

발 간 등 록 번 호

11-1543000-002557-01

# 수경재배 과채류 생산성 및 수분이용 효율성 향상을 위한 정밀 관수제어 기반 보급형 식물생산시스템 개발 최종보고서

2018. 12. 27.

주관연구기관 / 안동대학교 산학협력단

협동연구기관 / 제주대학교 산학협력단

협동연구기관 / (주)우성하이텍

위탁연구기관 / 서울대학교 산학협력단

농 립 축 산 식 품 부  
농림식품기술기획평가원

# 제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

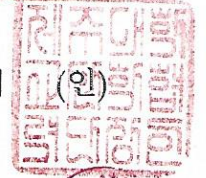
본 보고서를 “수경재배 과채류 생산성 및 수분이용 효율성 향상을 위한 정밀 관수제어 기반 보급형 식물생산시스템 개발”(개발기간 : 2015. 12. 28. ~ 2018. 12. 27.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2019. 1. 20.

주관연구기관명 : 안동대학교 산학협력단 (대표자) 이 혁 채 (인)



협동연구기관명 : 제주대학교 산학협력단 (대표자) 도 양 희 (인)



협동연구기관명 : (주)우성하이텍 (대표자) 이 해 완 (인)



위탁연구기관명 : 서울대학교 산학협력단 (대표자) 김 성 철 (인)



참여기관명 : (주)우성하이텍 (대표자) 이 해 완 (인)



주관연구책임자 : 신 종 화

협동연구책임자 : 조 영 열

협동연구책임자 : 심 정 옥

위탁연구책임자 : 손 정 익

참여기관책임자 : 이 해 완

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

## 보고서 요약서

과제고유번호	115104-3	해 당 단 계 연 구 기 간	2015. 12. 28. ~ 2018. 12. 27.	단 계 구 분	3/3
연구사업명	단 위 사 업	농식품기술개발사업			
	사 업 명	첨단생산기술개발사업			
연구과제명	대 과 제 명	(해당 없음)			
	세부 과제명	수경재배 과채류 생산성 및 수분이용 효율성 향상을 위한 정밀 관수제어 기반 보급형 식물생산시스템 개발			
연구책임자	신 종 화	해당단계 참여연구원 수	총: 12명 내부: 12명 외부: 0명	해당단계 연구개발비	정부: 230,000천원 민간: 57,500천원 계: 287,500천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 15명 내부: 15명 외부: 0명	총 연구개발비	정부: 690,000천원 민간: 172,500천원 계: 862,500천원
연구기관명 및 소속부서명	안동대학교 원예육종학과			참여기업명 (주)우성하이텍	
협 동 연 구	연구기관명: 제주대학교 산학협력단			연구책임자: 조영열	
협 동 연 구	연구기관명: (주)우성하이텍			연구책임자: 심정옥	
위 탁 연 구	연구기관명: 서울대학교 산학협력단			연구책임자: 손정익	
※ 국내외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음					
연구개발성과의 보안등급 및 사유	해당사항 없음				
					보고서 면수  121
○ 연구목적 - 양수분의 이동특성에 근거한 보급형 정밀 관수제어 장치의 활용을					

통한 수경재배 과채류 재배에서의 생산성 향상 및 양액제어 기술 증진 식물생산시스템 개발 및 농가보급

○ 연구내용

- 양수분 이동 특성을 고려한 정밀 관수제어 시스템 개발
- 고품질 시설 과채류 생산 및 양수분 에너지 절감을 위한 최적 관수제어 기술 개발
- 농가 보급형 관수제어 프로그램 개발
- 정밀 관수제어 기반 보급형 식물생산시스템 개발

○ 연구개발성과

- 무게측정 기준의 증산량 측정 장치 개발
- 배지 특성에 따른 관수 전략 기준안 제시
- 증산 및 배지 함수율 변화에 미치는 각 시계열 요인의 정량적 분석
- 쉽고 사용하기 편리한 사용자 인터페이스UI 화면으로 소프트웨어 개발
- 정밀 양액 공급제어가 가능한 보급형 관수제어 시스템 개발
- 상업화 가능 관수제어 시스템 개발 및 현장 식물생산시스템 적용성 검증

○ 연구개발성과의 활용계획

- 연구를 통해 개발된 보급형 식물생산시스템의 과채류 생산농가의 관수제어에 활용
- 수분이동특성 연구 개발결과와 작물의 수분이동특성 파악결과를 개발된 장치에 적용하여 수분이용 효율성 증진방안 연구에 활용
- 증산추정 기술과 수분특성 파악연구 결과를 활용한 관수제어 기술 보급과 가이드라인 제시를 위한 기초 데이터로 활용



<요약문>

<p>연구의 목적 및 내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ 연구목적           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 양수분의 이동특성에 근거한 보급형 정밀 관수제어 장치의 활용을 통한 수경재배 과채류재배에서의 생산성 향상 및 양액제어 기술 증진 식물생산시스템 개발 및 농가보급</li> </ul> </li> <li>○ 연구내용           <ul style="list-style-type: none"> <li>- 양수분 이동 특성을 고려한 정밀 관수제어 시스템 개발</li> <li>- 고품질 시설 과채류 생산 및 양수분 에너지 절감을 위한 최적 관수제어 기술 개발</li> <li>- 농가 보급형 관수제어 프로그램 개발</li> <li>- 정밀 관수제어 기반 보급형 식물생산시스템 개발</li> </ul> </li> </ul>				
<p>연구개발성과</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 생육단계별 양수분 흡수 및 이동 패턴 분석 완료</li> <li>- 무게측정 기준의 증산량 측정 장치 개발완료</li> <li>- 환경 요인별 증산율 기여도 분석</li> <li>- 배지 특성에 따른 관수전략 기준안 제시</li> <li>- 증산 및 배지 함수율 변화에 미치는 각 시계열 요인의 정량적 분석</li> <li>- open-source microcontroller를 활용한 농가 보급형 관수제어 프로그램 개발</li> <li>- 배지 내 함수율 측정오차 최소화 기술 개발</li> <li>- 쉽고 사용하기 편리한 사용자 인터페이스UI 화면으로 소프트웨어 개발완료</li> <li>- 정밀 양액 농도 및 산도 조절 관수제어 시스템의 소형화</li> <li>- 정밀 양액 공급제어가 가능한 보급형 관수제어 시스템 개발</li> <li>- 상업화 가능 관수제어 시스템 개발 및 현장 식물생산시스템 적용성 검증</li> </ul>				
<p>연구개발성과의 활용계획 (기대효과)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 연구를 통해 개발된 보급형 식물생산시스템의 과채류 생산농가의 관수 제어에 직접 활용</li> <li>- 수분이동특성 연구 개발결과와 작물의 수분이동특성 파악결과를 개발된 장치에 적용하여 수분이용 효율성 증진방안 연구에 활용</li> <li>- 증산추정 기술과 수분특성 파악연구 결과를 활용한 관수제어 기술 보급과 가이드라인 제시를 위한 기초 데이터로 활용</li> <li>- 각 도의 기술원 및 기술센터를 중심으로 농가보급형 수분관리 시스템 제작을 위한 교육에 활용</li> <li>- 양수분을 제어하기 위한 분야에 기존의 개발된 수분센서 모듈에 양분 센서를 부착한 시스템 개발에 활용 계획</li> <li>- 저비용 오픈소스를 사용한 다른 microcontroller 또는 microprocessor 등에 활용 가능</li> <li>- 농가 스스로가 직접 제작하여 농가 현장에 적용 가능</li> </ul>				
<p>국문핵심어 (5개 이내)</p>	과채류	보급형	수경재배	식물생산시스템	정밀관수
<p>영문핵심어 (5개 이내)</p>	fruit vegetable	entry	hydroponic	plant production system	precise irrigation

## 〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 .....	6
2. 연구수행 내용 및 결과 .....	8
3. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 .....	118
4. 연구결과의 활용 계획 등 .....	120
붙임. 참고 문헌 .....	121

# 제1장 연구개발과제의 개요

## 제1절. 연구개발 목적

### 1. 연구개발의 최종목표

양수분의 이동특성에 근거한 보급형 정밀 관수제어 장치의 활용을 통한 수경재배 과채류재배에서의 생산성 향상 및 양액제어 기술 증진 식물생산시스템 개발 및 농가보급

### 2. 연구개발 목표와 성격

- 양수분 이동 특성을 고려한 정밀 관수제어 시스템 개발
- 고품질 시설 과채류 생산 및 양수분 에너지 절감을 위한 최적 관수제어 기술 개발
- 농가 보급형 관수제어 프로그램 개발
- 정밀 관수제어 기반 보급형 식물생산시스템 개발

## 제2절. 연구개발의 필요성

### 1. 국내외 현황 및 문제점과 전망

- 수경재배의 양수분관리는 작물의 생육과 매우 긴밀한 관계를 가지고 있으며 농가 생산량과 직결된다. 과채류 작물에서 양수분의 과부족에 의한 작물의 스트레스는 과실의 생성과 발달에 지대한 영향을 미친다. 수분과 관련한 대표적인 생리장해로는 위조, 낙화, 낙과, 열과, 기형과 발생 등이 있으며, 원인으로서는 수분이동의 제한에 의한 양분분배의 불균형, 식물조직의 비정상 발달 및 파괴를 들 수 있다. 양수분의 최적 관리를 위해서는 수분의 공급 주기, 공급량, 그리고 공급양액의 농도와 산도를 체계적으로 조절하여야 한다.
- 지금까지 생산량 증대를 위한 다양한 양수분관리 기술이 개발이 되었고 현재에도 많은 연구가 진행되고 있지만, 대부분의 농가에서 사용하는 타이머에 의한 정량공급 방식 및 누적 광량 배양액 공급 방식은 작물의 수분 생리반응을 충분히 반영하지 못하고 있다. 고품질 과채류의 생산성 향상을 위해서는 양수분공급 주기, 공급량 조절 등의 관수 전략이 수립이 필요하다.
- 대규모 시설농가의 소득은 작물의 생산량과 생산을 위한 투입비와 직접적인 관계를 가진다. 우리나라는 물 부족 국가에서는 작물생산에 필요로 하는 양수분의 조절이 무엇보다도 중요한 환경제어 요소로 대두되고 있다. 따라서 에너지 투입 측면에서 수분의 사용 효율을 높이고자 다양한 양수분 관리 방법이 시도되고 있으며, 그중에서 누적광량 기준 관수 공급방식은 시설원예에서 대표적으로 수분과 양분을 절약하면서 원예산물을 생산할 수 있는 고도의 기술로 많이 활용되고 있다.
- 누적 광량 기준 관수 공급 체계에서는 지금까지의 선행 연구에 의한 결과에 기초하여 제어하므로 시시각각 변화하는 작물 생육환경을 충분히 고려하지 못하는 한계가 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 작물의 수분반응에 입각하여 정밀하게 양수분의 이동을 모니터링 하고 관수를 제어할 수 있는 장치를 기반으로 고도의 관수제어 기술이 요구된다.

## 2. 연구개발의 필요성

- 최적의 수분관리를 위해서는 수분 이동에 의한 작물의 반응을 실시간으로 판단할 수 있어야 한다. 이러한 데이터를 기반으로 수분에 대한 작물의 생리 반응을 가시화 할 수 있는 정량화 지표의 설정이 필요하며, 이러한 지표에 의해 운영되는 정밀 관수제어 시스템이 요구된다. 이를 위하여 체계적 수분관리가 가능한 지능형 관수제어 장치와 최적의 관수관리 방법의 개발이 필요하다.
- 대부분의 대형 상업농에서 수분이용 효율을 높이고자 재배 체계를 개선하고 있으며, 이러한 농가 실정에 맞거나 개선된 관수관리 방법이 적용될 수 있는 효율적인 식물생산시스템 개발이 필요하다. 실제로 해외 기업의 관수제어 시스템을 국내에 적용하는데 많은 한계가 있다. 국내 기후 및 재배 환경에 적합하며 농가가 쉽게 사용할 수 있는 사용자 중심의 정밀 관수제어 시스템 기반의 식물생산시스템의 개발이 절실히 요구된다.
- 본 과제의 연구 결과를 통한 효율적인 식물생산시스템 개발을 통하여 국내 시설자재 산업의 국제 경쟁력 제고와 고효율 작물생산 기술을 통한 농가의 소득에 기여할 것으로 판단된다.

### 제3절. 연구개발 범위

- 관수제어 알고리즘 개발을 위한 관수제어 지표(환경, 생육) 설정
- 양수분관리 지표를 활용한 관수제어 프로그램 개발
- 과채류 채소 작물 생육 형태에 따른 작물 내 양수분 이동 모델 개발
- 근권 환경에 따른 시스템 내의 양수분 이동 모델 개발
- 작물 내 수분 환경에 따른 생육특성(생산성, 수분생리장해) 비교 분석
- 작물생육과 환경과의 관계 분석을 통한 최적 관수제어 알고리즘 개발
- 양수분관리 요인별 양수분 에너지 절감 효율 비교 분석
- 실시간 작물 내 양수분 이동 모니터링 및 정밀 제어가능 보급형 관수제어 시스템 개발
- 농가 보급을 위한 정밀 관수제어 시스템의 국산화 및 현장 적용 분석
- 정밀 관수제어시스템 기반 보급형 식물생산시스템 개발

## 제2장 연구수행 내용 및 결과

### 제1절. 연구개발 목표

- 주관연구기관(안동대학교) : 과채류 관수제어를 위한 수분이동 분석 및 정밀 관수제어 기반 식물생산시스템 개발
- 1세부(위탁)(서울대학교) : 배지 함수율 및 배액량 설정 조건에 따른 적정 관수량 추정 기술 개발
- 1협동연구기관(제주대학교) : 농가 보급형 관수제어 지표 설정 및 프로그램 개발
- 2협동연구기관(우성하이텍) : 농가 보급형 정밀 관수제어 시스템 개발 및 현장 적용

### 제2절. 연구기관 별 연구내용

#### 1. 제1세부기간: 안동대학교

(과제명: 과채류 관수제어를 위한 양수분이동 분석 및 정밀 관수제어 기반 식물생산시스템 개발)

- 작물 생육 형태에 따른 작물 내 수분이동 변화 분석
  - ✓ 생육단계별 양수분 흡수 및 이용 패턴 분석
  - ✓ 생장 패턴에 따른 작물내 sink와 source간 수분 함량 비교
- 환경 요인별 작물 내 수분이동 기여도 분석
  - ✓ 근권의 물리적 환경요인에 따른 작물 내 양수분 이동 특성 비교
  - ✓ 공급양액의 농도조건에 따른 양수분 흡수 특성 분석
  - ✓ 환경 요인별 양수분 이동 특성에 따른 기여도 분석 및 양수분 이동 모델링
- 고품질 과채류(토마토, 파프리카) 대량생산을 위한 수분제어 요인 분석 및 수분관리기술 개발
  - ✓ 과채류(토마토, 파프리카) 생산성 향상 양수분관리 기술 개발
  - ✓ 과채류(토마토, 파프리카) 수분생리장해 최소화 양수분관리 기술 개발
  - ✓ 정밀 관수제어 시스템 활용을 위한 최적 관수제어 알고리즘 개발
  - ✓ 생산성 향상과 양수분 이용효율 증진을 위한 재배 가이드라인 제시
- 정밀 관수 제어를 위한 시스템 최적화
  - ✓ 농가 보급형 양수분관리 시스템 보완
  - ✓ 농가 보급형 양수분관리 시스템 최적화
  - ✓ 정밀 관수제어 기반 농가 보급형 식물생산시스템 개발

#### 2. 제1세부(위탁): 서울대학교

(과제명: 배지 함수율 및 배액량 설정 조건에 따른 관수량 추정 기술 개발)

- 배지 함수율 관련 시계열 데이터 해석 기반 구축 및 분석
  - ✓ 광도, VPD, 증산, 배지 함수율, EC, 급배액 데이터의 시계열 해석
  - ✓ 증산 및 배지 함수율 변화에 미치는 각 시계열 요인의 정량적 분석
- 증산 및 배액량 추정에 의한 배지 함수율 변화 모델 개발
  - ✓ 설정 배지 함수율에 따른 배액량 추정 모델 개발
  - ✓ 증산 및 배액량 추정 모델을 이용한 배지 함수율 변화 모델 개발
- 배지 함수율 및 배액량 설정 조건에 따른 적정 관수량 추정 기술 개발
  - ✓ 배지 함수율 및 배액량 설정 조건에 따른 따른 관수량 추정 기술 개발

### 3. 제1협동기관: 제주대학교

(과제명: 농가 보급형 관수제어 지표 설정 및 프로그램 및 개발)

- 관수제어 알고리즘 개발을 위한 제어 지표(환경, 생육)의 분석
  - ✓ 문헌을 통한 관수제어에 사용된 제어 지표(환경, 생육)의 분석
  - ✓ 문헌을 통한 관수제어 알고리즘 분석 및 관수제어 사례 분석
- 사용자 중심 관수제어 프로그램 개발
  - ✓ 농가 보급형 관수제어 프로그램 개발
- 실시간 수분 이동 모니터링 및 농가 보급형 관수제어 시스템 개발
  - ✓ 사물인터넷을 활용한 양수분 관리 모니터링
  - ✓ 농가 보급형 양수분관리 시스템 현장적용
  - ✓ 하드웨어/소프트웨어 통합 시스템 구축

### 4. 제2협동기관: 우성하이텍

(과제명: 농가 보급형 정밀 관수제어 시스템 개발 및 현장 적용)

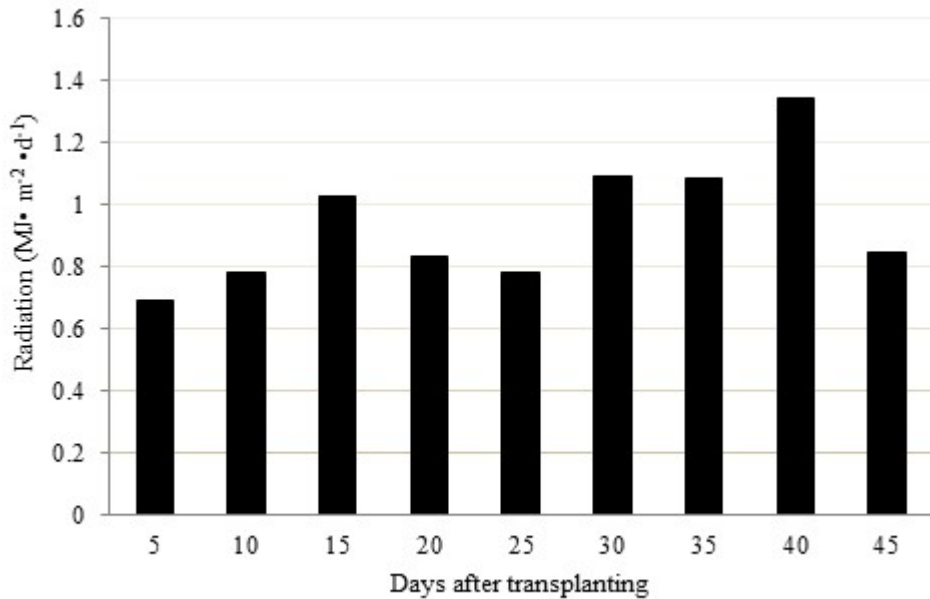
- 최적 관수 제어를 위한 작물 내 수분이동 측정 기술 고도화
  - ✓ 배지와 작물 내 양수분 함량 분할 측정 기술 연구
  - ✓ 배지함수율에 따른 양액공급 속도 조절 알고리즘 개발
  - ✓ 배지 내 함수율 측정오차 최소화 기술 연구
- 안정적인 관수제어 시스템 개발을 위한 장치의 국산화, 부품개발
  - ✓ 수입부품을 대체한 부품개발
  - ✓ 시스템 안정화를 위한 장치 제작
  - ✓ 정밀 양액 공급 제어 고도화
- 시설형태(농가환경)에 따른 보급형 관수제어 시스템 개발 및 성능 검증
  - ✓ 정밀 양액 농도 및 산도 조절 관수제어 시스템의 소형화
  - ✓ 정밀 양액 공급제어가 가능한 보급형 관수제어 시스템 개발 및 농가 실증
  - ✓ 상업화 가능 관수제어 시스템 개발 및 현장 식물생산시스템 적용성 검증

### 제3절. 연구수행 결과

1. 과채류 관수제어를 위한 양수분이동 분석 및 정밀 관수제어 기반 식물생산시스템 개발
  - 가. 작물의 생육단계 구분을 위한 지표 설정

#### (1) 작물 생육지표 기준 탐색

- (가) 현재 과종, 정식을 기준으로 재배일수를 생육단계의 구분 기준으로 많이 이용되고 있음
- (나) 다양한 생육환경 변수와 환경요인의 복잡한 관계로 인한 객관적인 지표설정을 위하여 작물생육 기준의 단계 구분을 실시



<재배일수에 따른 일정하지 않은 환경요인의 예시>

- (다) 작물 생육 지표 중 마디수, 잎수, 초장, 초폭 등의 변수는 환경에 의해 높은 편차를 보이고 있음
- (라) 증발산 산출 식에서도 직접적인 작물 생육 지표로 이용되는 엽면적 지수를 생육단계의 구분 지표 이용이 적합

$$ET = a * [1 - \exp(-k * LAI)] * RAD / \lambda + b * LAI * VPD$$

(단, VPD : 수증기압포차, LAI : 엽면적지수)

#### (2) 작물 생육의 구분

- (가) 다수 가지과 작물의 재배지침서의 생육 기준인 영양생장과 생식생장은 작물의 엽면적이 집적적으로 관여함을 반영
- (나) 과채류의 과실생성과 발육을 위해 필요한 기초 엽면적이 영양생장과 생장을 구분하는 기준으로 이용됨

나. 작물 생육에 따른 생육단계의 구분

(1) 작물 생육 데이터 수집을 위한 재배 시스템 구축

(가) 생육 데이터 수집을 위한 재배 시스템

- ① 480m<sup>2</sup> 플라스틱 하우스 (안동대학교 실험농장)
- ② 네덜란드 과채류 배양액
- ③ 비순환 형태의 양액자동 공급
- ④ 재배 매뉴얼에 따른 적심 적엽 실시

(나) 작물재배 일정

- ① 3월 10일 ; 토마토 (200주) 파종
- ② 4월 25일 ; 토마토 유묘 큐브 가식
- ③ 6월 4일 ; 토마토 실생묘 정식 (1차)
- ④ 7월 4일 ; 급배액량 측정 및 생육조사 (1주일 간격)

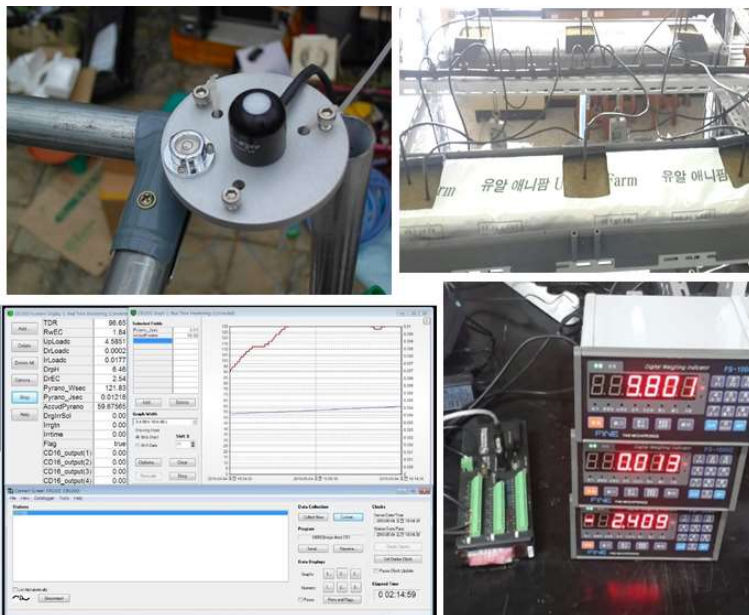


<7월 4일>



<7월 29일>

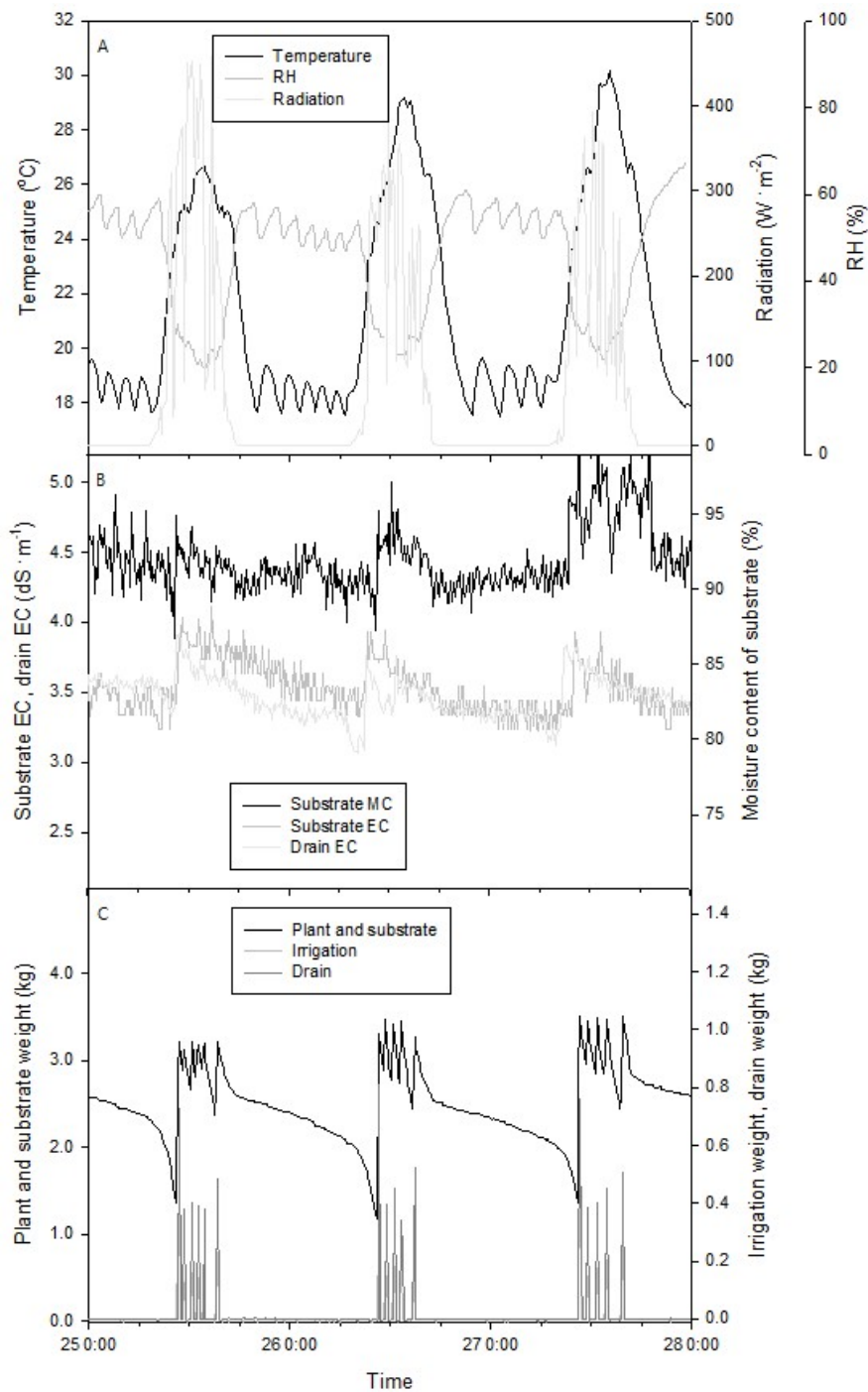
(다) 생육 환경 측정 및 관수관리 시스템 설치



<생육환경 측정 및 정밀 관수제어 시스템 구성>



(라) 생육 환경 측정 및 관수관리 시스템 수집 데이터 (시계열 데이터 분석을 위한 자료공급)



<생육환경 측정 및 관수제어 장치의 수집 데이터 형태>

(2) 엽면적의 증가 형태

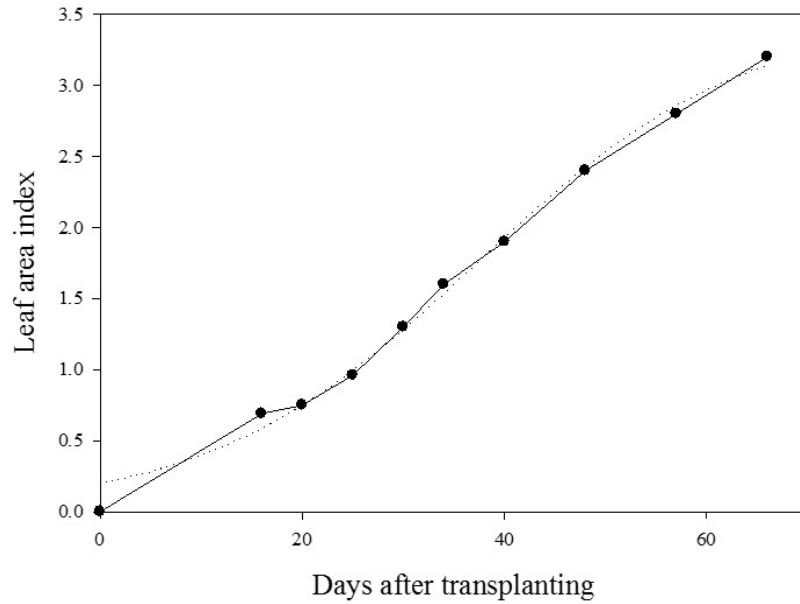
(가) 가지과 채소작물의 초기 엽면적은 크게 증가하지 않는 양상을 보였고, 방아다리 형성 후 급격한 엽면적의 증가를 보임

(나) 실험 기간 동안은 엽면적의 꾸준한 증가를 보임

(다) 선행 연구 결과를 참고 하여 일반 적인 작물 생육 조건에서 정식 후 75일 전후

하여 엽면적의 증가 추이가 감소하는 경향을 파악

- (라) 엽면적의 증가속도의 감소는 하위엽의 탈리와 지속적인 과실의 착과와 관련이 있는 것으로 판단
- (마) 전체적으로 300 - 390 기간 동안의 작물 생육에서 엽면적은 'S자형' 증가를 보임
- (바) 일반적으로 재배초기라 할 수 있는 정식 후 75일 전후하여 엽면적이 위와 같이 변화양상을 보이며 그 이후는 큰 변화를 보이지 않음



<정식 후 엽면적의 증가>

다. 엽면적지수의 증가에 따른 양수분의 흡수도 측정

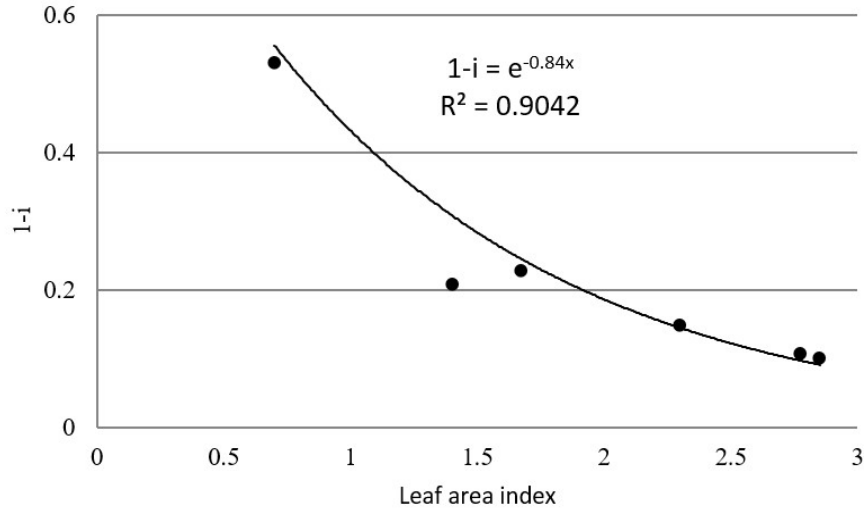
(1) 생육변수와 양수분 흡수

- (가) 작물의 양수분 흡수는 증산과 밀접한 연관을 가지므로, 생육변수 지표로 선정 한 엽면적 지수와 증산과의 관계를 분석
- (나) Penman-Monteith 증발산식의 개념을 적용한 과채류 적용형 변형 증발산 식을 이용한 양수분 흡수량을 계산함

$$ET = a * [1 - \exp(-k * LAI)] * RAD / \lambda + b * LAI * VPD$$

(단, VPD : 수증기압포차, LAI : 엽면적지수)

- (다) 광합성을 위한 광의 이용 효율 측면에서 엽면적과 수광량은 다음 그림과 같은 관계를 가짐



<엽면적에 따른 수광량 보정 계수>

(라) 엽면적과 증발산량은 지수함수관계가 있고, 이와 같은 관계를 증발산량 계산식에 적용

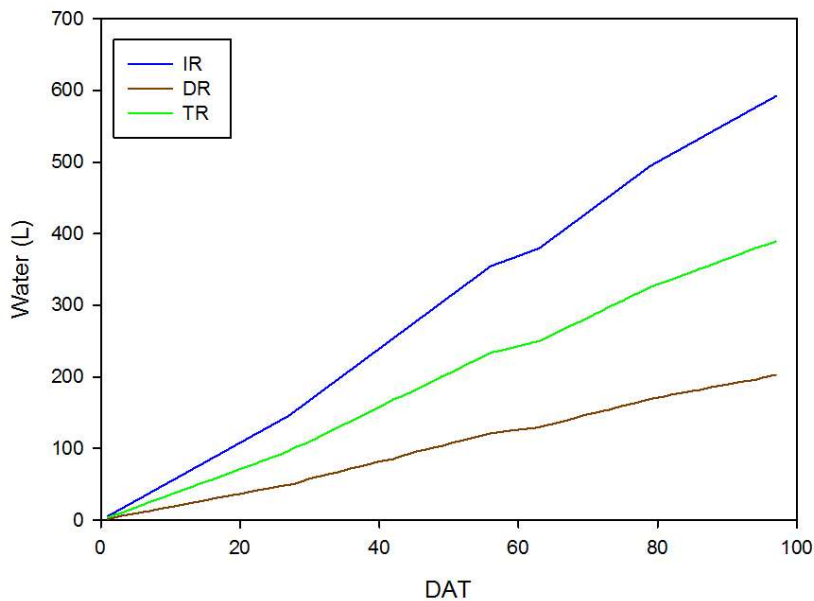
(2) 수분공급량 및 이용량의 측정을 통한 이용효율 분석

(가) 출수되는 양을 모두 무게 기준으로 측정함

① 관수량 =  $\Sigma(\text{드립퍼의 관수속도 (120mL)} \times \text{관수 횟수} \times \text{관수시간})$

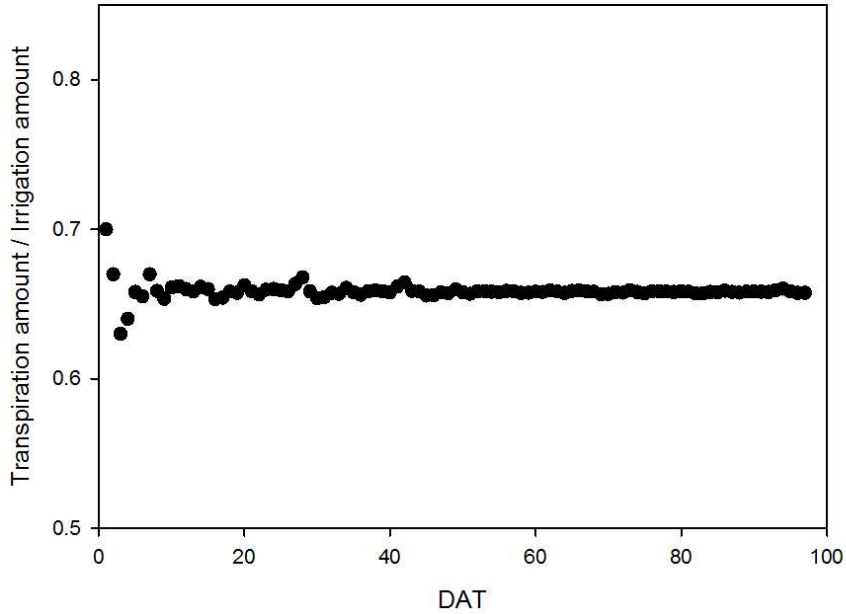
② 증산량 = 관수량 - 증산량

(나)  $Tr(\text{증산량}) = Ir(\text{관수량}) - Dr(\text{배액량})$ 의 개념에 의해 작물이 증산한 수분량의 추정  
 정으로 작물의 수분이용량을 측정



<누적 관수량, 배액량, 증산량>

- (다) 주기적인 엽면적의 측정데이터와 증산량 계산 데이터를 이용하여 식물의 공급 수분대비 이용효율을 계산
- (라) 실험 기간 동안 수분이용 효율은 60-70% 범위에서 큰 변화를 보이지 않음

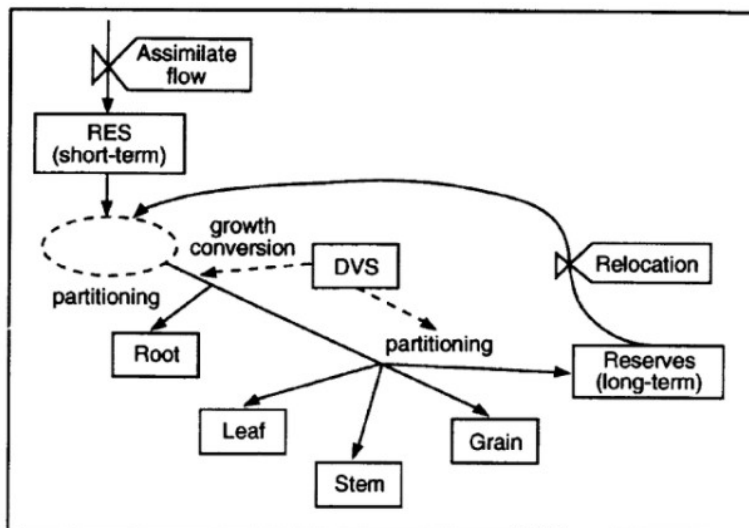


<수분이용효율>

라. 작물 생육 형태에 따른 작물 내 수분이동 변화 분석

(1) 성장 패턴에 따른 작물 내 sink와 source간 수분 함량 비교

(가) 작물은 성장에 따라 sink와 source간의 분배와 균형이 달라지는 양상을 보임



< 동화산물 분배의 관계 모식도 >

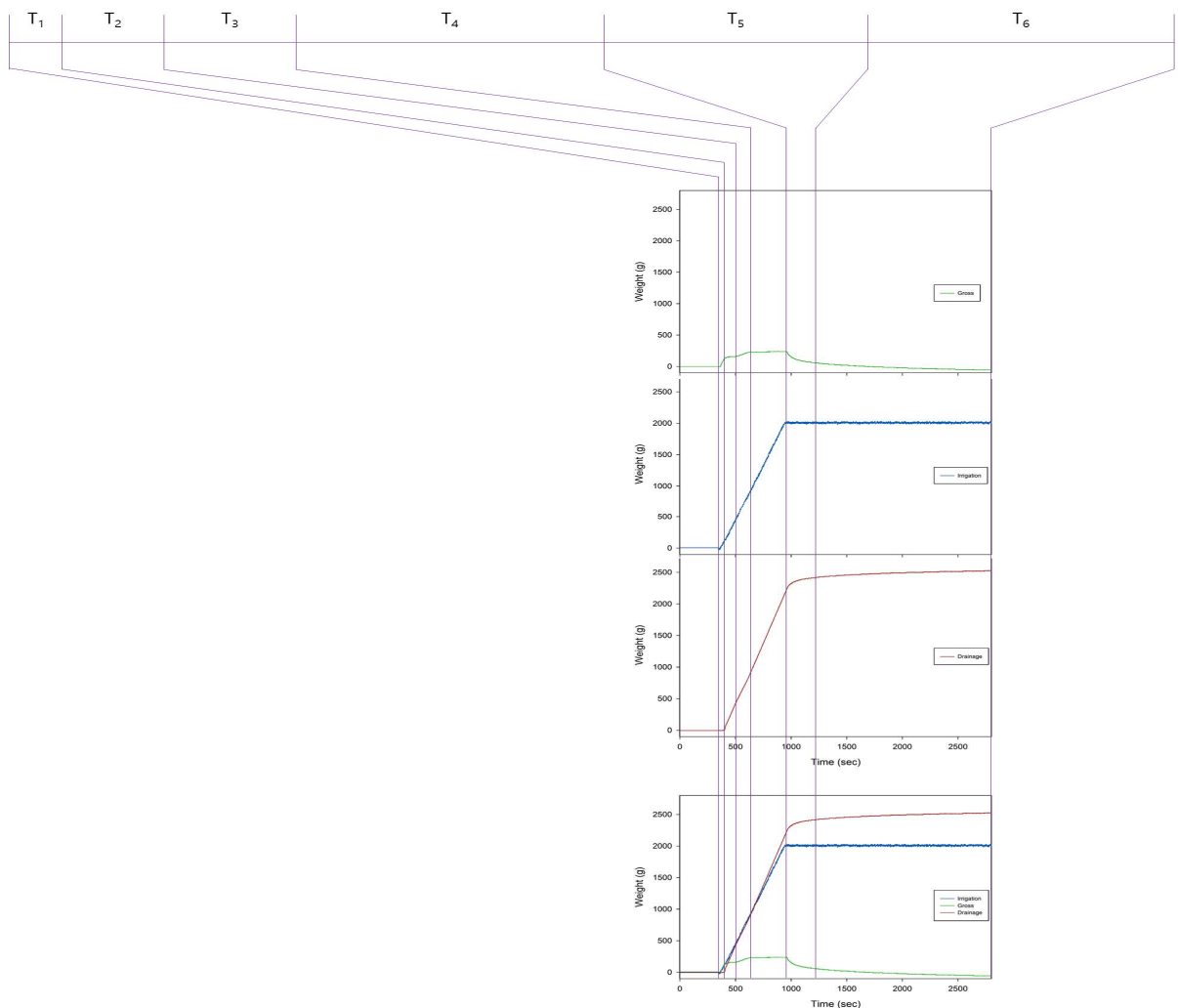
(나) 노화된 엽은 sink에서 source로 변화하여 질소를 공급하는데 이용되는 등 생육에 따라 동화산물의 분배가 달라짐

- (다) 특히 ceiling LAI에 도달했을 때 과실의 동화산물 분배비율을 높이는 것이 유리함
- (라) 따라서 생육이 진전됨에 따라 sink와 source간의 수분함량을 비교하여 영양생장기와 생식생장기를 나눌 수 있는 기초 데이터로 활용이 가능함
- (마) 실험에서 토마토의 평균 생체중은  $861.67 \pm 14.84g$  이었고 평균 과중은  $76.77 \pm 12.861g$  으로 식물 간의 편차가 큰 것을 확인 할 수 있었음
- (바) 생육 형태에 따른 과실의 중량과 상관도 분석에서 기초적인 생육정보인 마디수, 생체중, 초장, 엽수에 비해 엽면적이 과실의 중량과 크기를 비교하기 적합했으나 유의성 있는 비교를 할 수 없었음
- (사) 따라서 수집한 데이터와 수액흐름을 측정할 수 있는 센서를 활용하여 sink와 source간의 흐름정도를 비교하면 유의미한 지표로 가공이 가능할 것이라 판단됨

마. 환경 요인별 작물 내 수분이동 기여도 분석

(1) 근권의 물리적 환경요인에 따른 양수분 이동 특성 비교

(가) 일반적인 무토양 재배시 근권의 양수분 이동 특성



- ① 일반적인 무토양 재배시 근권의 수분이동 특성은 크게 6가지의 단계로 구분 가능함
- ② T1은 수분공급 시기로 관수속도에 의존하며 선형적으로 증가함
- ③ T2는 배액이 발생하는 시기로 주로 중력에 의해 발생되고 근권의 물리적 특성과 관련이 있음
- ④ T3는 배액속도가 줄어드는 시기로 이 시점에서 관수된 수분 함수율 기여가 감소함
- ⑤ T4는 배액속도와 관수속도가 같아지는 시기로 배지 내 양액이 관수된 양액으로 대부분 교체 되는 시기임
- ⑥ T5는 관수 종료 후 배액이 점차 줄어들어 T2와 마찬가지로 중력에 의해 배액이 발생함
- ⑦ T6는 대부분의 중력수가 빠져나가고 함수율에 기여하고 있는 수분만 남은 상태임
- ⑧ 일반적인 수분이동 변화에 대한 데이터를 실측 데이터와 비교하여 중량기반 증산량 측정이 가능함

$$T_x : \frac{dMC}{dt} = I_{r_x} - D_{r_x} - T_{r_x} \rightarrow T_{r_x} = I_{r_x} - D_{r_x} - \frac{dMC}{dt}$$

$$MC_x = \int_{t_{x1}}^{t_{x2}} T_x \quad , \quad MC = MC_0 + \sum_{x=1}^6 MC_x$$

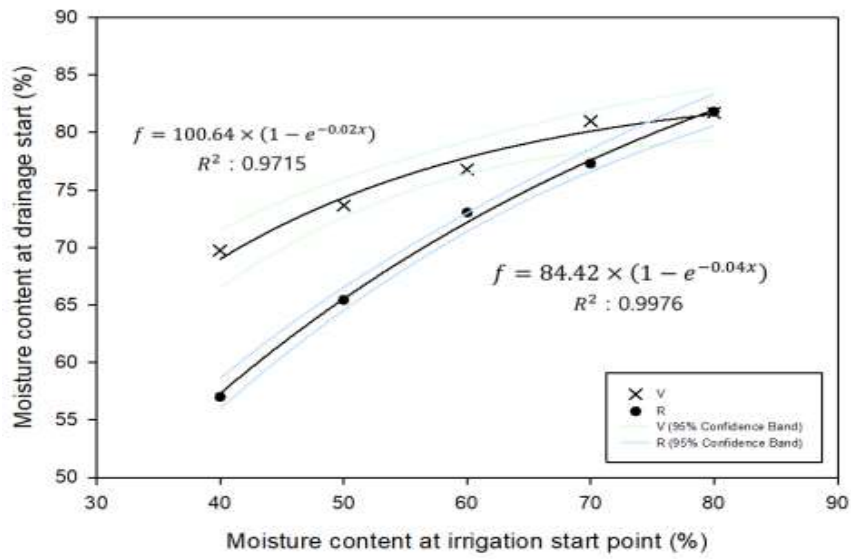
(단, x : 변화패턴, Ir : 급액, Dr : 배액, MC : 함수율, Tr : 증산량)

(2) 근권의 물리적 변화에 따른 압면 내 양수분 이동 특성

- (가) 근권의 물리적인 변화는 작물의 생육에 따라 뿌리 발달과 밀접한 연관이 있음
- (나) 특히 과채류 생산의 경우 수분에 민감하므로 근권의 물리적 변화 특성을 이해하고 관수에 적용해야 정밀한 관수가 가능함



<미사용 압면(왼) 과 재배 중의 압면의 근권부 변화>

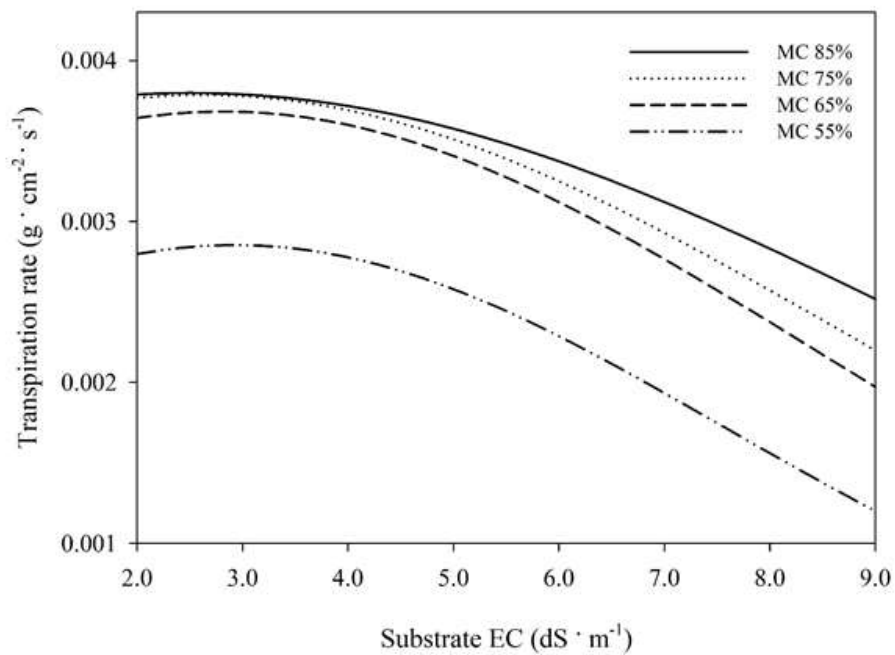


< 미사용과 재배 중 압면의 시작지점 함수율에 따른 T4 지점의 함수율 >

(다) 생육 단계에 따라 뿌리 발달 정도가 다르고 이는 근권의 물리성에 영향을 미침  
 (라) 따라서 1차년도 개발되었던 작물생육 구분의 생육지표를 활용하여 관수제어 요인 중 하나로 설정

(3) 공급양액의 농도조건에 따른 양수분 흡수 특성 분석

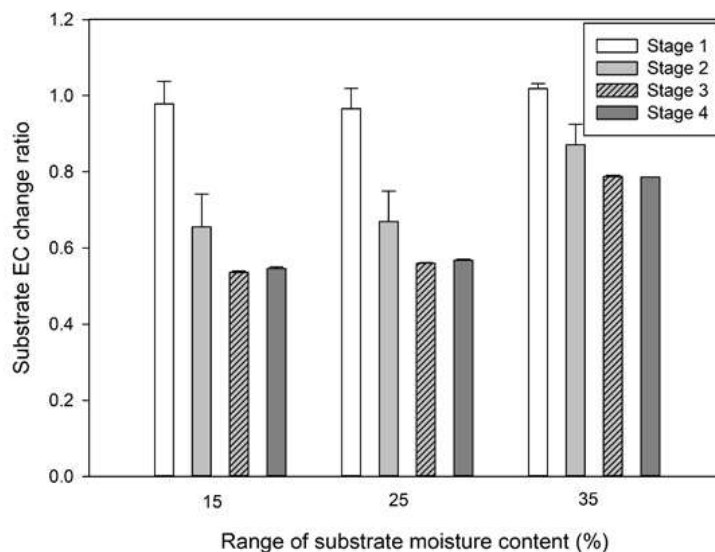
(가) 근권 농도에 따른 증산율 비교



< 배지 함수율 별 근권 농도와 증산율과의 관계 >

- ① 배지 함수율에 따른 증산율의 변화는 배지 함수율기준 60%이상에서는 큰 차이를 보이지 않음
- ② 3.0 dS/m<sup>2</sup> 이상의 배지농도 범위에서는 농도의 증가에 따라 증산율은 감소하는 경향을 보임
- ③ 대부분의 배지 함수율에서 증산율의 급격한 감소가 시작되는 배지의 농도는 4.0 dS/m<sup>2</sup> 수준으로 나타남
- ④ 일반적인 재배조건하에서 생식생장전환을 위한 근권의 농도증가에서도 작물의 스트레스를 고려하여 5.0 dS/m<sup>2</sup> 이상 높이지 않으므로, 관행의 재배조건에서 근권의 농도에 따른 증산율은 큰 차이를 보이지 않는 것으로 판단됨
- ⑤ 따라서 근권의 함수율과 농도가 증산에 관여하지 않는 범위는 각각 60%이상과 4.0 dS/m<sup>2</sup>이하임을 알 수 있었고, 이와 같은 범위 내에서 작물이 재배될 수 있도록 근권환경 조절이 필요함
- ⑥ 또한 위의 결과와 같이 근권환경을 모니터링하고 제어할 수 있는 기능과 알고리즘이 시스템에 탑재 되어야함

(나) 근권의 함수율 변화 범위와 생육단계에 따른 근권 농도 변화율 비교



<근권의 함수율 변화 범위와 생육단계에 따른 근권 농도 변화율 비교>

- ① 생육단계를 4단계로 구분 (stage 1 : 0-30 DAT, stage 2 : 30-60 DAT, stage 3 : 60-90 DAT, stage 4 : 90-120 DAT)
- ② 함수율 변화범위를 3가지 85-70%, 85-60%, 85-50%로 구분하여 각각의 근권농도의 변화율을 비교함
- ③ 함수율 변화범위기준은 재배에 사용한 암면배지의 포화함수율 기준으로 관수 시작 시점을 각각 70%, 60%, 그리고 50% 기준으로 정하여 비교함
- ④ 초기 생육에서는 근권의 함수율 변화범위에 크게 영향을 받지 않고 대체적으로 근권의 농도가 많이 증가함



- ⑤ 이는 초기 뿌리 발달이 활발하지 못하였기 때문으로 판단되며, 또한 작물에 의한 양수분의 흡수도가 낮고 배지 자체의 증발이 상대적으로 많이 일어났기 때문으로 사료됨
- ⑥ 따라서 초기 생육에서는 배지의 농도 증가를 줄이기 위하여 공급배양액의 농도를 줄이고 관수횟수를 늘려야함
- ⑦ 생육이 진전됨에 따라 근권의 농도 증가는 확연하게 줄어드는 경향을 보였으나, 근권함수율 변화 폭이 클수록 감소율은 낮게 나타남
- ⑧ 그러므로 근권의 농도 조절을 위하여 생육 초기 저농도 배양액으로 관수횟수를 늘리고 생육기간동안 배지의 함수율 변화를 최소화 하는 방향으로 관수전략을 수립하여야 함

(4) 환경 요인별 증산율 기여도 분석

- (가) 증산량 추정을 이용한 관수제어는 궁극적으로 작물의 스트레스를 조절하여 품질과 수확량을 향상시키는데 있음
- (나) 그러나 일반적인 농가의 경우 모든 변수를 복합적으로 제어할 수 있는 설비가 부족한 실정임
- (다) 따라서 생산량과 설비를 최적화 할 수 있는 관수제어 설계를 위해 각 환경요인의 기여도 분석이 필요함

variable	RH	T.	Rad.	LAI	Tr.
RH	1	0.893	0.68	0.003	0.133
T.	0.893	1	0.701	0.003	0.084
Rad.	0.68	0.701	1	0.003	0.226
LAI	0.003	0.003	0.003	1	0.001
Tr.	0.133	0.084	0.226	0.001	1

<변수 간 상관관계 분석>

(단, RH : 상대습도, T. : 온도, Rad. : 광도, LAI : 엽면적지수, Tr : 증산량)

- (라) 변수간 상관관계 분석에서 증산량은 광도와 가장 큰 상관관계를 보이고 있음
- (마) 그 다음으로 큰 상관관계를 보이는 변수는 상대습도로 증산량의 주 요인으로 작용하고 있음
- (바) 따라서 시설 내 관수제어는 상대습도를 충분히 고려한 요인설정이 필요함

바. 고품질 과채류 대량생산을 위한 수분제어 요인 분석 및 수분관리기술 개발

(1) 과채류 생산성 향상 양수분관리 기술 개발

- (가) 과채류의 양수분 관리 제어요인은 다양하고 복합적인 환경과 결합해서 관리하기 위해선 다양한 변수를 측정하여 이를 제어에 활용할 수 있는 데이터로 변환해야 함



< 시설 내 복합환경 측정 및 제어 장치 >

- (나) 시설 내 관수제어를 위한 데이터는 크게 두 가지로 식물 반응 데이터와 주변 환경 데이터임
- (다) 특히 증산량은 식물 생육에 관한 직접적인 지표로 활용되기 어렵지만 관수제어에 있어서 주요 요인으로 사용이 가능함

```

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
HX711 scale(DOUT, CLK);
HX711 scale1(DOUT1, CLK1);
float Time();
float hum;
float tap;
float pH();
float EC();
float TempProcess(bool ch);
int Drtime = 22;
bool Data;
int pHArray[ArrayLenth];
int pHArrayIndex=0;
const byte numReadings = 1;
byte ECSensorPin = A2;
byte DS18B20_Pin = 10;
unsigned int AnalogSampleInterval=25,printInterval=700,t
unsigned int readings[numReadings];
byte Index = 0;
unsigned long AnalogValueTotal = 0;
unsigned int AnalogAverage = 0,averageVoltage=0;
unsigned long AnalogSampleTime,printTime,tempSampleTime;
unsigned long int avgValue;
float b;
int buf[10],temp;
float temperature,ECcurrent;
int Time1;
char ssid[] = "VHSLab.";
char pass[] = "vegetable420";
int status = WL_IDLE_STATUS;
char timeServer[] = "time.windows.com";
unsigned int localPort = 2390;
boolean Rel = false;
const int NTP_PACKET_SIZE = 48;
const int UDP_TIMEOUT = 2000;

void loop(){
  unsigned long currentMillis = millis();

  float hum = dht.readHumidity();
  float tap = dht.readTemperature();

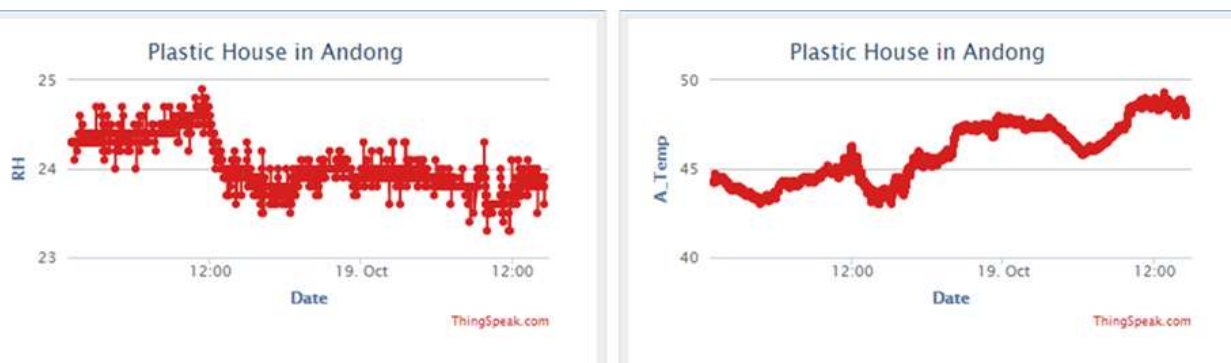
  sendNTPpacket(timeServer);
  unsigned long startMs = millis();
  while (!Udp.available() && (millis() - startMs) < UDP_TIMEOUT) {}

  if ((Udp.parsePacket()) == 48 )
  {
    Data = true;
  }
  else if ((Udp.parsePacket()) == 148 )
  {
    Data = false;
  }
  if (Udp.parsePacket()) {
    Udp.read(packetBuffer, NTP_PACKET_SIZE);
    unsigned long highWord = word(packetBuffer[40], packetBuffer[41]);
    unsigned long lowWord = word(packetBuffer[42], packetBuffer[43]);
    unsigned long secsSince1900 = highWord << 16 | lowWord;
    const unsigned long seventyYears = 2208988800UL;
    unsigned long epoch = secsSince1900 - seventyYears + 32400;
    Serial.print(year(epoch));
    Serial.print("-");
    Serial.print(month(epoch));
    Serial.print("-");
    Serial.print(day(epoch));
    Serial.print(" ");
    Serial.print((epoch % 86400) / 3600);
    Serial.print(":");
    if (((epoch % 3600) / 60) < 10) {
      Serial.print("0");
    }
    Serial.print((epoch % 3600) / 60); // print the minute (3600 equals se
    Serial.print(":");
  }
}

```

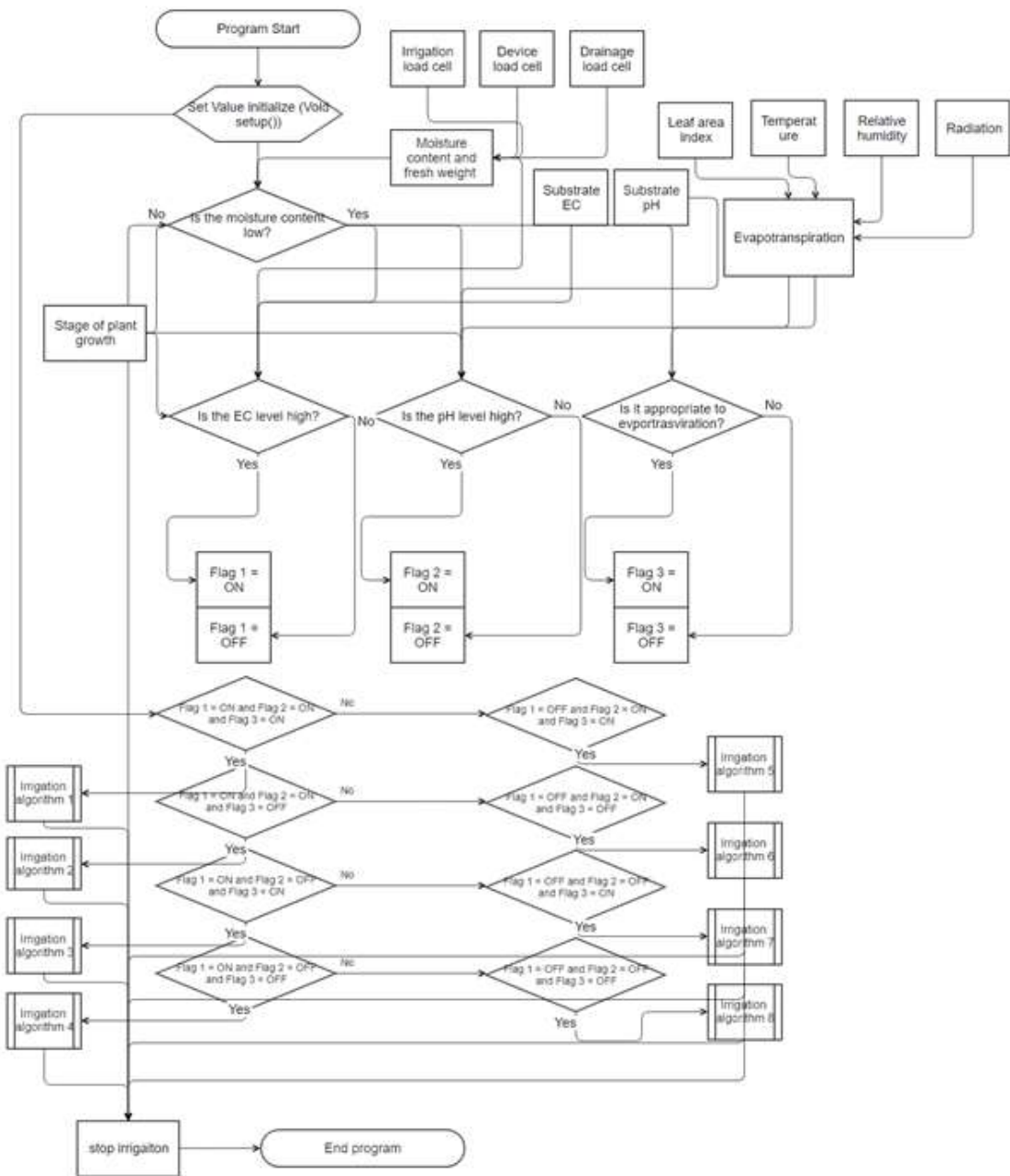
< Arduino IDE 기반 데이터 측정 및 제어 알고리즘 코드 >

- (라) 제어장치는 급액량, 배액량, 식물체 무게, 배지 무게, 배액 EC/pH, 급액 EC/pH, 배지 EC/pH, 상대습도, 광도, 온도를 초 단위로 측정하고 사용자가 실시간으로 확인할 수 있음



< WiFi-기반 실시간 데이터 로깅 및 모니터링 >

- (마) 이는 제어기준으로 활용 될 수 있으며 목표 함수율, 목표 EC 등을 설정하여 소량 다회, 다량 소회 등 다양한 관수 기준대로 제어가 가능함
- (2) 과채류 수분생리장해 최소화 양수분관리 기술 개발
  - (가) 과채류의 수분생리장해는 주로 근권부의 환경 변화 폭이 커질수록 커지는 경향이 있음
  - (나) 따라서 근권부의 환경을 실시간으로 모니터링 후 이 변화 폭을 낮출 필요가 있음



< 수분생리장애 최소를 위한 관수제어 알고리즘 >

- (다) 근권부 환경 중 함수율, EC, pH, 증산량 변화를 중점으로 각 변화량을 최소로 하면서 식물 생육에 유리한 환경조성을 위한 알고리즘을 제안하였음
- (라) 기본적인 알고리즘뿐만 아니라 일반 사용자가 제어할 수 있게끔 따로 로직을 만들어 제어할 수 있고 알고리즘은 지속적으로 업데이트가 가능

사. 고품질 과채류 대량생산을 위한 수분제어 요인 분석 및 수분관리기술 개발  
 (1) 지하부 환경요인에 따른 수분제어 요인 분석  
 (가) 지하부(암면)의 기초물리적인 특성

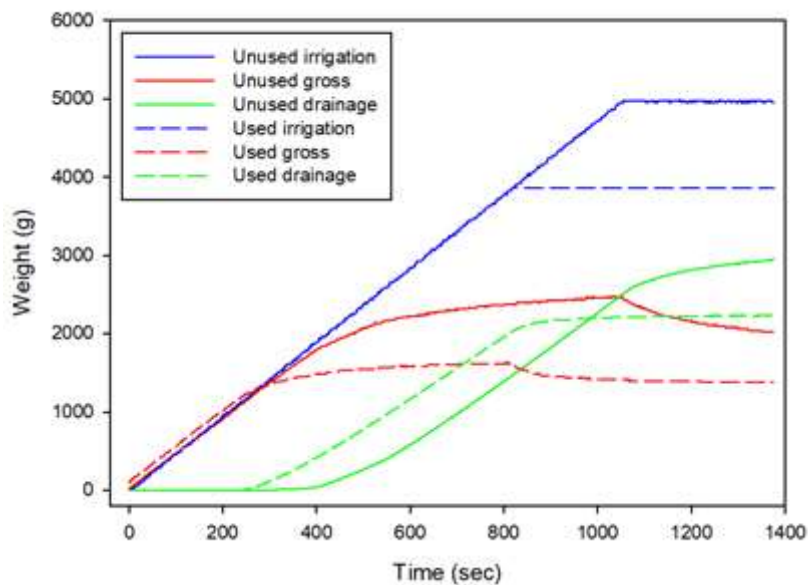
표 1. 사용암면과 미사용암면의 기초적 특성

Growing medium	Length (mm)	Width (mm)	Size Height (mm)	Volume (L)	Weight (kg)	Density (kg/L)	Max. water holding capacity (L)	Porosity (%)
Slab	1000	150	75	11.25	0.836	0.074	10.11	89.87
Cube	100	100	65	0.65	0.056	0.086	0.51	79.29
Slab + 3 Cube	-	-	-	13.20	1.004	0.076	11.64	88.18
Used slab	1000	150	75	11.25	0.838	0.074	9.68	86.04
Used slab + 3 Cube	-	-	-	13.20	1.006	0.076	11.21	84.92

- ① 미사용 암면에 비하여 사용된 암면은 공극률이 낮은 특징을 보였음
- ② 이는 재배 중 뿌리의 발달에 따라 배지의 물리적인 특징이 변하므로 이를 고려하여 관수제어를 위한 지표 요인 중 하나로 사용해야 함

(나) 사용암면과 미사용암면의 수분이동 특성

- ① 미사용암면에 비하여 사용암면은 물리적으로 악화되어 있으므로 다른 수분이동 특성을 나타냄



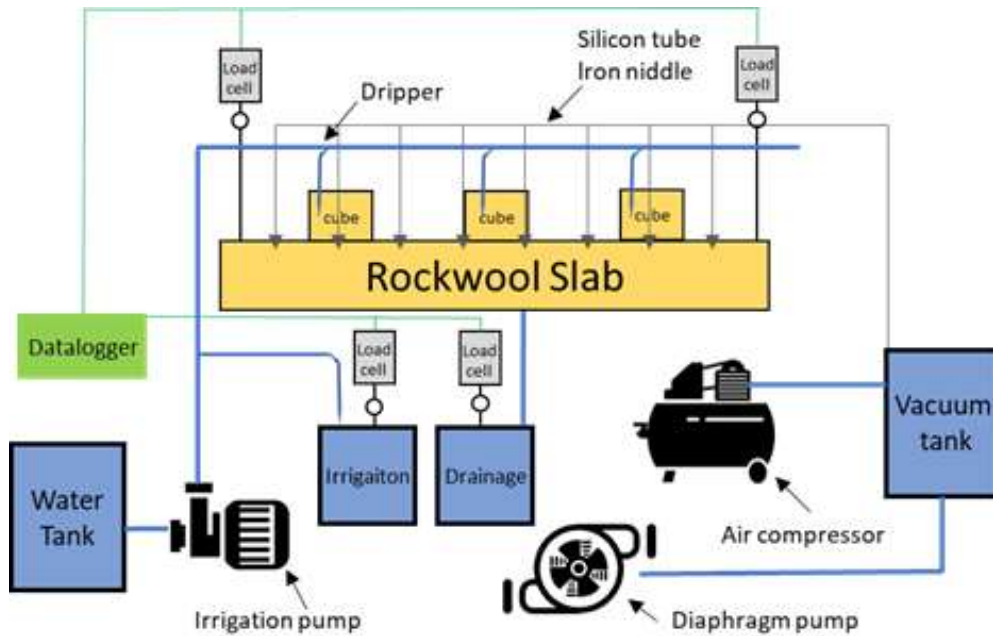
< 사용암면과 미사용암면의 수분이동 특성 비교 >

- ② 미사용암면은 배액이 빠르게 발생하고 포화되는 지점이 낮은 것을 확인하였음
- ③ 이는 작물 뿌리가 발달함에 따라 공극을 저해하고 포수력을 약화시키는 것으로 판단됨
- ④ 따라서 작물의 생육에 따라 수분제어를 다르게 해야 적절한 수분관리가 가능할 것으로 판단됨

(2) 관수속도와 관수시작지점 함수율에 따른 배지 수분변화 특성 비교

(가) 근권 부 수분제어 요인 분석을 위해 관수방법을 급액속도와 급액 급여 시간(관수시작지점 함수율)을 기점으로 분석함

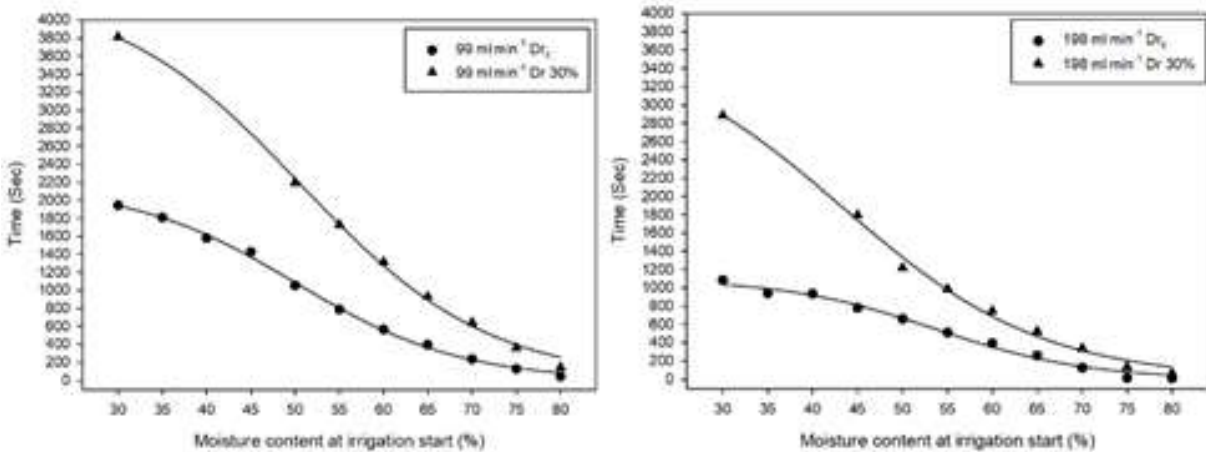
(나) 이를 위해 근권부의 함수율이 자동으로 조절이 가능한 장치를 이용하였음



< 근권부 함수율 조절 장치 >

- ① 에어 컴프레셔와 다이어프램 펌프를 이용하여 철제 바늘로 배지내 수분을 조절하는 장치임
- ② 장치의 함수율 조절범위는 30 - 80% 였음
- ③ 이에 따라 함수율을 매 5% 마다 수분이동 특성을 분석하였음

(다) 관수속도와 관수지점 함수율에 따른 배액개시시점과 배액률 30% 지점 비교



< 관수속도와 관수지점 함수율에 따른 배액개시시점과 배액률 30% 지점 비교 >

① 각 변수간의 관계는 Sigmoid 형태를 보였고 이를 sigmoid 형태로 fitting 하여 정량화 하였고 각 변수의 값은 표2. 와 같음

$$f = \frac{a}{1 + e^{\frac{-(x-x_0)}{b}}}$$

		a	b	x <sub>0</sub>	R <sup>2</sup>
99 ml·min <sup>-1</sup>	Dr <sub>0</sub>	2166.37	-9.34	50.07	0.99
	Dr 30%	4346.19	-10.60	50.67	0.99
198 ml·min <sup>-1</sup>	Dr <sub>0</sub>	1098.97	-8.45	53.71	0.99
	Dr 30%	3759.95	-11.14	43.35	0.99

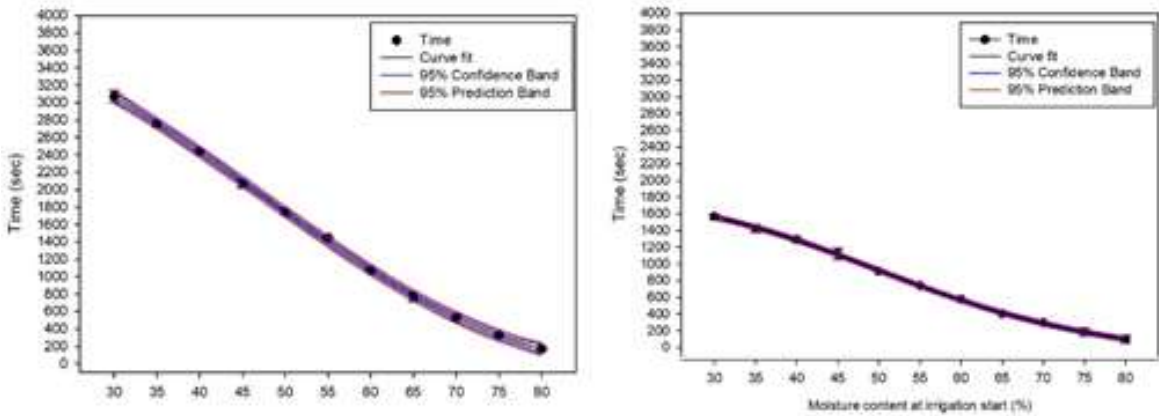
- ② 배액개시시점은 이전 연구의 기초적인 수분이동 특성에서 T2 까지의 지점이었음
- ③ 배액률 30% 지점은 T3-T5 지점으로 관수지점 함수율에 따라 상이하였음
- ④ 관수속도와 관계없이 시작지점의 함수율이 낮을수록 배액개시시점이 빨라지는 형태를 보였음
- ⑤ 수분포화율이 높을수록 수분이동특성이 수평적으로 나타나므로 포화배지에 비해 수직적인 수분이동에 따라 배액이 빠르게 발생한 것으로 판단됨
- ⑥ 관수속도가 빠를수록 빠를수록과 배액 발생 시간이 비례적으로 감소하는 경향을 보였는데 이는 관수 시점 함수율이 낮을수록 큰 폭으로 감소하는 경향을 보였음
- ⑦ 이를 총 관수량으로 비교 하였을 때 관수 시점 함수율 70% 수준까지는 99 ml·min<sup>-1</sup> 의 속도로 관수하는 것이 적은 양의 물을 필요로 했지만 그 이상 함수율에서는 198 ml·min<sup>-1</sup> 로 관수한 것이 적은 양의 물로 목표 배액율을 맞추는 것이 가능하였음
- ⑧ 따라서 함수율을 높게 유지하기 위해서는 작물에 대해서는 드리퍼의 용량을



늘리는 것이 바람직할 것으로 판단됨

- ⑨ 특히 과채류 재배에서 배액물은 근권 염류집적에 영향을 주어 각기 다른 배액률로 제어하였을 때 근권 내 이온 조성비가 달라지기 때문에 재배관리에 사용되는 배액률과 제시한 정량적 지표를 통해 수분이용 효율을 예측할 수 있을 것으로 사료됨

(라) 관수속도와 관수지점 함수율에 따른 배지 포화 시간 비교



< 관수속도와 관수지점 함수율에 따른 1차 포화 지점 비교 >

- ① 관수개시 후 포화되는 시점을 비교하였을 때 시작지점 함수율이 높을수록 1차 포화시점이 빨랐음
- ② 각 변수간의 관계는 Sigmoid 형태를 보였고 이를 sigmoid 형태로 fitting 하여 정량화 하였고 각 변수의 값은 표3. 와 같음

$$f = \frac{a}{\left(1 + e^{\frac{-(x-x_0)}{b}}\right)^c}$$

	a	b	c	x <sub>0</sub>	y <sub>0</sub>	R <sup>2</sup>
99 ml·min <sup>-1</sup>	2054.47	-11.27	0.59	43.30	-192.56	0.99
198 ml·min <sup>-1</sup>	5273.51	-27.10	16.64	123.96	-94.20	0.99

- ③ 이는 함수율 변화에 따른 수분이동 특성 분석에서 T4지점 까지 지점이었음
- ④ 관수속도에 따라서 수분이동변화는 관수속도와 포화지점까지의 시간이 반비례하는 관계를 보였음
- ⑤ 함수율이 높은 지점에서는 1차 포화지점이 배액률 30% 지점보다 빠르게 나타났으며 이는 배지가 대부분 수분으로 포화되어 있는 경우 배액이 빠르게 발생하고 이에 따라 순간적인 관수량과 배액량이 같아지므로 수분이 함수율 변화에 크게 기여할 수 없었던 것으로 판단됨



(마) 관수속도와 관수지점 함수율에 따른 각 지점까지의 관수량 비교

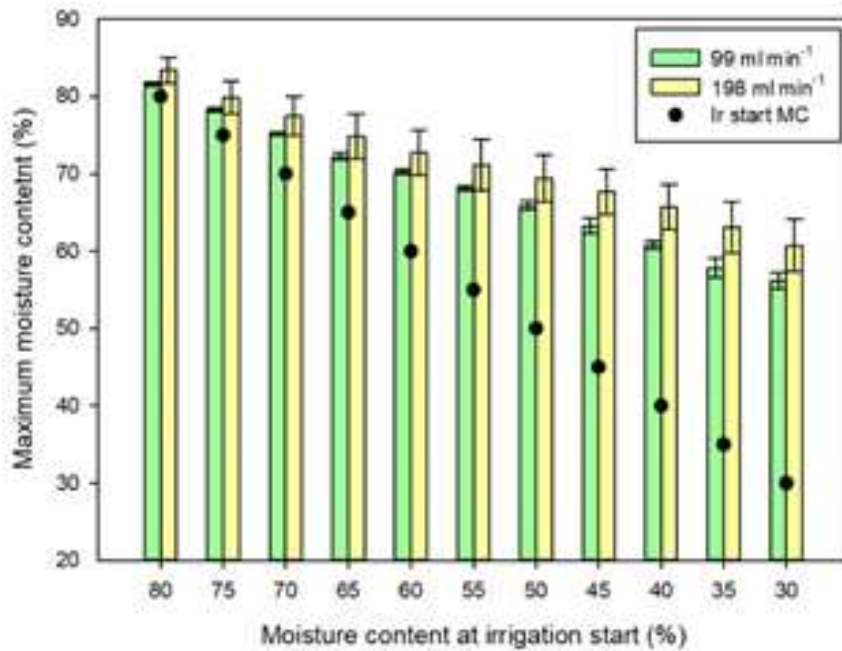
포 4. 관수속도와 관수지점 함수율에 따른 각 지점까지의 관수량

Irrigaiton Velocity (ml•min <sup>-1</sup> )	Time point	Sta ge (T <sub>x</sub> )	Irrigaiton quantity (ml•Slab <sup>-1</sup> )										
			Moisture content at Irrigation Start (%)										
			80 %	75 %	70 %	65 %	60 %	55 %	50 %	45 %	40 %	35 %	30 %
99	Dr <sub>0</sub>	T <sub>2</sub>	218	644	1168	1960	2802	3891	5217	7069	7821	8960	9623
	1 <sup>st</sup> saturation	T <sub>4</sub>	845	1624	2633	3805	5306	7168	8620	10240	12094	13649	15210
	Dr30%	T <sub>3</sub> <sup>-</sup> T <sub>5</sub>	723	1802	3188	4613	6514	8564	10880				18879
198	Dr <sub>0</sub>	T <sub>2</sub>	33	46	416	865	1294	1690	2178	2574	3089	3102	3577
	1 <sup>st</sup> saturation	T <sub>4</sub>	330	614	974	1337	1901	2439	3010	3699	4260	4712	5168
	Dr30%	T <sub>3</sub> <sup>-</sup> T <sub>5</sub>	218	449	1122	1736	2468	3260	4026	5927			9527

- ① 관수속도에 따라 관수량을 비교하면 배액시작 (Dr0), 배액률30% (Dr30%) 에서는 배액이 빠르게 발생하였던 높은 함수율 지점(75%, 80%)을 제외하고 관수속도 198 ml•min<sup>-1</sup> 로 관수 한 것이 많은 양의 수분을 필요로 했음
- ② 1차 포화지점 (1stsaturation) 에서는 모든 관수시점함수율에서 관수속도 198 ml•min<sup>-1</sup> 이 관수속도 99 ml•min<sup>-1</sup> 에 비하여 관수량이 많았음

(바) 관수속도와 관수지점함수율에 따른 1차 포화지점 비교

- ① 배지 함수율관리는 작물의 종류와 목적에 따라 상이하며 특히 파프리카의 배꼽썩음과 예방을 위해서는 함수율 65% 이상으로 유지하는 것이 권장되고 토마토의 품질향상을 위해선 초기 낮은 함수율로 관리하다 화방이 늘어남에 따라 점진적으로 늘리는 것이 좋은 전략임
- ② 재배 중 근권의 함수율 정도에 따라 포화되는 지점이 상이하므로 수분 관리기술에 이용하기 위해선 기초적인 포화 특성 파악이 필요함
- ③ 이를 관수속도와 관수지점함수율에 따라 1차적으로 포화되는 지점을 확인하였음



< 관수속도와 관수지점 함수율에 따른 암면배지의 1차 포화 지점 >

- ④ 배지 함수율은 관수지점 함수율이 높을수록 높게 나타났으며, 관수속도가 빠를수록 포화 함수율이 높은 경향을 나타내음
- ⑤ 이에 따라 빠른 관수속도가 배지 내 수분의 수평적인 수분이동에 더 효과적인 것을 더 기여할 수 있는 것을 확인하였음
- ⑥ 함수율의 관리 폭이 넓은 작물을 재배할 경우 관수속도를 높힌 것이 함수율 관리에 유용할 것으로 판단됨
- ⑦ 관수속도를 높이는 것은 배액을 빠르게 발생시킬 순 있지만 총 배액을 30%를 맞추기 위해서는 관수속도가 낮은 것에 비하여 1.1 - 1.5 배의 수분이 필요하므로 이를 다각적으로 분석하여 재배에 사용되는 관수속도를 결정하는 것이 중요할 것으로 판단됨
- ⑧ 또한 이는 근권부의 최저함수율과 배액을 조절 등 수분관리 기술을 위한 제어 요인으로 활용 될 수 있음
- ⑨ 근권부의 EC와 pH 조절을 위해 양액 공급을 조절하는 기술이 보급되어 있으며 위 자료를 통해 함수율 변화를 예측하여 수분 생리장해를 최소화 하는 기술에 적용이 가능할 것으로 판단됨

## 2. 배지 함수율 및 배액량 설정 조건에 따른 관수량 추정 기술 개발

가. 광도, VPD, 증산, 배지 함수율, EC, 급배액 데이터의 수집 시스템 구축

(1) 작물의 필요수량 산정을 위한 고려 항목 결정

(가) 작물의 관수설계에 있어서의 증산량 추정을 위한 주요 환경데이터는 광도와 수증기압포차(VPD) 항목으로 정리 가능함

(나) 시설 내의 광도(RAD)와 실제 증산에 이용되는 보정 광도(RAD')와의 차이는 아래의 식을 이용함

(2) 환경(광도, VPD)과 생육변수(엽면적지수)에 따른 증산량 추정 모델

(가) 작물의 증발산은 환경데이터 및 작물의 생육데이터를 활용하고, Penman-Monteith(P-M) 식을 수정한 아래의 식에 의해 정량화함

$$ET = a * [1 - \exp(-k * LAI)] * RAD / \lambda + b * LAI * VPD$$

(단, VPD : 수증기압포차, LAI : 엽면적지수)

(나) 수증기압포차(VPD)는 아래와 같이 시설내의 온도(T)와 상대습도(RH)를 이용하여 추정함

$$VPD = 610.7 * [(100 - RH) / 100] * 10^{7.5T / (237 + T)}$$

(3) 배지 내 수분 이동

(가) 배지의 다른 물리적 특성이 수분관리에 주요 요인이므로 수분공급과 배액의 패턴 파악이 필요함

(나) 배지의 무게를 연속적으로 측정하여 일반적인 암면 배지 내에서의 수분 공급과 포화용수량 도달 시 배액의 배출 패턴을 파악함

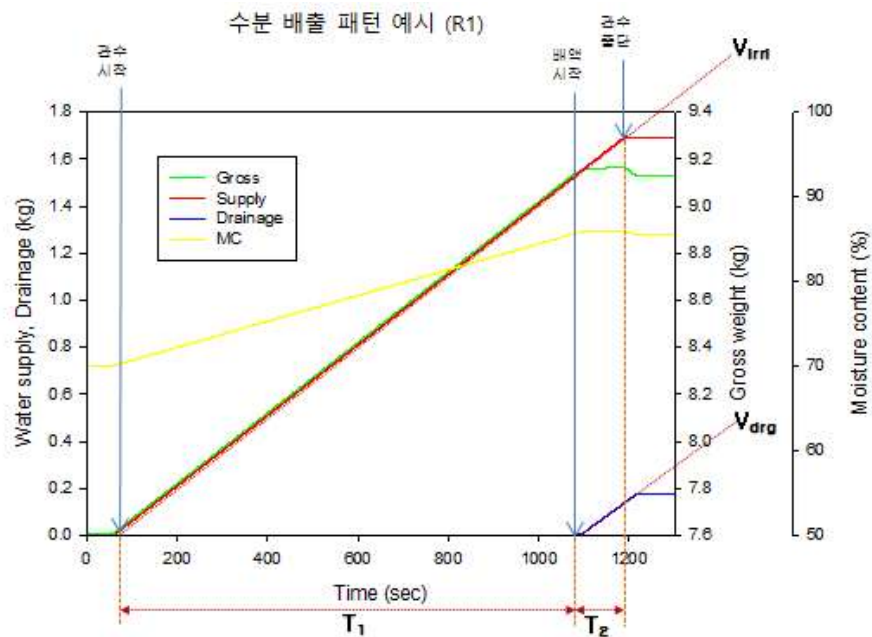


그림 1. 배지 내 수분 배출 패턴

(4) 데이터 수집 시스템 구성

- (가) 증산 관련 시계열 데이터 해석을 위한 증산 및 생육량 연속 측정 장치 시스템
- (나) 측정 항목 : 전체 시스템 (작물 생체중 + 배지) 무게, 배액량 및 급액량, 배지 함수량, 배액 EC, VPD, 일사량

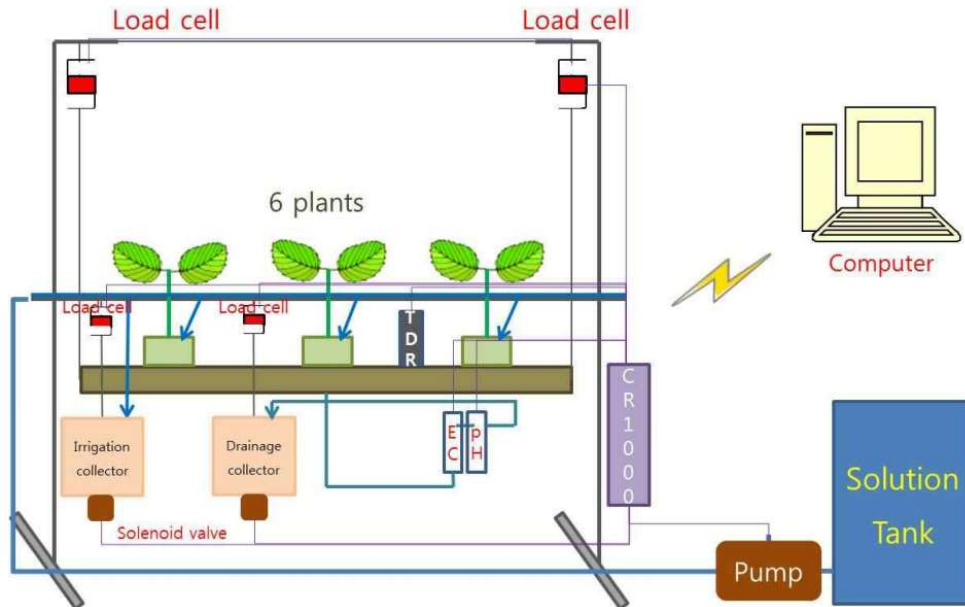


그림 2. 관수량 자동 측정 시스템 구상도

- (다) 측정 센서 : 배지 수분센서 (FDR), EC 센서, 일사센서, 로드셀, 수액 흐름 측정 센서, 온습도 센서

나. 수집된 증산 관련 데이터의 시계열 해석을 위한 체계 구축

- (1) 시계열 해석 체계 구축을 위한 방법론 선정 : 인공신경망 이용

- (가) 연속적인 많은 양의 데이터 해석에 용이함
- (나) 입력 변수와 출력 변수들의 조합을 이용하여 신경망을 학습 후 예측에 활용함
- (다) 인공신경망 프로그램 이용 (Alyuda NeroIntelligence 2.2)

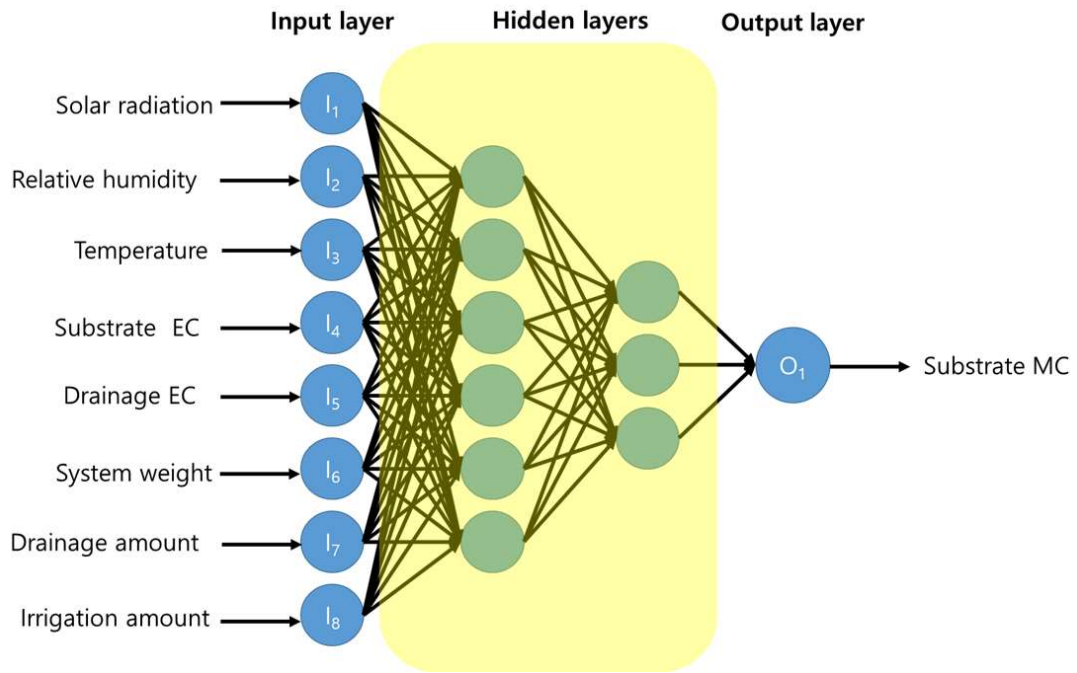


그림 3. 인공신경망 기본 구성

(2) 인공신경망 학습을 위한 데이터 선정

- (가) 기존의 시계열 측정 데이터에 대하여 인공신경망 적용 가능성 확인 및 학습을 진행함
- (나) 온도, 습도, 일사량, 배지 및 배액 EC, 작물 및 배지 무게, 배액량, 급액량을 입력 변수로 하고, 배지 함수량을 출력 변수로 활용함 (그림 4)

(3) 적정 회로망 구조 결정

- (가) 입력 변수 (온도, 습도, 일사량, 배지 및 배액 EC, 작물 및 배지 무게, 배액량, 급액량)과 출력 변수 (배지 함수량) 사이에 적절한 은닉층 (hidden layer)의 갯수 및 각 은닉층의 단위를 결정함
- (나) 본 학습 데이터를 이용하여 신경망 구조 탐색 결과, 그림 5와 같이 3개의 은닉층으로 구성되어 있으며 각 은닉층 별 9-5-3개의 단위를 갖는 신경망 구조가 가장 높은 일치도로 나타냄

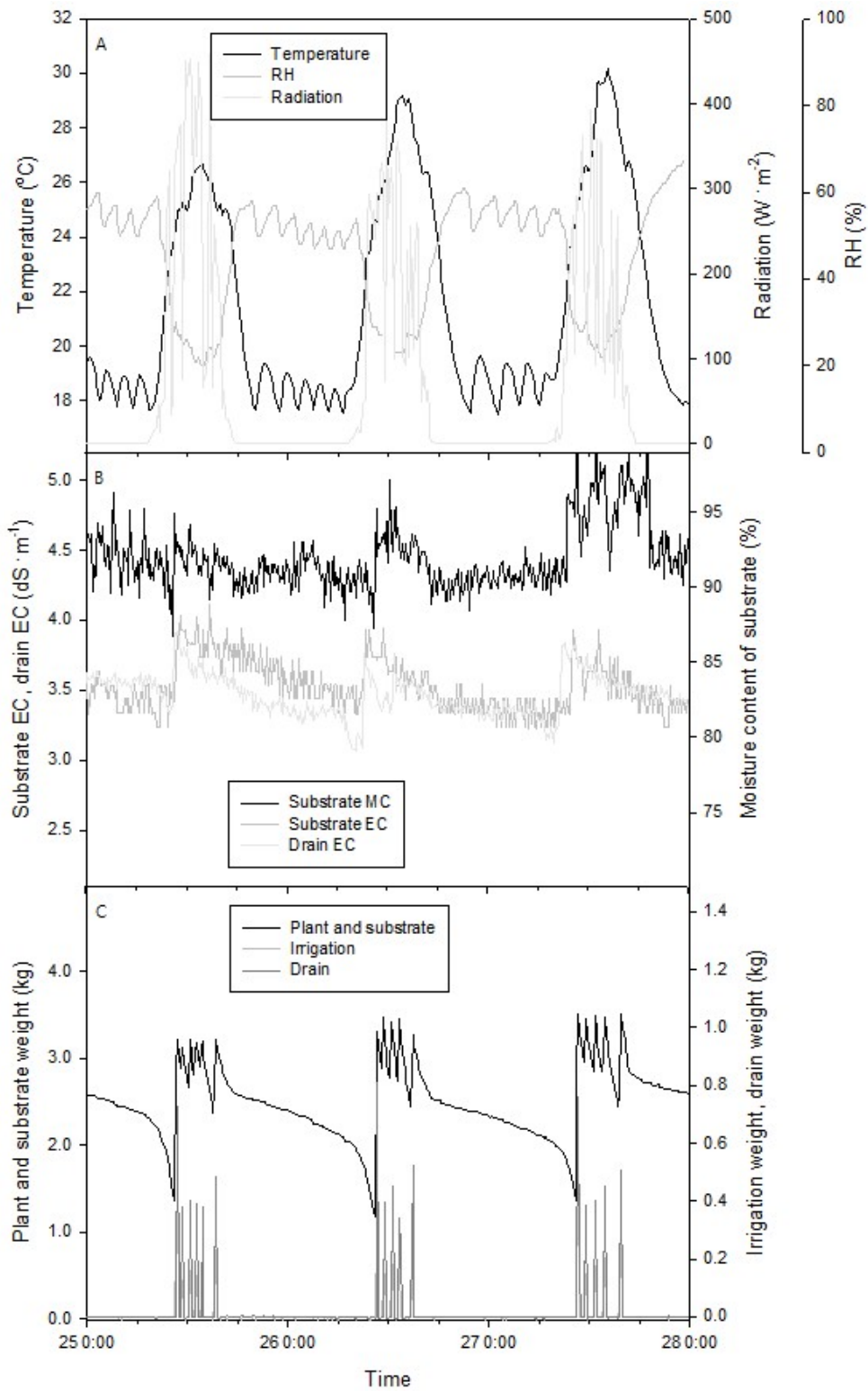


그림 4. 인공신경망 학습에 활용된 시계열 데이터



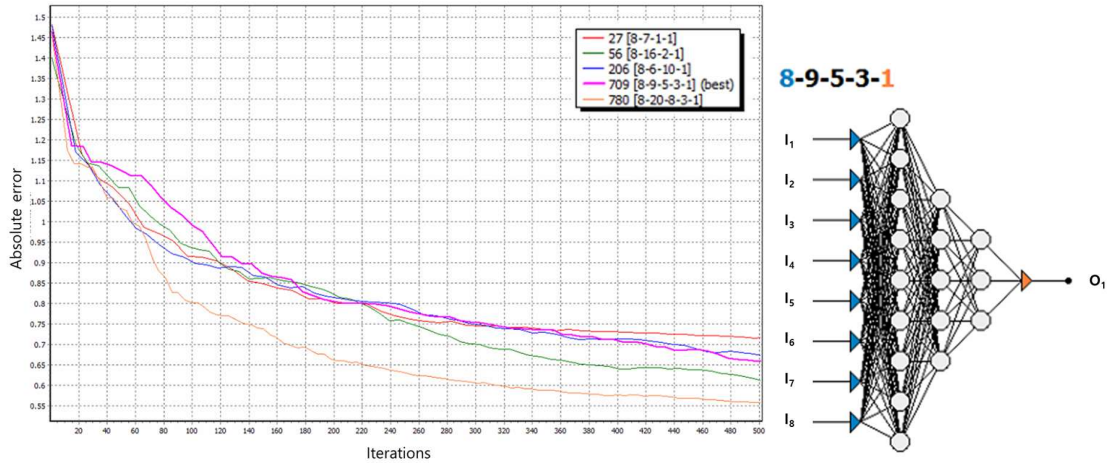


그림 5. 신경망 구조 결정을 위한 탐색 결과 오차(좌) 및 적정 회로망 구조(우)

(4) 인공신경망 학습 결과

- (가) 입출력 변수 조합을 8-9-5-3-1 구조의 신경망 구조에 대해 반복 알고리즘 활용에 적합한 켈레기울기법 (Conjugate gradient method)을 적용하여 학습함
- (나) 학습 과정에서 검증 데이터와 학습 데이터의 오차는(그림 6) 학습에 활용한 데이터가 약 800 세트 정도로 인공신경망을 학습하기에 부족한 양이기 때문으로 추정되며, 추가적인 측정 데이터를 활용하여 오차를 줄일 예정임
- (다) 최종적으로 학습 완성된 인공신경망 알고리즘의 정확도 상관관계는 0.82, 결정 계수 (R2)는 0.66이다. (그림 7) 추후 학습 데이터가 보완될 경우 정확한 배치 함수량 추정 알고리즘 개발이 가능할 것으로 판단됨

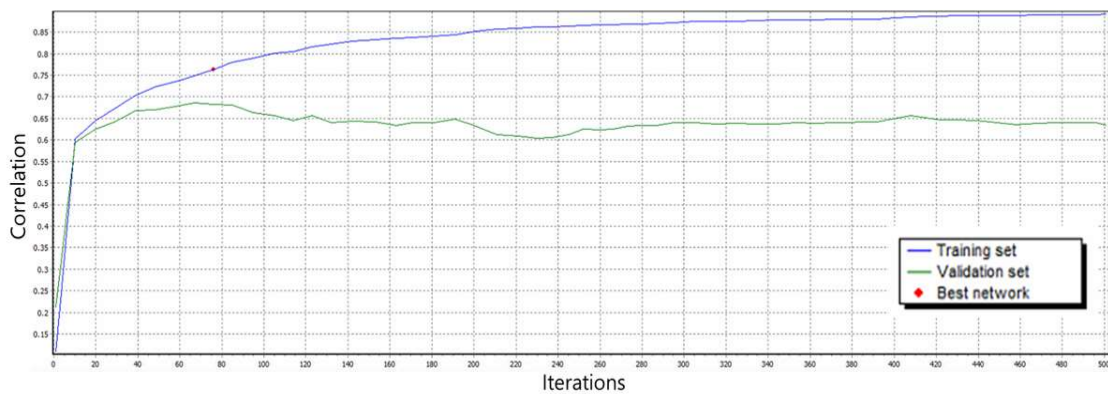


그림 6. 인공신경망 학습 횟수와 상관관계

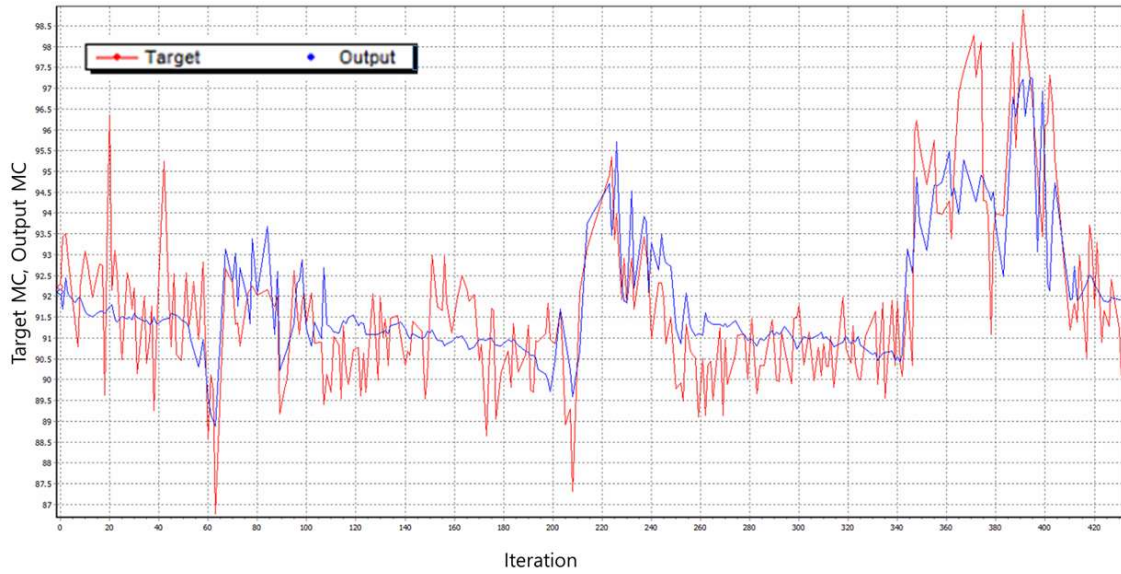


그림 7. 인공신경망 학습 데이터(Output)와 검증 데이터(Target)의 비교

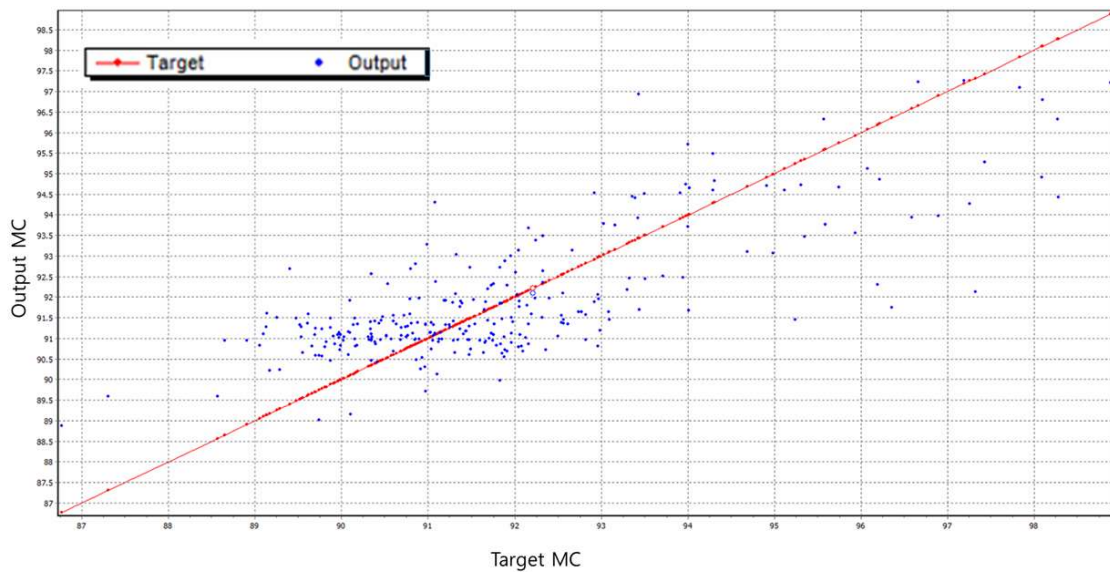


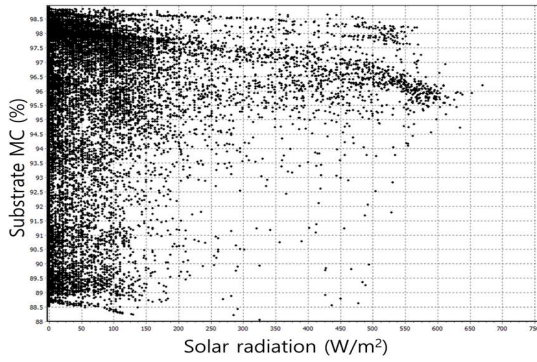
그림 8. 인공신경망 학습 데이터(Output)와 검증 데이터(Target)의 1:1 비교

(5) 인공 신경망 적용

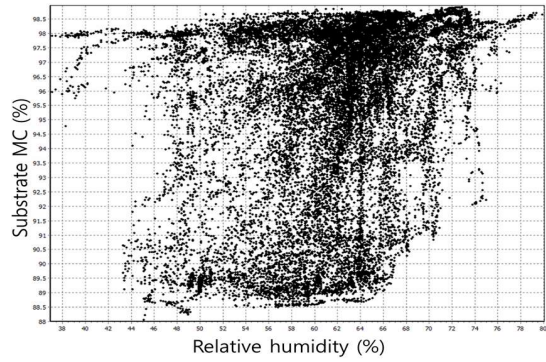
- (가) 학습된 인공신경망 알고리즘을 이용하여 측정 환경 변수들 (광도, 습도, 온도, 배지 EC, 배액 EC, 배액량, 급액량)에 대한 배지 함수량을 추정함
- (나) 1차년도 정교한 데이터 수집 장치 완성 이후, 계속적으로 출력 변수 추정 및 신경망 알고리즘의 정확성 향상을 추진함



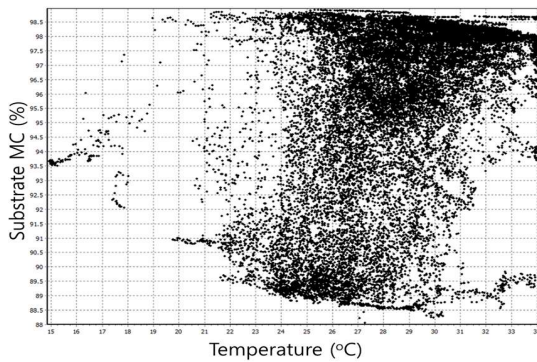
광도



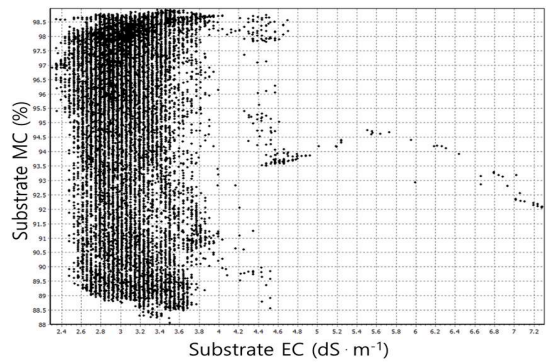
습도



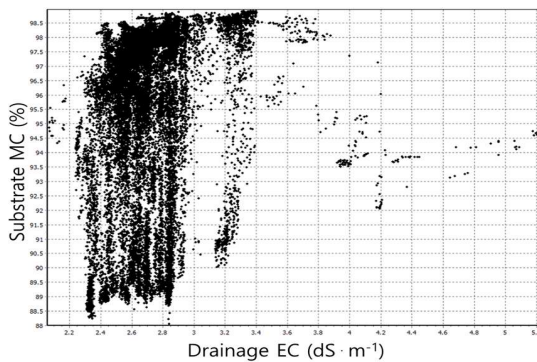
온도



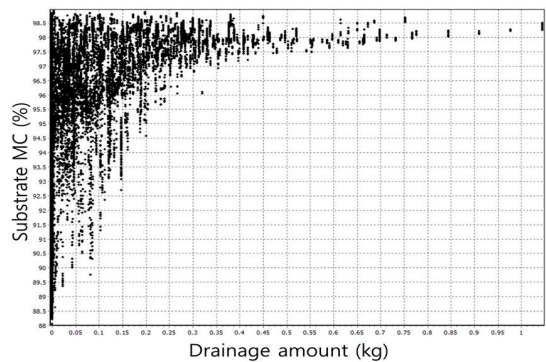
배지 EC



배액 EC



급액량



배액량

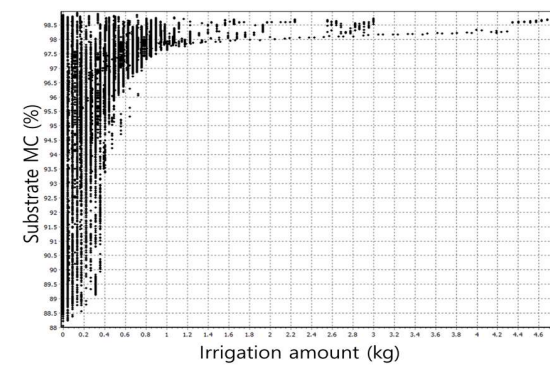


그림 9. 측정된 각 환경 요인과 배지 함수율과의 관계성

다. 증산 및 배지 함수율 변화에 미치는 각 시계열 요인 분석

(1) 지상부 및 지하부 증산 관련 데이터 수집 시스템 설치

(가) 증산 관련 시계열 데이터 해석을 위한 증산 및 생육량 연속 측정 장치 시스템

(나) 측정 항목 : 배지 EC, 배지 함수율, 배액 EC, 배액 pH, 온도, 습도, CO<sub>2</sub>, 배액 무게, 급액 무게, 전체 시스템 무게(배지 무게 + 작물 무게), 일사량

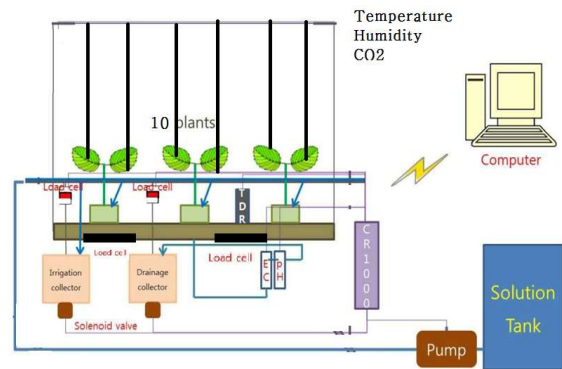
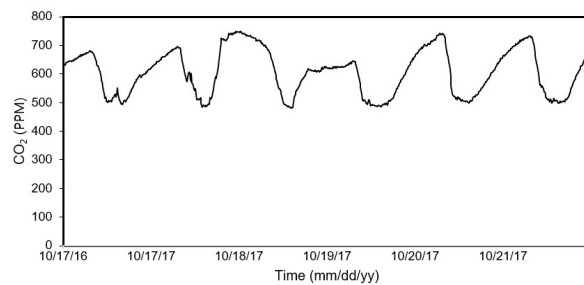
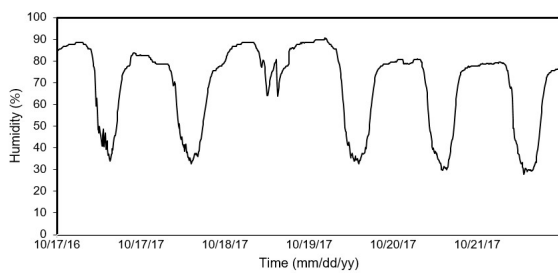
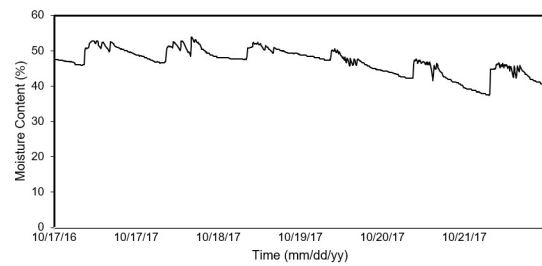
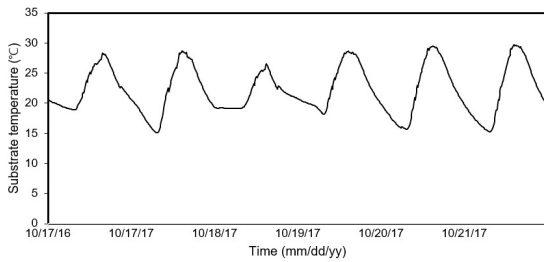
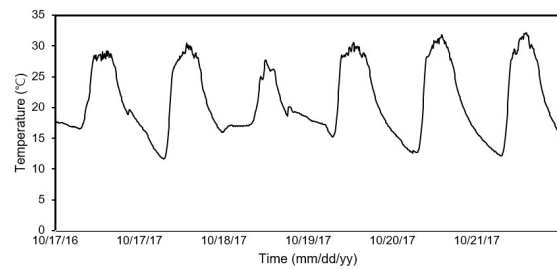
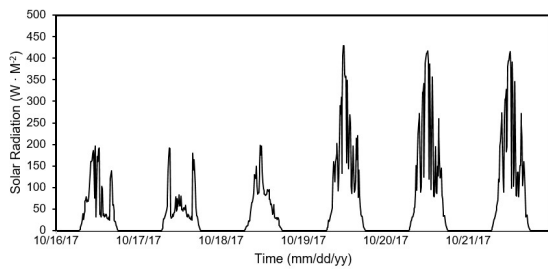


그림 1. 증산 관련 데이터 수집 시스템



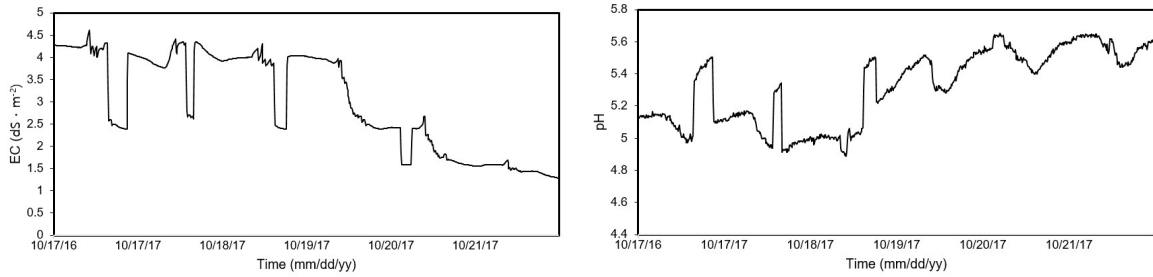


그림 2. 지상부와 지하부 환경 데이터 수집(2017/10/16 ~ 2017/10/21)

(2) 관행의 환경과 생육변수에 따른 증산량 추정 모델(Penman-Monteith Model)과 실측값 비교

(가) Penman-Monteith(P-M) 식을 수정한 관행의 방법으로 아래의 식에 의해 정량화함

$$ET = a * [1 - \exp(-k * LAI)] * RAD / \lambda + b * LAI * VPD$$

(단, VPD : 수증기압포차, LAI : 엽면적지수)

(나) 수증기압포차(VPD)는 시설내의 온도(T)와 상대습도(RH)를 이용하여 추정함

$$VPD = 610.7 * [(100 - RH) / 100] * 10^{7.5 T / (237 + T)}$$

(다) 측정된 LAI는 Boltzman sigmoid equation을 응용하여 DAT에 따른 회귀식으로 모델을 만들고 추정함 (R<sup>2</sup> = 0.99)

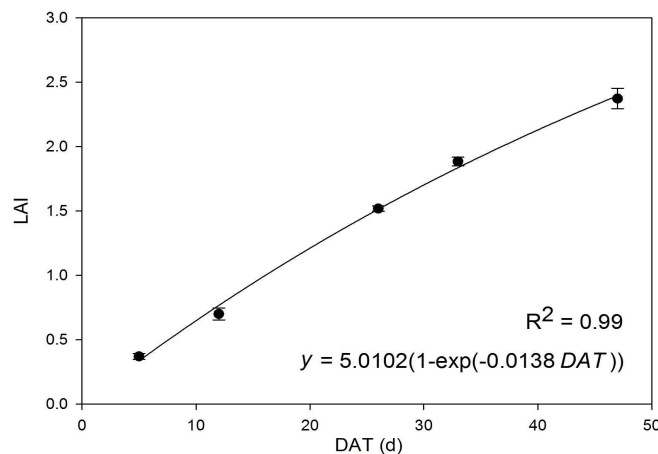


그림 3. 정식후 기간(DAT)에 따른 엽면적 지수 변화

(라) 실측된 누적 증산량과 관행 P-M 식으로 계산한 예측값과의 비교

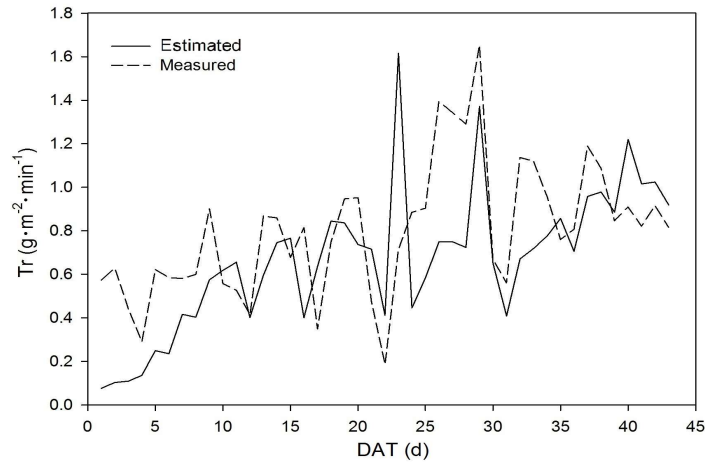


그림 4. 증산량(Tr)의 실측값 및 P-M 이용 예측값과의 비교

(3) 환경과 생육변수에 따른 인공신경망 이용 증산량 추정값과 실측값과의 비교

(가) 인공신경망은 입력층, 은닉층, 출력층으로 구성되고, 512개의 퍼셉트론들로 이루어진 5개의 은닉층과 1개의 증산량 출력층으로 구성됨

(나) 활성화함수  $f(x)$ 는 Rectified Linear Unit (ReLU) 함수를 사용함

(다) 인공신경망 학습에는 현재 사용되고 있는 Adam 최적화 방식을 사용함

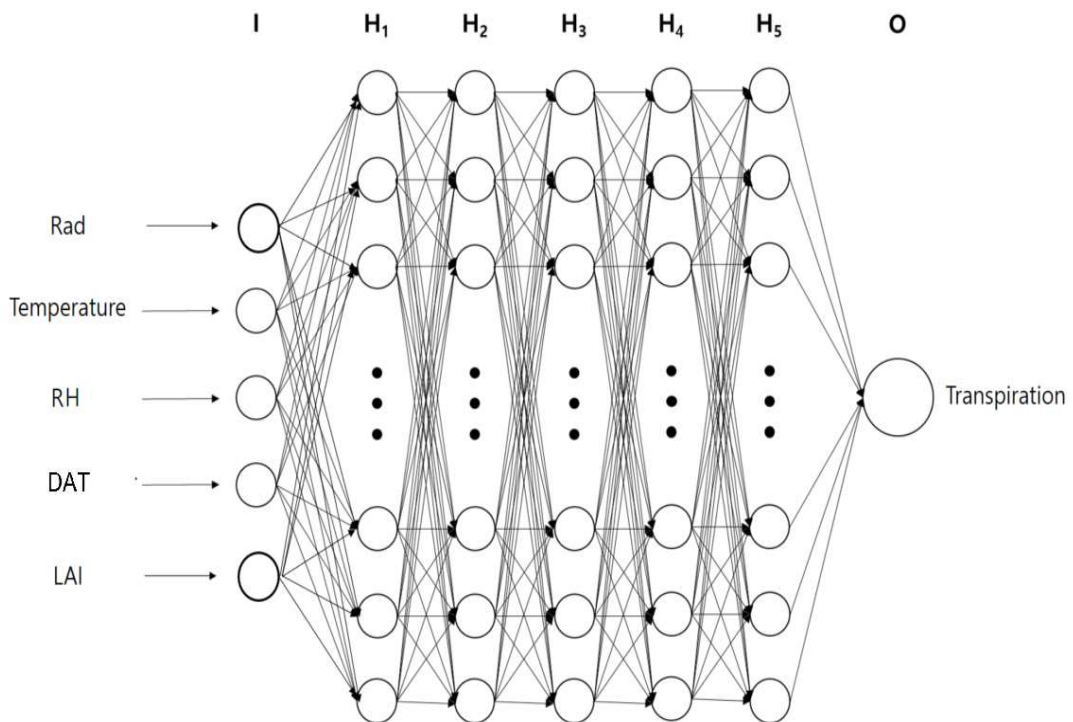


그림 5. 사용한 인공신경망 구조



표 1. Adam 최적화 방식에서 학습하기 전 계수

Parameter ◦	Value ◦	Description ◦
<u>Minibatch size</u> ◦	5000 ◦	Number of training cases over which each stochastic gradient descent update is computed ◦
Learning rate ◦	0.001 ◦	Learning rate used by Adams optimizing method ◦
$\beta_1$ ◦	0.9 ◦	Exponential decay rate for the moment estimates ◦
$\beta_2$ ◦	0.999 ◦	Exponential decay rate for the moment estimates ◦
$\epsilon$ ◦	1e-0.8 ◦	A constant for numerical stability ◦
Dropout probability ◦	0.7 ◦	Probability of dropping out units in the neural network ◦
Training epoch ◦	Various ◦	Number of training iteration ◦

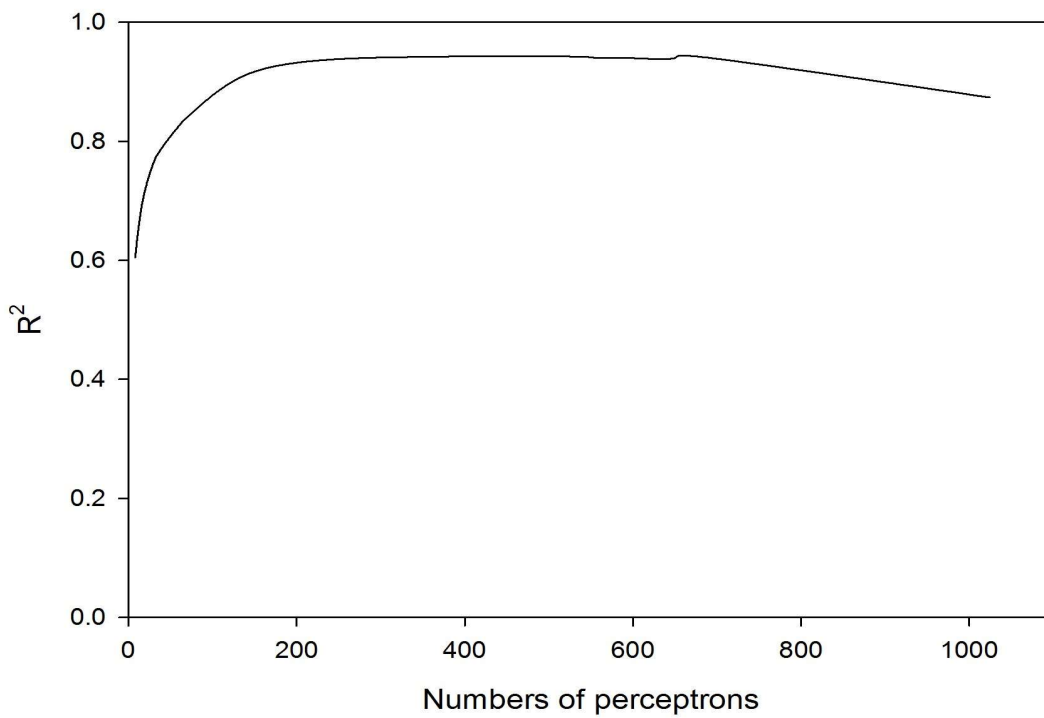


그림 6. 인공신경망의 은닉층의 퍼셉트론 개수에 따른 정확도 변화

(라) .csv 파일을 구축된 환경에 넣을 수 있도록 파일형식 변경코드

```
In [2]: raw_df = pd.read_csv("../Data/Tra.csv", index_col="date")
In [3]: #raw_df = pd.DataFrame(raw_df, dtype="float")
raw_df
Out[3]:
```

	temp	humid	co2	earth	ec	ph	rad	LAI	tr
date									
2017-08-04	29.130	69.8	541.00	30.68	0.0100	8.7250	0.0000	0.062720	0.000000
2017-08-04	29.030	70.5	538.70	30.59	0.0100	8.7370	0.0000	0.062720	0.000000
2017-08-04	28.920	70.6	538.50	30.50	0.0100	8.7400	0.0000	0.062720	0.000000
2017-08-04	28.790	71.4	540.40	30.41	0.0100	8.7200	0.0000	0.062720	0.000000
2017-08-04	28.720	71.6	545.40	30.32	0.0100	8.7420	0.0000	0.062720	0.000000
2017-08-04	28.650	72.3	543.40	30.24	0.0100	8.7310	0.0000	0.062720	0.000000
2017-08-04	28.590	72.6	545.30	30.10	0.0100	8.7400	0.0000	0.062720	0.000000
2017-08-04	28.480	73.0	546.70	30.02	0.0100	8.7430	0.0000	0.062720	0.000000
2017-08-04	28.390	73.6	547.60	29.90	0.0100	8.7280	0.0000	0.062720	0.000000
2017-08-04	28.310	73.7	544.40	29.86	0.0100	8.7430	0.0000	0.062720	0.000000

```
In [4]: raw_df.columns.tolist()
Out[4]: ['temp', 'humid', 'co2', 'earth', 'ec', 'ph', 'rad', 'LAI', 'tr']
```

그림 7. 인공지능망을 운용할 수 있도록 데이터 처리(데이터의 최대값, 최소값, 라벨링 등)

```
['testdataset', 'testlabel', 'mins', 'trainlabel', 'traindataset', 'maxs', 'labelmins', 'labelmaxs']
[[ 0.3569454  0.61549708  0.22568606  0.49822064  0.42098947  0.37881643
  0.72229176]
 [ 0.50725639  0.41959064  0.08342481  0.49466192  0.30044006  0.47399171
  0.05820005  0.2493303 ]
 [ 0.45542502  0.72368421  0.16487377  0.4452847  0.73727855
  0.28775364  0.08662412]
 [ 0.40877678  0.40643275  0.10384193  0.29403915  0.6352847  0.28609122
  0.08340415  0.98440577]
 [ 0.14789219  0.86988304  0.37475302  0.14991103  0.51700227  0.27798718
  0.85147125]]
(4500, 8)
[[ 0.28840909]
 [ 0.40090909]
 [ 0.44272728]
 [ 0.58636364]
 [ 0.33090909]]
(4500, 1)
[[ 0.16931583  0.81871345  0.2636663  0.28425267  0.26803574  0.38899359
  0.66293427]
 [ 0.30234969  0.58625731  0.20724479  0.33585409  0.27270303  0.46513381
  0.19660622]
 [ 0.62404976  0.37134503  0.06212953  0.49021352  0.32537672  0.3469657
  0.04357922  0.35045128]
 [ 0.33621285  0.67105263  0.09923161  0.39635231  0.54127217  0.26196758
  0.833783 ]
 [ 0.13545266  0.83918129  0.23271131  0.12010676  0.6044806  0.31002639
  0.93629153]]
(1730, 8)
```

그림 8. 인공지능망 최적화 및 구조 확립, 입출력 데이터 설정 및 학습 후 검증

```

In [3]: #Data setting
n_train = train_data.shape[0]
n_test = test_data.shape[0]
n_input = train_data.shape[1]
n_output = test_label.shape[1]
n_classes = n_output
n_hidden = 512

print("# train: %d # test: %d, # input: %d, # output: %d" % (n_train, n_test, n_input, n_output))
print("# layer: %d" % n_hidden)

# train: 4500 # test: 1730, # input: 8, # output: 1
# layer: 512

```

그림 9. 인공지능망 구조 형성 자료

(마) 매개변수들 설정

# Parameters

```

learning_rate = 0.001
training_epochs = 70000
batch_size = n_train
display_step = 1000

```

# Network Parameters

```

n_hidden_1 = n_hidden # 1st layer num features
n_hidden_2 = n_hidden # 2nd layer num features
n_hidden_3 = n_hidden # 3rd layer num features
n_hidden_4 = n_hidden # 4th layer num features
n_hidden_5 = n_hidden # 5th layer num features

```

```

end = time.time() - start
print ("Optimization Finished\ntraining time: %.2f sec." % (end))
Training Acc: 0.967, Test Acc: 0.907
Epoch: 53000/70000 cost: 1.432354, best: 0.921
Training Acc: 0.969, Test Acc: 0.905
Epoch: 54000/70000 cost: 1.465709, best: 0.921
Training Acc: 0.967, Test Acc: 0.903
Epoch: 55000/70000 cost: 1.402326, best: 0.921
Training Acc: 0.970, Test Acc: 0.909
Epoch: 56000/70000 cost: 1.521842, best: 0.921
Training Acc: 0.963, Test Acc: 0.900
Epoch: 57000/70000 cost: 1.373531, best: 0.922
Training Acc: 0.972, Test Acc: 0.909
Epoch: 58000/70000 cost: 1.382063, best: 0.922
Training Acc: 0.971, Test Acc: 0.910
Epoch: 59000/70000 cost: 1.348296, best: 0.922
Training Acc: 0.973, Test Acc: 0.909
Epoch: 60000/70000 cost: 1.361934, best: 0.923
Training Acc: 0.972, Test Acc: 0.913
Epoch: 61000/70000 cost: 1.387850, best: 0.923
Training Acc: 0.971, Test Acc: 0.911

```

그림 10. Tensorflow를 이용한 인공지능망 구동 예시

(바) 시계열 데이터들을 Excel의 .csv 형식에 맞추어 Input과 Output으로 구분함

(사) 학습은 Python 언어 기반 수치 계산 라이브러리인 Tensorflow 1.2.1 version 사 용함

(아) .csv 파일을 구축된 환경에 넣을 수 있도록 파일형식을 변경함

(자) 인공지능망을 돌릴 수 있도록 데이터 처리 코드를 작성함



(차) 인공신경망 최적화 구조를 확립하고, 매개변수들을 설정함

	Input Data (10)										Output Data (1)
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	date	DAT	temperat	humidity	co2	earthtem	ec	ph	tr	solar	MC
2	2017-09-08	36	30.42	46.9	499.9	31	4.14	4.943	0.042	51.114	56.622
3	2017-09-08	36	30.2	48.5	498.5	30.89	4.137	4.964	0.038	48.138	56.55

그림 11. 엑셀 내 데이터 가공 예시

(카) 환경과 생육변수에 따른 인공신경망 이용 증산량 추정값과 실측값 비교 (1:1)  
4500개의 데이터로 학습을 수행하고 나머지 1700개의 검증데이터로 검증을 수행함

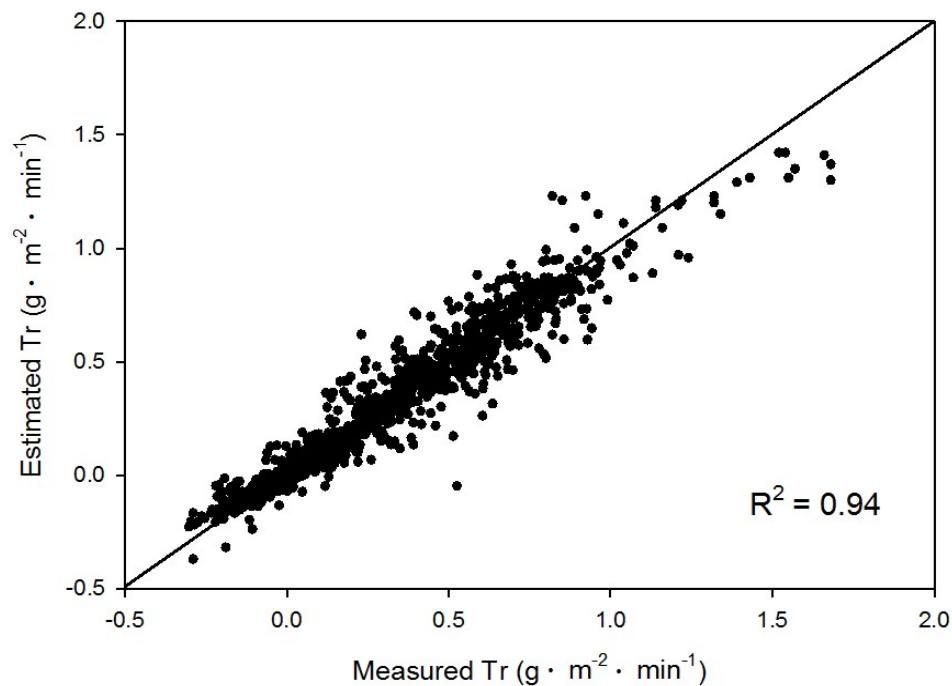


그림 12. 인공신경망 이용 증산량(Tr)의 예측값 및 실측값 비교

라. 배지 함수율에 따른 배액량 추정 모델 개발

(1) 지하부 환경 추가 후 인공신경망 이용 증산량 측정 정확도 확인

(가) 지하부 환경인자 : 배지 EC, 배액 EC, 배액 pH, 배지 온도, 배지 함수율

(나) 배액량은 배지의 염류집적(배지의 pH 및 EC)을 막기 위해서 급액량의 30% 수준으로 설정함

(다) 정확한 증산 추정으로 배액량 추정이 가능함

(라) 지하부 환경을 추가하여(10개의 입력인자와 1개의 출력인자) 4500개의 학습데이터와 1700개의 검증데이터로 이루어짐

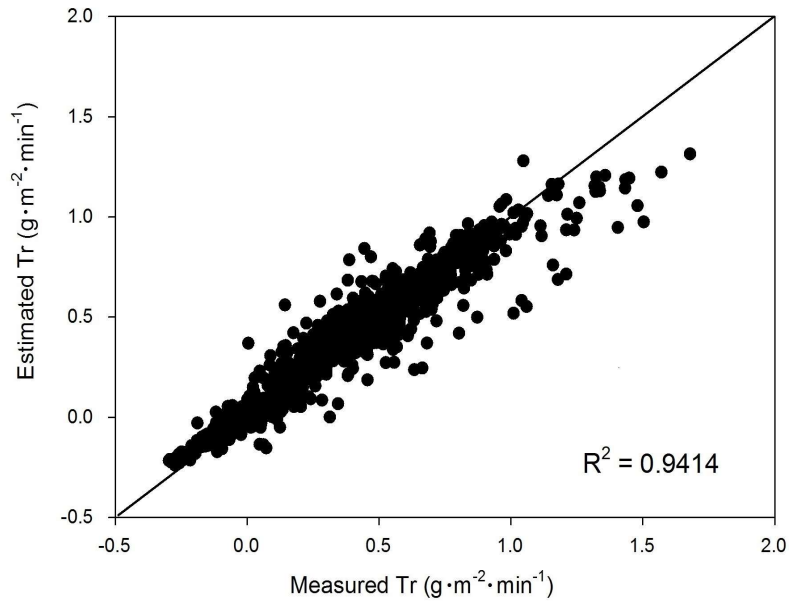


그림 13. 인공신경망 이용 증산량(Tr)의 예측값과 증산량 실측값의 비교

(마) 지하부 환경변수를 추가할 경우 지상부 환경변수만을 가지고 예측한 값보다 정확도가 높아짐

마. 증산 및 배액량 추정 모델 이용 함수율 변화모델 개발

(가) 환경변수들 및 생육변수들을 이용하여 함수율 변화를 추정함

(나) Output data를 FDR 센서로 측정한 배지함수율로 고정함

(다) 10개의 입력인자와 1개의 출력인자로 이루어져 있고, 5000개의 데이터로 학습을 수행하고 나머지 2200개의 데이터로 검증을 수행함

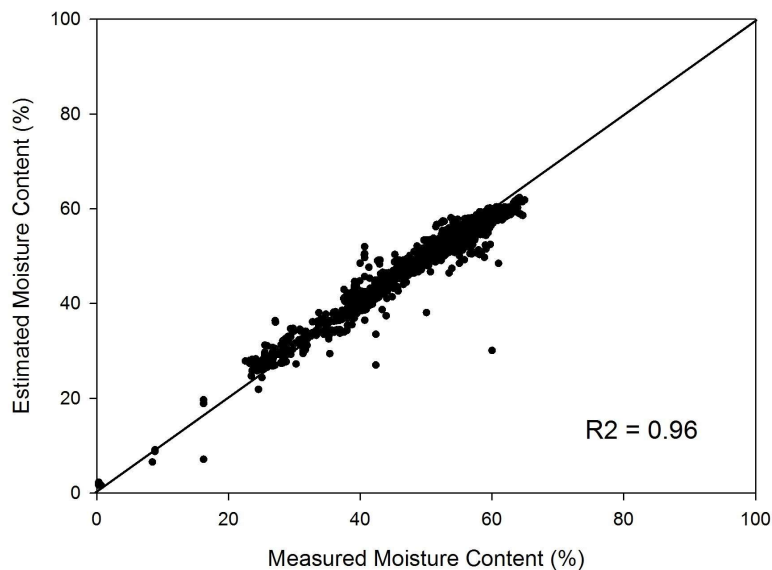


그림 14. 인공신경망 이용 배지함수율 예측값과 FDR 센서에 의한 배지함수율 실측값 비교

바. 지하부 및 지상부 환경 조건에 따른 수분 이동 패턴 통합 알고리즘 완성

(1) 재배 작기 설정 및 작기 별 일사량 조건

(가) 작기는 총 2개 작기로 구분하며 각 작기별 일사량 조건이 상이함

- ① 겨울 작기 (Aug - Jan) - 일사량이 낮음
- ② 여름 작기 (Feb - Jul) - 일사량이 높음

(나) 재배 온실 내 연중 환경 변화

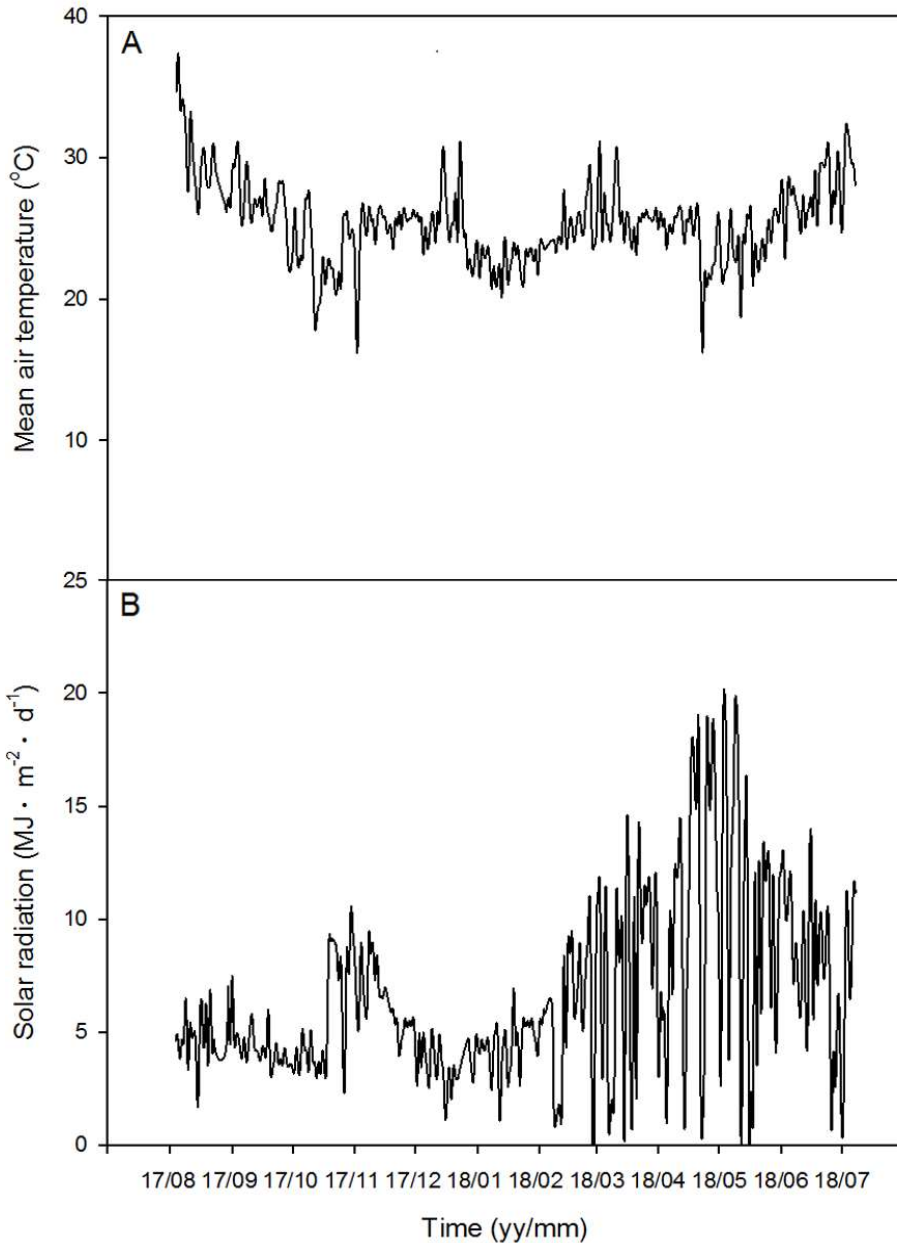


그림 1. 온실 내 일중 Mean temperature (A), 온실 내 일평균 누적 광량 (B)

(2) 총 작기 동안의 생육 환경

(가) 측정된 엽면적지수(LAI)는 Boltzman sigmoid equation을 응용하여 정식후 시기

(DAT)에 따른 모델을 만들어 추정함

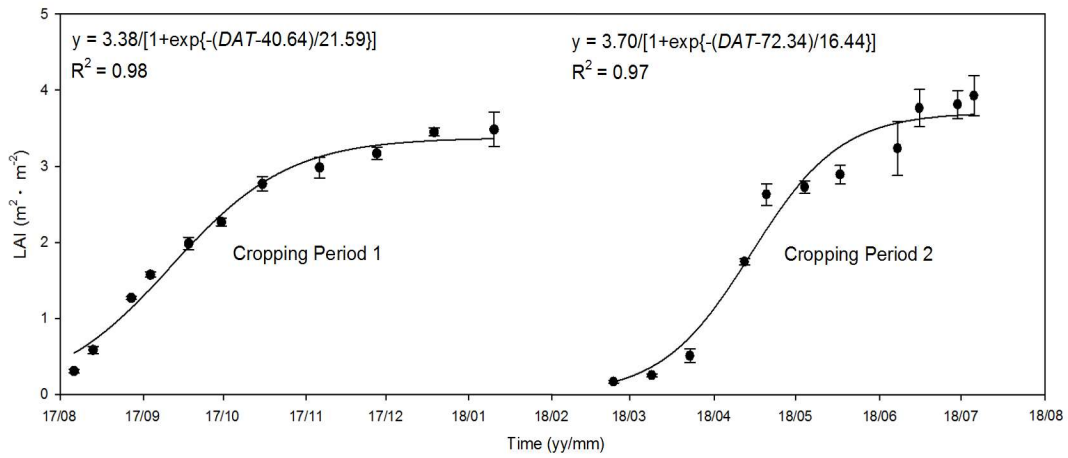


그림 2. 정식 후 일수에 따른 엽면적지수(LAI) 변화: 겨울작기 (Cropping period 1), 여름작기 (Cropping period 2)

- (3) 지상부와 지하부 환경변수의 입력변수에 따른 인공신경망 이용 증산량 추정  
 (가) 인공신경망 입력변수로 활용될 작기 내 데이터 수집

표 1. 인공신경망 입력변수의 평균 범위

Environmental factor	Range
Air temperature (°C)	9.0 - 40.7
Relative humidity (%)	23.1 - 97.0
Solar radiation (W·m <sup>-2</sup> )	0.0 - 632.1
CO <sub>2</sub> concentration(ppm)	413.9 - 1060.6
Electrical conductivity (dS·m <sup>-1</sup> )	2.1 - 5.3
pH	4.6 - 6.9
Substrate temperature (°C)	12.6 - 39.8
Leaf area index (m <sup>2</sup> ·m <sup>-2</sup> )	0.11 - 3.65

(나) 인공신경망 입력변수 최적 구조 결정

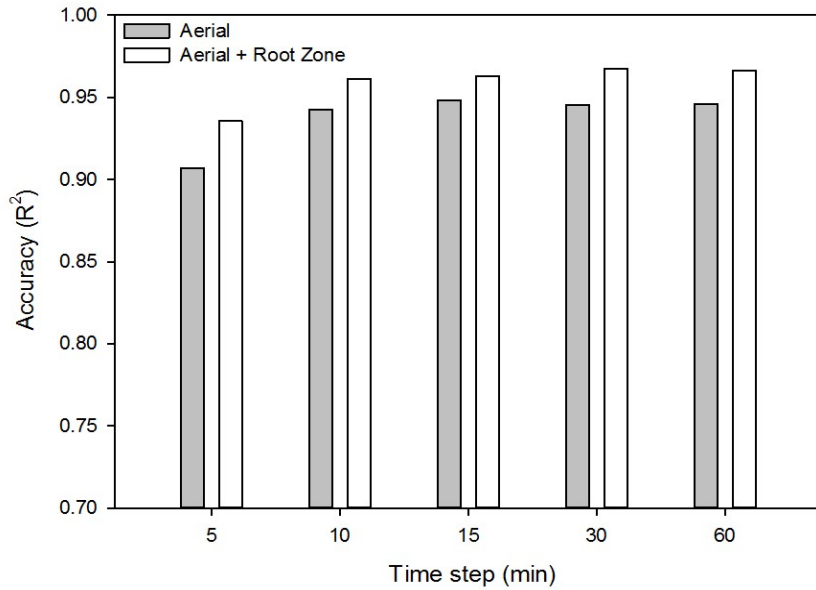


그림 3. 지상부와 지상부+지하부의 시간 간격 입력값에 따른 정확도

(다) 지상부(Aerial) : 온도, 상대습도, 일사량, 이산화탄소 농도, 엽면적 지수

(라) 지상부\_지하부(Aerial+Root zone) : 온도, 상대습도, 일사량, 이산화탄소 농도, 엽면적 지수, 전기전도도, pH, 배지 지온

(마) 환경에 대한 작물의 증산 반응 및 센서의 정확도를 고려한 입력변수들의 평균 시간별

(바) 정확도: 10분 (정확도가 높고, 많은 수의 데이터를 얻을 수 있는 Time step)

(사) 인공신경망 입력층, 은닉층, 출력층 구성

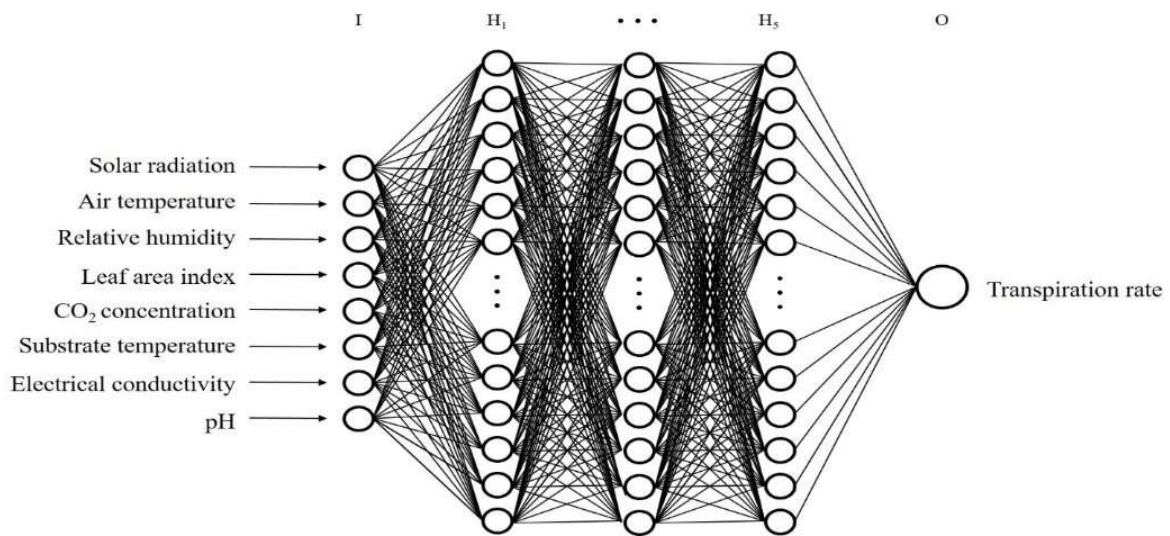


그림 4. 사용한 인공신경망 구조

(아) 환경과 생육변수를 이용한 인공신경망에 의한 증산량 추정값과 실측값 비교 (1:1) 8개의 입력인자와 1개의 출력인자로 이루어져 있고, 21,319개의 데이터로 학습을 수행하고 머지 9,138개의 데이터로 검증을 수행하였음

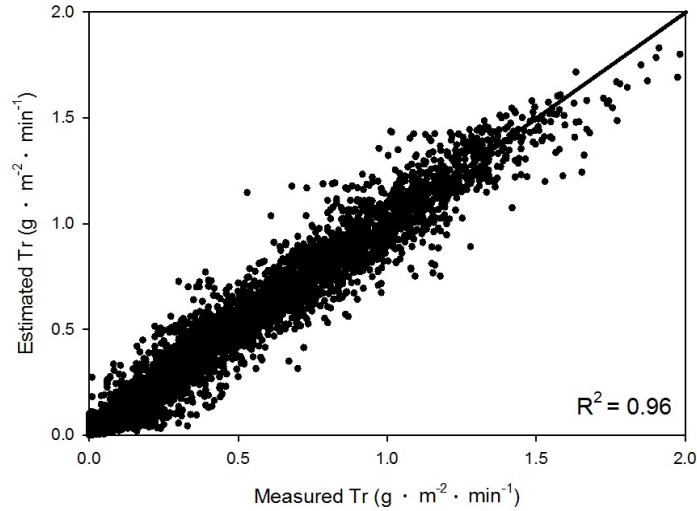


그림 5. 인공신경망 이용 증산량(Tr)의 예측값과 실측값 비교

(자) 재배 작기 전체 학습데이터로 학습을 수행하고 검증데이터로 검증 완료 후 총 4일 간의 576개의 데이터 (A, B, C, D)로 테스트를 수행하였음

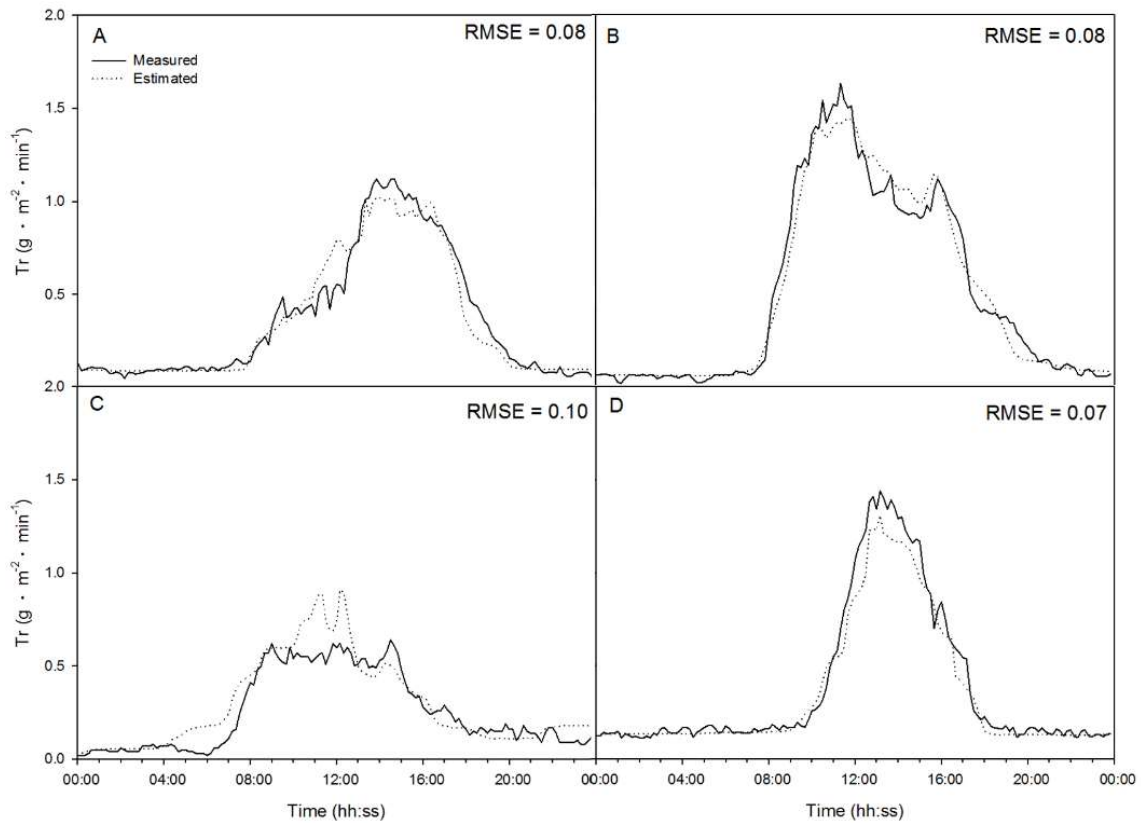


그림 6. 전체 데이터 활용한 인공신경망 이용 증산량(Tr)의 추정값과 실측값 비교

(차) A, B는 여름 작기 중 광도가 비슷한 날, C, D는 겨울 작기 중 광도가 비슷한 날을 선택

(카) A는 4월 7일 (LAI = 1.5), B는 6월 21일 (LAI = 3.6), C는 9월 10일 (LAI = 1.5), D는 1월 9일 (LAI = 3.4)임

사. 지하부 환경 설정 조건에 대한 수분 이동 패턴 분석

(1) 광도에 따른 급액 및 배액 변화

(가) 급액은 누적 일사량 기준으로 시행되며, 선행 연구에서 보정된 광도식(Shin et al., 2014)에 근거하여 누적광도가  $50\text{Jcm}^{-2}$ 에 도달 하였을 때, 100ml의 양액을 점적 공하였음.

(나) 누적 일사량에 의하여 구축된 관수에 따라서 일별 광도의 차이에도 불구하고, 배지 내에서는 일정한 함수율의 범위를 보였음.

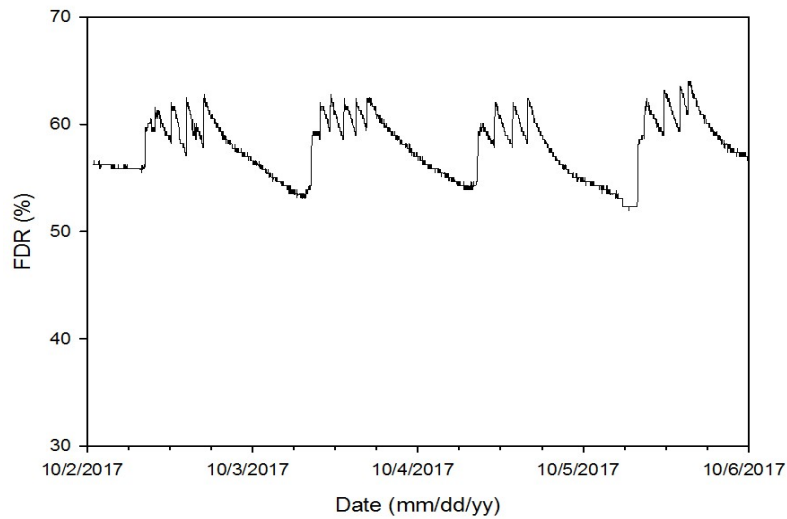


그림 7. 일정 기간 동안의 배지 내 함수율의 변화

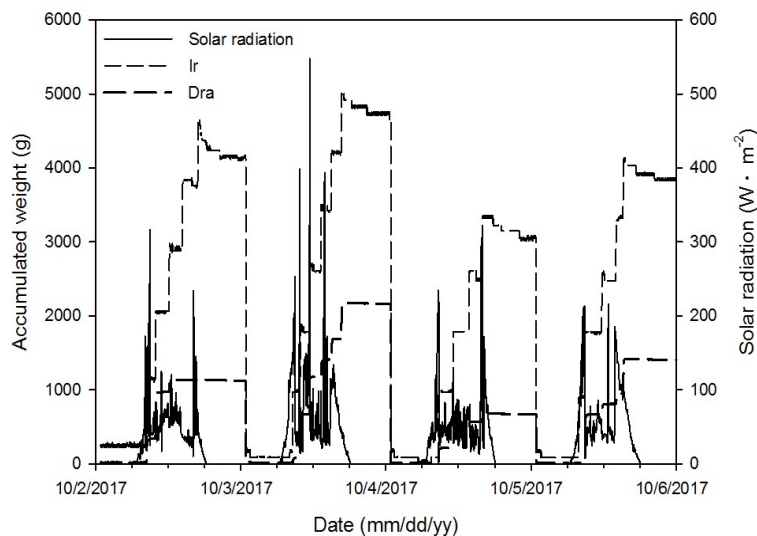


그림 8. 일정 기간 동안의 일사량, 급액(Ir) 및 배액(Dra)의 변화



(2) 작기별, 계절별 증산량 분석

(가) 관행의 증산량 추정 모델(Penman - Monteith Model)과 인공신경망 이용 증산량 추정 모델의 작기별, 계절별 분석 정확도 비교 (24h 평균 데이터로 분석)

표 2. 학습에 이용된 데이터 개수

Period of data	P-M (24 h)	ANN (24 h)			ANN (10 min)		
		Trainin g	Validatio n	Test	Trainin g	Validation	Test
Whole-year	295	203	88	4	21,319	9,138	576
Cropping period 1	130	88	39	3	9,070	3,887	288
Cropping period 2	165	113	49	3	12,250	5,250	288
Spring	74	50	22	2	6,720	2,880	144
Summer	91	62	27	2	5,530	2,370	144
Autumn	70	47	21	2	4,861	2,084	144
Winter	60	40	18	2	4,208	1,804	144

표 3. 적용 기간별 P-M 및 인공신경망(ANN) 이용 증산량 예측 정확도 비교

Period of data	P-M	ANN
Whole-year	0.73	0.88
Cropping period 1 (low radiation)	0.76	0.89
Cropping period 2 (high radiation)	0.79	0.92
Spring	0.83	0.93
Summer	0.79	0.84
Autumn	0.79	0.88
Winter	0.82	0.85

(나) P-M 모델은 전체적으로 인공신경망 (ANN) 이용 수분 패턴 분석에 비해 정확도가 낮은 경향을 보였지만, 작기별, 계절별로 기간이 특정해 질수록 정확해짐.

(다) 작기별 환경과 생육변수에 따른 인공신경망 이용 증산량 추정값과 실측값 비교 (1:1)

- ① 여름작기: 12,250개의 데이터로 학습, 나머지 5,250개의 데이터로 검증을 수행함.
- ② 겨울작기: 9,070개의 데이터로 학습, 나머지 3,887개의 데이터로 검증을 수행함

(라) 작기별 인공신경망 이용 증산량(Tr)의 추정값 및 실측값 비교

(마) 저광도 조건의 작기가 고광도 조건의 작기에 비하여 정확도가 높음

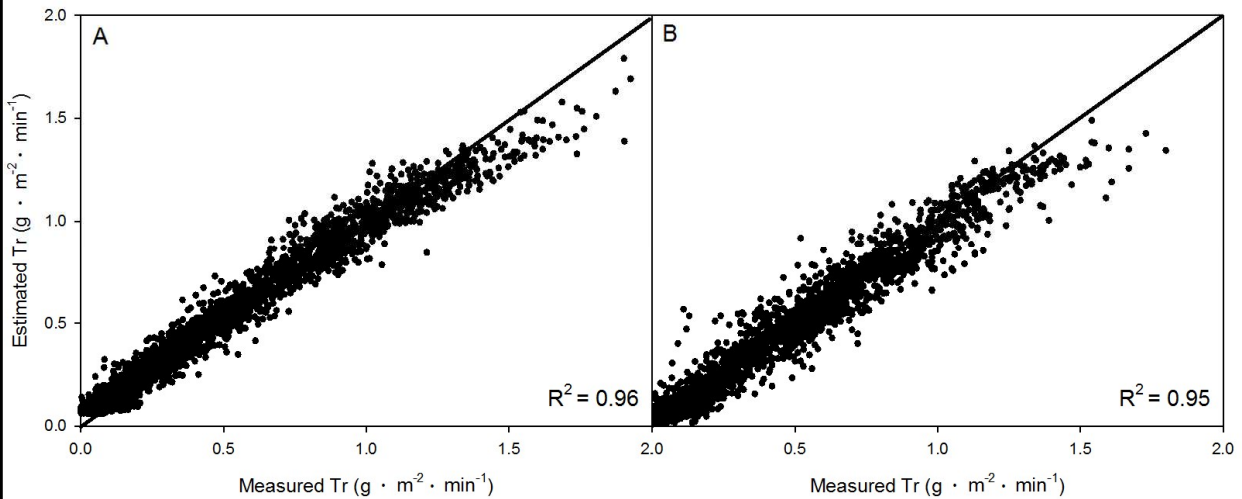


그림 9. 여름 작기의 실측 및 예측 증산량(Tr)의 비교: 여름 작기 (A), 겨울작기 (B)

(바) 여름(A, B) 및 겨울 작기(C, D) 각각 288개의 데이터로 테스트 수행

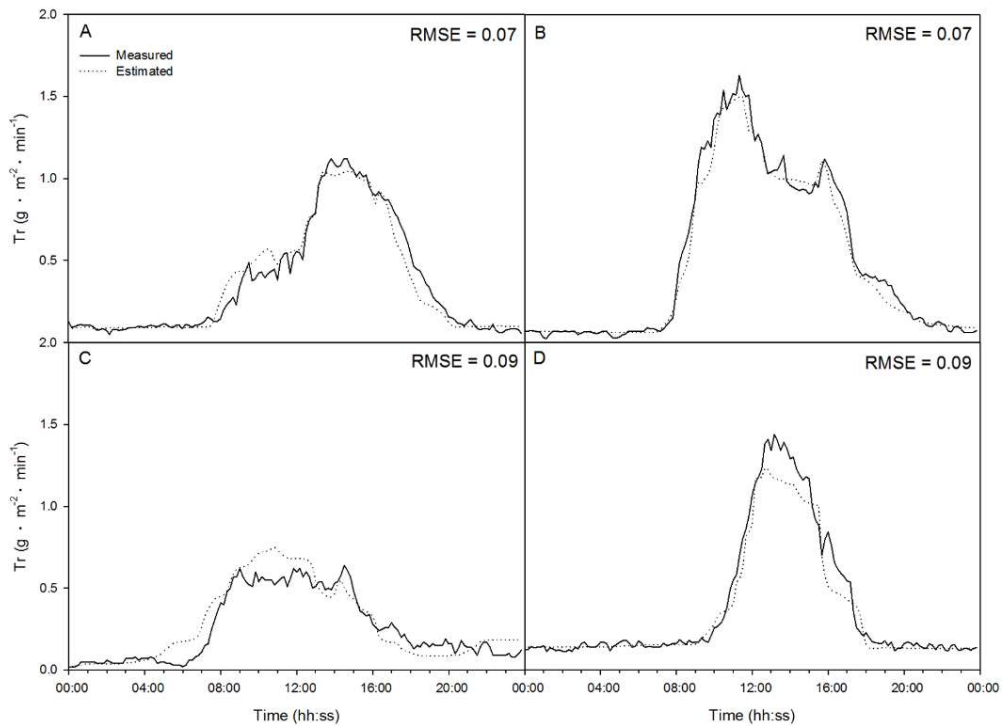


그림 10. 작기별 데이터 활용한 인공신경망 이용 증산량(Tr) 추정값 및 실측값 비교

(사) A, B는 여름 작기 중 광도가 비슷한 날, C, D는 겨울 작기 중 광도가 비슷한 날을 선택

(아) A: 4월7일 (LAI = 1.5), B: 6월21일 (LAI = 3.6), C: 9월10일 (LAI = 1.5), D: 1월9일 (LAI = 3.4)

(자) 계절별 환경과 생육변수에 따른 인공신경망 이용 증산량 추정값과 실측값 비교 (1:1) 8개의 입력인자와 1개의 출력인자로 이루어져 있고, 봄, 여름, 가을, 겨울로 데이터를 나누어 각각 학습을 수행하고 나머지 데이터로 검증을 수행함

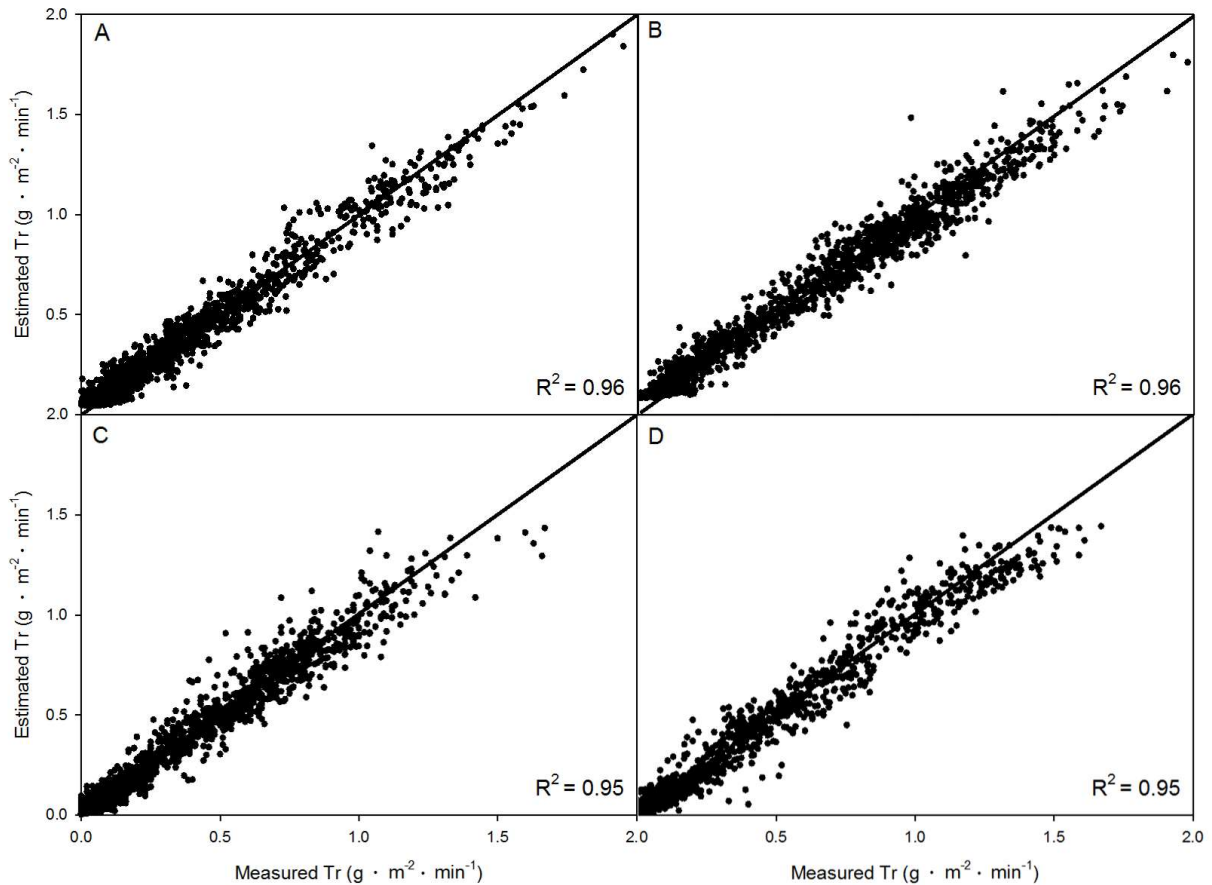


그림 11. 사계절 별 증산량(Tr)의 실측값과 예측값 비교: 봄(A), 여름(B), 가을(C), 겨울(D)

(차) 봄, 여름, 가을, 겨울 각각 계절별 데이터로 학습과 검증을 수행한 후에, 봄(A), 여름(B), 가을(C), 겨울(D)의 각각 144개 데이터로 테스트를 수행함.

(카) 봄과 여름의 고광도 조건일 경우가 저광도 조건인 가을과 겨울보다 정확도가 높았음

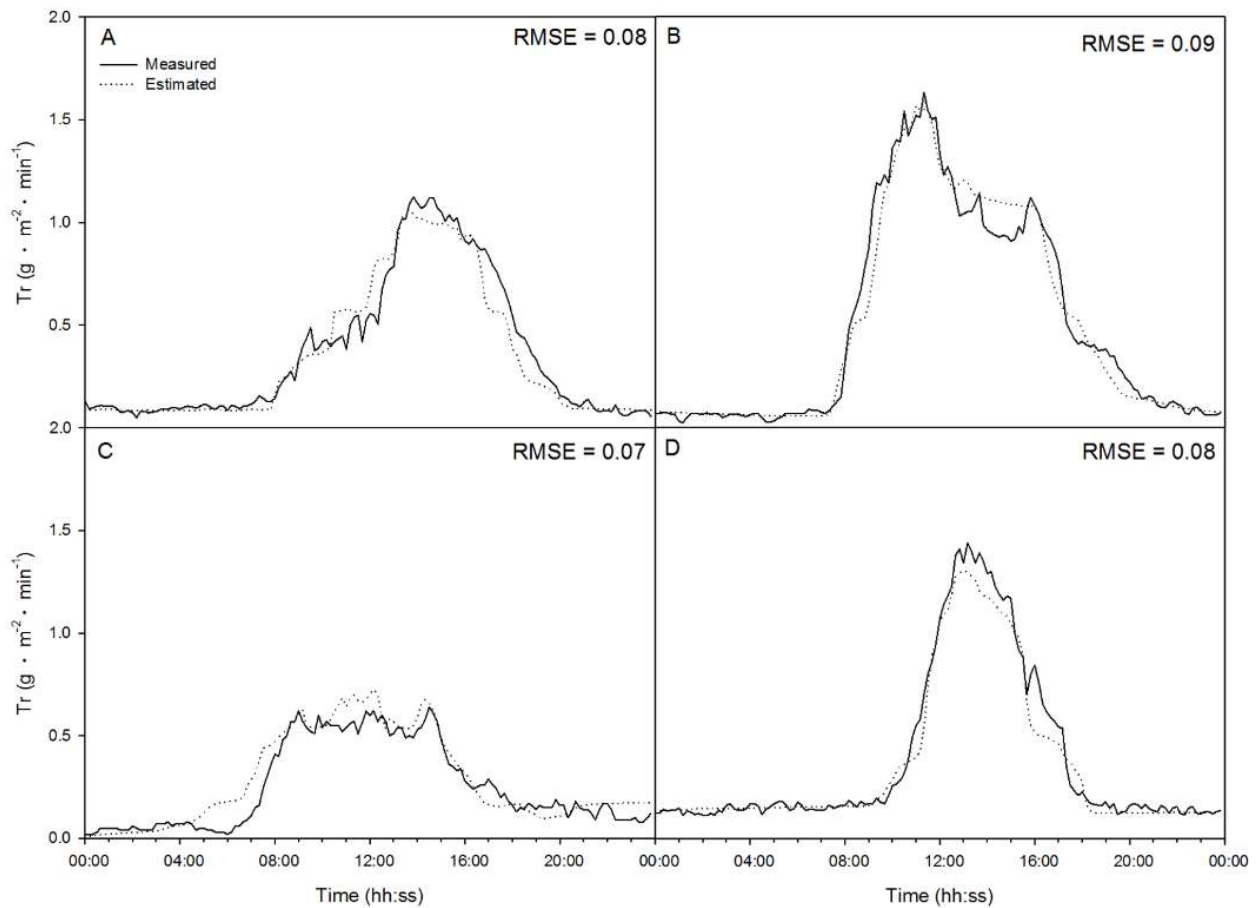


그림 12. 계절별로 인공신경망 이용 증산량(Tr) 추정값 및 실측값 비교

(타) A, B는 여름 작기 중 광도가 비슷한 날, C, D는 겨울 작기 중 광도가 비슷한 날을 선택하였음

(파) A: 4월 7일 (LAI = 1.5), B: 6월 21일 (LAI = 3.6), C: 9월 10일 (LAI = 1.5), D: 1월 9일 (LAI = 3.4)

(하) 가을은 차광막의 영향으로 계절별 데이터로 분석할수록 오차 값이 작아지는 경향을 보였던 반면, 봄, 여름, 겨울의 경우 충분한 데이터 수의 부족으로 계절별 데이터로 갈수록 오차율이 커지는 경향을 보였음

(3) 다양한 배지 함수율 조건에 따른 인공신경망 이용 증산 추정

(가) 총 3개의 배지함수율 조건 1(약 83%), 2(약 57%), 3(약 48%)에 대하여 증산량 변화를 추정함.

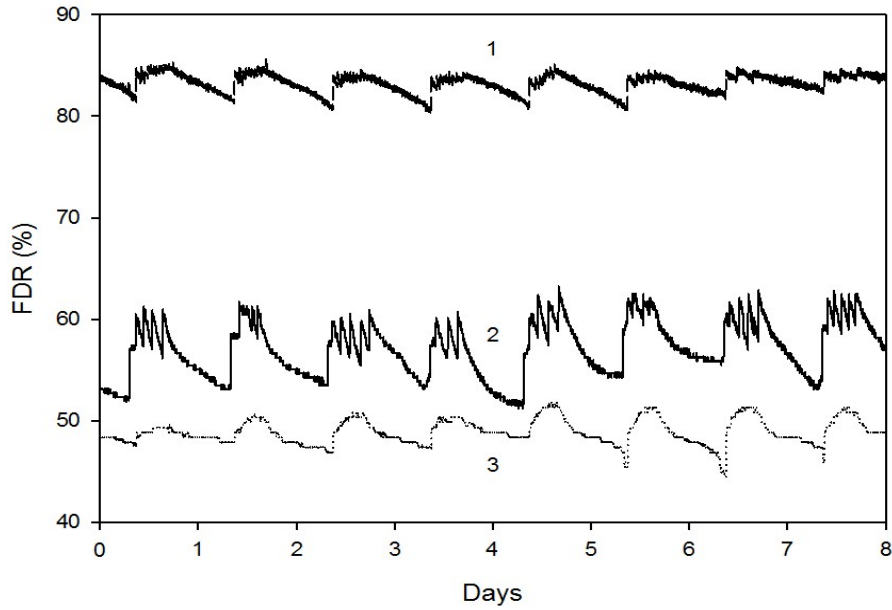


그림 13. 재배 기간 내 연속적인 시계열 배지함수율 변화

(나) 배지 함수율 조건에 따른 증산량 변화 패턴

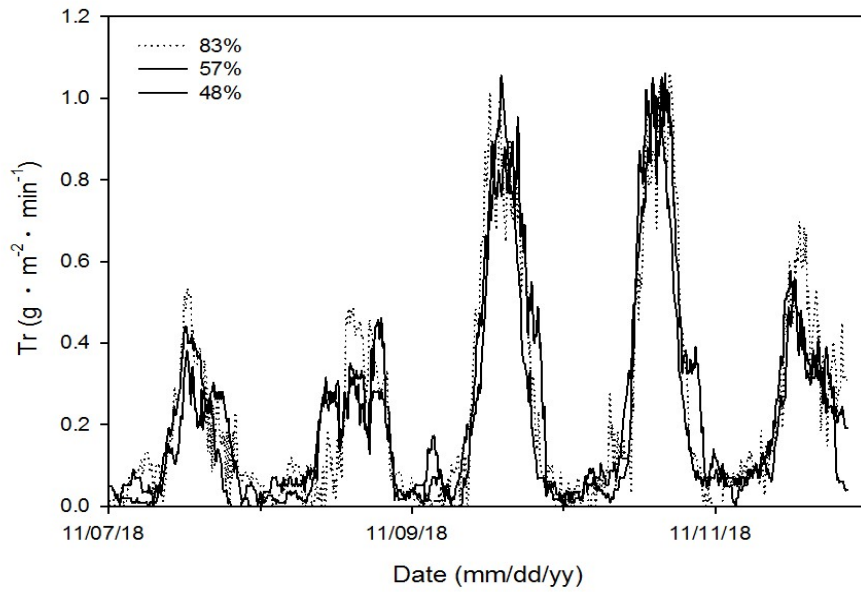


그림 14. 배지 함수율 변화에 따른 증산량(Tr)의 변화

(다) 증산은 광도에 가장 큰 영향을 받으며, 배지함수율에 따라 약간의 차이가 있었지만, 기본적으로 수분스트레스를 받지 않을 경우는 큰 차이가 나지 않음(Ta et al., 2012)

(라) 배지 함수율에 따른 인공신경망 이용 증산량의 추정값과 실측값과의 비교

(마) 배지함수율에 따라 6,754개의 데이터를 이용하여 학습하였고, 2,894개의 데이터를 이용하여 검증하였음

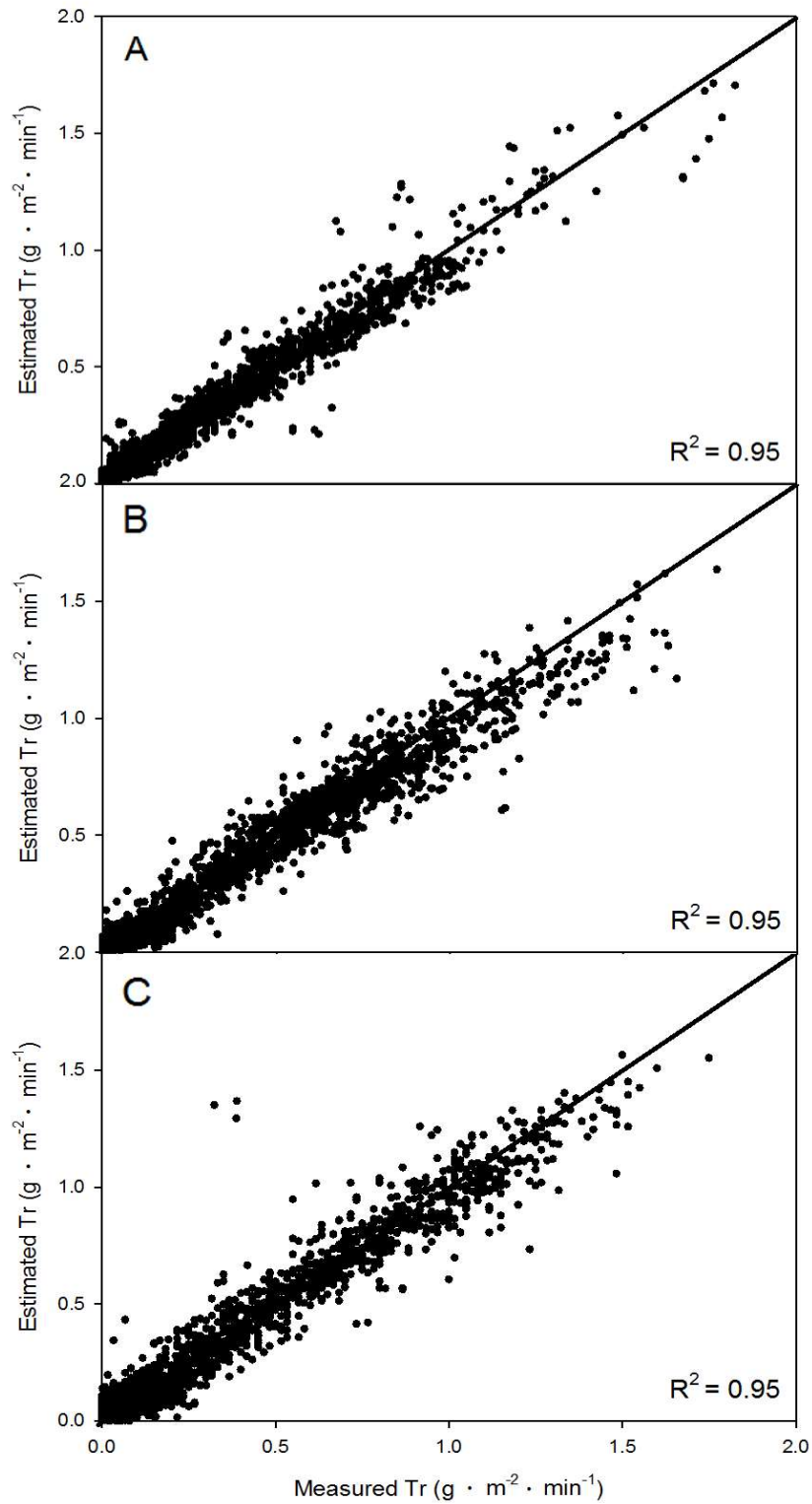


그림 15. 배지함수율 약 82%(A), 57%(B), 48%(C)의 조건에서 인공신경망 이용 증산량(Tr)의 예측값 및 실측값 비교

아. 개발된 적정 관수량 추정 기술 실증 농가 적용

- (1) 안성 소재 농가(37° 16' 45" N / 127° 26' 33" E) 비닐온실과 실험 유리온실 각각에서 측정되고 있는 환경변수를 이용하여 만들어진 인공신경망 모델에 대입(R<sup>2</sup>=0.96)
- (2) 실험 유리온실 17,789개 데이터와 농가 유리온실 432개 데이터를 모두 사용하여 인공신경망의 학습을 수행하였음.

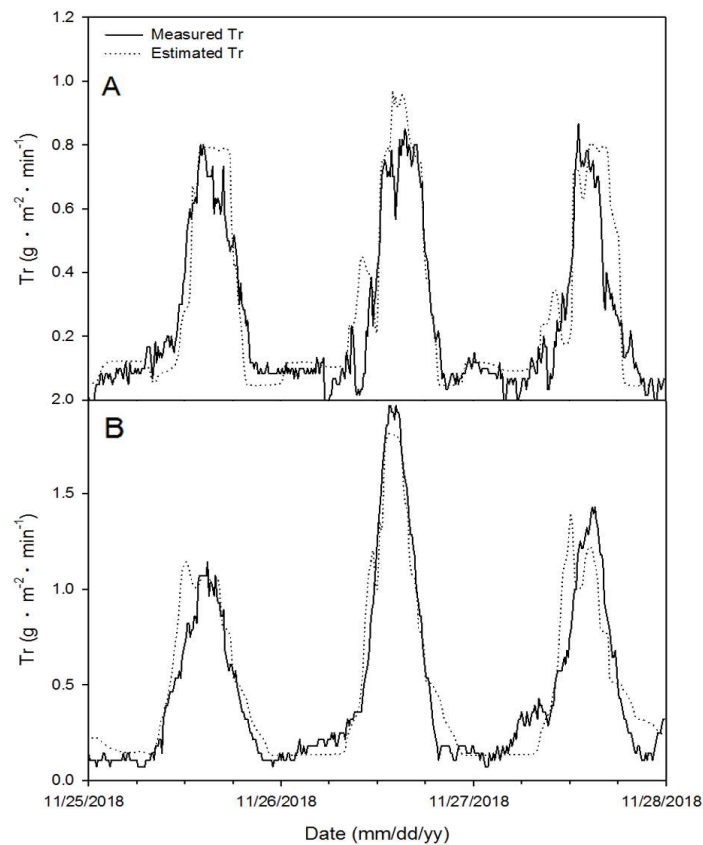


그림 16. 인공신경망을 이용한 실험유리 온실(A)와 농가 비닐온실(B)의 증산량(Tr)의 추정값 및 실측값의 비교



### 3. 농가 보급형 관수제어 지표 설정 및 프로그램 및 개발

가. 문헌 조사를 통한 관수제어 알고리즘 개발을 위한 제어 지표 (환경, 생육)의 분석

(1) 문헌을 통한 관수제어에 사용된 제어 지표와 관수제어 사례 분석

(가) 일반적으로 중력을 이용하는 방식으로 높은 지대에 물탱크를 올려놓고 밸브를 이용하여 관수하는 방식으로 관수를 제어하는 방법은 농사 경험에 많이 의존한다. 지하수를 펌프를 이용하여 물탱크에 저장함으로 급격한 온도(수온) 변화가 없어 작물 피해를 주지 않는다.



그림 81. 중력에 의한 관수 시스템 (밸브 Open-Close 방식)

- 출처 : [www.wikimedia.org](http://www.wikimedia.org)

지표 : 펌프로 작동

(나) 물탱크 없이 펌프를 이용하여 직접 물을 공급하는 방법으로 펌프를 ON-OFF 제어한다. 다만, 수분 공급시기는 농사 경험, 타이머와 센서 작동 등과 같은 방식을 이용할 수 있다.

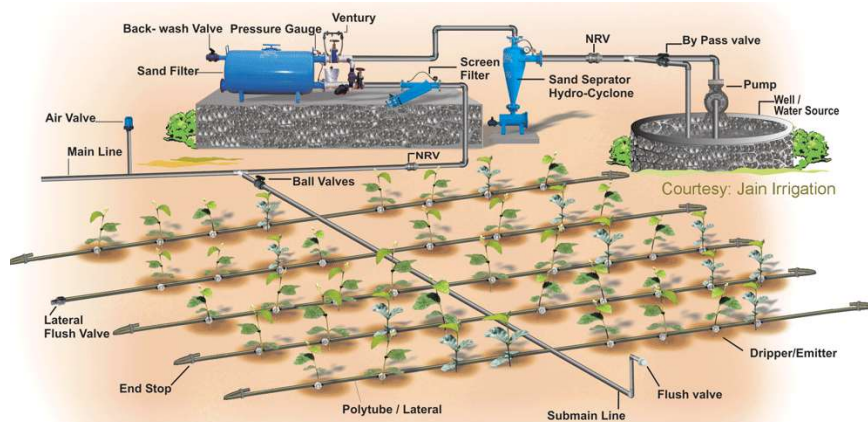


그림 82. 펌프를 이용한 점적관수 시스템 (ON-OFF 제어)

- 출처 : 시설원예학 (한국방송통신대학교출판부)

(다) 지표 : 포장용수량(%), 토양함수량(%), 근권의 깊이 (mm), 유효관수량 (%)  
 각 요인별 함량을 입력하면, 1m<sup>2</sup>당 1회 관수량이 출력된다. 다만, 토양함수량을 pF(수분장력) 단위가 아닌 % 단위로 해야 하며, 작물의 근권 깊이를 알아야 한다.



$$R = \frac{Fc - W}{100} \times D$$

R : 근권부위를 포장용수량 상태로 보충할 1회 관수량 (mm)  
 Fc : 용적비로 계산한 포장용수량 (%)  
 W : 용적비로 계산한 관수 직전의 토양함수비 (%)  
 D : 근권의 깊이 (mm)

그림 83. 관수제어 지표와 수식

- 출처 : Ferrarezi RS, Dove SK, van Iersel MW (2015) HortTechnology 25(1):110-118

(라) 지표 : 토양센서를 이용한 수분함량 (m<sup>3</sup>·m<sup>-3</sup>)  
 제어하고자 하는 토양센서(체적당 체적)가 제한적이며, ON-OFF제어 방식으로 작동된다. 다만, 개방형 마이크로컨트롤러의 일종인 아두이노로 제어하기 때문에 가격이 싸고, 제어 로직을 사용자에게 맞춰 수정할 수 있는 장점이 있다.

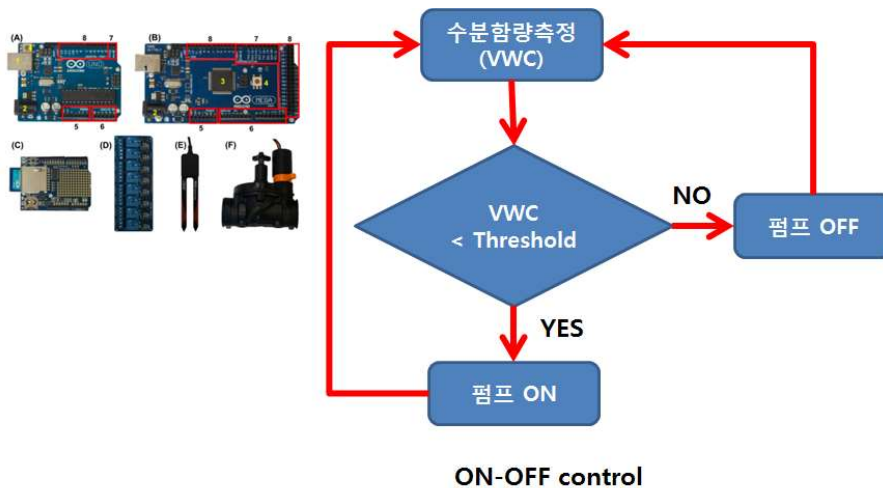


그림 84. 수분함량 제어 방법 (ON-OFF 제어)

- Park JS, Tai NH, An TI, Son JE (2009), J Bio-Env Con 18:238-243

(마) 지표 : 수분함량 (v/v, %)와 무게(g)

공급된 물량과 배액된 물량을 측정할 수 있으며 또한 배지내의 수분함량을 측정할 수 있다. 전체적인 수분의 흐름을 파악하는데 중요한 자료가 될 것으로 판단된다. 배액률에 따라 관수를 제어할 수 있다.

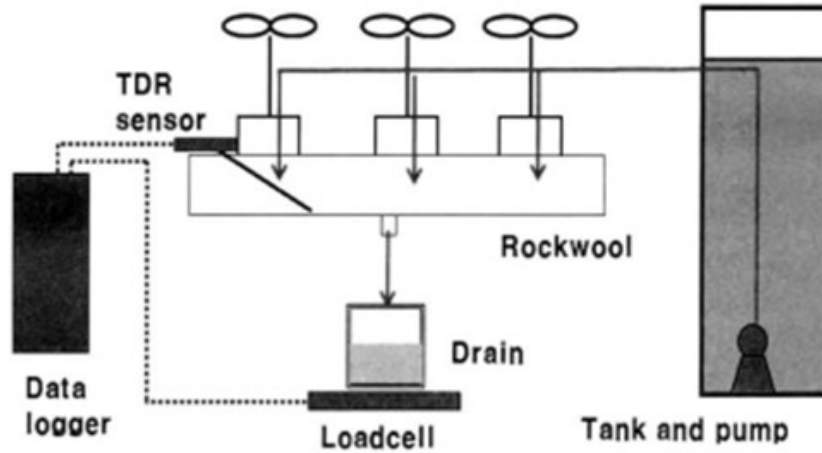


그림 85. 로드셀(중량법)과 TDR 센서를 이용한 수분함량 제어

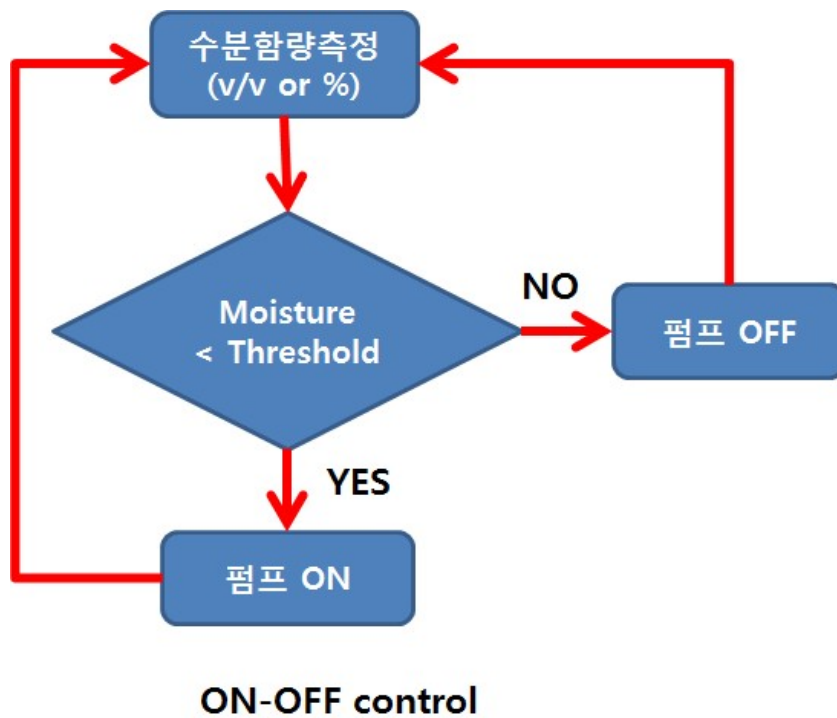


그림 86. 로드셀과 TDR 센서를 이용한 수분제어 (ON-OFF 제어)

- Choi EY, Kim HY, Choi KY, Lee YB (2016), Protected Hortic Plant Fac 25:63-70

(바) 지표 : 타이머(시간), 수분센서(%), 적산일사량(J)

타이머와 수분센서 및 적산일사량으로 관수를 제어하는 방식으로, 기존의 방식과 새롭게 수분함량을 제어하는 방법과의 비교를 통해 작물 생육에 적합한 수분제어를 제시한 논문이다. FDR 센서의 경우, 배지의 재질에 따라 교정을 해 줘야 한다.

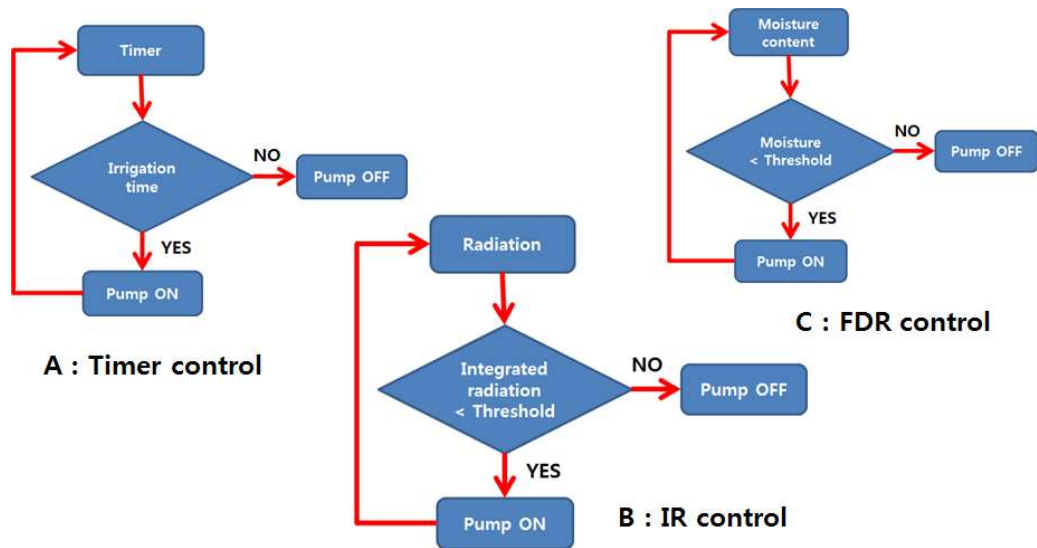
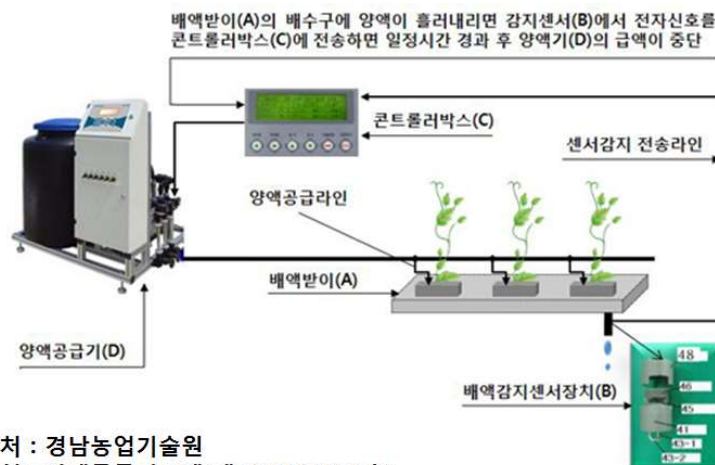


그림 87. 타이머(A), 적산일사량(B), FDR센서(C)를 이용한 수분제어 (ON\_OFF 제어)

- 출처 : 경남농업기술원 직무특허

(사) 지표 : 배액량

배액량에 따라 수분을 제어하는 방식이다. 기존의 타이머 처리에서보다 물과 비료의 사용효율이 높은 장점이 있다. 다만, 무배액 시스템에서는 사용할 수 없다.



출처 : 경남농업기술원  
 특허 : 양액공급시스템(제10-1179866호)  
 양액공급방법(제10-1179868호)

그림 88. 배액전극 수분제어 (ON-OFF 제어)

(아) 증발산량 모델식을 이용한 수분제어

작물이 요구하는 수분 만큼의 수분을 공급해 주는 것이 가장 효율적인 방법이다. 따라서, 작물에서 증산되는 수분량과 증발되는 수분량은 증발산량이라 말하는데, 이러한 증발산량을 작물에 따라 결정하면, 정확한 수분 공급량이 된다. 이러한 방식은 수분 이용 효율을 극대화하는 가장 좋은 방법일 것이다. 따라서, 증발산량을 수분 제어 알고리즘에 포함하는 것이 바람직하리라 판단된다.

작물 계수 (Kc) \* Reference Evapotranspiration = 작물 증발산량

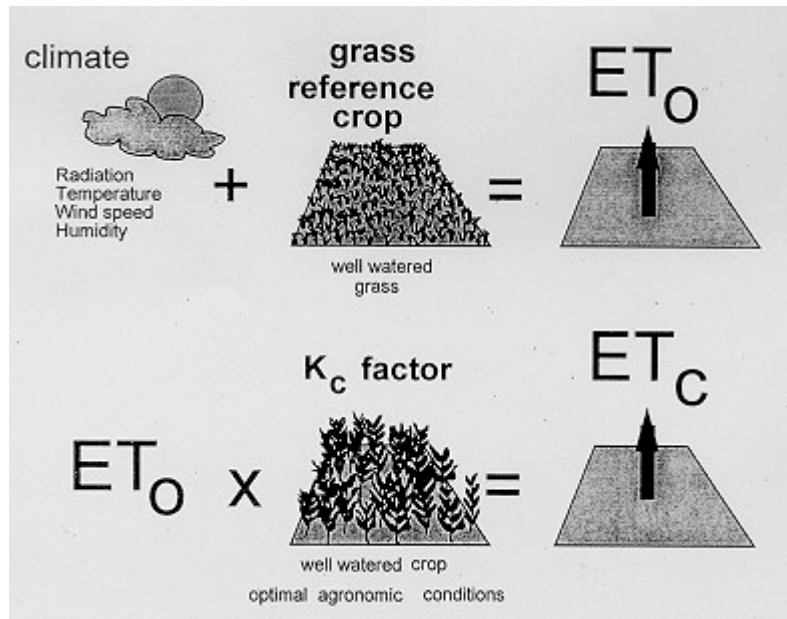


그림 89. 작물 증발산량 계산

표 1. 작물계수

Crop	Initial	Development	Mid season	Late	At harvest
Cabbage	0.4 - 0.5	0.7 - 0.8	0.95 - 1.1	0.9 - 1.0	0.8 - 0.95
Carrots	0.4 - 0.6	0.6 - 0.75	1.0 - 1.15	0.8 - 0.9	0.7 - 0.80
Cucumber	0.4 - 0.5	0.7 - 0.8	0.95 - 1.05	0.8 - 0.9	0.65 - 0.75
Lettuce	0.3 - 0.5	0.6 - 0.7	0.95 - 1.1	0.9 - 1.0	0.8 - 0.95
Onion Dry	0.4 - 0.6	0.7 - 0.8	0.95 - 1.1	0.85 - 0.9	0.75 - 0.85
Onion Green	0.4 - 0.6	0.6 - 0.75	0.95 - 1.05	0.95 - 1.05	0.95 - 1.05
Pepper	0.3 - 0.4	0.6 - 0.75	0.95 - 1.1	0.85 - 1.0	0.8 - 0.9
Tomato	0.4 - 0.5	0.7 - 0.8	1.05 - 1.25	0.8 - 0.95	0.6 - 0.65
Watermelon	0.4 - 0.5	0.7 - 0.8	0.95 - 1.05	0.8 - 0.9	0.65 - 0.75

Source: Doorenbos and Kassam (1979).

(2) 문헌을 통한 관수제어 알고리즘

(가) 제어 방식 : ON-OFF 제어 방식

(나) 측정 센서 : TDR, FDR, 텐시오미터, 로드셀(무게측정) 등

(다) 저장 장치와 제어 장치 : Datalogger 등



- (라) 환경 계측 시스템 : 일사량과 온도 및 상대습도 (또는 수증기압차) 등
- (마) 고려사항 : 식물체의 엽면적, 배지 종류, 배액률 등

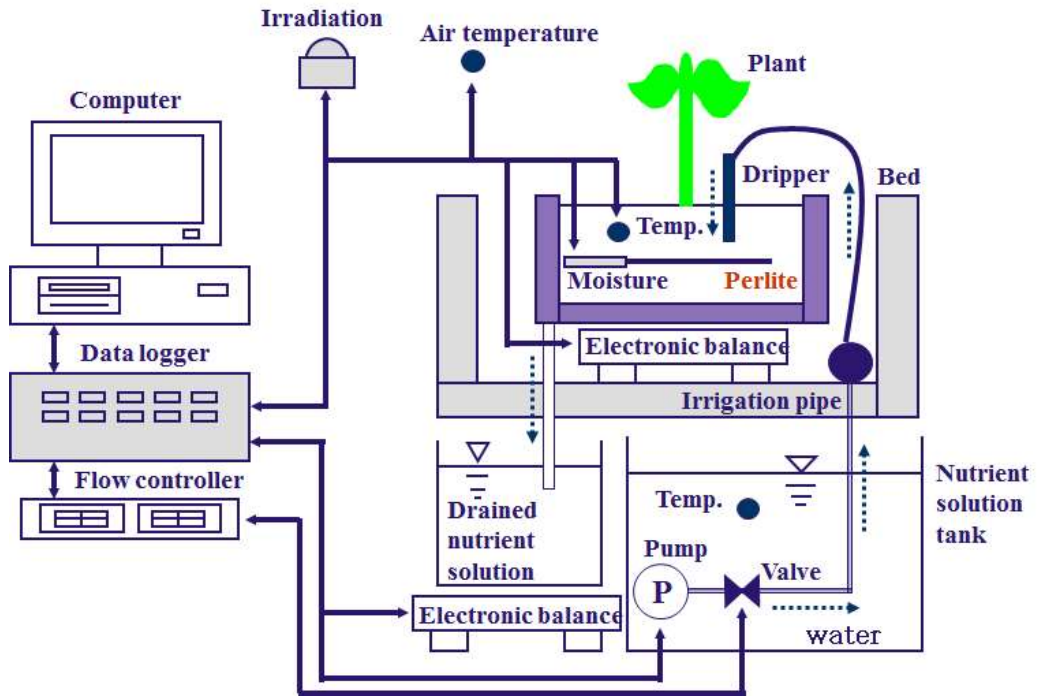


그림 90. 수분 제어 알고리즘 개략도

- (바) 관수 제어 추천 알고리즘

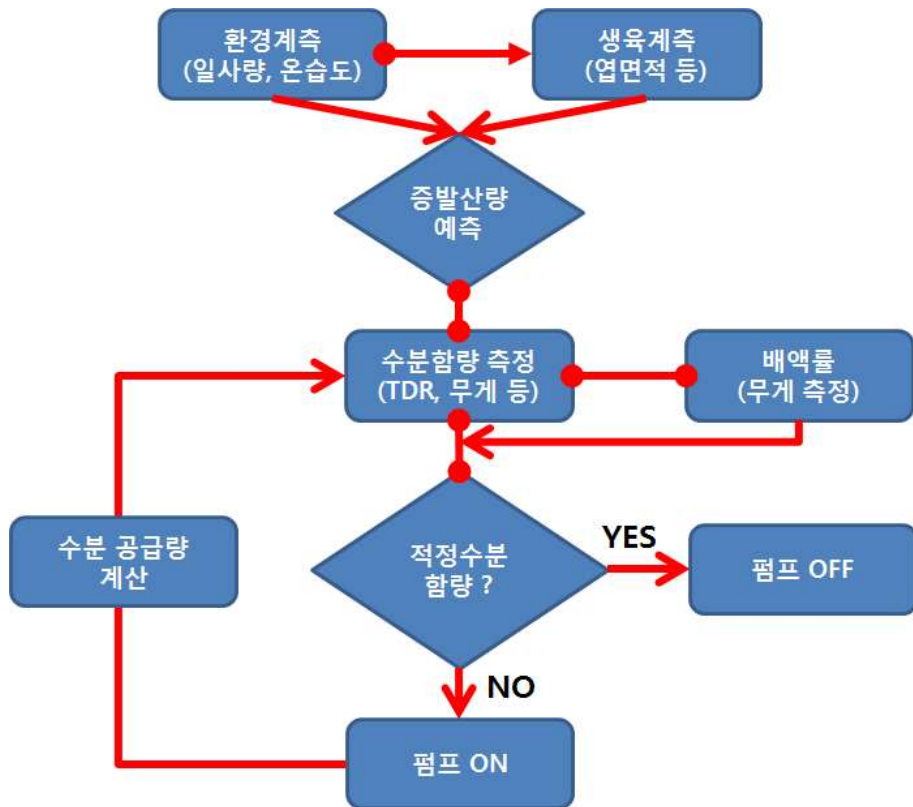
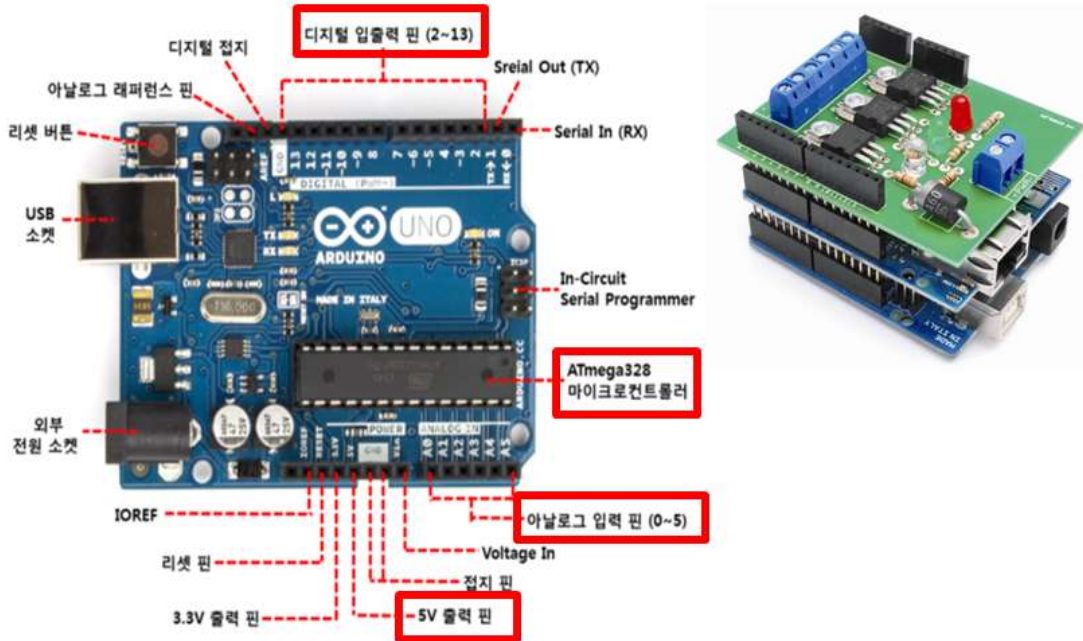


그림 91. 관수 제어 추천 알고리즘

나. 사용자 중심 관수제어 프로그램 개발

(1) 수분변화 관측을 위한 로드셀(무게측정-중량법) 제작

(가) 오픈소스(개방형) 마이크로컨트롤러 : 아두이노는 오픈 소스를 기반으로 한 단일 보드 마이크로컨트롤러로 완성된 보드와 관련 개발 도구 및 환경을 말한다. 아두이노는 다수의 센서로부터 값을 받아들여, 외부 전자 장치들을 통제함으로써 환경과 상호작용이 가능한 물건을 제작할 수 있다.



Source : <http://makeshare.org>

그림 92. 오픈소스의 마이크로컨트롤러의 일종인 아두이노 (Arduino) 플랫폼



(나) 오픈소스(개방형) 마이크로컨트롤러를 이용한 중량법 제작

아두이노와 로드셀을 이용하여 중량에 의한 수분변화를 측정하는 장비를 만들었다. 10kg 측정이 가능한 로드셀로 자료 저장 장치가 있어 몇 일 동안의 수분 변화를 관찰할 수 있는 장점이 있다. 또한 수분 변화에 따른 수분 공급 제어 장치를 구비한다면, 수분제어 (ON-OFF 제어) 또한 가능하다.

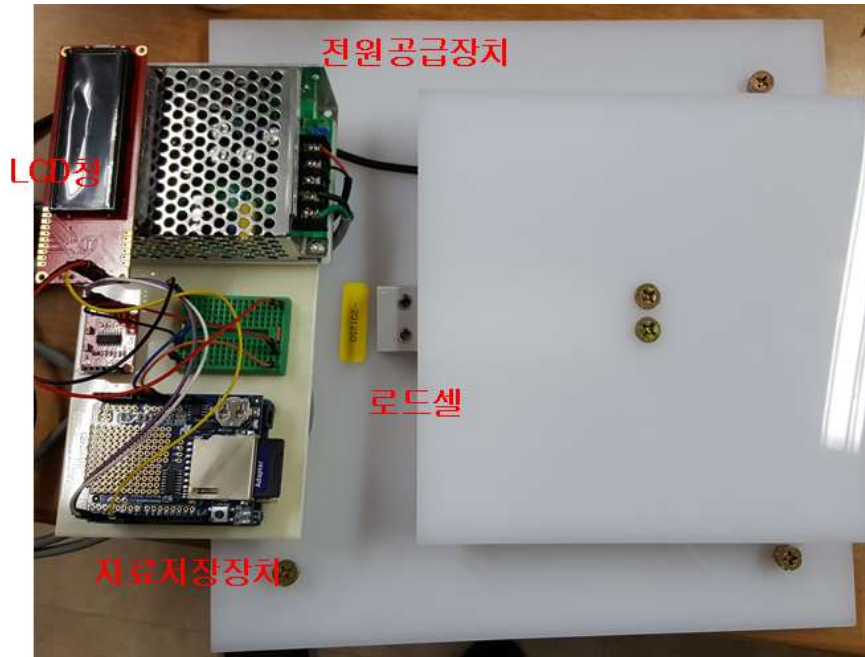


그림 93. 제작한 로드셀 (중량법)

- 로드셀 교정(Calibration) 코드

각각의 로드셀은 교정값을 가진다. 따라서 코드상에 그 값(빨간색)을 입력해 줘야 한다.

```

#include "HX711.h"
#define DOUT
#define CLK

HX711 scale(DOUT, CLK);

float calibration_factor = -7050;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("HX711 calibration sketch");
  Serial.println("Remove all weight from scale");
  Serial.println("After readings begin, place known weight on scale");
  Serial.println("Press + or a to increase calibration factor");
  Serial.println("Press - or z to decrease calibration factor");
  Scale.set_scale();
  Scale.tare(); //Reset the scale to 0
  long zero_factor = scale.read_average();
  Serial.print("Zero factor: ");
  Serial.println(zero_factor);
}

void loop() {
  Scale.set_scale(calibration_factor);
  Serial.print("Reading: ");
  Serial.print(scale.get_units(), 1);
  Serial.print(" lbs");
  Serial.print(" calibration_factor: ");
  Serial.print(calibration_factor);
  Serial.println();

  if(Serial.available())
    char temp = Serial.read();
    if(temp == '+' || temp == 'a')
      calibration_factor += 10;
    else if(temp == '-' || temp == 'z')
      calibration_factor -= 10;
  }
}

```

(다) 로드셀 측정 코드

본 프로그램은 파운드로 표기되지만, 파운드를 kg으로 환산하면 된다.

```
#include "HX711.h"
#define calibration_factor -7050.0
#define DOUT
#define CLK

HX711 scale(DOUT, CLK);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("HX711 scale demo");
  Scale.set_scale(calibration_factor);
  Scale.tare();
  Serial.println("Readings:");
}

void loop() {
  Serial.print("Reading: ");
  Serial.print(scale.get_units(), 1);
  Serial.print(" lbs");
  Serial.println();
}
```

(2) 중량법을 이용한 환경과 생육 상태에 따른 수분변화 관측

(가) 상추의 엽면적에 따른 수분 변화 곡선을 보면, 엽면적이 많은 상추에서 수분 감소량이 많은 것을 볼 수 있었다. 이러한 것은 엽면적이 증발산에 영향을 준다는 것을 나타낸 것으로, 같은 환경 조건하에서도 엽면적이 상대적으로 높은 식물체에서 높은 증발산량을 보이기 때문에, 관수량 또한 다르다라는 것을 보여준 결과이다. 따라서, 수분 제어할 경우, 엽면적이나 엽면적지수가 제어 로직에 들어가야 할 것으로 판단된다.

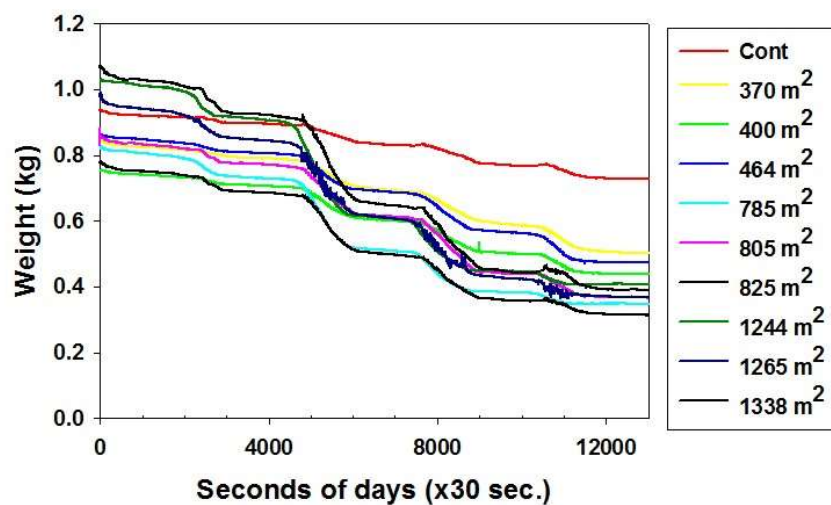


그림 94. 시간에 따른 로드셀의 수분 변화 (상추)

(나) 온도 변화를 보면 다음과 같다. 실험기간동안의 최소온도 18.3℃, 평균온도 24.1℃, 최대온도 39.7℃였다.

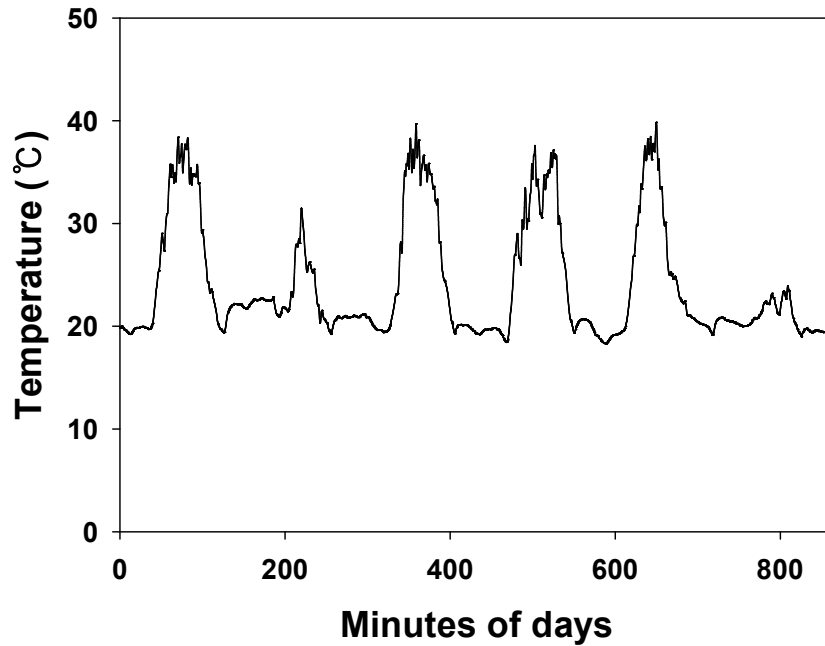


그림 95. 실험기간동안의 온도 변화

(다) 습도 변화를 보면 다음과 같다. 실험기간동안의 최소 상대습도 14.6%, 평균 상대습도 61.1%, 최대 상대습도 90.9%였다. 일사량이 높거나 온도가 높을수록 상대습도는 낮아지는 경향을 보였다.

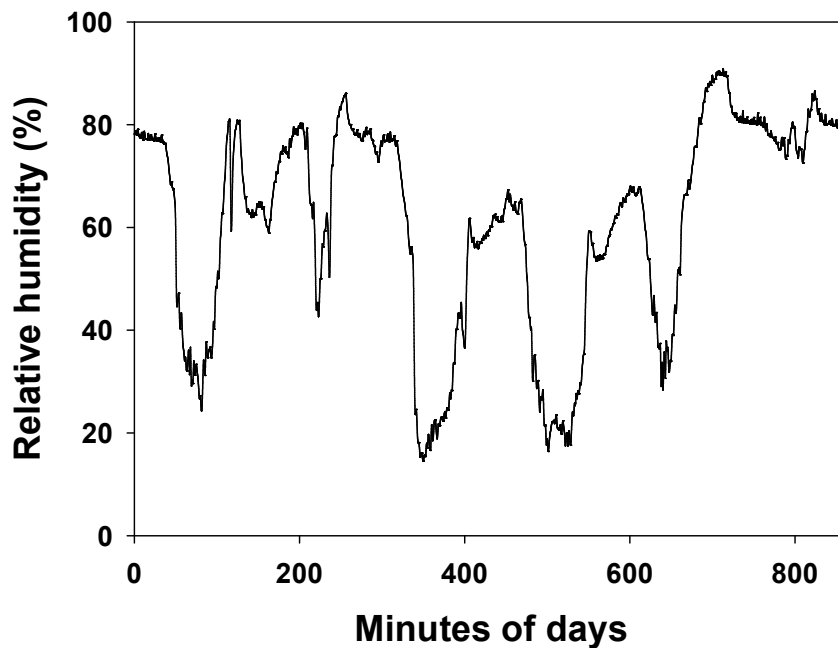


그림 96. 실험기간동안의 상대습도 변화

(라) 이산화탄소 농도 변화를 보면 다음과 같다. 실험기간동안 이산화탄소 농도는 556-931  $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$  농도 범위였다.

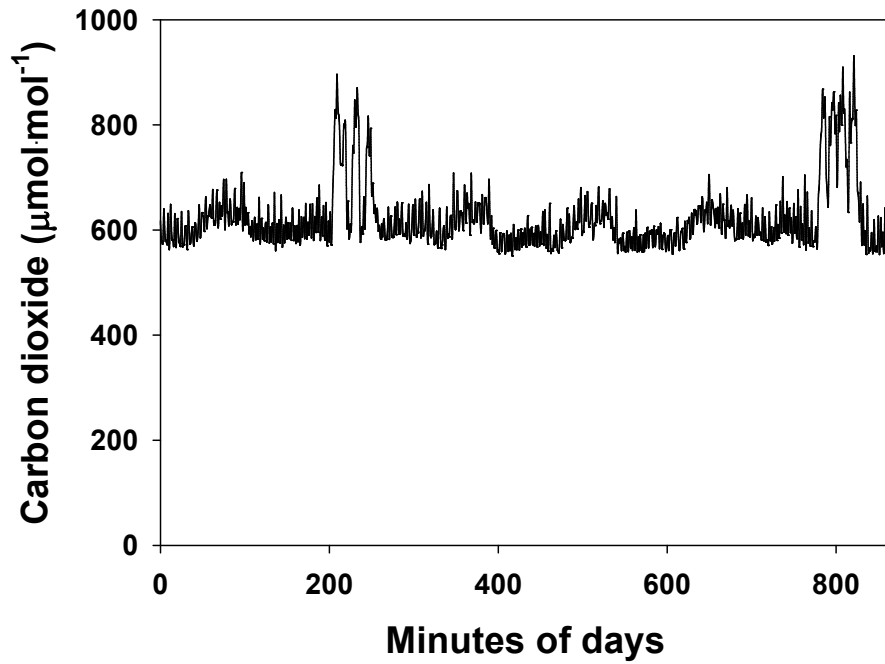


그림 97. 실험기간동안의 이산화탄소 농도 변화

(마) 일사량 변화를 보면 다음과 같다.

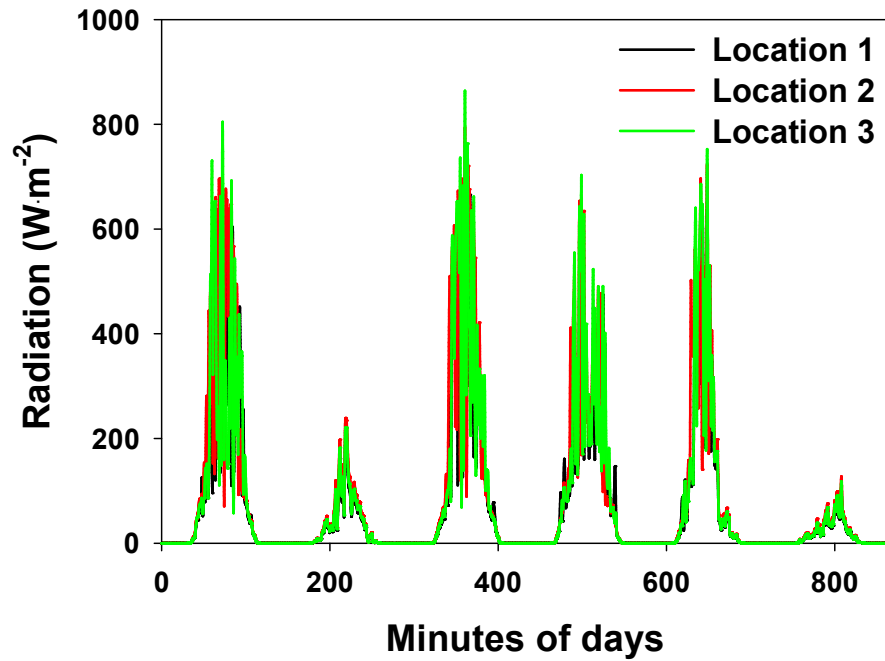


그림 98. 실험기간동안의 일사량 변화

(바) 이상의 결과를 바탕으로 일사량과 온도는 밀접한 관련이 있는 것으로 판단되었다. 그리고 일사량이나 온도가 높을수록 증발산량이 많았기 때문에 증발산량 모델은 일사량 함수가 포함되어야 할 것으로 판단된다. 다만, 밤 동안의 증발산량은 일사량보다는 온도나 상대습도(또는 수증기압차) 함수가 될 것으로 판단된다. 이러한 결과로, 수분 제어에는 일사량, 온도나 상대습도(또는 수증기압차) 함수로 증발산량을 예측해야 할 것이다.

(3) 관수량 결정 앱 프로그램 개발

(가) 이용된 수식 (출처 : 시설원예학, 한국방송통신대학교출판부)

$$R = \frac{F_c - w}{100} \times D$$

R : 근권부위를 포장용수량 상태로 보충할 1회 관수량 (mm)

F<sub>c</sub> : 용적비로 계산한 포장용수량 (%)

w : 용적비로 계산한 관수 직전의 토양함수비 (%)

D : 근권의 깊이 (mm)



그림 99. 관수량 결정 프로그램 앱

(4) 안드로이드 기반의 앱스토어에 등록

(가) 관수량 결정 프로그램은 현재 Play 스토어에 출시되어 있다.

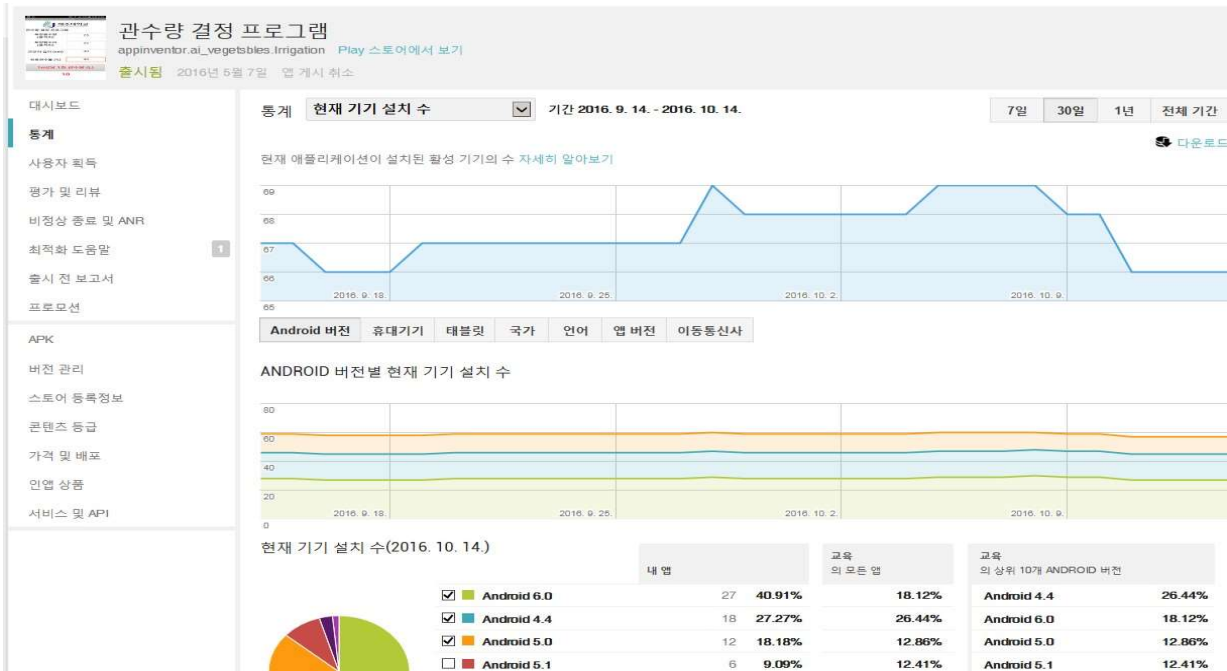


그림 100. 관수량 결정 프로그램이 출시된 인터넷 상태

다. 실시간 양수분 이동 모니터링 및 농가 보급형 관수제어 시스템 개발

(1) 아두이노와 수분센서를 이용한 오픈소스 마이크로컨트롤러 및 프로그램 개발

(가) 도시원예와 소규모의 공간 및 농가에서 사용할 수 수분 센서를 이용하여 수분 함량을 측정 및 제어할 수 있는 시스템을 아래 그림과 같은 단계로 개발하였다.



1단계-측정

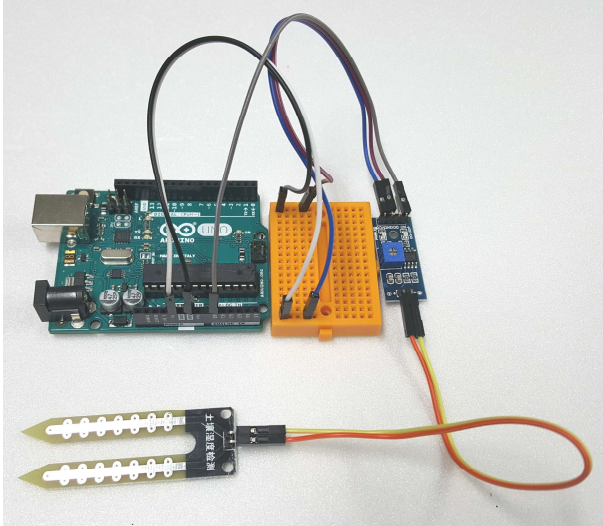


그림 101. 아두이노와 수분센서가 연결된 모습

2단계-측정과 LCD (선택1)

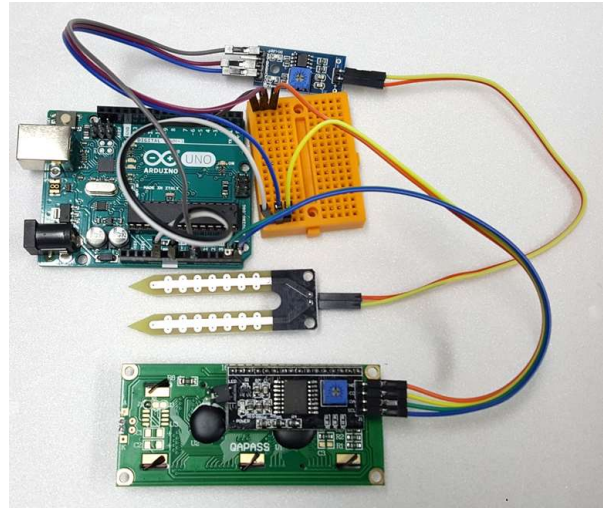


그림 102. 아두이노와 수분센서 및 LCD가 연결된 모습

2단계-측정, LCD (선택2)

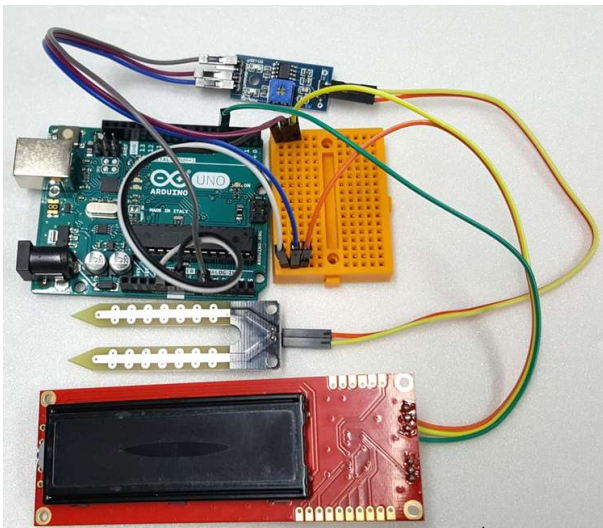


그림 103. 아두이노와 수분센서 및 LCD가 연결된 모습

2단계-측정, LCD (선택3)

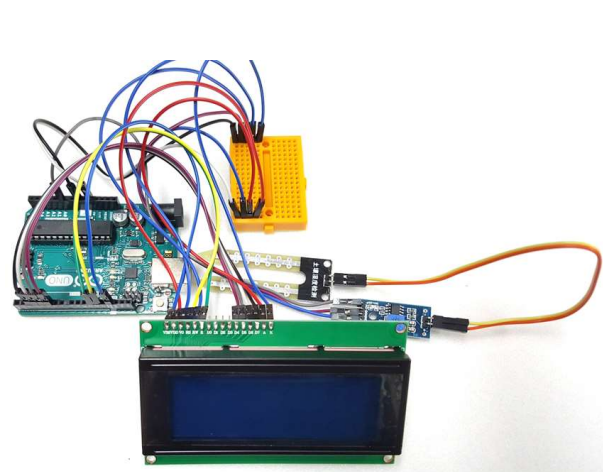


그림 104. 아두이노와 수분센서 및 LCD가 연결된 모습

2단계-측정, LCD (선택4)

선택 4에 연결할 수 있는 수분센서(GS3)

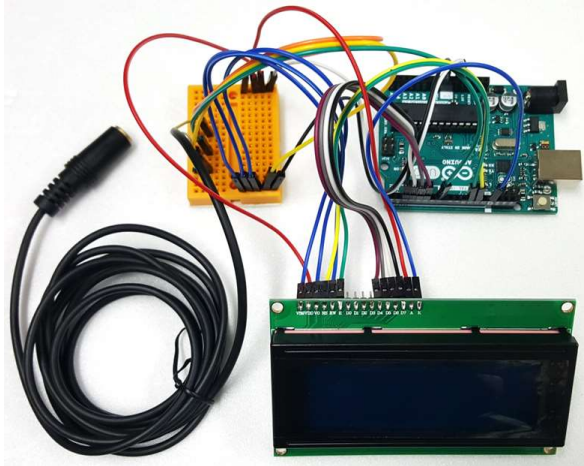


그림 105. 아두이노와 수분센서 및 LCD가 연결된 모습



그림 106. GS3 수분센서

3단계-측정, LCD, 선택4, 릴레이(제어)

4단계-측정, LCD, 선택4, 릴레이(제어), 블루투스통신

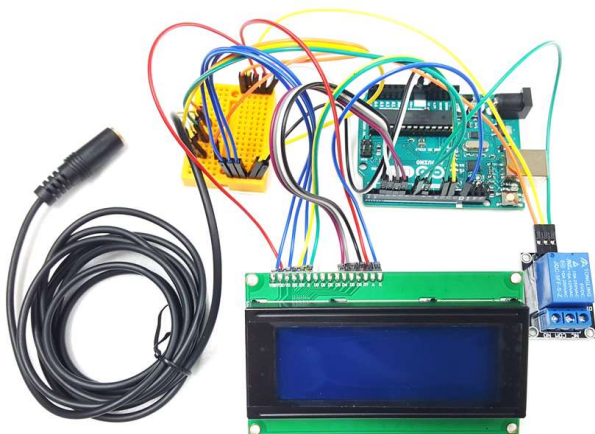


그림 107. 아두이노, 수분센서, LCD 및 릴레이가 연결된 모습

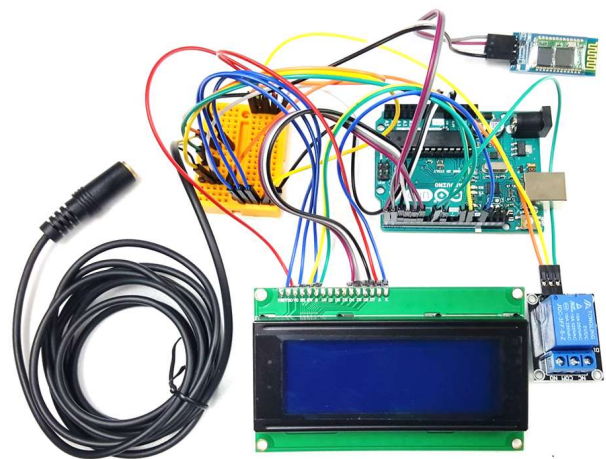


그림 108. 아두이노, 수분센서, LCD, 릴레이 및 블루투스가 연결된 모습

(나) 단계별로 입력된 프로그램을 보면 다음과 같다. 3단계부터는 수분함량을 계측과 제어를 할 수 있는 시스템이다. 농가 보급형은 현재 4단계 형태의 시스템을 적극 추천하고 있다.

### 1단계

```
int soil = A0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  int water_value = analogRead(soil);
  int water = map(water_value, 295, 1023, 100, 0);
  Serial.print("Read sensor value = ");
  Serial.println(water_value);
  Serial.print("Water Content = ");
  Serial.print(water);
  Serial.println(" %");
  delay(3000);
}
```

### 2단계 (선택1)

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

LiquidCrystal_I2C lcd(0x3F, 16, 2); //주소 0x20, 0x27, 0x3F 중 선택

int soil = A0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.print("Hello World !");
  delay(3000);
}

void loop() {
  int water_value = analogRead(soil);
  int water = map(water_value, 295, 1023, 100, 0);
  Serial.print("Read sensor value = ");
  Serial.println(water_value);
  Serial.print("Water Content = ");
  Serial.print(water);
  Serial.println(" %");

  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Value = ");
  lcd.print(water_value);
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("W C = ");
  lcd.print(water);
  lcd.print(" %");
  delay(3000);
}
```

## 2단계 (선택2)

```
#include <serLCD.h>

serLCD lcd(4);
int soil = A0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  lcd.clear();
  lcd.print("Hello World !");
  delay(3000);
}

void loop() {
  int water_value = analogRead(soil);
  int water = map(water_value, 295, 1023, 100, 0);
  Serial.print("Read sensor value = ");
  Serial.println(water_value);
  Serial.print("Water Content = ");
  Serial.print(water);
  Serial.println(" %");

  lcd.clear();
  lcd.selectLine(1);
  lcd.print("Value = ");
  lcd.print(water_value);
  lcd.selectLine(2);
  lcd.print("W C = ");
  lcd.print(water);
  lcd.print(" %");
  delay(3000);
}
```

## 2단계 (선택3)

```
#include <LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);

int soil = A0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  lcd.clear();
  lcd.begin(20, 4);
  lcd.print("Hello World !");
  delay(3000);
}

void loop() {
  int water_value = analogRead(soil);
  int water = map(water_value, 295, 1023, 100, 0);
  Serial.print("Read sensor value = ");
  Serial.println(water_value);
  Serial.print("Water Content = ");
  Serial.print(water);
  Serial.println(" %");

  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("Value = ");
  lcd.print(water_value);
}
```

```

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("W C = ");
lcd.print(water);
lcd.print(" %");
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print(" ");
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print(" ");
delay(3000);
}

```

## 2단계 (선택4)

```

#include <SDISerial.h>
#include <LiquidCrystal.h>

#define INPUT_SIZE 30
#define NUMSAMPLES 5
#define DATA_PIN 7
#define INVERTED 1

int sensorDelay = 1000;
float bulkDens = 0.4;
float theta = 1 - (bulkDens / 2.65);
char* samples;

SDISerial sdi_serial_connection(DATA_PIN, INVERTED);
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);

void setup() {
  sdi_serial_connection.begin();
  Serial.begin(1200);
  delay(3000);
  lcd.clear();
  lcd.begin(20, 4);
  lcd.print("Hello World !");
  delay(3000);
}

void loop() {

  uint8_t i;

  float dielectric[NUMSAMPLES];
  float soilMoist[NUMSAMPLES];
  float degC[NUMSAMPLES];
  float bulkEC[NUMSAMPLES];
  float porewaterEC[NUMSAMPLES];
  float solutionEC[NUMSAMPLES];

  float dielMean      = 0.0;
  float soilMoistMean = 0.0;
  float degCMean      = 0.0;
  float bulkECMean    = 0.0;
  float porewaterECMean = 0.0;
  float solutionECMean = 0.0;

  for (i = 0; i < NUMSAMPLES; i++) {
    samples = get_measurement();
    while (strlen(samples) < 5) {
      samples = get_measurement();
    }

    char* term1 = strtok(samples, "+");

```

```

term1      = strtok(NULL, "+");
dielectric[i] = atof(term1);

term1 = strtok(NULL, "+");
degC[i] = atof(term1);
term1 = strtok(NULL, "+");
bulkEC[i] = atof(term1);
porewaterEC[i] = ((80.3 - 0.37 * (degC[i] - 20)) * bulkEC[i] / 1000) / (dielectric[i] - 6);

if (bulkEC[i] < 5) {
    soilMoist[i] = (5.89 * pow(10.0, -6.0) * pow(dielectric[i], 3.0)) - (7.62 * pow(10.0, -4.0) *
        pow(dielectric[i], 2.0)) + (3.67 * pow(10.0, -2.0) * dielectric[i]) - (7.53 * pow(10.0, -2.0));
} else {
    soilMoist[i] = 0.118 * sqrt(dielectric[i]) - 0.117;
}
solutionEC[i] = (bulkEC[i] / 1000 * soilMoist[i]) / theta;

dielMean      += dielectric[i];
soilMoistMean += soilMoist[i];
degCMean      += degC[i];
bulkECMean    += bulkEC[i];
porewaterECMean += porewaterEC[i];
solutionECMean += solutionEC[i];
}

dielMean      /= NUMSAMPLES;
soilMoistMean /= NUMSAMPLES;
degCMean      /= NUMSAMPLES;
bulkECMean    /= NUMSAMPLES;
porewaterECMean /= NUMSAMPLES;
solutionECMean /= NUMSAMPLES;

Serial.print("VWC = ");
Serial.print(soilMoistMean * 100);
Serial.println(" %");
Serial.print("EC = ");
Serial.print(bulkECMean / 1000);
Serial.println(" dS/m");
Serial.print("Temp = ");
Serial.print(degCMean);
Serial.println(" oC");

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Jeju National Univ.");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("VWC = ");
lcd.print(soilMoistMean * 100);
lcd.print(" %");
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("EC = ");
lcd.print(bulkECMean / 1000);
lcd.print(" dS/m");
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("Temp = ");
lcd.print(degCMean);
lcd.print(" oC");
delay(sensorDelay);
}

char* get_measurement() {
char* service_request = sdi_serial_connection.sdi_query("?M!", sensorDelay);
char* service_request_complete = sdi_serial_connection.wait_for_response(sensorDelay);
return sdi_serial_connection.sdi_query("?D0!", sensorDelay);
}

```

### 3단계

```
#include <SDISerial.h>
#include <LiquidCrystal.h>

#define INPUT_SIZE 30
#define NUMSAMPLES 5
#define DATA_PIN 7
#define INVERTED 1
#define Relay 8

int sensorDelay = 1000;
float bulkDens = 0.4;
float theta = 1 - (bulkDens / 2.65);
char* samples;

SDISerial sdi_serial_connection(DATA_PIN, INVERTED);
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);

void setup() {
  pinMode(Relay, OUTPUT);
  sdi_serial_connection.begin();
  Serial.begin(1200);
  delay(3000);
  lcd.clear();
  lcd.begin(20, 4);
  lcd.print("Hello World !");
  delay(3000);
}

void loop() {

  uint8_t i;

  float dielectric[NUMSAMPLES];
  float soilMoist[NUMSAMPLES];
  float degC[NUMSAMPLES];
  float bulkEC[NUMSAMPLES];
  float porewaterEC[NUMSAMPLES];
  float solutionEC[NUMSAMPLES];

  float dielMean      = 0.0;
  float soilMoistMean = 0.0;
  float degCMean      = 0.0;
  float bulkECMean    = 0.0;
  float porewaterECMean = 0.0;
  float solutionECMean = 0.0;

  for (i = 0; i < NUMSAMPLES; i++) {
    samples = get_measurement();
    while (strlen(samples) < 5) {
      samples = get_measurement();
    }

    char* term1 = strtok(samples, "+");

    term1      = strtok(NULL, "+");
    dielectric[i] = atof(term1);

    term1 = strtok(NULL, "+");
    degC[i] = atof(term1);
    term1 = strtok(NULL, "+");
    bulkEC[i] = atof(term1);
    porewaterEC[i] = ((80.3 - 0.37 * (degC[i] - 20)) * bulkEC[i] / 1000) / (dielectric[i] - 6);
```



```

if (bulkEC[i] < 5) {
    soilMoist[i] = (5.89 * pow(10.0, -6.0) * pow(dielectric[i], 3.0)) - (7.62 * pow(10.0, -4.0) *
        pow(dielectric[i], 2.0)) + (3.67 * pow(10.0, -2.0) * dielectric[i]) - (7.53 * pow(10.0, -2.0));
} else {
    soilMoist[i] = 0.118 * sqrt(dielectric[i]) - 0.117;
}
solutionEC[i] = (bulkEC[i] / 1000 * soilMoist[i]) / theta;

dielMean      += dielectric[i];
soilMoistMean += soilMoist[i];
degCMean      += degC[i];
bulkECMean    += bulkEC[i];
porewaterECMean += porewaterEC[i];
solutionECMean += solutionEC[i];
}

dielMean      /= NUMSAMPLES;
soilMoistMean /= NUMSAMPLES;
degCMean      /= NUMSAMPLES;
bulkECMean    /= NUMSAMPLES;
porewaterECMean /= NUMSAMPLES;
solutionECMean /= NUMSAMPLES;

Serial.print("VWC = ");
Serial.print(soilMoistMean * 100);
Serial.println(" %");
Serial.print("EC = ");
Serial.print(bulkECMean / 1000);
Serial.println(" dS/m");
Serial.print("Temp = ");
Serial.print(degCMean);
Serial.println(" oC");

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Jeju National Univ.");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("VWC = ");
lcd.print(soilMoistMean * 100);
lcd.print(" %");
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("EC = ");
lcd.print(bulkECMean / 1000);
lcd.print(" dS/m");
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("Temp = ");
lcd.print(degCMean);
lcd.print(" oC");
delay(sensorDelay);

if ((soilMoistMean*100) <= 20) {
    digitalWrite(Relay, HIGH);
    delay(10000);
} else {
    digitalWrite(Relay, LOW);
    delay(1000);
}
}

char* get_measurement() {
    char* service_request = sdi_serial_connection.sdi_query("?M!", sensorDelay);
    char* service_request_complete = sdi_serial_connection.wait_for_response(sensorDelay);
    return sdi_serial_connection.sdi_query("?D0!", sensorDelay);
}

```

#### 4단계 (선택4)

```
#include <SDSerial.h>
#include <LiquidCrystal.h>

#define INPUT_SIZE 30
#define NUMSAMPLES 5
#define DATA_PIN 7
#define INVERTED 1
#define Relay 8

int sensorDelay = 1000;
float bulkDens = 0.4;
float theta = 1 - (bulkDens / 2.65);
char* samples;

SDSerial sdi_serial_connection(DATA_PIN, INVERTED);
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2);
SDSerial bluetooth(0, 1);
String readString;

void setup() {
  pinMode(Relay, OUTPUT);
  Serial.begin(1200);
  sdi_serial_connection.begin();
  delay(3000);
  lcd.clear();
  lcd.begin(20, 4);
  lcd.print("Hello World !");
  delay(3000);
}

void loop() {

  uint8_t i;

  float dielectric[NUMSAMPLES];
  float soilMoist[NUMSAMPLES];
  float degC[NUMSAMPLES];
  float bulkEC[NUMSAMPLES];
  float porewaterEC[NUMSAMPLES];
  float solutionEC[NUMSAMPLES];

  float dielMean      = 0.0;
  float soilMoistMean = 0.0;
  float degCMean      = 0.0;
  float bulkECMean    = 0.0;
  float porewaterECMean = 0.0;
  float solutionECMean = 0.0;

  for (i = 0; i < NUMSAMPLES; i++) {
    samples = get_measurement();
    while (strlen(samples) < 5) {
      samples = get_measurement();
    }

    char* term1 = strtok(samples, "+");

    term1      = strtok(NULL, "+");
    dielectric[i] = atof(term1);

    term1 = strtok(NULL, "+");
    degC[i] = atof(term1);
    term1 = strtok(NULL, "+");
    bulkEC[i] = atof(term1);
```

```

porewaterEC[i] = ((80.3 - 0.37 * (degC[i] - 20)) * bulkEC[i] / 1000) / (dielectric[i] - 6);

if (bulkEC[i] < 5) {
  soilMoist[i] = (5.89 * pow(10.0, -6.0) * pow(dielectric[i], 3.0)) - (7.62 * pow(10.0, -4.0) *
    pow(dielectric[i], 2.0)) + (3.67 * pow(10.0, -2.0) * dielectric[i]) - (7.53 * pow(10.0, -2.0));
} else {
  soilMoist[i] = 0.118 * sqrt(dielectric[i]) - 0.117;
}
solutionEC[i] = (bulkEC[i] / 1000 * soilMoist[i]) / theta;

dielMean      += dielectric[i];
soilMoistMean += soilMoist[i];
degCMean      += degC[i];
bulkECMean    += bulkEC[i];
porewaterECMean += porewaterEC[i];
solutionECMean += solutionEC[i];
}

dielMean      /= NUMSAMPLES;
soilMoistMean /= NUMSAMPLES;
degCMean      /= NUMSAMPLES;
bulkECMean    /= NUMSAMPLES;
porewaterECMean /= NUMSAMPLES;
solutionECMean /= NUMSAMPLES;

lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Jeju National Univ.");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("VWC = ");
lcd.print(soilMoistMean * 100);
lcd.print(" %");
lcd.setCursor(0, 2);
lcd.print("EC = ");
lcd.print(bulkECMean / 1000);
lcd.print(" dS/m");
lcd.setCursor(0, 3);
lcd.print("Temp = ");
lcd.print(degCMean);
lcd.print(" oC");
delay(sensorDelay);

if ((soilMoistMean * 100) <= 20) {
  digitalWrite(Relay, HIGH);
  delay(10000);
} else {
  digitalWrite(Relay, LOW);
  delay(1000);
}

readString = "";
String data = String(soilMoistMean * 100) + "," + String(bulkECMean / 1000) + "," + String(degCMean);
Serial.println(data);
while (Serial.available()) {
  delay(3);
  char c = Serial.read();
  readString += c;
}
}

char* get_measurement() {
  char* service_request = sdi_serial_connection.sdi_query("?M!", sensorDelay);
  char* service_request_complete = sdi_serial_connection.wait_for_response(sensorDelay);
  return sdi_serial_connection.sdi_query("?D0!", sensorDelay);
}

```

(2) 오픈소스 마이크로컨트롤러와 컴퓨터 및 사물인터넷 프로그램 개발

(가) 프로그램 개발을 위해 Visual Basic를 사용하였으며, 아두이노와 컴퓨터를 com 포트를 이용하여 통신 연결할 수 있는 프로그램을 개발하였다.

(나) 통신연결 화면은 아래 그림과 같다.



그림 109. 통신환경설정 화면

(다) 통신연결 한 후, 수분 센서의 값들이 실시간으로 화면에 출력하기 위해 다음과 같은 화면을 프로그램하였다. 실시간으로 수분함량을 수치화로 볼 수 있으며, 시간에 따른 수분함량, 토양온도, 토양농도 변화량도 볼 수 있으며, 텍스트 파일(WaterContent.txt)로 저장할 수 있게 하였다. 추후, 엑셀 프로그램을 이용하여 이들의 변화량을 컴퓨터에서 볼 수 있게 하였다.

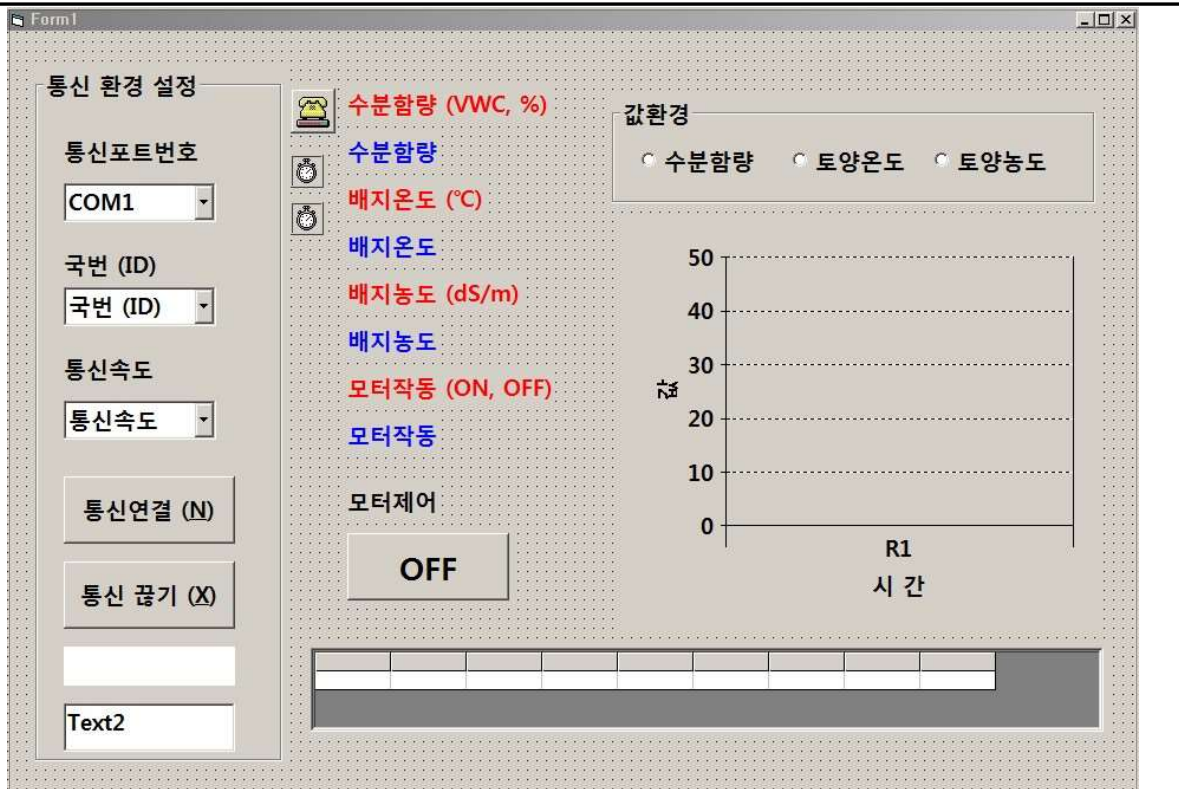


그림 110. 배지의 수분함량을 실시간으로 보여주기 위한 화면

(라) 코딩 예제는 다음과 같다.

```

Dim InBuffStr As String
Dim flagBlink As Boolean
Dim G_data() As String
Dim it, T As Integer
Dim n As Integer

Private Sub Command1_Click()
    Dim eFlag%
    On Error Resume Next
    eFlag = True

    With MSComm1
        .PortOpen = False
        .CommPort = Combo1.ListIndex + 1
        .Settings = Mid(Combo3.Text, 4, 6) + ",N,8,1"
        .InputMode = comInputModeText
        .InputLen = 0
        .Handshaking = comNone
        .PortOpen = True
        DoEvents
        If Not .PortOpen Then
            eFlag = False
            MsgBox "통신포트가 정상적으로 열리지 않았습니다.", , "확인"
            Text1.Text = "Communication Off"
            Text1.BackColor = vbRed
        End If
    End With

    If eFlag Then
        MsgBox "통신포트가 정상적으로 열렸습니다.", , "확인"
    End If

```

```

        Text1.Text = "Communication On"
        Text1.BackColor = vbBlue
        Text1.ForeColor = vbWhite
    End If
    ID = Combo2.Text

    Timer1.Enabled = True
    Timer2.Enabled = True
End Sub

Private Sub Command2_Click()
    MSComm1.InBufferCount = 0
    MSComm1.OutBufferCount = 0
    If MSComm1.PortOpen = True Then
        MSComm1.PortOpen = False
    End If
    Text1.Text = "Communication Off"
    Text1.BackColor = vbRed
    MsgBox "통신포트를 정상적으로 닫았습니다.", , "확인"
    Timer1.Enabled = False
    Timer2.Enabled = False

End Sub

Private Sub Command4_Click()

End Sub

Private Sub Command3_Click()
Dim status As String
Text2.Text = ""

If Command3.Caption = "ON" Then
    status = "a"
    MSComm1.Output = status
    Command3.Caption = "OFF"
    If Text2.Text = "101" Or Text2.Text = "a" Then
        Text2.Text = ""
    End If
End If
If Command3.Caption = "OFF" Then
    status = "b"
    MSComm1.Output = status
    Command3.Caption = "ON"
    If Text2.Text = "102" Or Text2.Text = "b" Then
        Text2.Text = ""
    End If
End If
End Sub

Private Sub Form_Load()
    If MSComm1.PortOpen = True Then
        MSComm1.PortOpen = False
    End If

    For i = 1 To 40
        Combo1.AddItem "COM" & i
    Next i

    Combo1.ListIndex = 1

    Combo2.AddItem "0"
    Combo2.AddItem "1"
    Combo2.AddItem "2"
    Combo2.AddItem "3"
    Combo2.AddItem "4"

```

```

Combo2.AddItem "5"
Combo2.AddItem "6"
Combo2.AddItem "7"
Combo2.ListIndex = 0

Combo3.AddItem "(0)4800"
Combo3.AddItem "(1)9600"
Combo3.AddItem "(2)14400"
Combo3.AddItem "(3)19200"
Combo3.AddItem "(4)38400"
Combo3.AddItem "(5)57600"
Combo3.AddItem "(6)76800"
Combo3.AddItem "(7)115200"
Combo3.ListIndex = 1

Timer2.Enabled = False
n = 0

End Sub

Private Sub Option1_Click()
    If Option1.Value = True Then
        For i = 1 To MSFlexGrid1.Rows - 2
            MSChart1.RowCount = MSFlexGrid1.Rows - 2
            MSChart1.Row = i
            MSChart1.Column = 1
            MSChart1.Data = MSFlexGrid1.TextMatrix(i, 4)
            MSChart1.RowLabel = MSFlexGrid1.TextMatrix(i, 0)
            MSChart1.Plot.Axis(VtChAxisIdY).AxisTitle.Text = "수분함량 (%)"
        Next i
    End If
End Sub

Private Sub Option2_Click()
    If Option2.Value = True Then
        For i = 1 To MSFlexGrid1.Rows - 2
            MSChart1.RowCount = MSFlexGrid1.Rows - 2
            MSChart1.Row = i
            MSChart1.Column = 1
            MSChart1.Data = MSFlexGrid1.TextMatrix(i, 6)
            MSChart1.RowLabel = MSFlexGrid1.TextMatrix(i, 0)
            MSChart1.Plot.Axis(VtChAxisIdY).AxisTitle.Text = "온도 (°C)"
        Next i
    End If
End Sub

Private Sub Option3_Click()
    If Option3.Value = True Then
        For i = 1 To MSFlexGrid1.Rows - 2
            MSChart1.RowCount = MSFlexGrid1.Rows - 2
            MSChart1.Row = i
            MSChart1.Column = 1
            MSChart1.Data = MSFlexGrid1.TextMatrix(i, 5)
            MSChart1.RowLabel = MSFlexGrid1.TextMatrix(i, 0)
            MSChart1.Plot.Axis(VtChAxisIdY).AxisTitle.Text = "EC (dS/m)"
        Next i
    End If
End Sub

Private Sub Timer1_Timer()
    Dim result() As Byte

    On Error GoTo ErrorGo

    result = MSComm1.Input
    Text2.Text = ""

```



```

For i = 0 To UBound(result)
    Text2.Text = Text2.Text & Chr(result(i))
Next i

G_data() = Split(Text2.Text, ",")

If Text2.Text = "" Then
Else
    Label5.Caption = G_data(0)    '수분함량
    Label9.Caption = G_data(1)    '농도
    Label7.Caption = G_data(2)    '온도
    Label11.Caption = G_data(3)   '모터작동
End If

Exit Sub

ErrorGo:

Resume Next
End Sub

Private Sub Timer2_Timer()
On Error GoTo ErrorGo
Dim dat0, dat1, dat2, dat3, dat4, dat5, dat6, dat7 As Double
it = it + 1

With MSFlexGrid1
    Timer2.Enabled = False
    .Rows = .Rows
    .TextMatrix(.Rows - 1, 0) = n
    .TextMatrix(.Rows - 1, 1) = Year(Now) & "-" & Month(Now) & "-" & Day(Now)
    .TextMatrix(.Rows - 1, 2) = Hour(Now)
    .TextMatrix(.Rows - 1, 3) = Minute(Now)
    .TextMatrix(.Rows - 1, 4) = Label5.Caption
    .TextMatrix(.Rows - 1, 5) = Label9.Caption
    .TextMatrix(.Rows - 1, 6) = Label7.Caption
    .TextMatrix(.Rows - 1, 7) = Label11.Caption

    dat0 = n
    dat1 = Year(Now) & "-" & Month(Now) & "-" & Day(Now)
    dat2 = Hour(Now)
    dat3 = Minute(Now)
    dat4 = Label5.Caption
    dat5 = Label9.Caption
    dat6 = Label7.Caption
    dat7 = Label11.Caption

    n = n + 1

    Open App.Path & "\WaterContent.txt" For Append As #1
        Print #1, dat0, dat1, dat2, dat3, dat4, dat5, dat6, dat7
    Close #1

    .Rows = .Rows + 1
    it = 0

    Timer2.Enabled = True
End With

ErrorGo:
Resume Next
End Sub

```

(마) 코딩 예제는 다음과 같다.



그림 111. 실시간으로 수분함량, 배지온도, 배지농도값이 화면에 출력되는 화면

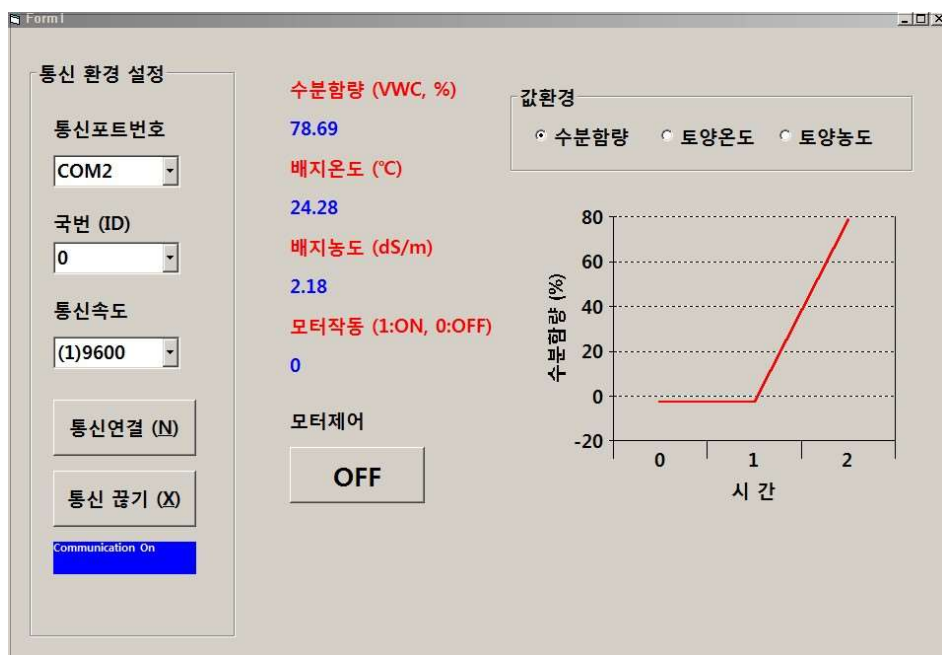


그림 112. 수분함량, 배지온도, 배지농도값을 그래프로도 볼 수 있게 한 화면

(바) 다만, 비주얼페이지적으로 통신하기 위해 아두이노에서는 출력값을 다르게 변경해야 한다. 중요한 코딩은 다음과 같다.

```
readString = "";
String data = String(soilMoistMean * 100) + "," + String(bulkECMean / 1000) + "," + String(degCMean) + "," + String(Relay_value) + ",";
Serial.println(data);
```

(3) 사물인터넷을 활용한 관수 제어 프로그램 개발

(가) 사물인터넷을 활용하기 위해 안드로이드 기반의 앱인벤터 프로그램을 위하여 관수 제어 프로그램을 개발하였다. 디자인 모습과 코딩은 아래 그림과 같다. 화면 터치를 위해 관수를 제어할 수도 있으며, 음성 인식으로도 관수를 제어할 수 있는 특징이 있다.

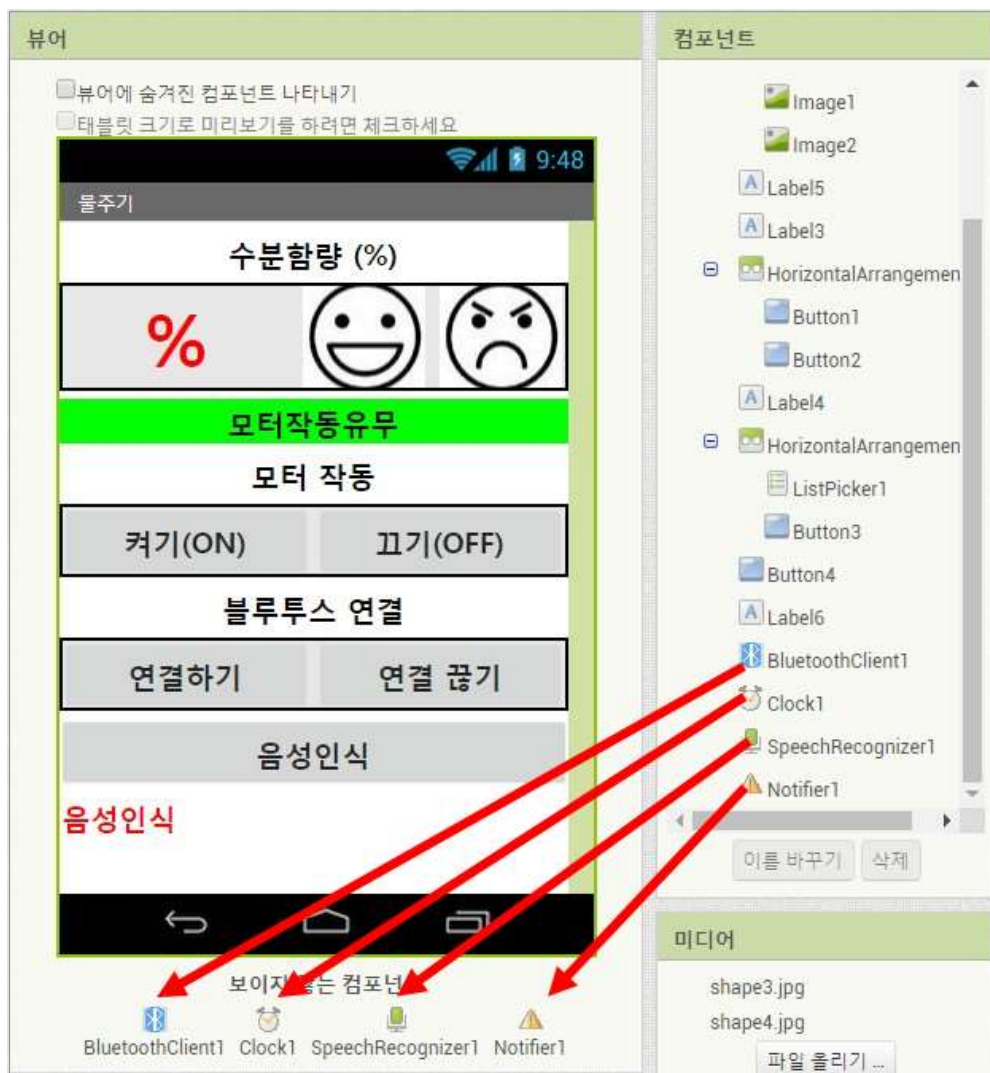


그림 113. 사물인터넷을 이용한 화면 디자인 모습

```

전역변수 초기화 data 값 " 1 "

언제 Screen1 - 초기화
실행 지정하기 ListPicker1 - 활성화 값 참
      지정하기 Button3 - 활성화 값 거짓
      지정하기 Clock1 - 타이머 활성화 여부 값 거짓

언제 ListPicker1 - 선택 전
실행 지정하기 ListPicker1 - 요소 값 BluetoothClient1 - 주소와 이름들

언제 ListPicker1 - 선택 후
실행 만약 호출 BluetoothClient1 - 연결
      주소 ListPicker1 - 선택된 항목
      그러면 지정하기 ListPicker1 - 활성화 값 거짓
              지정하기 Clock1 - 타이머 활성화 여부 값 참
              지정하기 Button3 - 활성화 값 참
              지정하기 Button3 - 텍스트 값 " 연결중 "
      아니라면 호출 Notifier1 - 경고창 나타내기
              알림 " 블루투스를 연결할 수 없습니다. "

언제 Button3 - 클릭
실행 호출 BluetoothClient1 - 연결 끊기
      지정하기 ListPicker1 - 활성화 값 참
      지정하기 Clock1 - 타이머 활성화 여부 값 거짓
      지정하기 Button3 - 텍스트 값 " 연결끊기 "

```

그림 114. 앱인벤터를 이용하여 블루투스 환경을 구축한 코딩 프로그램



그림 115. 애플벤터를 이용하여 타이머에 의해 센서값을 출력하기 위한 프로그램



그림 116. 휴대폰으로 수동으로 모터를 작동시키기 위한 프로그램



그림 117. 음성으로 모터를 작동시키기 위한 프로그램

라. 농가 보급형 관수 제어 시스템 개발 및 현장 적용

(1) 농가 보급을 위한 하드웨어와 소프트웨어 시스템 개발

(가) 4단계에 이용한 수분 계측 및 제어 모듈을 이용하여, 농가가 직접 또는 손쉽게 다룰 수 있는 농가 보급형 관수 제어 시스템을 개발하였다. 필요한 부품과 수량은 다음과 같다.



NO	부품명	사진	수량
A	CPU 12V 쿨러팬		1
B	브레드보드		1
C	SMPS (스위칭과워)		1
D	로터리 스위치 (ON-OFF)		1
E	누전차단기		1
F	케이블 그랜드		2
G	램프스위치		1
H	마그네틱스위치		1
I	저항(선택사항)		1
J	적색 LED		1
K	토글스위치 3단		1
L	전원소켓		1
M	연결 전선용 단자대		1
O	전기컨트롤박스 (300×400×150)		1

그림 118. 부품 사진들

(나) 연결하는 방법을 자세히 살펴보면, 다음과 같다.

### (1) CPU 팬 연결하기

팬 연결은 컨트롤박스의 결로가 생기지 않도록 하기 위함이며, 대략 사이즈는 50mm가 적당하다. 48mm 홀커터를 이용하여 컨트롤박스 옆에 구멍을 낸다. 쿨러 팬은 나사를 이용하거나 순간접착제를 이용해서 고정시킨다.





그림 119. 환기팬 장착 전과 후의 모습

## (2) LCD 창 설치하기

토양 수분의 환경 계측값을 보기 위해 LCD 창을 설치한다. 적당한 도구를 이용하여 LCD 창 크기에 맞게 사각 구멍을 낸다.



그림 120. LCD 창을 들어갈 전과 후의 모습

## (3) 케이블 그랜드 설치하기

컨트롤박스 바닥면에 케이블 그랜드를 설치한 사이즈로 드릴을 이용하여 구멍을 뚫는다.

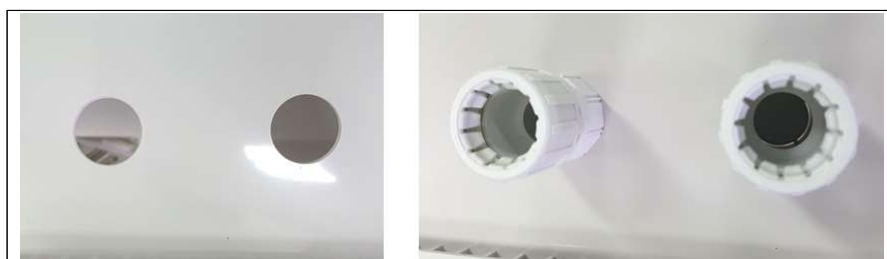


그림 121. 케이블 그랜드 설치 전과 후의 모습

#### (4) 램프와 로터리 스위치 설치하기

LCD 창 바로 아래에 램프와 로터리 스위치를 설치한다. 드릴을 이용하여 같은 사이즈로 구멍을 뚫는다.



그림 122. 파워 램프 설치 전과 후의 모습



그림 123. 로터리 스위치 설치 앞과 뒤 모습

**(5) LED와 토글스위치 설치하기**

같은 방식으로 LED 구멍과 토글스위치 구멍을 드릴을 이용하여 뚫는다.



그림 124. 토글 스위치 설치 전과 후의 모습

**(6) 컨트롤 박스 내부에 장비 설치하기**

컨트롤 박스 내부에 장비를 아래 그림과 같이 설치한다.



그림 125. 컨트롤 박스 내부 모습

### (7) 전원 연결하기

모든 부품들을 연결해 보자. 이 작업은 주의를 요하는 작업으로 전력, 전압 및 저항 테스트기를 이용하여 합선에 주의한다.

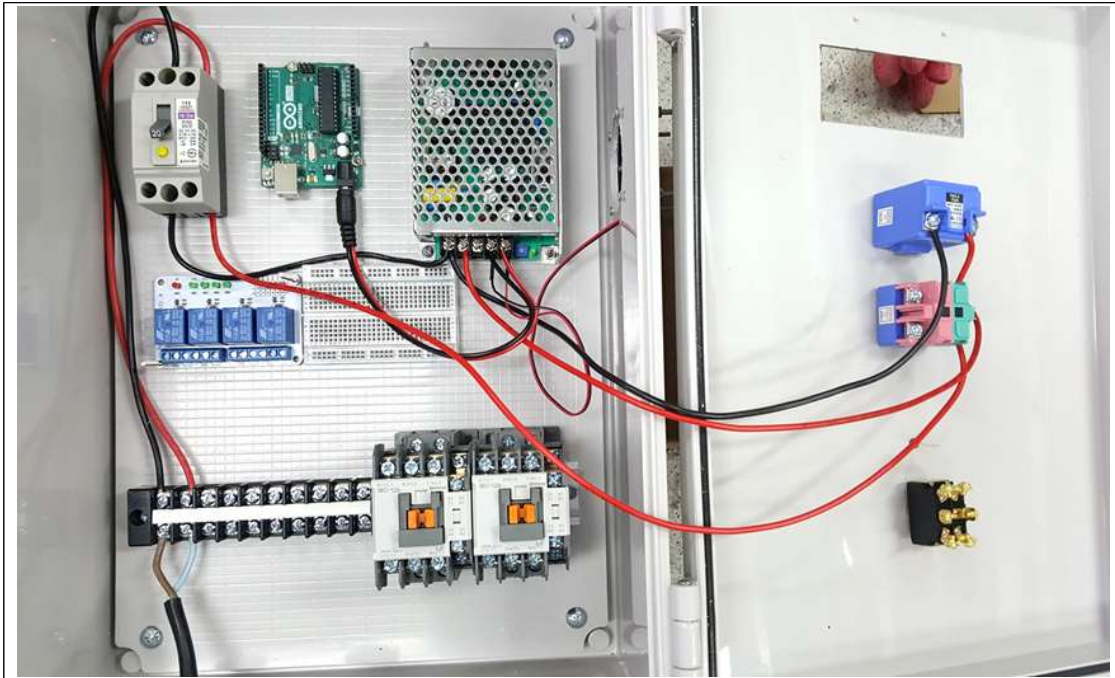


그림 126. 전원 연결도

AC 220V 전원을 누전차단기에 연결한 후, 한 선은 스위칭과워와 램프 스위치에 연결한다. 다른 한 선은 로터리 스위치에 연결하여, ON이 될 경우, 전류가 흘러 램프에 불이 들어오게 한다. 전류가 흐르게 되면, 12V SMPS가 작동되어 쿨러 팬과 아두이노에 전원을 공급하게 된다.



**(8) LCD 창과 블루투스 연결하기**

다음과 같이 실습한 것을 그대로 컨트롤 박스에 설치한다.

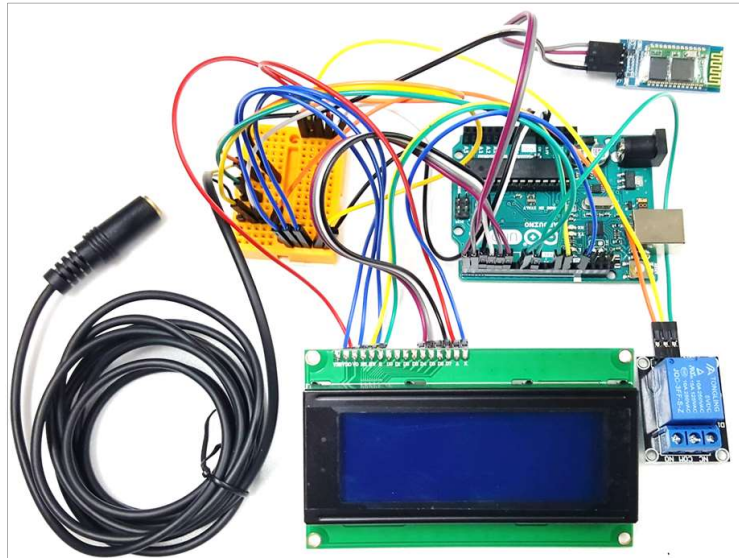


그림 127. 아두이노, LCD, 릴레이, 블루투스 및 수분센서 연결도

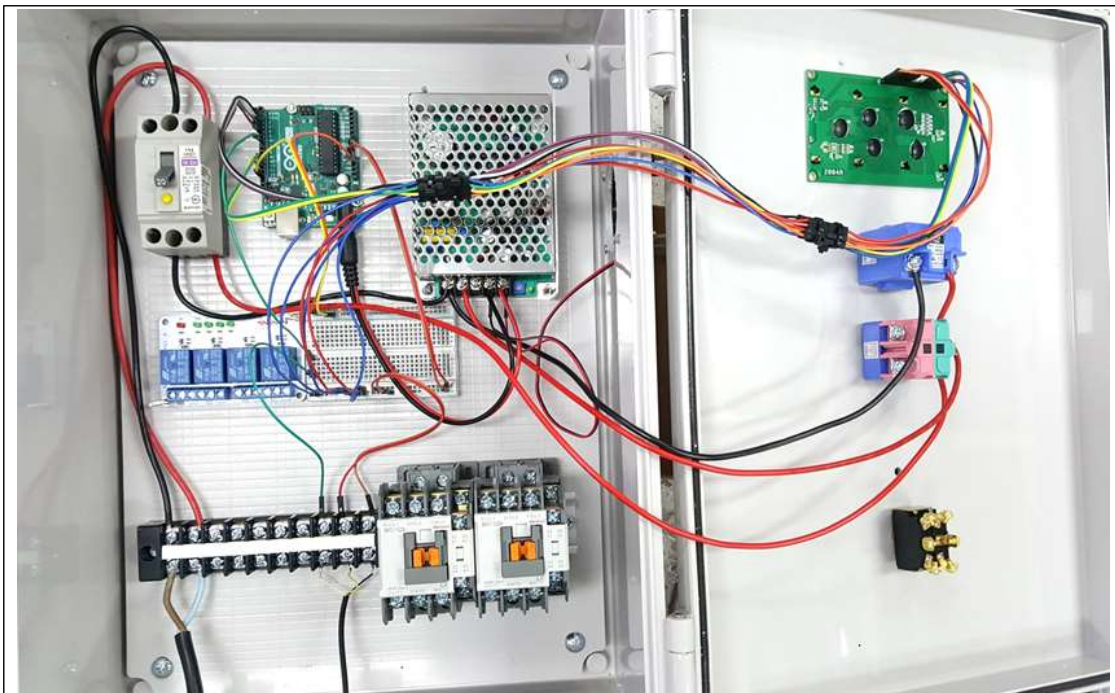
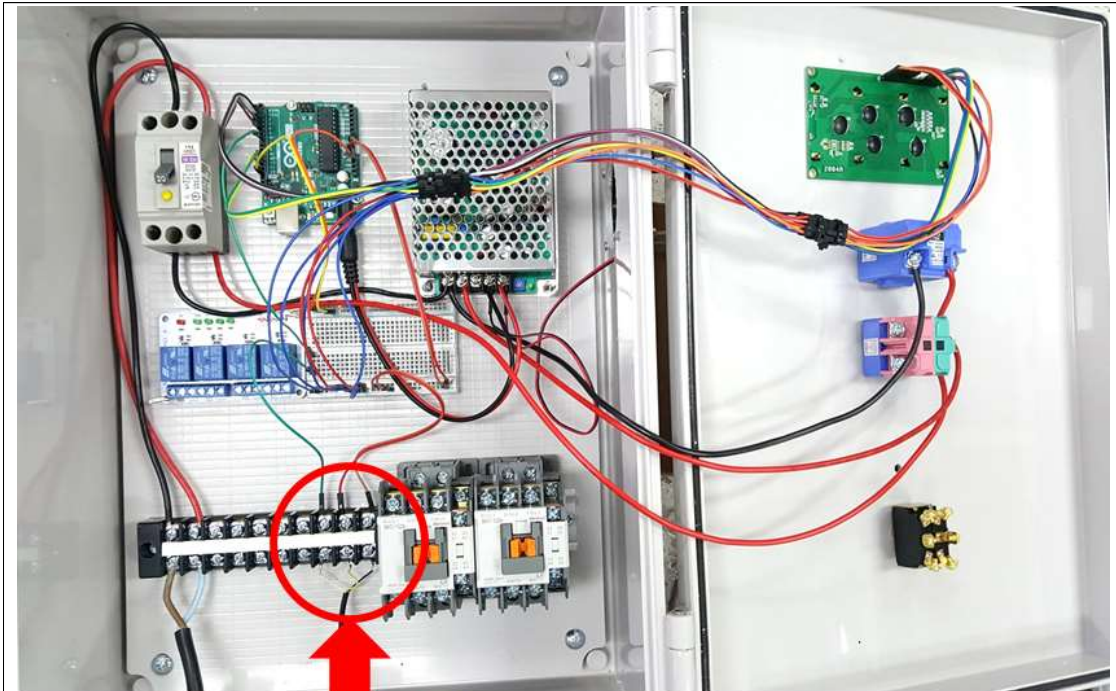


그림 128. 아두이노, LCD, 릴레이, 블루투스 및 수분센서 연결 컨트롤박스 내부도

**(9) 수분센서 연결하기**

수분센서 연결선을 단자대에 연결한다.



**수분센서연결선**

그림 129. 수분센서 연결선 모습



**(10) 토글스위치 연결하기**

토글스위치를 이용하여 자동/OFF/수동 작동시키도록 한다. 연결선은 다음과 같이 연결한다.

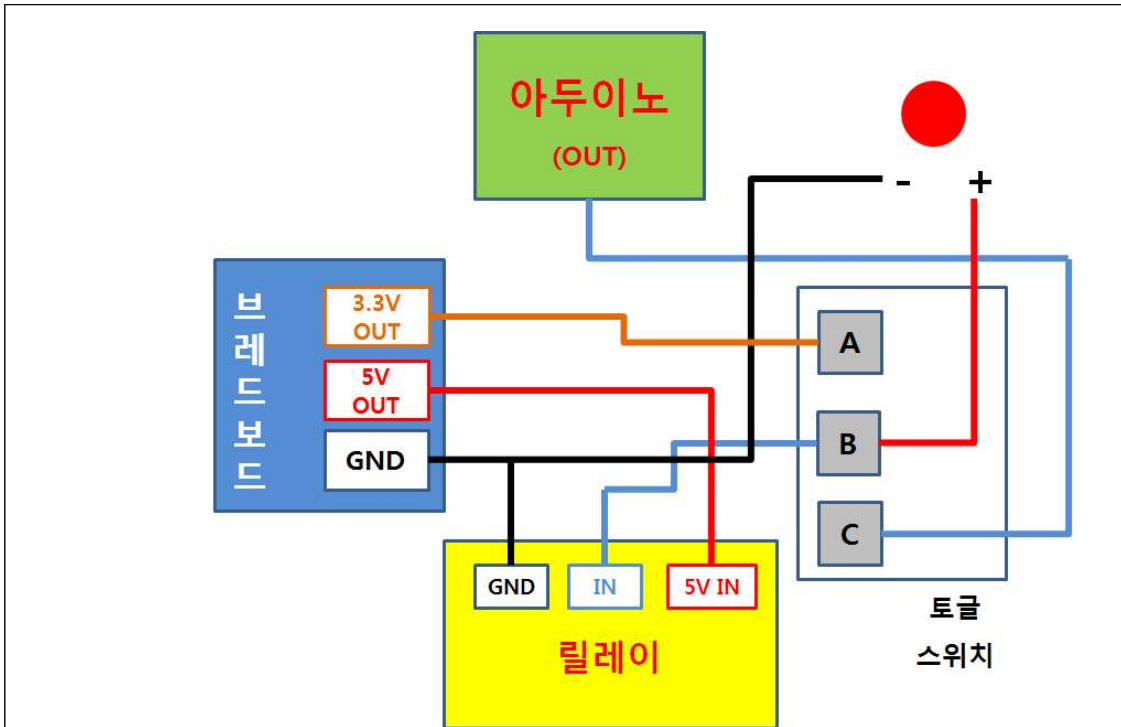


그림 130. 토글 스위치 연결도

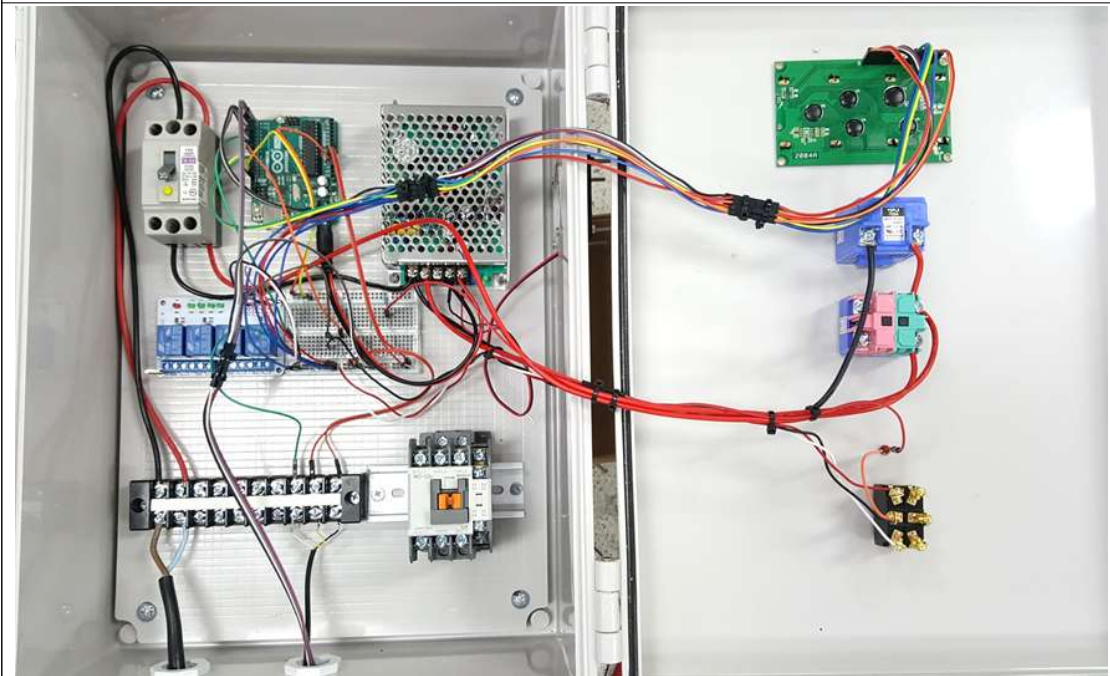


그림 131. 수분센서와 연결된 컨트롤 박스 내부 모습

- 완성된 모습은 아래 사진과 같다.

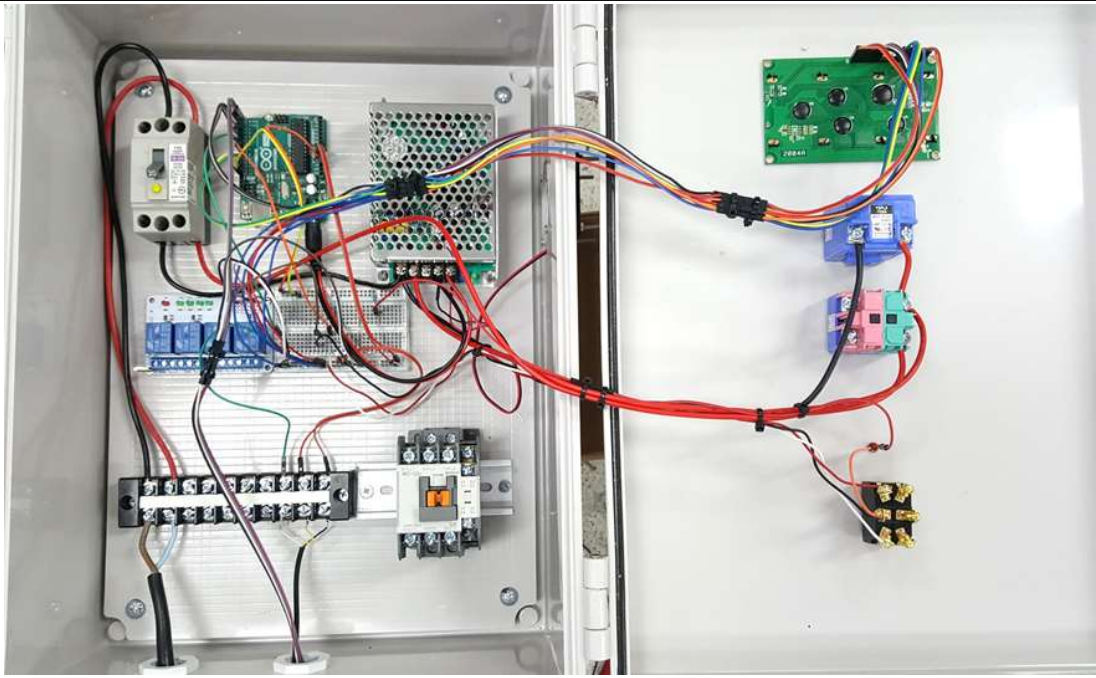


그림 132. 완성된 컨트롤 박스 내부 모습



그림 133. 완성된 컨트롤 박스 외부 모습



(2) 농가 보급형 수분 관리 시스템의 현장 적용

(가) 농가 위치는 경북 영주시 문수면 문수로 461번지로 500평 규모에 고추(품종:북주머니, 흥농종묘) 재배함. 재식거리는 고랑과 고랑 사이는 1m 정도, 식물체간 거리는 30-40 cm 정도, 정식은 2018년 4월 23일, 수확은 7월 23일 첫 수확하였다. 모터는 농공업용 펌프 PU-1700M(일로펌프)로, 용량은 2마력 용량이었다.



그림 134. 고추 정식한 모습 (2018년 4월 23일)



그림 135. 정식되어 있는 고추 모습  
(2018년 4월 23일 정식, 5월 13일 생육 모습)





그림 136. 농가 보급형 관수 제어 시스템 모습



그림 137. 2018년 6월 2일 생육 모습





그림 138. 첫 수확할 때의 고추 생육 모습



그림 139. 건조한 건고추 모습



(나) 올 2018년 여름기간동안의 강수량은 매우 적어, 관수처리한 곳과 관수 처리하지 않은 곳의 고추 생육 차이는 매우 심하였다.

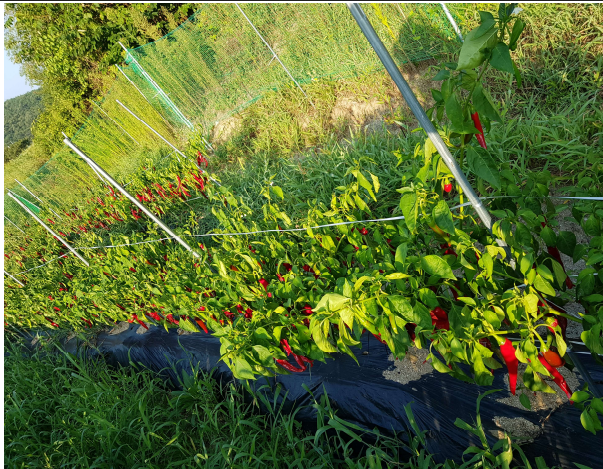


그림 140. 관수시설하지 않은 처리구의 고추 생육 모습 (2018년 8월 20일)



그림 141. 관수처리한 처리구의 고추 생육 모습 (2018년 8월 20일)

(다) 올 2018년 여름기간동안의 경북 영주 지역에서의 7월과 8월의 평균온도는 26℃와 25.3℃로 매우 높았다. 또한 5월부터 8월 초까지의 강수량은 매우 적어서 관수처리하지 않은 처리구의 생육에 문제가 발생하였다.

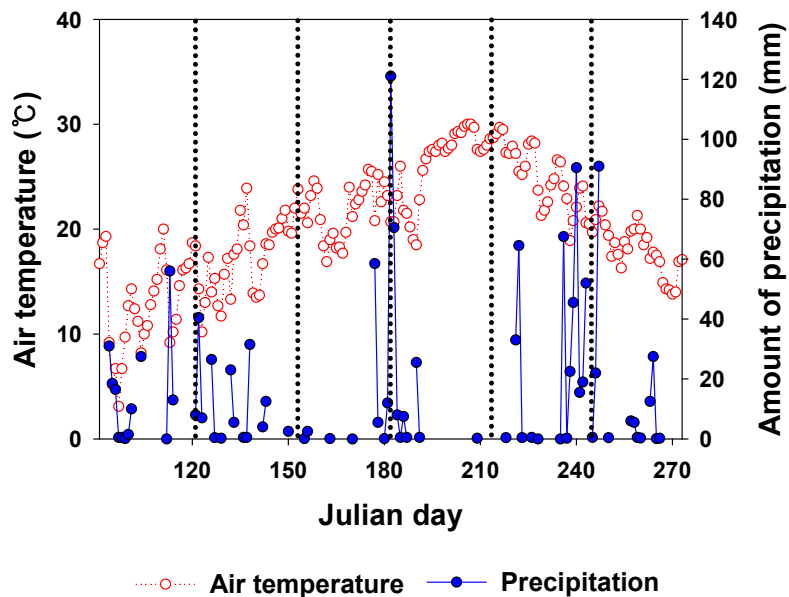


그림 142. 경북 영주지역에서의 평균온도와 강수량 변화 (4월1일부터 9월30일까지, Julian day는 1월 1일=1, 12월 31일=365).

(라) 2018년 7월 17일 하루 동안의 수분 공급, 토양의 수분함량과 온도 변화를 살펴 보면 다음과 같다. 30분간 수분 공급하였으며, 수분 공급 후부터 토양 중의 수분함량은 증가하는 경향을 보이다가, 오전 10시부터 수분함량이 감소하기 시작하였다. 토양 온도는 해가 뜬 후부터 계속적으로 증가하는 경향을 보였으며, 오후 2시부터 4시간까지 최고로 높은 근권온도를 보였다. 이 날의 기상청 자료를 보면, 평균기온은 28.2℃, 최저기온 22.4℃, 최고기온은 오후 2시에 33.2℃를 기록하였다.

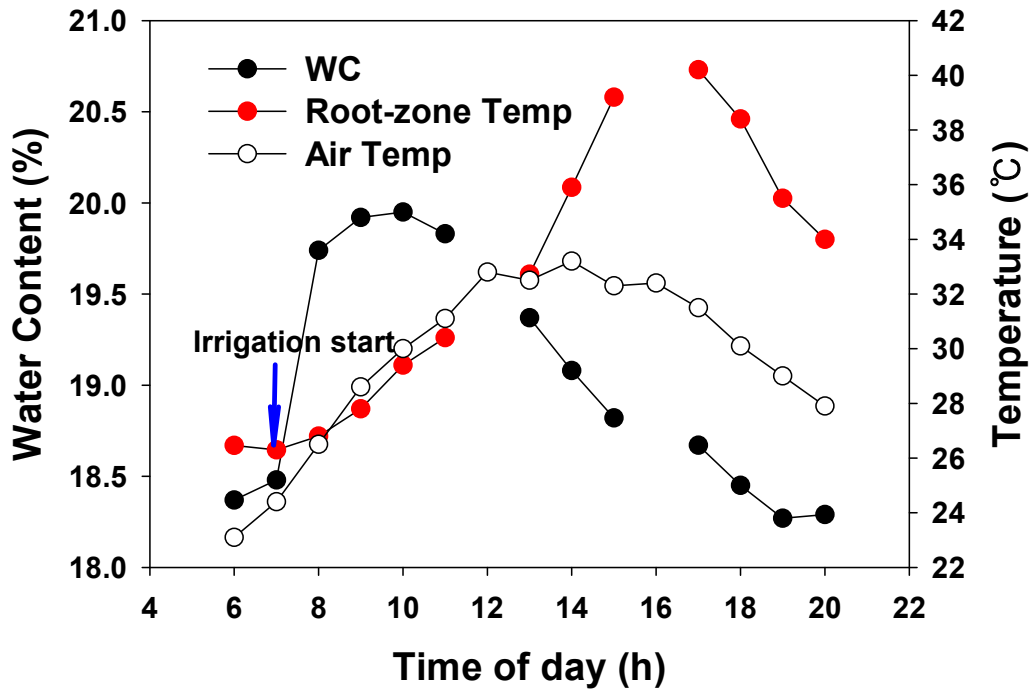


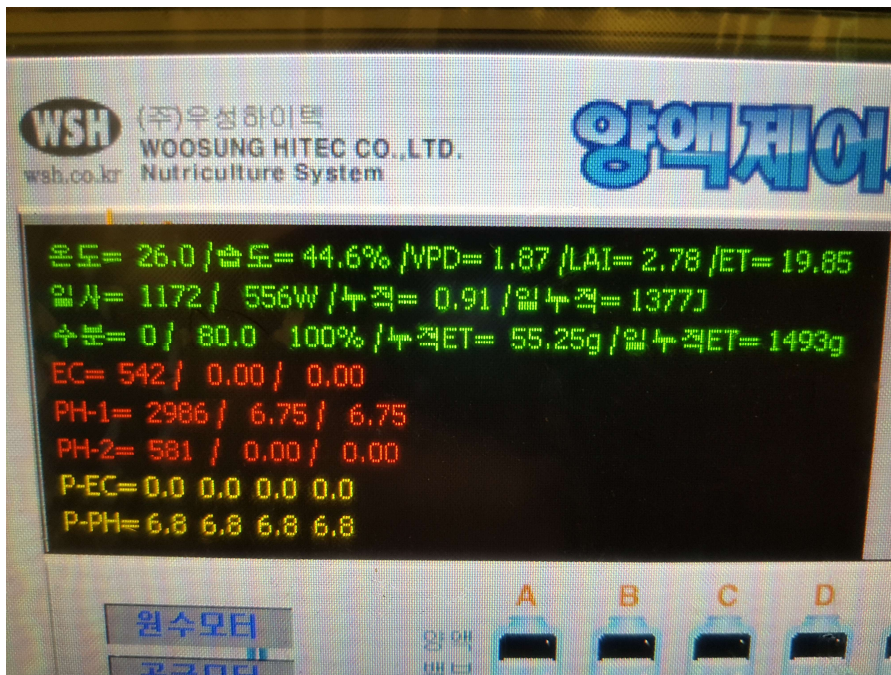
그림 143. 기상청 자료에 의한 기온 변화와 토양 내 수분센서에 의한 근권 온도와 수분함량 변화 (2018년 7월 17일)



4. 농가 보급형 정밀 관수제어 시스템 개발 및 현장적용

가. 농가 보급형 관수제어 시스템을 위한 소프트웨어 개발

(1) 증산량비례 양액공급정밀 조절을 위한 알고리즘 (양액공급기 적용화면)



< 양액 공급기 적용 화면 >

(2) 온도, 습도, 광도, 엽면적지수 대비 증산량 구하기 (vb코드)

```

Sub vpd_call(ByVal frm As frmMain) ' vpd 계산
Dim z As Single, z1 As Single, x As Single, x1 As Single
Dim A As Single, A1 As Single
Dim S As Single, S1 As Single

z = (Val(ZB_temp(0)) * 10)
z1 = ms_Table(z)
vpd_da(0) = (ZB_humi(0) * z1) / 100 ' 습부족분 /HD

x = 611 * (Math.Exp((19.65 * ZB_temp(0)) / (ZB_temp(0) + 273))) ' 포화수증기압
x1 = (ZB_humi(0) * x) / 100 ' 실제 수증기압
vpd_da(2) = (x - x1) / 1000 ' 수증기압포차 /VPD

A = (234.97 / (1 + Math.Exp(((81.605 - temp_c(1)) / 40.91)))) - 28.101 ' 광도보정식
vpd_da(3) = 3.5 / (1 + (Math.Exp((37.2 - ts_day) / 13.2))) ' 엽면적지수 보정

vpd_da(1) = (4.25 * (1 - Math.Exp(-0.84 * vpd_da(3))) * A + 0.009 * vpd_da(3) + vpd_da(2)) * 0.025 ' 최종 증산량 |

End Sub
    
```

< 증산량 계산 알고리즘 코딩 >

(3) VPD을 활용한 증산량에 의한 공급량조절 알고리즘

- (가) 기존공급방식은 광도500w에서 100J 설정시 30분 간격으로 공급됨(적색표참고)
- (나) 온도22도, 습도70%에서 동일하게 30분 간격으로 공급됨
- (다) 온도20도, 습도70%에서43분 간격으로 공급됨으로 약13분정도 간격이 커짐
- (라) 온도25도, 습도70%에서 20분 간격으로 공급되어 약10분 정도 빨리 공급됨
- (마) 습도가 높아지면 공급간격이 늘어나고 습도가 낮아질수록 공급 간격이 빨라짐
- (바) 기존식에서 습도가 80%이상이면, 공급 간격이 너무 크게 늘어나고, 60%이하에서는 너무 자주 공급되어져서 기존 누적일사량에 의한 공급방식하고 큰 차이가 발생함

증산량공식에 의한 양백 공급간격 시험데이터표 (기존공식)							증산량공식에 의한 양백 공급간격 시험데이터표 (VPD보정/우성하이백)						
온도	습도	일사	업면 적치 수(3)	누적증산	누적일사	공급간격시간(분)	온도	습도	일사	업면 적치 수(3)	누적증산	누적일사	공급간격시간(분)
20	80	500		100	300	120	20	80	500		100	168	50
22	80	500		100	270	95	22	80	500		100	143	43
23	80	500		100	240	80	23	80	500		100	131	39
25	80	500		100	200	60	25	80	500		100	109	32
20	70	500		100	140	43	20	70	500	정식 후80 일 이 후	100	153	46
22	70	500		100	100	30	22	70	500		100	100	30
23	70	500		100	86	26	23	70	500		100	93	27
25	70	500		100	60	20	25	70	500		100	66	19
20	60	500		100	64	19	20	60	500		100	104	31
22	60	500		100	45	15	22	60	500		100	85	19
23	60	500		100	38	11	23	60	500		100	52	16
25	60	500		100	27	9	25	60	500		100	35	11

< 증산량 공식에 의한 공급간격 시험 데이터 표 >

```

Sub vpd_val(ByVal frm As Form) '공산량 계산
Dim z As Single, z1 As Single, x As Single, y As Single
Dim k As Single
Dim vpd_val As Double

```

### 기존 계산식

```

Try
z = (Val(CE.Text) + 10)
If z < 0 Then
Return
ElseIf z > 50 Then
Return
Else
z1 = ac.Val(z)
End If

vpd_val = (CE.Text) * z / 100

x = 81 * (Math.Exp(16.85 * CE.Text) / (CE.Text + 270))
z1 = (CE.Text) * x / 100
vpd_val2 = (x - z1) / 1000

k = (57.257 * (1 - Math.Exp(-0.002 * time_d(1))) / 0.012)
vpd_val3 = (2 * k * vpd_val) / (1 + (Math.Exp(21.708 * CE.Text) / 5.957))
vpd_val = (89.82 * Math.Exp(-0.5 * Math.Pow(Convert.ToDouble(vpd_val2) - (2.26 / 0.786), 2)) / 28.46)

vpd_val1 = (0.85 * (1 - Math.Exp(-1 * (0.84 * vpd_val3) + vpd_val))) * k + 0.519 * vpd_val3 + vpd_val + 0.025

```

Catch as Exception

End Try

End Sub

```

Sub vpd_val(ByVal frm As Form) '공산량 계산
Dim z As Single, z1 As Single, x As Single, y As Single
Dim k As Single
Dim vpd_val As Double

```

### 추가 VPD보정식

```

Try
z = (Val(CE.Text) + 10)
If z < 0 Then
Return
ElseIf z > 50 Then
Return
Else
z1 = ac.Val(z)
End If

vpd_val1 = (CE.Text) * z / 100

x = 81 * (Math.Exp(16.85 * CE.Text) / (CE.Text + 270))
z1 = (CE.Text) * x / 100
vpd_val2 = (x - z1) / 1000

k = (57.257 * (1 - Math.Exp(-0.002 * time_d(1))) / 0.012)
vpd_val3 = (2 * k * vpd_val) / (1 + (Math.Exp(21.708 * CE.Text) / 5.957))
vpd_val = (89.82 * Math.Exp(-0.5 * Math.Pow(Convert.ToDouble(vpd_val2) - (2.26 / 0.786), 2)) / 28.46)

Dim y As Double = (70 - CE.Text) / 100
vpd_val = vpd_val + y

vpd_val1 = (0.85 * (1 - Math.Exp(-1 * (0.84 * vpd_val3) + vpd_val))) * k + 0.519 * vpd_val3 + vpd_val + 0.025

```

Catch as Exception

End Try

End Sub

## <기존 계산식과 VPD 보정식을 적용한 알고리즘 비교>

### 나. 농가 보급형 관수제어 시스템을 위한 하드웨어 개발

#### (1) 정밀제어 양액제어기 제작

- (가) 시제품 사출 및 시제품 제작
- (나) 양액혼합통 (다각형)적용
- (다) 양액흡입기(벤츄리)적용
- (라) 원수유입구 적용



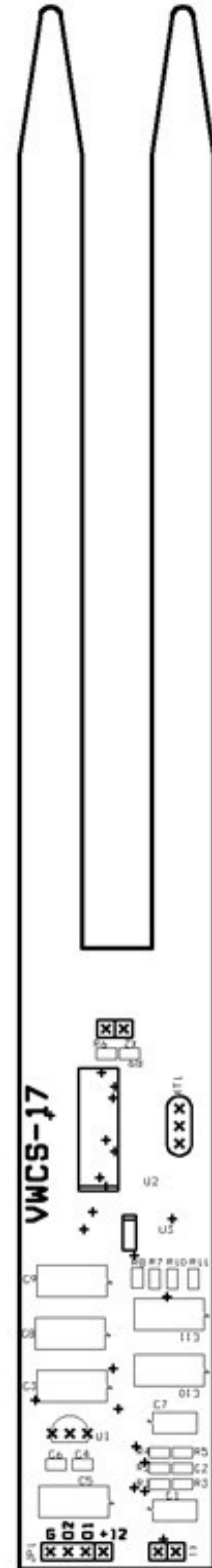
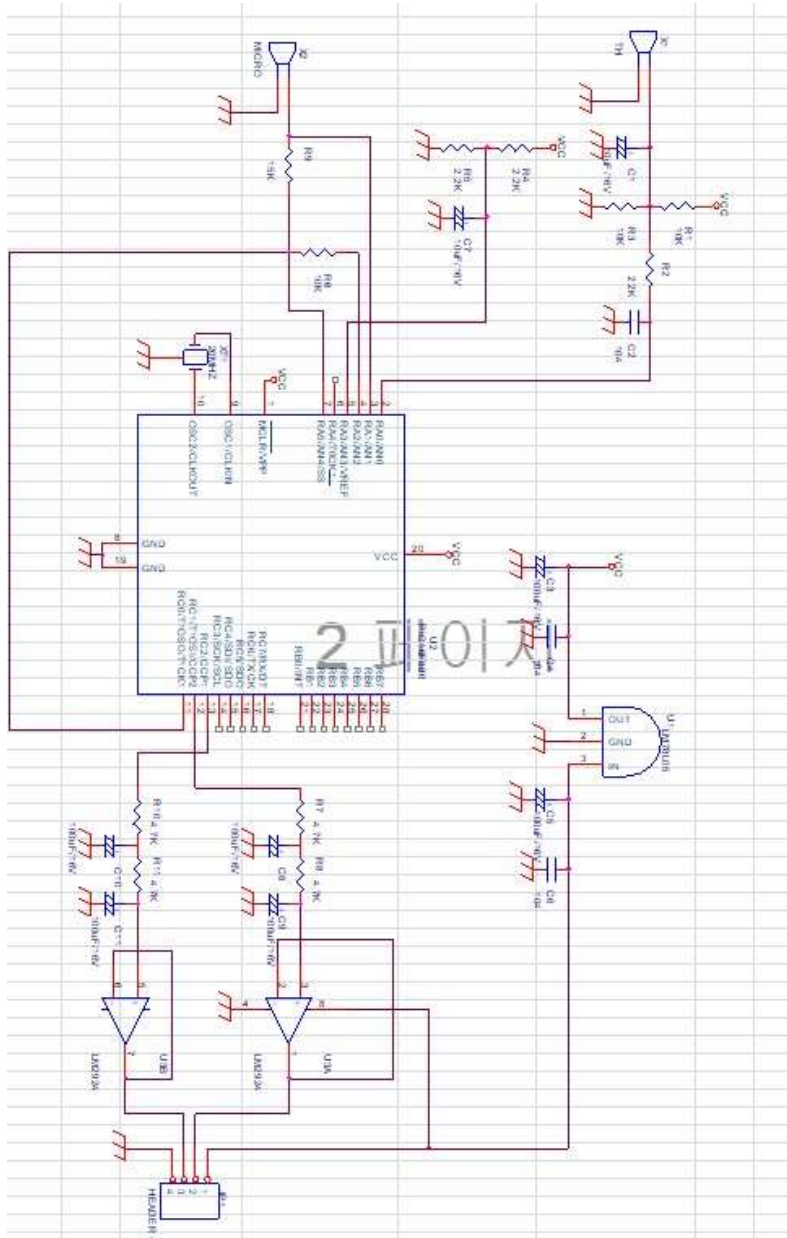
(2) pvc 부품금형개발



<양액흡입구 부품 및 적용>



(3) 함수율 센서 개발(TDR 방식) 배지내 함수율 측정용 센서 개발 자료



< 함수율 센서 PCB 회로도 >

(4) 2미터 길이 무게(중량)센서 및 수분센서 데이터 수집 장치  
(무선 지그비 통신, 최대 100Kg까지 측정)



<2미터 길이 무게(중량)센서 및 수분센서 데이터 수집 장치>

(5) 양액제어 정밀도 개선

- (가) 정밀도 향상을 위한 양액 흡입기(벤츄리) 사출금형 제작
- (나) 원수유입관 사출금형 제작
- (다) 균일한 사출제품으로 정밀도 향상 및 단가 절감



<양액 흡입기 사출금형>

다. 보급형 정밀 관수 제어 시스템 현장 실증 및 개선

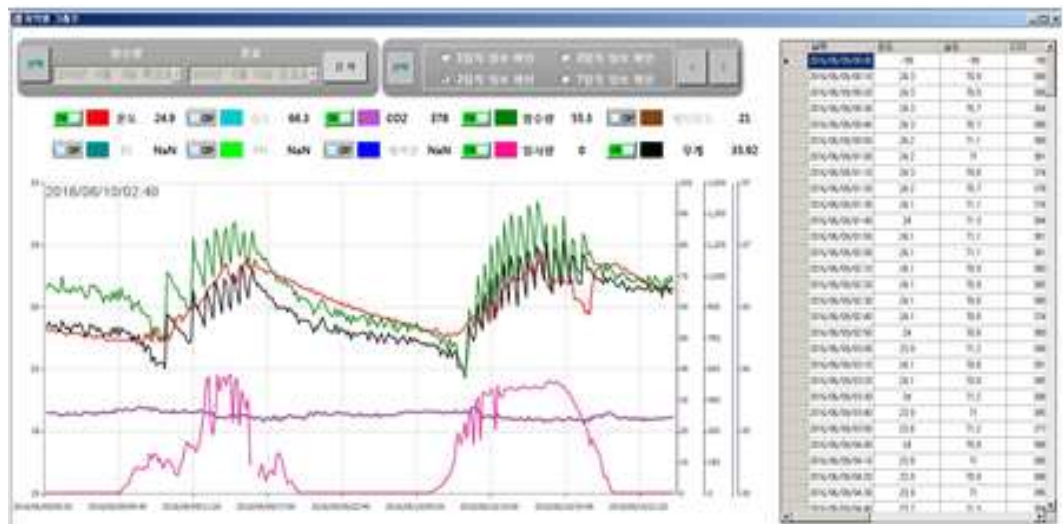
- (1) 정밀제어 양액제어기 시제품 실증
  - (가) 토마토 농장 설치 및 실험
  - (나) 2018년8월~11월10일



<관수제어 시스템 현장 실증>



(2) 자체 데이터 수집 및 분석용 소프트웨어로 수집한 그래프자료



<데이터 수집 및 분석용 소프트웨어>

(3) UI개선

(가) 사용자 인터페이스 개발

(나) 쉽고 편리한 기능 우선 적용



< 시스템 적용 UI >

## 제4절. 연구 성과

### 1. 논문게재 성과

#### 가. SCI급 논문 게재

(1) Evaluating plant stress conditions in paprika by comparing internal electrical conductivity, photosynthetic response, and sap flow

- 등재지 : Horticulture, Environment, and Biotechnology, 2019.

- 저 자 : 박현준, 박진희, 손정익

#### 나. KCI 논문 게재

(1) Transpiration Prediction of Sweet Peppers Hydroponically-grown in Soilless Culture via Artificial Neural Network Using Environmental Factors in Greenhouse

- 등재지 : 시설원예.식물공장 26:1-5, 2017. 10

- 저 자 : 남두성, 이준우, 손정익

### 2. 학술발표 성과

#### 가. 국제발표

(1) Development of a moisture content monitoring system using arduino, load-cell, and soil moisture sensor

- 2017 ASHS annual conference, 2017. 9

- 저자 : 차미경, 조영열

(2) Investigatiozn and Comparison of Water Movement Properties among Several Media for Precise Irrigation Control at Soilless Culture of Fruit Vegetable

- GreenSys 2017, 2017. 8

- 저자 : 최영배, 신종화

#### 나. 국내발표

(1) 저비용 개방형 Microcontroller와 로드셀을 이용한 화분의 수분 함량 측정 시스템 개발

- 등재지 : 한국원예학회추계학술대회 제34권 별호 2, 2016. 10.

- 저자 : 차미경, 전윤아, 조영열

(2) 저비용 개방형 Microcontroller와 수분센서(HL69) 이용한 화분의 수분 함량 측정 시스템 개발

- 등재지 : 한국원예학회추계학술대회 제35권 별호 2, 2017. 10.

- 저자 : 차미경, 조영열

(3) 암면배지의 재활용을 위한 작물재배 전과 후 배지의 수분이동 특성 비교

- 등재지 : 한국생물환경조절학회 추계학술대회, 2017. 10.

- 저자 : 최영배, 신종화

(4) Estimation of Leaf Area of Paprika with Leaf Length, Leaf Width, and Node Number Using Regression Model and Artificial Neural Network

- 등재지 : 한국원예학회추계학술대회 제35권 별호 2, 2017. 10.

- 저자 : 이준우, 문태원, 남두성, 정대호, 박경섭, 손정익

(5) Estimation of Transpiration of Paprika between Modified Regressed Equations and Artificial

## Neural Network

- 등재지 : 한국원예학회추계학술대회 제35권 별호 2, 2017. 10.

- 저자 : 남두성, 이준우, 문태원, 손정익

(6) 아두이노, 로드셀과 수분센서를 이용한 수분함량 측정 시스템 개발

- 등재지 : 한국생물환경조절학회 춘계학술대회, 2018. 4.

- 저자 : 양형석, 홍하림, 조영열

(7) Development of a greenhouse environment monitoring or control system using low-cost microcontroller and open-source software

- 등재지 : 한국생물환경조절학회 추계학술대회, 2018. 10.

- 저자 : 조영열, 정다인, 홍하림, 박지은, 현승민

(8) 환경변수를 이용한 인공신경망 기반 온실 파프리카 증산속도 추정

- 등재지 : 한국생물환경조절학회 춘계학술대회, 2018. 4.

- 저자 : 남두성, 이준우, 문태원, 손정익

(9) 암면배지에서 근권 함수율 제어를 위한 관수 시작지점 함수율과 관수속도에 따른 함수율 변화 분석

- 등재지 : 한국원예학회추계학술대회 제36권 별호 1, 2018. 5.

- 저자 : 최영배, 신종화

(10) Analysis of the changes in medium moisture content according to the rockwool medium properties for a precise moisture content control

- 등재지 : 한국생물환경조절학회 추계학술대회, 2018. 10.

- 저자 : 신종화, 최영배

### 3. 특허 성과

#### 가. 특허 출원

(1) 반려 식물 관수 장치 및 반려 식물 관수 장치의 구동 방법

- 출원번호 : 10-2018-0080814 (대한민국)

- 출원일 : 2018-07-11

- 발명자 : 박신애, 조영열

(2) 가습기 장치 및 그의 구동 방법

- 출원번호 : 10-2018-0080845 (대한민국)

- 출원일 : 2018-07-12

- 발명자 : 박신애, 조영열

(3) 테라리움을 이용한 공기정화 장치 및 그의 구동 방법

- 출원번호 : 10-2018-0082059 (대한민국)

- 출원일 : 2018-07-16

- 발명자 : 박신애, 조영열

(4) 아쿠아포닉스 장치 및 아쿠아포닉스 장치의 구동 방법

- 출원번호 : 10-2018-0085582 (대한민국)

- 출원일 : 2018-07-23

- 발명자 : 박신애, 조영열

(5) 수경 재배 장치 및 수경 재배 장치의 구동 방법

- 출원번호 : 10-2018-0085705 (대한민국)

- 출원일 : 2018-07-24

- 발명자 : 박신애, 조영열

(6) 벽면 녹화 장치

- 출원번호 : 10-2018-0151325 (대한민국)

- 출원일 : 2018-11-29

- 발명자 : 박신애, 안경진, 조영열, 이재명

4. 연구인력 양성 성과

가. 차미경 (박사학위 취득, 2017)

나. 전윤아 (석사학위 취득, 2017)

5. 기술실시

가. 기술이전계약

(1) 토마토 양수분 정밀관리를 위한 ICT 활용 배지수분 및 증발산 모니터링기술

- 기술실시 대상기관 : (주)우성하이텍

- 통상실시권 (노하우)

- 유상 (500만원)

- 최초 기술실시 계약년도 : 2018

6. 사업화

가. 제품개발

(1) 양액공급기 (Wim-1000)

- 사업화년도 : 2018

- 제품용도 : 배양액 자동공급

- 업체명 : (주)우성하이텍

7. 기타활용

가. 단행본발간

(1) 농가 보급형 수분관리 시스템

- 발간년도 : 2018

- 대표저자 : 조영열

### 제3장 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

#### 제1절. 목표달성도

연차	세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	연구수행내용	달성도 (%)
1	작물 생육 형태에 따른 작물 내 양수분 이동 변화 분석	5	• 생육단계별 양수분 흡수 및 이용 패턴 분석	100
	관수제어 알고리즘 개발을 위한 제어 지표(환경, 생육)의 분석	6	• 문헌을 통한 관수제어에 사용된 제어 지표 분석 • 문헌을 통한 관수제어 사례 분석 • 문헌을 통한 관수제어 알고리즘 분석	100
	최적 관수 제어를 위한 작물 내 양수분 이동 측정 기술 고도화	6	• 무게측정기준의 증산량측정 장치 개발	100
2	환경 요인별 작물 내 양수분 이동 기여도 분석	5	• 근권의 물리적 환경요인에 따른 양수분 이동 특성 비교 • 환경 요인별 증산율 기여도 분석	100
	작물 생육 형태에 따른 작물 내 수분이동 변화 분석	5	• 생장 패턴에 따른 작물내 sink와 source간 수분 함량 비교	100
	고품질 과채류(토마토, 파프리카) 대량생산을 위한 양수분 제어 요인 분석 및 관리기술 개발	5	• 고품질 과채류 대량생산을 위한 수분제어 요인 분석 및 수분관리기술 개발	100
	환경 요인별 작물 내 수분이동 기여도 분석	5	• 광, 온도, VPD 조건에 따른 증산량 추정식 개발	100
	배지 함수율 관련 시계열 데이터 해석 기반 구축 및 분석	5	• 증산 및 배지 함수율 변화에 미치는 각 시계열 요인의 정량적 분석	100
	배지 함수율, 증산 및 배액량 추정에 의한 배지 함수율 변화 예측	6	• 설정 배지 함수율에 따른 배액량 추정 모델 개발 • 증산 및 배액량 추정 모델을 이용한 배지 함수율 변화 모델 개발	100
	사용자 중심 관수제어 프로그램 개발	6	• Open-source microcontroller를 활용한 농가 보급형 관수제어 프로그램 개발 • 사물인터넷을 활용한 관수제어 프로그램 개발	100
	실시간 수분 이동 모니터링 및 농가 보급형 관수제어 시스템 개발	6	• 사물인터넷을 활용한 수분 관리 모니터링	100
	최적 관수 제어를 위한 작물 내 양수분이동 측정 기술 고도화	5	• 로드셀센서이용테스트패드 제작 및 수분센서와 이중화하여 데이터 수집 • 배지 내 함수율 측정오차 최소화 기술 개발 • 수집한 데이터를 바탕으로 배지내 수분함수율 변화의 오차범위와 최적의 보정기술 알고리즘 연구 개발	100
안정적인 관수제어 시스템	5	• pvc 부품금형개발 및	100	



	개발을 위한 장치의 국산화, 부품개발		적용, 배지함수율 측정 센서(TDR방식)개발	
3	고품질 과채류(토마토, 파프리카) 대량생산을 위한 양수분 제어 요인 분석 및 관리기술 개발	6	• 증산모델과 배액 이동특성 파악에 따른 수분관리 가이드라인 제시	100
	배지 함수율 및 배액량 설정 조건에 따른 적정 관수량 추정 기술 개발	6	• 관수개시 함수율에 따른 배액발생속도 분석 • 관수속도와 배액발생특성 관계식 개발	100
	정밀 관수 제어를 위한 시스템 최적화	6	• 정밀 양액 공급제어가 가능한 보급형 관수제어 시스템 개발 및 농가 실증 • 상업화 가능 관수제어 시스템 개발 및 현장 식물생산시스템 적용성 검증	100
	실시간 양수분 이동 모니터링 및 농가 보급형 관수제어 시스템 개발	6	• 하드웨어/소프트웨어 통합 시스템 구축 • 농가 보급형 양수분관리 시스템 개발 및 현장적용	100
	시설형태(농가환경)에 따른 보급형 관수제어 시스템 개발 및 성능 검증	6	• 증산량비례 양액공급정밀 조절을 위한 알고리즘 연구 분석 • 증산량을 구하기 위한 시스템 하드웨어 개발	100
	합계	100		

## 제2절. 후속연구의 필요성

- 토양이나 배지 수분이 주로 계측 및 제어 요인으로 수분관리에 이용되었지만, 현재로는 양분 이온 센서와 수분센서를 결합된 형태의 수분관리 체계가 유용하다고 판단됨.
- 각 양분 이온 센서(질소, 인, 칼륨, 칼슘, 마그네슘 등)는 비용과 수명에 있어 문제점이 대두되고 있어 현재로는 EC 기반 (총 염류농도)으로 하는 후속연구가 필요하다고 판단됨.
- 따라서, 수분센서와 EC 기반으로 한 양수분 관리 체계로 토양이나 배지 수분 관리를 바꿀 필요가 있을 것으로 판단됨.

## 제4장 연구결과의 활용 계획

### 제1절. 연구결과의 활용방안

- 연구를 통해 개발된 보급형 식물생산시스템의 과채류 생산농가의 관수제어에 직접 활용
- 수분이동특성 연구 개발결과와 작물의 수분이동특성 파악결과를 개발된 장치에 적용하여 수분이용 효율성 증진방안에 활용
- 증산추정 기술과 수분특성 파악연구 결과를 활용한 관수제어 기술 보급과 가이드라인 제시를 위한 기초 데이터로 활용
- 각 도의 기술원 및 기술센터를 중심으로 농가보급형 수분관리 시스템 제작을 위한 교육에 활용
- 양수분을 제어하기 위한 분야에 기존의 개발된 수분센서 모듈에 양분 센서를 부착한 시스템 개발에 활용
- 저비용 오픈소스를 사용한 다른 microcontroller 또는 microprocessor 등에 활용 가능성 큼
- 농가 스스로가 직접 제작하여 농가 현장에 적용

## 붙임. 참고문헌

- Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., Kudlur, M., 2016. Tensorflow: A system for large-scale machine learning. OSDI 16:265-283.
- Baille M., Baille A., Delmon D., 1994. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. Agricultural and Forest Meteorology 71:83-97.
- Kingma D., Ba J., 2014. Adam: A method for stochastic optimization. arXiv preprint arXiv:1412.6980v9.
- Nam D.S., Lee J.W., Moon T.W., Son J.E., 2017. Transpiration prediction of sweet peppers hydroponically-grown in soilless culture via artificial neural network using environmental factors in greenhouse. Protected Horticulture and Plant Factory 4:411-417.
- Shin J.H., Park J.S., Son J.E., 2014. Estimating the actual transpiration rate with compensated levels of accumulated radiation for the efficient irrigation of soilless cultures of paprika plants. Agricultural Water Management 135:9-18.
- Shin J.H., Noh E.H., Son J.E. 2012. Transpiration, growth, and water use efficiency of paprika plants (*Capsicum annum* L.) as affected by irrigation frequency. Horticulture, Environment, and Biotechnology 53:129-134.
- Arduino (2018) Downloads the Arduino software. Accessed 15 Nov. 2018
- Cahn, M., D. Krause, B. Noel, F. Cabrera, and B. Lidl. 2016. A web application for data-driven water and fertilizer conservation. CropManage.
- 조영열, 손정익. 1999. 펄라이트 배지의 수분함량 제어. 한국생물환경조절학회 발표논문집 8(2):217-220.
- 최은영, 김희용, 최기영, 이용범. 2016. 토마토 코이어 수경재배에서 FDR센서, 적산일사량 및 타이머 급액방식에 따른 급배액량, 생육 및 과실수량 비교. 시설원예·식물공장 25:63-70.
- Ferrarezi, R.S., S.K. Dove, and M.W. van Iersel. 2015. An automated system for monitoring soil moisture and controlling irrigation using low-cost open-source microcontrollers. HortTechnology 25(1):110-118.
- 김학진, 노미영, 이동훈, 전상호, 허승오, 최진용, 정선옥, 이중용. 2011. 전기저항식 워터마크센서기반 소형 관수장치의 토양 수분퍼텐셜 자동제어 효용성 평가. 생물환경조절학회지 20:93-100.
- 김성은, 김영식, 심상연. 2011. 토마토 펄라이트 베드재배시 배액전극 제어법에 적합한 측정틀 설계. 원예과학기술지 29:568-574.
- 농림축산식품부. 2018. 49회 국정현안점검조정회의 보도자료(배포본). 1-6.
- 박종석, 뉴엔타이, 안태인, 손정익. 2009. TDR 센서를 이용한 압면 슬라브 수분 특성 분석 및 파프리카 재배의 적용 예. 생물환경조절학회지 18:238-243.

#### 주 의

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