과 환경요인과 같은 여러 변수가 존재하는 실제 재배에 적용될 경우, 오차는 존재하게 되며, 주기적인 분석을 통한 피드백 제어를 적용하여 모델의 오차 보정에 반영할 필요가 있다.
- 그림 3-5-44는 비순환식과 Fe-EDTA의 단독공급 시스템을 갖춘 순환식 수경재배 시스템의 Fe 농도 변화 비교 결과를 나타낸다. 화성 농가에서의 실증실험 수행기간 동안 본 과제에서 개발한 순환식 수경재배 시스템에서 15 $\mu\text{m}/\text{L}$ 를 목표 농도로 Fe-EDTA의 단독 투입을 수행한 결과이다. 비순환식 수경재배의 경우 Fe-EDTA의 결핍 경향이 관찰되지는 않았으며 표준 농도보다 높은 수준에서 농도의 증감 경향을 나타냈다. 단독공급 방식의 경우 일정한 비율로 농축양액을 공급하기 때문에 변화 경향에 있어 근권부 시스템으로 다량을 공급 및 방출 시키는 비순환식 양분 공급 방식과 다른 경향을 나타냈다. Fe-EDTA의 농도는 점진적으로 증가하였으나 후반에서는 증가가 둔화되는 경향을 관찰할 수 있었다. 목표 농도를 초과하는 경향을 나타냈지만, 이는 정상상태 오차로 판단되며 정상상태 오차는 적분제어 개념을 적용한 피드백 수행으로 해소될 수 있으므로 이러한 부분은 재배 기간 동안의 피드백으로 해소될 수 있을 것으로 판단된다.

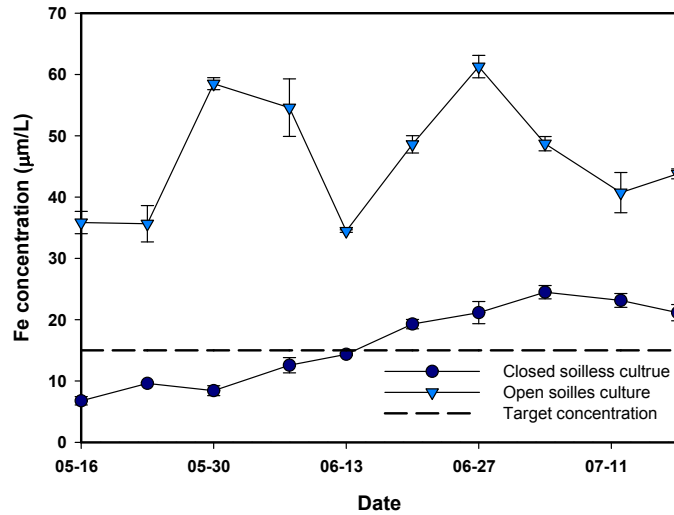


그림 3-5-44. UV 살균장치 적용 순환식 수경재배 시스템에서의 Fe-EDTA 단독 공급 방식과 비순환식 양분 공급 방식에 따른 근권부 Fe 농도 변화

(2) UV 살균장치의 순환식 수경재배 시스템 적용에 대한 이론적 분석 및 살균성능 평가

(가) UV 살균 방식

- 온실에서 배액탱크로 이송되는 배관 사이에 위치하여 온실로부터 배액탱크로 이송하는 즉시 살균을 수행하며, 관수 시에는 혼합 탱크 내의 양액을 내부 순환을 통해 살균을 수행한다. 혼합탱크에서의 내부 순환을 통한 살균의 경우 배액의 직접 살균보다 살균처리량이 많아지나 원수와 혼합되므로 배액보다 탁도가 감소하여 UV의 투과도 측면에서는 유리할 수 있다. 이 같이 원수를 배액과 혼합하여 살균하는 방식은 UV 살균에 있어 탁도 증가로 인한 효율 급감을 방지하기 위해 권장되는 방식에 해당된다(James, 1996). 이와 같은 구조와 제어 시퀀스는 살균장치의 용량을 소형화할 수 있게 하며 살균 공정을 1회 관수 마다 수행할 수 있어 시스템의 소형화에 적합하다.
- 상기 내용의 도출을 위하여 식 3-32~3-35의 모델식을 사용하였다.

$$\frac{dC_{Fesub}}{dt} = k_{ir} C_{Fedrg} - \frac{V_{mx} C_{n_{Fesub}}}{K_m + C_{n_{Fesub}}} - k_{dr} C_{n_{Fesub}} + k_{rp} C_{n_{festk}} \quad (\text{식 3-32})$$

$$\frac{dC_{Fedrg}}{dt} = k_{dr} Cn_{Fesub} - k_{ir} Cn_{Fedrg} - k_{ph} Cn_{Fedrg} \quad (\text{식 3-33})$$

$$\frac{dB_{sb}}{dt} = k_{ir} B_{drg} + k_{gr} B_{sb} - k_{dr} B_{sb} \quad (\text{식 3-34})$$

$$\frac{dB_{drg}}{dt} = k_{dr} B_{sb} - k_{st} B_{drg} - k_{ir} B_{sb} + k_{gr} B_{drg} \quad (\text{식 3-35})$$

B_{sub} : 배지의 박테리아수

B_{drg} : 배액의 박테리아수

k_{gr} : 박테리아의 지수증가 정수

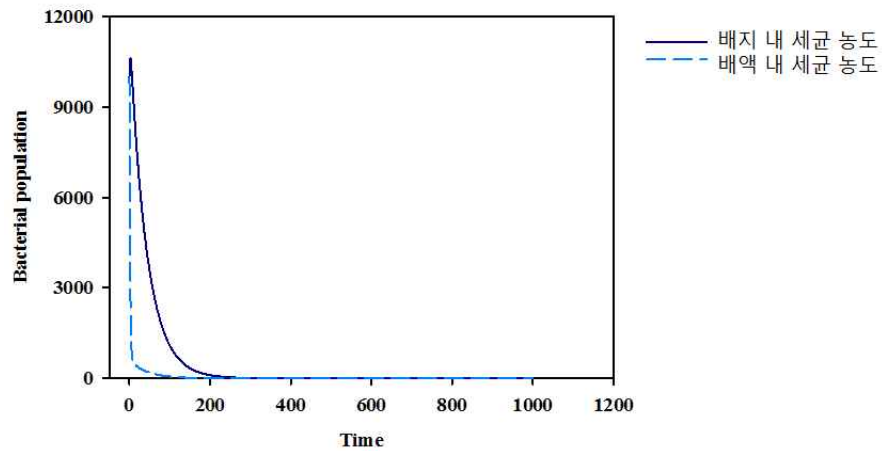


그림 3-5-45. 배액 탱크 자체 순환 UV 살균기가 장착된 시스템의 살균 결과 추정

- 배액 저장탱크에 UV 살균기를 설치하고 배관으로 유입되는 배액을 살균하고 관수 시 혼합탱크를 살균하는 시뮬레이션한 결과, 소규모 시스템에서 배액의 우수 살균을 통해 살균기 통과와 동시에 미생물 농도가 급감할 수 있기 때문에 적절한 시스템을 구현할 수 있다(그림 3-5-45). 그러나 시스템의 규모가 커질 경우 단방향 살균을 구현하려면 UV 살균장치의 규모가 증가해야 되는 제약이 있다. 또한 이 경우 살균 과정이 병목으로 작용할 수 있다. 자체 순환을 통하여 살균할 경우 살균을 통한 즉각적인 미생물 농도의 감소를 기대할 수는 없으나 지속적으로 미생물의 농도가 감소하는 방향으로 수렴하는 효과를 얻을 수 있다.
- 화성 상업농가에서의 실증실험 기간 동안의 비순환식과 UV 살균장치 적용 수경재배 시스템 간의 ATP 활성 테스트를 통한 미생물 농도의 간접 측정 결과 내부 순환 UV

살균 장치가 적용된 순환식 수경재배 시스템의 RLU 수치가 비순환식에 비해 유의적으로 낮은 수준에서 유지되었다(그림 3-5-46).

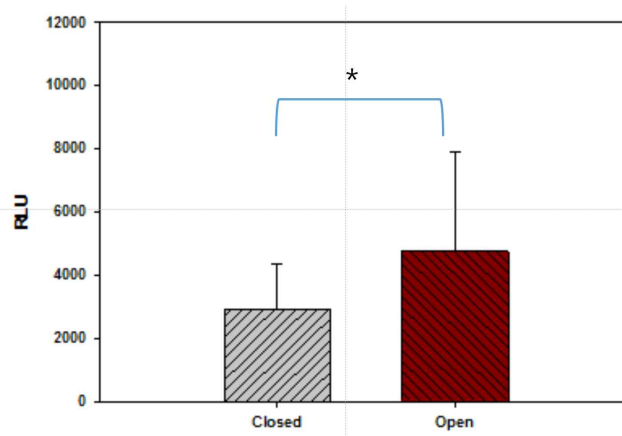


그림 3-5-46. 실증 실험 기간 동안의 순환식과 비순환식 미생물 농도 수치의 비교(P<0.05 by t-test)

(3) 양분 균형제어 및 그에 따른 작물 생육 비교

- 본 상업농가 실증 실험에서의 양분 균형 제어 알고리즘 적용에 따른 이온 농도 변화의 결과는 그림 3-5-47과 3-5-48과 같다. 양이온의 경우 연구농장 규모에서의 결과와 동일하게 비순환식 수경재배 시스템에서는 특정 이온의 농도가 초기 농도 대비 급격하게 감소하는 경우는 관찰되지 않았으나, 초기값 대비 유동이 크게 나타났다. 본 과제 개발 알고리즘이 적용된 순환식 수경재배 시스템에서는 K^+ 에서 조정 지점까지 빠른 감소 현상이 관찰되었다. 초기 조정 지점에서는 상기 설명된 progress curve analysis 방식에 따라 양분을 교정 하였으나, 초기값 대비 농도의 감소량이 크게 나타났으므로 단기 증량 과정을 수행하였다. 이 이후의 기간에서는 실험 초기의 감소 경향이 나타나지 않았으며 농도 변화의 수렴구간에 진입한 것으로 판단된다.
- 음이온의 경우 $H_2PO_4^-$ 에서 비순환식과 순환식 수경재배 시스템에서 증가 후 상대적으로 빠른 감소 경향이 관찰되었다(그림 3-5-48). 비순환식의 경우 이러한 감소 경향은 관찰되지 않았으며, 순환식의 경우는 조정지점 전까지 지속적인 감소 경향이 관찰되었다. 이후 양이온의 경우와 동일한 과정으로 농축 양액의 교정 및 양분 단기 증량 과정을 거쳤으며, K^+ 의 조정 이후의 경향과 유사하게 변화가 안정되었음을 확인할 수 있었다. SO_4^{2-} 의 경우 증가 경향이 관찰되었으며 조정 이후 완만한 감소 경향을 나타냈다.

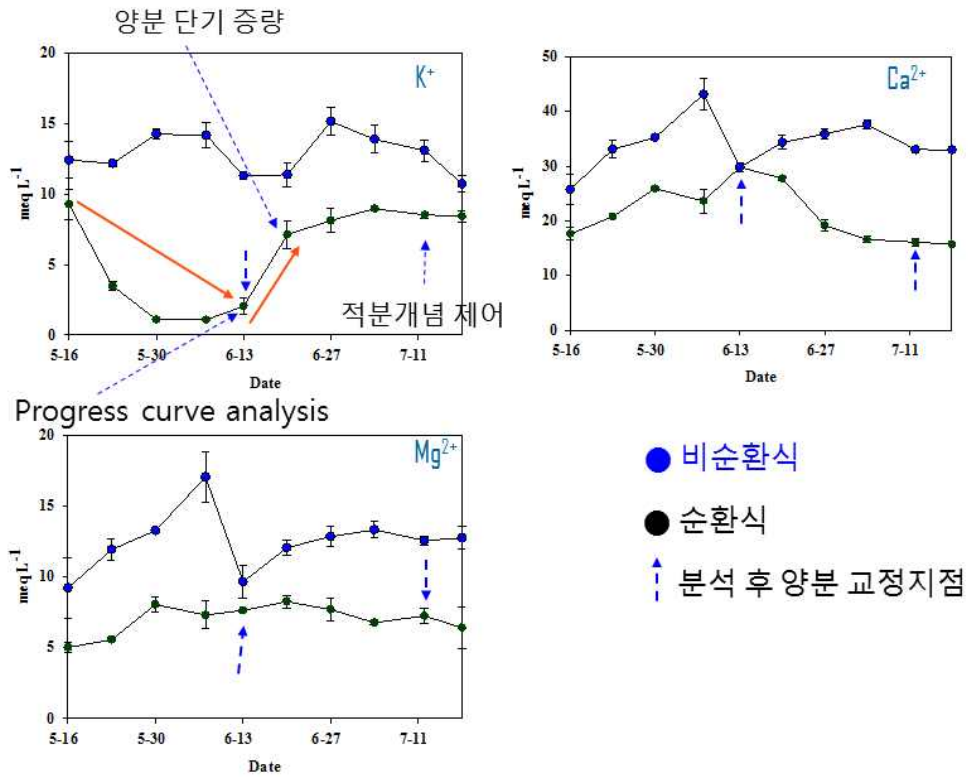


그림 3-5-47. 양분 균형 제어 알고리즘 적용 순환식 수경재배와 비순환식 수경재배 시스템의 양이온 농도 변화

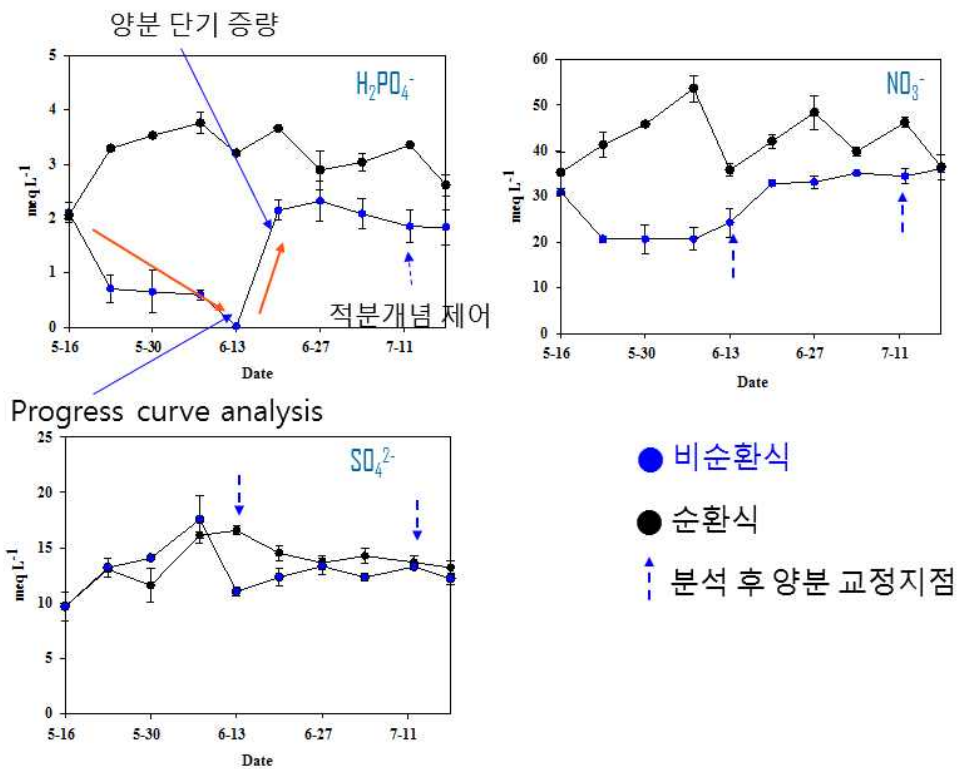


그림 3-5-48. 양분 균형 제어 알고리즘 적용 순환식 수경재배와 비순환식 수경재배 시스템의 음이온 농도 변화

- 상기의 농도 변화 데이터를 비율로 변환하여 양분의 균형 변화 경향의 비교에 대한 결과는 그림 3-5-49와 같다. 비순환식 수경재배의 양이온과 음이온 간의 비율에서는 순환식의 조정 전 비율 변화에 비해 변화 범위가 넓지 않은 것으로 나타났다. 그러나 순환식 수경재배 시스템의 경우 초기 분석 전까지는 양이온의 경우 K^+ 의 감소와 Ca^{2+} 의 증가의 방향으로 비율 변화가 발생하였으나, 교정 이후 다시 초기 비율의 지점으로 복귀하는 것을 확인 할 수 있었으며, 음이온의 경우 SO_4^{2-} 의 증가와 $H_2PO_4^{2-}$ 의 감소의 방향으로 이동하였다가 다시 초기 지점의 방향으로 회복하는 것을 확인할 수 있었다.
- 순환식 수경재배 시스템에서 관찰된 양분 농도와 비율 변화는 파프리카 과실 생산성과 당도, 배꼽썩음과 발생률의 비교에서 통계적으로 유의적인 영향을 미치지 않았다(그림 3-5-50)
- 엽분석 결과, 상위엽의 T-N(전질소)와 하위엽의 Mg 함량의 유의적인 차이가 나타났으나 파프리카 재배 매뉴얼의 목표 범위 대비 결핍이나 과잉의 수준에 해당되지 않았다. T-N과 Mg의 경우 각각 0.15%p, 0.11%p의 차이가 나타났다(표 3-5-3). 최초 양분 교정시기에 수확한 파프리카의 경우 Mg와 S에서 유의적인 차이가 관찰되었으며 각각 0.02%p정도이었다. 양분 교정 후에 해당하는 후기 수확에서는 이온 함량의 유의차를 확인할 수 없었다.
- 이러한 결과는 본 연구과제에서 이론적인 해석을 통해 수립한 비료 투입량 최소화 및 양분 균형 제어 기술의 이론적 기반이 여러 환경 변수의 영향이 미치는 실제에서의 재배 실증 실험에서 성립함과 이를 상업 농가의 현장으로 규모를 확장하였을 때도 같은 수준에서 구현될 수 있음을 의미한다.

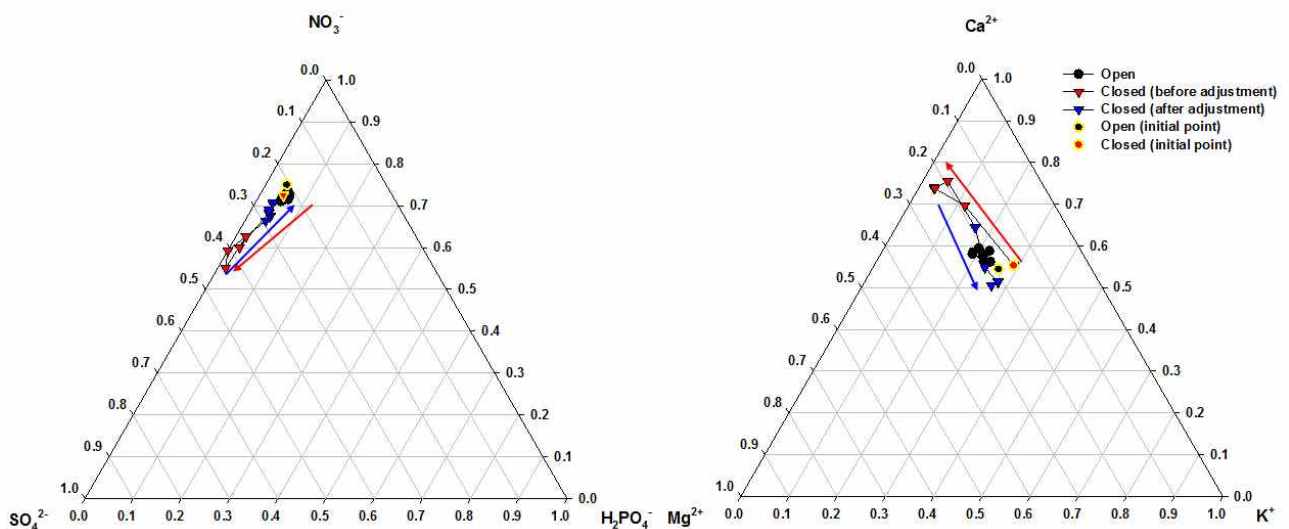


그림 3-5-49. 양분 균형 제어 알고리즘 적용 순환식 수경재배와 비순환식 수경재배 시스템의 양분 균형 변화

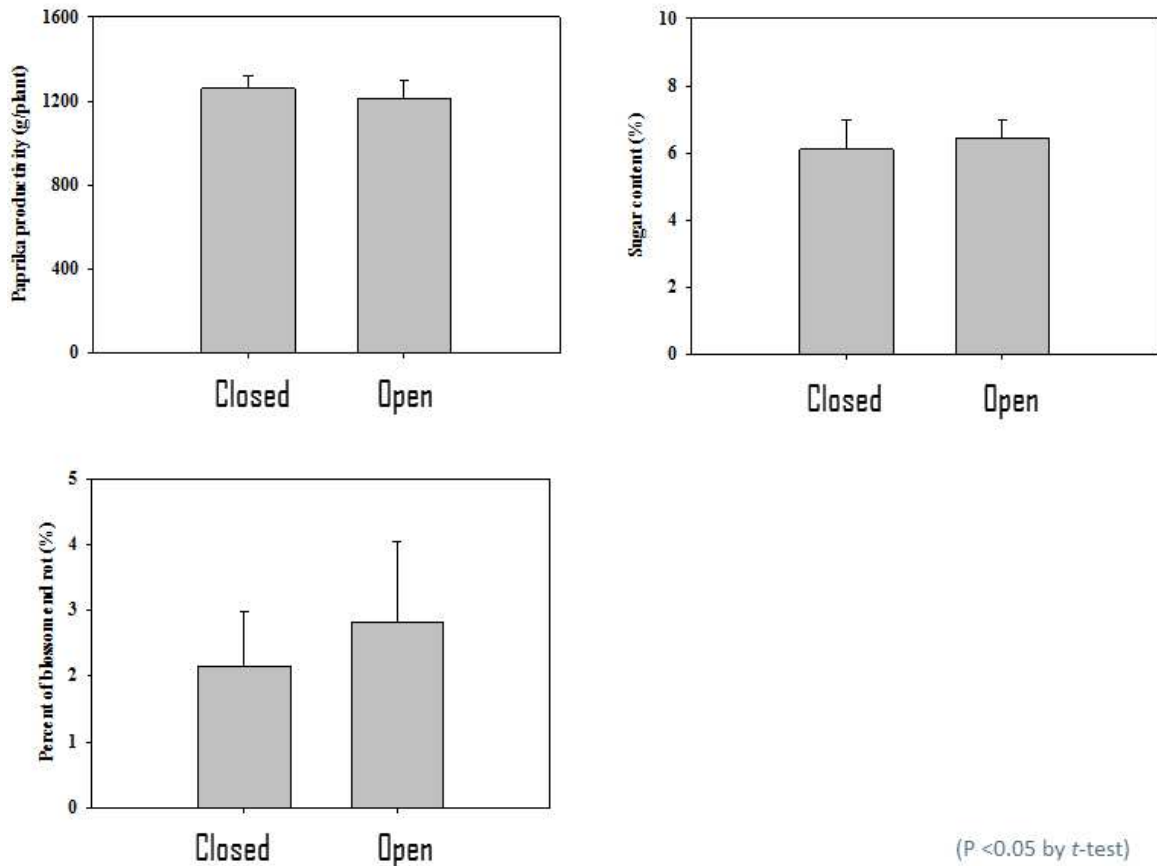


그림 3-5-50. 양분 균형 제어 알고리즘 적용 순환식 수경재배와 비순환식 수경재배 시스템의 생산성, 당도, 배꼽썩음과 발생률

표 3-5-3. 양분 균형 제어 알고리즘 적용 순환식 수경재배와 비순환식 수경재배 재배 파프리카의 이온 함량 비교

분석위치	Treatment	T-N	P	K	Ca	Mg	S
상위엽	비순환식	3.52±0.06	0.36±0.06	6.14±0.81	3.15±0.12	0.44±0.04	0.52±0.03
	순환식	3.67±0.02	0.42±0.03	5.38±0.33	3.54±0.22	0.51±0.05	0.57±0.02
	t-test	*	ns	ns	ns	ns	ns
하위엽	비순환식	2.59±0.15	0.21±0.03	5.72±0.83	4.53±0.17	0.58±0.01	0.42±0.07
	순환식	2.65±0.26	0.25±0.05	6.61±0.65	4.46±0.27	0.69±0.04	0.52±0.05
	t-test	ns	ns	ns	ns	*	ns
과실(6.14)	비순환식	2.01±0.14	0.38±0.02	2.66±0.12	0.09±0.01	0.11±0.009	0.23±0.01
	순환식	1.85±0.09	0.33±0.02	2.36±0.34	0.08±0.01	0.09±0.003	0.21±0.01
	t-test	ns	ns	ns	ns	*	*
과실(7.12)	비순환식	2.16±0.18	0.38±0.03	2.62±0.13	0.07±0.01	0.11±0.011	0.22±0.03
	순환식	1.99±0.08	0.37±0.01	2.63±0.41	0.08±0.02	0.11±0.013	0.23±0.01
	t-test	ns	ns	ns	ns	ns	ns

(P < 0.05 by t-test)

제6절 이온 센서를 이용한 양액 내 주요 이온의 모니터링 및 제어 알고리즘의 개발

1. 양액 내 개별이온 측정 인자 발굴

가. 연구배경

- 이온선택성전극은 용액 내 특정 이온에 대해 선택적으로 투과성을 가지거나 반응성을 가지는 물질을 이용하여 막을 만들고 해당 이온과 반응하여 생기는 기전력과 기준 전극의 전위차를 통해 농도를 측정하는 원리를 이용한 센서로 경량화 가능, 편의성, 높은 선택성과 반응속도와 같은 장점을 지니고 있어 양액 적용에 대한 높은 가능성을 지니고 있다. 이를 양액에 적용하기 위해 일차적으로 먼저 측정하고자 하는 개별이온에 대해 선택적으로 작용할 수 있는 측정 물질을 선별할 필요가 있다.

나. 연구개발 목표

- 본 연구는 양액 내 주요 개별이온 중 NO_3 , K, PO_4 에 대해 선택적으로 반응할 수 있는 물질을 선별하고 적용성을 확인하기 위해 다양한 농도의 샘플들에 대해 반응특성을 분석하였다.

다. 재료 및 방법

(1) NO_3 , K 측정 물질 선별

- 양액 내 질산이온(NO_3^-)과 칼륨(K)을 검출하기위한 감지물질로서 고분자(PVC) 지지체 막(matrix membrane) 형태의 이온선택성막(ion selective membrane)을 선별하였다(표 3-6-1).

표 3-6-1. NO₃, K 이온선택성 막 조성표

	NO ₃	K
Ionophore	TDDA 4.00wt% , 8mg	Valinomycin 0.50wt% , 1mg
Plasticizery	NPOE 67.75wt% , 135.5mg	DOS 64.7wt% , 129.4mg
Matrix	PVC 28.25wt% , 56.5mg	PVC 32.8wt% , 65.6mg
Additive		KTpClPB 0.5wt% , 1mg
inner solution	0.01M NaNO ₃ + 0.01M NaCl	0.01M KCl

(2) 양액 내 PO₄ 감지 물질 선발

- 양액 내 인산이온에 만족스럽게 선택적으로 반응하는 화합물질은 아직까지 보고되지 않았지만, 코발트 물질이 인산에 효과적으로 반응하는 것으로 보고되어 코발트 Rod를 이용하였다. 인산선택성전극 제조는 먼저, 순도 99.95% 지름 5 mm의 코발트 막대 (Sigma-Aldrich)를 길이 6 mm로 절삭하고 1 mm 구리선과 납땀 연결하여 구성하였다. 구리선과 연결된 코발트는 외경 6 mm, 내경 5 mm으로 가공된 PE 플라스틱 몸체 내에 삽입하여 제작하였다.
- 코발트 표면은 연마지(Sand paper)를 이용하여 (400, 1500 grit) 표면을 다듬은 후 증류수에 30분 동안 컨디셔닝 후에 KHP 0.025 M (pH = 4.0)에 30분간 컨디셔닝을 거쳐서 인산에 반응하는 코발트 전극을 제작하였다.

(3) NO₃, K 이온선택성전극 검량식 개발

- 비료염 NaNO₃, KCl, CaCl₂, MgCl₂, NaH₂PO₄, KNO₃, Ca(NO₃)₂를 이용하여 NO₃⁻, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, PO₄⁻이온이 주어진 농도조건에 맞도록 올바르게 조합하여 용액을 제조하여 캘리브레이션 식을 작성하였다. Ca 전극은 상용 제품 (9720BNWP, Orion, USA)을 사용하였다. 실제 양액에서의 특성을 알아보기 위해 실제 양액샘플에서의 측정실험을 시행하였는데, 샘플 용액은 실제 수정재배에서 사용되고 있는 PBG 암면재배용 파프리카 양액을 사용하였고 본 양액을 희석 또는 스파이킹 방법을 사용하여 양액샘플을 제작하였다. ISE에서 예측된 값과 표준분석실(NICEM)에서 분석된 데이터를 1:1비교하여 최종

검증을 수행하였다.

(4) 코발트전극 PO₄ 예측 성능 시험

- KHP버퍼를 사용하여 pH 4.0에 고정시킨 용액에 10⁻⁶~10⁻¹ KH₂PO₄ 용액을 사용하여 반응 대역을 확인하였으며, 코발트전극의 검량 설정은 1ppm부터 1000ppm까지 실제 상추양액을 기반으로 하여 PO₄의 농도만 변화를 주어 수행하였다.

라. 연구수행 내용 및 결과

- 제작한 NO₃, K 이온선택성전극과 코발트 전극은 그림 3-6-1과 3-6-2와 같았으며 측정 실험은 그림 3-6-2 (우)와 같이 전극을 다발로 연결하여 수행하였다.



그림 3-6-1. 제작한 이온선택성 막 (좌)와 이온선택성 전극(우)



그림 3-6-2. 제작된 코발트 전극 (좌)와 센서 감도 측정 실험 (우).

- 조제한 용액의 농도변화에 대한 ISE전극의 반응특성은 표 3-6-2와 그림 3-6-3에서 확인할 수 있으며, 그 결과 질산태 질소, 칼륨 전극 모두 0.9이상의 높은 결정계수 값이 나타난 것을 확인하였다.

표3-6-2. NO₃-K-Ca 농도에 대한 EMF 반응의 검량식

Ion	Regression equation	Coefficient of Determination (R ²)	SEC (ppm)
NO ₃	$Y = -44.37\log X + 228.6$	0.949	10.823
K	$Y = 60.526\log X - 49.627$	0.988	6.103
Ca	$Y = 27.343\log X - 50.27$	0.988	2.795

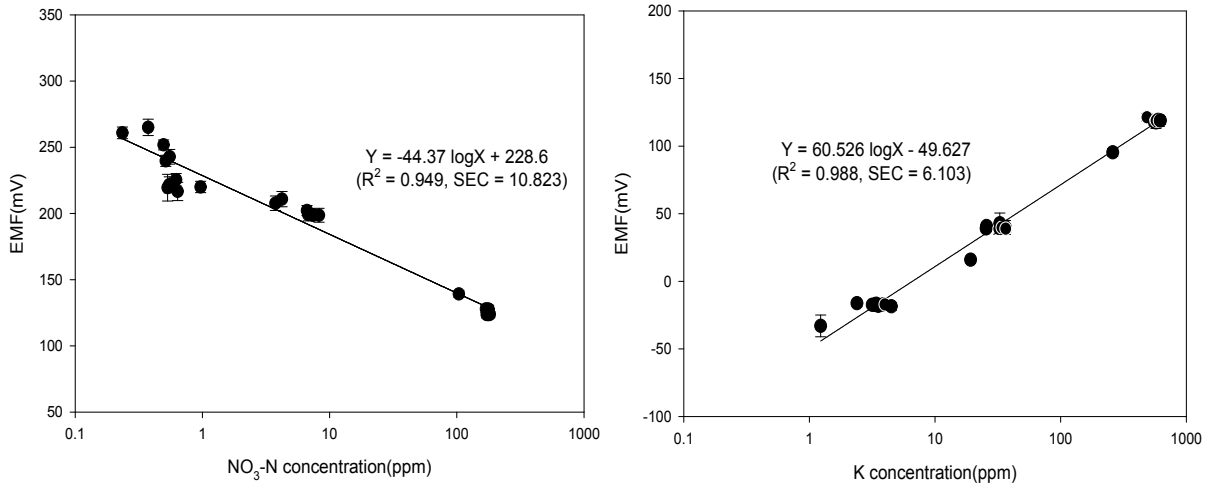


그림 3-6-3. NO₃-P-K-Ca-Mg 혼합 용액에서 직접 측정법으로 얻어진 ISE 반응 특성

- 실제 양액 측정에서 질소, 칼륨 전극의 경우 기울기는 0.96, 표준 예측오차 23.78ppm으로 표준분석기보다 평균 4% 낮게 예측하고 오차값은 약 20ppm으로 나타났으며 결정계수 또한 0.99로 매우 유의한 것으로 나타나 개발된 이온선택성 전극들이 양액 내 이온농도 감지에 효과적일 것으로 판단되었다 (그림 3-6-4).

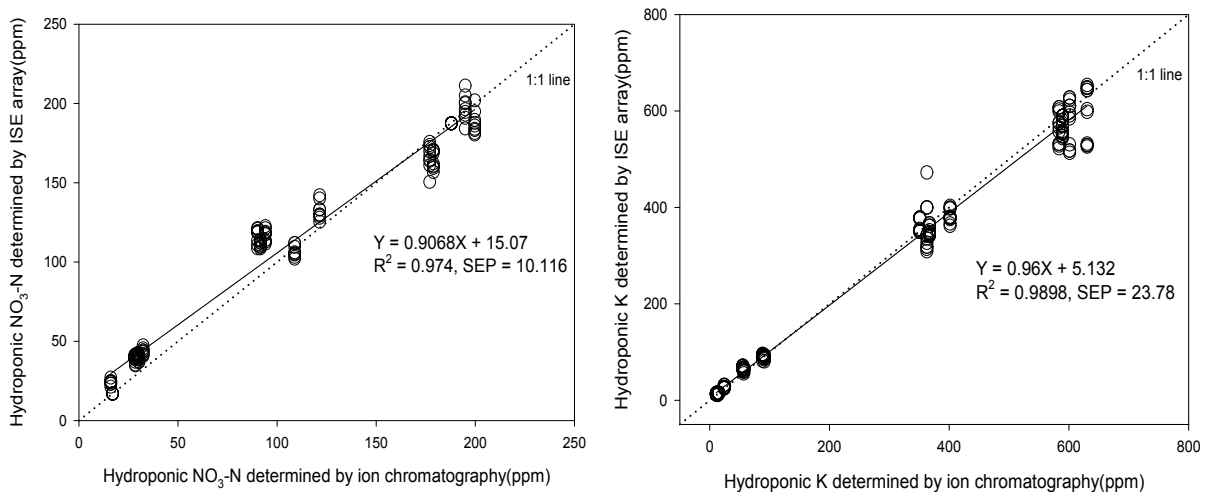


그림 3-6-4. 다양한 농도의 실제 양액에 적용한 ISE 측정값과 이온 크로마토그래피법으로 구한 농도 간 상관관계 (좌 : NO₃-N, 우 : K)

- 코발트 전극의 경우 인산농도 10^{-4} 의 대역부터 반응 감도가 $-40\sim 50$ mV/decade로 나타나 양액 내에서 이온농도 감지가 가능 할 것으로 판단하였다 (그림 3-6-5 (좌)). 실제 상추양액을 기반으로 한 PO_4 의 검량식은 결정계수가 0.91로 높은 상관관계를 갖는 것으로 나타났다 (그림 3-6-5 (우)).

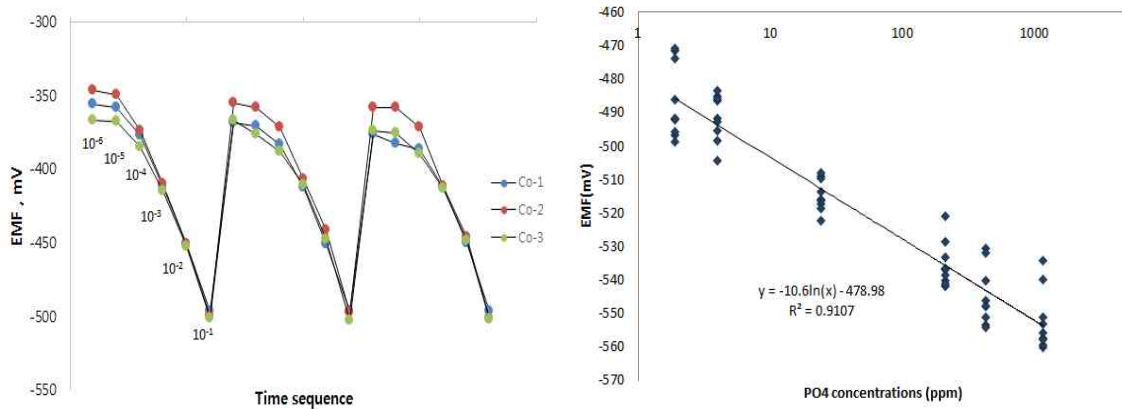


그림 3-6-5. 제작한 코발트 전극의 농도별 반응특성 (좌)와 검량식 (우).

- 하지만 실제 코발트 전극을 통해 인산이온 농도를 예측한 검증 그래프에서는 예측성능은 약 14% 오차가 있었고 결정계수 0.81을 갖는 결과가 나타나 신호 보정 및 컨디셔닝 처리 방법의 개선이 요구되었다 (그림 3-6-6).

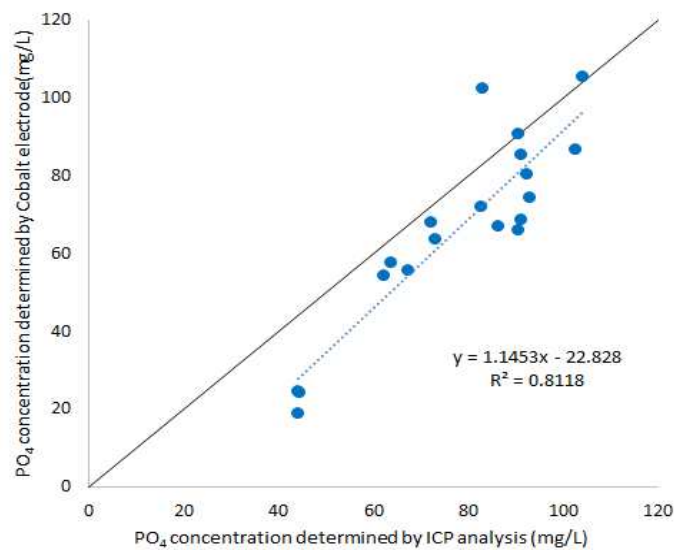


그림 3-6-6. 표준분석법과 코발트전극 예측성능 비교 결과.

2. 이온선택성 신호 안정성 확보 기술

가. 연구 배경

- 이온선택성 전극에서 선택성 막의 측정성능은 화학적 평형에 의해 영향을 받을 수 있다. 이론적으로, Nernstian 식 (식 3-6-1)에 따르면 온도의 변화는 화학센서가 가진 slope에 영향을 미치며 (그림 3-6-7), 이 외에도 다양한 물리적, 화학적 인자들이 온도에 영향을 주며, 인자들을 3가지로 정리가 가능하지만 각각의 인자들이 복잡하게 연관되어 있어 이론적인 해석이 어렵다. 따라서, 이러한 영향 인자들을 실험적으로 구명하고, 각 간섭에 따른 영향을 보정할 수 있는 기술의 개발이 필요하였다.

$$\frac{dE}{dT} = \frac{dE_o}{dT} + \left(\frac{RT}{Z_A F} \log[a_i] \right) + \left(\frac{RT}{Z_A F} \frac{d \log[a_i]}{dT} \right) + \dots \quad \text{식 3-6-1)}$$

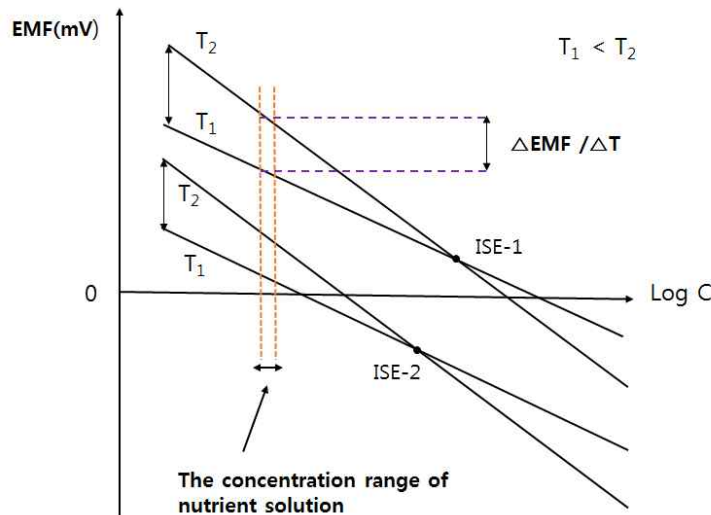


그림 3-6-7. 서로 다른 온도에서 나타나는 전극 캘리브레이션 영향성

나. 연구개발 목표

- 이온선택성 전극의 측정값에 영향을 줄 수 있는 요인들을 구명하고 각 간섭에 대한 보정 방법을 개발하는 것이 본 연구의 목표이며 이를 위해 각 요인들을 변화시켜 이에 대한 이온선택성 전극 측정값의 변화를 관찰하여 정량화 및 보정법을 개발하고자 하였다.

다. 재료 및 방법

(1) NO₃, K, Ca 전극의 신호 표류현상 연구

- 전극을 각 이온에 대해 열배 차이가 나는 농도 (10^{-2} M, 10^{-3} M)를 가진 용액을 조성하고 전극을 어레이 형태로 연결하여 신호 변화를 관찰하였다. 양액 내 질산이온(NO₃⁻)과 칼륨(K)을 검출하기 위한 감지물질로 고분자(PVC) 지지체 막(matrix membrane) 형태의 이온선택성막(ion selective membrane)을 사용하였다 (표 3-6-1). 칼슘전극은 Orion사의 상용 전극(part no. 9720bnwp, Orion, USA)을 사용하였다. 다수의 이온선택성전극 센서의 적용성 시험을 위해 그림 8과 같은 아크릴 소재의 측정용 수조를 제작하였다. 전극에서 발생하는 기전력 (EMF)을 측정하기 위해 Orion사의 이중접합전극 기준전극 (Part no. 900200, Orion, USA)을 접지하였고 이를 Agilent사의 다채널 데이터로거 (LXI-34972A, Agilent, USA)에 연결하여 데이터를 수집 저장하였다.

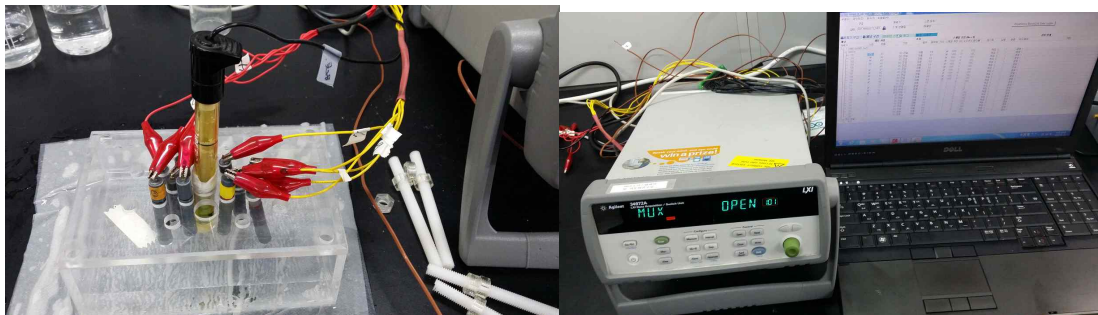


그림 3-6-8. 전극 시험용 수조와 데이터로거.

(2) 온도 영향성 실험

- 다수의 전극을 상추양액에 침지시킨 후 양액의 온도를 15~30℃로 변화를 주어 온도와 EMF 변화의 상관관계를 확인하였다. 온도 변화는 핫플레이트(SP131015Q, Cimarec, USA)을 이용하여 용액에 온도 변화를 주고 온도 측정은 J-Type의 써모커플 (34307A Thermocouple Kit, Agilent, USA)을 사용하였다. 실제 현장에 적용에 용이 하도록 변화되는 전극의 EMF는 상대적인 값을 비교하기 위해 15℃일 때의 EMF를 기준으로 측정하였다. 2차 실험에서는 양액의 온도 범위를 22~60℃로 크게 하여 그 결과를 관찰하였다.

(3) 매트릭스 효과 실험

- 동일한 측정 개별 이온 농도를 갖지만 그 외 이온 농도들은 다른 샘플들을 조성하여 시료에 존재하는 다른 이온이 전극 기전력반응에 어떠한 영향을 미치는지를 실험적으로 구명하고자 하였다. 이를 위해 증류수, 상추 양액, 파프리카 양액을 기준으로 하여 각각 조제 후 이를 기반으로 파프리카 양액 및 NO₃, K, Ca 기준액을 측정하여 비교하였다. 각 고농도 액의 NO₃, K, Ca 농도는 각각 300, 1656, 380 mg L⁻¹ 으로 동일하게 제작하고 (표 3-6-3) 저농도 액은 이를 10분의 1로 희석하여 조제하였다.

표 3-6-3. Matrix effect 효과 측정을 위한 샘플 조성 (단위: mg L⁻¹)

	증류수	기반	상추 양액	기반	파프리카 양액	기반
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	2240	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	2240		KCl	89.8
Fe-EDTA	0	Fe-EDTA	16		Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	2239
KNO ₃	776	KNO ₃	776		O	200.1
NH ₄ H ₂ PO ₄	0	NH ₄ H ₂ PO ₄	57		NH ₄ NO ₃	4.10375
MgSO ₄ · 7H ₂ O	0	MgSO ₄ · 7H ₂ O	123		Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	527.63
H ₃ BO ₃	0	H ₃ BO ₃	16		2O	5.51125
MnCl ₂ 4H ₂ O	0	MnCl ₂ 4H ₂ O	0.72		KNO ₃	170.1275
ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	0.09		Fe(EDTA)	427.4313
CuSO ₄ · 5H ₂ O	0	CuSO ₄ · 5H ₂ O	0.04		MgSO ₄ ·7H ₂ O	1.69
Na ₂ MoO ₄ 2H ₂ O	0	Na ₂ MoO ₄ 2H ₂ O	0.013		MnSO ₄ ·H ₂ O	0.9875
					ZnSO ₄ ·7H ₂ O	2.86
					Na ₂ B ₄ O ₇ ·10H ₂ O	0.2
					2O	0.12125
					CuSO ₄ ·5H ₂ O	
					Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	
					O	

(4) 신호 보정 적용 및 평가

- 본 연구에서는 현장에서 이온센서의 신호 보상을 위해서 2점 정규화 방법을 적용하였다. 기존 표준 2점에 시료를 측정하고 변화된 기울기와 절편값을 보상하여 이미 작성된 검량선을 사용하는 2점 정규화 방법의 시행을 측정 전마다 수행하는 것으로 하여 신호 보상을 수행하였다. 측정 전극은 어레이 형태에 NO₃, K, 상용 Ca전극 (9720bnwp, Orion, USA)을 사용하여서 다수의 센서의 신호 변화를 관찰하였다. 2점 정규화에서 기

준점으로는 고농도: N-1000 ppm, K-500 ppm, Ca-300 ppm, 저농도: N-100 ppm, K-50 ppm, Ca-30 ppm를 사용하였다. 하루에 한 번씩 2점 정규화 용액에서 나타난 decade 당 mV 차이, 감도를 측정하고 연속 측정에 대비하여 저농도 2점 정규화 용액에 다음 측정 때까지 센서를 보관하였다.

라. 연구수행 내용 및 결과

- NO₃ 전극들은 21일까지는 시간이 지나면서 상대적으로 전극신호값이 유지되는 경향을 나타냈지만, 21일 이후에는 감도가 떨어지면서 평균 EMF가 상승되는 시점을 확인하였고 (그림 3-6-9), K와 Ca 전극의 경우는 질산전극에 비해 신호표류현상이 높게 나타남을 확인하였다 (그림 3-6-10, 3-6-11).

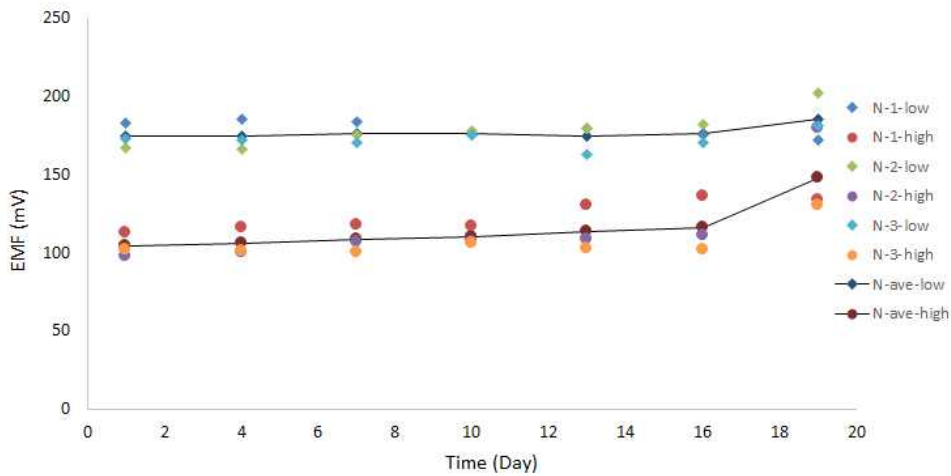


그림 3-6-9. NO₃ 전극 신호 측정 결과

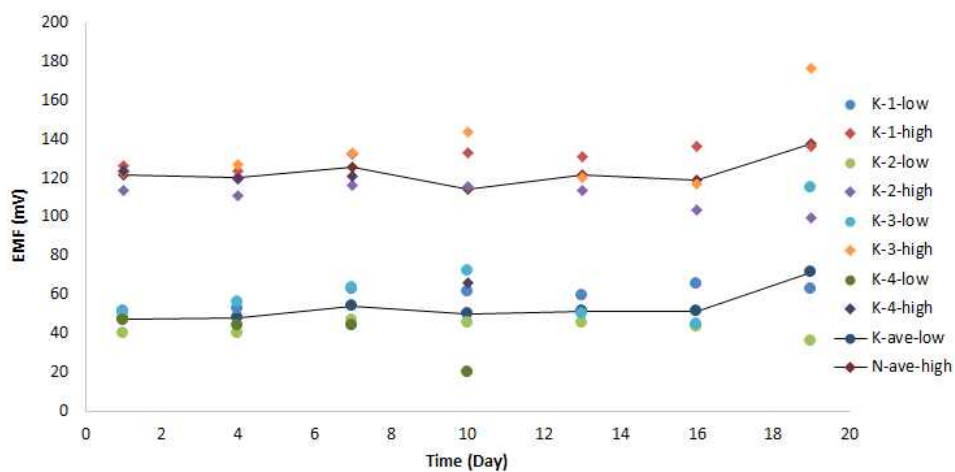


그림 3-6-10. K 전극 신호 측정 결과

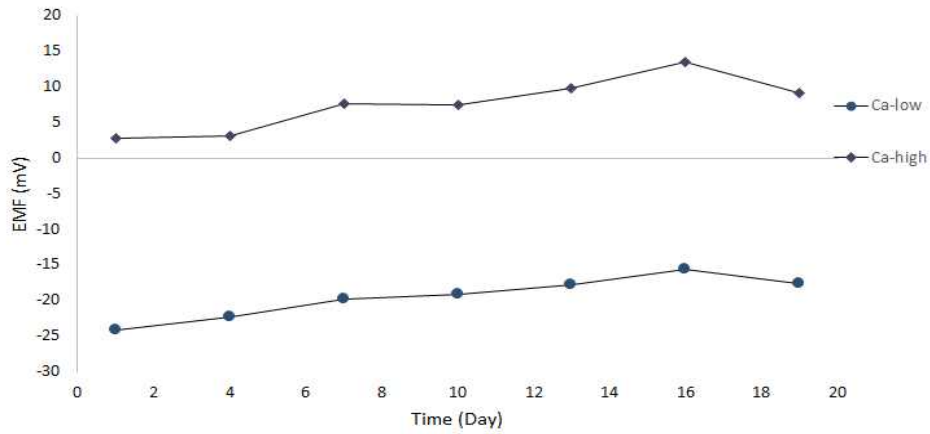


그림 3-6-11. Ca 전극 신호 측정 결과

- 온도 영향성의 경우, 온도가 높을수록 측정되는 신호의 출력이 높아지는 것을 확인하였으며, 측정한 온도 구간에서는 온도와 신호세기 간에 선형적인 관계식을 수립할 수 있음을 확인하였다 (그림 3-6-12, 3-6-13).

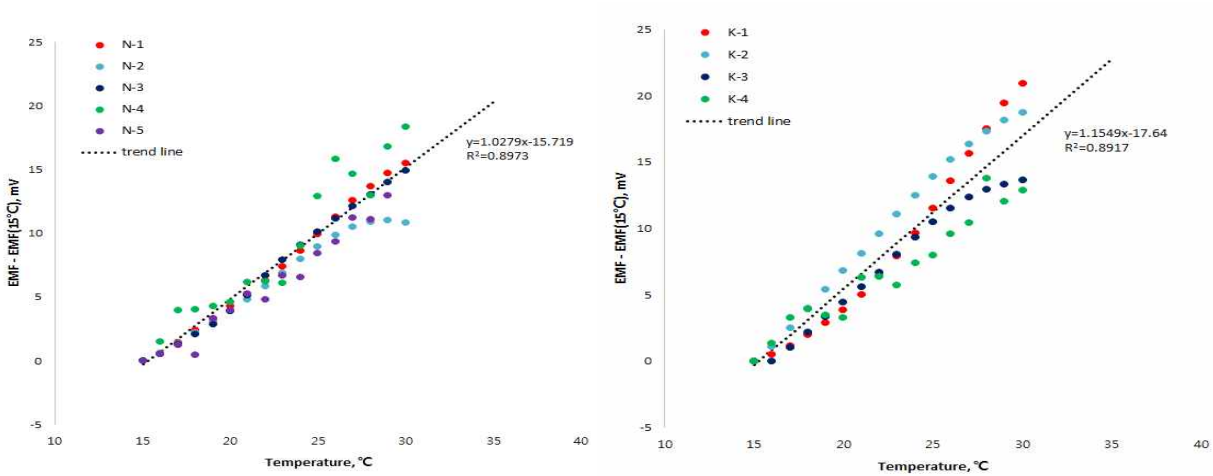


그림 3-6-12. 온도와 신호 기전력 (EMF) 간의 상관관계: NO₃ (좌), K (우)

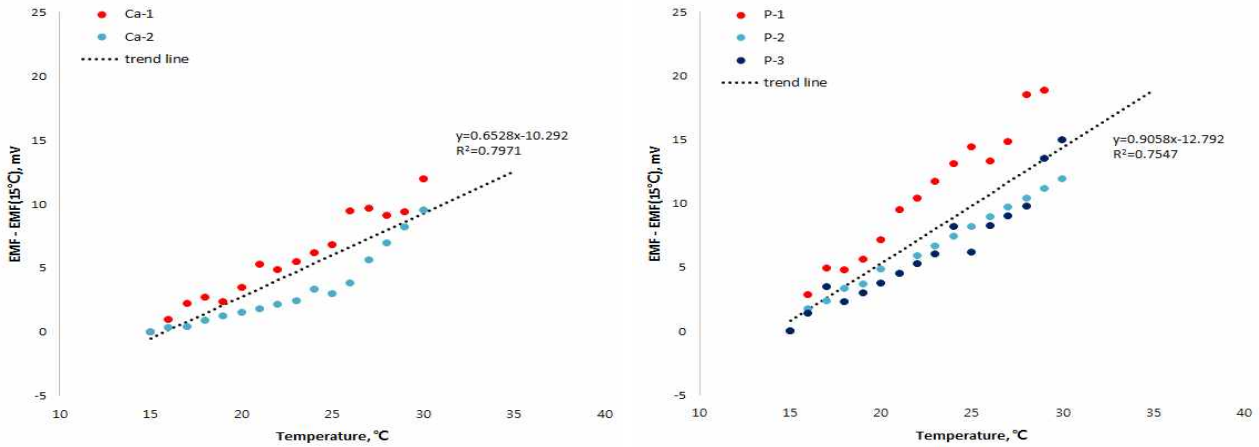


그림 3-6-13. 온도와 신호 기전력 (EMF) 간의 상관관계: Ca (좌), PO₄ (우)

- 온도 영향성 2차 실험에서도 선형성을 확인하였으나, K 전극은 1.639 mV/°C의 경사도를 가진 것으로 나타나 1차 실험과 다소 다른 경향이 나타났음을 확인하였다 (그림 3-6-14). 2차 실험에서는 전극 간에도 개체 차이가 존재하여 온도 영향성의 보정을 일괄적으로 처리하는 것은 어려울 것으로 생각되었다.

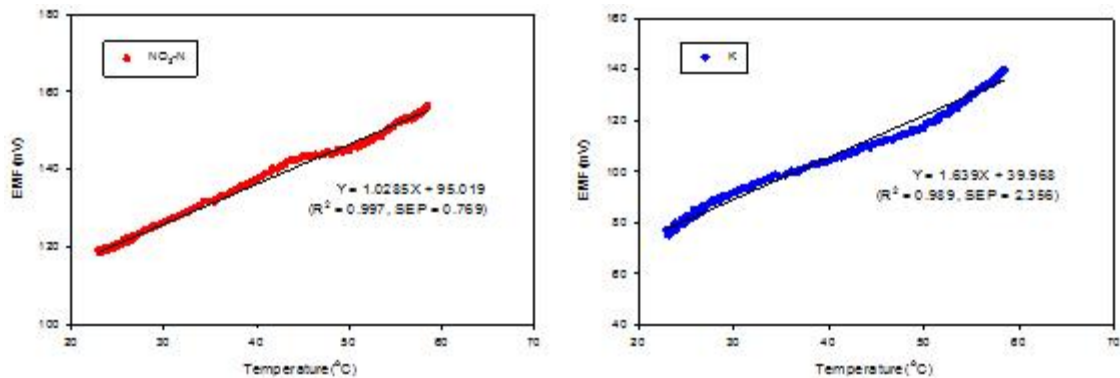


그림 3-6-14. 온도범위 22~60°C에서 온도와 신호 기전력 (EMF) 간의 상관관계: NO₃ (좌), K (우).

- 서로 다른 이온 매트릭스에서 측정된 NO₃, K, Ca 전극의 EMF 값은 그림 15과 같이 나타났다. 증류수 기반의 저농도 용액에서 칼륨과 칼슘, 그리고 고농도 샘플 중에서는 칼슘 전극에서 유의성이 나타났지만 질산에서는 서로 다른 매트릭스에 대해 유의미한 차이가 나타나지 않았으며, 유의한 차이가 있다고 나타난 값들에서도 그 차이가 1 mV 내외 수준으로 실질적으로 매트릭스가 영향을 주지 않는다고 할 수 있다.

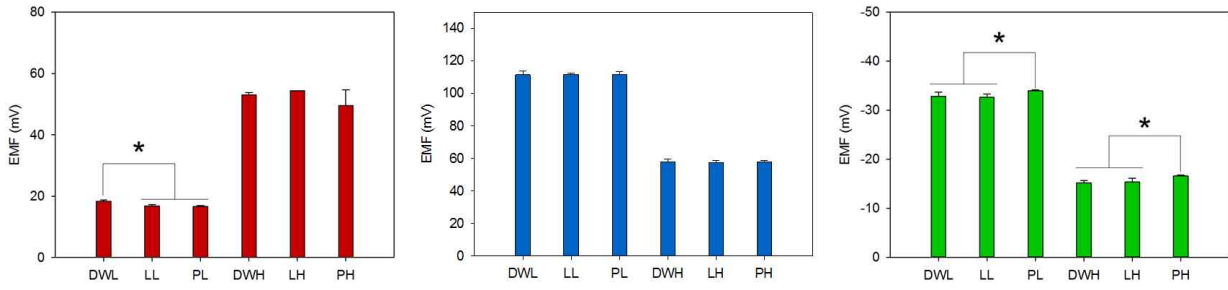


그림 3-6-15. NO₃, K, Ca 전극에 서로 다른 매트릭스를 가진 샘플 측정 결과. (DWL: 저농도 증류수 기반, DWH: 고농도 증류수 기반, LL: 저농도 상추 양액 기반, LH: 고농도 상추 양액 기반, PL: 저농도 파프리카 양액 기반, PH: 고농도 파프리카 양액 기반. *: 95% 수준에서 유의미한 차이가 나타남.)

- 센서 신호의 안정성 확보를 위해 먼저, 신호 표류현상 보정방법을 고안하였다. 전극의 Drift는 전극마다 변화되는 편차가 규칙성이 없어 이를 위해 표준 2점에 시료를 측정하고 변화된 기울기와 절편값을 보상하여 이미 작성된 검량선을 사용하는 방식으로 멤브레인을 교체하면서 발생할 수 있는 EMF의 드리프트 문제와 매 측정시 마다 검량선을 작성하는 문제점을 제거할 수 있는 2점 정규화 방법 (2-point normalization)을 적용하였다 (그림 3-6-16).

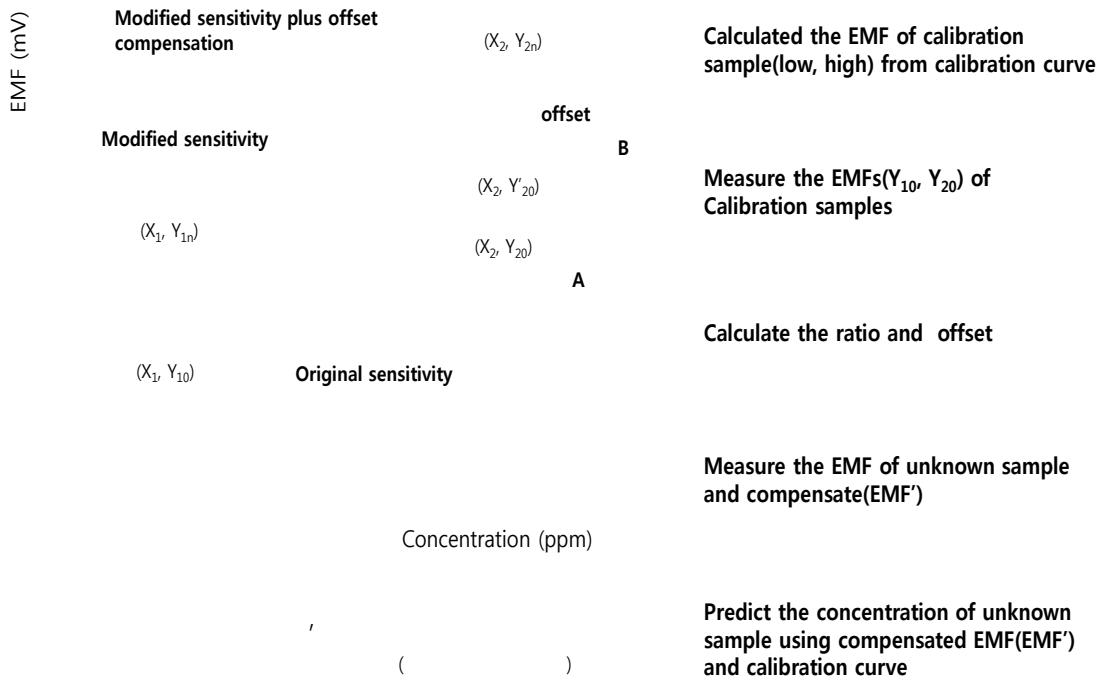


그림 3-6-16. 2점 정규화 방법의 개략도 (좌) 및 적용 알고리즘 (우)

- 2점 정규화 방법의 적용을 통한 전극 신호 보정 효과는 그림 3-6-17과 같았다. 그림 아래 쪽의 표는 2점 정규화를 통해 보상된 값과 온도보상까지 더한 예측 값들을 ICP 분석된 값들과 비교하여 RMSE를 %로 나타낸 표이며, 실제 양액 모니터링에서 2점 보상에 온도 보상을 추가로 수행한 결과이다. NO₃ 와 Ca 이온만이 약 1% 내외의 오차율을 보상 할 수 있었지만, K 전극의 보상은 효과가 미비하였고, 그 원인으로서는 시험 현장이 내부이며 온도변화가 기준으로 잡은 온도에 비해 ± 1℃ 정도의 큰 변화가 없었기 때문으로 사료된다. 이를 통해 온도 변화를 적게 할 경우 그 자체로 온도 보상 효과가 가능할 것으로 보이며 특히 2점 정규화 용액의 온도를 샘플의 온도와 동일하게 맞춘다면 온도에 의한 영향 요소를 배제할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

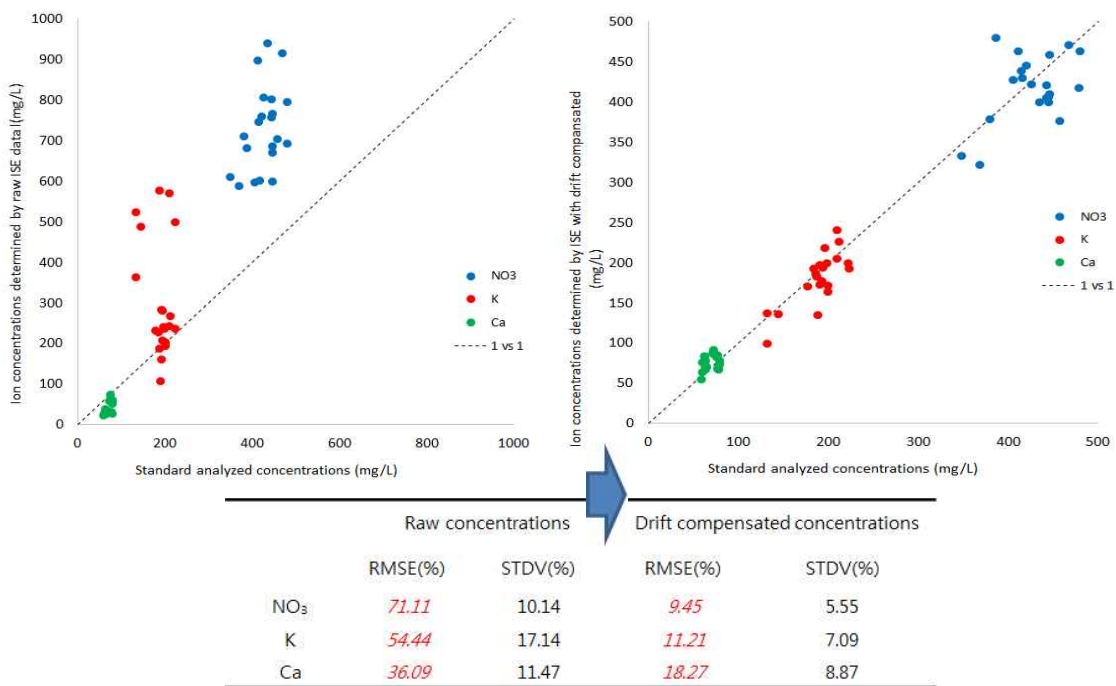


그림 3-6-17. 2점 정규화 방법 적용 전 (좌)과 적용 후 (우)의 농도 예측 성능 비교.

- 연속측정 결과에서는 그림 18에 나타난 바와 같이 각 센서별 평균 감도가 N: -50.5267 mV/dec, K: 35.7331 mV/dec, Ca: 18.53587 mV/dec로 양이온들의 경우 기존에 확인되었던 실험실에서의 감도 (K: 60.526 mV/dec, Ca: 27.343 mV/dec)보다 감소한 것으로 확인하였다. 이는 ISE 내부의 충진 용액들의 농도와 컨디셔닝 용액으로 사용한 2점 정규화 용액 간에 농도 차이가 존재하여 장기간 컨디셔닝 시 농도 차이에 의한 충진용액 변질 및 누출 등에 의한 영향이 나타날 수 있는 가능성 (Tang et al. 2012)을 보여주나, 2점 정규화 방법에 의해 센서를 적용할 수 있고 추후 현장 운용에서 센서 내구성 증진을 위해 각 ISE 내부 충진용액의 농도와 맞춘 별도의 컨디셔닝 용액을 활용한다면 좀 더 센서 감도

유지가 가능할 것으로 예상되었다.

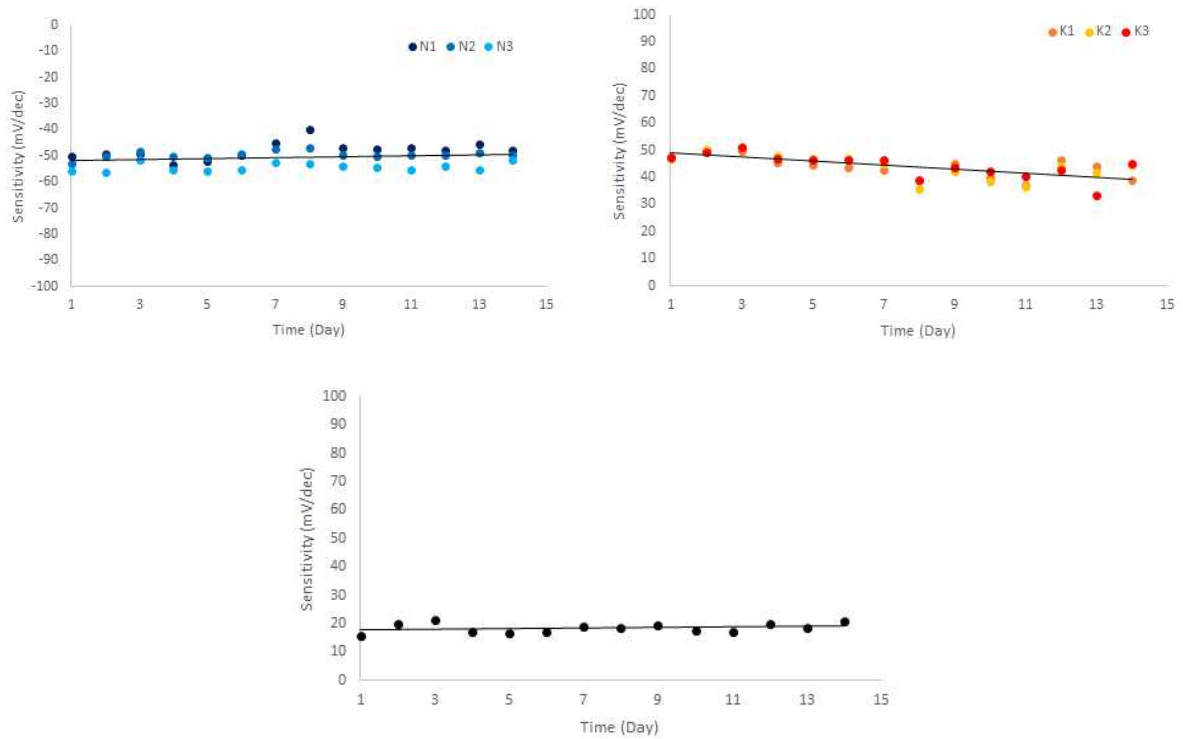


그림 3-6-18. 2점 정규화 방법을 적용하였을 경우의 시간별 감도 변화정도

- K전극의 경우는 그림 3-6-19에 나타난 바와 같이 상대적으로 EMF의 변화가 시간대별로 커서 빈번한 정규화 방법 적용이 필요한 것으로 나타났다. 또한 2점 정규화 방법을 적용하지 않고 농도를 예측한 것과 2점정규화 방법을 적용하였을 경우의 예측 성능은 그림 3-6-20에 나타난 바와 같아 2점 정규화 방법이 장기 측정에 있어서 성능에 큰 개선효과를 보이는 것으로 나타났다.

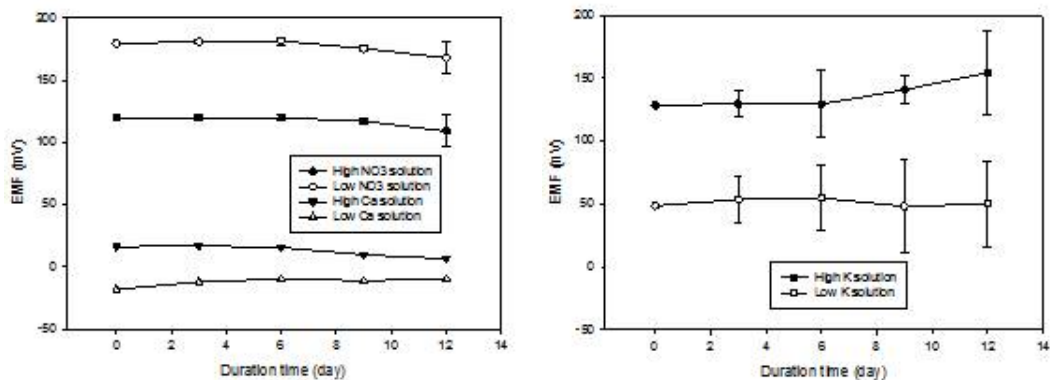


그림 3-6-19. 시간에 따른 이온센서의 EMF값 변화 정도(왼쪽: 칼슘과 질산 ISE, 오른쪽: 칼륨 ISE)

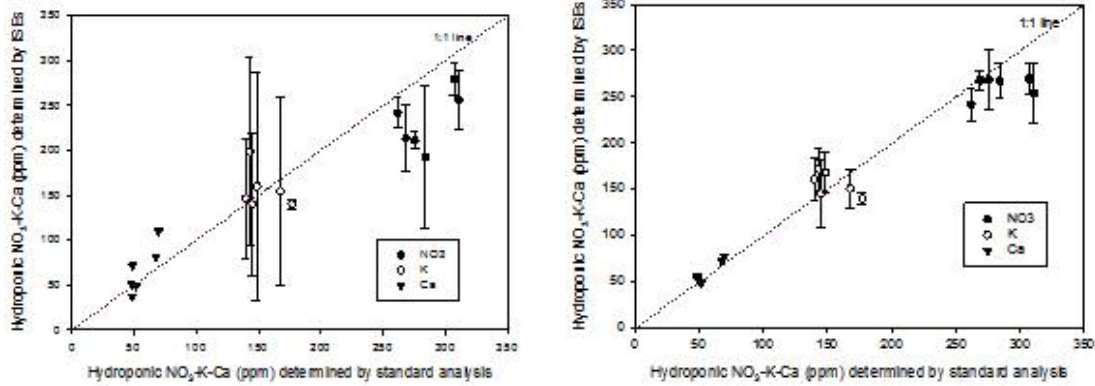


그림 3-6-20. 2점 정규화방법 적용에 의한 센서 예측성능의 효과

3. 현장 양액 농도 자동 측정 장치 개발

가. 연구배경

- 개발한 개별이온 센서들을 현장에 적용하여 양액의 농도를 측정하기 위해서는 양액 샘플을 담아 측정하기 위한 수조와 앞의 연구에서 선발한 ISE 어레이, 그리고 ISE 안정성 및 내구성 확보를 위한 2점 정규화 용액과 컨디셔닝 용액 보관 용기, 센서 신호의 노이즈 제거부가 필요하여 이를 개발하고자 하였다.

나. 연구개발 목표

- 정기적인 센서의 세척, 컨디셔닝, 측정 및 센서 이상 여부를 판단하기 위해서는 측정을 자동화하여 측정을 수행하고 기록해야하며 추가적으로 측정된 샘플 및 사용한 2점 정규화 용액 및 컨디셔닝 용액의 공급 및 제거를 위해 공급용 펌프와 제거를 위한 모터 및 모터 드라이브 등의 구성이 요구된다. 본 연구에서는 이에 PC 기반으로 시료 측정, 세척, 센싱 데이터 수집, 모터와 펌프 등의 제어를 수행하는 자동 측정 장치를 개발하고자 하였다.

다. 재료 및 방법

- 이온측정에 요구되는 요인들을 고려하여 개념도를 그림 3-6-21과 같이 제작하였다.

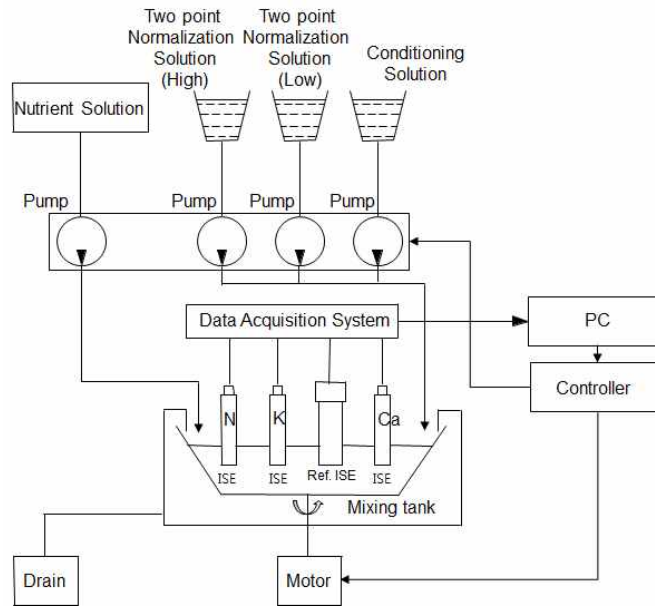


그림 3-6-21. 자동농도시험장치의 개요도

- 구상한 개념 설계를 기반으로 시스템을 양액 시료의 이온농도를 측정하는 시료측정부, 고농도 및 저농도의 2점 정규화 용액 및 센서 유지를 위한 컨디셔닝 공급부, 펌프 및 모터의 제어와 센서값 신호처리 및 로깅이 이루어지는 제어부로 구성하였다. 시료측정부의 샘플 홀더는 측정에서는 일정시간 동안 시료셀을 저속으로 회전시키면서 시료 샘플을 교반하여 측정의 균일도를 높이고 세척에서는 세척용액 (컨디셔닝 용액)을 자동으로 공급하여 세척한 뒤 고속회전으로 배출하는 방식을 채용하였으며 컴퓨터를 기반으로 다채널의 데이터를 동시에 수집할 수 있도록 구성하였다.

라. 연구수행 내용 및 결과

- 제작한 시스템은 표 3-6-4과 같이 시료측정부 및 공급부, 모터를 포함하여 구동부, 신호처리 및 로깅은 제어부로 구분할 수 있다. 센서 모듈은 기 개발된 센서를 이용하여 어레이 타입으로 샘플 측정 챔버에 적용 가능하도록 설계하였다 (그림 3-6-22 (좌)). 펌프의 동작을 제어하기 위해 Pump controller로 National Instrument 사의 NI USB6009 제품을 Control box II에 설치하였고 ISE의 측정에 영향을 줄 수 있는 노이즈 제거를 위해 National Instrument 사의 I/O 커넥터 블록인 SCC68 제품에 AI13을 적용하여 시그널 컨디셔닝 회로로 사용하였다 (그림 3-6-22 (우)).
- 또한, 측정 시 교반과 세척, 사용액 배출을 위한 모터 및 모터 컨트롤러, 양액과 정규화

용액 공급을 위한 펌프 및 릴레이, 시스템 제어 및 운용 프로그램을 탑재하는 메인 시스템, 샘플 측정통 및 센서 어레이, 독립 전원부 시스템 등을 기반으로 자동 개별이온 모니터링 시스템을 구성하였다 (그림 3-6-23).

- 양액의 이온 농도를 측정은 샘플홀더 안에서 이루어지도록 하였으며 ISE 센서를 어레이의 형태로 만들어 K, NO₃, Ca를 동시에 측정을 하여 원하는 이온의 농도를 선택하여 측정할 수 있도록 구성하였으며 샘플 홀더 안에는 양액의 교반과 ISE 세척을 위한 모터와 모터의 회전 속도 제어를 위한 모터드라이버를 설치하였으며 최대 10,000 RPM까지 회전할 수 있게 하였다.
- Sample holder 아래에는 High 용액과 Low 용액을 담은 양액 탱크를 준비하였으며 펌프는 모든 처리 과정에서 샘플 양액과 Low 용액, High 용액의 공급 및 배출을 위한 동력을 제공하는 장치로 이동하는 양액의 양을 정량적으로 제어하기 위해 Thomas사의 SR10/30 시리즈의 정량펌프를 사용하였다.

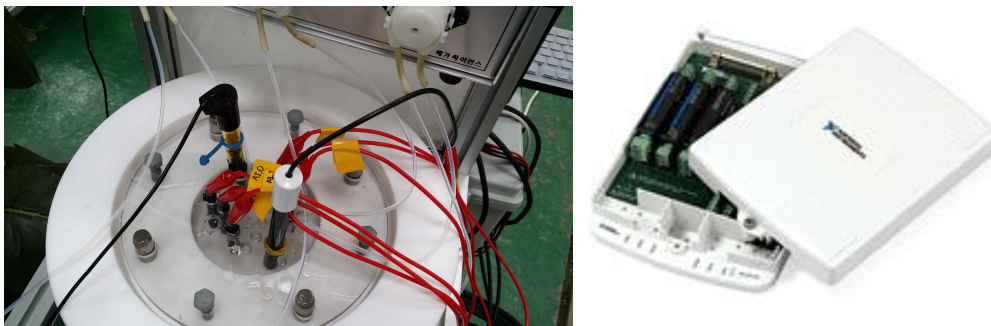



그림 3-6-22. 구성된 센서 어레이 (좌) 및 신호 컨디셔닝 보드 (우)

표 3-6-4. 자동시험장치의 주요 구성품 사양

제어부 (Controller part)	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Motion Controller - NI PCI-7390 - 4-axis motion command

	<ul style="list-style-type: none"> ■ A/D converter - NI PCIe-6341 - Analog input: 16bit, ± 10 V - Analog output: 16bit, ± 10 V - Digital I/O: 24 line, Max. 1 MHz
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Noise rejecting connector block - NI SCB-68A - Shielded I/O connector block
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Motor controller - Mitsubishi MELSERVO-J4 - Power: AC220V, 50W ■ Servo motor - Mitsubishi HG-KR/HG-MR/HG-SR series - Range: Max. 4,000,000 pulse/rev
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Preamplifier - OMEGA, PHTX-22 - Gain preamplifier
<p>구동부 (Motor & Pump part)</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> ■ Sample holder - Teflon housing - Volume: 200 mL - Connecting hole: 8

	<ul style="list-style-type: none"> ■ DC 무접점 전자 릴레이 - Voltage range: 10~200VDC
	<ul style="list-style-type: none"> ■ 연동펌프 (Peristaltic pump) - THOMAS, SR10/30 series - Flow rate: 55 ml/min - Tube: Silicon - Power: DC24V

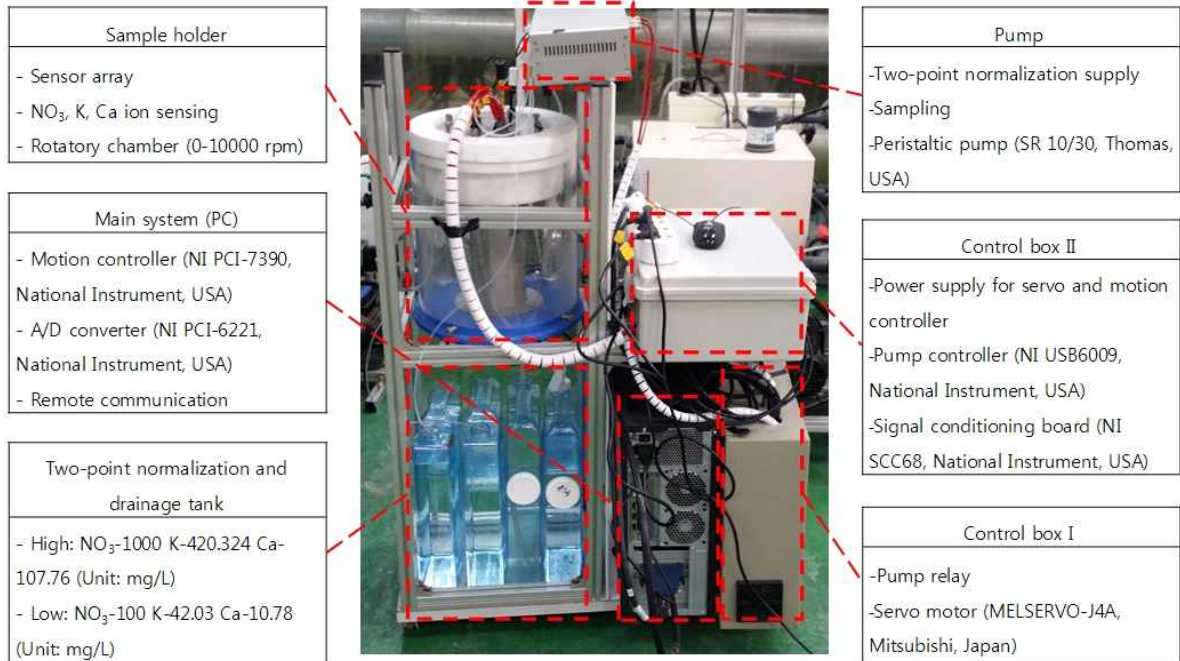


그림 3-6-23. 개발한 현장 적용형 양액 개별이온 모니터링 시스템

4. 양액 농도 자동 측정 장치 프로그램 구성

가. 연구 배경

- 제작한 양액 농도 자동 측정 장치는 자동화된 운용 알고리즘과 센서 측정값을 기반으로 2점 정규화 보정을 적용하여 농도값을 구하는 연산을 수행할 수 있도록 관련 알고리즘을 개발하고자 하였다.

나. 연구개발 목표

- 현장 측정에서는 지속적으로 센서 세척 및 샘플링을 통한 측정이 요구되므로 이에 대한 자동화가 요구되며 이를 달성하기 위해 타이머 기반으로 자체적으로 센서 세척, 2점 정규화 적용, 샘플링, 연산을 통한 농도 계산 및 출력, 메인 제어 시스템에서 활용하기 위한 통신 프로토콜 등이 구축된 프로그램을 개발하고자 하였다.

다. 재료 및 방법

- 먼저 앞서 설계한 양액 농도 자동 측정 장치의 측정 및 제어 로직 블록 다이어그램 구성하였다 (그림 3-6-24).

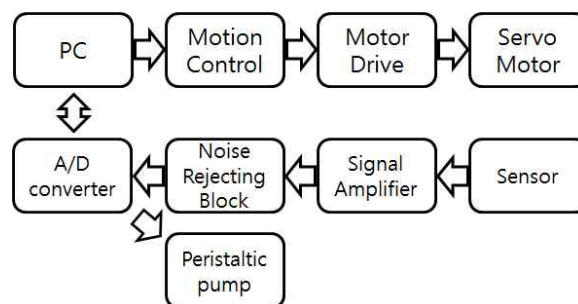


그림 3-6-24. 자동시험장치 구성품 연결도

- 즉, 이를 기반으로 센서 모듈 및 이온 측정 알고리즘을 제어하기 위해 NI LabVIEW (v2015, National Instrument, USA)를 사용하여 앞의 연구에서 구한 검량식을 기준으로 2점 정규화 계산식을 삽입하여 센서 측정값을 보정 및 농도값으로 환산할 수 있도록 구성하였다. 구성한 PC 기반의 제어 및 측정 알고리즘을 그림 25와 같다. ISE에서 측정된 전

극 신호는 LabVIEW에서 구성된 프로그램을 통해 캘리브레이션식을 계산하여 현재 양액의 ppm 농도를 예측하고 샘플링 속도는 1 kHz로 하여 100 개의 데이터를 이동 평균하여 계산하도록 설계하였다. Setting 창을 통해 장비 운용 시작, 펌프 변경 또는 사용자 설정에 따른 세척 및 측정, 측정 균일화를 위한 회전 및 폐액 배출을 위한 모터 회전속도 및 시간 설정이 가능하도록 프로그램 제작을 진행하였다.

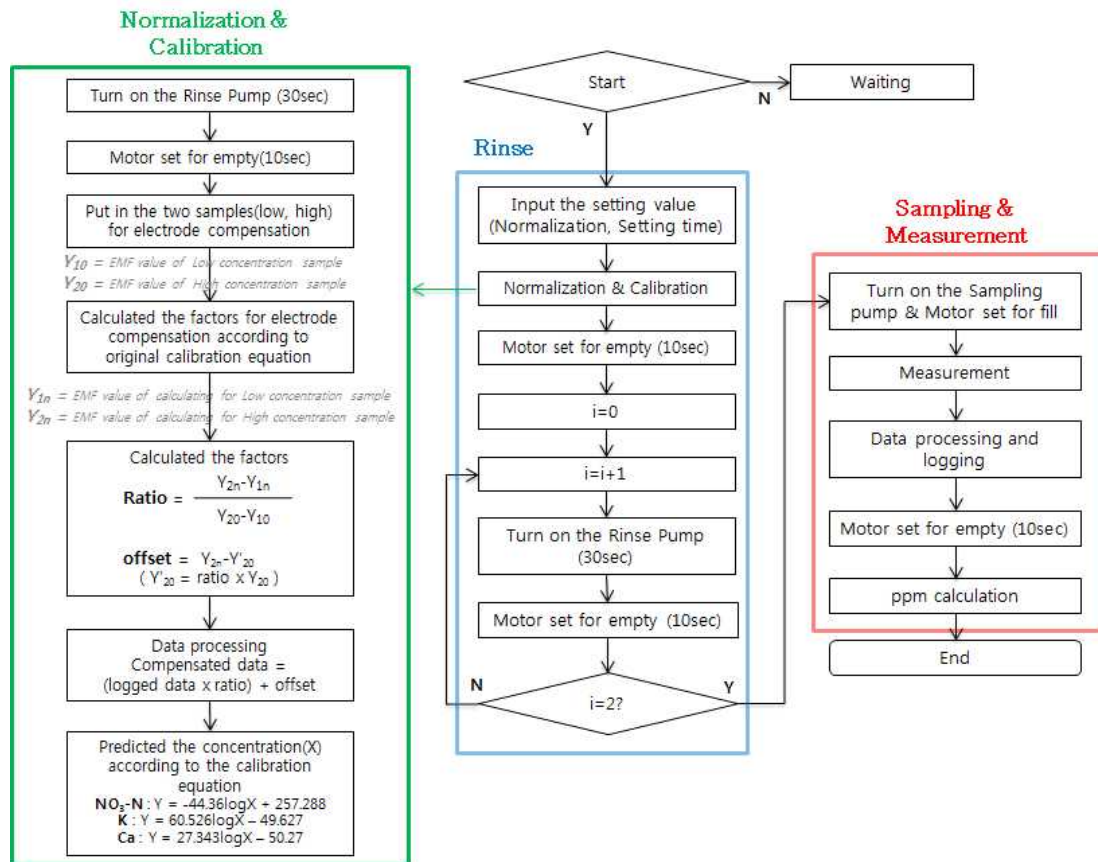


그림 3-6-25. 자동시험장치 운용 알고리즘 플로우차트

- 개별 이온의 EMF 값을 농도로 변환 시키는 회귀 방정식이 올바르게 구현되었는가에 대한 검증은 NO₃와 K 전극의 Low 용액과 High 용액을 대상으로 측정 및 농도 환산이 정상적으로 수행되는지 시험하여 진행하였다. 사용된 Low 용액과 High 용액은 NO₃와 K에 대해 각각 100, 50 mg/L, 그리고 1000, 500 mg/L로 조제하였고 각 이온별 농도 회귀식은 선행연구(Jung et al. 2015)를 참고하였다 (표 3-6-2).

라. 연구수행 내용 및 결과

- 측정 작업을 통해 양액 제어 작업의 결과를 평가할 수 있도록 타이머 기반으로 프로그래

밍하였으며 구성된 인터페이스는 그림 3-6-26과 같다. 구성된 인터페이스는 수동 측정 시작 버튼과 정지 버튼, 그리고 각 펌프별 동작시간 설정과 회전형 챔버의 회전속도 조정, 센서 어레이 구성에 따른 채널변경과 타이머 설정이 가능하도록 구성되었다. 측정된 개별 이온농도값과 이를 평균한 값들이 각각 출력되도록 하였다.

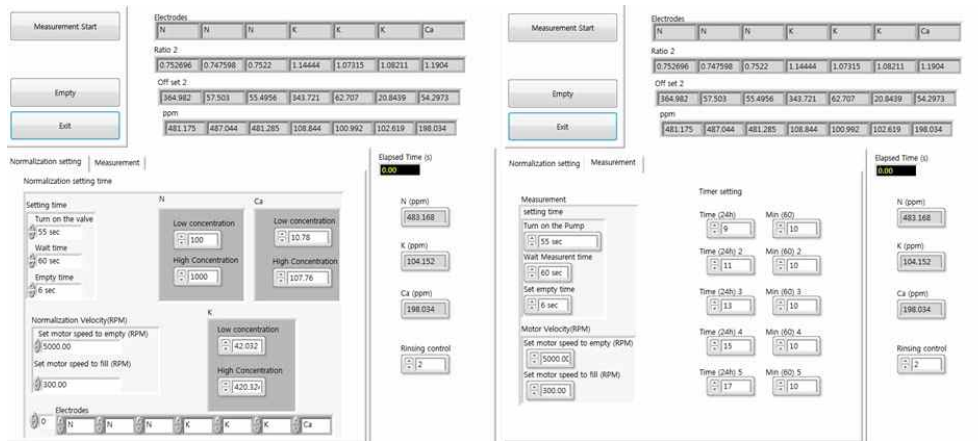


그림 3-6-26. 개별 이온 모니터링 장치의 인터페이스

- 주관기관 연구팀의 양액 제어 시스템을 조작하고 그에 따른 양액 제어 성능을 개별이온을 통해 확인할 수 있도록 모니터링 시스템에서 측정된 개별이온 농도값을 TCP/IP 통신망을 통해 전송할 수 있도록 통신 코드를 그림 3-6-27과 같이 삽입하였다.

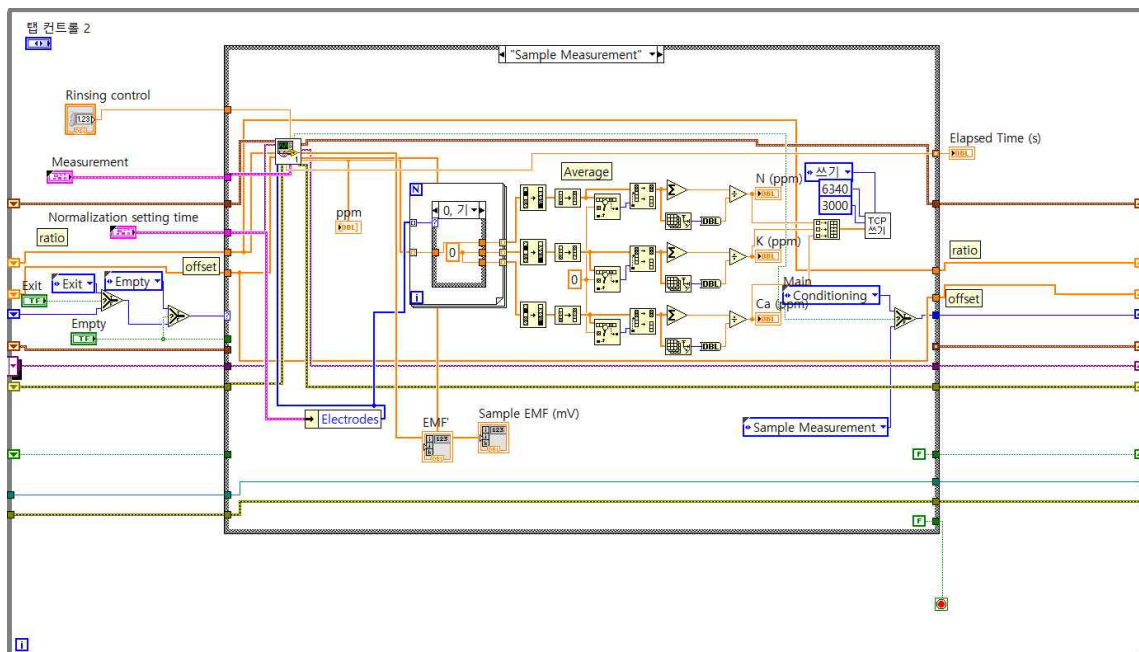


그림 3-6-27. 센서어레이에 대한 개별이온농도 측정 연산 및 통신코드

- 고안한 소프트웨어의 농도 연산 성능 평가 실험 결과에 따르면 표 3-6-5과 3-6-6와 같이

각 용액에 대해 목표한 값에 근접한 값들을 확인할 수 있었으며 NO₃와 K는 Low 용액에 대해 평균적으로 각각 0.56%와 0.18%, High 용액에 대해서는 1.73%와 0.472%의 오차를 나타내어 센서의 신뢰성이 적용 가능한 수준임을 확인하였다. 이 결과에서 2점 정규화 및 어레이 타입 적용에 의해 단일 센서로 운용하는 것보다 높은 수준의 정확성을 획득할 수 있었음을 확인하였다. 또한 센서는 측정 시간에 따라 드리프트 등이 발생하여 EMF 값은 변화하였지만 2점 정규화를 통해 값의 보정과 감도 유지가 성공적으로 이루어졌음을 확인할 수 있었다 (그림 3-6-28).

표 3-6-5. NO₃와 K 전극의 Low용액 측정 실험 결과

	NO ₃			K		
	N1	N2	N3	K1	K2	K3
Ratio	0.92	0.90	0.90	1.62	1.25	1.23
Offset	41.76	41.69	39.56	18.01	192.81	-7.23
Low EMF(mV)	138.16	141.23	143.67	21.725	-112.12	49.21
High EMF(mV)	89.83	91.85	94.27	59.084	-63.51	98.49
Sample EMF(mV)	137.99	141.12	143.58	20.93	-111.04	49.34
Concentration(ppm)	100.79	100.53	100.38	47.61	52.63	50.30

표 3-6-6. NO₃와 K 전극의 High용액 측정 실험 결과

	NO ₃			K		
	N1	N2	N3	K1	K2	K3
Ratio	0.92	0.89	0.89	1.59	1.24	1.23
Offset	42.41	42.42	40.07	22.78	189.74	-6.53
Low EMF(mV)	137.86	141.40	143.88	19.15	-110.06	48.46
High EMF(mV)	89.38	91.67	94.21	57.24	-61.27	97.58
Sample EMF(mV)	88.91	91.32	93.94	56.47	-60.41	97.97
Concentration(ppm)	1022.57	1016.65	1012.70	477.04	520.76	509.28

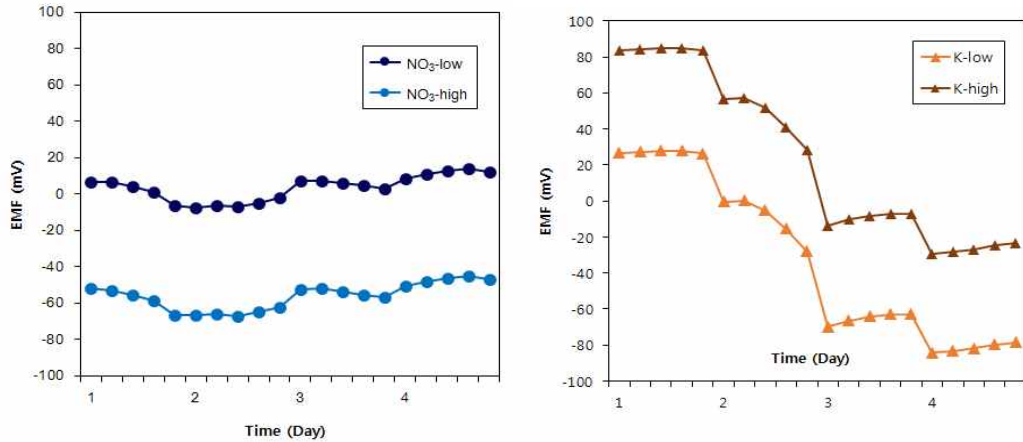


그림 3-6-28. Low용액과 High용액에서의 센서 EMF값 측정 결과: (좌) NO₃, (우) K.

5. 양액 농도 자동 측정 장치 현장 운용 실험

가. 연구 배경

- 구성된 프로그램 및 장치의 현장 적용성을 확인하기 위해 주관 연구팀에서 운용하고 있는 서울대학교 농장의 수원 파프리카 온실 테스트베드와 화성의 상용 파프리카 재배 농가에 개발 장비를 현장 설치하였다. 측정된 시료는 NICEM 이온크로마토그래피 분석에 의한 결과와 비교하여 장비의 개별이온 농도 측정 성능을 확인하고 제어 장비와 알고리즘의 성능 확인 및 개선에 적용할 수 있을 것으로 기대하였다.

나. 연구개발 목표

- 실제 작물을 키우는 수경재배 온실에서 개발한 장비의 측정 성능을 평가하고 지속적인 모니터링을 통해 개발한 전극과 개발 장비의 내구성을 확인한다. 또한 측정한 개별이온 농도값을 바탕으로 양액 내 양분 균형 제어 시스템과 알고리즘의 운용 성과와 개선점을 확인한다.

다. 재료 및 방법

- 실제 농가에 앞서 적용성을 검증하기 위해 서울대학교 수원 실험농장에 있는 파프리카 테스트베드에 설치하여 개별이온농도 측정장치의 예비 적용성 평가를 진행하였다 (그림

3-6-29).



그림 3-6-29. 수원 실험농장에 설치한 개별이온농도 측정 장치.

- 테스트베드에서 장비로 측정된 샘플을 채취하고 이를 NICEM에 분석되하여 ICP, 이온 크로마토그래피 등의 표준분석법으로 NO_3 , K, Ca 이온농도를 구한 뒤 이를 개별이온 측정장치에서 분석한 값과 비교하여 장비의 분석성능을 평가하였다. 1차 측정실험은 16일간 수행되었으며 양분 균형 조정 동작이 비교적 느리게 진행되는 알고리즘을 탑재하여 양분 조정을 시행하였다. 2차 측정실험은 11일간 수행되었으며 양분 균형 조정 동작이 상대적으로 빠르게 진행되는 알고리즘을 탑재하여 양분 조정을 수행하였다.
- 실제 적용성 시험은 상업 농가 (화성)에 장비를 설치하여 자동 양액 제어 시스템과 같이 연동하여 실제 양액의 변화를 측정하였다 (그림 3-6-30). 모든 개별이온농도 측정 동작은 양액제어가 이루어지는 낮 시간 (오전 9시~오후 5시)를 5등분하여 측정되도록 오전 9시, 오전 11시, 오후 1시, 오후 3시, 오후 5시에 수행되었다.



그림 3-6-30. 파프리카 농장 및 개별 이온 측정 장치 설치

라. 연구수행 내용 및 결과

(1) 장비 측정 성능 신뢰성 평가

- 샘플을 표준분석법과 장비의 측정값과 비교한 결과는 그림 31과 같이 높은 결정계수 값 ($R^2 > 0.98$)과 1:1 라인에 가까운 결과를 보여주어 장비의 분석능력이 충분히 적용가능한 수준인 것으로 판단하였다. 칼슘의 경우 다른 전극들에 비해 정확성이 다소 낮게 나왔으나 높은 결정계수를 갖고 있어 충분히 실제 농도에 대한 지표로 활용될 수 있을 것으로 판단하였다.

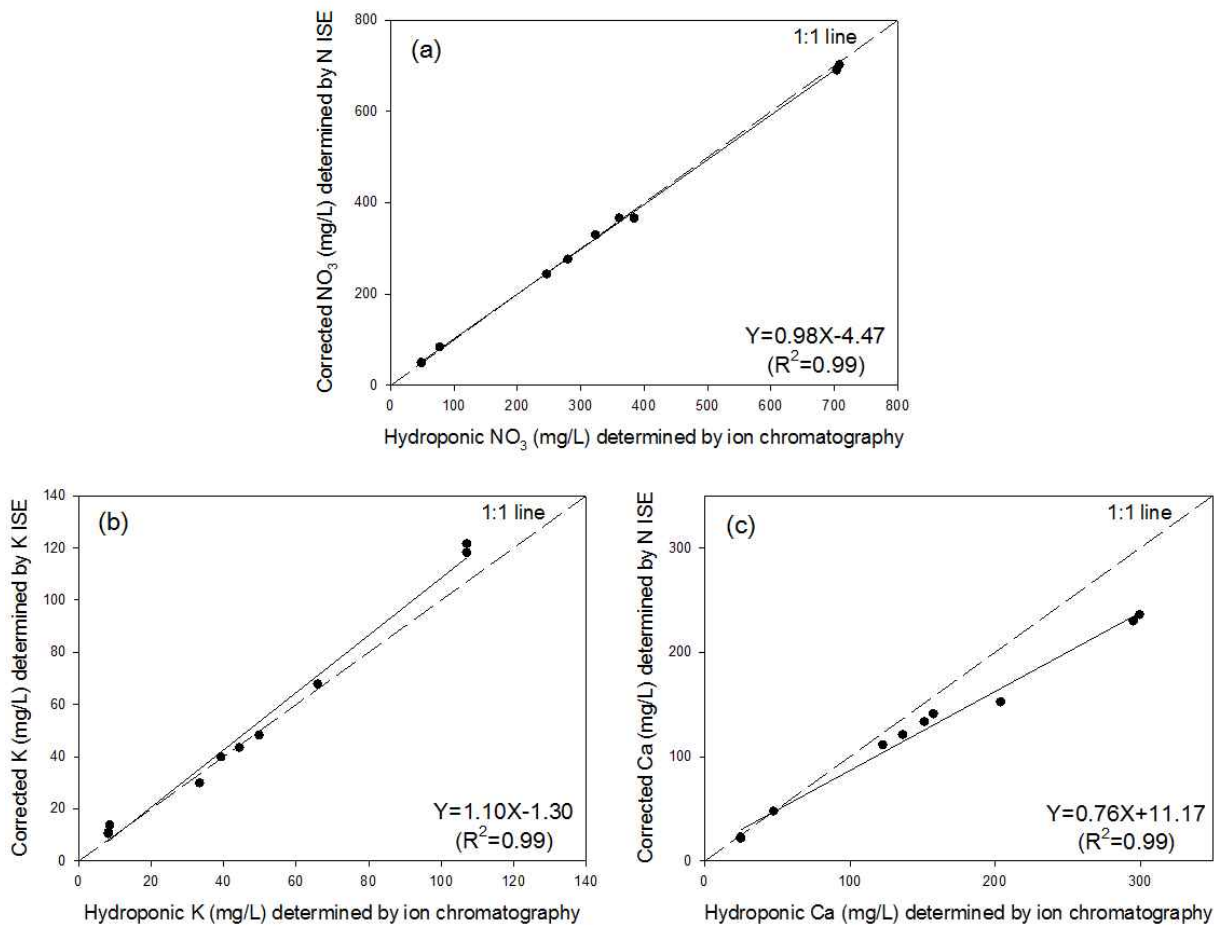


그림 3-6-31. 양액 내 NO₃, K, Ca에 대해 장비의 ISE array로 측정값과 표준분석법으로 측정된 값 간의 비교: (a)-NO₃, (b)-K, (e)-Ca.

(2) 1차 수경재배 재사용 양액 개별이온 농도 측정 (수원)

- 실험을 통해 확인한 재배 기간 동안의 NO₃, K, Ca 농도는 그림 3-6-32와 같이 나타났

다. 전체적으로 이온농도들은 거의 균일하게 조정되었으나 칼륨에 대해 작물이 흡수한 것에 비해 보충이 천천히 진행되었고 이로 인해 칼륨의 농도가 낮게 나타나 이에 대한 보완이 필요할 것으로 나타났다.

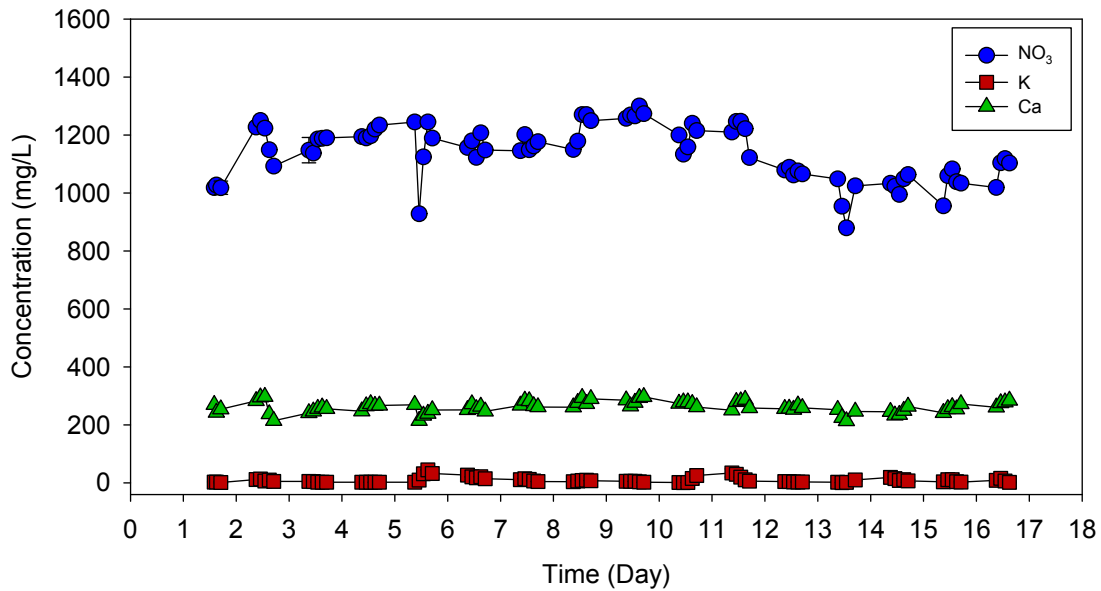


그림 3-6-32. 수원 실험농장 1차 실험에서 측정된 개별이온농도.

(3) 2차 수경재배 재사용 양액 개별이온 농도 측정 (수원)

- 2차 실험에서는 양분 균형 조정 알고리즘을 수정하여 앞서 1차 실험에서 나타난 K 농도에 대한 제어 성능을 강화하고자 하였으며 11일 간 측정된 개별이온농도 결과는 그림 3-6-33과 같았다. 양분 균형 제어 알고리즘 수정에 따른 효과가 1차 실험 때와 비교하여 뚜렷이 나타났으며 구체적으로는 K 농도에 대한 제어 균형이 보다 목표치 (250~300 mg/L)에 근접하게 나타남을 확인하였다. 그러나 양분 균형 조절 제어의 가속에 의한 오버슈트가 발생하여 과도한 염 주입이 나타나기도 하였으며 (5~6일째) 이는 주입하는 염 용액에 K와 NO₃가 서로 연결되어 있는 구조로 인해 야기된 것으로 생각된다. 향후 보다 정밀한 양분 균형 제어를 위해서는 기존의 A액과 B액을 사용하여 양분 균형을 조정하는 것보다 이온 간 간섭을 최대한 줄일 수 있도록 다양한 염 용액을 이용하여 양분 균형 제어를 하는 알고리즘의 개발이 필요할 것으로 생각된다. 그럼에도 불구하고 목표한 바와 같이 Ca보다 K의 농도가 높게 유지되었고, 전체적으로 양분 균형이 지속적으로 유지되는 것을 확인하여 작물 재배에 개발된 제어 알고리즘의 적용성을 확인할 수 있었다.

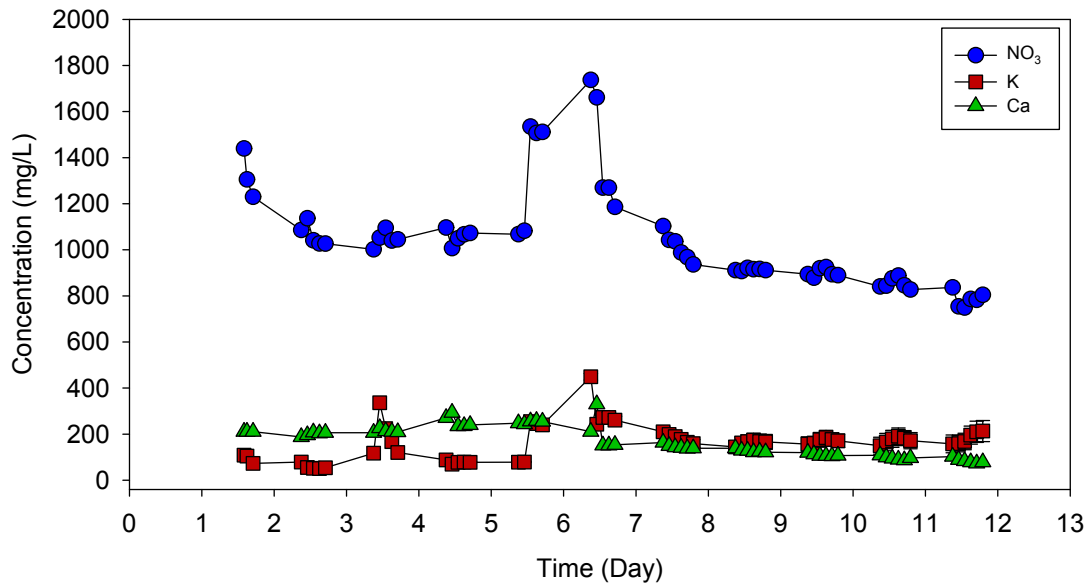


그림 3-6-33. 수원 실험농장 2차 실험에서 측정된 개별이온농도.

(4) 실제 상업 농가 적용성 실험 (화성)

- 화성에서 측정된 개별이온농도는 그림 3-6-34와 같았으며 EC에 기반하여 혼합주입하는 특성상 한 이온의 주입량이 늘어나면 다른 이온들의 주입량도 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 기본적인 파프리카 양액의 개별이온농도 수준 (Target 농도)은 점선으로 표시 되었으며 혼합탱크에서 Target 농도와 비슷한 수준으로 K와 Ca 주입이 이루어진 것으로 보아 파프리카 작물이 K와 Ca의 흡수가 많이 일어났다고 볼 수 있다. 실제 작물의 근권 부의 양분 균형을 확인하기 위해서는 혼합 탱크가 아닌 배액 탱크 부분에서 샘플을 취득하여 분석하도록 설치를 변경해야할 것으로 보이며 이를 위한 추가 실험은 과제 기간 종료 후에도 주관 연구팀과 같이 연구를 진행하여 확인하고자 한다.

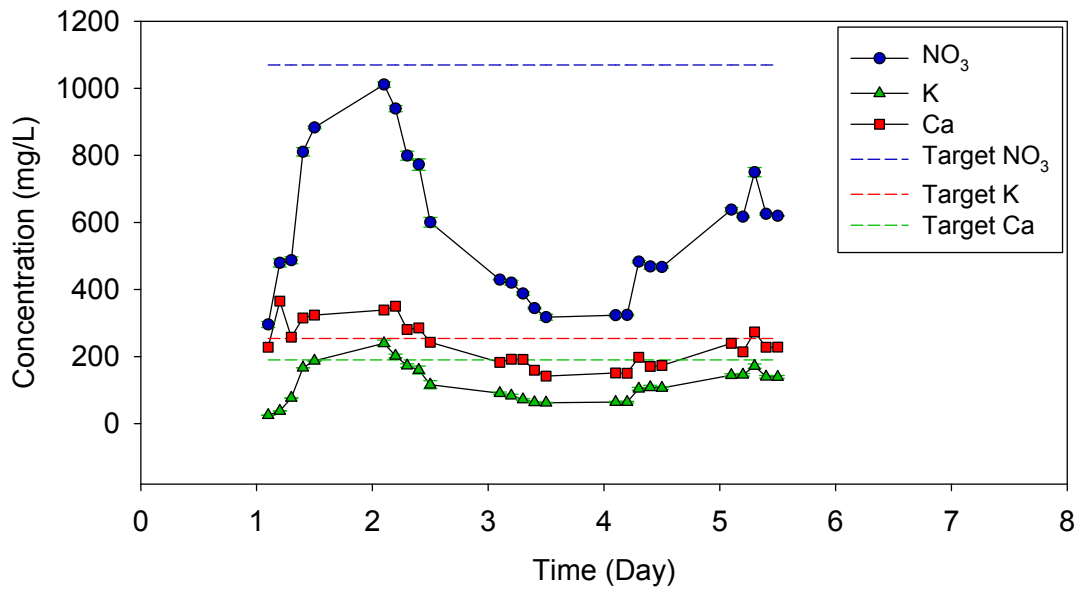


그림 3-6-34. 화성 파프리카 농장 혼합탱크 내 양액 개별 이온 측정 결과

제 7 절 범용 다기능 FDR센서 개발

1. 유기배지에서의 수분측정 센서

칩이 많이 포함된(40%이상) 유기배지는 수분이동이 수평보다 수직으로 이동하는 특성이 있어 특정부위만 측정할수 있는 형태의 센서가 필요함. 큐브와 큐브 사이의 센서를 설치 후 수분 측정결과 과습을 하여도 수분은 1~2%만 늘어났으며 나머지는 밑으로 배수가 되었음. 큐브 밑으로 측정할수 있는 형태의 센서가 필요하였으며 아래와 같이 제작함. 먼저 삽입부와 센서봉을 내부에서 분리하였음. 삽입부와 센서부의 분리는 센서부와 삽입부가 서로 영향을 받지 않음을 뜻한다. 삽입부 내부에 RF케이블을 삽입하여 주파수의 방사는 센서부에서만 이루어 지도록 하였음. 센서의 주파수는 센서부의 길이의 변화 그리고 케이블의 영향등을 고려하여 기존 50Mhz에서 100Mhz로 변경하였음. 그리고 센서부의 일정한 삽입을 위하여 고정판을 제작하였음. 고정판을 삽입부에 고정하여 사용자가 일정하게 측정할 수 있도록 고려하였음.

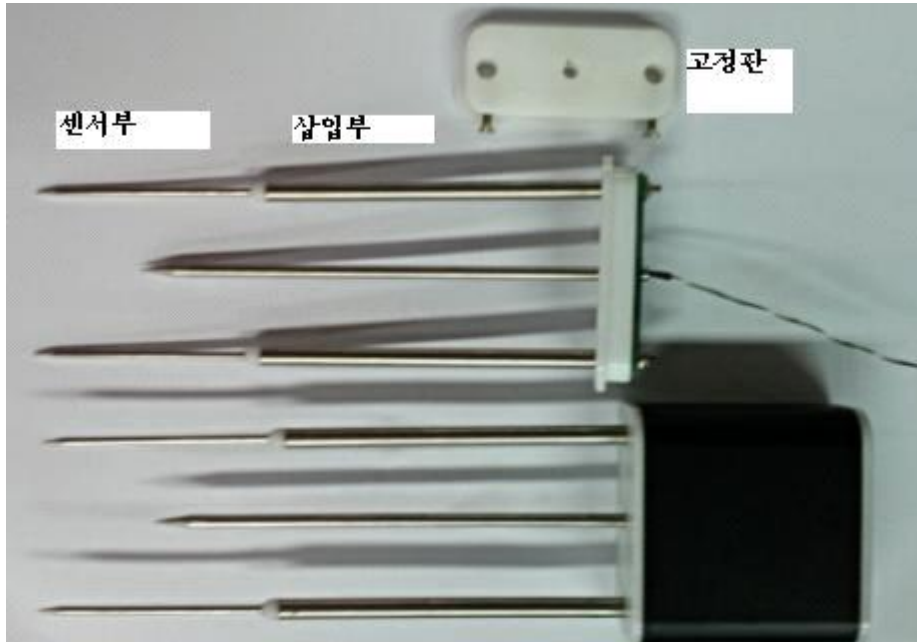


그림 3-7-1. 새로 개발한 깊이별 수분EC지온 측정장치

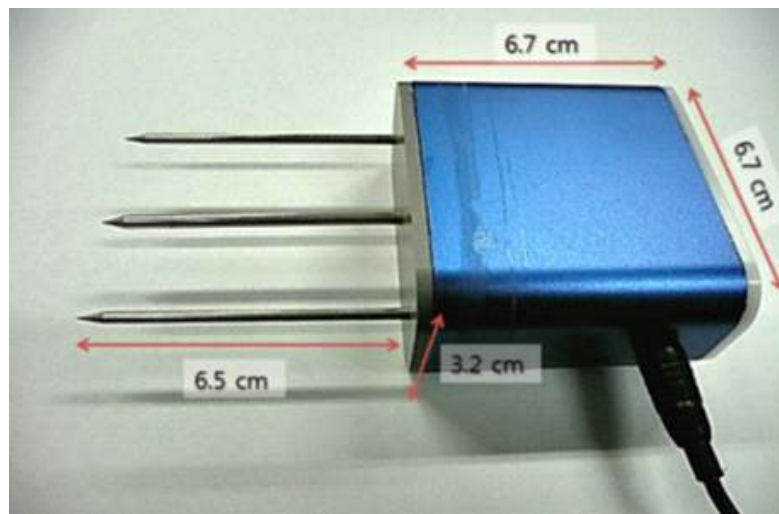


그림 3-7-2. 기존 유기배지용 수분EC지온센서

기존 센서 그림 3-7-2는 측정프로브(6.5cm)의 평균값이 측정이 되었음. 새로 개발한 깊이별 수분EC센서는 제일 끝지점이 센서부위라 센서를 삽입한 부분의 수분과 EC가 측정됨.

위와 같이 센서부분과 삽입 부분이 분리되어 삽입한 부분의 수분과 EC만 측정이 가능함.

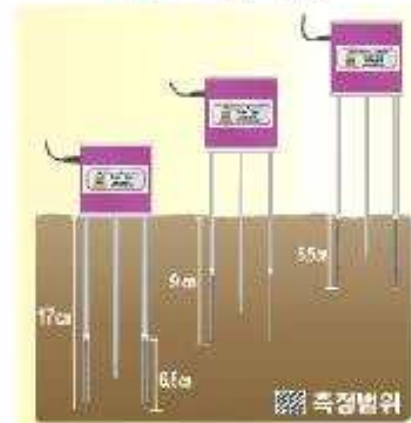
이 부분으로 특허를 출원중임. 딸기 수경재배 농가등에서는 유기배지의 깊이가 깊어 호응이 매우 좋으며 딸기농가를 중심으로 실제 제품화 되어 판매가 되었음.

CoCo-300

수경재배용 깊이별 수분EC온도센서+디스플레이



신 제품



- ★ 11월 중순 출시 예정
- ★ 최대 측정깊이 17cm

이 제품은 수경재배용 센서 CoCo-100의 깊이별 측정을 할 수 있게 업그레이드 된 제품입니다.

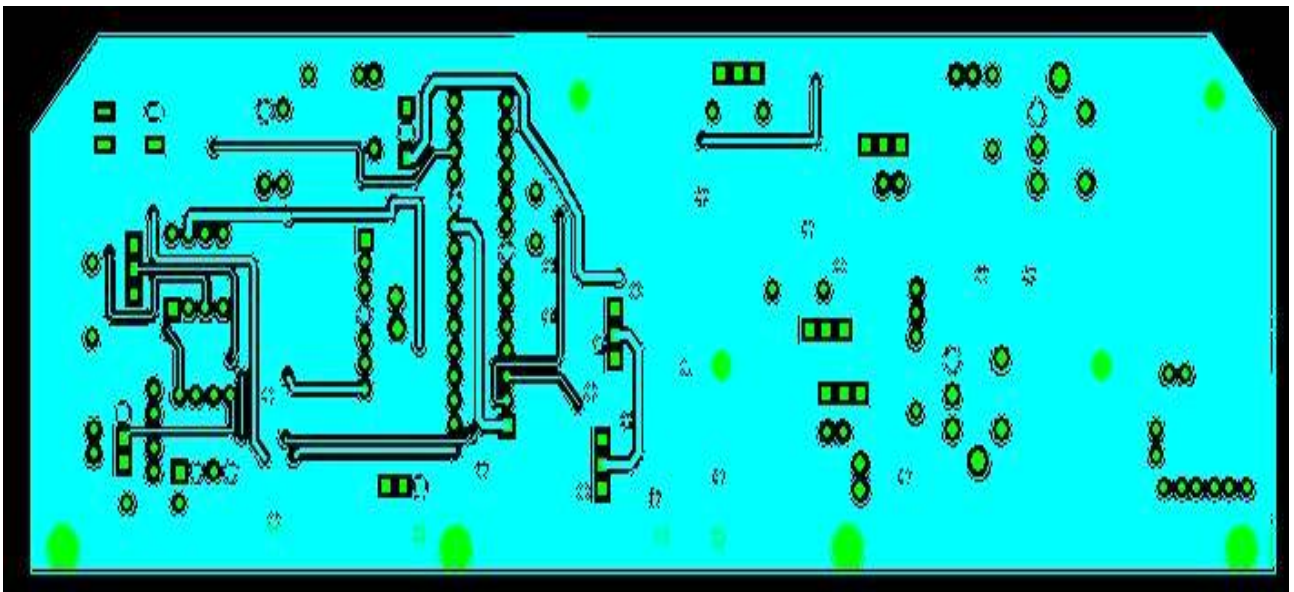
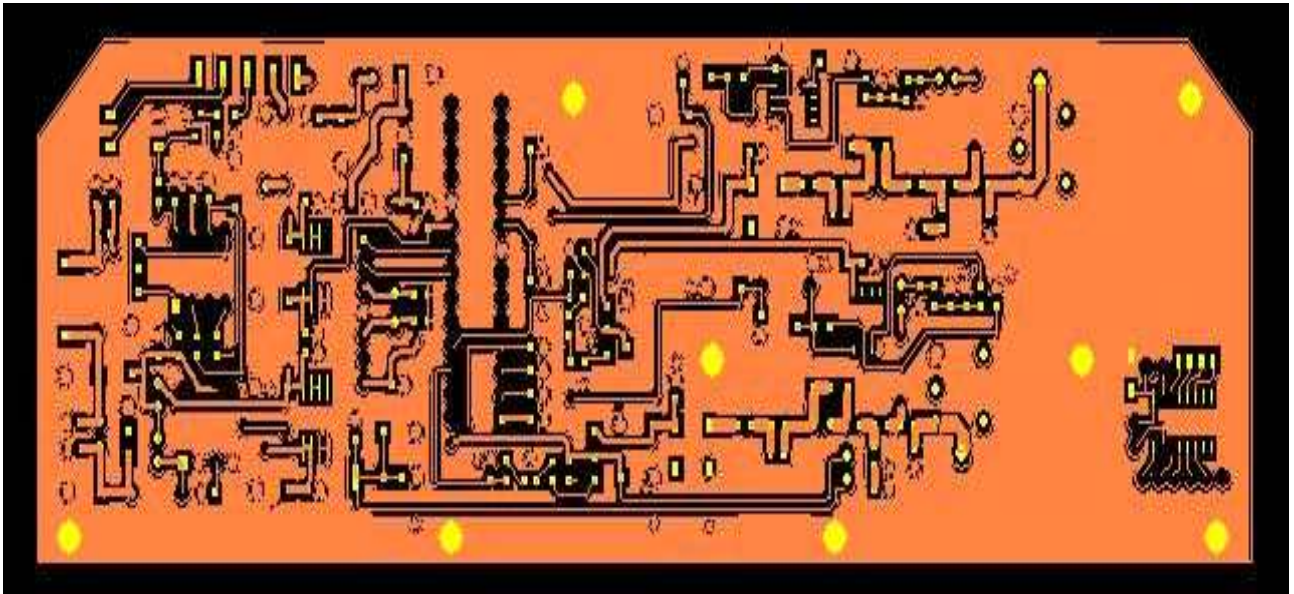
6.5cm, 9cm, 17cm 세 깊이의 측정이 가능합니다.

딸기, 파프리카, 장미, 토마토 등 수경재배 작물에 적합합니다.

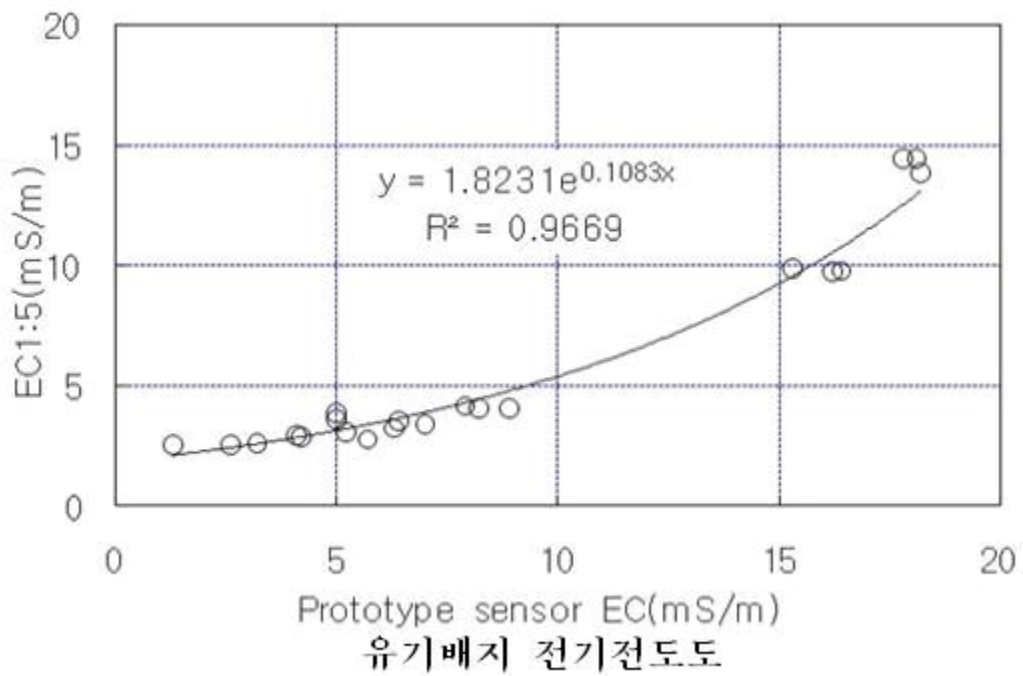
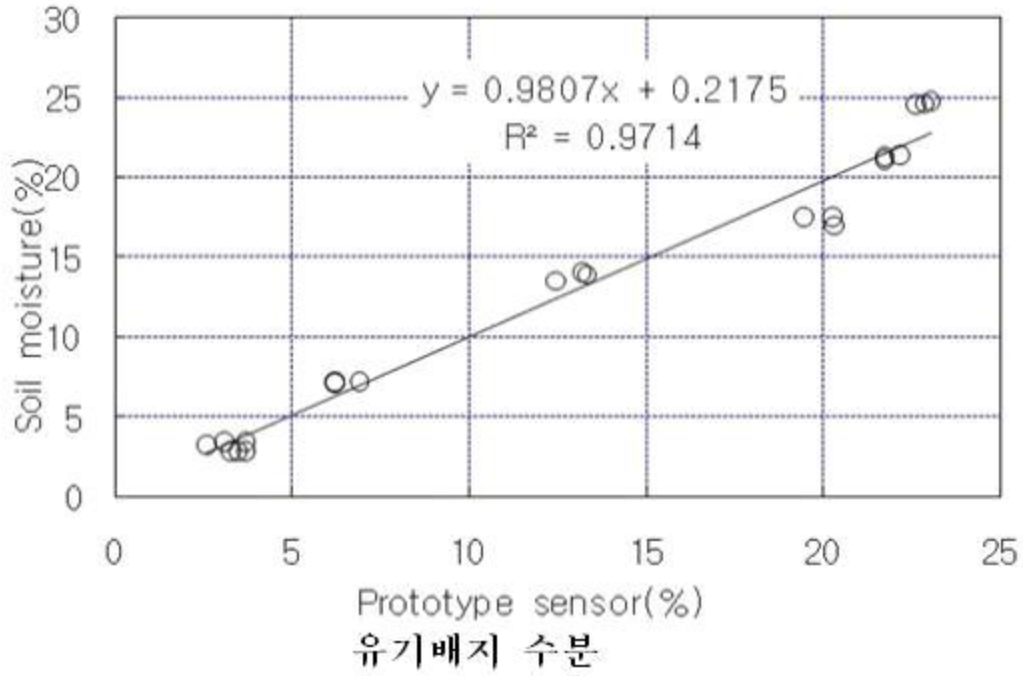
특
징

- 깊이별 수분, EC, 온도 측정
- 한글 디스플레이로 쉽고 편리함
- 딸기 파프리카, 장미, 토마토 등 수경재배 농가에 적합
- 코코피트, 암면, BC2에 적합

나. 센서도면



다. 실험결과



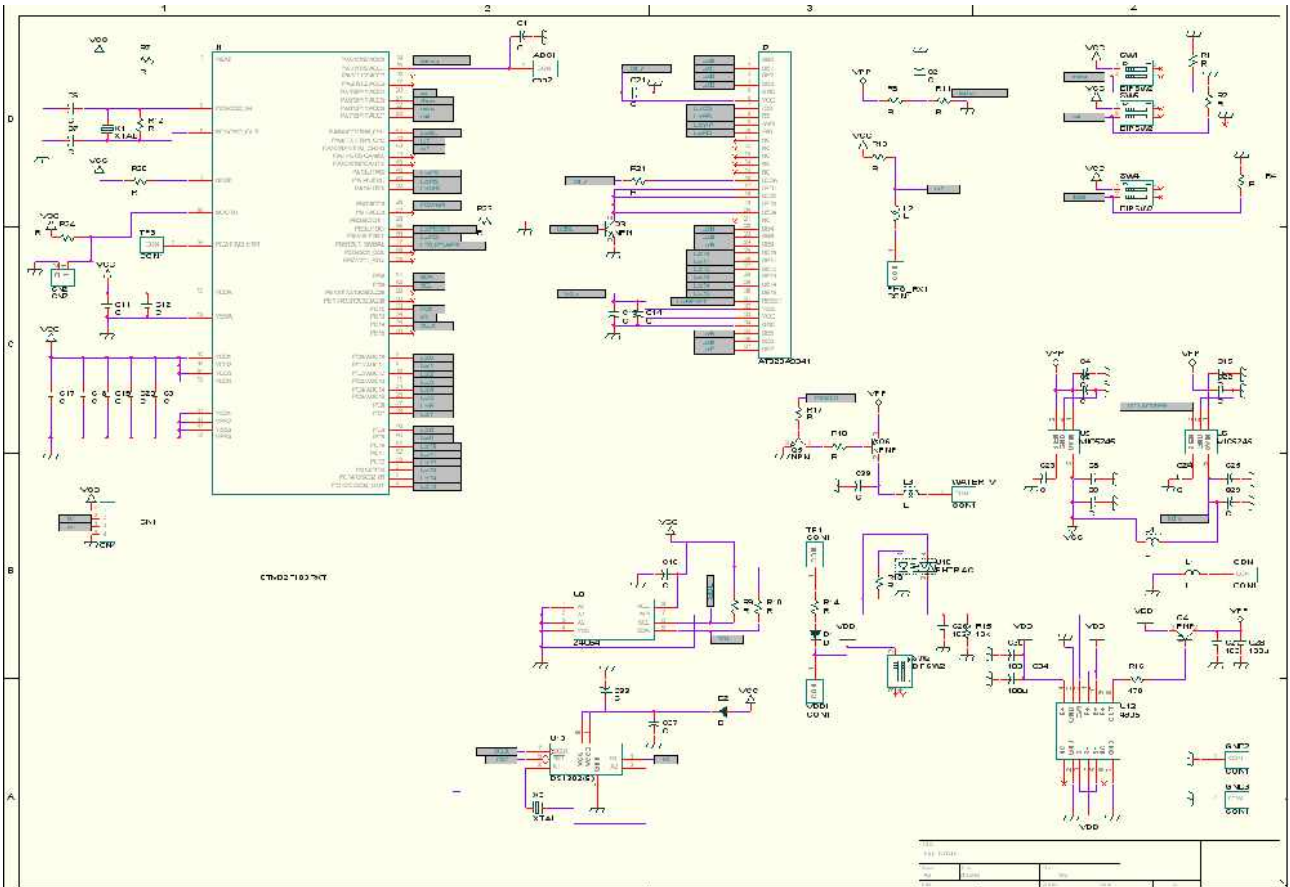
수분과 EC의 실험 결과 높은 신뢰성을 얻을 수 있었습니다.

2. 디스플레이

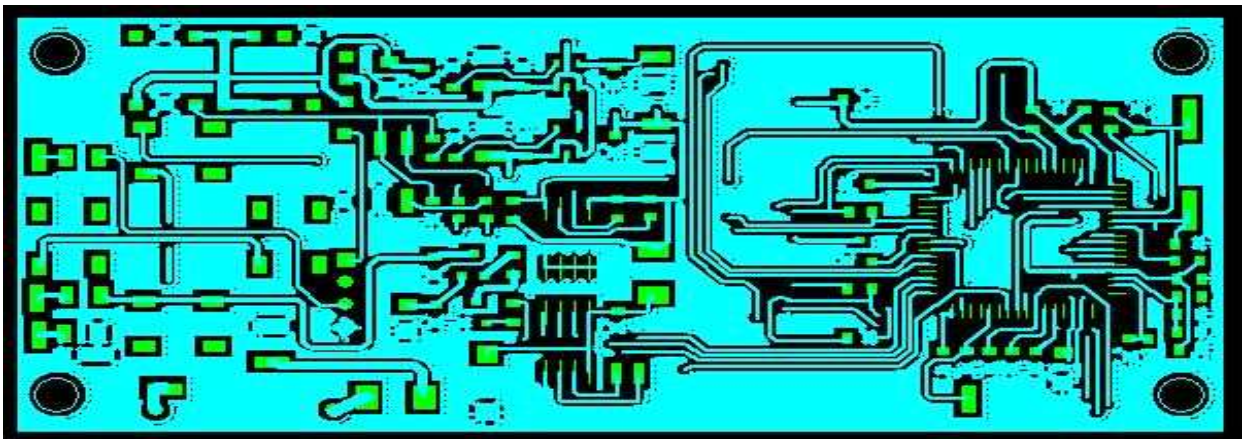
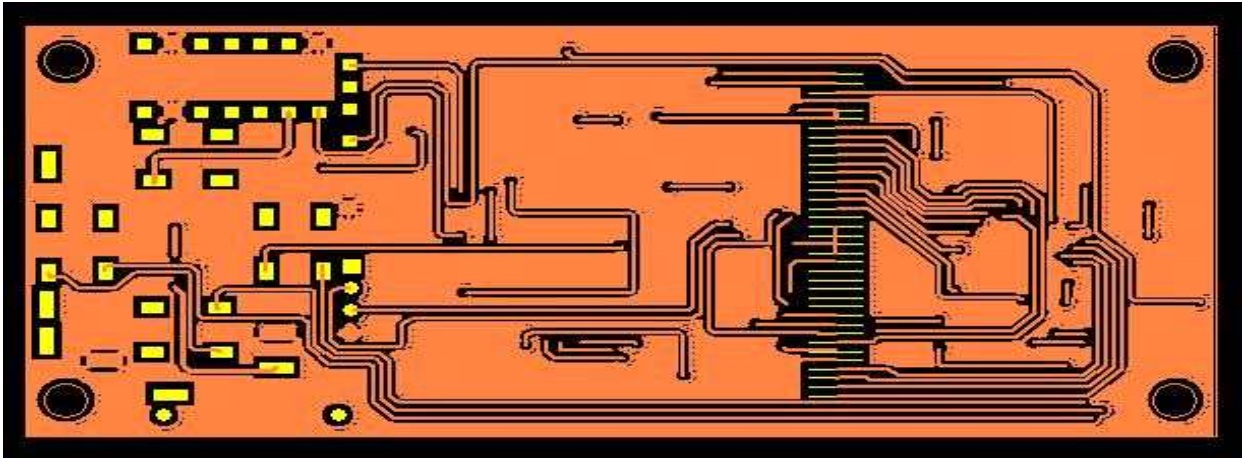
- 수분, EC, pH, 온도 동시 측정이 가능한 토양 측정장치와 유선으로 연결하여 컨트롤 및 저장할 수 있는 제어 시스템으로 구성
- 수분, EC, pH, 온도 동시 측정이 가능한 토양 측정장치의 전극부에 연결되고 별도의 원보드 형태의 개별 제어기를 통하여 입출력 및 데이터 저장 등의 기능을 수행
- 입력신호는 2가지로 토양의 pH의 전위차이며, 또 하나는 수분 전기전도도 온도의 전압신호를 각각 %, dS/m, °C로 나타낼 수 있도록 구성
 - 토양 pH : 두 개 전극에서 발생하는 전위차(potential difference) 측정방식
 - 토양 수분과 전기전도도 : 임피던스(Impedance) 측정방식
 - 토양 온도 : 서미스터(Thermistor)방식
- 전극부와 제어장치는 유선으로 연결하되 커넥터와 같은 연결단자를 사용하여 전극부와 제어장치를 분리 가능하도록 구성
- 측정된 데이터는 모니터를 이용하여 표시할 수 있도록 구성
- 측정 모니터는 2개로 구성하여 토양 pH의 경우는 ISFET-N형과 ISFET-P형의 전위차를 동시에 보여줄 수 있는 모니터와, 수분 전기전도도, 온도를 나타내는 모니터를 구분하여 제작



가. 회로도



나. 도면



- Controller Specification

- Micro Controller Unit (MCU) : Atmega 2560
- Communication : 4 channel UART (RS-232)
- ADC : 16 channels, 10 bit resolution ADC
- 128 kBytes internal programmable flash-rom
- Timer/Counter
- External Interrupt
- ETC.

- Display

- TFT LCD, Serial GLCD module

- Output

- SD card or USB or Data logging

3. pH센서

○ 유기배지의 pH를 측정할 수 있는 전극부 제작

- ISFET-N형(그림 1)과 ISFET-P형(그림 2) 두 가지 이온선택성FET를 사용하고 기준전극을 이용한 두 개체간의 전위 변환에 따라 pH를 측정함
- N형은 PH가 산성에서 알칼리성으로 변할 때 전위가 높아지고, P형은 반대의 특성을 가지며, N형일 경우 표준용액에 정확한 전위 변화가 나타나고 있음
- 또한 N형의 경우 혼합물질에는 중성~알칼리성에서 감도 둔화현상이 일어나고 P형 반도체의 경우 모든 경우에도 안정된 변화를 보임
- 따라서 ISFET-N형과 ISFET-P형을 사용하여 상호 보완할 수 있는 구조를 가져야 함
- 그림 3에 유기배지 측정장치 pH 전극부 회로 구성도 개요를 나타내고 있음

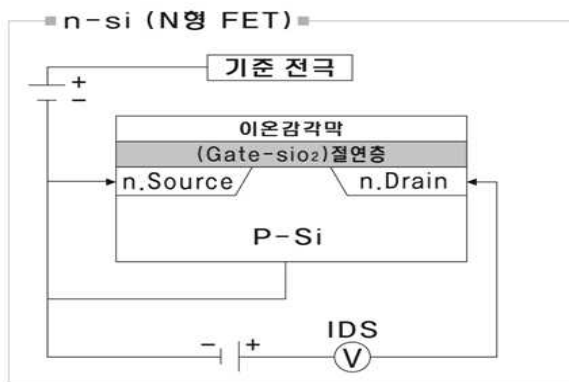


그림 3-7-3. ISFET-N형 pH 전극 개요

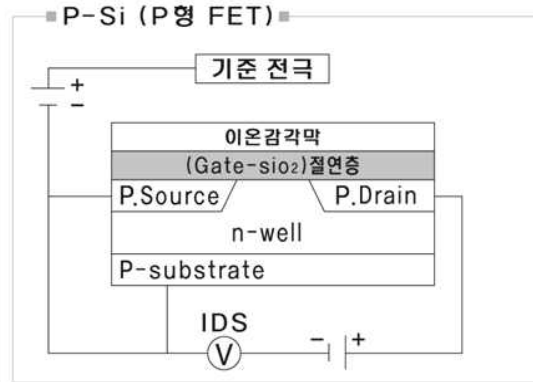
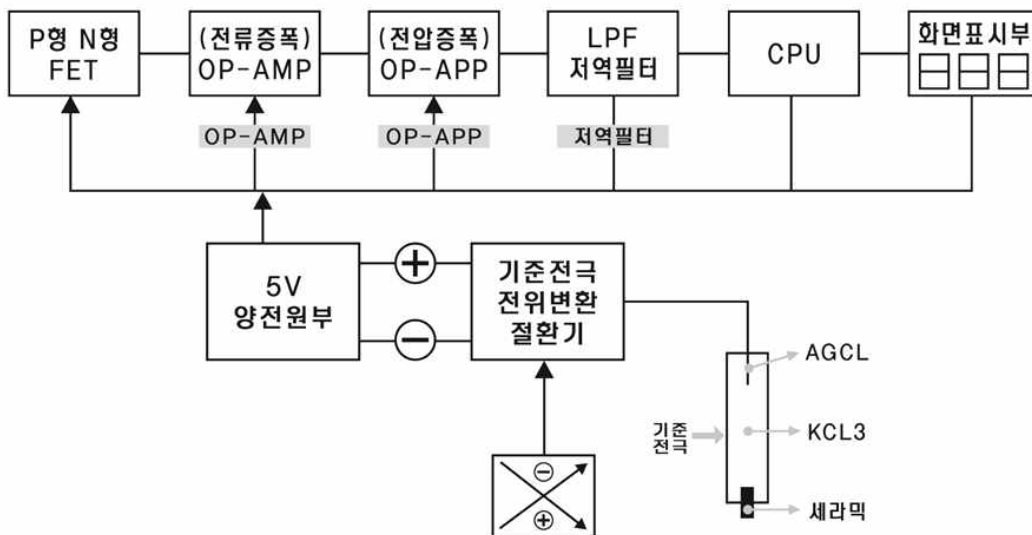


그림 3-7-4. ISFET-P형 pH 전극 개요

- P형 / N형 ISFET : 스테인레스 재질의 봉 안에 삽입하여 접착제를 이용해 고정하고, 유기배지와 밀착이 잘 되는 구조로 하여야 하며, 스테인레스를 사용하여 유기배지에 삽입이 잘 되는 구조로 제작되어야 함
- OP-AMP (전류증폭기) : ISFET는 기준전극과 반응하여 pH의 산성·중성·알칼리성에서 미세한 전류를 발생하므로 A/D컨버터에서 전류를 바로 알기는 어려우므로 미세전류를 증폭하며, 증폭도가 크면 노이즈가 발생할 수 있으므로 100dB 이하에서 증폭함
- OP-APP (전압증폭기) : 전류 증폭한 신호전류를 전압 증폭하여 A/D컨버터에서 분해능을 좋게 하여 전압값을 바로 읽을 수 있도록 함
- LPF (저역필터) : 유기배지의 경우 AC노이즈, 백색노이즈가 발생할 경우 센서값의 변화가 생기므로 저역필터를 사용하여 불필요한 노이즈를 제거하여야 함
- CPU와 화면표시부 : pH에 따른 전위변화를 CPU에서 처리하여 pH를 수치화시켜 화면

표시부에 나타낼수 있도록 하여야 함, 하지만 이 부분은 제작에 포함시키지 않음

- 5V (양전원부) : (+), (-) 그라운드의 양전원을 구성하여 측정 전극부에 대한 동작을 위한 전압을 공급함
- 기준전극 전위 변환 (절환기) : N형일 경우 기준전극에 (+)전원을 공급하며 P형일 경우 (-)전원을 공급하여 주는 장치임
- 기준전극 : 유전율이 적은 테프론이나 PP 등을 사용하여 관 타입으로 구성하고, 염화은 (Agcl)에 (+) 또는 (-) 전위를 주입하면 KCl_3 용액에 전달되어 세라믹을 통해 유전율이 발생하여 전위가 통과됨



- 그림 3-7-5와 같이 전극부를 구성하는 것은 스테인레스(SUS304) 재질로 관입 가능한 구조여야 함
- 전극부는 직경 4~6 mm, 길이 200 mm전극로 전극부 내부에는 염화칼륨(KCl) 용액을 넣을 수 있는 구조로 함
- 염화칼륨 용액은 전극부의 외부와 유전율이 적은 테프론이나 PP또는 세라믹 계열의 재료를 사용하고 이를 통하여 측정하고자 하는 용액이 이동 가능한 형태로 제작되어야 함
- 전극부는 이온선택성FET(Ion-Selective field effect transistor) 센서의 구조를 가지고 있으며, 반도체디바이스 전압출력을 갖추고 있어야함
 - 측정범위는 pH 4 ~ pH 9를 포함함
 - 이온선택성FET(ISFET)의 감도는 45mv/ph 이상으로 함
 - 측정 온도 범위는 0 ~ 100 ℃로 함
 - 출력 전압은 0 ~ 2 V내에서 이루어져야 함

- 이온선택성FET의 전극위치와 토양용액의 이동 경로의 위치는 그림 4와 별개로 다른 위치에 설치할 수 있음

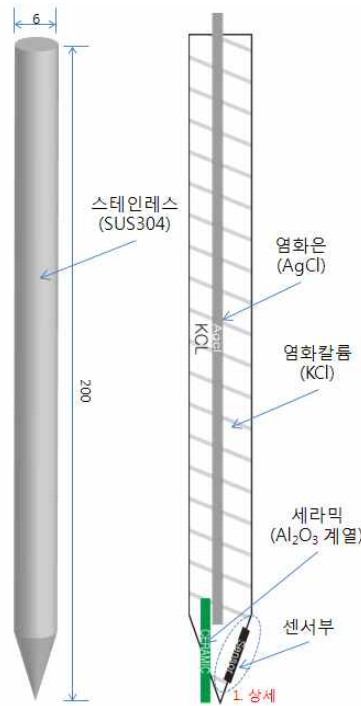


그림 3-7-5. 토양 측정장치 pH 전극

- 이온선택성FET(ISFET) 전극의 재질은 인-규소(p-Si)반도체를 사용하며, 기준전극을 포함하고 있어야 함
 - 전극부 이외에는 절연이 가능한 PV계열 또는 테프론 계통의 재질을 사용하여야 함
 - 또한 전극부 윗부분은 신호를 받을 수 있도록 선 작업을 하여야 함
 - 모든 전극은 첨단부는 토양 관입을 용이하게 하기위하여 원뿔모양의 형태를 갖추어야 함
- 유기배지의 수분, 전기전도도, 온도 측정 전극부 제작
- 발진부 : 크리스탈을 사용하여 고주파를 발생시키고, 200MHz를 사용하여야 함
 - RF AMP (고주파 증폭부) : 발진부의 자체 RF출력이 적으므로 발진부 신호를 증폭하는 역할하는 증폭기를 사용함
 - 고주파 제어부 : RF출력을 동일하게 만들더라도 출력이 기기별로 일정하지 않으므로 이를 보완하기 위해 RF출력을 원하는 수치만큼 나오도록 조정하는 장치를 사용함
 - 링 부리지부 : 링 부리지부는 고주파 검출을 위한 저항값의 변화에 따른 측정값을 얻을 수 있는 회로로서 많이 사용되어 지는 것으로, 여기서는 진행파와 반사파를 검출하여, 센싱부의 탐침봉에서 고주파가 공급되면 탐침봉에서의 반응에 따라 진행파와 반사파의

변화에 따른 전위 변화를 검출하기 위한 장치이며, 진행파와 반사파를 이용하여 토양수분과 EC를 측정할 있음

- RF검출 직류 전환부 : 링 부리지에서 검출된 신호는 교류성분의 고주파이므로 신호원으로 사용하기 위해서 직류(DC)화 시켜야 CPU에서 바로 읽을 수 있으므로 고주파 쇼트키트 다이오드로 직류변환 하여 사용하여야 함
- 직류 증폭부 : 고주파를 직류 변환한 전류를 OP-AMP를 사용하여 CPU에 직류(DC)공급하는 장치임
- CPU : 센싱값에 따른 직류 전압 변화를 수치화시켜 LCD화면에 전달하여 표시하는 등의 제어에 사용되지만, 본 제작에서는 제외함

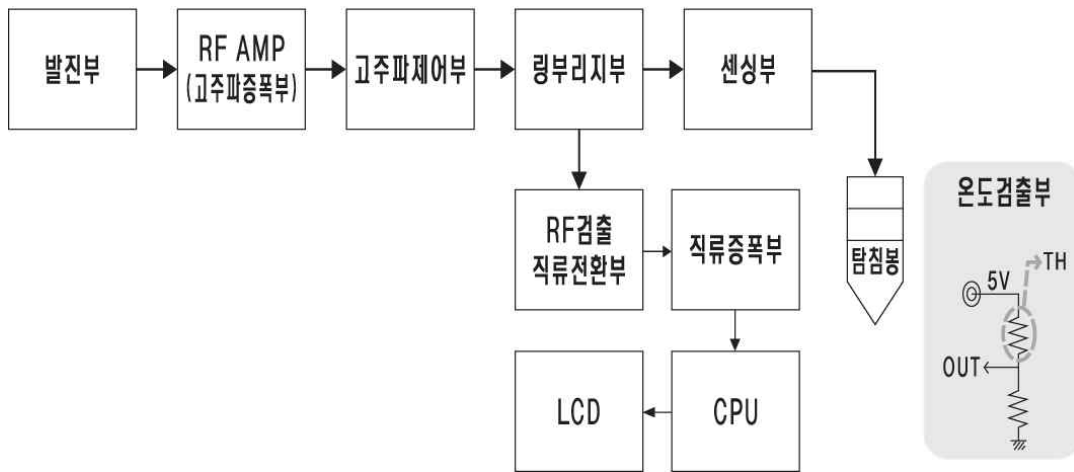


그림 3-7-6. 유기배지 측정장치 수분, EC, 온도 전극부 회로 구성도 개요

- 그림 6와 같이 온도와 pH 전극과는 별도로 수분과 전기전도도를 측정할 수 있는 전극을 별로 설치하여 총 4개의 전극으로 구성되어야 함

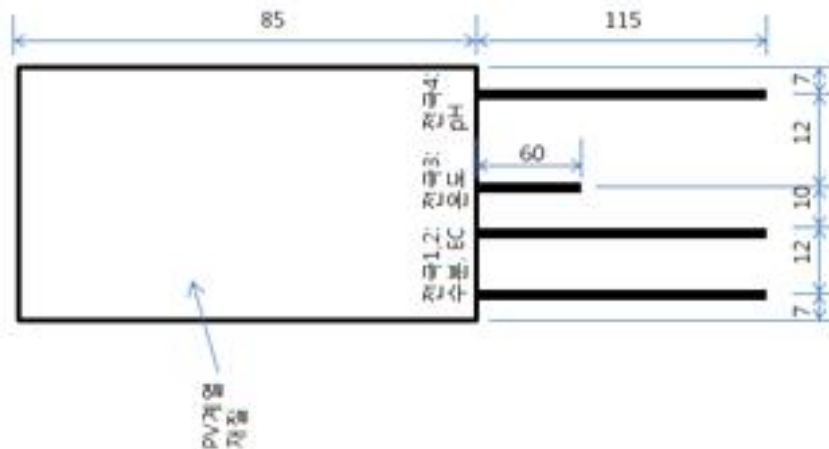


그림 3-7-7. 수분, EC, pH, 온도 동시 측정이 가능한 유기배지 측정장치 전극부

- 전극 1, 2는 유기배지의 수분 및 전기전도도 측정을 위한 것으로 재질은 스테인리스 (SUS304)로 함
- 전극 3은 온도 측정을 위한 것으로 재질은 스테인리스(SUS304)로 함
- 모든 전극은 침단부는 유기배지 관입을 용이하게 하기위하여 원뿔모양의 형태를 갖추어야 함
- 그림 7에 수분, EC, pH, 온도 동시 측정이 가능한 전극부 회로도의 회로구성을 나타냈음
- 유기배지용 수분, 전기전도도와 pH는 별도의 입력 및 출력 단자를 가지도록 하여야 함

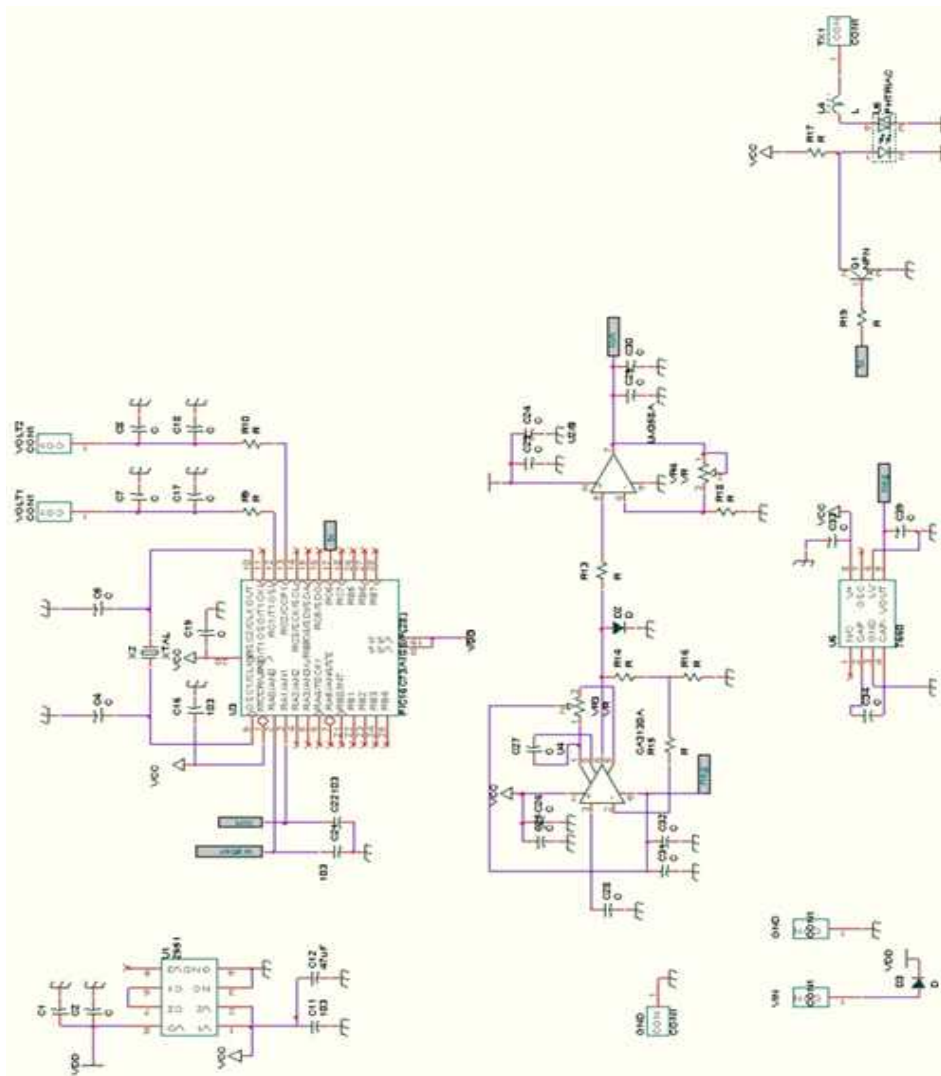


그림 3-7-8. 수분, EC, pH, 온도 동시 측정이 가능한 전극부 회로



그림 3-7-9. 제작된 유기배지용 수분,EC,지온,pH가 측정가능한 센서

○ 연구개발성과

- 특허출원 및 등록

출원된 특허의 경우					등록된 특허의 경우				
출원연도	특허명	출원인	출원국	출원번호	등록연도	특허명	등록인	등록국	등록번호
2014	유기배지용 깊이별 수분 염류 측정장치	이승복	한국	10-2014-0086335					
2014	양액 공급 시스템	그린씨에스(주)	한국	10-2014-0096611					
2016	배액을 전량 이용하는 순환식 수경재배 양액혼합 방법 및 혼합시스템	손정익, 안테인	한국	10-2016-0050461					
2016	순환식 수경재배 시스템의 양수분 소모량 최소화 양액 혼합 알고리즘	손정익, 안테인	한국	출원 준비 중					
2016	순환식 수경재배 시스템에서의 개별 양분의 농도 제어 방법	손정익, 안테인	한국	출원 준비 중					
2016	개별이온농도 모니터링 및 제어 알고리즘이 탑재된 시스템	김학진, 조우재, 정대현	한국	출원 준비 중					

- 논문개제 및 학술발표

○ 논문개제

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI여부 (SCI/비SCI)
1	Development of a non drainage hydroponic system with a coconut coir substrate by frequency domain reflectometry sensor for tomato cultivation	J. Plant Nutrition	최은영	37: 748-764	미국	Taylor& Francis Inc	SCI
2	Non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a frequency domain reflectometry sensor	European Journal of Horticultural Science	최은영	78: 132-143	독일	EUGEN ULMER GMBH CO	SCI
3	Nutrient solution concentration effects on non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a FDR sensor	J. Food, Agri. & Environ.	최은영	Vol.11 (3&4) 636-641	핀란드	WFL Publishers	SCIE
4	Scheduling non-drainage irrigation in coir substrate hydroponics with different percentages of chips and dust for tomato cultivation using a frequency domain reflectometry sensor	Protected Horticulture and Plant Factory	최은영	22:(3) 248-255	한국	한국생물 환경조절 학회	비SCI
5	Non-Drainage Irrigation Scheduling in Coir Substrate Hydroponic System for Tomato Cultivation by a Frequency Domain Reflectometry Sensor	European Journal of Horticultural Science	Eun-Young Choi	78(3) 132-143	국외	Verlag Eugen Ulmer KG	SCI
6	FDR센서를 이용한 코코넛 코이어 배지 내 수분특성 측정	Protected Horticulture and Plant Factory	박성태	23(2): 1-9	한국	한국생물 환경조절 학회	비SCI
7	Environmentally sustainable production of tomato in a coir substrate hydroponic system using a frequency domain reflectometry sensor	Horticulture, Environment and Biotechnology	Eun-Young Choi	56(2): 167-177	한국	(사)한국원예학회	SCIE
8	Irrigation Control for Improving Irrigation Efficiency in Coir Substrate Hydroponic System	Protected Horticulture and Plant Factory	Hyung-Joo Yoo	24(2) 153-160	한국	한국생물 환경조절 학회	비SCI
9	토마토 코이어 수경재배에서 FDR센서, 적산일사량센서 및 타이어 급액방식에 따른 급배액량, 생육 및 과실수량 비교	시설원예·식물공장	최은영	25(1) 63-70	한국	한국생물 환경조절 학회	비SCI

10	Effects of renewal pattern of recycled nutrient solution on the ion balance in nutrient solutions and root media and the growth and ion uptake of paprika (<i>Capsicum annuum</i> L.) in closed soilless cultures	Korean Journal of Horticultural Science and Technology	Myat Thaint Ko, Tae In Ahn	32(4)	한국	Korean Journal of Horticultural Science and Technology	SCIE
11	Changes in electrical conductivity and moisture content of substrate and their subsequent effects on transpiration rate, water use efficiency, and plant growth in the soilless culture of paprika(<i>Capsicum annuum</i> L.)	Horticulture, Environment and Biotechnology	Jong Hwa Shin	56(2)	한국	Horticulture, Environment and Biotechnology	SCIE
12	Application of a modified irrigation method using compensated radiation integral, substrate moisture content, and electrical conductivity for soilless cultures of paprika	Scientia Horticulturae	Jong Hwa Shin	198 (26)	국외	Scientia Horticulturae	SCI
13	Improving Water and Fertilizer Use Efficiencies by a FDR Sensor Automated Irrigation System in Coir Substrate Strawberry Production	Hort. Environ. Biotechnol	Eun-Young Choi	2016.10 개재예정	한국	(사)한국원예학회	SCIE
14	Theoretical and experimental analysis on ion balance of nutrient solution at different mixing methods in EC-based closed soilless culture system	Environmental Science and Technology	Tae In Ahn	투고예정	국외		SCI
15	Modeling and simulation on photodegradation of Fe-EDTA by UV irradiation in closed soilless culture system	Protected Horticulture and Plant Factory	Tae In Ahn	투고예정	국내		비SCI
16	Synchronization of nutrient supply and plant nutrient uptake in EC-based closed soilless culture	Biosystems Engineering	Tae In Ahn	투고예정	해외		SCI
17	Development of an algorithm for maintaining nutrients balance in EC-based closed soilless culture	Journal of Experimental Botany	Tae In Ahn	투고예정	국외		SCI
18	Nutrient balance, growth and quality paprika at an EC-based closed soilless culture with nutrient balance algorithm in commercial greenhouse	Scientia Horticulturae	Tae In Ahn	투고예정	국외		SCI
19	An embedded system for automated hydroponic nutrient solution	Transactions of the ASABE	Woo Jae	투고예정	국외		SCI

	management		Cho				
20	FDR 수분센서를 활용한 자동관수시스템이 토마토 코이어 수경재배에서 급배액량, 생육 및 과실 수량에 미치는 영향		지도 교수	2015.02	한국	한국방송통신대학교 대학원	학위논문
21	딸기의 코이어 수경재배에서 FDR 센서 자동관수제어 시 최소대기시간과 관수종료시각이 배액율, 수분이용효율, 비료이용효율 및 수량에 미치는 영향		지도 교수	2016.08	한국	서울시립대학교 일반대학원	학위논문

○ 국내 및 국제 학술회의 발표

개재 연도	논문명	저자		학술지명	Vol. (No.)	국내외 구분	SCI구분
		주저자	교신저자				
2014	딸기의 고설 수경재배에서 FDR센서를 이용한 급액제어시 배지조성이 배액률과 생육에 미치는 영향	최병민	이용범	한국생물환경조절학회 춘계학술대회	2014 별호	국내	학술대회 포스터발표
2014	딸기의 고설 수경재배에서 FDR센서를 이용한 급액제어시 배지조성이 배액률과 생육에 미치는 영향	최병민	이용범	한국원예학회 춘계학술대회	2014 별호	국내	학술대회 포스터발표
2014	딸기의 고설 수경재배에서 FDR센서를 이용한 근권부 수분함량 제어 시 목표 함수량이 초기생육과 수확량에 미치는 영향	송현지	이용범	한국원예학회 춘계학술대회	2014 별호	국내	학술대회 포스터발표
2014	FDR센서를 이용한 근권부 함수량 제어 시 제어 범위가 고설재배 딸기의 초기생육과 수확량에 미치는 영향	송현지	이용범	한국원예학회 춘계학술대회	2014 별호	국내	학술대회 포스터발표
2014	Theoretical and experimental analysis on EC-based closed soilless culture: change of ion balance under different automated mixing system	Tae In Ahn	Jung Eek Son	한국원예학회 춘계학술대회	2014 별호	국내	학술발표, 구두
2014	Effects of renewal pattern of recycled nutrient solution on the ion balance in nutrient solutions and root media and the growth and ion uptake of paprika (Capsicum annuum L.) in closed soilless culture	Myat Thaint Ko, Tae In Ahn	Jung Eek Son	한국원예학회 춘계학술대회	2014 별호	국내	학술발표, 포스터
2014	Water use efficiency and crop growth at a precise irrigation control system in soilless culture of paprika	Jong Hwa Shin	Jung Eek Son	한국생물환경조절학회 춘계학술대회	2014 별호	국내	학술발표, 포스터

2014	Closed lettuce cultivation system using an array of ion-selective electrodes	Dae-Hyun Jung	Hak-Jin Kim	한국농업기계학회	19(1)	국내	학술대회 포스터 발표
2014	Monitoring and managing hydroponic nutrients using ion-selective electrodes in closed lettuce cultivation	Dae-Hyun Jung	Hak-Jin Kim	World Congress of CIGR		국외	학술대회 구두 발표
2015	딸기의 코이어 수경재배에서 FDR센서를 이용한 관수제어 시 관수종료시각이 수분, 비료이용효율 및 수량에 미치는 영향	김민경,	이용범	한국원예학회 춘계학술대회		국내	학술대회 포스터 발표
2015	딸기의 코이어 수경재배에서 FDR센서를 이용한 관수제어 시 최소대기시간이 수분, 비료이용효율 및 수량에 미치는 영향	김민경,	이용범	한국원예학회 춘계학술대회		국내	학술대회 포스터 발표
2015	Improving Water and Fertilizer Use Efficiencies by a FDR Sensor Automated Irrigation System in Coir Substrate Strawberry Production	최기영,	이용범	한국원예학회 춘계학술대회		국내	학술대회 구두 발표
2015	Optimal off-time duration between irrigation cycles for environmentally sustainable production of tomato in a coir substrate hydroponic system	최은영	이용범	한국원예학회 춘계학술대회		국내	학술대회 포스터 발표
2015	Theoretical and experimental analyses of ion balance in completely- and semi-closed soilless cultures of paprika	안태인	손정익	한국원예학회 춘계학술대회	33(S1)	국내	학술대회 구두 발표
2015	Improvement of nutrients use efficiency in completely-closed soilless culture by minimizing estimation errors in nutrient uptakes	Tae In Ahn	Jung Eek Son	Greensys 2015 (Lisbon, Portugal)		해외	해외 학술대회 포스터 발표
2015	Development of an algorithm for synchronized supply of nutrients to uptake by plants in EC-based closed soilless culture	Tae In Ahn	Jung Eek Son	한국원예학회 추계 학술대회	2015 별호	국내	학술 발표, 구두
2015	An embedded system for control of hydroponic nutrients	Woo Jae Cho	Hak-Jin Kim	ASABE International Meeting		국외	학술대회 구두 발표
2016	Development of an algorithm for nutrients balance control in EC-based closed soilless culture	Tae In Ahn	Jung Eek Son	한국원예학회 춘계 학술대회	2016 별호	국내	학술 발표, 구두
2016	Effect of hydroponic macronutrients on multi-temporal variability of lettuce biomass	Woo Jae Cho	Hak-Jin Kim	생물환경조절학회		국내	학술대회 포스터

- 교육 및 지도활동

번호	교육명	교재명	주요내용	활용년도
1~5	충남농업마에스터 대학 강의		딸기 시설원예	2014. 1학기
6	(주) 농우바이오 연구원 및 농가대상		파프리카 수경재배 기술	2014.03.27
7	울산농업기술센터, 연구원 및 농가 대상		파프리카 수경재배 기술	2014.05.01
8	철원군 농업기술센터, 파프리카생산자조회 농가대상		파프리카 맞춤형 현장컨설팅	2014.05.21
9	채소포럼		과채류 배액극소화 수경재배 기술연구현황	2014.06.26
10	영농기술지원		토마토 토양재배기술	2014.01
11	영농기술지원		파프리카 수경재배기술	2014.03
12	영농기술지원		과채류 수경재배기술	2014.03
13	영농기술지원		수출과채류 재배기술	2014.04
14	영농기술지원		토마토 재배기술	2014.05
15	강원도 철원농업기술센터 현장컨설팅		수출파프리카재배기술 및 현장기술지도	2014.05
16	현장컨설팅		토마토현장기술지원	2014.06
17	강원농업 마이스터 대학 강의		토마토수경재배 배양액 관리 및 기술	2015.2.14
18	강원지역 춘천농협 대상		토마토 수경재배 양수분관리기술	2015.1.29
19	경남농업마에스터 대학 강의	ppt 자료	과채류수경재배기술 강의	2015.6.9
20	경남농업마에스터 대학 강의	ppt 자료	과채류관비재배기술 강의	2015.5.26
21	경남농업마에스터 대학 강의	ppt 자료	토마토재배 기술강의	2015.5.22
22	경남농업마에스터 대학 강의	ppt 자료	파프리카 수경재배기술 강의	2015.5.20
23	경북농업마에스터 대학 강의	ppt 자료	노지고추재배기술 강의	2015.4.8
24	경북농업마에스터 대학 강의	ppt 자료	과채류관비재배기술 강의	2015.5.20
25	강화군 농업인 강의	ppt 자료	과채류수경재배 기술 강의	2015.5.20
26	토마토재배농가 현장 기술지원	현장방문	토마토수경재배시 배양액 및 유인방법	2015.6.10
27	스마트팜 실용화 촉진현장 컨설팅	현장방문	파프리카 수경시설 및 재배기술	2015.6.5

28	과채류 수경재배기술 강의 및 기술지원	현장방문	강화군 농업인 과채류 수경재배기술	2015.3.20
29	파프리카 수경재배농가 기술지원	현장방문	김해시 파프리카농가 수경재배 및 배양액관리기술	2015.2.25
30	파프리카 배지재활용기술지원	현장방문	창원시 수경재배농가 양액관리 및 배지재활용기술	2015.2.3
31	풋고추수경재배농가 기술지원	현장방문	풋고추수경재배시 배양액 및 산도관리 및 유인방법	2015.1.9
32	한국방송통신대학교 2015년 1학기 시설원예학 출석수업 중 실습수업 총10회 (울산, 강릉, 대전, 부산, 서울성수, 서울남부, 전북, 대구, 경기, 인천지역대학 각 1회)	시설원예학 (한국방송통신대학교 출판부)	배양액의 산도(pH), 전기전도도(EC) 측정 및 FDR 센서를 사용한 코이어 인공배지의 함수량측정	2015년 3월~6월
33	춘천농협주체 영농교육	PPT 직접제작	토마토 적심 및 사후관리요령 (토마토 수경재배에서 적심 후 근권내 수분관리요령)	2015년 5월8일
34	건국대학교 GLOCAL 캠퍼스 부설 전문농업교육원 최고경영자과정 “도시원예 및 간이수경재배”	PPT 직접제작	도시원예 및 가정용 수경재배에서 사용 가능한 인공배지의 종류 소개 및 FDR 센서를 사용한 함수량 측정법)	2014년 11월 12일(1회) 2015년 5월 6일(1회)
35	경기농업 마이스터 대학 강의		딸기 수경재배 기술	2015.4.13
36	경기농업 마이스터 대학 강의		딸기 수경재배 기술	2015.4.20
37	경기농업 마이스터 대학 강의		딸기 수경재배 기술	2015.5.4
38	경기농업 마이스터 대학 강의		딸기 수경재배 기술	2015.5.11
39	경기농업 마이스터 대학 강의		딸기 수경재배 기술	2015.5.18
40	경기농업 마이스터 대학 강의		시설채소 수경재배 기술	2015.3.2
41	경기농업 마이스터 대학 강의		시설채소 수경재배 기술	2015.3.3
42	경기농업 마이스터 대학 강의		시설채소 수경재배 기술	2015.3.9
43	경기농업 마이스터 대학 강의		시설채소 수경재배 기술	2015.3.16
44	경기농업 마이스터 대학 강의		시설채소 수경재배 기술	2015.3.23
45	경기농업 마이스터 대학 강의		시설채소 수경재배 기술	2015.4.6
46	경기농업 마이스터 대학 강의		시설채소 수경재배 기술	2015.4.13
47	경기농업 마이스터 대학 강의		시설채소 수경재배 기술	2015.4.20
48	경기농업 마이스터 대학 강의		시설채소 수경재배 기술	2015.4.27

- 홍보실적

번호	홍보유형	매체명	홍보내용	홍보일자
1	신문	원예산업신문	정체된 농업생산성 획기적 높일 수 있는 대안은 원예산업	2013.07.25
2	신문	한국농어민신문	수출딸기 고설재배 확대시스템	2013.07.15
3	신문	한국농어민신문	수출딸기 신규시장진입을 위한 마케팅 지원	2013.08.01
4	신문	원예산업신문	딸기수출 동남아전역 확대	2013.08.19
5	신문	한국농어민신문	농식품 수출연구 5년성과와 과제 전문가 워크샵	2013.10.03
6	신문	원예산업신문	원예산업신문 인터넷 조회수로 본 원예산업 1년	2013.12.16
7	신문	한국농어민신문	원예산업, IT융합시설필요	2014.03.03
8	신문	원예산업신문	네이버 밴드이용 농가 컨설팅 호평	2014.03.03
9	신문	한국농어민신문	농식품수출확대 점검회의, 무슨 얘기 오갔나	2014.04.24
10	신문	한국농어민신문	딸기산업 현장 간담회, 어떤 얘기 오갔나	2014.06.19
11	신문	경인종합일보	농촌진흥청, 여름철에도 파프리카 생산	2014.06.29
12	신문	시민일보	한 여름에도 고품질 파프리카 수확	2014.06.30
13	신문	경도신문	여름철 새 곡식 낱 때도 파프리카 생산	2014.07.01
14	신문	시민일보	한 여름에도 고품질 파프리카 수확	2014.07.01
15	신문	농민신문	여름철 고품질 파프리카 재배기술 개발	2014.07.04
16	신문	한국농어민신문	여름철 파프리카 품질 높이려면 하우스 바깥 차광제 처리를	2014.07.04
17	신문	농업인신문	파프리카 차광제로 분산출하 가능	2014.07.04
18	신문	농축유통신문	파프리카, 차광제 처리로 여름철 평지재배	2014.07.07
19	신문	한국농자재신문	차광제로 파프리카 안정 생산	2014.07.16
20	신문	디지털농업	여름철 고온기에도 파프리카 안정 생산	2014.08.01
21	신문	월간원예	이달의 원예관리 채소(파프리카)	2014.08.01
22	신문	한국농어민신문	작물 신품종·목본성 과수 대량생산 기술 적용 순항	2015.06.29
23	신문	한국농어민신문	‘시설농가 환경개선’ 좌담회/ 생산량·안정화 품질 높이려면 낙후된 시설 개선 선결과제	2015.06.12
24	신문	한국농어민신문	여름 재배 파프리카, 야간 근권냉방 활용 생산량 증대	2014.10.03
25	신문	한국농어민신문	일본 시설원예·식물공장전	2014.08.05
26	신문	원예산업신문	FTA 원예지원사업 다양화 필요	2015.03.23.
27	신문	원예산업신문	원료농산물 맞춤형 살균소독세척 전환 필요	2014.10.27
28	신문	원예산업신문	양액재사용 순환식 수경재배 도입 절실/ 국내 95%	2014.10.27.

			비순환방식 환경오염·생산비 상승 유발	
29	신문	원예산업신문	중소과 생산 산학관연협력 절실/ 수출시장 중소기업 요구	2015.05.25.
30	신문	농축유통신문	인사	2015.02.06.
31	신문	한국농자재신문	남북한 원예교류 및 발전전략 토론회	2015.02.16
32	신문	디지털농업	물류비 절감과 생산성 높이기 집중	2015.06.01

- 전시회 등 참여

번호	유형	행사명	전시품목	장소	활용년도
1	전시회	2013 대전 국제농기자재 및 우수종자 전시회	유기패지용 수분EC지온센서, 토양수분EC지온센서, 데이터로거	대전	2013.11
2	농업박람회	대한민국농업박람회	양액시스템	전남기술원	2014년도

○ 사업화성과 및 매출실적

- 사업화 성과

항목	세부항목			성 과
사업화 성과	매출액	개발제품	개발후 현재까지	1.5억원
			향후 3년간 매출	5억원
		관련제품	개발후 현재까지	억원
			향후 3년간 매출	억원
	시장 점유율	개발제품	개발후 현재까지	국내 : 20 % 국외 : %
			향후 3년간 매출	국내 : 30 % 국외 : %
		관련제품	개발후 현재까지	국내 : % 국외 : %
			향후 3년간 매출	국내 : % 국외 : %
	세계시장 경쟁력 순위	현재 제품 세계시장 경쟁력 순위		위
		3년 후 제품 세계 시장경쟁력 순위		위

- 사업화 계획 및 매출 실적

항 목	세부 항목	성 과			
사업화 계획	사업화 소요기간(년)	1년			
	소요예산(백만원)	100			
	예상 매출규모 (억원)	현재까지	3년후	5년후	
		1.5	3	5	
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년후	5년후
		국내	20	30	40
국외					
	향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획	배액재활용 시스템			
무역 수지 개선 효과	(단위: 억원)	현재	3년후	5년후	
	수입대체(내수)	1	1.5	2.5	
	수 출	0.1	1	2	

번호	제품(상품)명	제품(상품)설명	활용 업체명	사업화 여부	매출 발생여부	제품 매출액	고용 창출	R&D 기여율
1	마그마양액시스템	함수율 센서에 의한 급액량 조절 및 일사와 누적일사량에 의한 급액량, EC농도 조절	문*량 최*인 한*진 김*기 김*철 문*욱 한*근 오*수 하*찬 황*성 이*권 유*열 유*철 오*록 천*원	기존 농가에서의 사업화	매출발생	150백만원	고용 창출에 기여함	50%

- 기술 및 제품 인증

구 분	인증분야	인증기관	인증내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		
품질인증	소프트웨어	한국산업기술원	GS인증	15-0025	2015.07	대한민국

제 4 장 목표달성도 및 관련분야 기여도

제 1 절 목표달성도

구분	연도	세부연구개발 목표	가중치	평가의 착안점 및 기준	달성도
최종 평가	2013~ 2015	무배액 수정재배기술 실용화	10%	- 작물 적용에 따른 기술 타당성, 기술이전	100%
		과채류의 유기배지 무배액 급액관리 기술	25%	- 작물 생산성, 작물 관리 운영	100%
		무배액 수정재배용 센서 및 시스템 통합기술	10%	- 센서 정밀성, 정확도, 응답성, 사용상 편리성, 수명 - 시스템 운용 편리성	100%
		순환식 수정재배기술 실용화	10%	- 작물적용에 따른 기술 타당성, 기술이전	100%
		순환식 수정재배 시스템 내 비료 투입량 최소화 기술 개발	25%	- 양분 투입량 최소화 (순환식 시스템 내의 양분의 총량이 재배 최초의 총량에 근접한 수준에서 유지될 것 (초기량=재배 후 총량)) - 양분 간 균형유지 기술 (초기 비율 대비 약 ±5% 이내 유지.) - 순환식 수정재배 시스템의 소형화 (배액 탱크의 규모 : 약 1회 최대 관수량의 수준, 해당 규모 내에서 배액의 외부 강제 방류가 없을 것.) - 재배 안정성 (비순환식 파프리카 생산지표 대비 통계적으로 유의적인 차이가 없을 것.)	100%
		순환식 수정재배용 이온 센서의 성능	10%	- 검출 농도 한계(NO_3^- , K^+ 10 ~ 3000 ppm) - 반응 시간(최대 1분 이하) - 감도(50~59.1mV/decade) - 센서 수명(100회 이상 (3개월))	100%
경제성 분석	10%	- 센서 가격(농가 보급)	100%		

제 2 절 관련분야 기여도

1)기술적 측면

- 환경친화형 유기배지를 이용한 토마토 수정재배 시스템에서 FDR센서를 활용한
급액자동화

- 토마토 수경재배에서 FDR센서를 활용한 배액극소화 시스템 실용화
- 종래의 완전 폐쇄형 순환식 수경재배의 재사용 양액 혼합방식 대비 투입 비료의 절감이 가능한 재사용 양액 혼합 기술 개발하여 기술적인 차별성을 확보하였으며, EC 측정 기반 순환식 수경재배 시스템에서의 양분 균형 제어 기술을 개발하여 순환식 수경재배 시스템의 식물영양학적 재배 안정성을 향상
- 비료 투입량 최소화, 양분 균형 제어 기술과 더불어 UV 살균, Fe-EDTA 독립 공급 체계가 적용된 순환식 수경재배 장치를 개발하였으며, 순환식 수경재배 시스템의 불안요인인 병원균 증식과, Fe-EDTA의 광산화로 인한 손실을 비순환식과 유사한 수준에서 해소하여 장치의 안정성을 확보
- 상기의 기능들에 대한 사용자 접근이 유용하도록 양수분 통합관리가 가능한 순환식 수경재배 시스템 개발
- 이온센서에 대한 확장성을 추가하여 기능의 확장이 가능한 시스템 설계
- 기존 EC 기반 수경재배 양액 평가 방식에서 현장 적용이 용이하고 자동화된 개별이온농도 모니터링 시스템을 개발하여 양액 내 양분 균형 제어 성능을 정량화
- 실제 수경재배 시스템의 운용 및 양분 균형 제어 기술에 대한 신속한 평가와 정밀 제어가 가능하도록 핵심적인 데이터를 제공하여 레퍼런스로 사용할 수 있는 기술 개발
- 이온선택성전극의 양액 적용 및 장기간 운용에서 일어나는 신호 드리프트 및 영향을 주는 인자에 대한 보정법을 개발, 적용하여 현장 적용성과 내구성을 증대시켜 향후 개별이온농도 모니터링의 가능성 향상

2)경제적·사회적 측면

- 토마토 비순환 재배 방식에서 배액 극소화 시스템 사용은 효율적인 비료의 사용과 환경오염을 최소화하는 농업으로 적용되리라 봄.
- 고품질 토마토 생산이 가능하고 과학영농 실현의 좋은 사례가 됨

제 5 장 연구결과의 활용계획

제 1 절 연구결과 활용계획

- 품종별 배액률 및 칩비를 구명에 의한 배액의 최소화기술(영농활용, 홍보(방송 신문 등))
- 코이어 배지 조성 비율에 따른 배액 극소화 금액 관리(학술발표, 논문제재)
- 금액방법에 따른 일반 파프리카 및 소과종 파프리카 코이어 수경재배기술(학술발표, 논문제재)
- 금액의 최소화에 의한 과실의 품질향상과 일소과 등 생리장애과 최소화(학술발표, 논문제재)
- 파프리카 생육 단계별 및 계절별 무배액 금액 관리 기술 체계 확립(영농활용, 홍보(방송, 신문 등))
- 생육단계 및 계절별 적정 함수량 제어 모델 개발 (학술발표, 논문제재)
- 일반 파프리카 및 소과종 파프리카 여름철 배액관리기술 (학술발표, 논문제재)
- 작물 균형생장을 위한 배액 극소화 수경재배에서의 적정 근권범위 설정(학술발표, 논문제재)
- FDR 센서를 이용한 배액 극소화 시스템 농가 실증 및 실용화(영농활용, 홍보(방송 신문 등))
- FDR 센서를 이용한 금액방법으로 일반 파프리카 및 소과종 파프리카의 수량증대와 품질향상기술(학술발표, 논문제재, 영농활용, 홍보(방송 신문 등))
- 양분 균형제어와 비료투입량 최소화 기술의 특허출원 및 등록을 통한 기술의 유형화 및 보호
- 상업농가 확장 설치를 통한 농가 활용성 증대
- 장치의 확장성 및 운용 기술 매뉴얼화를 통한 보급성 증대
- 추가적인 파프리카 수경재배 온실 적용 실험을 통한 양분 균형 제어 기술 확립, 관련 결과 정리하여 추가적인 학술성과 도출 예정(위탁)

제 2 절 추가 연구의 필요성

- FDR 센서가 재배온실 내 전기적 간섭을 최소한으로 받아 미세한 수분변화를 FDR 센서가 감지할 수 있도록 하는 연구가 필요
- 자동관수기와의 통신이 원활하게 될 수 있도록, 또 재배자가 최소 시간 투자로 바로 활용 가능하도록 기술을 안정화 시키는 것이 필요

제 3 절 타 연구에의 응용

- 작물 생체 정보 데이터와 병행하여 환경변화에 따른 작물생체반응을 이해하는 연구에 추가적으로 활용될 수 있는 중요한 데이터가 됨
- ICT 융합 한국형 스마트팜에 활용
- 도시팜, 도시농업, 관광원예에 사용되는 다양한 작물(화훼류, 목본류 등)과 시스템에 적용 확대

제 6 장 연구과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 Coconut 생산현황

시장에서 보통 판매하는 coconut은 코코넛야자(*Cocos nucifera*; coconut coir) 나무의 과일의 종자(single seed)라 할 수 있다. 열매 내부의 주스(수액)는 각종 미네랄을 함유한 건강음료로 열대지방에서 식용으로 이용되고 있고, 과일을 둘러싸고 있는 5~8cm 두께의 외부껍질은 coconut husk 라 불리며 husk내 섬유는 따로 채취하여 로프, 매트 등의 원료로 이용된다. 섬유 중에서도 갈색과 흰색 섬유는 장섬유로서 길이가 10~30cm 수준을 나타낸다. 섬유를 채취하고 남은 목수수(pith) 60%와 단섬유(40%)로 구성된 부산물을 coir dust, coir pith로 불리며 주로 상토재료로서 활용이 급속히 증가되고 있다.

과일내부껍질(과피, coco shell)은 coconut의 12%에 해당하는 무게를 나타내며 탄화시켜 1-2 charcoal과 활성탄소(activated carbon)로 생산된다. 보통 1톤의 코코넛 과피에서 300kg의 charcoal을 생산할 수 있으며, 활성탄소 120kg이 생산된다. 이것들은 공업적으로 필터나 흡수제로 이용되고 활성탄은 연료로 활용된다. 1개의 coconut husk(300g)에서 보통의 섬유와 210~220g의 coir, 80~90g의 dust가 생산된다. 일반적으로 섬유가 30%내외를 차지하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 코코넛은 약 4000년 전부터 재배되어왔고 세계에서 가장 오랜 식물종중 하나로서 아주 다양한 용도로 이용되고 있다. 즉, 식품, 음료, 야자유, 섬유, 연료, 건축자재, 유기물 등으로 이용되며 재배는 전세계 열대지역에서 주로 이루어지고 있다.

코코넛 야자는 매달 꽃이 피고, 항상 생육단계가 다른 과일들이 성숙되어 가고 있다. 수확은 보통 개화후 45~60일 간격으로 이루어지고 1년에 50~100개의 코코넛을 수확할 수 있다. 코코넛은 과피내 배유에 함유한 높은 유지를 식용과 비식용(공업용)으로 이용하기 위해서 주로 생산하고 있다. 생산지역은 주로 열대아시아 지역의 해안가를 따라 이루어지고 있다. 주요 생산국은 인도네시아, 필리핀, 인도, 스리랑카, 베트남, 말레이시아 등이다. 이들 지역에서 세계 생산량의 약 88%인 42백만톤이 생산되고 있다. 1980년 약 35백만톤에서 2000년에 약 50백만톤으로 증가되어 왔다. 수량은 지역에 따라 차이가 있어 연간 3,500~6,000개/ha 정도를 나타내고 있다. 평균적으로 1주당 70~100개정도가 생산되는데 생산성이 높은 지역에서는 150개에 이른다. 1개 코코넛은 무게로 65%가 과즙과 과피(coco shell)를 차지하고 35%가 외부껍질(husk)로 구성되어 있다.

Table 7-2-1. Coconut production in major producing countries (FAO, million tones)

Country	1980	1990	1995	2000	2003
Indonesia	11.2	12.3	14.0	14.7	15.6
Philippines	9.1	8.9	11.6	11.3	13.7
India	4.2	6.2	9.7	10.0	9.5
Sri Lanka	1.7	1.8	2.0	2.0	1.9
Malaysia	1.2	1.1	1.0	1.0	0.7
Thailand	0.8	1.4	1.4	1.4	1.4
Vietnam	0.5	1.2	1.1	0.9	0.9
Others	-	-	-	-	2.16
Total Asia	28.8	33.0	41.4	42.1	46.3
Africa	1.6	1.9	1.8	1.8	2.0
Oceania	2.3	2.2	1.9	1.9	2.0
Latin America	2.3	2.8	2.9	2.3	2.5
Total World	35	40.0	47.9	48.5	52.9

제 2 절 Coconut coir dust & fiber 생산현황

Coir 섬유는 코코넛을 둘러싸고 있는 외부껍질(husk)로부터 장섬유(10~30cm)만을 뽑아내 로프, 넷트, 매트용 등으로 이용하고 나머지 coir dust는 현지에서 멀칭, 유기물로 이용하던지, 칼륨을 다량함유한 관계로 유기질 비료원으로도 이용되고 있다.

Husk로부터 섬유를 뽑아 내는데는 전통적으로 빗물이나 지하수로 침적(3~6개월)한 후 brown coir 섬유를 생산하던가, 염수에 담갔다가(10~12개월) white coir 섬유를 생산하고 있다. 일반 빗물이나 지하수로 침적하여 섬유를 생산하고 남은 coir dust는 건조·가공하여 상토 및 축사 톱밥 대용으로 이용되고 있는 추세다.

외부껍질(husk)로부터 30%가 섬유, 70%가 coir pith로 구성되고 섬유는 다시 장, 중, 단섬유로 구분되는데 각각 60:30:10의 비율로 되어 있다. 전세계 coir fiber(섬유)의 최대 생산량은 연간 500~600만톤 수준으로 추정되고 있으며 이중 10% 내외가 상업적으로 거래되는 것으로 보인다. Brown fiber는 22만톤으로 인도에서 70%, 스리랑카에서 27%, 기타 3%로 보인다.

섬유의 잠재생산량은 coconut 생산량 × fiber yield(80~90g/nut)로 계산될 수 있으며 내수용 섬유는 전체의 10%선으로 추정한 결과다. Coir fiber의 전세계 최대 생산량(단섬유포함)은 연간 500~600만톤으로 추정하고 있다. 무역거래가 이루어지고 있는 양은 약 10%인 50~60만톤 정도로 추정된다. 지금까지 coconut 섬유산업이 활성화되어 있는 국가는 인도와 스리랑카 중심이고, 베트남, 필리핀, 인도네시아 등에서 급속히 성장되고 있다.

Table 7-3-1. Estimation of the availability of coir fiber raw materials. (unit: 1000tonnes)

	Philippines	Indonesia	India	Sri Lank
Potential fiber production	700	1,000	600	260
Fiber industry	-	-	300	100
Domestic use	70	100	60	26
Non-extracted fiber	630	900	240	134

코코넛 섬유산업의 발전과 더불어 부수적으로 생산되는 dust의 활용은 1980년 이전에는 거의 없었으나 1980년대 중반부터 원예용 상토 등으로 활용이 증대되기 시작하였다. 특히 1990년대 들어 지구 환경문제가 중시되면서 피트모스 채취를 자연환경 파괴 개념으로 보게 됨에 따라 그 채취도 계속 줄어 들것으로 보이고 채취할 수 있는 양도 한정되어 있는 상황에서 피트모스 대체 배지로서 cocopeat가 급속히 신장하고 있는 상황이다.

코코넛에서 섬유(30%)를 채취하고 남은 부산물은 목수부가 60%, 단섬유 40%로 구성되어 있고 이를 coir dust, coir pith로 불리며 상토용으로 어느 정도 가공된 것을 cocopeat라고 부르고 있다. 이러한 부산물의 원예용 이용에 대한 연구가 1980년대 중반부터 멀칭, 토양개선폰 유기물, 상토 및 수경재배 배지로서의 활용에 대하여 이루어져 주로 peatmoss와 vermiculite 대체 배지로서 상토개발의 주재료로 사용되어 왔다.

코코넛이 연간 전세계에서 5,000만톤이 생산되고 이중 husk가 35%를 차지하고, 이중에 70%가 coir dust 이므로 연간 coir dust의 최대 생산량이 1,225만톤이 생산될 수 있다고 본다. 그러나 실제 섬유생산 과정에서 만들어지는 dust만이 활용가능한 범위라고 본다면 표 @와 같은 정도로 추산될 수 있고 주요 아시아국가에서 생산 가능한 dust량은 약 600만톤으로 추정된다. 이처럼 dust의 최대 생산량은 1,225만 톤이고 잠재 생산량은 그중의 50%인 600만톤 정도이고, 실제 생산되어 거래되고 있는 양은 그중의 10%선인 60만톤 정도로 추정되고 있다. 앞으로 적절한 생산 가격이 주어진다면 더 많은 양이 생산, 가공되어 거래 될 수 있다는 것을 보여주고 있다.

제 3 절 해외 수경재배기술

○ 정밀한 재배는 가장 효율적이고 효과적인 재배법으로, 최소한의 투입으로 최대한의 생산을 이루는 것에 중점을 두고 있다. 지상부 환경, 유전적 특성, 근권 환경의 세가지를 핵심 조절 기법으로 한다. 이 조절로서, 수분 방출을 관리하여 환경에 친화적이며, 비료/에너지/노

동력 투입을 관리하여 경제적이고, 작물의 수확/품질/물질함량 관리를 통해 생산능력을 높이는 것으로 이 세가지를 구체적 목적으로 삼는다.

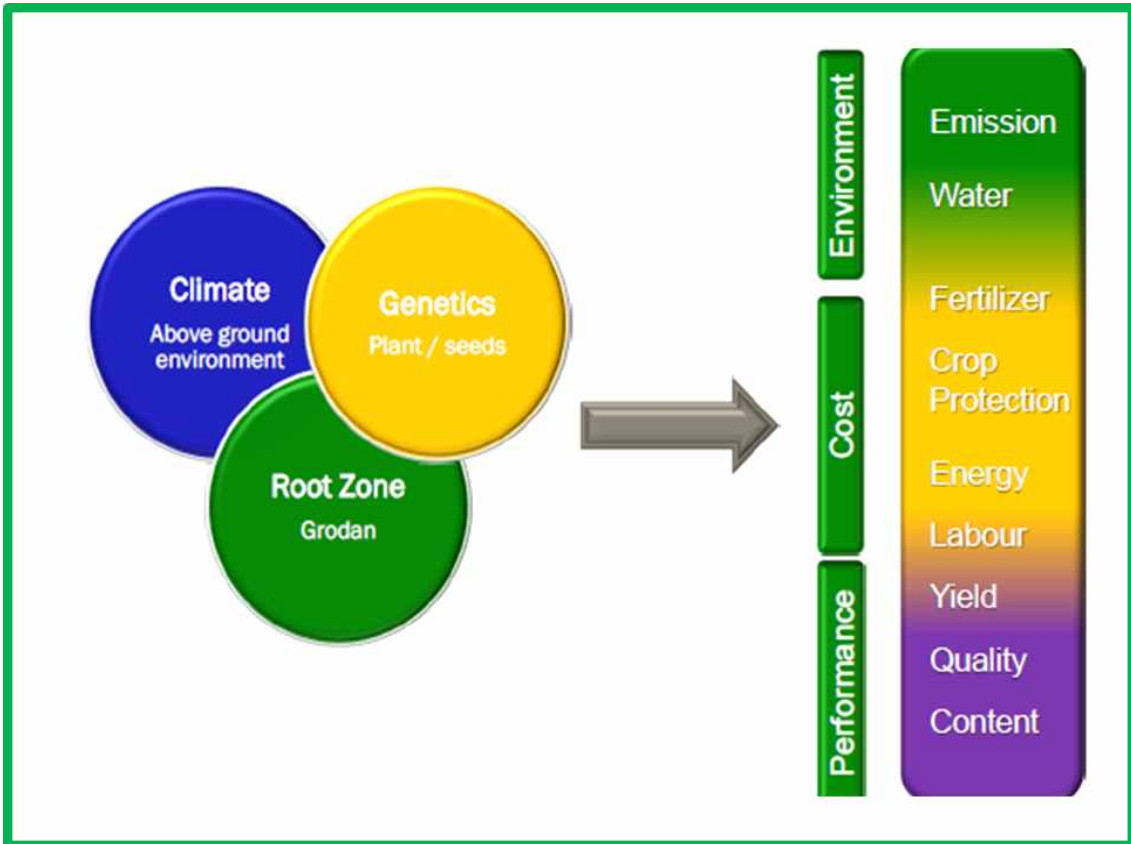
○ 왜 수분관리인가?

더 많은 수량과 고품질 작물의 생산한다. 적은 에너지, 노동력, 비료와 물 사용으로 생산에 투자되는 비용을 절감할 수 있다. 또한, 적은 에너지, 비료와 물 사용으로 환경 영향을 최소화 시켜 지속 가능한 성장을 가능하게 한다. 식물에서 수분은 광합성에 사용될 뿐만 아니라, 각종 양분을 이동시키는 수단이면서, 동시에 증산을 통한 엽온을 조절하는 역할을 한다. 수분의 공급은 식물 생육에 있어 핵심적이며, 일출 후 누적된 광이 일정수준 이상이 되면 급액을 시작하여, 광변화에 따른 급액 조절은 효과적인 물 관리에 있어서 핵심적인 부분이다.

○ 근권부 수분함량의 변화를 측정하는 WCM기기를 사용하게 되면, 일중 변화하는 근권부 수분함량과 EC를 확인할 수 있고, 이를 통해 재배하는 작물의 일중 흡수 패턴을 확인이 가능하고 앞으로 계속 재배되는 과정에서 작물이 어떻게 급액에 대하여 반응하는 지를 예측할 수 있다. 이러한 예측은 보다 안정적인 근권부 관리를 가능하게 하고, 광에 의한 급액 관리에 있어 추가적인 정보를 동시에 제공하여 필요에 따라 급액을 늘이거나 줄일 수 있도록 조절하는 데 사용되어 보다 효과적인 정밀한 급액 관리가 가능하도록 하여 준다.

○ 또한 배액과 근권 EC와의 관계를 조사하여 재배하고 있는 식물에서의 상관관계를 알 수 있다. 이는 다수의 센서를 사용할 수 없을 때, 발생하는 배액만으로 배지 근권내 EC를 예상할 수 있게 된다. 그리고, 급액, 배액 그리고 근권의 EC농도 비교를 통하여 환경, 작물 상태, 재배 시기 등 여러 조건에서 식물의 양분 흡수 정도를 파악하여 향후 발생 가능한 변화를 예측할 수 있어, 정밀한 양분관리가 가능하도록 하여 준다. 최적화된 생육과 생산 그리고 과실 품질은 근권부 조절을 통하여 가능하다. 외부 환경들 중, 광에 식물은 매우 민감히 반응하며, 이를 통하여 에너지를 생산해 생육에 사용한다.

○ 하지만, 재배라는 것은 식물의 생육을 좋게만 하는 것뿐만 아니라 재배자가 원하는 물질이나 산물을 식물에서 얻을 수 있어야 한다. 이를 정밀하게 조절함에 있어 근권부 환경 조절은 매우 중요하고 필수적으로 이루어지게 된다. 이 근권부 환경을 조절함에 앞서 근권환경 측정 센서를 이용한 계측은 현재의 상태와 과거 결과에 대한 확인을 통해 앞으로 있을 식물에 주어지는 환경 변화를 조절할 수 있게 해주는 중요한 정보원이다. 식물을 재배함에 있어 보다 고품질, 다량 생산 그리고 고부가가치를 더하고 싶다면, 근권부 측정 센서등을 활용한 정밀 재배 방법은 선택이 아닌 필수가 될 것이다.



Why water management?

Higher performance

High yields and high quality produce

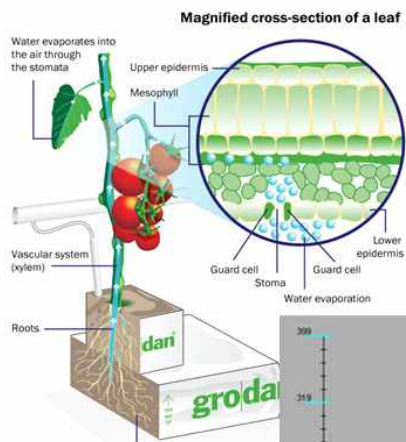
Lower costs

Reduction growing costs by using less energy, labour, fertiliser & water.

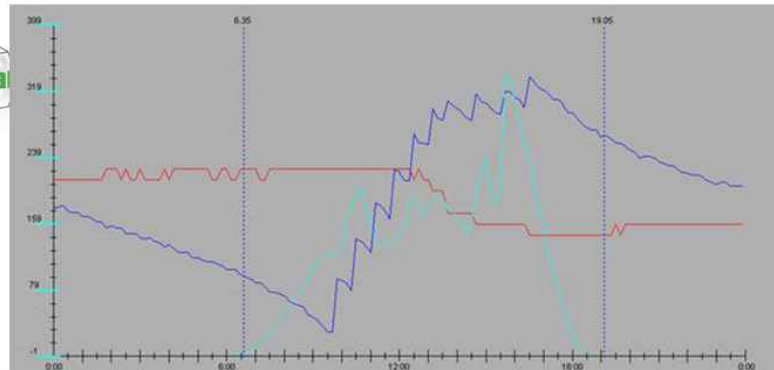
Reduced environmental impact

Sustainable growing by using less energy, water, & fertiliser.





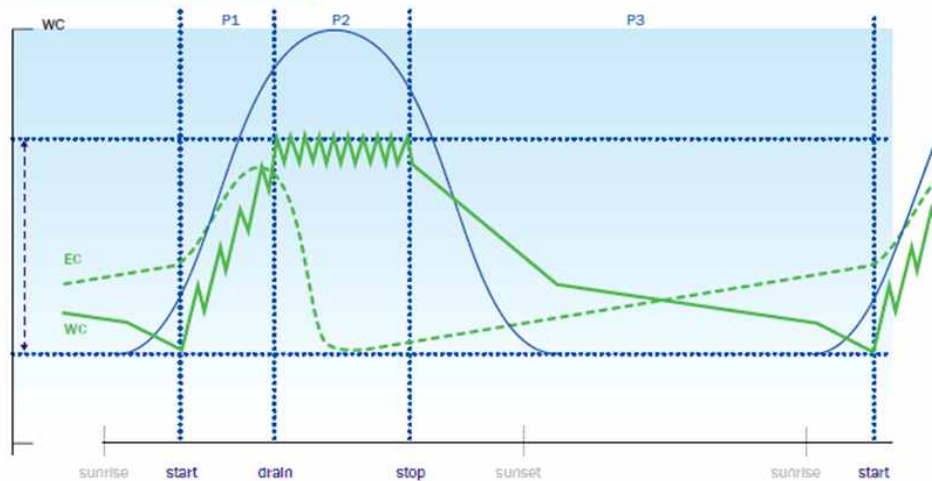
Plant transpiration



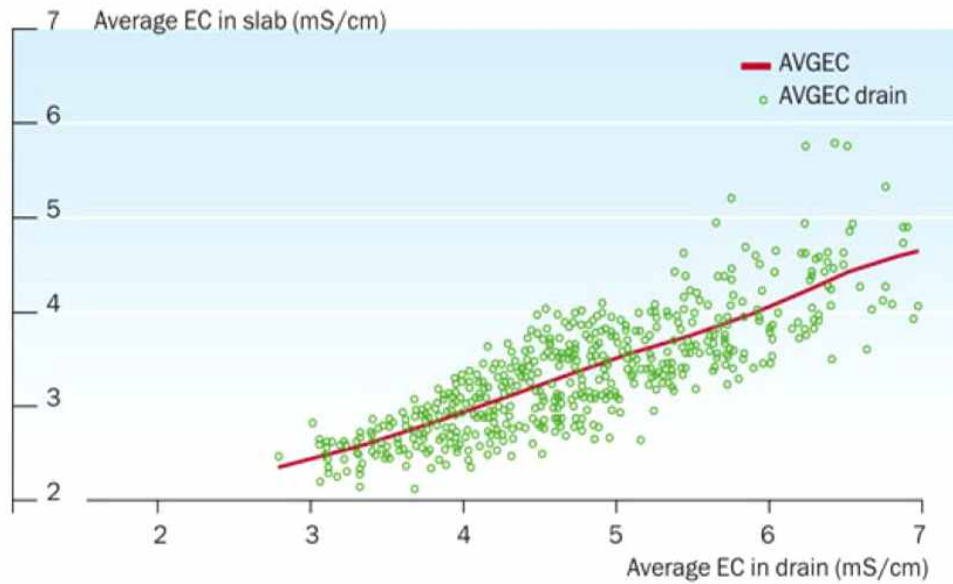
Benefits of control based on WCM

grodan®

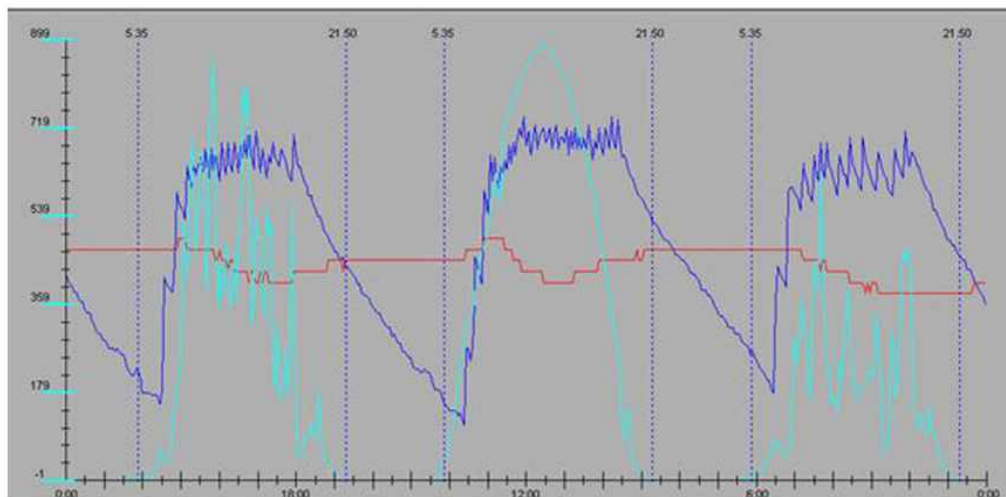
Day dynamic substrate WC & EC



Relation slab EC to drain EC



Controlled root zone for optimum growth, production & fruit quality



제 7 장 연구개발과제의 대표적 연구실적

번호	구분	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문게재지/ 특허등록국가	코드번호		D-12	
						Impact Factor	논문게재일 /특허등록일	사사여부 (단독사사 또는 중복사사)	특기 사항
1	논문	Development of a non drainage hydroponic system with a coconut coir substrate by frequency domain reflectometry sensor for tomato cultivation	방통대 시립대	저자	J. Plant Nutrition	0.680	2013		SCI
2	논문	Non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a frequency domain reflectometry sensor	방통대 시립대	저자	European Journal of Horticultural Science	0.400	2014		SCI
3	논문	Environmentally sustainable production of tomato in a coir substrate hydroponic system using a frequency domain reflectometry sensor	방통대 시립대	저자	Horticulture, Environment and Biotechnology	0.662	2015		SCIE
4	특허	양액 공급 시스템	그린씨에스	특허권자	한국		2014		
5	논문	Effects of renewal pattern of recycled nutrient solution on the ion balance in nutrient solutions and root media and the growth and ion uptake of paprika (<i>Capsicum annuum</i> L.) in closed soilless cultures	서울대	저자	Korean Journal of Horticultural Science and Technology	0.339	2016		SCIE

제 8 장 참고문헌

- Bilderback, T.E. 2002. Water management is key in reducing nutrient runoff from container nurseries. *HortTechnology* 12:541-544.
- Burnett, S.E. 2008. Morphology and irrigation efficiency of *Gaura lindheimeri* growth with capacitance sensor-controlled irrigation. *Hortic. Sci.* 43:1555-1560.
- Choi, E.Y., K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2013a. Non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a frequency domain reflectometry sensor. *Europ. J. Hortic. Sci.* 78:132-143.
- Choi, E.Y., Y.H. Woo, M. Son, K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2013b. Nutrient solution concentration effects on non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a FDR sensor. *Intl. J. Food Agr. Environ.* 11:636-641.
- Choi, E.Y., S.K. Seo, K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2014. Development of a non-drainage hydroponic system with a coconut coir substrate by a frequency domain reflectometry sensor for tomato cultivation. *J. Plant Nutr.* 37:748-764.
- Choi, E.Y., Y.H. Yoon, K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2015. Environmentally sustainable production of tomato in coir substrate hydroponic system using a frequency domain reflectometry sensor. *Hort. Environ. Biotechnol.* 56(2):167-177.
- Ehret, D.L., J.G. Menzies, and T. Helmer. 2005. Production and quality of greenhouse roses in recirculating nutrient systems. *Sci. Hortic.* 106:103-113.
- Farina, E., F.D. Battista, and M. Palagi. 2007. Automation of irrigation in hydroponics by FDR sensors-Experimental results from field trials. *Acta Hortic.* 747:193-196.
- Fricke, A. 1998. Influence of different surplus irrigation and substrate on production of greenhouse tomatoes. *Acta Hort.* 458:33-42.

- Giuffrida, F., S. Argento, V. Lipari, and C. Leonardi. 2003. Methods for controlling salt accumulation in substrate cultivation. *Acta Hort.* 614:799-803.
- Hwang, Y.H., C.G. An, Y.H. Chang, H.S., Yoon, J.U. An, G.M. Shon, C.W. Rho, and B.R. Jeong. 2012. Effect of zero drainage using drainage zero sensor on root zone environment, growth and yield in tomato rockwool culture. *J. Bio-Env. Cont.* 21:398-403.
- A.L. and R.F. 1999 : Temperature humidity effects on branchlet gas-exchange in white spruce : an explanation for the increase in transpiration with branchlet temperature. *Trees-Struct. Funct.* 14, 161 - 168.
- Abad, M., F. Fornes, C. Carrion, and V. Noguera. 2005. Physical properties of various coconut coir dust compared to peat. *HortScience* 40(7):2138-2144.
- Abad, M., P. Noguera, R. Puchades, A. Maquieira, and V. Noguera. 2002. Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for container ornamental plants. *Bioresource Technology* 82:241-245.
- Ahn T.I., J.W. Shin, and J.E. Son. 2010. Analysis of changes in ion concentration with time and drainage ratio under EC-based nutrient control in closed-loop soilless culture for sweet pepper plants (*Capsicum annum* L. 'Boogie'). *Jornal of Bio-Environment control*, 19(4): 298-304
- An C.G., Y.H. Hwang, H.S. Yoon, H.J. Hwang, G.M. Shon, G.W. Song, and B.R. Jeong. 2005. Effect of Drain Ratio during Fruiting Period on Growth and Yield of Sweet Pepper (*Capsicum annum* 'Jubilee') in Rockwool Culture. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 23(3):256-260
- Arguedas, F.R., J.D. Lea-Cox and A.G. Ristvey 2007: Revisiting the measurement of plant available water in soilless substrates. *Proc. Southern Nursery. Assoc. Res. Conf.* 52, 111-115.
- Ben-Asher, J., C.J. Phene and A. Kinarti 1992: Canopy temperature to assess daily evapotranspiration and management of high frequency drip irrigation systems. *Agr. Water Manage.* 22, 379-390.
- Berry, J. and O. Björkman 1980: Photosynthetic response and adaptation to temperature in

higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31, 491–543.

Boulard, T. and R. Jemaa 1993: Greenhouse tomato crop transpiration model application to irrigation control. *Acta Hort.* 335, 381 - 387.

Brandelik, A. and C. Hubner. 1996. Soil moisture determination: Accurate, large and deep. *Physics and Chemistry of the Earth* 21:157–160

Cho J.L., et al. 2009. The guided book of Growing Greenhouse Peppers in British Columbia., Gyeongsang National University. p33–39

Choi, E.Y., Y.B. Lee and J.Y. Kim 2001: Nutrient uptake, growth and yield of cucumber cultivated with different growing substrates under a closed and an open system. *Acta Hort.* 548, 543–550.

Conrad, K., and H.C.B. Hansen. 2007. Sorption of zinc and lead on coir. *Bioresource Technology* 98:89–97.

Ehret, D.L., J.G. Menzies and T. Helmer 2005: Production and quality of greenhouse roses in recirculating nutrient systems. *Sci. Hort.* 106, 103 - 113.

Evans, M.R., and R.H. Stamps. 1996. Growth of bedding plants in sphagnum peat-and coir dust-based substrates. *Acta Horticulturae* 14:187–190.

Evans, M.R., S. Konduru and R.H. Stamps 1996: Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. *HortSci.* 31, 965–967.

Fares, A. and V. Polyakov 2006: Advances in crop water management using capacitive water sensors. *Adv. Agron.* 90, 43–77.

Franco, J.A., P.J. Perez-Saura, J.A. Fernandez, M. Parra and A.L. Garcia 1999: Effect of two irrigation rates on yield, incidence of blossom-end rot, mineral content and free amino acid levels in tomato cultivated under drip irrigation using saline water. *J. Hort. Sci. Biotech.* 74, 430–435.

Fricke, A. 1998: Influence of different surplus irrigation and substrate on production of greenhouse tomatoes. *Acta Hort.* 458, 33–42.

Giuffrida, F., S. Argento, V. Lipari and C. Leonardi 2003: Methods for controlling salt accumulation in substrate cultivation. *Acta Hort.* 614, 799–803.

- Guichard, S., N. Bertin, C. Leonard and C. Gary 2001: Tomato fruit quality in relation to water and carbon fluxes. *Agronomie* 21, 385 - 392.
- Gül, A., I.H. Tüzel, Y. Tüzel and R.Z. Eltez 2001: Effect of continuous and intermittent solution circulation on tomato plants grown in NFT. *Acta Hort.* 554, 205-212.
- Handreck, K.A. 1993. Properties of coir dust, and its use in the formulation of soilless potting media. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. Rome,Italy.
- Hilhorst, M.A. 2000: A pore water conductivity sensor. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1922 - 1925.
- Hook, W.R. and N.J. Livingston 1996: Errors in converting time domain reflectance measurements of propagation velocity to estimates of soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 35 - 41.
- Hur, S.O., K.H. Jung, C.W.Park,S.K.Ha,andJ.G.Kim. 2007. Verification of soil volumetric water content measured by TDR, FDR. *Journal of Korea Water Resources Association Conference* pp.229-235.
- Hur, S.O., S.K. Ha and J.G. Kim. 2009. Verification of TDR and FDR Sensors for Volumetric Soil Water Content Measurement in Sandy Loam Soil. *Kor. J. Soil Sci. Fert.* 42(2):110-116
- Kang, J.Y., H.H. Lee and K.H. Kim 2004: Physical and chemical properties of organic horticultural substrates used in Korea. *Acta Hort.* 644, 231-235.
- Katerji, N., T. Francois, B. Olivier and Q. Philippe 1994: Behavior of maize stem diameter during drying cycles: Comparison of two methods for detecting water stress. *Crop Sci.* 34, 165-169.
- Kim N.Y., T.S. Lim, and Y.B. Lee. 2001. The effect of closed and open systems on growth, mineral absorption and yield in cocopeat substrate culture of cucumber. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* Vol.19 (Abstr.)
- Lee H.J. 2010. Plant growth, calcium distribution and proteome expression to different cation ratios of nutrient solution of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) in hydroponics. PhD Diss., Univer. of Seoul.
- Lee Y.B.,et al. 2010. Hydroponic technology export fruits and vegetables., The research of

Fruit Vegetable for Export. p144-134

- Lee, J.H., Y.B. Lee, E.Y. Choi and E.Y. Yang 2007: A controlled irrigation method using integrated solar radiation has effect on both the production and quality of single-node cutting rose 'versillia' *Acta Hort.* 761, 379-385.
- Lee, Y.H. 2007. Improvement of physicochemical properties for sound coconut coir substrates from hydroponics. MS Diss., The University of Seoul, Seoul.
- Lee, J.H. and D.J. Myoung. 2010. Concepts in Greenhouse Environmental Control for Growing the Sweet Pepper Crop. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* Vol.28.(2) (Abstr.)
- Lin, C.P. 2003: Frequency domain versus travel time analyses of TDR waveforms for soil moisture measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67, 720 - 729.
- Lizarraga, A., H. Boesveld, F. Huibers and C. Robles 2003: Evaluating irrigation scheduling of hydroponic tomato in Navarra, Spain. *Irrig. and Drain.* 52, 177-188.
- Lorenzo, P., E. Medrano and M.C. Sanchez-Guerrero 1998: Greenhouse crop transpiration: an implement to soilless irrigation management. *Acta Hort.* 458, 113 - 122.
- MIFAFF (Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries). 2009. 2007 Vegetable state. MIFAFF.
- Moriya, H., K. Iwao and H. Kageyama 1992: Studies on non-destructive and continuous measurement of water contents and applications to irrigation in crop culture. *Acta Hort.* 304, 345-352.
- Nguyen Huy Tai, J.S. Park, T.I. Ahn, J.H. Lee, D.J. Myoung, Y.Y. Cho and J.E. Son. 2010. Analysis of Relationship among Growth, Environmental Factors and Transpiration in Soilless Culture of Paprika Plants. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 28(1):59-61
- Noguera, P., M. Abad, R. Puchades, A. Maquieira, and V. Noguera. 2003. Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as container medium. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 34:593-605.
- Noguera, P., M. Abad, V. Noguera, R. Puchades and A. Maquieira 2000: Coconut coir waste, a new and viable ecologically-friendly peat substitute. *Acta Hort.* 517, 279-286.
- Papadopoulos, A.P., U. Saha, X. Hao and S. Khosla 2008: Irrigation management in

greenhouse tomato production in rockwool. *Acta Hort.* 799, 521–528.

Park, S.T., K.Y. Choi and Y.B. Lee 2010: Water content characteristics of coconut coir substrates on different mixture ratios and irrigation rates and times. *Korean J. Hortic. Sci.* 28, 227–233.

Prasad, M. 1997: Physical, chemical and biological properties of coir dust. *Acta Hort.* 450, 21–30.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2013. *Climate change 2013: The physical science basis. Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report.* Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1.

Jaria, F. and C.A. Madramootoo. 2013. Thresholds for irrigation management of processing tomatoes using soil moisture sensors in Southwestern Ontario. *Transactions of the ASABE.* 56(1):155–166.

Kim, J.Y. 2014. Efficient irrigation practice through soil moisture sensors based automated irrigation system in ornamental plant production. *Flower Res. J.* 22(2):48–53

Kim, M.K. 2015. The effects of off-time duration between irrigation cycles and the end-time of irrigation hours on drainage ratio, water and fertilizer use efficiencies, and yield in coir substrate hydroponic system for strawberry cultivation by a FDR (Frequency Domain Reflectometry) sensor. PhD Diss., The University of Seoul, Seoul, Korea.

Lee, J.H., Y.B. Lee, E.Y. Choi, and E.Y. Yang. 2007. A controlled irrigation method using integrated solar radiation has effect on both the production and quality of single-node cutting rose ‘versillia’. *Acta Hort.* 761:379 - 385.

Lizarraga, A., H. Boesveld, F. Huibers and C. Robles. 2003. Evaluating irrigation scheduling of hydroponic tomato in Navarra, Spain. *Irrig. Drain.* 52:177 - 188.

- Mathers, H.M. T.H. Yeager, and L.T. Case. 2005. Improving irrigation water use in container nurseries. HortTech.15:8-12.
- MAFRA, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2014. Actual production of greenhouse vegetables in 2013.
- Park, S.T. G.H. Jung, K.Y. Choi, Y.B. Lee, J.S Oh, and H.J. Yoo, 2011a. Changes of measuring water content values on FDR sensors dy different distances. Kor, J, Hortic. Sci. Technol. 29(2):187.
- Park, S.T., G.H. Jung, H.J. Yoo, E.Y. Choi, K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2014. Measuring Water Content Characteristics by Using Frequency Domain Reflectometry Sensor in Coconut Coir Substrate. Protected Hort. Plant Fac. 23:158-166.
- Park, S.T. 2015 Irrigaton control in coir substrate hydroponic system for rose cultivation by a frequency domain reflectometry (FDR) Sensor. The University of seoul. seoul. Korea.
- Runia, W.T.and JJ.Amsing. 2001.Disinfection of recirculating water from closed cultivation; State by heat treatment. Acta Hortic. 548:215-222.
- Schröder, F.G. and J.H. Lieth. 2002. Irrigation control in hydroponics, p. 265 - 296. In: D. Savvas and H. Passam (eds.). Hydroponic production of vegetables and ornamentals. Embryo Publishing, Athens, Greece.
- Seo, B.S. 1999. Future prospects and countermeasures for hydroponics in 21C. Kor. J. Hortic. Sci. Technol. 17:796-802.
- Yeager, T.R., C.H. Gilliam, T.E. Bilderback, D.C. Fare, A.X. Niemiera, and K.M. Tilt. 1997. Best management practice: guide for producing container-grown plants. Southern Nursery Assoc., Marietta, GA.
- Yoo, H.J. 2014. Effects of irrigation control by FDR(frequency domain reflectometer)sensor on drain on ratio and growth of sweet pepper(*Capsicum annuum*

- L.) hydroponics in coconut coir. PhD Diss., The University of Seoul, Seoul, Korea.
- van Iersel, M.W., S. Dove, J.G. Kang, and S.E. Burnett. 2010. Growth and water use of petunia as affected by substrate water content and daily light integral. *HortSci.* 45:277-282.
- Zekki, H., L. Gauthier, and A. Gosselin. 1996. Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 121:1082-1088.
- A.L. and R.F. 1999 : Temperature humidity effects on branchlet gas-exchange in white spruce : an explanation for the increase in transpiration with branchlet temperature. *Trees-Struct. Funct.* 14, 161 - 168.
- Abad, M., F. Fornes, C. Carrion, and V. Noguera. 2005. Physical properties of various coconut coir dust compared to peat. *HortScience* 40(7):2138-2144.
- Abad, M., P. Noguera, R. Puchades, A. Maquieira, and V. Noguera. 2002. Physico-chemical and chemical properties of some coconut coir dusts for use as a peat substitute for container ornamental plants. *Bioresource Technology* 82:241-245.
- Ahn T.I., J.W. Shin, and J.E. Son. 2010. Analysis of changes in ion concentration with time and drainage ratio under EC-based nutrient control in closed-loop soilless culture for sweet pepper plants (*Capsicum annum* L. 'Boogie'). *Jornal of Bio-Environment control*, 19(4): 298-304
- An C.G., Y.H. Hwang, H.S. Yoon, H.J. Hwang, G.M. Shon, G.W. Song, and B.R. Jeong. 2005. Effect of Drain Ratio during Fruiting Period on Growth and Yield of Sweet Pepper (*Capsicum annum* 'Jubilee') in Rockwool Culture. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 23(3):256-260
- Arguedas, F.R., J.D. Lea-Cox and A.G. Ristvey 2007: Revisiting the measurement of plant available water in soilless substrates. *Proc. Southern Nursery. Assoc. Res. Conf.* 52, 111-115.
- Ben-Asher, J., C.J. Phene and A. Kinarti 1992: Canopy temperature to assess daily evapotranspiration and management of high frequency drip irrigation systems. *Agr.*

Water Manage. 22, 379–390.

Berry, J. and O. Björkman 1980: Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 31, 491–543.

Boulard, T. and R. Jemaa 1993: Greenhouse tomato crop transpiration model application to irrigation control. *Acta Hort.* 335, 381 - 387.

Brandelik, A. and C. Hubner. 1996. Soil moisture determination: Accurate, large and deep. *Physics and Chemistry of the Earth* 21:157–160

Cho J.L., et al. 2009. The guided book of Growing Greenhouse Peppers in British Columbia., Gyeongsang National University. p33–39

Choi, E.Y., Y.B. Lee and J.Y. Kim 2001: Nutrient uptake, growth and yield of cucumber cultivated with different growing substrates under a closed and an open system. *Acta Hort.* 548, 543–550.

Conrad, K., and H.C.B. Hansen. 2007. Sorption of zinc and lead on coir. *Bioresource Technology* 98:89–97.

Ehret, D.L., J.G. Menzies and T. Helmer 2005: Production and quality of greenhouse roses in recirculating nutrient systems. *Sci. Hort.* 106, 103 - 113.

Evans, M.R., and R.H. Stamps. 1996. Growth of bedding plants in sphagnum peat–and coir dust–based substrates. *Acta Horticulturae* 14:187–190.

Evans, M.R., S. Konduru and R.H. Stamps 1996: Source variation in physical and chemical properties of coconut coir dust. *HortSci.* 31, 965–967.

Fares, A. and V. Polyakov 2006: Advances in crop water management using capacitive water sensors. *Adv. Agron.* 90, 43–77.

Franco, J.A., P.J. Perez–Saura, J.A. Fernandez, M. Parra and A.L. Garcia 1999: Effect of two irrigation rates on yield, incidence of blossom–end rot, mineral content and free amino acid levels in tomato cultivated under drip irrigation using saline water. *J. Hort. Sci. Biotech.* 74, 430–435.

Fricke, A. 1998: Influence of different surplus irrigation and substrate on production of greenhouse tomatoes. *Acta Hort.* 458, 33–42.

- Giuffrida, F., S. Argento, V. Lipari and C. Leonardi 2003: Methods for controlling salt accumulation in substrate cultivation. *Acta Hort.* 614, 799–803.
- Guichard, S., N. Bertin, C. Leonard and C. Gary 2001: Tomato fruit quality in relation to water and carbon fluxes. *Agronomie* 21, 385 - 392.
- Gül, A., I.H. Tüzel, Y. Tüzel and R.Z. Eltez 2001: Effect of continuous and intermittent solution circulation on tomato plants grown in NFT. *Acta Hort.* 554, 205–212.
- Handreck, K.A. 1993. Properties of coir dust, and its use in the formulation of soilless potting media. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. Rome, Italy.
- Hilhorst, M.A. 2000: A pore water conductivity sensor. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64, 1922 - 1925.
- Hook, W.R. and N.J. Livingston 1996: Errors in converting time domain reflectance measurements of propagation velocity to estimates of soil water content. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 35 - 41.
- Hur, S.O., K.H. Jung, C.W.Park, S.K.Ha, and J.G.Kim. 2007. Verification of soil volumetric water content measured by TDR, FDR. *Journal of Korea Water Resources Association Conference* pp.229–235.
- Hur, S.O., S.K. Ha and J.G. Kim. 2009. Verification of TDR and FDR Sensors for Volumetric Soil Water Content Measurement in Sandy Loam Soil. *Kor. J. Soil Sci. Fert.* 42(2):110–116
- Kang, J.Y., H.H. Lee and K.H. Kim 2004: Physical and chemical properties of organic horticultural substrates used in Korea. *Acta Hort.* 644, 231–235.
- Katerji, N., T. Francois, B. Olivier and Q. Philippe 1994: Behavior of maize stem diameter during drying cycles: Comparison of two methods for detecting water stress. *Crop Sci.* 34, 165–169.
- Kim N.Y., T.S. Lim, and Y.B. Lee. 2001. The effect of closed and open systems on growth, mineral absorption and yield in cocopeat substrate culture of cucumber. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* Vol.19 (Abstr.)
- Lee H.J. 2010. Plant growth, calcium distribution and proteome expression to different cation ratios of nutrient solution of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.) in hydroponics. PhD

Diss., Univer. of Seoul.

Lee Y.B., et al. 2010. Hydroponic technology export fruits and vegetables., The research of Fruit Vegetable for Export. p144-134

Lee, J.H., Y.B. Lee, E.Y. Choi and E.Y. Yang 2007: A controlled irrigation method using integrated solar radiation has effect on both the production and quality of single-node cutting rose 'versillia' Acta Hort. 761, 379-385.

Lee, Y.H. 2007. Improvement of physicochemical properties for sound coconut coir substrates fro hydroponics. MS Diss., The University of Seoul, Seoul.

Lee. J.H. and D.J. Myoung. 2010. Concepts in Greenhouse Environmental Control for Growing the Sweet Pepper Crop. Kor. J. Hort. Sci. Technol. Vol.28.(2) (Abstr.)

Lin, C.P. 2003: Frequency domain versus travel time analyses of TDR waveforms for soil moisture measurements. Soil Sci. Soc. Am. J. 67, 720 - 729.

Lizarraga, A., H. Boesveld, F. Huibers and C. Robles 2003: Evaluating irrigation scheduling of hydroponic tomato in Navarra, Spain. Irrig. and Drain. 52, 177-188.

Lorenzo, P., E. Medrano and M.C. Sanchez-Guerrero 1998: Greenhouse crop transpiration: an implement to soilless irrigation management. Acta Hort. 458, 113 - 122.

MIFAFF (Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries). 2009. 2007 Vegetable state. MIFAFF.

Moriya, H., K. Iwao and H. Kageyama 1992: Studies on non-destructive and continuous measurement of water contents and applications to irrigation in crop culture. Acta Hort. 304, 345-352.

Nguyen Huy Tai, J.S. Park, T.I. Ahn, J.H. Lee, D.J. Myoung, Y.Y. Cho and J.E. Son. 2010. Analysis of Relationship among Growth, Environmental Factors and Transpiration in Soilless Culture of Paprika Plants. Kor. J. Hort. Sci. Technol. 28(1):59-61

Noguera, P., M. Abad, R. Puchades, A. Maquieira, and V. Noguera. 2003. Influence of particle size on physical and chemical properties of coconut coir dust as container medium. Communications in Soil Science and Plant Analysis 34:593-605.

Noguera, P., M. Abad, V. Noguera, R. Puchades and A. Maquieira 2000: Coconut coir

- waste, a new and viable ecologically-friendly peat substitute. *Acta Hort.* 517, 279–286.
- Papadopoulos, A.P., U. Saha, X. Hao and S. Khosla 2008: Irrigation management in greenhouse tomato production in rockwool. *Acta Hort.* 799, 521–528.
- Park, S.T., K.Y. Choi and Y.B. Lee 2010: Water content characteristics of coconut coir substrates on different mixture ratios and irrigation rates and times. *Korean J. Hortic. Sci.* 28, 227–233.
- Prasad, M. 1997: Physical, chemical and biological properties of coir dust. *Acta Hort.* 450, 21–30.
- An, C.G., Y.H. Hwang, G.M. Shon, C.S. Lim, J.L. Cho, and B.R. Jeong. 2009. Effect of irrigation amount in rockwool and cocopeat substrates on growth and fruiting of sweet pepper during fruiting period. *Kor. J. Hort. Sci. Technol.* 27(2):233–238.
- Choi, E.Y., K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2013a. Non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a frequency domain reflectometry sensor. *Europ. J. Hortic. Sci.* 78:132–143.
- Choi, E.Y., Y.H. Woo, M. Son, K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2013b. Nutrient solution concentration effects on non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a FDR sensor. *Intl. J. Food Agr. Environ.* 11:636–641.
- Choi, E.Y., S.K. Seo, K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2014. Development of a non-drainage hydroponic system with a coconut coir substrate by a frequency domain reflectometry sensor for tomato cultivation. *J. Plant Nutr.* 37:748–764.
- Choi, E.Y., Y.H. Yoon, K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2015. Environmentally sustainable production of tomato in coir substrate hydroponic system using a frequency domain reflectometry sensor. *Hort. Environ. Biotechnol.* 56:167–177.
- Dorji, J. and M.H. Behboudian. 2003. Water relations, growth, yield, and fruit quality of hot pepper grown under controlled alternate drip irrigation on partial rootzone drying. *Sci. Hort.* 104:140–144.
- Farina, E., F.D. Battista, and M. Palagi. 2007. Automation of irrigation in hydroponics by FDR sensors—Experimental results from field trials. *Acta Hort.* 747:193–196.
- Hayata, Y., T. Tabe, S. Kondo, and K. Inoue. 1998. The effects of water stress on the

growth, sugar and nitrogen content of cherry tomato fruit. *J. Japan. Soc.Hort. Sci.* 65:759–766.

Jaria, F. and C.A. Madramootoo. 2013. Thresholds for irrigation management of processing tomatoes using soil moisture sensors in Southwestern Ontario. *Transactions of the ASABE.* 56(1):155–166.

Kim, J.Y. 2014. Efficient irrigation practice through soil moisture sensors based automated irrigation system in ornamental plant production. *Flower Res. J.* 22(2):48–53.

MAFRA, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.2014. Actual production of greenhouse vegetables in 2013.

Park, S.T. G.H. Jung, K.Y. Choi, Y.B. Lee, J.S Oh, and H.J.Yoo, 2011a. Changes of measuring water content values on FDR sensors dy different distances. *Kor, J, Hortic. Sci.Technol.* 29(2):187.

Park, S.T. G.H. Jung, K.Y. Choi, Y.B. Lee, J.S Oh, H.J, Son, and H.J. Yoo, 2011b. Changes of water content according to measuring locations of FDR sensors on coctent coir substate for hydroponics. *Kor. J. Hortic. Sci. Technol.* 29:187–188.

Park, S.T., G.H. Jung, H.J. Yoo, E.Y. Choi, K.Y. Choi, and Y.B. Lee. 2014. Measuring Water Content Characteristics by Using Frequency Domain Reflectometry Sensor in Coconut Coir Substrate. *Protected Hort. Plant Fac.* 23:158–166

Park, S.T. 2015 Irrigaton control in coir substrate hydroponic system for rose cultivation by a frequency domain reflectometry (FDR) Sensor. The University of seoul. seoul. Korea.

Seo, B.S. 1999. Future prospects and countermeasures for hydroponics in 21C. *Kor. J. Hortic. Sci. Technol.* 17:796–802.

Yoo, H.J. 2014. Effects of irrigation control by FDR(frequency domain reflectometer)sensor on drain on ratio and growth of sweet pepper(*Capsicum annum L.*) hydroponics in coconut coir. PhD Diss., The University of Seoul, Seoul, Korea.

Yu, G., D.G. choi, J.H. Bae, and S. Guak. 2006. Effects of substrate EC and water control on the incidence of brown fruit stem and blossom end rot in glasshouse sweet pepper. *J. Bio-Env. Con.* 15(2):167–172.

Beerling, E., Blok, C., Van der Maas, A., & Van Os, E. (2013). Closing the water and

nutrient cycles in soilless cultivation systems. Paper presented at the international symposium on growing media and soilless cultivation 1034.

Bratov, A., Abramova, N., & Ipatov, A. (2010). Recent trends in potentiometric sensor arrays—a review. *Analytica Chimica Acta*, 678(2), 149–159. doi:DOI 10.1016/j.aca.2010.08.035

Ehret, D. L., Menzies, J. G., & Helmer, T. (2005). Production and quality of greenhouse roses in recirculating nutrient systems. *Scientia Horticulturae*, 106(1), 103–113. doi:DOI 10.1016/j.scienta.2005.03.002

Gieling, T. H., van Straten, G., Janssen, H. J. J., & Wouters, H. (2005). ISE and chemfet sensors in greenhouse cultivation. *Sensors and Actuators B—Chemical*, 105(1), 74–80. doi:10.1016/j.snb.2004.02.045

Golicnik, M. (2011). Exact and approximate solutions for the decades-old Michaelis–Menten equation: progress-curve analysis through integrated rate equations. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 39(2), 117–125. doi:10.1002/bmb.20479

Hao, X., & Papadopoulos, A. P. (2002). Growth, photosynthesis and productivity of greenhouse tomato cultivated in open or closed rockwool systems. *Canadian Journal of Plant Science*, 82(4), 771–780.

Kim, W. S., & Lieth, J. H. (2012). Simulation of year-round plant growth and nutrient uptake in *rosa hybrida* over flowering cycles. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 53(3), 193–203. doi:DOI 10.1007/s13580-012-0054-y

Kuipers, N., (2005). More and more peppers. <http://www.cbs.nl/nl-NL/menu/themas/landbouw/publicaties/artikelen/archief/2005/2005-1802-wm.htm> Central Bureau of Statistics, the Netherlands.

Le Bot, J., Adamowicz, S., & Robin, P. (1998). Modelling plant nutrition of horticultural

crops: a review. *Scientia Horticulturae*, 74(1-2), 47-82.

Noordwijk, V. M. (Ed.) (1990). Synchronisation of supply and demand is necessary to increase efficiency of nutrient use in soilless horticulture: Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherland.

Pardossi, A., Carmassi, G., Diara, C., Incrocci, L., Maggini, R., & Massa, D. (2011). Fertigation and substrate management in closed soilless culture. Dipartimento di biologia delle piante Agrarie, University of Pisa, Pisa, Italy.

Savvas, D. (2002). Automated replenishment of recycled greenhouse effluents with individual nutrients in hydroponics by means of two alternative models. *Biosystems Engineering*, 83(2), 225-236. doi:Doi 10.1016/S1537-5110(02) 00152-6

Silberbush, M., Ben-Asher, J., & Ephrath, J. E. (2005). A model for nutrient and water flow and their uptake by plants grown in a soilless culture. *Plant and Soil*, 271(1-2), 309-319. doi:DOI 10.1007/s11104-004-3093-z

Van Os, E. A. (1999). Closed soilless growing systems: A sustainable solution for Dutch greenhouse horticulture. *Water Science and Technology*, 39(5), 105-112. doi:Doi 10.1016/S0273-1223(99)00091-8

Zekki, H., Gauthier, L., & Gosselin, A. (1996). Growth, productivity, and mineral composition of hydroponically cultivated greenhouse tomatoes, with or without nutrient solution recycling. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 121(6), 1082-1088.

Bamsey, M., T. Graham, C. Thompson, A. Berinstain, A. Scott, and M. Dixon. (2012). Ion-specific nutrient management in closed systems: the necessity for ion-selective sensors in terrestrial and space-based agriculture and water management systems. *Sensors (Basel)* 12(10), 13349-13392. doi: <http://dx.doi.org/10.3390/s121013349>.

- Tang, W., J. Ping, K. Fan, Y. Wang, X. Luo, Y. Ying, J. Wu, and Q. Zhou. (2012). All-solid-state nitrate-selective electrode and its application in drinking water. *Electrochimica Acta* 81:186–190.
- Jung, D. H., H. J. Kim, G. L. Choi, T. I. Ahn, J. E. Son, and K. A. Sudduth. (2015). Automated lettuce nutrient solution management using an array of ion-selective electrodes. *Transactions of the ASABE* 58(5), 1309–1319. doi: <http://dx.doi.org/10.13031/trans.58.11228>.
- Savvas, D. (2002). SW – Soil and Water: Automated replenishment of recycled greenhouse effluents with individual nutrients in hydroponics by means of two alternative models. *Biosystems engineering* 83(2), 225–236. doi: <http://dx.doi.org/10.1006/bioe.2002.0106>.
- Savvas, D., and G. Manos. (1999). Automated composition control of nutrient solution in closed soilless culture systems. *Journal of Agricultural Engineering Research* 73(1), 29–33. doi: <http://dx.doi.org/10.1006/jaer.1998.0389>.
- Shin, J. H., Park, J. S., & Son, J. E. (2014). Estimating the actual transpiration rate with compensated levels of accumulated radiation for the efficient irrigation of soilless cultures of paprika plants. *Agricultural Water Management*, 135, 9–18. doi:10.1016/j.agwat.2013.12.009
- Shin, J. H., & Son, J. E. (2016). Application of a modified irrigation method using compensated radiation integral, substrate moisture content, and electrical conductivity for soilless cultures of paprika. *Scientia Horticulturae*, 198, 170–175. doi:10.1016/j.scienta.2015.11.015
- Vardar, G., Altıkatoğlu, M., Orta, D., & Cemek, M. (2015). Measuring calcium, potassium, and nitrate in plant nutrient solutions using ion selective electrodes in hydroponic greenhouse of some vegetables. *Biotechnology and applied biochemistry*, 62(5), 663–668.
- 남윤일, 2004. 순환식 수경재배의 현황 및 문제점과 금후 발전방향. *Korean Research Society for Protected Horticulture* 17:1–7.