

발 간 등 록 번 호
11-1543000-003527-01

# 배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술개발

2021. 06. 03.

주관연구기관 : 한국방송통신대학교  
 협동연구기관 : 강원대학교  
 주식회사 텔로팜

배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술개발

2021

농림식품기술기획평가원  
 농림축산식품부

농림축산식품부  
 (전문기관) 농림식품기술기획평가원

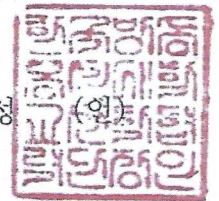
# 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술개발”(개발기간 : 2018.04. ~ 2020. 12.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2021. 06. 03.

주관연구기관명 : 한국방송통신대학교 산학협력단 (대표자) 김 태 성



협동연구기관명 : 강원대학교 산학협력단 (대표자) 신 대 용



협동연구기관명 : 주식회사 텔로팜 (대표자) 이 정 훈



주관연구책임자 : CHOI EUN YOUNG

협동연구책임자 : 최 기 영

협동연구책임자 : 박 주 성

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

## 보고서 요약서

과제고유번호	118015-3	해 당 단 계 연 구 기 간	2020-01-01 ~ 2020-12-31	단 계 구 분	2020-01-01 ~ 2020-12-31/ 2018-04-26 ~ 2020-12-31
연구사업명	단 위 사 업	농식품기술개발사업			
	사 업 명	첨단생산기술개발			
연구과제명	대 과 제 명	(해당 없음)			
	세 부 과 제 명	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술개발</li> <li>- 생체정보 센서를 이용한 고품질 오이 생산 기술개발</li> <li>- 배지 함수량 및 생체정보 센서 제어 알고리즘 개발</li> </ul>			
연구책임자	- CHOI EUN YOUNG - 최 기 영 - 박 주 성	해당단계 참여연구원 수	총 : 12명 내부: 12명 외부:   명	해당단계 연구개발비	정부: 198,000천원 민간: 66,000천원 계: 264,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 26명 내부: 25명 외부: 1명	총 연구개발비	정부: 546,000천원 민간: 182,000천원 계: 728,000천원
연구기관명 및 소속부서명	한국방송통신대학교 산학협력단 강원대학교 산학협력단			참여기업명 : (주)텔로팜	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과 의 보안등급 및 사유	
--------------------------	--

9대 성과 등록·기탁번호

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

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

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

요 약

1. 배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 고품질 토마토 생산 기술 개발
  - 1) 생체정보와 개발 관수 제어시스템을 이용한 적정 급액 ON/OFF 제어 점 구명
  - 2) 개발 관수 제어시스템을 활용한 배지 수분함량과 생체정보의 통합적 이용 급액 제어 기술개발
  - 3) 농가 현장 실증을 통한 수분흡수량 증가 및 물·비료 소비량 감소 확인
2. 생체정보 센서를 이용한 고품질 오이 생산 기술 개발
  - 1) 시설토양 수분 장력 센서를 이용한 오이 관수 개시점 구명
  - 2) 시설토양 오이 재배에서 생체정보를 적용한 자동 관수 기초자료 획득
  - 3) 관수 개시점 자동 제어로 농가 관행적 방식 대비 수분 이용효율 90% 증가 구명
3. 배지 함수량 및 생체정보 센서제어 알고리즘 개발
  - 1) 관수 제어 장치의 개선 및 정확도 보완
  - 2) 배지 함수량 제어 알고리즘 개발 및 보완
  - 3) 테스트 베드 실험을 통한 최적의 관수 조건 구명
  - 4) 농가 현장 실증 실험을 통한 데이터 축적 및 관행 기술과 차이점 구명

보고서 면수

256  
(표지제외)

### <요약문>

<p style="text-align: center;">연구의 목적 및 내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 생체정보와 배지 함수량 금액제어로 환경친화형 고품질 과채류(토마토·오이) 생산 기술 개발             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 생산비(비용) 및 물 사용량 절감</li> </ul> </li> <li>• 첨단기술 활용하여 배지 함수량 및 생체정보 센서 개발             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 배지 함수량 측정 정확도 향상</li> <li>- 배지 함수량과 생체정보 통합적 이용 관수 제어 프로그램 개발 및 보완</li> </ul> </li> </ul>																												
<p style="text-align: center;">연구개발성과</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술 개발             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 생체정보와 개발 관수 제어시스템을 이용한 적정 금액 ON/OFF 제어점 구명</li> <li>- 개발 관수 제어시스템을 활용한 배지 수분 함량과 생체정보 통합적 이용 금액제어 기술 개발</li> <li>- 농가 현장 실증을 통한 수분흡수량 증가 및 물·비용 소비량 감소 확인</li> </ul> </li> </ul> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>&lt;개발된 시스템의 관수제어 개요 (겨울 토마토 재배)&gt;</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin: 0 auto;"> <tr> <td colspan="3" style="text-align: center;">금액개시 첫 배액 배출까지 (타이머 기반)</td> <td colspan="2" style="text-align: center;">첫 배액 배출부터 금액종료까지 (타이머 또는 CT/배액량 기반)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">금액 개시</td> <td style="text-align: center;">금액 간격 (분)</td> <td style="text-align: center;">금액 간격 (분)</td> <td style="text-align: center;">Irrigation- on threshold (Capacitance threshold, CT)</td> <td style="text-align: center;">Irrigation-off threshold (Drain volume per slab)</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">&gt; 100w/s</td> <td style="text-align: center;">20~30분</td> <td style="text-align: center;">10~20</td> <td style="text-align: center;">0.95</td> <td style="text-align: center;">50</td> </tr> </table> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 10px;"> <p>&lt;누적일사량제어와 개발 시스템의 양액 소비량 비교&gt;</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin: 0 auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">구분</td> <td style="text-align: center;">기존 금액제어 시스템(누적일사량제어)</td> <td style="text-align: center;">새로 개발된 금액제어 시스템</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">배액량</td> <td style="text-align: center;">금액량의 평균 26%</td> <td style="text-align: center;">금액량의 평균 18%</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">양액 소비량</td> <td style="text-align: center;">4.0L/200g 토마토 (1-2화방)</td> <td style="text-align: center;">3.5L/200g 토마토 (1-2화방)</td> </tr> </table> </div> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 생체정보 센서를 이용한 고품질 오이 생산 기술 개발             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 시설토양 수분장력 센서를 이용한 오이 관수개시점 구명</li> <li>- 시설토양 오이 재배에서 생체정보를 적용한 자동 관수 기초자료 획득</li> <li>- 관수개시점 자동 제어로 농가 관행적 방식 대비 수분 이용효율 90% 증가 구명</li> </ul> </li> <li>• 배지 함수량 및 생체정보 센서 제어 알고리즘 개발             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 관수 제어 장치의 개선 및 정확도 보완</li> <li>- 배지 함수량 제어 알고리즘 개발 및 보완</li> <li>- 테스트베드 실험을 통한 최적의 관수 조건 구명</li> <li>- 농가 현장 실증 실험을 통한 데이터 축적 및 관행 기술과 차이점 구명</li> </ul> </li> </ul>					금액개시 첫 배액 배출까지 (타이머 기반)			첫 배액 배출부터 금액종료까지 (타이머 또는 CT/배액량 기반)		금액 개시	금액 간격 (분)	금액 간격 (분)	Irrigation- on threshold (Capacitance threshold, CT)	Irrigation-off threshold (Drain volume per slab)	> 100w/s	20~30분	10~20	0.95	50	구분	기존 금액제어 시스템(누적일사량제어)	새로 개발된 금액제어 시스템	배액량	금액량의 평균 26%	금액량의 평균 18%	양액 소비량	4.0L/200g 토마토 (1-2화방)	3.5L/200g 토마토 (1-2화방)
금액개시 첫 배액 배출까지 (타이머 기반)			첫 배액 배출부터 금액종료까지 (타이머 또는 CT/배액량 기반)																										
금액 개시	금액 간격 (분)	금액 간격 (분)	Irrigation- on threshold (Capacitance threshold, CT)	Irrigation-off threshold (Drain volume per slab)																									
> 100w/s	20~30분	10~20	0.95	50																									
구분	기존 금액제어 시스템(누적일사량제어)	새로 개발된 금액제어 시스템																											
배액량	금액량의 평균 26%	금액량의 평균 18%																											
양액 소비량	4.0L/200g 토마토 (1-2화방)	3.5L/200g 토마토 (1-2화방)																											
<p style="text-align: center;">연구개발성과의 활용계획 (기대효과)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시설재배 작물의 합리적 관수 제어             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 작물의 최적 성장을 위한 양수분 조절 및 비료 투입량 감소</li> <li>- 시간별 개체별 모니터링 추적을 통한 데이터 습득 및 분석</li> <li>- 식물체 내 수분 이동 패턴 분석 및 식물 스트레스 정도에 대한 정확한 측정</li> <li>- 과채류의 품질향상 및 생산량 증대</li> </ul> </li> </ul>																												
<p style="text-align: center;">국문핵심어 (5개 이내)</p>	수액흐름 센서	배지 수분센서	생체정보	최적 금액량	수분이용효율																								
<p style="text-align: center;">영문핵심어 (5개 이내)</p>	Sap flow sensor	Substrate water sensor	In-vivo Physiological Parameters	Optimal irrigation	water use efficiency (WUE)																								

# < 목 차 >

## 제 1 장. 연구개발과제의 개요

제 1 절. 연구개발 목적	6
제 2 절. 연구개발의 필요성	9
제 3 절. 연구개발 범위	9

## 제 2 장. 연구수행 내용 및 결과

제 1 절. 연구내용 및 결과	
1. 제1 세부: 배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술개발	12
2. 제1 협동: 생체정보 센서를 이용한 고품질 오이 생산 기술개발	92
3. 제2 협동: 배지 함수량 및 생체정보 센서 제어 알고리즘 개발	160
제 2 절. 연구개발성과	223

## 제 3 장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 227

제 1 절. 목표	
제 2 절. 목표 달성여부	

## 제 4 장. 연구결과의 활용 계획 등 228

제 1 절. 연구성과의 활용분야 및 활용방안	
제 2 절. 추가연구의 필요성	
제 3 절. 타 연구에의 응용	

붙임. 참고문헌	230
----------	-----

[부록] 개발 기기 사용 메뉴얼	235
-------------------	-----

[별첨 1] 연구개발 보고서 초록	247
--------------------	-----

[별첨 2] 주관연구기관의 자체평가의견서	248
------------------------	-----

[별첨 3] 연구성과 활용 계획서	252
--------------------	-----

# 제 1 장. 연구개발과제의 개요

## 제 1 절. 연구개발 목적

- 배지경에서 급배액 관리 방법들은 궁극적으로 배지의 적정함수량을 유지하려고 하는 것이고 이는 식물체의 수분상태를 실시간 계측하여 배지 내 함수량을 작물 생육단계, 생육 상태(영양생장, 생식생장)에 맞게 적절하게 관리하는 기술 체계화임
- 따라서 본 연구에서는 시설 채소의 환경친화적인 급액관리 모델을 개발하기 위해 근권의 수분함량과 작물의 생체정보를 활용하여 과채류 환경친화형 수경재배 기술을 개발하고자 함

## 제 2 절. 연구개발의 필요성

### 1. 연구개발의 개요

#### 가. 시설채소 현황

- (1) 시설채소 총생산량 2,558천톤(2015년 기준) 중 과채류 생산량은 2,063천톤으로 전체 생산량의 81%를 차지하고 있음(농림축산식품부, 2016)
- (2) 국내 과채류 재배면적 대비 시설면적은 80%이며, 이 중 토마토를 비롯한 파프리카, 멜론, 풋고추는 100% 시설재배로 이루어지고 있음. 시설재배는 작물 연중 생산이 가능하여 앞으로 재배면적 대비 시설 비중이 더 증가하리라 예측되나, 토양관리, 양수분 관리 등에 따른 작물 생산성과 품질에 영향을 미치고 있음

▶ 2016년 주요 과채류 생산액 순위 : 딸기 > 수박 > 토마토 > 오이 > 풋고추

▶ 2015년 주요 과채류 재배면적 순위 : 수박 > 토마토 > 딸기 > 참외 > 오이

▶ 2015년 주요 과채류 수량 순위 : 수박 > 토마토 > 오이 > 딸기 > 풋고추

▶ 2015년 주요 과채류 생산성 순위 : 파프리카 > 토마토, 오이 > 수박 > 풋고추

표 1. 국내 주요 과채류의 생산액, 재배면적, 수량 및 생산성

작물	생산액(억원)	재배면적	수량(톤)	생산성(톤/ha)
딸기	13,570	6,403	194,513	30.4
수박	7,946	15,185	634,562	41.7
토마토	7,455	6,976	456,982	65.5
참외	3,742	5,438	161,100	29.6
오이	5,009	4,137	271,040	65.5
풋고추	3,832	4,878	175,574	36.0
파프리카	2,409	707	72,750	103.2
멜론	785	1,500	45,374	26.8

(자료: 농림축산식품부, 2016)

표 2. 수출채소류 재배방식별 생산량 및 수확기간 비교 (기준 1기작)

작목별	수경재배(A)		토양재배(B)		비율(A/B)	
	생산량(kg/10a)	수확기간(일)	생산량(kg/10a)	수확기간(일)	수량(%)	수확기간(일)
고추	4,616	236	3,979	206	116	115
방울토마토	6,519	129	5,314	108	123	119
오이	7,097	74	11,893	114	60	65
토마토	9,740	108	8,585	83	113	130

(자료 : 한국수경재배연구회, 2002추계심포지엄)

#### 나. 시설재배 급배액 관리

- (1) 시설재배에서 적절한 급·배액 관리는 식물체의 수분상태를 실시간 계측하여 배지 내 함수량을 생육단계 및 생육 상태 (영양생장, 생식생장)에 맞게 적절하게 유지·관리하는 것임.
- (2) 시설재배 방식에 따른 비료흡수율은 순환식 수경재배 > 수경재배 > 관비 재배 > 토양재배 순으로써 앞으로의 재배방식은 환경 부하를 줄이면서 작물의 효율적인 양수분 관리가 매우 중요한 요소가 됨(표 4).
- (3) 비료흡수율이 낮은 토양재배에 ICT 기술이 활용되면 환경 부하를 줄이고 효율적인 양수분관리가 가능할 것임.
- (4) 시설재배에서의 양·수분 배출량 저감을 위한 양·수분 정밀 재배 및 모델링과 순환식 수경재배 양액관리 기술 실용화 연구 진행 중임.

▶ 환경친화적 물 관리를 위해 네덜란드에서는 1ha 재배시 우수조 500m<sup>3</sup>, 배액 재사용



을 통한 순환식 수경재배 뿐 아니라 1kg 토마토 생산에 1L의 물을 사용하는 초정밀 재배를 위한 실용화 연구를 진행 중임(자료 : Grodan survey, 2014).

▶ 2027년에는 온실 외부로의 물, 질소(인) 배출을 zero화를 목표로 하고 있음.

표 3. 질소 배출 감소 목표량(kg/ha/year)

구분	2012 ~ 2014	2015 ~ 2017	2018 ~ 2020	2012 ~ 2023	2024 ~ 2027	2027 ~
고추	200	133	100	67	33	0
토마토	125	83	67	42	21	0
오이	150	100	75	50	25	0

표 4. 재배 방법에 따른 비료 이용효율

재배법	비료흡수율(%)
일반토양재배	< 40
관비재배	60 ~ 70
비순환식 수경재배	> 70
순환식 수경재배	> 95

(자료: 이, 2004)

#### 다. 급액 관리를 위한 근권 수분함량 계측

(1) 비순환식 고품배지경에서 효과적인 관수제어방식으로 타이머제어법이나 적산일사량센서 제어법을 사용해 왔지만(Lee 등, 2007) 두 가지 방법 모두 근권 내 수분함량을 실시간 측정하는데 어려움이 있음. 최근 비순환식 고품배지 경에서 작물의 수분요구도와 배지의 수분상태를 측정할 수 있는 토양수분센서(soil moisture sensor) 개발이 이루어져 왔음.

(2) 수분센서의 종류로는 Time Domain Reflectometry(TDR) 센서, Frequency Domain Reflectometry(FDR) 및 텐시오미터 등이 사용되고 있고 최근 FDR 센서를 활용한 고품배지경에서 관수조절 및 관리(Jaria 등, 2013), 센서 간 간격과 측정위치 및 보정방법(Kim, 2014; Park 등, 2011a; 2011b; 2014), 적정 근권 수분제어 범위 구명(Park, 2015), 급액 개시 시기와 종료 시기, 배양액 관리(Yoo, 2014) 등이 연구되어 왔음. FDR 센서를 활용하여 실험한 작물은 토마토(Choi 등, 2013a; 2013b; 2014, 2015), 딸기(Kim, 2015), 파프리카(Yoo 등, 2014), 절화 장미(Park, 2015; Farina 등, 2007) 등이 있음.

(3) 하지만, FDR이나 TDR은 탐침을 활용하여 측정하기 때문에 코이어 배지 칩(chip) 비율이 높은 경우 정밀도가 떨어지고 배지 일부분 함수량을 대푯값으로 하므로 개선이 필요함.

(3) 토양재배는 수분장력을 이용한 텐시오미터를 관수개시점으로 급액제어를 하고 있으나 보급이 매우 미흡하여 이에 대한 실용화가 낮음. 따라서 ICT 첨단기술을 토양 재배에 접목할 경우 근권 수분 함량과 생체내 수액흐름센서를 동시에 계측함으로써 정밀 양수분 관리가 가능하리라 봄.

(4) 따라서, 본 연구에서는 시설 채소에서의 환경친화적인 급액관리 모델을 개발하기 위해 근권의 수분함량과 작물의 생체정보를 활용하여 과채류 환경친화형 수경재배 기술을 개발하고자 함.

### 제 3 절. 연구개발 범위

○ 배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술개발(방송대)

- 토마토 수경배지 함수량 및 생체정보 모니터링 (1년차)
- 토마토 수경배지 함수량 및 생체정보 이용 급액제어 기술 개발 (2년차)
- 배지수분 함량과 생체정보 통합적 이용 급액제어 기술 현장 실증 및 실용화 (3년차)

○ 생체정보 센서를 이용한 고품질 오이 생산 기술 개발(강원대)

- 오이 토경에서 생체정보 모니터링 (1년차)
- 오이 토경에서 생체정보 및 근권 수분센서 이용 급액제어 (2년차)
- 오이 토경 급액제어 기술 현장 실증 및 실용화 (3년차)

○ 배지 함수량 및 생체정보 센서 제어 알고리즘 개발 ((주) 텔로팜)

- 배지 함수량 측정 센서 개선 및 정확도 보완 (1년차)
- 배지 함수량 및 생체정보 센서 제어 알고리즘 개발 (2년차)
- 배지 함수량과 생체정보 통합적 이용 관수제어 프로그램 개발 및 보완 (3년차)

구분	세부연구목표	연구개발 범위
1차 년도 (2018) (방송대)	토마토 수경배지 함수량 및 생체정보 모니터링	- 배지 함수량 및 물관 수액흐름 속도 센서 이용 모니터링 : 일일 배지 함수량 변화, 물관 수액흐름 속도변화, 급· 배액량, 식물수분흡수량, 수분이용효율, 배액 pH, EC 변 화 측정, 주기적 배액시료 분석

구분	세부연구목표	연구개발 범위
1차 년도 (2018) (강원대)	오이 토경재배에서 물관 수액흐름 속도 모니터링	<p>: 토마토 생육, 생산량 및 당도 측정, 경제성 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- 관수제어 처리(3처리(10KPa, 20KPa, 30KPa)과 Control(농가 관행 타이머 관수)의 4수준에 따른 재배 환경계측(지상부/지하부), 관수량, 오이 줄기 Sap flow density 양상, 물소비량 산출, 생육 및 수량 조사하고, 오이 과장 변화에 따른 줄기와 Sap flow density 이동 양상 분석</li> <li>- 측정 항목: 지상부(광, 온도, 습도 환경계측, 지하부(온도, 함수율, EC)</li> <li>- 관수량, 줄기와 과병의 Sap flow density (SF)</li> <li>- 생육, 수량 및 비상품과율 조사</li> <li>- 관수제어 처리와 오이 과실 크기 변화에 따른 수액 이동 현상 조사 위해 지상부 환경, 관수량, 오이 과장 변화, 줄기와 과병의 Sap flow 이동 양상 관측</li> <li>- 측정 항목: 지상부(광, 온도, 습도 환경계측 토양수분 장력측정</li> <li>- 관수량 (유량계, 대성 Co.,Korea), 줄기와 과병의 Sap flow density (SF), 생육, 수량 및 비상품과율 조사</li> </ul>
1차 년도 (2018) (텔로팜)	배지 함수량 측정 센서 및 정확도 보완	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 개발센서의 배지 함수량 측정 특성 분석</li> <li>센서신호의 잡음특성 개선</li> <li>급.배액량 측정방법 개선</li> <li>배지 수분 센서 구조개선</li> <li>전자장치 개선</li> </ul>
2차 년도 (2019 ) (방송대)	토마토 수정배지 함수량 및 생체정보 이용 급액제어 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 개발 배지 함수량 측정센서(ScmD) 제어구와 ISR 처리구의 총급액량, 배액량, 함수율, 총식물 생산량 비교</li> <li>- 배지 정전용량 측정장치 제어구(ScmD)에서 재개울(Capacitance threshold ,CT, ON 제어)과 배액량(OFF 제어)에 따른 정전용량과, FDR 함수율 및 물관수액흐름 비교</li> </ul>
	정전용량 수분 센서의 함수량 정량화	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 정전용량 수분측정 장치의 정전용량과 배지 함수량 정량화를 위한 관수자동화 시스템 구축</li> <li>- dry-out 기반 정전용량 수분측정 장치의 정전용량과 배지 함수량 정량화</li> <li>- 수분포화 암면 배지를 자연 배수시키며 정전용량, 배지 온도, 배지 함수량 측정</li> <li>- 관수기반 정전용량 수분측정 장치의 정전용량과 배지</li> </ul>

구분	세부연구목표	연구개발 범위
		함수량 정량화
2차 년도 (2019) (강원대)	오이 토경재배에서 물관 수액흐름 속도 이용 급액제어	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 관수 개시점(kPa) 처리 10, 20, 30 또는 10, 15, 20 및 관행 Control</li> <li>- 환경 측정: 지상부(일사량, 온습도), 지하부(kPa, 수분함량, EC, 온도 등)</li> <li>- 조사 분석 : 총관수량, 생육, 광합성 특성, 상품과수 및 수량, 수분이용효율, 수액흐름속도, 엽온 등</li> </ul>
2차 년도 (2019 ) (텔로팜)	배지 함수량 및 생체정보 센서제어 알고리즘 개발(센서 모듈 및 임베디드 시스템 개발)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전자회로 설계 및 PCB 제작 전자측정 장치조립 및 시험</li> <li>개발된 전자장치를 구동을 위한 SW 개발</li> <li>관수를 위한 배지 함수량 측정 알고리즘 및 SW 개발</li> <li>센서의 구조 및 측정 방법 개선</li> <li>개발 센서기반 배지 함수량 제어 정량적 분석</li> <li>생체정보 센서기반 배지 함수량 제어의 정량적 분석</li> <li>현장적용 시험</li> </ul>
3차 년도 (2020) (방송대)	배지수분 함량과 생체정보 통합적 이용 급액제어 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 통합적 관수제어 프로그램 이용한 급액제어 : 일일 배지 함수량 변화, 물관 수액흐름 속도변화, 급·배액량, 식물수분흡수량, 배액 pH, EC 변화 측정</li> <li>: 토마토 생육, 생산량 및 당도 측정</li> <li>- 급액 통합관리 기술 농가 현장 적용 및 feed back</li> <li>- 새로 개발된 기술 적용 시 급액제어 시스템 효과 제시 (배액량, 양액소요량, 생산비(비료값))</li> </ul>
	딸기 재배용 혼합 상토 배지 함수량 정량화	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 전극판 간격에 대한 정전용량과 중량함수량의 상관관계 구축</li> <li>- 최대값으로 normalization 한 정전용량을 독립변수로 측 정된 중량함수량을 종속변수로 관계식과, 계산된 함수량 과 실측정 함수량의 결정계수 구축.</li> </ul>
3차 년도 (2020) (강원대)	오이 토경 급액제어 기술 현장 실증	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 생산 농가 연구 결과 적용 급액제어 기술 농가 실증 및 실용화</li> <li>- 기술 교육 및 지도</li> </ul>
3차 년도 (2020) (텔로팜)	배지 함수량 및 생체정보 통합적 이용 관수제어 프로그램 개발 및 보완	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 배지 함수량과 물관 흐름속도 측정 센서 통합적 이용 관수제어 프로그램 개발 및 보완</li> </ul>

## 제 2 장. 연구수행 내용 및 결과

### 제 1 절. 연구내용 및 결과

#### 1. 제1 세부: 배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술개발

가. 실험 1. <토마토 암면배지경에서 급액제어 방식에 따른 급배액률, 수분흡수량, 수분이용 효율, 생육 및 수량 비교>

##### (1) 요약

본 연구에서 개발된 배지 함수량 측정장치(SWC)는 급액 개시 시점부터 첫 배액이 발생할 때까지 배지 수분을 포화시킨 후 그 시점의 함수량을 포장용수량 100%로 간주하여 그 이후로 포장용수량과 배액량을 제어하는 방식으로 적산일사량(ISR) 및 물관수액흐름속도(SF)에 기준한 자동급액방식과 비교하여 물관수액흐름속도 변화, 근권 함수율 변화, 식물체 수분흡수량, 식물생육 및 과실 생산량을 봄~여름 재배기와 가을~겨울 재배기에 구분하여 비교·관찰하고 그 요인들의 연관성을 구축하였다.

##### <봄~여름 작기>

- 정식 후 45일에서 82일까지 급액제어방식에 따른 총급액량은 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 물관수액흐름센서(SF) 제어구 보다 약 6.3L가 더 소요되었으나 일일 평균 급액량, 배액률 및 수분흡수량은 유의차가 없었다.
- 정식 후 64일, 즉 적심 후 한 달이 경과된 시점에서 줄기 물관수액흐름속도와 광량 변화는 SF와 SWC 제어구에서는 비례적인 패턴을 보였고 ISR 제어구에서는 다르게 나타났다.
- 물관수액흐름속도와 로드셀로 측정된 수분흡수량이 비례적 관계를 보였다.
- 개발된 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 50mL로 제한한 경우 줄기 물관수액흐름속도(SF) 신호가 외부 광량 신호보다 늦어지는 time lag가 나타났고 배지 함수율(%)은 낮 동안 45~50% 수준을 유지하여 낮은 경향을 보였다. 하지만 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 100mL로 제한한 경우(6월 9일)는 time lag가 없었으며 배지 함수율(%)은 낮 동안 55~60% 수준을 유지하였다.
- 배액의 pH, 전기전도도(EC) 변화는 처리별 유의차가 없었다.

- 급액제어방식에 따른 배지 수분은 해 뜬 후 바로 급액이 1회 되도록 한 ISR 제어구에서 오전 중 빠르게 포화되었고 급액 개시 시점부터 첫 배액이 발생할 때까지 배지수분을 포화시키는 방식인 SWC 제어구도 배지 수분이 빠르게 포화 되었다.
- 급액제어방식에 따른 토마토 생육은 SWC 처리구에서 ISR 제어구보다 엽과 줄기 생체중이 높았다. 수분이용효율(WUE)은 SWC 제어구에서 가장 높았고 과실 200g을 생산하는데 소요된 물량은 SWC 제어구에서 ISR 제어구에 비해 1.3L 적게 소요된 것으로 나타났다(표 5). 토마토 총생산량은 SWC와 SF 제어구에서 각각 2.639kg, 2.682kg로 ISR 제어구(2.438kg)보다 다소 높았고 과실 당도는 2화방 과실에서 SWC 처리구에서 ISR 제어구보다 0.5brix 높았고 3화방에서는 0.8brix 높았다(표 7).
- 봄~여름 재배기간 동안 (4월 22일부터 6월 15일까지) 비료 소비량과 소비액을 계산하였을 때 ISR 제어구에 비해 SWC 제어구에 의한 자동급액제어 시 식물체당 17원 정도의 비료 소비량을 줄일 수 있다(표 9)

#### <가을~겨울 작기>

- 급액제어방식에 따른 평균 급액량이 SF 처리구는 다른 두 처리구 보다 유의적으로 높았고, 배액률은 가장 낮아 수분흡수량은 다른 두 처리구 보다 높았다(표 2.1). ISR 제어구는 일일 평균 급액량이 두 처리구 보다 낮았다.
- 개발 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 배지 당 배액량을 200mL로 제한한 경우 배지 정전용량(C(parallel))과 FDR 함수율이 증가되었다(그림 1-1-22 A). 반대로 배지 당 배액량을 50mL로 제한한 경우 급액 종료 후 배지 수분 감소량이 큰 것을 알 수 있다(그림 1-1-22 B).
- 급액제어방식에 따른 배지 함수율은 일일 평균 급액량이 두 처리구 보다 낮았던 ISR 처리구에서 낮았다(그림 1-1-23).
- 급액제어방식에 따른 토마토 과실비대속도는 SF와 ISR 제어구에서 SWC 제어구 보다 높았고 SF와 ISR 제어구 두 처리 간 유의차는 없는 것으로 나타났다(그림 1-1-24). SWC 처리구에서 총수량, 상품과실수, 과실 생체중 모두 가장 낮았다(표 2.3).
- 급액제어방식에 따른 수분이용효율은 배액량은 높고 생산량이 낮았던 SWC 처리구에서 가장 낮았고 과실 200g을 생산하는데 소요된 물량은 SWC 제어구에서 SF 제어구 보다 약 2.0L 더 소요된 것으로 나타났다(표 2.4). 이 결과는 봄~여름 재배기 결과와 반대로 나타났는데 이는 알고리즘 개발을 위해 1회 급액량을 75mL로 제한을 하고 배액량을 다양하게 변경하여 실험한 결과로 보인다.

## <결론>

1. 개발된 배지수분측정 장치(SWC)로 측정된 정전용량 변화와 FDR 센서로 측정된 함수율 변화가 일치되는 결과를 보였는데(그림 1-1-11) 이는 개발된 배지수분측정 장치가 자동 급액제어 센서로 활용 가능성이 있음을 보여주고 있다.
2. 줄기물관수액흐름 속도와 실제 식물 수분흡수량 및 배지 수분함량이 비례적 관계를 가지고 있어 배지 수분함량 변화와 함께 지상부 물관흐름속도를 실시간 측정한 정보를 활용하여 급액 하는 것이 합리적이라고 판단된다.
3. SWC 장치로 급액제어 시 식물체당 1회 급액량을 각 100mL로 하는 것이 줄기 물관수액흐름이 실시간 광량 변화에 바로 반응하여 식물체 내 수분을 이동시키는 데 용이한 것으로 보인다. SWC와 SF 처리구에서 재배된 식물 줄기 물관수액흐름속도와 실시간 광량 변화 간 상관관계가 높게 나타난 것은(그림 1-1-15 B,C) 물관수액흐름 시그널이 광량 변화 시그널과 유사하였다는 연구결과(Baek et al., 2018)를 뒷받침한다. 즉, SWC와 SF 제어구에서 재배된 식물은 실시간 광량변화에 물관수액흐름 신호가 일치되는 adaptive performance를 보인다. 이것이 상품과실 생산량이 SWC와 SF 제어구에서 높고(표 6) 상관관계가 낮은 ISR 제어구(그림 1-1-15 A)에서 과실 생산량이 다소 낮은 결과와 관계가 있는 것으로 보인다. 따라서 배지 수분함량 변화와 함께 지상부 물관흐름속도를 실시간 측정한 정보를 활용하여 급액 하는 것이 과실 품질과 수량에 긍정적 영향을 준다고 판단된다.

## (2) 주요 결과

### <봄~여름 재배 작기>

#### ○ 실험 모습

봄~여름 재배기의 경우 2018년 3월 25일부터 6월 24일까지 토마토(*Solanum lycopersicum* 'Hoyong') 모종을 누적일사량 제어구(ISR)는 40주, 물관수액흐름 제어구(SF) 77개, 개발 배지수분측정장치 제어구(SWC) 37개 모종을 암면 슬라브 당 5주씩 정식하여 완전임의배치방식으로 재배하였다(그림 1-1-1). SF 제어구의 경우 32개 식물에 SF 센서를 설치하여 제어 및 모니터링 하였고 ISR 제어구와 SWC 제어구의 경우 대표 식물 4주에 SF 센서를 설치하여 실시간 물관수액흐름속도를 모니터링 하였다.



그림 1-1-1. 급액제어방식(ISR, SF, SWC)으로 재배된 토마토 생육(A), 물관수액흐름센서(B), 배지수분측정장치장치(C), 배지수분센서장치에서 실시간 센싱한 수분변화(D)

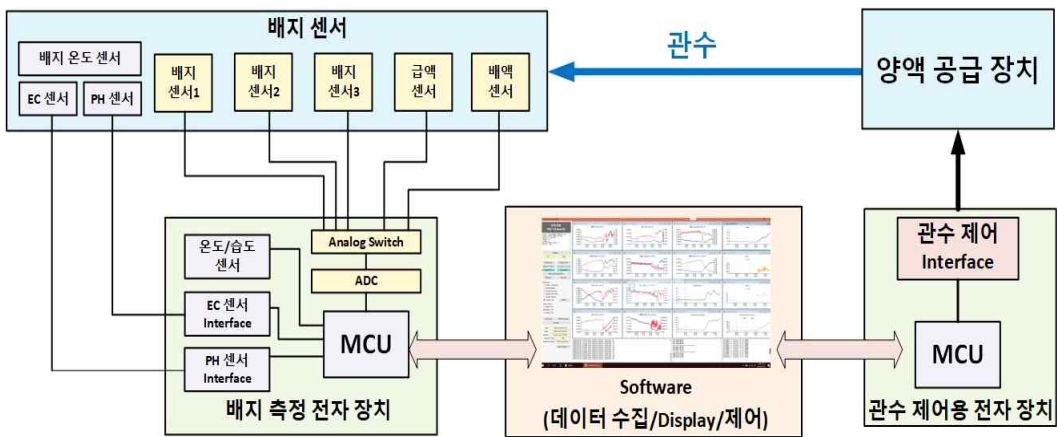


그림 1-1-2. 개발된 배지수분측정장치에 의한 자동급액방식 모식도



○ 재배기간 동안 온실 환경 변화

정식 후 28일부터 82일까지 온실 내부의 4, 5, 6월 중순까지 최고 온도(Highest)는 각각 33.5, 37.3, 34.5°C이며 최저 온도(Lowest)는 각각 8.7, 8.7, 12.9°C였다. 일 평균 광량(SI: solar irradiance)은 최저 31.3에서 최고 573w/m<sup>2</sup> 이었으며 일평균 상대습도(Humidity)는 75에서 99% 수준으로 유지되었다(그림 1-1-3). 일평균 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도는 313에서 610ppm 수준으로 유지되었고 누적일사량은 268에서 4,927J/m<sup>2</sup> 범위였다(그림 1-1-4).

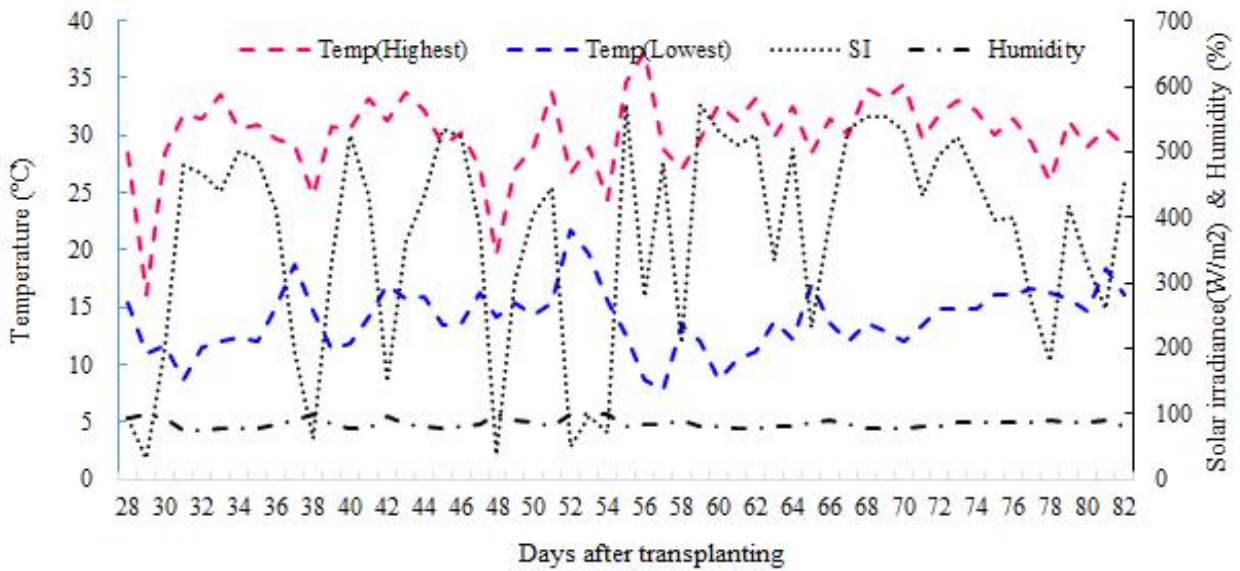


그림 1-1-3. 재배기간 동안 온실 내 온도, 광량 및 습도 변화

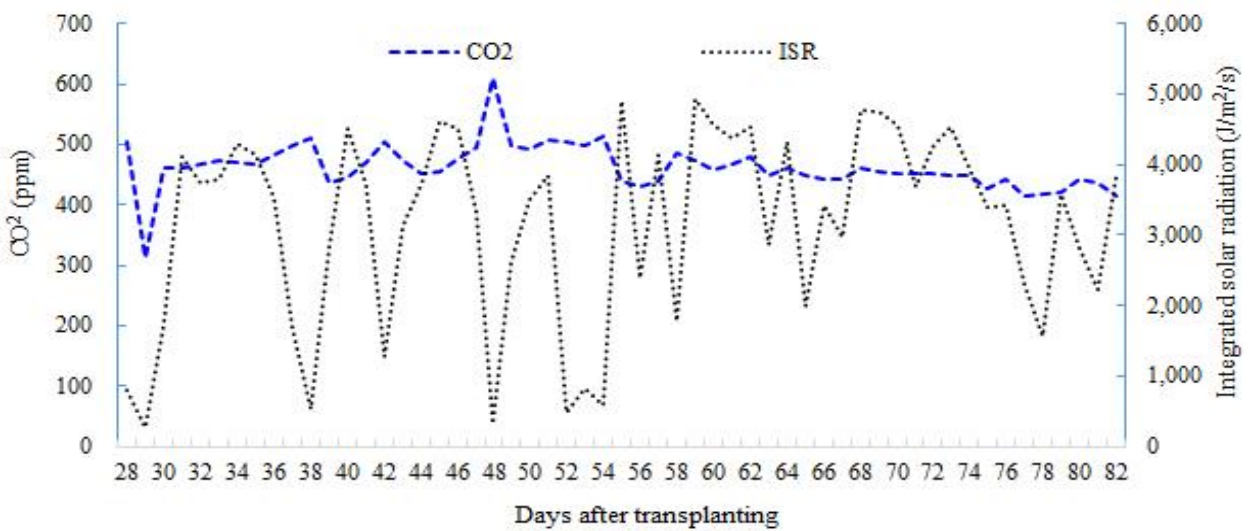


그림 1-1-4. 재배기간 동안 온실 내 이산화탄소 및 누적일사량 변화

○ 급액제어방식에 따른 총급액량, 평균 배액율 및 수분흡수량

정식 후 45일에서 82일까지 총급액량, 평균 배액율 및 평균 수분흡수량을 비교하였을 때 SF 제어구는 총급액량이 60.70L, 배액율은 17.2%, 수분흡수량은 1.319L였고 SWC 제어구는 총급액량이 67.03L, 배액율은 19.3%, 수분흡수량은 1.48L로 총급액량은 SWC 제어구에서 SF 제어구보다 약 6.3L가 더 소요되었다(표 1, 그림 1-1-5). 처리 별 총급액량은 차이가 있었으나 일일 평균 급액량, 배액율 및 수분흡수량은 유의차가 없었다.

표 1. 정식 후 45일(5월9일)에서 82일(6월15일)까지 급액제어방식에 따른 총급액량, 평균 배액율 및 수분흡수량

Treatment	Total irrigation volume (L/plant)	Daily irrigation volume (L/plant/day)	Drainage rate (%)	Water uptake (L/plant/day)
SF	60.70	1.64a	17.2a	1.31a
ISR	65.60	1.77a	16.4a	1.43a
SWC	67.03	1.81a	19.3a	1.48a

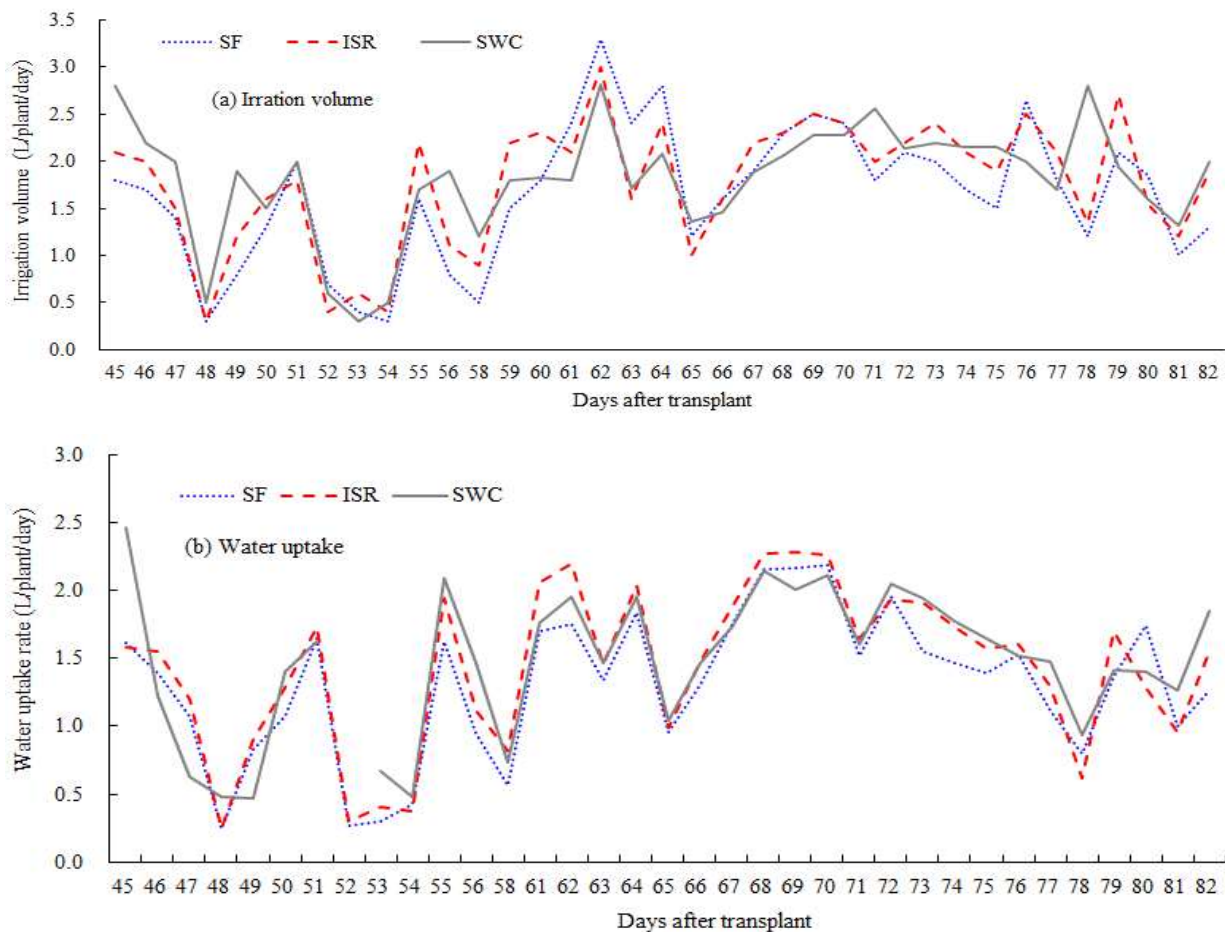


그림 1-1-5. 정식 후 45일(5월9일)에서 82일(6월15일)까지 급액제어방식에 따른 평균 일일 급액량(a) 및 수분흡수량(b) 변화

○ 급액제어 방식에 따른 광량과 물관수액흐름속도 변화

정식 36일부터 54일 시점까지 줄기 물관수액흐름속도를 관찰하였을 때 정식 45일 경부터 SF 처리구는 ISR 처리구와 다르게 물관수액흐름속도와 외부 광량 변화가 비례적 패턴을 보였다 (그림 1-1-6 a). 정식 후 64일, 즉 적심 후 한 달이 경과된 시점에서 줄기 물관수액흐름속도를 관찰하였을 때에도 마찬가지로 SF와 SWC 제어구에서는 줄기 물관수액흐름 신호와 광량(SI: Solar Irradiance) 신호가 비례적인 패턴을 보였고 ISR 제어구에서는 다르게 나타났다(그림 1-1-6 b). 이 결과로 정식 후 일정 재배 기간이 지난 후에는 외부 광량과 잎의 증산량이 비례적이지 않다는 것을 알 수 있다. 잎이 빛에 반응하여 증산하는 타이밍에 급액한 SF 제어구와 오전에 충분한 수분공급으로 광합성을 하는 타이밍에 근권 수분이 충분한 SWC 에서 수분이 이용효율이 높은 결과에 대한 이유가 될 수 있다.

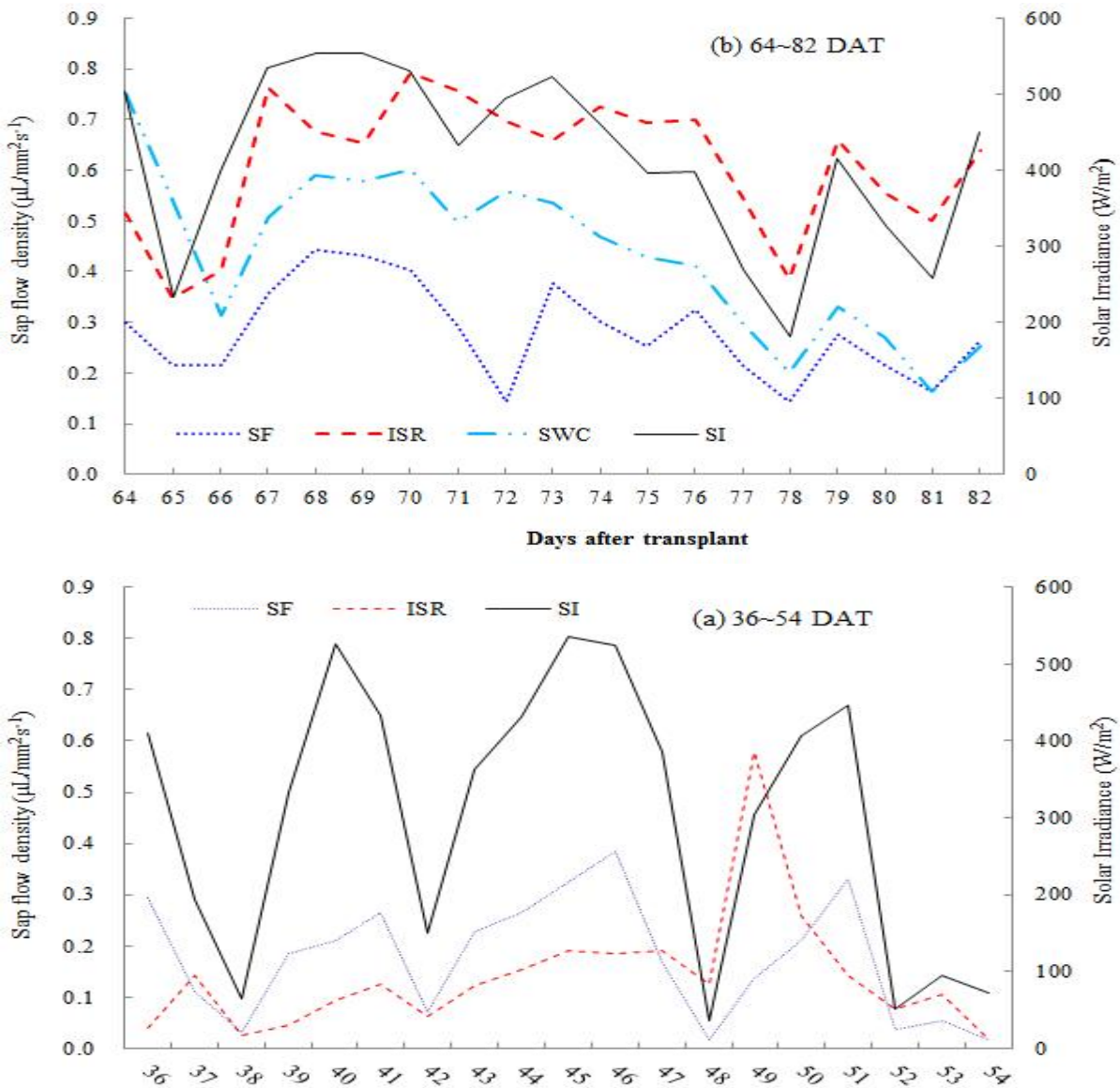


그림 1-1-6. 정식 후 36일에서 82일까지 급액제어 방식에 따른 광량과 물관수액흐름속도 변화

○ 급액제어방식에 따른 물관수액흐름속도와 수분흡수량

정식 64일에서 82일까지 수분흡수량(WU)과 일평균 물관수액흐름속도(SFD)를 비교한 결과 물관수액흐름속도(SFD)는 ISR( $0.614 \pm 0.030 \mu\text{L}/\text{mm}^2/\text{s}$ ) > SWC( $0.437 \pm 0.036 \mu\text{L}/\text{mm}^2/\text{s}$ ) > SF( $0.281 \pm 0.021 \mu\text{L}/\text{mm}^2/\text{s}$ ) 순으로 높았고 동일한 날짜에 측정된 일평균 수분흡수량(WU)은 ISR 제어구는  $1.633 \pm 0.105\text{L}$ , SWC 제어구는  $1.650 \pm 0.081\text{L}$ , SF 제어구는  $1.531 \pm 0.095\text{L}$ 이다. 따라서 물관수액흐름속도는 로드셀을 활용하여 측정된 수분흡수량과 비례적 관계가 있다는 것을 알 수 있다(그림 1-1-7).

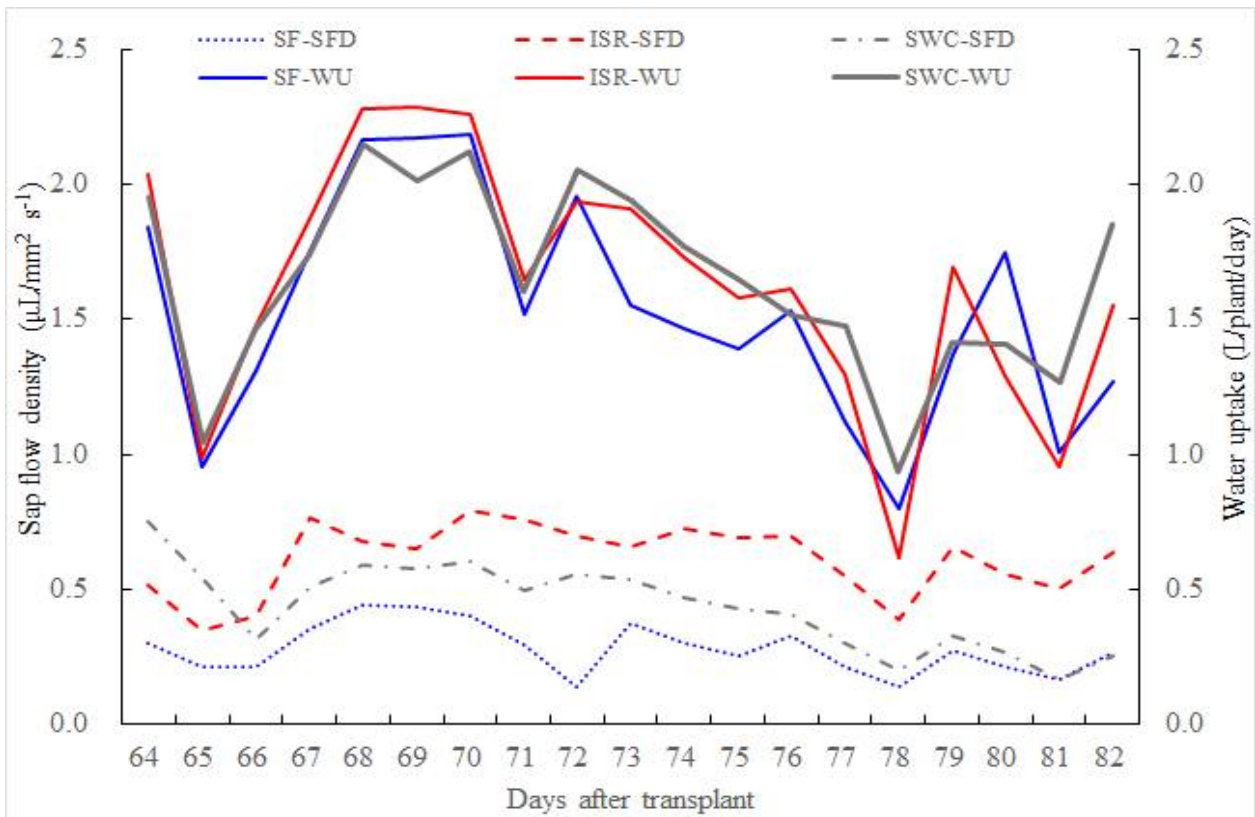


그림 1-1-7. 정식 후 64일(5월28일)에서 82일(6월15일)까지 급액제어방식에 따른 수분흡수량 (WU, Water uptake)과 물관수액흐름속도(SFD, Sap flow density)

○ 급액제어방식에 따른 급액개시 및 종료시간, 관수횟수

급액제어방식에 따른 급액개시 및 종료시간, 관수횟수를 비교하였을 때 ISR 제어구의 경우 일출 후 바로 1회 급액 되도록 설정하여 급액개시가 오전 5시에 시작되었고 SF 제어구의 경우 생체정보에 의해 급액 되어 매일의 기상상황에 따라 오전 7시~9시에 급액이 되었다. 급액종료 시간은 SF와 ISR 두 처리 간 차이가 없었다. SWC 처리구의 경우 알고리즘 구축을 위한 테스트를 위하여 광량이 200W 이상이 되는 시기 이후부터 급액개시가 되도록 매뉴얼로 작동하였다. 관수횟수(IrrFq: irrigation frequency)는 적심(5월 10일) 후 25일이 경과된 6월 4일부터 SF 제어구에서 최소 1회에서 최대 6회 더 적었다(표 2).

표 2. 정식 후 64일에서 82일까지 급액제어방식에 따른 급액개시 및 종료시간, 급액횟수

Date	Treat	Irrigation start time	Irrigation stop time	Drain Initiation	IrrFq	Drain rate (%)	Target setting			
							Irrigation volume per event (mL)	FC threshold (%)	Drain (mL)	Time interval (min.)
28-May (64DAT)	SWC	8:06	17:21	9:05	35	7.9	50	0.9	50	12
	ISR	5:15	17:30	-	24	27.5	100	-	-	-
	SF	7:03	17:28	-	29	36.6	100	-	-	-
29-May (65DAT)	SWC	8:06	17:17	9:30	27	15.8	50	0.9	50	12
	ISR	5:15	16:38	-	10	0.6	100	-	-	-
	SF	7:54	17:27	-	12	9.2	100	-	-	-
30-May (66DAT)	SWC	8:06	17:19	11:20	29	3.1	50	0.9	50	10
	ISR	5:14	17:24	-	16	22.5	100	-	-	-
	SF	8:59	17:32	-	16	24.0	100	-	-	-
31-May (67DAT)	SWC	8:06	17:08	13:20	38	2.3	50	0.9	100	10
	ISR	5:14	17:23	-	22	23.6	100	-	-	-
	SF	7:48	17:19	-	19	8.6	100	-	-	-
1-June (68DAT)	SWC	8:06	16:30	10:16	44	3.0	50	0.9	100	10
	ISR	5:13	17:02	-	23	14.8	100	-	-	-
	SF	7:43	17:08	-	23	9.9	100	-	-	-
2-June (69DAT)	SWC	8:08	17:22	17:28	35	3.8	50	0.9	100	8
	ISR	5:13	17:25	-	25	14.2	100	-	-	-
	SF	7:31	17:18	-	25	10.4	100	-	-	-
3-June (70DAT)	SWC	8:06	17:10	9:56	30	7.7	75	0.9	100	8
	ISR	5:13	17:26	-	24	15.8	100	-	-	-
	SF	7:43	17:24	-	24	11.8	100	-	-	-
4-June (71DAT)	SWC	7:38	17:17	9:10	33	32.3	75	0.92	200	8
	ISR	5:12	17:07	-	20	21.0	100	-	-	-
	SF	7:36	17:50	-	18	11.3	100	-	-	-
5-June (72DAT)	SWC	7:38	17:17	8:35	28	6.4	75	0.92	100	8
	ISR	5:12	16:55	-	22	23.6	100	-	-	-
	SF	7:40	17:12	-	21	14.3	100	-	-	-
6-June (73DAT)	SWC	7:36	17:31	9:08	29	13.6	75	0.92	100	8
	ISR	5:12	17:20	-	24	27.5	100	-	-	-
	SF	7:42	17:16	-	20	14.2	100	-	-	-
7-June (74DAT)	SWC	7:36	17:09	9:09	28	15.8	75	0.85	200	8
	ISR	5:12	16:59	-	21	26.3	100	-	-	-
	SF	9:12	17:33	-	17	12.5	100	-	-	-
8-June (75DAT)	SWC	7:36	17:29	9:21	28	22.9	75	0.85	200	8
	ISR	5:12	17:12	-	19	24.8	150	-	-	-
	SF	8:17	17:14	-	15	11.7	150	-	-	-

표 2-1. 정식 후 64일에서 82일까지 급액제어방식에 따른 급액개시 및 종료시간, 급액횟수

Date	Treat	Irrigation start time	Irrigation stop time	Drain Initiation	IrrFq	Drain rate (%)	Target setting			
							Irrigation volume per event (mL)	FC threshold (%)	Drain (mL)	Time interval (min.)
9-June (76DAT)	SWC	7:36	17:27	8:52	24	14.5	100	0.92	100	8
	ISR	5:11	15:53	-	21	42.7	150	-	-	-
	SF	7:48	17:11	-	21	39.1	150	-	-	-
10-June (77DAT)	SWC	7:36	16:51	10:24	18	26.5	100	0.92	100	8
	ISR	5:11	16:47	-	14	45.4	150	-	-	-
	SF	9:11	17:08	-	12	40.2	150	-	-	-
11-June (78DAT)	SWC	7:36	17:09	8:14	29	67.9	100	0.92	200	10
	ISR	5:11	14:14	-	9	54.8	150	-	-	-
	SF	8:17	17:11	-	8	31.7	150	-	-	-
12-June (79DAT)	SWC	7:36	17:30	10:25	21	23.8	100	0.92	200	10
	ISR	5:11	17:32	-	18	46.7	150	-	-	-
	SF	7:42	17:19	-	14	37.1	150	-	-	-
13-June (80DAT)	SWC	7:36	17:34	8:13	17	15.3	100	0.92	100	10
	ISR	5:11	16:39	-	14	28.1	100	-	-	-
	SF	7:55	17:17	-	12	3.2	100	-	-	-
14-June (81DAT)	SWC	7:36	15:57	8:02	14	24.6	100	0.92	100	10
	ISR	5:11	16:39	-	14	28.3	100	-	-	-
	SF	9:11	17:17	-	10	10.4	100	-	-	-
15-June (82DAT)	SWC	7:36	16:40	8:23	22	20.0	100	0.94	100	10
	ISR	5:11	17:11	-	19	27.9	100	-	-	-
	SF	8:37	16:32	-	13	1.5	100	-	-	-

○ 개발 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 50mL로 제한한 경우 줄기 물관수액흐름속도(SF), 배지 정전용량(C(parallel)) 및 FDR 함수율(%) 변화

SWC 센서로 측정된 정전용량 변화와 FDR 센서로 측정된 함수율 변화가 일치되는 결과를 보였다(그림 1-1-8). 5월 28일에서 29일 2일간 SWC 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 50mL로 제한한 경우 줄기 물관수액흐름속도(SF) 신호가 외부 광량 신호 보다 늦어지는 time lag가 나타났고 배지 함수율(%)은 낮 동안 45~50% 수준을 유지하여 낮은 경향을 보였다.

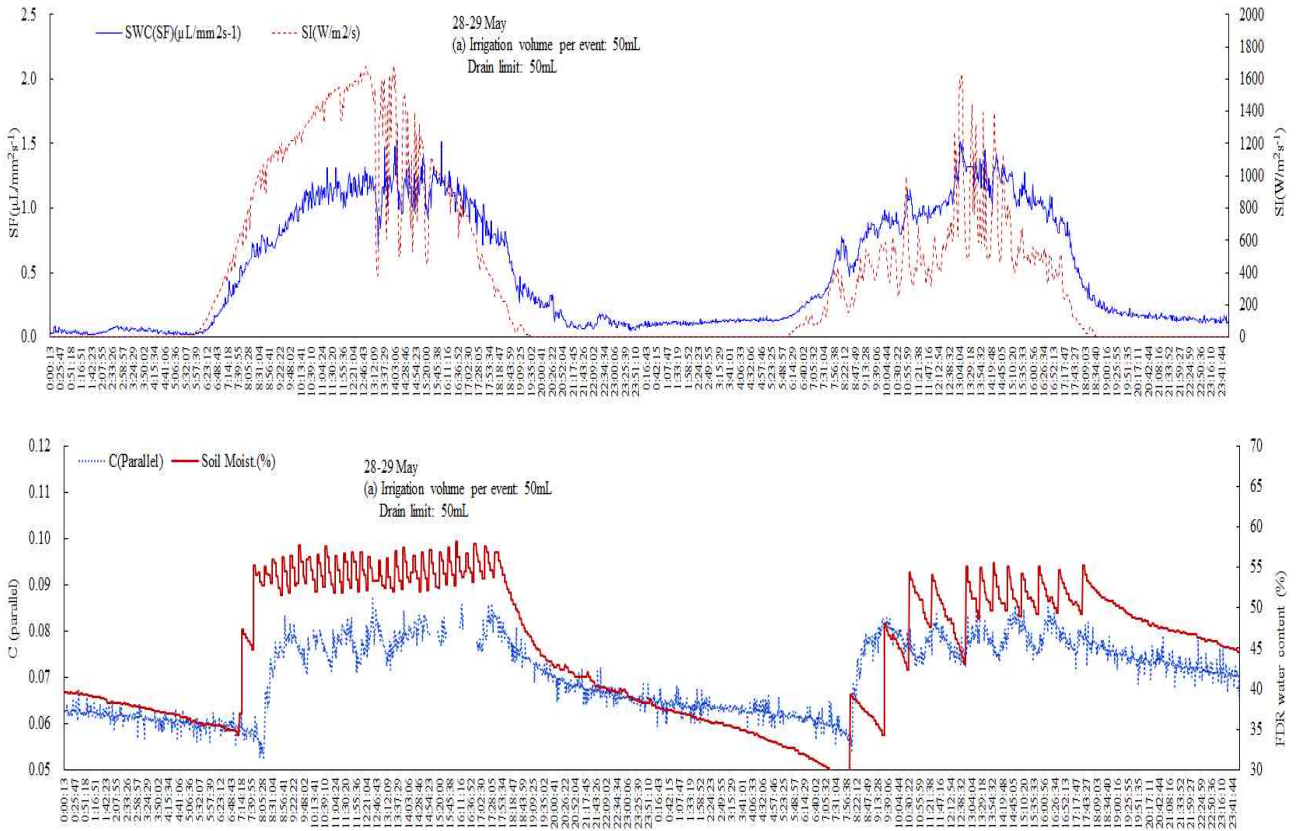


그림 1-1-8. 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 50mL로 제한한 경우 줄기 물관수액흐름속도 변화(위) 및 배지 정전용량(C(parallel))과 FDR 함수율(%) 변화(아래)

- 개발 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 50과 100mL로 제한한 경우 줄기 물관수액흐름속도(SF) 변화, 배지 정전용량(C(parallel)) 및 FDR 함수율(%) 변화

SWC 센서로 측정된 정전용량 변화와 FDR 센서로 측정된 함수율 변화가 일치되는 결과를 보였다(그림 1-1-9). 5월 31일에 SWC 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 50과 100mL로 제한한 경우도 줄기 물관수액흐름속도(SF) 신호가 외부 광량 신호 보다 늦어지는 time lag가 나타났고 배지 함수율(%)은 낮 동안 50% 수준을 유지하였다.

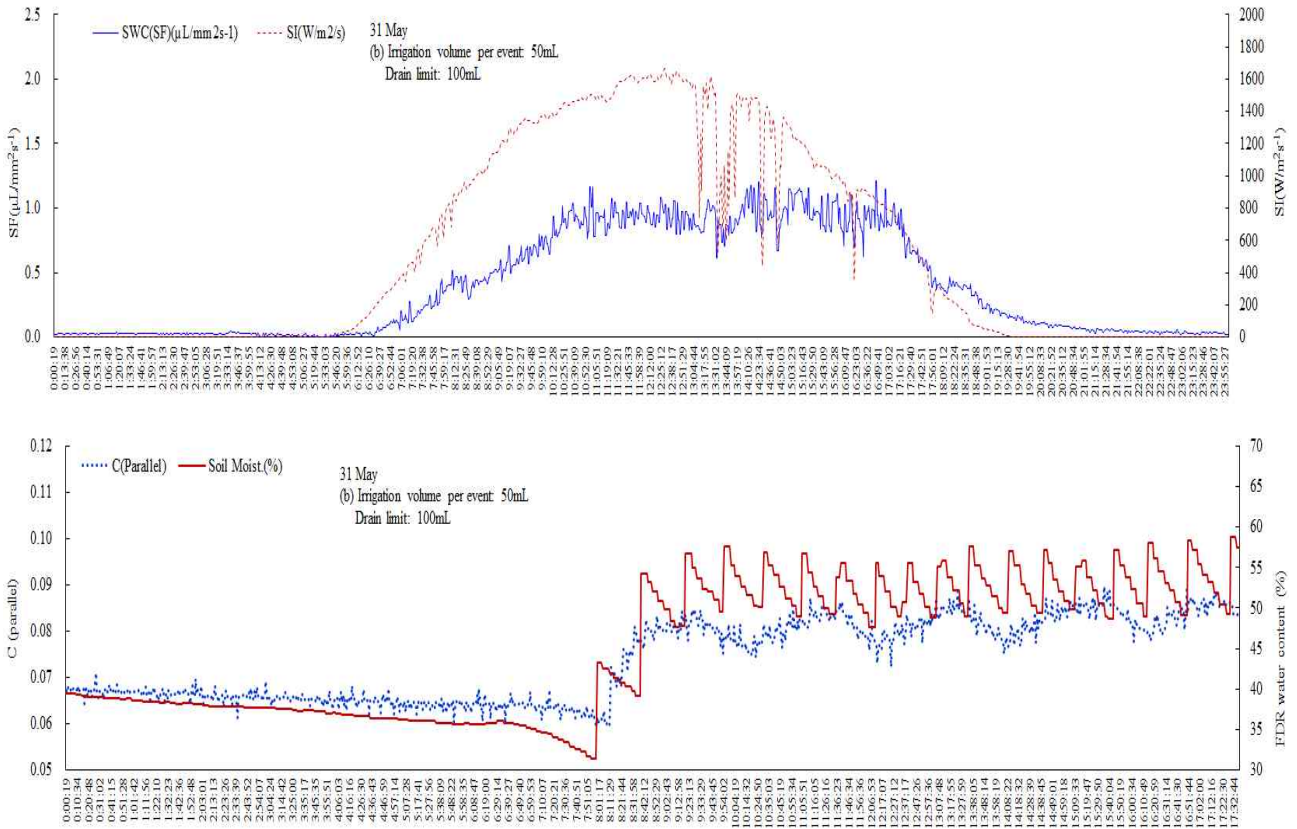


그림 1-1-9. 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 50과 100mL로 제한한 경우 줄기 물관수액흐름속도 변화(위) 및 배지 정전용량(C(parallel))과 FDR 함수율(%) 변화(아래)

- 개발 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 75와 100mL로 제한한 경우 줄기 물관수액흐름속도(SF) 변화, 배지 정전용량(C(parallel)) 및 FDR 함수율(%) 변화

SWC 센서로 측정된 정전용량 변화와 FDR 센서로 측정된 함수율 변화가 일치되는 결과를 보였다(그림 1-1-10). 6월 3일에 SWC 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 75와 100mL로 제한한 경우도 줄기 물관수액흐름속도(SF) 신호가 외부 광량 신호 보다 늦어지는 time lag가 나타났고 배지 함수율(%)은 낮 동안 55% 수준을 유지하였다.



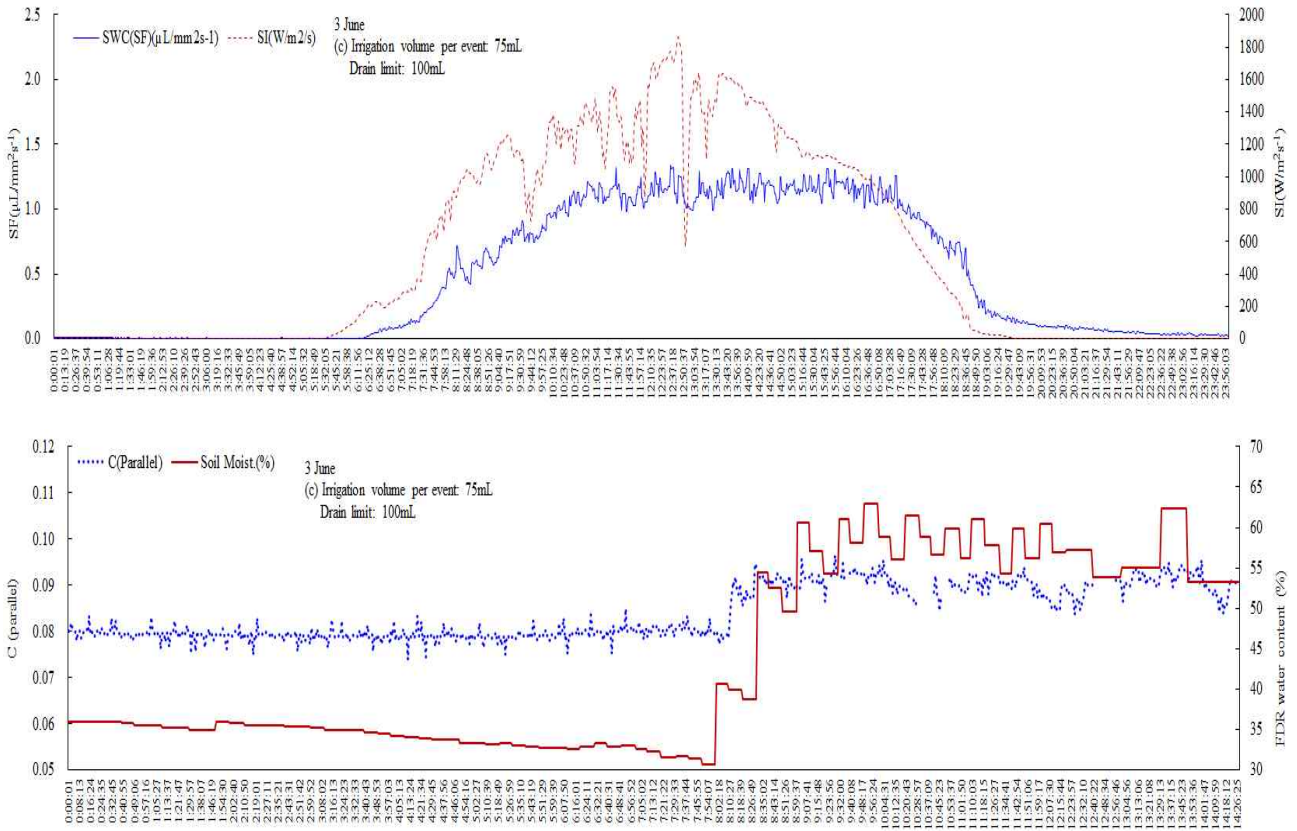


그림 1-1-10. 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 75와 100mL로 제한한 경우 줄기 물관수액흐름속도 변화(위) 및 배지 정전용량(C(parallel))과 FDR 함수율(%) 변화(아래)

○ 개발 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 100mL로 제한한 경우 줄기 물관수액흐름속도(SF) 변화, 배지 정전용량(C(parallel)) 및 FDR 함수율(%) 변화

SWC 센서로 측정된 정전용량 변화와 FDR 센서로 측정된 함수율 변화가 일치되는 결과를 보였다(그림 1-1-11). SWC 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 100mL로 제한한 경우(6월 9일)는 줄기 물관수액흐름속도(SF) 신호와 외부 광량 신호 간 time lag가 없었으며 배지 함수율(%)은 낮 동안 55~60% 수준을 유지하였다.

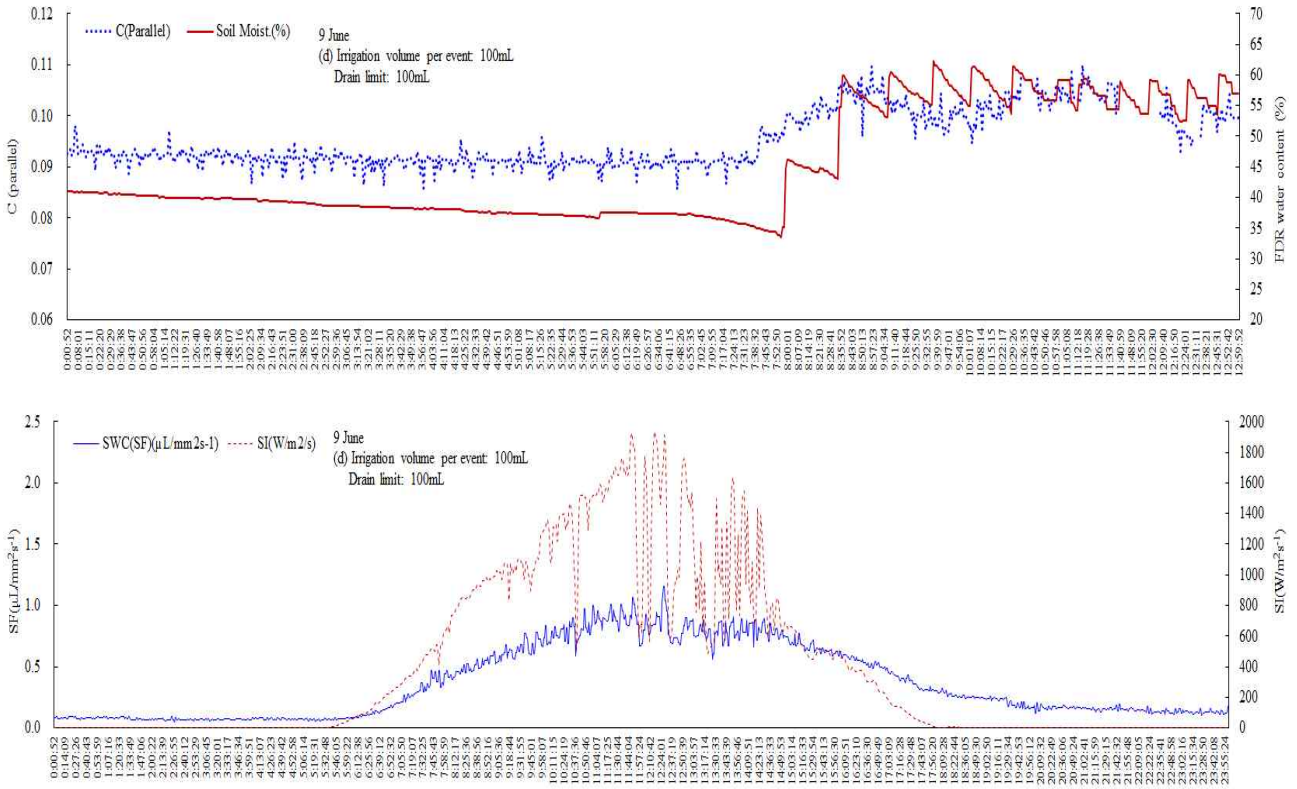


그림 1-1-11. 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 100mL로 제한한 경우 줄기 물관수액흐름속도 변화(위) 및 배지 정전용량(C(parallel))과 FDR 함수율(%) 변화(아래)

○ 누적일사량이 동일한 날 개발 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 식물체당 1회 급액량에 따른 줄기 물관수액흐름과 실시간 광량 변화 관계

누적일사량이 동일한 날 인 6월 1일과 6일을 비교하였을 때 SWC 제어구에서 식물체당 1회 급액량을 50mL로 제한한 6월 1일의 경우 SWC 제어구에서 줄기 물관수액흐름속도(SF) 신호가 외부 광량 신호 보다 늦어지는 time lag가 나타났다. 하지만 정상적으로 100mL를 공급한 SF 제어구의 경우 time lag를 보이지 않았고 ISR 제어의 경우 광량 신호와 일치가 되지 않는 것이 관찰되었다. SWC 제어구에서 식물체당 1회 급액량을 75mL로 제한한 6월 6일의 경우 SWC 제어구에서 time lag가 완화되는 모습을 보였다(그림 1-1-12).

줄기 물관수액흐름 속도는 6월 1일과 6일 모두 ISR 처리구에서 가장 높고 로드셀로 측정된 수분흡수량도 이와 같아(표 3) 줄기 물관수액흐름속도와 로드셀로 측정된 수분흡수량이 비례적인 것을 알 수 있다. 또한 동일한 누적일사량을 가진 두 날 중 6월 6일에 수분흡수량이 적었던 이유는 누적일사량은 같지만 6월 6일은 실시간 도달한 광량의 변화폭이 6월 1일 보다 컸던 것과 관련이 있다(그림 1-1-12). 하루 동안 계속 맑은 날과 비교하여 맑고 흐름이 반복되는 날의 경우 식물이 그 변화에 반응하여 수분흡수량이 감소되었다. 이러한 광량 신호 변화를 식물이 감지하고 물관수액흐름속도에 영향을 주는 것으로 보인다.

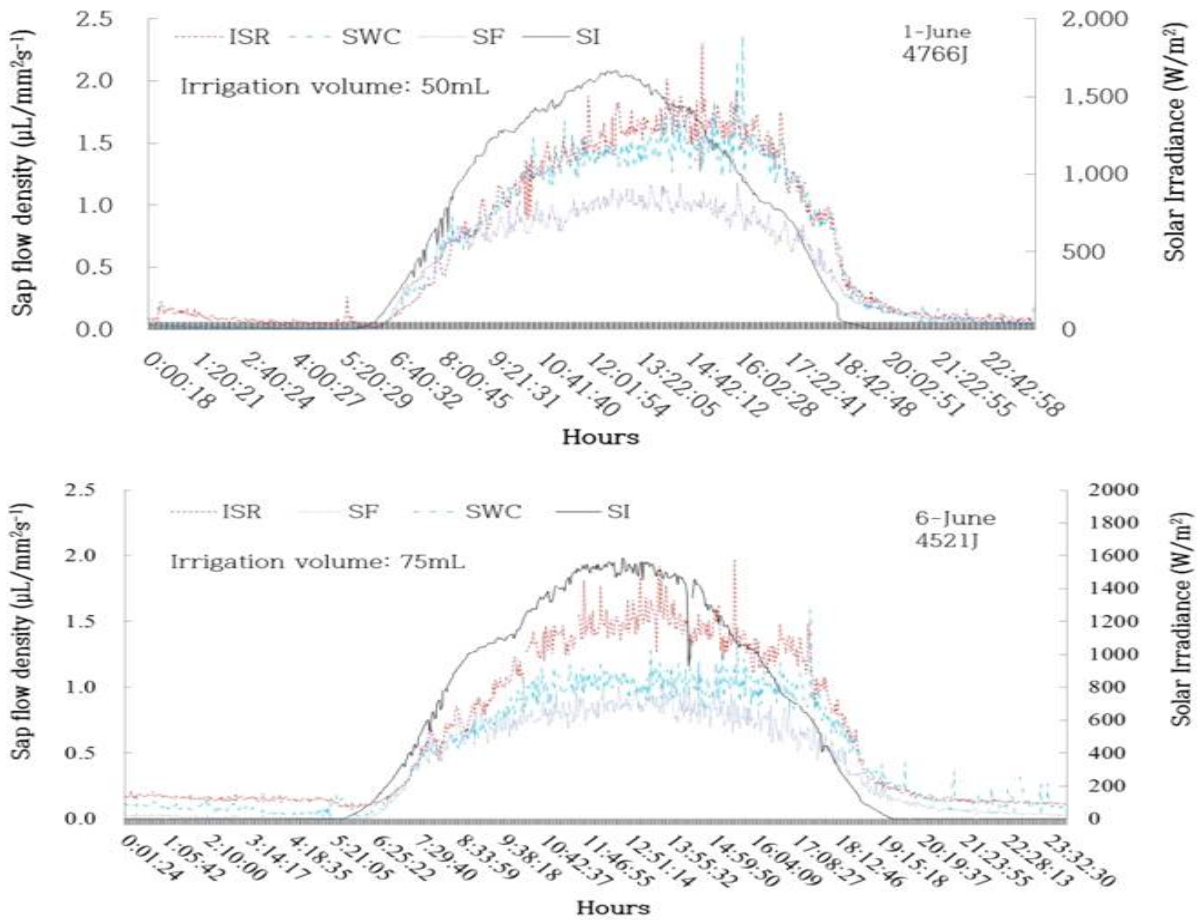


그림 1-1-12. 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 50과 75mL로 제한한 경우 줄기 물관수액흐름속도 변화 비교

표 3. 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 식물체당 1회 급액량과 배액량을 각각 50과 75mL로 제한한 경우 줄기 물관수액흐름속도 변화 비교

	Treatment	Irr.(L/plant)	Drain(%)	Water uptake (L/plant/day)
1 <sup>st</sup> June	SWC	2.07	3.0	1.72
	ISR	2.30	5.1	2.28
	SF	2.30	9.9	2.16
6 <sup>th</sup> June	SWC	2.20	13.6	1.55
	ISR	2.40	19.2	1.91
	SF	2.00	14.2	1.60

○ 배액의 pH, 전기전도도(EC) 변화

정식 후 28일부터 82일까지 배액의 pH와 EC를 측정된 결과 pH는 SWC 제어구의 경우 6.4에서 8.4의 범위를 보였고 평균값은 7.57이고 SF 제어구의 경우 6.2에서 8.6 범위를 보였고 평균값은 7.4이고 ISR 제어구의 경우 6.4에서 8.4범위를 보였고 평균값은 7.55였다(그림 1-1-13 A). 전기전도도(EC)는 SWC 제어구의 경우 2.28에서 6.81dS·m<sup>-1</sup> 범위를 보였고 SF 제어구의 경우 2.58에서 6.64dS·m<sup>-1</sup> 범위를 보였고 ISR 제어구의 경우 2.14에서 6.90dS·m<sup>-1</sup> 범위를 보여(그림 1-1-13 B) 처리에 따른 pH와 EC 수준은 유의차가 없는 것으로 나타났다.

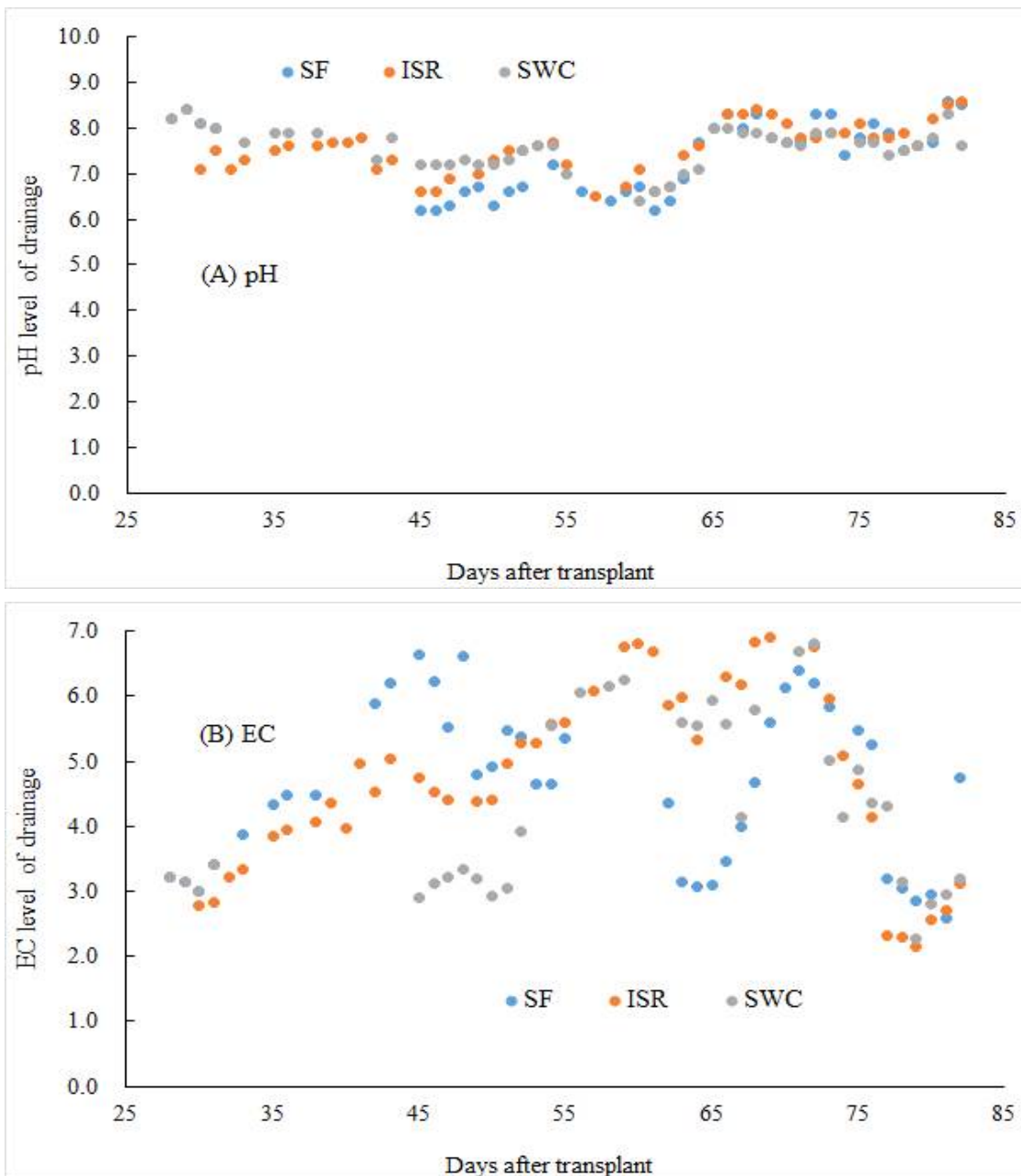


그림 1-1-13. 정식 후 28일에서 82일까지 급액제어방식에 따른 배액의 pH 및 EC

○ 급액제어방식에 따른 배지 함수율

정식 후 46일부터 75일까지 배지 함수율을 시간대별 평균으로 나타낸 것으로 이 재배기간 동안 SWC 제어구의 경우 배지 함수율이 31.10에서 49.4% 범위로, SF 제어구의 경우 배지 함수율이 38.20에서 52.34% 범위로, ISR 제어구의 경우 39.09에서 57.87% 범위로 유지되었다(그림 1-1-14).

해 뜬 후 바로 급액이 1회 되도록 한 ISR 제어구에서 배지수분이 오전 중 빠르게 포화 되는 것을 알 수 있다. 또한 급액 개시 시점부터 첫 배액이 발생할 때까지 배지수분을 포화시키는 방식인 SWC 제어구도 배지수분이 빠르게 포화 되는 것을 알 수 있다.

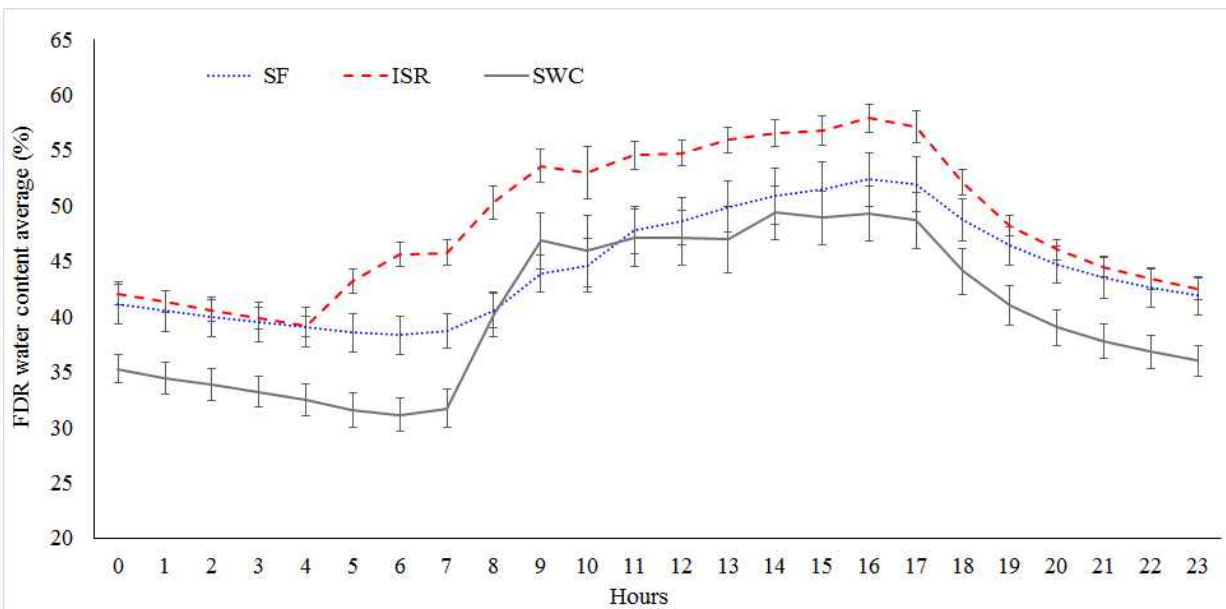


그림 1-1-14. 정식 후 46일에서 75일까지 급액제어방식에 따른 시간대별 평균 배지 함수율

○ 급액제어방식에 따른 토마토 생육

정식 후 66일(5월30일)에는 SWC와 SF 제어구에서 엽장이 ISR 제어구보다 유의적으로 높았고 줄기 굵기는 SF 제어구에서 두 처리구 보다 가장 굵은 것으로 나타났고 ISR 처리구보다 19.88% 굵은 것으로 나타났고 과실수와 착과속도는 처리별 차이가 없었다(표 4). 정식 후 83일(6월16일)에 측정된 토마토 엽생체중은 SWC 처리구에서 ISR 제어구보다 15.72% 높았으며 줄기 생체중은 24.61% 높았다(표 5).

표 4. 정식 후 66일(5월30일)에 측정된 급액제어방식에 따른 토마토 생육

Treatment	Plant height (cm)	Leaf number (ea/plant)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Stem diam. (mm)	Fruit no. (ea)	Fruiting speed (ea)
SF	140a	23.25a	55.18a	50.45a	19.24a	4.35a	5.00a
ISR	145a	22.75a	46.43b	45.85a	16.05b	4.40a	5.00a
SWC	149a	22.00a	51.48a	53.43a	14.73b	4.38a	5.00a

표 5. 정식 후 83일(6월16일)에 측정된 급액제어방식에 따른 토마토 생육

Treatment	Leaf fresh weight (g/plant)	Stem fresh weight (g/plant)
SF	631b	265b
ISR	776ab	256b
SWC	898a	319a

○ 급액제어방식에 따른 수분이용효율

정식 후 28일부터 82일까지 총급액량, 배액량, 지상부 생체중, 과실 생체중, 수분이용효율 및 과실 200g 생산에 소요된 물량을 비교한 결과, 총급액량은 SWC 제어구에서 ISR 제어구보다 약 9.7L 적게 공급되었고 SF 제어구는 ISR 제어구보다 약 5.0L 적게 공급되었다. 지상부 생체중과 과실생체중은 SWC 제어구에서 높아 수분이용효율(WUE)이 SWC 제어구에서 가장 높았다. 수분이용효율(WUE)은 2017년 재배에서는 SF 제어구에서 ISR 보다 높았다. 과실 200g을 생산하는데 소요된 물량은 SWC 제어구에서 ISR 제어구에 비해 1.3L 적게 소요된 것으로 나타났다(표 6).

표 6. 정식 후 28일부터 82일까지 급액제어방식에 따른 총급액량, 배액량, 지상부 생체중, 과실 생체중, 수분이용효율 및 과실 200g 생산에 소요된 물량

Treat- ment	Irr. (L/plant) (A)	Drain (L/plant) (B)	Retained (L/plant) (A-B)	Leaf fwt. (kg/plant)	Stem fwt. (kg/plant)	Fruit fwt. (kg/plant)	WUE (g/L/plant)		Irr. (L/200g fruit)
							2018	2017	
SF	74.30	13.43	60.87	0.631	0.265	2.64	58	63	5.63
ISR	79.22	13.66	65.56	0.776	0.256	2.44	53	59	6.50
SWC	69.53	14.15	55.38	0.898	0.319	2.68	70	-	5.18

○ 급액제어방식에 따른 토마토 상품과실 과실무게, 생산량 및 당도

토마토 식물체 당 총생산량은 SWC와 SF 제어구에서 각각 2.639kg, 2.682kg로 ISR 제어구 (2.438kg)보다 다소 높은 것으로 나타나 양액 공급량이 적었던 두 처리구에서 과실 생산량이 높았던 것은 수분이용효율이 높았던 결과(표 6)와 관련이 있다는 것을 알 수 있다(표 7). 처리 별로 대표 4개의 식물체를 선정하여 과실 생체중, 과실수, 당도를 측정하였을 때 1화방에서 4 화방까지 과실 생체중이나 과실수에는 통계적 유의차가 없었으나 과실 당도는 2화방부터 SWC 처리구에서 다른 두 처리구보다 높은 것을 알 수 있다(표 8). 과실 당도는 2화방 과실에서 SWC 처리구에서 ISR 제어구보다 0.5brix 높았고 3화방에서는 0.8brix 높았다(표 8).

표 7. 급액제어방식에 따른 과실 생산량

Treatment	Total marketable fruit weight (kg/plant)	Total marketable fruit number (ea/plant)	Fruit weight (g·fruit <sup>-1</sup> )
SF	2.639	15	177
ISR	2.438	14	178
SWC	2.682	15	179

표 8. 급액제어방식에 따른 화방별 상품과실 생산량 및 당도

Treatment	Cluster	Marketable fruit weight (g·fruit <sup>-1</sup> )	Marketable fruit number (ea·plant <sup>-1</sup> )	Soluble solid content (Brix°)
SF	1	180a	3.25a	5.00b
ISR		159a	3.50a	5.44a
SWC		181a	3.00a	5.46a
SF	2	158a	3.75a	5.28b
ISR		175a	4.00a	5.47b
SWC		170a	4.00a	5.97a
SF	3	163a	4.00a	5.56b
ISR		179a	3.25a	5.50b
SWC		193a	3.00a	6.28a
SF	4	197a	2.75a	-
ISR		239a	2.50a	-
SWC		235a	2.25a	-

○ 급액제어방식에 따른 실시간 광량과 물관수액흐름속도 상관관계

정식 후 58일에서 82일까지 급액제어방식에 따른 실시간 광량과 물관수액흐름속도 상관관계 (r<sup>2</sup>)는 SWC와 SF 제어구에서 각각 0.7525와 0.7496으로 ISR 제어구(r<sup>2</sup>= 0.4449)보다 높은 것으로 나타났다(그림 1-1-15). SWC와 SF 제어구에서 상관관계가 높게 나타난 것은(그림 1-1-15 B,C) 물관수액흐름 시그널이 광량 변화 시그널과 유사하였다는 연구결과(Back et al., 2018)를 뒷받침한다. 즉, SWC와 SF 제어구에서 재배된 식물은 실시간 광량변화에 물관수액흐

름 신호가 일치되는 adaptive performance를 보이는 것으로 판단된다. 이것이 상품과실 생산량이 SWC와 SF 제어구에서 높은 것(표 6)과 관련이 있는 것으로 보인다. ISR 제어구의 경우 상관관계가 다른 두 처리구 보다 낮은데(그림 1-1-15 A) 이는 ISR 제어구에서 과실 생산량이 다른 두 처리구에 비해 다소 낮은 결과와 관계가 있는 것으로 보인다.

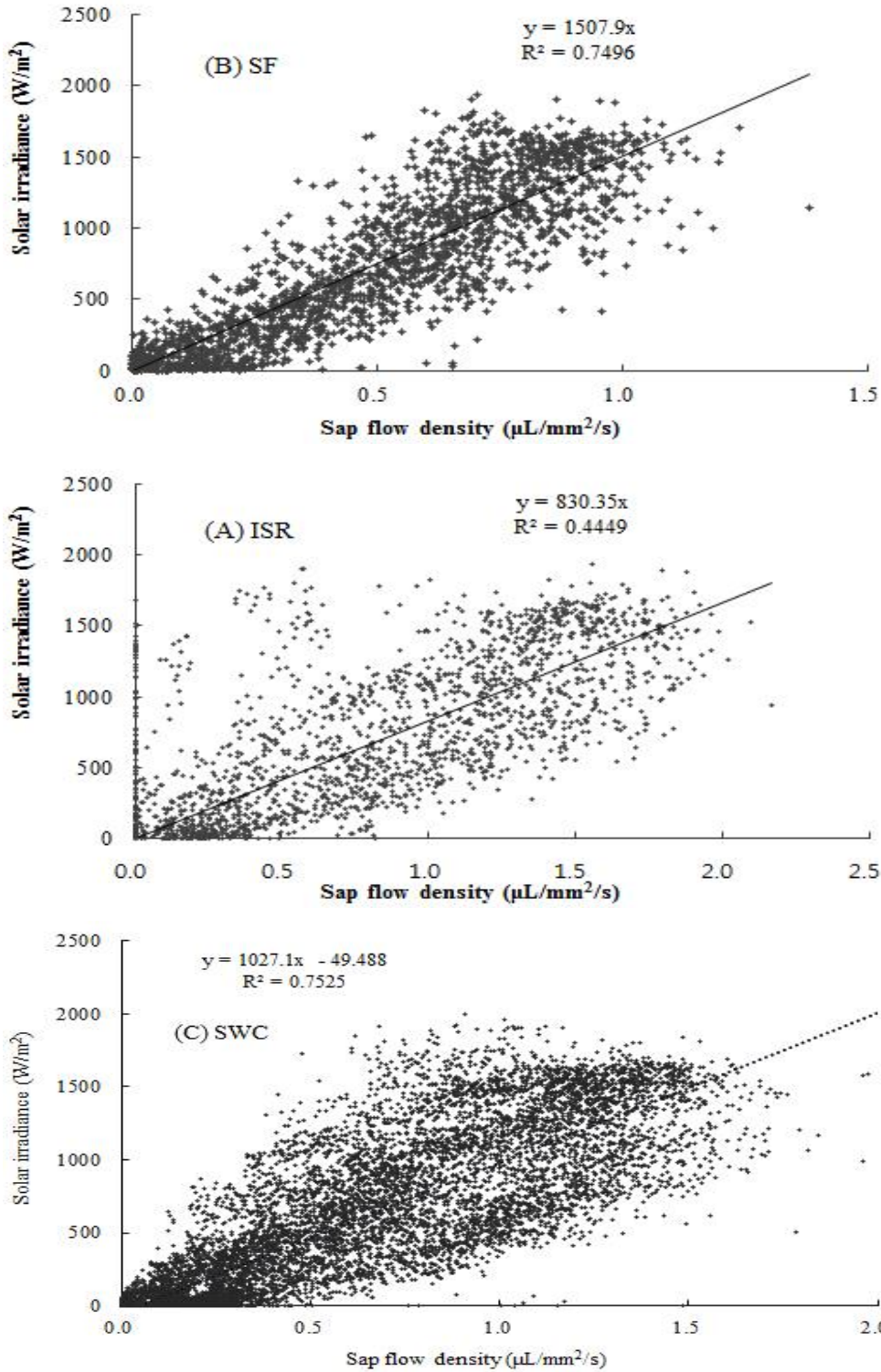


그림 1-1-15. 정식 후 58일에서 82일까지 급액제어방식에 따른 실시간 광량과 물관수액흐름속도 상관관계



○ 금액제어방식에 따른 비료 소비량 및 소비액

봄~여름 재배 기간 동안 (4월 22일부터 6월 15일 까지) 비료 소비량과 소비액을 계산하였을 때 ISR 제어구에 비해 SWC 제어구에 의한 자동금액제어 시 식물체당 17원정도의 비료 소비량을 줄일 수 있고 이로 인한 배액량 감소로 환경문제를 줄일 수 있을 것으로 보인다.

표 9. 정식 후 82일까지 금액제어방식에 따른 비료 소비량 및 소비액

Fertilizers(origin)	Fertilizer cost (Won/kg)	Amounts of fertilizer kg/1000L	Fertilizer cost per plant (won)	
			ISR	SWC
Calcium nitrate(China)	1000	0.354	28.04388	24.61362
Potassium nitrate(Belgium)	1800	0.404	57.60878	50.56222
Magnesium sulfate(China)	1200	0.246	23.38574	20.52526
Ammonium phosphate monobasic(China)	2500	0.076	15.05180	13.21070
Fe-EDTA(Holland)	9000	0.015	10.90859	9.57428
Boric acid(USA)	23000	0.001	2.07715	1.82308
Manganese sulfate(Korea)	32000	0.001	2.05338	1.80222
Zinc sulfate(Korea)	22000	0.000	0.15686	0.13767
Copper sulfate(Korea)	32000	0.000	0.10140	0.08900
Sodium molibdate (Korea)	54000	0.000	0.04278	0.03755
Total(Won)			139	122

<가을~겨울 재배 작기>

○ 실험 모습

가을~겨울 재배기의 경우 2018년 8월 24일부터 11월 20일까지 토마토(*Solanum lycopersicum* 'TY Limousine') 모종을 누적일사량 제어구(ISR)는 40주, 물관수액흐름 제어구(SF) 40주, 배지함수량 제어구(SWC) 40주 모종을 암면 슬라브 당 5주씩 정식하여 완전임의배치방식으로 재배하였다(그림 1-1-16). SF 제어구의 경우 식물 16개주에 SF 센서를 설치하여 제어 및 모니터링하였고 ISR 제어구도 식물 16주에 SF 센서를 설치하여 실시간 물관수액흐름속도를 모니터링하였다.



그림 1-1-16. 급액제어방식(ISR, SF, SWC)으로 재배된 토마토 생육(좌) 및 과실비대기 설치 모습(우)

○ 재배기간 동안 온실 환경 변화

정식 후 부터 79일(11월 11일)까지 온실 내부의 평균온도는 20℃이며 일평균 광량(SI: solar irradiance)은 최저 10.8에서 최고 280w/m<sup>2</sup>이었으며 일평균 상대습도(Humidity)는 78에서 95% 수준으로 유지되었다. 일평균 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도는 459ppm 수준으로 유지되었다(그림 1-1-17).

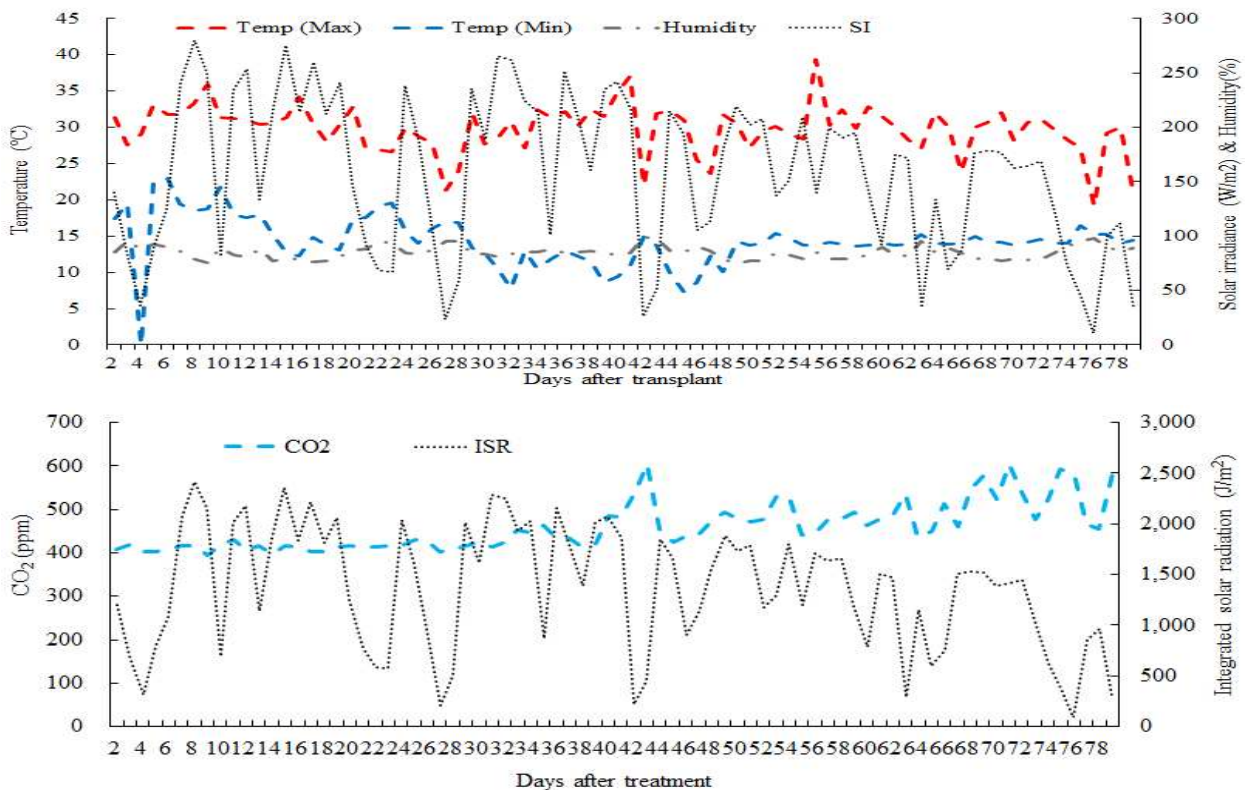


그림 1-1-17. 재배기간 동안 온실 내 온도, 광량 및 습도 변화

○ 배액의 pH, 전기전도도(EC) 변화

정식 후 3일부터 78일까지 배액의 pH와 EC를 측정된 결과 pH는 SWC 제어구의 경우 5.1에서 8.2의 범위를 보였고 SF 제어구의 경우 5.3에서 8.2 범위를 보였고 ISR 제어구의 경우 5.2에서 8.3 범위를 보였다. 전기전도도(EC)는 SWC 제어구의 경우 0.92에서 5.2dS·m<sup>-1</sup> 범위를 보였고 SF 제어구의 경우 0.99에서 7.55dS·m<sup>-1</sup> 범위를 보였고 ISR 제어구의 경우 1.02에서 4.92dS·m<sup>-1</sup> 범위를 보였다. 전 재배기간 동안 처리에 따른 pH 수준은 크게 다르지 않았으나 EC는 SF 제어구에서 재배 후반기에 다른 두 처리구 보다 약 2.0 dS·m<sup>-1</sup> 높아지는 것으로 나타났다(그림 1-1-18).

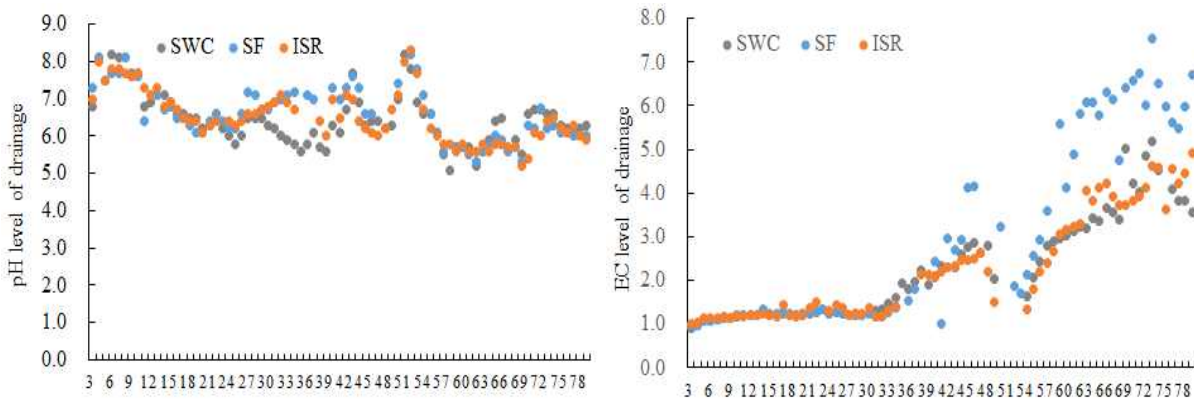


그림 1-1-18. 정식 후 28일에서 82일까지 급액제어방식에 따른 배액의 pH 및 EC

○ 급액제어방식에 따른 평균 급액량, 배액율 및 수분흡수량

정식 후 3일에서 79일까지 평균 급액량, 배액율 및 수분흡수량을 비교하였을 때 일일 평균 급액량이 SWC 제어구는 0.699L, 배액율은 32.15%, 수분흡수량은 0.468L였다. 평균 급액량이 SF 처리구는 0.800L로 다른 두 처리구 보다 유의적으로 높았고, 배액율은 14.22%로 가장 낮아 수분흡수량은 0.686L로 다른 두 처리구 보다 높았다(표 2.1). 일일 평균 급액량이 ISR 제어구는 두 처리구 보다 낮았다.

표 2.1. 정식 후 3일(8월27일)에서 79일(11월11일)까지 급액제어방식에 따른 총급액량, 평균 배액율 및 수분흡수량

Treatment	Daily irrigation volume (L/plant/day)	Drainage rate (%)	Water uptake (L/plant/day)
SF	0.800a	14.22b	0.686a
ISR	0.670b	30.87a	0.459b
SWC	0.699ab	32.15a	0.468b

○ 급액제어방식에 따른 줄기 및 과병 물관수액흐름속도 변화

정식 48일(10월 11일)부터 79일(11월 11일)까지 SF와 ISR 처리구에 줄기 및 과병 물관수액 흐름속도를 관찰하였을 때 일일 급액량과 흡수량이 많았던 SF 처리구에서 급액량과 흡수량이 낮았던 ISR 처리구 보다 물관수액흐름 속도가 높은 것을 알 수 있다(그림 1-1-19 A,B, 그림 1-1-21). 재배 기간 중 해 뜬 후 바로 1회 급액을 하였던 ISR 제어구의 경우 물관수액흐름 신호가 오전 중에 높아지는 것을 볼 수 있다(그림 1-1-19 B). 과병 물관수액흐름속도는 SF 제어구의 경우 낮 시간대에는 줄기 물관수액흐름속도 보다 낮았지만 줄기 물관수액흐름 신호가 없는 야간 시간대에도 신호가 감지되었으며(그림 1-1-20 A), ISR 제어구의 경우 낮 시간대에는 줄기 물관수액흐름속도와 유사하였고 물관수액흐름 신호가 없는 야간 시간대에도 신호가 감지되었다(그림 1-1-20 B).

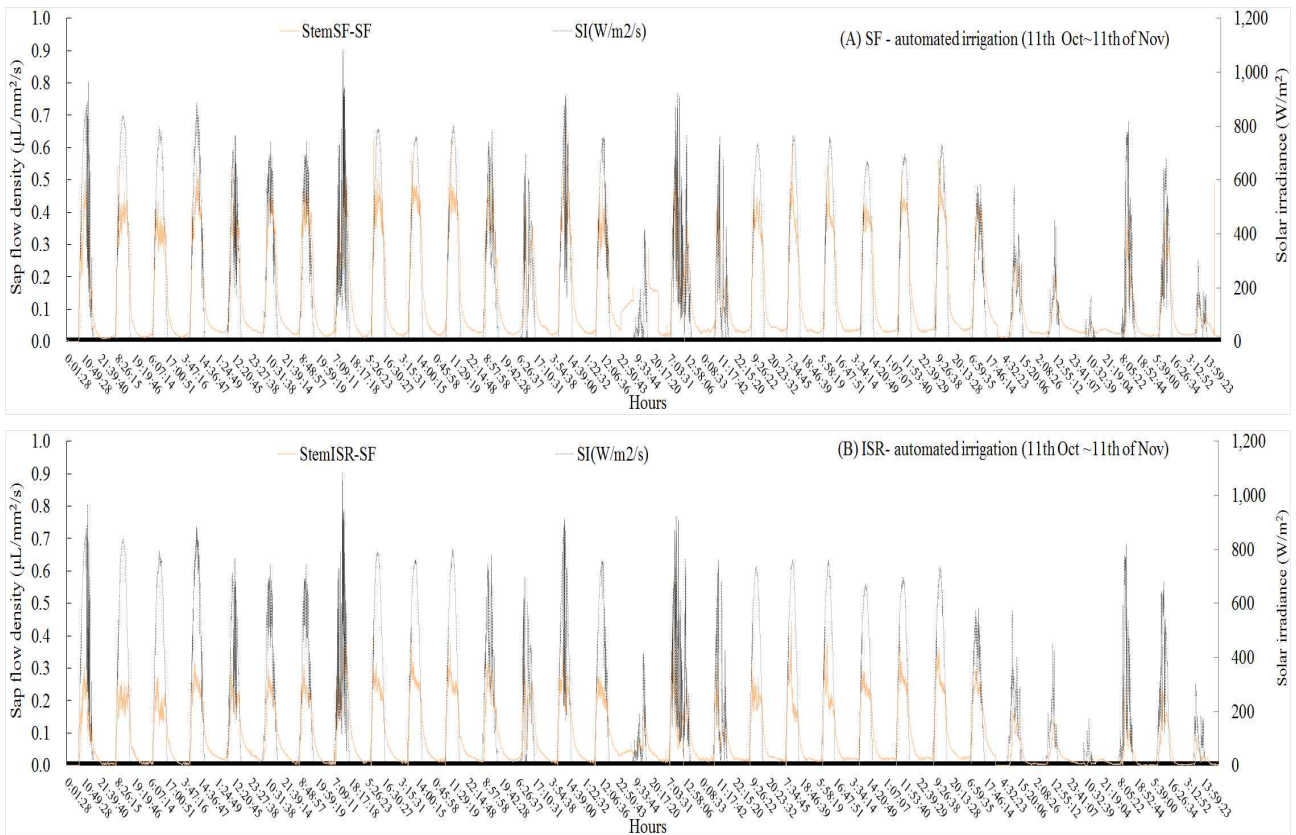


그림 1-1-19. 급액제어방식에 따른 토마토 줄기 물관수액흐름속도

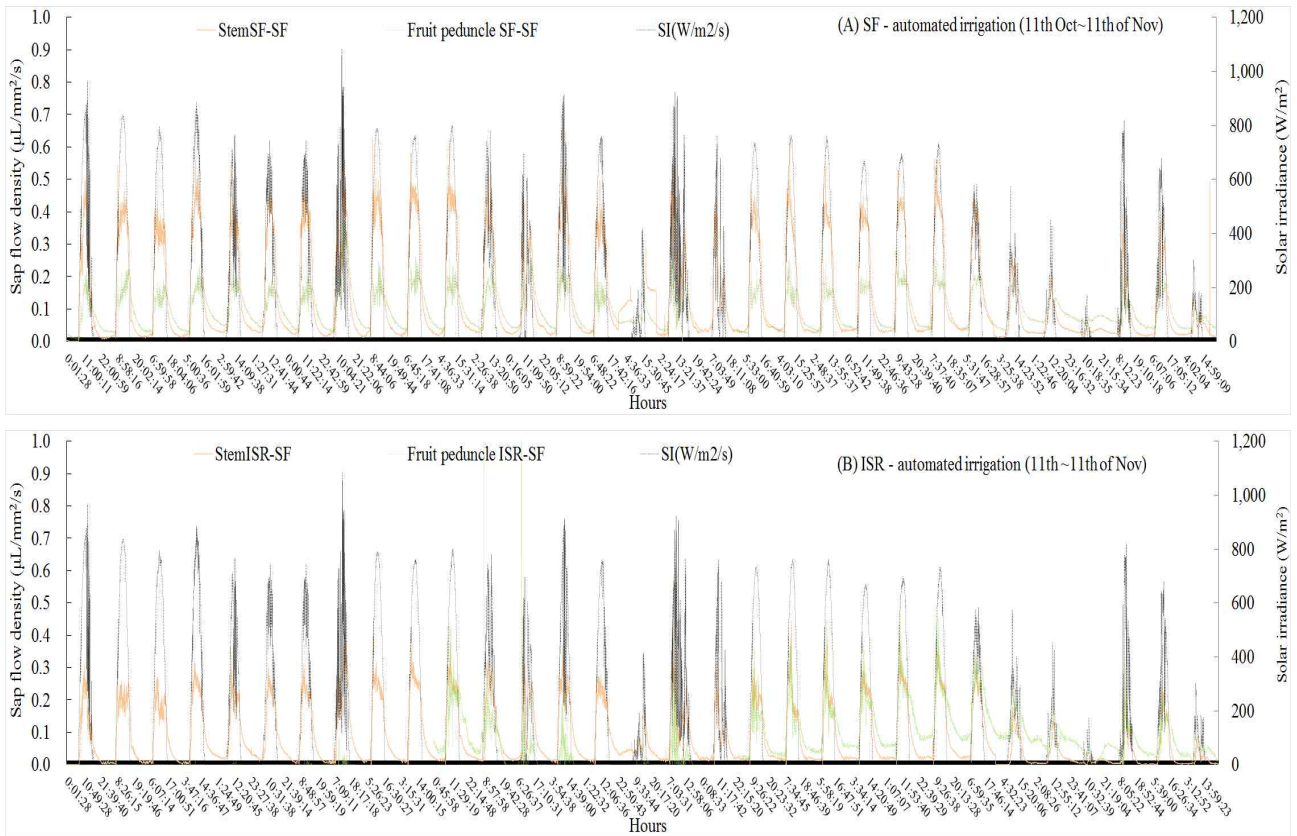


그림 1-1-20. 급액제어방식에 따른 토마토 줄기 및 과병 물관수액흐름속도

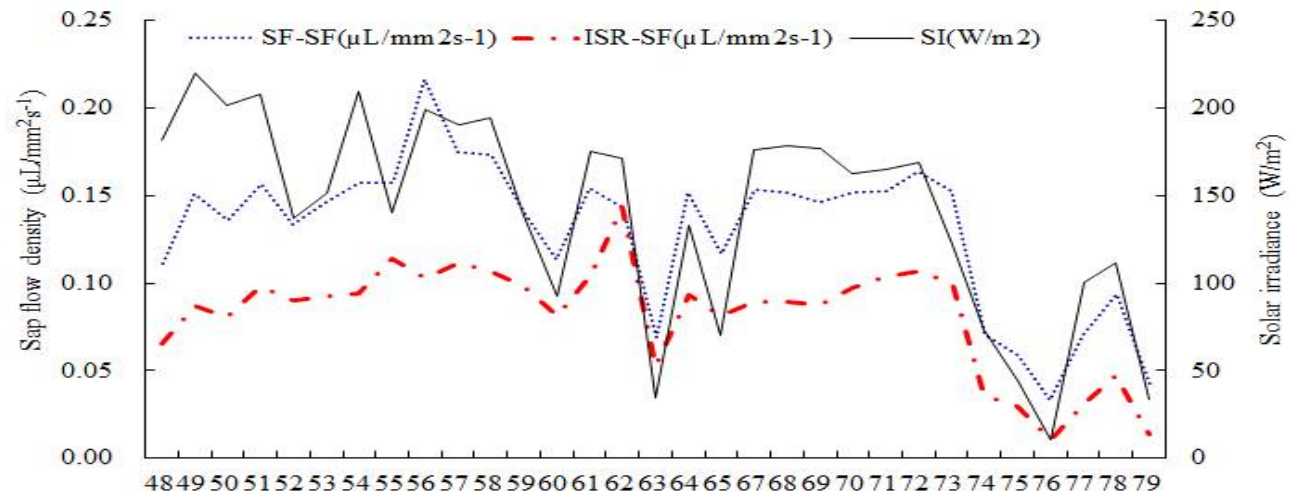


그림 1-1-21. 정식 후 48일(10월 11일)에서 79일(11월 11일)까지 일별 급액제어방식에 따른 광량과 물관수액흐름속도 변화

○ 급액제어방식에 따른 급액개시 및 종료시간, 관수횟수 (표 2.2)

Date	Treat	Irrigation start time	Irrigation stop time	Drain Initiation	IrrFq	Drain rate (%)	Target setting			
							Irrigation volume per event (mL)	FC threshold (%)	Drain (mL)	Time interval (min.)
12-Oct	SWC	8:31	13:54	9:21	10	46.7	75	0.99	100	10
	ISR	8:32	14:50		9	40				
	SF	7:58	14:43		7	0				
13-Oct	SWC	9:09	14:22	9:33	11	39.4	75	0.99	150	10
	ISR	8:31	14:20		8	35				
	SF	7:58	14:41		11	10.9				
14-Oct	SWC	9:09	14:27	9:33	12	38.9	75	0.99	150	10
	ISR	8:32	14:11		8	22.5				
	SF	7:59	14:15		8	0				
15-Oct	SWC	9:09	14:44	9:33	7	19	75	0.975	100	10
	ISR	8:33	14:40		7	28.6				
	SF	7:58	14:22		9	11.1				
16-Oct	SWC	9:09	15:21	9:33	10	30	75	0.975	100	10
	ISR	8:34	15:15		7	17.1				
	SF	7:59	15:10		9	8.9				
17-Oct	SWC	9:09	14:44	9:33	14	50	75	0.975	100	10
	ISR	8:35	14:21		10	44				
	SF	7:57	14:23		13	36.2				
18-Oct	SWC	9:09	15:09	9:32	20	58.3	75	0.994	200	10
	ISR	8:36	13:58		6	20				
	SF	7:58	14:41		14	50				
19-Oct	SWC	9:08	14:56	9:32	19	57.9	75	0.982	200	10
	ISR	8:37	14:38		10	32				
	SF	7:57	14:14		12	28.3				
20-Oct	SWC	9:09	12:29	9:35	7	38.1	75	0.988	200	10
	ISR	8:38	14:09		9	33.3				
	SF	7:58	14:33		11	16.4				
21-Oct	SWC	9:09	14:58	9:44	13	41	75	0.988	200	10
	ISR	8:38	14:03		9	0				
	SF	7:57	14:19		10	28.9				
22-Oct	SWC	9:08	13:34	9:32	10	53.3	75	0.992	200	10
	ISR	8:39	13:55		6	5				
	SF	7:58	14:16		8	10				
23-Oct	SWC	9:08	12:02	9:34	9	55.6	75	0.995	200	10
	ISR	8:40	14:33		5	24				
	SF	7:57	14:18		6	16.7				
24-Oct	SWC	9:08	14:55	9:31	17	52.9	75	0.995	200	10
	ISR	8:41	14:02		10	30				
	SF	7:58	14:17		8	20				
25-Oct	SWC	9:10	14:48	9:32	10	36.7	75	0.995	100	10
	ISR	8:42	13:48		8	27.5				
	SF	7:58	14:03		9	6.7				
26-Oct	SWC	9:08	13:49	9:31	5	40	75	0.995	100	10
	ISR	8:43	12:43		3	13.3				
	SF	7:57	13:57		4	10				

Date	Treat	Irrigation start time	Irrigation stop time	Drain Initiation	IrrFq	Drain rate (%)	Target setting			
							Irrigation volume per event (mL)	FC threshold (%)	Drain (mL)	Time interval (min.)
27-Oct	SWC	9:08	14:31	9:32	10	40	75	0.995	100	10
	ISR	8:44	13:31		6	40				
	SF	7:57	14:20		7	8.6				
28-Oct	SWC	9:09	14:11	9:23	7	52.4	75	0.995	100	10
	ISR	8:47	13:18		4	25				
	SF	8:45	14:08		6	26.7				
29-Oct	SWC	9:08	14:54	9:32	7	28.6	75	0.993	100	10
	ISR	8:46	13:12		5	20				
	SF	7:56	13:43		6	6.7				
30-Oct	SWC	9:08	14:23	9:33	11	45.5	75	0.992	100	10
	ISR	8:47	13:49		8	32.5				
	SF	7:56	14:01		9	15.6				
31-Oct	SWC	9:08	14:02	9:32	9	44.4	75	0.99	100	10
	ISR	8:48	14:28		8	28.9				
	SF	7:58	14:25		9	8.9				
01-Nov	SWC	10:07	14:50	13:13	12	22.2	75	0.99	100	10
	ISR	8:49	13:46		9	32.5				
	SF	7:56	14:11		9	11.1				
02-Nov	SWC	9:09	15:05	9:51	10	26.7	75	0.99	100	10
	ISR	8:50	14:18		8	22.5				
	SF	7:57	14:02		9	11.1				
03-Nov	SWC	9:09	14:42	9:44	13	41	75	0.99	50	10
	ISR	8:51	14:05		8	20				
	SF	7:57	14:14		10	10				
04-Nov	SWC	9:09	14:50	9:34	10	20	75	0.99	50	10
	ISR	8:51	14:01		8	20				
	SF	7:56	14:11		10	10				
05-Nov	SWC	9:09	14:41	9:35	8	12.5	75	0.99	50	10
	ISR	8:52	13:57		6	10				
	SF	7:59	14:15		8	2.5				
06-Nov	SWC	9:10	14:59	9:33	6	27.8	75	0.99	150	10
	ISR	8:53	14:11		4	20				
	SF	7:57	14:07		6	23.3				
07-Nov	SWC	9:09	14:49	9:33	7	42.9	75	0.99	150	10
	ISR	8:54	12:54		3	40				
	SF	7:57	13:21		5	40				
08-Nov	SWC	9:09	9:31	9:25	3	33.3	75	0.99	70	10
	ISR	8:55	12:55		3	33.3				
	SF	7:57	13:57		4	25				
09-Nov	SWC	9:10	14:34	9:35	10	46.7	75	0.99	150	10
	ISR	8:56	13:21		5	44				
	SF	7:57	14:02		5	12				
10-Nov	SWC	9:09	14:49	9:34	9	33.3	75	0.99	150	10
	ISR	8:57	13:43		5	20				
	SF	7:57	13:55		6	10				
11-Nov	SWC	9:09	14:59	9:33	8	72.2	75	0.99	150	10
	ISR	7:58	13:58		4	20				
	SF	8:58	12:58		3	10				

○ 개발 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 배지 당 배액량을 50~200mL로 제한한 경우 배지 정전용량(C(parallel))과 FDR 함수율(%) 변화

개발 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 배지 당 배액량을 200mL로 제한한 경우(10월18일~24일)배지 정전용량(C(parallel))과 FDR 함수율이 증가되었다(그림 1-1-22 A). 반대로 배지 당 배액량을 50mL로 제한한 경우(11월3일~5일) 급액 종료 후 배지 수분 감소량이 큰 것을 알 수 있다(그림 1-1-22 B).

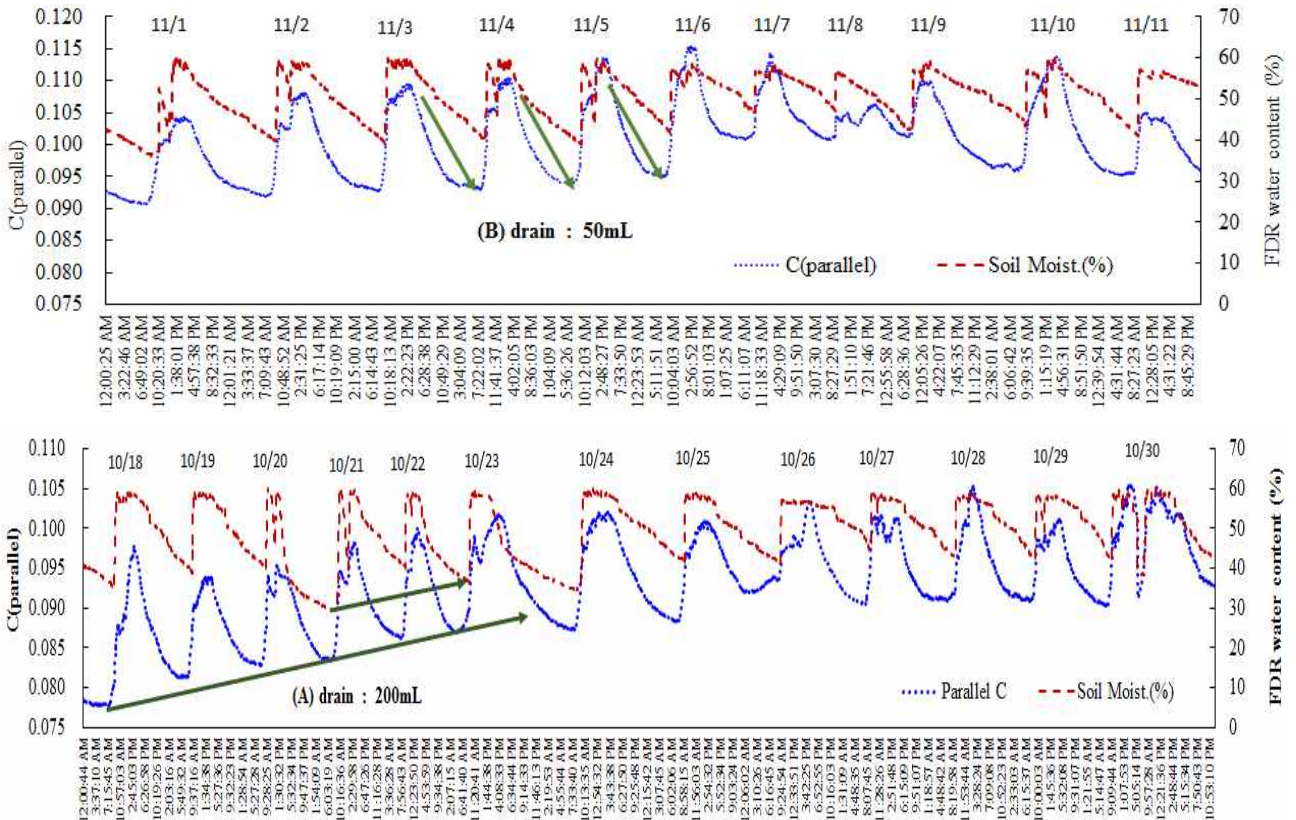


그림 1-1-22. 개발 배지수분측정장치(SWC) 제어구에서 식물체당 배액량을 50~200mL로 제한한 경우 배지 정전용량(C(parallel))과 FDR 함수율(%) 변화

○ 급액제어방식에 따른 배지 함수율

정식 후 40일부터 68일까지 배지 함수율을 시간대별 평균으로 나타낸 것으로 이 재배기간 동안 SWC 제어구의 경우 배지 함수율이 40.7에서 56.9% 범위로, SF 제어구의 경우 배지 함수율이 43.0에서 51.8% 범위로, ISR 제어구의 경우 33.9에서 48.1% 범위로 유지되어 일일 평균 급액량이 두 처리구 보다 낮았던 ISR 처리구에서 근권 함수율도 낮은 것을 알 수 있다(그림 1-1-23).



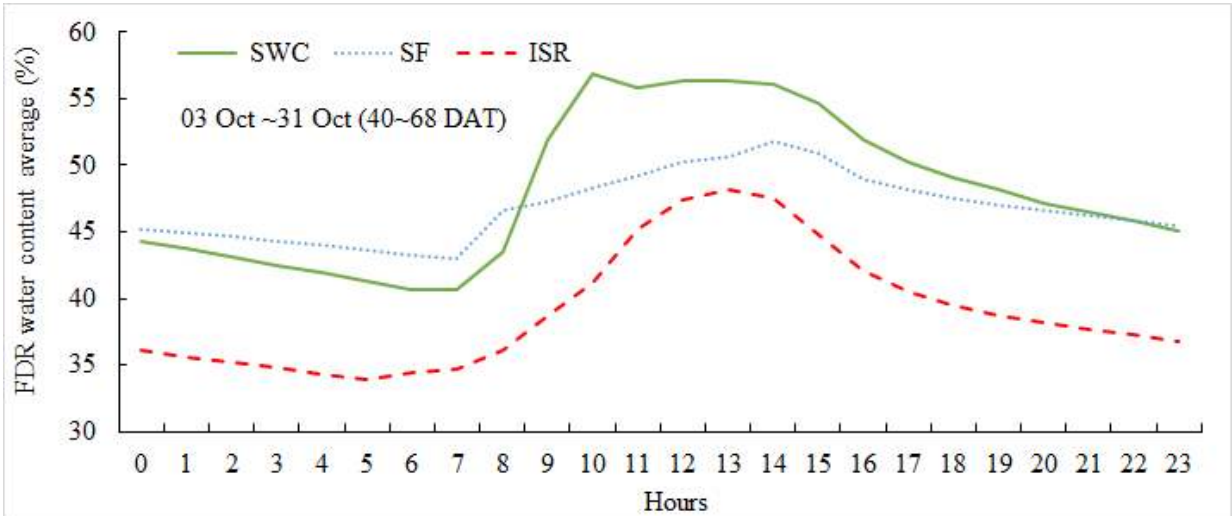


그림 1-1-23. 정식 후 40일에서 68일까지 급액제어방식에 따른 시간대별 평균 배지 함수율

○ 급액제어방식에 따른 토마토 과실비대속도 및 과실생산량

과경의 크기가 동일한(15mm) 과실에 과경측정센서를 부착하여 정식 후 62일부터 79일까지 관찰한 결과 과경비대속도는 SF와 ISR 제어구에서 SWC 제어구 보다 높았고 SF와 ISR 제어구 두 처리 간 유의차는 없는 것으로 나타났다(그림 1-1-24). 식물체 당 상품과실 총수량은 ISR과 SF 제어구에서 1.4kg으로 SWC 처리구보다 높았고 상품과실수와 과실 생체중도 더 높았다. SWC 처리구에서 총수량, 상품과실수, 과실 생체중 모두 가장 낮았다(표 2.3).

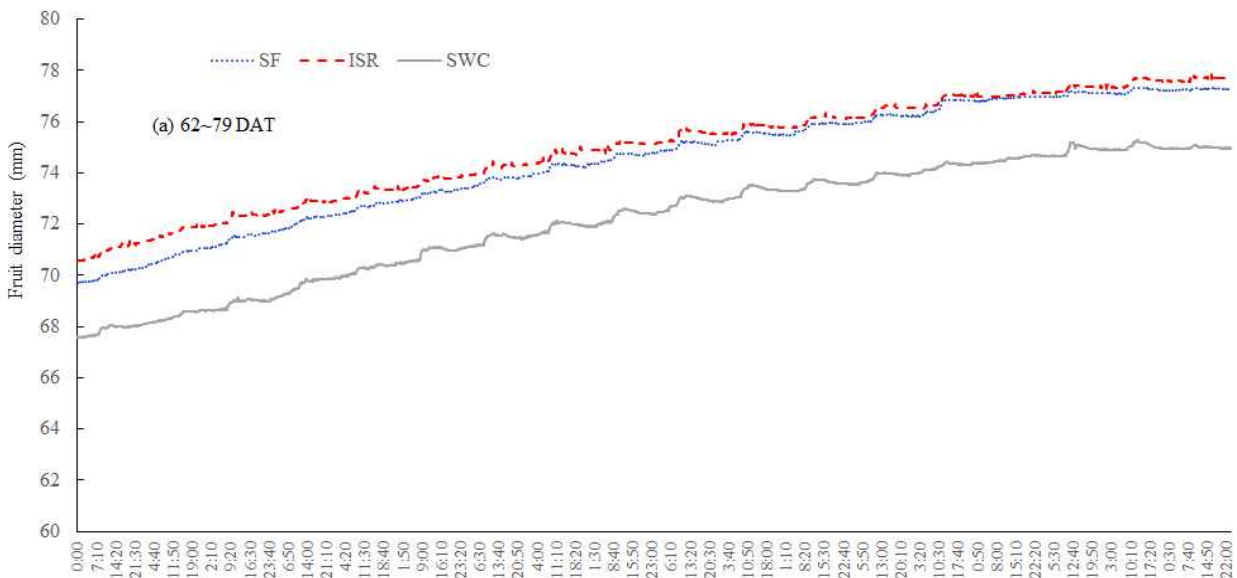


그림 1-1-24. 정식 후 62에서 79일까지 급액제어방식에 따른 토마토 과실비대속도

표 2.3. 정식 후 88일(11월 20일)까지 급액제어방식에 따른 과실 생산량)

Treatment	Total marketable fruit weight (kg/plant)	Total marketable fruit number (ea/plant)
SF	1,453	11
ISR	1,410	12
SWC	1,113	10

○ 급액제어방식에 따른 수분이용효율

정식 후 3일부터 79일까지 총급액량, 배액량, 지상부 생체중, 과실 생체중, 수분이용효율 및 과실 200g 생산에 소요된 물량을 비교한 결과, 수분이용효율은 배액량은 높고 생산량은 낮은 SWC 제어구에서 가장 낮았다. 과실 200g을 생산하는데 소요된 물량은 SWC 제어구에서 SF 제어구 보다 약 2.0L 더 소요된 것으로 나타났다(표 2.4). 이 결과는 봄~여름 작기 결과와 반대로 나타났는데 이는 알고리즘 개발을 위해 1회 급액량을 75mL로 제한을 하고 배액량을 다양하게 변경하여 실험한 결과로 보인다.

표 2.4. 정식 후 3일(8월27일)부터 79일(11월11일)까지 급액제어방식에 따른 총급액량, 배액량, 지상부 생체중, 과실 생체중, 수분이용효율 및 과실 200g 생산에 소요된 물량

Treat - ment	Irr. (L/plant) (A)	Drain (L/plant) (B)	Retained (L/plant) (A-B)	Leaf fwt. (kg/plant)	Stem fwt. (kg/plant)	Fruit fwt. (kg/plant)	WUE (g/L/plant)		Irr. (L/200g fruit)
							2018 autum	2018 spring	
SF	51.00	11.49	39.51	0.216	0.121	1.453	37	58	7.02
ISR	45.90	14.24	31.66	0.180	0.096	1.410	45	53	6.51
SWC	47.08	17.46	29.61	0.158	0.084	1.114	38	70	8.46

## 나. 실험 2. <정전용량 수분측정 장치를 이용한 급액제어 기술 확립>

### (1) 요약

본 실험은 토마토(*Solanum lycopersicum* L. 'Hoyong' 'Super Doterang') 암면재배에서 배지 전체의 정전용량을 측정할 수 있는 장치(Substrate capacitance measurement device, ScmD)를 기반으로 한 적정 급액 방법을 구명하기 위하여 누적일사량 제어구(Integrated solar radiation automated irrigation, ISR)와 물관수액흐름 제어구(sap flow automated irrigation, SF)를 대조구로 비교하면서 봄부터 여름철과 겨울철에 재배를 실시하였다. ScmD 제어구는 급액 개시 후 배지 한 개당 설정된 배액 목표량이 처음 발생하는 시점까지 10분간격으로 급액하였고 첫 배액이 배출되면 그 때의 배지의 정전용량(Capacitance)을 100%로 간주하고 그 기준치의 급액제어점(Capacitance threshold, CT)에 도달하면 급액 되었고 그 뒤 목표 배액량이 발생하면 급액이 멈추는 방식으로 제어되었다. 봄부터 여름재배에서 실험 처리를 위해 ScmD제어구의 일회 급액량 (Irrigation volume per event)을 50, 75, 또는 100mL로 설정하였고 겨울철 재배에서는 CT가 0.65, 0.75, 또는 0.90가 되면 급액 되도록 설정하였다.

봄부터 여름철 재배에서 일회 급액량을 50, 75, 100mL로 설정하였을 때 급액 횟수는 각각 39, 29, 19회였고 배액율은 각각 3.04, 9.25, 20.18%였다. 겨울철 재배에서 CT를 0.65, 0.75, 0.90로 설정하였을 때 급액횟수는 각각 5.67, 6.50, 14.67회였고 배액율은 9.91, 10.78, 35.3%였다. 봄부터 여름철 재배에서 일회 급액량 처리에 따른 물관수액흐름속도(SF) 변화는 1회 급액량과 배액량을 각각 50과 75mL로 제한한 경우 100mL로 제한한 경우와 비교하여 SF 신호가 외부 광량 신호 (SI) 보다 늦어지는 경향(time lag)을 보였고 겨울철 재배에서 CT를 0.65로 설정한 경우는 물관수액흐름 속도나 함수율이 매우 낮아졌고 CT를 0.90로 설정한 경우는 함수율과 물관수액흐름 속도는 매우 높았으나 많은 배액이 배출되었다. 따라서 토마토 봄부터 여름철 재배에서 ScmD를 활용하여 CT를 0.9로, 배지 한 개당 배액 목표량을 100mL로 설정하였을 때 일회 급액량은 75~100mL 범위가 적합하고 겨울철 재배에서는 1회 급액량을 75mL로, 배액 목표량을 70mL로 설정하였을 때 CT는 0.75이상 0.9이하 범위가 적합할 것으로 판단되었다.

### (2) 주요 결과

#### ○ 식물재배 환경

봄부터 여름철 재배에서 4, 5, 6월 온실 최고 온도는 각각 33.5, 37.3, 34.5°C이며 일평균 광량 (Solar irradiance, SI)은 최고 573W/m<sup>2</sup>이었으며 일평균 상대습도(Humidity)는 75에서 99% 수준으로 유지되었다. 일평균 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)농도는 313에서 610·10<sup>-6</sup>·m<sup>3</sup>CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>, 누적일사량은

268에서 4927J/cm<sup>2</sup>범위였다. 겨울철 재배에서는 시설 내부 기온은 13.4에서 19.9℃ 범위로 평균 기온은 16.3℃로 유지되었다. 야간 난방기 설정온도는 13.5℃로 전 생육기간에 설정온도 이상으로 제어되었다. 상대습도는 64에서 92% 범위였고 평균습도는 79%였다. 실험 기간 동안 누적 일사량은 8에서 1303J/cm<sup>2</sup>/day범위였고 일평균 광량은 최고 165.95W/m<sup>2</sup>이었으며 일평균 CO<sub>2</sub> 농도는 407에서 818·10<sup>-6</sup>·m<sup>3</sup>CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>범위였다(자료 미제출).

○ 일회 급액량 및 제어 기준점에 따른 관수 횟수와 배액률

봄부터 여름철 재배에서 일회 급액량을 50, 75, 또는 100mL로 처리하고 Capacitance threshold (CT, 급액제어점)를 0.9로, 배액 목표량을 100mL로 설정하여 급액하였을 때 급액 횟수는 각각 39, 29, 19회였고 배액율은 각각 3.04, 9.25, 20.18%였다(표 1).

표 1. 여름철 일회 급액량에 따른 급액 횟수 및 배액률

Irrigation-ON threshold (%)	Irrigation-OFF threshold (Drain, mL)	Irrigation volume per event (mL)	Irrigation frequency	Drain ratio (%)
0.9	100	50	39.0(±2.65)	3.04(±0.46)
0.9	100	75	29.0(±0.58)	9.25(±2.22)
0.9	100	100	19.0(±1.79)	20.18(±2.40)

겨울철 재배에서 1회 급액량을 75mL로, 배액 목표량을 70mL로 설정하고 CT를 0.65, 0.75, 또는 0.90로 처리하였을 때 급액횟수는 5.67, 6.50, 14.67회였고 배액율은 9.91, 10.78, 35.3%였다(표 2).

표 2. 겨울철 제어 기준점에 따른 급액 횟수 및 배액률

Irrigation-ON threshold (%)	Irrigation-OFF threshold (Drain, mL)	Irrigation volume per event (mL)	Irrigation frequency	Drain ratio (%)
0.65	70	75	5.67(±1.67) <sup>z</sup>	9.91(±3.56)
0.75	70	75	6.50(±0.37)	10.78(±3.09)
0.90	70	75	14.677(±3.28)	35.3(±2.33)

○ 일회 급액량에 따른 물관흐름속도와 일사량의 관계

토마토 줄기 물관수액흐름속도(SF)는 오전 일사량이 증가함에 따라 증가를 보이다 오후부터 감소하여 오후 늦게까지 계속 점진적으로 감소하였다. 1회 급액량을 50 또는 75mL로 처리한 경우 급액개시 후 SF 신호가 외부 광량 신호 (SI) 보다 늦어지는 경향(time lag)을 보였는데

광량이 200W/m<sup>2</sup>이상으로 기록된 시점에 도(화살표) SF 신호가 약하게 반응하고 있다(그림 1-2-1 A, B). 하지만 일회 급액량을 100mL로 처리한 경우는 급액개시 후 SF 신호와 외부 광량 신호가 비슷한 시간대에 관찰되었다(그림 1-2-1 C).

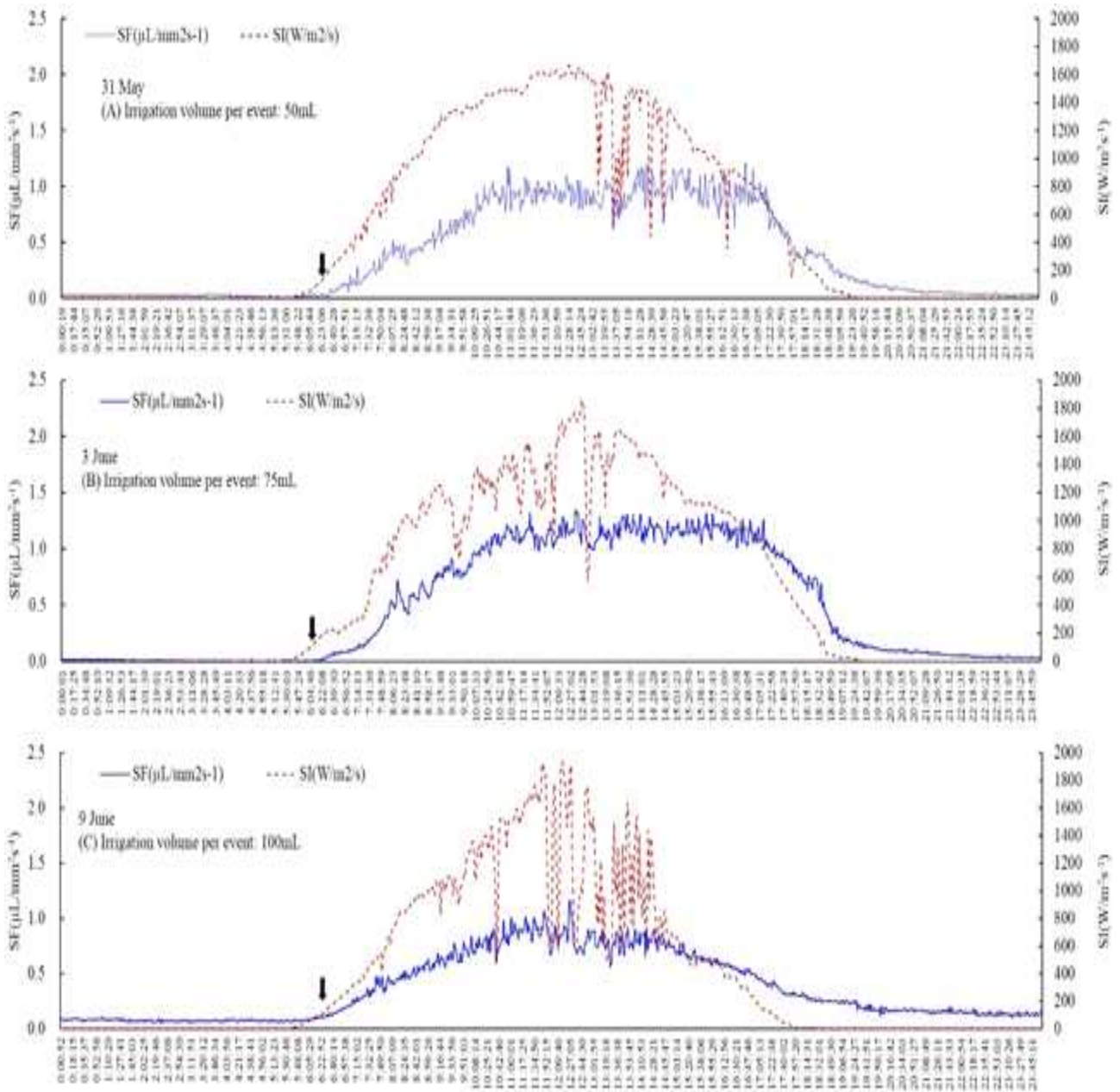


그림 1-2-1. 일회 급액량에 따른 물관수액흐름속도와 일사량과의 관계

○ 일회 급액량에 따른 FDR센서로 측정된 오전 근권 함수율

물관수액흐름 변화는 토양 내 수분이 제한적일 때 수분이 충분한 토양에 비해 공기 포차 (VPD) 변화에 늦게 반응하는 것으로 알려져 있다. 일회 급액량을 50, 75, 또는 100mL로 처리 하고 FDR 센서로 오전 근권 함수율을 관찰한 결과 1회 급액량이 100mL인 경우 50 또는 75mL로 처리한 경우보다 오전 중에 근권 수분이 빠르게 포화되는 것을 알 수 있었다(그림 1-2-2).

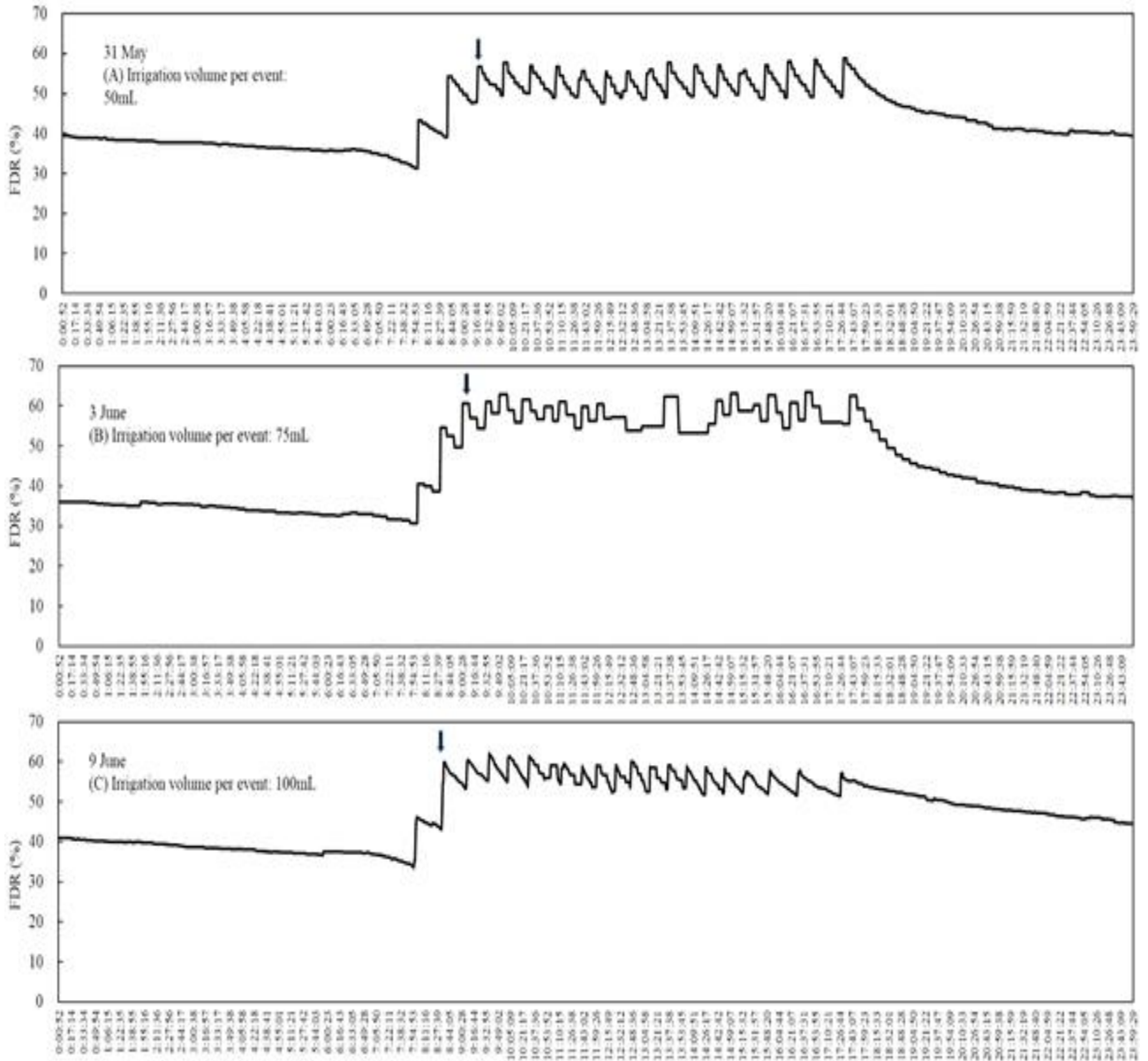


그림 1-2-2. 일회 급액량에 따른 FDR센서로 측정된 오전 근권 함수율  
화살표는 관수 후 포화지점

○ 급액제어점에 따른 물관수액흐름속도와 일사량과의 관계

겨울철 재배에서 토마토 줄기 물관수액흐름속도(SF)는 CT를 0.65, 또는 0.75로 처리한 경우, 각각 최대 2.676, 2.712 $\mu\text{l}/\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 였고(그림 1-2-3 A, B), CT를 0.90로 설정한 경우는 가장 높은 2.936 $\mu\text{l}/\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 로 다른 두 처리보다 높았다(그림 1-2-3 C). CT를 0.65로 처리한 경우 누적일사량 값이 0.75로 처리한 날보다 높았음에도 불구하고 최대 수액흐름속도가 낮은 것을 알 수 있다.

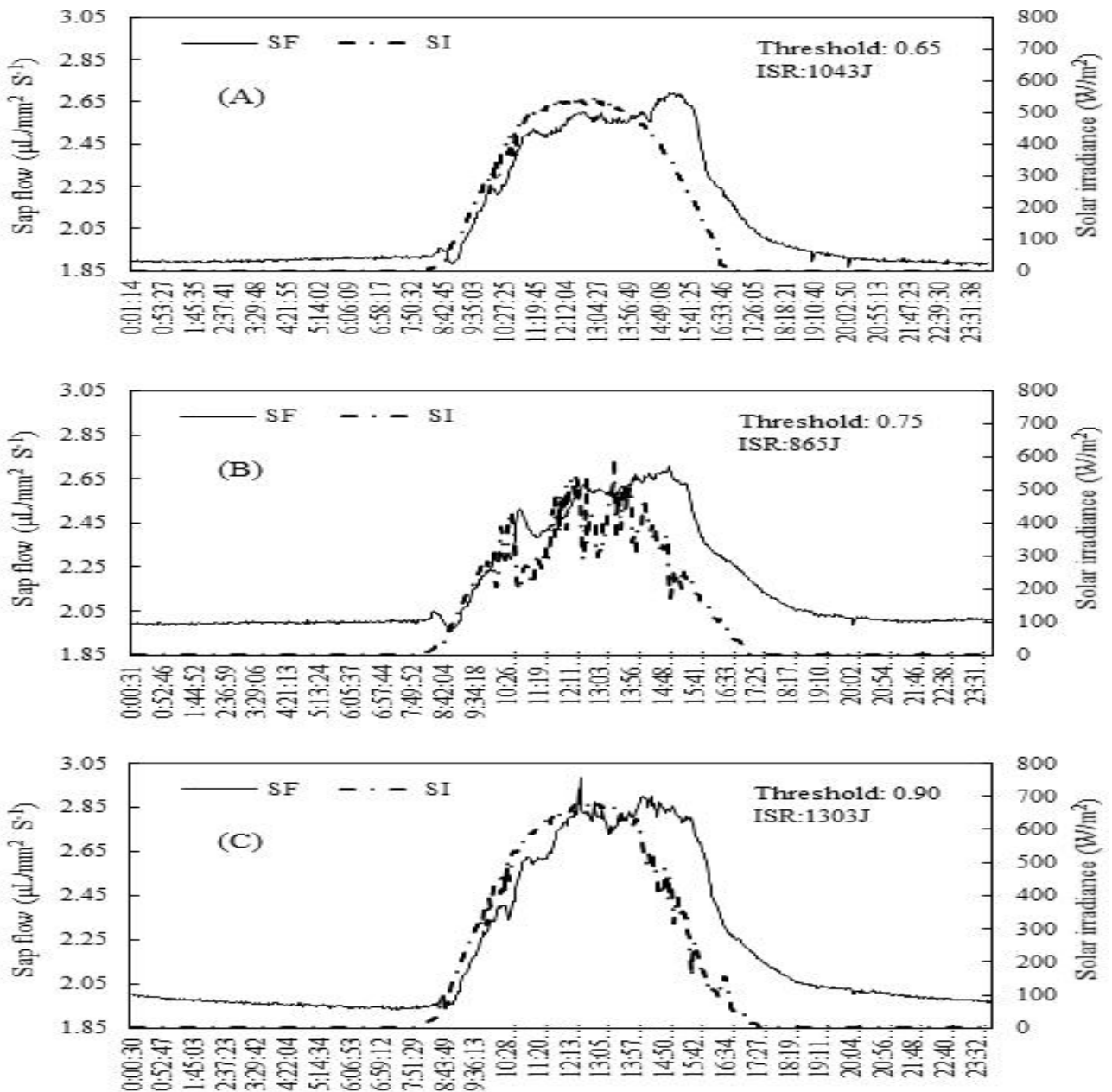


그림 1-2-3. 급액제어점에 따른 물관수액흐름속도와 일사량과의 관계

○ 금액제어점에 따른 정진용량과 FDR 함수율의 관계

겨울철 재배에서 ScmD의 정진용량 변화와 FDR 센서로 측정된 배지 용적함수율 변화 패턴이 거의 일치되는 결과를 보였다(그림 1-2-4). CT를 0.65로 설정한 경우 금액개시 후 첫 목표 배액량이 배출된 뒤 다시 CT 지점에 도달하지 못해 금액 재개가 이루어지지 않았고 그로 인해 배지 함수율이 점점 낮아져 보온커튼이 닫히는 시간대에는 함수율이 45%를 나타냈다(그림 1-2-4 A). CT를 0.75로 설정한 경우 첫 배액이 발생한 후 오후에 1회 더 금액이 재개되어 첫 배액이후 커튼이 닫히는 지점까지 55~65%의 적절한 수분함수율을 보였다(그림 1-2-4 B). CT를 0.80로 설정한 경우 첫 배액이 발생한 후 커튼이 닫히기 전까지 55~65%의 적절한 수분함수량이 나타났고 CT를 0.90로 설정한 경우는 첫 설정배액이 발생한 후 잦은 금액으로 커튼이 닫히는 지점까지 60~68%의 높은 함수율로 많은 배액이 배출되었다(그림 1-2-4 C). 이 결과들로 줄기물관수액흐름 속도(그림 1-2-3)가 배지 수분함량(그림 1-2-4)과 밀접한 관련이 있다는 것을 알 수 있고 배지 함수량 변화와 함께 지상부 물관수액흐름 속도 정보를 함께 활용하여 금액제어 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

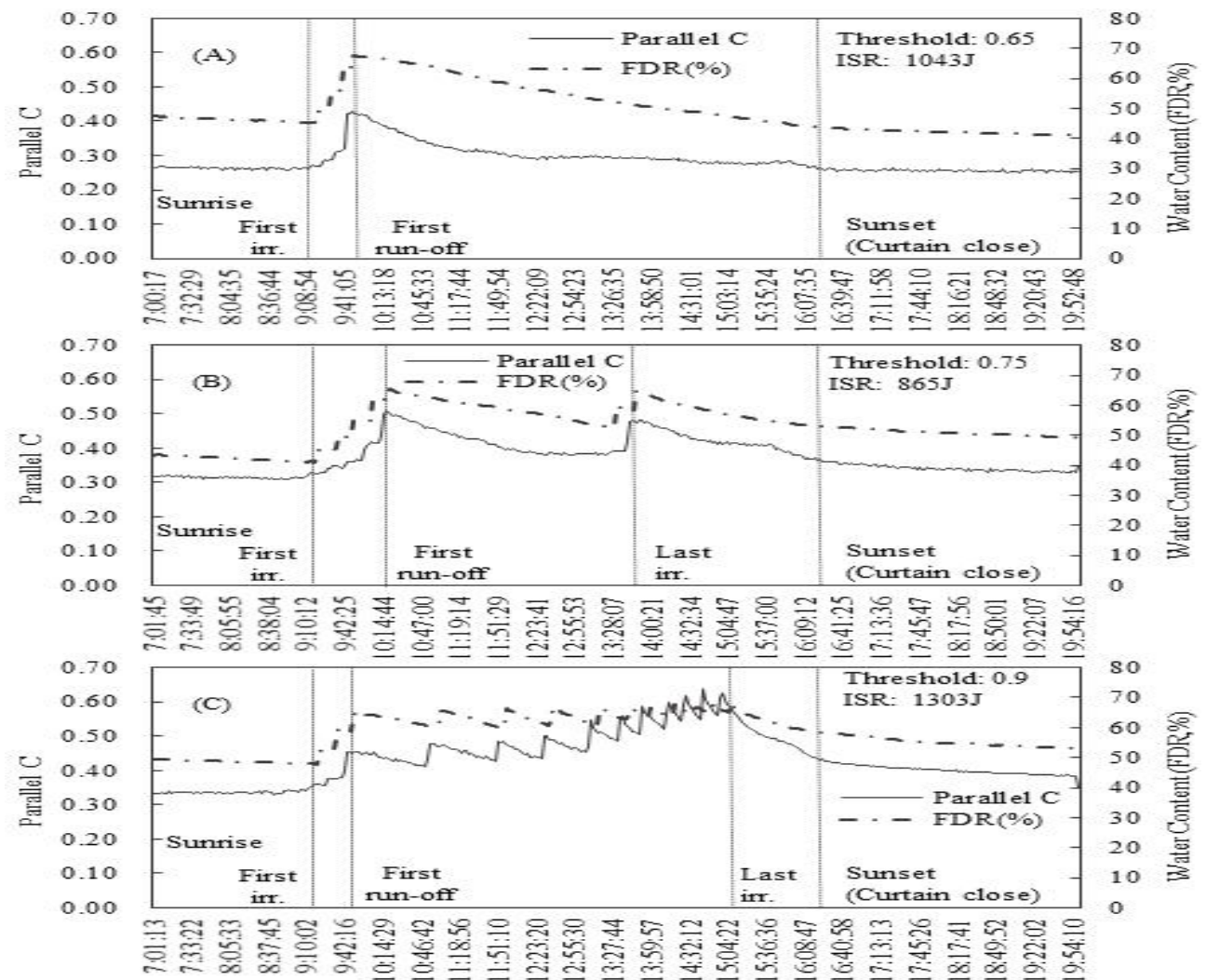


그림 1-2-4. 금액제어점에 따른 정진용량과 FDR 함수율의 관계



따라서 토마토 봄부터 여름철 재배에서 ScmD를 활용하여 CT를 0.9로, 배지 한 개당 배액 목표량을 100mL로 설정하였을 때 일회 급액량은 75~100mL 범위가 적합하고 겨울철 재배에서는 1회 급액량을 75mL로, 배액 목표량을 70mL로 설정하였을 때 CT는 0.75이상 0.9이하 범위가 적합할 것으로 판단되었다.

○ 계절 별 급액제어방식에 따른 총급액량, 배액량, 지상부 생체중, 과실 생체중, 수분이용효율 및 과실 200g 생산에 소요된 물량

봄부터 여름철 재배에서 정식 후 28일부터 82일까지 총급액량, 배액량, 지상부 생체중, 과실 생체중, 수분이용효율 및 과실 200g 생산에 소요된 물량을 비교한 결과, 총급액량은 ScmD 제어구에서 ISR 제어구보다 약 1.8L 적게 공급되었고 SF 제어구는 ISR 제어구보다 약 5.0L 적게 공급되었다. 지상부 생체중이 ScmD 제어구에서 높아 수분이용효율(WUE)이 ScmD 제어구에서 가장 높았다. 과실 200g을 생산하는데 소요된 물량은 ScmD 제어구에서 ISR 제어구에 비해 0.5L 적게 소요된 것으로 나타났다(표 4). 겨울철 재배에서는 총급액량은 ScmD 제어구에서 ISR 제어구보다 약 1.22L 적게 공급되었고 배액율도 낮았다(표 5).

표 4. 봄~여름 작기 각 처리구별 총급액량, 배액량, 지상부 생체중, 과실 생체중, 수분이용효율 및 과실 200g 생산에 소요된 물량

Treatment	TIV (L/plant) (A)	TDV (L/plant) (A)	TRV (L/plant) (A-B)	Leaf fwt <sup>z</sup> (kg/plant)	Stem fwt. (kg/plant)	Fruit fwt <sup>x</sup> . (kg/plant)	WUE <sup>v</sup> (g/L/plant)		IrrV (L/200g fruit)
							2018	2017	
SF	74.30	13.43	60.87	0.631b <sup>y</sup>	0.265b	2.64a	58	63	5.63
ISR	79.22	13.66	65.56	0.776ab	0.256b	2.44a	53	59	6.50
ScmD	81.05	15.39	65.66	0.898a	0.319a	2.68a	59	-	6.04

표 5. 겨울 작기 각 처리구별 총급액량, 배액량, 지상부 생체중, 과실 생체중, 수분이용효율 및 과실 200g 생산에 소요된 물량

Treatment	TIV (L/plant) (A)	TDV (L/plant) (B)	TRV (L/plant) (A-B)	Leaf fwt <sup>zy</sup> (kg/plant)	Stem fwt <sup>zy</sup> . (kg/plant)	Fruit fwt <sup>x</sup> . (kg/plant)	WUE <sup>w</sup> (g/L/plant)	IrrV (L/200g fruit)
ScmD	15.27	3.26	12.01	0.38	0.13	0.89	117	3.43
ISR	16.50	6.45	10.05	0.34	0.11	0.89	133	3.70

○ 급액제어방식에 따른 일평균 광량과 물관수액흐름속도

정식 64일부터 82일까지 일평균 광량과 줄기 물관수액흐름속도를 모니터링 하였을 때 물관수액흐름속도와 일평균 광량(Solar Irradiance, SI)은 SF와 ScmD 제어구에서 ISR 제어구보다 더 비례적 패턴을 보였다(그림 1-2-5 A). 이 결과는 ScmD 제어구에서 SI와 물관수액흐름속도 상관관계( $r^2$ )가 높은 것이 결과와 일치된다(그림 1-2-5 B). 즉, 줄기물관수액흐름속도와 배지 수분함량(그림 1-2-3) 및 실시간 광량변화(그림 1-2-5)가 비례적 관계를 구축한다는 것을 알 수 있다. 선행연구에서 물관수액흐름 신호가 광량 신호와 유사하였다는 연구결과를 뒷받침한다. 즉, ScmD와 SF 제어구에서 재배된 식물은 실시간 광량변화에 물관수액흐름이 반응하는 adaptive performance를 보인다. 이것이 ScmD와 SF 제어구에서 급액량은 많이 소비되지 않았으나 과실 생산량이 감소되지 않은 것과(표 3, 4) 관계가 있는 것으로 보인다.

○ 급액제어방식에 따른 일평균 광량과 물관수액흐름속도

정식 64일부터 82일까지 일평균 광량과 줄기 물관수액흐름속도를 모니터링 하였을 때 물관수액흐름속도와 일평균 광량(Solar Irradiance, SI)은 SF와 ScmD 제어구에서 ISR 제어구보다 더 비례적 패턴을 보였다(그림 6 A). 이 결과는 ScmD 제어구에서 SI와 물관수액흐름속도 상관관계( $r^2$ )가 높은 것 결과와 일치된다(그림 6 B). 즉, 줄기물관수액흐름속도(그림 4), 배지 수분함량(그림 4) 및 실시간 광량변화(그림 6)가 비례적 관계를 구축한 다는 것을 알 수 있다. 선행 연구에서 물관수액흐름 신호가 광량 신호와 유사하였다는 연구결과를 뒷받침한다. 즉, ScmD와 SF 제어구에서 재배된 식물은 실시간 광량변화에 물관수액흐름이 반응하는 adaptive performance를 보인다. 이것이 ScmD와 SF 제어구에서 급액량은 많이 소비되지 않았으나 과실 생산량이 감소되지 않은 것과(표 3, 4) 관계가 있는 것으로 보인다.

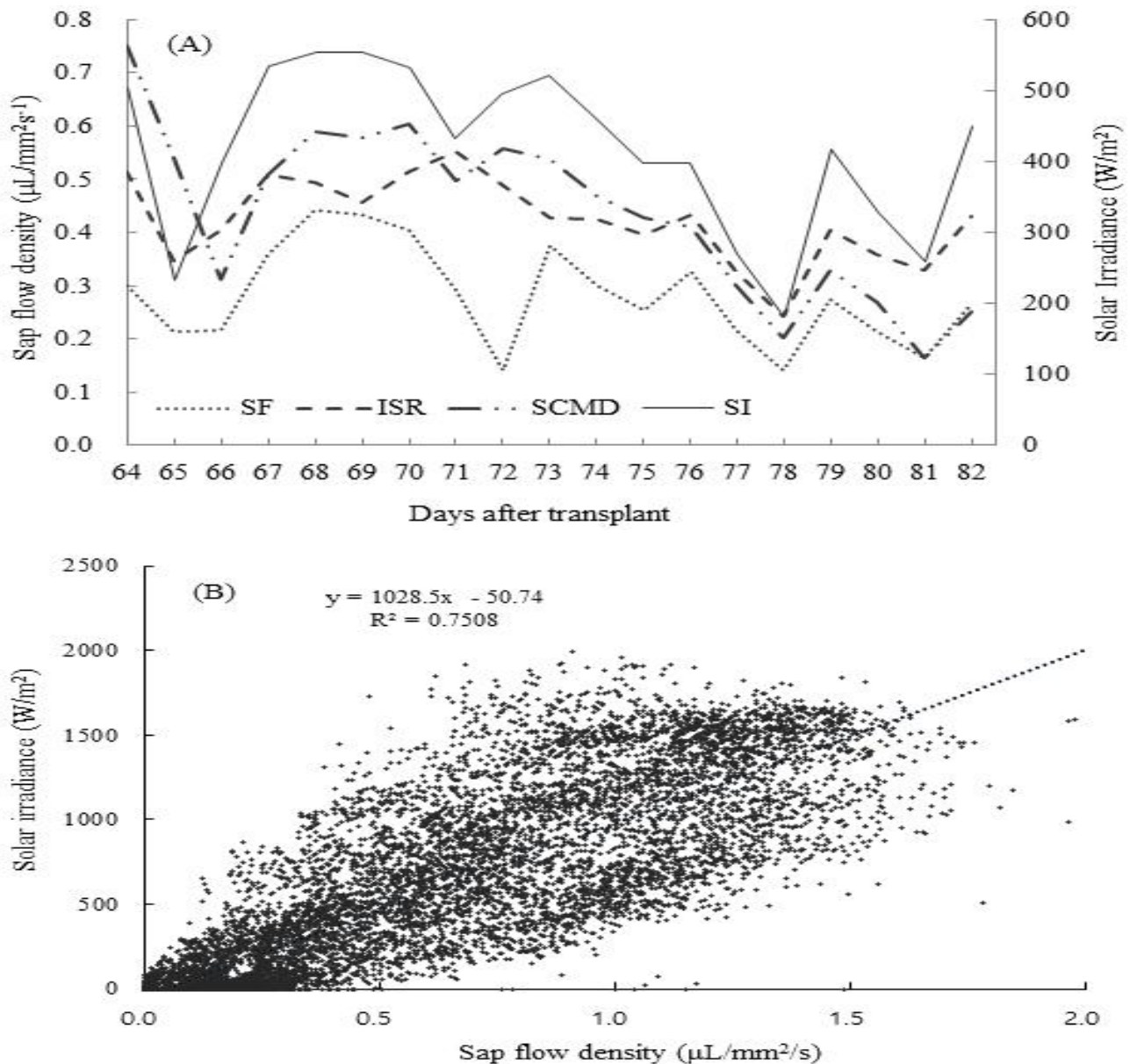


그림 1-2-5. 정식 64일부터 82일까지 일평균 광량과 줄기 물관수액흐름속도

첫 배액 배출 시점의 의미는 급액개시 후 배지가 포화되어 오전에 작물의 광합성에 요구되는 수분이 충분히 공급될 수 있는 환경조건이 갖추어진 것으로 볼 수 있는데 이는 전날 급액 종료 후 다음날 급액개시까지 건조해진 배지가 급액개시 이후 충분히 포화되어야 배액이 흘러 나오기 때문이다. 따라서 배지가 포화될 때까지 충분한 물공급이 필요한데, 함수율을 일정한 수준으로 높이는데 암면배지가 유기물 배지인 코이어 배지보다 공극이 작고 배액속도가 늦어 시간이 더 요구된다고 하였다. 또한 급액 되는 동안 식물 증산이 이루어지므로( $< 0.005\text{kg}/\text{s}/\text{plant}$ ) 이로 인한 근권 내 수분변화를 고려하여 급액되는 것이 필요하다고 하였다. 이 결과들로 ScmD 급액 시스템은 전날 급액 종료 후 다음 날 급액개시까지 감소된 물량을 급액개시 후 바로 충족시키는 시스템으로 Yeager 등 (1997)이 언급한 관수의 개념을 잘 반영하는 방식이며 FDR 측정값과 유사한 패턴을 보여 급액제어 장치로 활용 가능성이 있음을 보여 주고 있다.

### 다. 실험 3. <정전용량 수분측정 장치의 정전용량과 배지 함수량 정량화>

#### (1) 요약

정전용량 수분측정 센서는 수경용 배지 양쪽에 구리 및 테플론으로 절연된 전극판(30cm×10cm)을 부착하여 배지의 넓은 부분에 걸쳐 측정하도록 개발되었다. 본 연구는 콘덴서형 정전용량 센서로부터 출력되는 정전용량 값을 배지 함수량으로 변환하는 것이다. 정량화 실험은 양액을 공급하면서 배지 물무게와 정전용량 변화를 측정하고 그 값을 비교하는 방식으로 수행되었다. 배지 함수량과 정전용량은 본 연구를 위해 특별히 개발된 소프트웨어와 함께 센서와 로드셀을 사용하여 20~30초마다 측정되었다. 상용 curve-fitting 프로그램을 이용하여 배지 함수량과 정전용량을 변수로 정전용량 값으로 배지 함수량을 추정하였다. 공급하는 물의 양이 증가하면 정전용량도 증가하는 경향을 보였다. 배지 내 물무게에 따른 정전용량에 대한 변동계수(coefficient of variation, cv)는 배지 내 물무게가 1.0 kg 수준에서 다른 무게에 비해 높아 함수량 보정은 물무게를 1.7~6.0 kg 수준에서 수행하였다. 정전용량과 물무게 사이의 상관 계수는 0.996이었고 보정식에 의해 정전용량으로 추정된 함수량은 로드셀로 측정한 배지 함수량과 비교하였다.

#### (2) 주요 결과

정전용량 수분측정 장치의 ScmD 급액 시스템은 전날 급액 종료 후 다음 날 급액개시까지 감소된 물량을 급액개시 후 바로 충족시키는 시스템으로 Yeager 등 (1997)이 언급한 관수의 개념을 잘 반영하는 방식이며 FDR 측정값과 유사한 패턴을 보여 급액제어 장치로 활용 가능성이 있으나 출력값이 식물체 중량과 물 중량의 합으로 표시되어 정확한 함수량을 알 수 없었다. 본 실험은 식물체가 없는 암면 배지의 함수량에 따른 정전용량의 변화를 비교하여 정전용량과 배지 함수량 간 관계성 구축을 위한 보정계수를 구명하기 위해 실시되었다. 포수된 암면배지를 자연배수 시키며 정전용량과 함수량의 변화를 관찰하는 실험과 건조한 암면배지에 급액을 하며 정전용량과 함수량의 변화를 관찰하는 실험을 하였다.

#### ○ 관수자동화 시스템 구축

기존 급액제어에 사용하던 정전용량 수분측정 장치를 본 실험에 적합하게 자동화하였다. 분단위 타이머를 이용하여 일정한 시간 간격으로 급액하고, 수중 펌프에 연결 호스를 연결하고 압력 버튼에 의한 점적관수로 분당 일정량의 양액을 공급하였다. 본 실험에 불필요한 장치를 제거하고 실제 재배에 적합한 장치들로 실험 장치를 업그레이드했다.

- 기존 실험 장치(그림 1-3-1) : 암면배지를 상자모양의 구조물에 넣고 규격 30X10cm의 절연 전극판(구리 또는 알루미늄) 1쌍 또는 2쌍을 암면 배지의 측면에 마주보게 아크리판과 스프링으로 고정된 후 구조물을 로드셀 위에 올려놓는다. 구조물에는 배수 호스가 있어 배액통에

배액을 모아 급배액량을 측정할 수 있었다. 절연판과 로드셀, 급배액통은 전자장치와 데이터 전선 케이블로 연결되어 정용량, 배지 무게, 급배액 무게 등의 데이터를 노트북에 저장할 수 있었다. 배액은 배액통에 모아진 후 전자장치의 신호에 의해 배액통 밖으로 배수되었다.

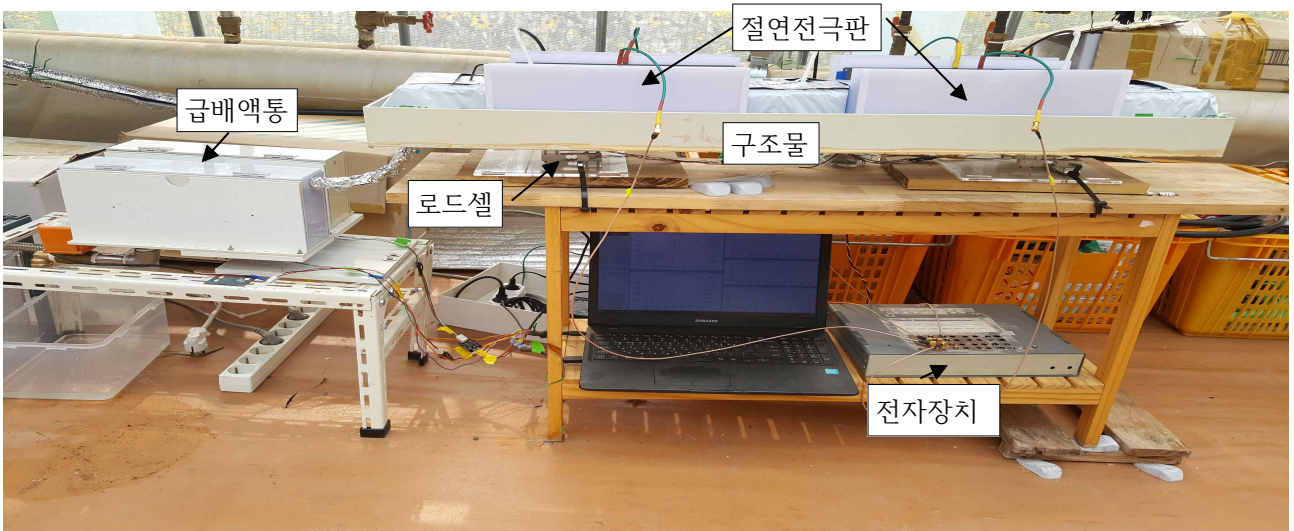


그림 1-3-1. 기존 실험 장치

- 현재 실험 장치(그림 1-3-2) : 본 실험에서는 급배액량을 측정하지 않으므로 급배액통을 제거하였고, 기존 구조물의 바닥이 평평하여서 배지에서 배수된 양액이 전극판과 아크릴판 사이로 스며들고 측정값에 영향을 미쳤다. 바닥이 오목한 딸기용 스카이 배드를 사용하여 이 문제를 시정하였다. 스프링으로 아크릴 지지대를 구조물 벽면에 밀착 고정시켰는데, ㄷ자 아크릴 지지대를 사용하여 일정한 장력으로 센서와 배지를 밀착되도록 하였다. 구조물에 연결했던 배수관을 스카이 배드와 분리하여 배지 중량을 더 정확히 측정할 수 있게 되고 배액을 바로 양액통으로 보내 순환식 관수시스템을 완성하였으며, 이로 인해 일정한 EC의 양액을 급액 할 수 있었다. 로드셀이 온도에 민감하여 다시 전자저울을 설치하였다.



그림 1-3-2. 현재 실험 장치

○ dry-out 기반 정전용량 수분측정 장치의 정전용량과 배지 함수량 정량화

본 실험은 2019년 6월 24일부터 7월 9일까지 실시되었다. 배양액(1.8dS/m, 야마자키 배양액)으로 100% 포수된 암면배지를 6시간 동안 배수한 후 윗면은 흑백필름으로 밀봉하고 아랫면은 2cm 배수구를 양쪽 2개씩 일정 간격으로 3쌍 절개하였다(그림 1-3-3). 배지에 온도계를 꽂아 배지 온도를, 구리 전극판을 암면배지 측면 중앙에 고정하고 전자장치에 연결하여 정전용량을, 로드셀로 배지의 무게를 측정하여 약 20초마다 저장하였다. 전체적으로 함수량이 줄어들수록 정전용량도 작아짐을 알 수 있었으나 낮시간대에는 반대의 경향도 관찰할 수 있었다(그림 1-3-4. A). 정전용량과 함수량의 상관관계는 0.8772로 크게 높지 않았다(그림 1-3-4. B).

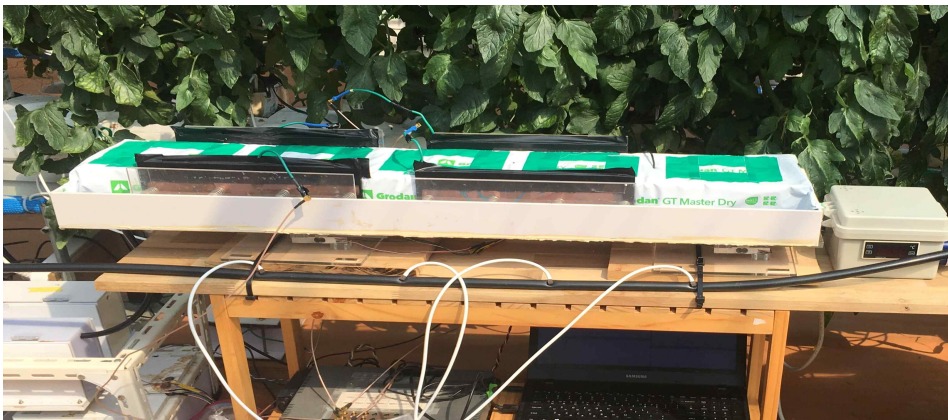


그림 1-3-3. dry-out 실험 장치

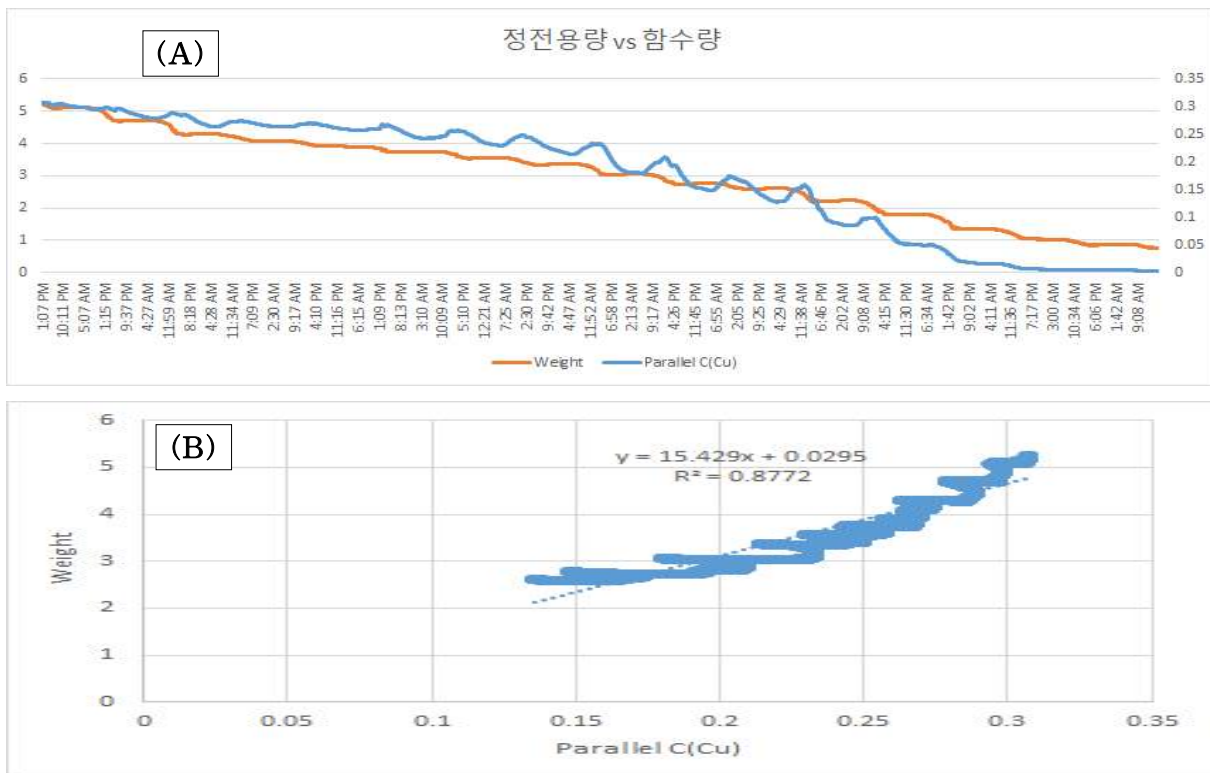


그림 1-3-4. dry-out시 정전용량과 함수량의 변화(A)와 상관관계(B)

○ 온도와 정전용량, 함수량의 관계

위 결과의 원인을 알아보기 위해 온도, 정전용량, 함수량의 관계를 살펴보았다. 각 항목의 측정범위 편차가 크기 때문에 온도, 정전용량, 함수량 데이터를 가장 큰 값으로 나눠 normalizing 한 후 비교해 보면, 온도가 상승할 때, 함수량은 감소하고 정전용량은 증가하는 구간이 반복적으로 나타나고 있다(그림 1-3-5). 함수량과 정전용량은 정의 상관관계인데 온도의 영향으로 부의 상관관계를 갖게 되므로 보정계수를 구하기 위해서는 온도 보상이 필요하고, 정전용량과 온도 두 변수를 독립변수로 함수량을 산출해야 함을 알 수 있었다.

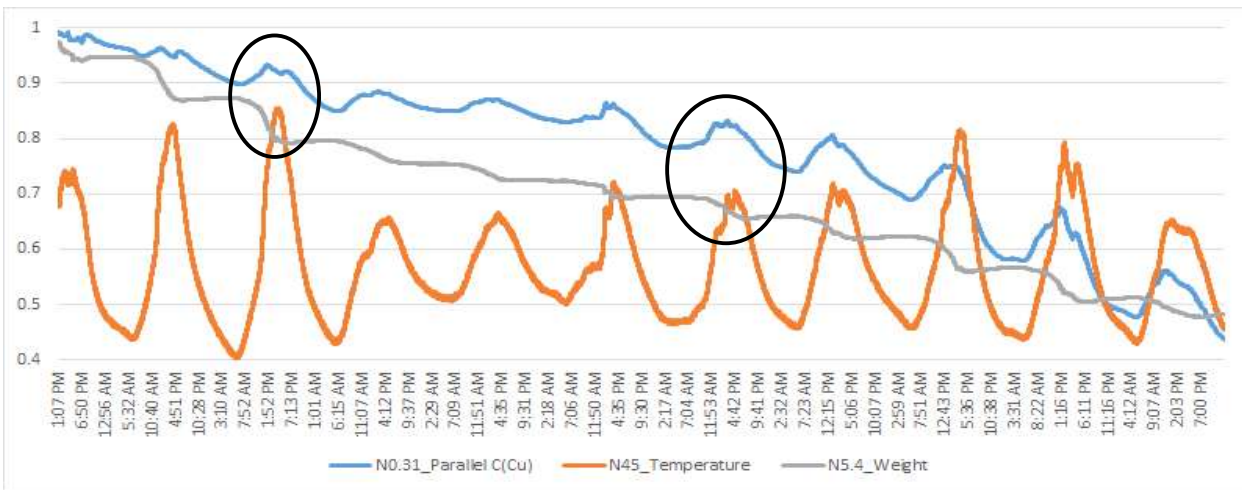


그림 1-3-5. normalizing 후의 온도, 정전용량 및 함수량의 관계

○ dry-out 기반 정전용량과 배지 함수량 보정계수

배지 무게, 정전용량, 배지 온도를 변수로 하여 상용 curve fitting 프로그램을 이용하여 정전용량에 의한 배지 함수량을 구했다. Full cubic 다항식을 이용하여 실험 데이터의 정전용량과 배지무게를 fitting한 결과 변수들의 상관계수는  $9.98E-01$ 이고 표준 편차는  $6.54E-02$ 였다. 이 보정계수는 온도에 따른 정전용량의 변화를 보정할 수 있을 것으로 생각된다.

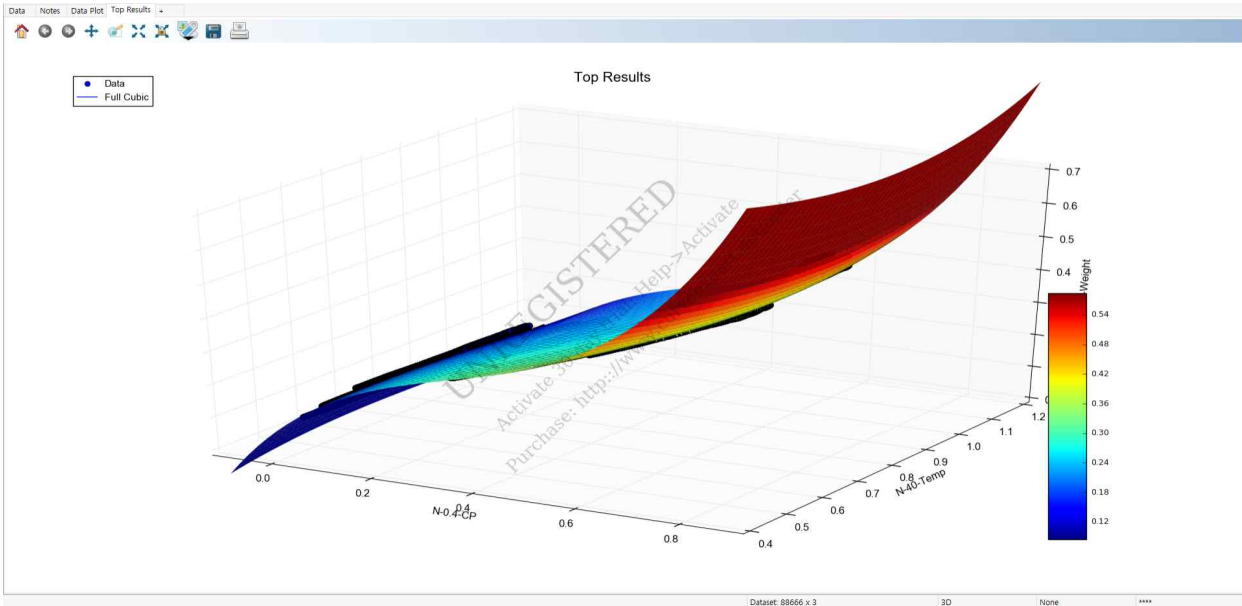


그림 1-3-6. dry-out 기반 정전용량과 배지 함수량 보정계수

Final Result [Polynomial/Full Cubic]:

Equation :  $a + b*x1 + c*x2 + d*x1^2 + e*x2^2 + f*x1^3 + g*x2^3 + h*x1*x2 + i*x1^2*x2 + j*x1*x2^2$

$a = -5.825881861770037E-02$       $b = 1.750547060703791E+00$   
 $c = 5.580248341708794E-01$       $d = -2.727080966571659E+00$   
 $e = -6.322609019082903E-01$       $f = 2.389014466923470E+00$   
 $g = 2.180448831917067E-01$       $h = -1.508129171110189E+00$   
 $i = 5.023042379594660E-01$       $j = 6.997081494677684E-01$

Standard Error : 6.547208636081958E-03

Correlation Coefficient : 9.989003096362905E-01

○관수 기반 정전용량 수분측정 장치의 정전용량과 배지 함수량 정량화

- 관수 방식에 대한 기초 실험

점적핀을 배지에 직접 설치할 때와 암면 큐브에 설치 할 때 물의 분포를 비교하기 위하여 양액에 식용색소를 첨가하여 공급해보았다. 10분 간격으로 1분씩 24시간 관수한 후 윗면과 측면을 관찰한 결과 점적핀을 암면 큐브에 설치하였을 때 물의 분포가 넓게 퍼져있음을 알 수 있었다(그림 1-3-7). 암면큐브는 농가에서도 널리 사용하므로 관행에 맞추어 이후 실험에서는 암면 큐브를 사용하였다.





그림 1-3-7. 점적편 위치에 따른 물의 분포

• 실험 방법

배지 위 일정한 간격으로 암면 큐브를 놓고 점적편을 이용하여 110cc/min/dripper의 속도로 급액하여 1회 급액량이 330±10cc 되도록 하고 암면 배지 아랫면에 2cm 배수구를 양쪽 2개씩 3쌍 절개하였다. 그림 1-3-2와 같이 암면 큐브는 3개, 전극판은 2쌍을 설치하였다. 순환식 관수 시스템으로 배양액의 EC 1.8dS/m을 유지하였고, 쿨링팬을 이용하여 고온의 영향을 최대한 약화시켰다. 정전용량, 배지 온도, 배지 함수량을 약 20초 간격으로 저장하였다.

• 데이터 선정 및 보정계수

dry-out 데이터와 달리 관수 데이터는 증감을 반복하므로 fitting data를 선정하는 것이 중요하다. 1회 급액 후 무게는 즉시 측정되는 반면 정전용량은 프로그램이 한 번 운용되어야 측정되어 약 20초 정도의 지연시간이 있고, 급액 중에는 함수량과 정전용량이 계속 변하므로 최저 변곡점(그림 1-3-8)을 찾아 fitting data로 사용하였다.

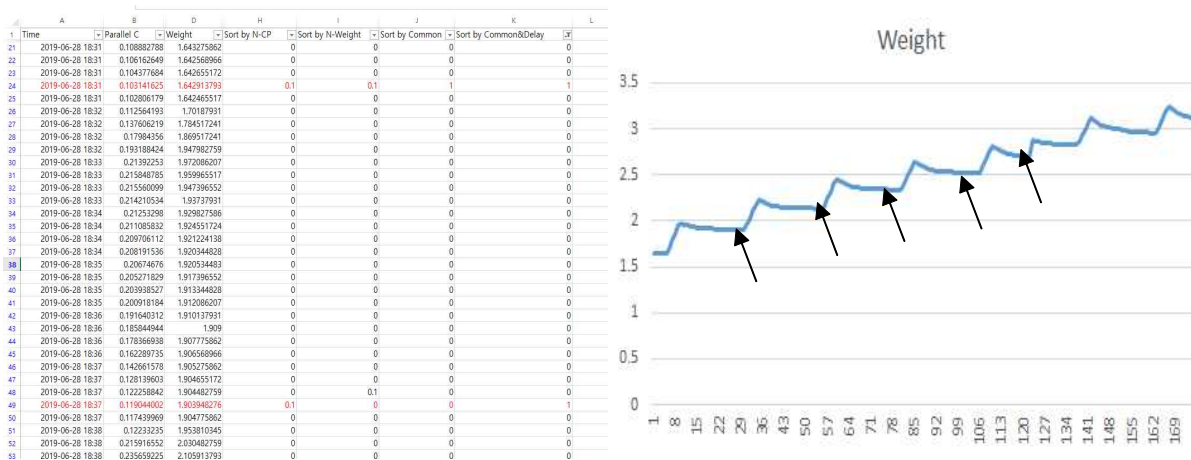


그림 1-3-8. 최저 변곡점

선정된 fitting data는 구간 내 최댓값으로 나눠 normalizing 한 후 상용프로그램을 이용하여 보정계수를 구하였다(그림 1-3-9). X1은 정전용량, X2는 배지 온도, Y는 배지 무게를 나타내고, a, b, c 등은 fitting 계수이다. 이러한 방식으로 fitting 한 결과 정전용량과 함수량 간의 상관계수가 9.96E-01이고 표준편차는 9.32E-03였다.

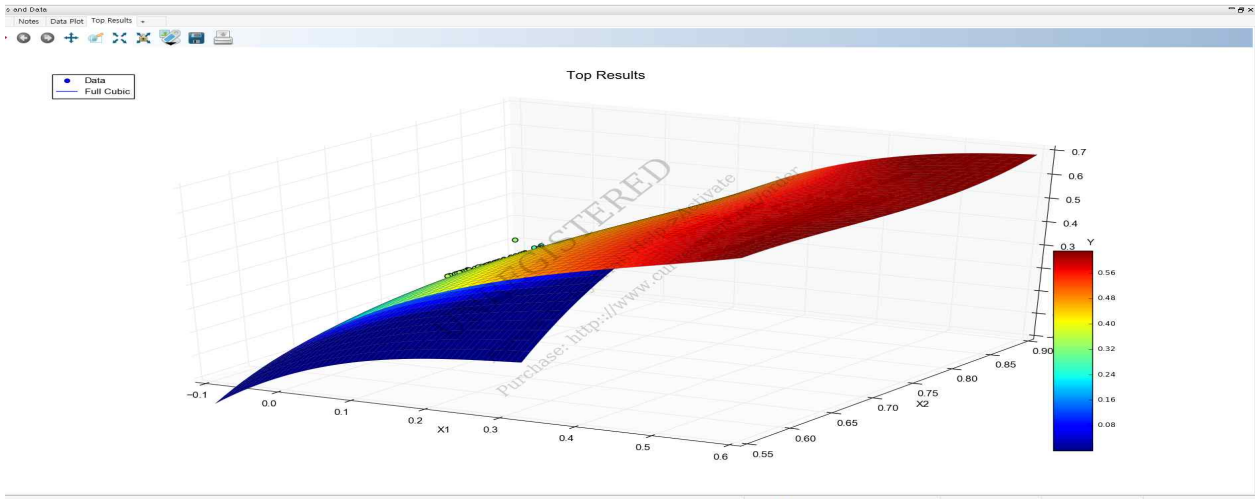


그림 1-3-9. 관수 기반 정전용량과 배지 함수량 보정계수

Final Result [Polynomial/Full Cubic]:

$$\text{Equation : } a + b \cdot x_1 + c \cdot x_2 + d \cdot x_1^2 + e \cdot x_2^2 + f \cdot x_1^3 + g \cdot x_2^3 + h \cdot x_1 \cdot x_2 + i \cdot x_1^2 \cdot x_2 + j \cdot x_1 \cdot x_2^2$$

a = -3.550782780356649E+00	b = 3.596594515494800E+00
c = 1.416489798628230E+01	d = -1.143166474870898E+00
e = -1.770444406546325E+01	f = 2.187847210037765E+00
g = 6.913959753039181E+00	h = -6.100814378049681E+00
i = -3.788673631017716E+00	j = 6.356350709319842E+00

Standard Error : 9.321180405553355E-03

Correlation Coefficient : 9.968242901561387E-01

라. 실험 4. <토마토 암면배지경에서 배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 급액제어방식이 식물흡수량과 배액률에 미치는 영향>

(1) 요약

본 연구과제에서 개발된 관수제어 장치를 사용한 CP 처리구는 오전에 급액 개시 후 타이머 기반으로 15~30분간격으로 급액 되고(급액간격, irrigation interval), 첫 배액이 배출되면 그 때의 배지 정전용량(Capacitance)값을 1.0으로 간주하여 그 기준치의 급액제어점(Capacitance threshold, CT: irrigation-on threshold)(예: 0.95)에 도달하면 급액 되고 배액이 발생하면(Drain volume per slab: irrigation-off threshold) OFF 된 뒤 다시 CT 0.95에 도달하면 급액되는 방식으로 제어되었다. 만일 CT에 의한 급액 작동 동안에 배액이 되지 않으면 타이머 방식으로 최소 대기시간에 맞추어 일정한 간격으로 급액 되는 방식으로 제어된다. 즉, 배액 발생이 없으면 타이머 방식으로 배액이 발생하면 정전용량값을 고려한 급액제어 방식으로 제어된다. 정식 후 12월 7일부터 1월 21일까지 총급액량, 총배액량, 평균 배액율 및 평균 수분흡수량을 측정한 결과 총급액량은 농가 관행방식인 ISR과 CP처리구에서 식물 한 개체에 각각 27.7L, 26.8L로 약 1.0L 정도 차이가 없었지만, 평균 배액률은 ISR 처리구가 26%, CP 처리구가 18%로 CP에서 8% 낮았고, 식물 한 개체의 일평균 수분흡수량은 ISR 처리구에서 0.422, CP에서 0.480L로 CP에서 많았다.

이 결과는 줄기 물관수액흐름(SF)은 오전 8시부터 서서히 증가하기 시작하여 광량이 149W/m<sup>2</sup>인 오전 9시에 급증하고 LAVPD는 온실 VPD가 증가하기 시작한 오전 9시보다 1시간 전인 오전 8시부터 증가하였다. 겨울철 난방기를 가동하는 온실 내에서는 광량이 낮은 오전부터 생체가 작동하는 것을 알 수 있다. 시간대별 급액빈도는 ISR 방식은 오전 11~13시에 높는데 이는 작물의 SF가 급증하기 시작하는 시간대와 시간적 격차가 크다. 반면 CP 제어구는 오전 10시에 타이머 방식으로 일정한 간격으로 배액이 배출될 때까지 수분이 공급되어 10시간대에 수분 공급이 상대적으로 많았고 첫 배액 시간이 ISR 보다 빠르고 배액이 배출된 이후로는 급액 횟수가 ISR보다 적어 배액율이 더 낮았고 배지 함수율은 더 높았다. ISR 제어구에 비해 CP 제어구에 의한 자동급액제어 시 관수효율이 높아 비료 소비량을 줄일 수 있고 이로 인한 환경문제를 줄일 수 있을 것으로 보인다.

(2) 서언

작물체내의 수분함량은 뿌리를 통해 흡수되는 수분량과 증산량에 의해 조절된다. 근권부의 수분 부족으로 작물체내로 수분이동이 원활하지 않으면 잎의 수분퍼텐셜이 감소함에 따라 기공전도도가 감소하며 증산이 저해되고 기공이 닫혀 광합성 효율이 떨어진다(Lee et al., 1997; Kim et al., 2017). 수분이 부족하면 세포 성장, 세포벽 합성, 단백질 합성이 저해되어 작물의

생육, 형태, 생산성, 품질에 부정적인 영향을 미친다(Kang and Oh, 1987). 반면, 근권부의 수분 과다는 뿌리의 활력을 저하시키고 작물체내로 산소 공급을 저해해 광합성과 호흡이 감소하여 대사 장애와 생육 저하를 초래한다(Kwon et al., 2016). 따라서 생체정보를 활용하여 식물의 수분상태를 측정하거나 토양수분센서에 의해 근권 수분을 모니터링하여 그 근거로 관수시기 및 관수량을 결정해야 한다. 관수관리 기술에서 가장 중요한 것은 토양수분을 실시간으로 측정하는 것이다. 토양수분센서는 토양의 매트릭포텐셜을 측정하는 토양수분장력센서(Tensiometer) (Smajstria and Locascio, 1997; Erika et al., 1999; Hoppula and Salo, 2006), 토양의 수분함량에 따른 유전상수 변화를 측정하는 Time Domain Reflectometry(TDR)와 Frequency Domain Refelctometry(FDR) 센서가 있다(Sim et al., 2006a; Brandelik and Hubner, 1996; Park et al., 2010). 토양수분장력센서는 기계적인 특성상 측정부위와 정확하게 접촉되지 못할 경우 쉽게 측정값에 오류가 발생한다(Woo et al., 2000; Sim et al., 2006b; Nemali et al., 2007). TDR과 FDR 센서는 건조토양의 유전상수는 2.7정도이고 순수한 물의 유전상수는 80이상이므로 이러한 토양 수분의 변화에 따른 유전상수를 수분측정에 이용하는 방식이다(Topp et al., 1980). TDR은 계측기(TDR tracer)로부터 전파된 고주파가 센서의 끝에서 다시 되돌아오는 전파속도에 근거하여 토양 내 수분을 측정하는 방식으로(Baas and Straver, 2001) 상대유전율을 이용하여 비교적 넓은 범위의 수분을 신속하고 정확히 측정할 수 있는 장점이 있으나 전극의 길이가 길수록 신뢰성이 커지므로 자루재배와 같이 배지의 깊이가 낮은 경우에는 정확도가 떨어진다고(Murray et al., 2004). FDR 센서는 토양 내 수분함량에 따른 유전상수의 변화가 센서의 정전용량 변화로 나타나기 때문에 센서의 구조가 간단하고 TDR 방법보다 비교적 간단하게 저렴하게 측정장치를 구성할 수 있다(Rial and Han, 2000). 하지만 센서 사용 시 적합한 위치에 설치하지 않을 경우 오차 값이 커질 수 있어 측정위치 선정이 중요하다(Park et al., 2011a; Park et al., 2011b).

본 연구팀에서 최근 개발된 정전용량 측정장치는 배지 양쪽 측면에 30cm×10cm 규격의 절연된 컨덴서 전극판을 마주보게 고정하여 배지의 넓은 부분에 걸쳐 정전용량을 측정하는 장치로 배지수분이 증가할수록 유전율( $\epsilon$ )이 증가하고, 정전용량(C)이 증가하며, 면적에 비례하고, 거리에 반비례하는 이론을 근거로 한다[ $C=(\epsilon/D)*A$  (C:정전용량,  $\epsilon$ :유전율, D:거리, A: 면적)]. 전극판을 배지의 양쪽 측면에 고정하고 전자장치에서 교류신호를 인가하면 배지내의 용적수분함량과 수분 분포에 따라 임피던스가 달라지고 임피던스 값과 위상값을 측정하여 그것을 토대로 커패시턴스를 구하는 방식이다. 토양에 물이 있으면 유전율이 증가하게 되고 토양을 유전체로 생각하여 커패시터를 만들면 토양의 함수량에 따라 유전체의 유전율이 변하게 되어 커패시터의 용량이 변하게 된다. 수경재배용 배지의 경우 인공 토양과 양액이 혼합된 유전체로 생각할 수 있다. 따라서 배지에 수분이 많아지면 유전율이 높아져 컨덴서 용량이 커지므로 컨덴서 용량을 측정함으로써 배지의 용적수분함량 또는 그 변화를 측정할 수 있다.

따라서, 본 실험은 개발된 기술을 상업적 토마토 생산 농가에서 적용하여 농가 관행적 급액 방식(누적일사량법)과 비교하여 물소비량과 수분흡수량을 측정하기 위해 수행하였다.

### (3) 재료 및 방법

#### ○ 정전용량 기반 함수량 측정회로

Fig 1(A)는 개발한 정전용량 기반 함수량 측정 및 관수제어 시스템 구성도이다. 본 시스템을 위한 SW는 2종으로 구성된다. 첫 번째는 제작한 전자장치를 구동하기 위한 임베디드 SW로 개발된 전자장치에 장착된 아두이노 CPU를 제어하기 위한 것이다. 다른 하나는 센서 데이터가 아두이노 CPU를 거쳐 노트북에 저장되고 display 하고 (Fig. 1B) 측정된 데이터를 기반으로 노트북에서 관수제어를 할 수 있게 하는 SW이다. 첫번째 SW는 전자장치에 저장되고 2번째 SW는 노트북에 저장된다. 측정 장치는 주파수 발생부(PLL Phase Locked Loop), 증폭부, 임피던스 측정부, 멀티플렉서(MUX, Multiplexer), 통신부, 제어부로 구성되어 있다. 전체 시스템 동작은 다음과 같다. PLL은 임피던스를 측정할 정현파의 주파수를 결정하고, PLL에서 나온 신호를 증폭부에서 증폭하여 임피던스 측정부에 인가한다. 사용자의 의도에 따라 측정을 할 수 있게 PC에서 수행되는 프로그램에서 나오는 명령에 따라 측정 장치의 각 부분을 제어할 수 있는 제어부가 있다. 제어부는 IoT 분야에서 많이 사용되는 아두이노 모듈을 채택하였다. 전자장치에서 측정된 정보를 관수제어 장치로 무선으로 보낼 수 있게 LoRA(Long Range) 모듈을 사용하였다. PLL은 제1, 2 전극판에 인가할 정현파 교류를 생성하고, 증폭부는 정현파 교류를 소정의 크기로 증폭한다. MUX는 제어부의 제어에 따라 여러 개의 전극 센서 중에서 임피던스를 측정할 전극 센서를 선택한다. 하나의 임피던스 측정부를 이용하여 16 채널의 센서 신호를 측정할 수 있게 analog MUX를 사용하였다. 임피던스 측정부는 MUX를 통해 선택된 전극 센서의 제1, 2 전극판에 정현파 교류를 인가하고 제1, 2 전극판 사이의 임피던스를 측정한다. 필요에 따라서 임피던스 측정부는 서로 연결된 복수 개의 전극 센서로부터 임피던스를 측정할 수도 있다. 이 경우 MUX는 사용되지 않을 수도 있다. 제어부는 임피던스 측정부의 임피던스 측정 결과를 바탕으로 함수량 또는 그 변화, 전기전도도 또는 그 변화를 측정한다. 통신부는 함수량과 전기전도도의 측정 결과를 유선 또는 무선 통신망을 통해 농장을 관리하는 호스트 컴퓨터나 관수 제어 장치 등 다른 장치로 전송한다. 제어부는 측정되는 임피던스의 크기, 임피던스로부터 변환된 저항(R) 또는 커패시턴스(Capacitance)의 변화를 이용하여 배지의 함수량의 변화를 측정할 수 있다. 즉, 제어부는 커패시턴스의 증가 및 감소에 따라 함수량의 증가 및 감소를 측정하거나, 임피던스의 크기 또는 변환된 저항(R, resistance)의 증가 및 감소에 따라 함수량의 감소 및 증가를 측정할 수 있다.

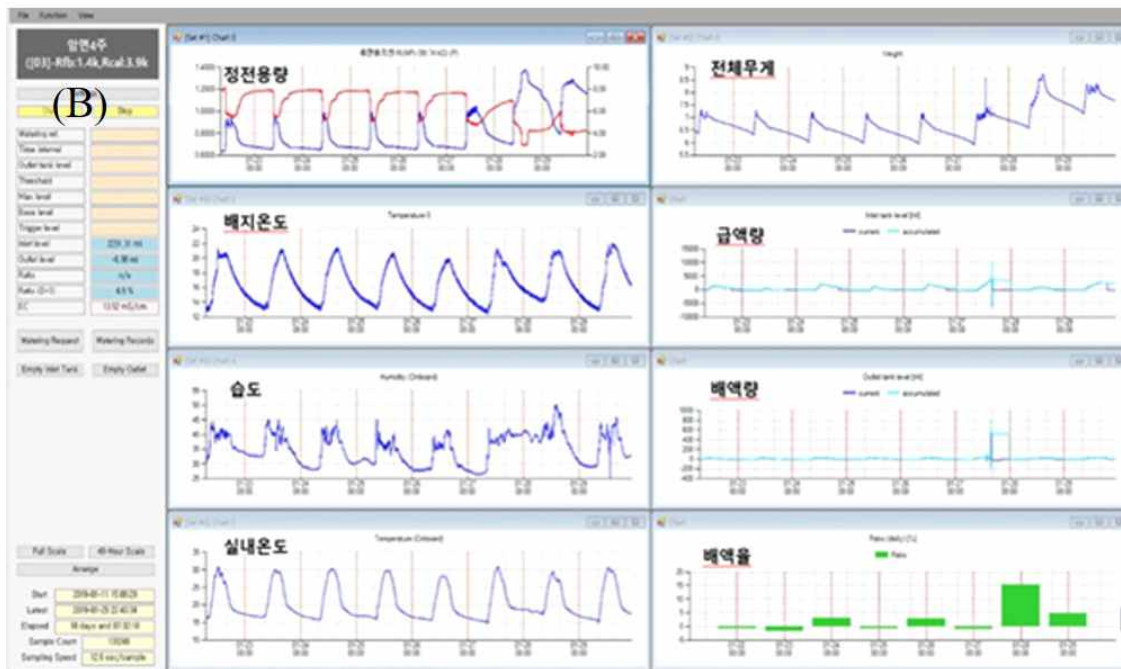
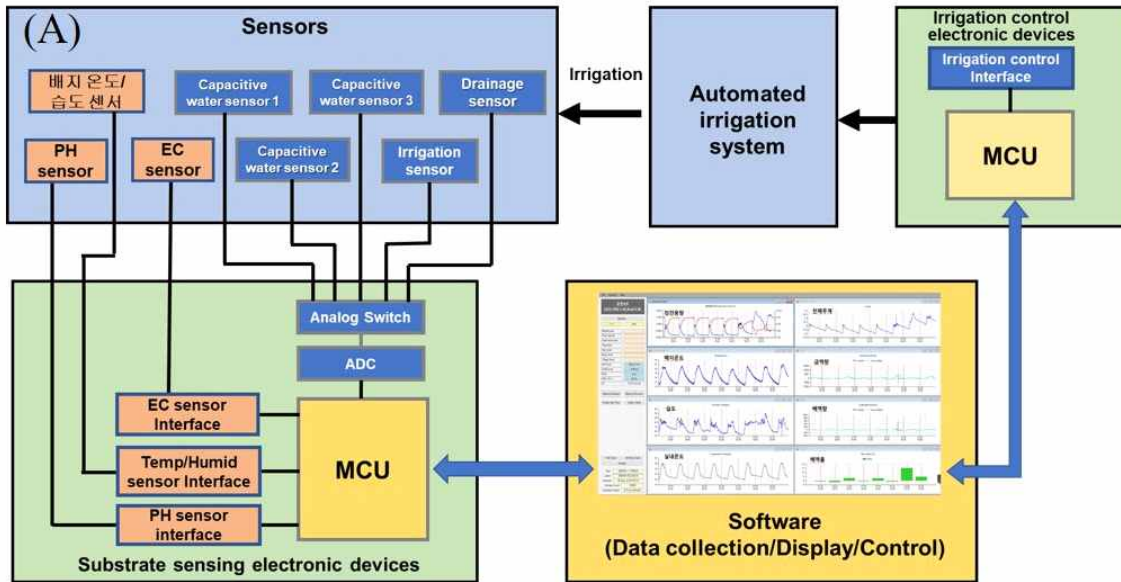


그림 1-4-1. A circuit for measurement of capacitive water content in the rockwool substrate (A) and computer displaying (B).

○ 컨덴서형 수분 센서

Fig. 2(A)는 전극 센서의 단면도를 나타낸다. 전극 센서는 암면배지 흑백필름의 제1 측면(길이 방향 측면)에 제1 전극판부와 배지 측면 반대편에 제2 전극판부를 부착한다. 제1 전극판부와 제2 전극판부 역시 배지의 길이 방향을 따라 여러 개를 설치할 수 있다. 제1 전극판부 제2 전극판부는 그 사이의 배지를 유전체로 하는 컨덴서를 형성한다. 제1 전극판부는 제1 전극판 및 이를 둘러싸는 제1 방수절연체로 구성되고, 제2 전극판부는 제2 전극판 및 이를 둘러싸는 제2 방수절연체로 구성될 수 있다. 함수량 측정 장치는 전극 센서의 제1 전극판과 제2 전극판

에 정현과 교류를 인가하여 제1 전극판과 제2 전극판 사이의 임피던스를 측정하고 측정된 임피던스를 바탕으로 배지의 함수량 또는 그 변화를 측정한다. 관수를 하며 배지의 중량함수량에 따른 정전용량의 변화를 살펴보면 공급하는 물의 양이 증가하면 정전용량도 증가하는 경향이 나타났다(Fig. 3).

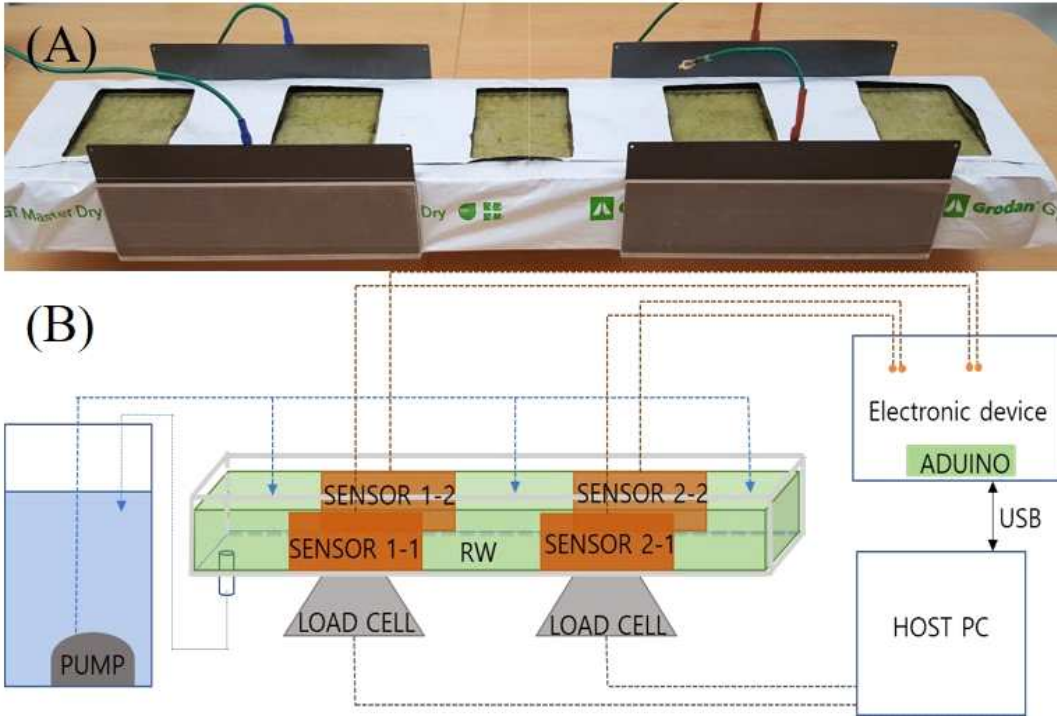


그림 1-4-2. Capacitive water sensors (electrode plates) with acryl panel for pushing the sensors toward the rockwool substrate (RW) (A) and a full calibration system (B).

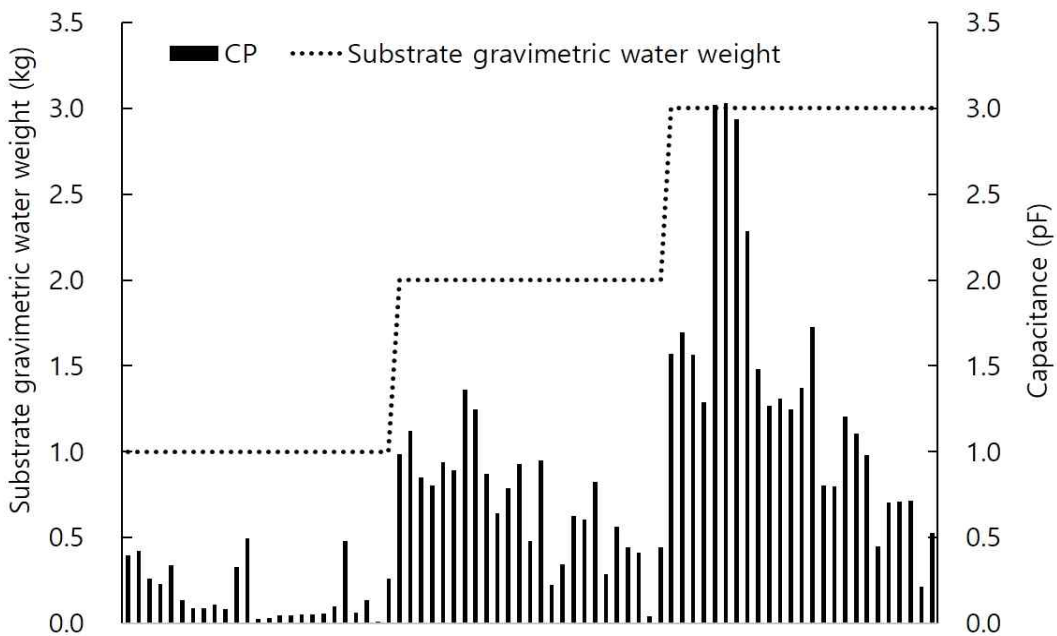


그림 1-4-3. Variation of capacitance with increased substrate gravimetric water weight(kg)

○ 작물 재배 및 환경

본 실험은 개발된 정전용량 측정 기반 배지 수분센서제어(CP)와 누적일사량제어(ISR)에 의한 토마토의 급액방식에 따른 물관수액흐름속도 및 근권수분 변화를 구명하기 위하여, 2020년 9월 20일부터 2021년 1월 4일까지 김해 대동면에 위치한 현영 토마토 농가의 연동 2중 비닐하우스에서 실시하였다. 실험에 사용된 품종은 진주시 초전동의 으뜸육묘장에서 재배된 파파에스종묘의 토마토(*Solanum lycopersicum* L. ‘필라비’)를 암면배지(Prestage, Grodan)에 9월 20일에 정식하였다. 작물별 균일한 급액량을 공급하기 위하여 식물체 당 드리퍼를 각 한 개씩 설치하였고, 배양액은 PBS 토마토 배양액을 기준으로 자동급액시스템(Aqua-M, Shinhan A-Tec, Seoul, Korea)으로 공급하였다:  $5[\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]\text{NH}_4\text{NO}_3$  90.8kg,  $\text{KNO}_3$  43.9kg,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  1.7kg  $\text{KCl}$  6.8kg,  $\text{KH}_2\text{PO}_5$  20.3kg, Fe-EDTA 860g,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 68.4kg,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  36.7kg,  $\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  169g,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  104g,  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  18.7g,  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  280g,  $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  12.1g (1000 L 100배). EC와 pH를 각각  $3.2\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$  및 5.7로 공급하였다. 토마토는 한 줄기로 유인하여 장기재배하였다. 겨울철 온실 보온을 위해 보온다겹커튼을 오전 9시 30분경 열고, 일몰 90분전에 닫았다. 난방은 덕트 온풍기를 이용하여 시설 내 균일하게 열분배를 하였다. 전 실험기간 야간 최저온도를  $13.5^\circ\text{C}$ 로 하였으며, 시설내·외부 기상환경(온도, 습도, 일사량,  $\text{CO}_2$ )측정은 신한환경계측시스템(Shinhan SH-3000 V8.0, Seoul, Korea)으로 하였다.

Hours	Ave. ISR	Ave. solar irradiance	Ave. relative humidity	Ave. temperature
0	0	0	90.53	13.95
1	0	0	90.72	13.92
2	0	0	90.79	13.92
3	0	0	90.86	13.92
4	0	0	90.91	13.90
5	0	0	90.91	13.89
6	0	0	90.97	13.96
7	0	0.880	91.22	14.06
8	6	50.10	91.10	14.39
9	43	161	89.84	15.67
10	121	267	85.05	17.42
11	233	354	82.93	19.16
12	366	386	78.34	19.45
13	501	359	76.49	19.42
14	616	283	77.59	19.16
15	702	163	81.89	18.26
16	735	38.43	86.77	16.56
17	0	0.074	90.05	15.19
18	0	0	90.62	14.51
19	0	0	90.36	14.15
20	0	0	90.20	14.03
21	0	0	90.09	13.99
22	0	0	89.79	13.99
23	0	0	89.45	13.98



## ○ 급액 제어 처리

재배 농가의 급액방식인 누적일사량 제어구(ISR)는 급액 시스템(Aqua-M, Shinhan A-Tec, Seoul, Korea)을 활용하여 첫 급액에서 첫 배액 배출까지  $100\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 로, 첫 배액 배출 후 관수 종료까지  $70\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ 로 설정하고 관수 최소 대기시간을 30분으로 최대 대기시간을 2시간으로 설정하여 누적일사량이 목표치에 도달했을 때 2분30초간 120mL가 급액되도록 하였다(표 1). 개발된 정전용량 측정 기반 배지 수분센서제어(CP) 처리구(그림 1-4-4)는 오전에 급액 개시 후 타이머 기반으로 15~30분간격으로 급액 되고(급액간격, irrigation interval), 첫 배액이 배출되면 그 때의 배지 정전용량(Capacitance)값을 1.0으로 간주하여 그 기준치의 급액제어점(Capacitance threshold, CT: irrigation-on threshold)(예: 0.95)에 도달하면 급액 되고 배액이 발생하면(Drain volume per slab: irrigation-off threshold) OFF 된 뒤 다시 CT 0.95에 도달하면 급액되는 방식으로 제어되었다(표 2). 만일 CT에 의한 급액 작동 동안에 배액이 되지 않으면 타이머 방식으로 최소 대기시간에 맞추어 일정한 간격으로 급액 되는 방식으로 제어되었다. 즉, 배액 발생이 없으면 타이머 방식으로 배액이 발생하면 정전용량값을 고려한 급액제어 방식으로 제어되었다. 이 장치는 실시간 배지 전체의 정전용량, 배지무게, 급액량, 배액량 변화가 측정 및 저장되었다.

## ○ 측정 항목 및 측정 방법

급액은 개발된 정전용량 측정 기반 배지 수분센서제어(CP) 처리에 의한 급액 방식과 비교하기 위하여 재배 농가의 급액방식인 누적일사량 제어구(ISR: Interated Solar Radiaon) 제어구를 대조구로 하여 급액 설정 후 근권내 배지의 함수율의 변화를 확인하기 위하여 각 처리구의 재배 배드에 FDR 센서(WT1000N, Mirea Sensor, Seoul, KOREA)를 설치하여 데이터로그(CR300)에 10초 단위로 저장되도록 하였다. 작물의 엽장, 엽폭, 마디수, 착과수, 개화속도를 측정하였다. 엽장과 엽폭은 착과 후 비대되고 있는 화방의 윗잎의 길이와 폭을 측정하였다. 과실의 중량은 정밀저울(HS-2500, 한성계기, Seoul, Korea)을 이용하였고, 당도는 당도계(PAL-1, ATAGO, JAPAN)를 사용하여 측정하였다. 포화수증기압차(VPD) 및 엽의 수증기압과 대기의 수증기압과의 차(LAVPD)는 엽온측정센서(LT-1M, 0 to 50°C range. 0 to 2 Vdc output, Republic of Moldova)와 환경계측시스템(Shinhan SH-3000 V 8.0, Gyeongsangnam-do, Korea)에 의해 저장된 온도와 습도 데이터를 SAS 9.2 소프트웨어 패키지(SAS Institute, Cary, NC, USA)에 공식을 입력하여 계산하였다.

## ○ 통계분석

누적일사량(ISR)제어와 타이머(TIMER) 제어에 따른 작물의 생장 특성의 차이를 t-test 분석과 습공기 선도를 분석하기 위해 SAS 9.4 소프트웨어 패키지(Statistical Anlysis System, version 9.4, SAS Institute Inc, Cary, NC, USA) 프로그램을 사용하였다.

```

data vent;
input LT DT RH @@;
es=6.1078*exp((17.2693882*DT)/(DT+237.3));
e=es*RH/100;
vpd=es-e;
x=0.622*e/(1013.3-e);
i=(0.240*DT)+(597.3+0.441*DT)*x;
v=0.455*(x+0.622)*(273.15+DT)/100;
tdp=-237.3*log(e/6.1078)/(log(e/6.1078)-17.2693882);
c=0.217*e/(273.15+DT);
fc=0.217*es/(273.15+DT);
hd=fc-c;
LRH1=8.314;
LRH2=LRH1*(LT+273.15);
LRH3=18.05;
LRH4=LRH2/LRH3;
LRH5=(-1/LRH4);
LRH=100*(exp(LRH5));
Les=6.1078*exp((17.2693882*LT)/(LT+237.3));
Le=Les*LRH/100;
LAVPD=Le-e;
Lc=0.217*Le/(273.15+LT);
Lfc=0.217*Les/(273.15+LT);
LAhd=Lc-c;
wt=11.356472-(3939.807096*x)+(0.050449*tdp)+(1.241995*RH);
q=0.622*e/(1013.3-(1-0.622)*e);
q1=x/(1+x);
x1=q/(1-q);
LH=597.3-0.559*DT;
SH=0.24*DT;
SH1=0.441*DT;
z=-1.06*(273.15+DT)*log10(100/RH);
bt=3997.6/((dt+234)*(dt+234));
RT=8.3141*(dt+273.15);
Vw =0.000018;
z1=bt*RT/Vw;
z2=z1/1000000;
z3=(DT-tdp);
z4=z2*z3;
LWT1=0.4606094183;
LWT2=273.15+LT;
LWT3=LRH/100;
LWT=LWT1*LWT2*LOG(LWT3);
cards;

;
proc print;
var vpd hd wt z4 LRH LWT LAVPD LAhd ;
run;

```

표 1. 재배 농가의 관행 급액방식의 누적일사량제어(ISR) 처리구의 급액 일정

ISR	첫 급액부터 첫 배액 배출까지	첫 배액 배출 to 급액종료
Date	Joules ( $J \cdot cm^{-2}$ )	
07-Dec	100	70
08-Dec	100	70
09-Dec	100	70
10-Dec	100	70
11-Dec	100	70
12-Dec	100	70
13-Dec	100	70
14-Dec	100	70
15-Dec	100	70
16-Dec	100	70
17-Dec	100	70
18-Dec	100	70
19-Dec	100	70
20-Dec	100	70
21-Dec	100	70
22-Dec	100	70
23-Dec	100	70
24-Dec	100	70
25-Dec	100	70
26-Dec	100	70
27-Dec	100	70
28-Dec	100	70
29-Dec	100	70
30-Dec	100	70
31-Dec	100	70
01-Jan	100	70
02-Jan	100	70
03-Jan	100	85
04-Jan	100	85

표 2. 개발된 정전용량 측정 기반 배지 수분센서제어(CP) 처리구의 급액 일정

날짜	급액개시부터 첫 배액 배출까지 (타이머 기반)		첫 배액 배출부터 급액종료까지 (타이머 또는 CT/배액량 기반)	
	급액 간격	급액 간격	Irrigation-on threshold (Capacitance threshold, CT)	Irrigation-off threshold (Drain volume per slab)
07-Dec	30	20	0.95	50
08-Dec	20	20	0.95	50
09-Dec	20	20	0.95	50
10-Dec	20	20	0.95	50
11-Dec	20	20	0.95	50
12-Dec	20	20	0.95	50
13-Dec	20	20	0.95	50
14-Dec	20	20	0.95	50
15-Dec	20	20	0.95	50
16-Dec	20	20	0.95	50
17-Dec	20	20	0.95	50
18-Dec	20	20	0.95	50
19-Dec	20	20	0.95	50
20-Dec	20	20	0.95	50
21-Dec	20	20	0.95	50
22-Dec	20	20	0.95	50
23-Dec	20	20	0.95	50
24-Dec	30	15	0.95	50
25-Dec	30	15	0.95	50
26-Dec	30	15	0.95	50
27-Dec	30	15	0.95	50
28-Dec	30	15	0.95	50
29-Dec	30	15	0.95	50
30-Dec	30	15	0.95	50
31-Dec	30	15	0.95	50
01-Jan	30	15	0.95	50
02-Jan	30	10	0.95	50
03-Jan	30	10	0.95	50
04-Jan	30	10	0.95	50

#### (4) 주요 결과

##### ○ 총급액량, 총배액량, 평균 배액율 및 평균 수분흡수량

정식 후 12월 7일부터 1월 21일까지 총급액량, 총배액량, 평균 배액율 및 평균 수분흡수량을 측정한 결과 총급액량은 ISR과 CP처리구에서 식물 한 개체에 각각 27.7L, 26.8L로 약 1.0L 정도 차이가 없었지만, 평균 배액율은 ISR 처리구가 26%, CP 처리구가 18%로 CP에서 8% 낮았고, 식물 한 개체의 일평균 수분흡수량은 ISR 처리구에서 0.422, CP에서 0.480L로 CP에서 많았다(표 3). 일일 배액율 차이를 보면 ISR 처리구에서 CP보다 변화폭이 더 큰 것을 알 수 있는데 이는 CP 처리구에서 더 근권 안정화가 이루어진 것으로 보인다(그림 1-4-5 A), 일일 수분흡수량 차이를 보면 거의 모든 날에 CP 처리구에서 높았다(그림 1-4-5 B).



그림 1-4-4. 개발된 정전용량 수분센서 장착 모습(김해 현영 농장) 급·배액율 및 관수 횟수

**표 3.** 누적일사량제어(ISR)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구의 12월 7일부터 1월 21일까지 총급액량(TIV (A): total irrigation volume), 총배액량(TDV (B): total drainage volume), 총배지에 남은 물량 (TRV(A-B): total retained volume), 평균 배액률(drainage ratio) 및 수분흡수량(water uptake).

Treatment	TIV (L/plant) (A)	TDV (L/plant) (B)	TRV (L/plant) (A-B)	(A-B)/day (L/day)	Drainage Ratio (%)	Water Uptake <sup>z</sup> (L/plant/day)
ISR	27.71	8.20	19.51	0.434	26.0	0.422
CP	26.81	5.28	21.53	0.479	18.0	0.480

<sup>z</sup>: [dM/dt = I (irrigation)-L (leaching)-Water uptake].

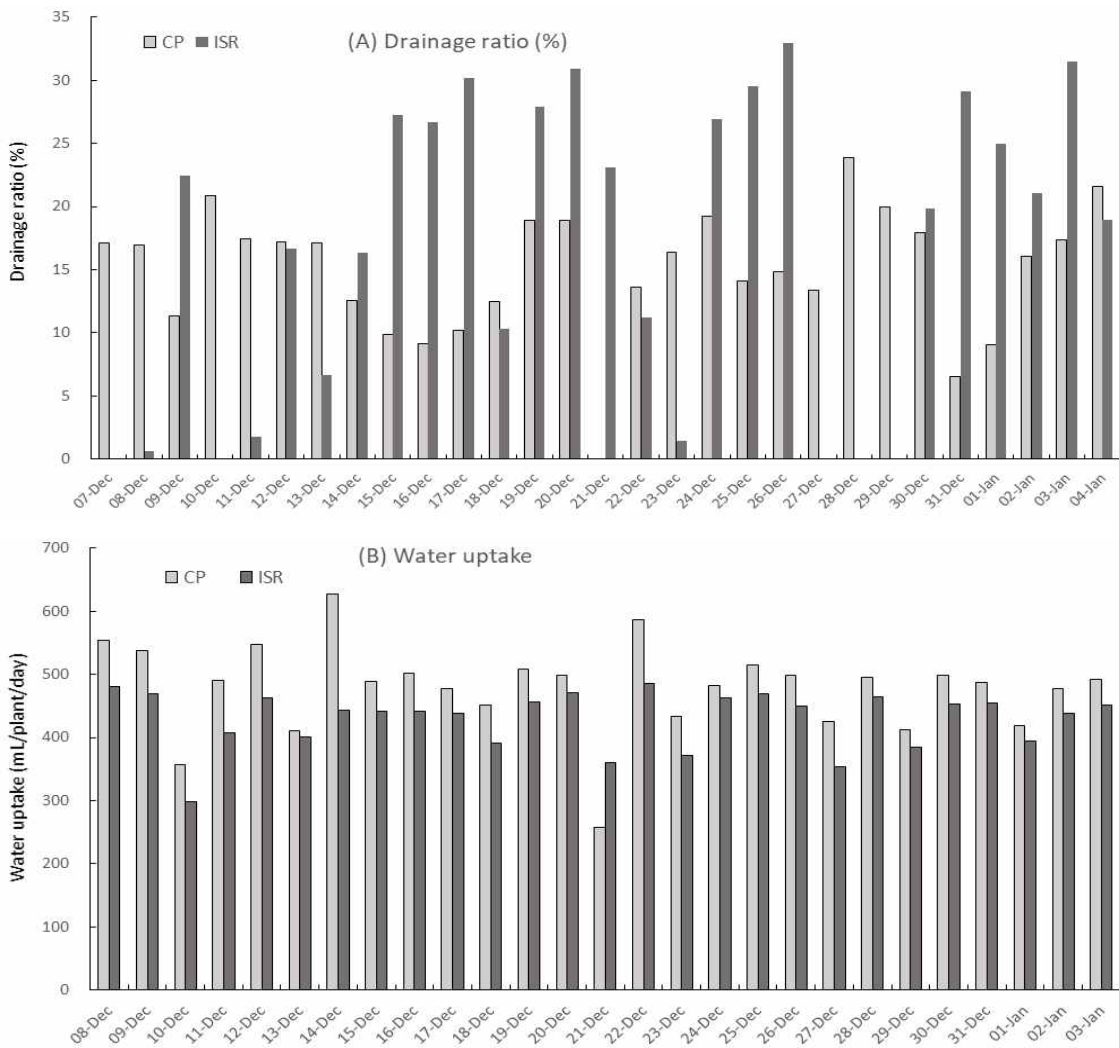


그림 1-4-5. 누적일사량제어(ISR)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구의 12월 7일부터 1월 4일까지 배액률(A)과 수분흡수량(B).

○ 시간대별 급액 횟수 및 배액 배출 횟수

시간대별 급액 횟수를 12월 7일부터 1월 4일까지 측정한 결과 급액제어 처리에 따라 다른 패턴을 보였다(그림 1-4-6). CP 처리구는 10시경에 다른 시간대에 비해 많은 횟수를 보였는데 이는 10시에 급액이 시작되어 첫 배액이 나오는 시점까지 타이머를 기반으로 20~30분 간격으로 지속적으로 급액된 결과이다. 반면, ISR 처리구는 11시, 12시, 13시에 CP보다 각각 22회, 20회, 29회 더 급액되었다.

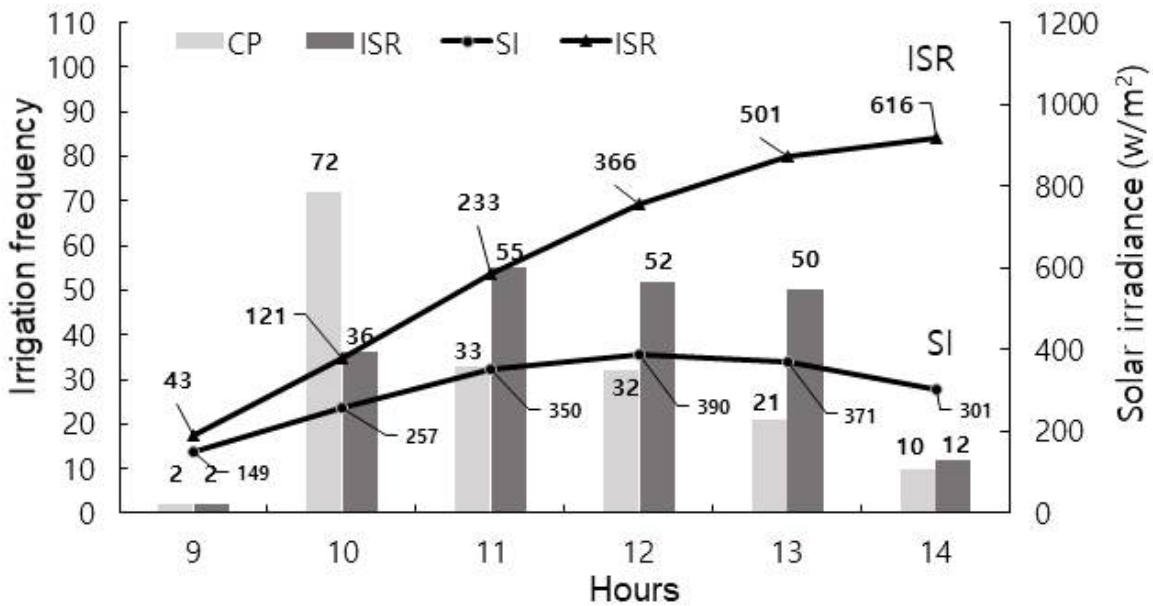


그림 1-4-6. 누적일사량제어(ISR)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구의 12월 7일부터 1월 4일까지 시간대별 관수 횟수 및 시간대별 평균 광량(SI).

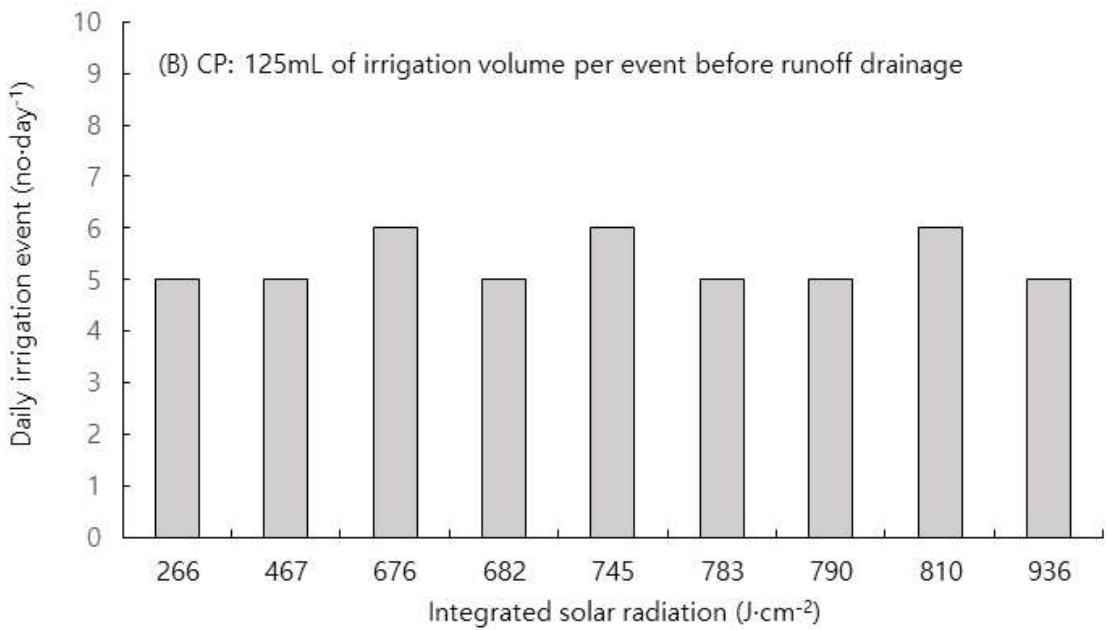
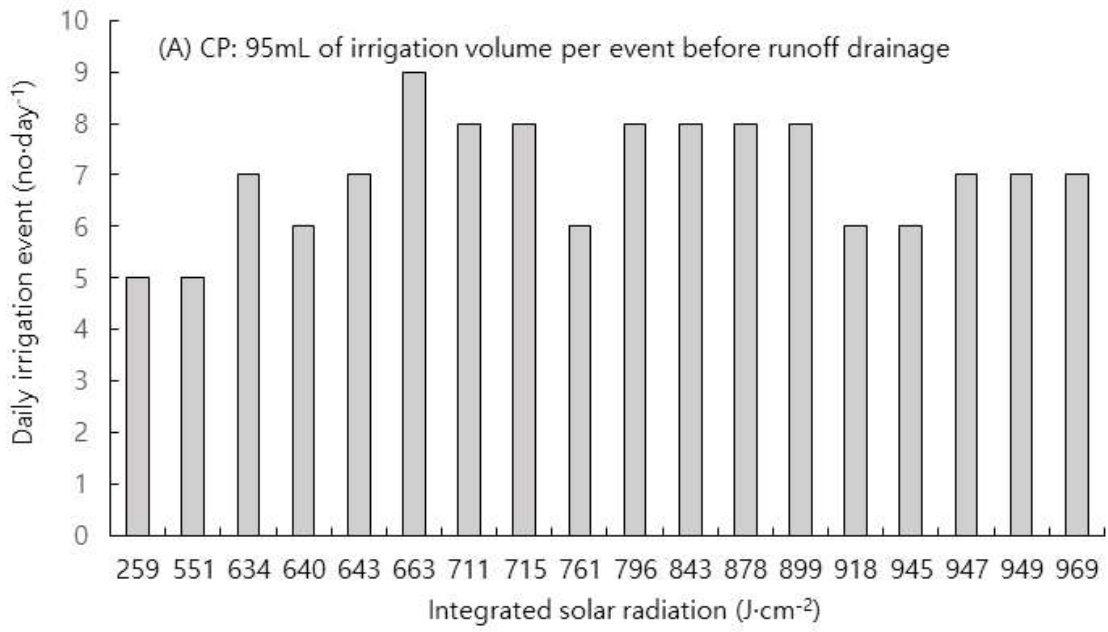


그림 1-4-7. Daily number of irrigation events in response to integrated solar radiation as affected with irrigation volume per event before runoff drainage under the CP treatment.



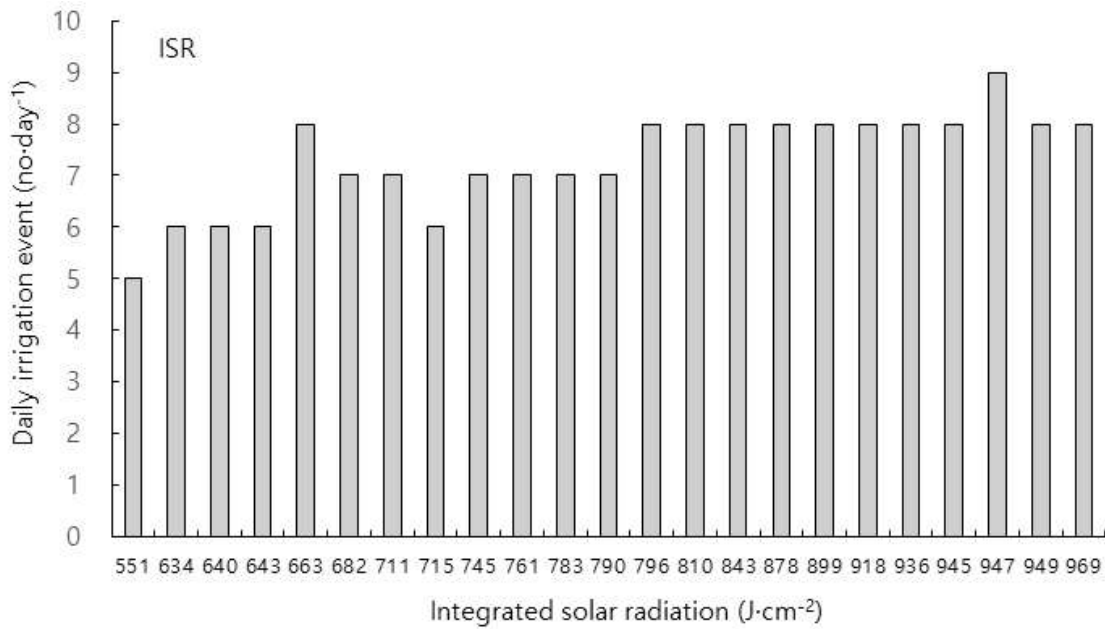


그림 1-4-8. Daily number of irrigation events in response to integrated solar radiation under the ISR treatment.

○ 급배액 시간과 급배액량

ISR 처리구의 12월 7일부터 1월 4일까지 급액 시간(분)과 급액량 (mL·plant<sup>-1</sup>)을 보면 누적 광량이 100J에 도달하는 10시~10시30분경에 시작되는 첫 급액과 두 번째 급액까지 1회 급액량을 120mL로 공급하고 첫 배액이 시작되는 11시 30분 이후부터는 70~80mL로 공급하였으며 급액종료 시점은 14시~14시 30분경으로 하루 총 8~9회 급액되었다(표 4).

개발된 정전용량 측정 기반 배지 수분센서제어(CP) 처리구는 광량이 200W/m<sup>2</sup> 이상으로 높아지는 오전 10시를 기준으로 급액 개시 후 타이머 기반으로 15~30분 간격으로 1회 급액량을 95~125mL로 급액하였고 첫 배액이 배출되면 그 때의 배지 정전용량(Capacitance)값을 1.0으로 간주하여 그 기준치의 급액제어점(Capacitance threshold, CT)(예: 0.95)에 도달하면 급액 되고 배액이 발생하면(Drain volume per slab: irrigation-off threshold) OFF 후 다시 CT 0.95에 도달하면 급액되는 방식으로 제어되었고(표 2), 급액종료 시점은 14시로 하루 총 8~9회 급액되었다(표 5).

ISR 처리구의 첫 배액 시간(분)은 11:30~12:00이고 첫 배액량 (mL·plant<sup>-1</sup>)은 식물 한 개체당 평균 16mL이었고 그 후 5회 배액량은 각각 28, 34, 37, 39, 41mL였다(표 6). CP 처리구는 첫 배액 시간은 11:00로 급액 개시 후 1시간 이후이고 첫 배액량은 식물 한 개체당 평균 37mL이었고 그 후 3회 배액량은 각각 26, 21, 20mL로 ISR 처리구보다 첫 배액량은 많았으나 그 이후 배액량은 적고 배액 횟수도 2회 적었다(표 7).

표 4. 누적일사량제어(ISR) 처리구의 12월 7일부터 1월 4일까지 급액 시간(분)과 급액량 (mL·plant<sup>-1</sup>).

Date	1st		2nd		3rd		4th		5th		6th		7th		8th		9th	
	time	vol.	time	vol.	time	vol.	time	vol.	time	vol.	time	vol.	time	vol.	time	vol.	time	vol.
07-Dec	10:00		10:30		11:01		12:43		13:13		14:17							
08-Dec	10:14	122	11:00	63	11:28	61.8	11:55	64	12:21	63	12:47	61	13:12	64	13:39	62		
09-Dec	9:58	121	10:50	121	11:21	65.3	11:49	63	12:16	64	12:42	63	13:08	63	13:36	64		
10-Dec	12:55	65																
11-Dec	9:41	119	10:54	124	11:26	62.4	11:56	65	12:24	61	12:52	63	13:21	62	13:52	64		
12-Dec	10:15	119	11:00	63	11:29	62.4	11:56	64	12:23	63	12:50	63	13:16	66	13:44	60		
13-Dec	10:16	119	11:05	64	11:50	65.8	12:47	62	13:17	63	13:51	66						
14-Dec	10:06	121	11:00	63	11:43	64.0	12:13	62	12:44	65	13:21	60	13:50	66				
15-Dec	10:03	123	10:55	120	11:24	64.3	11:52	60	12:18	65	12:44	61	13:10	63	13:37	63		
16-Dec	10:03	119	10:54	124	11:24	67.5	11:51	61	12:17	62	12:43	63	13:09	62	13:35	63		
17-Dec	10:05	121	10:57	121	11:27	63.5	11:54	64	12:21	64	12:48	63	13:14	63	13:41	66		
18-Dec	10:24	122	11:12	62	11:44	61.0	12:12	61	12:47	64	13:17	63						
19-Dec	10:05	123	10:56	123	11:26	64.1	11:53	62	12:19	60	12:45	65	13:04	62	13:37	61		
20-Dec	9:58	120	10:48	120	11:17	63.3	11:46	64	12:14	63	12:40	63	13:06	65	13:32	66	14:00	62
21-Dec	10:14	121																
22-Dec	10:16	122	11:01	66	11:34	63.6	12:05	64	12:35	62	13:05	64	13:36	61				
23-Dec	10:32	125	11:11	61	11:52	66.5	12:43	72	13:43	73								
24-Dec	11:10	122	11:45	73	12:01	76.9	12:32	74	12:52	123	13:23	74	13:52	77				
25-Dec	10:07	120	10:58	125	11:32	72.3	12:03	75	12:32	74	13:00	76	13:29	75	14:05	75		
26-Dec	10:09	120	10:58	123	11:32	76.3	12:03	77	12:32	75	13:00	71	13:40	75	14:22	80		
27-Dec	10:59	122	13:37	73														
28-Dec	11:02	129	11:38	74	12:13	71.5	12:50	74	13:32	61	14:12	65						
29-Dec	11:17	127	11:44	123	12:02	73.3	12:36	73	13:12	75								
30-Dec	10:31	121	11:19	121	11:54	79.4	12:28	68	13:00	73	13:35	75	14:13	73				
31-Dec	10:27	121	11:13	117	11:49	73.0	12:23	72	12:56	77	13:31	73	14:08	71				
01-Jan	10:20	125	11:12	121	11:49	72.3	12:22	70	12:56	76	13:30	72	14:00	74				
02-Jan	10:05	120	11:07	124	11:46	74.5	12:24	72	13:19	73	14:21	73						
03-Jan	10:29	121	11:05	122	11:35	78.5	12:06	72	12:37	73	13:08	72	13:41	72	14:27	74		
04-Jan	10:30	117	11:25	119	12:04	74.0	12:40	78	13:17	77	13:57	74						

표 5. 배지 수분센서(CP) 처리구의 12월 7일부터 1월 4일까지 급액 시간(분)과 급액량 (mL·plant<sup>-1</sup>).

Date	1st		2nd		3rd		4th		5th		6th		7th		8th		9th	
	time	vol.	time	vol.	time	vol.	time	vol.	time	vol.	time	vol.	time	vol.	time	vol.	time	vol.
07-Dec	10:00		10:30		11:01		12:43		13:13		14:17							
08-Dec	10:00	90	10:20	96	10:40	94	11:00	95	12:00	60	12:56	62	13:16	65	14:05	72		
09-Dec	10:00	95	10:20	95	10:40	94	11:00	93	12:15	63	12:35	63	13:30	67	14:15	67		
10-Dec	10:00	90	10:20	95	10:40	99	11:00	97	13:16	49								
11-Dec	10:00	92	10:20	95	10:40	96	11:00	94	11:52	55	12:49	59	13:36	69	14:07	66		
12-Dec	10:00	94	10:20	94	10:40	97	11:00	91	11:46	65	12:40	63	13:28	64	14:25	65		
13-Dec	10:00	95	10:20	95	10:40	96	11:00	95	12:15	64	13:14	64	14:04	64				
14-Dec	10:00	95	10:20	95	10:40	95	11:00	95	12:15	64	13:24	66						
15-Dec	10:00	95	10:20	96	10:40	95	11:00	95	12:13	64	12:33	62	13:40	65				
16-Dec	10:00	95	10:25	96	10:54	95	11:10	96	12:11	79	13:26	72						
17-Dec	10:00	95	10:20	96	10:40	96	11:00	95	12:22	80	13:34	80						
18-Dec	10:00	96	10:20	95	10:40	97	11:00	96	12:17	80	13:34	86						
19-Dec	10:00	96	10:20	95	10:40	96	11:00	96	12:03	81	13:01	80	14:02	80				
20-Dec	10:00	96	10:20	95	10:40	96	11:00	96	12:12	81	13:14	80	14:15	80				
21-Dec	10:00	95	10:20	95	10:40	97	11:00											
22-Dec	9:07	96	9:17	96	10:00	95	10:20	95	11:35	79	12:48	80	13:59	79	14:17	81		
23-Dec	10:00	106	10:20	95	10:40	96	11:00	95	12:24	80								
24-Dec	10:00	128	10:30	127	11:00	126	12:00	80	13:00	80	13:52	80						
25-Dec	10:00	127	10:30	128	11:00	128	12:02	80	13:02	80								
26-Dec	10:00	126	10:30	128	11:00	128	11:16	80	12:14	81	13:12	80						
27-Dec	10:00	125	10:30	127	11:00	127	12:33	78	13:54	80								
28-Dec	10:00	127	10:30	127	11:00	126	11:58	81	12:51	80	13:45	79						
29-Dec	10:00	126	10:30	125	11:00	126	12:10	80	13:07	79								
30-Dec	10:00	125	10:30	128	11:00	126	11:56	81	13:00	79								
31-Dec	10:00	126	10:30	126	11:00	127	12:28	80	13:30	79								
01-Jan	10:00	125	10:30	127	11:00	126	12:08	80	13:11	79								
02-Jan	10:00	94	10:30	96	11:00	95	11:11	65	11:21	64	12:27	64	12:37	64				
03-Jan	10:00	94	10:30	94	11:00	95	11:10	63	11:21	63	12:37	64	12:48	63	13:52	63	14:02	64
04-Jan	10:00	95	10:30	95	11:00	96	11:10	63	12:17	64	12:28	63	13:34	64	13:45	63		

**표 6.** 누적일사량제어(ISR) 처리구의 12월 7일부터 1월 4일까지 배액 시간(분)과 배액량 (mL·plant<sup>-1</sup>).

Date	1st		2nd		3rd		4th		5th		6th		7th	
	time	volume	time	volume	time	volume	time	volume	time	volume	time	volume	time	volume
08-Dec	13:15	10	13:41	20										
09-Dec	11:50	18	12:17	26	12:43	32	13:10	32	13:37	32				
10-Dec														
11-Dec	13:54	88												
12-Dec	12:25	15	12:52	21	13:18	25	13:46	32						
13-Dec	13:20	8	13:52	21										
14-Dec	12:47	18	13:24	27	13:52	37								
15-Dec	11:31	8	11:54	22	12:20	31	12:46	36	13:12	36	13:38	36		
16-Dec	11:28	5	11:53	19	12:19	28	12:45	32	13:10	38	13:36	43		
17-Dec	11:30	15	11:56	29	12:23	33	12:49	36	13:15	39	13:43	38		
18-Dec	12:49	15	13:22	29										
19-Dec	11:28	13	11:54	25	12:20	32	12:45	35	13:11	33	13:37	36		
20-Dec	11:20	10	11:48	27	12:15	32	12:41	33	13:07	35	13:33	37	14:01	39
21-Dec														
22-Dec	12:38	8	13:06	20	13:38	28								
23-Dec	13:46	6												
24-Dec	12:34	13	12:54	64	13:24	45	13:58	44						
25-Dec	11:34	7	12:04	28	12:33	37	13:01	42	13:30	43	14:02	47		
26-Dec	11:34	20	12:04	35	12:33	41	13:01	42	13:42	42	14:27	49		
27-Dec														
28-Dec														
29-Dec														
30-Dec	12:29	21	13:03	29	13:37	34	14:15	37						
31-Dec	11:53	16	12:24	38	12:58	39	13:33	40	14:10	42				
01-Jan	11:52	7	12:25	26	12:57	35	13:33	39	14:02	46				
02-Jan	11:49	18	12:27	28	13:21	32	14:23	35						
03-Jan	11:38	19	12:08	34	12:39	40	13:10	40	13:42	44	14:29	39		
04-Jan	12:07	10	12:42	26	13:20	31	13:59	34						
평균		16		28		34		37		39		41		

표 7. 배지 수분센서제어(CP) 처리구의 12월 7일부터 1월 4일까지 배액 시간(분)과 배액량 (mL·plant<sup>-1</sup>).

Date	1st		2nd		3rd		4th		5th	
	time	volume	time	volume	time	volume	time	volume	time	volume
08-Dec	11:00	36	12:07	18	13:18	38	14:10	16		
09-Dec	11:03	16	12:37	33	13:35	10	14:22	13		
10-Dec	11:04	67	13:22	22						
11-Dec	11:04	40	11:56	16	12:53	11	13:50	6	14:08	37
12-Dec	11:02	51	11:49	22	12:41	13	13:32	12	14:28	11
13-Dec	11:02	43	12:18	16	13:13	11	13:56	13		
14-Dec	11:04	40	12:19	15	13:31	9				
15-Dec	11:06	15	12:35	31	13:45	10				
16-Dec	11:16	16	12:16	19	13:30	15				
17-Dec	11:06	20	12:27	16	13:26	19				
18-Dec	11:06	30	12:22	20	13:45	19				
19-Dec	11:05	40	12:02	31	12:59	23	13:40	24		
20-Dec	11:06	39	12:14	27	13:15	28	12:15	25		
21-Dec										
22-Dec	10:25	22	11:39	13	12:54	8	14:05	53		
23-Dec	10:46	56	12:28	21						
24-Dec	11:04	48	12:05	61	12:58	27	13:58	17		
25-Dec	11:07	34	12:06	24	13:10	19				
26-Dec	11:12	50	12:18	23	13:17	20				
27-Dec	11:06	33	12:37	20	13:58	18				
28-Dec	11:04	64	12:03	32	12:54	29	13:49	23		
29-Dec	11:04	51	12:12	31	13:11	26				
30-Dec	11:04	46	11:59	27	13:04	24				
31-Dec	11:07	9	12:31	12	13:34	14				
01-Jan	11:06	16	12:10	17	13:14	17				
02-Jan	11:22	44	12:38	43						
03-Jan	11:23	27	12:50	37	13:55	51				
04-Jan	11:12	33	12:29	48	13:45	50				
평균		37		26		21		20		

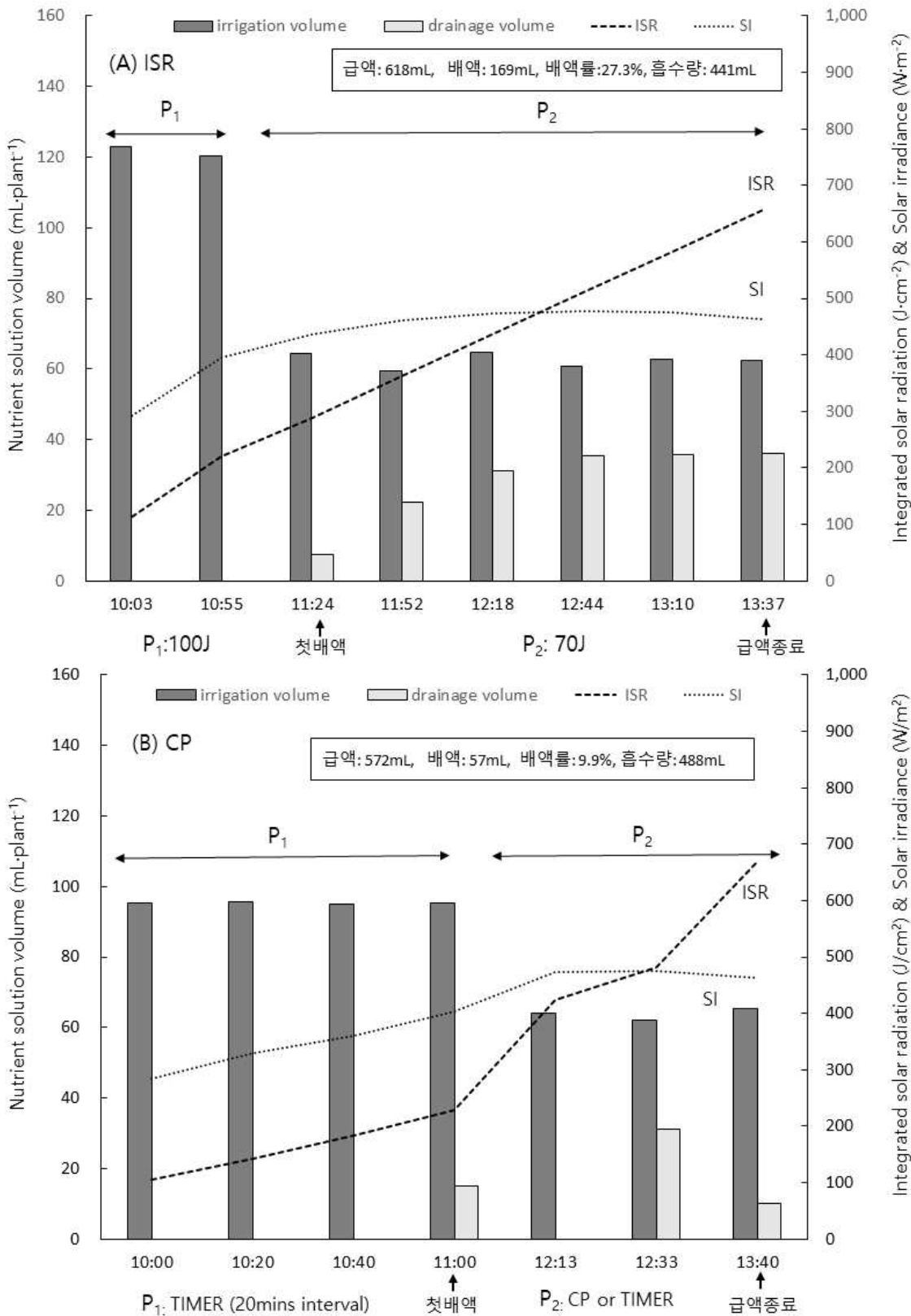


그림 1-4-9. 누적일사량(ISR, A)과 배지 수분센서제어 (CP, B) 처리구의 주기별 급액 scheduling (급액간격, 1회 급액량, 첫배액 및 급액종료 시간과 시간대별 급배액량 (mL·plant<sup>-1</sup>), 배액율(%) 및 흡수량((mL·plant<sup>-1</sup>))(12월15일 예시).

○ 급액량과 수분흡수량 관계성 및 물관수액흐름(SF)과 수분흡수량 관계성

재배기간 중 12월 7일부터 1월 4일까지 식물 한 개체의 평균 급액량과 수분흡수량 관계성은 ISR 처리구( $r^2=0.181$ )보다 CP 처리구( $r^2=0.389$ )에서 높았다(그림 1-4-10).

줄기 물관수액흐름(SF)은 오전 9시부터 급증하였는데 이때의 평균 광량은  $149\text{W}/\text{m}^2$ 였고 오전 8시에는 광량이  $49\text{W}/\text{m}^2$ 로 SF 상승이 서서히 시작되었다. 이 결과는 식물에서 증산에 의한 잠열의 유·출입은 광량이  $100 - 200\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$  이상에서 진행된다는 것과 일치된다(Pieruschka et al., 2010). 오전 9시에 ISR 제어구의 경우 SF가 1650mV, 1264mV, CP 제어구의 경우 2351mV, 1283mV를 보였다(표 8, 그림 1-4-11), ISR 제어구는 11시-13시에 SF가 높았는데 광량이  $390\text{W}/\text{m}^2$ 인 12시에 2739mV로 가장 높았으며 CP 제어구는 13시-14시에 높았는데 광량이  $371\text{W}/\text{m}^2$ 인 13시에 2654mV로 가장 높았다(표 8). CP 처리구의 시간대별 급액 빈도수를 보면 10시에 가장 많았고, ISR 처리구는 11시, 12시, 13시에 CP보다 각각 22회, 20회, 29회 더 많았다(그림 1-4-6). 매일의 SF 최고값과 로드셀로 측정된 매일의 흡수량의 관계성은 CP 제어구에서 더 높았다(그림 1-4-12),

FDR 수분센서로 측정된 함수율(%)은 배지 측면의 경우 CP 제어구는 평균 76.87%, ISR은 65.01%로 CP가 11.8% 높았고 시간대별로는 CP의 경우 오전 11시에 81.839%로 가장 높았고 ISR은 12시에 69.613%로 가장 높았다. 배지 윗면의 경우 CP 제어구는 평균 49.85%, ISR은 47.13%로 CP가 2.7% 높았고 시간대별로는 CP의 경우 13시에 58.12%로 가장 높았고 ISR은 14시에 56.44%로 가장 높았다(그림 1-4-13, 1-4-14).

시간대별 포화수증기압차(VPD)는 일중 1.37-5.26mb 범위를 보였고 오전 9시부터 증가하여 13시에 최대 5.258mb값을 보였다. 엽의 수증기압과 대기의 수증기압과의 차(LAVPD)는 0.79-8.068mb 범위로 오전에 VPD가 증가하기 시작한 오전 9시보다 1시간 빠른 오전 8시부터 증가하여 12-13시에 최대점을 보이고 감소되었다. Woo(1999)는 광량, VPD, LAVPD와 sap flow는 고도의 상관관계가 가지고 있다고 하였고 Baek 등(2018)도 물관수액흐름 신호가 광량 신호와 유사하다고 하였으며 Gordon 등(1999)도 수분이 충분한 조건에서 물관수액흐름은 광량과 밀접한 관련이 있다고 하였다. Hanping et al.(2017)도 온실 토마토 재배에서 급액이 충분히 공급된 조건에서 물관수액흐름속도와 기후요인 간의 상관관계를 낮(06:00 - 22:00), 아침(6:00 - 14:00), 오후(14:00 - 22:00)로 나누어 관찰하였을 때 낮의 경우 가을과 겨울 재배기는 물관수액흐름속도와 VPD(vapor pressure deficit) > LI(light intensity) > Ta(leaf temperature) 순으로 밀접한 관계를 보였고 봄과 여름 재배기는 LI > VPD > Ta 순으로 관계가 높았다고 하였다.

이러한 결과들을 종합하여 볼 때, 급액 개시 시간은 외부광량 신호만으로 결정하기보다는 광량에 반응하는 줄기 SF 변화에 대한 정보를 기반으로 결정하는 것이 더 효율적인 것으로 보인다. ISR 방식은 외부 광량에 의한 것으로 11~13시에 급액 횟수가 높았는데 이는 작물이 오전에

증산작용으로 인한 SF가 급증하는 시간대와 일치하지 않는다. 반대로 CP 제어구는 10시에 수분 공급이 상대적으로 많고 첫 배액이 배출된 이후로는 급액 횟수가 ISR보다 적어 배액율이 더 낮았고 배지 함수율은 더 높았다.

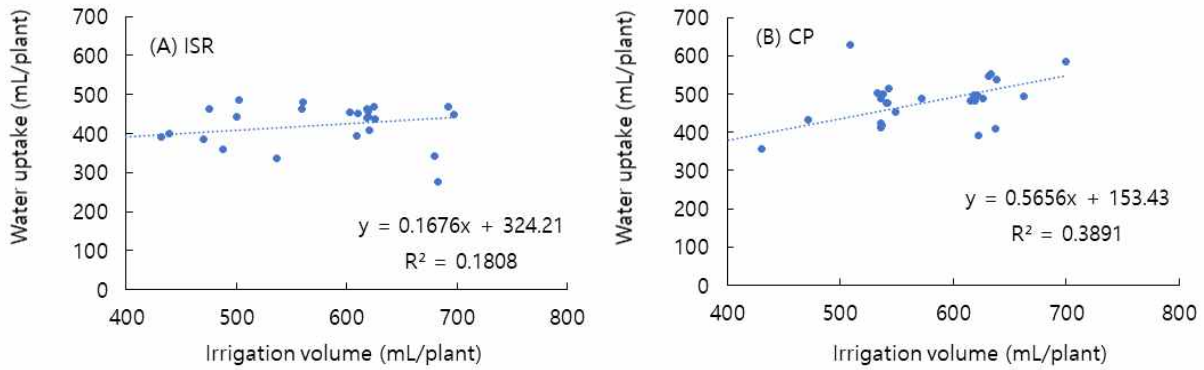


그림 1-4-10. 누적일사량제어(ISR)(A)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구(B)의 12월 7일부터 1월 4일까지 식물 한 개체의 평균 급액량과 수분흡수량 관계성.

표 8. 누적일사량제어(ISR)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구의 12월 7일부터 1월 4일까지 물관수 액흐름(sap flow: SF, mV) 시간대별 최대 측정치 및 최대 광량(SI, W/m²).

Treatment Hours	ISR	CP	ISR	CP	SI
	Rep1		Rep2		
0	503	530	740	570	0
1	526	524	772	585	0
2	533	517	745	566	0
3	531	505	768	597	0
4	538	532	743	614	0
5	548	521	758	583	0
6	558	512	761	610	0
7	570	708	845	623	0
8	770	827	1161	780	41
9	1650	2351	1264	1283	149
10	1545	2382	2529	1688	257
11	2737	2111	2731	1154	350
12	2739	1665	2465	2188	390
13	2671	2654	2687	2525	371
14	2372	2588	2233	2524	301
15	1898	2130	2191	2027	185
16	1341	1796	1756	1825	63
17	660	538	813	737	14
18	610	591	785	607	13
19	609	575	782	611	2
20	602	549	775	605	0
21	556	550	752	575	0
22	530	532	738	573	0
23	511	520	735	551	0
AV.	1088	1113	1272	1042	



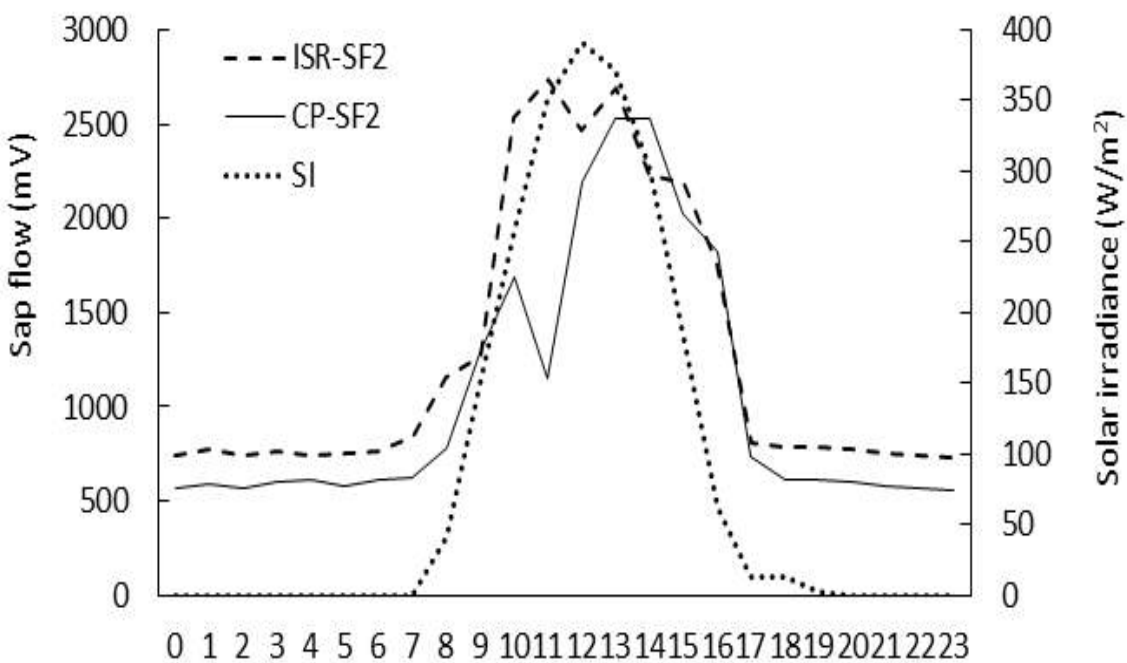
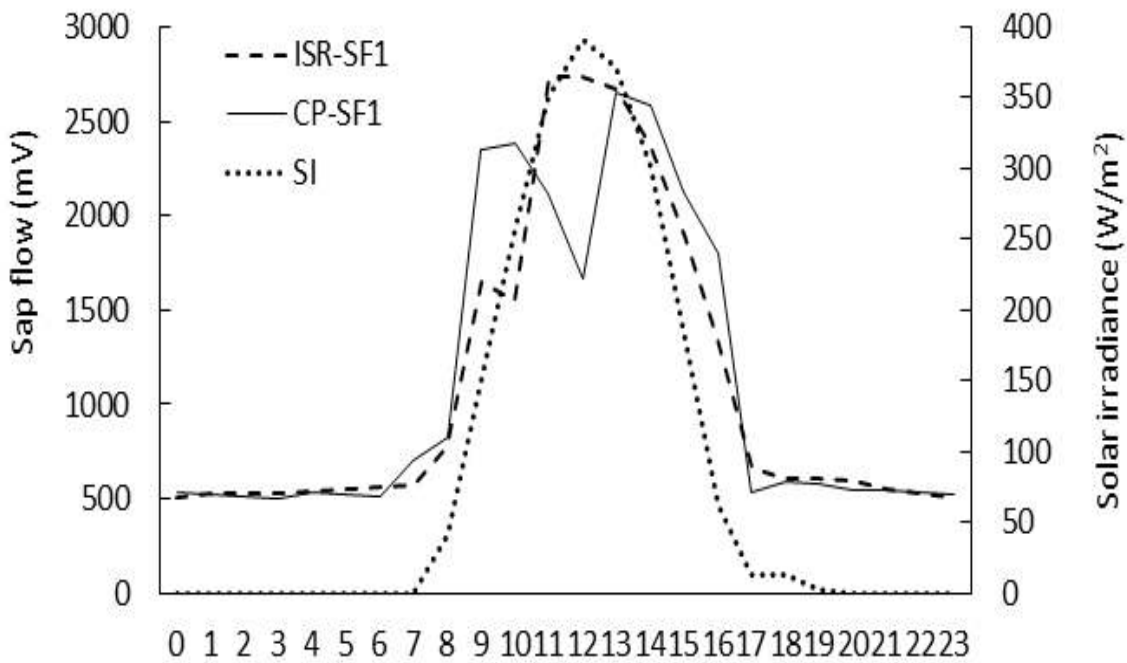


그림 1-4-11. 누적일사량제어(ISR)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구의 12월 7일부터 1월 4일까지 시간대별 물관수액흐름(SF) 최대값과 시간대별 평균 광량(SI).

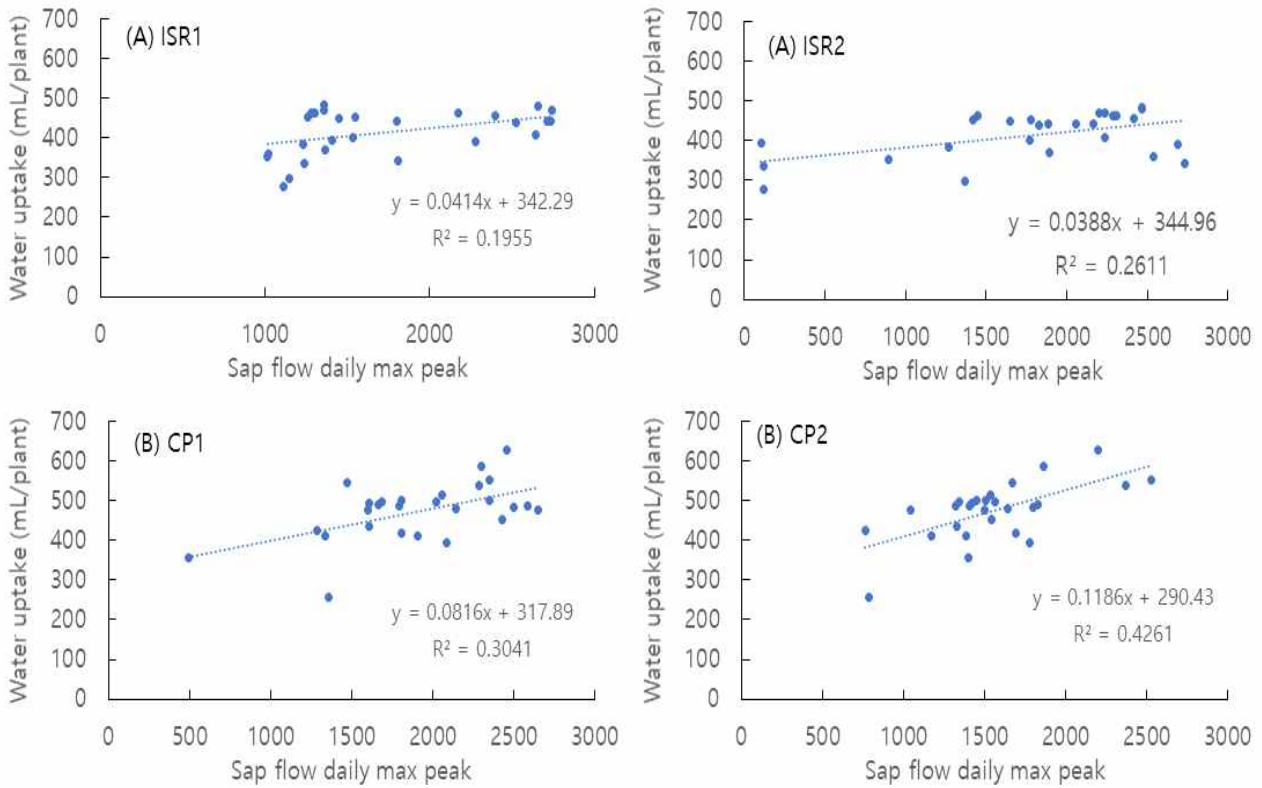


그림 1-4-12. 누적일사량제어(ISR)(A)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구(B)의 12월 7일부터 1월 4일까지 평균 주당 수분흡수량과 물관수액흐름 최고점과 관계성.

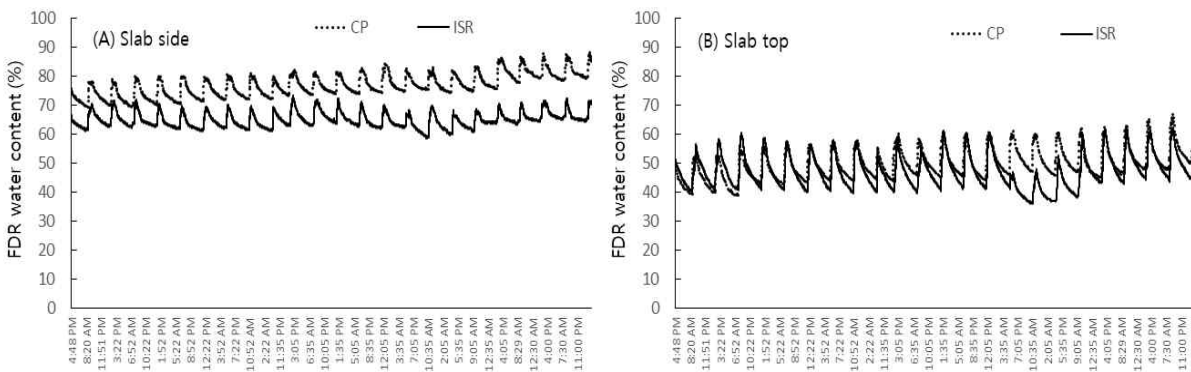


그림 1-4-13. 누적일사량제어(ISR)(A)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구(B)의 12월 7일부터 1월 4일까지 배지 측면(A)과 윗면(B)의 FDR 함수율(%) 변화.

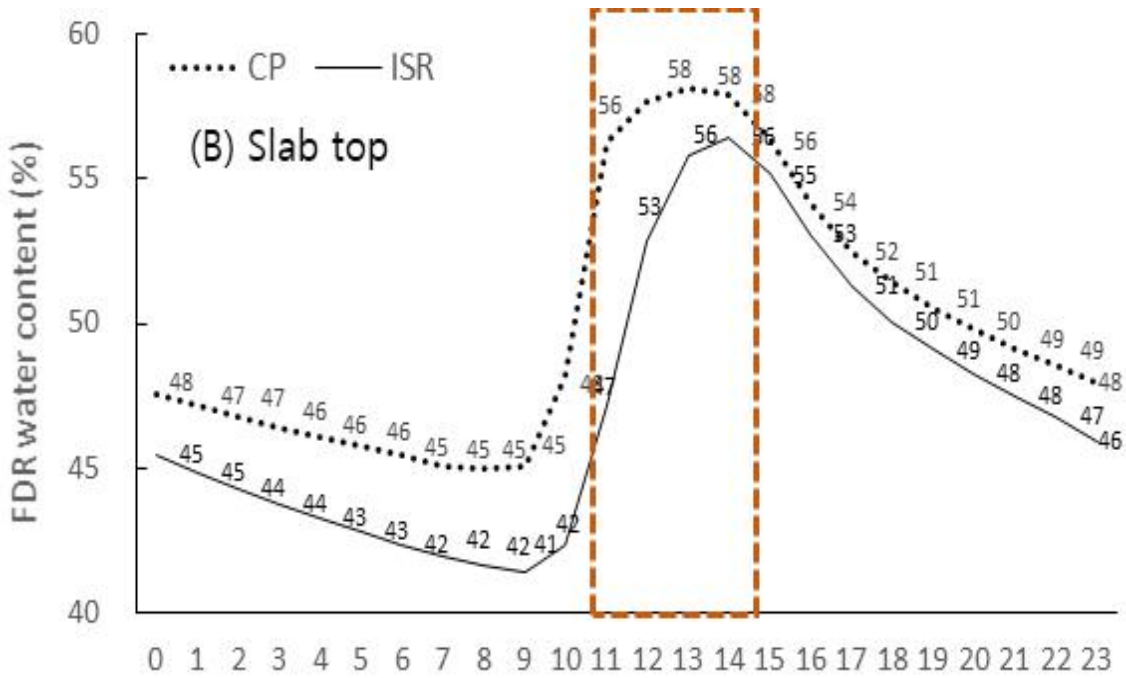
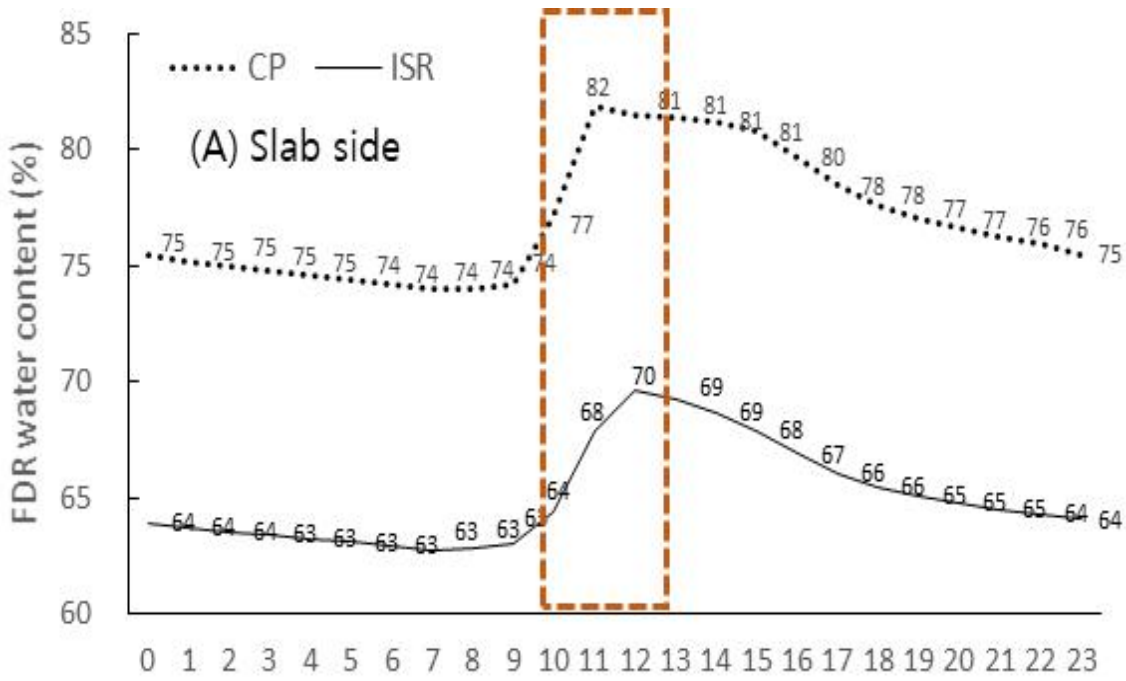


그림 1-4-14. 누적일사랑제어(ISR)(A)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구(B)의 12월 7일부터 1월 4일까지 일 중 시간대별 배지 측면(A)과 윗면(B)의 FDR 함수율(%) 변화.

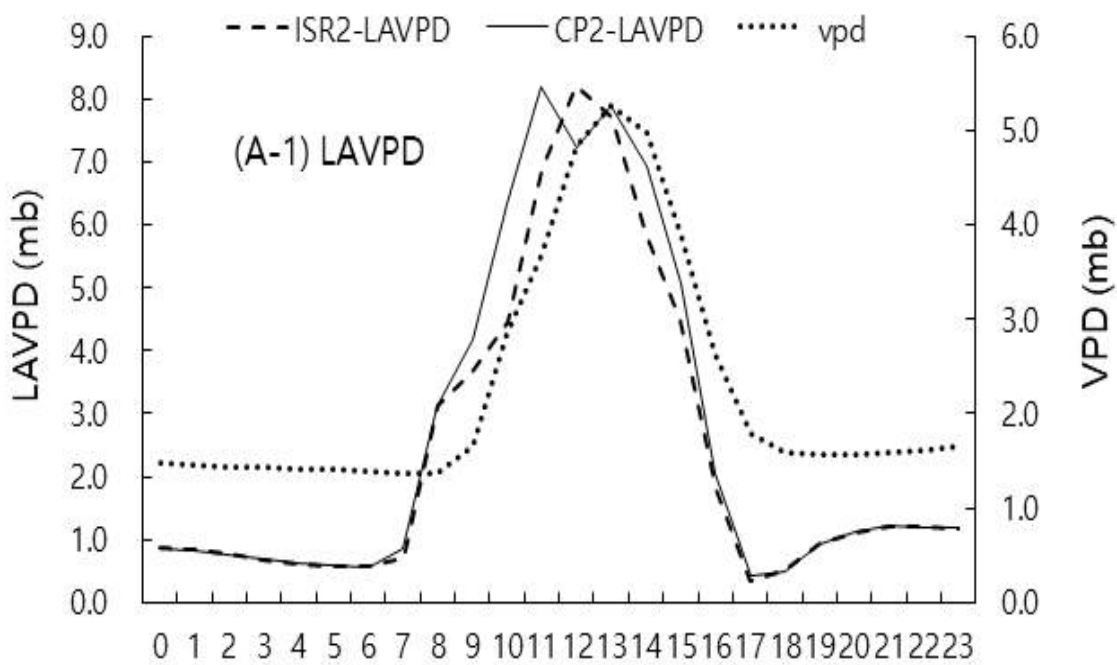
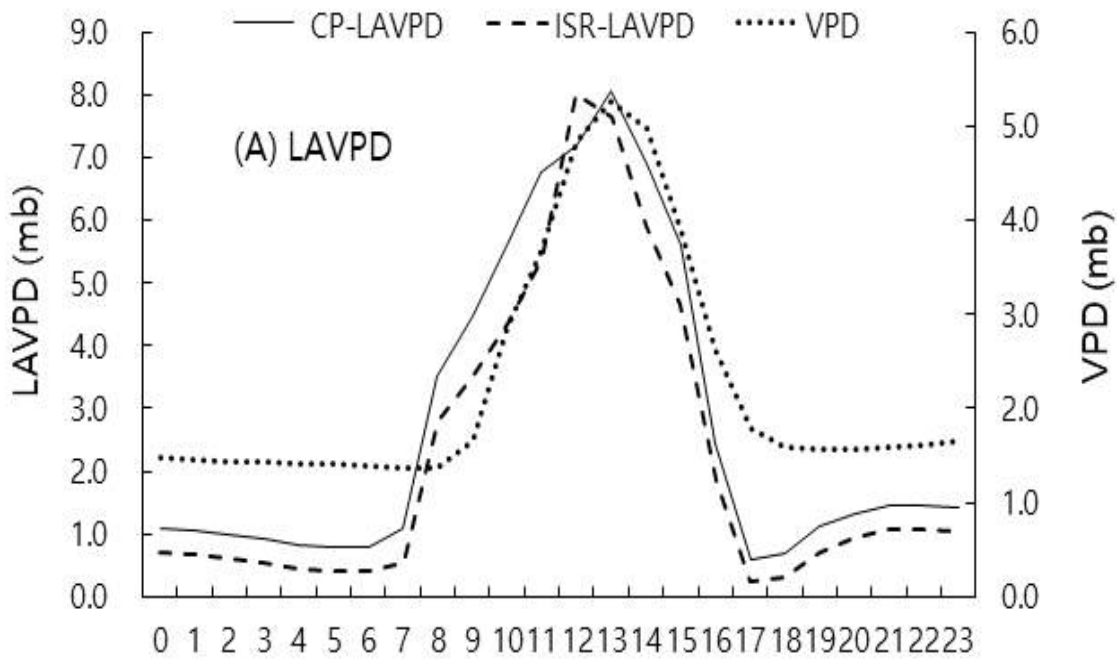


그림 1-4-15. 누적일사량제어(ISR)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구의 12월 7일부터 1월 4일까지 일 중 시간대별 포화수증기압차(VPD, mb) 및 엽의 수증기압과 대기의 수증기압과의 차(LAVPD, mb)(A, A-1)변화.

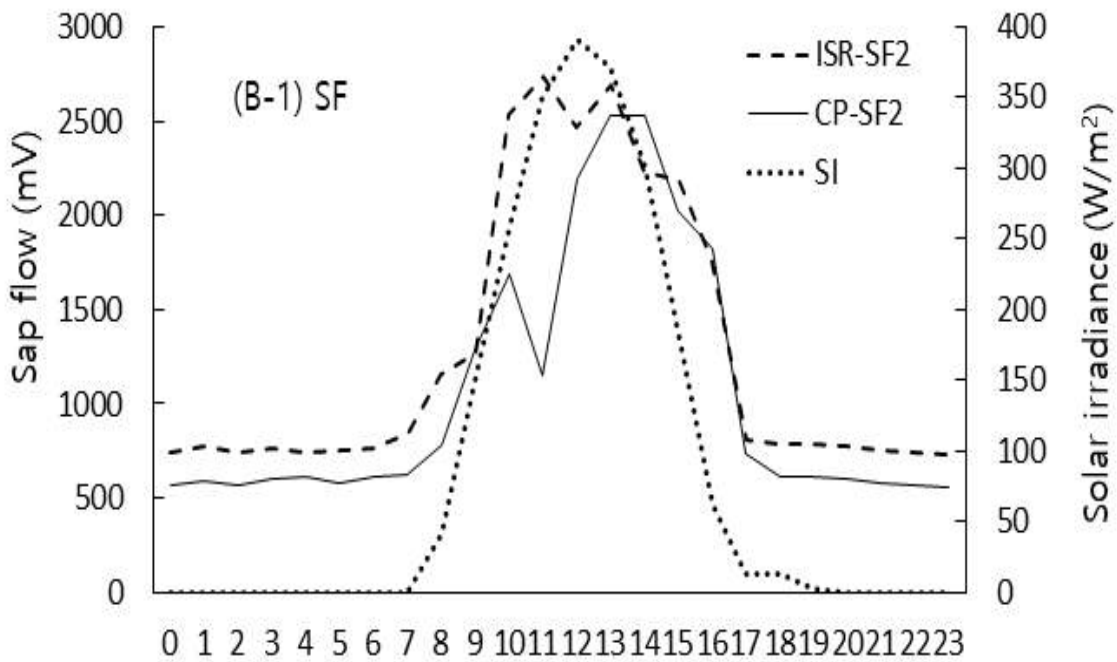
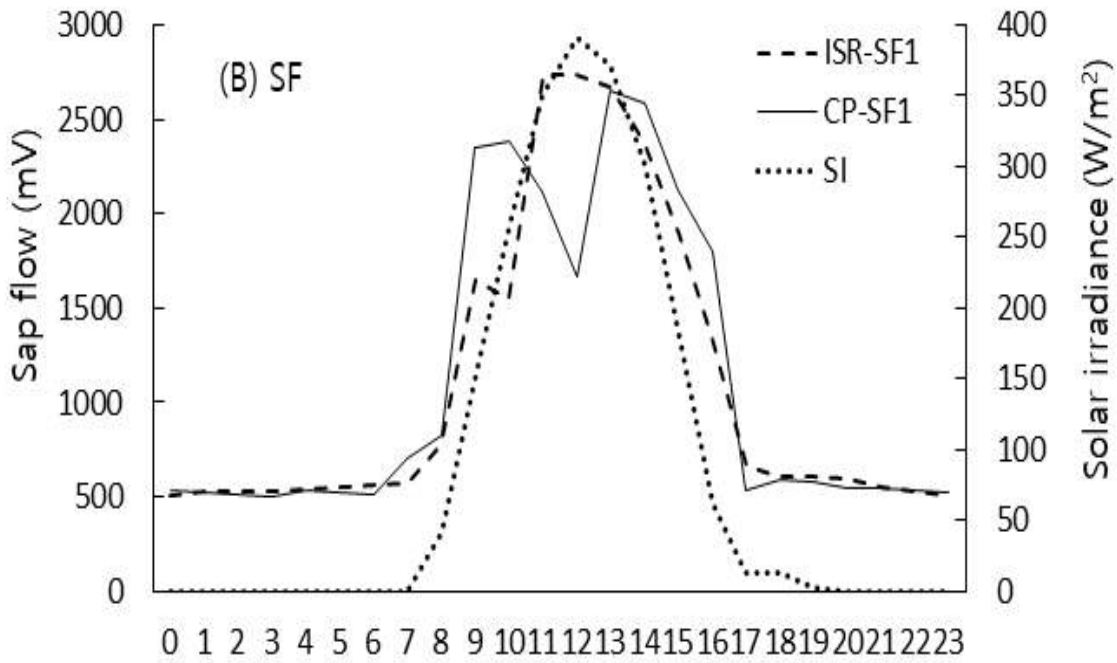


그림 1-4-16. 누적일사량제어(ISR)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구의 12월 7일부터 1월 4일까지 일 중 시간대별 물관수액흐름(SF, mV) 및 광량 (W/m<sup>2</sup>)(B, B-1) 변화.

○ 식물체 생육 및 수량

식물체 성장길이와 초장은 처리별 유의차가 없었고(표 9) 과중, 수량, 과실 둘레, 과고, 과폭도 처리별 유의차가 없었다(표 10). 과둘레 측정 센서에 의한 과둘레 변화 측정 결과도 유의차가 없었다(그림 1-4-17). 따라서, 급액제어 방식에 따른 식물체 생육 및 수량은 차이가 없었지만 CP에 의한 급액제어는 배액율을 ISR보다 8% 낮춰 물과 비료 소모를 줄일 수 있는 방식으로 보인다(표 11).

표 9. 누적일사량제어(ISR)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구의 성장길이와 초장.

Treatment	Growth length (cm) (n=6)		Plant height (cm) (n=6)	
	12/17	1/4	12/17	1/4
ISR	34.92	73.92	298	372
CP	34.92	72.50	286	358
t-test	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>

표 10. 누적일사량제어(ISR)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구의 과중, 수량, 과둘레, 과고, 과폭.

Treatment	Fruit weight (g·fruit <sup>-1</sup> ) (n=96)	Fruit yield (g·plant <sup>-1</sup> ) <sup>z</sup> (n=12 plants)	Fruit circumference (mm) (n=6)	Fruit length (mm) (n=6)	Fruit width (mm) (n=6)
ISR	217	1,376	229	528	607
CP	214	1,429	227	503	636
t-test	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>	<i>ns</i>

<sup>z</sup>Fresh fruit weights harvested to 2nd cluster.

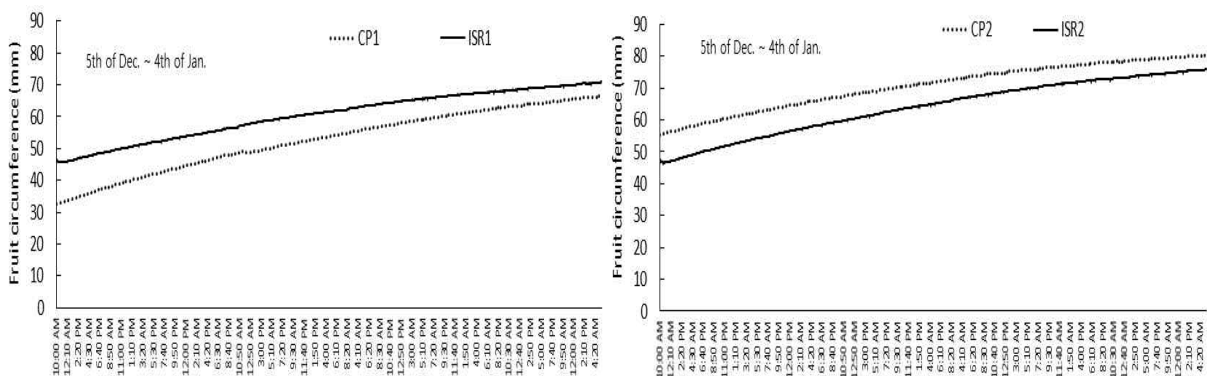


그림 1-4-17. 누적일사량제어(ISR)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구의 과둘레 측정 센서에 의한 과둘레 변화 (2반복, 좌, 우)

표 11. 누적일사량제어(ISR)와 배지 수분센서제어(CP) 처리구의 양액 소비량 비교

구분	기존 급액제어 시스템(누적일사량제어)	새로 개발된 급액제어 시스템
배액량	급액량의 평균 26%	급액량의 18%
양액 소비량	겨울: 4.0L/200g 토마토 (1-2화방)	겨울:3.5L/200g 토마토 (1-2화방)

(5) 결론 및 제언

콘덴서형 센서와 FDR 센서는 모두 유사한 방식으로 작동하지만, FDR 센서는 고주파(3~100MHz)를 이용하여 토양 내 유전을 정도에 따라 측정 회로 내에 걸리는 주파수영역에서 콘덴서에 걸리는 정전용량(electric capacity)으로 읽어 토양수분함량으로 환산하는 것이다. 즉, 센서 기기 본체(전자파 발생원)와 센서(전자파 발생 및 감지) 사이에 전선을 이었을 때 임피던스(저항)의 변화로 전자파의 이동은 파장을 이루는데 센서가 토양(수분)에 있을 때 전자파의 이동속도는 물의 쌍극성 때문에 느려진다. 전자파가 센서(탐지봉) 사이를 왕복하는 걸리는 시간이 토양수분함량과 일정한 관계가 있어 토양내 유전을 정도에 따라 반사파의 세기를 정전용량으로 읽어 토양수분함량으로 환산하는 것이다. 두 센서가 작동 원리는 유사하나 FDR 센서는 봉으로 되어 있어서 배지의 국부적인 위치에 한 포인트만 측정하지만 개발된 센서의 경우 배지 전체에서 약 70%에 해당되는 배지면적의 수분함량을 측정할 수 있다. 특히 코이어의 경우 압면에 비해 공극이 크고 배지 내의 입자가 압면에 비해 치밀하지 못하여 보수력이 떨어지고, 센서의 표시 값과 실제 함수율과의 관계에서 약 46%정도 차이가 나는 것으로 보고되었듯이 (Shin et al., 2015) 코이어는 압면에 비해 입자가 크고 거칠어 배지의 무게와 밀도가 상대적으로 높아 중력에 의한 자연 배액량이 커지고, Chip이나 Fiber의 함량에 따라 물리적 특성이 달라져 적합한 센서 설치방법과 계측지점을 찾는 것이 매우 중요하다(Park et al., 2014). 대부분 FDR과 같은 토양 수분센서들은 배지의 국소적인 부분을 측정하기 때문에 관수 후 시간의 흐름에 따라 중력에 의한 수분의 변화를 읽지 못하는 단점이 있고, 중량으로 제어하는 센서의 경우 배지 내 수분함량은 정확하게 제어할 수 있으나 외부의 충격이나 과실의 낙과 등 농작업에 의한 측정배지의 무게가 변할 경우의 오작동과 주기적인 보정 필요 등으로 사용상 번거로움으로 실제 현장에는 보급되지 않고 있다(Kim and Kim, 2004). 이처럼 대부분 수분 센서들은 배지 내 국부적 위치에 장착하여 배지의 극히 일부분의 함수량을 측정하게 되고, 여러 개의 센서를 1개의 배지에 사용하는 경우 상호 간섭으로 측정 정밀도가 떨어지는 것과 같이 근권의 수분을 측정하는 센서들은 적합한 측정위치와 그 특징에 대해 연구가 미비한 실정이다(Park et al., 2014). 반면 본 연구에서 개발된 센서는 배지의 특정 부분에 국한되지 않고 배지의 하부를 포함하는 보다 넓은 영역에 걸쳐 평균적인 함수량을 측정할 수 있다. 따라서 배지 전체의 평균 수분 측정이 가능하여 식물성장에 필요한 양액을 골고루 공급할 수 있어 식물의 고른 성장을 가능하게 할 수 있다. 또한, 배지의 함수량을 실시간으로 측정 가능하므로 함수량의 최대값과

최저값을 설정하여 배지 함수량을 조정하는 것이 가능하여 재배식물에 따른 함수량 조절이 가능하다. 또한, 배지의 함수량의 최대값을 조절함으로써 급액과 배액량 조절이 가능하여 양액 낭비와 배액의 과다배출을 막을 수 있어서 토양과 수질 오염을 막을 수 있다. 앞으로 추가 연구를 통하여 작물이 수분을 원하는 시점을 정확히 파악하고 이에 따른 급액방식의 변화가 작물의 생육에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 면밀히 관찰할 필요가 있을 것으로 보인다. 또한 이 과정을 통하여 효율적인 급액방식을 찾는 것이 물과 비료의 과도한 사용을 줄이고 농가의 생산비용을 감소시켜 고품질의 과실을 생산할 수 있을 것으로 판단된다.

마. 실험 5 <딸기 재배용 혼합 상토 배지 함수량 정량화>

(1) 요약

본 실험은 최근 개발된 컨덴서형 배지 수분측정 장치의 표준화를 위하여 딸기 재배용 상토에 설치된 컨덴서 전극판 간의 간격에 따른 커패시턴스(정전용량) 차이를 비교하여 적합한 간격을 구명하고 수분 공급에 따른 정전용량 변화와 로드셀로 측정된 중량함수량 변화의 관계식을 구하고자 수행하였다. 딸기 재배용 고설 재배조(1000x240x80mm)에 상토를 채우고 100×100mm 규격의 전극판 한 쌍을 서로 마주 보게 하여 그 간격을 6, 10, 또는 14cm 간격으로 설치하였다. 식물을 심지 않고 양액을 공급하면서 정전용량 변화와 상토의 중량함수량 변화를 전자장치와 소프트웨어를 이용하여 20~30초마다 측정하여 상호 비교하였다. 상토의 중량함수량이 최대 7.97kg일 때, 정전용량의 최댓값(pF, pico Farad)은 6cm 간격으로 설치한 경우는 2.87pF, 10cm는 1.28pF, 14cm는 0.53pF였다. 전극판 간격에 따른 정전용량과 함수량의 결정계수는 6cm는  $R^2=0.9634$ , 10cm는  $R^2=0.9674$ , 14cm는  $R^2=0.7615$ 였다. 따라서 전극판 간의 간격이 10cm보다 더 넓어지면 정전용량과 결정계수 모두 다른 두 처리에 비해 낮아지는 것을 알 수 있었다. 정전용량과 함수량의 관계식은 상용 curve fitting 프로그램을 이용하여 6cm와 10cm 처리에서의 정전용량을 각각의 최댓값으로 나눠 정규화하고, 6cm 처리의 정규화된 정전용량과 함수량을 변수로 하여 구하였다. 그 관계식을 이용하여 10cm 처리의 정규화된 정전용량에 대한 함수량과 실제 측정된 함수량과 비교하였을 때 기울기 0.992, y 절편 -0.111, 표준편차 0.404로 우수한 선형성을 보였다.

(2) 서언

과채류 고행배지경에서합리적인 급액관리는작물의 생산성과 품질을 향상시키고 배액 감소로 인한 토양 및 지하수 오염을 줄이는 중요한 요인이다. 적절한 급액 타이밍과 급액량결정은 실시간 근권 함수량과 작물 내 수분 상태 생체정보 데이터를 기반으로 이루어질 수 있다. 상용화



된 함수량 측정 센서 FDR과 TDR은 실시간 함수량을 측정할 수 있으나 배지의 국부적 위치의 함수량을 대푯값으로 일부분만 측정하는 한계가 있다. 최근 개발된 컨덴서형 배지 수분측정 장치는 100mm x100mm의 규격의 절연된 컨덴서 전극판을 사용함으로써 배지의 넓은 부분에 걸친 함수량을 측정할 수 있다. 본 실험은 최근 개발된 컨덴서형 배지 수분측정 장치의 표준화를 위하여 딸기 재배용 상토에 설치된 컨덴서 전극판 간의 간격에 따른 커패시턴스(정전용량) 차이를 비교하여 적합한 간격을 구명하고 수분 공급에 따른 정전용량 변화와 로드셀로 측정된 중량함수량변화의 관계식을 구하고자 수행하였다.

### (3) 재료 및 방법

#### ○ 정전용량 수분 센서 시스템

정전용량 수분 센서 시스템은 컨덴서형 수분 센서인 한 쌍의 방수절연전극판, 정전용량을 측정하는 전자장치와 소프트웨어를 실행하고 측정된 데이터를 저장, 출력하는 휴대용 컴퓨터로 구성된다(Fig. 1).

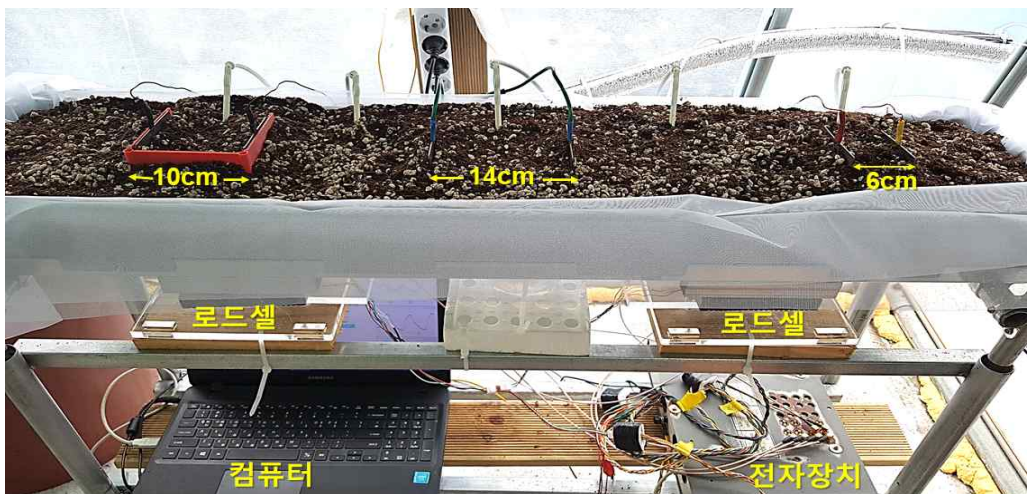


Fig. 1. Image of the capacitive water sensor at different distance between the electrode plates connected with electronic devices.

#### ○ 실험 장치

- 딸기용 스카이베드(A형 스카이베드, 1000mmX270(240)mmX80mm, 화성산업)에 망사원단을 깔고 105℃에서 72시간 건조된 상토(더존딸기고설재배용토, (주)건곤지오택)5.7kg을 충전하였다 (Fig. 1).

- 컨덴서 전극판 간의 간격을 각각 6, 10, 14cm가 되도록 설치하고 스카이 베드프레임에 고정하고 로드셀(TAL220 -10Kg, SparkFunElectronics, U.S.A.)위에 올려 영점을 잡았다.

- 전극판과 전자저울을 전자장치와 데이터 전송선으로 연결하여 정전용량과 중량함수량을 로깅하고 전자장치의 데이터는 휴대용 컴퓨터에 저장 및 디스플레이하였다.

- 수중펌프(IPS-225 [1/6HP], Hanil, Korea)에 연결호스를 연결하고 압력보상버튼으로 모든 점적핀에 일정한 양이 공급되도록 하였으며 타이머(SU-105ta2, Samwoneng, Korea)를 이용하여 10분마다 2분씩 급액하였다.

○ 정전용량과 함수량 상관관계 분석

- 전극판 간격에 대한 정전용량과 중량함수량의 상관관계를 구하였다.
- 최대값으로 normalization한 정전용량을 독립변수로 측정된 중량함수량을 종속변수로 관계식을 구하고, 관계식에 의한 함수량과 측정 함수량의 결정계수를 구하였다.

(4) 주요 결과

급액횟수가 많아질수록 함수량이 증가하고 정전용량도 증가하였으나 포화함수량에 가까워지면 함수량의 증가율이 줄어들며 함수량과 정전용량 모두 일정한 범위 값을 나타내어 정전용량 수분센서가 배지의 함수량 변화를 잘 나타내었다(Fig, 2).

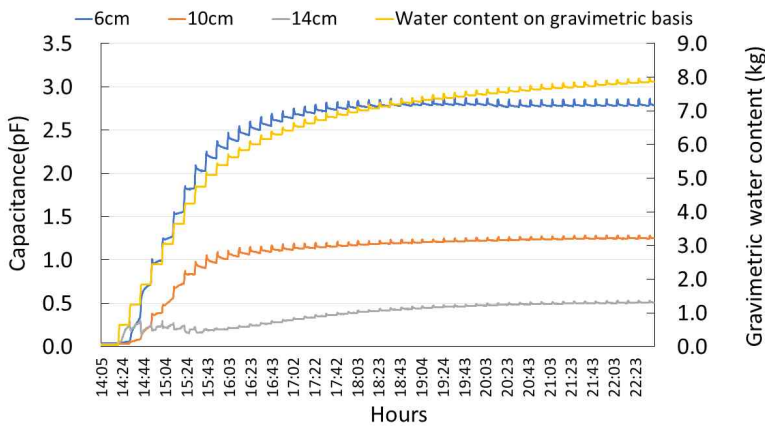


Fig. 2. Changes of capacitance and gravimetric water content at different distance between the electrode plates.

상토의 중량함수량이 최대 7.97kg일 때, 정전용량의 최댓값(pF, picoFarad)은 6cm 간격으로 설치한 경우는 2.87pF, 10cm는 1.28pF, 14cm는 0.53pF이고, 전극판 간격에 따른 정전용량과 함수량의 결정계수는 6cm는 0.9634, 10cm는 0.9674, 14cm는 0.7615였다. 따라서 전극판 간의 간격이 10cm보다 더 넓어지면 정전용량과 결정계수 모두 다른 두 처리에 비해 낮았다.(Fig. 3).

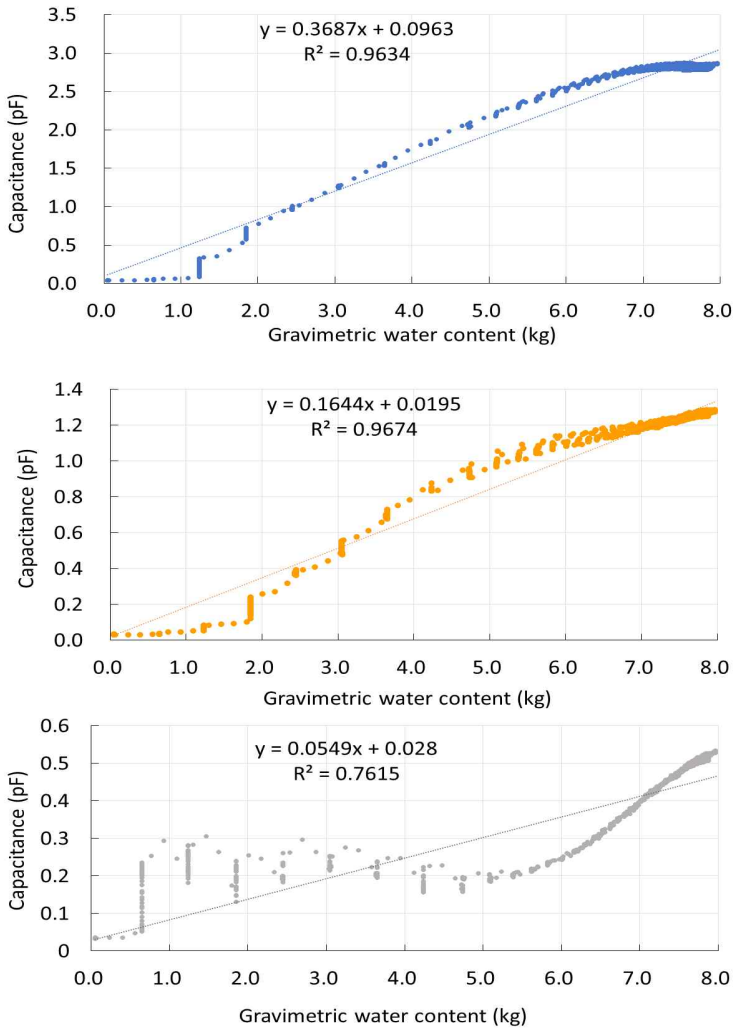


Fig. 3. Correlation coefficient between the capacitance and gravimetric water content by distance between the electrode plates at 6cm (A), 10cm (B), or 14cm (C).

간격이 다르면 정전용량이 달라지므로 6cm와 10cm에서 측정된 정전용량을 각각의 최댓값으로 나눠 Normalization하였다. 6cm 간격일 때, 정규화된 정전용량과 중량함수량 두 변수간의 관계식을 구하였다. 이 관계식에 10cm 간격에서 측정된 정규화된 정전용량을 대입하여 중량함수량을 계산하였고, 실험에서 측정된 함수량과의 결정계수가 0.9674로 우수한 선형성을 보였다 (Fig.4).

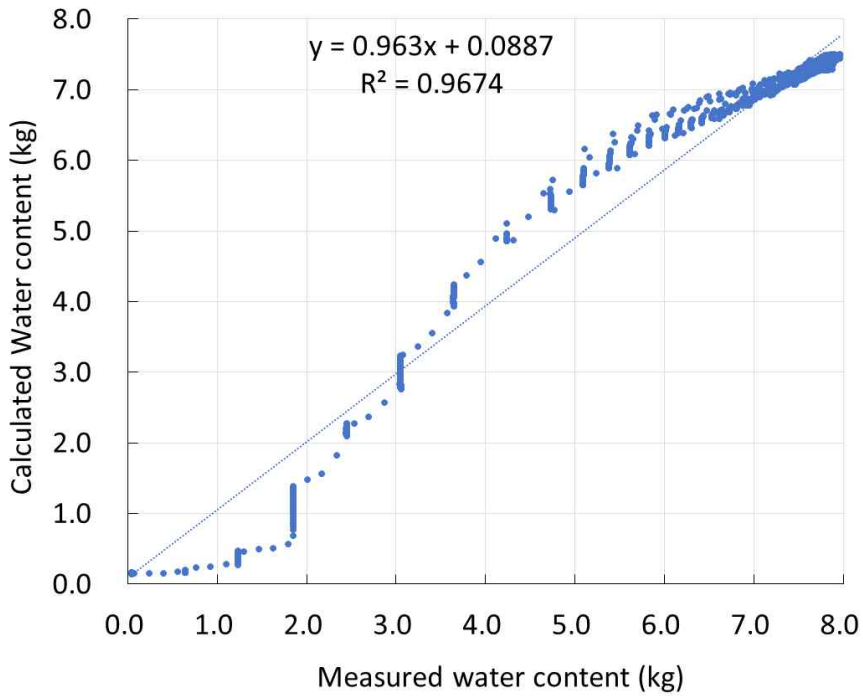


Fig. 4. Correlation coefficient between the calculated and measured water content at the 10cm distance between the electrode plates using the equation obtained from the 6cm distance treatment.

전극판간격이 14cm일 때, 배지 중량함수량과 상관관계가 다른 두 간격보다 낮았다. 따라서 배지의 수분함량을 나타내기에 적합하지 않다는 것을 알 수 있었다. 전극판 간격이 6cm 또는 10cm 일 때 배지 중량함수량과의 상관관계가 14cm 보다 높아 수분함량을 나타내기에 적합한 간격으로 판단되나, 실제 농가에서 작물을 재배할 때 센서의 간격이 뿌리의 발달에 영향을 미칠 수 있으므로 10cm간격이 더 적합할 것으로 사료된다.

## 2. 제1 협동: 생체정보 센서를 이용한 고품질 오이 생산 기술개발

가. 실험 1. <오이 토경 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 생체정보 모니터링>

### (1) 요약

2018년 8월 10일부터 9월 30일까지 관수개시점 3처리(10kPa, 20kPa, 30kPa)와 대조구(관행 관수)로 오이를 재배하였다. 9월 16일~30일까지 측정된 처리별 평균 토양수분장력은 7.6kPa(10kPa, 함수량 43.0%), 7.7kPa(20kPa, 함수량 37.0%), 25.3kPa(30kPa, 함수량 25.7%), 27.2kPa(Control, 함수량 21.0%)로 10kPa 처리에서 토양수분장력이 가장 낮았고, 관행 처리에서 높았다. 10, 20, 30, 및 대조구 처리구의 총 관수량(일평균 관수량)은 8.9L(591ml), 5.1L(339ml), 7.6L(516ml) 및 5.8L(386ml)로 공급되었다. 수확한 오이의 평균 과장은 23.5~24.6cm이었으며, 주당 과수 및 수량은 10kPa 처리에서 가장 높았다. 줄기의 수액흐름 밀도(Sap flow density, SF)는 일평균 일사량과 같은 경향을 보였으며, 10kPa 처리에서 SF가 가장 빨랐으며, 30kPa에서 가장 느렸다.

2018년 10월 2일부터 18일까지 16일간 관수개시점 처리에 따른 관수량 및 오이 줄기와 과병의 수액 이동 양상을 측정된 결과 일사량이 충분하여도 적정 온도가 유지되지 않으면 수액흐름이 감소하였다. 줄기와 과병의 수액흐름을 비교하였을 때, 10kPa은 줄기 수액흐름이 일평균  $0.16\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ 이었으며, 과병은  $0.14\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 줄기가 조금 더 많았으나, 30kPa은 줄기 수액흐름  $0.08\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 과병 수액흐름  $0.12\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ 보다 작았다. 오후 3시 이후 수액흐름이 10kPa과 30kPa 모두 줄기보다 과병의 SF 이동이 많아 과실로 동화산물 전류가 이루어지는 것으로 보인다. T-N, T-P, K 함량은 오이 상부가 하부보다 높았으며, Control 처리에서 무기이온 함량은 가장 높았으며, 30kPa 처리는 T-P, K 함량이 낮았다.

### (2) 주요 결과

○ 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 관수량과 재배환경

그림 2-1-1은 처리 기간 중 일평균 토양수분장력(kPa)의 결과로 10kPa 처리는 평균 7.6kPa(6.2~13kPa), 20kPa 처리는 평균 16.7kPa(7.7kPa~32.1kPa), 30kPa은 평균 25.3kPa(9.5~34.0kPa)을, Control은 평균 27.2kPa로 30kPa 처리와 비슷한 토양수분장력을 나타내었다. 이 기간 중 FDR 센서로 측정된 토양 수분함량은 10kPa 처리는 43.0%, 20kPa 처리는 37.0%, 30kPa 처리는 25.7%, Control은 21.0%의 용적 함수량을 나타냈다(그림 2-1-2).

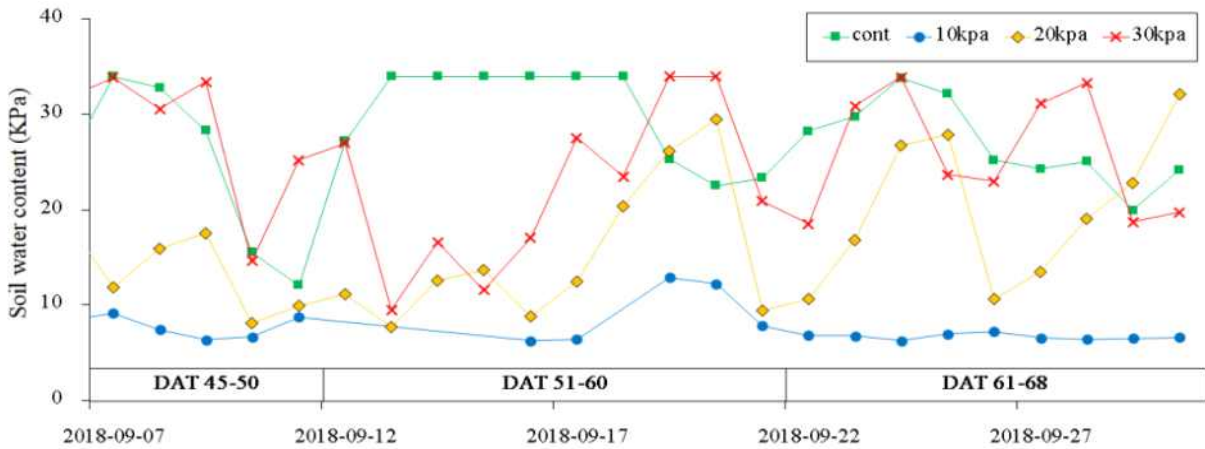


그림 2-1-1. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 일평균 토양수분장력  
(측정 기간: 2018.9.7 ~ 9.30.)

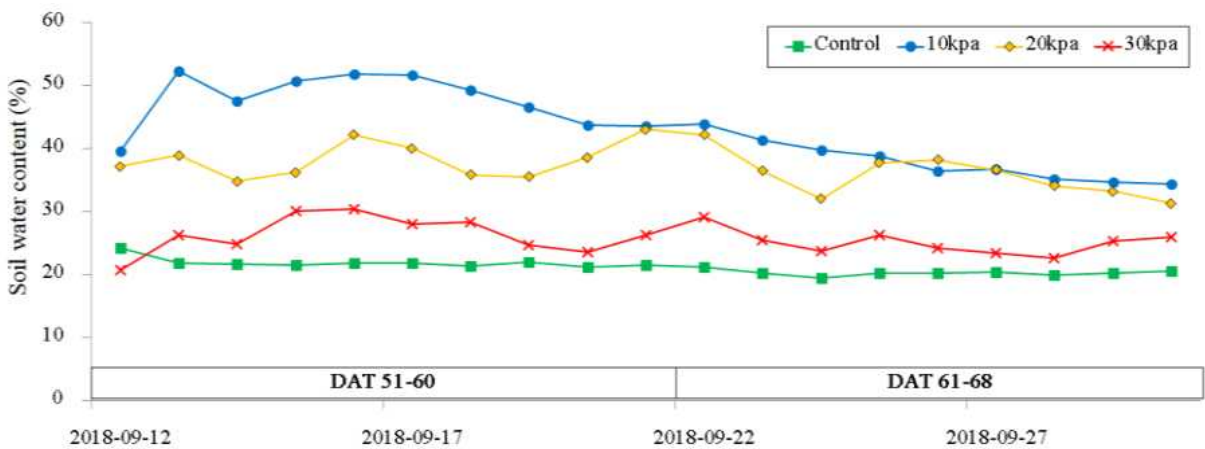


그림 2-2-2. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 일평균 토양수분함량  
(측정 기간: 2018.9.12.~ 9.30.)

2018년 9월 16일부터 30일까지의 오이 주당 관수량과 공급횟수 결과는 표 2-1-1과 같이 농가 관행 관수인 Control은 15일 동안 약 386ml/일 0.6회 관수하였고, 총 누적 관수량은 주당 5,795ml가 관수되었다. 1주당 최대 관수량은 10kPa 처리로 총 8,867ml, 하루 평균 591ml였으며, 30kPa 처리는 총 7,644ml 관수, 하루 평균 510ml가, 20kPa은 총 5,089ml로 하루 339ml로 가장 적게 관수되었다. 평균 공급횟수는 10, 20kPa 2.13회/일, 30kPa 1.8회/일로 측정되었다. 10kPa은 15일 동안 3일을 제외한 12일 공급된 것으로 보아 소량-다회 관수되었다. 반면 30kPa은 15일 동안 11일이 공급되지 않았으나, 한번 공급될 때, 5~8회로 하루 최대 2,283L/주로 다량-소회 관수되었다.

표 2-1-1. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 주당 일일 관수량과 공급횟수

	1주당 관수량(ml/주)				공급횟수			
	Control	10kPa	20kPa	30kPa	Control	10kPa	20kPa	30kPa
09월 16일	0	922	0	0	0	4	0	0
09월 17일	580	1,022	0	1,283	1(4분)	5	0	5
09월 18일	405	917	844	0	1(4분)	3	3	0
09월 19일	435	0	0	0	1(4분)	0	1	0
09월 20일	0	1,022	2,078	2,106	0	3	7	7
09월 21일	0	306	0	0	0	2	0	0
09월 22일	385	911	0	0	1(5분)	3	0	0
09월 23일	0	650	0	0	0	2	0	0
09월 24일	565	572	0	1,972	1(5분)	2	0	7
09월 25일	450	0	2,167	0	1(5분)	0	8	0
09월 26일	500	611	0	0	1(5분)	2	0	0
09월 27일	0	633	0	0	0	2	0	0
09월 28일	620	0	0	2,283	1(6분)	0	0	8
09월 29일	0	617	0	0	0	2	0	0
09월 30일	1,855	683	0	0	1(25분)	2	0	0
평균관수량(ml/주)	386	591	339	510	0.6	2.13	1.27	1.80
총관수횟수(분)					63	160	95	135
총관수량(ml)	5,795	8,867	5,089	7,644	9	32	19	27

\*10, 20, 30kPa: 관수개시점에 도달하면 5분 관수 후 1시간 정지, Control: 관행 타이머 관수 이론상 공급량=133ml/min (측정기간: 2018.9.16. ~ 9.30.)

재배 기간 중 온실 내의 지상부, 지하부의 주별 환경데이터 결과는 표 2-1-2와 같이 일평균 광량은 정식 41~50일째 107.0W/m<sup>2</sup>로 가장 많았으며, 51~60일째 59.8W/m<sup>2</sup>로 가장 적었다. 관측 기간 동안 일평균 광량은 81.8W/m<sup>2</sup>였다. 지상부 주간 온도는 재배기간 동안 평균 약 21.4℃였다. 주·야간의 온도 차는 정식 31~40일차 4.2℃, 61~68일은 12℃ 차이가 났다. 상대습도 또한 재배일수가 늘어날수록 하루 및 주·야간 모두 값이 떨어졌다. 근권 토양 평균온도는 22.1℃(24.7~19.6℃)였으나, 주간 재배 기간 중 지상부 온도에 비해 3℃(4.2~1.6℃) 낮은 반면 야간은 4.6℃(4.2~1.6℃) 높은 특징을 보였다. 특히 온도차는 9월 초인 정식 후 41~50일 지상부 온도와 토양온도가 큰 차이가 없었으나, 9월 22일인 정식 61일 이후 야간 온도가 급감하였다. 일평균 토양 온도 변화는 24.7℃에서 19.6℃로 5.3℃ 서서히 감소하였으나 오이 지하부 적정 온도(18~20℃) 범위에 정상적인 온도 범위에 분포하였다. 지상부 온도는 생육적온 23~28℃임을 고려할 때, 9월 초인 정식 41일 이후 온도는 다소 낮게 관리된 것으로 보인다. 근권의 토양온도는 대기온도의 비해 주간은 약 3℃ 낮았으며, 야간은 4.8℃가량 높았다. 토양의 주·야간 온도

차이는 0.2℃로 변화가 작았다. EC농도는 2.3~2.7dS/m 범위였다(표 2-1-2).

표 2-1-2. 시설오이 가을 재배에서 온실 내 주별 재배환경

측정항목	정식 후 재배일수				평균	
	31~40 (8/23~9/1)	41~50 (9/2~11)	51~60 (9/12~21)	61~68 (9/22~30)		
일 평균광량 (W/m <sup>2</sup> )	84.7	107.0	59.8	75.7	81.8	
지상부 평균온도 (℃)	주간	27.6	23.9	25.4	24.1	25.2
	야간	22.2	16.9	18.4	12.1	17.4
	하루	24.9	20.5	21.9	18.1	21.4
상대습도 (%)	주간	81.3	74.2	69.5	61.5	71.6
	야간	97.6	92.1	88.2	79.4	89.3
	하루	89.4	81.7	78.3	70.5	80.0
지하부 토양온도 (℃)	주간	24.9	22.3	21.6	19.9	22.2
	야간	24.6	22.3	21.6	19.4	22.0
	하루	24.7	22.3	21.6	19.6	22.1
EC(dS·m <sup>-1</sup> )	2.3	2.4	2.5	2.7	2.5	

- 측정 기간: 2018.8.23. ~ 9. 30.

- 일사량, 온도, 습도 측정은 Watchdog 1000series(Spectrum technologies Inc., USA)를 이용 15분 간격 측정하여 평균화함. 지하부 온도, 토양함수율(%) 및 EC는 (주)미래센서(Korea)을 이용 10분 간격 측정하여 평균화함



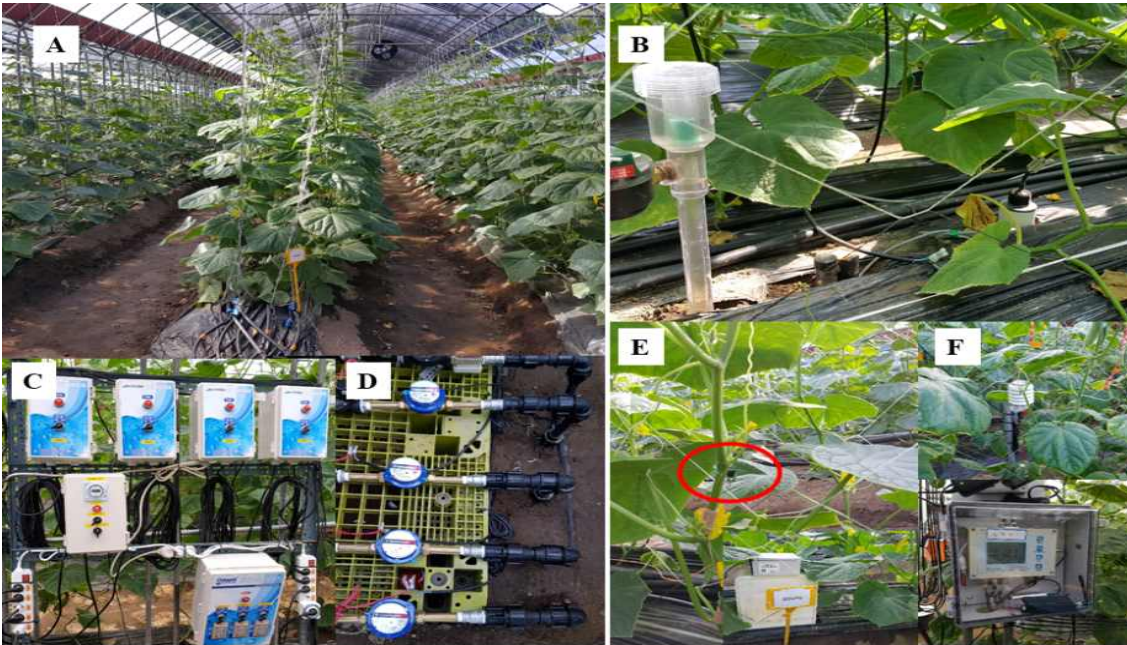


그림 2-1-3. 실험장소 및 설치한 장치

- A: 오이 관비 실험구
- B: 토양에 설치한 irrometer, 수분 장력로거, FDR 센서(좌로부터)
- C: 관수제어 시스템
- D: 유량계
- E: 식물 줄기에 설치한 micro sap flow 센서
- F: 온실의 온습도 센서와 로거

○ 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 생육

관수개시점 처리 기간 중 수확한 오이 과실 특성과 비상품과율은 표 2-1-3~4와 같다. 평균 과장은 30kPa 처리가 25.9cm로 가장 길었으며, Control 처리에서 24.1cm로 가장 짧았다. 평균 과수는 10kPa 처리가 13.0개로 나머지 처리보다 3.2~4.0개 가량 많았다. m<sup>2</sup>당 수량을 계산한 결과 10kPa 처리가 10,668g/m<sup>2</sup>로 가장 많았으며, Control(8,694g/m<sup>2</sup>), 20kPa(7,701g/m<sup>2</sup>), 30kPa(7,653g/m<sup>2</sup>) 순으로 높았다. 그러나 평균 과중은 10kPa 처리가 191.7g으로 가장 작았다. 10kPa 처리는 토양 수분장력이 6.2~13kPa(토양용적함수량 43%)의 높은 수분을 유지한 처리로 과수가 많음에 비해 과중은 적은 특징을 보였다. 곡과, 곤봉과와 같은 비상품과율은 전체 20~31%로 높았다. 특히 Control에서 31.8%로 가장 높았다. 수확 시기별로 과중은 재배 31~40일에서 221.4g으로 값이 가장 컸고, 오이 과수와 수량은 정식 후 31~40일째 20kPa과 30kPa 처리가 Control, 또는 10kPa 처리보다 값이 컸으나, 41일~68일부터는 10kPa 처리에서 더 많았다. 비상품과율은 주·야간 온도와 습도 변화가 커지는 9월 10일 이후에 발생율이 높아졌다(그림 2-1-4). 이는 정식 초기(8월 하순)와 9월 초의 고온 환경과 농가의 환경조절 시설 자재 부족에 따른 관리에 어려움이 비상품과율 발생에 영향을 준 것으로 보인다. 정식 후 비상품과율은 9월 10일 이후 증가하였으며, 수분 장력이 높았던 30kPa 처리에서 발생율은 높았다.

정식 후 31~40일의 수확량은 20kPa과 30kPa에서 각각 2.1, 1.5kg/m<sup>2</sup>로 가장 높았으나, 41~50 일째 수량은 Control 5.0kg/m<sup>2</sup>, 10kPa 4.4kg/m<sup>2</sup>로 m<sup>2</sup> 당 1.6~2.4kg가량 차이가 났다. 51~60, 61~68일째는 10kPa가 각 3.9, 1.2kg/m<sup>2</sup>로 가장 많았다. 정식 후 68일째 까지 누적 수량은 10kPa 이 10.7kg/주로 가장 많았고, Control, 30kPa, 20kPa 처리 순으로 많았다. 관수처리에 따른 오이 상대적 생산량을 그래프로 나타냈을 때, Control의 수량을 100%로 보았을 때, 정식 후 31~40일은 20kPa에서 175%로 가장 많이 수확하였다. 그러나 처리 41~50일에서 20, 30kPa 두 처리 모두 56%로 감소하였다. 재배 51~60일은 세 처리 모두 Control 처리보다 상대적 생산량이 높았으며, 특히 10kPa에서 200%로 2배 높게 생산하였다. 마지막 61~68일째에서도 10kPa 처리가 Control구 보다 67% 높게 수확하였다. 상대적 생산량은 오이 개수와 수확량과는 달리 20kPa 처리가 Control 처리보다 약 43% 높게 나타났다.

표 2-1-3. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 오이 과실 특성, 수량 및 비상품과율

관수 처리	평균 과장 (cm)	평균 과수 (개/주)	평균 과중 (g/주)	수량 (g/m <sup>2</sup> )	비상품과율 (%)
Control	24.1b <sup>Z</sup>	9.6b	205.9a	8,694ab	31.8
10kPa	24.8ab	13.0a	191.7a	10,668a	23.2
20kPa	25.8a	9.8b	198.5a	7,701b	20.5
30kPa	25.9a	9.0b	202.1a	7,653b	24.9

- 측정기간: 2018. 8. 23. ~ 9. 30. (n=5)

- <sup>Z</sup>Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$

표 2-1-4. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 시기별 오이 과실 특성

재배 일수	관수 처리	평균 과장 (cm)	과수 (ea/주)	평균 과중 (g/주)	수량 (kg/m <sup>2</sup> )	비상품과율 (%)
31~40 (8/23~9/1)	Control	23.0	1.3	221.3	1.2	0
	10kPa	25.0	5.7	221.3	1.2	0
	20kPa	24.4	2.7	222.3	2.1	0
	30kPa	26.0	1.0	220.6	1.5	0
	평균	24.6	2.7	221.4	1.5	0
41~50 (9/2~11)	Control	24.6	1.3	207.7	5.0	11.1
	10kPa	24.0	6.0	183.0	4.4	11.1
	20kPa	24.9	5.3	191.8	2.6	0
	30kPa	25.3	1.7	189.5	2.5	20
	평균	24.7	3.6	193.0	3.6	10.6
51~60 (9/12~21)	Control	24.0	2.3	181.4	1.9	12.5
	10kPa	25.1	3.3	180.7	3.9	18.8
	20kPa	25.8	3.0	192.8	2.3	22.2
	30kPa	25.4	1.0	200.3	2.7	40.0
	평균	25.1	2.4	188.8	2.7	23.4
61~68 (9/22~30)	Control	24.3	1.7	217.9	0.9	0
	10kPa	25.8	3.3	186.4	1.2	18.5
	20kPa	26.7	4.0	188.8	0.8	33.3
	30kPa	26.5	0.7	178.3	0.5	0
	평균	25.8	2.4	192.9	0.9	13.0

측정기간: 2018. 8. 25.~ 9. 30. (n=3)

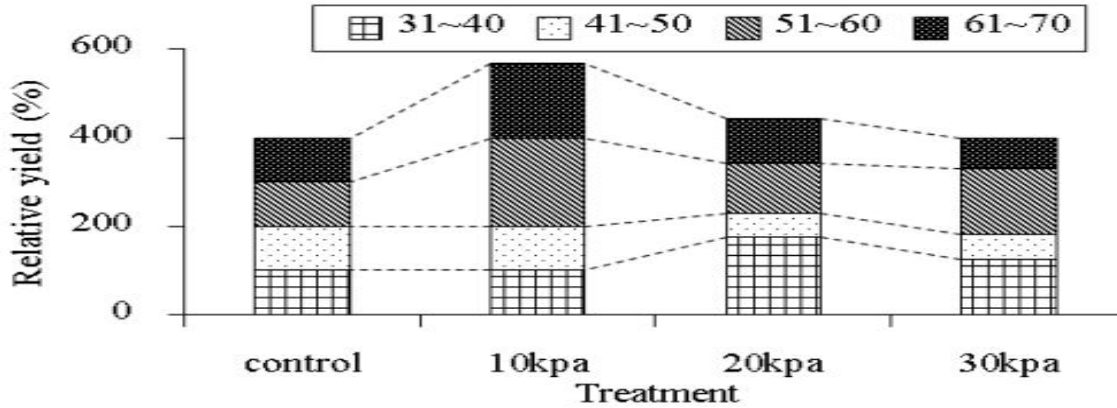


그림 2-1-4. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 대조구 대비 오이의 상대적 생산량 (추정기간: 2018. 8. 25, ~ 9. 30)



그림 2-1-5. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 오이 생육

재배 기간 중 오이의 관수량과 물 소비량을 계산하였을 때, 하루 관수량은 Control은 386ml, 10kPa 591ml, 20kPa 339ml, 30kPa 510ml 관수하였으며, 이에 따른 재배 68일간 오이의 재배에 사용된 누적 관수량을 산출하였을 때 Control 26.3L, 10kPa 36.0L, 20kPa 23.1L, 30kPa 34.7L로 계산되었다(표 2-1-5). 총 관수량과 총 수량을 토대로 오이 1g당 생산되는 물 소비량을 계산하였을 때, 30kPa 처리가 20.3ml로 가장 많이 소비되었으며, Control 처리에서 12.1ml/g으로 물 소비량이 가장 좋았다. 그러나 1회 실험에 의한 결과로 재배기간 중 관수량 자료 누락 등이 많아 평균값에 의한 것으로 차년도 정밀 실험을 통해 보완할 예정이다.

표 2-1-5. 시설오이 가을재배에서 관수개시점 처리에 따른 총 관수량과 물 소비량

	Control	10kPa	20kPa	30kPa
일일 관수량 (ml/day)	386	591	339	510
총 관수량 (L/68days)	26.3	36.0	23.1	34.7
수분이용효율 (ml/g)	12.1	15.9	12.4	20.3
수분이용효율 (L/200g)	2.4	3.2	2.5	4.1
토양수분장력 (kPa)	26.6	6.8	19.0	25.3
토양함수율 (%)	20.2	38.7	36.3	25.5

측정기간: 2018. 8. 10. ~ 9. 30.

\*Control의 이론상 공급량으로 산출한 200g 당 물 소비량은 3.6L

○ 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 수액흐름 변화

관수개시점 처리 56일부터 68일까지의 일사량에 따른 오이 줄기의 수액흐름 변화는 유사한 경향을 나타내었다(그림 2-1-6). 처리 56~60일은 Control, 10kPa, 20kPa, 30kPa 순으로 SF 빈도가 높았으나, 이후에는 10kPa이 다른 처리에 비해 높은 경향을 보였다. 나머지 처리는 큰 차이가 없는 것으로 보인다.

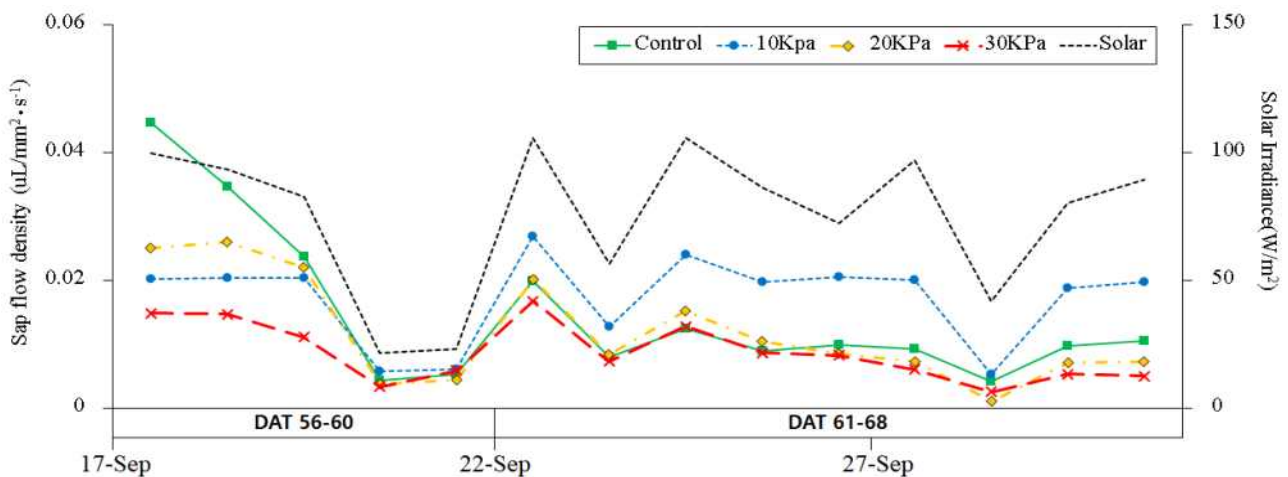
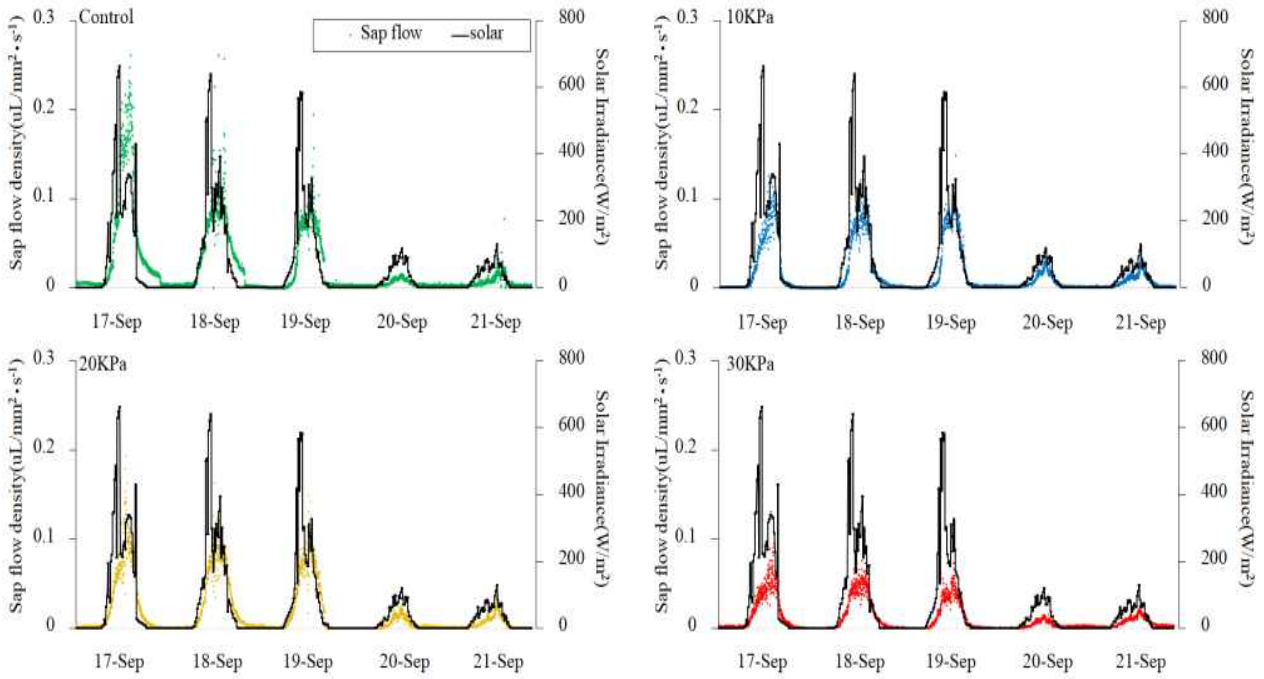


그림 2-1-6. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 평균 광량과 관수개시점 처리별 오이 줄기 수액흐름 (측정기간: 2018. 9. 17. ~ 9. 30)

일일 일사량과 수액흐름 변화를 나타낸 결과는 그림 2-1-7과 같다. 정식 재배 후 56~60일, 62~66일 동안 누적 광량을 비교하였을 때, 재배 56~60일이 62~66일보다 8,372kW/m<sup>2</sup> 가량 낮았다. Sap flow는 광량이 증가할수록 증가하였는데, Sap flow의 변화는 광량의 반응에 즉각적이기 보다 약 1시간 30분 일정 시간 뒤에 증가하였다. 두 기간 동안의 누적 Sap flow는 재배 62~66일째 누적 광량이 높았음에도 불구하고, 재배 55~60일 일 때 높았다. 이는 재배 62~66일이 누적 광량은 높으나 평균 온도가 3.7℃ 낮았기 때문에, 수액흐름에도 영향을 준 것으로 생각된다.

[2018.9.17.~9.21 (정식 56~60일)]



[2018.9.22.~9.30 (정식 62~66일)]

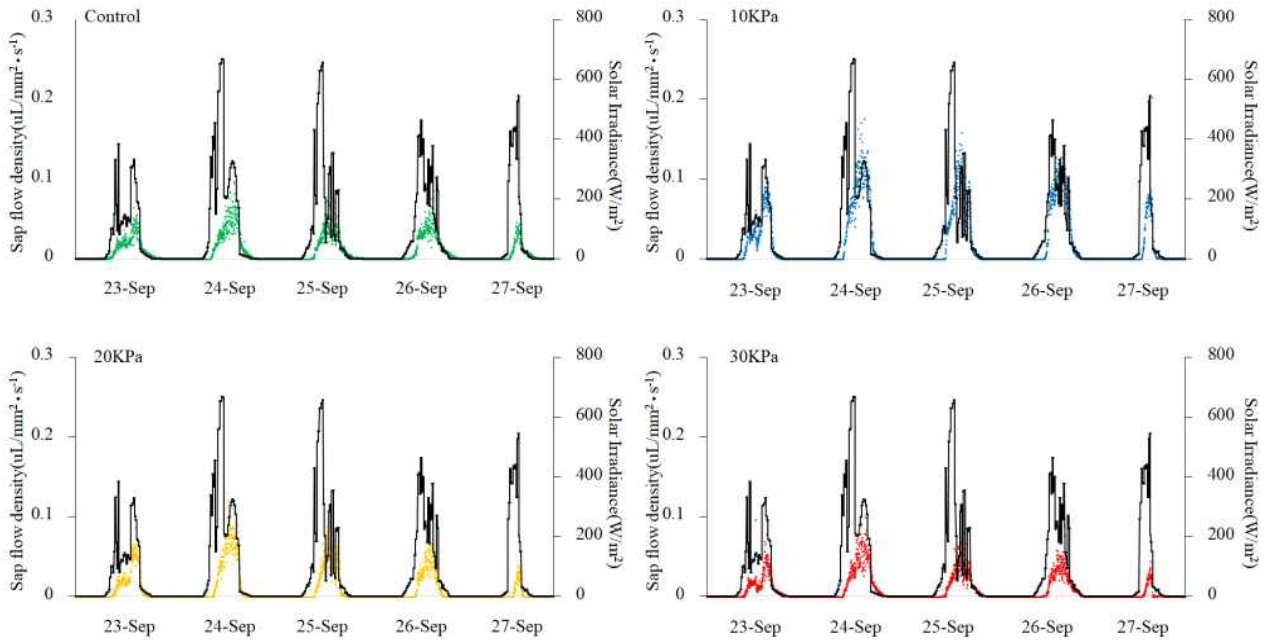


그림 2-1-7. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 일사량과 관수개시점 처리별 줄기 수액흐름 변화

그림 2-1-8은 하루 중 누적광량에 따른 SF 누적량을 나타낸 것으로 Control구는 수분 장력이 9월 17일과 18일 34kPa로 4분씩 1회 관수 되었으며, 누적 수액흐름량이 가장 많았으며, 30kPa 처리는 27.5~23.5kPa로 9월 17일에 5회 관수되었고, 누적 SF량이 가장 낮았다. 기간 중 총 누적 SF량은 누적광에 비례하는 경향을 보였으며, 광량이 낮았던 9월 20일과 21일에는 모든 처리에서 관수 유무에 상관없이 총 누적 SF량이 적은 것으로 나타났다. 또한 지상부 온도가 하강했던 9월 20일 이후 62~66일 재배 누적광량에 대한 총 SF량은 10kPa 처리에서 높았다. 10kPa의 기간 중 수분 장력은 평균 6.6kPa로 측정되었다. 관수량은 2,467ml가 공급되었다. 한편 20kPa, 30kPa도 총 관수량이 각 2,166ml, 1,515ml로 유사한 양이 공급되었으나, 총 수액흐름량은 낮은 경향을 보였다. SF 흐름은 관수량, 토양 수분 장력 보다 광량에 일정한 관계를 갖는 것으로 보인다.

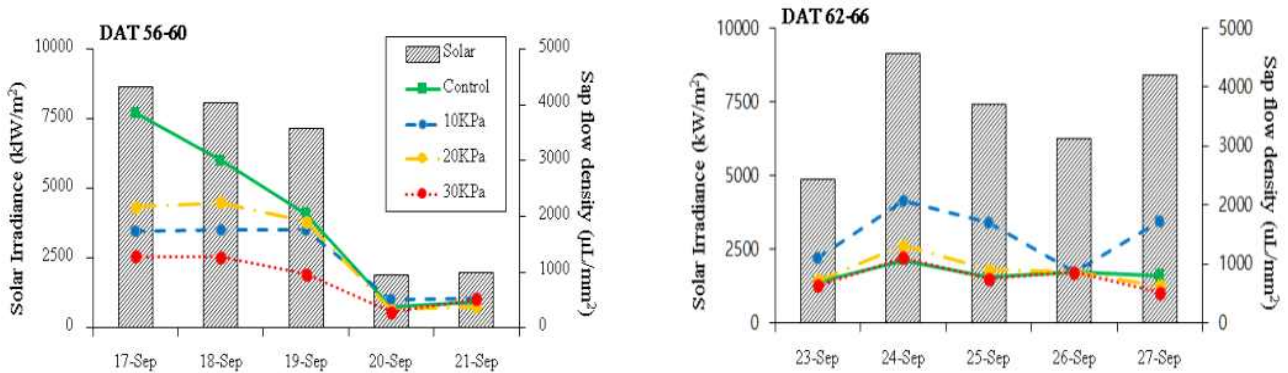


그림 2-1-8. 시설오이 가을 재배에서 누적일사량에 따른 관수개시점 처리별 즐기누적 수액흐름 (측정기간: 2018. 9. 17.~ 9. 27)

그림 2-1-9는 정식후 56~60일, 62~66일째, 일일 누적광, 온도와 수액흐름과의 상관관계이다. 정식 56~60일째에서 누적광과 수액흐름의 상관관계에서 4처리 모두  $R^2$ 값이 0.95~0.99로 유의성이 매우 높았다. Control 처리구의 기율기가 가장 높았으며, 30kPa처리가 기율기가 가장 낮았다. 일평균 온도에서도  $R^2$ 값은 0.8~0.98로 유의성이 매우 높았다. 정식 62~66일째 정식 후 일사량과 수액흐름의  $R^2$ 값은 56~60일째보다 낮았다. 특히 20kPa, 30kPa 처리는  $R^2$ 값이 각 0.27, 0.14로 유의성이 매우 낮았다. 10kPa를 제외하고, 나머지 3처리는 정식 56~60일보다 기율기가 매우 낮았다. 반면 온도와 수액흐름의 상관관계를 보았을 때, 20kPa의  $R^2$ 값은 0.67, 20kPa 0.79로 일사량과 수액흐름의 관계보다 더 유의성이 높았다. 이는 수액흐름은 누적광 이외 온도 또한 영향이 있는 것으로 보인다.

56~60일, 62~66일째, 일평균 온도와 수액흐름의 상관관계로, 일평균 온도에 대한 누적 SF 상관성은 정식 56~60일째가 정식 62~66일째보다 높았다. 표 2-1-6~7은 재배 기간 중 누적광, 평균 온도, 관수제어 처리에서의 측정된 평균 kPa과 관수량 및 총 누적 SF값을 정리한 것이다.

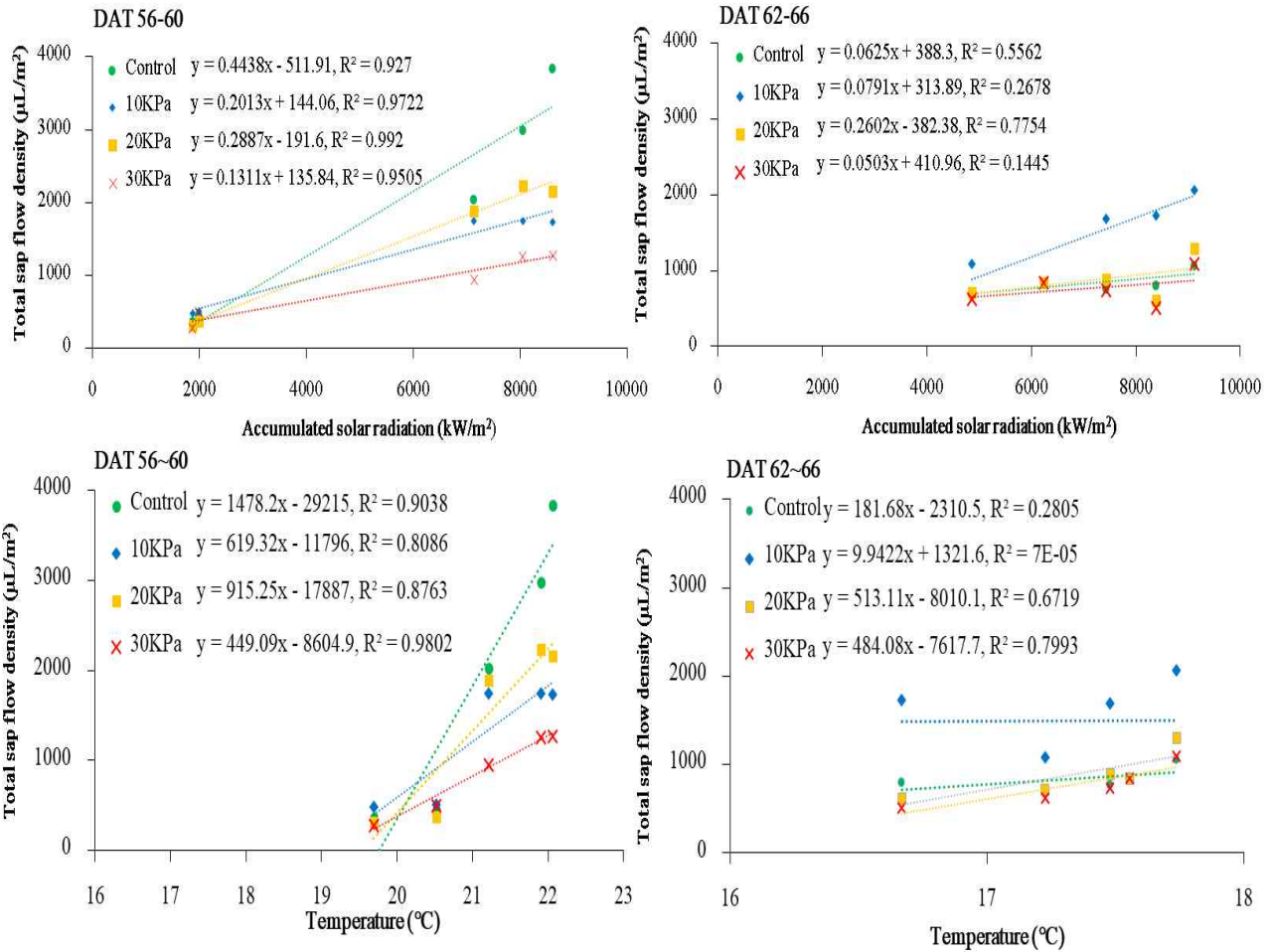


그림 2-1-9. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 누적일사량, 일평균온도와 수액흐름의 상관 (측정기간: 2018. 9. 17. ~ 9. 27)

표 2-1-6. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 정식 후 재배 56~60일에서 일일 누적광, 수분 포텐셜, 관수량, 일일 누적 수액흐름

	누적광 (kW/m <sup>2</sup> )	평균 온도 (°C)	토양 수분 장력 (KPa)				관수량 (ml/주)				총 줄기 수액흐름 (μL/m <sup>2</sup> )			
			Control	10kPa	20kPa	30kPa	Control	10kPa	20kPa	30kPa	Control	10kPa	20kPa	30kPa
9월 17일	8,615.7	22.1	34.0	6.4	12.5	27.5	580	1,022	0	1283	3,853.5	1,743.9	2,169.7	1281.0
9월 18일	8,057.7	21.9	34.0		20.4	23.5	405	917	844	0	2,996.2	1,759.7	2,246.5	1266.3
9월 19일	7,144.2	21.2	25.3	13.0	26.2	34.0	435	0	0	0	2,043.0	1,762.4	1,900.1	963.0
9월 20일	1,875.6	19.7	22.5	12.2	29.5	34.0	0	1,022	2078	2106	370.4	501.1	329.4	287.2
9월 21일	1,990.8	20.5	23.3	7.8	9.5	20.9	0	306	0	0	463.2	526.2	387.9	511.1
평균	5,536.8	21.1	27.8	9.9	19.6	28.0	284	653	584	677	1,945.3	1258.7	1,406.7	861.7
합	27,684.0	105.4					1,420.0	3,266	2,922	3,388	9,726	6,293	7033	4308



표 2-1-7. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 정식 후 재배 62~66일에서 일일 누적광, 수분 포텐셜, 관수량, 일일 누적 수액흐름

	누적광 (kW/m <sup>2</sup> )	평균 온도 (°C)	토양 수분 장력 (KPa)				관수량 (ml/주)				총 줄기 수액흐름 ( $\mu\text{l}/\text{m}^2$ )			
			Control	10kPa	20kPa	30kPa	Control	10kPa	20kPa	30kPa	Control	10kPa	20kPa	30kPa
9월 23일	4,864.5	17.2	29.8	6.8	16.8	30.9	0	650	0	0	688.8	1,096.6	725.7	633.3
9월 24일	9,124.2	17.7	33.8	6.3	26.8	34.0	565	572	0	1972	1,068.9	2,080.1	1,308.1	1,106.5
9월 25일	7,437.6	17.5	32.2	7.0	27.9	23.7	450	0	2167	0	773.3	1,699.6	900.6	750.9
9월 26일	6,237.9	17.6	25.2	7.2	10.7	23.0	500	611	0	0	856.3	856.3	856.3	856.3
9월 27일	8,392.5	16.7	24.3	6.6	13.5	31.2	0	633	0	0	806.4	1,737.0	630.8	520.2
평균	7,211.3	17.3	29.0	6.8	19.1	28.5	303.0	493.3	433.3	394.4	838.7	1,493.9	884.3	773.4
합	36,056.7	86.7	29.0	6.8	19.1	28.5	1515.0	2466.7	2166.7	1972.2	4,193.6	7,469.6	4,421.4	3,867.1

○ 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 오이 과실 수액흐름

2018년 10월 2일부터 18일까지 16일간 관수개시점 (수분장력값 기준) 10kPa, 20kPa, 30kPa에 따른 관수량 및 오이 줄기와 과병의 수액 이동 양상을 측정된 결과는 다음과 같다.

오이 1주 당 일일 관수량은 관행구인 Control은 일 평균 436ml, 총 누적 관수량 7,420ml로 관수하였다(표 2-1-8). 일평균 관수량은 10과 30kPa 처리에서 457~468ml로 가장 많이 관수되었고, 20kPa 219ml로 다른 3처리보다 약 2배가량 적었다. 총 공급횟수는 10kPa가 29회로 가장 많았으며, 30kPa 처리구 28회와 큰 차이가 없었다. 그러나 10kPa은 조사 16일 동안 3일을 제외한 13일간 1~3회/일 관수된 반면, 30kPa은 조사기간 동안 6일밖에 관수되지 않았으나 하루 5~7회 관수되었다. 20kPa은 16일 동안 4일 관수되었으며, 총 13회 관수되었다.

표 2-1-8. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 오이 관수량과 공급횟수

	1주당 관수량(ml/주)				공급횟수			
	Control	10kPa	20kPa	30kPa	Control	10kPa	20kPa	30kPa
10월 02일	0	928	0	1,917	0	3	0	7
10월 03일	0	0	0	0	0	0	0	0
10월 04일	840	306	0	0	1(10분)	1	0	0
10월 05일	0	606	0	0	0	2	0	0
10월 06일	0	0	0	1,339	0	0	0	5
10월 07일	460	656	0	0	1(7분)	2	0	0
10월 08일	0	317	1,433	0	0	1	5	0
10월 09일	725	622	0	0	1(10분)	2	0	0
10월 10일	0	611	0	1,350	0	2	0	5
10월 11일	0	0	0	0	0	0	0	0
10월 12일	650	917	1,433	0	1(10분)	3	5	0
10월 13일	820	606	0	617	1(10분)	2	0	2
10월 14일	0	611	0	1,367	0	2	0	5
10월 15일	2,095	667	578	0	1(20분)	3	2	0
10월 16일	0	0	283	0	0	0	1	0
10월 17일	0	611	0	0	0	3	0	0
10월 18일	1,830	311	0	1,361	1(10분)	2	0	5
평균관수량(ml/주)	436	457	219	468	0.4	1.7	0.8	1.7
총관수시간(분)					77	140	65	145
총관수량(ml)	7,420	7,767	3,728	7,950	7	28	13	29

\*10, 20, 30kPa: 관수개시점에 도달하면 5분 관수 후 1시간 정지, Control: 관행 타이머 관수.  
측정기간: 2018. 10. 2. ~ 10. 18.

처리 기간 중 처리별 평균 수분 장력은 Control은 약 14.6kPa (7.1~26.2kPa), 10kPa은 7.3kPa(4.9~9.8kPa), 20kPa는 19.3kPa (7.0~33.9kPa), 30kPa은 26.7kPa (15.2~33.9kPa)로 유지되었다(그림 2-1-10).

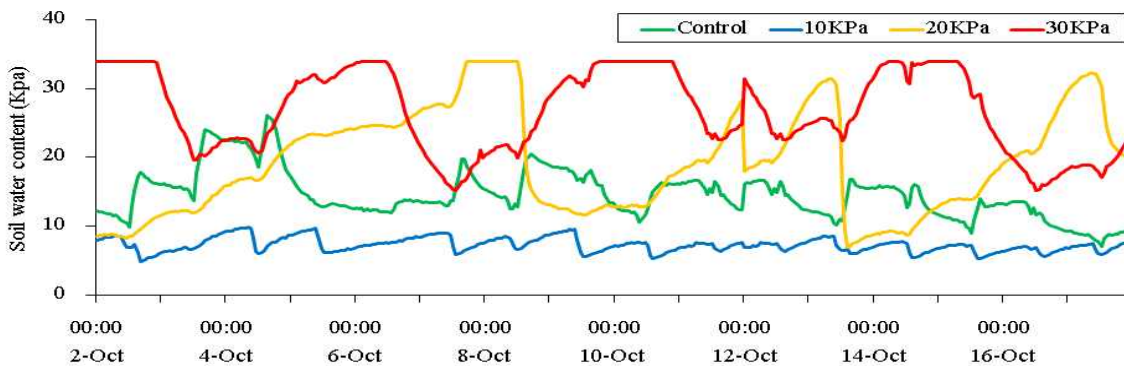


그림 2-1-10. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 일평균 토양수분함량  
(측정기간: 2018. 10. 2. ~ 10. 17)

그림 2-1-11은 관수처리에서 광량과 온도에 따른 줄기와 과병의 일평균 수액흐름의 변화이다. 일사량은 10월 12일  $90.9\text{W/m}^2$ 로 가장 높았으나, 수액흐름은 10월 10일에 가장 높았다. 재배 31~68일째는 광도가 높으면 수액흐름 또한 증가하였던 결과와 다르게 나타났다. 일평균 수액흐름값은 일평균 온도와 같은 경향으로 증감하였다. 이를 통해 수액흐름은 일사량이 충분하여도 적정 온도가 유지되지 않으면 수액흐름 또한 감소하는 것으로 보인다. 과병 수액흐름도 일사량보다 대기 온도변화와 비슷한 경향을 나타냈다. 줄기와 과병의 수액흐름을 비교하였을 때, 10kPa은 줄기 수액흐름이 일평균  $0.16\mu\text{L/m}^2/\text{s}$ 이었으며, 과병은  $0.14\mu\text{L/m}^2/\text{s}$ 로 줄기가 조금 더 많았다. 그러나 30kPa은 줄기 수액 흐름이  $0.08\mu\text{L/m}^2/\text{s}$ 로 과병 수액흐름  $0.12\mu\text{L/m}^2/\text{s}$ 보다 작았다.

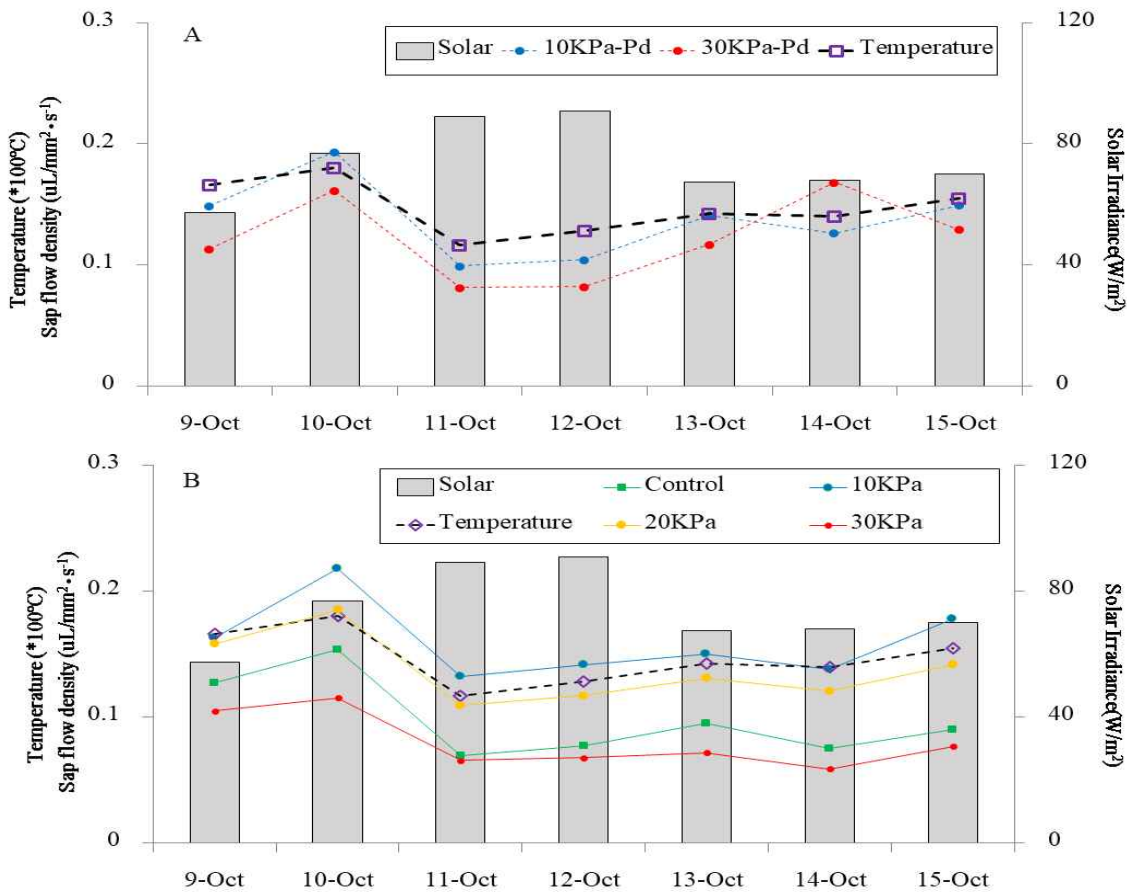


그림 2-1-11. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 일평균 줄기(A)와 과병(B) 수액흐름 변화 (측정기간: 2018. 10. 9. ~ 10. 15)

그림 2-1-12~14는 10kPa, 30kPa 처리에서 오이 과장 비대시기(10월 8일)와 오이 수확기(10월 16일)의 일사량에 따른 줄기와 과병의 수액흐름의 변화이다. 과장 비대시기 때 10kPa 줄기의 주간(7~18시) 수액흐름의 누적량은  $14,766\mu\text{L}/\text{m}^2$ , 과병 Sap flow의 누적량은  $8,942\mu\text{L}/\text{m}^2$ 로 줄기 수액흐름이 더 높았다. 줄기, 과병 모두 일사량 변화의 따라 증가하고 감소하였다. 일몰(18~21시) 후 수액흐름을 보았을 때, 과병의 수액흐름이 줄기의 수액흐름 보다 값이 높았다. 이는 해가 진 후 잎에 생성된 동화 산물이 오이 과실로 전류되기 때문에 높아진 것으로 보인다. 30kPa

처리는 주간 수액흐름의 값은 줄기  $8,942\mu\text{l}/\text{m}^2$ , 과병  $8,463\mu\text{l}/\text{m}^2$  차이 없었으나, 일몰의 수액흐름은 줄기  $649\mu\text{l}/\text{m}^2$ , 과병  $1,105\mu\text{l}/\text{m}^2$  차로 과병의 수액흐름이 약 1.7배 가량 높았다. 오이 수확기의 10kPa의 주간 수액흐름 누적량은 줄기  $11,871\mu\text{l}/\text{m}^2$ , 과병  $8,103\mu\text{l}/\text{m}^2$ 였으며, 과실 일몰 후 3시간 때 수액흐름은 줄기  $236\mu\text{l}/\text{m}^2$ , 과병  $608\mu\text{l}/\text{m}^2$ 로 과실비대기보다 수액흐름이 낮았다. 이는 온도의 영향도 있지만, 수확기에 과실이 비대가 완료되어 수액흐름 또한 늦춰진 것으로 사료된다. 30kPa는 주간 Sap flow 누적량은 줄기  $5745\mu\text{l}/\text{m}^2$ , 과병  $6499\mu\text{l}/\text{m}^2$ 였으며, 과실 일몰 후 3시간 때 수액흐름은 줄기  $66.5\mu\text{l}/\text{m}^2$ , 과병  $449\mu\text{l}/\text{m}^2$ 로 측정되었다.

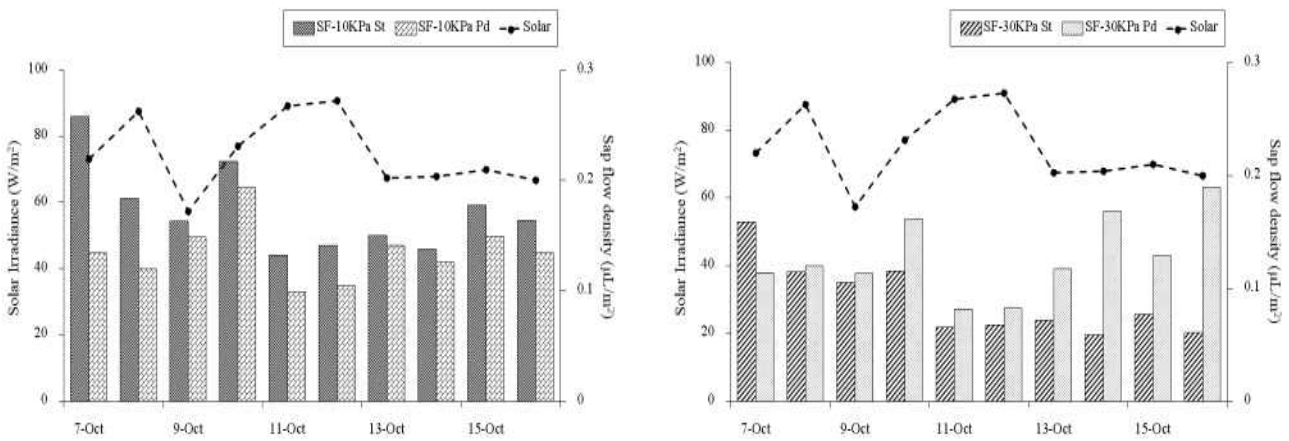


그림 2-1-12. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 하루 평균 일사량과 일평균 줄기 및 과병의 수액흐름 (측정기간: 2018. 10. 7. ~ 10. 16)



그림 2-1-13. 오이 과실 길이 측정(좌)과 과경에 삽입한 수액흐름 센서(우)

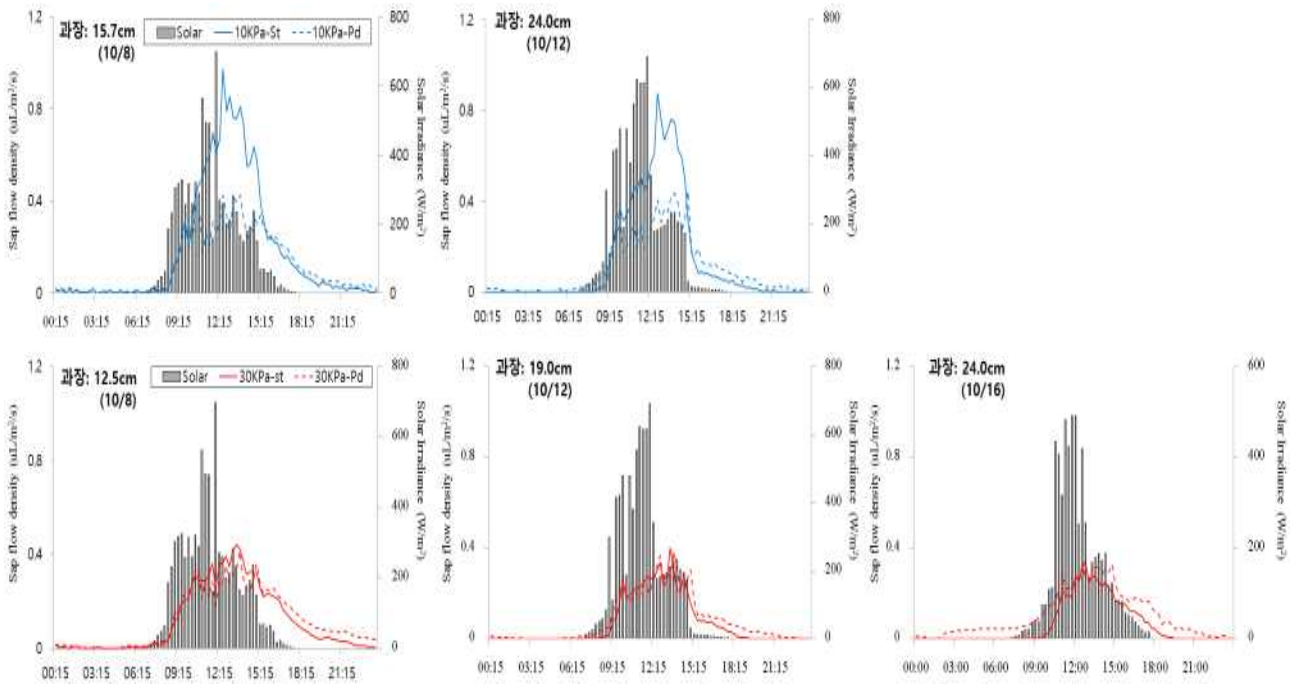


그림 2-1-14. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 과실 비대기와 수확기의 줄기와 과병의 수액흐름 (측정기간: 2018. 10. 8. ~ 10. 16)

관수개시점에 따른 처리별 오이 과장 변화를 알아보하고자 각 처리마다 10월 2일 과장 4.0~5.5 cm의 오이를 선발하여 이를 간격으로 과장을 측정하였다. 하루 일사량과 수액흐름에 따른 과장 변화를 알아보았을 때(그림 2-1-15), 가장 먼저 오이 적정크기(21~25cm)에 도달한 처리는 10kPa 처리였다. 10kPa의 오이가 21cm에 도달할 때까지 8일 걸렸으며, 나머지 3처리는 14일 걸렸다.

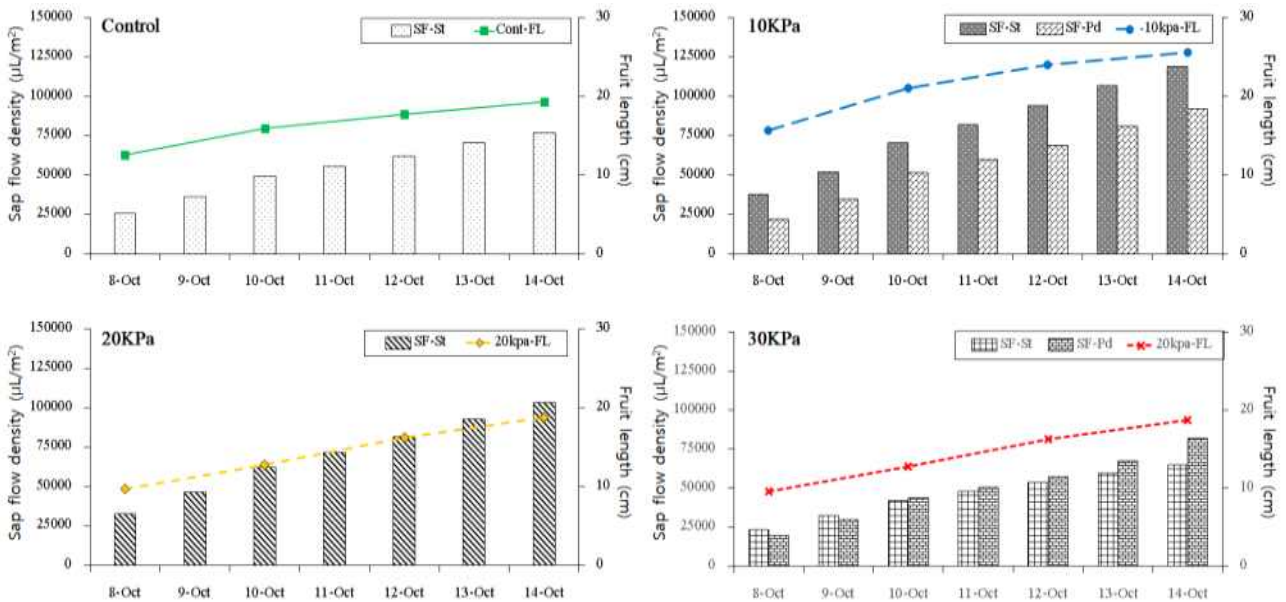


그림 2-1-15. 시설오이 가을재배에서 관수개시점 처리에 따른 관수개시점 처리 기간 중 누적 수액흐름과 과장 변화 (측정기간: 2018. 10. 8. ~ 10. 14)

관수처리와 오이 부위에 따른 총 질소, 인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 이온 함량을 분석한 결과, 총 질소 함량은 오이 위쪽이 아래 부위보다 함량이 높았다. 관수 처리에서 Control 처리가 질소 함량이 가장 높았으며, 30kPa, 20kPa, 10kPa 처리 순으로 함량이 높았다. 인 함량 또한 위쪽 부위가 0.70%로 아래 부위보다 높았고, Control 처리에서 높았다. 칼륨 또한 오이 위쪽에서 Control, 10, 20, 30kPa 순으로 함량이 높았다. Ca과 Mg 이온 함량은 오이 아랫부분에서 윗부분보다 더 높았다. 오이 부위와 관수제어의 상관관계를 보았을 때, 칼슘은 오이 T-N와 P 함량은 오이 부위와 관수 제어에 따라서 고도로 유의하였으나, 오이부위×관수제어 복합처리의 상관관계에서는 유의성이 없었다. K은 오이 부위, 관수제어, 오이 부위와 관수 복합 상관관계에서 모두 고도로 유의하였다. Ca은 모든 처리에서 유의성이 없었으며, Mg는 관수제어에서만 고도로 유의성을 나타냈다(표 2-1-9).

표 2-1-9. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 오이 부위별 무기성분 함량

오이 부위	관수 제어	T-N (%)	T-P (%)	K (%)	Ca (%)	Mg (%)
상	Control	2.2 a <sup>z</sup>	0.75 a	4.2 a	0.342a	0.267a
	10kPa	1.6 ab	0.69 b	4.0 b	0.353a	0.265a
	20kPa	1.5 b	0.66 b	3.5 c	0.370a	0.228c
	30kPa	1.8 ab	0.69 b	3.8 d	0.290b	0.247b
	Ave.	1.8	0.70	3.9	0.34	0.25
하	Control	1.7 a	0.72 a	3.7 a	0.550a	0.272a
	10kPa	1.3 b	0.67 b	3.5 b	0.373a	0.263ab
	20kPa	1.3 b	0.65 c	3.3 c	0.448a	0.243bc
	30kPa	1.5 ab	0.64 c	3.3 c	0.295a	0.227c
	Ave.	1.5	0.67	3.5	0.42	0.25
Significance <sup>y</sup>						
오이 부위 (P)		**	***	**	NS	NS
관수 제어 (W)		**	***	***	NS	***
P×W		NS	NS	***	NS	NS

<sup>z</sup>Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$

<sup>y</sup>Probability of significant F values NS, \*\*, \*\*\*: non-significant or significant at  $p \leq 0.01$  or 0.001.

나. 실험 2. <시설토양 재배에서 관수개시점 처리에 따른 급액제어>

(1) 요약

오이 봄 재배에서 2019년 5월 7일부터 7월 15일까지 관수개시점 10kPa, 20kPa, 30kPa 및 관행(Control)의 4처리하여 10주간 재배하였을 때 토양수분장력(pF)이 Control은 3.6~19.3kPa, 10kPa 처리구는 3.3~11.4, 20kPa 처리구는 7.5~24.7, 30kPa 처리구는 4.8~28.8kPa 범위였다. 식물체 1주당 총 관수량은 49.5L(Control), 91.3L(10kPa), 40.8L(20kPa), 20.8L(30kPa)로 10kPa에서 관수량이 가장 많았으며, 20kPa과 30kPa 처리구는 관수개시점에 따라 pF값의 변동이 컸고 매일 관수되지 않았다. 10kPa 처리의 상품과수는 24개, 상품 수량은 5.2kg로 가장 많았으며, 단위 면적당 오이 200g 생산에 공급된 관수량도 5.2L로 대조구와 비교했을 때 관수량이 40.8% 더 소요되었으며, 수량은 31.1% 증가하였다. 광합성율은 Control, 10kPa와 20kPa에서는 차이가 없었으나 30kPa에서 낮았다. 평균 엽온(6월 28일부터 7월 15일)은 22.7°C(Control, 10kPa) ~ 23.2°C(20, 30kPa)로 차이가 없었으나, 하루 중 온도차(최고 온도-최소 온도)가 10kPa은 3.8°C, 20kPa은 4.3°C, 30kPa은 4.9°C로 수분장력이 높을수록, 관수량이 적을수록 높았다. 처리 52일째부터 10일간(6월 28일~7월 8일) 측정된 평균 증기수액흐름속도는 Control( $0.232\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ ), 10kPa( $0.213\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ ), 20kPa( $0.267\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ ), 30kPa( $0.229\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ )로 차이가 없었다.

(2) 주요 결과

○ 시설토양 오이 봄 토경 재배에서 관수개시점 처리에 따른 관수량과 재배 환경

2019년 4월 20일 오이‘청춘’ 접목묘를 정식하고 토양수분장력(pF)계를 이용한 관수 제어 3처리(10kPa, 20kPa, 30kPa)와 Control(관행관수)로 처리하여 5월 7일부터 7월 15일까지 오이를 관행 재배하면서 토양 수분함량 변화, 관수량, 작물 생육 및 수량 등을 조사 분석하였다(그림 2-2-1).

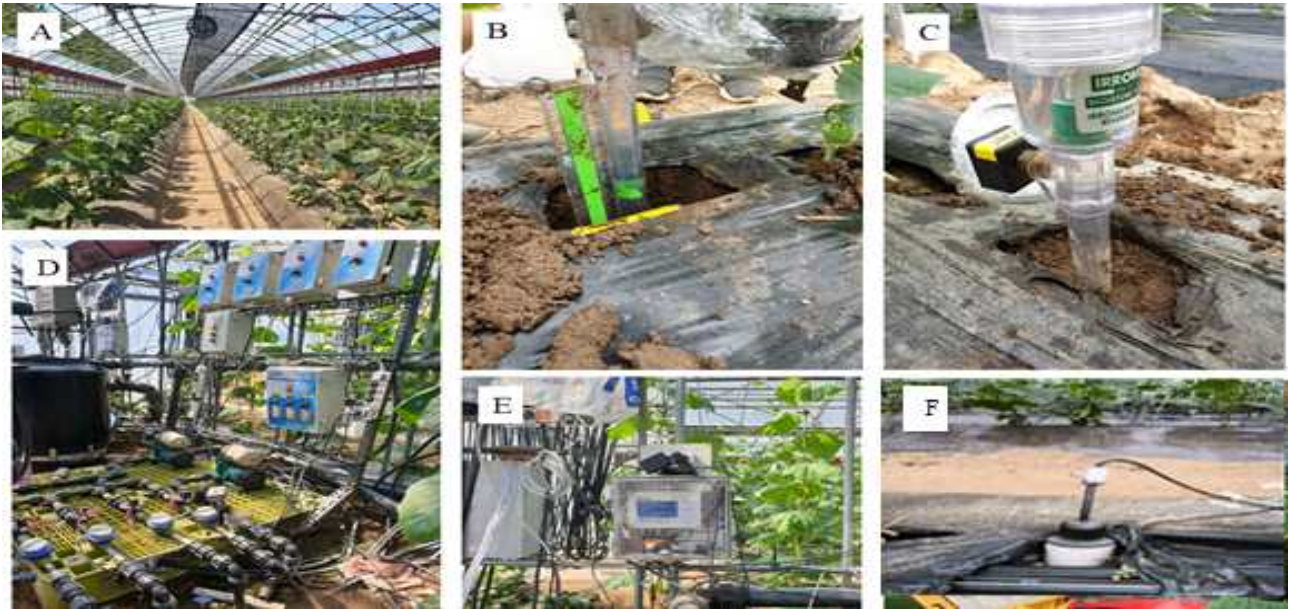


그림 2-2-1. 오이 생육 전경 및 토양 관수 및 함수량 계측

- A: 정식 4주 후 오이
- B: 텐시오미터 설치 토양 매설 깊이
- C: 관수 개시 제어를 위한 수분장력계
- D: 유량계 및 관수자동제어장치
- E: 토양환경계측로거
- F: FDR 토양수분센서

5월 7일부터 7월 15일까지 관수개시점 제어에 따른 1회당 3~4분 관수하였을 때 처리별 공급된 총 관수량이 49.5L(Control), 91.3L(10kPa), 40.8L(20kPa), 20.8L(30kPa)로 10kPa 처리구에서 가장 많았다. 토양 수분 장력에 의한 관수 개시 시점 처리가 시작된 5월 8일 이후 첫 급액은 Control과 10kPa에서는 5일 후인 5월 13일에 관수되었고, 20kPa에서는 8일 후 관수되었지만 30kPa에서는 18일 동안이나 관수가 되지 않아 건조 스트레스가 발생하여, 초기 생육 저하 및 낙과 현상이 발생하였다. 관수 처리 기간 중 한 식물체당 들어간 물량은 관행구와 비교하여 10kPa에서 약 1.8배 많았으며 30kPa에서는 0.42배로 관수량이 절반 정도였고 20kPa와 관행구와 차이가 거의 없이 비슷한 물이 사용되었다. 한편 재배시기에 따라 관수량도 달랐으며, 관수 횟수는 관행구의 경우 아침에 1회 관수하였지만 수분장력에 의한 관수개시점을 달리한 처리구의 공급 시기와 공급횟수는 달랐다. 10kPa에서는 처리기간 매일 평균 3.2회로 공급된 반면 20kPa 처리는 44일 2.1회, 30kPa 처리는 28일 1.8회 공급되어 20kPa은 1.3일 간격으로, 30kPa은 2.3일 간격으로 공급되었다. 한편 관행구는 1.2일 간격으로 평균 6.4분을 1회에 공급한 반면 수분장력제어에 의한 20kPa 처리는 관행구와 유사한 관수량이 들어간 처리인데 1회 공급량이 적고 공급횟수가 많았다. 이상의 결과 본 실험에서는 토양수분포텐셜이 낮아질수록 총 관수량은 증가하였고 관수횟수가 증가하였다(표 2-2-1).



표 2-2-1. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 관수량 및 관수횟수

	Treatment <sup>z</sup>			
	Control	10kPa	20kPa	30kPa
5월 7일부터 6월 4일까지				
총 관수량 (ml/plant)	11,154.5	25,234.5	11,780.0	3,649.1
일 평균 관수량 (ml/day)	485.0	1,097.2	512.2	158.7
총물량/관수된 횟수(ml/event)	587.1	1,097.2	841.4	729.8
6월 5일부터 6월 25일까지				
총 관수량 (ml/plant)	22,467.3	37,496.4	12,765.5	8,174.5
일 평균 관수량 (ml/day)	1,069.9	1,785.5	607.9	389.3
총물량/관수된 횟수(ml/event)	1,321.6	1,785.5	911.8	743.1
6월 26일부터 7월 15일까지				
총 관수량 (ml/plant)	15,845.5	28,576.4	16,258.2	8,996.4
일 평균 관수량 (ml/day)	792.3	1,428.8	812.9	449.8
총물량/관수된 횟수(ml/event)	880.3	1,428.8	1,016.1	749.7
5월 7일부터 7월 15일까지				
총 관수량 (ml/plant)	49,467.3	91,307.3	40,803.6	20,820.0
일 평균 관수량 (ml/day)	772.9	1,426.7	637.6	325.3
총물량/관수된 횟수(ml/event)	916.1	1,426.7	927.4	743.6
평균 관수 횟수(관수 횟수/기간)	6.4min	3.2	2.1	1.8

<sup>z</sup>관수 개시점에 도달하면 3~4min On/1hr Off 자동 관수, Control : 타이머 관행 관수  
 관수 시간: 5월 7일 ~ 6월 13일(4분:09시 ~16시), 6월 13일 ~ 7월 15일 (3분:08시~17시)

처리 기간(2019. 5. 7.~2019. 7. 15.)중 평균 온도 21.4℃, 습도는 76.3%였다. 일교차가 큰 5월의 경우 주·야간의 온도 차는 10℃ 정도로 차이가 컸지만 6월 이후 밤 기온이 상승하면서 낮과 밤 온도 차이가 작아졌고, 상대습도는 주간과 야간 모두 높아졌다. 평균 토양함수율은 Control 33.9%, 10kPa 32.1%, 20kPa 30.4%, 30kPa 28.5%로 Control에서 높고, 수분장력이 높아질수록 감소하였다. 평균 EC(mS·cm<sup>-1</sup>)는 Control 1.5, 10kPa 0.9, 20kPa 1.9, 30kPa 2.0으로 수분장력이 높아질수록 높았다. 토양온도(℃)는 Control 22.6, 10kPa 23.8, 20kPa 23.9, 30kPa 23.4로 10kPa 과 20kPa에서 높았다. 측정 분석한 자료는 오이 재배의 적정 기온이 22~28℃이며 광보상점은 1klux이며 광포화점은 40~55klux인 것을 고려해 보면 재배 온실의 재배환경은 적합하였다(표 2-2-2).

표 2-2-2. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 온실의 지상부와 지하부 환경

측정항목		관수개시 처리(주)					평균		
		0~2	2~4	4~6	6~8	8~10			
		5/7~5/20	5/21~6/3	6/4~6/17	6/18~7/1	7/2~7/15			
지 상 부	평균온도 (℃)	주간	23.5	23.1	23.6	25.1	25.8	24.2	
		야간	14.3	14.0	16.5	18.9	19.6	16.7	
		하루	20.1	19.7	20.9	22.8	23.5	21.4	
	상대습도 (%)	주간	58.8	58.9	71.2	77.3	73.4	67.9	
		야간	84.4	87.0	91.3	95.0	94.1	90.4	
		하루	68.4	69.4	78.7	84.0	81.2	76.3	
	함수율	Control	주간	39.9	36.8	32.8	30.8	32.5	34.6
			야간	37.9	34.2	31.3	29.6	30.7	32.7
			하루	39.2	35.8	32.3	30.4	31.8	33.9
		10kPa	주간	34.6	32.0	33.6	32.0	31.3	32.7
			야간	33.0	29.7	31.3	30.8	31.4	31.2
			하루	34.0	31.1	32.7	31.5	31.4	32.1
		20kPa	주간	28.5	30.9	32.3	30.3	30.8	30.6
			야간	27.9	30.5	31.9	30.1	30.7	30.2
			하루	28.3	30.7	32.1	30.2	30.8	30.4
30kPa		주간	33.4	24.3	28.0	29.7	29.7	29.0	
		야간	32.5	23.8	27.6	29.2	29.3	28.5	
		하루	33.1	24.1	27.8	29.5	29.6	28.8	
지 하 부	Control	주간	1.8	1.8	1.2	1.1	1.5	1.5	
		야간	1.8	1.9	1.2	1.1	1.5	1.5	
		하루	1.8	1.8	1.2	1.1	1.5	1.5	
	10kPa	주간	1.5	0.9	0.7	0.7	0.6	0.9	
		야간	1.5	0.9	0.8	0.7	0.6	0.9	
		하루	1.5	0.9	0.7	0.7	0.6	0.9	
	20kPa	주간	1.6	2.1	2.1	1.9	2.0	1.9	
		야간	1.7	2.1	2.1	2.0	2.0	2.0	
		하루	1.6	2.1	2.1	1.9	2.0	1.9	
	30kPa	주간	2.0	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0	
		야간	2.0	1.8	2.1	2.1	2.0	2.0	
		하루	2.0	1.8	2.0	2.0	2.0	2.0	
	온도	Control	주간	22.2	22.0	22.0	23.1	23.8	22.6
			야간	21.7	21.6	22.0	23.1	23.7	22.4
			하루	22.0	21.8	22.0	23.1	23.8	22.5
10kPa		주간	23.2	22.7	23.5	24.2	24.9	23.7	
		야간	23.6	23.4	23.8	24.6	25.1	24.1	
		하루	23.4	22.9	23.6	24.3	24.9	23.8	
20kPa		주간	22.8	22.8	23.2	24.5	25.1	23.7	
		야간	23.4	23.5	23.7	24.9	25.4	24.2	
		하루	23.0	23.1	23.4	24.6	25.2	23.9	
30kPa		주간	22.0	22.3	22.9	24.6	25.5	23.5	
		야간	22.2	22.3	22.9	24.4	25.3	23.4	
		하루	22.1	22.3	22.9	24.5	25.4	23.4	

측정기간: 2019. 5. 7.~2019. 7. 15., 10분 간격으로 데이터 수집

관수개시 처리 및 관행(Control): 관수시간 4min On/1h Off 및 타이머 관수(Control)

관수 처리 기간 중 일평균 토양수분장력 변화를 측정 한 결과 처리구별로 Control은 3.6~19.3kPa, 10kPa 처리구는 3.3~11.4 20kPa 처리구는 7.5~24.7, 30kPa 처리구는 4.8~28.8kPa 범위였다. 10kPa과 Control에서는 재배 전 기간 동안 낮은 수분장력을 위치하였지만 20kPa과 30kPa 처리구는 관수개시점에 따라 pF값의 변동이 컸으며 매일 관수되지 않았다는 것을 알 수 있었다(그림 2-2-2). FDR 센서를 이용한 일평균 함수율은 28.8~45.1%이었으며 관행처리구가 함수율이 높아 39~45.1%였으며 30kPa에서 37.6~28.8% 낮은 함수율을 나타내었으며, 관수량이 많은 10kPa에서 함수율이 관행처리구보다 조금 낮아 관수량과 비교해서 함수율의 차이가 적었다(그림 2-2-3). Control은 재배 초기에 다른 처리구 보다 높은 함수율을 나타내었는데 이는 식물체가 작아 필요로 하는 물량이 적음에도 관행적으로 관수하여 나타냈을 것으로 파악되며 재배 후기에 7월 12일 적엽 후 증산량이 적으나 관행적으로 관수하여 토양 수분이 높아졌을 것으로 파악되었다. 재배 중기인 6월 11일경부터는 모든 처리구가 비슷한 함수율을 유지하고, 30kPa에서는 낮은 함수율을 유지하는 것이 수분 부족일 가능성을 확인하였다.

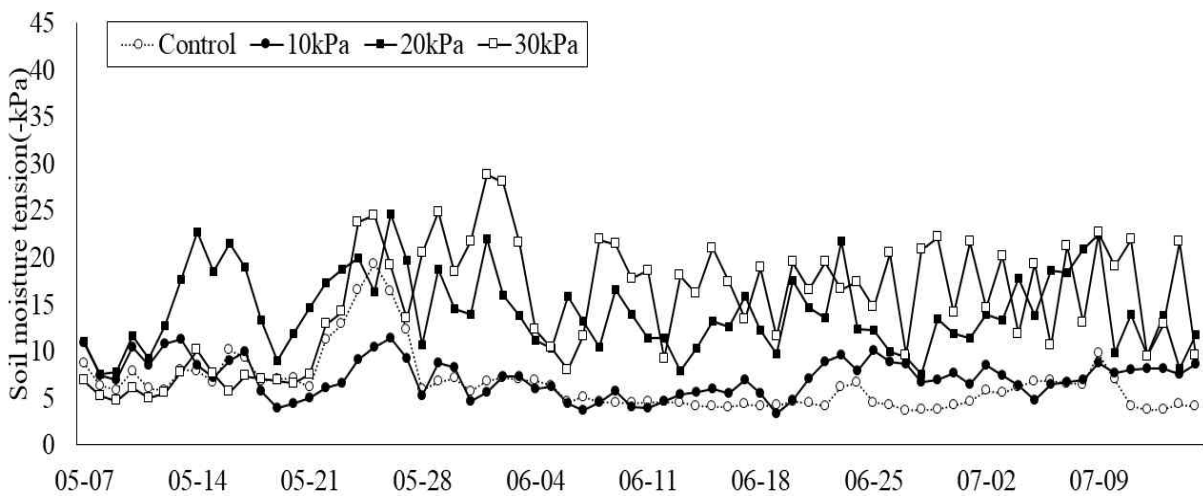


그림 2-2-2. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 일평균 토양 수분장력 변화 (측정기간:2019. 5. 7. ~ 7. 15)

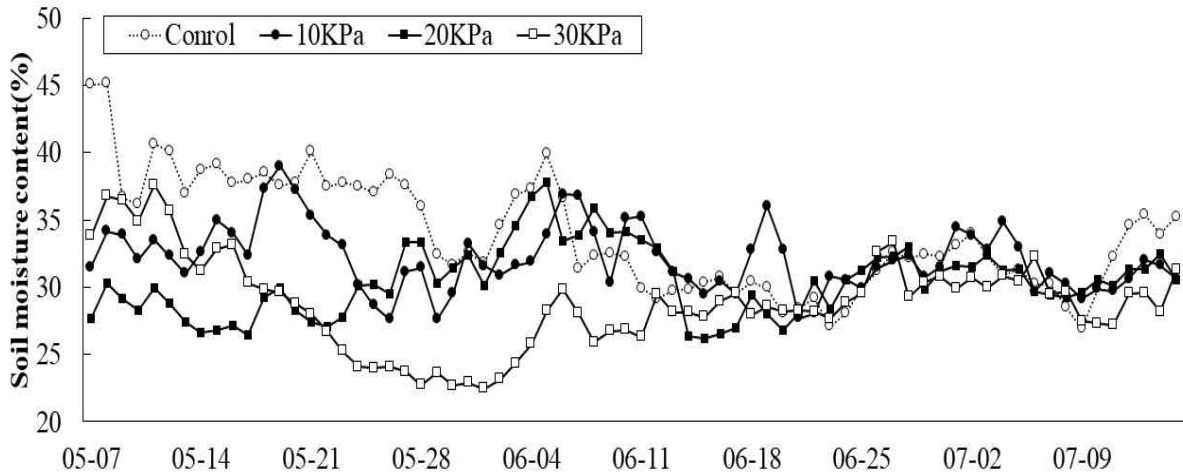


그림 2-2-3. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 일평균 함수량 변화  
(측정기간:2019. 5. 7. ~ 7. 15)

○ 시설오이 토경 재배에서 관수개시점 처리에 따른 생육

정식 시(2019.04.20.)의 오이묘의 초장은 약 11.5cm이었으며 마디수는 약 3개이었던 묘가 관수 처리 4주째 파괴한 생육조사에서 오이묘의 초장은 172.1cm으로 10kPa에서 가장 길어 관행구보다 21.4% 길었고 30kPa에서 가장 작았다, 엽면적은 10kPa에서 3,875.7cm<sup>2</sup>로 가장 넓어 관행구보다 48.6% 넓었고, 30kPa에서 가장 적어 46.3% 적었다. 관행구와 20kPa 처리구에 초장과 엽면적에서는 차이가 없었다. 오이묘의 지상부 생체중은 10kPa에서 관행구보다 40.0%, 줄기는 42.6% 무거웠고, 30kPa에서 가장 작아 52.2%, 줄기는 44.4% 가벼웠다. 관행구와 20kPa 처리구에 지상부 생체중에서는 유의한 차이가 없었다(표 2-2-3). 비엽중은 20kPa에서 가장 높아 10kPa보다 16.6%높아 관수량이 많은 10kPa에서 잎이 얇았고 20kPa에서 잎이 두꺼운 것을 알 수 있었다.

표 2-2-3. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 처리 4주째 오이 생육

	초장 (cm)	엽면적 (cm <sup>2</sup> )	지상부 생체중(g/pl.)		건물율 (%)	비엽중 (g·m <sup>-2</sup> )
			잎	줄기		
Control	141.8 b <sup>z</sup>	2,608.1 b	120.0 b	55.6 b	12.0 a	62.5 ab
10kPa	172.1 a	3,875.7 a	168.1 a	79.3 a	11.4 a	56.5 b
20kPa	131.3 b	2,488.9 b	113.7 b	49.1 b	13.1 a	65.9 a
30kPa	99.2 c	1,400.3 c	57.4 c	30.9 c	13.3 a	64.0 ab

<sup>z</sup>Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$

(측정기간: 2019. 6. 4. n = 5)

관수처리 4주 후 관수개시점에 영향을 받은 오이 과실의 생체중은 Control, 10kPa, 20kPa 처

리 간에는 차이가 없었지만, 30kPa 처리에서는 62.1g으로 가장 적었으며, 건물중과 함수율도 30kPa에서 유의적으로 감소하였다(그림 2-2-4, 표 2-2-4).

표 2-2-4. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 처리 4주째의 오이 과중과 수분함량

	생체중 (g)	건물중 (g)	함수율(%)
Control	152.3 a <sup>z</sup>	7.7 a	94.9 a
10kPa	161.5 a	8.0 a	95.1 a
20kPa	197.6 a	9.0 a	95.4 a
30kPa	62.1 b	3.8 b	93.7 b

<sup>z</sup>Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$

(측정기간: 2019. 6. 4. n = 5)



그림 2-2-4. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 처리 4주째 오이 초장(좌), 뿌리(중) 및 오이(우)  
(측정기간: 2019. 6. 4. n = 5)

2019년 5월 7일부터 7월 16일까지 2주 간격으로 측정한 처리구의 초장, 마디수 변화는 관수량이 가장 많이 공급된 10kPa에서는 처리 2주째 초장이 118.7cm로 가장 길었으며, 처리 10주째는 10kPa(496.3cm) > Control(459.2cm) > 20kPa(402.5cm) > 30kPa(295.2cm)로 관찰되었다. 마디수도 같은 경향을 나타내 30kPa 처리는 처리 4주째 유의한 감소를 보여 10주째는 10kPa(58.5개) > Control(56.3개) > 20kPa(55개) > 30kPa(45개)로 관찰되었다(그림 2-2-5). 성장점으로부터 아래로 3번째 잎의 엽장 변화는 10kPa 처리에서 가장 길어 평균 9.3cm이었으며, 30kPa에서는 처리 6주까지 계속 작아진 후 다시 증가하는 경향을 보였으며, 평균 엽장이 7.4cm였다. 엽형지수는 처리시 30kPa에서 0.74로 원형에 가까웠으며 Control이 0.62로 넓었지만 처리 2주째부터 엽장과 엽형지수가 10kPa에서 큰 것으로 보아 잎이 둥글고 넓게 자랐다. 성장점에서 3번째 잎까지의 길이는 처리 4주째까지 길이가 짧아진 후 증가하는 경향을 나타냈고, 엽록소 함량은 계속하여 감소하는 경향을 나타냈다(그림 2-2-5).

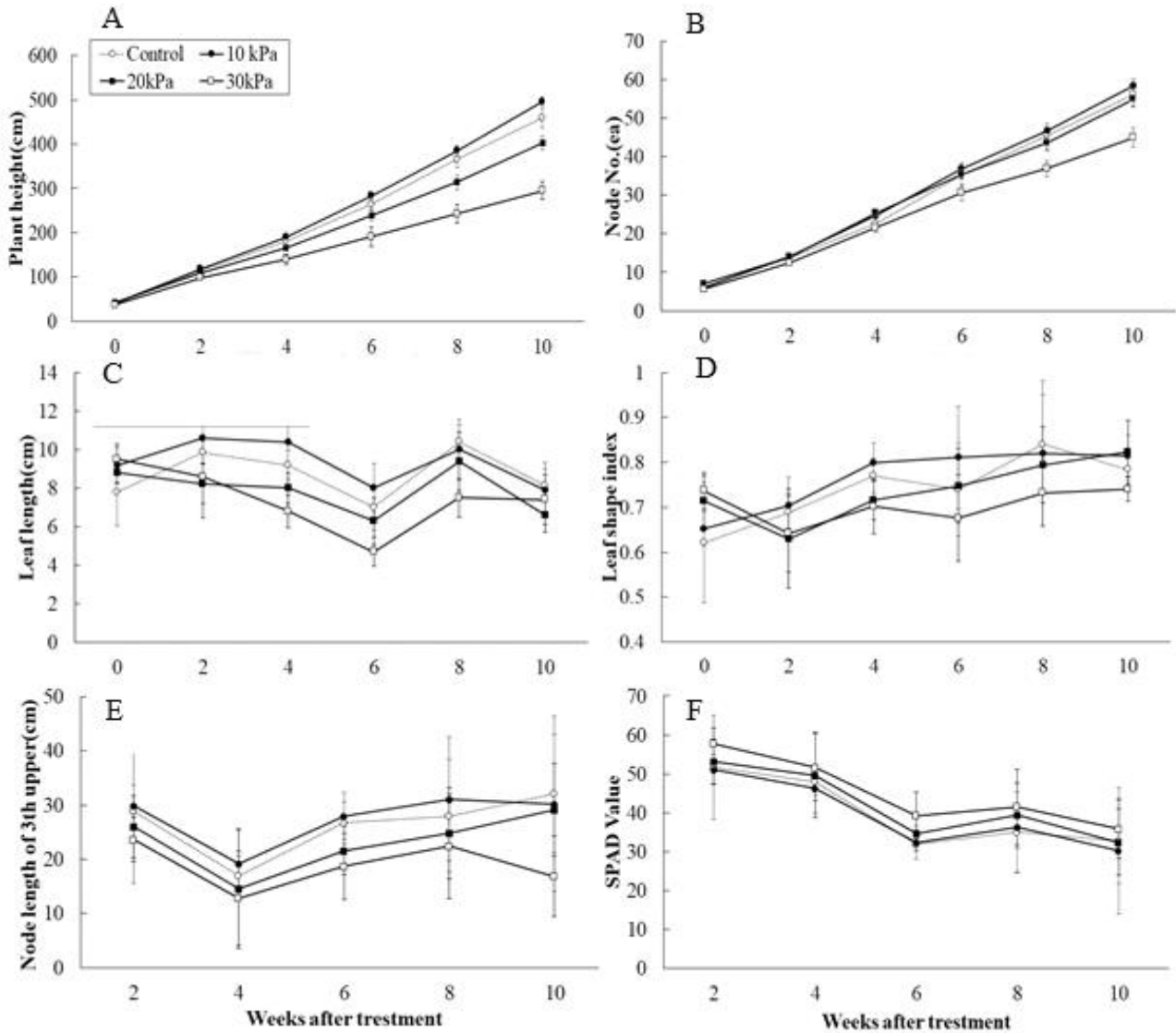


그림 2-2-5. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 생육특성  
 초장(A), 마디수(B), 엽장(C), 엽형지수(D), 성장점에서 아래로 3번째잎 까지의 길이(E) 및 SPAD value(F) 변화  
 측정기간: 2019. 5. 7.~ 7. 16. n=5.)

관수처리 4주째 광합성율은 Control, 10, 20kPa 처리 간에는 차이가 없으나, 30kPa에서는 감소하였으나 기공전도도 및 증산율은 차이가 없었다. 처리 9주째 광합성율과 증산율은 30kPa 처리를 제외한 나머지 처리 간에는 차이가 없었으나, 기공전도도는 10kPa > 20kPa, Control > 30kPa 순으로 처리간 차이가 나타났다(표 2-2-5). 기공전도도가 일일 1회 관수하는 처리에서 가장 높았으며 2일이나 3일에 한 번 관수 하는 처리구에서는 관수 주기가 길어질수록 기공전도도가 낮았다는(Lee et al, 2010) 연구결과와 같이 식물은 기공을 통해서 흡수된 CO<sub>2</sub>로 광합성 활동을 하고 증산을 통해 수분 조절하는데 식물이 수분 스트레스를 받게 되면 내부의 수분 손실을 막기 위한 방어 기작으로 기공을 닫아 증산율을 낮추어 광합성에서 CO<sub>2</sub>를 얻는 것보다 수분 손실을 감소시켜 수분 이용효율을 증대시키며 식물이 기공을 닫게 되면서 엽육 세포 내

CO<sub>2</sub> 농도는 낮아지게 되고 이에 따라 광합성 능력이 떨어지는 것으로 파악되었다. 이는 토양의 수분포텐셜 변화가 잎의 수분 균형에 영향을 줄 수 있으며 토양의 수분포텐셜 감소는 잎의 수분포텐셜을 감소시킴으로써 증산율의 감소를 초래한다는 것과 같은 결과이다(Tosio et al, 1985).

표 2-2-5. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 광합성(PS), 기공전도도(Cond) 및 증산율(TR)

	PS ( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Cond ( $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	TR ( $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
At 4 weeks after treatment			
Control	18.5a <sup>z</sup>	0.53a	9.3a
10kPa	19.8a	0.58a	9.9a
20kPa	19.5a	0.58a	9.7a
30kPa	15.5b	0.40a	7.8a
At 9 weeks after treatment			
Control	22.6a	0.7b	11.1a
10kPa	22.9a	1.0a	12.7a
20kPa	21.7a	0.8b	11.3a
30kPa	18.2b	0.5c	8.5b

<sup>z</sup>Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$

(측정기간: 2019. 6. 4. ~ 7. 9. n=5)

처리 10주 동안 수확한 오이 과수는 10kPa에서 24개, Control에서는 20개, 20kPa은 18개, 30kPa은 6.4개였으며, 주당 수량도 같은 경향을 나타냈다(그림 2-2-6). 10kPa은 처리 4주째부터 주당 수량이 높았으며, 30kPa 처리에서 낮았다. 그러나 과실 수확 성수기인 처리 7주째부터 10까지의 수량이 30kPa 처리를 제외한 나머지 처리 간에는 차이를 보이지 않았다. 한편 관수처리에 따른 처리구별 상품의 평균 과장이 10kPa에서 26.7cm, 20kPa은 25.6cm, 30kPa은 23.6cm로 수분장력이 높아질수록 감소하였으나 평균 과장은 203~214g으로 처리 간 차이가 없었다.

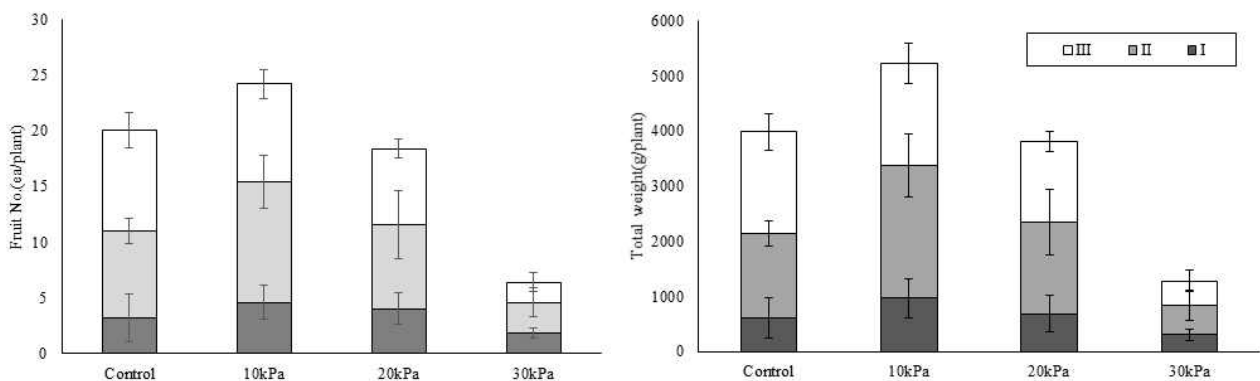


그림 2-2-6. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 시기별 상품과수(좌) 및 수량(우)

(측정기간: I: 2019. 5. 7.~6. 4, II: 6. 5. ~6. 25, III: 6. 26. ~ 7. 15)

처리 10주 동안 단위면적당 오이 200g 생산에 소요된 관수량을 계산한 결과 Control은 3.7L, 10kPa은 5.2L, 20kPa은 3.2L, 30kPa은 4.8L가 소요되었으며, 이를 대조구 대비 관수량과 수량으로 나타냈을 때 10kPa은 40.8%, 31.1% 증가를, 20kPa은 -13.9%, -4.2% 감소를, 30kPa은 30.9%, -67.9%를 나타냈다. 이는 Control과 유사한 관수량이 공급된 20kPa 처리는 관수 횟수가 2.1회 공급되어 소량 자주 관수되는 관수 패턴이 수량에 다른 영향을 나타내 1회 관수 시간이 주요 인자로 작용할 수 있으리라 생각되었다. 한편 30kPa은 물 공급이 많았음에도 수량이 감소해 관수시점이 적합하지 않음을 확인하였다(그림 2-2-7).

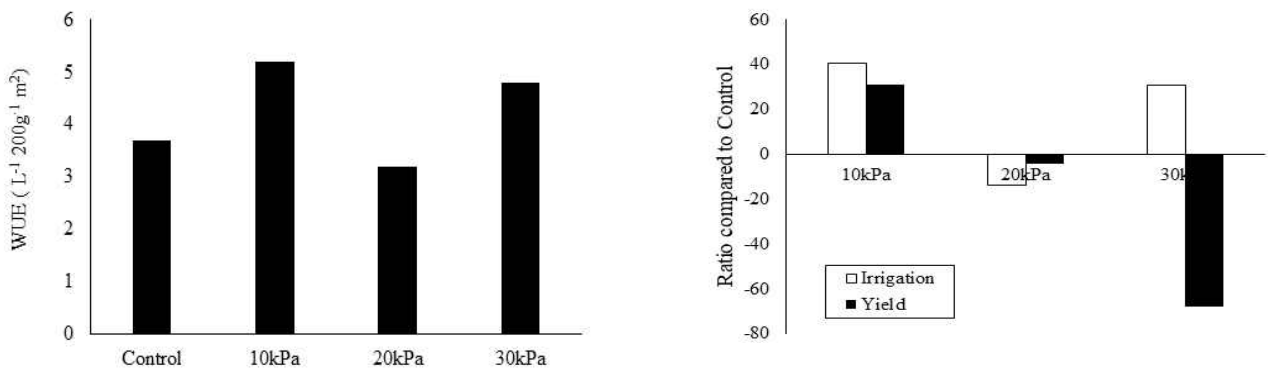


그림 2-2-7. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 수분이용효율과 대조구 대비 상대적인 수분과 수량 (측정기간: 2019. 5. 7.~ 7. 16. n = 5)

이와 같이 관수량에 의한 수량 차이는 개화 후 20cm 이상 상품과로 수확될 때까지 걸리는 시간을 26~28마디의 오이 착과된 과실을 측정한 결과에서도 10kPa에서는 평균 10일이 소요된 반면, 관행구는 12일, 20kPa은 14일, 30kPa에서는 16일 소요되어 관수량이 적어짐에 따라 수확시기가 길어지고, 1회 관수량이 상대적으로 적은 20kPa 처리의 수확 시기가 길어짐을 확인할 수 있었다(그림 2-2-8).

공급된 관수량과 오이 과실 증가(과장, 과폭)에 따른 상관성을 분석한 결과 R<sup>2</sup>값이 0.86~0.98로 양의 상관을 나타냈으며 과폭이 과장보다 상관성이 높았다(그림 2-2-9).



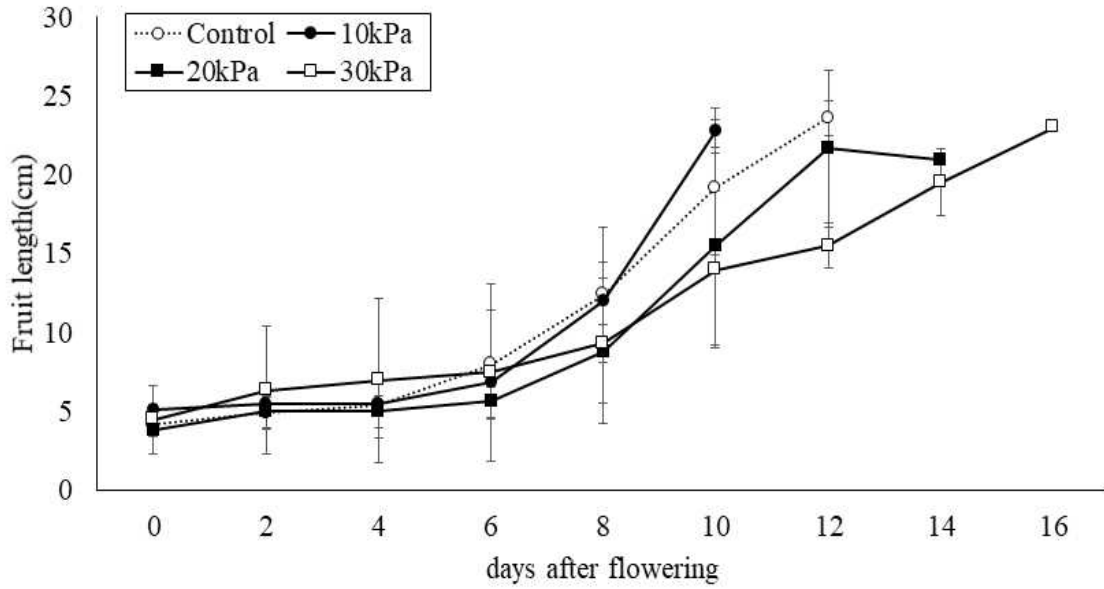


그림 2-2-8. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 과장 변화  
(측정기간: 2019. 6. 17.~7. 3)

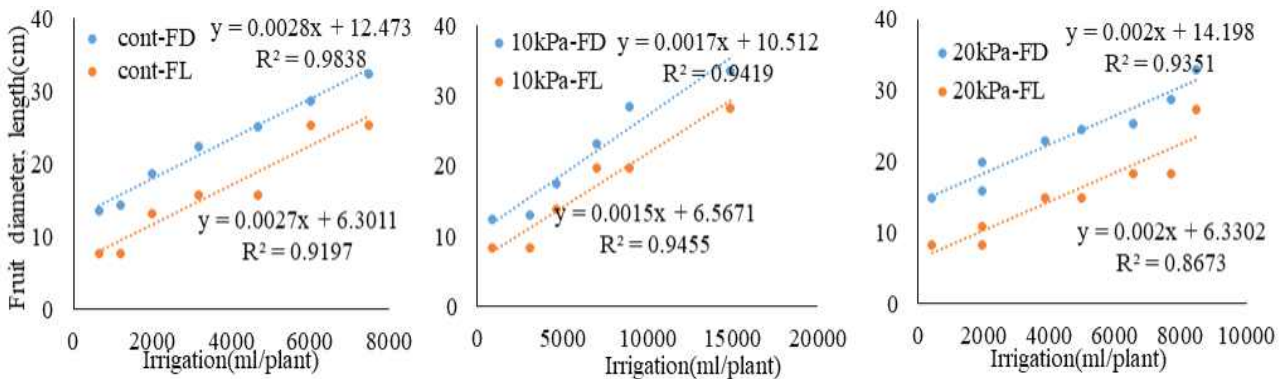


그림 2-2-9. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 관수량과 과장(FL) 및 과폭(FD)의 상관  
(측정기간: 2019. 7.1. ~ 7. 8)

○ 오이 봄 토경 재배에서 수분장력 처리에 따른 물관 수액흐름 속도와 엽온

관수개시점에 따른 오이 줄기의 수액흐름을 처리 9주인 6월 28일부터 7월 8일까지 10일간 측정한 결과 일 평균 줄기 수액흐름은 Control( $0.232\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ ), 10kPa( $0.213\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ ), 20kPa( $0.267\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ ), 30kPa( $0.229\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ ) 로 수분 개시에 의한 수액흐름 변화는 차이가 없었다(그림 2-2-10).

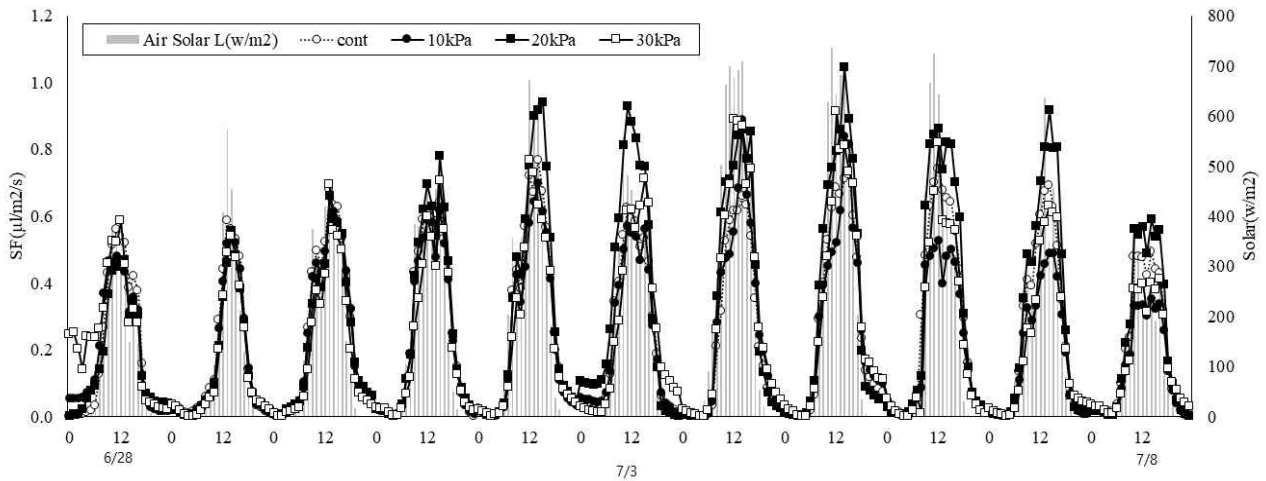


그림 2-2-10. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 광량과 수액흐름이동(SF) 변화  
(측정기간: 2019. 6. 28. ~ 7. 8)

맑은 날 하루 동안(6월 30일)의 시간별 수액흐름 속도는 광도  $100\text{W}/\text{m}^2$  이상을 보인 7시 이후 오이 줄기 수액이동도 이루어지기 시작해 정오에서 오후 2시 전후로 정점을 보인 후 감소하는 양상을 나타냈다. 그러나 처리에 따른 SF 변화는 차이가 없어 하루 동안의 누적 SF값이 Control에서는  $5.94\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ , 10kPa에서는  $5.79\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ , 20kPa에서는  $5.57\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ , 30kPa에서는  $4.83\mu\text{l}/\text{m}^2/\text{s}$ 였다(그림 2-2-11, 그림 2-2-12). 이날 토양의 pF 변화를 보면 Control은 평균 pF 4.2kPa(2.6~5.5kPa), 10kPa은 7.6kPa(4.4~10.4kPa), 20kPa은 11.9kPa(6.0~24.2kPa), 30kPa은 14.1kPa(11.1~22.4kPa)로 처리에 따른 토양 pF가 다르고, 관수 공급도 10kPa과 20kPa에서만 이루어졌으나 SF 변화는 시간과 토양 pF에 의한 차이를 찾기 어려웠다. 이러한 이유는 토양의 뿌리 근권 범위가 커서 관수에 의한 효율이 상대적으로 수경재배에 비해 낮음에 따라 그 변화를 찾기 어려운 것으로 판단된다.

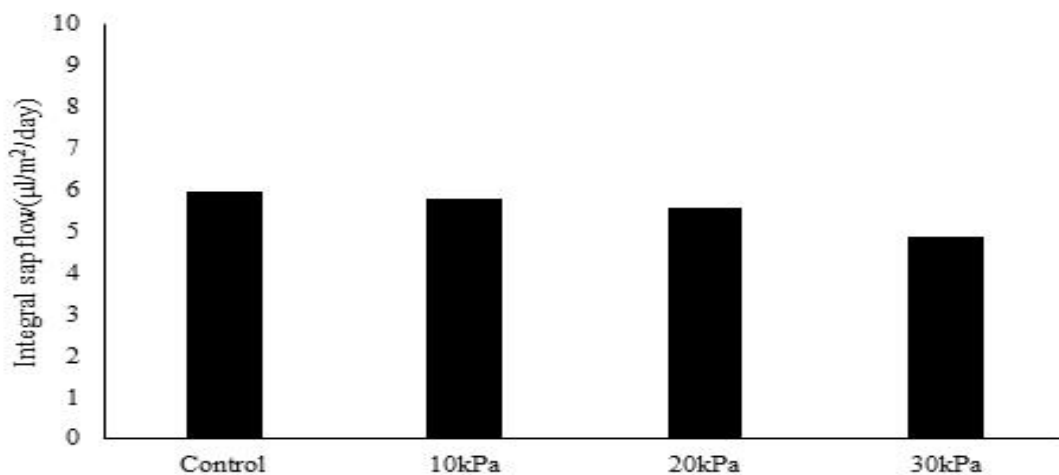


그림 2-2-11. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 일일 누적 오이 줄기 수액흐름  
(측정기간: 2019. 6. 30)

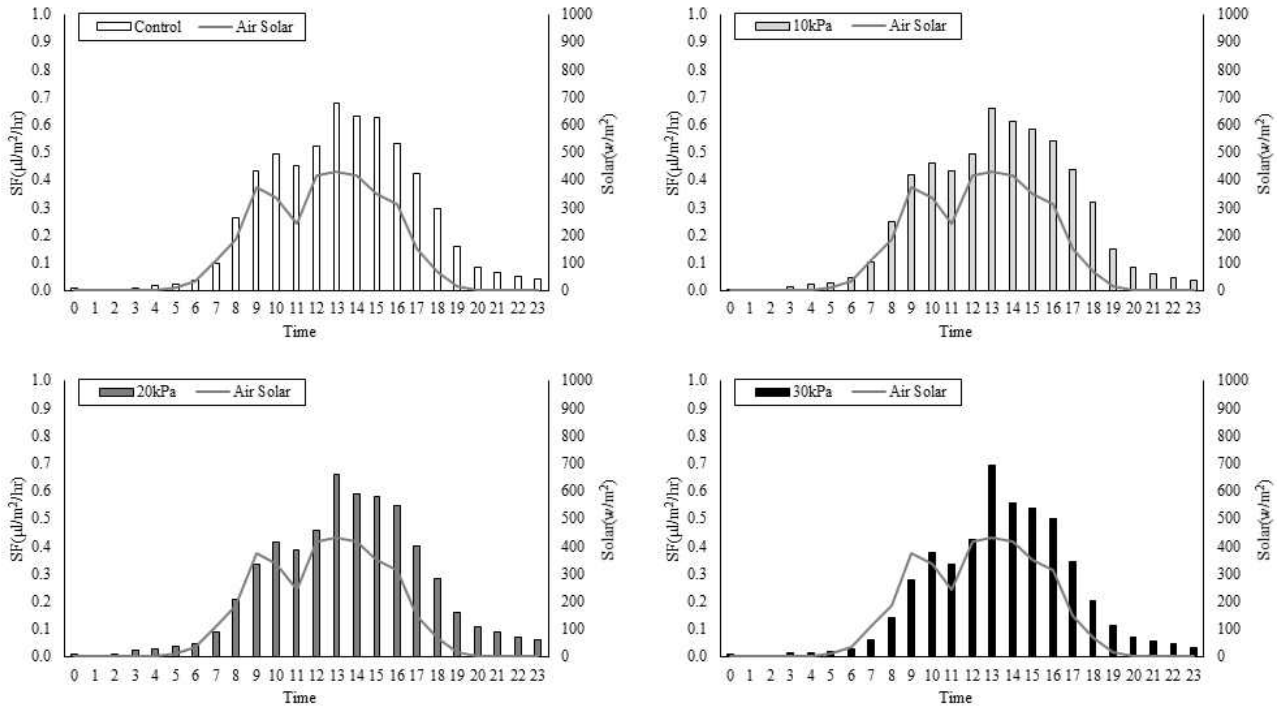


그림 2-2-12. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 일일 시간별 오이 수액흐름과 광량 (측정일: 2019. 6. 30)

흐린 날(5월 27일)과 맑은 날(5월 28일)의 오이 줄기와 과병 수액이동흐름 속도를 측정된 결과(그림 2-2-13, 2-2-14) 줄기의 수액 이동이 과병에 비해 많음을 알 수 있으며, 흐린 날의 줄기 수액이동속도는 최대  $1\mu\text{L}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 를 초과하지 않았으나, 맑은 날은 처리에 따라  $3\mu\text{L}\cdot\text{mm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 를 초과함에 따라 수액 이동이 광과 무관하지 않음을 확인할 수 있었다. 그러나 30kPa 처리를 제외한 처리는 흐린 날에도 관수가 이루어졌으며, 특히 10kPa은 흐린 날(5월 27일)이 맑은 날에 비해 관수량이 2배 이상 관수되었다. 즉, 5월 27일은 전날의 영향으로 흐림에도 불구하고 관수가 많았으나, 5월 28일은 전날의 영향으로 20kPa과 30kPa은 관수가 되지 않고, Control은 흐린 날(5월 28일)에 관수가 많았고, 10kPa은 5월 27일에 관수가 많았다. 5월 28일 맑은 날 계측된 줄기 SF 변화가 Control에서 많았던 이유로 추측된다.

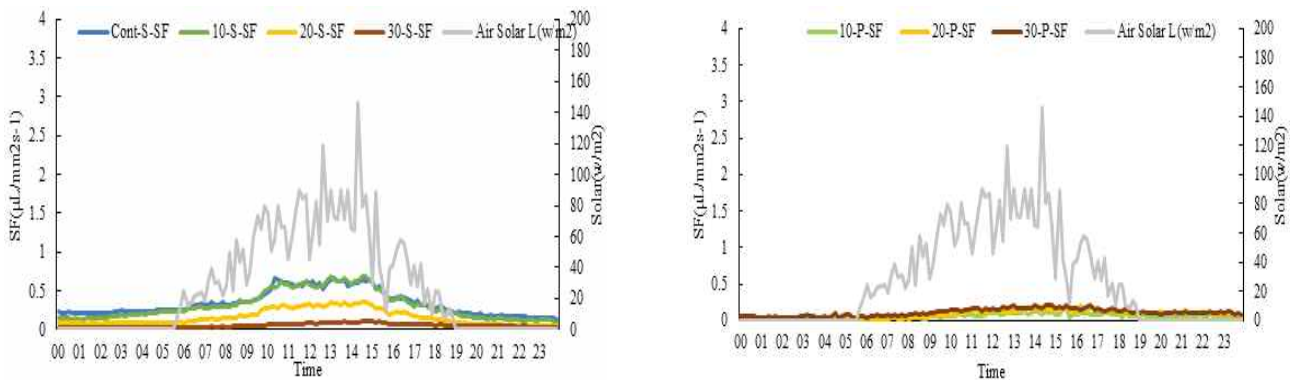


그림 2-2-13. 오이 봄 토경 재배에서 수분장력 처리에 따른 흐린날 줄기(좌)와 과병(우)의 수액흐름 변화 (측정기간: 2019. 5. 27.)

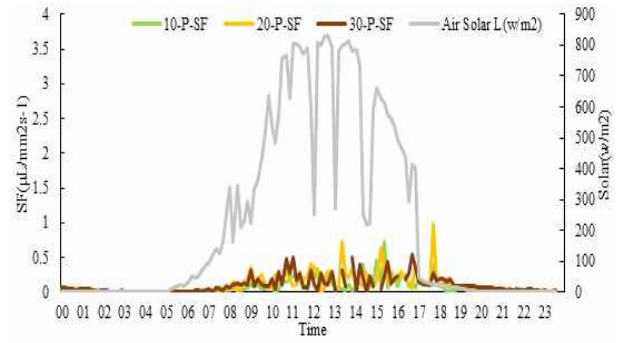
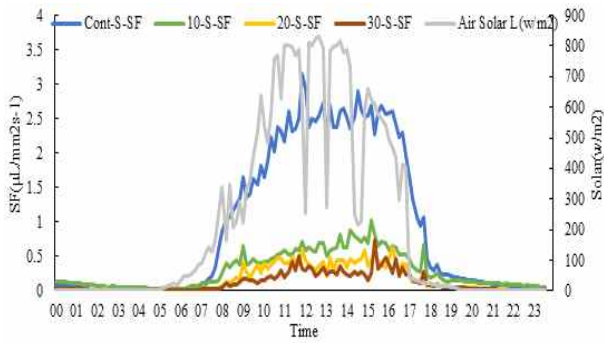


그림 2-2-14. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 맑은날 하루 동안의 줄기(좌)와 과병(우)의 수액흐름 (측정기간: 2019. 5. 28)

하루 중(맑은 날, 6월 21일) 온실 내 잎, 과실 및 식물체 주변 온도 변화를 알아보려고 시간 별로 온도를 측정하였다. 잎과 과실 온도는 9시에 상승하기 시작하였으며, 낮에는 엽온이 과실 온도보다 높은 경향을, 18시에는 과실 온도가 잎 온도보다 높은 경향을 나타냈다(그림 2-2-15). 9시 측정된 엽온은 20kPa 처리가 다른 처리에 비해 높았으며, 14시에는 30kPa 처리에서 엽온이 높았고, 과실 온도에서도 같은 경향을 보였다.

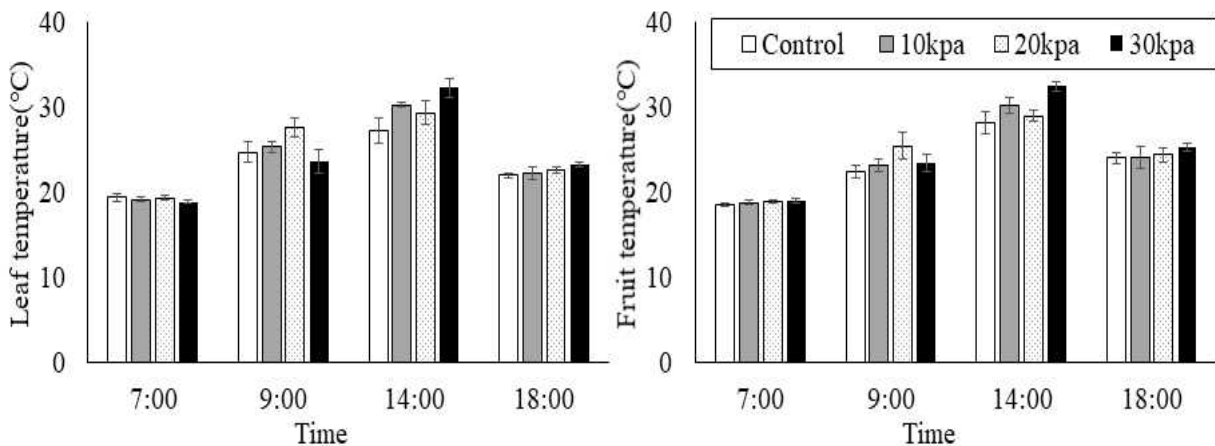


그림 2-2-15. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 시간대별 오이 엽온과 과실 온도 (측정일: 2019. 6. 20. n=5)

지면으로부터 약 1.5m 높이의 완전 전개된 잎과 온실 온도를 시간별로 측정한 결과는 10kPa 처리에서 14시 엽온 상승이 다른 처리에 비해 낮은 것을 확인할 수 있었으며, 14시 온실 온도가 31°C임을 고려하면 10kPa를 제외한 나머지 처리구의 엽온은 온실 온도보다 높은 것으로 나타났다. 또한 6월 20일은 모든 처리에서 관수가 이루어졌고, 특히 Control과 10kPa는 낮은 pF 범위 각각 4.2kPa, 4.7kPa를 나타냈음에도 14시 측정된 온도는 차이가 커서 토양의 수분 제어가 매우 제한적임을 확인하였다(그림 2-2-16).

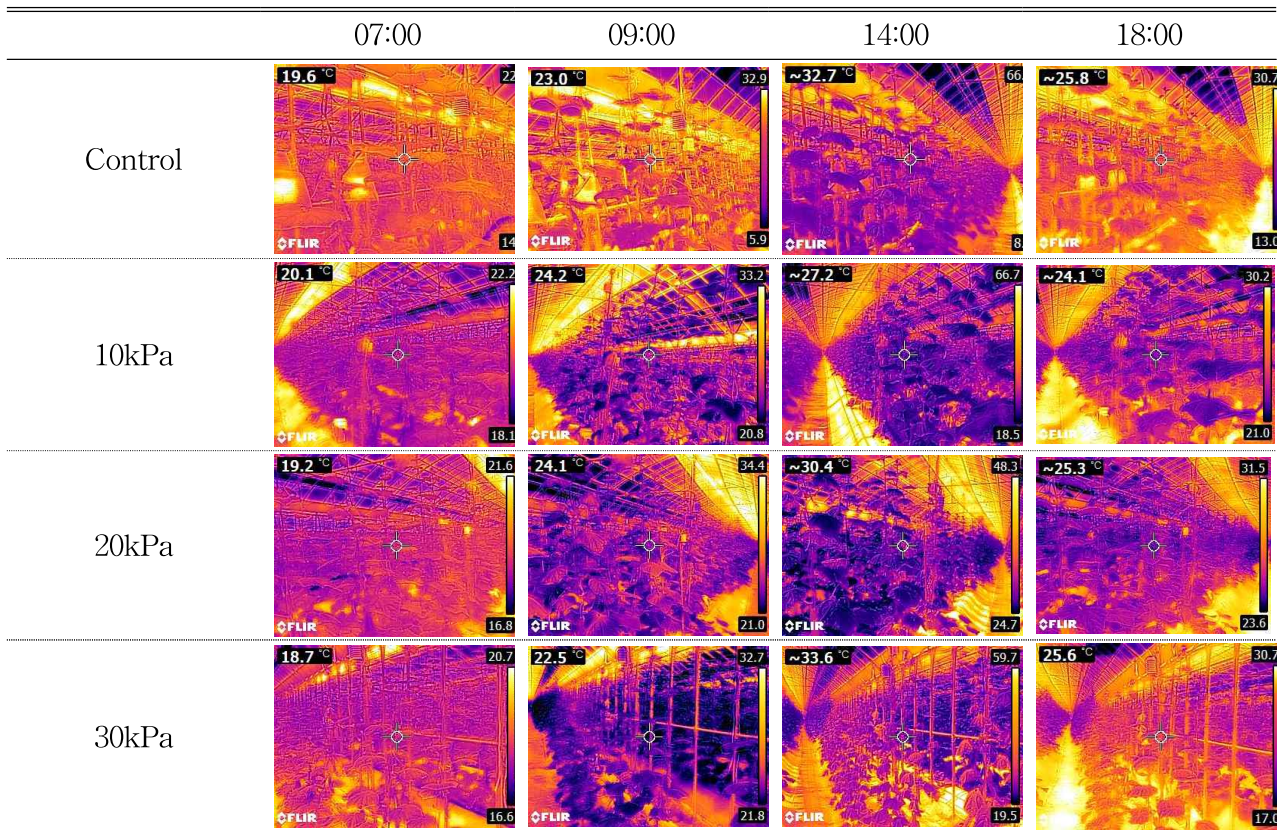


그림 2-2-16. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 시간별 온실 온도  
(측정일: 2019. 6. 20)

고온기에 해당하는 처리 9주 이후 6월 28일부터 7월 15일까지 지상부 1.5m 위치의 엽온을 측정된 결과 평균 엽온이 Control은 22.7°C, 10kPa은 22.7°C, 20kPa은 23.1°C, 30kPa은 23.2°C였으며, 최고 온도와 최소 온도 차이가 10kPa은 3.8°C, 20kPa은 4.3°C, 30kPa은 4.9°C로 pF가 높아져 관수량이 적을수록 엽온 차가 높았다(그림 2-2-17).

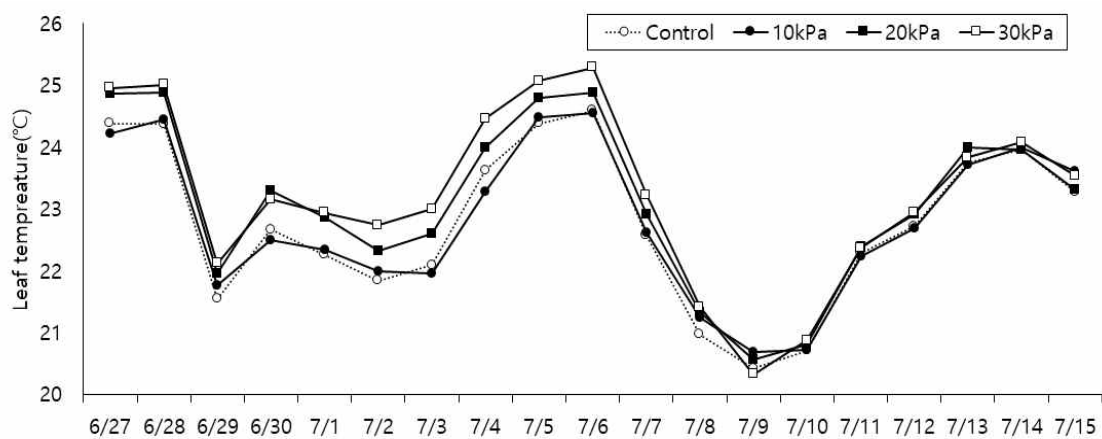


그림 2-2-17. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 일 평균 엽온 변화  
(측정기간: 2019. 6. 28~ 7. 15)

수액흐름속도가 높았던 7월 6일과 7일은 온실 내 대기 온도와 엽온간의 온도차가 7월 8일에 비해 크게 나타나는 특징을 보였다. 또한 광량에 따른 처리 별 엽온과의 상관성을 분석한 결과 (6월 24일~7월 15일) 엽온과 일사량 간에는 양의 상관을 얻었으며, 10kPa 처리에서 높은 상관 ( $R^2=0.580$ )를 얻었다(그림 2-2-18).

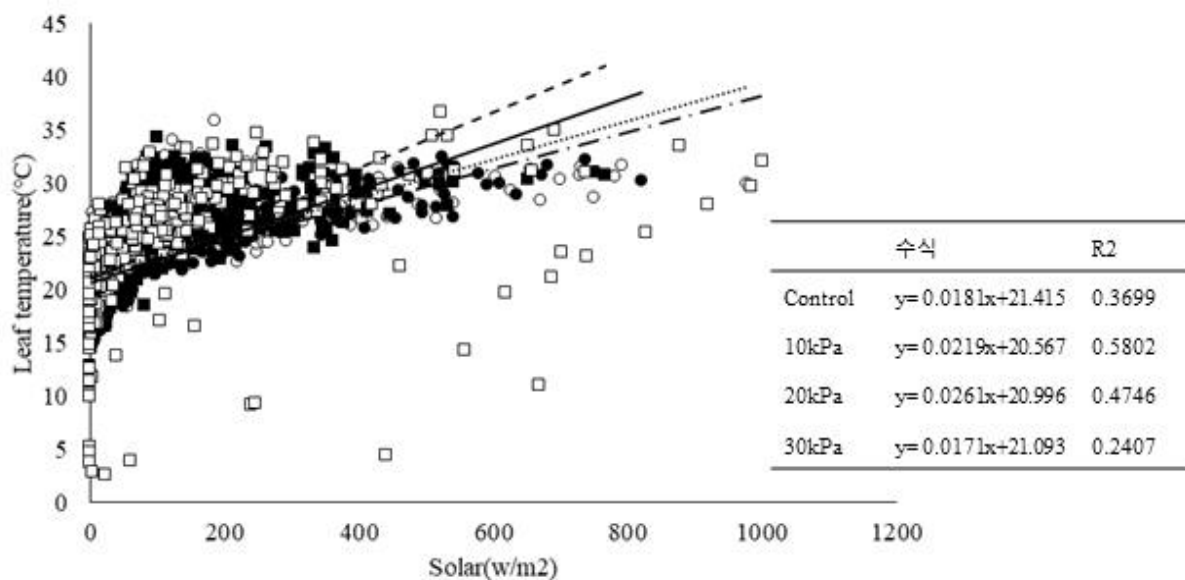


그림 2-2-18. 시설오이 봄 재배에서 관수개시점 처리에 따른 광량과 엽온의 상관관계  
(측정기간 : 2019. 6. 24.~ 7.15)

다. 실험 3. <시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 급액제어>

(1) 요약

2019년 8월 13일부터 10월 11일까지 토양 관수개시점을 10kPa, 15kPa, 20kPa한 3처리와 관행구 Control로 4처리하여 59일 동안 수행하였을 때 식물체 1주당 총 관수량이 45.0L(10kPa), 44.2L(15kPa), 33.7L(20kPa), 31.8L(Control)로 10kPa과 15kPa 처리에서 관수량이 많았다. 상품 과수와 상품 수량은 15kPa에서 가장 높았으며, 200g 과실 생산에 소요된 물량은 4.1L로 가장 적었다. 수확기 과실의 당도는 Control은 3.8°Bx., 10kPa은 3.1°Bx.로 관수량이 적은 처리에서 당도는 높았다. 9월 28일~10월 10일까지 측정된 일평균 엽온은 17.7~17.8℃로 차이가 없었지만, 엽기온차(최고 엽온- 최소 엽온)는 10kPa에서는 7.7℃, 15kPa에서는 8.6℃, 20kPa에서는 8.4℃로 관수량이 많은 처리에서 온도 편차가 적었다. 일사량 변화에 따른 처리구의 수액 흐름 속도, 엽온 및 엽수증기압의 변화는 모든 처리구에서 유사한 경향을 보였으며, 낮 시간 토양 수분 장력 증감에 따른 수액 흐름 속도, 엽온 변화는 처리구에 따라 차이를 보였다. 또한 줄기수액 흐름 속도가 높은 날(맑은 날)은 온실 내부의 대기 온도와 엽온 간의 온도 차가 흐린 날에 비해 컸으며, 광량과 엽온 간의 변화(9월 19일~10월11일)는 모든 처리구에서 R2=0.32~0.38로 양의 상관성이 있었다.

(2) 주요 결과

○ 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 재배 환경과 관수량

재배 기간 중 (2019.08.13.~ 2019.10.11.)온실 내 지상부와 지하부 온도는 정식 후 수확 전까지는 평균 22.8℃, 25℃였으나, 수확기인 9월 18일 이후는 평균기온 18.6℃, 21℃였다. 주간 평균 습도는 88.7%였다(자료 미제시)



그림 2-2-19. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 재배 모습  
(측정기간: 2019. 9. 18)

관수처리 기간 중 일평균 토양수분장력은 처리구별로 10kPa 처리구 3.8~11.6kPa, 15kPa 처리구 5.5~16.8kPa, 20kPa 처리구 5.6~17.1kPa 범위였다. 9월 18일부터 31일까지의 기간의 수분장력은 10kPa은 변화가 없었으나 20kPa의 경우 10~20kPa로 변화가 상대적으로 컸으며, 이는 매일 급액 되지 않음에 따른 영향으로 보인다. FDR 센서를 측정된 토양함수율은 10kPa 처리는 평균 30±5%범위, 15kPa는 38±8%범위, 20kPa은 22.3~41.0%, Control은 41.4~62.4%로 토양수분장력 kPa 측정 변화 양상과는 달랐다(그림 2-2-20, 2-2-21).

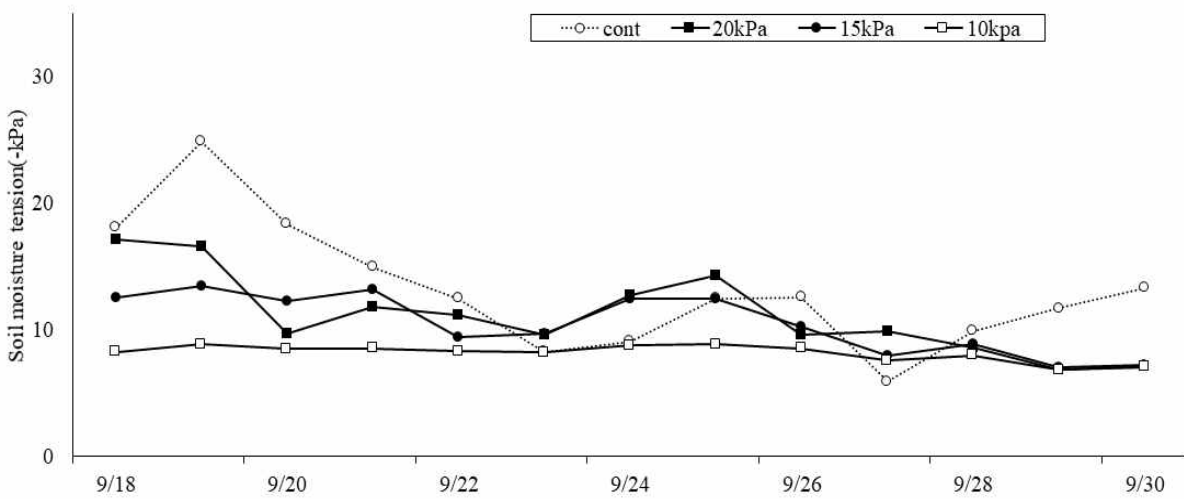


그림 2-2-20. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 일평균 토양 수분장력 변화 (측정기간: 2020. 9. 18.~ 9. 30)

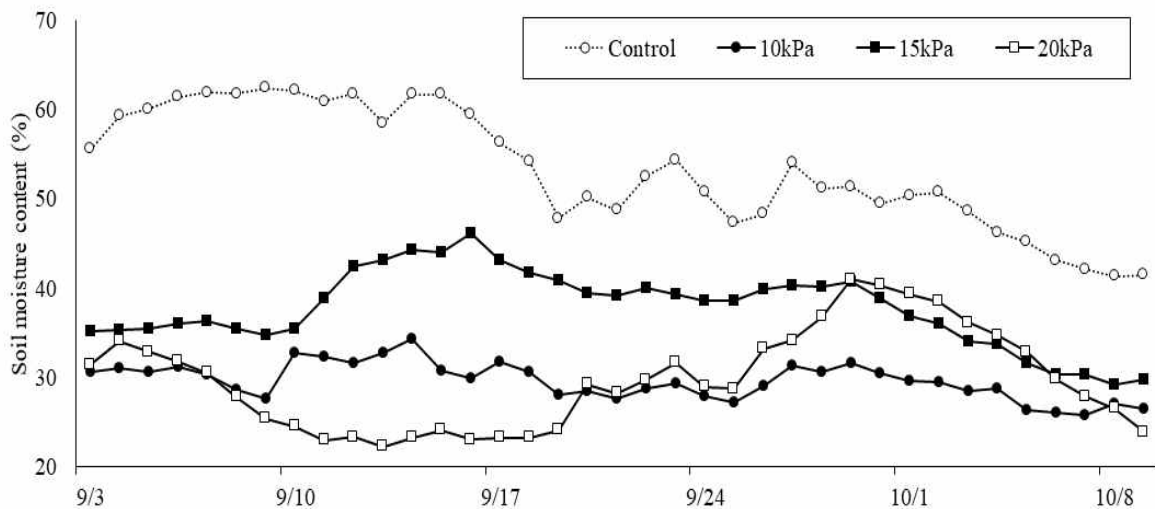


그림 2-2-21. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 토양 함수량 변화 (측정기간: 2019. 8. 29. ~ 2019. 10. 11)



관수 개시 처리 기간(8월 29일부터 10월 11일까지) 동안 공급된 관수량은 10kPa에서 45L, 15kPa은 44.2L, 20kPa은 33.7L가 공급되었고, 관행구는 31.8L가 공급되었다. 첫 급액은 9월 6일 시작되었으며, Control은 오이수확 이전에 처리구보다 관수량이 많은 11.5L가 공급된 반면, 10kPa과 15kPa은 5.9L, 5.1L가 각각 공급되었고, 20kPa은 1.3L로 적었다. 그러나 오이 수확기인 9월 18일 이후 관수량은 10kPa, 15kPa은 39.1L가 공급되고, 20kPa도 32.4L가 공급된 반면 Control은 낮은 20.4L가 공급되었다. 즉 20kPa은 초기 관수량이 10kPa과 15kPa에 비해 낮았으나, 수확기에는 관수량이 급격히 증가하여 일평균 관수량이 1.35L, 공급시 관수량도 2.95L로 많았다. 10kPa과 15kPa은 관수량과 공급횟수에 차이가 없어 하루 평균 2.3~2.4회 공급되었고, 관수개시점이 높아질수록 관수 횟수와 관수량은 감소하였다(표 2-2-6).

표 2-2-6. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 관수량과 공급횟수

	Treatment			
	Control	10kPa	15kPa	20kPa
8월 29일부터 9월 17일까지				
총 관수량 (ml/plant)	11,490.9	5,885.5	5,114.5	1,330.9
일 평균 관수량 (ml/day)	604.8	309.8	269.2	70.0
총물량/관수된 횟수(ml/event)	1,641.6	1,471.4	852.4	665.5
9월 18일부터 10월 11일까지				
총 관수량 (ml/plant)	20,402.7	39,118.2	39,112.7	32,403.6
일 평균 관수량 (ml/day)	850.1	1629.9	1629.7	1350.2
총물량/관수된 횟수(ml/event)	1,854.8	2,301.1	2,172.9	2,945.8
8월 29일부터 10월 11일까지				
총 관수량 (ml/plant)	31,827.8	45,003.6	44,227.3	33,734.5
일 평균 관수량 (ml/day)	757.8	1,071.5	1,053.0	803.2
총물량/관수된 횟수(ml/event)	1,768.8	2,413.0	1,842.8	2,595.0
평균 관수 횟수(관수 횟수/기간)	1.4	2.4	2.3	1.7

측정 기간: 2019. 8. 29.~2019. 10. 11.

○ 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 광합성 및 수량

처리 4주 째 관수개시점 처리에 따른 오이 잎의 광합성 형광반응을 오전 9시에 측정 했을때 10kPa에서 양자수율(Y)이 0.71로 높았으며, 광합성은 처리간 차이가 없었다(표 2-2-7, 2-2-8). 기공전도도와 엽육 내 CO<sub>2</sub> 농도는 15kPa 처리에서 높았다.

표 2-2-7. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 형광반응

	초소 형광값(Fo)	최대 형광값(Fm)	최대 양자수율(Y II)
Control	888.5 a <sup>z</sup>	2618.5 a	0.65 ab
10kPa	792.5 a	2799.0 a	0.71 a
15kPa	931.3 a	2561.6 a	0.63 b
20kPa	775.2 a	2434.0 a	0.68 ab

<sup>z</sup>Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$

(측정 기간: 2019. 9. 26. 09시 n=7)

표 2-2-8. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 오이 잎의 광합성(Photo), 기공전도도(Cond), 엽육 내 CO<sub>2</sub> 농도(Ci), 증산율(Trmmol), 수증기압차(VpdL) 및 엽록소 함량(SPAD)

	Photo ( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Cond ( $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	Ci ( $\mu\text{mol}\cdot\text{CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{air}$ )	Trmmol ( $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	VpdL ( $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	SPAD
Control	12.0 aZ	0.33 b	302.6 b	6.6 a	2.3 a	46.6 a
10kPa	11.1 a	0.37 ab	313.6 ab	7.0 a	2.2 a	42.9 a
15kPa	13.8 a	0.54 a	320.9 a	9.1 a	2.0 a	47.4 a
20kPa	11.9 a	0.45 ab	309.9 ab	7.5 a	2.2 a	47.3 a

<sup>Z</sup>Duncan's multiple range test at  $p<0.05$

(측정기간 : 2019. 9. 26, n=7)

엽수 3~4매인 오이 묘를 정식(2019. 7. 29.)하여 처리 전 측정된 생육은 처리 1주일 후 생육과 모든 항목에서 처리간 차이가 없었다(표 2-2-9). 관수 개시 처리 5주째(10월4일) 수확한 오이 과장은 20~21cm, 과폭 35±2cm, 경도 및 생체중은 처리간의 차이가 없었다. 그러나 당도는 Control에서 3.8°Brix로 가장 높았고, 10kPa에서 3.1°Brix로 낮았으며, 건물중도 Control에서 높았다. 한편 가을 작기 처리구에서는 봄 작기에 비해 기후 및 생육 불량 등에 의한 잘록과 발생이 상대적으로 많이 관찰되었다(표 2-2-10). 오이 착과 후 직경이 약 15mm 정도 크기의 오이 과실에 과실 비대기를 설치하여 관수처리에 따른 오이 과실 과경의 변화를 측정한 결과 17mm 내외에서 20kPa 처리의 과경 크기 변화가 관찰되었고, 10월 6일부터 과경 30mm에서는 15kPa처리가 20kPa보다 빠르게 증가하는 경향을 나타냈다. 수확 시 오이 과경이 15kPa에서는 약 38mm, 였으며 10kPa과 20kPa에서는 약 35mm였다(그림 2-2-22). 17~18마디에 착과된 오이의 과장을 2일 간격으로 측정(과장 4cm 내외)한 결과 과장 12cm 정도까지는 15kPa에서 가장 컸으나, 9월 25일째는 Control에서 약 16cm로 가장 길어져 대조구의 20cm 내외의 수확까지의 기간이 15일 정도가 소요되었다. 이는 봄 작기에 비해 2~3일 길어지는 것으로 온도 하강에 의한 영향으로 보인다.

표 2-2-9. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 처리 1주일째 생육

	엽장 (cm)	엽수 (ea)	엽병장 길이 (cm)	잎 (cm)		SPAD	마디수 (ea)	줄기직경 (mm)
				길이	폭			
Control	166.7 a <sup>Z</sup>	18.2 a	19.2 a	10.6 a	14.0 a	20.0 a	44.4 a	8.6 a
10kPa	160.1 a	16.8 a	18.8 a	11.4 a	14.2 a	20.5 a	44.4 a	8.2 a
15kPa	162.9 a	17.2 a	18.8 a	11.2 a	14.5 a	21.2 a	44.0 a	9.7 a
20kPa	166.2 a	17.6 a	19.2 a	11.9 a	15.4 a	22.0 a	44.4 a	10.4 a

<sup>Z</sup>Duncan's multiple range test at  $p<0.05$

(측정일: 2019. 9. 6)

관수 개시 처리 5주째(10월4일) 수확한 오이 과장은 20~21cm, 과폭 35±2cm, 경도 및 생체중은 처리간의 차이가 없었다. 그러나 당도는 Control에서 3.8°Brix로 가장 높았고, 10kPa에서

3.1°Brix로 낮았으며, 건물중도 Control에서 높았다. 한편 가을 작기 처리구에서는 봄 작기에 비해 기후 및 생육 불량 등에 의한 잘록과 발생이 상대적으로 많이 관찰되었다(표 2-2-10).

표 2-2-10. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 오이 과실 특성

	과장 (cm)	과폭 (mm)	경도 (g/mm)	당도 (°Brix)	생체중 (g/pl)	건물중 (g/pl)
Control	21.9 a <sup>Z</sup>	36.7 a	16.7 a	3.8 a	181.9 a	7.6 a
10kPa	21.3 a	37.0 a	15.2 a	3.1 c	176.8 a	6.3 ab
15kPa	20.4 a	32.5 a	14.2 a	3.2 bc	130.6 a	5.0 b
20kPa	20.1 a	34.2 a	14.9 a	3.6 ab	136.4 a	5.6 ab



<sup>Z</sup>Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$

(측정기간: 2019. 10. 4, n=5)

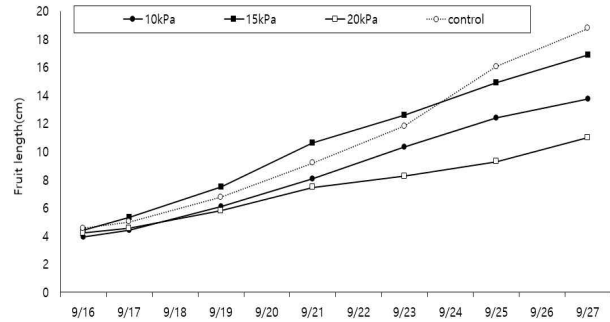
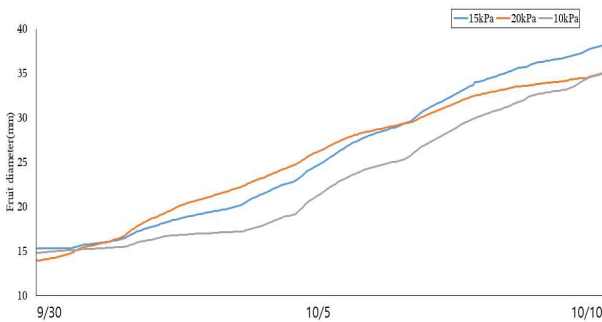


그림 2-2-22. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 오이 과경(좌)과 과장(우) 변화 (측정기간: 2019. 9. 16. ~ 2019. 10. 10)

처리 5주 동안 수확한 과실의 수량은 15kPa에서 주당 10개를 수확하여 수량이 높았으며, 200g 과실을 생산하는데 소요된 관수량도 4.1L로 가장 적었다(표 2-2-11). 이는 관수 처리 후 수확 전까지의 관수량이 10kPa보다 적었던 것이 수량과 과실 수분이용효율에 긍정적인 결과를 가져온 것으로 보인다. 이에 차년도에는 시기별 관수 개시 시점을 달리하여 적정 금액 개시 시점을 구명하는 것이 바람직하리라 본다.

표 2-2-11. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 상품과수, 수량 및 수분이용효율

	과장 (cm)	과수 (ea/pl.)	과중 (g/pl.)	수량 (g/pl.)	수분이용효율 (L/200g fruit)
Control	23.7 a <sup>Z</sup>	7.2 b	226.2 a	1592.6 b	4.6 b
10kPa	23.7 a	7.1 b	222.2 a	1579.9 b	6.2 a
15kPa	24.1 a	10.3 a	220.0 a	2267.5 a	4.1 b
20kPa	23.8 a	7.3 b	228.7 a	1660.1 b	4.4 b

<sup>Z</sup>Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$

(측정기간: 2019. 9. 18. ~ 10. 11, n=10)

○ 시설오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 생체정보와 환경과의 상관성

온실 온도가 낮아지는 가을 작기의 관수 처리 후 5주(9월 28일~10월 10일)까지 엽온을 측정한 결과 처리별 일평균 엽온이 17.7~17.8℃로 차이가 없었지만 최고 온도와 최저 온도의 차는 10kPa에서는 7.7℃, 15kPa에서는 8.6℃, 20kPa에서는 8.4℃로 온도 편차를 나타냈다(그림 2-2-23).

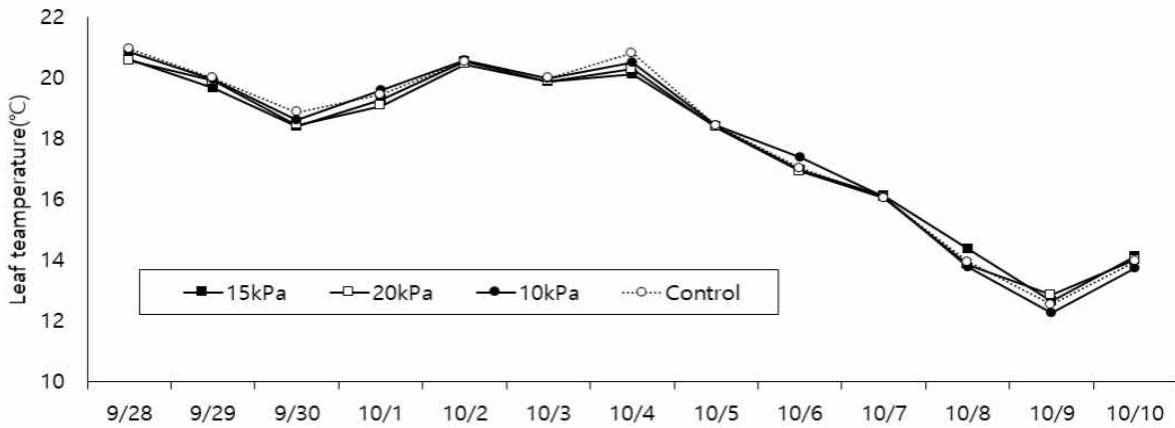


그림 2-2-23. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 일평균 엽온 변화 (측정기간: 2019. 9. 28. ~ 2019. 10. 10)

맑은 날(10월4일) 하루 동안의 엽온과 대기온도와 엽온의 차를 측정한 결과 일평균 엽온이 Control에서 20.8℃으로 높았으며 엽온 차는 20kPa에서 시간대별 평균 온도차가 -1.6~1.9℃로 적었으며, Control에서 -5.0~1.7℃로 온도 차가 가장 컸다. 엽온 차는 15kPa와 20kPa에서 적었으며 10kPa와 Control에서 대기와 엽온과의 차이가 컸으며, 광이 없는 시간에는 모든 처리구에서 차이가 없었으나, 광량이 있는 낮 시간 오전 7시경부터 처리 간 차이가 나타났다(그림 2-2-24).

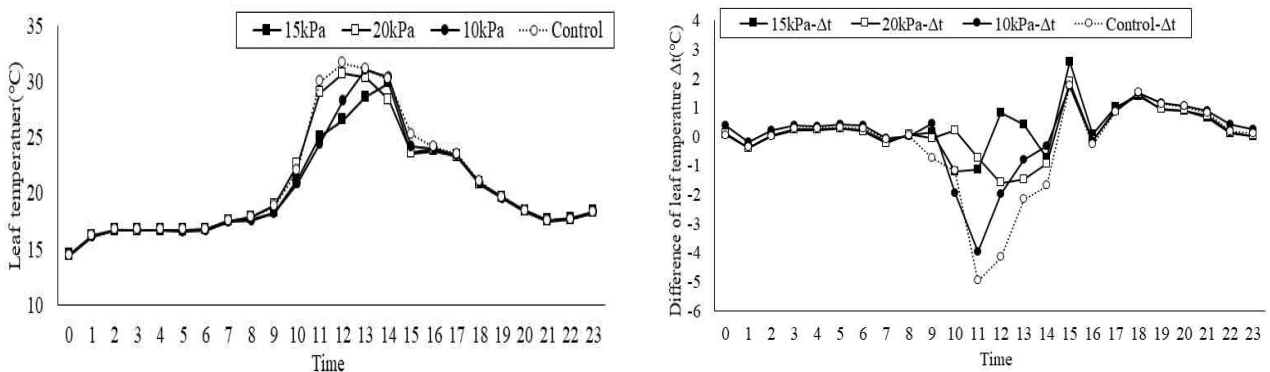


그림 2-2-24. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 하루 동안 처리간 엽온과 엽온차 (측정기간: 2019. 10. 4)

줄기 수액흐름속도, 엽온의 생체 정보를 활용하여 일사량, 온도, 수액흐름속도, 엽온, 엽 수증기압 및 토양수분장력 간의 관계를 알아보려고 3일 동안(6.24~7.15)의 시간별 변화를 분석하였다. 측정된 7월 6일과 7일은 시간별 일사량이 최고  $600\text{W}/\text{m}^2$  이상을 나타냈고, 7월 8일은  $400\text{W}/\text{m}^2$ 이었다. 일사량 변화에 따른 처리구의 수액흐름 속도, 엽온 및 엽 수증기압의 변화는 모든 처리구에서 유사한 경향을 보였으나, 낮시간 토양 수분장력 증감에 따른 수액흐름속도, 엽온 변화가 처리구에 따라 차이를 보였다(그림 2-2-25~28).

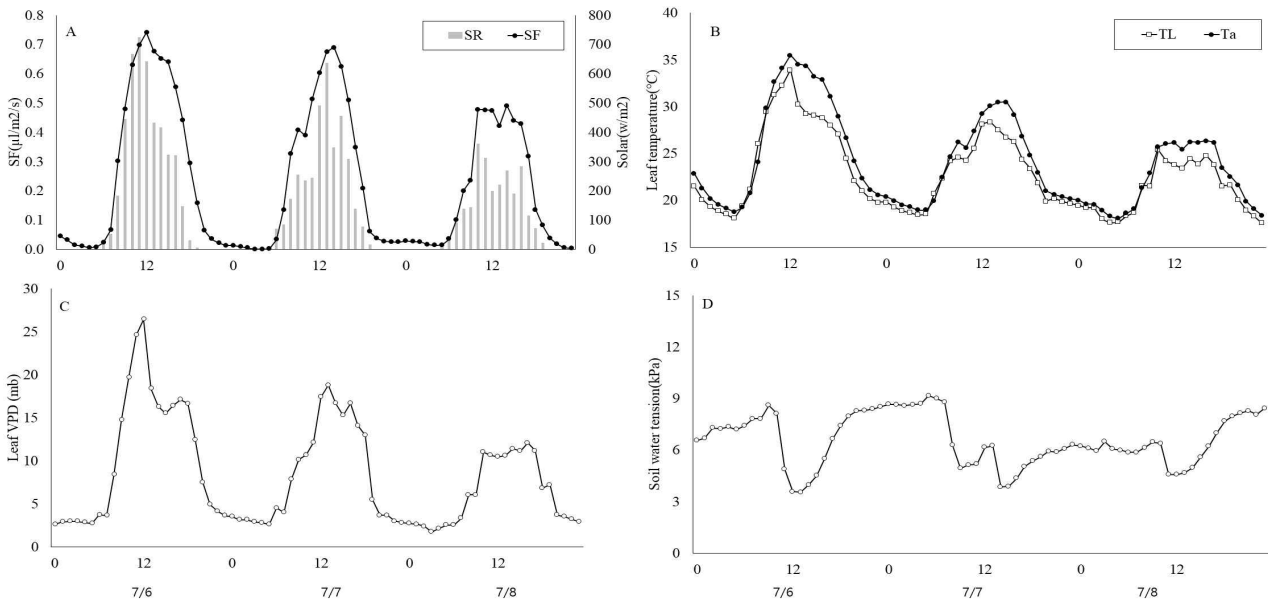


그림 2-2-25. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 대조구(관행관수)의 시간별 오이 줄기 수액흐름속도(A), 엽온(B), 엽수증기압(C) 및 토양수분장력(D) 변화 (측정기간: 2019. 7. 6. ~ 7. 8)

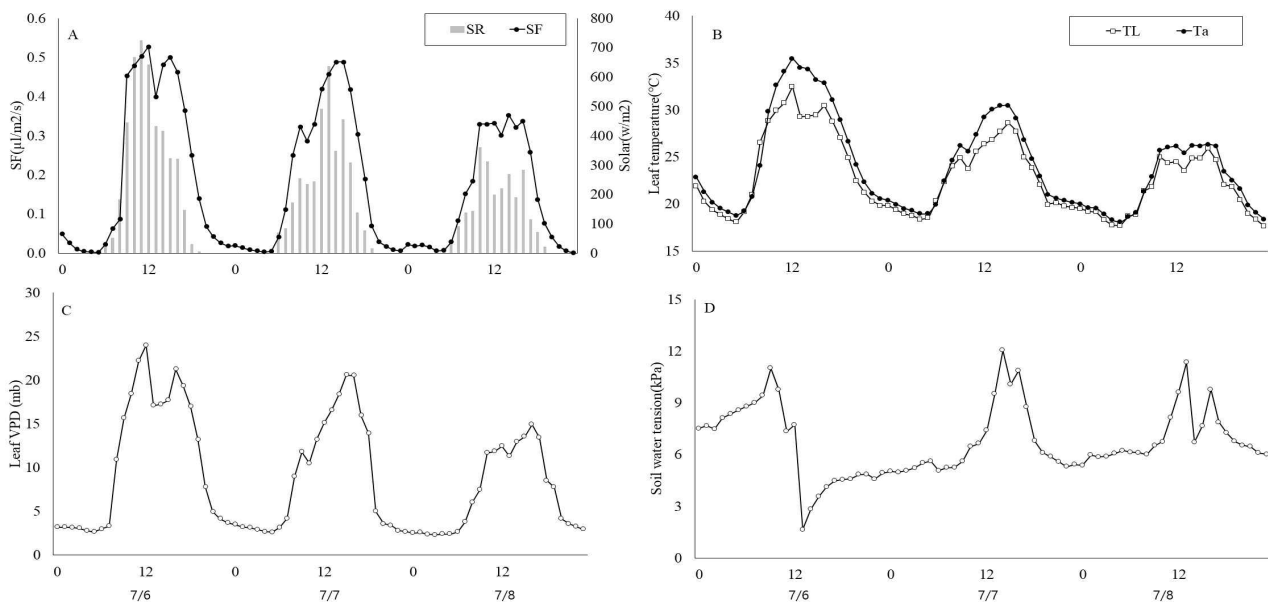


그림 2-2-26. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 10kPa 처리의 시간별 오이 줄기 수액흐름속도(A), 엽온(B), 엽수증기압(C) 및 토양수분장력(D) 변화 (측정기간: 2019. 7. 6.~ 7. 8)

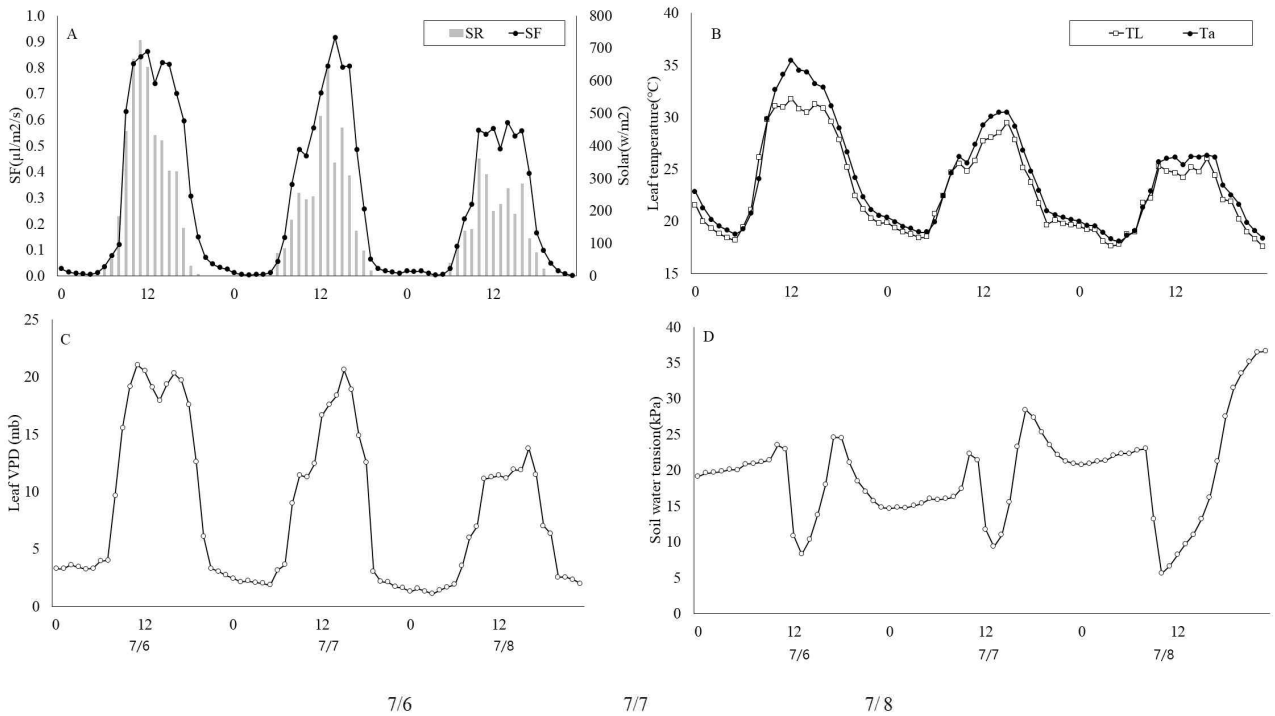


그림 2-2-27. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 20kPa 처리의 시간별 오이 줄기 수액흐름속도(A), 엽온(B), 잎수증기압(C) 및 토양수분장력(D) 변화  
(측정기간: 2019. 7. 6. ~ 7. 8)

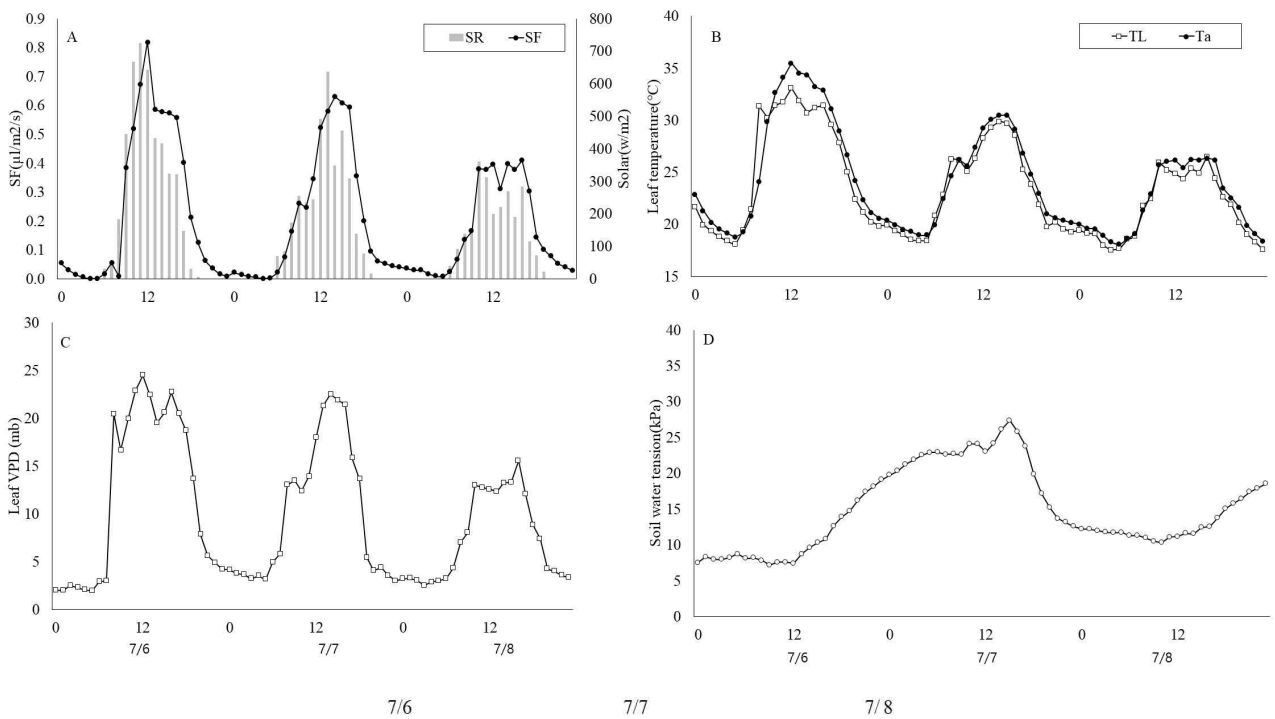


그림 2-2-28. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 30kPa 처리의 시간별 오이 줄기 수액흐름속도(A), 엽온(B), 잎수증기압(C) 및 토양수분장력(D) 변화  
(측정기간: 2019. 7. 6. ~ 7. 8)

식물 증산은 광합성에 필요한 물을 뿌리를 통해 공급받아 기공을 통해 증발되는 것으로 증산과 엽온 간에는 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있으며, 이들 요인은 식물 내부 인자 뿐 아니라 외부 환경요인에 따라 복잡하게 변한다. 재배 기간(9월19일~10월11일) 중 광량과 엽온간의 변화는 모든 처리구에서 양의 상관성이 있으며 10kPa에서  $R^2=0.498$ 로 처리구 중 높은 상관성을 나타냈다(그림 2-2-29). 시설토양에서의 생체정보를 활용한 수액흐름 속도, 엽온 변화를 실시간 관측하여 토양 수분을 제어하기에는 토양의 근권 범위가 넓고, 복잡하여 모니터링의 수단으로 적용되는 것이 바람직하리라 본다.

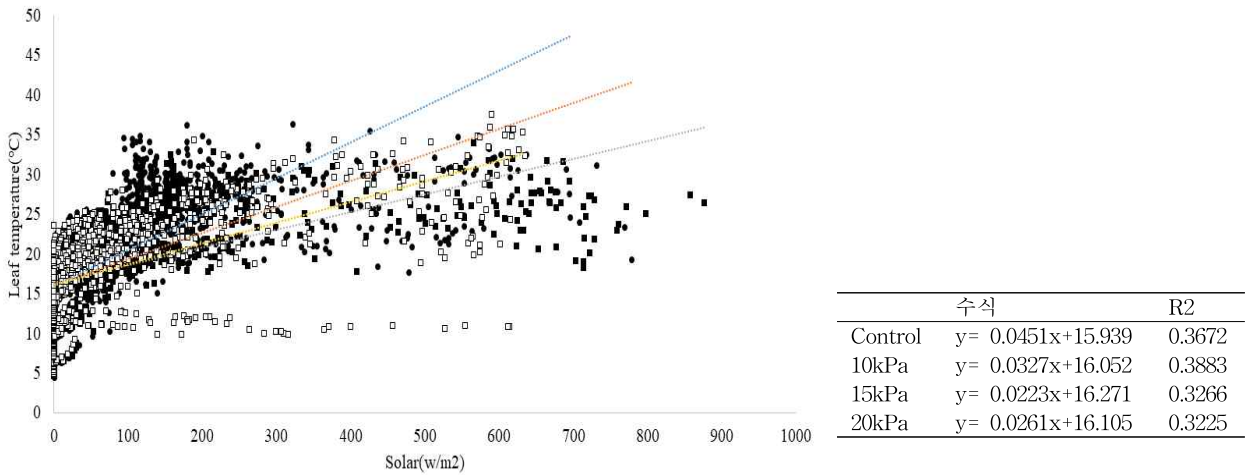


그림 2-2-29. 시설토양 오이 가을 재배에서 관수개시점 처리에 따른 처리별 광량과 엽온의 상관관계 (측정기간 : 2019. 9. 19. ~ 10. 11)

라. 실험 4. <시설오이 봄 재배에서 생육 단계별 관수개시점 처리에 따른 급액제어 현장 실증>

(1) 요약

2020년 4월 28일부터 7월 5일까지 오이 토경 재배농가에서 생육단계별 관수개시점 처리를 달리한 10-10-10kPa(T1), 10-10-20kPa(T2), 20-10-10kPa(T3), 20-10-20kPa(T4) 4처리와 Control(T5)로 5처리하여 10주간 수행하였다. 일평균 토양수분장력이 T1은 8.3kPa, T2는 9.2kPa, T3는 10.7kPa, T4는 10.2kPa였으며, Control은 5.9kPa였다. 일평균 관수량은 T1은 773ml, T2는 787ml, T3는 780ml, T4는 858ml였으며, 총 관수 횟수는 99회(T1), 92회(T2), 86회(T3), 93회(T4)였으며, 관수 간격도 0.7일로 차이가 없었다. 그러나 Control 처리는 일평균 관수량 1,525ml, 총 관수 횟수 50회로 평균 관수량이 처리구에 비해 2배 이상 많았다. 생육기(기간 I) 오이 마디수의 변화는 T2(6.0개)에서 유의적으로 높았으며 T4(5.2개)에서 낮았지만 수확성기(기간 II)에서는 Control(9.0개)에서 높았다. 상품 과수와 수량은 T2 처리에서 가장 높았으며, 수확 시기에 따라 처리에 따라 차이를 보였다. 1L 관수량에 생산된 오이의 수분이용효율( $g \cdot L^{-1}$ )은 T2(45.1g) > T1(33.5g), T3(31.9g) > T4(28.9g) > Control(23.7g)으로 높았다. 따라서 4월 정식 5월 수확하는 시설 작형에서 시기별 오이 관수개시점은 생육기와 수확성기는 10kPa로 생육을 안정적으로 확보하면서 수확하고, 수확량이 적어진 수확후기에는 20kPa이 관수하는 것이 적합하였다.

관수 처리 중 관수개시점에 의한 생체반응 간의 상관성을 알아보려고 10-10-20kPa 또는 20-10-10kPa의 2처리에서 광합성 형광반응, 수액흐름, 엽온 등을 측정하였다. 766~854 $W \cdot m^{-2}$ 의 고광, 32°C 이상의 고온인 처리 66일째 광합성형광반응변수( $F_o$ ,  $F_m$ ,  $F_v/F_m$ )값은 처리 간 차이가 컸다. 66일째 낮 시간(오전 10시 30분~오후 6시)의  $F_o$ 와  $F_v/F_m$ 값은 10-10-20kPa 처리보다 20-10-10kPa 처리에서 높았다. 엽온이 높았을 때  $F_v/F_m$ 값은 감소하였다. 28일과 66일째 엽 생육(엽장, 엽폭, 엽면적)은 차이가 없었으나 엽록소 함량(SPAD값)은 20-10-10kPa 처리에서 유의하게 높았다. 광도와 온도가 증가함에 따라 줄기수액흐름상대율(SFRR)과 엽온은 상승하였다. 두 처리구 모두 SFRR은 광도 170  $W \cdot m^{-2}$  이상인 오전 8시~9시간대에 급격한 증가가 시작되었다. 관수 후의 처리구 토양온도는 감소하였으나 7월 5일(광도 820 $W \cdot m^{-2}$ , 오후 1시) 토양온도가 10-10-20kPa에서는 31.0°C, 20-10-10kPa에서는 28.5°C였다. 그러나 처리 간 SFRR, 엽온, 기온차, VPD는 차이가 없었다. SFRR과 엽온 간에는 정의 상관성( $p < 0.01$ ,  $r = 0.770$ )을 보였으며, SFRR과 엽온은 광, 온도, 토양 온도, 토양 수분함량, VPD 간에는 정의 상관, 상대습도와 기온차 간에는 부의 상관을 보였다.

따라서 오이 적정 토양수분장력 범위 내 관수 제어 처리에서 식물의 광합성 형광 반응, SFRR, 엽온은 광, 온도, 습도, 토양수분함량, 토양 온도, VPD에 의해 영향을 받았고, 생체 정보 측정 과정에서 얻어진 변수들은 관수 제어 활용 가능성을 확인하였다.



(2) 주요 결과

○ 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 생육과 수분 이용

2020년 4월 28일부터 7월 5일까지 오이 토경 재배농가에서 생육단계별 관수개시점 처리를 달리한 10-10-10kPa(T1), 10-10-20kPa(T2), 20-10-10kPa(T3), 20-10-20kPa(T4) 4처리와 Control(T5)로 5처리하여 10주간 수행하였다. 관수개시점을 시기별로 10-10-10kPa, 10-10-20kPa, 20-10-10kPa, 20-10-20kPa등 4처리와 농가에서 관행적으로 공급하는 타이어 관수 Control 등 총 5처리 하였다(그림 2-3-1).

Growth stage	Transplanting	Fruiting	Harvest
Date	4/20	4/28	5/10
		5/26	6/26
		7/5	
	0 DAT		29 DAT
	60 DAT		
Control			
Treatment (-kPa)	T1	10	10
	T2	10	20
	T3	20	10
	T4	20	20

그림 2-3-1. 생육 단계별 관수개시점 변경 처리 모식도

재배 중 하루 평균 온도는 21.6℃, 최저 평균 온도 13.8℃, 최고 평균 온도 31.3℃, 하루 평균 누적 광량 1,383.5 J·cm<sup>-2</sup> 로 오이 재배에 적합하였으나(그림 2-3-3), 온실 내 난방 시설과 보온 커튼이 미설치되어 4월 중 야간 최저 온도가 5℃이하(1.4~5.2℃)로 낮았고, 낮 최고 온도가 35℃를 초과하는 날도 17일 이상 발생하였다(그림 2-3-2).

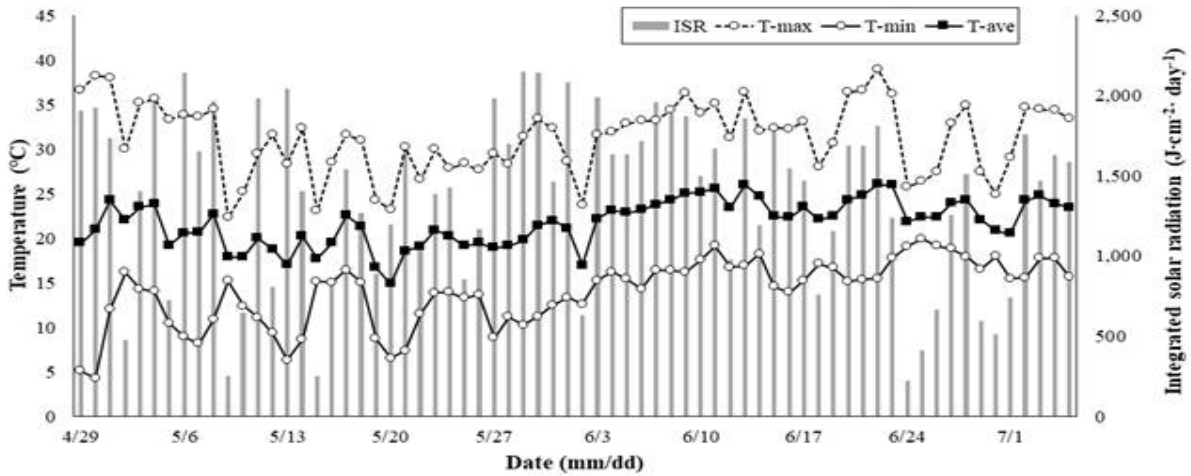


그림 2-3-2. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 온실의 지상부 환경  
(측정기간: 2020. 4. 29. ~ 7. 5)

처리 동안 일평균 토양수분장력(kPa)이 T1은 8.3, T2는 9.2, T3는 10.7, T4는 10.2였으며, Control은 5.9였다(그림 2-3-3). 일평균 토양수분장력을 기간별로 보면, 생육기(기간 I) 10kPa로 관수된 T1, T2 처리에서는 8.8~10.3kPa이었으며, 20kPa로 관수된 T3, T4에서는 13.9~15.3kPa로 토양수분장력이 높았다. 수확성기(기간 II)는 모든 처리구가 10kPa로 관수된 시기로 7~8kPa 범위에 있었으며, Control은 4.1kPa로 낮은 수준을 유지하였다. 수확후기(기간 III)는 10kPa 처리인 T1, T3에서는 6.8~6.9kPa을, 20kPa 처리인 T2, T4에서는 8.2~10.2kPa이었으며, Control은 4.6kPa을 나타내어 처리 기간 동안 Control은 처리구보다 낮은 토양수분장력을 유지하였다. 20kPa로 관수 개시 설정하였을 때 처리구의 토양수분장력은 10kPa 처리보다 높은 토양수분장력을 유지하였다. 생육기(기간 I) 20kPa로 설정된 T3, T4 처리구는 처리 후 5월 18일까지 4~5번 밖에 관수가 이루어지지 않았으며, 그림에도 T4 처리구의 토양수분장력이 낮은 경향을 나타내었다. 이는 처리구의 위치, 토양 분포 양상 등이 복합적으로 관여하였으리라 본다.

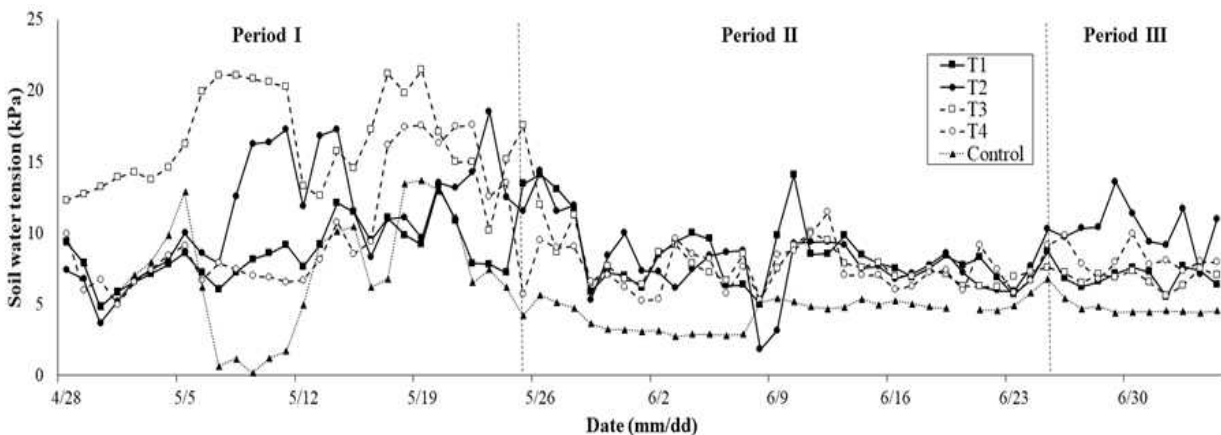


그림 2-3-3. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 일평균 토양 수분장력 변화  
(측정기간: 2020. 4. 28. ~ 7. 5)

2020년 4월 28일부터 7월 5일까지 주당 총 관수량은 53,322ml(T1)~59,206ml(T4)였고, 일평균 관수량은 T1은 773ml, T2는 787ml, T3는 780ml, T4는 858ml였으며, 총 관수 횟수는 T1 99회, T2 92회, T3 86회, T4 93회로 처리 간 차이가 없었다. 그러나 Control은 일평균 관수량 1,525mL, 총 관수 횟수 50회로 처리구에 비해 평균 관수량이 2배 이상 많았고, 관수 횟수는 40% 이상 감소하였다. 관수 된 날에 공급된 평균 관수량도 처리구 간에는 1,111mL(T1)~1,260mL(T4)로 차이가 없으나 Control은 2,105mL로 높았다. 그러나 처리 기간 중 관수 간격은 0.7일로 차이가 없었다. 토양 수분장력을 15kPa, 20kPa, 30kPa, 40kPa의 관수개시점으로 각각 오이 재배하였을 때 Jeon 등(2010)은 15kPa과 20kPa 처리에서는 총 관수량이 차이가 없으나, 30kPa과 40kPa에서는 관수량이 감소했다고 보고하였으며, Bem 등(1999)도 0.2bar에서 1bar로 토양 수분장력이 높아졌을 때 0.2bar와 1/3bar에서는 관수 간격, 관수 횟수는 차이가 있으나 총 관수량은 차이가 없었으며, 1bar에서는 총 관수량이 감소했다고 보고했다. 본 실험은 토양 수분 적정 범위에서 생육 단계에 따라 10kPa, 20kPa로 설정함에 따라 Bem 등(1999), Jeon 등(2010)의 결과와 같이 20kPa 이내 범위에서는 관수량, 관수 횟수 등에 차이를 주지 않은 것으로 생각되었다(표 2-3-2).

표 2-3-2. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 관수량 및 관수횟수

	Treatment				
	T1	T2	T3	T4	T5
4월 28일부터 5월 25일까지					
총 관수량 (ml/plant)	8,358	7,440	4,370	5,273	11,077
일 평균 관수량 (ml/day)	299	266	156	188	396
총물량/관수된 횟수(ml/event)	321	413	364	406	1007
평균 관수 횟수(관수 횟수/기간)	0.9	0.6	0.4	0.5	0.4
5월 26일부터 6월 25일 까지					
총 관수량 (ml/plant)	35,660	38,862	35,084	44,571	78,414
일 평균 관수량 (ml/day)	1,150	1,254	1,132	1,438	2,529
총물량/관수된 횟수(ml/event)	540	572	557	619	2,704
평균 관수 횟수(관수 횟수/기간)	2.1	2.2	2.0	2.3	0.9
6월 26일부터 7월 5일까지					
총 관수량 (ml/plant)	9,304	8,034	14,336	9,362	15,741
일 평균 관수량 (ml/day)	930	803	1434	936	1,574
총물량/관수된 횟수(ml/event)	1,329	1,339	1,303	1,170	1,574
평균 관수 횟수(관수 횟수/기간)	0.7	0.6	1.1	8	1
4월 28일부터 7월5일 까지					
총 관수량 (ml/plant)	53,322	54,336	53,790	59,206	105,232
일 평균 관수량 (ml/day)	773	787	780	858	1525
총물량/관수된 횟수(ml/event)	539	591	626	637	2,105
평균 관수 횟수(관수 횟수/기간)	1.4	1.3	1.2	1.3	0.7

\*측정기간: 2020. 4. 28. ~ 7. 5.

관수개시점을 시기별로 달리 처리한 오이 봄 재배에서 처리 시작일부터 2주 간격으로 처리 7주까지 조사한 오이 묘의 생육은 초장은 관행구에서 가장 높았으며 T3, T4에서 작았다. 이 차이는 관수 처리 변경 전 20kPa로 처리한 처리 3주째부터 발생하였으며, 재배 5주에서 7주 사이 엽수의 변화가 없는 것은 하엽 제거로 인하여 노엽을 제거하였기 때문으로 오이의 묘의 엽수가 변화가 없었다(그림 2-3-4).

생육기(기간 I) 오이 마디수의 변화는 T2(6.0개)에서 유의적으로 높았으며 T4(5.2개)에서 낮았지만 수확성기(기간 II)에서는 Control(9.0개)에서 높았다. 오이의 재배 특성상 매 마디 착과시키는 오이의 수확량에 차이가 발생할 것으로 판단된다(그림 2-3-5). 적심한 오이 묘의 초장은 처리간 차이가 없었으나 엽수는 관행구에서 적었으며 마디수가 적은 것으로 보아 절간장의 길이가 길었을 것으로 사료되며 뿌리 길이는 좌우로 50~80cm, 깊이는 25cm 범위에 있었으며 가늘고 긴 수염뿌리였다(그림 2-3-6, 표 2-3-3).

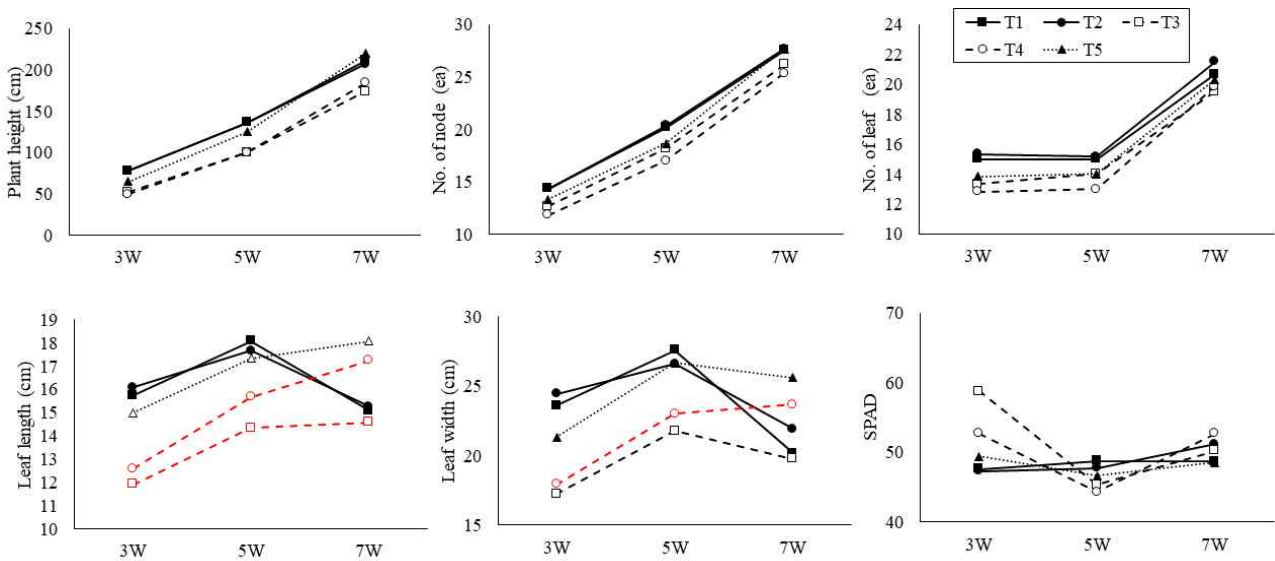


그림 2-3-4. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 오이의 초장, 마디수, 엽수, 엽록수 함량, 엽장과 엽폭 (측정기간: 2020. 5. 19, ~ 6. 9. n=6)

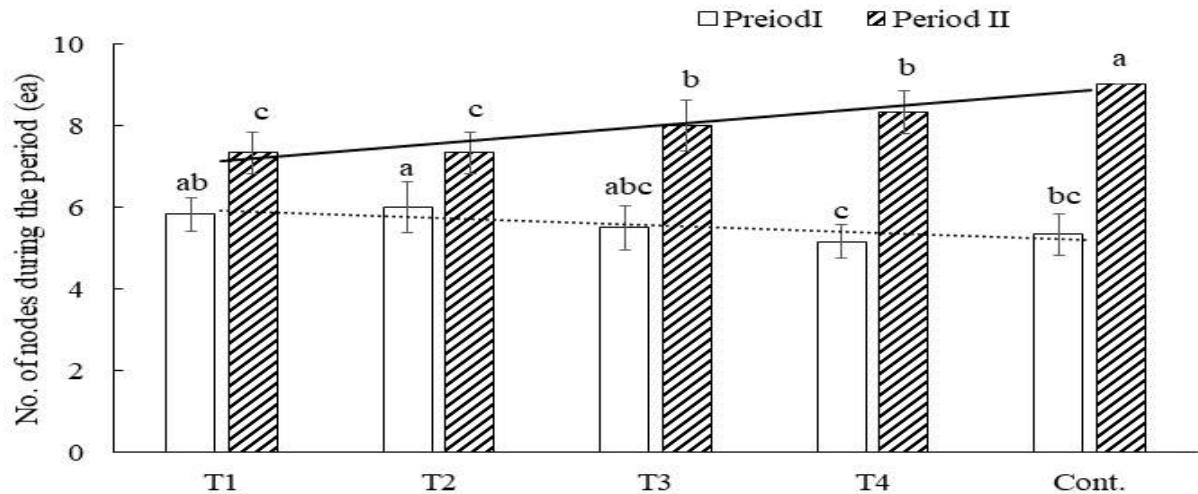


그림 2-3-5. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 기간별 마디수 변화  
Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$  (측정기간: 2020. 5. 19, ~ 6. 9, n=5)



그림 2-3-6. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 오이 봄 재배 처리 오이의 지상부(좌), 지하부(우) 생육모습 (측정기간: 2020. 7. 5)

표 2-3-3. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 생육

	초장 (cm)	엽수 (ea)	마디수 (ea)	뿌리길이 (cm)	함수율(%)	
					지상부	지하부
T1	273 a <sup>Z</sup>	24.8 a	32.2 ab	66.6 a	83.0 a	90.8 a
T2	258.8 a	24.4 a	33 a	60.6 a	83.8 b	90.7 a
T3	265.2 a	24 a	34.2 a	63.9 a	84.5 ab	90.5 a
T4	258.4 a	22.2 a	32 ab	61.9 a	85.2 ab	90.5 a
T5	268.8 a	16.6 b	30.2 b	58.5 a	87.6 a	90.6 a

<sup>Z</sup>Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$

(측정기간: 2020. 7. 5, n=5)

관수개시점을 시기별로 달리 처리한 오이 봄 재배에서 T2(10-10-20kPa) 처리에서 개화 6일째부터 길어지며 수확일까지 15일이 소요되었으나 T1(10-10-10kPa)은 16일 T3(20-10-10kPa),

T4(20-10-20kPa)는 18일 Control은 16.5일이 소요되었다 한 식물체에 달려있는 오이의 수와 위치에 따라 오이는 수확일수가 달라질 수 있어 반복적인 추가 실험이 필요하며, 상품과를 제외한 비상품과의 발생이 많았다(그림 2-3-7). 6월 018일 오이 과수의 특성은 오이 길이는 T4를 제외하고는 관행구와 처리구 간의 유의적인 차이가 없었으며, 생체중, 건물중, 과폭은 처리구 중 T2에서 높았고 T4에서 낮았다. 경도와 산도는 처리구간 차이가 없었지만 당도는 T3과 Control에서 유의적으로 높았으며 T2에서 낮았다(표 2-3-4).

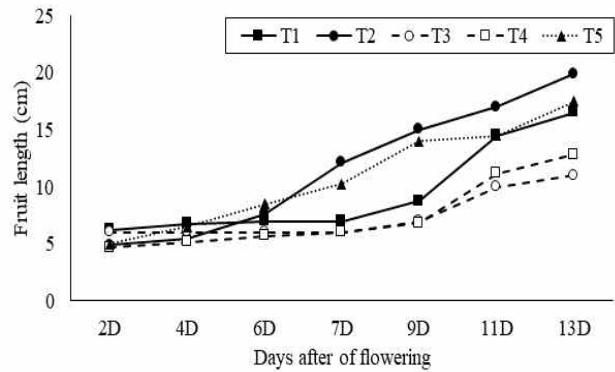
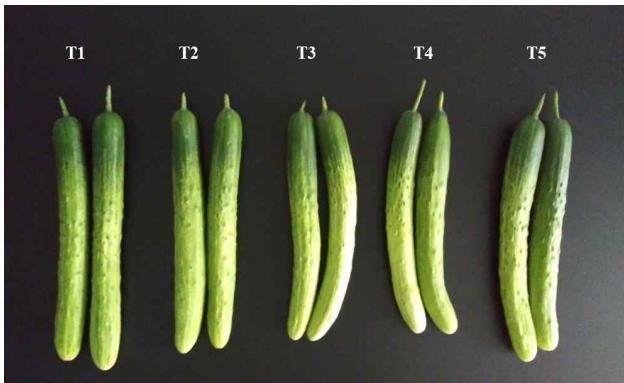


그림 2-3-7. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 오이과실의 개화 후 수확일까지 생장 길이변화 (측정기간: 2020. 6. 17.~ 7. 5, n=3)

표 2-3-4. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 과실 생육

	과장 (cm)	생체중 (g)	건물중 (g)	과폭 (mm)	경도 (N/Ø3mm)	산도 (%)	당도 (Brix)	함수율 (%)
T1	26.9 a	198.9 ab	8.3 ab	31.4 a	16.1 a	0.7 a	3.7 ab	95.8 ab
T2	27.4 a	230.5 a	9.2 a	31.9 a	16.6 a	0.7 a	3.5 b	96.0 ab
T3	25.9 ab	197.2 ab	8.1 ab	31.0 ab	17.3 a	0.7 a	3.7 a	95.9 ab
T4	25.4 b	183.0 b	7.2 b	28.8 b	16.1 a	0.8 a	3.6 ab	96.1 a
T5	27.3 a	198.9 ab	9.2 a	30.6 b	17.6 a	0.7 a	3.8 a	95.3 b

<sup>2</sup>Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$

(측정기간: 2020. 6. 18, n=4)

오이 수확이 시작된 5월 29일부터 7월 5일까지의 상품 과수와 수량은 T2 처리에서 가장 높았다(그림 2-3-8). 총 과수와 수량이 T1은 9.2개, 1,804g, T2 처리에서는 12.3개, 2,452g, T3는 8.3개, 1,683g, T4는 8.4개, 1,790g, Control은 11.9개, 2,496g을 각각 수확하였다. 수확 기간을 2주 간격으로 나뉘었을 때 5월 29일부터 6월 11일까지는 T1, T2, Control에서 높았으며, 6월 12일부터 6월 25일까지는 T4와 Control에서 높았으며, 6월 26일부터 7월 5일까지는 T2 처리에서 높아 수확 시기에 따른 과수와 수량은 달랐다. 생육기 관수개시점이 10kPa인 T1, T2 처리는 정식 30일째 7~9마디에서 암꽃 발생률이 90% 이상이었고, 20kPa로 관수가 개시된 T3, T4 처리에서는 첫 관수 시작일이 5월 6일로 T1, T2 처리에 비해 8일 늦어졌으며, 암꽃 발생률도 50% 미만으로 낮았다(자료 미제시). 한편 생육기에 암꽃이 발생하고 착과가 진행되는 무한 생

장 특성을 고려하여 생육량이 낮은 T3, T4 처리에서는 처리 25일째 7~8마디에 착과 된 오이를 작물 성장 세력을 확보하기 위해 인위적으로 낙과시켰다. 따라서 T3, T4 처리에서는 첫 수확이 시작된 5월 29일부터 2주간의 오이 수확 과수와 수량이 T1, T2 처리보다 적었다. 그러나 6월 12일부터 6월 25일 기간에 수확된 과수는 T4 처리구에서 가장 많았다. 6월 26일부터 7월 5일 수확 과수는 관수 개시가 20kPa로 변경 설정한 T2 처리구에서 가장 많았다(그림 2-3-8).

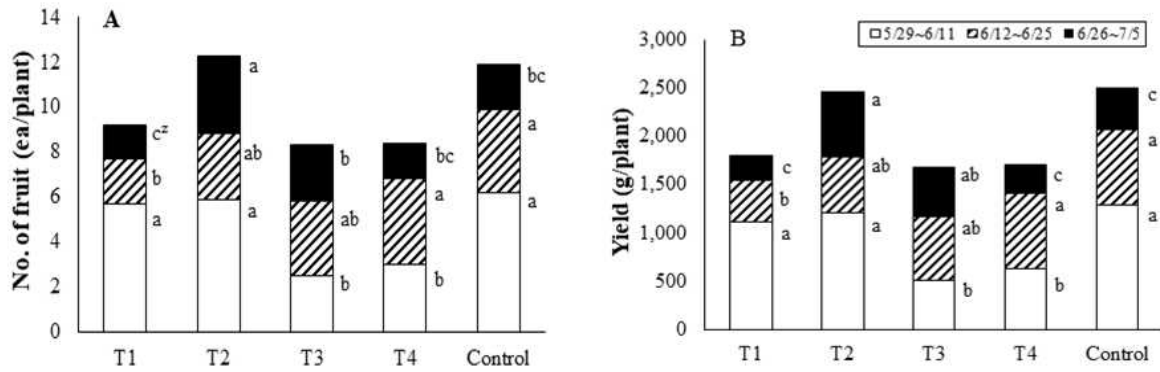


그림 2-3-8. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 상품과수와 수량  
Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$  (추정기간: 2020. 5. 5. ~ 7. 5. n = 10)

1L 관수량에 생산된 오이가 T1 처리는 33.5g, T2 처리는 45.1g, T3 처리는 31.9g, T4 처리는 28.9g, Control은 23.7g으로 수분이용효율은 T2 처리에서 가장 높았고, Control에서 가장 낮았다. Control은 1회 관수량을 많게 하면서 전 생육기간 동안 비교적 낮은 토양 수분장력을 유지하며 수분 관리가 이루어진 처리구로 평균 과중은 높은 경향을 나타냈으나, 수확한 총 과수와 수량은 T2 처리와 차이가 없어 수분이용효율이 가장 낮았다. 또한 전 생육기 10kPa로 관수 개시가 이루어진 T1 처리구의 수분이용효율도 Control 보다 높았고, 생육기와 수확성기에는 10kPa, 수확후기는 20kPa로 관수개시점을 변경한 T2 처리구는 본 실험에서 가장 높은 수분이용효율을 나타냈다(그림2-3-9). 이는 생육 단계에 따른 관수개시점을 제시하여 농업용수 물 사용 효율성을 높일 수 있음을 확인할 수 있었다.

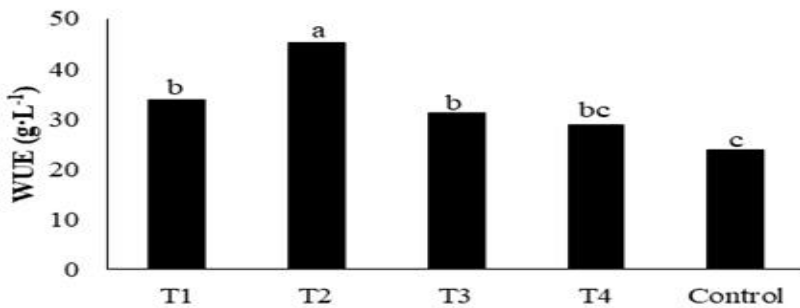


그림2-3-9. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 수분이용효율  
Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$  (추정기간: 2020. 4. 29. ~ 7. 5. n=10)

○ 시설오이 봄 재배에서 생육 단계별 관수개시점 처리가 광합성 형광반응, 줄기수액흐름 및 엽온에 미치는 영향

관수개시점을 시기별로 달리 처리한 오이 봄 재배에서 관수 처리 28일째(2020년 6월 28일)와 66일째(2020년 7월2일) 광합성 형광반응 변수들의 측정결과이다. 28DAT에서  $F_o$  값은 처리별 차이가 없었으나, T2 처리에서  $F_m$  값은 오전 10시 30분,  $F_v/F_m$  값은 오전 10시 30분과 오후 6시 측정에서 유의하게 높았으며, Leaf area/ $F_v$  값은 오전 10시 30분, 오후 1시, 오후 6시 측정에서 유의하게 낮았다. 66DAT에서 T3 처리의  $F_o$  값은 오전 10시 30분에 유의하게 높았으며,  $F_m$  값은 오후 3시 30분, 오후 6시에,  $F_v/F_m$  값은 오전 10시 30분, 오후 3시 30분, 오후 6시에 유의하게 낮았고, Leaf area/ $F_v$  값은 오후 3시 30분, 오후 6시에 유의하게 높아 측정일, 측정시간에 따른 형광 변수값은 처리에 따라 달랐다(그림 2-3-10).

일반적으로 고온 또는 저온, 수분 부족 또는 과습, 고농도 염 상태와 같은 스트레스 상태에서  $F_o$  값은 증가하고,  $F_m$  값은 감소하는 것으로 토마토 (Kang et. al., 2009), 배추 (Oh et. al., 2014), 파프리카 (Bhandari et. al., 2018) 등에서 보고되었다. 또한 광계II에서 잠재적인 양자효율  $F_v/F_m$  값은 암 적응된 잎의 최대 양자수율 값으로 식물 잎이 광합성을 수행할 수 있는 잠재력으로 표현하며, 적정 잎의 경우 0.83 값을 나타낸다고 Maxwell and Johnson(2000)은 보고하였다. 본 실험에서 66DAT(측정일 7월 2일)는 고온기로 13시 736~854W·m<sup>-2</sup>의 고광과 32°C 이상의 고온(그림 2-3-10 A, B, C, D)에 노출되었고 처리구의 오전 8시 측정된  $F_v/F_m$  값은 0.72~0.74 범위에 있었으나, 10-10-20kPa 처리에서는 낮 시간  $F_v/F_m$  값이 0.61~0.63으로 감소하였고 오후 6시 0.69값을 나타내며 회복되는 양상을 보였다. 그러나 20-10-10kPa 처리에서는  $F_v/F_m$  값이 0.69~0.71값을 나타내 측정 시간에 따른  $F_v/F_m$  값의 상대적 감소폭이 달랐다. 이는 고광, 고온뿐 아니라 관수개시점이 다름에 따라 낮 시간 대 토양 함수량(SWC)과 토양 온도( $T_{soil}$ )가 10-10-20kPa 처리에서는 26.8%(22.8~35.2%), 26.2°C(23.1~29.0°C)를, 20-10-10kPa에서는 31.8%(25.6~38.4%), 25.2°C(23.5~27.2°C)로 달라 10-10-20kPa 처리의  $F_v/F_m$  값에는 지상부 환경뿐 아니라 토양 함수율, 토양 온도도 관여했으리라 본다(그림 2-3-10 G, H). 이들 자료를 이용하여 엽온과  $F_v/F_m$ 과의 관계를 도식화한 결과 엽온 증가에 따라  $F_v/F_m$ 값이 감소함을 확인하였다.



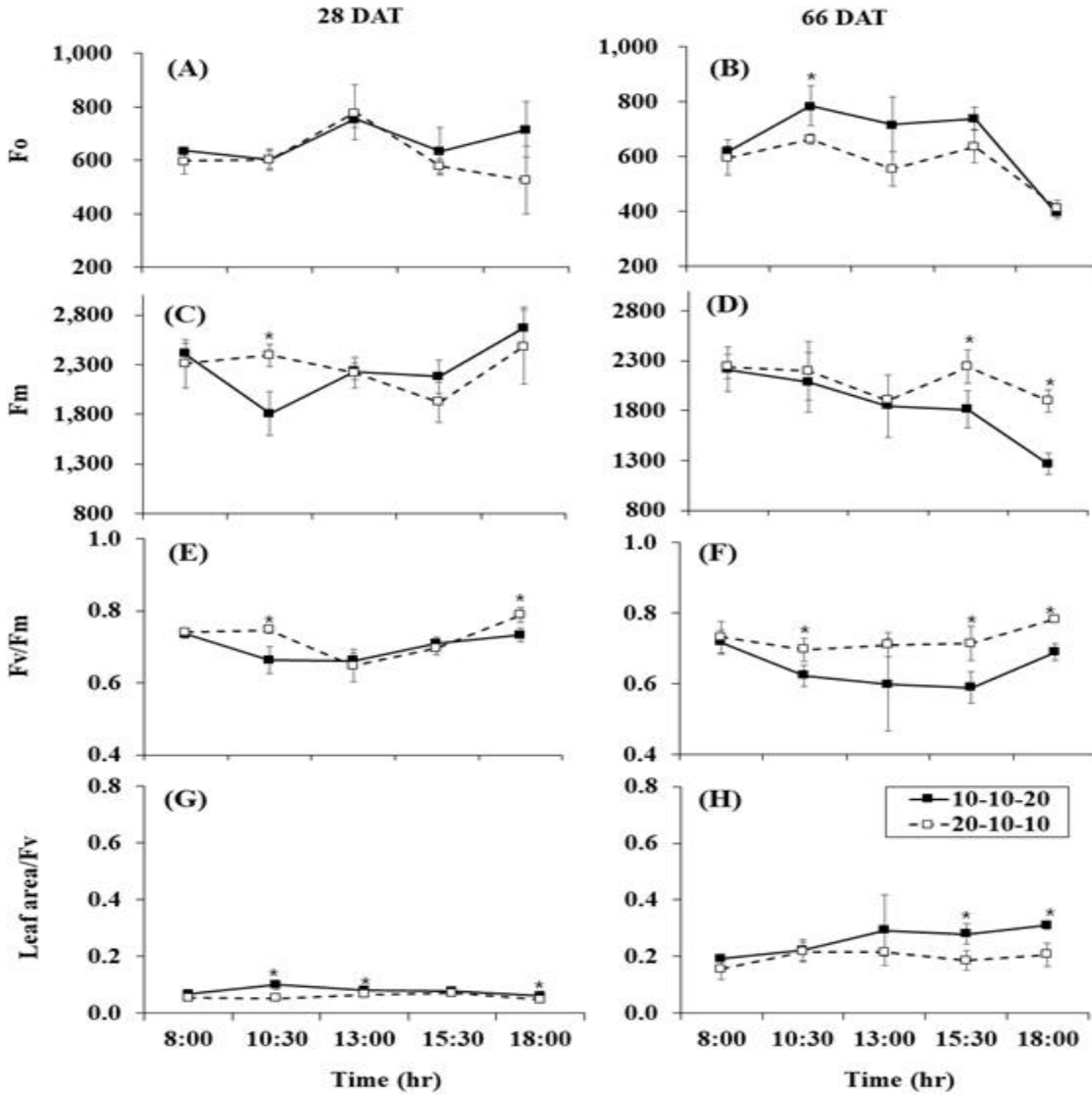


그림 2-3-10. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 형광반응  
(측정기간: 2020. 6. 28, 7. 2, n=3)

관수개시점을 시기별로 달리 처리한 오이 봄 재배에서 6월 30일부터 7월 4일까지 하루 중 온실 내 지상부 환경(광, 온도, 수증기압포차), 토양 환경(수분장력, 수분함량, 온도), 식물 줄기수액흐름(SFRR), 엽온, 기온차(엽온 - 지상부온도) 변화를 시간 평균화한 결과이다. 광도 변화에 따라 수액흐름은 변화하였으며, 광도  $170 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  이상인 오전 8시~9시간대에 급격한 증가가 시작되었다(그림 2-3-11 A, B). 지상부 온도와 엽온은 유사한 경향을 보였으나,  $600 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  이상의 광도를 나타낸 7월 2일부터 4일 동안의 지상부 온도와 엽온의 낮 시간대 변화는 처리에 따라 상이한 양상을 보였다(그림 2-3-11 C, D). 기온차(엽온 - 기온)와 수증기압포차는 광도가 낮은 6월 30일과 7월 1일에 비해 광도가 높은 날에서 차이가 큰 경향을 보였다(그림 2-3-11 E, F). 기온차가 (-)상태인 시간대가 10-10-20kPa 처리는 전일 이루어진 반면, 20-10-10Pa 처리에서는 7월 2일 ~ 4일 8 ~ 12시간대의 기온차는 (+)를, 이후는 (-) 상태를 나타냈다. 이는 처리구의 위치적 차이로 인한 광도가 영향을 준 것으로 보인다. 낮은 광도인 6월 60일과 7월 1일의

수증기압포차는 평균 0.3~0.4kPa 범위였으며, 광도가 높은 날의 수증기압포차는 평균 0.7~1.0kPa로 차이를 보였으나, 처리 간 차이는 없었다. 측정 기간 중 관수 시간은 오전 8시부터 오후 8시까지 수분장력 처리에 의해 20kPa 또는 10kPa에 도달되면 자동 관수가 이루어졌으며, 관수된 후의 토양수분함량은 각각 6.8~12.5%(그림 2-3-11 G), 또는 6.8~12.8%(그림 2-3-11 H) 범위로 증가하는 유사한 경향을 보였고, 관수 후 토양 온도는 감소하는 변화를 나타냈다. 광도가 낮은 6월 30일, 7월 1일의 토양 온도는 최대 24.8℃를 나타냈으나, 광도가 높은 7월 5일 오후 1시 820W·m<sup>-2</sup> 에서의 토양 온도가 10-10-20kPa에서는 31.0℃, 20-10-10kPa에서는 28.5℃를 나타냈다. 이러한 근권 온도의 차이는 온실 내 처리 위치 간 영향과 함께 10-10-20kPa 에서는 오후 12시~오후 5시 사이에 29℃ 이상의 온도범위를 나타냈다(그림 2-3-11).

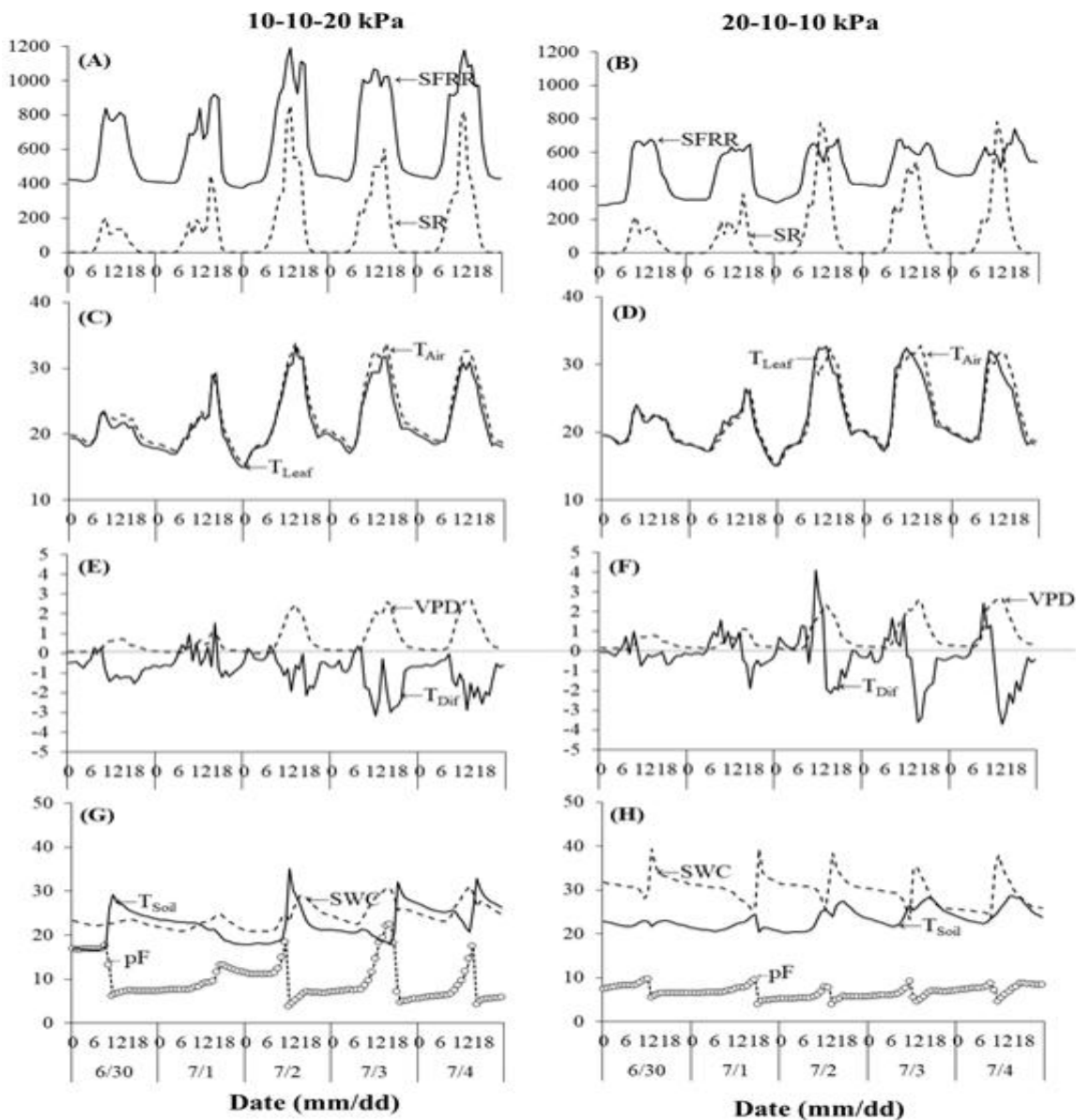


그림 2-3-11. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 10-10-20 및 20-10-10kPa 처리에서 온실 환경, 줄기 수액흐름(SFRR, mV) 및 잎 온도(TLeaf, °C) 변화 SR(일사량, W/m<sup>2</sup>), TAir(기온, °C), TDif(TLeaf - TAir, °C), VPD(증기압 부족, kPa), TSoil(토양 온도, °C), SWC(함수량, %), pF(토양 수 장력, kPa)(측정기간: 2020. 6. 30.~ 7. 4)

관수개시점을 시기별로 달리 처리한 오이 봄 재배에서 수액흐름과 엽온 간에는 정의 상관성 ( $p<0.01$ ,  $r=0.770$ )을 확인하였으며, 수액흐름과 광도( $p<0.01$ ,  $r=0.692$ ), 지상부 온도( $p<0.01$ ,  $r=0.786$ ), 토양 온도( $p<0.01$ ,  $r=0.578$ ), 토양수분함량( $p<0.05$ ,  $r=0.137$ ), 수증기압포차( $p<0.01$ ,  $r=0.765$ ) 간에는 정의 상관성을, 수액흐름과 상대습도( $p<0.01$ ,  $r=-0.710$ ), 기온차( $p<0.01$ ,  $r=-0.177$ )간에는 부의 상관성을 보였다. 엽온 또한 광도( $p<0.01$ ,  $r=0.793$ ), 지상부 온도( $p<0.01$ ,  $r=0.973$ ), 토양 온도( $p<0.01$ ,  $r=0.754$ ), 토양수분함량( $p<0.05$ ,  $r=0.247$ ), 수증기압포차( $p<0.01$ ,  $r=0.827$ ) 간에는 정의 상관성을, 엽온과 상대습도( $p<0.01$ ,  $r=-0.656$ ) 간에는 부의 상관성을 보였다. 광도는 지상부 온도, 토양 온도, 토양수분함량, 기온차, 수증기압포차에 정의 상관성을, 광도와 상대습도 간에는 부의 상관성을 보였으며, 지상부 온도는 토양 온도, 토양 함수량, 수증기압포차 간에는 정의 상관성을, 지상부 온도와 상대습도, 기온차간에는 부의 상관성을 나타냈다. 상대습도와 기온차간에는 정의 상관성을, 습도와 토양 온도, 토양수분함량, 수증기압포차간에는 부의 상관성을 보였으며, 토양 온도와 수증기압포차 간에는 정의 상관성을, 토양 온도와 기온차 간에는 부의 상관성을, 토양수분함량과 수증기압포차간에는 정의 상관성을, 기온차와 수증기압포차 간에는 부의 상관성을 보였다(표 2-3-5).

표 2-3-5. 시설오이 봄 재배에서 생육단계별 관수개시점 처리에 따른 환경요인과 오이의 줄기 수액흐름과 잎 온도 간의 상관

	수액흐름	엽온	일사량	기온	상대습도	토양온도	함수율	기온차
엽온	0.770**							
일사량	0.692**	0.793**						
기온	0.786**	0.973**	0.745**					
상대습도	-0.710**	-0.656*	-0.712**	-0.693**				
토양온도	0.578**	0.754**	0.416**	0.826**	-0.474**			
함수율	0.137**	0.247**	0.192**	0.248**	-0.334**	0.042 <sup>ns</sup>		
기온차	-0.177**	-0.023 <sup>ns</sup>	0.097*	-0.253**	0.253**	-0.418**	-0.038 <sup>ns</sup>	
수증기압포차	0.765**	0.827**	0.801**	0.865**	-0.931**	0.659**	0.296**	-0.280**

\*Significant at  $p<0.05$ , \*\*significant at  $p<0.01$ .

(측정기간: 2020. 5. 20. ~ 7. 5)

마. 실험 5. <시설오이 가을재배에서 관수개시점과 관수량에 따른 현장 실증>

(1) 요약

2020년 8월 7일부터 10월 19일까지 시설오이 가을 재배에서 생육단계에 따라 관수개시점 2처리(10kPa, 20kPa)과 관수량 2처리[S(5~6분/회, L(10~12분/회)]가 조합된 4처리(10kPa:S10, 20kPa:S20, 10kPa:L10, 20kPa:L20)와 대조구의 5처리하여 11주간 재배하였다. 처리 기간 동안 관수량은 S10(38.7L), S20(35.6L), L20(61.5L), L10(43.0L), Cont(84.8L)로 관행구에서 공급량이 가장 많았으며 1회 관수량이 적은 S10과 S20에서 관수량이 적었다, 오이의 초장과 마디수는 처리 간 차이가 없었으며 처리 16일째(8월 23일) 생장점에서 10번째 잎 생육은 Control에서 유의적으로 높았으며 S20에서 낮았다. 착과 후 수확까지의 일수가 8월말(8월 20일~9월 3일)은 8.6~10.5일, 10월(10월 7일~10월 19일)은 17.1~23.0일이 소요되었다. 재배 전 기간 동안 착과수, 상품과수, 과중과 수량은 Control 처리에서 많았으나, 수분이용효율은 S10과 S20에서 높았다. 광합성율은 L20, Control에서 유의적으로 높았으며 S10에서 낮았다. 생체정보인 엽온과 수액흐름속도 및 환경요인(기온, 함수량, 토양온도, 수증기압차 등)간에는 상관계수가 높아 유의성이 인정되었고, 1회 관수량이 적었던 Short 처리에서 높았다. 관행관수 대비 관수제어 처리구의 관수량은 27.5~57.9% 적었으며, 수분이용효율은 S10과 S20에서 36.3~44.0% 높았으나 정상과수가 9.0~11.0% 감소하였다.

(2) 주요 결과

○ 시설오이 가을 토경 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 관수량 및 환경

2020년 8월 7일부터 10월 19일까지 시설오이 가을 재배에서 생육단계에 따라 관수개시점 2처리(10kPa, 20kPa)과 관수량 2처리(S, L)가 조합된 4처리(10kPa:S10, 20kPa:S20, 10kPa:L10, 20kPa:L20)와 대조구의 5처리하여 11주간 재배하였다. 관수개시점을 1회 관수량을 5~6분 짧게 관수한 Short(10kPa:S10, 20kPa:S20)와 10~12분 길게 관수한 Long(10kPa:L10, 20kPa:L20)의 4처리와 관행적으로 관수하는 Control로 5처리하였다. 정식은 2020년 7월 25일 하였으며, 처리 시작은 13일 후인 8월 7일에 처리를 시작하여 10월 19일까지 처리하였다(그림 2-3-12).


생육단계			G			H1			H2			H3	H4	H5
처리기간			8/7~	8/14~	8/20~	8/28	8/29~	9/4~	9/11~	9/13~	9/15~	9/26~	10/7~10/19	
처리	Short	관수 시간(on/off)	5~6min/2hr			6min/1hr			6min/2hr					
		S10	관수개시점	10	10	10	10	10	8	8	8	5	5	5
		S20	(kPa)	20	15	10	5	8	8	8	8	5	5	5
	Long	관수 시간(on/off)	10~12min/4hr			12min/1hr			12min/4hr					
		L10	관수개시점	10	10	10	10	10	8	8	8	5	5	5
		L20	(kPa)	20	15	10	5	8	8	8	8	5	5	5
Control			농가 관행적 관수											
관수시간 (hr)			8~18		8~18	7~16	9~14	9~14	7~11	9~12			9~14	
생육모습														

그림 2-3-12. 시설오이 가을 재배 관수개시점과 관수량처리에 따른 처리구의 관수 스케줄

재배 기간(8월 7일 ~ 10월 19일) 중 온실의 평균 광량은  $652.2\text{J}/\text{cm}^2$ 로 광보상점 이상이였으며, 주간의 온도가 재배 초기에  $28.1^\circ\text{C}$ 로 생육적온보다 약간 높았으나 수확기인 재배 중기에는  $24.2\sim 23.4^\circ\text{C}$ , 재배 후기  $18.6^\circ\text{C}$ 로 낮아졌으나 오이 재배에는 적합한 것을 알 수 있었다. 온실 내 상대습도는 재배 기간 동안 주간 77.9% 야간 95.8%로 평균 85.6%이었다. 관수개시점과 관수량 처리에 의한 처리 간 토양 함수율은 26.6~36.1%이었으며 토양 EC는  $1.7\sim 2.2\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ 로 재배에 적합하였다. 토양 내 온도는 재배 초기  $26.0\sim 26.6^\circ\text{C}$ 으로 적온보다 약간 높았으나 평균  $21.6\sim 22.2^\circ\text{C}$ 였다(그림 2-3-13~14). 처리 초기 관수개시점을 20kPa로 설정한 S20과 L20 처리에서 수분장력이 높았으며 재배 중기에는 처리 간의 차이가 없지만 관행적으로 관수하는 Control에서는 재배 기간 토양수분 장력이 낮았다. 재배 후기(수확기 H3, H4)에서 L20 처리구에서 수분 장력값이 높은 장력값을 보이는 것은 하루 관수시간이 09시 ~ 12시로 지연시간이 4시간으로 길고 관수가 오전에만 이루어져 짧아 관수 되지 않았던 날이 있어 수분장력이 높았다(그림 2-3-15).

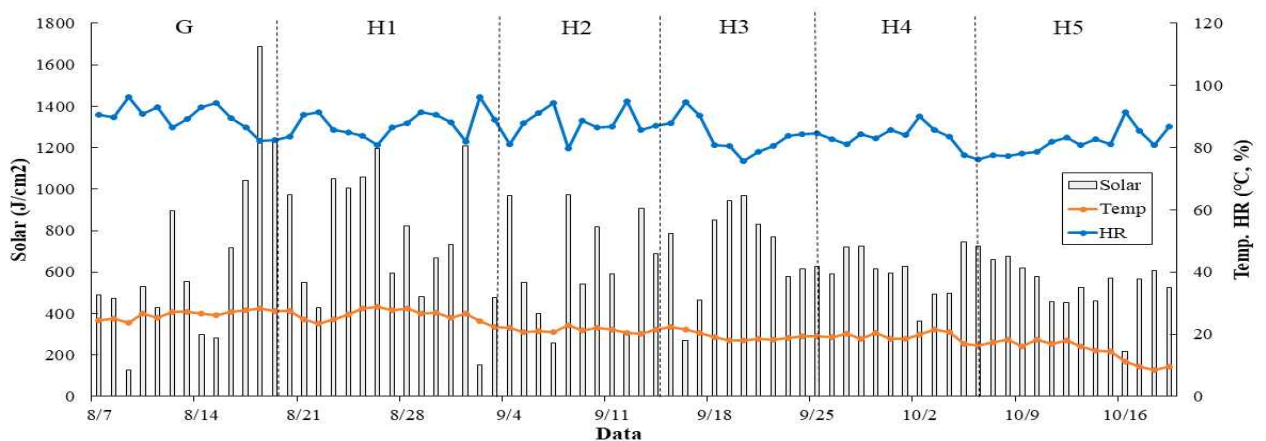


그림 2-3-13. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 온실 지상부 환경 (측정기간: 2020. 8. 7. ~ 10. 19)

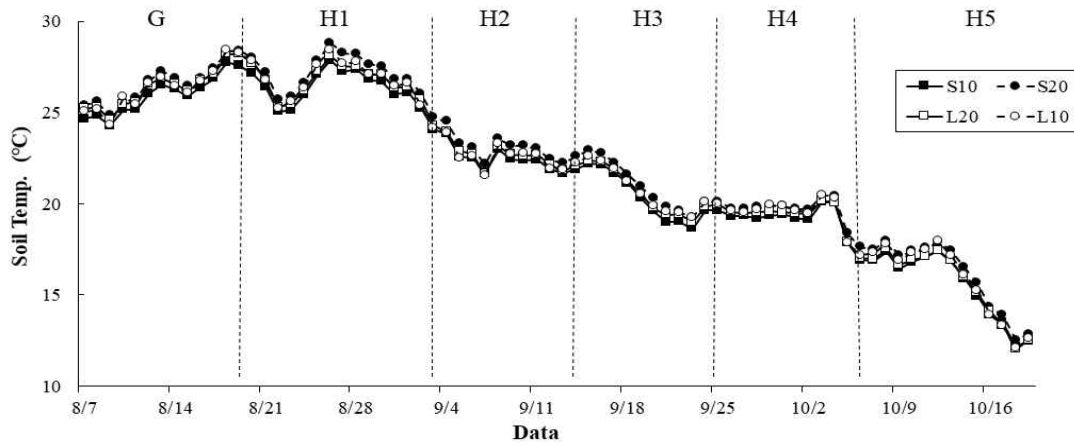


그림 2-3-14. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 토양온도  
(측정기간: 2020. 8. 7. ~ 2020. 10. 19)

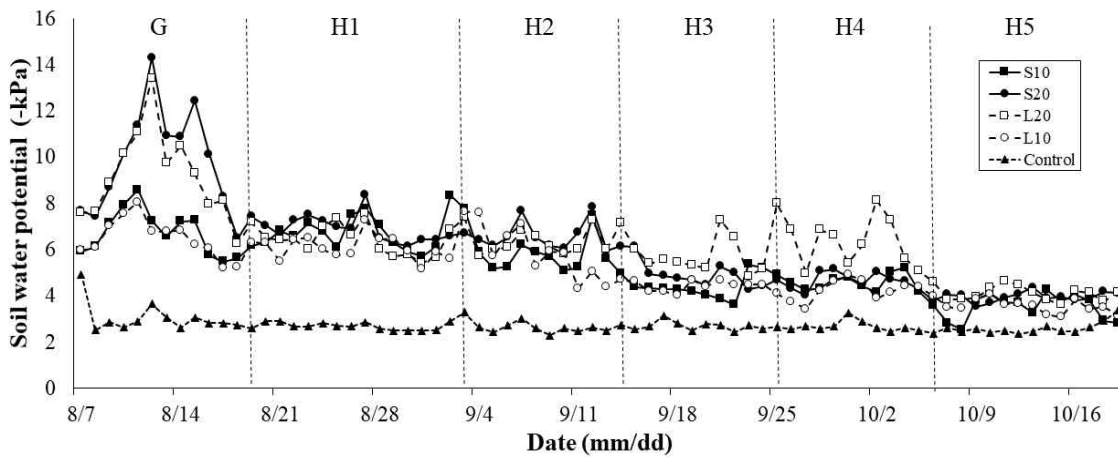


그림 2-3-15. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 일평균 수분장력변화  
(측정기간: 2020. 8. 7. ~ 2020. 10. 19)

관수개시점과 관수량이 관행구에서 84L로 물 소비량이 많은 것을 확인할 수 있었으며 일회 관수량이 많은 처리구에서 43~62L, 일회 관수량이 적은 처리구에서는 36~39L로 적었다(표 2-3-6).

표 2-3-6. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 오이 주당 관수량 분석

	Treatment				
	S10	S20	L10	L20	Cont.
총 관수량 (ml/plant)	38,753	35,645	42,983	61,507	84,827
일 평균 관수량 (ml/day)	524	482	581	831	1,146
총물량/관수된 날수(ml/day)	668	743	1,075	1,230	1,885
총물량/관수된 횟수(ml/event)	646	699	1,075	1,079	1,885
평균 관수 횟수(관수 횟수/기간)	0.8	0.7	0.5	0.8	0.6

(측정기간: 2020. 8. 7. ~ 10.19)

○ 시설오이 가을 토경 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 생육

관수개시점과 일회 관수량 처리 후 10일 간격으로 20일(적심)까지 오이의 생육은 차이가 없었다. 초장이 Control의 초장이 처리 20일에 약간 큰 것을 확인할 수 있지만 처리간의 차이가 없었으며 매 마디 오이를 착과시키는 작물의 특성상 마디수도 처리간의 차이가 없는 것을 확인할 수 있다(그림 2-3-16).

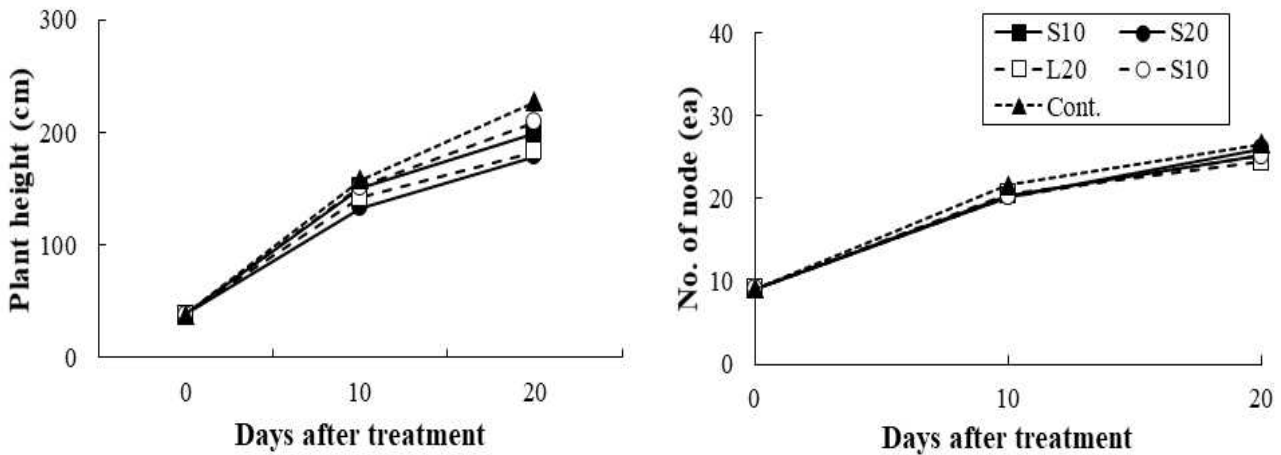


그림 2-3-16. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 오이의 초장(좌), 마디수(우) (측정기간: 2020. 8. 7. ~ 5. 27, n=5)

처리17일째(8월 23일) 성장점에서 10번째 잎(지제부 12번째 잎)의 엽장은 Control > L20 > S10, L10 > S20 순으로 길었으며, 엽폭은 Control > S10, L20 > L10 > S20 순으로 넓어 잎 생육은 Control에서 가장 크고 S20에서 가장 적었다. 잎의 엽록소 함량은 S10과 S20에서 높았으며 엽면적도 Control에서 가장 넓었고 생체중과 건물중도 유의적으로 높아 오이 잎의 생육은 Control에서 높았으며 S20에서 낮았다(표 2-3-7).

표 2-3-7. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리 17일째 잎의 생육

	엽장 (cm)	엽폭 (cm)	SPAD	엽면적 (cm <sup>2</sup> )	생체중 (g)	건물중 (g)
S10	19.3 bc <sup>Z</sup>	26.3 b	51.4 a	411.0 bc	4.7 bc	1.2 b
S20	17.5 c	23.5 c	52.3 a	325.3 c	3.4 c	1.0 b
L10	18.3 bc	24.0 bc	43.8 b	344.8 bc	3.6 bc	0.9 b
L20	20.0 b	26.5 b	44.1 b	428.3 b	5.0 b	1.2 b
Cont.	23.3 a	31.6 a	46.0 b	606.1 a	8.0 a	1.8 a

<sup>Z</sup>Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$

(측정기간: 2020. 8. 23, n=4)

광합성율은 L20, Cont에서 유의적으로 높았으며 S10에서 낮았다. 기공전도도 Cont > S20, L20 > L10, S10 순이었다. 엽육 내 CO<sub>2</sub> 농도도 Cont에서 높았으며 L10, S10에서 낮았고 증산률도 Cont, L20, S20에서 높았고 L10, S10에서 유의적으로 낮았다. 그러나 엽육 내 수증기압차

는 S10과 L10에서 높았고 S20, L20, Cont에서 낮았다(표 2-3-8).

2020년 8월 17일부터 8월 25일까지 오이 과실의 착과 후 수확일까지 8일이 소요되었고, Control에서 개화 4일 이후부터 길이 생장이 빠르게 진행되었다(그림 2-3-17). 관수 처리 26일(9월 1일) 수확된 오이의 과실의 과장은 21~22cm로 처리간 차이가 없었으나 생체중은 S20, L10 처리에서 가장 높았고 건물중은 L10, 오이의 함수율은 Control에서 가장 높았다(표 2-3-9).

표2-3-8. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리 17일째 잎의 광합성

	광합성 ( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	기공전도도 ( $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	엽육내 $\text{CO}_2$ 농도 ( $\mu\text{mol CO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	증산율 ( $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	수증기압차 ( $\text{mol}\cdot\text{H}_2\text{O}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )
S10	16.2 c <sup>Z</sup>	0.2 c	237.9 c	5.4 b	2.5 a
S20	19.4 ab	0.5 b	278.3 ab	8.3 a	2.0 b
L10	16.9 bc	0.3 c	243.7 c	6.0 b	2.4 a
L20	20.4 a	0.5 b	273.0 b	8.4 a	2.0 b
Cont.	20.0 a	0.7 a	301.5 a	10.3 a	1.7 b

<sup>Z</sup>Duncan's multiple range test at  $p<0.05$

(측정기간: 2020. 8. 23, n=5)

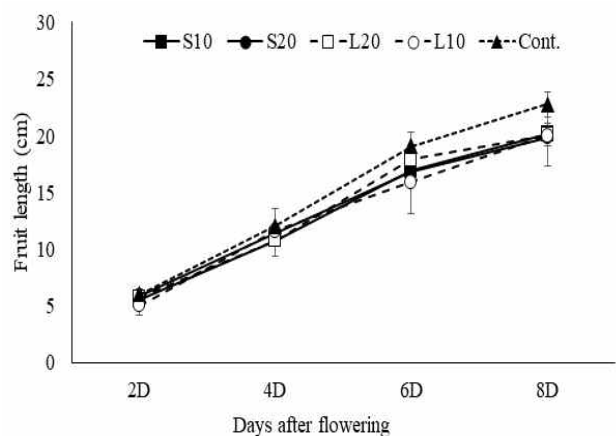
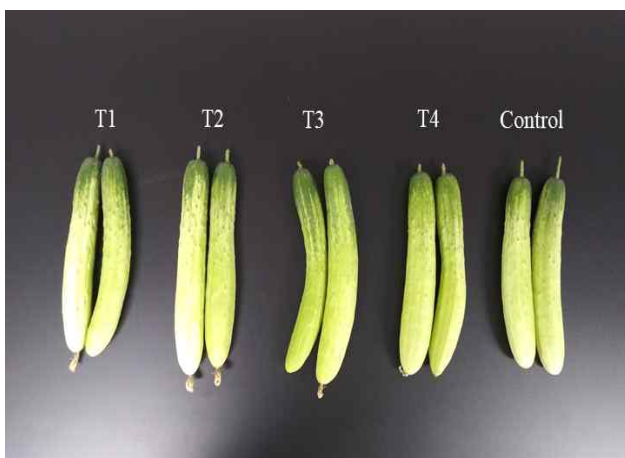


그림 2-3-17. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 오이과실의 개화 후 수확일 까지 성장 길이변화와 생육모습 (측정기간: 2020. 8. 17. ~ 8. 25, n=3)

표 2-3-9. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리 26일째 과실 생육

	과장 (cm)	생체중 (g)	건물중 (g)	함수율 (%)
S10	21.2 a <sup>Z</sup>	147.6 b	7.4 bc	95.0 c
S20	22.0 a	181.1 a	8.3 ab	95.4 b
L10	21.4 a	176.5 a	9.0 a	94.9 c
L20	21.1 a	128.5 c	6.1 c	95.3 bc
Cont.	21.9 a	164.7 ab	6.7 c	95.9 a

<sup>Z</sup>Duncan's multiple range test at  $p<0.05$

(측정기간: 2020. 9. 1, n=3)

일회 관수량과 관수개시점 처리에 따른 수확 기간 동안 오이의 기간별 착과 후 수확일까지 소요 일수는 H1 기간에서는 8.6~10.5일이 소요되었고, H5 기간에서는 17.1~23.0으로 2배 이상



길었으며 수확시기가 후반으로 갈수록 소요 일수가 증가하였다. 이 기간 평균 착과 후 수확일까지 소요되는 일수가 Control에서 13.3일로 가장 짧았으며 S20에서 14.3일로 하루정도 차이가 발생하였다(그림 2-3-18).

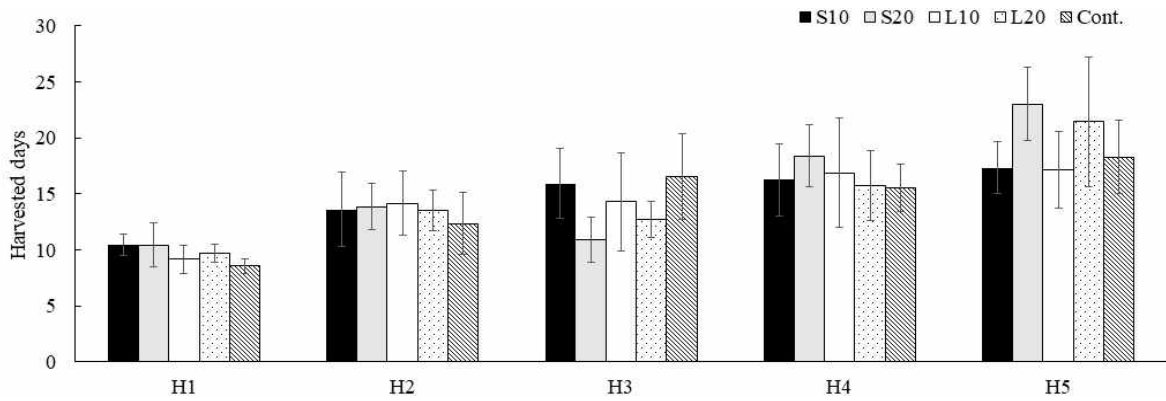


그림 2-3-18. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 오이 과실의 착과 후 수확일까지 기간별 소요일수 (측정기간: 2020. 8. 20. ~ 10. 19, n=7)

재배기간 동안에 오이의 비상품과 모습이다. 작물의 특성상 매 마디 오이를 개화 및 착과 되지만 재배환경(온도, 광, 토양온도)등에 민감한 작물로 가을 작기 수꽃의 발생도 있었으며 비상품과의 발생이 많았다(그림 2-3-19).



그림 2-3-19. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 비상품과 모습(곡과, 끈봉과, 미라과, 열과) (측정기간: 2020. 8. 20. ~ 10. 19)

2020년 가을 작기 오이의 수확이 시작된 8월 20일부터 10월 19일까지 조사하였다. 재배 전 기간 동안 관행구에서 착과수, 정상과수, 과중, 수량 등은 높았으나 수분이용효율을 Short처리구인 S10과 S20에서 높았다. 착과수는 H1~H4까지는 처리간의 차이가 없었지만 H5에서는 관행구보다 S10, S20, L10에서 낮았으나 정상과수와 수량은 H1~H2까지는 관행구에서 높았으나 이후 처리간의 차이가 없었으며, 과장은 H1에서 관행구에서 길었으나 이후 처리간 차이가 없어졌다. 수분이용효율은 H1에서 S10과 L20에서 높았으나 H2에서는 S20에서 높았으며 이후 수분이용효율의 처리간의 차이가 없어졌다(표 2-3-10).

표 2-3-10. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 시기별 오이 과실 특성, 수량 및 수분이용효율

	착과수 (ea/plant)	정상과수 (ea/plant)	정상과율 (%)	평균과중 (g/fruit)	수량 (g/pl)	과장 (cm/fruit)	수분이용 효율(g/L)
8/20~10/19 총기간							
S10	43.7 bZ	12.6 bc	30.0 a	172.9 abc	2,169.2 bc	24.0 a	56.0 a
S20	39.0 b	12.7 bc	33.4 a	165.8 bc	2,110.5 bc	24.8 a	59.2 a
L10	36.9 b	10.6 c	30.1 a	161.1 c	1,727.7 c	22.7 b	40.2 b
L20	47.0 ab	14.9 b	31.7 a	174.5 ab	2,582.7 b	24.1 a	42.0 b
Cont.	55.9 a	18.9 a	33.7 a	183.6 a	3,465.0 a	24.4 a	41.1 b
8/20~9/3(H1)							
S10	9.7 a	3.9 b	41.0 bc	176.4 b	671.5 b	20.5 b	84.9 a
S20	7.9 a	3.1 bc	41.7 bc	167.1 b	521.0 b	20.8 b	63.8 b
L10	7.4 a	2.7 c	38.5 c	175.0 b	478.3 b	20.3 b	51.3 bc
L20	8.0 a	4.1 b	52.4 ab	164.9 b	684.2 b	20.4 b	43.0 a
Cont.	9.3 a	5.3 a	57.4 a	201.7 a	1,062.7 a	22.5 a	58.2 bc
9/4~9/14(H2)							
S10	7.9 a	2.6 b	31.7 a	157.3 a	406.5 b	22.8 a	90.8 bc
S20	9.7 a	2.7 b	33.7 a	152.3 a	404.1 b	22.4 a	156.3 a
L10	8.7 a	2.9 b	37.2 a	147.5 a	421.7 b	21.1 a	116.6 ab
L20	9.1 a	3.4 ab	47.8 a	160.9 a	550.4 ab	23 a	81.2 bc
Cont.	10.1 a	4.6 a	48.6 a	161.5 a	731 a	22.8 a	47.6 c
9/15~9/25(H3)							
S10	6.4 a	2.5 a	37.0 a	158.3 ab	392.9 a	25.5 a	55.3 a
S20	4.7 a	2.4 a	55.0 a	135.2 b	317.6 a	25.0 a	41.2 a
L10	5.3 a	2.3 a	50.8 a	137.0 ab	322.2 a	23.7 a	45.7 a
L20	4.1 a	2.8 a	65.5 a	156.4 ab	437.7 a	25.7 a	39.8 a
Cont.	7.4 a	3.0 a	47.0 a	167.2 a	473.5 a	25.5 a	38.9 a
9/26~10/6(H4)							
S10	6.9 a	2.6 a	41.9 b	191.2 a	472.5 a	27.6 a	62.8 a
S20	10.1 a	3.4 a	35.5 b	178.1 a	617.9 a	27.4 a	86.4 a
L10	4.4 a	2.0 a	86.7 a	198.2 a	369.0 a	26.7 a	52.3 a
L20	10.4 a	3.0 a	36.5 b	192.7 a	586.8 a	26.4 a	66.5 a
Cont.	7.6 a	3.1 a	44.6 b	194.0 a	609.3 a	27.3 a	50.0 a
10/7~10/19(5)							
S10	12.9 bc	2.0 a	17.2 ab	209.8 a	362.6 a	28.0 a	59.7 a
S20	6.6 c	1.7 a	28.9 a	215.8 a	358.9 a	30.0 a	57.3 a
L10	12.8 bc	1.8 a	10.9 b	184.2 a	331.3 a	27.2 a	43.8 a
L20	15.3 ab	2.3 a	15.7 ab	208.5 a	448.7 a	28.3 a	32.9 a
Cont.	21.4 a	2.9 a	13.3 b	211.9 a	548.4 a	27.9 a	41.1 a

<sup>2</sup>Duncan's multiple range test at  $p < 0.05$

(추정기간: 2020. 8. 20. ~ 10. 19, n=7)

○ 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 생체정보와 환경요인 분석 수액 흐름 속도와 엽온

관수 처리에 영향을 받은 가을 오이 재배에서 처리구별 광량과 엽온, 온실온도, 수액흐름, 기온차를 2020년 8월 21일부터 8월 27일까지 맑은 날과 흐린 날로 나눠 분석하였고 재배기간Ⅱ의 7일간 조사하였다. 광량이 상승하며 엽온, 수액흐름과 온실온도가 함께 상승하는 것을 확인할 수 있으며 기온차는 낮에 음의 값으로 낮았다.

조사 기간중 맑은 날 8월23, 25와 26일 3일간과 흐린날 8월 21, 22와 27일 3일간을 비교하여 보았을 때 최대 광량이 맑은 날은 628~589W/m<sup>2</sup>으로 높았으나 흐린 날은 324~429W/m<sup>2</sup>으로 절반 정도로 낮았다. 수액흐름은 광과 함께 상승하며 가장 낮을 때와 높을 때의 차가 맑은 날 678~955mV보다 흐린날 325~642mV로 낮았다(그림 2-3-20).

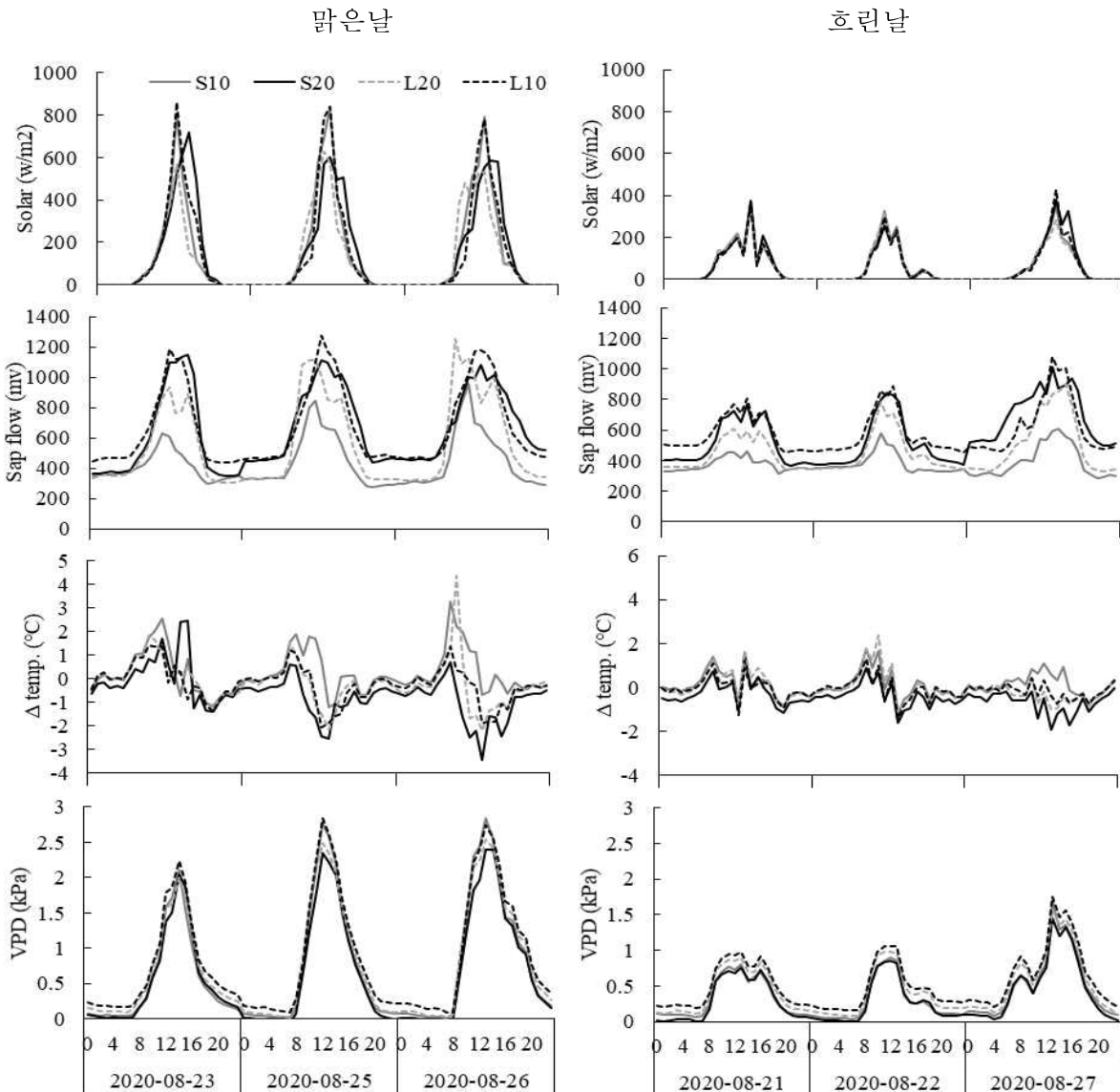


그림 2-3-20. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 맑은날과 흐린 날의 광량, 수액흐름, 엽온차와 수증기압차 (측정기간:2020. 8. 21. ~ 8. 27)

생육 단계별 관수개시점과 1회 관수량을 변경한 가을 오이 재배에서 수액흐름과 엽온, 일사량, 기온, 토양함수량, 토양온도, 증기압차는 정의 상관성( $p < 0.01$ )이 있었다. 수액흐름과 상대습도, 기온차가 Short 처리에서는 부의 상관성( $p < 0.01$ )을 Long 처리에서는 수액흐름과 상대습도에서는 부의 상관성( $p < 0.01$ ,  $r = -0.83$ )이었으나 기온차에서는 상관성이 없었다. 항목간 Person상관계수값이 Short처리가 Long 처리보다 높았다(표 2-3-11~12).

표 2-3-11. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 Short 처리 따른 수액흐름, 엽온의 환경요인과 상관관계

	수액흐름	엽온	일사량	기온	상대습도	기온차	함수율	토양온도
엽온	0.95**							
일사량	0.86**	0.86**						
기온	0.95**	0.98**	0.84**					
상대습도	-0.91**	-0.88**	-0.84**	-0.90**				
기온차	-0.23**	-0.17*	-0.10 <sup>ns</sup>	-0.35**	0.34**			
함수율	0.55**	0.55**	0.39**	0.59**	-0.56**	-0.38**		
토양온도	0.49**	0.57**	0.26**	0.64**	-0.52**	-0.51**	0.78**	
수증기압포차	0.92**	0.90**	0.89**	0.93**	-0.98**	-0.38**	0.58**	0.53**

\*Significant at  $p < 0.05$ , \*\*significant at  $p < 0.01$ . (측정기간: 2020. 8. 21. ~ 8. 27)

표 2-3-12. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 Long 처리에 따른 수액흐름, 엽온의 환경요인과 상관관계

	수액흐름	엽온	일사량	기온	상대습도	기온차	함수율	토양온도
엽온	0.90**							
일사량	0.89**	0.76**						
기온	0.88**	0.97**	0.74**					
상대습도	-0.83**	-0.84**	-0.69**	-0.89**				
기온차	0.04 <sup>ns</sup>	0.08 <sup>ns</sup>	0.09 <sup>ns</sup>	-0.15*	0.26**			
함수율	0.27**	0.32**	0.17*	0.39**	-0.38**	-0.28**		
토양온도	0.31**	0.56**	0.08 <sup>ns</sup>	0.65**	-0.54**	-0.41**	0.36**	
수증기압포차	0.86**	0.86**	0.73**	0.93**	-0.98**	-0.29**	0.41**	0.55**

\*Significant at  $p < 0.05$ , \*\*significant at  $p < 0.01$ . (측정기간: 2020. 8. 21. ~ 8. 27)

관수개시점에 따른 하루 중 토양함수량 변화와 토양온도를 도식화한 결과 수확후기(H5) 2020년 10월 11일 일평균 토양 온도는 4처리 모두 17.1~17.6℃로 차이가 없었지만 관수 전후의 온도 변화가 관찰되었다. 관수시점 함수율과 토양온도는 S10처리에서 함수율이 25%에서 29.8%로 상승할 때 토양온도는 16.8℃에서 17.1℃로 상승하였으며, S20 처리에서 함수율은 28.8%에

서 35.3%, 토양온도는 17.8°C에서 18.4°C로 상승하였지만, L10 처리는 함수율이 33.8%에서 44.4%, 토양온도가 15.9°C에서 15.3°C, L20 처리는 함수율이 22.1%에서 29.5%, 토양온도가 18.1°C에서 18.0°C로 하강하였다(그림 2-3-21). 온도가 하강하는 가을 작기 재배 후기에 1회 관수량이 많은 처리에서 관수 후 토양 온도의 하강이 식물 지하부에 스트레스로 작용하였을 것을 생각된다(그림 2-3-21).

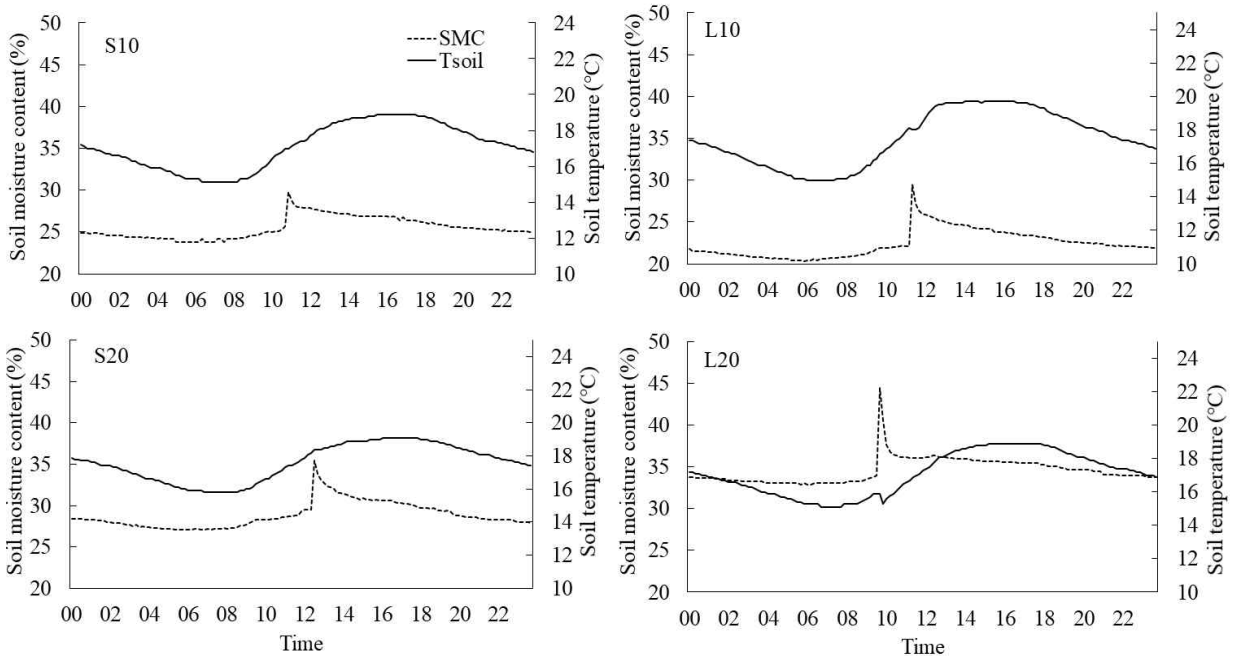


그림 2-3-21. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 하루중 함수량 과 토양온도 변화 (측정기간: 2020. 10. 11)

그림 2-3-14는 관수개시점과 관수량 처리에 따른 Control 대비 수분이용효율, 관수율, 관수 횟수, 정상과수의 결과이다. Control보다 처리구에서 모두 27.5~57.9% 관수량은 적었으며 수분이용효율은 Short 처리구인 S10과 S20에서 36.3~44.0% 높았으며 관수 횟수도 16.7~33.3% 높았지만 정상과수가 -9.0~11.0% 적었다(그림 2-3-22).

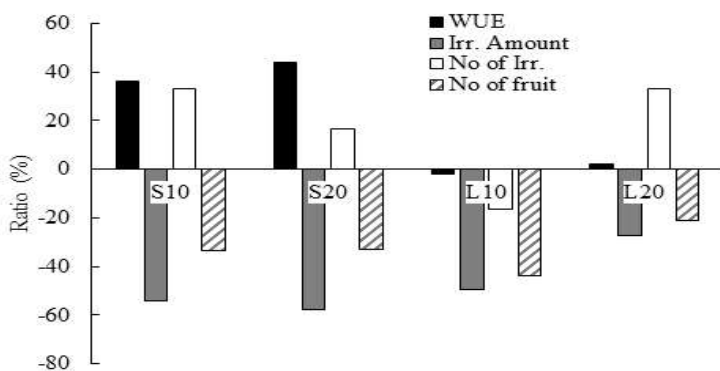


그림 2-3-22. 시설오이 가을 재배에서 관수개시점과 관수량 처리에 따른 Control 대비 수분이용 효율, 일 평균 관수량, 관수 횟수, 정상과수의 비율 (측정기간: 2020. 8. 7. ~ 10. 19)

## [비교] 토양분석, 재료 및 방법

### ○ 공시 재료 및 실험 장소

실험 장소는 강원도 춘천시 남산면에 위치한 플라스틱 온실(W6×L115×H3.5m, 위도 37°, 경도 127°) 토경 오이 농가에서 수행되었다. 공시재료는 다다기계 오이를 사용하고 호박 ‘하나짱 토좌’(매일 종묘, Korea)를 대목으로 한 해오름종묘의 ‘쿨’(2018년)과 ‘청춘’(2019~2020년) 접목묘를 사용하였다.

### ○ 관수 조건

관수개시점은 텐시오미터(2725ARL Jet fill, Soil moisture, USA)에 역압 센서(Autonics PSAN-LV01CPV, Korea)를 결합하여 얻어진 수분장력 값을 사용하였다. 관수는 토양 수분장력 값이 미리 설정된 관수 시점에 도달하면 자동으로 미리 정해진 시간만큼 공급되는 방식으로 마이크로컨트롤러(아두이노 UNO)와 릴레이를 이용하여 자체 제작한 프로그램을 적용하였고, 듀얼 타이머(Dual timer TF62D, Hanyoung NUX, Korea) 제어 판넬을 제작하여 관수 시간을 조정하였다. 관수량은 온실 1동에는 4개 이랑을 조성하였고, 이랑 폭은 50cm, 이랑 간 간격은 100cm였다. 이랑 폭 25cm 기준 점적 호스를 1줄씩, 20cm 간격(1.4 L·h<sup>-1</sup>)의 점적 테이프(Eolos compact, Eurodrip, France)를 설치하고 각 처리구에 국가공인검정된 수도 미터(Water meter-15mm, Daesung, Korea)를 설치하여 매일 관수 종료 후 유량계 값을 측정한 후 하루 관수량으로 산정하였다.

### ○ 재배방식

재배는 일일 공급시간을 08~20시까지 급액시간을 5~12분 공급/1~4시간 정지 재배 기간에 따라 조정하여 관수하였으며 2018 가을, 2019 가을, 2020 봄과 가을에는 그물망을 사용하여 지표면에서 2m(22~33마디)에서 적심하였고, 2019년 봄에는 줄내림 방식으로 재배하였다. 시비는 관행방식에 따라 수동으로 필요시 3~5배 농축액을 시비하였다.

토양분석은 시험 전 토양의 화학성 분석은 지표에서 15~20cm 깊이에서 채취하여 채취 풍건한 후 2mm 체에 통과된 것을 분석 시료로 이용하였다. 토성은 비중계법을 이용하여 미농무성 기준의 삼각도표법(USDA)에 의하여 분류하였으며, 토양화학성은 농업과학기술원 토양 및 식물체 분석법(NAAS, 2000)에 준하여 분석하여 작물별 시비처방기준(NAAS, 2006)과 비교하였다. pH와 EC는 토양과 증류수를 1:5 비율로 혼합하여 30분간 진탕한 후 pH와 EC측정기(HI9813-6, Hann Instruments, Inc., Romania)로 분석하였으며, 유기물함량은 Tyurin법으로, 유효 인산은 Lancaster법으로 발색한 후 분광광도계(U-3900H, HITACHI, Japan)로, 치환성 양이온은

1N-Ammonium acetate (pH=7.0)으로 추출 여과한 후 유도결합플라즈마발광광도계(GBC Integra XL, GBC, Australia)로 분석하였다. 물리성 분석시료는 Core Sampler를 사용하여 실험동 입구에서부터 15~20m 지점에서 6곳에서 시료를 채취하였다. Core의 내경, 높이, 무게를 측정하고 전 중량 측정 후 105℃ 건조기(OF-11E, JeioTech, Daejeon, Korea)에서 18시간 건조하여 건물중을 측정하였으며 용적밀도와 공극률을 계산하였다.

$$\text{용적밀도 (g/cm}^3\text{)} = \text{건토중량 (g)} / \text{Core 부피 (cm}^3\text{)}$$

$$\text{공극률(\%)} = (1 - (\text{용적밀도} / \text{입자밀도})) * 100$$

재배지 토양의 토성은 사양토였으며, pH 5.1~5.5, EC 1.4~2.0dS·m<sup>-1</sup>, 유기물 함량 59.8~61.4 g·kg<sup>-1</sup>, 유효 인산 1657~1731.9mg·kg<sup>-1</sup>, 치환성 Ca, K, Mg 함량은 각각 12.1~14.2, 2.6~3.6, 3.6~4.4cmol·kg<sup>-1</sup>이었다(표 2-4-1). pH는 적정 수준보다 낮았으며, EC 수준은 적정 범위에 있으나, 유기물 함량은 높았고, 유효 인산은 적정 범위보다 3배 이상을 초과하였으며, 치환성 양이온 함량도 적정 수준보다 높은 것으로 나타났다.

표 2-4-1. 처리 전 재배 토양의 물리성과 화학성 분석

	용적밀도 (g·cm <sup>-3</sup> )	공극률 (%)	EC (dS·m <sup>-2</sup> )	pH	유기물 (g/kg)	유효인산 (mg/kg)	Ca <sup>2+</sup> (cmol/kg)	K <sup>+</sup> (cmol/kg)	Mg <sup>2+</sup> (cmol/kg)
	1.2	54.9	2.3	6.8	54	1563	3.57	15.7	4.8
적정범위	2이하		2이하	6.0~6.5		400~500	5.0~6.0	0.7~0.8	1.5~2.0

#### ○ 환경 조건

재배 온실 환경계측은 일사량(Pyrarno-70, RF sensor Co., Korea), 온·습도(SHT-110, RF sensor Co., Korea)를 10분 간격으로 측정하고 데이터 로거(WP700, RF sensor Co., Korea)하였다. 처리구별 환경 측정은 처리구 이랑 안쪽으로 20m 지점에 계측용 센서를 1개씩 각각 설치하였으며 지상부 환경은 바닥으로부터 150cm 높이 위치에 일사량센서(LightScout Pyranometer 36701, Spectrum Technologies, Inc. USA)와 온·습도 센서(측정범위 -40~85℃)가 내장된 데이터 로거(WatchDog 1450, Spectrum Technologies, Inc. USA)를 설치하여 1분 간격으로 측정값을 저장한 후 분석에 이용하였다. 수증기압 포차(VPD)는 온도와 상대습도를 이용하여 산출하였다. 토양 환경은 지면으로부터 20cm 깊이에 토양온도와 토양수분 함량이 동시에 측정되는 FDR센서(WT1000B, Mirae-Sensor, Korea)를 매설한 후 10분 간격으로 측정하고 데이터 로거(WP700, Mirae-Sensor, Korea)에 저장하였다.

○ 생체정보 및 광합성

수액흐름은 텔로팜(Telofarm Co. Ltd., Korea)에서 개발 SF센서 마이크로칩은 Baek 등(2018)이 개발한 것으로 single probe에 single hot wire가 장착된 thermal probe를 사용하였으며 data는 100초 간격으로 저장하였다. 실증 실험에서는 수액흐름 측정기(SF-5M Sap Flow sensor, Bio instruments S.R.L., Republic of Moldova)사용하여 1분 간격으로 측정하였다.

엽온은 지표로부터 1.5m 상부에 위치한 완전 전개된 잎에 엽온센서(LT-1M, Bio instruments S.R.L., Republic of Moldova)를 부착하여 엽온측정기(LT-1M Leaf Temperature sensor, Bio instruments S.R.L., Republic of Moldova)를 사용하여 1분 간격으로 측정하였다.

광합성은 휴대용 광합성 측정기(Li-6400XT, LI-COR, USA)를 이용하여 CO<sub>2</sub> 400ppm, 25°C, 400μmol/m<sup>2</sup>/s에서 완전 전개된 잎의 광합성, 기공전도도, 증산율을 측정하였다. 잎의 형광반응은 형광측정기(Junior-pam chlorophyll fluorometer, Heinz Walz GmbH, Germany)를 사용하여 20분 암적응 상태에서 445nm, 2800μmol/m<sup>2</sup>/s의 블루 LED를 조사하여 측정하였다.

○ 생육 및 수량

생육 특성은 초장, 엽장, 엽폭, 엽록소 함량(SPAD-502, Minolta Co., Japan)을 측정 조사하였고, 매일 수확한 상품과의 과장, 과중을 측정하고 수분 이용효율을 계산하였다. 엽면적은 Area meter(LI-3100C, LI-COR, USA.), 생체중은 전자저울(CUW420HX, CAS corporation, Korea), 건물중은 건조기(OF-22GW, JEIO TECH, Korea)에서 70°C, 48시간 건조 후 건조 중량을 측정하고 비엽중(Specific Leaf Weight)은 건물중(g)/엽면적(m<sup>2</sup>)으로 계산하였다.

○ 통계처리

통계 분석은 SAS package(SAS version 9.4, SAS Institute Inc. NC, USA)를 이용하여 ANOVA(analysis of variance) 분석하였으며 유의수준 0.05에서 Duncan's multiple range test(DMRT)로 검정하였다.



### 3. 제2 협동: 배지 함수량 및 생체정보 센서 제어 알고리즘 개발

가. 실험 1. <배지 함수량 측정 센서 개선 및 정확도 보완>

(1) 요약

유기 및 무기(암면) 배지 전체 면적 내 함수량 측정 및 넓은 면적 측정치로 정확도 높임.

(2) 주요 결과

○ 개발센서의 배지 함수량 측정 가능성 확인

시판되고 있는 FDR 센서와 (주)텔로팜에서 개발한 배지 함수량 센서의 유사성을 비교한 결과 그림 3-1-1과 같이 유사한 2 센서의 함수량 특성이 아주 유사함을 알 수 있다. 이 결과로부터 제2 협동 과제에서 개발한 센서가 배지 함수량 측정에 활용될 수 있음을 확인하였다.

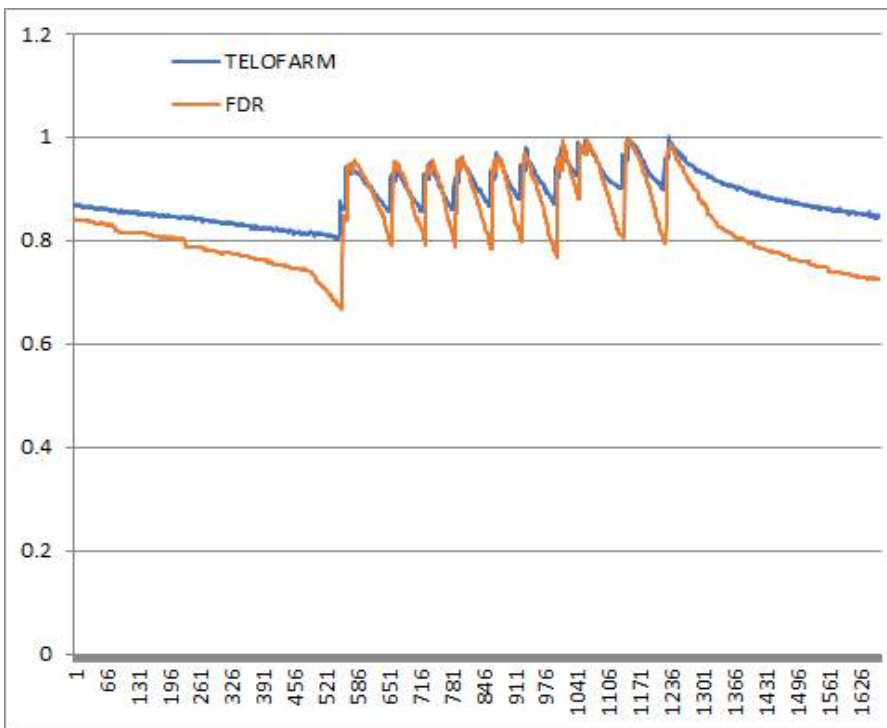


그림 3-1-1. 텔로팜 배지 수분센서와 FDR특성 비교

(주) 2 센서는 서로 다른 배지에서 측정

텔로팜(주)에서 개발한 센서의 특성과 배지전체의 무게변화를 그림 3-2에 비교하였다. 그림 3-2에서 두 그래프의 추세 변화가 유사함을 통하여 개발센서를 이용하면 배지 함수량 측정이

가능하다는 것을 확인하였다. 그림 3-1-2는 각 측정 그래프에서 최댓값으로 normalization 한 것이며, 좌측 y축은 함수량을, 우측 y축은 배지 무게변화를 나타낸다. 함수량과 무게변화를 하나의 축에 표시해보면 그림 3-1-3과 같은데, 본 과제에서 개발한 센서의 변화폭이 무게변화 폭보다 훨씬 크음을 알 수 있다. 정량적으로 비교해보면 본 과제에서 개발한 센서의 변화폭이 무게변화보다 22.5 배가 크다. 그 이유는 배지 무게에는 배지무게, 물 무게, 식물무게가 포함되어 있어 소량의 양액이 공급되면 전체 무게에 비하여 아주 작다. 그러나 본 과제에서 개발한 센서는 식물무게를 배제할 수 있기 때문에 금액에 따른 전기 용량변화가 크다.

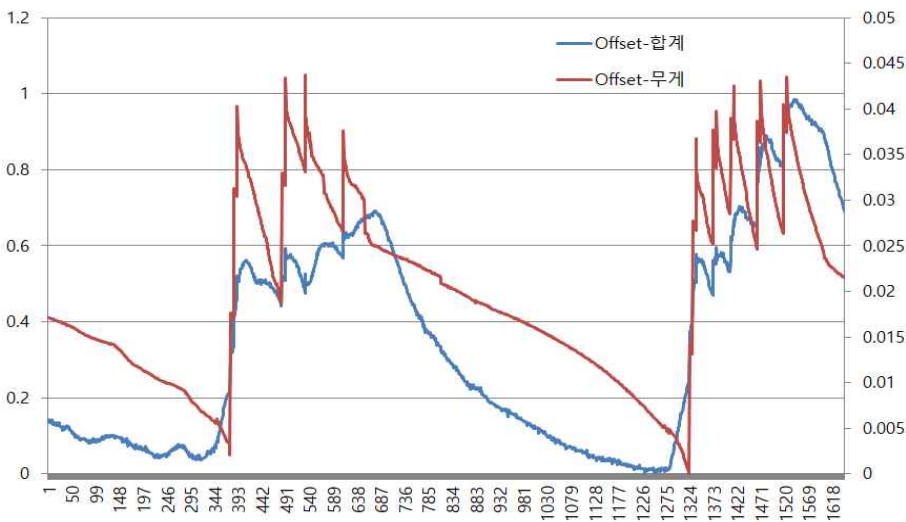


그림 3-1-2. 개발된 센서를 이용한 함수량 변화와 배지무게 변화  
(주) 함수량은 좌측, 무게는 우측 좌표



그림 3-1-3. 개발센서의 함수량과 배지 무게의 dynamic range 비교

○ 센서신호의 잡음특성 개선

• 접지를 통한 개선

사용하는 센서는 전기용량을 측정하여 배지 함수량을 계산한다. 센서가 사용되는 환경이 전자장치를 개발하는 연구실과 같이 주변 전기적 잡음이 없는 곳이 아니고, 수시로 동작하는 각종 모터(관수 모터, 냉난방 모터, 환풍 및 그물막 개폐 모터)로 인한 잡음과 농가에 공급하는 220V 전원의 접지 불량 등으로 인하여 센서와 전자측정 장치에 잡음이 많아 함수량 측정오차가 크다. 본 연구가 시작되기 전에는 배지 함수량 측정 신호가 그림 3-1-4와 같이 잡음이 많았으나 측정 장치에 공급되는 220V 교류 전원을 접지시켜 그림 3-1-5과 같이 잡음이 제거된 신호를 얻을 수 있었다.

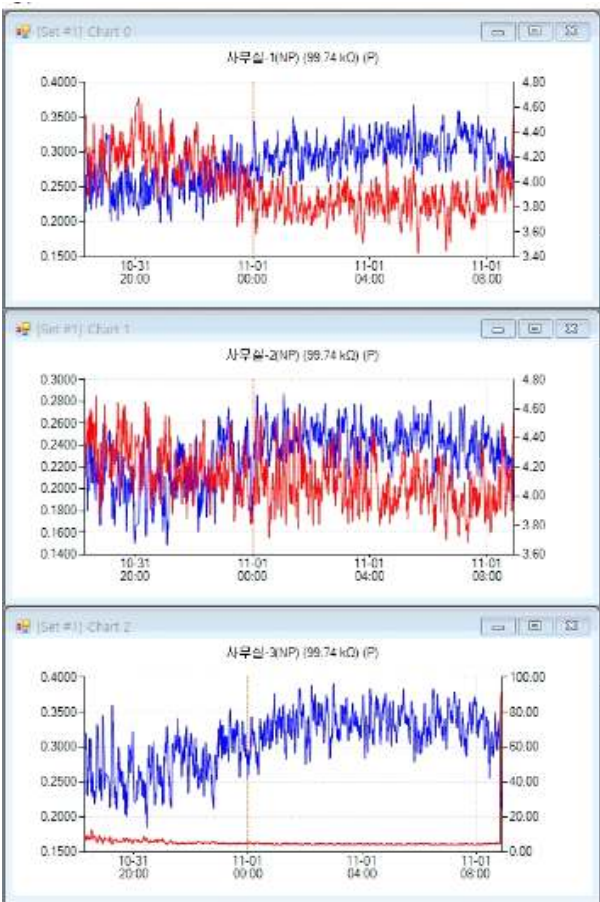


그림 3-1-4. 접지 개선 전 함수량 신호



그림 3-1-5. 접지 개선 후 함수량 신호

• SW 적인 방법을 이용한 잡음 제거

Sensor의 접지를 개선함으로써 전반적으로 비교적 양호한 신호를 얻을 수 있었다. 그러나 감

자기 변화하는 잡음신호를 접지만으로 제거하는 것은 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 SW 필터 프로그램을 개발하여 해결하였다. 그림 3-1-6의 신호는 삐죽삐죽하게 변하고 있으나 sw 필터를 이용하여 처리한 그림 3-1-7의 신호는 이러한 현상을 보이지 않는다.

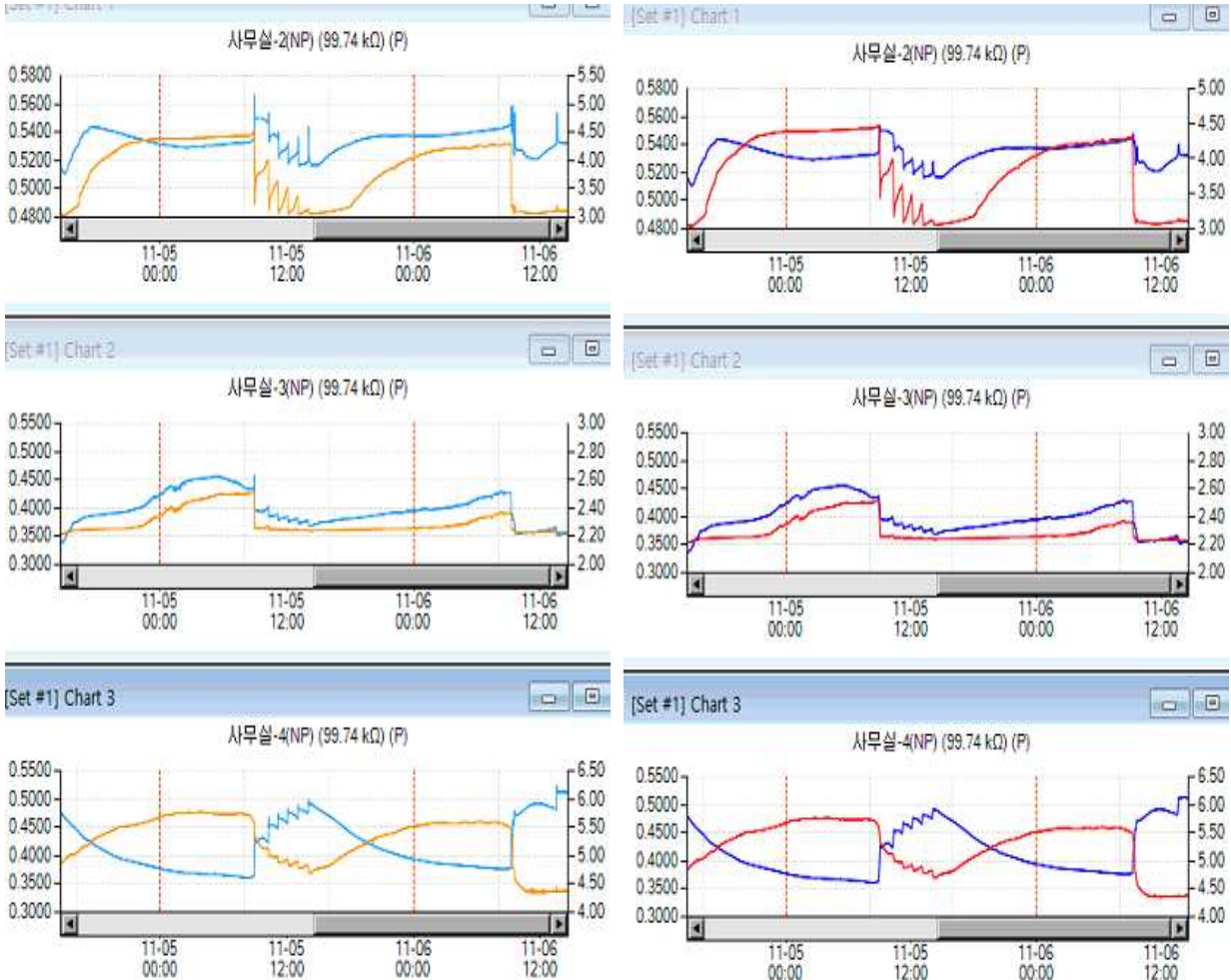


그림 3-1-6. 접지 개선만을 통하여 얻은 신호      그림 3-1-7. 접지 개선과 sw 필터를 통하여 얻은 신호

○ 급.배액량 측정 방법 개선

농가 현장에서는 급액량과 배액량을 실시간으로 측정하는 것은 필수적이다. 제2 협동과제를 수행하는 텔로팜에서는 본 연구 과제를 시작하기 전에 자체적으로 수량측정기를 개발하였다. 개발한 수량측정기는 많은 양의 수량을 측정할 때는 그림 3-1-8과 같이 오차 없이 측정할 수 있으나 소량의 배액을 측정할 때는 그림 3-1-9과 같은 현상이 나타나 정확한 수량 측정에 어려움이 있었다. 특히 소량의 액체일 때 온도에 따른 측정값의 오차가 커서 문제가 있었다. 이러한 문제를 개선하기 위해서 수량 측정기의 구조를 개선하여 그림 3-1-10과 같이 개선된 결과를 얻었다. Load cell을 이용한 배액량을 측정한 결과는 그림 3-1-11인데 자체개발 수량계와 동일한 특성을 가짐을 알 수 있다.

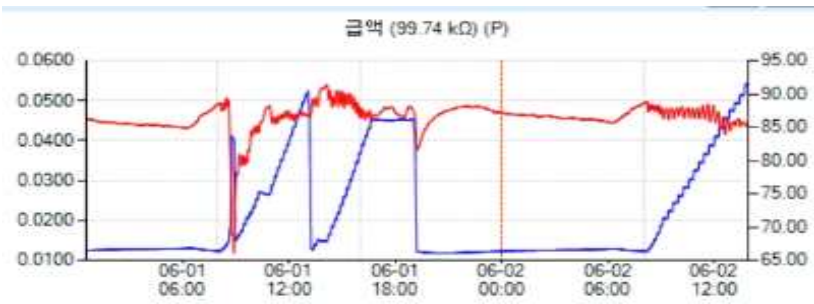


그림 3-1-8. 대량의 액체 측정 그래프

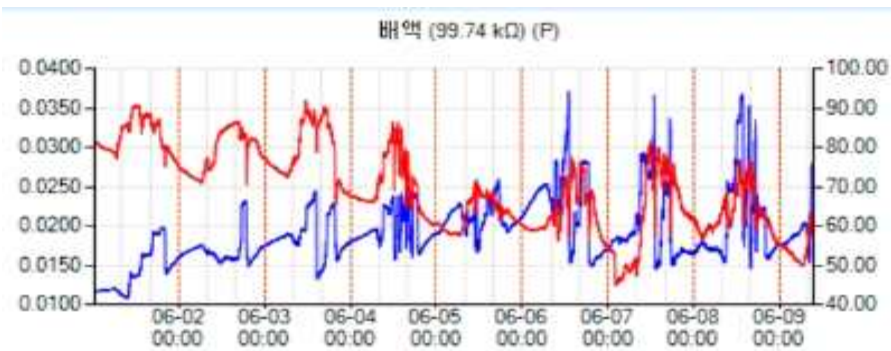


그림 3-1-9. 소량 액체 측정 그래프

1-

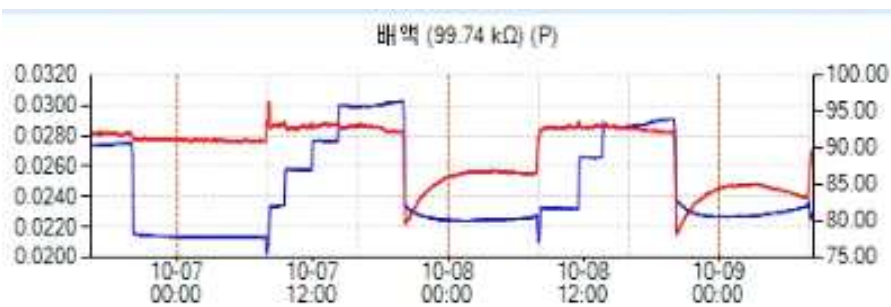


그림 3-1-10. 개선된 액체레벨 측정기 액체 측정 그래프

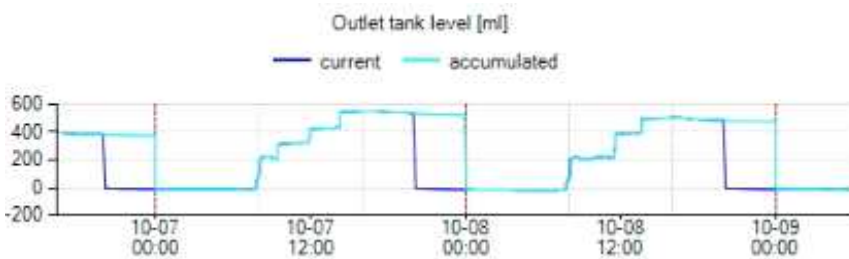


그림 3-1-11. Load cell로 실시간으로 측정된 배액량

○ 배지 수분 장치 구조개선

• 식물 마름 현상 개선

배지로부터 흘러나오는 배액을 모으기 위하여 그림 3-1-12와 같이 배지를 받치는 아랫부분에 원형 구멍을 만들었다. 실험을 진행하면서 식물이 자람에 그림 3-1-13와 같이 배지장치가 설치된 배지에 식재된 토마토의 마름현상이 있었다. 이 현상을 두고 연구팀에서 “측정과정의 전자파 영향”과 “배지 아랫부분의 공기 노출로 인한 뿌리 온도 상승” 영향을 검토하였다. 논의 결과 측정하는데 사용하는 전압이 낮기 때문에 전자파에 의한 영향은 무시할 수 있다는 결론을 얻고 원형 구멍 없이 배액을 모으는 형태로 배지구조물을 개선하여 배지측정 장치 위의 식물 마름현상을 없앴다.



그림 3-1-12. 배액을 모으기 위한 원형구멍이 있는 배지 구조물



그림 3-1-13. 배지구조물 위의 식물 마름현상

- load cell 설치

함수량 측정 장치를 calibration 하기 위해서는 급액량, 배액량, 배지무게 변화를 정량적으로 측정하는 것이 필요하다. 실시간으로 무게변화를 측정하기 위해서는 디지털 전자저울이 필요하다. 연구초반에는 그림 3-14와 같이 상용 전자저울을 사용하여 무게를 측정하였다. 원하는 무게를 모두 측정하기 위해서는 배지측정용 2개, 급액용 1개, 배액용 1개 등 총 4개의 전자저울이 필요하다. 여러 배지에 장치를 설치하는 경우 전자저울에 드는 비용도 무시할 수 없을 뿐만 아니라 상용저울 무게 때문에 장치가 높아져서 식물생육에 지장을 주었다. 이러한 문제를 해결하기 위해 저가의 load cell을 구매하여 컴퓨터와 인터페이스 하여 그림 3-15와 같은 장치를 만들어 필요한 무게를 실시간으로 측정하였다.



그림 3-1-14. 상용전자저울이 장착된 배지 함수량 측정 장치



그림 3-1-15. Load cell이 장착된 배지 함수량 측정 장치

○ 전자장치 개선

과제 수행이전에 배지 함수량 측정 센서와 그 센서를 활용하여 배지 함수량, 금액 및 배액량을 측정하고 PC 화면에 display 하는 수준까지 개발된 상태였다. 연구과제를 수행 중에 배지 많은 센서 데이터를 받아들이고 배지와 급.배액 무게를 측정할 수 있게 전자장치를 개선하였다. 개발된 전자장치의 block diagram은 그림 3-1-16.와 같으며 조립한 PCB 는 그림 3-1-17.과 같다. 2차년에 이 장치를 지속적으로 up-grade 할 예정이다.

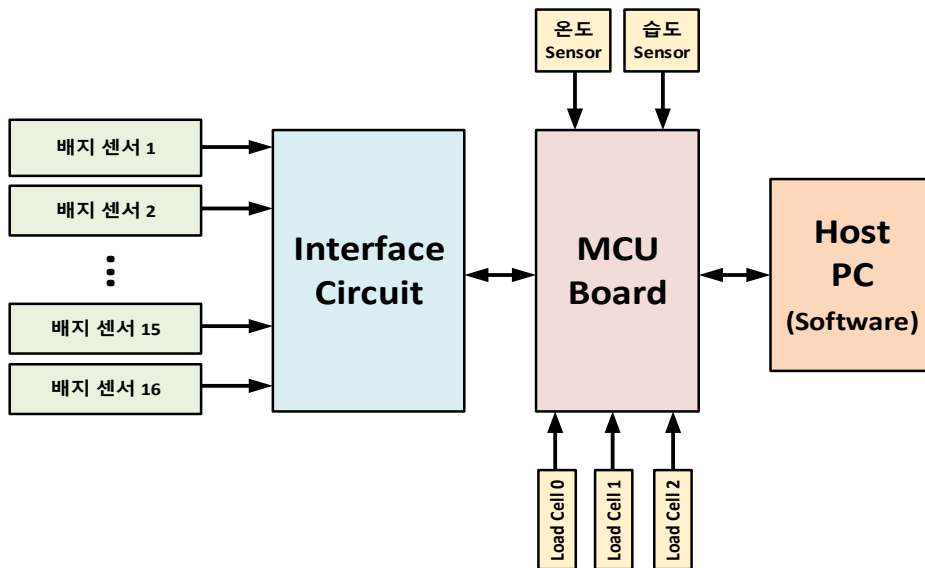


그림 3-1-16. 개발한 전자장치 block diagram

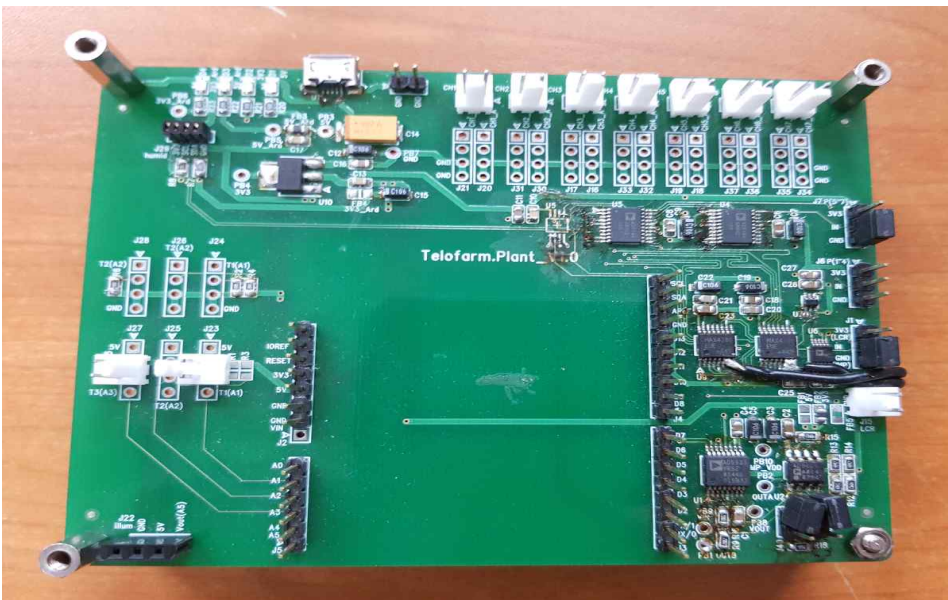


그림 3-1-17. 개발한 전자 장치의 PCB 조립 사진

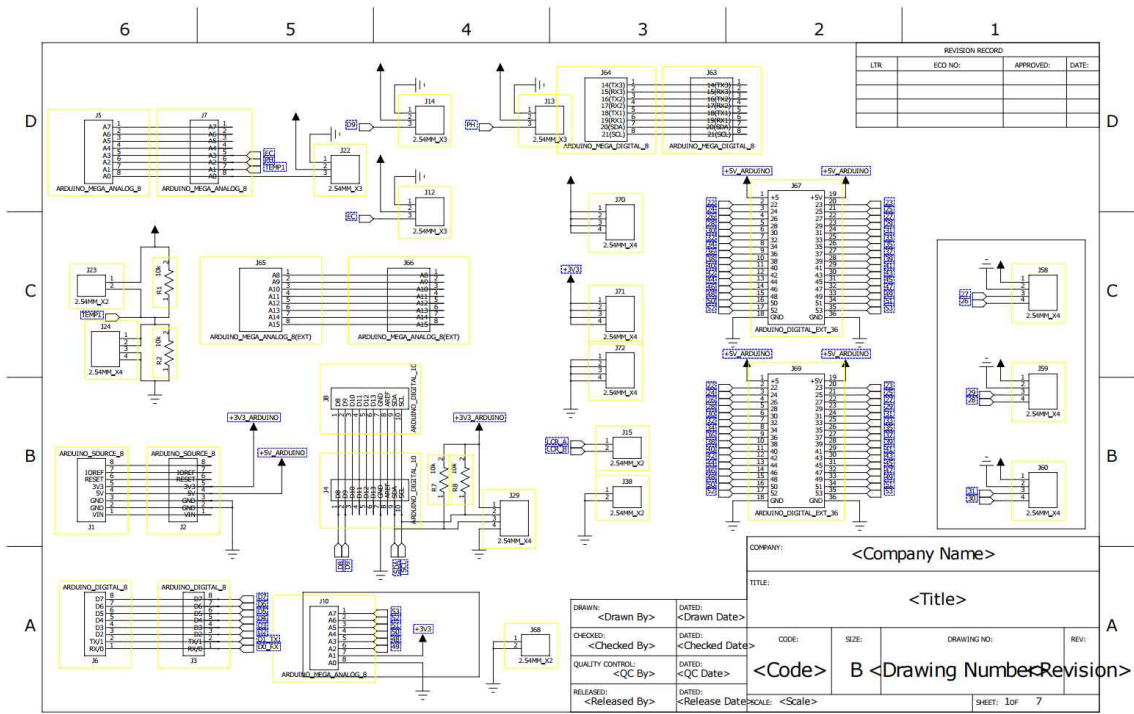


나. 실험 2.

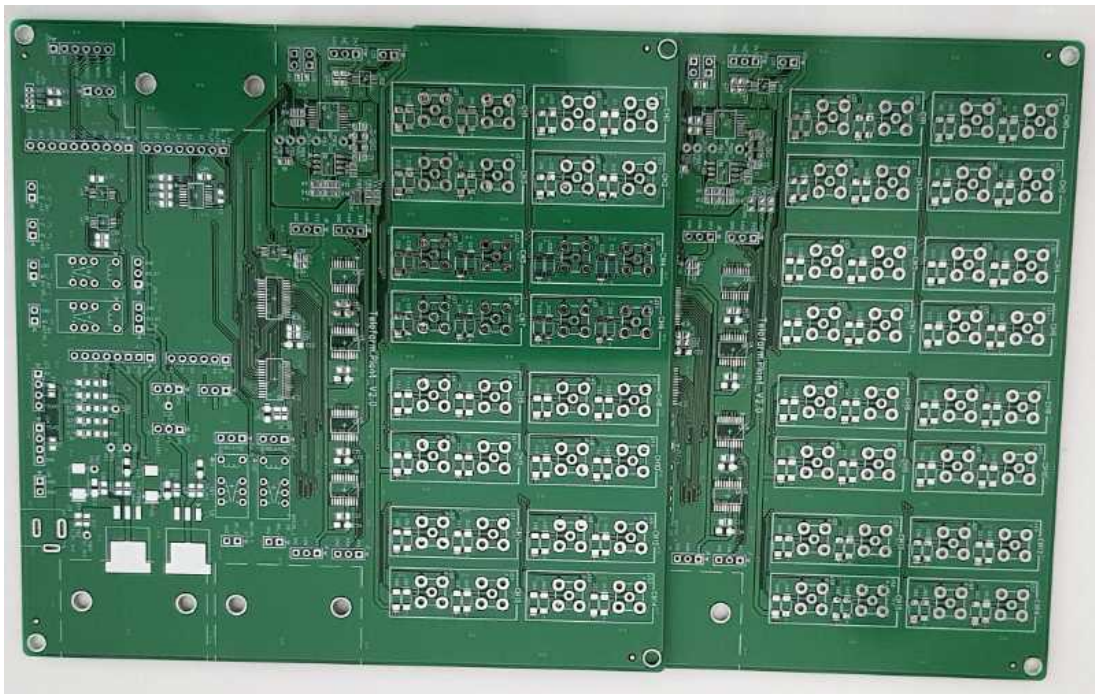
연구수행 내용	연구결과
전자회로 설계 및 PCB 제작	전자측정 시스템 회로 설계 2회 PCB 2회 외주 제작
전자측정 장치조립 및 시험	전자 측정 시스템 장치 조립 2회 조립된 전자측정 시스템을 이용한 실험 및 검증: 정상동작
개발된 전자장치를 구동을 위한 SW 개발	전자장치 구동용 임베디드 소프트웨어 작성 아두이노를 통한 센서와 노트북간의 원활한 데이터 통신
관수를 위한 배지 함수량 측정 알고리즘 및 SW 개발	함수량 측정 및 관수제어를 위한 SW 개발 관수제어에 필요한 다양한 MENU를 가진 GUI 개발 금액방식, 배지 함수량과 배액량 기반 관수제어 방식개발 : 배액을 정량화 가능
센서의 구조 및 측정 방법 개선	수직구조에서 수평구조로 변경: 온도에 따른 측정 오차 개선 정전용량 기반 함수량 측정장치 특허 출원 배액통 개폐를 솔레노이드 밸브에서 전동밸브로 교체하여 밸브의 막힘 현상해결 전동밸브 교체에 따른 HW와 임베디드 소프트웨어 수정
개발 센서기반 배지 함수량 제어 정량적 분석	정전용량과 관수에 따른 배지 무게를 이용한 개발 센서의 절대 함수량 계산 방법 고안 암면과 코코핏를 대상으로 실험 중
생체정보 센서기반 배지 함수량 제어의 정량적 분석	배지 함수량과 SAF 센서를 연동시켜 관수하는 것이 합리적이라는 결론
현장적용 실험	정전용량 함수량 측정 센서를 딸기 농장에 설치하여 가능성 조사: 관수에 따른 함수량 변화 확인 시험 딸기농장: 경남 고성군 영오면 영회로 26

○ 전자회로 설계 및 PCB 제작

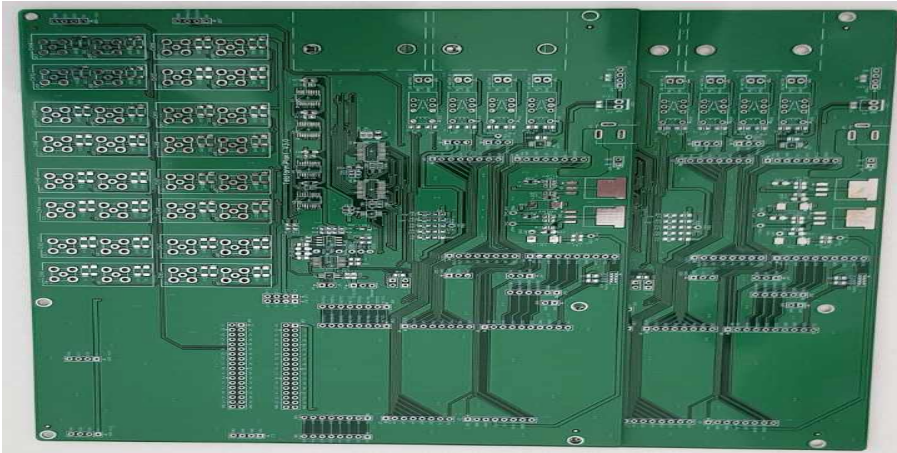
- 1차적으로 정전용량 센서를 배지 함수량을 측정하고 관수제어를 할 수 있는 회로를 설계하였음
- 1차에 설계한 회로를 현장에 적용하여본 결과 노이즈가 발생하여 접지기능을 강화시킨 회로를 설계
- Analog switch 회로의 노이즈 감소를 위하여 analog MUX IC ground 강화
- 1~2차에 걸쳐 설계한 회로를 제작하기 위한 PCB를 외주 제작하였음



< 전자시스템의 일부 회로도: 총 7장 >



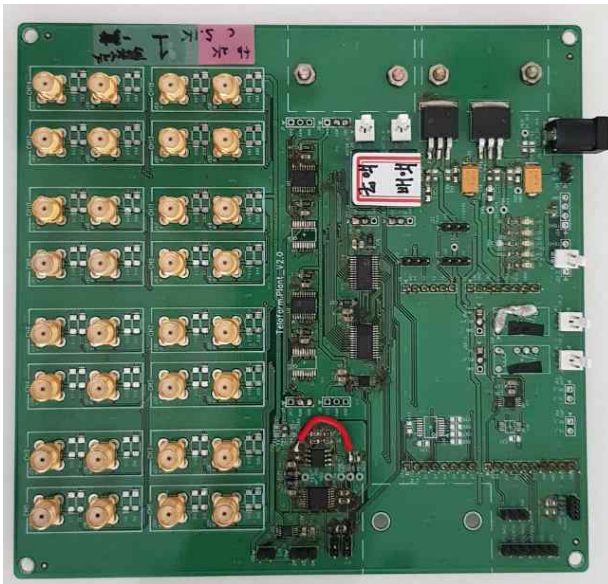
< 1차 제작한 PCB >



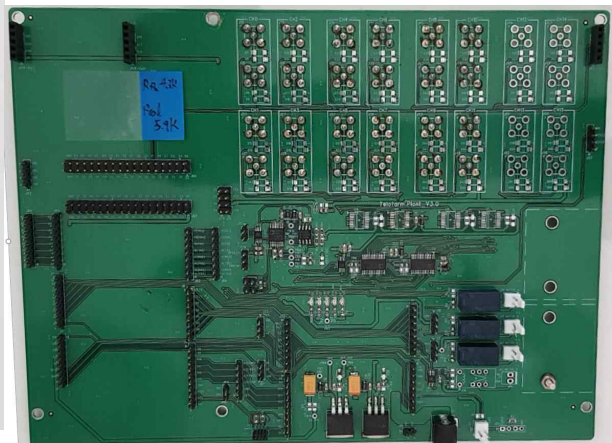
< 2차 제작 PCB >

○ 전자측정 장치조립 및 시험

- 1,2차에 제작한 PCB위에 전자 부품을 탑재하여 정전용량 센서를 구동하여 함수량을 측정할 수 있는 전자 장치를 제작하여 현장 시험한 결과 정상적인 동작을 하는 것을 확인

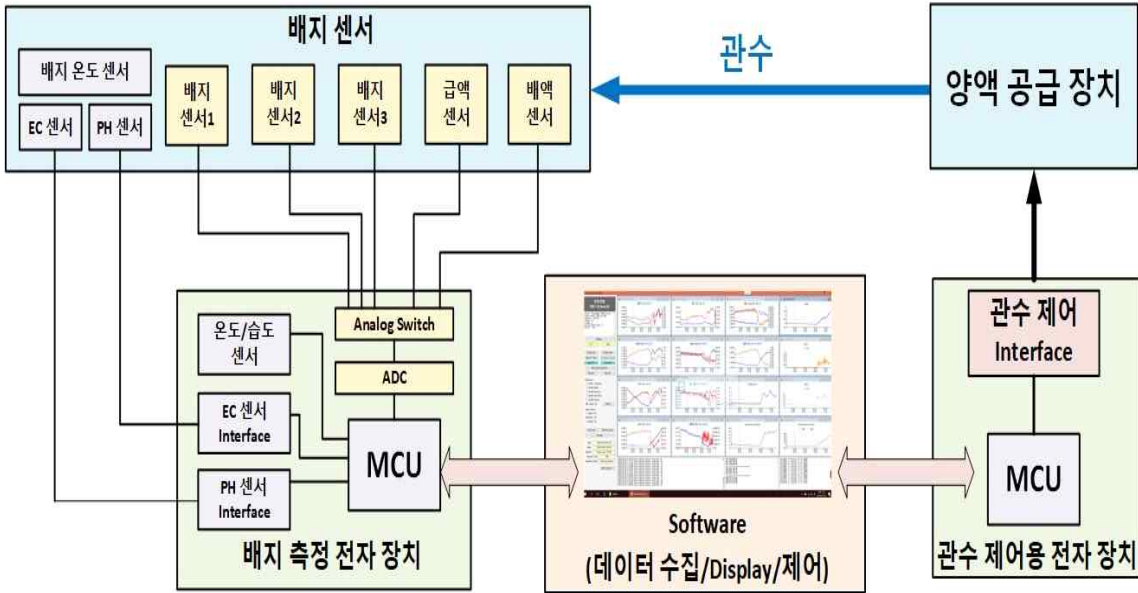


<1차 제작 보드 사진>



<2차 제작 보드 사진>

○ 개발된 전자장치를 구동을 위한 SW 개발



< 개발한 함수량 측정 시스템 구성도 >

위 그림은 개발한 정전용량 기반 함수량 측정 및 관수제어 시스템 구성도이다. 본 시스템을 위한 SW는 2종으로 구성된다. 첫 번째는 제작한 전자장치를 구동하기 위한 임베디드 SW로 개발된 전자장치에 장착된 아두이노 CPU를 제어하기 위한 것이다. 다른 하나는 센서 데이터가 아두이노 CPU를 거쳐 노트북에 저장되고 display 하고 측정된 데이터를 기반으로 노트북에서 관수제어를 할 수 있게 하는 SW이다. 첫 번째 SW는 전자장치에 저장되고 2번째 SW는 노트북에 저장된다.

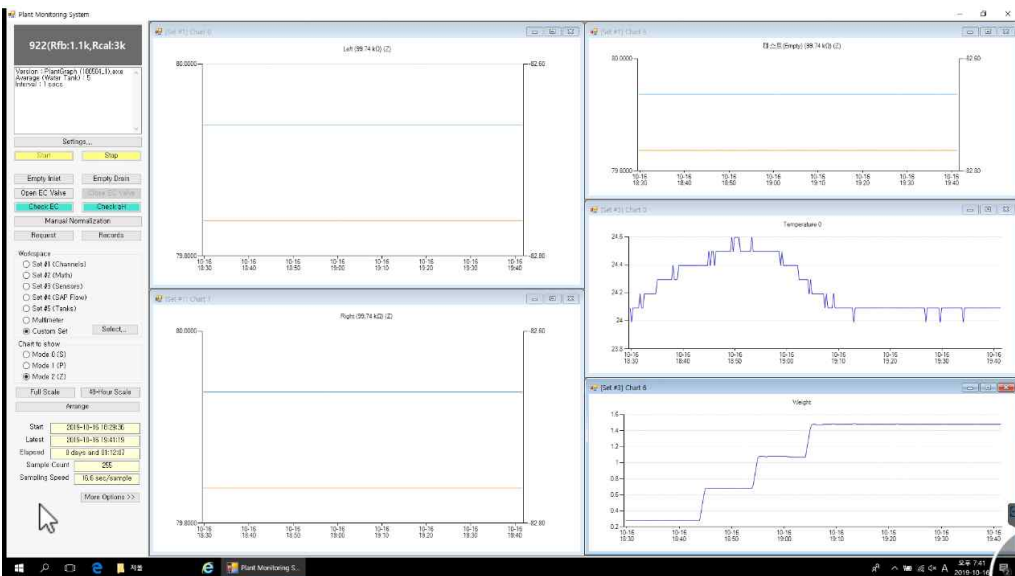
<pre> lowest_level_2=-1 ref_ch=0 drain_tank_level_ml=100 full_level_ref0=0.335810637034373 full_level_ref1=0.549873618534883 full_level_ref2=0.464703200535489 full_level_ref3=5.76532758620689 start_hour_1=09 start_min_1=10 stop_hour_1=15 stop_min_1=00 low_threshold_1=0.8 interval_min_1=10 drain_tank_level_ml_1=50 start_hour_2=17 start_min_2=00 stop_hour_2=17 stop_min_2=00 low_threshold_2=0.5 interval_min_2=15 drain_tank_level_ml_2=100 start_hour_3=17 start_min_3=00 stop_hour_3=17 stop_min_3=00 low_threshold_3=0.5 interval_min_3=15 drain_tank_level_ml_3=100 valve_open_duration_1=1 valve_open_duration_2=10 valve_open_duration_3=10 base_level_ref0=0.2000 base_level_ref1=0.2300 base_level_ref2=0.2500 base_level_ref3=6.0000  [tank] update_inlet_tank_eq=1 update_drain_tank_eq=1 [load_cell] soil_offset=12.5281724137931 soil_scale=58000 inlet_offset=2.21671253071253 inlet_scale=407000 outlet_offset=2.58126535626536 outlet_scale=407000 </pre>	<pre> [options] disable_secure_mode=0 infinite_serial_log=0 export_log=1  [default] system_name=917(LoRa[01:S6]-Rfb:1.4k.Rcal: ad5933_enable=1 lcr821_enable=0 scale_enable=0 sapflow_enable=0 sapflow_calibration=0 watering_enable=1 multimeter_enable=1 interval=1 calibration_enable=0 calibration_hours=5 capture_device=1 frequency=100 voltage=1.275 bias=0 speed=0 average=1 tank_channel_average=5 ad5933_gainfactor=7.257675304226E-08 ad5933_systemphase=2.7055 ad5933_average=3 ch0_enable=1 ch1_enable=1 ch2_enable=1 ch3_enable=0 ch4_enable=0 ch5_enable=0 ch6_enable=0 ch7_enable=0 ch8_enable=0 ch9_enable=0 ch10_enable=0 ch11_enable=0 ch12_enable=0 ch13_enable=0 ch14_enable=0 ch15_enable=0 ch0_name=수평좌측 ch1_name=수평-새것 ch2_name=수평-우측 ch3_name=사무실4_Hole(NP) </pre>
---	---

### <전자장치에 내장된 SW 일부>

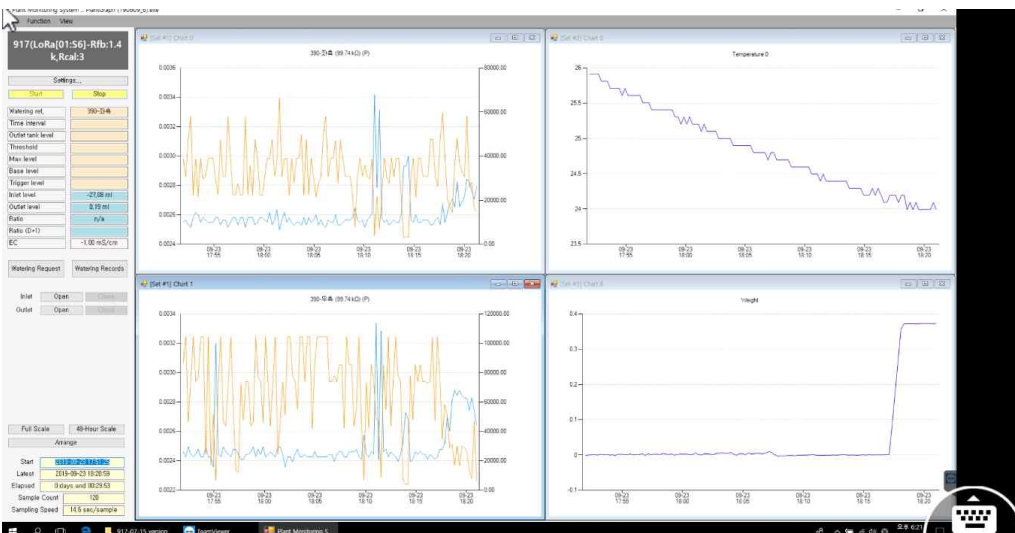
#### ○ 관수를 위한 배지 함수량 측정 알고리즘 및 SW 개발

- 함수량 측정 및 관수제어를 위한 SW 개발
- 관수제어에 필요한 다양한 MENU를 가진 GUI 개발
- 금액방식, 배지 함수량과 배액량 기반 관수제어 방식개발: 배액을 실시간 정량화 가능
- 사용자 편의와 관수제어 편의를 위하여 노트북에서 수행되는 소프트웨어 2version을 개발
- 2차 버전은 아래 사항들을 main 화면에 편리하게 표시할 수 있게 하였다.
  - 관수제어 기준센서 설정
  - 관수제어 인터벌
  - 관수재개 기준 설정
  - 실시간 금액량 표시

- 실시간 배액량 표시
- 실시간 배액율 표시
- 실시간 EC 표시
- 급액 배액통 개폐
- 수동 급액



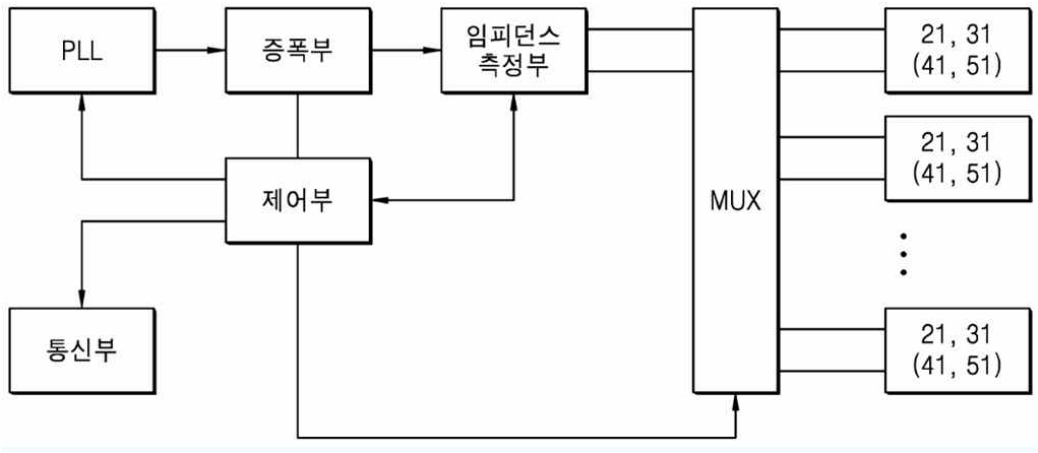
<1차 Version PC 소프트웨어 GUI>



<2차 Version PC 소프트웨어 GUI>

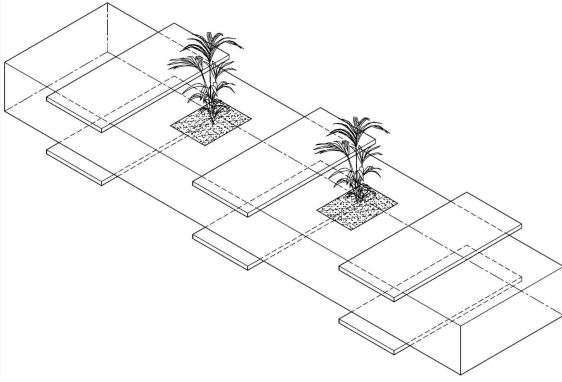
○ 센서 구조 및 측정 방법 개선

본 과제는 센서, 전자장치 하드웨어, 측정 소프트웨어, GUI(Graphic User Interface)를 개발 및 개선하는 목표를 갖고 있다. 전체 시스템 동작은 다음과 같다. 주파수 발생부(PLL)은 임피던스를 측정할 정현파의 주파수를 결정하고, PLL에서 나온 신호를 증폭부에서 증폭하여 임피던스 측정부에 인가한다. 하나의 임피던스 측정부를 이용하여 16 채널의 센서 신호를 측정할 수 있게 analog MUX를 사용하였다. 사용자의 의도에 따라 측정을 할 수 있게 PC에서 수행되는 프로그램에서 나오는 명령에 따라 측정 장치의 각 부분을 제어할 수 있는 제어부가 있다. 제어부는 IoT 분야에서 많이 사용되는 아두이노 모듈을 채택하였다. 전자장치에서 측정된 정보를 관수제어 장치로 무선으로 보낼 수 있게 LoRA 모듈을 사용하였다. 1차 년도에는 하나의 전자장치에서 4개의 정전용량 함수량을 측정할 수 있었으나 2차 년도에는 16 정전 용량 함수량 센서를 측정할 수 있게 하드웨어와 소프트웨어를 개선하였다.

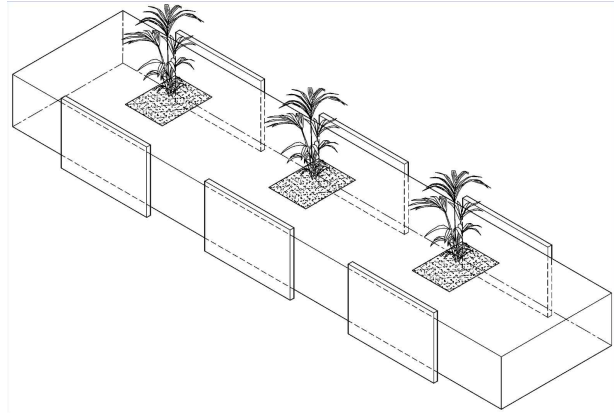


< 정전용량 함수량 측정 시스템 블록도 >

정전용량을 이용하여 배지 함수량을 측정하는 방식으로 3가지 방법을 생각할 수 있다. 압면과 같이 비닐로 육면체 형태로 배지가 만들어진 경우는 아래와 같이 2가지 방법으로 정전용량을 측정할 수 있다. 배지의 상, 하에 정전용량 센서를 설치하는 경우는 배지 바닥에 있는 물까지 정확하게 측정할 수는 있으나, 물의 위치에 따른 정전용량 변화가 커서 함수량을 정량화하는데 어려움이 있으며, 배지 온도에 따른 정전용량 변화가 커 함수량 정량화의 또 다른 장애요인이 발생하였다. 본 연구팀은 여러 실험 결과를 바탕으로 압면의 경우 배지 앞뒤로 정전용량 센서를 부착하는 방식이 안정적이라는 결론을 내렸다.

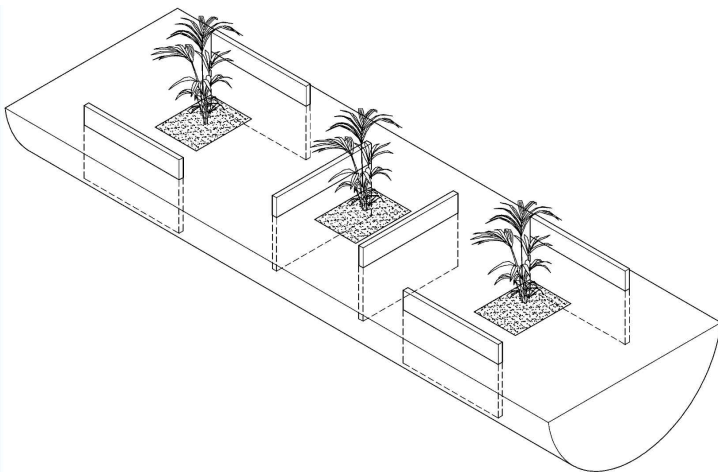


< 암면 배지의 상하에 센서 설치 경우>



<암면배지 전후에 센서 설치 경우>

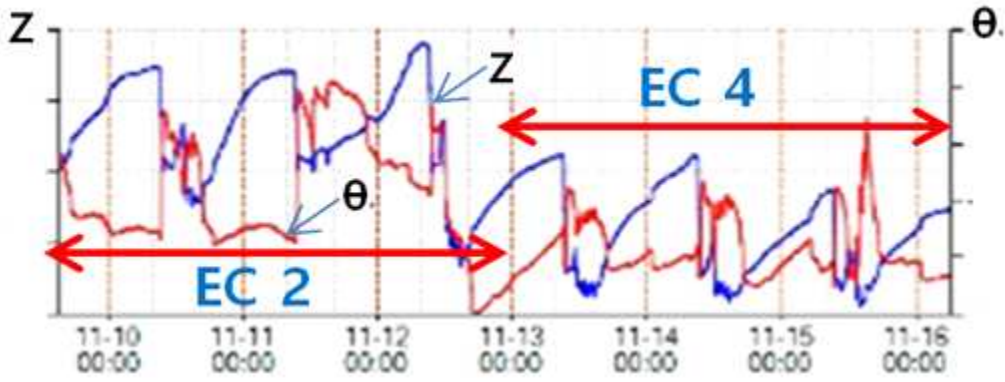
딸기재배용 배지의 경우는 암면과 같은 직육면체가 아니므로 정전용량 센서를 아래 그림과 같이 배지에 직접 설치하는 방법을 채택할 수밖에 없다. 3종의 모든 경우를 특허에 반영하여 출원하였다.



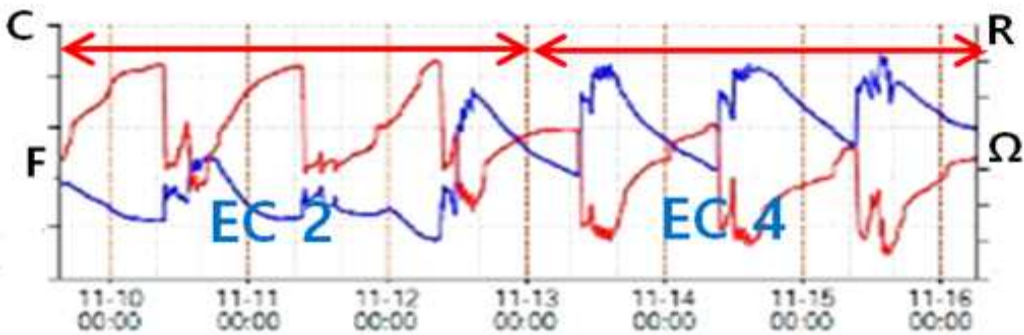
<딸기 배지에 센서를 직접 설치한 경우>

본 과제에서 개발한 정전용량 함수량 측정 장치는 함수량을 측정할 수 있다는 것 외에 배지 내의 전도도(EC: Electric Conductivity)를 측정할 수 있다는 장점이 있다. 아래 그림은 배액 전도도를 2mS에서 4mS로 변화 시켰을 때 임피던스, 병렬 R-C, 직렬 R-C 특성의 실험결과이다. 전도도를 높이면 임피던스의 크기, 병렬 R-C의 저항, 직렬 R-C의 저항이 감소하는 것을 알 수 있다. 위 실험결과들에 의하면 정전용량 함수량 측정장치를 이용하면 배지의 함수량과 전도도를 동시에 측정할 수 있음을 알 수 있다. 농가 현장에서는 배지나 배액의 EC를 매일 측정하는 것이 번거롭기 때문에 매일 측정하지 않고 있다. 본 과제에서 개발한 정전용량 함수량 측정 장치를 활용하면 EC 변화추세를 알 수 있어 배액 EC 제어를 손쉽게 할 수 있다. EC의 정량화를 위해서는 별도의 연구가 필요하다.

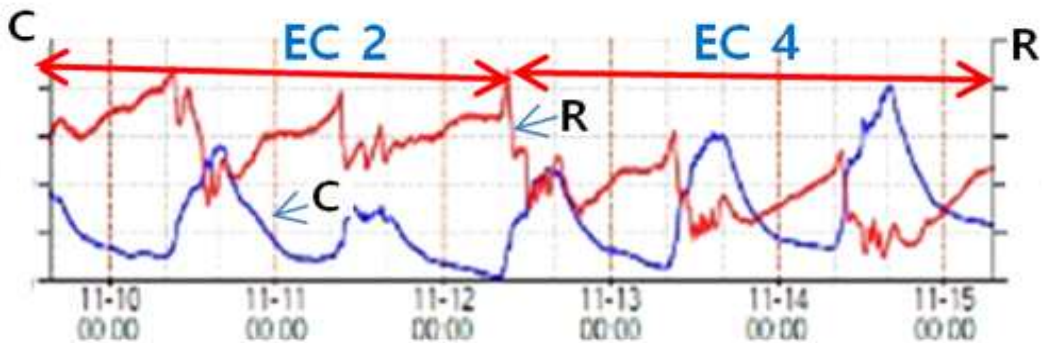




<EC변화에 따른 임피던스(Z)의 변화>



<EC변화에 따른 커패시턴스(C)의 변화>



<EC변화에 따른 저항(R)의 변화>

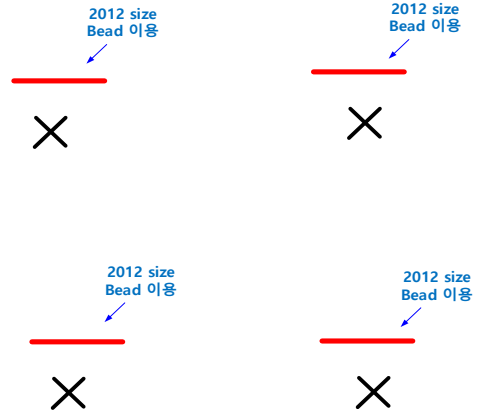
본 과제에서 개발한 시스템은 급액량과 배액량을 실시간으로 측정하고 일정량 이상이면 자동으로 급액통과 배액통을 비운다. 그리고 지정된 시간에 배액통과 급액통을 비우기도 한다. 그런데 급액통과 배액통의 개폐를 솔레노이드 밸브를 사용하는 경우 밸브에 이물질이 끼이게 되어 통들이 밸브가 완전하게 닫히지 않아 누수가 발생하는 문제가 있었다. 이 문제는 솔레노이드 밸브 대신 전동밸브를 사용하여 완전하게 해결하였다.

Inlet open

Inlet close

Outlet open

Outlet close



< 전동밸브 장착을 위한 수정 회로도 >

```
else if(line_num == 80)//inlet Valve open
{
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(7, LOW);
    digitalWrite(8, LOW);
    Serial.print("#80$");
    delay(Valve_pulse_duration);
    digitalWrite(2, HIGH);
}
else if(line_num == 81)//inlet Valve close
{
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(7, HIGH);
    digitalWrite(8, LOW);
    Serial.print("#81$");
    delay(Valve_pulse_duration);
    digitalWrite(2, HIGH);
}
else if(line_num == 82)//outlet Valve open
{
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(7, LOW);
    digitalWrite(8, HIGH);
    Serial.print("#82$");
    delay(Valve_pulse_duration);
    digitalWrite(2, HIGH);
}
else if(line_num == 83)//outlet Valve close
{
    digitalWrite(2, LOW);
    digitalWrite(7, HIGH);
    digitalWrite(8, HIGH);
    Serial.print("#83$");
    delay(Valve_pulse_duration);
    digitalWrite(2, HIGH);
}
```

<전동 밸브 제어를 위한 펌웨어>

○ 개발 시스템의 배지 함수량 제어 원리 및 제어 로직

• 개발 정전용량 함수량 측정 시스템 기능

- 측정 주요 Parameter: 급액량, 배액량, 배액율, 배지 무게

- 제어 방식: 정전용량 함수량 센서를 이용한 제어 & 배지 무게 변화기반 제어

- 안전장치: 정전용량과 배지 무게를 동시에 측정하여 정전용량 센서가 고장 나면 무게로 관수 제어할 수 있게 함. 또한 급.배액량을 정전용량과 무게를 동시에 측정하여 1 sensor가 고장 나면 다른 센서로 대체하여 제어할 수 있게 함

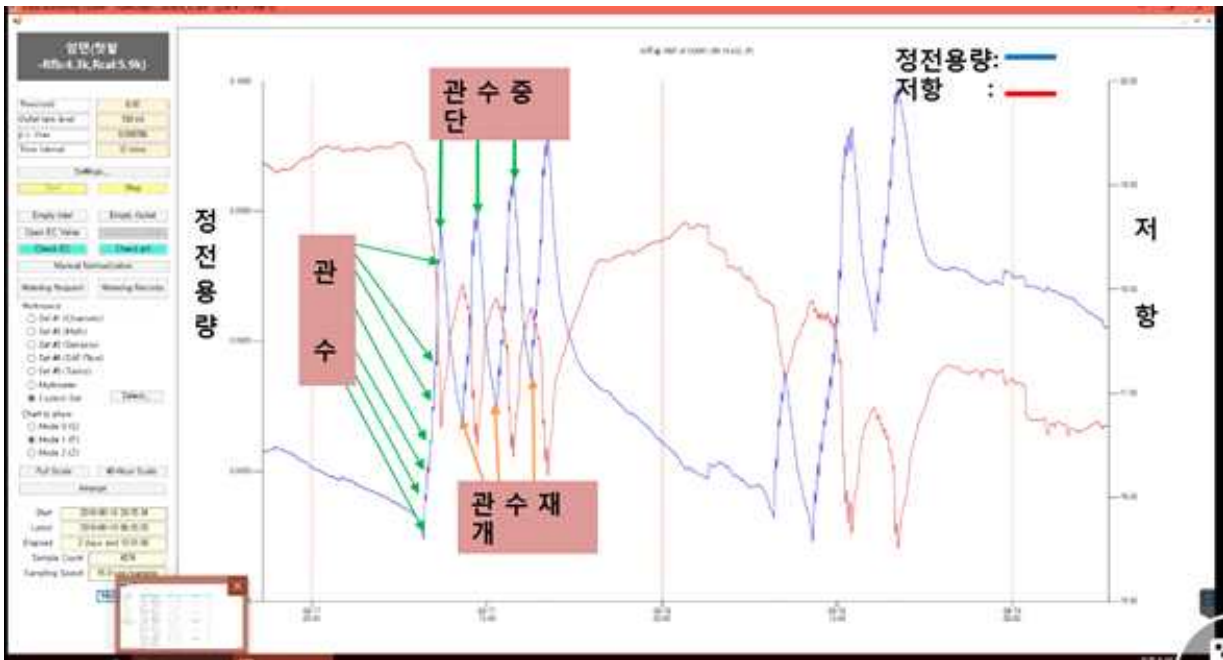
• 배지 함수량 제어

- 제어기능: 아래 그림은 개발한 함수량 측정 장치 화면이다. 개발한 정전용량의 변화와 전체무게(배지무게+배지의 수분무게+식물무게) 변화 추세가 동일함을 알 수 있다. 그리고 실시간으로 급액량과 배액량을 체크할 수 있으며 매 순간마다 배액율을 알 수 있다. 배액량과 관수 재개시점을 조절할 수 있게 하여 배액율을 제어할 수 있게 하였다.

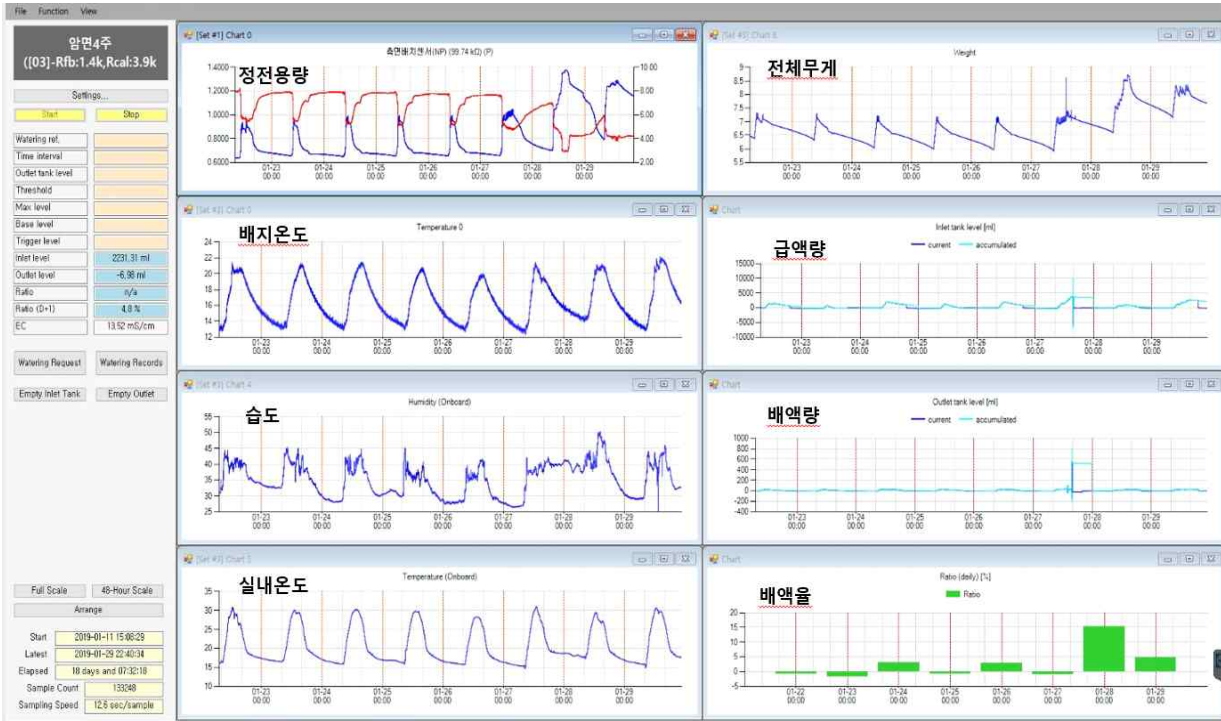
- 제어방법: 개발된 수분 측정 장치를 이용한 급액제어는 급액제어점에 관수가 재개되고(관수ON), 목표 배액량에 관수중단(관수 OFF)되는 방식임. 즉, 관수재개점(아래 그림에서 threshold)이 0.92, 목표 배액량이 100ml(아래그림에서 drain tank level)일 때, 일출 2시간 후 급액을 시작하여 10분 간격(아래그림에서 time interval)로 지속적으로 급액 되고 첫 배액이 배출될 때 배지의 정전용량(Capacitance) 값을 1로 간주함. 그 후 급액이 되어 배액이 목표 배액량에 도달하면 급액이 다시 중지됨. 이 후 배지의 함수량이 감소하여 정전용량이 관수재개점에 도달하면 다시 급액 재개됨. 이 제어법은 급액제어점과 목표배액량을 조절함으로써 근권의 함수량을 적정하게 유지하는 데 효과적임.

Start Time	07	40	
Stop Time	17	40	
Time Interval	10		mins
Reference Channel	Soil Channel 1		
Low Threshold	0.92		
Drain Tank Level	100 ml		
minimum (D+2)	-1		
minimum (D+1)	-1		
minimum (D+0)	-1		
p.c. maximum	0,210573250918691		
reference outlet level	0		

< 개발한 함수량 측정 시스템의 관수재개점(Threshold)과 관수중단(drain tank level) 설정모습 >



< 개발한 함수량 측정 시스템의 관수재개점과 관수중단에 의한 제어 모습 >



< 개발한 함수량 측정 시스템 제어 화면 >

- 기존 FDR 센서와 차이점

개발된 컨덴서형 배지 수분 측정 장치는 컨덴서형 수분센서(방수절연전극판, 테플론 코팅, 30 cm x10cm)를 배지에 고정하고 전자장치에서 교류신호(정현파)를 인가하면 배지내의 함수량과 수분 분포에 따라 임피던스(저항)가 달라지고 임피던스 값과 위상값을 측정하여 정전용량(capacitance)을 측정하는 것임. FDR 센서는 고주파(3~100MHz)를 이용하여 토양 내 유전율 정도에 따라 측정 회로 내에 걸리는 주파수영역에서 콘덴서에 걸리는 정전용량(electric capacity)으로 읽어 토양수분함량으로 환산하는 것임. 즉, 센서 기기 본체(전자파 발생원)와 센서(전자파 발생 및 감지) 사이에 전선을 이었을 때 임피던스(저항)의 변화로 전자파의 이동은 파장을 이루는데 센서가 토양(수분)에 있을 때 전자파의 이동속도는 물의 쌍극성 때문에 느려진다. 전자파가 센서(탐지봉) 사이를 왕복하는 걸리는 시간이 토양수분함량과 일정한 관계가 있어 토양내 유전율 정도에 따라 반사파의 세기를 정전용량으로 읽어 토양수분함량으로 환산하는 것임.

두 센서가 작동 원리는 유사하나 FDR 센서는 봉으로 되어 있어서 배지의 국부적인 위치에 한 포인트만 측정하지만 개발된 센서의 경우 배지 전체에서 약 70%에 해당되는 배지면적의 수분함량을 측정할 수 있음.

- 암면 배지 함수량 정량화

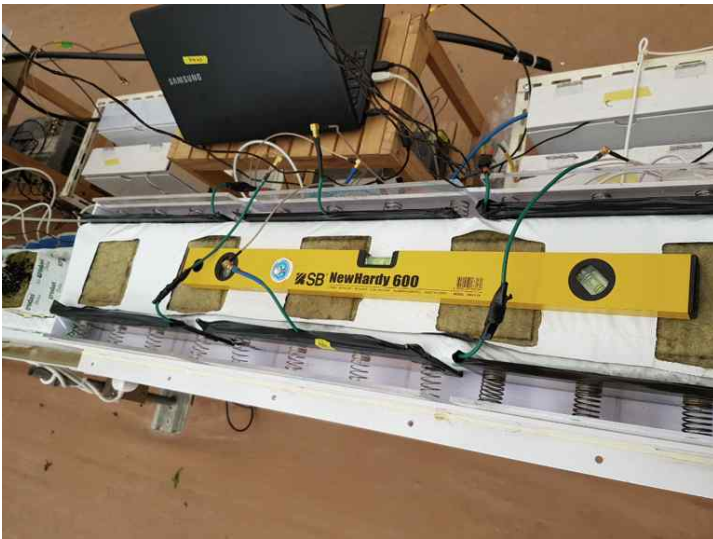
1차적으로 암면에 수분을 충분히 포화시킨 후 장시간(약 2주) 정전용량과 암면 배지무게를

비교하여 배지수분 측정용 정전용량이 어떤 함수량을 나타내는 지를 계산하였다. 정전용량과 배지 온도를 독립 변수로 하여 그 시간의 배지 무게를 종속변수로 하여 curve fitting 방식으로 배지 함수량을 구할 수 있는 식을 구하였다. Curve fitting은 상용 프로그램을 활용하여 가장 좋은 결과를 주는 방정식과 계수를 구하였다. 위 경우에는 아래와 같은 full cubic polynomial이 좋은 fitting 결과를 나타내었다.

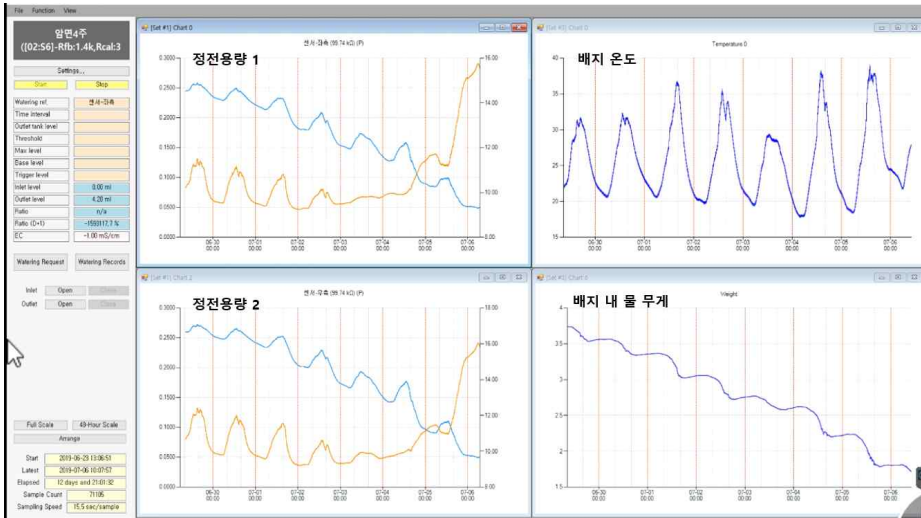
$$a+b*x1+c*x2+d*x1^2+e*x2^2+f*x1^3+g*x2^3+h*x1*x2+i*x1^2*x2+j*x1*x2^2=Y$$

위 식에서 X1은 정전용량, X2는 배지 온도, Y는 배지 무게를 나타내고, a, b, c 등은 fitting 계수이다. 이러한 방식으로 fitting 한 결과 정전용량에 의한 함수량 값과 배지전체 무게 간의 correlation coefficient 가 0.946 이고 표준편차는 0.00243 이었다.

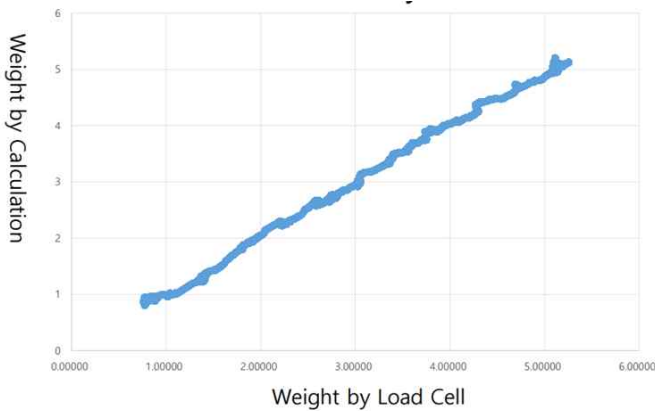
Dry-out 방식으로 구한 계수를 관수시 함수량 계산하는 데 사용할 수 있는가를 조사하였는데 실제 함수량과 차이가 나는 것을 발견하였다. 관수하면서 얻은 계수를 다른 관수 시에 사용할 수 있는 실험을 계속하고 있다.



< Dry-out 방식의 함수량 정량화 실험 장치 >



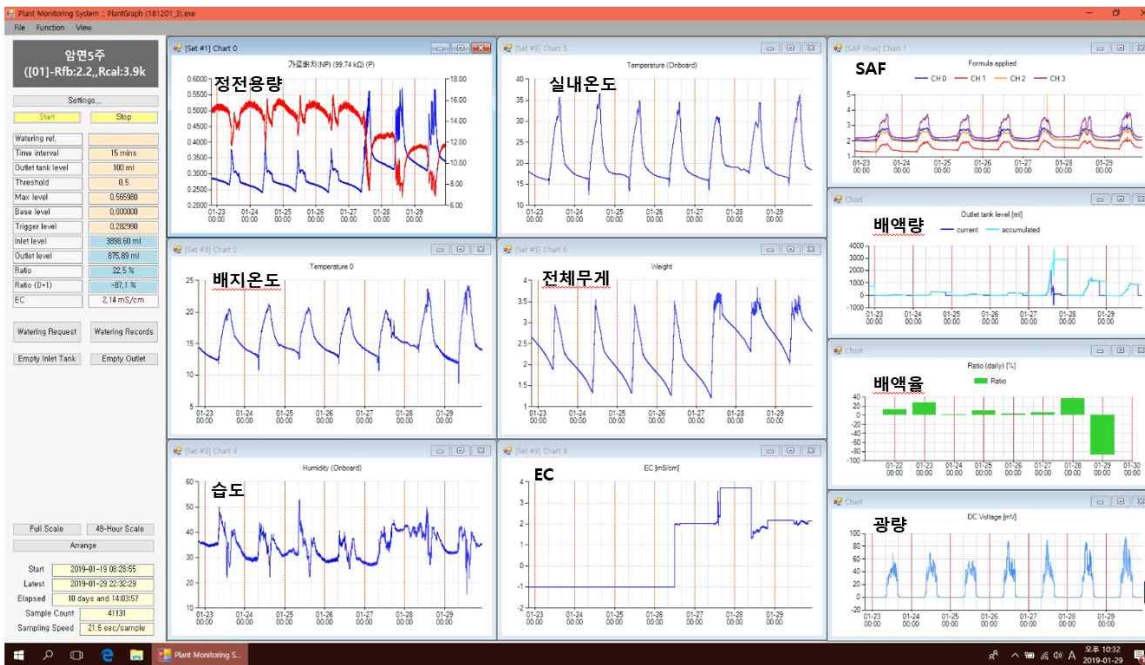
< Dry-out 방식에 의한 함수량 계산 방식 실험 화면 >



<측정한 배지 물 무게와 정전용량에 의한 배지 물 무게 >

○ 생체정보 센서기반 배지 함수량 제어의 정량적 분석

개발한 시스템은 아래 그림과 같이 정전용량, 배지온도, 실내습도, 실내온도, 배지 전체 무게, 배액의 EC, SAF 값, 배액량, 급액량, 배액율, 광량을 실시간으로 측정할 수 있다. 이러한 시스템을 통하여 생체정보 센서(SAF)기반 관수제어시 배지 함수량을 정량화 할 수 있다. 배지에 수분 부족할 경우에 생체 신호가 미약할 경우 배지에 수분공급을 충분히 하게 한다. 배지에 수분과 광량이 충분 한데도 생체신호가 미약할 경우 식물의 병충해 감염 여부에 대하여 조사할 필요가 있다. 배지 함수량 측정 장치와 SAF를 상호 보완적으로 사용하면 이상적인 smart farm 관수 시스템을 구현할 수 있을 것이다.



<생체 정보(SAF) 신호와 배지 함수량을 실시간으로 측정된 화면>

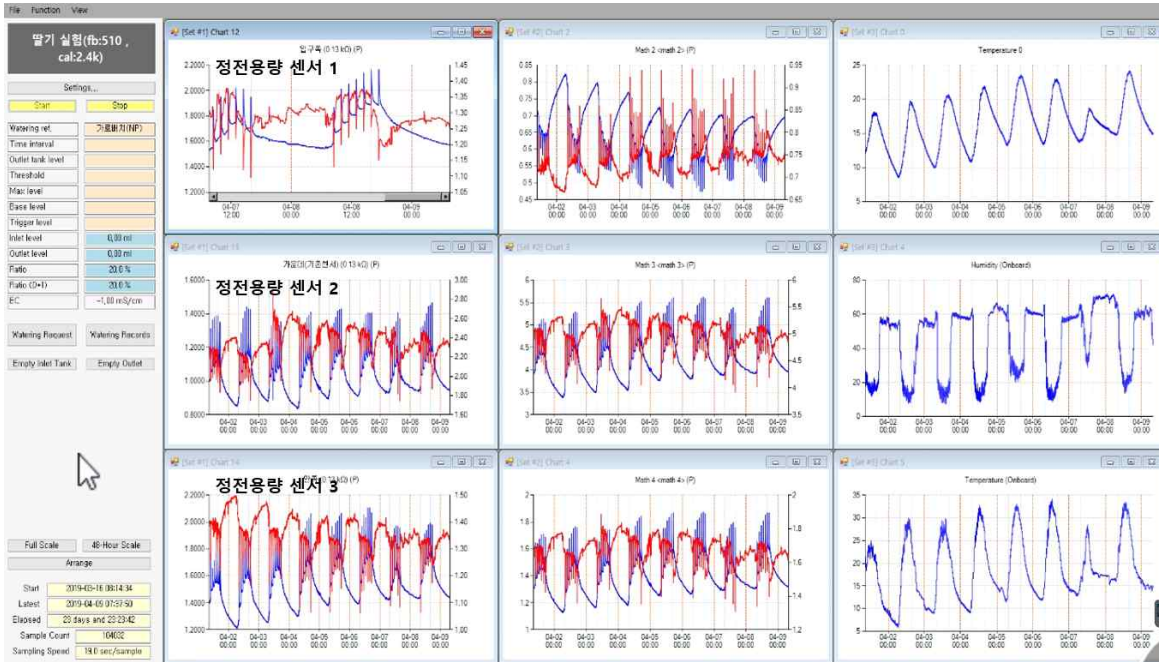
○ 현장적용 시험

개발한 함수량 측정 시스템을 경남 고성군 영오면 영회로 26에 위치한 딸기 농장에 설치하여 개발시스템이 딸기 농장에도 사용될 수 있는지를 시험하였다. 이 시험에서는 아래 그림과 같이 센서를 상토에 직접 삽입하여 설치하였다. 전자장치와 PC에 돌아가는 SW는 암면의 경우와 동일한 것을 사용하였다. 실험 결과 아래 그림에서 보는 바와 같이 관수시점에 정전용량이 급격하게 증가하고 관수를 중지하면 정전용량이 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다. 이런 결과를 통하여 개발한 함수량 측정 시스템이 딸기 상토에도 적용가능하다는 것을 확인하였다.



< 딸기 상토에 센서를 직접 삽입하여 설치한 경우 >





<정전용량 센서를 말기 상토에 설치하여 실험결과>

다. 실험 3. <관수제어 프로그램 보완 및 현장 실증>

(1) 요약

- 개발한 함수량 및 배액량 기반 관수제어 장치는 배지의 함수량을 측정하는 여러 개의 함수량 센서, 급액량 및 배액량 센서, 측정 및 제어부, 통신부, GUI(Graphic User Interface), 관수 알고리즘부, 개발 장치와 양액기를 연결하는 인터페이스부로 구성됨.
- 배지에 물이 있으면 유전율이 증가하게 되는데(물의 유전체 상수는 약 80) 배지 내 수분을 유전체로 생각하여 컨덴서를 만들면 배지 함수량이 높아짐에 따라 유전체의 유전율이 높아지고 컨덴서의 용량이 높아지고 정전용량이 커지며 Farad로 표시함. 즉 배지의 정전용량을 측정하면 배지의 함수량을 측정할 수 있음.
- 관수제어장치의 기능 및 성능은 다음과 같음.
  - 배액량과 배지 함수량을 이용한 관수제어
    - ✓ 배액량 기준으로 관수중단 기준 설정
    - ✓ 배지 함수율로 관수 재개기준 설정
  - 배지 EC 변화 추세 측정
  - 다양한 측정값, 제어 파라미터 display
  - 정전용량 방식의 배지 함수율 측정: 최대 16 센서
  - 로드셀을 이용한 배지 무게 측정, 급액량, 배액량 측정
  - 정전용량을 이용한 급액량, 배액량 측정
  - 광량측정, 배지 온도 측정, 배액 pH, EC 측정 가능
- 테스트베드 실험을 통해 정전용량값으로 fitting 방정식에 의해 계산된 함수량과 측정된 배지의 함수량(물부피(v)/배지부피(v), %)의 상관관계수가 높아 정전용량센서가 함수량을 정확하게 측정할 수 있음을 확인.
- 테스트베드 실험을 통한 최적의 관수 조건 구명
- 농가 실증 실험 결과 개발 급액제어 장치에 의한 제어방식이 농가 관행적 급액제어방식 보다 관수 효율이 높음을 확인

(2) 주요결과

가) 관수 제어 장치 개요

개발한 함수량 및 배액량 기반 관수제어 장치는 그림 3-3-1과 같이 배지의 함수량을 측정하는 여러 개의 함수량 센서, 급액량 및 배액량 센서, 측정 및 제어부, 통신부, GUI(Graphic User Interface), 관수 알고리즘부, 개발 장치와 양액기를 연결하는 인터페이스부로 구성된다. 관수 제어장치의 함수량 측정 센서와 급액/배액 측정 장치 조감도는 그림 3-3-2와 같다.

측정 및 제어부는 여러 센서로부터 데이터를 받고 센서를 제어하는 기능을 하고, GUI 부는 관수 방법을 입력하고 센서의 측정값을 display 한다. 관수 알고리즘부는 관수량, 관수 주기, 관수 중지 기준, 관수 재개 기준 등의 정보와 장치제어 방법에 대한 소프트웨어를 저장하고 있다. 배지에서 흘러나오는 배액량과 급액량을 측정하기 위하여 그림 3-3-3과 같은 급액통과 배액통을 장착하였으며, 각 통은 로드셀과 개폐 밸브를 갖고 있어 급액량과 배액량을 측정하고, 프로그램에 의하여 밸브를 자동으로 개폐할 수 있다. 또한 급액량과 배액량을 측정할 수 있어 배액율을 실시간으로 측정 가능하다. 배액량을 측정하기 위하여 그림 3-3-4와 같이 배지를 둘러쌀 수 있는 배액 수집통을 만들고, 그 통 안에 센서 홀더를 장착한다. 통신부는 유선과 무선으로 양액기에 관수신호를 보낼 수 있는데, 무선의 경우 4Km 이상 통신이 가능하다. 양액기 인터페이스는 다양한 기존 양액기를 ON/OFF 시킬 수 있게 한다.

동일한 배지라도 위치에 따라 함수량이 다르기 때문에 여러 개의 센서를 설치하여 함수량 평균값을 구하여 배지 함수량을 결정하는 것이 좋다. 현재 많이 사용되는 배지의 함수량을 측정하는 방법으로 FDR, TDR, 로드셀을 이용한 배지무게측정 등의 방법이 있다. FDR, TDR 센서는 탐침 로드가 위치한 부분의 함수량을 측정하기 때문에 배지의 극히 일부분 함수량을 측정하기 때문에 배지전체 함수량을 측정하는데 어려움이 있다. 이 센서들을 이용하여 배지전체 함수량을 측정하려면 여러 개의 센서를 배지에 설치해야 하고, 여러 개를 설치함에 따라 경제적인 문제가 있을 뿐 만 아니라 센서간의 간섭현상으로 정밀한 함수량을 측정하는데 어려움이 있다. 로드셀을 이용하여 배지무게를 측정하여 함수량을 측정하는 경우는 배지나 식물에 외부 충격이 가해질 경우 함수량이 변화하는 문제가 있다. 본 연구에서는 센서간의 간섭이 없고 배지 전체 함수량을 쉽게 측정할 수 있으며, 외부 충격에도 영향이 없는 정전용량 함수량센서를 개발하였다. 정전용량 함수량 센서가 고장 났을 때 관수제어를 위하여 배지 무게를 측정할 수 있는 로드셀도 함께 설치하였다. 또한 배지 온도와 광량도 측정할 수 있게 하여 작물 생장연구에 활용할 수 있게 하였다.

배지로부터 흘러나오는 배액을 모으는 배액 수집통과 센서를 장착하는 센서 홀더의 구조는 그림 3과 같다. 배액 수집통은 누수가 없어야 배액량에 따른 관수중단을 정확하게 제어할 수 있으므로 누수문제를 해결하기 위하여 많은 노력을 하였다. 센서 홀더 바닥면에 있는 구멍들은 배지와 센서 사이에 배액이나 양액이 흘러들어가는 것을 방지하기 위하여 만들었다. 여러 종류의 배지 크기에 대비하여 센서 홀더 크기를 다양하게 만들었다. 배액 수집통, 센서 홀더 및 센서를 설치한 사진은 그림 4와 같다.

배지로부터 흘러나오는 배액과 관수되는 관수량을 측정하기 위한 장치는 그림 3-3-5와 같다. 양액과 배액통 아래에는 로드셀이 설치되어 있어 급액과 배액량을 실시간으로 측정할 수 있으며, 배액율도 실시간으로 알 수 있다. 배액율을 실시간으로 알 수 있으므로 관수방식을 즉각 변경할 수 있다. 급액 및 배액통 아래에 전동밸브가 설치되어 있어, 프로그램에 의하여 정해진

시간에 자동이나 수동으로 통을 비울 수 있게 하였다. 전동밸브 대신 솔레노이드 밸브를 사용하는 경우에는 배액이나 급액의 이물질로 때문에 밸브가 완전하게 닫히지 않아 누수가 발생하여 급액과 양액량을 정확하게 측정할 수 없다. 급액과 배액통의 경우에도 누수를 막기 위하여 많은 노력을 기울였다. 개발한 전체 시스템의 실물 사진은 그림 3-3-6과 같다.

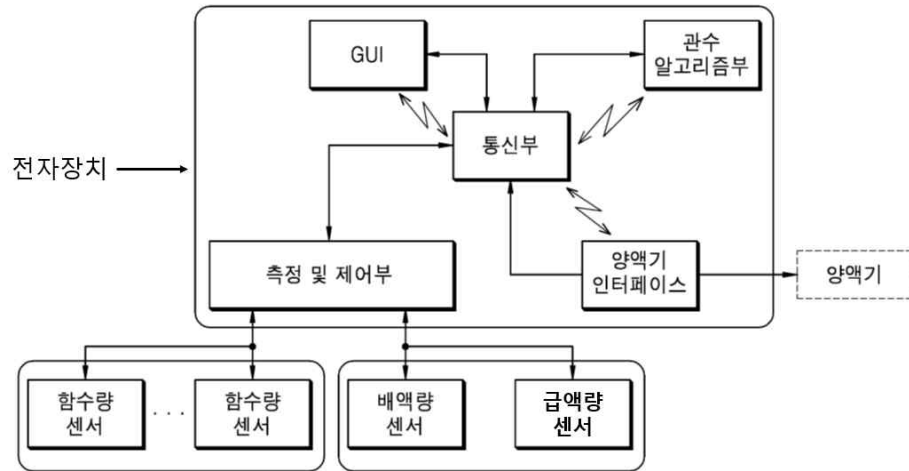


그림 3-3-1. 관수제어 장치 전체 구성도

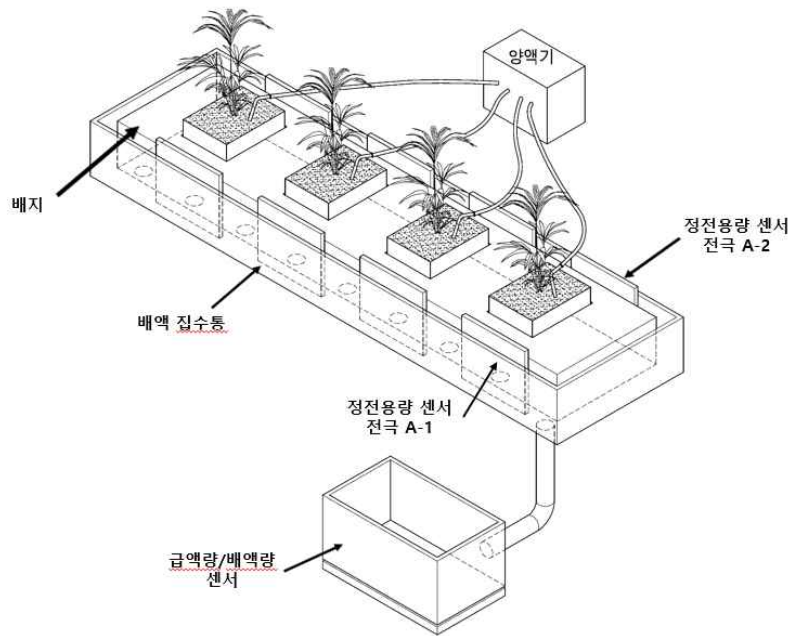


그림 3-3-2. 관수 제어장치의 함수량 측정 센서와 급액/배액 측정 장치 조감도



그림 3-3-3. 배액 수집통과 센서 holder

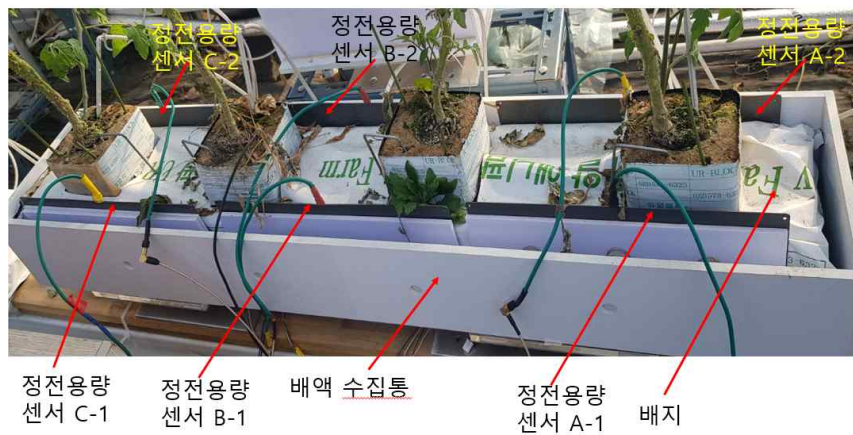


그림 3-3-4. 정전용량 센서 및 배액 수집 통 설치 사진



그림 3-3-5. 급액 및 배액 측정장치



그림 3-3-6. 전체 시스템 실물 사진

#### 나) 관수제어장치 기능 및 성능

##### ○ 주요 기능

- 배액량과 배지 함수량을 이용한 관수제어
  - ✓ 배액량 기준으로 관수중단 기준 설정
  - ✓ 배지 함수율로 관수 재개기준 설정
- 배지 EC 변화 추세 측정
- 다양한 측정값, 제어 파라미터 display
- 정전용량 방식의 배지 함수율 측정: 최대 16 센서
- 로드셀을 이용한 배지 무게 측정
- 로드셀을 이용한 급액량 측정
- 정전용량을 이용한 급액량 측정
- 로드셀을 이용한 배액량 측정
- 정전용량을 이용한 배액량 측정
- 광량측정
- 배지 온도 측정
- 배액 EC 측정 가능
- pH 측정 가능

○ 장치 메뉴

- 주화면 구성: 측정 값 display

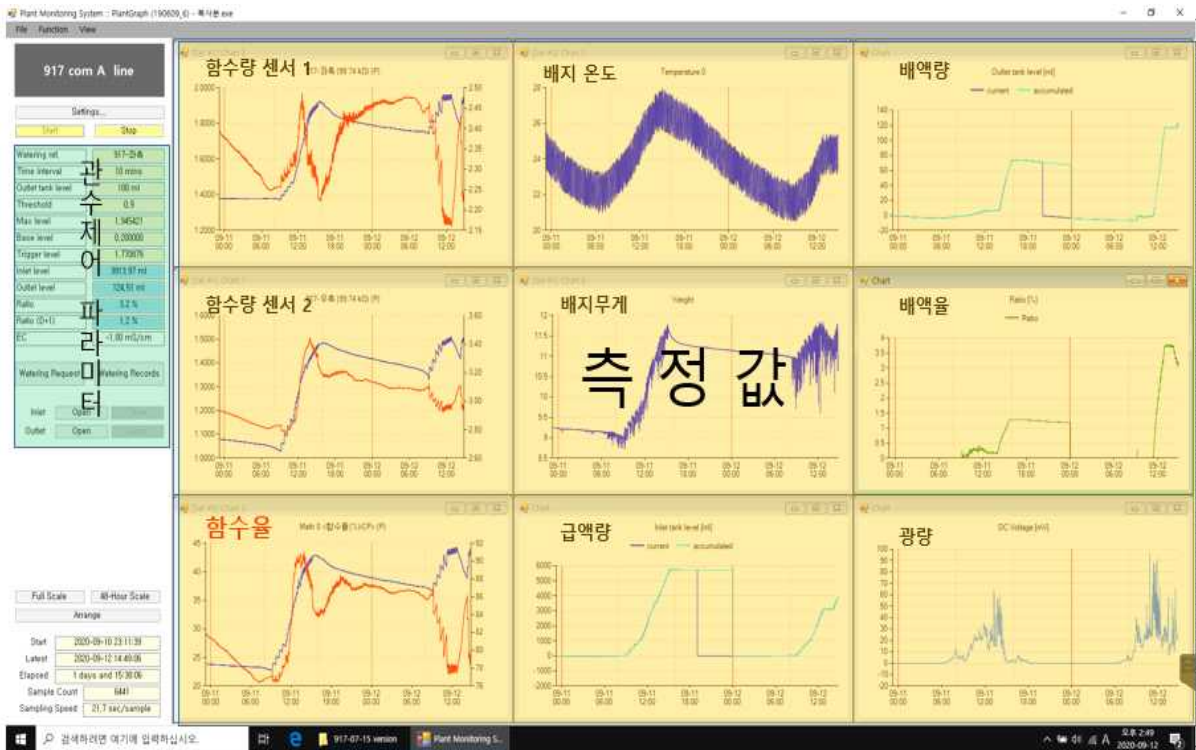


그림 3-3-7. 주화면 전체 구성

- 주화면 구성: 관수제어 파라미터 display

김해 대동

관수 방법 입력

관수 기준센서

관수주기

1회 배액량

관수 재개율

최대 정전용량 기준선

관수 재개용량

급액량

배액량

현재 배액율

어제 배액율

EC

Settings...

Start
Stop

Watering ref.	대동1-좌측
Time interval	13 mins
Outlet tank level	50 ml
Threshold	0.87
Max level	1.772030
Base level	0.200000
Trigger level	1.567666
Inlet level	7142.87 ml
Outlet level	576.58 ml
Ratio	8.1 %
Ratio (D+1)	34.7 %
EC	11.94 mS/cm

수동급액
Watering Request
Watering Records
관수기록

급액통 Inlet Open Close

배액통 Outlet Open Close

그림 3-3-8. 주화면 제어 파라미터 표시창

■ 제어정보 입력창



그림 3-3-9. 함수량 센서 선정: 최대 16채널 (Setting-Watering)

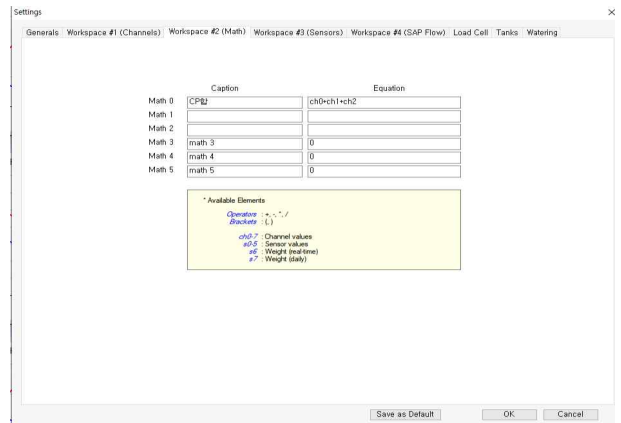


그림 3-3-10. 센서 기반 방정식 입력: 함수량 (Setting-Workspace(Math))

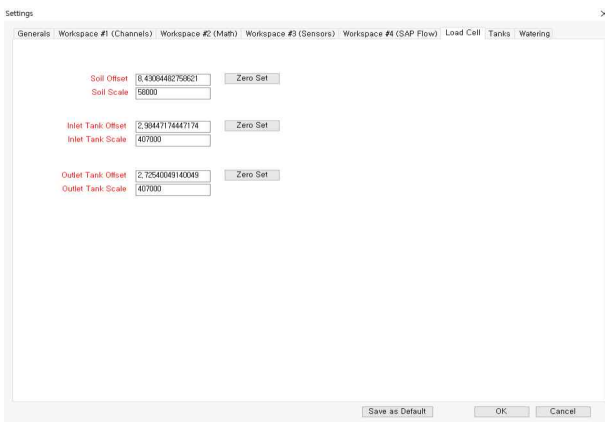


그림 3-3-11. 로드셀 영점 조절 (Setting-Load Cell)

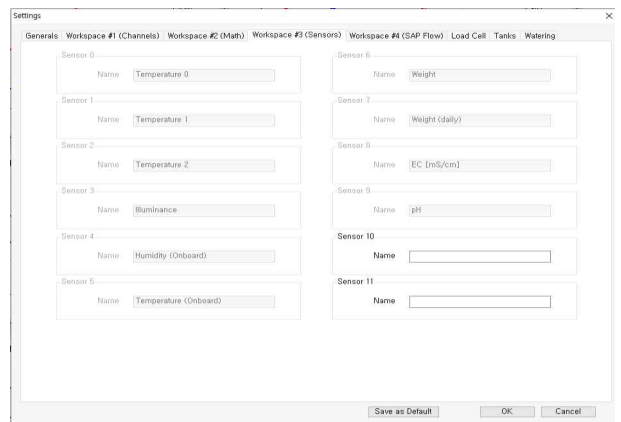


그림 3-3-12. 센서 정의 (Setting-Workspace #3)

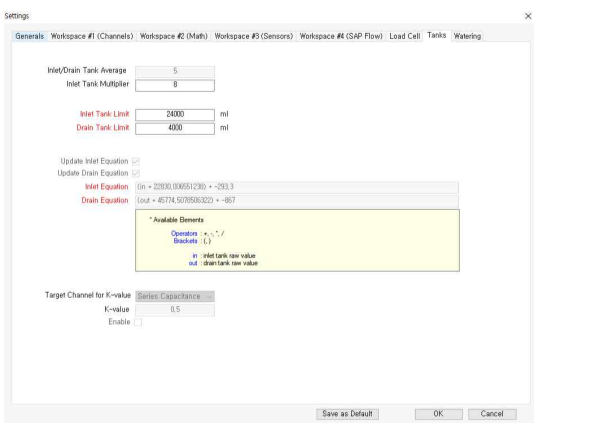


그림 3-3-13. 배지 식물 수 입력 (Setting-Tanks)

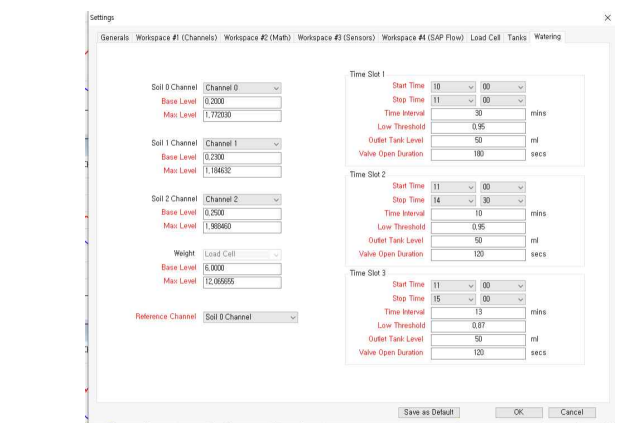


그림 3-3-14. 관수 방법 입력 (Setting-Watering)



- 화면표시 방법

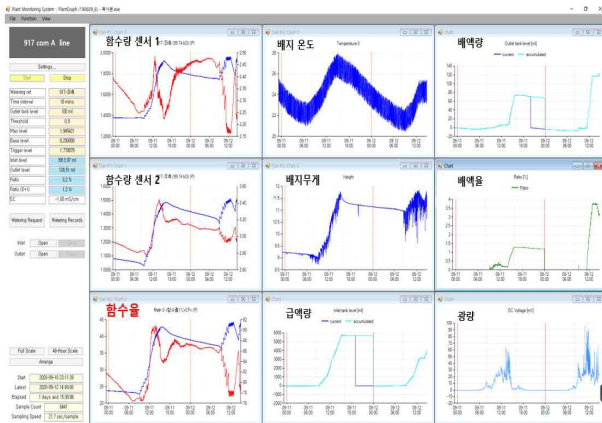


그림 3-3-15. 전체 화면

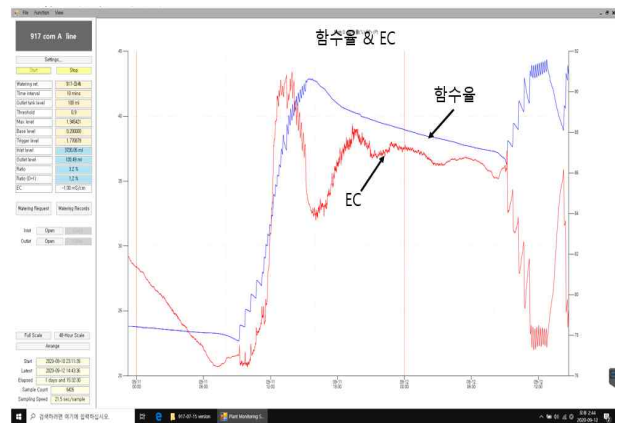


그림 3-3-16. 개별 전체 화면

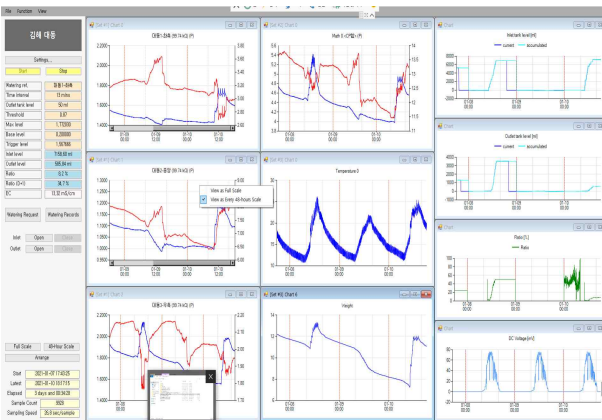


그림 3-3-17. 개별화면 48시간 선택

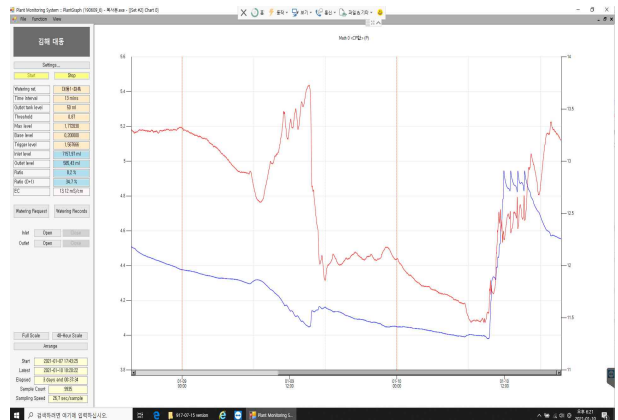


그림 3-3-18. 개별화면 48시간 전체화면

다) 개발 장치의 우수성

○ 배지의 함수량과 배액량 조절 가능

현재 대부분 스마트 팜 농가는 일사량 제어방식으로 관수 하고 있다. 이 방식은 햇빛이 강하면 온도가 올라가 증산 활동과 광합성이 활발해진다는 데 이론적 근거를 두고 있다. 증산활동과 광합성이 햇빛만의 함수가 아니고, 온도, 습도, CO<sub>2</sub> 농도, 배지의 EC 등과 같은 다양한 변수들의 함수이다. 따라서 일사량 제어방식은 식물이 원하는 시간에 관수할 수 없다. 경우에 따라서는 식물이 양액을 흡수할 수 있는데도 부족하게 관수하여 배지의 함수량이 낮아지게 되거나, 관수를 많이 하여 배액이 많아져 양액 낭비와 배액으로 인한 토양오염과 환경오염을 일으키게 된다.

본 연구는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 그림 19와 같이 배지 함수량과 배액량을 입력하게 하였다. 본 연구에서는 정전용량 센서를 이용하여 배지의 함수량을 측정하고 배지로부터 흘

러나오는 배액을 실시간으로 측정하여 함수량과 배액량을 조절한다. 관수 시작시간, 관수 주기, 관수량(시간:초)에 따라 관수를 시작하여 설정된 관수주기 동안 관수를 하면 배액통에 배액이 모이게 된다. 배액통에 모인 배액량이 1주기 배액량(1회 배액량) 이상이 되면 관수를 중단한다. 관수를 중단하면 식물이 배지로부터 양액을 흡수 하므로 배지 함수량이 줄어들게 된다. 계속 관수 하지 않으면 배지 함수량이 줄어들어 식물이 스트레스를 받게된다. 적절한 함수량에서 관수를 재개하기 위하여 관수재개 정전용량 값을 입력한다. 관수재개 정전용량 값은 1주기 배액량이 나왔을 때 정전용량 값의 비율이다. 그림 3-3-19에서는 배지 함수량이 배액 50ml가 나왔을 때 정전용량의 0.9배 즉 90%가 되었을 때 관수가 재개 된다. 배지의 함수량을 높이고 싶으면 관수재개 정전용량을 키우면 되고, 배액량을 줄이고 싶으면 1주기 배액량을 줄이면 된다.

Time Slot 1	
관수 시작 시간	Start Time: 10:00
관수 종료 시간	Stop Time: 11:00
관수 주기	Time Interval: 30 mins
관수 재개 정전용량	Low Threshold: 0.9
1주기 배액량	Outlet Tank Level: 50 ml
관수량	Valve Open Duration: 180 secs

Time Slot 2	
	Start Time: 11:00
	Stop Time: 14:30
	Time Interval: 10 mins
	Low Threshold: 0.9
	Outlet Tank Level: 50 ml
	Valve Open Duration: 120 secs

그림 3-3-19. 배지 함수량과 1주기 배액량 입력창

○ 배지 평균 수분 측정 가능

본 연구에서 발명한 센서는 배지 넓은 면적을 커버하여 배지전체 수분량을 측정할 수 있으므로 식물성장에 필요한 양액을 골고루 공급할 수 있다. 농가에서 가장 많이 사용되는 FDR 함수량 측정 센서는 탐침 로드 끝 부분의 함수량 측정하기 때문에 배지의 극히 일부분 함수량을 측정한다.

그림 3-3-20은 정전용량 함수량 센서가 설치된 동일배지의 측면부와 상부에 FDR 센서를 설치하여 함수량 변화를 관찰한 것이다. 그림 3-3-21은 본 연구에서 개발한 정전용량 함수량 센서를 이용하여 측정한 배지의 함수량 변화이다. 두 그래프는 각 그래프의 최대값으로 normalization 하였으며, 동일한 배지에 2종의 센서가 설치되었기 때문에 관수조건은 동일하다. 그림 3-3-20에 의하면 FDR 센서의 경우 최대함수량과 최소함수량의 차이는 50%이고, 배지 측면에 설치한 FDR 센서의 함수량이 배지 위 측에 설치한 FDR보다 평균적으로 43.8% 높다. 본 연구의 정전용량 함수량 센서는 최대 함수량과 최소 함수량 차이는 30% 이며 평균 함수량은

4.1% 차이를 보이고 있다. 이 결과로부터 본 과제에서 개발한 정전용량 함수량 센서가 FDR 센서 보다 배지 함수량을 정밀하게 측정할 수 있다는 것을 알 수 있다.

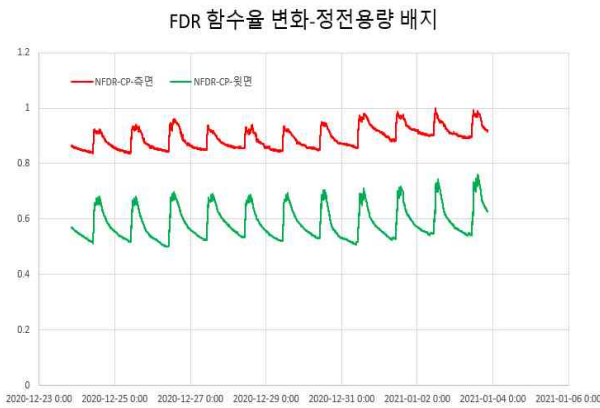


그림 3-3-20. FDR 센서 함수량 변화

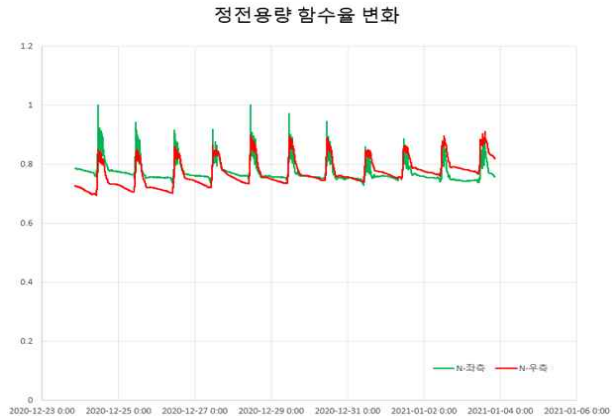


그림 3-3-21. 정전용량 센서의 함수량 변화

○ 배지의 EC 변화 측정 가능

스마트 팜에서 작물을 재배함에 있어 배지의 함수량도 중요하지만, 배지의 EC도 중요하다. 배지의 EC가 높으면 식물의 뿌리가 배지로부터 양액을 빨아들이는데 어려움이 있다. 배지의 EC는 양액자체의 EC에 의하여 결정되지만 배액량의 영향도 크다. 배지의 EC를 알기 위하여 배액의 EC를 측정하지만 배액의 EC와 배지의 EC는 다를 수 있다. 배액량이 작으면 배지에 양액이 농축되어 쌓이게 되어 배지의 EC가 올라가게 된다. 농민들이 배지의 EC를 측정하기 위하여 배액을 모으는 것도 어렵고 매일 배액의 EC를 측정하는 것 또한 번거로운 일이다. 본 연구에서 발명한 센서를 이용하면 실시간으로 배지 수분량과 EC를 동시에 측정할 수 있으므로 수동으로 EC를 측정하는 번거로움을 없앨 수 있을 뿐 만 아니라, 상용 EC 메터를 장착하는 경우보다는 별도의 EC 장치가 필요 없어 시스템 가격을 낮출 수 있다.

본 연구에서 개발한 장치의 측정화면은 그림 3-3-22와 같이 배지의 함수량에 비례하는 정전용량, EC의 역수인 저항을 표시한다. 그림 3-3-23는 저항과 EC는 역수관계 이므로 양액의 EC를 2mS에서 4mS로 변화 시켰을 때 배지에 장착된 센서로 부터 나오는 저항(R)이 줄어드는 것을 보여준다. 이 실험 결과를 통하여 본 연구에서 개발한 센서와 장치는 배지의 EC 변화 추세를 감지할 수 있음을 알 수 있다. 개발센서를 이용한 배지 EC의 절대값에 측정해서는 추가적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

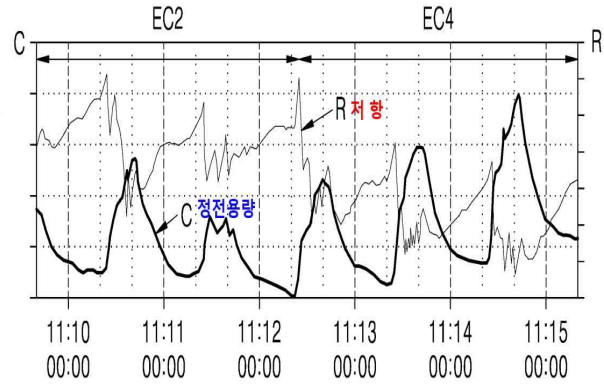
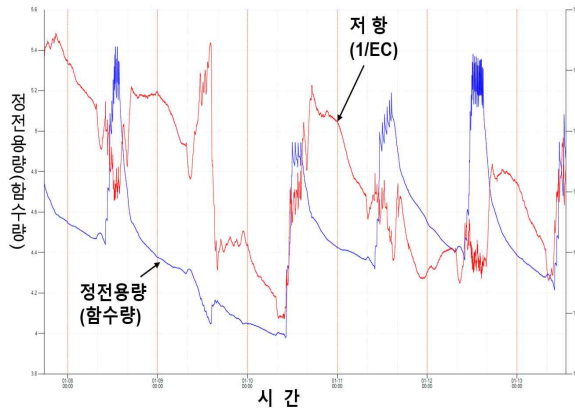


그림 3-3-22 배지 함수량(정전용량)과 EC  
 그림 3-3-23 EC 변화에 따른 저항과 정전용량 변화  
 (저항) 표시 화면

○ 비오거나 흐린 날 관수문제 해결

농가 실증결과에 의하면 일사량 제어 방식으로 관수하는 경우 관수량이 작아 다음날 식물이 극심한 스트레스를 받는다. 그림 3-3-24는 비가 오거나 흐린 날 2 관수방식(일사량 제어, 개발 관수 제어기)에 따른 배지 함수율 변화를 측정해본 것이다. 일사량 제어방식의 경우는 흐린 날 광량이 충분하지 않아 관수횟수가 작아 배지 함수율이 낮다. 그 다음날 날씨가 화창한 경우는 관수개시 전에 증산작용과 광합성 때문에 배지 함수량이 급격히 줄어들어 식물이 스트레스를 받는다. 개발관수기의 경우에는 흐린 날이라도 일단 배액이 나올 때까지 관수를 하게 되므로 배지 함수량이 어느 정도 유지된다. 배액이 나온 이후는 배지 함수량과 배액에 따라 관수를 하게 되므로 배지 함수량을 적정하게 유지할 수 있다.

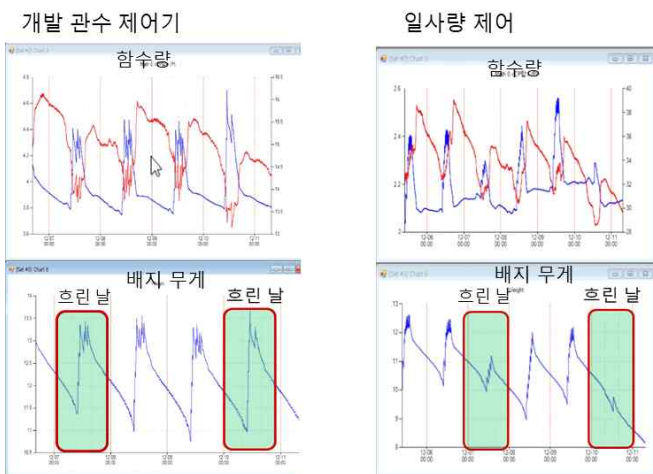


그림 3-3-24. 흐린 날 2종의 관수방식 비교

○ 외부 충격에 강함

앞서 언급한 바와 같이 현재 스마트팜에서 일반적으로 사용하는 배지 함수량을 측정하는 방법으로 로드셀을 이용한 배지 무게 측정, FDR 센서를 이용한 함수량 측정 등이 있다. 배지무게를 이용한 함수량측정은 배지전체 함수량을 측정할 수는 있으나 과일수확, 유인줄 이동, 바람 등으로 인하여 배지 무게가 변할 때, 배지 함수량이 변하는 것과 같은 착각을 할 수 있어 관수 제어 기준으로 사용하는데 어려움이 있다. FDR 센서는 약한 외부 충격으로 인한 영향은 없으나, 설치된 위치에 국한하여 함수량을 측정할 수 있으므로 배지전체 함수량을 측정할 수 없다. FDR로 배지전체 함수량을 측정하기 위해서는 많은 센서를 설치해야한다.

본 연구과제에서 개발한 센서는 전극이 배지전체를 커버하게 설치되므로 배지전체 함수량 측정이 가능하다. 그리고 센서 전극이 배지 양측에 센서 홀더와 배지 사이에 꼭 밀착되어 설치되기 때문에 과일수확, 유인줄 이동 등의 외부 충격으로부터 영향을 전혀 받지 않는다. 그림 3-3-25는 외부 바람이 심한 실험농장에 본 연구과제에서 개발한 정전용량 센서를 이용한 함수량과 배지무게를 이용한 함수량 특성을 보여준다. 외부 바람이 심하기 때문에 유인줄에 묶인 토마토가 흔들림에 따라 배지도 함께 흔들리게 되어 그림 3-3-25의 우측 아래 그래프에서 나타난 바와 같이 배지 무게가 심하게 변하는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 3-3-25의 좌측 위에 나타난 본 연구에서 개발한 센서 함수량 값은 외부 충격에 의한 변화가 없음을 알 수 있다. 배지나 식물에 외부 충격이 심한 환경에서 배지무게를 이용하여 관수제어를 하는 것은 불가능하다.

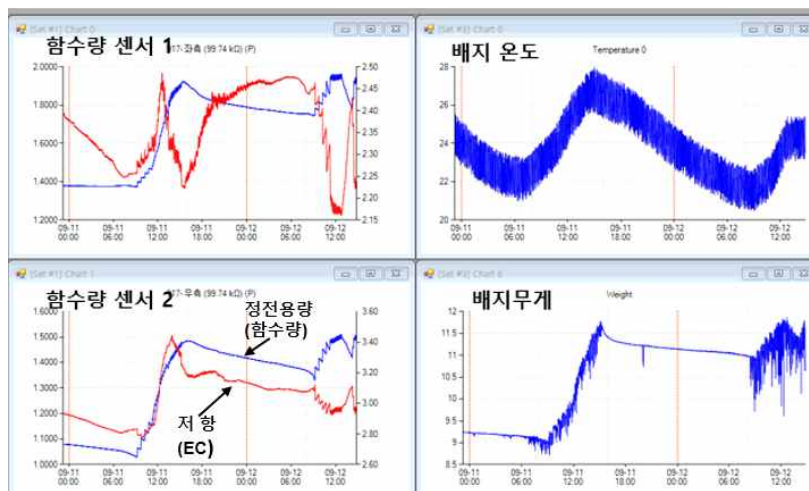


그림 3-3-25 정전용량 센서와 로드셀을 이용한 배지 함수량 특성

○ 식물생장 연구에 필요한 다양한 data 수집 가능

개발 장치는 농장 운영에 필요한 다양한 데이터에 대한 정량적인 값을 그래프로 표시하거나 Excel data 형태로 출력한다. 개발 장치에서 얻을 수 있는 정보는 아래와 같다. 이러한 정보는 식물생장 연구에 유용하게 사용될 것이다.

- 정전용량 센서 값: 최대 16개 센서
- 급액량
- 배액량
- 배액을
- 급액/배액의 EC
- 급액/배액의 PH
- 배지무게
- 광량
- 배지 온도
- 환경 온도
- 환경 습도

라) 정전용량 함수량 센서 원리

일반적으로 토양의 비유전율은 3~5 정도이나, 물의 비유전율은 80 정도이다. 토양에 물이 있으면 유전율이 증가하게 된다. 토양을 유전체로 생각하여 커패시터를 만들면 토양의 함수량에 따라 유전체의 유전율이 변하게 되어 커패시터의 용량이 변하게 된다. 커패시터의 용량을 정전용량이라고 하며 Farad로 표시한다. 즉 토양에 수분이 많으면 유전율이 커지게 되어 정전용량이 커진다. 배지의 정전용량을 측정하면 배지의 함수량을 측정할 수 있다.

커패시터는 그림 3-3-26과 같이 유전체의 양측에 도체 전극의 붙여서 만들고, 커패시터의 용량은 식 (1)로 표시할 수 있다.

$$C = \frac{\epsilon A}{d} \quad (1)$$

여기서  $\epsilon$ 은 유전율, A는 마주보는 정전용량 전극의 면적, d는 두 전극 간의 거리를 나타낸다.

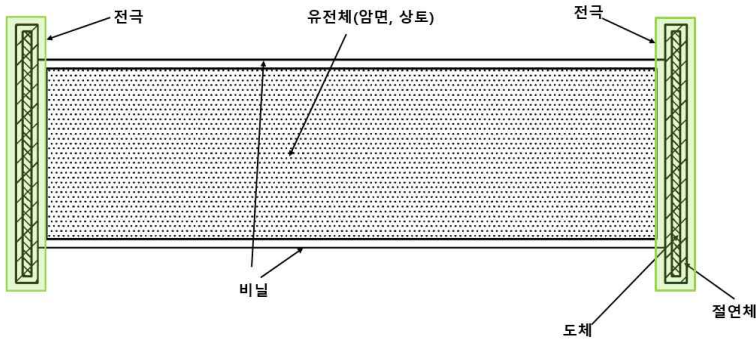


그림 3-3-26. 배지를 유전체로 했을 때 컨덴서 구조

배지양측에 금속전극을 부착하여 교류신호를 인가하여 임피던스를 측정하면 식 (2)와 같이 실수부(R)과 허수부(X)로 표시되는데, 실수부는 저항, 허수부는 리액턴스 성분이다. 그리고 임피던스는 크기( $Z_m$ )와 위상( $\theta$ )으로 표시될 수 있고, 위상 값 양이면 인덕터, 음이면 커패시터 이다. 그린 하우스 배지 즉 인공토양과 양액이 혼합된 배지의 임피던스를 측정하여 허수부를 구하면 배지의 정전용량을 구할 수 있다. 배지의 경우는 컨덴서가 되므로 위상 값은 음의 값을 가진다.

$$Z = R + jX = Z_m \angle \theta \quad (2)$$

배지와 같은 직선형 구조의 저항은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = (1/\sigma)L/A \quad (3)$$

여기서  $\sigma$ , L, A는 각각 물질의 전도도(electric conductivity: EC), 길이 및 면적을 나타낸다. 식 3에서 전도도가 커지면 저항이 작아지는 것을 알 수 있다. 저항이 작아지면 임피던스도 작아진다. 기하학적으로 복잡한 구조의 컨덴서라고 할지라도 저항(R)과 커패시턴스(C)은 식 (4)와 같이 표시된다. 저항과 컨덴서의 임피던스 크기가 비슷하면 식 (4)에 의하여 R이 증가하면 C가 감소하고 반대로 C가 증가하면 R이 감소한다. 만약 유전율( $\epsilon$ )이나 전도도의 임피던스가 다른 하나보다 월등히 크면 큰 변수에 따라 변화한다. 배지의 유전율은 재질의 종류나 수분의 상태에 따라 변화가 큰 편이다.

$$R.C = \epsilon/\sigma \quad (4)$$

본 연구는 위 원리를 이용하여 스마트팜에 사용되는 배지 전체수분과 EC를 측정할 수 있는 정전용량 형 수분센서를 만들었다.

컨덴서 동작원리를 비전공자들이 이해할 수 있게 설명하면 다음과 같다. 절연체로 코팅된 전극을 그림 3-3-27과 같이 배지 양측에 마주보게 2전극을 설치하여 한 전극에 교류전압을 걸면

그 전극에서 나온 전자과가 배지를 통과하여 반대편 배지에 도달한다. 배지에 수분이 많이 있으면 반대편 전극에 전자과가 작게 도달한다. 이러한 원리를 이용하면 배지의 수분량 측정이 가능하다. 정전용량을 측정하기 위해서는 반드시 2 전극 사이에 교류 전압을 가해줘야 하며, 직류전압을 가하는 경우 정전용량을 측정할 수 없다. 그리고 2 전극은 그림 3-3-26과 같이 확실하게 방수 및 절연이 되어야 한다. 배지에 일정 주기로 양액을 관수했을 때 배지 무게를 전자저울로 측정하면서 정전용량을 측정한 결과를 그림 3-3-28에 나타내었다. 그림 3-3-28에서 양액 공급에 따라 배지 무게가 증가하고 동시에 정전용량이 증가하는 것을 알 수 있다. 정량적 분석에 의하면 배지무게와 정전용량의 상관계수가 0.998 이상이었다. (본보고서 함수량 정량화 분석 참조)

본 연구는 위 원리를 이용하여 스마트 팜에 사용되는 배지 전체수분과 EC를 측정할 수 있는 정전용량 형 수분센서를 만들었다. 개발된 센서는 그림 3-3-29와 같으며 크기는 다양한 배지에 사용 가능하게 30x12 cm<sup>2</sup> 로 규격화 하였으며, 센서를 실제로 설치한 사진은 그림 3-3-30과 같다.

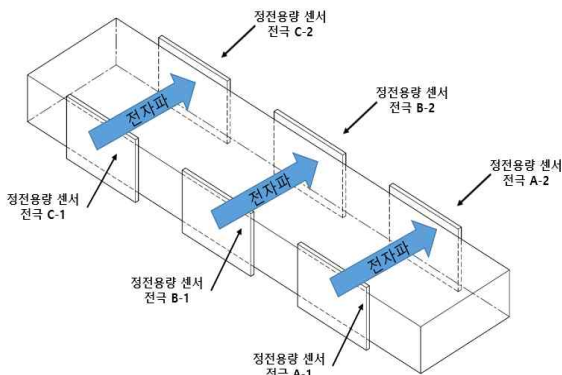


그림 3-3-27 정전용량 함수량 센서 동작 원리

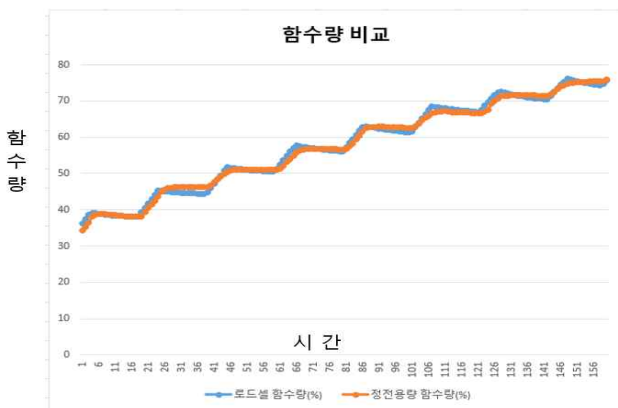


그림 3-3-28 정전용량과 배지 무게의 상관관계



그림 3-3-29 개발된 정전용량 센서



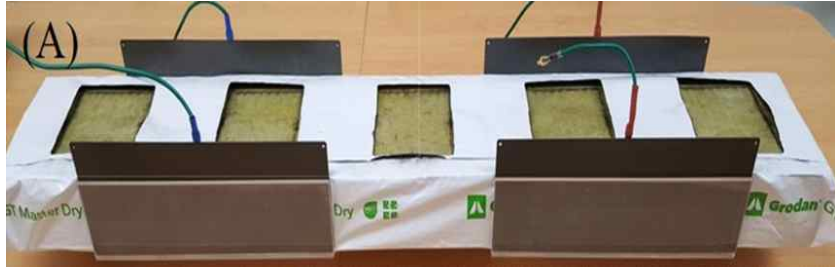


그림 3-3-30. 배지에 2개의 정전용량 센서를 설치한 장면

마) 장치개발

○ 전자장치 개요

개발한 장치의 전체 구성은 그림 3-3-31에 나타난 바와 같이 함수량 센서, 배액량 센서, 및 제어장치로 구성되고, 제어장치는 측정 및 제어부, GUI(graphic user interface)부, 관수 알고리즘 부, 양액기 인터페이스 부, 및 통신부를 포함한다. 측정 및 제어부는 함수량 센서의 측정값을 기초로 배지의 함수량을 측정하고, 배액량 센서의 측정값을 기초로 배지의 배액량을 측정하며, 측정된 함수량과 배액량을 기초로 배지에 공급되는 양액공급을 제어한다.

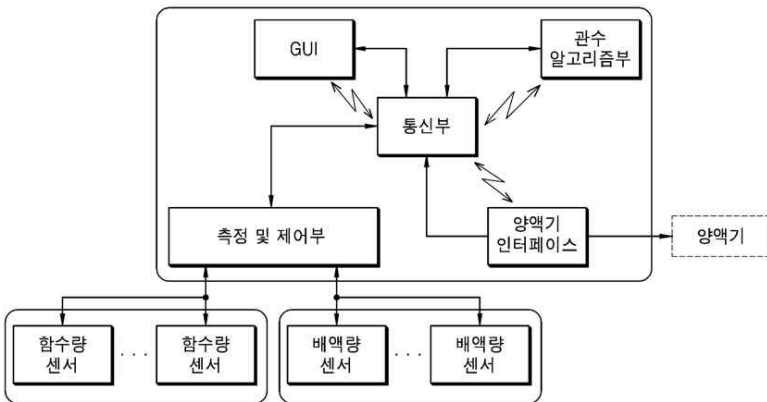


그림 3-3-31. 장치 전체 구성도

배지의 함수량은 정전용량 센서를 이용하여 측정 및 제어부에서 측정한다. 함수량 센서의 제 1 전극판과 제2 전극판에 정현파 교류를 인가하여 제1 전극판과 제2 전극판 사이의 임피던스를 측정하고 측정된 임피던스를 바탕으로 배지의 함수량 및 그 변화를 측정한다. 배지, 즉 인공토양과 양액이 혼합된 배지의 임피던스를 측정하여 임피던스의 허수부를 구하면 배지의 커패시턴스를 구할 수 있다. 배지에 수분이 많아지면 유전율이 커지게 되어 컨덴서 정전용량 (커패시턴스, C)이 커지게 되므로 커패시턴스를 통해 배지의 함수량 또는 그 변화를 측정할 수 있다.

임피던스 측정을 위해 측정 및 제어부는 그림 3-3-32에 도시한 바와 같이 제1, 2 전극판에 인가할 정현파 교류를 생성하는 PLL, 정현파 교류를 소정의 크기로 증폭하는 증폭부, 임피던스 측정부, 여러 개의 전극 센서 중에서 임피던스를 측정할 전극 센서를 선택하기 위한 멀티플렉서(multiplexer, MUX)가 있다. 이러한 제1 전극판과 제2 전극판을 구비한 정전용량 센서를 이용하여 배지의 함수량을 측정하는 구성 등에 대한 내용은 본 연구 팀의 공개된 선행 특허출원 (대한민국 공개특허공보 제10-2020-0112030호, 공개일자: 2020.10.05.)에 구체적으로 설명되어 있다.

배지의 배액량은 로드셀과 같은 배액량 센서를 이용하여 측정 및 제어부에서 측정할 수 있다. 측정 및 제어부는 배액량 센서인 로드셀에서 실시간으로 측정된 배액통의 하중값을 수신하여 배액통에 유입되는 배지의 배액량 및 그 변화를 측정한다. GUI(Graphic User Interface)부는 배지의 함수량, 배지의 배액량, 제어상태, 측정된 변수 값을 이용하여 만든 함수를 그래프로 표시하고 제어 변수들을 입력하기 위한 것으로서, 배지의 함수량과 배액량이 측정되는 배지에 배치하거나 유무선을 통하여 연결되는 중앙관수제어 컴퓨터(미도시)에 배치될 수 있다.

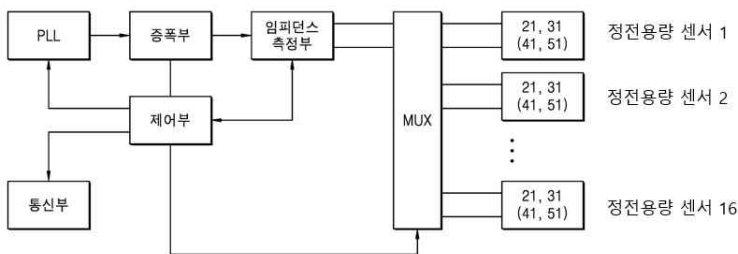


그림 3-3-32. 임피던스 측정을 위한 전자장치 구성도

관수 알고리즘부는 통신부로부터 수신한 배지의 함수량과 배액량 측정 데이터를 바탕으로 미리 정해진 프로그램에 따라 관수신호를 생성하는 분으로서 관수 알고리즘은 컴퓨터나 ROM에 저장될 수 있다. 관수 알고리즘부는 배지의 함수량과 배액량이 측정되는 배지에 배치하거나 유무선을 통하여 연결되는 중앙관수제어 컴퓨터에 배치될 수 있다. 양액기 인터페이스부는 여러 종류의 양액기에 딸린 모터를 ON/OFF 제어하기 위하여 양액기와 제어장치의 다른 구성 부분을 연결하는 부분이다. 통신부는 각각의 측정 및 제어부, GUI(graphic user interface)부, 관수 알고리즘부, 양액기 인터페이스부를 유무선으로 서로 연결하여 상호간에 정보나 신호를 송수신할 수 있게 한다.

제어장치의 동작을 순서대로 설명하면, 먼저 각각의 함수량 센서와 배액량 센서에서 측정된 측정값을 측정 및 제어부에서 수신하여 이를 토대로 함수량 측정 데이터와 배액량 측정 데이터를 생성하고 이를 통신부를 매개로 관수 알고리즘부에 전송한다. 관수 알고리즘 부는 함수량

측정 데이터와 배액량 측정 데이터를 토대로 미리 정해진 프로그램에 따라 관수신호를 생성하여 통신부를 매개로 측정 및 제어부로 관수신호를 전송한다. 측정 및 제어부는 관수신호를 수신하여 이를 기초로 양액기의 모터를 ON/OFF하거나 또는 양액이 공급되는 배관이나 호스 등에 설치된 관수밸브(미도시)를 개폐하는 제어신호를 생성하여 양액기 인터페이스 부로 전송한다. 양액기 인터페이스 부는 제어신호를 수신하여 이에 따라 양액기의 모터나 관수밸브를 작동시킨다. 한편 사용자는 GUI(Graphic User Interface)부를 통해 여러 가지 제어 변수들을 입력할 수 있으며, GUI부에 나타나는 배지의 함수량, 배지의 배액량, 제어상태 등에 관한 그래프를 실시간으로 확인할 수 있다.

## ○ 하드웨어 개발

본 연구에서 개발한 장치는 하드웨어와 소프트웨어로 구성되며, 하드웨어는 다시 전자장치와 기계적인 구조물로 구성된다.

### - 전자장치

전자장치는 배지의 정전용량 측정을 위하여 정현파 신호를 만들고 증폭하여 정전용량 센서의 전극에 인가하여 임피던스(정전용량)를 측정하는 기능, 관수제어, 함수량 측정, 통신, PC와 인터페이스 등의 일을 수행한다. 전자장치는 여러 종류의 센서를 인터페이스 하는 회로, 여러 센서를 순차적으로 측정할 수 있게 하는 MUX array, 하드웨어 장치를 제어하고 PC와 통신하는 아두이노 보드, 무선 통신을 위한 LoRa 모듈, 로드셀로 부터 오는 무게정보를 얻는 모듈로 구성된다. 아두이노 CPU에 내장될 펌웨어는 별도로 코딩하였다. 전체 하드웨어를 그림 3-3-33과 같이 회로를 설계 하였다. 설계된 총 회로도도 그림 3-3-33과 같은 회로도도 8장이다. 설계된 회로도도를 제작하기 위하여 PCB 제작, 전자부품 조립, 테스트 과정을 거쳐 최종적으로 전자장치 하드웨어를 완성하였다.

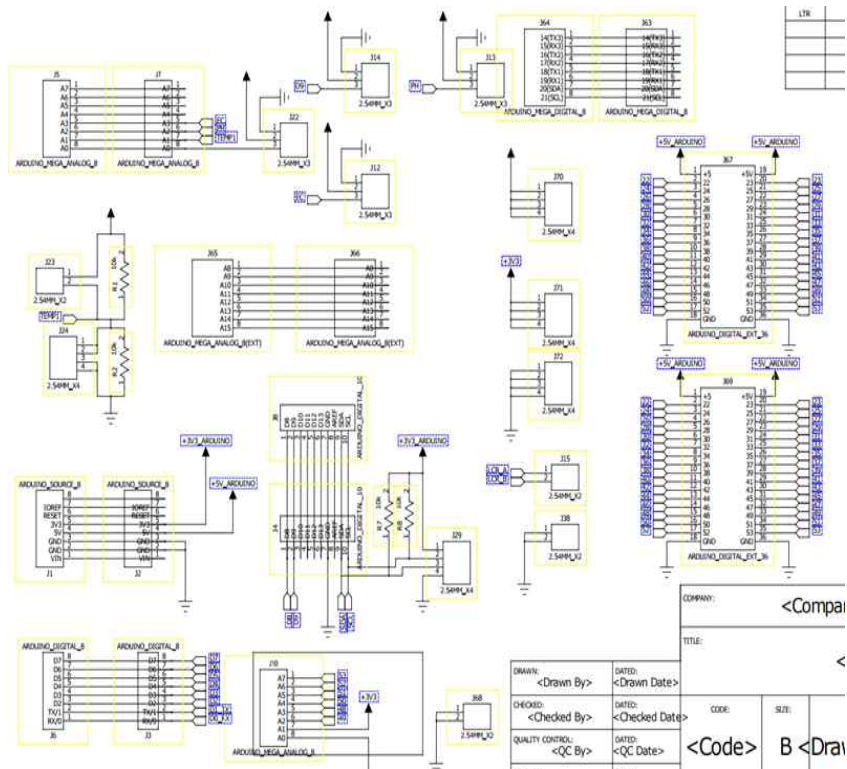


그림 3-3-33. 전자장치의 회로 일부

상품화 모델 개발하기 위하여 배지, 배액, 급액 측정을 위한 보드를 그림 3-3-34~35과 같이 전자장치 내부에 설치하고 배선을 간결하게 하였다. 이렇게 함으로써 안정적인 배지무게, 급액 및 양액 측정이 가능하고 방수효과도 있다. 상품모델을 위하여 케이스도 그림 3-3-36~37와 같이 변경하였다.

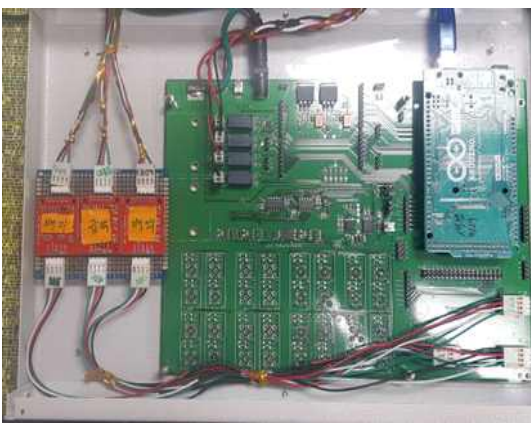


그림 3-3-34. 상품화 모델 내부사진



그림 3-3-35. 2차년 모델 내부사진

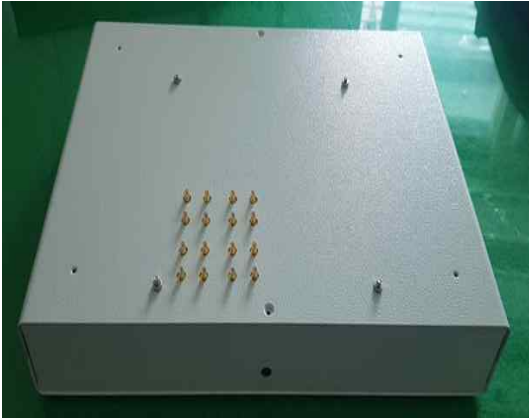


그림 3-3-36. 상품화 모델 외관사진



그림 3-3-37. 2차년 모델 외관사진

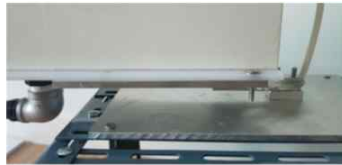
- 로드셀

개발 장치는 배지무게, 급액무게, 배액무게를 로드셀을 이용하여 측정한다. 무게를 상용화한 전자저울을 사용하여 측정할 경우 가격이 비싸고, 장치의 부피가 커지는 문제가 있어 실용적이지 않다. 본 연구에서는 무게를 측정하는 부품(로드셀)을 구입하여 전자저울을 만들어 이러한 문제를 해결하였다. 전자저울을 만들기 위해서 로드셀을 장착하기 위한 구조물 설계, 구조물 재질에 따른 로드셀의 온도변화를 최소화하기 위한 노력을 하였다. 로드셀 개발과정과 장착장면과 완성된 전자저울을 그림 3-3-38에 나타냈다.

로드셀의 동작원리는 로드셀에 압력이 가해지면 압력의 세기에 비례하는 전압이 나온다. 이 전압을 전자장치에서 무게로 환산한다. 배액통은 하나의 배지에서 나오는 배액량을 측정하고, 급액통은 하나의 점적판에서 나오는 양액을 측정하므로 하나의 배지에 설치된 점적판 수를 별도로 입력할 수 있게 하였다.



로드셀 장착



로드셀 급/배액통 장착



완성된 전자저울



배지용 전자저울

그림 3-3-38. 로드셀 장착 및 완성된 전자저울

- 전동밸브 장착

스마트 팜 운영에 있어 급액 및 배액을 측정하는 것은 중요한 일이다. 현재 농가에서는 매일 비이커를 사용하여 급액과 배액을 측정하고 버린다. 이러한 불편을 없애기 위해서 개발 장치는 하루의 관수가 끝난 시점(저녁 7, 8시)에 급액통과 배액통을 자동으로 비우게 전동밸브를 장착하였다. 그리고 배액통과 급액통의 량이 일정량 이상이 되면 자동으로 비울 수 있게 그림 3-3-39과 같이 세팅할 수 있다. 그리고 급액통과 배액통을 수동으로 비울 수 있게 하였다. 급액통은 하나의 점적핀에서 공급되는 양액량을 측정하기 때문에 배지에 공급되는 전체 양액을 측정하기 위해서는 그 배지에 설치된 점적핀 수를 입력하도록 그림 3-3-39과 같은 창을 만들었다.



그림 3-3-39 급액/배액통 비움량 및 점적핀 수 설정

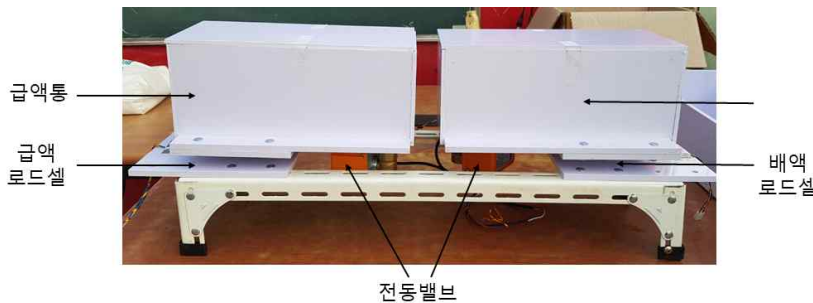


그림 3-3-40. 급/배액통에 전동 밸브 및 로드셀을 설치한 사진

- 기구물 설계 및 제작

본 세부과제는 함수량 센서 부터 관수 제어시스템을 개발하는 것이다. 이러한 광범위한 내용을 커버하기 위해서는 함수량 센서, 전자장치, 소프트웨어 개발과 기구 설계 및 제작 등의 일을 수행하였다. 기구개발은 배지에서 흘러나오는 배액을 모으기 위해서 배지를 둘러싸는 배액 수집통, 급액과 배액을 모으는 급/배액통, 센서 장착용 구조물, 로드셀 설치용 구조물, 급/배액통 설치용 앵글 등을 포함한다. 배액 수집통은 다양한 크기의 배지에도 사용될 수 있게 만들었다. 여러 종류의 통은 변형과 내구성을 고려하여 ABS 재질을 사용하였다. 각 통들의 누수를 없애기 위하여 많은 시행착오를 겪었으며, 각고의 노력 끝에 누수 문제를 완전하게 해결하였다.

개발한 기구물들은 그림3-3- 41에 나타나 있다.

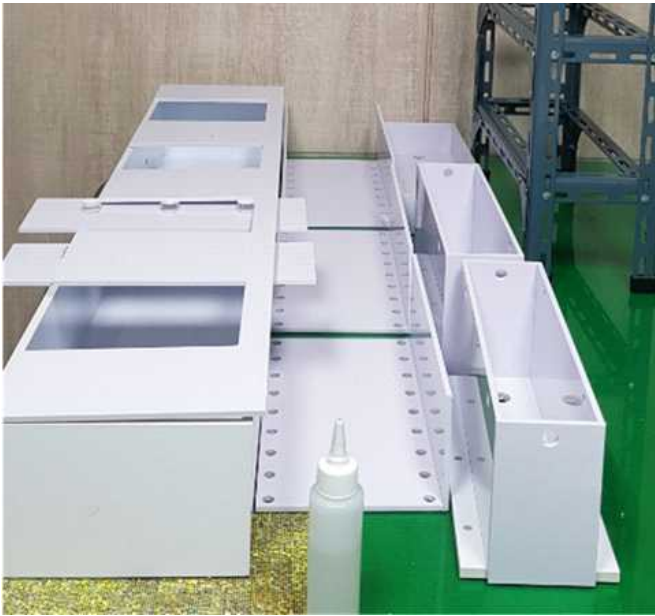


그림3-3-41. 개발한 기구물

○ SW 개발

개발 장치의 소프트웨어는 그림 3-3-42에 표시한 바와 같이 시스템 동작 상태 출력, Data 출력 파일, 각종 센서 인터페이스, PC에서 돌아가는 메인 프로그램, 주요 변수 저장 프로그램으로 구성된다.

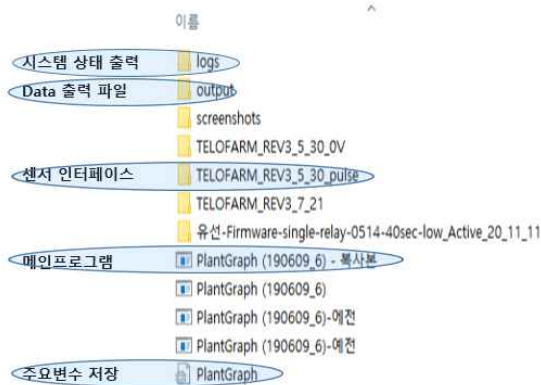


그림 3-3-42 전체 SW 프로그램 폴더

PC에서 돌아가는 메인 프로그램은 관수제어를 위한 핵심 프로그램으로 시스템이 관수제어 파라미터 입력, 입력 파라미터에 따른 관수제어, 측정결과 display, 현재제어 파라미터 표시, display 방법 변경, 사용채널 선택, 수학공식 입력, 로드셀 초기화, 급/배액탱크 설정, 관수 수동

제어, 급/배액통 수동 개폐 등의 기능을 하게 한다. 프로그램은 C언어와 C# 언어로 코딩 되었 으며 소스코드 폴더는 그림 3-3-43과 같으며 52개의 소스코드를 갖고 있고 소스코드는 그림 3-3-44과 같은 형태 이며 코드 크기는 압축 파일로 52.3MB 이다.

파일명	압축크기	원본크기	압축률	종류
..				로컬 디스크
bin				로컬 디스크
obj				로컬 디스크
Properties				로컬 디스크
App.config	139	189	26%	CONFIG 파일
Arduino.cs	5,115	25,430	80%	CS 파일
AutoDetectDevicesClass.cs	1,465	7,689	81%	CS 파일
CalcTankLevel.cs	903	3,621	75%	CS 파일
CommunicationClass.cs	11,349	66,750	83%	CS 파일
CustomChart.cs	312	822	62%	CS 파일
Dataset.cs	3,477	17,005	80%	CS 파일
EcValve.cs	1,250	4,793	74%	CS 파일
ExportDataAsTxt.cs	1,959	9,069	78%	CS 파일
ExportDataAsXlsx.cs	2,162	11,325	81%	CS 파일
ExportRawData.cs	1,397	5,398	74%	CS 파일
Fdr.cs	1,045	4,496	77%	CS 파일
FodyWeavers.xml	70	79	11%	XML 문서
Form1.cs	10,838	79,899	86%	CS 파일
Form1.Designer.cs	7,031	67,218	90%	CS 파일
Form1.resx	1,574	6,216	75%	RESX 파일
Form2.cs	204	407	50%	CS 파일
Form2.Designer.cs	596	1,525	61%	CS 파일
Form2.resx	1,497	5,817	74%	RESX 파일
Form4.cs	466	1,357	66%	CS 파일
Form4.Designer.cs	1,071	4,931	78%	CS 파일
Form4.resx	1,497	5,817	74%	RESX 파일
formChart.cs	1,458	6,938	79%	CS 파일
formChart.Designer.cs	1,355	8,259	84%	CS 파일
formChart.resx	1,561	6,022	74%	RESX 파일
formCustomWorkspaceSettings.cs	1,064	5,400	80%	CS 파일
formCustomWorkspaceSettings.Designer.cs	1,671	11,258	85%	CS 파일

그림 3-3-43. 메인 프로그램 소스코드 폴더 일부

```

namespace PlantGraph
{
    public class Arduino
    {
        const int MAX_RETRY = 3;
        const int WATERING_MAX_RETRY = 1;

        public delegate void Log_Callback(string Text);

        private SerialPort m_Port = null;
        private Log_Callback LogCallback;
        public bool WateringBusy { get; private set; } = false; // 급액 요청 후 급액 장치가 작동하는 동안에는 true 로 설정된다.

        public bool Open(string PortName)
        {
            m_Port = OpenSerialPort(PortName, 9600);
            if (m_Port.IsOpen)
                return true;
            else
                return false;
        }

        public bool Close()
        {
            CloseSerialPort(m_Port);
            if (m_Port.IsOpen == false)
                return true;
            else
                return false;
        }
    }
}

```

그림 3-3-44. 소스 프로그램 코드 일부

각종 센서 인터페이스는 전자장치에 있는 아두이노 펌웨어이다. 전자장치의 보드가 제작된 후 아두이노 모듈을 장착한 후, 인터페이스 프로그램을 업로드한다. 이 프로그램은 전자장치의



여러 센서 및 제어부품을 메인 프로그램이 돌아가는 PC와 연결하는 것으로 정전용량 센서 16 채널, 급/배액통 및 배지 로드셀, 급/배액통 개폐를 위한 전동밸브 2개를 인터페이스 한다. 그리고 이 소프트웨어는 개발한 장치가 설치된 배지의 정보를 바탕으로 양액기 모터를 ON/OFF 시키는 신호를 무선으로 보내는 기능을 한다. 이 프로그램 소스 코드는 그림 3-3-45와 같으며 코드 길이는 A4용지로 8페이지 분량이다.

```

{
  Serial.print("#46,");

  for(int i=0;i<10;i++) //Get 10 sample value from the sensor for smooth the value
  {
    buf[i]=analogRead(SensorPin);
    delay(10);
  }
  for(int i=0;i<9;i++) //sort the analog from small to large
  {
    for(int j=i+1;j<10;j++)
    {
      if(buf[i]>buf[j])
      {
        temp=buf[i];
        buf[i]=buf[j];
        buf[j]=temp;
      }
    }
  }
  avgValue=0;
  for(int i=2;i<8;i++) //take the average value of 6 center sample
  avgValue+=buf[i];
  float pHValue=(float)avgValue*5.0/1024/6; //convert the analog into millivolt
  pHValue=3.5+pHValue; //convert the millivolt into pH value
}

```

그림 3-3-45 Aduino 소스 프로그램 일부

바) 정전용량 센서 함수량 정량화 실험

○ 실험장치

정전용량 센서의 용량 즉 capacitance 값을 함수량으로 환산하기 위하여 그림 3-3-46와 같은 실험 장치를 개발하였다. 5구 암면 배지(15x7.5x100cm)에 2쌍의 정전용량 센서를 설치하고 배지로부터 흘러나오는 배액 수집통 아래에 2개의 전자저울을 설치하였다. 양액은 수중펌프를 통하여 양액을 공급되고 수중 펌프는 타이머를 이용하여 ON/OFF 시켰다. 양액을 공급하기 전에 저울의 영점을 잡아 양액 공급이후의 저울무게는 양액무게만 측정하게 하였다. 양액공급에 따른 정전용량과 전자저울 값 측정은 개발 장치의 소프트웨어를 이용하였다. 실험에 사용된 양액의 EC는 2mS 이며 실제 실험 장치는 그림 3-3-47과 같다.

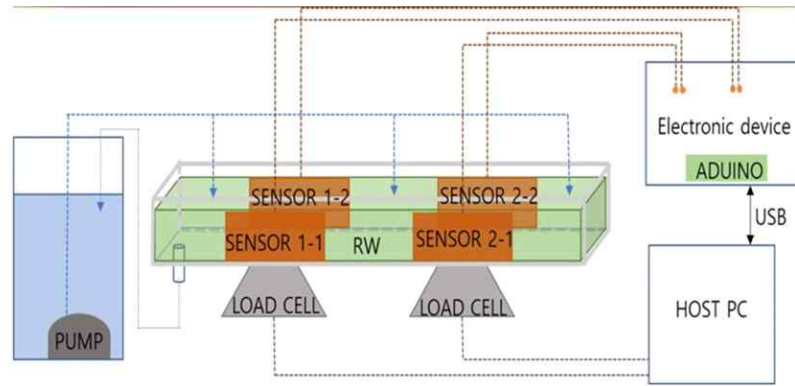


그림 3-3-46. 정전용량 센서의 함수량 정량화실험 장치도



그림 3-3-47 정전용량 센서의 함수량 정량화 실험장치 사진

### ○ Data 분석

개발 장치로부터 얻은 Excel 파일의 정전용량과 양액 무게는 시간적인 측면에서 정확하게 일치하지 않는다. 그 이유는 점적판을 통하여 배지 표면에 공급된 양액이 센서가 설치된 배지하부로 확산되는데 시간이 걸리기 때문이다. 정전용량의 피크치는 무게의 피크치보다 늦게 나타난다. 두 피크치가 일치되게 정전용량 data를 시간적으로 약간 이동시켰다. 정전용량 센서의 값은 수백 pF( $10^{-12}$ ) 단위이고, 배지무게는 수 Kg 단위 이기 때문에, 두 값을 이용하여 피팅을 하면 문제가 있기 때문에 그림 3-3-48과 같이 센서 데이터와 배지 무게를 규준화(normalization)하였다. 그리고 하나의 배지에 설치된 2 센서의 평균값을 사용하였다. 배지에 양액을 공급하기 전에 배지무게를 측정하는 로드셀 값을 zero로 세팅하였기 때문에 배지무게가 배지에 흡수된 물의 양이다. 그림 3-3-48의 normalized 센서 평균값(N-평균센서)을 X, normalized 배지 무게(N-배지) 값을 Y로 하여 그림 3-3-49과 같은 data 파일을 만든다. 그림 3-3-49과 같은 파일을 상업용 피팅 프로그램을 이용하여 1차 함수로 피팅한 결과 그림 3-3-50~51과 같은 결과를 얻었다. 피팅 결과에 의하면 정전용량과 배지의 양액 무게 상관계수가 0.998로 정전용량센서가 함수량을 정확하게 측정할 수 있음을 알 수 있다.

시간	센서1	센서2	배지무게	N- 센서1	N-센서2	N-배지	N-평균 센서
2020-03-08 13:14	0.03188439	0.033256455	12.55	8.77922E-07	1.10284E-08	0	4.44475E-07
2020-03-08 13:14	0.03592463	0.036741099	12.55	0.000808926	0.00069694	0	0.000752933
2020-03-08 13:14	0.036230357	0.036915014	12.56	0.000870071	0.000731723	0.001818182	0.000800897
2020-03-08 13:15	0.037605173	0.037560319	12.56	0.001145035	0.000860784	0.001818182	0.001002909
2020-03-08 13:15	0.037563069	0.03828983	12.56	0.001136614	0.001006686	0.001818182	0.00107165
2020-03-08 13:16	0.037523716	0.038292581	12.56	0.001128743	0.001007236	0.001818182	0.00106799
2020-03-08 13:16	0.038345686	0.038766721	12.56	0.001293137	0.001102064	0.001818182	0.001197601
2020-03-08 13:17	0.039549337	0.039498983	12.56	0.001533867	0.001248517	0.001818182	0.001391192
2020-03-08 13:17	0.039723252	0.043586828	12.56	0.00156865	0.002066086	0.001818182	0.001817368
2020-03-08 13:18	0.039894417	0.046992766	12.56	0.001602883	0.002747273	0.001818182	0.002175078
2020-03-08 13:18	0.039644546	0.047809235	12.56	0.001552909	0.002910567	0.001818182	0.002231738
2020-03-08 13:19	0.039902668	0.048667807	12.56	0.001604534	0.003082281	0.001818182	0.002343407
2020-03-08 13:19	0.040374057	0.048841722	12.56	0.001698811	0.003117064	0.001818182	0.002407938
2020-03-08 13:19	0.040890301	0.049271008	12.55	0.00180206	0.003202922	0	0.002502491
2020-03-08 13:20	0.040418911	0.049015637	12.55	0.001707782	0.003151847	0	0.002429815
2020-03-08 13:20	0.040592826	0.050174434	12.55	0.001742565	0.003383607	0	0.002563086
2020-03-08 13:21	0.04123538	0.050090227	12.55	0.001871076	0.003366765	0	0.002618921
2020-03-08 13:21	0.041493502	0.055260915	12.55	0.0019227	0.004400903	0	0.003161802

그림 3-3-48. 정전용량 센서 및 배지무게 data 처리 과정

X	Y
N-평균센서	N-배지 무게
0.00107165	0.001818182
0.001197601	0.001818182
0.001391192	0.001818182
0.001817368	0.001818182
0.01234734	0.107272727
0.03345817	0.118181818
0.094225012	0.227272727
0.111743993	0.234545455
0.11769332	0.234545455
0.133673937	0.347272727
0.146486913	0.350909091
0.168591405	0.414545455
0.180853249	0.465454545
0.19130697	0.461818182
0.207263995	0.449090909
0.249161415	0.534545455
0.249191712	0.534545455
0.264760794	0.607272727

그림 3-3-49. 정전용량 센서 값에 해당되는 배지 양액 무게

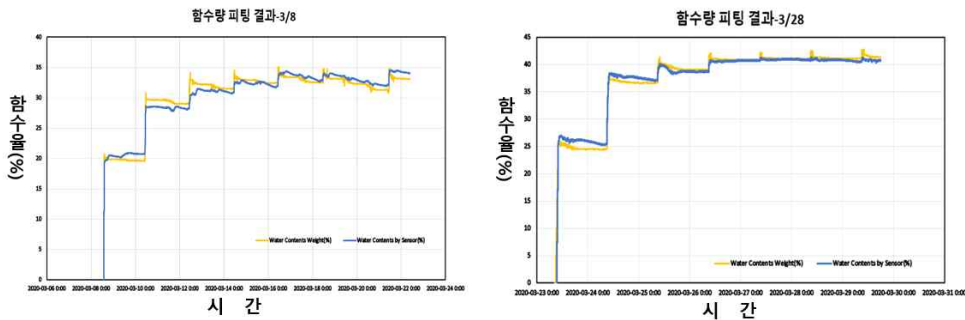


그림 3-3-50. 피팅 방정식에 의한 정전용량 함수량과 배지의 물 무게로 계산한 함수량 비교:  
(좌) 3월8일, (우) 3월28일

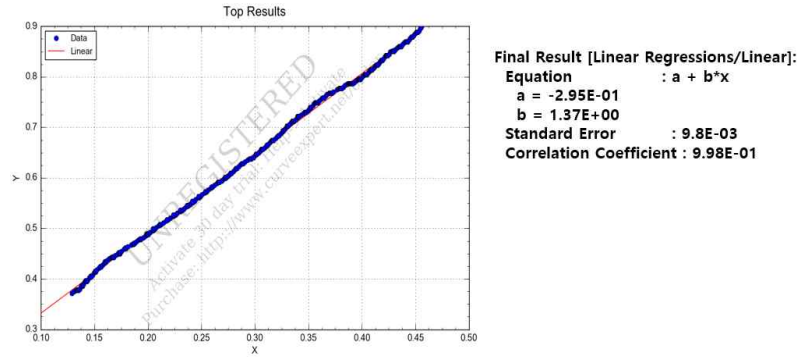


그림 3-3-51. 정전용량(X)과 양액무게(Y)의 상관계수

○ 절대 함수량 계산

본 연구에서 절대 함수량은 용적기준 함수율(%),  $v/v$ 로 배지의 부피에 대한 배지내 물 부피의 백분율을 의미한다. 실험에 사용된 배지는 압면배지로 크기는  $7.5 \times 15 \times 100 \text{cm}^3$  이다. 배지 아래에 설치된 전자저울 즉 로드셀은 양액공급 직전의 무게를 zero로 잡았기 때문에 전자저울 무게는 배지에 있는 물 무게이다. 그림 3-3-52에서 C열 즉 normalized 배지무게( $NW_L$ )를 함수량으로 표시하면 식 (5)와 같다. 이때 양액 비중을 1.1로 계산하였다.

$$\text{함수율} = \frac{W_L * (NW_L)}{1.1 * (7.5 * 15 * 100)} 100(\%) \quad (5)$$

그림 3-3-49의 x열은 정전용량 센서로 측정된 normalized 함수량인데 식 (6)을 이용하여 용적기준 함수율로 변환하였다. 식 (6)에서 “N평균센서”는 2개의 센서 값을 평균하여 normalization 한 것이고, 식 (6)의 분자에 있는 방정식은 그림 3-3-50에서 피팅하여 얻은 것이다. 정전용량 센서로 측정된 배지 함수량을 실시간으로 표시한 그래프를 그림 3-3-54~55에 나타내었다.

$$\text{함수율} = \frac{W_L * (-0.29 + 1.37 * N\text{평균센서})}{1.1 * (7.5 * 15 * 100)} 100(\%) \quad (6)$$

	A	B	C	D
1	N-평균센서	N-배지	로드셀 함수량(%)	정전용량 함수량(%)
2	0.496411622	0.407213793	36.20130621	34.23396062
3	0.505436989	0.420632759	37.39425224	35.33318716
4	0.515702818	0.433901724	38.57386328	36.58349331
5	0.527583062	0.440477586	39.15845741	38.03042384
6	0.532649106	0.4389	39.01821	38.64743256
7	0.533590229	0.437863793	38.92609121	38.7620548
8	0.533814059	0.435998276	38.76024672	38.78931566
9	0.533714006	0.435025862	38.67379914	38.77712999
10	0.533441109	0.434112069	38.59256293	38.74389301
11	0.532492344	0.433110345	38.50350966	38.62834008
12	0.531897869	0.431934483	38.39897552	38.55593717
13	0.531123523	0.431517241	38.36188276	38.46162724
14	0.530009669	0.430725862	38.29152914	38.32596763
15	0.529112504	0.430415517	38.26393948	38.21669924

그림 3-3-52 로드 셀로 측정된 무게에 의한 함수량

D2 = (-0.295+A:A\*1.37)\*88.9

	A	B	C	D
1	N-평균센서	N-배지	로드셀 함수량(%)	정전용량 함수량(%)
2	0.496411622	0.407213793	36.20130621	34.23396062
3	0.505436989	0.420632759	37.39425224	35.33318716
4	0.515702818	0.433901724	38.57386328	36.58349331
5	0.527583062	0.440477586	39.15845741	38.03042384
6	0.532649106	0.4389	39.01821	38.64743256
7	0.533590229	0.437863793	38.92609121	38.7620548
8	0.533814059	0.435998276	38.76024672	38.78931566
9	0.533714006	0.435025862	38.67379914	38.77712999
10	0.533441109	0.434112069	38.59256293	38.74389301
11	0.532492344	0.433110345	38.50350966	38.62834008
12	0.531897869	0.431934483	38.39897552	38.55593717
13	0.531123523	0.431517241	38.36188276	38.46162724
14	0.530009669	0.430725862	38.29152914	38.32596763
15	0.529112504	0.430415517	38.26393948	38.21669924

그림 3-3-53 정전용량 센서 함수량 계산

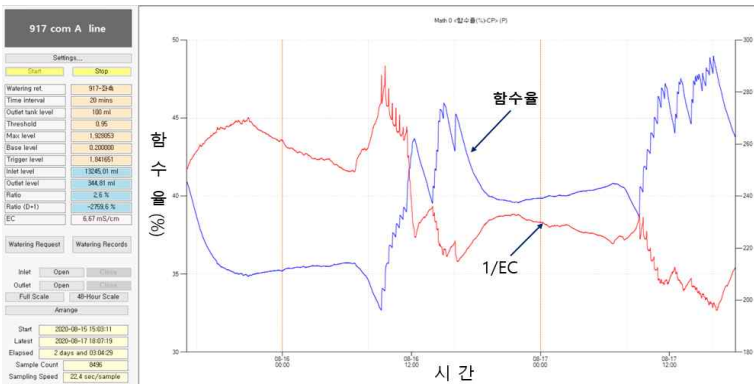


그림 3-3-54 정전용량 센서로 측정된 함수량(%)

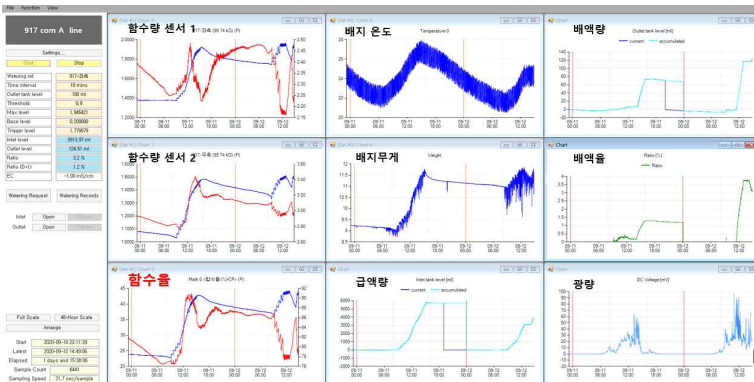


그림 3-3-55 다른 측정 data와 정전용량 함수량 실시간 그래프

### 사) 실험 농장 운영

1,2차년은 서울 낙성대 소재 관악 리얼 스마트팜에서 개발장치의 시험을 하였으나, COVID-19가 확산됨에 따라 부산에서 서울로 이동하는 어려움이 있어 실험농장을 부산 인근 기장군 정관면 임곡리 124-1에 시험 농장을 만들었다. 실험농장은 정관면 일대에 있는 화훼농장내 일부에 만들었다.

#### ○ 환경구축

실험농장은 화훼농장 일부를 사용하기 때문에 토마토 재재와 맞는 환경을 구축하였다. 배지 설치, 양액통 설치, 가압 모터 설치, 배관, 토마토 정식 장면을 그림 3-3-56에 나타냈다.



그림 3-3-56. 실험 농장 환경구축 장면

실험 농장은 2 라인을 A-Line, B-line으로 나누어 관수제어를 할 수 있게 하였다. 하나의 모터와 양액통으로 2 라인을 따로 제어하기 위해서 가압펌프와 각 라인 관수를 위하여 전동밸브

를 사용하였다. A, B 라인을 따로 관수하는 이유는 1,000평이 넘는 농장에서는 위치에 따라 관수조건이 달라야 하므로 위치에 따라 관수를 할 수 있는 배관과 전자장치를 개발하기 위해서이다. 또 다른 이유는 관수 조건을 따로 설정할 수 있으므로써 실험 시간을 단축할 수 있게 하기 위해서 이다.

두 라인 제어를 위하여 설치한 배관은 그림 3-3-57과 같다. 작동 순서는 다음과 같다. 자동 제어 모드로 동작시키기 위하여 가압모터에 전원을 항상 가해준다. Main valve를 열고 오른쪽 수동/자동 선택 밸브를 잠그고 A/B Line 선택 밸브를 잠근다. 이렇게 하면 전자장치에서 오는 A, B Line 전동밸브 개폐신호에 따라 각 라인에 양액이 공급된다. 만약 A, B 라인에 있는 합수량 제어 장치중의 하나가 고장 나면 A/B Line 선택 밸브를 열면 고장 나지 않는 장치에 의하여 A, B Line에 양액이 공급된다. 이 배관 개념과 개발한 전자장치를 이용하면 하나의 양액통과 모터를 이용하여 여러 라인을 각기 다른 조건으로 관수할 수 있다.

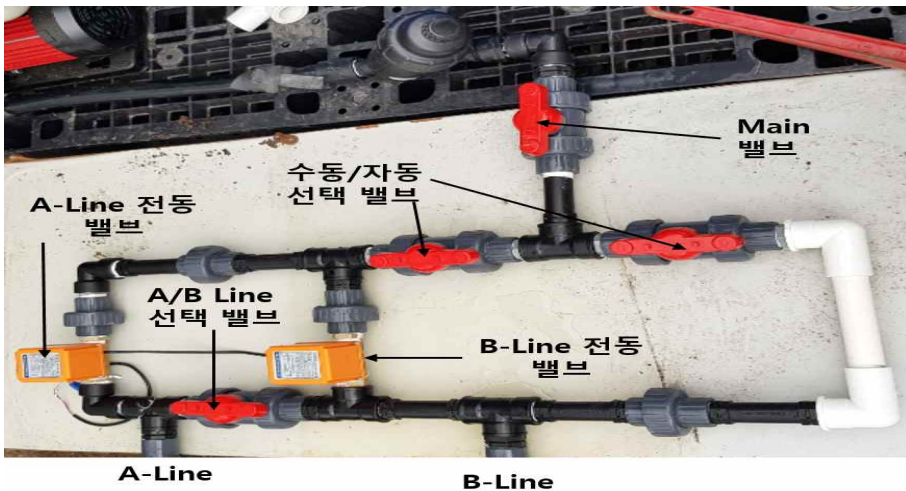


그림 3-3-57. A, B Line 관수를 따로 제어하기 위한 배관장치

○ 전자제어 시스템

A, B 라인을 따로 관수제어하기 위하여 그림 3-3-58와 같이 각 라인에 개발 장치를 설치하였다. 설치된 장치는 배지의 합수량, 급액량, 배액량을 측정하고 관수조건에 따라 관수신호를 발생한다. 관수신호는 모터의 ON/OFF 또는 전동밸브의 개폐에 활용된다.

각 장치에는 컴퓨터가 연결되어 있어 관수조건을 서로 다르게 설정할 수 있으며, 전자장치에서 관수 신호를 무선으로 양액통 근처에 설치된 그림 3-3-59와 같은 무선 수신장치로 보낸다. 무선 수신장치는 A, B line 제어장치에서 보낸 관수신호를 구분하여 릴레이를 이용하여 각 전동밸브를 개폐할 수 있게 한다. 무선 수신기에 내장된 SW와 릴레이 보드만 확장하면 여러 라인을 서로 다른 관수조건으로 제어할 수 있다. 수신거리는 4Km 이상 되기 때문에 넓은 농장이라도 신호전달에는 문제가 없다.



제어장치 설치 위치



제어장치

그림 3-3-58 실험농장 관수제어장치

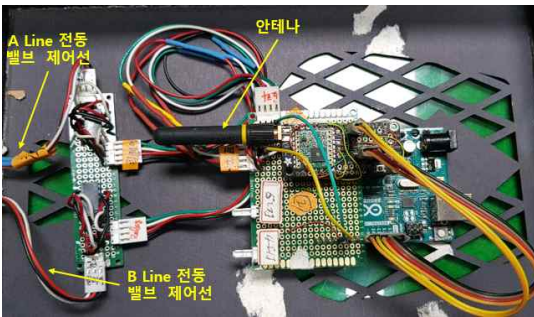


그림 3-3-59 관수신호 무선 수신장치

### ○ 개발 장치의 관수제어 원리

실험농장 운영 목적은 개발한 관수제어 장치가 정상적으로 동작하는지 확인하고 동작 특성을 조사하는 것이다. 연구실에서는 전자장비의 하드웨어 및 SW 동작을 확인할 수 있지만 관수실험을 할 수 없다. 관수실험을 하려면 관수재개 시점에서 관수를 하는지를 체크해야 하는데 인위적으로 배지 함수량을 줄일 수 없기 때문이다. 배지의 수분 함량 감소는 식물의 증산작용과 광합성에 의해서만 가능하기 때문에 실험농장을 만들었다.

현재 스마트 팜에서 일반적으로 많이 사용하는 관수방식은 일사량에 따라 관수하는 형태로, 광량을 적분하여 기준치 이상이면 양액을 일정기간 동안 관수한다. 이러한 관수방식은 광량이 많으면 온도가 올라가서 증산작용이 많아지고 광량증가로 인하여 광합성이 활발해진다는 이론적인 배경에 근거를 두고 있다. 이러한 방식의 문제점은 증산량은 빛의 세기만의 함수가 아니고 공기온도와 습도 등 여러 요인에 따라 변화 한다는데 있다. 광량만으로 관수하는 시스템은 준 폐회로 제어 시스템 (semi-closed loop control system)이라고 볼 수 있다. 이러한 시스템은 식물이 배지에서 수분을 흡수하는 정도를 고려하지 않고 일방적으로 양액을 공급하게 되어 양액을 과다하게 공급하거나 양액을 부족하게 공급하게 되는 문제점이 있다.



식물이 배지에서 수분을 흡수하는 것은 물이 필요하기 때문이다. 식물이 배지에서 수분을 흡수하는 양은 광량, 공기 중 온도, 공기 중 습도, 식물의 발육 상태에 따라 이 달라진다. 식물이 배지로부터 수분을 많이 흡수하게 되면 배지의 함수량이 낮아질 것이고, 반대로 수분을 작게 흡수하면 배지 함수량이 덜 감소할 것이다. 식물이 수분을 흡수하는 정도에 따라 수분을 공급하기 위해서는 배지의 함수량을 측정하여 양액을 공급해야 한다. 배지 함수량 기반으로 관수하면 앞서 언급한 모든 변수의 영향이 고려된 폐회로 제어 시스템(closed loop control system)이 된다.

통상적으로 스마트 팜에서 사용하는 배지는 상부에 식물을 식재하고 하부에 복수의 구멍을 뚫어 양액이 과도하게 공급되면 그 구멍으로 양액이 흘러 나가게 되어있다. 광량제어 관수제어 시스템의 또 다른 문제점은 양액이 많이 공급되어 식물이 흡수하지 못하고 흘러 나가는 배액이 많아도 양액공급을 중단하지 못하는 것이다. 양액이 필요이상으로 흘러 나가면 불필요한 양액공급으로 생산원가가 올라가고 수질 및 토양오염이 일어나는 문제점이 있다.

배지로 부터 흘러나오는 배액은 배지의 전기전도도(Electric Conductivity: EC)를 조절하는 기능을 한다. 배액이 아주 작을 경우는 배지의 EC가 올라가 식물의 뿌리가 배지로 부터 양액을 흡수하는 양이 줄어든다. 식물의 종류와 생육 시기에 따라 배지의 EC를 변화시켜야 하므로 배액량을 제어하는 것이 필요하다.

위와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 본 연구과제는 배액량과 배지의 함수량을 이용하여 식물의 종류나 식물의 생육시기에 따라 효과적으로 관수할 수 있는 관수제어 장치를 개발하였다. 이러한 장치를 개발함으로써 다음과 같은 효과들이 있다.

- 배지 함수량과 배액량을 실시간으로 측정하여 양액기에 ON/OFF 신호를 줌으로써 특정 식물 종류나 생육시기에 국한하지 않고 재배식물에 맞게 관수를 제어할 수 있는 효과가 있다.

- 원하는 배액량을 설정하여 배액량이 설정된 배액량 값보다 많으면 관수를 중지하여 양액 낭비를 막을 수 있고 수질 오염 및 토양 오염을 막을 수 있는 효과가 있고, 재배식물에 맞게 배액 조절이 가능한 이점이 있다.
- 관수가 중단된 경우에도 관수재개 시점을 설정하여 필요한 경우 관수가 재개되도록 함으로써 재배식물의 종류나 생육시기에 맞는 함수량 조절이 가능한 이점이 있다.
- 함수량과 동시에 배지 EC 변화 추세를 측정할 수 있어 작물에 따라 EC 조절이 가능하다.
- 식물의 성장 상태에 따라 관수를 함으로써 작물의 생산량을 높이고 과일의 질을 높일 수 있다.
- 급액량, 배액량, 배액율을 실시간으로 알 수 있어 관수조절이 용이하다.

○ 함수량 및 배액량을 이용한 관수실험

개발한 관수제어 장치는 배지 함수량과 배액량을 기반으로 하여 관수를 한다. 관수 방법을 그림 3-3-60~61을 이용하여 설명한다. 그림 3-3-60의 좌측 맨 아래에 함수량 기준이 되는 센서를 설정하고, 우측의 대화창에 관수시작 시간, 종료시간, 관수인터벌, 관수 재개율, 1회 배액량, 관수량(시간)을 입력한다. 하루를 3개의 구간으로 나누어 각 구간별로 관수 파라미터를 입력할 수 있다.

관수 인터벌은 타이머의 관수주기라고 생각하면 된다. 배액이 많이 나와 관수를 중단하게 되면 식물이 배지 수분을 흡수하게 됨에 따라 배지 함수량이 줄어들게 된다. 계속 관수하지 않으면 식물이 말라죽게 된다. 따라서 함수율이 어느 이하가 되면 관수를 재개해야 한다. 그 기준이 관수재개율 이다. 관수재개율은 배액이 나올 때 정전용량(함수율)을 “1”로 잡았을 때 센서의 정전용량 값이다. 그림 3-3-60의 경우의 관수재개율 “0.9”는 배액이 나올 때 정전용량의 0.9배 즉 90%가 될 때 관수를 재개한다는 것을 의미한다. 1회 배액량은 관수를 시작한 후부터 배액이 나오는 양이 설정된 양이 “1회 배액량” 이상 되면 관수를 중단하라는 것을 의미한다. 그림 3-3-60의 “50ml”는 관수 시작 후 배액이 50ml 이상 되면 관수를 중단하라는 것을 의미한다.

Soil 0 Channel	Channel 0
Base Level	0,2000
Max Level	2,530288
Soil 1 Channel	Channel 1
Base Level	0,2300
Max Level	1,938314
Soil 2 Channel	Channel 2
Base Level	0,2500
Max Level	2,078413
Weight	Load Cell
Base Level	6,0000
Max Level	12,607828
Reference Channel	Soil 0 Channel

Time Slot 1	Start Time	10:00	시작시간
	Stop Time	11:00	종료시간
	Time Interval	20	관수인터벌 <sup>mins</sup>
	Low Threshold	0.9	관수재개율
	Outlet Tank Level	50	1회 배액량
	Valve Open Duration	180	관수량(초) <sup>secs</sup>
Time Slot 2	Start Time	11:00	시작시간
	Stop Time	14:30	종료시간
	Time Interval	10	관수인터벌 <sup>mins</sup>
	Low Threshold	0.9	관수재개율
	Outlet Tank Level	50	1회 배액량
	Valve Open Duration	60	관수량(초) <sup>secs</sup>
Time Slot 3	Start Time	09:00	시작시간
	Stop Time	08:00	종료시간
	Time Interval	13	관수인터벌 <sup>mins</sup>
	Low Threshold	0.9	관수재개율
	Outlet Tank Level	50	1회 배액량
	Valve Open Duration	60	관수량(초) <sup>secs</sup>

그림 3-3-60 관수제어 장치의 관수방법

이와 같은 방법으로 관수 하면 그림 3-3-61과 같이 함수량과 1/EC가 변화한다. 그림 3-3-61에서 10시에 관수가 시작되면 6번의 관수가 있을 때까지 관수를 계속한다. 6번의 관수가 있을 후 배액량이 50mL 이상 되어 관수를 중단한다. 6회의 관수기간 동안 초반 2회 관수 후에는 함수량이 증가하고 감소하지 않지만, 3~6회 동안은 관수직후 함수량이 증가하고 조금 있으면 함수량이 감소한다. 그 이유는 관수에 따라 함수량이 증가하고 관수 중단 후 식물이 배지수분을 흡수하기 때문에 함수량이 줄어들기 때문이다. 시간이 정오에 가까워짐에 따라 광량이 많아져

증산작용과 광합성이 활발해서 함수율 감소가 커지는 것을 알 수 있다. 6번째 관수 후 일정시간이 지나 배액이 지정된 값(50mL) 이상 되어 관수를 중단한다. 그 후 식물의 증산작용과 광합성에 의하여 배지 함수량이 줄어들어 관수 재개율 이하가 되면 관수를 재개한다. 이와 같은 과정이 관수기간 내에 반복하여 수행된다. 그림 3-3-61에서 함수량이 증가하면 1/EC(R:저항)가 감소하는 이유는 배지에 양액이 증가하면 EC가 증가하기 때문이다. A, B 라인의 관수조건을 다르게 하여 실험한 결과 화면을 그림 3-3-62에 나타내었다.

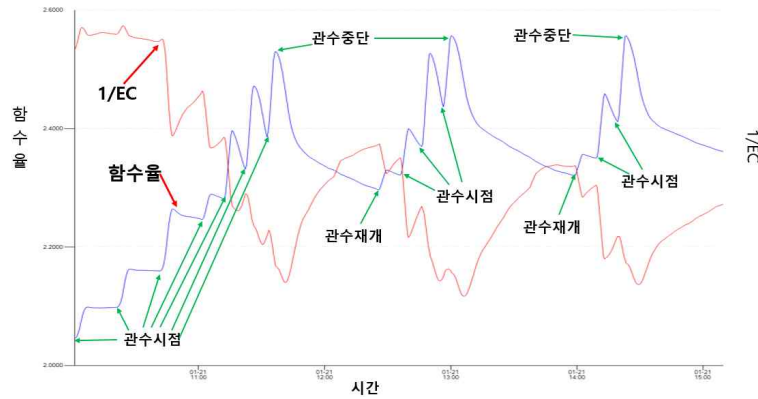


그림 3-3-61 관수에 따른 함수량과 1/EC 변화



그림 3-3-62. 실험농장의 A-Line(좌측), B-Line 관수제어 화면

실험농장은 규모는 작지만 2 line을 따로 제어할 수 있게 만들었기 때문에 다양한 실험을 할 수 있었다. 그림 3-3-63~64는 2 라인의 관수조건을 다르게 설정한 과정을 보여준다. 2 라인의 관수조건 중에 관수주기, 관수량, 배액량은 동일하게 하고 관수 재개율만 다르게 설정하였다. 이 실험은 관수재개율이 배지 함수량에 미치는 영향을 조사하기 위한 것이다.

다른 조건은 동일하게 하고 관수 재개율을 변화시켜 함수율을 측정된 결과를 표 3-1에 정리하였다. 관수 재개율을 0.9, 0.92, 0.93으로 증가 시키면 함수율도 28.3%, 33.8%, 40.5%로 증가한다. 다른 관수조건은 동일하게 하고 1주기 배액량을 다르게 했을 때 배액율(배액량/급액x100)의 변화를 표 3-2에 정리하였다. 1회 배액량을 50ml, 70ml, 100ml로 증가시키기에 따라 배액율은 10.5%, 24.3%, 40.5%로 증가되는 것을 알 수 있다. 원하는 배액율을 얻기 위한 조건을 얻기 위

해서는 많은 실험 데이터 즉 big data를 분석해야 한다. 실험 결과에 의하면 1회 배액량을 70ml 이하로 하면 원하는 배액율을  $\pm 3\%$  이내로 조절가능하다. 관수 인터벌을 짧게, 관수량을 많게, 1주기 배액량을 많게 하면 배액율 조절이 어렵다.

위 실험은 관수재개율과, 1주기 배액량이 함수율과 배액율에 미치는 영향을 조사한 것이다. 관수주기와 관수량에 따른 함수율과 배액율에 대한 분석은 많은 실험 데이터를 얻어 인공지능적인 방법을 사용해야 할 것이다. 또한 연구개발한 장비를 이용하여 다양한 재배작물에 맞는 최적의 관수조건을 찾기 위한 연구도 계속되어야 할 것이다.



그림 3-3-63 Line-B 관수 조건 입력

9시~11시: 30분주기, 0.9, 100ml, 120초  
11시~15시: 10분주기, 0.9, 100ml, 90초

그림 3-3-64. Line-A 관수조건 입력

9시~11시: 30분주기, 0.92, 100ml, 120초  
11시~15시: 10분주기, 0.92, 100ml, 90초

	관수 재개율		
	0.9	0.92	0.95
함수율(%)	28.3	33.8	37.5

표 3-1. 관수 재개율에 따른 함수율: 1주기 배액량 70ml

	1 주기 배액량(ml)		
	50	70	100
배액율 (%)	10.5	24.3	40.5

표 3-2. 1회 배액량에 따른 배액율: 관수 재개율 0.92

#### 아) 토마토 재배 농가 실증

3차년 동안 연구개발한 장치를 경남 김해시 조눌리 210-1 소재 토마토 재배 농장에 설치하여 장비성능평가와 농장의 기존관수 방법과 개발장비에 의한 관수 방법이 식물생장에 미치는 영향을 조사하였다. 정확한 평가를 위하여 본 연구팀에서 개발한 2개의 장치를 사용하였다. 첫

번째 장치는 개발한 장치를 이용하여 본 연구팀에서 고안한 관수방법을 이용하여 관수하여 다양한 데이터를 얻었다. 다른 하나의 장치는 농가에서 기존방식 대로 관수했을 때 각종 데이터를 모니터링 하도록 하게 하였다. 두 장치가 2m 이내에 있게 하여 위치에 따른 환경변화를 없도록 그림 3-3-65과 같이 설치하였으며 다양한 각도에서 촬영한 실험장치 사진은 그림 3-3-66와 같다.



그림 3-3-65 농가실증을 위한 실험 장치와 모니터링 장치 설치 사진



그림 3-3-66 다양한 각도에서 촬영한 실험 장치 사진

농가실증 관수실험은 정전용량 센서의 함수량과 배액량을 실시간으로 측정하여 앞서 설명한 관수방법으로 관수하였다. 공평한 실험을 위하여 2 장치 모두 동일한 양액을 사용했다. 기존 방식으로 관수하는 배지에 설치된 장치는 관수하지 않게 세팅하여 기존 관수방식에 따른 배지 함수량, 급액, 배액량을 측정하게 하였다. 개발 장치로 관수하는 배지는 배지의 함수량, 배액량,

급액량 정보를 바탕으로 관수 알고리즘에 따라 무선으로 관수신호(모터 ON/OFF)를 보내어 별도로 설치된 수중 모터를 ON/OFF 시켰다. 개발 장치를 이용한 관수방법과 농가의 기존관수 방법에 의한 차이점을 간단하게 살펴보면 그림 3-3-67과 같다. 개발장치를 이용한 관수방법이 기존방법보다 급액량이 작지만, 관수효율, 배액율, 작물 흡수량 측면에서 모두 우수하다는 결론을 얻었다. 자세한 분석은 본보고서에 있는 다른 연구팀의 연구 결과에서 상세하게 다룰 것이다.

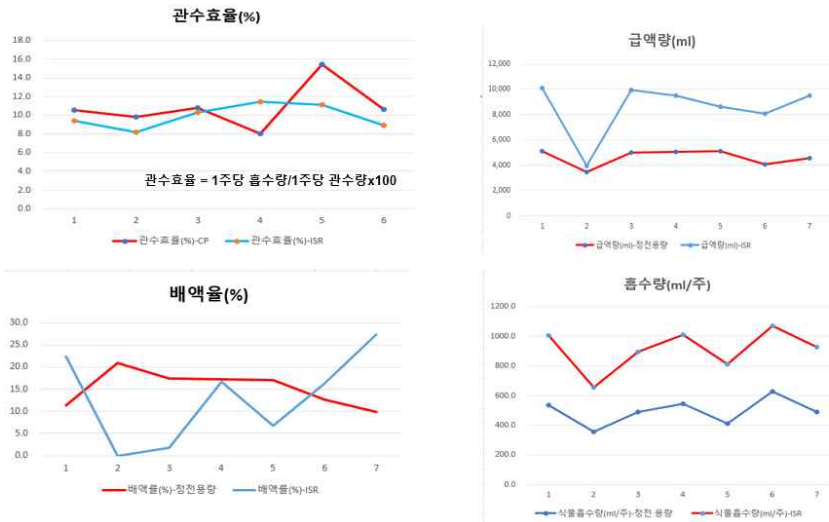


그림 3-3-67 개발장치를 이용한 관수와 기존관수 차이점

자) 출원 특허

### 출원 번호 통지서

출원 일자 2019.03.20  
 특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(DP190011)  
 출원번호 10-2019-0031856 (접수번호 1-1-2019-0286555-16)  
 출원인 명칭 (주) 텔로팜(1-2017-039153-9)  
 대리인 성명 윤□승(9-2002-000187-9)  
 발명자 성명 박□성 김□만 박□주  
 발명의 명칭 수경재배용 배지의 함수량을 측정하는 시스템

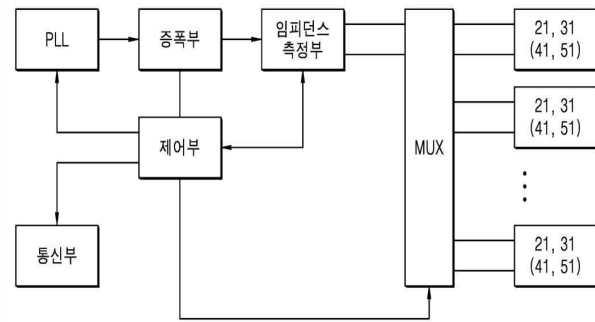


그림 3-3-68 함수량 측정 시스템 출원 통지서 그림 3-3-69 함수량 측정 시스템 구성도

본 발명의 일 실시예에 따른, 수경재배용 배지의 함수량을 측정하는 시스템은, 수경재배용 배지를 포함한 포장재의 제1 면에 부착되는 제1 전극판; 상기 포장재의 상기 제1 면의 반대편의 제2 면에 상기 제1 전극판을 마주보도록 부착되는 제2 전극판; 및 상기 제1 전극판과 상기 제2 전극판에 정현파 교류를 인가하여 상기 제1 전극판과 상기 제2 전극판 사이의 임피던스를 측정하고 상기 측정된 임피던스를 바탕으로 상기 배지의 함수량 또는 그 변화를 측정하는 측정

장치를 포함하는 것을 특징으로 한다.

### 출원 번호 통지서

출원 일자 2020.12.31  
 특기사항 심사청구(유) 공개신청(무) 참조번호(DP200165)  
 출원 번호 10-2020-0189342 (접수번호 1-1-2020-1440328-75)  
 (DAS접근코드 1158)  
 출원인 명칭 (주) 텔로팜(1-2017-039153-9)  
 대리인 성명 윤□승(9-2002-000187-9)  
 발명자 성명 박□성 최□영 백□현 이□훈  
 발명의 명칭 수경재배용 배지의 배액량과 함수량을 이용한 관수 제어 시스템

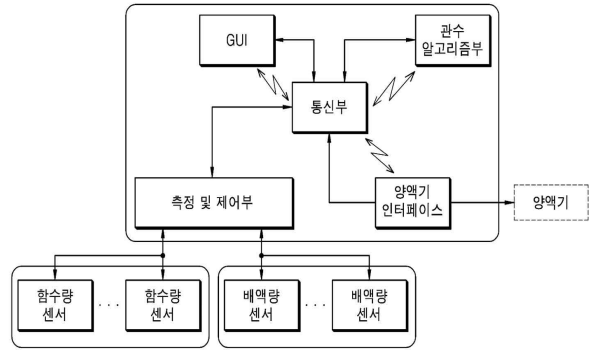


그림 3-3-70 관수제어 시스템 출원 통지서

그림 3-3-77 관수제어 시스템 구성도

본 발명은 수경재배용 배지의 배액량과 함수량을 이용한 관수 제어 시스템으로서, 상기 수경재배용 배지의 함수량을 실시간으로 측정하기 위하여 설치되는 적어도 하나의 함수량 센서; 상기 수경재배용 배지의 배액량을 실시간으로 측정하기 위하여 설치되는 적어도 하나의 배액량 센서; 및 상기 함수량 센서의 측정값을 기초로 상기 배지의 함수량을 측정하고, 상기 배액량 센서의 측정값을 기초로 상기 배지의 배액량을 측정하며, 측정된 함수량과 배액량을 기초로 상기 배지에 공급되는 양액의 관수를 제어하는 제어장치;를 포함하는 수경재배용 배지의 배액량과 함수량을 이용한 관수 제어 시스템에 관한 것이다.

## 제 2 절. 연구개발성과

### 1. 연구개발성과

#### 가. 논문

No	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호
1	토마토 암면재배에서 정전용량 측정장치를 기반으로 한 급액방법 구명	시설원예·식물공장	한○섭	28(4)	국내	한국생명환경조절학회	비SCI	2019.10.31	pISSN 2288-0992
2	토마토 암면 고품배지경에서 급액방식에 따른 급액량, 생육 및 과실 수량 비교	시설원예·식물공장	윤○희	29(1)	국내	한국생물환경조절학회	비SCI	2020.1.31	pISSN 2288-0992
3	Quantification of Rockwool Substrate Water Content using a Capacitive Water Sensor	시설원예·식물공장	백○현	30(1)	국내	한국생물환경조절학회	비SCI	2021.1.30.	pISSN 2288-0992
4	겨울철 토마토 암면배지경에서 조기가온에 의한 수분흡수, 광합성, 생육 및 수량	원예과학기술지	조○경	39(1)	국내	한국원예학회	SCIE	2021.2.28. (게재예정)	ISSN 2465-8588
5	텐시오미터를 이용한 관수개시점 처리가 시설 재배 오이 생육과 물 이용에 미치는 영향	원예과학기술지	최○영 안○희 전○호	39(2)	국내	한국원예학회	SCIE	2021.04 (게재예정)	ISSN 2465-8588
6	시설토양 오이재배에서 관수개시점 처리가 광합성 형광반응, 줄기수액흐름 및 엽온에 미치는 영향	시설원예·식물공장	최○영 안○희	30(1)	국내	한국생물환경조절학회	비SCI	2021.1.31.	pISSN 2288-0992

#### 나. 국내 및 국제학술회의 발표

No	발표제목	발표자	발표일시	장소	국명
1	한국생물환경조절학회 2018년도 추계학술대회 (토마토 수경재배에서 정전용량 기반 배지수분센서를 활용한 자동급액시스템)	안○희	2018.10.4~5	연암대학교	국내
2	한국생물환경조절학회 2018년도 추계학술대회 (과실생체정보를 활용한 급액제어 기술에 따른 토마토 비대속도 비교)	윤○희	2018.10.4~5	연암대학교	국내
3	한국생물환경조절학회 2019년도 춘계학술대회 (토마토 배지경에서 정전용량 측정 장치를 기반으로 한 급액방식 구축을 위한 최적 급액 제어점 선정)	한○섭	2019.5.10	경상대학교 GNU컨벤션센터	국내
4	한국생물환경조절학회 2019년도 추계학술대회 (정전용량 수분 센서의 함수량 정량화 방법)	백○현	2019.11.8	한국농수산대학교	국내



5	GreenSys 2019 (Effect of starting point of soil water tension on sap flow density of fruit enlargement in cucumber)	최○영, 김○경, 이○현, 안○희, 김○섭, 장○철 최○영	2019.06.16.-20.	Agers	프랑스
6	한국생물환경조절학회 2019년도 추계학술대회 (토양 수분 제어에 의한 관수 개시 시점이 관수량, 오 1이의 생육 및 수량에 미치는 영향)	안○희, 이○현, 최○영, 최○영	2019. 11.7~8	한국농수산 대학교	국내
7	한국생물환경조절학회 2019년도 추계학술대회 (토양 수분 장력 관수 개시점에 의한 환경과 엽온과의 상관)	안○희, 이○현, 최○영, 최○영	2019. 11.7~8	한국농수산 대학교	국내
8	2020년 (사)한국생물환경조절학회 추계학술발표회 (시설 토양 재배에서 관수 개시점과 관수 시간이 오이 광합성과 엽 생육에 미치는 영향)	안○희, 최○영, 전○호, 최○영	2020.10.22~28	온라인 학술발표	국내
9	2020년 (사)한국생물환경조절학회 추계학술발표회 (오이 시설 토양 재배에서 관수 개시점 처리가 수액흐 름, 엽의 형광반응과 엽온에 미치는 영향)	안○희, 최○영, 전○호, 최○영	2020.10.22~28	온라인 학술발표	국내
10	2020년 (사)한국생물환경조절학회 추계학술발표회 (딸기 수경재배용 상토에서 정진용량 수분 센서의 표 준화를 위한 기초 연구)	백○현	2020.10.22.	온라인 학술발표회	국내
11	2020 한국원예학회 제112차 추계학술발표회 (토마토 코이어 배지경에서 유통되는 배지 종류별 물 리성과 식물체 생육, 수량, 과실비대속도 및 수분포텐 셜 구명)	최○영	2020.11.05.	e-conferen ce	국내

다. 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

No	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국 명	출원			등 록			기여율 (%)
			출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호	
1	수경재배용 배지의 함수 량을 측정하는 시스템	대한민국	(주)텔로팜	2019.03.20	10-2019-0031856				30
2	수경재배용 배지의 배액 량과 함수량을 이용한 관수 제어 시스템	대한민국	(주)텔로팜	2020.12.31.	10-2020-0189342				35

라. 전문연구 인력양성

No	분류	기준 년도	현 황											
			학위별				성별		지역별					
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타	
1		2018												
2		2019	1	2			1	2	2		1			
3		2020		1				1	1					

바. 교육지도

No	교육명	교재명	주요내용	활용년도
1	첨단 스마트팜 교육	자체 개인 자료	양수분 흡수, 금액관리 기술 및 현재 연구 동향	2018
2	ICT- IOT 플랫폼	자체 개인 자료	센서 및 환경조절을 이용한 원예작물 생산	2018
3	'정밀농업 [과학자, 식물과 통한다]'	어린이 과학 동아	센서를 활용한 자동관수방식	2018
4	Irrigation control and sap flow density for production of high quality fruit in cucumber fertigation cultivation	자체 개인 자료	오이 관비재배시, 금액 처리에 따른 수액흐름 변화	2018
5	시설재배기술(농학과 현장실습 교과목)	자체 개인 자료	시설원예 기술	2019
6	강원농업마이스터 친환경 채소 교육	자체 개인 자료	시설원예 물 관리	2019
7	강원도 미래농업원	자체 개인 자료	스마트팜 필요성과 동향	2019
8	품목전문 인력 양성 (전북김제 농식품인력개발원)	자체 개인 자료	오이 재배 기술	2019
9	품목전문 인력 양성 (경남농업기술원)	자체 개인 자료	오이 재배 기술	2019
10	스마트 기업 대상 ICT 활용 근권 조절기술	자체 개인 자료	근권환경 조절기술	2020
11	스마트팜 기업 활성화를 위한 산학관 협력 주제 발굴	'스마트팜 기업 활성화를 위한 산학관 협력 주제 발굴' 세미나	○ 스마트 팜 현장의 기업으로 및 필요 기술에 대한 수요조사, 산학 네트워크 확장 ○ 중앙대학교 학생들의 스마트팜 진출을 위한 상호협력 전략 도출.	2020
12	충남농업마이스터대학	자체 개인 자료	근권 수분 관리 근권 수분 측정방법과 활용-적절한 관수 시기와 관수량의 중요성 이해, 토양수분 측정방법 이해 및 적용	2020

사. 기술거래(이전) 등

No	기술이전 유형	기술실시계약명	기술실시 대상기관	기술실시 발생일자	기술료 (당해연도 발생액)	누적 징수현황

아. 사업화 현황 (단위 : 명, 년)

No	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액(만원)		매출 발생년도	기술 수명
							국내	국외		
1	상품화	기술보유자의 직접사업화- 기존업체	-	스마트팜 관수제어장치	정전용량 수분센서를 이용하여 배지 함수량과 배액량 제어 시스템 구축	(주)텔로팜	330		2020	

자. 홍보전시

No	홍보유형	매체명	홍보내용	홍보일자
1	박람회	제8회 서울시 도시농업박람회	개발 수분 측정 장치 홍보	2019
2	박람회	종로구 도시농업 어울마당	개발 수분 측정 장치 홍보	2019

차. 기타

- 정책 활용

종류	정책활용대상	정책 활용내용	활용성과	기타
정책건의				

- 고용 창출

종류	고용대상	고용 내용	고용일자	기타
고용창출	오○우	(주)텔로팜	2018-04-26	계약직
	이○호	(주)텔로팜	2018-04-26	정규직
	안○희	한국방송통신대학교 산학협력단	2018-04-26	계약직
	조○환	(주)텔로팜	2018-04-26	정규직
	장○일	(주)텔로팜	2018-04-26	정규직
	이○석	(주)텔로팜	2019-04-01	계약직

- 수상 내역

종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일자	포상기관
수상	우수구두발표상	2019년도 추계학술대회에서 우수구두발표상 포상: 해피머니 10만원	○	2020.10.22.	(사)한국생물환경조절학회
수상	우수포스터발표상	2018년도 추계학술대회 우수포스터발표상 포상: 해피머니 10만원	○	2019-05-10	(사)한국생물환경조절학회

- 영농 활용

번호	활용유형	발간책자명	활용내용	발간처
1				

### 제 3 장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

#### 제 1 절. 목표

- 배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술개발(방송대)
- 생체정보 센서를 이용한 고품질 오이 생산 기술 개발(강원대)
- 배지 함수량 및 생체정보 센서 제어 알고리즘 개발 ((주) 텔로팜)

#### 제 2 절. 목표 달성여부

연구개발의 목표		가중치	평가의 착안점 및 기준	달성도 (%)	
1차년	제1세부 (방송대)	○토마토 수경배지 함수량 및 생체정보 모니터링	35	- 배지수분함량, 수분흡수량, 물관수액흐름속도, 토마토 생육 및 수량 요인들의 연관성 구축	100
	제1협동 (강원대)	○오이 토경에서 생체정보 모니터링	35	- 토양수분장력 관수제어 처리에 따른 물관수액흐름속도, 함수량, 생육, 수량, 상품성 및 양수분 투입량 등 비교	100
	제2협동 (텔로팜)	○배지 함수량 측정 센서 개선 및 정확도 보완	30	- 센서 정밀도 FDR 센서와 비교점 Load cell 측정 함수량과 비교 센서 내구성	100
2차년	제1세부 (방송대)	○ 토마토 수경배지 함수량 및 생체정보 이용 급액제어 기술 개발	35	- 관행 급액제어 방식과 비교한 총급액량, 배액량, 함수율, 생산량 - 개발 장치 제어목표점에 따른 생체정보비교	100
	제1협동 (강원대)	○오이 토경재배에서 생체정보 이용 급액제어	35	- 관수량, 재배환경, 토양수분장력, 물관 수액흐름, 엽온, 광합성, 형광반응, 급액량, 토양 함수율, 생육 및 생산량 측정	100
	제2협동 (텔로팜)	○ 배지 함수량 및 생체정보 센서제어 알고리즘 개발	30	- 전자장치를 구동을 위한 SW 개발 배지 함수량 측정 알고리즘 및 SW 개발 개발 센서 및 생체정보 센서 기반 배지 함수량 제어 정량적 분석 현장 적용 시험	100
3차년	제1세부 (방송대)	○배지수분 함량과 생체정보 통합적 이용 급액제어 기술 개발	35	- 새로 개발된 기술 적용 시 급액제어 시스템 효과 제시(배액량, 양액소요량)	100
	제1협동 (강원대)	○ 오이 토경 급액제어 기술 현장 실증	35	- 관수량, 재배환경, 토양 수분장력, 물관 수액흐름, 엽온, 광합성, 형광반응, 급액량, 토양함수율, 생육 및 생산량 측정	100
	제2협동 (텔로팜)	배지 함수량 및 생체정보 통합적 이용 관수제어 프로그램 개발 및 보완	30	- 관수제어 전자장치 및 프로그램 보완 농가 현장 실증 실험	100

## 제 4 장. 연구결과의 활용 계획 등

### 제 1 절. 연구성과의 활용분야 및 활용방안

#### 1. 시설재배 작물의 합리적 관수제어

- 작물의 최적 생장을 위한 양수분 조절 및 비료 투입량 감소
- 시간별 개체별 모니터링 추적을 통한 데이터 습득 및 분석
- 식물체 내 수분 이동 패턴 분석
- 식물 스트레스 정도에 대한 정확한 측정
- 과채류의 품질 향상 및 생산량 증대
- 토경 오이 관비 재배 농가의 물과 비료 절감에 따른 경영비 감소
- 오이 재배 시 지상부 지하부 환경 구명 의로 인한 토양 관수개시점 제시

#### 2. 수경재배 스마트 팜에 적용 가능한 융합기술 실용화

- 비료, 수분 이용 효율 향상으로 수경재배 농가 경영비 절감 ( 20% 이상 절감)
- 환경 부하 최소화의 기여
- 생체정보 활용한 급액제어 수경재배 시스템 실용화
- 비료 투입량 최소화를 통한 농가 생산비 절감
- 국내 시설원에 자재 산업 기술 분야 경쟁력 제고 (새로운 개념의 배지 수분센서, 배지 함수량 및 생체정보 활용한 급액제어 수경재배 시스템 등)

#### 3. 과채류 수경재배를 위한 융합기술의 적용 확대 및 실용화

- 토양 및 수질오염 최소화에 기여
- 생체정보 활용한 급액관리 실용화 (상품화, 기술교육 지도)
- 물과 비료 투입량 최소화를 통한 농가 생산비 절감
- 국내 시설원에 자재 산업 신기술 분야 경쟁력 제고, 상품화 및 실용화 (배지 수분센서, 생체정보 센서)

## 제 2 절. 추가연구의 필요성

1. 개발된 장치를 농가에 확대 보급을 위해 작물별 현장의 실증 시험을 통해 경제성과 생산량 자료를 축적할 필요가 있고 이를 위해 지속적인 재배 현장 연구를 진행할 예정이다.
2. 토양재배의 관수제어기술의 확대
  - 시설토양 주요 과채류 작물별 관수개시와 종료에서의 관수량 구명
  - 토양 관수 자동화 시스템
3. 측정 지역의 컴퓨터 배제
  - 현재 배지에 설치된 장치와 함께 컴퓨터가 설치되어 있어 이 컴퓨터에서 관수에 필요한 SW가 돌아간다. 현재 개발한 관수제어 장치를 이용하여 한 농장의 여러 부분의 함수량 측정과 관수 조건을 세팅 하려고 하면 여러 대의 컴퓨터가 필요하다. 경제적인 방법으로 큰 농장을 효과적으로 관수 하려고 하면 측정 지역에는 컴퓨터를 두지 않고 무선으로 중앙 컴퓨터로 데이터만 전송해야한다.
4. 개발 장치를 활용한 작물별 최적 관수조건 연구
  - 개발 장치에 의한 관수방식이 현재 토마토 재배 농장의 일사량 제어 방식보다 식물 성장에 도움이 된다는 것을 확인 하였다. 개발 장치는 토마토에 국한 하지 않고 다양한 작물(딸기, 파프리카, 오이 등)에 활용가능 하므로 이들 작물을 최적생장을 위한 관수조건에 대한 연구가 필요하다.
5. 빅 데이터와 인공지능을 이용한 다양한 작물의 최적 관수조건 확립
  - 개발 장치를 상위 1% 이내의 작물 재배 기술을 가진 사람이 운영하는 농장에 설치하여 함수량, 관수 방법, 금액량, 배액량, 광량을 조사하여 big data를 확보한다. 확보한 데이터를 인공지능 엔진으로 학습 시켜 최적의 관수 조건을 찾는다. 다양한 작물에 이러한 접근을 하면 스마트 팜 생산성을 획기적으로 높일 수 있을 것이다.

## 제 3 절. 타 연구에의 응용

- 시설토양 자동 관수를 위한 생체정보와 환경요인간의 매개변수 적용 기초 마련

## 붙임. 참고문헌

- An JH, Jeon SH, Lee MH, Jang DC, Choi EY, Na JK, Choi KY (2021) Effect of irrigation starting point of soil using tensiometer on growth and water use of cucumber in greenhouse. *J Korea Soc Hort Sci* (in pressing, in Korean)
- Anjum SA, Xie XY, Wang LC, Saleem MF, Man C, Lei W (2011) Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African J of agricultural research* 6(9):2026-2032
- Atkins R.T., T. Pangburn, R.E. Bates, and B.E. Brockett 1998, Soil moisture determinations using capacitance probe methodology. US Army Corps of Engineers. 98-2. CRREL Spec Rep 98-2:1-49.
- Bass R., and N.A. Straver 2001, In situ monitoring water content and electrical conductivity in soilless media using a frequency-domain sensor. *Acta Horti* 562:295-303.
- Bhandari SR, Kim YH, Lee JG (2018) Detection of temperature stress using chlorophyll fluorescence parameters and stress-related chlorophyll and proline content in paprika (*Capsicum annuum* L) seedlings. *Hort Sci & Tech* 36(5):619-629
- Brandelik A., and C. Hubner 1996, Soil water determination; accurate, large and deep. *Phys Chem Earth* 21:157-160.
- Bum IS, Kim YW, Kim KS, Kim KY, Sohn BK, Kim HW (1999) Effect of soil water potential on physico-chemical properties of soil and cucumber (*Cucumis sativus*L.) growth. *Korean J Soil Sci Fert* 32:171-181
- Burnett S.E., and M.W. van Iersel 2008, Morphology and irrigation efficiency of *Gaura lindheimeri* grown with capacitance sensor-controlled irrigation. *HortSci* 43:1555 - 1560.
- Buttaro D, Santamaria P, Signore A, Cantore V, Boari F, Montesano FF, Parente A (2015) Irrigation management of greenhouse tomato and cucumber using tensiometer: Effects on yield, quality and water use. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4:440-444
- Chen L., L. Zhangzhong, W. Zheng, J. Yu, Z. Wang, L. Wang, C. Huang 2019, Data-driven calibration of soil moisture sensor considering impacts of temperature: A case study on FDR sensors. *Sensors* 19:4381-4392.
- Chen LS, Cheng L (2009) Photosystem 2 is more tolerant to high temperature in apple (*Malus domestica*Borkh) leaves than in fruit peel. *Photosynthetica* 47(1):112-120
- Choi EY, Choi KY, Lee YB (2013) Scheduling non-drainage irrigation in coir substrate hydroponics with different percentages of chips and dust for tomato cultivation using a frequency domain reflectometry Sensor protected. *Hort and Plant Factory* 22(3):248-255
- Erika K., G. Schmidt, and U. Bruckner 1999, Scheduling strawberry irrigation based upon tensiometer measurement and a climatic water balance model. *Sci Horti* 81:409-424.
- Gong Y., Q. Cao, and Z. Sun 2003, The effects of soil bulk density, clay content, and temperature on soil water content measurement using time-domain reflectometry. *Hydrol Process* 17:3601 - 3614.

- Han D., J. Baek, J. Park, W. Shin, I. Cho, and E. Choi 2019, Determination of proper irrigation scheduling for automated irrigation system based on substrate capacitance measurement device in tomato rockwool hydroponics. *Protected Hort Plant Fac* 28:366-375.
- Hoppula K.I., and T.J. Salo 2006, Tensiometer-based irrigation scheduling in perennial strawberry cultivation. *Irrig Sci* 25:401-409.
- Hsiao T.C., E. Acevedo, E. Fereres, and D.W. Henderson 1976, Water Stress, Growth and Osmotic Adjustment. *Phil Trans R Soc Lond B*273:479 - 500.
- [http://waterniergokr/publicFront/easyWater/knowledgeInfo/easyKnow02.jsp?menuIdx=1\\_1\\_2](http://waterniergokr/publicFront/easyWater/knowledgeInfo/easyKnow02.jsp?menuIdx=1_1_2)
- Idso SB (1982) Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology* 27(1-2):59-70
- Jackson RD, Idso SB, Reginato RJ, Pinter PJ (1981) Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resour Res* 17(4):1133-1138
- Jeon SH, Hur SO, Ha SK, Jun HJ, Han KH, Cho HR, Hong SD (2010) Water saving irrigation point in cucumber cultivation under greenhouse. *Korean J Soil Sci Fert* 43:540-545
- Jeon SH, Hur SO, Ha SK, Jun HJ, Han KH, Cho HR, Hong SD (2010) Water saving irrigation point in cucumber cultivation under greenhouse. *Korean J Soil Sci Fert* 43:540-545
- Jones HG (2004) Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods *Journal of experimental botany*55(407):2427-2436
- Kang NJ, Choi YH (2009) Influence of irrigation levels on plant growth and fruit quality in *lycopersicon esculentum* mill. *Kor J Hort Sci Technol* 27:93-101
- Kang YI, Kang NJ, Cho MW, Lee SY, Kang GC, Kwon JK (2009) Effect of daily weather and soil EC on chlorophyll fluorescence of tomato during high temperature season. *Kor J Hort Sci Technol* 27
- Kim DE, Kwon JK, Hong SJ, Lee JW, Woo YH (2020) The effect of greenhouse climate change by temporary shading at summer on photo respiration, leaf temperature and growth of cucumber protected. *Hort and Plant Factory* 29(3):306-312
- Kim HG, Lee JS, Kim YH (2018) Chlorophyll fluorescence, chlorophyll content, graft-taking, and growth of grafted cucumber seedlings affected by photosynthetic photon flux of LED lamps Protected. *Hort and Plant Factory*, 27(3)231-238
- Kim HJ, Roh MY, Lee DH, Jeon SH, Hur SO, Choi JY, Chung SO, Rhee JY (2011) Feasibility test on automatic control of soil water potential using a portable irrigation controller with an electrical resistance-based watermark sensor. *J Bio-Environment Control* 20(2):93-100
- Kim KH, Kim KY, Kim JG, Sa TM, Suh JS, Sohn BK, Yang JE, Eom KC, Lee SE et al (2006) *Soil Science*, Hyangmun-sa, Seoul, Korea, pp 67-70, 125
- Kim S.K., H.J. Lee, H.S. Lee, B. Mun, and S.G. Lee 2017, Effect of soil water content on growth, photosynthetic rate, and stomatal conductance of kimchi cabbage at the early growth stage after transplanting. *Kor J Crop Sci* 26:151-157.



- Kim SK, Lee HJ, Lee HS, Mun BH, Lee SG (2017) Effect of soil water content on growth, photosynthetic rate, and stomatal conductance of Kimchi cabbage at the early growth stage after transplanting Protected. Hort and Plant Factory 26(3):151-157
- Kim YB, An CG, Lee YH (2000) Effect of soil moisture on quality and yield in tomatoes. J Kor Soc Hort Sci 41:139-142
- Kwon Y.H., J.M. Lee, H.H. Han, S. Ryu, J.H. Jeong, G.R. Do, J.H. Han, H.C. Lee, and H.S. Park 2016, Physiological responses for soil water stresses in 'Mihong' peach tree. Protected Hort Plant Fac 25:255-261.
- Lee S.G., Y.W. Seo, J.W. Johnson, and B.H. Kang 1997, Effects of water stress on leaf water potential, photosynthesis and root development in Tobacco plant. Kor J Crop Sci 42:146-152.
- Lee SH, Chung GC, Suh SR (1998) Effect of light intensity on the leaf temperature, chlorophyll fluorescence, transpiration and leaf area index in cucumber plants. Kor J Hort Sci & Tech 16(1):97-97
- Lee SW, Cho MS, Kim GN (2010) Effect of different irrigation period on photosynthesis and growth performances of controlainerized seedling of eucalyptus pellita and acacia mangium. Jour Korean For Soc Vol 99(3):414-422
- Lee YB, Son JE, Jun HJ (2010) Protected Horticulture, Hyangmun-sa, Seoul, Korea, pp166-202
- Locascio SJ, Myers JM, Martin FG (1977) Frequency and role of fertilization with trickle irrigation for strawberries. J Amer Soc Hortic Sci 102:456-458
- MAFRA(Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs)(2020) Vegetable greenhouse Status and vegetable production
- Maxwell K. Johnson GN (2000) Chlorophyll fluorescence—a practical guide Journal of experimental botany 51(345): 659-668
- Moon W, Yu DJ (2013) Plant physiology. KNOU Press ISBN 978-89-20-01122-1 93520
- Murray J.D., J.D. Lea-Cox, and D.S. Ross 2004, Time domain reflectometry accurately monitors and controls irrigation water applications in soilless substrates. Acta Hort 633:75-82.
- NAAS(2000) Method of soil and plant analysis National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea
- NAAS(2006) Fertilization standard of crop plant National Institute of Agricultural Science and Technology, RDA, Suwon, Korea pp 69
- Nemali K.S., F. Montesano, S.K. Dove, and M. W. van Iersel 2007, Calibration and performance of water sensors in soilless substrates: ECH2O and Theta probes. Sci Hortic 112:227-234.
- Oh SJ, Moon KH, Son IC, Song EY, Moon YE, Koh SC (2014) Growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence of chinese cabbage in response to high temperature. Kor J Hort Sci Technol 32(3):318-329
- Oletic D, Bilas V (2020) How thirsty the crops are: Emerging instrumentation for

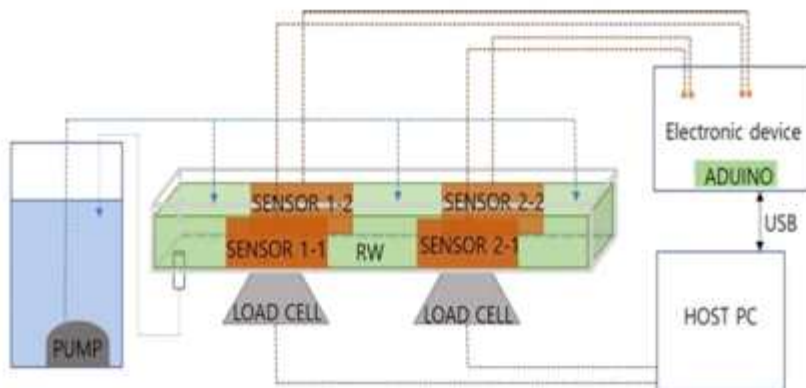
- plant-based field measurement of water stress. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* 23(2):37-46
- Park J.S., N.H. Tai, T.I. An, and J.E. Son 2009, Analysis of moisture characteristics in rockwool slabs using time domain reflectometry (TDR) sensors and their applications to paprika cultivation. *J Bio-Env Con* 18:238-243.
- 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. *Kor J Hort Sci Tech* 28:227-233
- Park YM (2011) Leaf temperature characteristics being affected by light regimes. *Journal of the Environmental Sciences* 20(12):1599-1605
- RDA 2018 Cucumber- Agricultural technology guide 107 RDA, Korea pp24-25, 91
- RDA 2020 Agricultural and livestock income databook ISBN 978-89-480-6452-0 93520
- Rhee HC, Choi GL, Jeong JW, Cho MH, Yeo KH, Kim DM, An CG, Lee DY (2013) Effect of soil water potential on the fruit quality and yield in fertigation cultivation of paprika in summer *Protected Hort Plant Fac* 22:378-384
- Rhee HC, Choi GL, Jeong JW, Cho MH, Yeo KH, Kim DM, An CG, Lee DY (2013) Effect of soil water potential on the fruit quality and yield in fertigation cultivation of paprika in summer. *Protected Hort Plant Fac* 22:378-384
- Rhie Y.H., and J. Kim 2017, Changes in physical properties of various coir dust and perlite mixes and their capacitance sensor volumetric water content calibrations. *HortSci* 52:162 - 166.
- Rial W.S., and Y.J. Han 2000, Assessing soil water content using complex permittivity. *ASAE* 43:1979-1985.
- Sakaki T., A. Limsuwat, and T.H. Illangasekare 2011, A simple method for calibrating dielectric soil moisture sensors: laboratory validation in sands. *Vadose Zone J* 10:526 - 531.
- Seo YJ, Kim BS, Lee JP, Kim JS, Park KC, Park CG, Cha SW (2015) Effects of soil water potential and nitrogen fertilization on characteristics of photosynthesis and chlorophyll fluorescence induction in *schisandra chinensis baillon*. *Korean J Soil Sci Fert*48(6):705-711
- Shin J.H., and J.E. Son 2015, Irrigation criteria based on estimated transpiration and seasonal light environmental condition for greenhouse cultivation of paprika. *Protected Hort Plant Fac* 24:1-7.
- Sim S.Y., S.Y. Lee, S.W. Lee, M.W. Seo, J.W. Lim, S.J. Kim, and Y.S. Kim 2006a, Characteristics of root media water in various irrigation control methods for tomato perlite bag culture. *J Bio-Environ Control* 15:225-230.
- Sim S.Y., S.Y. Lee, S.W. Lee, M.W. Seo, J.W. Lim, S.J. Kim, and Y.S. Kim 2006b, Appropriate set time in irrigation system by time clock in tomato perlite bag culture. *J Bio-Environ Control* 15:327-334.
- Smajstrla A.G., and S. J. Locascio 1996, Tensiometer-controlled, drip-irrigation scheduling of tomato. *ASABE* 12:315-319.
- Thompson RB, Gallardo M, Agüera T, Valdez LC, MD (2006) Evaluation of the watermark

- sensor for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrigation Science* 24(3):185-202
- Topp G.C., J.L. Davis, and A.P. Annan 1980, Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour Res* 16:574-582.
- Tosio CRO, Hiromi E, Masaharu K, Akira T, Masahiro K, Lek NA, Tsuyoshi M (1985) Effect of soil water potential on transpiration rate in cucumber plants *BIOTRONICS* 14:1-6
- WEIS(Water environment Information System) (2019)
- Woo Y.H., H.J. Kim, Y.I. Nam, I.H. Cho, and Y.S. Kwon 2000, Predicting and measuring transpiration based on phytomonitoring of tomato in greenhouse. *Hort Environ Biotechnol* 41:459-463.
- Woo, YH, Kim HJ, Nam YI, Cho IM, Kwon YS (2000) Predicting and measuring transpiration based on phytomonitoring of tomato in greenhouse. *J Korea Soc Hort Sci* 41(5):459-463
- Wraith J.M., and D. Or 1999, Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: experimental evidence. *Water Resour Res* 35:361 - 369.
- Yoon BH, Cho EK, Baek JH, Cho IH, Woo YH, Choi EY (2020) Comparison of irrigation and drainage volumes, growth and fruit yield under different automated irrigation methods in tomato rockwool hydroponics. *Protected Hort and Plant Factory* 29(1):28-35
- Yu SH, Bae JH (2004) The Effect of fertigation setting point on the growth and fruit quality of sweet pepper (*Capsicum annuum* L) *J Bio-Env Con* 13:102-106
- Yun, SK, Kim SJ, Nam ET, Kwon JH, Do YS, Song SY, Kim MY, Choi YH, Kim GS, Shin HS (2020) Evaluation of water stress using canopy temperature and crop water stress index (CWSI) in peach trees. *Protected Hort and Plant Factory* 29(1):20-27



## 사용 메뉴얼

# 수경재배용 배지의 함수량과 배액량 측정 및 관수 제어 시스템



특허 출원 ... 10-2019-0031856, 10-2020-0189342

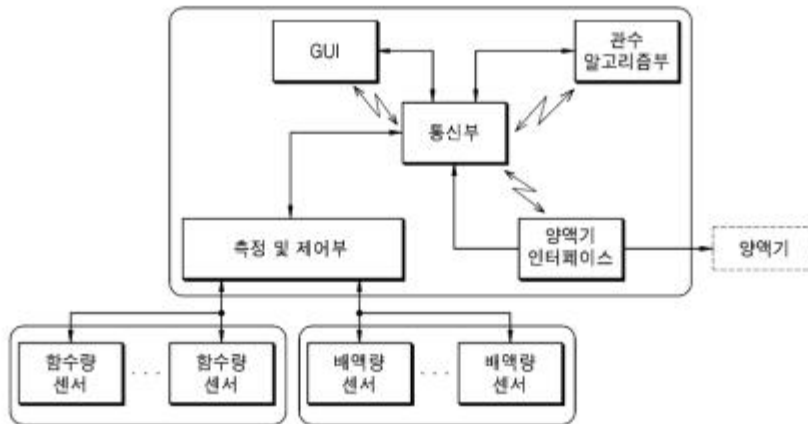
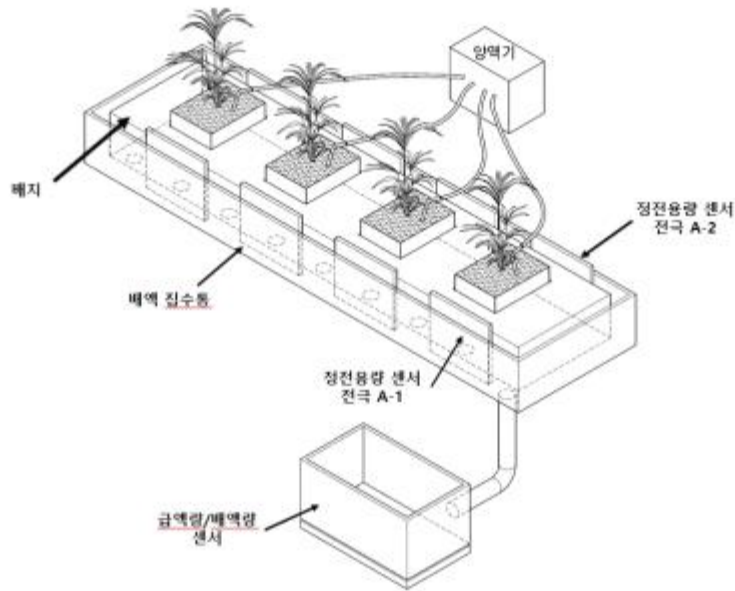
2020. 12. 31.

## 차 례

◎ 각 부 명칭 .....	5
◎ 주요 기능 .....	7
◎ 장치 메뉴	
○ 화면의 구성 .....	8
○ 화면의 표시 .....	10
◎ 설정 방법	
○ 배지의 함수량과 배액량 조절 .....	11
○ 배액 처리 .....	12
○ SW 프로그램 폴더데이터 수집 .....	13
○ 기 타 .....	13



## 각 부 명칭





배액 수집통과  
센서 holder

금액 및 배액  
측정장치



정전용량 센서 및  
배액 수집통 설치



정전용량  
센서 C-1    정전용량  
센서 B-1    배액 수집통    정전용량  
센서 A-1    배지

전체 시스템 실물





## 주요 기능

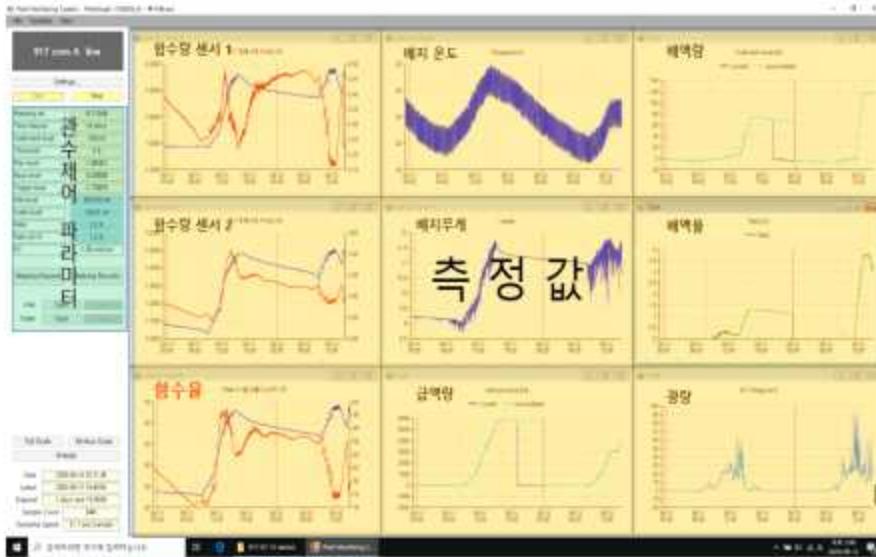
- ◎ 배액량과 배지 함수량을 이용한 관수제어
  - 배액량 기준으로 관수중단 기준 설정
  - 배지 함수율로 관수 재개기준 설정
- ◎ 배지 EC 변화 추세 측정
- ◎ 다양한 측정값, 제어 파라미터 **display**
- ◎ 정전용량 방식의 배지 함수율 측정: 최대 16 센서
- ◎ 로드셀을 이용한 배지 무게 측정
- ◎ 로드셀을 이용한 금액량 측정
- ◎ 정전용량을 이용한 금액량 측정
- ◎ 로드셀을 이용한 배액량 측정
- ◎ 정전용량을 이용한 배액량 측정
- ◎ 광량 측정
- ◎ 배지 온도 측정
- ◎ 배액 EC 측정 가능
- ◎ pH 측정 가능





## 장치 메뉴

### 화면의 구성



• 측정값 display

**김해 대응**

관수 알림 입력

관수 기준센서

관수 주기	Waiting int.	대동 1-4분
1회 배액량	Time Interval	13 min
관수 재개량	Outlet tank level	50 ml
최대 정전용량	Threshold	0.07
기준선	Max level	1.77000
관수 재개량	Base level	0.00000
급액량	Trigger level	1.58700
배액량	Inlet level	1142.87 ml
배액량	Outlet level	576.58 ml
배액 비율	Ratio	0.5 %
배액 비율	Ratio (D-D)	34.7 %
EC	EC	11.94 mS/cm

수동급액

급액종

배액종

• 관수제어 파라미터 display

• 제어정보 입력창



함수량 센서 선정: 최대 16채널



센서 기반 방정식 입력: 함수량



로드셀 영점 조절



센서 정의

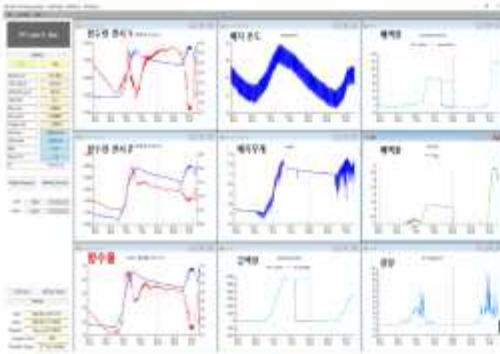


배지 식물 수 입력

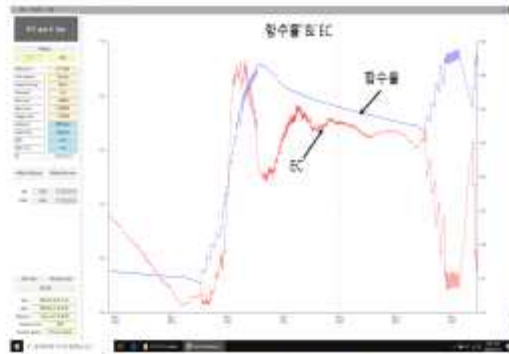


관수 방법 입력

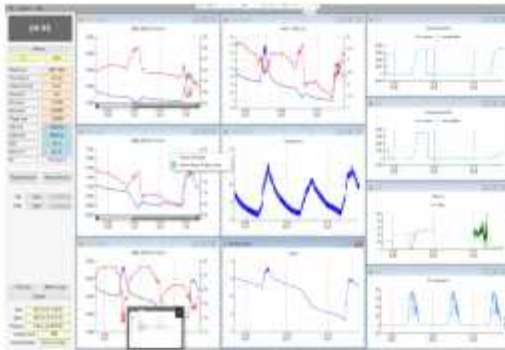
화면의 표시



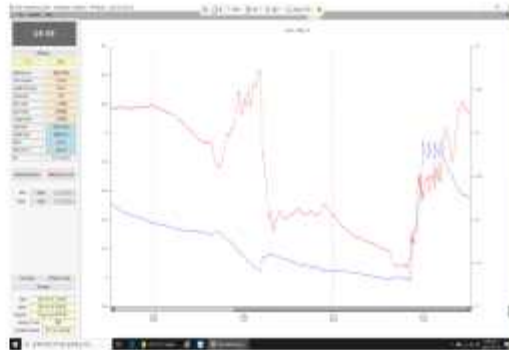
전체 화면



개별 전체 화면



개별화면 48시간 선택



개별화면 48시간 전체 화면



## 설정 방법

### 배지의 함수량과 배액량 설정

Time Slot 1	
관수 시작 시간	Start Time 10 00
관수 종료 시간	Stop Time 11 00
관수 주기	Time Interval 30 mins
관수 재개 정전용량	Low Threshold 0.9
1주기 배액량	Outlet Tank Level 90 ml
관수량	Valve Open Duration 180 secs

Time Slot 2	
Start Time	11 00
Stop Time	14 30
Time Interval	10 mins
Low Threshold	0.9
Outlet Tank Level	90 ml
Valve Open Duration	120 secs

- 관수 시작 시간 : 관수를 시작할 시각을 입력한다.
- 관수 종료 시간 : 관수를 종료할 시각을 입력한다.
- 관수 주기 : 관수를 재개할 시간 간격을 입력한다.
- 관수 재개 정전용량 : 1주기 배액량에 따라 관수가 중단된 후 식물이 배지 내 양액을 흡수하고 함수량이 줄어들면 관수를 재개하기 위한 비율이다. ex) 0.9=90%
- 1주기 배액량 : 실시간으로 측정된 배액량이 설정값 이상이면 관수가 중단된다. 이 때 배지는 포수 상태이다.
- 관수량 : 1회당 최장 관수 시간을 입력한다.

- \* 배지함수량을 높이려면 관수 재개 정전용량 설정을 높인다.
- \* 배액량을 줄이려면 1주기 배액량 설정을 낮춘다.

## 배액 처리

점적핀 수	Inlet/Drain Tank Average	<input type="text" value="5"/>
	Inlet Tank Multiplier	<input type="text" value="0"/>
급액통 비용량	Inlet Tank Limit	<input type="text" value="30000"/> ml
배액통 비용량	Drain Tank Limit	<input type="text" value="30000"/> ml

급액/배액통 비용량 설정

Watering Request	Watering Records
Inlet	<input type="button" value="Open"/> <input type="button" value="Close"/>
Outlet	<input type="button" value="Open"/> <input type="button" value="Close"/>
Full Scale	<input type="button" value="48-Hour Scale"/>
<input type="button" value="Arrange"/>	

급액/배액통 수동 비움



급/배액통에 전동 밸브 및 로드셀을 설치한 사진


\* 급액량이 점적핀당 측정되므로 점적핀 수를 입력한다.

## SW 프로그램 폴더

	이름
시스템 상태 출력	logs
Data 출력 파일	output
	screenshots
	TELOFARM_REV3_5_30_0V
센서 인터페이스	TELOFARM_REV3_5_30_pulse
	TELOFARM_REV3_7_21
	유선-Firmware-single-relay-0514-40sec-low_Active_20_11_11
메인프로그램	PlantGraph (190609_6) - 복사본
	PlantGraph (190609_6)
	PlantGraph (190609_6)-예전
	PlantGraph (190609_6)-예전
주요변수 저장	PlantGraph

## 기 타

- 배지 평균 수분 측정
- 배지의 EC 변화 측정
- 비오거나 흐린 날 관수 문제 해결
- 내구성 향상
- 식물성장 연구에 필요한 다양한 data 수집 가능



농림축산식품부 (전문기관) 농림식품기술기획평가원  
첨단생산기술개발사업의 연구결과임.

[배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술개발]

## 연구개발보고서 초록

과 제 명	(국문) 배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술개발 (영문) Development of eco-friendly hydroponic system for integrated irrigation control based on substrate volumetric water content and sap flow density				
주 관 연구 기관	한국방송통신대학교		주 관 연 구 자	(소속)한국방송통신대학교	
참 여 기 업	(주)텔로팜		책 임 자	(성명) 최은영	
총 연구개발비 (728,000천원)	계	728,000	총 연 구 기 간	2018.4. 26.~2020.12.31(2년 9개월)	
	정부출연 연구개발비	546,000	총 참 여 연 구 원 수	총 인 원	26
	기업부담금	182,000		내부인원	25
	연구기관부담금			외부인원	1

- 연구개발 목표 및 성과
  - 생체정보와 배지 함수량 급액제어로 환경친화형 고품질 과채류(토마토·오이) 생산 기술 개발
    - 생산비(비료) 절감
    - 물 사용량 절감
  - 첨단 기술 이용하여 배지 함수량 및 생체정보 센서 개발
    - 배지 함수량 측정 정확도 향상
    - 배지 함수량과 생체정보 통합적 이용 관수제어 프로그램 개발 및 보완
- 연구개발성과
  - 배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술개발
    - 생체정보와 개발 관수제어 시스템을 이용한 적정 급액 ON/OFF 제어점 구명
    - 개발 관수제어 시스템을 활용한 배지 수분 함량과 생체정보 통합적 이용 급액제어 기술 개발
    - 농가 현장 실증을 통한 수분흡수량 증가 및 물·비료소비량 감소 확인

<개발된 시스템의 관수제어 개요 (겨울 토마토 재배)>

급액개시 첫 배액 배출까지 (타이머 기반)		첫 배액 배출부터 급액종료까지 (타이머 또는 CT/배액량 기반)		
급액 개시	급액 간격 (분)	급액 간격 (분)	Irrigation- on threshold (Capacitance threshold, CT)	Irrigation-off threshold (Drain volume per slab)
> 100w/s	20~30분	10~20	0.95	50

<누적일사량제어와 개발 시스템의 양액 소비량 비교>

구분	기존 급액제어 시스템(누적일사량제어)	새로 개발된 급액제어 시스템
배액량	급액량의 평균 26%	급액량의 평균 18%
양액 소비량	4.0L/200g 토마토 (1-2화방)	3.5L/200g 토마토 (1-2화방)

- 생체정보 센서를 이용한 고품질 오이 생산 기술 개발
  - 시설토양 수분장력 센서를 이용한 오이 관수개시점 구명
  - 시설토양 오이 재배에서 생체정보를 적용한 자동관수 기초자료 획득
  - 관수개시점 자동 제어로 농가 관행적 방식 대비 수분이용효율 90% 증가 구명
- 배지 함수량 및 생체정보 센서 제어 알고리즘 개발
  - 관수 제어장치의 개선 및 정확도 보완
  - 배지 함수량 제어 알고리즘 개발 및 보완
  - 테스트베드 실험을 통한 최적의 관수 조건 구명
  - 농가 현장 실증 실험을 통한 데이터 추적 및 관행 기술과 차이점 구명
- 연구성과 활용실적 및 계획
  - 시설재배 작물의 합리적 관수 제어
    - 작물의 최적 성장을 위한 양수분 조절 및 비료 투입량 감소
    - 시간별 개체별 모니터링 추적을 통한 데이터 습득 및 분석
    - 식물체 내 수분 이동 패턴 분석 및 식물 스트레스 정도에 대한 정확한 측정
    - 과채류의 품질 향상 및 생산량 증대



[별첨 2]

## 자체평가의견서

### 1. 과제현황

		과제번호	118015-03-2-SB010		
사업구분	농식품기술개발사업				
연구분야				과제구분	단위
사업명	첨단생산기술개발사업				주관
총괄과제	기재하지 않음			총괄책임자	기재하지 않음
과제명	배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술개발			과제유형	개발
연구기관	한국방송통신대학교			연구책임자	최은영
연구기간 연구비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차연도	2018. 04. 26 - 2020. 12. 31	150,000	50,000	200,000
	2차연도	2019. 01 01- 2019. 12. 31	198,000	66,000	264,000
	3차연도	2020. 01 01- 2020. 12. 31	198,000	66,000	264,000
	계	33개월	546,000	182,000	728,000
참여기업	(주)텔로팜				
상대국		상대국연구기관			

※ 총 연구기간이 5차연도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 :2021.01.28

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
한국방송통신대학교	부교수	최은영

4. 평가자(연구책임자) 확인 :

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

확약	
----	--

## I. 연구개발실적

### 1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

본 연구과제의 제2 협동기관이 개발한 관수제어 장치는 배지 함수량과 배액량을 실시간으로 측정하여 양액기에 ON/OFF 신호를 줌으로써 특정 식물 종류나 생육 시기에 국한하지 않고 재배식물의 생체정보에 맞게 관수를 제어할 수 있는 효과가 있음을 제1세부기관이 여러 차례의 실험 결과로 증명함. 제1협동기관의 토경 오이재배에서 토양수분장력센서의 적절한 목표점을 결정하는데 지상부 생체정보(물관수액흐름센서, 엽온센서)가 고려될 수 있음을 증명함.

### 2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

본 연구과제의 제2 협동기관이 개발한 관수제어 장치는 시판 중인 기존의 배지 수분측정 센서에 비해 배지 전체의 함수량을 정전용량값으로 측정하고 배액량을 고려하여 제어하는 신개념 급액제어 장치로 제1세부기관이 연구한 결과 스마트팜 고품질 과채류 생산에 적용 확대할 경우 수분이용 효율을 높이고 물과 비료소비는 줄여 환경부하를 감소시키는 효과를 기대할 수 있음. 제1 협동기관의 토경 오이재배에서도 지하부 함수량과 지상부 수분상태를 고려하여 급액할 경우 토경에서 수분이용 효율을 관행적 방법보다 많이 높일 수 있음.

### 3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

과채류 생산 현장에 실시간 근권 수분상태와 지상부 생체정보를 고려한 통합된 급액제어 시스템이 적용된다면 매일의 급액개시 및 급액종료 시간과 급액 간격 시간을 결정할 수 있는 정밀농업을 실현할 수 있음.

### 4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

주관기관인 방송대에서는 개발 관수제어 장치를 과채류 수정재배기술에 적용하는 데 필요한 적절한 재개울과 배액량을 구명하고 기존 관수제어 방식과 비교하여 수분이용효율과 식물생육 및 수량을 비교하는 실험을 수행함. 제1 협동기관의 토경 오이재배 실험의 경우 3년간 상업적 재배현장에서 실험함으로써 기존 관행적 방법과 지속적으로 비교 재배를 수행함.

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

■ 등급 : (아주우수, 우수, 보통, 미흡, 불량)

본 연구를 통하여 1건의 특허출원이 진행되었으며, 4건의 비SCI 논문이 출간되었으며 2건의 SCIE 논문이 게재 예정이며 14건의 학회발표를 진행하였습니다.

## II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	가중치	달성도 (%)	자체평가
○토마토 수경배지 함수량 및 생체정보 모니터링	35	100	관행적 관수제어 방식을 대조구로 설정하여 재배 실험을 통해 생체정보와 개발 관수제어 시스템을 적용하기 위한 적정 급액 ON/OFF 제어점 구명함.
○오이 토경에서 생체정보 모니터링	35	100	시설재배 토경 오이 재배 농가 현장 실험을 통해 농가 관행적 관수 방식을 대조구로 비교 실험을 통하여 토양 수분장력 센서를 이용한 오이 관수개시점을 구명함.
○배지 함수량 측정 센서 개선 및 정확도 보완	30	100	테스트베드 실험을 통한 관수 제어장치의 개선 및 정확도 보완함.
1차년도 계	100	100	
○ 토마토 수경배지 함수량 및 생체정보 이용 급액제어 기술 개발	35	100	누적일사량 및 물관수액흐름센서에 의한 급액 제어 방식을 대조구로 설정하여 개발 관수제어 시스템을 활용한 배지 수분 함량과 생체정보 통합적 이용 급액제어 기술을 개발함.
○오이 토경재배에서 생체정보 이용 급액제어	35	100	시설재배 토경 오이 재배 농가 현장 실험을 통한 생체정보를 적용한 자동관수 기초자료를 획득함.
○ 배지 함수량 및 생체정보 센서 제어 알고리즘 개발	30	100	테스트베드 실험을 통한 배지 함수량 제어 알고리즘을 개발하고 보완함.
2차년도 계	100	100	
○배지수분 함량과 생체정보 통합적 이용 급액제어 기술 개발	35	100	농가 현장 실증을 통한 수분흡수량 증가 및 물·비료소비량 감소를 확인함
○오이 토경 급액제어 기술 현장 실증	35	100	관수개시점 자동 제어로 농가 관행적 방식 대비 수분이용효율 90% 증가하는 것을 구명함.
○배지 함수량 및 생체정보 통합적 이용 관수제어 프로그램 개발 및 보완	30	100	테스트베드 실험을 통한 최적의 관수 조건 구명 및 농가 현장 실증 실험을 통한 데이터 축적과 관행 기술과 차이점을 구명함.
3차년도 계	100	100	

### III. 종합의견

#### 1. 연구개발결과에 대한 종합의견

개발된 정전용량 측정 기반 배지 수분센서제어 장치는 배액 발생이 없으면 타이머 기반의 일정한 급액간격에 의해 급액 되고 배액이 발생하면 정전용량값을 고려한 급액제어 방식으로 전환되는 전 세계에서 유일한 관수제어 방식임. 스마트팜 고품질 과채류 생산에 적용 확대할 경우 수분이용효율을 높이고 물과 비료소비는 줄여 환경부하를 감소시키는 효과를 기대할 수 있음.

#### 2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

본 연구에서 도입한 전자공학기술의 자동관수화 적용 사례는 첨단기술융복합의 새로운 시도인 만큼 스마트팜 재배 현장에 보급되기 위해서는 지속적인 재배 현장의 데이터 축적이 필요하다는 것을 고려하여 평가해 주시기 바랍니다.

#### 3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

현재 개발 장치를 구매한 춘천 토마토 재배농가에서 지속적인 연구를 수행할 예정이며 농정원 지원으로 구축한 방송대 실습장에 설치하여 현장실습 교육용과 고도화 연구과제에 적극 활용할 계획임.

### IV. 보안성 검토

o 연구책임자의 보안성 검토의견, 연구기관 자체의 보안성 검토결과를 기재함

※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성함.

#### 1. 연구책임자의 의견

#### 2. 연구기관 자체의 검토결과

[별첨 3]

## 연구성과 활용계획서

### 1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input checked="" type="checkbox"/> 자유응모과제 <input type="checkbox"/> 지정공모과제	분 야		
연구과제명	배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 환경친화형 수경재배 기술개발			
주관연구기관	한국방송통신대학교	주관연구책임자	최은영	
연구개발비	정부출연 연구개발비	기업부담금	연구기관부담금	총연구개발비
	546,000	182,000		728,000
연구개발기간	2018-04-26~ 2020-12-31			
주요활용유형	<input type="checkbox"/> 산업체이전 <input checked="" type="checkbox"/> 교육 및 지도 <input type="checkbox"/> 정책자료 <input type="checkbox"/> 기타(                      ) <input type="checkbox"/> 미활용 (사유:                      )			

### 2. 연구목표 대비 결과

당초목표	당초연구목표 대비 연구결과
① 배지 함수량 및 생체정보 센서를 이용한 고품질 토마토 생산 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 생체정보와 개발 관수제어 시스템과 생체정보를 활용한 적정 급액 ON/OFF 제어점 구명</li> <li>• 개발 관수제어 시스템을 활용한 배지 수분 함량과 생체정보 통합적 이용 급액제어 기술 개발</li> <li>• 농가 현장 실증을 통한 수분흡수량 증가 및 물·비료소비량 감소 확인</li> </ul>
② 생체정보 센서를 이용한 고품질 오이 생산 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시설토양 수분장력 센서를 이용한 오이 관수개시점 구명</li> <li>• 시설토양 오이 재배에서 생체정보를 적용한 자동관수 기초자료 획득</li> <li>• 관수개시점 자동 제어로 농가 관행적 방식 대비 수분이용효율 90% 증가 구명</li> </ul>
③ 배지 함수량 및 생체정보 센서 제어 알고리즘 개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 관수 제어장치의 개선 및 정확도 보완</li> <li>• 배지 함수량 제어 알고리즘 개발 및 보완</li> <li>• 테스트베드 실험을 통한 최적의 관수 조건 구명</li> <li>• 농가 현장 실증 실험을 통한 데이터 축적 및 관행 기술과 차이점 구명</li> </ul>

3. 연구목표 대비 성과

성과목표	사업화지표										연구기반지표									
	지식 재산권			기술실시 (이전)		사업화					기술인증	학술성과			교육지도	인력양성	정책 활용·홍보		기타 (타 연구 활용 등)	
	특허출원	특허등록	품종등록	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출	투자유치		논문		학술발표			정책활용	홍보전시		
												SCI	비SCI							논문평균 IF
단위	건	건	건	건	백만원	백만원	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	명	건	건			
가중치	30					5							20	10	10		25			
최종목표	1					1	10		1			3	3	0.8	6	6	2	4		
1차년도	목표													2	2			1		
	실적								5					2	4					
2차년도	목표			1		1	5		1			1	2	0.4	2	2	1		1	
	실적												1		8	5	3		2	
3차년도	목표	1					5					1	1	0.4	2	2	1		1	
	실적	1					3.3		1			2	3	0.4	4	3	1			
소계	목표	1		1		1	10		1			2	3	0.8	6	6	2		3	
	실적	1				1	3.3		6			2	4	0.4	11	11	4		3	
종료 1차년도																				
종료 2차년도																				
종료 3차년도																				
종료 4차년도																				
종료 5차년도																				
소계																				
합계	1			1		1	3.3		6			2	4	0.4	11	11	4		3	

#### 4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	정전용량 수분센서를 이용한 급액제어 시스템 개발
②	개발 관수제어 시스템을 활용한 배지 수분 함량과 생체정보 통합적 이용 급액제어 기술
③	시설토양 오이 재배에서 생체정보를 적용한 자동관수 기술

#### 5. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)				
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복제	외국기술 소화·흡수	외국기술 개선·개량	특허 출원	산업체이전 (상품화)	현장애로 해결	정책 자료	기타
①의 기술		v				v				
②의 기술		v								
③의 기술		v								
:										
:										

#### 6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과 활용계획 및 기대효과
①의 기술	시설재배 작물의 합리적 관수제어 방식으로 스마트팜 도입 및 확대
②의 기술	작물의 최적 생장을 위한 양수분 조절 및 물 비료 투입량 감소 결과로 과채류의 품질 향상 및 생산량 증대
③의 기술	시설 채소 토양재배에서 관수개시점 자동 제어 시스템 도입 및 확대

7. 연구종료 후 성과창출 계획

성과목표	사업화지표										연구기반지표								
	지식 재산권			기술실시 (이전)		사업화					기술인증	학술성과			교육지도	인력양성	정책 활용·홍보		기타 (타 연구용 등)
	특허출원	특허등록	품종등록	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출	투자유치		논문		학술발표			정책 활용	홍보전시	
												SCI	비SCI						
단위	건	건	건	건	백만원	백만원	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	명	건	건		
가중치							100												
최종목표							10												
연구기간 내 달성실적																			
연구종료 후 성과창출 계획							10												

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

핵심기술명 <sup>1)</sup>	정전용량 수분센서를 이용한 배지 함수량과 배액량 제어 시스템		
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input checked="" type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	천원
이전방식 <sup>2)</sup>	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타( )		
이전소요기간		실용화예상시기 <sup>3)</sup>	
기술이전시 선행조건 <sup>4)</sup>			

- 1) 핵심기술이 2개 이상일 경우에는 각 핵심기술별로 위의 표를 별도로 작성
- 2) 전용실시 : 특허권자가 그 발명에 대해 기간·장소 및 내용을 제한하여 다른 1인에게 독점적으로 허락한 권리  
통상실시 : 특허권자가 그 발명에 대해 기간·장소 및 내용을 제한하여 제3자에게 중복적으로 허락한 권리
- 3) 실용화예상시기 : 상품화인 경우 상품의 최초 출시 시기, 공정개선인 경우 공정개선 완료시기 등
- 4) 기술 이전 시 선행요건 : 기술실시계약을 체결하기 위한 제반 사전협의사항(기술지도, 설비 및 장비 등 기술이전 전에 실시기업에서 갖추어야 할 조건을 기재)



## 주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 첨단생산기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 첨단생산기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.