

과 제 구 분	기관고유	과 제 번 호	LP004580	
과 학 기 술 분 류	LB0203	품 목 표 준 코 드	VC-05-1315	
주 관 과 제 명	시설과채류 결로 모니터링 및 제어시스템 개발			
과 제 책 임 자	성명	직급	소속기관 및 부서	
	이원경	농업연구사	강원도원 연구협력과	
연 구 기 간	2021 ~ 2024	참여연구기관	강원도원 연구협력과	
세부과제명		부서	세부책임자	연구기간
1) 시설과채류 결로 모니터링 및 제어시스템 개발		원예연구과	이원경	'21~'22
2) 시스템 현장실증 및 고도화		원예연구과	이원경	'22~'24
키 워 드	결로, 모니터링, 경보, 토마토			

ABSTRACT

Gangwon State features highland and high-latitude regions that experience relatively low nighttime temperatures and significant diurnal temperature variations in summer, creating favorable conditions for protected cultivation of fruit vegetables compared to southern areas. Although the province's total greenhouse cultivation area continues to expand, a large proportion of these greenhouses are single-span structures reliant on unheated, insulation-focused management strategies. Such limitations hinder effective condensation control, which can lead to serious issues including fungal diseases, poor pollination, and microcracks in fruit. This problem is particularly acute during the early morning when rapid temperature increases and high transpiration often trigger surface condensation. To address these challenges, this study aims to develop and refine a "Condensation Monitoring and Control System" tailored to Gangwon's distinctive geography and climate. Specifically, a model-fruit sensor will be used to monitor actual fruit surface temperature, while real-time dew point data will determine condensation likelihood. Integrating these elements into a unified monitoring platform will enable timely, automated control of heating, ventilation, and circulation fans to minimize condensation-related damage. Field demonstrations will verify the system's performance, and the collected data will inform the optimization of sensor and control components, including advanced approaches based on artificial intelligence. Ultimately, the knowledge and experience gained will be compiled into a practical manual and guideline, facilitating widespread adoption by diverse greenhouse growers both within and beyond Gangwon Province. Through enhanced productivity and reduced postharvest losses, the system is expected to contribute substantially to the expansion of smart farming and to strengthen agricultural competitiveness.

1 연구목표

강원특별자치도의 고령지·고위도 지역은 여름철 야간기온이 낮고 일교차가 큰 지리·기후적 이점을 지니고 있어, 남부지역에 비해 하절기 시설과채류 생산이 유리한 조건을 갖추고 있다. 이에 따라 강원특별자치도 내 시설재배 면적은 꾸준히 증가하고 있으나, 전체 온실 중 단동형 비중이 높고, 무가온·보온 위주의 환경관리로 인해 결로 발생 문제를 효과적으로 해소하지 못하는 실정이다. 결로는 곰팡이병, 수정 장애, 미세열과 등 다양한 생리·병리적 문제를 야기하여 작물 품질과 수량에 직접적인 타격을 준다. 특히 새벽이나 일출 직전·직후의 급격한 온도 상승과 작물 증산으로 인해 발생하는 표면 결로는, 고비용을 투자하기 어려운 중·소규모 농가에 지속적인 부담 요소로 작용하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 결로 현상을 사전에 예측·판단하고, 적시에 대응할 수 있는 통합 모니터링 및 제어시스템이 필수적이다. 예를 들어 모형과실 센서를 이용해 실제 과실의 표면온도를 측정하고, 이를 이슬점 데이터와 실시간으로 비교함으로써 결로 가능성을 신속히 파악할 수 있다면 난방과 환기, 유동팬 가동 등의 환경제어를 효율적으로 운용할 수 있다. 그러나 현재 도내 영세농가 대다수가 보유한 단동형 온실은 설비 개선이 어려워, 간단한 센서와 제어 프로그램을 연동하더라도 높은 효과를 얻기 힘든 경우가 많다. 또한 스마트팜 기술이 결로 문제 해결에 유효하다는 인식이 확산되고 있지만, 설치 비용과 운용 기술이 복잡해 실제 현장 도입이 제한적인 상황이다. 이에 본 연구는 강원특별자치도의 지리·기후적 특성을 최대한 활용하면서, 단동형 및 무가온 등 열악한 온실 구조에서도 효과적으로 적용할 수 있는 ‘시설과채류 결로 모니터링 및 제어시스템’을 개발·고도화하는 것을 목표로 한다. 우선 결로가 자주 발생하는 새벽부터 일출 직후까지의 환경 변화를 정밀 측정하고, 모형과실 센서와 이슬점 데이터를 결합해 결로 발생 여부를 실시간으로 예측·판단할 수 있는 모니터링 체계를 구축한다. 더 나아가 난방·환기·유동팬 등 제어장치를 연동해 자동으로 대응할 수 있는 시스템을 현장에서 실증함으로써, 결로 문제로 인한 작물 피해 및 품질 저하를 최소화한다. 또한 현장 실증 과정에서 수집된 데이터를 토대로 센서·제어 장치를 고도화하고, 인공지능 연계 기반의 정밀 제어 기법을 도입하여 다양한 기상 조건과 작물 특성에 대응할 수 있는 확장성을 마련한다. 이를 통해 시설개선이 여의치 않은 상황에서도 농업인들이 보다 쉽게 결로를 관리하여, 곰팡이병이나 수정 불량, 미세열과 등에 의한 손실을 줄이고 고품질 과채류를 안정적으로 생산할 수 있는 환경을 구현하고자 한다. 최종적으로는 이러한 연구개발 과정에서 축적된 기술적·운영적 노하우와 현장 적용 데이터를 매뉴얼 및 가이드라인으로 체계화함으로써, 강원특별자치도를 비롯한 국내외 다양한 시설농가에 폭넓게 보급할 계획이다. 이를 통해 농가의 생산성 향상과 품질 개선은 물론, 스마트팜 확산과 농업 경쟁력 제고에도 기여하는 결로 모니터링 및 제어시스템을 완성해 나가는 것이 본 연구의 주요 목표이다.

2 재료 및 방법

〈Q 제2세부과제 : 시스템 현장실증 및 고도화〉

(시험 1) 과실 결로발생에 따른 생육특성 및 과실 품질변화 조사

본 연구는 작물의 결로 노출 시간에 따른 생육 특성 변화와 과실 품질 저하를 규명하고, 이를 바탕으로 적절한 환경관리 방안을 제시하기 위해 수행되었다. 시험은 강원특별자치도농업기술원 유리온실에서 실시하였으며, 주요 시설과채류를 대상으로 작목별 결로 지속시간을 달리하여 처리하였다. 각 처리구에 대해 온도, 습도, 이슬점, 결로 지속시간 등의 재배환경 요소를 정밀 측정하고, 경경, 개화거리, 생장길이, 엽장, 엽폭, 엽수 등의 생육정보를 조사하였다. 아울러 결로 지속에 따른 과실의 미세열과 발생 정도를 조사하고, 시스템 도입에 대한 부분 경제성을 분석하였다.

(시험 2) 실증농가 데이터 수집 및 분석

본 연구는 2022년에 개발한 과실 결로 모니터링 및 제어시스템의 현장 적용성과 실용성을 검토하고, 시스템 고도화를 위한 보완점을 도출하기 위해 수행되었다. 시험은 춘천을 포함한 강원특별자치도 내 4개 지역 20개 실증농가를 대상으로 실시하였으며, 각 농가에 결로 모니터링 및 제어시스템을 설치하여 현장 실증을 진행하였다. 처리 내용은 시스템을 통한 자동 환경 제어와 결로 데이터 수집이며, 각 농가의 시설 현황을 비롯해 온도, 습도, 이슬점, 결로 발생 상태 및 지속시간 등을 포함한 재배환경 요소를 조사하였다. 또한 하우스 내 위치별 결로 발생 정도를 분석하여 시스템의 제어 정확도와 활용 가능성을 평가하였다. 본 시험을 통해 수집된 현장 데이터를 기반으로 시스템을 보완하고, 결로 제어의 효율성을 향상시켜 스마트 환경관리 기술의 농가 확산 가능성을 높이고자 한다.

(시험 3) 시스템 활용 매뉴얼 개발 및 고도화

본 연구는 2022년 개발된 결로 모니터링 및 제어시스템의 실사용 과정에서 나타나는 문제점을 분석하고, 사용자 편의성과 시스템 안정성을 향상시키기 위한 개선 방안을 도출하여 활용 매뉴얼을 고도화하기 위해 수행되었다. 시험은 춘천을 포함한 4개 지역 20개 실증농가를 대상으로 진행되었으며, 현장에서 발생한 시스템 오류를 파악하고 사용자용 앱 등의 기능 개선을 포함한 시스템 전반에 대한 보완 작업을 수행하였다. 조사 내용으로는 실증농가에서 발생한 시스템 오류 사례, 모니터링 기능의 개선 요구사항, 제어 기능 관련 불편사항 등을 수집·분석하였다. 본 시험을 통해 실사용자의 운영 만족도와 실제 환경에서의 시스템 성능을 반영한 개선점을 도출하고, 현장 중심의 활용 매뉴얼을 체계화하여 시스템의 완성도와 현장 적용 가능성을 높이고자 한다.

3 결과 및 고찰

〈제2세부과제 : 시스템 현장실증 및 고도화〉

(시험 1) 과실 결로발생에 따른 생육특성 및 과실 품질변화 조사

가. 시설 내 결로처리를 위한 환경조절

결로처리 구간에서는 총 369.8시간 동안 결로가 지속되었고, 난방+환기 처리는 147.6시간으로 결로시간이 약 60% 감소하였다. 특히 11월 중순부터 결로시간 차이가 크게 나타났으며, 난방과 환기 등 적절한 환경제어를 통해 결로 발생을 효과적으로 억제할 수 있음을 보여준다.

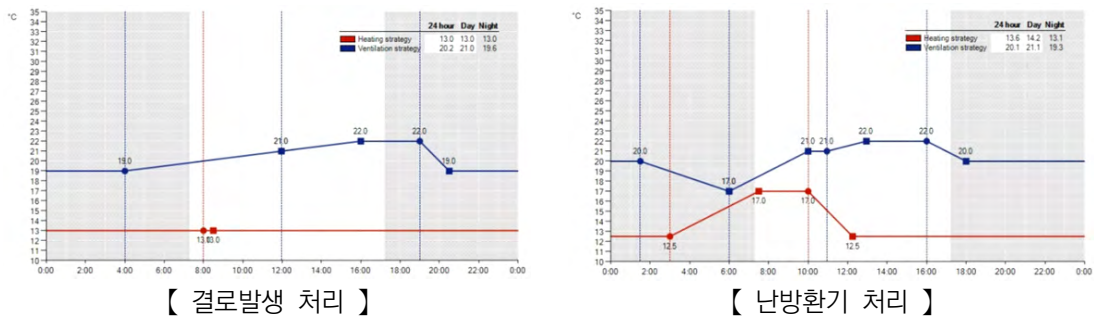


그림 1. 처리구별 난방 및 환기 설정

표 1. 재배기간 중 결로발생 및 지속시간

처리	10월		11월		합계 (h)
	43주*	44주	45주	46주	
결로처리	66.3	180.5	123.0		369.8
난방+환기	0.8	90.3	56.5		147.6

* 2023년 43주차(10.21.)부터 결로처리 시작

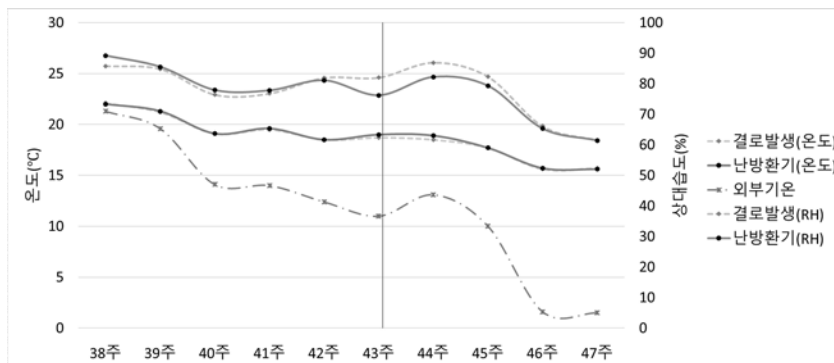


그림 2. 재배기간 중 평균기온과 상대습도 변화

나. 과실 결로 지속시간과 토마토 생육특성

결로발생과 난방환기 처리 후 3주간 경경, 개화거리, 생장길이, 엽장, 엽폭, 엽수 등 생육지표의 유의미한 차이는 확인할 수 없었으며, 처리 전과 경향을 유지하는 수준이었다. 다만, 장기간 잎과 과실에 결로가 발생할 경우 광합성 저해와 병발생의 증가가 우려되므로 추가적인 관찰이 필요하다.

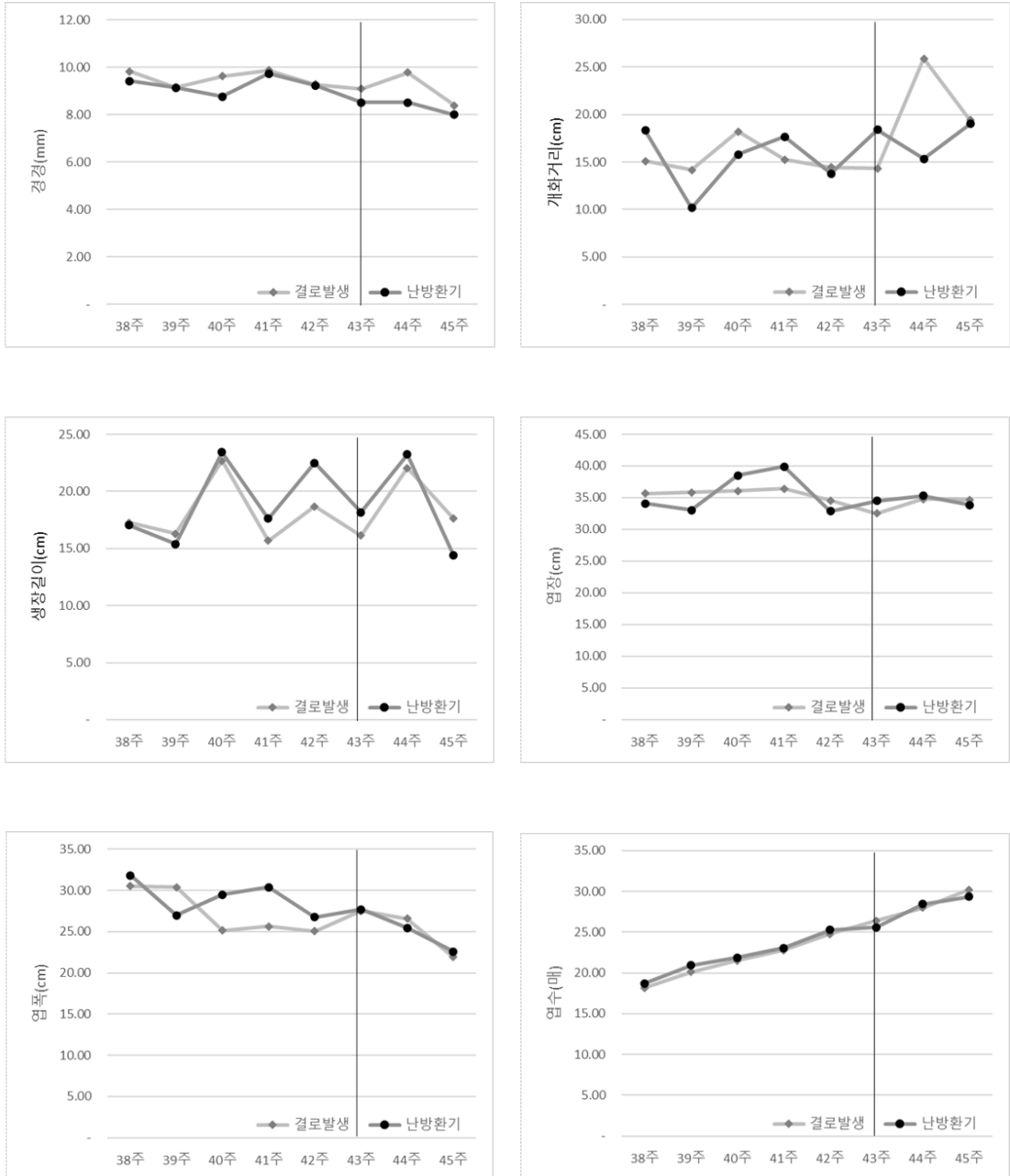


그림 3. 결로 지속에 따른 토마토 생육 특성

다. 결로 지속에 따른 과실 미세열과 발생정도와 품질기준

결로처리에서는 미세열과 발생율이 45.7%로 난방·환기 처리의 22.7%보다 두 배 이상 높았다. 품질 등급 또한 결로 구간은 평균 1.5등급으로, 3.0등급을 기록한 제어 처리에 비해 열과 피해가 심각하게 나타났음을 보여준다. 열과 발생 정도에 따라 등급을 특, 상, 보통, 결점, 중결점으로 나누어 분류하였으며, 그물 무늬, 갈라짐, 코르크화 진행 등 육안으로 확인 가능한 품질저하 양상을 체계화하였다.

표 2. 결로 지속에 따른 과실 미세열과 발생정도 (조사일 : 23.11.20.)

처리	비상품과율 (%)	미세열과 발생율 (%)	미세열과 등급
결로발생	25.0	22.7	3.0
난방환기	47.8	45.7	1.5

* 2023년 43주차(10.21.)부터 가슴처리 시작

				
1단계(특)	2단계(상)	3단계(보통)	4단계(결점)	5단계(중결점)
미세열과 발생하지 않음	화탁 주변 부분적 미세한 그물 무늬가 관찰됨	넓은 범위에서 미세한 그물 무늬가 관찰됨	미세열과 부분이 갈라지고 코르크화 진행	넓은 범위에서 코르크화가 심하게 진행됨

그림 4. 미세열과 발생정도에 따른 등급과 기준

라. 결로 모니터링 시스템 도입에 따른 부분 경제성 분석

결로 제어 시스템 도입 시 연간 10a당 약 189만 원의 순이익이 발생하며, 상품율 증가에 따른 판매단가 상승 효과가 비용 증가를 상회하였다. 이는 시스템 설치가 단순한 품질 관리 수단을 넘어 경제적 이익으로 직결될 수 있음을 의미한다.

표 3. 시설 과채류 결로 모니터링 및 경보시스템의 손실적 요소

구 분		결로 모니터링 및 경보시스템
구입비(원)		5,000,000
내구년(년)		8
사용시간(시간)		8,640
고정비	감가상각비(원/년)	625,000
	수리비(원/년)	300,000
	이자(원/년)	125,000
	소계	1,050,000
시간당 고정비(원/시간)		122
변동비	인건비(원/시간)	146,019
	전기료(원/시간)	45,792
	소계	191,810
연간소요비용(원/시간, 고정비+변동비)		1,241,811

※ 인건비 : 인건비 : 남 146,019 , 여 113,301 (2023년 통계청 1/4)

※ 이자율(년): 5%

※ 수리비계수(년) : 6%

표 4. 시설 과채류 결로 모니터링 및 경보시스템의 이익적 요소

구분		시스템 적용		시스템 미적용	
등급	가격 [원/kg]	수량 [kg(%)]	판매액 [원]	수량 [kg(%)]	판매액 [원]
계		11,021(100)	36,216,152	11,021(100)	33,080,898
특품	3,529	7,847(71.2)	27,691,894	5,114(46.4)	18,046,403
상품	2,864	2,336(21.2)	6,691,599	4,155(37.7)	11,899,682
중품	2,188	838(7.6)	1,832,660	1,433(13.0)	3,134,813
하품	0	0(0)	0	320(2.9)	0

※ (시스템 적용) 난방, 환기 처리, (시스템 미적용) 난방, 환기 미조치로 인한 결로 발생시

※ 수량 : 2022 농산물소득자료집 토마토 축성재배 주산물 수량 적용(11,021kg/10a)

※ 가격 : 가락시장 등급별 경락가격 '19~'23 5년 평균가격 적용

(특 3,529원/kg, 상 2,864원/kg, 중 2,188원/kg)

※ 상품율 : 시설 결로 발생과 억제 따른 과실품질등급 조사자료 적용

표 5. 경제성 분석 (단위: 원/10a) : 1,893,443원 이익/10a

손실적 요소(A)	이익적 요소(B)
○ 증가되는 비용 - 고정비 : 1,050,000원 - 변동비 : 191,811원 - 계(A) : 1,241,811원	○ 증가되는 이익 - 결로 관리로 인한 상품성 향상에 따른 소득증대 효과 : (시스템 적용) - (시스템 미적용) = 36,216,152 - 33,080,898 - 계(B) : 3,135,254원
○ 추정수익액(B-A) : 3,142,145 - 1,241,811 = 1,893,443원	

(시험 2) 실증농가 데이터 수집 및 분석

가. 시스템 실증 농가 현황

표 5. 2023년 제어시스템 실증농가 온실 규격 및 환경조절장치 현황

항목	유○○	곽○○	하○○	이○○	신○○	이○○	308	
온실타입	연동	연동	단동	단동	단동	연동	단동	
동 수	5	2	8	3	6	2	5	
지붕의 형상	아치형	아치형	아치형	아치형	아치형	아치형	아치형	
온실 규격	지붕높이	2	2	1.8	1.8	1.8	2.5	2
	측고	2.5	2.5	1.5	1.8	1.8	2	2.3
	동고	4.5	4.5	3.3	3.6	3.6	4.5	4.3
	폭	7	7.5	7	7	7	7.5	7
	길이	60	107	90	90	100	100	30
피복재	1중	PE	PE	PE	PE	PE	PE	PE
	2중	-	PE	-	-	-	-	-
	3중	-	-	-	-	-	-	-
커튼	1층	부직포	-	PE	PE	PE	흑색차광	AL보온
	2층	다겹	-	다겹	PE	AL보온	-	-
	3층	PE	-	-	복박이	-	-	-
급액시스템	센서	시간	시간	시간	센서	시간	센서	
환경제어	센서	반자동	센서	센서	센서	센서	센서	
환기창	천·측	천·측	천·측	천·측	천·측	천·측	측	
난방장치	온풍	무	온풍	온풍	온풍	무	팬코일	
냉방장치	무	무	무	무	무	무	무	
제습장치	무	무	무	무	무	무	무	
유동팬	유	무	유	유	유	유	유	
배기팬	유	유	유	유	유	무	무	
탄산시비	무	무	무	무	무	무	유	

실증에 참여한 농가의 온실은 연동형과 단동형이 혼재되어 있으며, 대부분 PE 피복재를 사용하고 커튼과 환기창, 난방장치 등 시설 사양이 상이하다. 특히 지붕 높이, 동고, 측고 등 구조적 특성에 따라 내부 기류 및 복사열의 분포가 다르게 나타나 결로 발생에 영향을 줄 수 있음을 시사한다. 센서 기반 환경제어 시스템이 적용된 농가도 있지만, 일부는 반자동 또는 수동 제어 방식이 사용되어 스마트 환경관리의 편차가 존재한다. 이러한 시설 환경 차이는 모니터링 데이터 해석 시 필수 고려사항이며, 향후 시스템 표준화에도 반영되어야 한다.

농가별 시스템 활용도는 일부 농가는 원격제어 및 실시간 데이터 분석을 활발히 활용한 반면, 다수의 농가는 수동 조작에 의존하고 있었다. 이는 시스템 도입 이후에도 사용자 역량 및 교육 수준에 따라 활용 격차가 크며, 실질적 효과를 위해서는 사용자 중심의 교육 콘텐츠 개발과 기술 지원이 병행되어야 함을 보여준다.

표 6. 2023년 결로 모니터링 및 제어시스템 농가 활용도 조사

실증 농가	활용등급 ²	원격 제어	환경제어			환경 데이터 분석	환경 데이터 분석				영상 이미지 활용
			천창	측창	커튼		원격 분석	온도	습도	결로	
유○○	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
곽○○	3	3	3	5	3	5	5	3	3	5	3
하○○	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	3
이○○	5	3	5	5	5	3	5	5	5	5	3
신○○	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
이○○	3	3	3	5	3	5	5	5	5	5	3

² 1 : (원격제어 및 환경 데이터 분석), 3(환경데이터 모니터링), 5(수동 조작)

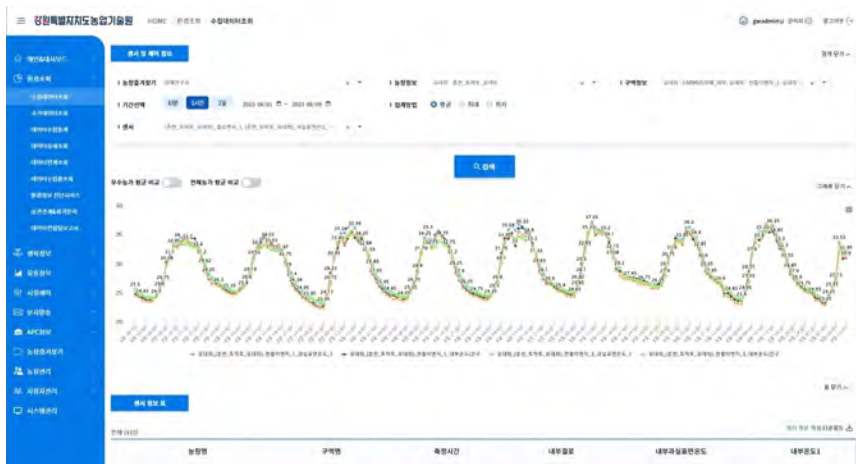
표 7. 2024년 결로 모니터링 시스템 신기술시범사업 농가선정 현황

번호	성명	사업장소	면적	센서	경보	히팅팬	비고	설치일
합 계			57,029	52		66		
1	김○○	둔내면 마암리	2,310	4	앱	X	-	5.17.
2	김○○	둔내면 화동리	2,310	2	경보기	X	인터넷 X	6. 8.
3	김○○	둔내면 조항리	11,550	4	앱	X	-	5.22.
4	박○○	둔내면 화동리	6,600	4	앱	X	-	6. 8.
5	오○○	안흥면 소사리	3,960	4	앱	X	-	6. 8.
6	이○○	둔내면 화동리	1,980	4	앱	X	-	6. 8.
7	이○○	우천면 양적리	5,822	4	앱	X	딸기	5.18.
8	전○○	둔내면 영랑리	5,610	4	앱	X	-	5.18.
9	조○○	둔내면 석문리	2,540	2	경보기	X	인터넷 X	6. 8.
10	김○○	둔내면 화동리	2,145	2	경보기	X	인터넷 X	6. 8.
11	허○○	무릉도원면 무릉리	5,743	8	경보기	32	2개소, 히팅팬	9.20.
12	김○○	무릉도원면 무릉리	2,859	4	경보기	16	히팅팬 설치	9.20.
13	김○○	무릉도원면 무릉리	3,600	6	경보기	18	히팅팬 설치	7.20.

총 13명의 농가가 시범사업에 참여하였으며, 대부분 둔내면과 무릉도원면 등 강원도 고령지 지역에 위치해 있다. 시스템 구성은 경보기 또는 앱 기반 경보 장치를 중심으로 구성되었고, 일부 농가는 히팅 팬을 부착하여 결로 제어에 실질적 대응이 가능하도록 하였다. 특히 영월 지역의 농가는 독립적 제어 장치와 히팅팬을 갖춰 적극적인 환경제어가 가능했다. 반면, 인터넷 연결이 불안정한 농가에서는 현장에 설치된 경보장치의 화면과 타워램프를 활용해 현재 상황을 파악할 수 있었다.

나. 실증농가 데이터 수집

통합관제시스템은 각 농가별 센서노드에서 수집된 데이터를 실시간으로 서버에 연동하고, 관리자 및 사용자가 웹 기반으로 데이터에 접근할 수 있도록 구성되었다. 시스템은 농가별, 구역별, 항목별로 데이터를 세분화해 조회할 수 있으며, 이는 모니터링 및 분석 효율성을 크게 높였다. 다양한 지표의 시계열 추적이 가능해 결로 발생 패턴을 농가 특성에 맞춰 분석하는 데 기초 자료로 활용된다.



【 통합관제시스템 데이터 연계 】



【 농가별 현황 조회 】



【 센서노드별 데이터 조회 】

그림 5. 통합관제시스템 데이터 연계 및 조회 현황

온실 내의 주요 기상요인(온도, 습도, 이슬점 등)과 과실 표면온도를 항목별로 수집한 결과, 과실온도가 이슬점 이하로 떨어지는 경우가 잦았으며, 이는 결로 발생의 주요 원인이 된다. 데이터를 통해 각 항목 간 상호작용과 시간별 변화양상을 직관적으로 파악할 수 있으며, 실시간 경보 알고리즘 설정에 기초 자료로 적용된다. 특히 이슬점 접근 구간에서의 과실온도 관리가 결로 제어의 핵심임을 보여준다.

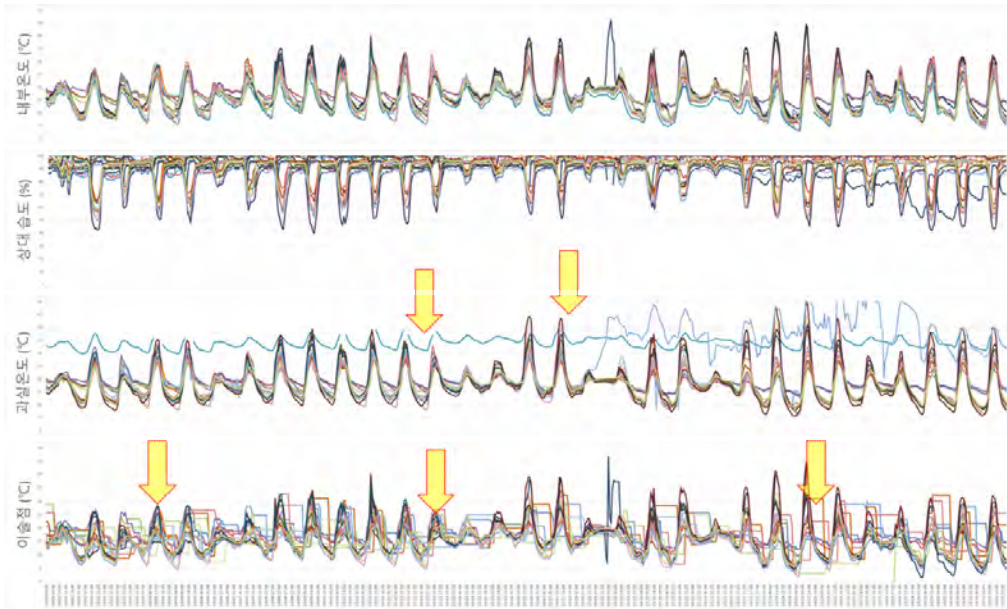
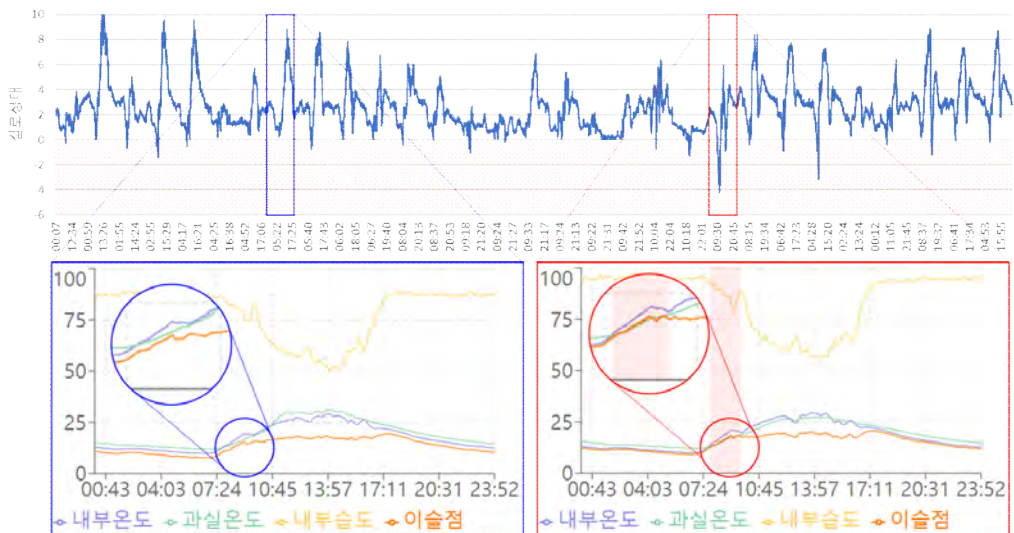


그림 6. 항목별 데이터 수집 현황



【 과실온도가 이슬점보다 높음 】

【 과실온도가 이슬점보다 낮음 】

그림 7. 과실온도와 이슬점에 따른 결로상태

과실온도가 이슬점보다 낮은 시점에서 결로가 발생하며, 이 과실 표면에 결로상태가 지속될수록 미세열과 및 병해의 위험이 높아진다. 시스템은 이러한 상태를 실시간 감지해 경보를 제공하며, 특히 일출~오전 시간대에서 결로 발생 빈도가 집중적으로 높게 나타났다. 이 결과는 모형과실 센서 기반의 감지 알고리즘이 실제 결로 상태를 민감하게 반영함을 시사한다.

다. 농가 데이터 분석

춘천 연동형 온실 내 동서남북 방향과 중앙에 5개의 센서노드를 설치하여 내부 환경정보 및 결로상태를 관찰하였다. 남북향온실이나 북동쪽으로 비스듬하게 설치되었으며, 기계실과 작업공간이 위치해 광환경이 불량한 남쪽은 제외하였다.



그림 8. 실증온실 센서 위치

13일간 누적된 결로 데이터를 분석한 결과, 온실 내 위치별 결로 지속시간이 중앙 1,085분, 서편 1,081분, 북편 820분, 동편 428분으로 차이를 보였다. 이는 온실 구조와 태양광 유입 방향, 공기순환 상태 등 복합적인 요인에 따른 것으로, 온실 내부의 위치별 환경 편차를 고려한 맞춤형 결로 제어 전략 수립의 필요성을 보여준다.

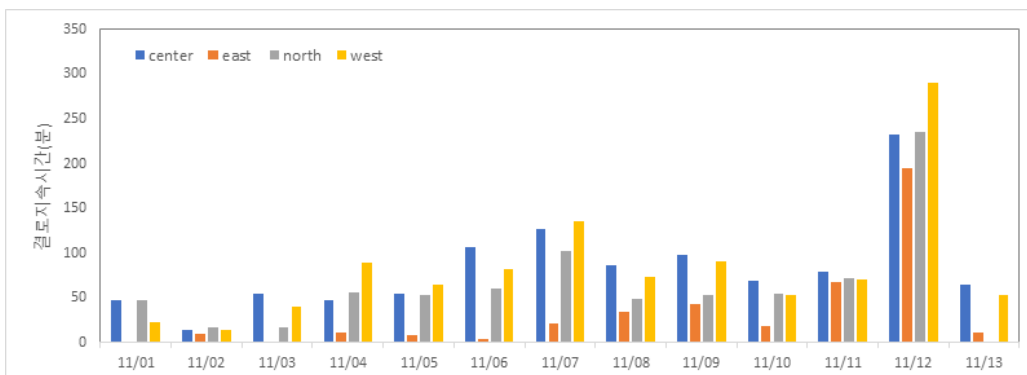


그림 9. 온실 위치별 일 누적 결로 지속시간

외기 평균온도, 최고/최저기온, 일교차, 일사량 등의 외부 기상 지표와 결로 지속시간 간에는 명확한 상관관계가 나타나지 않았다. 이는 결로 발생이 외부기상 보다는 온실 내부의 국지적 온·습도, 구조, 공기 흐름 등 미세환경 요소에 더 큰 영향을 받는다는 사실을 강조한다. 따라서 정밀한 결로 제어를 위해서는 외부 날씨보다 내부 환경 모니터링이 우선되어야 함을 보여준다.

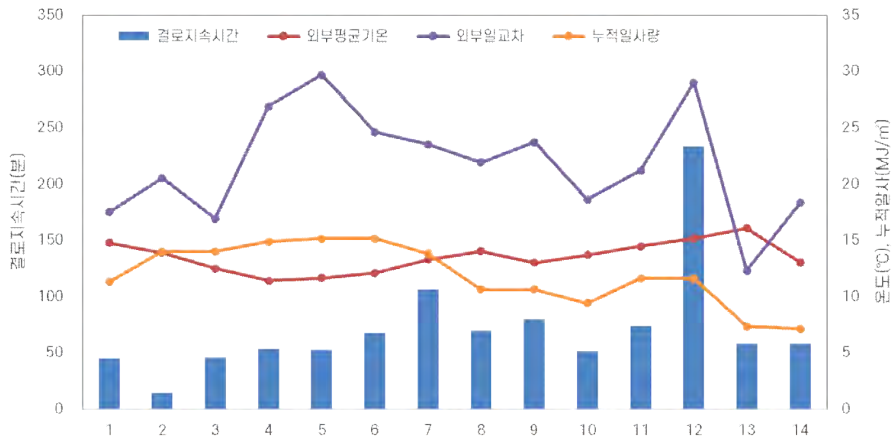


그림 10. 결로 발생과 외부환경 요소 비교

기온과 이슬점의 차이가 얼마나 작은지, 상대습도 95% 이상인 상황, 수분부족분이 0.5보다 작은 상황 등 작물의 결로발생 위험도를 추정해볼 수 있는 여러 지표가 있으나 모형과실을 이용해 추정한 과실온도와 이슬점의 차이만큼 결로상태를 잘 설명하는 지표가 없었다.

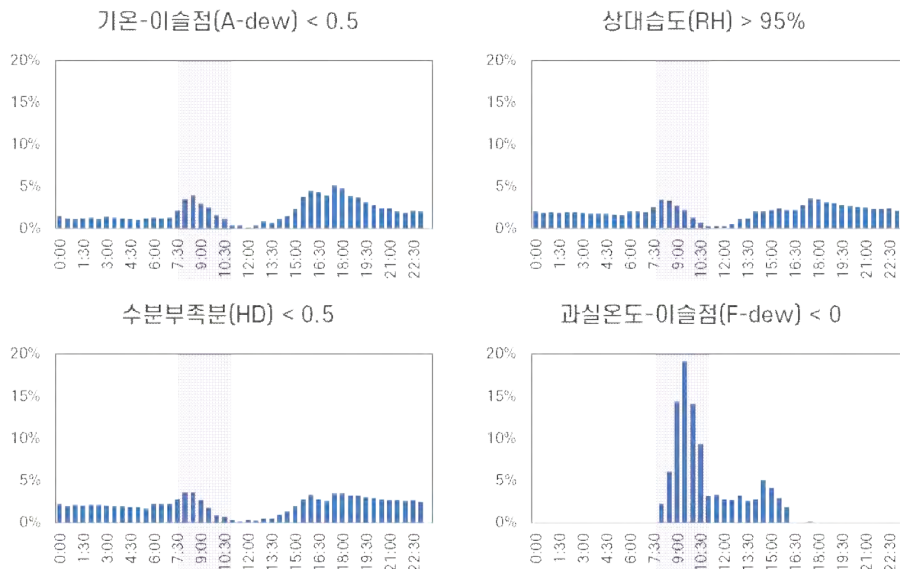


그림 11. 결로 발생과 내부환경 요소 비교

일출 후 약 1시간 30분부터 결로가 발생하기 시작해 전체 결로 지속시간의 약 75%가 3시간 이내에 집중되었다. 이는 결로 제어를 위한 환경조절의 핵심 시점이 일출 직후라는 점을 명확히 보여주는 자료로, 난방 및 환기 시점의 자동화 제어 기준 설정에 매우 유용하다.

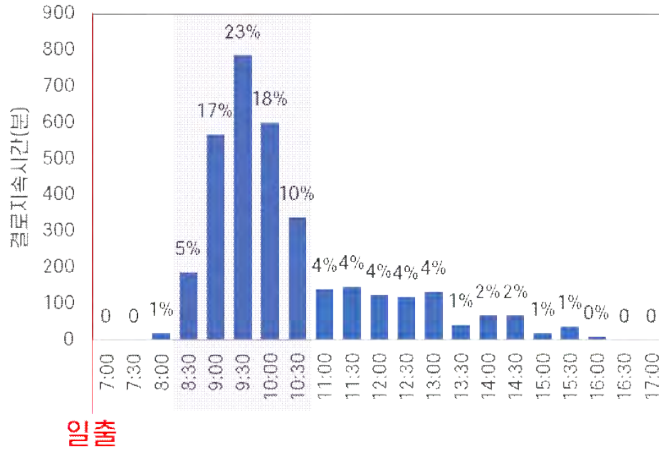


그림 12. 결로 발생시간 분포

조사기간 동안 온실 내 결로 발생 시각은 위치별로 다르게 나타났으며, 중앙 및 서편에서 더 긴 시간 동안 결로가 지속되었다. 동편은 일사 유입량이 많아 빠르게 온도가 상승하며 결로 발생이 상대적으로 짧았고, 이는 구조적 환경 차이에 따라 발생 시간도 달라짐을 보여준다. 위치별 맞춤 제어가 필요함을 시사한다. 중앙과 서편은 결로 지속시간이 유사했지만, 서편에서 과실온도와 이슬점 간 온도 차가 가장 커 결로 상태가 더 심각하였다. 이는 온풍기 덕트 방향, 유동현 위치 등 미세 환경 제어 요소가 결로 발생 양상에 큰 영향을 미침을 의미하며, 시스템 설치 시 내부 구조를 고려한 맞춤 설계가 요구된다.

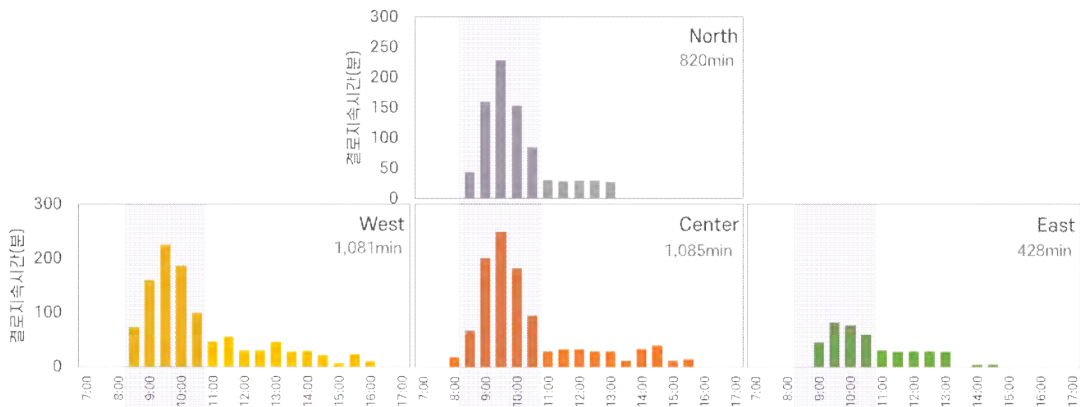


그림 13. 온실 내 위치별 결로 발생시간 분포

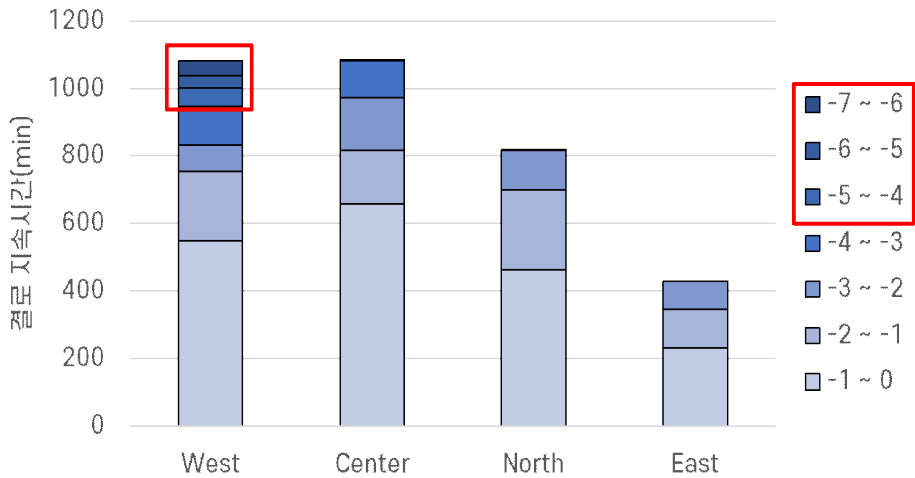


그림 14. 온실 위치별·시간별 경로상태 분포

(시험 3) 시스템 활용 매뉴얼 개발 및 고도화

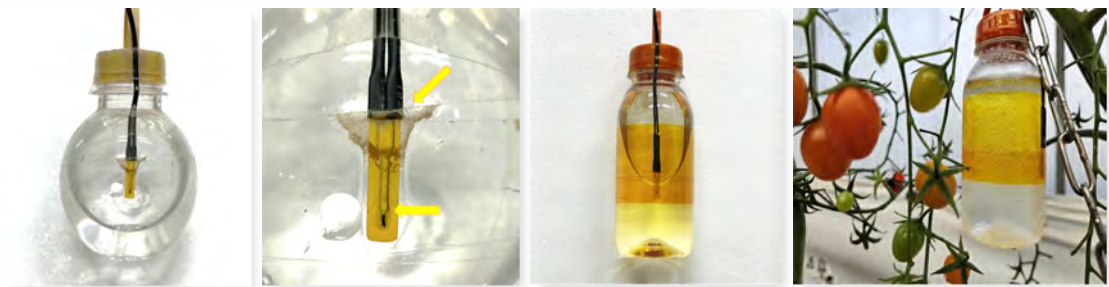
가. 실증농가 시스템 오류 발생사례 및 개선사항

실증농가 6곳 중 절반은 시스템에 만족하였으며, 그 이유로는 낮은 설치 비용, 원격지 환경제어의 편리함, 실시간 모니터링 기능 등이 꼽혔다. 그러나 나머지 농가는 시스템 불안정, 인터넷 연결 문제, 작물 피해 가능성 등으로 불만을 표시했다. 특히 축창 개폐 시 작물 말림 현상이나 시스템 오작동 등 현장 실사용과 관련된 문제점이 지적되었으며, 수리 및 부품 공급의 대응속도에 대한 개선 요구도 있었다. 사용자는 시스템의 직관성과 신뢰성을 중요하게 평가하고 있었으며, 이를 반영한 하드웨어 개선과 UI 보완, 매뉴얼 정비가 향후 시스템 확산의 핵심 요소임을 보여준다.

표 7. 실증농가 만족도 조사

농가	농가수	이유	요구사항	사례 평가
만족한 농가	3	저렴함, 축장제어 편리, 원격지 확인 가능	시스템 연결 기능 추가 환풍기 풍속 조절기능	설치된 센서노드 간 데이터 차이 있음 습구관리 어려움
불만족 농가	3	인터넷 환경 영향 큼, 시스템 불안정 축창 비닐 개폐시 작물 말림 등 현상 발생 우려	A/S 신속처리 제어 소모품 준비 제어판 묶음 작동 버튼 추가	부재 중 온실 관리를 모니터링 할 수 있어 유용하나, 수동조작 기능개선 필요

시스템 운용 중 주요 오류로는 모형과실 센서의 물리적 손상, 센서 부착면 오염, 부식, 케이블 연결 부로 유입된 결로수로 인한 커넥터 손상 등의 사례를 수집하였다. 특히 기존 구(球)형 모형과실 센서는 구조적으로 부착 불균형 및 외부 충격에 취약하였다. 센서의 부착강도가 높고 균일한 측정이 가능한 원통형으로 모형과실센서의 형태를 변경하였다. 적엽 등 작업과정에서 센서의 위치가 변경되어 정상 데이터가 수집되지 않는 경우가 많았다. 직사광선에 노출되지 않도록 위치를 조정하도록 설치 시 안내 및 사용자 교육이 필요하다. 또한 전원 및 통신케이블 연결부로 결로수 유입을 방지하도록 드립루프(Drip loop)를 형성하여 설치하도록 설치 매뉴얼을 보완하였다. 이러한 사례는 센서 내구성과 설치환경 개선이 시스템 신뢰성 확보에 필수적이다.



【 모형과실센서(구형) 】

【 센서 부식 손상 발생 】

【 모형과실센서(원통형) 】



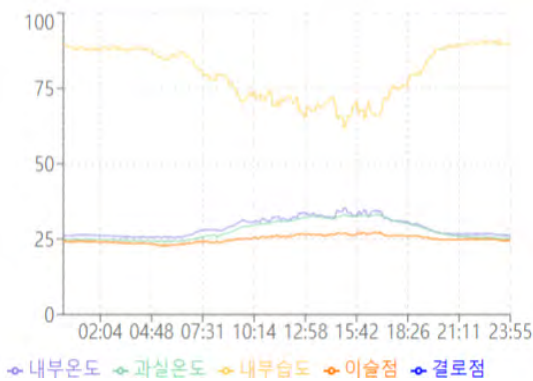
【 직사광선에 노출 】

【 결로 유입에 의한 UTP 케이블 부식 발생 】

【 Drip loop 형성 】

그림 15. 시스템 오류 사례

실증기간 동안 일부 센서노드에서 습구온도계의 심지가 마르거나 물이 부족한 상태로 장기간 운용되는 문제가 발생하였다. 이는 결로 감지 정확도 저하로 이어지며, 경보 시스템 오작동의 원인이 된다. 이를 해결하기 위해 앱 내 ‘심지 수위 임계값 설정’ 기능과 연계된 알람 설정을 활성화하고, 타워램프 알람을 통해 통신 불량이나 수위 부족 상태를 사용자에게 시각적으로 즉시 전달하도록 개선하였다. 더 불어 수위 센서의 유지관리 매뉴얼을 강화하고, 이상 데이터 발생 시의 대응 절차를 추가함으로써 시스템 유지관리의 안정성과 신뢰도를 높이는 기반을 마련하였다.



【 정상관리 센서노드 】



【 심지가 마른 센서노드 】



【 결로 모니터링 앱 알람설정 】

구분	결로 발생	주의	양호	고온	차광	통신 불량	물 부족
결로 상태	0이하	0~1	1~3	3~5	50이상	-	-
신호	점등	점등	점등	점등	점등	점멸	점멸
타워램프	적					적	
	황					황	황
	녹						
	청						청

【 결로 경보시스템 타워램프 알람설정 】

그림 16. 습구온도계 심지관리 및 물 보충 관련 매뉴얼 보완

모니터링 및 제어시스템은 센서노드, 게이트웨이, 서버, 사용자 앱 또는 PC 기반 관제화면으로 구성되어 있으며, 사용자 편의를 고려한 매뉴얼이 제작되었다. 모니터링 시스템 매뉴얼은 결로 상태 판단 기준, 센서 설치 및 유지관리 방법, 알람 설정 절차 등을 상세히 안내하고 있으며, 제어시스템 매뉴얼은 환기, 난방, 유동팬 등을 원격 제어하는 방법과 수동 전환 시 유의사항을 포함한다. 사용자 수준에 따라 초급자용 요약본과 고급기능 설명서를 병행 제공함으로써 시스템 적응도를 높이고, 실질적인 현장 활용이 가능하도록 구성되었다. 특히 직관적 화면 구성과 단계별 설정 가이드 제공이 실사용자의 만족도를 높이는 데 크게 기여할 것으로 판단된다.

사용 설명서

파모스 모바일

농장을 모니터링하고, 최적의 상태로 환경 조절



01 설치	07 명상
02 요약	08 일일
03 보고서	09 설정
04 제어	10 회원구성
05 자동	11 문의
06 사진	12 예외

01 설치, 로그인

이제 파모스 앱을 설치하여 시작합니다.

(1) 파모스 어플 설치
* 안드로이드: 구글 플레이 스토어에서 파모스 어플을 다운로드
* 아이폰: 애플 앱스토어에서 파모스 어플을 다운로드

① 구글 플레이스토어 이동 ② "파모스" 검색

② 농장 선택
파모스 1호(21) (영양사) | 농장 유형

③ 로그인
이름, 비밀번호 입력 후 로그인 버튼을 클릭합니다.

④ 농장 선택
농장이 여러 개일 경우 '농장이 파모스'를 클릭하여 원하는 농장을 선택합니다.

02 요약

농장의 중요 변수와 주요 제어 상태를 요약합니다.

(1) 기상정보
파모스 1호(21) | 일일 | 농장 유형

① 날씨 정보
현재 날씨와 기온, 습도, 풍속, 풍향, 강수량, 일출, 일몰, 월출, 월몰 정보를 제공합니다.

② 예외 정보
농장별 예외 설정을 관리할 수 있습니다.

② 온실외부
파모스 1호(21) | 온실외부

① 외부기상 환경정보
농장의 외부 기상 정보를 실시간으로 모니터링할 수 있습니다.

② 기상대 정보
기상청의 기상 정보를 실시간으로 모니터링할 수 있습니다.

(3) 내부구역

파모스 1호(21) | 내부구역

① 농장 환경관리 상태
온도, 습도, 환기, 조명, 가스 등 농장 환경 상태를 실시간으로 모니터링할 수 있습니다.

② 내부기상 환경정보
농장 내부의 온도, 습도, 환기, 조명, 가스 등 환경을 실시간으로 모니터링할 수 있습니다.

③ 농업기상 분석정보
농업기상 데이터를 분석하여 농장 환경에 대한 정보를 제공합니다.

④ 제어 상태
농장 내부의 제어 상태를 실시간으로 모니터링할 수 있습니다.

⑤ 데이터 조회, 선택

농장 데이터 조회 및 선택을 지원합니다.

⑤ 데이터 조회, 날짜 조회
농장 데이터를 날짜별로 조회할 수 있습니다.

03 보고서

농장에 대한 다양한 데이터를 기반으로 한 보고서를 생성합니다.

(1) 농장 설정
파모스 1호(21) | 일일 | 농장 유형

① 구역 정보
농장의 구역 정보를 관리할 수 있습니다.

② 제어 정보
농장의 제어 상태를 실시간으로 모니터링할 수 있습니다.

③ 관수 정보
농장의 관수 상태를 실시간으로 모니터링할 수 있습니다.

(2) 분석 지표 설정

파모스 1호(21) | 회원구성 | 보고서 | 분석 지표

① 지출 분석 기준
농장의 지출 데이터를 분석할 수 있습니다.

② 환경분석 지표
농장의 환경 데이터를 분석할 수 있습니다.

③ 센서 설정
농장의 센서 데이터를 설정할 수 있습니다.

(4) 일간 보고서

파모스 1호(21) | 보고서 | 일간

① 지출부 분석
농장의 지출 데이터를 분석할 수 있습니다.

② 지해부 분석
농장의 지해 데이터를 분석할 수 있습니다.

③ 온실환경 분석
농장의 온실환경 데이터를 분석할 수 있습니다.

④ 생육사진
농장의 생육 사진을 관리할 수 있습니다.

(5) 월간 보고서

파모스 1호(21) | 보고서 | 월간

① 온도 분석
농장의 온도 데이터를 분석할 수 있습니다.

② 습도 분석
농장의 습도 데이터를 분석할 수 있습니다.

③ 지출/지급 분석
농장의 지출/지급 데이터를 분석할 수 있습니다.

④ 관수 분석
농장의 관수 데이터를 분석할 수 있습니다.

그림 19. 제어시스템 사용자 매뉴얼

다. 농업기술동영상 제작

결로 모니터링 시스템의 현장 활용사례와 기술개요를 담은 맞춤형 농업기술 동영상이 제작되었으며, 실제 생육상황 및 시스템 시연 영상, 사용자 인터뷰가 포함되어 있다. 이 영상은 농가 교육자료 및 기술보급 콘텐츠로 활용될 수 있도록 구성되었으며, 시스템의 원리, 설치방법, 활용효과 등을 시각적으로 이해하기 쉽게 전달함으로써 농업인의 접근성을 높인다. 온라인 시사회 및 유튜브를 통한 공개를 통해 비대면 교육과 홍보 효과도 기대할 수 있다.



그림 20. 맞춤형 농업기술 동영상 제작('24. 4.~11., 애니스마트)

4 적 요

〈 제2세부과제 : 시제품 현장실증 및 고도화 〉

(시험 1) 과실 결로발생에 따른 생육특성 및 과실품질변화 조사

- 가. 난방·환기 제어를 적용한 처리구는 총 결로시간이 147.6시간으로, 결로처리구의 369.8시간보다 60% 이상 감소하였다.
- 나. 결로 지속에 따른 토마토 생육 지표는 단기간 차이가 없었으나, 장기적으로는 생육 저해와 병 발생 가능성이 높았다.
- 다. 결로처리구에서 미세열과 발생률은 45.7%로, 제어구의 22.7%에 비해 두 배 이상 높게 나타났다.
- 라. 미세열과 등급은 결로처리구에서 평균 1.5등급으로 나타났고, 제어구는 3.0등급으로 품질 차이가 컸다.
- 마. 결로 상태는 그물무늬, 갈라짐, 코르크화 등으로 구분되며, 등급별 품질 기준을 체계적으로 정리하였다.
- 바. 시스템 도입 시 고품질 과실 비율이 높아져 10a당 연간 약 189만 원의 순이익 증가 효과가 있었다.
- 사. 결로 방지를 위한 환경 제어는 작물 품질 향상뿐 아니라 농가의 실질적인 경제성 확보에도 기여하였다.

(시험 2) 실증농가 데이터 수집 및 분석

- 가. 온실 구조 및 환경설비에 따라 결로 지속시간과 상태에 농가 간 차이가 크게 나타났다.
- 나. 온실 내 위치별 결로시간은 중앙과 서편이 길고, 동편은 짧았으며 이는 일사량과 구조적 요인에 따른 결과였다.
- 다. 전체 결로의 약 64%는 일출 후 4시간 이내에 발생해, 해당 시간대 환경관리의 중요성이 입증되었다.
- 라. 과실온도가 이슬점보다 낮아질 경우 결로가 발생하며, 이 구간의 실시간 제어가 핵심 관리 요소이다.
- 마. 서편은 결로시간은 중앙과 비슷했지만 상태가 더 심각하여 위치별 맞춤 제어가 필요함을 보여주었다.
- 바. 외부기상요인과 결로 발생 간 상관관계는 낮았으며, 내부 미세환경 요소가 결로 제어에 더 중요하였다.
- 사. 농가별 시스템 활용도는 사용자 기술 수준에 따라 크게 달랐으며, 교육과 기술지원의 병행이 필요하다.
- 아. 통합관제시스템을 통한 실시간 데이터 연계로 결로 감지와 조기 대응이 가능해졌음을 확인하였다.

(시험 3) 시스템 활용 매뉴얼 개발 및 고도화

- 가. 농가 만족도는 절반 이상이 긍정적이었으며, 주요 이유는 설치비 저렴함과 원격 제어의 편리성이었다.
- 나. 시스템 오류는 주로 센서 파손, 결로수 유입, 부착불량 등 설치환경과 유지관리 미흡에서 발생하였다.
- 다. 기존 구형 센서는 외부 충격에 약해 원통형으로 개선하고, 케이블 드립루프 설치로 결로수 유입을 방지하였다.
- 라. 습구 심지 건조로 경보 오작동 문제가 발생해 수위 알람 설정 기능과 타워램프 알림 기능을 도입하였다.
- 마. 사용자 매뉴얼은 초급자용 요약본과 고급 기능 설명서를 병행 구성해 실용성과 교육 효과를 높였다.
- 바. 시스템 설치 및 사용 교육, 유지보수 매뉴얼이 강화되어 실증농가의 시스템 활용도 향상에 기여하였다.
- 사. 농업기술 동영상 제작을 통해 결로 제어 기술을 시각적으로 홍보하고 비대면 교육 콘텐츠로 활용 가능하다.

5 인용문헌

- 이문행, 조숙경, 김영식, 이동진. 2017. 토마토 잎마름역병 발생 예측 및 방제 시기 연구. 한국국제 농업개발학회지 29.4 : 454-458.
- Eva Domínguez, María Dolores Fernández, Juan Carlos López Hernández, Jerónimo Pérez Parra, Laura España, Antonio Heredia, Jesús Cuartero. 2012. Tomato fruit continues growing while ripening, affecting cuticle properties and cracking." *Physiologia Plantarum* 146.4: 473-486.
- David L. Ehret, Bernard D. Hill, David A. Raworth, Brad Estergaard. 2008. Artificial neural network modelling to predict cuticle cracking in greenhouse peppers and tomatoes. *Computers and Electronics in Agriculture* 61.2 : 108-116.
- Light, A. 2010. IV. CLIMATIC FACTORS RELATED TO THE DEVELOPMENT OF CUTICLE CRACKING. *Horticultural Reviews*, Volume 30 : 171.
- Paul Skolik, Camilo L. M. Morais, Francis L. Martin & Martin R. McAinsh 2019. Determination of developmental and ripening stages of whole tomato fruit using portable infrared spectroscopy and Chemometrics. *BMC plant biology* 19 : 1-15.
- Wei, Y. Q., B. J. Bailey, and B. C. Stenning. 1995. A wetness sensor for detecting condensation on tomato plants in greenhouses. *Journal of agricultural engineering research* 61.3 : 197-204.

6 연구결과 활용

연도(연차)	활용구분	제 목
2022(1년)	기술이전	"결로현상을 방지할 수 있는 스마트팜시스템" 유상기술이전 2건
	홍보	결로현상을 방지할 수 있는 스마트팜 시스템 기술이전
2023(2년)	특허등록	결로현상을 방지할 수 있는 스마트팜 시스템
	사업화	'24 농촌진흥청 신기술 보급사업 선정(4지역, 20개소)
2024(3년)	학술발표	시설 토마토 결로 모니터링 시스템 개발과 현장 활용
	영농활용	시설과채류 결로 모니터링 및 경보시스템 현장활용
	기술이전	"결로현상을 방지할 수 있는 스마트팜시스템" 유상기술이전 3건

성과지표		연도	1년차 (2022)		2년차 (2023)		3년차 (2024)		계	
			목표	실적	목표	실적	목표	실적	목표	실적
논문 게재	SCI									
	비SCI									
특허	출원									
	등록			1	1			1	1	
학술 발표	국제									
	국내	1					1	1	1	
품종	출원									
	등록									
영농 활용	기술									
	정보			1			1	1	1	
기술이전		1	2			1	3	2	5	
사업화				1	1			1	1	
농자재 등록										
홍보		3	6	3	0			6	6	
현장컨설팅										
계		6	8	8	2	4	5	12	15	

7 연구원 편성

구분	소속	직급	성명	수행업무	참여년도		
					'22	'23	'24
과제책임자	강원도원	농업연구관	이원경	과제 총괄	○	○	○
세부책임자	강원도원	농업연구사	이원경	시험수행 및 평가	○	○	○
공동연구자	강원도원	농업연구사	서현택	현장조사 지원	○	○	-
	강원도원	농업연구사	김경원	현장조사 지원	○	○	-
	강원도원	공업주사보	유정영	품질조사 지원	○	○	-
	강원도원	농업연구관	박영식	평가분석 지원	○	○	-
	강원도원	농업연구사	박소현	현장조사 지원	-	-	○
	강원도원	농업연구사	최주영	품질조사 지원	-	-	○
	강원도원	농업연구사	김경대	평가분석 지원	-	-	○