

발간등록번호

11-1543000-000154-01

유기배지를 이용한 과채류와 장미
수경재배에서 무배액 기술체계화와
유기배지용 수분센서 개발에 관한 연구

Development of Non-drainage Irrigation Control
Technology and Moisture Measuring Sensor on Fruit
Vegetables and Rose Hydroponics in Organic Substrates

서울시립대학교

농림축산식품자료실



0018173

농림축산식품부

제 출 문

농림수산식품부 장관 귀하

이 보고서를 “유기배지를 이용한 과채류와 장미 수경재배에서 무배액 기술체계화와 유기배지용 수분센서 개발에 관한 연구” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2013년 9월

주관연구기관명 : 서울시립대학교

주관연구책임자 : 이용범

연 구 원 : 최기영, 유형주, 박성태,
오정심

협동연구기관명 : 건국대학교

협동연구책임자 : 최은영

연 구 원 : 서승관, 차부건, 김미란

협동연구기관명 : (주)미래센서

협동연구책임자 : 이승복

연 구 원 : 이상국

협동연구기관명 : 그린씨에스(주)

협동연구책임자 : 배임성

연 구 원 : 정진, 변인석

요 약 문

I. 제 목

유기배지를 이용한 과채류와 장미 수경재배에서 무배액 기술체계화와 유기배지용 수분 센서 개발에 관한 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 현재 수경재배용 배지로 개발 이용되고 있는 배지로는 농업용 암면(이용범, 금강암면, 1988), 입상암면과 펠라이트(이용범, 1989, 1991), 펠라이트+입상암면 혼합배지(이용범, 1994), 펠라이트+훈탄(원예연구소, 1993), 팽연왕겨(강원농진, 2003), 코코넛코이어(이용범, 2006) 등이 개발되어 왔으며, 최근 코코넛코이어를 중심으로 한 유기배지가 50%, 암면과 펠라이트가 50%(2012년, MIFFA)로 유기배지 사용이 증가되고 있음.
- 암면재배는 1ha재배시 최소한 100m²의 폐암면 매트와 12m²의 폐암면 포트가 배출되어 환경 및 처리비용에서 문제점을 유발시키고 있고 펠라이트 재배는 펠라이트 충전 및 폐기 시 분진 발생 등으로 작업과 폐기시의 문제점이 나타남에 따라 새로운 환경친화형 배지 개발의 필요성이 수출용 파프리카, 딸기, 토마토, 장미를 중심으로 환경친화형 유기배지의 사용 면적은 급증하였으며, 앞으로 시설재배 농가에서 증가하리라 예측됨.
- 한편 환경오염 및 비료의 불필요한 과다 사용의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 최근 급증하고 있는 코코넛 코이어를 비롯한 유기배지가 함유하는 적정량의 양수분이 배지 내에 균일하게 분포할 수 있는 배지 수분 제어 및 재배환경을 고려한 급액 관리 기술 체계를 종합화한 통합시스템 관리기술이 확립되어야 함.
- 실제 시설 내 특히 유기배지 수경 재배 농가는 배지의 함수율을 측정할 있는 적합한 배지 수분측정기가 없고, 작물의 양수분 요구도를 완벽하게 알지 못하기 때문에 일중 시간대별, 일사량 별, 식물 개개의 흡수 편차 등을 고려하여 부족할 수 있는 양수분의 양을 방지하기 위해 실제 투입해야 할 급액량보다 많게 유지하는 즉, 배액율이 20~50% 되게 관리하고 있음.
- 이를 해결하기 위해 본 연구과제에서 개발하고자 하는 유기 배지의 함수량 제어를 통한 급액관리 통합 시스템은 배지 내 무배액에 따른 염류 집적의 우려로부터 근권의 함수량, 목표 근권이온 농도 관리가 동시에 이루어지면서, 식물의 생육 단계, 재배 환경이 고려된 통합 급액 관리 시스템이므로 불필요한 비료 사용을 줄일 뿐 아니라, 배지 내 적정 함수량과 근권이온 농도 관리가 이루어질 수 있으리라 판단됨.

- 따라서 본 연구에서는 유기 배지에 적합한 농가보급형 수분 센서의 개발과 작물이 식재된 유기 배지에서의 수분 센서 측정/제어 기술을 접목한 배양액 급배액 관리 기술을 확립하고자 함. 이는 배양액이 배액되지 않는 무배액 비순환식 수경재배 시스템이며 국내 시설원에 현황에 적합한 환경친화형 수경재배 방식으로 농가에 보급 및 실용화가 가능하리라 판단됨.

Ⅲ. 연구개발 내용 및 범위

	연구내용
유기배지에 적합한 농가보급형 FDR 수분센서 개발 및 제품화	<ol style="list-style-type: none"> 1. 유기배지 센서 calibration 표준화 공정 2. 유기배지 센서에 적합한 구조 개선 3. 유기배지 센서의 디스플레이 및 소프트웨어
유기배지의 함수량 계측 및 유지기술 체계화	<ol style="list-style-type: none"> 1. 센서를 이용한 위치별 수분함량 측정 2. 센서 간격에 따른 측정값에 따른 변동 구명 3. 급액부위에서의 간격에 따른 적합한 센서 측정위치 구명
FDR 센서를 활용한 파프리카 무배액 급액관리 기술 체계화	<ol style="list-style-type: none"> 1. 무배액 시스템에 적합한 급액체계 구명 2. 무배액 시스템을 위한 급액시간대 조절(가을~겨울재배) 3. 무배액 시스템에 적합한 급액의 전기전도도 구명 4. 시설 과채류(파프리카) 수경재배 농가실증 연구
FDR 센서를 활용한 토마토 무배액 급액관리 기술 체계화	<ol style="list-style-type: none"> 1. 가을~겨울철 재배를 위한 무배액 시스템에 적합한 급액 체계 2. 봄~여름철 재배를 위한 무배액 시스템에 적합한 급액 체계 3. 무배액 시스템에 적합한 급액의 적정 전기전도도 구명 4. 무배액 시스템에 적합한 코이어 배지 조성 성분 구명 5. 시설 과채류(토마토) 수경재배 농가실증 연구
FDR 센서를 활용한 장미 무배액 급액관리 기술 체계화	<ol style="list-style-type: none"> 1. 무배액 시스템 실험 수행의 온실 환경 측정 2. 타이머와 센서를 이용한 급액체계 3. 무배액 시스템에 적합한 근권부 수분함량 제어 4. 무배액 시스템에 적합한 급액체계 구명 5. 무배액 시스템에 적합한 급액의 적정 전기전도도 구명
배지 수분함량을 고려한 통합형 급액제어 시스템 개발	<ol style="list-style-type: none"> 1. 통합형 급액시스템 개발 2. 복합 환경제어기와 연동 제어

IV. 연구개발결과

제 1 절. 유기배지에 적합한 농가보급형 FDR 수분센서 개발 및 제품화

유기배지는 원산지, 제조사 및 제조 과정 중 기후 등의 환경 조건 등에 따라 밀도와 재질에 영향을 줄 수 있다. 유기배지의 수분함량 기준점을 잡는 데에 있어 기존의 무게측정 방식으로 하면 배지의 밀도에 따라 수분 분포도가 달라지고 수분 분포는 밀도가 낮을수록 밀도로 수분이 많이 분포하였다. 이를 해결하기 위해 센서의 기준점을 단위면적당 수분량으로 정하고, 실험의 오차를 줄이기 위해 토양이나 배지 수분 센서용 스탠다드 칼리브레이션 물질로 사용되는 glass beads를 사용하여 수분을 포함한 기준점을 잡았다. 기존의 토양수분센서는 토양용으로 제작 되었으나, 이는 유기물 배지에는 유기배지의 특성상 공극의 차이 밀도 유전율이 많이 차이가 나므로 이러한 문제점을 해결하기 위하여 센서 길이, 사용 주파수, 센서 간격, 측정시간, 센서 구조물, 구동 방식, 센서 넓이 등에 대한 조절과 분석을 통하여 유기배지에서 센서로 측정되는 값을 신뢰할 수 있는 수준으로 만들었다. 이러한 개발된 유기배지용 수분 센서를 대학에 60개, 전국 12개 수경재배 농가에 보급하여 개발된 센서의 보다 정확한 측정을 위한 개선 방안과 현장 적용에서의 문제점 등을 파악하고 있다. 그리고 센서의 구조, calibration 등을 보완하였다. 농민이 사용하는 제품으로 제품의 한글화가 필요하였고 사용자중 고령자가 많아 화면을 크게 보이게 교체하였으며 사용 배터리를 교체하여 장시간 측정이 가능해지고 내구성도 좋아졌다. 또한 케이스 양산화, 스티커 제작, 전용 케이스 및 포장 박스의 제작을 통해 제품의 질과 상품성을 높였다. 경고 등 측정후 컨설팅프로그램 삽입, 데이터 로깅 프로그램, 평균값 측정기능추가, 회로도, PCB 아트웍, 거버파일, 센서매뉴얼 제작, 데이터엑셀 호환 프로그램 등을 통하여 소프트웨어의 기능을 강화하고, 편리성을 더해 업그레이드 하였다.

미국과 일본에서는 분광 분석기술을 이용하여 수분뿐 아니라 여러 가지 토양환경을 한번에 측정하는 센서를 상용화시켜 보급되고 있으나 국내에서는 분광분석기술을 이용한 수분, EC, 유기물 함량 측정에 대한 연구를 진행하고 있지만 아직 실용화 단계에 이르지 못하고 있다. 세계 최대 센서 생산국은 미국으로 전체 생산의 31.8%를 차지하고 있으며 다음은 일본, 독일 순으로 이들 3개국들이 전 세계 생산의 절반 이상을 차지하고 있다. 국내 센서 내수 시장은 2000년을 피크로 감소하다가 다시 성장세를 나타내고 있고, 현재 우리나라의 이상기후로 인해 안정적인 작물수확이 힘들어지고 있는 상황이라 늘어나는 센서의 수요를 충족하는데 크게 기여할 것으로 보인다.

제 2 절. 유기배지의 함수량 계측 및 유지기술 체계화

1. 센서를 이용한 위치별 수분함량 측정

수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 급액 되는 부분에서 떨어진 거리에 따라 위치별 배지내 수분함량의 변화를 측정하고, 적합한 센서 측정 위치를 구명하기 위하여, 완전 포수한 코코넛 코이어 배지에서 윗면에 급액 위치를 중심으로 FDR 수분센서를 9개 동시에 설치하여 배지내 수분함량 변화를 측정하였다. 측정 위치별 평균 배지 수분함량은 위치마다 다양한 값이 나타났으며 최대값과 최소값간의 차이가 10%이상 나타났고, 이는 유기배지라 완전히

균일한 상태를 유지하기에 무리가 있는 것이 그 원인일 것으로 생각되었다.

2. 센서 간격에 따른 측정값의 변동 구명

가. 무(無)수분 조건

칼리브레이션용 표준 배지(glass beads)내 수분이 없는 상황에서 센서 간격에 따라 센서 측정값의 변동을 알아보려고 실험하였다. 플라스틱 상자에 센서용 스탠다드 칼리브레이션 물질을 채운 후 완전 건조된 상태에서 윗면(상부)에 센서 2개를 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21cm 간격으로 설치하여 측정하였다. 모든 센서간 간격에서 수분함량은 특정한 변화없이 일정하게 0으로만 측정되었다. 센서에 수분이 측정 되지 않기에 0이 지속되는 것으로 보이며, 이때 센서간의 전자기적 간섭 현상을 발견할 수 없었다.

나. 유(有)수분 조건

근권 수분 측정센서를 사용함에 있어 센서간 간격을 멀리 떨어지게 설치하는 것이 가장 좋을 것이지만 부득이하게 근처에 설치할 경우 최소한 9cm이상 간격을 확보하는 것이 좋을 측정 결과를 얻었다. 그리고 가능하다면, 노이즈 필터를 이용하게 될 경우 변동폭이 적게 되어 매우 높은 수준의 측정 정확성과 안정성 향상을 얻을 수 있을 것이다. 다량의 센서를 한 곳에 9cm 이내로 가깝게 설치하는 것은 평균 값에 있어서는 유효한 사용이되지만, 실시간 변화를 관찰함에 있어서는 적합하지 않다. 물론 간격을 두고 여러 개의 센서 사용은 매우 좋은 선택이 될 수 있다.

3. 급액부위로부터 거리에 따른 적합한 센서 측정위치 구명

수경재배 배지(코코넛 코이어)에 급액 되는 부위로부터 측정 센서 설치거리에 따라 위치별 배지내 수분함량의 변화를 측정, 적합한 센서 측정 위치를 구명하고자 실험하였다. 코코넛 코이어 배지와 암면배지를 이용하여, 한 센서를 급액 지점에서부터 5, 10, 20, 30cm로 거리를 점차 멀어지게 하며 윗면과 측면을 측정하였다. 수경재배용 코코넛코이어 배지에서 FDR 센서를 이용하여 수분함량을 측정시 윗면에 설치하는 것이 측면보다 최고점에 다다른 시간 면에서는 느리지만 보다 정확한 측정을 할 수 있었다. 민감하게 변화하는 배지 내 수분함량의 측정은 급액구로부터 가까운 곳(실험에서는 5cm)에 설치하는 것이 측정에 유리할 것으로 판단된다.

제 3 절. FDR 센서를 활용한 파프리카 무배액 급액관리 기술 체계화

1. 무배액 시스템에 적합한 급액체계 구명

가. 파프리카 무배액 수경재배에 적합한 수분함량 구명

‘Special’ 품종의 파프리카 수경재배에서 FDR수분센서를 이용하여 근권의 수분을 제어하였을 때 기존 타이머 재배에 비해 평균 일일 급액량은 41.3~59.8% 감소하였으나 배지 내 EC 변화가 증가하지 않아 근권의 목표 수준 범위에 있었다. 또한 타이머 처리에 비해 FDR 센서에 의한 수분 제어 처리구의 광합성, 생육 및 수량은 차이가 없었으며, 배액율은

0%였다.

'RZ208' 품종의 파프리카 수경재배에서 광합성과 식물체와 분지와 잎 생육 결과에서 배지내 함수량이 50~55%가 대조구인 타이머 처리보다 높았으며, 60~65% 처리는 대조구와 유사한 수준을 보였다. 과실 생육과 수에서는 60~65%에서 대조구보다 높았다. 단기간에 수확한 결과로 식물체 전 생육 기간을 판단할 수는 없으나 파프리카 초기 수경재배에 적합한 배지내 수분조건은 40~45%, 50~55%, 60~65%가 적합하며 식물체 생육만을 보았을 때 50~55% 배지 수분함량이 권장할 만하다. 30~35%의 경우 단기간에 좋은 품질의 과일을 얻을 수 있을 수 있으나 수량에서 대조구의 반정도로 많은 차이를 보였다.

이와 같은 결과는 FDR 수분 센서 제어에 의한 급액 공급 방식은 기상 환경, 작물 증산, 생육 상태 등을 반영하여 일일 공급량이 달라졌음에도 근권의 EC가 안정적이고, 생육 및 수량의 차이를 보이지 않아 효율적면서 친환경적인 방식(무배액 수경재배)의 가능성을 확인할 수 있었다.

나. 유기배지 조성 비율별 적합한 수분함량 구명

파프리카 수경재배시에 FDR 센서를 이용하여 코코넛 코이어 조성비율에 따른 배지내 근권부 수분 함량을 조절하여 배지 조성별 파프리카 생육에 적합한 배지내 수분 조건을 구명하고자 실험을 수행하였다. 코코넛 코이어 배지는 dust와 chip 비율별(10:0, 7:3, 5:5)과, 대조구로서 암면을 이용하였고 배지내 수분함량조건은 FDR 센서를 이용하여 함수율 범위 $45\pm 2\%$, $55\pm 2\%$, $65\pm 2\%$ 와 타이머 제어법을 사용하였다. 배지내 전기전도도(EC)는 코이어 배지의 경우 전체적으로 급액 EC수준을 보였으며 변동폭이 작았다. 암면 배지의 경우는 제어 수분함량 순으로 점차 낮아졌으며 타이머 처리는 약 2배 가량 높은 전기전도도 수준을 보였다. 배지내 수분함량이 감소할수록 급액량도 감소하는 경향을 보였으며 5:5 배지를 제외한 다른 코이어 배지들은 타이머 처리가 $65\pm 2\%$ 제어 처리보다 높은 급액을 나타냈다. 타이머 처리구들은 13~30%정도의 배액율을 보인 반면에 FDR센서로 제어한 배지들은 배액량이 거의 없었다. 특정 함수율 처리 조건에서 나타나는 생육의 경향은 없었으나 배지 조건에서 보았을 때, 7:3 배지의 경우, 다른 처리에 비해 조금 더 높은 생육 결과를 보였다. 또한 FDR 센서를 이용한 제어구에서 배지내 EC수준은 크게 높아지지 않았다.

다. 근권부 수분함량 제어에 따른 급액시간 조절(봄~여름재배)

파프리카 수경재배시에 FDR 센서를 이용, 코코넛 코이어 배지내 근권부 수분 함량을 조절할 때 급액 시작시각과 종료시각을 다르게 하여 생육에 적합한 급액시간을 구명하고자 실험을 수행하였다. 코코넛 코이어 dust와 chip 7:3배지 내 수분함량조건은 FDR 센서를 이용한 함수율 범위 $55\pm 2\%$ 으로, 급액시각은 3~4월의 평균 일출 시각인 오전 7시, 일몰 시각은 오후 6시를 기준으로 해가 뜨고 난후 제어가 시작되는 처리부터 해가지기 3시간 전 제어가 끝나는 처리, 24시간 제어되는 처리등 총 10가지 방법으로 조절하였다. 배지내 전기전도도(EC)의 변화는 수분함량보다 복잡한 패턴을 보이며, 급액 시작이 오전 9시인 처리구들의 경우 다른 급액 시간 처리에 비해 낮으나 많은 수의 증감 변화 패턴을 보이면서 점차적으로 전기전도도가 증가하는 모습을 보였고, 24시간 급액을 제외한 다른 처리들에서 급액 중지시 이후 약간 EC가 증가 되는 경향을 나타냈다. 00-00 처리구가 주당 2L를 넘기는 가장 높은 급액량을 보였고, 07-16처리와 09-16처리는 주당 1L가 안되는 상대적으로 낮은 급액량을 나

타냈다. 배액량은 FDR센서 제어구에서 시험 초기에 작물의 근권 분포가 완성되기 전까지 약간의 배액이 있었으나 생육이 진전되면서 근권이 확보되며 점차 무배액으로 제어가 되었다.

2. 무배액 시스템을 위한 급액시간대 조절(가을~겨울재배)

유기배지를 이용한 파프리카의 무배액 수경재배 기술 체계화를 위해 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 수분 센서를 이용하여 적정 급액 시간대를 찾아 식물의 균형을 유지하고자 실험이 수행되었다. 코코넛 코이어 배지에 파프리카 'RZ208' 품종을 2011년 8월 10일에 정식 후 FDR 수분센서를 이용하여 배지 수분 함량을 $50\pm 2\%$ 로 조절하였고, 9월 1일부터 11월 30일까지 급액 가능시각을 9월 평균 일출과 일몰시간을 기준하여(06시, 19시)로 관수시작시점을 일출 시각(+0,1,2,3)으로, 관수종료 시각을 일몰 시각(-0,1,2,3)으로 조정한 06-17, 06-19, 07-16, 08-19, 09-16, 09-18, 00-24의 7처리로 재배하였다. 모든 처리에서 급액량은 광량이 $600\text{W}/\text{m}^2$ 이상일 때, $400\pm 90\text{mL}/\text{plant}/\text{day}$, 광량이 $600\text{W}/\text{m}^2$ 미만인 날에는 아예 급액량이 없거나, $170\pm 30\text{mL}/\text{plant}/\text{day}$ 으로 유지되었으며 모든 처리구는 무배액으로 관리되었다. 전 재배기간 동안 공급액의 EC를 높여주거나 낮추어주는 반응에 있어 모든 처리구에서 비교적 안정적으로 유지되었다. 11월의 근권 EC 변화폭은 09시에 급액이 시작된 두 처리에서 가장 높은 수치를 보였으나 평균수치가 $4.5\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 를 넘지 않아 걱정할 수치는 아니지만, 배지 내 근권의 변화를 보다 안정적이게 관리하고자 한다면 09시 이전(일출 후 1~2시간)에 급액을 시작하는 것이 적당할 것으로 판단된다. 전반적으로 과실 생산과 품질의 결과에서는 유의적으로 차이가 없었으나 08-19, 06-17, 09-18의 처리에서는 주당 평균 6.9개의 수확율을 보였으며 06-19와 09-16처리에서는 열과, 배꼽썩음과 등과 같은 비상품과율이 높았다. 일출 3시간 이후에 급액을 시작하여 일몰 3시간 전에 급액을 종료하였을 때 식물체를 생식생장으로 유도할 수 있고, 일출 1~2시간 이후에 급액을 시작하여, 일몰 1시간 전에 급액을 종료하였을 때 영양생장으로 유도할 수 있을 것으로 보인다. 따라서, 파프리카 재배시 전 기간 배지 내 수분함량을 $55\pm 2\%$ 로 유지할 때, 재배자가 식물의 현재 상황에 맞추어 급액시작과 종료시각을 조절하는 것이 어렵다면, 9월~11월의 파프리카 재배중에는 오전 8시경(일출 후 1~2시간내)에 급액을 시작하여, 17시경(일몰 1~2시간 전)에는 급액을 종료하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

3. 무배액 시스템에 적합한 급액의 전기전도도 구명

본 실험은 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 센서를 이용한 유기배지 무배액 수경재배시 급액 전기전도도(EC) 수준별 파프리카의 생육 변화를 알아보려고 수행하였다. 배지 내 수분함량을 $55\pm 1\%$ 기준으로 조절하고, 2그룹 착과기부터는 $65\pm 1\%$ 로 높여 급액을 제어하였다. 관행구 처리에 비해 FDR센서 제어구들에서는 급액되는 경향에 따라 근권의 EC가 변화되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 배양액의 급액 EC가 높을수록 슬라브 내의 EC도 높아지는 경향을 보였으나 모든 처리의 근권의 EC는 $1.63\sim 4.55\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 내에 있어 비교적 안정적으로 보여진다. 관행구는 재배기간동안 약 28.6%의 배액율을 유지하였고, FDR 센서로 급액량이 조절된 배지는 배액율 2.21%로 무배액 수준으로 재배되었다. 근권 EC는 FDR 센서를 이용한 제어구들에서는 재배 전기간동안 거의 무배액으로 재배되었음에도 근권의 EC는 관행구보다 유의적으로 낮은 경향을 보였다. 일일 평균 급액량은 급액의 EC가 높아짐에 따

라서 함수량이 감소하면서 감소하는 경향이 나타났다. 특히 생육초기 5월 한달 동안 급액된 양은 관행구의 절반 수준이었다. 정식 후 4주차의 광합성 결과에는 차이가 없었지만, 정식 후 8주차에는 2.0 dS·m⁻¹과 2.5 dS·m⁻¹ 처리구에서 유의적으로 높았고, 기공전도도와 증산량에서 급액을 2.0 dS·m⁻¹로 공급한데서 가장 높은 값을 보였다. 광합성과 기공전도도에서 급액의 농도가 높아질수록 수치적으로 줄어들었으나 유의적 차이는 없었다. 시간이 경과할수록 급액이 높은 수준에서 초장이 짧았고, 생육량에서는 유의적 차이가 나타나지 않았다. 과실의 생체중은 2.0 dS·m⁻¹에서, 건물중은 2.5 dS·m⁻¹에서 높았고, 수량은 급액수준에 따른 유의성은 없었다. 상품과율은 2.0, 2.5 dS·m⁻¹에서 높았고, 3.5 dS·m⁻¹과 4.0 dS·m⁻¹에서 낮았으며, 당도는 가장 고농도인 4.0 dS·m⁻¹에서 8.1°Brix로 가장 높았고, 저농도인 2.0 dS·m⁻¹에서 6.28°Brix로 가장 낮았다. 이상의 결과로 보아 FDR센서를 이용한 파프리카 무배액 수경재배시 공급 배양액 전기전도도는 재배 전기간 일정하게 공급할 때 2.0~3.0 dS·m⁻¹로 조절하는 방법이 배액을 거의 발생시키지 않으면서 높은 수확량을 얻는데 효과적일 것으로 판단되었다.

4. 시설 파채류(파프리카) 수경재배 농가실증 연구

재배시기별로 적정 함수율을 활착기에는 75~65%, 1그룹 착과기 및 과실비대 영양생장기 65%, 1그룹 수확 및 2그룹 착과기 60%, 과실비대 영양생장기 65%로 설정하여 유지될 수 있게 하였다. FDR 센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어하였을 때의 근권의 EC는 재배 전기간 동안 2.31~4.82 dS·m⁻¹로 유지된 것으로 보아 약 7개월 동안 근권의 EC가 안정적인 수준임을 알 수 있었다. 또한 일사량제어에 의한 관행구의 배지내 함수율의 변화는 46.1~77.3%로 변화의 폭이 비교적 큰편으로 보이나 이는 농가에 급액되는 암면에 기준한 일사량 제어 방식으로 제어했기 때문으로 생각되며, 배지내 근권 EC 변화는 1.7~2.9 dS·m⁻¹로 FDR센서로 제어한 것 보다 안정적으로 보여진다. 재배초기 급액량에는 관행구와 FDR 센서 처리구의 유의적으로 큰 차이가 없으며 FDR센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어한 처리구는 정식 후 150일경에 관행구의 52.6% 수준을 보였고, 180일에는 약 64.1%의 수준을 보였다. 또한 일사량으로 제어된 관행구에서는 재배시기별로 약 20%의 배액율을 보였고, FDR 센서로 제어된 처리구에서는 재배 전기간동안 약 3%의 배액율을 보였으며 급액량이 많은 정식후 180일 경에도 일평균 22ml로 거의 무배액 수준을 유지하고 있음을 보였다. 재배시기별 광합성과 생육특성에는 전반적으로 차이가 없었지만, 재배 초기에 FDR 센서로 제어한 처리구에서 관행 처리구보다는 높았고 암면으로 재배한 생산성 온실보다는 유의적으로 낮았다. 전반적으로 유의적 차이가 없었으나, 생산량에서는 관행구보다는 높았고, 생산성 온실에서의 수치와 비슷하게 나타났다. FDR 센서를 이용하여 제어한 처리구에서 평균과중이 가장 높았으며, 당도 또한 높았다.

제 4 절. FDR 센서를 활용한 토마토 무배액 급액관리 기술 체계화

1. 가을~겨울철 재배를 위한 무배액 시스템에 적합한 급액 체계

유기배지를 이용한 토마토 무배액 수경재배 기술의 체계화를 위해 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 수분 센서를 적용하여 적정 급액 기준을 설정 하고자 실험을 실시하였다. 코코넛 코이어 배지에 토마토 ‘스타백1’품종이 9월 초 정식 된 후 1개월 동안 타이머에 의해 관수 되었고 그 후, FDR 수분센서를 이용하여 배지 용적당 수분 함량이 40,50 또

는 60%에 도달 할 때 마다 급액이 중지되도록 처리 하였다. 하루 평균 식물체당 공급된 총 급액량은 40과 50% 처리구에서 0.95-1.0L, 60% 제어구에서 1.9-2.0L 였다. 40과 50% 제어구에서는 전 재배기간동안 무배액으로 유지된 반면 60% 처리구에서는 약 15%의 배액이 발생하였다 배지 용적당 수분함량이 40과 50%로 제어되었을 때 오전 9시에서 12시 사이에 급액된 량이 하루 총 급액량의 각각 75와 79% 였고, 60% 제어구는 같은 시간대에 하루 총 급액량의 68% 가 급액 되어 처리별 유의차를 보였다. 또한 하루 24시간 동안 배지 내 수분 함량과 전기전도도(EC) 변화를 관찰한 결과 처리에 따라 전형적인 패턴이 나타났다. 무배액으로 유지된 40과 50% 제어구에서는 배지 내 수분함량과 EC가 관수 되지 않는 시간대에 관수 시간대 보다 낮게 유지 되었고, 배액이 발생한 60% 제어구에서는 관수되지 않는 시간대에 더 높게 유지되었다. 이들 결과는 재배기간 동안 무배액으로 유지된 40%와 50% 처리구에서 배지내 EC가 배액이 된 60% 처리구보다 낮게 유지된 이유를 잘 설명하고 있다. 광합성 효율, 상품과중, 화방별 과실 수확량 및 과실 비대속도는 처리별 유의차가 없었다. 40%와 50% 처리구에서 생산된 과실의 당도가 60% 처리구 보다 높았다. 네덜란드 토마토 배양액으로 100일 동안 토마토 재배시 한 식물체당 소비되는 비료값은 FDR 센서 에 의해 40%와 50%로 제어하여 무배액을 유지하였을 때 8,600,000원/ha을 절감 할 수 있었다. 따라서 가을~겨울철 재배에서 FDR 수분센서를 적용하는 경우 배지내 용적당 수분함량을 40과 50% 범위로 제어하여 무배액 시스템이 조성되면 물과 비료량을 절약하고 식물에게 친환경적인 재배방법이 된다. 하지만 60%로 제어할 경우는 배액의 량을 극소화 하면서 배지 내 EC 농도 변화를 줄 일 수 있도록 재배하는 것이 필요하다.

2. 봄~여름철 재배를 위한 무배액 시스템에 적합한 급액 체계

유기배지를 이용한 토마토 무배액 수경재배 기술의 체계화를 위해 FDR 수분 센서를 이용하여 적정 급액 기준을 설정하고자 실험이 수행되었다. 코코넛 코이어 배지에 토마토 ‘스타빅 1’ 품종을 2011년 4월 1일에 정식 후 FDR 수분센서를 이용하여 배지 용적당 수분 함량이 40, 50 또는 60%에 도달할 때마다 급액이 중지되도록 처리하였고 대조구로 타이머에 의한 급액을 하되 배지의 수분을 60-65%가 유지되도록 급액횟수를 조절하여 재배하였다. 2011년 7월 12일 수확하기 전까지 관수개시 및 종료시간을 계절 변화에 따라 일출 1시간 후 관수하여 일몰 3시간 전에 관수 종료하였다. 40과 50% 두 제어구에서는 하루 평균 급액량이 1.6-1.7L(± 0.12)였고 전 재배기간 동안 무배액으로 유지되었다. 60%와 타이머 두 제어구는 하루 평균 급액량이 2.6L(± 0.17)로 동일한 반면, 배액률은 각각 15%와 33%로 타이머에 의한 제어가 배액량을 두 배 높게 발생시켰다. 또한 60% 제어구는 정식 후 65일 이후는 무배액으로 유지된 반면, 타이머 제어구는 배액률이 기후 변화에 따라 불규칙적으로 변화되었다. 40과 50%제어구에서는 배지내 EC 수준이 전 재배기간 동안 1.5-2.5mS·cm⁻¹ 범위로 유지된 반면 60% 제어구에서 무배액으로 유지되는 시점부터 4.0mS·cm⁻¹ 이상의 수준으로 유지되었다. 40과 50% 두 처리 모두에서 배꼽썩음과 발생율이 한 식물체당 3.0(ea/plant)인 반면, 60% 처리구는 1.0(ea/plant)였고 타이머 제어구에서는 배꼽썩음과가 발생되지 않았다. 따라서, 봄과 여름계절에 걸친 토마토 작물 재배시, 정식 직후엔 코코넛 코이어 배지 수분을 50%로 유지시키고, 정식 60일 이후, 과실이 비대, 성숙하는 시기엔 배지 수분을 60-65% 범위로 유지시키면, 전 재배기간동안 무배액 시스템으로 되어 물과 비료량을 절약하고 배지내 적절한 EC 수준이 유지되면서도 작물의 생육과 수량을 높일 수 있다고 판단된다.

3. 무배액 시스템에 적합한 급액의 적정 전기전도도 구명

본 저자들이 수행한 이전 실험의 결과에서 가을에서 겨울까지의 토마토 재배 작기에, 코코넛 배지 용적당 수분 함량을 40% 이상 60% 이하로 조절하면, 전 재배 기간 동안 무배액 시스템을 유지할 수 있고 물과 비료량을 절약하고 배지 내 적절한 EC(electrical conductivity) 수준으로 과실의 수량을 높일 수 있다는 결론을 얻었다. 이를 근거로 하여 배지의 수분함량 조절과 함께 급액의 최적 전기전도도를 설정하여 고품질의 토마토 무배액 수경재배 기술을 체계화 하고자 이 실험이 수행되었다. 토마토 '스타벅1' 품종을 2011년 8월 24일에 정식 후 FDR(frequency domain reflectometry) 수분 센서를 이용하여 배지 용적당 수분 함량이 45%, 또는 55%에 도달할 때마다 급액이 중지되도록 처리하였고 급액의 EC는 각 수분함량 처리별, 전 생육기간동안 $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 2.0에서 $2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 높여, 또는 2.5에서 $3.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 높여 공급하였다. 대조구로 타이머에 의한 급액을 하되 배지의 수분을 55-60%가 유지되도록 급액횟수를 조절하였고 급액 EC는 $2.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 공급하였다. 2011년 11월 2일 마지막 수확일까지 계절 변화에 따라 일출 1시간 후 관수를 시작하여 일몰 3시간 전에 관수를 종료 하였다. 타이머와 55%의 $2.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 제어구에서 하루 평균 급액량이 각각 2.3L와 2.2L로 가장 높았고 45%의 $2.5\text{-}3.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 제어구에서 1.0L로 가장 낮았다. 식물생육과 상품과실 1개당 무게는 45% 제어구에서 급액 EC를 2.5에서 $3.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 높여 공급하였을 때 128g으로 가장 낮았고 타이머 제어구에서 191g으로 가장 높았으며, 과실당도는 45% 제어구에서 급액 EC를 2.5에서 $3.0\text{mS}/\text{cm}$ 로 높여 공급하였을 때 6.3 brix로 가장 높았고 타이머에서 4.7brix로 가장 낮았다. 그 외 제어구들에서는 통계적 유의차가 없었다. 배지 수분 함량을 45%로 유지할 경우 급액 EC를 $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 이상으로 공급하면 생육 및 과실 품질이 저하되었고 배지 수분 함량을 55%로 유지할 경우 급액 EC를 $3.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 공급하여도 당도 및 상품품과 크기에 차이가 없었으므로 두 제어구 모두 급액 EC를 $2.0\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 공급하는 것이 보다 경제적이다 판단된다.

4. 무배액 시스템에 적합한 코이어 배지 조성 성분 구명

정식 후 24일에서 99일 사이에 측정된 일일 평균 급액량은 chip: dust (v/v) 비율이 30:70% 배지에서 2.422 L, 이층배지 25:70%에서 2.495 L로 다른 배지들 보다 높게 나타났다. 반대로, chip: dust (v/v) 비율이 70:30% 배지에서 일일 평균 급액량이 1.858 L로 가장 낮았다. 총급액량도 같은 결과를 얻었다. 실험에 사용된 모든 배지에서 배출된 배액의 양은 매우 미비 하였고 특히 chip: dust (v/v) 비율이 0:100% 배지와 rockwool 배지에서는 배액이 전혀 발생되지 않았다. 정식 후 52일 부터 99일까지 오전 10시에서 오후 1시까지, 오후 1시에서 3시까지, 오후 3시부터 5시까지 공급된 급액량을 관찰한 결과 모든 배지에서 오전 7시에서 오전 10시까지의 3시간 동안 급액된 물량이 오전 10시부터 오후 1시간 동안 급액된 물량보다 더 많은 것으로 나타났고 chip: dust (v/v) 비율이 0:100%, 30:70%와 35:65% 배지에서 그 특징이 다른 처리보다 명확한 것을 알 수 있었다. 배지의 용적 당 수분함량은 전 배지에서 50%~70%를 유지하였고 0:100% 배지에서 근권 내 수분함량 변화폭이 큰 것으로 나타났다. 이는 식물의 생육과 수량이 0:100%배지에서 가장 높았던 것과 관련하여 근권 내 수분 흡수가 활발히 일어난 것으로 고찰되어 진다. EC농도는 전 재배 기간 동안 $2.0\sim 4.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 범위를 유지하였다. 정식 후 102일에 측정한 식물의 생육은 chip: dust (v/v) 비율이

rockwool배지에서 가장 낮게 나타났고 0:100% 배지에서 가장 높게 나타났다. 광합성 속도와 기공 전도도는 처리간 차이가 없었으나 증산 속도는 이층 배지에서 재배된 식물의 잎에서 다소 높았다. chip: chip (v/v) 비율이 0:100%로 조성된 배지에서 재배된 토마토가 다른 배지에서 재배된 토마토 보다 상품과중 및 상품과수량이 두 배 가량 높은 것으로 나타났다. dust과 chip을 슬라브 내에 이층구조 (two-story: dust at top and chip at bottom)로 조성한 배지 (chip : dust (v/v)= 15:85%, 75:25% 또는 35:65%)에서 재배된 토마토는 0:100% 배지보다는 수량이 낮지만 50:50%, 70:30% 및 rockwool 배지 보다는 상품과중 및 상품과수량이 높으면서 당도도 높은 결과를 얻었다. 이러한 결과는 수분이용효율 (WUE)과 관련이 있었다. WUE 값은 chip의 함량이 높을수록 낮아지는 경향을 보여서 수분이용효율은 0:100% 배지에서 가장 높았다. 또한 정식 후 24일에서 99일 사이에 측정된 일일 급액 패턴은 chip과 dust의 비율이나 판매 배지와 이층배지 구조에 따라 다양한 것을 알 수 있었다. 이는 배지의 물리적 특성에 따라 1회 급액량과 급액 대기 시간을 조절하지 않고 모든 배지에 공통된 조건으로 급액 하였기 때문이다. 따라서 더 세밀한 연구가 필요하다고 고찰된다. FDR 센서에 의존한 급액이라도 1회 급액량과 급액 대기시간 조절로 배지 내 국부적 함수율 변이계수를 감소시키며 수분이용 효율을 최대화 하여 최적의 생육과 고품질 과실 생산을 얻기 위한 정밀 연구가 필요하다.

5. 시설 과채류(토마토) 수경재배 농가실증 연구

가을~겨울철 재배에서 타이머에 의한 관행 급액시 일일 평균 급액량은 주당 2.2 L이고 평균 배액량은 약 1.6 L였다 (Fig. 1). 반면, FDR 수분센서에 의해 목표 함수율을 변화시키며 급액하였을 때 (Table 1), 일일 급액량은 가을철에 비해 겨울철에 급격히 감소되어 (Fig. 2), 일일평균 급액량은 0.41 L 였다 (Fig. 1). 가을~겨울철 재배기간 동안 배지 수분함량은 타이머에 의한 관행 급액 시 70~75% 수분으로 유지된 반면, FDR 수분센서에 의한 무배액 시스템에서는 50~55% 수준으로 낮게 유지 되었다 (Fig. 3). 가을~겨울철 재배에서 FDR 센서에 의한 급액시 근권 내 EC 농도는 초기에 0.5 dS m⁻¹에서 재배 후반기에는 3.5 dS m⁻¹ 까지 증가되었다. 반면 타이머에 의한 관행 급액 시 배액과 배지 내 용액의 EC 농도는 전 재배기간 동안 2.0~2.5 dS m⁻¹ 수준으로 유지 되었다(Fig. 4, 5). 관행 급액방식과 비교하여 초기 근권 내 EC가 낮았던 이유는 정식 전 배지의 함수율이 80~90% 정도로 높게 유지되어 FDR 센서 의존 방식에서는 일일 급액량이 낮게 유지되는 것과 관련이 있다. 학교 내 온실포장 시험과 달리 농가현장 실증시험에서는 정식 전 충분히 물로 세척하여 함수율이 높아진 재활용 코이어 배지가 45m 길이로 설치되어 물 빠짐이 불균일하게 되어 함수율이 높은 상태로 오랜 시간 유지 된다. 따라서 초기 목표 함수율을 높게 설정하여 뿌리 활착 시까지 급액을 충분히 하여야 재배 초기 근권 내 EC가 관행 수준으로 유지 될 수 있다. 온도가 급격히 낮아지는 겨울철 재배에서는 목표 함수율을 낮추는 동시에 EC농도를 낮게 유지시켜야 할 것으로 고찰된다. 가을~겨울철 재배에서 화방 당 과실무게, 과실 수 당도는 1화방을 제외 하고는 급액방법에 따른 통계적 유의차가 없는 것으로 나타났다.

제 5 절. FDR 센서를 활용한 장미 무배액 급액관리 기술 체계화

1. 무배액 시스템 실험 수행의 온실 환경 측정

장미 수정재배시 실험을 수행한 온실 내부의 온도, 상대습도, 광도를 측정하여 생육 환경의 기초 자료로서 사용하고자 측정하였다. 2011년부터 2013년 현재까지 서울시립대학교 연동형 비닐 온실 내부의 온도, 상대습도, 광도를 대기 온습도 센서와 일사량센서 그리고 데이터 로거를 이용하여 조사하였다.

2011년에는 재배기간 동안 주간에 $400\sim700$ ($W\cdot m^{-2}$)의 광도, 최고 $30\sim40(^{\circ}C)$, 최저 $20\sim5(^{\circ}C)$ 의 온도, $20\sim40(\%)$ 의 상대습도를 나타내었다. 2011년에는 재배기간 동안 주간에 $300\sim600$ ($W\cdot m^{-2}$)의 광도, 최고 $30\sim40(^{\circ}C)$, 최저 $20\sim7(^{\circ}C)$ 의 온도, $20\sim50(\%)$ 의 상대습도를 나타내었다. 2013년에는 재배기간 동안 주간에 $200\sim600$ ($W\cdot m^{-2}$)의 광도, 최고 $30\sim40(^{\circ}C)$, 최저 $20\sim7(^{\circ}C)$ 의 온도, $20\sim50(\%)$ 의 상대습도를 나타내었다.

2. 타이머와 센서를 이용한 급액체계

가. 타이머를 이용한 근권부 수분함량 변화

코코넛 코이어와 압면을 이용한 장미 수정재배에서 타이머를 이용한 급액 자동 제어시 배지내 근권부 수분 함량 변화를 2011년에서 2013년까지 측정하였다. 급액 조건은 전기전도도 $1.5\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 급액량 $640\pm 20\text{ mL/day/plant}$ 으로 1일 8회 급액하였다. 타이머-코이어 처리에서 2011년에는 수분함량은 $60\sim70\%$, 전기전도도는 $1.0\sim2.0\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 범위 중심으로 변화하였고, 2012년에는 수분함량 $30\sim70\%$, EC $1.5\sim4.0\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 범위 중심으로 2013년에는 수분함량 $60\sim75\%$, 전기전도도 $1.5\sim2.5\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 범위로 변화가 나타났었다. 코이어 처리의 수분함량은 계절에 따른 영향뿐 아니라 장마와 같은 날씨 영향으로 일정한 패턴보다는 다양한 연중 변화를 나타냈고, 전기전도도는 여름에 높아졌다가 다시 낮아지는 연중 변화 특징을 나타냈다. 타이머-압면 처리에서는 2011년에 수분함량 $30\sim50\%$, 전기전도도 $1.0\sim3.0\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 2012년은 수분함량은 $30\sim45\%$, 전기전도도는 $2.5\sim6.0\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 2013년에는 수분함량은 $30\sim50\%$, EC는 $2.0\sim4.0\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 범위를 중심으로 변화를 보였다. 압면 처리는 코이어 처리보다 확실히 차이가 나는 낮은 수분함량 범위를 나타내었으며, 수분함량은 일정한 패턴보다는 다양한 연중 변화를 나타냈고, EC는 여름에 약간 높아졌다가 초가을에 낮아지고 가을 중반이 넘어가면서 다시 높아지는 연중 변화 특징을 보였다.

나. FDR 센서를 이용한 근권부 수분함량 변화

코코넛 코이어를 이용한 장미 수정재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 근권부 수분 함량을 조절하여 급액제어를 하였다. 근권 수분함량 제어 목표 범위는 $45\pm 1(\%, \text{WC}45)$, $55\pm 1(\%, \text{WC}55)$, $65\pm 1(\%, \text{WC}65)$ 로 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 급액량은 $2/3\sim 1/3$ 로 배액량은 $1/4\sim 1/50$ 정도로 크게 감소하였다. 이렇게 줄어든 급배액에도 불구하고, 절화의 생육 특징들은 타이머 제어와 센서 제어가 큰 차이를 나타내지 않았다. 수확량에 있어서 WC55와 WC65는 타이머 처리와 차이를 나타내지 않았다. 급배액량을 중요 포인트로 한다면, WC45처리가 품질에 있어 큰

차이가 나지 않아 우수한 생산성을 나타낸다. 생육과 수확량, 그리고 급배액량을 고려하게 되면, 센서를 이용한 급액 제어시 근권 수분함량을 55%로 하는 것이 우수할 것으로 판단된다.

3. 무배액 시스템에 적합한 근권부 수분함량 제어

가. 무배액 시스템을 위한 수분함량 제어 범위 구명

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 급액제어범위를 조절하였다. 급액제어범위는 54~56%(WC55±1), 53~57%(WC55±2), 50~60%(WC55±5), 45~65%(WC55±10)로 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 모든 급액제어범위에서 급액량은 타이머 대비 1/3~1/5로 배액량은 1/25이하로 크게 감소하였다. 이렇게 줄어든 급배액에도 불구하고, 절화의 생육 특징들은 타이머 제어와 센서 제어가 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만, 수확량에 있어서 타이머 제어가 센서 제어보다 높았다. 센서를 이용한 급액제어시 절화 생육 수준과 고품질 절화 수량을 고려한다면, 급액 제어 범위를 53~57%로 하는 것이 우수할 것으로 판단된다.

나. 무배액 시스템을 위한 계절별 근권 수분함량 조절

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 계절에 따라 근권 수분 함량을 조절하였다. 실험은 4월에서 7월까지 진행중이며, 조절범위는 54~56% 고정(WC55), 계절에 따라 증감하며 최대 58~62%(WC55,57,60), 계절에 따라 증감하며 최대 63~67%(WC55,60,65)인 처리를 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 모든 급액제어범위에서 급액량은 타이머 대비 2/3~1/3로 배액량은 1/3~1/200로 큰 감소를 보였다. 하지만, 줄어든 급액처럼, 센서 제어가 타이머 제어보다 낮은 절화 생육을 보였다. 수확량에 있어서도 타이머 제어가 센서 제어보다 높았다. 조절 처리들간의 비교시 급액을 조금 더 많이 한 처리에서의 생육과 수확량이 우수한 결과를 보였다. 하지만, 급액을 타이머 대비 2/3까지 주어도 1/2 공급한 처리보다 높은 생육과 수량을 나타내지 않았다. 코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 급액 자동 제어시 급액 조건은 근권 수분함량을 일정하게 하는 것보다 계절에 맞추어 약간(2~3%) 증가하는 것이 보다 높은 생산성과 품질을 나타낼 것으로 판단된다.

다. 무배액 시스템을 위한 급액시기와 급액량

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 급액 시기와 급액량 비교 실험을 해보았다. 실험은 4월에서 7월까지 진행중이며, 충분한 급액 공급 처리(타이머), 정상조절처리로는 54~56%(WC55)와 센서 제어의 급액 시기에 초점을 둔 53%시 80±10mL 공급 처리(WC55-80mL), 그리고 센서제어의 급액량 조절에 초점을 두어 기존 타이머와 같은 시간에 공급하되 공급량을 1/4 1/3 1/2 으로 계절에 따라 조절하는 처리(Timer/4 1/3 1/2)의 네 가지로 하였다.

급액 조절 처리시, 급액량은 타이머 대비 2/5이하, 배액량은 1/50이하로 큰 감소를 보였다. 절화 장미의 생육과 수확량에 있어서 급액량이 많은 타이머 제어가 센서 제어보다 높았다. 조절 처리들간의 비교에서도 절화 생육에서는 차이를 보이지 않았으나, 총 수확량에서는 급액이 조금더 공급된 Timer/4 1/3 1/2 처리에서 높았다. 즉, 급액시기보다는 급액량이 그리고 급액이 한순간에 몰리는 것보다는 일정간격을 두는 것이 식물 생육에 효과적일 수 있다고 판단된다. 향후 연속적인 실험으로 이에 대한 결과가 보다 확실해 질 것이다.

라. 무배액 시스템을 위한 정상, 조절, 스트레스 처리

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 식물이 스트레스 받는지 여부를 스트레스 환경을 조성하여 비교를 해보았다. 실험은 4월에서 7월까지 진행중이며, 정상조절처리는 54~56%(WC55)와 스트레스 조절처리 32~37%(WC35)로 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 모든 급액제어범위에서 급액량은 타이머 대비 1/3 이하, 배액량은 1/100로 큰 감소를 보였다. 절화 장미의 생육과 수확량에 있어서 타이머 제어가 센서 제어보다 높았다. 조절 처리들간의 비교에서도 절화 생육에서는 차이를 보이지 않았으나, 수확량에서는 급액을 조금 더 많이 한 처리에서 우수한 결과를 보였다.

센서를 이용한 수분 조절 처리 모두 고온기인 여름철에 상대적으로 낮은 수분공급으로 인한 스트레스를 받았을 것으로 생각되며, 약간 많은 급액을 공급받은 WC55 처리에서 WC35 보다는 극복할 수 있는 능력이 있어서 수확량에 있어 증가를 보인 것으로 판단된다.

4. 무배액 시스템에 적합한 급액체계 구명

가. 무배액 시스템을 위한 급액시작 시각조절

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 급액시작시간을 조절하였다. 급액시작시간을 일출후 1시간(Sunrise+1), 일출후 2시간(Sunrise+2), 일출후 3시간(Sunrise+3)으로 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 모든 급액시작시간에서 급액량은 타이머 대비 1/3 ~1/4로 배액량은 1/60이하로 큰 감소를 나타냈다. 이렇게 줄어든 급배액에도 불구하고, 절화의 생육 특징들은 타이머 제어와 센서 제어가 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만, 수확량에 있어서 타이머 제어가 센서 제어보다 높았다. 센서를 이용한 급액제어시 절화 생육 수준과 고품질 절화 수량을 고려한다면, 급액 시작을 일출후 3시간 뒤 하는 것이 우수할 것으로 판단된다.

나. 무배액 시스템을 위한 급액종료 시각조절

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 급액종료시간을 조절하였다. 급액종료시간 조절을 위해 하루 중 급액시간을 09:00~15:00(시:분, Time0915), 09:00~17:00(시:분, Time0917), 09:00~19:00(시:분, Time0919)로 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 모든 급액종료시간에서 급액량은 1/2~1/3로 배액량

은 1/6~1/30정도로 크게 감소하였다. 이렇게 줄어든 급배액에도 불구하고, 절화의 생육 특징들은 타이머 제어와 센서 제어가 큰 차이를 나타내지 않았다. 상품 절화수확에 있어서 Time0917과 Time0919는 타이머 처리와 차이를 나타내지 않았다. 급액량과 배액량을 중요 포인트로 한다면, Time0919 처리가 우수하였다. 하지만, 절화 생육 수준과 고품질 절화 수량을 고려한다면, 급액 종료를 17:00 에 하는 것이 우수할 것으로 판단된다.

5. 무배액 시스템에 적합한 급액의 적정 전기전도도 구명

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 급액농도를 조절하여 급액제어를 하였다. 급액농도 조절은 전기전도도 1.0(dS · m⁻¹, EC1.0), 1.5(dS · m⁻¹, EC1.5), 2.0(dS · m⁻¹, EC2.0)로 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 급액 농도에 상관없이 급액량은 1/2~1/3로 배액량은 1/6~1/15정도로 크게 감소하였다. 이렇게 줄어든 급배액에도 불구하고, 절화의 생육 특징들은 타이머 제어와 센서 제어가 큰 차이를 나타내지 않았다. 상품 절화수확량에 있어서 EC1.0와 EC1.5는 타이머 처리와 차이를 나타내지 않았다. 배액량만을 중요 포인트로 한다면, EC2.0처리가 품질에 있어 큰 차이가 나지 않아 우수한 생산성을 나타낸다. 하지만, 좀 더 나은 생육 환경과 수확량 그리고 배액량을 고려 시, 센서를 이용한 급액제어시 절화 생육 수준과 고품질 절화 수량을 고려한다면, 급액 농도를 1.5 dS · m⁻¹로 하는 것이 우수할 것으로 판단된다.

제 6 절. 배지 수분함량을 고려한 통합형 급액제어 시스템 개발

기존 시설 재배에서 이용되는 양액 시스템에 FDR수분센서를 이용한 급액 제어 방법을 적용하고, 이와 더불어 환경제어기능인 일사량을 통한 급액제어도 동시에 구성하여 자동 급액이 이루어질 수 있도록 연구하였다. 센서를 이용한 급액 제어와 누적일사량에 의한 제어 모두 잘 적용되고 있음을 확인할 수 있었다. 측정결과를 잠시 보면, 일사량 제어시 급액량과 일사량은 거의 같은 수준의 변화를 보였으나, 센서 제어시는 일사량과 직접적으로 비슷한 변화를 나타내지는 않았다. 본 연구로 기존 양액 공급기 시스템에 FDR수분 센서를 이용한 급액 제어 시스템과 함께 식물에 있어 중요 환경중 하나인 광환경 그 중 일사량을 이용하여 급액을 제어할 수 있도록 시스템화하였고, 본 양액 공급 시스템을 통한 센서와 일사량을 통한 급액 제어는 실사용에 문제없이 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구 결과를 적용하여 양액 공급기를 업그레이드 하였고, 이를 파프리카 재배에 실사용한 결과, 목표로 하는 수분 센서 제어와 일사량 센서 제어 모두 잘 이루어졌다. 환경조건에 대한 급액 제어가 완전하게 이루어지므로, 다양한 작물별 재배 시기별 적절한 지상부/지하부 환경조건을 알 수 있으면 이를 자동화된 양액 공급기에 적용하면 작물에 최적화된 급액 제어를 할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 연구성과 및 성과활용

1. 특허출원 및 등록

특허 등록

- 1) 10-1042166 : 코코넛 코이어 배지에서 FDR 센서를 이용한 수경재배 방법

2. 학술논문 발표 및 투고

학술 논문

- 1) Non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a Frequency Domain Reflectometry for tomato cultivation, 2013, European Journal of Horticultural Science 78(3)S. 132-143, Eun-Young Choi, Ki-Young Choi, Yong-Beom Lee (**국외 SCI**)
- 2) The use of a frequency domain reflectometry sensor to establish a non -drainage hydroponic system with a coconut coir substrate for tomato cultivation, 2013, Journal of Plant Nutrition 36 (게재확정), Eun-Young Choi, Seng-Kwan Seo, Ki-Young Choi, Yong-Beom Lee (**국외 SCI**)
- 3) Nutrient solution concentration effect on non-drainage irrigation scheduling coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a FDR sensor, 2013, Journal of Food, Agriculture and Environment 11(3&4)(게재확정), Eun-Young Choi, Min Son, Ki-Young Choi, Yong-Beom Lee (**국외 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, 2013, Eun-Young Choi, Min Son, Ki-Young Choi, Yong-Beom Lee (**국외 SCIE**)

학술 발표

- 1) Boron Availability Alters Boron Distribution in Tomato (*Solanum lycopersicum*), 2010, Kor. J. Hort. Sci. Technol., 28(2), Eun-Young Choi, Seng-Kwan Seo, Yoon-A Jeun, In-Song Han, Gyung-Ran Do (**SCIE**)
- 2) Coconut coir를 이용한 파프리카 수경재배에서의 급액 시간대 조절에 따른 배지내 함수량에 미치는 영향, 2011, 한국생물환경조절학회지, 20(1),126, 유형주, 박성태, 오정심, 손금주, 최기영, 이용범
- 3) Farm Scale Evaluation on Non-drainage Irrigation Scheduling in Coir Substrate Hydroponic System for Tomato Cultivation by a Frequency Domain Reflectometry Sensor, 2013, 한국원예학회 Kor. J. Hort. Sci. Technol. (SUPPL I) vol. 31. P. 66, 최은영, 차부진, 이용범

- 4) FDR 센서를 이용한 코코넛 코이어 무배액 수경재배에서 급액 전기 전도도가 파프리카의 생육과 품질에 미치는 영향, 2012 원예과학기술지 Vol.30 No. S2, 유형주, 이호진, 고지연, 박성태, 오정심, 손금주, 연제성, 최기영, 이용범
- 5) FDR 센서를 이용한 배지내 함수량 조절이 coconut coir 조성 비율과 배지내 양수분함량 변화에 미치는 영향, 2011, 한국생물환경조절학회지, 20(1),97, 유형주, 박성태, 오정심, 손금주, 최기영, 이용범
- 6) FDR 센서를 이용한 장미 코코넛 코이어 수경재배시 급액농도가 장미 생육과 수량에 미치는 영향, 2011, 원예과학기술지 Vol. 29 No. S2, 정금향, 박성태, 이호진, 고지연, 최기영, 이용범
- 7) FDR 센서를 이용한 코코넛 코이어 배지에서 착색단고추 수경재배시 배지내 수분 함량의 변화, 2011, 한국생물환경조절학회지, 20(1),195, 정금향, 박성태, 이호진, 고지연, 최기영, 정운화, 이용범
- 8) FDR 수분센서 센서간 간격에 따른 수분함량 측정값의 변화 특징, 2011, 원예과학기술지 Vol. 29 No. S2, 박성태, 정금향, 오정심, 유형주, 최기영, 이용범
- 9) 수경재배용 Coconut coir 배지에 FDR수분센서 사용시 측정위치에 따른 수분함량 변화, 2011, 원예과학기술지 Vol. 29 No. S2, 박성태, 정금향, 김민경, 손금주, 오정심, 유형주, 최기영, 이용범
- 10) 유기배지를 이용한 토마토 무배액 수경재배 기술의 체계화를 위해 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 수분 센서 이용, 2011, 한국원예학회 학술발표 Kor. J. Hort. Sci. Technol. vol. 29. 최은영, 최기영, 이용범
- 11) 코코넛 코이어 배지 사용시 근권 수분 함량에 따른 딸기 생육특성, 2010, 한국생물환경조절학회지, 19(2), 오정심, 유형주, 박성태, 이해진, 정금향, 최기영, 배종향, 이용범
- 12) 코코넛 코이어 배지에서 장미 수경재배시 FDR 센서를 이용한 근권 수분 함량 조절에 따른 장미 생육 특성, 2011, 원예과학기술지 Vol. 29 No. S2, 정금향, 박성태, 최기영, 이용범, 배종향
- 13) 코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 자동 급액 제어 시 근권 수분제어 범위가 절화 생육에 미치는 영향, 2013, 원예과학기술지 Vol. 31 No. S1, 박성태, 유형주, 이호진, 연제성, 최기영, 이용범
- 14) 코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 자동 급액제어 시 급액시작 시간이 절화 생육에 미치는 영향, 2013, 원예과학기술지 Vol. 31 No. S1, 박성태, 오정심, 고지연, 장은지, 최기영, 이용범
- 15) 토마토 무배액 수경재배 기술의 최적화를 위한 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 수분 센서를 이용한 코코넛 코이어 배지의 수분함량 조절과 급액의 전기전도도 설정, 2012, 한국원예학회 Kor. J. Hort. Sci. Technol. (SUPPL I) vol. 30. P. 78, 최은영, 차부건, 이용범
- 16) 토마토 유기배지 수경재배에서 Frequency Domain Reflectometry (FDR)센서를 활용한 무배액 기술의 체계화, 2013, 한국원예학회 Kor. J. Hort. Sci. Technol. (SUPPL II) vol. 30. P. 36, 최은영, 차부건, 이용범

졸업논문

- 1) FDR센서를 이용한 오이와 파프리카 수경재배용 coconut coir 배지 최적 수분조건 구명
2011, 서울시립대학교 일반대학원 석사학위논문, 이철승
- 2) 코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배시 근권 수분함량, 급액농도 및 시간 조절이 근
권환경과 생육에 미치는 영향, 2013, 서울시립대학교 일반대학원 석사학위논문, 정금향

3. 인력 양성

지원 총 인원	지원대상				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타
22	4	11	6	1	9	13	20	0	2

4. 실용화, 산업화 계획

- 1) 추가연구 : 배양액 재활용 및 극소화 수경재배 시스템 개발
- 2) 시제품 개발 : 근권 함수량 제어용 다양한 길이의 FDR센서 개발
FDR센서를 활용한 근권수분 피드백 복합 환경제어기 개발
- 3) 재배기술 : FDR센서를 활용한 파프리카 무배액 재배기술 확립
FDR센서를 활용한 토마토 무배액 재배기술 확립
FDR센서를 활용한 장미 무배액 재배기술 확립

5. 교육 및 지도 : 9건

회차	일자	교육지역	내용
1	2011.02.22	전남 김제	과채류 수출농가에 배지모니터링 센서 설치 및 환경제어 기술교류
2	2011.03.22	경남 진주 대곡면	배지수분모니터링 센서 데이터 확인과 식물생육 측정 및 환경제어 기술교류
3	2011.04.15	충북 진천 덕산면	코이어를 이용하여 파프리카를 재배하는 농가에 배지수분 모니터링 센서 설치와 환경제어 기술 논의
4	2012.01.11	경남 진주 대곡면	겨울철 날씨로 인한 추위 극복을 위한 관리 방안 및 수분 센서 데이터 토의
5	2012.07.10	강원도 철원	과채류 수출농가 방문 및 기술교육
6	2012.10.24	충북 진천 에텐농장	파프리카 재배 농가 방문 및 모니터링 관리
7	2012.11.29	전북 익산 파프리카 시험장	파프리카 생산성 향상 기술개발 심포지엄
8	2013.04.23	전북 남원	과채류 무배액 수경재배 기술
9	2013.05.30	부산 시설원예시험장	파프리카 무배액 수경재배 기술

6. 홍보 : 6건

회차	일자	홍보	내용
1			홈페이지 제작 광고 (http://www.rfsensor.com/)
2	2011.10.13~14	aT센터	생명산업 D.N.A 대전 - 과채류공통수출연구사업단 전시회 참가
3	2011.11.05~08	대전무역전시관	대전 TAMAS 전시회
4	2013.05.22~25	한국원예학회	한국원예학회 전시 홍보
5	2012.12.10	원예산업신문	무배액 수경재배 토론
6	2013.05.23	한국농어민신문	유기배지 활용 무배액 수경재배 실용화 눈앞

SUMMARY

I . Title

Development of Non-drainage Irrigation Control Technology and Moisture Measuring Sensor on Fruit Vegetables and Rose Hydroponics in Organic Substrates

II . Outline of Research

1. Development of a frequency domain reflectometry sensor suitable for coir substrate and its commercialization
 - a. Calibration standardization of FDR sensor for organic substrates
 - b. Structural improvement of FDR sensor for organic substrates
 - c. Display device and software of FDR sensor for organic substrates
2. Establishment of technology for measuring water content of coir substrate and strategy for maintenance
 - a. Measuring water contents on each position of substrates by using FDR sensors
 - b. Effects of different distances between FDR sensors on measuring water contents
 - c. Effects of different sensing positions and distances from irrigation point on water contents measurement
3. Non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for paprika cultivation by a frequency domain reflectometry sensor
 - a. Developing irrigation managements for non-drainage hydroponics
 - b. Controlling irrigation times for non-drainage hydroponics at autumn-winter season
 - c. Determining electric conductivities for irrigation in non-drainage hydroponics
 - d. Field test of non-drainage hydroponics in paprika
4. Non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a frequency domain reflectometry sensor
 - a. Developing irrigation for non-drainage hydroponics at autumn-winter season
 - b. Developing irrigation for non-drainage hydroponics at spring-summer season
 - c. Determining electric conductivities for irrigation in non-drainage hydroponics
 - d. Determining coconut coir components on substrates for non-drainage hydroponics

- e. Field test of non-drainage hydroponics in tomato
- 5. Non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for rose cultivation by a frequency domain reflectometry sensor
 - a. Air environment changes of multi span plastic greenhouse during experiments
 - b. Root environment changes of timer irrigation regimes
 - c. Controlling rootzone water contents for non-drainage cultivation
 - d. Determining irrigation managements for non-drainage cultivation
 - e. Determining electric conductivities for irrigation in non-drainage cultivation
- 6. Development of integrated irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system by controlling its water content

III. Results and Discussion

1. Development and commercialization of FDR sensor for growers on organic substrates

Organic medium could be affected the material and the density in accordance with environmental conditions, climate in the manufacturing process, origin, and manufacturing company. To taking the water content of the reference point of the organic medium, when the weighing system, the water distribution have changed according to the density of the medium. Moisture is distributed in a lower layer of substrate when substrate density is low. To solve this, the reference point of the sensor have been established the amount of water per unit area, and to reduce the experimental error using the glass beads as standard calibration materials.

Soil moisture sensors were made in the soil only, but because of the characteristics of the organic medium, there were many differences on density, pore size, and dielectric constant. In order to solve these problems, by analyzing and adjusting the length of the sensor, frequency of use, sensor spacing, measurement time, sensor structure and drive systems, the sensing data by sensor in an organic medium were to the level of reliable measuring values. Developed moisture sensor for organic medium have been spread to hydroponic growers and colleges across the country, and continuously, finding problems and improvement points such as on-site application and improvement measures for a more accurate measurement of the sensor. And, the structure, and calibration of the sensor have been complemented.

Localizing was required for products that farmers are using, replacing the screen look bigger for elderly users, and durability was also good to become possible to measure a long time by replacing the user battery. In addition, the product quality and marketability were enhanced by the mass production of cases, product stickers, a special case, and the packaging box. Creating a manual insert additional consulting program after the measurement, data logging program, the average value measurement function, schematic, PCB artwork, Gerber files, the sensor manual, Excel-compatible program, and so on, to enhance the functionality of the software. Loggers has been upgraded by the addition of convenience.

In USA and Japan, let commercialize sensor that utilizes the spectral analysis technique, to measure at a time as well as moisture, the soil in various environments, and it is spread. Whereas, in Korea, we have been research on using spectral analysis techniques measuring

moisture, EC, organic matter content, but not yet at the stage of practical use. In the United States, the world's largest sensor producer accounts for 31.8% of the whole production, in the following order, Japan, Germany. These three countries account for more than half of world production. Domestic sensors market shows the re-growth, having declined since peaking at 2000. In situations where the abnormal weather of our country, the current harvest of crops is difficult, so the demand and reliability of sensors will increase further.

2. Systematizing of water contents sensing and stabilizing technology for organic substrates

a. Measuring water contents on each position of substrates by using FDR sensors

Depending on the distance away from the irrigation point that is the liquid supply in hydroponics for coconut coir medium, in order to measure the change in water content of each location and determine the measurement suitable sensor positioning, nine FDR sensors were set around the position of irrigations on fully watered coconut coir substrate. The average moisture content of each measurement position, a different value for each location has been shown. The differences between the maximum and minimum values appeared more than 10%. Unevenness of coconut coir substrate would be a reason of these variations. Water content deviation is higher than the minimum unit of sensing in each sensor to a position measured by the sensor. Installing nine sensors on a medium can be a problem. It requires additional experiments for suitable measurement positions of sensors through the installation interval between the sensors.

b. Effects of different distances between FDR sensors on measuring water contents

It would be the best, in use the moisture sensor measurement of rhizosphere, installing the product sustains a far distance between the sensors. When located near necessity, getting a good measurement result would be to ensure an interval of at least 9cm. If possible, Using a noise filter could be got to improve the stability and measurement accuracy by lowering variation levels. Installing many sensors near by 9cm within one place, and the mean value of sensors is an effective use, but it is not suitable to observe changes in real time. Of course, using many sensors with distances is a better choice.

i. Testing sensors without water

In the absence of moisture on the standard matter(glass beads) for calibration, experiments performed to identifying the variation of the measured value of the sensor according to the distance of the sensor. After filling the sensor calibration standard material in plastic box, in a state of completely dry, the two sensors had been located on an upper part of material in 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21 cm intervals. The moisture content was regularly 0% without certain changes at intervals of all sensors. Because of water was not measured on the sensor, 0% was continued. And, there were not able to discover the electromagnetic interference phenomenon between the sensor.

ii. Testing sensors with water

It would be the best, in use the moisture sensor measurement of rhizosphere, installing the product sustains a far distance between the sensors. When located near necessity, getting a good

measurement result would be to ensure an interval of at least 9cm. If possible, Using a noise filter could be got to improve the stability and measurement accuracy by lowering variation levels. Installing many sensors near by 9cm within one place, and the mean value of sensors is an effective use, but it is not suitable to observe changes in real time. Of course, using many sensors with distances is a better choice.

c. Effects of different sensing positions and distances from irrigation point on water contents measurement

Experiments were performed to measure changes in moisture content of each position according to the distance away from the irrigation points in hydroponic medium, and try to determine the measurement positions of the appropriate sensing. Using the rockwool and coconut coir substrate, sensors were located away gradually distance 5, 10, 20, 30 cm from the irrigation start point and set on upper and side. The slower in terms of times to reach the peak rather than the side to be installed in the upper surface, the water content measuring by the FDR sensors hydroponics for coconut coir medium, it is possible to more accurate measurements. For the measurement of water content changes sensitively, it was determined to be installed near the irrigation point (in this experiment, 5cm) would be advantageous for the measurement .

3. Systematizing of non-drainage irrigation by using FDR sensors in paprika hydroponics

a. Developing irrigation managements for non-drainage hydroponics

i. Determining proper rootzone water contents for non-drainage in paprika hydroponics

When controlling the moisture in the root zone by using the FDR moisture sensor in paprika hydroponic cultivation of variety 'Special', average irrigation amount per day was reduced from 41.3 to 59.8% compared to the timer cultivation, but the substrate EC has not been increased. So, the substrate EC was in the range of the target level of rhizosphere. Furthermore, there was no differences in moisture control group treated by FDR sensor on the photosynthetic rate, the growth and yield, compared to the timer processing, and drainage rate was zero.

In paprika hydroponics "RZ208" varieties, the growth of branches and leaves of plants and photosynthetic rate were higher on WC50~55% than the timer treatment, and WC60~65 showed similar levels as timer treatments. Fruit growth and number were higher than the control group(timer treatments) in the WC60~65 and WC40~45 treatment. It could not be determined by a result of harvested in a short period of time, but the culture medium moisture conditions suitable for initial hydroponic cultivation of paprika were 40~45, 50~55, 60~65%. 50-55% moisture content was suitable, when only the growth of the plant. For 30-35%, it is possible to obtain the fruits of good quality in the short term, showed a difference of about half of the control group in numbers. Such a result, the irrigation system by FDR moisture sensor control, EC of rhizosphere is stabilized, even though the supply of daily changes reflecting weather environment, crop production, and growth state, have not seen a difference in the amount and growth. No drainage hydroponics was able to confirm the potential method environmentally friendly.

ii. Determining proper rootzone water contents for different substrate component ratios

Using the FDR sensor in paprika hydroponic cultivation, by adjusting the water content of the medium in the rhizosphere portion corresponding to coconut coir composition ratio, experimental attempts to investigate the culture medium moisture conditions on paprika growth. Using coconut coir medium for different dust:chip ratios(10:0, 7:3, 5:5), and rock wool as a control treatment, rootzone water contents were controlled $45 \pm 2\%$ range of water content, $55 \pm 2\%$, and $65 \pm 2\%$ by FDR sensors, and timer method. The rootzone EC, in the case of coir medium, variation was small and show supply EC level as a whole. In the case of rockwool, timer processing showed a high level about two times, and water content controls were lower gradually in the order of moisture contents. There were a tendency to decrease irrigations about substrates moisture content is reduced. Other Coir medium except the 5:5 substrate, timer processing showed higher irrigated amounts than the treatment $65 \pm 2\%$.

While the timer treatments showed the drainage rate of 13-30%, there was little drainage at the substrates that were controlled by FDR sensor. There were no differences on growth of the water content conditions, but when viewed from the condition of the medium, 7:3 showed growth results slightly higher compared to the other treatments. In addition, EC level of substrates had not been increased significantly in the control irrigation with FDR sensors.

iii. Controlling irrigation times on rootzone water contents based irrigation at spring-summer season

By using the FDR sensor in paprika hydroponic cultivation, controlling the moisture content of coconut coir medium in rhizosphere section, the experiments were carried out to try to determine the suitable time for growth in different ways of the irrigation start and end time. On coconut coir substrate(dust:chip, 7:3), water content condition was $55 \pm 2\%$ by FDR sensors, 10 irrigation times was selected from sunrise time(average at am 7:00) to sunset time(average at pm 18:00), including 24 hours. EC changes in substrates were much more complex than water content changes, and treatment that irrigation started at am 9:00 showed low EC level and many variations, then gradually increased EC levels, and other treatment without 24hours showed a little EC increasing patterns when irrigation stopped. 00-00 treatment irrigated the highest supply at 2L per plant, but 07-16 and 09-16 treatments irrigated relatively low under 1L per plant. Drainage were decreased on FDR sensor treatment, and finally, there were no drains.

b. Controlling irrigation times for non-drainage hydroponics at autumn-winter season

Experiment was investigated to determine adequate irrigation times for sustaining plant balances. In paprika hydroponics with coconut coir substrates, on August, rootzone water content was controlled by $50 \pm 2\%$, and from September to November, irrigation times were 06-17, 06-19, 07-16, 08-19, 09-16, 09-18, 00-24. Every treatment irrigated $400 \pm 90\text{mL/plant/day}$ when light intensity was over 600W/m^2 , and under W/m^2 , there will be no irrigation or $170 \pm 30\text{mL/plant/day}$ was irrigated. There were no drainages in all treatments. At November, rootzone EC variations were higher at 09-16 and 09-18, but under $4.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$. Irrigation started before am 9:00 would be sustained safe rootzone conditions. No significant was found among fruit growth. In yields, 08-19, 06-17, 09-18 showed 6.9 fruit per plant, and there were higher unmarketable fruit at 06-19 and 09-16. When irrigation started at 3 hours after sunrise and stopped at 3 hours before sunset,

plant leads to reproductive stages, and when irrigation started at 1~2 hours after sunrise and stopped at 1 hour before sunset, plant leads to vegetative stages.

So, in paprika cultivation, at water content $55\pm 2\%$, if it is hard for growers to control irrigation times, from september to November, irrigation time would be from am 8:00(1~2 hours after sunrise) to pm 17:00(1~2 hours before sunset).

c. Determining electric conductivities for irrigation in non-drainage hydroponics

This experiment was performed to determine paprika growth changes on different irrigation EC levels in non- drainage hydroponics by FDR sensors. Rootzone water content was controled by $55\pm 1\%$, from 2nd fruiting, control range was changed to $65\pm 1\%$. Higher irrigation EC levels, higher rootzone EC levels, but all treatments rootzone EC levels were in the range of $1.63\sim 4.55$ $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Timer treatments had 28.6% of drainage ratio, and FDR sensor control treatments had 2.2%. Rootzone EC level were significantly low than timer treatments, even there were no drainage. Average daily irrigation amount was decreased when irrigation EC was gone higher and water contents lower gradually. Especially, on May at initial growth stage, irrigation amount for sensor control was a half of timer control. Four weeks after transplanting, there was no differences on photosynthetic rate among treatments. But after 8 weeks, EC 2.0 and 2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ treatment had significantly higher photosynthetic rate, and EC 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ treatment showed the highest stomatal conductance and transpiration rate. As time passes, there were no significantly differences on plant growth, except plant height that had been shorter when irrigation amount increased. Fruit fresh weight was higher at 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, and dry weight was higher at 2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Fruit yield was not significantly different between irrigation controls, but in EC, marketable yield were higher on 2.0 and 2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, and sugar content was higher at 4.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ by 8.1°Brix and lower at 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ by 6.28°Brix. Irrigation EC 2.0~3.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ would be recommended ranges on paprika hydroponics controled by FDR sensors when irrigation EC levels will not be changed.

d. Field test of non-drainage hydroponics in paprika

For each cultivation regime, rootzone water content control ranges were 75~65% at rooting, 65% at 1st fruiting and enlargement, 60% at 1st harvesting and 2nd fruiting, 65% at fruit enlargement. When irrigated by FDR sensors, rootzone EC was 2.31~4.82 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ during 7 month's cultivation. When irrigated by solar radiation, water content changed 46.1~77.3%. It was higher variation, because the irrigation was controled by rockwool based, nevertheless rootzone EC change was 1.7~2.9 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, and its variation was much smaller than FDR sensor irrigations. At initial stage, there were no significantly differences on irrigation amounts between solar radiation and FDR sensors. Irrigation amounts of FDR sensors showed 52.6% of solar radiation at 150 days after transplanting, and 64.1% at 180 days after transplanting. Control treatment irrigated by solar radiation showed 20% drain ratio during cultivation, and FDR sensor irrigation showed 3%. There was very low drainages(22mL/day/plant) in FDR sensor irrigations on 180 day after transplanting when higher amount of water was required. In photosynthetic rate and plant growth, there were no differences in total cultivation period, whereas at initial cultivation stage, FDR sensor irrigation was higher than control treatment but lower than rockwool cultivation. In fruit yield, no differences found among irrigation controls. Average fruit weight and sugar content

were higher on FDR sensor irrigation treatments.

4. Systematizing of non-drainage irrigation control by using FDR sensors in tomato hydroponics

a. Developing irrigation for non-drainage hydroponics at autumn-winter season

This study aimed to establish a non-drainage hydroponic system with a coconut coir substrate by a frequency domain reflectometry (FDR) sensor in controlling irrigation to set volumetric water levels in tomato (*Solanum lycopersicum* L. Starbuck 1) cultivation in the autumn to winter season. When the volumetric water content was controlled at 40 or 50 %, daily-averaged irrigation amounts were roughly half those needed when the water content was set at 60 %. In the 40 and 50 % treatments, there was no drainage, and the water contents and electrical conductivity (EC) levels in the substrate during irrigation-off hours were lower than during irrigation hours. In the 60 % treatment, the average rate of drainage was 15 % of the total irrigation, and the EC level in the substrate increased during the irrigation-off hours. Further research is needed to verify this result during a summer season.

b. Developing irrigation for non-drainage hydroponics at spring-summer season

This study examines an irrigation scheduling technique for tomato (*Solanum lycopersicum* L. 'Starbuck F1') cultivation aimed at avoiding effluent from coir substrate hydroponic system. The technique utilized a frequency domain reflectometry (FDR) sensor that controlled irrigation to preset volumetric water levels. For comparison, a time-clock scheduling was examined. When the volumetric water content in the substrate was controlled at 40 or 50% by the FDR, there was no leaching of drain water over the entire investigation period. When the volumetric water content was controlled at 60% by the FDR or timer-set, drainage ratio to the total irrigation was 22% or 38%, respectively, from 32 to 69 days after transplant (DAT), while from 70 DAT onwards, the 60% treatment ceased its drainage. The EC level in the substrate in the 40 and 50% treatments was lower during irrigation-off hours than those during irrigation-on hours, which was opposite to that in the 60% treatment during 25 to 69 DAT. While there was no significant difference in plant growth among the treatments at 30 DAT, the plant height, fresh weights of leaf and stem, and numbers of leaves at 102 DAT showed significant ($P < 0.05$) reduction under the 40 and 50% treatments, compared to that under the 60% and timer-set treatments. A 24 and 26% of the total fruit number under the 40 and 50% treatment, respectively, was affected by blossom-end rot (BER), whereas no BER was observed in the 60% or timer-set treatment. These results indicate that controlling the volumetric water content of the substrate within a range of 40 and 50% for the entire growth period was too low during the late spring to summer season. Efficient irrigation scheduling to obtain a drainage-free system during late spring to summer season can be achieved by starting to control the volumetric water content of substrate between 40 and 50% by the FDR, and then by increasing it between 60 and 70% with close observations of patterns of the water content and the EC level of the substrate.

c. Determining electric conductivities for irrigation in non-drainage hydroponics

This study examined effects of electrical conductivity (EC) level on irrigation scheduling for

tomato (*Solanum lycopersicum* L. 'Starbuck F1') cultivation aimed at avoiding effluent from coir substrate hydroponic system. The technique utilized a frequency domain reflectometry (FDR) sensor that controlled irrigation to preset volumetric water levels. For comparison, a time-clock scheduling was examined. The volumetric water content in substrate was controlled at 45 or 55% by the FDR, and nutrient solution with pH 5.8 and EC 2.0 or 2.5 mS cm⁻¹ was supplied until about the time of fruit setting on the 4th cluster after transplant. The EC level was then adjusted from 2.0 to 2.0 (EC2.0-2.0), 2.0 to 2.5 (EC 2.0-2.5), or 2.5 to 3.0 mS cm⁻¹ (EC 2.5-3.0) until the end of the growing season. The EC concentration had a significant effect on daily-averaged irrigation amount and the EC level of substrate. In both of the 45 and 55% water contents, the daily-averaged irrigation volumes were in the order of EC 2.0-2.0 > EC2.0-2.5 > EC2.5-3.0 treatment. The EC level of the substrate at the EC 2.5-3.0 treatment under the 45% water content was significantly lower than other EC treatments. In addition, significantly lower plant and root growth as well as lower marketable fruit weight were observed at the EC 2.5-3.0 under the 45% water content than other EC treatments. In contrast, under the 55% of water content, the higher solution EC did not affect the plant growth and fruit weight. Significantly higher soluble solid content was observed in the fruit grown under the FDR treatments than that under the timer-set system.

d. Determining coconut coir components on substrates for non-drainage hydroponics

This study examined a technique for scheduling irrigation for tomato (*Solanum lycopersicum* L. 'Starbuck F1') cultivation aimed at avoiding effluent from an open hydroponic system with coir substrate containing different ratios of chip-to-dust (v/v) content. Specifically, the objectives were to undertake preliminary measurements of irrigation volumes, leachate volume, volumetric water content and electrical conductivity (EC) in the substrate, plant growth, fruit yield, and water use efficiency resulting from variation in chip content as an initial experiment. The technique utilized a frequency domain reflectometry sensor that controlled irrigation at preset volumetric water levels. Commercial coir substrates containing different percentages of chips and dust (0 and 100%, 30 and 70%, 50 and 50%, or 70 and 30%), two-story coir substrates with different percentages of chips in the lower layer and dust in the upper layer (15 and 85%, 25 and 75%, or 35 and 65%), or rockwool slabs were used. The results showed that a negligible or no leachate was found for all treatments when plants were grown under a technique for scheduling non-drainage irrigation using the FDR sensor. Daily irrigation volume was affected by chip content in both commercial and two-story slabs. The highest plant growth, marketable fruit weight, and water-use efficiency were observed in the plants grown in the commercial coir slab containing 0% chips and 100% dust. Detailed experiment is necessary to closely focus on determining appropriate irrigation volume at each of irrigation as well as duration of each individual irrigation cycle depending on different physical properties of substrates using an automated irrigation system operated by the FDR sensor.

e. Field test of non-drainage hydroponics in tomato

This study evaluated an irrigation scheduling technique for tomato (*Solanum lycopersicum* L. 'Betatini') cultivation in farm scale aimed at avoiding effluent from coir substrate hydroponic

system. The technique utilized a frequency domain reflectometry (FDR) sensor that controlled irrigation to preset volumetric water levels. For comparison, a time-clock scheduling was examined. When the volumetric water content in the substrate was controlled by the FDR, there was less than 10% leaching of drain water over the entire investigation period. During Autumn to Winter growing season, daily average irrigation and drainage volume were about 2.2L and 1.6L per plant, respectively, in the timer-set. In the non-drainage system controlled by the FDR sensor, daily average irrigation volume was about 0.41 L per plant. The substrate water content ranged between 70% and 75% for the timer-set, while in the non-drainage system it ranged between 55 to 50% during the Autumn to Winter season. The EC level in the substrate in the non-drainage system gradually increased from 0.5 dS m^{-1} to 3.0 dS m^{-1} , while it was maintained to 2.0 dS m^{-1} in the timer-set. There was no significant difference in fruit yield, except for the fruit weight produced in the first cluster. During Spring to Summer growing season, daily average irrigation volume and drainage ratio at 70 DAT were about 4.4L and 46%, respectively, in the timer-set. In the non-drainage system controlled by the FDR sensor, daily average irrigation volume and drainage ratio at 70 DAT was about 2.0L and 5% (Table 2, Fig. 5). Results confirmed the benefits of irrigation scheduling by the FDR sensor for the non-drainage hydroponic system, such as less waste of water and fertilizers, more environmental safe without yield losses. It is going to be necessary that irrigation scheduling be achieved by closely monitoring daily patterns of the water content and the EC level of the substrate.

5. Systematizing of non-drainage irrigation control by using FDR sensors in rose hydroponics

a. Air environment changes of multi span plastic greenhouse during experiments

Air temperature, relative humidity, and light intensity have been measured to proved as foundational environment data. From 2011 to 2013, in the University of Seoul, on multi span plastic greenhouse, environmental conditions were collected with data logger and temperature, humidity, light intensity sensors. In 2011, during cultivation, on daytime, light intensity was $400\sim 700 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-2})$. Air temperature was $30\sim 40(\text{C})$ at maximum values and $20\sim 5(\text{C})$ at minimum values. Relative humidity was $20\sim 40(\%)$. In 2012, during cultivation, on daytime, light intensity was $300\sim 600 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-2})$. Air temperature was $30\sim 40(\text{C})$ at maximum values and $20\sim 7(\text{C})$ at minimum values. Relative humidity was $20\sim 50(\%)$. In 2013, during cultivation, on daytime, light intensity was $200\sim 600 \text{ (W}\cdot\text{m}^{-2})$. Air temperature was $30\sim 40(\text{C})$ at maximum values and $20\sim 7(\text{C})$ at minimum values. Relative humidity was $20\sim 50(\%)$.

b. Root environment changes of timer irrigation regimes

i. Changes of rootzone water contents on timer irrigations

Automatic irrigation control using a timer in hydroponic cultivation of roses with the rock wool and coconut coir, experimental attempts to investigate the changes in the water content of the rootzone of growth medium from 2011 to 2013. Every treatment irrigated $640\pm 20\text{mL/day/plant}$, 8 times at one day. In Timer-Coir treatment, there is changes in WC $60\sim 70(\%)$, EC $1.0\sim 2.0 \text{ (dS}\cdot\text{m}^{-1})$ in 2011, $30\sim 70(\%)$, EC $1.5\sim 4.0 \text{ (dS}\cdot\text{m}^{-1})$ in 2012, $60\sim 75(\%)$, EC $1.5\sim 2.5 \text{ (dS}\cdot\text{m}^{-1})$ in

2013. The water content of coir not only affected by the season but also under the influence of weather such as rainy season, shows various changes rather than in a constant pattern. The characteristics of yearly pattern of root zone EC show that higher at summer and low again. There is changes in WC 30~50(%), EC 1.0~3.0 ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) in 2011, WC 30~45(%), EC 2.5~6.0 ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) in 2012, WC 30~50(%), EC 2.0~4.0 ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$) in 2013. Rock wool shows much lower range of moisture content than coir, The patterns of water contents shows various changes throughout the year. And the characteristics of yearly pattern of root zone EC show that higher in the summer and lower in the early autumn and increase again after middle of autumn.

ii. Determining rootzone water contents for non-drainage irrigation

Automatic irrigation control using a FDR sensor in hydroponic cultivation of roses with the coconut coir, experimental attempts to controlling the water content of coconut coir medium in rootzone. The target ranges of controlling root zone water contents is $45\pm 1\%$ (WC45), $55\pm 1\%$ (WC55), $65\pm 1\%$ (WC65), and automatic irrigation control using a timer as a control. Control of irrigation by using the sensor, irrigation was decrease in 1/3 to 2/3, drainage was in 1/4 to 1/50. Although the drainage decreased in this way, there is no significancy distinction at growth characteristics of cut flowers. W65 and W55 showed no difference from the timer at yield. When considering an amount of irrigation and drainage, WC45 treatment does not make a big difference in quality, so its productivity is good. When considering the growth, yield and amount of irrigation and drainage, irrigation control with sensor to a water content of 55% is expected to be excellent.

c. Controlling rootzone water contents for non-drainage cultivation

i. Determing rootzone water contents control ranges for non-drainage cultivation

Irrigation control range was adjusted for automated irrigation using FDR sensor in hydroponic rose cultivation with coconut coir substrate. Irrigation control range was set 54 ~ 56% (WC55 \pm 1), 53 ~ 57% (WC55 \pm 2), 50 ~ 60% (WC55 \pm 5), 45 ~ 65% (WC55 \pm 10) and to compare, automatic Irrigation system with a timer was used. Irrigation volume when irrigation controlled by using sensors decreased 1/3~1/5 and drainage volume decreased significantly under 1/25 compare to irrigation controled by timer. Despite of Irrigation and drainage volume decreased, growth characteristics of cut flowers showed little difference. However, the yield of timer control was higher than that of the sensor control. Considering growth and yields of high quality cut flowers, Irrigation control range 53-57% is expected to be optimal when Irrigation controled with sensors.

ii. Changing rootzone water contents control levels for non-drainage cultivation

Seasonal rootzone water content was controlled for automated irrigation using FDR sensor in hydroponic rose cultivation with coconut coir substrate. Experiments are in progress from April to July, the adjustment range treatment was fixed range of 54-56%(WC55), range vary on the season and maximum 58 ~ 62% (WC55 57 60), range vary on the season and maximum 63-67% (WC55 60 65) using a timer to control automatic Irrigation systems were used to compare. Irrigation volume when irrigation controlled by using sensors decreased 2/3~1/3 and drainage

volume decreased significantly under 1/3~1/200 compare to irrigation controled by timer. As irrigation volume decreased, sensor control showed lower growth characteristics of cut flowers. Also the yield of timer control was higher than that of the sensor control. Comparison between treatments more irrigation showed better results in growth and yields. However, 2/3 irrigation volume compare to timer and 1/2 irrigation volume did not show difference in growth and yield. In automated irrigation using FDR sensor in hydroponic rose cultivation with coconut coir substrate, irrigation condition increased slightly(2-3%) according to the season is expected higher productivity and quality than maintaining constant water contents of rootzone.

iii. Effects of irrigation timings and amounts on non-drainage cultivation

Compared irrigation timings and amounts for automated irrigation using FDR sensor in hydroponic rose cultivation with coconut coir substrate. Experiments are in progress from April to July, using 4 treatment, sufficient irrigation treatment (timer), a normal adjustment treatment 54 ~ 56% (WC55) and treatment focus on irrigation timing at 53% irrigates $80 \pm 10\text{mL}$ (WC55-80mL), and treatment focus on irrigation amounts irrigates at same time as timer treatment, but irrigate 1/4 1/3 1/2 amounts depending on the season(Timer / 4 1/3 1/2). Irrigation control treatment showed a large decrease compared to the timer, irrigation amounts was less than 2/5, drainage was less than 1/50. Timer control which had more irrigation amounts showed much higher growth and yield of cut flowers in a rose than the sensor control. Comparison between the controlled treatment did't showed difference in cut flower growth, but the total yield was higher in the Timer / 4 1/3 1/2 treatment supplied more irrigation amounts. In other words, irrigation amounts rather than irrigation timing, frequent irrigation rather than few large irrigation is more effective in plant growth.

iv. Effects of rootzone water contents for stress and non-stress conditions on non-drainage cultivation

This experiment tried to compare with the stress environment reclamation plant whether to undergo stress automatic nutrient solution at the time using the FDR sensors rose hydroponics using coconut coir. Experiments are conducted to April-July, stress control and processing (WC55), we have the (WC35) 32 ~ 37% 54 ~ 56%, adjustment process of normal, in control group for comparison I using an automated liquid supply system using the timer. When controlled nutrient solution by using the sensor, the nutrient solution, 1/3 of the timer drain showed a greater reduction in 1/100 in the nutrient solution control in all ranges. Timer control was higher than the sensor control in the growth and yiend of cut rose. Difference was not seen in cut roses in comparison between the control process, yields showed excellent results in the process that was a little more nutrient supply. Considered to be stressed by the relatively low moisture supplied to the summer is a high temperature phase the moisture control process using the sensor, an increase in harvested be ability to overcome than WC35 in WC55 process receives a supply of the liquid supply some it is determined that it was observed.

d. Determining irrigation managements for non-drainage cultivation

i. Determing irrigation starting times for non-drainage cultivation

Using coconut coir in hydroponic roses. Using automatic Irrigation in the FDR sensor Irrigation start time was adjusted. Irrigation start time is 1hour after sunrise, 2hour after sunrise and 3hour after sunrise. For comparison, Automatic Irrigation System using a timer control was used. Irrigation control using sensors when Irrigation start time nutrient feeds quantity from all over the timer 1/3~1/4. The drainage quantity of 1/60 or less showed a large decrease. But, growth characteristics of cut flowers and sensor control timer control did not show a big difference. However Yield was higher than that of the sensor control timer control. Using irrigation control sensor. Growth and high levels of cut flowers cut flowers considering quantity, Irrigation start three hours after sunrise is expected to stand behind that.

ii. Determing irrigation stopped times for non-drainage cultivation

Automatic irrigation control using a FDR sensor in hydroponic cultivation of roses with the coconut coir, experimental attempts to controlling the end irrigation time. The end irrigation time is 09:00~15:00(Time: Minute, Time0915), 09:00~17:00(Time: Minute, Time0917), 09:00~19:00(Time: Minute, Time0919), and automatic irrigation control using a timer as a control. Control of irrigation by using the sensor, the amount of irrigation in every treatment, is decrease in 1/2 to 1/3, drainage was in 1/6 to 1/30. Although the drainage decreased in this way, there is no significancy distinction at growth characteristics of cut flowers. Time0917 and Time0919 treatment does not make a big difference with timer treatment in yield of product cut flower. When considering the amount of irrigation and drainage, Time0919 treatment is expected to be excellent. But, if considering growth and high levels of cut flowers yield, it is better that irrigation end at 17:00.

e. Determining electric conductivities for irrigation in non-drainage cultivation

Different irrigation EC levels were regulated in rose hydroponics by using FDR sensor control. Irrigation levels were EC 1.0(dS · m⁻¹), EC 1.5(dS · m⁻¹), EC 2.0(dS · m⁻¹) on FDR treatments, and timer irrigation as control treatment had EC 1.5(dS · m⁻¹). When irrigation was controlled by FDR sensor, irrigation and drainage amounts were decreased by 1/2~1/3 and 1/6~1/15 of timer irrigation, respectively. In spite of these low irrigated and drained amounts, growth characteristics of cut flower had not showed noticeable differences. In marketable yield, EC1.0 and EC1.5 treatment showed no differences to timer treatment. Considered only drainage as a priority, EC2.0 showed higher productivity because of no differences at cut flower growth. But, in FDR sensor controlled irrigation, considering rootzone conditions, yields, and drainages, irrigation EC level on 1.5 dS · m⁻¹ would be recommended for higher flower growth and marketable qualities.

6. Developing integrated management control systems on different substrates water content

- a. Developing integrated management control systems
- b. Associated controlling with complex environmental control systems

CONTENTS

Chapter I . Introduction	
1. Research background and knowledge gap	35
2. Research objectives and aspects	43
Chapter II. Review of the current status of research	
1. International status	44
2. National status	47
2. Domestic and foreign market tendency	50
Chapter III. Results and Discussion	
1. Development of a frequency domain reflectometry sensor suitable for coir substrate and its commercialization	51
2. Establishment of technology for measuring water content of coir substrate and strategy for maintenance	69
3. Non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for paprika cultivation by a frequency domain reflectometry sensor	102
4. Non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a frequency domain reflectometry sensor	155
5. Non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for rose cultivation by a frequency domain reflectometry sensor	206
6. Development of integrated irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system by controlling its water content	303
Chapter IV. Achievement of Goal and Contribution	316
Chapter V. Outcomes of research and its application	318
Chapter VI. Comparison of related overseas technologies	328
Chapter VII. Reference	335

목 차

제 1 장 연구개발과제의 개요	
제 1 절 연구 개발의 필요성	35
제 2 절 연구 개발의 목적과 범위	43
제 2 장 국내외 기술개발 현황	
제 1 절 해외 현황	44
제 2 절 국내 현황	47
제 3 절 국내외 시장동향	50
제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과	
제 1 절 유기배지에 적합한 농가보급형 FDR 수분센서 개발 및 제품화	
1. 유기배지 센서 calibration 표준화 공정	51
2. 유기배지 센서에 적합한 구조 개선	52
3. 유기배지 센서의 디스플레이 및 소프트웨어	56
제 2 절 유기배지의 함수량 계측 및 유지기술 체계화	
1. 센서를 이용한 위치별 수분함량 측정	69
2. 센서 간격에 따른 측정값에 따른 변동 구명	74
가. 무(無)수분 조건	74
나. 유(有)수분 조건	78
3. 급액부위에서의 간격에 따른 적합한 센서 측정위치 구명	88
제 3 절 FDR센서를 활용한 파프리카 무배액 급액관리 기술 체계화	
1. 무배액 시스템에 적합한 급액체계 구명	102
가. 파프리카 무배액 수경재배에 적합한 수분함량 구명	102
나. 유기배지 조성 비율별 적합한 수분함량 구명	111
다. 근권부 수분함량 제어에 따른 급액시간 조절(봄~여름재배)	120
2. 무배액 시스템을 위한 급액시간대 조절(가을~겨울재배)	129
3. 무배액 시스템에 적합한 급액의 전기전도도 구명	139
4. 시설 과채류(파프리카) 수경재배 농가실증 연구	146

제 4 절 FDR센서를 활용한 토마토 무배액 급액관리 기술 체계화	
1. 가을~겨울철 재배를 위한 무배액 시스템에 적합한 급액 체계	155
2. 봄~여름철 재배를 위한 무배액 시스템에 적합한 급액 체계	167
3. 무배액 시스템에 적합한 급액의 적정 전기전도도 구명	178
4. 무배액 시스템에 적합한 코이어 배지 조성 성분 구명	189
5. 시설 과채류(토마토) 수경재배 농가실증 연구	196

제 5 절 FDR센서를 활용한 장미 무배액 급액관리 기술 체계화	
1. 무배액 시스템 실험 수행의 온실 환경 측정	206
2. 타이머와 센서를 이용한 급액체계	212
가. 타이머를 이용한 근권부 수분함량변화	212
나. FDR센서를 이용한 근권부 수분함량변화	227
3. 무배액 시스템에 적합한 근권부 수분함량 제어	239
가. 무배액 시스템을 위한 수분함량 제어 범위 구명	239
나. 무배액 시스템을 위한 계절별 근권 수분함량 조절	249
다. 무배액 시스템을 위한 급액시기와 급액량 비교	256
라. 무배액 시스템을 위한 정상, 조절, 스트레스처리 비교	264
4. 무배액 시스템에 적합한 급액체계 구명	270
가. 무배액 시스템을 위한 급액 시작 시간조절	270
나. 무배액 시스템을 위한 급액 종료 시간조절	278
5. 무배액 시스템에 적합한 급액의 적정 전기전도도 구명	291

제 6 절 배지 수분함량을 고려한 통합형 급액제어 시스템 개발	303
------------------------------------	-----

제 4 장 목표달성도 및 관련 분야에의 기여도	316
---------------------------	-----

제 5 장 연구개발 성과 및 성과 활용계획	318
-------------------------	-----

제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외과학기술정보	328
------------------------------	-----

제 7 장 참고문헌	335
------------	-----

제 1 장 연구개발과제의 개요

제 1 절 연구개발의 목적

1. 시설원예 산업 현황

- 국제 사회 개방화에 따른 FTA에 대응하기 위한 시설원예 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 시설원예 경쟁력을 강화하고 수출 산업으로 발전시켜야 함
 - 복합환경 조절기술, 수경재배기술, 연중생산 작형 수립
 - 수출작물의 수경재배 비율 : 파프리카 95%, 토마토 80%, 딸기 10%, 장미 70% 이상
 - 수경재배 효과 : 생산성 향상, 안정생산, 고품질 안전생산, 비료 절감, 환경친화형 재배
 - 국내 시설원예면적 (채소+화훼) 51,829ha에서 수경재배 면적은 채소 2,413ha, 화훼 1,072ha로서 전체가 3,485ha로 급증하고 있는 상태임.
- ▶ 국내 수경재배면적(ha) : ('90)8.2→('96) 274→('00)700 →('06)917→('11) 3,485

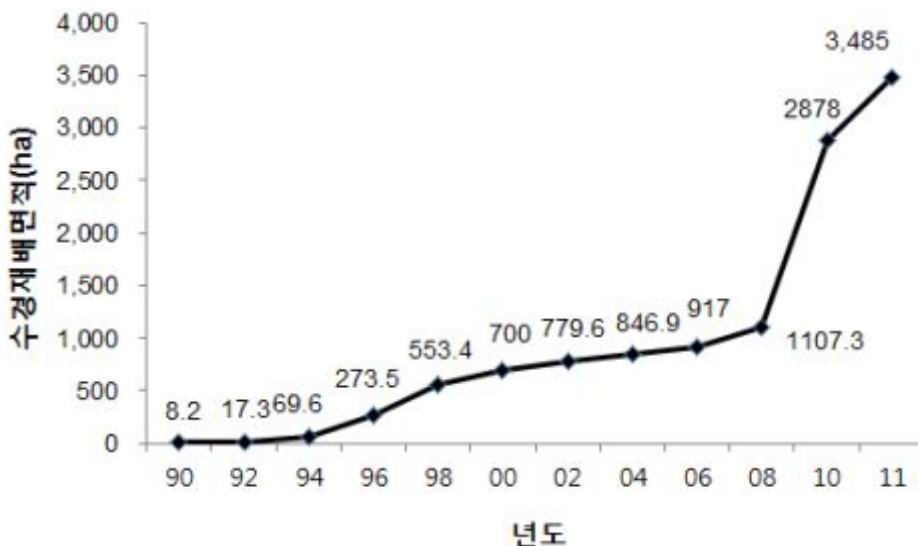


그림 1-1-1. 한국의 수경재배 면적 변화 (MIFFAF, 2012)

- 시설 원예 구성원인 농업 인구의 지속적인 감소와 농업 인구의 고령화는 시설의 현대화와 자동화가 요구됨(그림 1-1-2).

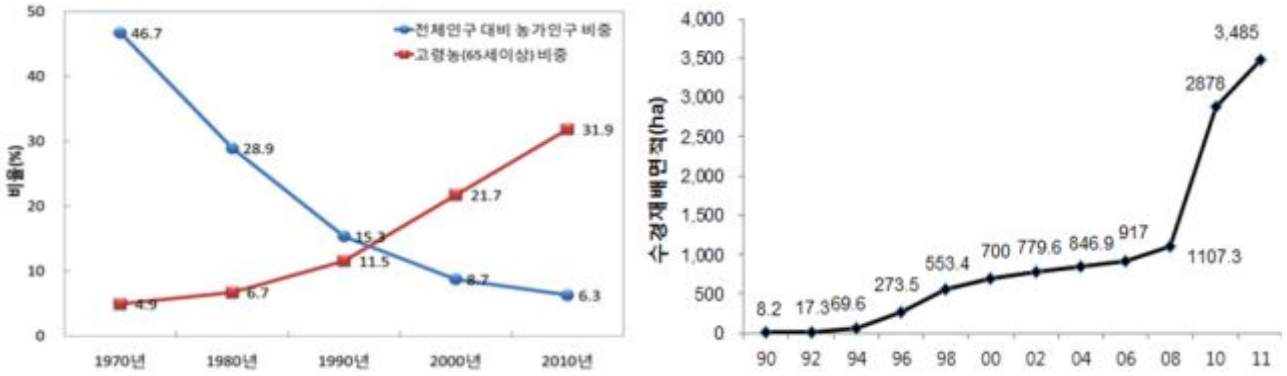


그림 1-1-2. 농가 인구 비중과 고령 인구의 증가 추이

- 국내 시설 원예 면적은 51,829ha('10년)으로 이 중 채소 시설 면적은 48,835ha로 94%를 차지함.
 - 94년 정부의 시설시범단지사업으로 시설원예 면적이 급격히 증가함에 따라 온실 사용연수가 15년 이상된 면적이 80% 이상을 차지(그림 1-1-3)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.
 - 한편 수출 과채류 첨단원예온실은 이미 규모화(2ha 이상)가 진행되고 있어 시설원예 농가 호당 경지 면적은 양극화 현상이 심화되고 있음.

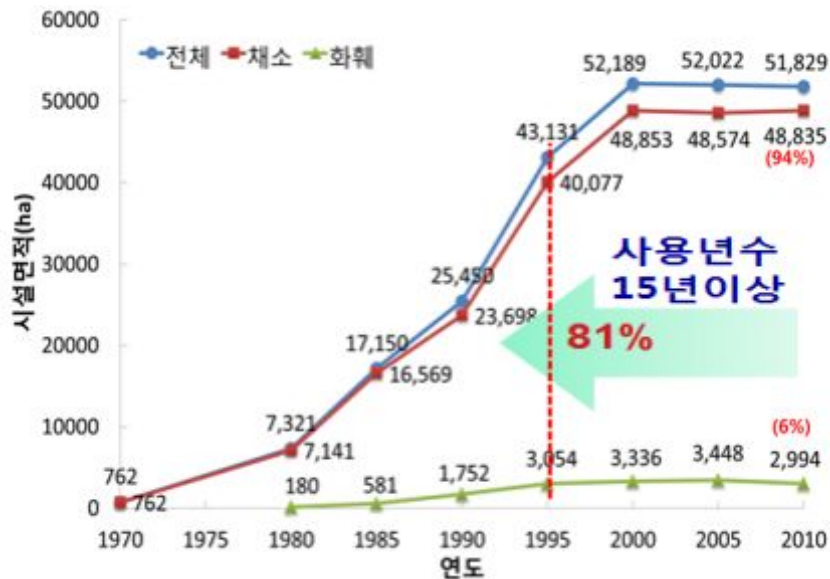


그림 1-1-3. 시설원예 면적의 변화 (MIFFAF,2012)

- 최근 5년간 원예작물의 수출동향을 살펴보면 화훼류는 2008년도부터 평균 87백만불의 수출을 유지하고 있고, 채소는 2008년에 비해 2012년에는 약 76백만불이 증가되었다(그림 1-1-4). 수출되는 주요작물은 채소에서 파프리카, 토마토 등이고, 화훼류는 장미이다. 그중 파프리카 95%, 토마토 80%, 장미 70% 가 수경재배로 작물을 재배하고 있음



그림 1-1-4. 최근 5년간 원예작물 수출동향 (농수산물유통공사, 2013)

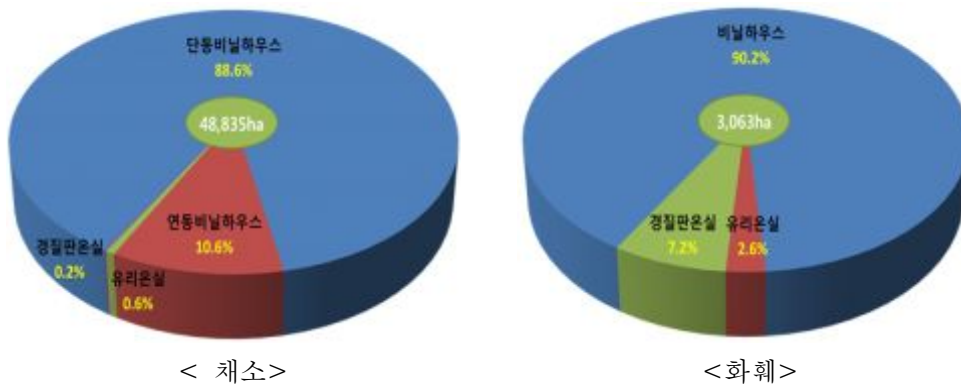


그림 1-1-5. 작물별 온실 유형(MIFFAF, 2012)

- 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

2. 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%(08년, MIFFA)로 사용되고 있음.
- 2011년 시설채소에서 수경재배 면적 중 배지 재배 면적에서 코코넛 코이어를 비롯한 유기배지가 46%이며, 화훼작물에서는 56%를 차지하고 있음.

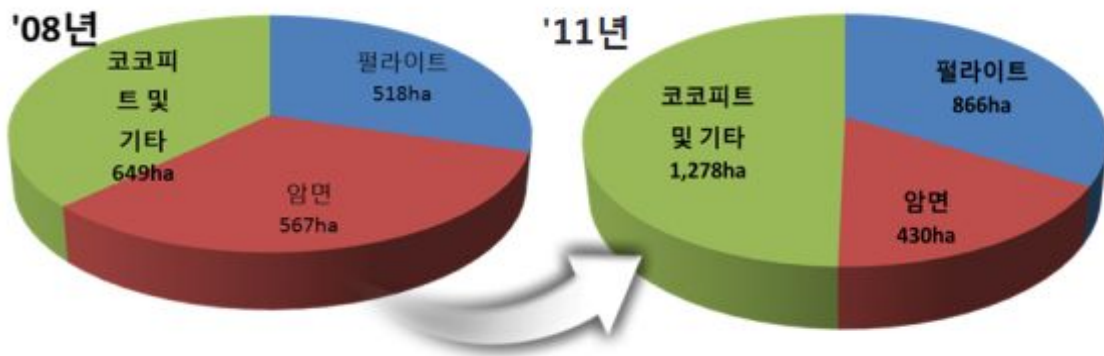


그림 1-1-6. 수경재배용 배지 이용 변화 (MAFRA, 2012)

- 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 측정기 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.

[표 1-1-1] 배지별 주요 재배 작물

배지 종류	주요 재배 작물
펄라이트 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

3. 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, 일사량별, 식물 개개의 흡수 편차 등을 고려하여 부족할 수 있는 양수분의 양을 방지하기 위해 급액량을 많게 유지 하는 약 20~50% 배액이 되도록 관리하는 현실임.
- 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 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 1-1-7. 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.
- 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 기술 체계화가 필요함.







4. 무배액 수경재배 급액관리 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.
- 배지의 수분 함량을 측정하는 방법으로는 크게 중량 수분함량과 용적 수분함량으로 나눌 수 있다(표 1-1-2). 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(표 1-1-3).
- 배지경 재배에 급배액 관리 방법들은 궁극적으로 배지의 적정함수량을 유지하려고 하나, 이를 최적 수준으로 조절하지 못하고 있는 실정하기에, 가장 바람직한 것은 배지 내 함수량에 따라 본 연구에서 개발하고자 하는 체계의 개발이 필요함.

표 1-1-2. 토양수분 측정방법 및 특징

구분		측정방법	특징	
중량 수분 함량	건토중량법	- 토양시료를 채취하여 무게를 정량 후에 104℃ 이상의 온도에서 48시간 이상 건조시킨 후에 무게를 정량하여 중량함량 %로 나타낸 방식	-정확한 토양수분 측정 가능 -시간소모 및 노력이 많이 듦	
	Core법	- 일정한 용적의 코어를 이용해 일정 체적 내에 존재하는 토양수분 함량 측정		
토양 수분 함량 측정	용량 수분 함량	TDR	- 토양수분내의 정전용량을 측정하여 수분을 도출하는 방식 - 토양 내에 고주파를 송출하여 50(Ω) 임피던스 변화에 따라 (토양내의 수분양이 많나 적나) <u>반사파의 시간차를 데이터로 변환한 방식</u>	-토양층의 손상을 최소화 -여러 지점의 토양수분을 동시에 연속적으로 측정 가능
		FDR	- 토양수분내의 정전용량을 측정하여 수분을 도출하는 방식 - 토양 내에 고주파를 송출하여 50(Ω) 임피던스 변화에 따라 (토양내의 수분양이 많나 적나) <u>반사파의 세기를 전압으로 변환하여 데이터로 변환하는 방식</u>	
	센서 측정			
토양 수분 장력 측정	장력계	- 다공질 컵을 폐쇄관에 연결하여 다공질 컵에 걸리는 부압, 즉 수분장력을 측정	-빠른 시간에 함수량 측정 곤란	



표 1-1-3. 토양함수량 계측에서 TDR /FDR 센서 방식에 따른 비교

측정 형태	TDR (Tmie Domain Reflectometry)			FDR (Frequency Domain Reflectometry)		
	탐침형태 (rod)	단면측정형태 (profile)	단면측정형태 (profile)	탐침형태 (rod)	단면측정형태 (profile)	단면측정형태 (profile)
측정 방법	센서를 토양내로 삽입하여 측정	튜브를 토양내에 묻고 깊이별로 측정	튜브를 토양내에 묻고 깊이별로 측정	센서를 토양내로 삽입하여 측정	튜브를 토양내에 묻고 깊이별로 측정	튜브를 토양내에 묻고 깊이별로 측정
제품	MiniTrase (미국)	Trime IT (독일)	Trime (독일)	Wet-2 (영국)	WT1000A (한국)	EasyAG (오스트레일리아)
사진						
가격	1620만원	150만원	370만원	180만원	30~50만원	350만원

- 현재 수경재배 농가에서 사용하는 배지 함수량 측정기의 경우 암면을 제조 판매하는 (주)그로단에서 암면배지 함수량 적합하게 개발된 것으로 펄라이트를 비롯한 환경친화형 유기배지인 코코넛코이어 등과 같은 배지에는 정확성이 떨어지며, 판매 가격이 고가인

점(250~300만원), 배지 내 센서 위치, 깊이 등 조건에 따른 측정값의 변화 등은 재배자가 배지의 수분 측정기를 구입 사용하는 데, 어려움을 주고 있음.

표 1-1-4. 수경재배에서 사용되는 배지 수분 센서의 특징

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

5. 배지 내 수분함량 측정에서 기존센서 사용상의 문제점

- **기준점이 없다:** 토양수분의 경우는 용적수분함량으로 기준점을 정하여 쓰고 있으나 유기배지는 코코피트 블록을 물로 포화했을 때를 100%, 수분이 없을 때를 0%로 나타냄. 그러나 배지의 무게에서 보면 물이 50% 빠져나가면 수분이 50%가 되나 식물이 존재의 뿌리에서 살펴보면 실제 수분은 배지 밑에 많이 고여 있어 배지의 수분 함량은 50%보다 낮을 것임. 더욱이 밀도가 낮은 배지에서는 이런 현상이 더 심할 것이고, 밀도가 높은 배지는 조금 덜 할 것이므로, 일반적으로 사용하는 방법인 무게로 수분 함량 calibration을 잡아 측정할 경우 배지 수분함량은 오차가 커진다.
- **현행 수분계측기 구조성의 개선:** 유기 배지 수분함량을 측정할 때 암면 배지 수분함량 측정용 Grodan 센서를 사용할 경우 식물이 없을 상태에서는 계측 수분 함량 값의 차이가 크지 않으나, 작물이 식재된 상태에서는 배지 밀도 차이와, 배지 특성상 물이 한 곳으로 몰리는 현상 등에 의해 측정값의 정밀도가 떨어짐. 따라서, 배지 특성을 고려한 유기 배지 전용 센서의 개발 및 측정값의 정밀도와 정확도를 높일 수 있는 센서 구조의 개선이 시급함. 예를 들어 센서간의 넓이를 넓혔을 경우 그에 임피던스 아날라이저를 이용한 실제 사용하는 수분범위의 최적화된 주파수를 찾아야 하며 그 주파수를 이용해 회로구성을 다시하여 코코피트 수분함량 값을 추출해야 함. 또한 배지의 특성에 맞게 센서봉의 길

이 위치등을 설계하여 회로구성에 보완하도록 함.

- **사용상의 편리성**(디스플레이 보완): 기존의 시판하는 수분 센서를 수경재배 농가에서 사용할 경우 측정 값에 대한 정확한 정보가 어려움. 측정값에 대해 자료를 찾거나, 전문가에게 문의해야 하며, 특히 컴퓨터에 능숙하지 못한 농가에서는 이런 자료를 취득하기가 더욱 어려워 최적의 데이터를 디스플레이에 표기해야 할 필요성이 대두됨. 이를 위해 센서로 수분함량을 측정을 한 후 버튼 등의 간단한 조작으로 측정 값에 대한 컨설팅 내용이 화면에 나와 현장에서 바로 대처할 수 있어야 함. 그리고 모든 사용 동작과 데이터는 한글로 표기해야 함.
- **보급 가격** : 기존 수분 센서는 주로 연구소, 학교 및 대형 농가 위주로 소량 주문 판매됨에 따라 상대적인 가격이 높게 책정되어 일반 수경재배에서 구매하여 사용하기에 어려움. 이를 위해 유기 배지의 수분 함량 측정에 적합한 센서의 개발과 이를 활용한 재배 기술을 보급함으로써 농가에서 쉽게 활용할 수 있는 대량 생산 체계 가격을 안정화 또는 저렴한 가격의 센서 보급이 필요함. 기존 센서 및 디스플레이는 기존 케이스를 가공해서 쓰는 방식으로 가공시에 가공비용과 인건비, 시간 등으로 대량생산 체계의 한계가 있었음. 제품에 특성에 맞게 금형을 할 경우 비용 및 시간절약으로 대량생산체계가 가능하며 이 경우 **제품 가격의 30~50% 정도의 낮은 가격으로 공급할 수 있음.**

제 2 절 연구개발의 목표 및 내용

1. 연구개발의 최종목표 및 주요내용

- 유기배지에 적합한 농가보급형 FDR 수분센서 개발 및 제품화
- 유기배지의 함수량 측정 및 유지기술 체계화
- FDR 센서를 활용한 파프리카 무배액 급액관리 기술 체계화
- FDR 센서를 활용한 토마토 무배액 급액관리 기술 체계화
- FDR 센서를 활용한 장미 무배액 급액관리 기술 체계화
- 배지 수분함량을 고려한 통합형 급액제어 시스템 개발

2. 과제별 연구개발의 목표 및 내용

연구개발	연구내용
유기배지에 적합한 농가보급형 FDR 수분센서 개발 및 제품화	<ol style="list-style-type: none"> 1. 유기배지 센서 calibration 표준화 공정 2. 유기배지 센서에 적합한 구조 개선 3. 유기배지 센서의 디스플레이 및 소프트웨어 4. 시제품 개발과 경제성 분석
유기배지의 함수량 계측 및 유지기술 체계화	<ol style="list-style-type: none"> 1. 센서를 이용한 위치별 수분함량 측정 2. 센서 간격에 따른 측정값에 따른 변동 구명 3. 급액부위에서의 간격에 따른 적합한 센서 측정위치 구명
FDR 센서를 활용한 파프리카 무배액 급액관리 기술 체계화	<ol style="list-style-type: none"> 1. 무배액 시스템에 적합한 급액체계 구명 2. 무배액 시스템을 위한 급액시간대 조절(가을~겨울재배) 3. 무배액 시스템에 적합한 급액의 전기전도도 구명 4. 시설 과채류(파프리카) 수경재배 농가실증 연구
FDR 센서를 활용한 토마토 무배액 급액관리 기술 체계화	<ol style="list-style-type: none"> 1. 가을~겨울철 재배를 위한 무배액 시스템에 적합한 급액 체계 2. 봄~여름철 재배를 위한 무배액 시스템에 적합한 급액 체계 3. 무배액 시스템에 적합한 급액의 적정 전기전도도 구명 4. 무배액 시스템에 적합한 코이어 배지 조성 성분 구명 5. 시설 과채류(토마토) 수경재배 농가실증 연구
FDR 센서를 활용한 장미 무배액 급액관리 기술 체계화	<ol style="list-style-type: none"> 1. 무배액 시스템 실험 수행의 온실 환경 측정 2. 타이머와 센서를 이용한 급액체계 3. 무배액 시스템에 적합한 근권부 수분함량 제어 4. 무배액 시스템에 적합한 급액체계 구명 5. 무배액 시스템에 적합한 급액의 적정 전기전도도 구명
배지 수분함량을 고려한 통합형 급액제어 시스템 개발	<ol style="list-style-type: none"> 1. 통합형 급액시스템 개발 2. 복합 환경제어기와 연동 제어

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 세계적 수준

1. 국외 수경재배기술

- 전 세계 수경재배 흐름은 1980년을 기점으로 순수수경재배에서 배지를 이용한 수경재배 (rockwool, 펄라이트 등) 방식으로 바뀌면서 주로 암면(rockwool)의 이용이 주류를 이루고, 스페인, 그리스, 이스라엘, 한국 등에서는 펄라이트 이용을 증가시켜 왔다. 그러나 전 세계적인 흐름은 환경친화형 배지로의 전환 필요성이 증대되면서 새로운 배지에 대한 연구가 계속되어 왔다. 그동안 무기배지(암면, 펄라이트 등)에서 나타난 사용 전 후 및 폐기 시 환경오염 증대문제로 유기배지를 이용한 수경재배 가능성이 다방면으로 검토되고 있

다.

- 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.

2. 국외 수분센서 시장 및 개발현황

- 센서는 첨단 기술을 요하는 기술집약적 산업의 특징을 가지고 있어 미국, 독일, 일본 등 선진국들의 생산 비중이 높게 나타나고 있다. 전 세계 센서 생산은 2004년 기준으로 전년 대비 5.7% 증가한 297억 6천만불을 기록했다. 전 세계 센서 생산은 2002년 이후 지속적인 생산 증가 추세를 보이고 있다. 2002년에는 전년대비 4.9% 증가한 266억 7천만불, 2003년 5.6% 증가한 281억 6천만불, 2004년에도 5.7%의 성장을 보이며 297억 6천만불을 기록했다(표 2-1-1).
- 세계 최대 센서 생산국은 미국으로 2004년 기준, 전체 생산의 31.8%를 차지하고 있으며 다음은 일본이 18.6%, 독일 12.2% 순으로 이들 3개국들이 전 세계 생산의 62.6%를 차지하고 있다. 그 외에는 영국, 프랑스, 중국 순이며, 한국은 7위를 보이고 있다.
- 국가별로는 미국이 2002년에 84억 6천만불에서 2003년 89억 1천만불로 5.3% 증가를 보였으며 2004년에는 전년대비 6.2% 증가한 94억 6천만불 규모로 성장해 국가별로 가장 큰 생산규모를 나타냈다. 2위인 일본은 2002년 47억 9천만불에서 2003년 51억 7천만불로 8.0% 증가했고 2004년에는 전년대비 6.8% 증가한 55억 3천만불 규모의 생산을 기록했다.

표 2-1-1. 국가별 세계 센서 생산 추이

(단위 : 백만불, %)

	2002		2003		2004	
	금액	증감율	금액	증감율	금액	증감율
전세계	26,670	4.9	28,164	5.6	29,761	5.7
미국	8,465	4.8	8,912	5.3	9,465	6.2
독일	3,246	5.6	3,434	5.7	3,637	5.9
영국	1,775	4.5	1,878	5.8	1,862	-0.9
중국	763	2.3	823	7.9	879	6.8
일본	4,793	8.4	5,177	8.1	5,530	8.6

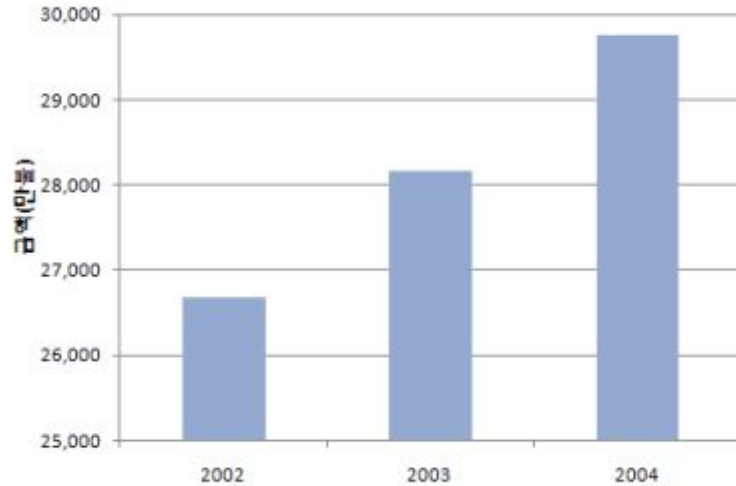


그림 2-1-1. 세계 센서 생산 추이

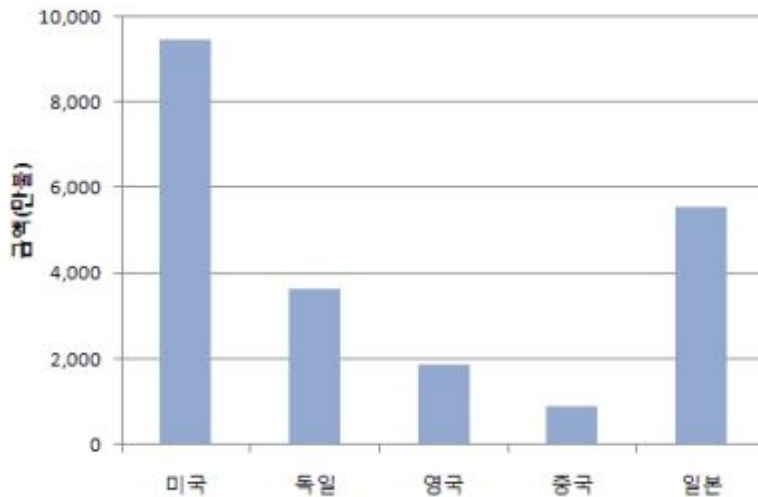


그림 2-1-2. 국가별 센서 생산 추이

- 미국의 Veris사에서는 분광 분석 기술을 이용하여 수분뿐만 아니라 여러 가지 근권 환경을 한 번에 측정하는 센서를 상용화 시켜 보급하고 있다. 아직 보급량은 상당히 미흡하지만 최근의 정밀 농업 등에 이용 가능성은 상당히 높다고 판단된다. 개발한 측정 센서는 트랙터 부착형으로 측정항목은 전탄소, 전질소, 수분, pH 등이고, 측정 속도는 6km/h, 측정 깊이는 약 7.5cm이다. 또한 사용 파장대역은 350nm~1050nm, 900nm~1700nm이다.
- 일본에서는 일본 동경농공대학에서 관련 연구가 활발히 수행되고 있으며, 역시 분광 분석 기술을 이용한 측정 센서를 개발하여 보급시키려 노력하고 있다. 측정항목은 수분, EC, pH, 질산태질소, 유기물함량 등이고, 시속 1~4km/h, 측정 깊이는 15~30cm이다. 사용 파장대역은 400~1700nm이다. 국내에서는 분광 분석 기술을 이용한 수분, EC, 유기물 함량 측정 센서 등에 대한 연구를 진행하고 있으나 아직 실용화 단계에는 이르지 못하고 있다.

- 네덜란드의 Grodan사에서 개발된 WCM은 낮은 배액률을 유지하여 적은 물, 양액, 에너지의 공급을 가능하게 하고, 배지의 상황을 파악하고 있는 것이 영양과 생식의 최적균형을 유지하는데 도움이 된다. 급액개시시간과 종료시간을 제어하여 흐린 날의 제어에 도움이 되는데 급액이 시작되면 뿌리주변의 전기전도도는 낮아지고 수분함량은 올라가서 식물의 영양생장을 촉진하는 원리로, 그로단사의 수분연속측정기는 수분함량의 변화를 알 수 있게 하고, 휴대용 수분측정기는 배지의 EC, WC를 균일하게 하여 정밀한 제어가 가능하게 한다고 알려져 있다.
- 정보통신기기를 개발하는 Routrek Networks(가나가와현 가와사키시)는 센서를 이용한 시스템 「제로·어그리」를 개발했다고 발표했다. 양액토경재배는 관개수에 비료를 녹여 작물의 뿌리부근에 물과 비료를 필요한 양만 공급하는 재배방법으로 시스템에서는 각종 센서가 보내는 정보를 기초로, 최적의 양이나 빈도를 조절한다. 이를 도입한 경작지에서는 센서가 10분 간격으로 일사량, 수분량, EC(염류집적농도)값 등을 찾아내 측정치를 데이터베이스로 송신한다. 그 데이터와 동 농장이 작성한 「관리지표」를 대조하여 조절한다. 또한 「비료의 이용 효율이 높아져 배액(排液)도 줄일 수 있다」라며 환경부하를 경감할 수 있을 것으로 예상한다.

<해외 수경재배용 FDR센서 개발 기업>

회사명	나라	제품명	기능	출처
Delta-T Devices	영국	WET-2 sensor	배지용(코이어, 피트) 수분함량, EC, 온도	www.delta-t.co.uk
Grodan	네덜란드	wcm-control	암면용, 수분함량, EC, 온도	www.grodan.com
phyto-sensor	몰도바공화국	SMS-5M	암면용, 수분함량, EC, 온도	www.phyto-sensor.com
Decagon Devices	미국	MAS-1 4-20	암면용, 수분함량, EC, 온도	www.decagon.com
Mini Trase	미국	5TE	배지용, 수분함량, EC, 온도	

제 2 절 국내 수준

1. 국내 수경재배기술

- 최근 국내 수경재배용 배지는 암면 배지 중심에서 가격, 재활용 등을 고려한 코코넛 코이어와 같은 유기 배지 비중이 급속히 높아지고 있다.
- 고품질 생산물의 다수확은 최적의 재배 환경과 식물의 양수분 관리 기술이 선행되어야하나 식물의 양수분 요구도를 완벽하게 알지 못하기 때문에 일중 시간대별, 일사량별, 식물

개개의 흡수 편차 등을 고려하여 부족할 수 있는 양수분의 양을 방지하기 위해 급액량을 많이 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.
- 암면용 센서의 수입으로 판매 회사와 컨설팅을 병행하여 암면에서의 재배의 양수분 조절 기술을 정립하여 상용화 되었으며, 배지의 함수량 계측기 또한 암면 배지 특성에 맞게 배지 함수량을 정밀 제어가 가능할 수 있게 되었다.
- 암면에서 작물생장별 배지 수분, EC와 관련한 자료를 데이터화시켜 실제시설 재배 농가를 비롯한 수출 선도 국가에서는 이를 활용하는 과학영농을 실현하고 있으며, 이는 재배 관리 기술로 시설 재배 국가에 연구결과 및 연구 인력 등을 파견하여 국제 경쟁력을 높이고 있다.
- 2009년 경남농업기술원에서 실시된 <배액절감형 양액공급 방법이 파프리카 생육과 수량에 미치는 영향> 의 연구 논문에서는 함수율 측정기(WCM, Grodan, Denmark) 를 이용하여 암면배지에서 파프리카를 슬라브당 4주씩 2조로 정식하여 배액절감을 위해 관행(대조구, $100J \cdot cm^{-2}$ -100mL)과 공급 횟수를 2배로 하기 위해 일사량이 $50J \cdot cm^{-2}$ 에 도달했을 때 주당 1회 공급량을 45mL(목표 배액 20% 이하), 40mL(목표 배액 10% 이하), 35mL(목표 배액 5% 이하)로 조절하여 적은 양으로 자주 공급하는 처리구를 두었을 때, 100-100 처리가 241.0mL 26.3%, 50-45 처리가 65.5mL 8.8%, 50-40 처리가 39.2mL 6.0%, 50-35 처리가 26.2mL 4.4%였고 100-100 처리와 50-45 처리가 초장이 길고 분지수가 증가하였으며, 과실크기와 평균과중은 100-100 처리와 50-45 처리가 가장 크고 무거웠다.
- 2012년 전남농업기술원에서 발표된 <수분 센서를 이용한 급액관리로 토마토 당도 향상>의 연구논문에서는 FDR 수분 센서를 사용하여 펄라이트배지에서 토마토 3단 재배시 25, 35, 45%로 근권함수율을 제어하였을 때, 1화방 과비대기 부터 배지의 함량이 25%이하로 내려가면 주당 100ml를 급액하면 배지 내 수분함량이 35%내외로 관리되어 토마토 당도가 6.5 °Brix로 관행대비 1.3 높고 경도는 1.2ØKgf·m로 관행보다 0.28높고, 수량은 11,296kg/10a로 관행대비 1,834kg/10a 적어진다고 하였다.
- 2013년 경남농업기술원에서 발표된 <배액제로 센서를 이용한 적색계 토마토 단기재배 배액제로형 수경재배 기술>의 연구논문에서는 적색계 토마토의 단기수경재배시 일사센서와 배액제로 센서를 이용하여 소량다회 공급법 (표준 배액률보다 1일 공급횟수는 4배, 1회 공급량은 1/4배로 설정)으로 배액량을 최소화하여 재배하면 수량감소 없이 10a당 배액량은 86.6m³가 감소되었고, 양액비료는 216.5kg을 절감할 수 있다고 보고되었다.

2. 국내 수분센서 시장 및 개발현황

- 국내 센서 내수 시장은 2000년을 피크로 감소하다가 다시 성장세를 나타내고 있다. 2000년 5,036억원의 센서시장 규모가 2004년에는 8,688억원으로 성장했다. 2004년 수치는 전년 6,428억원 대비 35.2%의 높은 증가를 보였다. 2004년도 국내 센서 시장규모는 세계시장

279억 6백만 불의 3.1%에 수준이다. 국내 센서 생산은 2000년 3,549억 규모였으며 2002년부터 증가세로 돌아서 2003년에는 전년대비 21.2% 증가한 4,230억원, 2004년에는 5,313억원으로 전년대비 25.6%의 비교적 높은 생산 증가율을 보였다(그림 2-2-1).

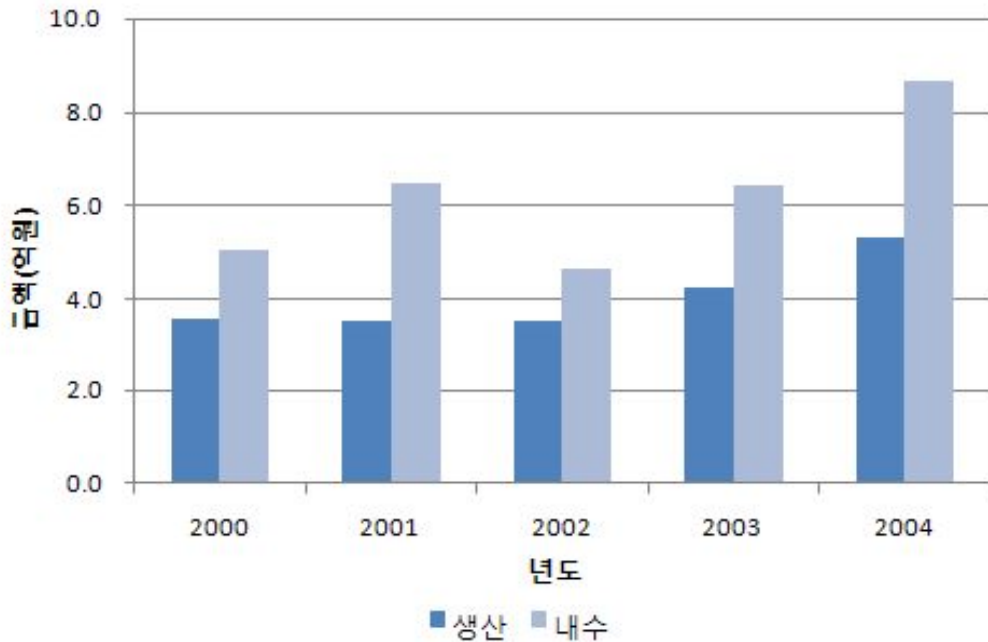


그림 2-2-1. 국내 생산 내수 추이

- 센서의 수입은 2000년을 고비로 감소하다가 2003년에 수입이 회복되었을 뿐만 아니라 크게 신장되었다. 2000년에 1억 7천만불로 전년대비 18.9% 증가하였다. 2000년에는 세계 경기와 국내 경기가 피크를 이룰 때이어서 센서의 수입이 많이 증가하였다. 그러나 세계 경기가 심각한 후퇴국면에 접어든 2001년에는 센서 수입이 1억4천만 불로 전년대비 16.8% 감소하였고, 2002년에도 1억 4천만불로 1.0% 감소하였다. 2년간 수입 감소세가 지속되다가, 2003년에 와서는 2억 5천만불로 전년대비 무려 79.9%나 급증하였다(표 2-2-1).

표 2-2-1. 국내 센서 수입 추이(단위 : 만불, %)

	2001		2002		2003	
		증감율		증감율		증감율
센서수입	1,450	-16.8	1,436	-1.0	2,583	79.9

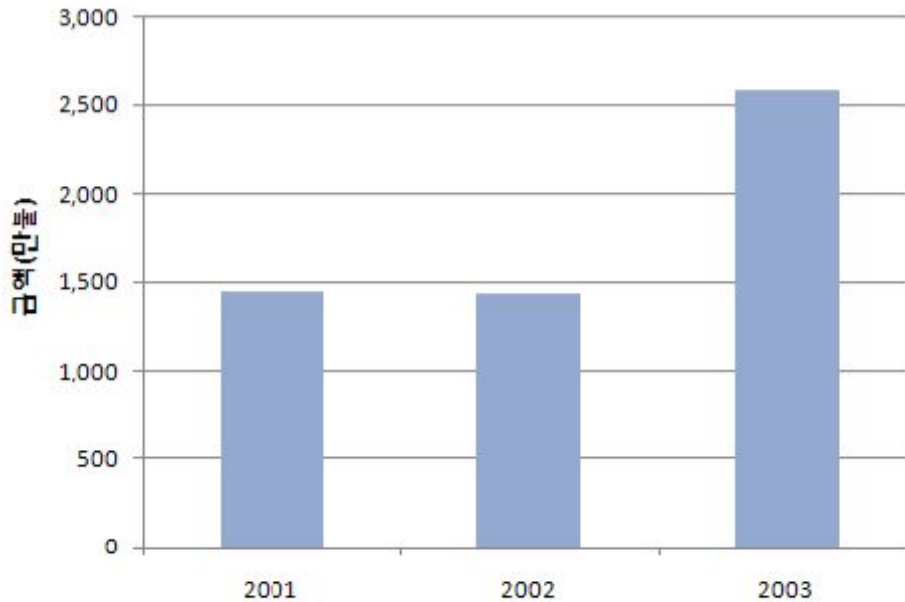


그림 2-2-2. 국내 센서 수입 추이

<국내 수경재배용 FDR센서 개발 기업>

회사명	나라	제품명	기능	출처
미래센서	한국	CoCo-100	배지용(코이어, 피트) 수분함량, EC, 온도	http://www.rfsensor.com/

제 3 절 국내·외 시장동향

21세기 농업은 상상을 초월할 정도로 변모할 것으로 전망되고 있다. 특히 건강, 환경, 정보화 등을 중시하는 국내외 농업여건의 변화, 농업기술의 발전 등으로 인하여 이들 요소가 농업경영, 생산과정, 농산물시장 등에 영향을 주게 되며, 또한 농업의 생산양식을 결정하는 농업의 패러다임이 달라지게 될 것이다. 지금도 정밀농업(precision agriculture), 정보농업(intelligence agriculture), 디지털농업(digital agriculture) 등의 접근을 시도하는 것이 세계적인 추세이다. 위와 같은 이름들을 사용하고 있지만, 생산, 유통 소비 단계에서 발생하는 정보를 활용한다는 것

으로 유사한 개념으로 볼 수 있다. 또한 위와 같은 농업을 구현하기 위해서 필요한 요소기술들이 다양하게 필요하다. 그 요소기술 기술 중에 하나로 토양 정보를 파악할 수 있는 토양 센서(수분 포함)이다. 그렇기 때문에 농업 분야에서 사용되는 센서의 수요는 점차적으로 증가할 것으로 예상된다.

표 2-3-1. 연도별 국내외 센서 판매 및 매출 시장동향 (단위 : 백만원)

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
미래센서 (대한민국) 가격:70만원	판매:50 매출:35	판매:100 매출:70	판매:150 매출:105	판매:250 매출:175	판매:500 매출:350	판매:700 매출:490	판매:800 매출:560
DECAGON (미국) 가격:150만원	판매:100 매출:150	판매:150 매출:225	판매:150 매출:225	판매:200 매출:300	판매:150 매출:225	판매:100 매출:150	판매:100 매출:150
Cambel (미국) 가격:200만원	판매:500 매출:1,000	판매:700 매출:1,400	판매:500 매출:1,000	판매:500 출액:1,000	판매:500 출액:1,000	판매:700 출액:1,400	판매:1000 출액:2,000
Delta-T (영국) 가격:300만원	판매:200 매출:600	판매:300 매출:900	판매:300 매출:900	판매:200 매출:600	판매:300 매출:900	판매:200 매출:600	판매:200 매출:600
EasyAG (오스트레일리아) 가격:200만원	판매:400 매출:800	판매:500 매출:1,000	판매:500 매출:1,000	판매:500 매출:1,000	판매:300 매출:600	판매:300 매출:600	판매:200 매출:400
Trime IT (독일) 가격:300만원	판매:100 매출:300	판매:100 매출:300	판매:150 매출:450	판매:150 매출:450	판매:100 매출:300	판매:100 매출:300	판매:100 매출:300
Gorodan (네덜란드) 가격:250만원	판매:40 매출:100	판매:100 매출:250	판매:150 매출:375	판매:200 매출:500	판매:300 매출:750	판매:300 매출:750	판매:300 매출:750
합계	2,985	4,145	4,055	4,025	4,125	4,290	4,760

국내에서 판매되는 대표적인 센서들의 표를 보면 시장은 꾸준히 커지고 있음을 보여주고 있다. Cambel 사의 경우는 4대강사업으로 인해 수요가 급격하게 늘어났을 뿐 대부분의 센서들은 연구용으로 꾸준히 판매되고 있다. 이중에서 Grodan, 미래센서의 경우는 시설농사를 하는 농민이 필요로하는 EC 측정기능을 갖춘 센서로 시장점유율이 늘어나고 있다. 이는 농민들이 정밀농업의 관심을 가진 결과라 할 수 있겠다. 현재 우리나라의 이상기후로 인해 안정적인 작물수확이 힘들어지고 있는 상황이며 시설농가는 더욱 늘어날 것으로 보인다. 그로인해 센서를 필요로 하는 시장은 더욱 늘어날 것으로 예상된다.

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

제 1 절

유기배지에 적합한 농가보급형 FDR 수분센서 개발 및 제품화

1. 유기배지 센서 calibration 표준화 공정

토양수분의 경우는 용적수분 함량으로 기준점을 정하여 쓰고 있으나 유기배지는 코코피트 블록을 물로 포화했을 때를 100%, 수분이 없을 때를 0%로 나타낸다. 그러나 배지의 무게에서 보면 물이 50% 빠져나가면 수분은 50%가 되나 식물이 존재하는 뿌리에서 살펴보면 실제 수분은 배지 밑에 수분이 많이 고여 있어 배지의 수분 함량은 50% 보다 낮을 것이다.

특히 밀도가 낮은 배지에서는 이런 현상이 더 심할 것이고, 밀도가 높은 배지는 조금 덜 할 것이므로, 일반적으로 사용하는 방법인 무게로 수분 함량 calibration을 잡아 측정할 경우 배지 수분함량은 오차가 커지므로 배지 특성을 고려한 수분 센서의 calibration 표준화가 필요하다.

유기배지는 원산지, 제조사 및 제조 과정 중 기후 등의 환경 조건 등에 따라 밀도와 재질에 영향을 줄 수 있다. 유기배지의 수분함량 기준점을 잡는 데에 있어 기존의 무게측정 방식으로 하면 배지의 밀도에 따라 수분 분포도가 달라지고 수분 분포는 밀도가 낮을수록 밑으로 수분이 많이 분포하였다. 이를 해결하기 위해 센서의 기준점을 단위면적당 수분량으로 정하고, 실험의 오차를 줄이기 위해 토양이나 배지 수분 센서용 스탠다드 칼리브레이션 물질로 사용되는 glass beads(spherical glass beads made of soda lime silicate glass, Trime-IMKO, Germany)를 사용하여 포수 시의 수분 함량을 44.8%, 물 포수시 수분 함량을 100%로 한 기준점을 잡았다.



그림 3-1-1. 수분 센서 calibration을 위한 glass bead

2. 유기배지 센서에 적합한 구조 개선

기존의 토양 수분센서는 토양용으로 제작 되었으나, 유기물 배지에는 유기배지의 특성상 공극의 차이 밀도 유전율이 많이 차이가 나므로, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 여러 가지 실험을 해 본 결과 주파수 재질 여러 가지 전자회로 방식과 구조물을 바꾸어서 센서의 분석 값을 신뢰할 수 있는 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다.

가. 센서 길이 변경

토양수분센서 봉의 길이는 115mm로 식물의 뿌리 근처에 수분을 측정하기 위한 길이이며,

표토~115mm의 센서 봉과 센서 봉 사이의 평균 수분 측정 양을 측정하여 디스플레이 한다. 유기배지는 보통 75~80mm 이며 근권부에 가장 적합한 센서봉 길이를 65mm를 제작하였으며 유기배지 블록이 100mm인 경우는 90mm 센서봉을 사용하였음.

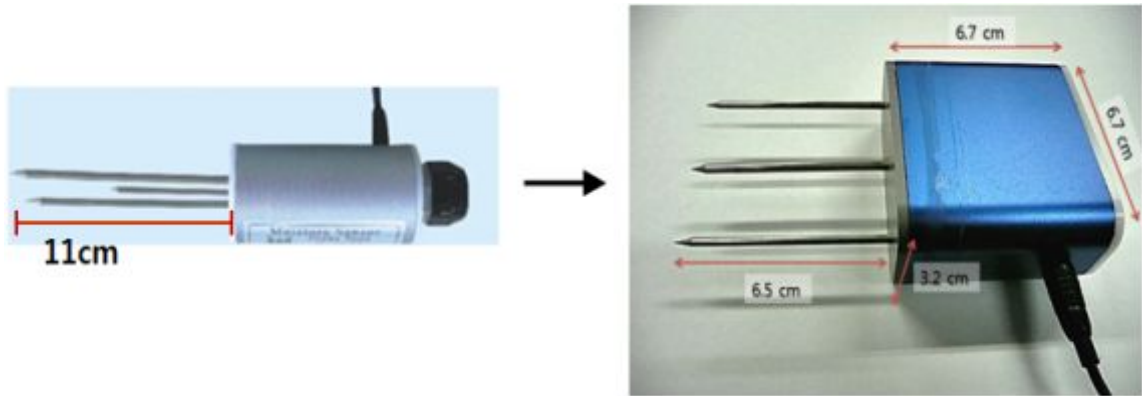


그림 3-1-2. 배지 용도에 적합한 센서 길이 구조 변경

나. 주파수 변경

토양 수분센서는 수분 50MHz, EC 1MHz 2주파를 사용하여 측정하며 온도센서로 EC를 보정하는 방식으로써, 토양은 일반적으로 밀도가 일정하고 수분의 유동적 변화가 느리고 임의적으로 토양을 오염시키기 전에는 일반적인 토양 내 EC량은 매우 낮다. 그러나 유기배지는 재배하는 농민이 임의적으로 EC의 용액을 조절하고 수분의 양도 유기배지를 포화상태로 조절하는 것이 가능하므로, 센서의 구조, 주파수 등의 여러 가지 방식을 구현해야만 만족할 만한 센서가 만들어진다.

유기배지용 센서 90mm는 고주파 70MHz로 수분을 측정, 저주파 대역인 100KHz~1MHz는 EC를 측정한다. 센서 65mm는 고주파 90MHz로 수분을 측정하고 EC측정은 동일한 저주파 대역을 사용한다. 이와 같이, 센서 길이별 주파수의 차이점은, 고주파가 수분을 통과할 때 수분 내 정전용량에 의해 임피던스 변화 값이 포화되어 위상이 찌그러지면 위상의 임피던스 변화가 커지며, 예측할 수 없는 측정 값을 얻게 된다. 센서 봉과 주파수의 관계식은 이렇하다.

$$x = \frac{300,000,000m/s(\text{빛의 속도})}{f(\text{사용 주파수})} \times \frac{1}{4} (4\text{분의 } 1\text{과장}) \times 0.67(\text{케이블 단축율})$$

이러한 공식에 의하여 센서 봉의 길이를 산출할 수 있으며, 케이블의 임피던스는 50Ω을 사용해야 한다.

EC의 측정은 저주파인 100KHz~1MHz를 사용하여 측정한다. 낮은 저주파를 사용하는 이유는 유기물 내의 Cx(정전용량), Rx(저항)을 측정하기 위한 주파수 대역으로 적합하기 때문이다.

즉, 저주파가 좋은 이유는 다음과 같다. 유기배지 내의 양액(염류)을 조절하는 과정에서 양액의 농도를 높이면, EC의 농도가 증가하여 C_x 의 값은 증가하고 R_x 의 값은 감소한다. 반대로 EC의 농도가 감소하면 C_x 의 값은 작아지고 R_x 의 값은 높아진다. 이러한 결과 값에 의하여 다양한 주파수가 필요하다. 예를 들어 C_x 값이 낮으면 높은 주파수, C_x 값이 높으면 낮은 주파수로 측정하여야 하고, R_x 값은 저항이 낮으면 낮은 주파수, R_x 가 높으면 높은 주파수로 측정하여야 정확한 (R_x) (C_x) 미지의 값을 얻을 수 있으므로 유기배지용 센서를 만들 수 있다.

다. 센서 간격 변경

센서 봉과 봉 사이의 수분 EC를 측정하므로, 좁은 간격을 측정할 경우 측정 시 센서를 대상물에 삽입할 때 가해지는 압력에 의하여 밀도의 변화가 온다. 이러한 문제를 최소화하기 위하여 많은 양의 유기배지를 측정함으로써 오차를 최소화 하였으며 밀도 변화도 적어진다. 기존 토양수분센서의 경우는 25mm에서 유기배지용 수분센서는 50mm로 변경하였으며 이는 실험치와 제품의 크기, 모양 등을 고려하였다.

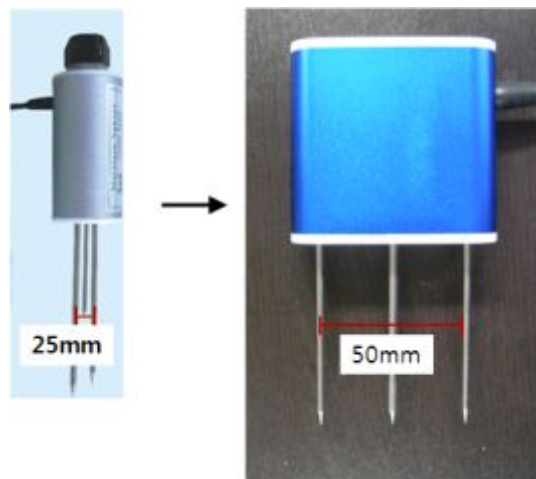


그림 3-1-3. 배지 용도에 적합한 센서 폭 구조 변경

라. 측정시간 변경

센서를 삽입 후 6초 후에 측정치를 표시하도록 하였다. 이러한 이유는 유기배지의 밀도가 안정되는 시간과 EC센서의 온도보정을 위한 온도센서가 안정화 되는 시간을 감안하여 측정 값을 6초 후에 표현하였으며, 기존의 토양수분 센서는 2주파를 한 번씩 측정하여 측정값을 표현하였으나 유기배지 센서는 각각 5번을 측정하여 최소값과 최대값은 버리고 중간 값 3개의 데이터의 평균값을 측정치로 표현하였으므로 안정된 sensing 값을 얻을 수 있었다.

마. 센서 구조물

가장 문제가 되었던 외부·내부 EMI(전자파)와 용액의 EC문제가 있었다. 문제를 해결하기 위하여 EMI는 몸체 부분을 AL다이캐스팅 하여 외부와 내부로부터의 전자파를 차단하였으며 토

양수분의 기존의 사용 주파수를 2주파를 사용하였으나, 유기배지 센서는 다주파를 사용하므로 유기배지의 수분 EC를 완벽히 센싱할 수 있었다.

내부	몸통	상면	하면	완성품
				
<p>에폭시양면 PCB에 전자부품을 장착시켰으며, 소형화 및 안정성을 위하여 SMD 부품을 장착하였다. 최대한 GND(어스)를 넓게 활용하여 자체 EMI(전자기파) 외부로 방출을 억제한 구조이다.</p>	<p>알루미늄 재질로써 가볍고 구리와 동일한 전자파 차단 효과를 가지며, 착색을 하면 다양한 색으로 변화하여 디자인 구성이 우수하다.</p>	<p>아세탈을 가공하여 몸통 부품의 윗부분에 장착되며, EMI(전자기파) 방출 및 외부로부터의 EMI(전자기파)의 유입을 차단하기 위해 동판을 밀착하여 접착한 구조이다.</p>	<p>아세탈과 에폭시 기판을 밀착시킨 구조이며 센서봉 지지 및 센서봉에 용접을 하기 쉬운 구조로 구성되어있다.</p> <p>PCB 동판 기판에 금도금을 하여 접착성 저항의 감소, 고주파 유도에 적합한 구조이다.</p>	<p>기구물을 조립한 구조이며, 무게 및 안정성 내구성을 감안하여 설계된 구조이다.</p> <p>최종적으로 외부 충격에 의한 내부 구조물 파손을 막기 위해 에폭시를 내부에 부어 밀봉시켜 완전 방수를 실현하였다.</p>

그림 3-1-4. 개선된 센서 구조물의 주요 내용

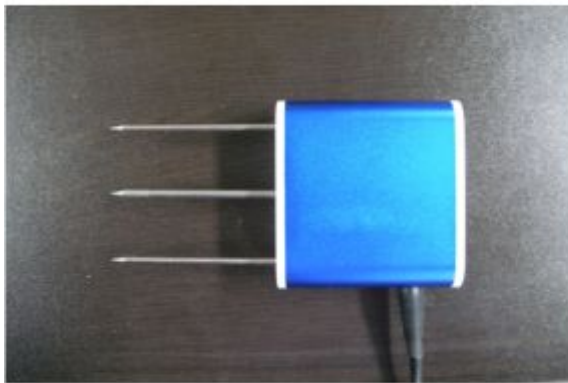
바. 센서 구동 방식 변경

유기배지용 센서 90mm는 70MHz로 수분 측정 EC는 100KHz~1MHz 여러 주파수 중 EC용액이 낮을 경우 낮은 주파수, EC 양이 적을 경우 높은 주파수에 의해서 측정한다. 65mm는 90MHz로 EC는 동일하다. 이를 모두 만족시키기 위해서 PLL을 이용한 다주파 방식을 이용하여 넓은 범위의 EC를 측정하도록 하였다.

사. 센서 넓이 변경

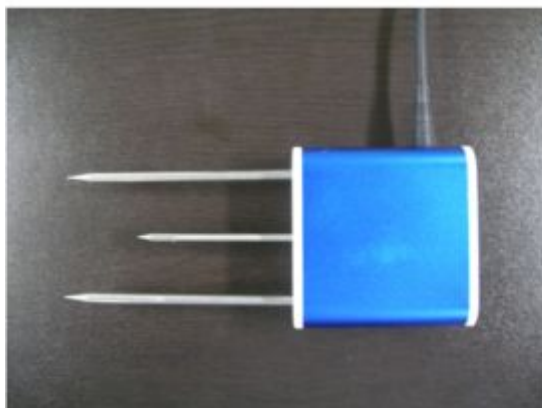
유기배지의 수분 측정시 센서의 단면 넓이가 너무 좁으면, 측정시 센서를 배지에 삽입할 때 가해지는 압력에 의해 밀도의 변화가 온다. 이러한 문제를 최소화하기 위해 유기 배지 양을 달

리하여 실험을 수행한 결과 가로 68mm, 세로 32mm의 크기가 적합한 것으로 나타나 개발 센서의 봉 부분을 개선하였다(그림 3-1-5).



센서봉 길이 : 65mm
수분 주파수 : 70MHZ
EC 주파수 : 100KHZ~1MHZ
수분 함유율 : 99.9%
EC 최대 측정치 : 10m/s
재질 : AL다이캐스팅
색상 : 청색

그림 3-1-5. 개발된 유기 배지용 수분 센서 (길이 65mm)



센서봉 길이 : 90mm
수분 주파수 : 90MHZ
EC 주파수 : 100KHZ~1MHZ
수분 함유율 : 99.9%
EC 최대 측정치 : 10m/s
재질 : AL다이캐스팅
색상 : 청색

그림 3-1-6. 개발된 유기 배지용 수분 센서 (길이 90mm)

3. 유기배지 센서의 디스플레이 및 소프트웨어

가. 디스플레이

(1) 외관 및 화면

농민이 쓰는 제품이다 보니 제품의 한글화가 필요하였고 사용자중 고령자가 많다보니 디스플레이 크기도 키웠습니다. 디스플레이는 192*128 그래픽LCD를 사용하였고 드라이어IC는 애플손사의 S1D13305F001A를 사용하였습니다.



그림 3-1-7. CoCo-200, 2012년 제작 - (주) 미래센서

(2) 사용 배터리 개선

기존은 리튬이온 8.4v 1100mA 였으나 이를 리튬폴리 8.4v 1700mA로 교체하였습니다. 교체 이유는 디스플레이가 커짐에 따라 전류 소모도 커지고 기존 배터리의 무게도 무거워 교체하였습니다. 무게는 기존 무게의 1/2이며 충전횟수도 기존 1000회에서 리튬폴리는 2000회로 2배의 성능을 업그레이드 하였습니다. 이로 인해 장시간측정이 가능해 졌으며 내구성도 더 좋아졌습니다.



그림 3-1-8. 기존 배터리, 교체한 배터리 사진

(3) 케이스 양산화

케이스는 양산화를 위하여 금형 제작하였습니다. 경제성을 위하여 최대한 단순한 구조로 금형 하였습니다. 조립 및 A/S가 쉽도록 하였습니다. 케이스재질은 ABS이며 색상은 투톤으로 하여 외관에 신경을 썼습니다.

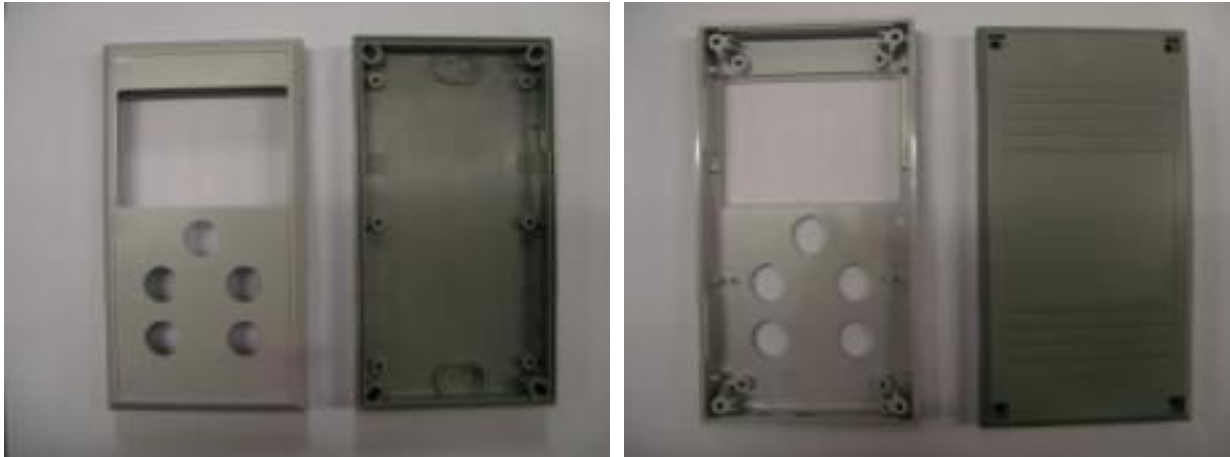


그림 3-1-9. 케이스의 양산화

(4) 스티커 제작

방수처리와 디자인을 위해 스티커를 제작하였습니다. 색상별로 제작을 하였습니다.



그림 3-1-10. 센서 종류별 부착 스티커 제작

(5) 전용케이스 및 포장박스 제작

제품의 실제 판매 및 해외수출을 위해 전용가방과 포장박스를 제작하였습니다.

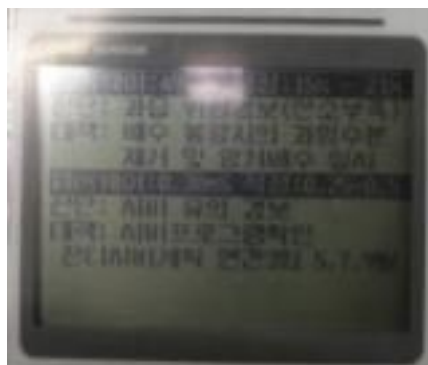


그림 3-1-11. 판매용 전용가방과 포장박스 제작

나. 유기배지센서의 사용 편리성 확보 및 소프트웨어 업그레이드

(1) 경고등 측정 후 컨설팅 프로그램 삽입

센서 사용은 선두농가는 쉽게 가능하나 일반농가는 센서를 쓰면서도 활용을 못하는 경우가 많습니다. 1년차 연구성과를 바탕으로 센서 측정후 측정된 데이터를 디스플레이에서 보여주는 컨설팅 프로그램을 삽입하였습니다. 사용방법은 측정후 ▼버튼을 누르면 컨설팅 측정된 데이터의 컨설팅 화면이 나오도록 하였습니다. 이는 농가에서 별도로 책을 구매하여 공부하여야 하는 어려움이 없도록 작물별, 시기별로 근권의 적정 함수율, 근권 EC를 입력하여 참고가 되도록 하였다.



1. 토마토의 시기별 적정 수분
2. 토마토 시기별 적정 EC,온도
3. 파프리카 적정 수분
4. 파프리카 적정 EC,온도
5. 장미 적정 수분
6. 장미 적정 EC,온도

그림 3-1-12. 유기배지 센서의 컨설팅프로그램 삽입

(2) 데이터 로깅 프로그램

연구자 및 선두농가가 쓸 수 있도록 데이터 로깅기능을 추가하였습니다. 데이터저장량은

10,000개이며 저장 시간은 1분부터 99분까지 사용자가 선택할 수 있도록 하였습니다. 전원보호를 위해 저장시에만 화면이 켜지도록 설계하였습니다.

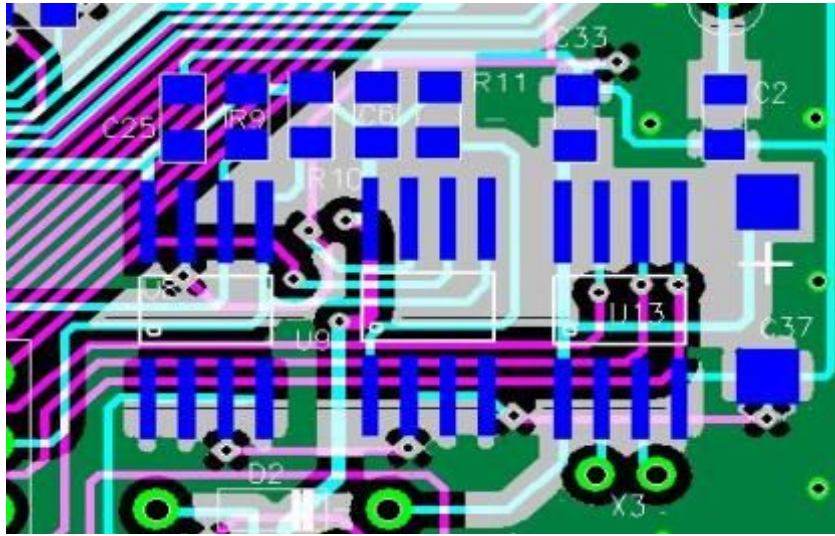


그림 3-1-13. 데이터저장 회로도

(3) 평균값 측정 기능

배지 내의 수분값이 불균형하여 평균값 기능을 추가하였습니다. 배지의 수평이 맞지 않고 기울어지거나 배지자체의 특성상 수분이 고르게 분포하지 않은 경우를 대비해 평균값 측정기능을 넣었습니다. 사용자는 평균수를 설정한 후 평균수 만큼 측정하면 측정된 내역과 평균값은 자동으로 저장됩니다.



그림 3-1-14. 기존에 없던 기능 추가 일반화면 평균값 화면 선택가능

(4) 회로도

MCU는 PIC계열의 18F4525를 사용하였습니다. 그래픽LCD 드라이버는 S1D13305F00A1을 사용하였으며 램은 KM68100 삼성램을 사용하여 그래픽LCD를 구동하였습니다. 24LC512를 사

용하여 사용하는 한글폰트와 영문폰트를 제작하였으며 측정된 데이터도 저장하였습니다. 24LC512는 한 개 더 사용하여 데이터로깅시 데이터저장용으로 사용하였습니다. DS1302를 사용하여 시간과 날짜를 받았으며 슈퍼콘덴서 사용으로 날짜 저장을 하였습니다. 전원보호를 위해 레귤레이터를 3개 사용하였으며 LCD는 3.3v MCU는 5v를 사용하였습니다. max232c를 사용하여 외부에서 들어온 데이터를 받거나 측정된 데이터를 외부로 전송하였습니다. CD4095를 사용하여 전원 ON/OFF로 사용하였습니다.

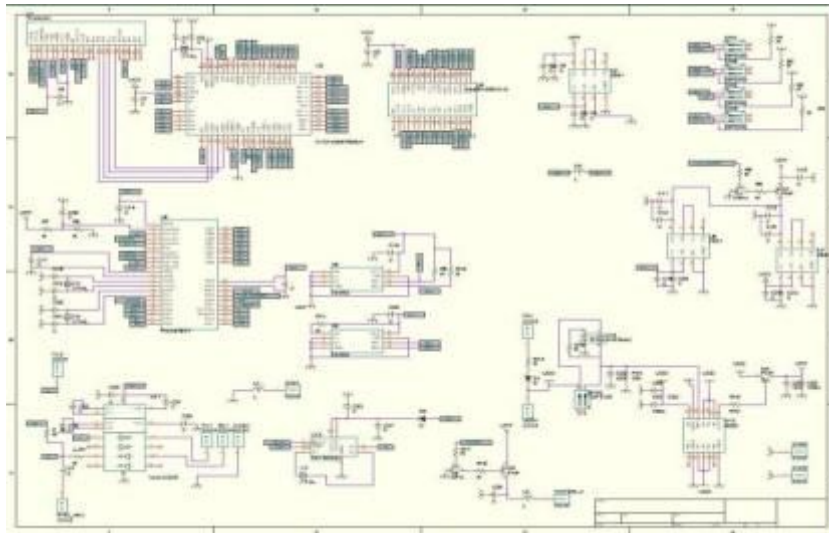


그림 3-1-15. 디스플레이 전체 회로도

(5) PCB 아트웍

WINPCB를 사용 하여 아트웍하였습니다. 양면기판으로 금도금을 하여 불량률을 최소화 하였습니다. 두께는 1.6t이며 동판의 재질은 에폭시로 하였습니다.

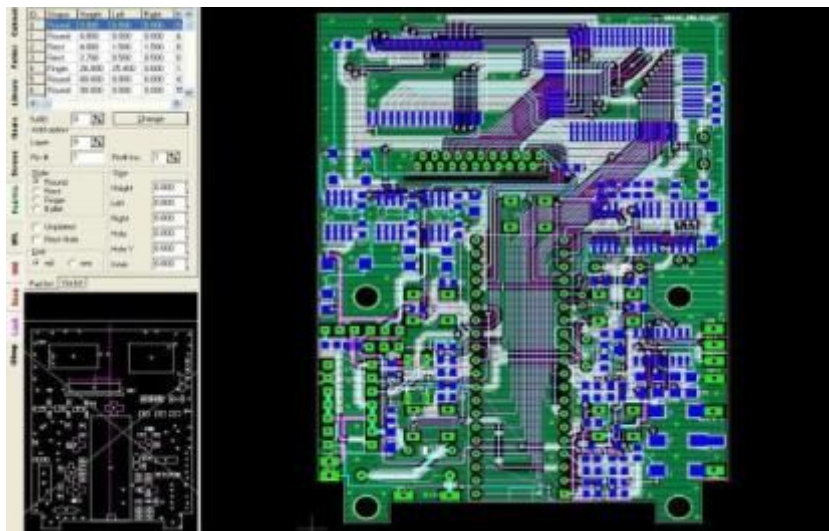


그림 3-1-16. PCB아트웍 전체화면

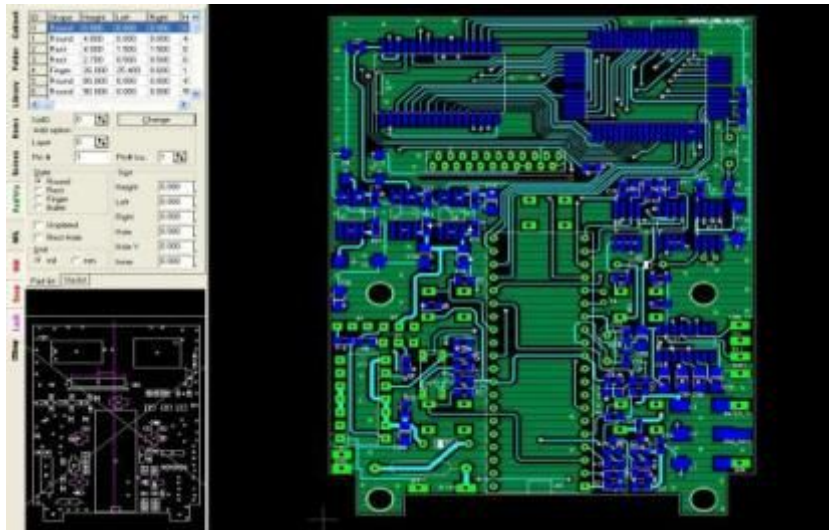


그림 3-1-17. PCB아트웍 전면

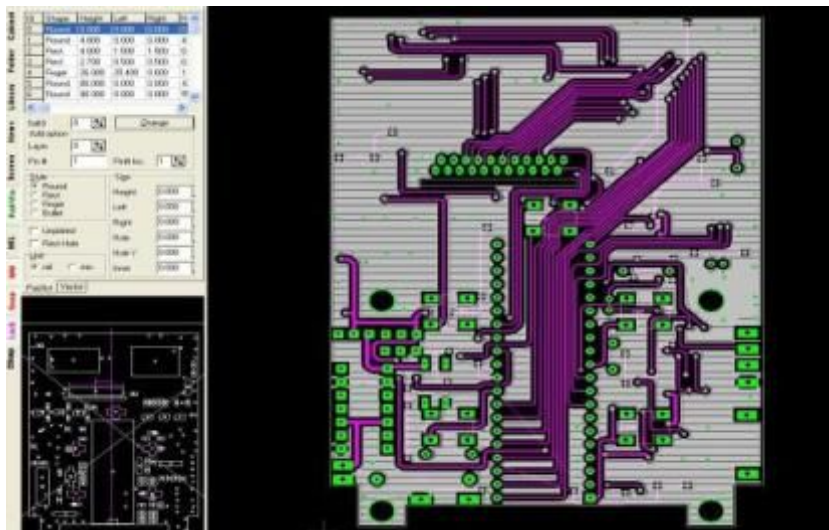
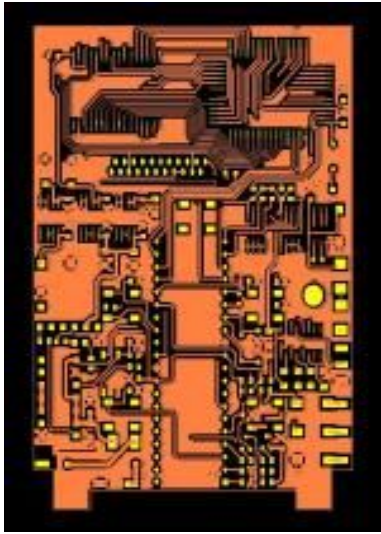


그림 3-1-18. PCB아트웍 후면

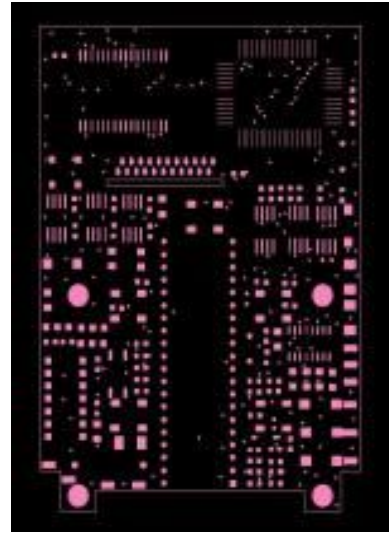
(6) 거버파일



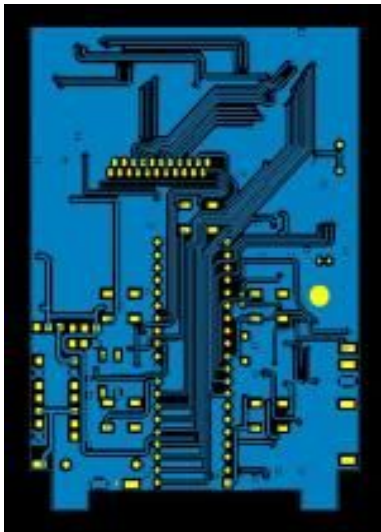
A



B



C



D



E



F

그림 3-1-19. GEBBER FILE

(A : Top Pattern, B : Top silk, C : Top soldermask,
D : Bottom pattern, E : Bottom silk, F : bottom soldermask)

(7) 센서 매뉴얼 제작

(가) 버튼설명

M	Mode	<p>모드변경 버튼. 모드를 한번 누르면 모드화면이 나타나며 제어화면서 한번 더 누르면 메인측정화면으로 복귀합니다.</p>
C	Call	<p>측정 및 선택 버튼. 모드화면에서 기능설정 선택시 사용합니다.</p>
▲	Up	<p>모드화면에서 기능설정변경 버튼으로 사용합니다.</p>
▼	Down	<p>모드화면에서 기능설정변경 버튼으로 사용합니다.</p>

(나) 기기설명

① 측정

- 토양 측정: 센서를 측정하고자 토양에 센서를 꽂으시고(봉을 끝까지 토양에 삽입) 측정 버튼을 누르면 약 5초후에 데이터가 들어옵니다.
- 용액 EC측정: 용액을 센서봉이 다 들어갈 수 있도록 비커나 길죽한 통에 여유있게 담으신후 센서봉을 용액 끝까지 삽입하신 후 측정하시면 EC값이 정확히 측정됩니다. (센서 봉 끝에 하얀색부분이 살짝 닿을듯하게)

② 모드화면

- 이 화면은 디스플레이의 채널선택, 실시간 기능등 디스플레이 동작에 대한 기능들이 있습니다. 각 기능으로 이동시엔 ▲,▼ 버튼을 누르면 커서가 움직이며 이동한 커서에서 Call버튼을 누르면 수치에 커서가 이동하며 ▲,▼ 버튼으로 수치변경을 할수 있습니다. 수치변경 후에는 다시 Call버튼을 누르면 변경한 데이터가 저장됩니다.
- 측정채널선택: 토양종류를 고르는 기능입니다. WT1000N,H 사용자는 토양용적수분 12cm를 선택하시면 되며 CoCo-100,200을 사용하시면 암면 6cm,코코피트 6cm을 사용하시면 됩니다.
- 채널세부조정 : 코코피트나 암면에 수분값을 영점 조정하는 기능입니다. 코코피트 블럭이나 암면블럭에 물을 포화시킨다음에 이 기능의 수치를 조정하여 측정수분값이 97~98% 나오게 하여 해당 암면이나 코코피트의 영점수분조정을 하는 기능입니다. (+)값을 하면 측정값보다 2%씩 상승하며 (-)값을 하면 측정값보다 2%(-1인 경우)씩 감소합니다.
- 실시간 기능 : 현장에서 측정한 데이터를 기록하고 싶을시에 사용합니다. 폴더별로 50번지까지 저장되며 폴더는 1~4개가 있습니다. 평균수는 측정하고자 하는 곳에 평균값을 내고 싶을때 사용하며 1~8까지 선택할 수 있습니다.(3으로 선택시 3번 측정한 값과 평균값이 저장됨)
- 실시간저장시작: 실시간저장측정 화면으로 이동합니다.

- 측정데이터보기: 실시간저장으로 저장된 데이터를 화면으로 볼 수가 있습니다.
- 나가기(ESC): 이 기능을 실행하지 않고 다시 메뉴화면으로 돌아가는 기능입니다.
- 폴더1~4삭제하기: 폴더1~4 데이터를 삭제하는 기능입니다.
- 데이터전송하기: 실시간측정으로 저장한 데이터를 컴퓨터로 다운받는 기능입니다.

③ 실시간저장화면 설명

- 실시간화면에서 측정버튼을 누르면 평균수가 3/1, 3/2, 3/3 이런식으로 증가가 되면 3/3 이 되면 저장번지가 증가합니다. 측정된 데이터를 기록하지 않으려면 ▼을 누르면 됩니다.

토양수분: 12.3 %	→ 측정된 수분값
토양EC: 1.31 dS/m	→ 측정된 EC
토양온도: 23.1 °C	→ 측정된 온도
F:폴더1 저장번지:05 평균수:3/1	→ 저장번지:05 →저장된 번지 50까지 가능함 → 평균수: 3/1 3번중 1번 측정됨.3번이되면 번지증가
평균수분: 12.1 % M:정지	→ 평균 수분값 표시 MODE 버튼 누르면 기능정지
평균EC : 1.42 dS/m C:측정	
평균온도: 22.5 °C D:저장안함	→ ▼을 누르면 현재 측정된 데이터는 저장안함. 평균수나 번지 증가가 되지 않습니다.

④ 측정화면 설명

- 평균수가 3이면 3번 측정한 내역이 나오며 만약 8을 선택하면 8개측정한 내역이 나옵니다. ▲,▼으로 보고싶은 번지를 선택한후 Call버튼을 누르면 해당번지의 측정된 내역이 화면에 디스플레이 됩니다.

저장번지: 00	평균수:3
1. W: 12.1% EC:0.59 dS/m T:19.9 °C	→ 3/1의 측정값. 0번지의 첫 번째 측정된 값
2. W: 12.2% EC:0.60 dS/m T:19.9 °C	→ 3/2의 측정값.
3. W: 12.3% EC:0.61 dS/m T:19.9 °C	→ 3/3의 측정값.
A W: 12.2% EC:0.60 dS/m T:19.9 °C	→ 0번지의 평균값

- 평균수 설정 : 실시간 저장기능에서 쓸 평균수를 설정하는 기능입니다. 평균수를 5로 하면 실시간 저장기능에서 측정을 하면 5번 측정된 내역과 평균값이 저장됩니다.
- 저장폴더선택 : 저장 폴더를 선택하는 기능입니다. 예를 들어 오이밭에서는 폴더1을 사용하고 딸기밭에서는 폴더2를 사용하면 측정된 데이터 구분을 할 때 용이합니다.
- 그래프 보기: 실시간저장기능으로 저장된 평균값 데이터를 볼 수 있는 기능입니다.
 - 토양수분* 5개: 5개 번지의 평균값 그래프를 볼수 있습니다.
 - 토양수분* 25개: 25개 번지의 평균값 그래프를 볼수 있습니다.
- Cal : 이 기능은 센서 측정값 보정기능입니다. 기본 값을 0이며 센서 측정값이 원하시는 측정치보다 적을 경우 (+)값을 올려주시고 많은 경우엔 (-)값을 취해서 원하시는 수치

에 보정할 수 있습니다.

- 저장간격선택 : 데이터저장을 몇 분 단위로 할지 정하는 기능입니다. 저장간격을 정한 후 선택 버튼을 누르면 평균수를 조정할 수 있습니다.

- 데이터로거 : 데이터저장 데이터삭제, 데이터전송하기 등의 기능이 있습니다.

㉔ 로깅횟수-0000: 몇 개의 데이터가 저장되어 있는지를 보여줍니다. 최대 5900개

㉕ 데이터 로깅시작: 이 기능을 선택하면 데이터저장화면으로 바뀌고 자동으로 센싱해 데이터를 저장시킨 후 전원보호를 위해 화면이 꺼집니다. 저장간격이 되면 화면은 다시 살아나고 데이터를 저장 후 다시 꺼집니다. 이때 화면을 나타나게 하려면 업, 다운, Call, 모드 버튼중 하나를 길게 누르시면 됩니다. 로깅을 멈추고 싶을시에 화면이 살아있는 상태에서 모드 버튼을 누르시면 됩니다.

㉖ 데이터 전송하기: 저장되어 있는 데이터를 전송하는 기능입니다. 데이터케이블을 컴퓨터 컴퓨터에 연결 후 데이터다운 프로그램을 실행해 데이터를 전송하면 됩니다.

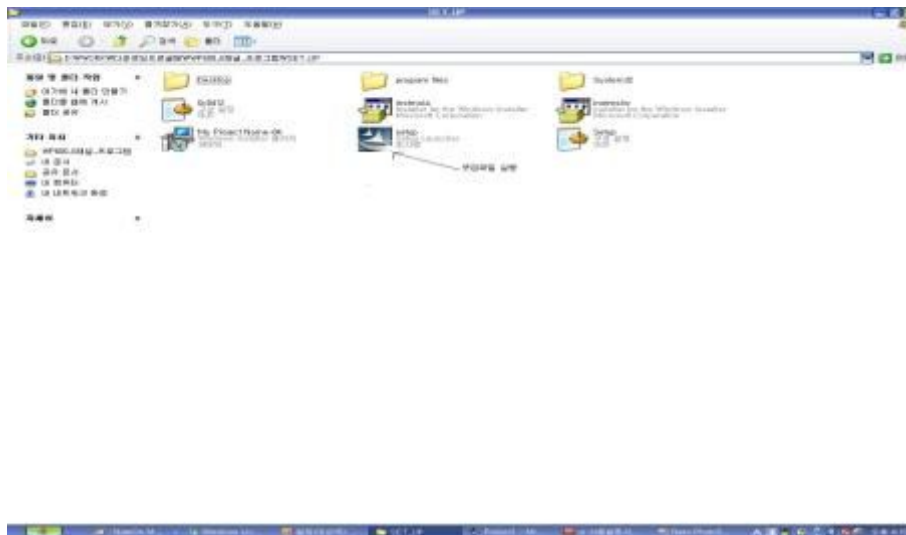
㉗ 데이터 삭제하기: 저장되어 있는 데이터를 모두 삭제하는 기능입니다.

(8) 데이터 엑셀 프로그램

데이터로깅에서 측정한 데이터를 엑셀로 변환과 그래프로 나타내는 프로그램입니다. 프로그램은 비주얼 베이직으로 프로그래밍 하였으며 배포를 위하여 인스톨샐드 프로그램을 사용하여 인스톨 프로그램을 만들었습니다.

① 설치

- CD에서 인스톨이라는 폴더 안에 들어가서 아래그림과 같이 셋업을 하시면 데이터 다운 프로그램이 생성됩니다.



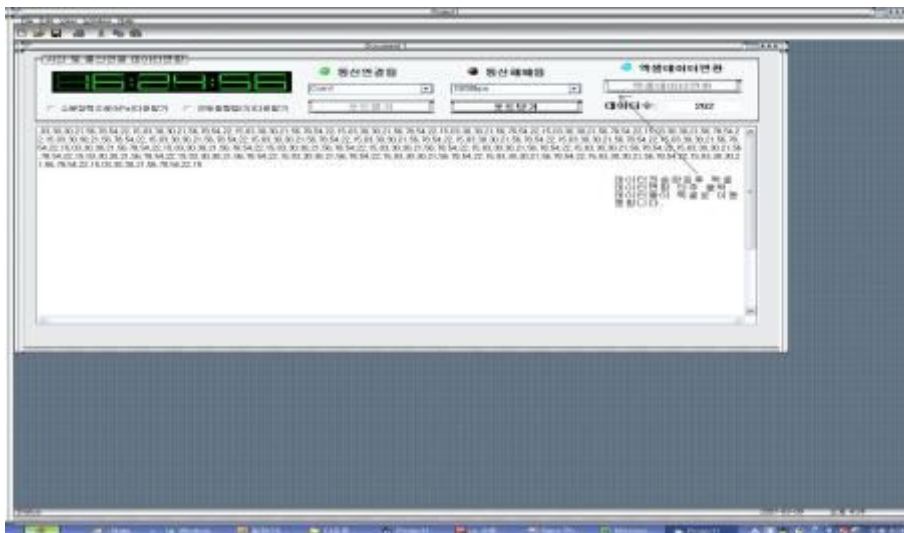
② 실행

- 생성된 실행파일을 실행하시면 아래와 같이 다운로드 프로그램이 나옵니다. 프로그램이 나오면 데이터다운을 받을수 있도록 통신연결을 해줍니다. 포트를 설정하신 후(대부분은 Com1입니다.) 포트열기를 누르시면 데이터를 다운받을 준비가 됩니다.



③ 엑셀데이터 변환

- 통신연결이 끝났으면 디스플레이에서 데이터전송을 합니다. 전송이 끝나면 아래와 같이 데이터 엑셀변환 단추를 누르시면 전송된 데이터가 엑셀로 정리 됩니다. 정리된 데이터는 C:\Program files\mire\WT1000H 폴더안에 저장한 날짜로 자동저장이 됩니다.



④ 그래프 저장

- 데이터를 다운받으면 WT1000H_v2 버전인 경우 그래프가 자동으로 생성됩니다. 도구들을 클릭하면 3D변환, 확대, 프린트, 저장, 불러오기, 다른 그래프 형태등을 선택할 수 있습니다. 저장하실 때는 파일형식을 Text 형식으로 해주세요.



⑤ 그래프 불러오기

- 도구에서 불러오기를 클릭한 후 파일형식을 Text 타입으로 합니다. 그 다음엔 자기가 저장한곳에 가서 원하시는 데이터를 클릭하시면 그래프로 보실 수 있습니다.



⑥ 변환된 엑셀데이터

	A	B	C	D	E	F
	날짜	시간	수분강도(MPa)	투습수분(%)	투습EC(dS/m)	투습온도(°C)
3	2009-03-28	11시25분		0.0%	0.0015/m	20.0°C
4	2009-03-28	11시25분		0.0%	0.0015/m	20.1°C
5	2009-03-28	11시25분		0.0%	0.0015/m	20.0°C
6	2009-03-28	11시25분		0.0%	0.0015/m	20.0°C
7	2009-03-28	11시25분		0.0%	0.0015/m	19.8°C
8	2009-03-28	11시25분		0.0%	0.0015/m	19.8°C
9	2009-03-28	11시25분		0.0%	0.0015/m	19.7°C
10	2009-03-28	11시25분		0.0%	0.0015/m	19.7°C
11						
12						
13						
14						
15						
16						

제 2 절 유기배지의 함수량 계측 및 유지기술 체계화

1. 센서를 이용한 위치별 수분함량 측정

(1) 실험 목표

수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 급액 되는 부분에서 떨어진 거리에 따라 위치별 배지내 수분함량의 변화를 측정, 적합한 센서 측정 위치를 구명하여 코코넛 코이어 배지에 있어 센서 활용의 기초자료로서 사용하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

완전 포수시 가로 세로 높이가 100x20x12cm 인 코코넛 코이어 배지(dust:chip = 3:7, v/v, 신성미네랄, Sri Lanka)에서 윗면(상부)에 중앙에서 좌우로 10cm 떨어진 두 곳에 점적핀을 이용하여 급액하고 배액구는 배지슬라브 양쪽 끝에서 10cm되는 부분에 만들었다. 급액은 수돗물 ($EC\ 0.2\ dS \cdot m^{-1}$, $pH\ 6.2$)을 사용하였고, 1일 2회로 오전 10시와 오후 14시에 급액하였으며 1회 급액량은 100ml로 하였다. 그림 3과 같이 센서를 9개 동시에 설치하여(드리퍼 급액위치에서 배지 외곽방향으로 하여 급액 위치에서 5cm, 10cm, 20cm, 30cm 부분에 설치하고 드리퍼 사이, 즉 배지 한가운데에도 센서를 설치함) 배지내 수분함량 변화를 측정하였다. 측정에는 FDR(Frequency Domain Reflectometry)방식의 센서(Coco sensor, 미래센서, Korea)와 이를 제어하는 데이터 로거(WP700, 미래센서, Korea)를 사용하였다.



그림 3-2-1. 실험에 사용한 코코넛 코이어 슬라브

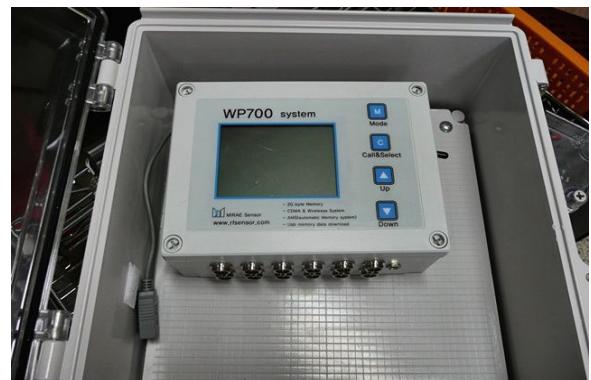
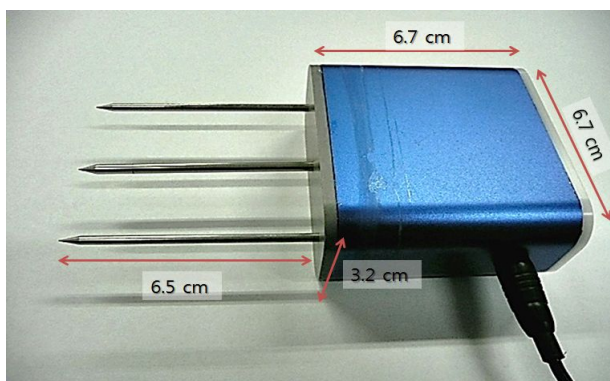


그림 3-2-2. 실험에 사용한 FDR 센서와 로거

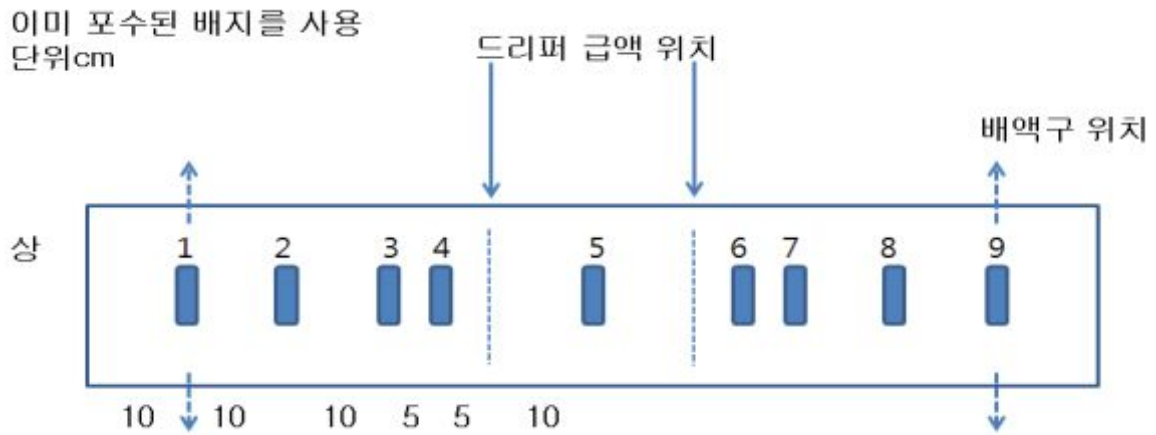


그림 3-2-3. 코코넛 코이어 슬라브에서의 실험 묘사도

(3) 실험수행 내용 및 결과

측정 위치별 배지 수분함량(표 3-2-1)은 1번 센서부터 9번 센서까지 각각 평균 36.4, 33.6, 37.8, 43.7, 38.3, 41.2, 37.8, 38.9, 32.3%로 30~40%수준의 다양한 값이 나타났으며 최대값과 최소값 간의 차이가 10%이상 나타났다. 같은 한 배지 안에서 측정 위치에 따라 수분함량이 다소 차이가 생기는 것은 배지가 코코넛 열매의 부산물인 코코넛 코이어와 칩으로 이루어진 유기배지라 배지 전체에 고르게 균일한 상태를 유지하기에 무리가 있는 것이 그 원인일 것으로 판단된다.

표 3-2-1. 측정 위치별 배지 수분 함량 평균

Sensing position	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Average Water content (%)	36.4	33.6	37.8	43.7	38.3	41.2	37.8	38.9	32.3

시간 흐름에 따른 측정 위치별 배지 수분함량의 변화(그림 3-2-4)는 위치별로 다양한 수준을 보였다. 하지만, 그래프에서 각 위치별 센서 데이터의 변동폭이 크게 나타나서 실시간으로 수분함량의 변화 정도를 예측하기에는 무리가 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 변동폭은 센서간 설치 위치가 5cm와 10cm로 이 정도 거리가 센서 상호간에 전자기적 간섭 영향을 발생시켜 센싱위치에서 측정되는 것이 커지고 작아지기를 반복하는 결과로 나타나게 된 것으로 추측된다. 이와 같은 센서간 영향으로 평균값 외에 실시간 변화를 측정하기에는 무리가 있었다. 급액에 따른 수분증가 현상도 급액시 수분함량이 약간 증가되었다는 것 이상의 계측이 불가능한 결과를 나타냈다.

그림 3-2-5는 센서로 측정된 위치별 수분함량 값에서 수분 함량 편차에 대한 것을 나타낸 그래프로 수분함량 편차는 측정된 센서 값에서 바로 전의(2분전) 측정값을 뺀 것을 의미한다. 즉, 이는 시간에 따른 센서가 측정하는 값이 일정한지를 판단하기 위한 수치이다. 센서별로 편차의 정도가 급액 여부에 상관없이 0.5에서 2.0까지 다양하게 변화하며, 이런 편차 정도는 센서의 최소측정값인 0.1을 상위하여 센서를 이용한 실시간 계측 활용에 문제가 된다고 할 수 있다.

측정 결과로 보았을 때, 센서간의 설치 간격에 대한 추가적인 실험이 이루어져서 센서 적정 설치 간격을 제시하는 것이 필요할 것으로 판단되었다(이에 대한 추가 실험은 ‘센서간격에 따른 측정값에 따른 변동 구명’에서 수행하였다.).

(4) 연구결과 요약

수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 급액 되는 부분에서 떨어진 거리에 따라 위치별 배지내 수분함량의 변화를 측정하고, 적합한 센서 측정 위치를 구명하기 위하여, 완전 포수한 코코넛 코이어 배지에서 윗면에 급액 위치를 중심으로 FDR 수분센서를 9개 동시에 설치하여 배지내 수분함량 변화를 측정하였다.

측정 위치별 평균 배지 수분함량은 위치마다 다양한 값이 나타났으며 최대값과 최소값간의 차이가 10%이상 나타났고, 이는 유기배지라 완전히 균일한 상태를 유지하기에 무리가 있는 것이 그 원인일 것으로 생각되었다. 센서로 측정된 위치별 수분 함량 편차는 센서별로 편차의 정도가 센서의 최소측정 단위를 상위하여 한 배지 위에 9개의 센서를 설치하는 것은 문제가 된다고 할 수 있다. 이는 센서간의 설치 간격에 대한 추가적인 실험을 통한 적합한 센서 측정 위치에 대한 추가적인 실험을 필요로 하며, 이에 대한 진행을 하였다.

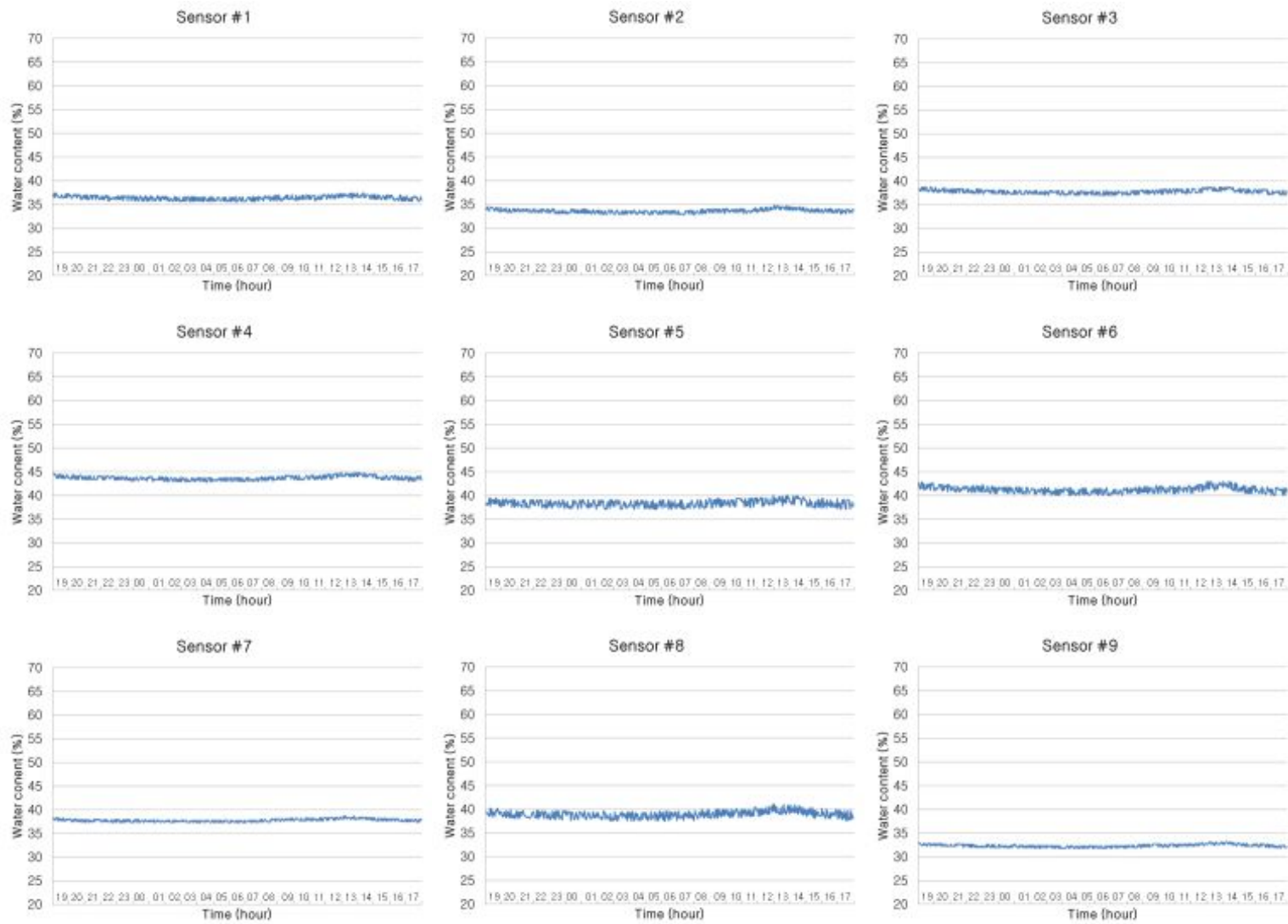


그림 3-2-4. 측정 위치별 배지내 수분함량의 변화

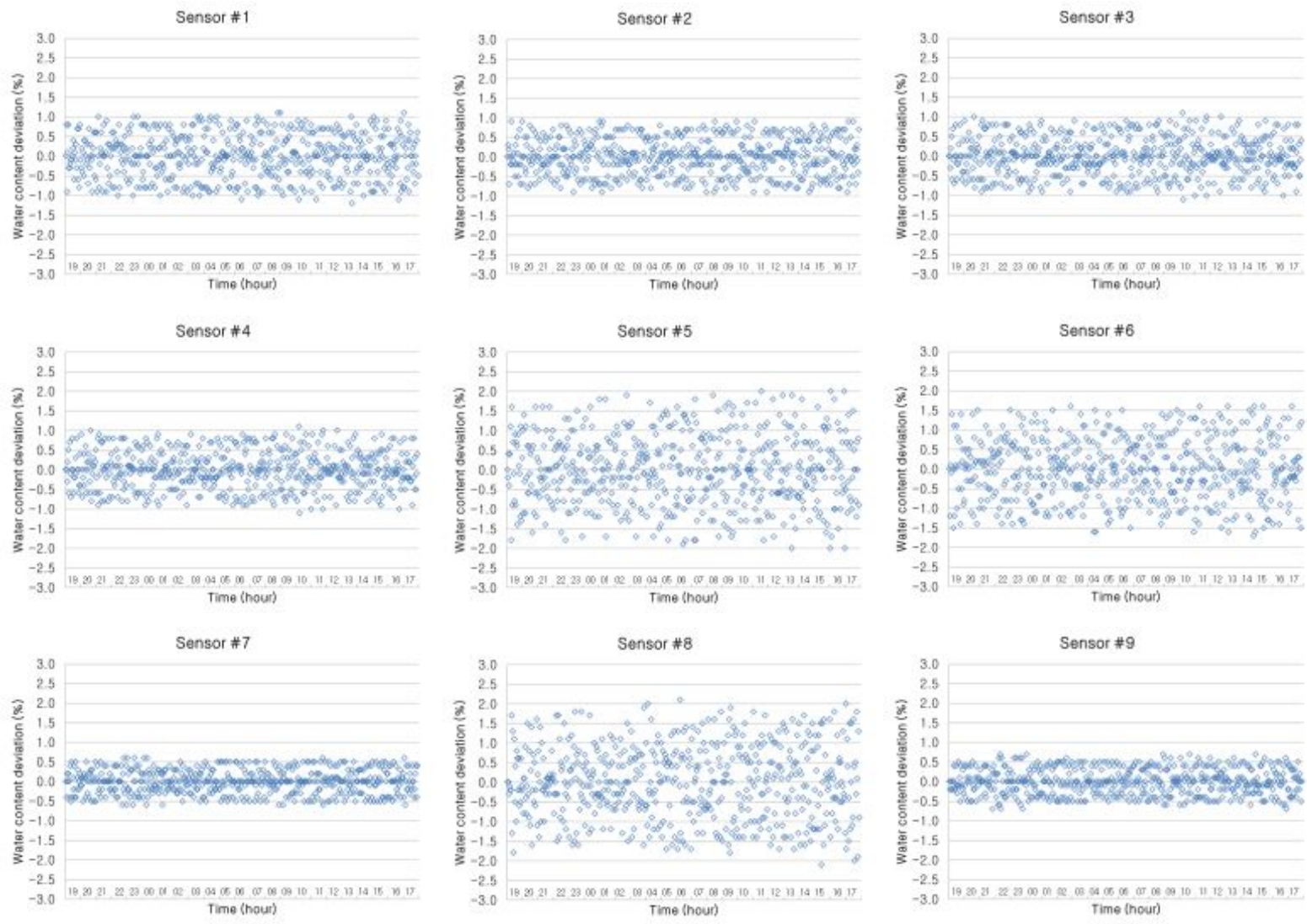


그림 3-2-5. 측정 위치별 배지내 수분 함량 편차의 변화

2. 센서 간격에 따른 측정값에 따른 변동 구명

가. 무(無)수분 조건

(1) 실험 목표

칼리브레이션용 표준 배지(glass beads)내 수분이 없는 상황에서 센서 2개를 이용하여 근권 수분 측정시 두 센서간 간격에 따라 센서 측정값의 변동이 어느 정도 발생하는 지를 구명하고자 한다. 그리고 센서에 유입되는 전기의 전자기적 노이즈를 줄일 수 있는 노이즈 필터를 이용하여 이의 사용 가능성을 파악하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

용기 내부의 가로 세로 높이가 29x14x14cm 인 플라스틱 상자에 토양이나 배지 수분 센서용 스탠다드 칼리브레이션 물질로 사용되는 glass beads(spherical glass beads made of soda lime silicate glass, Trime-IMKO, Germany, 포수시 44.8% 용적수분함량)를 11cm 높이로 채운 후, 물을 채우지 않고 완전 건조된 상태에서 그 윗면(상부)에 센서 2개를 설치하였다. 센서 간의 간격은 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21cm로 조절하며 센서 측정 데이터를 조사하였다. 측정에는 FDR(Frequency Domain Reflectometry)방식의 수분 센서(Coco sensor, 미래센서, Korea)와 이를 제어하는 데이터 로거(WP700, 미래센서, Korea)를 사용하였다. 노이즈 필터 사용시에는 센서와 로거 전원 공급이 전기노이즈 필터(UF4STS, Union Elecom, Korea)를 거친 후에 공급될 수 있도록 하였다.

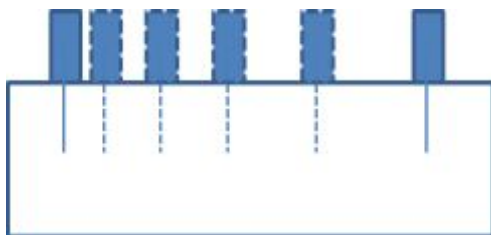


그림 3-2-6. 실험 세팅에 대한 묘사도



그림 3-2-7. 실험에 사용된 글라스 비드

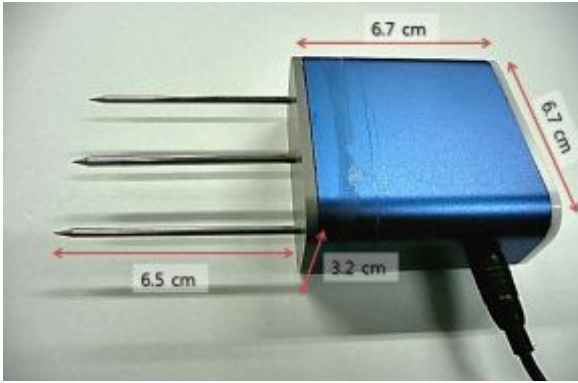


그림 3-2-8. 실험에 사용한 FDR 센서와 로거



그림 3-2-9. 실험에 사용한 노이즈필터 콘센트와 내부 구성

(3) 실험수행 내용 및 결과

수분이 없는 상태에서 수분함량 변화를 측정된 결과(그림 3-2-10)를 보면, 0부터 21cm 까지 모든 센서간 간격에서 수분함량이 특정한 차이없이 일정하게 0으로만 측정되었다. 노이즈 필터를 이용한 센서 측정 결과(그림 3-2-11)에서도 모든 센서간 간격에서 수분함량이 특정한 차이 없이 일정하게 0으로만 측정되었다.

실험에 사용된 FDR 센서는 수분이 매우 적거나 없는 환경에 놓였을 경우에 수분이 측정이 되지 않기에 0이라는 값을 지속적으로 유지하는 것으로 판단된다. 이 경우에는 센서 간의 전자 기적 간섭에 의한 측정 값의 변동이 발생되지 않았다.

(4) 연구결과요약

칼리브레이션용 표준 배지(glass beads)내 수분이 없는 상황에서 센서 간격에 따라 센서 측정값의 변동을 알아보고자 실험하였다. 플라스틱 상자에 센서용 스탠다드 칼리브레이션 물질을 채운 후 완전 건조된 상태에서 윗면(상부)에 센서 2개를 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21cm 간격으로 설치하여 측정하였다. 모든 센서간 간격에서 수분함량은 특정한 변화없이 일정하게 0으로만 측정되었다. 센서에 수분이 측정 되지 않기에 0이 지속되는 것으로 보이며, 이 때 센서간의 전자 기적 간섭 현상을 발견할 수 없었다.

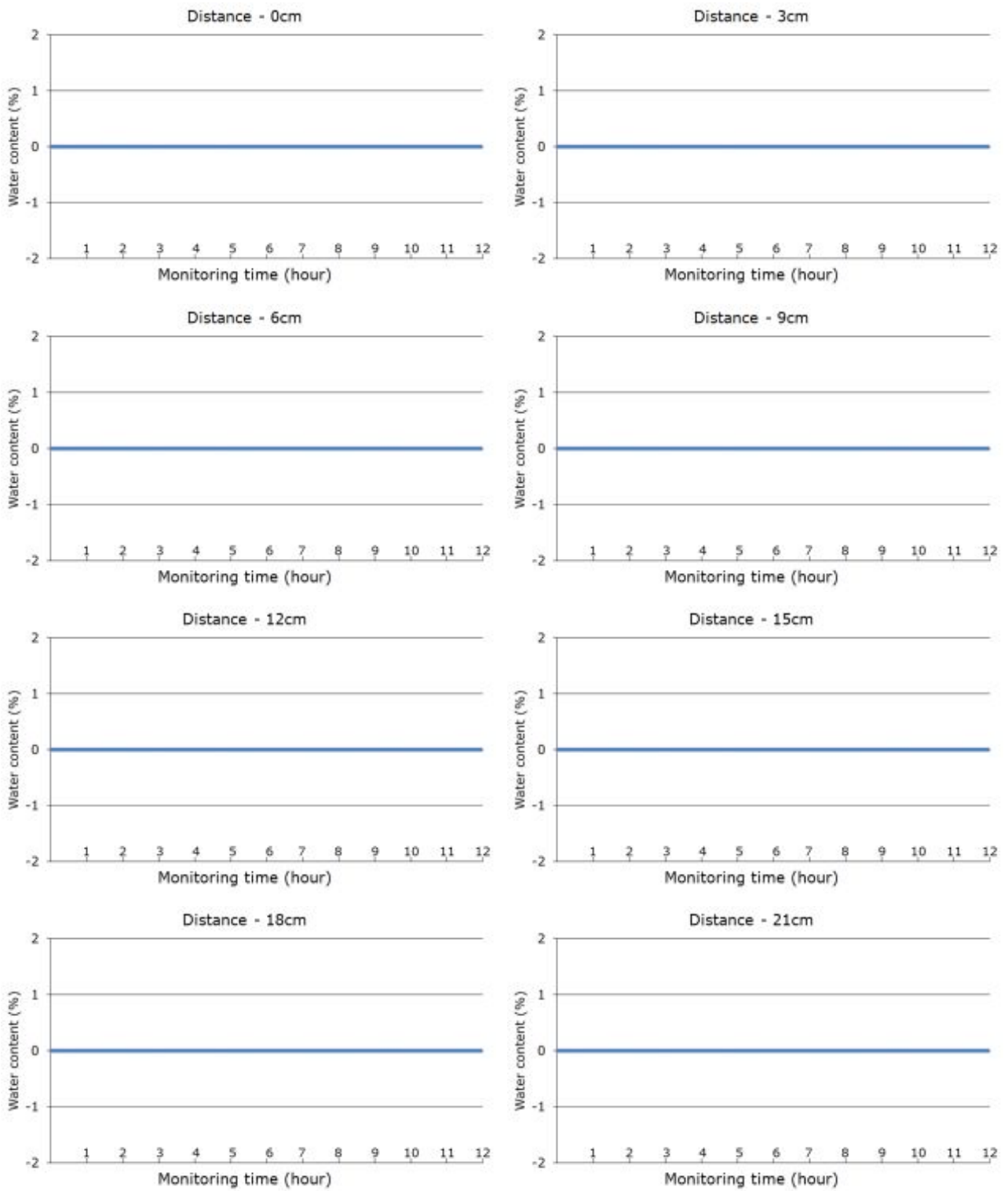


그림 3-2-10. 물이 없는 상황에서 노이즈 필터 없이 칼리브레이션용 표준 배지(glass beads)에 설치된 센서 수분함량 변화 데이터(n=6, 센서간격 : 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21cm).

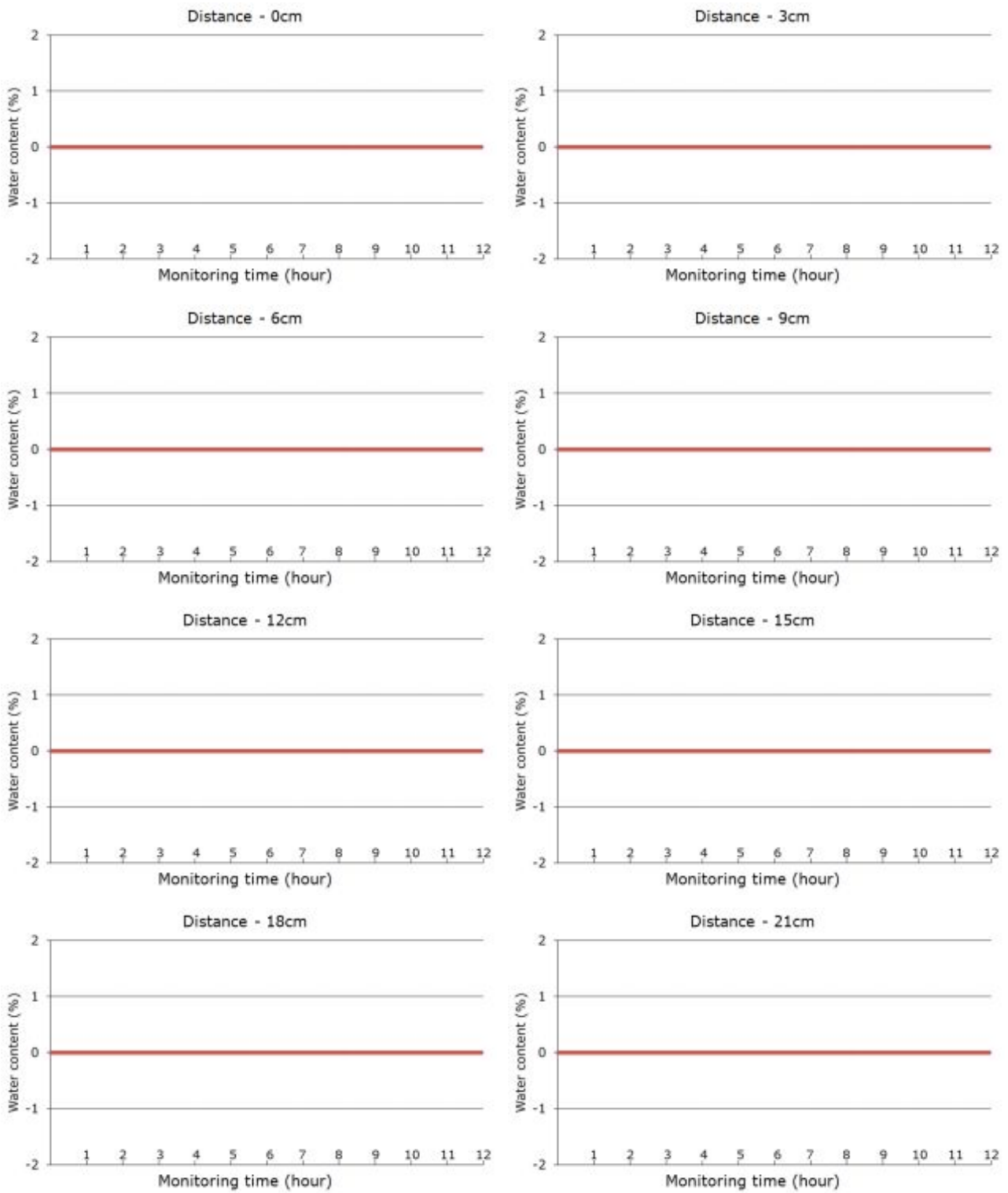


그림 3-2-11. 물이 없는 상황에서 노이즈 필터 사용시 칼리브레이션용 표준 배지(glass beads)에 설치된 센서 수분함량 편차 데이터(n=6, 센서간격 : 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21cm).

나. 유(有)수분 조건

(1) 실험 목표

칼리브레이션용 표준 배지(glass beads)내 수분이 있는 상황에서 센서 2개를 이용하여 근권 수분 측정시 두 센서간 간격에 따라 센서 측정값의 변동이 어느 정도 발생하는 지를 구명하고자 한다. 그리고 센서에 유입되는 전기의 전자기적 노이즈를 줄일 수 있는 노이즈 필터를 이용하여 이의 사용 가능성을 파악하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

용기 내부의 가로 세로 높이가 29x14x14cm 인 플라스틱 상자에 토양이나 배지 수분 센서용 스탠다드 칼리브레이션 물질로 사용되는 glass beads(spherical glass beads made of soda lime silicate glass, Trime-IMKO, Germany, 포수시 44.8% 용적수분함량)를 11cm 높이로 채운 후, 증류수(EC 0.0025 dS · m⁻¹ pH 5.5)을 glass beads보다 수위가 3~4mm 정도로 약간 높게 완전히 채운 상태에서 그 윗면(상부)에 센서 2개를 설치하였다. 센서 간의 간격은 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21cm로 조절하며 센서 데이터를 조사하였다. 측정에는 FDR(Frequency Domain Reflectometry)방식의 수분 센서(Coco sensor, 미래센서, Korea)와 이를 제어하는 데이터 로거(WP700, 미래센서, Korea)를 사용하였다. 노이즈 필터 사용시에는 센서와 로거 전원 공급이 전기노이즈 필터(UF4STS, Union Elecom, Korea)를 거친 후에 공급될 수 있도록 하였다.



그림 3-2-12. 실험 세팅에 대한 묘사도



그림 3-2-13. 실험에 사용된 글라스 비드

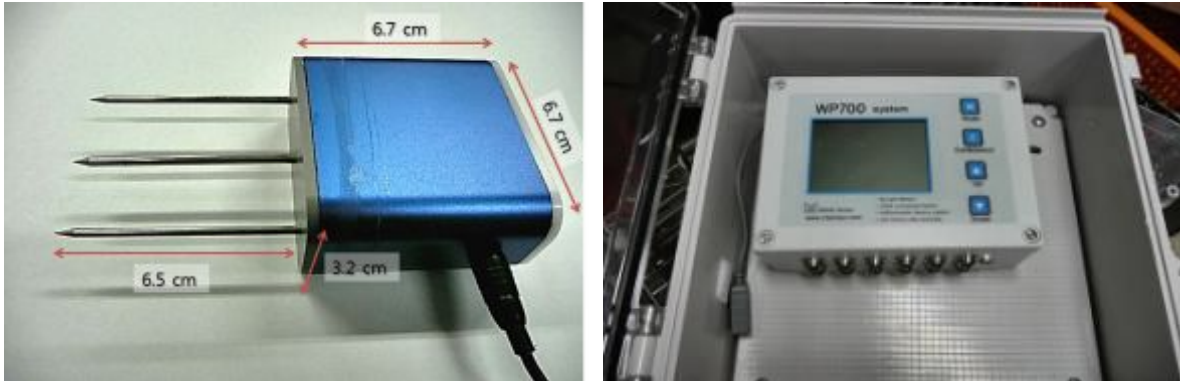


그림 3-2-14. 실험에 사용한 FDR 센서와 로거

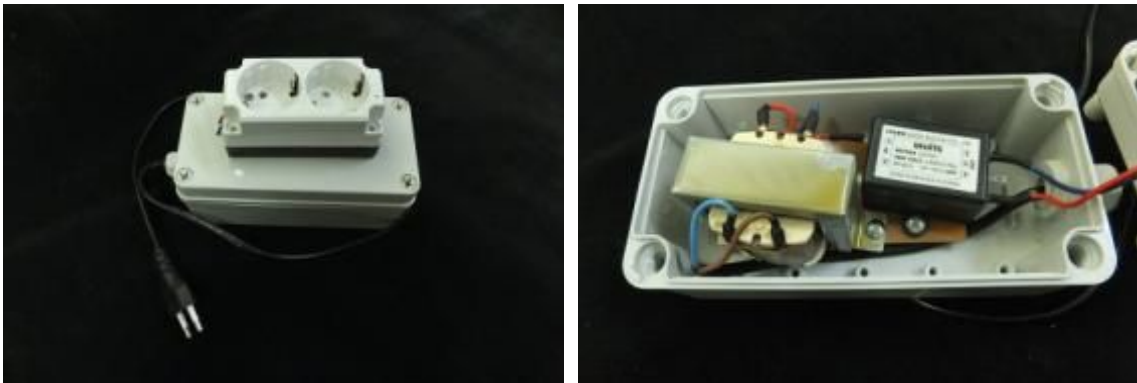


그림 3-2-15. 실험에 사용한 노이즈필터 콘센트와 내부 구성

(3) 실험수행 내용 및 결과

(가) 필터 비사용 측정

그림 3-2-16은 물을 채운 상태에서 센서간 간격에 따른 두 센서들의 평균 수분함량 변화를 최고, 최저, 평균으로 나타내었다. 측정 값 만으로 보았을 때 모든 간격에서 평균 수분함량은 기준 수분함량 함량(44.8%, v/v)을 중심으로 나타났다. 수분 함량 변화의 변동은 센서간의 간격이 가까울수록 크고 멀수록 작아지는 특징을 보였다. 하지만, 특이하게 9cm 간격의 경우는 이보다 먼 12, 15cm 간격보다 더 작은 수분 변화를 나타내었다.

이상하게도, 본 실험에서는 배지내 수분함량 변화가 전혀 없는 상황임에도 불구하고 측정 수치가 변화하는 것을 관찰할 수 있었고 이 변화 정도가 간격에 따른 차이를 보였다. 그래서, 이 변화를 센서간의 간섭이라는 전기적 상호 영향으로 인해 수분측정 센서가 영향받은 것으로 판단하였다. 이러한 변화 정도를 알아보기 위해 수분함량 편차를 계산하였다. 수분함량 편차는 측정된 센서 값에서 바로 전의(2분전) 측정값을 뺀 것을 의미한다. 이러한 편차는 수분함량이 지속적 증가(+)되는 순간에는 같이 증가(+)가 되고, 지속적 감소(-)가 되면 같이 감소(-)가 되며, 변화가 없으면 0을 나타낼 것이다. 각 측정 순간에서 수분함량이 어떻게 변화하는 지를 알아보기 위해 계산한 수치이다. 간섭이 크면 클수록 안정적인 0이 아닌 증가(+)와 감소(-)가 불규칙적으로 발생할 것이다. 이 계산을 통하여 편차 그래프를 그려 보았다.

물을 채운 상태에서 센서간 간격에 따른 두 센서들의 평균 수분 함량 편차는 그림 3-2-17과 같다. 그래프 내에 진한 부분이 많을수록 많은 측정 수가 발견되는 것이고 빈공간이 있을수록 상대적으로 적은 수의 측정 결과들이 분포하고 있다는 것이다. 가장 이상적인 결과는 0의 위치에 일렬로 하나의 선이 그려지는 것일 것이다. 하지만, 실제 측정시 그렇게 나타나지는 않았고 수분함량과 같이 다양한 편차가 나타났다. 편차 분포 정도가 센서간의 간격이 가까울수록 넓어지고 멀수록 좁아지는 특징을 보였으며, 여전히 9cm 간격의 경우는 이보다 먼 12, 15cm 간격보다 더 작은 수분 편차 분포를 나타내었다. 특히, 0.2% 이상의 편차는 실제로 센서가 측정 최소 범위인 0.1%를 넘는 편차로서 누적될 경우에는 실제 측정 값에서 크게 오류가 난 측정을 할 수 있는 가능성이 있다고 할 수 있다.

수분함량 변화는 측정의 정확성 즉, 측정값이 얼마인가가 확실한가를 나타내어 주고, 수분함량 편차는 측정의 안정성 즉, 값이 갑자기 변화하지 않는 정도를 나타내어 준다고 할 수 있다. 이 두 가지가 적합해야 정확하고 안정적인 센서 측정을 할 수 있다고 판단할 수 있다. 본 수분 센서(Coco sensor, 미래센서, Korea)를 실제로 배치할 때, 여러 개의 센서를 동시에 사용할 경우는 간격을 약 20cm 이상 차이를 두어 설치를 하거나 9cm 수준의 간격을 유지하여야 보다 정확하고 안정적인 측정 수치를 기대할 수 있을 것이다. 그리고 만일 센서가 충분히 많아서 간격에 상관없이 다수의 측정(본 실험에서는 6번의 반복)을 실시할 경우에는 평균값을 이용한다면 문제없이 원하는 측정값에 도달할 수 있을 것으로 판단된다.

그러나, 센서 간격과 개수로 많은 부분이 조절될 수 있어도, 실제 재배 현장인 온실과 실험실에서 사용되는 전기가 항상 안정적인 전압과 전력을 보장할 수 있는 것이 아니기에 다른 시스템을 이용하여 보다 안정적으로 센서를 활용할 수 있을가 하는 생각에서 음향기기 쪽에서 다루어지는 노이즈 필터라는 제품을 본 센서에 활용해 보았다.

(나) 필터 사용 측정

노이즈 필터를 사용하고, 물을 채운 상태에서 센서간 간격에 따른 두 센서들의 평균 수분함량 변화를 최고, 최저, 평균으로 나타내었다(그림 3-2-18). 모든 센서간 간격에서 수분 함량 변화의 변동은 많이 줄어들어 보다 기준 수분함량 함량(44.8%, v/v)에 가깝게 나타났다. 센서간의 간격에 따른 변화에서도 9cm이상의 간격에서는 변화폭이 줄어든 측정 수치를 나타내 9cm이상의 간격을 두고 사용할 수 있을 정도로 높은 개선 효과를 보였다. 노이즈 필터가 없을 경우, 9cm와 21cm에서만 변화폭이 $\pm 0.1\%$ 수준이 였다면, 노이즈 필터 사용시에는 9cm이상에서 모두 약 $\pm 0.1\%$ 의 변화폭을 나타내었다.

수분함량 편차에서도 노이즈 필터를 사용하였을 때(그림 3-2-19), 모든 센서 간격에서 $\pm 0.2\%$ 편차가 차지하는 비율이 크게 감소하고 $\pm 0.1\%$ 수준의 편차를 나타내었고, 간격이 15cm 이상 일 때에는 일시적이지만 편차가 0인 구간도 있었다.

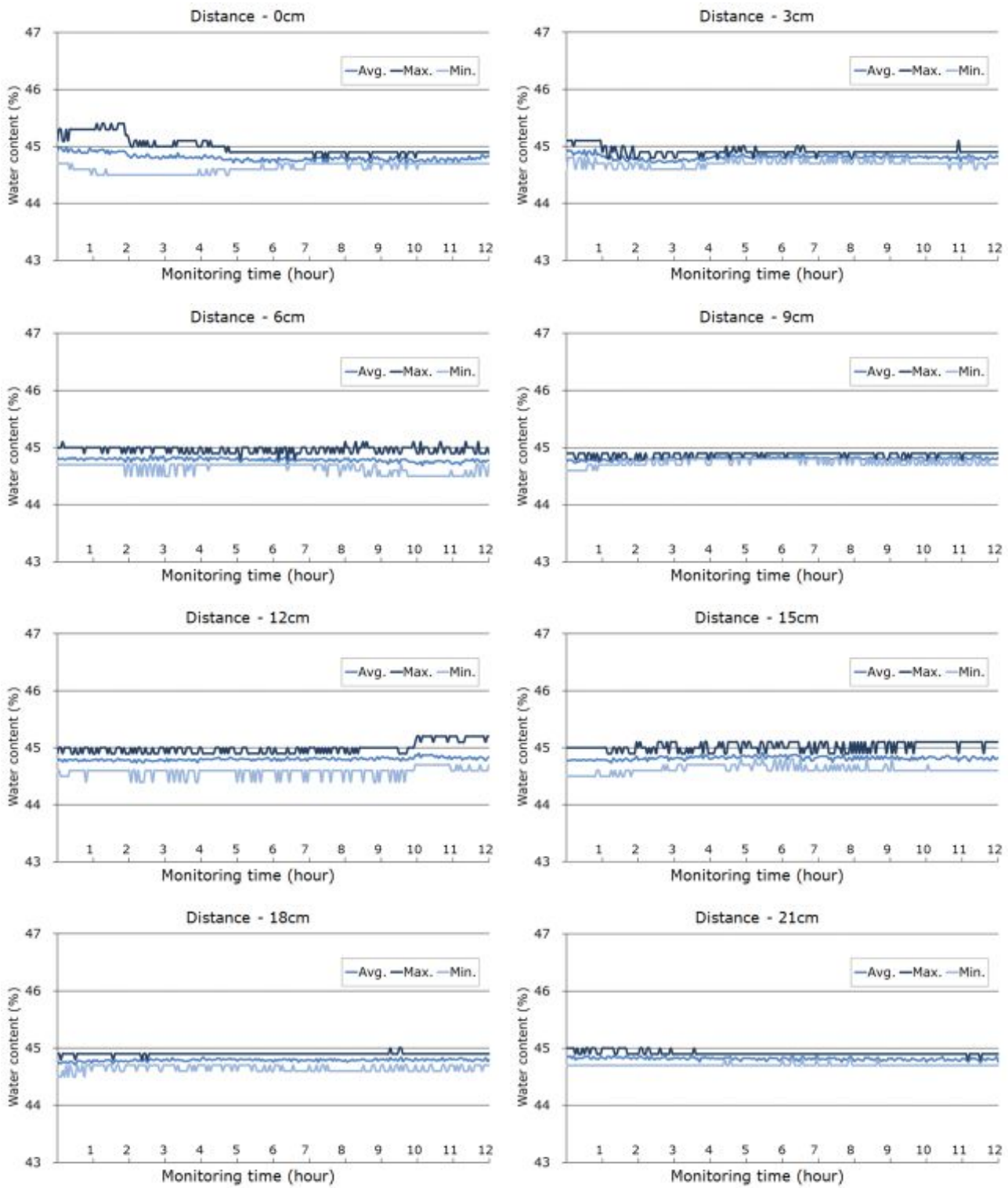


그림 3-2-16. 물이 있는 상황에서 칼리브레이션용 표준 배지(glass beads)에 설치된 센서들의 수분함량 변화 데이터(n=6, 센서간격 : 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21cm).

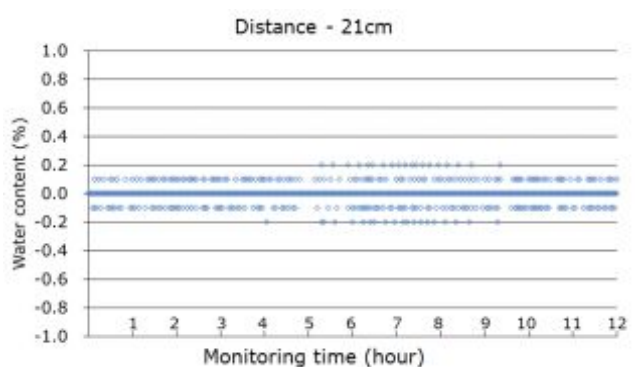
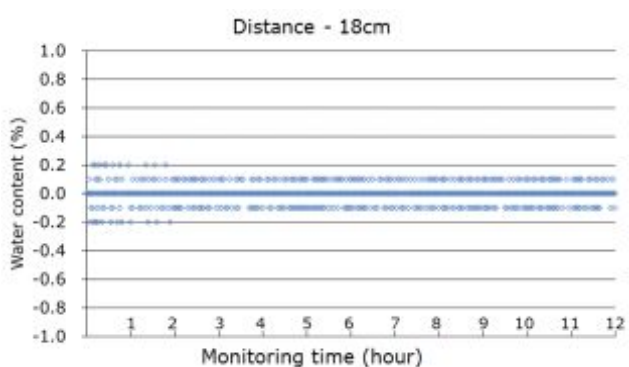
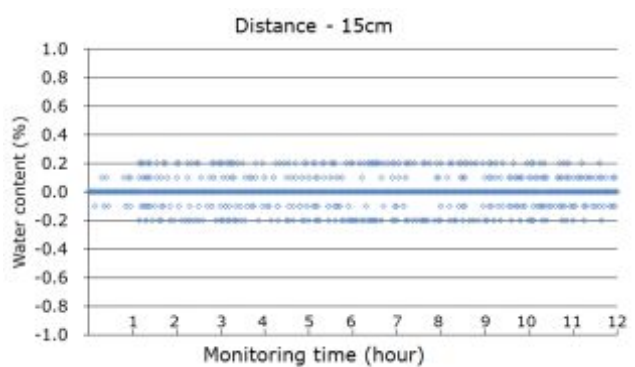
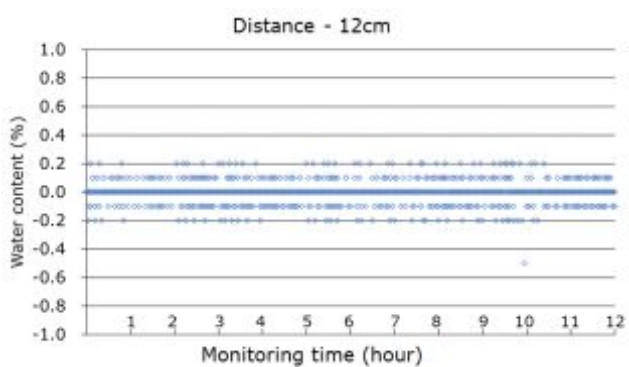
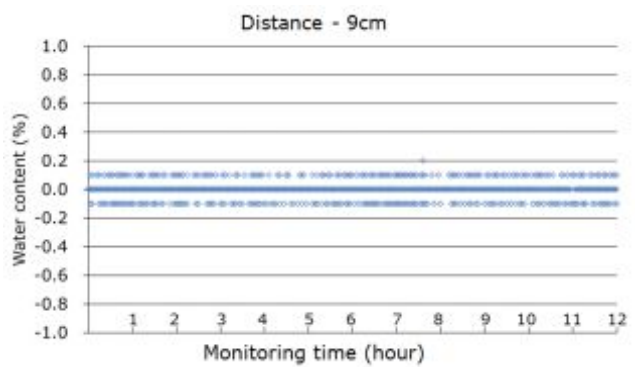
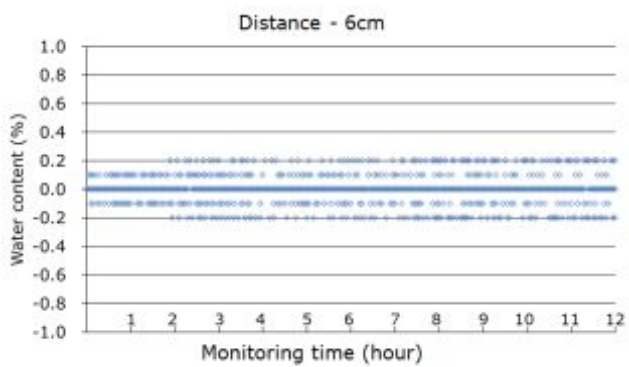
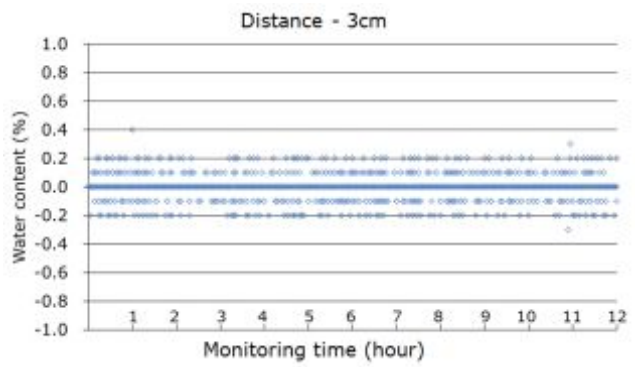
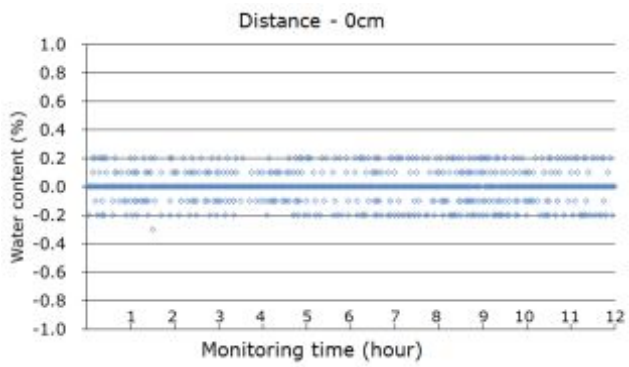


그림 3-2-17. 물이 있는 상황에서 칼리브레이션용 표준 배지(glass beads)에 설치된 센서들의 수분함량 편차(n=6, 센서간격 : 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21cm).

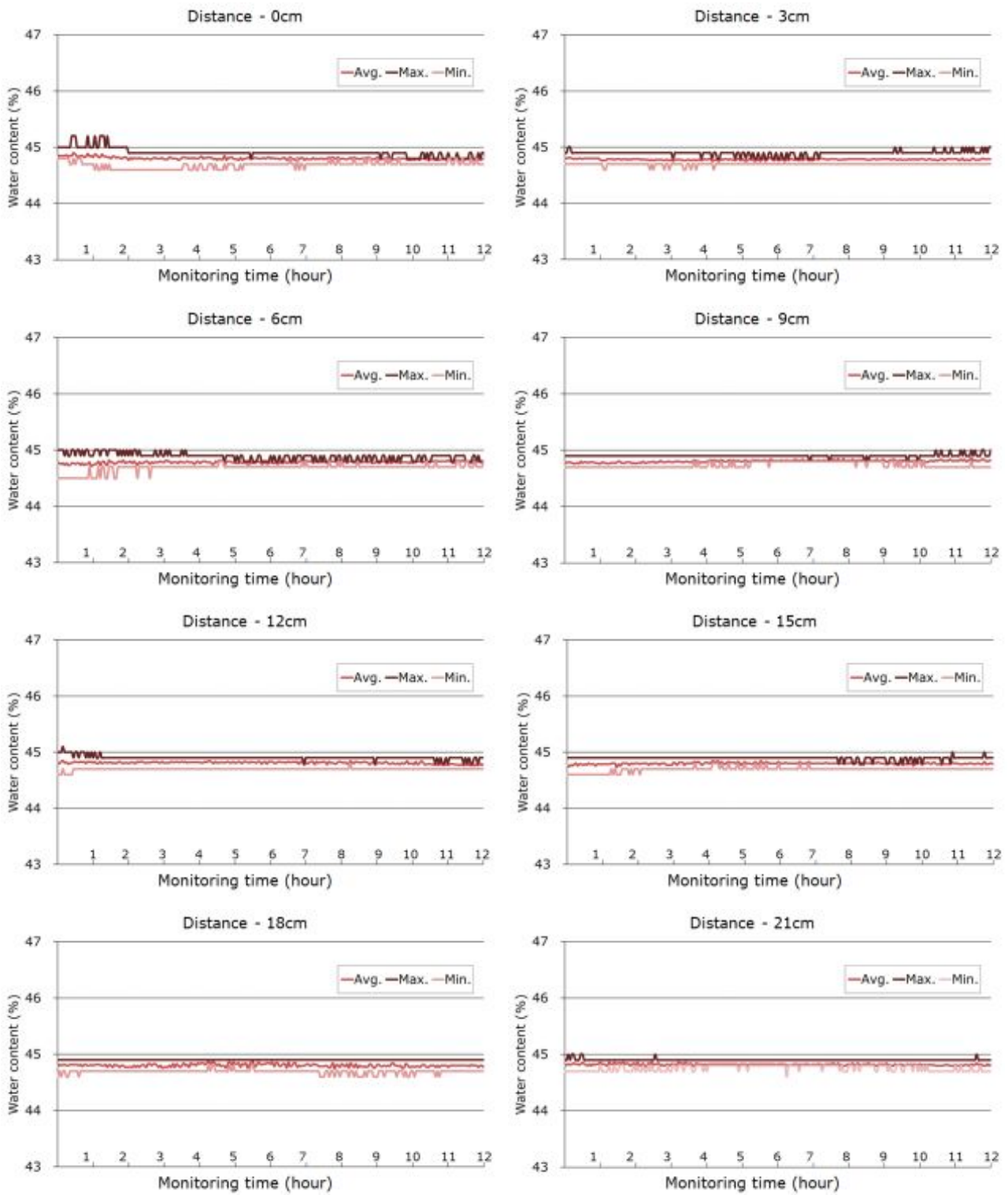


그림 3-2-18. 물이 있는 상황에서 노이즈 필터 사용시 칼리브레이션용 표준 배지(glass beads)에 설치된 센서들의 수분함량 변화 데이터(n=6, 센서간격 : 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21cm).

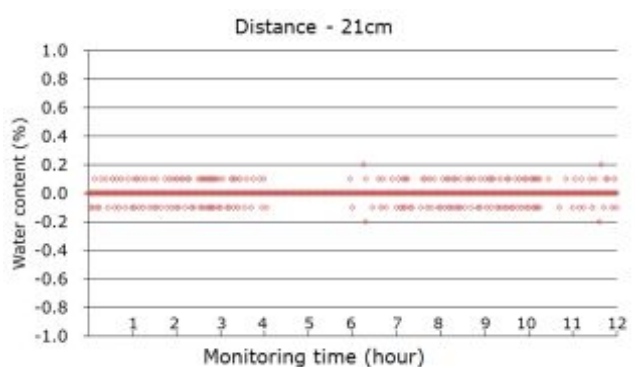
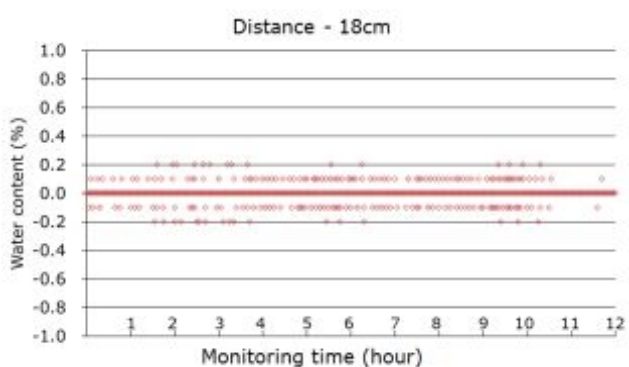
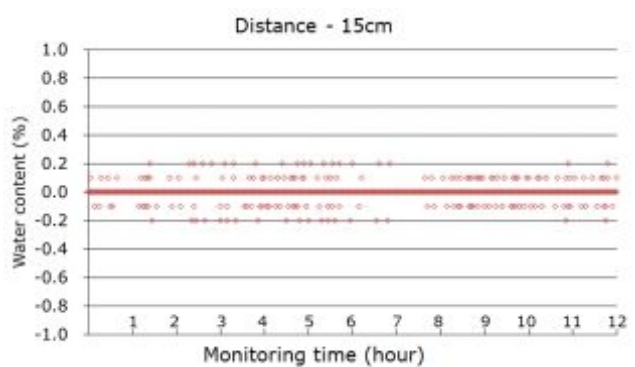
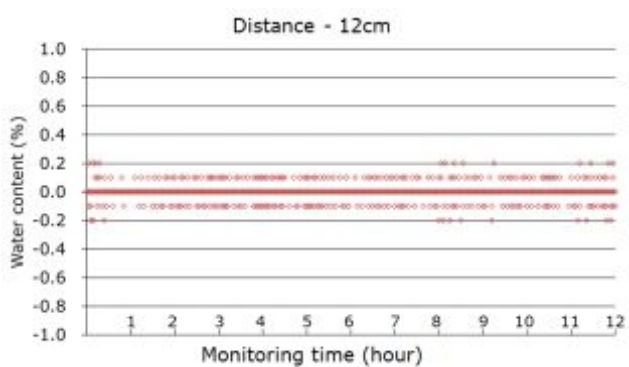
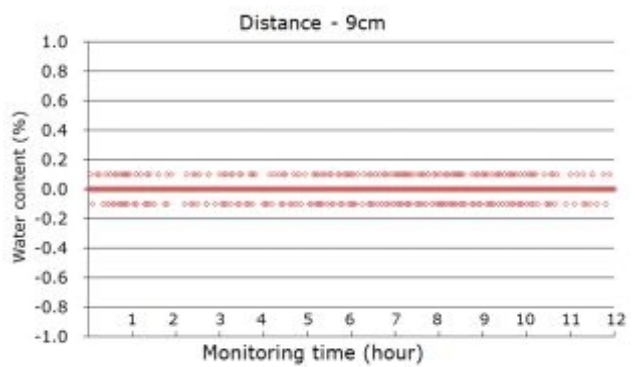
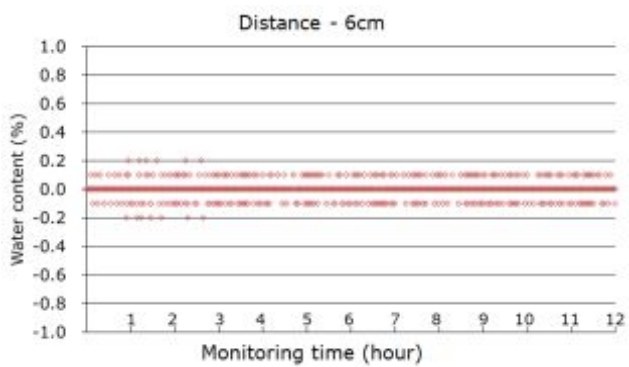
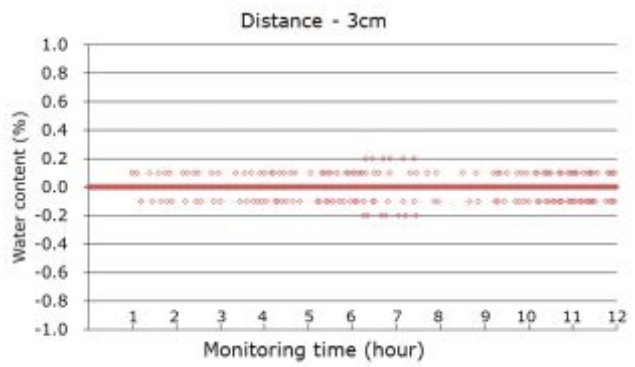
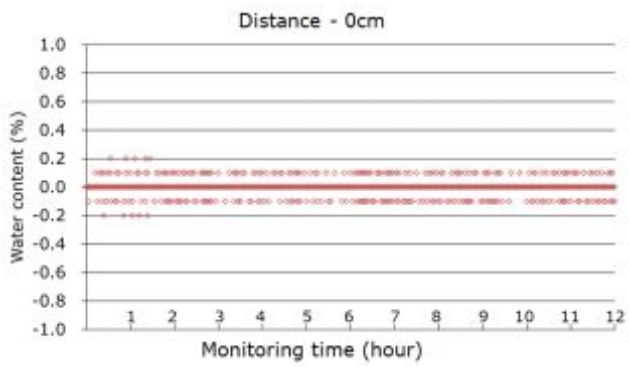


그림 3-2-19. 물이 있는 상황에서 노이즈 필터 사용시 칼리브레이션용 표준 배지(glass beads)에 설치된 센서들의 수분함량 편차(n=6, 센서간격 : 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21cm).

(다) 수분 변화 편차

센서 정확성인 수분 변화는 필터 사용시 육안으로도 확인한 차이를 나타냄을 알 수 있으나, 안정성을 나타내는 수분 편차는 보다 정확한 비교가 필요할 것으로 판단하여 측정 결과별 편차의 정도를 개수하여 나타내었다(표 3-2-2). 적은 수치(0나 ± 0.1)의 값이 많을수록 편차가 적은 상태라 할 수 있다. 필터를 사용 유무와 상관없이 센서간 간격이 멀어질수록 편차가 줄어드는 경향을 보였다. 필터를 사용할 경우에 확실한 편차 감소를 나타내었다.

표 3-2-3는 표 3-2-2의 개수화된 편차 정도에 편차 수치별로 점수를 부여하여 나타낸 것이다. 총점은 각 측정 데이터 별로 편차 0.0을 4점, ± 0.1 을 3점, ± 0.2 를 2점, 그 이상을 1점으로 하여 개수에 점수를 곱하여 합산 한 것을 개별 포인트로 하였다. 점수가 높을수록 편차가 적은 것이라 할 수 있겠다. 편차 점수에 있어서 노이즈 필터 사용 효과는 통계적으로 고도로 유의함을 나타내었고, 거리에 따른 편차 차이 또한 유의함을 보였다.

앞서 그래프 상으로만 보았을 때, 필터 비사용 9cm의 경우 사용에 적합할 것으로 판단하였으나, 편차 점수로 판단하였을 때에는 9cm는 12cm와 같은 수준으로 15, 18, 21cm 보다 낮은 편차 점수를 보여 상대적으로 우수하지 않은 측정 안정성을 나타내었다. 이에 필터 비사용시 센서간 간격은 20cm이상으로 가능한 멀리 배치하는 것이 측정에 유리함을 알 수 있다. 그리고, 필터 비사용 21cm는 편차 점수로 보면 필터 사용한 모든 간격보다 낮은 점수를 나타내어서 필터 사용시 모든 간격이 실사용에 적합할 수 있다라고 말할 수 있겠다. 즉, 노이즈 필터의 사용으로 인해 센서 측정 안정성이 필터 비사용 21cm이상으로 많이 상승되는 결과를 나타내었다.

(라) 결론

근권 수분 측정센서를 사용함에 있어 센서간 간격을 멀리 떨어지게 설치하는 것이 가장 좋을 것이지만 부득이하게 근처에 설치할 경우 최소한 9cm이상 간격을 확보하는 것이 좋을 측정 결과를 얻는데 도움이 될 것이다. 그리고 가능하다면, 노이즈 필터를 이용하게 될 경우 변동폭이 적게 되어 매우 높은 수준의 측정 정확성과 안정성 향상을 얻을 수 있을 것이다. 다량의 센서를 한곳에 9cm 이내로 가깝게 설치하는 것은 평균 값에 있어서는 유효한 사용이되지만, 실시간 변화를 관찰함에 있어서는 적합하지 않다. 물론 간격을 두고 여러 개의 센서 사용은 매우 좋은 선택이 될 수 있다.

표 3-2-2. 물이 있는 상황에서 칼리브레이션용 표준 배지(glass beads)에 설치된 센서들의 수분함량 편차 발생 개수 평균

Noise filter	Distance between sensors (cm)	The number of water content deviation (No.)						
		Water content deviation (%)						
		below -0.2	-0.2	-0.1	0.0	0.1	0.2	over 0.2
Non	0 ²	0.2	26.7	26.5	252.2	27.0	27.5	0.0
	3	0.2	19.7	40.8	238.2	41.0	19.8	0.3
	6	0.0	22.0	43.0	230.8	41.8	22.3	0.0
	9	0.0	2.8	61.8	231.7	61.0	2.7	0.0
	12	0.2	12.3	46.2	243.3	45.8	12.2	0.0
	15	0.0	17.5	29.7	267.0	28.7	17.5	0.0
	18	0.0	3.3	58.5	237.0	58.2	3.0	0.0
	21	0.0	3.3	45.7	261.2	46.7	3.2	0.0
Filtered	0	0.0	0.8	43.0	271.8	43.7	0.8	0.0
	3	0.0	1.2	31.0	295.8	31.0	1.0	0.0
	6	0.0	1.2	42.5	272.7	42.7	1.0	0.0
	9	0.0	0.0	39.0	282.7	38.3	0.0	0.0
	12	0.0	4.8	36.3	277.8	36.0	5.0	0.0
	15	0.0	4.0	20.2	312.7	19.2	4.0	0.0
	18	0.0	5.4	23.2	303.8	22.8	4.8	0.0
	21	0.0	0.8	23.3	311.3	23.7	0.8	0.0

²Each treatment has been classified on 2160 result data(n=6).

표 3-2-3. 물이 있는 상황에서 칼리브레이션용 표준 배지(glass beads)에 설치된 센서들의 수분함량 편차 발생 점수화

Noise filter	Distance between sensors (cm)	The point of water content deviation	
Non	0 ^y	1277.7	de ^x
	3	1277.7	de
	6	1266.5	e
	9	1306.2	cde
	12	1298.5	cde
	15	1313.0	abcde
	18	1310.7	bcde
	21	1334.7	abcde
	Filtered	0	1350.7
3		1373.7	abc
6		1350.5	abcd
9		1362.7	abc
12		1348.0	abcd
15		1384.7	ab
18		1373.6	abc
21		1389.7	a

Significance^z

Noise filter (NF)

Distance between sensors (DS)

*

^zProbability of significant F values : NS, *, **, *** :non-significant or significant at $p \leq 0.05$, 0.01, or 0.001, respectively

^yEach treatment has been classified on 2160 result data(n=6).

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

(4) 연구결과 요약

칼리브레이션용 표준 배지(glass beads)내 수분이 있는 상황에서 센서 2개를 이용하여 측정 시 센서 측정값의 변동이 어느 정도 발생하는 지 알아보려고 실험하였다. 플라스틱 상자에 토양이나 배지 수분 센서용 스탠다드 칼리브레이션 물질로 사용되는 glass beads를 채운 후, 증류수로 완전히 포수한 상태에서 윗면(상부)에 센서 간의 간격을 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21cm로 조절하며 측정하였다.

간격별 측정값 평균이 기준 함량(44.8%, v/v)을 중심으로 나타났는데 이는 다수의 측정으로 인한 결과로 판단되었다. 하지만, 배지내 수분함량 변화가 전혀 없는 상황임에도 불구하고 측정 수치가 변동되는 것을 관찰할 수 있었다. 센서를 일정간격으로 설치하려면 최소한 9cm이상으로, 권장은 21cm 이상의 간격을 유지하는 것이 변동폭이 적어서 좋을 측정 결과를 얻는데 도움이 될 것이다. 그리고, 노이즈 필터를 사용할 경우에는 비사용시보다 매우 높은 변동폭의 감소를 나타내었다. 이와 더불어 센서 간격을 넓게 설치한다면 보다 정확하고 안정적인 측정이 가능할 것으로 판단된다.

3. 급액부위에서의 간격에 따른 적합한 센서 측정위치 구명

(1) 실험 목표

수경재배 배지(코코넛 코이어와 암면)에 급액 되는 부분에서 떨어진 거리에 따라 위치별 배지내 수분함량의 변화를 측정, 적합한 센서 측정 위치를 구명하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

실험에 사용한 코코넛 코이어 배지는 완전 포수시 길이 폭 높이가 100cm x 20cm x 12cm 인 슬라브 형태(신성 미네랄, Sri Lanka)를 이용했다. 배지 조성은 코이어 더스트(dust)와 칩(chip) 비율 10:0, 7:3, 5:5, 3:7 (v:v) 네 가지를 사용했다. 급액 위치는 윗면 중심부에 점적핀이 들어갈 만한 구멍을 뚫고 점적핀을 이용하여 급액하고 배액구는 슬라브 배지 양끝에서 10cm 되는 바닥면에 만들었다. 측정에는 FDR(Frequency Domain Reflectometry)방식의 센서(CoCo Sensor, 미래센서, Korea)와 이를 제어하는 데이터 로거(WP700, 미래센서, Korea)를 이용했다. 센서는 측정시 배지 가운데로 긴 방향을 배지 폭에 수평이 되도록 했다. 센서 위치는 배지 윗면과 측면으로 나누어 각각 측정하였고, 거리는 드리퍼에서 5, 10, 20, 30cm 간격을 각각 두면서 설치하여 측정하였다. 한 개 드리퍼당 한 개의 센서를 이용하였으며, 하루에 배지별로 한 위치에서만 측정하였다. 급액은 하루에 2회로 오전과 오후로 나누었고, 급액간에 함량 변화가 영향을 미치지 않도록 간격을 4시간 이상을 두었다. 수돗물(EC 0.3 mS·cm⁻¹, pH 6.2)을 사용하였고, 1회에 150±20ml를 6분간 공급했다. 조사 항목으로는 급액이 공급되는 시점과 급액 후 최고 수분함량 지점과의 관계에 대한 항목으로 위치별 급액 후 최고점에 도달하는 데 걸리는 시간, 최고 수분함량 지점과 급액 공급 시점의 수분함량과의 차이, 그리고 급액 후 수분함량이 증가하여 최고점에 도달하는 동안 센서에서 감지하는 배지내 수분함량 변화율을 측정하여 계산했다.



그림 3-2-20. 실험에 사용한 코코넛 코어 슬라브

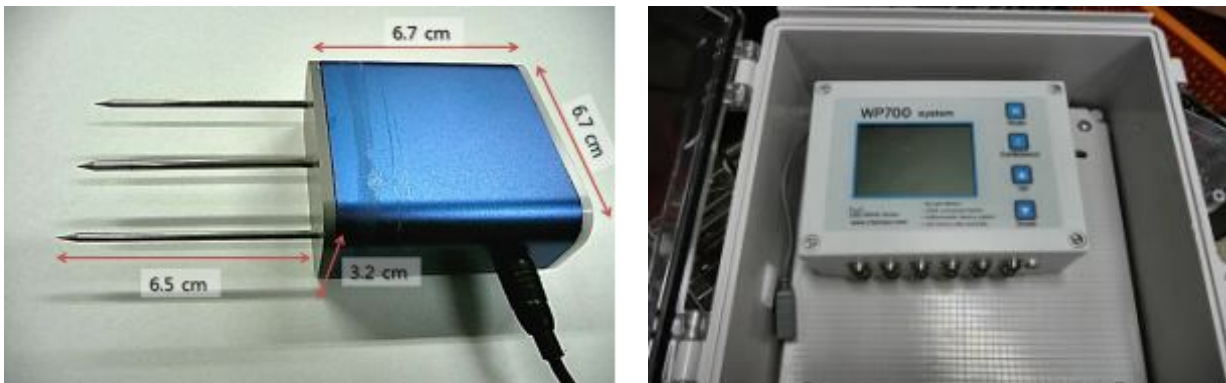


그림 3-2-21. 실험에 사용한 FDR 센서와 로거

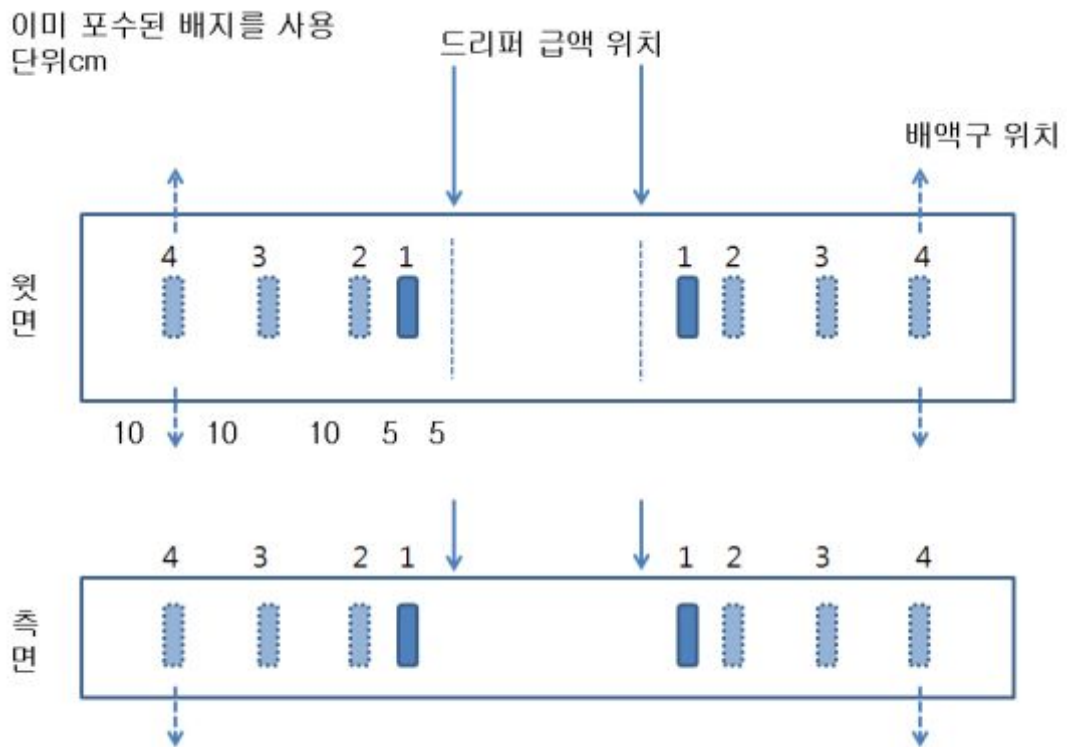


그림 3-2-22. 코코넛 코어 슬라브에서의 실험 묘사도

(3) 실험수행 내용 및 결과

(가) 코코넛 코이어 배지의 물리적 특성

본 실험에 사용한 코코넛 코이어 배지들의 물리적 특성을 표 3-2-4에 나타내었다. 4가지 배지 조성에서 가밀도와 입자밀도는 chip의 함량이 증가할수록 점차 증가되었다. 총공극은 거의 차이를 나타내지 않았으나, chip함량이 증가할수록 총공극이 미미하게 감소하는 경향을 보였다. 액상은 chip의 함량이 증가할수록 확연한 감소가 나타났고, 기상의 경우는 반대로 chip의 함량이 증가할수록 증가되는 특징을 보였다.

표 3-2-4. 실험에 사용한 코코넛 코이어 배지의 조성별 물리성

Substrate (coir dust:chip)	Dry bulk density (g·cm ⁻³)	Particle density (g·cm ⁻³)	Total pore space (v/v, %)	Water volume (v/v, %)	Air volume (v/v, %)
10 : 0 ²	0.072	1.20	94.0	52.0	42.0
7 : 3	0.087	1.38	93.7	51.0	42.7
5 : 5	0.087	1.44	93.9	48.3	45.6
3 : 7	0.099	1.55	93.6	42.8	50.8

²Each data has been obtained by 10 repetitions.

(나) 코코넛 코이어 배지에서의 측정 위치와 거리에 따른 수분함량 변화

코코넛 코이어 dust와 chip의 비율이 3:7(v/v)인 배지에서의 측정 위치별 수분함량 변화(그림 3-2-23)는 윗면의 경우는 5, 10cm는 증가곡선이 나타났으나 측정 거리가 멀어짐에 따라 급액시 생기는 증가곡선이 부정확하게 나타나는 모습을 나타냈다. 배지내 수분함량의 경우는 5cm 위치가 35~40%로 다른 위치에 비하여 높게 나타났다. 10cm는 35%수준, 20, 30cm의 경우 수분함량은 둘다 30~35%정도 수준을 나타냈다. 측면 측정 결과, 급액시 생기는 증가곡선의 패턴이 5, 10cm는 나타났으나 측정 거리가 멀어짐에 따라 부정확하게 나타났다. 측면의 경우, 배지내 수분함량은 5cm 위치가 40% 정도로 다른 위치에 비해 높게 나타났다. 10, 20cm의 경우 수분함량은 35% 정도 수준을 나타냈으며, 30cm의 경우 수분함량은 25~30%정도이며 가장 낮은 수준을 나타냈다. 전체적인 수분함량을 비교할 때 윗면과 측면이 큰 차이가 없었다.

코코넛 코이어 dust와 chip의 비율이 5:5(v/v)인 배지에서의 측정 위치별 수분함량 변화(그림 3-2-24)를 보면, 윗면 측정에서는 5cm에서 확실한 증가곡선을 볼 수 있었고, 10cm의 경우도 증가곡선을 발견할 수 있었다. 하지만, 20, 30cm의 경우, 변화의 정도가 낮은 증가곡선을 발견할 수 있었다. 배지내 수분함량은 5cm가 45~50% 수준으로 가장 낮았고, 점점 멀어질수록 높아졌다. 측면 측정 결과, 5cm에서는 확실한 증가곡선을 발견하였고, 10cm경우도 작으나 증가곡선이 나타남을 알 수 있었다. 20cm와 30cm는 증가곡선 형태가 거의 나타나지 않았다. 측면에서의 수분함량은 윗면과 다르게 10cm가 45% 수준으로 가장 낮았고, 나머지 세 위치는 45~50% 범위로 비슷한 수분함량을 나타냈다. 전체적으로 측면이 윗면보다 약간 낮은 수분함량을

보였다.

코코넛 코이어 dust와 chip의 비율이 7:3(v/v)인 배지에서의 측정 위치별 수분함량 변화(그림 3-2-25)를 관찰하였을 때, 윗면 측정시 5, 10, 20, 30cm 측정위치 모두 배지내 수분 증가곡선을 발견할 수 있었으며, 5cm과 10cm이 20cm과 30cm보다 좀 더 확실한 증가곡선이 나타났다. 수분함량은 전체적으로 55~60% 수준으로 비슷하고 10cm 부분이 65% 수준으로 조금 높았다. 측면 측정에서는 5, 10, 20, 30cm 측정위치 모두 배지내 수분 증가곡선을 발견할 수 있었다. 배지내 수분함량은 10cm가 가장 높았고, 멀어질수록 점점 낮아지는 경향을 보였다. 윗면과 측면의 수분함량을 비교해 보면, 급액구 근처인 5, 10cm는 측면에서 높았고, 멀어지는 20, 30cm은 윗면이 높았다. 이는 5:5 까지는 배지내 공극이 많이 조성되어 배지가 직접 흡수하는 것이 7:3 보다 적었으나 dust 함량의 증가와 함께 배지가 직접 흡수하는 수분양도 상대적으로 증가되어 기본 보유 수분량이 많을 뿐만 아니라 측면 측정시 윗면에서 측정되는 깊이보다 좀 더 깊은 배지 부분을 측정할 수 있어서 상대적으로 수분을 많이 보유하고 있는 급액부분 배지 하단부를 측정할 수 있었던 것이 그 이유로 판단된다.

코코넛 코이어 dust와 chip의 비율이 10:0(v/v)인 배지에서의 측정 위치별 수분함량 변화(그림 3-2-26)에서 윗면 측정시 5, 10, 20, 30cm 측정위치 모두 배지내 수분 증가곡선을 발견할 수 있었는데, 급액구에 멀어질수록 증가되는 높이가 약간씩 감소되는 것을 발견할 수 있었다. 배지내 수분함량은 급액구에서 멀어질수록 조금씩 높아 졌다. 측면 측정 결과의 증가곡선 패턴을 보면 5, 10, 20, 30cm 측정위치 모두 배지내 수분 증가곡선을 발견할 수 있었는데, 윗면과 마찬가지로 급액구에 멀어질수록 증가되는 높이가 약간씩 감소되었다. 수분함량은 20cm에서 80% 수준으로 가장 높았고, 30cm에서 70% 수준으로 네 위치들 중 가장 낮았다. 윗면과 측면의 수분함량을 비교해 보면, 다른 종류의 배지들과 다르게 측면의 수분함량이 윗면보다 전부 높았으며, 이는 앞서 이야기 한 것처럼 측면측정시 윗면 측정정보다 수분이 모일 수 있는 배지 하단부를 조금 더 측정할 수 있고, 수분 보유력이 다른 것보다 높은 10:0 배지의 경우에는 배지 하단에 수분을 보유할 수 있는 가능성이 타배지보다 높으므로 측면 측정을 통한 배지내 수분함량의 상대적 증가를 유도할 수 있을 것이다.

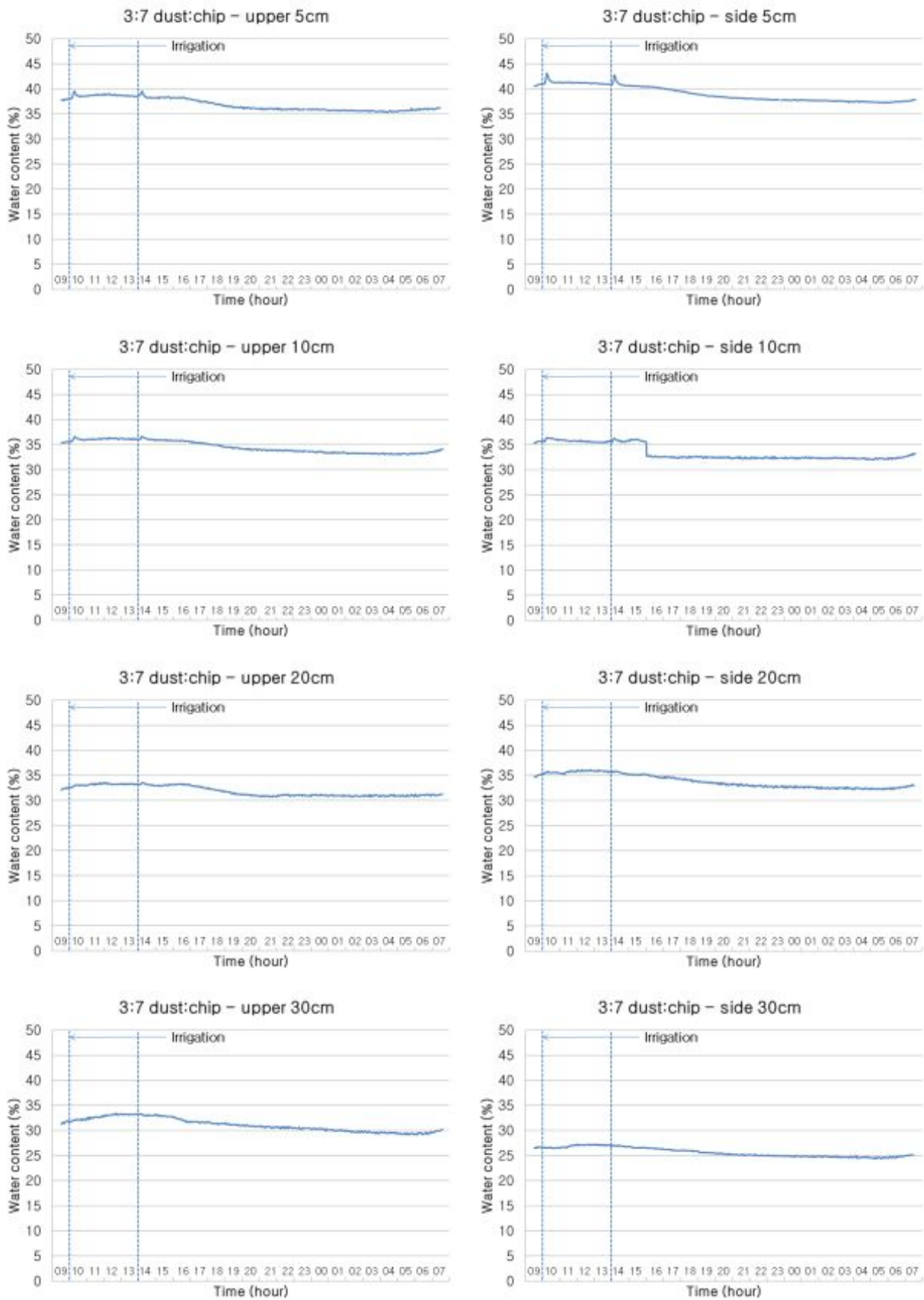


그림 3-2-23. 코코넛 코이어 배지(dust:chip = 3:7)에서의 측정 위치별 수분함량 변화

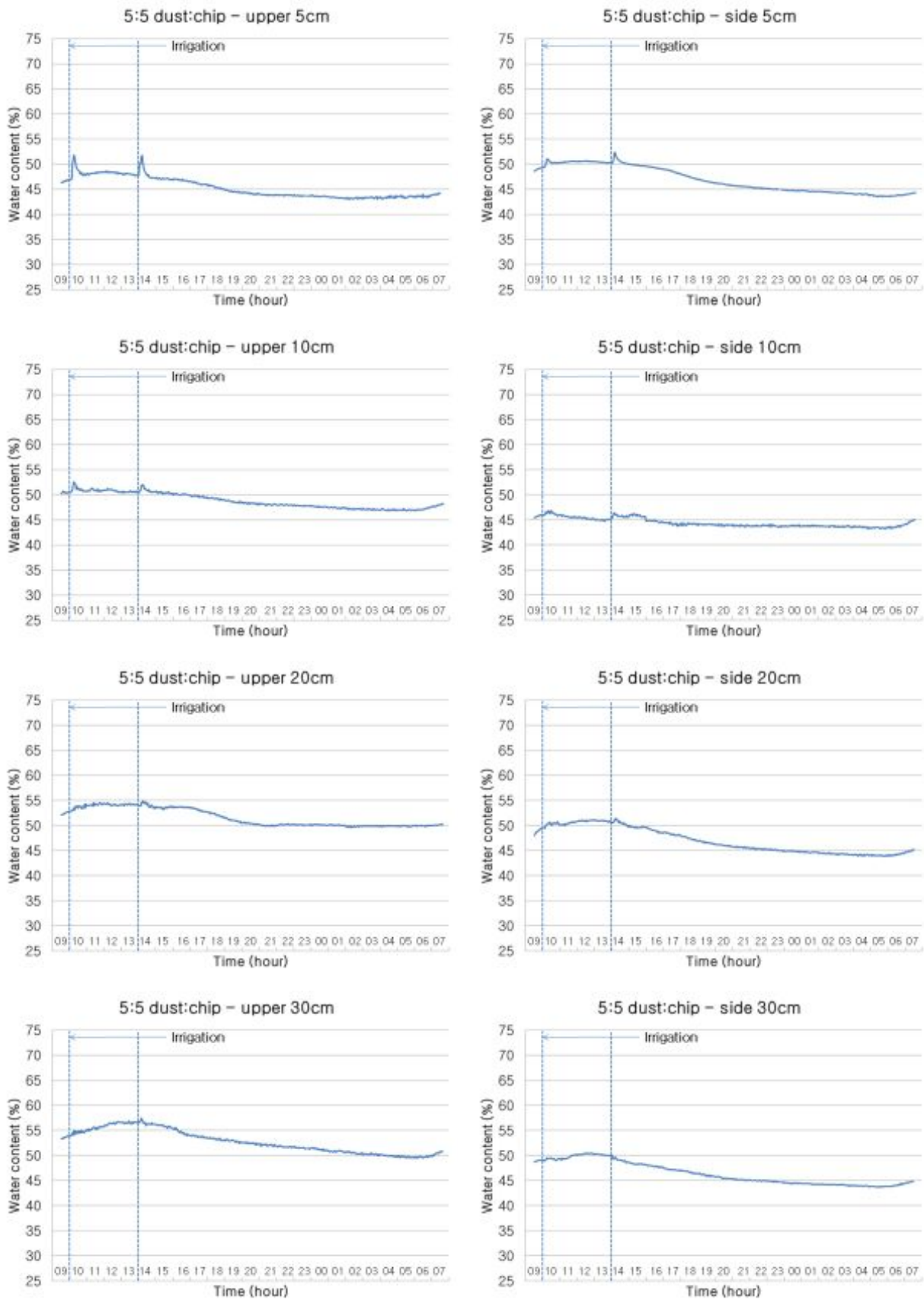


그림 3-2-24. 코코넛 코이어 배지(dust:chip = 5:5)에서의 측정 위치별 수분함량 변화

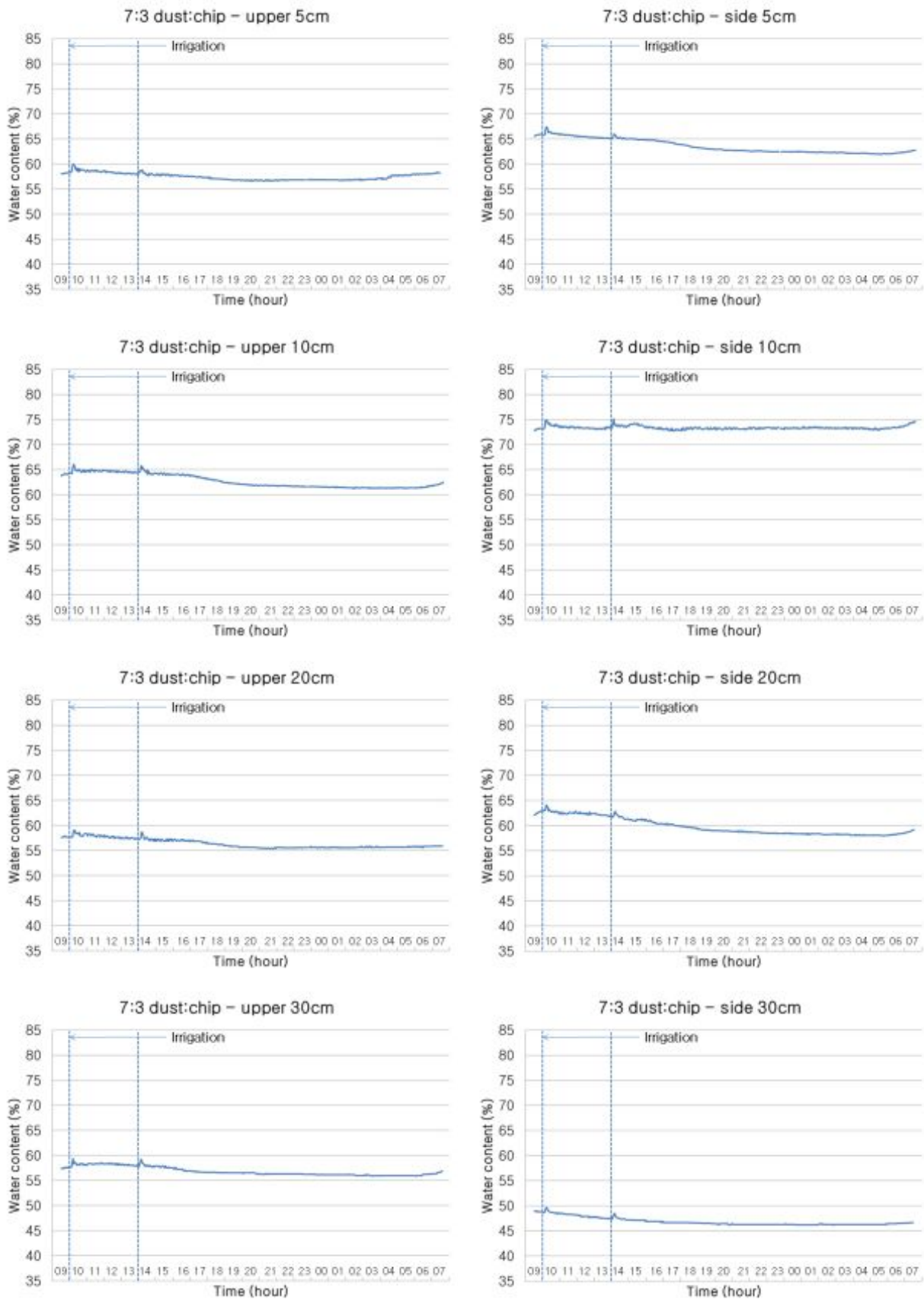


그림 3-3-25. 코코넛 코이어 배지(dust:chip = 7:3)에서의 측정 위치별 수분함량 변화

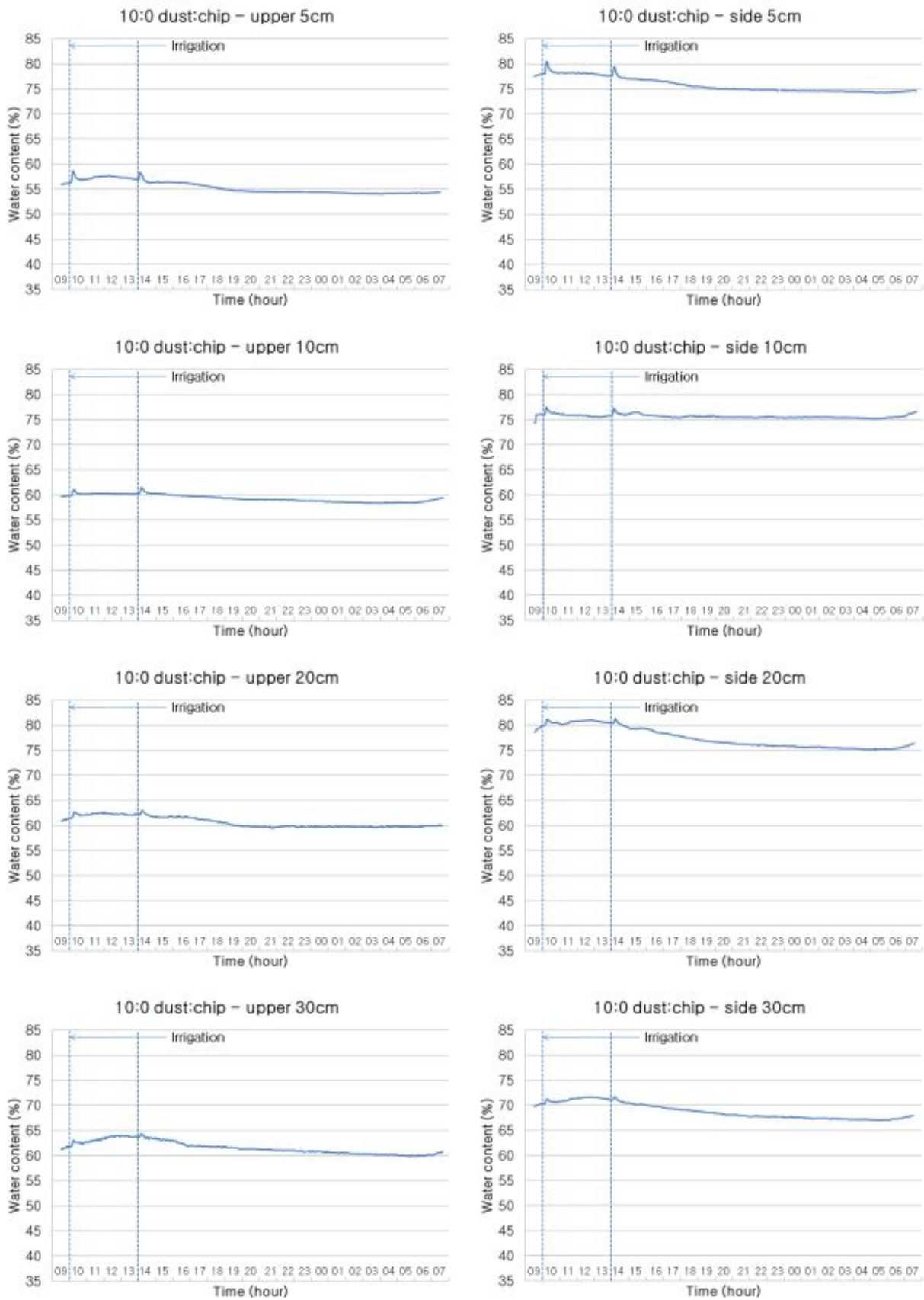


그림 3-3-26. 코코넛 코이어 배지(dust:chip = 10:0)에서의 측정 위치별 수분함량 변화

(다) 코코넛 코이어 배지에서의 측정 위치와 거리별 수분 함량 측정 특성

표 3-2-5~8은 앞의 그래프에서 급액이 들어가는 시점과 최초 최고 수분함량 지점과의 관계를 나타낸 것이다. 배지종류와 측정 위치별 최초 최고점에 도달하는 시간, 최초 최고점에서의 수분함량과 급액시작 시간 때 수분함량의 차이, 그리고 급액 후 최초 최고점에 도달하는 동안의 수분함량 상승률을 계산한 것이다.

표 3-2-5는 코코넛 코이어 배지 조성 3:7에서 측정 위치별 FDR센서를 이용한 수분함량 측정 특징을 나타낸 것이다. 최고점 도달 시간에서 측정 위치와 측정 거리의 영향력이 나타났는데, 윗면 측정시 측면 측정보다 늦었고 측정 거리가 급액 지점에서 가장 멀리 떨어진 30cm에서 빠른 도달 시간을 보였다. 수분함량 차이와 변화율은 측정 위치에 따른 차이를 보이지 않았으나 측정 거리에 의한 차이가 나타났다. 급액 지점에 가까울수록 높았고 멀어질수록 낮아지는 수분함량 차이와 변화율을 보였다.

코코넛 코이어 배지 조성 5:5에서 측정 위치별 FDR센서를 이용한 수분함량 측정 특징(표 3-2-6에서 최고점 도달 시간은 측정 위치에 따른 차이를 나타내지 않았으며, 측정 거리에 따른 차이도 나타내지 않았다. 급액지점에서 어느 위치나 거리에서 측정하더라도 최고점에 도달하기까지 비슷한 시간이 걸렸다는 것을 의미한다. 수분함량 차이와 변화율에서는 측정 위치와 측정 거리에 따른 차이를 보였다. 수분함량 차이는 윗면 측정에서 측면 측정보다 높았고, 거리에 따라서는 급액 지점에 가장 가까운 5cm서 높았다가 멀어질수록 낮아졌다. 수분 변화율은 윗면 측정이 측면 측정보다 높았고, 측정을 급액 지점에 가까운 곳에서 할수록 높고 멀어질수록 낮아졌다.

표 3-2-7은 코코넛 코이어 배지 조성 7:3에서 측정 위치별 FDR센서를 이용한 수분함량 측정 특징을 나타낸 것이다. 최고점 도달 시간은 측정 위치와 측정 거리의 영향력을 받지 않았다. 어느 위치나 거리에서 측정해도 최고점에 도달하기까지 비슷한 시간이 걸렸다는 것을 의미한다. 수분함량 차이는 윗면 측정시 측면 측정보다 높게 나타났으며, 거리에서는 급액 지점에 가장 가까운 5cm서 높았다가 멀어질수록 낮아졌다. 수분 변화율 또한 윗면 측정이 측면 측정보다 높았고, 측정 거리가 급액 지점에 가까울수록 높고 멀어질수록 낮아졌다.

표 3-2-7은 코코넛 코이어 배지 조성 10:0에서 측정 위치별 FDR센서를 이용한 수분함량 측정 특징을 나타낸 것이다. 최고점 도달 시간, 시작점과 최고점의 수분함량 차이, 그리고 수분 변화율 모두 측정 위치에 따른 차이를 나타내지 않았다. 하지만, 측정 거리에 의한 차이를 나타냈다. 최고점 도달 시간은 윗면 측정시 차이를 나타내지 않았지만, 측면을 측정 하였을 때, 측정 거리가 멀어지면서 최고점 도달 시간이 길어졌다. 수분함량 차이는 윗면과 측면 모두 급액 위치에 가장 가까운 5cm서 높았다가 멀어질수록 낮아졌다. 수분 변화율 또한 급액 지점에 가까울수록 높고 멀어질수록 낮아졌다.

다른 배지들과 다르게 3:7 배지에서는 급액 지점에서 멀어질수록 빠르게 최고점에 도달하는 특징을 나타낸다. 이는 다른 배지들과 다르게 3:7 배지에서의 높은 chip 함량으로 인해 수분의 이동이 빠르게 일어나는 것이 그 이유로 판단된다. 다만, 수분의 이동이 빠른 만큼 보유 수분함량은 다른 처리들에 비하여 적음을 알 수 있다(그림 3-2-27~28). 수분함량 차이에 있어서도 다른 배지와 다르게 3:7 배지에서는 측정 위치에 따른 차이를 보이지 않았는데, 이는 치밀하지 못한 배지조성으로 인해 수분이 빠르게 그러나 적게 이동하는 것이 그 이유가 될 것으로 판단된다.

코이어 5:5 배지의 5cm 위치에서 가장 높은 수분함량 차이와 변화를 나타내었다.

표 3-2-5. 코코넛 코이어 배지(dust:chip = 3:7)에서의 측정 위치와 거리별 수분 함량 측정 특성

Position	Distance (cm)	Reaching time of maximum point after irrigation (minute)	Gap of water content between irrigation and maximum point (% , v/v)	Water content changing rate (%/min)
Upper	5	15.5 ab ^y	2.2 a	0.140 a
	10	15.8 ab	1.0 b	0.065 b
	20	18.5 a	0.6 b	0.030 b
	30	13.3 b	0.5 b	0.033 b
Side	5	16.6 a	2.4 a	0.144 a
	10	15.5 a	1.3 ab	0.088 ab
	20	14.0 a	0.4 b	0.028 b
	30	8.5 b	0.2 b	0.025 b
Significance ^z				
Position (P)		*	ns	ns
Distance (D)		***	***	***

^zProbability of significant F values : NS, *, **, *** ; non-significant or significant at P<0.05, 0.01, or 0.001, respectively.

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

표 3-2-6. 코코넛 코이어 배지(dust:chip = 5:5)에서의 측정 위치와 거리별 수분 함량 측정 특성

Position	Distance (cm)	Reaching time of maximum point after irrigation (minute)	Gap of water content between irrigation and maximum point (% , v/v)	Water content changing rate (%/min)
Upper	5	15.4 a ^y	5.6 a	0.366 a
	10	16.3 a	2.6 b	0.162 b
	20	16.7 a	0.9 c	0.053 b
	30	16.7 a	1.1 bc	0.067 b
Side	5	15.2 a	2.4 a	0.158 a
	10	14.3 a	1.2 b	0.087 ab
	20	16.7 a	1.3 b	0.077 b
	30	16.7 a	0.8 b	0.047 b
Significance ^z				
Position (P)		ns	***	***
Distance (D)		ns	***	***

^zProbability of significant F values : NS, *, **, *** ; non-significant or significant at P<0.05, 0.01, or 0.001, respectively.

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

표 3-2-7. 코코넛 코이어 배지(dust:chip = 7:3)에서의 측정 위치와 거리별 수분 함량 측정 특성

Position	Distance (cm)	Reaching time of maximum point after irrigation (minute)	Gap of water content between irrigation and maximum point (% , v/v)	Water content changing rate (%/min)
Upper	5	13.8 a ^y	2.2 a	0.160 a
	10	15.0 a	1.9 ab	0.133 ab
	20	14.7 a	1.4 b	0.093 b
	30	15.0 a	1.7 ab	0.110 ab
Side	5	13.2 a	1.6 ab	0.122 a
	10	15.0 a	2.0 a	0.133 a
	20	14.0 a	1.2 bc	0.088 b
	30	13.3 a	0.9 c	0.065 b
Significance ^z				
Position (P)		ns	***	**
Distance (D)		ns	***	***

^zProbability of significant F values : NS, *, **, *** ; non-significant or significant at P<0.05, 0.01, or 0.001, respectively.

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

표 3-2-8. 코코넛 코이어 배지(dust:chip = 10:0)에서의 측정 위치와 거리별 수분 함량 측정 특성

Position	Distance (cm)	Reaching time of maximum point after irrigation (minute)	Gap of water content between irrigation and maximum point (% , v/v)	Water content changing rate (%/min)
Upper	5	14.7 a ^y	2.5 a	0.172 a
	10	15.5 a	1.5 b	0.095 b
	20	18.3 a	1.1 b	0.060 b
	30	15.7 a	1.0 b	0.060 b
Side	5	14.2 b	2.2 a	0.155 a
	10	14.7 ab	1.7 ab	0.113 ab
	20	15.5 a	1.1 bc	0.073 bc
	30	15.5 a	0.8 c	0.053 c
Significance ^z				
Position (P)		ns	ns	ns
Distance (D)		*	***	***

^zProbability of significant F values : NS, *, **, *** ; non-significant or significant at P<0.05, 0.01, or 0.001, respectively.

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

(라) 코코넛 코이어 배지에서의 수분 함량 증가율

식물 근권 적정 배지 함량을 과채류 다년재배시 적용하는 10L라 가정하고, 본 실험에서 공급하는 수준(1회 150±20ml, 6분 공급)을 적용시 10L의 근권에는 0.217~0.283 %/min의 수분함량 증가가 발생되어야 한다. 그러나 이는 배지 전체에 골고루 수분이 전달되었을 때 나타나는 결과라 할 수 있다. 실험에서 측정에 사용한 센서는 길이 6.5cm로서 어느 방향을 쫓던 길이로는 6.5cm 범위만 측정이 가능하다. 그러므로, 윗면 측정시 실험에 사용된 배지의 높이인 12cm 중 6.5cm에 전달된 수분만 측정이 이루어 진다고 할 수 있다. 이를 적용하면, 센서에 의해 측정될 수분함량 증가율은 0.217~0.283 %/min의 6.5/12인 0.118~0.153 %/min 가 된다.

이 값은 배지내에서 수분이 골고루 확산된다고 가정할 때, 실험에 사용된 FDR센서에 의해 계측되어지는 배지의 수분함량 증가율이다. 즉, 센서는 급액이 되면 분당 0.118~0.153 % 수분함량 증가를 계측할 수 있어야 한다. 이보다 낮은 수준으로 측정이 되면, 근권 수분변화에 대한 민감도가 낮은 것이라고 표현할 수 있겠다. 이 기준 값을 배지 윗면에서 측정한 위치에 따른 배지별 수분함량 증가율에 적용한 결과(그림 3-2-27)를 보면, 5cm의 측정 위치는 4종류의 배지 조성 모두에서 적합함을 나타내었고 10cm 위치는 7:3과 5:5에서만 나머지는 센서가 만족할 만한 측정 감도를 나타내지 못하는 것을 알 수 있다.

배지 측면에서도 위와 같은 방법으로 적용을 해보면, 센서에 의해 측정될 측면의 수분함량 증가율은 0.217~0.283 %/min의 6.5/20인 0.071~0.092 %/min 가 된다. 이를 측면에서 측정한 배지별 수분함량 증가율(그림 3-2-28)에 나타내면, 5cm의 측정 위치는 4종류의 배지 조성 모두에서 측정 감도보다 높은 수준으로 적합함을 나타내었고 10cm 위치 또한 측정에 적합함을 나타내었다. 20cm 위치는 3:7을 제외한 나머지 배지에서 측정에 적합함을 보였다. 30cm의 위치는 센서가 만족할 만한 측정 감도를 나타내지 못했다.

감도로만 판단할 경우 측정이 더 좋은 결과를 나타내는 것처럼 보일 수 있으나, 기본적으로 절대적인 변화율 수치가 윗면 측정의 절반 수준이고, 결정적으로 측면 설치시 배지와 센서 간에 유격(그림 3-2-29)이 생길 수가 있어서 정확한 측정을 방해하는 요인이 있는 단점을 가지고 있다. 이 틈의 간격은 약 3mm로 이는 센서에 표시된 외부 포장 플라스틱과 같은 수준의 두께이다. 센서 탐침의 길이가 약 6.5mm 수준으로 3mm는 이의 5% 수준에 못미치는 작은 부분이지만, 이 부분이 벌어진다는 것은 그만큼 배지와 센서의 접촉성에서 문제가 발생할 수 있다는 것이고, 이는 측정의 부정확성 뿐만 아니라 센서가 외부 충격에 쉽게 빠질 수 있는 가능성을 제시한다고 할 수 있다.

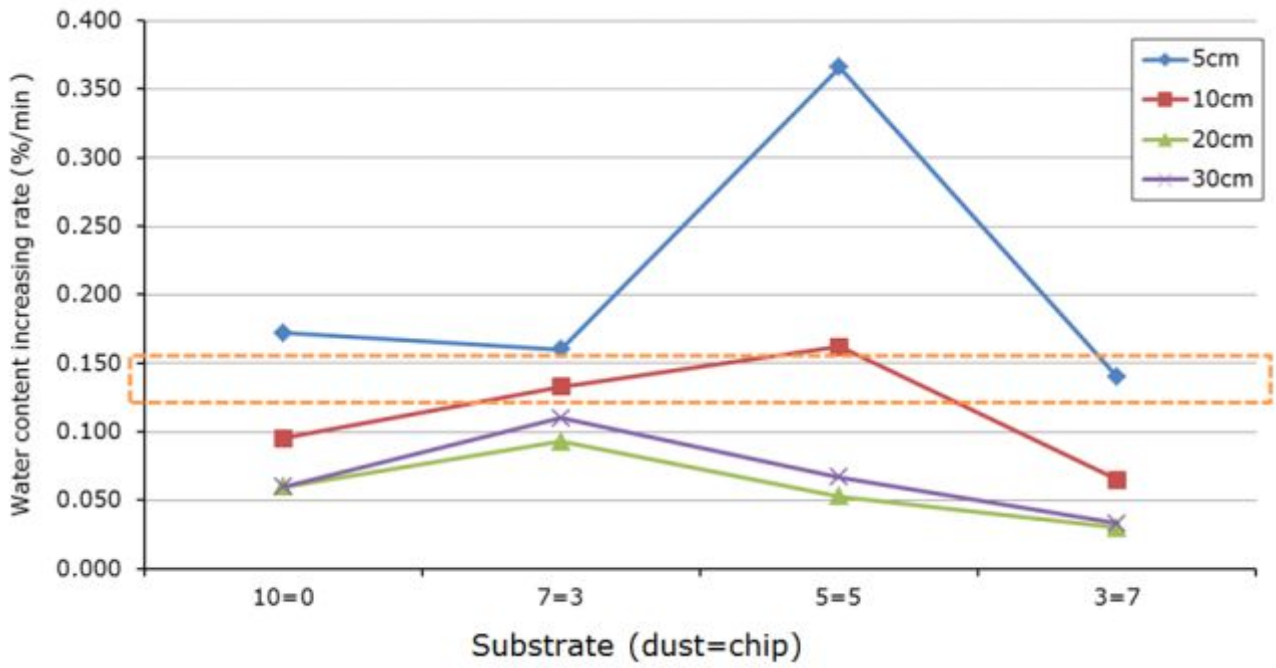


그림 3-2-27. 코코넛 코이어 배지에서 윗면 측정시 거리별 수분함량 증가율

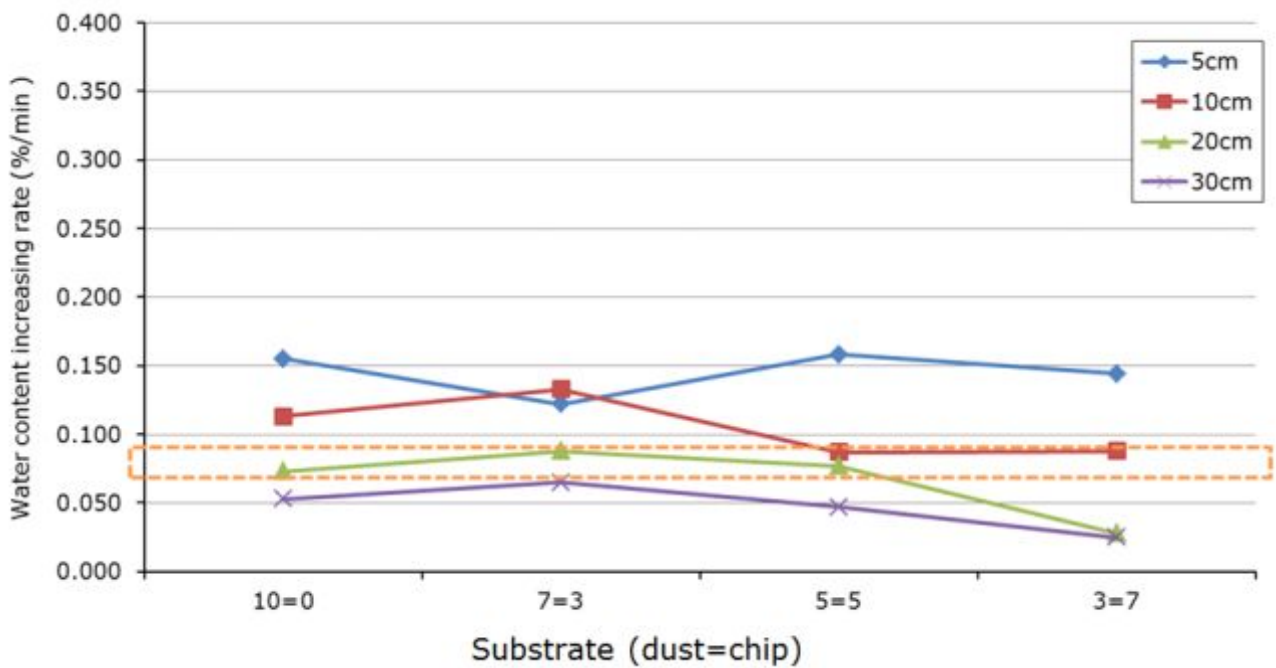


그림 3-2-28. 코코넛 코이어 배지에서 측면 측정시 거리별 수분함량 증가율

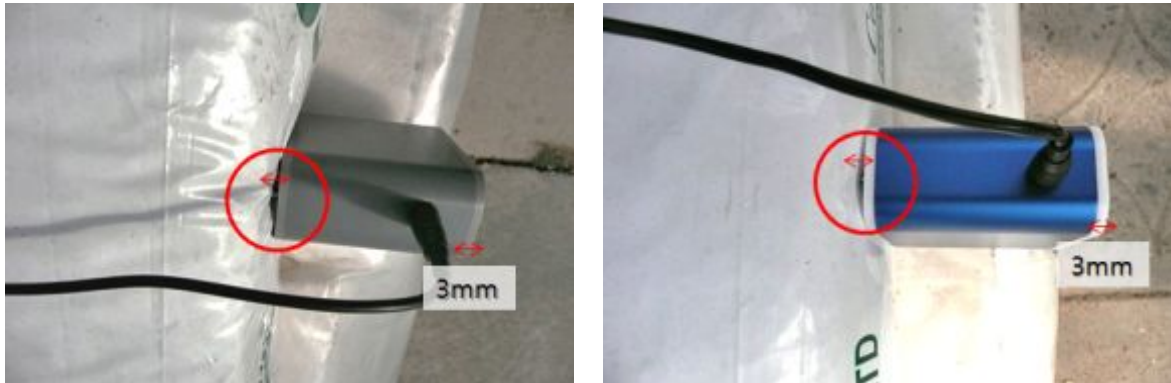


그림 3-2-29. 측면 측정시 센서와 배지사이의 벌어짐

(4) 연구결과 요약

수경재배 배지(코코넛 코이어)에 급액 되는 부분에서 떨어진 거리에 따라 위치별 배지내 수분함량의 변화를 측정, 적합한 센서 측정 위치를 구명하고자 실험하였다. 코코넛 코이어 배지와 압면배지를 이용하여, 한 센서를 급액 지점에서부터 5, 10, 20, 30cm로 거리를 점차 멀어지게 하며 윗면과 측면을 측정하였다.

수경재배용 코코넛코이어 배지에서 FDR센서를 이용하여 수분함량을 측정시 윗면에 설치하는 것이 측면보다 최고점에 다다른 시간 면에서는 느리지만 보다 정확한 측정을 할 수 있다. 민감하게 변화하는 수분함량의 측정을 위해 급액구에 가까운 곳(실험에서는 5cm)에 설치하는 것이 측정에 유리할 것으로 판단된다.

제 3 절

FDR센서를 활용한 파프리카 무배액 급액관리 기술 체계화

1. 무배액 시스템에 적합한 급액체계 구명

가. 파프리카 무배액 수경재배에 적합한 수분함량 구명

(1) 실험 목표

코코넛 코이어 배지를 이용한 파프리카 수경재배시에 FDR 센서를 이용, 배지내 근권부 수분 함량을 조절하여 파프리카 생육에 적합한 배지내 수분 조건을 구명하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

공시작물은 빨간색 파프리카 품종인 'Special' (*Capsicum annum* cv. Special)을 서울시립대 양지봉 온실에서 2010년 2~8월에서, 노란색 품종인 'RZ208'(Rijk Zwaan Co., Netherlands)는 7월~9월에 연동형 온실에서 재배하였다. 재배 전기간동안 PBG 배양액(EC 1.5 dS · m⁻¹, pH 5.8)으로 충분히 포수시킨 240공 암면플러그(Cultilene Co., Netherlands)에 종자를 1립씩 파종한 후 버미큘라이트를 이용하여 복토하였다. 균일한 발아를 위하여 생육상(주야간 온도 27/23±1℃, 습도 80% 이상)에서 본엽 2~3매가 전개될 때까지 2~3일 간격으로 PBG 배양액(EC 2.0 dS · m⁻¹, pH 5.8)을 저면 관수하였다. 본엽 3매가 완전히 전개된 후 PBG 배양액(EC 2.0 dS · m⁻¹, pH 5.8)으로 포수시킨 암면블럭(10cm×10cm×7.5cm, 한국유알암면, Korea)에 줄기를 U자형으로 절곡 이식하였다. 육묘기간 중에는 PBG 배양액(EC 2.3 dS · m⁻¹, pH 5.8)을 2일 간격으로 저면관수하였고, 정식일까지 점진적으로 배양액의 EC를 2.5dS · m⁻¹까지 상승시켜 육묘하였다. 실험에 사용된 배지는 인도네시아산 coconut coir dust와 fiber의 혼합을 8:2 (v/v)의 비율로 조제하여 PE bag(100×15cm)에 주입하여 사용한 자루재배 방식에서 'Special' 을, 'RZ208' 품종은 판매용 코코넛 코이어 슬라브(12cm×20cm×100cm, dust:chip = 7:3, v/v, 신성미네랄)에서 PBG배양액 1/2배액으로 충분히 포수한 뒤 정식하여 사용하였다.

'Special' 품종의 배지내의 수분함량을 제어하기 위해 사용한 수분센서는 FDR 수분센서(WT1000N, 미래센서, 한국)로 뾰족한 probe를 배지에 45° 각도로 찔러 넣어서 이를 측정하며 동시에 제어하였다. 배지 내 수분함량 제어 포인트는 30~35%, 40~45%, 50~55%, 60~65%로 조절하였고, 관행 수경재배는 타이머를 이용한 배양액 공급(1회 200ml씩 5~6회)을 실시하였다. 조사 항목으로는 광합성, 생육, 급, 배액량 및 수량을 측정 분석하였다. 'RZ208' 품종의 양액 공급 처리는 배지수분측정 FDR센서와 로거(WP600, 미래센서)를 이용하였으며 배지내 수분함량을 기준으로 급액시작 포인트와 급액차단 포인트를 20~25, 30~35, 40~45, 50~55, 60~65(water content, WC, %, v/v) 범위로 설정하였으며, 대조구는 하루에 배양액을 주당 10회로 나누어 공급하며, 공급량은 착과 전까지는 주당 600±50ml, 착과 후에는 주당 1000±50ml의 배양액을 공급하였다. 날씨가 흐려지거나 비오는 날에는 공급횟수를 3회로 제한하였다.

(3) 실험수행 내용 및 결과

‘Special’ 품종의 파프리카 수경재배에서 coconut coir 혼합 배지(coconut dust : fiber = 8:2) 급액제어수준에 따른 수분 함량변화는 그림 3-3-1과 같다. 배지 내 수분센서 제어 처리에 비해 타이머로 배양액이 공급된 처리의 배지 내 수분함량은 최저 35%에서 최대 65%까지 변화 폭이 컸다. 하루 동안(5월 10일)의 배지 내 수분함량 변화는 제어 처리구는 각 제어 수준 변차 범위 $5\pm 2\%$ 에 포함되었으나, 타이머 처리는 최저 수분함량 47%에서 최고 수분함량 63% 범위로 일중 수분편차가 15%였다. 하루 동안의 배지 내 EC 변화는 40~45%제어 처리구의 EC $2.0 \sim 2.3 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 를 제외한 나머지 처리구는 $1.5 \sim 2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 이었다(그림 3-3-2).

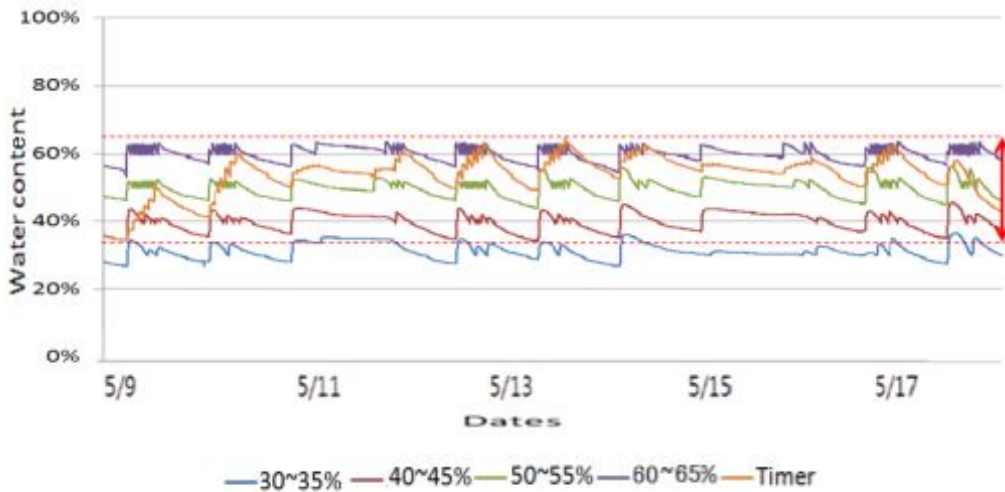


그림 3-3-1. 파프리카 수경 재배시 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급에 의한 Coconut coir배지의 수분함량 변화

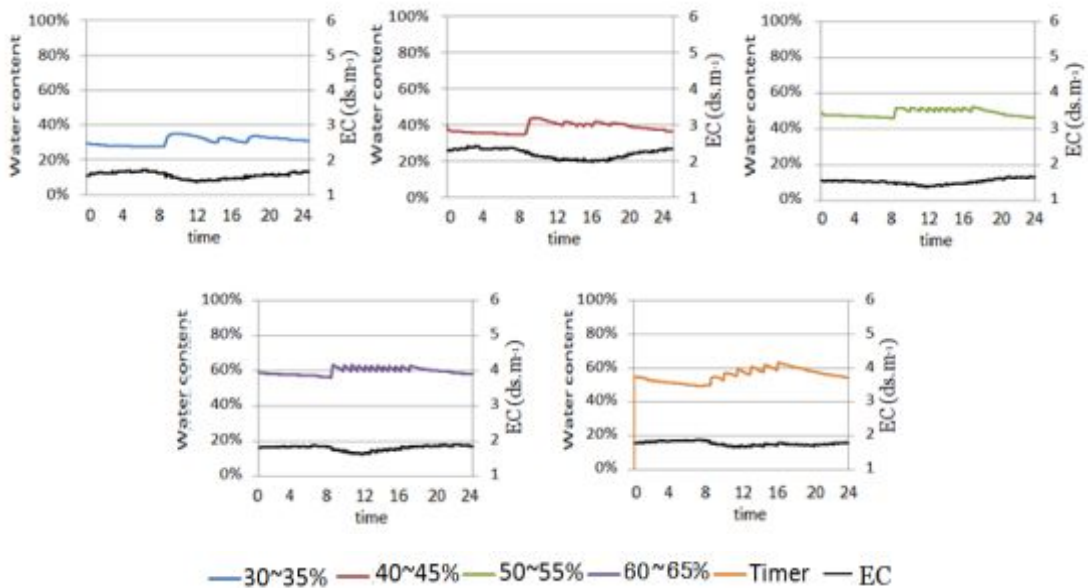


그림 3-3-2. 파프리카 수경 재배시 FDR 센서 수분 제어 및 Timer 공급에 의한 Coconut coir배지 하루 동안의 수분함량과 EC 변화

표 3-3-1은 'Special' 파프리카 수경재배 기간 중 8일 동안 FDR 수분센서와 타이머로 배양액을 공급했을 때의 급액량과 배액율을 측정된 결과이다. FDR 센서 제어에 의한 하루 평균 급액량은 475~688ml 인 반면 타이머 처리구는 1,150ml로, 수분 센서 제어에 의해 평균 급액량이 41.3~59.8% 감소되었다. 측정 기간 중 FDR 수분 제어 처리구의 급액량은 일사량 변화에 따라 급액량이 달라져 이는 기상 환경, 작물 증산, 생육 상태 등에 영향을 받았음을 알 수 있었다. 즉, 배지의 수분 함량 제어에 의한 방법은 기존의 타이머 제어에 비해 작물 생육을 고려한 방법으로써 배액율이 zero로 나타났다. 한편 배지 내 EC 변화는 제어 처리에 따라 EC 1.5~2.0 dS·m⁻¹와 EC 2.0~2.3 dS·m⁻¹(40~45% 처리)로 처리 기간 중 배지 내 EC 는 3.0 dS·m⁻¹ 이하로 파프리카 근권 목표 EC 농도인 3.0dS·m⁻¹를 넘지 않았다.

표 3-3-1. 'Special' 품종의 파프리카 수경재배시 FDR 센서 수분제어와 타이머 처리에 의한 평균 일일 급액량과 배액율

Water content(%)	Solar radiation(MJ/m ²)/day								Ave. amount of irrigation (ml/plant/day)	Drainage ratio (%)
	14.2	27.7	22.5	9.1	1.8	9.2	27.4	24.3		
30~35	0	767	540	420	240	167	833	833	475	0
40~45	167	1,000	660	513	293	183	650	867	539	0
50~55	243	983	675	525	300	233	767	733	557	0
60~65	333	1,167	750	583	333	367	967	1,000	688	0
Timer	1,200	1,200	1,200	1,200	1,000	1,000	1,200	1,200	1,150	35

표 3-3-2. 'Special' 품종의 파프리카 수경 재배시 배지 내 FDR 센서 수분제어와 Timer 공급이 처리 77일째 파프리카의 광합성, 기공컨덕턴스 및 증산율에 미치는 영향

Substrate	Water content(%)	Photosynthetic rate (μmol·CO ₂ ·m ⁻² ·s ⁻¹)	Stomatal conductance (mol·H ₂ O·m ⁻² ·s ⁻¹)	Transpiration rate (mmol·H ₂ O·m ⁻² ·s ⁻¹)
Coir (dust : fiber = 8 : 2)	30~35	20.9 b ^z	0.4 b	3.5 b
	40~45	23.5 ab	0.7 b	4.5 b
	50~55	20.5 b	0.6 b	3.7 b
	60~65	24.8 a	0.7 b	4.5 b
	Timer	25.1 a	1.3 a	5.8 a

^zMeans followed by different letters in the same column are significantly different by Duncan's multiple range test(P<0.05)

표 3-3-2는 파프리카 1그룹 수확되던 시점인 처리 77일째 처리별 광합성 결과로, 수분제어 60~65% 처리와 타이머 처리에서 높았으며, 기공전도도와 증산율은 타이머 처리에서 높았다. FDR 센서 처리에 의한 파프리카 생육은 수분함량 60~65%수준 제어구에서 가장 높은 경향을 보여주고 있으나 타이머 처리와 수분함량 제어구에서 비슷한 생육상태를 나타냈다(표 3-3-3).

FDR 센서와 타이머 처리에 의한 파프리카 상품 수량은 차이가 없었으며, 생리장해과인 배꼽썩음과는 30~35% 제어 처리에서 높은 경향을 보였으나, 처리에 따른 유의차는 없었다.

이상의 결과 코코넛 코이어의 파프리카 수경재배에서 FDR수분센서를 이용하여 근권의 수분을 제어하였을 때 기존 타이머 재배에 비해 평균 일일 급액량은 41.3~59.8% 감소하였으나 배지 내 EC 변화가 증가하지 않고 근권의 목표 수준 범위에 있었다. 또한 타이머 처리에 비해 FDR 센서에 의한 수분 제어 처리구의 광합성, 생육 및 수량은 차이가 없었으며, 배액율은 zero 였다. 이는 FDR 수분 센서 제어에 의한 급액 공급 방식은 기상 환경, 작물 증산, 생육 상태 등을 반영하여 일일 공급량이 달라졌음에도(표 3-3-1), 근권의 EC가 안정적이고, 생육 및 수량의 차이를 보이지 않아 효율적면서 친환경적인 방식(무배액 수경재배)임을 확인할 수 있었다.

표 3-3-3. ‘Special’ 품종의 파프리카 수경재배시 FDR 센서 수분제어와 타이머 처리에 의한 처리 77일째 파프리카 생육 및 엽록소 함량

Substrate	Water content(%)	Plant height (cm)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	SPAD(value)		
					Top	Middle	Bottom
Coir (dust : fiber = 8 : 2)	30~35	89.0 a ^z	12.7 ab	8.2 ab	30.7 a	40.6 a	53.4 a
	40~45	84.7 ab	14.2 a	7.8 b	29.5 a	38.7 ab	51.0 a
	50~55	93.0 a	12.8 ab	8.2 ab	32.7 a	42.5 a	56.1 a
	60~65	98.0 a	14.3 a	8.8 a	34.7 a	44.9 a	59.2 a
	Timer	83.0 ab	11.8 b	8.2 ab	30.3 a	38.4 ab	50.6 a

^zMeans followed by different letters in the same column are significantly different by Duncan’s multiple range test($P < 0.05$)

표 3-3-4. ‘Special’ 품종의 파프리카 수경재배시 FDR 센서 수분제어와 타이머 처리에 의한 처리 180일 후 파프리카 상품 수량과 배꼽썩음과 발생율

Substrate	Water content(%)	No. of maketable fruit	Average fruit weight (g)	Maketable yield (g/plant)	BER(%)
Coir (dust : fiber = 8 : 2)	30~35	11.4 a ^z	172.8 a	1,996.9 a	25.0 a
	40~45	11.3 a	172.7 a	1,951.5 a	20.0 a
	50~55	12.2 a	169.0 ab	2,061.8 a	11.4 a
	60~65	10.9 a	171.6 a	1,956.2 a	17.8 a
	Timer	11.0 a	162.5 ab	1,787.5 a	16.7 a

^zMeans followed by different letters in the same column are significantly different by Duncan’s multiple range test($P < 0.05$)

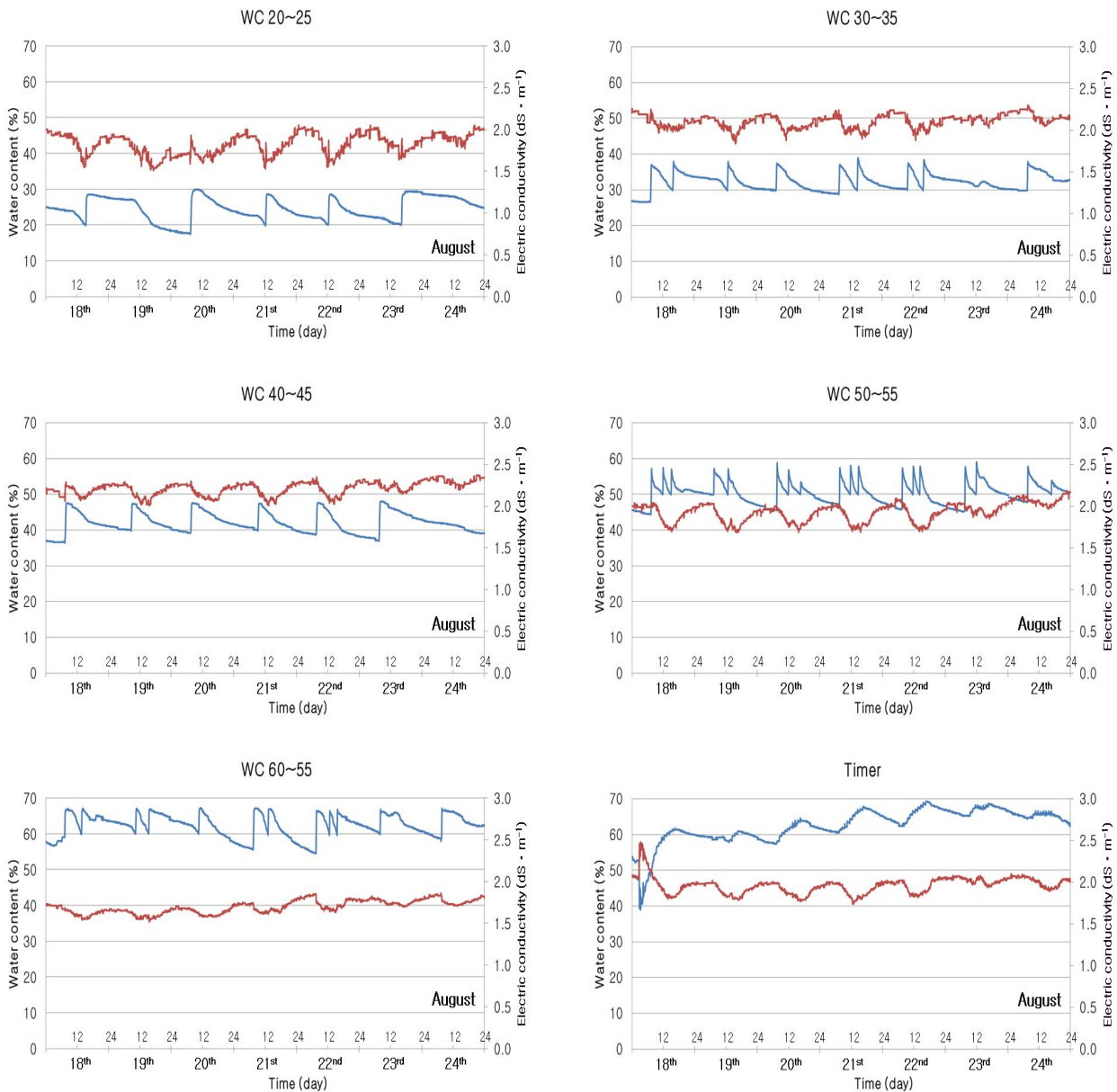


그림 3-3-3. ‘RZ208’ 품종의 파프리카 수경재배에서 급액 조건에 따른 배지내 수분함량과 전기전도도(EC : electric conductivity)의 변화

‘RZ208’ 품종의 파프리카 수경재배에서 처리별 급액 조건에 따른 배지내 수분함량(v/v, %) 과 전기전도도(EC, electric conductivity, $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)의 변화(그림 3-3-3)는 모든 처리에서 급액 시작과 급액중지가 잘 나타났음을 알 수 있다. 전기전도도는 수분함량에 대하여 반응으로 나타났는데, 급액시 감소하였다가 시간이 지나면 수분함량이 감소하면서 다시 높아지는 패턴을 보였다. WC 60~65 처리가 $1.75 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 수준으로 낮게 나타난 것을 제외하면 전체적으로 $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 을 중심으로 나타났다. 전기전도도 변화폭은 배지 내 수분함량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.

배지 내 수분함량 조절을 통한 급액량 조절시 광합성 특성(표 3-3-5)에서는 WC 20~25, WC 30~35 처리등이 낮은 광합성률을 나타냈고, 다른 처리들은 대조구와 비슷한 수준의 광합성률을 보였다. WC 60~65 처리에서 광합성률이 가장 높았다. 기공전도도는 타이머를 사용한 대조구가 가장 높았으나 전체 처리구들 간에 통계적 유의성은 없었다. 세포내 CO₂ 농도는 WC 40~45와 WC 50~55 처리에서 가장 높았다. 증산률은 WC 60~65 처리가 가장 높았다. 광합성 특성에서 전체적으로 WC 20~25, WC 30~35 처리구들이 낮은 수치를 나타냈고, 대조구인 타이머처리와 WC 40~45, WC 50~55, WC 60~65 처리들은 비슷한 수준을 보였다.

‘RZ208’ 파프리카 식물체의 생육 특성(표 3-3-6)은 WC 50~55 처리는 초장이 가장 높았다. 생체중은 타이머 처리인 대조구와 WC 50~55 처리들이 가장 높았다. 건물중은 대조구인 타이머 처리가 가장 높았다. WC 20~25, WC 30~35 처리들은 낮은 식물체 초장, 생체중, 건물중을 보였다. 대조구인 타이머 처리와 WC 50~55 처리들은 상대적으로 높은 초장, 생체중, 건물중을 보였다.

표 3-3-5. ‘RZ208’ 품종의 파프리카 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 급액량 조절시 광합성 특성

Treatment	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ^z	Stomatal Conductance ($\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Control	18.40 a ^y	0.884 a	6.99 ab
WC 20~25	16.80 c	0.778 a	6.78 ab
WC 30~35	17.06 bc	0.716 a	6.55 b
WC 40~45	18.58 a	0.880 a	7.05 ab
WC 50~55	18.06 ab	0.854 a	7.02 ab
WC 60~65	18.98 a	0.870 a	7.23 a

^zMeasuring conditions : CO₂ 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, PAR 900 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, Air temp. 25±0.5°C, RH 60±2(%) and Flow rate 500±2 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

^yMean separation within columns by Duncan’s multiple range test at $P = 0.05$.

표 3-3-6. ‘RZ208’ 품종의 파프리카 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 급액량 조절시 식물체 생육 특성

Treatment	Height (cm)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
Control	149.6 ab ^z	827.4 a	177.8 a
WC 20~25	141.9 b	661.0 b	164.3 ab
WC 30~35	139.5 b	679.3 ab	159.8 b
WC 40~45	144.3 ab	755.4 ab	168.0 ab
WC 50~55	153.7 a	827.9 a	175.3 ab
WC 60~65	146.5 ab	767.5 ab	170.6 ab

^zMean separation within columns by Duncan’s multiple range test at $P = 0.05$.

파프리카 식물체 분지 줄기와 잎의 생육 특성은 표 3-3-7과 같다. 분지 길이는 WC 50~55에서 가장 높았고, 경경은 WC 60~65에서 가장 높았다. 마디수는 대조구인 타이머 처리서 가장 높았고, 분지 생체중과 건물중은 WC 50~55에서 가장 높았다. 잎의 생체중은 WC 50~55에서 가장 높았고, 잎의 건물중은 대조구인 타이머 처리에서 가장 높았다. 분지 생육 특성에서 WC 50~55 처리가 전체적으로 가장 높은 수치를 나타냈고, 잎의 생육 특성에서는 대조구인 타이머 처리가 전체적으로 가장 높은 수치를 보였다. 반면, WC 20~25와 WC 30~35처리는 낮은 분지와 잎 생육 결과를 나타내었다.

표 3-3-7. 'RZ208' 품종의 파프리카 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 급액량 조절 시 식물체 줄기와 잎의 생육 특성

Treatment	Stem			Leaf			
	Length (cm)	Diameter (mm)	Nodes (No./plant)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
Control	116.5 ab ^Z	11.91 b	25.4 a	161.1 ab	38.89 ab	225.8 a	44.49 a
WC 20~25	106.4 c	12.63 ab	22.8 b	130.1 c	36.83 ab	166.6 b	38.46 b
WC 30~35	110.7 bc	12.21 b	24.0 ab	137.8 bc	36.45 b	175.9 b	38.51 b
WC 40~45	112.7 bc	12.00 b	24.5 a	149.8 abc	37.09 ab	201.3 ab	41.86 ab
WC 50~55	121.1 a	12.29 ab	24.3 a	172.9 a	40.21 a	222.8 a	42.16 ab
WC 60~65	117.8 ab	13.06 a	24.9 a	156.1 abc	39.42 ab	220.3 a	43.47 ab

^Z Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

표 3-3-8. 'RZ208' 품종의 파프리카 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 급액량 조절 시 과실의 생육 특성

Treatment	No. of fruits (no./plant)	Maximum width (mm)	Maximum length (mm)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)
Control	28 bc ^Z	64.46 a	64.99 a	84.52 a	3.31 ab
WC 20~25	1.2 c	62.97 a	66.98 a	75.65 a	2.12 ab
WC 30~35	1.3 c	62.81 a	63.48 a	84.92 a	3.60 a
WC 40~45	3.8 ab	65.20 a	61.76 a	80.63 a	2.79 ab
WC 50~55	1.3 c	63.96 a	63.95 a	82.78 a	1.54 b
WC 60~65	4.7 a	59.23 a	61.57 a	67.09 a	2.87 ab

^Z Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

표 3-3-9. 'RZ208' 품종의 파프리카 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 급액량 조절 시 급배액 특성

Treatment	Average water supply amount (ml·day ⁻¹ ·plant ⁻¹)		Average drained water amount (ml·day ⁻¹ ·plant ⁻¹)		Drain ratio ^x (%)	
	42 days ^z	7 days ^y	42 days	7 days	42 days	7 days
	Control	490.2	966.2	82.2	175.9	17.0
WC 20~25	391.2	581.4	57.0	1.8	14.6	0.3
WC 30~35	417.4	710.0	68.8	4.3	16.5	0.6
WC 40~45	490.5	718.6	58.8	2.4	11.9	0.3
WC 50~55	484.0	777.1	41.7	1.7	8.6	0.2
WC 60~65	483.1	777.1	28.2	2.4	5.8	0.3

^zData obtained during 42days from 5th August to 14th September.

^yData obtained during 7days from 17th August to 24th August.

^xDrained water amount / water supply amount.

파프리카 수확 과실의 생육 특성(표 3-3-8)에서 과실 수확은 전체적으로 적은 수량이 나왔으며 이는 1차 수확이라 그럴 것으로 생각된다. 주당 수량으로 볼 때 WC 60~65처리가 가장 높았고, WC 60~65와 40~45 처리가 대조구인 타이머 처리보다 높은 수확을 보였다. 나머지 WC 20~25, 30~35, 50~55 처리들은 타이머 처리보다 낮은 수확을 하였다. 최대 과폭과 길이는 통계적으로 유의한 결과를 얻지는 못했다. 통계적 유의성은 없으나 평균값을 비교해 볼 때, WC 60~65처리가 가장 작은 과실 사이즈를 나타냈고 다른 처리들은 대조구와 비슷한 과실 사이즈를 보였다. 과실의 생체중 또한 통계적 유의성은 없었으나 대조구가 가장 높았고, WC 30~35, 40~45, 50~55 처리들이 대조구보다는 낮았으며, WC 20~25와 WC 60~65 처리가 가장 낮은 생체중을 보였다. 과실 건물중은 WC 30~35 처리가 가장 높았고, WC 50~55가 가장 낮았다. WC 30~35 처리를 제외한 다른 모든 처리들은 대조구인 타이머 처리보다 낮은 건물중을 보였다.

급배액 특성(표 3-3-9)은 착과후 42일간의 결과에서 대조구인 타이머 처리가 주당 하루 급액량은 평균 490.2ml로 가장 높았으며 배액량도 82.2ml로 가장 높았다. WC 20~25와 30~35 처리가 391.2ml과 417.2ml로 낮은 평균 급액을 보였다. 다른 처리들의 경우 대조구보다 약간 낮은 수준의 급액이 공급되었다. 배액량은 WC 30~35처리가 제어 처리구중 가장 높았으며, WC 60~65처리가 가장 낮은 배액량을 나타냈다. 배액률에서는 대조구와 WC 20~25와 30~35 처리구는 비슷한 배액률을 보였으며 상대적으로 높았고, WC 60~65는 0.06으로 낮은 배액률을 보였다. 배액률이 수분함량이 낮은 처리에서 상대적으로 높은 이유는 낮은 수분함량을 가지고 제어하였을 경우 급액이 배지 내 수분함량이 적은 상태에서 한 시기에 몰려서 들어가고 이 때 조건에 도달할 때 까지 배지가 직접적으로 흡수하는 것 외에 흡수가 못되고 배액되는 것이 생기기 쉬울 수 있는 급액패턴이 이러한 배액률의 증가되는 결과로 나타났을 것이다. 그러나 급배액 특성을 한여름의 7일간 평균으로 보게 되면(표 3-3-9) WC 20~25 581.4ml로 낮은 급액

량을 보였으며, 나머지 급액 처리에서는 700ml 이상으로 대조구인 타이머 처리는 966.2ml로 주당 급액되었으며, 배지 내 수분함량을 높게 잡은 배지일수록 조금 더 많은 급액이 들어갔다. 배액량은 대조구인 타이머 처리는 175.9로 배액률 18.3%를 보였고, 수분함량 조절처리들은 4ml 미만 배액량과 0.3% 수분의 매우 낮은 배액률을 보였다.

광합성과 식물체와 분지와 잎 생육 결과에서 WC 50~55가 대조구인 타이머 처리보다 높거나 유사한 수준으로 결과가 나왔으며, WC 60~65도 대조구와 비슷한 결과를 나타냈다. 반면, 수분함량을 적게 유지한 WC 20~25와 WC 30~35 처리들은 전체적으로 낮은 수준의 생육 결과를 보였다. 과실생육 결과는 식물체 생육과는 다르게 WC 50~55처리가 상대적으로 적은 과실수와 건물중을 보였고 이와 다르게 함께 생육이 좋았던 WC 40~45와 60~65는 과실수와 건물중에서 높았다. 이러한 결과는 일차 수확만 이룬 상황에서 생육에 포인트를 많이 둔 WC 50~55 식물체의 경우 과실을 비대시키는 기간이 부족하여 생육적으로 유리한 상황을 과실품질로 이동시키지 못한 것이 그 이유일 것으로 판단된다. 생육이 낮았던 WC 20~25와 30~35처리들에서 수분함량이 가장 낮은 WC 20~25 처리는 과실 생육이 낮았으며, 이보다 약간 높은 수분 함량의 WC 30~35는 가장 높은 건물중과 과실 생체중, 크기를 보였다.

단기간에 수확한 결과로 식물체 전 생육 기간을 판단할 수 는 없으나 파프리카 초기 수경재배에 적합한 배지내 수분조건은 40~45, 50~55, 60~65% 가 적합하며 식물체 생육만을 보았을 때 50~55% 배지 수분함량이 권장할만 하다. 30~35%의 경우 단기간에 좋은 품질의 과일을 얻을 수 있을 수 있으나 수량에서 대조구의 반정도로 많은 차이를 보인다.

(4) 연구결과 요약

‘Special’ 품종의 파프리카 수경재배에서 FDR수분센서를 이용하여 근권의 수분을 제어하였을 때 기존 타이머 재배에 비해 평균 일일 급액량은 41.3~59.8% 감소하였으나 배지 내 EC 변화가 증가하지 않아 근권의 목표 수준 범위에 있었다. 또한 타이머 처리에 비해 FDR 센서에 의한 수분 제어 처리구의 광합성, 생육 및 수량은 차이가 없었으며, 배액율은 zero였다.

‘RZ208’ 품종의 파프리카 수경재배에서 광합성과 식물체와 분지와 잎 생육 결과에서 WC 50~55%가 대조구인 타이머 처리보다 높았으며, WC 60~65 처리는 대조구와 유사한 수준을 보였다. 과실 생육과 수에서는 WC 40~45와 WC 60~65에서 대조구보다 높았다. 단기간에 수확한 결과로 식물체 전 생육 기간을 판단할 수 는 없으나 파프리카 초기 수경재배에 적합한 배지내 수분조건은 40~45, 50~55, 60~65% 가 적합하며 식물체 생육만을 보았을 때 50~55% 배지 수분함량이 권장할 만하다. 30~35%의 경우 단기간에 좋은 품질의 과일을 얻을 수 있을 수 있으나 수량에서 대조구의 반정도로 많은 차이를 보였다.

이와 같은 결과는 FDR 수분 센서 제어에 의한 급액 공급 방식은 기상 환경, 작물 증산, 생육 상태 등을 반영하여 일일 공급량이 달라졌음에도 근권의 EC가 안정적이고, 생육 및 수량의 차이를 보이지 않아 효율적면서 친환경적인방식(무배액 수경재배)의 가능성을 확인할 수 있었다.

나. 유기배지 조성 비율별 적합한 수분함량 구명

(1) 실험 목표

파프리카 수경재배시에 FDR 센서를 이용, 코코넛 코이어 조성비율에 따른 배지 내 근권부 수분 함량을 조절하여 배지 조성별 파프리카 생육에 적합한 배지내 수분 조건을 구명하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

국내에서 가장 많이 재배되고 있는 품종들 가운데 빨간색 품종인 ‘Special’을 이용하여 2011년 3월 13일부터 2011년 5월 5일까지 서울시립대학교 양지봉 온실에서 재배하였다. 배양액은 원수 분석결과를 고려하여 네덜란드 파프리카 PBG 배양액으로 다량원소($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$: $\text{NO}_3\text{-N}$ 15.25, $\text{NH}_4\text{-N}$ 1.0, P 1.25, K 7.5, Ca 4.25, Mg 1.5)와 미량원소($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$: Fe 15.0, B 30.0, Mn 10.0, Zn 5.0, Cu 0.75, Mo 0.5)로 하여 조성하였다.

파프리카 PBG 배양액 ($\text{EC } 1.5\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}/\text{pH } 5.8$)으로 충분히 흡수시킨 240공 암면 플러그에 1립씩 파종하여 버미큘라이트를 이용하여 복토하였다. 균일한 발아를 위해서 생육상(주야간 온도 $27/23 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 80% 이상)에서 본엽 2~3매가 전개될 때까지 2~3일 간격으로 배양액($\text{EC } 2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, pH 5.8)을 저면 관수하여 40일간 육묘하였다. 본엽 3매가 완전히 전개된 후 배양액($\text{EC } 2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, pH 5.8)으로 포수시킨 암면블럭($10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 7.5\text{cm}$, 한국유알암면, Korea)에 줄기를 U자형으로 절곡 이식하였다. 본엽이 12매 내외로 전개된 3월 13일에 코코넛 코이어 슬라브($12\text{cm} \times 20\text{cm} \times 100\text{cm}$, 신성미네랄, Sri Lanka)를 PBG배양액 1/2배액으로 충분히 포수한 뒤 슬라브당 네주씩 정식하여 완전임의 2반복으로 배치하였다. 정식 후 7일 간은 뿌리의 활착을 위해 배양액이 완전히 포수된 상태에서 양액공급은 1/2배액으로 오전 9시부터 1시간 간격으로 8회 공급하였고, $600 \pm 50\text{ml}$ 를 공급하였다. 공급 배양액의 EC와 pH는 휴대용 EC, pH meter(HI9813, HANNA, Netherlands)를 이용하여 각각 $1.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 와 pH 5.5로 유지하였다. 발근 후에는 1배액 배양액으로 다시 포수한 후 공급 배양액의 급액 EC $2.2 \pm 0.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, pH 5.5~6.0로 유지하였다. 착과기 전에는 EC $2.3\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$, pH 5.8 로 착과기에는 EC $2.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, pH 5.8로 재배하였다.

본 실험에 사용된 coconut coir 는 시중에서 판매되는 dust와 chip 비율별(10:0, 7:3, 5:5)로 압축 성형된 코코슬라브(신성미네랄, Profit, Sri Lanka)와 대조구로서 암면(UR슈퍼매트, UR암면, 한국)을 이용하여 재배하였다.

파프리카 재배중 배지내 조건은 FDR센서와 로거(WP700, 미래센서, 한국)를 이용하여 함수율 범위 $45 \pm 2\%$, $55 \pm 2\%$, $65 \pm 2\%$ 로 제어하였고, 일반적으로 농가에서 사용하는 타이머 제어법(생육단계별 1일 적정공급량 공급)을 사용하였다. 센서는 뿌리가 배지에 활착이 되었다고 판단된 3월 31일부터 설치하여 제어 및 측정하였다. 유인방법은 V자형으로 두 줄기로 유인하였고, 분지마다 잎 2개를 확보하고 측지를 제거하였다. 묘들의 과도한 생육에 의한 차이를 줄이기 위해 정식 후 모든 식물체에서 분지 4번째 마디까지의 과실과 꽃은 모두 제거하고 실험을 시작하였다.

3) 실험수행 내용 및 결과

실험시간 동안 서울시립대 양지봉 온실의 온습도환경 변화는 다음 그래프(그림 3-3-4)와 같다.

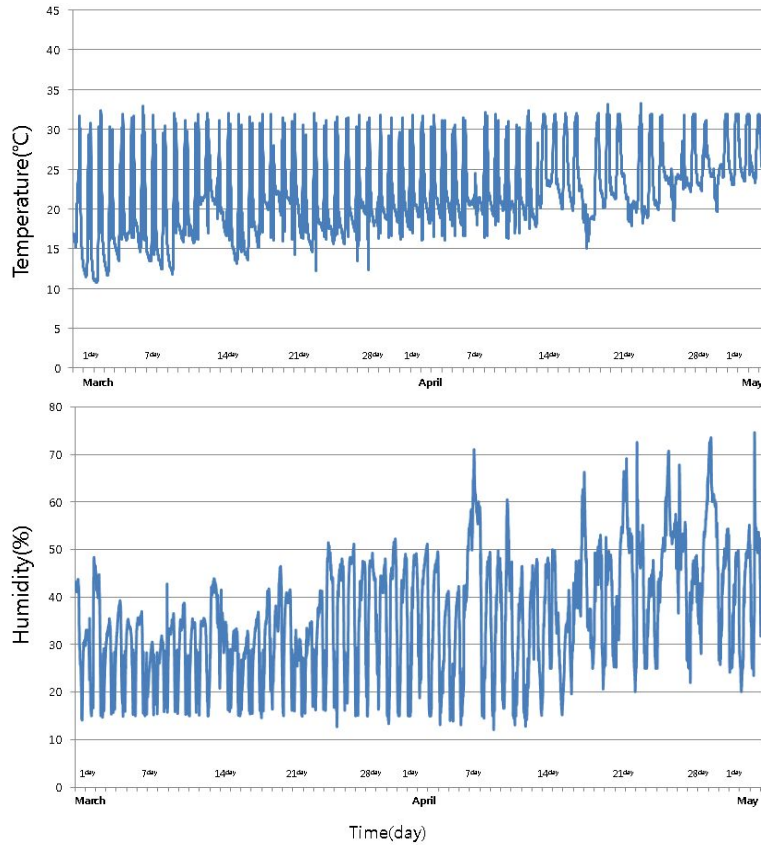


그림 3-3-4. 서울시립대학교에 위치한 양지봉 온실의 2011년 3월~5월의 온습도 환경조사

2011년 4월 14일부터 5월 5일 까지의 서울시립대 양지봉 온실의 온습도 환경은 그림 1.과 같다. 평균 온도는 22.2°C로 주간평균(오전 6시~오후 6시)은 26.0°C, 야간평균(오후 6시~오전 6시)은 17.7°C로서 기간동안 온실내 온도는 17~33°C 수준으로 유지하였다. 상대습도의 경우, 평균 35.6%이며 주간평균은 39.1%, 야간평균은 27.9%이였고, 기간동안 온실내 습도는 25~65% 범위로 온실을 관리하였다.

그림 3-1-5~8는 FDR센서를 이용한 다양한 배지내 수분함량을 다양하게 제어시(65±2%, 55±2%, 45±2%)의 일주일간의 배지내 수분함량 변화를 대조구인 타이머 급액방식과 함께 나타낸 것이다. 센서에 의한 제어가 이루어지고 있음을 알 수 있으며, 배지 종류별 수분함량의 최대, 최소, 평균값은 표 3-3-10과 같다. 가장 높은 평균 수분함량은 분함 타이머 제어로 95.9%이며, 가장 낮은 평균 수분함량은 변화 배지의 45±2% 처리에서 44.5%로 나타났다. 최대최소 편차는 분함 배지 55±2%에서 15.7%로 가장 크게 나타났으며, 분함 65±2%는 5.2%로 가장 낮은 편차를 보였다. 코이어 배지에서 가장 낮은 편차는 변화 배지의 타이머 제어로 6.3%이며, 가장 높은 편차는 내 수분 배지의 45±2%제어로 11.5%이다. 공극이 많은 5:5배지를 제외한 나

머지 배지들에서 타이머 제어는 $65\pm 2\%$ 제어보다 높은 배지수분함량을 나타냈다.

다양한 배지 종류에서 배지 수분함량을 다양하게 제어시($65\pm 2\%$, $55\pm 2\%$, $45\pm 2\%$, 타이머)의 일주일간 배지내 전기전도도(EC) 변화를 대조구인 타이머 급액방식과 함께 나타낸 것(그림 3-3-9~12)이다. 배지내 EC는 코이어 배지의 경우 전체적으로 $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 수준을 보였으며 변동폭이 거의 없었다. 암면 배지의 경우는 $65\pm 2\%$ 가 $4.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 수준, $55\pm 2\%$ 가 $3.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 수준, $45\pm 2\%$ 가 $2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 수준으로 제어 수분함량 순으로 점차 낮아졌으며 타이머 처리는 $4.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 수준을 보였고 급액에 따른 약간의 증감을 나타냈으나 미미하였다.

그림 3-3-13은 배지내 수분함량 제어시 일주일 간의 총 급배액량을 나타낸 그래프이다. 타이머 처리구들은 배지 종류에 상관없이 주당 일일평균 1.2L의 급액량을 공급해 주었고, 5:5 배지조성에서 $65\pm 2\%$ 제어 처리가 11L로 급액량이 가장 많았다. 7:3 배지의 $45\pm 2\%$ 처리가 2L로 급액량이 가장 낮았다. 코이어 배지 처리들의 경우, 배지내 수분함량이 감소할수록 급액량도 감소하는 경향을 보였으며 5:5 배지를 제외한 다른 코이어 배지들은 타이머 처리가 $65\pm 2\%$ 제어 처리보다 높은 급액을 나타냈다. 암면 배지의 경우 코이어 배지와는 다르게 배지내 수분함량이 낮아질수록 급액량이 조금 증가하였다. 모든 배지의 타이머 처리구들은 13~30%정도의 배액율을 보인 반면에 FDR센서로 제어한 배지들의 처리구에서는 배액량이 거의 없었다. 다만, 배지 내 수분함량을 $65\pm 2\%$ 로 제어한 처리한 배지조성은 배액이 있었고, 5:5 배지에서는 17%의 배액율을 보였다.

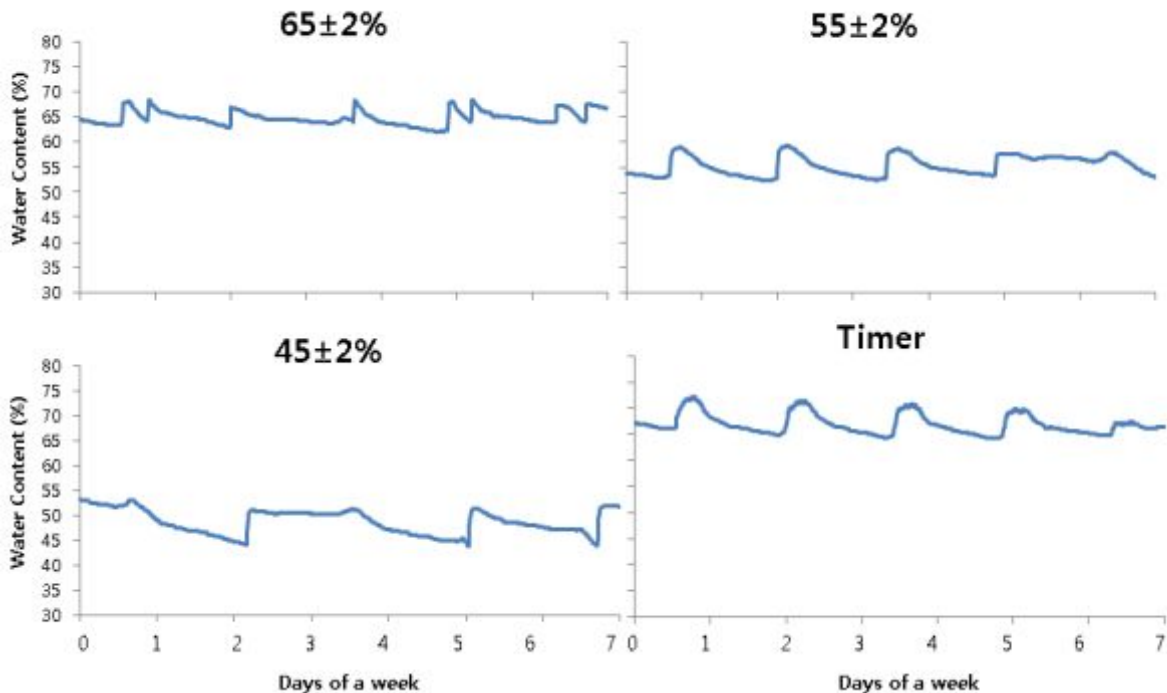


그림 3-3-5. 수경재배용 배지조성(Dust: Chip=10:0)에서 FDR센서와 타이머를 이용한 배지내 수분함량 제어

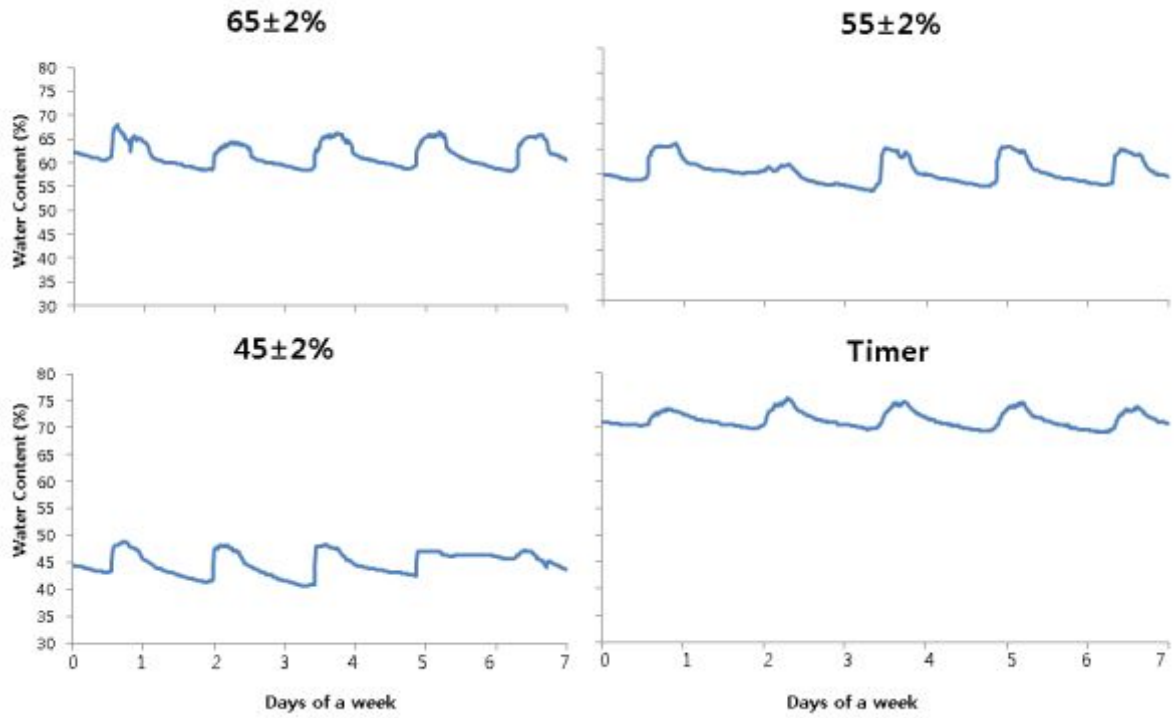


그림 3-3-6. 수경재배용 배지조성(Dust: Chip=7:3)에서 FDR 센서와 타이머를 이용한 배지내 수분함량 제어

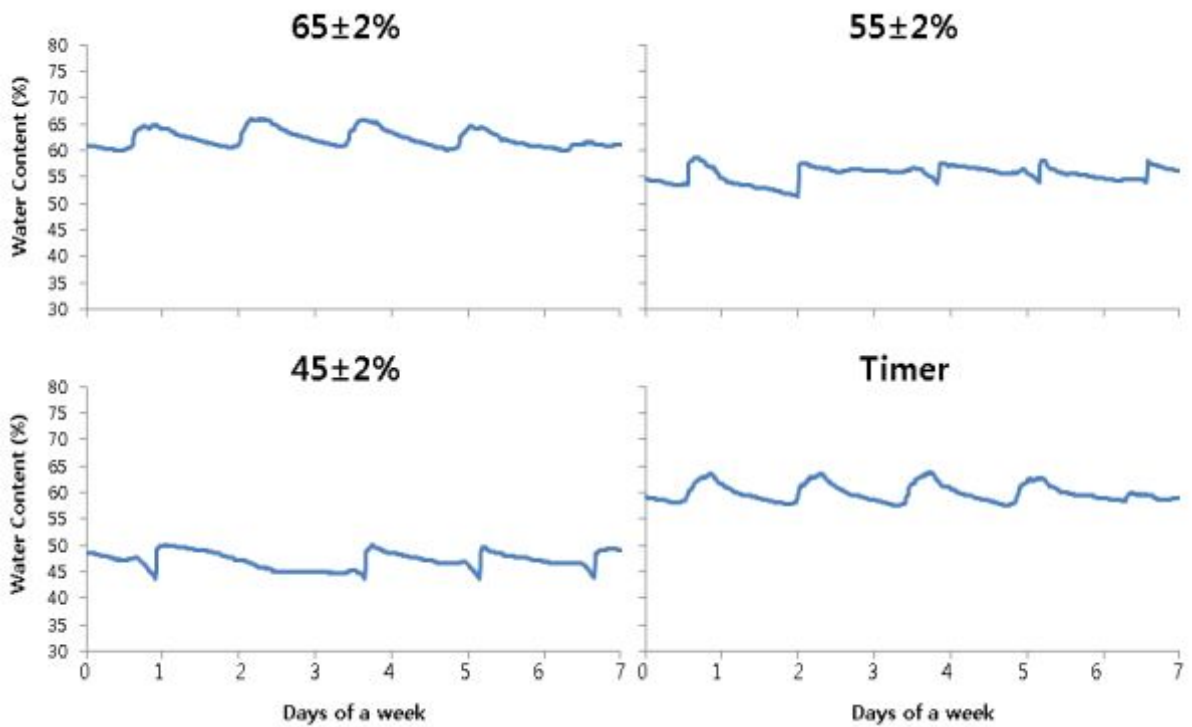


그림 3-3-7. 수경재배용 배지조성(Dust: Chip=5:5)에서 FDR 센서와 타이머를 이용한 배지내 수분함량 제어

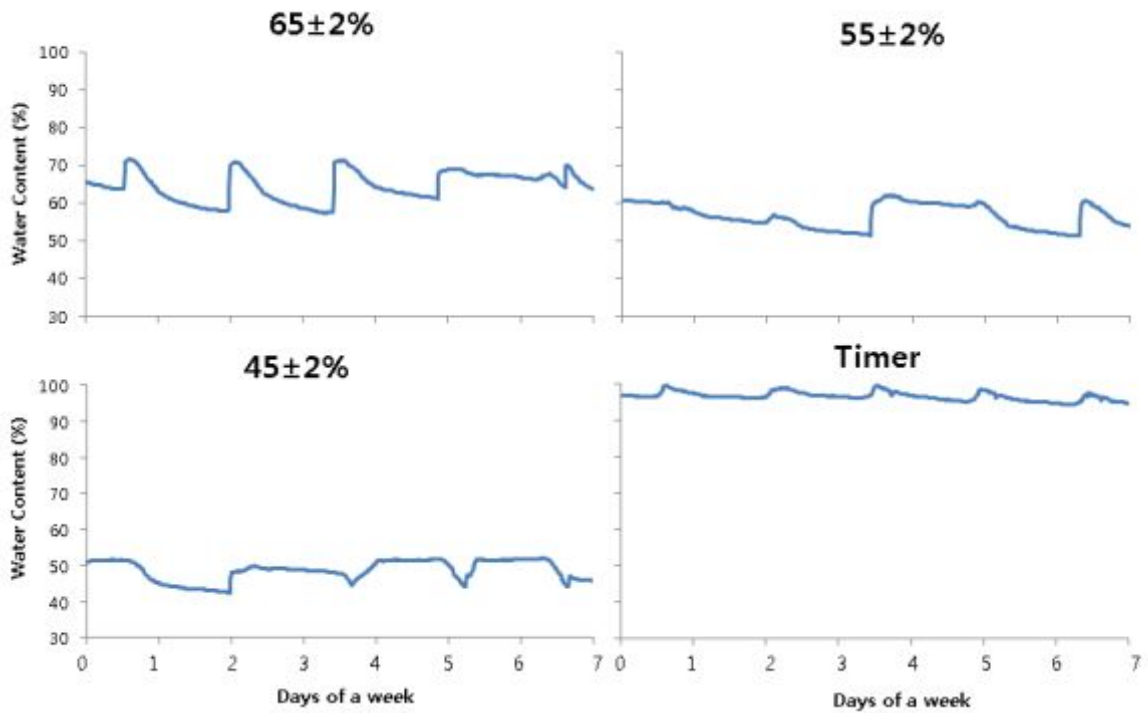


그림 3-3-8. 수경재배용 암면에서 FDR 센서와 타이머를 이용한 배지내 수분함량 제어

표 3-3-10. 수경재배용 각 배지조성별 FDR 센서와 타이머를 이용한 배지내 수분함량 제어시 최대, 최소값

근권함수량 (%)	배지 조성비율 (dust:chip)	평균	최대값	최소값
65	10:0	64.9	68.4	61.9
	7:3	59.2	69.5	48.9
	5:5	62.0	66.0	59.1
	암면	64.4	72.5	57.3
55	10:0	54.9	59.2	51.0
	7:3	55.9	61.1	51.6
	5:5	55.6	58.7	51.3
	암면	55.9	63.0	47.3
45	10:0	48.4	53.1	41.6
	7:3	44.5	48.9	40.8
	5:5	47.1	50.1	43.7
	암면	59.7	63.8	57.0
Timer	10:0	66.9	72.2	64.2
	7:3	71.2	75.3	69.0
	5:5	59.7	63.8	57.0
	암면	95.9	99.4	93.1

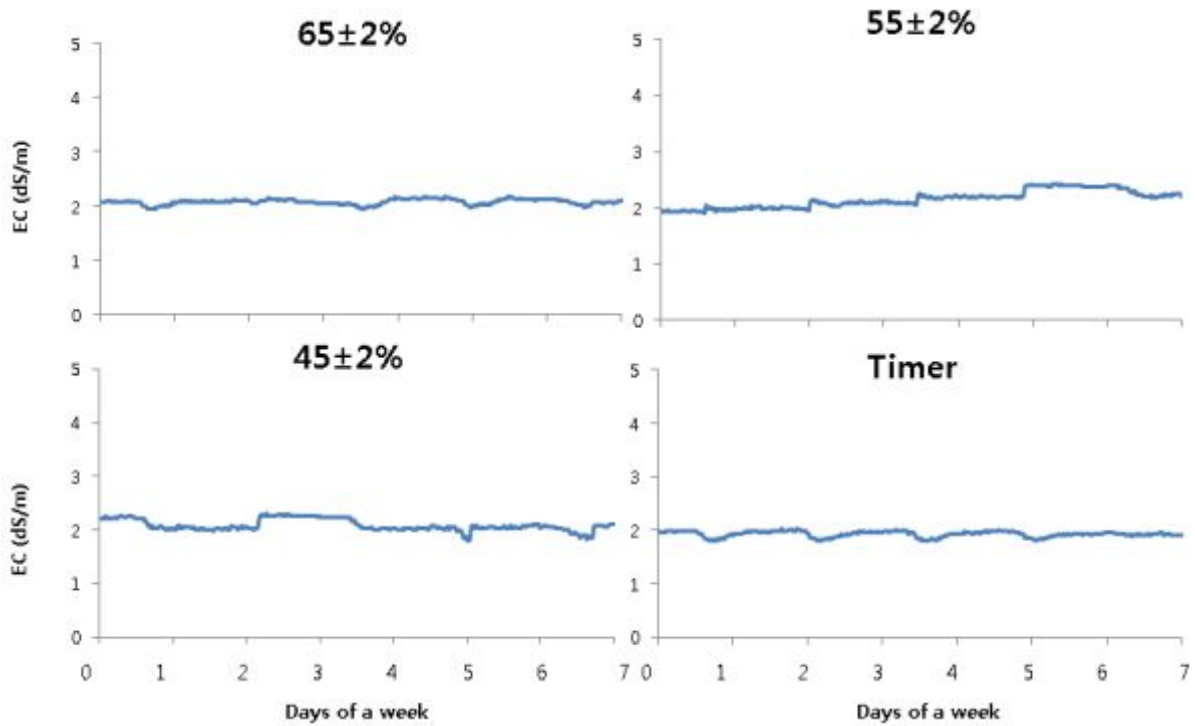


그림 3-3-9. 코코넛 코이어 Dust:Chip=10:0의 비율의 배지에서 FDR센서와 타이머를 이용한 각 함수량 조절시, 배지내 전기전도도 변화 (급액 EC: $2.2\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 측정일자: 4월 17일~23일)

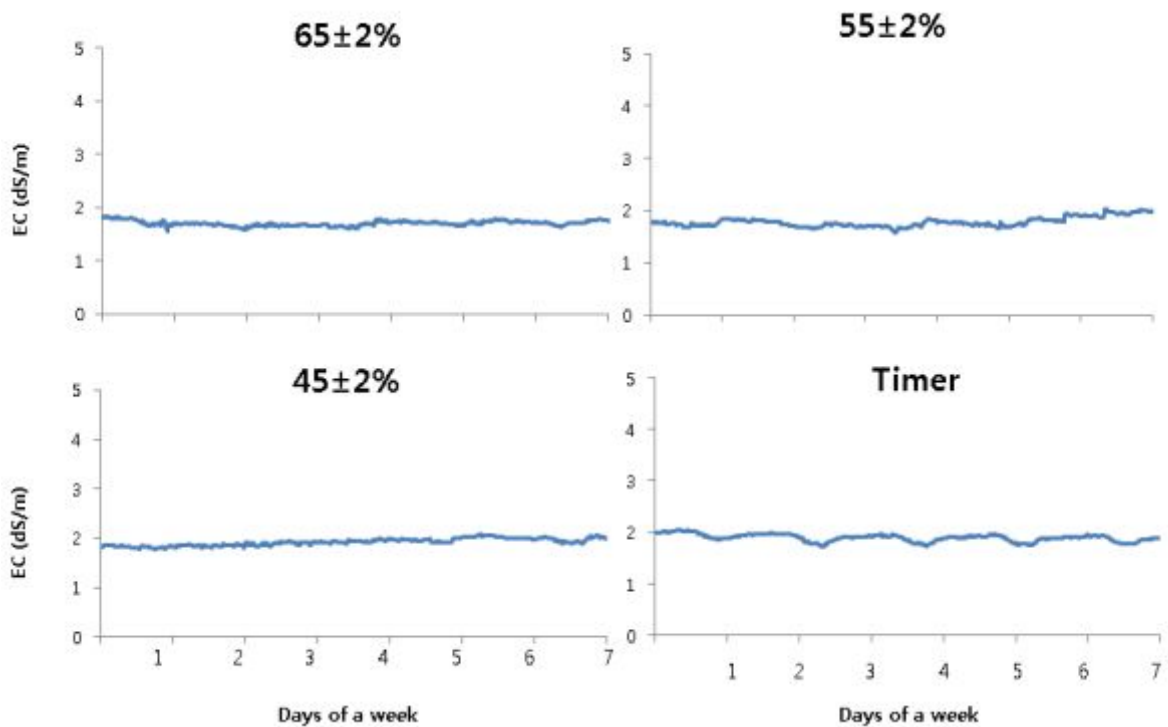


그림 3-3-10. 코코넛 코이어 Dust:Chip=7:3의 비율의 배지에서 FDR센서와 타이머를 이용한 각 함수량 조절시, 배지내 전기전도도 변화 (급액 EC: $2.2\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 측정일자: 4월 17일~23일)

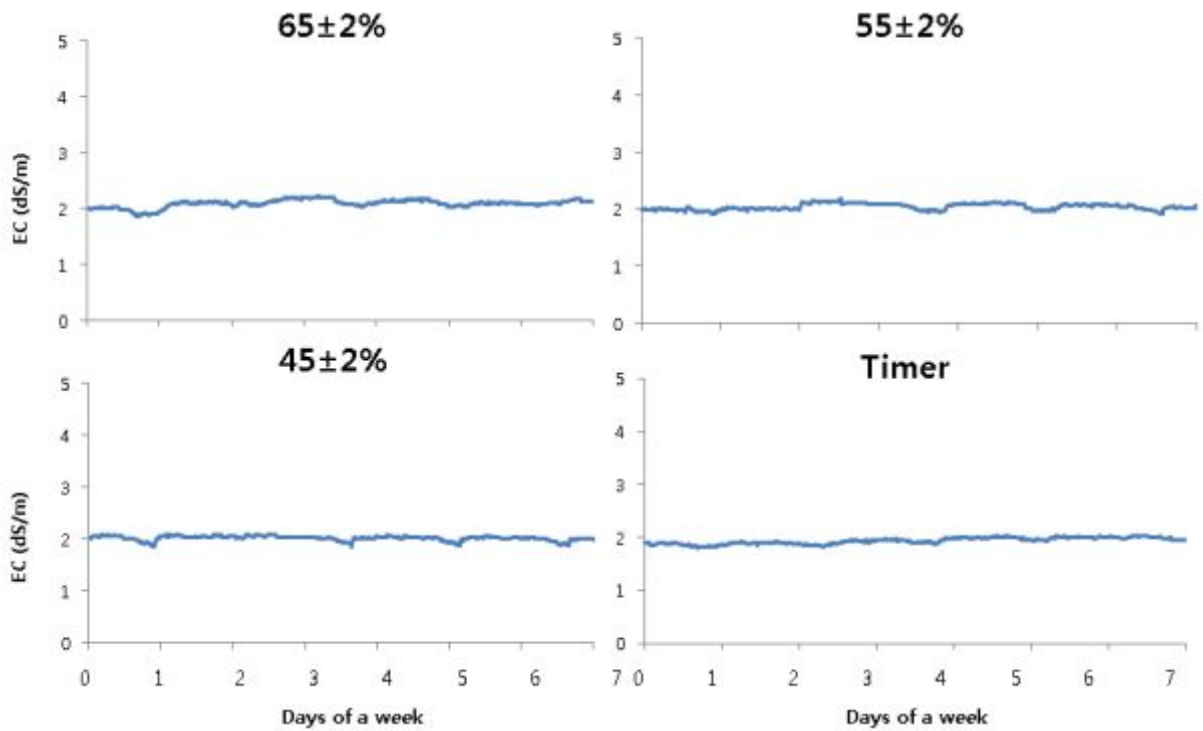


그림 3-3-11. 코코넛 코이어 Dust:Chip=5:5의 비율의 배지에서 FDR센서와 타이머를 이용한 각 함수량 조절시, 배지내 전기전도도 변화 (급액 EC: $2.2\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 측정일자: 4월17일~23일)

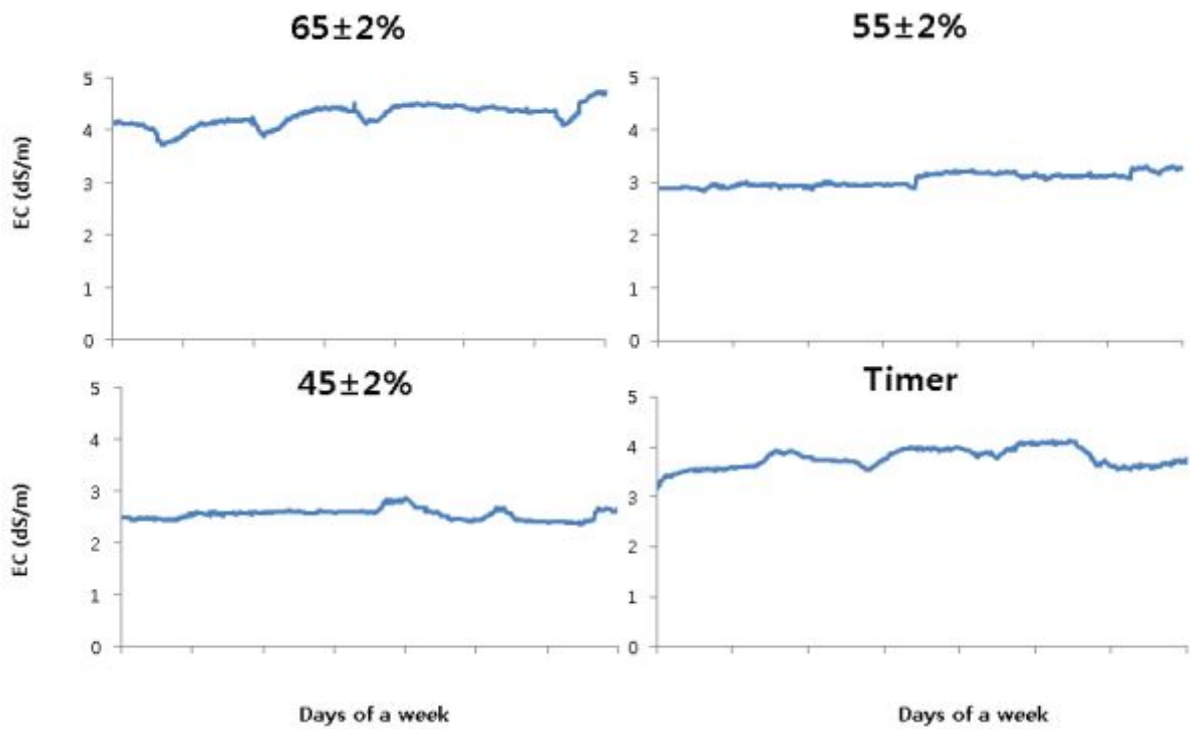


그림 3-3-12. 수정재배용 암면에서 FDR센서와 타이머를 이용한 각 함수량 조절시, 배지내 전기전도도 변화 (급액 EC: $2.2\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 측정일자: 4월 17일~23일)

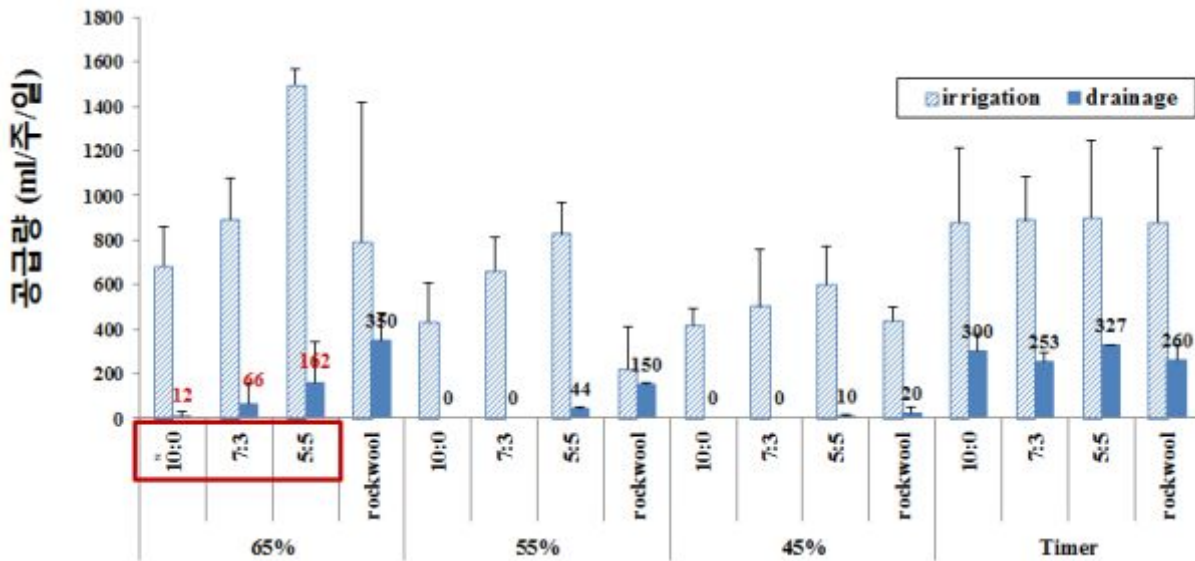


그림 3-3-13. 수정재배용 암면과 코코넛 코이어 Dust와 Chip의 비율조성에 따른 FDR센서와 Timer를 이용한 배지내 수분함량 제어시 일주일간의 총 급배액량(4월 29일~5월 5일)

배지조성별 배지내 수분함량 제어시 파프리카의 생육은 표 3-1-11과 같다. 초장은 10:0 배지에서는 65±2% 처리, 5:5 배지에서는 55±2%처리가 각 배지별로 가장 높았으며, 암면과 7:3배지에서는 수분함량 처리에 따른 초장은 유의하지 않았다. 방아다리 길이는 7:3 배지를 제외한 다른 처리들은 수분함량에 따른 유의성을 보이지 않았다. 7:3 배지에서는 타이머 처리가 가장 높은 방아다리 경경을 나타냈다. 분지 마디수의 경우는 10:0 과 7:3 배지의 경우 수분함량에 대한 통계적 유의성을 나타내지 않았으며, 5:5 배지는 45±2%에서 가장 높았고, 암면에서는 65±2%와 45±2%에서 높았다. 분지 경경은 5:5 배지에서는 타이머 처리가 가장 높았고, 다른 배지들은 수분함량에 대해 통계적으로 유의하지 않았다. 성장점에서 10cm 아래의 줄기 굵기는 모든 처리에서 수분함량에 대한 통계적 유의성을 나타내지 않았다. 식물체 정단부에서 2cm이상의 마디를 정단부에서 내려오면서 순서대로 측정된 절간 길이 결과에서는 모든 배지에서 모든 수분함량에 대해 모든 마디에서 통계적으로 유의하지 않았다.

각 측정 단위에 대한 결과들은 나타났으나 특정 처리 조건에서 나타나는 경향은 없었다. 이는 아직 생육 초기 단계임으로 인하여, 각 실험처리의 영향이 확연히 나타나지 않은 것으로 판단된다. 다만, 배지 조건에서 보았을 때, 7:3 배지의 경우, 다른 처리에 비해 조금 더 높은 생육 결과를 보였다.

표 3-3-11. 수경재배용 각 배지조성별 FDR센서와 타이머를 이용한 배지내 수분함량 제어시 파프리카의 생육

근권함수량 (%)	배지 조성비율 (dust:chip)	상품과중 (g)	평균과수(개/주)			평균수량 (g/m ²)	상품과율 (%)	BER율 (%)
			1그룹	2그룹	계			
65	10:0	99.8 b	2.0	4.6	6.6	2634.2	91.2	56
	7:3	131.0 ab	2.4	4.7	7.1	3081.8	95.5	28
	5:5	103.8 ab	3.1	4.0	7.1	2443.3	88.6	51
	암면	119.2 ab	3.0	3.3	6.2	2458.7	58.0	20.4
55	10:0	137.8 ab	3.0	3.5	6.5	2956.0	63.6	20.5
	7:3	150.9 a	2.5	6.3	8.8	4358.5	89.6	89
	5:5	120.3 b	2.3	4.8	7.1	2778.0	93.5	18
	암면	120.2 b	2.3	3.3	5.6	2233.4	65.2	23.4
45	10:0	92.7 b	2.4	3.2	5.6	1721.3	78.0	20.5
	7:3	131.9 a	3.0	5.0	8.0	3481.1	63.8	20.4
	5:5	114.4 ab	2.2	4.3	6.4	2423.5	76.0	22.0
	암면	106.0 ab	2.5	4.3	6.8	2360.7	63.6	23.2
Timer	10:0	89.65 b	1.4	3.1	4.5	1331.3	92.6	0
	7:3	111.79 a	1.4	3.6	5.0	1844.5	86.7	7.0
	5:5	123.80 a	1.8	2.0	3.8	1532.0	81.3	10.6
	암면	110.72 a	1.6	3.2	4.8	1735.5	90.9	8.0

²Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

(4) 연구결과 요약

파프리카 수경재배시에 FDR 센서를 이용하여 코코넛 코이어 조성비율에 따른 배지내 근권부 수분 함량을 조절하여 배지 조성별 파프리카 생육에 적합한 배지내 수분 조건을 구명하고자 실험을 수행하였다. 코코넛 코이어배지는 dust와 chip 비율별(10:0, 7:3, 5:5)과, 대조구로서 암면을 이용하였고 배지내 수분함량조건은 FDR센서를 이용하여 함수율 범위 45±2%, 55±2%, 65±2%와 타이머 제어법을 사용하였다. 배지내 EC는 코이어 배지의 경우 전체적으로 급액 EC 수준을 보였으며 변동폭이 작았다. 암면 배지의 경우는 제어 수분함량 순으로 점차 낮아졌으며 타이머 처리는 약 2배 가량 높은 수준을 보였다. 배지내 수분함량이 감소할수록 급액량도 감소하는 경향을 보였으며 5:5 배지를 제외한 다른 코이어 배지들은 타이머 처리가 65±2% 제어 처리보다 높은 급액을 나타냈다. 타이머 처리구들은 13~30%정도의 배액율을 보인 반면에 FDR 센서로 제어한 배지들은 배액량이 거의 없었다. 특정 함수율 처리 조건에서 나타나는 생육의 경향은 없었으나 배지 조건에서 보았을 때, 7:3 배지의 경우, 다른 처리에 비해 조금 더 높은 생육 결과를 보였다. 또한 FDR센서를 이용한 제어구에서 배지내 EC수준은 크게 높아지지 않았다.

다. 근권부 수분함량 제어에 따른 급액시간 조절(봄~여름재배)

(1) 실험 목표

파프리카 수경재배시에 FDR 센서를 이용, 코코넛 코이어 배지내 근권부 수분 함량을 조절할 때 급액 시작시각과 종료시각을 다르게 하였을 때, 배지내 함수량 변화와 작물생육 상태 변화(Plant Balance)를 추정 하고자 파프리카 생육에 적합한 급액시간을 구명하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

국내에서 가장 많이 재배되고 있는 품종들 가운데 빨간색 품종인 'Special'을 이용하여 2011년 3월 27일부터 2011년 5월 5일까지 서울시립대학교 양지봉 온실에서 재배되었다. 배양액은 원수 분석결과를 고려하여 네덜란드 파프리카 PBG 배양액으로 다량원소($\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$: $\text{NO}_3\text{-N}$ 15.25, $\text{NH}_4\text{-N}$ 1.0, P 1.25, K 7.5, Ca 4.25, Mg 1.5)와 미량원소($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$: Fe 15.0, B 30.0, Mn 10.0, Zn 5.0, Cu 0.75, Mo 0.5)로 하여 조성하였다.

파프리카 PBG 배양액 ($\text{EC } 1.5\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$, pH 5.8)으로 충분히 흡수시킨 240공 암면 플러그에 1립씩 파종하여 버미클라이트를 이용하여 복토하였다. 균일한 발아를 위해서 생육상(주야간 온도 $27/23 \pm 1^\circ\text{C}$, 습도 80% 이상)에서 본엽 2~3매가 전개될 때까지 2~3일 간격으로 배양액($\text{EC } 2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, pH 5.8)을 저면 관수하여 40일간 육묘하였다. 본엽 3매가 완전히 전개된 후 배양액($\text{EC } 2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, pH 5.8)으로 포수시킨 암면블럭($10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 7.5\text{cm}$, 한국유알암면, Korea)에 줄기를 U자형으로 절곡 이식하였다. 본엽이 12매 내외로 전개된 3월 27일에 코코넛 코이어 슬라브($12\text{cm} \times 20\text{cm} \times 100\text{cm}$, 신성미네랄, Sri Lanka)를 PBG배양액 1/2배액으로 충분히 포수한 뒤 슬라브당 3주씩 정식하여 완전임의 배치법으로 배치하였다. 정식 후 7일 간은 뿌리의 활착을 위해 배양액이 완전히 포수된 상태에서 양액공급은 1/2배액으로 오전 9시부터 1시간 간격으로 8회 공급하였고, $600 \pm 50\text{ml}$ 를 공급하였다. 공급 배양액의 EC와 pH는 휴대용 EC, pH meter(HI9813, HANNA, USA)를 이용하여 각각 $1.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 와 pH 5.5로 유지하였다. 발근 후에는 1배액 배양액으로 다시 포수한 후 공급 배양액의 급액 EC $2.2 \pm 0.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, pH 5.5~6.0로 유지하였다. 착과기 전에는 EC $2.3\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$, pH 5.8로 착과기에는 EC $2.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, pH 5.8로 재배하였다.

3월의 평균 일출 시각인 오전 7시, 일몰 시각은 오후 6시를 기준으로 해가 뜨고 난후 제어가 시작되는 처리부터 해가지기 3시간 전 제어가 끝나는 처리, 24시간 제어되는 처리등 총 10가지 방법으로 급액시각을 조절하였다(표 3-3-12). 또한 파프리카 재배중 배지내 조건은 FDR센서와 로거(WP700, 미래센서, 한국)를 이용하여 재배 전기간동안 함수율 범위 $55 \pm 2\%$ 로 제어하였다. 센서는 뿌리가 배지에 활착이 되었다고 판단된 4월 1일부터 설치하여 제어 및 측정하였다. 유인방법은 V자형으로 두 줄기로 유인하였고, 분지마다 잎 2개를 확보하고 측지를 제거하였다. 묘들의 과도한 생육에 의한 차이를 줄이기 위해 정식 후 모든 식물체에서 분지 4번째 마디까지의 과실과 꽃은 모두 제거하고 실험을 시작하였다.

표 3-3-12. 처리조성

	급액시작	급액종료	비고
T1	24 시간		00:00~00:00
T2	일출+0	일몰+0	07:00~18:00
T3	일출+1	일몰+0	08:00~18:00
T4	일출+2	일몰+0	09:00~18:00
T5	일출+0	일몰-3	07:00~15:00
T6	일출+0	일몰-2	07:00~16:00
T7	일출+0	일몰-1	07:00~17:00
T8	일출+2	일몰-3	09:00~15:00
T9	일출+2	일몰-2	09:00~16:00
T10	일출+2	일몰-1	09:00~17:00

3) 실험수행 내용 및 결과

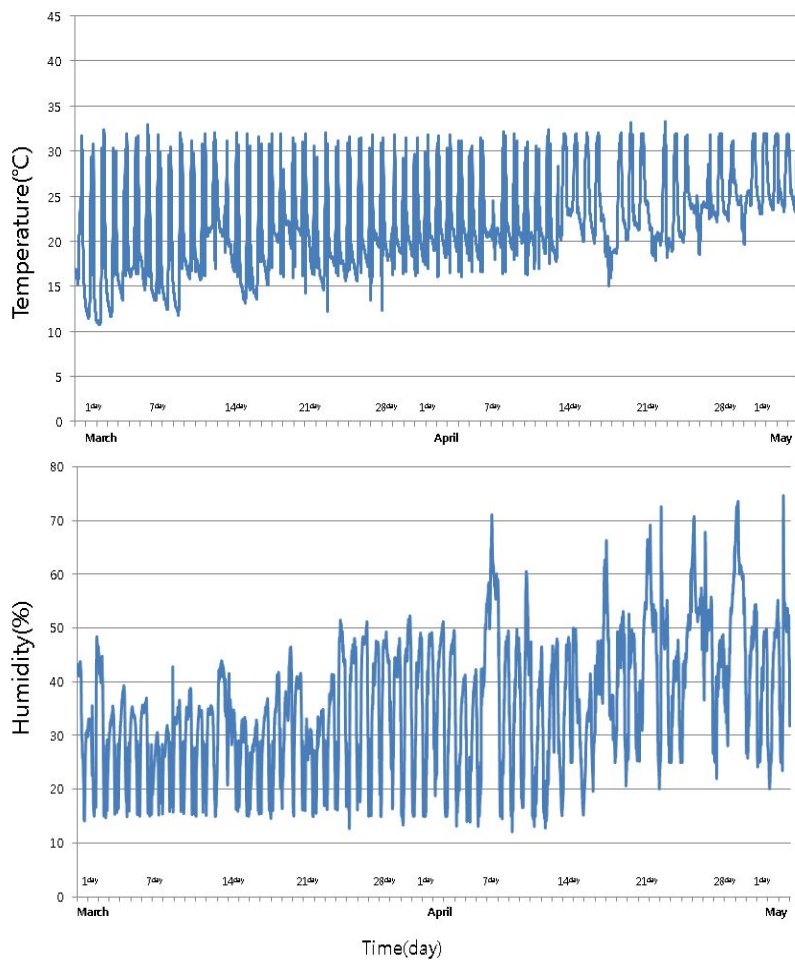


그림 3-3-14. 서울시립대학교에 위치한 양지붕 온실의 2011년 4월~5월의 온습도 환경조사

그림 3-3-14은 2011년 4월~5월의 양지봉온실내 온습도 환경을 나타낸 것이다. 그림 3-3-15는 FDR센서를 이용한 배지내 수분함량 제어시(55±2%)의 일주일간의 배지내 수분함량 변화를 나타낸 것이다. 센서에 의한 제어가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있으며, 배지내 수분함량의 최대, 최소, 평균 값은 표 3-3-13과 같다. 측정 기간동안 T7이 56.1%와 58.5%로 가장 높은 평균 수분함량과 최대값을 T1이 가장 높은 최소값을 나타내었다. 최대최소 편차는 T8이 7.4%로 가장 높았고, T1(24시간)이 2.5%로 가장 낮았다. 급액이 오전 9시 이후에 시작될 경우에 다른 처리보다 조금 더 많은 수분 공급 회수가 나타나 보다 복잡한 급액 패턴을 보였다. 이는 오전 9시가 넘으면서 식물체의 수분의 흡수가 왕성해져서 그에 대한 수분감소로 추가적인 급액이 필요로 하게 되기 때문으로 생각된다. 오후 급액 마감 시간을 앞당김에 따라 배지내 함수량 차이가 크게 나타나고 있어 Plant Balance 조절에 유효하게 이용할 수 있을 것으로 나타났다.

급액 시간 조절에 따른 배지내 수분함량 제어시 배지내 전기전도도(EC)의 변화는 그림 3-3-16과 같다. 수분함량보다 복잡한 패턴을 보이며, 전반적으로 급액EC보다 낮게 유지되고 있으나 점차적으로 전기전도도가 미세하게 증가하는 모습을 보였다. 배지내 전기전도도(EC)는 급액시간이 늦게 시작되고, 일찍 끝나는 경우에서 점차 증가되는 경향이 뚜렷하게 나타났다.

처리구별 하루간 배지내 수분함량 변화(그림 3-3-17.)에서는 제어 조건에 맞추어 급액이 이루어지는 것을 볼 수 있다. 정오를 중심으로 급격히 감소하는 배지수분함량 패턴을 전체적으로 발견할 수 있다.

급액시간 조절에 따른 수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR센서를 이용한 배지내 수분함량 제어시 하루의 배지내 EC변화는 그림 3-3-18과 같다. 24시간 급액을 제외한 다른 처리들에서 급액 중지시 이후 약간 EC가 증가 되는 경향을 나타냈다.

표 3-3-13. 급액시간 조절에 따른 수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR센서를 이용한 배지내 수분함량 제어시 최대, 최소값

Treat	평균	최대값	최소값
T1(00-00)	55.86	56.90	54.50
T2(07-18)	54.83	57.80	53.40
T3(08-18)	55.41	57.60	54.10
T4(09-18)	54.33	57.32	52.40
T5(07-15)	53.57	57.00	50.50
T6(07-16)	55.09	57.50	53.90
T7(07-17)	56.11	58.50	54.00
T8(09-15)	53.50	57.80	50.40
T9(09-16)	55.39	57.70	52.00
T10(09-17)	54.64	57.70	51.70

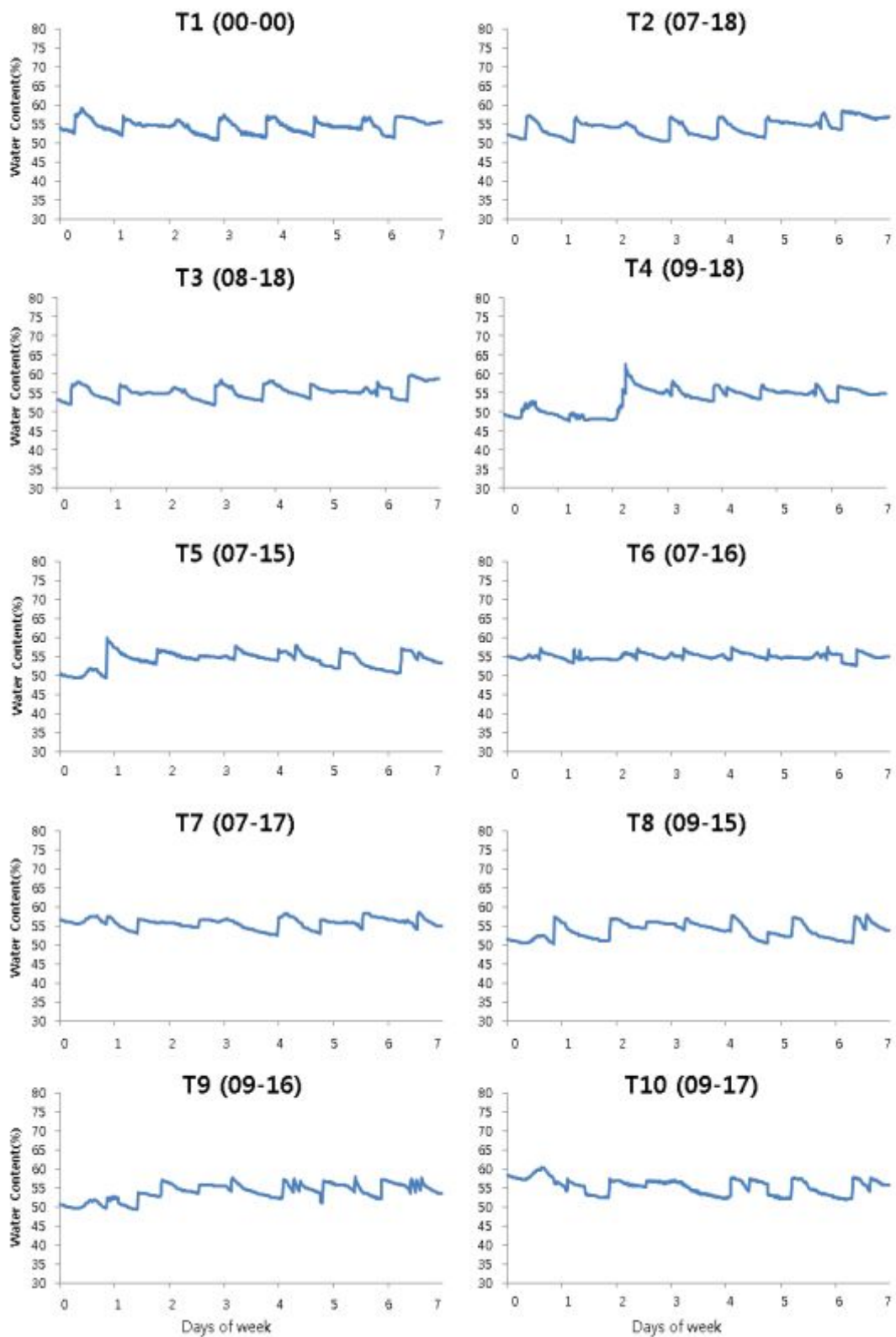


그림 3-3-15. 급액시간 조절에 따른 수정재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR센서를 이용한 배지내 수분함량 제어(55±2%)의 일주일간의 배지내 수분함량변화 (측정기간 : 4월 29일~5월 5일)

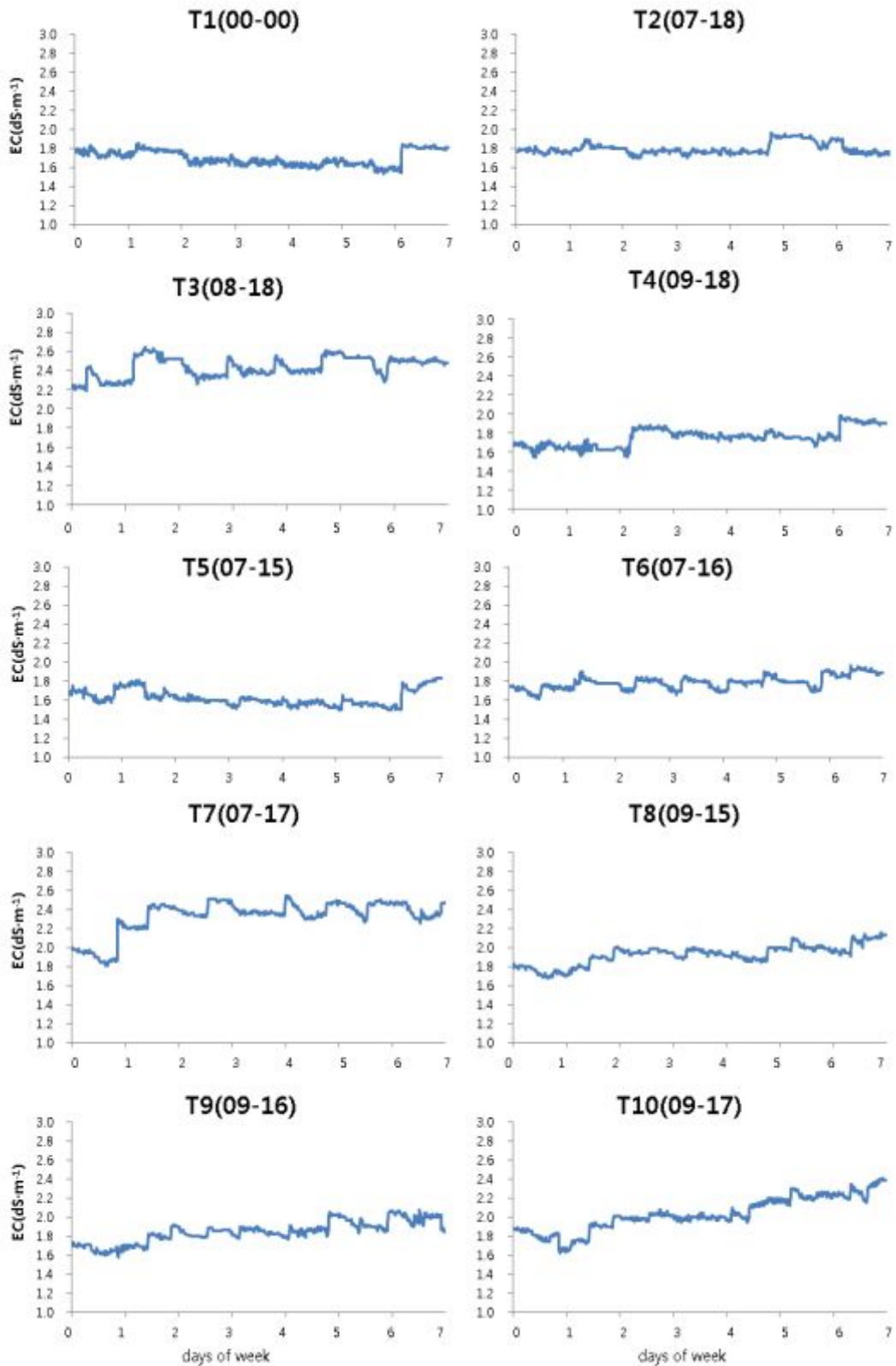


그림 3-3-16. 급액시간 조절에 따른 수정재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR센서를 이용한 배지내 수분함량 제어($55 \pm 2\%$)의 일주일간의 배지내 EC변화 (급액 EC: $2.2 \text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$, 측정기간 : 4월 29일 ~ 5월 5일)

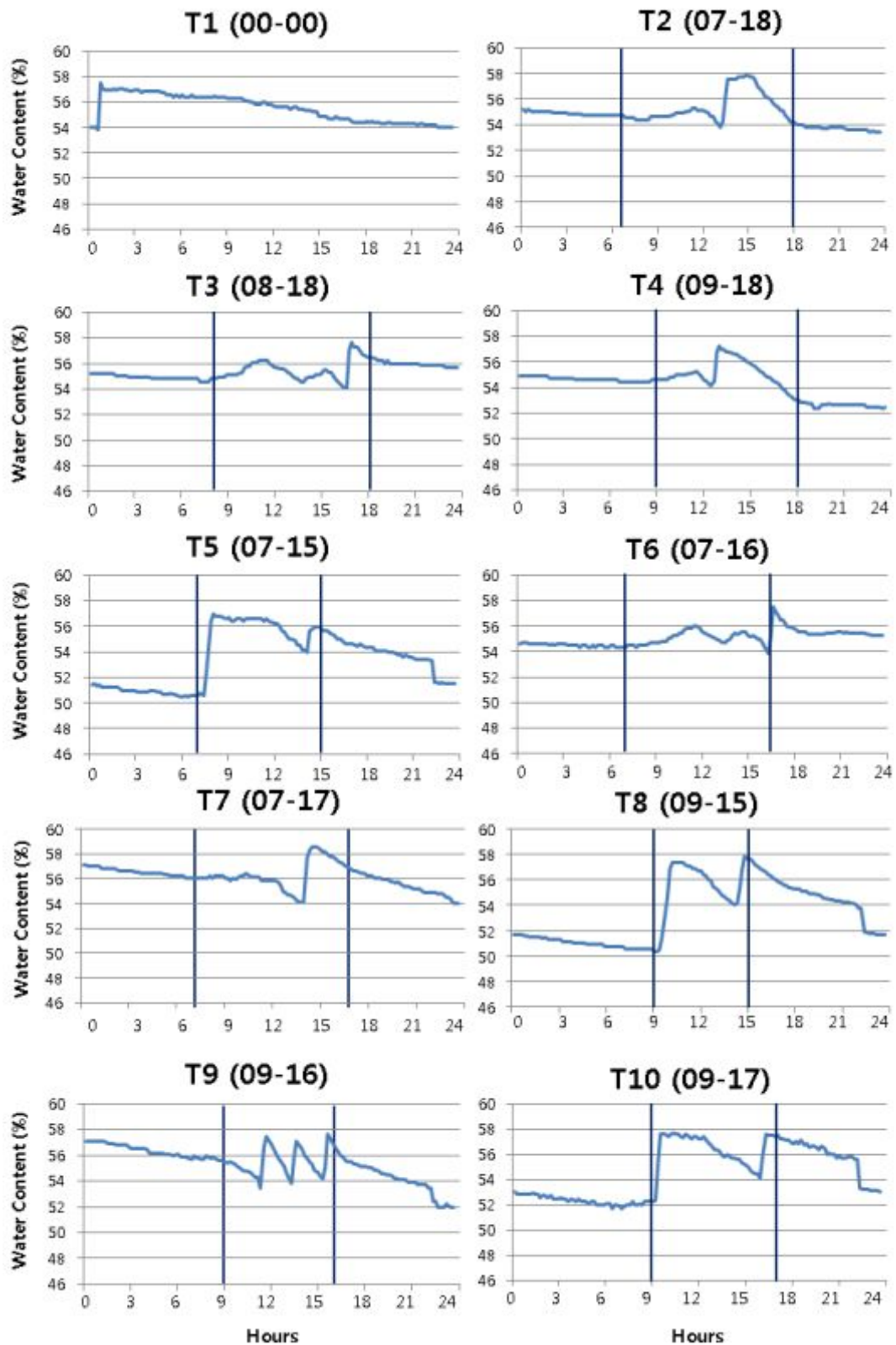


그림 3-3-17. 급액시간 조절에 따른 수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR센서를 이용한 배지내 수분함량 제어(55±2%)의 하루의 배지내 수분함량변화

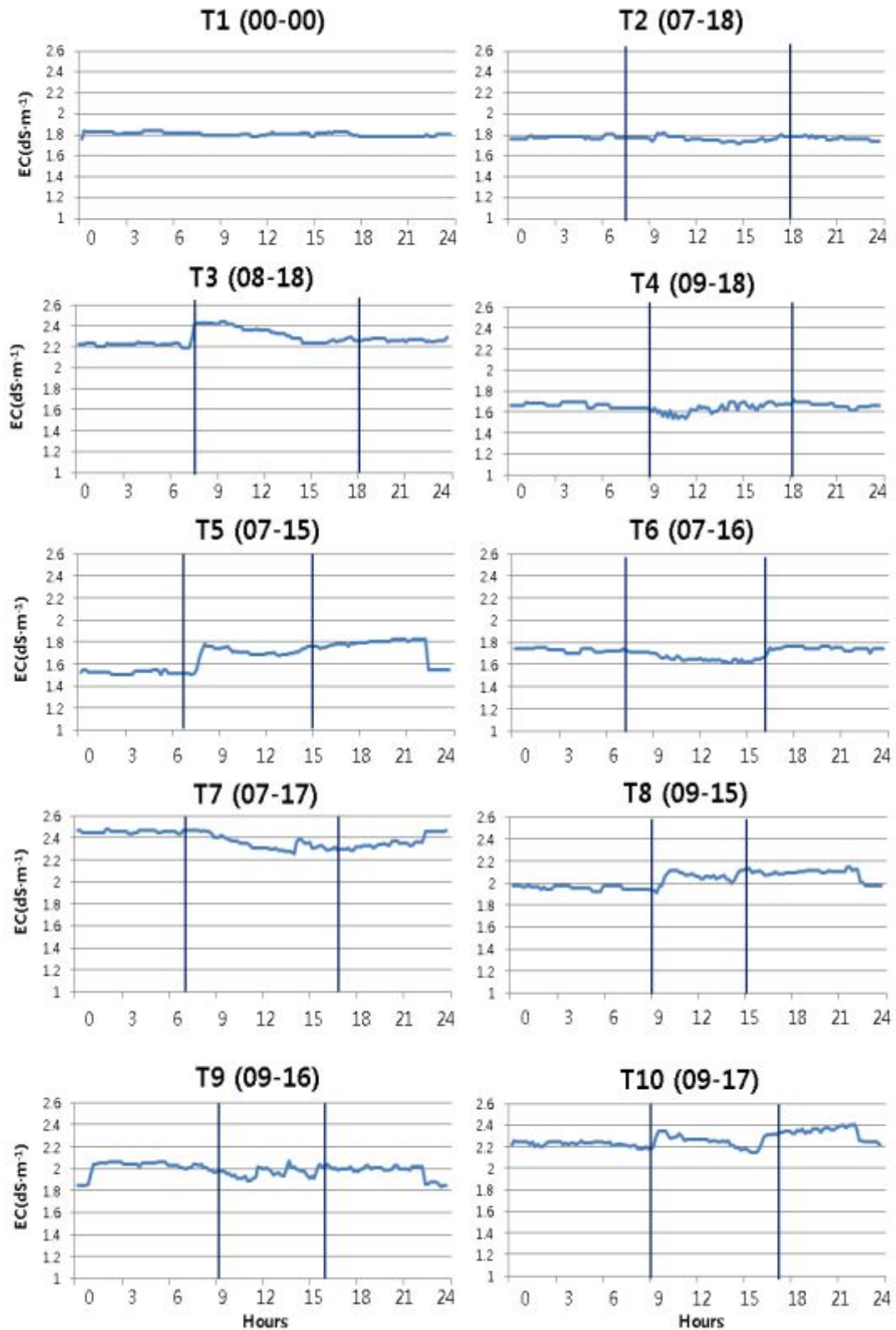


그림 3-3-18. 급액시간 조절에 따른 수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR센서를 이용한 배지내 수분함량 제어(55±2%)의 하루의 배지내 EC변화 (급액 EC: 2.2dS·m⁻¹)

그림 3-3-19는 배지내 수분함량 제어시 일주일 간 총 급배액량을 나타낸 그래프이다. T1 처리구가 주당 2.8L를 넘기는 가장 높은 급액량을 보였고, T2와 T5, T8 처리구들이 주당 2.5~3L로 그 다음으로 높은 급액량을 나타냈다. T6과 T9처리는 주당 1L가 안되는 상대적으로 낮은 급액량을 나타냈다. 배액량은 생육초기인 관계로 일부 배액이 나타내고 있으나 전체적으로 일주일간의 배액으로는 매우 낮은 수치인 0.5L보다 작은 수준이었다.

급액시간 조절에 따른 배지내 수분함량 제어시 파프리카의 생육은 표 3-1-14와 같다. 초장은 T7, T8, T9가 가장 높았고, 24시간 처리인 T1이 가장 낮았다. 방아다리 경경은 통계적 유의성을 보이지 않았고, 분지 마디수는 T3가 가장 낮았고 나머지 처리구들은 통계적 유의성을 나타내지 않았다. T8 처리가 가장 높은 수치의 분지 마디수를 나타냈다. 분지 경경은 T6과 T10에서 높았고 T7에서 가장 낮았다. 생장점에서 10cm 아래의 줄기 굵기는 T2, T4, T8, T10에서 높았고, T5에서 가장 낮았다. 식물체 정단부에서 2cm이상의 마디를 정단부에서 내려오면서 순서대로 측정된 절간 길이 결과에서는 처리별 정단부 부근의 마디들은 통계적 유의성을 보이지 않았고, 3번째 마디에서 T3가 가장 길었고, T2가 가장 짧았다. 4번째 마디에서는 T3와 T5가 가장 길었으며, 5번째 마디의 경우는 T4, T8, T10이 길었고, T2가 가장 짧았다. 정단부에서부터의 절간 길이에서는 전체적으로 보았을 때 T2처리가 절간들이 짧았으며, T3는 절간들이 5번째 절간을 제외하고는 가장 길어서 전체적으로 가장 긴 정단부에서부터의 5 마디를 가졌다.

각 측정 단위에 대한 결과들은 나타났으나 특정 처리 조건에 따른 생육상태 변화가 나타나는 경향은 없었다. 이는 아직 생육 초기 단계임으로 인하여, 각 실험처리의 영향이 확연히 나타나지 않은 것으로 판단된다. 앞으로 고온기를 거치면서 배지내 함수량, 배지내 전기전도도의 변화와 함께 작물생육상에 변화가 있을 것으로 추정된다.

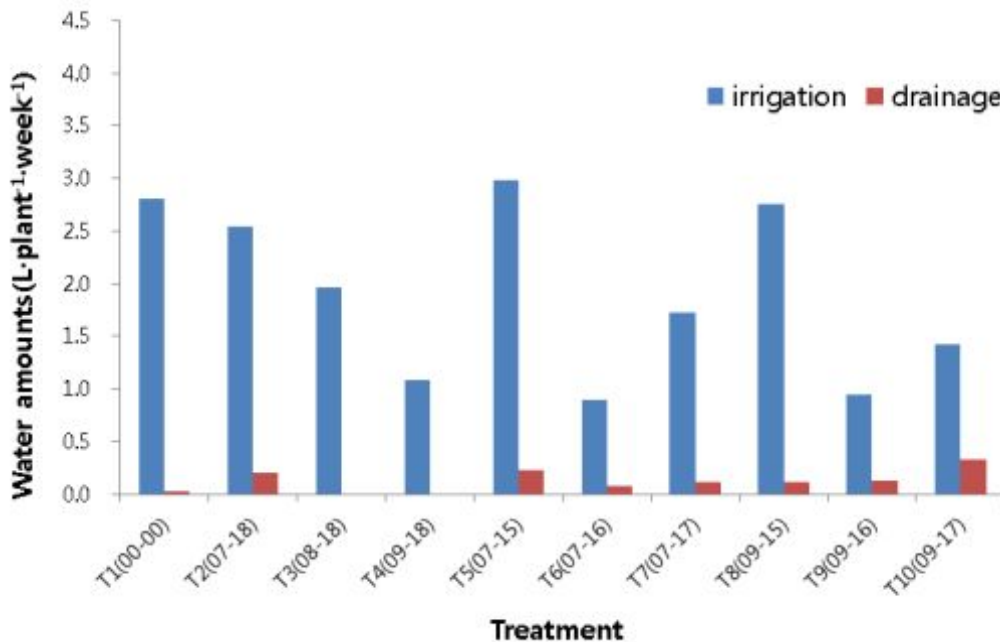


그림 3-3-19. 급액시간 조절에 따른 수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR센서를 이용한 배지내 수분함량 제어(55±2%)의 일주일간의 총 급배액량 (측정기간 : 4월 29일~5월 5일)

표 3-3-14. 급액시간 조절에 따른 수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR센서를 이용한 배지내 수분함량 제어(55±2%)조절에 따른 파프리카 생육

Treat	Plant height (cm)	Main stem length (cm)	No. of branches per plant (ea)	Stem diameter (mm)	Node diameter (mm)	Length of internode				
						1st	2nd	3rd	4th	5th
T1(00-00)	87.6 d ²	29.3 a	8.3 a	10.9 ab	8.0 ab	3.2 a	7.0 a	8.5 ab	8.9 b	9.8 ab
T2(07-18)	89.5 cd	30.0 a	8.8 a	10.9 ab	8.8 a	3.5 a	8.0 a	7.9 b	8.3 b	9.1 b
T3(08-18)	97.0 abc	34.1 a	6.8 b	11.6 ab	7.9 ab	3.3 a	8.0 a	10.7 a	11.6 a	10.2 ab
T4(09-18)	95.9 abcd	33.1 a	8.3 a	10.9 ab	8.4 a	2.5 a	5.7 a	8.9 ab	9.0 b	10.8 a
T5(07-15)	101.1 ab	29.8 a	9.0 a	11.2 ab	7.0 b	3.0 a	7.6 a	9.5 ab	11.4 a	9.7 ab
T6(07-16)	99.2 ab	30.7 a	8.8 a	12.2 a	8.0 ab	3.8 a	7.5 a	9.5 ab	9.7 b	9.6 ab
T7(07-17)	104.3 a	37.1 a	8.3 a	10.2 b	7.8 ab	3.2 a	5.5 a	8.6 ab	9.3 b	10.2 ab
T8(09-15)	102.4 a	31.1 a	9.2 a	11.2 ab	8.1 a	3.0 a	6.5 a	8.9 ab	9.2 b	10.8 a
T9(09-16)	102.5 a	29.2 a	8.8 a	11.5 ab	7.8 ab	3.4 a	6.8 a	8.7 ab	9.0 b	10.5 ab
T10(09-17)	92.9 bcd	30.2 a	8.2 a	12.4 a	8.1 a	2.9 a	6.2 a	8.8 ab	8.6 b	10.6 a

²Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

4) 연구결과 요약

파프리카 수경재배시에 FDR 센서를 이용, 코코넛 코이어 배지내 근권부 수분 함량을 조절할 때 급액 시작시각과 종료시각을 다르게 하였을 때, 생육에 적합한 급액시간을 구명하고자 실험을 수행하였다. 코코넛 코이어 dust와 chip 7:3배지내 수분함량조건은 FDR센서를 이용한 함수율 범위 55±2%으로, 급액시각은 3~4월의 평균 일출 시각인 오전 7시, 일몰 시각은 오후 6시를 기준으로 해가 뜨고 난후 제어가 시작되는 처리부터 해가지기 3시간 전 제어가 끝나는 처리, 24시간 제어되는 처리등 총 10가지 방법으로 조절하였다. 배지내 전기전도도(EC)의 변화는 수분함량보다 복잡한 패턴을 보이며, 급액 시작이 오전 9시인 처리구들의 경우 다른 급액 시간 처리에 비해 낮으나 많은 수의 증감 변화 패턴을 보이면서 점차적으로 전기전도도가 증가하는 모습을 보였고, 24시간 급액을 제외한 다른 처리들에서 급액 중지시 이후 약간 EC가 증가 되는 경향을 나타냈다. 00-00 처리구가 주당 2L를 넘기는 가장 높은 급액량을 보였고, 07-16처리와 09-16처리는 주당 1L가 안되는 상대적으로 낮은 급액량을 나타냈다. 배액량은 FDR센서 제어구에서 시험 초기에 작물의 근권분포가 완성되기 전까지 약간의 배액이 있었으나 점차 무배액으로 제어가 되었다.

2. 무배액 시스템을 위한 급액시간대 조절 (가을~겨울재배)

(1) 실험 목표

코코넛 코이어 배지를 이용한 파프리카 수경재배시에 FDR 센서를 이용한 배지 내 근권부 수분 함량을 제어의 급액 시작과 종료시각을 조절하여 적합한 급액 시간대를 구명하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

파프리카 'RZ208'(*Capsicum annuum* L.)을 이용하여 2011년 8월 10일~11월 30일까지 서울 시립대학교 양지봉 온실에서 재배하였다. 7월 10일경 압면 240공 플러그 판에 파종하여 약 2주 후 압면블럭에 U자형으로 이식하였고, 본엽이 6~8매 되었을 때 정식하여 재배하였다. 네덜란드 파프리카 PBG 배양액을 사용하였고, 파종부터 유효기간(6월 30일~8월 9일)에는 EC 2.0~2.2dS·m⁻¹, 정식 후 활착기간(8월 10일~8월 31일)에는 EC 2.5dS·m⁻¹로 높여서 공급하였다. 1그룹 착과기 및 과실 비대기(9월 1일~10월 19일)에는 2.7~2.8dS·m⁻¹로 공급 EC를 높였으며, 1그룹 수확 및 2그룹 과실 비대기(10월 20일~11월 30일)에는 2.5dS·m⁻¹로 낮추어서 관리하였다. pH는 5.8~6.0으로 공급하였다.

9월의 평균 일출 시각인 오전 6시, 일몰 시각은 오후 7시를 기준으로 06~17시(+0,-2), 06~19시(+0,-0), 07~16시(+1,-3), 08~19시(+2,-0), 09~16시(+3,-3), 09~18시(+3,-1)으로 급액시작 시각과 급액종료 시각을 조절하였다. 6개의 처리는 정한 시간에만 함수율의 범위를 조절하여 급액될 수 있게 하였으며 대조구로 00~24시(24시간)를 두어 지속적으로 배지 내 함수율을 유지할 수 있게 하였다. 파프리카 재배중 배지 내 조건은 FDR센서와 로거(WP700, (주)미래센서, 한국)를 이용하여 함수율 범위 55±2% (53.0% 이하일 때 급액이 시작되어 57.0% 이상이 되면 급액을 정지)로 제어하였고, 배지 내 수분함량(%), 전기전도도(Electrical Conductivity; EC), 온도(°C)의 변화를 기록하였다. 모든 실험은 FDR센서를 이용하여 처리기간 중 무배액으로 진행되었고, 일일 급액량을 측정하였다. 코이어 배지는 시중에서 판매되는 dust와 chip 비율 7:3으로 압축 성형된 코코피트(COCO-PEAT, (주)신성미네랄, 한국)를 이용하였다. 묘를 정식하기 전에 압축 성형된 코코피트 슬라브를 수돗물로 포수한 후 2~3회 씻어내는 작업을 하였고, 근권의 뿌리 활착 유도를 위해 EC 2.0dS·m⁻¹의 PBG배양액으로 포수하는 작업을 하였기 때문에 묘 정식 후 10일 후부터 배지 함수율에 따른 급액이 되기 시작하였으며, 그 후 10일 동안은 안정화의 기간을 가졌다.

생육조사는 정식 후 4주째(9월 7일)부터 2주 간격으로(9/21, 10/5, 10/19, 11/2, 11/16, 11/30) 초장, 경경, 마디수, 엽장, 엽폭을 측정하였고, 성장점으로부터 15cm 위치의 경경, 엽장, 엽폭을 측정하고, 상위부분 5마디 절간장을 측정하여 식물의 영양생장 및 생식생장을 판단하였다. 또한 과실이 90% 이상 착색된 것을 기준으로 2011년 10월 12일부터 11월 30일까지 (10/12~11/10:1그룹, 11/12~11/30:2그룹) 과실을 수확하였고, 수량조사는 100g이상의 모양이 정상적이고 병충해 흔적이 없는 과실을 상품으로 분류하였고, 100g미만의 사과, 열과, 기형과, BER 등을 비상품으로 구분하여 조사하였다. 총 두 개의 그룹을 착과 및 수확하여 과장, 과폭, 당도를 조사하였다. 당도는 수확된 과실의 정중앙 부분의 1.0g을 채취하여 3반복으로 당도계(Pocket

Refractometer PAL-1, ATAGO, Japan)를 이용하였고, 통계분석은 SAS프로그램을 이용하여 분석하였다.

3) 실험수행 내용 및 결과

실험기간 동안 서울시립대 양지봉 온실의 온도환경 및 광도변화는 다음 그래프(그림 3-3-20) 같다.

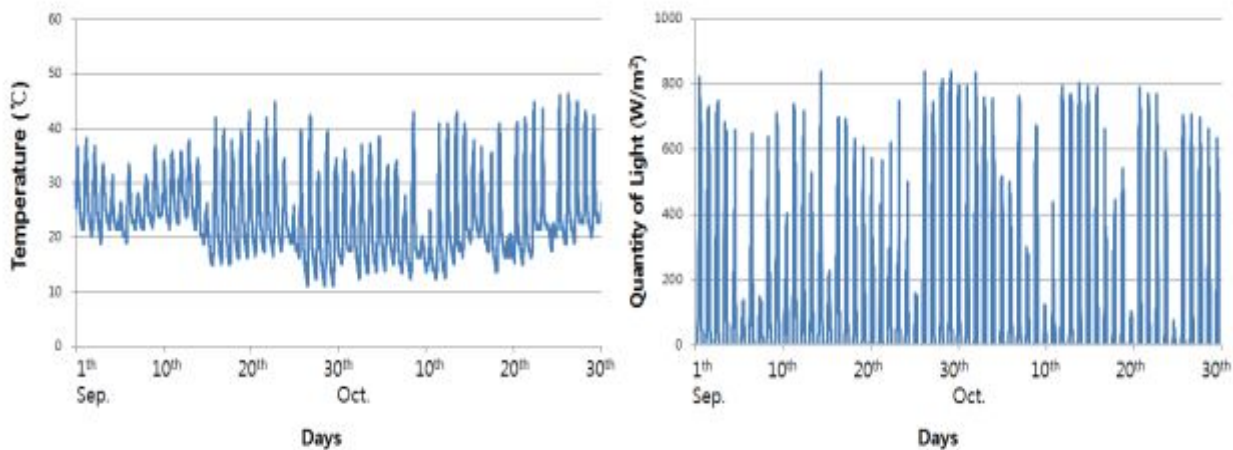


그림 3-3-20. 서울시립대학교에 위치한 양지봉 온실의 2012년 9월~10월의 온도, 광도환경조사

그림 3-3-21은 FDR 센서를 이용하여 배지 내 함수율을 55±2%로 유지한 재배기간 동안의 급액시간 조정에 따른 배지내 함수율, 근권 EC의 시간대별 일일 변화 그래프이다. 배지 내 함수율은 전반적으로 급액 제어를 24시간 가능하게 한 처리에서 일정하게 유지되었고, 모든 처리구는 재배 전기간 동안 52.22~60.83% 범위 내에 있었으며, 평균 56.47%의 함수율과 약 4.3%의 편차를 가졌다. 00-24시간동안 급액이 가능한 처리구에서는 함수율 평균 58.69%로 급액시간대를 조정해 다른 처리구들보다 높은 수준을 유지하였고, 편차 값도 가장 적어 가장 안정적인 배지내 함수율을 보였으나 다른 처리들에 비해 야간에 근권이 습한 상태로 유지되었음을 알 수 있었다. 16시에 급액이 종료되는 07-16, 09-16 처리구에서 최소-최대값의 편차가 가장 컸는데, 이는 급액이 되지 않는 시각에도 식물의 지속적인 수분 흡수가 일어나 배지 내 함수율이 낮아진 결과로 보인다.

전반적으로 일출 직전부터 급액시작 전까지가 일중 가장 낮은 배지 내 수분함량을 보이며 24시간 급액 가능한 처리를 제외하고, 최소 평균 53.7%의 수치까지 낮아지는 경향을 보인다. 급액이 시작되는 시간대에서 보이는 배지 내 함수율 변화의 폭은 9월에 비해 10월에서, 10월에 비해 11월에서 작아짐을 보이는데 이는 일몰의 시각이 점차 늦추어지는 경향이라 판단된다. 또한 급액이 끝난 이후 근권 함수율 변화의 폭이 시간이 지날수록 일몰 시각이 앞당겨져 배지 내 함수율이 급격한 감소를 보일 것으로 예상했지만 반대로 완만한 기울기를 보인 것은 배지 내 함수율이 크게 변화하지 않은 것이 원인일 것이라 생각한다.

공급액의 EC는 재배기간중 센서로 제어하기 전 활착기에는 2.5 dS·m⁻¹로 관리하였고, 1그

를 착과기~1그룹 과실 비대기인 9월 1일~10월 19일까지 EC $2.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로, 2그룹 착과기부터 EC를 낮추어 $2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 공급하였다. 재배기간중 9월에는 평균 $2.49 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 10월에는 $3.09 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 11월에는 $3.36 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 으로 전반적으로 높아지는 경향을 보였고, 10월 20일부터 11월경에는 급액의 EC를 낮추어도 근권의 EC가 떨어지거나 급격히 높아지는 현상은 일어나지 않았다.

재배 전기간 동안의 평균값은 급액을 24시간 가능하게 한 처리에서 $2.88 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 의 수치로 가장 낮았고, 06-17의 처리구와 비슷한 수준을 보였다. 다른 처리구들은 비슷한 수준을 보였지만 09-18, 07-16, 06-19, 09-16 처리구 순으로 높았다. 미세하지만, 급액될 때 마다 함수율의 변화에 따라 비슷하게 근권 EC가 변화되었지만 배지 내 근권은 비교적 안정적으로 유지되었다. 11월의 근권 EC의 평균 수치는 일출 후 3~2시간 후 급액이 시작된 09시에 급액이 시작된 두 개의 처리구에서 가장 높은 수치를 보였다. 09-18 처리구는 $4.35 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 09-16 처리구는 $4.04 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 의 값을 보였으며, 00-24처리는 $3.39 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 06-17, 07-16, 06-19, 의 처리구들과 비슷한 수치를 보였다. 오히려 08-19 처리에서는 $2.85 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 가장 낮은 근권이온 농도를 보였다. Ahn 등(2010)은 순환식 수경재배에서도 지속적인 순환으로 재배기간이 길어지게 되면 양분 불균형으로 인한 효과가 나타나기 때문에 배지 내 양분의 불균형 여부를 파악하기 위해서 주기적으로 분석할 필요가 있으며, 이온 변화 범위를 정량화할 수 있는 연구가 더 필요하다고 하였다. 배지 내 공급된 양액의 공급횟수도 중요한 요인으로 볼 수 있는데, 24시간 급액가능 처리구는 일일 약 9.6회로 가장 높았고, 06-17 처리구는 5.6회, 06-19는 5.3회, 07-16처리와 08-19 처리구는 5.0회의 급액횟수를 보였으나, 09-16 처리구는 일일 약 3회, 09-18 처리구는 약 3.6회로 낮은 급액 횟수를 보였다. 09-16 처리구는 공급가능 시간이 7시간으로 가장 짧아 배지 내 함수율과 근권의 EC 변화에 영향을 준 것으로 보인다. Sim 등(2006)은 뿌리는 광합성 산물을 분해하여 수분 및 영양분 흡수에 필요한 에너지를 생성하고 질소 동화, 생장 및 에너지 요구과정을 위하여 산소가 필요한데, 너무 많은 관수 빈도는 근권 배지의 산소를 부족하게 할 수 있고, 1회당 많은 양을 공급하는 것 또한 배지가 과습해지거나 건조해질 위험이 있어 일정한 함수량으로 유지할 수 있도록 지속적인 급액이 이루어지는 것이 필요하다고 하였다.

그림 3-2-3는 재배기간 동안의 FDR센서를 이용하여 급액시간대 조절에 따른 월별 급액량의 변화이다. 평균 함수율 $55\pm 2\%$ 를 유지시 공급된 총 급액량은 $27.5\sim 41.2 \text{ L/plant}$ 로 일몰 시각까지 급액이 가능했던 19시에 종료되는 두 처리에서 다른 처리보다 총 급액량이 높았다. 09-16, 09-18 처리는 24시간 급액이 가능한 처리와 비슷한 수준을 보였고, 06-17, 07-16 처리는 00-24보다 낮은 급액량을 보였다. 공급 가능한 시간이 7시간으로 가장 짧았던 09-16처리에서 재배기간 동안 공급된 총 급액량이 09-18과 24시간과 비슷한 수준이라면 공급된 횟수가 많거나 또는 한번 급액될 때, 보다 많은 양이 공급된 결과로 추측해 볼 수 있다.

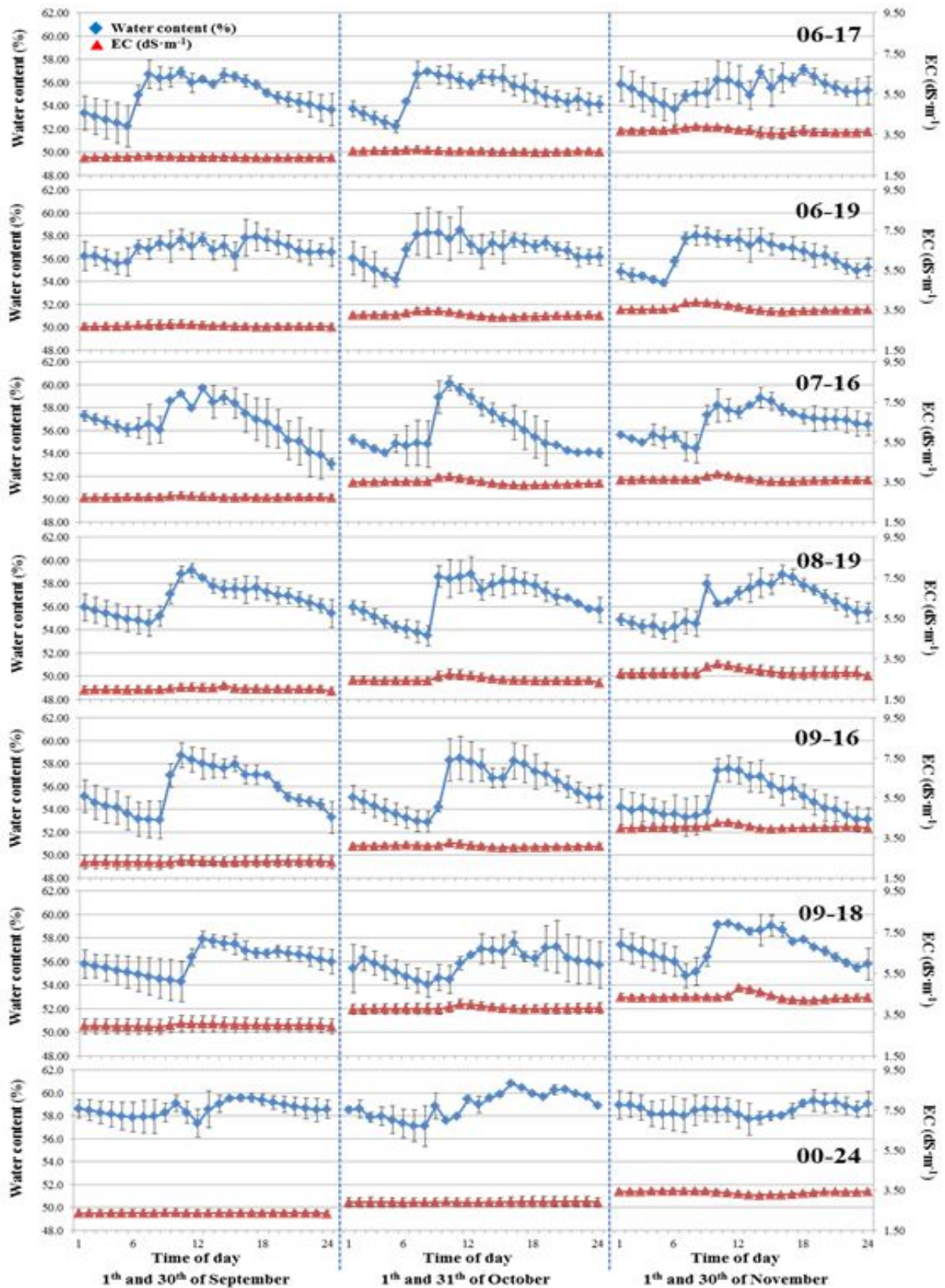


그림 3-3-21. 급액시간대 조절에 따른 수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR 센서를 이용한 배지 내 수분함량 제어의 배지내 수분함량 및 근권 EC 변화 (측정기간: 9월 1일~11월 30일) (9/1~10/18; 공급 EC:2.8, 10/19~ 11/30; 공급 EC:2.5)

월별 주당 급액량은 9~10월동안 비교적 일일 또는 전체 급액량과 비슷한 경향을 보였다. 9~10월에 비해 작물이 자라면서 요구하는 급액량이 증가함에도 불구하고 11월 동안의 급액량이 비교적 낮은 것은 11월 중 광량이 600 W/m²미만인 일수가 가장 많은 20일이었고, 평균 일출시각과 일몰시각의 변화로 작물이 광합성과 증산을 할 시간이 줄어들어 적은 급액량 만으로도 배지 내 수분함량을 유지할 수 있었을 것으로 생각한다. 일일 급액량은 맑은날(광량 600W/m²이상, 56일)과 흐린날(광량 600W/m²미만, 36일)의 급액량은 약 300ml 이상의 차이를 보였다. 일반적으로 1그룹 착과기에는 배액 20~40%를 유지할 때, 일일 2회~5회, 평균 일일 급액량 0.6~1.0 L/plant 이 적당하다고 알려져 있으나(Lee 등, 2009), FDR센서를 이용한 본 실험에서는 약 하루 1~5회, 맑은날 일일 평균 0.40 L/plant, 흐린날 0.08 L/plant로 기준치보다 약 50~60% 낮은 수준으로 관리되었고, 무배액 상태로 유지되었다. 관행적인 타이머를 이용한 급액제어는 일일 적산일사량이나 온도, 습도와 상관없이 날씨의 변화에 대해 급액 횟수나 1회 급액량을 수동적으로 조절하여야 하는 단점(Cho 등, 2009)이 있고, 이 방법은 재배자의 경험에 기초하므로 날씨에 상관없이 급액이 되어 흐린 날은 과습 되기 쉽고, 맑고 더운 날에는 건조하기 쉬운 문제점이 있으나, FDR센서를 이용하여 배지 내 함수율을 조절하면 재배의 경험이 없는 초보자도 쉽게 근권의 적정 수분함량을 유지할 수 있을 것으로 판단된다.

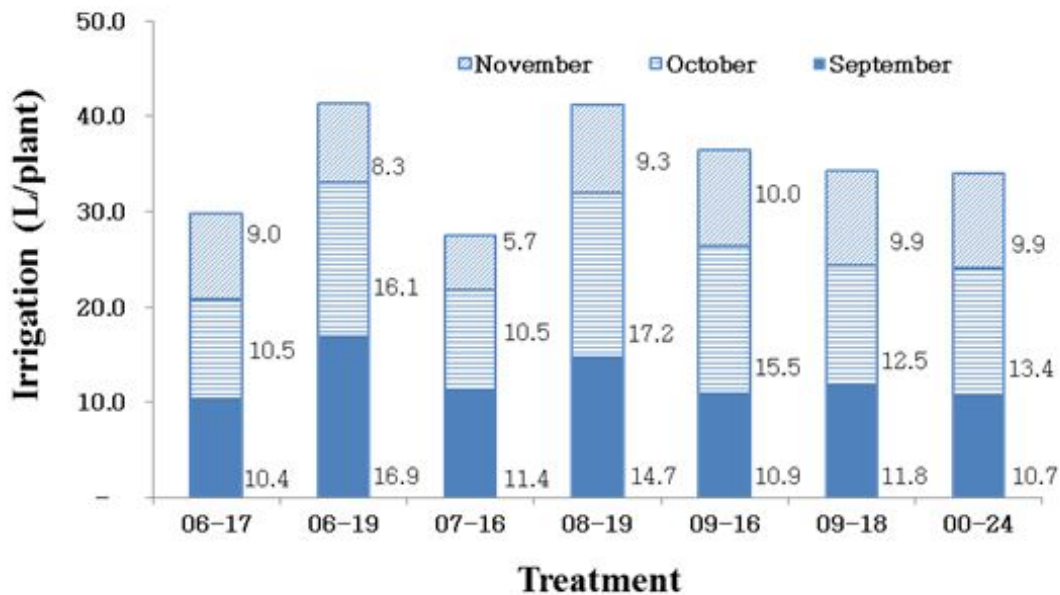


그림 3-3-22. 급액시간대 조절에 따른 수정재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR센서를 이용한 배지 내 수분함량 제어의 재배 전기간의 급액량(9월 1일~11월 30일)
(총 재배기간:92일, 누적일사량 600W/m²light 이상:56일, 600W/m²light 이하:36일)

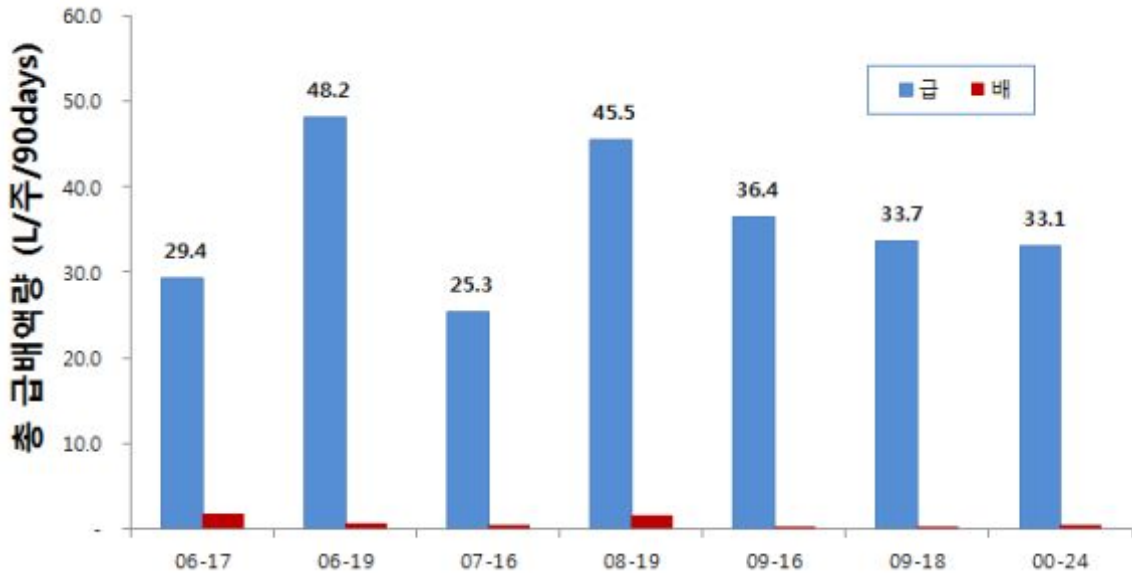


그림 3-3-23. 급액시간대 조절에 따른 수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR 센서를 이용한 배지 내 수분함량 제어의 재배 전기간 동안의 주당 급배액량 (9월 1일~11월 30일)

표 3-3-15~16은 정식 후 4주후의 광합성, 기공전도도, 증산량의 결과이다. 06-17, 06-19, 07-16, 09-16에서 광합성이 높았지만 처리간 큰 차이는 없었고. 08-19처리가 00-24의 수준으로, 09-18처리는 가장 낮은 광합성을 보였다. 기공전도도와 증산량에서는 06-19처리에서 가장 높은 값을 보였다. 정식 후 12주째의 광합성, 기공전도도, 증산량 모두 09-16에서 높았으며, 06-19에서 가장 낮은 광합성율을 보였다. Yu와 Bae(2004)는 관비재배에서의 착색단고추 재배에서 토양 내 수분함량이 낮아질수록 광합성 및 증산속도가 낮아지는 결과를 보인 것은 수분공급이 제한되면서 스트레스를 받아 체내에 ABA 함량이 증가하여 기공이 닫히고, CO₂흡수에 영향을 미친 것이라 말하고 있다. 영양생장기인 정식 후 4주차 결과와 2그룹 생식생장기인 정식 후 12주차 광합성, 전기전도도, 증산량 값을 비교했을 때 정반대의 결과가 나타나는 것을 표로 알 수 있다. 본 연구에서는 9월부터 11월까지 급액시간을 지속적으로 일정하게 처리하였기 때문에 12차 광합성 측정 시기인 11월에는 일출 시각(07시)은 늦춰지고, 일몰 시각(18~17시)은 앞당겨져서 일출 이전부터 일몰 이후까지 급액된 시기에 낮은 값을 나타내어 생장시기에 따른 급액시간대 조절이 식물균형을 유지하는데 있어 중요한 요인이 되는 것을 알 수 있다.

과채류의 생육조절은 성장속도와 발육속도를 조절하는 것을 의미하며, 이러한 생육속도는 지상부 환경요인인 온도와 광 의존하는 경향이 크고(Lee와 Myoung, 2010), Sim 등(2006)은 배지 내 수분이 시간의 경과 및 일사량에 따라 변화양상을 조사하였을 때, 배지 내 수분이 감소함에 따라 일중 무게 변화량도 감소하는 경향을 나타내었는데 이것은 수분스트레스에 의해 식물활력의 회복이 일출 후 점차 느려지기 때문이라고 보고하고 있다. 또한 Nguyen Huy Tai 등(2010)의 연구에서도 오전의 관수량이 배지의 포장 용수량 근방까지 도달할 때까지 여러번의 관수를 하여야만 배수가 발생하고, 균락상태에서 광합성은 일출과 함께 증가하였다가 점차 감소하는 경향이 있는 것은 생리적 특성과 지하부 수분관리는 물의 싱크와 소스로서 밀접한 관계가 있다고 하였다.

표 3-3-15. 급액시간대 조절에 따른 수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR센서를 이용한 배지 내 수분함량 제어시 정식후 4주차 광합성 특성

Treat	4 th					
	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 ($\text{mmol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	
06-17	15.414	a	0.282	c	3.692	cd
06-19	16.156	a	0.639	a	5.778	a
07-16	15.765	a	0.430	c	4.756	b
08-19	12.888	ab	0.266	c	3.568	cd
09-16	15.841	a	0.311	bc	4.026	bc
09-18	11.898	b	0.192	c	2.797	d
00-24	12.719	ab	0.242	c	3.446	cd

^z Mean separation within columns by Duncan's multipul range test at the 5% level.

표 3-3-16. 급액시간대 조절에 따른 수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR센서를 이용한 배지 내 수분함량 제어시 정식후 12주차 광합성 특성

Treat	12 th					
	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 ($\text{mmol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	
06-17	14.273	b	0.677	bc	3.093	c
06-19	9.977	c	0.317	c	1.780	d
07-16	17.213	ab	1.062	ab	4.303	ab
08-19	14.553	b	0.490	c	2.990	c
09-16	18.127	a	1.227	a	4.707	a
09-18	17.083	ab	0.657	bc	3.648	abc
00-24	14.992	ab	0.672	bc	3.485	bc

^z Mean separation within columns by Duncan's multipul range test at the 5% level.

표 3-3-17. 급액시간대 조절에 따른 수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR센서를 이용한 배지 내 수분함량 제어시 정식 후 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16주차 성장점으로부터 5마디 길이의 생육특성

Treat	4 th		6 th		8 th		10 th		12 th		14 th		16 th	
06-17	9.8	ab ^z	17.5	a	16.8	a	22.1	ab	19.9	ab	17.8	a	19.2	a
06-19	11.6	a	13.9	a	14.3	ab	19.5	abc	19.4	ab	16.1	a	16.9	a
07-16	12.0	a	16.5	a	16.8	a	18.6	c	19.9	ab	17.2	a	18.6	a
08-19	11.0	ab	13.5	a	14.7	ab	19.2	bc	18.2	b	16.0	a	18.5	a
09-16	11.0	ab	17.8	a	15.8	ab	22.6	a	22.9	a	20.0	a	20.1	a
09-18	11.4	ab	17.0	a	14.2	b	21.3	abc	21.2	ab	20.4	a	20.0	a
00-24	8.9	b	15.0	a	14.0	b	21.7	abc	20.9	ab	20.1	a	18.6	a

^z Mean separation within columns by Duncan's multipul range test at the 5% level.

표 3-3-17은 생장점부터 5마디까지의 절간장의 차이의 값을 나타낸 그래프로 전반적으로 6~8주 사이, 10~12주, 14~16주 사이에 강한 음의 값을 나타낸 것은 5마디의 절간장이 짧아지는 것으로 과실의 착과기를 예상할 수 있으며, 강한 생식생장이 일어나고 있음을 보였다. 또한 과실이 비대해지고, 영양생장이 일어나는 시기인 8~10주, 12~14주 사이에 영양생장으로의 전환이 일어났다고 보여진다. 4~6주까지의 영양생장기에서는 06-17, 09-16처리에서 24시간 급액 가능한 처리 수준의 변화폭을 보였고, 08-19, 06-19처리에서는 가장 적은 변화값을 보였는데, 전반적으로 생장점부터 5마디 절간장의 길이는 급액시각 조절에 따른 큰 차이는 없었기 때문에 급액을 19시에 종료한 두 처리에서는 이미 빠른 영양생장이 진행되어 변화의 폭이 크지 않았음을 알 수 있었다. 전반적으로 07-16과 09-16의 처리구는 다른 처리구에 비해 영양생장과 생식생장으로 전환의 변화폭이 크지 않았는데, 이것은 9월부터 11월까지의 재배기간 동안 일출과 일몰의 시각이 변화되었음에도 불구하고, 일출시각 이후 급액이 시작되어 일몰시각 이전에 급액이 종료되는 것으로 유지되었던 결과인 것으로 보여진다.

전반적으로 과실은 상품과, 비상품과, 과장, 과폭, 당도에서 유의적으로 차이가 없었다(표 3-2-4). 주당 과실의 수확량에서는 유의적 차이가 없었으나 급액 시간을 조절한 6개 처리구에서는 주당 평균 6.6개의 과실을 수확하였고, 24시간 급액이 가능했던 처리구(6.3개) 보다 높은 수치를 보였다. 또한 08-19, 06-17, 09-18처리에서 주당 평균 6.9개의 상품과 수를 보였고, 07-16, 06-19, 09-16, 00-24가 평균 5.1개의 주당 상품과 수를 보였다. 급액가능 시간이 13시간으로 가장 길었던 06-19처리에서 27.5%의 비상품과율을 보였으며, 급액가능 시간이 7시간으로 가장 짧았던 09-16처리에서도 14%의 비상품과율을 보였다.

일반적으로 비상품과는 열과, 배꼽썩음과, 기형과 등으로 분류하였는데 그 중에서도 과실이 비대하는 과정의 세포 팽창과 관련이 있는 열과는 낮 동안에는 수분 흡수에 의한 세포팽창과 증산에 의한 세포수축이 균형있게 이루어지나, 일몰 이후에는 더 이상의 증산이 없기 때문에 세포가 팽창된 상태를 다음날 일출까지 유지하였다가 증산하게 되기 때문에 발생한다고 알려져 있다. 재배기간 중에는 실제로 8월~9월의 일출시각(06시)과 일몰시각(19시)을 기준으로 제어하였기에 과실비대 및 수확기인 10월~11월의 일출 시각(07시)은 늦춰지고, 일몰 시각(18~17시)은 앞당겨져 06-19의 처리는 일출 이전부터 일몰 이후까지 급액되어서 06-19 처리에서 비상품과율이 가장 많이 발생한 것으로 보인다. 또한 배꼽썩음과는 동절기 재배의 초기에 나타나며 근권의 EC가 높고 배지의 수분이 부족할 경우 발생하는 것으로 알려져 있는데 재배기간 중 근권의 EC가 비교적 높았던 09시(일출 후 3시간~2시간 후)에 급액을 시작하는 두 처리에서만 2그룹 수확시 비상품과가 발생한 것으로 보아 배지 내 근권의 EC를 조절하는 것도 상품과율을 높이는 데 중요한 요소일 것으로 생각된다(Lee 등, 2009; Lee 2010).

An 등(2011)이 연구한 배액량 감소가 파프리카 생육과 수량에 미치는 영향의 연구결과를 보면 배액제로의 처리구에서 배액율이 3.8%이 발생하고, 평균 21.2%의 함수율을 유지하였을 때, 관행처리(배액율 25.8%, 함수율 60.9%)에 비해 상품과율이 44.9%, 과실 수량에서 42.2%가 낮게 나타났다. 배액율을 10.5 ~ 12.2% 유지한 처리구는 함수율 33.5% ~ 45.7%의 함수율이 유지되었고, 관행처리보다 상품과수가 높았던 결과를 보였다. Ahn 등(2010)과 An 등(2005)의 논문에서도 무배액 수경재배의 가능성을 낮게 판단하였지만 이는 근권의 함수율이 낮게 유지된 영향으로 급액량 자체가 감소하여 생육에 필요한 수분을 공급하지 못하였기 때문에 수분부족에 의해 발생한 스트레스 때문인 것으로 보이며, FDR센서를 이용하여 배지 내 함수율을 적정 수준으로 유지하는 것이 파프리카의 무배액 수경재배를 가능하게 할 수 있는 중요한 요인

으로 보인다.

FDR센서를 이용하여 근권의 함수율을 조절하는 것은 무배액 시스템으로 이용할 수 있는 것은 물론이고, 급액시간의 조절을 통해 재배자가 원하는 대로 식물의 균형을 유지할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 식물의 균형을 조절하는데 있어서 급액 시간을 앞당기고, 마지막 공급을 늦게 끝내는 것이 영양생장에 유리한 생육 패턴을 보였고, 급액 시간을 늦추고 마지막 공급을 일찍 늦게 끝내는 것이 생식생장에 도움이 되는 것으로 보여진다.

(4) 연구결과 요약

유기배지를 이용한 파프리카의 무배액 수경재배 기술 체계화를 위해 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 수분 센서를 이용하여 적정 급액 시간대를 찾아 식물의 균형을 유지하고자 실험이 수행되었다. 코코넛 코이어 배지에 파프리카 'RZ208' 품종을 2011년 8월 10일에 정식 후 FDR 수분센서를 이용하여 배지 수분 함량을 $50\pm 2\%$ 로 조절하였고, 9월 1일부터 11월 30일까지 급액 가능시각을 9월 평균 일출과 일몰시간을 기준으로 (06시, 19시)로 관수시작시점을 일출시각(+0,1,2,3)으로, 관수종료시각을 일몰시각(-0,1,2,3)으로 조정한 06-17, 06-19, 07-16, 08-19, 09-16, 09-18, 00-24의 7처리로 재배하였다. 모든 처리에서 급액량은 광량이 $600\text{W}/\text{m}^2$ 이상일 때, $400\pm 90\text{mL}/\text{plant}/\text{day}$, 광량이 $600\text{W}/\text{m}^2$ 미만인 날에는 아예 급액량이 없거나, $170\pm 30\text{mL}/\text{plant}/\text{day}$ 으로 유지되었으며 모든 처리구는 무배액으로 관리되었다. 전 재배기간 동안 공급액의 EC를 높여주거나 낮추어주는 반응에 있어 모든 처리구에서 비교적 안정적으로 유지되었다. 11월의 근권 EC 변화의 폭은 09시에 급액이 시작된 두처리에서 가장 높은 수치를 보였으나 평균수치가 $4.5\text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 를 넘지 않아 걱정할 수치는 아니지만, 배지 내 근권의 변화를 보다 안정적이게 관리하고자 한다면 09시 이전(일출 후 1~2시간)에 급액을 시작하는 것이 적당할 것으로 판단된다. 전반적으로 과실의 결과에서는 유의적으로 차이가 없었으나 08-19, 06-17, 09-18의 처리에서는 주당 평균 6.9개의 수확율을 보였으며 06-19와 09-16처리에서는 열과, 배꼽썩음과 등과 같은 비상품과율이 높았다. 일출 3시간 이후에 급액을 시작하여 일몰 3시간 전에 급액을 종료하였을 때 식물체를 생식생장으로 유도할 수 있고, 일출 1~2시간 이후에 급액을 시작하여, 일몰 1시간 전에 급액을 종료하였을 때 영양생장으로 유도할 수 있을 것으로 보인다. 따라서, 파프리카 재배시 전 기간 배지 내 수분함량을 $55\pm 2\%$ 로 유지할 때, 재배자가 식물의 현재 상황에 맞추어 급액시작과 종료시각을 조절하는 것이 어렵다면, 9월~11월의 파프리카 재배중에는 오전 8시경(일출 후 1~2시간내)에 급액을 시작하여, 17시경(일몰 1~2시간 전)에는 급액을 종료하는 것이 적절할 것으로 판단된다.

표 3-3-18. 급액시간대 조절에 따른 수경재배용 코코넛 코이어 배지에서 FDR센서를 이용한 배지 내 수분함량 제어시 과실의 특성

Treatment ^x	Early ^z				Late ^y				Total						
	No. of marketable fruits	No. of unmarketable fruits	No. of fruits	Unmarketable fruits (%)	No. of marketable fruits	No. of unmarketable fruits	No. of fruits	Unmarketable fruits (%)	No. of marketable fruits	No. of unmarketable fruits	No. of fruits	Unmarketable fruits (%)	Fruit length (mm)	Fruit Width (mm)	Soluble solids (°Brix)
06-17	3.05	0.75	3.80	19.74	3.80	0.00	3.80	0.00	6.85	0.75	7.60	9.87	73.38a	56.18a	9.17a
06-19	1.80	1.75	3.55	49.30	2.80	0.00	2.80	0.00	4.60	1.75	6.35	27.56	80.53a	61.51a	8.16a
07-16	2.80	0.50	3.30	15.15	2.55	0.00	2.55	0.00	5.35	0.50	5.85	8.55	80.28a	61.35a	8.80a
08-19	3.80	0.25	4.05	6.17	3.80	0.00	3.80	0.00	7.60	0.25	7.85	3.18	83.83a	65.68a	8.80a
09-16	2.55	0.25	2.80	8.93	2.05	0.50	2.55	19.61	4.60	0.75	5.35	14.02	76.47a	60.56a	8.27a
09-18	2.55	0.00	2.55	0.00	3.80	0.25	4.05	6.17	6.35	0.25	6.60	3.79	84.74a	61.84a	9.03a
00-24	2.30	0.50	2.80	17.86	3.55	0.00	3.55	0.00	5.85	0.50	6.35	7.87	80.27a	67.28a	7.94a

^z Early periods : harvesting for 1 group (10/12~11/10)

^y Late periods : harvesting for 2 group (11/12~11/30)

^x Mean separation within columns by Duncan's multipul range test at the 5% level.

3. 무배액 시스템에 적합한 급액의 전기전도도(EC) 구명

(1) 실험 목표

유기배지 코코피트는 양분 불균형이 발생할 수 있기 때문에 무기배지와 다른 급액관리가 필요하다. FDR센서는 환경계측과 모니터링으로 재배환경 개선에 대한 관심의 증가로 토양이나 배지내 수분함량을 실시간으로 계측하여 제어할 수 있는 방법이다. 본 실험은 FDR센서를 이용한 유기배지 무배액 수경재배시 급액 전기전도도(EC) 수준별 파프리카의 생육 변화를 알아보고자 수행하였다.

(2) 실험 수행 방법

파프리카 'Special'(Capsicum annuum L.)을 이용하여 2012년 5월 1일~7월 30일까지 서울시립대학교 양지봉 온실에서 재배하였다. 4월 1일경 암면 240공 플러그 판에 파종하여 약 2주 후 암면블럭에 U자형으로 이식하였고, 본엽이 6~8매 되었을 때 정식하여 재배하였다. 묘를 정식하기 전에 압축 성형된 코코넛 코이어 배지[(dust:chip = 7:3), 신성미네랄, 한국]를 수돗물로 포수한 후 2~3회 씻어내는 작업을 하였고, 근권의 뿌리 활착 유도를 위해 EC 2.0dS·m⁻¹의 PBG배양액으로 포수하는 작업을 하였기 때문에 묘 정식 후 10일 후부터 배지 함수율에 따른 급액이 되기 시작하였으며, 그 후 10일 동안은 안정화의 기간을 가졌다. 파프리카 재배중 배지내 조건은 FDR센서와 로거(WP700, (주)미래센서, 한국)를 이용하여 함수율 범위 55±2% (53.0% 이하일 때 급액이 시작되어 57.0% 이상이 되면 급액을 정지)로 조절하고, 2그룹 착과기부터는 65±1%로 높여 급액을 제어하였다. 배지 내 수분함량(%), 전기전도도(Electrical Conductivity; EC)의 변화를 기록하였다. 모든 실험은 FDR센서를 이용하여 처리기간 중 무배액으로 진행되었고, 일일 급배액량을 측정하였다. 파프리카 수경재배에서 공급배양액의 적정 EC를 구명하고자 EC 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0 dS·m⁻¹의 수준으로 공급하였다. 관행구는 타이머 급액으로하여 공급 배양액 EC는 3.0 dS·m⁻¹으로 하루에 배양액을 주당 1~2.5L를 8회로 나누어 공급하였고, 배지는 암면(UR슈퍼매트, UR암면, 한국)을 사용하였다. 표준배양액 조성은 PBG배양액(me·L⁻¹:NO₃-N 15.25, NH₄-N 1, P 3.75, K 7.5, Ca 8.5, Mg 3)으로 pH 5.5~5.8로 조절하였다.

생육조사는 초장, 경경, 마디수, 엽장, 엽폭을 측정하였고, 성장점으로부터 15cm 위치의 경경, 엽장, 엽폭을 측정하고, 상위부분 5마디 절간장을 측정하여 식물의 영양생장 및 생식생장을 판단하였다. 또한 과실이 90% 이상 착색된 것을 기준으로 2012년 6월 16일부터 8월 16일까지 (6/16~7/12:1그룹, 7/13~8/16:2그룹) 과실을 수확하였고, 수량조사는 100g이상의 모양이 정상적이고 병충해 흔적이 없는 과실을 상품으로 분류하였고, 100g미만의 사과, 열과, 기형과, BER 등을 비상품으로 구분하여 조사하였다. 총 두 개의 그룹을 착과 및 수확하여 과장, 과폭, 당도를 조사하였다. 당도는 수확된 과실의 정중앙 부분의 1.0g을 채취하여 3반복으로 당도계(Pocket Refractometer PAL-1, ATAGO, Japan)를 이용하였고, 통계분석은 SAS프로그램을 이용하여 분석하였다.

(3) 실험수행 내용 및 결과

실험기간 동안 서울시립대 양지봉 온실의 온도환경 및 광도변화는 다음 그래프(그림 3-3-24 ~25) 같다.

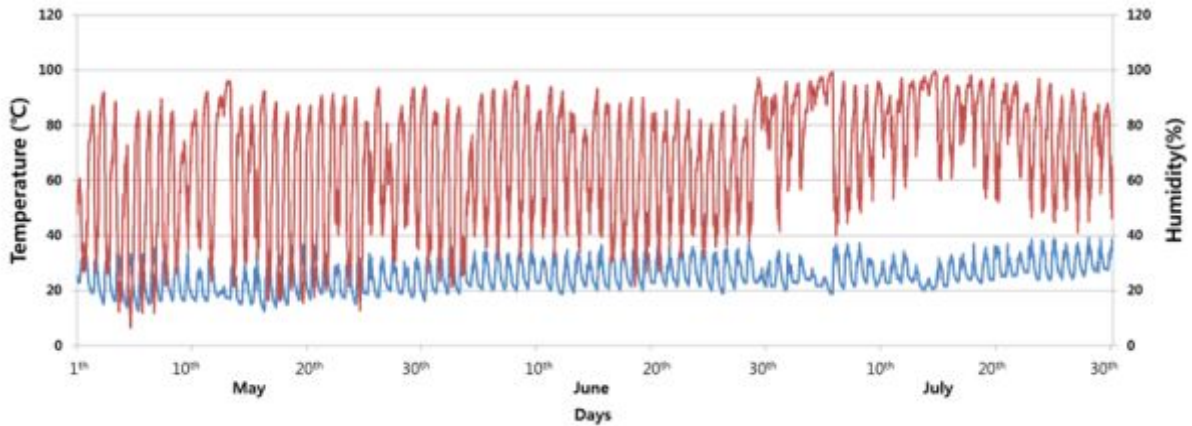


그림 3-3-24. 서울시립대학교에 위치한 양지봉 온실의 2012년 5월~7월의 온습도 환경조사

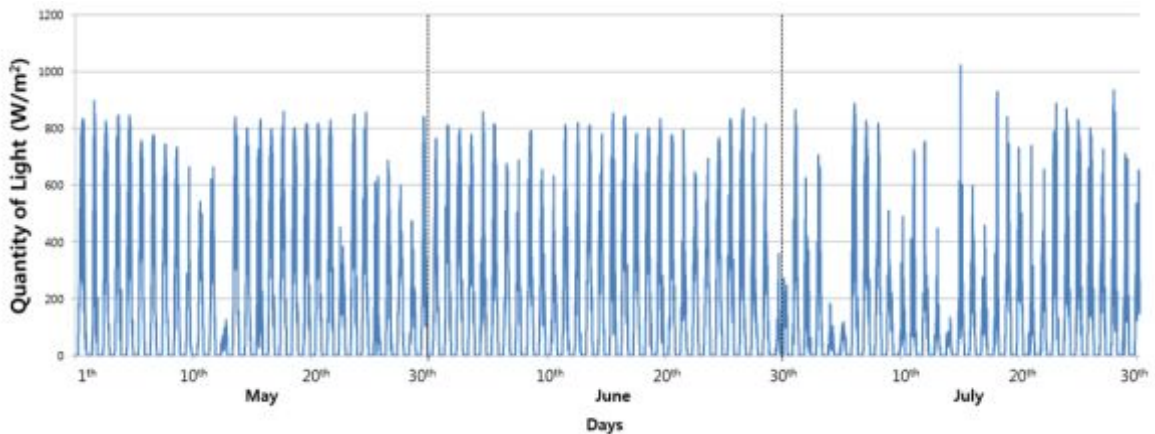


그림 3-3-25. 서울시립대학교에 위치한 양지봉 온실의 2012년 5월~7월의 광도환경조사

근권의 함수율은 재배 초기부터 $55 \pm 2\%$ (53.0% 이하일 때 급액이 시작되어 57.0% 이상이 되면 급액을 정지)로 제어하고, 2그룹 착과기부터는 $65 \pm 1\%$ 로 높여 급액을 제어하였다. 비교적 큰 오차 범위 없이 제어되었으나 타이머로 제어된 관행구 처리에서는 2그룹 착과기에 급액량을 높여 공급해 주었음(그림 3-3-28)에도 불구하고 근권의 함수율이 다소 떨어지는 경향을 보였다. 슬라브 내 EC가 배지 내 함수율과 반대 경향으로 움직이는 관행구 처리에 비해 FDR센서 제어구들에서는 급액되는 경향에 따라 근권의 EC가 변화되고 있는 것을 알 수 있다. 또한 배양액의 급액 EC가 높을수록 슬라브 내의 EC도 높아지는 경향을 보였으나 모든 처리의 근권의 EC는 $1.63 \sim 4.55 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 내에 있어 비교적 안정적으로 보여진다. 근권의 EC는 FDR센서를

이용한 제어구들에서는 재배 전기기간동안 거의 무배액으로 재배되었음에도 2그룹 착과기 이전의 근권의 EC는 관행구보다 유의적으로 낮은 경향을 보였다. 제어함수율을 높여주면서 관행구는 근권의 EC가 급격히 낮아진 반면 FDR센서 제어구들은 변화의 폭이 점차 감소하는 경향을 보였다.

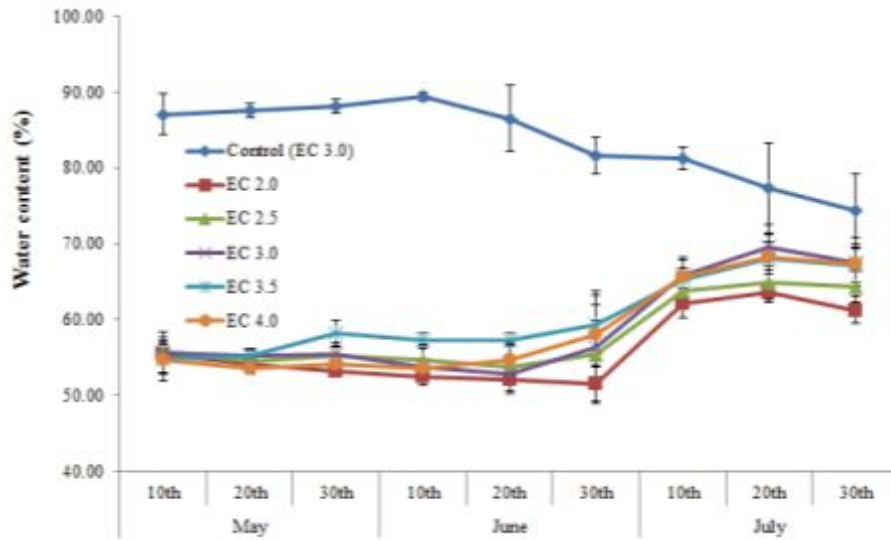


그림 3-3-26. 파프리카의 수경재배에서 급액의 전기전도도 조절에 따른 FDR센서를 이용한 급액 제어시 배지내 수분함량 변화 (5월 1일~7월 30일)

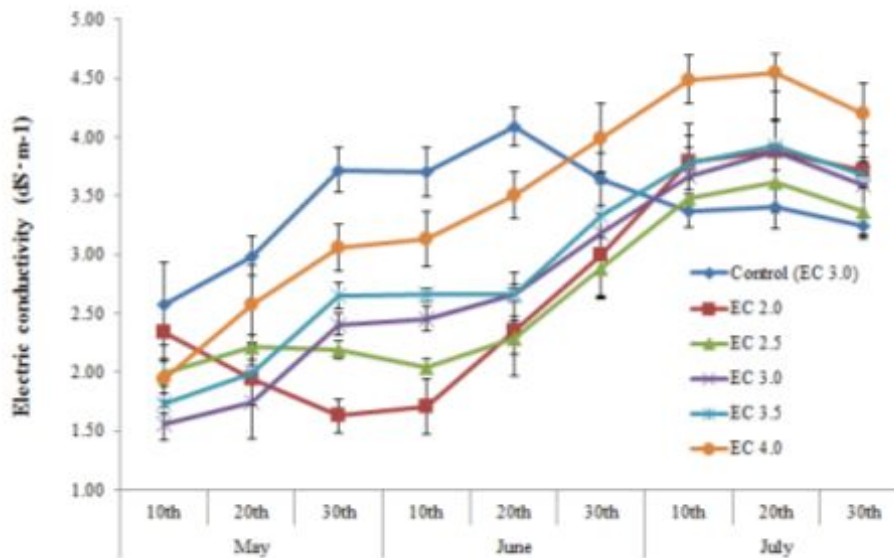


그림 3-3-27. 파프리카의 수경재배에서 급액의 전기전도도 조절에 따른 FDR센서를 이용한 급액 제어시 배지내 EC 변화 (5월 1일~7월 30일)

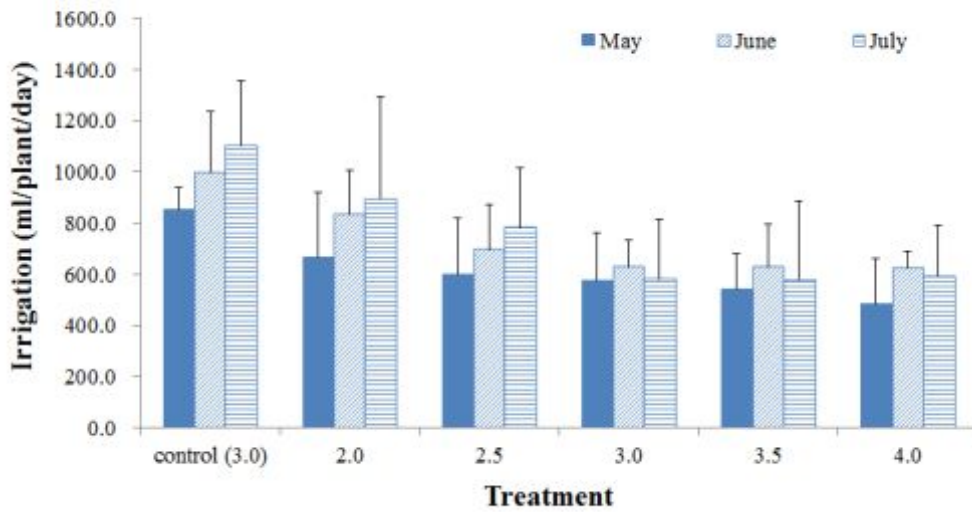


그림 3-3-28. 파프리카 수경재배시 급액의 전기전도도 조절에 따른 FDR센서를 이용한 급액제어에서 재배 기간별 주당 일일 급액량(5월 1일~7월 30일)

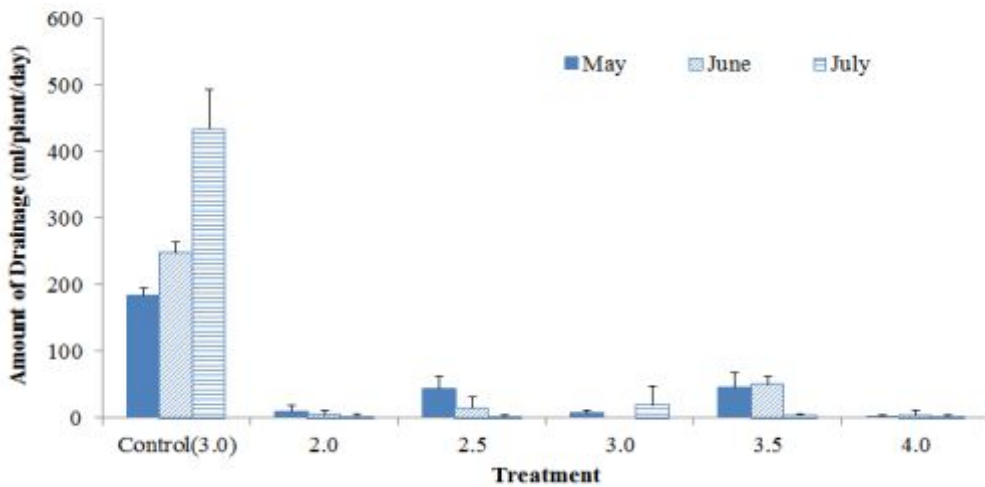


그림 3-3-29. 파프리카 수경재배시 급액의 전기전도도 조절에 따른 FDR센서를 이용한 급액제어에서 재배 기간별 주당 일일 배액량(5월 1일~7월 30일)

재배 기간별 일일 평균 급액량은 급액의 EC가 높아짐에 따라서 급액량이 감소하는 경향이 나타났다. 재배기간 동안의 총량으로 보면 관행구에 비해 EC 4.0 dS·m⁻¹ 처리에서는 약 57.6%으로 절반 수준이었고, 같은 FDR센서로 제어된 EC 2.0 dS·m⁻¹처리와 비교하였을 때도 70.9%의 급액량만을 보였다. FDR센서로 같은 함수율로 제어되었을 때, 처리구들 중에 EC가 낮은 처리에서 급액량이 비교적 높게 나타나는 것은 높은 EC로 급액되었을 때 식물 체내의 세포생육이 느려지며 세포가 작고, 세포벽이 두꺼워져 수분 흡수에 저해를 준 결과로 보여진다. 또한 여름철의 높은 광량에서 식물은 증산으로 잃은 수분을 보충하기 위하여 물을 필요로 하는데,

낮은 EC용액에서 수분의 흡수가 더 쉽기 때문에 급액의 EC를 다소 낮은 농도로 관리한 처리에서 수분흡수가 촉진된 결과로 보인다.

관행구는 재배 기간동안 약 28.6%의 배액율을 유지하였고, FDR 센서로 급액량이 조절된 배지는 배액율 약 2.21%로 무배액 수준으로 재배되었다. 이는 FDR 센서로 하루에 필요한 공급량, 즉 최대 증산량으로 소모될 양 또는 생장 및 아주 작은 부위까지 과실비대에 필요할 양 만큼만 최소한의 양이 공급된 것으로 보인다. 배액이 없이 배지가 건조한 상태로 유지되는 경우에는 식물의 수분흡수가 저해되면서 생식생장으로 치우치게 된다. 그래서 관수량이 충분할 때 작물이 증산을 하는 것이 중요한데 FDR 센서를 이용하여 근권의 수분함량을 제어함으로써 작물이 수분흡수를 원할 때 원하는 만큼 공급하여 무배액 수준으로 유지해주는 것이 가능할 것으로 보인다(이용범 외(2010)).

표 3-3-19. 파프리카 수경재배시 급액의 전기전도도 조절에 따른 FDR센서를 이용한 급액제어에서의 정식 후 4주째 광합성 특성

Electric conductivity ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	Photosynthetic rate ^z ($\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance ($\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Control (3.0)	16.37 a ^y	0.80 a	5.63 a
2.0	16.37 a	0.63 a	4.68 a
2.5	15.86 a	0.60 a	4.45 a
3.0	15.68 a	0.57 a	4.52 a
3.5	16.64 a	0.60 a	4.98 a
4.0	17.09 a	0.42 a	4.30 a

^zMeasuring conditions : CO_2 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, PAR 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, Air temp. $25\pm 0.5^\circ\text{C}$, RH $60\pm 2(\%)$ and Flow rate $500\pm 2 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$

^yMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

표 3-3-20. 파프리카 수경재배시 급액의 전기전도도 조절에 따른 FDR센서를 이용한 급액제어에서의 정식 후 8주째 광합성 특성

Electric conductivity ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	Photosynthetic rate ^z ($\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Stomatal conductance ($\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
Control (3.0)	16.97 b ^y	1.18 b	5.00 bcd
2.0	21.44 a	2.80 a	6.45 a
2.5	18.74 ab	2.67 a	5.87 ab
3.0	16.65 b	1.68 ab	4.52 cd
3.5	16.34 b	1.76 ab	5.30 abc
4.0	15.70 b	0.80 b	3.73 d

^z Measuring conditions : CO_2 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, PAR 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, Air temp. $25\pm 0.5^\circ\text{C}$, RH $60\pm 2(\%)$ and Flow rate $500\pm 2 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$

^y Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

표 3-3-21. 파프리카 수경재배시 급액의 전기전도도 조절에 따른 FDR센서를 이용한 급액제어시 식물체의 생육특성

Electric conductivity (dS·m ⁻¹)	4th						8th						12th											
	Plant height (cm)	The growing tips under						Plant height (cm)	The growing tips under						Plant height (cm)	The growing tips under								
		diameter (mm)	leaf length (cm)	leaf width (cm)	diameter (mm)	leaf length (cm)	leaf width (cm)		diameter (mm)	leaf length (cm)	leaf width (cm)	diameter (mm)	leaf length (cm)	leaf width (cm)										
Control (3.0)	116.75	b ²	8.58	a	18.32	ab	11.75	a	131.84	b	7.48	b	15.70	ab	10.10	ab	153.63	b	7.68	b	13.17	c	7.98	c
2.0	117.81	ab	8.03	a	18.47	ab	12.16	a	142.69	a	7.61	b	14.41	b	9.38	b	165.38	a	8.17	ab	13.87	bc	8.88	bc
2.5	119.25	ab	8.26	a	19.34	a	12.22	a	142.25	a	8.42	a	16.29	ab	10.09	ab	164.19	a	9.15	a	13.51	c	8.69	bc
3.0	122.44	a	8.52	a	18.88	b	12.28	a	133.87	b	8.46	a	16.23	ab	10.32	ab	148.00	b	8.33	ab	15.00	bc	9.59	ab
3.5	111.75	c	8.48	a	18.32	b	11.81	a	128.25	bc	7.90	ab	16.63	a	10.88	a	144.88	b	7.98	b	16.26	a	10.63	a
4.0	114.81	bc	8.59	a	19.09	ab	12.40	a	123.03	c	8.24	ab	16.93	a	11.03	a	134.38	c	8.20	ab	15.72	ab	10.49	a

²Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

정식 후 4주차의 광합성 결과에는 유의적 차이가 없었지만, 정식 후 8주차에는 EC 2.0 dS·m⁻¹과 2.5 dS·m⁻¹ 처리구에서 유의적으로 높았고, 기공전도도와 증산량에서 급액을 2.0 dS·m⁻¹으로 공급한데서 가장 높은 값을 보였다. 광합성과 기공전도도에서 급액의 농도가 높아질수록 수치적으로 줄어들었으나 유의적 차이는 없었다. 시간이 경과할수록 급액이 높은 수준에서 초장이 짧았고, 생육량에서는 유의적 차이가 나타나지 않았다.

과실의 생체중은 2.0 dS·m⁻¹에서, 건물중은 2.5 dS·m⁻¹에서 높았고, 수량은 급액수준에 따른 유의성은 없었다. 생산량은 2.5 dS·m⁻¹와 3.0 dS·m⁻¹은 관행구와 비슷한 수치를 보였고, 3.5 dS·m⁻¹, 4.0 dS·m⁻¹에서 수치적으로 높았으나 BER이 45% 이상 발생되어 채배 전기간동안 급액의 EC를 고농도로 관리하는 것은 부적합 한 것으로 보인다. 상품과율은 2.0, 2.5 dS·m⁻¹에서 높았고, 3.5 dS·m⁻¹와 4.0 dS·m⁻¹에서 낮았으며, 당도는 가장 고농도인 4.0 dS·m⁻¹에서 8.1 °Brix로 가장 높았고, 저농도인 2.0 dS·m⁻¹에서 6.28°Brix로 가장 낮았다. 이상의 결과로 보아 FDR센서를 이용한 파프리카 무배액 수경재배시 공급 배양액 전기전도도를 2.0~3.0dS·m⁻¹으로 조절하는 방법은 배액을 거의 발생시키지 않으면서 높은 수확량을 얻는데 효과적인 것으로 판단되었다.

표 3-3-22. 파프리카 수경재배시 급액의 전기전도도 조절에 따른 FDR센서를 이용한 급액제어시 과실의 생육특성

Electric conductivity (dS·m ⁻¹)	Fruit weight (g)	Average number of fruit (ea/plant)			Marketable yield (kg/10a)	Marketable rate (%)	BER rate (%)	Dry weight (g)	Soluble sugar content (°Brix)	
		1	2	total						
Control (3.0)	156.3 a ^z	4.9	4.3	9.3	4772.4	87.8	12.2	12.45	ab	7.41 abc
2.0	160.4 a	4.4	4.1	8.5	4499.4	89.7	10.3	12.15	ab	6.28 d
2.5	155.0 a	4.5	4.5	9.0	4602.7	86.8	13.2	12.75	a	6.98 cd
3.0	135.8 b	5.7	4.7	10.4	4651.0	85.5	14.5	11.92	ab	7.20 bc
3.5	155.5 a	5.6	4.3	9.9	5066.1	54.4	45.6	12.15	ab	7.82 ab
4.0	147.3 ab	5.6	4.4	10.0	4859.3	31.3	68.8	11.08	b	8.10 a

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

^z Early periods : harvesting for 1 group (6/16~7/12)

^y Late periods : harvesting for 2 group (7/13~8/16)

(4) 연구결과 요약

본 실험은 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 센서를 이용한 유기배지 무배액 수경재배시 급액 전기전도도(EC) 수준별 파프리카의 생육 변화를 알아보고자 수행하였다. 배지내 수분함량을 55±1% 기준으로 조절하고, 2그룹 착과기부터는 65±1%로 높여 급액을 제어하였다. 관행구 처리에 비해 FDR센서 제어구들에서는 급액되는 경향에 따라 근권의 EC가 변화되고

있는 것을 알 수 있다. 또한 배양액의 급액 EC가 높을수록 슬라브 내의 EC도 높아지는 경향을 보였으나 모든 처리의 근권의 EC는 1.63~4.55 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 내에 있어 비교적 안정적으로 보여진다. 관행구는 재배기간동안 약 28.6%의 배액율을 유지하였고, FDR센서로 급액량이 조절된 배지는 배액율 2.21%로 무배액 수준으로 재배되었다. 근권 EC는 FDR센서를 이용한 제어구들에서는 재배 전기간동안 거의 무배액으로 재배되었음에도 근권의 EC는 관행구보다 유의적으로 낮은 경향을 보였다. 일일 평균 급액량은 급액의 EC가 높아짐에 따라서 함수량이 감소하면서 감소하는 경향이 나타났다. 특히 생육초기 5월 한달 동안 급액된 양은 관행구의 절반 수준이었다. 정식 후 4주차의 광합성 결과에는 차이가 없었지만, 정식 후 8주차에는 EC 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 과 2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 처리구에서 유의적으로 높았고, 기공전도도와 증산량에서 급액을 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 으로 공급한데서 가장 높은 값을 보였다. 광합성과 기공전도도에서 급액의 농도가 높아질수록 수치적으로 줄어들었으나 유의적 차이는 없었다. 시간이 경과할수록 급액이 높은 수준에서 초장이 짧았고, 생육량에서는 유의적 차이가 나타나지 않았다. 과실의 생체중은 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 에서, 건물중은 2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 에서 높았고, 수량은 급액수준에 따른 유의성은 없었다. 상품과율은 2.0, 2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 에서 높았고, 3.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 와 4.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 에서 낮았으며, 당도는 가장 고농도인 4.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 에서 8.1°Brix로 가장 높았고, 저농도인 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 에서 6.28°Brix로 가장 낮았다. 이상의 결과로 보아 FDR센서를 이용한 파프리카 무배액 수경재배시 공급 배양액 전기전도도를 재배 전기간 일정하게 공급할 때 2.0~3.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 으로 조절하는 방법이 배액을 거의 발생시키지 않으면서 높은 수확량을 얻는데 효과적일 것으로 판단되었다.

4. 시설 파채류(파프리카)의 수경재배 농가실증 연구

(1) 실험 목표

코코넛 코이어 배지를 이용한 파프리카 수경재배시에 FDR 센서를 이용, 배지내 근권부 수분 함량을 조절하여 파프리카 생육에 적합한 배지내 수분 조건을 구명하고자 서울시립대학교에서 진행했던 연구결과를 바탕으로 농가에 직접 시스템을 적용하여 실용가능한지 또한 관행재배와 비교하였을 때 생산성과 경제성에 대해 조사하고자 하였다.

(2) 실험 수행 방법

파프리카를 재배하는 농가 중 직접 재배, 수확, 선별, 출하 작업을 자체적으로 진행하는 ISO 인증을 받은 기업인 충북 진천군 이월면에 위치한 에덴농장영농조합법인(에덴농장)에서 시행되었다. 공시작물은 노란색 파프리카 품종인 '피에로'(*Capsicum annum* cv.)를 사용하였으며, 2012년 9월초에 암면 플러그 판에 파종하여 본엽이 6~8매 된 10월 24일에 정식하여 2013년 5월 15일까지 에덴농장 <가동>에서 수행되었다.

파프리카 재배중 배지 내 조건은 마그마 양액제어 시스템(MAGMA-1000, 그린씨에스(주), 한국)을 이용하여 급액 가능시간을 일출 2시간 후부터 일몰 3시간 전에 종료하는 것으로 두고, 재배시기별로 적정 함수율을 활착기에는 75~65%, 1그룹 착과기 및 과실비대 영양생장기 65%, 1그룹 수확 및 2그룹 착과기 60%, 과실비대 영양생장기 65%으로 입력하여 원하는 조건으로 유지될 수 있게 설정하였다. 또한 최소 대기시간을 5분~10분으로 두어 급액이 한번 된 후 근

권의 함수율이 증가되길 기다리는 대기시간을 주었고, 최소한의 일일 급액량을 유지해 주기 위해 급액 가능시간에 최대 5시간동안 급액되지 않으면 1회(100J/plant) 공급될 수 있게 설정하였다. 관행구는 일사량 제어 방식으로 활착기에는 J당 0.5 cc, 1그룹 착과기 및 과실비대 영양생장기 J당 1.0 cc, 1그룹 수확 및 2그룹 착과기 J당 1.5 cc, 과실비대 영양생장기 J당 1.3 cc로 관리하였다. 처리구와 관행구 모두 배양액 조성은 서울시립대 배양액($\text{me}\cdot\text{L}^{-1}$: $\text{NO}_3\text{-N}$ 15.25, $\text{NH}_4\text{-N}$ 1, P 3.75, K 7.5, Ca 8.5, Mg 3)을 이용하여 공급 배양액의 EC는 유묘기에 $3.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 그 이후에는 $3.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, pH 5.5~6.0로 조절하였다.

관행구도 마그마로 제어된 실험구와 마찬가지로 코코넛 코이어 배지[(dust:chip = 7:3), 신성 미네랄, 한국]로 슬라브당 4주씩 정식하여 10개의 슬라브를 반복해 처리하였으며 같은 일사량으로 제어된 암면(UR슈퍼매트, UR암면, 한국)을 대조구로 두어 파프리카의 생육과 과실을 조사하였다. 묘를 정식하기 전에 압축 성형된 코코넛 코이어 배지를 수돗물로 포수한 후 2~3회 씻어내는 작업을 하였고, 근권의 뿌리 활착 유도를 위해 암면과 코이어 배지 모두 $3.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 의 양액으로 포수하는 작업을 하였기 때문에 묘 정식 후 약 10일 후부터 배지 함수율에 따른 급액이 되기 시작하였으며, 그 후 10일 동안은 안정화의 기간을 가졌다.

마그마 양액제어시스템에서 배지 내 수분함량(%), 전기전도도(Electrical Conductivity; EC), 현재 일사량(W/m^2) 누적일사량(J/cm^2), 온도($^{\circ}\text{C}$), 습도(%), 관수량(L), 관수횟수(회)등이 기록되었고, 일일 주당 급액량과 배액량을 수기로 기록하였다. 생육조사는 초장, 경경, 마디수, 엽장, 엽폭을 측정하였고, 성장점으로부터 15cm 위치의 경경, 엽장, 엽폭을 측정하여 식물의 영양생장 및 생식생장을 판단하였다. 또한 과실이 90% 이상 착색된 것을 기준으로 2012년 12월 3일부터 5월 15일까지 과실을 수확하였고, 수량조사는 100g이상의 모양이 정상적이고 병충해 흔적이 없는 과실을 총 세 개의 그룹으로 나누어 수확하여 과중, 수확량, 당도를 조사하였다. 당도는 2그룹으로 분류하여 수확된 과실의 정중앙 부분의 1.0g을 채취하여 3반복으로 당도계(Pocket Refractometer PAL-1, ATAGO, Japan)를 이용하였고, 통계분석은 SAS프로그램을 이용하여 분석하였다.

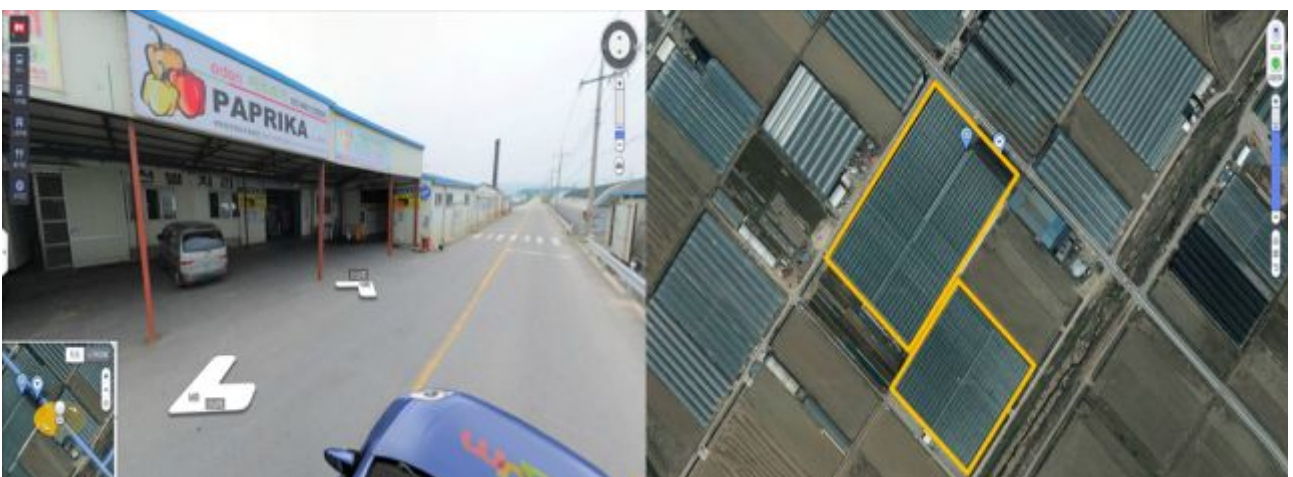


그림 3-3-30. 인터넷 포털사이트 지도에서 보이는 농가전경
(충북 진천군 이월면 삼용리 : 예덴농가 - 가동 4400평, 나동 2600평)



그림 3-3-31. 농가 안 재배전경

(3) 실험수행 내용 및 결과

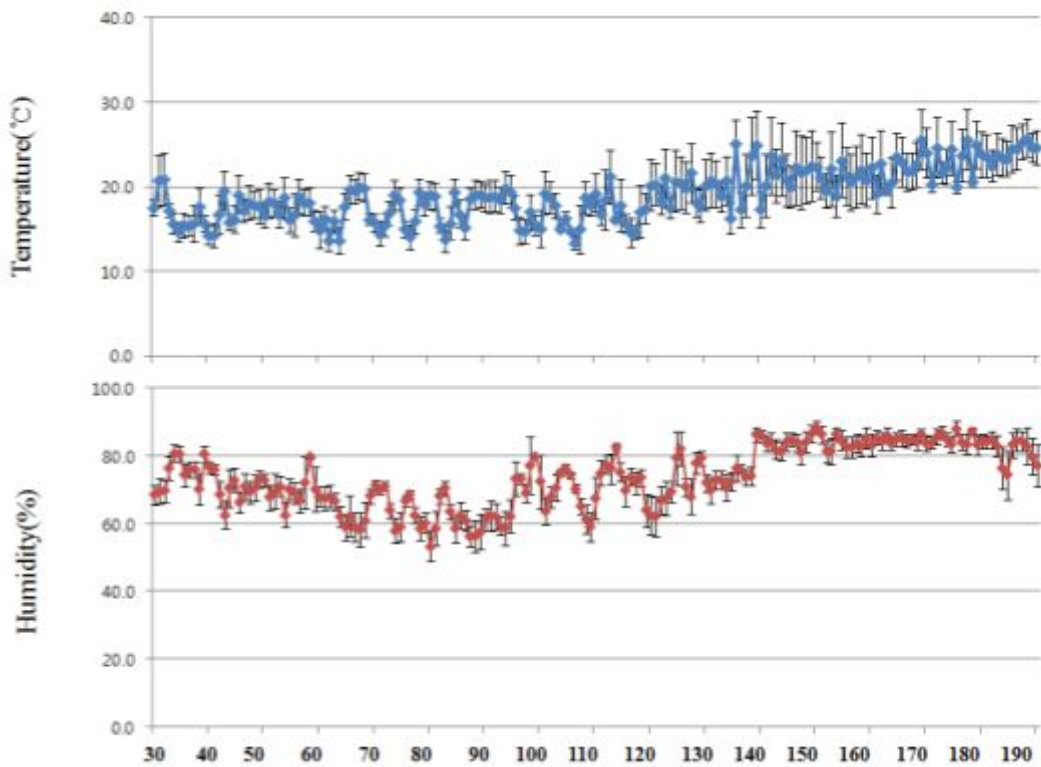


그림 3-3-32. 에텐농장의 <가동>온실의 온습도 환경 조사
(2012년 11월 1일 ~ 2013년 5월 15일)

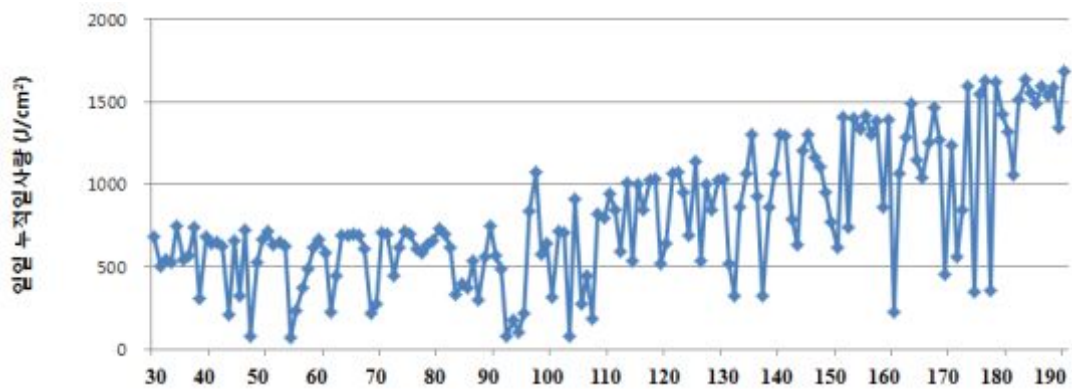


그림 3-3-33. 에텐농장의 <가동>온실의 광도의 환경 조사
(2012년 11월 1일 ~ 2013년 5월 15일)

채배 기간인 약 7개월 동안 온실의 온도는 평균 19.1°C(최소-최대:13.3~25.7°C)로 관리되었고, 습도는 평균 73.4%(최소-최대:53~88%)로 관리되었다. 온도, 습도, 일일 누적 일사량은 봄이 되는 약 3월부터 점차 높아지는 경향을 보였다.

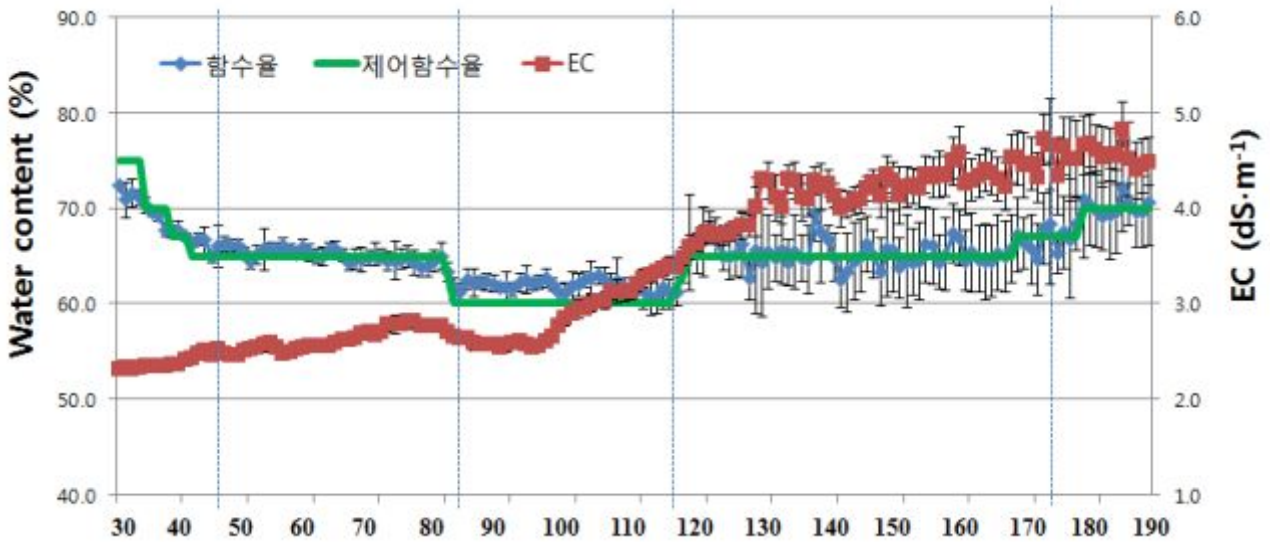


그림 3-3-34. FDR센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어하였을 때의 제어함수율과 유지된 근권 함수율, EC 변화 그래프

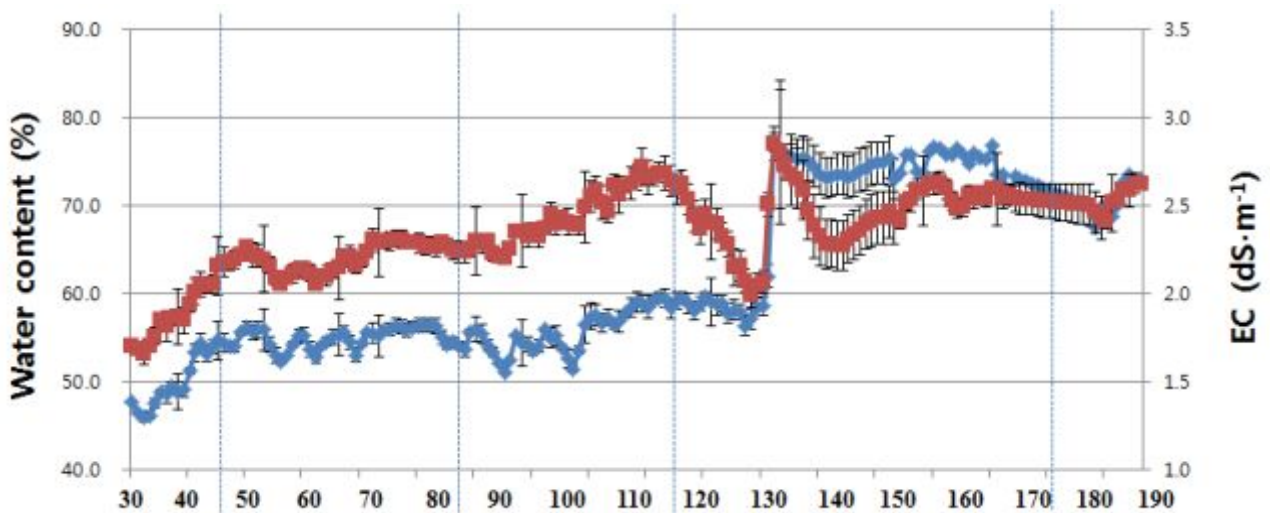


그림 3-3-35. 일사량제어에 의한 관행구의 배지내 근권 함수율, EC 변화 그래프

재배시기별로 적정 함수율을 활착기에는 75~65%, 1그룹 착과기 및 과실비대 영양생장기 65%, 1그룹 수확 및 2그룹 착과기 60%, 과실비대 영양생장기 65%로 설정하여 유지될 수 있게 하였다. FDR센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어하였을 때의 근권의 EC는 재배 전기간 동안 2.31~4.82 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 유지된 것으로 보아 약 7개월 동안 근권의 EC가 안정적인 수준임을 알 수 있었다. 또한 일사량제어에 의한 관행구의 배지내 함수율의 변화는 46.1~77.3% 로 변화의 폭이 비교적 큰편으로 보이나 이는 농가에 급액되는 암면에 기준한 일사량 제어 방식으로 제어했기 때문으로 생각되며, 배지내 근권 EC 변화는 1.7~2.9 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 FDR센서로 제어한 것 보다 안정적으로 보여진다.

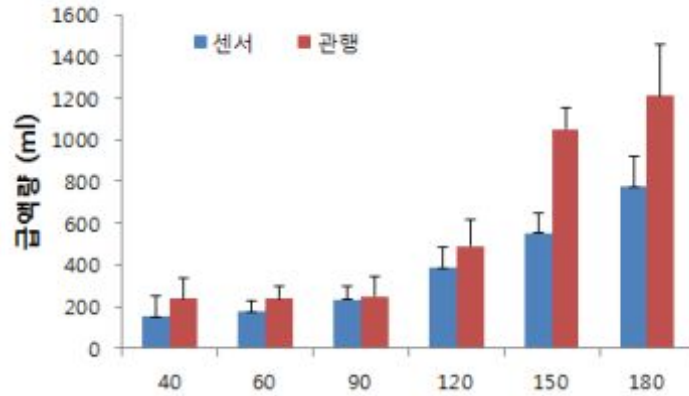


그림 3-3-36. FDR센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어하였을 때(센서)와 일사량제어에 의한 관행구(관행)의 재배 전기간동안의 급역량 비교

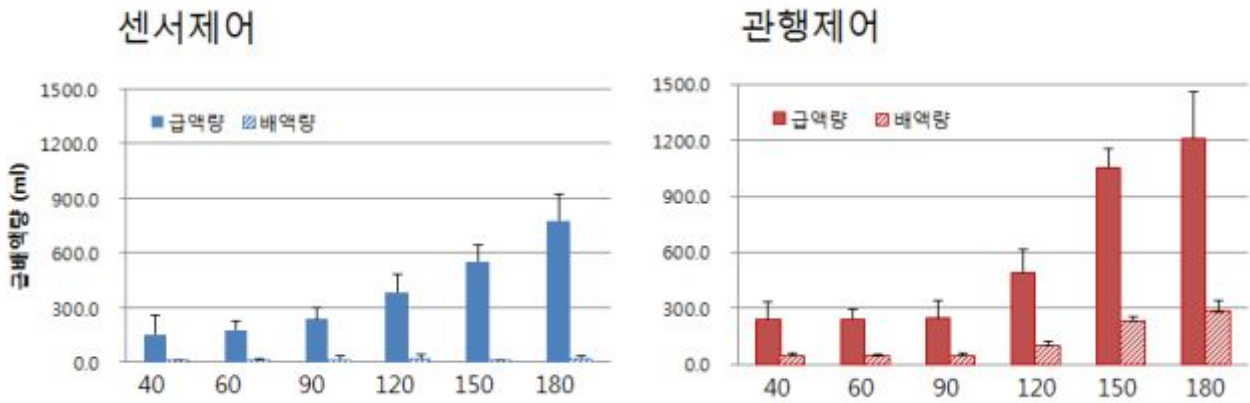


그림 3-3-37. FDR센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어하였을 때(센서제어:좌)와 일사량제어에 의한 관행구(관행제어:우)의 재배 전기간동안의 급배역량

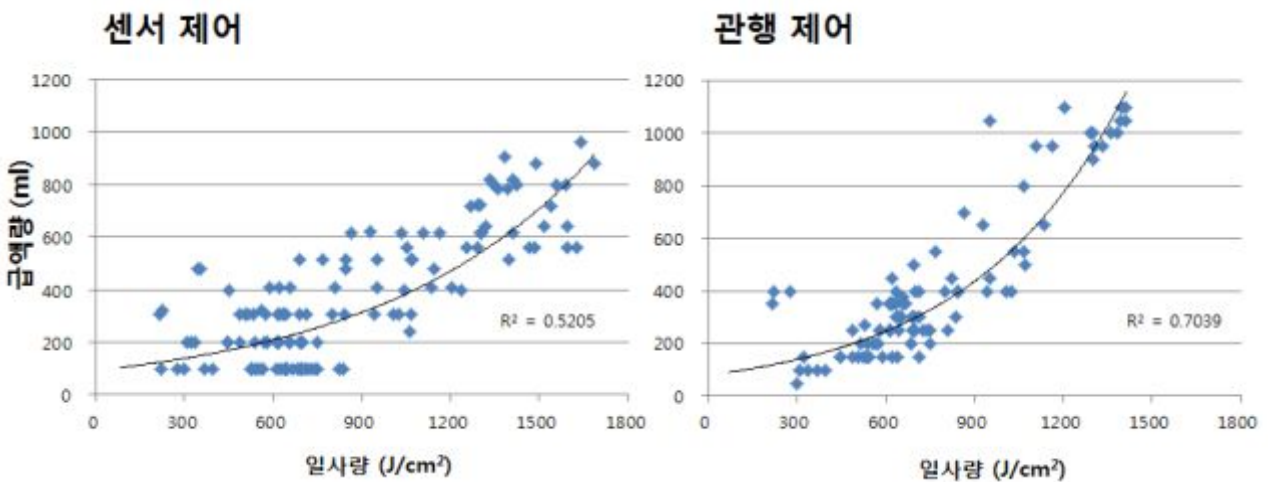


그림 3-3-38. FDR센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어하였을 때(센서제어:좌)와 일사량제어에 의한 관행구(관행제어:우)의 일일 누적일사량과의 상관관계

그림 3-3-36은 재배시기별로 FDR센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어하였을 때(센서)와 일사량제어에 의한 관행구(관행)의 재배 전기간동안의 급액량을 비교한 그래프이다. 재배초기인 40~90일경의 급액량은 일일 주당 약 150~250ml로 관행구와 FDR 센서 처리구의 유의적으로 큰 차이가 없었으며 FDR센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어한 처리구는 정식 후 150일에 관행구는 일일주당 평균 급액량 1,050ml, 센서 처리구는 553ml로 관행구의 52.6% 수준을 보였고, 180일에는 관행구는 1,210ml, 센서 처리구는 776ml로 약 64.1%의 수준을 보였다.

재배시기별로 급액량과 배액량을 측정된 결과(그림 3-3-37), 일사량으로 제어된 관행구에서는 재배시기별로 약 20% 이상의 배액율을 보였다. FDR 센서로 제어된 처리구에서는 재배 전기간동안 약 3%의 배액율을 보였으며 급액량이 많은 정식후 180일 경에도 일평균 22ml로 거의 무배액 수준을 유지하고 있음을 보였다.

급액량과 일일 누적일사량과의 상관관계를 분석한 결과 일사량으로 제어된 관행제어에서는 70.3%의 상관관계를 보이는 반면에 FDR 센서로 제어된 처리구에서는 약 52%의 상관관계를 보였다(그림 3-3-38). 또한 일일 누적 일사량이 300 J/cm²일 때에는 약 1~3회 정도의 급액이 이루어 졌고, 1,200 J/cm² 일 때에는 4~8회 급액이 된 것(복합 환경 제어기인 <마그마> 제어로 1회 급액량 제어)으로 보아 광량에 따라 급액량이 제어된다는 것을 알 수 있었다.

표 3-3-23. 유기배지를 이용한 파프리카 수경재배시 FDR센서를 이용한 급액제어와 일사량 제어를 이용한 관행제어, 암면배지를 이용한 일사량 제어(생산성 온실)에서의 정식 후 60, 90, 120, 150일째의 광합성 특성

측정 시기	배지	제어방법	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 ($\text{mmol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	
60	Coir	FDR센서 제어	18.33	ab ²	0.87	ab	6.34	a
		일사량 제어 (관행)	15.86	b	0.78	b	6.00	a
	암면	생산성 온실	24.93	a	1.20	a	7.87	a
90	Coir	FDR센서 제어	23.25	ab	1.03	a	6.62	a
		일사량 제어 (관행)	18.19	b	0.87	a	6.08	a
	암면	생산성 온실	24.23	a	1.15	a	6.97	a
120	Coir	FDR센서 제어	20.48	a	0.88	a	6.16	a
		일사량 제어 (관행)	18.23	a	0.74	a	5.73	a
	암면	생산성 온실	19.10	a	0.70	a	5.72	a
150	Coir	FDR센서 제어	19.96	a	0.97	a	6.18	a
		일사량 제어 (관행)	19.51	a	1.01	a	6.32	a
	암면	생산성 온실	19.99	a	0.98	a	6.77	a

²Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

표 3-3-24. 유기배지를 이용한 파프리카 수경재배시 FDR센서를 이용한 급액제어와 일사량 제어를 이용한 관행제어, 암면배지를 이용한 일사량 제어(생산성 온실)에서의 정식 후 60, 90, 120, 150일째 생육특성

측정 시기	배지	제어방법	Plant height (cm)	No.of nodes per stem	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Stem diameter (mm)		
							(Top)	(Bottom-2)	(Bottom-1)
60	Coir	FDR센서 제어	106.50 a ^z	15.81 a	17.48 a	11.53 a	6.55 a	9.01 a	12.53 a
		일사량 제어 (관행)	106.31 a	16.44 a	17.30 a	10.55 a	5.85 b	9.08 a	13.23 a
	암면	생산성 온실	108.06 a	16.19 a	17.65 a	10.43 a	5.91 b	9.00 a	13.45 a
90	Coir	FDR센서 제어	132.13 a	21.19 a	17.13 a	11.00 a	6.72 a	9.66 a	13.68 a
		일사량 제어 (관행)	135.69 a	20.75 a	16.75 a	10.50 a	6.11 ab	9.37 a	12.86 a
	암면	생산성 온실	135.88 a	21.38 a	16.00 a	9.69 a	5.68 b	9.64 a	12.56 a
120	Coir	FDR센서 제어	180.91 b	25.94 b	17.55 ab	10.25 a	6.09 a	10.73 a	16.36 a
		일사량 제어 (관행)	188.71 ab	28.29 a	18.91 a	9.68 ab	5.74 a	10.43 a	14.29 b
	암면	생산성 온실	192.63 a	28.88 a	16.51 b	9.03 b	5.80 a	10.51 a	14.81 ab
150	Coir	FDR센서 제어	212.50 b	21.80 a	17.38 ab	10.66 a	6.28 a	11.44 a	15.78 a
		일사량 제어 (관행)	193.40 b	20.70 a	15.98 b	9.30 a	6.12 a	10.40 a	14.30 a
	암면	생산성 온실	237.60 a	23.70 a	19.18 a	10.58 a	6.56 a	11.30 a	15.44 a

^zMean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

표 3-3-25. 유기배지를 이용한 파프리카 수경재배시 FDR센서를 이용한 급액제어와 일사량 제어를 이용한 관행제어, 암면배지를 이용한 일사량 제어(생산성 온실)에서의 과실특성

배지	제어방법	수확량 (개)				평균과중 (g)	생산량 (g/m ²)	당도 (Brix)
		1그룹	2그룹	3그룹	total		total	
Coir	FDR센서 제어	3.9	6.1	2.4	12.3	203.7	8,268	6.9
	일사량 제어 (관행)	2.9	5.5	2.5	10.9	202.9	7,298	6.0
암면	생산성 온실	3.1	5.6	3.7	12.4	200.5	8,204	6.3

^z Mean separation within columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

표 3-3-23은 재배시기별로 FDR센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어하였을 때(센서)와 일사량제어에 의한 관행구(관행)의 재배 전기간동안의 광합성량을 비교한 표이다. 전반적으로 차이가 없었지만, 재배 초기에 FDR 센서로 제어한 처리구에서 관행 처리구보다는 높았지만 암면으로 재배한 생산성 온실보다는 유의적으로 낮았다.

표 3-3-24는 재배시기별로 FDR 센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어하였을 때(센서)와 일사량제어에 의한 관행구(관행)의 재배 전기간동안의 생육특성을 조사한 표이다. 과채류의 재배는 전 생육기간동안 잎과 과실사이의 균형을 유지해 주는 것이 필수적이다. 식물에서의 줄기정단부가 두껍고 착과 하중이 커지지 않게 유지하는 것이 식물균형에 있어서 가장 좋은 지표로 알려져 있다. 전반적으로 유의적 차이가 없었으나, 본 실험에서 FDR 센서를 이용하여 제어한 처리구에서 성장점부근의 경경이 가장 높은 값을 나타내는 것으로 보아 초기에 적정 함수율로 제어되어 무배액으로 유지되면서 좋은 생육 상태를 유지하는 것으로 보인다. 정식 후 120~150일째 생산성온실의 암면재배보다 초장의 길이가 유의적으로 낮은 경향을 보였지만 수확량에는 큰 영향을 미치지 않은 것으로 보인다.

표 3-3-25는 재배시기별로 FDR 센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어하였을 때(센서)와 일사량제어에 의한 관행구(관행)의 재배 전기간동안의 과실특성을 조사한 표이다. 전반적으로 유의적 차이가 없었으나, 생산량에서는 관행구보다는 높았고, 생산성 온실에서의 수치와 비슷하게 나타났다. FDR 센서를 이용하여 제어한 처리구에서 평균과중이 가장 높았으며, 당도 또한 높았다.

(4) 실험결과 요약

재배시기별로 적정 함수율을 활착기에는 75~65%, 1그룹 착과기 및 과실비대 영양생장기 65%, 1그룹 수확 및 2그룹 착과기 60%, 과실비대 영양생장기 65%로 설정하여 유지될 수 있게 하였다. FDR센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어하였을 때의 근권의 EC는 재배 전기간 동안 2.31~4.82 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 유지된 것으로 보아 약 7개월 동안 근권의 EC가 안정적인 수준임을 알 수 있었다. 또한 일사량제어에 의한 관행구의 배지내 함수율의 변화는 46.1~77.3% 로 변화의 폭이 비교적 큰편으로 보이나 이는 농가에 급액되는 암면에 기준한 일사량 제어 방식으로 제어했기 때문으로 생각되며, 배지내 근권 EC 변화는 1.7~2.9 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 FDR센서로 제어한 것 보다 안정적으로 보여진다. 재배초기 급액량에는 관행구와 FDR 센서 처리구의 유의적으로 큰 차이가 없으며 FDR센서를 이용하여 근권의 함수율을 제어한 처리구는 정식 후 150일경에 관행구의 52.6% 수준을 보였고, 180일에는 약 64.1%의 수준을 보였다. 또한 일사량으로 제어된 관행구에서는 재배시기별로 약 20%의 배액율을 보였고, FDR 센서로 제어된 처리구에서는 재배 전기간동안 약 3%의 배액율을 보였으며 급액량이 많은 정식후 180일 경에도 일평균 22ml로 거의 무배액 수준을 유지하고 있음을 보였다. 재배시기별 광합성과 생육특성에는 전반적으로 차이가 없었지만, 재배 초기에 FDR 센서로 제어한 처리구에서 관행 처리구보다는 높았지만 암면으로 재배한 생산성 온실보다는 유의적으로 낮았다. 전반적으로 유의적 차이가 없었으나, 생산량에서는 관행구보다는 높았고, 생산성 온실에서의 수치와 비슷하게 나타났다. FDR 센서를 이용하여 제어한 처리구에서 평균과중이 가장 높았으며, 당도 또한 높았다.

제 4 절

FDR센서를 활용한 토마토 무배액 급액관리 기술 체계화

1. 가을~겨울철 재배를 위한 무배액 시스템에 적합한 급액 체계

(1) 실험 목표

유기배지를 이용한 토마토 무배액 수경재배 기술의 체계화를 위해 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 수분 센서를 적용한 급액 시스템에서 적절한 급액 스케줄을 설정 하고자 하였다.

(2) 실험 수행 방법

(가) 생육 및 재배환경

토마토 '스타벅1' 품종(Starbuck F1, De Ruiter Seeds®)는 2011년 7월 12일에 파종 되었고 4개의 어린 묘는 각 코코넛 코이어 배지 슬라브(100cm x 20cm x 10cm, Sinsung®)에 0.33m 재식간격과 1.2m의 배지간 간격으로 9월 6일에 정식 되었다. 처리당 4개의 슬라브를 난괴법의 통계적 방법으로 충청북도 충주시 건국대학교 (latitude 35°49'N and longitude 127°08'E)에 위치한 비닐온실에 배치하였다. 정식된 후 1개월 동안은 타이머에 의해 관수 되었고 그 후, 마지막 수확일인 12월 24일까지 FRD 수분센서를 이용하여 배지 용적당 수분 함량이 40,50 또는 60%에 도달 할 때 마다 급액이 중지되도록 처리 하였다. 네덜란드 토마토 배양액 (pH 5.8)은 정식 후 8주간은 EC 2.0 dS·m⁻¹수준으로 그 후 부터는 EC 2.5 dS·m⁻¹수준으로 공급 되었다. 재배기간 동안, 온실 내 CO₂, 온도, 상대습도, 광도 변화는 ALMEMO® 2890-9(AHLBORN, German)에 의해 30분 간격으로 측정되었다.

(나) 광합성을 분석 및 생육조사

광합성 분석기기(model Li-6400, Li-CO, Lincoln, Nebraska, USA)를 이용하여 자연 CO₂와 50 - 60% 범위의 상대습도, 1500 μmol·m⁻²·s⁻¹ 수준의 광도(PAR) 조건으로 잎의 광합성율 (Photosynthesis rate), 증산율 (transpiration rate), 잎과 대기의 수증기압차 (VpdL), 기공전도도(stomata conductance), 세포내 CO₂ (Intercellular CO₂)농도를 영양생장기에서 착과기, 과실 비대기, 과실 수확기에 나누어 각각 32, 24, 8번 반복하여 관찰하였다.

(다) ICP-OES 분석: 배액 내 양이온 함량 분석을 위해 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) (Perkin-Elmer Optima 4300/5300 DV)가 사용되었다.

(라) 조사항목: 관수 제어 시작 후 매일의 총 급배액량 및 시간대별 급액량, 근권내 토양수분 함량 및 EC 변화, 식물체 생육, 광합성 효율, 상품과중, 화방별 과실 수확량 및 과실비대 속도 등을 측정 하였다.

(마) 통계분석: 결과에서 얻은 데이터는 SAS 9.2 프로그램(SAS Institute, Cary, NC)으로 ANOVA 분석하였고 실험은 난피법에 의하여 처리하였다.

(3) 실험수행 내용 및 결과

전 재배기간 동안, 온실 내 CO₂, 온도, 상대습도, 광도 변화는 ALMEMO® 2890-9 데이터 로거(AHLBORN, German)에 의해 30분 간격으로 측정되었다. 전 재배기간 동안 온실 내 CO₂ 농도는 최저 170에서 700 ppm의 범위를 유지하였고 온도는 최저 15°C에서 37°C가 유지되었다. 상대습도는 최저 30에서 최고 100%까지 유지되었다. 광도는 최고 400 $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 의 범위를 보였다(그림 3-4-1). CO₂ 농도는 밤부터 새벽까지는 오전과 낮 시간에 비해 높게 유지되었고 정오에는 최저 수준을 보였다(그림 3-4-2). 9월에 비하여 10, 11, 12월에는 낮 시간에도 CO₂ 농도가 상대적으로 높게 유지되었다. 이는 환기가 제한된 겨울 재배기에 10, 11, 12월에 난방기가 가동된 것과 관련 있다. 야간의 최저 온도는 15°C로 그 이상의 온도가 야간에 전 재배기 동안 유지되었다. 상대습도는 밤부터 새벽까지 높은 수준으로 유지되었고 정오에는 50에서 70% 정도를 유지했다. 온실 내부의 온도와 광도는 9월과 10월에 비해 11월과 12월에 낮았다(그림 3-4-2). 정식 한 달 후부터인 10월 12일부터 배지 용적당 수분함량을 FDR 수분센서에 의해 오전 9시부터 오후 3시까지 급액 되도록 제어 후 12월 20일까지 86일 동안 매일 식물체당 공급된 급액량과 배액된 배액량을 측정하였다. 하루 평균 식물체당 공급된 총 급액량은 40%와 50%로 제어된 경우 0.95-1.0L, 60%로 제어된 경우 1.9-2.0L였다(그림 3-4-3). 하루 평균 식물체당 공급된 총 급액량은 40%와 50% 제어구에서 유의적 차이가 없었다. 40%와 50% 처리구에 비해 60% 처리구에서는 급액량이 두 배였다. 40%와 50% 제어구에서는 전 재배기간에 무배액으로 유지된 반면 60% 처리구에서는 평균 15%의 배액이 발생하였다. 관수 제어 시작 후 40일 부터 23일간 오전 9시부터 정오 12시까지, 12시부터 오후 3시까지의 공급된 급액량을 구분하여 관찰하였다. 40%와 50% 처리구에서는 하루 총 급액량의 75에서 79%가 오전 9시부터 12시 사이에 급액 되었고, 60% 처리구에서는 같은 시간대에 하루 총 급액량의 68%가 같은 시간대에 급액 되었고 통계적으로 유의적 차가 있었다(표 3-4-1). 40%와 50% 처리구에서 그 나머지 급액량인 각 25, 21%가 정오 12시부터 오후 3시 사이에 급액 되었고, 60% 처리구에서 그 나머지 급액량인 32%가 같은 시간대에 급액 되었다. 따라서, 급액이 해지기 3시간 전인 오후 3시에 종결되었을 때 60% 처리구에 비해 40%와 50% 처리구에서는 광합성과 증산량이 가장 활발한 오전 시간대에 상대적으로 더 많은 물량이 급액 되었고 오후 시간엔 상대적으로 적은 물량이 공급되었다. 정식 한 달 후부터인 10월 12일부터 배지 용적당 수분함량을 FDR 수분센서에 의해 오전 9시부터 오후 3시까지 급액 되도록 제어 후 12월 20일까지 86일 동안 센서에 의해 10분 간격으로 배지내 수분함량과 전기전도도(EC)가 측정되었다. 정식 한 달 후부터인 10월 13일부터 11월 9일까지 26일간은 EC가 2.0인 급액이 공급되었고, 11월 10일부터 12월 4일까지 24일간 EC가 2.5인 급액이 공급되었다. 전 재배기간 동안 무배액으로 유지된 40%와 50% 처리구에서 배액이 된 60% 처리구에 비해 낮게 유지되었고 재배 후기로 갈수록 모든 제어구에서 배지내 EC가 증가하였다. 40% 제어구에서는 EC 3.0 이하로, 50% 제어구에서는 EC 4.0 이하로, 60% 제어구에서는 EC 5.0 이하로 유지되었다(그림 3-4-4). 하지만 재배기간중 60% 제어구에서 양분 불균형에 의한 불량과는 생산되지 않았다. 하루 24시간 동안 배지 내 수분 함량과 EC 변화를 분석한 결과 관수 제어 처리에 따라 전형적인 패턴이

나타났다. 무배액으로 유지된 40과 50% 제어구에서는 관수 되지 않는 시간대인 오후 3시 이후 부터 오전 9시 이전까지 배지내 수분함량과 EC가 관수되는 시간대인 오전 9시와 오후 3시 사이 보다 낮게 유지 되었다. 즉, 관수가 시작된 이 후에 수분함량과 EC가 증가되었다. 반면, 배액이 발생한 60% 제어구에서는 해가 진 후 밤 시간에도 낮 시간과 유사한 수분함량을 유지하고 있었고 EC는 관수 시작 후 낮아졌다 (그림3-4-5). 이는 11월 10일부터 12월 4일 까지 24일간 EC가 2.5인 급액이 공급되었을 때도 동일한 결과를 얻었다(그림3-4-6). 이들 결과는 재배기간 동안 무배액으로 유지된 40과 50% 처리구에서 배지내 EC가 배액이 된 60% 처리구보다 낮게 유지된 이유를 잘 설명하고 있다. 잎의 광합성율, 증산률, 잎과 대기의 수증기압차, 기공전도도, 세포내 CO₂ 농도를 영양생장기에서 착과기, 과실 비대기, 과실 수확기에 나누어 각각 32, 24, 8번 반복하여 관찰하였다. 수분 제어 처리에 관계없이 광합성율이 영양생장기에서 착과기 단계에서 다른 생육단계에 비해 높게 나타났다. 영양생장기에서 착과기까지 광합성율과 기공전도도는 60% 에서 다른 처리구보다 다소 높은 결과를 보였다. 하지만 그 외 나머지 생육단계에서 처리별 광합성율, 증산률, 잎과 대기의 수증기압차, 기공전도도 및 세포내 CO₂ 농도에 유의차가 없었다 (표3-4-2). 수분 제어 시작 후 80일째에 식물체를 크게 세 부분 (Lower: 1-2화방, middle: 3-4화방, above: 4화방 이후)으로 구분하여 잎의 건물중과 줄기의 건물중을 측정하였다. 3화방 아래의 잎의 건물중과 줄기의 건물중이 나머지 부분의 잎과 줄기의 건물중 보다 제어 처리에 관계없이 가장 높았다. 처리별로 2-3화방 사이에 잎과 줄기가 60% 처리구에서 다른 처리구 보다 높게 나타났으나 그 외에 부위의 결과에는 처리별 유의차가 없었다 (표3-4-3). 각각의 화방, 1화방에서 4화방까지에서 생산된 토마토 과실 한 개당 생체중, 한 식물체당 화방당 생산된 과실수와 당도를 12월 7일과 24일 사이에 조사 되었다. 수분함량 처리에 관계없이 1화방의 과실 생체중이 2,3,4 화방에 비하여 높게 나타났다. 처리에 관계없이 1화방에서 평균 과실의 생체중은 200g 이고 2화방은 160-170g이고 3화방은 140-150g 이었다. 4화방은 40%와 50% 처리구에서는 100g 이었고 60% 처리구에서는 129g으로 다소 높았다(표3-4-4).한 식물체당 화방당 생산된 과실수는 처리별 유의차 없이 화방당 3-4개의 과실이 생산 되었다.당도는 윗 화방으로 갈 수록 높아지는 경향을 보였다. 즉, 화방별 당도는 처리에 관계없이 1화방 < 2화방 < 3화방 < 4화방 순으로 4화방의 당도가 처리에 관계없이 가장 높았다. 3화방과 4화방에서 생산된 과실의 당도는 처리별 유의차가 있었다. 3화방에서 생산된 과실의 당도는 60% 처리구는 4.56°Birx, 40%와 50% 처리구는 각각 5.01과 4.94°Birx 로 통계적 유의차(p < 0.05)가 있었다. 4화방에서 생산된 과실의 당도는 60% 처리구는 4.73°Birx, 40%와 50% 처리구는 각각 5.29과 5.39°Birx 로 통계적 유의차(p < 0.05)가 있었다.40%와 50% 두 처리 간에는 유의차가 없었다 (표 3-4-4).

수분 제어 시작 후 30일 째에 40%와 50% 처리 배지에 일시적으로 급액량을 늘려 공급하였을 때 빠져나온 배액과 60% 처리에서 나오는 배액에 함유되어 있는 양이온, K, Ca과 Mg 농도를 ICP-OES로 측정하였다. 60% 처리구에서 40%와 50% 처리에 비해 양이온 K, Ca와 Mg 농도가 높게 나타났다(그림 3-4-7). Ca은 40, 50, 60% 처리구에서 각각 102±14, 87±13, 133±7 였고, Mg은 18±7, 13±9, 36±6 였고 K는 14±1, 14±1, 59±1 수준을 나타냈다. 과실의 비대 속도를 관찰하기 위해 정식 후 55일부터 토마토 과실을 수확하지 않고, 처리별 같은 화방의 같은 크기의 과실을 선택해 일주일 간격으로 과경과 과고를 5주간 측정하여 매주 증가 비율을 퍼센트(%)로 표현하였다(그림 3-4-8). 선택된 과실은 정식 후 55, 62, 69, 76, 83, 90일에 과경과 과고의 변화를 측정하였다. 즉, 정식 후 55일에 측정한 값에 비해 62일에 변화된 과경과 과고의

비율을 나타냈다. 수분 제어 처리별 과정의 증가 속도에는 유의차가 없었다. 정식 후 55일과 62일 사이에 과실의 과고 변화가 60% 처리에서 다른 처리에 비해 다소 낮게 나타났으나 그 뒤 지속적인 측정 결과들은 처리별 유의차가 없는 것으로 나타났다. 처리 별 하루 평균 한 식물체당 공급되는 급액량이 40과 50% 는 1.0L 이고 60% 는 2.0L가 되는 것을 감안하여(그림 3-4-3), 네덜란드 토마토 배양액으로 100일 동안 토마토 재배시 한 식물체당 소비되는 비료 가격을 계산했을 때, 40과 50% 제어구는 341원이고 60% 제어구의 그 두 배의 비료값인 682원이다(표 3-4-5). 각 비료의 원산지가 다르기 때문에 발생하는 비료 단가의 차이로 현재 예측된 가격과 차이가 있을 수 있다.

(4) 연구결과 요약

유기배지를 이용한 토마토 무배액 수경재배 기술의 체계화를 위해 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 수분 센서를 적용하여 적정 급액 기준을 설정 하고자 실험을 실시하였다. 코코넛 코이어 배지에 토마토 ‘스타벅1’ 품종이 9월 초 정식 된 후 1개월 동안 타이머에 의해 관수 되었고 그 후, FDR 수분센서를 이용하여 배지 용적당 수분 함량이 40,50 또는 60%에 도달 할 때 마다 급액이 중지되도록 처리 하였다. 하루 평균 식물체당 공급된 총 급액량은 40과 50% 처리구에서 0.95-1.0L, 60% 제어구에서 1.9-2.0L 였다. 40과 50% 제어구에서는 전 재배기간동안 무배액으로 유지된 반면 60% 처리구에서는 약 15%의 배액이 발생하였다 배지 용적당 수분함량이 40과 50%로 제어되었을 때 오전 9시에서 12시 사이에 급액된 량이 하루 총 급액량의 각각 75와 79% 였고, 60% 제어구는 같은 시간대에 하루 총 급액량의 68% 가 급액 되어 처리별 유의차를 보였다. 또한 하루 24시간 동안 배지 내 수분 함량과 전기전도도(EC) 변화를 관찰한 결과 처리에 따라 전형적인 패턴이 나타났다. 무배액으로 유지된 40과 50% 제어구에서는 배지내 수분함량과 EC가 관수 되지 않는 시간대에 관수 시간대 보다 낮게 유지 되었고, 배액이 발생한 60% 제어구에서는 관수되지 않는 시간대에 더 높게 유지되었다. 이들 결과는 재배기간 동안 무배액으로 유지된 40%와 50% 처리구에서 배지내 EC가 배액이 된 60% 처리구 보다 낮게 유지된 이유를 잘 설명하고 있다. 광합성 효율, 상품과중, 화방별 과실 수확량 및 과실 비대속도는 처리별 유의차가 없었다. 40%와 50% 처리구에서 생산된 과실의 당도가 60% 처리구 보다 높았다. 네덜란드 토마토 배양액으로 100일 동안 토마토 재배시 한 식물체당 소비되는 비료값은 FDR 센서 에 의해 40%와 50%로 제어하여 무배액을 유지하였을 때 8,600,000 원/ha을 절감 할 수 있었다. 따라서 가을~겨울철 재배에서 FDR 수분센서를 적용하는 경우 배지내 용적당 수분함량을 40과 50% 범위로 제어하여 무배액 시스템이 조성되면 물과 비료량을 절약하고 식물에게 친환경적인 재배방법이 된다. 하지만 60%로 제어할 경우는 배액의 량을 극소화 하면서 배지 내 EC 농도 변화를 줄 일 수 있도록 재배하는 것이 필요하다.

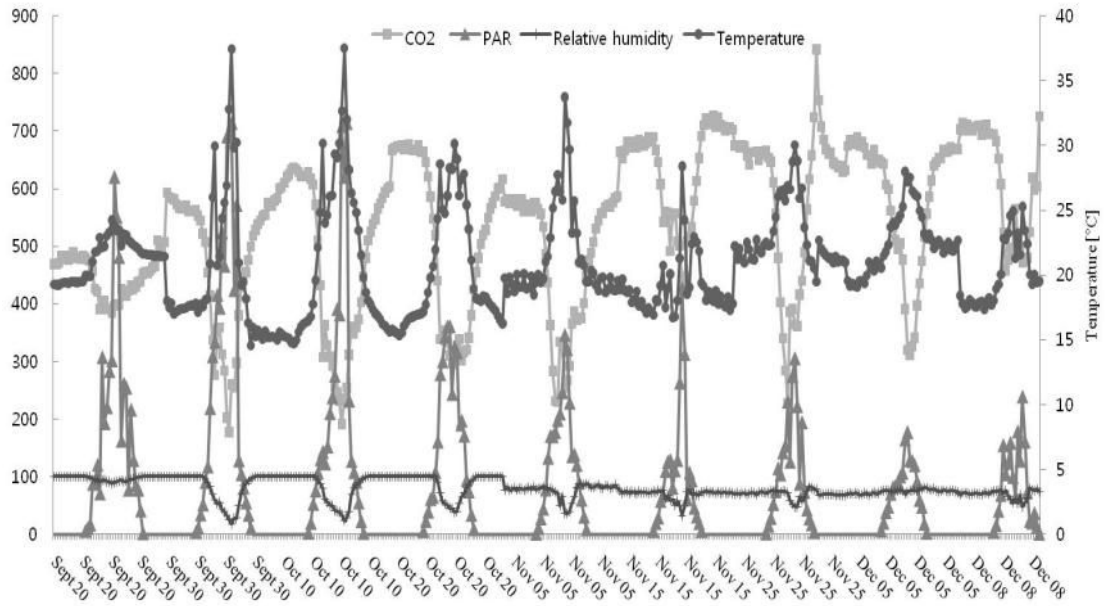


그림 3-4-1. 온실 내 이산화탄소, 광도, 상대습도 및 온도의 월별변화

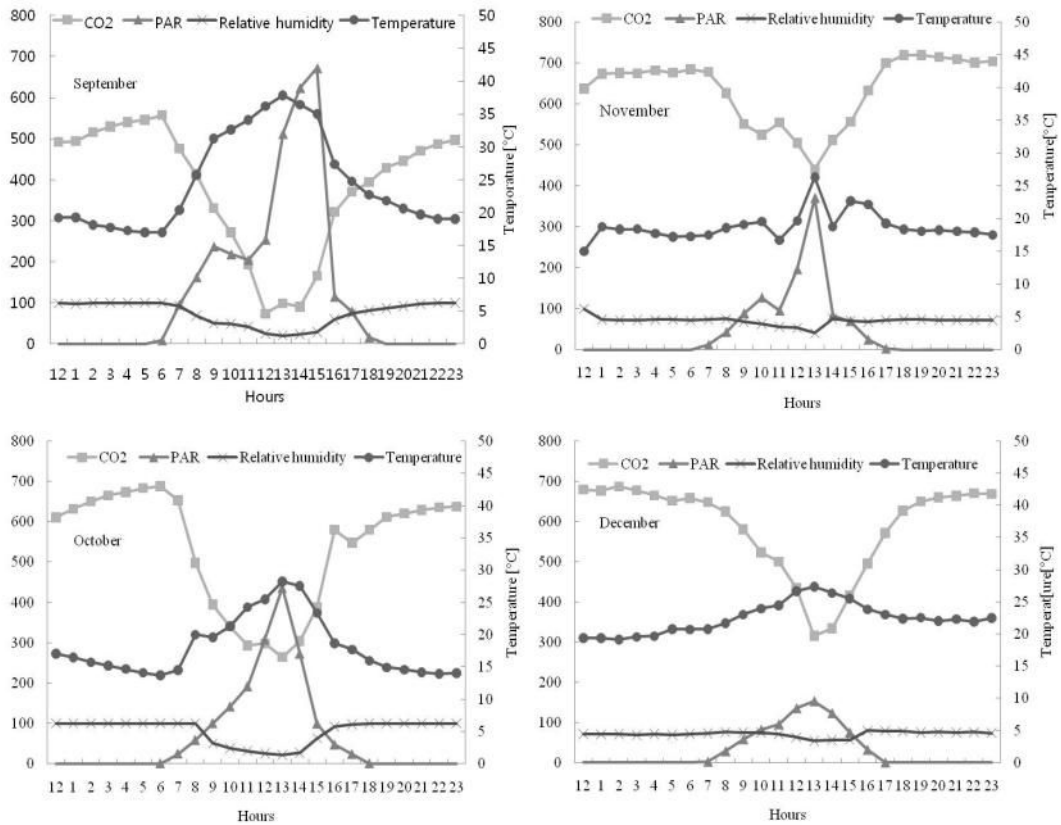


그림 3-4-2. 온실 내 이산화탄소, 광도, 상대습도 및 온도의 일변화

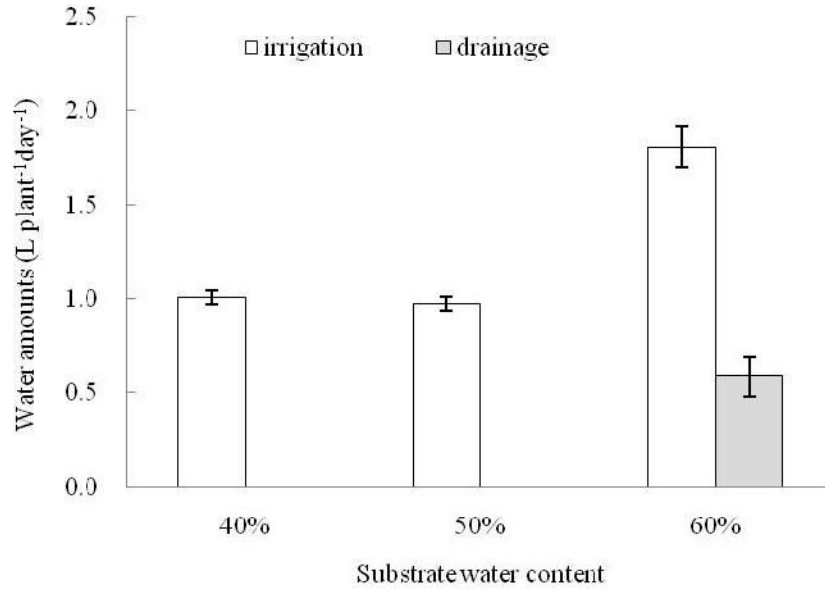


그림 3-4-3. 배지 내 수분함량 40%, 50% 및 60%로 제어시 한 식물체당 일일 총 급액량과 배액량 (측정기간 : 2010년 10월 12일 ~ 12월 20일)

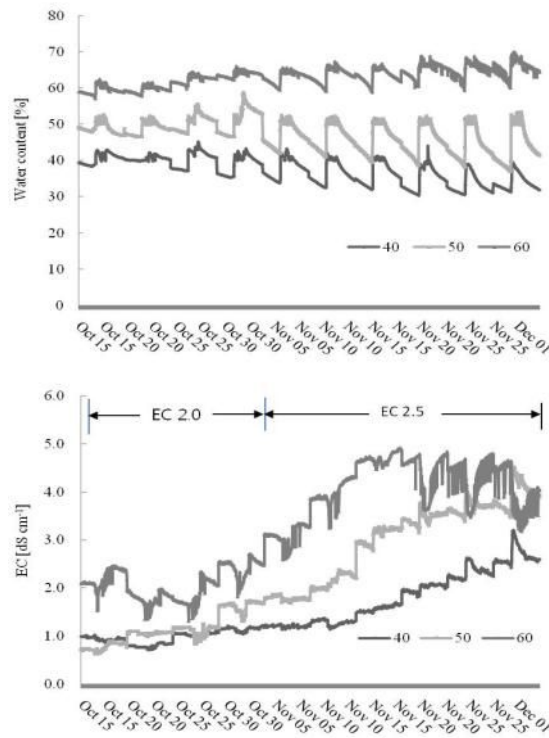


그림 3-4-4. 전 재배기간동안 코코넛 코이어 배지내 수분함량(%) 과 전기전도도(EC)의 월변화. (양액의 EC 2010년 10월 13일~11월 09일간 2.0 dS·m⁻¹로 제어. 2010년 11월 10일~12월 04일간 2.5 dS·m⁻¹로 제어)

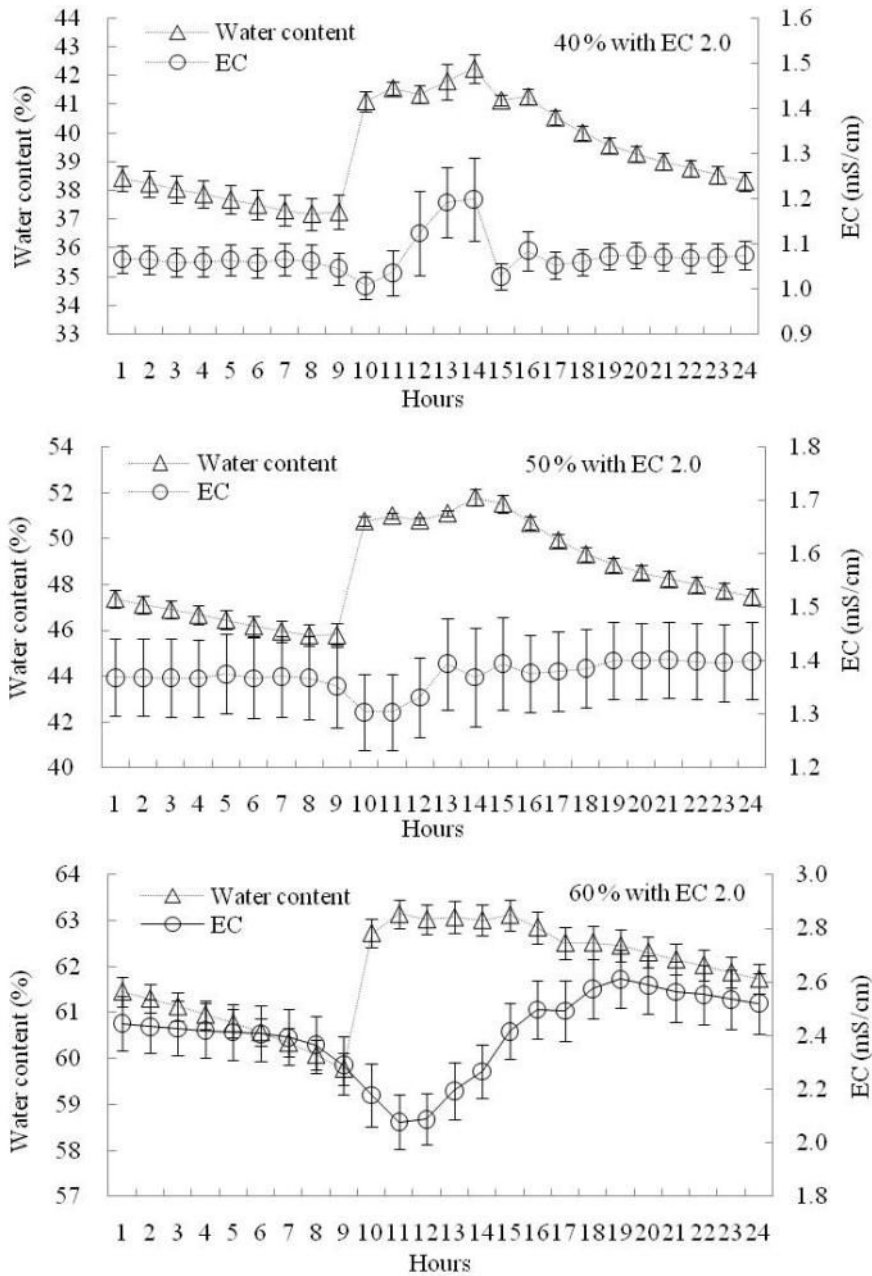


그림 3-4-5. 배지 내 수분함량 40%, 50%, 60% 및 EC 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 제어 시 24시간동안 코코피트 배지의 수분함량과 EC의 변화패턴(2010년 10월 13일~11월 09일)

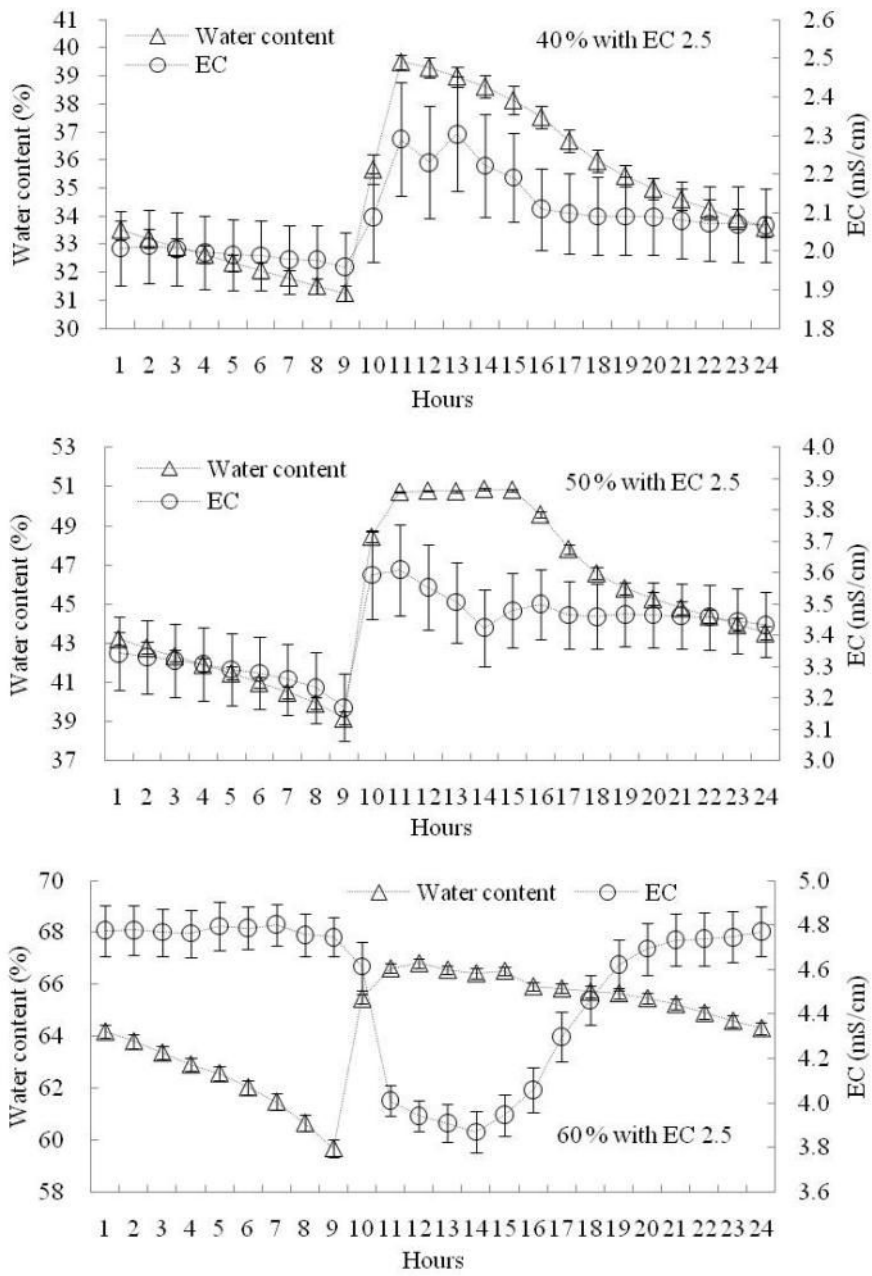


그림 3-4-6. 배지 내 수분함량 40%, 50%, 60% 및 EC 2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 제어 시 24시간동안 코코피트 배지의 수분함량과 EC의 변화패턴 (2010년 11월 10일~12월 04일)

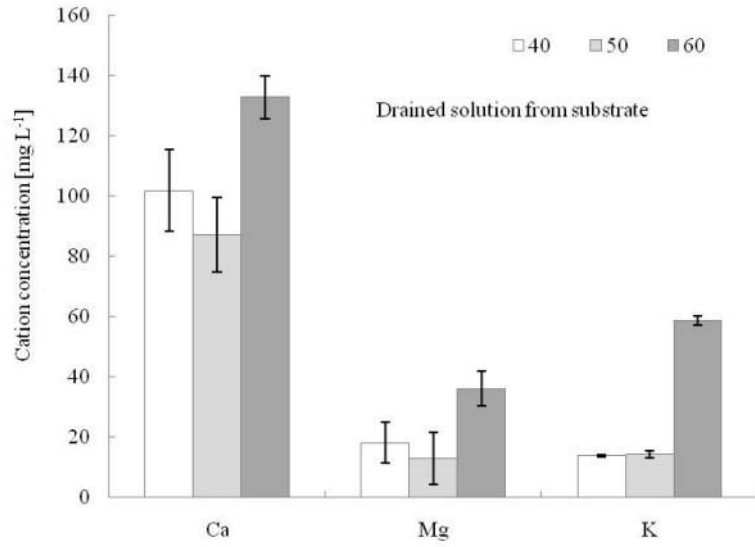


그림 3-4-7. 처리 후 30일 후의 배액 양이온 농도 (40%, 50% 처리는 일시적으로 충분한 관수로 배액발생)

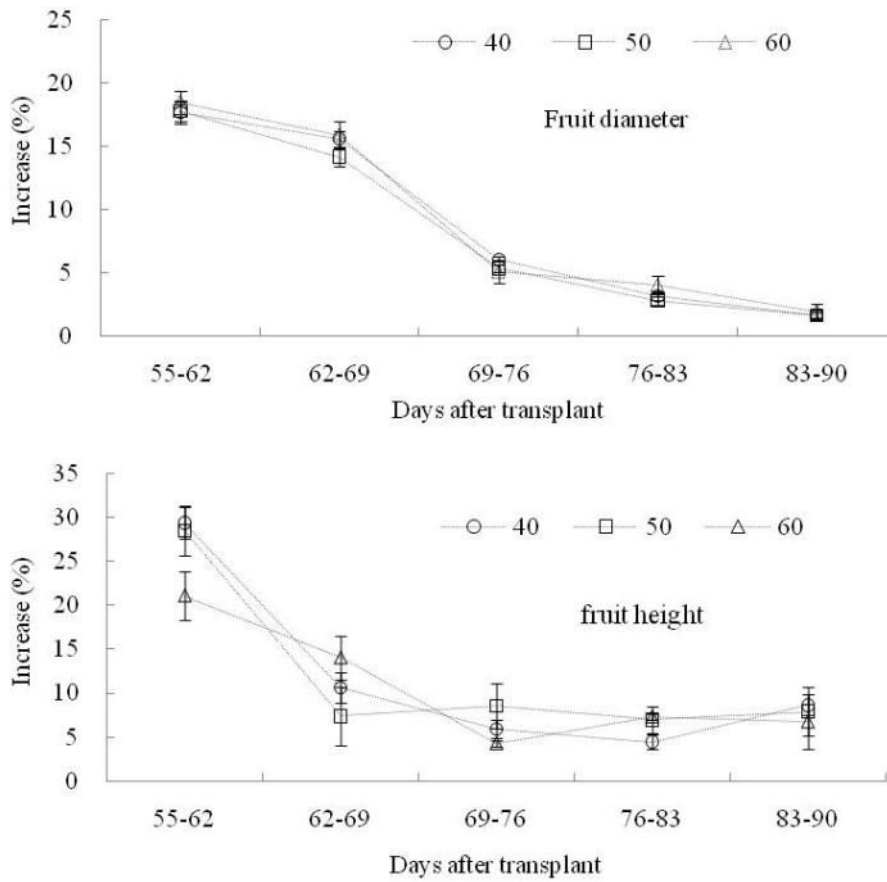


그림 3-4-8. 배지 내 수분함량 40%, 50% 및 60% 제어시 주간 토마토 과실 성장률

표 3-4-1. 배지 내 수분함량 40%, 50% 및 60% 제어 시 총 급액량 중 시기별 급액량 비율.

Treatment	9am -12 pm	12pm - 15pm	Total (L·plant ⁻¹ ·day ⁻¹)
	%		
40	75 b	25 b	1027 b
50	79 a	21 c	1016 b
60	68 c	32 a	1891 a
Block	0.0008	0.0008	<.0001
Treat	<.0001	<.0001	<.0001

Data were represented with means of 92 replications per treatment in a randomized block design. Observations were made between 40 and 62 days after treatment. Different lowercase-letters are significantly different at P < 0.05 by Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

표 3-4-2. 생육시기별 완전히 전개된 토마토 잎의 광합성률[$\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$], 증산률[$\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$], 잎과 대기의 수증기압차[VpdL: $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$], 기공전도도[$\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$], 세포 내 CO₂ 농도[$\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$].

Growth stages	Volumetric water content (%)		
	40	50	60
Vegetative to Fruit set			
Photosynthesis rate	23.3 ab	21.6 b	24.8 a
Transpiration rate	6.85 a	7.04 a	7.56 a
VpdL	1.20 a	1.23 a	1.18 a
Conductance	0.73 b	0.71 b	0.81 a
Intercellular CO ₂	317 a	321 a	316 a
Fruit development			
Photosynthesis rate	20.9 a	20.8 a	20.5 a
Transpiration rate	8.33 b	8.54 ab	8.89 a
VpdL	1.34 a	1.39 a	1.39 a
Conductance	0.79 a	0.77 a	0.82 a
Intercellular CO ₂	311 a	311 a	313 a
Fruit harvesting			
Photosynthesis rate	19.7 a	19.3 a	19.5 a
Transpiration rate	8.30 a	8.64 a	8.34 a
VpdL	1.58 a	1.61 a	1.56 a
Conductance	0.65 a	0.65 a	0.65 a
Intercellular CO ₂	328 a	329 a	332 a

Data were represented with mean values of 32, 24, and 8 replications at vegetative to fruit setting, fruit development, and fruit harvesting stage, respectively in a randomized block design. Different lowercase-letters are significantly different at P < 0.05 by Duncan's Multiple Range Test. Each observation was repeated 2 times on two leaves randomly selected from 2 individual plants of each treatment.

표 3-4-3. 배지내 수분 함량 40, 50 및 60% 제어시 수경재배 토마토의 잎과 줄기의 건물중. 처리 후 80일 이후 계측.

Plant Location	Treatment	Leaf DW	Stem DW
Lower	40	63.0 a	32.2 a
	50	55.2 a	27.8 a
	60	64.9 a	30.0 a
Middle	40	18.5 b	12.2 a
	50	15.1 b	9.74 b
	60	25.7 a	12.0 a
Above	40	20.0 a	7.92 a
	50	22.7 a	8.70 a
	60	28.8 a	10.1 a

Data were represented with means of 6 replications per treatment in a randomized block design. Different lowercase-letters are significantly different at $P < 0.05$ by Duncan's Multiple Range Test (DMRT). The test was separately conducted for samples harvested from each plant location.

표 3-4-4. 각 화방별 수확된 사실의 생체중, 수확량, 가용성 고형물 함량. 화방1(C1), 화방2(C2), 화방3(C3) 및 화방4(C4)를 포함. (12월 7일, 24일)

Cluster	Treatment	Fruit weight (g fruit ⁻¹)	Fruit number (no.plant ⁻¹)	Fruit sugar (°Brix)
C1	40	198 a	4.56 a	4.07 a
	50	207 a	4.63 a	4.11 a
	60	216 a	3.93 a	3.99 a
C2	40	168 a	3.80 a	4.39 a
	50	158 a	3.13 a	4.50 a
	60	172 a	3.73 a	4.38 a
C3	40	145 a	2.53 a	5.01 a
	50	139 a	2.81 a	4.94 a
	60	141 a	3.07 a	4.56 b
C4	40	101 b	3.08 a	5.29 a
	50	107 ab	3.64 a	5.39 a
	60	129 a	3.56 a	4.73 b

Data were represented with means of 74, 39, 20 and 52 replications per treatment for C1, C2, C3 and C4 in a randomized block design. Different lowercase-letters are significantly different at $P < 0.05$ by Duncan's Multiple Range Test (DMRT). The test was separately conducted for samples harvested from each fruit cluster.

표 3-4-5. 네덜란드 (Naaldwijk, Glasshouse Crops Research and Experiment Station) 양액을 이용한 토마토 100일 재배시 무배액과 배액시스템의 비료값의 비교

Fertilizers (origin)	Fertilizer cost (KWRZ/kg)	Amounts of fertilizer (kg /1000L)	Fertilizer cost (KWR) per plant per 100 days	
			Non-drainage	drainage
Calcium nitrate (China)	1,000	1.003	100	201
Potassium nitrate(Belgium)	1,800	0.531	96	191
Magnesium sulfate(China)	1,200	0.493	59	118
Potassium sulfate(Belgium)	1,000	0.305	31	61
Ammonium phosphate monobasic (China)	2,500	0.144	36	72
Fe-EDTA (Holland)	9,000	0.006	5.4	11
Boric acid (USA)	23,000	0.00185	4.3	8.5
Manganese sulfate (Local)	32,000	0.00169	5.4	11
Zinc sulfate (Local)	22,000	0.00144	3.2	6.3
Copper sulfate (Local)	32,000	0.00019	0.6	1.2
Sodium molibdate (Local)	54,000	0.00012	0.7	1.3
Total(KRW)			341	682

Z: KRW: Korean won

2. 봄~여름철 재배를 위한 무배액 시스템에 적합한 급액 체계

(1) 실험 목표

유기배지를 이용한 토마토 무배액 수경재배 기술의 체계화를 위해, Frequency Domain Reflectometry (FDR) 수분 센서를 이용한 급액시스템으로 봄과 여름계절에 걸친 토마토 작물 재배시 적절한 급액 스케줄을 설정하고자하였다.

(2) 실험 수행 방법

(가) 재배환경

토마토 '스타벅1' 품종 (Starbuck F1, De Ruiter Seeds®)는 2011년 2월 1일에 파종 되었고 4개의 어린 묘는 각 코코넛 코이어 배지 슬라브 (100cm x 20cm x 10cm, dust:chip=100:0%, Sivanthi Joy, India, Sinsung®)에 0.33m 재식간격과 1.2m의 배지간 간격으로 4월 1일에 충청북도 충주시 건국대학교 (latitude 35°49'N and longitude 127°08'E)에 위치한 비닐온실에 정식하였다. 처리당 4개의 슬라브를 난괴법(a completed block design)에 의해 배치 하였다. 정식 후 100배로 농축 조제된 유럽 토마토 배양액(the Glasshouse Crops Research and Experiment Station at Naaldwijk in the Netherlands)을 125 L 탱크에 수돗물 100 L에 희석되어 pH 5.8과 EC 2.0 dS·m⁻¹로 맞춘 후 수중모터(55W, Hyupsin®)의 동력에 의해 급액 하였다. 전 실험기간 동안 매일 급액된 양은 하루 3번 측정하였고 배액은 하루 한 번 측정하였다. 온실 내 CO₂, 온도, 상대습도, 광도 변화는 ALMEMO®2890-9(AHLBORN, German)에 의해 30분 간격으로 측정되었다.

(나) FDR 수분센서 또는 타이머에 의한 자동관수 시스템

정식 후 FDR 수분센서 (WT1000N, Mirae-Sensor®, Korea)에 의한 급액을 시행 하였다. 배지 용적당 수분 함량이 40, 50 또는 60%에 도달 할 때 마다 급액이 중지되도록 처리하였고, 대조구로 타이머를 이용해 배지의 수분을 60-70%가 유지되도록 간이 FDR 센서 측정기 (COCO-100, Mirae-Sensor®, Korea) 로 모니터링 하면서 일정한 급액횟수 및 급액 간격으로 급액 하였다 (그림 3-4-9). 2011년 7월 12일 수확하기 전까지 관수개시 및 종료시간을 계절 변화에 따라 일출 1 시간 후 관수하여 일몰 3시간 전에 관수종료 하였다. 즉, 2011년 4월 1일부터 6월 8일까지 정식 후 69일까지 오전 9시에 관수를 개시하여 오후 3시에 관수를 종료하였고 2011년 6월 9일부터 7월 11일 까지 정식 후 70일부터 102일까지는 오전 7시에 관수를 개시하여 오후 5시에 관수를 종료하였다. 전 재배기간 동안 근권내 수분함량과 EC 수준은 10분 간격으로 데이터 로거 (WT600, Mirae-Sensor®, Korea)에 저장되었다.

(다) 광합성을 분석

광합성 분석기기(model Li-6400, Li-CO, Lincoln, Nebraska, USA)를 이용하여 자연 CO₂ 400-450 μmol·mol⁻¹ 범위와 상대습도 50-60%, 광도(PAR, 1500 μmol·m⁻²·s⁻¹ 조건으로 정식 후 30일과 60일 사이에 반복하여 잎의 광합성율 (Photosynthesis rate), 증산율 (transpiration rate), 잎과 대기의 수증기압차 (VpdL), 기공전도도 (stomata conductance), 세포내 CO₂

(Intercellular CO₂) 농도를 관찰하였다.

(라) 수분 포텐셜 측정

잎의 수분 포텐셜은 정식 후 75일째에 수분 포텐셜 측정기 (Dewpoint Potential Meter, 제4, Decagon Devices, Pullman, USA)에 의하여 측정되었다.

(마) 배지 내 무기이온 농도 측정

근권내 무기이온 농도를 분석하기 위하여 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) (Perkin-Elmer Optima 4300/5300 DV)가 사용되었다.

(바) 생육조사

식물체 생육조사는 마지막 수확 후 실행되었고 수확기에 상품과중, 화방별 과실 수확량 및 당도를 측정 하였다.

(사) 통계분석

결과에서 얻은 데이터는 SAS 9.2 프로그램 (SAS Institute, Cary, NC)으로 ANOVA 분석하였고 실험은 난괴법 (a completed block design)에 의하여 처리하였다.

(3) 결과 및 고찰

전 재배기간 동안 온실 내 온도는 17°C~37°C, 상대습도는 30~100%, 이산화탄소는 200~700 ppm, PAR는 0에서 1200 $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 을 유지했다 (그림 3-4-10). 밤 동안 온실 내 이산화탄소 농도는 오전이나 오후보다 높았고 정오가 가장 낮은 수준을 나타냈다. 전 재배기간 동안 상대습도는 밤과 이른 오전에 높게 유지되었고 낮 동안은 50~70%를 유지했다. 온실 내 광도는 6월보다 7월에 낮았는데 이는 6월말부터 7월 초순까지 장마시기가 영향을 준 것으로 생각된다.

배지의 수분함량을 40 또는 50%로 제어한 후 32일과 69일 사이에 측정된 일일 평균 급액량은 각각 1.12L(± 0.17) 또는 1.18L(± 0.13)였고 70일과 102일 사이에 측정된 일일 평균 급액량은 각각 1.91L (± 0.50) 또는 2.31L (± 0.48)였다 (표 3-4-6). 40% 또는 50% 제어구에서는 전 재배기간 동안 무배액으로 유지되었다. 배지의 수분함량이 60%나 타이머로 제어되었을 때 일일 평균급액량은 비슷한 수준을 보였다. 32일과 69일 사이에 측정된 일일 평균급액량은 각각 1.98L(± 0.30) 또는 1.87L(± 0.21)였고 70일과 102일 사이에 측정된 일일 평균급액량은 각각 3.45L (± 0.58) 또는 3.70L (± 0.23)였다. 하지만 60%제어구와 타이머 제어구 사이에 배액률은 통계적 유의차를 보였다. 제어후 70일 이전까지 60% 제어구는 22%(± 2.7), 타이머 제어구에서 38%(± 5.0)였다. 처리 70일 이후로는 60% 제어구에서 배액은 더 이상 배출되지 않았지만, 타이머 제어구에서는 재배 종료 시까지 배액률이 23%(± 6.9)로 유지되었다. 정식 후 32일부터 69일까지 오전 9시부터 오후 3시까지 급액하고 매일 오전 9시부터 10시까지, 오전 10시부터 오후 1시까지, 오후 1시부터 오후 3시까지 급액량을 관찰하였을 때, FDR센서에 의한 급액시 다른 시간대에 비해 오전 9시에서 10까지 급액량이 가장 많았다. 반면 타이머에 의한 급액시 측정 간격이 길었던 오전 10시부터 오후 1시까지가 급액량이 가장 많았다 (표 3-4-6). FDR센서에 의해 배지 수분량을 40, 50, 또는 60%로 제어한 경우 오전 9시부터 10시까지 급액된량은 각각 일일 총급액량의 44, 48, 또는 41%였고 오전 10시부터 오후 1시까지 급액된량은 각각 일일

총급액량의 34, 28, 또는 32%였다. 정식 후 70일부터 102일까지 오전 7시부터 오후 5시까지 급액 하였을 때도 오전 7시부터 오전 10시까지가 급액량이 가장 많았다. FDR 수분센서에 의해 오전 9시부터 오후 3시까지 급액 되도록 제어 후 정식 후 25일부터 69일까지 측정된 전기전도도 (EC)는 40, 50 또는 60%에서 각각 1.6, 1.4 또는 2.4 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 였다 (그림 3-4-11). 배지내 수분함량은 40% 제어구에서는 35~41%, 50% 제어구에서는 45~50%, 60%제어구에서는 55~63%였다. 제어구에 따라 하루 24시간동안 배지 수분함량 및 EC농도에 특성이 다르게 나타났다. 즉 40과 50% 제어구에서는 EC수준이 관수종료 이후 시간대에 관수시간대 보다 낮아진 반면 60% 제어구에서는 관수시간대에 EC 수준이 관수종료 이후 시간대 보다 낮았다. 40% 제어구에서 관수종료 후(3 p.m.) 일몰 전(8 p.m.)까지 배지내 수분함량 변화는 41~35%였고 EC 변화는 1.7~1.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 였다. 50% 제어구에서는 수분함량 변화는 50~45%였고 EC 변화는 1.4~1.3 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 였다. 60% 제어구에서는 수분함량 변화는 63~55% 였고 EC 변화는 2.4~2.8 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 이었는데, 이는 50%제어구 EC의 두배가 된다. 정식 후 70일 이후 60% 제어구에서 배액이 더 이상 발생하지 않게 되었을 때는 EC수준이 관수종료 이후 시간대에 관수시간대 보다 낮아졌다 (그림 3-4-12). 타이머 제어구에서는 전 재배기간 동안 간이 FDR 수분 측정기로 측정된 배지내 수분함량은 50~70% 이었고 EC는 2.0~3.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 범위로 유지되었다 (그림 3-4-13). 잎의 광합성율, 증산률 및 기공전도도는 40% 제어구에서 가장 낮았고 VpdL은 가장 높았다 ($P < 0.05$) (표 3-4-7). 정식 후 75일에 측정된 수분 포텐셜도 40% 제어구에서 가장 낮게 나타났고 그 다음으로 50%에서 낮았다 ($P < 0.05$)(표 3-4-8). 수분 포텐셜은 60% 제어구와 타이머 제어구 간에 통계적 유의차가 없었다. 정식 후 102일 후 측정된 식물초장, 잎과 줄기의 생체중 및 엽수는 40%와 50% 제어구에서 60%와 타이머 제어구보다 낮았다 ($P < 0.05$) (표 3-4-9). 특히 40% 처리구에서 초장, 엽중, 경중, 및 엽수가 가장 낮았고, 50% 처리구에서는 위 항목들이 60% 처리구 보다는 낮았지만 40% 처리구 보다는 높은 것으로 나타났다. 타이머 제어구에서 60% 제어구 보다 엽 생체중 및 엽수가 높게 나왔다 ($P < 0.05$). 과실중 및 과실수는 각 화방에서 생산된 과실수 및 과실중은 2011년 6월 17일에서 7월 12일까지 측정되었다. 배지 수분함량은 과실중에 유의적 영향을 미쳤다 ($P < 0.05$). 40% 제어구에서 가장 낮은 과실중이 관찰되었고 가장 높은 과실중은 타이머 제어구에서 관찰되었다 (표 3-4-10). 40% 제어구에서 생산된 과실은 60%에서 생산된 과실중에 비해 1, 2, 3, 4화방에서 각각 65, 60, 76, 40g 씩 낮은 것으로 관찰 되었다. 각 화방당, 처리에 관계없이 3-4개의 과실이 생산되었다. 4화방의 과실수가 배지 수분함량에 큰 영향을 받은 것으로 나타났다. 40과 50% 제어구에서 60% 제어구에 비해 낮은 과실수를 생산했다. 당도는 40% 제어구에서 가장 높았는데($P < 0.05$) 각각의 1, 2, 3, 4 화방에서 5.98, 6.49, 6.28, 6.44°Brix를 기록했다. 반면 타이머 제어구에서 당도가 가장 낮았는데 ($P < 0.05$), 각각의 1, 2, 3, 4 화방에서 4.90, 4.87, 4.76, 4.65°Brix를 기록했다. 40과 50% 두 처리 모두에서 배꼽썩음과 발생율이 한 식물체당 평균 3.0(ea/plant)인 반면, 60% 처리구와 타이머 제어구에서는 배꼽썩음과가 발생되지 않았다. 40% 제어구와 타이머 제어구에서 칼슘 (Ca), 마그네슘 (Mg), 칼륨(K), 총질소 (T-N)의 농도가 다른 제어구에 비해 낮았다 ($P < 0.05$) (표 3-4-11). 타이머 제어구에 총인산 (T-P) 함량은 50%와 60% 두 제어구와 유사하였다. 일일 평균 급액량과 생육온도와의 상관계수 (correlation coefficient) 는 타이머 제어구보다 FDR 센서에 의한 급액 제어구에서 높은 것으로 나타났다 (그림 3-4-16). 생육온도 외 환경조건들 즉, 광도 및 상대습도는 일일 평균 급액량과의 상관계수가 높지 않게 관찰되었다 (data not presented).

40%와 50% 두 제어구의 근권내 EC와 무기이온 농도가 60%와 타이머 제어구에 비해 낮은 것은 근권내 낮은 수분함량 유지와 관련이 있었다 (그림 3-4-11~12, 표 3-4-11). 반면 60% 제어구에서 EC와 무기이온 농도가 증가한 것은 전 재배기간 중 정식 후 65일간 배액이 발생하다가 그 후 배액이 발생되지 않은 것과 관련이 있다. 배액의 부피 변화는 근권내 무기이온이 집적되는 결과를 낳은 것으로 보이고 이는 배액이 발생하지 않은 40%와 50%에 비해 큰 차이가 있다 (표 3-4-6). 정식 후 70일 이후 60% 제어구에서 배액이 발생하지 않았을 때 근권내 EC는 다른 두 처리에 비해 높은 것으로 관찰되었고 이는 배지 용적당 수분함량이 정식 후 69일까지 배지내 수분함량이 60%인 것은 필요 이상으로 높은 것으로 고찰되어진다. 따라서 정식 후 69일까지는 40-50%로 수분함량을 유지시키다가 그 후 수확기까지 60-70%로 유지시키는 것이 바람직한 것으로 고찰된다. 타이머 제어구에서 EC가 수확기에 가까워짐에 따라 점차적으로 감소한 것은 6월 말경부터 7월 중순까지 이어진 장마기간과 관련이 있다 (그림 3-4-10). 이러한 결과는 타이머에 의한 관수 제어는 생육환경 변화에 대응력이 결여된 방식이어서 물과 양분을 소비하는 결과를 초래한다. 하루 중 시간별 급액량의 차이는 무배액 시스템을 유지시키는 중요한 요인으로 고찰된다. FDR 센서에 의한 급액방식은 전 날의 관수종료 후 다음날 관수개시까지 소비한 물의 양을 감지하여 급액하는 효율성을 가지고 있다 (표 3-4-6). 이것은 선행된 연구에서 주장된 관수량을 결정할 때는 마지막 관수 이후 소비된 물량을 근거로 해야 한다는 것을 뒷받침 한다 (Yeager et al., 1997). 기존의 많은 연구들이 적정 관수량을 예측할 때 지상부의 엽온에 근거한 증발산 모델을 사용해왔다 (Ben-Asher et al., 1994; Boulard and Jemaa, 1993; Lorenzo et al., 1998). 비록 오전에 상대적으로 오전에 많이 공급된 급액이 증산에 소비되었는지는 확실치 않지만, 본 연구에서는 일일 평균 급액량이 온실 내 일일 평균 광량이나 상대습도보다 일일 평균 온도와 관련이 있었다. 40% 제어구에서 기공전도도와 수분포텐셜이 다른 처리구에 비해 낮은 것과 VpdL은 높은 결과들은 식물들이 수분 스트레스를 받은 것으로 고찰된다. VpdL의 증가는 기공전도도를 감소시키고, 따라서 광합성을 감소시킨다고 한다 (Berry and Bjorkman 1980; Fredeen and Sage, 1999). 40과 50% 처리구에서 줄기 생체중이 감소한 결과도 또한 식물체가 수분 부족상태임을 증명한다 (Katerji et al., 1994; Moriya et al., 1992). 40과 50% 처리구에서 상품과중 및 과수의 감소는 과실 비대와 수확기에 앞의 낮은 수분포텐셜 수치와 근권내 낮은 수분함량과 관련되어 있는데 이는 두 처리에서 과실의 당도가 높고 배꼽썩음과 발생율이 18%가 되는 결과를 초래하였다 (표 3-4-10). 배꼽썩음과는 수분부족이나 배지 내 염분 증가와 관련이 있다 (Franco et al., 1988). 이러한 결과들은 배지 수분함량을 전 생육기간 동안 40%나 50%로 제어하는 것은 봄에서 여름으로 이어지는 재배 작기에 수분 부족을 초래한다. 따라서 전 생육기간 동안 무배액을 유지하면서 근권내 EC가 증가하지 않도록 하기 위해서는 정식 후 70일 이전은 배지 내 수분함량을 50% 수준으로 유지하다가 과실 70일 이후 과실 비대기에는 60%~70% 범위로 유지해 주는 것이 적합할 것으로 고찰된다.

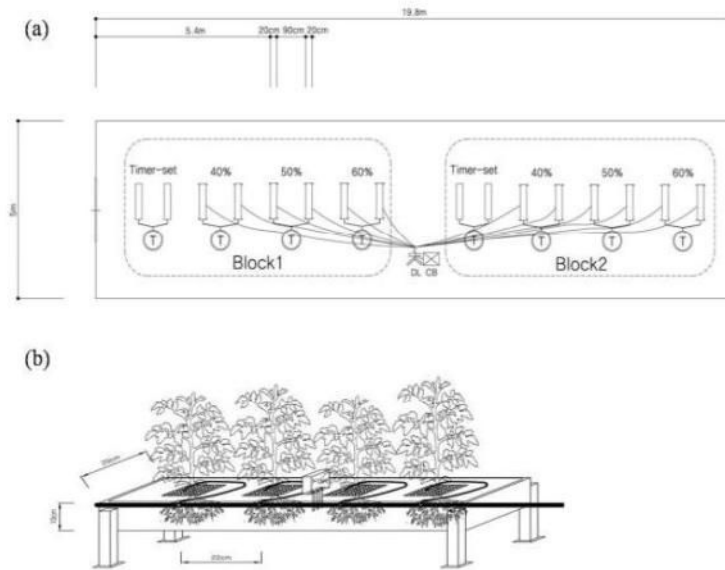


그림 3-4-9. 비닐온실내에 처리당 4개의 코코넛 슬라브를 난피법으로 배치(a) 4개의 토마토묘를 코코넛 코이어 슬라브(100cm x 20cm x 10cm, dust : chip = 100:0 %, Sivanthi Joy, India) 슬라브간 1.2m 간격 식물간 0.22m간격으로 재식(b)

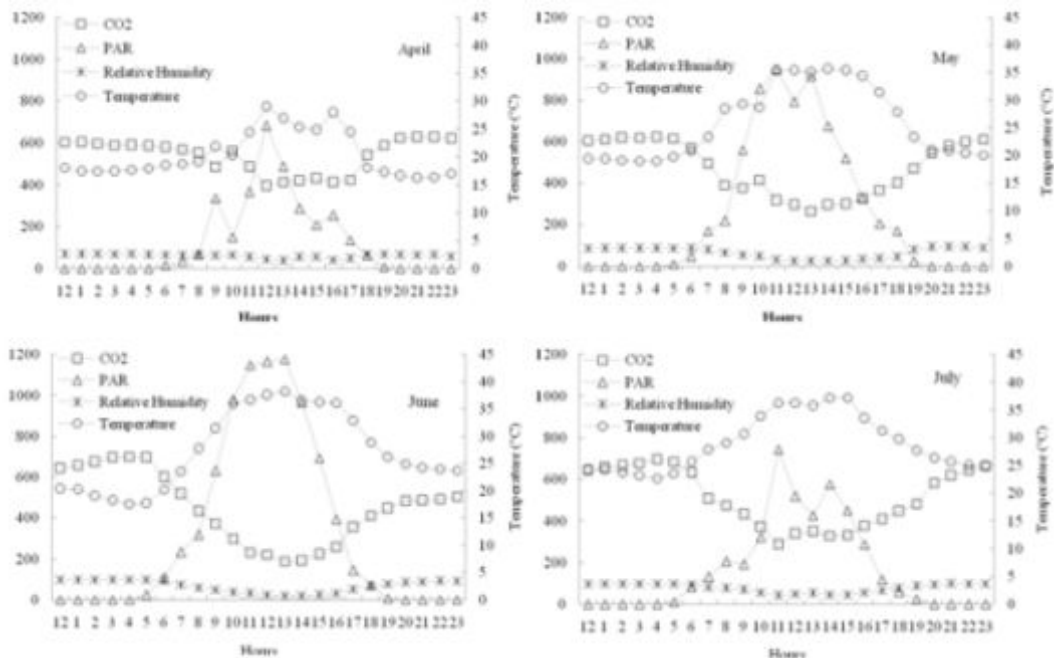


그림 3-4-10. 온실 내 이산화탄소 (CO_2 ,ppm), 광도 (PAR , $\mu\text{m}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 상대습도 (%) 및 온도 ($^{\circ}\text{C}$) 의 일변화.

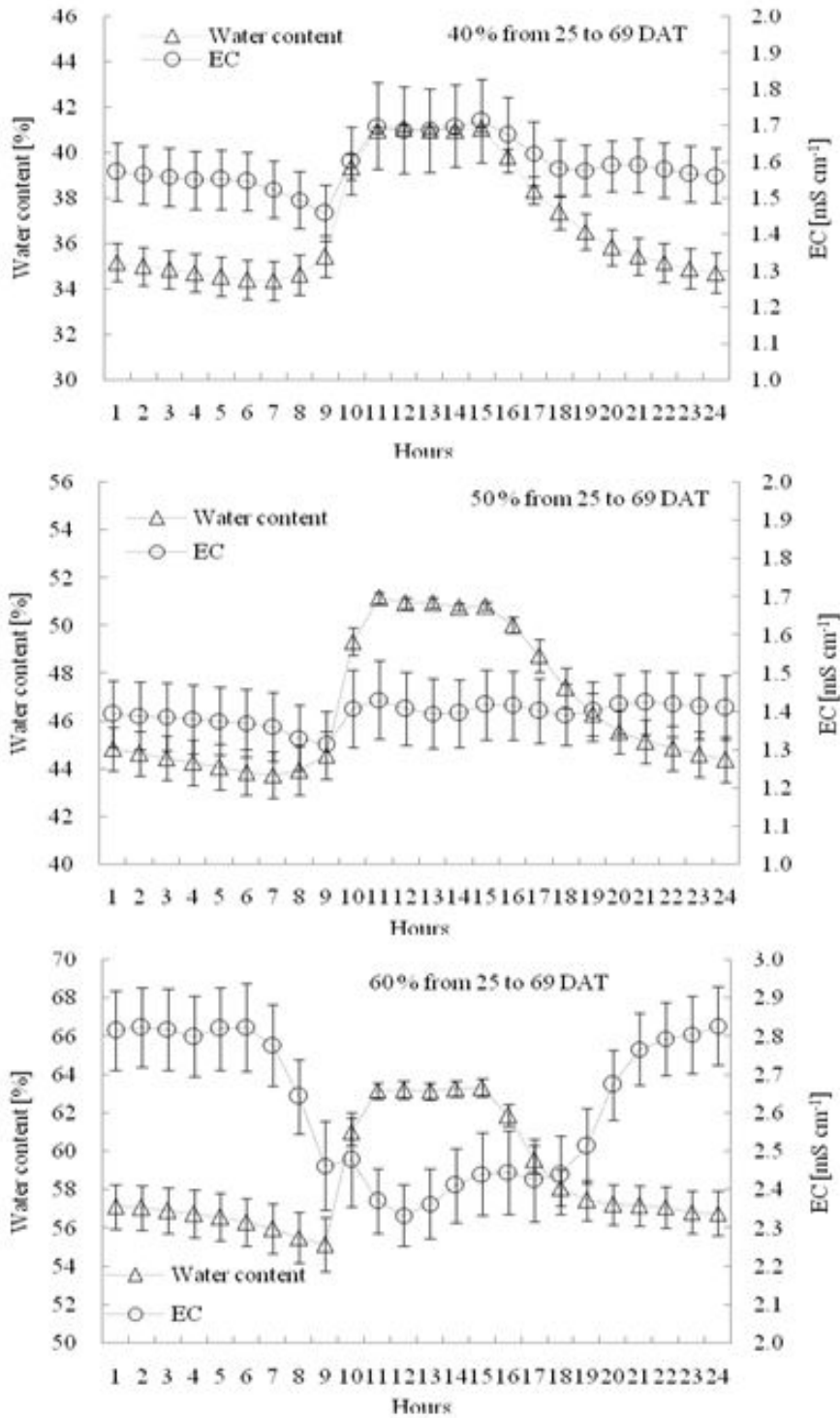


그림 3-4-11. 배지 내 수분함량 40%, 50%, 60% 및 EC 2.0 dS·m⁻¹ 제어 시 24시간동안 코코 피트 배지의 수분함량과 EC의 변화패턴. 정식 후 25일부터 69일까지 30개 조사구. 관수 개시 시간과 종료시간 오전 9시, 오후 3시.

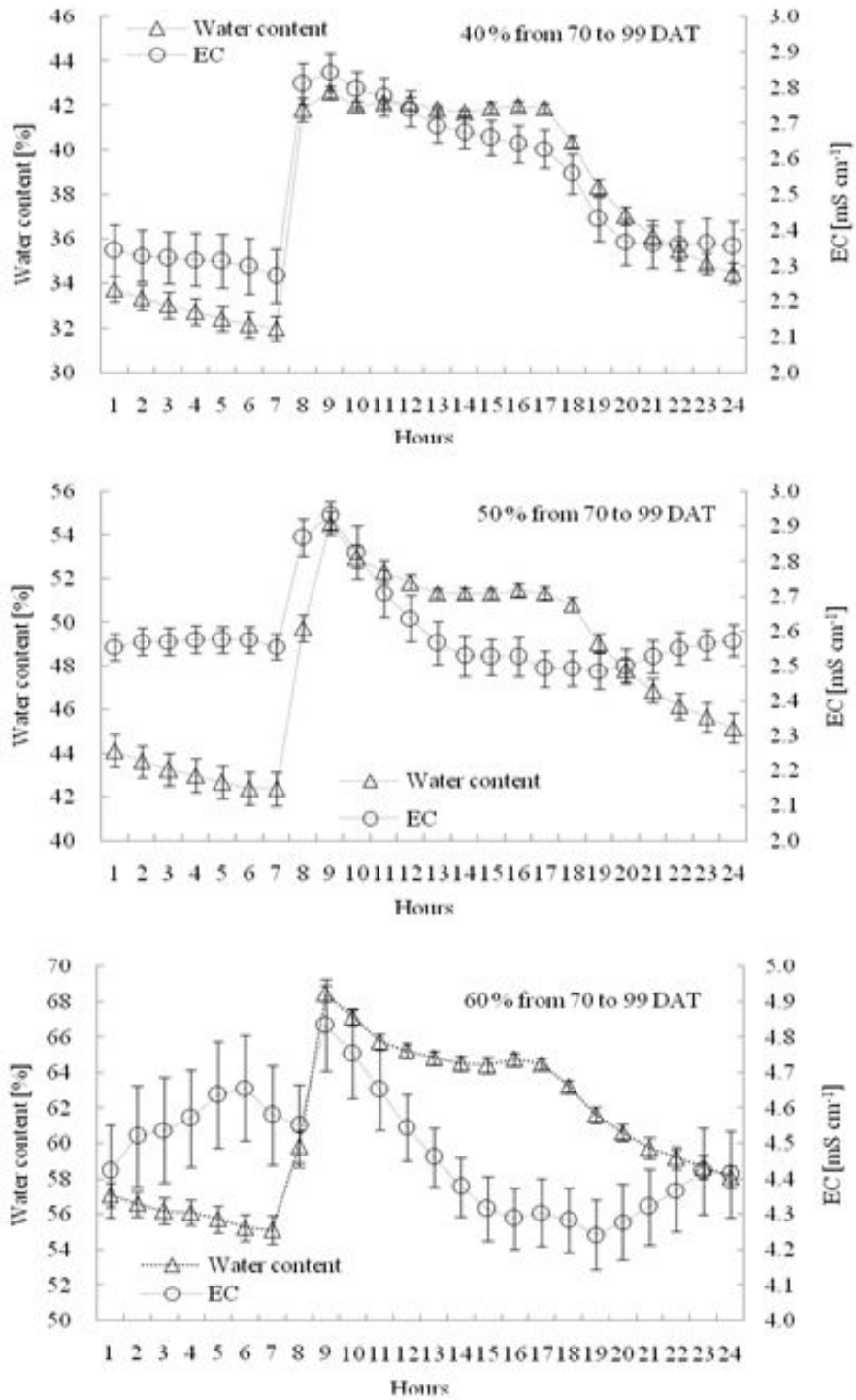


그림 3-4-12. 배지 내 수분함량 40%, 50%, 60% 및 EC 2.0 dS·m⁻¹ 제어 시 24시간동안 코코 피트 배지의 수분함량과 EC의 변화패턴. 정식 후 70일부터 99일까지 30개 조사구. 관수 개시 시간과 종료시간 오전 7시, 오후 5시.

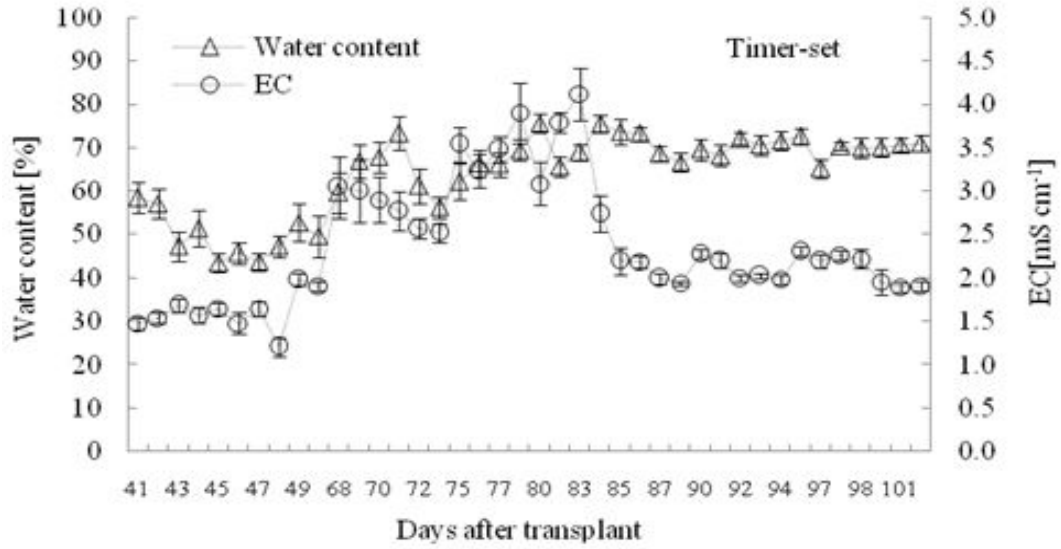


그림 3-4-13. 배지 내 수분함량 40%, 50%, 60% 및 EC 2.0 dS·m⁻¹ 제어 시 24시간동안 코코 피트 배지의 수분함량과 EC의 변화패턴. 정식 후 41일부터 102일까지 40개 조사구.

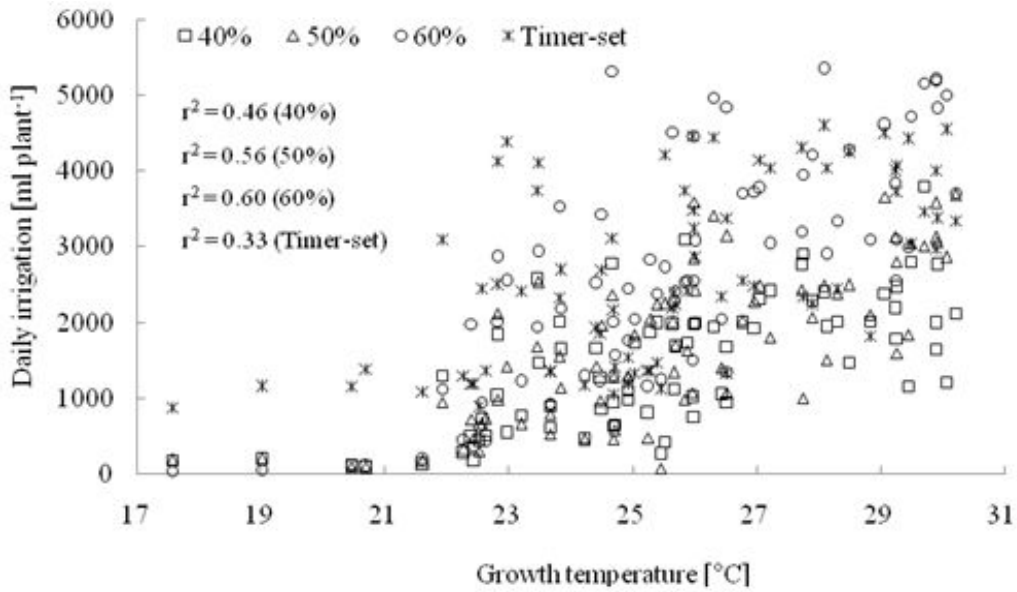


그림 3-4-14. 일평균 급액량과 생육온도의 상관관계. (정식 후 25일부터 102일간 78개구 조사)

표 3-4-6. 총 급액량중 시기별 급액량 비율, 평균 급액량, 평균배액률. 코코넛 코이어 배지의 수분함량을 FDR센서로 40,50,60%제어 혹은 타이머 제어

Volumetric water content (%)	40	50	60	Timer-set
	Timely irrigation volume to total volume (%)			
Hours	between 32 and 69 days after transplant (n=25)			
9 a.m. - 10 a.m.	44a	49a	43a	24efd
10 a.m. - 1 p.m.	34b	30bcd	31bc	49a
1 p.m. - 3 p.m.	23ef	21f	26cdef	27cde
Average irrigation (ml· plant ⁻¹ · day ⁻¹)	1122b	1182b	1977a	1874a
Average drainage (%)	0	0	22b	38a
	between 70 and 102 days after transplant (n=19)			
7 a.m. - 10 a.m.	40ab	38abc	44a	33bcde
10 a.m. - 1 p.m.	32cde	29e	27e	31de
1 p.m. - 5 p.m.	29e	33cde	29e	36bcd
Average irrigation (ml· plant ⁻¹ · day ⁻¹)	1911b	2314b	3465a	3696a
Average drainage (%)	0	0	0	23a

Data are represented with means of replications per treatment in a randomized block design. The irrigation-on and -off hours were set at 9 a.m. and 3 p.m. between 0 and 69 days after transplant (between the 1st of April and 8th of June, 2011), and at 7 a.m. and 5 p.m. between 70 and 102 days after transplant (between the 9th of June and 11th of July, 2011). Observations for average irrigation and drainage were made between 25 and 101 days after treatment. Different lowercase-letters are significantly different at P<0.05 by Duncan's Multiple Range Test(DMRT).

표 3-4-7. 정식 후 60일 후 완전히 전개된 토마토 잎의 광합성률 [$\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$], 증산률 [$\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$], 잎과 대기의 수증기압차 [VpdL: $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$], 기공전도도 [$\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$], 세포 내 CO₂ 농도 [$\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$].

Volumetric water content (%)	Photo	Trans	VpdL	Cond	InCO ₂
40	10.62b	4.235c	2.617a	0.162b	169a
50	11.67a	4.834b	2.571ab	0.197a	172a
60	12.20a	5.193a	2.548ab	0.208a	187a
Timer-set	11.67a	4.858b	2.508b	0.201a	177a

The data are represented with means of four replications per treatment in a randomized block design. The statistical values having lowercase-letters were significantly different at $P<0.05$ by Duncan's Multiple Range Test.

표 3-4-8. 과실 비대기, 정식 후 75일 후 전개된 토마토 잎의 수분포텐셜 (Mpa) 과 수분장력 (pF)

Volumetric water content (%)	Potential force (pF)	Water Potential (Mpa)
40	4.385a	-2.278c
50	4.218b	-1.590b
60	4.152c	-1.368a
Timer-set	4.130c	-1.317a

The data are represented with means of four replications per treatment in a randomized block design. The statistical values having lowercase-letters were significantly different at $P<0.05$ by Duncan's Multiple Range Test.

표 3-4-9. 배지 수분함량 40%, 50%, 60% 제어 및 타이머 관수 수경재배 토마토의 초장, 잎과 줄기 생체중, 엽수. 정식 후 102일 후.

Treatment	Plant height (cm·plant ⁻¹)	Leaf wt. (g·plant ⁻¹)	Stem wt. (g·plant ⁻¹)	Leaf number (no. plant ⁻¹)
40	169c	883d	418c	22.13c
50	182b	1075c	486b	23.50bc
60	191a	1544b	583a	24.63ab
Timer-set	184ab	1778a	576a	26.00a

The data are represented with means of four replications per treatment in a randomized block design. The statistical values having lowercase-letters were significantly different at $P<0.05$ by Duncan's Multiple Range Test.

표 3-4-10. 각 과실 화방로부터 수확된 토마토 과실의 특성. (측정기간: 2011년 6월 17일~7월 12일)

Cluster	Treatment	Fruit weight (g· fruit ⁻¹)	Fruit number (no.cluster ⁻¹)	Fruit sugar (°Brix)	BER (no. plant ⁻¹)
C1	40	211c	3.75a	5.98a	-
	50	244bc	4.87a	5.40b	-
	60	276ab	3.81a	5.41b	-
	Timer-set	289a	4.13a	4.90c	-
C2	40	194b	4.71a	6.49a	1.0a
	50	264a	4.07a	5.53b	1.3a
	60	254a	4.25a	5.49b	-
	Timer-set	291a	4.13a	4.87c	-
C3	40	137c	4.23a	6.28a	1.5a
	50	196b	3.87a	5.49b	1.5a
	60	213b	4.80a	5.67b	-
	Timer-set	277a	4.88a	4.76c	-
C4	40	120b	3.40b	6.44a	1.3a
	50	177a	3.00b	5.44b	1.3a
	60	160a	4.25ab	5.60b	-
	Timer-set	186a	5.14a	4.65c	-

The data are represented with the means of eight replications for C1, C2, C3 and C4 per treatment in a randomized block design. The statistical values having lowercase-letters are significantly different at P<0.05 by Duncan's Multiple Range Test (DMRT). The test was separately conducted for samples harvested from each fruit cluster.

표 3-4-11. 코코넛 코이어 배지 내 Ca, Mg, K, P (T-P), N (T-N) 함량 (이식 후 120일 후)

Treatment	Ca	Mg	K	T-P	T-N
			%		
40	1.26bc	0.38a	0.56b	0.040b	0.80b
50	1.63ab	0.42a	0.83ab	0.065a	1.05ab
60	2.00a	0.49a	0.92a	0.070a	1.15a
Timer	1.00c	0.18b	0.50b	0.075a	0.80b

The data are represented with the means of three replications per treatment in a randomized block design. The statistical values having lowercase-letters were significantly different at P<0.05 by Duncan's Multiple Range Test (DMRT). The test was separately conducted for samples harvested from each plant location.

3. 무배액 시스템에 적합한 급액의 적정 전기전도도 구명

1) 실험 목표

본 과제의 1차년에 수행한 실험의 결과에서 가을~겨울철 토마토 재배 작기에, 코코넛 배지 용적당 수분 함량을 40%이상 60% 이하로 조절하면, 전 재배 기간 동안 무배액 시스템을 유지할 수 있고 물과 비료량을 절약하고 배지 내 적절한 EC 수준으로 과실의 수량을 높일 수 있다는 결론을 얻었다. 이를 근거로 하여 배지의 수분함량 조절과 함께 급액의 최적 전기전도도를 설정하여 고품질의 토마토 무배액 수정재배 기술을 체계화 하고자 이 실험이 수행되었다.

2) 실험 수행 방법

(가) 재배환경

토마토 '스타벅1' 품종 (Starbuck F1, De Ruyter Seeds®)는 2011년 6월 10일에 파종 되었고 4개의 어린 묘는 각 코코넛 코이어 배지 슬라브 (100cm x 20cm x 10cm, dust:chip=100:0%, Sivanthi Joy, India, Sinsung®)에 0.33m 재식간격과 1.2m의 배지간 간격으로 8월 9일에 충청북도 충주시 건국대학교 (latitude 35°49'N and longitude 127°08'E)에 위치한 비닐온실에 정식 하였다. 정식 후 100배로 농축 조제된 유럽 토마토 배양액(the Glasshouse Crops Research and Experiment Station at Naaldwijk in the Netherlands)을 125 L 탱크에 수돗물 100 L에 희석되어 pH 5.8과 EC 2.0 또는 2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 맞춘 후 수증모터(55W, Hyupsin®)의 동력에 의해 급액 하였다. 4화방이 착과된 후인 9월 13일에 배양액 농도를 EC 2.0, 2.5 또는 3.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 조정하여 급액 하였다. 전 실험기간 동안 매일의 급액량을 측정하였다. 온실 내 CO_2 , 온도, 상대습도, 광도 변화는 ALMEMO®2890-9(AHLBORN, German)에 의해 30분 간격으로 측정되었다.

(나) FDR 수분센서 또는 타이머에 의한 자동관수 시스템

정식 후 FDR 수분센서 (WT1000N, Mirae-Sensor®, Korea)에 의한 급액을 시행 하였다. 배지 용적당 수분 함량이 45% 또는 55%에 도달 할 때 마다 급액이 중지되도록 처리하였고, 대조구로 타이머를 이용해 배지의 수분을 60-70%가 유지되도록 간이 FDR 센서 측정기 (COCO-100, Mirae-Sensor®, Korea) 로 모니터링 하면서 일정한 급액횟수 및 급액 간격으로 급액 하였다. 2011년 11월 2일 수확하기 전까지 관수개시 및 종료시간을 계절 변화에 따라 일출 1 시간 후 관수하여 일몰 3시간 전에 관수종료 하였다. 전 재배기간 동안 근권 내 수분함량과 EC 수준은 10분 간격으로 데이터 로거 (WT600, Mirae-Sensor®, Korea)에 저장되었다.

(다) 광합성을 분석

광합성 분석기기(model Li-6400, Li-CO, Lincoln, Nebraska, USA)를 이용하여 자연 CO_2 400-450 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 범위와 상대습도 50-60%, 광도(PAR, 1500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 조건으로 정식 후 30일과 60일 사이에 반복하여 잎의 광합성율 (Photosynthesis rate), 증산율 (transpiration rate), 잎과 대기의 수증기압차 ($V_p\text{dL}$), 기공전도도 (stomata conductance), 세포내 CO_2 (Intercellular CO_2) 농도를 관찰하였다.

(라) 배지 내 무기이온 농도 측정

근권내 무기이온 농도를 분석하기 위하여 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) (Perkin-Elmer Optima 4300/5300 DV)가 사용되었다.

(마) 생육조사

식물체 생육조사는 정식 후 102일째에 마지막 과실 수확을 한 후 실행되었고 수확기에 상품과 중, 화방별 과실 수확량 및 당도를 측정 하였다.

(바) X-ray computed tomography

정식 후 102일째에 마지막 과실 수확을 한 후 코코넛 코이어 슬라브에 토마토 식물체의 줄기 지체부를 잘라내고 그 내부의 뿌리만 남겨 건국대학교 메티칼 센터 (충청북도 충주시)에서 CT 촬영하였다.

(사) 통계분석

결과에서 얻은 데이터는 SAS 9.2 프로그램 (SAS Institute, Cary, NC)으로 ANOVA 분석하였고 실험은 완전임의설계법 (a completely randomized design)에 의하여 처리하였다.

3) 결과 및 고찰

배지의 수분을 45와 55%로 제어 하고 배양액의 EC 수준을 2.0 또는 2.5로 제어하기 시작하여 4화방에 과실이 착과되는 9월 13일에 EC 2.0, 2.5 또는 3.0dS·m⁻¹ 수준으로 공급했을 때 각각의 일일 평균 급액량에 통계적 유의차가 있었다 (표 3-4-12). 8월29일부터 9월 13일까지는 통계적 유의차를 보이지 않았으나 9월14일부터 11월 1일까지 측정된 결과에서 보면 45% 처리에서는 EC 2.5-3.0 처리구에서 2.0-2.0 처리구보다 평균 일일 급액량이 약 38.5% 감소되었다. 전 생육기간동안 (8월 29일부터 11월 1일 까지 전체적 데이터를 관찰했을 때), 45%에서는 과실결실기에 EC 수준을 증가함에 따라 급액량은 감소되어 다음과 같은 순서로 평균 급액량의 수치를 보였다; EC2.0-2.0 > EC2.0-2.5 > EC2.5-3.0. 배지 내 수분함량 55% 처리구에서는 45% 보다 전 생육기간 동안 평균 급액량이 EC2.0-2.0에서는 1.2배, EC2.0-2.5에서는 1.3배, EC2.5-3.0에서는 1.5배 높게 공급되었고 EC 2.0-2.0처리구에서는 타이머 제어에 의한 급액량과 차이가 없는 것으로 나타났다. 55% 처리구에서는 과실결실기에 EC 수준을 증가함에 따라 급액량이 감소되어 다음과 같은 순서로 평균 급액량의 수치를 보였다; EC2.0-2.0 > EC2.0-2.5 > EC2.5-3.0. 타이머 제어구에서 일일 평균 급액량이 2.3L로 55% 처리구의 EC2.0-2.0 처리에서와 비슷한 수치를 보였다. 배양액의 전기전도도(EC: Electrical conductivity)를 달리하여 공급하였을 때 24시간 변화된 배지 내 수분 함량은 배지 내 EC변화와 밀접한 관련이 있었다. 가장 주목할 만한 결과로는 배지 수분함량을 45%로 제어 했을 때 배지 내 EC가 EC2.0-2.0이나 EC2.5-3.0 처리구에서 다른 처리구 보다 낮았고 배지 내 수분도 다른 처리구에 비해 낮게 유지되었고 (그림 3-4-15~16), 배지 내 무기이온 함량도 낮게 유지되었다 (표 3-4-16). 이 결과는 다음과 같이 설명될 수 있다. 첫째, EC2.0-2.0처리에서는 배지 수분함량 45%나 55%처리 모두에서 수분포텐셜과 관련하여 식물뿌리에 의한 수분 및 양분 흡수량이 균형을 이루며 높았을 것으로 추정되고 그 결과로 배지 내 수분이 낮게 유지된 것으로 고찰된다. 둘째, EC2.5-3.0

처리에서, 특히 배지 수분함량이 45%로 유지된 환경에서, 급격히 급액량이 감소한 것은 양분의 고농도에 의한 뿌리발달 저해의 결과와 관련이 있고 (그림 3-4-18), 이로 인해 수분 흡수량이 감소되어 점차 급액량 감소의 결과를 가져온 것으로 판단된다 (표 3-4-12). 하지만 배지 내 수분함량이 55%로 유지된 환경에서는 EC2.0-2.5나 EC2.5-3.0 처리구에서 배지 내 수분 변화, EC농도 (그림 3-4-15~16) 및 무기이온 농도 변화 (표 3-4-16)에 큰 차이를 보이지 않았다. 비록 55% 처리구에서도 과실결실기에 EC 수준을 증가함에 따라 EC2.0-2.0 > EC2.0-2.5 > EC2.5-3.0 순서로 평균 급액량의 수치를 보였지만 그 차이가 45% 처리보다는 작았고 과실결실기 이전에는 EC별 급액량 차이가 없었던 것과 관련이 있다. 이와 같이 급액의 EC 수준이 배지 내 수분함량을 변화시킨 것은 위에서 언급한 일일 급액량의 차이에 기인한 것이고 이러한 결과는 배양액의 EC 농도수준에 따라 식물뿌리에서의 수분흡수 및 생육발달이 변화되고 이러한 식물 생리학적 변화에 따라 FDR 센서는 급액이 조절된 것으로 판단된다. 반면, 타이머에 의한 급액방식(EC2.0-2.0처리)에서는 전 재배기간 동안 배지 수분이 60-70%로 유지되었고 EC농도는 2.0-2.5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 유지되었지만 (그림 3-4-17), 기후 변화에 따라 배액이 발생하여 수분과 양분의 손실을 초래하고 환경오염의 원인을 낳게 되므로 FDR 센서에 의한 급액 스케줄은 타이머에 의한 급액방식에 비해 식물 친화적 방식이라고 고찰되어진다. 평균 일일 급액량이 배양액의 EC수준에 영향을 받은 것에 비해 잎의 광합성 효율에는 통계적 유의차를 보이지 않았고 EC 수준에 관계없이 45%, 55% 또는 타이머에 의해 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다 (표 3-4-13). 이는 여름재배가 아닌 늦가을과 겨울시기에 이루어진 재배에서 나타난 결과라고 고찰되어진다. 다른 처리구에 비해 타이머로 배양액을 EC 2.0으로 관리했을 때 엽과 줄기 생체중 및 엽수가 가장 높았고 배지 수분함량을 45%로 제어하고 배양액 EC 수준을 2.5에서 3.0로 높였을 때 엽과 줄기의 생체중이 가장 낮았다. 배지 수분함량을 55%로 제어한 경우 배양액 EC 수준은 생육에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다 (표 3-4-14). 다른 처리구에 비해 타이머로 배양액을 EC 2.0으로 관리했을 때 과실중이 가장 높았고 배지 수분함량을 45%로 제어하고 배양액 EC 수준을 2.5에서 3.0로 높였을 때 가장 낮았다. 배지 수분함량을 55%로 제어한 경우 배양액 EC 수준은 과실 수확량에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 나타났다 (표 3-4-15). 과실당도는 45% 제어구에서 급액 EC를 2.5에서 3.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 높여 공급하였을 때 6.3°Brix로 가장 높았고 타이머에서 4.7°Brix로 가장 낮았다. 그 외 제어구들에서는 통계적 유의차가 없었다. 따라서 배지 수분 함량을 45%로 유지할 경우 급액 EC를 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 이상으로 공급하면 생육 및 과실 품질이 저하 되었고 배지 수분 함량을 55%로 유지할 경우 급액 EC를 3.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 공급하여도 당도 및 상품과 크기에 차이가 없었으므로 두 제어구 모두 급액 EC를 2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 공급하는 것이 보다 경제적이라 판단된다. 본 실험에서 배지 용적당 수분함량을 40, 50, 60%로 설정하고 FDR센서에 의해 급액을 실시하였을 때 1m 길이의 배지 내 수분함량의 변동계수는 최저 4%에서 최대 38%였다 (표 3-4-16). 이는 FDR 센서에 의해 무배액이나 배액 극소화 방식으로 재배 할 때 FDR 센서에 의해 측정되어 지는 배지 내 국부적 수분함량 차이가 있음을 나타낸다. 이를 줄이기 위해 최적 급액 관리 범위를 제시하기 위한 연구가 필요하다.

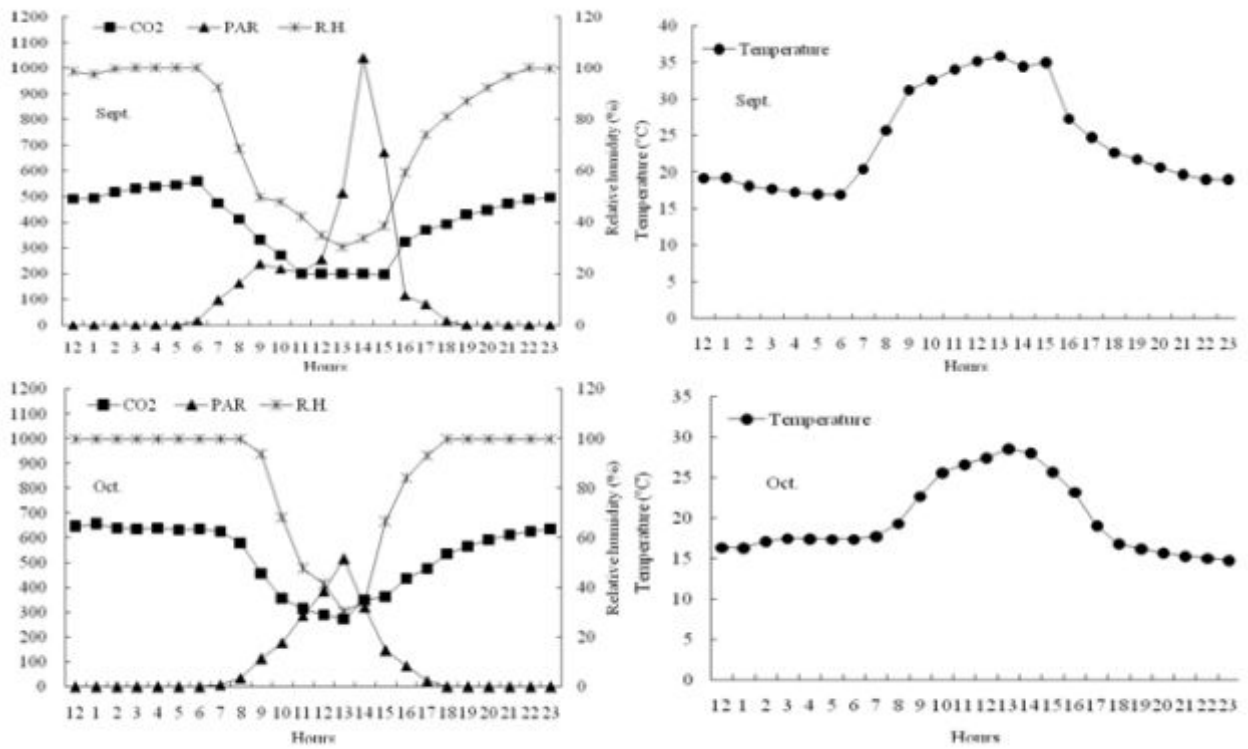


그림 3-4-15. 9월~10월간 온실 내의 CO₂, 유효광합성량(PAR), 상대습도, 온도

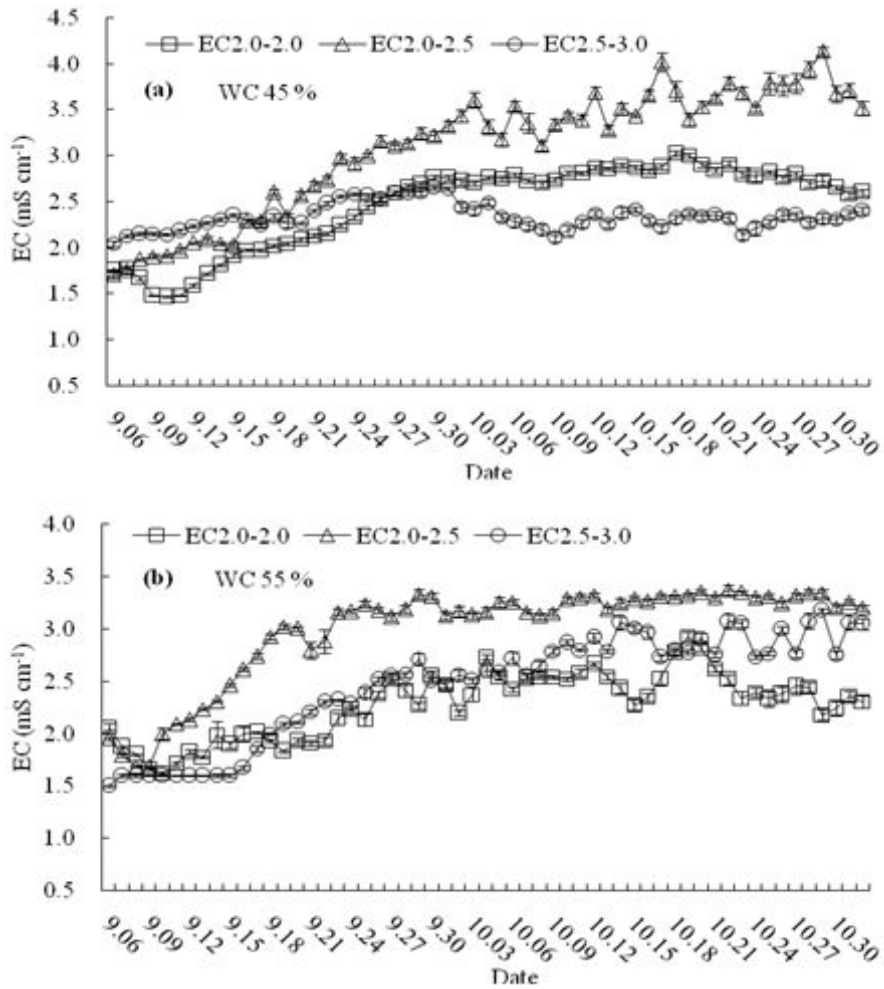


그림 3-4-16. 배지 내 수분함량이 45%(a) 또는 55% (b)일 때 코코넛 코이어 배지에서의 EC (2011년 9월 14일~11월 2일까지, 배양액은 EC 2.0-2.0, EC2.0-2.5, EC2.5-3.0까지 조절하여 공급)

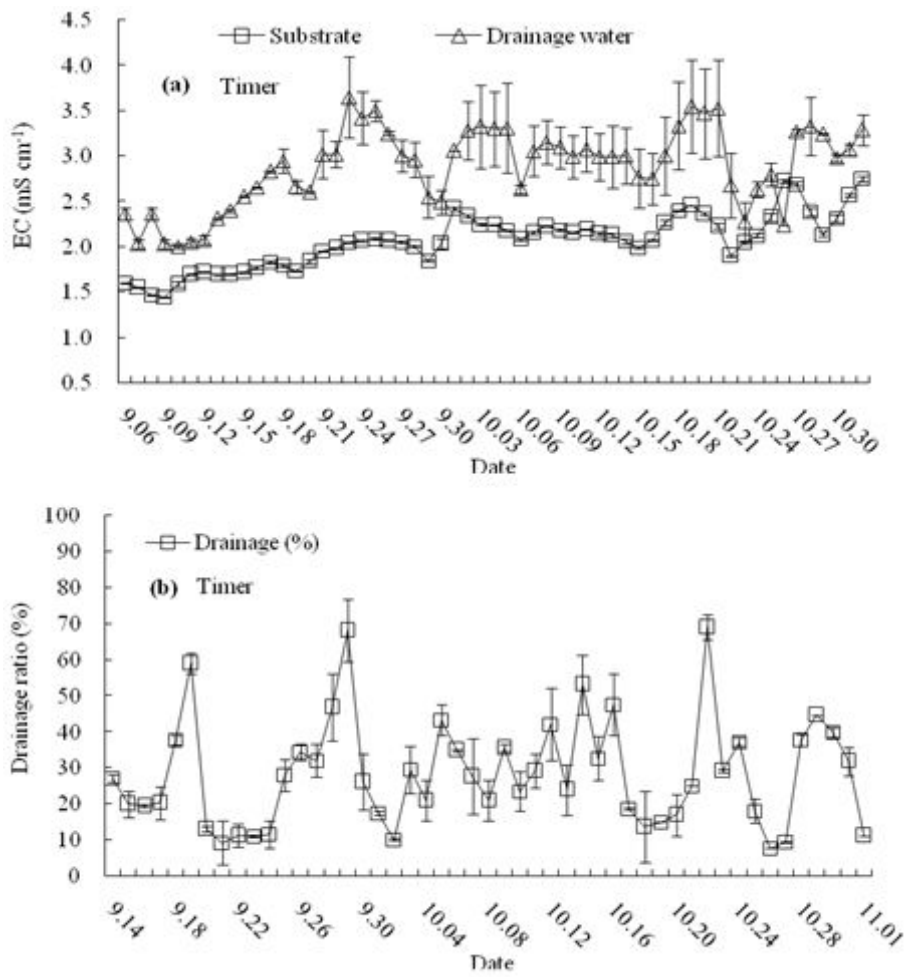


그림 3-4-17. 관수가 타이머에 의해 조절될 때 코코넛 코이어 배지에서의 배액 EC(a), 배액의 비율(b) (배양액은 2011년 9월 14일 ~ 11월 2일 까지, EC 2.0dS·m⁻¹로 공급)

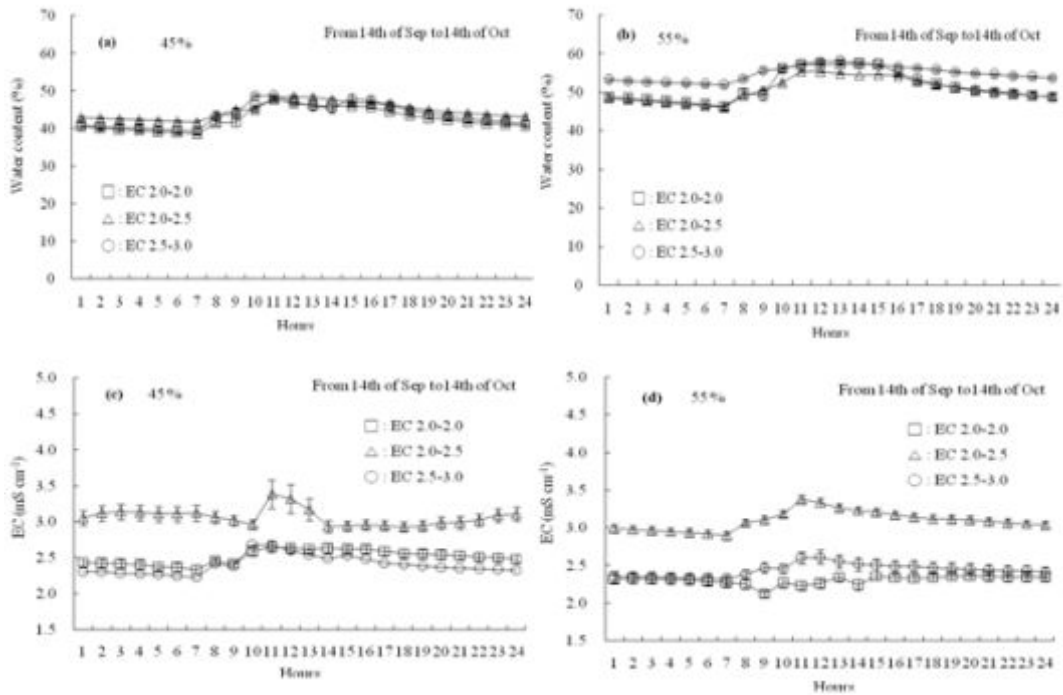


그림 3-4-18. 배지 내 수분함량이 45% 또는 55%로 조절될 때 24시간 동안 코코넛 코이어 배지 내 수분 함량(a, b)과 EC(c, d), 배양액은 EC2.0-2.0, EC2.0-2.5, EC2.5-3.0으로 조절(2011년 9월 14일- 11월 2일)

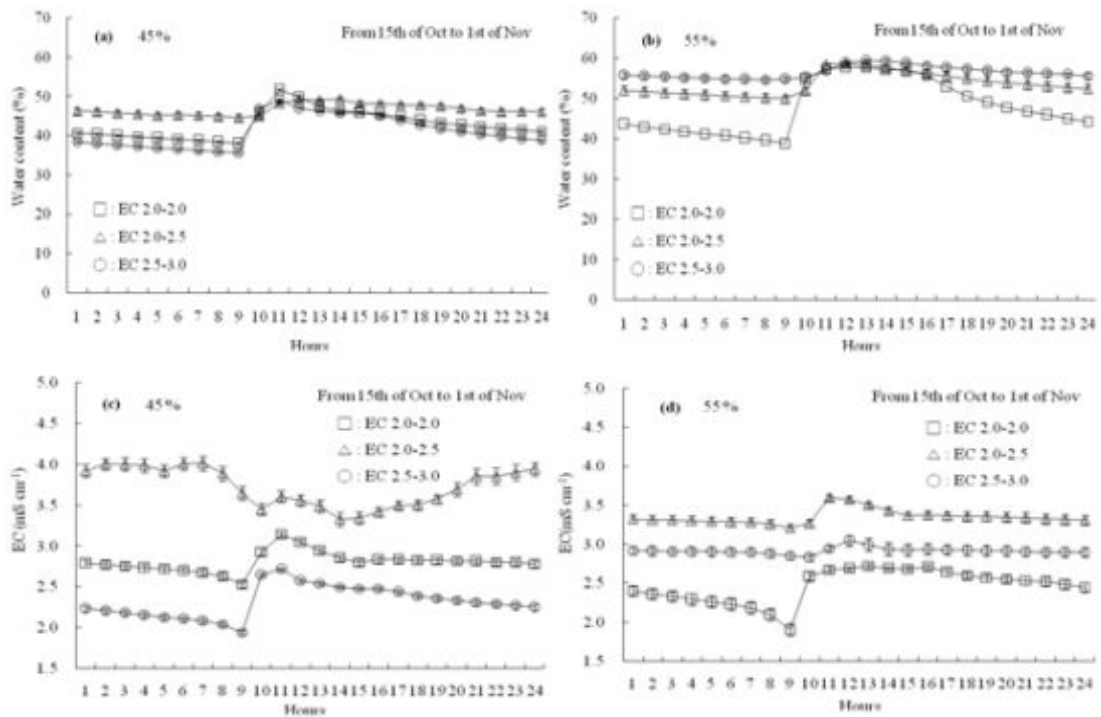


그림 3-4-19. 배지 내 수분함량이 45-55%로 조절될 때, 24시간 동안 코코넛 코이어 배지 내 수분 함량(a, b)과 EC(c, d), 배양액은 EC2.0-2.0, EC2.0-2.5, EC2.5-3.0으로 조절되어 공급(2011년 9월 14일- 11월 2일)

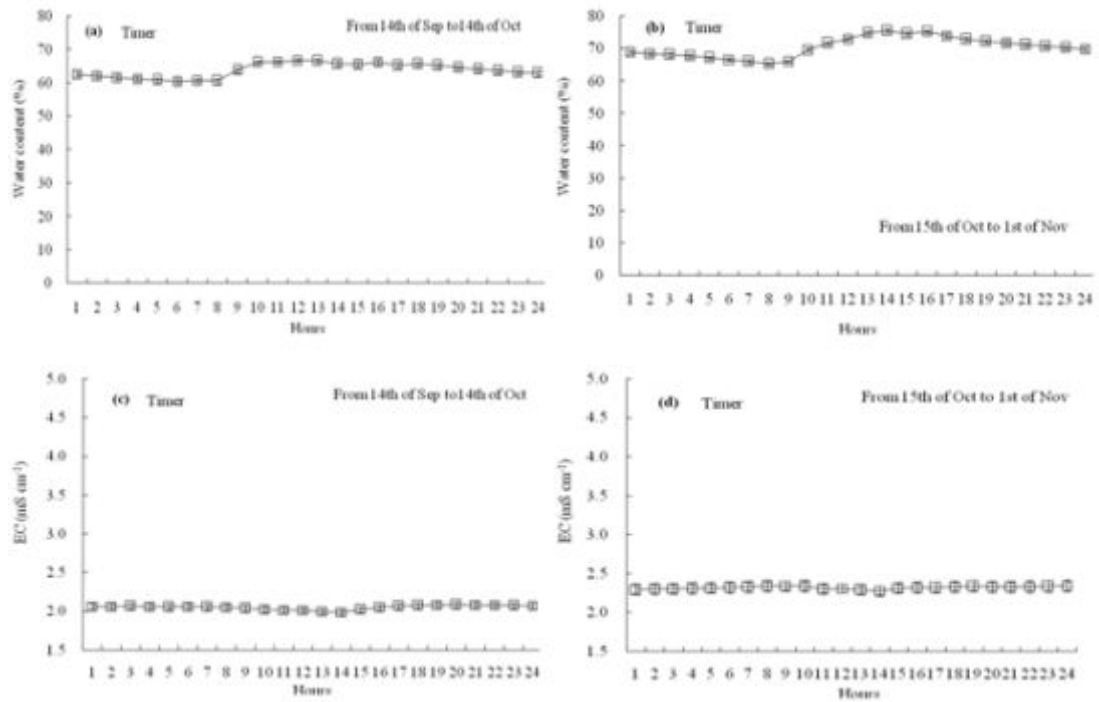


그림 3-4-20. 배지 내 수분함량이 타이머에 의해서 조절되고 전체 조사 기간 동안 배양액 내 EC.2.0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 조절될 때, 24시간 동안 코코넛 코이어 배지에서의 수분 함량(a, b)과 EC(c, d)

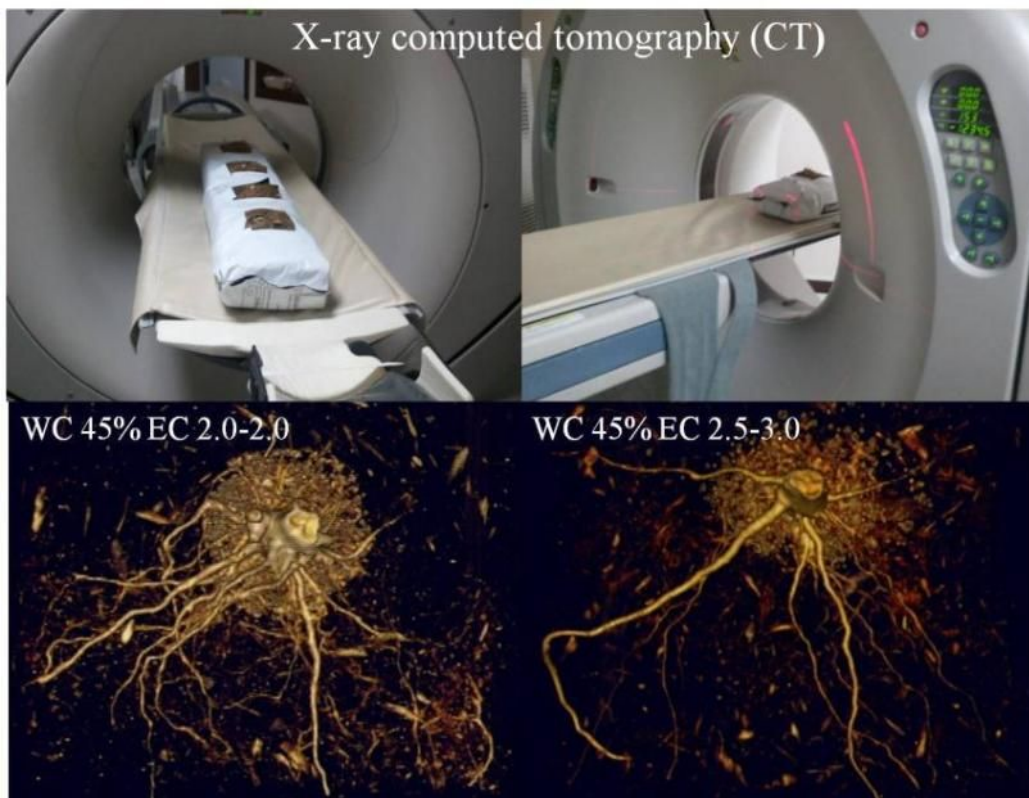


그림 3-4-21. X-ray computed tomography에 의해 표현된 토마토 뿌리 사진

표 3-4-12. FDR센서에 의해 45 또는 55%로 조절하거나 타이머로 관수했을 때의 일평균 관수량과 EC

WC (%)	EC treatments	Irrigation volume (ml·plant ⁻¹ ·day ⁻¹)	
		29 th of Aug. to 13 th of Sep.	14 th of Sep. to 1 st of Nov.
45	2.0-2.0	873 b	1836 c
	2.0-2.5	703 b	1651 d
	2.5-3.0	701 b	1134 e
55	2.0-2.0	1328 a	2352 b
	2.0-2.5	1573 a	1900 c
	2.5-3.0	1590 a	1500 d
Timer	2.0	1652 a	2551 a

Nutrient solution with EC 2.0 or 2.5 mS cm⁻¹ was supplied until about the time of fruit setting on the 4th cluster after transplant between 24th of August and 13th of September, and then the EC level was adjusted from 2.0 to 2.0 (EC2.0-2.0), 2.0 to 2.5 (EC2.0-2.5), or 2.5 to 3.0 dS·m⁻¹ (EC2.5-3.0) until the end of the growing season between 14th of September 2011 (39 DAT) and 2nd of November 2011 (88 DAT). Different lowercase letters are significantly different at P < 0.05 by Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

표 3-4-13. FDR센서에 의해 45 또는 55%로 조절하거나 타이머로 관수했을 때의 수분함량과 EC에 따른 초장, 잎과 줄기의 생체중, 엽수 (70일간 성장한 토마토)

WC (%)	EC (dS·m ⁻¹)	Plant height (cm·plant ⁻¹)	Leaf fwt.z (g·plant ⁻¹)	Stem fwt. (g·plant ⁻¹)	Leaf number (no. plant ⁻¹)
45	2.0-2.0	213 b	825 b	453 b	25 b
	2.0-2.5	213 b	725 b	321 c	26 ab
	2.5-3.0	209 b	335 c	238 d	20 c
55	2.0-2.0	239 a	720 b	350 c	27 ab
	2.0-2.5	223 ab	833 b	355 c	26 ab
	2.5-3.0	206 b	790 b	318 c	27 ab
Timer	2.0-2.0	246 a	1447a	545 a	30 a

z: fresh weight.

Nutrient solution with EC 2.0 or 2.5 dS·m⁻¹ was supplied until about the time of fruit setting on the 4th cluster after transplant between 24th of August 2011 and 13th of September 2011, and then the EC level was adjusted from 2.0 to 2.0 (EC2.0-2.0), 2.0 to 2.5 (EC2.0-2.5), or 2.5 to 3.0 mS cm⁻¹ (EC2.5-3.0) until the end of the growing season between 14th of September 2011 (39 DAT) and 2nd of November 2011 (88 DAT). The stem above the 4th cluster was pinched. Different lowercase-letters are significantly different at P < 0.05 by Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

표 3-4-14. FDR센서에 의해 45 또는 55%로 조절하거나 타이머로 관수했을 때의 수분함량과 EC에 따른 토마토의 상품과 무게(100g이상), 상품과의 수, 가용성 고체 함량.

WC (%)	EC (dS·m ⁻¹)	Marketable Fruit weight (g· fruit ⁻¹)	Marketable Fruit number (no plant ⁻¹)	Soluble solid content (°Brix)
45	2.0-2.0	152 b	54 a	5.43 b
	2.0-2.5	143 bc	51 a	5.79 b
	2.5-3.0	128 c	34 b	6.33 a
55	2.0-2.0	161 b	52 a	5.81 b
	2.0-2.5	154 b	56 a	5.37 b
	2.5-3.0	147 b	52 a	5.73 b
Timer	2.0-2.0	191 a	51 a	4.66 c

Nutrient solution with EC 2.0 or 2.5 dS·m⁻¹ was supplied until about the time of fruit setting on the 4th cluster after transplant between 24th of August 2011 and 13th of September 2011, and then the EC level was adjusted from 2.0 to 2.0 (EC2.0-2.0), 2.0 to 2.5 (EC2.0-2.5), or 2.5 to 3.0 mS cm⁻¹ (EC2.5-3.0) until the end of the growing season between 14th of September 2011 (39 DAT) and 2nd of November 2011 (88 DAT). The stem above the 4th cluster was pinched. Different lowercase-letters are significantly different at P < 0.05 by Duncan's Multiple Range Test (DMRT). The observation had been made between 4th of October 2011 and 2nd of November 2011.

표 3-4-15. FDR센서에 의해 45 또는 55%로 조절하거나 타이머로 관수했을 때의 수분함량과 EC에 따른 이식 후 70일 된 코코넛 코이어 배지내에서의 Ca, Mg, K, P (T-P)의 함량

WC (%)	EC (dS·m ⁻¹)	Ca	Mg	K	T-P
		g·100g ⁻¹			
45	2.0-2.0	2.01 b	0.35 c	1.40 cd	0.04 c
	2.0-2.5	2.76 ab	0.37 c	2.20 b	0.08 a
	2.5-3.0	2.67 ab	0.39 c	2.15 bc	0.05 b
55	2.0-2.0	2.57 ab	0.40 c	1.45 bcd	0.04 bc
	2.0-2.5	3.86 a	0.46 b	2.99 a	0.09 a
	2.5-3.0	3.96 a	0.55 a	3.64 a	0.09 a
Timer	2.0-2.0	1.69 b	0.27 d	1.02 d	0.05 b

Different lowercase letters are significantly different at P < 0.05 by Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

표 3-4-16. 배지의 수분 함량이 FDR센서에 의해 40, 50, 60%로 조절될 때 6일 동안 배지 수분 함량의 공간 변이성과 균일계수

Days	Substrate water content (WC, %)	Spatial variability of WC (Average, %)	Coefficient of Variationy
1	40	41.9(±3.0) _z	25
	50	48.6(±0.5)	4
	60	54.7(±1.2)	8
2	40	46.4(±1.5)	11
	50	53.8(±5.8)	38
	60	58.0(±3.5)	21
3	40	38.8(±2.2)	20
	50	48.7(±2.3)	16
	60	56.3(±5.3)	32
4	40	47.6(±3.1)	23
	50	58.5(±2.6)	15
	60	65.0(±4.1)	22
5	40	43.4(±1.7)	14
	50	50.4(±2.5)	17
	60	60.4(±2.9)	17
6	40	46.8(±3.1)	23
	50	50.6(±2.4)	16
	60	62.0(±2.9)	16

z: standard errors

y: Coefficient of variation = {(standard deviation/average) x 100}

Three replicated measurements for each slab were conducted, and total 4 slabs were measured for each treatment using a portable FDR water sensor (Coco 100, Mirae-Sensor®, Korea).

4. 무배액 시스템에 적합한 코이어 배지 조성 성분 구명

(1) 실험 목표

FDR 센서에 의한 무배액 수경재배 기술을 체계화 하고자 코이어 배지 슬라브의 chip과 dust 함량 비율 차이에 따른 급액량, 배지의 용적당 수분함량, 근권 EC농도 변화, 식물생육, 과실 수량 및 수분이용효율을 측정하고자 이 실험이 수행되었다.

(2) 실험 수행 방법

(가) 재배환경

토마토 '스타벅1' 품종 (Starbuck F1, De Ruiter Seeds®)는 2012년 2월 1일에 파종 되었고 4개의 어린 묘는 코이어 배지 슬라브 (100cm x 20cm x 10cm, chip:dust (v/v) = 0:100%, 30:70%, 50:50%, 70:30%, Sivanthi Joy, India)와 직접 제작된 이층 구조 슬라브(100cm x 20cm x 10cm, chip in lower layer : dust in upper layer (v/v)= 15:85%, 25:75%, 35:65%), 또는 락울 슬라브에 0.33m 재식간격과 1.2m의 배지 간 간격으로 2012년 3월 16일에 충청북도 충주시 건국대학교 (latitude 35°49'N and longitude 127°08'E)에 위치한 비닐온실에 정식하였다. 정식 전 배지 내 수분의 EC가 0.3 dS·m⁻¹의 수준에 이를 때 까지 수돗물 (EC 0.15 dS·m⁻¹, pH 6.2)로 배지를 세척하였다. 정식 후 100배로 농축 조제된 유럽 토마토 배양액(the Glasshouse Crops Research and Experiment Station at Naaldwijk in the Netherlands)을 125 L 탱크에 수돗물 100 L에 희석되어 pH 5.8과 EC 2.0 dS·m⁻¹ 로 맞춘 후 수중모터(55W, Hyupsin®)의 동력에 의해 급액 하였다. The nutrient solution composition was in the following: Nitrate nitrogen (NO₃-N) 13.75 milliequivalent L⁻¹(meL⁻¹); ammonium nitrogen(NH₄-N) 1.25 meL⁻¹; P 3.75 meL⁻¹; potassium(K) 8.75 meL⁻¹; calcium(Ca) 8.5 meL⁻¹; magnesium(Mg) 4.0 meL⁻¹; sulfur(S) 7.5meL⁻¹; Fe 0.84 ppm, Mn 0.55 ppm, Zn 0.33 ppm, Cu 0.05 ppm, B 0.33 ppm, Mo 0.05 ppm. 매일의 급액량 및 소량으로 배출되는 배액량도 측정하였다. 온실 내 CO₂, 온도, 상대습도, 광도 변화는 ALMEMO®2890-9(AHLBORN, German)에 의해 30분 간격으로 측정되었다.

(나) FDR 수분센서 또는 타이머에 의한 자동관수 시스템

정식 후 FDR 수분센서 (WT1000N, Mirae-Sensor®, Korea)에 의해 급액일정에 따라 시행 하였다 (표3-4-17). 배지 용적당 수분 함량이 설정치에 도달 할 때 마다 급액이 중지되는 방식으로 일정한 급액횟수 및 급액 간격으로 급액 하였다. 2012년 7월 12일 수확하기 전까지 관수개시 및 종료시간을 계절 변화에 따라 일출 1 시간 후 관수하여 일몰 3시간 전에 관수종료 하였다. 전 재배기간 동안 근권 내 수분함량과 EC 수준은 10분 간격으로 데이터 로거 (WT600, Mirae-Sensor®, Korea)에 저장되었다.

(다) 광합성을 분석

광합성 분석기기(model Li-6400, Li-CO, Lincoln, Nebraska, USA)를 이용하여 자연 CO₂ 400-450 μmol·mol⁻¹ 범위와 상대습도 50-60%, 광도(PAR, 1500 μmol·m⁻²·s⁻¹ 조건으로 정식 후

30일과 60일 사이에 반복하여 잎의 광합성율 (Photosynthesis rate), 증산율 (transpiration rate), 잎과 대기의 수증기압차 (VpdL), 기공전도도 (stomata conductance), 세포내 CO₂ (Intercellular CO₂) 농도를 관찰하였다.

(라) 배지 내 무기이온 농도 측정

근권내 무기이온 농도를 분석하기 위하여 Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES) (Perkin-Elmer Optima 4300/5300 DV)가 사용되었다.

(마) 생육조사

식물체 생육조사는 정식 후 102일째에 마지막 과실 수확을 한 후 실행되었고 수확기에 상품과중, 화방별 과실 수확량 및 당도를 측정 하였다.

(바) 통계분석

결과에서 얻은 데이터는 SAS 9.2 프로그램 (SAS Institute, Cary, NC)으로 ANOVA 분석하였고 실험은 완전임의설계법 (a completely randomized design)에 의하여 처리하였다.

(3) 결과 및 고찰

정식 후 24일에서 99일 사이에 측정된 일일 평균 급액량은 chip: dust (v/v) 비율이 30:70% 배지에서 2.422 L, 이층배지 25:70%에서 2.495 L로 다른 배지들 보다 높게 나타났다 (표 3-4-18). 반대로, chip: dust (v/v) 비율이 70:30% 배지에서 일일 평균 급액량이 1.858 L로 가장 낮았다. 총급액량도 같은 결과를 얻었다. 실험에 사용된 모든 배지에서 배출된 배액의 양은 매우 미비 하였고 특히 chip: dust (v/v) 비율이 0:100% 배지와 rockwool 배지에서는 배액이 전혀 발생되지 않았다. 정식 후 52일 부터 99일까지 오전 10시에서 오후 1시까지, 오후 1시에서 3시까지, 오후 3시부터 5시까지 공급된 급액량을 관찰한 결과 모든 배지에서 오전 7시에서 오전 10시까지의 3시간 동안 급액된 물량이 오전 10시부터 오후 1시간 동안 급액된 물량보다 더 많은 것으로 나타났고 chip: dust (v/v) 비율이 0:100%, 30:70%와 35:65% 배지에서 그 특징이 다른 처리보다 명확한 것을 알 수 있었다 (표 3-4-17). 배지의 용적 당 수분함량은 전 배지에서 50%~70%를 유지하였고 0:100% 배지에서 근권 내 수분함량 변화폭이 큰 것으로 나타났다 (그림 3-4-22, 그림 3-4-24). 이는 식물의 생육과 수량이 0:100%배지에서 가장 높았던 것과 관련하여 근권 내 수분 흡수가 활발히 일어난 것으로 고찰되어 진다. EC농도는 전 재배 기간 동안 2.0~4.0 dS·m⁻¹범위를 유지하였다(그림 3-4-22). 정식 후 102일에 측정된 식물의 생육은 chip: dust (v/v) 비율이 rockwool배지에서 가장 낮게 나타났고 0:100% 배지에서 가장 높게 나타났다 (표 3-4-18). 광합성 속도와 기공 전도도는 처리간 차이가 없었으나 증산 속도는 이층 배지에서 재배 된 식물의 앞에서 다소 높았다 (표 3-4-20). chip: chip (v/v) 비율이 0:100%로 조성된 배지에서 재배된 토마토가 다른 배지에서 재배된 토마토 보다 상품과중 및 상품과 수량이 두 배 가량 높은 것으로 나타났다 (표 3-4-19). dust과 chip을 슬라브 내에 이층구조 (two-story: dust at top and chip at bottom)로 조성한 배지 (chip : dust (v/v)= 15:85%, 75:25% 또는 35:65%)에서 재배된 토마토는 0:100% 배지보다는 수량이 낮지만 50:50%, 70:30% 및 rockwool 배지 보다는 상품과중 및 상품과 수량이 높으면서 당도도 높은 결과를 얻었다. 이러한 결과는 수분이용효율 (WUE)과 관련이 있었다. WUE 값은 chip의 함량이 높을수록 낮

아지는 경향을 보여서 수분이용효율은 0:100% 배지에서 가장 높았다 (표 3-4-23). 또한 정식 후 24일에서 99일 사이에 측정된 일일 급액 패턴은 chip과 dust의 비율이나 판매 배지와 이층 배지 구조에 따라 다양한 것을 알 수 있었다 (그림 3-4-24). 이는 배지의 물리적 특성에 따라 1회 급액량과 급액 대기 시간을 조절하지 않고 모든 배지에 공통된 조건으로 급액 하였기 때문이다. 따라서 더 세밀한 연구가 필요하다고 고찰된다. FDR 센서에 의존한 급액이라도 1회 급액량과 급액 대기시간 조절로 배지 내 국부적 함수율 변이계수를 감소시키며 수분이용 효율을 최대화 하여 최적의 생육과 고품질 과실 생산을 얻기 위한 정밀 연구가 필요하다.

표 3-4-17. 정식(3월 16일)후 FDR센서에 의해 조절되는 코이어 배지 내 수분함량 목표량과 일별 관수 시간

Days	DAT (days after transplant)	Daily duration of Irrigation	Targets of volumetric water content
16 th March - 10 th April	0~25	9:00-15:00	50 %
11 th April - 7 th May	26~52	9:00-15:00	53 %
8 th May - 15 th May	53~60	7:00-17:00	55 %
16 th May - 17 th May	61~62	7:00-17:00	57 %
18 th May - 21 th May	63~66	7:00-17:00	60 %
22 th May - 14 th June	67~90	7:00-17:00	65 %
15 th May - 26 th June	91~102	7:00-17:00	67 %

표 3-4-18. FDR센서로 조절되는 코이어 배지에서 chip과 dust 비율에 따른 일평균 관수량, 전체 관수량, 침출액의 양(정식 후 24-99일간 측정)

Substrates	Ratio (chip:dust)	Daily-averaged Irrigation volume (ml· plant ⁻¹ ·day ⁻¹)	Total irrigation volume for 75 days (L· plant ⁻¹) _Z	Total leachate volume for 75 days (L· plant ⁻¹)
commercial slab	0:100	2129 bcd	160 abc	0
	30:70	2422 a	182 ab	0.22(±0.25)
	50:50	2279 abc	171 ab	0.53(±0.29)
	70:30	1858 c	139 c	1.45(±0.68)
	Rockwool	2109 bc	153 bc	0
two-story slab	15:85	2079 bc	156 bc	2.28(±0.88)
	25:75	2495 a	187 a	2.32(±0.96)
	35:65	2396 ab	171 ab	1.91(±0.72)

Z: standard deviation for two replications.

Different lowercase-letters are significantly different at $P < 0.05$ by Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

표 3-4-19. FDR센서로 조절되는 코이어 배지에서 chip과 dust 비율에 따른 토마토의 초장, 잎과 줄기의 생체중, 엽수(정식 후 70일된 토마토)

Substrates	Ratio (chip: dust)	Plant height (cm· plant ⁻¹)	Leaf fwt. (g· plant ⁻¹)	Stem fwt. (g· plant ⁻¹)	Leaf number (no. plant ⁻¹)
commercial slab	0:100	195 a	1718 a	628 a	29.25 a
	30:70	186 a	1495 ab	571 ab	28.13 a
	50:50	177 ab	1171 c	510 b	27.75 a
	70:30	179 ab	1231 bc	563 ab	28.33 a
	Rockwool	168 b	1575 a	570 ab	29.29 a
two-story slab	15:85	182 ab	1488 ab	579 ab	28.25 a
	25:75	189 a	1465 ab	554 ab	29.00 a
	35:65	190 a	1615 a	626 a	28.50 a

Different lowercase-letters are significantly different at P < 0.05 by Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

표 3-4-20. FDR센서로 조절되는 코이어 배지에서 chip과 dust 비율에 따른 첫 번째부터 5번째 화방에서 수확된 토마토의 상품과 무게(150g이상), 상품과 수, 가용성 고체 함량.

Substrates	Ratio (chip: dust)	Marketable Fruit weight (g· plant ⁻¹) (n=8)	Marketable Fruit weight (g· fruit ⁻¹) (n=120)	Soluble solid content (°Brix) (n=120)
commercial slab	0:100	8251 a	285 a	5.63 b
	30:70	4131 b	275 a	5.78 b
	50:50	2905 ed	200 c	7.05 a
	70:30	3297 cd	214 bc	7.03 a
	Rockwool	2407 e	209 bc	6.85 a
two-story slab	15:85	3679 bc	272 a	6.92 a
	25:75	3453 bcd	249 b	6.69 a
	35:65	3782 bc	271 a	6.34 ab

Different lowercase-letters are significantly different at P < 0.05 by Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

표 3-4-21. 정식 후 60일 된 토마토 잎의 광합성율(Photo: $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 증산율(Trmmol: $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 엽 표면 증기압차(VpdL: $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 기공전도도(Cond: $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 세포간 CO_2 (InCO₂: $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{mol}^{-1}$).

	Ratio (chip: dust)	Photo	Trans	VpdL	Cond	InCO ₂
commercial slab	0:100	17.6 a	9.2 d	1.5 ab	0.78 a	195 a
	30:70	17.8 a	9.9 bcd	1.4 b	0.87 a	200 a
	50:50	16.4 a	9.6 cd	1.7 a	0.80 a	196 a
	70:30	17.1 a	9.3 d	1.4 b	0.85 a	202 a
	Rockwool	17.3 a	10.5 abc	1.5 ab	0.90 a	201 a
two-story slab	15:85	17.1 a	10.9 ab	1.6 ab	0.87 a	200 a
	25:75	16.7 a	11.13 a	1.7 a	0.82 a	201 a
	35:65	16.5 a	11.5 a	1.6 ab	0.87 a	202 a

표 3-4-22. 정식 후 52-99일 된 토마토의 시간당 관수량(배지내 수분 함량은 FDR센서에 의해 조절)

Substrates	Ratio (chip: dust)	7a.m. - 10a.m.	10a.m. - 1p.m.	1p.m. - 5p.m.
commercial slab	0:100	42.0 a	18.2 g	40.0 ab
	30:70	41.0 ab	19.8 fg	40.6 ab
	50:50	32.2 cd	32.1 cd	35.8 abcd
	70:30	35.4 abcd	29.2 de	36.3 abcd
	Rockwool	34.1 bcd	29.7 de	36.8 abc
two-story slab	15:85	32.2 cd	30.8 cde	37.0 abc
	25:75	32.8 cd	33.1 cd	34.5 bcd
	35:65	40.2 ab	25.0 ef	35.8 abcd

Data are represented with means of replications per treatment. The irrigation-on and -off hours were set at at 7 a.m. and 5 p.m. between 52 and 99 days after transplant (between the 8th of May and 26th of June,2012).

Different lowercase-letters indicate significant differences at $P < 0.05$ by Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

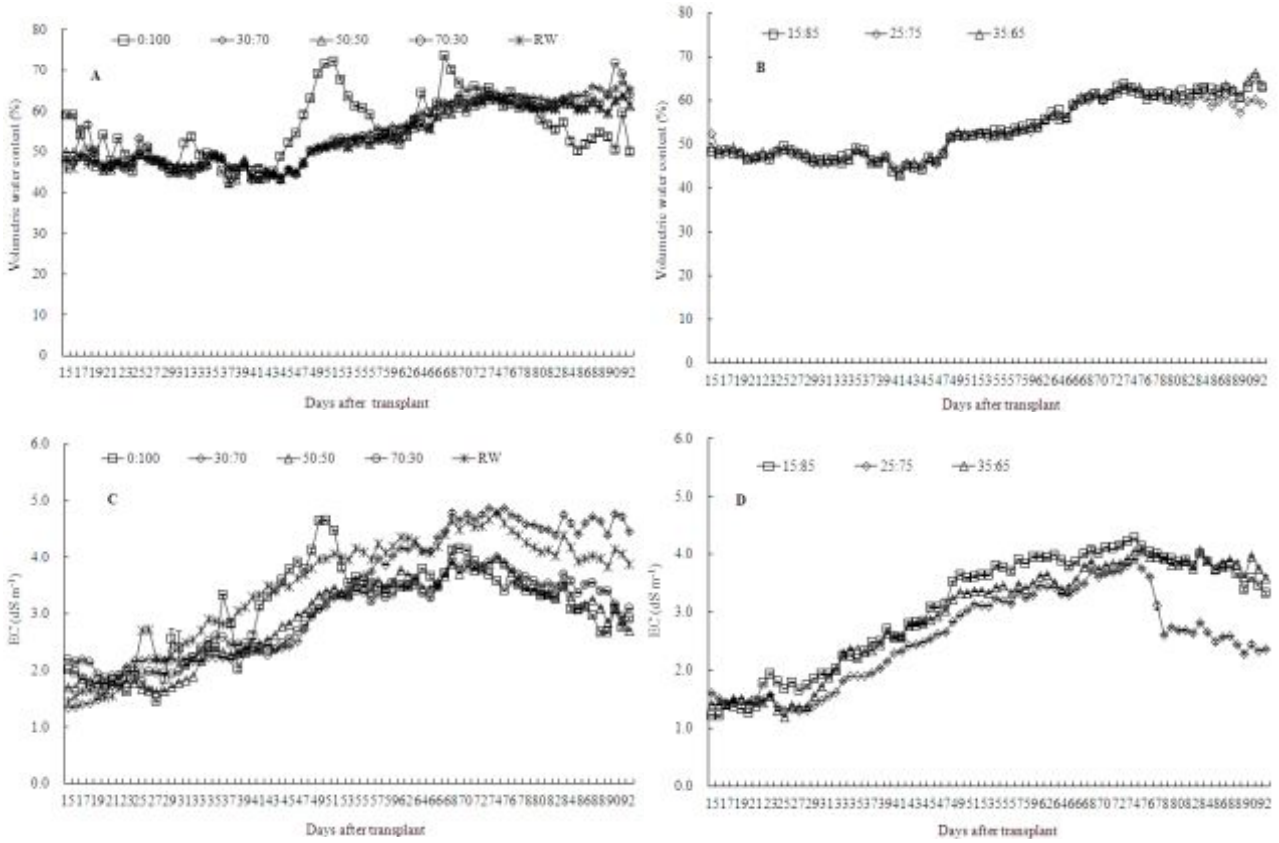


그림 3-4-22. 배지내 수분 함량이 55-60%, EC 2.0dS·m⁻¹로 조절될 때 코이어 슬라브(A, C)와 이층 복합 배지(B, D)에서 수분 함량과 EC 변화

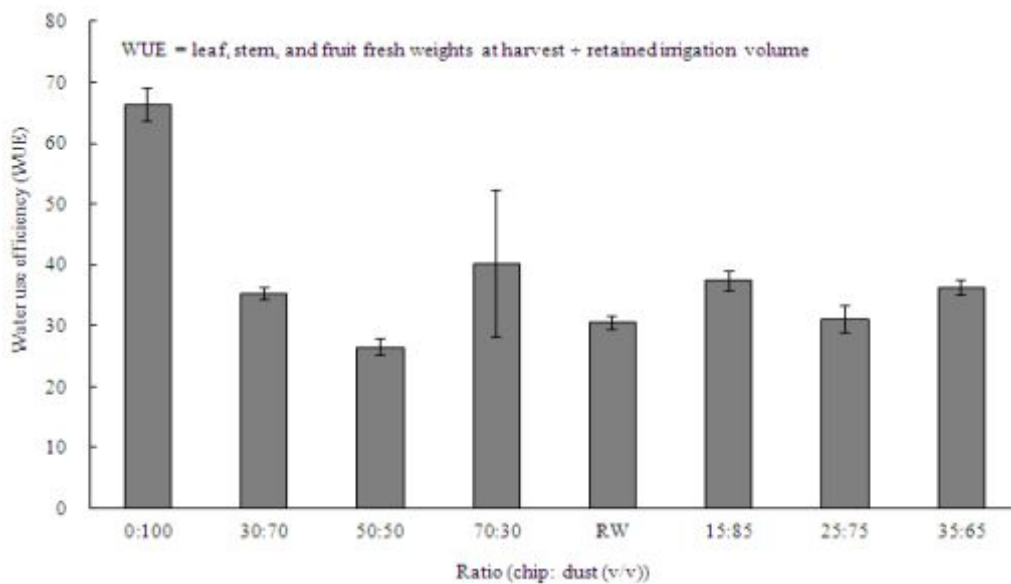


그림 3-4-23. FDR센서로 조절되는 코이어 배지에서 chip과 dust 비율에 따른 토마토의 수분이 용효율(WUE= 잎, 줄기, 과실 생체중÷ 보유된 관수량)

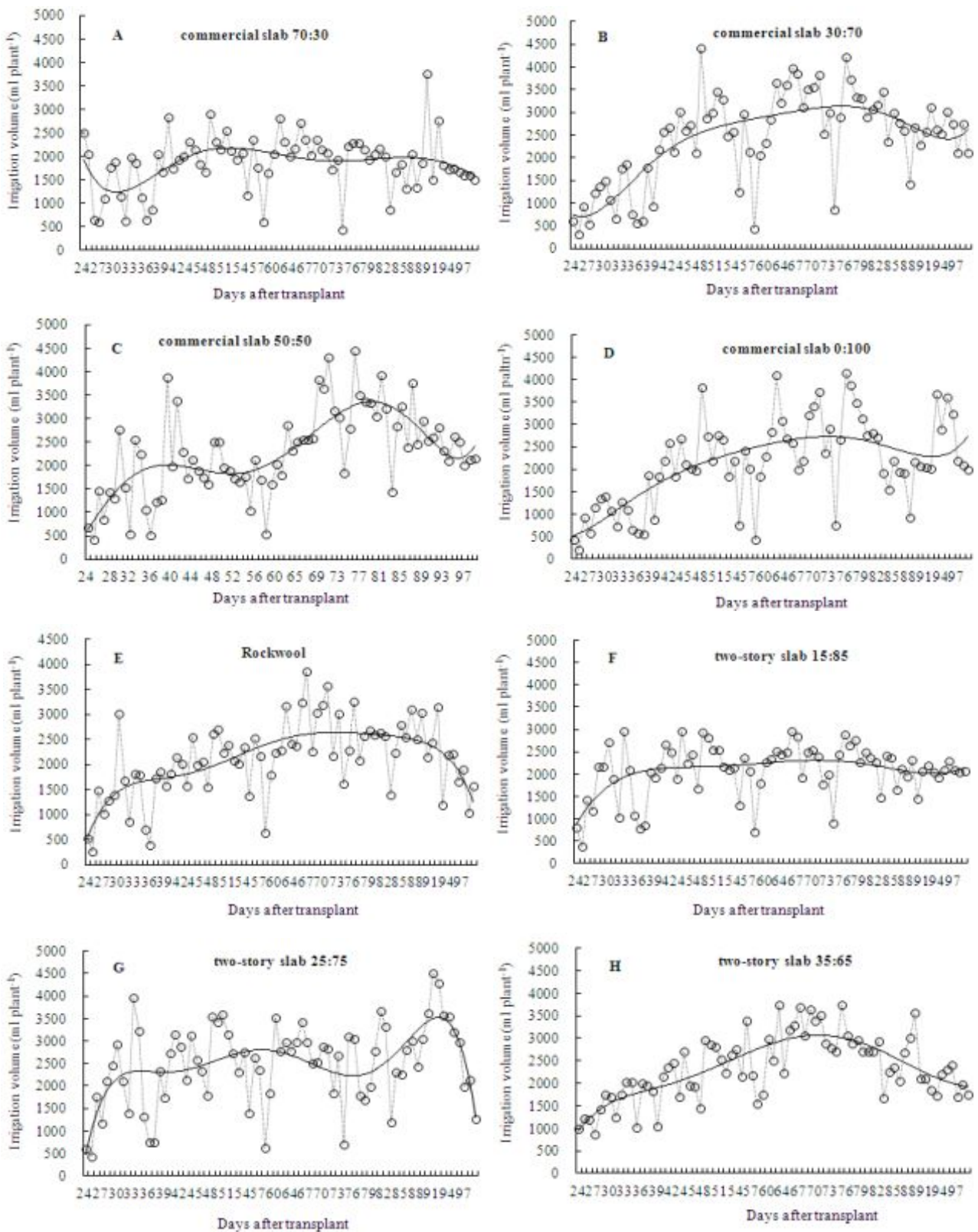


그림 3-4-24. FDR센서로 조절되는 코이어 배지에서 chip과 dust 비율에 따른 일별 강수량

5. 시설 과채류(토마토)의 수경재배 농가실증 연구

(1) 실험 목표

본 과제의 1, 2 차년에 수행한 실험의 결과에서 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 수분 센서를 이용한 무배액 토마토(*Solanum lycopersicum* L. Starbuck1) 수경재배 기술을 향상시키기 위한 재배 작기별 코코넛 배지의 최적의 용적당 수분 함량, 급액 농도 및 물리적 조성을 구명하였다. 가을과 겨울 작기의 경우 전 재배기간 동안 배지 내 용적당 수분함량을 40과 60%내의 범위로 제어할 경우 전 재배 기간 동안 무배액 시스템으로 유지되어 비료량을 절약하면서 고당도 과실을 생산 할 수 있었다. 봄과 여름시기엔 정식 직후에 배지 수분함량을 50%로 유지시키고, 정식 60일 이후, 즉 과실이 비대 및 성숙하는 시기엔 수분함량을 60~65% 범위로 제어하면, 전 재배 기간 동안 무배액 시스템으로 유지되어 비료량이 절약되고 배지내 적절한 EC(electrical conductivity) 수준이 유지되면서도 작물의 생육과 수량을 높일 수 있었다. 배지 용적당 수분함량을 50%보다 낮게 제어할 경우 급액 EC를 $2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 이상으로 공급하면 생육 및 과실 품질이 저하 되었고, 배지 수분 함량을 50%로 이상으로 제어할 경우 급액 EC를 $2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 나 $3.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 공급하여도 당도 및 상품과 크기가 $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 공급한 것과 차이가 없었으므로 급액 EC를 $2.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 공급하는 것이 더 경제적이라 판단된다. 상업용 코코넛 코이어 슬라브 배지(100cm x 20cm x 10cm, Sivanthi Joy, India)들 중 dust: chip (v/v) 비율이 100:0% 또는 70:30%로 조성된 배지에서 재배된 토마토가 50:50%나 30:70% 배지에서 재배된 토마토 보다 상품과중 및 상품과수량이 더 높은 것으로 나타났고 dust과 chip을 슬라브내에 이층구조 (two-storey: dust at top and chip at bottom)로 조성한 배지 (dust: chip (v/v)= 85:15%, 25:75% 또는 65:35%)에서 재배된 토마토는 상품과중 및 상품과수량이 높으면서 당도도 높은 결과를 얻었다. 이를 근거로 하여 실제 수경재배 농가에서 실증실험을 통해 고품질의 토마토 무배액 수경재배 기술을 체계화 하고자 이 실험이 수행되었다. 토마토 수경재배에서 근권 내 적절한 수분함량을 유지시켜 주고 비료 사용량과 배액 배출로 인한 환경오염을 감소시키기 위한 FDR수분센서를 활용한 무배액 기술을 실제 농가현장에 적용시켜 기존 관행적인 타이머에 의한 비순환식 기술과 비교하여 평가되었다.

(2) 실험 수행 방법

본 실험은 충청북도 충주시 신니면에 위치한 방울토마토 (*Solanum lycopersicum* L. Betatinie) 재배 농가에서 실시하였다. 가을~겨울철 재배 실험은 2012년 8월 26일에 정식하여 2013년 2월 12일까지 실시하였고 봄~여름철 재배 실험은 2013년 3월 10일에 정식하여 2013년 6월 30일까지 실시하였다. 배지는 농가에서 재활용 코이어 슬라브 (100cm x 20cm x 10cm, Sivanthi Joy, India; dust: chip (v/v) = 70:30%)를 충분히 세척하여 사용하였고 배양액은 가을~겨울철 재배 실험에서는 유럽 토마토 배양액(the Glasshouse Crops Research and Experiment Station at Naaldwijk in the Netherlands)을 봄~여름철 재배 실험에서는 야마자끼 배양액을 사용하였다. EC (Electrical conductivity)는 가을~겨울철 재배 실험에서는 정식 후 $1.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 급액하여 일주 간격으로 $0.2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 씩 증가시켜서 $2.2 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 수준까지 높여 급액하였다. 봄~여름철 재배 실험에서는 정식 후 $1.0 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 급액하여 일주 간격으로 0.2

$\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 씩 증가시켜서 $1.8 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 수준까지 높여 급액하였다. 급액은 FDR 수분센서 (WT1000N, Mirae-Sensor®, Korea)가 연결된 자동급액기 (Magna-1000)(GreenCS®)에 의해 체계적으로 되었고 (표 3-4-23), 관행처리는 타이머가 장착된 자동급액기 (두레박)에 의해 급액 하였는데 그 양은 가을~겨울철 재배에서는 일일 주당 2.0L를 공급하였고 다. 온실 내 CO_2 , 온도, 상대 습도, 광도 변화는 ALMEMO® 2890-9 (AHLBORN, German)에 의해 30분 간격으로 측정되었다.

(3) 결과 및 고찰

(가) 가을~겨울철 재배를 위한 무배액 수경재배 기술 농가실증시험

가을~겨울철 재배에서 타이머에 의한 관행 급액시 일일 평균 급액량은 주당 2.2 L이고 평균 배액량은 약 1.6 L였다 (그림 3-4-25). 반면, FDR 수분센서에 의해 목표 함수율을 변화시키며 급액하였을 때 (표 3-4-23), 일일 급액량은 가을철에 비해 겨울철에 급격히 감소되어 (그림 3-4-26), 일일평균 급액량은 0.41 L 였다 (그림 3-4-25). 가을~겨울철 재배기간 동안 배지 수분함량은 타이머에 의한 관행 급액 시 70~75% 수분으로 유지된 반면, FDR 수분센서에 의한 무배액 시스템에서는 50~55% 수준으로 낮게 유지 되었다 (그림 3-4-27). 가을~겨울철 재배에서 FDR 센서에 의한 급액시 근권 내 EC 농도는 초기에 $0.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 에서 재배 후반기에는 $3.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 까지 증가되었다. 반면 타이머에 의한 관행 급액 시 배액과 배지 내 용액의 EC 농도는 전 재배기간 동안 $2.0\sim 2.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 수준으로 유지 되었다(그림 3-4-28~29). 관행 급액방식과 비교하여 초기 근권 내 EC가 낮았던 이유는 정식 전 배지의 함수율이 80~90% 정도로 높게 유지되어 FDR 센서 의존 방식에서는 일일 급액량이 낮게 유지되는 것과 관련이 있다. 학교 내 온실포장 시험과 달리 농가현장 실증시험에서는 정식 전 충분히 물로 세척하여 함수율이 높아진 재활용 코이어 배지가 45m 길이로 설치되어 물 빠짐이 불균일하게 되어 함수율이 높은 상태로 오랜 시간 유지 된다. 따라서 초기 목표 함수율을 높게 설정하여 뿌리 활착 시까지 급액을 충분히 하여야 재배 초기 근권 내 EC가 관행 수준으로 유지 될 수 있다. 온도가 급격히 낮아지는 겨울철 재배에서는 목표 함수율을 낮추는 동시에 EC농도를 낮게 유지시켜야 할 것으로 고찰된다. 가을~겨울철 재배에서 화방 당 과실무게, 과실 수 당도는 1화방을 제외 하고는 급액방법에 따른 통계적 유의차가 없는 것으로 나타났다 (표 3-4-24).

(나) 봄~여름철 재배를 위한 무배액 수경재배 기술 농가실증시험

봄~여름철재배에서 타이머에 의한 관행 급액시 일일 평균 급액량은 최소 3.0 L에서 최대 4.4 L 수준이었고 일일 평균 배액률은 약 최소 37%에서 최대 50% 였다. 반면, FDR 수분센서에 의해 목표 함수율을 변화시키며 급액하였을 때, 일일 급액량은 최소 0.38 L에서 최대 2.40 L 였고 일일 평균 배액률은 약 최소 2%에서 최대 6.3% 였다 (표 3-4-25, 그림 3-4-20). 봄~여름철 재배기간 동안 배지 수분함량은 타이머에 의한 관행 급액 시 65~90% 수분으로 유지된 반면 (그림 3-4-32), FDR 수분센서에 의한 무배액 시스템에서는 55~90% 수준으로 유지 되었다 (그림 3-4-31). 정식 후 103일에 측정한 식물의 생육은 급액방식에 따른 통계적 유의차가 없었다 (표 3-4-25, 그림 3-4-32). 식물체당 총 상품과 수량은 급액방식에 따른 유의차가 없었고 화방 당 과실 상품과 수량, 과실당 무게 및 당도는 1화방에서 4화방까지는 유의차가 없었다 (표 3-4-26). 하지만 5~6화방에서는 과실당 무게가 감소한 것으로 나타났다. 네덜란드 토

마토 배양액으로 봄~여름철에 100일 동안 토마토 재배 시 3600주를 860평에 소비되는 비료값은 FDR 센서에 의해 배액을 극소화 하였을 때 897,508원이 소비된 반면 관행 급액방식은 2,279,000원이 소비되었다 (표 3-4-28). 본 실험에서는 배지 용적당 수분함량을 설정하고 FDR 센서에 의해 급액을 실시하였을 때 45m 길이의 배양구 내에 배지 수분함량 변동계수는 최저 1%에서 최대 24%였다 (그림 3-4-33). 이는 FDR 센서에 의해 무배액이나 배액 극소화 방식으로 재배 할 때 FDR 센서에 의해 측정되어 지는 배지 내 국부적 수분함량 차이가 있음을 나타낸다. 이를 줄이기 위해 최적 급액 관리 범위를 제시하기 위한 연구가 필요하다. 또한 물리성이 다른 배지에 1회 급액량과 급액 대기시간 조절로 수분이용 효율을 최대화 하여 최적의 생육과 고품질 과실 생산을 얻기 위한 정밀 연구가 필요하다. 생육단계별 체계적 EC 농도설정과 생육단계별 근권 수분함량 설정에 대한 급액 일정을 체계화하여 근권 내 EC 농도 변화폭, 일일 수분함량 변화폭, 및 배액률 변화폭을 최소화하는 기술을 제시하고 매뉴얼 작성을 위한 연구가 필요하다.

표 3-4-23. 8월 26일 정식 후 FDR센서에 의해 조절되는 코이어 배지에서의 목표 수분함량과 일별 강수량의 주기적인 변화

Days	Targets of volumetric water content
26 th Aug - 4 th Sept	70-75%
5 th Sept - 25 th Sept	65-60%
26 th Sept - 24 th Jan	60-55%
25 th Jan - 12 th Feb	55-50%

표 3-4-24. 가을-겨울동안 FDR센서에 의한 무배액 시스템과 타이머에 의한 관행 급액 시스템 간의 과실무게, 과실수, 가용성 고체 함량 비교

Cluster	Treatment	Fruit weight	Fruit number	Soluble solid content
		(g·fruit ⁻¹) (n=20)	(no cluster ⁻¹) (n=9)	(°Brix) (n=20)
1	Conv.	30.8 a	12.8 a	7.55 b
	FDR	27.0 b	14.0 a	7.93 a
2	Conv.	23.0 a	15.2 a	7.49 b
	FDR	22.2 a	13.8 a	7.75 a
3	Conv.	19.8 a	15.3 a	7.81 a
	FDR	18.2 a	13.9 a	7.72 a
4	Conv.	17.0 a	13.5 a	8.99 a
	FDR	16.9 a	14.1 a	9.13 a
5	Conv.	15.9 a	12.6 a	9.79 a
	FDR	15.7 a	13.6 a	9.84 a
6	Conv.	14.2 a	13.5 a	9.55 a
	FDR	14.5 a	12.7 a	9.60 a

Different lowercase-letters are significantly different at P < 0.05 by Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

표 3-4-25. 봄-여름동안 FDR센서에 의한 무배액 시스템과 타이머에 의한 관행 급액 시스템 간의 관수량, 배액 비율 비교

Method	Days after transplant	Preset volumetric water content	Irrigation volume (ml/plant/day)	Irrigation volume - Drainage volume (ml/plant/day)	Drainage ratio (%)
FDR	0~44	70~85%	388 (±31)	339(±29)	6.3(±1.4)
	45~55	60%	974 (±86)	925(±87)	5.4(±1.5)
	56~69	65%	1706(±103)	1658(±105)	4.8(±0.6)
	70~73	70%	1867(±67)	1802(±98)	4.0(±3.0)
	74~98	75%	2400(±252)	1851(±366)	5.0(±2.0)
	99~103	65%	2123(±393)	2087(±387)	2.0(±1.0)
Timer	0~55	-	3000(±0)	1501(±176)	50(±6)
	56~69	-	3000(±0)	1988(±98)	37(±3)
	70~	-	4380(±0)	2380(±45)	46(±2)

표 3-4-26. FDR센서와 타이머로 수분 함량이 조절되는 토마토의 초장, 잎과 줄기의 생체중, 엽수 (정식후 30일(4/25)과 102일(7/8)에 측정)

Treatment	Plant height (cm·plant ⁻¹)	Leaf		Stem diam. (mm)	Leaf number (no. plant ⁻¹)
		Length	Width		
30 days after transplant					
FDR	135a	44.8a	38.2a	11.86a	17a
Cont.	130a	47.4a	40.9a	12.0a	17a
102 days after transplant					
FDR	205a	980a		1258a	40a
Cont.	206a	858a		1391a	39a

Z: Growth data at 30 DAT was from plant samples without cutting, and therefore no stem fresh weight data are available. The data are represented with means of four replications per treatment in a randomized block design. Different lowercase-letters indicate significant differences at $P < 0.05$ by Duncan's Multiple Range Test (DMRT).

표 3-4-27. 각 과실 화방으로부터 수확된 토마토의 상품과 무게, 가용성 고체 함량, 배꼽썩음과(BER)

Cluster	Treatment	Fruit weight		soluble solid contents (°Brix)
		g· fruit ⁻¹	g· cluster ⁻¹	
C1	FDR	19.45 a	790 a	8.2 a
	Cont	18.85 a	801 a	8.0 a
C2	FDR	17.59 a	1160 a	8.4 a
	Cont	16.67 a	880 a	8.3 a
C3	FDR	14.72 a	861 a	9.0 a
	Cont	14.81 a	1011 a	10.0 a
C4	FDR	14.20 a	555 a	8.8 a
	Cont	15.00 a	497 a	8.5 a
C5	FDR	14.07 b	609 a	8.9 a
	Cont	15.50 a	510 a	8.5 a
C6	FDR	14.01 b	303 a	8.9 a
	Cont	15.12 a	476 a	8.6 a
Total (g plant ⁻¹)	FDR	4205 a		
	Cont	4175 a		

The data are represented with the means of eight replications for C1, C2, C3 and C4 per treatment in a randomized complete block design. Different lowercase-letters indicate significant differences at $P < 0.05$ by Duncan's Multiple Range Test (DMRT). The test was separately conducted for samples harvested from each fruit cluster.

표 3-4-28. 100일간 토마토를 재배하기 위해서 사용되는 무배액과 관행 금액 시스템간의 비료 비용 비교(네덜란드 Naaldwijk의 Crops Research and Experiment Station 유리온실에서 만들어짐)

Fertilizers (origin)	Cost (USDZ/kg)	Amounts of fertilizer (kg /1000L)	Fertilizer cost (USD) per plant per 100 days	
			Non-drainage	drainage
Calcium nitrate (China)	0.92	1.003	0.034	0.086
Potassium nitrate (Belgium)	1.65	0.531	0.071	0.180
Magnesium sulfate (China)	1.10	0.493	0.030	0.077
Potassium phosphate monobasic (China)	2.35	0.044	0.012	0.032
Ammonium phosphate monobasic (China)	2.29	0.144	0.011	0.029
Fe-EDTA (Holland)	8.26	0.006	0.048	0.121
Boric acid (USA)	21.1	0.00185	0.007	0.018
Manganese sulfate (Local)	29.4	0.00169	0.005	0.013
Zinc sulfate (Local)	20.2	0.00144	0.0005	0.0013
Copper sulfate (Local)	29.4	0.00019	0.0003	0.0007
Sodium molibdate (Local)	49.5	0.00012	0.0001	0.0004
Total(USD)			0.22	0.56

Z: USD: US. Dollar

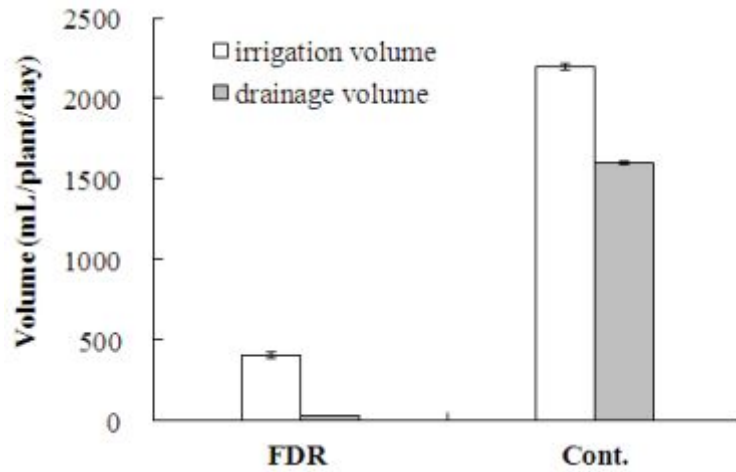


그림 3-4-25. 가을-겨울동안 FDR센서에 의한 무배액 시스템과 타이머에 의한 배액 시스템간의 평균 관수량과 배액 비율 비교

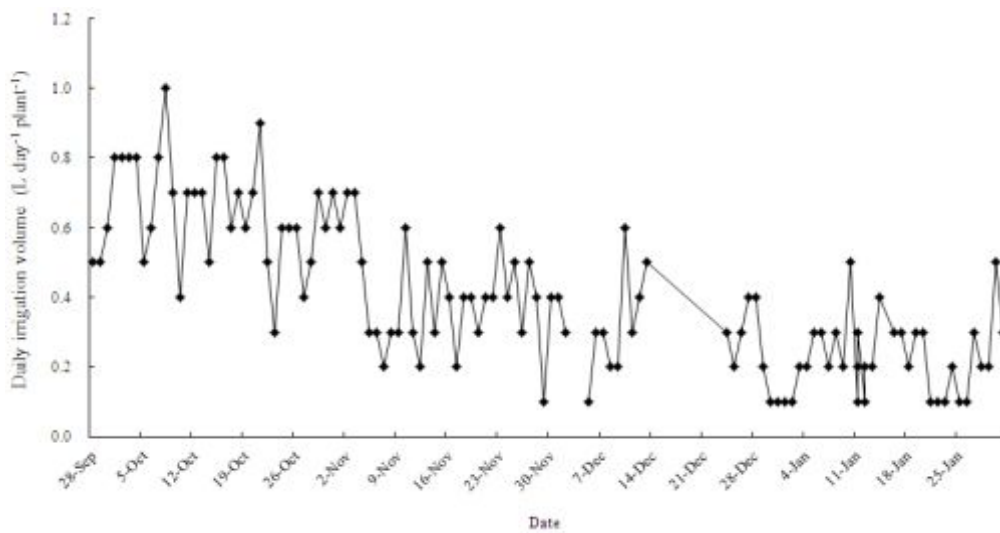


그림 3-4-26. 가을-겨울동안 코코넛 코이어 배지의 수분함량이 FDR센서에 의해 조절될 때 일별 관수량

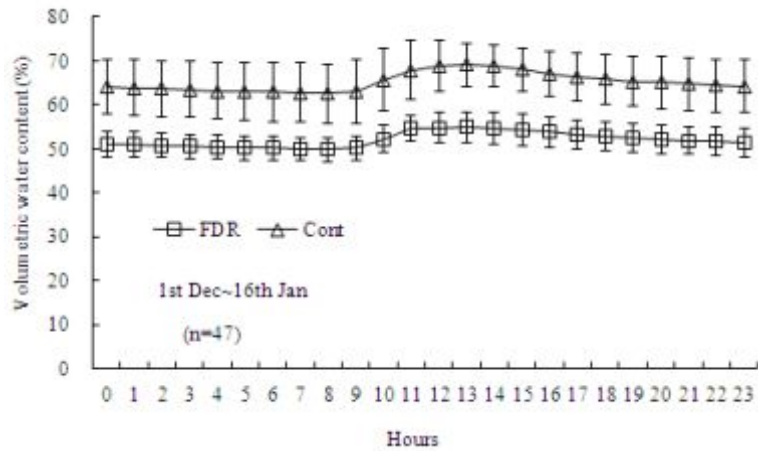


그림 3-4-27. 가을~겨울 재배에서 FDR센서를 이용한 무배액 시스템과 타이머를 이용한 관행 시스템에서 배지의 시간별 함수량 비교.

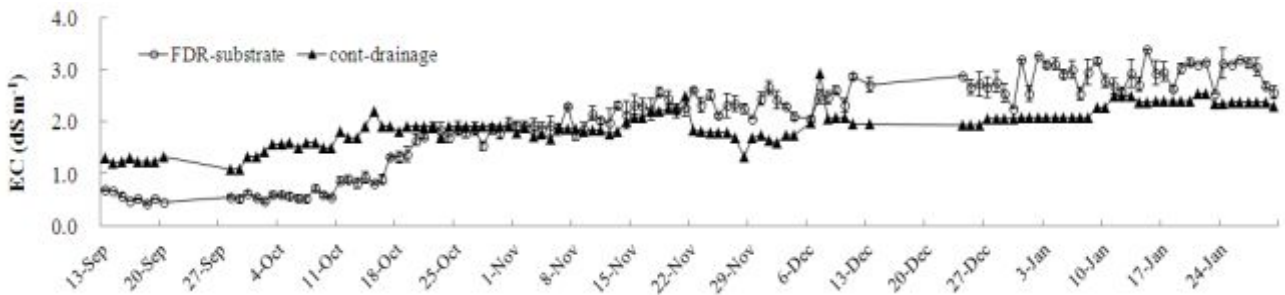


그림 3-4-28. 가을~겨울 재배기간 동안 무배액시스템과 관행급액시스템에서 배지의 EC 비교

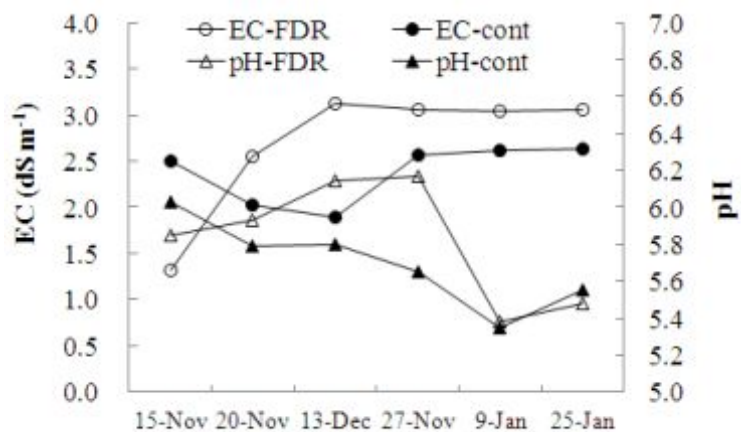


그림 3-4-29. 가을~겨울 재배기간 동안 무배액시스템과 관행급액시스템에서 배지에서 짜낸 물의 EC와 pH 비교.

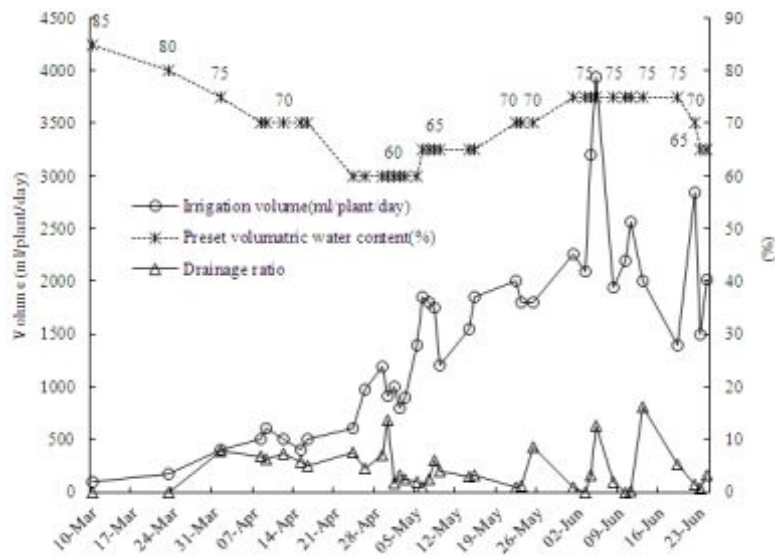


그림 3-4-30. 봄~여름 재배기간 동안 FDR 센서를 이용한 수분함량제어시 목표함수율, 급액량 및 배액율의 변화

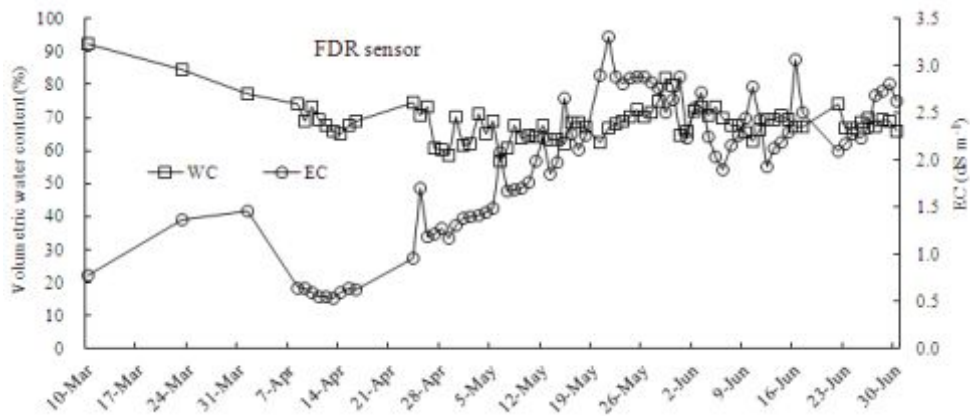


그림 3-4-31. 봄~여름철 재배기간 동안 FDR센서를 이용한 수분함량제어시 수분함량과 EC의 변화

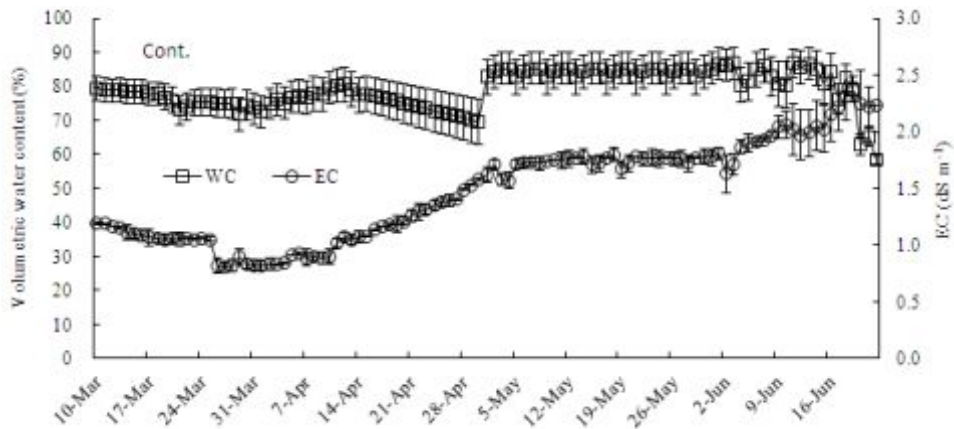


그림 3-4-32. 봄~여름철 재배기간 동안 타이머를 이용한 제어에서 코이어 배지 수분함량과 EC의 변화

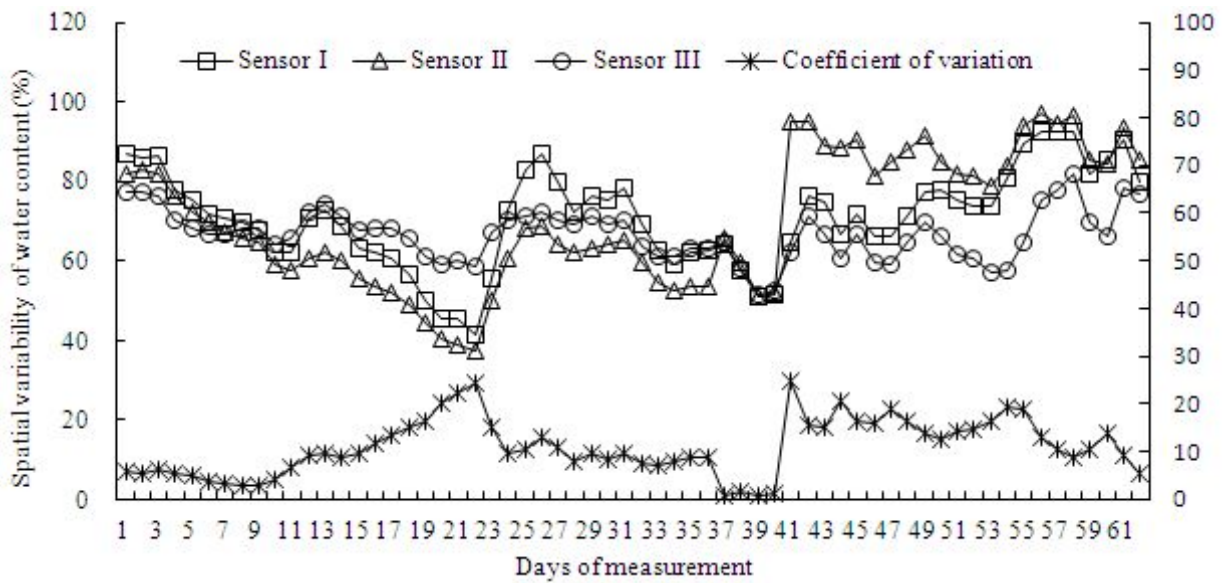


그림 3-4-33. 봄~여름철 재배기간 동안 FDR센서를 이용한 배지수분 제어에서 53일간의 배지 수분함량의 공간변이성과 균일계수

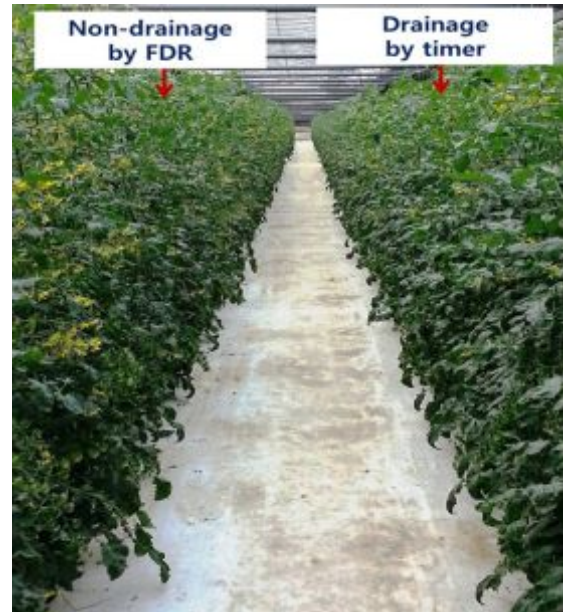


그림 3-4-34. 봄~여름철 재배기간 동안 FDR센서를 이용한 무배액 시스템과 타이머를 이용한 관행급액시스템의 식물 생장 비교

제 5 절

FDR센서를 활용한 장미 무배액 급액관리 기술 체계화

1. 무배액 시스템 실험 수행의 온실환경 측정

(1) 실험 목표

코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배시 FDR 센서를 이용한 급액 자동 제어 실험을 수행한 온실 내부의 온도, 상대습도, 광도를 측정하여 생육 환경의 기초 자료로서 사용하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

2011년부터 2013년 현재까지 서울시립대학교 연동형 비닐 온실 내부의 온도, 상대습도, 광도를 측정하였다. 환경측정은 대기 온습도 센서 (SHT-110, 미래센서, Korea)와 일사량센서 (Pyrarno-70, 미래센서, Korea) 그리고 데이터 로거 (WP700, 미래센서, Korea)를 이용하였다.



그림 3-5-1. 실험에 사용한 대기온습도 센서, 일사량 센서와 데이터 로거

(3) 실험수행 내용 및 결과

(가) 2011년 온실 환경

그림 3-5-2와 그림 3-5-3은 실험기간 중 2011년 6월에서 11월까지의 온실 환경(광도, 대기 온도, 상대 습도) 변화를 나타낸 것이다. 광도는 재배기간(6월~11월) 동안 주간에 400~700 ($W \cdot m^{-2}$)으로 8월 중순부터 점차 높아져서 8월과 9월에 가장 높은 광도를 보였고 10월부터는 다시 광도가 점차 하강하는 경향을 나타냈다. 6월 말부터 7월, 그리고 8월 초의 기간에 많은 날들이 장마 기간으로 인해 낮은 광도를 나타내었다. 대기 온도는 재배기간 동안 최고 30~40 ($^{\circ}C$), 최저 20~6($^{\circ}C$)으로 8월에서 9월 초가 가장 높은 하루 온도를 나타냈다. 9월 말부터 온도가 감소하였는데, 11월 중순이 되면서 하루 최저 온도가 10 $^{\circ}C$ 이하를 나타내었다. 상대습도는

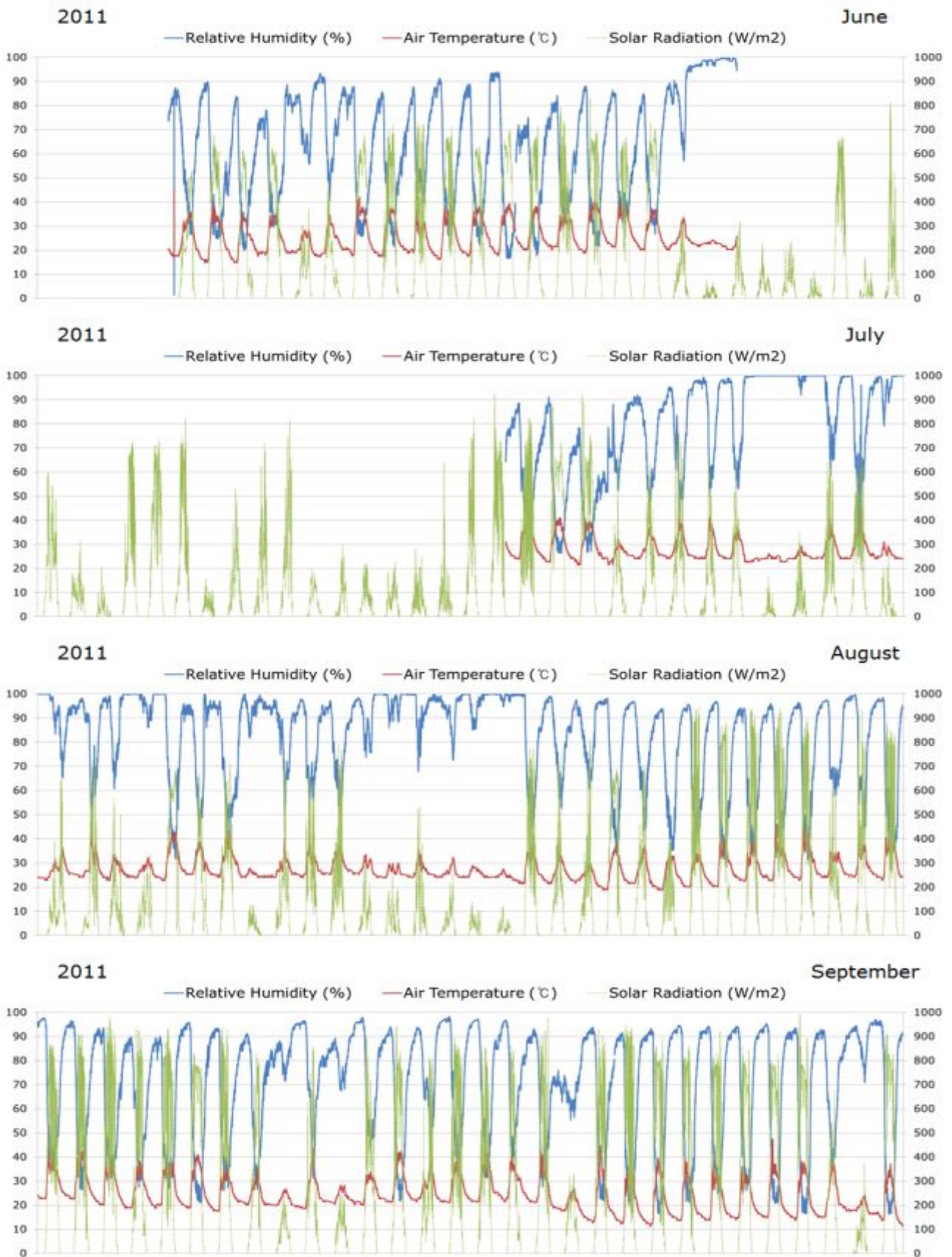


그림 3-5-2. 2011년 6월에서 9월까지 온실내 광도, 온도, 상대습도 변화

재배기간 동안 주간에는 낮고 밤에는 높은 형태로 낮과 밤의 편차가 크게 나타났다. 장마기간에는 주간에도 70%가 넘는 높은 수준의 습도를 나타내었으며, 장마기간 초기에는 온습도 장비가 고장이 날 정도로 너무 많은 호우가 발생하였다.

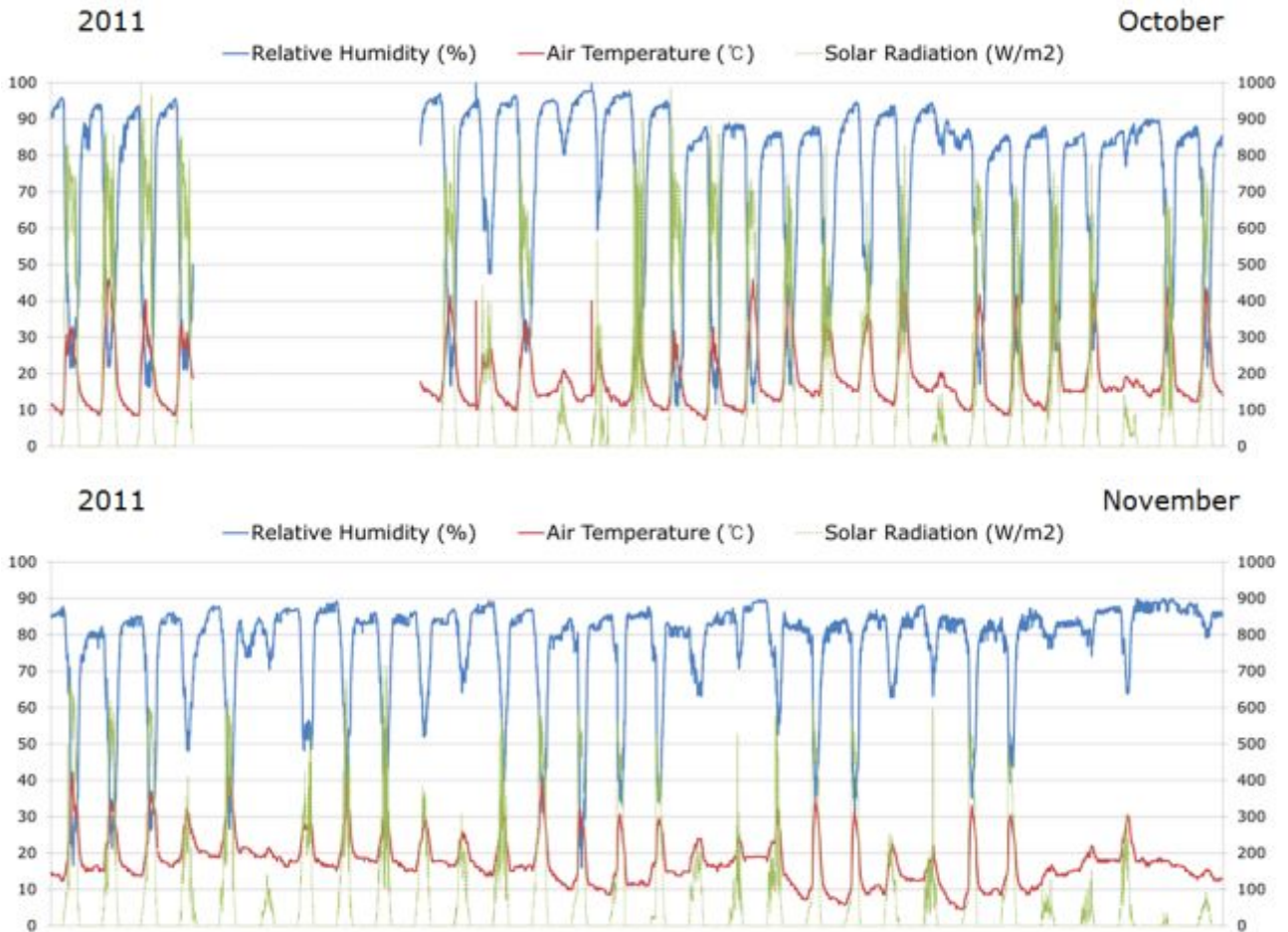


그림 3-5-3. 2011년 10월에서 11월까지 온실내 광도, 온도, 상대습도 변화

(나) 2012년 온실 환경

그림 3-5-4와 그림 3-5-5는 실험기간 중 2012년 6월에서 11월까지의 온실 환경(광도, 대기 온도, 상대 습도) 변화를 나타낸 것이다. 광도는 재배기간(6월~11월) 동안 주간에는 300~600 ($W \cdot m^{-2}$)으로 7월 중순부터 점차 높아져서 7월과 8월에 가장 높은 광도를 보였고 9월말부터는 다시 광도가 점차 하강하는 경향을 나타냈다. 7월 중순과 8월 중순 기간이 장마 기간으로 인해 낮은 광도를 나타내었다. 대기 온도는 재배기간 동안 최고 30~40(°C), 최저 20~7(°C)으로 7월에서 8월 중순이 가장 높은 하루 온도를 나타냈다. 9월 말부터 온도가 감소하였는데, 11월 말에 하루 온도가 10°C이하를 나타냈다. 상대습도는 재배기간 동안 주간에는 20~50(%)으로 낮에는 낮고 밤에는 높은 형태로 낮과 밤의 편차가 크게 나타났다. 장마기간에는 주간에도 60%가 넘는 높은 수준의 습도를 나타내었다.

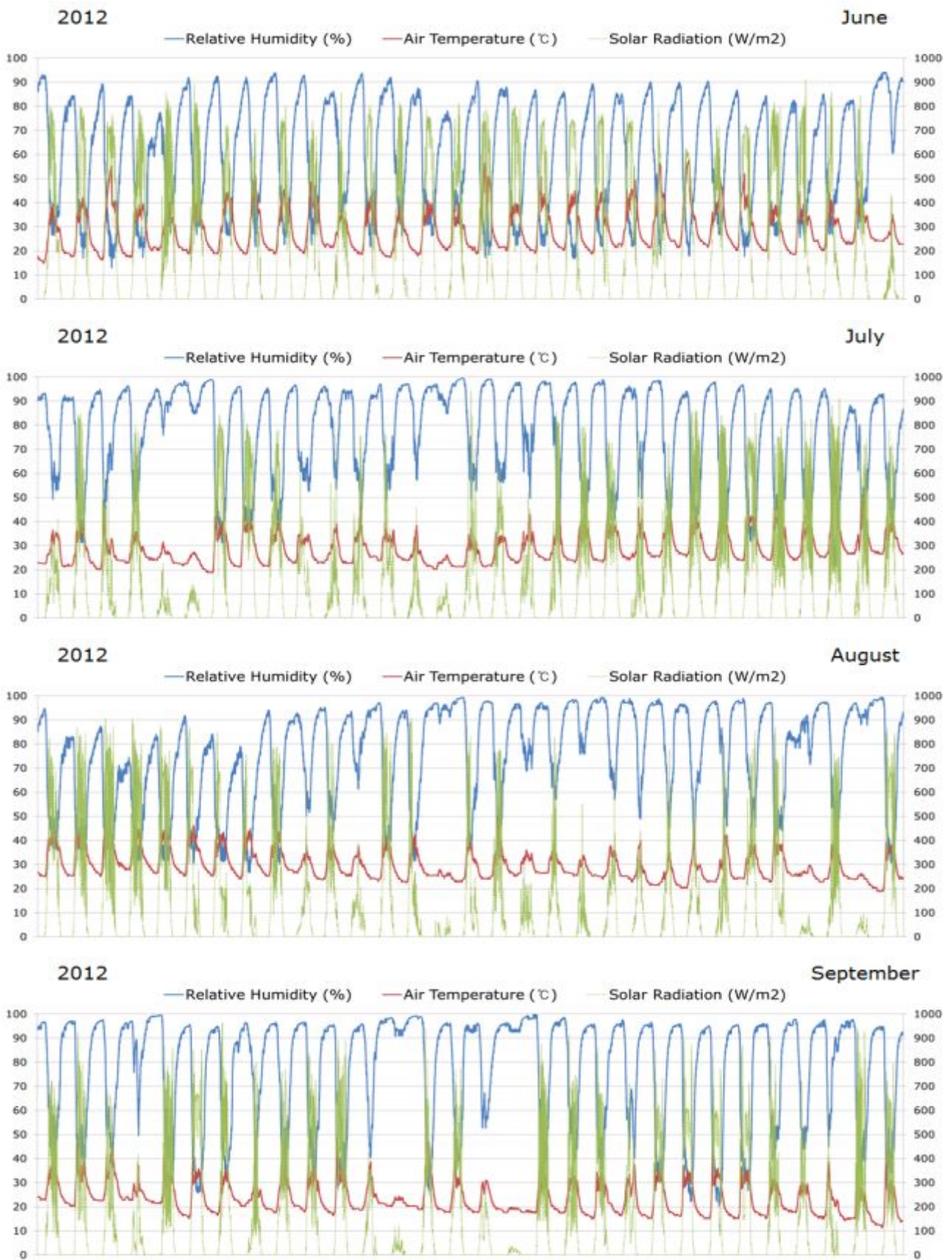


그림 3-5-4. 2012년 6월에서 9월까지 온실내 광도, 온도, 상대습도 변화

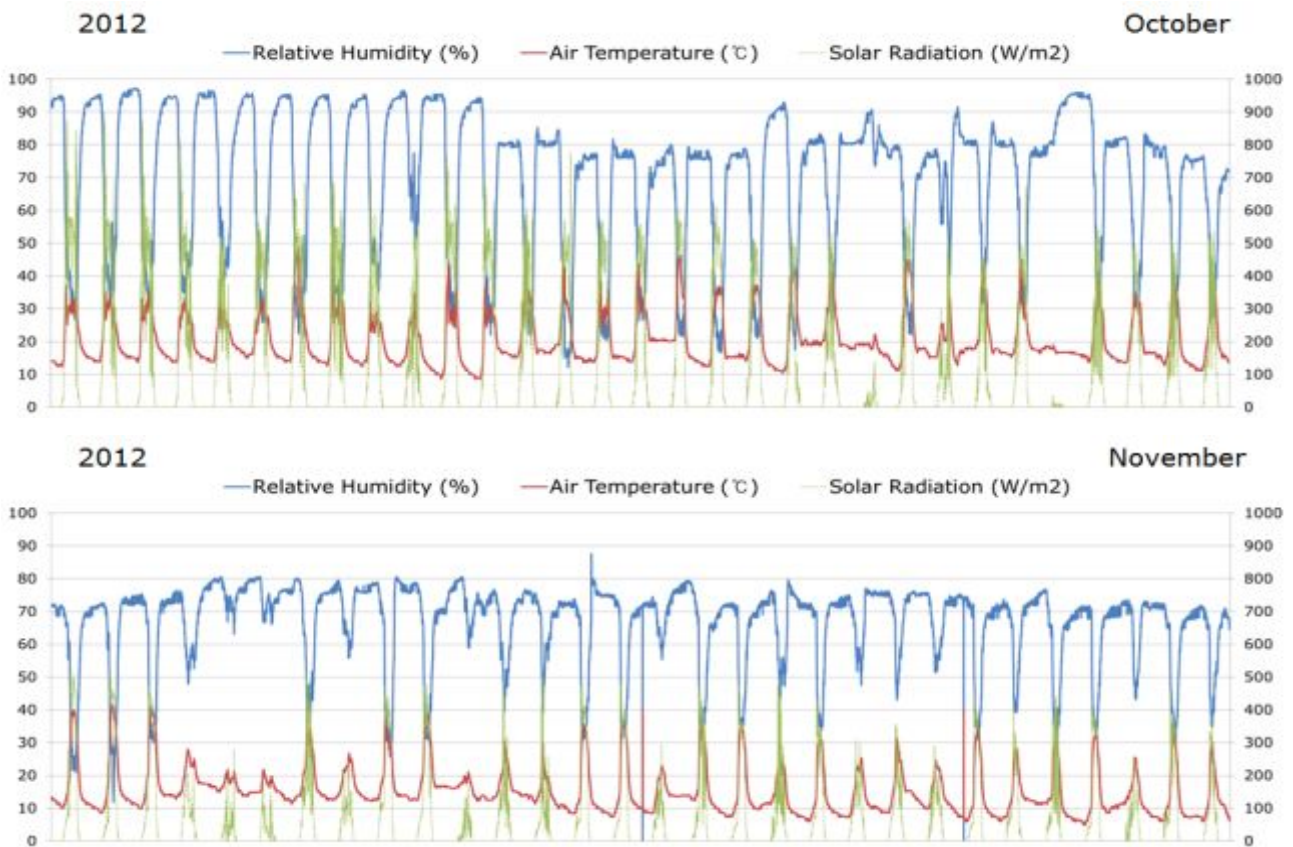


그림 3-5-5. 2012년 10월에서 11월까지 온실내 광도, 온도, 상대습도 변화

(다) 2013년 온실 환경

실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 온실 환경(광도, 대기 온도, 상대 습도) 변화를 나타낸 결과(그림 3-5-6)에서, 광도는 재배기간(4월~7월) 동안 주간에 $200 \sim 600 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2})$ 으로 4월에 약간 높았다가 5, 6월이 되면서 약감 하강하는 경향을 나타냈다. 대기 온도는 재배기간 동안 최고 $30 \sim 40 \text{ (}^\circ\text{C)}$, 최저 $20 \sim 7 \text{ (}^\circ\text{C)}$ 으로 6월이 가장 높은 하루 온도를 나타냈다. 상대습도는 재배기간 동안 주간에 $20 \sim 50 \text{ (}\%)$ 으로 낮에는 낮고 밤에는 높은 형태로 낮과 밤의 편차가 크게 나타났다. 4월에서 6월까지 점차적으로 주간 상대 습도가 증가하는 경향을 나타냈다. 7월 현재 장마가 진행중이다.

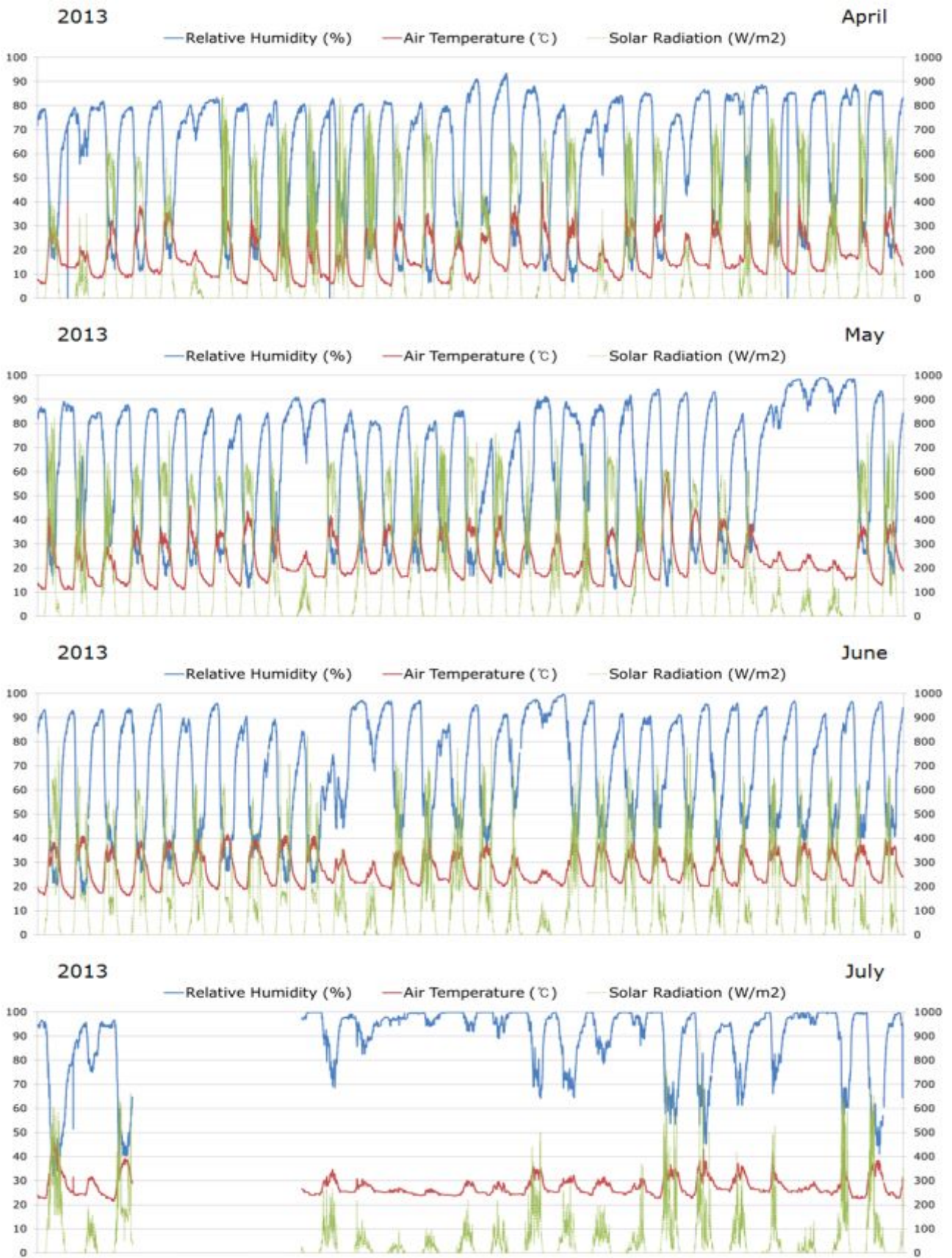


그림 3-5-6. 2013년 4월에서 7월까지 온실내 광도, 온도, 상대습도 변화

(4) 연구결과 요약

장미 수경재배시 실험을 수행한 온실 내부의 온도, 상대습도, 광도를 측정하여 생육 환경의 기초 자료로서 사용하고자 측정하였다. 2011년부터 2013년 현재까지 서울시립대학교 연동형 비닐 온실 내부의 온도, 상대습도, 광도를 대기 온습도 센서와 일사량센서 그리고 데이터 로거를 이용하여 조사하였다.

2011년에는 재배기간 동안 주간에 $400\sim 700$ ($W\cdot m^{-2}$)의 광도, 최고 $30\sim 40(^{\circ}C)$, 최저 $20\sim 5(^{\circ}C)$ 의 온도, $20\sim 40(\%)$ 의 상대습도를 나타내었다. 2011년에는 재배기간 동안 주간에 $300\sim 600$ ($W\cdot m^{-2}$)의 광도, 최고 $30\sim 40(^{\circ}C)$, 최저 $20\sim 7(^{\circ}C)$ 의 온도, $20\sim 50(\%)$ 의 상대습도를 나타내었다. 2013년에는 재배기간 동안 주간에 $200\sim 600$ ($W\cdot m^{-2}$)의 광도, 최고 $30\sim 40(^{\circ}C)$, 최저 $20\sim 7(^{\circ}C)$ 의 온도, $20\sim 50(\%)$ 의 상대습도를 나타내었다.

2. 타이머와 센서를 이용한 급액체계

가. 타이머를 이용한 근권부 수분함량 변화

(1) 실험 목표

코코넛 코이어 배지와 암면을 이용한 장미 수경재배시 타이머를 이용한 급액 자동 제어시 배지내 근권부 수분 함량 변화를 측정하여 근권 환경의 기초 자료로서 사용하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

국내에서 많이 재배되고 있는 장미 품종들 가운데 붉은색 'Vital' 품종을 2011년 3월부터 2013년 7월 현재까지 서울시립대학교 연동형 온실에서 재배하고 있다. 본 실험에 사용한 표준 배양액 조성은 변형된 서울시립대 장미 배양액으로 다량원소($me\cdot L^{-1}$: NO_3-N 9.6, NH_4-N 0.73, P 2.2, K 5, Ca 4.5, Mg 2, SO_4-S 1.5)와 미량원소 (ppm : Fe 1.75 Cu 0.055 B 0.275 Mn 0.35 Zn 0.25 Mo 0.05)로 하여 조성하였다. 장미 묘는 2010년 11월 12일에 장미 배양액(EC 1.0 $dS\cdot m^{-1}$, pH 5.8)으로 포수시킨 암면블럭($7.5cm\times 7.5cm\times 6.5cm$, 한국유알암면, Korea)에 삽목하였다. 균일한 발근을 위하여 생육상(주간/야간 온도 $30/14\pm 2^{\circ}C$, 상대 습도 65% 이상)에서 묘를 재배하였고, 1~2일 간격으로 장미 배양액(EC 0.5 ± 0.1 $dS\cdot m^{-1}$, pH 5.7 ± 0.2)을 저면관수로 공급하였다. 뿌리가 뻗고 신초가 나와 10cm이상 되었을 때, 좀 더 높은 농도의 장미 배양액(EC 0.7 $dS\cdot m^{-1}$, pH 5.7 ± 0.2)으로 저면관수 하였다. 정식은 장미 신초 길이가 40cm 이상 전개된 식물들을 가지고 2011년 3월 21일에 실시하였다. 정식전 수돗물(EC 0.2 $dS\cdot m^{-1}$, pH 6.2)로 완전 포수하는 세척을 5회 수행한 코코넛 코이어 슬라브(완전 포수시 $100\times 20\times 12cm$, dust:chip = 7:3, v/v, 신성미네랄, Sri Lanka)와 암면슬라브($100\times 15\times 10cm$, 한국유알암면, Korea)를 장미 배양액 1/2배액으로 충분히 포수한 뒤 슬라브당 장미를 6주씩 정식하여 완전임의 3반복으로 배치하였다. 정식 후 7일 간은 활착을 위해 배양액이 완전히 포수된 상태에서 양액공급은 1/2배액으로 오전 9시부터 1시간 간격으로 8회 공급하였고, 1회당 주당 80ml를 공급하였다. 장미 재배는 아칭형 재배(arching or bending cultivation)로 50cm이상으로 성장한 장미 줄기를 구부려서 엽면적을 확보하는 동화지로 사용하였다. 정식 후 동화지 2개를 확보한 후에 각 처리에 대

한 실험을 시작하였다.

공급 배양액의 EC와 pH는 휴대용 EC/pH meter(HI9813, HANNA, USA)를 이용하여 각각 $0.7 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 과 pH 5.5로 유지하였다. 7일 후에는 1배액 배양액으로 다시 한 번 포수하였다. 이후 공급 배양액의 급액 EC $1.5 \pm 0.2 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, pH 5.7 ± 0.2 로 유지하였다. 배지수분측정은 FDR 센서(Coco sensor, 미래센서, Korea)와 데이터 로거(WP700, 미래센서, Korea)를 이용하였으며 급액 EC, 급액제어, 급액시간을 표 3-5-1에서와 같이 처리하였다. 타이머 처리는 날씨가 흐려지거나 비오는 날에는 공급을 중단하였다.



그림 3-5-7. 실험에 사용한 코코넛 코이어와 암면 슬라브

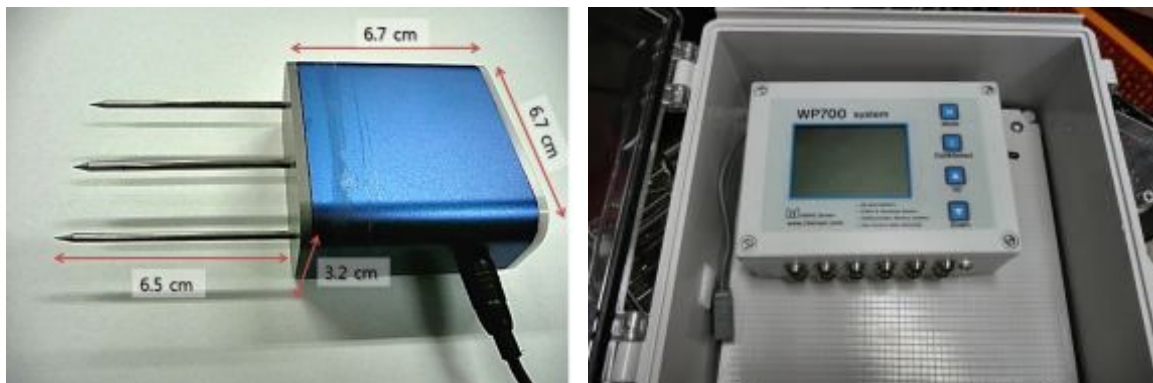


그림 3-5-8. 실험에 사용한 FDR 센서와 로거

표 3-5-1. 장미 수경재배에서 타이머를 이용한 급액 자동 제어 실험 처리구

Treatment	Electric Conductivity ($\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$)	Irrigation control	Irrigation time (hour)
Timer	1.5	640±20 ml/day/plant (80ml x 8 times/day)	2011 09 ~ 17
			2012 sunrise +1 ~ sunset -2
			2013 sunrise +3 ~ sunset -2

(3) 실험수행 내용 및 결과

(가) 코코넛 코이어 배지의 물리 화학적 특징

실험에 사용된 dust:chip = 7:3 비율의 코코넛 코이어 배지 물리성과 화학성을 표 3-5-2에 나타내었다. 총공극은 93.7%로 높은 측정치를 나타내었고, 코이어의 특징인 높은 K와 Na 함량을 나타내었는데, 이는 물에 용해될 경우 282.1과 27.1 mg·L⁻¹, 치환성의 경우는 1206.4와 161.8 mg·L⁻¹로 높은 함량을 나타내고 있다. 반면, EC는 1:5 비율에서 0.28로 매우 높은 수치는 아니나 물로 세척없이 바로 사용하기에는 무리가 있는 수준이었다. 배지 pH는 5.56으로 작물 재배에 적합하였다. 본 실험에서 코이어 배지는 수돗물(EC 0.2 dS·m⁻¹, pH 6.2)호 5회 이상 세척한 후 사용하였다.

표 3-5-2. 실험에 사용한 코코넛 코이어 배지(dust:chip = 7:3)의 물리성과 화학성

Physiological properties									
Dry bulk density (g·cm ⁻³)	Particle density (g·cm ⁻³)	Total pore space (v/v, %)				Water volume (v/v, %)		Air volume (v/v, %)	
0.087 ^z	1.38	93.7				51.0		42.7	
Chemical properties									
Electric Conductivity (dS·m ⁻¹ , 1:5)	pH (1:5)	Water soluble cation (mg·L ⁻¹)				Exchangeable cation (mg·L ⁻¹)			
		K	Ca	Mg	Na	K	Ca	Mg	Na
0.28	5.56	282.1	7.2	2.8	27.1	1206.4	92.4	89.1	161.8

^zEach data has been obtained by 10 repetitions.

(나) 2011년 타이머-코이어 처리의 근권환경 측정 결과

그림 3-5-9과 3-5-10은 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 타이머-코이어 배지에서의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 60~70(%), EC는 1.0~2.0 (dS·m⁻¹) 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 5월에서 6월까지 점차 증가하다가 6월말 장마기간이 시작되면서 급액공급을 줄여서 50~60(%)로 낮아졌다가 다시 높아지기를 반복하였다. 장마가 완전히 끝난 8월 말부터는 정상적인 급액 공급을 통해 65~70(%)을 나타내었다. 이후 점차 수분함량이 약간씩 높아지면서 주간에는 70(%) 이상을 유지하였다. EC변화는 5월부터 점차 증가하다가 장마가 시작하는 6월 말부터 끝나는 8월 말까지 1.5~2.5(dS·m⁻¹) 로 나타났다. 9월부터 점차 감소하여 11월에는 1.3~1.7 (dS·m⁻¹) 범위를 나타내었다.

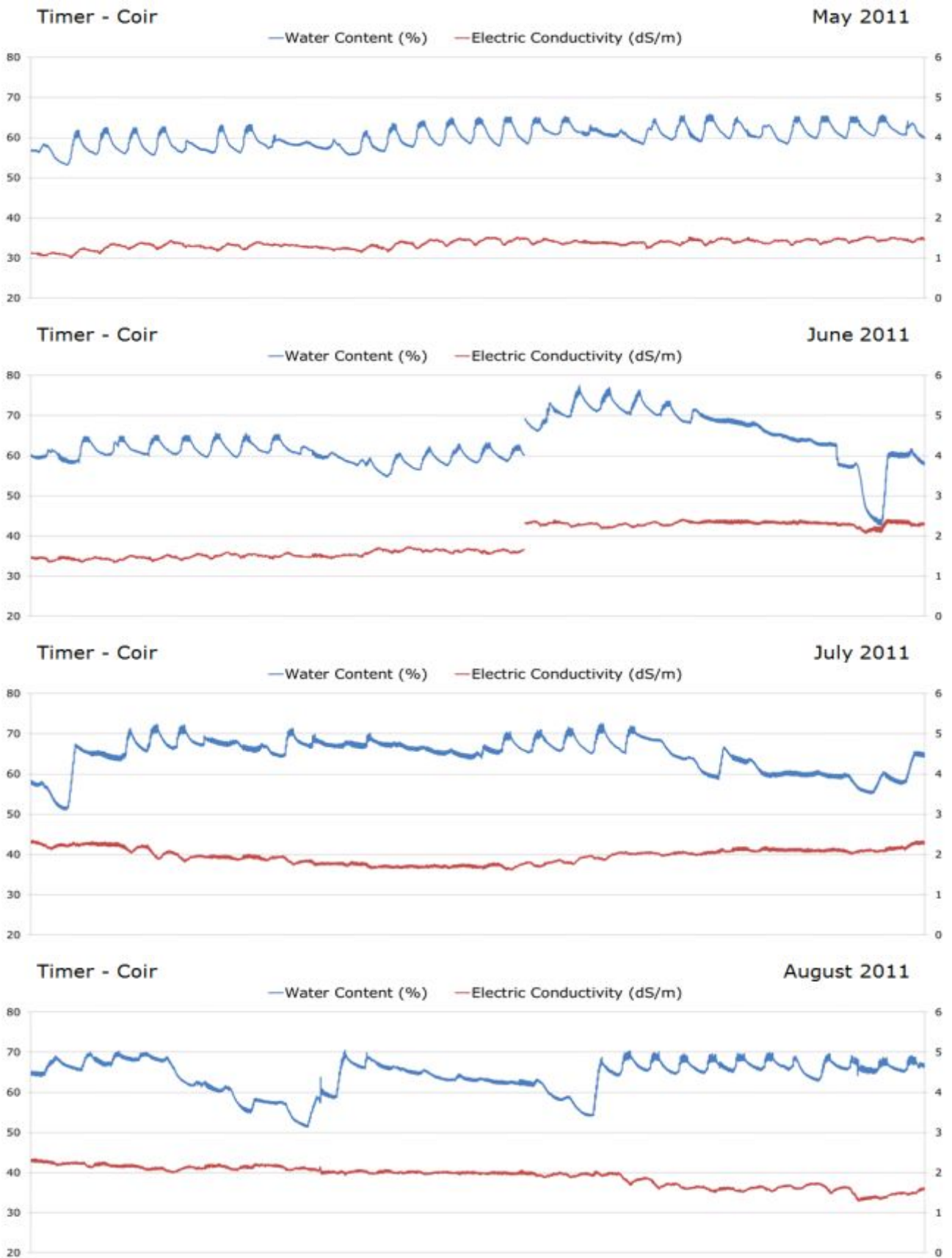


그림 3-5-9. 타이머-코이어 처리에서 2011년 5월에서 8월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

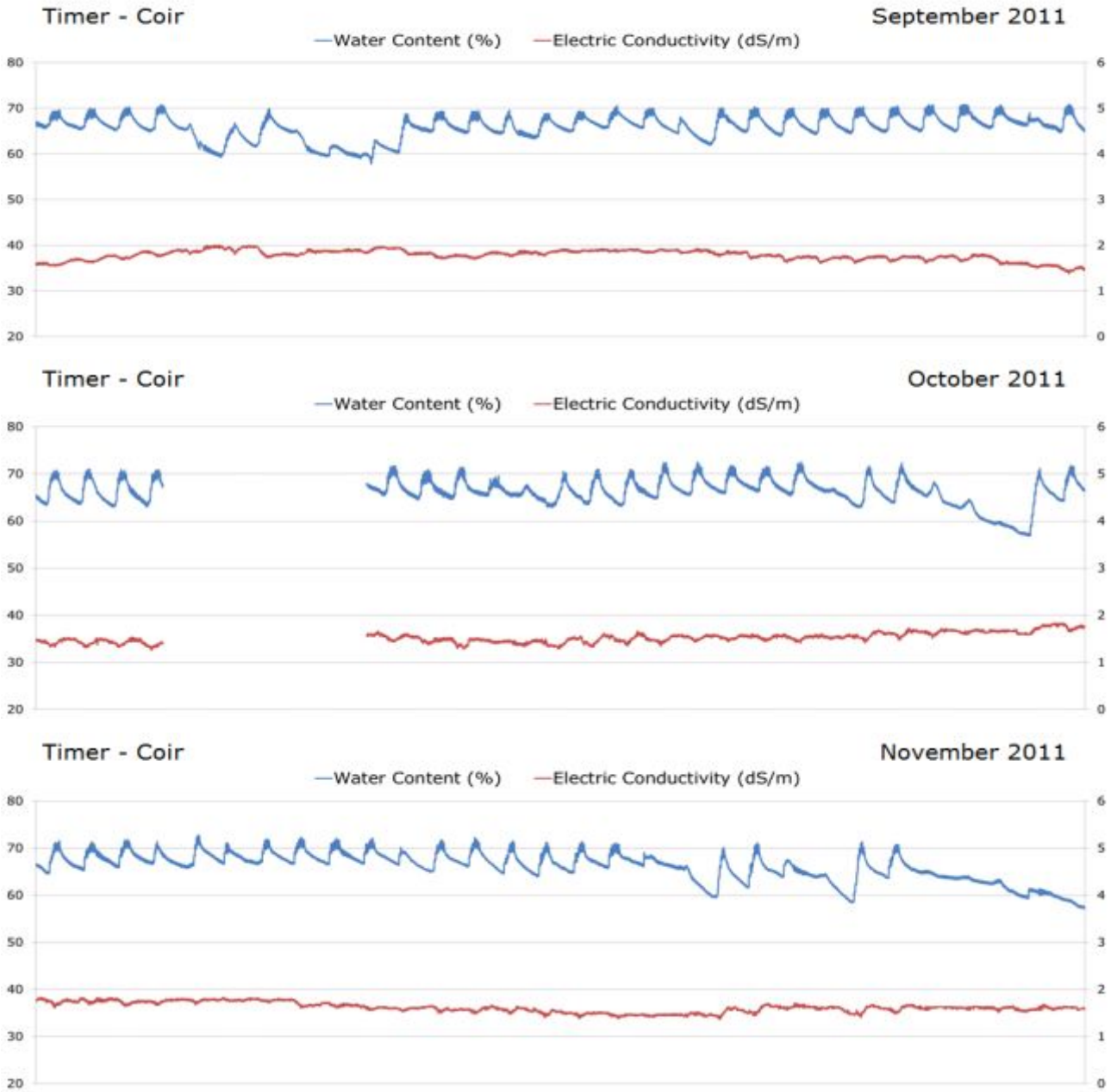


그림 3-5-10. 타이머-코이어 처리에서 2011년 9월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(다) 2012년 타이머-코이어 처리의 근권환경 측정 결과

그림 3-5-11와 3-5-12는 실험기간 중 2012년 6월에서 11월까지의 타이머-코이어 배지에서 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 30~70%, EC는 1.5~4.0 (dS·m⁻¹) 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 6월 중순 30~40(%)에서 점차 증가하여 장마기간인 7월 초 이후에 50(%) 수준까지 약간 낮아졌다가 다시 높아졌다. 8월 중순 장마가 끝나면서 다시 잠깐 50(%) 수준으로 낮아졌다가 9월부터는 60(%) 수준을 유지하였다. 10월 중순 이후에 약간 수분함량이 낮아져서 50~60(%)를 나타내었다. EC변화는 6월 1.5~2.5(dS·m⁻¹) 부터 점차 증가하여 7월 말과 8월 초에는 3.0~4.0(dS·m⁻¹) 까지 높아졌다. 그 이후 감소하여 9월에는 2.0~3.0(dS·m⁻¹), 11월에는 1.5~2.0(dS·m⁻¹) 까지 낮아졌다.

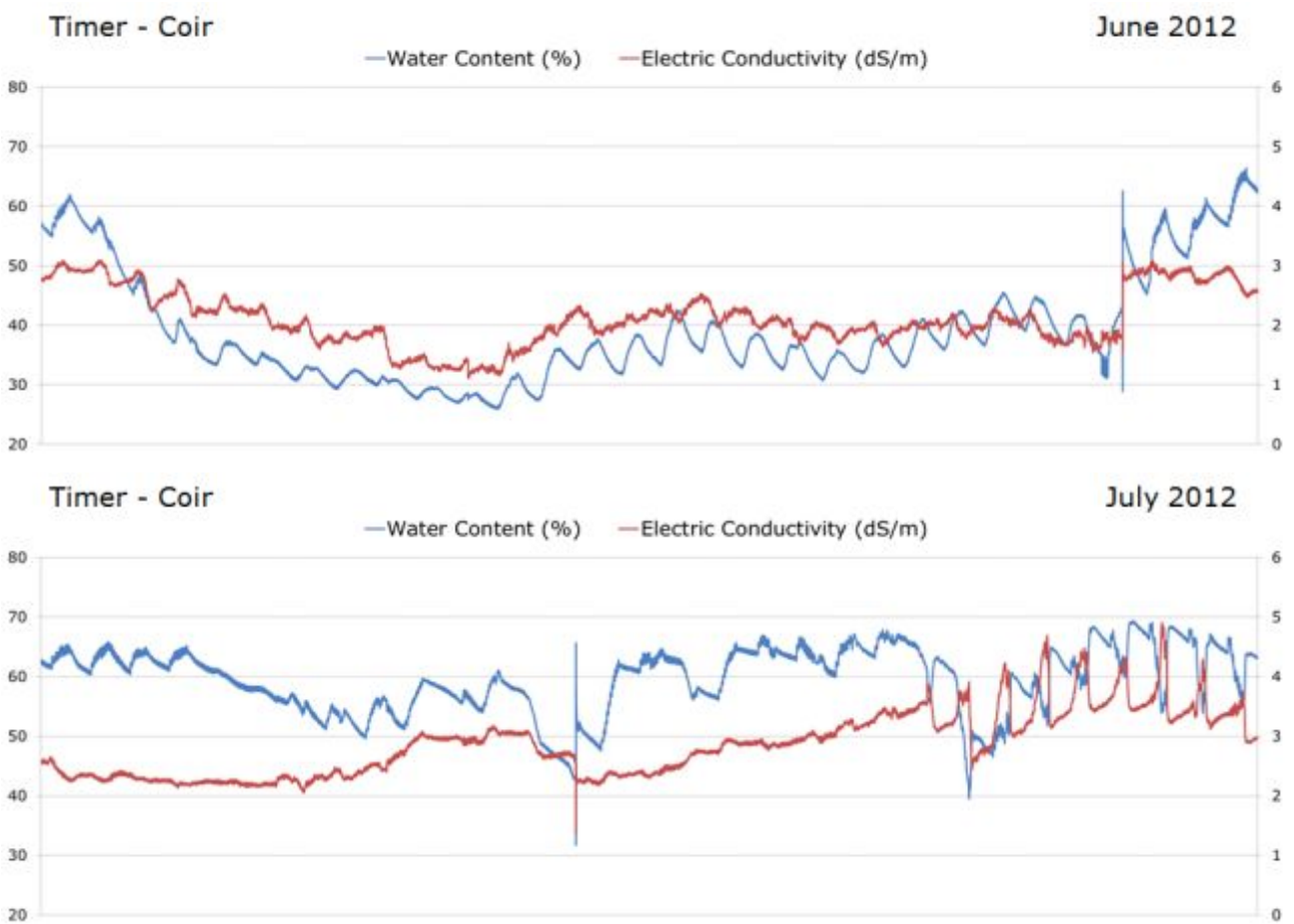


그림 3-5-11. 타이머-코이어 처리에서 2012년 6월에서 7월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

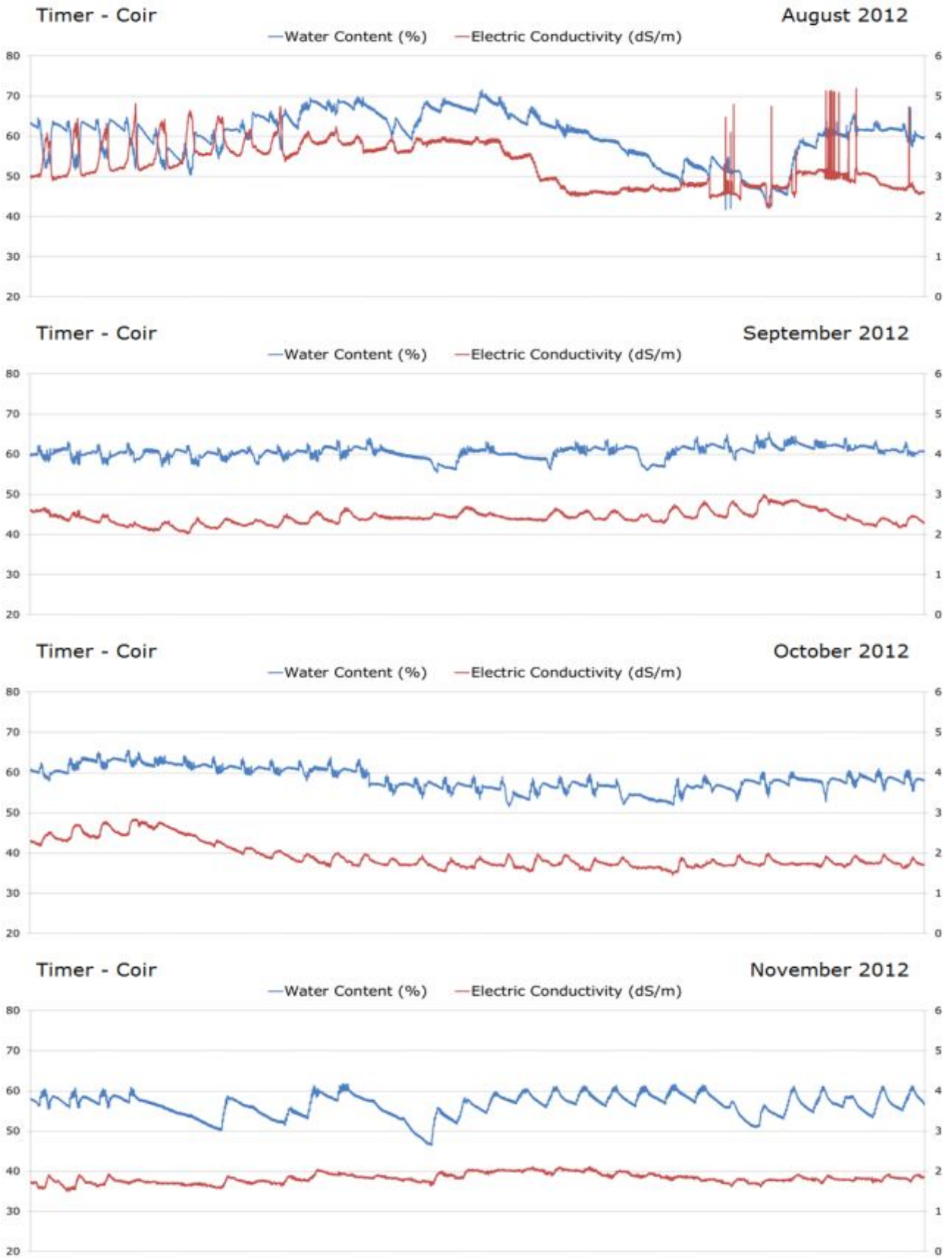


그림 3-5-12. 타이머-코이어 처리에서 2012년 8월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(라) 2013년 타이머-코이어 처리의 근권환경 측정 결과

그림 3-5-13과 3-5-14은 실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 타이머-코이어 배지에서의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 60~75(%), EC는 1.5~2.5 (dS·m⁻¹) 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 실험을 시작한 4월말에 60~70(%)를 나타내다가 5월 중반에 60(%) 수준으로 감소하였다. 그 이후 점차 증가하여 6월에는 70~75(%)까지 높아졌다. EC변화는 4월말 1.5~2.0(dS·m⁻¹)부터 증가하여 5월 중순에 잠깐 2.0(dS·m⁻¹) 이상을 나타내었다가 5월 말에서 6월 초까지는 2.0(dS·m⁻¹) 이하를 보였다. 그 이후 증가하여 2.5(dS·m⁻¹) 수준까지 높아졌다.

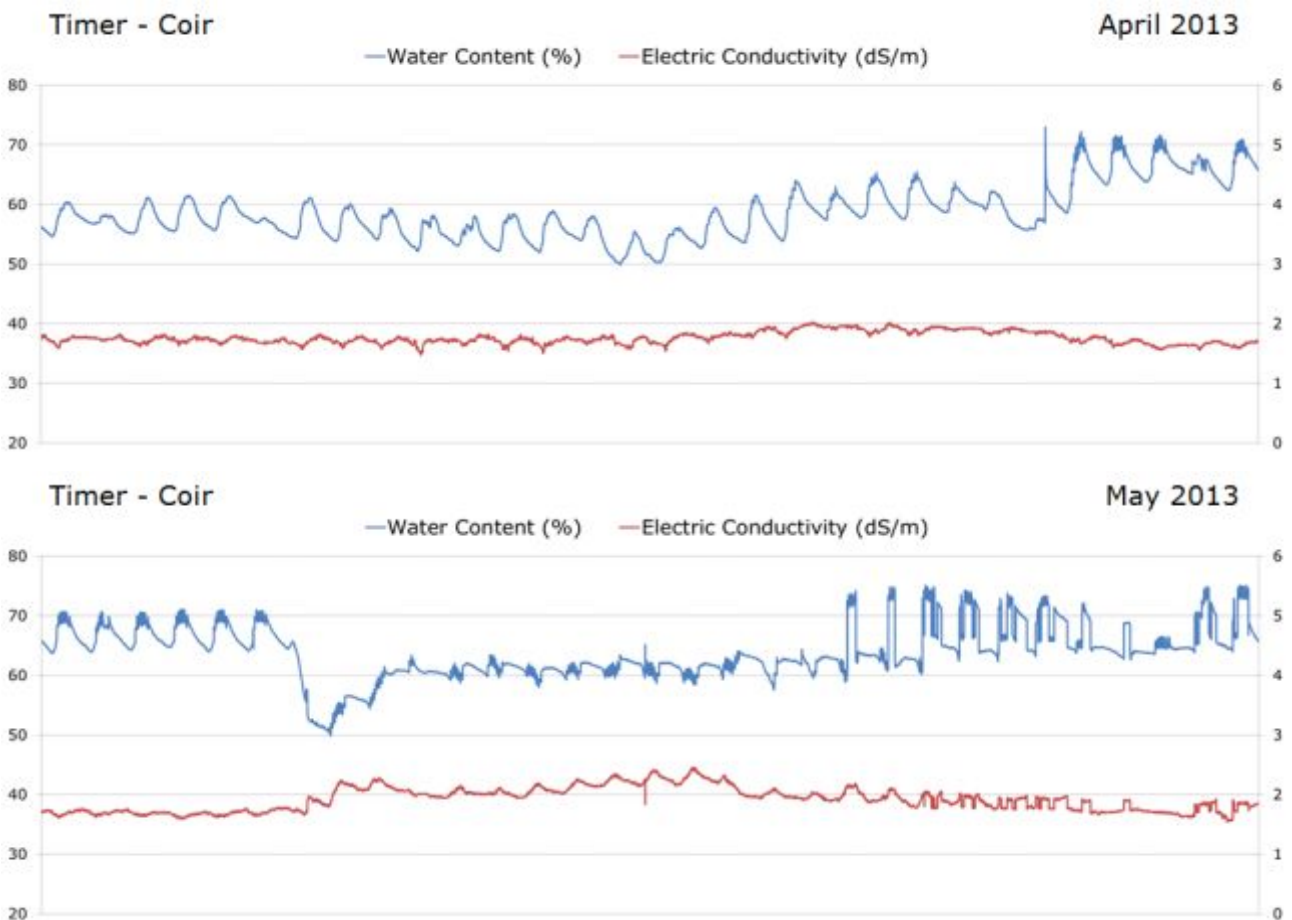


그림 3-5-13. 타이머-코이어 처리에서 2013년 4월에서 5월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

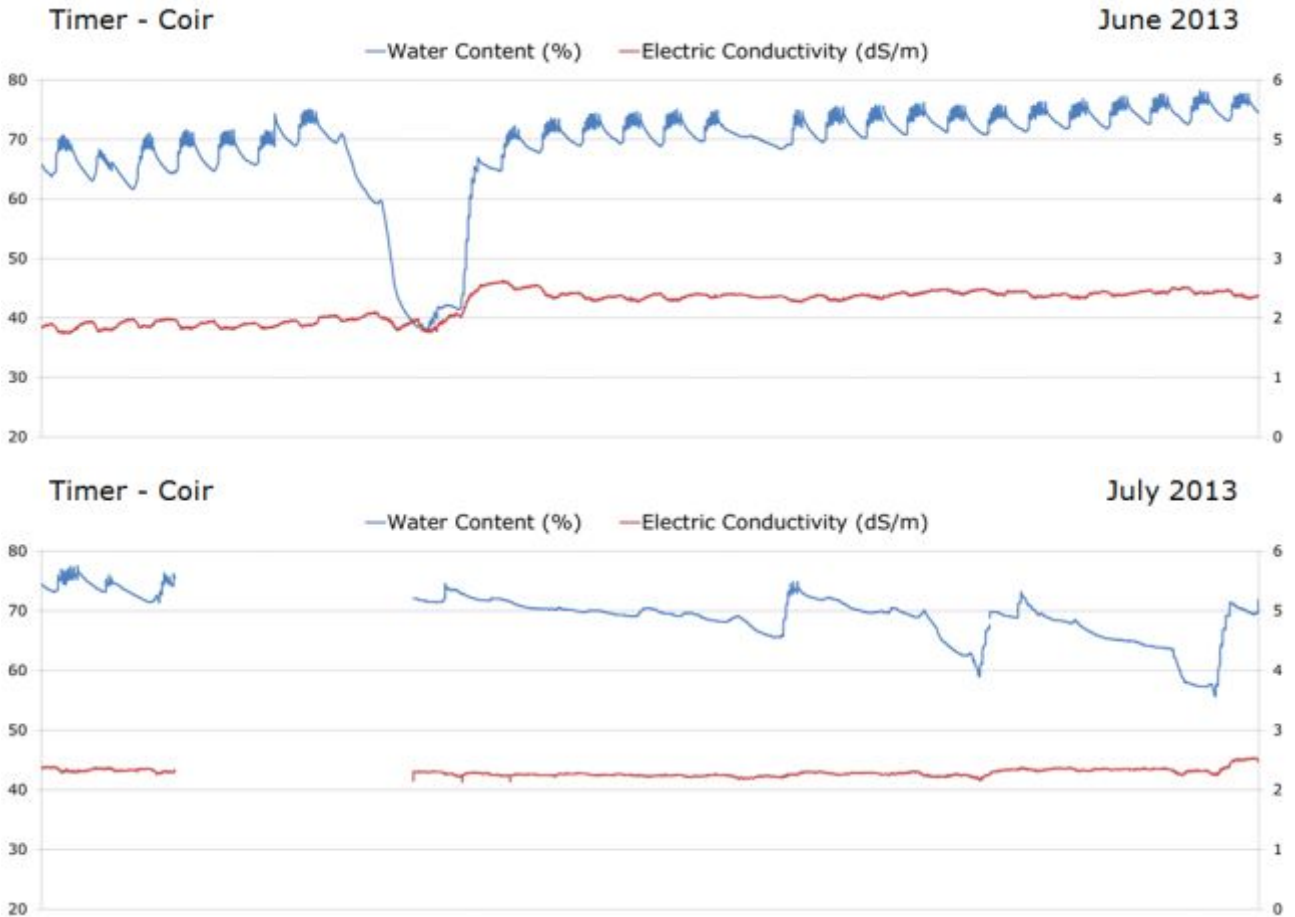


그림 3-5-14. 타이머-코이어 처리에서 2013년 6월에서 7월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(마) 2011년 타이머-암면 처리의 근권환경 측정 결과

그림 3-5-15와 3-5-16은 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 타이머-암면 배지에서의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 30~50(%), EC는 1.0~3.0 (dS·m⁻¹) 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 5월 중순 35~40(%) 에서 점차 증가하여 장마기간인 6월 중순에 50(%) 수준까지 높아졌다. 6월 말부터 장마가 시작되었고, 그와 동시에 센서 고장, 교체 등이 이루어지면서 장마가 끝나는 8월 중순까지 30~40(%) 수준의 수분함량과 EC 2.0~3.0 (dS·m⁻¹) 범위의 변동을 나타내었으나 정확한 측정이 이루어지지 않았다. 장마가 끝나는 8월 말부터 11월까지 40~50(%)의 수분함량 변화폭을 나타내었고, EC는 10월 중순까지 2.0~2.5 (dS·m⁻¹) 변화폭을 보였다가 증가하여 11월에는 2.5 (dS·m⁻¹) 이상을 유지하였다.

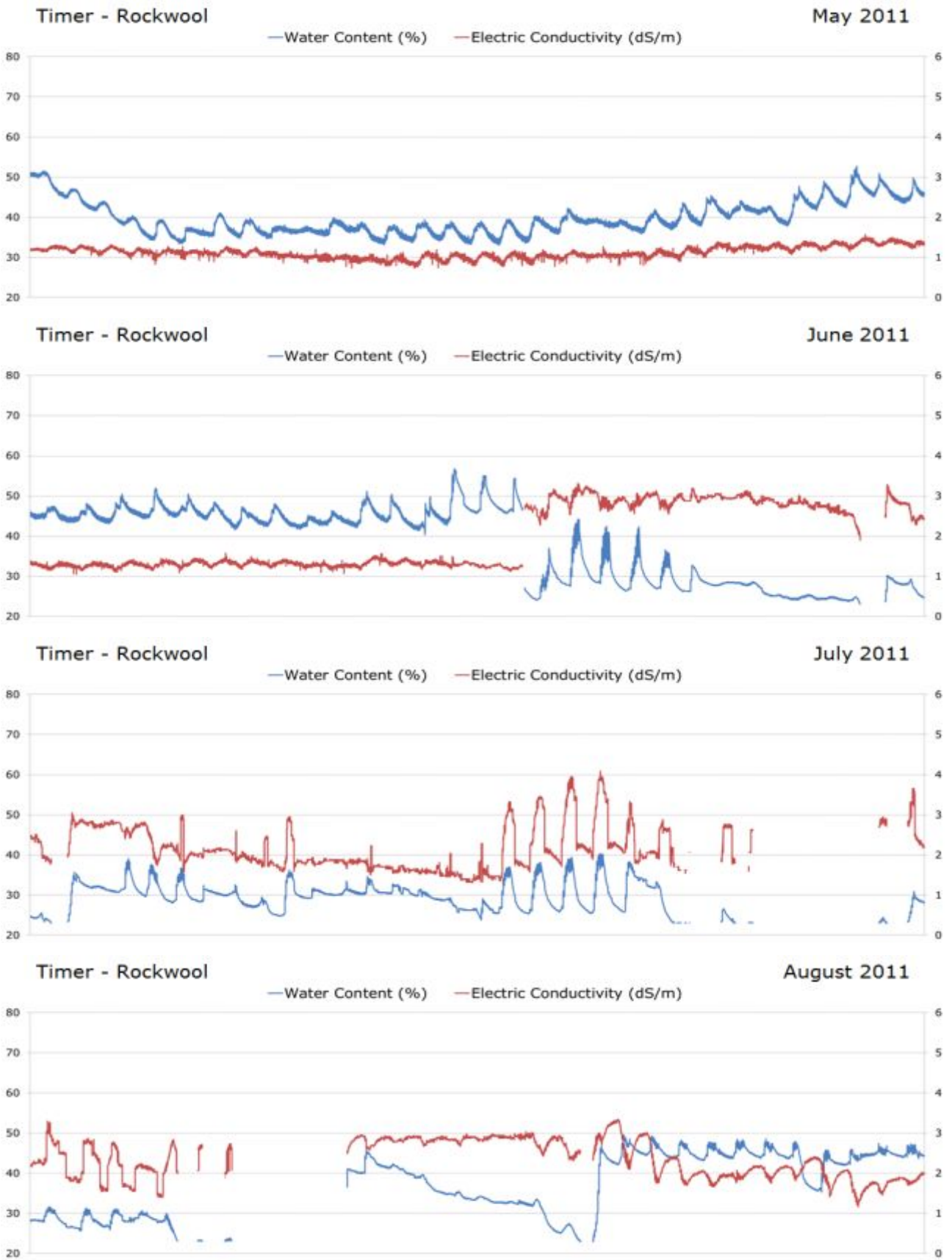


그림 3-5-15. 타이머-암면 처리에서 2011년 5월에서 8월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

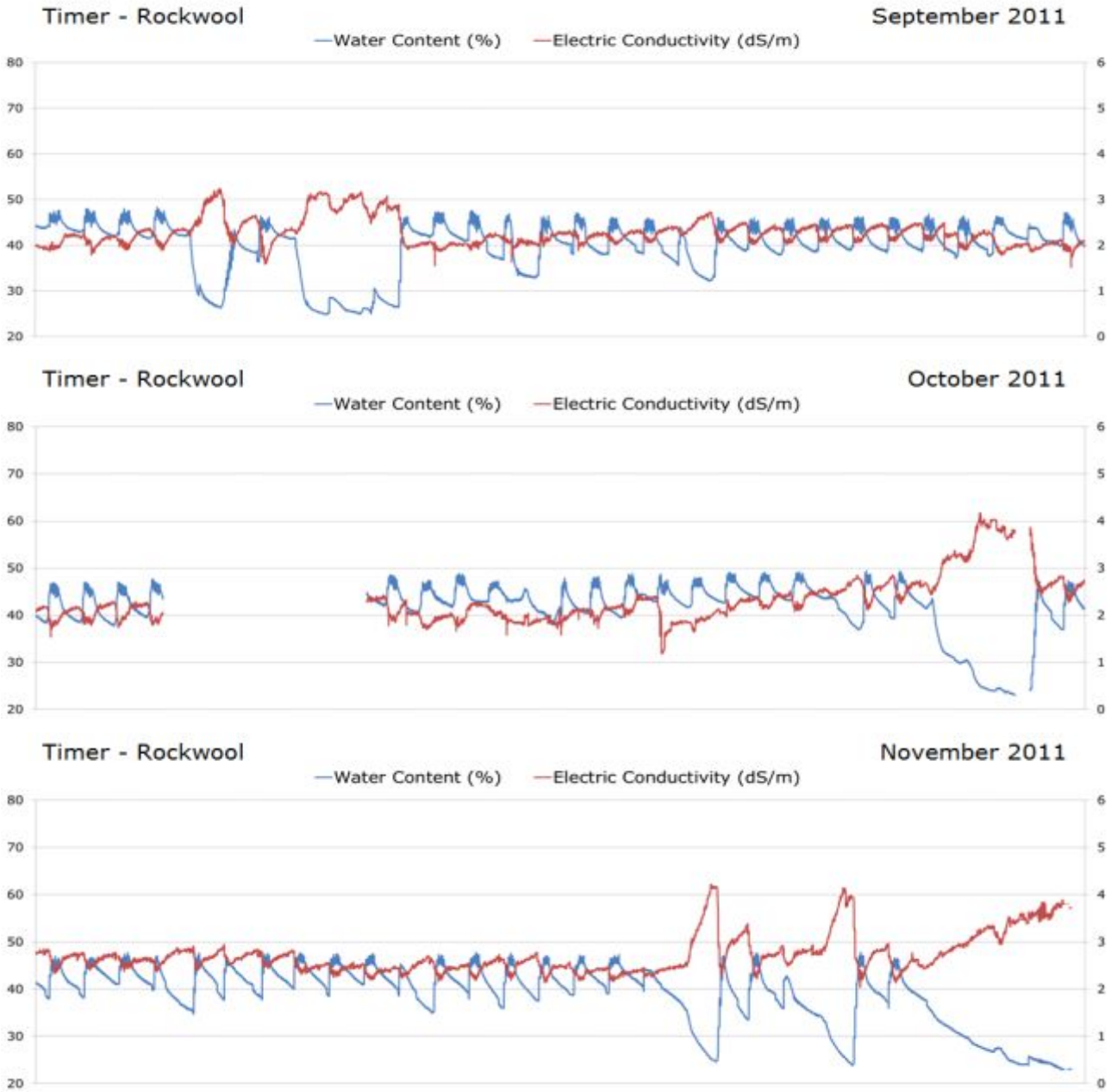


그림 3-5-16. 타이머-암면 처리에서 2011년 9월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(바) 2012년 타이머-암면 처리의 근권환경 측정 결과

그림 3-5-17와 3-5-18은 실험기간 중 2012년 6월에서 11월까지의 타이머-암면 배지에서의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 30~45%, EC는 2.5~6.0 (dS·m⁻¹) 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 6월 초 25~35(%)에서 40~50(%)로 점차 증가하였다가 장마기간인 7월 초 이후에 30(%) 수준까지 약간 낮아졌다가 다시 35~40(%)로 높아져 8월 초에는 45(%) 수준까지 높아졌다. 8월 중순 장마가 끝나면서 다시 잠깐 25~30(%) 수준으로 낮아졌다가 9월부터는 35~45(%) 범위를 유지하였다. 11월 중순 이후에 약간 수분함량이 낮아져서 30~40(%)를 나타내었다. EC변화는 6월에 4.0(dS·m⁻¹)이상으로 높게 나타났다가 7월초부터 낮아져서 4.0(dS·m⁻¹) 수준에서 7월 말에는 3.0(dS·m⁻¹)까지 낮아졌다. 8월 중순에 4.0 (dS·m⁻¹)까지 높아졌다가 9월로 넘어가면서 2.5~3.5 (dS·m⁻¹) 로 낮아졌다. 10월 초에 4.0 (dS·m⁻¹)로 약간 높아졌다가 다시 2.5~3.5 (dS·m⁻¹) 범위로 낮아졌다. 11월 초반 이후에는 다시 증가하여 3.0~4.0 (dS·m⁻¹) 범위를 보였다.

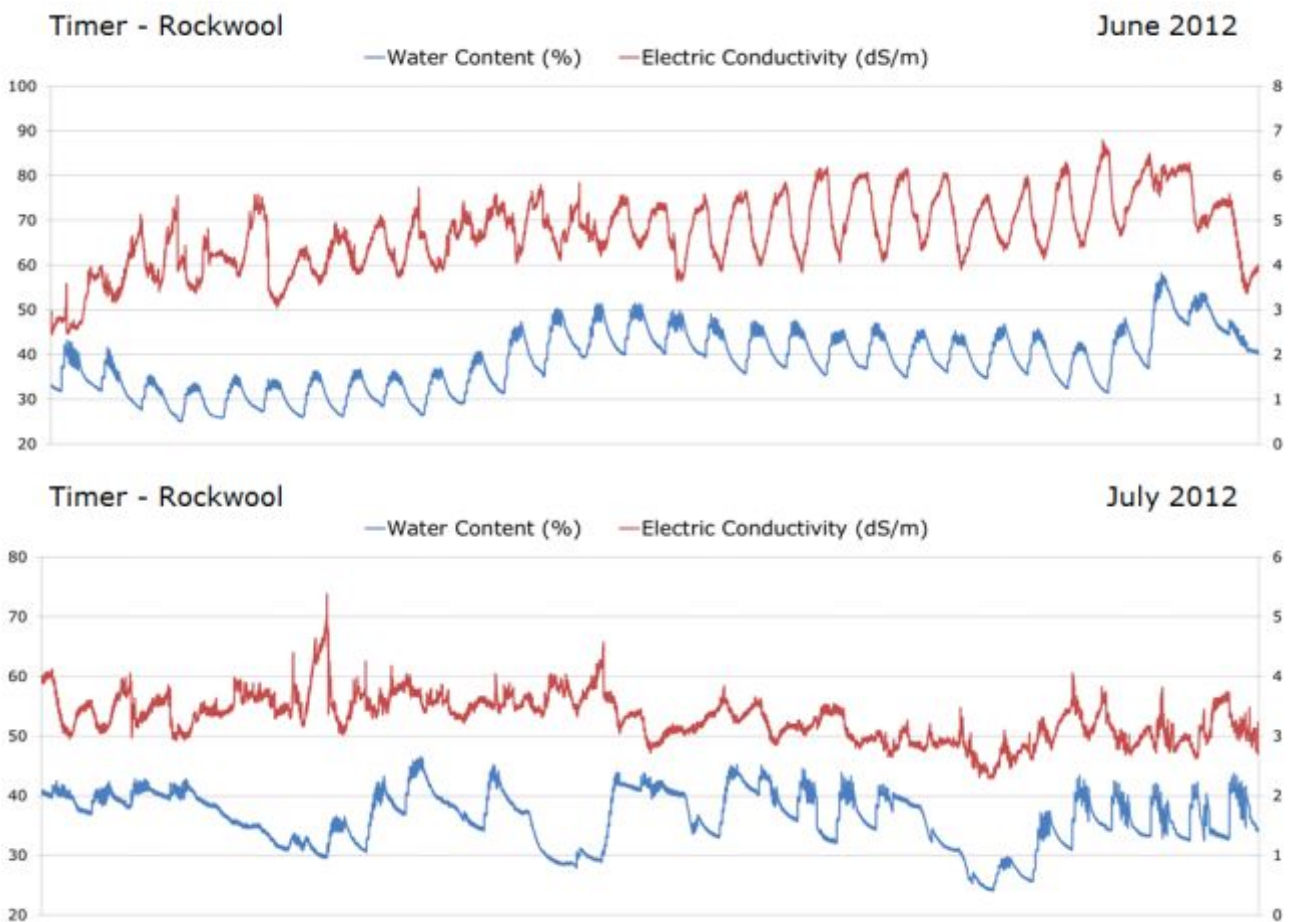


그림 3-5-17. 타이머-암면 처리에서 2012년 6월에서 7월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

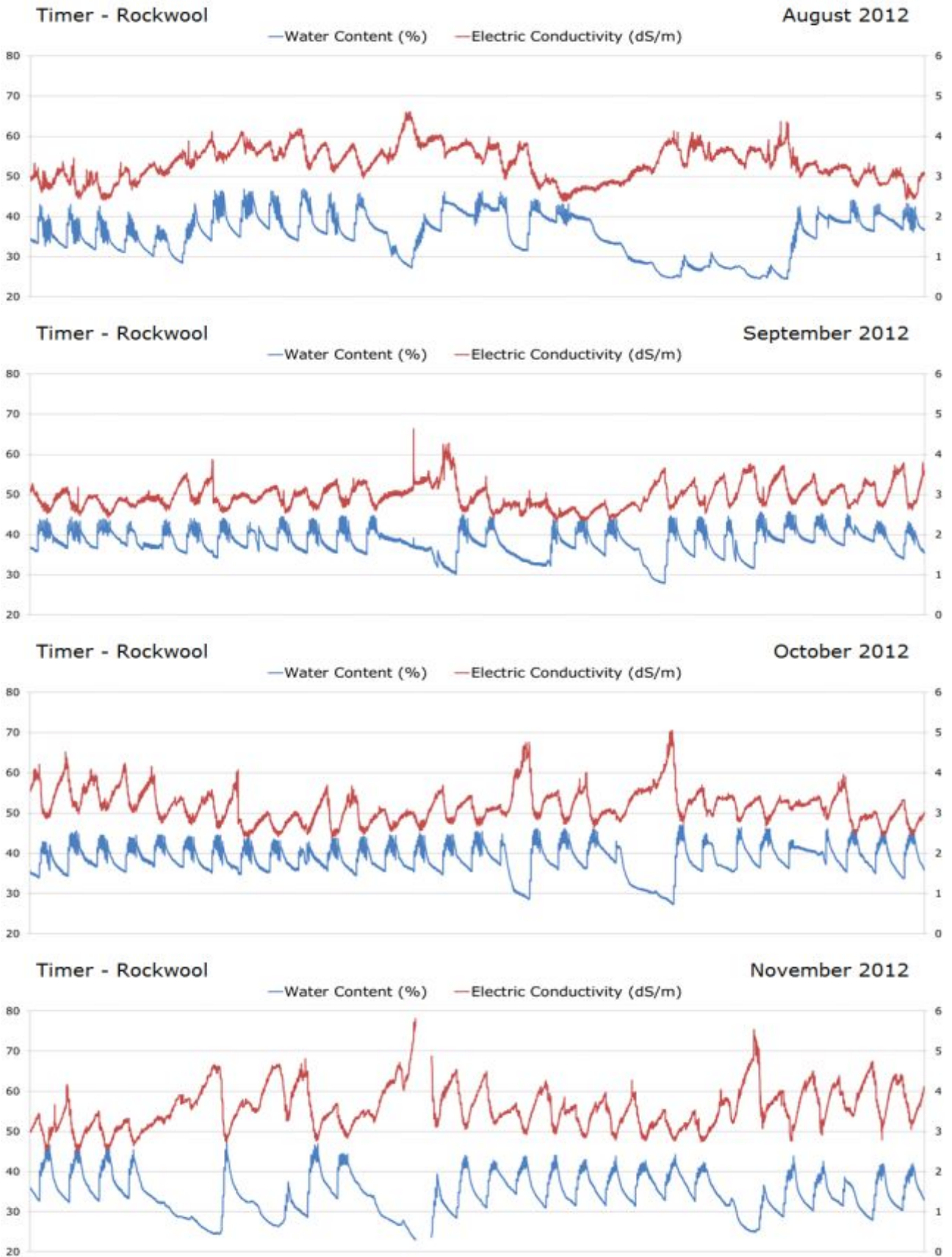


그림 3-5-18. 타이머-암면 처리에서 2012년 8월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(사) 2013년 타이머-암면 처리의 근권환경 측정 결과

그림 3-5-19와 3-9-20은 실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 타이머-암면 배지에서의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 30~50(%), EC는 2.0~4.0 (dS·m⁻¹) 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 실험을 시작한 4월말에 35~45(%)를 나타내었고, 5월에도 35~45(%)를 보이다가 점차 높아져 5월 말에는 40~50(%)를 나타냈다. 이는 6월까지 지속되다가 6월말에 약간 높아져 45~55% 범위를 보였다. EC변화는 4월 말 2.0~4.0(dS·m⁻¹)를 나타내었고, 5월까지 계속되다가 5월 말에 변화 범위가 감소하여 2.0~3.0(dS·m⁻¹)을 보였다. 6월 중순에 호리고 비가 오면서 근권 EC는 약간 높아졌다가 다시 2.0~3.0(dS·m⁻¹) 범위를 나타내었으나 이후 6월말 2.5~3.5(dS·m⁻¹)로 점차 증가하였다.

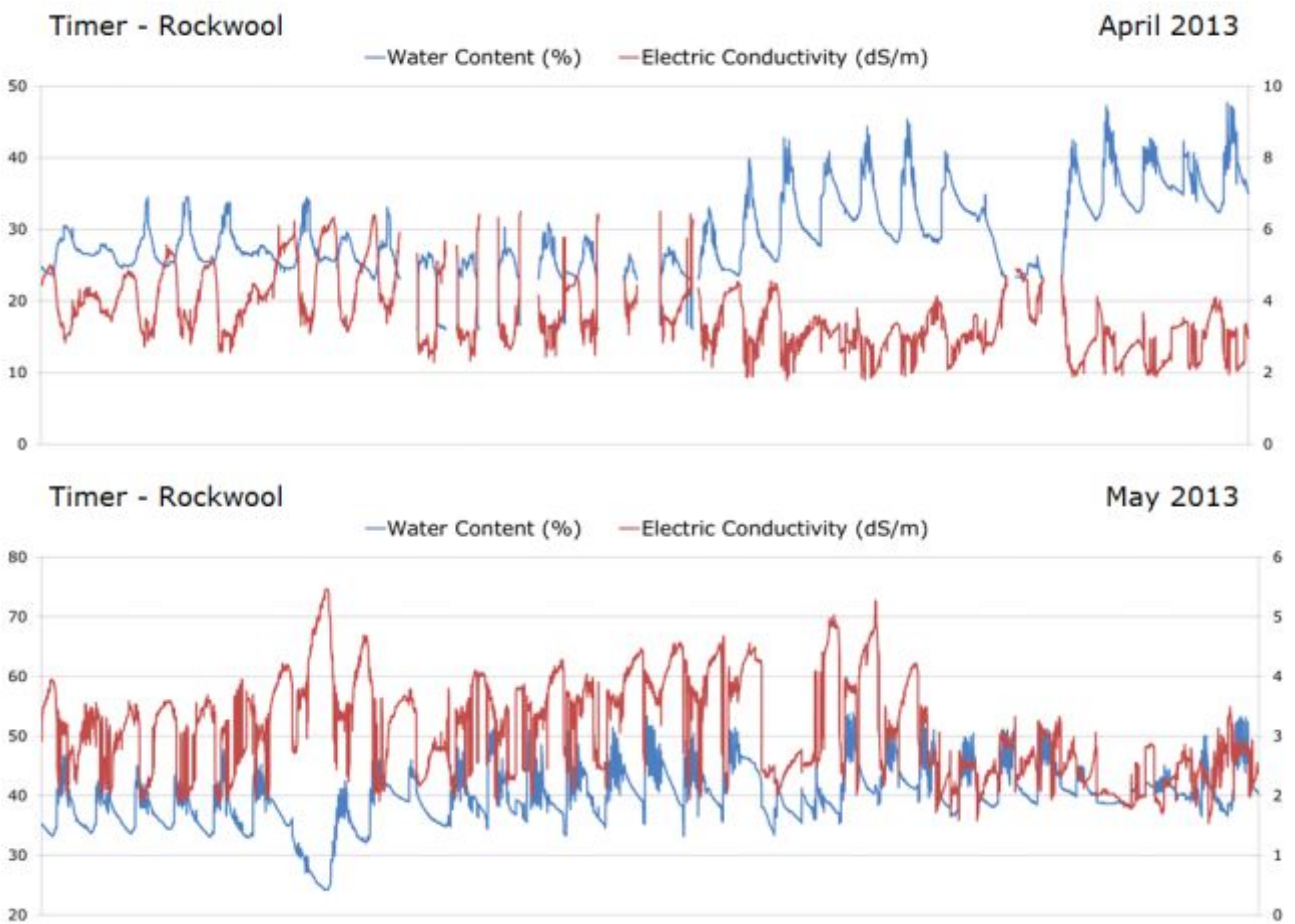


그림 3-5-19. 타이머-암면 처리에서 2013년 4월에서 5월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

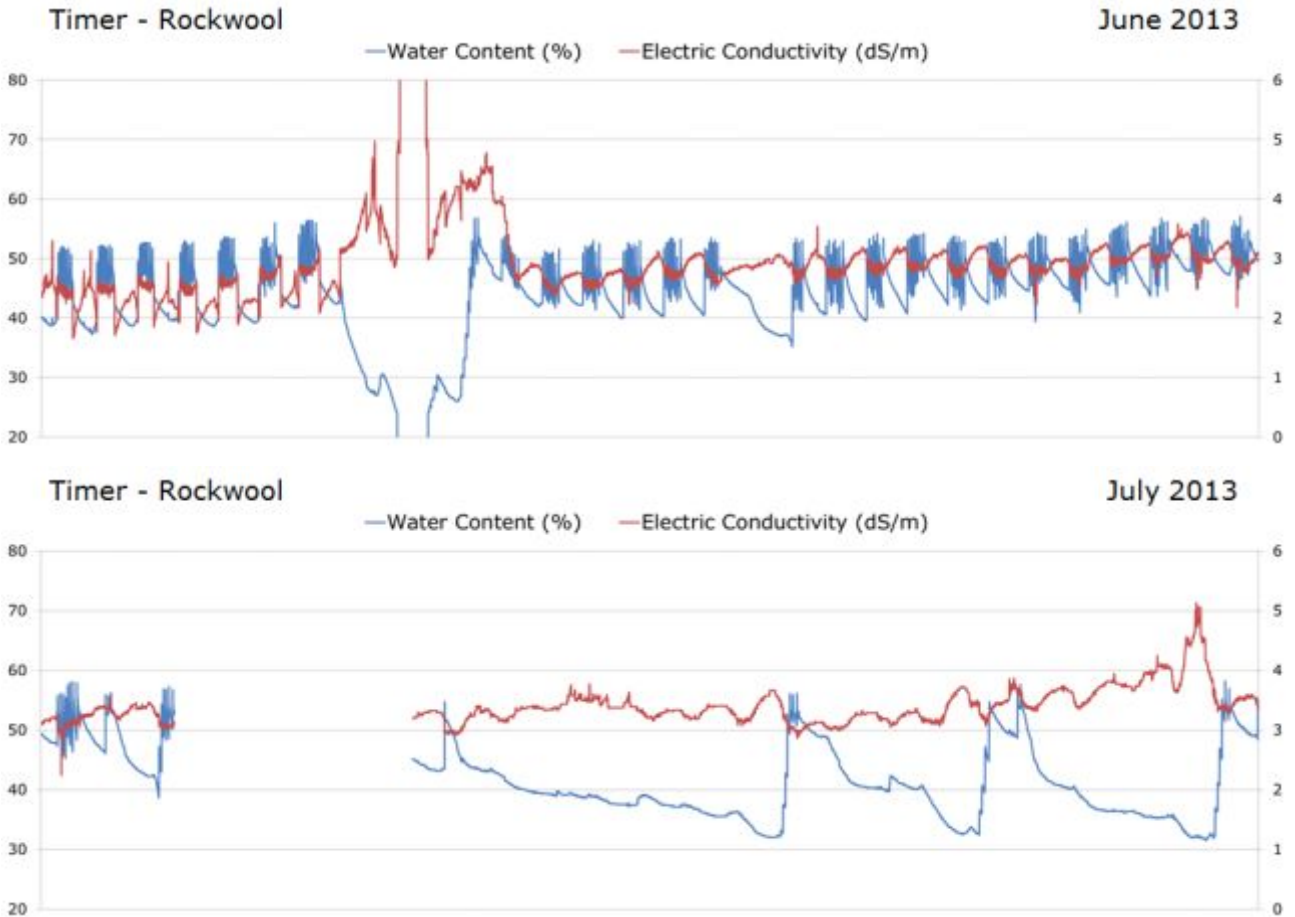


그림 3-5-20. 타이머-암면 처리에서 2013년 6월에서 7월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(4) 연구결과 요약

코코넛 코이어와 암면을 이용한 장미 수경재배에서 타이머를 이용한 급액 자동 제어시 배지 내 근권부 수분 함량 변화를 2011년에서 2013년까지 측정하였다. 급액 조건은 EC $1.5 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$, 급액량 $640\pm 20\text{mL/day/plant}$ 으로 1일 8회 급액하였다.

타이머-코이어 처리에서 2011년에는 수분함량은 60~70(%), EC는 $1.0\sim 2.0 \text{ (dS}\cdot\text{m}^{-1})$ 범위 중심으로 변화하였고, 2012년에는 수분함량 30~70(%), EC $1.5\sim 4.0 \text{ (dS}\cdot\text{m}^{-1})$ 범위 중심으로 2013년에는 수분함량 60~75(%), EC $1.5\sim 2.5 \text{ (dS}\cdot\text{m}^{-1})$ 범위로 변화가 나타났었다. 코이어 처리의 수분함량은 계절에 따른 영향뿐 아니라 장마와 같은 날씨 영향으로 일정한 패턴보다는 다양한 연중 변화를 나타냈고, EC는 여름에 높아졌다가 다시 낮아지는 연중 변화 특징을 나타냈다. 타이머-암면 처리에서는 2011년에 수분함량 30~50(%), EC $1.0\sim 3.0 \text{ (dS}\cdot\text{m}^{-1})$, 2012년은 수분함량은 30~45(%), EC는 $2.5\sim 6.0 \text{ (dS}\cdot\text{m}^{-1})$, 2013년에는 수분함량은 30~50(%), EC는 $2.0\sim 4.0 \text{ (dS}\cdot\text{m}^{-1})$ 범위를 중심으로 변화를 보였다. 암면 처리는 코이어 처리보다 확실히 차이가 나는 낮은 수분함량 범위를 나타내었으며, 수분함량은 일정한 패턴보다는 다양한 연중 변화를 나타냈고, EC는 여름에 약간 높아졌다가 초가을에 낮아지고 가을 중반이 넘어가면서 다시 높아지는 연중 변화 특징을 보였다.

나. FDR센서를 이용한 근권부 수분함량 변화

(1) 실험 목표

코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배에서 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 센서를 이용한 자동 급액시 근권부 수분 함량을 조절하여 장미 생육에 적합한 근권부 수분함량 조건을 구명하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

212 페이지 실험 수행 방법 부분 참조

자동 급액 제어는 코코넛 코이어 슬라브를 배지로 이용하였으며, 2011년 4월 20일부터 제어를 시작하였다. 급액 EC, 급액제어, 급액시간을 표 3-5-3에서와 같이 처리하였다. 타이머 처리는 날씨가 흐려지거나 비오는 날에는 공급을 중단하였다.

표 3-5-3. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 '근권수분함량별' 실험 처리구

Treatment	Electric Conductivity (dS · m ⁻¹)	Irrigation control (water content range, %)	Irrigation start	Irrigation time (hour)
			Irrigation stop	
WC 45	1.5	45±1	under 44%	09:00 ~ 17:00
			over 46%	
WC 55		55±1	under 54%	
			over 56%	
WC 65		65±1	under 64%	
			over 66%	
Control (Timer)	Coir Rockwool	640±20 ml/day/plant (80ml x 8 times/day)		

(3) 실험수행 내용 및 결과

(가) 온실환경 및 근권환경 측정 결과

207 페이지 (가) 2011년 온실환경 부분 참조.

214 페이지 (나) 2011 타이머-코이어처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

220 페이지 (마) 2011 타이머 암면처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

(나) FDR 센서를 이용한 자동 급액시 근권 환경 측정 결과

그림 3-5-21과 그림 3-5-22는 근권수분함량 45%처리(WC 45)에서 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 40~50%, EC는 1.5~3.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 7, 8월 장마기를 제외하고는 40~50% 범위를 유지하였다. 장마가 끝나가는 8월 초기부터 급액 조절을 통한 근권 수분함량이 회복되는 모습을 나타냈다. EC변화는 5월에 1.5 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 에서 2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 조금씩 증가하다가 장마기간에 약간의 감소가 일어난 후에 다시 9월까지 증가하여 10월초 3.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 에 다다른 다음 중순에 약간 감소 후 다시 증가하여 11월에는 2.5~3.5 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 범위를 나타냈다.

그림 3-5-23과 그림 3-5-24는 근권수분함량 55%처리(WC 55)에서 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~60%, EC는 1.5~4.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 7, 8월 장마기를 제외하고는 꾸준히 50~60% 범위를 유지하였다. 장마가 끝나가는 8월 초기부터 급액 조절을 통한 근권 수분함량이 회복되는 모습을 나타냈다. EC변화는 5월부터 1.0~2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 수준에서 증감을 나타내었다가 7월 말부터 약간 증가하여 8월 말에는 2.5 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 수준까지 증가하였다. 9월 중순에 감소가 일어난 후 다시 점차 증가하여 11월 말에 4.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 증가되는 패턴을 나타내었다.

그림 3-5-25와 그림 3-5-26은 근권수분함량 65%처리(WC 65)에서 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 60~70%, EC는 1.5~3.5 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 7, 8월 장마기를 제외하고는 꾸준히 60~70 % 범위를 유지하였다. 장마가 끝나가는 8월 초기부터 급액 조절을 통한 근권 수분함량이 회복되는 모습을 나타냈다. 다만, 8월 후반 시기에 야간의 근권 수분함량이 높아지는 측정 결과가 나타났는데 이는 이 시기에 장마 이후의 높은 근권 수분함량을 식물체가 증발산으로 충분히 활용하지 못한 것이 그 이유로 생각된다. EC변화는 5월에 1.0~2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 수준에서 증감을 나타내었는데, 이는 7월 말 장마에 의한 영향을 제외하고는 8월까지 계속 되었다. 9월이 되면서 근권 EC는 점차 증가하여 10월 말에는 3.0~3.5 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 범위에 다다랐으며, 이는 11월 중순까지 지속되다가 감소하였다.

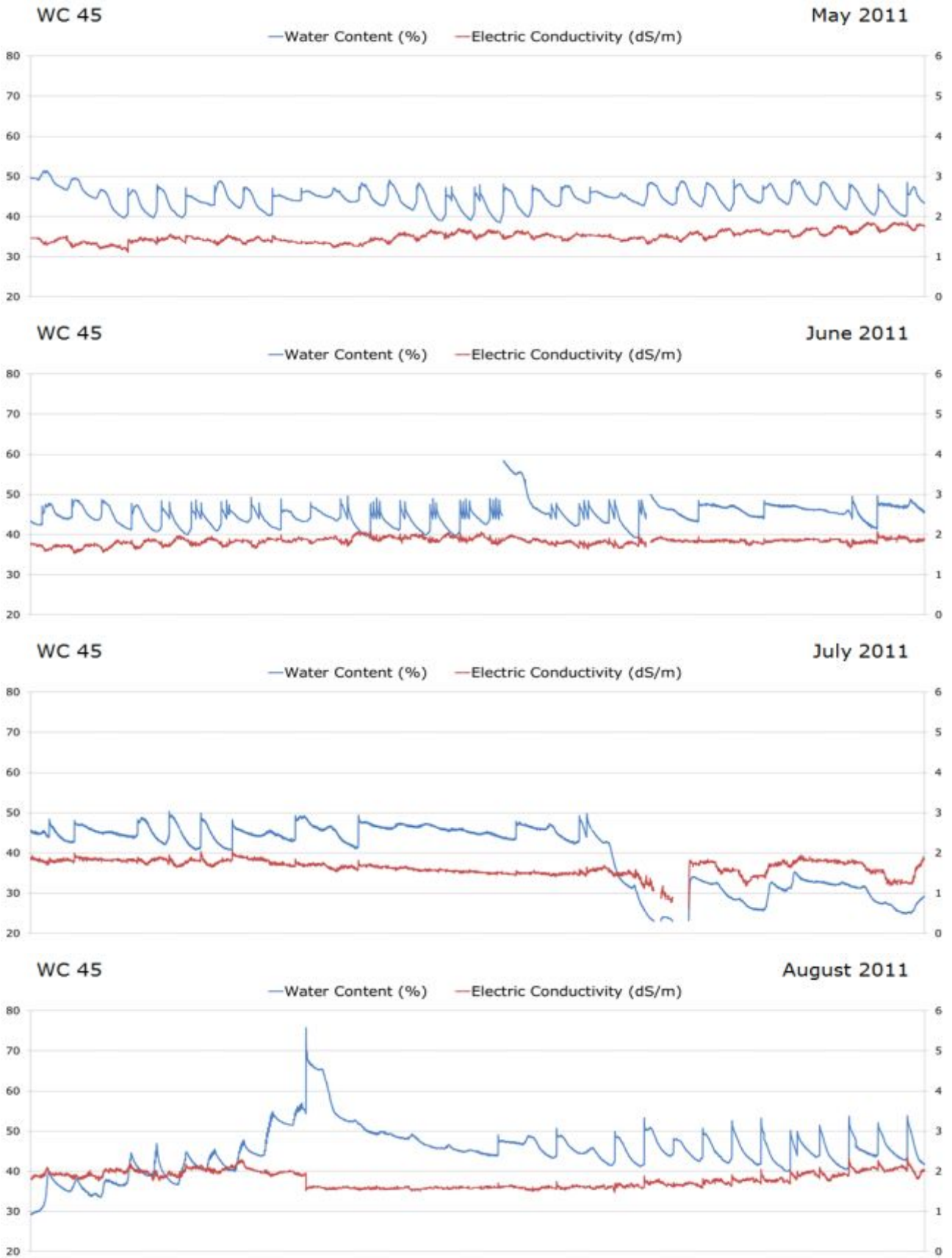


그림 3-5-21. WC45 처리에서 2011년 5월에서 8월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

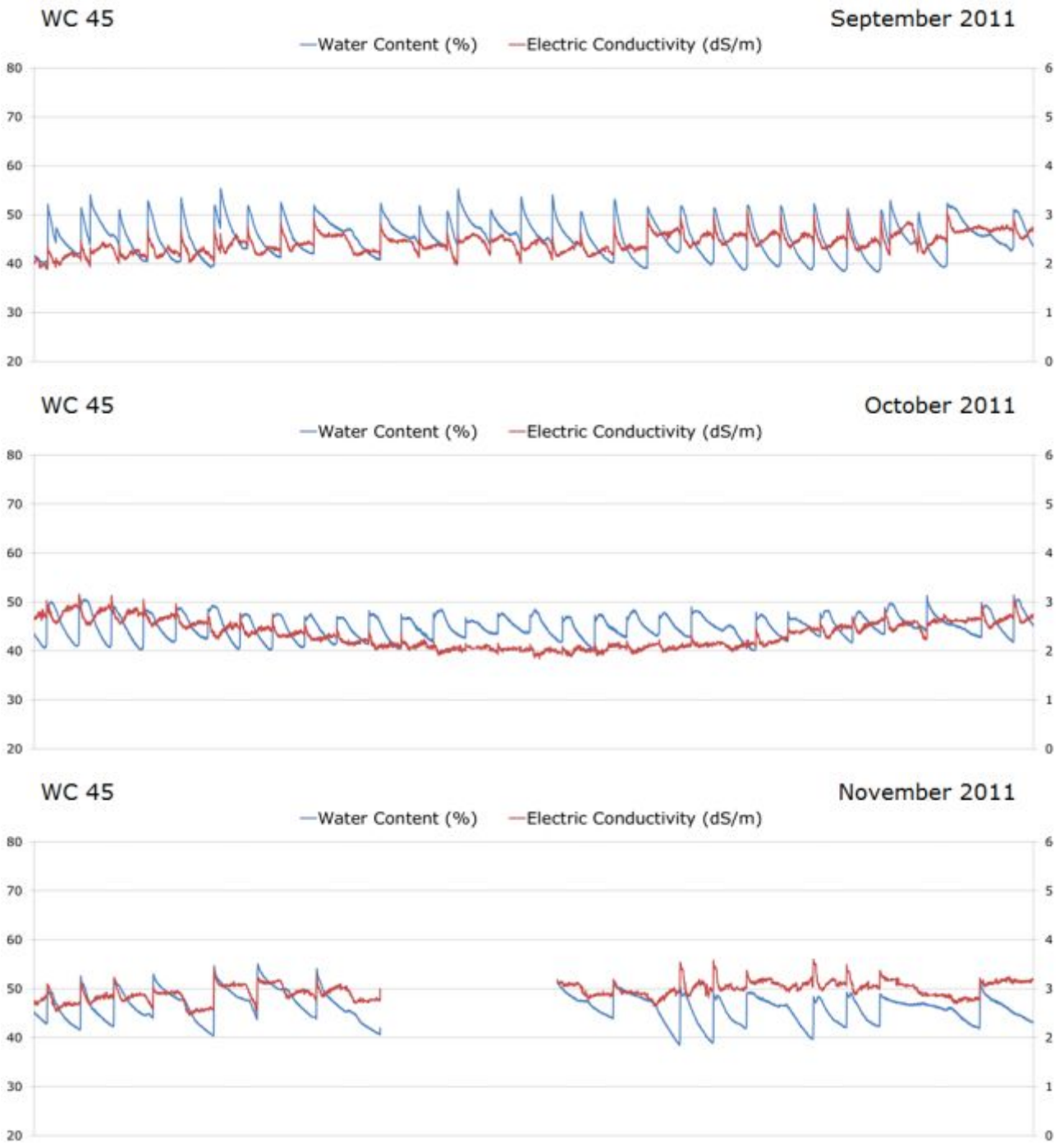


그림 3-5-22. WC45 처리에서 2011년 9월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

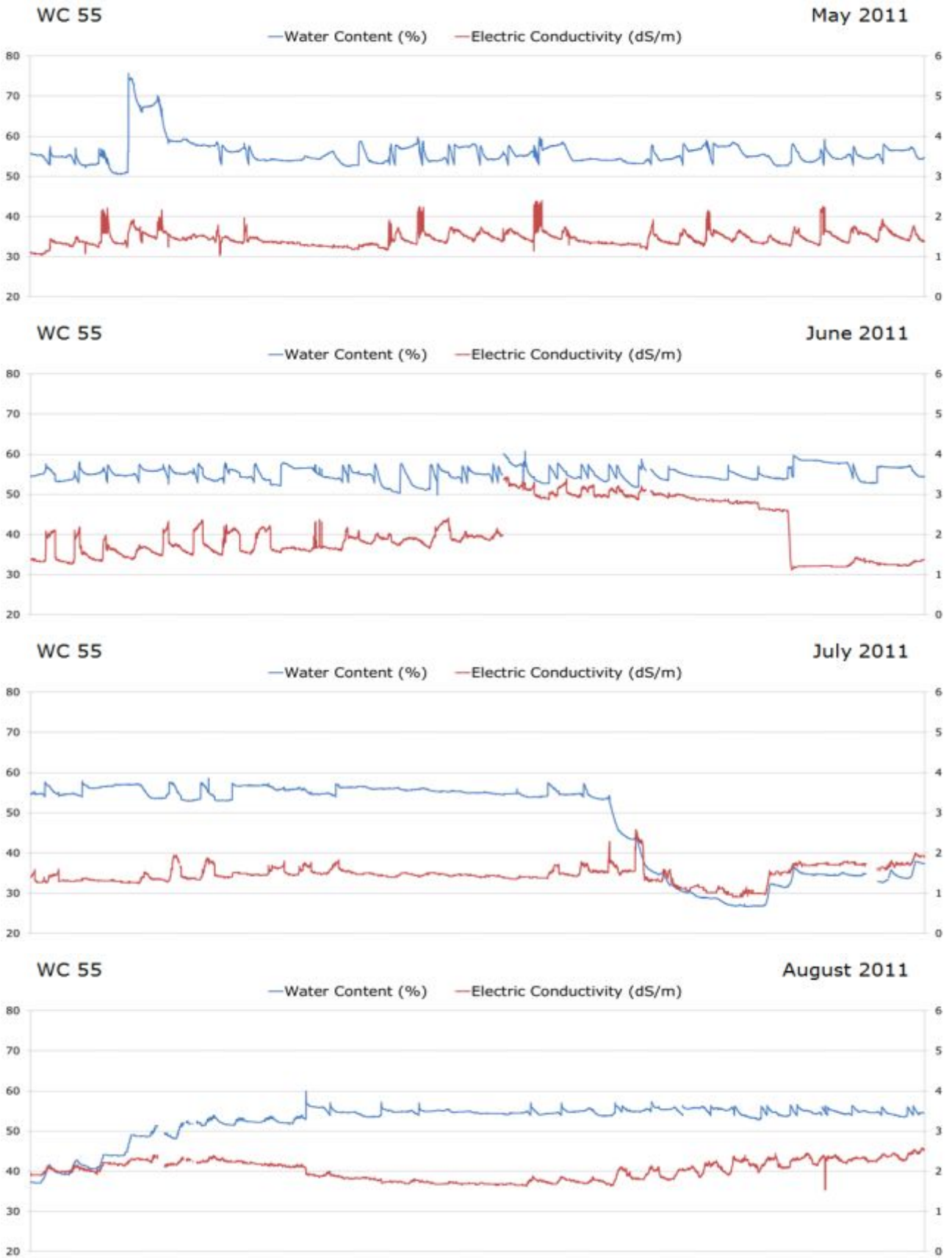


그림 3-5-23. WC55 처리에서 2011년 5월에서 8월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

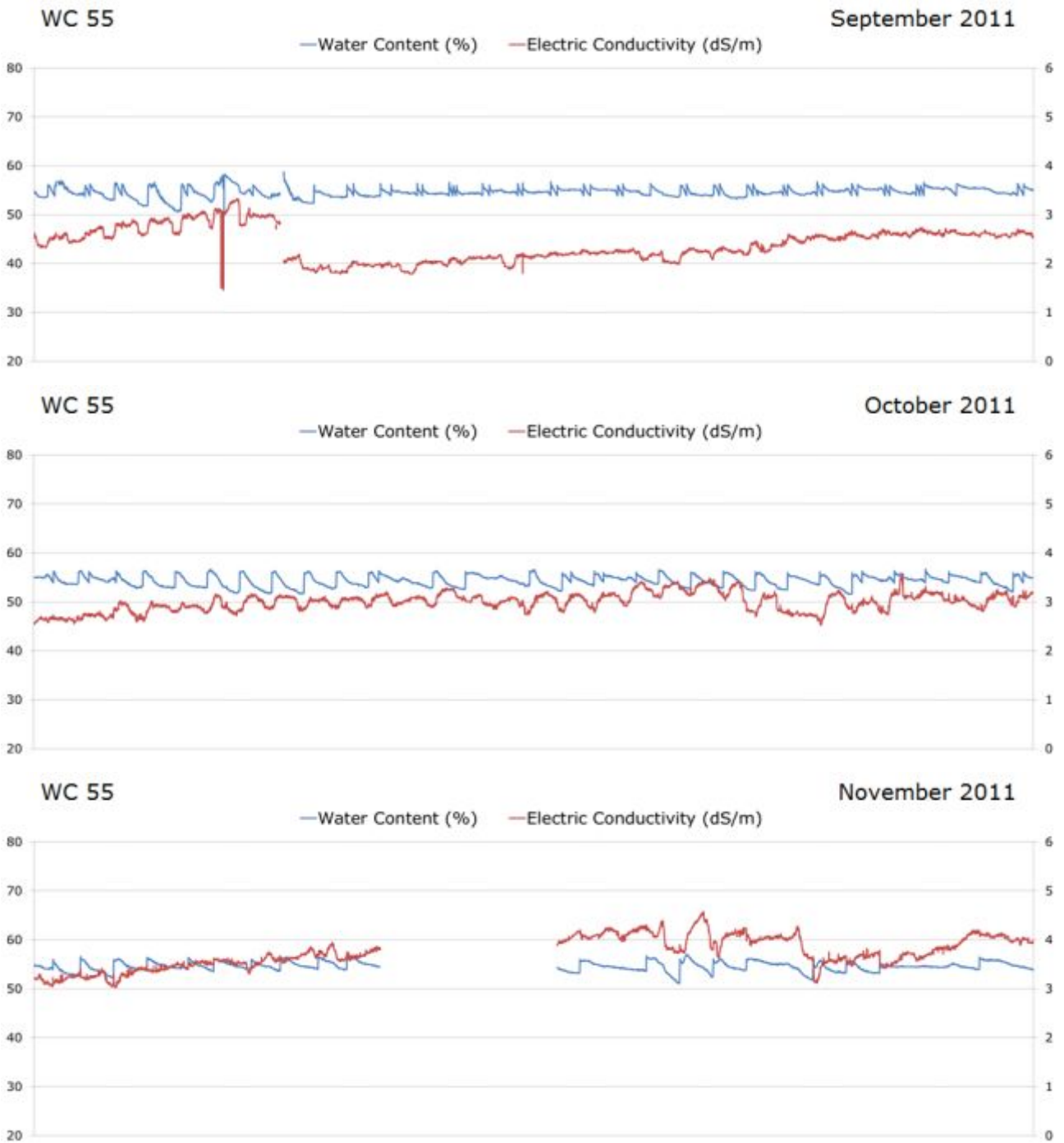


그림 3-5-24. WC55 처리에서 2011년 9월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

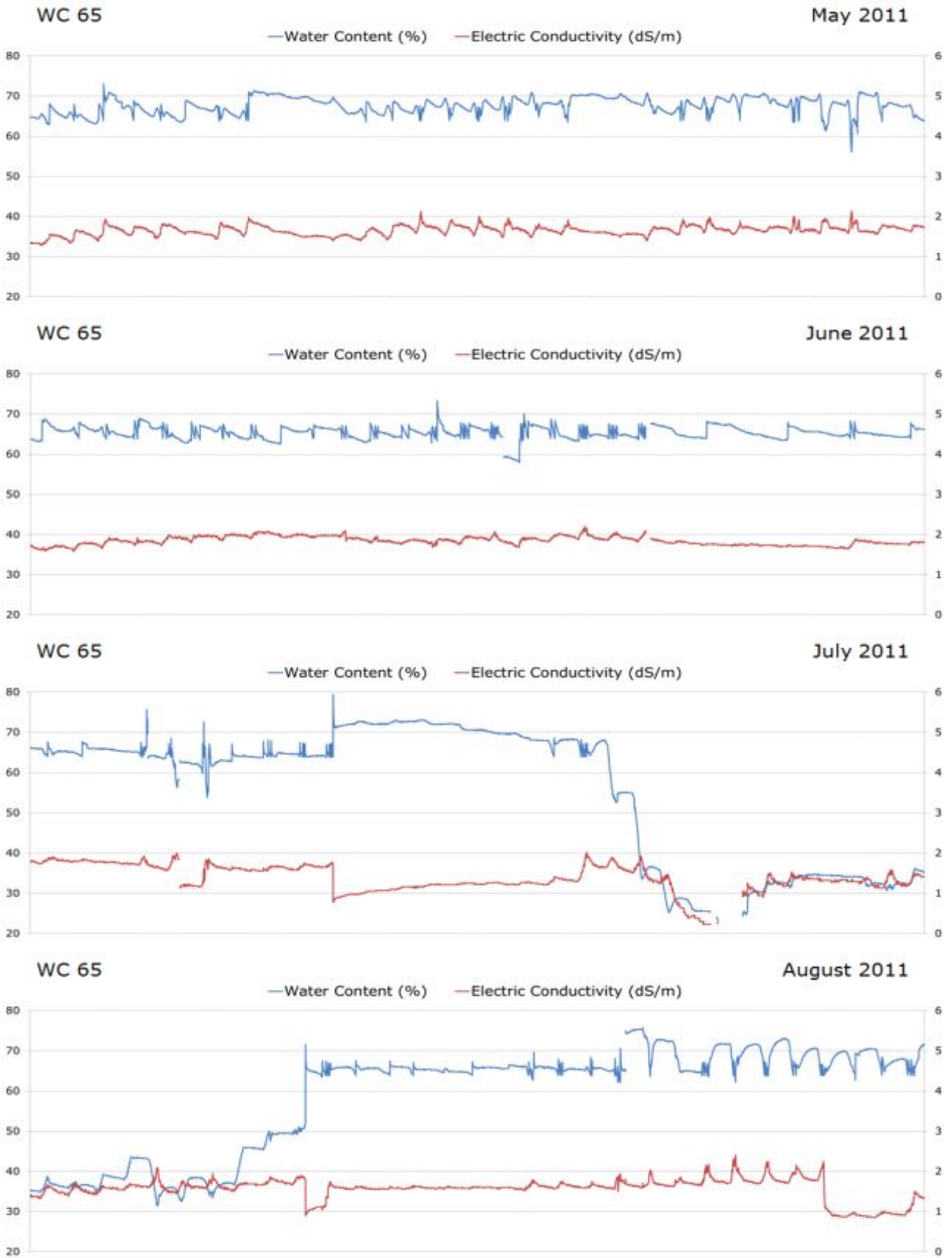


그림 3-5-25. WC65 처리에서 2011년 5월에서 8월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

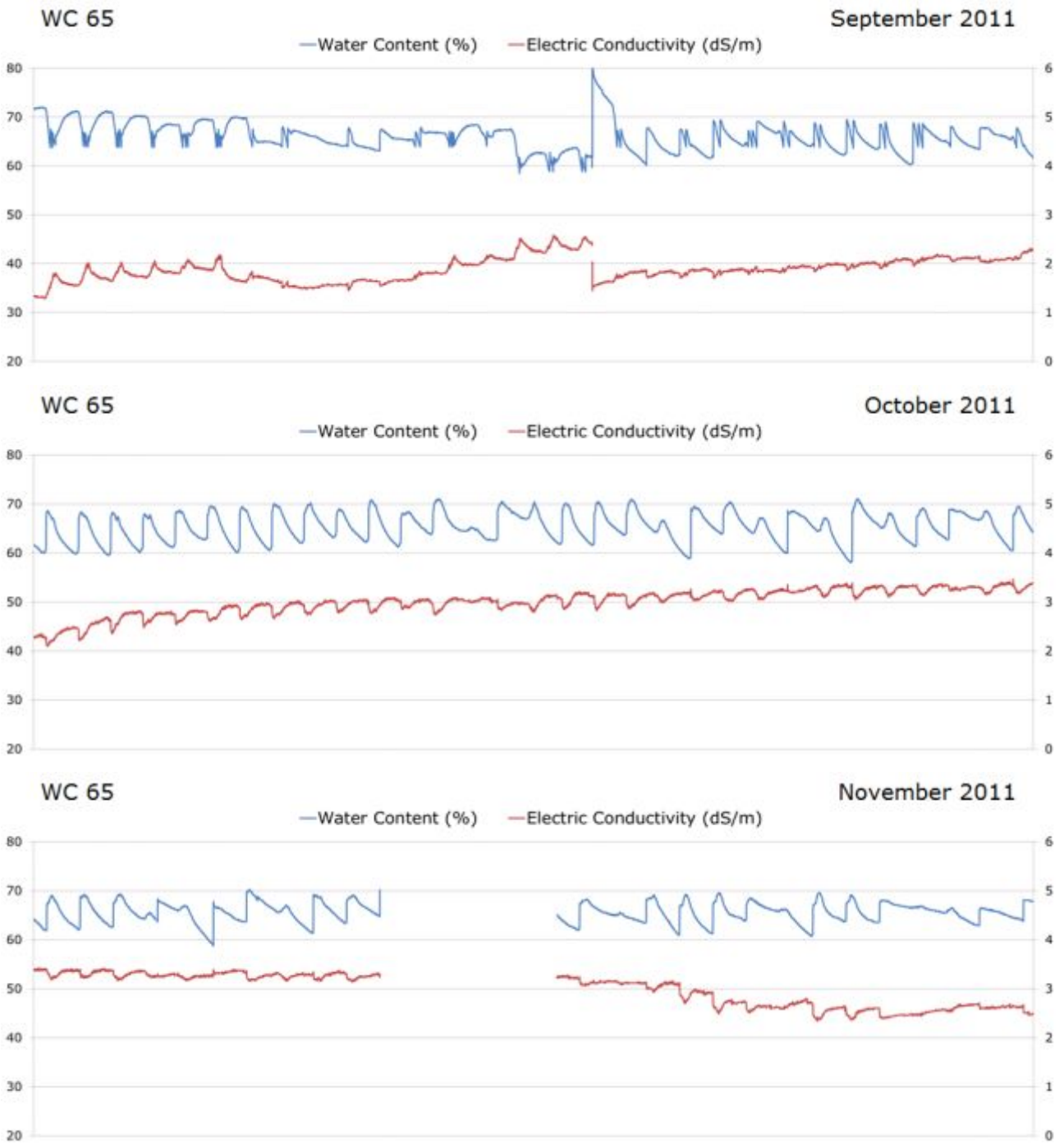


그림 3-5-26. WC65 처리에서 2011년 9월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(다) 급배액량 측정 결과

표3-5-4와 표3-5-5는 근권 수분함량 처리들에서 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 월별 급액량과 배액량을 나타낸 것이다. 전체 급액량의 평균은 대조구인 타이머 처리구들이 높았고, 근권 수분함량 조절 처리들은 WC65, WC55, WC45 순으로 나타났다. 전체 배액량의 평균은 대조구인 타이머 처리구들이 여전히 가장 높았고, 근권 수분함량 조절 처리들은 WC65, WC55, WC45 순으로 점차 낮아졌다. 전체 급액량과 배액량의 평균에서 배액률을 계산해 보면, 타이머 처리구들이 코이어 암면 각각 45.6%와 49.5%로 가장 높았고, 조절처리들에서는 WC65가 24.0%로 가장 높았고, WC55와 WC45는 13.1과 2.0%로 낮은 배액률을 나타냈으며 이는 타이머 처리들의 1/4과 1/25로 급액 대비 배액 발생이 거의 되지 않는다는 것을 보여준다.

월별 급액량 결과를 보면, 타이머 처리들은 주요 장마기간인 7월에 흐린날이 많아서 급액이 적었고, 점차 증가하여 9월은 가장 많은 급액이 공급되었으며, 11월로 갈수록 급액량이 줄어드는 경향을 나타냈다. 수분함량 조절처리들은 6월에 가장 많은 급액이 공급되었다가 장마가 시작되면서 확실히 적은 양이 공급되는 것을 볼 수 있었다. 장마 이후 원래 수준으로 회복되는 과정에 WC65처리는 타이머 처리 만큼 매우 많은 양의 수분이 공급되었으며, 9월의 약간 증가된 급액공급 이후 11월까지 점차적으로 줄어드는 급액패턴을 나타냈다. 배액량에서는 타이머 처리들은 장마가 있어서 급액량이 적었지만 그래도 더운 날씨로 수분 흡수량이 높을 수 있는 여름인 6, 7, 8월에 상대적으로 낮은 배액량은 나타내었으며, 이중 장마가 시작되기 전인 6월은 가장 낮은 배액량을 나타내었다. 타이머 처리의 배액량은 6월부터 10월까지 점차 증가 하였으며, 급액량이 크게 줄어드는 11월이 되어서야 배액량도 줄어들었다. 급액농도 조절처리들은 8월에 가장 많은 배액을 발생시켰고, 11월로 갈수록 낮아졌다. WC65 처리의 경우에 6월과 8월에 타이머 처리보다 많은 배액량을 발생하였다. 이를 제외한 모든 기간에서 조절 처리들은 타이머 처리에 대비하여 배액이 없거나 최대 1/3 수준의 배액만을 배출하였다.

조절처리별로 보았을 때, WC45 처리의 경우 적은 급액량의 영향도 있지만 5, 9, 10, 11월에는 배액이 없을 정도로 매우 낮은 배액량을 나타내었으며, WC55는 타이머 처리들의 1/2~1/3 수준의 급액량과 1/3~1/25 수준의 배액량을 나타내었다. WC65는 전체적으로 타이머의 절반인 적은 급액량을 나타내었으나 장마 이후 8월에 65%수준을 맞추기 위해 많은 급액이 공급되었고 이로 인해 많은 양의 배액 또한 발생하게 되었다. 10월 이전까지는 다른 조절처리에 비해 평균 2배 정도로 많은 배액을 배출하였다.

표 3-5-4. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 '근권수분함량별' 급액량

		Average irrigated water amount (mL·day ⁻¹ ·plant ⁻¹)							
Treatment		May	June	July	August	September	October	November	Total
Timer	Coir	391.5 a ^z	324.0 a	220.7 a	325.5 a	497.2 a	455.1 a	314.1 a	361.2 a
	Rockwool	387.2 a	309.5 a	220.6 a	285.5 a	461.8 a	427.7 a	304.3 a	342.4 a
	WC 45	140.2 b	208.2 b	83.0 b	112.6 b	161.3 c	91.1 b	88.8 b	126.5 c
	WC 55	198.7 b	265.8 ab	86.4 b	164.0 b	228.9 bc	143.1 b	111.6 b	171.2 bc
	WC 65	175.0 b	277.5 ab	113.8 b	312.8 a	282.0 b	130.5 b	115.6 b	201.0 b

^zMeans with different letters are significantly different at P<0.05, as determined by Tukey's test. At a rainy day, irrigation was not performed.

표 3-5-5. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 '근권수분함량별' 배액량

		Average drained water amount (mL·day ⁻¹ ·plant ⁻¹)							
Treatment		May	June	July	August	September	October	November	Total
Timer	Coir	211.3 a ^z	61.8 ab	93.9 a	147.0 a	198.3 ab	268.5 a	181.5 a	164.7 a
	Rockwool	198.9 a	62.4 ab	93.5 a	141.3 a	211.6 a	285.5 a	193.9 a	169.6 a
	WC 45	0.9 c	3.8 c	3.2 b	9.4 b	0.3 c	0.0 b	0.0 b	2.5 b
	WC 55	24.9 bc	27.0 bc	18.9 b	48.5 b	11.9 bc	18.8 b	7.8 b	22.5 b
	WC 65	37.2 b	76.1 a	24.1 b	152.9 a	42.1 bc	3.5 b	2.2 b	48.3 b

^zMeans with different letters are significantly different at P<0.05, as determined by Tukey's test. At a rainy day, irrigation was not performed.

(라) 장미 절화 생육 결과

표 3-5-6은 근권 수분함량 처리들에서 장미 절화의 광합성 특징들을 나타낸 것이다. 대조구를 포함한 모든 처리간에 광합성률, 기공전도도, 세포내 CO₂농도, 증산률은 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 표 3-5-7은 근권 수분함량 처리들에서 장미 절화의 생육 특징들을 나타낸 것이다. 대조구를 포함한 모든 처리간에 줄기 경경, 절화 생체중, 절화 건물중, 줄기 생체중, 줄기 건물중은 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 절화 길이에 있어서 타이머-암면 처리가 높았으며 WC45처리에서 낮았다. 표 3-5-8은 근권 수분함량 처리들에서 생육 결과 중 절화 잎의 생육 특징들을 나타낸 것이다. 대조구를 포함한 모든 처리간에 5소엽수, 3소엽수, 엽생체중, 엽건물중은 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 잎의 크기에서 최대엽장과 최대 엽폭 둘다 다른 처리들에 비해 타이머-암면처리와 WC55처리에서 높았고, 반대로 WC45 처리는 낮았다. 표 3-5-9는 근권 수분함량 처리들에서 생육 결과 중 수확량을 나타낸

것이다. 총수량과 80에서 60cm 길이 수확량과 60cm미만 길이 수확량은 통계적으로 처리구들 간에 차이를 나타내지 않았다. 길이 80cm가 넘는 절화 수확량과 상품수량에서 WC45는 가장 낮은 수량을 나타내었고, 이를 제외한 다른 처리들간에는 차이가 나타나지 않았다.

장미 절화의 생육과 수확량 측면에서 판단할 때, WC55와 WC65 두처리가 우수한 재배 조건이라 할 수 있다. 다만, 급배액량에서 WC65는 WC55에 비하여 평균 1.2배의 급액이 필요하고 2.1배의 배액이 발생하는 단점을 가지고 있다. 코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 자동 급액시 절화 생육과 수확량 그리고 적은 급액량과 배액량을 고려하였을 때, WC55 처리가 가장 우수한 근권 수분함량이라 판단할 수 있다. WC45처리는 급배액 대비 생산성 효율은 높으나 낮은 배지내 수분함량으로 인해 수분 공급과 비공급에 따른 배지 수분 변화 편차가 커서 문제가 될 수 있어 근권부 수분 함량 변화 폭이 적어서 안정적인 WC55처리가 우위에 있다고 할 수 있다.

표 3-5-6. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘근권수분함량별’ 광합성 특성

Treatment	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ^z	Stomatal Conductance ($\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Intercellular CO ₂ concentration ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	
Timer	Coir	17.9 a ^y	0.97 a	327.0 a	3.83 a
	Rockwool	19.1 a	1.19 a	334.0 a	3.29 a
WC 45	18.7 a	1.04 a	336.2 a	3.05 a	
WC 55	18.2 a	0.81 a	321.8 a	4.00 a	
WC 65	17.9 a	1.22 a	338.6 a	3.79 a	

^zMeasuring conditions : CO₂ 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, PAR 900 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, Air temp. 25±0.5°C, RH 60±2% and Flow rate 500±2 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

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

표 3-5-7. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘근권수분함량별’ 절화 생육 특성

Treatment	Length (cm)	Diameter (mm)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	Stem Fresh weight (g)	Stem Dry weight (g)	
Timer	Coir	80.5 ab ^z	7.14 a	31.7 a	7.4 a	18.6 a	4.5 a
	Rockwool	82.2 a	7.48 a	34.8 a	8.3 a	20.6 a	5.1 a
WC 45	77.1 b	7.14 a	29.7 a	7.2 a	17.3 a	4.4 a	
WC 55	79.3 ab	7.13 a	33.0 a	7.6 a	19.0 a	4.6 a	
WC 65	80.4 ab	7.22 a	33.7 a	7.7 a	20.2 a	4.8 a	

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

표 3-5-8. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 '근권수분함량별' 절화 잎의 생육 특성

Treatment		Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	5 leaflet (No.)	3 leaflet (No.)	Leaf Fresh weight (g)	Leaf Dry weight (g)
Timer	Coir	13.7 ab ^z	11.9 a	12.6 a	2.8 a	13.1 a	2.9 a
	Rockwool	14.3 a	11.5 a	12.7 a	2.7 a	14.2 a	3.2 a
WC 45		13.0 b	10.7 b	12.4 a	3.2 a	12.3 a	2.8 a
WC 55		14.0 a	11.4 a	13.1 a	3.2 a	14.1 a	3.0 a
WC 65		13.6 ab	11.0 ab	12.9 a	2.7 a	13.4 a	2.9 a

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

표 3-5-9. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 '근권수분함량별' 수확량 특성

Treatment	Cut flower Yield (number · plant ⁻¹)					
	>80cm	80~60cm	<60cm	Marketable yield ^y	Total yield	
Timer	Coir	5.8 a ^z	5.9 a	3.3 a	116.7 a	149.2 a
	Rockwool	5.1 a	5.7 a	2.9 a	108.0 a	137.0 a
WC 45		3.5 b	4.9 a	4.0 a	84.0 b	124.0 a
WC 55		4.7 a	5.5 a	4.3 a	101.6 a	144.8 a
WC 65		5.1 a	6.1 a	3.7 a	112.0 a	148.7 a

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

^yMeans yield of the cut flower length above 60cm.

(4) 연구결과 요약

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 근권부 수분 함량을 조절하여 급액제어를 하였다. 근권 수분함량 제어 목표 범위는 45±1(%), 55±1(%), 65±1(%), WC45), 55±1(%), WC55), 65±1(%), WC65)로 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 급액량은 2/3~1/3로 배액량은 1/4~1/50정도로 크게 감소하였다. 이렇게 줄어든 급배액에도 불구하고, 절화의 생육 특징들은 타이머 제어와 센서 제어가 큰 차이를 나타내지 않았다. 수확량에 있어서 WC55와 WC65는 타이머 처리와 차이를 나타내지 않았다. 급배액량을 중요 포인트로 한다면, WC45처리가 품질에 있어 큰 차이가 나지 않아 우수한 생산성을 나타낸다. 생육과 수확량, 그리고 급배액량을 고려하게 되면, 센서를 이용한 급액 제어시 근권 수분함량을 55%로 하는 것이 우수할 것으로 판단된다.

3. 무배액 시스템에 적합한 근권부 수분함량제어

가. 무배액 시스템을 위한 수분함량 제어 범위 구명

(1) 실험 목표

코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배시 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 센서를 이용한 배지 수분함량 조절에 따른 자동 급액시 급액 제어 범위를 조절하여 장미 생육에 적합한 급액 조건을 구명하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

212 페이지 실험 수행 방법 부분 참조

자동 급액 제어는 코코넛 코이어 슬라브를 배지로 이용하였으며, 2012년 7월 15일부터 제어를 시작하였다. 급액 EC, 급액제어, 급액시간을 표 3-5-10에서와 같이 처리하였다. 타이머 처리는 날씨가 흐려지거나 비오는 날에는 공급을 중단하였다.

표 3-5-10. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 '제어범위별' 실험 처리구

Treatment	Electric Conductivity (dS · m ⁻¹)	Irrigation control (water content range, %)	Irrigation start Irrigation stop	Irrigation time
WC 55±1	1.5	55±1	under 54% over 56%	1 hour after sunrise ~ 2 hours before sunset
WC 55±2		55±2	under 53% over 57%	
WC 55±5		55±5	under 50% over 60%	
WC 55±10		55±10	under 45% over 65%	
Control (Timer)		Coir Rockwool	640±20 ml/day/plant (80ml x 8 times/day)	

(3) 실험수행 내용 및 결과

(가) 온실환경 및 근권환경 측정 결과

208 페이지 (나) 2012 온실환경 부분 참조.

217 페이지 (다) 2012 타이머-코이어처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

223 페이지 (바) 2012 타이머 암면처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

(나) FDR 센서를 이용한 자동 급액시 근권 환경 측정 결과

그림 3-5-27은 급액제어범위 55±1 처리(WC55±1)에서 실험기간 중 2012년 8월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~65%, EC는 3.0~5.0 dS·m⁻¹으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 꾸준히 55~60% 범위를 중심으로 변화를 나타내었다. EC변화는 8월에는 3.0~4.0 dS·m⁻¹ 범위내에서 변화를 나타내었다가 점차적으로 증가하여, 9월말에는 5.0 dS·m⁻¹ 까지 상승하였다. 10월에는 4.0~5.0 dS·m⁻¹ 범위내서 증감을 나타내었고, 11월 이후 조금씩 증가하여 11월말에는 5.0 dS·m⁻¹ 을 중심으로 나타났다.

그림 3-5-28은 급액제어범위 55±2 처리(WC55±2)에서 실험기간 중 2012년 8월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~75%, EC는 2.0~5.0 dS·m⁻¹의 변화를 보였다. 수분함량의 변화는 꾸준히 55~70% 범위를 중심으로 변화를 나타내었다. 8, 9, 10 월에는 급액 직후 근권 수분의 최고점이 75%까지를 나타내었으나 10월 말부터는 70% 이하로 낮아졌다. EC변화는 8월에는 2.5~3.5 dS·m⁻¹ 범위를 중심으로 변화를 나타내었다가 9월 말부터 점차적으로 증가하여 10월말에는 4.5 dS·m⁻¹ 까지 상승하였고, 11월에는 더욱 증가하여 5.0 dS·m⁻¹ 까지 높아졌다.

그림 3-5-29는 급액제어범위 55±5 처리(WC55±5)에서 실험기간 중 2012년 8월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~70%, EC는 2.5~5.0 dS·m⁻¹의 변화를 보였다. 수분함량의 변화는 꾸준히 50~70% 범위를 중심으로 변화를 나타내었다. EC변화는 시간이 지나면서 점차적으로 증가하는 특징을 나타냈다. 8월에는 2.5~4.0 dS·m⁻¹ 범위, 9월에는 3.0~4.5 dS·m⁻¹ 범위, 10월에는 3.5~4.5 dS·m⁻¹ 범위, 11월에는 3.5~5.0 dS·m⁻¹ 범위까지 상승하였다.

그림 3-5-30은 급액제어범위 55±10 처리(WC55±10)에서 실험기간 중 2012년 8월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 45~70%, EC는 2.0~3.5 dS·m⁻¹의 변화를 보였다. 수분함량의 변화는 전기간 동안 꾸준히 50~70% 범위를 중심으로 변화를 나타내었다. EC변화는 다른 처리들이 시간이 지나면서 점차적으로 증가하는 특징을 나타내는 반면, WC55±10 처리는 2.0~3.5 dS·m⁻¹의 범위를 실험기간동안 유지하였다. 9월과 10월에 2.0~3.0 dS·m⁻¹ 범위로 약간 낮아졌다가 11월에 다시 2.0~3.5 dS·m⁻¹의 범위로 돌아가는 정도의 변화만을 보였다.

수분변화가 일정한 범위에서 변화가 발생하는 반면, EC는 전체적으로 조금씩 시간이 지나면서 증가하는 특징을 보였다. 모든 처리에서 9월로 넘어가면서 한번 급액후 근권 수분함량이 감소하는 과정에서 수분의 공급없이도 변화를 보이는 곡선이 생겼는데, 이는 센서 설치 위치가 장미 근권이 위치하는 곳보다 깊은 곳까지 설치되어 발생하는 것으로 판단된다. 급액이 시작된 후에 수분함량이 증가되었다가, 식물이 수분을 흡수하면 점차 낮아졌고, 그 다음날 오전에 식물이 수분을 흡수하면, 근권부 EC 상승이 발생되고 그 수준이 높아질 경우, 식물 뿌리가 존재하지 않는 배지의 다른 부위와의 삼투압차가 발생하여 수분이 센서가 있는 쪽으로 수분 이동하여 잠시동안 수분이 높아졌다가, 다시 식물이 이용하면서 낮아지고, 낮아지면 삼투압차로 다른 배지에서 수분이 이동해오는 형태의 근권 수분 움직임이 발생되어 이와 같은 결과가 나타났을 것으로 판단한다.

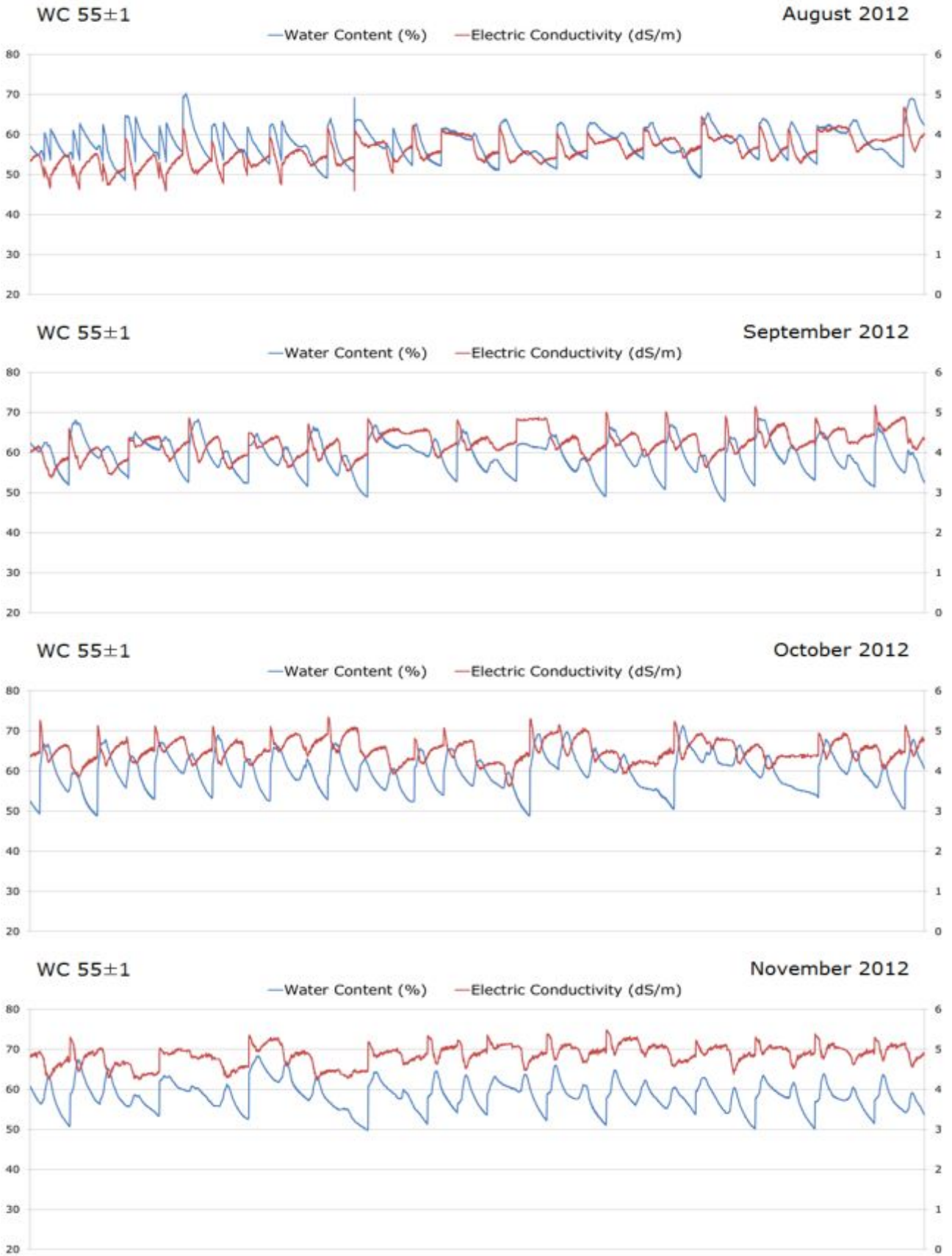


그림 3-5-27. WC 55±1 처리에서 2012년 8월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

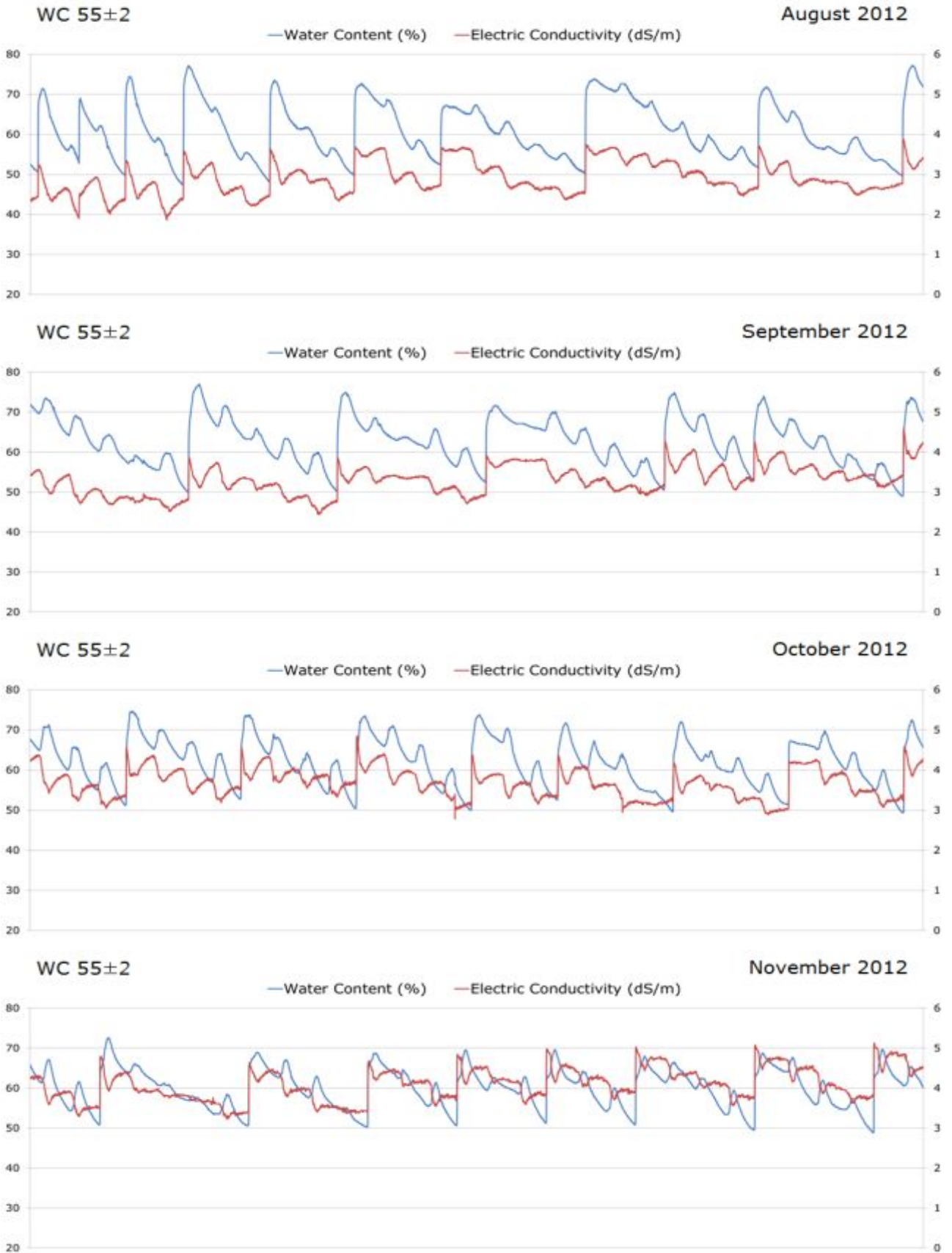


그림 3-5-28. WC 55±2 처리에서 2012년 8월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

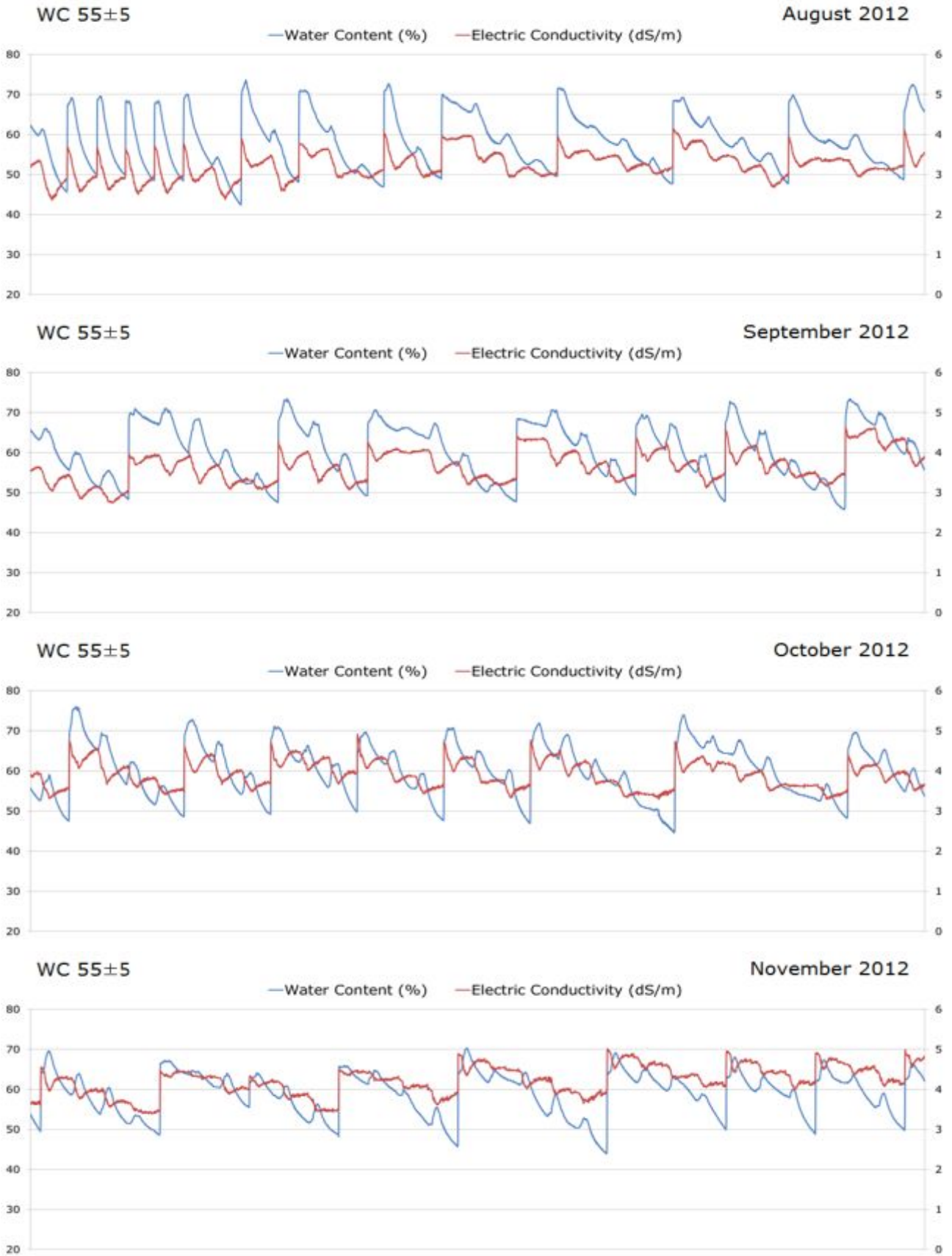


그림 3-5-29. WC 55±5 처리에서 2012년 8월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

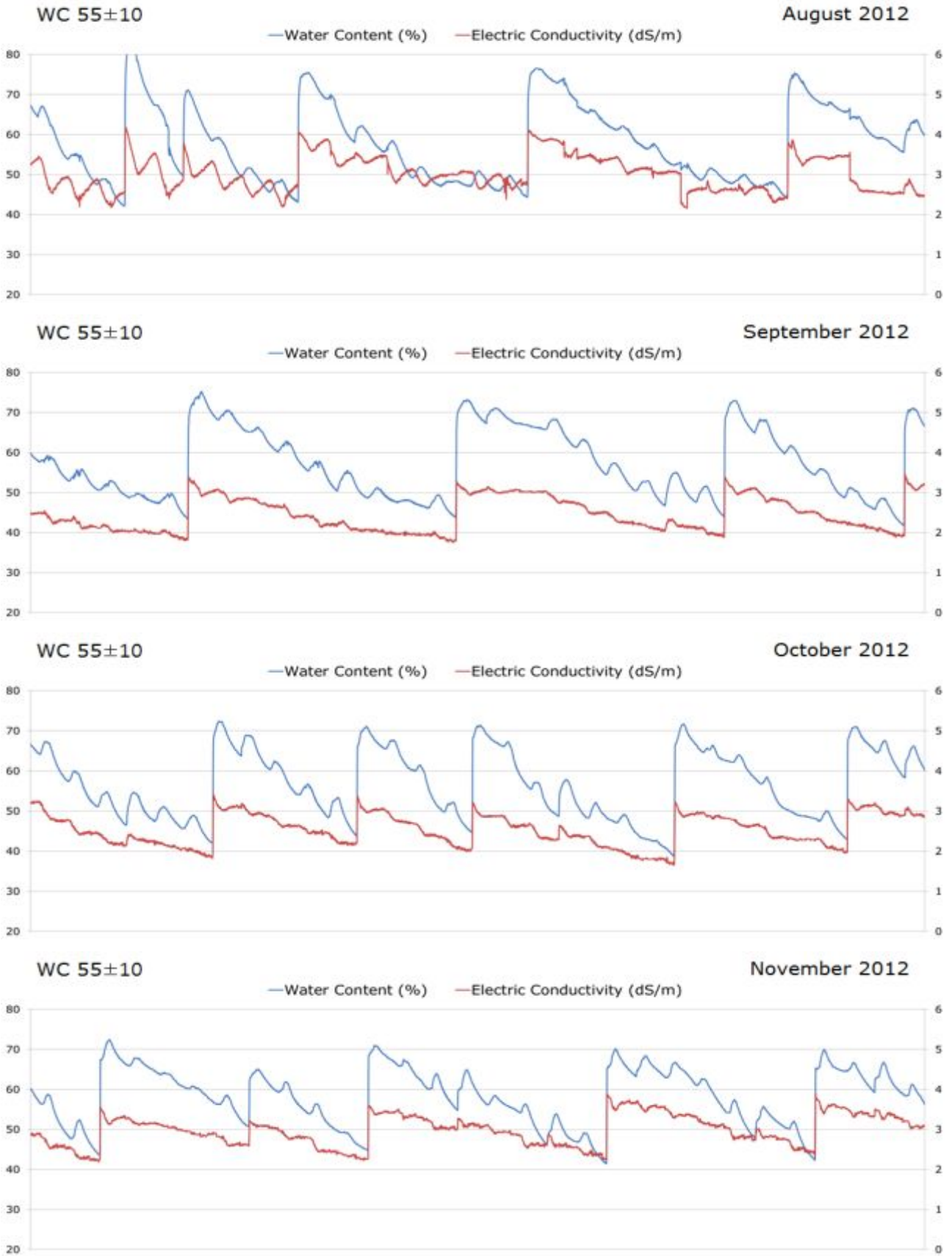


그림 3-5-30. WC 55±10 처리에서 2012년 8월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(다) 급배액량 측정 결과

표3-5-11과 표3-5-12는 급액제어범위 처리들에서 실험기간 중 2012년 8월에서 11월까지의 월별 급액량과 배액량을 나타낸 것이다. 전체 급액량의 평균은 대조구인 타이머 처리구들이 높았고, 급액제어범위 조절 처리들은 타이머 처리들의 1/3이하 였으며, 조절처리들 간에는 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 전체 배액량의 평균 또한 대조구인 타이머 처리구들에서 가장 높았고, 급액제어범위 조절 처리들은 타이머 처리의 1/50이하 배액량을 나타내었으며 그들간에 통계적으로 유의하지 않았다. 조절 처리들 중에서 WC55±1 처리에서 급액량이 조금 더 측정되었다. 전체 급액량과 배액량의 평균에서 배액률을 계산해 보면, 타이머 처리구들이 코이어 압면 각각 45.6%와 49.5%로 가장 높았고, 조절처리들에서는 WC55±10이 4.1%로 가장 높았고, 그 다음이 WC55±1로 2.6%, 나머지 WC55±2와 WC55±5 처리들은 각각 0.2, 0%의 배액률을 보였다. 조절 처리들은 타이머 처리들 배액률의 1/10이하로 급액 대비 배액 발생이 거의 되지 않았다.

월별 급액량 결과를 보면, 타이머 처리들은 급액이 8월부터 점차 증가하여 10월은 가장 많은 급액이 공급되었으며, 11월은 급액량이 줄어드는 경향을 나타냈다. 급액제어범위 조절처리들은 8월에 가장 많은 급액이 공급되었고, 9월에 감소된 급액공급 이후 조절 처리들의 급액량은 처리마다 다른 변화를 보였다. WC55±1, WC55±5와 WC55±10 처리들은 11월까지 점차적으로 감소하는 경향을 나타내었으며, WC55±2 처리는 9월 감소 이후 다시 증가하였다. 배액량에서는 타이머 처리들은 급액량과 같이 10월까지 점차 증가하다가 11월에 대폭 줄어드는 특징을 나타내었다. 반면, 조절처리들에서는 WC55±1 처리에서 11월에 9.5mL가 가장 높은 배액량이 였고, WC55±10 처리에서만 실험기간동안 지속적인 배액이 발생하였을 뿐이 였고, WC55±2와 WC55±5 처리들은 배액량이 거의 발생하지 않았다.

조절처리별로 보았을 때, WC55±2 처리는 배액이 발생하지 않았고, WC55±5 처리도 거의 배액이 없는 수준이었다. WC55±1 처리는 8월과 9월에는 배액이 없었으나 그 이후 점차 증가하였고, WC55±10 처리는 실험기간 전반에 걸쳐 약간의 배액이 발생하였으며 11월까지 점차 낮아지는 경향을 나타내었다.

표 3-5-11. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 '제어범위별' 급액량

Treatment	Average irrigated water amount (mL·day ⁻¹ ·plant ⁻¹)					
	August	September	October	November	Total	
Timer	Coir	411.0 a ^z	433.8 a	465.8 a	262.4 a	393.3 a
	Rockwool	378.8 a	401.9 a	430.9 a	264.5 a	369.0 a
WC 55±1	198.2 b	115.0 b	75.6 b	79.9 b	117.2 b	
WC 55±2	123.7 bc	75.2 b	86.8 b	91.8 b	94.4 b	
WC 55±5	115.5 bc	69.0 b	78.5 b	63.5 b	81.6 b	
WC 55±10	106.7 c	91.2 b	96.7 b	92.1 b	96.7 b	

^zMeans with different letters are significantly different at P<0.05, as determined by Tukey's test. At a rainy day, irrigation was not preformed.

표 3-5-12. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 '제어범위별' 배액량

Treatment	Average drained water amount (mL·day ⁻¹ ·plant ⁻¹)					
	August	September	October	November	Total	
Timer	Coir	128.4 a ^z	184.5 a	362.3 a	94.9 a	192.5 a
	Rockwool	103.7 a	152.3 a	333.4 a	98.9 a	172.1 a
WC 55±1	0.0 b	0.0 b	2.3 b	9.5 b	3.0 b	
WC 55±2	0.0 b	0.0 b	0.0 b	0.0 b	0.0 b	
WC 55±5	0.6 b	0.0 b	0.0 b	0.0 b	0.2 b	
WC 55±10	3.4 b	6.4 b	5.2 b	1.0 b	4.0 b	

^zMeans with different letters are significantly different at P<0.05, as determined by Tukey's test. At a rainy day, irrigation was not preformed.

(라) 장미 절화 생육 결과

표 3-5-13은 급액제어범위 처리들에서 장미 절화의 생육 특징들을 나타낸 것이다. 대조구를 포함한 모든 처리간에 절화 길이, 절화 생체중, 절화 건물중, 잎 생체중, 클로로필 함량은 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 줄기 경경에 있어서 타이머-코이어 처리가 높았으며 WC55±10 처리에서 낮았다. 잎 건물중은 WC55±5 처리가 높았으며 타이머 처리들과 WC55±1 처리에서 낮았다. 표 3-5-14는 급액제어범위 처리들에서 생육 결과 중 수확량을 나타낸 것이다. 60cm미만 길이 수확량은 통계적으로 처리구들 간에 차이를 나타내지 않았다. 총수확량, 상품수확량, 길이 80cm가 넘는 절화 수확량, 그리고 80에서 60cm 길이 수확량 부분에서 타이머 처리들이 높은 수량을 나타내었다. 급액제어범위 처리들간에 상품수량은 차이를 보이지 않았다. 하지만, 80cm가 넘는 절화 수확량에서 WC55±2 처리가 높았으며, 총수량에서는 WC55±1과 WC55±2 처리가 높은 결과를 보여주었다.

장미 절화의 생육 측면에서 판단할 때 WC55±2와 WC55±5 처리들 우수하였고, 수확량에서 판단할 때에는 WC55±1과 WC55±2 처리들이 높았다. 생육과 수확량 이 둘을 종합하였을 때, WC55±2 처리가 우수한 급액제어범위라고 할 수 있겠다. 다만, 급액량에서 WC55±5에 비하여 약간 높지만 생육과 수확량에서 같이 통계적으로 차이를 나타내지는 않았다. 코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 자동 급액시 절화 생육과 수확량 그리고 급액량과 배액량을 고려하였을 때, 근권수분 55±2% 제어가 가장 우수한 급액제어범위이라고 판단할 수 있다.

표 3-5-13. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 '제어범위별' 절화 생육 특성

Treatment	Length (cm)	Diameter (mm)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	Leaves fresh weight (g)	Leaves dry weight (g)	Chlorophyll content (SPAD value)	
Timer	Coir	72.9 a ^z	5.68 a	27.2 a	5.59 a	8.45 a	1.84 b	46.8 a
	Rockwool	74.1 a	5.35 ab	26.3 a	5.42 a	8.00 a	1.69 b	48.9 a
WC 55±1	69.5 a	5.43 ab	24.6 a	5.38 a	8.06 a	1.81 b	47.8 a	
WC 55±2	70.9 a	5.34 ab	26.7 a	6.07 a	9.55 a	2.16 ab	49.2 a	
WC 55±5	68.7 a	5.42 ab	26.5 a	6.00 a	9.44 a	2.50 a	49.6 a	
WC 55±10	69.0 a	5.17 b	26.4 a	5.84 a	9.10 a	2.06 ab	49.2 a	

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

표 3-5-14. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘제어범위별’ 수확량 특성

Treatment	Cut flower Yield (number · plant ⁻¹)					
	>80cm	80~60cm	<60cm	Marketable yield ^y	Total yield	
Timer	Coir	2.9 a ^z	5.1 a	10.3 a	7.8 a	18.2 a
	Rockwool	2.5 a	4.8 a	11.3 a	7.3 a	18.5 a
WC 55±1	0.5 c	3.6 ab	12.3 a	4.0 b	16.3 ab	
WC 55±2	1.6 b	2.7 b	11.5 a	4.3 b	15.8 ab	
WC 55±5	0.3 c	2.6 b	10.7 a	3.0 b	13.7 bc	
WC 55±10	0.8 bc	2.2 b	9.8 a	3.0 b	12.8 c	

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

^yMeans yield of the cut flower length above 60cm.

(4) 연구결과 요약

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 급액제어범위를 조절하였다. 급액제어범위는 54~56%(WC55±1), 53~57%(WC55±2), 50~60%(WC55±5), 45~65%(WC55±10)로 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 모든 급액제어범위에서 급액량은 타이머 대비 1/3~1/5로 배액량은 1/25이하로 크게 감소하였다. 이렇게 줄어든 급배액에도 불구하고, 절화의 생육 특징들은 타이머 제어와 센서 제어가 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만, 수확량에 있어서 타이머 제어가 센서 제어보다 높았다. 센서를 이용한 급액제어시 절화 생육 수준과 고품질 절화 수량을 고려한다면, 급액 제어 범위를 53~57%로 하는 것이 우수할 것으로 판단된다.

나. 무배액 시스템을 위한 계절별 근권수분함량 조절

(1) 실험 목표

코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배시 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 센서를 이용한 배지 수분함량 조절에 따른 자동 급액시 계절에 따라 근권 수분 함량을 조절하여 장미 생육에 적합한 급액 조건을 구명하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

212 페이지 실험 수행 방법 부분 참조

자동 급액 제어는 코코넛 코이어 슬라브를 배지로 이용하였으며, 2013년 4월 20일부터 제어를 시작하였다. 급액 EC, 급액제어, 급액시간을 표 3-5-15에서와 같이 처리하였다. 타이머 처리는 날씨가 흐려지거나 비오는 날에는 공급을 중단하였다.

표 3-5-15. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘계절에 따른 근권수분함량별’ 실험 처리구

Treatment	Electric Conductivity (dS · m ⁻¹)	Irrigation control (water content range, target±control range, %)						Irrigation time (hour)
WC 55	1.5	55±2						1 hour after sunrise ~
WC 55 57 60		Apr. 55±2	May 57±2	June ~ Aug. 60±2	Sep. 57±2	Oct. 55±2	Nov. 55±2	
WC 55 60 65		Apr. 55±2	May 60±2	June ~ Aug. 65±2	Sep. 60±2	Oct. 55±2	Nov. 55±2	2 hours before sunset
Control (Timer)		Coir	640±20 ml/day/plant (80ml x 8 times/day)					
	Rockwool							

(3) 실험수행 내용 및 결과

(가) 온실환경 및 근권환경 측정 결과

210 페이지 (다) 2013 온실환경 부분 참조.

219 페이지 (라) 2013 타이머-코이어처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

225 페이지 (사) 2013 타이머 암면처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

(나) FDR 센서를 이용한 자동 급액시 근권 환경 측정 결과

그림 3-5-31은 계절에 따른 근권 수분 조절 고정55±2% 처리(WC55)에서 실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~80%, EC는 2.0~3.5 dS·m⁻¹ 으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 꾸준히 50~60% 범위를 중심으로 변화를 나타내었다. EC변화는 4월에는 2.0 dS·m⁻¹ 중심에서 변화를 나타내었다가 점차적으로 증가하여, 5월에는 2.5~3.5 dS·m⁻¹ 까지 상승하였다. 이후 약간 감소하여 6월에는 2.0~3.0 dS·m⁻¹ 범위를 유지하였다.

그림 3-5-32는 계절에 따른 근권 수분 조절 여름에 따라 증가하는 55 57 60±2% 처리(WC55 57 60)에서 실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~70%, EC는 2.0~6.0 dS·m⁻¹ 으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 5월까지 50~60% 범위를 중심으로 변화를 나타내었다. 6월에는 55~65% 범위를 나타내었다. EC변화는 4월에는 2.0~3.0 dS·m⁻¹ 범위에서 변화를 나타내었다가 점차적으로 증가하여, 5월에는 3.0~4.0 dS·m⁻¹ 까지 상승하였다. 이후 6월 초까지 약간 감소하였다가 다시 증가하여 6월 말에는 4.5~6.0 dS·m⁻¹ 범위를 보였다.

그림 3-5-33은 계절에 따른 근권 수분 조절 여름에 따라 증가하는 55 60 65±2% 처리(WC55 60 65)에서 실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~75%, EC는 1.5~3.0 dS·m⁻¹ 으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 5월 초까지 50~60% 범위를 중심으로 변화를 나타내었다가 중순부터 55~66% 범위를 나타내었고, 6월에는 60~70% 범위를 나타내었다. EC변화는 4월에는 2.0~3.0 dS·m⁻¹ 범위에서 변화를 나타내었다가, 5월 중순부터 감소하여 월말에는 1.5~2.5 dS·m⁻¹ 범위를 나타냈다. 이후 6월 초까지 약간 증가하여 6월 말에는 2.0~3.0 dS·m⁻¹ 범위를 보였다.

수분변화는 시기별로 설정한 근권 제어 범위를 기준으로 변화가 발생하였다. 반면, EC는 WC55와 WC55 57 60 처리에서는 증가하였고, WC55 60 65 처리에서는 약간 감소하였다가 기존과 비슷한 범위를 유지하였는데, 이는 WC55 60 65 처리의 계절별 근권 수분 기준이 높게 올라서거 급액량도 급격히 증가하여 나타난 것으로 판단된다.

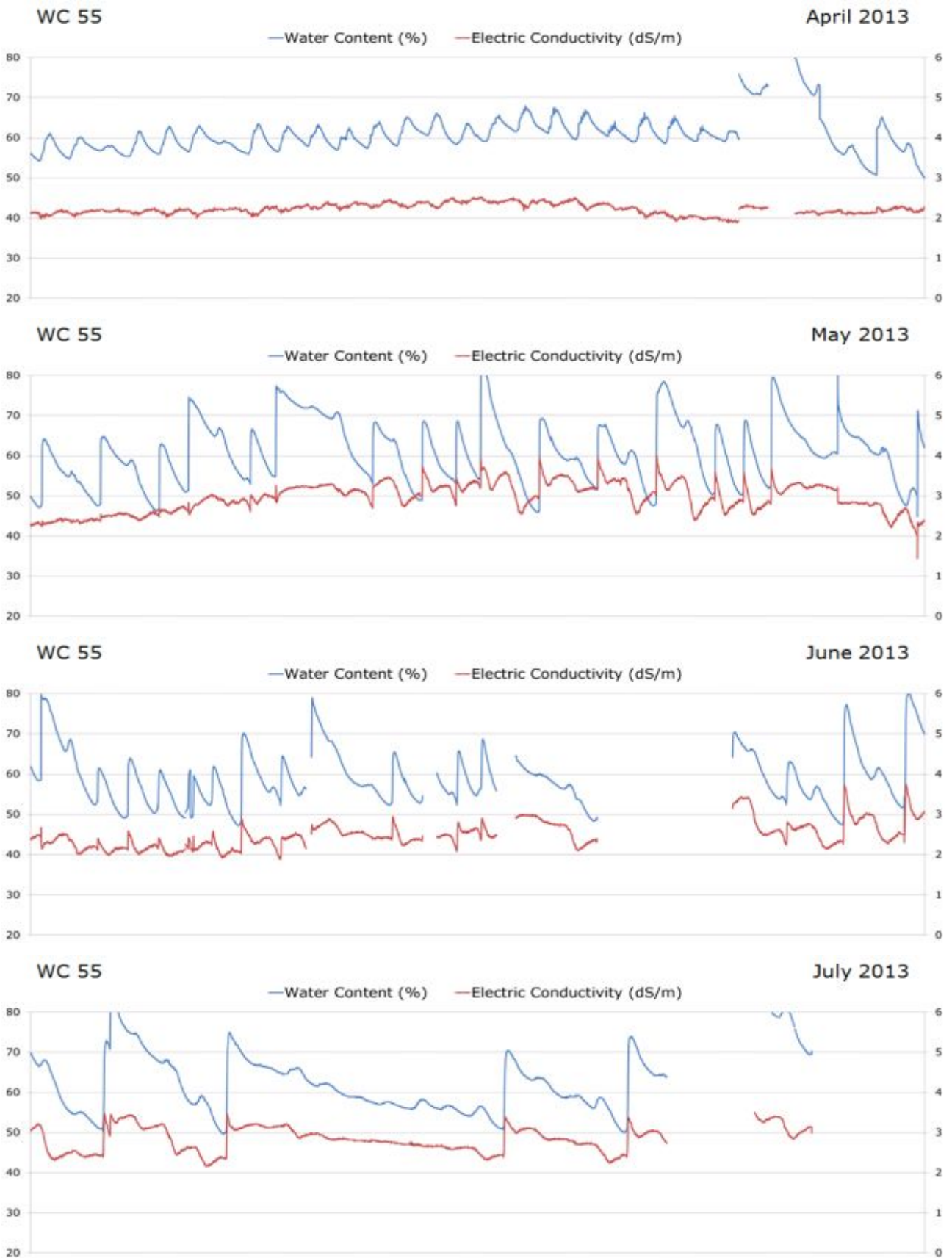


그림 3-5-31. WC 55 처리에서 2013년 4월에서 7월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

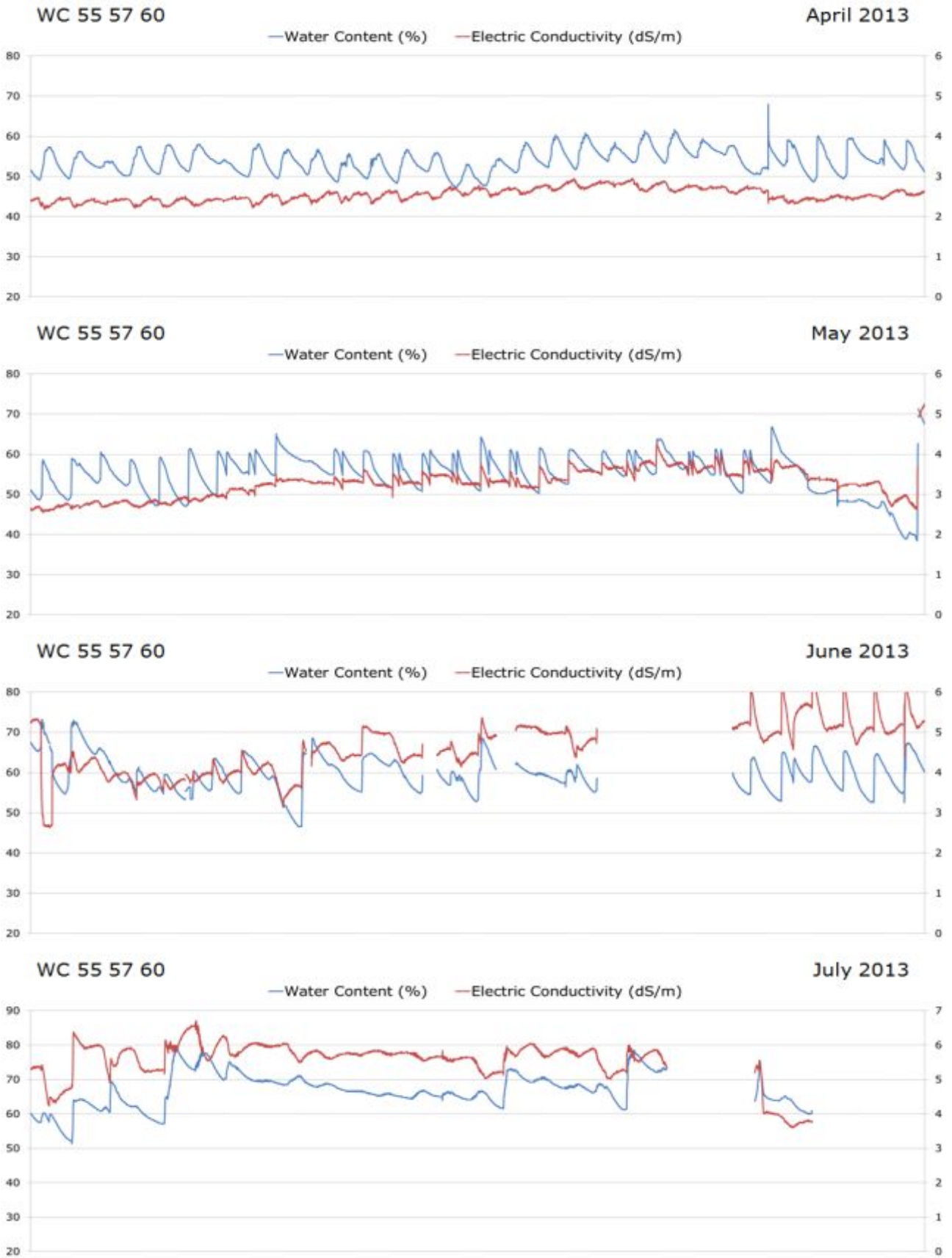


그림 3-5-32. WC 55 57 60 처리에서 2013년 4월에서 7월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

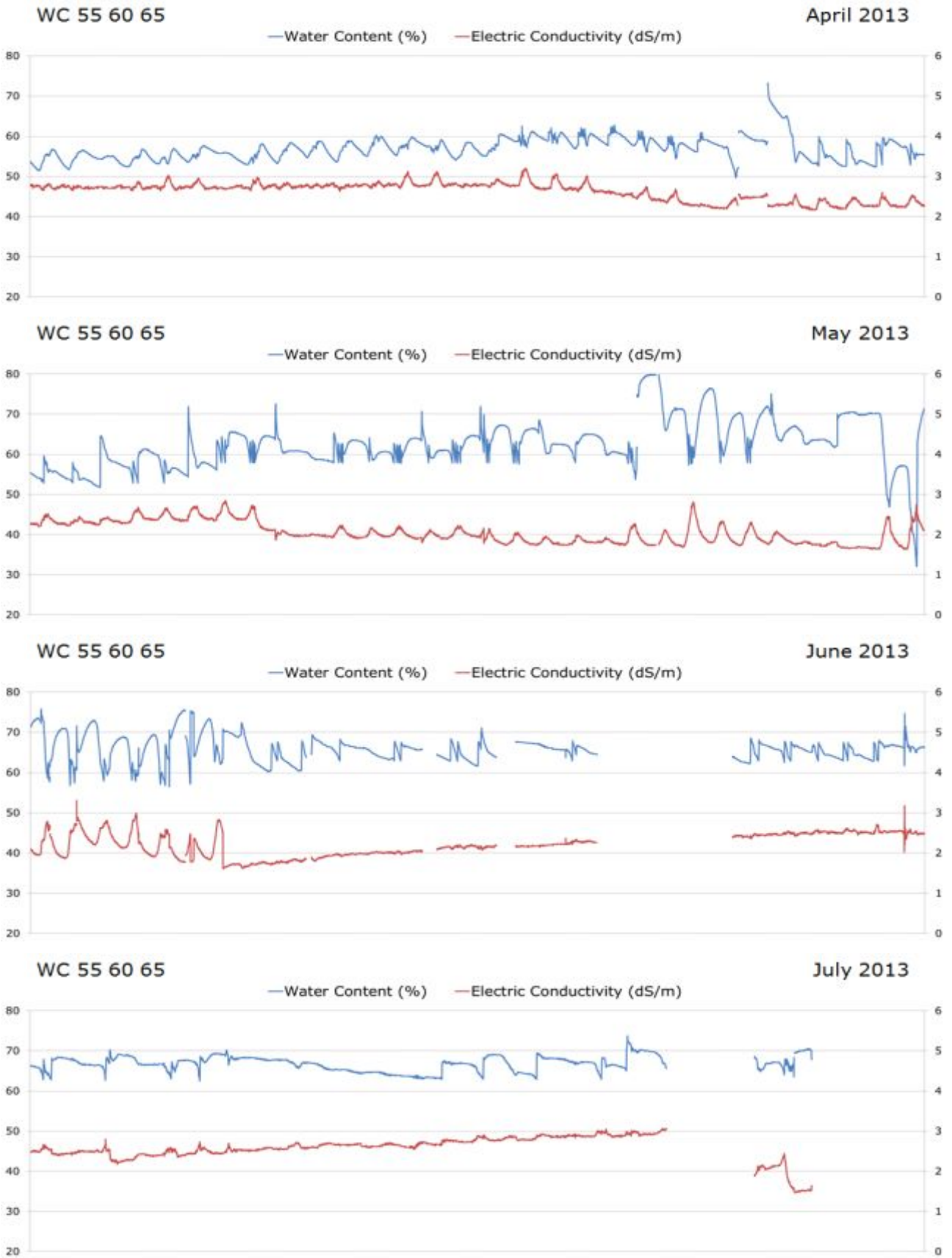


그림 3-5-33. WC 55 60 65 처리에서 2013년 4월에서 7월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(다) 급배액량 측정 결과

그림 3-5-34는 계절에 따른 근권수분 조절 처리들에서 실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 평균 급액량과 배액량을 나타낸 것이다. 전체 급액량의 평균은 대조구인 타이머 처리구들이 높았고, 계절에 따른 근권수분 조절 처리들은 2/3 이하를 나타내어 확연한 급액량의 차이를 나타내었다. 조절 처리중, 최대 65%를 제어 조건으로 하는 WC55 60 65 처리가 가장 급액량이 높았으며, 그 다음으로 최대 조건 60%인 처리 그리고 마지막으로 55% 제어 범위 유지 처리가 가장 낮았다. 전체 배액량의 평균 또한 대조구인 타이머 처리구들에서 높았고 배액률이 50%를 넘는 결과를 보였다. 반면, 급액제어범위 조절 처리들은 타이머 처리의 1/3이하 배액량을 나타내었다. 특히, WC55처리의 경우, 배액량이 거의 발생하지 않아 배액률이 1% 수준이었다. 최대 60%를 제어 조건으로 하는 WC55 57 60 처리도 매우 낮은 배액으로 5%의 배액률을 나타내었다.

근권 수분함량 조절 수준을 65%로 높이는 것은 작물이 필요시 많은 양의 급액을 공급해 줄 수 있는 장점이 있지만, 배액이 발생하는 정도가 60% 수준으로 조절하였을 때보다 5배 이상 많아 배액을 최소화하고자 하는 본 실험의 취지에는 적합하지 않은 급액 조절 조건이라 할 수 있겠다. 하지만, 급액이 타이머의 2/3 수준임에도 배액은 1/3이어서 상대적으로 타이머에 비해 배액이 발생하는 수준은 양호하다고 할 수 있겠다.

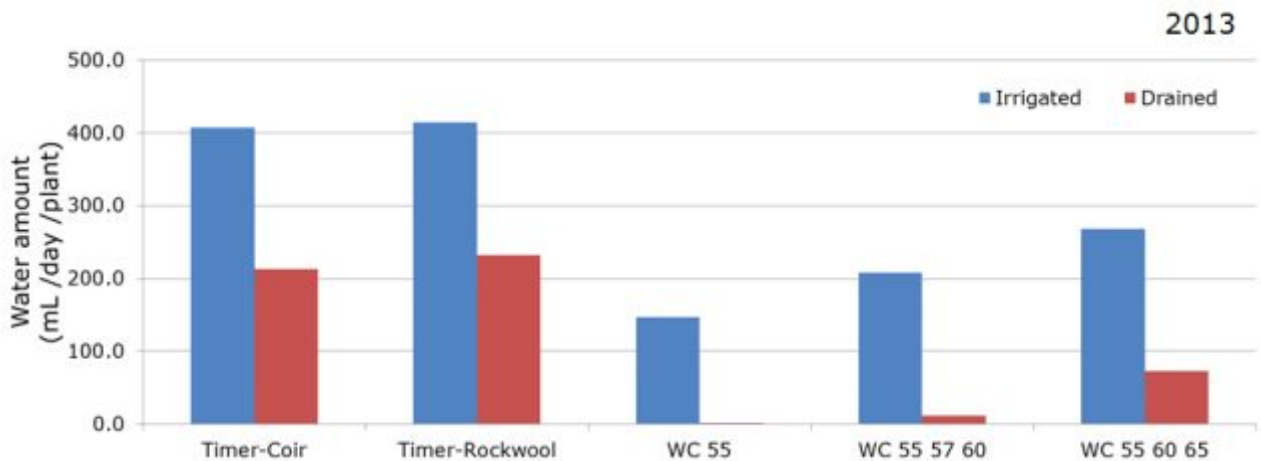


그림 3-5-34. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘계절에 따른 근권수분함량별’ 급배액량

(라) 장미 절화 생육 결과

표 3-5-16은 계절에 따른 근권수분 조절 처리들에서 장미 절화의 생육 특징들을 나타낸 것이다. 모든 처리간에 절화 길이, 절화 경경, 클로로필 함량에서 대조구인 타이머 처리가 높았다. 조절 처리들간에는 절화 길이와 경경에서 WC55처리가 낮았고, 클로로필 함량은 조절처리간 통계적 차이를 보이지 않았다. 표 3-5-17은 계절에 따른 근권수분 조절 처리들에서 장미 절화 수확량을 나타낸 것이다. 여전히 타이머 처리에서 높게 나타났으며, 길이 60cm 이하 절화 수량은 모든 처리간에 통계적 차이를 보이지 않았다. 60cm이상 절화에서는 타이머 처리가 2배 이상의 차이로 높게 나타났고, 전체 수확량에서도 타이머 처리들이 높았다. 조절처리들 간에는 60cm 이상의 절화 수확량은 통계적 유의차를 보이지 않았고, 총 수확량에서는 WC55 57 60이

높았다. 가장 적은 급액량을 공급받은 WC55 처리는 총 수확량이 가장 낮았다.

장미 절화의 생육 측면에서 판단할 때, WC55 60 65 처리가 조절 처리구들 중 가장 높은 수치를 나타내었다. 하지만, 현재 실험이 초기 단계이고 현재 점차 여름으로 진입하고 있는 시기여서 급액량이 많은 처리구들에서 상대적으로 절화 생육 특성이 높게 나타났을 것으로 판단된다. 그리고, WC55 60 65 처리의 급액량과 배액량이 WC55 57 60 처리에 비하여 다소 높은 았던 것에 비해 생육적 차이는 통계적으로 유의성을 나타내지 않아 장미 재배시 급액 조절 근권 수분함량 조건을 65%까지 높이는 것은 권장하지 못할 것으로 판단된다. 수확량에서도 급액량의 증가는 수확량의 증가로 연결되는 경향을 나타내었고, 조절처리에서 급액량이 가장 많았던 WC55 60 65처리와 WC55 57 60처리가 수확량이 큰 차이를 보이지 않았다. 이에, 코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 급액 자동 제어시 급액 조건은 근권 수분함량을 일정하게 하는 것보다 계절에 맞추어 약간(2%) 증가하는 것이 보다 높은 생산성과 품질을 나타낼 것으로 판단된다.

표 3-5-16. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘계절에 따른 근권수분함량별’ 절화 생육

Treatment		Length (cm)	Diameter (mm)	Chlorophyll content (SPAD value)
Timer	Coir	63.3 a ^z	5.39 a	44.3 a
	Rockwool	61.6 a	5.11 ab	45.3 a
WC 55		52.0 c	4.75 c	42.6 b
WC 55 57 60		55.3 b	5.00 bc	41.8 b
WC 55 60 65		55.7 b	5.01 bc	42.3 b

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

표 3-5-17. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘계절에 따른 근권수분함량별’ 수확량

Treatment	Cut flower Yield (number · plant ⁻¹)			
	≥60cm	<60cm	Total yield	
Timer	Coir	4.7 a ^z	13.2 a	17.8 a
	Rockwool	4.6 a	13.6 a	18.2 a
WC 55		0.9 b	14.1 a	15.0 c
WC 55 57 60		2.2 b	14.4 a	16.6 b
WC 55 60 65		1.6 b	13.8 a	15.5 bc

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

(4) 연구결과 요약

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 계절에 따라 근권 수분 함량을 조절하였다. 실험은 4월에서 7월까지 진행중이며, 조절범위는 54~56% 고정(WC55), 계절에 따라 증감하며 최대 58~62%(WC55 57 60), 계절에 따라 증감하며 최대 58~62%(WC55 57 60)인 처리를 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 모든 급액제어범위에서 급액량은 타이머 대비 2/3~1/3로 배액량은 1/3~1/200로 큰 감소를 보였다. 하지만, 줄어든 급액처럼, 센서 제어가 타이머 제어보다 낮은 절화 생육을 보였다. 수확량에 있어서도 타이머 제어가 센서 제어보다 높았다. 조절 처리들간의 비교시 급액을 조금 더 많이 한 처리에서의 생육과 수확량이 우수한 결과를 보였다. 하지만, 급액을 타이머 대비 2/3까지 주어도 1/2 공급한 처리보다 높은 생육과 수량을 나타내지 않았다.

코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 급액 자동 제어시 급액 조건은 근권 수분함량을 일정하게 하는 것보다 계절에 맞추어 약간(2~3%) 증가하는 것이 보다 높은 생산성과 품질을 나타낼 것으로 판단된다.

다. 무배액 시스템을 위한 급액시기와 급액량 비교

(1) 실험 목표

코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배시 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 센서를 이용한 배지 수분함량 조절에 따른 자동 급액시 급액시기에 공급되는 양을 일정 수준으로 한 경우와 급액을 일정 간격으로 하되 총 급액량을 FDR센서 급액 제어 방법 수준으로 낮게 공급하는 실험간의 비교를 통하여 급액 제어에 있어서 급액 시기와 급액량 중 무엇이 더 중요한 요건인지를 구명하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

212 페이지 실험 수행 방법 부분 참조

자동 급액 제어는 코코넛 코이어 슬라브를 배지로 이용하였으며, 2013년 4월 20일부터 제어를 시작하였다. 급액 EC, 급액제어, 급액시간을 표 3-5-18에서와 같이 처리하였다. 타이머 처리는 날씨가 흐려지거나 비오는 날에는 공급을 중단하였다.

표 3-5-18. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액시기와 급액량’ 실험 처리구

Treatment	Electric Conductivity (dS · m ⁻¹)	Irrigation control (water content range, target±control range, %)	Irrigation time (hour)																		
WC 55		55±2																			
WC 55 - 80ml		at 53%, irrigated 80±20 ml/plant	1 hour after sunrise																		
Timer 1/4 1/3 1/2	1.5	<table border="1"> <tr> <td>Apr.</td> <td>May</td> <td>June ~ Aug.</td> <td>Sep.</td> <td>Oct.</td> <td>Nov.</td> </tr> <tr> <td>20ml</td> <td>27ml</td> <td>40ml</td> <td>27ml</td> <td>20ml</td> <td>20ml</td> </tr> <tr> <td colspan="6" style="text-align: center;">x 8 times/day</td> </tr> </table>	Apr.	May	June ~ Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	20ml	27ml	40ml	27ml	20ml	20ml	x 8 times/day						~ 2 hours before sunset
Apr.	May	June ~ Aug.	Sep.	Oct.	Nov.																
20ml	27ml	40ml	27ml	20ml	20ml																
x 8 times/day																					
Control (Timer)	Coir Rockwool	640±20 ml/day/plant (80ml x 8 times/day)																			

(3) 실험수행 내용 및 결과

(가) 온실환경 및 근권환경 측정 결과

210 페이지 (다) 2013 온실환경 부분 참조.

219 페이지 (라) 2013 타이머-코이어처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

225 페이지 (사) 2013 타이머 암면처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

(나) FDR 센서를 이용한 자동 급액시 근권 환경 측정 결과

그림 3-5-35는 일반 수분 제어 55±2% 처리(WC55)에서 실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~80%, EC는 2.0~3.5 dS · m⁻¹ 으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 꾸준히 50~60% 범위를 중심으로 변화를 나타내었다. EC변화는 4월에는 2.0 dS · m⁻¹ 중심에서 변화를 나타내었다가 점차적으로 증가하여, 5월에는 2.5~3.5 dS · m⁻¹ 까지 상승하였다. 이후 약간 감소하여 6월에는 2.0~3.0 dS · m⁻¹ 범위를 유지하였다.

그림 3-5-36은 수분제어를 통해 급액시기를 결정하되 공급되는 양을 일정 수준으로 한 경우 53%시 급액 80mL 처리(WC55 - 80ml)에서 실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~70%, EC는 2.5~4.0 dS · m⁻¹ 으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 4월 제어를 시작하면서부터 계속 50~60% 범위를 중심으로 변화를 나타내었다. EC변화는 4월에는 2.5 dS · m⁻¹ 중심에서 변화를 나타내었다가 점차적으로 증가하여, 5월 중순에는 3.0 dS · m⁻¹ 중심으로 나타났다. 이후 6월에는 2.5~3.0 dS · m⁻¹ 범위를 보였다.

그림 3-5-37은 급액을 타미어 제어와 같이 일정 간격으로 하되 총 급액량을 FDR센서 급액 제어 방법 수준으로 하고 이 양을 계절에 따라 조절하는 1/4 1/3 1/2 공급 처리(Timer 1/4 1/3 1/2)에서 실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 25~65%, EC는 0.5~3.5 dS·m⁻¹ 으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 4월에 제어가 시작된 후 5월 초까지 25% 수준으로 감소하였다. 이후 점차 증가하여 5월말에는 40~50% 범위를 나타내었다. 6월에도 지속적인 증가를 나타내어 6월말에는 60~70% 범위에 도달하였다. EC변화는 4월에는 2.0 dS·m⁻¹ 중심에서 변화를 나타내었다가 5월에는 감소와 증가를 반복하면서 1.0~2.0 dS·m⁻¹ 범위에서 변화를 나타내었다. 5월말에 2.0 dS·m⁻¹ 이상으로 높아졌고, 이후 6월에는 약간씩 증가하여 6월 말에는 3.0~4.0 dS·m⁻¹ 범위를 보였다.

수분변화는 시기별로 설정한 근권 제어 범위를 기준으로 변화가 발생하였다. WC55 - 80ml 처리에서도 50~60%를 중심으로 변화하였다. 반면, Timer 1/4 1/3 1/2 처리는 급액량이 증가하면서 근권 수분함량이 증가하는 경향을 나타냈다. EC는 모든 제어 처리에서는 시간에 따라 증가하였다. 다만, Timer 1/4 1/3 1/2 처리는 다른 제어 처리들에 비해 시간에 따른 증가가 크게 나타났다.

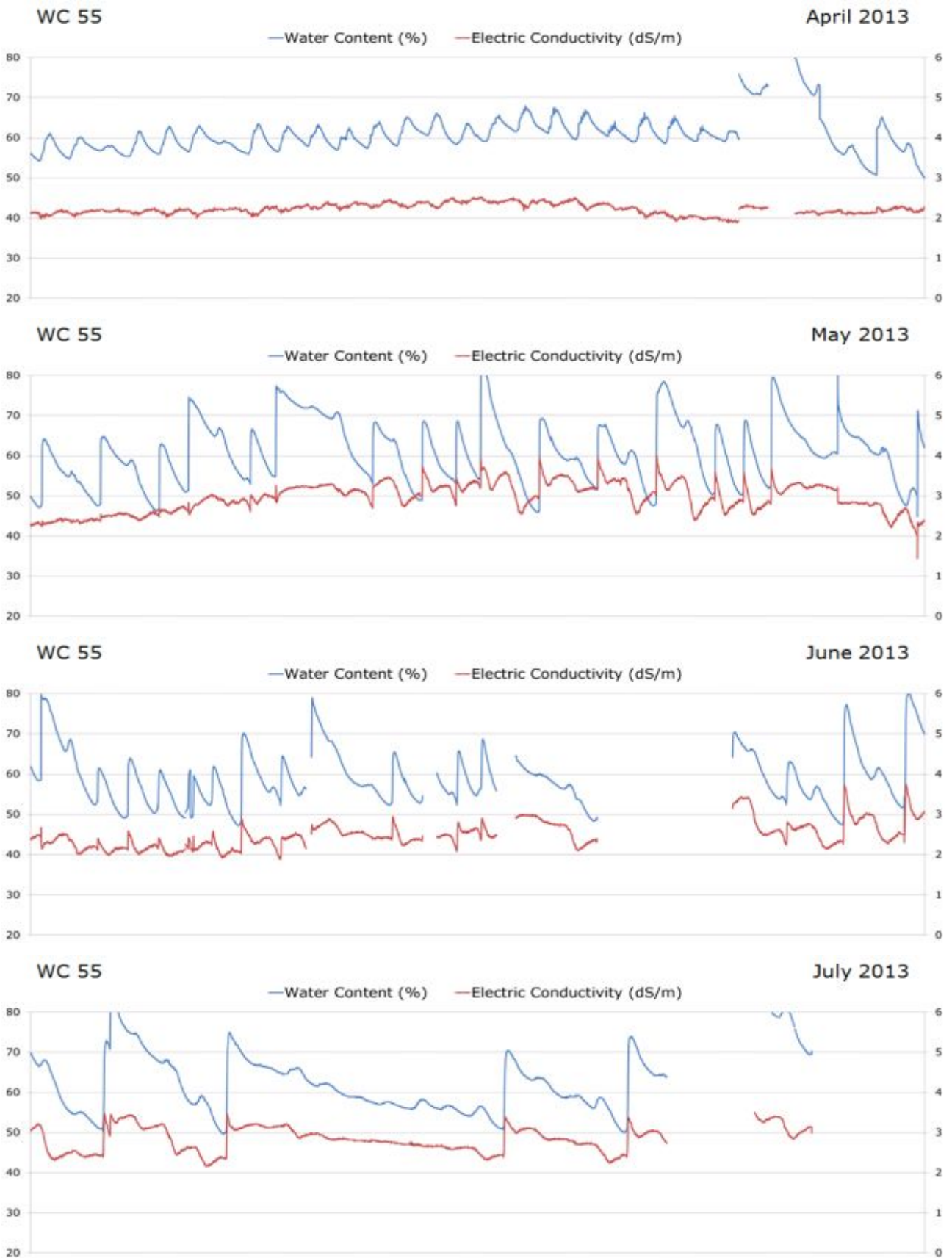


그림 3-5-35. WC 55 처리에서 2013년 4월에서 7월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

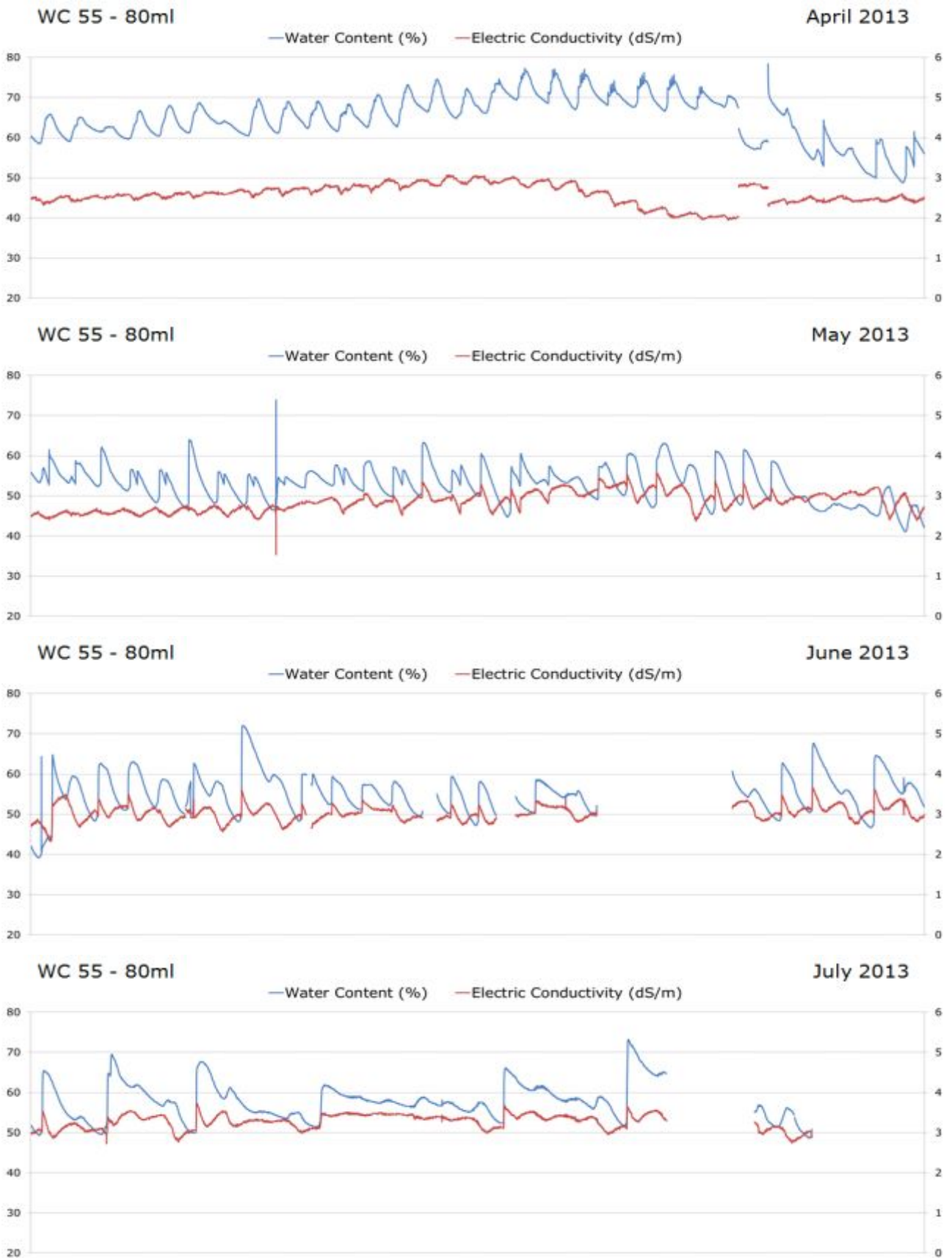


그림 3-5-36. WC 55 - 80ml 처리에서 2013년 4월에서 7월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

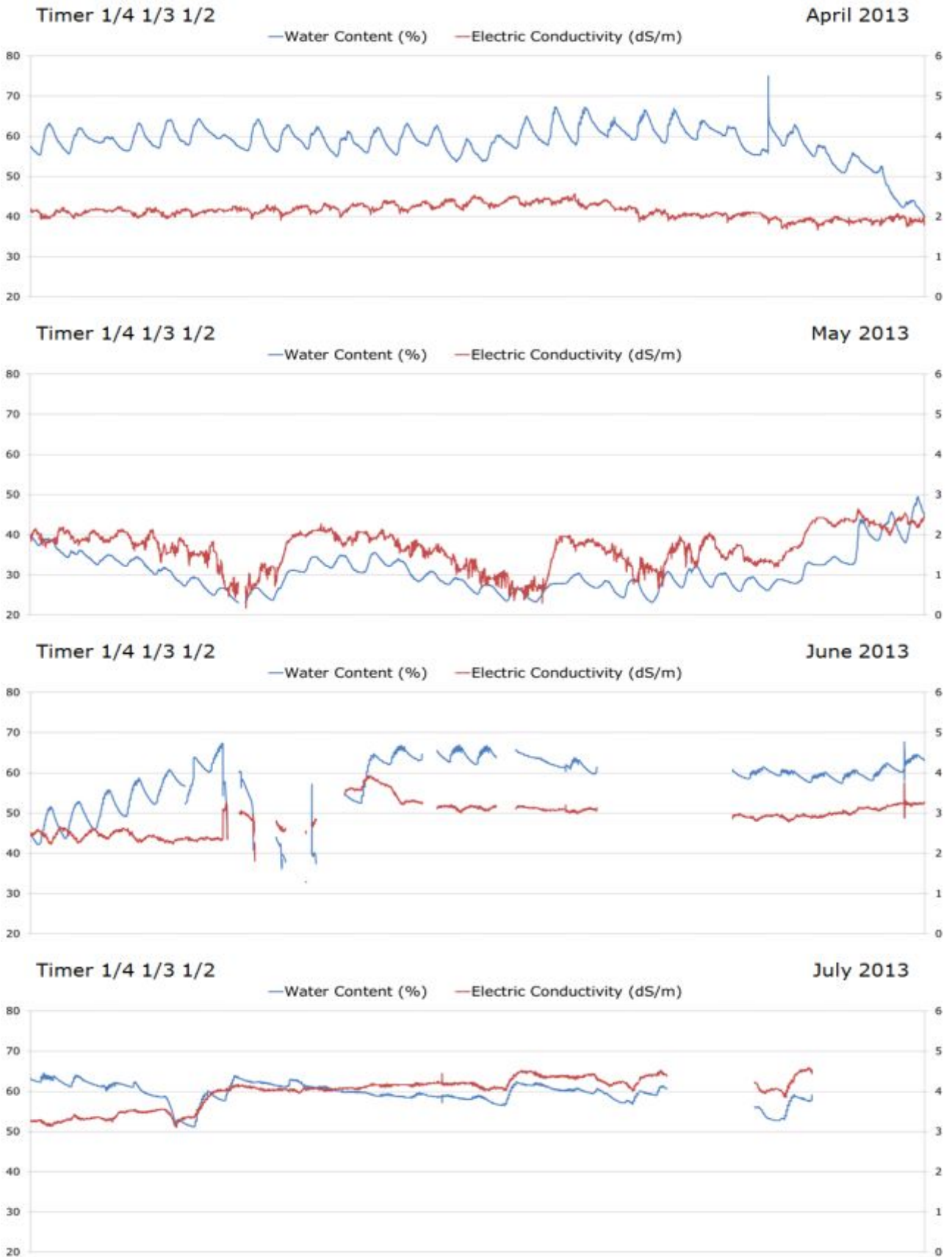


그림 3-5-37. Timer 1/4 1/3 1/2 처리에서 2013년 4월에서 7월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(다) 급배액량 측정 결과

그림 3-5-38은 급액 시기와 급액량 비교 실험에서 처리구 간에 실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 평균 급액량과 배액량을 나타낸 것이다. 전체 급액량의 평균은 대조구인 타이머 처리구들이 높았고, 조절 처리들은 1/2 이하를 나타내어 확연한 급액량의 차이를 나타내었다. 조절 처리중, 공급량을 조절하되 최대 타이머 공급의 1/2를 제어 조건으로 하는 Timer1/4 1/3 1/2 처리가 가장 급액량이 높았으며, 그 다음으로 제어 범위 53~57% 처리(WC55) 그리고 마지막으로 53%시 80ml공급 처리(WC55-80mL)가 가장 낮았다. 전체 배액량의 평균 또한 대조구인 타이머 처리구들에서 높았고 배액률이 50%를 넘는 결과를 보였다. 반면, 조절 처리들은 타이머 처리의 1/70이하 배액량을 나타내었다. 특히, WC55-80mL처리의 경우, 배액률이 0.3%로 배액이 거의 발생하지 않았다.

급액량을 기존 타이머 처리에서 양만 계절에 따라 감소시킨 처리에서 배액량이 매우 적게 발생하였다는 것은 배액 발생에 있어서 1회 공급되는 양이 중요하다는 것을 말해 준다. 그리고 여름철 장미 재배시 타이머의 1/2 수준(300mL)으로 급액하여도 분할하여 급액할 경우에는 배액이 거의 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 이는 여름 장미 재배시 하루에 300mL이상의 수분을 흡수 또는 증발산 한다는 것을 의미한다. 만일 하루 급액이 300mL가 되지 않는거나 더 적다면 식물이 스트레스를 받을 가능성도 있을 것이다. 이를 근거로 WC55를 판단해보면, 온도가 매우 높아지는 여름철에는 WC55의 수분 조건이 식물에 스트레스를 줄 수 있을 것이다. WC55-80mL 처리는 식물이 수분을 흡수하여 근권 수분이 일정 수준이 되면 물을 공급하는 시스템인데, Timer 1/4 1/3 1/2 처리보다 적은 양이 공급되었다는 것은 작물이 흡수하는 것보다 많은 양이 들어가도 배액이 발생되지 않을 수도 있다는 것을 나타내기에 작물 흡수와 배지 흡수 두가지 측면에 대한 추가적인 고찰을 필요할 것으로 판단되며, 연속적인 실험을 통하여 전체적인 변화양상을 파악해야 할 것이다.

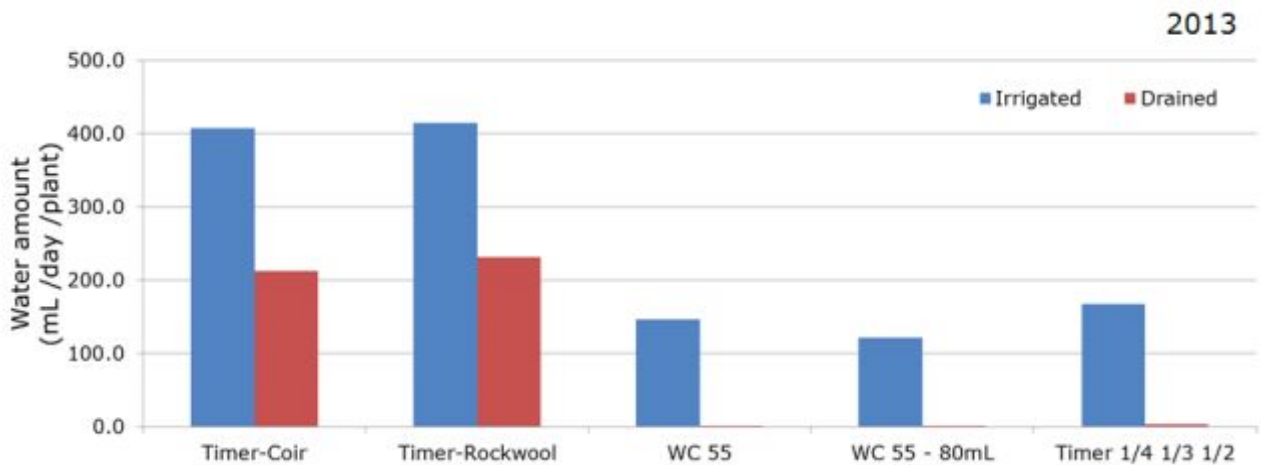


그림 3-5-38. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액시기와 급액량’ 실험의 급배액량

(라) 장미 절화 생육 결과

표 3-5-19는 급액 시기와 급액량 비교 실험에서 장미 절화의 생육 특징들을 나타낸 것이다. 모든 처리간에 절화 길이, 절화 경경, 클로로필 함량에서 대조구인 타이머 처리가 높았다. 조절 처리들에서 절화 길이는 차이가 없었고, 절화 경경에서는 Timer1/4 1/3 1/2 처리가 낮았고, 클로로필 함량은 WC55-80mL 처리가 높았다. 표 3은 급액 시기와 급액량 비교 실험에서 장미 절화 수확량을 나타낸 것이다. 길이 60cm 이하 절화 수량은 모든 처리간에 통계적 차이를 보이지 않았다. 60cm 이상 절화에서는 타이머 처리가 2배 이상의 차이로 높게 나타났고, 전체 수확량에서도 타이머 처리들이 조절처리들보다 높았다. 조절처리들 간, 60cm 이상과 60cm 미만 각각의 절화 수확량은 통계적 유의차를 보이지 않았으나, 총 수확량에서는 차이를 보여 Timer1/4 1/3 1/2 가 높았다. 가장 적은 급액량을 공급받은 WC55-80mL 처리는 총 수확량이 가장 낮았다.

조절 처리들만 놓고 보았을 때, Timer1/4 1/3 1/2 처리가 배액이 매우 적게 발생되면서 비슷한 생육을 나타내고 총 수확량에서는 높아 다른 조절 처리에 비해 우수한 것으로 판단할 수 있겠다. 이는 WC55 처리같이 일정 범위안에서 식물이 요구하는 수준의 급액을 하는 것과 식물이 요구할 때 일정 수준의 급액을 하는 것 보다, 전체적으로 약간 많은 급액이 요구되지만 일중 골고루 수분을 공급하는 것이 생육에 유리할 수 있다는 설명이 된다. 특히, 여름같은 고온 시기에 말이다. 식물이 흡수하지 않더라도 근권에 일정 이상의 수분이 있다는 것이 생육에 도움이 될 수도 있을 것으로 판단되며, 이는 7월로 되면서 근권 수분함량이 점차 증가되고 EC 또한 증가되는 것으로 볼 때 설명이 가능할 것이다. 이로 볼 때, 급액 시기보다는 급액량이 더 중요하고, 이를 공급하는 것이 일시적으로 하는 것이 아닌 일정 시간을 간격으로 공급하는 것이 식물 재배에 보다 적합할 수도 있다는 결론에 다다르게 된다. 이는 좀더 연속적으로 실험을 지속하면서 여러 가지 변화를 조사함으로써 보다 확실한 결론에 이를 것으로 판단된다.

표 3-5-19. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액 시기와 급액량’ 실험의 절화 생육

Treatment		Length (cm)	Diameter (mm)		Chlorophyll content (SPAD value)
Timer	Coir	63.3 a ^z	5.39	a	44.3 a
	Rockwool	61.6 a	5.11	ab	45.3 a
WC 55		52.0 b	4.75	c	42.6 b
WC 55 - 80ml		51.8 b	4.77	c	43.9 ab
Timer 1/4 1/3 1/2		54.0 b	4.81	bc	42.7 b

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

표 3-5-20. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액 시기와 급액량’ 실험의 수확량

Treatment	Cut flower Yield (number · plant ⁻¹)			
	≥60cm	<60cm	Total yield	
Timer	Coir	4.7 a ^z	13.2 a	17.8 a
	Rockwool	4.6 a	13.6 a	18.2 a
WC 55	0.9 b	14.1 a	15.0 bc	
WC 55 - 80ml	0.8 b	13.4 a	14.2 c	
Timer 1/4 1/3 1/2	2.1 b	14.8 a	16.9 ab	

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

(4) 연구결과 요약

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 급액 시기와 급액량 비교 실험을 해보았다. 실험은 4월에서 7월까지 진행중이며, 충분한 급액 공급 처리(타이머), 정상조절처리로는 54~56%(WC55)와 급액 시기에 초점을 둔 53%시 80±10mL 공급 처리(WC55-80mL), 그리고 급액량 조절에 중점을 두어 기존 타이머와 같은 시간에 공급하되 공급량을 1/4 1/3 1/2 으로 계절에 따라 조절하는 처리(Timer/4 1/3 1/2)의 네 가지로 하였다.

급액 조절 처리시, 급액량은 타이머 대비 2/5이하, 배액량은 1/50이하로 큰 감소를 보였다. 절화 장미의 생육과 수확량에 있어서 급액량이 많은 타이머 제어가 센서 제어보다 높았다. 조절 처리들간의 비교에서도 절화 생육에서는 차이를 보이지 않았으나, 총 수확량에서는 급액이 조금더 공급된 Timer/4 1/3 1/2 처리에서 높았다. 즉, 급액시기보다는 급액량이 그리고 급액이 한순간에 물리는 것보다는 일정간격을 두는 것이 식물 생육에 효과적일 수 있다고 판단된다. 향후 연속적인 실험으로 이에 대한 결과가 보다 확실해 질 것이다.

라. 무배액 시스템을 위한 정상, 조절, 스트레스 처리 비교

(1) 실험 목표

코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배시 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 센서를 이용한 배지 수분함량 조절에 따른 자동 급액시 식물이 스트레스 받는지 여부를 스트레스 환경을 조성한 실험과의 비교를 통하여 구명하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

212 페이지 실험 수행 방법 부분 참조

자동 급액 제어는 코코넛 코이어 슬라브를 배지로 이용하였으며, 2013년 4월 20일부터 제어를 시작하였다. 급액 EC, 급액제어, 급액시간을 표 3-5-21에서와 같이 처리하였다. 타이머 처리는 날씨가 흐려지거나 비오는 날에는 공급을 중단하였다.

표 3-5-21. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘상황별’ 실험 처리구

Treatment	Electric Conductivity (dS · m ⁻¹)	Irrigation control (water content range, %)	Irrigation start	Irrigation time
			Irrigation stop	
WC 35	1.5	35±2	under 33% over 37%	1 hour after sunrise
WC 55		55±2	under 53% over 57%	~
Control (Timer)		Coir Rockwool	640±20 ml/day/plant (80ml x 8 times/day)	

(3) 실험수행 내용 및 결과

(가) 온실환경 및 근권환경 측정 결과

210 페이지 (다) 2013 온실환경 부분 참조.

219 페이지 (라) 2013 타이머-코이어처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

225 페이지 (사) 2013 타이머 암면처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

(나) FDR 센서를 이용한 자동 급액시 근권 환경 측정 결과

그림 3-5-39는 스트레스 여부 실험 저수분 35±2% 처리(WC35)에서 실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 30~60%, EC는 0.5~4.0 dS · m⁻¹ 으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 제어 처리를 시작한 다음부터 30~40% 범위를 중심으로 변화를 나타내었다. EC변화는 4월말 제어 처리 시작후에 0.5 dS · m⁻¹ 까지 낮아졌다가 점차 증가하였다. 5월말에는 2.5 dS · m⁻¹ 까지 상승하였고, 6월에는 더 증가하여 2.5~3.5 dS · m⁻¹ 범위에서 변화를 나타냈다.

그림 3-5-40은 스트레스 여부 실험 일반 제어 55±2% 처리(WC55)에서 실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~80%, EC는 2.0~3.5 dS · m⁻¹ 으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 꾸준히 50~60% 범위를 중심으로 변화를 나타내었다. EC변화는 4월에는 2.0 dS · m⁻¹ 중심에서 변화를 나타내었다가 점차적으로 증가하여, 5월에는 2.5~3.5 dS · m⁻¹ 까지 상승하였다. 이후 약간 감소하여 6월에는 2.0~3.0 dS · m⁻¹ 범위를 유지하였다.

저수분 처리인 WC35에서는 일반 제어 처리인 WC55에 비해 실험이 진행될수록 확연한 근권 EC증가를 나타내었다. 이러한 증가가 지속될 경우, 더운 여름에 높은 근권 EC로 인한 피해가 예상된다. 일반 제어 처리 또한 타이머 제어에 비하여 식물에 약간의 스트레스가 될 수 있으나 저수분 처리만큼의 극단적인 변화가 나타나지는 않는 것을 확인할 수 있어 향후 지속되는 실험 결과를 주목할 필요가 있을 것이다.

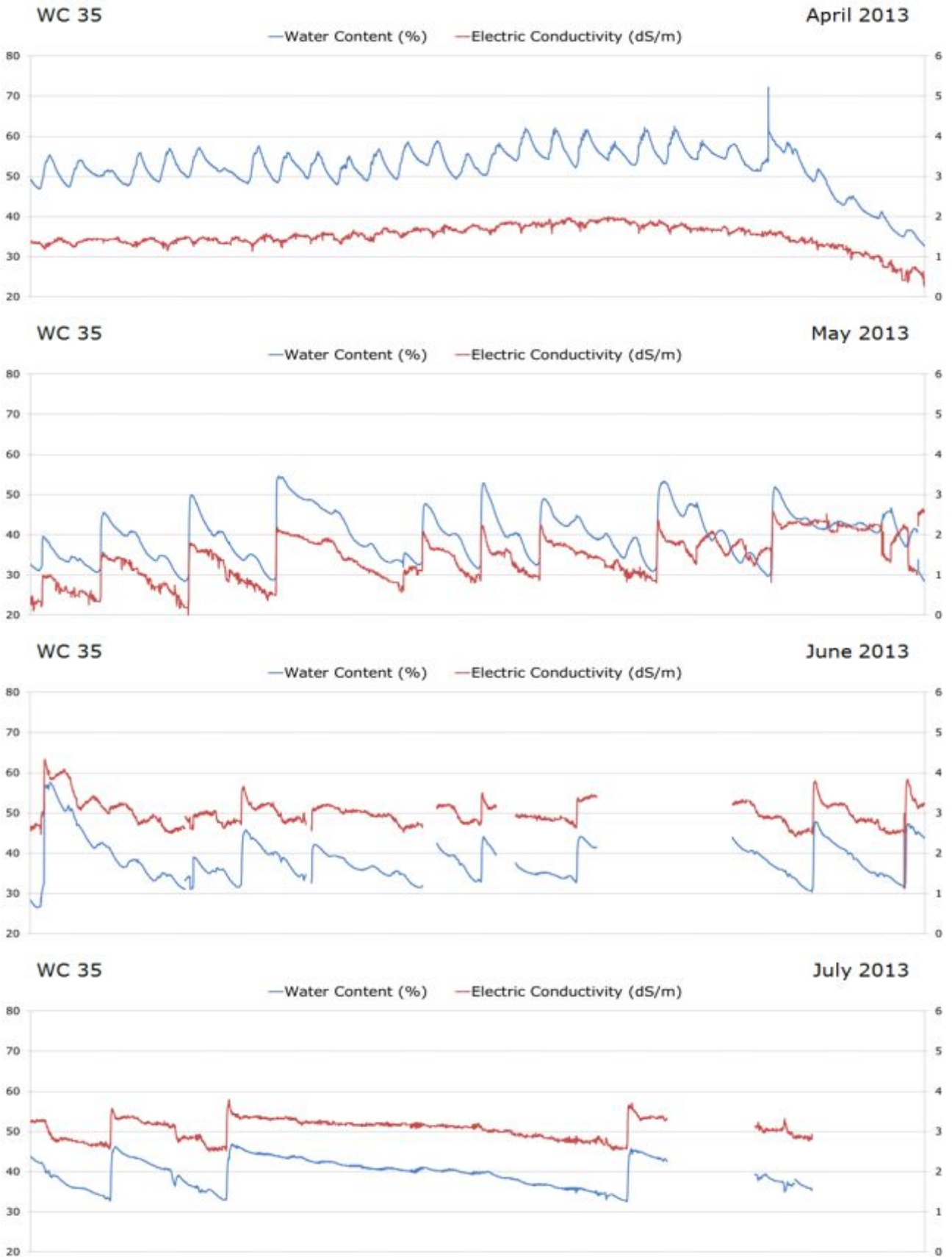


그림 3-5-39. WC 35 처리에서 2013년 4월에서 7월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

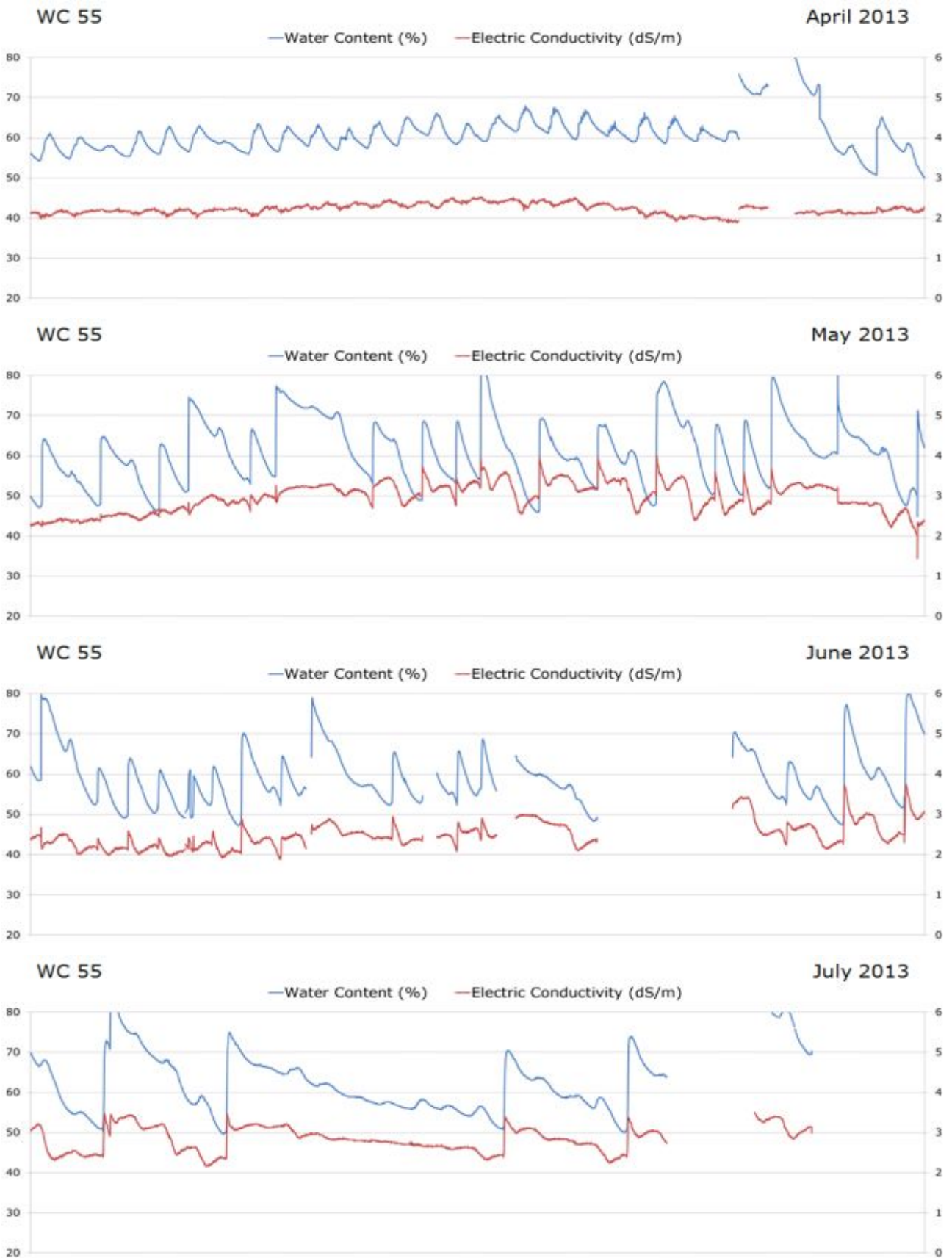


그림 3-5-40. WC 55 처리에서 2013년 4월에서 7월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(다) 급배액량 측정 결과

그림 3-5-41은 스트레스와 비스트레스 처리들에서 실험기간 중 2013년 4월에서 7월까지의 평균 급액량과 배액량을 나타낸 것이다. 전체 급액량의 평균은 대조구인 타이머 처리구들이 높았고, 수분 조절 처리들은 1/3 이하를 나타내어 확연한 급액량의 차이를 나타내었다. 전체 배액량의 평균 또한 대조구인 타이머 처리구들에서 높았고 배액률이 50%를 넘는 결과를 보였다. 반면, 수분 조절 처리들은 배액량이 거의 발생하지 않아 타이머 처리의 1/100이하의 배액량을 나타내었다. 배액률을 보면, 타이머-코이어와 압면은 각각 52.3과 55.9%인데, 수분 조절 처리들은 WC35가 0.9%이고 WC55는 1.2%로 매우 낮았다.

특히 이 중 WC35는 적은 급액에 낮은 근권 수분으로 WC55보다 작물에 큰 피해를 줄 수 있는 수준으로 생각할 수 있겠다.

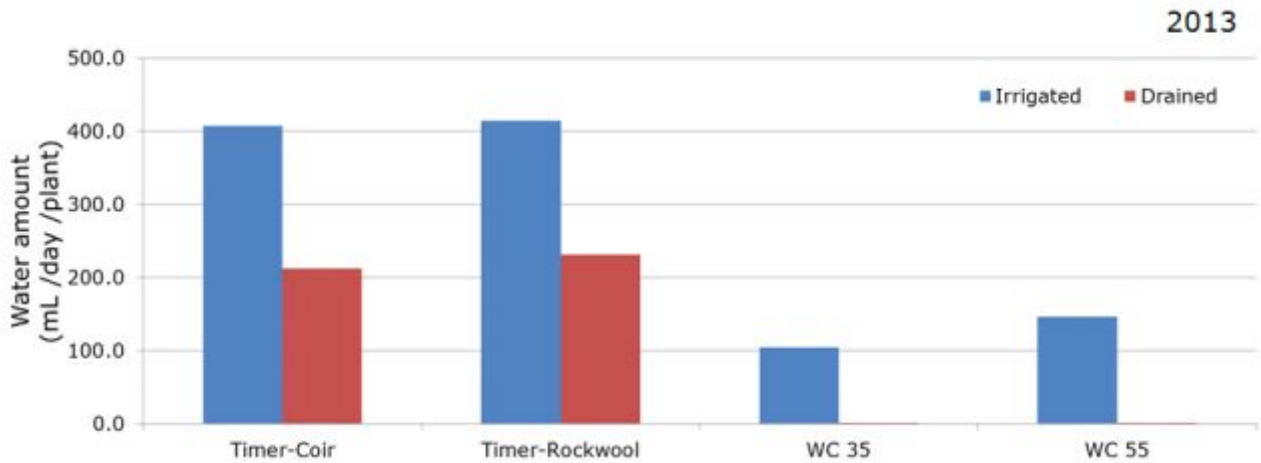


그림 3-5-41. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘스트레스별’ 급배액량

(라) 장미 절화 생육 결과

표 3-5-22는 스트레스와 비스트레스 처리들에서 장미 절화의 생육 특징들을 나타낸 것이다. 모든 처리간에 절화 길이, 절화 경경, 클로로필 함량에서 대조구인 타이머 처리가 높았다. 조절 처리들간에는 절화 생육에 있어서 통계적 유의성을 나타내지 않았다. 표 3-5-23은 스트레스와 비스트레스 처리들에서 장미 절화의 수확량을 나타낸 것이다. 60cm 미만 절화 수확량은 모든 처리에서 차이를 보이지 않았으나, 60cm이상과 전체 수확량에서는 타이머 처리가 높게 나타났다. 수분 조절처리간에는 총 수확량에 WC55처리가 높게 나타났다.

수분 조절 처리구 간에 수확량에 있어서는 차이를 보이나, 절화 생육에 있어 큰 차이가 나타나지 않은 것은 재배 초기 단계임과 더불어 하절기의 고온 영향하에서 급액량이 적은 두 조절 처리 모두 큰 스트레스를 받아서 둘간에 차이를 나타내지 않는 것이 그 이유로 판단된다. 작물이 좀더 성장하고 극단적으로 높은 고온에 의한 영향이 줄어들면, 수분함량에 의한 차이가 발생할 수 있을 것이다. 좀더 큰 스트레스를 주기 위해 30% 수준까지 처리 수준을 낮추는 것도 의미있는 시도일 것이다.

표 3-5-22. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘스트레스별’ 절화 생육

Treatment		Length (cm)	Diameter (mm)	Chlorophyll content (SPAD value)
Timer	Coir	63.3 a ^z	5.39 a	44.3 a
	Rockwool	61.6 a	5.11 a	45.3 a
WC 55		52.0 b	4.75 b	42.6 b
WC 35		53.7 b	4.78 b	41.5 b

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

표 3-5-23. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘스트레스별’ 수확량

Treatment		Cut flower Yield (number · plant ⁻¹)		
		≥60cm	<60cm	Total yield
Timer	Coir	4.7 a ^z	13.2 a	17.8 a
	Rockwool	4.6 a	13.6 a	18.2 a
WC 55		0.9 b	14.1 a	15.0 b
WC 35		0.6 b	12.2 a	12.8 c

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

(4) 연구결과 요약

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 식물이 스트레스 받는지 여부를 스트레스 환경을 조성하여 비교를 해보았다. 실험은 4월에서 7월까지 진행중이며, 정상조절처리는 54~56%(WC55)와 스트레스 조절처리 32~37%(WC35)로 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 모든 급액제어범위에서 급액량은 타이머 대비 1/3이하, 배액량은 1/100로 큰 감소를 보였다. 절화 장미의 생육과 수확량에 있어서 타이머 제어가 센서 제어보다 높았다. 조절 처리들간의 비교에서도 절화 생육에서는 차이를 보이지 않았으나, 수확량에서는 급액을 조금 더 많이 한 처리에서 우수한 결과를 보였다.

센서를 이용한 수분 조절 처리 모두 고온기인 여름철에 상대적으로 낮은 수분공급으로 인한 스트레스를 받았을 것으로 생각되며, 약간 많은 급액을 공급받은 WC55 처리에서 WC35보다는 극복할 수 있는 능력이 있어서 수확량에 있어 증가를 보인 것으로 판단된다.

4. 무배액 시스템에 적합한 급액체계 구명

가. 무배액 시스템을 위한 급액시작 시간조절

(1) 실험 목표

코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배시 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 센서를 이용한 배지 수분함량 조절에 따른 자동 급액시작 시간 조절하여 장미 생육에 적합한 급액 조건을 구명하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

212 페이지 실험 수행 방법 부분 참조

자동 급액 제어는 코코넛 코이어 슬라브를 배지로 이용하였으며, 2012년 7월 15일부터 제어를 시작하였다. 급액 EC, 급액제어, 급액시간을 표 1에서와 같이 처리하였다. 타이머 처리는 날씨가 흐려지거나 비오는 날에는 공급을 중단하였다.

표 3-5-24. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시작 '시작시간별' 실험 처리구

Treatment	Electric Conductivity (dS · m ⁻¹)	Irrigation control (water content range) (%)	Irrigation start	Irrigation time	
			Irrigation stop	Start	Stop
Sunrise +1	1.5	55±1	under 54%	1 hour after sunrise	
Sunrise +2			after sunrise	2 hours
Sunrise +3			over 56%	after sunrise	before sunset
Control (Timer)	Coir Rockwool	640±20 ml/day/plant (80ml x 8 times/day)		1 hour after sunrise	

(3) 실험수행 내용 및 결과

(가) 온실환경 및 근권환경 측정 결과

208 페이지 (나) 2012 온실환경 부분 참조.

217 페이지 (다) 2012 타이머-코이어처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

223 페이지 (바) 2012 타이머 암면처리의 근권환경 측정결과 부분 참조

(나) FDR 센서를 이용한 자동 급액시 근권 환경 측정 결과

그림 3-5-42는 급액시작시간 일출후 1시간 처리(Sunrise+1)에서 실험기간 중 2012년 8월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~70%, EC는 $3.0 \sim 5.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 꾸준히 55~60% 범위를 중심으로 변화를 나타내었다. EC변화는 8월에는 $3.0 \sim 4.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 범위내에서 변화를 나타내었다가 점차적으로 증가하여, 9월말에는 $4.0 \sim 5.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 상승하였다. 10월에는 이 범위를 유지하였고, 11월 이후 조금씩 증가하여 11월말에는 $5.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 을 중심으로 나타났다.

그림 3-5-43은 급액시작시간 일출후 2시간 처리(Sunrise+2)에서 실험기간 중 2012년 8월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~70%, EC는 $3.0 \sim 5.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 의 변화를 보였다. 수분함량의 변화는 꾸준히 55~65% 범위를 중심으로 변화를 나타내었다. EC변화는 8월에는 $3.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 중심에서 $3.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 중심으로 증가를 나타내었고, 점차적으로 증가하여 10월말에는 $4.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 상승하였고, 10월에는 이를 유지하여 $3.5 \sim 4.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 의 변화 범위를 보였다. 11월에 다시 증가하여 11월말에는 $4.5 \sim 5.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 높아졌다.

그림 3-5-44는 급액시작시간 일출후 3시간 처리(Sunrise+3)에서 실험기간 중 2012년 8월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~70%, EC는 $2.5 \sim 5.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 의 변화를 보였다. 수분함량의 변화는 8월부터 9월까지는 50~60% 범위를 꾸준히 유지하였다. 10월이 되면서 범위의 폭이 증가하여 10월 말에는 50~70% 범위를 중심으로 변화를 나타내었고, 11월까지 지속되었다. EC변화는 시간에 따라 꾸준히 증가하는 특징을 나타냈다. 8월초 $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 미만에서 8월말 $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 이상으로, 9월말 $3.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 이상, 10월말은 $4.0 \sim 5.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 범위까지 높아졌다. 11월에는 이를 유지하였다.

수분변화가 일정한 범위에서 변화가 발생하는 반면, EC는 전체적으로 조금씩 시간이 지나면서 증가하는 특징을 보였다. 처리에 따라 차이가 있으나 한번 급액후 근권 수분함량이 감소하는 과정에서 수분의 공급없이도 상승했다가 하강하는 변화를 보이는 구간이 생겼는데, 이는 센서 설치 위치가 장미 근권이 위치하는 곳보다 깊은 곳까지 설치되어 발생하는 것으로 판단된다. 급액이 시작된 후에 수분함량이 증가되었다가, 식물이 수분을 흡수하면 점차 낮아졌고, 그 다음날 오전에 식물이 수분을 흡수하면 근권 수분이 낮아지면서 동시에 근권부 EC 상승이 발생되고 그 수준이 높아질 경우, 식물 뿌리가 존재하지 않는 배지의 다른 부위와의 삼투압차가 발생하여 다른 곳에서 수분이 센서가 있는 쪽으로 수분이 이동하여 잠시동안 수분이 높아졌다가, 다시 식물이 이용하면서 낮아지고, 낮아지면 삼투압차로 다른 배지에서 수분이 이동해오는 형태의 근권 수분 움직임이 발생되어 이와 같은 결과가 나타났을 것으로 판단한다.

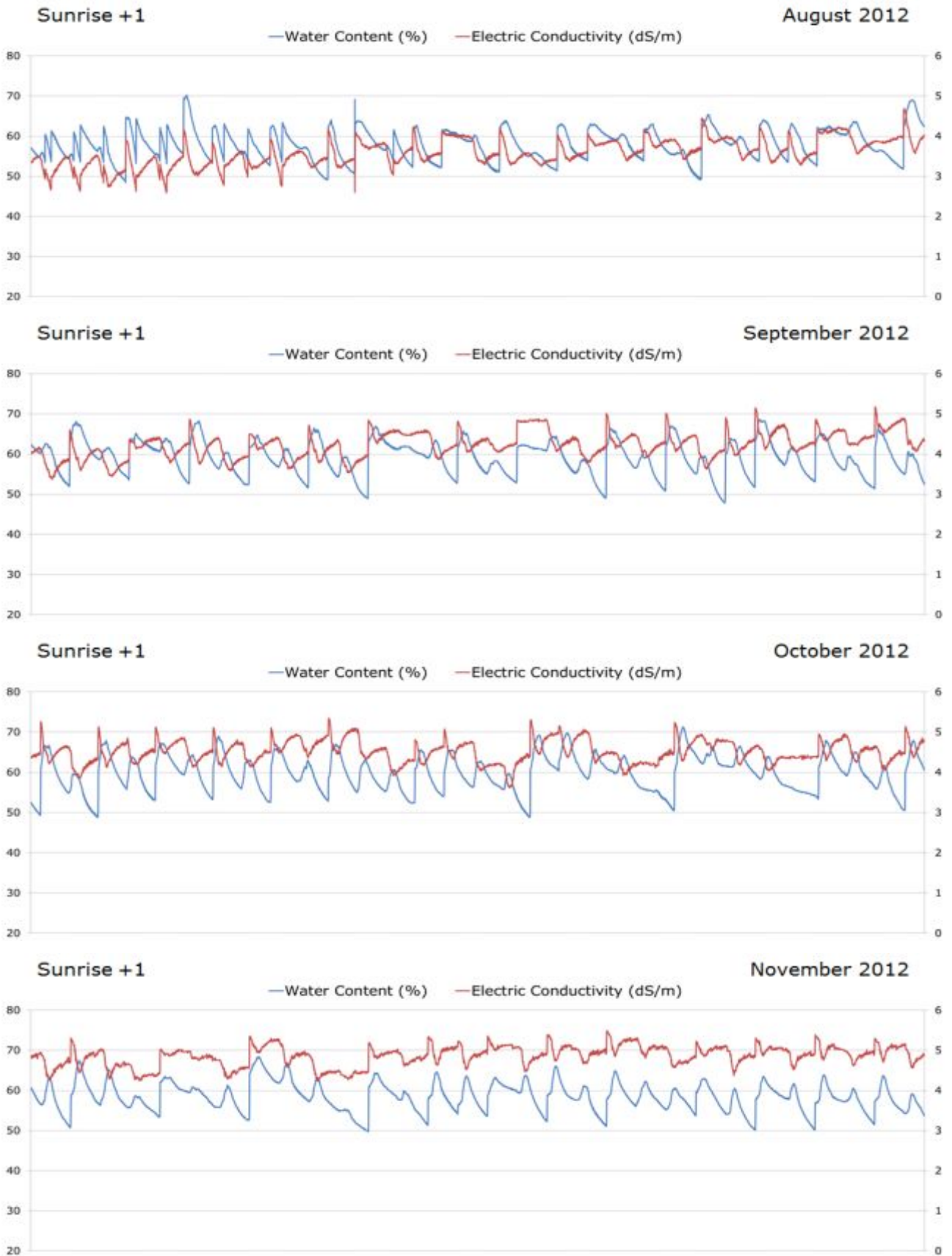


그림 3-5-42. Sunrise +1 치리에서 2012년 8월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

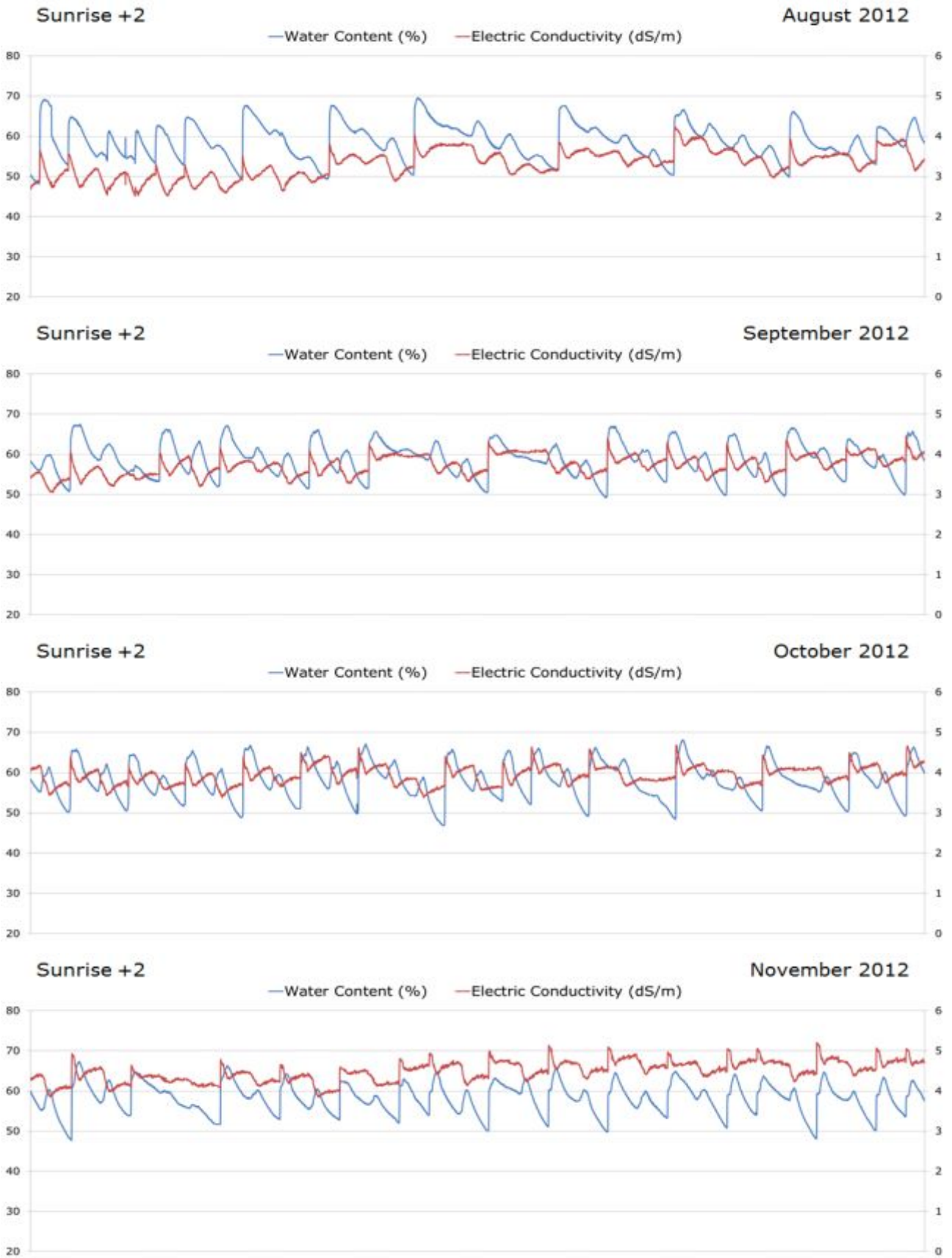


그림 3-5-43. Sunrise +2 차리에서 2012년 8월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

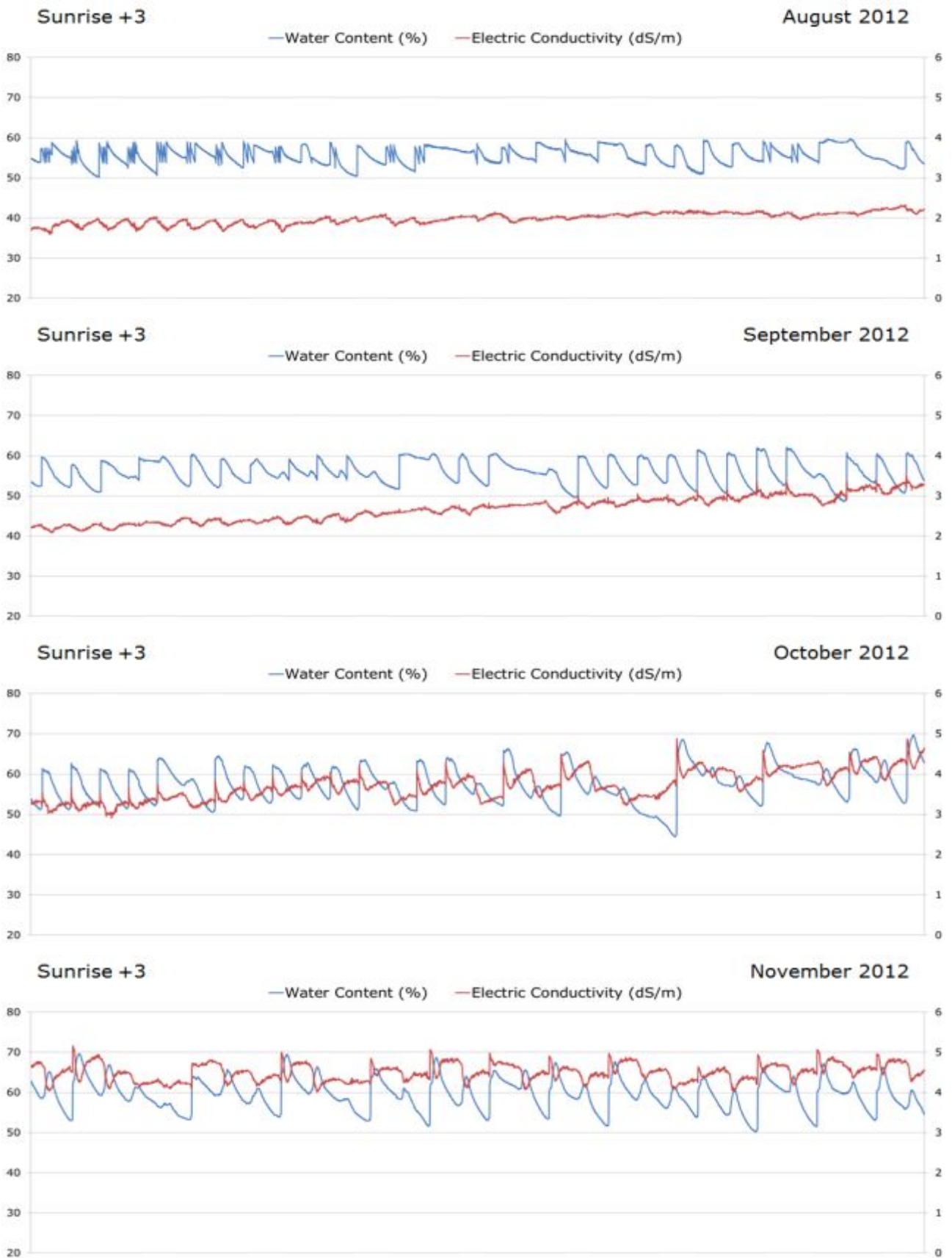


그림 3-5-44. Sunrise +3 처리에서 2012년 8월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(다) 급배액량 측정 결과

표3-5-25와 표3-5-26은 급액시작시간 처리들에서 실험기간 중 2012년 8월에서 11월까지의 월별 급액량과 배액량을 나타낸 것이다. 전체 급액량의 평균은 대조구인 타이머 처리구들이 높았고, 급액시작시간 조절 처리들은 타이머 처리들의 1/3이하 였으며, 조절처리들 간에는 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 전체 배액량의 평균 또한 대조구인 타이머 처리구들에서 가장 높았고, 급액시작시간 조절 처리들은 타이머 처리의 1/60이하 배액량을 나타내었으며 그들간에 통계적으로 유의하지 않았다. 조절 처리들 중에서 Sunrise+2 처리에서 급액량이 조금 더 적게 측정되었다. 전체 급액량과 배액량의 평균에서 배액률을 계산해 보면, 타이머 처리구들이 코이어 압면 각각 45.6%와 49.5%로 가장 높았고, 조절처리들에서는 Sunrise+1이 2.6%로 가장 높았고, 나머지 Sunrise+2와 Sunrise+3 처리들은 각각 0, 0.3%의 배액률을 보였다. 조절 처리들은 타이머 처리들 배액률의 1/20이하로 급액 대비 배액 발생이 거의 되지 않았다.

월별 급액량 결과를 보면, 타이머 처리들은 급액이 8월부터 점차 증가하여 10월은 가장 많은 급액이 공급되었으며, 11월은 급액량이 줄어드는 경향을 나타냈다. 급액제어범위 조절처리들은 8월에 가장 많은 급액이 공급되었고, 이중 Sunrise+1와 Sunrise+3 처리들은 점차 급액량이 감소되는 경향을 나타냈다. Sunrise+2 처리는 10월까지의 일정 수준의 급액을 유지하다가 11월에 약간 감소되는 특징을 보였다. 배액량에서는 타이머 처리들은 급액량과 같이 10월까지 점차 증가하다가 11월에 대폭 줄어드는 특징을 나타내었다. 반면, 조절처리들에서는 Sunrise+1 처리에서 11월에 9.5mL가 가장 높은 배액량이며, 10월에 2.3mL와 Sunrise+3 처리에서 8월에 1.7mL를 제외하고는 배액량이 발생하지 않았다.

조절처리별로 보았을 때, Sunrise+2 처리의 경우는 전 실험기간동안 배액이 없었다. Sunrise+1 처리는 8월과 9월에는 배액이 없었으나 그 이후 점차 증가하였고, Sunrise+3 처리는 8월에 약간의 배액이 발생하였고 그 이후에는 배액이 없었다.

표 3-5-25. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시작시간별 급액량

		Average irrigated water amount (mL·day ⁻¹ ·plant ⁻¹)					
Treatment		August	September	October	November	Total	
Timer ^z	Coir	411.0 a ^y	433.8 a	465.8 a	262.4 a	393.3 a	
	Rockwool	378.8 a	401.9 a	430.9 a	264.5 a	369.0 a	
	Sunrise +1	198.2 b	115.0 b	75.6 b	79.9 b	117.2 b	
	Sunrise +2	98.2 c	90.2 b	100.9 b	82.4 b	92.9 b	
	Sunrise +3	206.4 b	103.8 b	97.4 b	65.4 b	118.3 b	

^zDuring experiments, irrigations were started at an hour after sunrise, and stopped 2 hours before sunset. At a rainy day, irrigation was not preformed.

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

표 3-5-26. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘시작시간별’ 배액량

Treatment	Average drained water amount (mL·day ⁻¹ ·plant ⁻¹)					
	August	September	October	November	Total	
Timer ^z	Coir	128.4 a ^y	184.5 a	362.3 a	94.9 a	192.5 a
	Rockwool	103.7 a	152.3 a	333.4 a	98.9 a	172.1 a
Sunrise +1	0.0 b	0.0 b	2.3 b	9.5 b	3.0 b	
Sunrise +2	0.0 b	0.0 b	0.0 b	0.0 b	0.0 b	
Sunrise +3	1.7 b	0.0 b	0.0 b	0.0 b	0.4 b	

^zDuring experiments, irrigations were started at an hour after sunrise, and stopped 2 hours before sunset. At a rainy day, irrigation was not preformed.

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

(라) 장미 절화 생육 결과

표 3-5-27은 급액시작시간 처리들에서 장미 절화의 생육 특징들을 나타낸 것이다. 대조구를 포함한 모든 처리간에 절화 길이, 절화 생체중, 절화 건물중, 잎 생체중, 클로로필 함량은 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 줄기 경경에 있어서 타이머-코이어 처리가 높았으며 Sunrise+2 처리에서 낮았다. 잎 건물중은 조절 처리들이 높았다. 표 3-5-28은 급액시작시간 처리들에서 생육 결과 중 수확량을 나타낸 것이다. 60cm미만 길이 수확량은 통계적으로 처리구들 간에 차이를 나타내지 않았다. 총수확량, 상품수확량, 길이 80cm가 넘는 절화 수확량, 그리고 80에서 60cm 길이 수확량 부분에서 타이머 처리들이 높은 수량을 나타내었다. 급액시작시간 처리들간에 상품수량은 차이를 보이지 않았다. 하지만, 상품수량과 총수량, 그리고 80cm가 넘는 절화 수확량에서 Sunrise+3 처리가 높은 결과를 보여주었다.

장미 절화의 생육 측면에서 판단할 때 Sunrise+1와 Sunrise+3 처리들 우수하였고, 수확량에서 판단할 때에는 Sunrise+3 처리가 높았다. 생육과 수확량 이 둘을 종합하였을 때, Sunrise+3 처리가 우수한 급액제어범위라고 할 수 있겠다. 다만, 급액량이 Sunrise+2 처리에 비해 약간 높지만 생육과 수확량에서 같이 통계적으로 차이를 보이지 않았다. 코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 자동 급액시 절화 생육과 수확량 그리고 급액량과 배액량을 고려하였을 때, 급액을 일출후 3시간부터 시작할 때 가장 우수한 급액시작시간이라고 판단할 수 있다. 실제로 일출후 3시간은 실험에 사용한 온실에 태양빛이 완전히 비추고 한시간이 지난 시간이다(Data were not shown.). 즉, 온실에 빛이 들어오고 한시간정도 충분히 식물이 빛을 받은 다음에 수분을 공급받는 것이 작물 재배에 우수한 급액 공급 조건이라고 표현할 수도 있겠다.

표 3-5-27. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘시작시간별’ 절화 생육 특성

Treatment	Length (cm)	Diameter (mm)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	Leaves fresh weight (g)	Leaves dry weight (g)	Chlorophyll content (SPAD value)	
Timer ^z	Coir	72.9 a ^y	5.68 a	27.2 a	5.59 a	8.45 a	1.84 b	46.8 a
	Rockwool	74.1 a	5.35 ab	26.3 a	5.42 a	8.00 a	1.69 b	48.9 a
Sunrise +1	69.5 a	5.43 ab	24.6 a	5.38 a	8.06 a	1.81 a	47.8 a	
Sunrise +2	69.1 a	5.08 b	27.4 a	5.92 a	9.16 a	2.02 a	50.4 a	
Sunrise +3	72.9 a	5.21 ab	24.9 a	5.70 a	8.00 a	1.79 a	50.1 a	

^zDuring experiments, irrigations were started at an hour after sunrise, and stopped 2 hours before sunset.

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

표 3-5-28. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘시작시간별’ 수확량 특성

Treatment	Cut flower Yield (number · plant ⁻¹)					
	>80cm	80~60cm	<60cm	Marketable yield ^x	Total yield	
Timer ^z	Coir	2.9 a ^y	5.1 a	10.3 a	8.0 a	18.2 a
	Rockwool	2.5 ab	4.8 ab	11.3 a	7.3 a	18.5 a
Sunrise +1	0.5 d	3.6 ab	12.3 a	4.0 b	16.3 b	
Sunrise +2	1.0 cd	2.7 b	9.7 a	3.7 b	13.4 c	
Sunrise +3	1.7 bc	4.1 ab	12.3 a	5.8 ab	18.1 ab	

^zDuring experiments, irrigations were started at an hour after sunrise, and stopped 2 hours before sunset.

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

^xMeans yield of the cut flower length above 60cm.

(4) 연구결과 요약

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 급액시작시간을 조절하였다. 급액시작시간을 일출후 1시간(Sunrise+1), 일출후 2시간(Sunrise+2), 일출후 3시간(Sunrise+3)으로 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 모든 급액시작시간에서 급액량은 타이머 대비 1/3~1/4로 배액량은 1/60이하로 큰 감소를 나타냈다. 이렇게 줄어든 급배액에도 불구하고, 절화의 생육 특징들은 타이머 제어와 센서 제어가 큰 차이를 나타내지 않았다. 하지만, 수확량에 있어서 타이머 제어가 센서 제어보다 높았다. 센서를 이용한 급액제어시 절화 생육 수준과 고품질 절화 수량을 고려한다면, 급액 시작을 일출후 3시간 뒤 하는 것이 우수할 것으로 판단된다.

나. 무배액 시스템을 위한 급액종료 시간조절

(1) 실험 목표

코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배시 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 센서를 이용한 배지 수분함량 조절에 따른 자동 급액시 급액 종료 시간을 조절하여 장미 생육에 적합한 급액 조건을 구명하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

212 페이지 실험 수행 방법 부분 참조

자동 급액 제어는 코코넛 코이어 슬라브를 배지로 이용하였으며, 2011년 4월 20일부터 제어를 시작하였다. 급액 EC, 급액제어, 급액시간을 표 3-5-29에서와 같이 처리하였다. 타이머 처리는 날씨가 흐려지거나 비오는 날에는 공급을 중단하였다.

표 3-5-29. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액종료시간별’ 실험 처리구

Treatment	Electric Conductivity (dS · m ⁻¹)	Irrigation control (water content range, %)	Irrigation start	Irrigation time (hour)
			Irrigation stop	
Time 0915			under 54%	09:00
				~
Time 0917	1.5	55±1		15:00
				09:00
Time 0919			over 56%	~
				17:00
Control (Timer)	Coir			09:00
				Rockwool
				~
				19:00
		640±20 ml/day/plant		09:00
		(80ml x 8 times/day)		~
				17:00

(3) 실험수행 내용 및 결과

(가) 온실환경 및 근권환경 측정 결과

207 페이지 (가) 2011 온실환경 부분 참조.

214 페이지 (나) 2011 타이머-코이어처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

220페이지 (마) 2011 타이머 암면처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

(나) FDR 센서를 이용한 자동 급액시 근권 환경 측정 결과

그림 3-5-45과 그림 3-5-46는 급액시간 09:00~15:00 처리(Time0915)에서 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~60%, EC는 1.0~2.5 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 7, 8월 장마기를 제외하고는 꾸준히 50~60% 범위를 유지하였다. EC변화는 5월에 1.0~1.5 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 범위에서 6월말 2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$, 7월 중순에 2.5 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 증가하다가 장마기간에 약간의 감소가 일어난 후에 8월에 2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 을 중심으로 변화폭을 나타내었다. 9월부터 증가하여 10월에는 2.5 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 중심으로 변화를 나타내었고, 11월까지 지속되었다.

그림 3-5-47과 그림 3-5-48은 급액시간 09:00~17:00 처리(Time0917)에서 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~60%, EC는 1.5~4.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 7, 8월 장마기를 제외하고는 꾸준히 50~60% 범위를 유지하였다. 장마가 끝나가는 8월 초기부터 급액 조절을 통한 근권 수분함량이 회복되는 모습을 나타냈다. EC변화는 5월부터 1.0~2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 수준에서 증감을 나타내었다가 7월 말부터 약간 증가하여 8월 말에는 2.5 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 수준까지 증가하였다. 9월에 2.0~3.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 수준에서 변화를 보였고, 중순부터 점차 증가하여 11월 말에 4.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 증가되었다.

그림 3-5-49와 그림 3-5-50은 급액시간 09:00~19:00 처리(Time0919)에서 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~60%, EC는 1.0~4.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 7, 8월 장마기를 제외하고는 꾸준히 50~60% 범위를 유지하였다. 장마가 끝나가는 8월 초기부터 급액 조절을 통한 근권 수분함량이 회복되는 모습을 나타냈다. EC변화는 5월에 1.0~2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 범위 안에서 증가를 시작하여 5월말에는 2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 높아졌다. 이후 7월 말 장마에 의한 영향을 제외하고는 8월 중순까지 2.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 수준을 유지하였다. 그 이후 점차 증가하여, 9월 말 3.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 에 다다랐고, 11월 초까지 2.5~3.5 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 범위 안에서 변화하다가 증가하여 11월 말에는 4.0 $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 증가하였다.

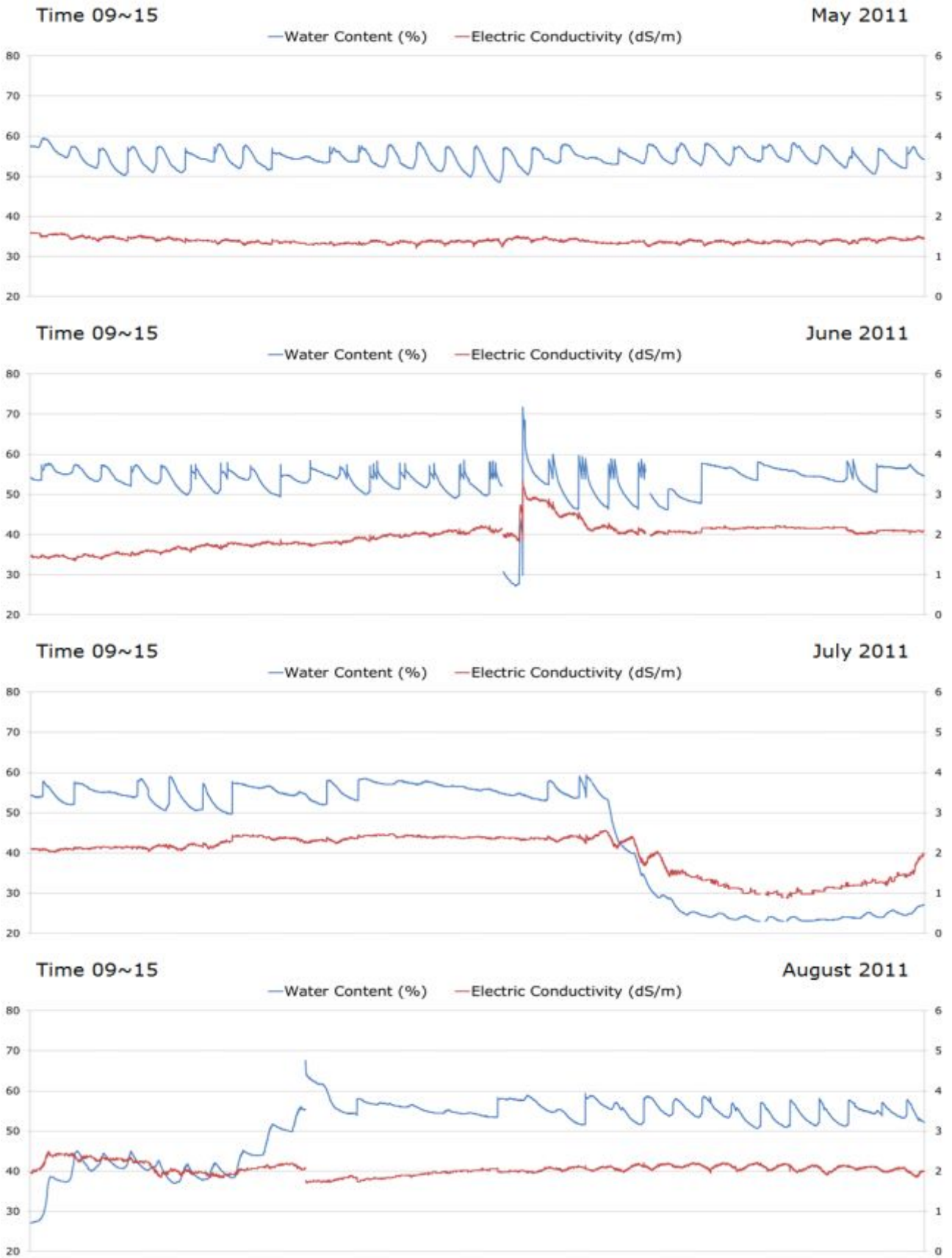


그림 3-5-45. Time 0915 처리에서 2011년 5월에서 8월까지 근권내 수분함량과 EC 변화



그림 3-5-46. Time 0915 처리에서 2011년 9월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화



그림 3-5-47. Time 0917 처리에서 2011년 5월에서 8월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

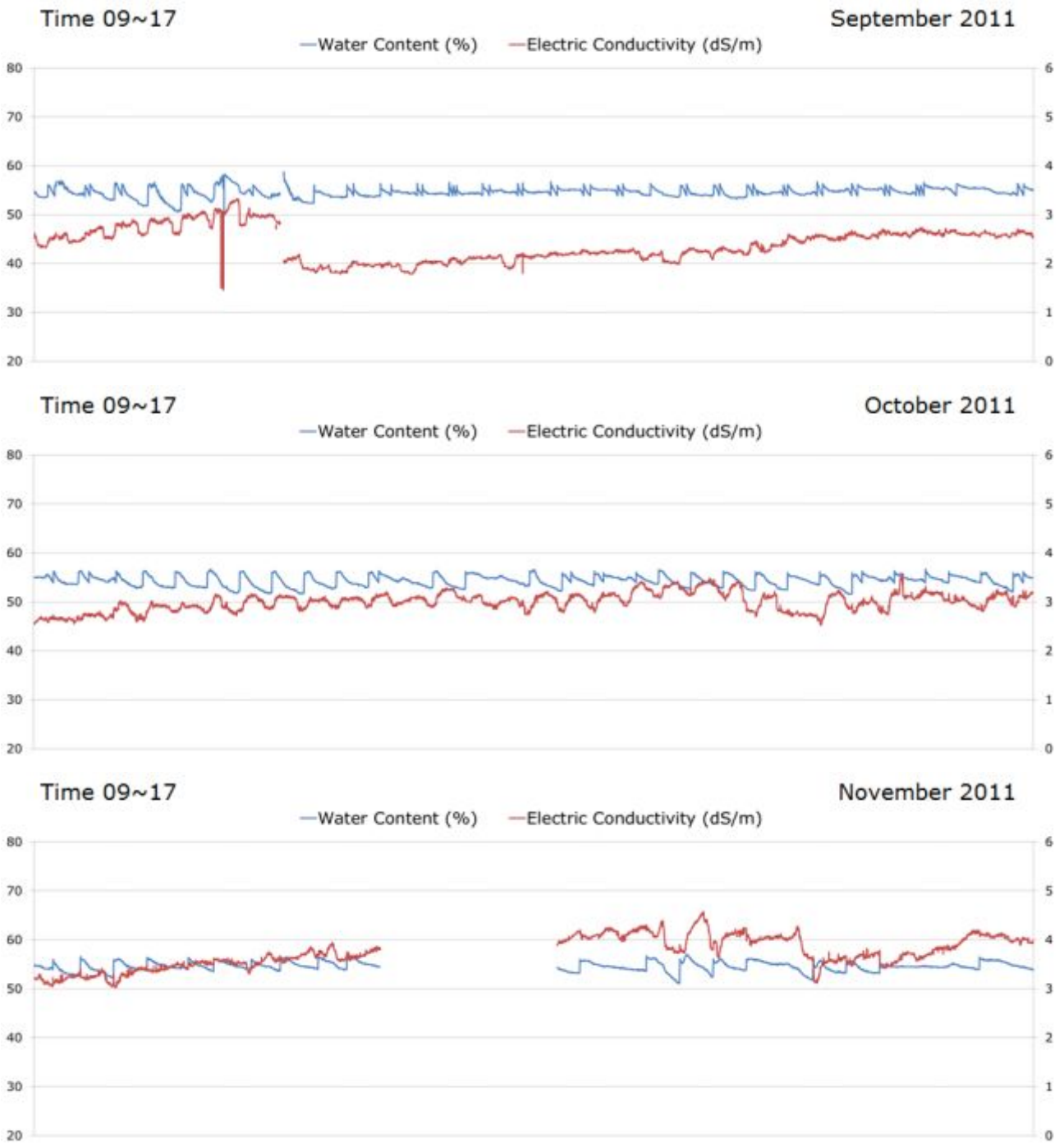


그림 3-5-48. Time 0917 처리에서 2011년 9월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

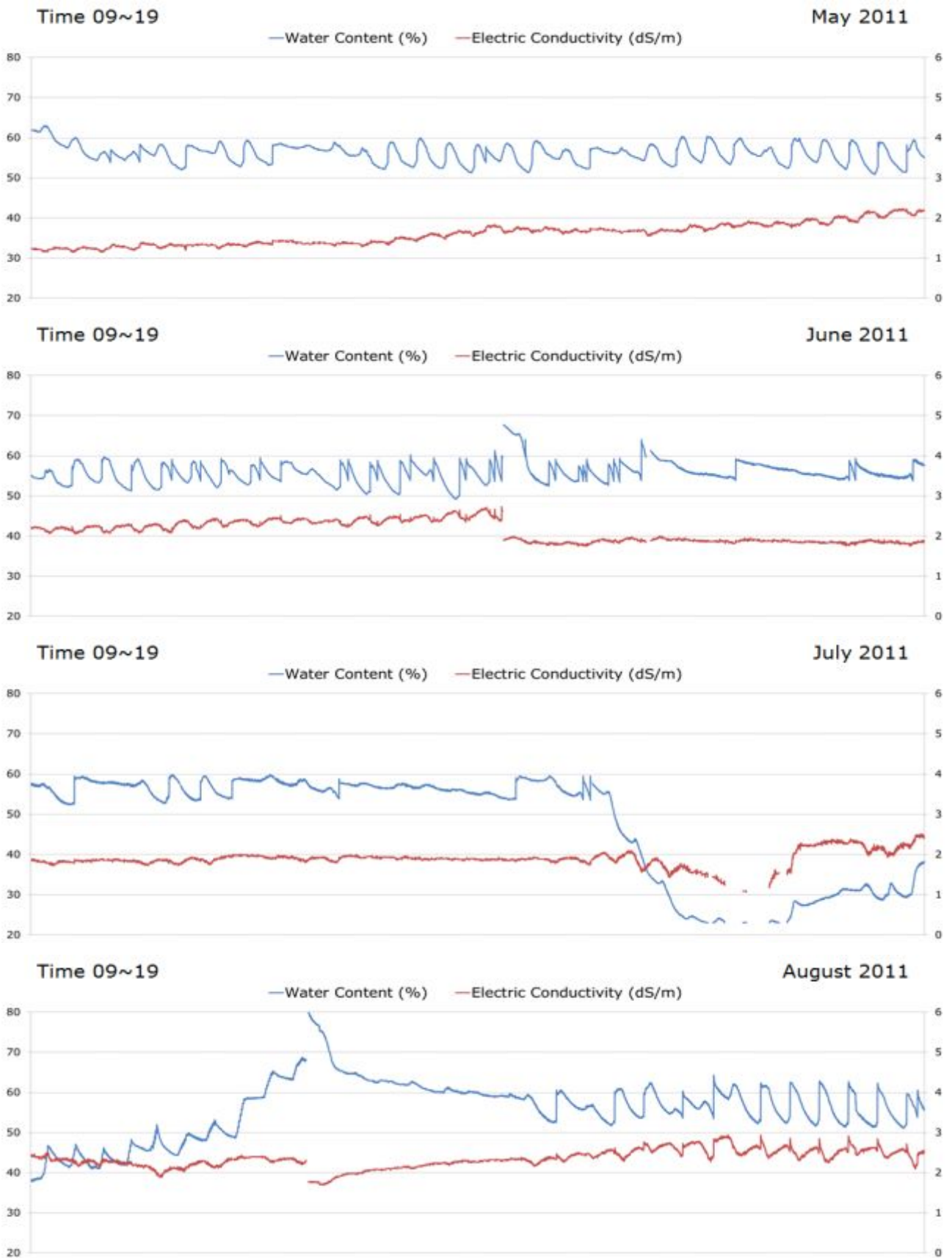


그림 3-5-49. Time 0919 처리에서 2011년 5월에서 8월까지 근권내 수분함량과 EC 변화



그림 3-5-50. Time 0919 처리에서 2011년 9월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(다) 급배액량 측정 결과

표3-5-30와 표3-5-31은 급액종료시간 처리들에서 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 월별 급액량과 배액량을 나타낸 것이다. 전체 급액량의 평균은 대조구인 타이머 처리구들이 높았고, 급액종료시간 조절 처리들은 타이머 처리들의 1/2이하 였으며, 조절처리들 간에는 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 전체 배액량의 평균 또한 대조구인 타이머 처리구들에서 가장 높았고, 종료시간 조절 처리들은 타이머 처리 1/7이하의 배액량을 나타내었으며 그들 간에 통계적으로 유의하지 않았다. 조절 처리들 중에서 Time0917 처리에서 급액량과 배액량이 많이 측정되었다. 전체 급액량과 배액량의 평균에서 배액률을 계산해 보면, 타이머 처리구들이 코이어 압면 각각 45.6%와 49.5%로 가장 높았고, 조절처리들에서는 Time0917이 13.1%로 가장 높았고, 그 다음이 Time0915로 5.7%, 늦게까지 급액한 Time0919는 3.9%의 배액률을 보였다. 조절 처리들은 타이머 처리들 배액률의 1/3이하로 급액 대비 배액 발생이 거의 되지 않는다는 것을 보여준다.

월별 급액량 결과를 보면, 타이머 처리들은 주요 장마기간인 7월에 흐린날이 많아서 급액이 적었고, 점차 증가하여 9월은 가장 많은 급액이 공급되었으며, 11월로 갈수록 급액량이 줄어드는 경향을 나타냈다. 급액종료시간 조절처리들은 6월에 가장 많은 급액이 공급되었다가 장마가 시작되면서 확실히 적은 양이 공급되었다. 장마 이후 원래 수준으로 회복되는 과정에 급액량이 증가되어 공급되었으며, 9월의 약간 증가된 급액공급 이후 11월까지 점차적으로 줄어드는 급액 패턴을 나타냈다. 배액량에서는 타이머 처리들은 장마가 있어서 급액량이 적었지만 그래도 더운 날씨로 수분 흡수량이 높을 수 있는 여름인 6, 7, 8월에 상대적으로 낮은 배액량은 나타내었으며, 장마가 시작되기 전인 6월은 가장 낮은 배액량을 나타내었다. 타이머 처리의 배액량은 처리마다 다른 변화를 보였다. Time0915 처리는 5월부터 9월까지 점차 감소하였고, Time0917 처리는 8월에 가장 많은 배액량을 나타내었다가 점차감소하는 경향을 나타내었다. Time0919는 8월까지 적은 양이지만 배액이 점차 증가하였다가 9월부터 다시 감소하는 패턴을 보였다. Time0919 처리의 경우에 5, 6, 10, 11월에 0에 가까운 배액이 발생하였다.

조절처리별로 보았을 때, Time0919 처리는 매우 낮은 배액량을 나타내었으며, Time0917은 타이머 처리들의 1/2~1/3수준의 급액량과 1/3~1/25의 배액량을 나타내었다. Time0915는 지속적으로 배액량이 감소하다가 10월에 약간 높아졌었고, 이때 Time0917 처리는 보다 적은 급액량으로 많은 배액량을 발생시켰으며, 이 시기(그림 4)에, Time0917는 다른 처리에 비해 적은 수분 변화 폭과 높은 근권 EC로 식물체가 수분을 흡수하기 용이하지 않았아 상대적으로 다른 처리구들에 비해 배액이 좀더 발생할 가능성이 있었다.

표 3-5-30. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액종료 시간별’ 급액량

Treatment	Average irrigated water amount (mL·day ⁻¹ ·plant ⁻¹)							
	May	June	July	August	September	October	November	Total
Timer								
Coir	391.5 a ^z	324.0 a	220.7 a	325.5 a	497.2 a	455.1 a	314.1 a	361.2 a
Rockwool	387.2 a	309.5 a	220.6 a	285.5 a	461.8 a	427.7 a	304.3 a	342.4 a
Irrigation Time 0900~1500	188.1 b	244.7 ab	80.8 b	135.1 c	174.5 b	158.5 b	110.5 b	156.0 b
Irrigation Time 0900~1700	198.7 bc	265.8 ab	86.4 b	164.0 bc	228.9 b	143.1 b	111.6 b	171.2 b
Irrigation Time 0900~1900	125.0 c	202.7 b	81.4 b	126.4 c	203.0 b	112.2 b	93.3 b	134.9 b

^zMeans with different letters are significantly different at P<0.05, as determined by Tukey's test. At a rainy day, irrigation was not preformed.

표 3-5-31. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액종료 시간별’ 배액량

Treatment	Average drained water amount (mL·day ⁻¹ ·plant ⁻¹)							
	May	June	July	August	September	October	November	Total
Timer								
Coir ^z	211.3 a ^z	61.8 ab	93.9 a	147.0 a	198.3 ab	268.5 a	181.5 a	164.7 a
Rockwool	198.9 a	62.4 ab	93.5 a	141.3 a	211.6 a	285.5 a	193.9 a	169.6 a
Irrigation Time 0900~1500	19.6 b	12.2 b	6.2 b	3.3 b	0.9 b	12.8 b	7.0 b	8.9 b
Irrigation Time 0900~1700	24.9 b	27.0 b	18.9 b	48.5 b	11.9 b	18.8 b	7.8 b	22.5 b
Irrigation Time 0900~1900	0.2 b	0.4 b	9.1 b	18.2 b	7.9 b	0.6 b	0.2 b	5.2 b

^zMeans with different letters are significantly different at P<0.05, as determined by Tukey's test. At a rainy day, irrigation was not preformed.

(라) 장미 절화 생육 결과

표 3-5-32는 급액농도 처리들에서 장미 절화의 광합성 특징들을 나타낸 것이다. 대조구를 포함한 모든 처리간에 광합성률, 기공전도도, 세포내 CO₂농도, 증산률은 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 표 3-5-33은 급액농도 처리들에서 장미 절화의 생육 특징들을 나타낸 것이다. 대조구를 포함한 모든 처리간에 절화 생체중, 절화 건물중, 줄기 생체중, 줄기 건물중은 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 절화 길이와 줄기 경경, 두 가지에 있어서 타이머-암면 처리가 높았으며 Time0919 처리에서 낮았다. 표 3-5-34는 급액농도 처리들에서 생육 결과 중 절화 잎의 생육 특징들을 나타낸 것이다. 대조구를 포함한 모든 처리간에 엽장, 엽폭, 5소엽수, 3소엽수, 엽생체중, 엽건물중은 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 표 3-5-35는 급액농도 처리들에서 생육 결과 중 수확량을 나타낸 것이다. 총수확량과 80에서 60cm 길이 수확량와 60cm미만 길이 수확량은 통계적으로 처리구들간에 차이를 나타내지 않았다. 다만, 길이 80cm가 넘는 절화 수확량부분에서 타이머-코이어는 높은 수량을 나타내었고 Time0919 처리는 낮은 수량을 보였다. 또, 상품수량에서 타이머-코이어는 높은 수량을 나타내었고 Time0915 처리는 낮은 수량을 보였다.

장미 절화의 생육과 수확량 측면에서 판단할 때, Time0917 처리가 우수한 재배 조건이라 할 수 있다. 다만, 급배액량에서 Time0915과 Time0919에 비하여 약간 높지만 생육과 수확량에서 같이 통계적으로 유의함을 나타내지는 않았다. 코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 자동 급액시 절화 생육과 수확량 그리고 급액량과 배액량을 고려하였을 때, 급액 종료 17:00 이 가장 우수한 급액종료 시간이라 판단할 수 있다.

표 3-5-32. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액종료 시간별’ 광합성 특성

Treatment	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ^z	Stomatal Conductance ($\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Intercellular CO ₂ concentration ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Timer Coir ^z	17.9 a ^y	0.97 a	327.0 a	3.83 a
Rockwool	19.1 a	1.19 a	334.0 a	3.29 a
Irrigation Time 0900~1500	18.4 a	1.10 a	331.9 a	4.00 a
Irrigation Time 0900~1700	18.2 a	0.81 a	321.8 a	4.00 a
Irrigation Time 0900~1900	17.1 a	0.89 a	329.2 a	3.43 a

^zMeasuring conditions : CO₂ 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, PAR 900 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, Air temp. 25±0.5°C, RH 60±2(%) and Flow rate 500±2 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

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

표 3-5-33. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액종료 시간별’ 절화 생육 특성

Treatment	Length (cm)	Diameter (mm)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	Stem Fresh weight (g)	Stem Dry weight (g)	
Timer	Coir	80.5 ab ^z	7.14 ab	31.7 a	7.4 a	18.6 a	4.5 a
	Rockwool	82.2 a	7.48 a	34.8 a	8.3 a	20.6 a	5.1 a
Irrigation Time 0900~1500	78.5 ab	7.11 ab	28.5 a	6.6 a	16.8 a	4.0 a	
Irrigation Time 0900~1700	79.3 ab	7.13 ab	33.0 a	7.6 a	19.0 a	4.6 a	
Irrigation Time 0900~1900	76.9 b	6.88 b	30.1 a	7.4 a	17.8 a	4.6 a	

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

표 3-5-34. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액종료 시간별’ 절화 잎의 생육 특성

Treatment	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	5 leaflet (No.)	3 leaflet (No.)	Leaf Fresh weight (g)	Leaf Dry weight (g)	
Timer	Coir	13.7 a ^z	11.9 a	12.6 a	2.8 a	13.1 a	2.9 a
	Rockwool	14.3 a	11.5 a	12.7 a	2.7 a	14.2 a	3.2 a
Irrigation Time 0900~1500	14.1 a	11.5 a	12.1 a	2.9 a	11.6 a	2.5 a	
Irrigation Time 0900~1700	14.0 a	11.4 a	13.1 a	3.2 a	14.1 a	3.0 a	
Irrigation Time 0900~1900	13.6 a	11.2 a	12.0 a	3.2 a	12.3 a	2.8 a	

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

표 3-5-35. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액종료 시간별’ 수확량 특성

Treatment	Cut flower Yield (number · plant ⁻¹)				
	>80cm	80~60cm	<60cm	Marketable yield ^y	Total yield
Coir	5.8 a ^z	5.9 a	3.3 a	11.7 a	14.9 a
Rockwool	5.1 ab	5.7 a	2.9 a	10.8 ab	13.7 a
Irrigation Time 0900~1500	4.0 bc	5.0 a	4.2 a	9.0 b	13.2 a
Irrigation Time 0900~1700	4.7 abc	5.5 a	4.3 a	10.2 ab	14.5 a
Irrigation Time 0900~1900	3.6 c	5.8 a	4.3 a	9.4 ab	13.7 a

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

^yMeans yield of the cut flower length above 60cm.

(4) 연구결과 요약

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 급액종료시간을 조절하였다. 급액종료시간은 09:00~15:00(시:분, Time0915), 09:00~17:00(시:분, Time0917), 09:00~19:00(시:분, Time0919)로 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 모든 급액종료시간에서 급액량은 1/2~1/3로 배액량은 1/6~1/30정도로 크게 감소하였다. 이렇게 줄어든 급배액에도 불구하고, 절화의 생육 특징들은 타이머 제어와 센서 제어가 큰 차이를 나타내지 않았다. 상품 절화수확에 있어서 Time0917과 Time0919는 타이머 처리와 차이를 나타내지 않았다. 급액량과 배액량을 중요 포인트로 한다면, Time0919 처리가 우수하였다. 하지만, 절화 생육 수준과 고품질 절화 수량을 고려한다면, 급액 종료를 17:00 에 하는 것이 우수할 것으로 판단된다.

5. 무배액 시스템에 적합한 급액의 전기전도도 구명

(1) 실험 목표

코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배시 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 센서를 이용한 배지 수분함량 조절에 따른 자동 급액시 공급 배양액 농도를 조절하여 장미 생육에 적합한 급액 조건을 구명하고자 한다.

(2) 실험 수행 방법

212 페이지 실험 수행 방법 부분 참조

자동 급액 제어는 코코넛 코이어 슬라브를 배지로 이용하였으며, 2011년 4월 20일부터 제어를 시작하였다. 급액 EC, 급액제어, 급액시간을 표 3-5-36 에서와 같이 처리하였다. 타이머 처리는 날씨가 흐려지거나 비오는 날에는 공급을 중단하였다.

표 3-5-36. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액농도별’ 실험 처리구

Treatment	Electric Conductivity (dS · m ⁻¹)	Irrigation control (water content range, %)	Irrigation start	Irrigation time (hour)
			Irrigation stop	
EC 1.0	1.0		under 54%	
EC 1.5	1.5	55±1		09:00 ~
EC 2.0	2.0		over 56%	17:00
Control (Timer)	Coir Rockwool	1.5		640±20 ml/day/plant (80ml x 8 times/day)

(3) 실험수행 내용 및 결과

(가) 온실환경 및 근권환경 측정 결과

207 페이지 (가) 2011 온실환경 부분 참조.

214 페이지 (나) 2011 타이머-코이어처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

220 페이지 (마) 2011 타이머 암면처리의 근권환경 측정결과 부분 참조.

(나) FDR 센서를 이용한 자동 급액시 근권 환경 측정 결과

그림 3-5-51과 그림 3-5-52는 급액농도 $1.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 처리(EC1.0)에서 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~60%, EC는 $0.5 \sim 2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 7, 8월 장마기를 제외하고는 꾸준히 50~60% 범위를 유지하였다. EC변화는 5월에 $0.5 \sim 1.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 범위에서 $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 조금씩 증가하다가 장마기간에 약간의 감소가 일어난 후에 8월말부터 증가하여 9월에 $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 에 다다른 다음, 9월 말 부터는 $1.5 \sim 2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 범위를 나타냈다.

그림 3-5-53과 그림 3-5-54는 급액농도 $1.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 처리(EC1.5)에서 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~60%, EC는 $1.5 \sim 4.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 7, 8월 장마기를 제외하고는 꾸준히 50~60% 범위를 유지하였다. 장마가 끝나가는 8월 초기부터 급액 조절을 통한 근권 수분함량이 회복되는 모습을 나타냈다. EC변화는 5월부터 $1.0 \sim 2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 수준에서 증감을 나타내었다가 7월 말부터 약간 증가하여 8월 말에는 $2.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 수준까지 증가하였다. 9월 중순에 감소가 일어난 후 다시 점차 증가하여 11월 말에 $4.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 증가되는 패턴을 나타내었다.

그림 3-5-55와 그림 3-5-56은 급액농도 $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 처리(EC2.0)에서 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 근권 환경(수분함량, EC) 변화를 나타낸 것이다. 재배기간 동안 수분함량은 50~60%, EC는 $1.5 \sim 4.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 를 중심으로 변화하였다. 수분함량의 변화는 7, 8월 장마기를 제외하고는 꾸준히 50~60% 범위를 유지하였다. 장마가 끝나가는 8월 초기부터 급액 조절을 통한 근권 수분함량이 회복되는 모습을 나타냈다. EC변화는 5월 초기에 $1.0 \sim 1.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 수준에서 증가를 시작하여 5월말에는 $2.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 높아졌다. 이후 7월 말 장마에 의한 영향을 제외하고는 8월까지 $2.0 \sim 2.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 범위 안에서 변화가 나타났다. 9월이 되면서 다시 증가가 시작하여, 9월 말에 $3.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$, 10월 중순에는 $4.0 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 까지 높아졌으며, 11월 말에는 $3.5 \sim 4.5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ 범위까지 증가하였다.

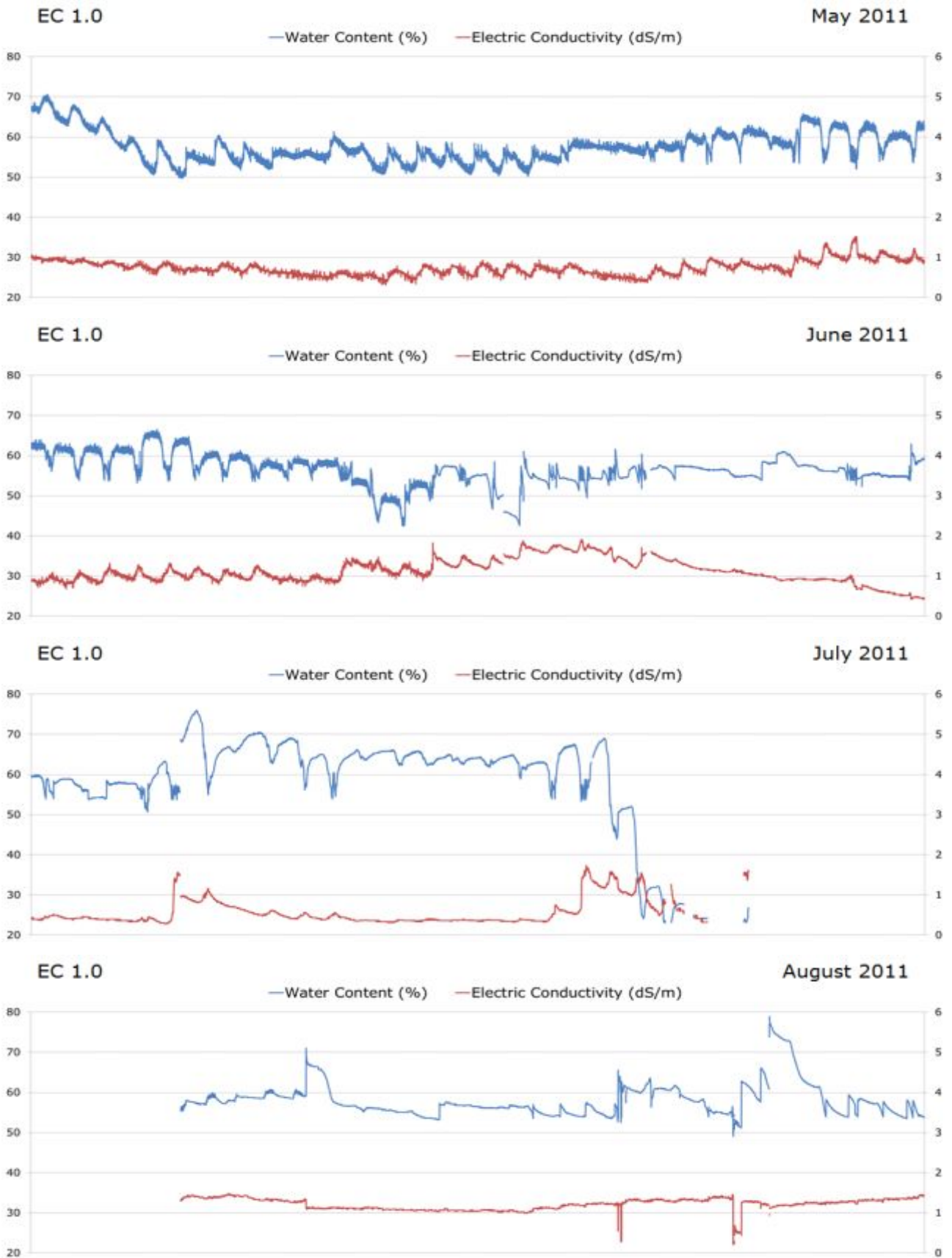


그림 3-5-51. EC1.0 처리에서 2011년 5월에서 8월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

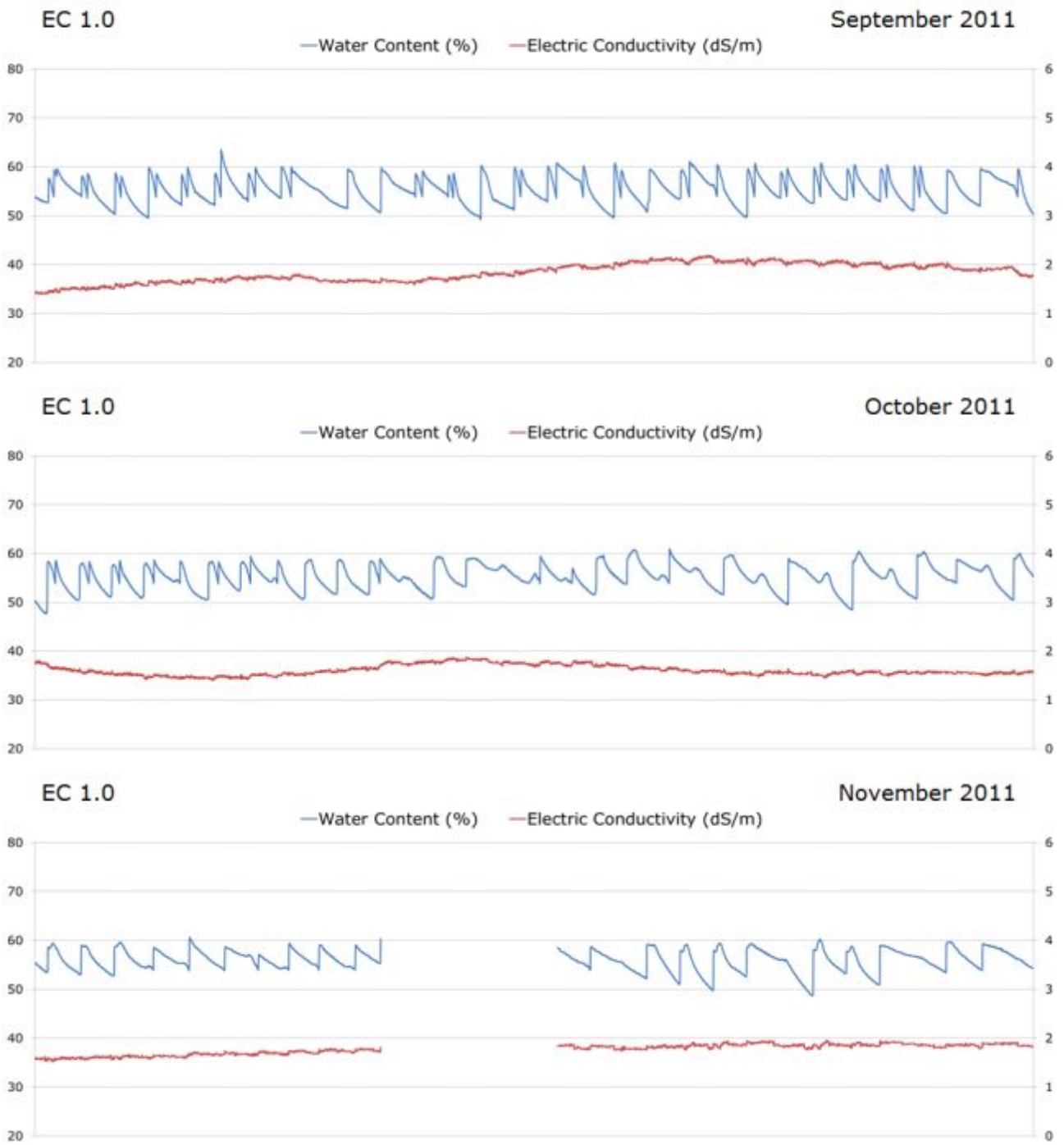


그림 3-5-52. EC1.0 처리에서 2011년 9월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화



그림 3-5-53. EC1.5 처리에서 2011년 5월에서 8월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

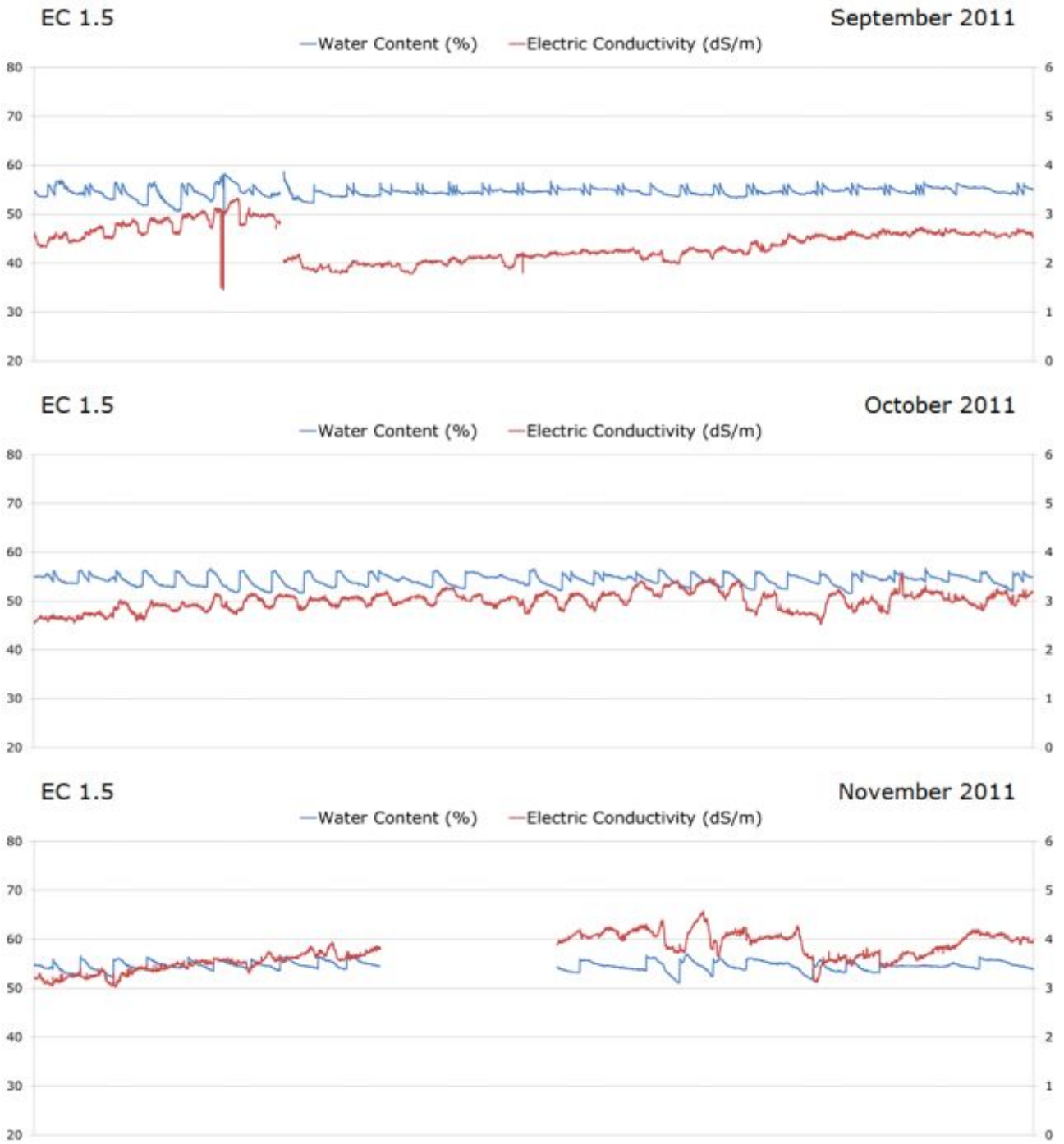


그림 3-5-54. EC1.5 처리에서 2011년 9월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

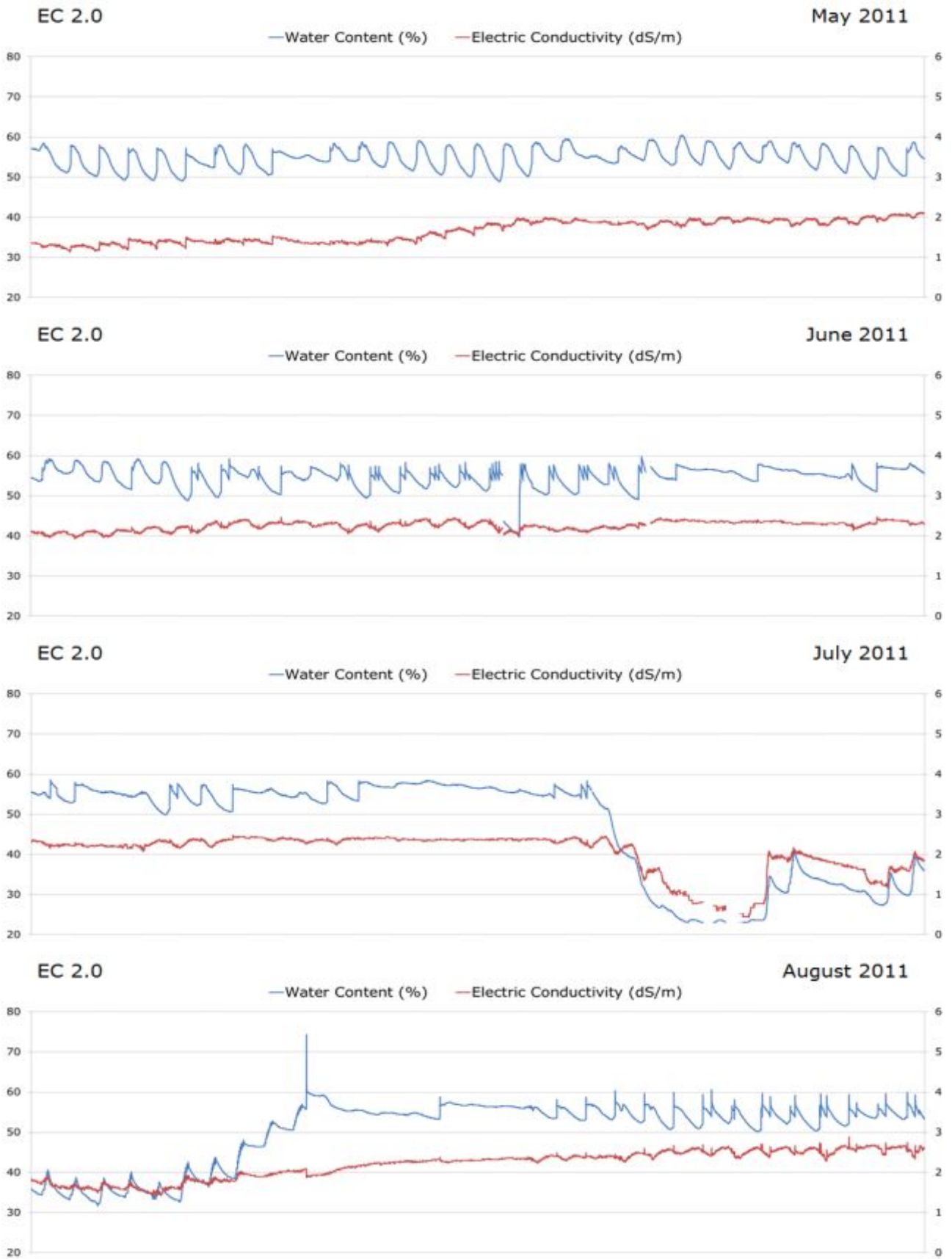


그림 3-5-35. EC2.0 처리에서 2011년 5월에서 8월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

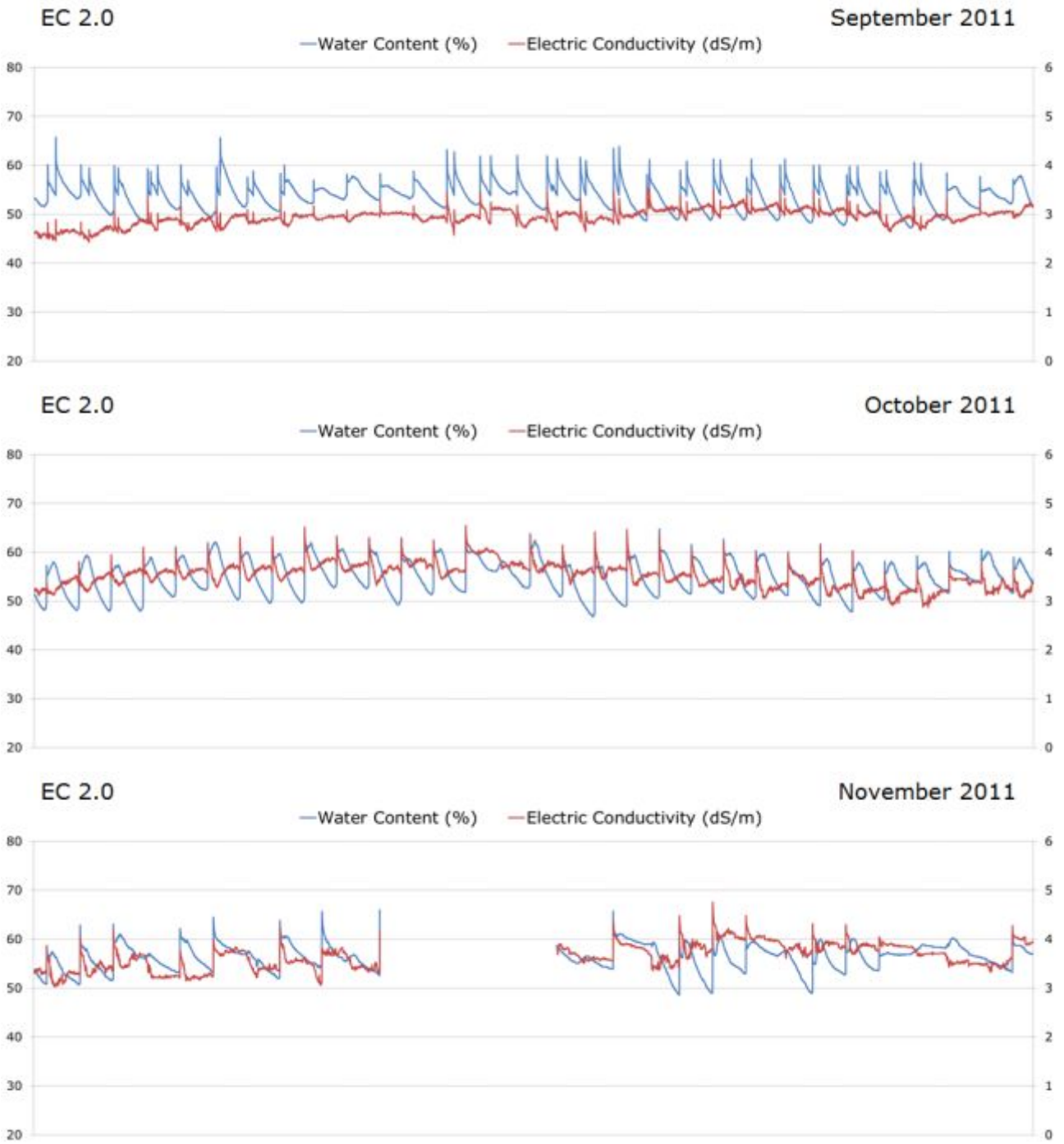


그림 3-5-56. EC2.0 처리에서 2011년 9월에서 11월까지 근권내 수분함량과 EC 변화

(다) 급배액량 측정 결과

표 3-5-37과 표 3-5-38은 급액농도 처리들에서 실험기간 중 2011년 5월에서 11월까지의 월별 급액량과 배액량을 나타낸 것이다. 전체 급액량의 평균은 대조구인 타이머 처리구들이 높았고, 급액농도 조절 처리들은 처리간에 차이를 나타내지 않았다. 전체 배액량의 평균 또한 대조구인 타이머 처리구들에서 가장 높았고, 급액농도 조절 처리들에서는 통계적 유의차를 보이지 않았지만, EC2.0의 배액량은 EC1.0과 EC1.5에 비해 적은 양이었다. 전체 급액량과 배액량의 평균에서 배액률을 계산해 보면, 타이머 처리구들이 코이어 압면 각각 45.6%와 49.5%로 가장 높았고, 조절처리들에서는 EC1.0이 16.1%로 가장 높았고, 그 다음이 EC1.5로 13.1%, 가장 급액농도가 높은 EC2.0은 7.5%로 급액 농도의 역순으로 낮은 배액률을 나타냈으며 이는 타이머 처리들 배액률의 1/3이하로 급액 대비 배액 발생이 거의 되지 않는다는 것을 보여준다.

월별 급액량 결과를 보면, 타이머 처리들은 주요 장마기간인 7월에 흐린날이 많아서 급액이 적었고, 점차 증가하여 9월은 가장 많은 급액이 공급되었으며, 11월로 갈수록 급액량이 줄어드는 경향을 나타냈다. 급액농도 조절처리들은 6월에 가장 많은 급액이 공급되었다가 장마가 시작되면서 확실히 적은 양이 공급되었다. 장마 이후 원래 수준으로 회복되는 과정에 급액량이 증가되어 공급되었으며, 9월의 약간 증가된 급액공급 이후 11월까지 점차적으로 줄어드는 급액 패턴을 나타냈다. 배액량에서는 타이머 처리들은 장마가 있어서 급액량이 적었지만 그래도 더운 날씨로 수분 흡수량이 높을 수 있는 여름인 6, 7, 8월에 상대적으로 낮은 배액량은 나타내었으며, 이중 장마가 시작되기 전인 6월은 가장 낮은 배액량을 나타내었다. 타이머 처리의 배액량은 6월부터 10월까지 점차 증가 하였으며, 급액량이 크게 줄어드는 11월이 되어서야 배액량도 줄어들었다. 급액농도 조절처리들은 8월에 가장 많은 배액을 발생시켰고, 11월로 갈수록 낮아졌다. EC1.0 처리의 경우에 6월에 타이머 처리보다 많은 배액량을 발생하였다. 이를 제외한 모든 기간에서 조절 처리들은 타이머 처리에 대비하여 배액이 1/3이하 수준으로 배출되었다.

조절처리별로 보았을 때, EC2.0 처리의 경우 적은 급액량의 영향도 있지만 10, 11월에는 배액이 없을 정도로 매우 낮은 배액량을 나타내었으며, EC1.5는 타이머 처리들의 1/2~1/3수준의 급액량과 1/3~1/25의 배액량을 나타내었다. EC1.0은 6월에 가장 적은 급액량에도 불구하고 가장 높은 배액량을 나타냈다. 이 때의 근권 EC변화를 보면(그림 3-5-51), 6월 중순 이후부터 감소하고 있는 것을 확인할 수 있었다. 적은 공급량에도 불구하고 근권 EC가 낮아지는 것은 식물의 근권내에서 수분에 대한 흡수가 감소하고 양분 흡수가 증가한 것으로 판단할 수 있겠다. 7월 이후부터는 타이머 처리 배액의 1/5이하인 낮은 배액량을 보였다.

표 3-5-37. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액농도별’ 급액량

Treatment		Average irrigated water amount (mL·day ⁻¹ ·plant ⁻¹)							
		May	June	July	August	September	October	November	Total
Timer	Coir ^z	391.5 a ^z	324.0 a	220.7 a	325.5 a	497.2 a	455.1 a	314.1 a	361.2 a
	Rockwool	387.2 a	309.5 a	220.6 a	285.5 a	461.8 a	427.7 a	304.3 a	342.4 a
	EC 1.0	162.7 b	241.4 b	96.8 b	137.1 b	254.7 b	146.5 b	130.5 b	167.1 b
	EC 1.5	198.7 b	265.8 ab	86.4 b	164.0 b	228.9 b	143.1 b	111.6 bc	171.2 b
	EC 2.0	192.4 b	258.9 ab	85.8 b	152.2 b	192.0 b	100.3 b	68.2 c	150.0 b

^zMeans with different letters are significantly different at P<0.05, as determined by Tukey's test. At a rainy day, irrigation was not performed.

표 3-5-38. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액농도별’ 배액량

Treatment		Average drained water amount (mL·day ⁻¹ ·plant ⁻¹)							
		May	June	July	August	September	October	November	Total
Timer	Coir ^z	211.3 a ^z	61.8 ab	93.9 a	147.0 a	198.3 ab	268.5 a	181.5 a	164.7 a
	Rockwool	198.9 a	62.4 ab	93.5 a	141.3 a	211.6 a	285.5 a	193.9 a	169.6 a
	EC 1.0	36.5 b	71.0 a	15.7 b	27.1 b	12.2 b	10.5 b	15.3 b	26.9 b
	EC 1.5	24.9 b	27.0 ab	18.9 b	48.5 b	11.9 b	18.8 b	7.8 b	22.5 b
	EC 2.0	18.8 b	10.9 b	15.1 b	22.2 b	11.8 b	0.0 b	0.0 b	11.3 b

^zMeans with different letters are significantly different at P<0.05, as determined by Tukey's test. At a rainy day, irrigation was not performed.

(라) 장미 절화 생육 결과

표 3-5-39는 급액농도 처리들에서 장미 절화의 광합성 특징들을 나타낸 것이다. 대조구를 포함한 모든 처리간에 광합성률, 기공진도도, 세포내 CO₂농도, 증산률은 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 표 3-5-40는 급액농도 처리들에서 장미 절화의 생육 특징들을 나타낸 것이다. 대조구를 포함한 모든 처리간에 줄기 경경, 절화 생체중, 절화 건물중, 줄기 생체중, 줄기 건물중은 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 절화 길이에 있어서 타이머-암면 처리가 높았으며 EC2.0처리에서 낮았다. 표 3-5-41은 급액농도 처리들에서 생육 결과 중 절화 잎의 생육 특징들을 나타낸 것이다. 대조구를 포함한 모든 처리간에 엽장, 5소엽수, 엽생체중, 엽건물중은 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았다. 잎의 크기인 최대엽장에서 EC2.0처리에서 가장 낮았다. 3소엽수에서는 EC2.0처리가 많았고 타이머 처리구들이 적었다. 표 7은 급액

농도 처리들에서 생육 결과 중 수확량을 나타낸 것이다. 총수량과 80에서 60cm 길이 수확량과 60cm미만 길이 수확량은 통계적으로 처리구들간에 차이를 나타내지 않았다. 다만, 길이 80cm가 넘는 절화 수확량과 상품수량 두가지 부분에서 타이머-코이어는 높은 수량을 나타내었고 EC2.0처리는 낮은 수량을 보였다.

장미 절화의 생육과 수확량 측면에서 판단할 때, EC1.0과 EC1.5 두처리가 우수한 재배 조건이라 할 수 있다. 다만, 급배액량에서 EC1.0은 EC1.5에 비하여 평균 1.2배의 배액이 발생하는 단점을 가지고 있다. 코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 자동 급액시 절화 생육과 수확량 그리고 적은 급액량과 배액량을 고려하였을 때, EC1.5 처리가 가장 우수한 급액농도라 판단할 수 있다. EC2.0처리는 배액 대비 생산성 효율은 높으나 급액에 따른 이득은 없으며, 게다가, 다른 처리에 비해 배지내 EC가 빠르게 높아져 문제가 될 수 있어 보다 안정적인 EC1.5처리가 우위에 있다고 할 수 있다.

표 3-5-39. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액농도별’ 광합성 특성

Treatment	Photosynthetic rate ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) ^z	Stomatal Conductance ($\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	Intercellular CO ₂ concentration ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$)	Transpiration rate ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
Timer	Coir ^z	17.9 a ^y	0.97 a	327.0 a
	Rockwool	19.1 a	1.19 a	334.0 a
EC 1.0	17.4 a	0.88 a	326.1 a	3.64 a
EC 1.5	18.2 a	0.81 a	321.8 a	4.00 a
EC 2.0	18.1 a	0.96 a	321.9 a	3.03 a

^zMeasuring conditions : CO₂ 400 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, PAR 900 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, Air temp. 25±0.5°C, RH 60±2(%) and Flow rate 500±2 $\mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$

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

표 3-5-40. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액농도별’ 절화 생육 특성

Treatment	Length (cm)	Diameter (mm)	Fresh weight (g)	Dry weight (g)	Stem Fresh weight (g)	Stem Dry weight (g)
Timer	Coir	80.5 ab ^z	7.14 a	31.7 a	7.4 a	18.6 a
	Rockwool	82.2 a	7.48 a	34.8 a	8.3 a	20.6 a
EC 1.0	77.9 ab	7.35 a	31.7 a	7.8 a	18.4 a	4.7 a
EC 1.5	79.3 ab	7.13 a	33.0 a	7.6 a	19.0 a	4.6 a
EC 2.0	76.7 b	6.94 a	30.2 a	6.9 a	17.7 a	4.3 a

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

표 3-5-41. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액농도별’ 절화 앞의 생육 특성

Treatment	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	5 leaflet (No.)	3 leaflet (No.)	Leaf Fresh weight (g)	Leaf Dry weight (g)	
Timer	Coir	13.7 a	11.9 a	12.6 a	2.8 b	13.1 a	2.9 a
	Rockwool	14.3 a	11.5 a	12.7 a	2.7 b	14.2 a	3.2 a
EC 1.0	13.7 a	11.3 a	12.8 a	3.0 ab	13.3 a	3.0 a	
EC 1.5	14.0 a	11.4 a	13.1 a	3.2 ab	14.1 a	3.0 a	
EC 2.0	12.7 b	10.2 a	12.5 a	3.6 a	12.5 a	2.7 a	

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

표 3-5-42. FDR을 이용한 장미 수경재배에서 배지내 수분함량 조절을 통한 자동 급액시 ‘급액농도별’ 수확량 특성

Treatment	Cut flower Yield (number · plant ⁻¹)					
	>80cm	80~60cm	<60cm	Marketable yield ^y	Total yield	
Timer	Coir ^z	5.8 a ^z	5.9 a	3.3 a	11.7 a	14.9 a
	Rockwool	5.1 ab	5.7 a	2.9 a	10.8 ab	13.7 a
EC 1.0	4.6 ab	5.8 a	2.1 a	10.5 ab	12.6 a	
EC 1.5	4.7 ab	5.5 a	4.3 a	10.2 ab	14.5 a	
EC 2.0	3.7 b	5.8 a	4.4 a	9.5 b	13.9 a	

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

^yMeans yield of the cut flower length above 60cm.

(4) 연구결과 요약

코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR센서를 이용한 자동 급액시 급액농도를 조절하여 급액제어를 하였다. 급액농도 조절은 EC 1.0(dS · m⁻¹, EC1.0), EC 1.5(dS · m⁻¹, EC1.5), EC 2.0(dS · m⁻¹, EC2.0)로 하였으며, 비교를 위해 대조구로 타이머를 이용한 자동 급액 시스템을 이용하였다.

센서를 이용하여 급액을 제어했을 때, 급액 농도에 상관없이 급액량은 1/2~1/3로 배액량은 1/6~1/15정도로 크게 감소하였다. 이렇게 줄어든 급배액에도 불구하고, 절화의 생육 특징들은 타이머 제어와 센서 제어가 큰 차이를 나타내지 않았다. 상품 절화수확량에 있어서 EC1.0와 EC1.5는 타이머 처리와 차이를 나타내지 않았다. 배액량만을 중요 포인트로 한다면, EC2.0처리가 품질에 있어 큰 차이가 나지 않아 우수한 생산성을 나타낸다. 하지만, 좀 더 나은 생육 환경과 수확량 그리고 배액량을 고려하면, 센서를 이용한 급액제어시 절화 생육 수준과 고품질 절화 수량을 고려한다면, 급액 농도를 1.5 dS · m⁻¹로 하는 것이 우수할 것으로 판단된다.

제 6 절. 배지 수분함량을 고려한 통합형 급액제어 시스템 개발

(1) 실험 목표

수경재배에서 사용하는 배양액 자동 급액 양액기에 수분측정 센서인 FDR 센서를 이용하여 측정된 근권 수분함량 기준으로 급액이 제어될 수 있도록 센서 통합형 급액 시스템을 개발하고, 이 급액 시스템을 복합 환경제어 시스템과 함께 연계할 수 있도록 하여, 일사량 변화에 따른 급액 제어도 가능할 수 있는 기능을 추가한다.

(2) 연구결과

(가) 마그마 양액 제어 시스템

그림 3-6-1은 양액 공급기 ‘마그마’의 메인화면으로 각종 환경 데이터와 급액 설정, 급액 상태 등을 확인할 수 있다.

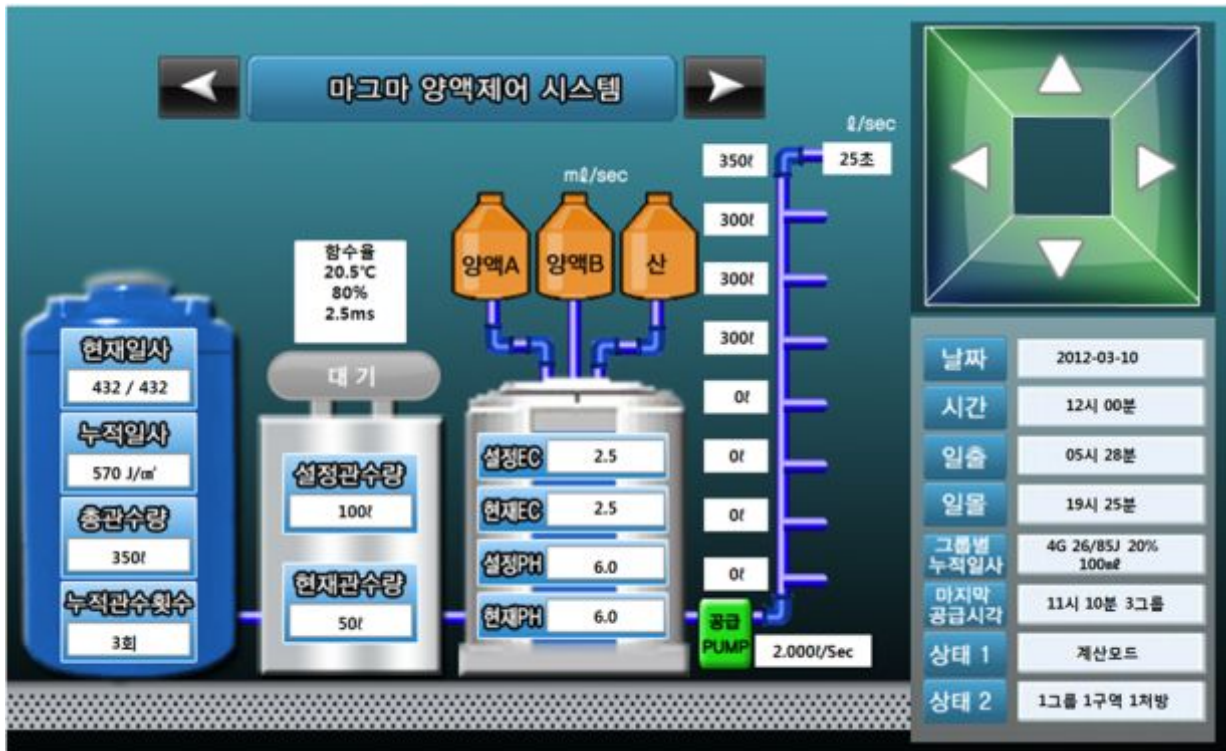


그림 3-6-1. 양액공급기 메인화면

메인화면의 내용들을 살펴보면, 좌측에서부터

- 현재 일사, 누적 일사, 일일 총관수량, 누적 관수 횟수를 볼 수 있고, 누적 관수 횟수는 그룹별 관수 종료시마다 횟수가 증가한다.
- 함수율 : 함수율에 의한 관수중임을 표시
20.5℃ : 실내온도를 나타냄, 80% : 배지내 함수율을 나타냄, 2.5ms : 배지내 EC값을 나타냄
- 관수가 시작될 때 현재 관수구역의 설정관수량, 현재관수량, 구역별 누적 관수량, 현재구역

- 의 설정 EC값, PH값 및 현재 EC값, PH값을 볼 수 있음
- 날짜, 시간, 오늘의 일출시간, 일몰시간, 그룹별 누적 일사값, 관수의 마지막 공급시간을 볼 수 있음
- 그룹별 누적일사 : 현재 그룹별 누적일사와 계산되는 관수량을 볼 수 있음
- 상태 1에서 유량상태가 고정, 계산, 계측값에 의한 것인지를 알 수 있으며, 상태 2에서는 현재 관수그룹, 관수구역, 양액 처방번호가 표시됨
- 매일 24시 00분에 누적되는 데이터 값이 리셋되어 다시 디스플레이됨.

(나) FDR 수분 센서에 의한 급액 제어 프로그램

그림 3-6-2~4는 양액기에 수분센서에 의한 급액 제어가 이루어지도록 프로그램하기 위한 알고리즘 구성과 프로그램 언어 내용 일부이다.

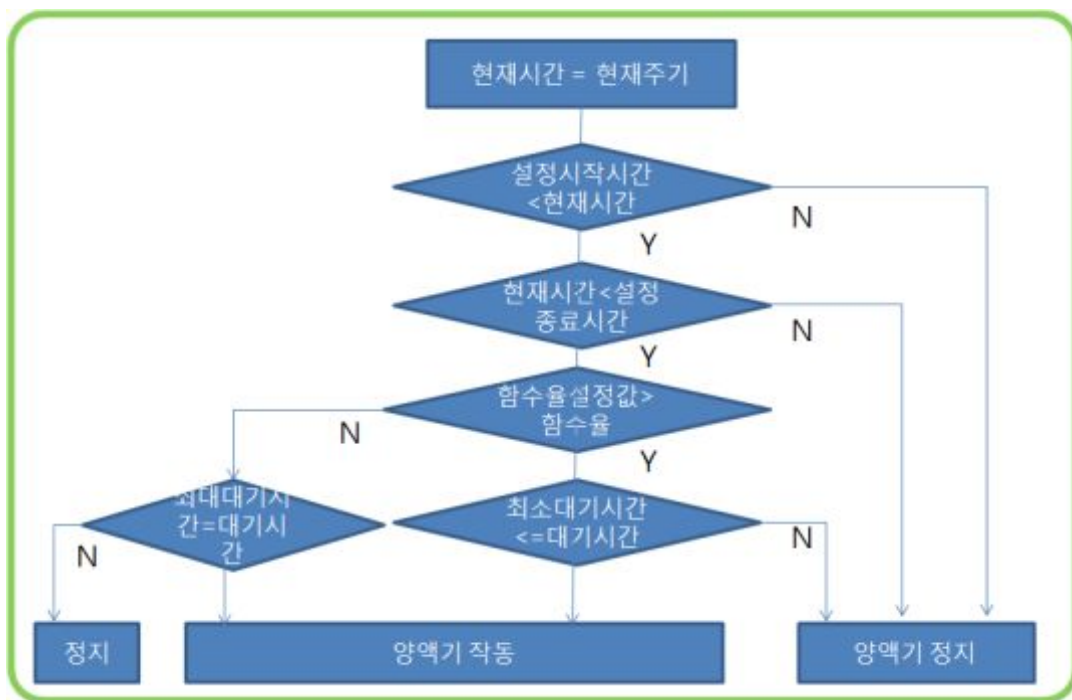


그림 3-6-2. 함수율센서에 의한 양액공급기 제어 알고리즘

양액공급기 제어를 위한 알고리즘 중 가장 먼저 고려한 요인은 현재시간이 양액공급 시작시간과 양액공급 종료 시간 사이에 위치 여부이고, 그 이후로 설정 함수율보다 배지 내 함수율이 낮은지 높은지 측정하는 순서로 구성 하였다.

배지 내 함수율이 함수율 설정값보다 높고 대기시간이 이미 설정된 관수간격 최대대기시간과 같을 때, 의무적으로 관수가 시작되도록 하였으며 그때의 관수 시점은 관수시작 시간과 종료시간 사이에서만 작동이 되도록 하였다.

배지 내 함수율이 함수율 설정값보다 낮을 때에는 급액 후 함수율 센서까지 양수분의 이동시간을 감안하여 대기하며, 이 대기시간이 이미 설정된 관수간격 최소대기시간을 충족시키고 관수가 이루어지도록 구성하였다.

```

@ "Stc 226, 42,235,17,20,,$center;" '현재일사//M
    @ "Staic 227,35,282,425296,, $center;" '설정EC/M
    @ "Staic 228,35,350,425363, $center;" '설정PH/M
    @ "Staic 229,70,324,300,707,, $center;" '설정DT
    @ "Static 230,40,43,118,359,, $center;" '총관수량/M
    @ "Static 231,66,371780,394,, $center;" '마지막공급시각//M
    @ "button 232,51,35,581,74,'수동관수';" '수동관수
        '@ "CTRLCOLOR&H0000(0,&hFFFFFF;"
    @ "Static 233,18,314,262,330,, $center;" '설정관수1회)//M
    @ "Static 234,40,91,118,304,, $center;" '누적일사량//M
    @ "Staic 235,35,38,425,395,, $center;" '현재일사//M
    @ "Static 236,35,38,425,395,, $center;" '현재PH/M
    @ "toggle 237,45,389,556,425;" '작시간
    @ "Static 238,40,97,119,414,, $center;" '누적관수원수//M
    @ "toggle 239,45,429,556,465;" '동료시간
    @ "Staic 240,66,358,782563,, $center;" '구분별누적일사남은//M
    @ "Static 241,18,38,262,402,, $center;" '현재관수량(1회)//M
    @ "button 242,1,33,74,74,'시정';" '시정
    @ "Staic 243,66,215,780230,, $center;" '//시
    @ "Staic 244,66,247,780262,, $center;" '//분
    @ "Staic 245,66,280,780295,, $center;" '//M
    @ "Staic 246,66,310,780325,, $center;" '//M
    @ "Staic 247,66,405,780420,, $center;" '//M
    @ "Staic 248,66,430,780451,, $center;" '영도표시//M
    @ "Static 253,53,86,184,104,, $center;" '구역상태표시_관수량//M
    @ "Static 254,49,40,583,422,, $center;" A_TANK/

str_bf = "$caption"

for IX= 58 To 14
next
    ShowCtrl IX,(
for IX= 148 To 29
next
    ShowCtrl IX,(
next
    ShowCtrl 23(0
for IX= 232 To 29
next
    ShowCtrl IX,(
next
    ShowCtrl 24:0
    ShowCtrl 24:0
for IX= 248 To 21
next
    ShowCtrl IX,(
next
    ShowCtrl 25:0 '물량MOVE
    ShowCtrl 25:0 '영역사
    TX1=I
    TY1=I*2
    T= Eeread(TY,2)'
    Delay 5
    D(TX1)= T
for I=101 To 19:
    TX1= I+200
    Delay 5

```

그림 3-6-3. 함수용센서에 의한 양액공급기 제어 프로그램 중 상태 표시부분 내용

```

If sunch=5 Then BAIACK_SNS =Hadin(1) '배액-P33
If sunch=6 Then BUFFER11=Hadin(2)+100'합수상-P34
If BUFFER11>D(847) Then BUFFER12=BUFFER11-(847)
BUFFER2=BUFFER12/D(848)
BUFFER3=BUFFER22/5(00)
HAMSUSSENS =Floor(BUFFER23)

PH1_SENS11 = Hadin(3)+100
PH1_SENS = PH1_SENS11
Else
If PH1_SNS > PH1_SENS11 then PH1_SENS11=PH1_SENS11 +1
If PH1_SNS < PH1_SENS11 then PH1_SENS11=PH1_SENS11 -1
PH1_SENS = PH1_SENS11
Endif
If BUFFER11>D(849) Then BUFFER12=BUFFER11-D(849)
BUFFER2=BUFFER12/D(850)
BUFFER3=BUFFER22/5(00)
PH1_SENS =Floor(BUFFER23)

If sunch=1 Or sunch=4 Then EC1_SENS11 = Hadin(4)+100
Debug T

If COLNER=1 Then
EC1_SENS = EC1_SENS11
Else
If EC1_SNS > EC1_SENS11 then EC1_SENS11= EC1_SENS11 +1
If EC1_SNS < EC1_SENS11 then EC1_SENS11= EC1_SENS11 -1
EC1_SENS = EC1_SENS11
Endif
BUFFER1=EC1_SENS
If BUFFER11>D(851) Then BUFFER12=BUFFER11-D(851)
BUFFER2=BUFFER12/D(852)
BUFFER3=BUFFER22/5(00)
EC1_SENS =Floor(BUFFER23)
PH2_SENS =hAdin(5) 'P2_P37
EC2_SENS =hAdin(6) 'EC_P38
Else
'/////////TEST
BUFFER1 = Tadin(3)+100
If BUFFER11>D(845) Then BUFFER12=BUFFER11-D(845)
BUFFER2=BUFFER12/D(846) '일사-P32
BUFFER3=BUFFER22/22
BUFFER2=BUFFER21/D(846)
BUFFER3= BUFFER23/22 '*9250 일사0-1800(796)MW 0~3V A/CONV 0 ~ 614 환43V 녹색:SIG 적:록:G
[ILSA] =floor(BUFFER12)
[BAIACK] =Floor(BUFFER22)
BAIACK_SNS =Tadin(4) '배액-P33

```

그림 3-6-4. 합수율센서에 의한 양액공급기 제어 프로그램 중 제어 부분

(다) 양액공급기 금액 제어

그림 3-6-5는 양액공급기 자동관수 설정 화면이다. 여기서는 금액 시작 종료 시간, 금액 후 대기시간, 다양한 금액 조건(일사량, 함수량, 금액량 등)을



그림 3-6-5. 양액공급기 자동관수 화면

현재의 화면 조작을 위해 메인화면에서 메뉴버튼을 누르고 1번 버튼 누르고 다시 1번 버튼을 누른다(1 자동관수, 1 그룹의 화면).

그 외 그룹 변경 방법은 다음과 같다.

- 메뉴버튼 + 1번 버튼 + 1번 버튼 = 1 자동관수, 1 그룹
- 메뉴버튼 + 1번 버튼 + 2번 버튼 = 1 자동관수, 2 그룹
- 메뉴버튼 + 1번 버튼 + 3번 버튼 = 1 자동관수, 3 그룹
- 메뉴버튼 + 1번 버튼 + 4번 버튼 = 1 자동관수, 4 그룹으로 이동된다.

자동 관수 방법을 조절하기 위한 설정방법은

- 주기사용선택 : 유효란에 커서를 위치한 다음 “+/-” 버튼을 누르면 변경됨.
- 시작시간 설정 : “0+” 란에 커서를 위치한다음
1버튼 누르면 □ (고정시간), 2 버튼 누르면 ●+(일출후 시간), 3버튼 누르면 ●-(일출전 시간),
4버튼 누르면 ★+ (일몰후 시간), 5버튼 누르면 ★- (일몰전 시간)으로 변경됨.
이 후, 바로 옆의 우측칸에 커서를 위치한 다음 키패드를 이용하여 시간을 설정하면,

윗줄의 유효칸에 현재그룹의 하루 시작시간이 자동 계산되어 표기됨.

- 최소대기 시간설정 : 관수간격 최소대기 시간 입력
- 최대대기 시간설정 : 관수간격 최대대기 시간 입력
- 급액 조건 설정1 : '최대대기' 아래칸에 커서 이동 후,키패드 버튼을 활용하여
1 : 누적일사, 2 : 배액 %, 3 : 일일관수횟수, 4 : 외부시작, 5 : 사용안함
=> 선택
- 급액 조건 설정2 : 설정1 아래에 키패드 버튼을 활용하여
1 : 일사, 2 : 실내온도, 3 : 함수율%, 4 : 사용안함
=> 선택
- 급액 기준 설정 : 설정2 아래에 키패드 버튼을 활용하여
1 : 시간(분:초), 2 : 구역물량, 3 : 면적당 ml, 4 : 드리퍼 ml
=> 선택

※※ 시간(분:초)설정 : 급액 조건(구역물량, 면적, 드리퍼) 으로 설정된 설정값과 별도로 입력함(센서에 대한 안전 장치 개념), 화면의 설정이 시간(분:초)설정으로 되어있으면 구역물량과 비교하여 관수시간이 결정됨. 유량 또는 시간(분:초) 2개값 중 먼저 도달한 값에 의해 관수가 종료됨

- * 구역물량 : 주기별 관수량 증감을 %로 조정
: 구역별 물량은 메뉴+2. 2.구역란의 물량에서 관수량을 설정함.
- * 면적당 : m² 당 1회 관수량을 ml 로 설정
- * 드리퍼 : 드리퍼당 1회 관수량을 ml 로 설정

- 처방설정 : 주기별로 처방을 1~6까지 선택 할 수 있음. “-----” 양액 사용 안함
- 설정이 완료된 후에는 엔터 버튼을 눌러 저장함

(라) 양액공급기 구역별 제어 기능

그림 6은 관수 구역을 설정하여 같은 시설내의 다른 구역에서 서로 다른 급액 시스템을 이용할 수 있도록 한 프로그램 기능이다.



그림 3-6-6. 양액공급기 관수구역 설정화면

- 그룹 선택 설정 : 자동관수 설정 화면에서 입력한 1~4개의 그룹 설정값을 선택
- 드리퍼수 설정 : 관수구역의 드리퍼 수를 입력
- 물량 설정 : 관수구역의 1회 관수량을 입력 (단위 : L)
- 교정율 설정 : 결정된 관수구역의 물량을 “+/-”, 버튼으로 증감시킴
- 면적 설정 : 관수구역의 면적을 입력 (단위 : m²)
- 시비전시간 : 각 관수구역에 입력된 시간만큼 8구역으로 배출시킨 후 해당구역 관수시작
(사용하지 않으려면 0분 00초 입력)
(관수구역 시간에 8번구역에 배출하는 시간도 포함 됨)

** 수동작동 방법 : “비상관수” 버튼을 한번 누르면 각 관수구역별로 1회 관수됨.
관수도중 비상관수 버튼을 다시 한번 더 누르면 1구역씩 정지됨.

- 설정이 완료된 후에는 엔터 버튼을 눌러 저장함.

(마) 양액공급기 급액 처방(조정) 기능

그림 3-6-7은 양액 급액에 있어서 급액 농도, pH, 급액 농도, 일사량 변화 등을 설정하여 사용자가 환경에 따라 체계화된 급액을 공급할 수 있도록 해주는 기능이다.

	처방1	처방2	처방3	처방4	처방5	처방6
양액공급선택	공급	미공급	미공급	미공급	미공급	미공급
EC.PH제어(%)	센서30	----	----	----	----	----
일사감소EC (ms/cm)	----	----	----	----	----	----
	처방1	처방2	처방3	처방4	처방5	처방6
설정EC (ms/cm)	2.5	----	----	----	----	----
설정PH	6.0	----	----	----	----	----
일사범위(최소) (w/m²)	200	----	----	----	----	----
일사범위(최대) (w/m²)	400	----	----	----	----	----

그림 3-6-7. 양액공급기 양액처방 설정화면

- 양액공급 선택 설정 : “ +/-“ 버튼을 활용하여 공급, 미공급 선택
- EC, pH 제어 설정 : 센서값에 의한 제어비율을 %로 입력(기본값 50%)
- 일사감소 EC 설정 : 일사값에 의한 EC 감소폭 입력
- 설정 EC 설정 : 처방별로 EC값 입력
- 설정 pH 설정 : 처방별로 pH값 입력
- 일사범위 최소 설정 : 일사감소 EC 값이 적용되는 최소 일사값 설정
- 일사범위 최대 설정 : 일사감소 EC 값이 적용되는 최대 일사값 설정
: 현재 일사값이 일사범위 최소와 최대 사이에 위치하면 범위에 비례하여 적용됨

** “메뉴+6번“ 을 사용할 경우 사용안함 “.....”으로 설정함

- 설정이 완료된 후에는 엔터 버튼을 눌러 저장함.

(바) 양액공급기 일반 설정

그림 8은 양액 공급기 설정에 있어서 단위, 편차, 교정범위 등 양액공급기 기본 정보에 대한 내용들을 설정하는 부분이다.



그림 3-6-8. 양액공급기 일반설정 화면

- 양액 비율 설정 : 조성된 양액 비율 입력 (기본값 : 100)
- pH유량계 설정 : 산탱크(C통) 흡입 용량 입력(L/분) --> 설정표참고
- pH 상한레벨 설정 : 현재 pH 값이 pH 설정값과 비교하여 일반설정의 pH 교정범위 값보다 높게 벗어나면 적용됨 (기본값 50%)
- pH 하한레벨 설정 : 현재 pH값이 pH 설정값과 비교하여 일반설정의 pH 교정범위 값보다 낮게 벗어나면 적용됨 (기본값 10%)
- EC 비상 정지 설정 : 현재 EC값이 설정이하 값이 되면 믹싱통의 양액이 없는 것으로 판단하여 펌프 작동 정지됨
- EC 경보지연 설정 : 경보지연 되는 시간을 입력
- EC 정지 편차 : 설정된 편차폭을 벗어나면 공급펌프 정지
(설정된 편차폭에 ± 0.5 차이가나면 경보 울림)
- pH 경보지연 설정 : 경보지연 되는 시간을 입력
- pH 정지 편차 : 설정된 편차폭을 벗어나면 공급펌프 정지
(설정된 편차폭에 ± 0.5 차이가나면 경보 울림)
- 액비유량계 설정 : 액비 흡입 용량 입력(L/분)

- 유량에 의한 양액 공급방식 설정 : 키패드 버튼을 활용하여 계산/측정 중 선택
(1000 단위 이상이 되면 계산모드로 변경됨)
계산모드 : 계산유량을 활용하여 관수량 결정
측정모드 : 유량계 측정값 활용 (측정 L/펄스, 펄스유량 단위 입력)
- 계산유량 설정 : 관수구역에 공급되는 유량을 초단위로 입력(ml/초)
- EC교정 범위 설정 : 교정 범위를 설정함 (기본설정 : 0.5 입력)
교정 범위를 상향으로 벗어나면 => EC, 상한 레벨값이 적용됨
교정 범위를 하향으로 벗어나면 => EC, 하한 레벨값이 적용됨
- pH교정 범위 설정 : 교정 범위를 설정함 (기본설정 : 0.5 입력)
교정 범위를 상향으로 벗어나면 => pH 상한 레벨값이 적용됨
교정 범위를 하향으로 벗어나면 => pH 하한 레벨값이 적용됨
- EC세밀 교정 설정 : 세밀 교정 범위를 설정함
(기본설정 : 50% 입력, 숫자가 높을수록 EC조정 변화가 빠름)
- pH세밀 교정 설정 : 세밀 교정 범위를 설정함
(기본설정 : 50% 입력, 숫자가 높을수록 PH조정 변화가 빠름)
- 설정이 완료된 후에는 엔터 버튼을 눌러 저장함.

※ pH유량계 설정과 액비유량계 기본설정표

계산유량(ml/초)	액비유량(L/분)
500	0.6
1000	1.2
1500	1.8
2000	2.4
2500	3.0
3000	3.6

(사) 양액공급기 센서교정 및 시간설정

그림 9는 양액 공급기에 연결되어 사용하는 각종 센서들의 교정값과 현재시간 등을 조절하는 부분으로 보다 정확한 환경계측을 위해 작성하는 부분이다.



그림 3-6-9. 양액공급기 센서교정 및 시간설정화면

- 각 센서의 제로값과 스팬값 입력
 일사1, 함수1, pH1, EC1 : 센서 최저 기준값 (100) 입력
 pH1 : +6마다 0.1감소, -6마다 0.1증가
 EC1 : +17마다 0.1 감소, -17마다 0.1증가
 일사2, 함수2, pH2, EC2 : 센서 최고 기준값 (5000) 입력
 pH2 : +51마다 0.1 증가, -51마다 0.1감소
 EC2 : +155마다 0.1증가, -155마다 0.1감소
 센서 보정할 때 센서 2 기준값을 변경하여 보정
- 시간, 날짜 : 현재 시간과 날짜를 입력함, 장시간 전원이 꺼졌을때는 다시 입력해야함.
- EC, 상한 레벨 : 현재 EC값이 EC 설정값과 비교하여 4.일반설정의 EC 교정범위 값보다 높게 벗어나면 적용됨 (기본값 10%)
- EC, 하한 레벨 : 현재 EC값이 EC 설정값과 비교하여 4.일반설정의 EC 교정범위 값보다 낮게 벗어나면 적용됨 (기본값 50%)
- 드리퍼 용량 : 드리퍼의 용량을 입력 (기본값 2L/h)
- EC 공급 주기 : 액비 솔레노이드 밸브의 작동 주기를 시간으로 표시 (기본값 5초)
- 시작 시간 : 자동관수의 각 그룹별 시작 시간 설정 중 가장 빠른 그룹의 시작 시간이 자동

표기

- 종료 시간 : 관수 종료 시간을 임의 설정하여 입력
- 관수 시작시간 이전과 종료시간 이후에는 관수가 되지 않음
- 설정이 완료된 후에는 엔터 버튼을 눌러 저장함.

(아) PC에서의 양액공급기 데이터 확인

그림 10는 양액 공급기에 연결된 PC에서 사용된 센서가 측정하는 값들을 일정기간 선택하여 화면에 나타낸 것이다. 본 양액 공급기는 실시간으로 PC 각종 센서 값이 표시됨과 동시에 과거의 필요구간을 선택하여 따로 출력 받을 수 있는 기능을 포함한다. 관수시간, 관수구역, 관수시 누적일사량, EC/pH설정값, 누적관수횟수 등을 볼 수 있다.

구역별 센서 보기

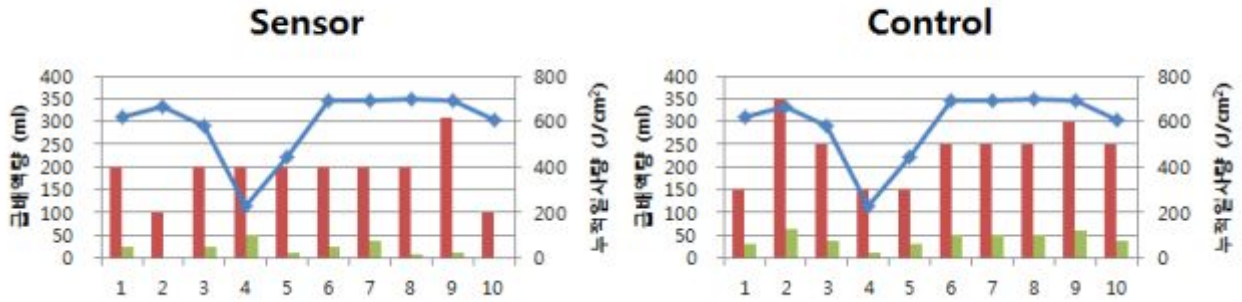
시간	구역	누적일사	설정EC	EC1	설정EC(%)	설정PH	PH1	설정PH(%)	총관수량	누적관수횟
03-20 09:06	1	143	2.5	2.1	-30	6.0	6.1	-30	150	1
03-20 11:00	1	250	2.5	2.0	-30	6.0	6.0	-30	150	2
03-20 13:16	1	366	2.5	2.2	-30	6.0	6.1	-30	150	3
03-20 14:56	1	500	2.5	1.9	-30	6.0	6.1	-30	150	4
03-20 15:26	1	684	2.5	2.0	-30	6.0	6.0	-30	150	5
03-20 16:02	1	851	2.5	2.0	-30	6.0	6.0	-30	150	6
03-20 16:50	1	985	2.5	2.2	-30	6.0	6.1	-30	150	7
03-21 08:20	1	150	2.5	2.3	-30	6.0	6.0	-30	150	1
03-21 09:46	1	321	2.5	2.1	-30	6.0	6.0	-30	150	2
03-21 10:45	1	489	2.5	2.0	-30	6.0	6.1	-30	150	3
03-21 11:06	1	599	2.5	1.9	-30	6.0	5.9	-30	150	4
03-21 12:48	1	654	2.5	2.0	-30	6.0	6.0	-30	150	5
03-22 08:35	1	100	2.5	2.2	-30	6.0	6.1	-30	150	1
03-22 09:49	1	214	2.5	2.1	-30	6.0	6.0	-30	150	2
03-22 10:56	1	369	2.5	2.0	-30	6.0	6.2	-30	150	3
03-22 12:00	1	489	2.5	2.1	-30	6.0	6.0	-30	150	4
03-22 14:26	1	654	2.5	2.0	-30	6.0	6.1	-30	150	5
03-23 09:16	1	147	2.5	2.2	-30	6.0	6.0	-30	150	1
03-23 10:03	1	269	2.5	2.3	-30	6.0	6.0	-30	150	2
03-23 12:02	1	389	2.5	2.0	-30	6.0	6.1	-30	150	3
03-23 14:04	1	489	2.5	2.1	-30	6.0	6.0	-30	150	4
03-23 15:08	1	577	2.5	2.1	-30	6.0	6.2	-30	150	5
03-23 16:04	1	712	2.5	2.2	-30	6.0	6.1	-30	150	6
03-24 08:07	1	145	2.5	1.8	-30	6.0	6.0	-30	150	1
03-24 09:01	1	288	2.5	2.0	-30	6.0	6.0	-30	150	2
03-24 11:05	1	349	2.5	2.0	-30	6.0	6.1	-30	150	3
03-24 12:09	1	485	2.5	2.1	-30	6.0	6.0	-30	150	4
03-24 15:07	1	576	2.5	2.0	-30	6.0	6.2	-30	150	5
03-24 17:03	1	623	2.5	2.1	-30	6.0	6.0	-30	150	6

그림 3-6-10. PC에 있는 양액공급기 센서값 보기화면

(3) 양액 공급기를 이용한 급액 공급시 센서 기준 공급과 일사량 기준 공급 제어 결과

그림 11는 본 양액 공급기에서 급액 공급을 센서와 일사량의 각 기준에 맞추어 파프리카 재배시 적용한 결과 그래프이다. 센서를 이용한 급액 제어와 누적일사량에 의한 제어 모두 잘 적용되고 있음을 확인할 수 있었다. 측정결과를 잠시 보면, 일사량 제어시 급액량과 일사량은 거의 같은 수준의 변화를 보였으나, 센서 제어시는 일사량과 직접적으로 비슷한 변화를 나타내지는 않았다. 본 연구로 기존 양액 공급기 시스템에 FDR수분 센서를 이용한 급액 제어 시스템과 함께 식물에 있어 중요 환경중 하나인 광환경 그 중 일사량을 이용하여 급액을 제어할 수 있도록 시스템화하였고, 본 양액 공급 시스템을 통한 센서와 일사량을 통한 급액 제어는 실사용에 문제없이 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

< 정식후 60~70일 >



< 정식후 150~160일 >

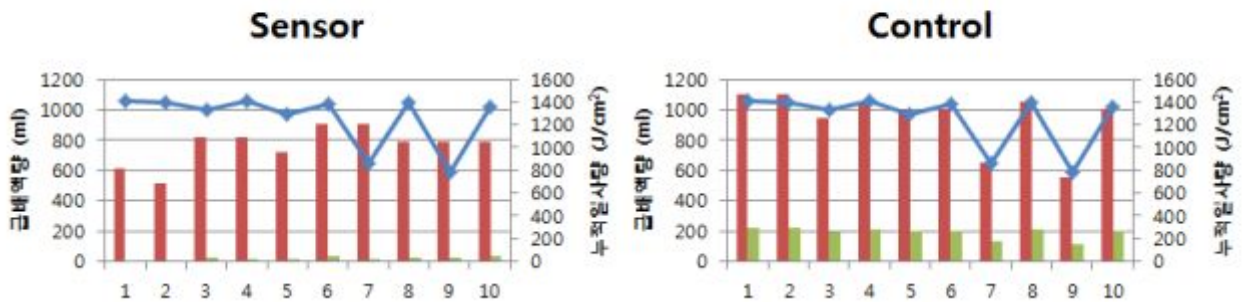


그림 11. 양액 공급기를 이용한 제어 결과
(sensor : 센서 기준 공급, control : 일사량 기준 공급)

(4) 연구 결과 요약

기존 시설 재배에서 이용되는 양액 시스템에 FDR수분센서를 이용한 급액 제어 방법을 적용하고, 이와 더불어 환경제어기능인 일사량을 통한 급액제어도 동시에 구성하여 자동 급액이 이루어질 수 있도록 연구하였다.

본 연구 결과를 적용하여 양액 공급기를 업그레이드 하였고, 이를 파프리카 재배에 실사용한 결과, 목표로 하는 수분 센서 제어와 일사량 센서 제어 모두 잘 이루어졌다. 환경조건에 대한 급액 제어가 완전하게 이루어지므로, 다양한 작물별 재배 시기별 적절한 지상부/지하부 환경조건을 알 수 있으면 이를 자동화된 양액 공급기에 적용하면 작물에 최적화된 급액 제어를 할 수 있을 것으로 판단된다.

제 4 장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

제 1 절 연구개발 목표의 달성도

구분	평가의 착안점 및 척도	
	착안사항	목표달성도
1차년도 (2010- 2011)	○ 유기배지에 적합한 수분센서 개발 되었는가?	100
	○ FDR센서를 이용한 무배액 파프리카 수경재배 급액관리 연구가 충분한가?	100
	○ FDR센서를 이용한 무배액 토마토 수경재배 급액관리 연구가 충분한가?	100
2차년도 (2011- 2012)	○ 유기배지에 적합한 수분센서가 개발되었는가?	100
	○ FDR센서를 이용한 무배액 파프리카 수경재배 근권환경관리 연구가 충분한가?	100
	○ FDR센서를 이용한 무배액 토마토 수경재배 근권환경관리 연구가 충분한가?	100
3차년도 (2012- 2013)	○ FDR센서를 이용한 무배액 장미 수경재배 근권환경관리 연구가 충분한가?	100
	○ 배지수분함량을 고려한 통합형 급액시스템이 개발되었는가?	100
	○ 통합형 급액시스템이 복합환경제어기와 연동하여 제어가능한가?	100
	○ FDR센서를 이용한 무배액 파프리카 수경재배 급액체계화 연구가 충분한가?	100
	○ FDR센서를 이용한 무배액 토마토 수경재배 급액체계화 연구가 충분한가?	100
	○ FDR센서를 이용한 무배액 장미 수경재배 급액체계화 연구가 충분한가?	100

제 2 절 관련분야의 기여도

1) 기술적 측면

- 유기배지 전용 배지 수분센서 개발
- 유기배지 수분제어를 통한 과채류 급액 관리 기술 체계화
- 배양액이 배액되지 않는 배지 수분제어 기술은 정밀 복합환경 제어시스템 구현 가능.
- 유기배지 전용 농가 보급형 수분센서 개발 - 가격이 저렴하면서 사용 및 관리가 용이하면, 저가 소형 휴대형으로 배지 수분 정량 측정이 가능하며 관련 기술은 유기 배지 재배 농가 현장에 적용되어 급액 시스템 기술로 적용할 수 있음
- 환경친화형 유기배지를 이용한 수경재배 시스템 체계화

2) 경제적 · 사회적 측면

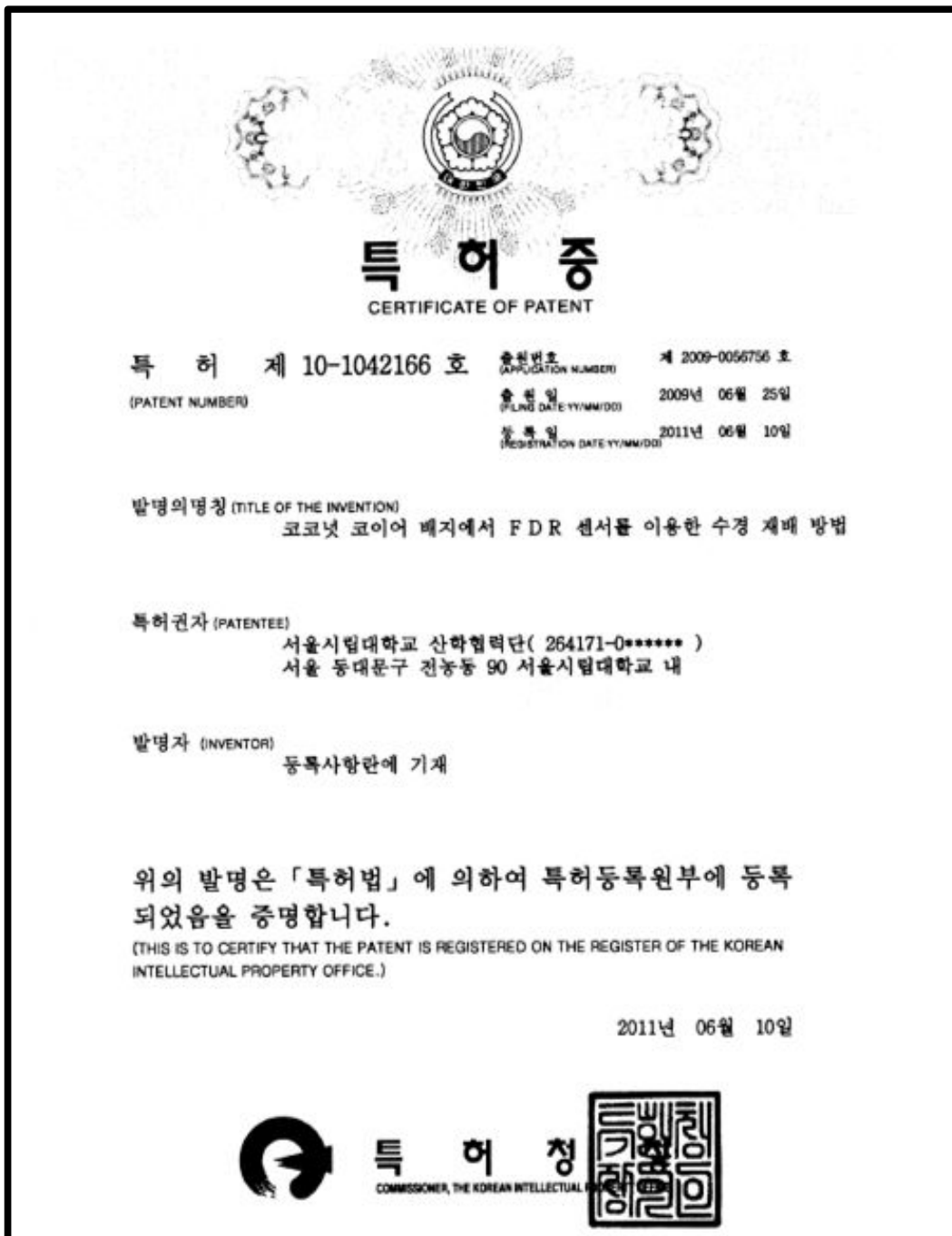
- 배양액의 배액이 없는 무배액 방식은 비순환 재배 방식에서 효율적인 비료의 사용과 환경오염을 최소화하는 농업으로 적용되리라 봄.
- 고품질 친환경 수경재배 농산물 생산이 가능하여 국내 농산물의 경쟁력이 높아질 것이며 과학영농 실현으로 환경친화형 재배로 좋은 사례가 될 것임

제 5 장 연구개발 성과 및 성과 활용계획

가. 특허출원 및 등록

특허 등록

- 1) 10-1042166 : 코코넛 코이어 배지에서 FDR 센서를 이용한 수경재배 방법



나. 학술논문 발표 및 투고

학술 논문

- 1) Non-drainage irrigation scheduling in coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a Frequency Domain Reflectometry for tomato cultivation, 2013, European Journal of Horticultural Science 78(3)S. 132-143, Eun-Young Choi, Ki-Young Choi, Yong-Beom Lee (국외 SCI)
- 2) The use of a frequency domain reflectometry sensor to establish a non -drainage hydroponic system with a coconut coir substrate for tomato cultivation, 2013, Journal of Plant Nutrition 36 (게재확정), Eun-Young Choi, Seng-Kwan Seo, Ki-Young Choi, Yong-Beom Lee (국외 SCI)
- 3) Nutrient solution concentration effect on non-drainage irrigation scheduling coir substrate hydroponic system for tomato cultivation by a FDR sensor, 2013, Journal of Food, Agriculture and Environment 11(3&4)(게재확정), Eun-Young Choi, Min Son, Ki-Young Choi, Yong-Beom Lee (국외 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, 2013, Eun-Young Choi, Min Son, Ki-Young Choi, Yong-Beom Lee (국외 SCIE)

학술 발표

- 1) Boron Availability Alters Boron Distribution in Tomato (*Solanum lycopersicum*), 2010, Kor. J. Hort. Sci. Technol., 28(2), Eun-Young Choi, Seng-Kwan Seo, Yoon-A Jeun, In-Song Han, Gyung-Ran Do (SCIE)
- 2) Coconut coir를 이용한 파프리카 수경재배에서의 급액 시간대 조절에 따른 배지내 함수량에 미치는 영향, 2011, 한국생물환경조절학회지, 20(1),126, 유형주, 박성태, 오정심, 손금주, 최기영, 이용범
- 3) Farm Scale Evaluation on Non-drainage Irrigation Scheduling in Coir Substrate Hydroponic System for Tomato Cultivation by a Frequency Domain Reflectometry Sensor, 2013, 한국원예학회 Kor. J. Hort. Sci. Technol. (SUPPL I) vol. 31. P. 66, 최은영, 차부건, 이용범
- 4) FDR 센서를 이용한 코코넛 코이어 무배액 수경재배에서 급액 전기 전도도가 파프리카의

생육과 품질에 미치는 영향, 2012 원예과학기술지 Vol.30 No. S2, 유형주, 이호진, 고지연, 박성태, 오정심, 손금주, 연제성, 최기영, 이용범

- 5) FDR 센서를 이용한 배지내 함수량 조절이 coconut coir 조성 비율과 배지내 양수분함량 변화에 미치는 영향, 2011, 한국생물환경조절학회지, 20(1),97, 유형주, 박성태, 오정심, 손금주, 최기영, 이용범
- 6) FDR 센서를 이용한 장미 코코넛 코이어 수경재배시 급액농도가 장미 생육과 수량에 미치는 영향, 2011, 원예과학기술지 Vol. 29 No. S2, 정금향, 박성태, 이호진, 고지연, 최기영, 이용범
- 7) FDR 센서를 이용한 코코넛 코이어 배지에서 착색단고추 수경재배시 배지내 수분 함량의 변화, 2011, 한국생물환경조절학회지, 20(1),195, 정금향, 박성태, 이호진, 고지연, 최기영, 정운화, 이용범
- 8) FDR 수분센서 센서간 간격에 따른 수분함량 측정값의 변화 특징, 2011, 원예과학기술지 Vol. 29 No. S2, 박성태, 정금향, 오정심, 유형주, 최기영, 이용범
- 9) 수경재배용 Coconut coir 배지에 FDR수분센서 사용시 측정위치에 따른 수분함량 변화, 2011, 원예과학기술지 Vol. 29 No. S2, 박성태, 정금향, 김민경, 손금주, 오정심, 유형주, 최기영, 이용범
- 10) 유기배지를 이용한 토마토 무배액 수경재배 기술의 체계화를 위해 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 수분 센서 이용, 2011, 한국원예학회 학술발표 Kor. J. Hort. Sci. Technol. vol. 29. 최은영, 최기영, 이용범
- 11) 코코넛 코이어 배지 사용시 근권 수분 함량에 따른 딸기 생육특성, 2010, 한국생물환경조절학회지, 19(2), 오정심, 유형주, 박성태, 이혜진, 정금향, 최기영, 배종향, 이용범
- 12) 코코넛 코이어 배지에서 장미 수경재배시 FDR 센서를 이용한 근권 수분 함량 조절에 따른 장미 생육 특성, 2011, 원예과학기술지 Vol. 29 No. S2, 정금향, 박성태, 최기영, 이용범, 배종향
- 13) 코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 자동 급액 제어 시 근권 수분제어 범위가 절화 생육에 미치는 영향, 2013, 원예과학기술지 Vol. 31 No. S1, 박성태, 유형주, 이호진, 연제성, 최기영, 이용범
- 14) 코코넛 코이어를 이용한 장미 수경재배에서 FDR 센서를 이용한 자동 급액제어 시 급액시작 시간이 절화 생육에 미치는 영향, 2013, 원예과학기술지 Vol. 31 No. S1, 박성태, 오정심, 고지연, 장은지, 최기영, 이용범

- 15) 토마토 무배액 수경재배 기술의 최적화를 위한 FDR (Frequency Domain Reflectometry) 수분 센서를 이용한 코코넛 코이어 배지의 수분함량 조절과 급액의 전기전도도 설정, 2012, 한국원예학회 Kor. J. Hort. Sci. Technol. (SUPPL I) vol. 30. P. 78, 최은영, 차부건, 이용범
- 16) 토마토 유기배지 수경재배에서 Frequency Domain Reflectometry (FDR)센서를 활용한 무배액 기술의 체계화, 2013, 한국원예학회 Kor. J. Hort. Sci. Technol. (SUPPL II) vol. 30. P. 36, 최은영, 차부건, 이용범

졸업논문

- 1) FDR센서를 이용한 오이와 파프리카 수경재배용 coconut coir 배지 최적 수분조건 구명 2011, 서울시립대학교 일반대학원 석사학위논문, 이철승
- 2) 코코넛 코이어 배지를 이용한 장미 수경재배시 근권 수분함량, 급액농도 및 시간 조절이 근권환경과 생육에 미치는 영향, 2013, 서울시립대학교 일반대학원 석사학위논문, 정금향

다. 인력 양성

지원 총 인원	지원대상				성별		지역별		
	박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	대전	기타
22	4	11	6	1	9	13	20	0	2

라. 실용화, 산업화 계획

- 1) 추가연구 : 배양액 재활용 및 극소화 수경재배 시스템 개발
- 2) 시제품 개발 : 근권 함수량 제어용 다양한 길이의 FDR센서 개발
FDR센서를 활용한 근권수분 피드백 복합 환경제어기 개발
- 3) 재배기술 : FDR센서를 활용한 파프리카 무배액 재배기술 확립
FDR센서를 활용한 토마토 무배액 재배기술 확립
FDR센서를 활용한 장미 무배액 재배기술 확립

마. 교육 및 지도

회차	일자	교육지역	내용
1	2011.02.22	전남 김제	과채류 수출농가에 배지모니터링 센서 설치 및 환경제어 기술교류
2	2011.03.22	경남 진주 대곡면	배지수분모니터링 센서 데이터 확인과 식물생육 측정 및 환경제어 기술교류
3	2011.04.15	충북 진천 덕산면	코이어를 이용하여 파프리카를 재배하는 농가에 배지수분 모니터링 센서 설치와 환경제어 기술 논의
4	2012.01.11	경남 진주 대곡면	겨울철 날씨가로 인한 추위 극복을 위한 관리 방안 및 수분 센서 데이터 토의
5	2012.07.10	강원도 철원	과채류 수출농가 방문 및 기술교육
6	2012.10.24	충북 진천 에덴농장	파프리카 재배 농가 방문 및 모니터링 관리
7	2012.11.29	전북 익산 파프리카 시험장	파프리카 생산성 향상 기술개발 심포지엄
8	2013.04.23	전북 남원	과채류 무배액 수경재배 기술
9	2013.05.30	부산 시설원예시험장	파프리카 무배액 수경재배 기술



[전남 김제 파프리카 농가 방문 및 센서설치 및 재배환경 모니터링]



[진주 대곡 파프리카 농가 방문 및 센서설치 및 재배환경 모니터링]



[과채류 토양 수분 모니터링 시스템 설치]

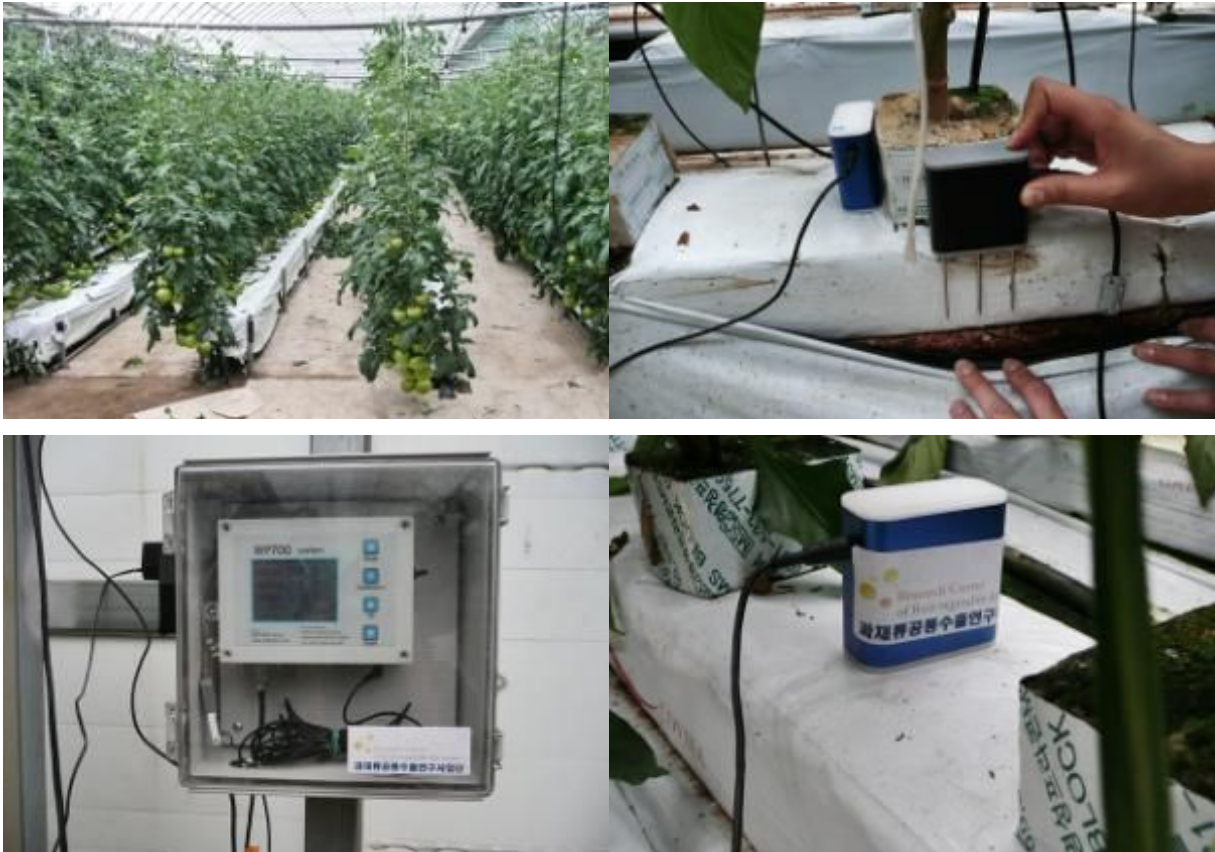


[온실환경 모니터링과 제어에 대한 토의, 질의응답]



[온실환경 모니터링에 대한 질의응답 및 기술교류]





[배지 수분 모니터링 시스템 설치]



[배지 수분 모니터링 시스템 설치]

6. 홍보

회차	일자	홍보	내용
1			홈페이지 제작 광고 (http://www.rfsensor.com/)
2	2011.10.13~14	aT센터	생명산업 D.N.A 대전 - 과채류공통수출연구사업단 전시회 참가
3	2011.11.05~08	대전무역전시관	대전 TAMAS 전시회
4	2013.05.22~25	한국원예학회	한국원예학회 전시 홍보
5	2012.12.10	원예산업신문	무배액 수경재배 토론
6	2013.05.23	한국농어민신문	유기배지 활용 무배액 수경재배 실용화 눈앞



[홈페이지 제작]





[유기배지용 수분센서 전시홍보]

<p>원예산업신문 www.wonnye.com</p> <p>2021년 11월 15일 (월) / 제 115호 / 10페이지</p> <p>무배액 수경재배 등 토론 한계 극복, 저수익이 농민생존을 위한 최선</p> <p>원예산업신문은 11월 15일(월) '2021년 원예산업 세미나'를 개최하고, '수경재배 등 배액'을 주제로 토론회를 개최했다. 이 자리에서 원예산업신문은 '수경재배 등 배액'을 주제로 토론회를 개최했다. 이 자리에서 원예산업신문은 '수경재배 등 배액'을 주제로 토론회를 개최했다.</p>	<p>한국농어민신문 www.knnews.com</p> <p>2021년 11월 15일 (월) / 제 115호 / 10페이지</p> <p>유기배지 활용 무배액 수경재배 실용화 농업 이동형 고수 연구원 특수장 속성으로 배지 내 양·수분 조절 연구 통한 실용화</p>  <p>이동형 고수 연구원 특수장 속성으로 배지 내 양·수분 조절 연구 통한 실용화</p> <p>이동형 고수 연구원 특수장 속성으로 배지 내 양·수분 조절 연구 통한 실용화</p>
---	--

[무배액 수경재배 신문홍보]

제 6 장 연구개발 과정에서 수집한 해외과학기술정보

제 1 절 Coconut coir

1. 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 오래 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

2. Coconut coir dust & fiber 생산현황

Coir 섬유는 코코넛을 둘러싸고 있는 외부껍질(husk)로부터 장섬유(10~30cm)만을 뽑아내 로프, 매트, 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 중심

이고, 베트남, 필리핀, 인도네시아 등에서 급속히 신장되고 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 줄어들 것으로 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 2 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/노동력 투입을 관리하여 경제적이고, 작물의 수확/품질/물질함량 관리를 통해 생산능력을 높이는 것으로 이 세가지를 구체적 목적으로 삼는다.

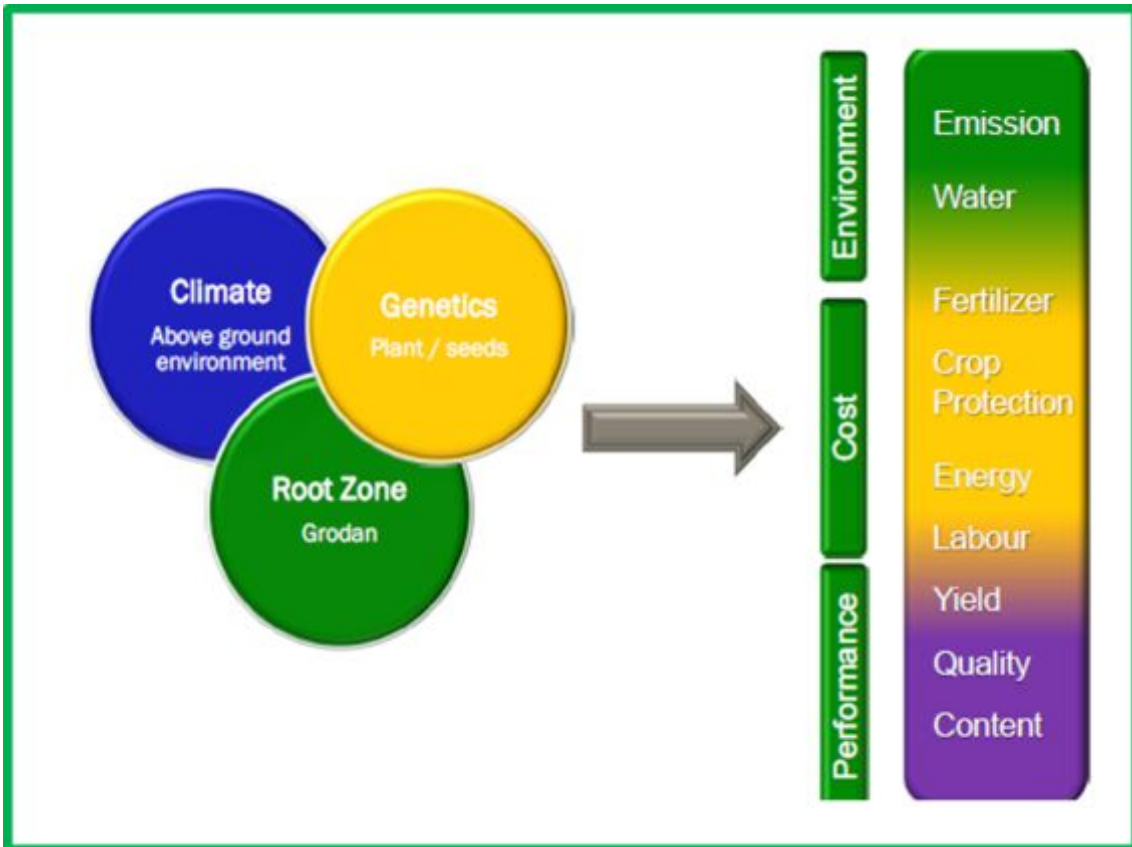
○ 왜 수분관리인가?

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 수단이며, 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 예측은 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

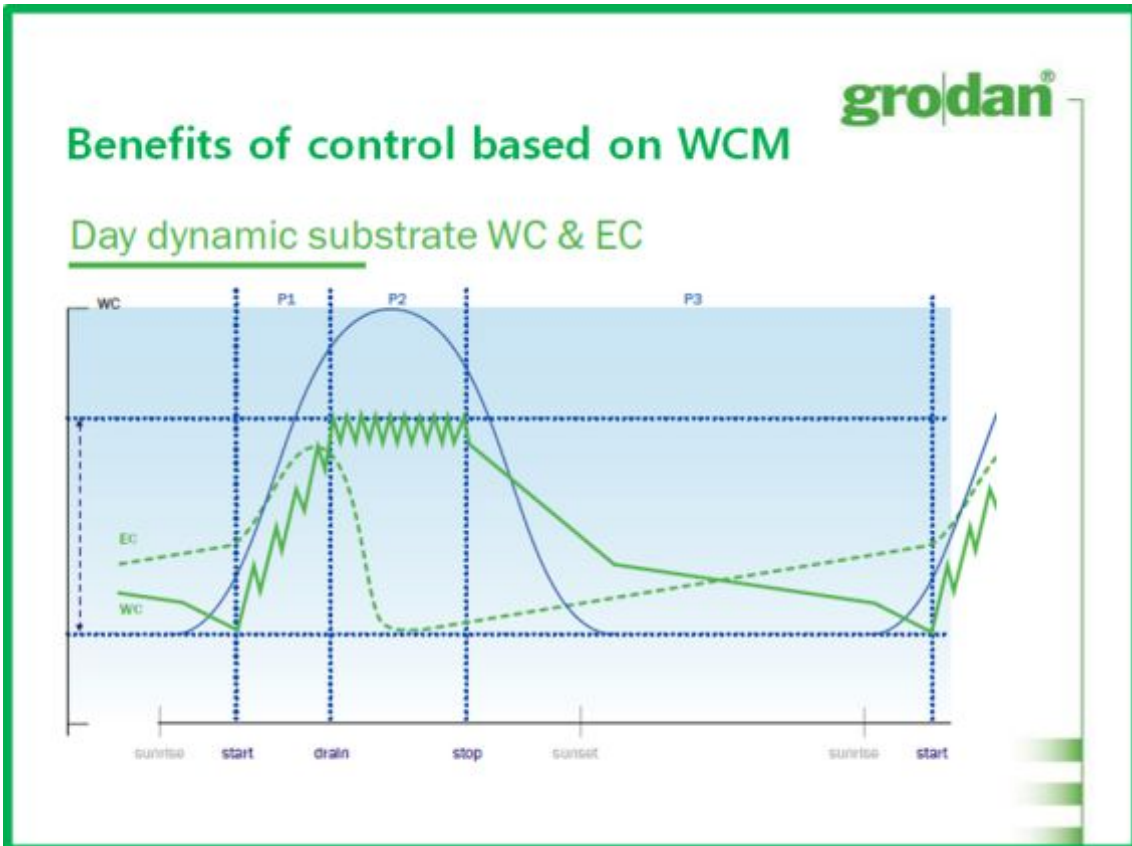
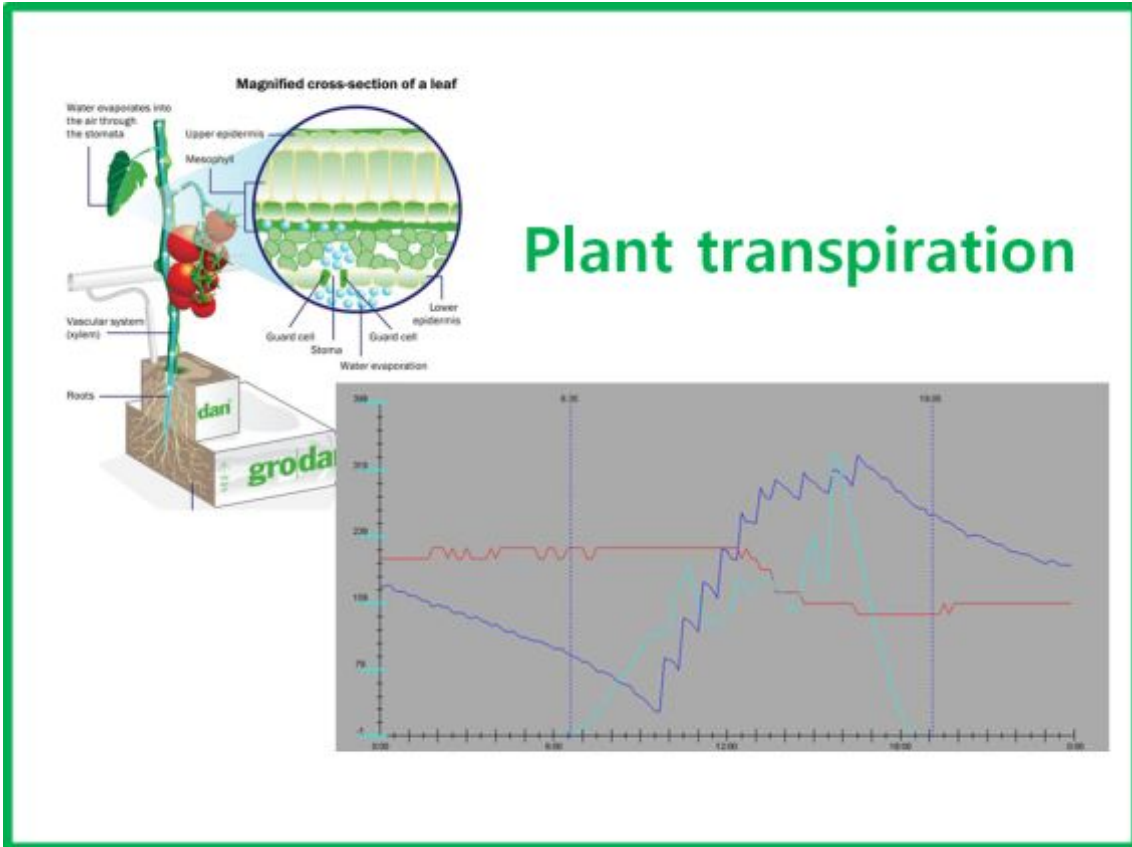
Lower costs

Reduction growing costs by using less energy, labour, fertiliser & water.

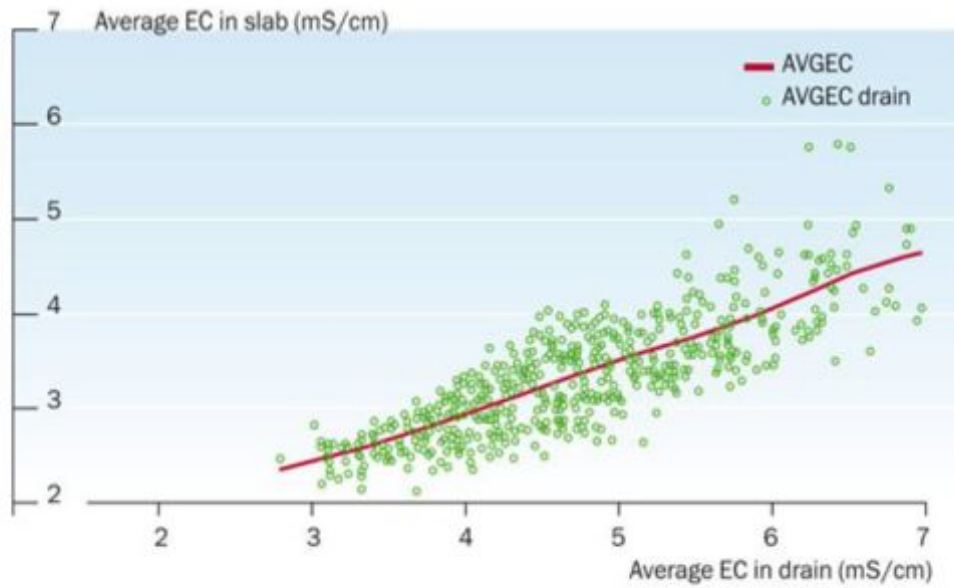
Reduced environmental impact

Sustainable growing by using less energy, water, & fertiliser.

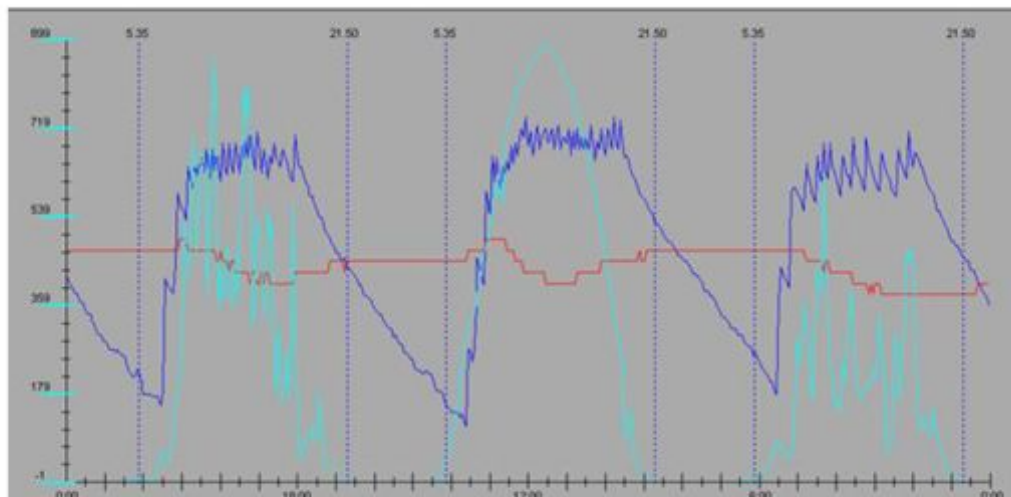




Relation slab EC to drain EC



Controlled root zone for optimum growth, production & fruit quality



제 7 장 참고문헌

- 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 annuum* 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 annuum* '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.

- 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 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. Hort. Sci.* 28, 227-233.

- Prasad, M. 1997: Physical, chemical and biological properties of coir dust. *Acta Hort.* 450, 21-30.
- Raviv, M., S. Medina, Y. Shamir and Z. Ner 1993: Very low medium moisture tension—a feasible criterion for irrigation control of container-grown plants. *Acta Hort.* 342, 111-120.
- Runia, W. T. and J. J. Amsing 2001: Disinfection of recirculating water from closed cultivation systems by heat treatment. *Acta Hort.* 548, 215-222.
- Savvas, D., E. Chatzieustratiou, G. Pervolaraki, G. Gizas and N. Sigrimis 2008: Modelling Na and Cl concentrations in the recycling nutrient solution of a closed-cycle pepper cultivation. *Biosys. Eng.* 99, 282-291.
- Sim S.Y., S.Y. Lee, S.W. Lee, M.W. Seo, J.W. Lim, S.J. Kim, and Y.S. Kim. 2006. Appropriate Set Time in Irrigation System by Time Clock in Tomato Perlite Bag Culture. *Journal of Bio-Environment Control*, 15(4):327-334
- Stradiot, P. 2001. The Grodan water content meter for root management in stonewool. *Acta Horticulturae* 548:71-77.
- Thompson, R.B., M. Gallardo, L.C. Valdez and M.D. Fernandez 2007: Determination of lower limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors. *Agr. Water Manage.* 92, 13-28.
- Topp, G.C., and J.L. Davis. 1985. Measurement of soil water content using time domain reflectometry. *Soil Science Society of America Journal* 49:19-24.
- Topp, G.C., J.L. Davis and A.P. Annan 2003: The early development of TDR for soil measurements. *Vadose Zone J.* 2, 492 - 499.
- Urrestarazu, M. and M. García 2000: [Modeling electrical conductivity management in a recirculating nutrient solution under semi arid conditions.](#) *J. Plant Nutri.* 23, 457-468.
- Vavrina, C.S., K. Armbruster, M. Arenas, and M. Pena. 1996. Coconut coir as an alternative to peat media for vegetable transplant production. SWFREC station report. pp 1-2.
- Veldkamp, E., and J.J. O'Brien. 2000. Calibration of a frequency domain reflectometry sensor for humid tropical soils of volcanic origin. *Soil Science Society of America*

Journal 64:1549-1553.

- Warren, S.L. and T.E. Bilderback 2004: Irrigation timing: Effect on plant growth, photosynthesis, water-use efficiency and substrate temperature. *Acta Hort.* 644, 29-37.
- Warren, S.L. and T.E. Bilderback, 2004. Irrigation timing: Effect on plant growth, photosynthesis, water-use efficiency and substrate temperature. *Acta Hort.* 644 : 29-37
- 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.
- Yu, S.O. and J.H. Bae. 2004. The effect of fertigation setting point on the growth and fruit quality of sweet pepper (*Capsicum annuum* L.). *Journal of Bio-environment Control* 13(2):102-106.
- Zekki, H., Gauthier, L. 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.