

(옆면)

(앞면)

421039-03

계절 간
자연냉기
저장이용
기반
차세대
신재생
스마트온실
냉방 기술

최
종
보
고
서

2024

스마트팜연구개발사업단
농림식품기술기획평가원
농촌진흥청
농림축산식품부
과학기술정보통신부
농림축산식품부

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()발간등록번호(O)
스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업 2024년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-004732-01

계절 간 자연냉기 저장 이용기반 차세대 신재생 스마트 온실 냉방 기술

2024.5.28

주관연구기관 / 한국에너지기술연구원
공동연구기관 / 한국과학기술연구원,
숙명여대산학협력단,
(주)바토너스,에임트(주),
AFP센터(주)

농림축산식품부
과학기술정보통신부
농촌진흥청
(전문기관)농림식품기술기획평가원
스마트팜연구개발사업단

제출문

제 출 문

농림축산식품부 장관 · 과학기술정보통신부 장관 · 농촌진흥청장 귀하

본 보고서를 “계절 간 자연냉기 저장·이용기반 차세대 신재생 스마트 온실 냉방 기술”(개발기간 : 2021.4.7. ~ 2023.12.31.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2024.5.28

주관연구기관명 : 한국에너지기술연구원 이 창 근(직인)

공동연구기관명 : 한국과학기술연구원 오 상 록(직인)

공동연구기관명 : 숙명여자대학교산학협력단 오 중 산(직인)

공동연구기관명 : (주)바토너스 이 지 수(직인)

공동연구기관명 : AFP스마트팜R&BD센터(주) 정 봉 진(직인)

공동연구기관명 : 에임트(주) 갈 승 훈(직인)

주관연구책임자 : 윤영직

공동연구책임자 : 이주영, 정영수, 이지수, 유치영, 류재룡

「국가연구개발혁신법」 제17조에 따라 보고서 열람에 동의 합니다.

뒷면지

주 의


1. 이 보고서는 농림축산식품부·과학기술정보통신부·농촌진흥청에서 시행한 “스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업”의 “과제명” 연구개발과제 최종보고서입니다.
2. 이 연구개발 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부·과학기술정보통신부·농촌진흥청((재)스마트팜연구개발사업단)에서 시행한 “스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업”의 “계절 간 자연냉기 저장·이용기반 차세대 신재생 스마트 온실 냉방 기술” 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.

최종보고서							보안등급			
							일반[✓], 보안[]			
중앙행정기관명		농림축산식품부 과학기술정보통신부 농촌진흥청		사업명		사업명		스마트팜 다부처 패키지 혁신기술 개발사업		
전문기관명 (해당 시 작성)		농림식품기술기획평가원 (재)스마트팜연구개발사업단				내역사업명 (해당 시 작성)		차세대융합/원천기술 연구사업		
공고번호		제농축 2021-45호		총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)						
				연구개발과제번호		421039-03				
기술분류	국가과학기술 표준분류		LB0505	40%	LB0805	30%	LB0203	30%		
	농림식품과학기술분류		RA0406	40%	RC0102	30%	AA0203	30%		
총괄연구개발명 (해당 시 기재)		국문	계절 간 자연냉기 저장-이용 기반 차세대 신재생 스마트 온실 냉방 기술							
		영문	Next-generation renewable cooling technology for smart farm using seasonal natural cooling storage and utilization							
연구개발과제명		국문	계절 간 자연냉기 저장-이용 기반 차세대 신재생 스마트 온실 냉방 기술							
		영문	Next-generation renewable cooling technology for smart farm using seasonal natural cooling storage and utilization							
주관연구개발기관		기관명	한국에너지기술연구원		사업자등록번호		314-82-02242			
		주소	(34129) 대전광역시 유성구 가청로 152		법인등록번호		160122-000982			
연구책임자		성명	윤영직		직위		책임연구원			
		연락처	직장전화		휴대전화		157-5555-1155			
			전자우편		국가연구자번호		1157 6573			
연구개발기간		전체		2021. 04. 07 - 2023. 12. 31(2년 9개월)						
		1단계		2021. 04. 07 - 2022. 12. 31(1년 9개월)						
		2단계		2023. 01. 01 - 2023. 12. 31(1년 0개월)						
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원	기관부담		그 외 기관 등의 지원금				연구개발비 외	
		연구개발비	연구개발비	지방자치단체		기타()		합계		연구개발비 외
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계	지원금
총계		3,500,000	20,004	280,056					3,520,060	3,800,060
1단계	1년차	1,000,000	0	100,020					1,000,020	1,100,020
	2년차	1,250,000	10,002	90,018					1,260,018	1,350,020
2단계	1년차	1,250,000	10,002	90,018					1,260,018	1,350,020
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명	책임자		직위	휴대전화	전자우편	비고		
								역할	기관유형	
공동연구개발기관		숙명여자대학교산학협력단	정영수		부교수			공동	대학	
공동연구개발기관		한국과학기술연구원	이주영		책임연구원			공동	정부출연	
공동연구개발기관		㈜바토너스	이지수		대표			공동	중소기업	
공동연구개발기관		AFP스마트팜R&BD센터	유치영		전무			공동	중소기업	

공동연구개발기관	AIMT㈜	유제룡	과장	●●●●●●	공동	중소 기업
연구개발과제 실무담당자	성명		운영직	직위	책임연구원	
	연락처	직장전화	●●●●●●	휴대전화	●●●●●●	
		전자우편	●●●●●●	국가연구자번호	1157 6573	


이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 연구개발과제 중단, 협약 해약, 제재처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2024 년 2 월 29 일


연구책임자: 한국에너지기술연구원 윤 영 직 (인) 

주관연구개발기관의 장: 한국에너지기술연구원 이 창 근 (직인) 

공동연구개발기관의 장: 한국과학기술연구원 윤 석 진 (인) 

공동연구개발기관의 장: 숙명여자대학교산학협력단 오 중 인 (직인) 

공동연구개발기관의 장: ㈜바토너스 이 지 수 (직인) 


공동연구개발기관의 장: AFP스마트팜R&BD센터(주) 정 봉 진 (직인) 

공동연구개발기관의 장: 에임트(주) 갈 승 훈 (직인) 

농림축산식품부장관 과학기술정보통신부장관 농촌진흥청장 농림식품기술기획평가원장 귀하

< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명	스마트팜 다부처패키지 혁신기술개발 사업			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)			
내역사업명 (해당 시 작성)	차세대 융합/원천기술 연구사업			연구개발과제번호		421039-03	
기술 분류	국가과학기술 표준분류	LB0505	40%	LB0805	30%	LB0203	30%
	농림식품 과학기술분류	RA0406	40%	RC0102	30%	AA0203	30%
총괄연구개발명 (해당 시 작성)	계절 간 자연냉기 저장·이용 기반 차세대 신재생 스마트 온실 냉방 기술						
연구개발과제명	계절 간 자연냉기 저장·이용 기반 차세대 신재생 스마트 온실 냉방 기술						
전체 연구기간	2021. 04. 07 - 2023. 12. 31(2년 9개월)						
해당 단계	2021. 04. 07 - 2022. 12. 31(1년 9개월)						
총 연구개발비	총 3,800,060천원 (정부지원연구개발비: 3,500,000천원, 기관부담연구개발비: 300,060천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)						
해당 단계	총 2,450,040천원 (정부지원연구개발비: 2,250,000천원, 기관부담연구개발비: 200,040천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)						
연구개발단계	기초[] 응용[✓] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]			기술성숙도 (해당 시 작성)		착수시점 기준(3) 종료시점 목표(7)	
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)							
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)							
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	<p style="text-align: center;">기후변화 대응을 위한 냉방 중심 차세대 스마트팜 공조 핵심 기술 개발 및 실증기반 사업화 모델 확립</p> <div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px auto; width: fit-content;"> <p>최종 목표</p> <p>기후변화로 인한 냉방 관리를 통해 농가소득 증대가 가능하도록 ① 친환경 냉열 생산·공급과 ② 지능형 온실 에너지·생육 관리가 가능한 차세대 스마트 온실 냉방 사업화 모델 실증</p> </div> 					

연구개발 목표 및 내용	전체 내용		<p>각 기관별 연구 개발 세부 내용 및 협력체계를 아래의 체계도와 같이 구축하여 전체 연구내용을 진행하며 본 과제에서 핵심으로 개발하고자 하는 기술은 아래와 같은 4가지임</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 나노물질 이용 표면코팅 기술 적용 Anti-icing 및 진공단열재 기반 고성능 냉기 저장·이용 기술 개발 ○ 복사냉각(Solar Cooling) 및 광소결 이용 OHP(Oscillating Heat Pipe) 성능 고도화 통한 자연냉각기반 냉열생산 향상 기술 개발 ○ 인공지능 및 기계학습 기반 온실 냉방 에너지 공급 및 관리기술 개발 ○ 자연냉각기반 냉방 기술 실증 및 사업화 모델 개발
	1단계 []	목표	에너지자립형 차세대 신재생 스마트팜 냉방 핵심 요소기술 개발 및 검증
		내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 자연냉각(Free Cooling) 생산·저장기술 개발: 무동력 진동형 히트파이프(OHP)이용, 나노 표면처리 기법을 적용한 고성능 자연냉기수확(Harvesting) 기술 ○ 재생에너지 냉각(Solar Cooling) 기술 개발: 태양 복사에너지 이용 냉방기술을 이용한 자연냉각 냉열생산 고도화 기술 ○ 하이브리드 냉방·제습 기술: 축냉열 이용 제습·냉방 복합 제어기술 ○ 냉방·탄산시비(CO2) 복합 제어 및 적정공급 기술: 온실 네트워크 기반 냉방(냉수) 및 탄산시비용 CO2 동시공급 및 제어기술 ○ 초고효율 단열기술: 계절간 냉기저장·이용을 위한 진공단열 기반 장기 열저장 기술 ○ 인공지능, 빅데이터 기반 스마트 온실 냉방 지능형 관리·이용 기술: 인공지능/ 기계학습 알고리즘을 활용한 냉방 중심 작물 생육 최적제어·관리 기술
	2단계 []	목표	에너지자립형 차세대 신재생 스마트팜 냉방기술 실증 및 사업화 모델 수립
내용		<ul style="list-style-type: none"> ○ 핵심요소기술 상용화 추진을 위해 온실 실증을 통한 사업화 타당성 검증 	

연구개발 목표 및 내용	2단계[]	내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 신재생 스마트 온실 냉방 솔루션 검증을 위한 50평 규모 테스트 온실 구축 ○ 작물 실 재배조건에서의 핵심요소기술 적용 타당성 검증 및 고도화 기술개발
-----------------	--------	----	---

연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 계절 간 자연냉기 저장·이용 차세대 신재생 스마트 온실 냉방 및 CO2 공급 시스템 통합 플랫폼 개발 ○ 냉방·제습 환경 정밀제어 통한 반밀폐형 스마트팜 공조 사업화 모델 개발 ○ OHP기반 고성능 자연냉열생산 열교환 장치 개발 ○ 마이크로/나노구조 기반 다기능(열전달, 항균 등) 소재 및 코팅기술 개발 ○ 태양복사에너지이용 자연냉열생산 소재 또는 장치 개발 ○ 진공단열재(VIP)기반의 고효율 축냉조 장치 개발 ○ 자연냉열이용 냉방기술 적용 재배 시스템의 자동관수 장치 또는 시스템 개발 ○ 냉방환경에서의 친환경 양액 재사용 장치 또는 시스템 개발 ○ 온실의 재배환경 데이터 저장 및 분석 플랫폼 개발 ○ 온실 냉방 네트워크 운용 비용 최적화 알고리즘 또는 소프트웨어 개발 ○ 자연냉열이용 시기반 냉방공급 및 온실 수요예측 소프트웨어 개발
연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 농가소득 증대를 위한 혁신형 스마트팜 냉방 보급모델 (농가단위 보급) <ul style="list-style-type: none"> - 작기 연장 (>1개월)을 통한 생산성 증대와 제품(작물) 희소성에 따른 높은 판매가격 구조에 따른 농가소득의 획기적 개선 - 냉열을 이용한 적정 제습제어를 통해 동·춘·추절기 작물품질 개선을 통한 농가 소득 향상 ○ 기후변화(온난화) 대응형 차세대 스마트팜 신사업 모델 확립 및 신시장 창출 <ul style="list-style-type: none"> - 지구 온난화에 따라 급변하는 온실 생육환경 변동에 대응, 스마트팜의 생산성 저하 문제해결을 위한 획기적인 냉방기반 생산성 증대 모델 (적정 생육환경 유지 및 작기연장) 구축 및 보급화 추진 ○ 스마트팜 혁신밸리 사업 연계를 통한 실증기반 수출형 모델 확립 <ul style="list-style-type: none"> - 원천기술 개발 및 단순 실증연구에 그치지 않고 사업종료 후 국내(내수) 시장 뿐 아니라 해외수출이 가능한 수출형 사업화 모델 개발 추진 - 당 연구를 통한 실증 검증 후, 스마트팜 혁신밸리 사업과 연계한 대규모 시범 사업화 추진으로 상용화 수준의 사업모델 확립 (기술이전 대상기업과 협력) ○ 평창 캠퍼스 혁신파크 사업 참여를 통한 스마트팜 융복합단지 구현 <ul style="list-style-type: none"> - 평창캠퍼스 혁신파크 내 본 과제 연계형 스마트팜 적용을 통한 첨단스마트팜 융복합단지 구현 계획 ○ 베트남 온실 사업 추진 계획 (고온다습형 수출형 모델) <ul style="list-style-type: none"> - 현재 해외농업자원개발사업으로서 베트남 달랏 지역 스마트팜 모델 분석 중임. - 대상 지역은 고도 1400m로서 연평균기온이 18.8도로 시원한 편이나 여름에는 평균 20도를 상회하여서 딸기 등을 재배하기에는 어려움이 있음. - 즉, 딸기의 경우 저온성 생물로 약간 냉랭하고 온화한 기후조건을 좋아하는 작물이고, 온도가 25℃를 넘으면 생육이 떨어지고 30℃ 이상의 고온에서는 생육이 정지되며 35~40℃이상으로 올라가게 되면 고온장해를 받게 되므로 고온 환경에서 냉방을 적절히 할 필요가 있음.

<p>연구개발성과 활용계획 및 기대 효과</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 따라서 본 과제인 계절간 자연냉기 저장·이용 기반 차세대 신재생 스마트 온실 냉방기술은 베트남의 고도 지역에 위치한 온실 산업 시장의 니즈를 충분히 만족시켜줄 것으로 기대됨. ○ 신남방 무상원조사업 (ODA) 사업을 위한 실증기반 수출형 모델 확립 <ul style="list-style-type: none"> - 본 사업 종료이후 신남방 무상원조(ODA)사업을 위한 인도네시아형 스마트팜 실증팜에 적용하기 위한 계획 추진 - 공동협동기관 (KIST)가 현재 추진 중에 있는 무상원조 ODA 사업-인도네시아형 스마트팜 사업에 본 기술 완료 후 현지 적용을 위한 계획을 수립, 시행 추진 ○ 스마트 온실냉방 에너지·생육 복합환경 빅데이터 연계 활용을 통한 기술보급 확산 추진 <ul style="list-style-type: none"> - 스마트팜 다부처사업 과제별 빅데이터 플랫폼 구축 사전조사 단계에서부터 협업 중 - 당 기술개발을 통해 구축예정인 스마트 온실냉방 에너지·생육 복합환경 모니터링 빅데이터를 농식품부에서 구축 중인 플랫폼과 연계 활용이 가능하도록 개방형 플랫폼화 추진 				
<p>국문핵심어 (5개 이내)</p>	<p>자연냉각</p>	<p>열교환</p>	<p>물수확</p>	<p>인공지능</p>	<p>온실</p>
<p>영문핵심어 (5개 이내)</p>	<p>Free cooling</p>	<p>Heat exchange</p>	<p>Water harvesting</p>	<p>AI</p>	<p>Green house</p>

210mm×297mm[(백상지(80g/m²) 또는 종질지(80g/m²)

(30쪽 중 5쪽)

1. 연구개발과제의 개요

1-1 연구의 필요성



[그림] '계절 간 자연냉기 저장·이용 기반 차세대 신재생 스마트 온실 냉방' 기술개발 중요성

○ 최근 급격한 기후변화의 영향에 따른 화석연료 사용 중심에서 지속 가능한 신재생에너지 중심의 에너지공급 시스템 전환이 필요

- 국내에서도 재생에너지 보급 3020 정책, 탈원전·탈화석 에너지전환 정책의 수립 및 실행에 따라 전력수급 안정화 측면의 큰 변동성이 예상되며, 이로 인한 한전의 영업적자 규모의 증가에 따라 전력요금 체계 전반에 걸친 인상요인이 발생
- 특히 가장 낮은 전력요금 체계의 적용을 받아 오던 농업용 전력요금에 대한 인상까지 고려되는 등, 그동안 경험해보지 못한 급격한 에너지 가격체계에 대한 변화의 조짐이 대두되고 있음
- 전 세계적인 친환경 지속가능한 에너지원로의 체제 전환에 발 맞추어 국내 신재생에너지 보급률 20%(2030년까지) 달성을 위한 로드맵에 따라 성과목표를 달성하기 위한 다양한 실행 방안 마련이 필요
- 특히 재생에너지원 설비의 구축을 위한 막대한 규모의 부지확보는 대규모 에너지 수요가 발생하고 있는 도심에서는 매우 요원하며, 따라서 상대적으로 부지확보 및 활용성이 용이한 농산어촌 부문과의 융합을 통한 새로운 활로 모색이 필요한 시점임

○ 기후변화로 인한 급격한 온난화로 인해 기존 난방 중심의 스마트팜 열 부하 운영 중심에서 냉방부하 운영 중심으로 스마트 온실 수요가 급격히 변동 될 것으로 전망됨에 따라 적정 냉방솔루션 개발이 시급

- 기후변화로 인해 향후 몇십년 내에 국내 농업의 주력 작물이 열대형 작물로 완전히 대체될 것으로 예측되고 있음
- 이러한 기후변화의 영향에 따른 국내 농업 작물 생산환경의 급격한 변화, 특히 노지 재배에 대한 피해를 완화시키고자 온실(시설원예)로의 전환이 지속적으로 이루어지고 있으나, 이 또한 온난화에 따른 적정 온열환경 유지에 필요한 에너지 비용 증대로 인해 장기적 관점에서의 해결책 마련이 시급한 실정
- 난방 공급 대비 에너지비용이 훨씬 크게 소요되는 냉방부하에 소요되는 에너지비용을 최소화할 수 있는 신재생에너지원을 활용한 냉방 원천기술 개발을 통해 미래 차세대 스마트 냉방 온실 상용화를 위한 기반 확립이 필요
- 전력소모가 많은 에어컨 전기 냉방에만 전적으로 의존하기 보다는 공기 순환이나 자연 냉각(Free Cooling)의 원리를 적절히 조합해, 전력소모는 낮추면서 고성능의 냉방

을 가능하게 하는 새로운 개념의 냉방기술 개발이 필요

○ 4계절 작물 재배를 통한 농가수익 극대화 방안 마련 필요성

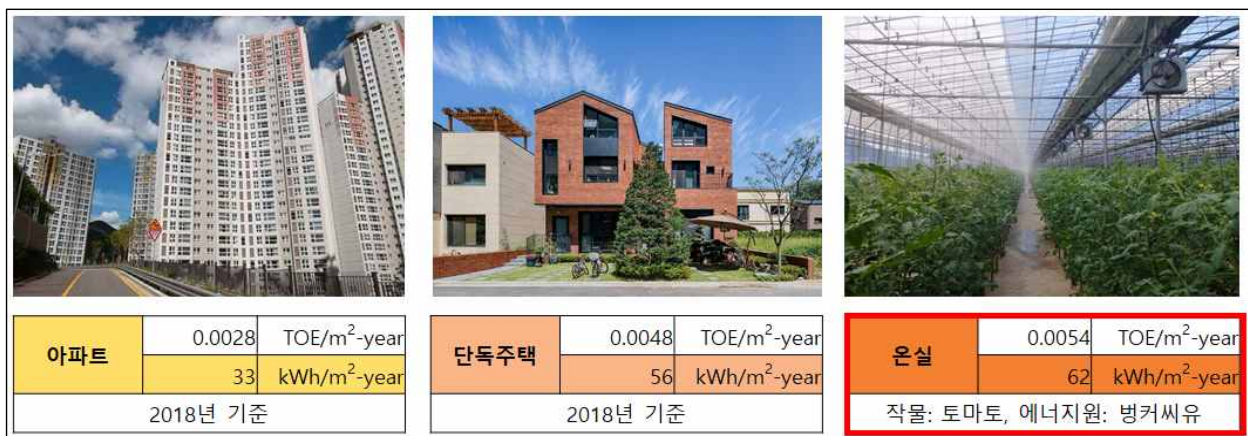
- 하절기 고온다습한 온실 내 온·습도 열 환경 극복을 통해 연중 작물 생산을 위한 하절기 냉방부하 대응이 가능한 신개념 냉방 솔루션 개발 필요성 상존
- 기존 전력 구동 냉방(히트펌프) 방식의 기술적 한계 극복을 위한 신기술 기반 혁신적 냉방 솔루션 개발을 통해 농가 수익 극대화 방안 마련의 필요성 상존

○ 친환경 스마트 온실 냉방 기술개발을 통한 수출형 K-스마트팜 모델 개발을 통한 성장 동력화 추진 필요성 대두

- 하절기 고온다습한 온실 내 온·습도 열 환경 극복을 통해 연중 작물 생산을 위한 하절기 냉방부하 대응이 가능한 신개념 냉방 솔루션 개발 필요성 상존
- 기후변화로 인한 온실가스 배출 규제 등으로 전 세계적으로 친환경 재생에너지 중심의 신재생 스마트 온실 에너지공급 기술의 수요가 급증할 것으로 전망되며, 따라서 폭발적으로 급증할 것으로 예상되는 글로벌 친환경 스마트팜 냉방 시장을 선점할 수 있는 차세대 스마트팜 냉방 원천기술 개발 필요
- 국내 시장에 국한하지 않고, 동남아 등 고온다습형 지역, 사막형 기후 등 해외 시장을 타겟으로 한 스마트팜 신시장 지향형 수익 창출을 위한 냉방 솔루션 개발 필요성 대두
- 4차 산업혁명 기초에 부합할 수 있는 IoT 기술 융합형 스마트팜 모델 확립 및 실증 기반 기술검증을 통해 기술 융합형 K-스마트팜 대표 비즈니스 모델 구축 (고온다습지역 수출형 모델, 사막지역 수출형 모델 등) 추진 필요
- 자연냉방 기술 등 친환경 재생에너지 기반의 스마트 냉방 솔루션 개발을 통해 단순 국내 스마트팜 수요에 국한하지 않고 글로벌 스마트팜 시장 공략이 가능한 혁신적인 스마트팜 냉방 솔루션 개발 추진 및 신성장 동력화 추진 필요

1-2 국내 평균 온실 연간 에너지 소비량

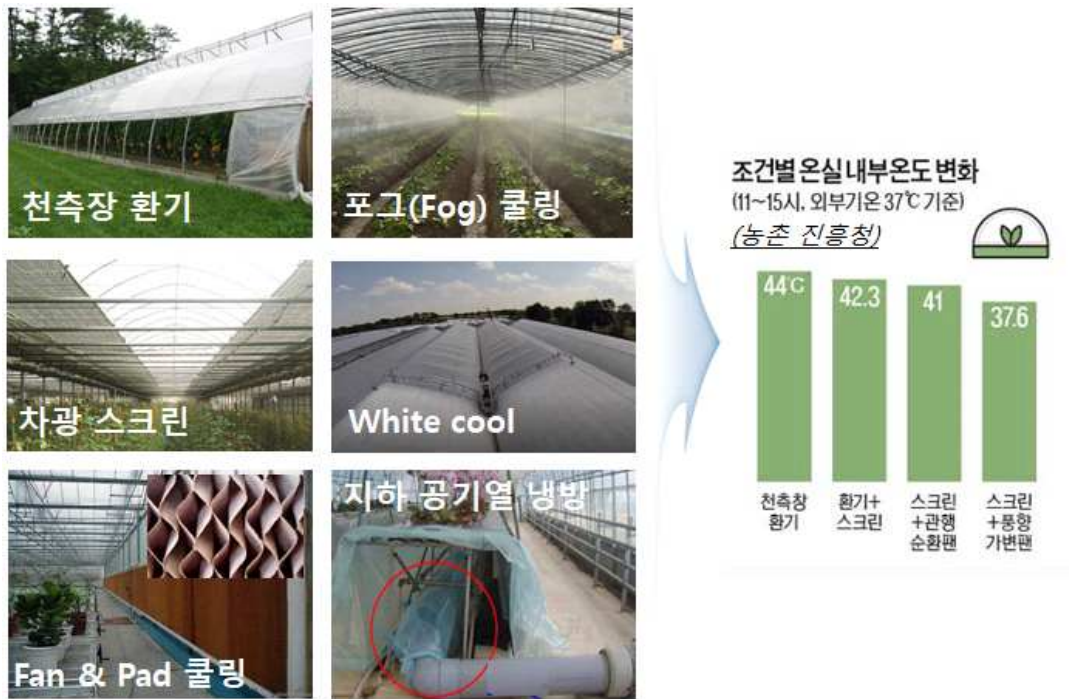
- 단위면적(m²)당 비닐온실의 연간 난방에너지부하는 아파트 부하의 약 2배 정도(재배 작물에 따라 다름)
- 일반적으로 온실 냉방부하는 난방부하의 약 3배 정도로 많은 냉방에너지를 필요로 하기 때문에 경제성이 없기 때문에 국내 대부분의 농가에서는 하절기에는 대부분 재배를 하지 않는 실정



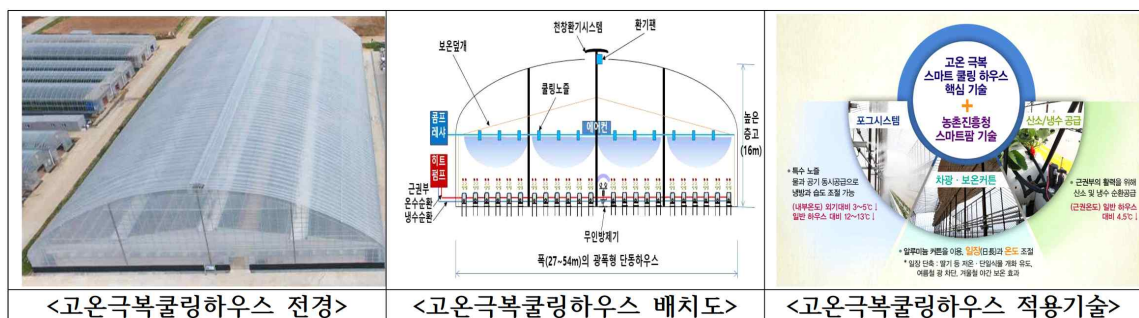
[그림] 수요건물별 국내 평균 온실 연간 에너지 소비량 산출

1-3 국내외 기존 온실 냉방 기술 현황

- 현재 보급되어 있는 기존 온실 냉방기술(포그쿨링, 차광 스크린, white cool, 팬&패드 쿨링, 지하 공기열 냉방 등)은 온실의 생산성을 향상시킬 수 있는 수준까지 도달 못함
- 농진청은 고온극복 혁신형 스마트 쿨링 하우스 시스템 국산화 기술개발 및 실증 테스트 중. 하지만 높은 초기설치 비용으로 보급이 쉽지 않은 실정

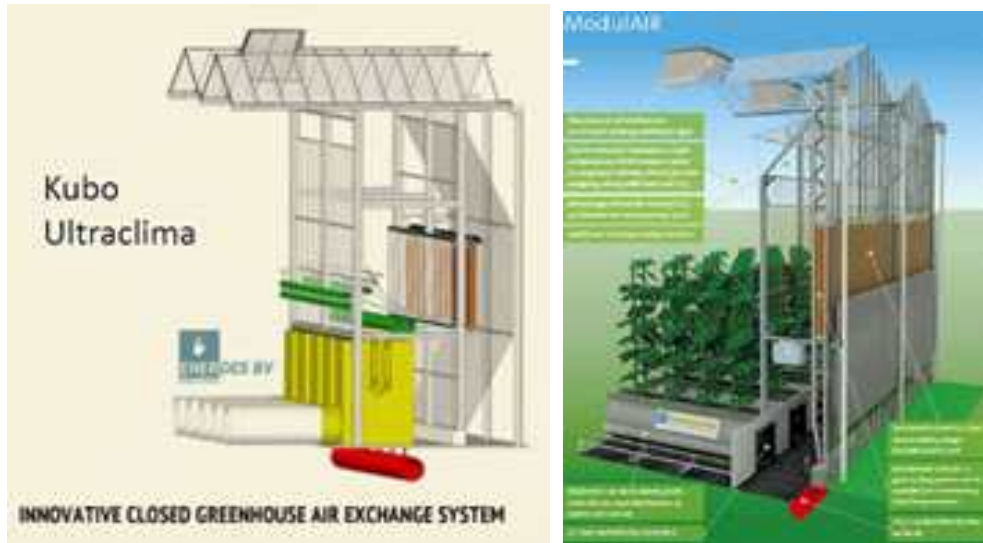


[그림] 국내 온실 냉방기술 현황



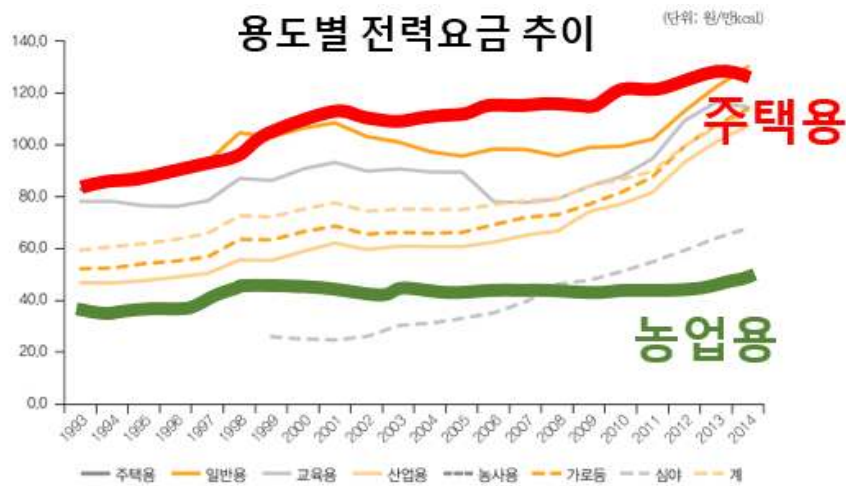
[그림] 고온극복혁신형 쿨링하우스 (농촌진흥청)

- 시설원에 선진국 유럽 전역에서는 효율적인 냉방 및 난방을 위한 반밀폐형 온실 설치 보급을 확대하고 있음
- 온실 에너지기술 세계 최고 기관인 네덜란드 KUBO사는 증발 냉각 및 포그 기술 이용 반밀폐형 냉방시스템 개발 및 실증 테스트 진행 중.



[그림] 네덜란드 KUBO사의 반밀폐형 온실 냉방 시스템

- 한국전력공사가 올해 두 차례 전기요금을 인상을 단행하며 농사업 전기요금을 74%나 올려 농가들이 줄도산 위기에 놓임
- 이번 인상 결정으로 1월 1일 대비 농사용(갑)은 kWh당 요금이 16.6원에서 10월 기준 28.9원으로 74.1%, 농사용(을)은 34.2원에서 46.5원으로 36% 늘었음
- 농업용 전기요금의 계속된 상승으로, 전력소모 낮추면서 고성능 냉방이 가능한 신재생에너지 기반의 신개념 냉방기술 개발이 필요함



자료: 한국전력공사

[그림] 농업용 전력요금 상승

[표] 전력요금 인상 현황 (위성곤 민주당 의원실, 한국전력공사 자료 재가공)

구분	전력량요금(원/kwh)			요금인상액(%)	
	1월1일	4월1일	10월1일	인상A(1월대비4월)	인상B(1월대비10월)
농사용(갑)	16.6	21.5	28.9	4.9(29.5)	12.3(74.1)
농사용(을)저압	34.2	39.1	46.5	4.9(14.3)	12.3(36)
산업용(갑) I	60.9	65.8	73.2	4.9(8)	12.3(20.2)
산업용(갑) II	79.5	84.4	91.8	4.9(6.2)	12.3(15.5)
일반용전력(갑) I	66.9	71.8	79.2	4.9(7.3)	12.3(18.4)



[그림] 농업용 전력요금 상승 예상

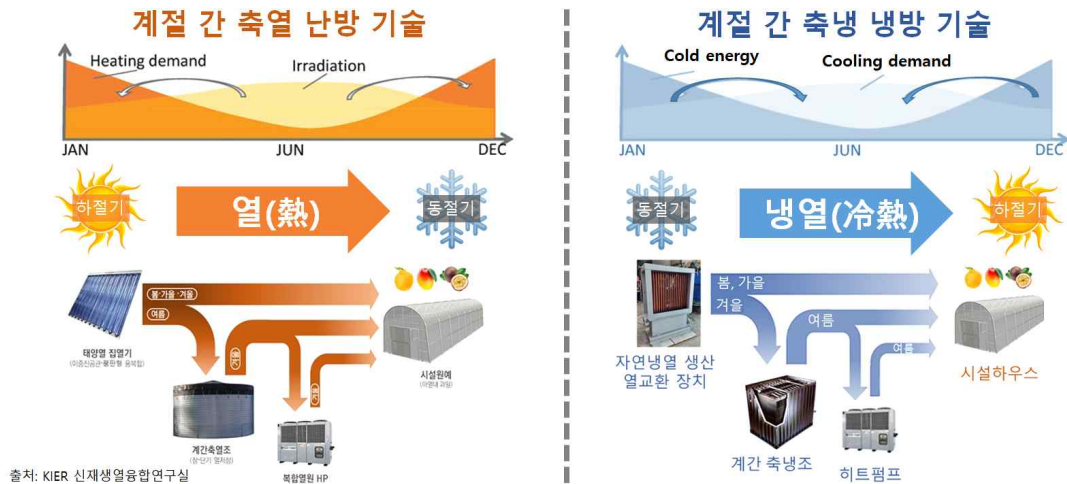
1-4 계절 간 자연냉기 저장이용 냉방 기술 개념 설명

○ 계절 간 신재생 태양열 저장이용 난방 기술

- 난방수요가 거의 없는 하절기에 신재생 태양열 잉여 열원을 대용량 계간 축열조에 저장 후, 난방수요가 많은 동절기에 수요처에 급탕 및 난방 공급에 이용하는 기술.
- 덴마크, 노르웨이, 독일 등 유럽에서는 지역난방과 연계하여 많이 보급되어 있음.

○ (본 연구개발) 계절 간 신재생 자연냉기 저장이용 냉방 기술

- 냉방수요가 거의 없는 동절기에 차가운 자연냉기를 계간 축냉조에 저장하여, 냉방수요가 많은 하절기에 수요처에 냉방을 공급하여 이용하는 기술.



[그림] 계절 간 축열 및 축냉 기술 개념

1-5 계절 간 자연냉기 저장이용 냉방 기술 국내외 개발 사례

○ 국내 사례 조사 (한국전력 나주 신사옥 적용)

국내 사례 - I

지하 2층
지상 31층
연면적 93,221m²
최대 냉방 부하
3,393 kW

지중 축냉 시스템
Underground cold storage system

겨울철에 냉각탑, 증온수 흡수식 냉동기로 냉열을 생산하여 지중 축냉 시스템에 저장 후, 여름철에 건물 냉방에 활용하였다.
(국내 최초 적용 / 독일 HL Technik사 + 창조건축)

- 한국전력 나주 신사옥 (2014년 완공)
- 국내 최초의 동절기 자연냉기 저장이용 냉방기술 적용
- (동절기) 외기가 갖고 있는 냉열을 냉각탑(외기냉수순환)으로 지중에 축냉
- (하절기) 흡수식 냉방+계간 축냉이용 바닥, 천장에 냉수 공급 통한 복사 냉방

흡수식냉동기 COP 0.66

○ 국내 사례 조사 (농촌 진흥청 실증 연구)

국내 사례 - II

하절기

동절기

겨울 지하수층 냉열 주입수량 및 열량

냉열 축열 2개월 경과후 지하수층 주변 온도 변화

은실 냉방효과

- 농촌 진흥청 (2018년)
- (동절기) HP증발기, 겨울철 생성 냉수(7~12°C)를 지하수층(깊이 20m)에 저장, 여름철 은실 냉방에 사용
- (하절기) HP응축기, 여름철 생성 온수(25~30°C)를 지하수층에 저장, 겨울철 은실 난방에 사용

○ 해외 사례 조사 (일본 Fujikura사 소규모 실증)

해외 사례 - I

Storage Specifications:

- Under ground
- Concrete container
- Ice formation by thermosiphon
- Storage size: 624 m³

Proposed Ice Storage System (Heat Pipe)

Storage Specifications:

- Under ground
- Concrete container
- Ice formation by thermosiphon
- Storage size: 624 m³

Storage Tank Dimensions:

- Height: 3000 mm
- Width: 2600 mm
- Length: 14 m
- Storage Depth: 3 m
- Storage tank
- Insulation
- Waterproof layer
- Concrete container
- Insulation
- Thermosiphon
- Ice Storage
- Chiller
- Thermosiphon
- Storage Depth: 3 m
- Ground level
- L=14m

Temperature Graph:

Temperature (°C) vs. dd:mm:yy

Labels: Adiabatic section (T8), Ambient air (T5), Cold storage water (T1 to T4), Condenser section (T7)

Shorttime-high frequency current and skin effect used to remove ice formed on the heat pipe

Number of Days vs. Ice Diameter (mm) and Heat Flow Rate (W)

Labels: AC, Thermosiphon, Separating line, Ice formed

- 일본 Fujikura사 (히트파이프 전문 제작업체)
- 데이터센터 냉방 (최대 냉방 부하 8,800 kW)
- Thermosiphon이용 동절기 자연냉열을 지중에 축냉, 하절기 냉방 사용
- Pilot스케일 실증 연구 수행 (2011)

○ 해외 사례 조사 (중국 칭화대 실증)

해외 사례 - II

Key parameters of the implemented seasonal cold storage system:

Heat pipe	Material and thickness: Stainless steel pipe Φ _o = 25 mm	Surface area: Evaporator 375 m ² Condenser 750 m ²	Charged Refrigerant: R22
Storage tank	Volume: 450 m ³	Storage capacity: 31,500 kWh	Storage capacity: 31,500 kWh
Insulation	Material and thickness: XPS(Extruded polystyrene) 100 mm	Overall heat-transfer coefficient: 0.3 W/m ² ·°C	Seasonable cold loss rate: <10%

Temperature Graph:

Outdoor air temperature (°C) vs. Cooling load (kW)

Labels: Temperature, Cooling load

Charge Refrigerant: R22

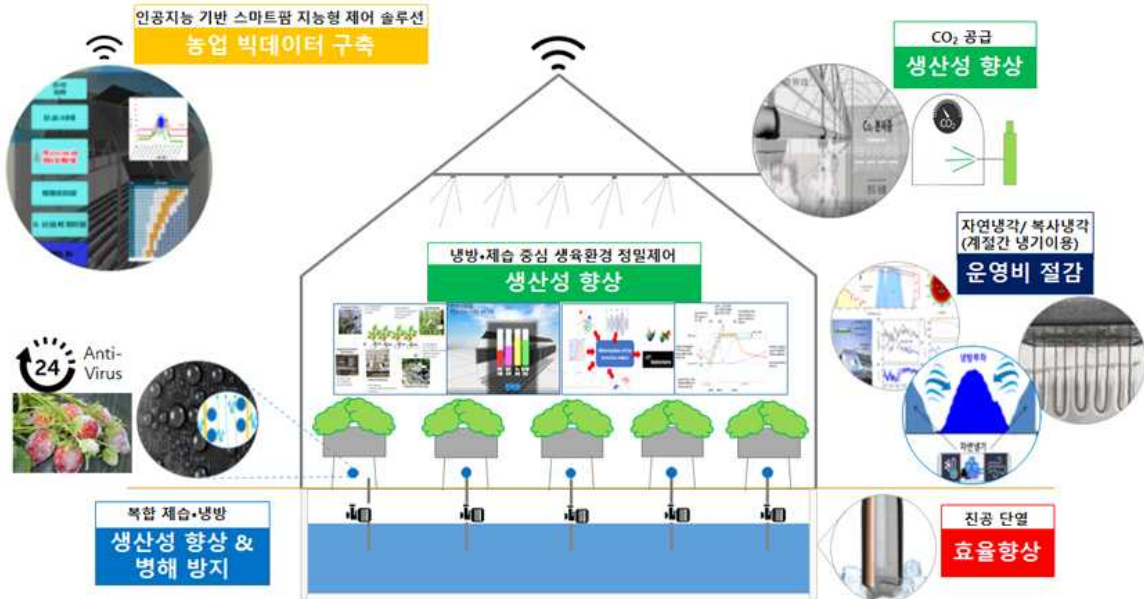
Storage capacity: 31,500 kWh

Seasonable cold loss rate: <10%

- 중국 Tsinghua University 연구
- 중국 하얼빈시 공공건물 냉방 실증 연구 수행 (2016)
- Thermosiphon이용 동절기 자연냉열을 지중에 축냉, 하절기 냉방 사용
- 전체 냉방부하(83.1 MWh) 중 약 30%(28,35 MWh) 부하 cover

1-4 연구내용 및 목표

- (1단계) 계절 간 자연냉기 저장이용기반 온실 냉방 핵심 요소기술 개발
- (2단계) 현장 실증 적용 시스템 고도화 및 사업화 모델 수립
 - 냉방·제습중심 생육환경 정밀 제어 기술개발 통한 생산성 향상
 - 자연냉각기반 냉열생산 기술개발 통한 에너지 설비 운영비 절감
 - 진공단열 기술개발 통한 자연냉기 냉열저장 효율 향상
 - 복합제습·냉방·CO2공급 기술개발 통한 생산성 향상 및 병해 방지 효과
 - 인공지능 기반 에너지 공급·수요 지능제어 기술개발 통한 농업 빅데이터 구축



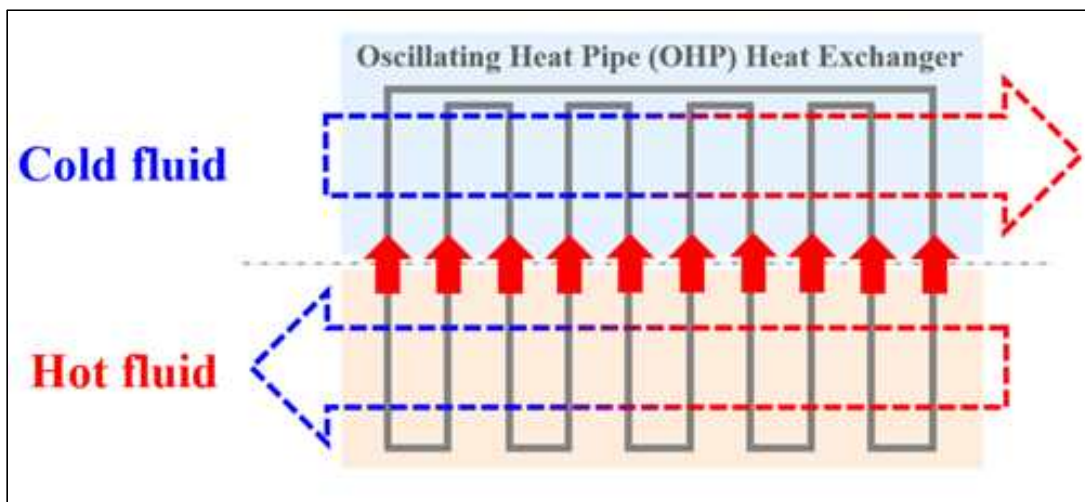
[그림] 연구내용 및 목표

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

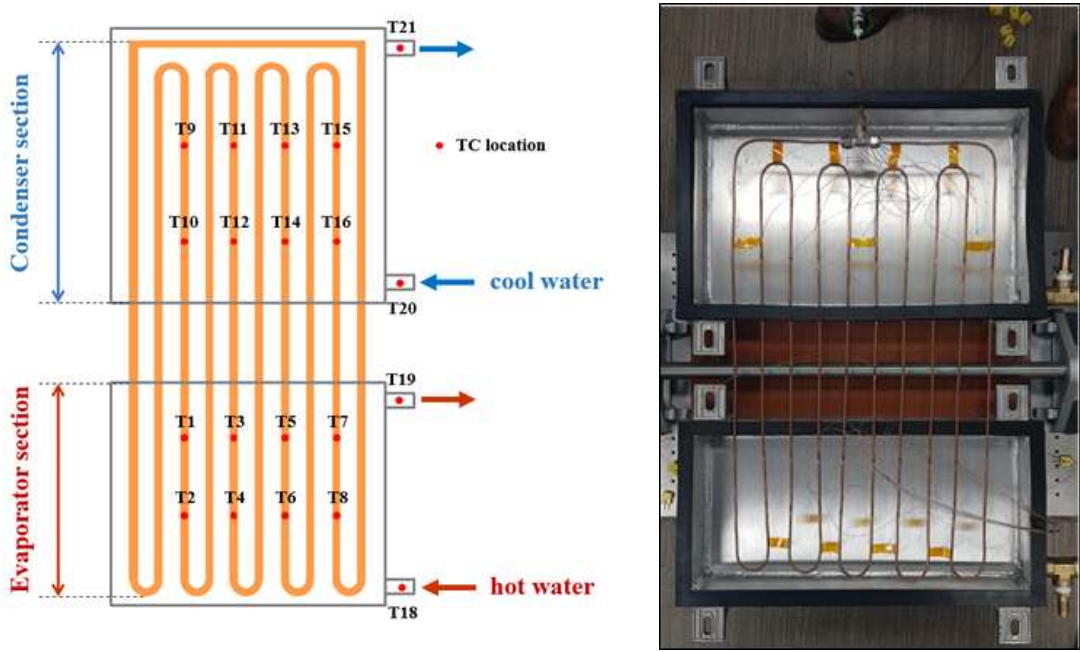
2-1 OHP기반 동절기 자연냉기 냉열생산 기술 개발 (한국에너지기술연구원)

가. 진동형히트파이프(OHP, Oscillating Heat Pipe) 기초 성능 실험

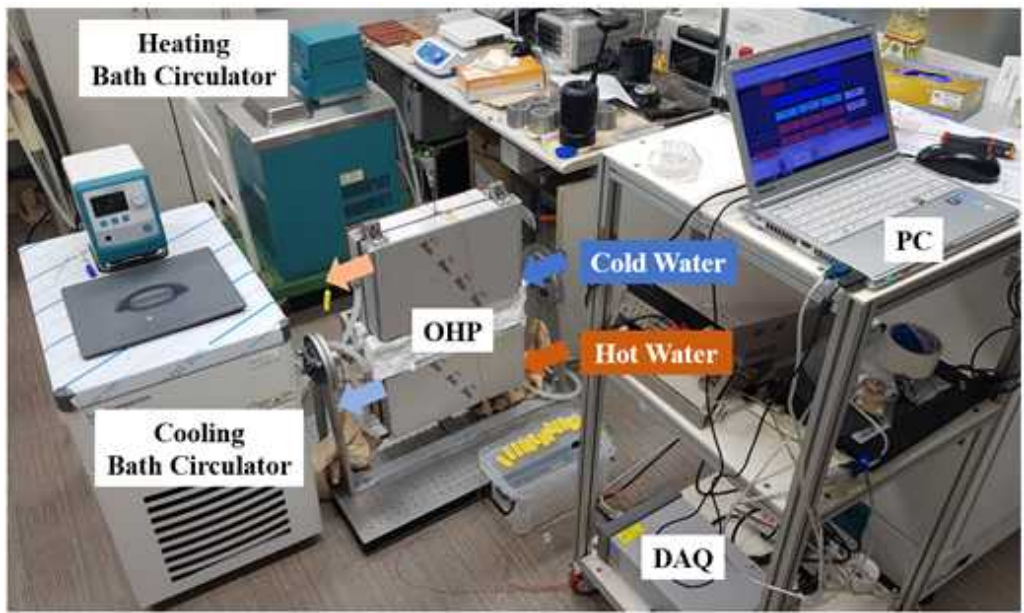
- 5개의 효율수(턴 수)를 가지는 OHP 열교환 모듈을 구리재질의 모세관 튜브(내경: 2 mm, 외경: 3.2 mm)를 이용하여 제작하여 열전달 성능실험을 수행함.
- 고온부(증발부)와 저온부(응축부)에는 각각 일정 온도로 유지되는 온수와 냉수를 공급하여 실험을 수행함.



[그림] OHP 열교환 기술 개념



[그림] 5개의 효용수(턴수)를 갖는 OHP 열교환 모듈



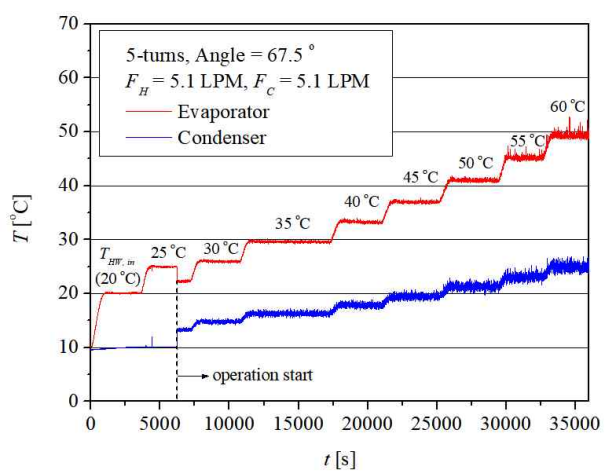
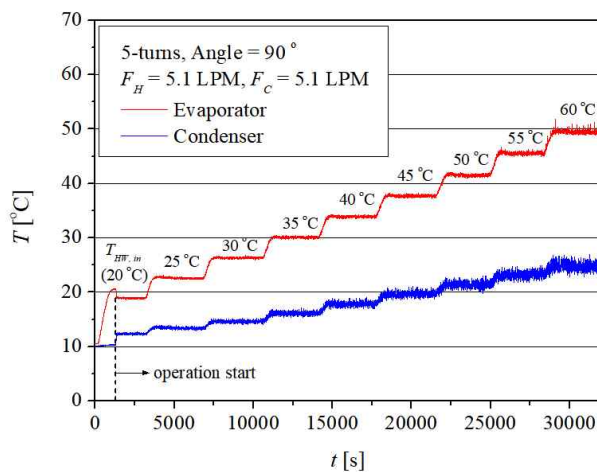
[그림] 5개 효용수-OHP모듈 성능실험 장치

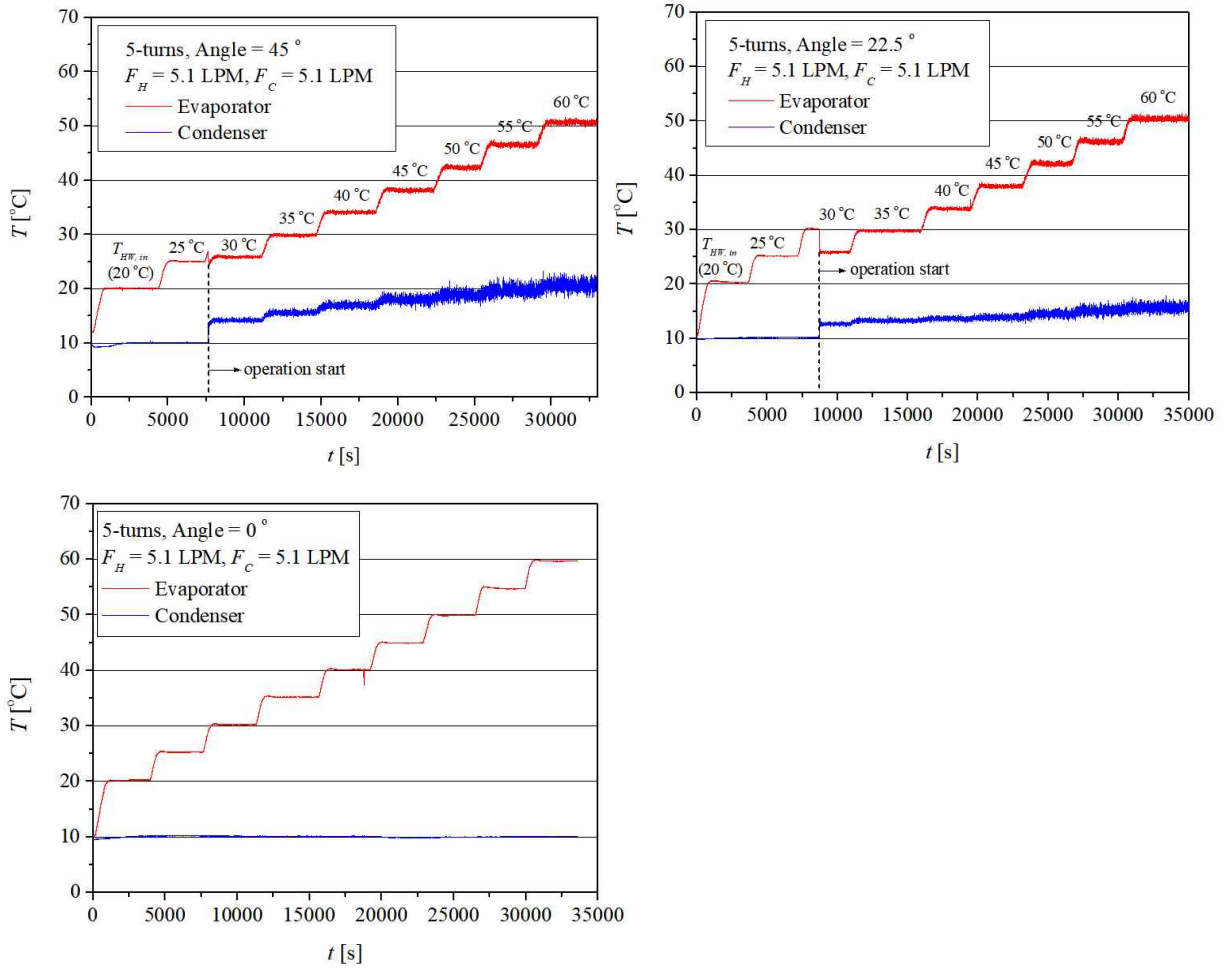
- 작동유체(냉매)는 -20~60℃의 온도범위에서 좋은 열전달 성능을 가지는 R-134a를 선정하였고, 아래의 표는 25℃온도조건에서의 물성치를 나타냄.

[표] R-134a 작동유체(냉매)에 대한 물성치

	Temperature (°C)	R-134a
ρ [kg/m ³]	25	1225.3
μ [μPa·s]	25	207.3
c_p [kJ/kg·°C]	25	1.405
h_{fg} [kJ/kg]	25	182.3
σ [mN/m]	25	8.692
$(dP/dT)_{sat}$ [kPa/°C]	25	17.67
$T_{boiling}$ [°C] at 1 atm	25	-26.3

- 고온부(증발부)가 저온부(응축부) 아래쪽에 위치할 때(evaporator below condenser) 즉 Angle 90° 조건에서는 고온부의 온도가 증가함에 따라 고온부 및 저온부 벽면의 온도가 점차 활발하게 진동(oscillation)하면서 고온부에서 저온부로 열이 잘 전달 됨. 저온부 벽면의 온도도 점차 증가하는데 이는 고온부에서 저온부로 열이 잘 전달 됨을 의미함.
- Angle 값이 점차 감소함에 따라 온도의 진동이 시작하는 즉 OHP동작을 시작하는 operation start time이 점차 delay됨.
- 고온부(증발부)가 저온부(응축부)와 같은 위치에 있을 때(condenser below evaporator) 즉 Angle 0° 조건에서는 고온부의 온도가 증가해도 고온부 및 저온부의 벽면온도의 진동현상은 일어나지 않고, 저온부 벽면온도 변화가 없는데 이는 고온부에서 저온부로 열이 거의 전달되지 않음을 의미함.
- 일단 OHP가 작동하기 시작하면, 온수온도(T_{HW})가 증가함에 따라 온도의 진동은 더 활발해지고 온도의 진폭이 뚜렷하게 증가함.



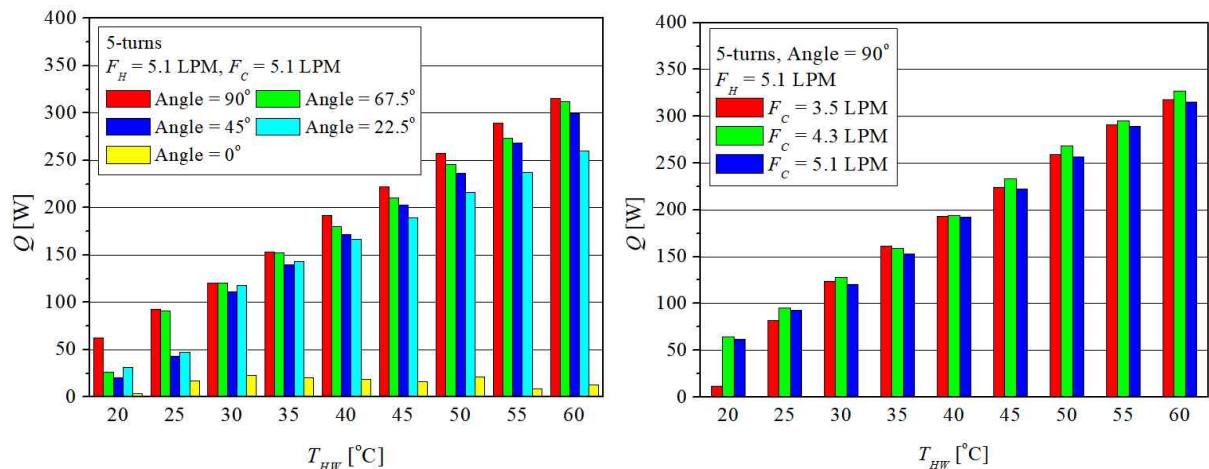


[그림] 5개 효용수-OHP모듈의 고온부 온수온도에 따른 온도변화

- OHP를 통해 열교환 되는 열전달량(Q)은 저온부(응축부)에 공급되는 냉수의 질량유량, 냉수의 정압비열, 냉수의 입출구 온도차를 통해 다음의 식으로부터 얻을 수 있음.

$$Q = \dot{m} c_p (T_{water, out} - T_{water, in})_{condenser}$$

- 온수온도(T_{HW})가 증가함에 따라 열전달량은 점차 증가하고, Angle 90° 조건에서 가장 큰 열전달량을 나타냄. Angle 0° 조건에서는 열전달량 값이 매우 작는데, 튜브 벽면을 따른 전도(conduction) 및 자연대류(free convection)에 의한 열전달만 발생함.
- 고정된 온수유량(F_H) 조건에서, 냉수유량(F_C) 변화에 따른 열전달량 변화는 미미함.

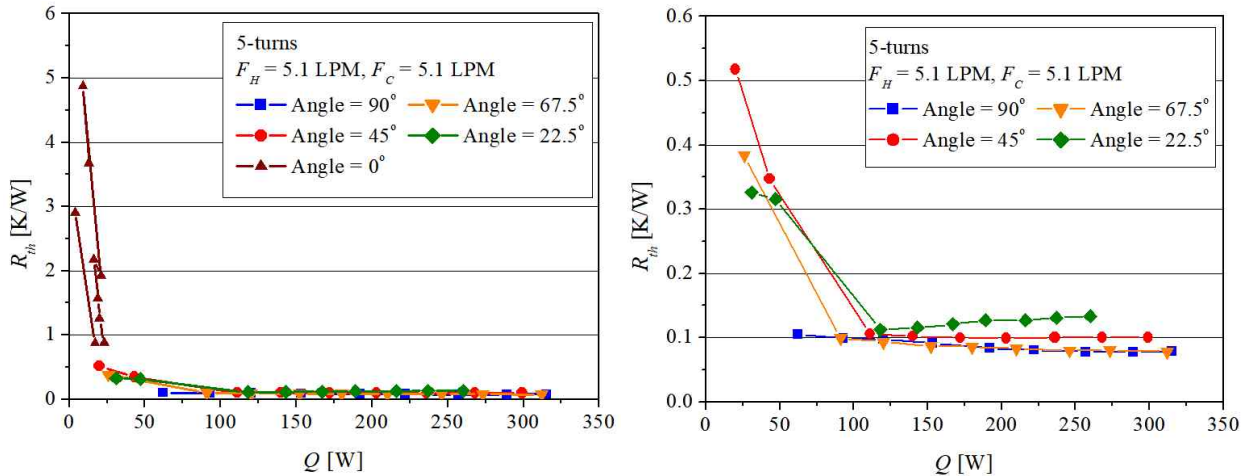


[그림] 5개 효용수-OHP모듈의 온수온도, 냉수유량에 따른 열전달량 변화

- 열전달 성능은 열저항으로 나타낼 수 있는데 OHP에 열량(Q)가 가해졌을 때의 고온부(증발부)와 저온부(응축부) 벽면온도 차로 정의됨. 낮은 열저항 값은 높은 열전달(열교환) 성능을 나타내고, 높은 열저항 값은 낮은 열전달 성능을 의미함.

$$R_{th} = \frac{T_{evap,avg} - T_{cond,avg}}{Q}$$

- OHP의 열전달 성능은 열저항으로 나타낼 수 있는데 OHP에 열량(Q)가 가해졌을 때의 고온부(증발부)와 저온부(응축부) 벽면온도 차로 정의됨.
- 5효용수-OHP모듈의 경우 열저항 최소값은 약 0.08 K/W이고, Angle 0° 조건에서는 OHP가 정상적으로 작동하지 않기 때문에 매우 높은 열저항 값을 나타냄.
- 일반적으로 열저항 값이 0.2 K/W 이하가 되면, OHP가 정상적으로 작동하고 우수한 열전달(열교환) 성능을 나타낸다고 보고됨.
- 일반적으로 열전달량(Q) 증가함에 따라, OHP가 잘 작동하기 때문에 열저항 값은 점차 감소하는 경향을 보임. Angle이 점차 0°에 가까워짐에 따라, 열저항 값이 점차 증가하는 것은 OHP 내부에서 dry-out이 발생하면서 열전달 성능이 점차 감소하는 현상을 나타냄.

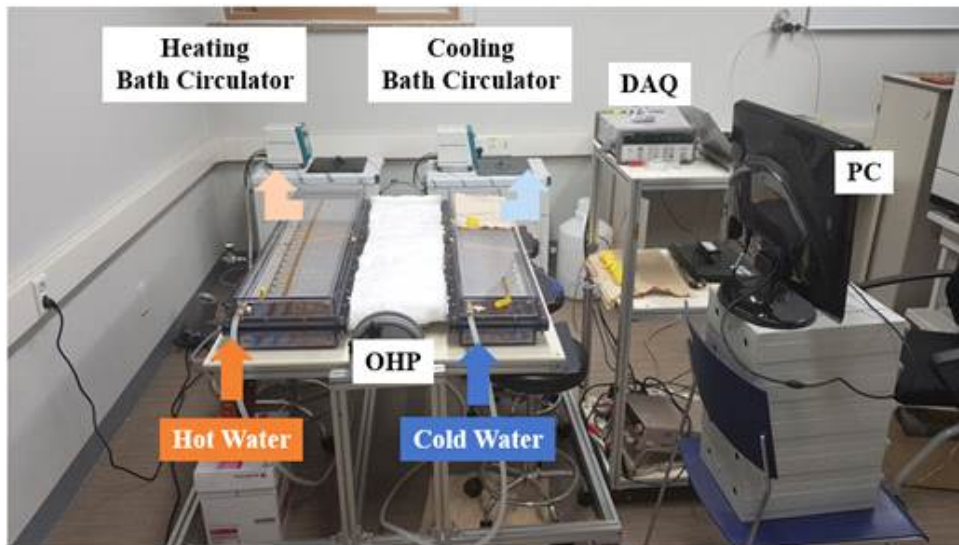


[그림] 5개 효용수-OHP모듈의 열전달 성능을 나타내는 열저항

- 20개의 효용수(턴 수)를 가지는 OHP 열교환 모듈을 구리재질의 모세관 튜브(내경: 2 mm, 외경: 3 mm)를 이용하여 제작하여 열전달 성능실험을 수행하였고, 5개의 효용수를 갖는 OHP 열교환 모듈과 성능비교를 함.
- 모든 실험조건 및 방법은 5효용수-OHP 열교환 모듈에 대한 실험의 경우와 동일함.

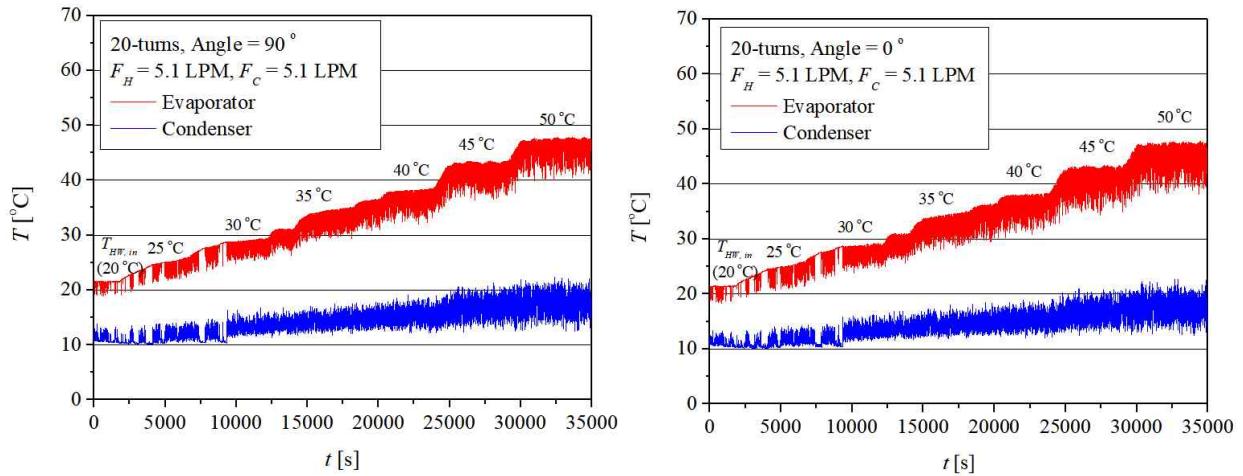


[그림] 20개의 효용수(턴수)를 갖는 OHP 열교환 모듈



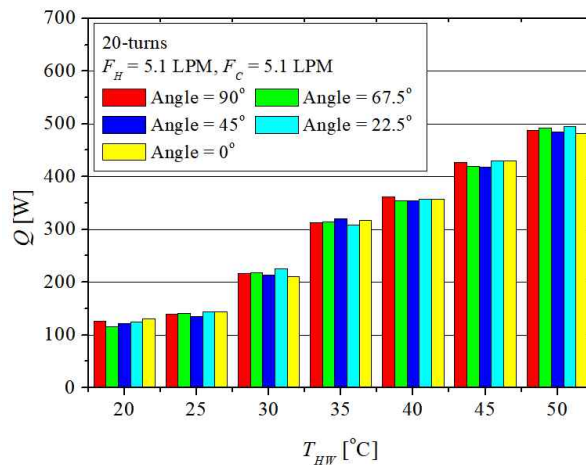
[그림] 20개 효용수-OHP모듈 성능실험 장치

- 고온부(증발부)가 저온부(응축부) 아래쪽에 위치할 때(evaporator below condenser) 즉 Angle 90° 조건에서는 고온부의 온도가 증가함에 따라 고온부 및 저온부 벽면의 온도가 점차 활발하게 진동하면서 고온부에서 저온부로 열이 잘 전달됨. 저온부 벽면의 온도도 점차 증가하는데 이는 고온부에서 저온부로 열이 잘 전달됨을 의미함.
- 고온부(증발부)가 저온부(응축부)와 같은 위치에 있을 때(condenser below evaporator) 즉 Angle 0° 조건에서도 Angle 90° 조건의 경우와 마찬가지로 OHP가 정상적으로 잘 작동하며, 5효용수-OHP모듈에서 관측되었던 OHP 동작 정지 현상은 나타나지 않음.
- 즉 효용수(턴수)가 증가함에 따라 OHP 동작은 더 잘 일어나게 되며, Angle에 따른 열 전달 성능 저하 문제는 발생하지 않게 됨. 이는 효용수(턴수)가 증가함에 따라 내부 불안정성(instability)이 증가하여, OHP의 작동을 더 원활하게 함.



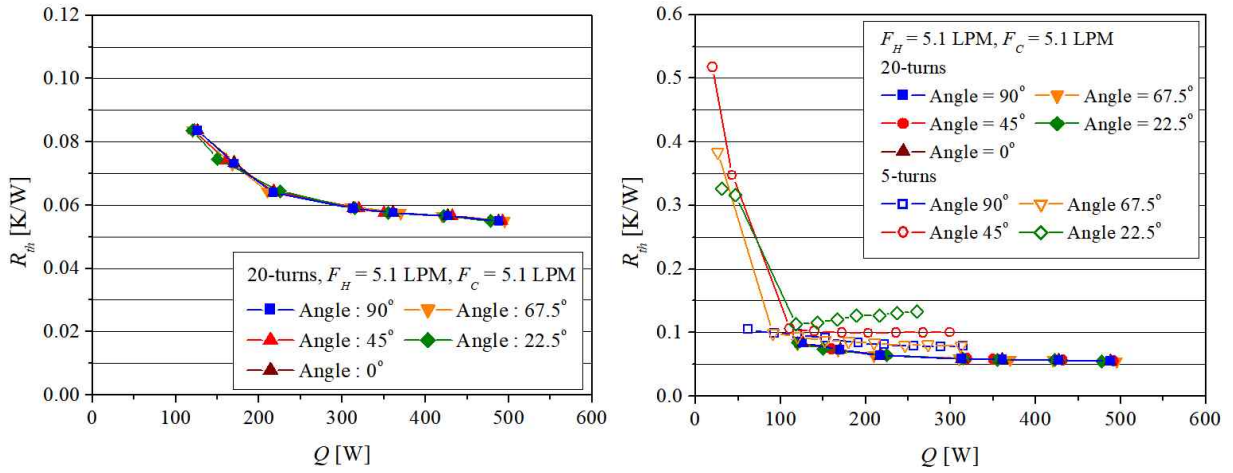
[그림] 20개 효용수-OHP모듈의 고온부 온수온도에 따른 온도변화

- 5효용수-OHP 모듈의 경우와 마찬가지로 온수온도(T_{HW})가 증가함에 따라 열전달량은 점차 증가함. 하지만 Angle 90° 및 Angle 0° 조건에서 열전달량 저하 없이 동일한 열전달량을 나타냄.



[그림] 20개 효용수-OHP모듈의 고온부 온수온도에 따른 온도변화

- 20효용수-OHP모듈의 경우 열저항 최소값은 약 0.05 K/W로 5효용수-OHP모듈의 열저항 최소값인 약 0.08 K/W 보다 낮은 열저항 값을 보임. Angle 변화에 상관없이 동일한 열저항 값을 나타냄. 즉, 20효용수-OHP모듈의 경우 Angle 변화에 상관없이 동일하게 우수한 열전달 또는 열교환 성능을 나타냄. 기존의 히트파이프(웍구조체기반 히트파이프, 써모사이폰 히트파이프 등)는 Angle 변화에 따른 성능저하가 뚜렷하게 나타나서 폭넓은 적용에는 한계가 있음. 기존의 히트파이프 기술과의 정량적인 성능비교 연구를 추가적으로 수행할 예정임.



[그림] 20개 효용수-OHP모듈의 열전달 성능을 나타내는 열저항

- OHP모듈의 열전달 또는 열교환 성능을 예측하기 위해 effectiveness-NTU 방법을 이용하여 해석적 모델을 개발함. 일반적인 열교환기의 effectiveness는 다음과 같이 정의됨.

$$\varepsilon = \frac{Q_{actual}}{Q_{max}} = \frac{C_h (T_{h,i} - T_{h,o})}{C_{min} (T_{h,i} - T_{h,o})} = \frac{C_c (T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min} (T_{h,i} - T_{h,o})}.$$

- 고온부 및 저온부에서의 flow에 대한 각 열용량(heat capacity)는 다음과 같이 정의됨.

$$C_h = \dot{m}_h c_{p,h}.$$

$$C_c = \dot{m}_c c_{p,c}.$$

- 일반적인 대향류 열교환기의 유용도(effectiveness)는 다음의 식으로 나타냄. U 는 전체 열전달 계수, A 는 OHP의 고온부 및 저온부 flow의 면적을 나타냄. C_{min} 과 C_{max} 는 각각 C_h 와 C_c 중 최대값과 최소값을 의미함.

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp\left[-\frac{UA}{C_{min}}\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)\right]}{1 - \frac{C_{min}}{C_{max}} \exp\left[-\frac{UA}{C_{min}}\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)\right]}.$$

- OHP와 고온부 및 저온부의 flow에 대한 각 유용도는 다음과 같음.

$$\varepsilon_h = 1 - \exp(-NTU_h) = 1 - \exp\left(-\frac{U_h A_h}{C_h}\right).$$

$$\varepsilon_c = 1 - \exp(-NTU_c) = 1 - \exp\left(-\frac{U_c A_c}{C_c}\right).$$

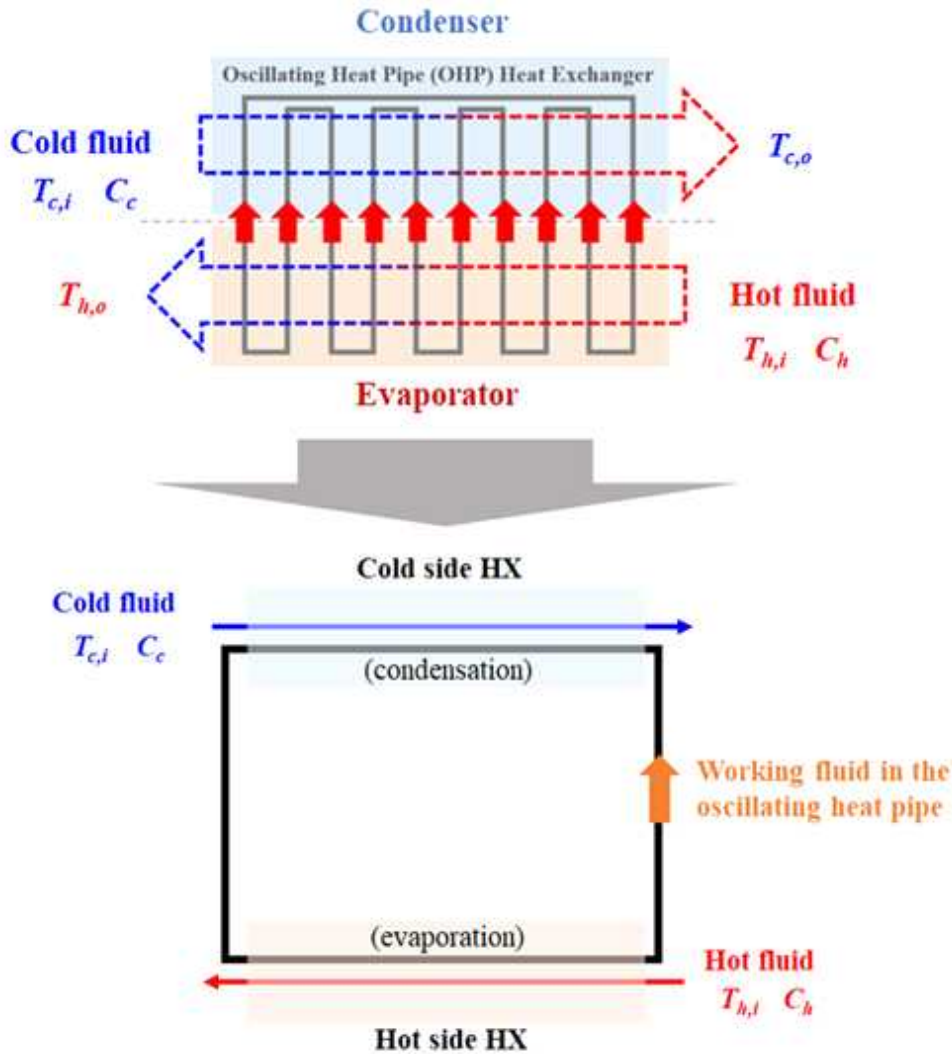
- OHP열교환 모듈의 전체 유용도는 다음과 같이 나타냄. C 는 열용량 비를 의미함.

$$\varepsilon_{OHP} = \left[\frac{1}{\min(\varepsilon_h, \varepsilon_c)} + \frac{C}{\max(\varepsilon_h, \varepsilon_c)} \right]^{-1}$$

$$C = \frac{\min(C_h, C_c)}{\max(C_h, C_c)}$$

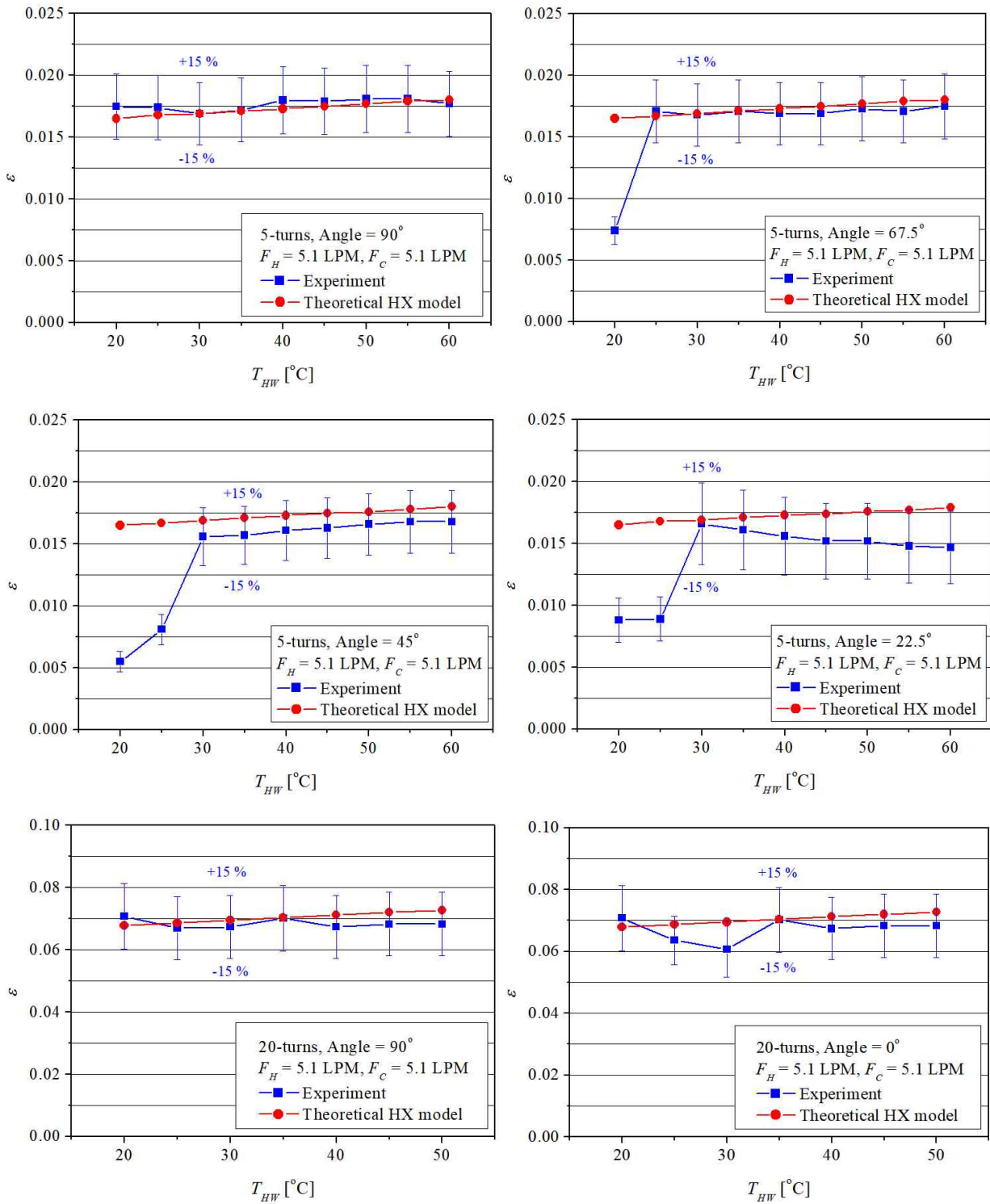
- OHP를 통한 실제 열전달률은 다음과 같이 나타낼 수 있음.

$$Q_{actual} = \varepsilon_{OHP} Q_{max} = C_{min} (T_{h,i} - T_{h,o})$$



[그림] OHP 열교환 모듈의 열교환 성능 예측을 위한 해석 모델 개발

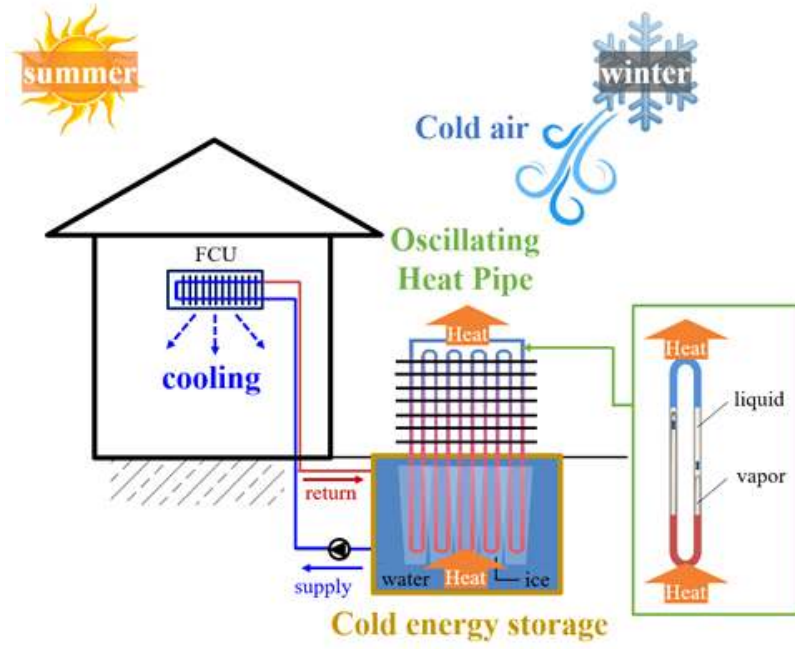
- 개발한 OHP 열교환 모듈 성능 예측 모델을 검증하기 위해 5유용도-OHP모듈 및 20유용도-OHP모듈에 대한 실험결과와 비교함. 그 결과 OHP가 정상적으로 작동하는 경우에 대해서는 약 15% 이내로 실험결과를 잘 예측함을 확인함.
- 5유용도-OHP모듈의 Angle 값이 작은 경우 OHP모듈이 정상적으로 작동하지 않은 경우에 대해서는 해당 모델이 예측하는데 한계가 있음.
- 20유용도-OHP모듈의 경우 Angle 변화에 상관없이 OHP모듈이 모든 조건에서 정상적으로 작동하기 때문에 해당 해석 모델로 모든 경우에 대해 예측이 가능함을 확인함.



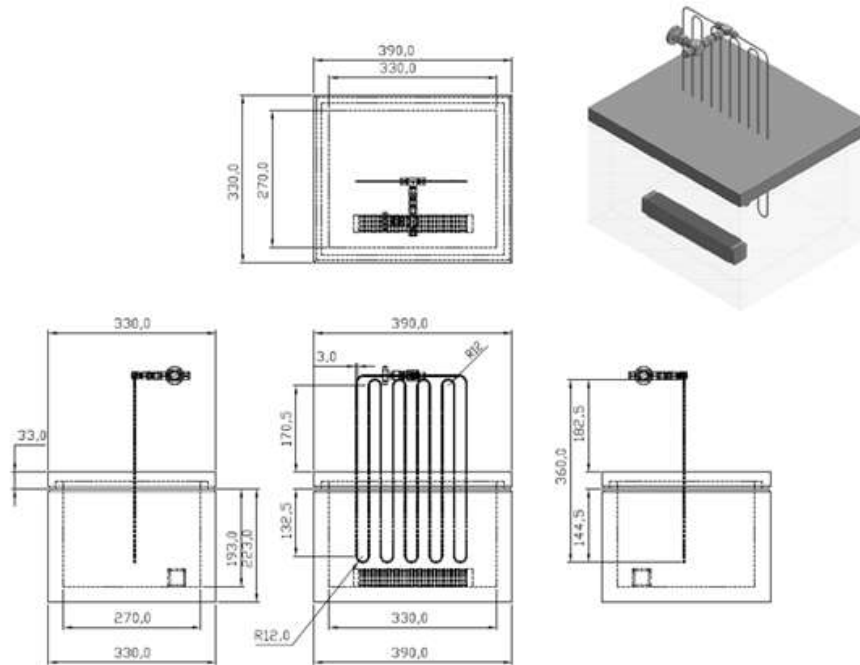
[그림] OHP 열교환 모듈의 성능 예측 해석 모델과 실험결과와의 비교

나. OHP기반 냉열생산 랩스케일 기초실험 수행

- 5개의 효용수(턴 수)를 가지는 OHP 열교환 모듈을 구리재질의 모세관 튜브(내경: 2 mm, 외경: 3.2 mm)를 이용하여 제작하여 랩스케일 냉열생산 기초실험을 수행함.
- 고온부(증발부)는 일정량의 물이 담겨있는 단열된 축냉조에 잠겨 있고, 저온부(응축부)는 저온 항온조 내부에 위치하여 다양한 저온온도(최대 -20°C)조건에서 냉열생산 실험을 수행함.



[그림] OHP 자연냉열 생산 개념



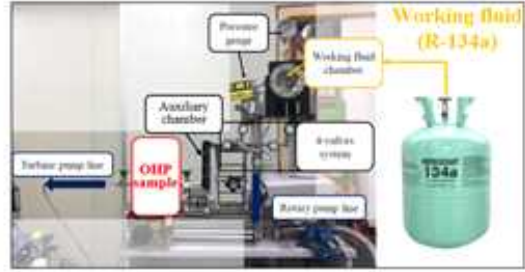
[그림] OHP 자연냉열 생산 실험모듈 구성



1. OHP sample



2. Cooling energy production module



3. Working fluid charging



4. Cooling energy storage module



5. Completed module

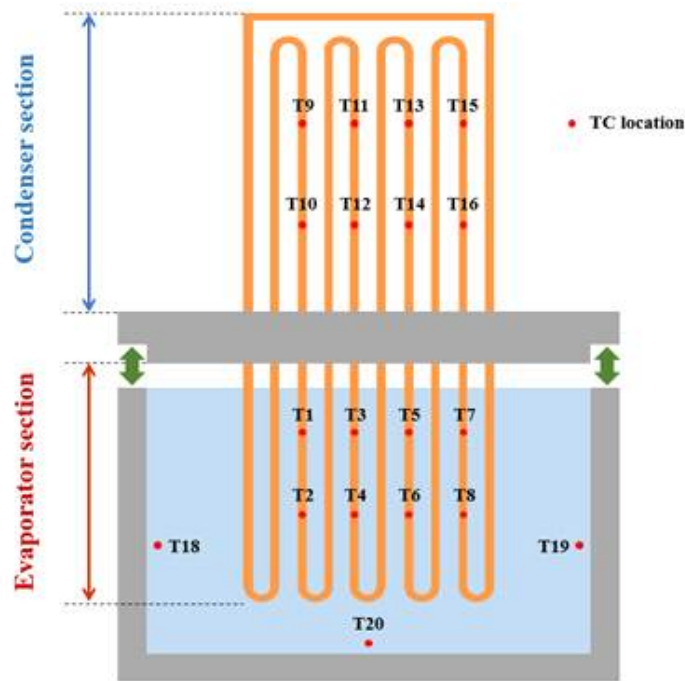
[그림] OHP 자연냉열 생산 실험모듈 제작

- 제작한 OHP 자연냉열 생산 실험모듈을 저온 항온 챔버(TC3-ME, Jeiotech, LTD)에 내부에 설치하여 동절기 외기온도 조건을 만들어 냉열생산 실험을 수행함.



[그림] OHP 자연냉열 생산 성능 실험

- OHP의 고온부(증발부) 및 저온부(응축부) 벽면의 온도, 단열 축냉조 내부 물온도를 측정하여 OHP 정상 작동여부 및 냉열생산을 위한 열전달 성능 산출에 사용함.



[그림] OHP 자연냉열 생산 성능측정을 위한 센서 위치

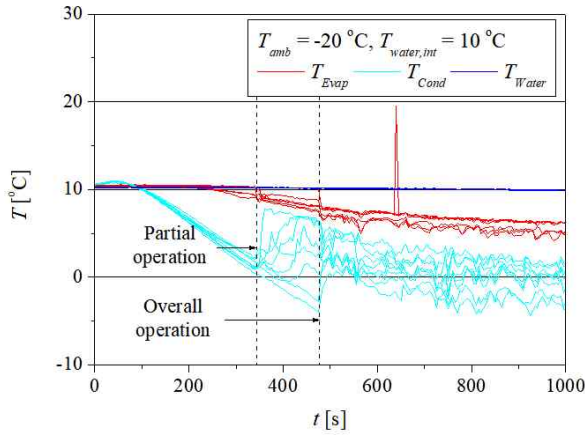
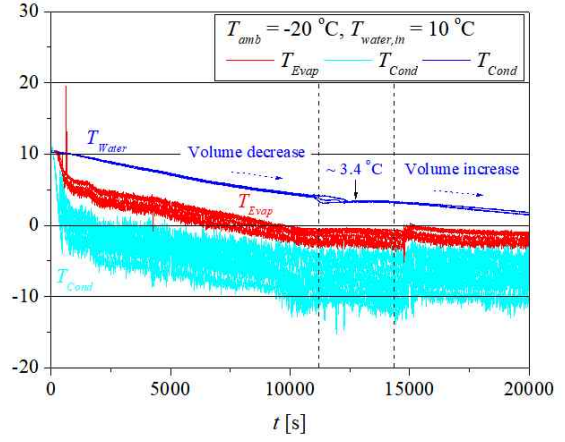
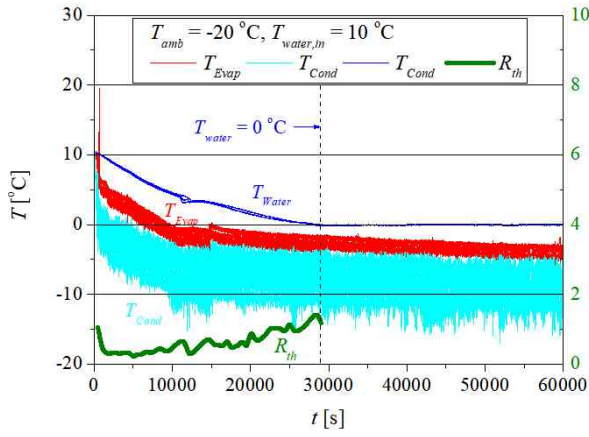
- OHP의 저온부(응축부)가 놓여진 저온 항온 챔버 내부의 온도를 -20°C 로 세팅을 하고 OHP의 고온부(증발부)가 위치한 축냉조 내부 초기 물온도를 10°C 로 세팅을 했을 때, OHP의 고온부 및 저온부 벽면온도 변화, 축냉조 내부 물온도 변화를 아래 그래프에 나타냄.
- OHP가 생산하는 냉열 생산량(Q)는 축냉조 내부 물의 질량, 물의 정압비열, 물의 시간에 따른 온도변화를 통해 다음의 식으로부터 얻을 수 있음.

$$Q_{sen,t} = \frac{mc_p (T_{water,t+1} - T_{water,t})}{\Delta t}$$

- 냉열생산을 위한 OHP 성능은 아래의 식의 열저항으로 표현함.

$$R_{th} = \frac{T_{evap,avg} - T_{cond,avg}}{Q}$$

- OHP가 작동을 시작하면서 열저항은 점차 감소하다가 축냉조 내부 물의 온도가 0°C 에 도달할 때까지의 OHP냉열생산 모듈의 열저항은 점차 증가하는 경향을 보임. 이는 OHP의 고온부와 저온부의 온도차가 점차 감소하면서 열전달 성능 즉 냉열생산 성능이 점차 감소하기 때문임.
- OHP의 저온부(응축부) 표면, 고온부(증발부) 표면, 축냉조 내부 물의 순서로 온도가 0°C 에 도달함.



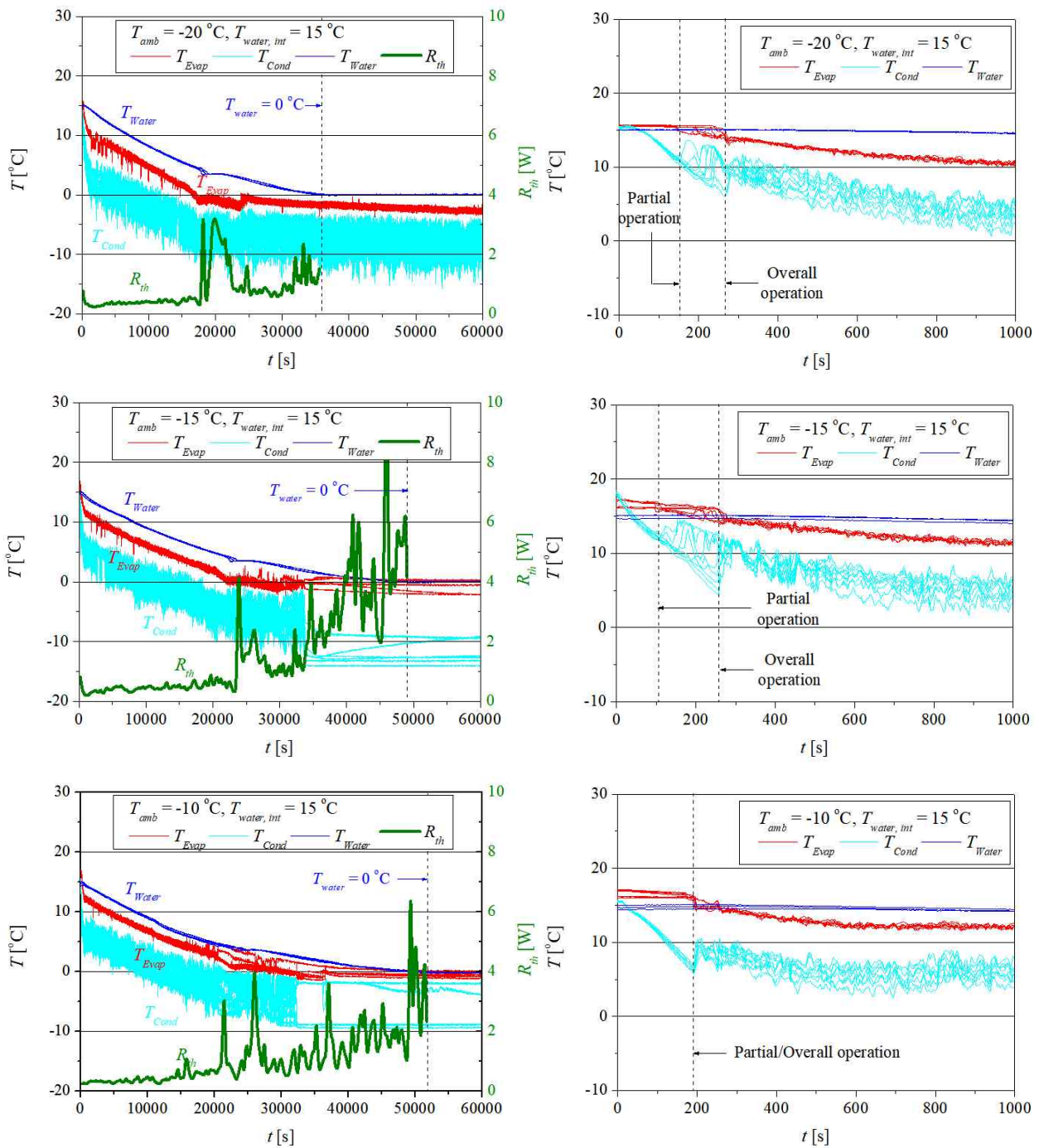
[그림] 외기 온도 -20°C , 초기 축냉조 물온도 10°C 조건에서 OHP 냉열생산 성능 결과



[그림] OHP 자연냉열 생산을 통한 고온부(증발부) 표면 ice 생성

- 초기 축냉조 물온도가 15°C 로 일정하게 유지될 때, 외기온도가 -20°C , -15°C , -10°C 로 변할 때 온도변화 및 냉열생산 성능 변화에 대해 관찰함.
- 외기온이 점차 높아지면서 외기온과 축냉조 물온도 차이가 점차 감소함에 따라 OHP 열저항은 증가하여 냉열생산 성능은 저하됨.

- 외기온이 점차 감소하면서 OHP 작동 및 멈춤이 반복되는 특성을 보임.
- 냉열생산 성능을 높이기 위해서는 외기온을 낮추는게 중요함.



[그림] 외기 온도 변화(-20, -15, -10°C)에 따른, 초기 축냉조 물온도 15°C 조건에서 OHP 냉열생산 성능 결과

다. OHP기반 자연냉열 생산 실증 실험

- OHP 냉열생산 기초성능 실험결과를 기반으로 실증현장에서 냉열생산 성능 실증실험을 수행함. 실증실험은 2022년 2월부터 3월까지 한 달 동안 진행 됨.
- 실증실험 장소는 본 과제의 실증장소인 강원도 평창군 대화면 신리 1957-9번지.
- 38개의 효용수(턴 수)를 가지는 OHP 열교환 모듈을 구리재질의 모세관 튜브(내경: 2 mm, 외경: 3.2 mm)를 이용하여 시제품을 제작함.
- OHP모듈의 고온부(증발부)에는 물이 흐르면서 흡열을 하고, 저온부(응축부)에는 차가운 공기와 접촉하면서 열전달이 물에서 차가운 공기로 방열하는 구조로 되어 있음.

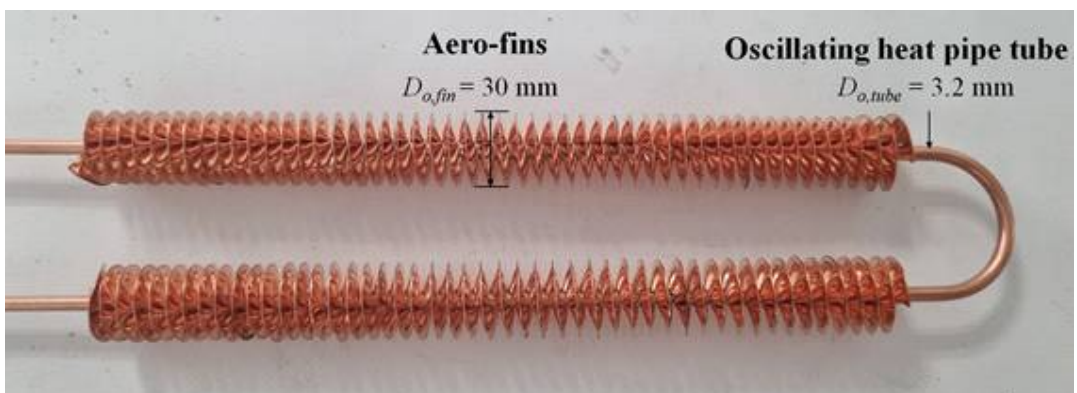
이 때 공기 측 열전달 성능을 높이기 위해 aero-fins를 제작하여 설치 함.



[그림] 실증 장소 (강원도 평창군 대화면 신리 1957-9번지)

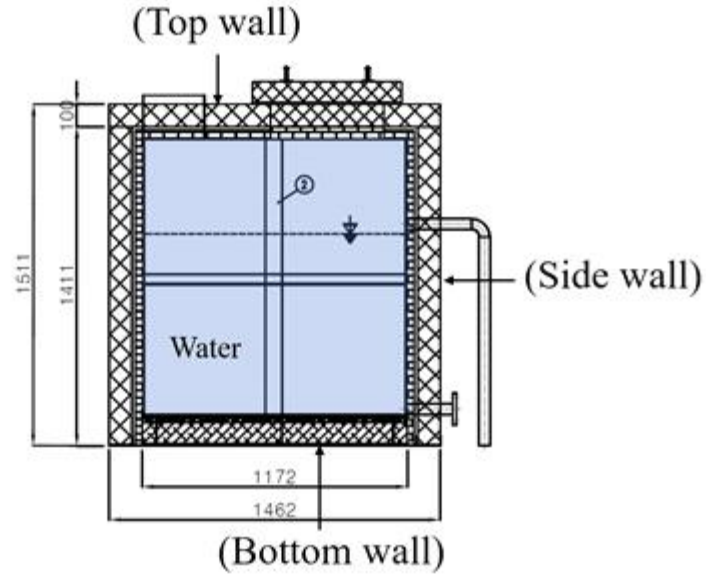


[그림] OHP 자연냉열 생산 및 저장 실증 실험 장치



[그림] OHP 응축부의 aero-fins 구조

- OHP를 이용하여 생산된 냉열을 저장하기 위해 공동연구기관 에임트(주)에서 개발하고 제작한 진공단열재(VIP) 기반의 초고단열 1톤 용량 축냉조를 제작하여 실증현장 지중에 설치함. 축냉조 내부에는 물 1톤이 채워져 있음.



<p>Poly urethane 100T VIP 35T STS304 4T</p>	<p>Poly urethane 100T VIP 35T STS304 4T</p>	<p>STS304 4T Glass wool 25T Poly urethane 100T STS304 2T</p>
Top wall	Side wall	Bottom wall

[그림] 생산된 자연냉열 저장을 위한 진공단열재(VIP)기반 초고단열 축냉조 구조





[그림] 생산된 자연냉열 저장을 위한 진공단열재(VIP)기반 초고단열 축냉조 설치

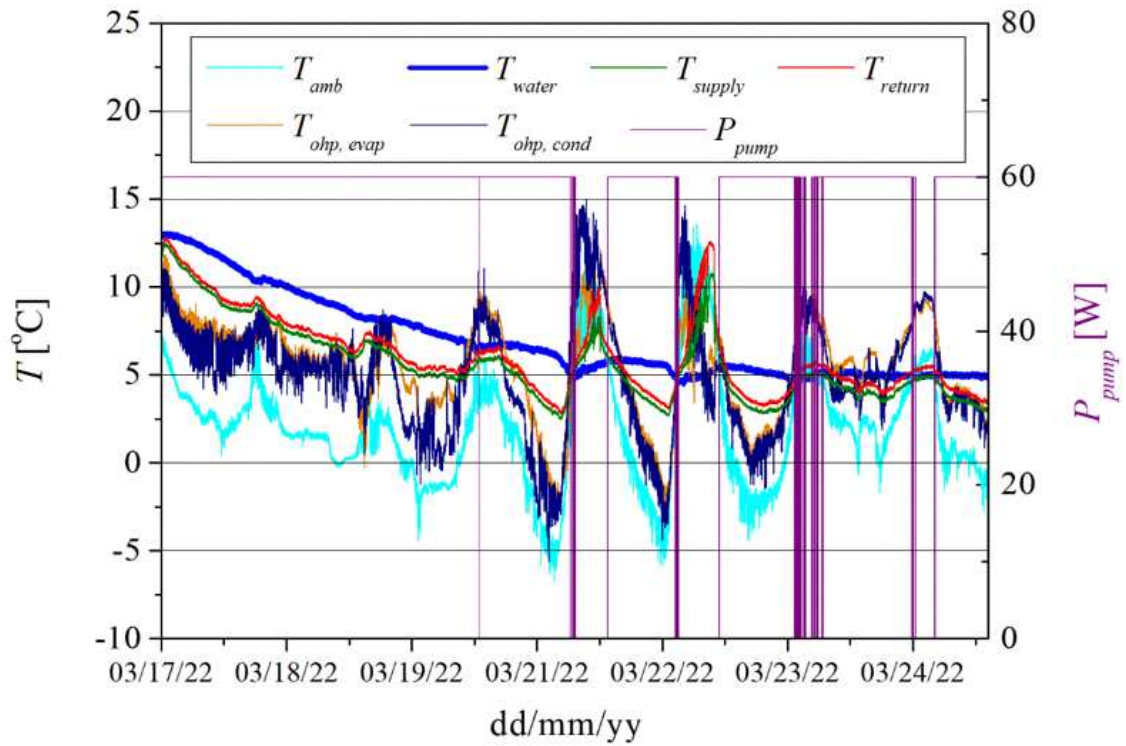
- OHP의 고온부(증발부)는 배관을 통해 축냉조 내부와 연결되어 있고, 배관 내부에는 브라인(부동액)이 흐르면서 축냉조 내부 물을 차갑게 만들어서 냉열이 저장됨.
- 실증현장의 외기온이 축냉조 내부 물 온도보다 낮을 때, 배관 내부에 브라인(부동액)의 유동이 발생하여 냉열이 생산되어 축냉조에 저장됨. 반대로 외기온이 축냉조 내부 물 온도보다 높을 때, 브라인 유동이 정지하여 축냉조에 저장되어 있는 차가운 열 손실이 발생하지 않도록 제어 시스템이 구축 되어 있음.
- 본 시스템에서는 브라인을 순환시키기 위해 60W 소비전력을 갖는 순환펌프를 사용함.
- 냉열생산량은 브라인 질량유량, 비열, 브라인 환수 및 공급온도를 이용하여 다음의 식을 통해 얻을 수 있음. 브라인 환수는 OHP 모듈에 들어가는 덜 차가운 브라인, 브라인 공급은 OHP 모듈을 통과하여 나오는 차가워진 브라인을 의미함.

$$Q_{cold} = \dot{m}c_p (T_{brine, return} - T_{brine, supply})$$

- 초기 온도 13°C의 축냉조 내부 물은 자연냉열 생산 및 저장을 통해 약 10°C 온도가 하강하여 최대 약 1kW의 냉열생산능력을 검증함.



[그림] OHP 자연냉열 생산 및 저장 실증 실험 장치

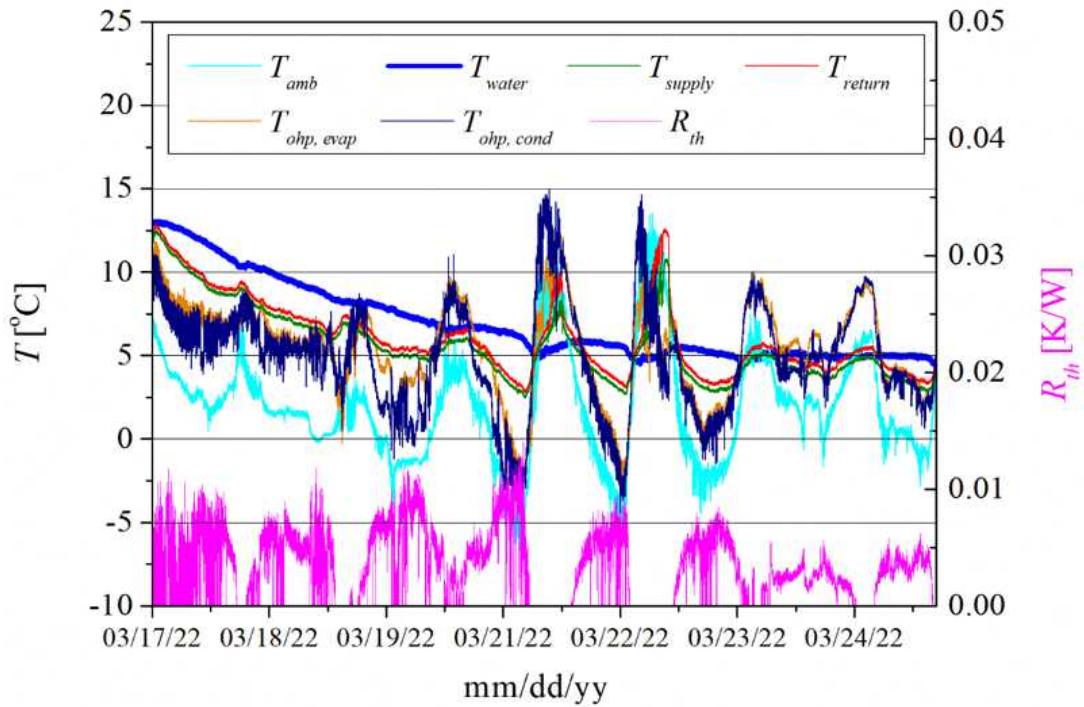


[그림] OHP 자연냉열 생산 모듈의 외기온, 축냉조 물온도, 브라인 입출구온도, OHP 고온부 및 저온부 온도, 브라인 순환펌프 소비전력 분포

- OHP 자연냉열 생산 모듈의 열전달 성능은 다음과 같이 열저항으로 나타냄. $T_{ohp, evap}$ 는 OHP의 고온부(증발부) 표면 평균온도를, $T_{ohp, cond}$ 는 OHP의 저온부(저온부) 표면 평균온도를 나타냄.

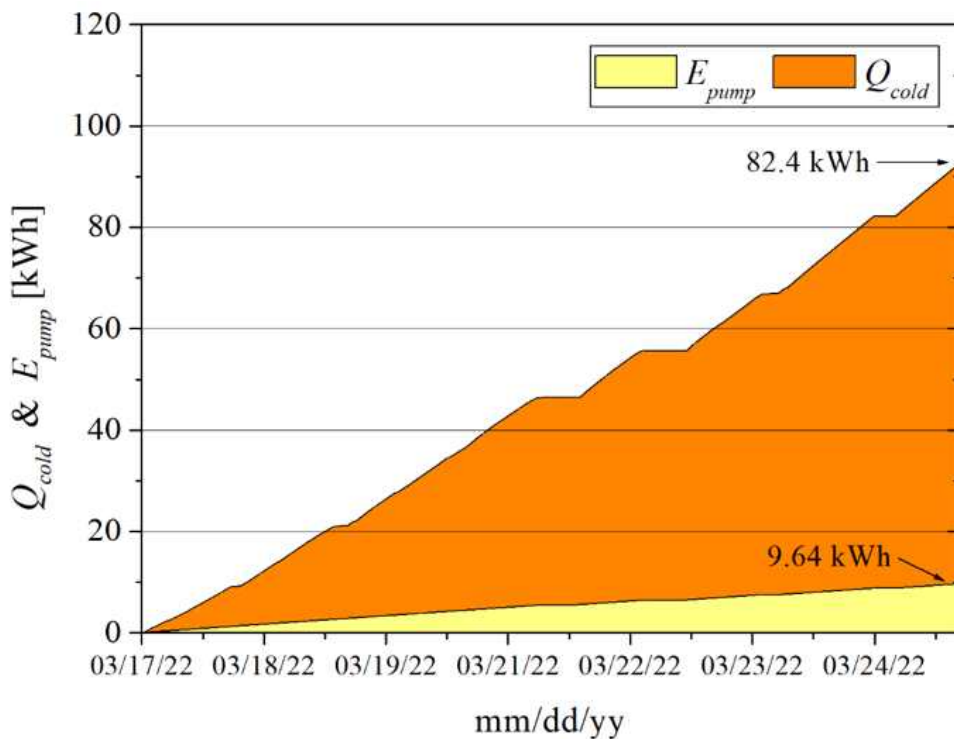
$$R_{th} = \frac{T_{ohp, evap} - T_{ohp, cond}}{Q_{cold}}$$

- OHP 자연냉열 생산 모듈이 정상적으로 작동할 때, 열저항은 0.02 K/W 이하의 값을 나타냄. 일반적으로 우수한 성능을 갖는 히트파이프의 열저항은 0.01~0.03 K/W이기 때문에, 본 실험에서의 0.02 K/W 이하의 열저항은 매우 우수한 열전달 성능을 나타냄.

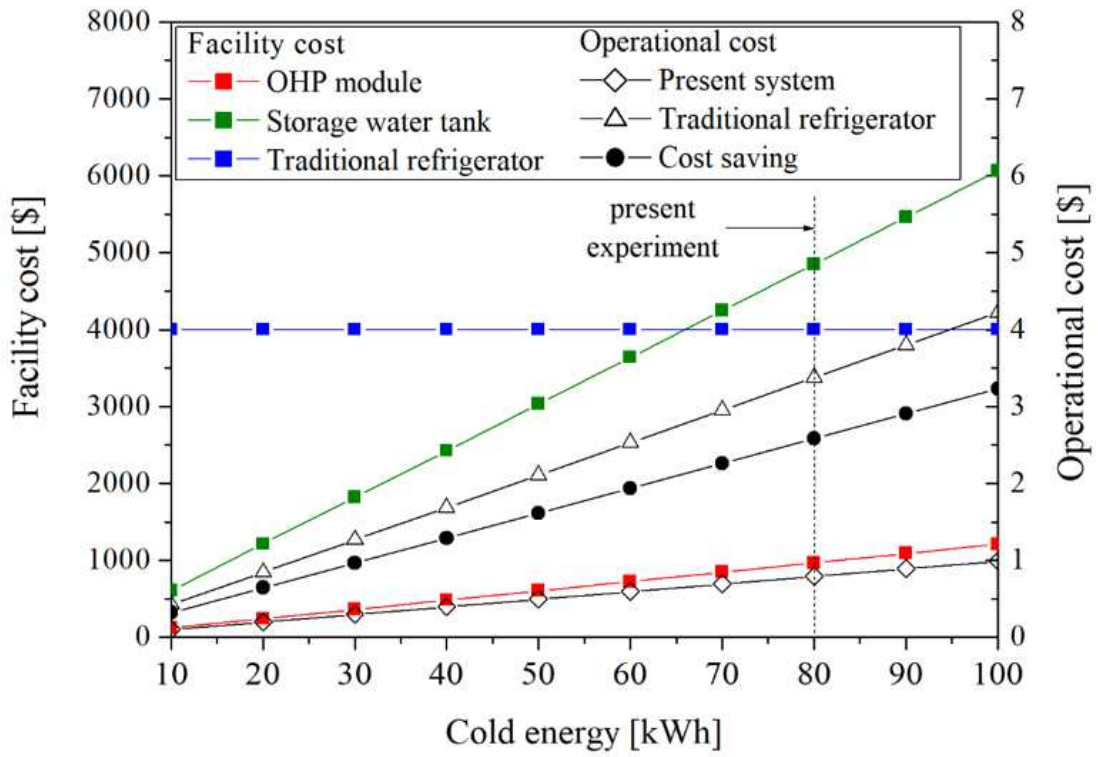


[그림] OHP 자연냉열 생산 모듈의 열저항 변화

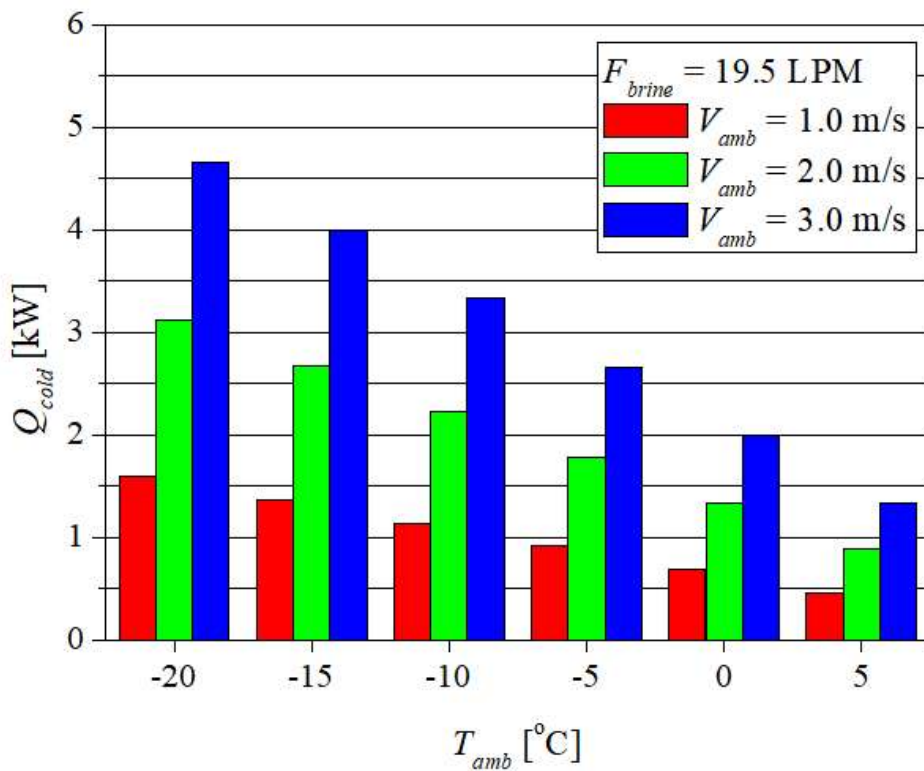
- OHP를 이용한 총 자연냉열 생산량은 82.4 kWh이고, 해당 자연냉열을 생산하기 위한 총 소비전력은 9.64 kWh 임.
- 기존의 전기냉방 시스템을 이용하여 동일한 82.4 kWh의 냉열을 생산하기 위해 필요한 전기냉방 시스템의 소비전력은 약 41 kWh 임. 이때 전기냉방 시스템의 성능지수(COP)는 약 2로 가정함.
- 따라서 OHP를 이용한 동절기 자연냉열 생산 기술은 기존의 전기냉방 시스템에 비해 상당한 에너지 절감이 가능함을 확인함.



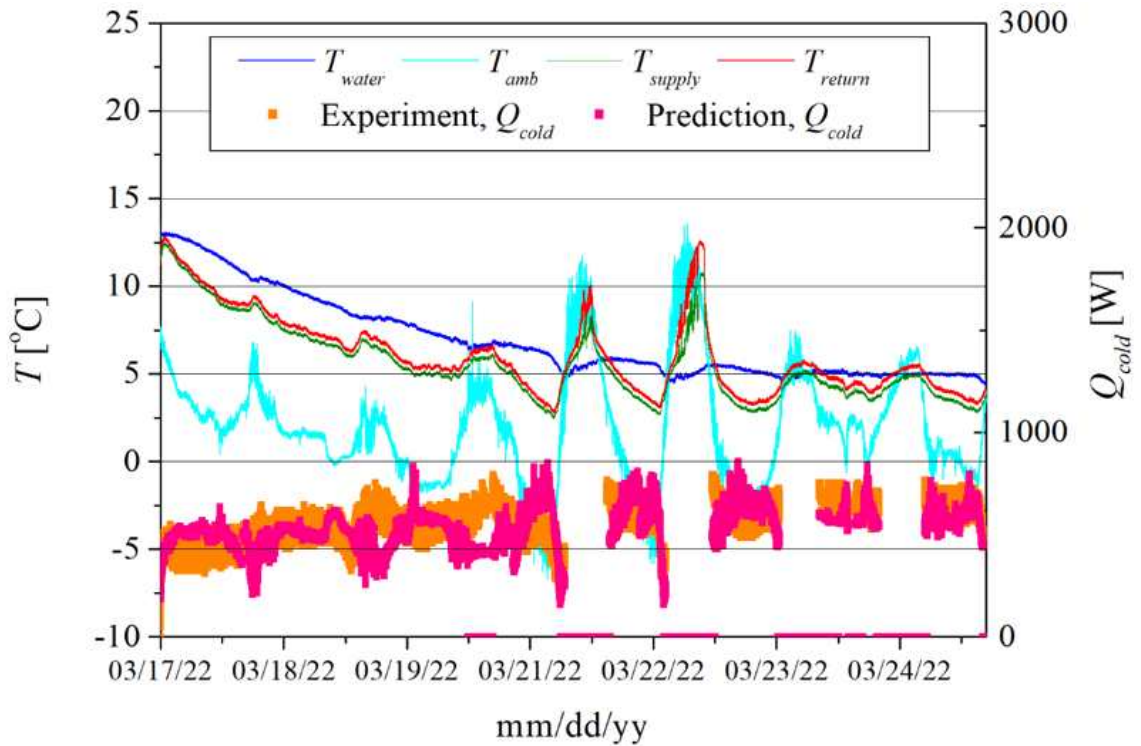
[그림] OHP 자연냉열 생산량과 소비전력



[그림] OHP 자연냉열 생산에 대한 경제성 분석



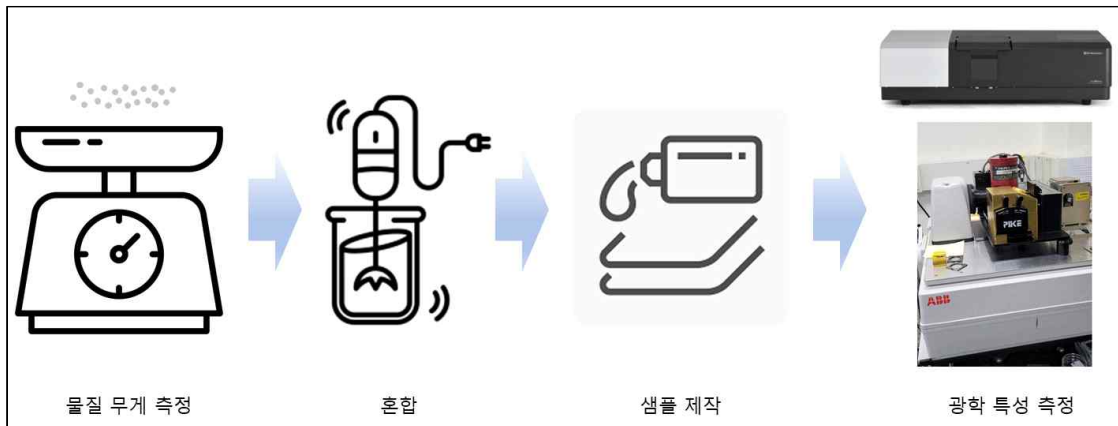
[그림] OHP 자연냉열 생산 모듈의 열저항 변화



[그림] OHP 자연냉열 생산 모듈의 열저항 변화

라. OHP기반 자연냉열 생산 고도화를 위한 복사냉각 기술 개발

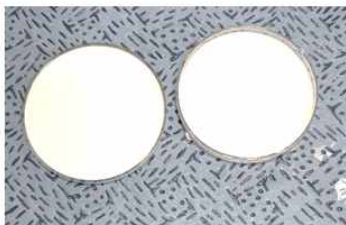
- 복사냉각 기술은 태양광의 반사를 유도하기 위해 은(Ag) 반사층을 사용하게 되나 이 경우 대면적화가 어렵고, 경제성 측면에서 불리함. 이에 파티클 분산을 통한 빛의 산란(Scattering)을 유도함으로써 태양광을 반사하는 방식을 택하여 대면적화, 저비용, 고내구성의 특징을 갖는 구조 도출 연구를 진행함.
- 이종 물질이 혼합된 경우 굴절률(refractive index)의 차이가 큰 경우 반사율이 높아지는 특성을 이용해 고려하는 물질의 광학 계수를 조사하고 매질과 굴절률 차이가 큰 물질(이산화티타늄)을 선정함.
- 크기에 대한 산란계수를 Mie scattering을 계산하여 산란 정도를 예측함. 계산 결과 0.5 μm (마이크로미터) 크기의 이산화티타늄 입자가 태양광 산란에 효과적일 것으로 판단되어 이를 이용한 샘플 제작을 진행함.
- 미세 사이즈(마이크로-나노미터) 입자를 포함하는 복사냉각 소재 제작 시 입자들 간 간격, 농도 등이 고르게 분포되어야 함. 그러나 일반적으로 복사냉각에 사용되는 물질의 점도가 높아 입자의 혼합 및 분산이 어려움.
- 이에 새로운 혼합 방법 (저점도 휘발성 용매 활용)을 통해 혼합을 유도하고 상기 문제를 극복함.



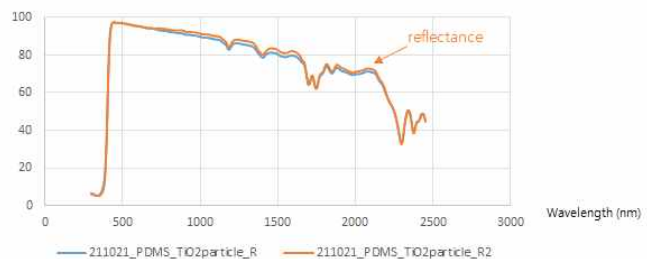
[그림] 복사냉각 폴리머 제작 및 측정 절차

- KAIST 기계공학과에서 보유하고 있는 두 개의 광학 특성 측정 장비를 활용함.
- 첫 번째 장비는 UV-Vis-NIR 측정 장치(Shimadzu, UV-3600)로 UV-Vis-NIR영역 (0.3-2.5 μm) 에서의 광학 특성(Transmission/Reflection/Absorption)을 측정하는 장치로 태양광 반사도 및 흡수도 측정이 가능함. Resolution 은 0.1 nm, 정확도는 UV-Vis 영역에서 ± 0.2 nm, NIR 영역에서 ± 0.8 nm 임.
- 두 번째 장비는 IR영역(2.5-15 μm) 에서의 측정 장비로 ABB 사의 FTIR(Fourier Transform IR)을 이용함. 적외선 영역대의 분자진동 모드를 분석하여 측정시료의 성질을 분석하는 방법으로 유기물, 폴리머 등의 정성, 정량분석의 기본 분석법으로 널리 사용됨.

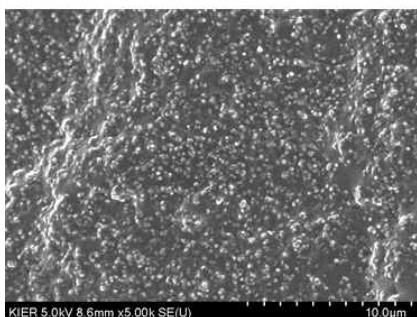
복사냉각 샘플 제작 사진



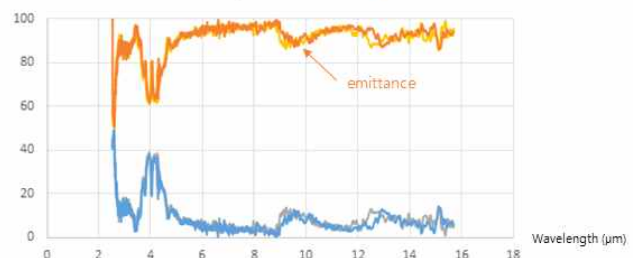
PDMS + TiO₂ particle UV- Vis-NIR 광학 특성



복사냉각 샘플 SEM 측정 사진



PDMS + TiO₂ particle IR 광학 특성



[그림] 복사냉각 폴리머 제작 및 측정 절차

- 샘플 제작 및 SEM 측정, 광학 특성 분석을 수행함. 샘플은 흰색으로 반사 특성을 갖고, SEM 측정 결과에서 볼 수 있듯이 particle 이 고르게 분포되어 있음.
- 태양광이 주로 입사되는 가시광 영역에서의 반사도(reflectance) 가 90 % 이상이며,

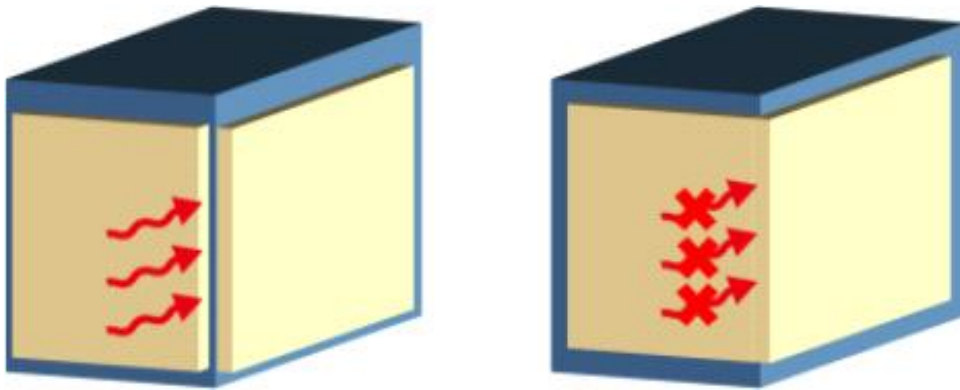
대기창 영역의 방사율(emittance)도 90 % 이상임을 확인할 수 있음. 1,000 W/m² 강도의 태양광 입사 조건에서 냉각 성능은 34.3 W/m² 로 나타남.

- 이종 사이즈 입자 혼합을 통해 추가적인 성능 향상을 도모할 수 있을 것으로 판단되어 최적화 연구 및 도출된 소재를 이용한 동절기 야외 실험 진행 예정임.

2-2 고성능 냉열저장을 위한 고효율 진공단열재(VIP) 개발 (AIMT(에임트)주식회사)

가. 다양한 형상을 가지는 진공단열재 개발

- 진공단열재는 일반적으로 직사각형 판상 형태로 제조됨. 그러나 축냉조는 외벽에 다수의 파이프와 구조물이 존재하며, 직사각형상만으로는 축냉조의 단열 커버리지를 높이는 데 한계가 있음.
- 또한, 아래 그림처럼 모서리에 단열재 간 단절부위가 존재하여 이를 통해 들어오는 열을 효과적으로 차단하기 어려움 (열교 현상).
- 이에, 본 과제에서는 원형, 파이프형, 삼각형, 90도로 절곡된 형태 등 다양한 형상의 진공단열재를 개발하였으며, 각 형상 별 제조상 애로사항을 확인하고 이를 해결하기 위한 연구를 진행하였음.



[그림] 판상형 단열재와 절곡형 단열재 적용 시 열교 발생 비교 모식도













(1) 삼각형, 원형 형상의 진공단열재

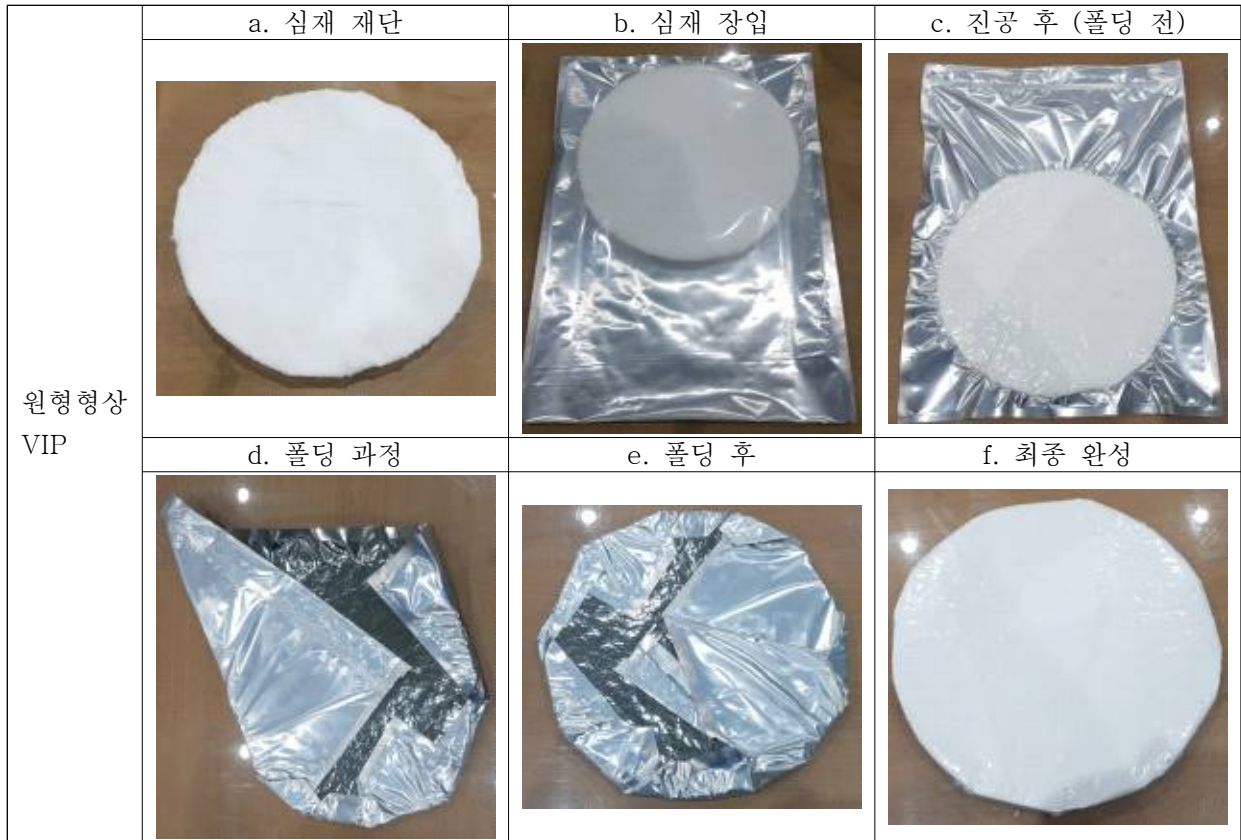
- 진공단열재의 제조는 크게 “심재 재단과 파우치 제조” - “파우치에 심재 장입” - “진공 챔버에서 진공공정” - “폴딩 및 마무리” 단계로 구성되어 있으며, 아래 표와 같은 이유로 직사각형상으로 제작되는 것이 일반적임.

[표] 다양한 형상의 진공단열재 제조 과정에서 발생하는 애로사항

a	파우치 제작 : 필름 A와 필름 B를 언와인딩 후 양측 측면부 실링하여 접착한 뒤, 일정 간격을 두고 하방 실링 및 재단하여 제조. 이러한 3방 실링의 특성 상 직사각형상 외 양산 불가
b	심재 재단 : 재단의 수작업에 따른 소요시간과 심재의 자투리 발생, 치수 안정성 등을 고려했을 때 직사각형상이 가장 경제적이고 용이함.
c	폴딩 및 마무리 : 직사각형 외 형상의 경우, 파우치의 자투리 공간이 다량 발생. 폴딩 난이도 상승과 이로 인한 공정시간 증가. 또한, 폴딩 및 마무리 과정에서 외피재가 중첩되어 겹쳐지는 경우가 발생하며, 이는 두께 상승으로 인한 허용공차 이탈 및 표면 편평도 저하 (그로 인한 밀착성 감소 및 성능 저하) 등의 문제 야기.

- 우선 기존의 진공단열재 제조공정에 따라 사각, 삼각, 원형 형상의 진공단열재를 제조하고, 최종 형상과 공정 별 소요시간을 비교하였음.

사각형상 VIP	a. 심재 재단	b. 심재 장입	c. 진공 후 (폴딩 전)
			
	d. 폴딩 과정	e. 폴딩 후	f. 최종 완성
			
	a. 심재 재단	b. 심재 장입	c. 진공 후 (폴딩 전)
			
d. 폴딩 과정	e. 폴딩 후	f. 최종 완성	
			



[그림] 진공단열재의 형상 별 제조과정 비교

[표] 진공단열재의 형상 별 제조공정시간 비교

	사각형상	삼각형상	원형형상
심재 재단	30초	45초	60초
심재 장입	15초	15초	15초
진공 공정	30분 / 30pcs = 1분	30분 / 30pcs = 1분	30분 / 30pcs = 1분
폴딩 공정	1분	2분	4분
총 공정시간 합계	2분 45초	4분	6분 15초
사각형상 대비 증감율 (%)	-	45% 증가	127% 증가

- 사각형상 진공단열재와 비교했을 때 총 제조시간은 삼각형상의 경우 약 45%, 원형형상의 경우엔 약 127% 증가되는 것을 확인하였음.
- 진공단열재의 단가에서 제조공정단가의 비율이 큰 것을 감안했을 때, 원형형상 진공단열재 단가는 약 2배 이상 상승할 것으로 예상됨.
- 또한 최종 제품의 경우에도 폴딩 과정에서 외피재가 다수 중첩되면서 두께가 늘어나고 (두께 공차 이탈) 편평도가 저하되는 문제를 확인하였음.



[그림] 외피재의 중첩으로 표면(바닥)의 편평도가 저하된 모습

- 이러한 문제를 해결하고자 폴딩 과정 대신, 아래 사진처럼 진공 후 심재 부근에 2차 열융착을 진행한 후 외피재를 재단하는 방법을 검토하였으며, 기존 공정과의 장단점을 비교하였음.



[그림] 심재 4개의 모서리를 2차 열융착 한 후, 필름의 여유부를 재단하는 과정 (사각)









[그림] 원형 모서리를 2차 열융착 한 후, 필름 여유부를 재단하는 공정 (원형 VIP)

[표] 기존공정과 신규공정 비교표

	기존 제조 공정	신규 검토 공정	
마무리 공정	폴딩 시간 : 1분 ~ 4분	[삼각, 사각] 용착 시간 : 20초 재단 시간 : 30초 → 약 75% 저감	[원형] 용착 시간 : 1분 재단 시간 : 1분 → 약 66% 저감
최종 형상	표면 편평도 저하 및 두께 균일도 확보 어려움	표면 편평도 및 두께 균일도 확보 심재 테두리에 약 10mm 정도의 실링부위 잔존 → 두께가 얇아 사용 상 큰 지장 없을 것으로 사료	
불량률	불량률 1% 미만	두께에 따라 불량률 3~20%	

- 형상에 관계없이 기존 폴딩 작업에서 열용착 및 재단 작업으로 진행되면서 마무리 공정시간이 최대 75%까지 저감되었음. (다만, 원형 VIP의 경우 실링바가 일직선으로 되어 있어 다수의 용착 작업이 필요하였는데, 추후 도넛형태의 실링바 도입으로 1회 용착 및 공정시간 단축 가능할 것으로 예상됨)
- 또한 삼각과 원형 형상에 대해서도 두께 균일도와 표면의 편평도를 확보할 수 있었음.
- 다만, 열용착이 충분히 되지 못한 경우 필름 재단 과정에서 외부 공기가 투입되어 터짐 불량률이 다수 발생하였음.

	4T	10T
실링 전		
실링 후		
재단 후		
터짐 불량률	3% 미만	20% 이상

[그림] 2차 열용착 및 재단 후의 모습 비교 (4T vs 10T) 및 불량률 비교

- 두께에 따른 불량률을 확인하였을 때, 4T는 약 3% 미만, 10T는 20% 이상으로 불량률의 발생빈도 차이가 컸음.
- 4T 제품의 경우, 진공 공정 후 외피재에 주름 발생이 적었던 반면, 10T의 경우, 심재 모서리와 꼭지점 부위에 자잘한 주름이 많이 발생하였음, 이는 진공 공정 후 대기압에 의해

심재 수축 과정에서, 고 두께일수록 필름에 더 많은 스트레스와 변형이 발생했기 때문임.

- 현재 구비하고 있는 실링바는 큰 압력으로 외피재를 눌러주지 못하므로 주름부위에 완벽한 실링을 할 수 없고, 외피재의 재단 시 이 부위가 기체 침입 통로로 작용, 터짐불량을 야기하였음.
- 이러한 불량을 해결하기 위해 차년도 연구에서 2가지 솔루션을 연구하고자 함.

[표] 터짐 불량률 저하를 위한 개발방향

a	실링기의 프레스압력 및 실링강도 강화 : 외피재의 주름부위에 강한 압력과 열을 가해 실링강도를 강화
b	부품율이 낮은 심재 개발 : 진공전후의 심재 두께 차이가 적은 심재를 개발. 진공 전 심재 두께가 얇으면 그만큼 외피재를 심재 사이즈에 맞게 타이트하게 제작할 수 있음. 이 경우 외피재에 발생하는 스트레스와 변형이 감소하여 주름발생 억제.

- 심재의 부품율은 심재의 제조공정 및 핫프레스 공정을 통해 제어 가능함. 심재에 고온을 가하여 섬유 표면을 일시적으로 용융시킨 후, 프레스를 가하여 섬유와 섬유를 서로 융착시킴으로써 심재의 두께를 줄이고 부품율을 억제할 수 있음.
- 다만, 과도한 부품율 억제는 진공단열재의 성능 저하를 야기하므로 (섬유 간 점접촉이 면접촉으로 바뀌면서 열전달 용이) 부품율과 성능의 발란스를 찾는 것이 중요함.
- 심재 부품율 50% 수준으로 낮추어 터짐 불량률을 10% 이하로 저감시키고, 열전도도는 0.0025W/mK 이하를 만족시키는 심재 제조 공정 조건을 셋업함으로써 다양한 형상의 진공단열재 제조 노하우를 확보하고자 함.

(2) 원통형 진공단열재 개발



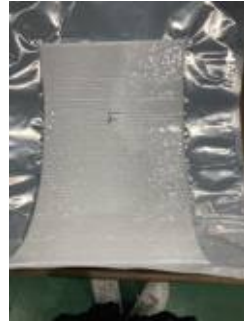



- 축냉조는 다수의 냉, 온수가 흐르는 배관이 존재하며, 이를 단열하기 위한 원통형 진공단열재를 개발하였음.
- 먼저 지관을 활용해 진공단열재를 원통형으로 굴곡시켰을 때 두께 별 불량률을 파악하고 제조 가능한 한계 두께를 파악하였음.



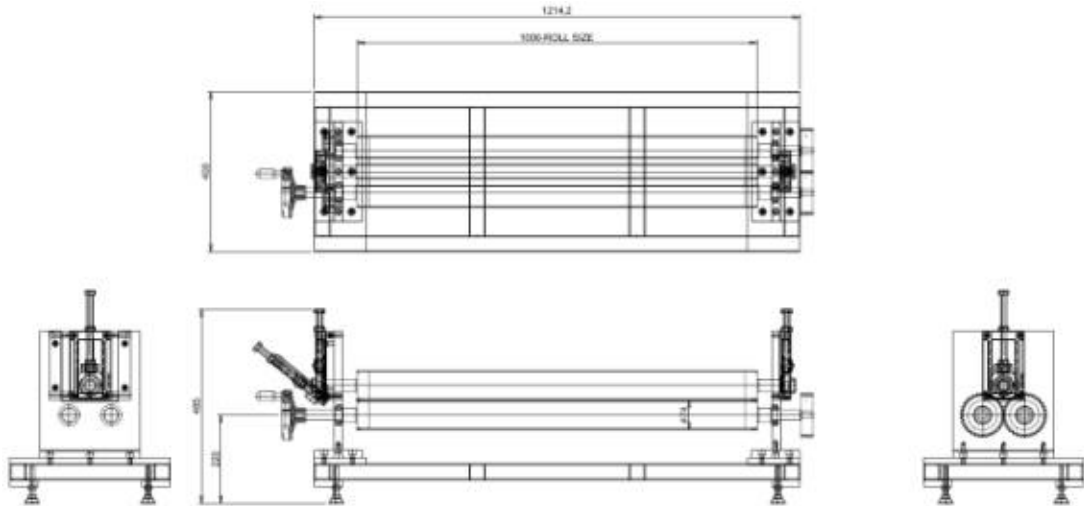
[그림] 지관을 활용한 진공단열재 굴곡 과정

- 진공단열재는 외피재에 의해 내부가 진공으로 유지되고 있으며, 외피재에 작은 핀홀이라도 발생할 시, 외부 기체 침투에 의한 성능저하 및 터짐불량이 발생함.
- 진공단열재를 굴곡시킨 후 진공단열재의 표면에 다수의 주름이 발생하는 것을 확인, 외피재에 높은 스트레스가 작용했을 것으로 추측되었음.

[표] 두께에 따른 원통형 진공단열재 표면/완성 사진 및 불량률

	2T	4T	6T	8T
제조가능 최소직경	100mm 이하	150mm	200mm	지관으로 원통형 제작 불가
표면 사진				-
원통형 사진				-
불량률	3%	6%	15%	-

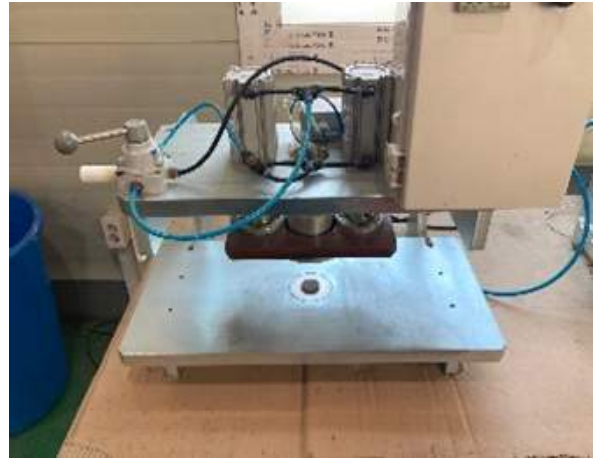
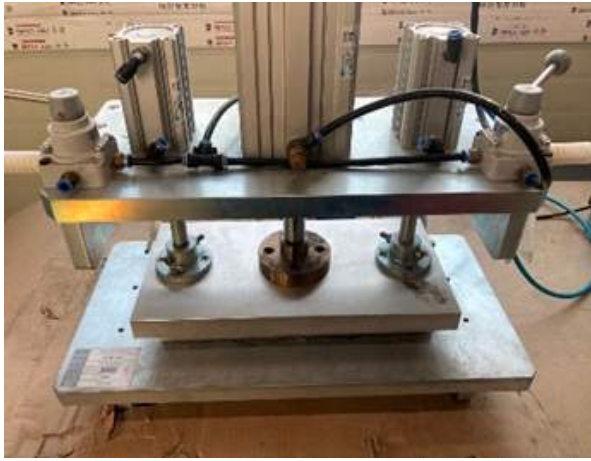
- 실제 불량률을 파악한 결과, 6T 이상에서는 약 15%의 불량률이 확인되었음. 또한, 8T 이상에서는 굴곡이 불가하였음.
- 다만, 이는 지관을 활용한 간이테스트 결과이며, 차년도 연구에서는 아래 그림과 같은 굴곡지그 개발을 통해 굴곡한계두께 증가 및 불량률을 저감하고자 함. (12T 및 10% 미만)




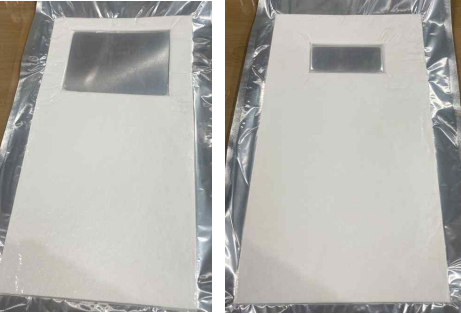


[그림] 원통형 진공단열재 제조용 굴곡지그 도면

(3) 홀을 가지는 진공단열재 개발




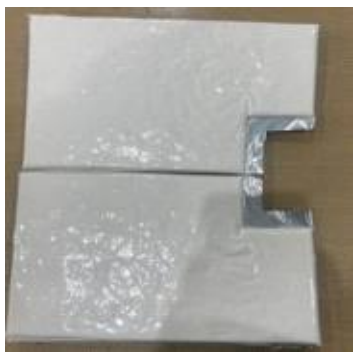
- 파이프가 돌출되어 나오는 벽면에 적용하기 위해서는 내부에 홀이 타공된 진공단열재 개발이 요구되었음.
- 홀이 타공되는 부위의 외피재는 반드시 타공 전 충분한 실링과정이 요구되며 이를 위해 아래 사진과 같은 홀실링 지그와 타공 지그를 제작하였음.
- 외피재에 직접 홀을 타공하는 방법과 다수의 진공단열재를 이어붙여 제작하는 방법, 2가지 방법을 비교, 검토하였음.



[그림] 홀 실링 및 타공 지그

방법 A	제조 공정	
외피재 홀 타공	a. 심재 재단	b. 진공 후 폴딩 전 모습
		
	c. 홀 부위 실링	d. 홀 타공
		

[그림] 외피재에 홀을 타공하는 공정

방법 B	제조 공정	
	다수 진공단열재 결합	a. 심재 재단
		
c. 코너부 열융착		d. 폴딩 및 완성
		

[그림] 다수의 진공단열재를 이어붙여 홀을 형성하는 공정

[표] 홀을 가지는 진공단열재의 제조공정별 비교

	방법 A	방법 B
공정 시간	a. 심재재단 : 2분 b. 진공공정 : 1분 (30분/30pcs) c. 홀 부위 실링 : 5분 d. 홀 타공 : 2분 합계 : 10분	a. 심재재단 : 4분 (4개 심재 재단필요) b. 진공공정 : 1분 (30분/30pcs) c. 코너부 열융착 : 2분 (4개 기준) d. 폴딩 : 4분 합계 : 11분
불량률	20% 이상	5% 미만
고찰	- 홀실링 지그의 사이즈가 작아 다수 실링 작업이 필요하고 그에 따른 작업시간 상승 - 사각형상 및 사이즈가 확대된 지그 사용 시 보다 안정적이고 빠른 작업 가능할 것 으로 예상. - 홀 타공 과정에서 불량 다수 발생 (원형 지그로 인해 홀의 모서리부가 충분히 열융 착 되지 못하는 것으로 사료되며, 사각형상 으로 교체 시 개선될 것으로 예상)	- 1개의 홀을 가지는 진공단열재 제작 시, 2개~4개 다수의 진공단열재 제작 요구되 며 그에 따른 단가 상승 (동일 사이즈 제작 시 A방법 대비 약 2배 예상됨) - 홀의 사이즈 제약 없으며, 불량률 낮음. - 진공단열재가 서로 맞닿은 부위에 열교 발생 가능함.

- 작업 시간은 A와 B 간 큰 차이는 없었음. 다만, 현재 가지고 있는 홀/타공 지그를 개선 (기존 소형 원형 지그를 대형 사각 지그로 대체) 할 경우 A 방법의 작업시간을 3분 이상 저감할 수 있을 것으로 예상됨.
- 불량률은 B 공정이 A 공정 대비 1/4 수준으로 낮게 확인되었음. 다만, 다수의 진공단열

재 제작에 따른 단가상승 (2배 이상)과 열교 발생 가능성이 높다는 단점이 있어, 궁극적으로는 A 공정으로 가는 것이 바람직할 것으로 사료됨.

- 차년도 연구에서는 홀/타공 지그를 개선하여 A 공정 작업 시 불량률과 작업시간 개선을 확인하고자 함.

(4) 90도 절곡된 진공단열재 개발






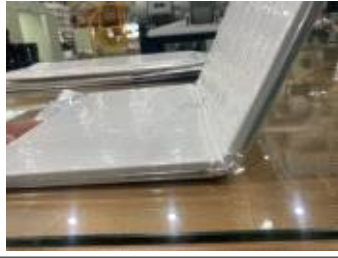
- 축냉조의 모서리부 열교 저감 및 커버리지 향상을 통한 단열성 개선을 위해서 90도로 절곡된 진공단열재를 개발하였음. 절곡 과정 역시 필름에 과도한 스트레스를 야기하는 만큼, 진공단열재의 두께에 따른 불량률의 상관관계를 검토하였음.









[그림] 절곡 지그를 이용한 진공단열재 절곡 과정

- 테스트 결과, 12T 미만의 경우 절곡 후 파손불량률(터짐 불량)이 1% 미만으로 적었던 반면, 15T 이상에서는 5%로 상승하는 것을 확인하였음. 또한 15T는 절곡 부위의 R 값이 크고 축냉조 모서리부에 적용 시 밀착되기 어려워, 열교차단을 위한 적용 의미가 없을 것으로 판단하였음.

- 파손 불량률 외, 성능 불량률을 파악하기 위해 시간 경과에 따른 두께별 열전도 변화를 측정하였음. 12T 미만은 reference 샘플 (절곡X) 들과 비교했을 때 열전도 상승속도가 유사하였으나, 15T 이상에서는 reference 샘플 대비 약 7배 빠른 속도로 열화되는 경향을 보여 주었음.

	4T	6T	8T
그루브 후			
절곡 후			
파손불량률	1% 미만	1% 미만	1% 미만

	10T	12T	15T
그루브 후			
절곡 후			
파손불량률	1% 미만	1% 미만	5%

[그림] 두께 별 절곡 후 형상비교 및 불량률

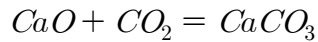
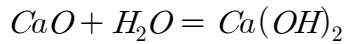
[표] 절곡여부 및 두께에 따른 진공단열재 열전도 상승 비교

샘플 사양		초기 열전도도 (mW/mK)	30일 경과 (mW/mK)	60일 경과 (mW/mK)	90일 경과 (mW/mK)	열전도 상승폭 (mW/mK)
4T	절곡X	2.23	2.21	2.23	2.27	0.04
	절곡O	2.21	2.23	2.22	2.27	0.06
6T	절곡X	2.15	2.20	2.18	2.21	0.06
	절곡O	2.19	2.18	2.22	2.23	0.04
8T	절곡X	2.20	2.23	2.24	2.25	0.05
	절곡O	2.16	2.19	2.21	2.23	0.07
10T	절곡X	2.22	2.21	2.20	2.24	0.02
	절곡O	2.19	2.20	2.22	2.23	0.04
12T	절곡X	2.18	2.20	2.21	2.23	0.05
	절곡O	2.24	2.26	2.28	2.30	0.06
15T	절곡X	2.12	2.14	2.13	2.15	0.03
	절곡O	2.17	2.24	2.30	2.37	0.20

나. 진공단열재의 수명 확보 및 가속시험법 개발

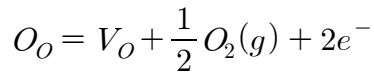
(1) 내부 잔류가스 제거를 위한 고성능 흡착소재 개발

- 1차년도에 25.447 m²/g 이상의 고비표면적 CaO 제조공정을 개발하여 흡착제의 성능을 강화하였으나, CaO는 기본적으로 수분과 이산화탄소만 흡착 가능하므로 장기 수명을 확실히 보장하기 어려웠음.



- 진공단열재 내부로 침투하는 기체 중 가장 높은 비율은 질소와 산소임. 그러나 질소의 경우 3중결합의 안정적인 구조로 화학흡착이 쉽지 않은 소재임. 이에, 두 번째로 큰 비중을 차지하는 산소 흡착을 목표로 관련 문헌을 조사하였음.

a) 일본 특허 JP3288265B2은 산소결핍 이산화티타늄 (TiO_{2-x}) 분말을 활용한 산소흡착제에 대해 주장하고 있으며, 산소결핍 비율은 0.01%에서 50% 범위임. (0%는 온전한 이산화티타늄) 산소결핍 이산화티타늄은 산소가 희박한 환경 (비활성기체, 질소, 수소 기체 등)에서 약 800°C 고온으로 가열하여 제조함.



위 반응은 가역적으로 일어나며, 산소결핍 이산화티타늄이 공기에 노출되면 역반응, 즉 산소를 흡착하는 반응이 일어남.

b) Erik W., et al. Science 303, 511 (2004) 에서는 TiO_{2-x} 표면에서 산소 분자의 흡착 및 확산을 STM으로 관찰한 연구를 다루고 있음. 또한, O Vacancy의 농도와 온도가 높을수록 산소 분자의 hopping rate가 증가함을 보여주었음.

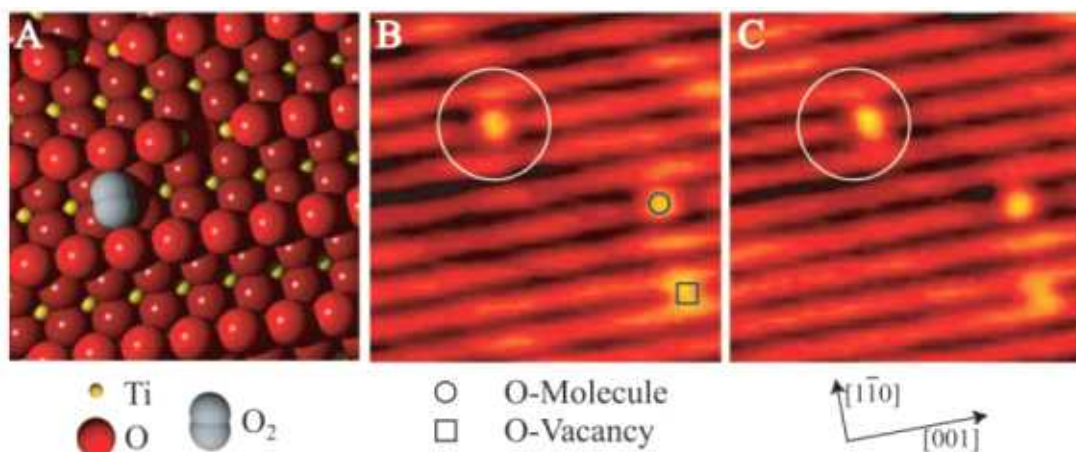
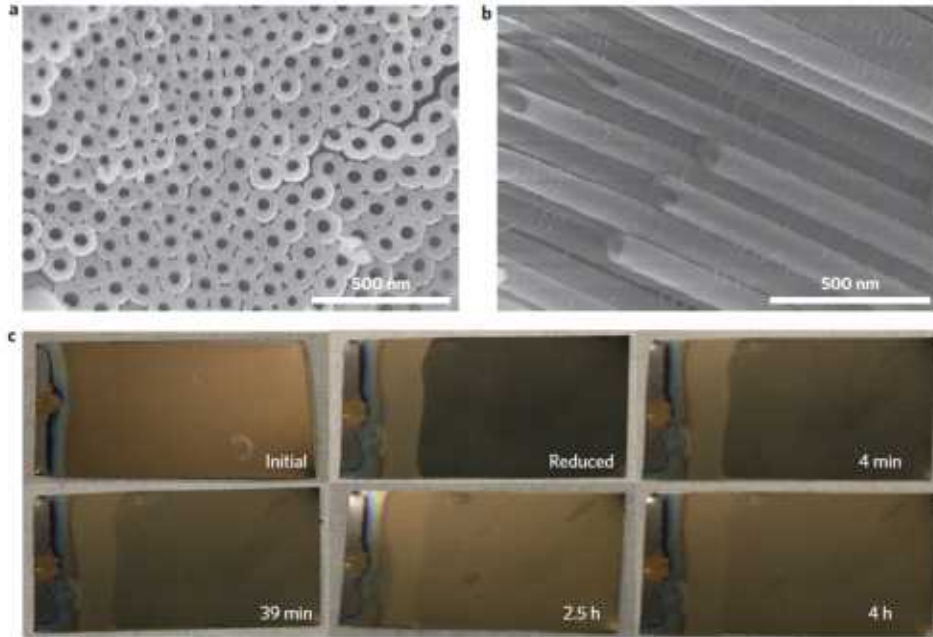


Fig. 1. (A) Schematic ball model of the TiO₂(110) surface. (B and C) An example of observed O₂ molecules and diffusion events (in circle). Two sequential STM images are shown; frame rate is 2.23 s⁻¹; bias voltage, 1.25 V; tunnel current, 0.22 nA. Image was acquired at 240 K, and its size is 65 Å by 65 Å.

[그림] TiO₂ 내 산소분자의 확산에 대한 STM 이미지

c) 한편, Thomas C., et al. Nature Nanotechnology. 10, 418-422 (2015) 과 Gaurav T., et al. Packag. Technol. Sci. (2017) 에서는 TiO₂ 나노튜브를 활용한 산소흡착 연구를 다루고 있음. 기존 소재 대비 약 수 천배 이상 뛰어난 산소흡착능력을 보여주었는데 그 이유를 나노튜브 형상에 기반한 반응표면적의 증가로 설명하였음.



[그림] TiO₂ 나노튜브의 SEM이미지와 시간에 따른 색깔 변화 관찰
(출처 : Thomas C., et al. Nature Nanotechnology. 10, 418-422 (2015))

- 상기 문헌 조사를 기반으로, 산소흡착 게터를 개발하기 위하여 기존 CaO 분말에 산소결핍 산화티타늄 분말을 섞어 게터를 제조하였음. 산화티타늄 분말은 일본의 Ako Kasei에서 구매하였음.



[그림] 게터 제조 과정

- 그러나 일반적으로 산소흡착 능력을 높이기 위해서는 가시광선이나 자외선 등의 광자극이 필요한 것으로 확인되었고 진공단열재 내부로는 빛 침투가 어려운 바, 반응성을 높이기 위한 다른 방안이 필요하였음.

- 이에 아래 문헌조사를 기반으로 Pt와 Pd 등의 촉매를 소량 첨가하여 이산화티타늄의 산소 흡착능력을 향상시키고자 하였음.

d) C.L.Muhich et al., J. Phys. Chem. C, 2012, 116, 10138 논문에는 Pt 촉매 유무에 따른 TiO₂ 표면에서 발생하는 산소흡착 메커니즘을 설명하고 있음. Pt 표면에 산소흡착 사이트가 생성됨으로써, Pt가 없을 때보다 더 많은 산소 흡착이 가능함.

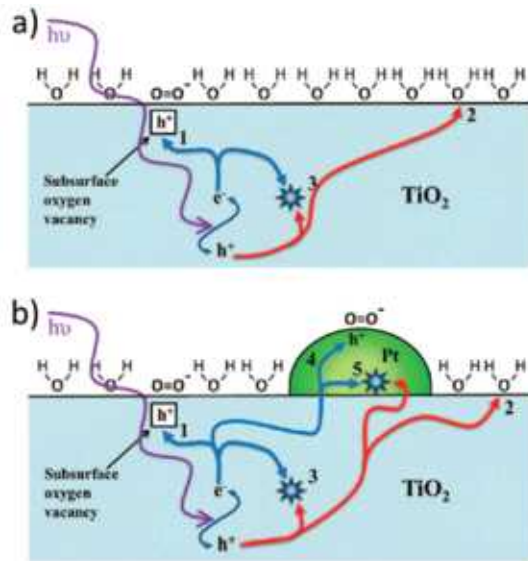


Figure 7. Schematic representation of the photoexcited electron and hole paths in (a) TiO_2 and (b) Pt/TiO_2 . Process 1 represents an excited electron annihilating the hole created by O_2 scavenging electrons from the TiO_2 subsurface O vacancy; process 2 represents water acting as a hole acceptor; process 3 represents electron-hole recombination in TiO_2 ; process 4 represents the excited electron annihilating the hole created in the Pt cluster by O_2 adsorption; process 5 represents the electron-hole recombination in the supported Pt cluster.

표면의 산소가 전자를 흡수하여 환원될 때, Pt가 산소흡착 사이트를 제공, 반응성을 높임.

[그림] Pt 유무에 따른 산소흡착 메커니즘 비교

(출처 : C. L. Muhich et al., J. Phys. Chem. C, 2012, 116, 10138)

- 제작한 게터를 활용하여 진공단열재를 제작하고, 시간 경과에 따른 열전도 변화를 관찰하였음.
- 이상기체 방정식에 의거 진공단열재 내부 (300 x 300 x 10T의 부피, 0.00001기압) 에는 약 10^{-7} 몰의 산소분자가 존재할 것으로 파악되며, 이론적으로는 수 밀리그램의 산화티타늄으로도 충분한 효과를 볼 수 있을 것으로 예상됨.
- 그러나 본 테스트에서는 산화티타늄 여부에 따른 확실한 효과 검증을 위해 CaO 대비 약 10% 무게인 0.4g을 사용하였음. 또한 PdO2를 0.01g, 0.04g, 0.1g 3가지 경우로 나누어 촉매 여부와 양에 따른 성능을 검증하였음.
- 테스트 결과, 산화티타늄이 첨가된 경우 열전도 증가율이 절반으로 감소됨을 확인하였으며, 0.01g (CaO 대비 0.25% 질량비)의 촉매를 사용한 샘플에 대해서도 열전도 증가율이 약 80% 저감되는 것을 확인하였음.
- 향상된 게터의 효과를 보다 정량적으로 검증하기 위해서 차년도 RGA 분석을 진행하고자 함. RGA는 진공단열재 내부의 기체 성분을 분석할 수 있는 장비로, 산화티타늄 사용여부에 따라 진공단열재 내부의 산소기체 함량이 달라질 것으로 예상됨.

[표] 게터 소재별 진공단열재의 열전도 변화 비교

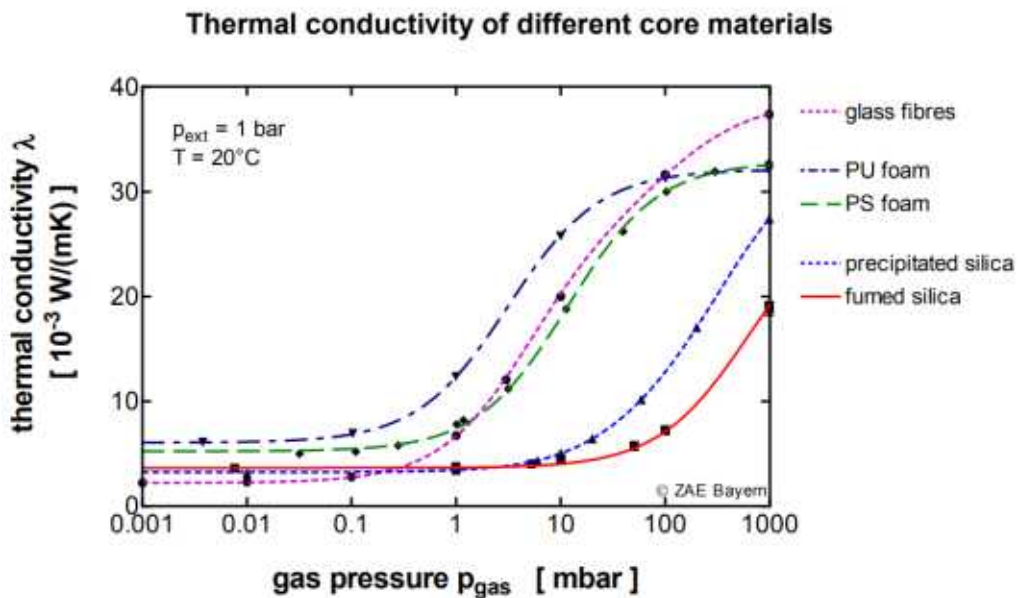
구성	CaO 4g	CaO 4g TiO2 0.4g	CaO 4g TiO2 0.4g PdO2 0.01g	CaO 4g TiO2 0.4g PdO2 0.04g	CaO 4g TiO2 0.4g PdO2 0.1g
초기 성능	2.15	2.09	2.12	2.08	2.08
30일 이후	2.21	2.15	2.11	2.09	2.09
60일 이후	2.30	2.21	2.15	2.08	2.09
90일 이후	2.45	2.25	2.16	2.10	2.11
증가량	0.30	0.16	0.04	0.02	0.03



[그림] RGA (residual gas analysis) 장비

(2) 진공단열재 수명 예측을 위한 가속시험법 개발

- 진공단열재의 성능은 내부 진공도가 감소할수록, 즉 내부의 기체압력이 증가할수록 감소함. 외부에서 들어오는 기체를 제거하기 위해 흡착제가 사용되나 흡착 가능한 양에 한계가 존재하고, 필름 역시 외부 환경 (온, 습도) 및 시간이 지남에 따라 열화되어 배리어성이 감소하게 됨.



[그림] 내부 기체압에 따른 진공단열재 열전도 상승 그래프
(출처 : IEA/ECBCS Annex 39)

- 진공단열재의 수명과 관련하여 한 가지로 명확하게 정의된 것은 없으나, 여러 문헌에서 다음과 같이 정의하고 있음.

a) 진공단열재의 열전도도가 초기값의 2배가 되는 시점 (Baetens, R., Jelle, B. P., Thue,

J. V., Tenpierik, M. J., Gynning, S., & Uvslokk, S. (2010). Vacuum Insulation Panels for Building Applications: A Review and Beyond. *Energy and Buildings*, 42, 147–172)

b) 진공단열재의 열전도도가 초기값의 50% 상승한 시점 (Schwab, H., Heinemann, U., Beck, A., Ebert, H.-P., & Fricke, J. (2005). Prediction of Service Life for Vacuum Insulation Panels with Fumed Silica Kernel and Foil Cover., 28, pp. 357–373.)

c) 진공단열재의 내부 기체 압력이 100mbar에 도달하는 시점 (IEA/ECBCS Annex 39)

d) 진공단열재의 열전도도가 0.01W/mK에 도달하는 시점 (ISO 16478)

- 본 과제에서는 a) 기준에 따라, 5년 후 열전도율이 0.005W/mK (초기값 0.0025W/mK의 2배) 이하가 되는 것을 목표로 설정하였음.

- 진공단열재의 수명은 최소 몇 년 이상으로 길기 때문에 경시변화를 장기간 직접 관찰하는 것은 비효율적임. 이에, 가속수명평가 (Accelerated life test) 즉, 실제 적용되는 환경보다 가혹조건 (고온, 다습) 에 노출시킴으로써 진공단열재를 빠르게 열화시킨 후, 역으로 진공단열재의 수명을 예측하는 연구가 많이 진행되고 있음.

- 진공단열재가 노출되는 일반적인 환경을 평균 23°C, 습도 50%로 가정하였을 때, 가혹조건인 80°C, 70% 환경의 가속계수를 산출하였음.

- 외피재 필름을 통과하는 기체의 투과량은 Fick's 1st law에 의해 아래와 같이 정의됨.

$$Q = D(C_i) \frac{dC_i}{dx}$$

(D: diffusion coefficient, C: concentration)

- 확산계수 D는 Arrhenius식의 형태로 표현되고 다른 조건이 같다는 가정하에 온도에 의해서만 영향을 받음.

$$D = D_0 \exp(-E_a/RT)$$

(Ea: activation energy, R: gas constant, T: absolute temperature)

- 위 두 식에 의해서 가속계수 f는 아래와 같이 계산됨.

$$f = \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1} \right) \right] = P(80C, 70\%RH) / P(23C, 50\%RH)$$

(P : permeability of air and vapor)

- ISO 16478 B.4.1에서 50°C, 70%RH 조건에서의 가속계수 f는 23°C, 50%RH 대비 40 (f_vapor = 10, f_air = 4)이며, 위 식에 의거 80°C, 70%RH의 가속계수는 186임을 확인하였음. (습도가 같으므로 f_vapor는 동일하게 10으로 가정)

[표] 온도, 습도에 따른 가속계수

	23°C, 50%RH	50°C, 70%RH	80°C, 70%RH
f_vapor	-	10	10
f_air	-	4	18.6
f_total	-	40	186

- 위 결과에 따라, 일반적인 환경에서의 5년은 80°C, 70%RH 환경에서 약 10일에 해당함을 알 수 있음.

- 본 연구에서는 다양한 사이즈의 진공단열재를 제작한 후, 30일 간 가속수명평가를 진행하고 열전도 변화를 관찰하였음.

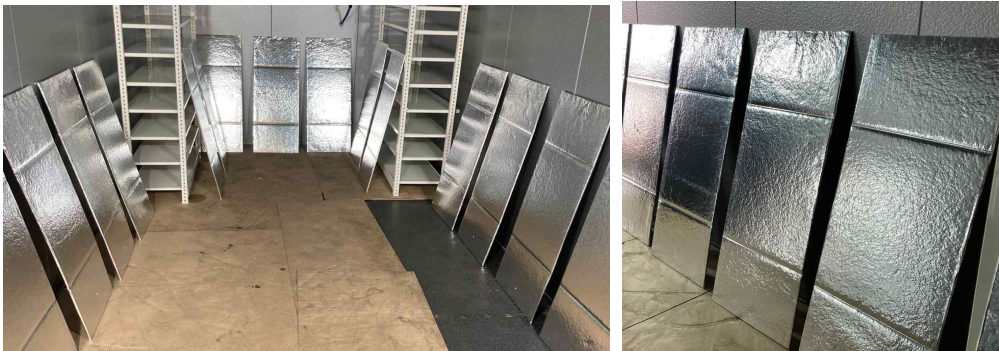
[표] 진공단열재의 사이즈에 따른 가속수명평가 결과

조건 : 80℃, 70%RH	초기값	10일	20일	30일
300 x 400 x 10T	2.13	4.01	5.53	6.70
300 x 1000 x 10T	2.10	4.12	5.32	6.34
500 x 1000 x 10T	2.09	3.77	5.02	6.22
600 x 1500 x 10T	2.10	3.65	4.87	5.92

- 테스트 결과, 진공단열재의 사이즈가 클수록 열전도 상승속도가 느린 것 (즉, 내구성이 우수한 것) 으로 확인되었으며 그 원인을 아래와 같이 고찰하였음.

[표] 진공단열재 사이즈에 따른 가속수명평가 결과 고찰

a	진공단열재에서 가장 취약한 부위는 필름의 폴딩이 발생하는 4개의 코너부로, 전/후면의 평면을 통해 투과하는 기체의 양은 미미할 것으로 예상되며 코너부를 통해 침투하는 기체 양의 비중이 클 것으로 예상됨. 즉, 사이즈에 관계없이 투과되는 기체의 절대적인 양은 동일하다고 가정할 때, 부피가 큰 경우 압력의 증가가 상대적으로 낮고 열전도의 상승 정도 역시 낮음.
b	두 번째로 기체가 잘 통과할 수 있는 부위는 외피재의 실링부위로, 진공단열재의 사이즈가 클수록 실링 부위가 차지하는 비율이 낮음. 예를 들어, 300 x 400 사이즈의 경우, 실링부위는 전체 면적의 약 6%인 반면, 600 x 1500 사이즈의 경우, 실링부위 비율은 약 2.3%에 불과함.
c	진공단열재의 사이즈 비율에 맞추어 게터를 증량 투입하였으나, 사이즈에 비례하여 기체 투과량이 일정하게 증가하지 않고 (a, b에 의거) 따라서 대형 사이즈에서 더 호조건이었을 것으로 예상됨.



[그림] 항온항습 챔버를 이용한 진공단열재 가속수명 테스트



[그림] 쾌속측정기와 대면적 측정기를 이용한 진공단열재(대형)의 성능 측정



[그림] Heat flow meter를 이용한 진공단열재(소형)의 정밀 성능 측정



시험성적서



1. 성적서 번호 : CT22-068493K
2. 의뢰자
 - 업체명 : 매임트 주식회사
 - 주소 : 대구광역시 달서구 달구벌대로226길 22 (신당동)
3. 시험기간 : 2022년 07월 14일 ~ 2022년 07월 22일
4. 시험성적서의 용도 : 국가과제 목표달성 증빙서류 제출용
5. 시료명 : 진공단열재 #3
6. 시험방법
 - (1) KS L 9016:2010
7. 시험결과

1) 진공단열재 #3

시험항목	단위	시험방법	시험결과	비고	시험장소
열전도도(Apparent Thermal Conductivity) [평균온도 : 24 °C]	W/(m·K)	(1)	0.00244	-	A

- * 측정방법 : 평판 직결법(보통 열관법, 중사각형)
- * 건조방법 : (40±5) °C
- * 교정관의 종류 : 1450d [평균온도 : 20 °C, 0.002 W/(m·K)]
- * 시험체 온도차 : 20 °C
- * 시험장소
 - A : 충청북도 청주시 흥원구 오창읍 알참3길 73

확인	작성자명	최석주	기술책임자명	서준식

비고 : 1. 이 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 및 KOLAS 인허가 관련이 있으며, 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명에 한정된 결과로서 전체제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
 3. 이 성적서의 일부를 무단으로 발췌하여 사용한 결과는 보증할 수 없습니다.

[그림] 진공단열재 초기 열전도 관련 공인시험성적서

장비활용 기술지원 보고서

2022. 11. 15

지원담당자 : 지형용 연구원

지원책임자 : 백종현 수석연구원



1. 일반 사항

본 장비활용 보고서는 에임트(주)에서 의뢰한 과제목표 증빙을 위한 진공단열재 가속수명시험에 대하여 한국생산기술연구원 보유장비를 활용하여 기술지원 실험을 수행한 사항임

- 활용 장비 (장비설치장소 : 충남 천안시 서북구 양대기로길 89, 한국생산기술연구원 연구)
- 항온항습챔버 (Humidity Chamber)
- 단열재 열전도 측정장비(Heat Flow Meter)

실험대상 제품 일반사항

구분	사양	구분	사양
제품명	진공단열재	가로(S)	300
모델명	-	외형 크기 (mm)	폭(W)
제조사	에임트(주)	높이(H)	10
제품 사진			

2. 실험 조건 및 방법

2.1 실험 조건은 의뢰자 제시조건에 따른다.

- 시험 조건
- 시험제품인 진공단열재 16ea에 대하여 아래 표에서 제시한 온도, 습도 환경을 모사하고 가속수명시험의 조건을 따를 것
- 시험제품이 제시한 온/습도 환경에서 최소 360시간 (15일) 노출되는 것을 만족 할 것

[표] 시험조건

구분	온도 (°C)	습도 (%)	노출 기간 (hr)
진공단열재	80	75	360

2.2 항온항습챔버 환경모사 가속수명시험 수행

- 항온항습챔버 시험 종료 후 열전도 측정장비 활용을 통한 진공단열재 열전도율 측정



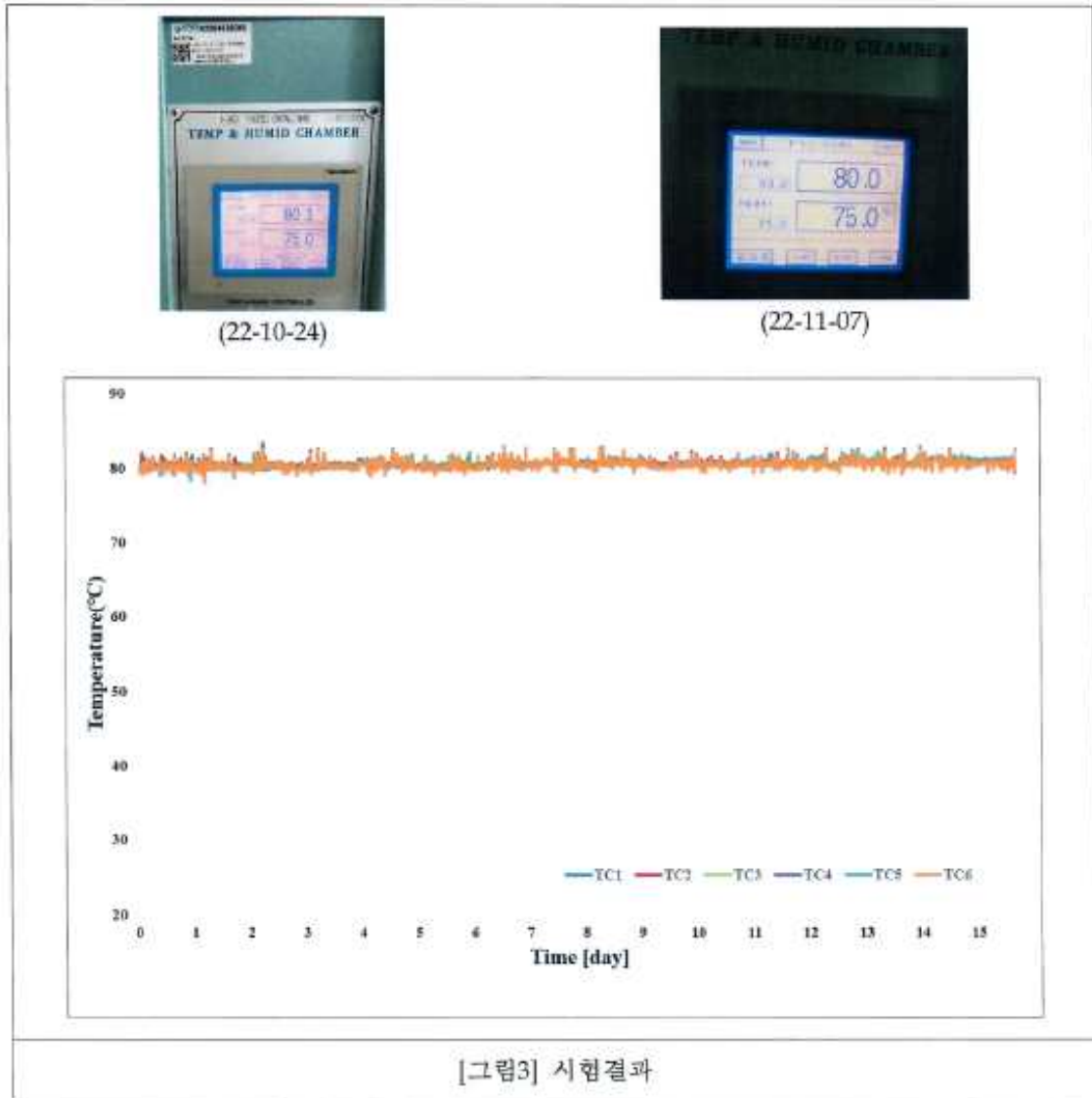
3. 시험 결과

3.1 시험평가 사진



3.2 시험 결과

- 360hr (15day) 항온항습챔버 가동에 대한 온도데이터 확보
 : 데이터로거(MV1000, Yokogawa) 및 열전대(Thermocouple, T-type)를 통한 챔버 내부 6pt 온도데이터 확보
- HFM 활용 진공단열재 4ea 열전도율 측정 값 확인
 : 0.0031 ~ 0.0046 W/(m·k)



감형 투명필름과 장수명을 위한 고비표면적 흡착소재를 적용함.

- 축냉조 배관 및 구조물 위치와 크기, 제작 가능한 VIP의 최대 치수를 고려하여 적절한 사이즈로 VIP를 분할 제작하였음.

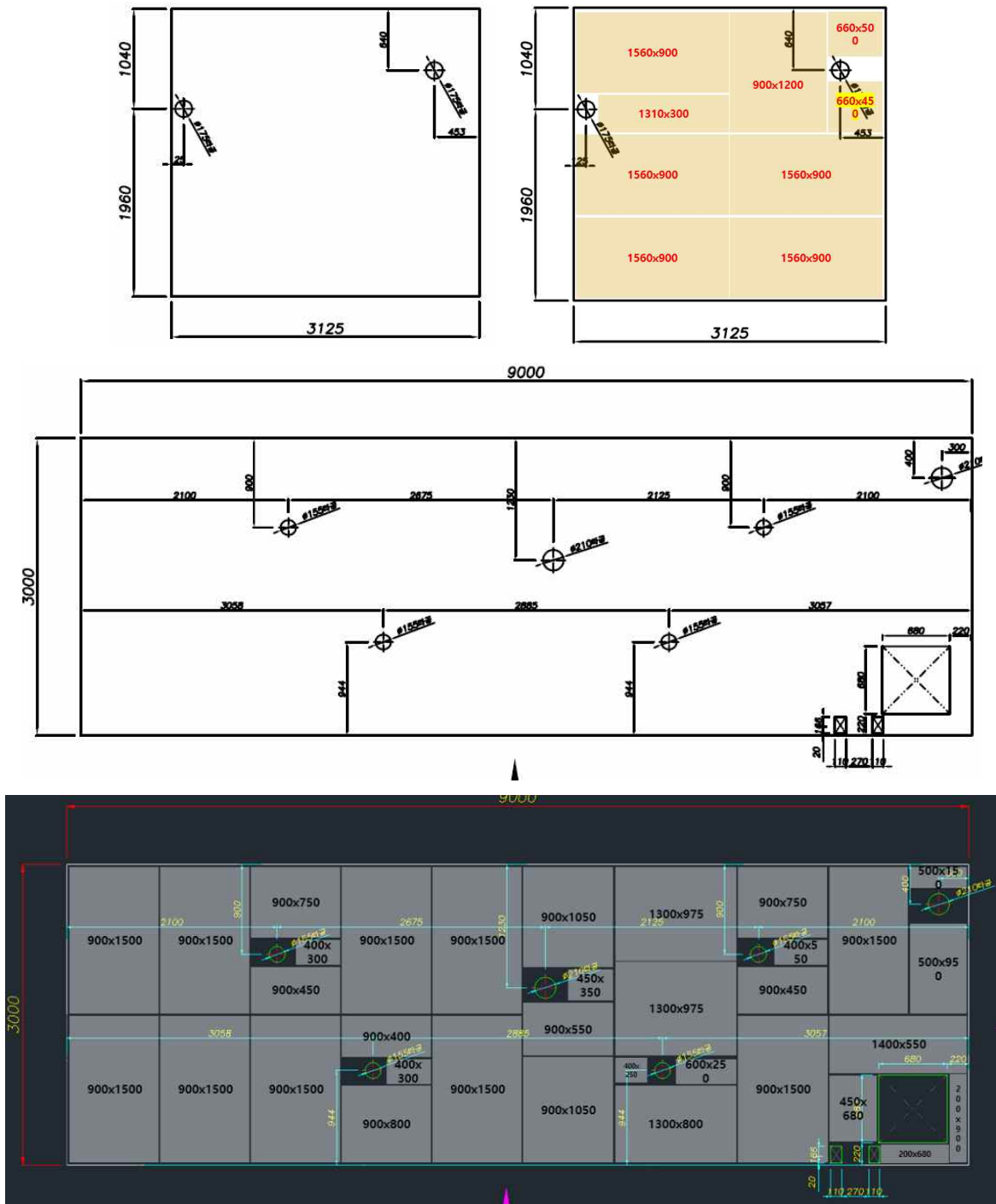


그림 1 축냉조 시공 도면 및 VIP 분할 배치 도면

- 축냉조 SUS Plate 위에 VIP를 시공하였음. VIP와 SUS 사이는 양면테이프를 이용하여 부착하였으나, 영하의 날씨로 양면접착제의 접착력이 감소, VIP와 SUS 간 탈착 현상이 발생하였음.

- 향후 시공 시에는 양면테이프 대신 본드나 핫멜트 사용이 바람직할 것으로 사료됨.



그림 2 축냉조 VIP 시공 현장 사진

라. 자연냉각기반 냉열저장 시스템에서 설계된 단열성능 평가 (3차년도)

(1) 축냉조 단열벽체 열관류율 계산 및 외기에 따른 축냉조 내부 수온 예측

- 축냉조의 단열벽체 사양을 기반으로 외기 조건에 따른 내부 수온 변화를 예측하고, 이를 수학적으로 모델링하였음.
- 우선, 축냉조 벽체를 구성하는 각 소재별 열전도도를 조사하고 벽체의 열관류율을 계산하였음.

표 1 소재 별 열전도도

Material	Thermal conductivity (W/mK)
Polyurethane	0.025
Atilon	0.035
VIP	0.002
STS	15
Concrete	1.6
Rubber	0.15
Glass Wool	0.035

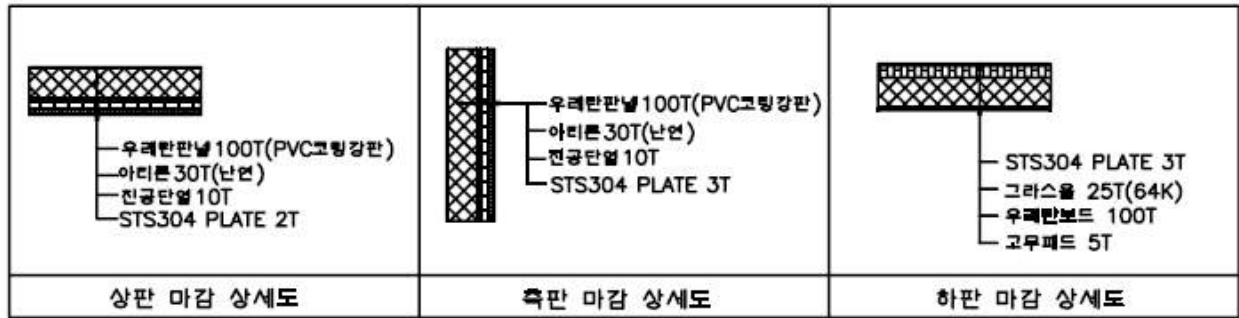


그림 3 축냉조 벽체 단열구조

표 2 축냉조 벽체 열관류율

Wall	Size	Material	U-value (W/m2K)
Side1	3000*3000*143T	PU Panel 100T / Atilon 30T / VIP 10T / STS 3T	0.10
Side2	9000*3000*143T	PU Panel 100T / Atilon 30T / VIP 10T / STS 3T	0.10
Top	9000*3000*142T	PU Panel 100T / Atilon 30T / VIP 10T / STS 2T	0.10
Bottom	9000*3000*383T	Concrete 250T / Rubber 5T / PU Panel 100T / Glasswool 25T / STS 3T	0.19

- 열관류율은 복합소재 열전도도 방정식을 이용하여 아래와 같이 계산하였음.

$$\frac{L}{k} = \sum_i \frac{L_i}{k_i} = \frac{1}{U} \quad (\text{식 1})$$

- 위 식에서 L_i 은 각 소재(i) layer의 두께, k_i 는 각 소재(i)의 열전도도를 의미하며, U는 벽체의 열관류율(단위 : W/m²K)을 의미함.

- 열관류율과 외부온도, 수온을 기반으로 아래 식을 활용해 외부에서 들어오는 열량과 수온 변화를 계산할 수 있음.

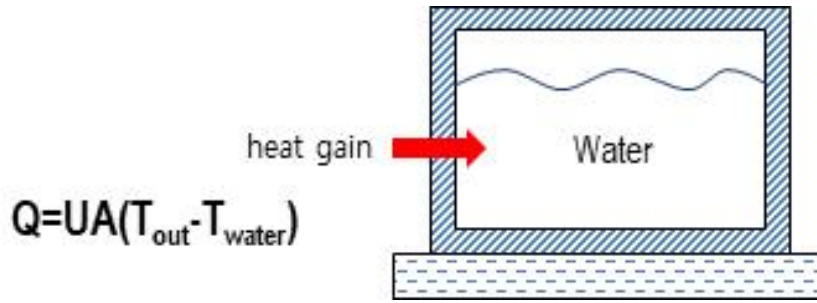


그림 4 축냉조 내부로 유입되는 열량

$$Q = UA(T_{out} - T_{water}) \quad (\text{식 2})$$

Q는 외부에서 들어오는 열량, A는 축냉조 벽체 면적

$$Q\Delta t = MC_p\Delta T_{water} \Rightarrow \frac{\Delta T_{water}}{\Delta t} = \frac{Q}{MC_p} = \frac{UA(T_{out} - T_{water})}{MC_p} \quad (\text{식 3})$$

M은 물의 중량 (60,000kg), C_p는 물의 열용량 (4,190J/kg·K)

- 계산을 간단히 하고자 태양열, OHP, 칠러 등의 외부 요인 및 물의 온도가 균일하게 분포 되는데 걸리는 시간은 무시하였음.
- 외기 온도는 평창과 거리가 가까운 대관령의 22년도 1년치 평균온도 자료를 활용하였음.

표 3 대관령 일 평균온도(22년도)를 기반으로 한 수조 내부 수온 변화 예측

날짜	일 평균온도 (°C)	열 유입량 (W)	일 수온 변화 (°C)	수온 (°C)
2022-01-01	-9.5			4.40
2022-01-02	-4.8	-140.76	-0.05	4.35
2022-01-03	-6.9	-172.15	-0.06	4.29
2022-01-04	-5.7	-152.88	-0.05	4.24
2022-01-05	-7.9	-185.74	-0.06	4.18
...
2022-04-01	0.1	-23.15	-0.01	1.60
2022-04-02	3	21.34	0.01	1.61
2022-04-03	2.8	18.17	0.01	1.62
2022-04-04	6.5	74.69	0.03	1.64
2022-04-05	7.9	95.71	0.03	1.68
...
2022-07-01	23.5	263.68	0.09	6.36
2022-07-02	23	254.65	0.09	6.44
2022-07-03	23.5	260.96	0.09	6.53
2022-07-04	22.6	245.81	0.08	6.62
2022-07-05	21.9	233.81	0.08	6.70
...
2022-10-01	14.5	53.23	0.02	11.04
2022-10-02	12.6	23.88	0.01	11.05
2022-10-03	18.5	114.03	0.04	11.09
2022-10-04	12.6	23.16	0.01	11.09
2022-10-05	8.3	-42.75	-0.01	11.08
...
2022-12-26	-11.2	-286.49	-0.10	7.43
2022-12-27	-9.3	-255.91	-0.09	7.34
2022-12-28	-7.2	-222.43	-0.08	7.26
2022-12-29	-8.4	-239.63	-0.08	7.18
2022-12-30	-6.4	-207.77	-0.07	7.11

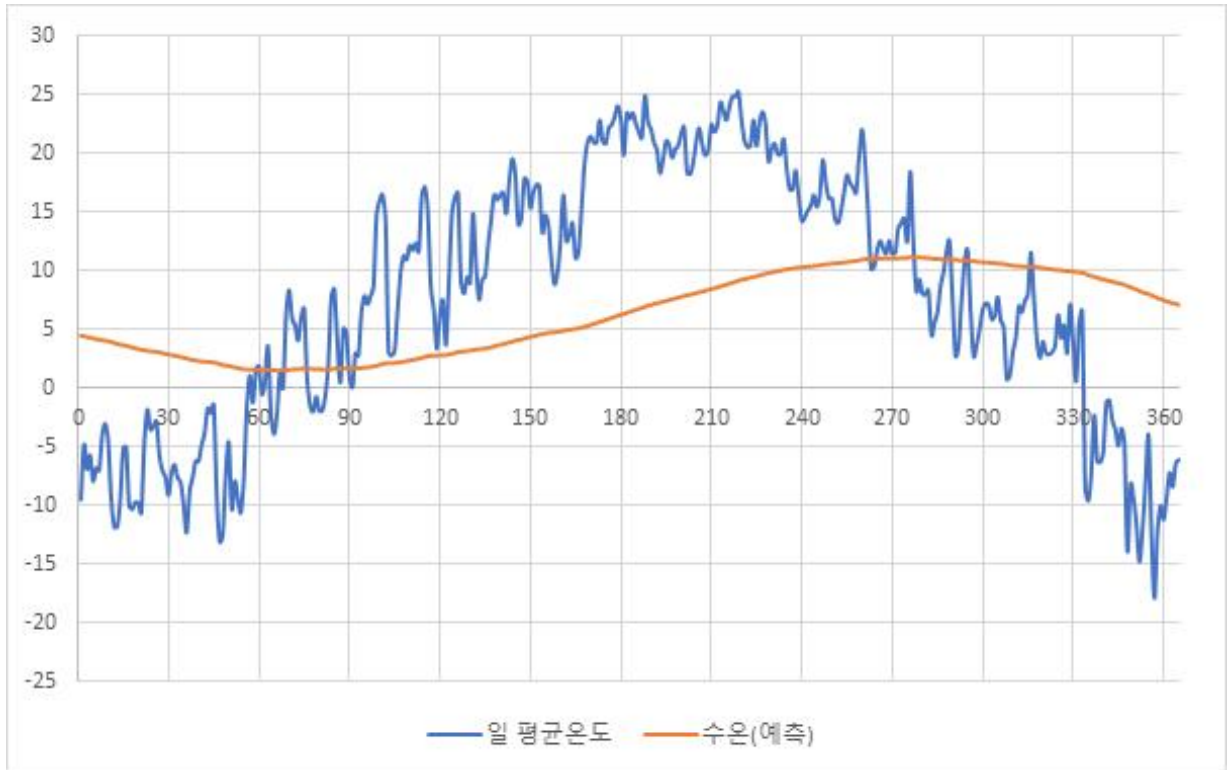


그림 5 수온 예측 그래프

- 각 일자별 수온과 외기온도 차에 의한 열 유입량을 계산하고, 이를 활용하여 일일 수온 변화를 계산하였음. (표 3)
- 물의 초기 온도는 약 4.5°C로 가정하였음. 그 결과, 수온은 최저 1.43°C (3월 초), 최고 11.1°C (9월 말)로 예측되었음. 냉기가 가장 필요한 시기인 6~8월에는 수온이 약 5~10도씨로 유지되며, 재배실에 냉기를 제공하는데 크게 문제가 없는 수준으로 확인되었음.

(2) 수학적 모델링

- 단열벽체 사양과 외기 온도에 따라 수온 그래프가 어떻게 변화하는지 수학적으로 분석하고자 모델링 작업을 수행하였음.
- 이를 위해 우선 외기 온도 데이터를 삼각함수로 근사하였음. (1년 주기 사이클로 외기 순환)

$$T_{out} = T_0 + T_v \cos(w(t-a)) \quad (\text{식 4})$$

T_0 는 외기의 중간값, T_v 는 외기의 진폭, w 는 $2\pi/365=0.00172$, a 는 상수

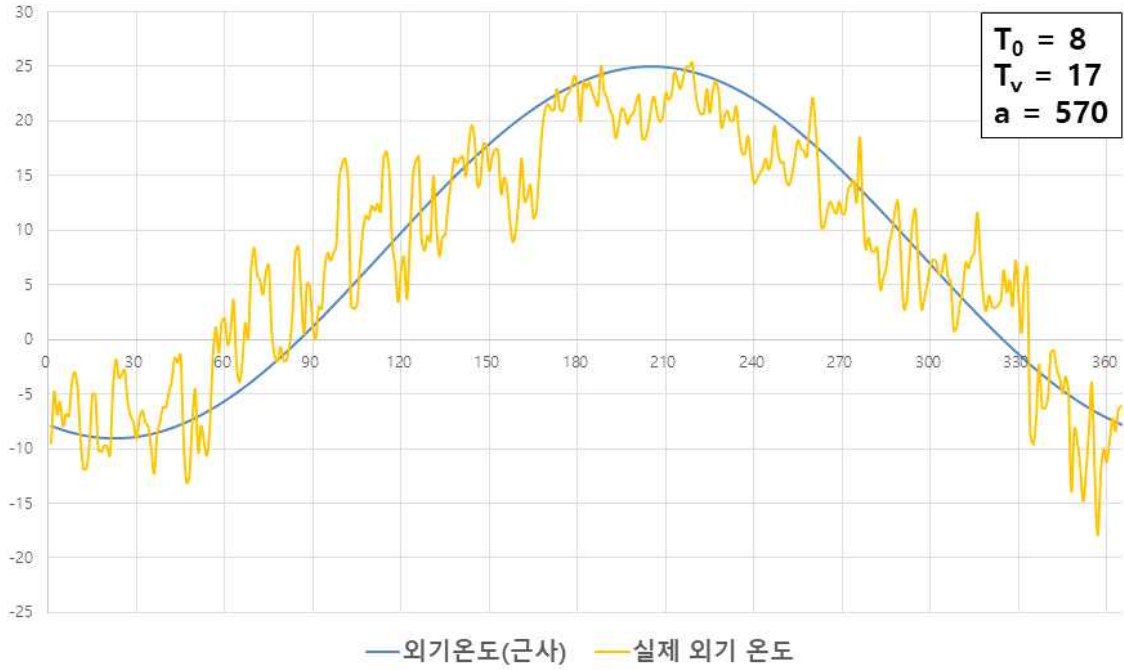


그림 6 삼각함수로 근사된 외기 온도 그래프

- 식 3을 미분방정식으로 표현하면 아래와 같음.

$$\frac{dT_{water}}{dt} = \frac{UA}{MC_p}(T_{out} - T_{water}) = C(T_{out} - T_{water}) \quad (\text{식 5})$$

$$\frac{dT_{water}}{dt} = C(T_0 + T_v \cos(w(t-a)) - T_{water}) \quad (\text{식 6})$$

- 위 미분방정식의 해는 아래와 같음.

$$T_{water} = T_0 + \alpha \cos(w(t-a)) + \beta \sin(w(t-a)) + \gamma \exp(-Ct) \quad (\text{식 7})$$

$$\alpha = (CT_v) \frac{C}{C^2 + w^2}, \quad \beta = (CT_v) \frac{w}{C^2 + w^2}, \quad \gamma \text{는 상수 (초기 수온 조건)}$$

- 위 해로부터 다음과 같은 사실을 확인할 수 있음.

- √ 수온 역시 외기와 동일한 주기를 같은 삼각함수의 형태로 표현됨.
- √ 수온의 진폭은 α , β 에 의해 정해짐. 즉, C(단열 관련 상수)와 외기온도진폭(T_v)에 의존하는 값임. 단열사양이 좋을수록 수온의 진폭은 작아지며, 외기온도진폭이 클수록 수온의 진폭은 커짐.
- √ 시간이 많이 지나면 식 7의 마지막 항은 0에 수렴함. 즉, 초기 수온에 무관하게 동일한 온도 변화 그래프의 형태를 가지게 됨.

√ 이 때, 최고온도(T_{max})는 $T_0 + \sqrt{\alpha^2 + \beta^2} = T_0 + \frac{CT_v}{\sqrt{C^2 + w^2}}$ (식 8)

√ 최저온도(T_{min})는 $T_0 - \frac{CT_v}{\sqrt{C^2 + w^2}}$ 값을 가짐. (식 9)

√ $\lim_{C \rightarrow \infty} \alpha = T_v$, $\lim_{C \rightarrow \infty} \beta = 0$ 이므로, 단열사양이 매우 낮을 때 수온 그래프는 외기온도

그

래프와 거의 동일해짐.

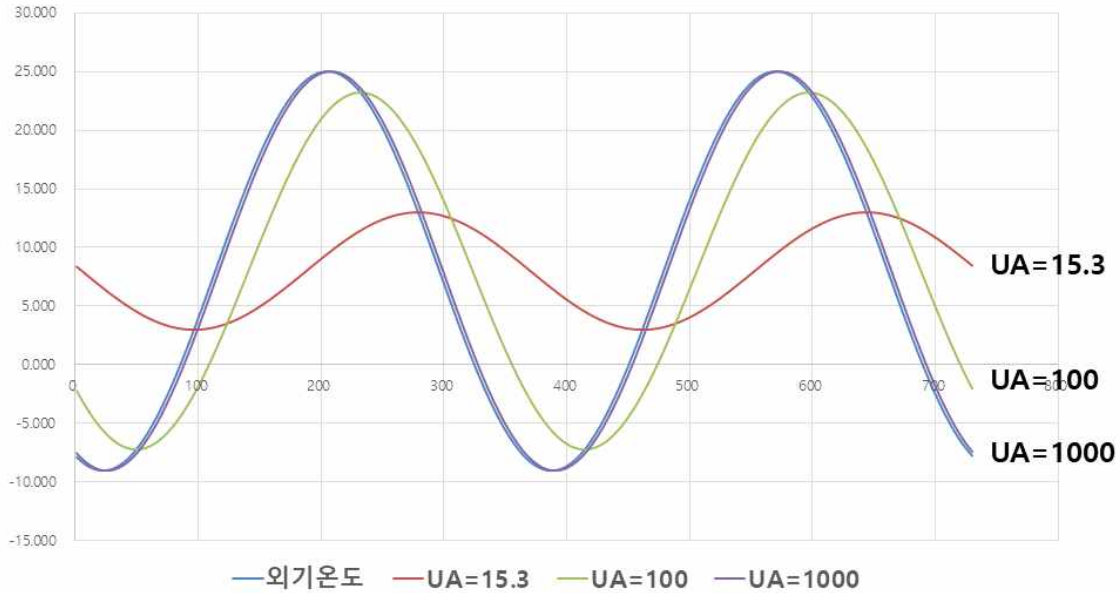


그림 7 UA(열관류율 x 면적)값에 따른 수온 변화 그래프 (외기 온도 근사함수 반영)



그림 8 UA(열관류율 x 면적)값에 따른 수온 변화 그래프 (실제 외기 온도 반영)

- UA값 (U: 열관류율, A: 벽체면적)에 따른 수온 변화 그래프를 확인한 결과, UA값이 커질수록 수온이 큰 폭으로 변화하였으며, 값이 1,000일 때는 외기 온도와 거의 동일하게 변화

는 것을 볼 수 있었음. (참고로 UA값 15.3은 본 과제에서 제작한 축냉조에 해당하는 수치)

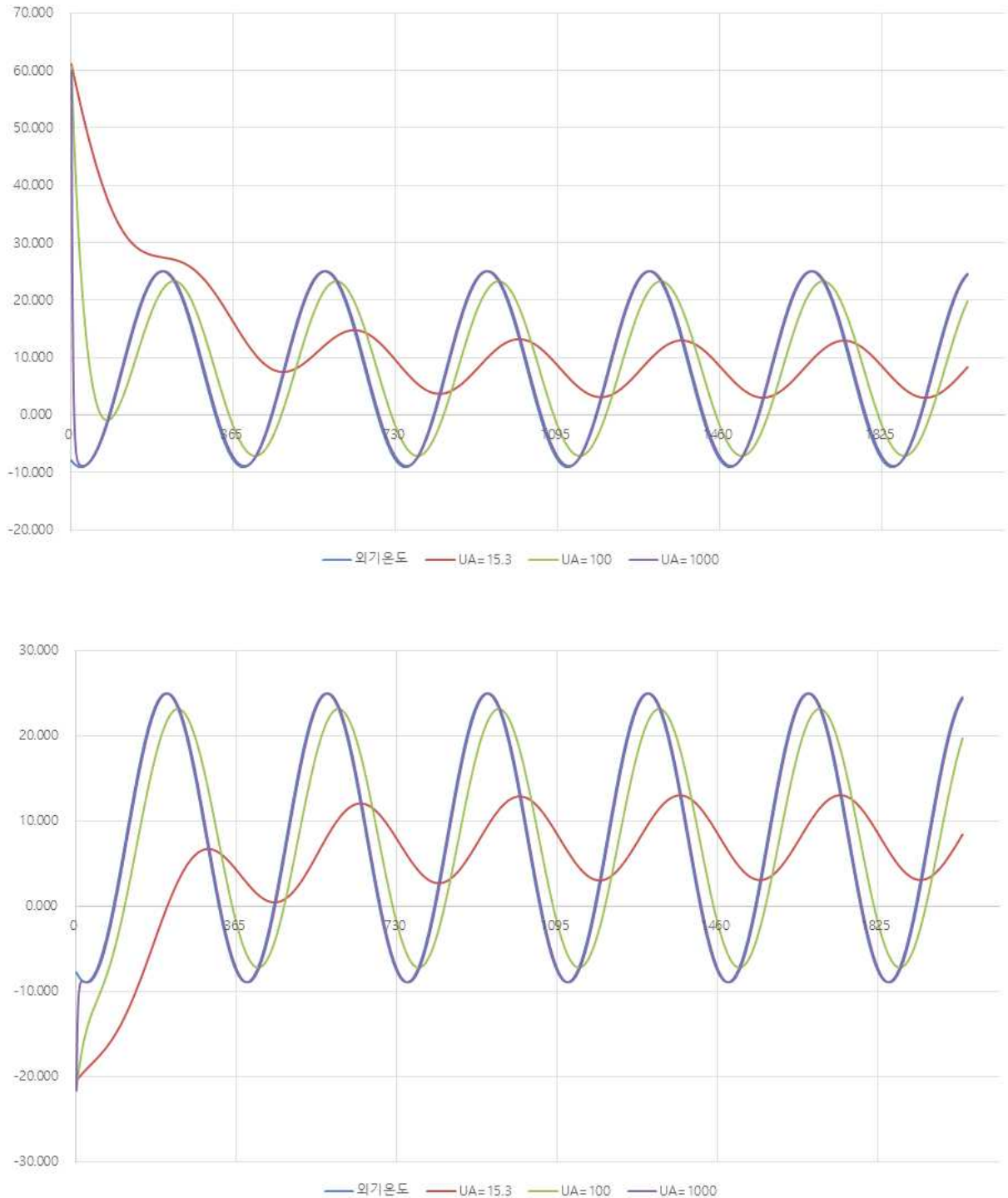


그림 9 초기 수온에 따른 수온 변화 그래프 (고온일 때(위)와 저온일 때(아래))

- 초기 수온이 외기 대비 높거나 낮은 경우, 축냉조의 단열력이 낮을수록 수온이 외기에 급방 수렴하였음. 또한, 시간이 지날수록 그래프의 형태가 초기 수온에 관계없이 온전한 삼각함수 형태에 근접함을 확인할 수 있었음.

(3) 지역별 최소 VIP 두께 사양 산출

- 한편, 지역마다 외기온도가 다르므로 이를 반영하여 단열벽체 구조를 다르게 설계하는 것이 바람직함.
- 각 지역별 기상청 데이터를 토대로 최대 수온이 15℃ 이하를 유지하기 위한 U_{max} 값과

VIP 최소 두께를 산출하였음. (VIP 외 다른 소재 두께는 동일하다고 가정)

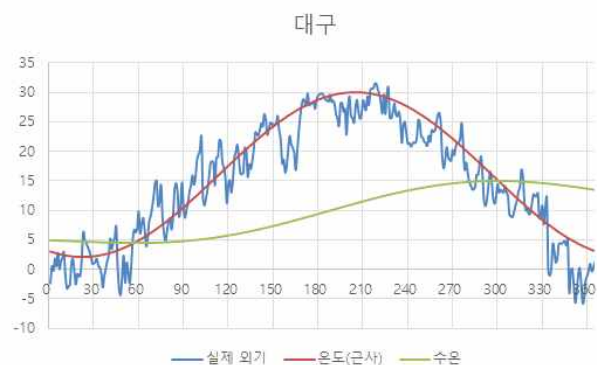
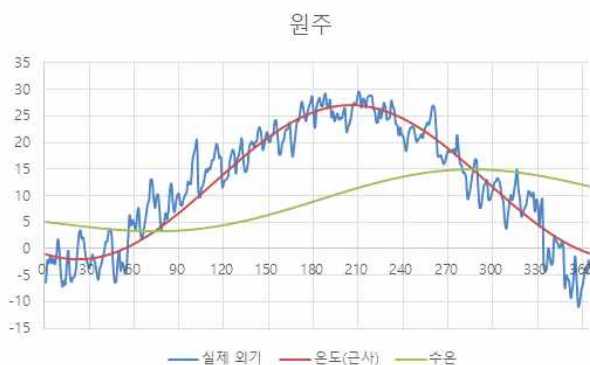
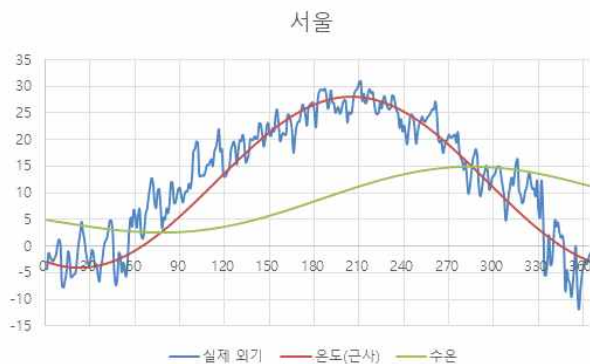
- 각 지역별 외기 온도를 삼각함수(식 4)로 근사하였으며, 미분방정식(식 6)의 해를 도출한 뒤, 최대 수온을 계산하였음. 초기 수온은 5°C로 가정하고 처음 1년 동안의 수온만 고려하였음.

- 식 7에서 $T_{water} \leq 15^\circ\text{C}$ 를 만족시키는 각 지역별 U_{max} 값을 구한 뒤 역으로 VIP의 두께를 산정, 그 결과를 아래 표에 나타내었음.

- 다만, 이는 초기 1년의 수온만 고려한 결과로 식 7에 의해 수온은 결국 시간이 지남에 따라 외기와 동일한 기준점(T_0)을 가지고 변동함. 대구와 광주처럼 외기 기준점이 높은 지역은 1년 이상 경과 시점에서 수온이 15°C 이상으로 상승할 가능성이 높음. 이 경우에는 주기적으로 기존의 물을 5°C 이하 냉수로 교환해주거나 수온을 낮춰주는 칠러 등의 장치가 필요할 것으로 사료됨.

표 4 지역별 축냉조 최대 수온이 15°C 이하를 유지하기 위한 U-value 및 VIP 두께

지역	T_0	T_v	U_{max} (W/mK) * Bottom 제외	VIP 최소 두께 (mm)
서울	12	16	0.10	10mm
대전	13	15	0.089	12.5mm
원주	12.5	14.5	0.10	10mm
대구	16	14	0.054	27mm
광주(전라도)	14	13	0.085	13.5mm



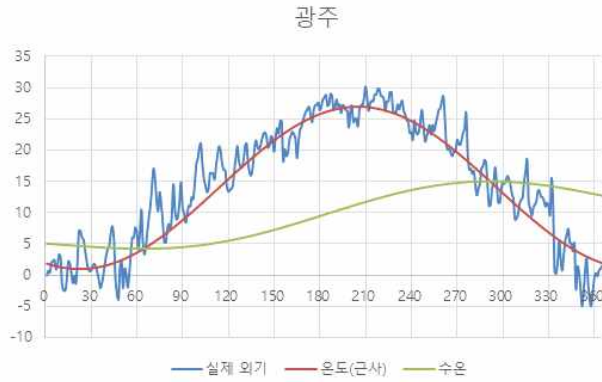


그림 10 지역별 수온 변화 예측 그래프 (표4 데이터 기준)

마. 설계된 단열성능 실증 및 평가를 통한 최적 적용방안 모색

(1) 모사 컨테이너 제작 및 수온의 실제 변화와 예측 변화 비교

- 모사 컨테이너를 제작하고 내부에 물을 배치하여 수온 변화를 관찰하였음. 그리고 이론에 근거한 예측 수온 변화와 비교/고찰하였음.
- 컨테이너 내부에 냉각기를 설치하여 사전 컨디셔닝(물의 온도를 원하는 온도대로 설정)이 가능하도록 제작하였음.
- 단열벽체는 VIP 12T 2장과 폼지(6T)로 구성하였고, 외형 프레임은 SUS (1T)를 사용하였음.
- 도어부 열손실을 최소화하기 위해 2중 도어구조로 설계하였음.



그림 11 모사 컨테이너 제작 (외형 프레임 제작)



그림 12 모사 컨테이너 제작 (내부 VIP 시공)



그림 13 모사 컨테이너 제작 후

- 컨테이너 내부에 물(각각 125kg)이 채워진 드럼 2통을 배치하고 냉각기를 이용해 1℃까지 온도를 낮춘 후, 냉각기를 off하고 수온의 변화를 관찰하였음. 수온 측정은 무선 온도기록계(T&D社, TR-45)를 이용하였으며, 프로브가 물과 직접 접촉한 상태에서 측정될 수 있도록 하였음. (측정 간격 1회/5분)



그림 14 컨테이너 내부 물 드럼 배치

- 모사 컨테이너 벽체의 열관류율은 약 $0.1\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$, 컨테이너를 통해 유입되는 열량은 1.873 W/K 로 산출되었음.

표 30 모사 컨테이너 열 유입량 산출 (이론값)

	넓이(m ²)	단열벽체구조		
		소재	두께	열전도율 (W/m·K)
측면1	3.37	VIP	24T	0.0025
측면2	1.89	Foam	6T	0.035
바닥/천장	3.89	SUS	1T	16.27
총면적	18.31	총 열관류율 (W/m ² ·K)		0.1023
컨테이너 열 유입량 = 18.31 x 0.1023 = 1.873 W/K				

표 31 수온 비교 (측정값 vs 예측값)

시간(day) - 5분 간격	수온 (측정값)	외기 (측정값)	열유입량 (kJ) (계산값)	수온 (예측값)
0	1.2	19.7		1.20
0.0034722	1.3	19.8	10.45	1.21
0.0069444	1.3	19.8	10.45	1.22
0.0104167	1.3	19.8	10.44	1.23
0.0138889	1.3	19.8	10.44	1.24
0.0173611	1.3	19.8	10.43	1.25
0.0208333	1.4	20	10.54	1.26
...
6.7118056	15.3	16.1	2.44	11.75
6.7152778	15.3	16.1	2.44	11.76
6.71875	15.3	16.1	2.44	11.76
6.7222222	15.3	16.1	2.44	11.76
6.7256944	15.3	16.1	2.44	11.76
6.7291667	15.3	16.1	2.44	11.77
6.7326389	15.3	16.2	2.49	11.77

6.7361111	15.3	16.2	2.49	11.77
-----------	------	------	------	-------

* 열유입량 = 1.873 W/K x (외기 - 수온) x 300sec

* 수온(예측값) = 5분 전 수온 예측값 + 열유입량 / (물의 비열 x 물의 무게)

- 그 결과, 실제 수온의 변화는 예측 변화와 다소 차이가 있는 것을 확인하였음.

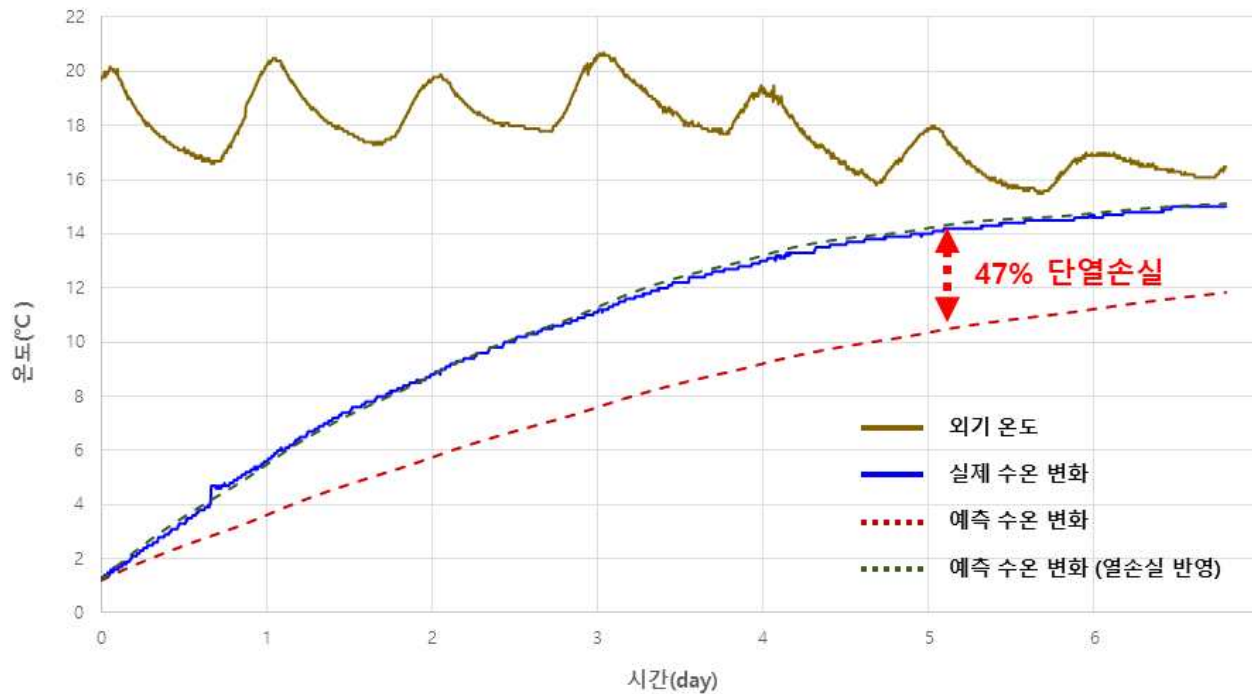


그림 15 실제 수온과 예측 수온 비교 그래프

- 실제 수온은 더 빠르게 상승하였으며, 컨테이너를 통해 들어오는 실제 열 유입량은 예측량의 1.9배 수준으로 확인되었음. (1.873 W/K ⇒ 3.560 W/K) 이를 반영하여 그래프를 그려 보면 실제 수온 변화와 거의 일치하였음.

- 즉, 약 47%의 단열손실이 발생했음을 알 수 있었음. $[(1.9-1) / 1.9 = 47\%]$

- 이러한 단열손실이 발생하는 원인은 VIP-VIP 접합부의 열교, 컨테이너 모서리, 도어, 냉각기 설치부 등 단열이 취약한 곳을 통해 침입하는 추가 부하, VIP 일부의 성능 불량 등 여러 가지가 있을 수 있음.

- 보다 정확한 원인 파악을 통해 단열 손실을 억제하기 위한 방안을 지속적으로 연구할 계획임.

- 향후 목표성능 달성을 위한 단열구조 설계 시, 위와 같은 요인을 감안하여 safety factor를 설계에 반영하고, 단열재의 두께를 1.5~2배 이상 증가시키는 것이 바람직할 것으로 사료됨.

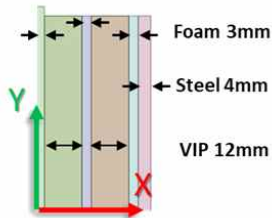
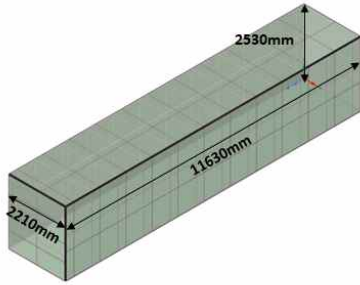
(2) VIP 파손에 따른 열손실 해석 및 최적 VIP 배치 방안 모색

- 단열벽체 구성 VIP가 파손되었을 때 발생하는 단열성능 저하를 시뮬레이션을 통해 예측하였음.

- 추후 동남아 시장진출을 고려하여 40피트 컨테이너 내부에 VIP 단열시공 상황을 가정, 시뮬레이션을 진행함. (동남아시아에서는 40피트 중고 reefer container를 냉장, 냉동창고 대용으로 많이 사용함)

- 컨테이너 단열벽체는 아래와 같이 모델링하였으며, 비교를 위해 우레탄 단열재 적용 모델도 함께 검토하였음. (그림 16)

□ VIP 적용 모델



□ Urethane 적용 모델

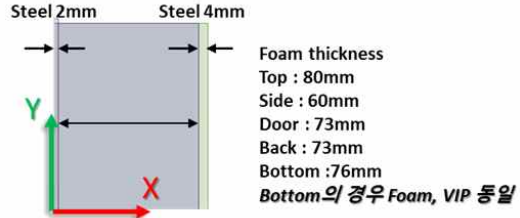
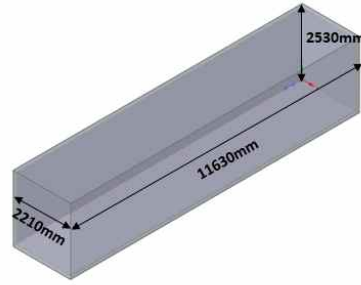
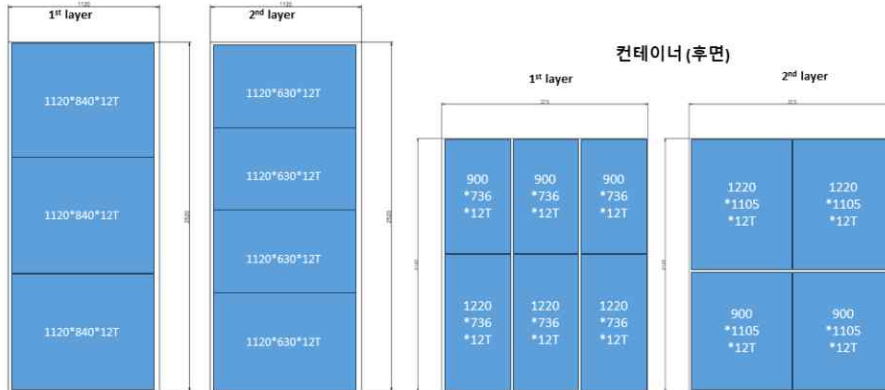


그림 16 컨테이너 단열벽체 모델링

- VIP는 2겹으로 시공하되, VIP-VIP 접합부 열교 저감을 위해서 1st layer와 2nd layer간 서로 어긋나게 배치하였음. (그림 17)
- 컨테이너 바닥은 내부 구조물 등으로 인해 VIP 시공이 쉽지 않을 것으로 예상, 설계에서도 제외하였음.

컨테이너(도어)



컨테이너(측면)



컨테이너 (천장)

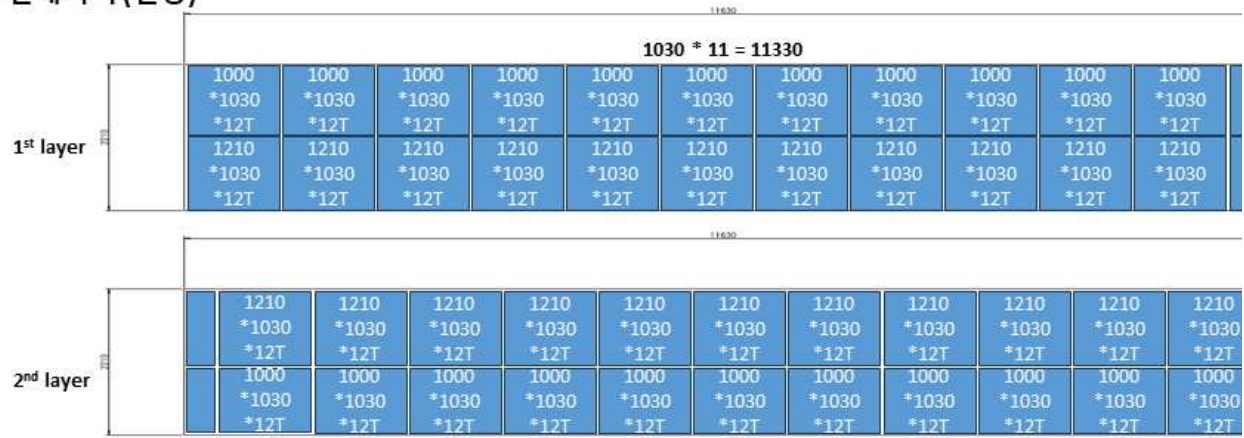


그림 17 컨테이너 내부 VIP 배치도

- 외기온도는 35℃ (308K), 내부 온도는 -15℃ (258K)로 가정하였고, 대류열전달계수는 각각 23W/mK(외부), 9W/mK(내부)로 설정하였음. (건축물 설계기준 반영, 그림 18)

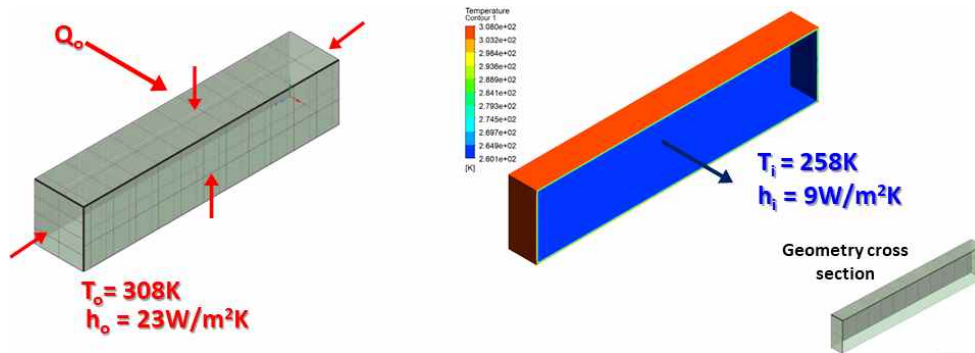


그림 18 모델링 설계조건 (내외부 온도 및 열전달계수)

- 먼저 VIP파손이 없을 때의 열 유입량을 산출하였음. 그 결과, 6면을 통해서 유입되는 열량은 약 847W로 계산되었음. (그림 19)

□ VIP 벽체 열 유입량_no failure

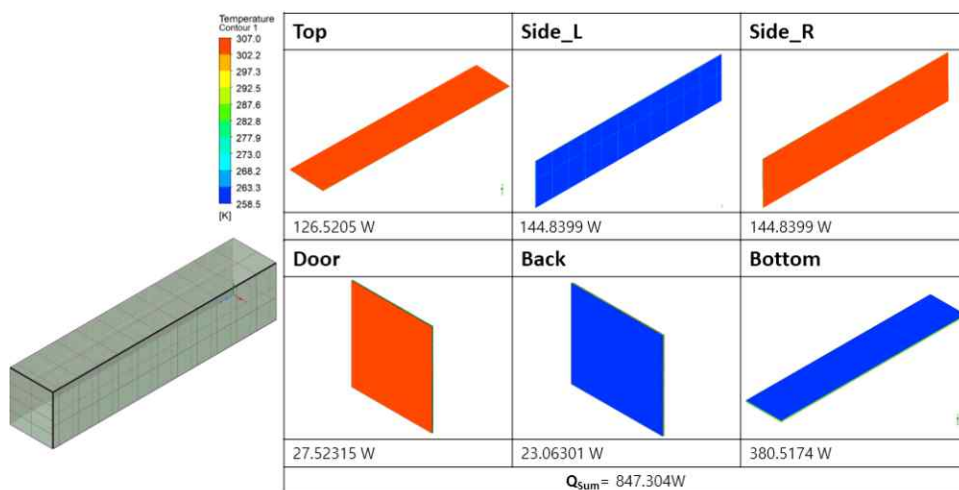


그림 19 VIP벽체 컨테이너의 총 열유입량 계산

- 우레탄 벽체 컨테이너의 총 열 유입량은 약 2000W로 VIP 벽체보다 2.3배 가량 높았음. (그림20)

□ 우레탄 벽체 열 유입량

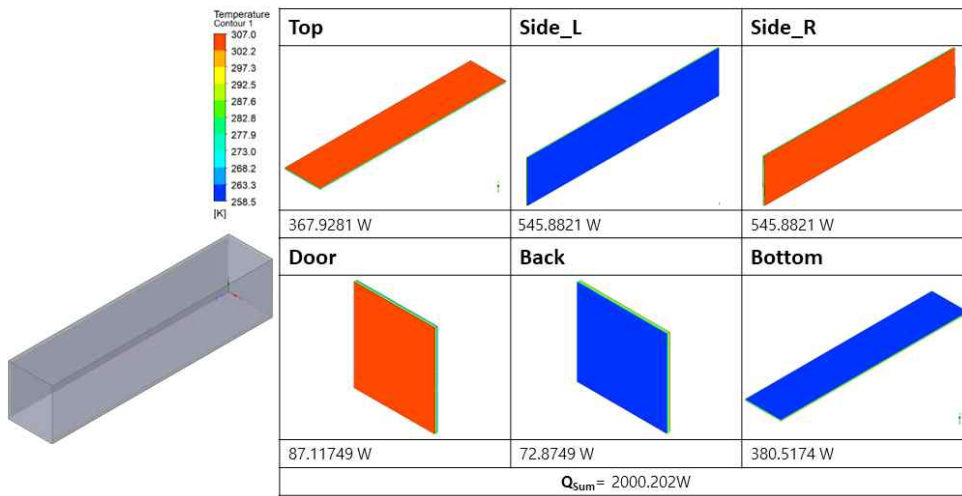
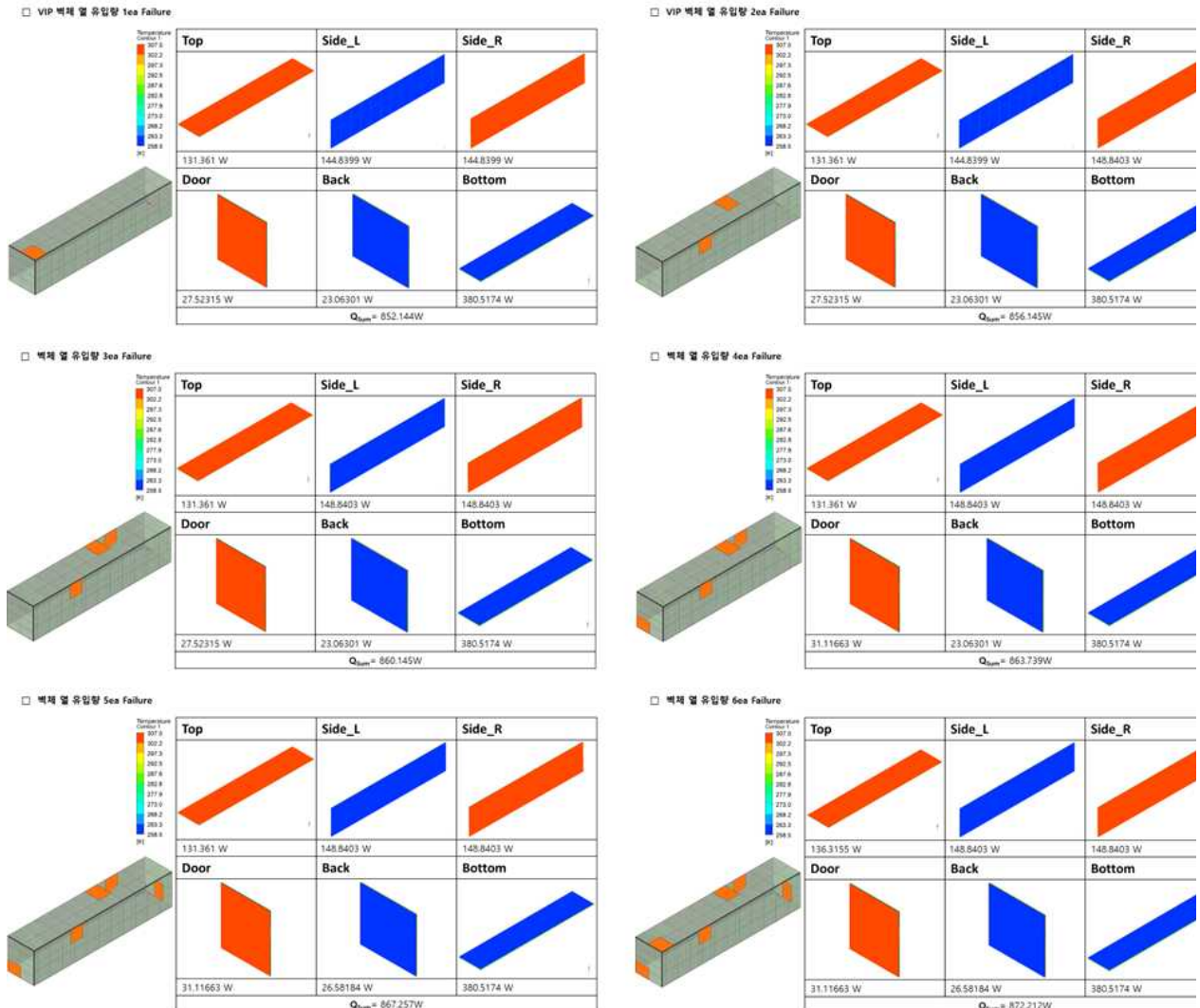


그림 20 우레탄 벽체 컨테이너의 총 열유입량 계산

- VIP 파손 상황을 가정 (1ea~10ea, 파손 VIP 위치는 1st layer와 2nd layer에서 무작위 선정하되 서로 겹치지 않도록 함) 하여 컨테이너 총 열유입량을 계산함. (그림 21)



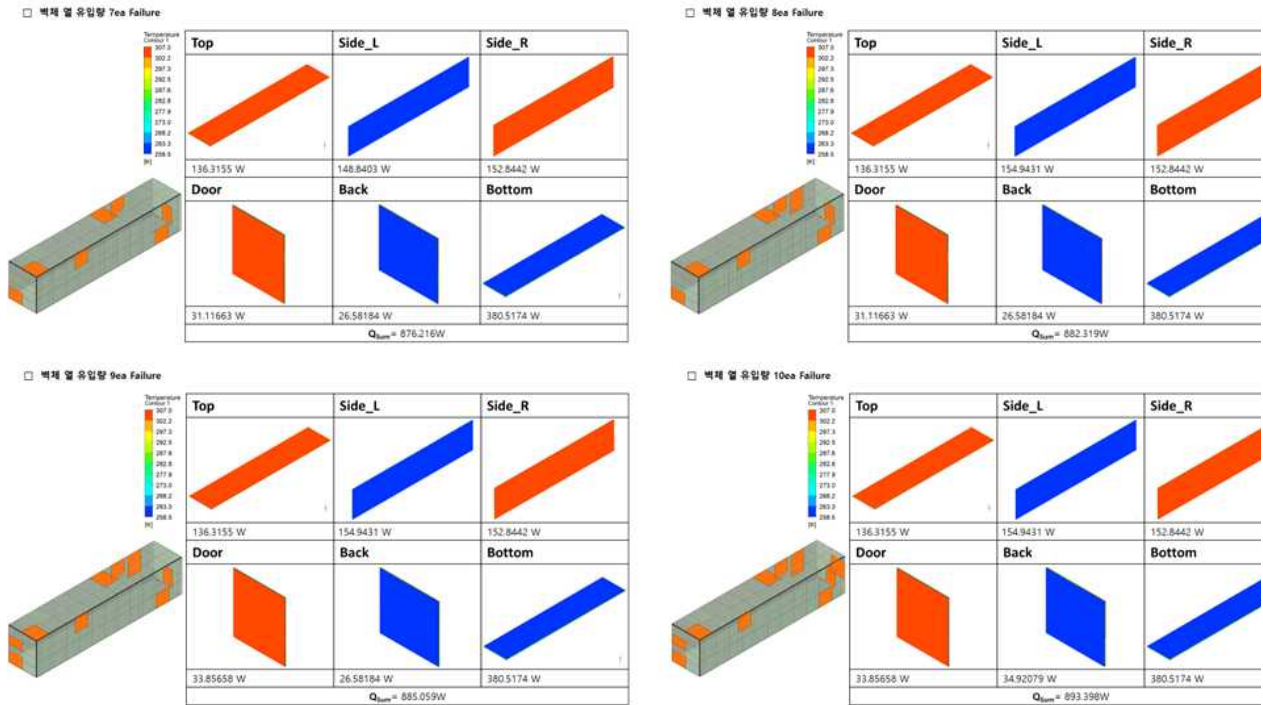


그림 21 VIP 파손 수량(1~10ea)에 따른 컨테이너 총 열유입량 계산

- 그 결과, VIP가 10ea 파손되어도 열유입량은 약 5% 증가하는데 그쳤으며, 우레탄 단열재 대비 여전히 낮은 유입량을 보여주었음.

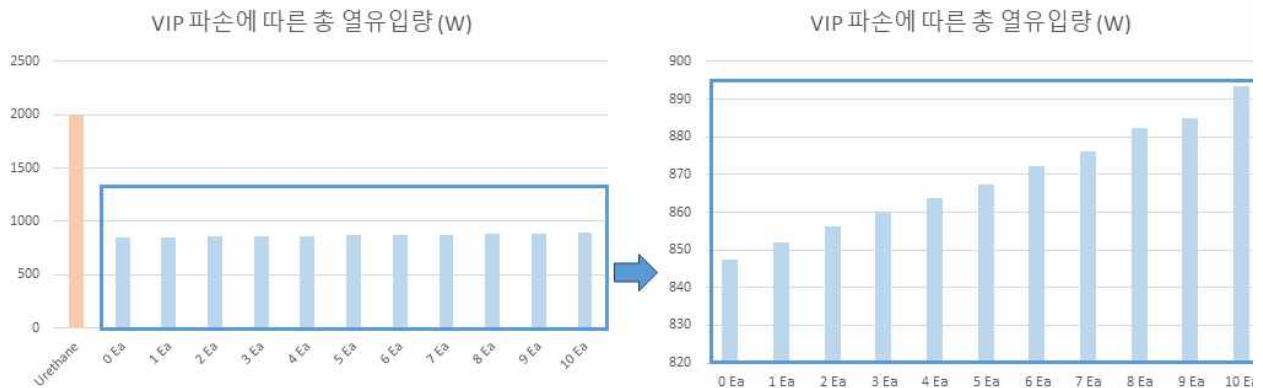


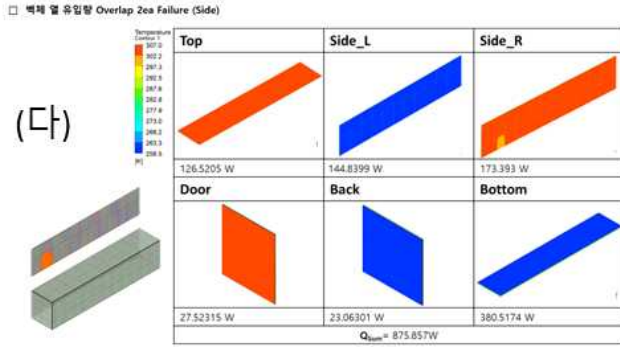
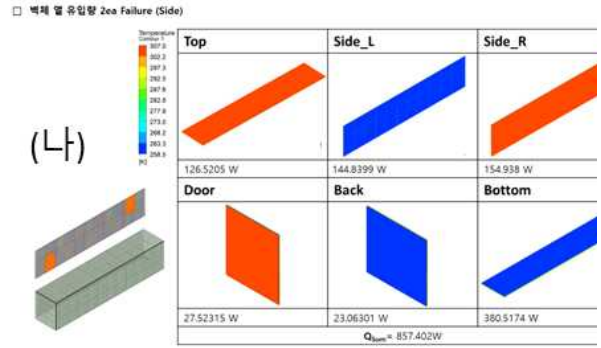
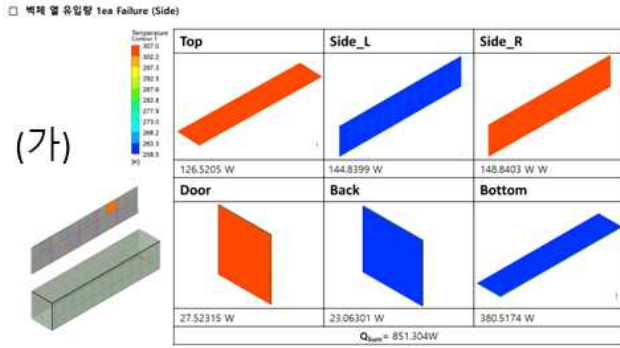
그림 22 VIP 파손 수량(1~10ea)에 따른 컨테이너 총 열유입량 그래프

- 다음으로, 아래 그림처럼 1st layer에서 파손된 VIP와 2nd layer에서 파손된 VIP가 서로 겹쳐져 있을 때의 상황을 가정하였음. (그림 23)

컨테이너 (측면)

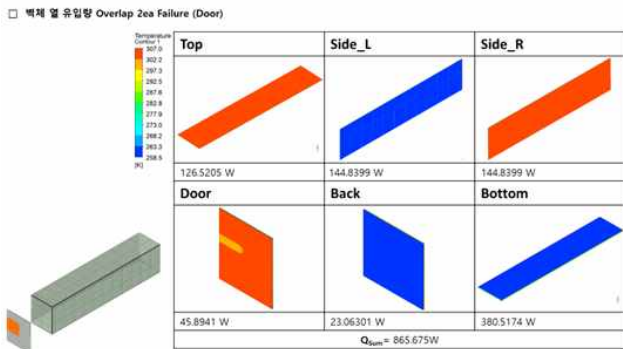
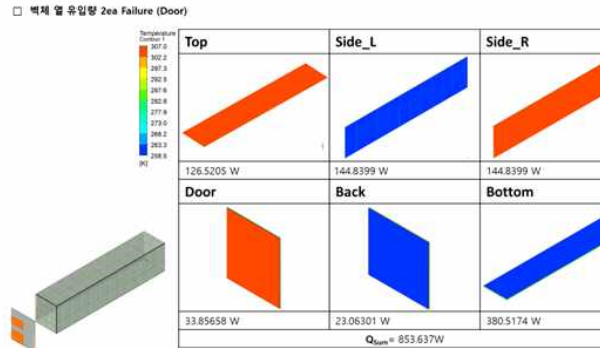
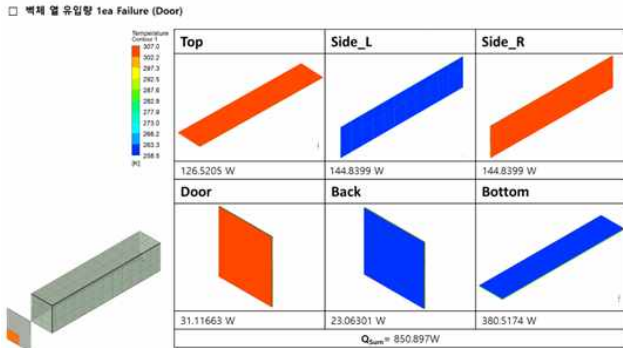


그림 23 각 layer에서 파손된 VIP가 서로 겹쳐진 상황 가정 (빨간색 표시)



측면부
 (가) 1ea VIP 파손
 (나) 2ea VIP 파손 (not overlapped)
 (다) 2ea VIP 파손 (overlapped)

그림 24 측면부 VIP 파손상황 가정



도어부
 (가) 1ea VIP 파손
 (나) 2ea VIP 파손 (not overlapped)
 (다) 2ea VIP 파손 (overlapped)

그림 25 도어부 VIP 파손상황 가정

- 그 결과, 동일 개수의 VIP가 파손되더라도, 서로 겹쳐진 VIP들이 파손되었을 때 그 영향이 더 큼을 확인할 수 있었음. 측면부 VIP가 overlap 되어 파손된 경우, 약 7개의 overlap 되지 않은 VIP가 파손된 것과 비슷한 영향을 보여주었음.
- Overlap 되지 않은 상황에서는 1개 layer의 VIP가 파손되더라도 그 뒤 (혹은 앞)에 배치된 VIP 정상이라면 열차단을 효과적으로 수행할 수 있음.
- 반면, overlap 된 VIP가 모두 파손된 경우, 그 부위를 통해 열이 집중적으로 유입될 수 있으므로 전반적인 컨테이너의 단열성능이 큰 폭으로 감소하게 됨.
- 이러한 영향을 최소화하기 위해서, 1st layer는 사이즈가 큰 VIP를 배치하고, 2nd layer는 사이즈가 작은 VIP를 배치하는 것이 효과적일 것으로 사료됨. (그림 27)

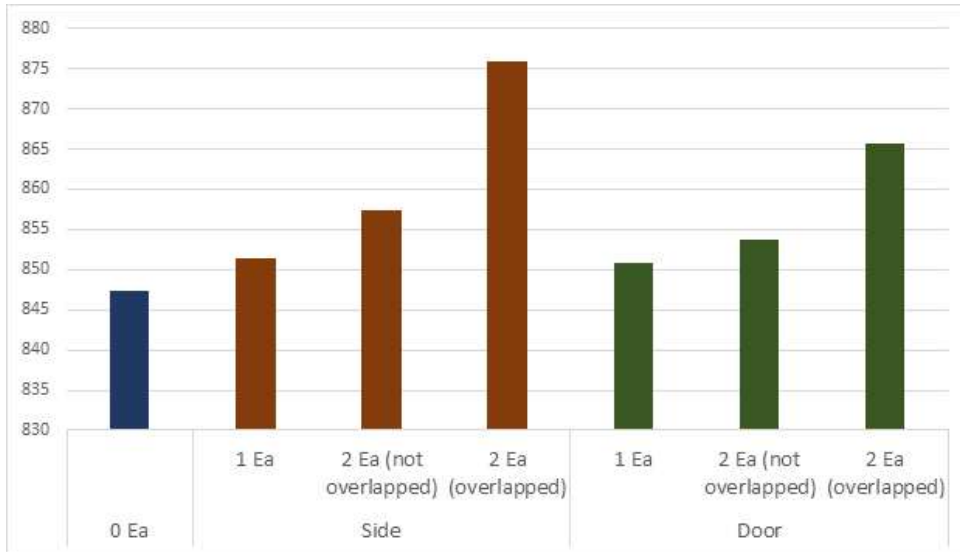


그림 26 파손 부위 및 수량, 유형별 열유입량 비교 그래프

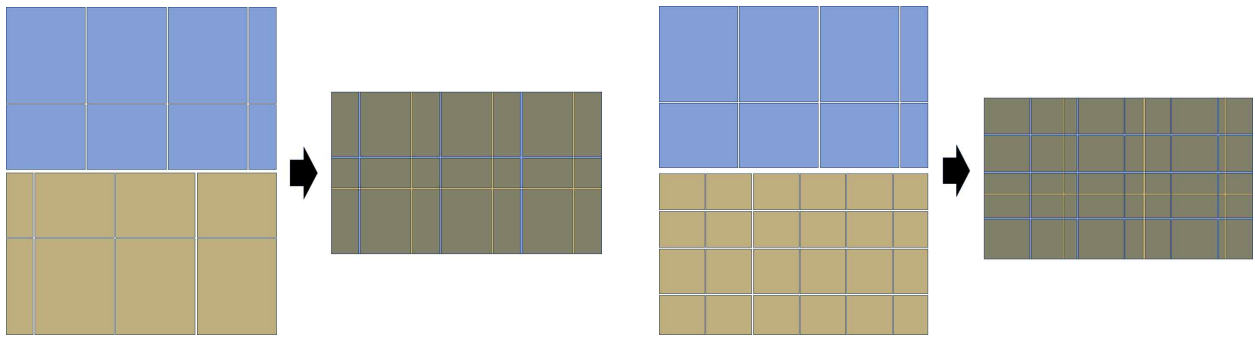


그림 27 열교저감 및 overlap파손 위험성 저감을 위한 VIP 배치 설계
 - overlap 파손에 의한 단열손실을 줄이기 위해서는 (좌) 보다 (우) 형태가 더 바람직함

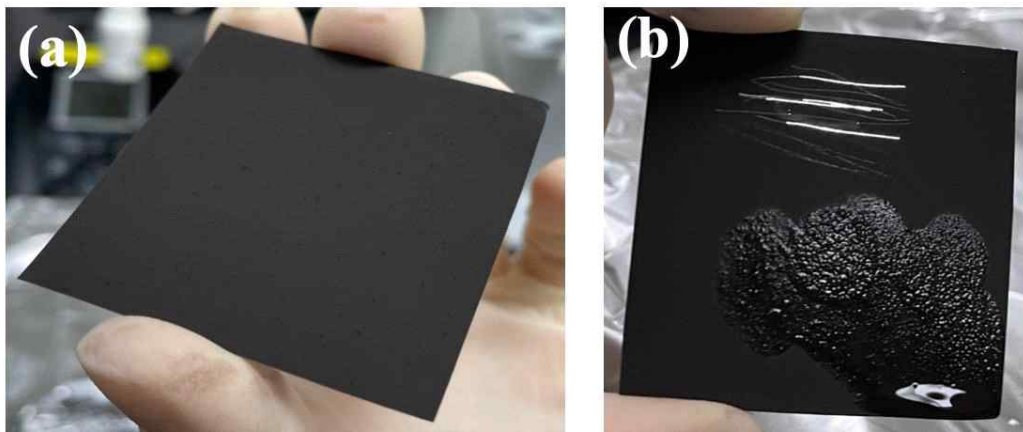
(3) 실제 수온 데이터와의 비교 및 오차에 대한 검증, 고찰

2-3 나노구조 기반 표면처리 및 코팅 기술 개발 (숙명여자대학교 산학협력단)

가. 기능성 나노 물질 표면 코팅 기술 개발

□ 광소결 및 열소결 표면 처리 기술의 한계

- 광소결은 국부적인 크기에만 소결이 가능하기 때문에 가공 면적이 넓은 표면에 적용할 수 없다는 단점이 존재하며, 양산화의 한계가 있음
- 또한 광소결된 표면은 균일도가 낮고, 제논 스펙트럼의 펄스 에너지를 일정하게 발생시킬 수 있는 기술의 개선이 필요하다는 한계점이 존재함
- 비교적 대면적 코팅이 가능한 열소결 처리를 통해 기능성 표면을 달성하고자 함
- 구리 나노 입자의 산화막 형성을 줄이기 위한 시도로써 polyvinylpyrrolidone (PVP)를 사용하여 열소결 방법으로 코팅하였음
- 가공한 표면은 열소결 후 균일하게 코팅이 되었으나, 내구성이 떨어지고, 수분에 취약한 결과를 보였음



[그림] 광소결을 이용한 구리 나노입자 코팅 표면. (a) 스테인리스 스틸에 구리 나노입자 코팅한 뒤 열소결 후의 코팅 표면 상태 (b) 내 스크래치성 테스트 후의 코팅 표면

□ 전기영동법을 이용한 표면 코팅 기술

- 전기영동법은 저비용의 단순한 제작 방법으로 다양한 나노 입자를 증착할 수 있음
- 저온에서 빠르게 제작이 가능하고 높은 증착 속도를 가지며 대면적화에 용이하다는 장점 때문에 다양한 분야에서 적용되고 있는 표면개질방법임
- 상기 방법은 다양한 기능성을 갖는 나노 입자를 경제적으로 코팅할 수 필요한 기능성을 있으므로 본 과제에서 필요한 anti-icing과 소수성, 항균 기능을 동시에 가지는 표면 개발이 가능함
- 본 과제를 통해, 열소결에서의 나노입자의 코팅 표면이 부스러지고 탈락되는 현상을 전기영동법으로 개선하고자 함
- 전기영동법은 전기장을 사용하여 표면을 코팅하기 때문에 기존 연구에서는 전도성 재료에 국한되어 사용되었으나, 층상자기조립법 (Layer-by-Layer Assembly, LBL)을 사용하여 비전도성 재료에 나노입자를 부착할 수 있음

□ 전기영동법을 이용한 항균, 소수성 및 투습성 표면 코팅

○ 코팅 방법

- 금속 기판 위에 원단을 감싸주어 Cathode 전극을 제조하였음
- 층상 자기조립법 (LBL)을 이용한 전처리 단계:

- a. LBL에 많이 사용되는 poly(sodium 4-styren sulfonate) (PSS)와 poly(diallyl dimethyl diammonium chloride) (PDDA)가 각각 음전하, 양전하 물질 수용액으로 사용됨. 위의 폴리머를 사용한 수용액은 탈이온수에 8g/L의 농도로 제조되었음
 - b. 본 과제에서 사용한 원단의 경우, 표면이 양전하를 띄고 있으므로 PSS 수용액에서 침지가 시작되어 정전기 인력을 통해 음전하 물질로 흡착되어야 함
 - c. 1차 흡착이 완료된 전극을 세정 용매인 탈이온수로 세척함으로써 잔류 음전하 물질 제거
 - d. 2차 흡착 과정은 양전하 PDDA 수용액에 전극을 침지함으로써 동일하게 수행되며, 필요에 따라 1-2차 흡착 과정을 반복 수행할 수 있음
 - e. 위에서 언급한 세척 단계는 각 폴리머 수용액에 흡착시킨 직후 항상 수행됨
 - LBL 과정을 통해 최종적으로 PSS 폴리머가 도포된 전극을 ZnO 서스펜션에 침지하여 직류 전원 공급 장치를 통해 일정 시간 동안 전압을 인가
 - * 해당 서스펜션은 polyethylenimine (PEI)을 5g/L 의 농도로 메탄올에 혼합시킨 뒤, ZnO 나노입자를 2g/L로 분산하여 제조하였음
 - ZnO 입자가 증착된 항균 표면을 SiO₂ 서스펜션에 침지하여 동일한 방식으로 전압을 인가
 - * 해당 서스펜션은 SiO₂ 나노입자를 1g/L 의 농도로 메탄올에 분산시켜 제조하였음
- o 항균, 소수성 및 제습성을 갖는 재료의 표면 특성 평가
- 1) 개발한 표면의 항균성 테스트 방법 및 결과
 - 재료의 특성에 따라 다양한 항균성 표면을 평가하기 위한 방법 존재하나 표면의 친수성 또는 소수성 등과 같은 변수에 의해 그 결과가 상이하게 나타나므로 적절한 평가 방법에 대한 기준이 모호함
 - * 대표적인 원단의 항균성 평가방법; AATCC 147, ISO 20645:2004, AATCC 100, JIS L 1902 등
 - 본 과제에서 개발한 원단의 하이브리드 표면은 두 가지 특성 (방수성 및 친수성)이 동시에 발생하므로, 이에 대한 보다 정확한 방식의 항균 평가를 수행하기 위하여 콜로니 배양 방법을 사용하였음
 - 코팅된 표면의 항균성은 대장균(*Escherichia coli*, *E.coli*)이 포함된 박테리아 현탁액을 사용하여 평가되었음
 - 실험에 사용할 *E.coli*로 ATCC 25922 종을 선택하였으며, 인산완충식염수에 성장시킨 균을 희석하여 1×10⁴ cells/mL의 농도와 2.73×10⁶ cells/mL 농도로 제조함
 - 코팅된 표면에 박테리아 현탁액을 6μL씩 떨어뜨려 액적을 생성시킨 뒤, 액적이 완전히 증발된 90분 이후 고체배지 (Luria-Bertani Broth, LB 배지)에 stamping 하여 오버나이트로 배양하였음
 - 배양된 배지에서 자라난 박테리아의 콜로니(집락)의 수를 수집하여 생존율 평가
 - 본 과제에서 제시한 실험 방법에 따라 ZnO 나노입자와 SiO₂ 나노입자가 이중층으로 증착시켜 항균-방수 복합 코팅 표면 (하이브리드)을 제조하였으며, 증착 시간에 따른 항균성 평가를 실시함 (박테리아 농도: 2.73×10⁶ cells/mL, 방치시간: 90, 120, 150, 180분)

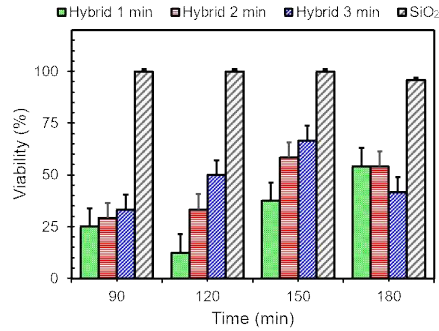


그림 2. 증착된 나노입자의 종류 및 증착 시간에 따른 원단의 항균 테스트 결과. 하이브리드 표면은 ZnO-SiO₂로 구성된 복합 표면을 의미하며 함께 표기된 숫자는 코팅 시간을 의미 (각 초록막대 1분, 빨강막대 2분, 파랑막대 3분). Superhydrophobic 표면의 경우 SiO₂ 나노입자로 코팅되었음. 그래프의 x축은 박테리아 현탁액 증발 시간을 나타낸 것으로 90분, 120분, 150분, 180분 각 상이한 증발 시간동안 박테리아 생존율을 평가하였음.

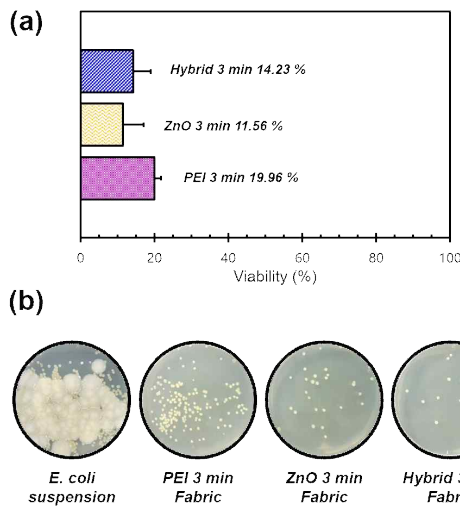


그림 3. 교차검증으로 진행된 침지방식의 항균테스트 결과. (a) 직물을 박테리아 현탁액에 5시간동안 침지시킨 후 얻은 생존율 결과. 각 샘플은 나노입자와 폴리머를 동일한 가공 시간동안 전기영동으로 증착시켜 준비하였음. 하이브리드는 ZnO-SiO₂로 구성된 복합 표면을 의미함. (b) 원단이 침지된 박테리아 현탁액을 고체 배지에 접종시킨 뒤 얻어진 콜로니 이미지.

2) 개발한 표면의 투습도 테스트 방법 및 결과

- 투습성 테스트는 ASTM E96 upright cup method를 참고하여 코팅된 원단의 수증기 투과율(Water vapor transmission, WVTR) 을 확인하였음
- 1L 용량의 유리병에 탈이온수를 일정량으로 채운 후, 병의 입구를 각 샘플로 밀봉하여 일정 시간동안 90-95 °C로 가열함
- 감소된 물의 양을 측정하여 아래의 식과 같이 샘플별 WVTR을 계산하였음

$$WVTR = \frac{m_1 - m_2}{A \times time}$$

- 여기서 m₁은 초기 탈이온수의 무게, m₂는 일정 가열시간 이후 측정한 탈이온수의 무게, A는 밀봉 샘플의 면적, time은 증발 시간을 의미함

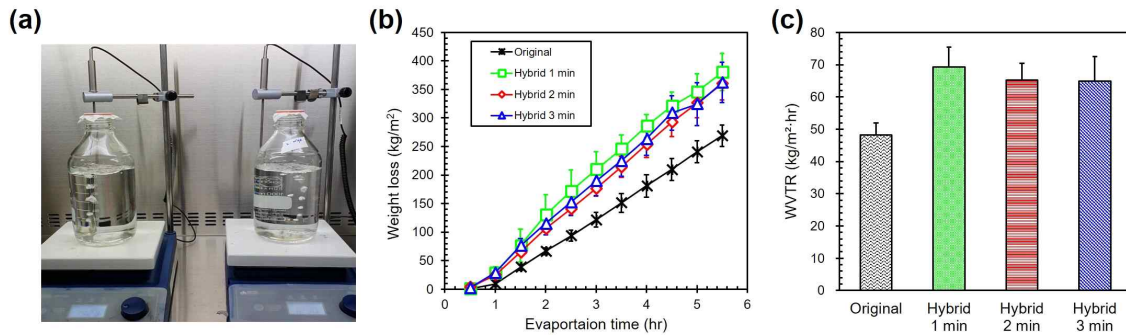


그림 4. 개발한 직물의 WVTR 시험 결과 (a) 전기영동법으로 개질한 기능성 원단의 WVTR 테스트 구성. (b) 가열 시간에 따라 측정된 탈이온수 감소량. 하이브리드는 ZnO-SiO₂로 구성된 복합 표면을 의미하며 상이한 증착 시간 (1분, 2분, 3분) 을 갖는 하이브리드 원단과 가공 전 원단 샘플의 감소량을 비교 (c) 5시간 동안 가열한 뒤 측정된 결과 값을 수식에 따라 계산한 최종 WVTR 결과

3) 개발한 표면의 발수성 테스트 방법 및 결과

- 접촉각 측정기 (Smartdrop, 펠토바이오메드)를 이용하여 가공된 샘플의 접촉각을 측정
- 동일한 면적의 샘플 위에 5 mL 의 탈이온수를 떨어뜨려 액적의 접촉각을 시간에 따라 측정
- 접촉각 : 액체 방울이 고체 위에 존재할 때, 액체-기체 경계면이 액체-고체 경계면과 만드는 각 (고체표면이 얼마나 잘 젖을 수 있는가를 보여주는 척도)
- 평가에 사용된 샘플은 ZnO-SiO₂ 나노입자로 코팅시킨 하이브리드 표면으로 액적이 떨어진 초기에는 소수성 특성이 발현되지만, 시간 경과에 따라 ZnO 입자에 의한 수분 흡착이 이루어져 접촉각이 감소하게 됨
- 따라서 일정 수압 조건 하에 특정 시간동안 원단을 노출시키는 기존의 발수성 평가에 대한 대체 평가 방안이 필요하므로 접촉각을 고려한 표면의 특성 평가로 대체함

① 표면의 접촉각이 90°이상일 경우, 소수성 표면으로 정의

② 표면의 접촉각이 150°이상일 경우, 초소수성 표면으로 정의

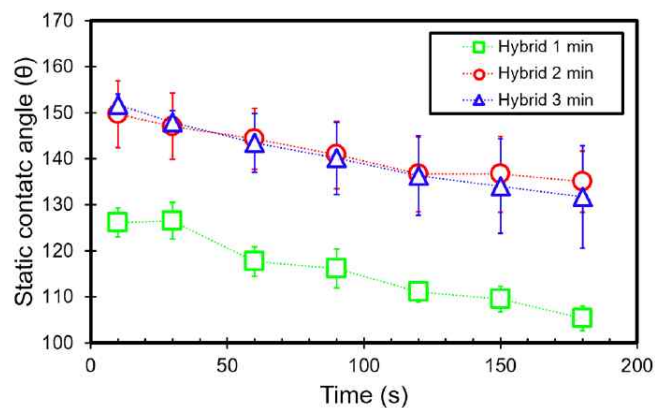


그림 5. 하이브리드 표면의 시간에 따른 접촉각의 변화 하이브리드는 ZnO-SiO₂로 구성된 복합 표면을 의미, 최소 2분 이상의 증착 시간에서 초소수성 표면이 달성됨을 확인할 수 있음

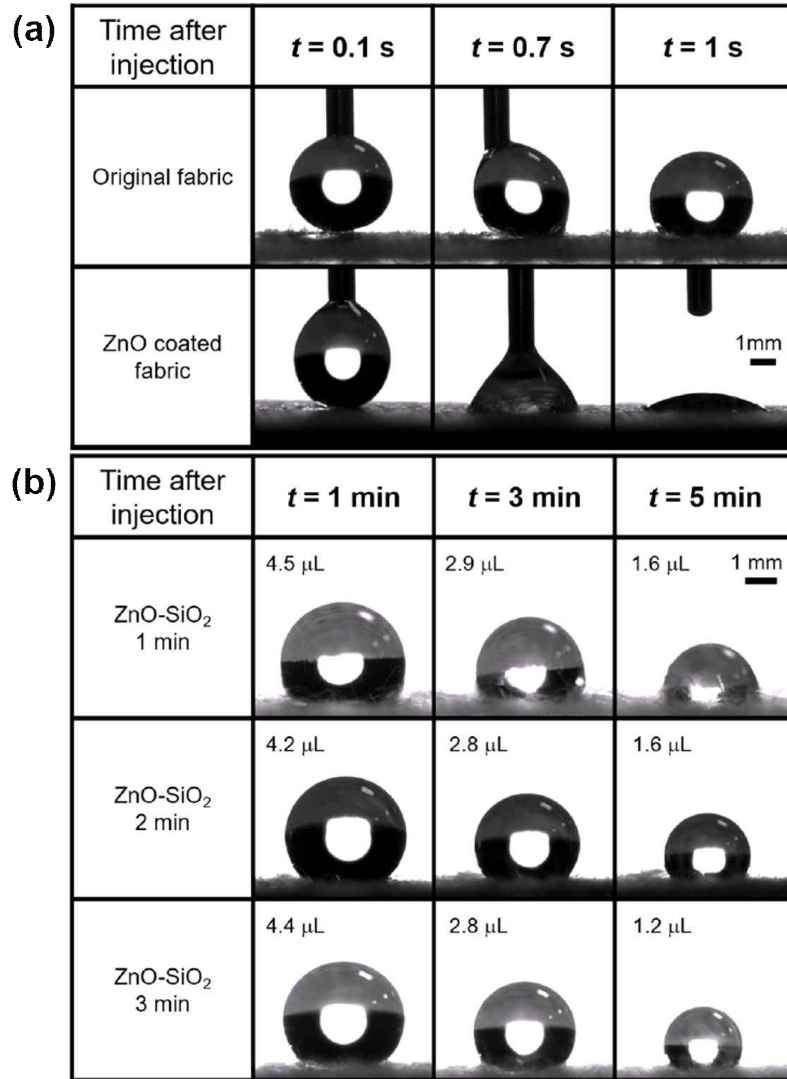


그림 6. 하이브리드 표면의 시간에 따른 접촉각의 변화 (a) 가공 전 원단과 ZnO 입자로 코팅된 원단 표면에서 측정된 액적의 접촉각 변화. ZnO의 표면이 친수성인 관계로 가공 전 원단보다 동일 시간 대비 빠르게 액적이 흡수되는 것을 확인할 수 있음 (b) 증착 시간에 따른 하이브리드 원단의 접촉각 변화. 하이브리드는 ZnO-SiO₂로 구성된 복합 표면을 의미하며 최소 2분 이상의 증착 시간에서 초소수성 표면이 달성됨을 확인할 수 있음. 시간이 지남에 따라 원단을 구성하는 하위 ZnO 표면으로 인하여 점차 액적이 양상을 보이지만 액적의 형태를 비교적 유지

□ 전기영동법을 이용한 초소수성 제습 표면 코팅

- 기존 축·천창 개폐형 온실의 제습 문제 해결을 위해 당 사업에서는 열교환기 표면에서 응축되는 물 입자의 신속한 제거를 통한 열전달 효율 개선이 가능하도록 폴리머 기반의 나노 스케일 물질(Particle) 코팅 기술을 적용, 초소수성을 갖는 열교환 시스템 개발로 온실 내 습도의 능동제어가 가능한 시스템 개발을 추진하였음
- 규격 SPS-KACA0020-6631:2016 에 의거하여, 비전력이 정상상태에 도달한 시점에서 시험체의 무게 W1 (kg)을 측정후, 시험체의 무게 W1을 측정된 시점부터 3시간 이상 운전하여 시험체의 무게 W2 (kg)를 측정하였음 (공인성적서 별도 첨부)

□ 공인인증 시험 결과

1) 항균성 시험 성적서

KATRI 한국의류시험연구원

서울특별시 동대문구 왕산로 51 (용두동)
 T : 02-3668-3000 F : 02-3668-2900
 www.katri.re.kr

전자문서
전송서비스

시험 성적서

신청자 : 주식회사 성원엔지니어링
 주소 : 부산 강서구 과학산단1로60번길 31, 1동 106호
 (지사동, 부산테크노파크)
 제출처 :
 시료명 : 직물원단 2 점
 S/# 1.대조군, 2.가공원단

KATRI NO : STAA21-00064879
 접수일자 : 2021.10.19
 발급일자 : 2021.11.08
 용도 : 품질관리용
 PAGE(S) : 1 / 1

시 험 항 목	시 험 결 과	
	시료1	시료2
항균도 (%) : KS K 0693:2016 준용		
정균감소율		
시험균①	99.9	> 99.9
시험균②	25.6	> 99.9
* 주) 1. 시험균종 : - 시험균① : <i>Staphylococcus aureus</i> ATCC 6538 (황색포도상구균) - 시험균② : <i>Klebsiella pneumoniae</i> ATCC 4352 (폐렴간균) 2. 접종균액의 농도 : - 시험균① : 1.1 x 10 ⁸ CFU/mL - 시험균② : 1.3 x 10 ⁸ CFU/mL 3. 대조편 : 표준면포 4. 비이온계면활성제 : Tween 80, 접종균액의 0.05 % 첨가		
	시료1	시료2

한국의류시험연구원

시험자 : 최수영

기술책임자 : 이경민

시험장소 : 경기도 안양시 만안구 덕천로48번길 19(안양동)

비고 1. 이 성적서는 신청자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
 2. 이 성적서는 당 시험연구원의 사전 서면동의 없이 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
 3. 이 성적서는 KOLAS 인정과 무관함을 알려드립니다.

2) 투습성 시험 성적서

- 가공 전 원단

시험 성적서

신청자 : 주식회사 성원엔지니어링 주소 : 부산 강서구 과학산단1로60번길 31, 1동 106호 (지사동, 부산테크노파크) 제출처 : 시료명 : 직물원단 1 점 가공전 원단	KATRI NO : STAA21-00071207 접수일자 : 2021.11.18 발급일자 : 2021.11.19 용도 : 품질관리용 PAGE(S) : 1 / 1
---	---

시험항목	시험결과
	시료1
두께 (mm) : KS K ISO 5084:1996	0,13
* 주) 1. 프레스 푸트의 지름 : (50.5 ± 0.2) mm 2. 가압압력 : 1.0 kPa	
투습도 (g/(m ² · 24 h)) : KS K 0594:2021 열화칼슘법	9 812
	시료1

한국의류시험연구원

시험자 : 손영해



기술책임자 : 홍재용




시험장소 : 서울특별시 동대문구 왕산로 51 (용두동)

- 비고 1. 이 성적서는 신청자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
 2. 이 성적서는 당 시험연구원의 사전 서면동의 없이 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
 3. 이 성적서는 KCI AS 인정과 무관함을 알려드립니다.

- 가공 후 원단

시험 성적서


신청자 : 주식회사 성원엔지니어링
주소 : 부산 강서구 과학산단1로60번길 31, 1동 106호
(지사동, 부산테크노파크)
제출처 :
시료명 : 직물원단 1 점


KATRI NO : STAA21-00064880
접수일자 : 2021.10.19
발급일자 : 2021.10.25
용도 : 품질관리용
PAGE(S) : 1 / 1

시 험 항 목	시 험 결 과
	시료1
손세탁견뢰도 (급) : TWC TM 250 : 2009 ((40 ± 2) °C, 30분, ECE A 세제)	
변회색	4-5
오염(아세테이트)	4-5
오염(면)	4-5
오염(폴리아마이드)	4-5
오염(폴리에스터)	4-5
오염(아크릴)	4-5
오염(모)	4-5
두께 (mm) : KS K ISO 5084:1996	
	0.20
* 주) 1. 프레스 푸트의 지름 : (50.5 ± 0.2) mm ^o 2. 가압압력 : 1.0 kPa	
* 주) 개개치 (0.21, 0.20, 0.18, 0.19, 0.20) mm ^o	
투습도 (g/(m ² · 24 h)) : KS K 0594:2021 영화칼슘법	
	11 131
	시료1

한국의류시험연구원



시험자 : 송명호 

기술책임자 : 윤준호 



시험장소 : 경기도 안양시 만안구 전파로24번길 82(안양동), 서울특별시 동대문구 왕산로 51 (용두동)

1. 이 성적서는 신청자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 당 시험연구원의 사전 서면동의 없이 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 KOLAS 인정과 무관함을 알려드립니다.

3) 발수성 (표면습윤저항성) 시험 성적서

시험 성적서

신청자 : 주식회사 성원엔지니어링
주소 : 부산 강서구 과학산단1로60번길 31, 1동 106호
(지사동, 부산테크노파크)
제출처 :
시료명 : 직물원단 1 점
코팅원단

KATRI NO : STAA21-00071209
접수일자 : 2021.11.18
발급일자 : 2021.11.19
용도 : 품질관리용
PAGE(S) : 1 / 1

시험항목	시험결과
	시료1
두께 (mm) : KS K ISO 5084:1996	0.17
* 주) 1. 프레스 푸트의 지름 : (50.5 ± 0.2) mm ^o 2. 가압압력 : 1.0 kPa	
표면습윤저항성 (급) : KS K ISO 4920:2012	
시험편 1	5
시험편 2	5
시험편 3	5
* 주) 1. 물의온도 : (20 ± 2) °C 2. 등급표시 : 5급(100), 4급(90), 3급(80), 2급(70), 1급(50), 0급(0)	
	시료1

한국의류시험연구원

시험자 : 손영해



기술책임자 : 홍재용




시험장소 : 서울특별시 동대문구 왕산로 51 (용두동)

비고 1. 이 성적서는 신청자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로서 전체 제품에 대한 품질을 보증하지는 않습니다.
2. 이 성적서는 당 시험연구원의 사전 서면동의 없이 홍보, 선전, 광고 및 소송용으로 사용될 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
3. 이 성적서는 KCI ΔS 인정과 무관함을 알려드립니다.

4) 제습성 시험 성적서

시험 성적서 (TEST REPORT)



한국산업기술시험원
Korea Testing Laboratory

성적서 번호 : 21-073159-01-1
Report No.

페이지 (1) / (총 5)
Page of Pages



1. 의뢰자 (Client)

기관명 (Name) : 주식회사 성원엔지니어링

주소 (Address) : 부산광역시 강서구 과학산단1로60번길 31, 1동 106호 (지사동, 부산테크노파크)

의뢰일자 (Date of Receipt) : 2021. 11. 04.

2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) : 연구과제 관리용

3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample)

제품명 (Description) : 기능성 코팅이 적용된 온실용 공기조화장치의 제습 모듈

제작회사 (Manufacturer) : 주식회사 성원엔지니어링

모델명 (Model Name) : ***

제조번호 (Serial Number) : ***

기타 (Remark) : ***

4. 시험기간 (Date of Test) : 2021년 11월 04일 ~ 2021년 11월 04일

5. 시험장소 (Location of Test) :

KTL 고정시험실

현장시험 (주소 : 서울시 용산구 청하로47길 100 숙명여자대학교 르네상스플라자 502호)

6. 시험규격/방법 (Test Standard/Method) : 의뢰자 제시 시험방법

7. 시험결과 (Test Results) : 첨부 시험결과 참고

- 비고(Note) : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제출한 시료에 한하며, 법적 및 기타분쟁의 근거 등으로의 사용을 금합니다.
2. 이 성적서는 원본만 유효하며, 임의로 재 가공된 사본 및 전자인쇄본 등은 유효하지 않습니다.
(*원본이란 KTL에서 정해진 절차에 따라 보안성을 포함시켜 제공하는 모든 성적서를 의미합니다.)
3. 아래의 2D바코드를 스캔하여 성적서의 원본내용 확인이 가능하며, KTL 보관 원본과의 동일성은 고객전용홈페이지(customer.ktl.re.kr)의 "성적서 원본확인"창에서 비교가능 합니다.
4. 본 성적서는 KS Q ISO/IEC 17025 표준 및 KOLAS 인정과 관련이 없습니다.

확 인 Affirmation	작성자(Tested by)	박대건	기술책임자(Technical Manager)	차재두
	성명(Name): 박대건	(Signature)	성명(Name): 차재두	(Signature)

2021. 12. 13.

한국산업기술시험원



서울특별시 구로구 디지털로26길 87 (구로동) (87, Digital-ro 26-gil, Guro-gu, Seoul, KOREA) Tel.02-860-1217 Fax. 02-860-1509

FP104-05-00



※ 위 마크는 추후 전자확인증 대조 프로그램에서 원본대조시 사용되는 2D코드입니다.

시험 결과 (Test Results)

시험항목	단위	결과			시험규격
		1회 시험	2회 시험	평균	
제습량	kg/m ² · hr	4.23	4.47	4.35	의뢰자 제시 시험 방법

[비 고]

○ 시험 일시 / 장소

- 시험 일시 : 2021년 11월 4일
- 시험 장소 : 숙명여자대학교 르네상스 플라자 502호 실험실 (서울시 소재)

○ 시험품명 및 시험방법

- 시험품명 : ㈜성원엔지니어링 「기능성 코팅이 적용된 온실용 공기조화장치의 제습 모듈」
- 시험항목 및 방법 : 의뢰자의 항온항습 챔버에서 제습 모듈 가동 중 제습량 현장 측정

시험 항목	시험 방법 (의뢰자 제시 시험방법)						
제습량	<ul style="list-style-type: none"> • 의뢰자의 항온항습 챔버에 제습된 물을 채취할 수 있는 제습 모듈(시험품) 구조물을 설치함. • 챔버 내부에 실시간 온·습도계를 설치하고, 아래의 의뢰자가 제시한 온도와 습도 조건으로 챔버 내부를 30분간 안정화시킴. <table border="1" style="margin-left: 40px;"> <thead> <tr> <th colspan="2">챔버 내부 항온항습 조건 (의뢰자 제시)</th> </tr> <tr> <th>온도</th> <th>습도</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>30 ℃ ± 3 ℃</td> <td>90 % ± 3%</td> </tr> </tbody> </table> <ul style="list-style-type: none"> • 챔버 내부의 시험 환경 조건이 안정화 된 후, 제습 모듈을 가동하고 60분간 제습 시험을 실시함. • 제습 시험 완료 후, 제습 모듈 구조물에 채워진 물의 무게와 제습 모듈의 면적을 측정하여 아래의 의뢰자 제시 수식으로 제습량을 산정함. $\text{제습량 (kg/m}^2\text{hr)} = \frac{[\text{1시간 동안 제습된 물의 무게 (kg/hr)}]}{[\text{제습 모듈 면적 (m}^2\text{)}]}$	챔버 내부 항온항습 조건 (의뢰자 제시)		온도	습도	30 ℃ ± 3 ℃	90 % ± 3%
챔버 내부 항온항습 조건 (의뢰자 제시)							
온도	습도						
30 ℃ ± 3 ℃	90 % ± 3%						

○ 측정 장비

- 제습량 현장 시험 챔버(의뢰자 제공) : 항온항습 챔버 (WON TECH / Model : WTH-1000)
- 챔버 내부 온습도 조건 확인 : 온습도계 (MADGE TECH / Model : PRHTemp2000)
- 제습된 물의 무게 측정 : 전기식 지시저울 (METTLER TOLEDO / Model : ME2002)

○ 현장 시험 측정 및 확인 사항

제습 모듈 면적 (m ²)	제습된 물의 무게 (kg)	
	1회 시험	2회 시험
0.101 40	0.428 89	0.453 08

FP104-06-00



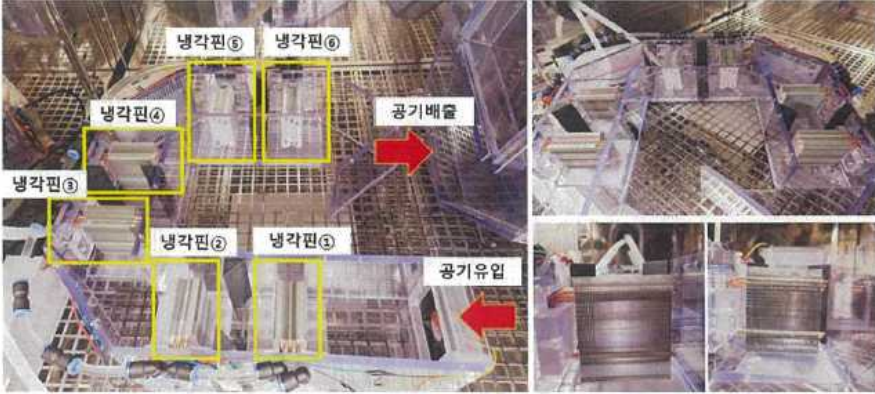

※ 위 마크는 추후 전자확인증 대조 프로그램에서 원본대조시 사용되는 2D코드입니다.

항목	현장 시험 확인 사항
<p>의뢰자 항온항습 챔버</p>	<p>• 의뢰자의 현장 실험실 (숙명여자대학교)에 설치된 항온항습 챔버를 확인하였으며, 챔버 내부의 시험품 「기능성 코팅이 적용된 온실용 공기조화장치의 제습 모듈」 설치상태와 챔버 외부의 제습 모듈 전력공급 및 냉각수 공급 장치 구성을 확인함.</p>  <p>[의뢰자의 항온항습 챔버 및 챔버 내·외부 장치 구성 확인]</p>
<p>챔버 내부 시험 장치</p>	<p>• 챔버 내부에는 제습된 물을 채취할 수 있는 제습 모듈(시험품) 구조물과 항온 항습 조건 확인용 온·습도계를 아래의 사진과 같이 설치함.</p>  <p>[제습 모듈(시험품) 구조물 및 온습도계 설치 모습]</p>
<p>제습 시험</p>	<p>• 챔버 내부를 항온항습 조건(온도 30 ℃/ 습도 90 %)으로 30분간 안정화 실시 후, 제습 시험을 60분간 실시함.</p>  <p>[제습 시험 항온항습 조건 및 챔버 외부 냉각수 공급 모습]</p>

FP104-06-00






※ 위 마크는 추후 전자확인증 대조 프로그램에서 원본대조시 사용되는 2D코드입니다.

항목	현장 시험 확인 사항												
제습 모듈 면적 측정	<p>• 제습 모듈은 제습된 물을 채취할 수 있는 구조물로 냉각핀이 총 6개 설치되어 있음.</p>  <p>[제습 모듈 구조물 및 냉각핀 설치 확인]</p>  <p>[제습 모듈 구조물 단면적 측정]</p> <p>• 제습 모듈의 면적은 제습 모듈 구조물의 면적을 측정하고, 구조물에 설치된 냉각핀의 수량을 적용하여 계산함.</p> <table border="1" data-bbox="432 1346 1254 1503"> <thead> <tr> <th colspan="2">제습 모듈 구조물 단면적 측정 (mm)</th> <th rowspan="2">구조물 단면적 (m²)</th> <th rowspan="2">제습 모듈 냉각핀 수량 (개)</th> <th rowspan="2">제습 모듈 면적 (m²)</th> </tr> <tr> <th>가로</th> <th>세로</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>130</td> <td>130</td> <td>0.016 90</td> <td>6</td> <td>0.101 40</td> </tr> </tbody> </table>	제습 모듈 구조물 단면적 측정 (mm)		구조물 단면적 (m ²)	제습 모듈 냉각핀 수량 (개)	제습 모듈 면적 (m ²)	가로	세로	130	130	0.016 90	6	0.101 40
	제습 모듈 구조물 단면적 측정 (mm)		구조물 단면적 (m ²)				제습 모듈 냉각핀 수량 (개)	제습 모듈 면적 (m ²)					
가로	세로												
130	130	0.016 90	6	0.101 40									

FP104-06-00



※ 위 마크는 추후 전자확인증 대조 프로그램에서 원본대조시 사용되는 2D코드입니다.

항목	현장 시험 확인 사항																					
제습된 물 무게 측정	• 제습 시험이 완료된 후, 아래의 사진과 같이 제습된 물을 실험실용 티슈와 비이커를 사용하여 채취하고 무게를 측정함.																					
																						
	[제습된 물 채취 모습]																					
																						
	[1회 시험 제습된 물 무게 측정]																					
																						
[2회 시험 제습된 물 무게 측정]																						
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">No.</th> <th colspan="2">실험실용 티슈에 채취된 물의 무게 (g)</th> <th colspan="2">비이커에 채취된 물의 무게 (g)</th> <th rowspan="2">제습된 물의 무게 (g)</th> </tr> <tr> <th>채취 전 무게</th> <th>채취 후 무게</th> <th>채취 전 무게</th> <th>채취 후 무게</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1회 시험</td> <td>8.42</td> <td>38.64</td> <td>49.74</td> <td>348.93</td> <td>0.428 89</td> </tr> <tr> <td>2회 시험</td> <td>8.39</td> <td>38.78</td> <td>49.73</td> <td>372.96</td> <td>0.453 08</td> </tr> </tbody> </table>	No.	실험실용 티슈에 채취된 물의 무게 (g)		비이커에 채취된 물의 무게 (g)		제습된 물의 무게 (g)	채취 전 무게	채취 후 무게	채취 전 무게	채취 후 무게	1회 시험	8.42	38.64	49.74	348.93	0.428 89	2회 시험	8.39	38.78	49.73	372.96	0.453 08
No.		실험실용 티슈에 채취된 물의 무게 (g)		비이커에 채취된 물의 무게 (g)			제습된 물의 무게 (g)															
	채취 전 무게	채취 후 무게	채취 전 무게	채취 후 무게																		
1회 시험	8.42	38.64	49.74	348.93	0.428 89																	
2회 시험	8.39	38.78	49.73	372.96	0.453 08																	

끝.

FP104-06-00



※ 위 마크는 추후 전자확인증 대조 프로그램에서 원본대조시 사용되는 20코드입니다.

나. Polypropylen fabric 항균 및 항곰팡이성 코팅 기술 개발

: Polypropylene fabric 표면에 구리 나노 입자를 코팅하여 항균, 항곰팡이성 부여

□ Polypropylene(PP) fabric

- PP fabric은 합성 섬유 중 하나로 가볍고 통기성과 보온성이 좋다는 장점을 가지고 있음
- 그러나, 합성 섬유는 금속 이온이 표면에 부착될 수 있는 수산기, 카르복실기와 같은 active group을 가지고 있지 않아 나노 입자가 부착되기 어렵다는 문제가 있음

□ 구리 나노 입자 코팅

- PP fabric에 active group을 부착하는 활성화 과정을 진행하여 PP fabric 표면을 구리 이온이 부착하기 쉬운 구조로 변형함
- 구리 나노 입자 합성 용액을 사용하여 PP fabric 표면에 구리 나노 입자 코팅 진행하여 구리입자가 함유된 PP 원단(CuNP-PP)을 개발하였음
- 구리 이온(Cu nitrate hydrate) 용액에 침지 후 환원제(Ascorbic acid) 용액에 재 침지하여 코팅을 진행함(각 단계는 한 시간 동안 수행되었음)
- 이후 두 번째 코팅에서는 각 단계별로 10분씩 침지하여 코팅 횟수를 증가시켰으며, 증착 단계가 거듭됨에 따라 PP fabric 위에 코팅된 CuNP 입자 수가 증가함

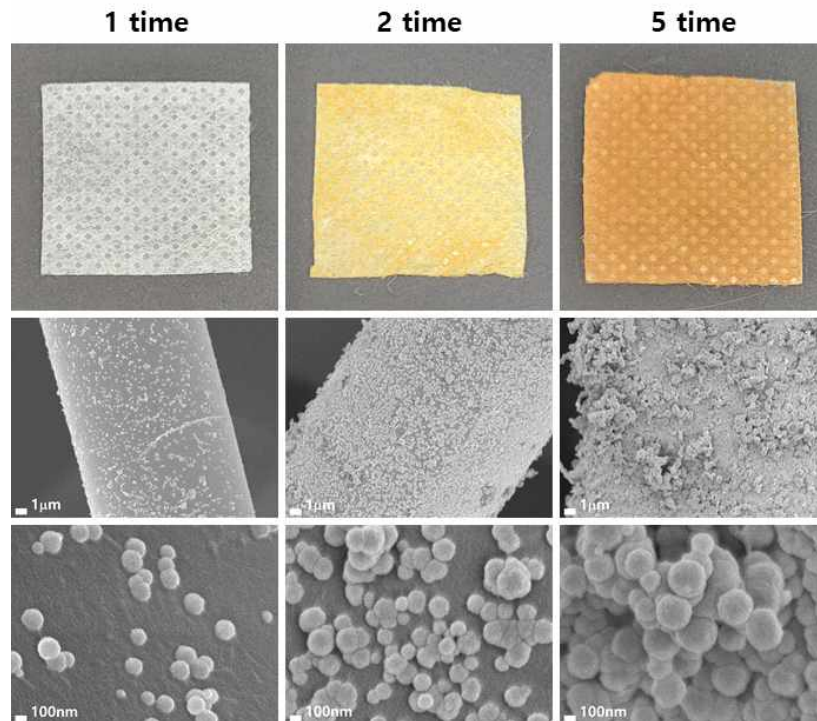


그림 7. 코팅 횟수에 따른 CuNP-PP fabric 모습 및 SEM 사진 코팅 횟수 증가에 따라 PP fabric 표면에 구리 나노 입자 수가 증가하였음

□ 개발한 표면의 항균성 및 항곰팡이 성능 평가

o 테스트 방법

1) 항균성 평가

- 항균성 표면을 평가하기 위하여 재료의 특성에 따라 다양한 평가 방법이 존재
- 그러나 표면 장력에 의한 친수성/소수성 등과 같은 변수에 의해 결과가 상이하게 나타나므로 적절한 평가 방법에 대한 기준이 모호함
- 대표적으로 많이 사용되는 원단의 항균성 평가는 AATCC 147, ISO 20645:2004, AATCC 100, JIS L 1902 등이 있음

- 본 과제에서는 CuNP-PP fabric에 항균 평가를 수행하기 위하여 콜로니(colony) 배양 방법을 사용하였음
 - CuNP-PP 표면의 항균성을 평가하기 위하여 대장균(*Escherichia coli*, *E.coli*)을 사용함
 - 실험에 사용된 *E.coli*는 그람음성 세균이며 ATCC 25922 종을 인산완충식염수에 1×10^5 cells/mL의 농도로 희석하여 박테리아 오염 용액을 제조함
 - 박테리아 오염 용액 10mL를 $1 \times 1 \text{cm}^2$ 로 재단한 CuNP-PP fabric에 침지한 다음 Vortex mixer로 혼합하였음 (박테리아 오염 용액에 코팅된 PP fabric 투입)
 - 해당 샘플을 5시간 동안 인큐베이터에서 배양한 후, 오염 용액을 5 μ L씩 피펫으로 채취하여 대장균 성장 배지인 LB 고체 배지 위에 도말함
 - 오버나이트로 LB 고체 배지에서 배양한 박테리아의 콜로니 수를 수집하여 생존율 평가하였음
 - CuNP-PP 원단의 항균 효과를 비교하기 위하여 가공되지 않은 PP 원단을 control로 지정하여 동일한 항균 평가를 시행함

2) 항곰팡이성 평가

- CuNP와 CuNP-PP의 항곰팡이성 표면을 평가하기 위하여 딸기에 곰팡이 병을 유발하는 *Cladosporium cladosporioides*(KCTC 16680)와 *Botryotinia fuckeliana*(KCTC 6973) 2 종을 선별
 - 항곰팡이 평가를 위해 선택된 두 가지 균에서 포자를 채취하여 탈이온수와 혼합하여 포자 현탁액을 생성함
 - 곰팡이 성장 배지인 PDA(potato dextrose agar)에 포자 현탁액을 200 μ L씩 분주하여 배지 전체에 곰팡이 포자를 도포하였음
 - 포자가 도포된 PDA 배지 위에 CuNP-PP fabric을 중앙 배치한 후 25°C 환경에서 최대 7일간 배양한 후 항곰팡이 성능을 평가하였음

o 테스트 결과

1) 항균성 평가 결과

- 구리 나노입자가 코팅된 PP원단의 (CuNP-PP)의 항균성 평가를 진행한 결과, CuNP-PP에서 대장균이 100% 사멸함을 확인하여 효과적인 항균성을 나타내는 것을 확인하였음
- 실험 결과, 가공되지 않은 PP 원단에서는 순수 박테리아 오염 용액 보다 더 많은 대장균이 생존하는 것을 확인하였음

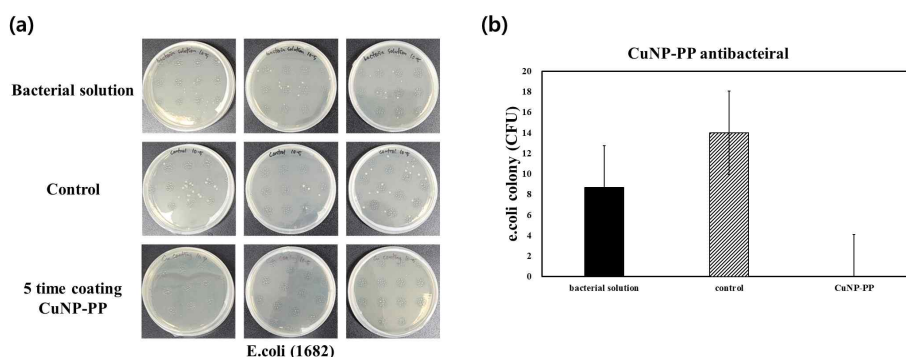


그림 8. 코팅된 PP fabric 항균성 결과

2) 항곰팡이성 평가 결과

- CuNP(구리 나노입자)의 항곰팡이 효과 확인

- 항곰팡이 성능을 확인하기 위해 곰팡이 포자가 도포된 PDA 배지 중앙에 구리 나노 입자를 배치하여 25°C 환경에서 최대 7일간 배양하였음
- 구리 이온 용액(copper nitrate trihydrate, trisodium citrate dehydrate)과 환원제 용액(ascorbic acid)을 각각 pH 11로 조절한 후 두 용액을 혼합하여 3시간동안 반응시켜 구리나노 입자 합성 후 washing 과정 진행 후 나노 입자를 채취하였음
- 구리 나노 입자 주위에 곰팡이 *Botryotinia fuckeliana*와 *Cladosporium cladosporioides* 모두 균사의 색상의 변화를 관찰하여 항곰팡이성을 평가함

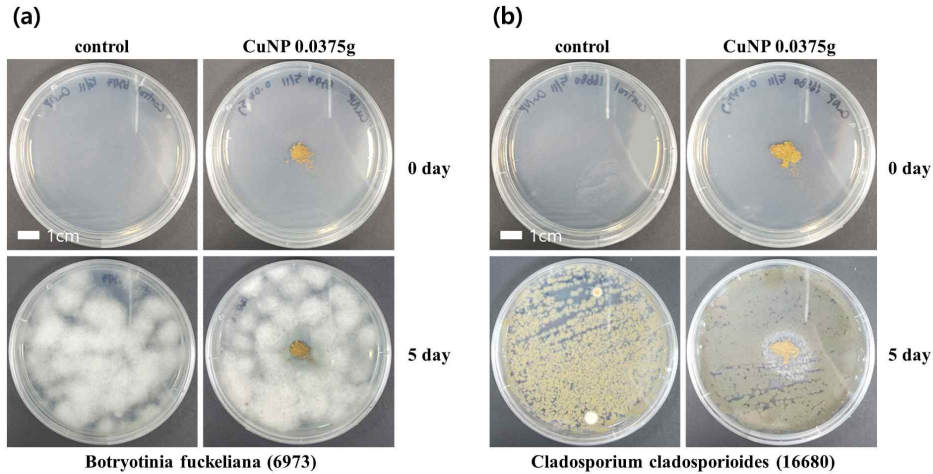


그림 9. 구리 나노 입자 자체의 항 곰팡이성 결과. (a) *Botryotinia fuckeliana* 균주 위에 구리 나노입자 배치, (b) *Cladosporium cladosporioides* 균주 위에 구리 나노 입자 배치, 두 조건 모두 배양 5일차 단계에서 구리 나노 입자의 항 곰팡이성을 확인하였음

- CuNP-PP fabric의 항곰팡이 시험 결과

- 본 과제에서 제시한 항곰팡이성 실험 방법에 따라 구리 나노 입자(CuNP)가 코팅된 PP 원단에 항균성 평가를 실시하였음
- CuNP-PP 세균에 대한 항균성은 매우 뛰어나지만 곰팡이에 대한 유의미한 항곰팡이 효과는 확인되지 않았음

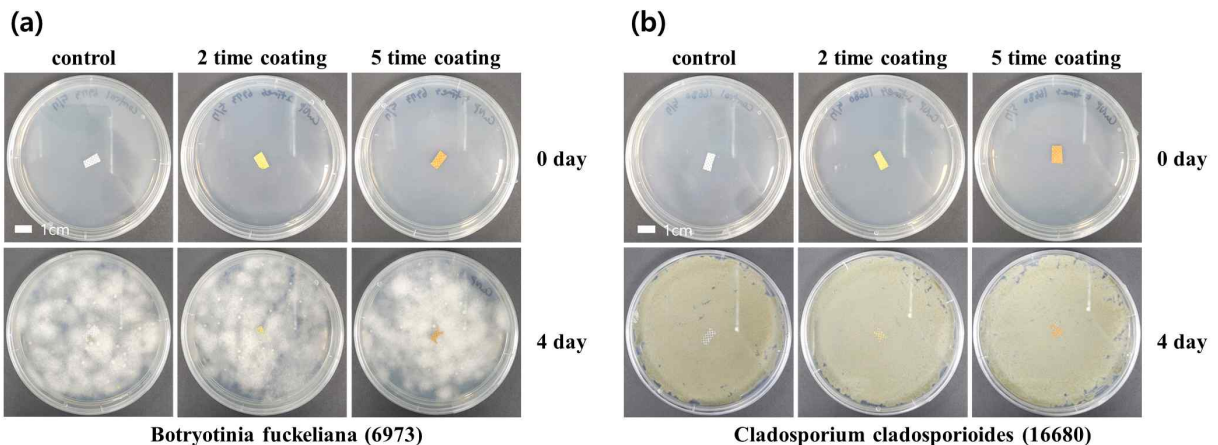


그림 10. 2 time, 5 time coating CuNP-PP fabric 항 곰팡이 결과. (a) *Botryotinia fuckeliana* 균주 위에 2 time, 5 time coating CuNP-PP 올려놓음. (b) *Cladosporium cladosporioides* 균주 위에 2 time, 5 time coating CuNP-PP 올려놓음. (a), (b) 모두 배양 4일차 단계에서 항 곰팡이성 결과 확인

다. 항균성, 생체적합성, 열전도성이 강화된 하이드로겔 개발

□ 하이드로겔의 특징 및 현재 기술의 한계

- 하이드로겔은 수분을 약 85%이상 함유할 수 있으며, 기계적 성질(Ex. 유연성, 신축성 등) 이

우수하고 높은 투명성과 점착력으로 약물전달 등의 의료용으로 많은 연구가 진행되고 있음

- 기존에 알려진 하이드로겔 내부에 금속입자를 형성시키는 방법은 용매를 함유하고 있는 하이드로겔을 금속 이온 수용액과 환원제에 침지시켜 각 단계에서 하이드로겔 내부에 이온을 침투시키고 금속 나노입자로 변환하는 방식을 사용하며, 상기의 방법은 고농도의 금속 나노입자를 생성시키지 못하는 단점이 존재함

□ 고복원성 및 금속입자 농도 제어가 가능한 하이드로겔 제작 기술 개발

- 뛰어난 항균성, 생체적합성, 열전도성의 특성을 가진 하이드로겔 개발은 농업, 냉열저장 등을 비롯한 다양한 분야에 적용이 가능할 것으로 예상됨
- 본 과제에서 개발한 하이드로겔은 수분을 모두 증발 시킨 후 다시 물을 주입하여도 원래 형태로 복원이 가능함
- 수분을 모두 증발 시킨 하이드로겔을 구리 수용액에 침지시켜, 하이드로겔에 침투되는 수분의 양을 제어하고, 형성되는 구리입자의 농도를 제어할 수 있음

□ 항균성, 생체적합성, 열전도성이 강화된 하이드로겔 제작 방법

1) 알지네이트 기반의 고 복원성 하이드로겔

- 하이드로겔 제작 방법은 모두 25g 기준으로 작성하였음
- DI Water 21.85g에 Alginate(AG) 0.1017g, Acrylamide(AAm) 3.0483g, Ammonium Persulfate(APS) 0.0306g, N,N'-Methylenebisacrylamide(MBAA) 0.0045g을 모두 넣고 잘 분산시킴
- 잘 분산시킨 하이드로겔 제조 용액에 N,N,N',N'Tetramethylenediamine(TEMED) 11.12 μ L를 넣고 잘 섞어준 후 몰드에 담아줌
- 50 $^{\circ}$ C에서 1시간동안 열처리 시켜주면 Alginate 기반의 고 복원성 하이드로겔 제작 완료

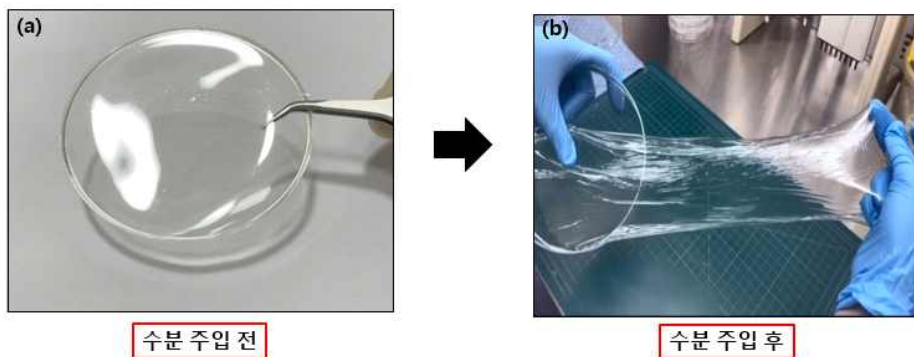


그림 11. 수분 주입 전후 하이드로겔 이미지. (a) 하이드로겔 제작 후 50 $^{\circ}$ C에서 24시간동안 열처리하여 수분을 모두 증발시킨 하이드로겔 Thin Film, (b) 하이드로겔 Thin Film을 5시간 이상 탈이온수에 침지시켜 복원된 하이드로겔

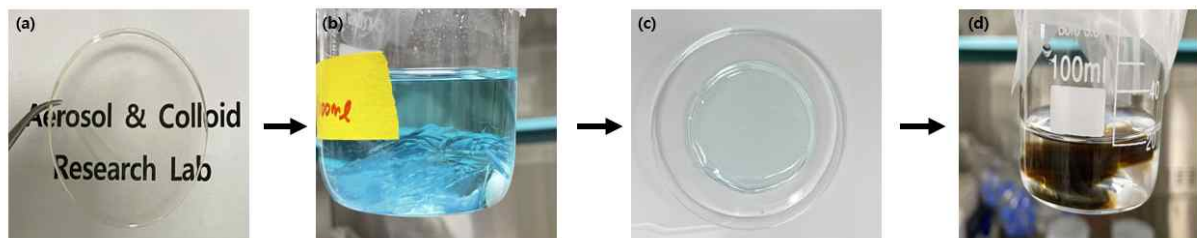


그림 12. 구리 나노입자가 함유된 하이드로겔 제작 과정. (a) 수분을 모두 증발시킨 하이드로겔 Thin Film, (b) 하이드로겔 Thin Film을 구리 수용액에 침지하여 내부에 구리 이온 형성되고 있는 하이드로겔, (c) 침지가 완료되어 구리 이온이 침투된 하이드로겔, (d) 재열처리 후 환원제(NaOH)에 침지시켜 구리 나노입자가 형성되고 있는 하이드로겔

2) 하이드로겔 내 구리입자 생성 방법

- 하이드로겔 표면에 있는 불순물을 제거하기 위하여 탈이온수로 세척한 후, 50°C 에서 24시간의 열처리 과정을 통해 수분을 완전히 증발된 박막 형태의 하이드로겔 필름을 제작함
- Copper(II) nitrate trihydrate를 탈이온수에 혼합하여 0.03M, 0.06M의 구리 수용액을 제작하였음
- 두 가지 농도의 구리 수용액에 하이드로겔 필름을 실온에서 24시간 동안 침지하면 하이드로겔 필름 내부로 수분과 함께 구리 이온이 침투되고, 파란색으로 변화함
- 구리 이온이 침투된 하이드로겔을 탈이온수로 세척한 후, 동일한 환경(50°C, 24시간) 에서 재 열처리를 진행하였음
- 구리 이온이 함유된 하이드로겔 필름을 NaOH(0.25M) 수용액에 24시간 동안 침지하여 하이드로겔 내부에 구리 나노입자를 합성시켰음
- 환원제를 통해 수분을 함유한 하이드로겔은 내부에 구리 나노입자를 함유하여 진한 녹색으로 변화되었음
- 그림 14에서 각각 다른 농도의 구리 이온이 침투된 하이드로겔을 환원제에 침지시키기 전 열처리를 진행하여 수분을 모두 날린 것과, 열처리 과정을 거치지 않고 하이드로겔 상태 그대로 침지 시킨 샘플을 비교하여 구리 나노입자가 변환되는 정도의 차이를 나타내었음

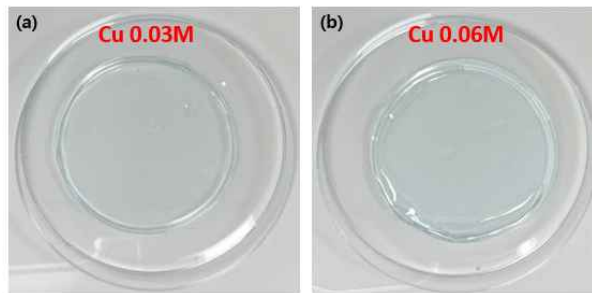


그림 13. 구리 수용액 농도에 따른 하이드로겔 내부 구리 이온 형성 비교 이미지. (a),(b) 각각 구리 수용액 농도 0.03M, 0.06M에 침지시킨 하이드로겔

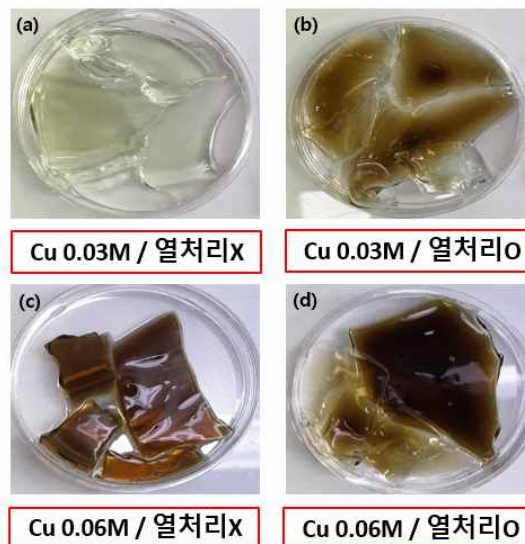


그림 14. 구리 수용액 농도와 열처리 유무에 따른 구리 나노입자 하이드로겔 이미지. (a),(b) 구리 수용액 농도 0.03M에 침지시킨 후 각각 열처리 하지 않고, 열처리 한 후, 환원제(NaOH)에 침지하여 내부에 구리 나노입자가 형성된 하이드로겔, (c),(d) 구리 수용액 농도 0.06M에 침지시킨 후 각각 열처리 하지 않고, 열처리 한 후, 환원제(NaOH)에 침지하여 내부에 구리 나노입자가 형성된 하이드로겔

□ 내부에 구리입자가 생성된 하이드로겔의 항균성 평가

1) 테스트 방법

- 본 과제에서는 구리 하이드로겔에 항균 평가를 수행하기 위하여 Inhibition zone을 확인을 통한 항균성 평가를 진행하였음
- 항균성을 평가를 위한 균주로 대장균(*Escherichia coli*, E.coli, ATCC 25922)을 선택했으며, 배양시킨 박테리아를 인산완충식염수(PBS)에 분산시킨 박테리아 오염 용액을 제조하였음
- 멸균된 면봉에 박테리아가 충분히 흡수될 수 있도록 박테리아 오염 용액 내에 침지시켰음
- 박테리아 오염 용액을 함유한 면봉을 LB 배지에 여러 번 도말한 후 대장균이 균일하게 도포된 LB 배지 위에 0.75, 1.5g 구리 하이드로겔을 중앙 배치 후, overnight 배양하여 항균성을 평가함
- 대장균이 균일하게 도포된 LB 배지 위에 0.75, 1.5g 구리 하이드로겔을 중앙 배치 후, overnight 배양하여 항균성을 평가함
- 이때 세균이 도포된 LB 배지 위에 아무것도 올리지 않은 Control 샘플과 비교해줌

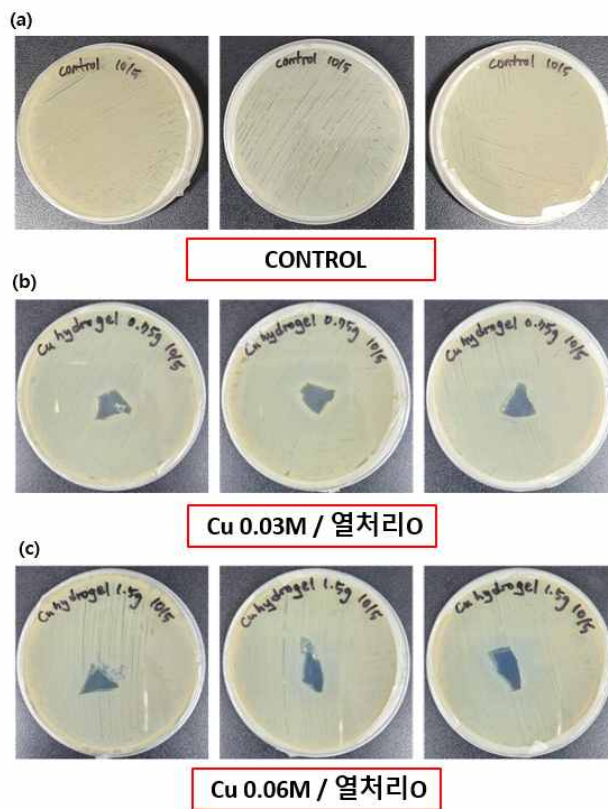


그림 15. 구리 나노입자 함유 하이드로겔(농도 Cu 0.03/0.06M) 항균성 평가. (a), (b), (c) 모두 세균이 균일하게 도포된 LB 배지로 실험 진행됨. (a) 하이드로겔을 올리지 않은 control. (b) Cu 0.03M 하이드로겔을 LB 배지 위에 올려놓음. (c) Cu 0.06M 하이드로겔을 LB 배지 위에 올려놓음.

2) 테스트 결과

- 실험 결과, 제작된 하이드로겔(구리입자 함유 하이드로겔)과 접촉된 영역에서는 대장균이 자라지 않은 것을 확인하였음
- 구리 나노입자가 함유됨에 따라 진한 녹색을 띤 하이드로겔은 항균성 실험 과정 이후 투명해진 것을 확인하였으며, 이는 구리 이온이 방출되어 대장균 생성을 억제하였을 것으로 예측함
- 고농도(Cu 0.06M), 저농도(Cu 0.03M)의 구리 나노입자 하이드로겔의 항균성 차이가 크게 식별되지 않는 관계로, 향후 최적의 구리 및 환원제 농도를 찾는 것이 중요할 것으로 예상되며, 결과적으로 구리 나노입자가 함유된 하이드로겔이 우수한 항균성을 나타냄

□ 내부에 구리입자가 생성된 하이드로겔의 생체적합성 평가

- 본 과제에서 개발한 소재의 생물학적 안정성을 평가하기 위하여 다양한 시험 방법 중 세포독성 시험을 진행하였음
- 고분자 소재의 생물학적 안전성 시험은 의료 기기의 인체 접촉 부위와 인체 접촉 기간 등을 고려하여 선택되어야 하며, <의료기기의 생물학적 안전에 관한 공통 기준 규격>에서 제시된 시험 방법을 참고하여 제품의 안전성 확보에 가장 적절한 것으로 선정·평가 되어야 함
- 국제표준화기구 (International Organization for Standardization, ISO)에서는 고분자 소재의 세포 독성을 세포수, 형태, 세포 활성 등 여러 측정 지표에 의거하여 규정되며, 의료기기 및 고분자 소재 생체적합성 평가는 대표적으로 국제 시험규격인 ISO 10993 시리즈를 활용할 수 있음
- 구리 입자가 함유된 하이드로겔의 생물학적 안전성을 평가하는 시험법으로 수분을 쉽게 흡수하는 하이드로겔 특성상, 용출 시험법이 적절한 것으로 판단하였음 (세포 독성시험법)

○ 테스트 방법

1) 구리 주입 하이드로겔의 용출액

- Control group은 positive control(0.1% ZDEC Polyurethane film) 과 negative control (High density Polyethylene film) 을 사용하였음
- Experimental group은 original Hydrogel, CuO 0.75g과 1.5g을 주입한 Hydrogel 그리고 3-4번 세척한 Hydrogel을 사용하였음
- 하이드로겔의 용출을 수행하기 전에 UV에 15분간 조사하여, 멸균 상태를 유지하여 세포 독성 시험에 영향을 미치지 않도록 조치하였음
- 제작된 하이드로겔을 세포 배지에 침지시킨 후 37°C에서 130rpm으로 24시간 동안 교반과정을 통해 용출 과정을 진행함

2) 하이드로겔의 세포독성을 평가하기 위해 MTT assay를 실시함

- 구리 주입 하이드로겔의 세포 독성을 측정하기 위하여 피부 섬유아세포주인 L929 세포를 사용하였음
- L929 세포를 2.5×10^4 cell/well이 되도록 세포를 분주하고 overnight 배양 후 제작된 하이드로겔 용출액을 첨가하였음
- 100 μ L의 MTT 용액을 분주 후 37°C에서 4시간 동안 반응시키고, MTT solubilization solution 100 μ L을 첨가하여 Microplate reader로 570nm 흡광도로 측정하였음

○ 테스트 결과

- Positive control과 Negative control의 결과로 세포 독성 실험이 신뢰성 있는 데이터를 확보하였음
- Original Hydrogel 대비 3-4번 세척한 Hydrogel 세포 생존율이 90%로 세포 독성을 유발하지 않으며, 생체에 적합한 하이드로겔이라는 것을 확인하였음
- 실험결과, 0.03M, 0.06M 농도의 구리 수용액으로 합성된 나노입자가 합성된 하이드로겔에서 세포 생존율이 5-6%로, Positive control의 세포 생존률인 8%보다 낮은 것으로 나타남
- 해당 결과는 단시간 고농도의 구리 이온 방출이 생체에 독성을 유발하는 것으로 사료됨
- 결과적으로 Original Hydrogel 대비 3-4번 세척한 Hydrogel인 경우 생체적합성이 우수하여 스마트팜 작물에 사용 가능할 것으로 예상하지만 구리 나노 입자로 인한 하이드로겔의 세포 독성이 높아지는 것을 확인하였음

- 따라서 구리 나노입자의 적절한 농도와 이온 방출 속도를 유지할 수 있으며 동시에 생체적합성이 뛰어난 하이드로겔 성분의 보완이 필요함

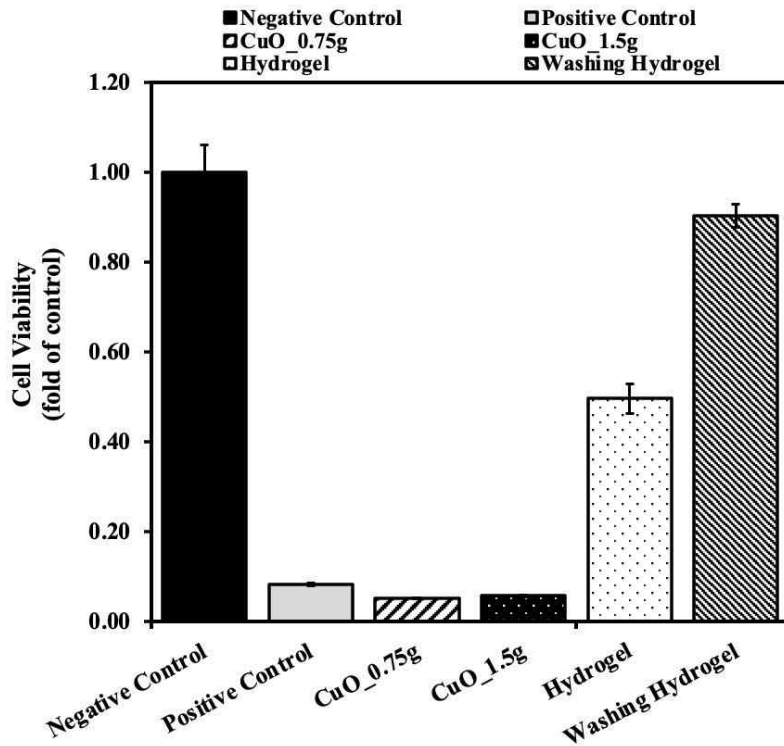


그림 16. 구리 주입 하이드로겔과 세척한 하이드로겔 세포 독성 비교

□ 내부에 구리입자가 생성된 하이드로겔의 열전달성 평가

○ 테스트 방법 및 결과

1) 하이드로겔 침지 용액의 농도 조절

- 본 과제에서 제시하는 금속나노입자 함유 하이드로겔 제작 방식은 기존의 하이드로겔이 보유하고 있는 수분을 모두 증발시켜 합성되는 입자의 농도를 제어할 수 있는 장점이 존재함
- 함께 시행한 항균, 항곰팡이성, 생체 적합성 테스트를 고려했을 때 적절한 양과 농도의 구리 이온 주입 및 환원 과정이 필요하다고 판단하였음
- 항균 평가에 사용된 Cu 0.03M, 0.06M 수용액 외에 좀 더 농도를 세분화하고 작업과정을 반복하여 다양한 농도로 구리입자가 함유된 하이드로겔을 제작함

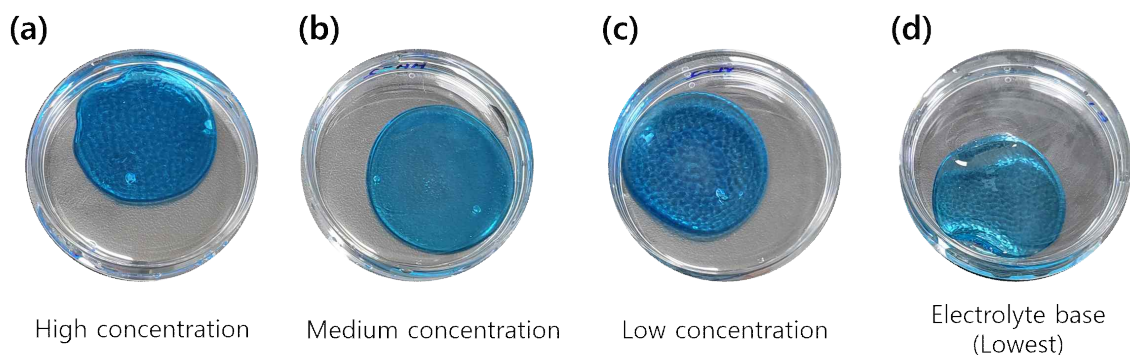


그림 17. 다른 농도와 물질로 제조된 구리수용액에 침지된 하이드로겔의 이미지. (a)와 (c)는 상기 시험에 사용된 0.06M, 0.03M 구리수용액을 그대로 사용한 샘플(copper nitrate trihydrate로 제조),

(b)는 결정수를 포함하는 수화물(copper sulfate pentahydrate)로 제조하였음 (0.045M). 수용액이 되면 같은 형태로 존재하지만 동일한 그램 수를 첨가하여도 시약의 물 질량이 다르기 때문에 실험의 편의성을 위해 사용되었음. (d)는 구리 도금 시 사용되는 전해액을 사용하였으며, (b)와 마찬가지로 수화물로 제작되었음.



그림 18. 환원제의 농도 및 침지된 구리 수용액의 농도에 따라 보여지는 하이드로젤의 색상 변화. 위에서 제시한 수용액에 2.5M, 0.25M, 0.1M 등의 환원제의 농도 또한 각기 시도하여 하이드로젤의 복원성 및 구리입자 함성 변화를 확인하였음. 또한 재침지-재건조의 반복 작업을 통해 균일하고 밀도 높은 구리입자 함유 하이드로젤을 제작하였음.

2) 제작된 하이드로젤의 열전도도 평가

- o 다양한 농도의 구리 수용액과 환원제로 가테스트한 후, 열전도성 평가에 사용될 4가지 종류의 하이드로젤 샘플을 선정하였음
 - 환원제의 농도는 기존과 동일하게 0.25M로 고정하고, 구리 수용액의 농도를 그림 17과 같이 고농도, 중농도, 저농도 및 구리 도금용 전해액 (High, medium, low concentration, and electrolyte)로 표현함
 - 고농도와 저농도는 copper nitrate trihydrate을 사용하여 각각 0.06M, 0.03M로 제작하였음
 - 중농도와 저농도는 copper sulfate pentahydrate로 제작됨(중농도: 0.045M)
 - 그림 17에서 확인한 바와 같이, 수용액의 농도와는 무관하게 무수화물과 수화물로 만들어진 용액의 색상차이가 발견되었음
 - 환원 작업은 모두 동일하게 NaOH 0.25M에 침지한 후 50℃ 환경의 오븐안에서 밀폐되어 4시간동안 진행함

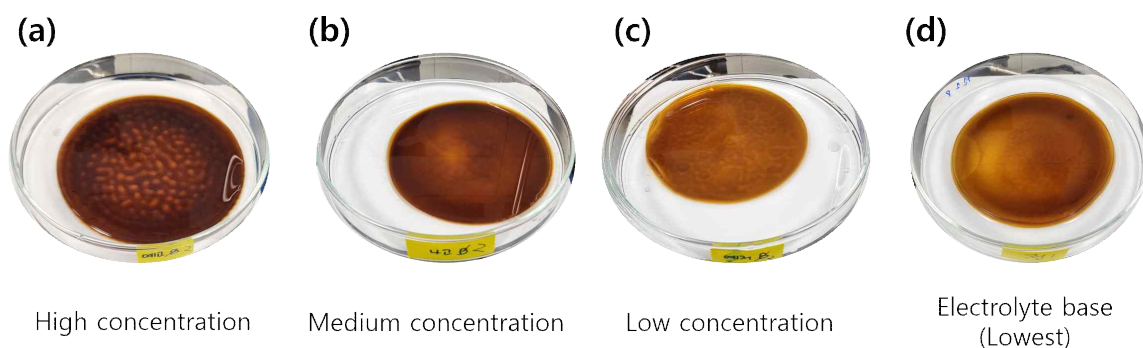


그림 19. 다른 용액과 농도의 구리수용액을 이용하여 제작한 구리입자 함유 하이드로겔의 색상 변화. 환원제는 NaOH 0.25M을 사용하였으며 4시간동안 50℃ 오븐에서 수분이 날라가지 않게 밀봉시킨 후 합성과정을 진행하였음. 환원 전의 하이드로겔 색상과 연결성이 없는 각기 다른 색상의 구리입자 함유 하이드로겔이 제작됨.

o 구리 나노입자가 생성된 하이드로겔의 열전달성 평가를 위한 시스템 구축

- 제작한 하이드로겔의 열전도도를 측정하기 위하여 총 7개의 온도센서를 사용하였으며 센서의 위치는 그림 20에 나타냄
- 온도센서는 핫플레이트의 표면, 하이드로겔을 샌드위치 타입으로 접합시키는 구리판의 상단부와 하단부의 표면, 총 3개의 표면온도를 측정하는데 사용되었음
- 온도센서 간의 오차범위를 좁히기 위하여 구리판과 접합하는 하이드로겔의 상·하부 계면에 각각 2개의 온도 센서를 연결함으로써 총 7개의 온도 센서가 이용되었음
- 측정에 사용된 하이드로겔의 면적은 $3 \times 5 \text{ cm}^2$ 으로 통일하였으며, 하이드로겔의 두께는 ImageJ를 통해 샘플별로 측정하여 계산에 반영하였음
- 핫플레이트를 열 공급 장치로 하여 25g 질량의 구리판을 실온 25℃에서 35℃까지 가열하였으며, 이때 공급되는 열량은 외부로 손실이 없이 일정하게 하이드로겔 표면으로 공급되는 것으로 가정하고 열량을 산출함
- Labview 시스템을 통해 2초 간격으로 위치시킨 부분의 온도를 측정한 후, ΔT (온도차)를 계산하였음

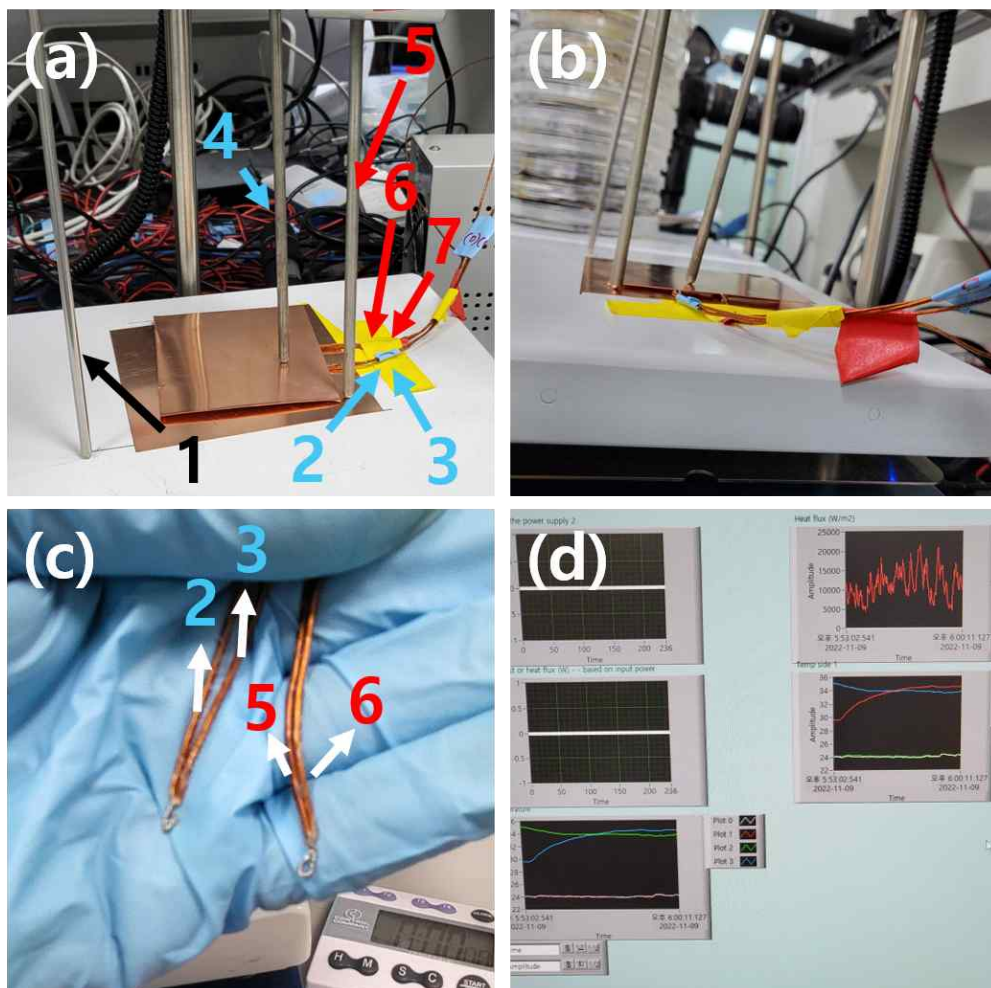


그림 20. 하이드로겔 열전도도 평가를 위한 시스템의 이미지. (a) 각 위치에서 온도를 측정하는 센

서. 센서의 위치는 핫플레이트의 표면 온도, 구리판의 상단부 표면, 하이드로겔과 구리판의 계면 (각 2개씩, 총 4개)에 위치함. 여기서 빨간 글씨는 하단부, 파란 글씨는 상단부에 위치한 센서를 의미함. (b) 열전도도를 계산하기 위한 온도를 측정중인 시스템의 측면 이미지. (c) 구리판과 하이드로겔 계면에 위치하는 온도센서의 이미지. 각 센서의 온도편차를 줄이기 위해 상단부에 각 2개씩 센서를 위치하였음. (d) 랩뷰를 통해 실시간으로 시간에 따른 온도변화를 측정하는 모니터 이미지.

o 구리 나노입자가 생성된 하이드로겔의 열전도도 비교

- 열전도도 비교에 대조군으로 구리입자가 함유되지 않은 순수 하이드로겔을 준비하였으며, 수분함량이 비교적 유사할 수 있도록 환원 작업과 동시에 하이드로겔 필름에 탈이온수를 주입하였음
- 하이드로겔과 구리판 사이의 계면의 온도차 및 구리판의 표면 온도를 측정하여 확인한 결과, 가공되지 않은 하이드로겔의 열전도도는 평균 0.23 κ [W/mK]로 가장 낮았으며, 그 다음으로 저농도 (0.35 κ), 고농도 (0.46 κ), 중농도 (0.49 κ), 전해질 용액 (0.52 κ)순으로 높았음

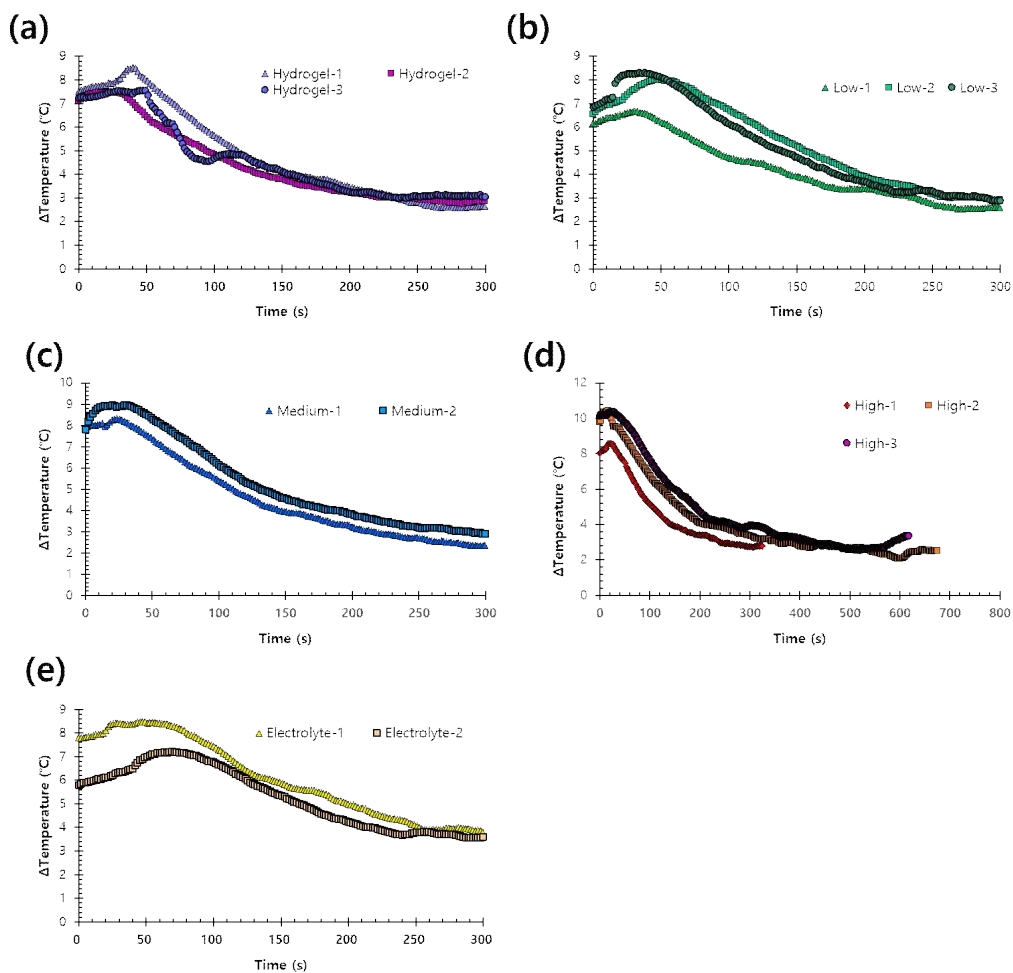


그림 21. 열전도도를 계산하기 위해 수집한 온도 측정 그래프. 하이드로겔과 구리판의 내부 계면 및 구리판의 외부 표면에서에서 측정한 온도 값 차이를 확인하였음. (a)-(d) 순으로 순수 하이드로겔, 구리 수용액을 저농도, 중농도, 고농도로 사용한 하이드로겔, 마지막으로 구리 도금용 전해액으로 제조된 하이드로겔을 나타내며 반복 평가 결과 유사한 값을 나타내는 것을 확인하였음

- 비교적 유사한 두께를 가진 얇은 하이드로겔 샘플들의 결과를 비교하여 열전도도의 신뢰성을 다시 평가하였음 (순수 하이드로겔 두께 2 mm, 중농도 주입 하이드로겔 두께 3.2 mm, 전해질 용액 주입 두께 2.3 mm)

- 실험 결과, 앞선 실험에서 가장 열전도도가 높았던 전해질 용액의 샘플의 온도차이가 가장 격차가 생기는 현상이 나타났으며, 이는 하이드로겔 두께로 인한 내부 이온의 침투 한계에 의한 것으로 예측함
- 이와 관련하여 계속해서 실험을 진행 중이며 하이드로겔의 함습율 및 구리입자 농도가 열전도도에 미치는 영향을 파악하여 이를 개선할 계획임

□ 축열 시스템에 적용 가능한 PCM 캡슐레이션 하이드로겔 개발

o 테스트 방법 및 결과

1) 하이드로겔 내 주입된 물질에 따른 열전도율

- PCM, 상변화 물질의 경우 상태가 변화하면서 많은 열을 흡수하거나 방출할 수 있음. 현열과 잠열 등 열을 저장하는 방식에 따라 차이는 있으나 대부분의 PCM이 상변화과정에서 액체로 존재할 때 외부로 누출될 수 있으므로 이를 위한 캡슐레이션 방안 또는 공정이 추가적으로 필요함
- 본 과제에서 발명한 하이드로겔은 습윤, 팽창, 건조에 영향을 받지 않고 수용액 대부분을 함습할 수 있으며, 부피 대비 표면적이 매우 넓어 PCM 로딩 비율을 높일 수 있음

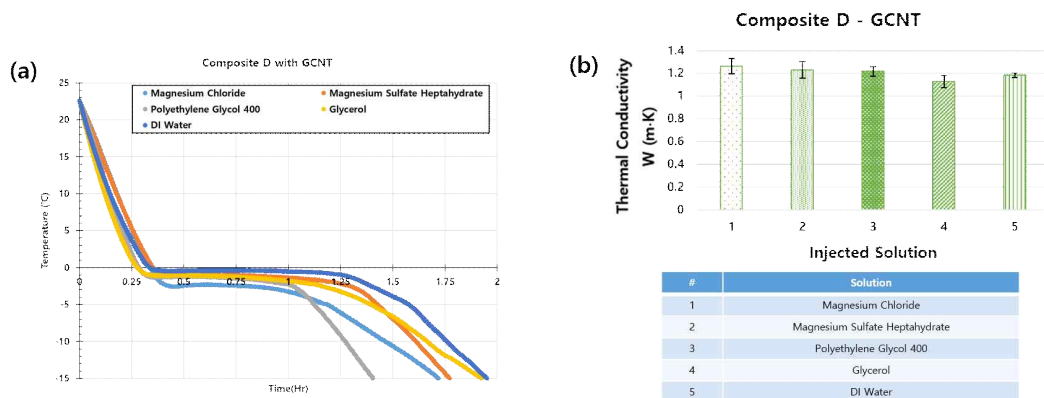


그림 22. 다양한 용매를 함유한 하이드로겔의 냉각곡선 및 열전도율. (a) 용매에 따른 하이드로겔의 냉각곡선. 여러 조성의 하이드로겔 중 임의의 한가지 조성을 선택하여 열저장 재료에 사용될 수 있는 용액을 주입한 결과, PEG를 함습한 하이드로겔이 냉각실험에서 가장 빠르게 냉각되었음. (b) 하이드로겔이 함습한 용매의 종류 및 이에 따른 열전도도

2) 하이드로겔 나노필러 삽입에 따른 열전도율 향상

- PCM에서 열전도율은 열 흡수/방출 속도에 직접적인 영향을 미치기 때문에 중요한 요소임
- 본 과제에서 제시하는 나노입자 함유 하이드로겔 개발 방식을 통해 하이드로겔 조성과 나노필러를 변경하여 열전도도를 평가하였음

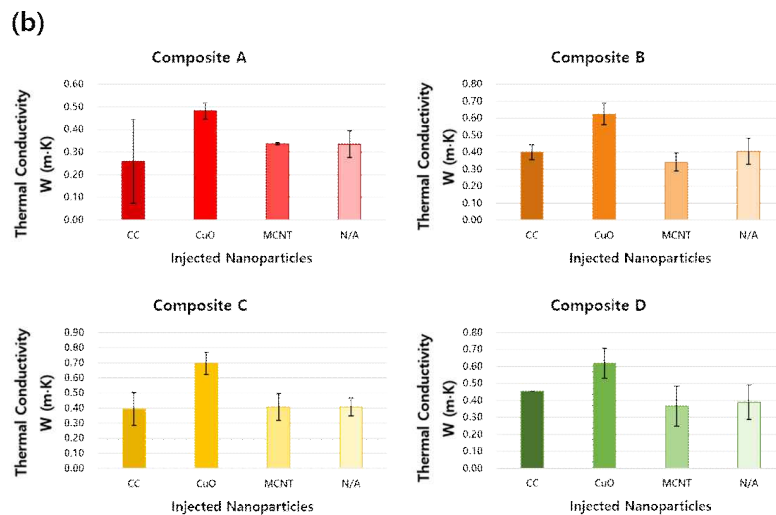
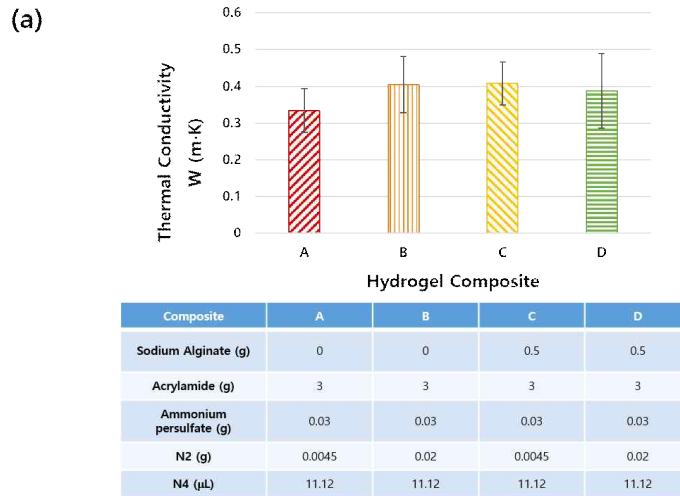


그림 23. 하이드로겔 조성 및 나노입자에 따른 열 전도율. 하이드로겔의 조성을 달리한 후 여러 가지 나노필러를 하이드로겔에 삽입하여 열전도도를 측정하였음. (a) 하이드로겔의 조성에 따른 열전도도 결과. 조성에 따라 알파벳 순으로 명기하였으며, 해당 조성을 표로 나타냄. (b) 조성을 고정한 후 4가지의 나노필러를 삽입하여 하이드로겔의 특성에 따라 열전도율을 최적화 할수 있는 물질을 확인하였음. CC는 전도성카본, CuO는 산화구리 나노입자, MCNT는 다중벽탄소나노튜브, N/A는 나노필러가 삽입되지 않은 순수 하이드로겔을 의미함.

3) 열전도성과 내구성이 강화된 MCNT 기반 PCM 하이드로겔

- 본 과제를 통해 자연 온도 (냉기)하에서 열에너지 수확이 가능한 하이드로겔을 one-step method로 개발하였으며, 하이드로겔 제작에 사용된 나노필러와 PCM의 종류를 변경하여 특성을 평가하였음

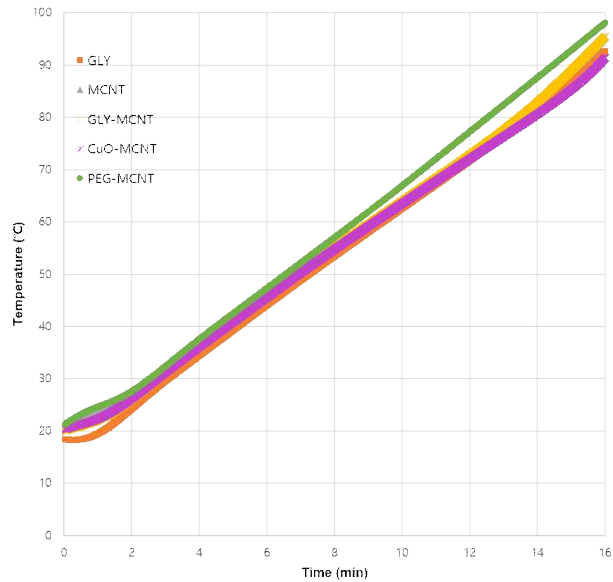


그림 24. 하이드로겔에 삽입한 PCM 및 나노필러에 대한 상온구간 가열 곡선 그래프. 열중량 분석기를 통해 동일한 조건에서 가열하여 샘플의 온도를 확인하였음. 실험결과, 상온구간에서는 하이드로겔의 조성 또는 열전도도에 따른 유의미한 온도 변화가 나타나지 않음. GLY은 글리세린, PEG는 폴리에틸렌글리콜을 상변화물질로 사용한 것을 의미하며, CuO, MCNT는 삽입된 나노필러를 나타냄

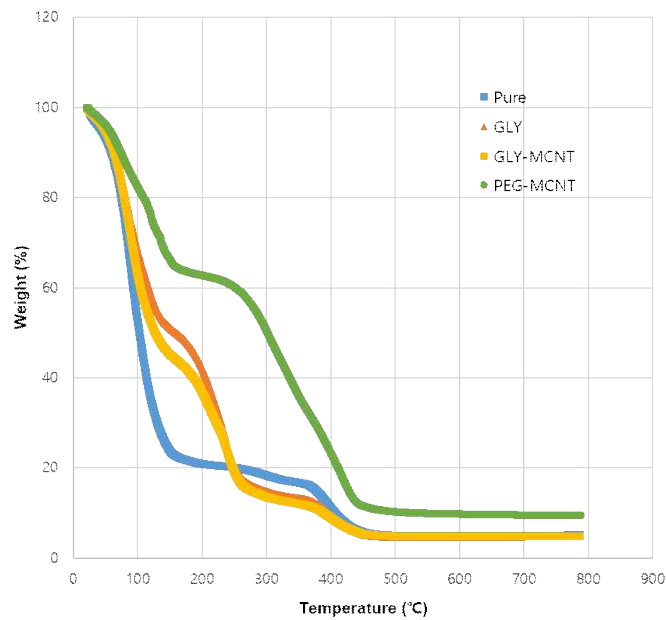


그림 25. PCM이 내장된 하이드로겔의 TGA 그래프. 열중량 분석기를 통해 상온에서 고온까지 물질의 열안정성을 평가하였음. 온도 가열시 발생된 무게 손실률을 하이드로겔 내 수분에 의한 것으로, 글리세린 기반으로 제작된 하이드로겔은 100도 이상 구간에서 비교적 안정적임을 알 수 있음.

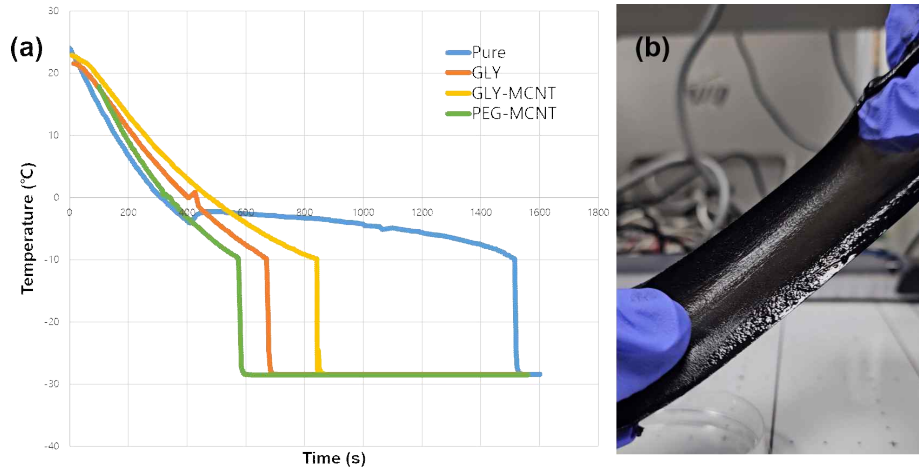


그림 26. (a) 개발된 PCM 하이드로겔의 냉각곡선 그래프. Pure-탈이온수가 주입된 하이드로겔의 경우 물의 어는점 구간에서 과냉각 현상을 보이며 서서히 냉각됨. PCM 하이드로겔은 글리세린, 글리콜의 도움으로 빙점이 낮아져 약 -10도 구간에서 급격한 속도로 고체화되었음. (b) -20도에서도 얼지 않는 하이드로겔의 스트레칭 이미지.

□ 정성적 연구 결과 요약

가. 기능성 나노 물질 표면 코팅 기술 개발

- ✓ 광소결 및 열소결의 단점을 극복하면서도 나노입자의 기능성을 구현할 수 있는, 대면적에 적용이 가능한 전기영동법을 이용하여 항균성, 소수성, 제습 성능을 갖는 표면을 달성
 - 광소결을 통해 표면 코팅을 수행한 결과, 국부적인 면적에만 적용이 가능하거나 표면이 불균하여 경제성 및 양산성이 떨어짐
 - 대면적에 적용이 가능한 열소결 방식으로 실험을 진행하였으나, 내스크래치성에 취약한 모습을 나타냄
 - 이를 극복하기 위해서 대면적에 적용이 가능하고 내구성을 확보할 수 있는 나노구조 제어 기술로 전기영동법을 사용하였으며, 이를 통해 물질의 표면에 항균, 소수성, 제습성 등 원하는 기능성을 부여하였음

나. Polypropylen fabric 항균 및 항곰팡이성 코팅 기술 개발

- ✓ 나노입자를 합성하기 어려운 기존의 합성 섬유에 구리 나노입자를 성공적으로 코팅하여 항균 성능을 부여하였으며, 코팅 횟수에 따라 코팅의 정도와 목표 항균 성능을 달성하였음
 - 합성한 구리 나노 입자에 대한 효과적인 항곰팡이성을 확인하였음
 - 제안한 코팅 기법을 통해 PP 원단에 효과적으로 구리 나노입자를 코팅할 수 있으며, 코팅 횟수에 따라 원하는 농도만큼 표면을 두껍게 증착할 수 있음
 - 일반 PP 원단은 세균이 성장하기 좋은 환경임을 확인하였으며, CuNP-PP는 죽이기 쉬운 세균에 대해 더 효과적인 항균성능을 나타내는 것을 확인하였음

다. 항균성, 생체적합성, 열전도성이 강화된 하이드로겔 개발

- ✓ 하이드로겔 내부에 금속 입자를 효과적으로 형성하는 방법을 제안하였고, 하이드로겔 내부에 간단한 공정을 추가하여 구리 나노입자를 형성하는데 성공하였음.
- ✓ 이를 활용하여 항균성, 생체적합성, 열전도 하이드로겔 개발하여 성공적으로 목표를 달성하였음
 - 열처리 과정과 수용액 속에서 스웰링 과정을 반복한 후에도, 하이드로겔 형태와 특성이 잘 유지되는 방법을 개발함
 - 구리 이온 수용액 농도에 따라 하이드로겔에 형성되는 구리입자의 농도가 변화하는 것을 확인하였으며, 하이드로겔 열처리 유무, 구리 수용액 농도에 따라 최종적으로 하이드로겔 내부에 형성되는 구리 나노입자의 양을 제어할 수 있음
 - 본 연구를 통해 개발된 하이드로겔의 항균성을 평가한 결과, 구리 나노입자가 함유됨에 따라 진한 녹색으로 변한 하이드로겔이 항균성 실험 과정을 거치며 투명해진 것을 확인하였으며, 하이드로겔이 접합된 부분에서 박테리아의 성장이 억제되었음
 - 결과적으로 구리 나노입자가 함유된 하이드로겔은 우수한 항균성을 보이는 것을 알 수 있었으나 구리 나노입자의 농도 차이에 의한 하이드로겔의 항균성 차이가 두드러지지 않았으므로 최적의 구리, 환원제 농도를 찾는 것이 선행되어야 함
 - 개발된 하이드로겔의 생체 적합성을 평가한 결과, 세척 단계를 진행한 하이드로겔은 세포 생존율이 90%이상으로 세포 독성이 낮아 생체적합성이 뛰어난 것을 확인하였음
 - 합성한 구리 나노입자의 농도를 조정하여 열전도도 평가를 수행하였으며, 가공되지 않은 순수 하이드로겔에 비하여 더 높은 열전도도를 달성한 것을 확인하였음
 - 추가적으로 하이드로겔에 의한 빙결 방지효과를 확인하기 위해 어는점 내림 실험을 진행하였으며, 그 결과 제작한 하이드로겔은 빙결 온도 제어 효과는 미미하나 탈이온수 및 순수 하이드로겔에 비하여 빙결에 더 오랜 시간이 소요되므로 빙결 지연 효과를 갖는 것을 확인하였음.
 - 자연 냉기를 이용한 열에너지 저장매체로 사용될 수 있도록 PCM 물질을 하이드로겔로 캡슐화 하였음
 - 캡슐화된 PCM 하이드로겔은 부피대비 넓은 표면적으로 다량의 PCM을 로딩시킬 수 있으며, 폴리에틸렌글리콜, 글리세린을 사용하여 혹한의 겨울 날씨에서도 동결되지 않고 사용될 수 있음.

(숙대 임용훈 교수 내용 수정해야함)

□ 냉수, CO₂ 2차측 분배조 시스템 및 제어기술 개발

✓ 기술 근거: 헨리의 법칙 (Henry's Law)

- “ 액체 용매에 대한 기체의 용해도는 용액과 접하고 있는 기체의 압력과 비례 ”
 $P(\text{외부 기체압력}) = H(\text{헨리 상수}) \times C(\text{용액 중 기체 농도})$
- “ 가스의 용해도는 온도에 반비례 ”

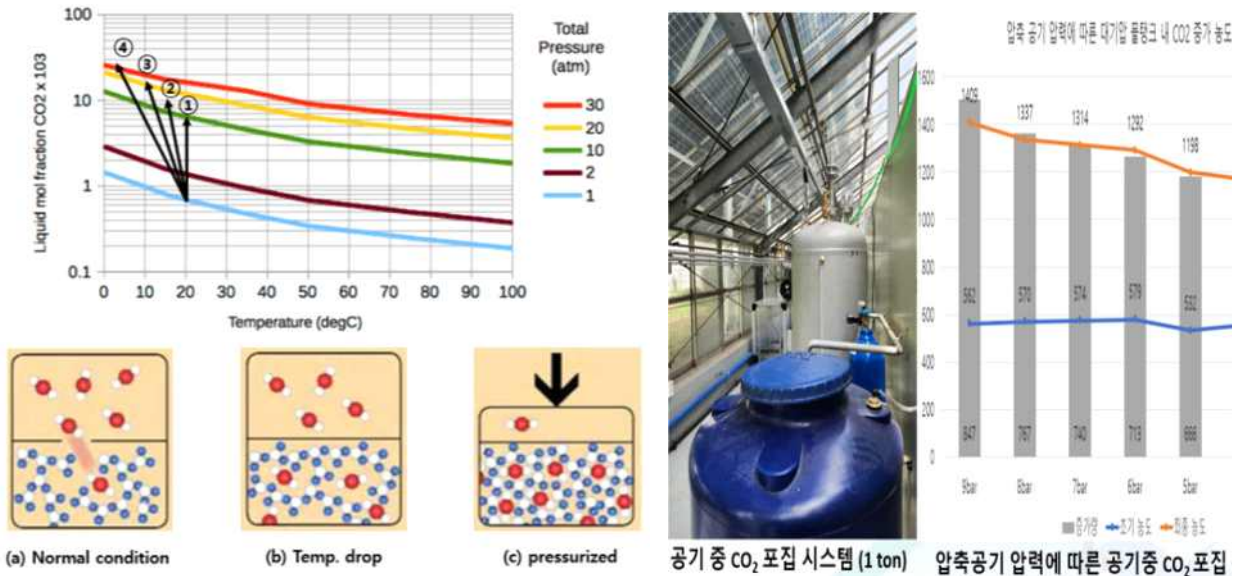


그림 27. Henry's Law 개념도 및 실증 현황 (숙명여대 실증 온실)

* LFM: Liquid Mole Fraction

✓ 모델 수립 및 기초 설계

- 온실 냉방공급을 위한 냉수 기반의 냉방 네트워크 구축에 있어 냉수뿐 아니라 냉수에 온실 탄산 시비에 필요한 CO₂를 녹여 동시에 수요처 온실로 보내는 개념 (특허(등록): 10-1398395)
- 대규모 중앙열원으로부터 다수의 수요처 온실로의 배관 네트워크 기반의 냉난방공급 및 이산화 탄소 시비 공급이 가능한 모델을 수립, 제시
- 30bar @5~7°C 조건에서 형성되는 중앙 공급 조건에서 각 수요처별 축냉 및 탄산저장이 가능한 축냉조(분배조) 시스템, 그리고 실제 운전조건에서의 냉운열 수요 및 탄산 수요에 대한 최적 제어시스템에 대한 모델 수립이 필요

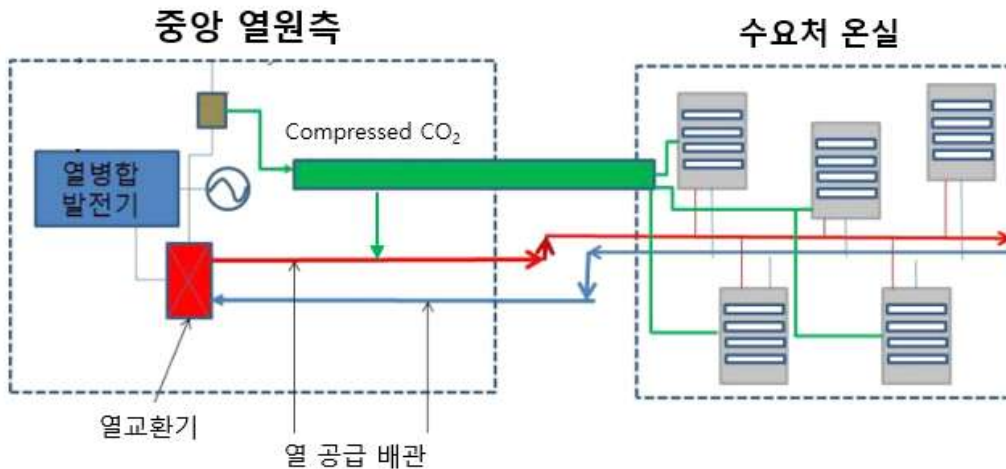


그림 28. 온실 냉운수 및 탄산 공급 배관 네트워크 모델 개요도

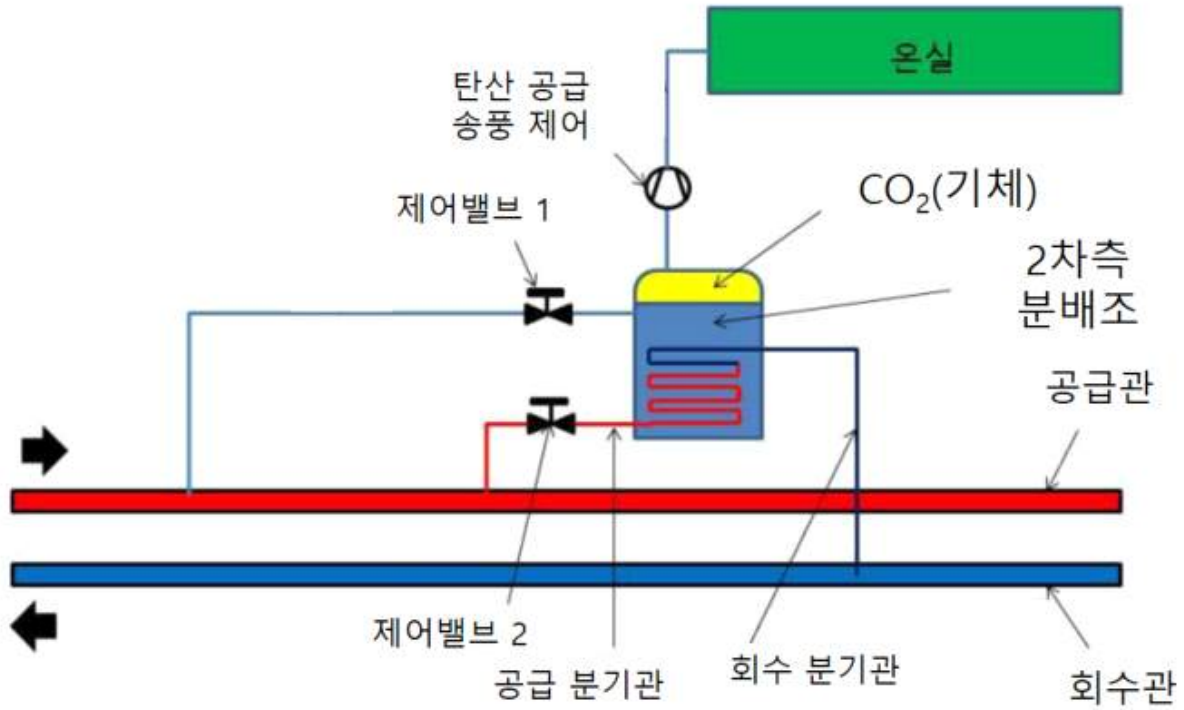


그림 30. 냉수, CO₂ 2차측 분배조 시스템 및 주요 제어 요소

- 중앙 열원으로부터 최대 적용 가능한 운전조건 [고압, 저온 (<30bar, >5°C)]에서 온실 공급에 필요한 탄산 시비량 및 냉방 부하에 따라 제어밸브 1을 통해 분배조 저장상태 (SOC: State of Charge)에 맞도록 유량을 조절하도록 설계
- 공급 관의 또 다른 분기 배관으로부터 분배조로 유입된 고압(저온) 조건의 복합 냉수로부터 탄산을 토출시키기 위한 온도제어가 가능하도록 제어밸브 2를 제어하여 온실에 필요한 탄산 공급 송풍을 위한 기체상태의 CO₂를 분리하도록 설계

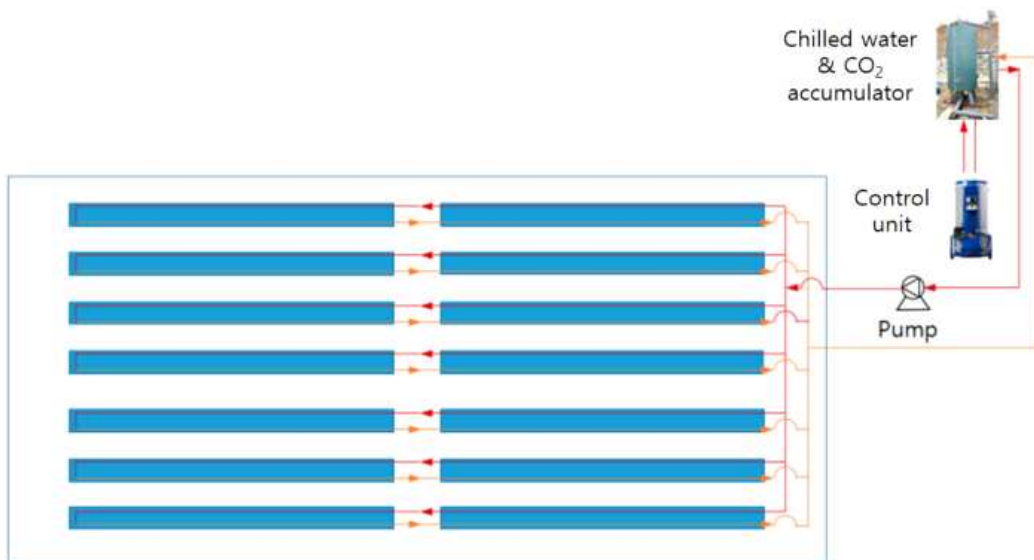


그림 31. 2차측 (수요측 온실) 분배조 및 제어유닛 연계도

- 제어밸브 2를 통해 승온되는 분배조 내 냉수의 온도가 과도하게 승온될 경우 냉방 고유의 목적 달성을 위해 제어밸브 2를 통한 온도제어 대신 별도의 2차측 분배조 압력 제어(감압)를 통해 독립적인 탄산 토출 제어가 가능하도록 설계에 반영 예정

- 페루프로 구성되는 온실 냉난방 및 탄산 공급 배관네트워크의 배관 내 압력 유지를 위해 각 온실 수요처에서 토출되는 (즉, 2차측 분배조로 유입되는 유량) 냉수의 양만큼 별도의 시수 배관으로부터의 팽창탱크를 이용한 물의 보충이 이루어지도록 설계

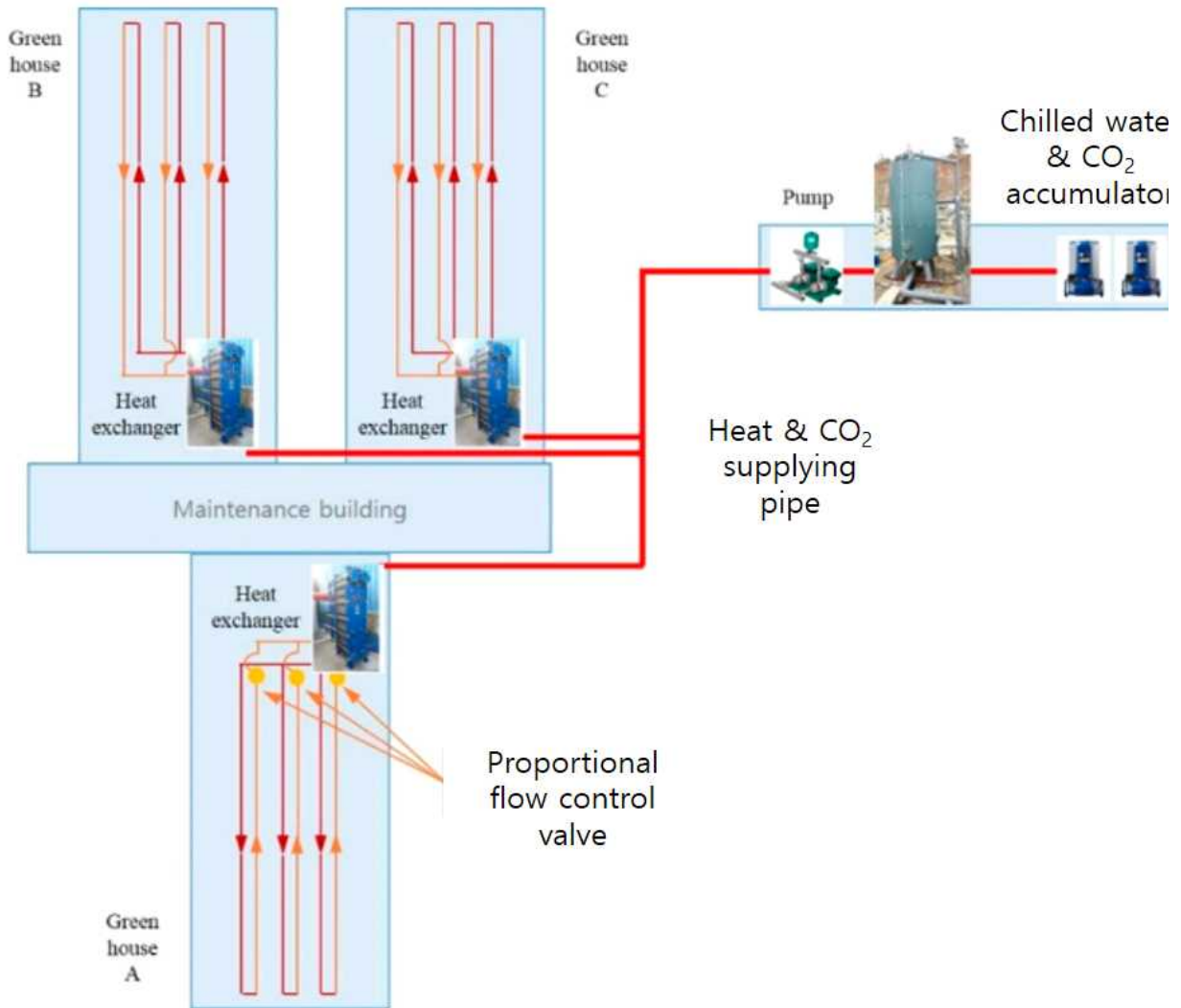
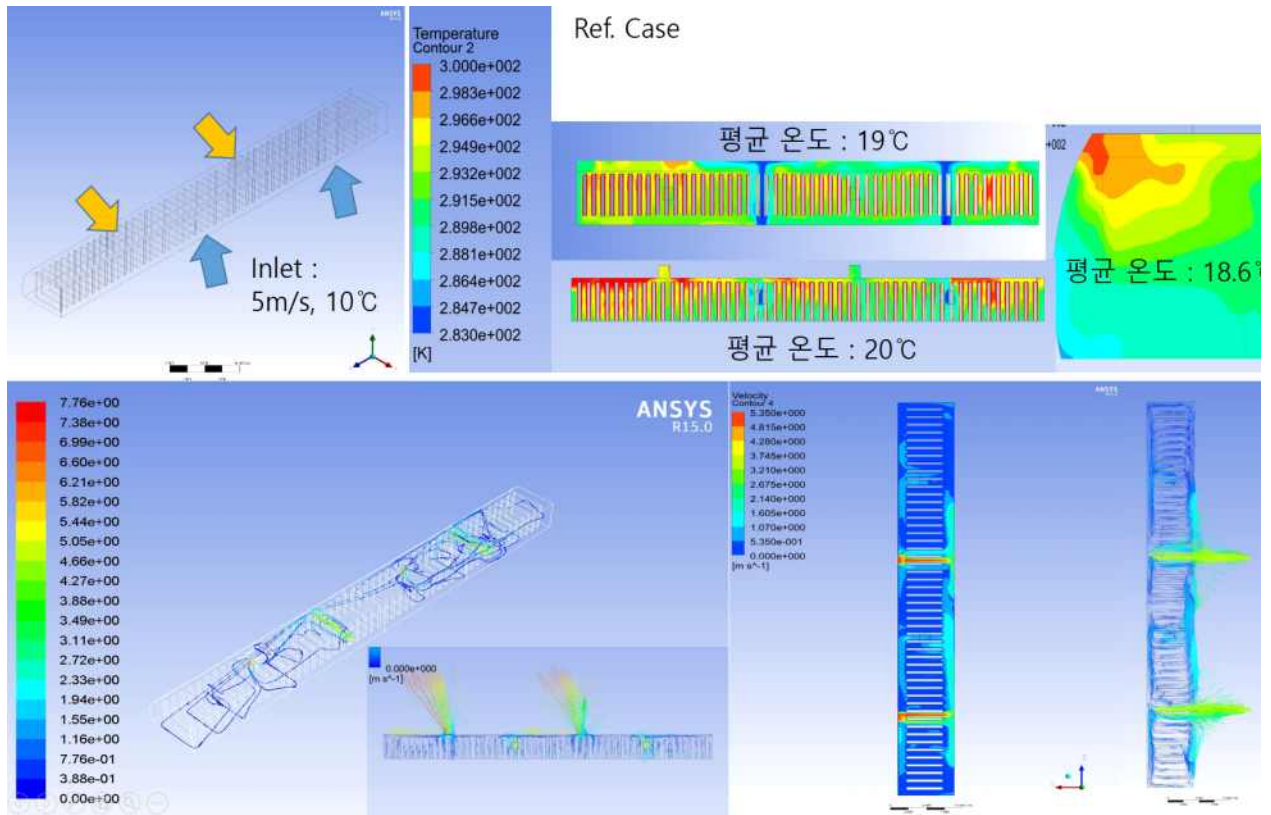


그림 32. 다수 온실 수요처를 연계한 온실 복합 공급 배관 네트워크 모델 개요도

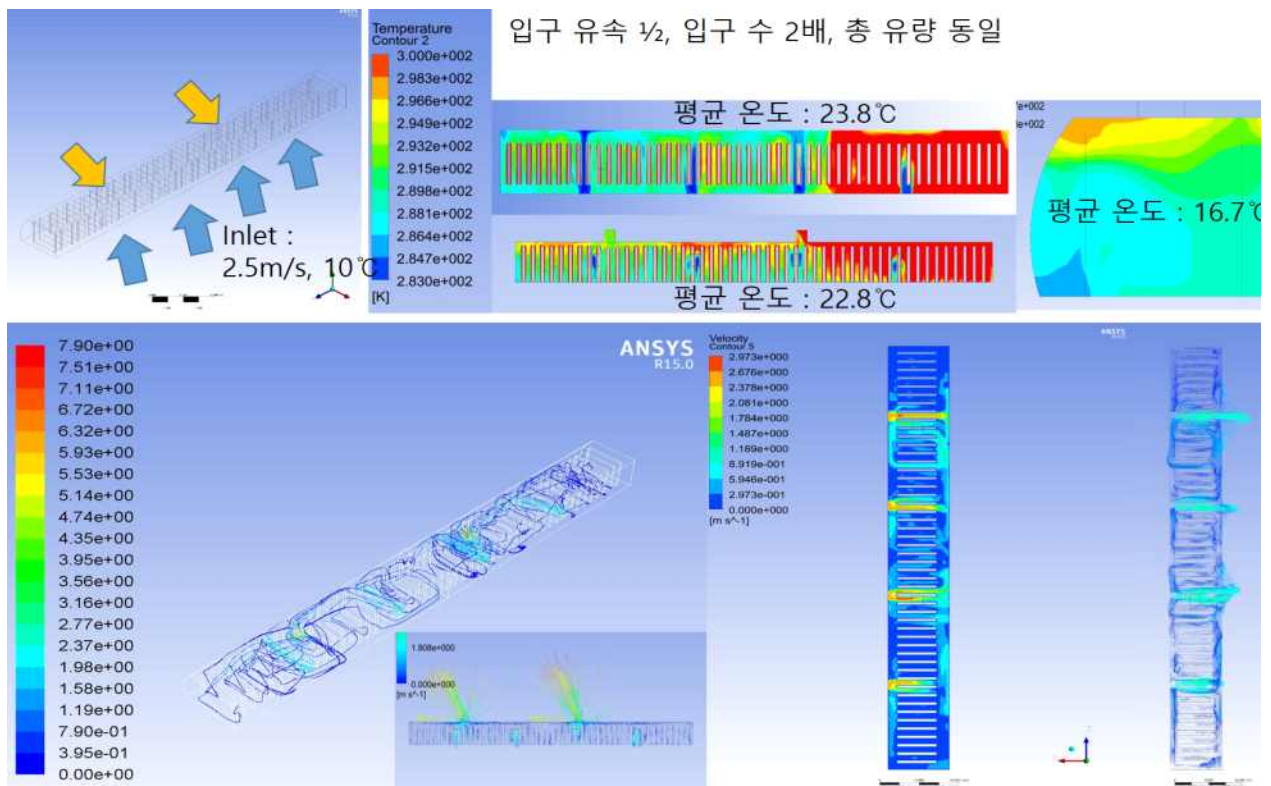
□ 분산형 축냉조시스템 열설계/ 시뮬레이션 기반 최적 설계

✓ 2차측 (분산형 축냉조 설치) 온실 냉방 및 탄산시비 최적 공급 방안 설계

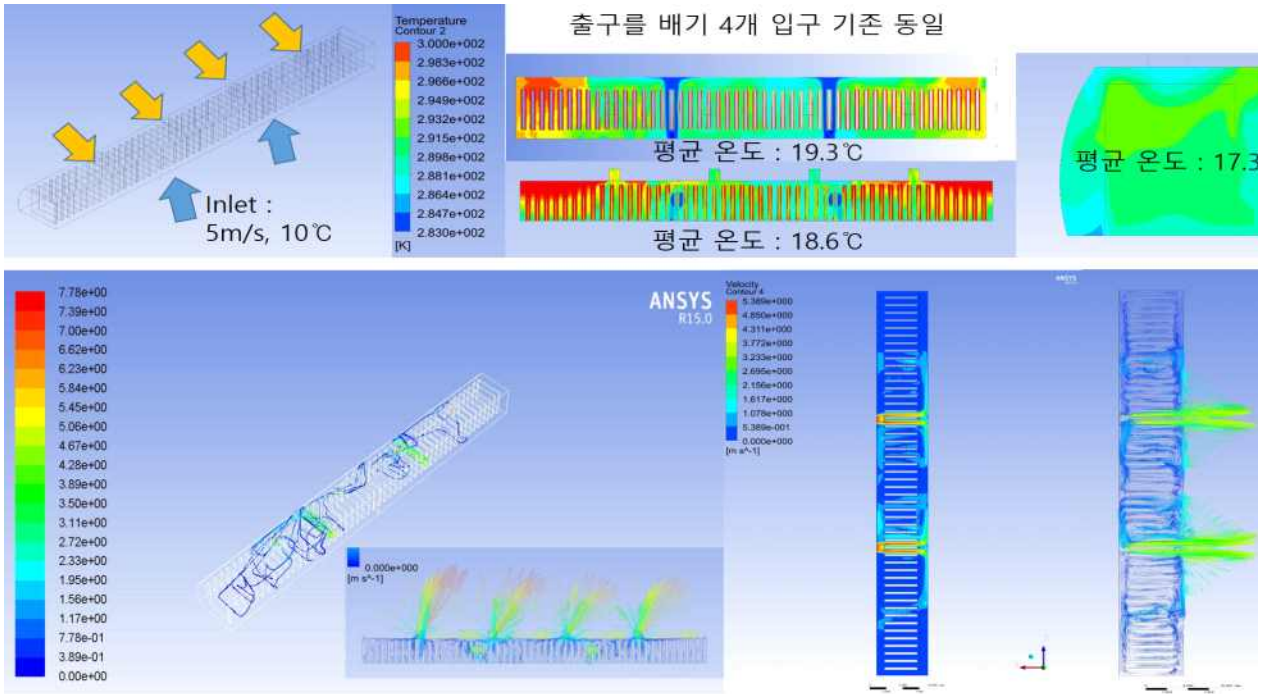
- 냉수를 매개로 한 탄산 용해 방식의 복합 (냉열+ CO₂) 공급 모델의 경제성 확보를 위해서는 수요처(2차측) 온실 냉방부하 전체를 대상으로 한 설비 구축에 한계 (배관 투자비 증대로 인한 경제성 확보의 어려움)
- 따라서, 수요처 온실의 냉방부하 저감을 위한 방안 마련을 기반으로 복합 축냉조(냉열 및 탄산 저장활용) 용량의 최적 설계 방안을 수립
- 2차측 온실의 탄산 시비 수요량과 냉방부하 공급량 (축냉저장조 용량)의 밸런스를 맞추기 위해서는 온실의 냉방부하를 대폭 저감할 수 있는 모델이 필요하며, 당 연구개발에서는 작물(딸기)의 생육공간을 제한하는 반밀폐형 재배단(Semi-closed Bed)을 고려한 최적 설계안을 수립
- 냉수·탄산 복합공급 모델의 경제성 확보를 위한 대안으로는 반 밀폐형(혹은 밀폐형) 재배단의 적층 모델, 즉 수직형 식물공장의 수요처가 적합하며, 적층형 재배단의 경우 공간섭에 따른 인공광(LED 조명)의 적용이 불가피하므로 자연광(태양복사에너지)에 의한 냉방부하 대응과 더불어 LED 발열에 의한 작물 생육 영향을 최소화하기 위한 설계 반영이 필요



(a) Scenario 1



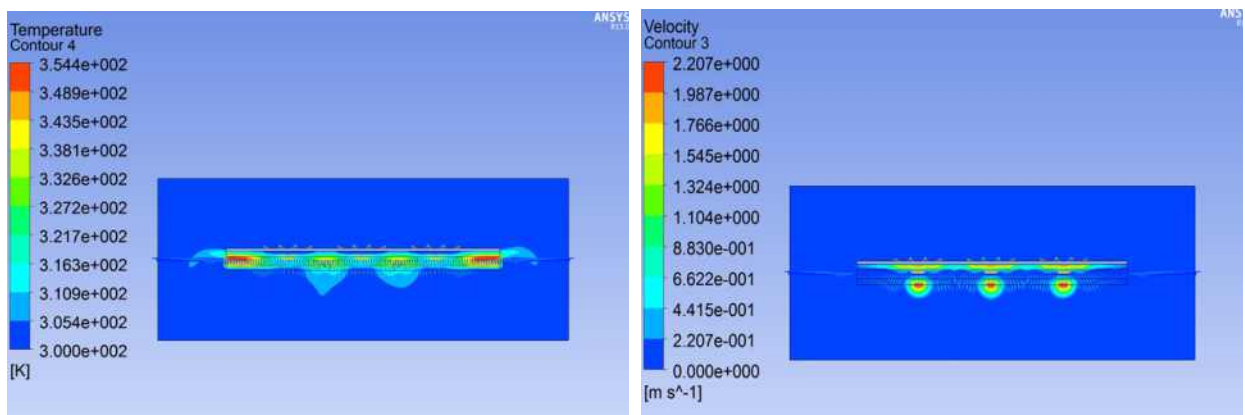
(b) Scenario 2



(c) Scenario 3

그림 33. 반 밀폐형 재배단 적용에 따른 온실 내 냉방공조 최적화 시뮬레이션 분석 예

- 반 밀폐형 재배단의 수직 적층에 따른 온실 내부의 온도 분포는 작물 생육 환경의 균일성과 제어 기준을 설정하는데 매우 중요한 영향을 끼치게 되므로 전체 온실 내 공조에 따른 온도 분포에 대한 분석을 수행
- 기존 냉풍을 이용한 일반적인 공조 방식의 경우 재배단 자체의 LED 발열과 자연광(태양 복사에너지)의 불균일한 흡수 및 산란 작용으로 인해 온실 내부의 송풍 시스템에 대한 최적 조건에 대한 분석이 필요
- 상기의 분석 사례에서와 같이 기존 공조 방식의 내부 공기 제어시스템 적용에 있어 출구 및 입구의 개수, 배치, 유량에 대한 온실 내 온도 분포에 매우 상이한 조건이 발생함을 알 수 있음.
- 따라서, 적용 수요처 온실의 규모, 재배단의 단수(규모), 배치 등 다양한 설계 조건을 고려한 표준화 된 최적 설계안 도출을 현실적으로 매우 어려우므로 실제 수요처의 설계 조건에 따른 다양한 설계 시나리오별 최적 시뮬레이션 과정이 수반되어야 함을 확인



(a) 내부 송풍 유량 (5m/sec) (b) 내부 송풍 유량 (2.5m/sec)

그림 34. 반 밀폐형 재배단 내부 유동 및 온도 분포 시뮬레이션 예



(a) LED 배열 확산 송풍 팬 전경 (As is)



(b) LED 배열 회수 장치 (To be)



그림 35. 반 밀폐형 재배단 적용에 따른 LED 배열회수 장치 설계안

- 개별 재배단의 경우에도 LED 발열에 의해 자체 확산되는 열로 인해 반 밀폐형 온실 내부 위치 별 온도의 불 균일성이 나타남
- 현행 식물공장, 수직형 베드의 경우 위 그림 (a)와 같이 이러한 LED 발열에 의한 작물생육 영향을 최소화하기 위해 다수의 송풍팬을 배치, 신속한 열 확산을 하기 위한 제어를 적용 중이나 송풍팬 비용과 전체 다수 송풍팬 가동에 따른 전력비용의 부담으로 인해 효과적인 대안 마련이 필요
- 당 연구개발에서는 반 밀폐형 외부 공간보다는 내부에서의 온습도 분포와 최고 피크 온도 발생 여부를 효과적으로 제어하기 위해 기존 방식 대신, LED 배열회수 장치를 고안, 작물 생육 공간으로의 영향을 최소화 시킬 수 있는 대안을 수립, 적용
- 막대한 온실 하절기 냉방부하에 대응한 2차 복합 저장조(냉열+ 탄산)의 최적 용량 설계를 위해서는 온실 전체에 대한 냉방부하 저감을 위한 반 밀폐형, 혹은 완전 밀폐형 방식의 적층형 재배단의 적용이 불가피하며,
- 다수의 수직 재배단 구조 적용 시 LED 설치에 따라 발생하는 LED 배열 처리 문제가 최적 설비 구성을 위한 제한요건으로 작용함을 확인하였으며,
- 당 연구개발에서는 이러한 문제의 최종 해결방안으로 반 밀폐형 구조 적용, LED를 이용한 인공광 적용, 그리고 LED 발열의 효과적인 제거를 위해 별도의 LED 발열 열 에너지를 회수, 제거, 활용할 수 있는 LED 배열회수 장치의 최적 설계안을 적용하였음.

□ 냉수, CO₂ 복합이송 배관네트워크 시스템 제어특성 시험 및 고도화

- 냉수 배관네트워크는 5~7°C의 공급배관 및 12~15°C의 회수배관으로 구성되며, 냉수 열 공급의 경우 온수와 달리 작동 조건이 물의 비등(1기압 100°C)이 발생하지 않는 조건이므로 배관 압력을 CO₂ 용해도 조건에 따라 가변적으로 제어함으로써 효과적인 냉수공급 및 탄산가스 공급이 가능토록 개발 (2~10bar 내외 적용)

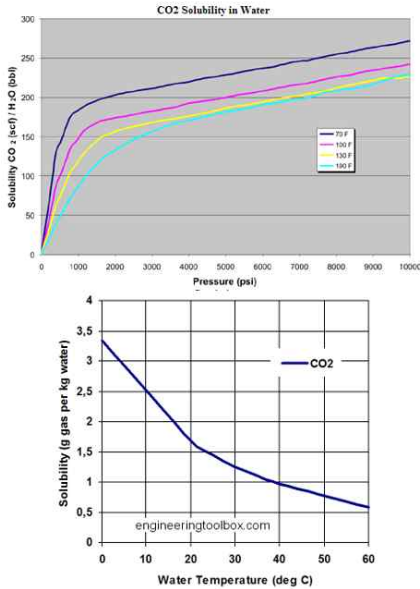


TABLE 4. Calculated solubilities for carbon dioxide in water at various CO₂ partial pressures

Temperature (°C)	Solubility of CO in water at various partial pressures (Solubility in mole fraction × 1000, pressure in kPa)			
	50	101.325	200	500
0	0.671	1.355	2.66	6.52
10	0.477	0.963	1.89	4.65
20	0.353	0.713	1.400	3.45
25	0.308	0.622	1.223	3.01
30	0.271	0.548	1.077	2.66
40	0.216	0.437	0.858	2.12
50	0.178	0.359	0.706	1.75
60	0.150	0.304	0.598	1.480
70	0.131	0.264	0.520	1.288
80	0.116	0.236	0.463	1.148
90	0.106	0.214	0.422	1.046
100	0.098	0.199	0.391	0.971
110	0.093	0.188	0.370	0.917
120	0.089	0.180	0.354	0.880
130	0.086	0.175	0.345	0.856
140	0.085	0.172	0.339	0.844
150	0.085	0.172	0.338	0.841
160	0.085	0.173	0.340	0.846

그림 35. 온도, 압력차에 따른 CO₂ 용해도 차이

✓ 냉수·CO₂ 복합이송을 위한 배관 시스템 선정 (부식 및 내구성 성능평가)

- 강관 이중보온관 적용시, 탄산 부식으로 인한 배관 내구성 문제에 대한 기술검토 수행 (CO₂ corrosion)



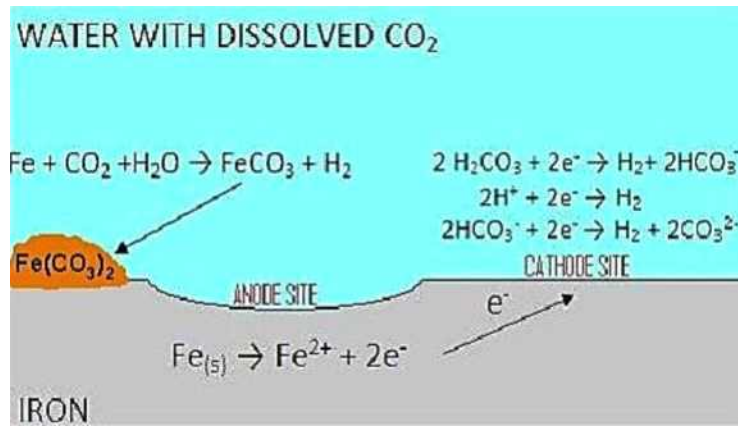


그림 36. 강관 탄산부식 사례 및 개요

- 냉수·CO₂ 이송 배관시스템 구축에서의 배관 내구연한(>25년) 동안 부식문제 발생에 따른 위험요인에 대한 최적 내관 재질 선정 성능평가 수행
- 산업안전보건기준에 관한 규칙에 따라 물과 탄산에 의한 배관의 부식을 평가하였음 (기기 및 배관 부식관리 기술지침 M-116-2012 한국산업안전 보건공단)

<표> 내관 재질별 부식 시험 조건

	실험 조건
Case 1	<ul style="list-style-type: none"> • Pet 병에 물과 배관 샘플 넣고 일정 기간 부식 발생을 확인하는 실험. • 물은 동일한 생수를 사용하여 동일한 조건이 되도록 함. • 실험실 조건에서 실험이 진행되었고 상온에서 보관함.
Case 2	<ul style="list-style-type: none"> • 스테인리스 압력 용기에 부식이 발생하지 않는 PU 배관으로 유로를 만들고 플라스틱 임펠러를 사용하는 펌프로 물을 순환시키는 실험 장치 구성. • 배관 중간에 부식 실험 배관을 연결하여 물이 배관을 지나가도록 함. • 8L 수돗물을 채우고 2.4 bar의 압력으로 탄산가스를 주입하여 물에 탄산이 용해되도록 함. 본 실험에서 물에 용해된 CO₂량은 약 31g.

- Case 1의 경우 물에 배관 시편을 담근 후 일주일간 상온 보관하면서 배관에 부식 발생 여부를 확인하는 실험으로 구성하였음.
- Case 2는 아래 그림과 같이 순환펌프를 이용한 유동 조건에서의 배관 부식 실험 장치를 구성하였음.
- 최대 4bar 조건을 인가할 수 있는 스테인리스 압력용기를 사용하여 순환하는 물에 탄산을 녹여 배관을 지나가도록 하였음. (구성품은 PU 또는 플라스틱 재질을 사용하여 내관에서 발생하는 부식 이외의 요인을 배제하였음)



그림 37. 배관 부식 실험 장치 구성 (순환)

- 압력용기에 물 8L를 넣고 2.5 bar의 압력으로 탄산을 주입하여 물에 탄산이 용해되어 순환되도록 장치를 구성하였으며, 해당 압력을 유지할 때 물에 약 31g의 탄산이 용해되었음.
- ✓ 실험 평가 (육안 검사)
 - 기기 및 배관 부식관리 기술지침 (M-116-2012 한국산업안전 보건공단) 내용을 기반으로 육안 검사와 전기저항법을 사용해 배관의 부식을 평가하였음.
 - 육안 검사는 실제 배관 부식 검사에 유효하게 사용되고 있으며 배관 운용으로 비파괴 검사를 해야 하는 경우 사용됨.
 - 전기저항법도 비파괴검사 방법의 하나로 배관이 부식에 의해 두께가 감소하면서 시험편의 전기저항이 증가하는 원리를 이용한 것임. 다만 이 방법은, 점 부식 및 국부 부식 용으로는 적합하지 않고 임계 부식성 평가에는 적합함.
 - Case 1에 대한 육안 검사 결과, 스테인리스의 경우 물과 배관에 오염과 부식이 발생하지 않았음을 확인 할 수 있음.
 - 백관의 경우 물에 배관 부식물로 보이는 이물질이 발생했고 배관 외부에 검은 점 형태로 부식이 발생하며 배관 내부에도 부식이 발생함을 확인하였음.
 - 흑관의 경우 백관보다 더 많은 양의 부식물이 발생했고 더욱 광범위하게 배관 부식이 발생한 것을 확인할 수 있었음.
 - 배관의 부식이 발생했지만 유동이 없었기 때문에 배관에 고르게 부식이 발생하지 않고 배관 표면이나 내부에 점 또는 부분적으로 부식이 발생하는 특징을 보이고 있음.



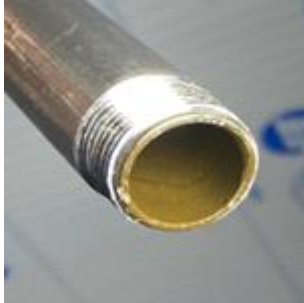





그림 38. 배관 부식 실험 육안 평가 (배관 샘플 - Sus 배관/ 백관/ 흑관)

- Case 2의 실험 결과는 아래 <표>에 나타내었음.
- 스테인리스 배관의 경우 탄산과 물에 의한 부식이 발생하지 않아 PU 배관과 순환수의 오염이 없었던 것에 반해 백관과 흑관은 오염으로 인한 PU 배관 변색, 순환수 오염이 발생하고 있음을 확인할 수 있음.
- 백관의 경우 아연 도금처리로 흑관에 비해 상대적으로 부식의 정도가 덜 했지만, 당 배관시스템의 내구연한인 20~25년의 기간을 감안할 때 부식으로 인한 잠재적인 문제가 될 수 있을 것으로 평가됨.
- 흑관은 재료비가 저렴한 대신 부식 방지 처리가 적용되지 않아 부식에 의한 오염 정도가 가장 심한 것으로 평가되었으며 배관 내부에 붉은 녹이 발생하였음을 볼 수 있음. 따라서 당 배관시스템 적용에서는 배제되어야 할 것으로 평가됨.

<표 > Case 2 실험 결과

스테인리스 배관	백관	흑관
		
부식으로 인한 PU 배관 변색 없음	부식으로 인한 PU 배관 변색 발생	부식으로 인한 PU 배관 변색 발생, 백관 대비 약간 더 진한 변색

		
배관 내부 부식 없음	배관 내부 부식 발생	배관 내부 부식 발생 백관 대비 부식 정도 심함
		
순환수의 부식 오염 없음	순환수 부식 오염물 발생	순환수 부식 오염물 발생 백관 대비 진한 적색 오염

✓ 실험 평가 (전기 저항법)

<표> 전기저항법을 사용한 배관 부식 평가 (Case 1)

	실험 전	실험 후
스테인리스 배관		
백관		
흑관		

- 스테인리스의 경우 0.058 Ω 에서 0.056 Ω 으로 큰 변화가 발생하지 않았다. 백관의 경우 0.098 Ω에서 0.185 Ω 으로 저항이 증가했고 흑관은 0.048 Ω 에서 0.047 Ω 으로 부식에 의한 저항 증가는 발생하지 않았다. 흑관의 경우 부식이 발생했으나 전기저항법이 점 부식 또는 국부 부식에 의한 저항 증가를 측정하는 방법으로 적합하지 않기 때문에 저항의 변화가 나타나지 않은 것으로 평가할 수 있음. 따라서 상기한 육안 검사 결과를 고려한 평가가 필요함.

<표 > 전기저항법을 사용한 배관 부식 평가 (Case 2)

	실험 전	실험 후
스테인리스 배관		
백관		
흑관		

- 스테인리스의 경우 0.098 Ω 에서 0.076 Ω 으로 저항이 약간 줄어들었다. 백관의 경우 0.301 Ω에서 1.126 Ω 으로 흑관의 경우 0.317 Ω 에서 2.193 Ω 으로 부식에 의해 저항 증가가 발생한 것으로 보인다. 흑관의 경우 Case 1과 달리 배관 내부에 고르게 부식이 발생되어 전기저항법을 사용하여도 유효한 결과가 나타난 것으로 평가됨.
- 상기, 정체 및 실제 유동조건에서의 배관 재질별 탄산 부식에 대한 평가 결과, 기존 냉수 이송에 가장 일반적으로 적용되고 있는 강관을 내관으로 하는 이중보온관의 경우 지속적인 CO_{2(aq)} 에 노출될 경우 탄산부식에 의한 내부 스케일링, 압력손실 증가, 배관 파손에 의한 배관 교체 등의 잠재적 위험 요인에 노출될 개연성이 매우 크므로 초기 설치 비용 증가를 감안하더라도 내관을 sus 배관으로 하는 이중보온관이 적용되어야 함.
- 따라서 당 냉수·CO₂ 복합이송을 위한 배관 시스템 설계 및 구축에 있어 탄산부식에 의한 영향을 최소화하면서 배관시스템의 내구성을 확보하기 위한 대안기술로는 PEX 이중보온관과 Sus 이중보온관 가능하며, 각 대안기술별 기술 스펙은 다음과 같음.

<표 > PEX vs. SUS 이중보온관 기술 스펙 비교

구분	관경	온도	사용압력	내관	보온재/외관
PEX 이중보온관	20~140A	<95°C	<6 bar	PE-Xa	PUR/LDPE

SUS 이중보온관	20~140A	-20°C~180°C	< 25bar	SUS	PUR/LDPE
-----------	---------	-------------	---------	-----	----------

- 분산형 복합 축냉조로의 안정적인 CO2 이송을 위해서는 최대 가압조건(P_{max})이 최소 15bar ~ 25bar (평균 20bar) 수준이 요구되므로 PEX 이중보온관의 최대 적용 가능 압력조건을 고려하였을 때, Sus 이중보온관의 적용이 최적 설계안으로 적합한 것으로 분석되었음.
- CO₂의 압력, 온도에 따른 물 용해도 변화를 고려한 복합 냉수 이송 기술 적용시, 10bar 이상의 고압용기(복합 축냉조) 설치를 위해서는 고압가스 안전관리 인력의 고용이 의무화되어 있으므로 실증 및 사업화 과정에서 추가 고려할 필요가 있음.
- 단, 당 적용 모델은 개별 농가별 고압용기를 설치, 운영하는 방식이 아닌, 중앙집중형 대형 복합 축냉조를 통해 각 농가로의 분산형 축냉조 기반 공급이 되는 모델이므로 각 농가별 고압용기 관리 인력이 필요하지는 않을 것으로 판단됨.

<표 > 고압용기 적용 법 규제 개요

구분	산업안전보건법	에너지이용합리화법	고압가스안전관리법
적용기준	용기의 내면 또는 외면에서 일정한 유체의 압력을 받는 밀폐된 용기에 적용 (우기 법 적용 제외)	열(스팀)을 사용하는 압력용기에 적용	고압가스(액화가스 포함)를 사용하는 압력용기에 적용
적용범위	<ul style="list-style-type: none"> •갑종 압력용기 화학공정 유체 취급 용기 및 설계압력이 1MPaG를 초과하는 공기 및 질소 취급 용기 •을종 압력용기 갑종을 제외한 압력용기 •용기가 안지름, 폭 높이, 단면 대각선의 길이가 150mm이하인 경우 제외 	<ul style="list-style-type: none"> •제1종 용기 최고사용압력(Mpa)X내용적(m3)>0.004 •제2종 용기 최고사용압력>0.2MPa 	<ul style="list-style-type: none"> •액화가스 35°C에서 압력 또는 설계압력이 0.2MPa 이상인 용기 •압축가스 35°C에서 압력 또는 설계압력이 1MPa 이상인 용기

- 최종 실증온실 냉수, CO₂ 복합이송 배관 네트워크는 상기 부식에 대한 내성 성능테스트 결과를 바탕으로 Sus 내관으로 구성되는 이중보온관으로 선정하였으며, 실증 적용 온실 규모에서는 10bar 이하의 압력조건에서 적용이 가능하나, 추후 상용화 추진에 따른 대규모 냉수, CO₂ 복합이송 네트워크 구축, 적용에 있어 최대 25bar (평균 20bar)의 운전 조건이 가능하도록 설계·적용 예정.



그림 39. SUS 이중보온관 구조 및 Flexible pipe 개요도

- 상용화 추진시 복합이송 배관 네트워크 규모의 확대를 고려하여 기존 6m 단위의 직관 방식 이중보온관 대신 최대 800m 단위의 Roll type 제작, 설치가 가능한 Flexible 이중보온관을 실증에 적용하도록 설계하였음.

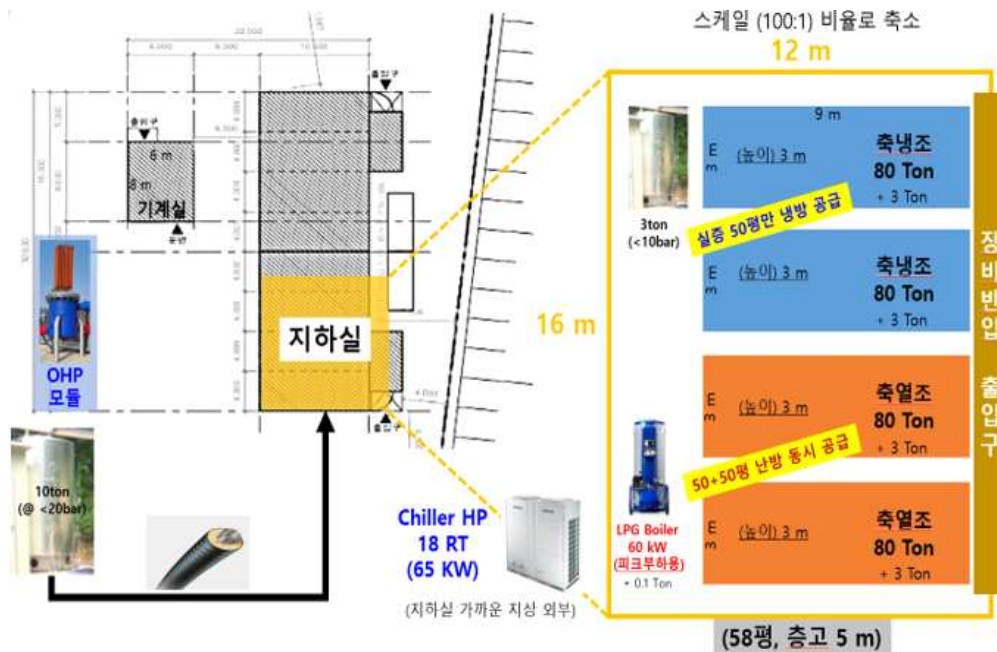


그림 40. 실증 온실 냉수·CO₂ 복합 이송 네트워크 설치 개요도 (설계변경 전)

□ 분산형 축냉조 연계 최적 제어시스템 설계, 성능평가

✓ 분산형 복합 축냉조 시스템 설계 (냉수+ CO₂+ 물)

- 당초 제안된 복합 냉열·탄산 공급 모델은 수요처(2차측) 온실별 직접 생산, 공급 방식을 특징으로 하는 분산형 방식이었으며, 온실 내 잔류 CO₂의 회수, 활용이 가능한 특징을 가짐

- 그러나 시장보급 확대 측면에서 고압의 복합 저장조(10bar 이상일 경우 개별 고압용기 처리 인력 확보가 필요)를 개별 온실별 설치하는 것은 비용 및 안전상의 문제점이 대두될 수 있으므로 고압, 저온의 대규모 중앙 집중형 저장조로부터 각 수요처별(온실별) 분산 복합조로 연계 운영하는 네트워크 방식의 모델로 최적 설계안을 변경

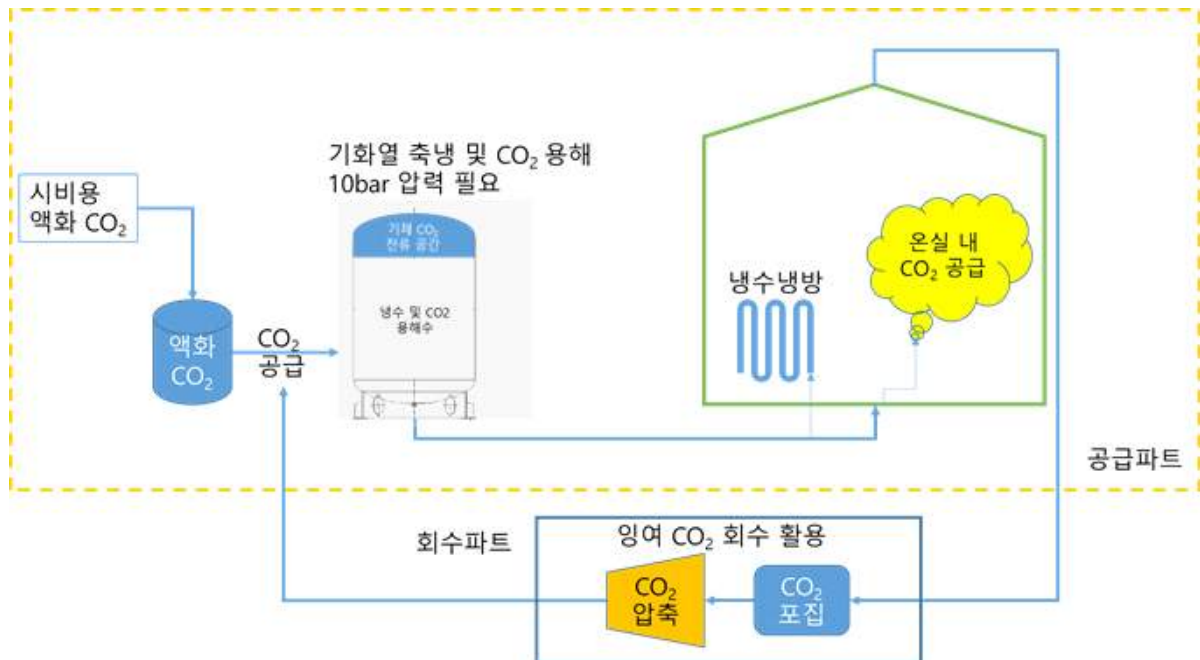


그림 41. 냉수·CO₂ 복합 이송 개념도 (기준 안)

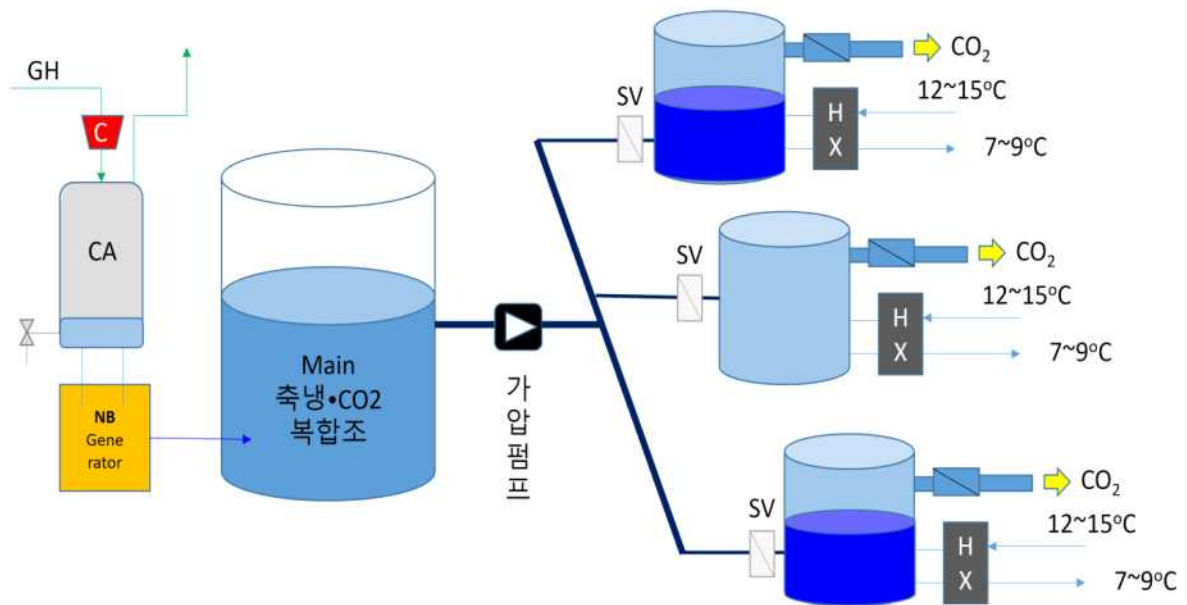


그림 42. 분산형 복합 축냉조(냉수+CO₂) 시스템 기초 설계안 (냉수+CO₂+물 공급; 개선 안)

- 분산형 복합 축냉조는 중앙에 설치되는 대용량 복합 축냉조와 가압펌프로 연계가 되도록 설계하였으며, Solenoid valve를 통해 분산형 축냉조의 총방전을 제어할 수 있도록 구성
- 기존 지역냉방 네트워크에서는 냉열의 공급/회수로 이루어진 폐루프 배관 네트워크를 구축, 적용하는 반면, 당 복합 냉수·CO₂ 공급 네트워크는 일방향 공급 방식을 채택함으로써 공급/회수 배관 2열을 시공하는데 따른 배관투자비를 최소화할 수 있도록 설계하

였음

- 특히 최근 기후변화에 따른 물 부족 심화 등 안정적인 물 공급이 기후변화 대응 스마트 팜 사업화에 있어 또 다른 이슈로 대두될 것으로 전망됨에 따라, 스마트팜 재배에 필요한 냉수 및 CO₂ 공급에 추가하여 분산형 스마트팜 온실에 소요되는 물 공급의 복합 기능을 추가로 고려한 모델을 수립, 설계에 반영
- 분산형 축냉조에 저장된 냉열의 1차 활용 (열교환기)과 압력 조절을 통해 토출되는 CO₂의 온실 시비 공급, 그리고 온실 관수 등에 소요되는 물 공급이 완료될 경우 각 분산 복합 축냉조로의 냉수+CO₂ 공급이 필요하게 되는데, 이 때 주 축냉조와 연결된 가압펌프와 S.V.를 제어함으로써 각 분산 축냉조에 필요한 양만큼의 총진 제어가 이루어질 수 있도록 설계
- 각 분산 축냉조에는 내부 압력을 조절 할 수 있는 별도의 압력제어 장치가 구비되게 되며, 총진 이후의 내부 압력의 조절을 통해 압력을 낮춤으로써 가압을 통해 물에 녹아 있던 CO₂가 토출되어 CO₂(g)를 온실 내부로 공급 가능하도록 제어시스템을 구축하도록 설계
- 또한, 당해연도에는 향후 연계 스마트팜 온실의 규모가 확대될 경우 CO₂ 공급 밀도를 높이기 위한 새로운 기술의 접목을 고려한 설계안을 도출 2단계 실증사업에 적용할 계획
- 즉, 주 복합 축냉조 운영에 있어 메인 스마트팜 내부의 온실 공기를 가압하여 1차 제습을 통한 제습부하를 경감시키고, 이 때 회수되는 (대기중으로 환기되어 버려지는 수분 환수) 물을 버리지 않고 재활용 할 수 있는 시스템 구성을 통해 기후변화에 따른 물 부족 문제 해결을 위한 수단으로 활용 (분산형 축냉조 물 공급원으로 일부 활용: 3~5%)
- 기존 물의 압력과 온도 조건을 활용하여 냉수에 CO₂를 용해시켜 이송시키는 방식의 단위 질량당 CO₂ 이송 밀도 개선을 위해 Nano bubble 기술을 이용한 추가적인 CO₂ 이송 기술에 대한 검증 및 실증 방안 수립을 위한 기초 시스템 설계를 수행하였으며, 기초 설계 조건 확립을 위한 시뮬레이션 결과는 아래와 같음.

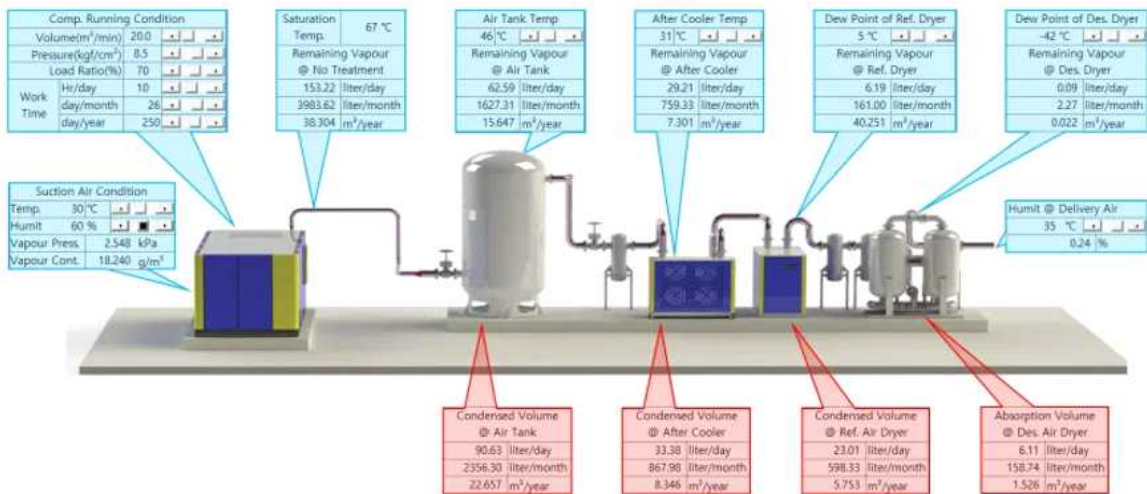


그림 43. 압축공기 기반 냉방/제습 시스템 요소설비별 설계

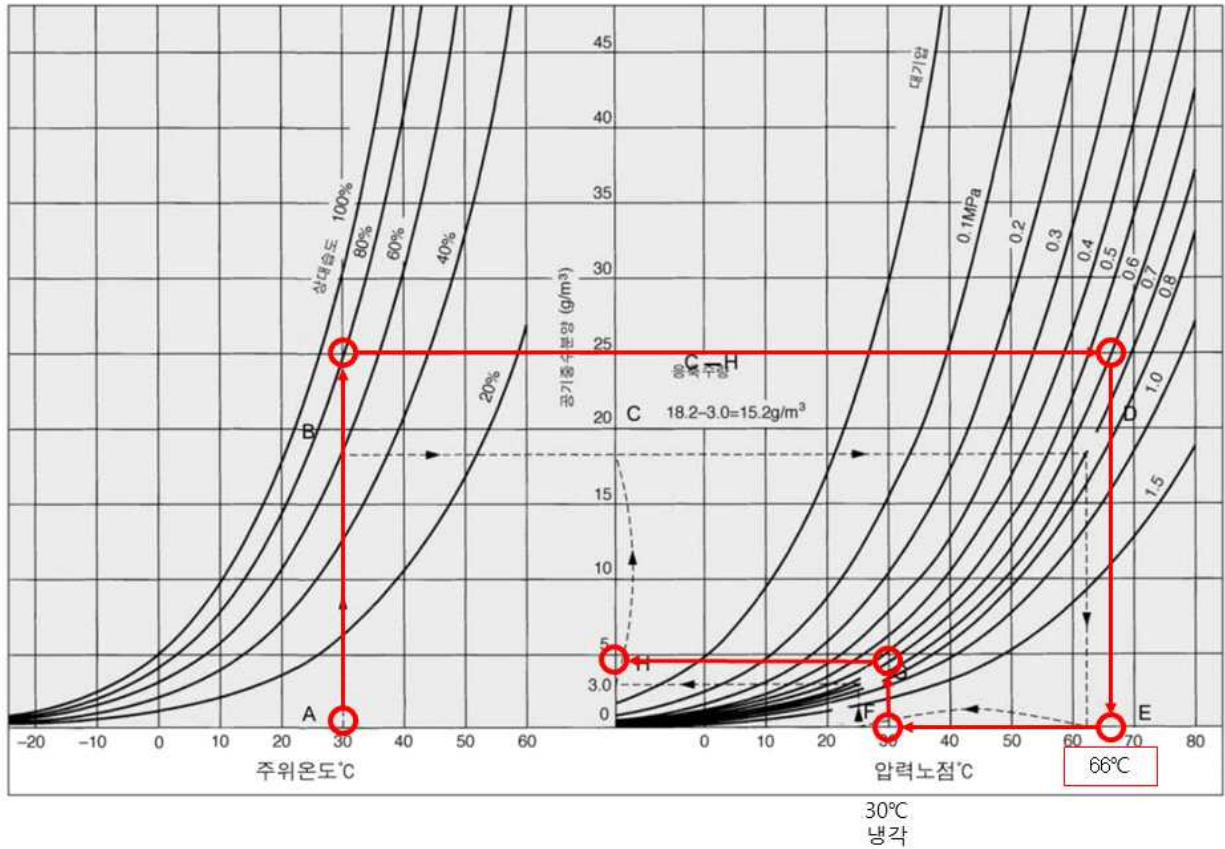


그림 44. Psychrometric chart를 이용한 가압 수분공기 회수 시뮬레이션 분석 예

- 30°C 80% 공기 7bar로 압축 시 압력 노점 온도 66°C 이며, 압축 공기 30°C 로 냉각 시 약 21g/m³ 응축수 발생 100hp 컴프레서 846 m³/h
- 시간 당 17.7L 응축수 제거(8시간 141L)
- 9.4 m³ 원통형 압력용기 7bar 기준 66 m³, 1.4L

✓ 분산형 복합 축냉조 시스템 현장 적용 및 최적 제어 테스트

- 앞서 기술한 냉열 및 CO₂의 복합 이송을 목적으로 하는 복합 축냉조 시스템 설계안을 바탕으로 1ton 규모의 현장실증 시스템을 구축
- 운전조건은 10bar, 20°C 로 설계하였으며, 추후 시스템 현장 실증 테스트 결과를 바탕으로 10°C@10bar, 5°C@10bar 조건으로 냉수로의 탄산 용해도를 증대시키는 방향으로 시스템 고도화를 추진 예정
- 압력 조건의 경우도 현행 10bar (고압용기 관리 인력 고용 기준 압력)에서 15bar, 20bar, 25bar (최대 30bar 이내) 시스템으로 점진적인 가압조건을 증대할 예정이며, 현장의 적용성을 감안하여 20bar 이상부터는 대규모 복합 저장조 기반의 중앙 공급형 모델로 설계, 적용 예정
- 압력 용기의 안정성을 고려할 때, 10bar 이상의 압력용기의 제작비용 또한 급증하게 되므로 10~15bar 이상의 조건을 적용할 때는 규모의 경제성 확보를 위한 압력용기의 저장 용량 또한 10tons 이상으로 설계가 필요함
- 30bar 이상의 압력조건에서는 CO₂ 물성의 특성상 현행 물에 탄산을 녹인 Aqueous 형태의 이송 방안보다는 액화 CO₂ 방식이 더 적합하므로 냉열·탄산 복합 공급 모델보다는 고밀도 액화 CO₂ 공급 모델로의 전환이 필요

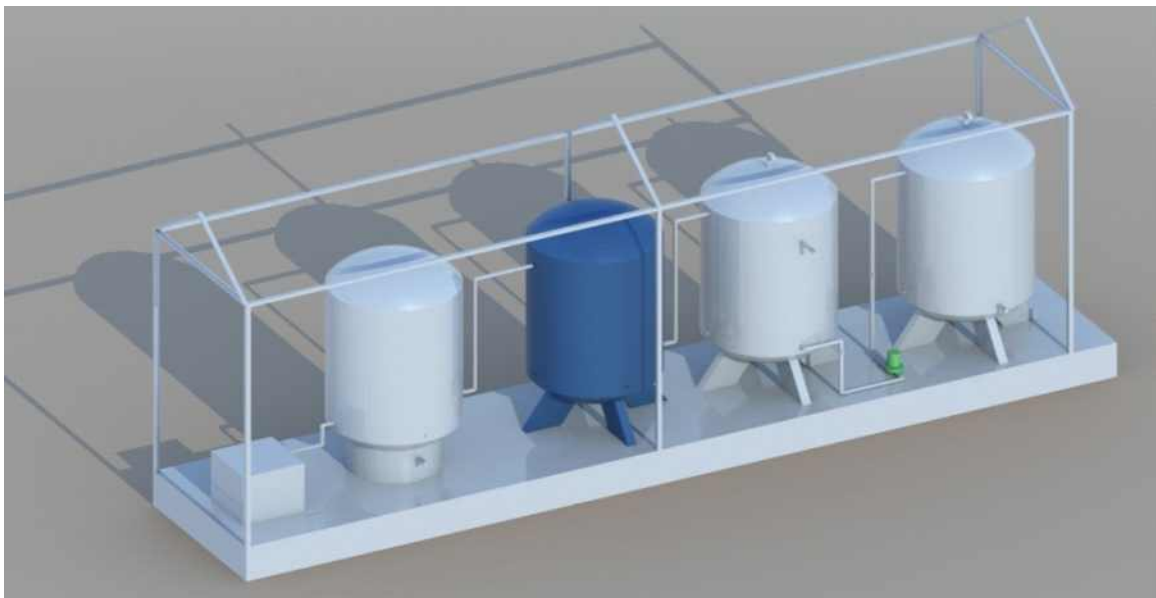
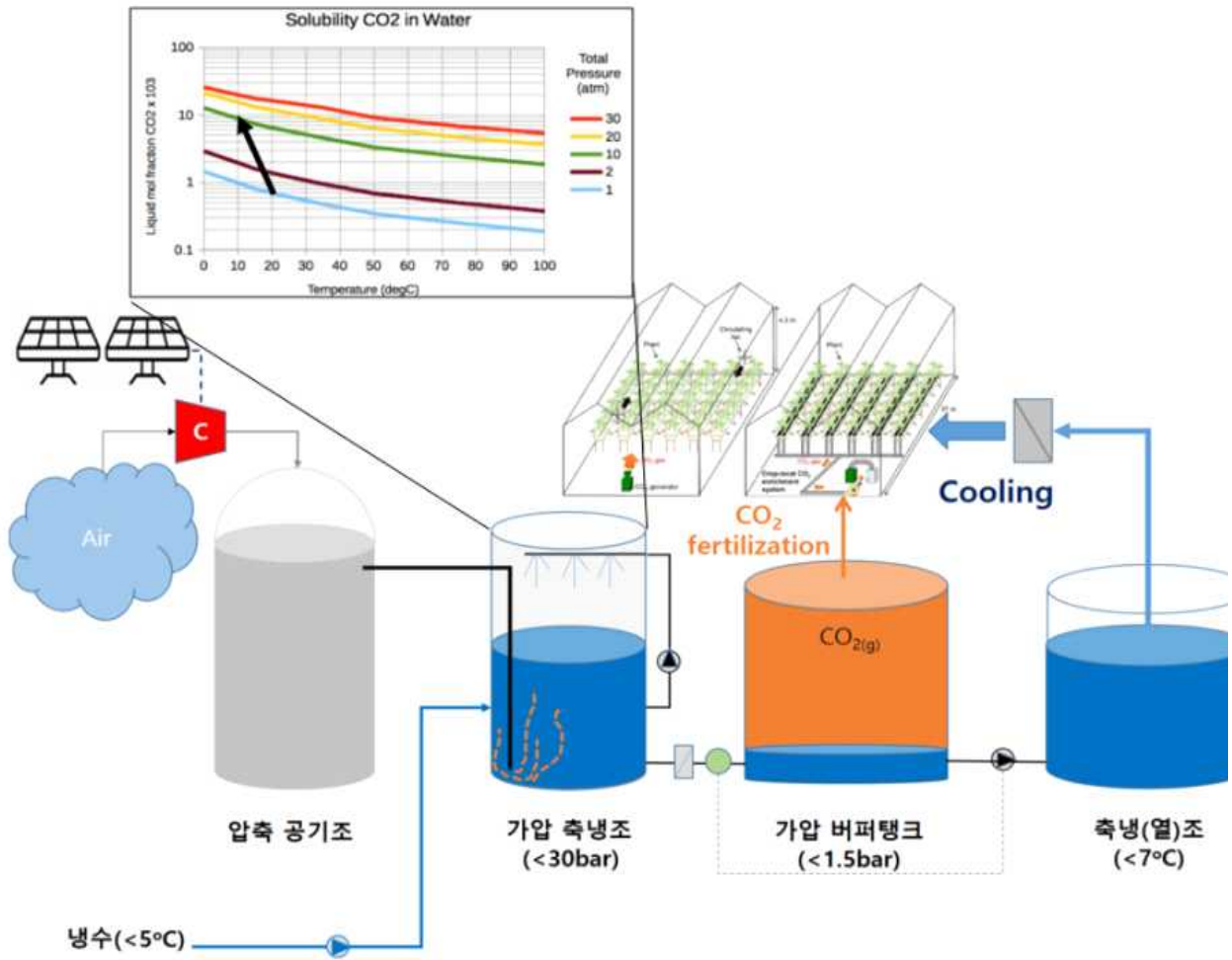


그림 45. 냉열·탄산 복합저장 기반 탄산 시비 시스템 개요도



(a) 압축공기 기반 냉열·CO₂ 복합 저장조 전경



(b) 반 밀폐형 수직 재배단 및 분산 축냉조 이용 재배단 균일 냉방/ 탄산 시비 제어 전경

그림 46. 분산형 냉열·CO₂ 복합 저장조 시스템 및 실증 전경

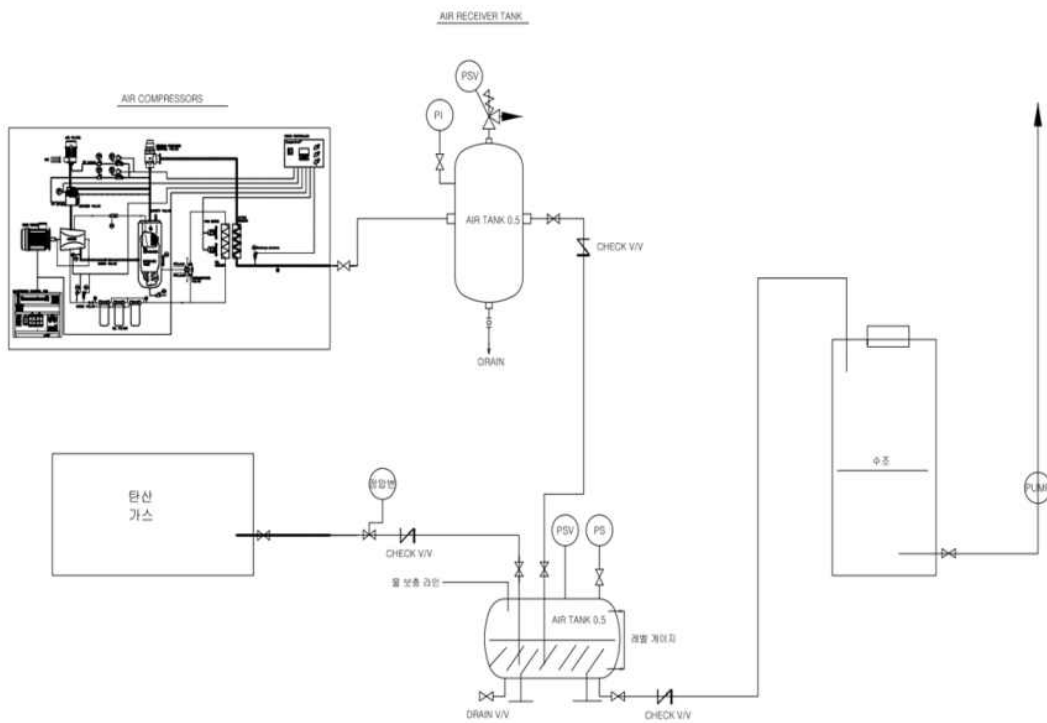


그림 47. 분산형 냉열·CO₂ 복합 저장조 시스템 구성도

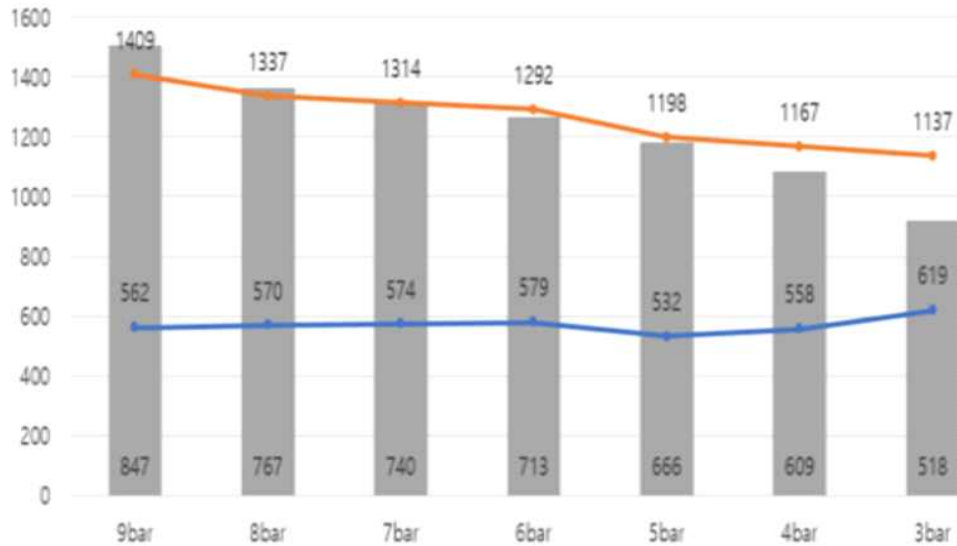


그림 48. 압축공기 압력에 따른 분산 복합 저장조 내 CO₂ 농도 변화 [ppm]

- 실 설치된 1ton (10bar@20°C) 규모의 실증 테스트 설비 적용에 따른, 압축공기 압력에 대한 분산 복합 저장조 내 CO₂ 농도 변화는 위 그림에 보는 바와 같음
- 설치된 실증 테스트 설비의 최적 제어 측면에서 가압 축냉조에서 가압 버퍼탱크로의 CO₂ 토출을 위한 공정 진행 과정에서 압축공기조로부터 가압축냉조의 압력을 보상해주는 (예를 들어 10bar의 압력을 유지) 제어가 이루어져야 CO₂ 농도를 높게 얻을 수 있는 최적 제어가 가능
- 따라서, 추후 실 스케일의 설비 구축 및 운영에 있어 중앙 열원설비의 가압축냉조의 압력이 수요처(온실)로의 냉열 공급에 따른 등압 제어가 이루어질 수 있도록 제어시스템 구축이 필수적임

□ 냉열 탄산 복합공급 열 네트워크 실증 및 고도화

✓ 실증기반 냉열·탄산 복합공급 시스템 개선방안

- 소규모 냉열·탄산 복합공급 시스템 실증 및 성능 테스트 결과 향후 경제성 확보를 위한 모델의 개선방안을 정리하면 다음과 같음
 - 완전 밀폐형 재배 단 기반 고밀도, 고생산성 모델로 확장
 - 복합 저장(냉열+탄산) 운전조건 고도화



그림 50. 반 밀폐형 재배단 설치 전경

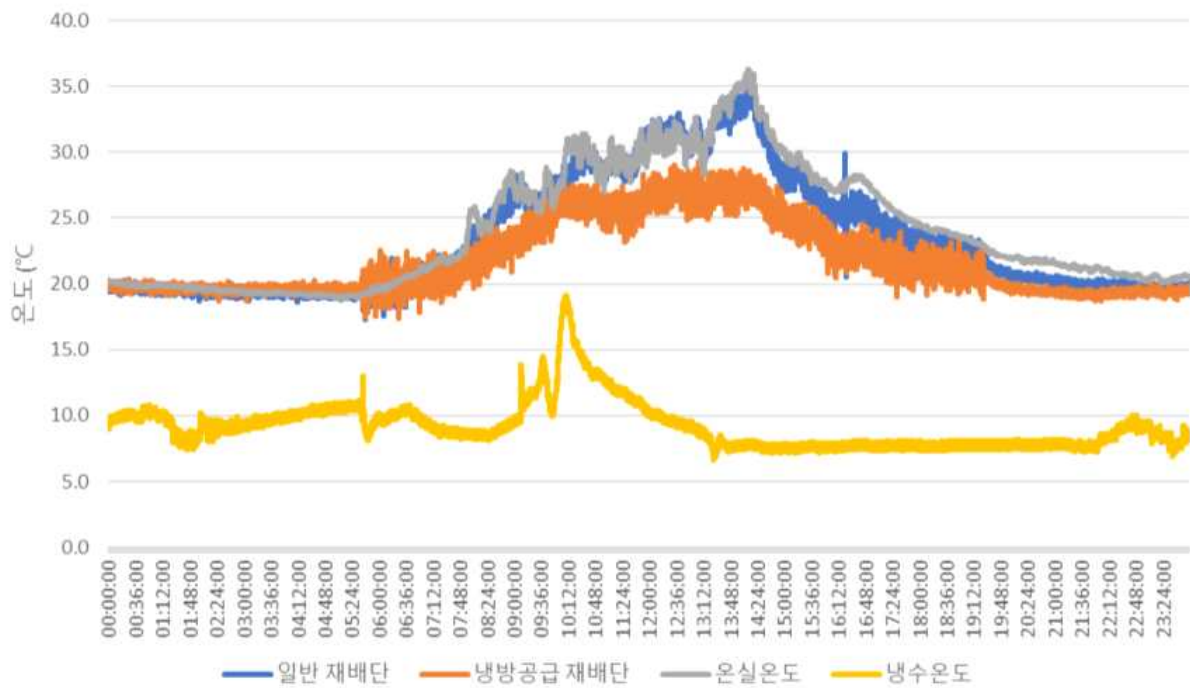


그림 49. 반 밀폐형 재배단 냉방 제어에 따른 온도 변화



그림 51. 탄산 시비 효율 개선을 위한 완전 밀폐형 재배단 시제품 전경

- 수요처 온실에서의 냉방 및 탄산 시비 수요에 대한 최적 제어 달성을 위해서는 현행 냉방부하 제어에 초점이 맞추어진 반 밀폐형 재배단으로는 한계가 있음 (탄산 시비 효율을 극대화하기 위한 완전 밀폐형 재배단으로의 시스템 고도화가 필요)
 - 기존 반 밀폐형 재배단과 달리 냉수 기반의 냉방/제습 제어, LED 배열 회수를 통한 밀폐형 공간 열 간섭 최소화, 그리고 탄산 leak 방지의 기밀성 확보를 통해 냉방/제습 및 탄산 시비 효과를 극대화 시킬 수 있는 완전 밀폐형 재배단 시제품 제작
 - 적층형 구조와 재배 단 내 다중 베드 설치가 가능한 최적 설계 적용으로 다양한 온실 조건에서의 적용성을 고려하였음
- 분산 복합 저장조의 냉열 공급 능력 및 이에 따른 탄산 용해도 증대의 효과를 달성하기 위해서는 기존 히트펌프로는 한계가 있음 (기존 히트펌프 제어로는 냉수의 온도를 10°C 이하로 달성하기 어려움; COP 성능이 크게 저하)
- 이러한 문제 해결을 위해서는 당 연구개발을 통해 계절 간 냉기저장으로 5°C 이하의 냉수를 얻을 수 있는 시스템 성능 확보가 필수적임
- 당 실증 테스트 시스템에서는 기존 히트펌프 설비의 한계를 극복하고 10bar 조건에서의 냉수 온도 저감에 따른 탄소 용해도 증대를 위한 시스템 고도화를 위해 온실 내부의 베드 하단부를 활용한 분산형 축냉조(가압 버퍼탱크) 설비를 구축

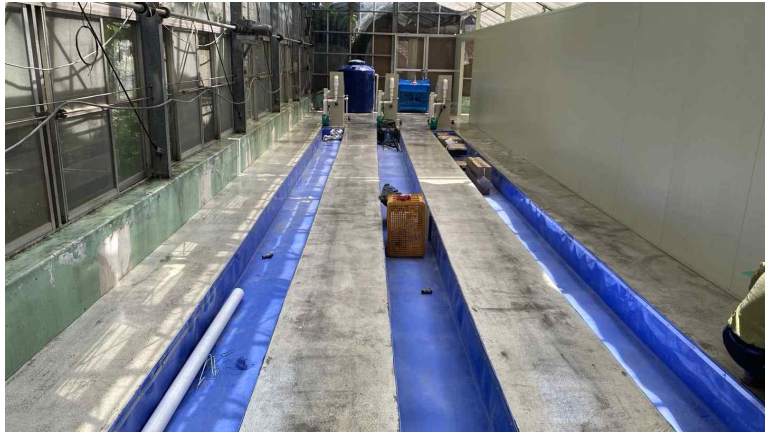


그림 52. 좌상-기존 분산 물탱크 (1톤, 직경 1.1m, 높이 1.5미터 크기), 우상- 재배단 하부 공간을 활용한 분산 축냉조, 하-수조 위 재배단이 설치된 모습



(a) 아이슬러시 제빙 시스템 설치 (b) 분산 축냉조 연계 부 전경
그림 53. 분산 축냉조 탄산 저장 용량 증대를 위한 아이슬러시 제빙 시스템 설치 전경

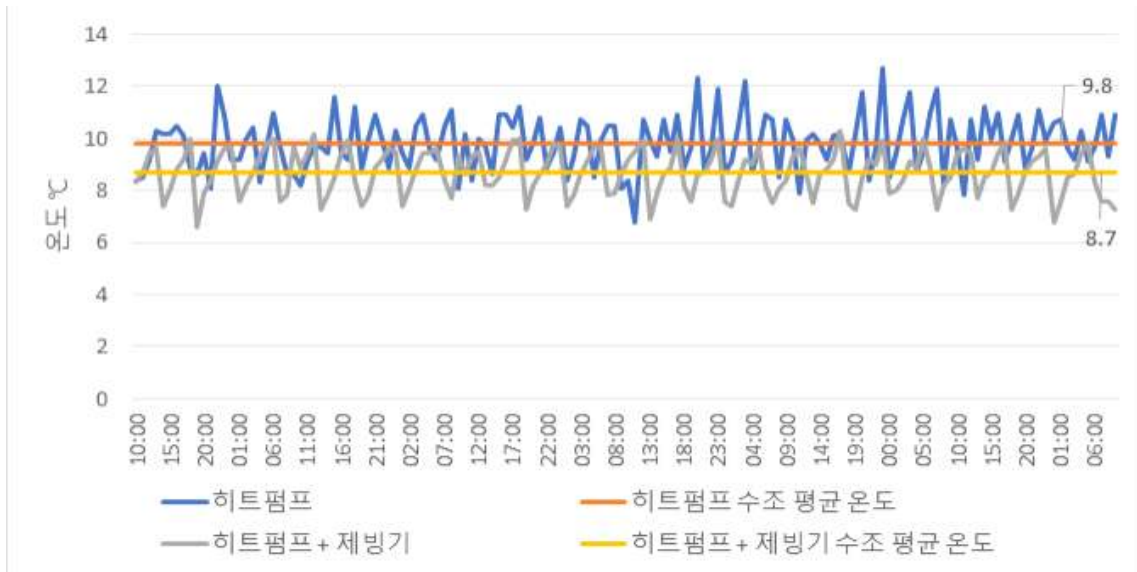


그림 54. 아이슬러리 제빙기 가동에 따른 분산 축냉조 물 온도 변화 (최적화 전)

- 냉열·탄산 복합 공급 모델의 시장보급 확대를 위한 활용도 제고와 제어 최적화를 위해서는 해당 설비들이 온실 내 위치하는 것이 가장 적합한 조건이므로 용량 증대에 따른 축열조 공간 확보 문제 해결 측면에서도 베드 하단부를 활용한 분산 저장조 설치 및 제어 최적화가 바람직함
- 공간 활용도를 극대화 시킬 수 있는 베드 하단부를 활용한 분산 저장조를 활용, 기존 20°C의 탄산 용해수의 온도를 10°C, 5°C 로 점진적으로 낮추어 탄산수 용해도 증대에 따른 탄산 시비용 CO² 농도 증대 제어의 고도화 설계를 수행
 - 위 그림에서 보는 바와 같이 기존 히트펌프로 평균 10°C 내외의 냉수 생산이 가능한 조건에서, 도입 초기 최적화 이전의 아이슬러리 제빙 시스템 도입에 따른 냉수의 온도는 최대 6.5, 평균 8.7°C을 달성
 - 분산 저장조 내 저장되는 물의 저장 용량을 변경, 제어함으로써 최적화를 통해 평균 5°C 조건을 달성
 - 향후 수요처 온실에 적합한 최적의 분산 저장조 용량에 맞는 냉수 공급 방안(최적 설비 용량) 설계가 적용되어야 함

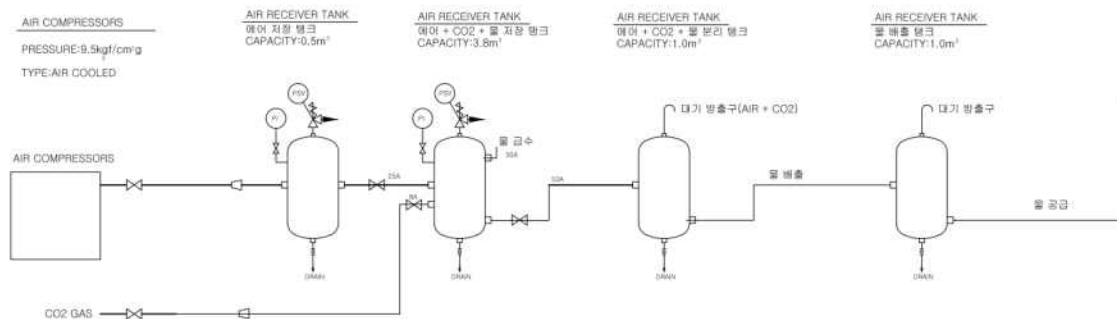


그림 56. 냉열·탄산 복합 저장시스템 고도화 설계

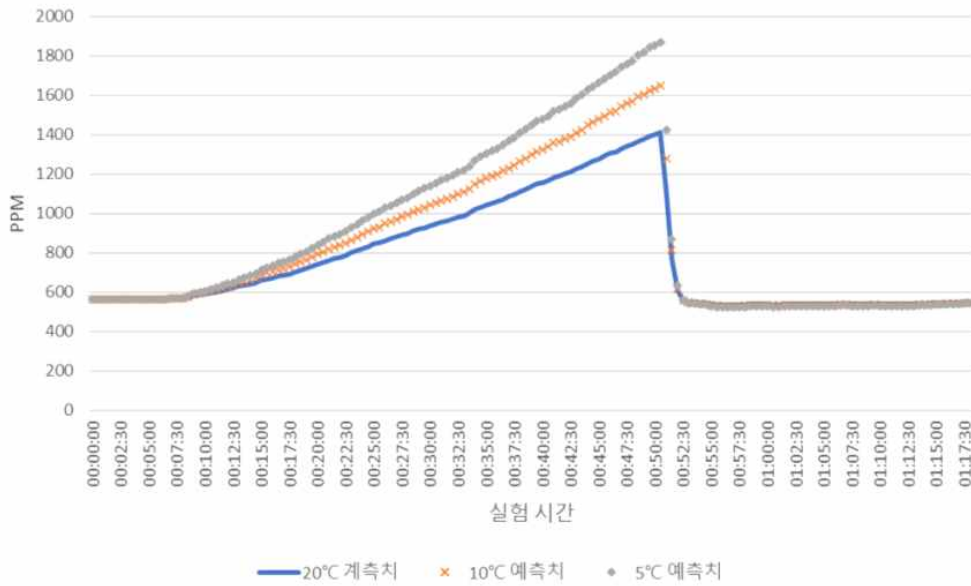


그림 55. 냉수 온도에 따른 탄산 용해도 변화 분석 결과 (10 bar 조건)

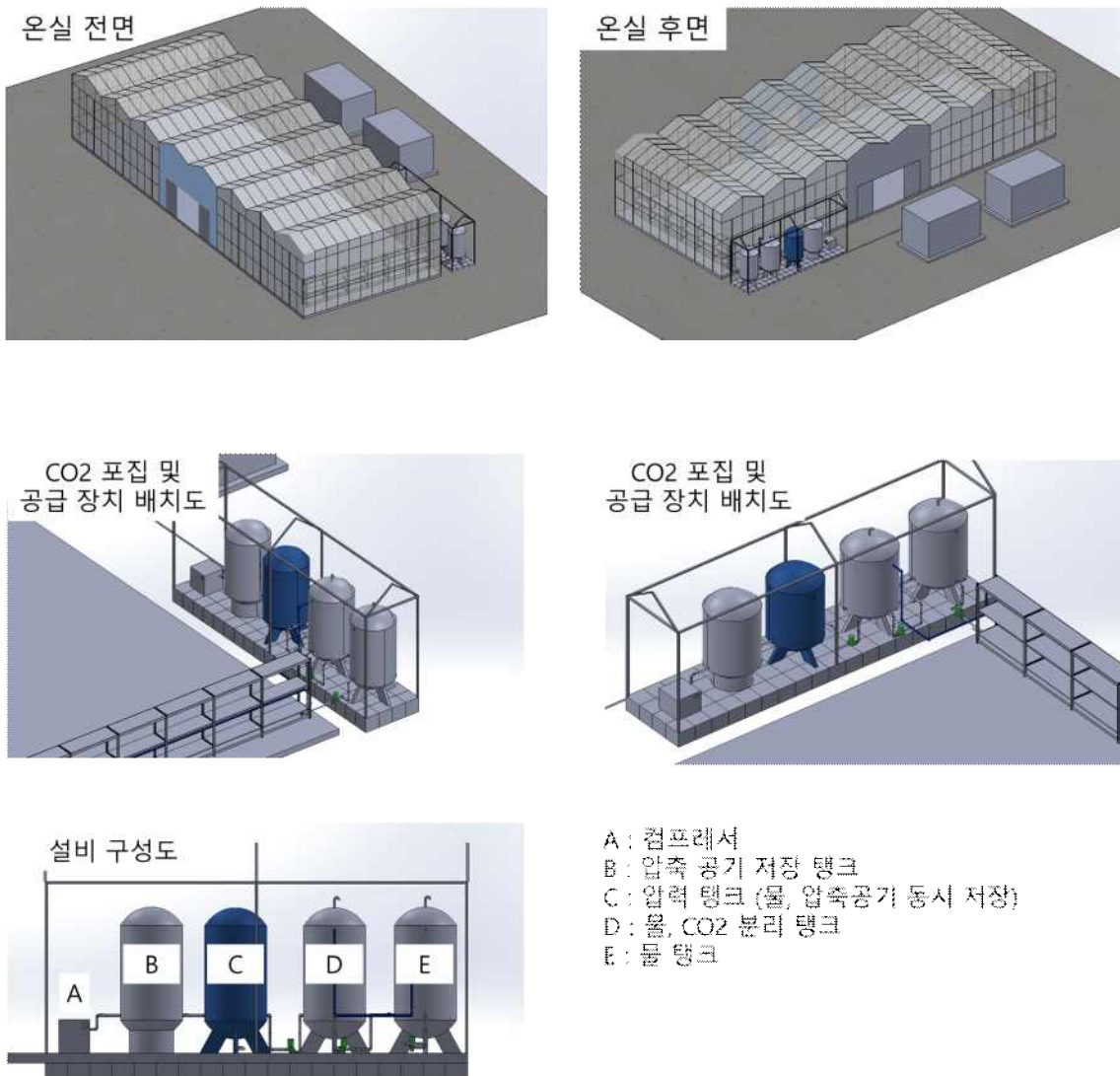
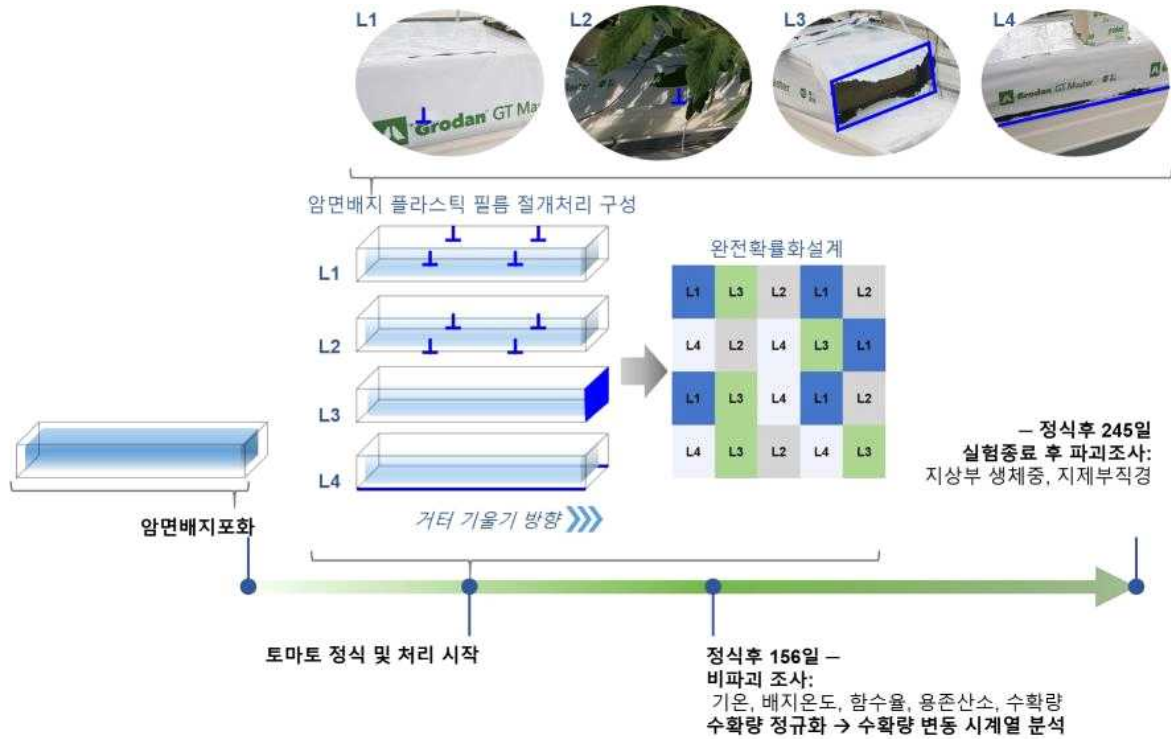


그림 57. 실제 온실 적용 가상도

2-4 냉기저장기술의 재배 활용에 대한 평가 (한국과학기술연구원)

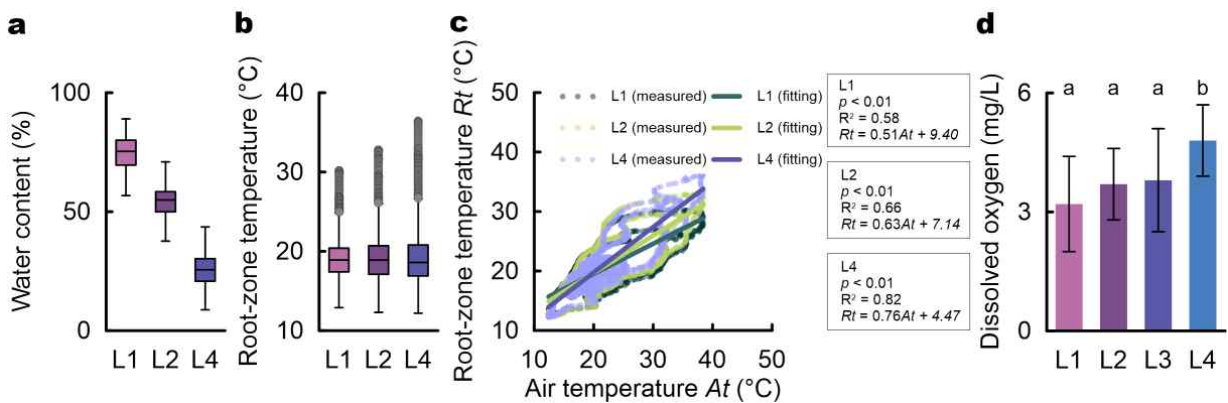
가. 냉기저장기술 적용 재배 시스템 데이터의 수집 및 환경 변화 패턴 분석

- 일반 환기온실과 냉방성능을 갖춘 온실의 공기환경은 서로 다른 특성을 나타냄. 또한, 작물은 대기-식물-근권부 연속체 상에 위치하고 있으므로 냉방 조건에서의 작물 재배 기술을 최적화하기 위해서는 대기 환경변화가 근권부, 식물의 생육에 미치는 연쇄적인 영향관계를 분석할 필요가 있음.
- 본 연구는 일반적인 환기기반 환경제어 온실에서 배지관리인자의 변화와 그에 따른 근권부 환경 변화, 그리고 후속적인 작물 생산량의 영향 평가를 위해 수행함. 본 연구에서 선정한 배지관리인자는 암면배지를 피복하고 있는 플라스틱 필름의 절개 방식으로, 완충용량이 낮은 암면배지의 특성상, 절개 방식에 따라서도 근권부가 온실환경 변화에 반응하는 양상이 달라질 수 있음.
- 일반적으로 시설재배 기반 수경재배에서는 고품배지가 사용됨. 여러 고품배지 중에서도 특히 암면은 시설재배 작물 생산에 널리 사용되고 있음. 암면배지는 규격화, 단순화된 근권환경을 제공하여, 근권부 환경 조절에 용이함. 현장에서는 암면배지를 기반으로 한 체계화된 생산 모델이 많이 활용되고 있음.
- 플라스틱 필름으로 포장된 상태로 사용되는 암면배지는 약 0.01 m³의 제한된 공간을 가지고 있으며, 이 공간에서 식물의 양분 흡수, 뿌리 생육, 양수분 공급 및 배출이 이루어짐. 이는 근권부의 물리화학적 완충용량이 토경에 비해 상대적으로 낮음을 의미함.
- 근권부의 완충용량이 낮은 조건에서는 온실 환경 및 양수분 관리 등의 외부 영향에 근권부 환경이 상대적으로 민감하게 반응하며, 이에 따라 작물의 생산성 변화에 미치는 효과도 크게 나타날 수 있음.
- 즉 암면의 플라스틱 필름의 절개 방식은 근권부 환경과 외부 환경 간의 유체 교환에 영향을 미칠 수 있음. 또한 근권부의 통기성, 산소 확산, 배수, 보수성과 같은 특성이 근권부 시스템 안에서 밀접하게 얽혀 민감하게 반응하기 때문에 토양 시스템보다 복잡도가 낮고 변수가 적은 것에 반해 이러한 매개변수 변경의 잠재적인 연쇄 효과는 직관적으로 이해되기 어려울 수 있음. 특히 일반적인 환기기반의 온실의 공기환경은 냉방온실에 비해 변동 범위가 상대적으로 넓을 수 있기 때문에 암면배지와 이어서 작물의 생산성에 미치는 영향 분석이 필요함.
- 일반 환기기반 온실에서 토마토 암면재배를 계획하였으며, 암면 플라스틱 필름은 4단계의 절개 수준을 디자인하여 처리하였음. 플라스틱 필름 절개 처리는 배수 성능의 증가 수준에 따라 L1부터 L4로 설계하였으며, 절개 정도가 L1에서 L4 순으로 증가하므로 L1에서 가장 낮은 배수성능을, L4에서 가장 높은 배수 성능을 나타낼 수 있도록 함. 이후 플라스틱 절개 수준의 효과를 평가하기 위해 암면배지 온도, 함수율, 용존산소, 생산량 등을 조사함(그림 1).



[그림 1. 암면배지 플라스틱 필름 절개 처리 구성 및 재배 실험 진행도]

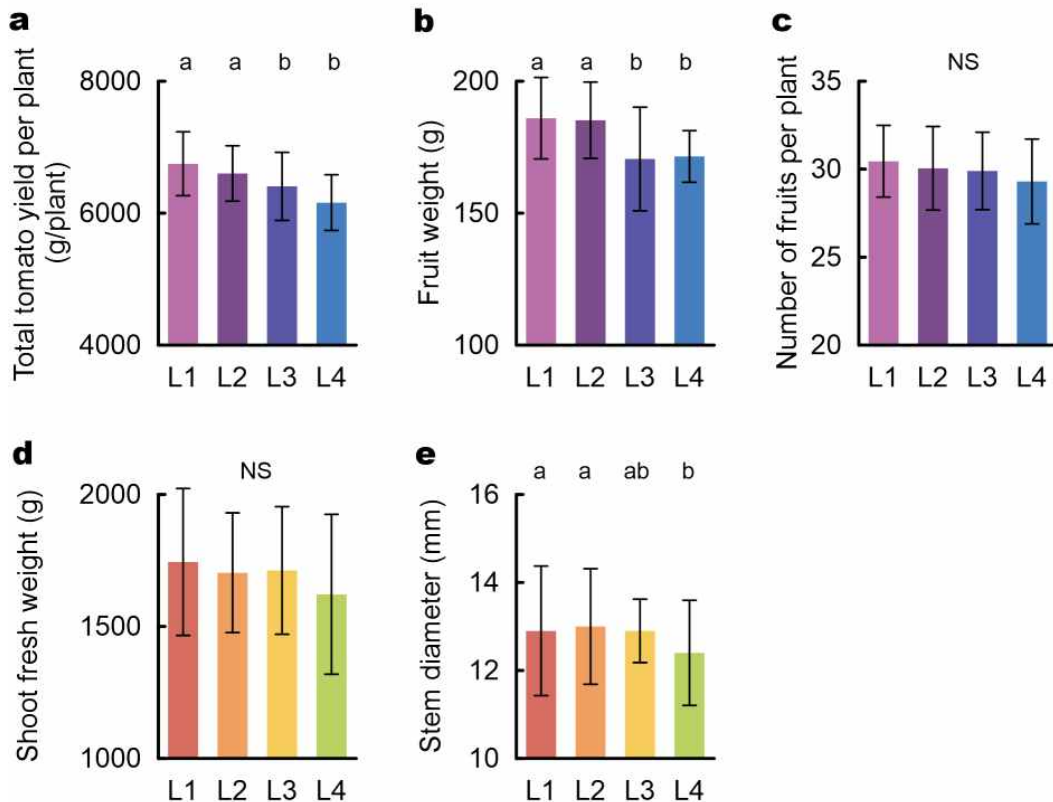
- 실험결과, 암면배지의 플라스틱 필름 절개 수준에 따라 각 처리별 암면배지의 근권부 환경에서는 일련의 변화가 관찰됨. 함수율 분포의 경우, 배수성능이 낮았던 L1가 가장 높은 분포 범위를 나타냄(그림 2). 특히 L1의 함수율 분포는 모든 처리 중 가장 높은 배수 성능과 절개 수준을 나타내는 L4 처리와 큰 차이를 보임. L4 처리 함수율 분포의 중앙값은 26%(제1사분위수 = 21%, 제3사분위수 = 30%)인 반면, L1 처리구의 수분 함량은 75%(제1사분위수 = 70%, 제3사분위수 = 80%)를 나타냄. L1과 L4 사이의 절개 및 배수 수준을 가지는 L2 처리의 함수율의 경우 중앙값이 55%(제1사분위수 = 50%, 제3사분위수 = 58%)로 L1과 L4 사이 수준으로 나타남.



[그림 2. 암면배지 플라스틱 필름 절개 처리에 따른 근권부 환경 변화(a: 함수율 분포, b: 배지 온도 분포, c: 배지온도와 동시간대 기온의 상관관계, d: 배지내 양액의 용존산소)]

- 수분 함량 변화와 달리 배지온도는 크게 다르지 않은 분포를 나타냄. L1, L2, L4 처리의 배지 온도 분포의 중앙값은 각각 L1 18.9°C, L2 18.9°C, L4 18.6°C로 나타났으며, 사분위수의 경우도 L1 17.4°C(제1사분위수)~20.4°C(제3사분위수), L2 17.1°C(제1사분위수)~20.1°C(제3사분위수), L4 16.9°C(제1사분위수)~20.8°C(제3사분위수)로 대부분의 배지온도가 매우 유사한 범위에 분포하였음(그림 2).

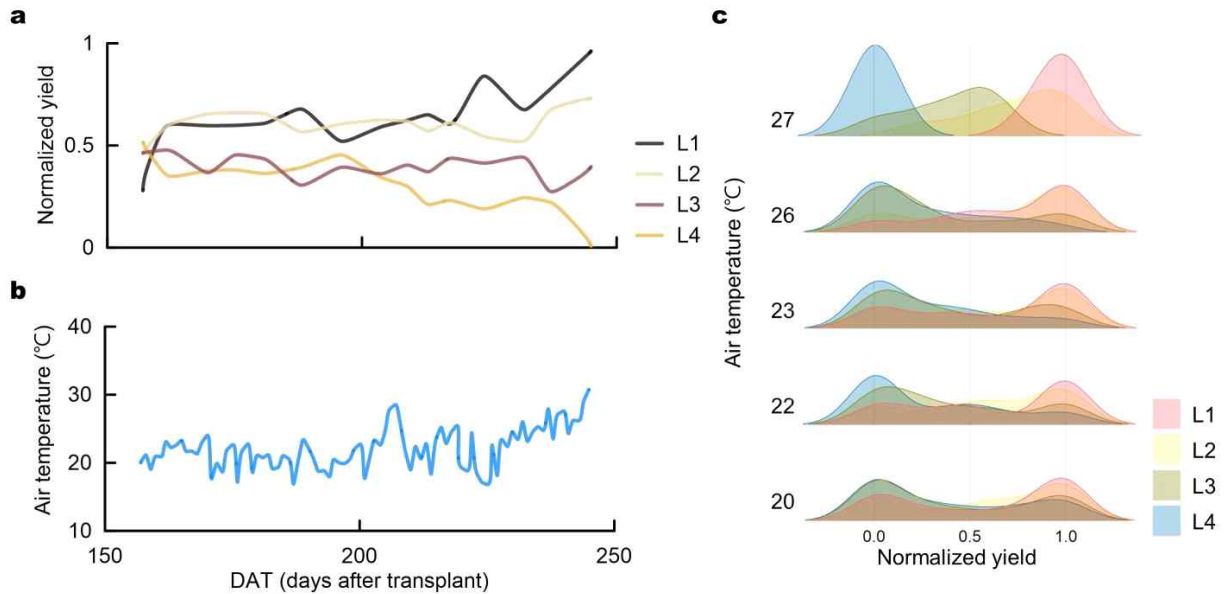
- 그러나 각 처리별 배지온도 분포의 이상치에 대해서는 뚜렷한 경향이 관찰됨 L1의 이상치 최대값은 30.2°C인 반면 L4의 최대 이상값은 36.5°C로 높게 나타남. 또한, L1, L2, L4의 배지온도와 기온의 동시간대 변화의 상관관계를 비교하면, 결정 계수(L1, R2 = 0.57; L2, R2 = 0.66; L4, R2 = 0.81)의 증가와 함께 그 기울기도 L1(0.50) < L2(0.63) < L4(0.76) 순으로 증가하였음.
- 배지에서 추출된 양액 용존산소의 경우 L4 처리가 다른 처리에 유의적으로 높은 결과를 보여주었음. L1~L3 처리의 용존 산소간에는 유의적인 차이가 관찰되지는 않았으나 L1의 평균값이 가장 낮게 나타났으며, 이는 L4 처리의 34% 정도 낮은 수준으로 나타남. L1, L2, L3 평균값의 차이는 크지 않았으나, L2와 L3의 용존산소 평균값은 L1보다 각각 14%, 17% 높게 조사되었음.



[그림 3. 암면배지 플라스틱 필름 절개 처리에 따른 작물 생산성 변화(a: 작물 당 토마토 총 생산량, b: 평균 과실중, c: 평균 과실 수, d: 지상부 생체중, e: 지제부 줄기직경)]

- 암면 절개 처리에 따른 토마토의 생육 반응은 L1과 L2, L3와 L4의 두 개 그룹으로 구분된 반응이 관찰됨. 평균 과실중과 작물 당 토마토 총 생산량의 경우 L1과 L2가 L3와 L4에 비해 유의적으로 높은 생산성을 나타냄(그림 3). 절개 및 배수 수준이 가장 낮은 L1 처리의 평균 수확량이 높게 나타났고 절개 및 배수 수준이 가장 낮은 L4 처리의 평균 수확량이 가장 낮게 나타남(L1 처리에서 L4보다 약 10% 정도 높은 평균 수확량 관찰).
- 이러한 토마토 수확량에 기여하는 생육지표 중, 식물당 과실수와 지상부 생체중은 처리군에 따른 유의차가 관찰되지는 않았으나, 과실 중량과 지제부 줄기 직경에서는 유의적인 차이가 관찰됨.
- 암면배지 플라스틱 필름 절개 수준의 조작용은 평균 과실 중량과 평균 줄기 직경을 각각 최대 8% 및 4%까지 증가시켰으며, 각 처리별 식물 생육지표의 성장 지수 평균의 전반적으로 절개 수준의 증가와 반비례의 경향이 관찰됨.
- 실험기간 동안의 토마토 수확량의 시계열 변화를 확인하기 위해 수확량 변화의 정규화를 수행함(그림 4). 실험기간 후반의 정규화 평균 수율의 경향은 관찰기간 전반의 경향과 구별되는 경향을 나타냄. 약 160 DAT에서 정규화 된 수율은 0.5 이상의 그룹(L1 및 L2)과 0.5 미만의 그

룹(L3 및 L4)으로 처리 간에 분기되는 변화를 보여주었음. 그러나 실험기간의 후반기에는 L1 처리가 실험 종료시까지 가장 높은 수준으로 증가하는 경향을, 대조적으로, L4 처리에서의 실험 기간의 후반 이후 가장 낮은 수준으로 감소하는 경향을 나타냄. 실험 종료 시 정규화된 수율은 $L4 < L3 < L2 < L1$ 순으로 관찰됨.



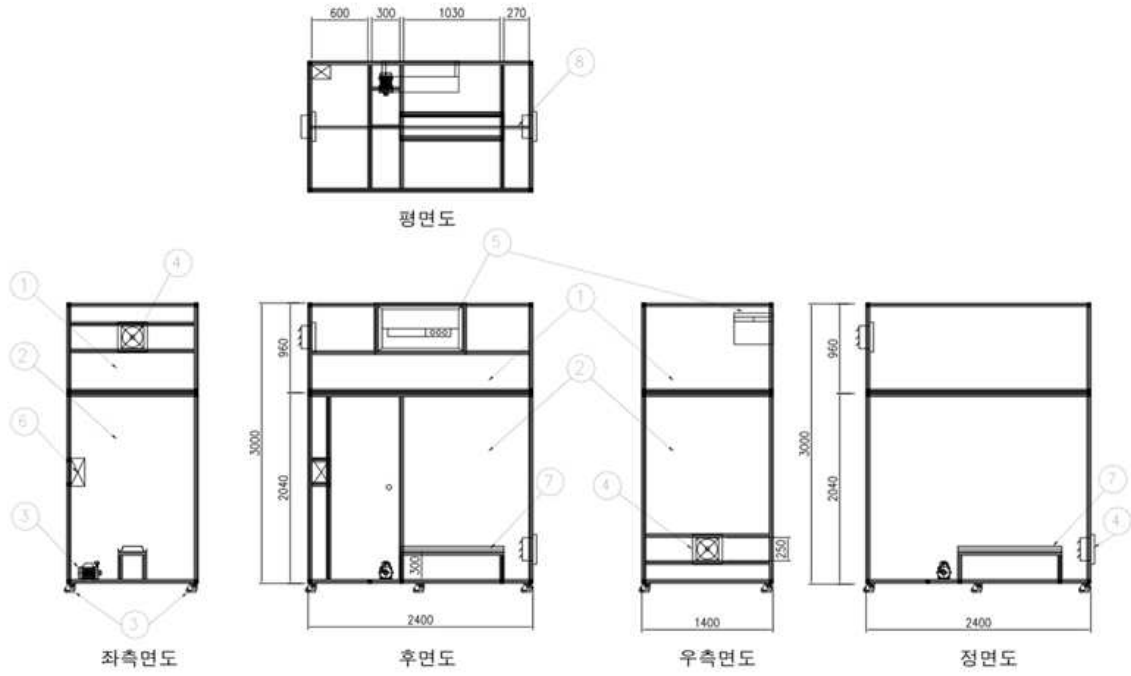
[그림 4. (a) 암면 절개 처리의 정규화 수확량, (b) 온실 일 평균 기온, (c) 수확 중 기온 수준에 따른 정규화 된 수확량 분포 (n = 20)]

- 온실 내부의 일일 평균 온도에서도 유사한 경향이 관찰됨(그림 x). 정식 후 150~200일 사이의 일일 평균 기온은 17~24°C 이내로 유지되었으나, 정식 후 200일이 지나서는 내부 온실 온도는 점진적으로 31°C까지 증가함. 실험 기간 동안의 온실 기온 분포를 5개 그룹으로 분류하여 각 처리별 정규화된 수확량의 분포를 능선 그래프로 표현했을 때 특정 온도 구간에서 정규화된 수확량 분포의 분리를 관찰할 수 있었음. 20~26°C의 온도 범위 내에서 각 처리 샘플의 정규화된 수확량은 비교적 균일하게 분포하였으나 27°C 구간에서는 L1과 L4가 명확하게 분리되는 경향을 확인함.
- 요약하면, 암면배지의 플라스틱 필름 절개 방법은 근권부 환경 분포에 영향을 미쳤으며, 이러한 변화는 다시 근권부 환경과 온실 환경 간의 관계를 조정하는 결과를 보여주었음.
- 또한 일반적으로 근권부 수분의 용존산소는 작물 생육에 유리한 요인으로, 과습 조건은 불리한 조건으로 작용하는 것에 반해 본 연구에서는 그 효과가 상쇄되는 결과가 나타났음. 이러한 상충적인 결과에는 일반 환기조건의 온실 기온 변화에 대한 암면배지의 반응 특성이 영향을 미친 것으로 추정됨. 즉, 상대적으로 온도의 변동 범위가 안정적인 냉방조건에서는 환경요인이 서로 trade-off 관계로 작용하는 충돌 요인을 해소하여 암면배지 기술체계의 성능 재현성과 새로운 최적화 요인을 제시할 수 있을 것으로 기대할 수 있음.

나. 냉기저장기술 적용 온실의 환경 데이터 분석 체계 구축

- 냉방 조건 온실 내부환경측정센서 설치 실시간 모니터링 시스템 구축
- 과제의 냉기저장기술이 적용된 실증 온실의 구축에는 다소 시간이 소요됨. 또한 냉방/일반 환기 조건 변화에 따른 따른 대기-식물-근권부의 동적인 관계를 분석하기 위해 실증 온실 규모의 거대 시스템을 조작에는 일정 부분 제약이 따를 수 있음.
- 따라서 본 연구에서는 온실 냉방 조건과 일반 환기 조건의 변화를 빠르게 적용하고 이에 따른 대기-식물-근권부 변수들의 변화를 분석하기 위한 냉방챔버를 제작하였음. 본 챔버는 냉방조건과 자연환기 조건의 빠른 전환이 가능하며, 이에 따른 작물의 증산량, 기온, 근권부 온도 등의 환경 변수를 동시간대에 수집하여 분석할 수 있도록 설계하였음.

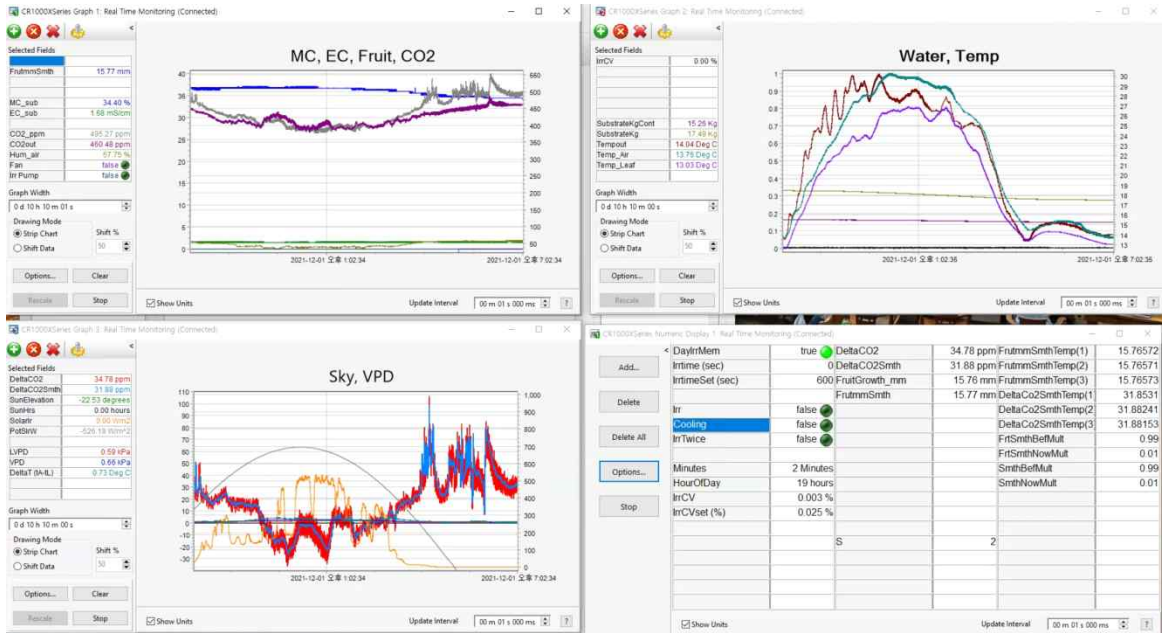
- 냉방챔버의 제원은 1.4(W)×2.4(L)×3.0(H)m, polycarbonate(투명)로 독립 관수 시스템(펌프 일체형, 일사비례제어)를 갖추고 있으며, 에어컨 냉방, 상 하단 팬 환기 시설을 설치하였음(그림 5~7).



[그림 5. 냉방/환기챔버의 설계도면]



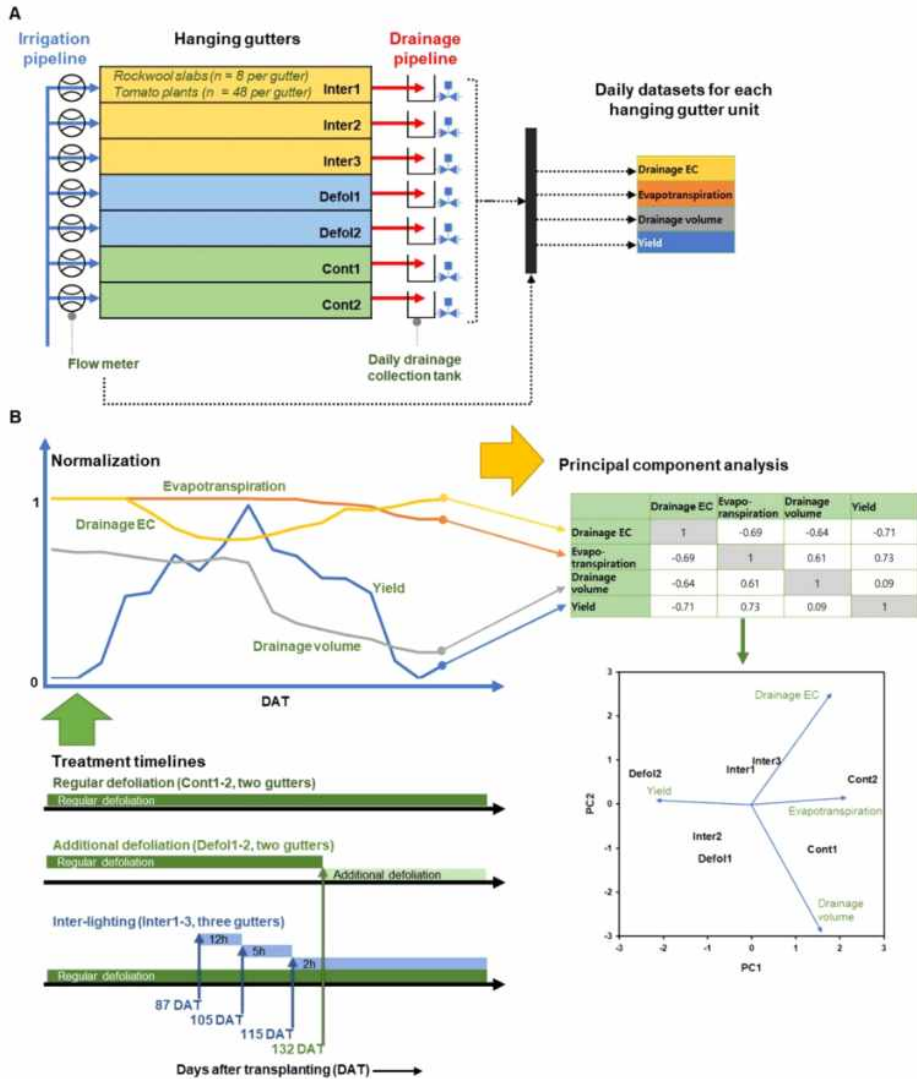
[그림 6. 냉방/환기 챔버 온실 설치 사진(KIST 자체 실증 온실)]



[그림 7. 냉방/환기 챔버의 지상부, 근권부 실시간 환경 데이터 수집 화면]

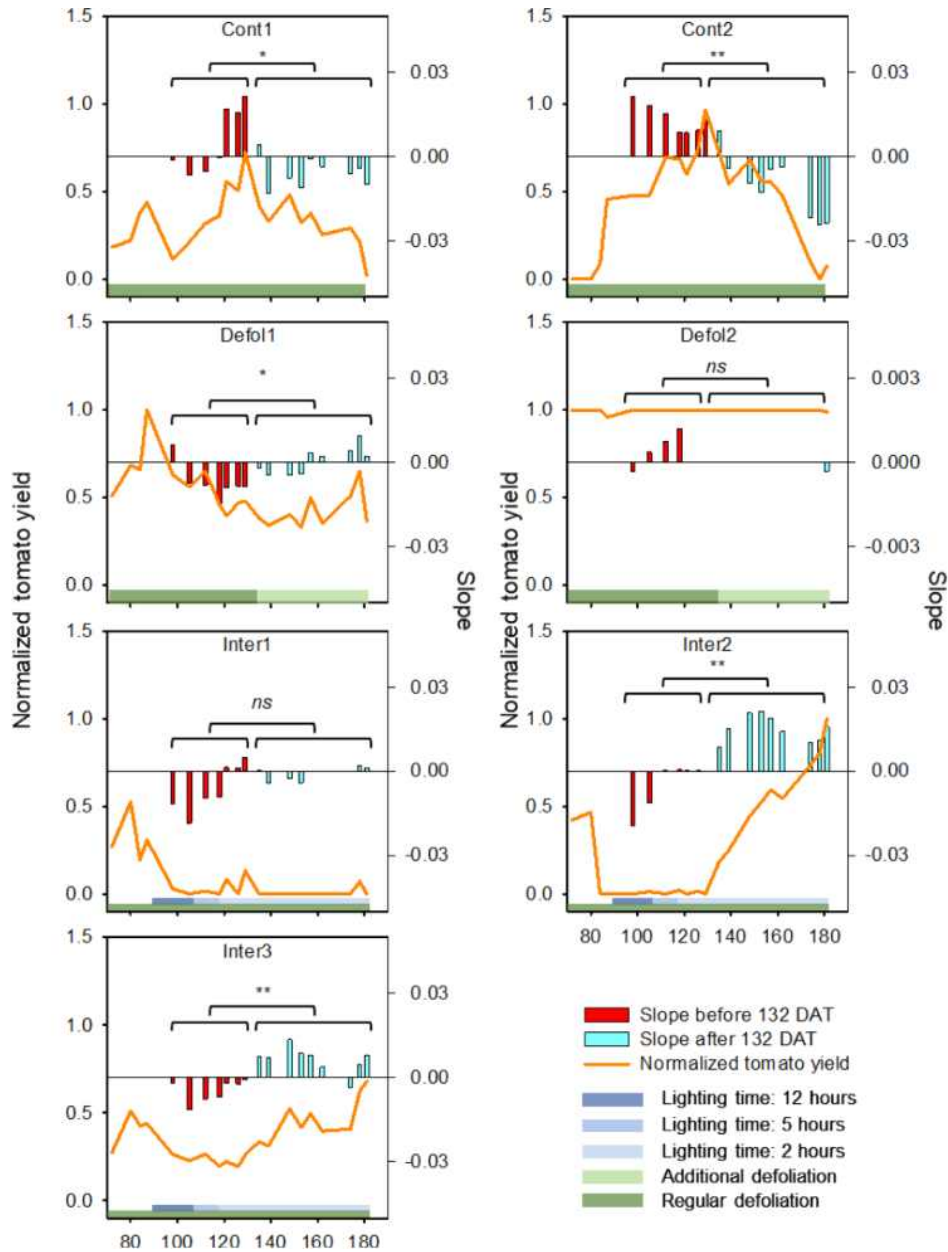
○ 식물-환경 상관관계에 영향을 미칠 수 있는 재배 시스템 요인 분석

- 온실에 냉기저장기술을 적용할 경우(또는 일반 냉방조건을 통해 주간 온실평균온도를 낮출 경우), 태양광의 입사에 따른 자연스러운 현열량의 상승을 인위적으로 억제하게 됨.
- 이는 일반 자연조건에서 발생할 수 있는 광량대비 온도, 습도 관계와 대비되는 조건으로 환기 냉방, 기화 냉방 등의 수동적 공기조절기술이 적용된 온실에서 나타날 수 있는 미기상조건과 상이할 수 있음.
- 대부분의 온실 양수분 관리 기술은 상기한 공기조절 기술이 적용된 조건에서의 식물과 근권부, 대기 환경 간의 상관관계를 바탕으로 구축되어 있음.
- 식물의 생리활동은 식물의 지하부(근권부)-식물-지상부(대기)와 연속체 안에서 복합적인 상호작용의 결과로 나타나며, 특히 수경재배 온실의 재배 조건은 연속체 내 각 요인의 변동에 따른 영향이 더욱 극적으로 나타나게 됨.
- 따라서 냉기저장기술에서의 재배기술 최적화를 위해서는 비냉방조건(에어컨과 같이 적극적인 냉방기술이 적용되지 않은 조건)을 포함하여, 냉방조건(에어컨, 냉기저장기술과 같은 적극적인 냉방기술이 적용된 조건)에서의 근권부-식물-지상부 그리고 아울러 재배 시스템(관수체제)과의 복합적인 영향 분석을 바탕으로 재배 기술 개선점을 도출하기 위한 데이터 분석체계가 필요함.
- 우선적으로, 비냉방 조건에서 지하부-식물-지상부 연속체의 미기상조건에 영향을 미칠 수 있는 두가지 수준의 적엽처리와 시간 가변형 interlighting 처리를 적용하였으며, 이러한 처리가 재배 시스템과 식물의 생산량에 미치는 복합적인 영향의 분석 체계를 구축함(그림 8).



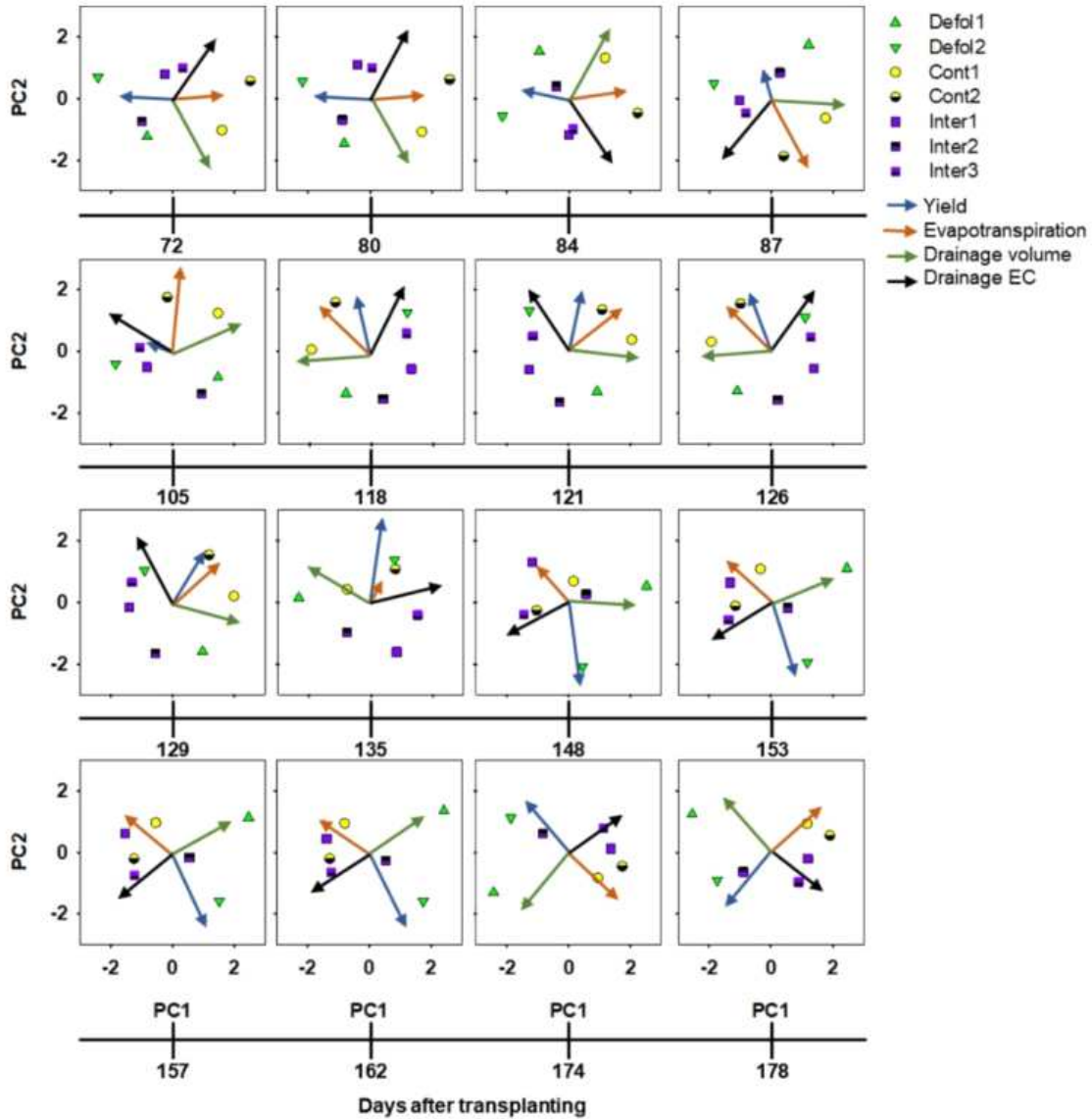
[그림 8. 미세 환경변화 처리에 따른 재배 시스템 변수, 식물 생산량 변동 요인 분석 체계 개요. (a) 재배 처리 배치(Inter: inter-lighting, Defol: 추가적엽, Cont: 일반수준적엽), (b) 정규화를 통한 재배 기간 중 처리에 따른 재배 시스템 주요 변수의 시계열 변화 시각화 및 주성분 분석(Ahn 등, 2022)]

- 조사 대상 작목은 토마토로, 적엽처리와 시간 가변형 inter-lighting 처리 결과 재배시간 경과에 따른 수확량 변동 패턴을 조사함(그림 9).
- inter-lighting 처리 시간의 조정에 따라 수확량의 감소/증가 경향이 관찰되었으며, 마찬가지로 적엽 처리 수준의 변경에 따라 수확량의 증가 경향이 감소되는 경향이 관찰됨.



[그림 9. 적엽처리와 시간 가변형 inter-lighting 처리에 따른 토마토 수확량의 정규화 값 변화. Cont:일반 적엽처리, Defol: 일반적엽--> 작기 중간 추가 적엽 전환, Inter: 작기 중 12-->5-->2 시간으로 보광 시간 순차적 조정(Ahn 등, 2022)]

- 재배 작기 중 적엽, inter-lighting 처리에 따른 식물-미기상 관계의 조정의 영향을 주성분 분석을 통해서 시각화하였음(그림 10).
- 이를 통해, inter-lighting과 적엽처리가 수확량-증산량 간의 일반적인 상관관계에 동요를 발생시켰음이 확인됨.
- 수확량-증산량의 거시적으로는 선형적인 상관관계를 가지고 있으나 온실 수경재배 조건에서는 증가된 증산량이 다시 재배 시스템의 배액량, 배액 EC와 같은 식물 생육과의 상관을 가지고 있는 요인에 영향을 미치는, 미세 환경 변화의 파급효과가 매우 빠른 주기로 나타남을 파악할 수 있음.
- 일반적으로 적엽 또는 inter-lighting 처리가 적용될 경우 관수 제어 파라미터의 미세 조정은 동반되지 않으나, 본 분석을 통해서 온실수경재배 조건의 경우 보다 짧은 시간 스케일에서의 동적인 관수 파라미터 최적화가 필요함.
- 본 조사에서는 비냉방 조건에서 환경-증산량-수확량 관계에 영향을 미칠 수 있는 광, 식물 파라미터를 조정하므로써 발생할 수 있는 시스템의 영향을 조사하였음.



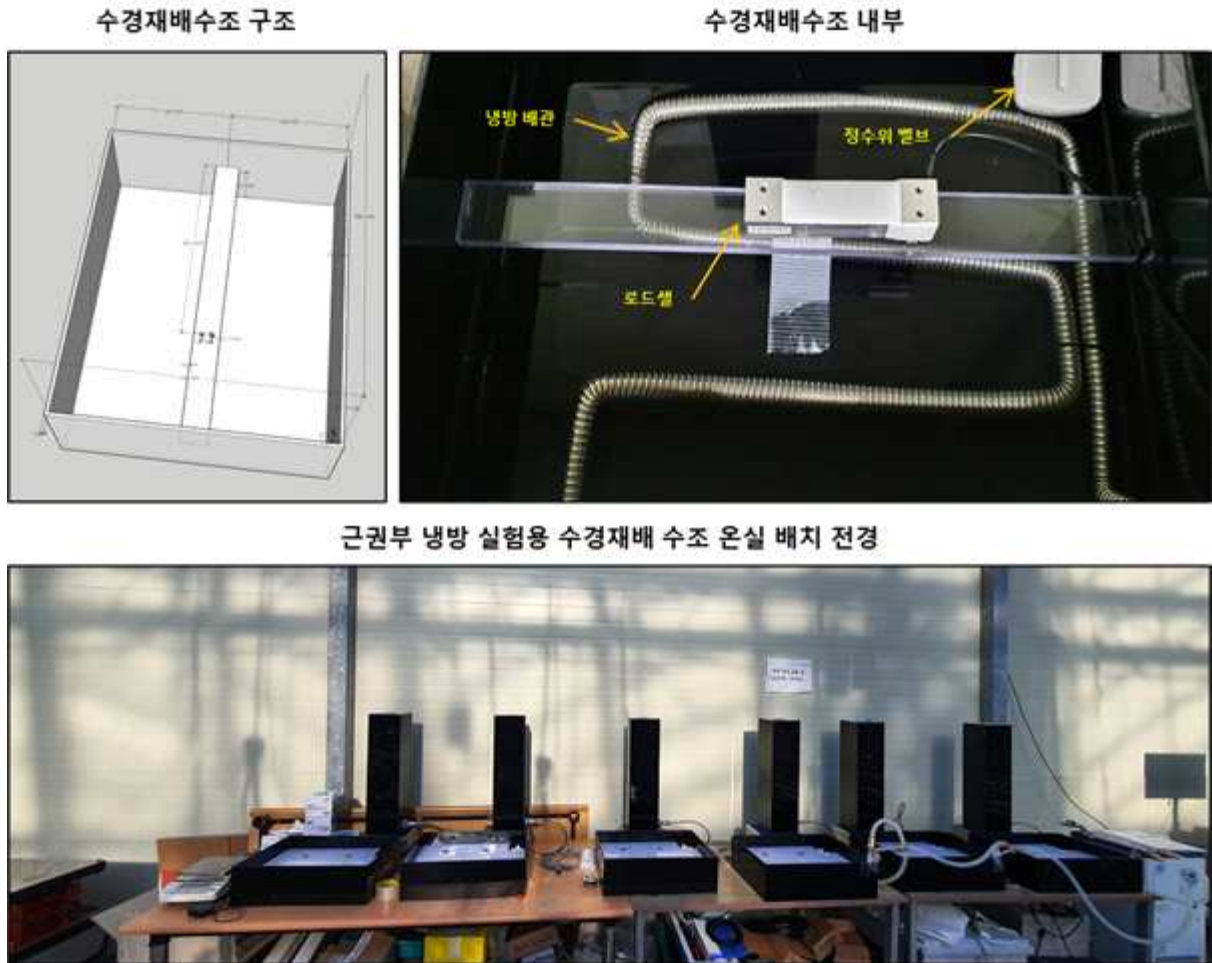
[그림 10. 재배 작기 진행 중 적엽, inter-lighting 처리에 따른 재배 시스템 내 주요 변수(수확량, 증산, 배액량, 배액 EC) 영향에 대한 주성분 분석(Ahn 등, 2022)]

- 비냉방 조건에서의 간접적인 식물, 환경 파라미터의 조절을 통해 확인한 환경-수확량 동요 요인을 파악하였으며, 냉방 처리 또한 환경-증산량-수확량 관계에 미치는 영향이 유사할 것으로 판단됨.
- 기본적으로 식물 재배에서 공기 온도 조절의 기술적 의미는 식물 내부의 생화학적 대사 과정의 적정 조건을 제공에 있음.
- 그러나 본 분석 결과는, 실질적인 재배 시설에서 온도 조절의 영향이 재배 시스템의 여러 변수와 결합되어 있음을 시각화하며, 온도 조절의 기술적 효과를 극대화하기 위해서는 관수 제어의 최적화가 동반되어야 한다는 것에 대해 시사하는 바가 있음.

다. (엽채류) 근권부 온도별 양분 흡수 패턴, 미생물 변화, 생육조사

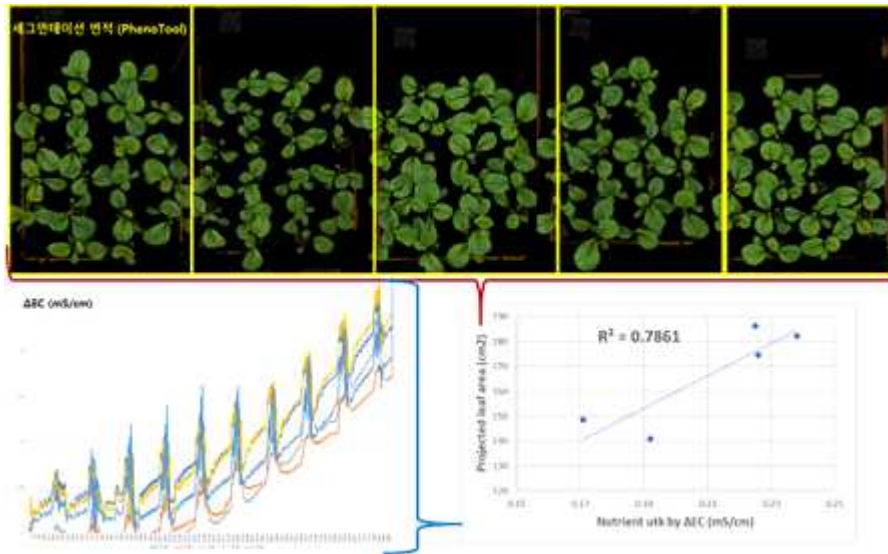
- 온실 내 온도 조절은 증산 외에도 식물의 양분 흡수에도 영향을 미칠 수 있음.
- 식물의 양분 조건은 증산과 마찬가지로 재배 시스템의 양수분 공급 체제에 직접적인 영향을 받는 관계에 있으며, 양분의 흡수 현상도 온도 조건의 영향 아래에 있음.
- 엽채류의 경우 일반적으로 순수 수경조건에서 재배가 이루어지며, 순수 수경조건은 고품배지경에 비해서 냉방 시설과 직접적인 열교환에 유리함.
- 냉방조절 기술의 활용성 확장을 위해 근권부 온도 조절의 효과를 조사하고 그에 따른 기술적 개선점 파악을 위한 실험 체계를 구축하였음(그림 11).

- 본 실험을 위해 순수 수경재배 수조 6대를 배치하였으며, 이 중 3대는 쿨러를 통한 냉수 방열관을 침지시키고, 3대는 비냉방 조건 대조구로써 별도로 근권부 온도 조절을 적용하지 않음.



[그림 11. 근권부 냉방 실험용 수경재배 수조]

- 근권부 온도 처리에 따른 식물 생육 변화를 시계열 상에서 동적으로 비교하기 위해 식물 증량 계측을 위한 로드셀을 재배 상판과 수조 사이의 거치대에 설치함.
- 또한, 식물의 양분 흡수량 변화를 파악하기 위해 양액 공급수조의 공급 배관 말단에 정수위 밸브를 설치하여 재배 수조의 수위변화는 상수(constant)로 나타나도록 설정하였음.
- 식물 증산을 통해서 재배 수조 내에 물이 감소하더라도 수위는 변하지 않으며, 이로 인해 수조 내 EC 변화값은 식물의 전체 양분 흡수량으로 변환 가능(그림 12).
- 더불어, 재배 수조 내의 수위가 변하지 않는 대신 식물이 증산한 만큼 양액 공급수조의 수위가 감소하므로 이때의 양액 공급 수조 무게 변화를 로드셀로 측정하여 작물의 생육, 양분 흡수, 증산을 동시 측정할 수 있는 시스템을 구축하였음.

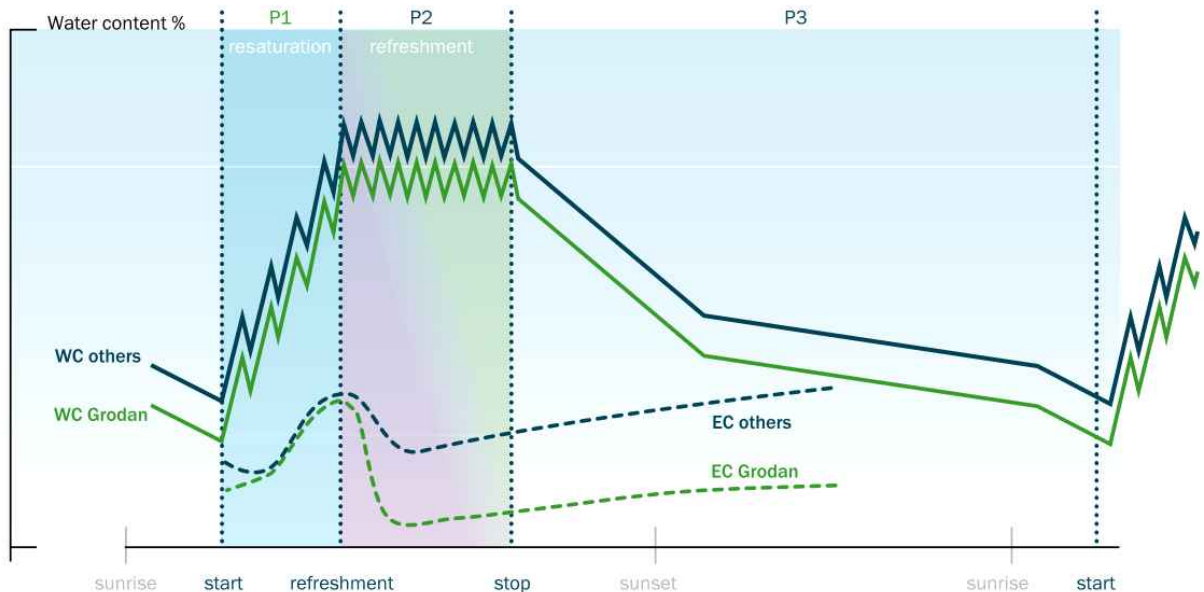


[그림 12. 수경재배 수조 재배 및 EC 센서+정수위 기반 양분 흡수량 추정 데이터 예비실험, 투영
 엽면적과 EC 센서 기반 양분 흡수량 상관관계 비교]

- 본 시스템을 통해 수집된 데이터를 활용하여 근권부 냉방 기술의 최적화 요인과 더불어 근권부 냉방/비냉방 조건에서의 근권부 미생물 농도 변화 또한 조사하여 냉기저장기술 활용성의 확장 영역을 탐색할 계획임.

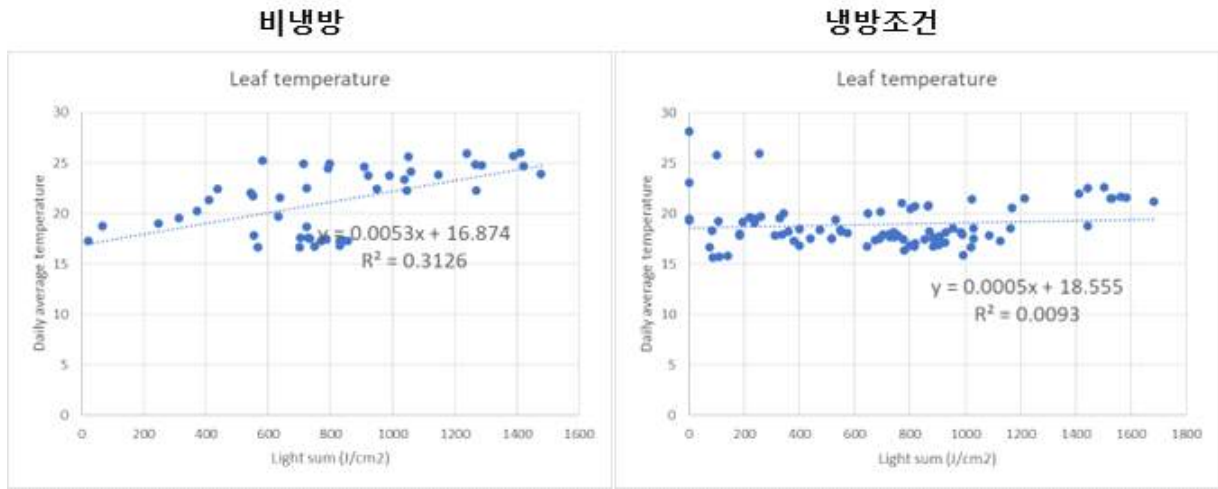
라. 냉기저장기술 적용 재배 시스템에서 관수 방법 설계

- 재배자-재배 시스템-작물 간의 데이터 흐름은 수경재배 시스템에서도 증가하고 있으며 특히 관수량, 배액량, 배액률, 잠재 증산량 등의 지표 체계를 기반으로 한 수분관리 연구 및 기술 개발이 활발하게 이루어지고 있음.
- 식물의 수분 관리는 근권부 함수율, 배지 중량, 일사, 시스템의 유량, 습도와 같은 물리량 센싱 통해 획득되는 데이터 체인이 잘 구축되어 있으며 농가의 효율적인 수분관리를 위한 의사결정에 활용되고 있음.
- 그러나 상업농가 현장에서의 의사결정은 작물의 영양생장, 생식생장, 분배에 관련된 생육정보와 근권부 센싱 데이터의 종합적 분석이 수분관리와 연결되는 수준까지 고도화 되어 있음.
- 최근의 연구는 농가에 전개된 수경재배 시스템의 수분관리 센서 플랫폼을 기반에서 획득되는 데이터를 고차원의 번역된 식물 상태 정보로의 스트림으로 만들기 위한 방향으로 확장되고 있음.
- 일반적으로 농가에서 일단위로 수행되는 수분 제어의 목표는 아래와 같음.
 - - 함수율 편차를 일정 범위 내에서 유지함.
 - - EC 변화를 안정적인 범위 내에서 유지함.
 - - 일출 후에는 야간의 관수 휴지기 동안 감소한 증산량을 채우는 단계로 배치.
 - - 일몰 전 기준 시간에 따라 관수 중단을 실시하 함수율의 자연 감소를 유도.

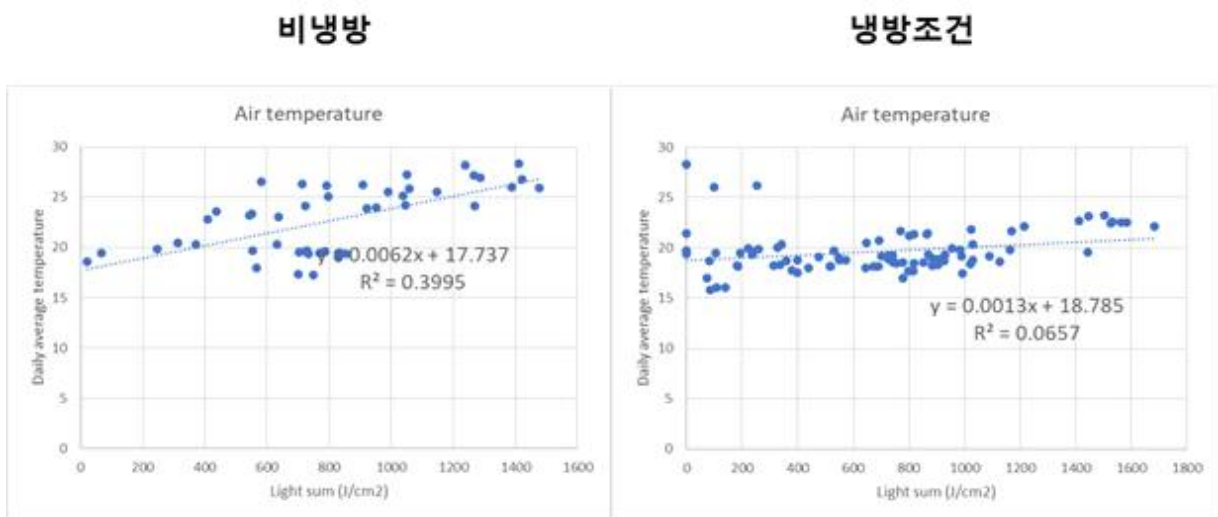


[그림 13. 일중 수분 관리 패턴의 예시(출처: Grodan)]

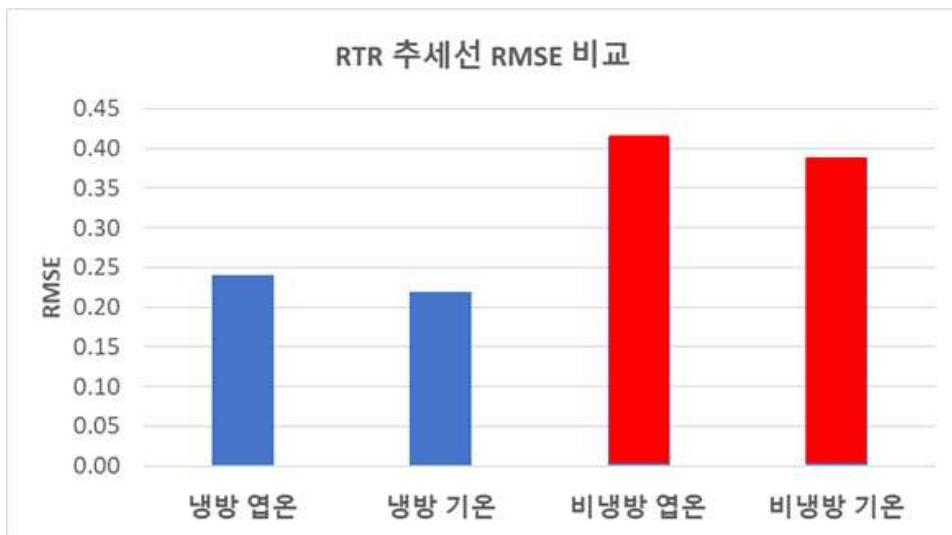
- 그림 13과 같은 일변화 패턴 기반의 관수 자동화는 현재 기술 수준에서 함수율 데이터와 EC 데이터를 센싱값을 바탕으로 구현 가능.
- 그러나, 실제 농가의 수분관리 기술은 재배작물의 전체 생활환에서 영양생장/생식생장 및 식물의 지상부/지하부 발달과도 밀접하게 연결되어 있으며, 이는 현재 자동화 측면에서 기술적인 어려움이 있음.
- 재배 작물의 최초 정식 후에는 뿌리의 활착이 중요하며, 이 시기에서는 건조 스트레스 구간이 설계되어 있음.
- 재배 초기의 건조 스트레스 구간에서는 식물이 수분을 흡수하기 위해서 세근을 많이 발달시키게 되며, 건조 스트레스 구간을 통해 세근 발달이 어느정도 수행이 되면 농가는 관리 방향을 정상 수분관리 구간으로 전환하게 됨.
- 파프리카의 착과기에 맞춰 정상 수분관리 구간으로의 전환이 제대로 이루어지지 않았을 경우, 파프리카 과실 발달의 스트레스로 작용하게 되며 배꼽썩이과의 발생률 증가로 이어지게 됨.
- 이처럼 관수의 자동화 전략을 재배작기 전체로 확장하고자 할 경우, 식물의 발달과 세력에 대한 상태 지표가 필요하게 됨.
- 전술한 바와 같이 일반적으로 식물 재배 기간동안의 관수 관리는 작물의 세력 수준에 근거하여 영양/생식생장의 관리가 이루어지며, 이에 대한 환경제어 측면에서의 관리 방향은 전문 재배 컨설턴트의 생육진단에 근거하여 설정될 수 있음.
- 영양/생식생장의 조절에 있어 참고 가능한 경험적 지표로써 RTR(Ratio Temperature to Radiaton)이 네덜란드 시설원에 그룹을 통해 제시된 바 있으며, RTR의 기본적으로 식물의 동화와 소모에 근거하고 있음.
- 이는 식물의 세력 수준과 밀접한 환경요인은 광과 온도이며, 광은 식물의 탄소동화작용을 통한 동화산물의 생성에, 온도는 호흡 작용에 직결되어 있는 지표이기 때문에 이에 근거하여 식물의 세력 관리가 이루어질 수 있음.
- 그러나 본 지표는 경험적인 지표로써 이 지표만을 근거로 자동제어 피드백 루프를 설계하는데는 위험요소가 있음.
- 본 연구에서 냉방 챔버를 활용하여 RTR을 계산하였을 때 냉방/비냉방 조건에 따라 RTR 관계가 냉방 조건에서 기울기가 낮아지는 것을 확인함.



[그림 14. 비냉방, 냉방 조건에서의 RTR 지표 변화, 엽온(2022년 1월~7월 냉방/비냉방 챔버 데이터), 재배작목: 파프리카]



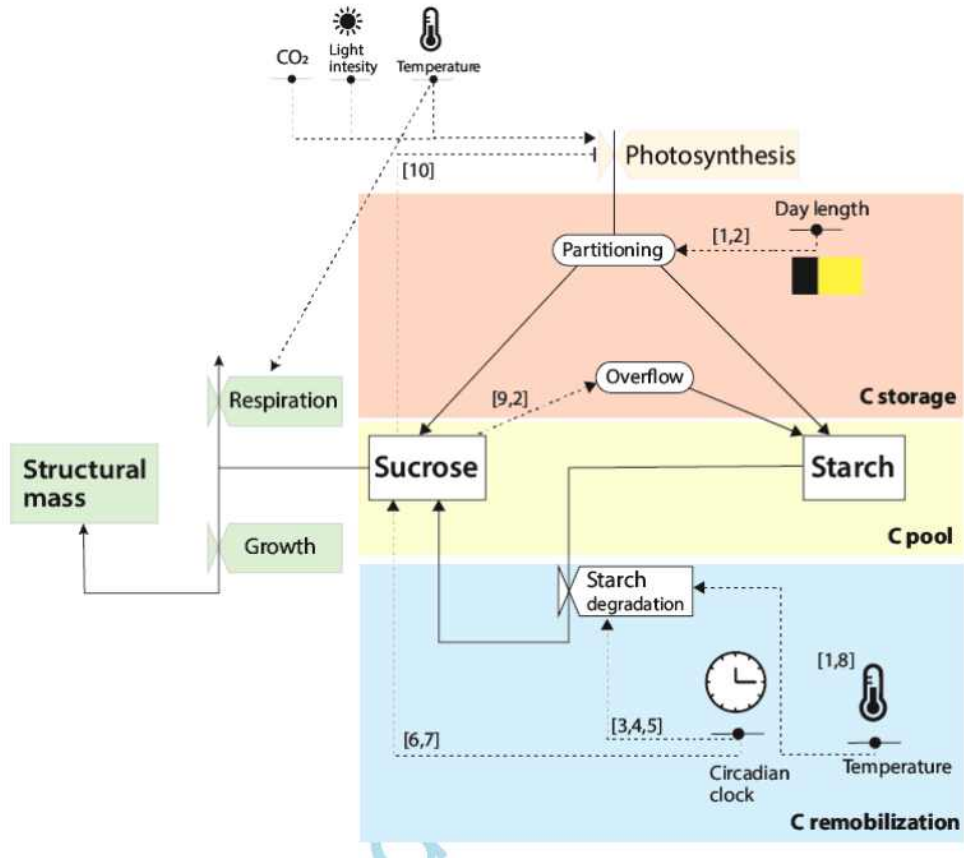
[그림 15. 비냉방, 냉방 조건에서의 RTR 지표 변화, 기온(2022년 1월~7월 냉방/비냉방 챔버 데이터), 재배작목: 파프리카]



[그림 16. 비냉방, 냉방 조건에서의 RTR 추세선의 RMSE 비교(2022년 1월~7월 냉방/비냉방 챔버 데이터), 재배작목: 파프리카]

- 그림 14는 냉방/비냉방 조건에서의 엽온 기반 RTR 관계를 나타내고 있으며, 그림 15는 냉방/비냉방 조건에서의 기온 기반 RTR 관계를 나타내고 있음.

- 엽온 기반 데이터의 경우 냉방/비냉방 데이터 모두 기온 기반 데이터에 비해 상대적으로 낮은 기율기를 보이며, 식물 증산에 따른 엽온 냉각 효과를 냉방/비냉방 조건 모두에서 나타냄.
- 특히, 엽온의 경우 냉방 조건에서 RTR 기율기가 90% 수준으로 감소됨이 확인되었으며, 이는 기온이 비냉방 조건 대비 냉방 조건의 RTR 기율기가 80% 수준으로 감소된 수준보다 높게 나타남.
- 일반적으로 RTR 기율기는 양의 상관관계를 나타내며, 이는 일사량이 증가함에 따라 온실 내부로 유입되는 복사 에너지의 증가에 따른 자연적인 관계를 따르고 있음.
- 그러나, 온실 재배 조건에서는 복합환경조절 기술을 통해 이 관계를 조절할 수 있으며, 이에 따라 작물은 동화와 소모의 밸런스를 적절하게 조절할 수 있음.
- RTR 기율기가 너무 높을 경우 식물이 광합성을 통해 고정한 동화산물의 소모량이 증가하게 되며, 생식생장으로의 시그널로 작용할 수 있게됨.
- 자연환기 기반 비냉방 온실에서의 RTR은 광의 유입에 따른 온실의 재배 작물 내 동화산물의 축적(작물 세력의 증가)과 연쇄적으로 이어지는 온도 증가에 따른 동화산물의 소모량 증가와의 trade-off 관계에 있는 것으로 판단할 수 있음.
- 그러나 냉방 온실의 경우 광량 증가에 따른 기율기 증가를 최소화할 수 있으며, 이는 냉방을 통해 동화산물 소모량 증가와의 trade-off 관계를 기술적으로 해소할 수 있는 영역이 있음을 시사함.
- 이와 유사한 trade-off 해소작용을 기대할 수 있는 다른 기술적인 온실재배관리 방식으로는 LED 보광이 있을 수 있음.
- LED 보광은 작물 잎 표면으로의 열복사는 최소화하면서 식물 균락의 광합성을 증가시킬 수 있음.
- 즉, 효율적인 냉방기술의 적용 시 온실의 내재적인 trade-off 관계를 해소하여 고도화된 작물환경조절기술로의 단초를 기대할 수 있음.
- 또한, 온실 내에서 냉방 조건이 적용될 경우 RTR 추세선의 RMSE 값도 감소하는 것을 확인하였으며, 광량 대비 온도 변화의 편차가 비교적 낮게 유지되었음을 확인할 수 있었음.
- 현재 RTR의 경우 네덜란드에서는 범용적으로 사용되나 대부분 경험적인 관점에서 활용되고 있음.
- 본 연구에서는 RTR 개념을 관수 프로그램으로 연계 활용하여 식물의 전체적인 생활환에 있어 자동화가 가능한 관수 모델 설계를 계획하고 있음.
- RTR은 작물의 영양/생식생장 관리에 활용될 수 있으며, 이를 조절하기 위한 복합환경 제어 수단 중의 하나로 근권부 수분 관리가 활용되고 있음.
- 즉, RTR과 근권부 수분관리는 작물의 영양/생식생장 발달 관계와 시스템적으로 연결 고리가 형성되어 있으며, RTR의 Radiation 과 Temperature는 모두 온실 내에서 기본적으로 계측·수집되는 데이터에 해당하기 때문에 이를 연계하여 확장할 경우 작물 재배 생활사 전체 시계열 상에서의 관수 자동화로의 단초를 제공할 여지가 있음을 시사함.
- 또한, 광과 온도 변화는 모두 직간접적으로 온실내 포화수증기압차(Vapor Pressure Deficit, VPD)에 영향을 미치며, VPD는 작물의 기공 전도도에 영향을 미칠 수 있음.
- VPD는 작물 증산 모델에서 광에 이어 중요한 인자로 사용되고 있기 때문에 온실 내 냉방 조건에서 기존 환기 기반 온실에서의 증산모델이 적합하지 않을 수 있으며, 이를 온실 냉방 조건에 특화된 증산 모델로 확장하기 위한 고려가 필요함.



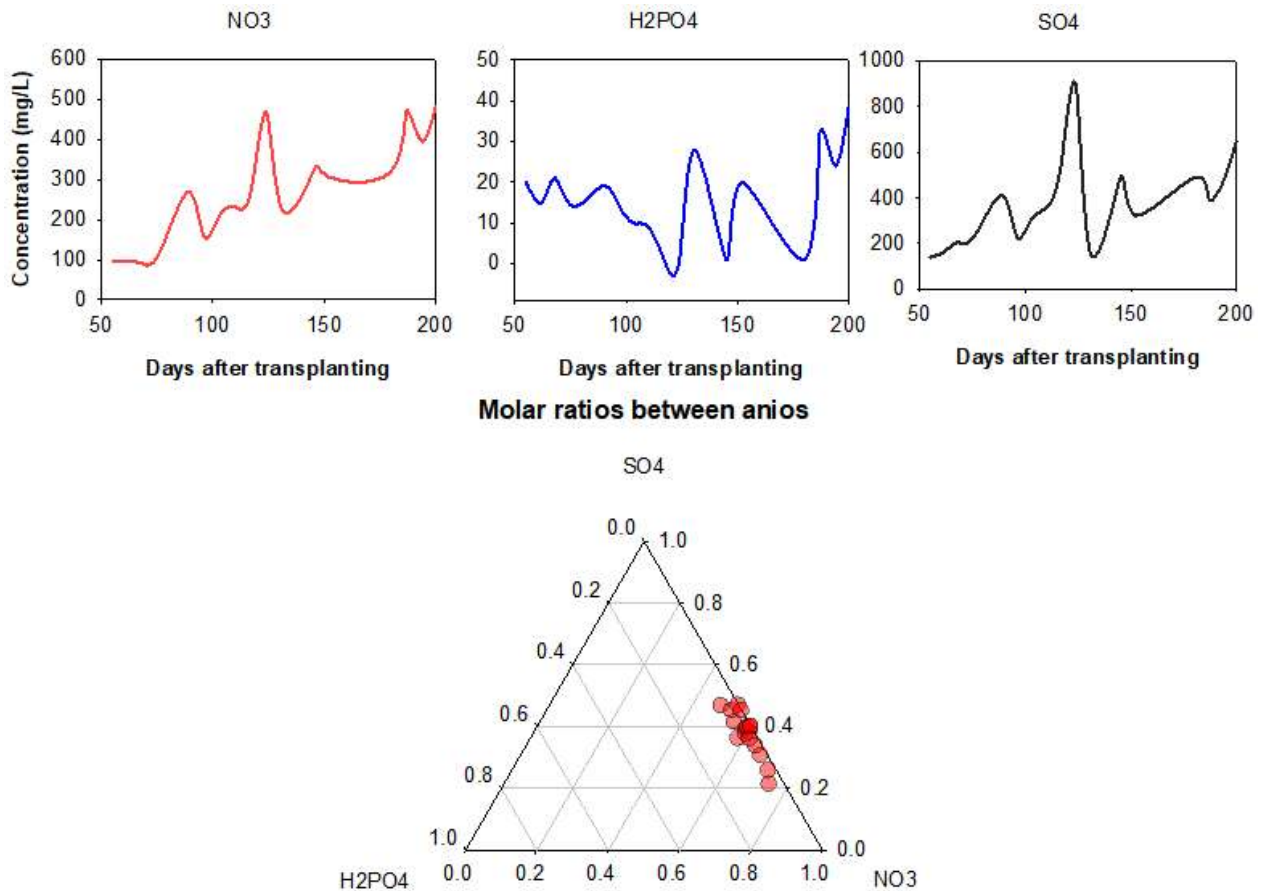
[그림 17. 식물 내 탄소플과 일장, circadian clock, 온도, 광 변화와의 연계 해석을 위한 모델 예시(참조: *in Silico Plants*, Marcelis 등(2022))]

- 냉방 조건에서 관찰될 수 있는 이러한 특징은 온실 내 에너지 투입-작물생육 관계에 있어 trade-off 관계의 해소와 이를 통한 온실 농업의 지속가능성 향상과의 밀접한 관계가 기대되는 바 시스템적 관점에서 추가적인 분석이 필요하며, 이를 바탕으로 기술화의 단초를 확보할 필요가 있음.
- 본 연구에서는 RTR, 작물상태변수(세력,영양/생식생장 전환), 수분관리와 연계 해석을 위해 관련 환경요인 및 데이터와 접점을 가지고 있는 식물 내 carbon-flux 모델(그림 17)을 활용하여 자동화 관수 체계의 이론 수립 및 기술화 기반을 확보하고자 함.

마. 냉기 저장 활용 기술 적용 온실의 친환경 순환식 수경재배 양분관리 체계 수립, 미생물 변화, 생육조사

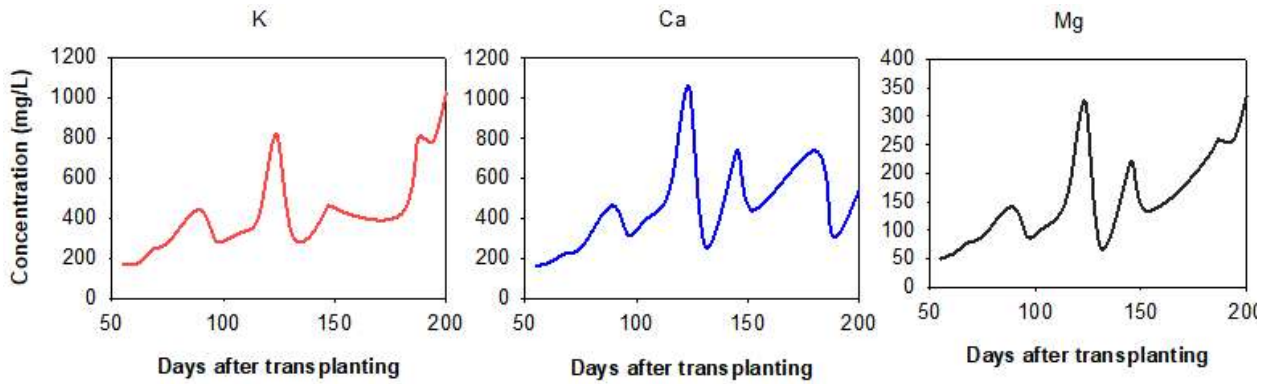
- 본 연구에서 구축한 냉방조건(냉방 챔버활용, 냉방조건 구현)에서 순환식 수경재배 방식을 적용했을 때의 양분 농도 변화 양상을 조사하였음.
- 음이온의 경우 NO₃, SO₄에서 전체적으로 증가하는 경향이 관찰되었으며, H₂PO₄의 경우 매우 결핍 구간까지 하강하였다가 다시 회복되는 경향이 관찰됨(그림 18).
- 이를 양분 간의 몰비율로 변환했을 경우 이러한 변화 경향은 NO₃와 SO₄를 중심으로 변동함이 확인되었음.
- 이러한 변화 경향은 일반적인 수경재배 조건에서 확인되는 변화 경향으로 냉방 조건에서 크게 특이하게 평가할 만한 변화 양상이 관찰되지는 않았음.
- 순환식 수경재배의 경우 적절한 양분 교정 과정이 적용되지 않으면 음이온 내

NO₃:SO₄ 변화는 H₂PO₄의 결핍 영역까지 포함하여 변동할 수 있기 때문에 이러한 양분 균형 변화를 적정 범위 안에서 유지할 필요가 있음.

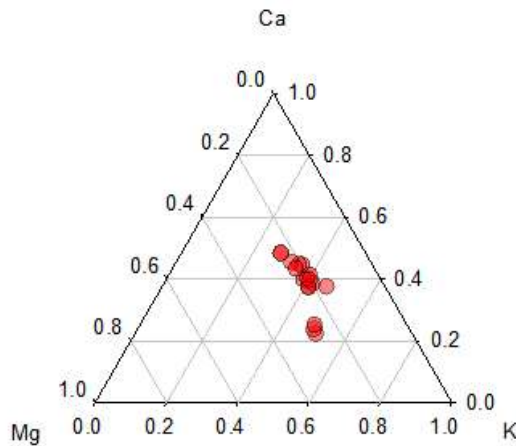


[그림 18. 냉방챔버 조건에서의 순환식 수경재배 음이온 농도 및 비율 변화]

- 양이온의 경우 전체적으로 증가하는 경향이 관찰되었음(그림 19).
- 이를 양분 간의 몰비율로 변환했을 경우 이러한 변화 경향은 K와 Ca를 중심으로 변동함이 확인되었음.
- 이러한 변화 경향은 음이온의 균형 변화 경향과 마찬가지로 일반적인 수경재배 조건에서 확인되는 변화 경향으로 냉방 조건에서 크게 특이하게 평가할 만한 변화 양상이 관찰되지는 않았음.
- 전반적으로, 냉방 챔버 조건에서 관찰된 양분 균형 변화 경향으로 비추어보면 냉방 챔버의 경우도 일반온실 순환식 수경재배 조건 대비 특별한 파라미터의 변동 없이 양분 균형관리가 가능할 것으로 판단됨.



Molar ratios between cations



[그림 19. 냉방챔버 조건에서의 순환식 수경재배 양이온 농도 및 비율 변화]

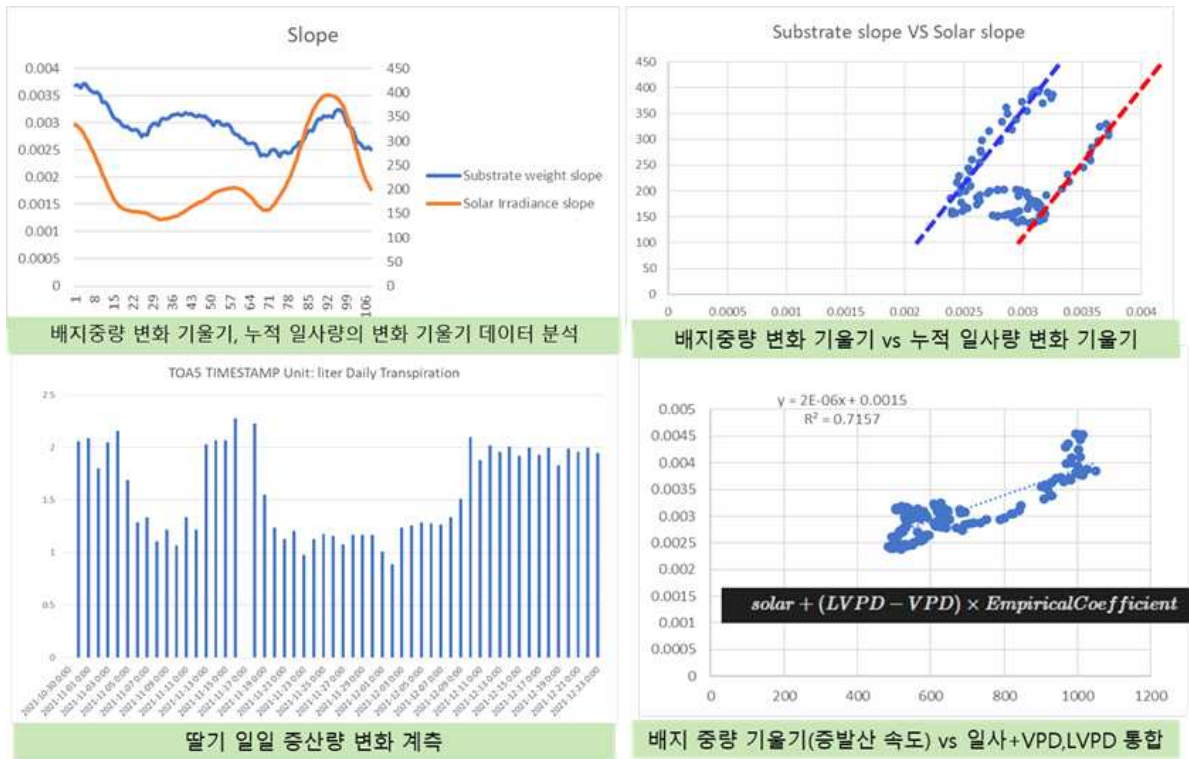
- 냉방챔버 시스템에서의 순환식 수경재배 시스템의 미생물 농도 변화를 조사하였을 때 그림 20과 같은 변화 양상이 관찰되었음.
- 총대장균, 진균류 일반세균은 재배가 개시됨과 동시에 일제히 증가하였으며 초기 lag-phase를 지나면서 점차적으로 증식속도가 빨라지는 경향이 관찰되었음.
- 빠른 증식구간을 지나면서 전체적으로 미생물의 증식은 포화되거나 감소되는 양상이 관찰되었으며 이 구간은 미생물 분류군 별로 각각 총대장균 약 1900~2200 CFU/100mL, 진균류 3000~4000 CFU/mL, 일반세균 9000~12000 CFU/mL 사이에서 관찰되었음.



[그림 20. 냉방챔버 조건에서의 순환식 수경재배 미생물 농도 변화, 2022년 1월~5월]

- 이러한 변화 경향은 본 연구팀이 이전 연구를 통해 조사한 UV 살균 조건에서의 순환식 수경재배 시스템 미생물 농도 변화 경향과 유사한 경향으로 판단됨.
- 본 연구 조건에서는 UV 살균 장치가 적용되지 않았으며, 미생물 농도 증식의 포화 지점이 이전 연구에 비해 다소 높은 수준에서 관찰되었으나, 이전 연구(저널: Journal of

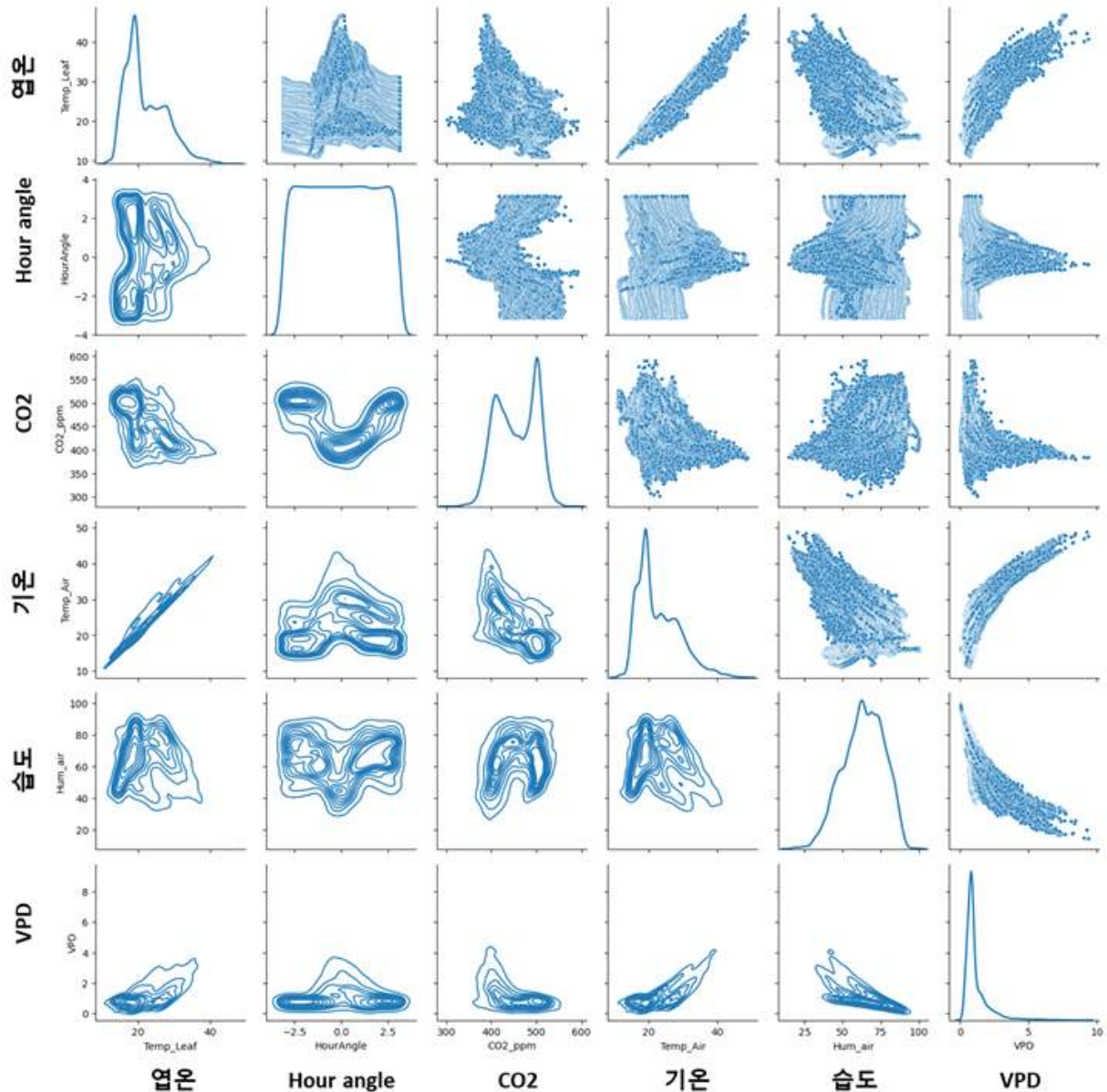
Cleaner Production, 제목: Nutrient recirculating soilless culture system as a predictable and stable way of microbial risk management, 안 등(2021))에서 고찰한 순환식 수경재배 미생물 다이내믹스 관리 관점이 동일하게 적용될 수 있을 것으로 생각됨.



[그림 21. 냉방챔버 조건에서의 딸기 증산량 및 관련 환경 요인 관계 변화]

- 냉방챔버 조건과 작물 생육지표와 관련된 증산량의 영향을 확인하기 위해 본 연구에서 조성한 냉방챔버 환경에서 딸기의 증산량을 조사하였음(그림 21).
- 냉방챔버의 일사량 데이터, 배지중량 데이터 변화를 활용하여 누적 일사량의 변화 기울기와 배지중량의 변화 기울기 데이터를 추출하였음.
- 두 요인의 기울기 변화는 각각 실제 증산량과 증산에 영향을 미치는 일사량의 변화 경향을 나타냄.
- 냉방챔버의 누적일사량 기울기와 증산량 변화의 상관관계를 비교하였을 때 서로 다른 두 개의 기울기 그룹이 관찰되었으며, 이는 냉방 조건에 따라 증산에 영향을 미치는 환경 요인의 가중치 변화가 있었음을 시사함.
- 그러나, 이러한 변화 경향은 일사량, VPD만 고려한 경험식보다 일사량, Leaf VPD, VPD를 활용한 경험식으로 추정하였을 때 통합되는 것을 확인하였으며, 냉방/비냉방 조건이 기존의 Leaf VPD-VPD-일사량 사이의 관계식에 영향을 미쳤음을 시사함.
- 이러한 냉방조건에서의 환경-작물생육지표 변화의 특성은 냉방, 비냉방 조건에서 통합 가능한 통합식의 개발에 있어 추가적인 분석을 통해 모델화 할 필요가 있음.

바. 냉기저장기술 적용 온실의 광, 온도, 습도, 수증기압차 등 환경 데이터-생육 관계 분석

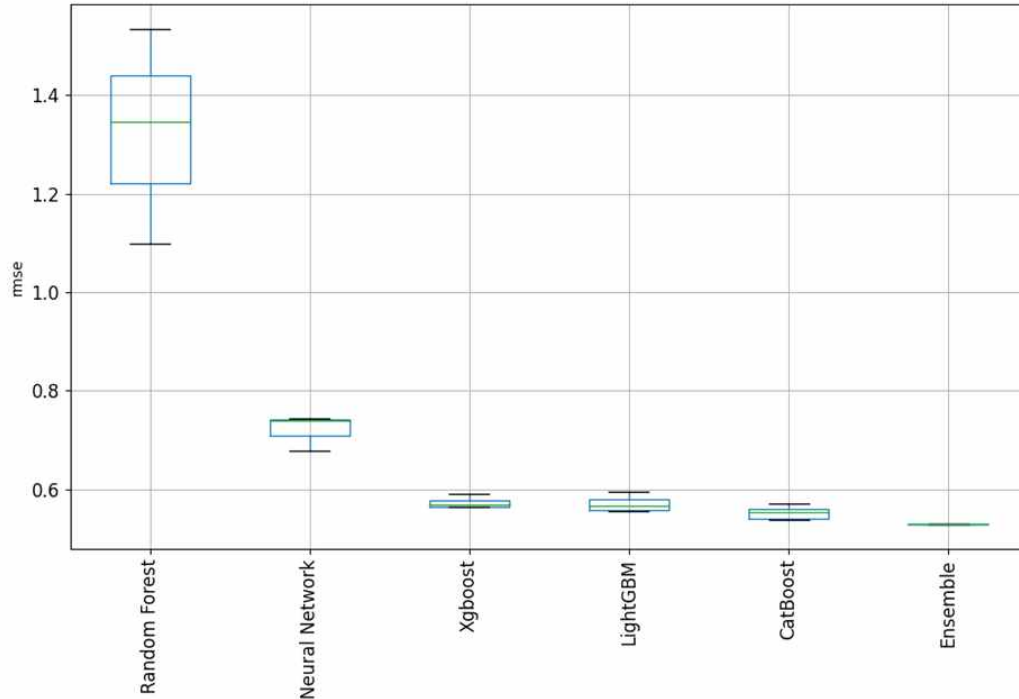


[그림 22. 냉방챔버 내 주요 환경데이터 및 식물 엽온 간의 관계 가시화]

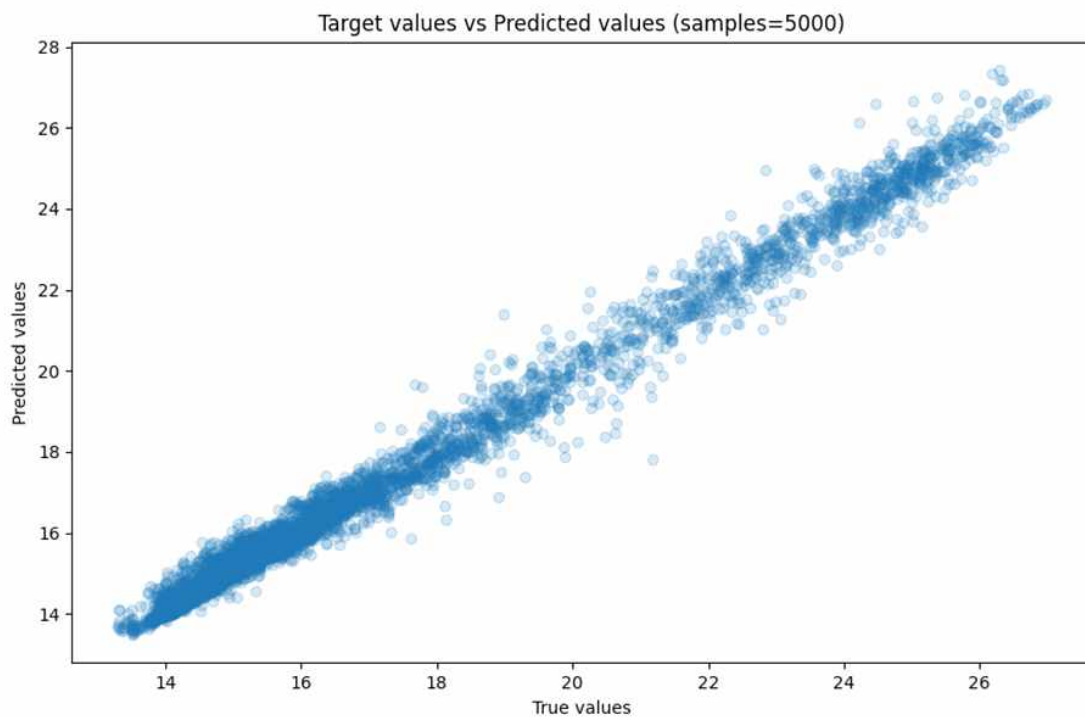
- 냉방챔버 내 데이터 중에서 작물의 생육지표와 직간접적인 관련이 있는 요인은 엽온에 해당하며 엽온을 기준으로 다른 환경 요인과의 관계 지표를 가시화 하였을 때 기온을 제외하고 상관성이 잘 관찰되는 요인은 VPD로 확인되었음(그림 22).
- 엽온과 CO2의 경우 엽온이 낮은 구간에서는 CO2 농도도 낮게 유지되다가 엽온이 증가하면서 CO2 농도도 같이 증가하는 구간, 그리고 엽온농도가 다시 낮아지면서 CO2 농도가 증가하는 구간이 관찰되었으며, 전자의 경우 주간 냉방 조건에 따른 엽온 감소와 광합성량 증가에 의한 챔버 내 CO2 감소 경향으로 추정되며, 후자의 경우 야간의 전환에 따른 엽온 감소 및 호흡에 의한 CO2 증가 경향에서 유래한 것으로 추정됨.
- 습도의 경우 유사요인인 VPD가 엽온이 나타내는 관계와 부의 상관을 나타내었으며, 두 지표의 습도 포화 수준을 나타내는 방식의 차이에 기인함.
- 그러나 습도의 경우 VPD에 비해서 엽온과의 상관성이 상대적으로 선명하게 나타나지

는 않았으며, 이는 수증기압에 해당하는 VPD가 식물의 증산 및 엽온과 더 직접적인 관계를 나타내는 지표임을 시사함.

- 이와 더불어 본 연구에서는 냉방챔버에서 수집된 데이터를 활용하여 주요 환경데이터 간의 관계성을 조사하였으며, 이 과정에서는 ML-Jar 자동화 기계학습 파이썬 패키지를 활용하였음.



[그림 23. 냉방챔버 내 주요 환경데이터 활용 엽온 예측 모델의 RMSE 비교]



[그림 24. 냉방챔버 내 주요 환경데이터 활용 엽온 예측 Ensemble 모델의 validation]]

- ML-Jar는 데이터를 전처리하여 기계학습모델을 구성하고, 최상의 모델을 찾는 과정을 자동화 할 수 있으며, 여러 모델의 파라미터 최적화 과정을 수행함.
- 본 과정에서 엽온을 추정하는데 사용된 환경요인은 CO2, hour angle, 습도, VPD였으며, 이를 대상 모델은 Random Forest, Neural Network, Xgboost, LightGBM, CatBoost로 하였음.
- 이 중에 단일 기계학습 모델로는 CaBoost가 엽온에 대한 높은 예측성능을 나타냈으며, 모든 모델의 복합 사용을 탐욕 알고리즘을 통해 구현한 Ensemble 모델이 모든 모델 중에서 가장 높은 예측 성능을 보여주었음.
- Ensemble 모델은 이미 훈련된 ML 모델들로부터 탐욕 알고리즘을 통해 가중치 앙상블을 생성하는 접근 방식에 해당하며 이 모델을 활용하여 테스트 데이터셋을 검증하였음(그림 24).
- 식물의 엽온은 냉방조건과 비냉방조건 사이에서 가장 핵심적으로 차별화되는 환경요인이며 이에 대한 환경변수와의 관계를 적절하게 추정하는 것은 냉방 조건에서의 수분관리 최적화에 있어 주요 접점으로 활용될 수 있을 것으로 판단됨.
- 이러한 냉방조건외 환경-식물지표 특성을 종합적으로 고려하여 냉방 조건에서의 광-온도 간의 trade-off 해소 요인을 적절하게 활용하기 위한 심화 연구로 연계될 필요가 있음.

사. 냉기저장기술의 재배 활용 기술의 실증 (3차년도)

① 냉기저장기술 적용 재배 시스템에서 자동관수 실증



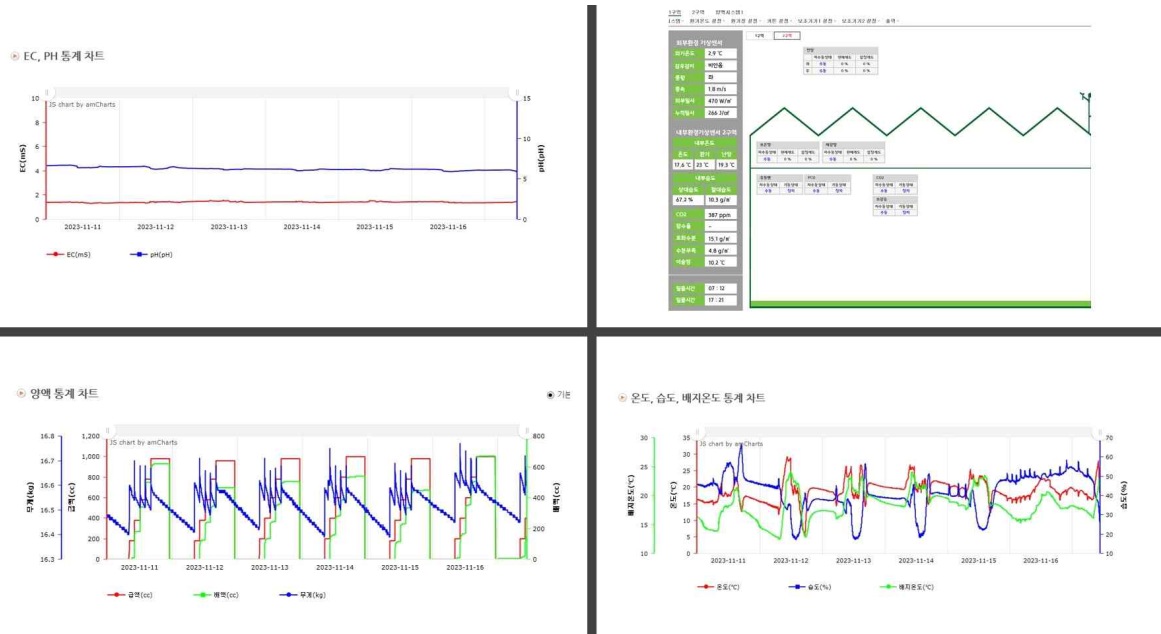
<평창 실증테스트팜>

○ 설계된 자동관수체계에 따른 냉기저장기술이 적용된 온실에서의 재배 실증

- 본 실증 단계 연구는 서울대학교 평창 캠퍼스에 새로 구축된 냉기저장기술 적용 온실에서 일부 수행되었음.
- 온실 시공 완료 시점을 고려했을 때 제한된 시간 동안의 데이터 수집이 가능했으며, 작목은 딸기로 선정되었음.
- 또한 실증 규모의 온실의 완공 전에 동일 기술이 적용된 숙명여자대학교의 실험 온실에서 사전 실증 실험을 수행하였으며, 본 과제의 연구 수행 내용은 새로 구축된 실증 온실, 사전 실증 실험 내용으로 구성하였음.
- 사전 실증 실험의 경우에는 냉방기술 적용온실의 딸기 생체중 증가 효과를 비파괴적으로 평가

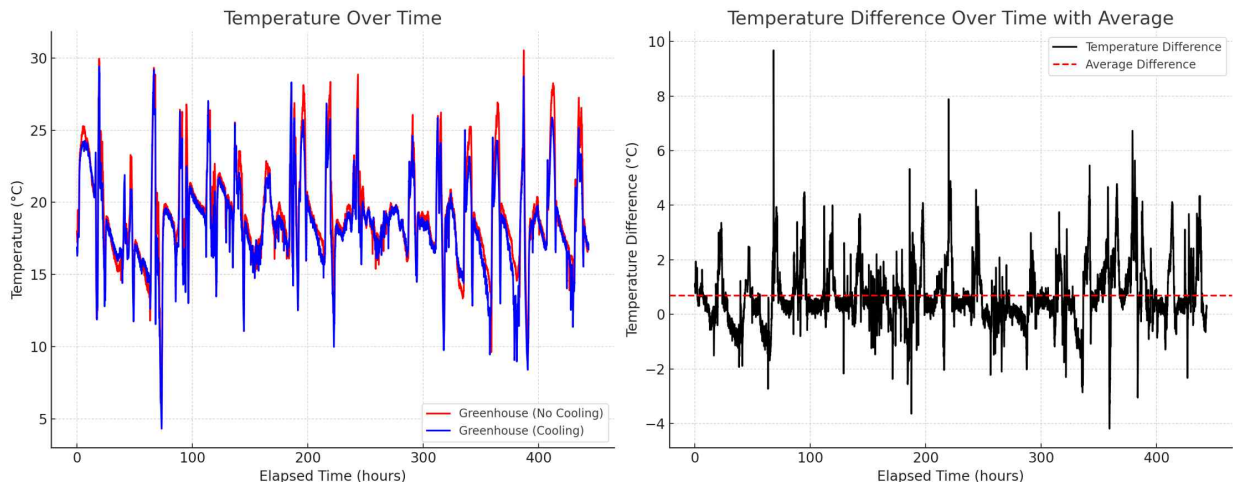
하기 위해 근권부의 이탈이 가능한 분무경 방식의 관수 체계를 채택하였음.

- 평창 실증 온실에서는 본 과제의 연구를 통해 도출한 엽온 추정 모델을 기반으로 LVPD(leaf vapor pressure deficit)를 Penman-Monteith modified 증산 모델의 VPD 항의 입력 변수로 사용하였으며, 이 조건에서의 관수량, 증산량, 관수/증산 비율을 비교하였음.
- 평창 실증 온실은 벨로형 연동 온실을 2개 구역으로 분할하여 1구역은 일반 조건 온실, 2구역은 냉기저장기술 적용 온실로 배치하였음.
- 각 온실의 환경 모니터링 시스템을 체계로 구축하여 작물 재배 데이터와 환경 데이터를 연계하여 해석할 수 있도록 하였음.
- 환경 계측 항목은 경우 온습도, CO₂, 일사량이며, 작물의 직간접적 영향 안에 있는 계측 항목으로는 배지 함수율, 배액량, 배액EC, 배액pH 데이터를 수집하였음.



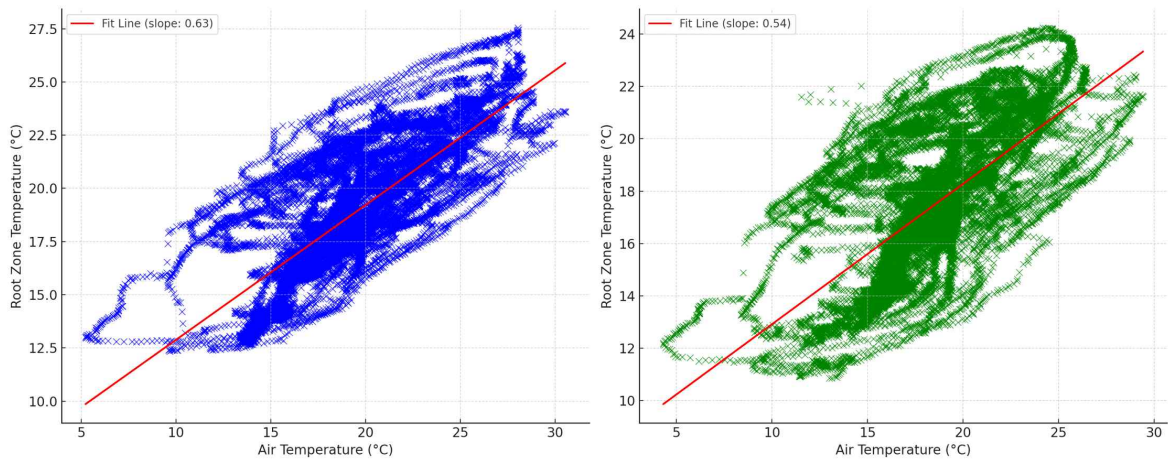
[그림] 냉기저장기술 적용 실증 온실에 구축된 환경 모니터링 시스템

- 평창 실증 온실의 내부 기온의 계측 결과 두 온실 모두 최소 약 10℃에서 최대 약 30℃범위에서 온도의 변동 범위가 계측되었음.
- 냉방 기술 적용 온실의 경우 일반 온실과의 동시간대 온도차(비냉방-냉방온실 온도)의 범위는 최소 약 -2Δ℃에서 최대 약 7Δ℃범위 내에서 변동하였으며, 평균적으로 비냉방 온실에 비해 0.9Δ℃ 범위 내에서 유지되었음.



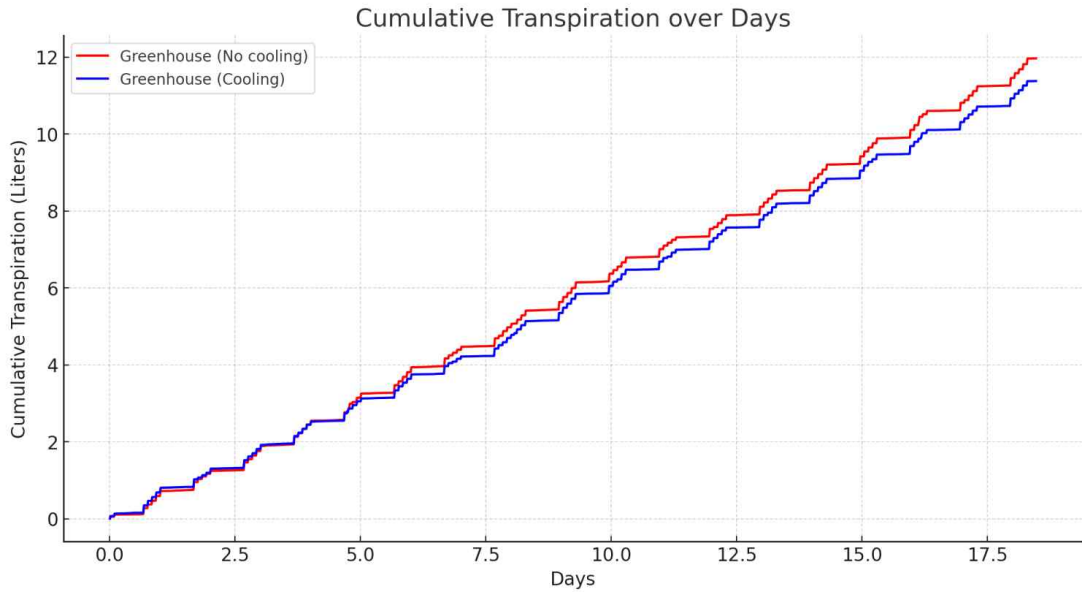
[그림. 평창 실증 온실의 실내 온도 변화(좌)와 온도 차이(우, 비냉방-냉방)]

- 실증 온실 완공 및 부대시설의 설치가 완료된 후 계획이 이루어진 시점이 2023년 추계 임을 고려할 때 생육 범위내로 온도를 제어하기 위한 냉방부하가 크지 않았으나, 평균적으로는 온도 주기의 상방 영역을 비냉방 구간에 비해 낮게 유지할 수 있음을 확인할 수 있었음.
- 온실 내부 냉기의 배출 부위는 배지의 하부에 위치하고 있으며 이로 인해 기온과 근권부 온도의 상관성에 영향이 있을 수 있음.
- 따라서 각 온실의 기온 변화 대비 근권부 온도 변화에 대한 상관 분석을 수행하였음.
- 분석 결과 냉방 적용 온실 구획에서 비냉방 온실 대비 상대적으로 완만한 근권부/기온 온도 변화의 기울기가 관찰되었으며, 본 과제의 이전 연구에서 근권부의 온도 변화의 완만함이 작물의 생산성 개선에 기여하였던 결과를 고려했을 때 근권부 환경 또한 작물 생산에 유리한 환경이 조성될 수 있음을 확인함.

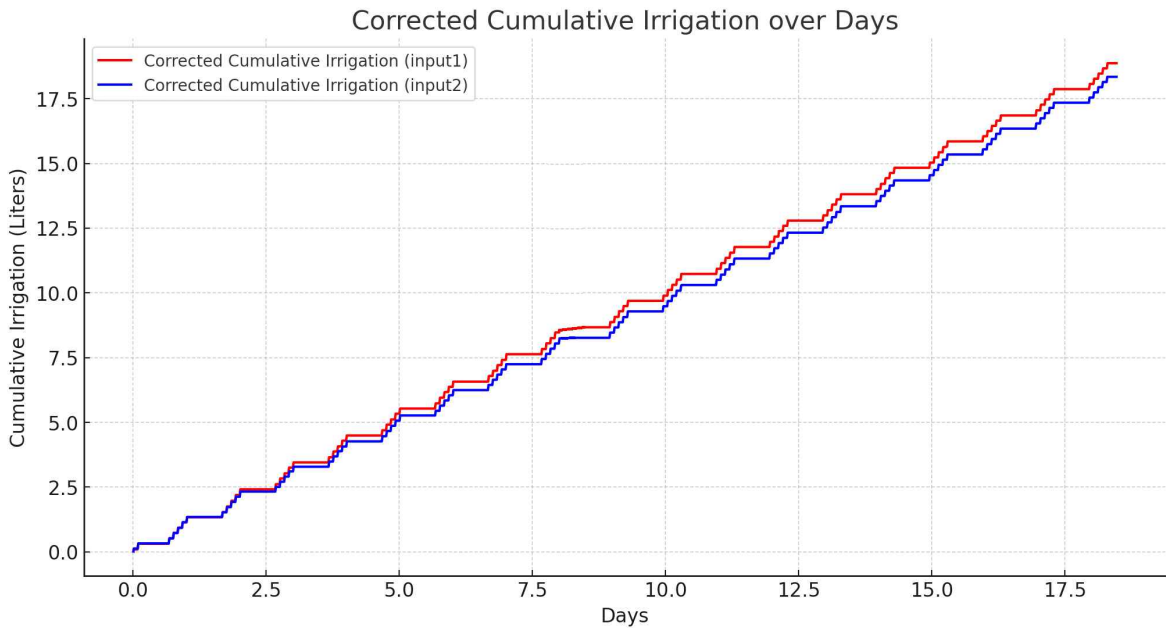


[그림. 평창 실증 온실의 비냉방 온실(좌)과 냉방 온실(우)의 근권부/실내 온도 기울기 비교]

- 이러한 환경 조건 하에서 각 온실의 작물 증산량 변화를 비교하기 위해 배지 증량센서의 증량 변화 데이터를 이용하여 누적 증산량을 비교하였음.
- 누적 증산량의 경우 비냉방 온실의 경우 약 19일간 단일 암면 슬라브 배지에서 약 11.7L의 증산이 이루어졌으며, 냉방 온실의 경우 약 11.0L의 증산이 발생하여, 배지 수준에서 약 6%의 증산량 감소를 관찰할 수 있었음.



[그림. 평창 실증 온실의 비냉방, 냉방 조건에서의 누적 증산량 비교]

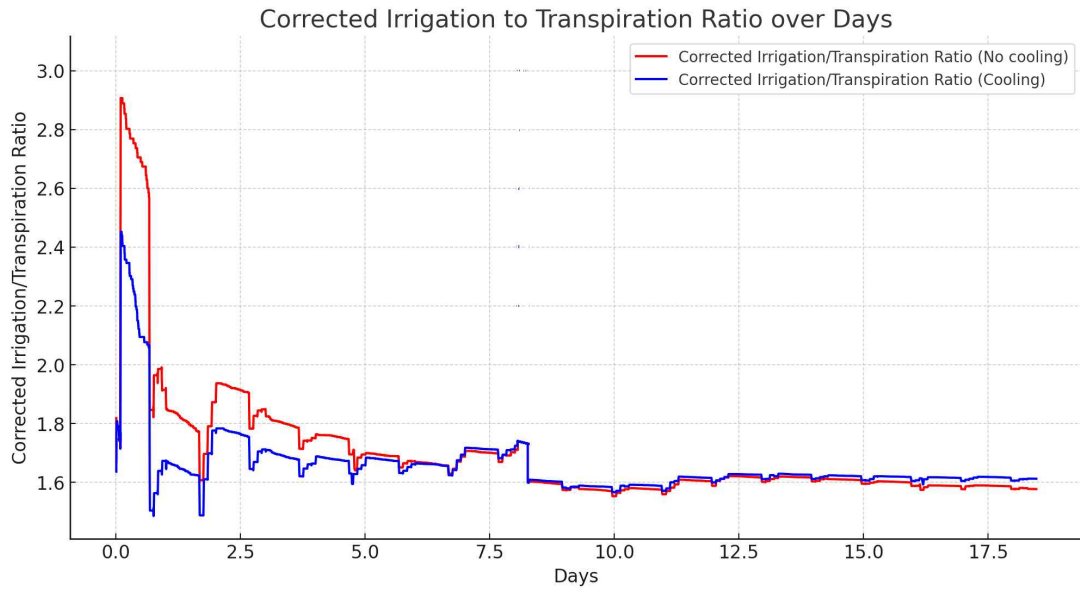


[그림. 평창 실증 온실의 비냉방, 냉방 조건에서의 누적 관수량 비교(red: 비냉방, blue: 냉방)]

- LVPD항 활용 일사비례 기반 관수 모델이 적용된 각 온실 누적 관수량의 경우 비냉방 온실의 관수량이 조금 더 높게 나타났으며(비냉방 관수량 18.9L, 냉방 관수량 17.9L), 냉방 온실의 관수량은 비냉방 온실의 관수량보다 약 5% 적게 관수되었음.
- 비냉방 온실과 냉방 온실의 누적 관수량에서 관찰되는 차이와 그 수준은 누적 증산량 데이터와도 일치하는 경향임.
- 일사비례항만 적용하였을 경우 원칙적으로 그 차이는 기기의 오차 수준 이하에서 관찰되어야 하나, 이러한 결과가 관찰된 것은 냉방기술이 적용된 온실의 일사량, 장파복사, 냉기 공급 및 그에 따른 온실 내 온도 변화, 이에 따른 엽온·LVPD의 변화, 그리고 그에 따른 식물 증산량의 변화가 관수에 적절하게 반영된 결과로 해석됨.
- 또한, 양 온실의 증산량 대비 관수량 변화를 비교했을 때, 딸기의 생육 초기 증산량 대비 과도하게 공급된 관수량의 수준이 비냉방 온실에 비해서 낮게 유지되었으며, 생육 후반으로 넘어가서는 대략적으로 관수량/증산량 비율이 두 온실 모두 1.6 수준에서 유지됨을 볼 수 있었음.
- 이는 냉방 온실에서의 상대적으로 완만한 근권부의 온도 변화 기울기, LVPD를 고려한 적정 관수량 제어, 또한 이러한 효과가 적용된 냉방 온실에서 기대할 수 있는 상대적으로 낮은 기온-

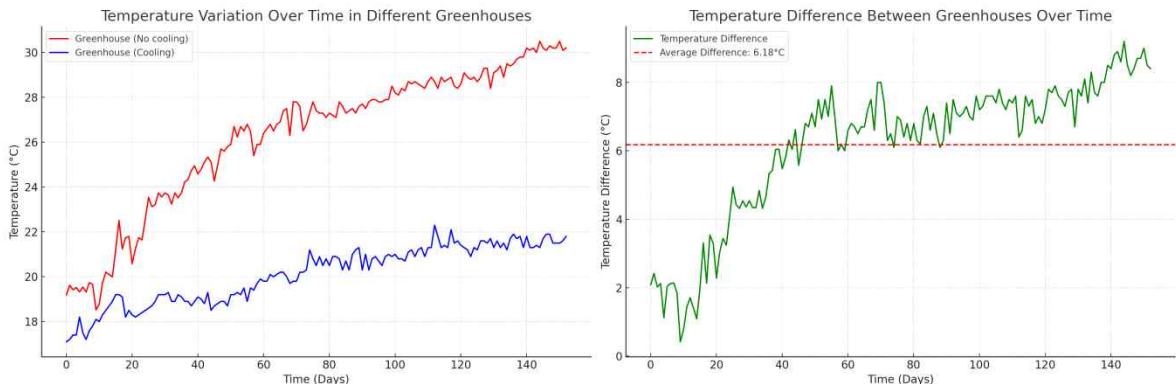
엽온 차이가 복합적으로 영향을 미친 결과로 추정됨.

- 따라서 냉방 적용 온실의 경우 비냉방 조건에서 일반적으로 관찰될 수 있는 일사량, 기온, 엽온 사이의 관계성을 일부 decoupling 할 수 있는 조건이 형성될 수 있는 것으로 유추할 수 있으며, 이는 관수 제어 외란 요인의 안정화, 제어 환경과 작물 재배 조건의 개선 등의 효과를 기대할 수 있음을 의미함.



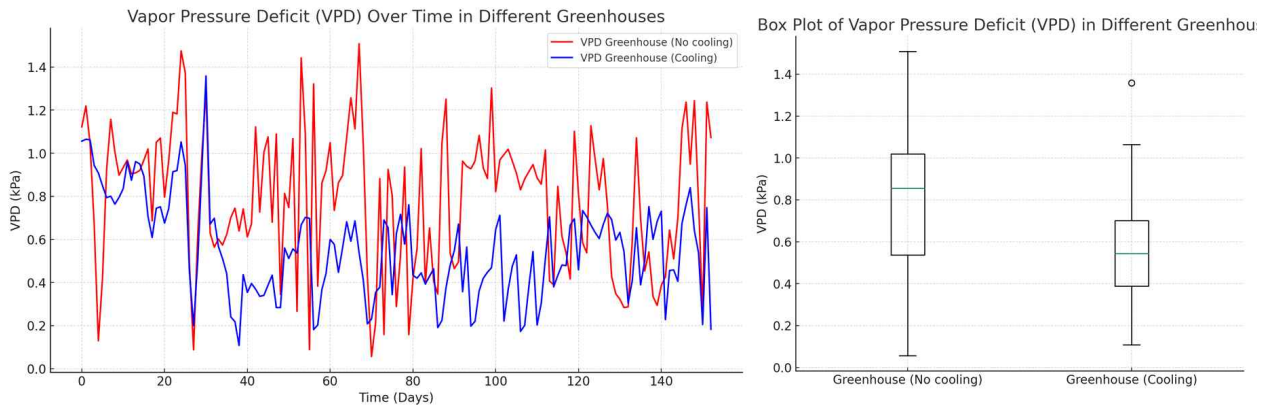
[그림 냉방/비냉방 온실의 증산량 대비 관수량의 비율 변화]

- 평창 서울대학교 캠퍼스의 온실의 완공 전 실증 데이터 수집 공백을 채우기 위해 숙명여자 대학교의 실험 온실 사전 실증 실험을 수행함.
- 전술한 바와 같이 딸기를 공시작물로 활용하였으며 2023년 5월 1일부터 작기를 시작하여 9월 30일에 작기를 종료하였음.
- 본 실증 실험의 경우 비냉방/냉방 적용 조건 하에서의 딸기 개체 생체중 증가를 비파괴적으로 관찰하기 위해 분무경을 적용하였음.
- 본 실험은 2023년 하계 조건에서 냉방기술적용 온실의 작물 생산성을 실증하였음.
- 온실의 기온 변화 계측 결과, 비냉방 온실과 냉방 온실의 온도 차이는 작기 초기인 5월에 약 2°C정도의 온도 차이가 발생했던 반면, 일사량이 증가하는 6, 7, 8월로 작기가 진행이 되면서 비냉방-냉방 온도 차이도 6°C 이상 증가하였음.
- 비냉방-냉방 온실 간의 평균적인 온도 차이는 약 6.2°C로 나타났으며, 모든 재배 기간 동안에 냉방 온실의 온도가 낮게 유지되었음.



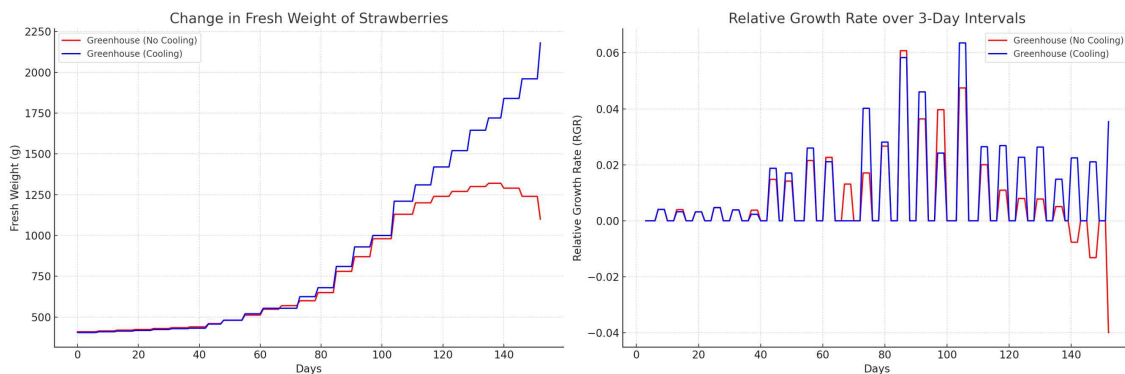
[그림 사전 실증실험 온실의 냉방 비냉방 조건에 따른 온도 변화(좌: 실내 온도, 우: 비냉방-냉방 온도차이)]

- 냉방 온실 VPD의 경우 주로 0.4-0.7kPa 수준에서 분포하였으며, 비냉방 온실의 경우 0.7~1.0kPa로 상대적으로 넓은 범위에서 분포하는 것을 확인할 수 있었음.
- 냉방 온실의 VPD는 상대적으로 증산/광합성에 적합한 범위에서 유지된 것을 확인할 수 있었으며, 비냉방 온실의 경우 더 넓은 범위의 VPD 분포를 확인할 수 있었음.
- 일반적으로 냉각 시스템은 공기를 냉각하는 과정에서 응결수의 발생으로 공기 중의 습도가 제거될 수 있으나, 동시에 기온 저하로 포화 수증기압이 함께 감소하여 이와 같은 VPD의 분포가 관찰된 것으로 생각됨.



[그림 사전 실증실험 온실의 VPD 분포 비교]

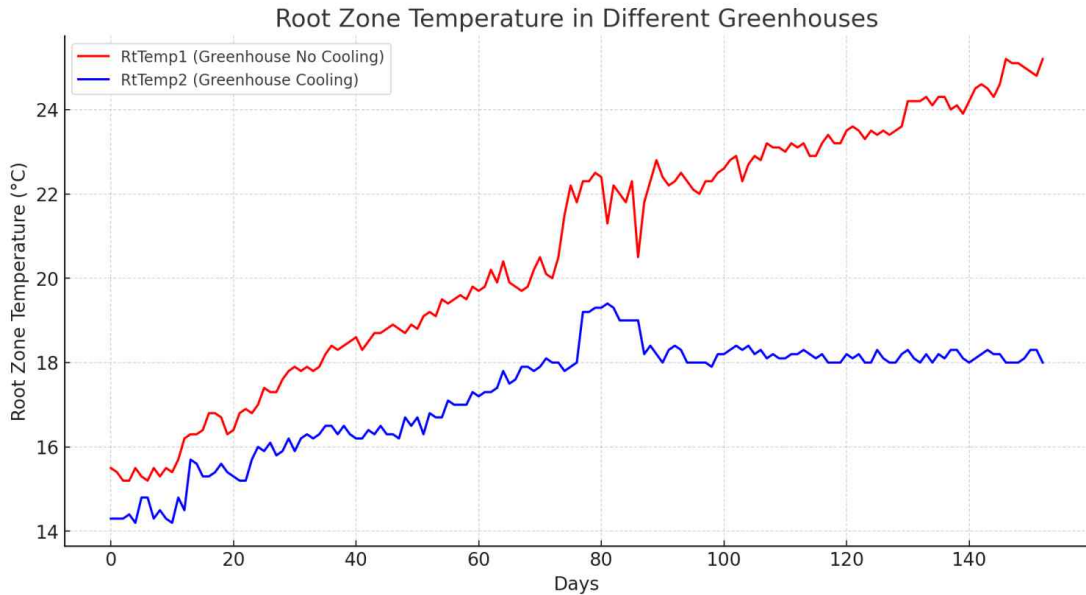
- 사전 실증 실험 온실에서 재배된 딸기 생체중의 비파괴 조사에서는 각 온실별로 3개 개체의 뿌리포함 중량을 측정하였으며, 최종 생육 결과는 냉방기술 적용 조건에서 재배된 딸기의 생육이 비냉방 조건의 딸기 생체중의 약 2배에 달하는 차이를 나타냈음.
- 두 온실의 성장량 증가 양상은 생육 초기 저온 구간에서는 두 온실 딸기의 상대성장률에서 큰 차이를 나타내지 않았던 반면 고온기로 접어드는 재배 중후반 시기로 넘어가면서 비냉방 온실에서 딸기의 상대성장률이 급격하게 감소하는 경향을 확인할 수 있었음.
- 특히, 비냉방 온실의 경우 작기가 고온기로 진입함에 따라 생체중의 증가 속도가 둔화되었으며, 140일 경과 시점에서는 음의 성장률을 나타냈음.
- 이는 고온기로 인한 작물 스트레스, 상대적으로 높은 VPD 조건 등의 영향으로 작물의 수분 함량이 감소하고, 잎의 생리적 기능이 쇠퇴함에 따라 관찰된 경향으로 판단됨.



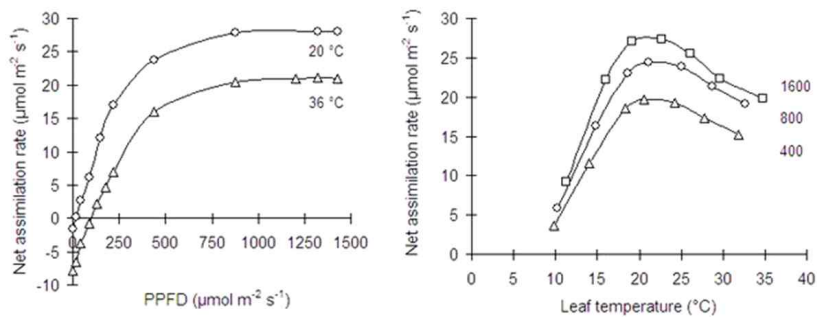
[그림 사전 실증 실험 온실에서 재배된 딸기의 전체 생체중(지상부, 지하부 포함) 변화 비교]

- 사전 실증 실험온실의 딸기 분무경 베드의 근권부 온도의 경우도 기온과 마찬가지로 두 온실 사이의 차이를 관찰할 수 있었으며, 비냉방 온실의 근권부가 계절 변화에 따라 지속적으로 상승하는 경향을 보인 반면 냉방 온실의 근권부는 재배 기간 80일 경과 시점까지 상승 후 정상상태로 진입하는 경향이 확인되었음.

- 냉방 기술이 적용된 온실의 온도 조건은 장파 복사로 온실 효과가 발생하는 비냉방 온실과는 다르게 일사량 증가에 따른 온도의 동반 상승 경향이 다소 완화되었음을 확인할 수 있었으며, 이는 광량과 온도 변화의 decoupling을 통해서 광합성에 필요한 광량은 상승시키면서 온도의 동반 상승은 억제하는 효과를 나타냈음.



[그림 사전 실증 온실의 근권부 온도 변화 비교]

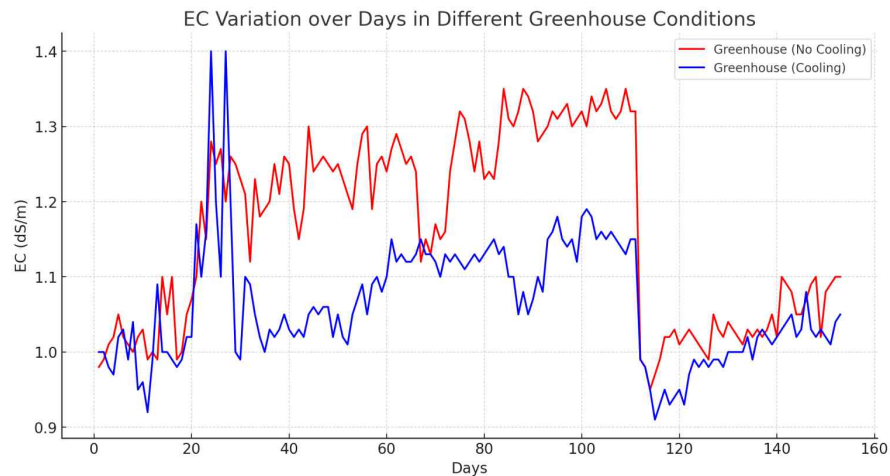


Archontoulis et al., 2008

[그림 광도와 온도 변화에 따른 광합성 속도 변화의 비교 자료]

- 광도와 온도가 작물의 광합성 현상에 미치는 영향은 서로 다른 경향을 따르고 있으며, 광도의 경우 광도 증가에 따라 광합성 속도는 선형적으로 증가하다가 더 이상의 광합성 속도를 동반하지 않는 포화 지점이 발생하는 경향을 나타냄.
- 이와는 다르게, 온도는 저온 조건에서 광합성 속도가 저해되다가 온도 상승과 함께 증가, 정점에 도달하면 그 이상의 온도 증가는 광합성 속도의 저해를 나타냄.
- 즉 이러한 관계에서 볼 수 있듯이 광도와 온도가 동반 상승하는 조건에서는 광량 증가에 따른 광합성 속도의 증가 효과와 더불어 고온 조건으로의 진입에 따른 광합성 속도 저해 현상이 발생할 수 있음.
- 특히 온실의 경우 장파 복사에 의한 온도 상승 효과가 뚜렷하기 때문에 본 연구에서와 같이 적절한 냉방기술이 적용되면 일사량이 증가하는 하계 시기의 풍부한 광량을 광합성에 적극 활용하면서도 온도 상승은 억제하여 시설원예 시스템의 작물 생산 성능을 대폭 향상시킬 수 있는 기술이 될 수 있음.
- 냉방, 비냉방 온실의 재사용 양액 내 EC 변화의 경우, 전반적으로 냉방 조건의 온실이 낮게 유지됨을 확인할 수 있었음.
- 식물의 양분 흡수 속도와 수분 흡수 속도는 각각 근권부에서 양분과 수분이 소모되는 속도에 영향을 미치며, 근권부에 공급된 양액 내 양분의 농도와 양분과 수분 흡수속도를 나뉜 값인 흡수농도가 같은 수준일 경우 이론적으로 근권부에서의 양분 농도 변화는 없음.

- 이를 EC 데이터를 통해 살펴보면 폐회로 수경재배 시스템의 양액 EC가 초깃값에서 감소할 경우, 식물은 조성된 양분/수분 비율보다 더 큰 비율로 양분을 흡수하고 있다고 생각할 수 있음.
- 본 실증 실험에서는 EC 값이 두 온실 모두 초깃값에서부터 상승하는 경향을 확인할 수 있었으나, 냉방 조건의 온실에서 상대적으로 낮은 EC가 측정되는 것을 확인할 수 있었음.
- 이는 간접적인 지표로써 비냉방 온실의 식물이 양분 대비 수분을 많이 소비하고 있음을 의미하며, 냉방 온실의 경우 양분을 더 많이 소비하고 있음을 의미할 수 있음.
- 근권부 수분 변화의 경우 잎의 표면적 증가에 비례해서 증산량이 증가하기 때문에 식물 생육의 변화 영향을 나타낼 수 있기는 하나 환경 조건의 영향을 많이 받는 요인임.
- 그러나 근권부 양분 변화는 식물이 흡수량을 동적으로 제어하며, 식물이 동화산물을 분배하여 식물의 생육 현상을 진행하는 것에 맞춰서 양분 흡수 용량도 증가하는 관계임.
- 즉, EC 측정 결과에서 냉방 온실의 EC가 상대적으로 낮게 유지된 것에는 냉방 조건에서 식물 생육이 더 빠르며 그에 따라서 양분의 소모 속도도 빨라진 결과임을 알 수 있음.



[그림 냉방 비냉방 온실에 따른 근권부 양액의 EC 변화]

아. 냉기 활용 스마트 온실 복합환경 제어 기술 실증 및 평가 (3차년도)

○ 생육 예측 모델 기반 복합환경제어 기술 개발

- 도메인 지식 기반의 설명적인 모델은 수학적과 컴퓨터 프로그램을 이용하여 식물 내의 생물학적인 프로세스를 모사하고 설명, 해석할 수 있는 것을 목표로 함.
- 이는 일반적으로 연립 상미분 방정식으로 구현될 수 있으며 수치해석 기법을 이용하여 컴퓨팅 환경에서 시뮬레이션을 수행할 수 있음.
- 이를 바탕으로 식물의 생육 과정을 모사한 것이 process-based model (PBM)이며, 정확한 과정을 이해할 필요가 없는 블랙박스 모델과는 달리 농업 시스템의 구성 요소의 효과와 이들 간의 복잡한 상호작용을 이해하는데 도움이 됨.
- 이를 통해서 식물의 생육 과정에서 특정 현상이 발생하는 이유에 대해 과학적 설명이 가능해질 수 있으며, 이를 재배 시스템의 관리 요인들과 연계하여 의사결정 기술로 발전시킬 수 있는 잠재력이 있음.
- 식물의 광합성, 증산 등 식물 생리에 핵심적인 구동력으로 작용하는 환경요인인 광과 온도는 현재 식물 생산시스템에서 단순 모니터링 지표로 활용되거나, 조금 더 적극적으로 사용될 경우 <광 → 증산>으로 변환 계수를 사용하여 작물의 증산량을 추정하고 관수 제어를 자동화 하는데 사용되고 있음.
- 그러나, 광은 증산 뿐만 아니라 식물의 구조 생성에 필요한 탄소 동화 작용의 입력 변수이며, 온도는 고정된 동화산물이 분배되고 식물의 실제 기관으로 변환되는데 영향을

$$LAI = DM_{leaf}(t-1) \cdot SLA \cdot Den \quad (Eq. 1)$$

$$Rad_{int} = Rad \cdot (1 - e^{-0.8LAI}) \quad (Eq. 2)$$

$$C_i = CO_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{m \cdot RH}\right) \quad (Eq. 3)$$

$$Phot_{can} = \min(A_c, A_j, \frac{V_{cmax}}{2}) \quad (Eq. 4)$$

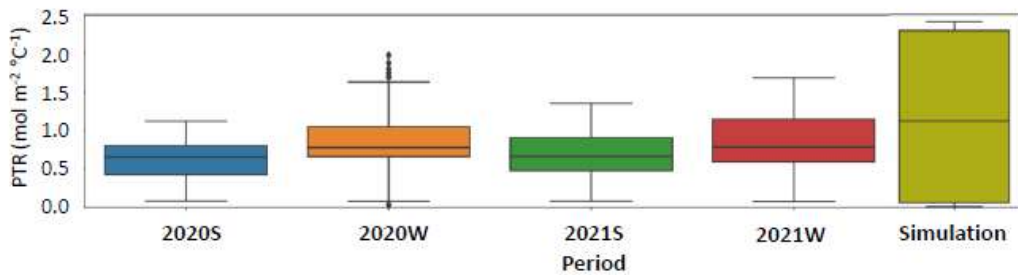
$$A_c = V_c \cdot \left(\frac{V_c \cdot (C_i - \Gamma^*)}{C_i + K_c \cdot \left(1 + \frac{\Gamma^*}{K_o}\right)}\right) \quad (Eq. 5)$$

$$V_c = V_{cmax} \cdot \left(\frac{31 + \frac{69}{1 + e^{\frac{8.8 \cdot (C_i - 31)}{100}}}}{100}\right) \quad (Eq. 6)$$

$$A_j = \frac{1 \cdot (C_i - \Gamma^*)}{(4C_i + 8\Gamma^*)} \quad (Eq. 7)$$

$$J = \frac{\alpha \cdot Rad_{int} + J_{max} - \sqrt{(\alpha \cdot Rad_{int} + J_{max})^2 - 4\theta \cdot J_{max} \cdot \alpha \cdot Rad_{int}}}{2\theta} \quad (Eq. 8)$$

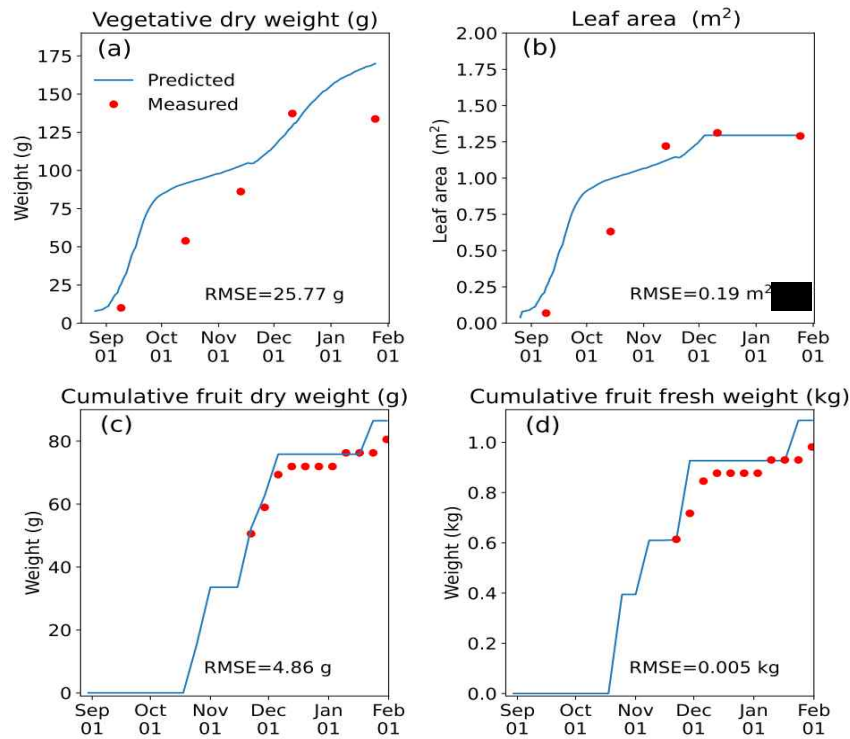
- 엽면적 지수(LAI)는 식물 성장 상태에 따라 엽면적이 증가하도록 전날의 specific leaf area (SLA)와 잎의 건물중(DM_{leaf} (t-1))을 일정하게 곱하여 추정함.
- 수관부 광합성 속도는 the Farquhar, von Caemmerer, and Berry (FvCB) 모델과 Beer-Lambert 법칙을 사용하여 초당 광합성 속도로 계산하였음.
- 이러한 모델의 핵심 구조를 바탕으로 온실에서 수집한 광량 및 온도 데이터를 입력 변수로 하여 총 4개 작기의 환경 데이터 셋을 구축하였으며, 4개 작기의 환경 데이터 범위 전체를 포함하는 추계적인 환경 데이터 분포를 생성하여 다양한 조건의 시뮬레이션 환경을 구축하였음.



[그림 INTKAM 모델의 광, 온도 비율 시뮬레이션에 활용한 온실 PTR 변화 데이터의 분포]

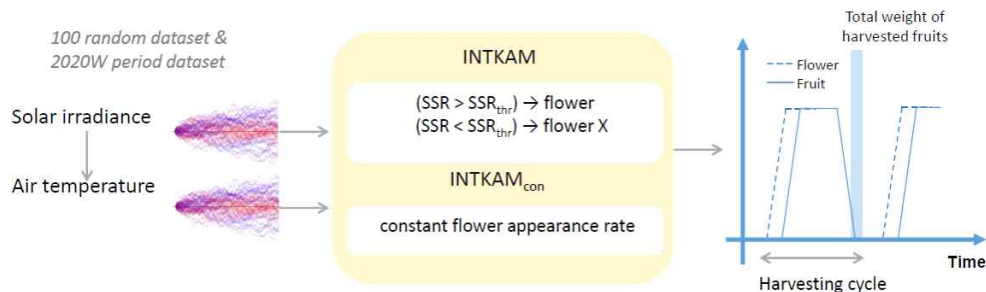
- 작물의 생육을 정상 범주 내에서 시뮬레이션하기 위해서 모델의 파라미터 보정을 수행하였으며, 이 모델은 2020W 데이터 셋에서 측정된 엽면적, 과실 건물중, 식물 총 건물중으로 보정하였음.
- 보정 알고리즘으로는 목적함수를 최대화하거나 최소화하면서 동시에 매개변수의 집합을 최적화할 수 있는 HyperOpt가 사용되었음.
- 목적함수의 평가 지표로는 정규화된 NRMSE가 사용되었으며 보정된 매개변수를 활용하여 모델의 시뮬레이션 분석에 사용하였음.
- 보정 파라미터의 시뮬레이션 결과는 파프리카의 생육, 엽면적 증가, 과실 생성 커브를

실측 데이터의 경향에 맞게 잘 모사하여 시뮬레이션 분석을 위한 기본적인 검증이 잘 이루어진 것으로 판단됨.



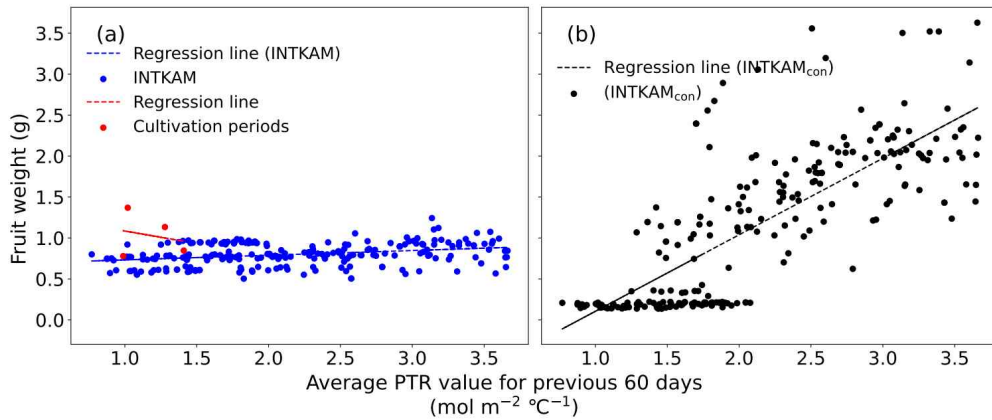
[그림 INTKAM 모델의 파라미터 보정 결과]

- 인공적으로 생성된 데이터를 활용하여 시뮬레이션 분석을 하기 위해 무작위 행보 (random walk)를 적용하여 100가지의 다양한 광 및 온도 조건의 조합을 생성하였음.
- 광의 경우 구름이 무작위로 하늘을 덮어 다양한 광량 조건을 확률적으로 생성한다고 가정하였으며, 온도는 일사의 복사 의존성을 반영하기 위해 온실 외부 환경의 광, 온도 관측 데이터에서 도출한 경험적 계수를 다음과 같이 적용하였음.
 - $Ta' = Rad' - a + b$
- 여기서 여기서 Ta' 는 생성된 온도(°C), Rad' 생성된 광량, a 와 b 는 각각 16~44, 14.85~16.85 범위 내에서 임의로 변화하며, a , b 는 경험 계수의 변동폭을 고려하여 변화 범위를 설정하였음.
- 시뮬레이션에서 재식밀도는 평방미터당 3개체로 설정하고 재배 기간은 1년으로 설정하였음.



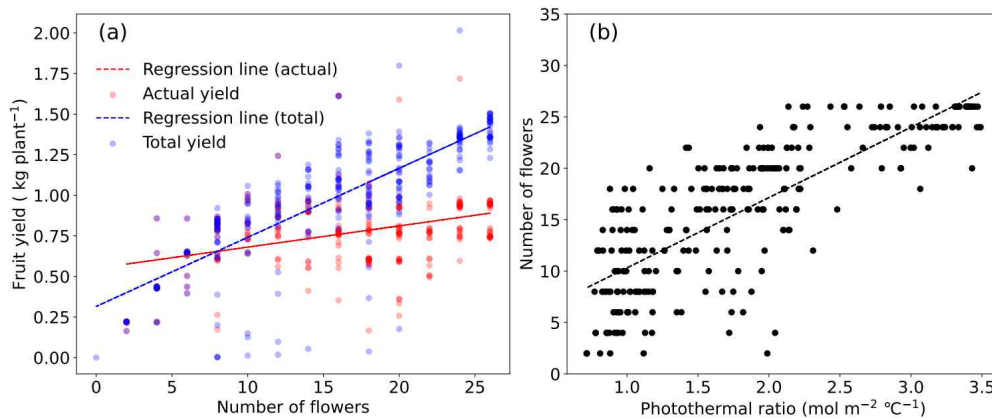
[그림 INTKAM 모델 기반 온실 재배 조건 시뮬레이션의 온도, 광도 시나리오 생성 및 시뮬레이션 분석 과정]

- 시뮬레이션 분석에서 INTKAM 모델의 SSR은 SSR의 임계값 SSR_{thr} 을 초과할 때 꽃이 나타나고, INTKAM_{con}에서는 꽃의 출현율을 상수값을 설정하였음.



[그림 INTKAM 모델 시뮬레이션 시나리오에 따른 PTR과 과실 중량 비교]

- 시뮬레이션을 통해 분석한 파프리카의 과실 수확량과 평균 PTR 사이의 관계를 조사한 결과 상관계수는 0.32로 선형성이 약하다는 것을 확인하였음.
- 대부분의 원예작물은 무한성장형으로 벼와 같이 유한성장형의 프로세스를 가지고 있지 않으며, 이 경우 동화산물의 고정을 통한 잎과 같은 영양 기관으로의 분배와 그에 따른 동화산물 고정능력의 향상, 그리고 그에 따른 과실로의 동화산물 분배 저하와 같은 프로세스가 복잡하게 얽혀있을 수 있음.
- 이러한 복잡성을 제거하기 위해 생식 기관인 꽃의 출현율을 SSR에 연동되지 않고 상수에 의거하여 구동되도록 한 INTKAMcon 시나리오의 경우 PTR과 시뮬레이션 된 과실 수확량간의 상관 계수의 경우 SSR과 꽃 출현율이 연동된 시나리오와는 달리 0.78로 강한 선형성을 관찰할 수 있었음.
- 본 연구를 통해 PTR과 과실 수확량 사이의 관계를 시뮬레이션 분석을 수행하였으며, 일반적인 PTR 활용에서는 두 요인 간의 관계에 강한 선형성이 관찰되지 않음을 확인하였음.



[그림 source-sink ratio 임계치 이상일 때의 꽃의 수와 과실 수확량과의 관계(좌)와 PTR 과 개화 수 사이의 관계(우)]

- 그러나, 꽃 출현율을 상수로 처리하여 시뮬레이션하였을 때 강한 선형성이 관찰되었으며, 이는 PTR과 과실 수확량 사이에 존재하는 비선형성은 착과 패턴을 조절하는 SSR에 기인한다는 것을 시사함.
- 이를 개선하기 위해 시뮬레이션 분석 과정에서 SSR의 임계치 이상일 때의 PTR 값을

분류하였으며, 이를 개화 수준과 관계성을 분석하였을 때 선형성이 관찰된 것을 확인할 수 있었음.

- 즉 이는 온실 내 광도와 온도 데이터를 작물 모델과 결합하여 SSR 임계치 값으로 변환하게 될 경우 작물의 과실 생산 속도를 향상시키기 위해 온도와 광도의 복합적인 제어를 수행할 수 있음을 의미하며, 복합환경제어 시스템과 이를 연동시킬 경우 농가의 작물 재배 의사결정 체계로 활용할 수 있음을 의미함.
- 이러한 발견은 환경-식물 관리 지표로서 PTR의 활용도를 향상시킬 수 있다는 점에서 주목할만 함.

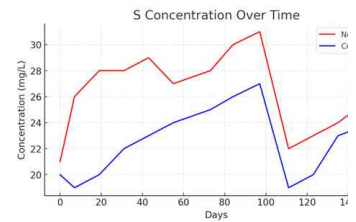
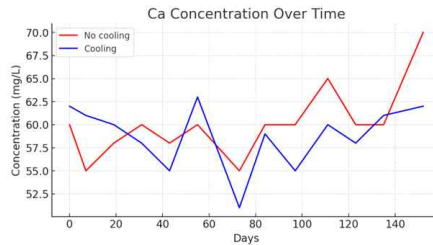
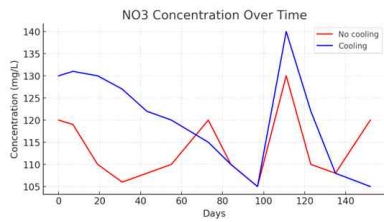
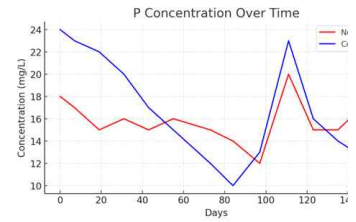
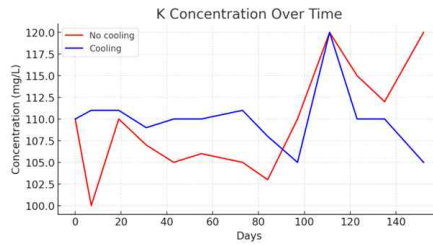
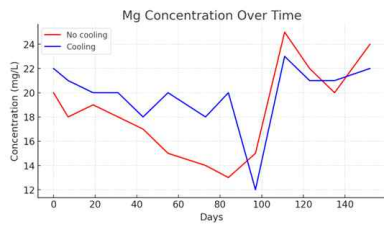
자. 냉기저장 활용 기술 적용 온실의 친환경 순환식 수경재배 양분관리 체계 실증 (3차년도)



<숙명여자대학교 실증테스트팜>

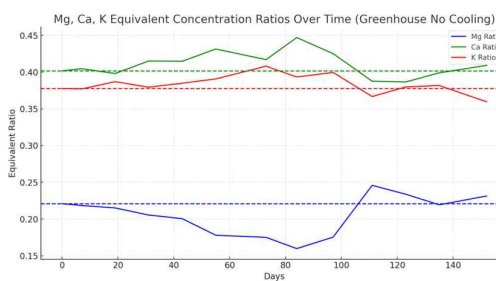
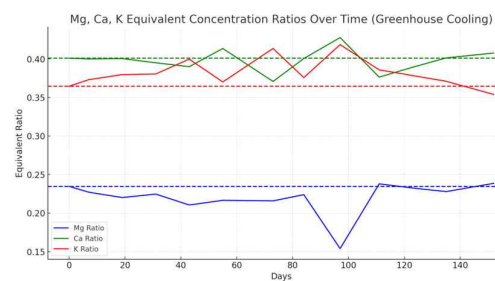
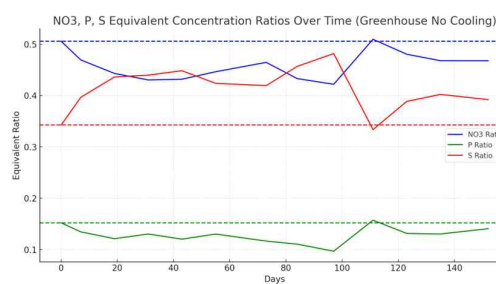
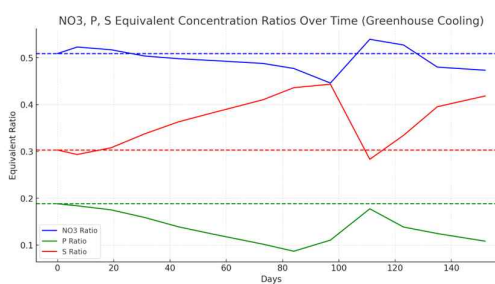
○ 냉기저장기술 적용 온실의 친환경 순환식 수경재배 기술 실증

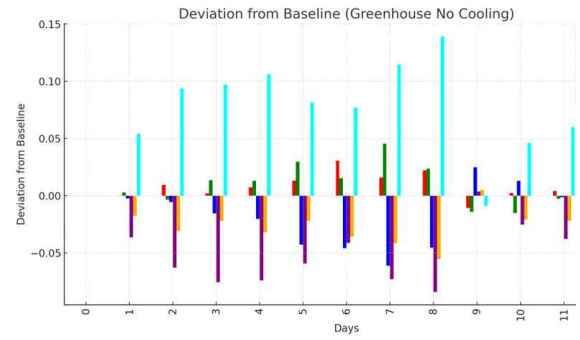
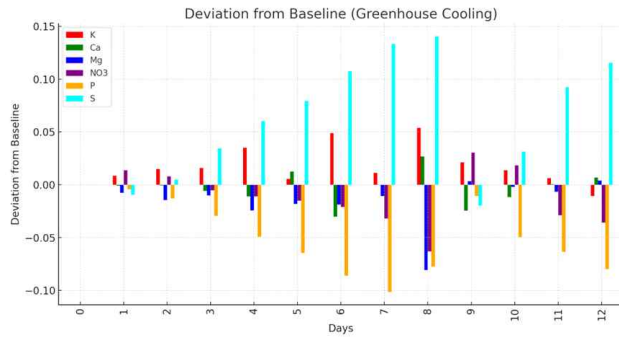
- 냉기저장기술 적용 온실에 적용한 순환식 수경재배 시스템 실증을 수행하였음.
- 각 온실의 재사용 양액 내 양분 분석 결과 두 온실의 각 농도 변화는 각 양분별로 유사한 경향을 나타냈음.
- 초반에 전체적인 감소 경향을 나타낸 양분은 Mg, P, NO₃였으며, S의 경우 뚜렷한 증가 경향이 관찰되었음.
- 본 연구는 숙명여자대학교 냉방 기술 적용 온실에서 수행되었으며, 냉방기술 적용 온실의 사전 실증 실험을 수행하면서 순환식 수경재배 시스템을 적용하였고 재배 실증 실험과 동시에 양분 데이터를 수집하였음.



[그림 냉방, 비냉방 적용 사전 실증 실험 온실의 딸기 순환식 수경재배 양분 농도 변화]

- 양분 농도 변화의 경우 각 양분별로 변동폭이 크게 나타났으나, 전체 양분의 농도의 합은 앞서 분석한 EC 데이터를 참고했을 때 결핍 구간에 있지는 않는 것으로 확인됨.
- 실제 식물의 양분 흡수와 식물의 생리는 대부분의 양분 농도가 적정 수준에서 존재할 경우 양분 사이의 균형이 유의적인 영향을 미칠 수 있음.
- 따라서 각 양분의 농도를 각 이온간의 당량 비율로 변환할 경우 양분 균형의 관리를 평가할 수 있음.
- $\text{Cation}/(\text{K}+\text{Ca}+\text{Mg})$, $\text{Anion}/(\text{NO}_3+\text{H}_2\text{PO}_4+\text{SO}_4)$ 수식을 통해 음이온, 양이온 내의 양분 균형 데이터로 변환하였으며, 냉방, 비냉방 조건 모두 초깃값에 비해서 점진적으로 감소하는 경향이 관찰되었으나, 급진적이 불균형의 양상은 관찰되지 않았음.
- 또한, 양분 균형의 교정 효과로 인해 재배일수 100일 경의 양분 균형은 두 온실 모두 초깃값으로 근접해가는 결과를 확인할 수 있었음.





[그림 냉방, 비냉방 적용 사전 실증 실험 온실의 딸기 순환식 수경재배 양분 당량 농도 비율 변화(위: 각 양분의 당량 비율 변화, 아래: 각 양분의 당량농도 비율 초깃값 대비 변화)]

- 냉방, 비냉방 조건에서 순환식 수경재배 시스템을 적용했을 때 두 온실 모두 뚜렷한 양분 불균형 현상이 관찰되지는 않았으며, 앞서 제시한 생체중 변화 데이터를 비교하였을 때도 양분 불균형과 연관된 생육 저하 현상이 관찰되지는 않았음.
- 전체적으로 순환식 수경재배 시스템의 양분 균형은 안정적인 범위 내에서 유지되었으며 정상 생육이 가능한 범위 내에서 관리될 수 있음을 확인하였음.

2-5 시계열 기반 냉방 에너지 수요예측 모델 설계 (주식회사 바토너스)

가. 실증지역 열환경(기온, 습도) 예측

- 주소: 강원도 평창군 대화면 신리 1958-2, 1958-3
- 위도: 37.53485, 경도: 128.44813
- 평창 스마트팜 400m 내에 위치한 관측소의 기온 및 습도 정보 마이닝

[매분관측자료] 대화 597 (562m) / 2021.07.22.18:30 / 강원도 평창군 대화면 신리

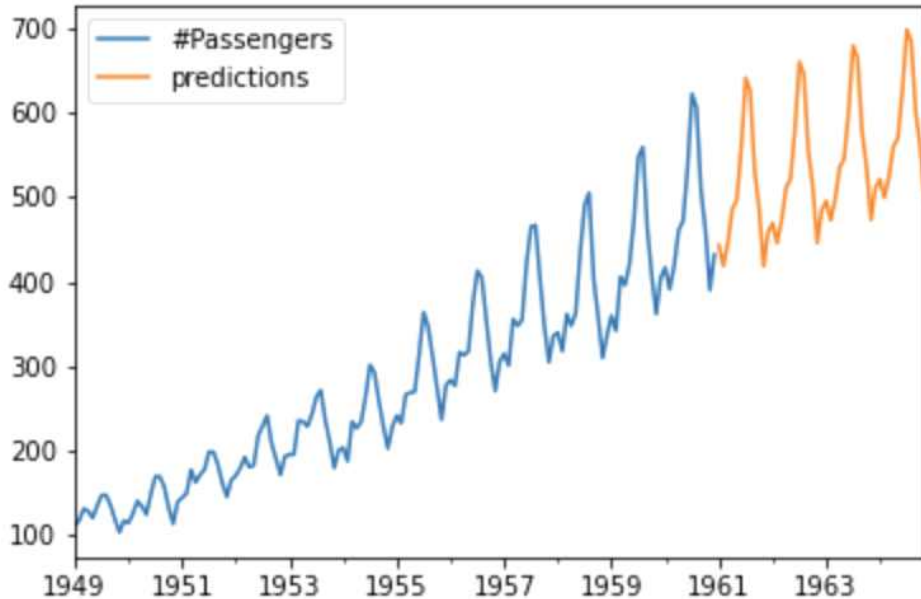
시:분	강수	강수15	강수60	강수3H	강수6H	강수12H	일강수	기온	풍향1	풍속1(m/s)	풍향10	풍속10(m/s)	습도	해면기압
18:30
18:29
18:28	○	0	0	0	0	0	0	26.5	252.1 WSW	0.9	269.7 W	0.7	68	1009.6
18:27	○	0	0	0	0	0	0	26.6	277.3 W	1.1	269.4 W	0.6	67	1009.6
18:26	○	0	0	0	0	0	0	26.6	275.2 W	1.3	259.3 W	0.6	67	1009.6
18:25	○	0	0	0	0	0	0	26.6	288.0 WNW	0.9	249.9 WSW	0.6	67	1009.6
18:24	○	0	0	0	0	0	0	26.7	294.0 WNW	0.7	248.3 WSW	0.6	67	1009.6
18:23	○	0	0	0	0	0	0	26.8	286.7 WNW	0.5	242.7 WSW	0.6	67	1009.5
18:22	○	0	0	0	0	0	0	27.0	239.1 WSW	0.5	240.2 WSW	0.6	66	1009.5
18:21	○	0	0	0	0	0	0	27.1	210.3 SSW	0.5	239.1 WSW	0.6	64	1009.5
18:20	○	0	0	0	0	0	0	27.3	245.9 WSW	0.3	239.3 WSW	0.6	64	1009.4
18:19	○	0	0	0	0	0	0	27.2	326.2 -	0.1	232.5 SW	0.6	63	1009.4
18:18	○	0	0	0	0	0	0	27.1	191.7 SSW	0.3	225.3 SW	0.7	65	1009.5
18:17	○	0	0	0	0	0	0	27.1	209.1 SSW	0.8	225.3 SW	0.8	65	1009.5
18:16	○	0	0	0	0	0	0	27.1	235.3 SW	0.9	220.7 SW	0.9	65	1009.5
18:15	○	0	0	0	0	0	0	27.3	259.9 W	1.1	41.4 NE	0.9	66	1009.4

나. 시계열 예측 모델 조사

- 시계열 데이터: 시간과 함께 측정된 데이터, 시간적인 상관 관계가 있는 경우가 많음

○ ARIMA - 자기회귀 누적 이동평균

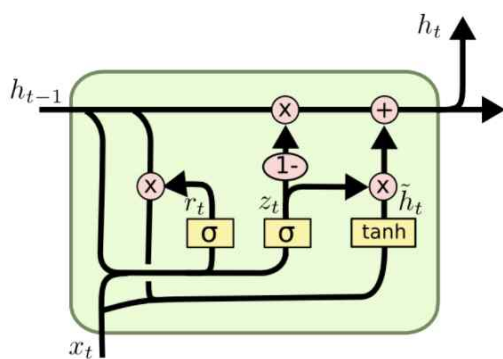
- 시계열 데이터를 위해 개발된 통계 방법
- 자기회귀(AR) 누적(I) 이동평균(MA) 모델
- AR: 이전의 관측값이 이후의 자신의 관측값에 영향을 끼침
- MA: 평균이 변할 때 적합함. 이전 항에서의 오차 혹은 변동값을 이용하여 현재 항의 상태 추측
- ARIMA: AR과 MA모델을 섞어 과거의 상태와 오차값을 이용하여 현재의 상태를 예측
- 관측치 사이의 차분, 현재와 추세간의 관계까지 이용하는 Integrated라는 개념을 추가하여 시계열 데이터 예측을 하는 모델
- 모델의 변수 측면에서 보면 이해하기 쉽고 통계 모델을 정의하는 수학적 표현이 비교적 간단하여 통계적인 방식으로 관심 속성을 도출하는 것이 가능
- SARIMA(Seasonal ARIMA) 모델을 이용하여 기온 예측을 실시한 결과 MSE가 0.89가 나왔다는 보고가 있음



[그림 1. ARIMA 기반 시계열 데이터 예측 예시]

○ LSTM - Long Short-Term Memory

- 딥러닝 중 순환신경망에서 사용되는 알고리즘
- 먼 과거의 정보와 최근의 정보 모두를 잘 이용하여 다음에 순차적으로 어떤 정보가 올 것인지 예측하는 알고리즘
- 일반적으로 ARIMA와 같은 전통적인 알고리즘들에 비해 성능이 우수
- 학습을 위해 시간 및 하드웨어적인 비용이 필요하다는 단점
- 예측을 위해서 딥러닝 분야에 관한 전문지식 요함



$$z_t = \sigma(W_z \cdot [h_{t-1}, x_t])$$

$$r_t = \sigma(W_r \cdot [h_{t-1}, x_t])$$

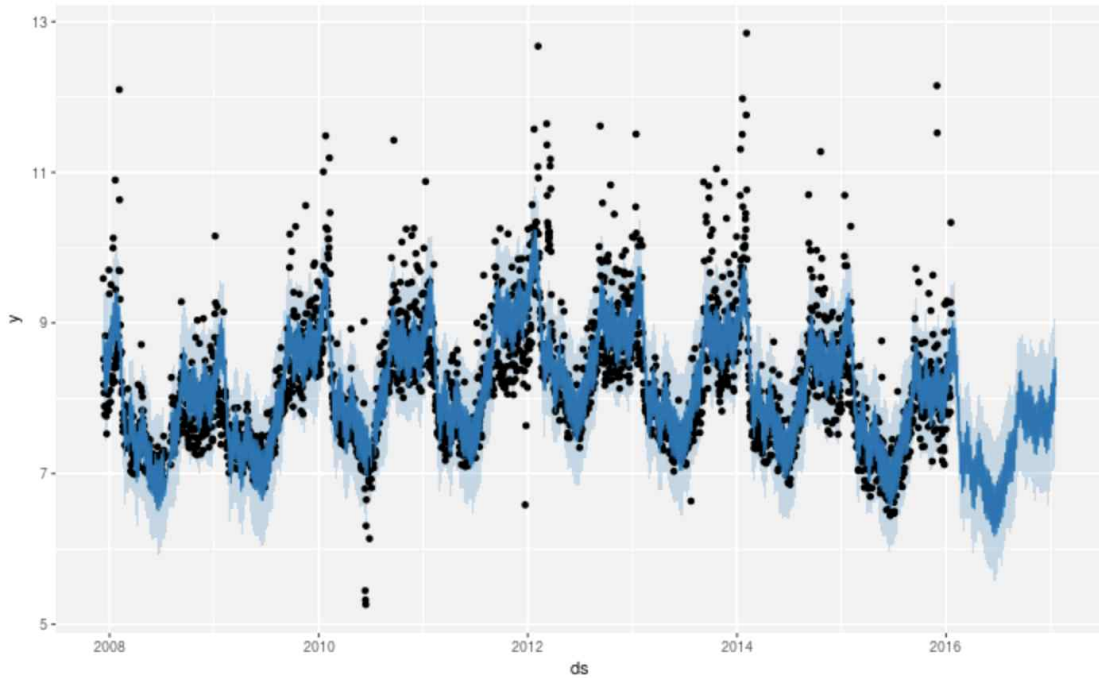
$$\tilde{h}_t = \tanh(W \cdot [r_t * h_{t-1}, x_t])$$

$$h_t = (1 - z_t) * h_{t-1} + z_t * \tilde{h}_t$$

[그림 2. LSTM 기본 구조도]

○ Prophet

- 블랙박스 라이브러리로 인하여 내부의 알고리즘을 조회할 수 없다는 단점
- 과거의 장기적 추세를 이용하여 대략적인 추세를 확인할 때, 갑작스러운 데이터 변동이 없을 때 실제 데이터와 유사한 예측 결과를 보임
- 기온 예측 시에 LSTM과 비교하여 크게 차이가 나지 않는다는 연구 결과 존재
- LSTM은 최저온도에 대해 더 잘 예측하였으며 Prophet은 최고온도에 대해 더 잘 예측
- 특별한 연산 장비 없이 빠르게 예측할 수 있어 하드웨어 및 시간 비용 측면에서 우수



[그림 3. Prophet 기반 시계열 데이터 예측 예시]

다. 평창 지역 기온 예측 결과 비교를 위한 정량 척도

○ RMSE - Root Mean Squared Error

- MSE의 루트
- MSE는 실제값과 예측값 차이를 제공하여 평균화
- 예측값과 실제값 차이의 면적의 합
- 특이값이 존재하면 수치가 과다하게 커지는 경우를 방지하기 위해 루트
- 에러에 따른 손실이 제공하여 커지는 경우 쓰기 적합

○ MAE - Mean Absolute Error

- MSE의 루트
- 실제 값과 예측값의 차이 Error의 절대값을 평균화
- 에러가 10이 나왔을 때 5가 나왔을 때 보다 2배 더 나쁜 경우 사용됨
- 에러에 따른 손실이 선형적으로 올라갈 때 적합
- 온도예측의 경우 에러에 따른 손실이 선형적으로 올라가며 정량적인 수치로 나타내는 MAE로 비교.

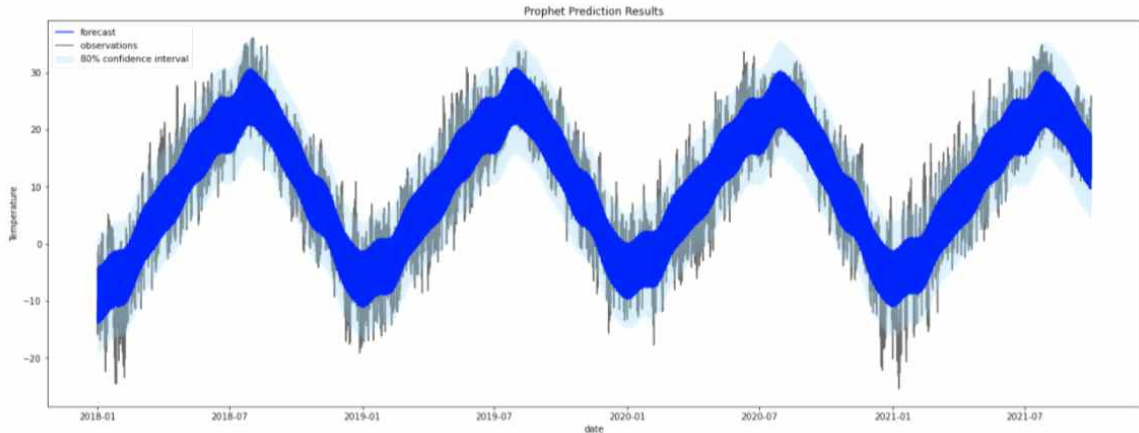
○ MAPE - Mean Absolute Percentage Error

- MAE를 퍼센트로 변환
- MAE와 유사한 단점이 있으며 모델에 대한 편향이 존재
- 절대적인 값이 아니라 퍼센트이기 때문에 다른 도메인에서 비교를 위해 사용

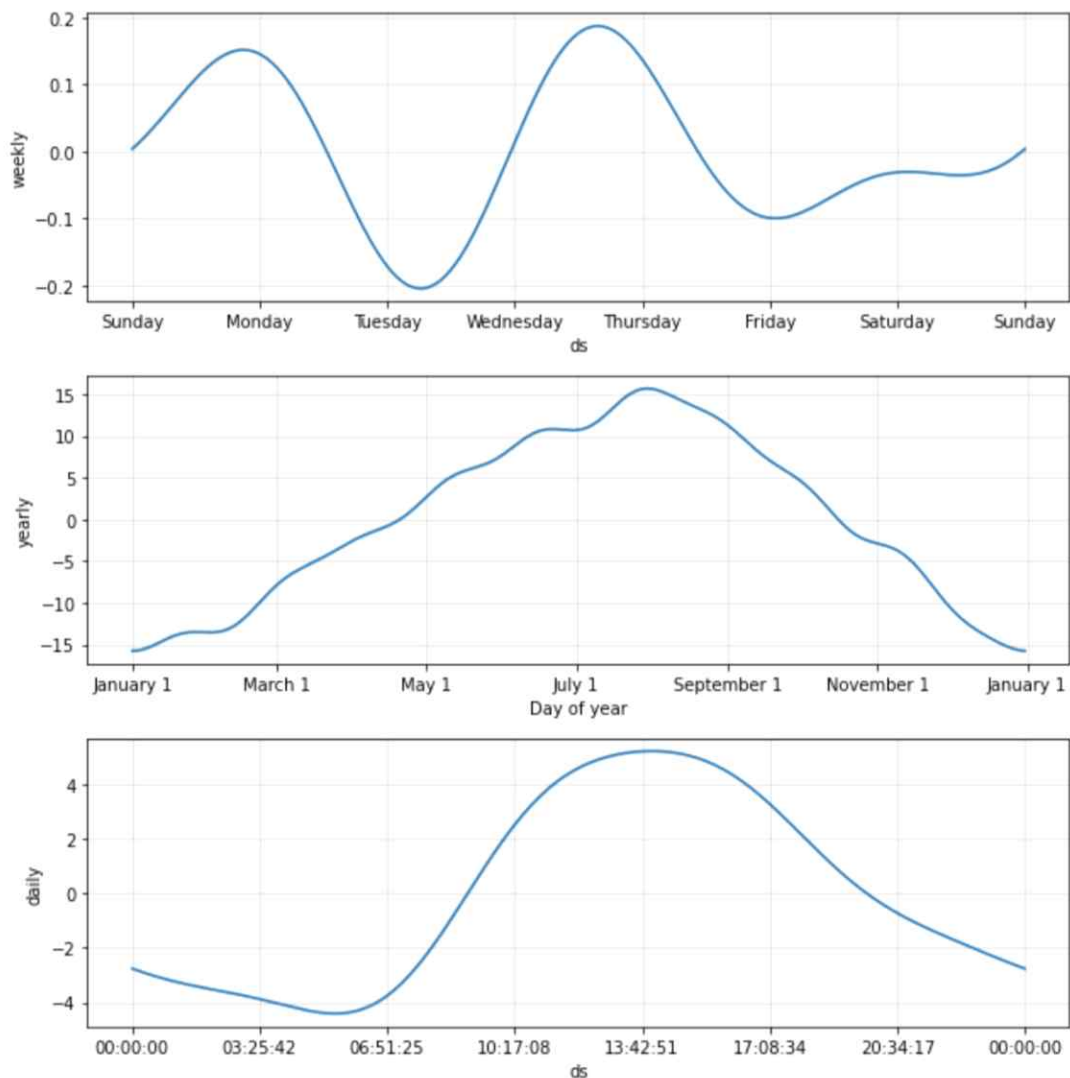
라. 평창 지역 기온 예측 결과

- 특별한 하드웨어 설치 없이 비용 및 시간 측면에 우수한 Prophet 모델 적용
- 과거 10년간 매시간 관측한 기온 데이터 활용
- 검은 점은 실제 관측값, 파란 점은 예측값, 연한 하늘색은 80% 확률로 예측

- 월별, 요일별, 시간별 예측값 도출



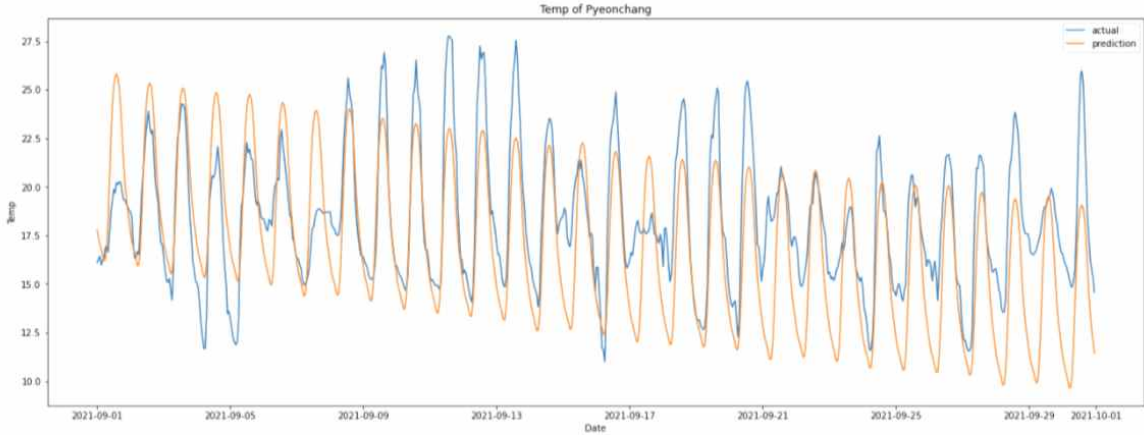
[그림 4. 2018-2021년 평창지역 기온 예측 결과]



[그림 5. 월별, 요일별, 시간별 기온 예측 결과]

- 2019년 9월 기온과 예측 기온 값 오차 분석
- 2021년 9월 기온 예측 MAE 값: 2.31
- 2021년 9월 기온 예측 MAPE 값: 12.76
- 전반적으로 9월에서 10월로 갈수록 온도가 완만하게 떨어질 것이라 예측

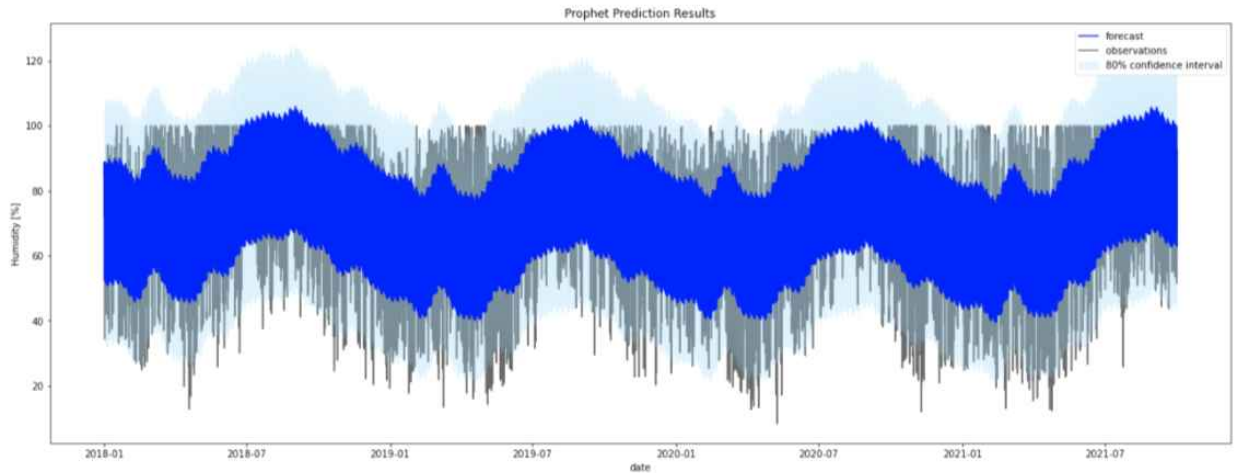
- 하지만 실제 2021년 9월 월말에 기온이 많이 떨어지지 않아 오차 발생



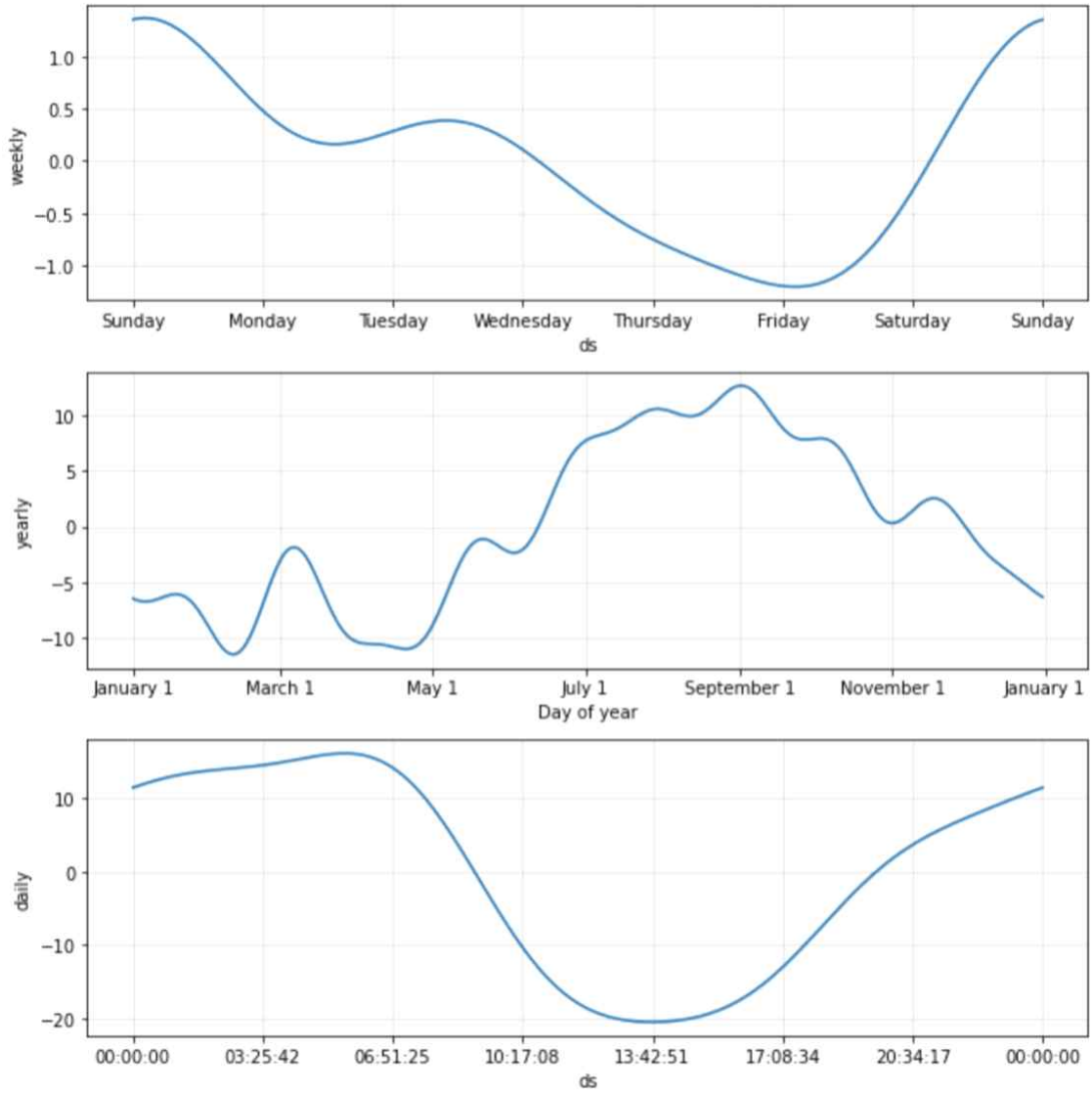
[그림 6. 2021년 9월 온도 예측 및 실제 온도 결과]

마. 평창 지역 습도 예측 결과

- 과거 10년간 매시간 관측한 습도 데이터 활용
- 검은 점은 실제 관측값, 파란 점은 예측값, 연한 하늘색은 80% 확률로 예측
- 월별, 요일별, 시간별 예측값 도출

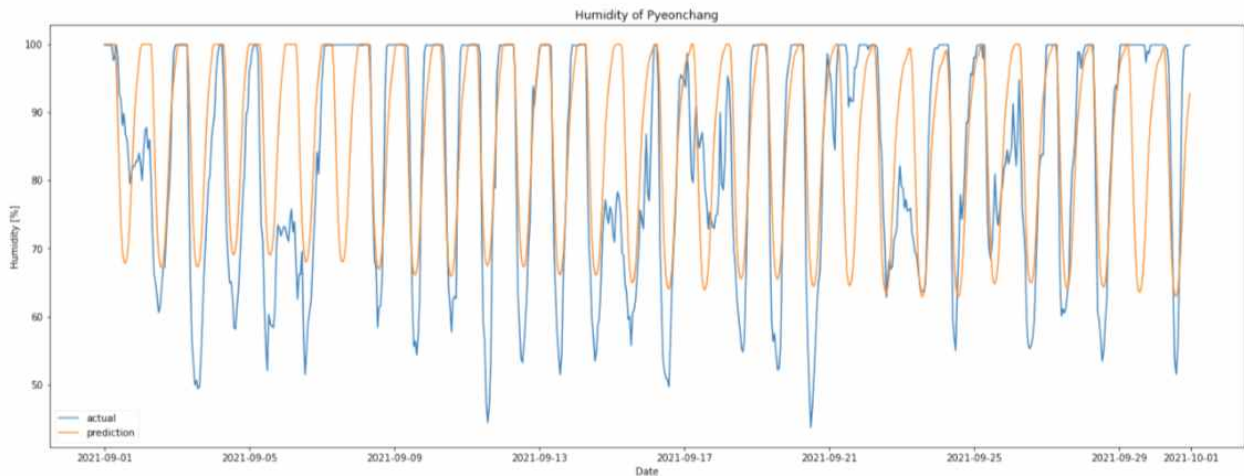


[그림 7. 2018-2021년 평창지역 습도 예측 결과]



[그림 8. 월별, 요일별, 시간별 기온 예측 결과]

- 2019년 9월 습도와 예측 습도 값 오차 분석
- 2021년 9월 기온 예측 MAE 값: 8.79
- 2021년 9월 기온 예측 MAPE 값: 11.85



[그림 9. 2021년 9월 습도 예측 및 실제 온도 결과]

바. 평창 지역 기온 예측 프로그램 개발

- 과거 10년간 매시간 관측한 온도 데이터 활용
- 사용자가 원하는 날짜 및 시간 입력 시, 해당 시기의 온도 내용 제공
- 평창의 경우 매년 1.2~1.3도 가량씩 상승할 것으로 예측

```
날짜를 입력해주세요(예시: yyyy-mm-dd) : 2021-12-31 03:00
2021년 12월 31일 3 예상 기온은 -9.1도 입니다.
날짜를 입력해주세요(예시: yyyy-mm-dd) : 2022-12-31 03:00
2022년 12월 31일 3 예상 기온은 -7.85도 입니다.
날짜를 입력해주세요(예시: yyyy-mm-dd) : 2023-12-31 03:00
2023년 12월 31일 3 예상 기온은 -6.61도 입니다.

날짜를 입력해주세요(예시: yyyy-mm-dd) : 2021-08-30 14:00
2021년 8월 30일 14 예상 기온은 26.5도 입니다.
날짜를 입력해주세요(예시: yyyy-mm-dd) : 2022-08-30 14:00
2022년 8월 30일 14 예상 기온은 27.66도 입니다.
날짜를 입력해주세요(예시: yyyy-mm-dd) : 2023-08-30 14:00
2023년 8월 30일 14 예상 기온은 29.21도 입니다.

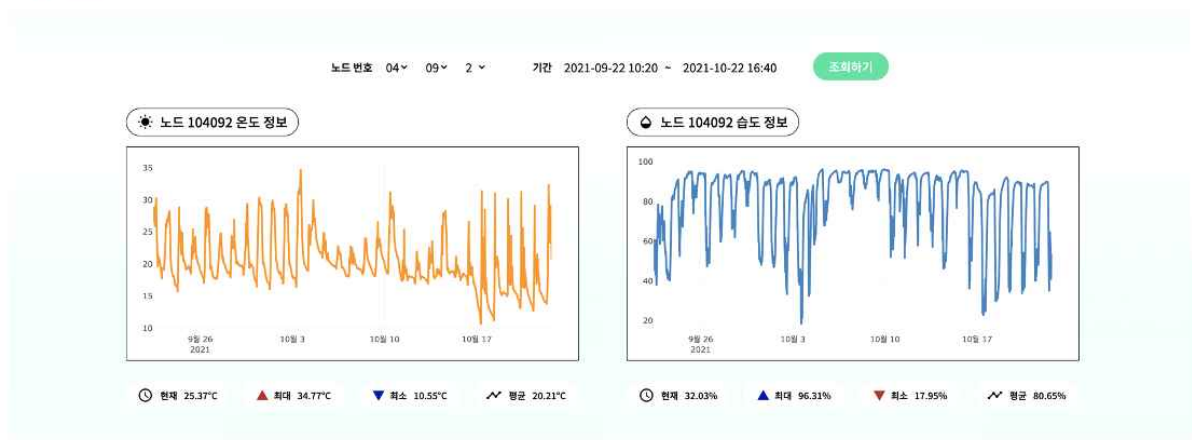
날짜를 입력해주세요(예시: yyyy-mm-dd) : 2021-03-15 10:00
2021년 3월 15일 10시 예상 기온은 6.19도 입니다.
날짜를 입력해주세요(예시: yyyy-mm-dd) : 2022-03-15 10:00
2022년 3월 15일 10시 예상 기온은 7.17도 입니다.
날짜를 입력해주세요(예시: yyyy-mm-dd) : 2023-03-15 10:00
2023년 3월 15일 10시 예상 기온은 8.65도 입니다.

날짜를 입력해주세요(예시: yyyy-mm-dd) : 2021-10-26 17:00
2021년 10월 26일 17시 예상 기온은 11.0도 입니다.
날짜를 입력해주세요(예시: yyyy-mm-dd) : 2022-10-26 17:00
2022년 10월 26일 17시 예상 기온은 12.49도 입니다.
날짜를 입력해주세요(예시: yyyy-mm-dd) : 2023-10-26 17:00
2023년 10월 26일 17시 예상 기온은 13.5도 입니다.
```

[그림 10. 기온 예측 프로그램 샘플]

사. 스마트팜 환경 데이터 모니터링 프로그램 개발

- 스마트팜 내부 위치별로 온도 시각화 모듈 개발
- 스마트팜 내부 위치별로 습도 시각화 모듈 개발
- 스마트팜 내부 시계열 온/습도 시각화 모듈 개발
- 5분 간격으로 데이터 업데이트 및 오류 발생시 알람 기능 개발
- 환경 데이터 CSV 출력 기능 제공



[그림 11. 273개 온실 열환경(온도, 습도) 모니터링 소프트웨어 개발]

105193(2021-09-27 10_33_53_2021-10-27 10_33_53)

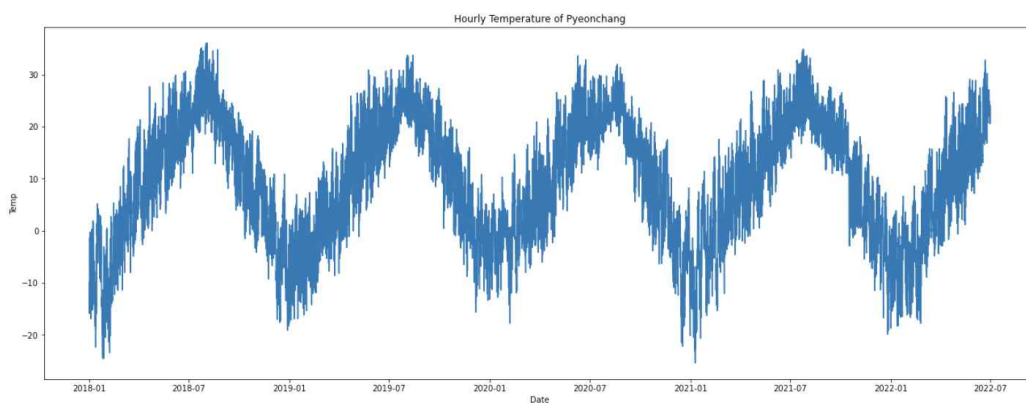
Time	Ambient Temperature	Ambient Humidity
2021-09-27 10:36	21.97	75.69
2021-09-27 10:41	22.01	75.72
2021-09-27 10:46	22.1	76.73
2021-09-27 10:51	22.28	76.05
2021-09-27 10:56	22.52	74.15
2021-09-27 11:01	22.75	73.38
2021-09-27 11:05	23.06	72.89
2021-09-27 11:10	23.23	71.1
2021-09-27 11:15	23.57	69.66
2021-09-27 11:20	23.64	68.19
2021-09-27 11:25	23.58	67.0
2021-09-27 11:30	23.34	67.18
2021-09-27 11:35	23.19	67.43
2021-09-27 11:40	23.09	68.84
2021-09-27 11:45	23.09	69.25

[그림 12. 273개 온실 열환경(온도, 습도) 모니터링 결과 샘플]

2-1. 에너지 수요예측 모델 개발

가. 온실 주변 환경 데이터 분석

- 온실이 위치한 평창지역 과거 10년간 기온 데이터를 분석 진행
- 과거 기온 데이터를 바탕으로 향후 3년간 기온 예측하여 에너지 수요예측 모델 정립



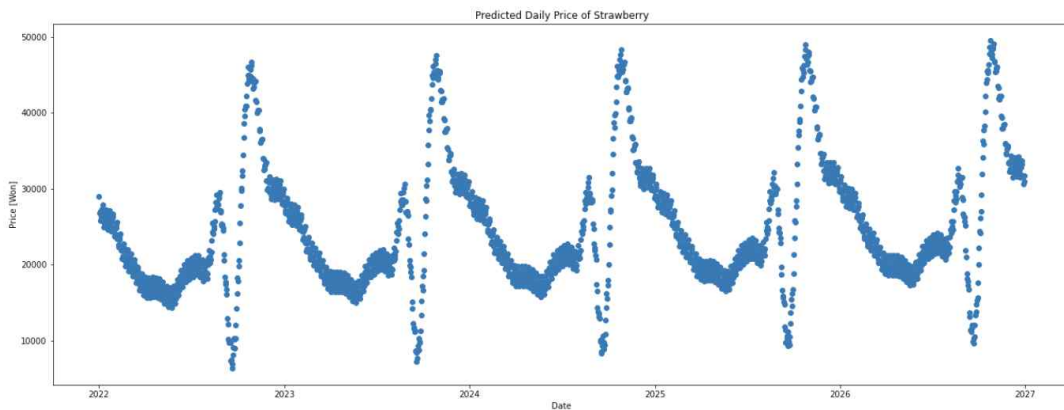
<2018년부터 2022년까지 평창지역 실제 관측 기온 데이터>

	temp	temp_diff
2018-01-01 00:00:00	-11.27	0.00
2018-01-01 01:00:00	-11.71	-0.45
2018-01-01 02:00:00	-12.03	-0.32
2018-01-01 03:00:00	-12.32	-0.29
2018-01-01 04:00:00	-12.67	-0.35
2018-01-01 05:00:00	-13.00	-0.32
2018-01-01 06:00:00	-12.98	0.02
2018-01-01 07:00:00	-12.27	0.71
2018-01-01 08:00:00	-10.76	1.52
2018-01-01 09:00:00	-8.70	2.05
2018-01-01 10:00:00	-6.64	2.07
2018-01-01 11:00:00	-5.02	1.62
2018-01-01 12:00:00	-4.02	1.00
2018-01-01 13:00:00	-3.54	0.48
2018-01-01 14:00:00	-3.42	0.12
2018-01-01 15:00:00	-3.61	-0.20
2018-01-01 16:00:00	-4.21	-0.60
2018-01-01 17:00:00	-5.25	-1.03
2018-01-01 18:00:00	-6.56	-1.32
2018-01-01 19:00:00	-7.88	-1.32
2018-01-01 20:00:00	-8.96	-1.08
2018-01-01 21:00:00	-9.76	-0.80
2018-01-01 22:00:00	-10.40	-0.64
2018-01-01 23:00:00	-11.00	-0.60

<인공지능 기반 평창지역 기온 예측 데이터>

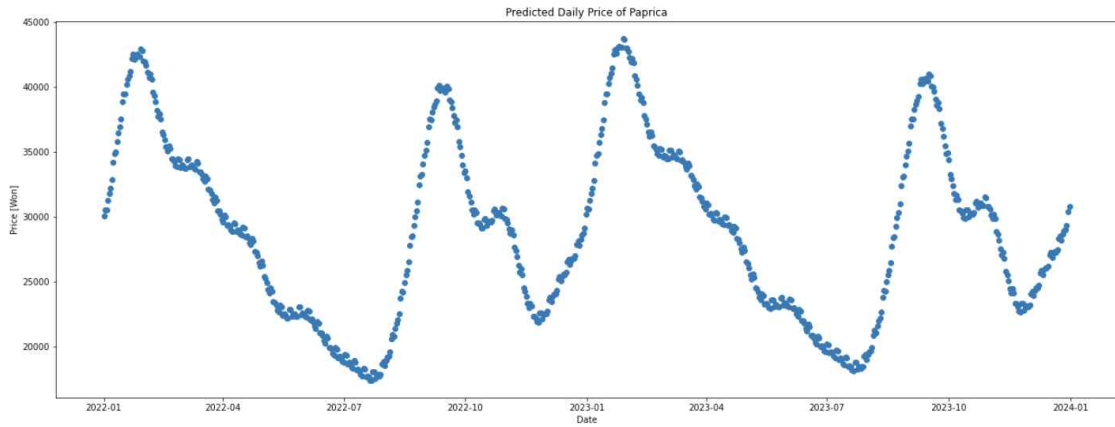
나. 작물 판매 데이터 분석

- 재배 작물 후보인 딸기(설향) 및 파프리카의 과거 판매 데이터 분석
- 딸기(설향)의 경우 등급 상, 가락시장 판매 가격을 기준으로 데이터 수집
- 과거 데이터 기반 향후 5년동안의 딸기 (설향) 가격 데이터 예측



<향후 5년동안의 딸기(설향) 판매 가격 예측 결과>

- 파프리카의 경우 농산물유통정보에서 제공하는 시세 기준으로 데이터 획득
- 2012년부터 2021년까지의 과거 판매 가격을 바탕으로 향후 2년간의 가격 예측



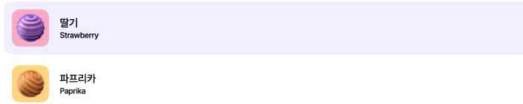
<향후 2년동안의 파프리카 판매 가격 예측 결과>

2-1. 에너지 수요예측 모델 평가

가. 데이터 입력부

- 스마트팜 내 농작물 재배에 필요한 에너지 수요예측 모델 평가
- 농작물 종류, 생산량, 재배온도, 재배기간, 상승 및 하강 비용 입력부 구현

예측 가능한 농산물



필터

생산량	2000	kg
재배 온도	30	°C
재배 기간	2022-06-15 ~ 2022-11-14 (183 일)	
상승 온도 비용	10	원
하강 온도 비용	10	원

나. 에너지 수요 표시부

- 스마트팜 내 농작물 재배에 필요한 에너지 수요를 일별 그래프로 표현
- 스마트팜 구축 냉온실 비용을 적용한 반응형 그래프 구축 완료

일별 온도 유지 비용



다. 에너지 수요 기반 수익 지출 표시부

- 스마트팜 내 농작물 재배 후 산출되는 주 수익 및 지출 표시부 구현 완료
- 농작물 수확 시기 및 판매 시기를 예측하여 수익 및 지출 예측

순 수익

37,142,453원

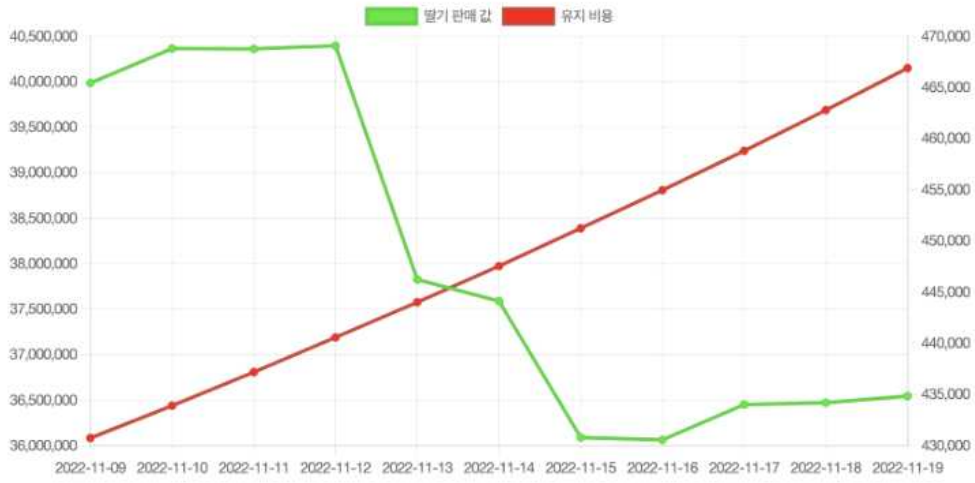
수익

37,590,000원

지출

447,547원

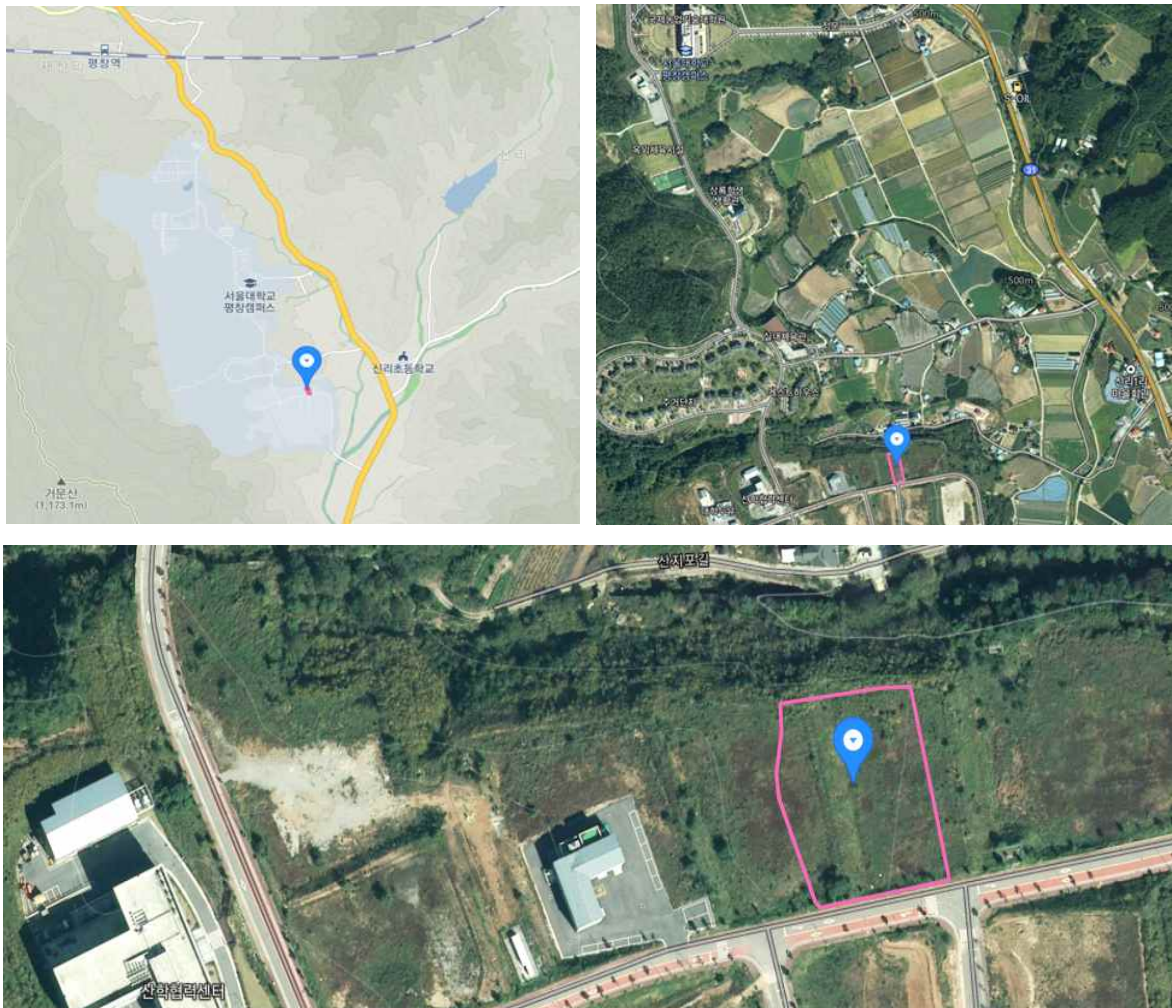
판매 가격 예측



2-6 실증 온실 부지 설계 (한국에너지기술연구원, AFP스마트팜R&BD센터 주식회사)

가. 실증 온실 부지 정보

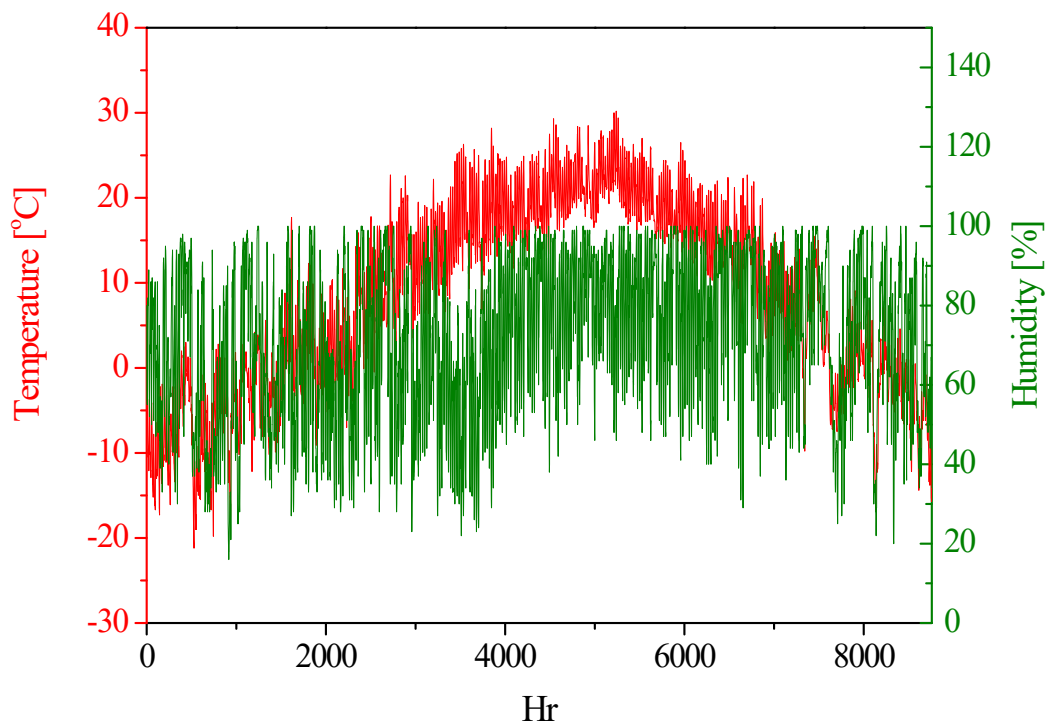
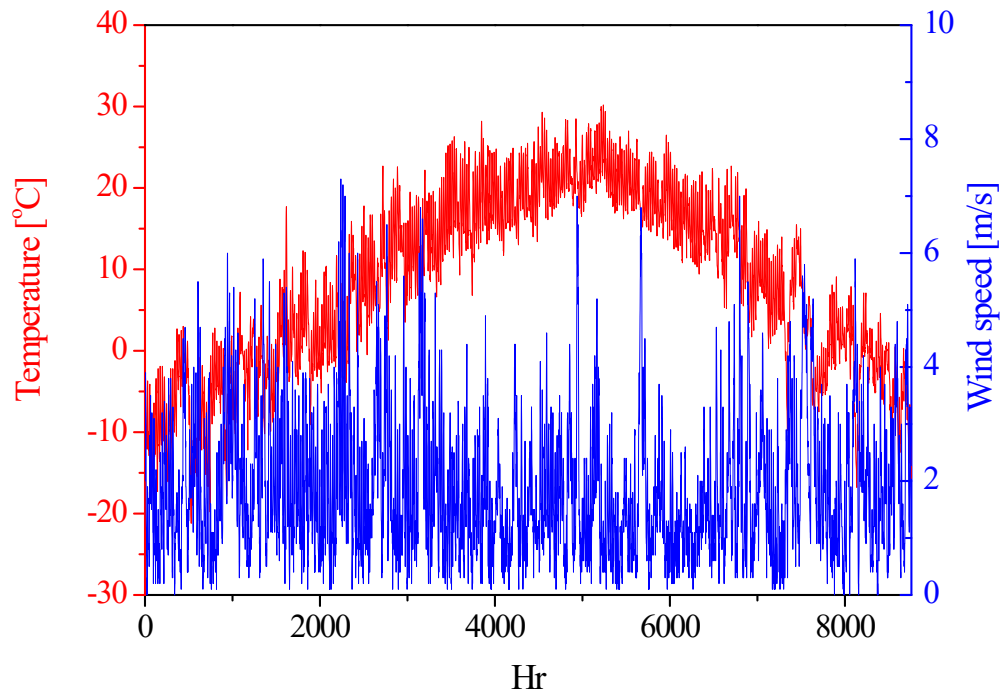
- 강원도 평창군 대화면 신리 1958-2, 1958-3 (서울대학교 평창캠퍼스 내)



[그림 1. 실증 온실 부지 (서울대학교 평창캠퍼스 내)]

○ 실증 온실 부지 냉난방부하 예측을 위한 TMY 데이터 분석

- 실증부지 TMY 데이터 : 실제 실증부지와 가장 가까운 거리에 있는 위치에서의 TMY 데이터 확보 (한국에너지기술연구원 신재생에너지데이터센터)
- TMY 데이터 확보 위치 : 강원도 평창군 용평면 장평리(위도 : 37.6° , 경도 : 128.4°)



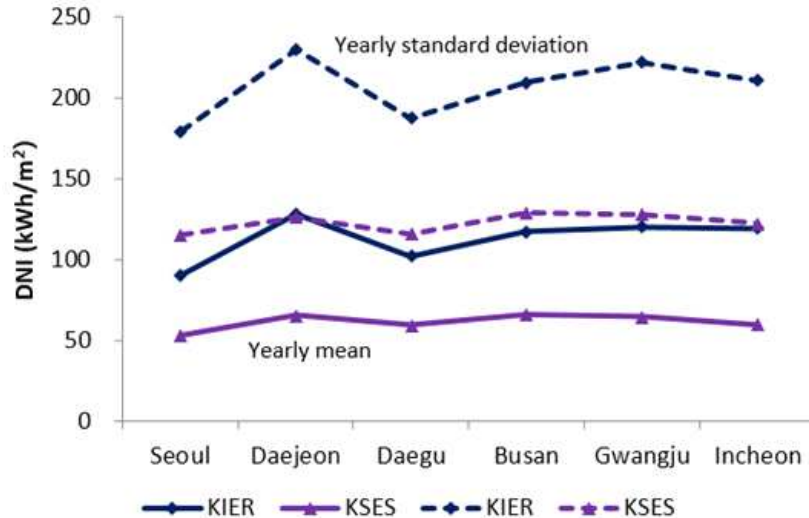
[그림 2. 실증부지의 외기온/풍속 데이터(왼쪽), 실증부지의 외기온/습도 데이터(오른쪽)]

[표 1. 과거 데이터기반 8760시간 기상 데이터]

위도(°N)	경도(°E)	관측도 측정군 측정면 정보				7월 7일	건구온도(°C)	이슬점온도(°C)	이슬점온도-불화도(°C)	상대습도(%)	상대습도-불화도(%)	표면기압(hPa)	표면기압-불화도(hPa)	풍속(m/s)	풍속-불화도(m/s)	수평면 전일사량(W/m²)	수평면 전일사량-불화도(W/m²)
		년	월	일	시간												
1	2012	1	1	0	5.9	5.3	8.9	3.6	80	23	940	3	2	0.5	0		
2	2012	1	1	1	5.3	5.3	9.5	3.6	72	25	940.2	3	2.3	0.5	0		
3	2012	1	1	2	4.7	5.3	10.2	3.6	66	25	937.8	3	2.7	0.5	0		
4	2012	1	1	3	3.9	5.3	10.7	3.6	59	25	938.7	3	3.3	0.5	0		
5	2012	1	1	4	3.5	5.3	11	3.6	56	25	937.9	3	3.8	0.5	0		
6	2012	1	1	5	3.4	5.3	11.2	3.6	53	25	937.2	3	3.9	0.5	0		
7	2012	1	1	6	4	5.3	11	3.6	58	25	937.2	3	3.6	0.5	0		
8	2012	1	1	7	4.8	5.3	9.8	3.6	68	25	936.6	3	3.3	0.5	0		
9	2012	1	1	8	6	5.3	9.9	3.6	74	25	937.2	3	3.2	0.5	0		
10	2012	1	1	9	7	5.3	10.3	3.6	77	25	937.8	3	3.2	0.5	103		
11	2012	1	1	10	7.9	5.3	10.7	3.6	80	25	938.7	3	3	0.5	145		
12	2012	1	1	11	8.4	5.3	11.2	3.6	81	25	938.1	3	2.6	0.5	169		
13	2012	1	1	12	8.9	5.3	11.6	3.6	81	25	939.4	3	2.4	0.5	141		
14	2012	1	1	13	9.2	5.3	11.9	3.6	81	25	939.7	3	1.9	0.5	244		
15	2012	1	1	14	10	5.3	12.5	3.6	82	25	939.8	3	1.4	0.5	93		
16	2012	1	1	15	10.5	5.3	13	3.6	82	25	940	3	1.2	0.5	73		
17	2012	1	1	16	10.2	5.3	12.8	3.6	81	25	940.1	3	1.3	0.5	0		
18	2012	1	1	17	9.8	5.3	12.5	3.6	80	25	940.8	3	0.9	0.5	0		
19	2012	1	1	18	9.5	5.3	12.4	3.6	80	25	940.5	3	0.7	0.5	0		
20	2012	1	1	19	10.4	5.3	12.8	3.6	82	25	941.2	3	0.7	0.5	0		
21	2012	1	1	20	10.8	5.3	12.8	3.6	83	25	941.1	3	0.6	0.5	0		
22	2012	1	1	21	11.2	5.3	12.9	3.6	87	25	941.6	3	0.4	0.5	0		
23	2012	1	1	22	11.7	5.3	13.1	3.6	89	25	941.7	3	0	0.5	0		
24	2012	1	1	23	12.1	5.3	13.3	3.6	89	25	941.9	3	0.3	0.5	0		
25	2012	1	2	0	11	5.3	13	3.6	85	25	942.1	3	0.3	0.5	0		
26	2012	1	2	1	8	5.3	12.4	3.6	77	25	942.1	3	0.3	0.5	0		
27	2012	1	2	2	5.9	5.3	11.7	3.6	64	25	941.9	3	0.9	0.5	0		
28	2012	1	2	3	4.3	5.3	11.5	3.6	58	25	941.4	3	1.5	0.5	0		
29	2012	1	2	4	3.8	5.3	11.6	3.6	55	25	940.8	3	1.9	0.5	0		
30	2012	1	2	5	3.7	5.3	11.9	3.6	53	25	940.3	3	1.8	0.5	0		
31	2012	1	2	6	3.8	5.3	12.1	3.6	52	25	940.2	3	1.8	0.5	0		
32	2012	1	2	7	4.6	5.3	12.2	3.6	55	25	940.2	3	1.6	0.5	0		
33	2012	1	2	8	5.8	5.3	12.1	3.6	61	25	940.2	3	1.6	0.5	0		
34	2012	1	2	9	7.1	5.3	12.6	3.6	64	25	940.6	3	1.7	0.5	5.3		
35	2012	1	2	10	8.5	5.3	13.4	3.6	68	25	940.5	3	1.6	0.5	127		
36	2012	1	2	11	9.8	5.3	14.3	3.6	70	25	940.7	3	1.6	0.5	197		
37	2012	1	2	12	10.2	5.3	14.8	3.6	69	25	940.7	3	1.2	0.5	246		
38	2012	1	2	13	9.9	5.3	14.7	3.6	68	25	939.8	3	0.8	0.5	264		
39	2012	1	2	14	10.5	5.3	14.7	3.6	71	25	939.8	3	0.8	0.5	230		
40	2012	1	2	15	11.1	5.3	14.8	3.6	75	25	939.6	3	0.8	0.5	235		

○ 정확한 TMY 데이터 확보를 위한 TMY 데이터 비교

- 동일한 지역에서도 TMY 데이터 간 차이 존재함. 특히 냉방부하의 경우 TMY 데이터에 따라 시뮬레이션 결과에 큰 차이 발생, 원인은 직달 일사량 차이로 예상.
- 건구온도, 풍속, 상대습도, 수평면 전일사량은 서로간의 차이가 15%이하로 작음.
- 법선면 직달 일사량은 기관 관의 차이가 45% 정도로 다른 기상 요소에 비해 큰 차이 발생.
- 건물 에너지 부하 예측을 위한 TMY는 제1, 제2주성분이 온도와 일사량으로 구성되면 지점에 따라서도 일관성이 필요함.
- KIER의 TMY와 KSES의 TRY가 이러한 조건을 충족하나 KSES의 TRY의 연평균 법선면 직달 일사량은 타 기관관의 차이가 45% 정도로 작게 예측함.
- KIER의 TMY의 주성분에 대한 설명력이 세 기관 중 가장 높음을 고려할 때 KIER의 TMY가 가장 신뢰성 있다고 판단됨.
- 따라서 본연구에서는 KIER에서 제공하는 TMY 데이터를 기반으로 하여 온실 에너지부하, 외기온, 습도, 풍속 등의 데이터를 확보하여 활용함.



[그림 3. 실증 부지 지역 기상데이터 확보위한 TMY 데이터 구조 비교]

▼ The comparison of solar irradiance and meteorological elements between the 3 institutions

Element	Measure	Busan	Seoul	Incheon	Daejeon	Daegu	Gwangju
Dry bulb temperature (°C)	Difference of mean (%)	0.7	2.8	2.5	1.7	1.7	2.7
	Difference of standard deviation (%)	4.1	1.9	2.8	4.7	2.8	3.7
Wind speed (m/s)	Difference of mean (%)	11.8	8.1	2.9	7.6	9.5	14.8
	Difference of standard deviation (%)	20.5	2.8	6.6	11.1	14.3	25.1
Relative humidity (%)	Difference of mean (%)	4.2	6.0	1.7	0.9	6.6	3.5
	Difference of standard deviation (%)	1.0	4.8	4.2	1.5	7.6	2.6
Global horizontal irradiance (kWh/m ²)	Difference of mean (%)	11.9	6.9	8.5	2.9	9.6	8.8
	Difference of standard deviation (%)	14.4	6.3	4.4	10.8	6.8	4.8
Direct normal irradiance (kWh/m ²)	Difference of mean (%)	43.6	40.6	49.7	49.0	41.7	46.2
	Difference of standard deviation (%)	38.5	35.5	41.9	44.9	38.2	42.2

[그림 4. 실증 부지 지역 기상데이터 확보위한 TMY 데이터 구조 비교(계속)]

○ 실증 부지 지열 데이터 조사

- 실증 부지 지열 데이터: 실제 실증부지와 가장 가까운 거리에 있는 위치에서의 지열 데이터 확보 (한국에너지기술연구원 신재생에너지데이터센터)
- (지열류량: 80.4 mW/m², 지온경사: 29.3 °C/km, 지중 열전도도 분포도: 2.9 W/mK, 지중 버퍼온도: 14.8°C)
- 지열 데이터는 지중 축냉조 단열 설계 시 사용
- 지열 데이터 확보 위치: 강원도 평창군 대화면 신리

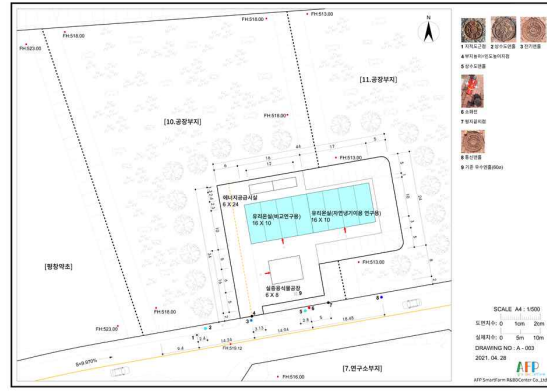
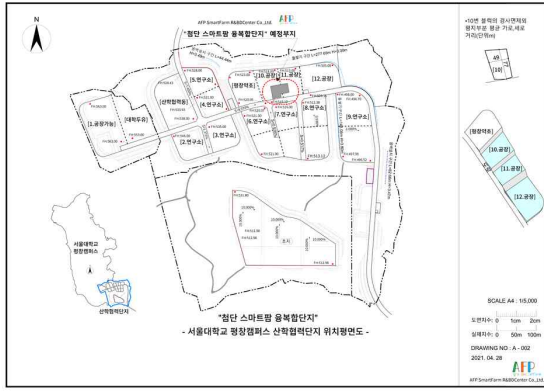


[그림 5. 실증부지의 지열 데이터]

나. 실증 온실 구축위한 기초 설계

○ 실증 온실 부지 승인 작업 및 시스템 설계

- 본 과제에 따른 온실 시스템 설계를 위한 기초 단계로서 해당 온실 시스템 설치 부지의 토목 공사 관련 기본 설계 착수
- 100평 규모의 유리 온실 시스템을 기반으로 하여 그 내부에 본 과제에 따른 냉방 시스템 적용 온실(50평)과 대조용 일반 냉방 시스템 적용 온실(50평) 각각 구축 예정.
- 본 실증 온실 시스템의 구축 시작은 2022년 상반기로 예정함



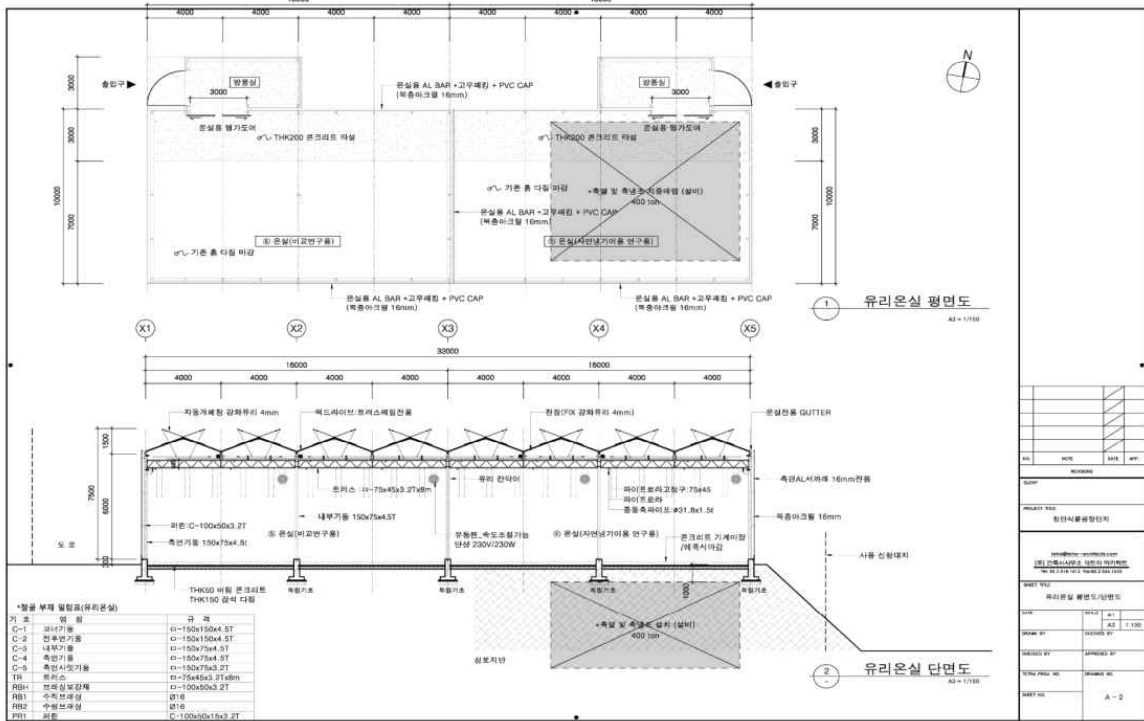
[그림 6. 세부 설계도 및 용지별 조감도 위치 평면도(왼쪽), 실증 온실 부지 상세 평면도(오른쪽)]



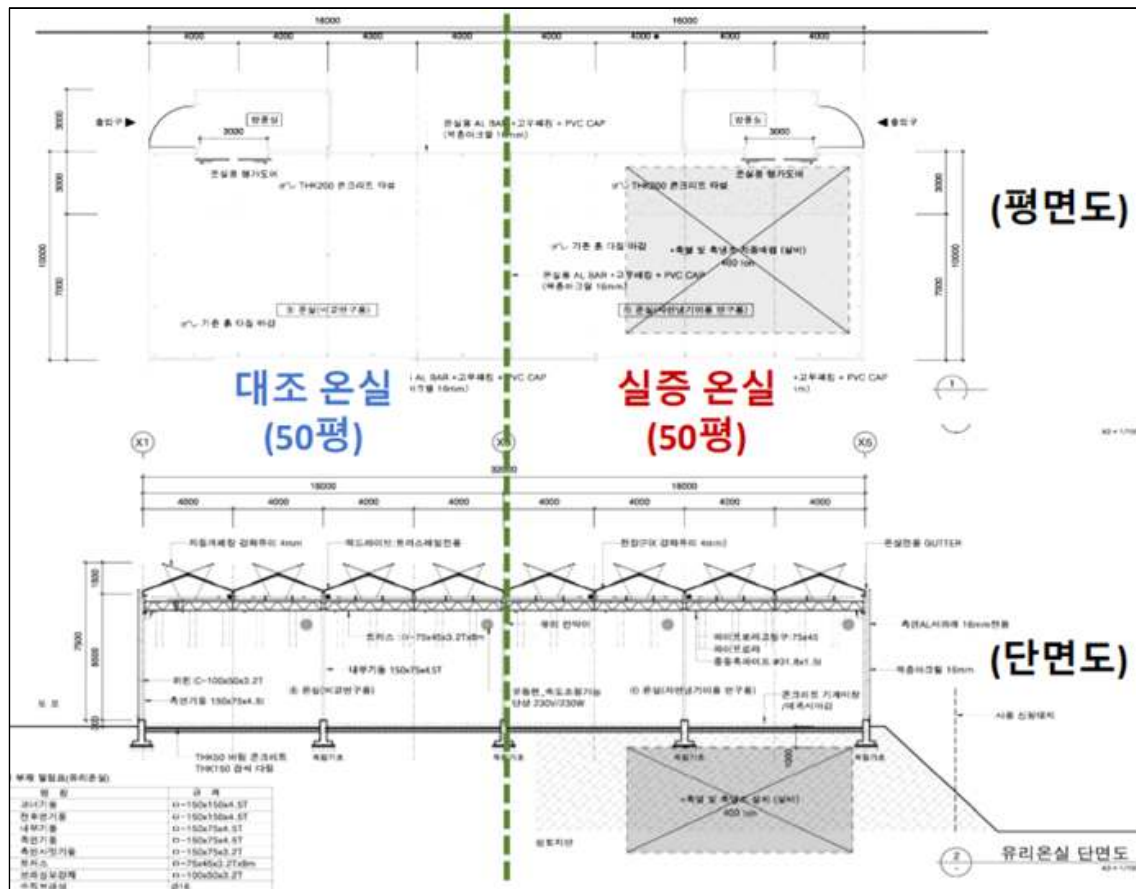
[그림 7. 서울대 평창캠퍼스 내 실증 온실 부지]



[그림 8. 서울대 평창캠퍼스 내 유리온실 조감도]



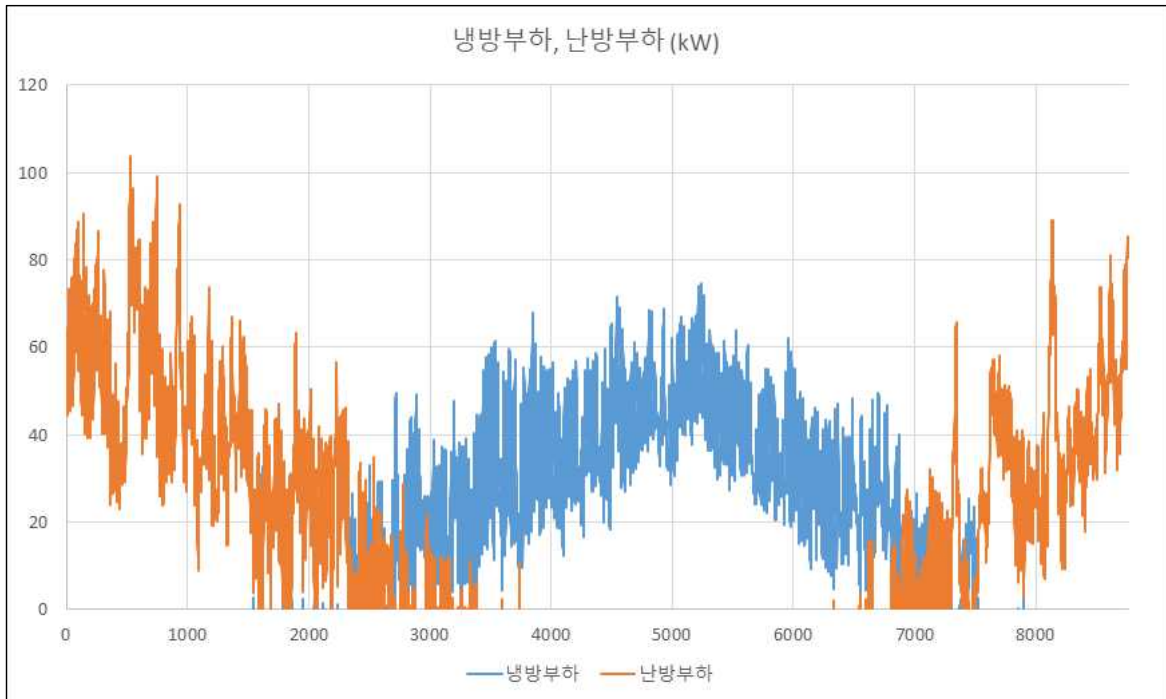
[그림 11. 서울대 평창캠퍼스 내 유리온실 조성 단면도]



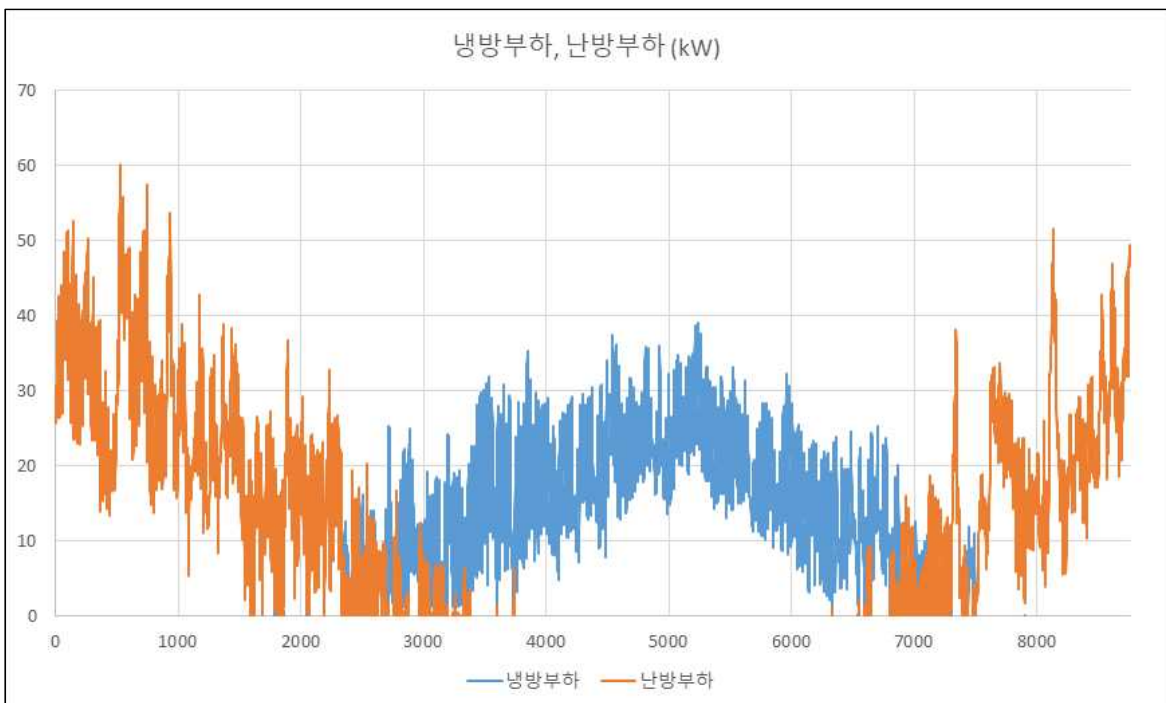
[그림 12. 서울대 평창캠퍼스 내 유리온실 조성 단면도]

○ 실증 온실 에너지 부하 산정

- 실증 지역 TMY 데이터 및 구축 유리온실 도면을 기반으로 하여 온실 에너지 부하를 산정함.
- (50평 기준) **평균 연중 난방부하: 88,774 kWh, 피크 난방 부하: 60 kW**
- (50평 기준) **평균 연중 냉방부하: 68,161 kWh, 피크 냉방 부하: 39 kW**



[그림 13. 실증 유리온실(100평)에 대한 냉방부하, 난방부하 산출]

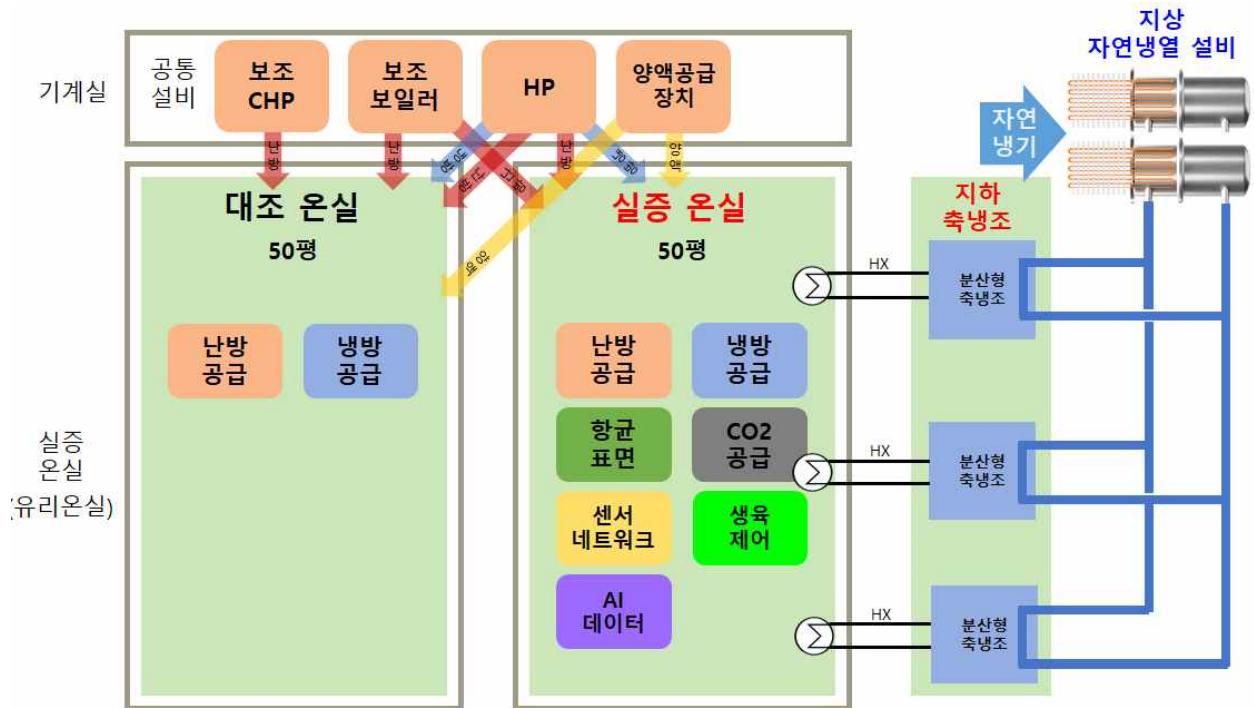


[그림 14. 실증 유리온실(50평)에 대한 냉방부하, 난방부하 산출]

○ 실증 온실 에너지 공급위한 설비

- 기존 냉방 및 난방공급 방법을 이용한 대조온실(50평), 본 과제에서 개발하는 냉방공급 방법을 적용한 실증온실(50평)은 아래 그림과 같음.
- 공통 냉난방 설비: HP(히트펌프), 보조보일러, 보조CHP

- 실증온실 에너지 공급·저장 설비: 자연냉열 설비(지상), 자연냉열 저장 설비(지하)
- 각 설비 용량은 2차년도 시작 시, 최종 확정 예정임.



[그림 15. 에너지 생산 및 저장 설비 배치]

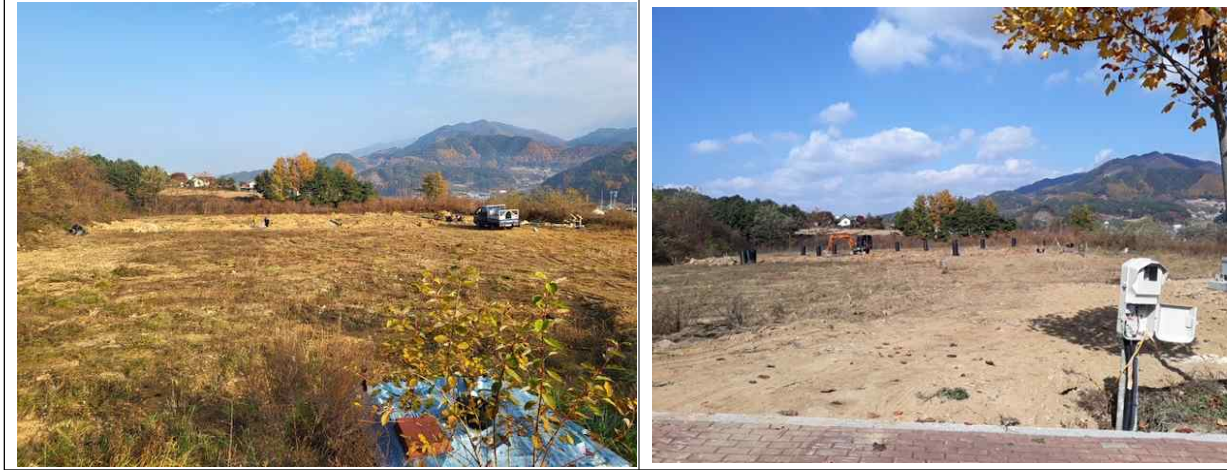
○ 자연냉열 생산 실증(실증1) 및 온실 대상 실증(실증2) 일정

- (실증1) 1차년도 12월 말까지 실증 부지에 자연냉열 생산·저장 설비 현장 설치를 완료예정(제작 완료). 12월 말부터 동절기 자연냉열 생산·저장 실증 실험 수행. 향후 2차년도 3차년도까지 성능 고도화를 하여 연속적으로 수행 예정.
- (실증2) 2차년도 상반기부터 실증 유리온실 구축위한 토목공사, 온실 구축공사 시작 예정. 2차년도 하반기에 실증 유리온실 구축을 완료하여 본격적인 실증 수행 예정.

나. 실증 온실 구축 공사

○ 온실 설치 부지 기반 조성

- 온실 설치를 위한 부지의 평탄화 작업
- 부지 정리, 온실 위치 잡기, 기초 콘크리트 작업 준비



[그림 2. 실증 온실 설치 부지 기반 조성 사진]

○ 온실 벽체용 판넬 세우기 및 철근 작업

- 온실 콘크리트 양생용 벽체용 판넬 세우기 작업
- 온실 설치 목적용 및 안전 공사 표시용 현수막 설치



[그림 3. 실증 온실 설치 부지 기반 조성 사진]

○ 온실 벽체 시공

- 온실 벽체 구축을 위한 콘크리트 주입
- 콘크리트 양생 및 온실 벽체 구축



[그림 4. 실증 온실 콘크리트 벽체 구축 사진]

○ 실증 온실내 축냉조 및 축열조 설치용 기초석 조성

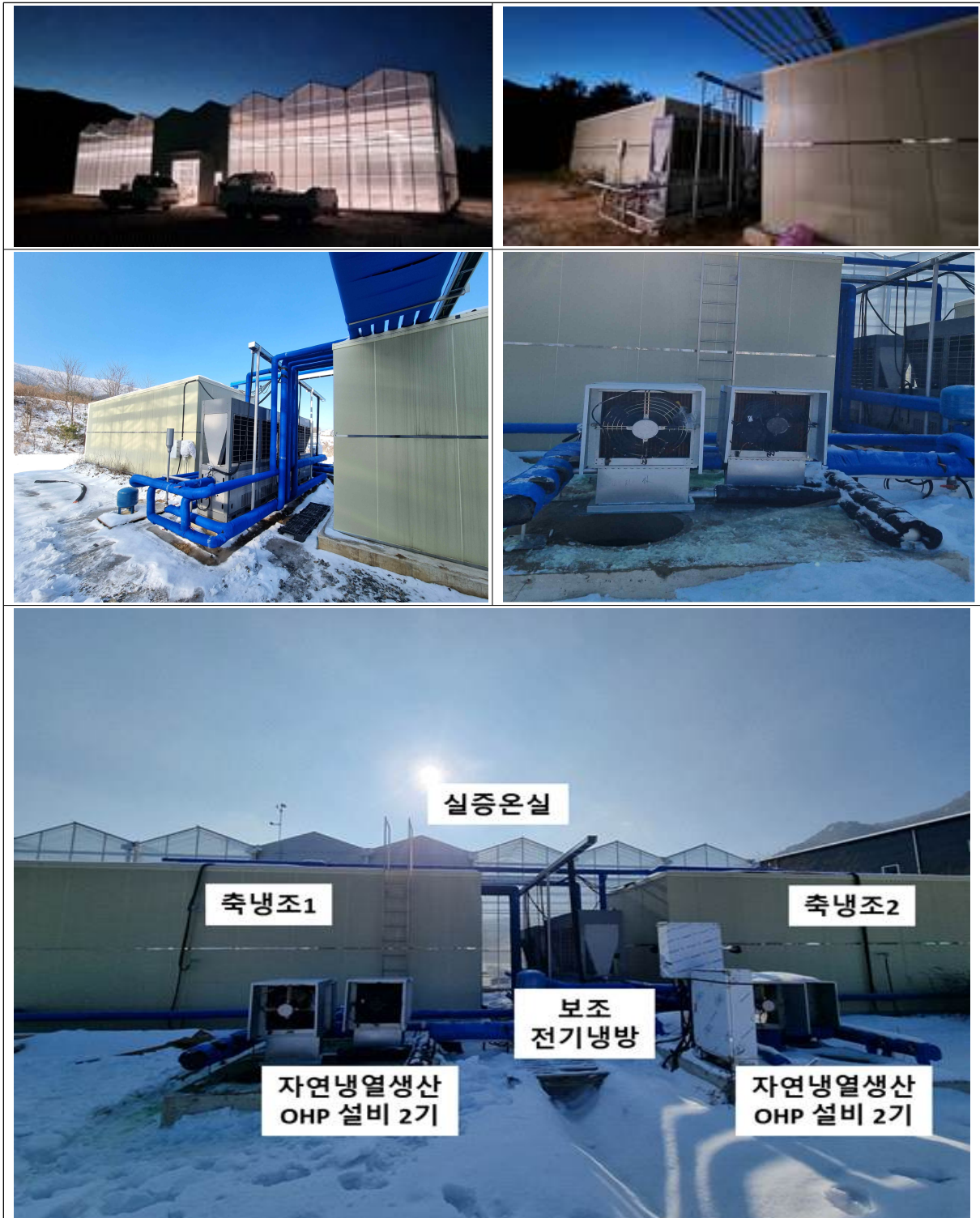
- 축냉조 및 축열조 기초석 기반 조성을 위한 석분 투입
- 기초석 설치 작업



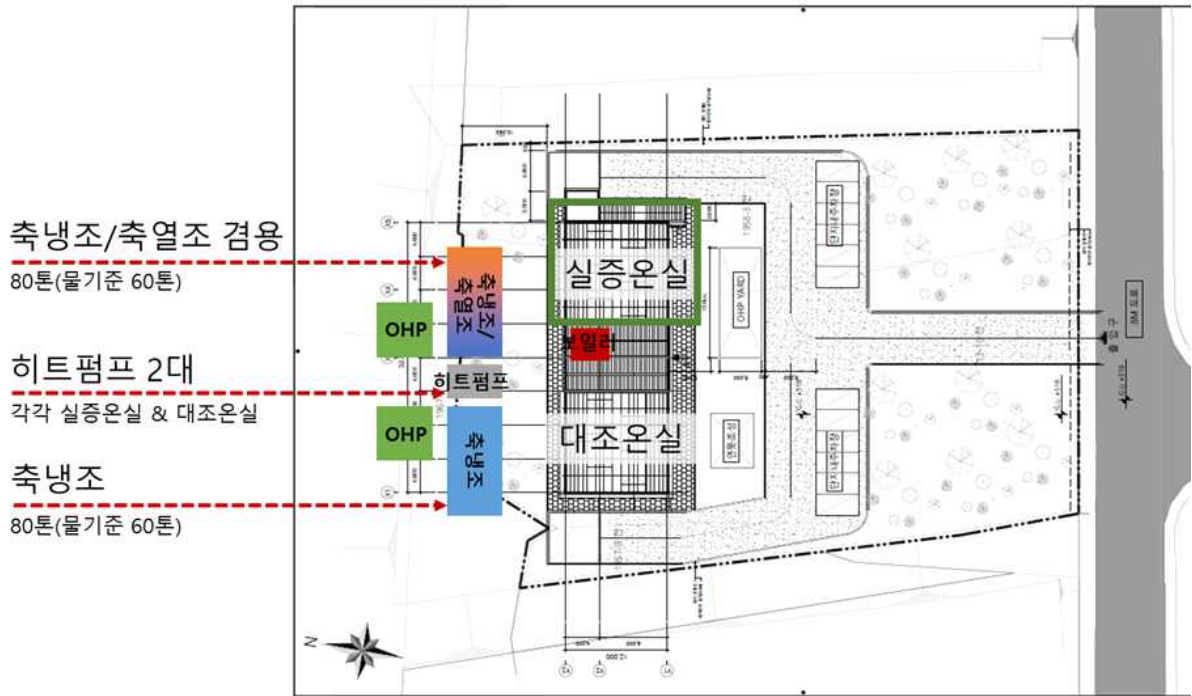
[그림 5. 실증 온실내 축냉조 및 축열조 설치용 기초석 조성 사진]

나. 실증온실 및 실증 냉방시스템 구축 완료

- 강원도 평창 실증온실에 구축한 냉방시스템은 아래와 같이 구성되어 있음.
- (자연냉열 생산장치) 본 과제에서 개발한 자연냉열 생산을 위한 초열전도체(OHP)기반의 자연냉열 생산 설비 4기 (냉열생산량 8kW 용량) 설치 및 실증.
- (자연냉열 저장장치) 본 과제에서 개발한 진공단열재(VIP)기반의 자연냉열 저장을 위한 축냉조(60톤) 2기 설치 및 자연냉열 저장 실증.
- (보조 냉방장치) 실증 온실의 냉방은 우선 동절기 및 간절기에 확보한 자연냉열을 이용해 냉방공급을 하고, 보조 냉방장치로 공기열 히트펌프(소비전력 2kW 용량) 2기를 설치하여 추가적으로 필요한 냉방을 공급함.



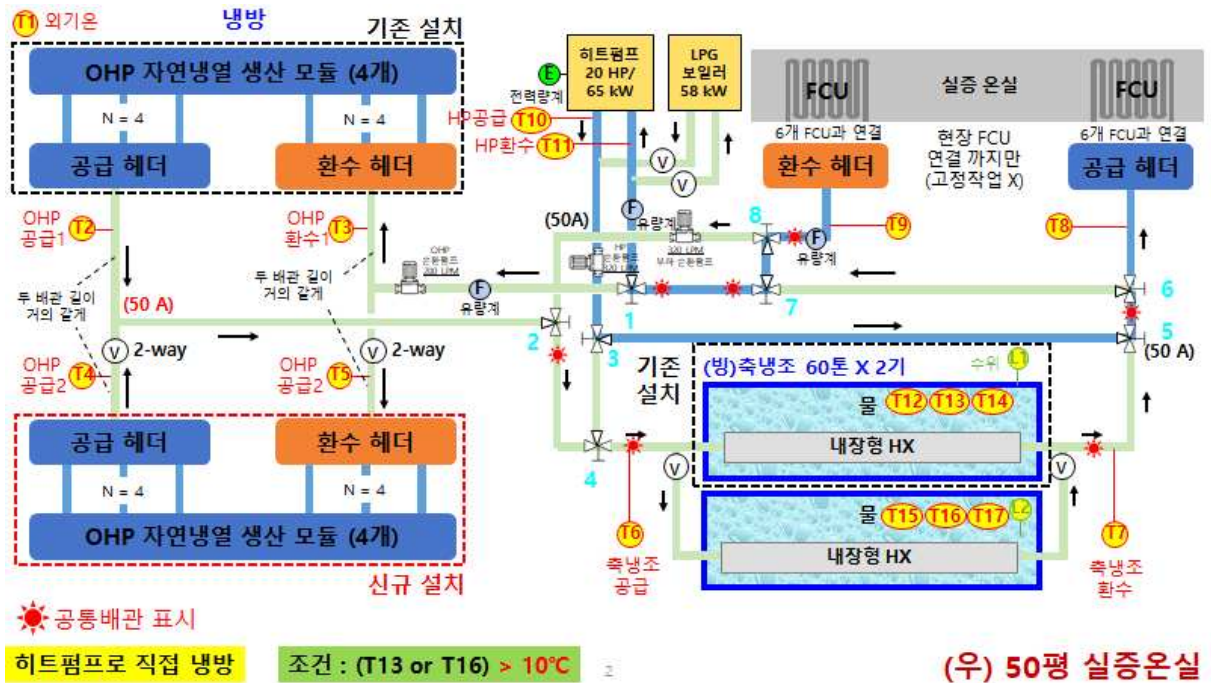
[그림] 강원도 평창 실증온실 구축된 냉방 에너지 시스템



[그림] 강원도 평창 실증온실 구축된 냉방시스템 배치도

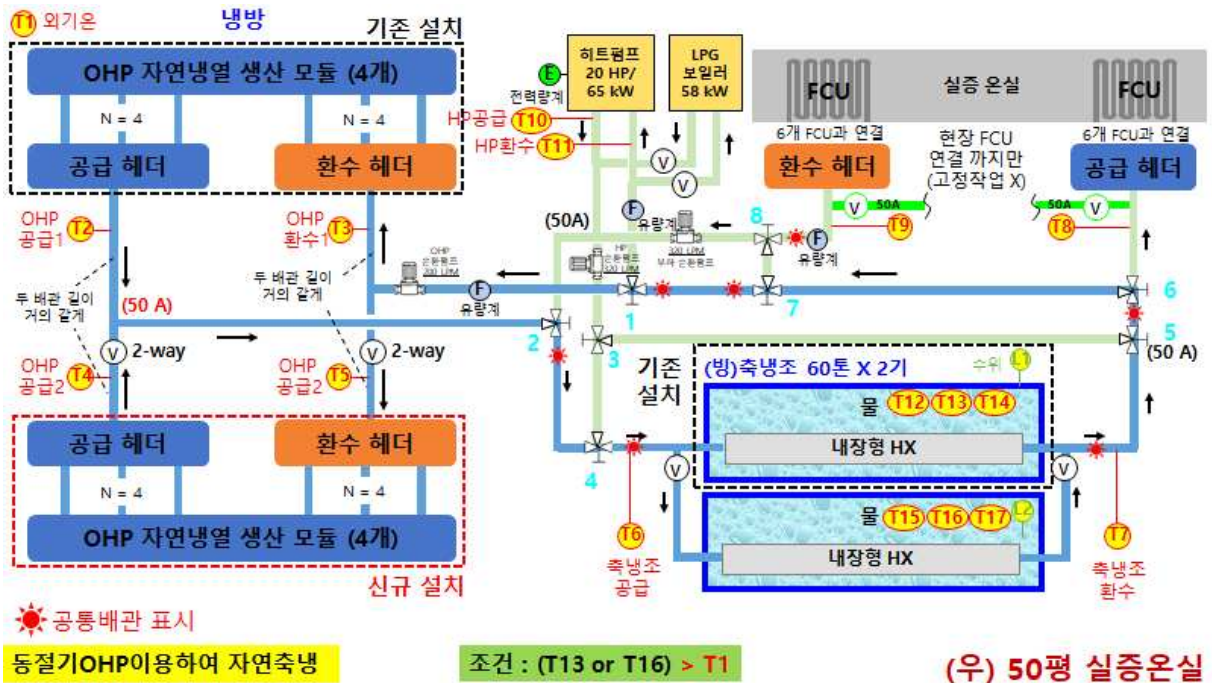
다. 실증 냉방시스템 운전 제어

- (Case-1) 하절기 전기냉방(히트펌프)으로 직접 냉방 공급 모드



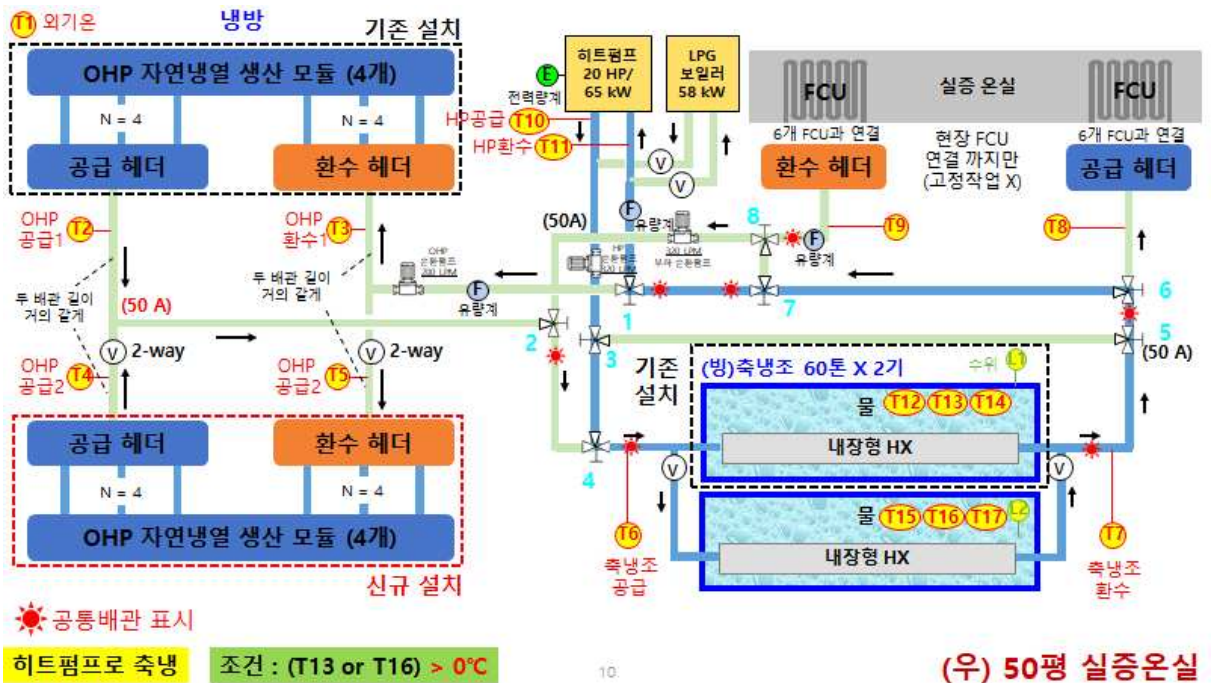
[그림] Case-1 운전 모드

- (Case-2) 동절기 자연냉열 축냉 운전 모드



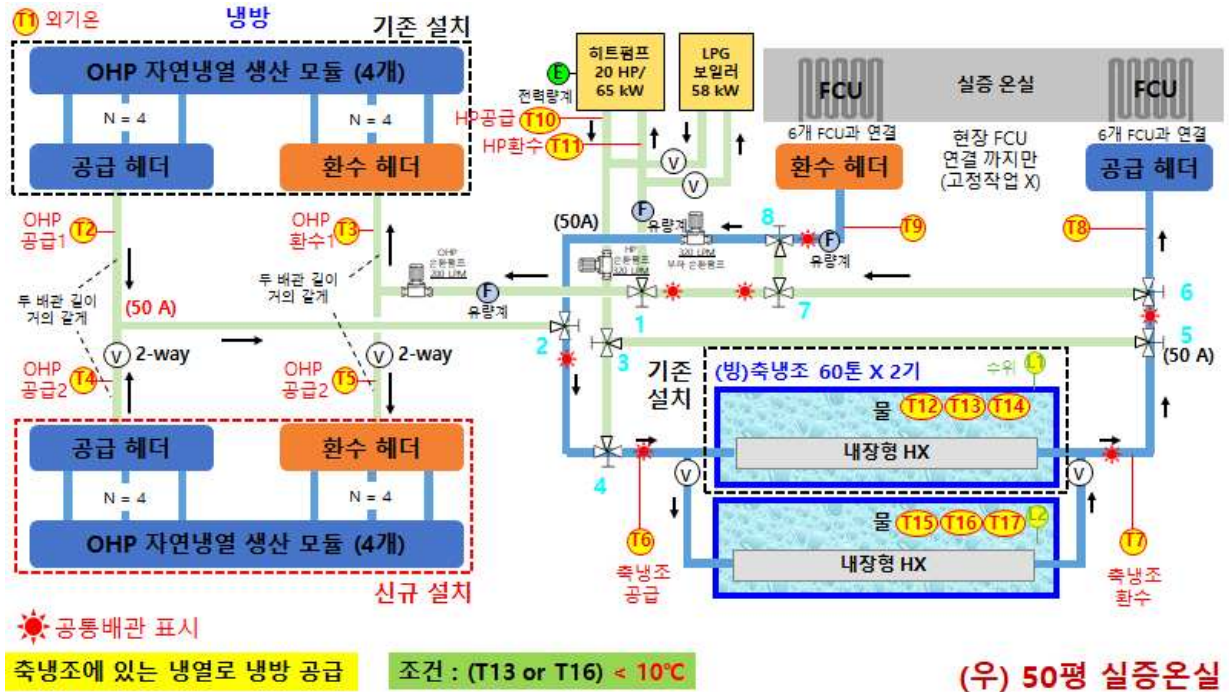
[그림] Case-2 운전 모드

- (Case-3) 동절기 히트펌프이용 축냉 운전 모드



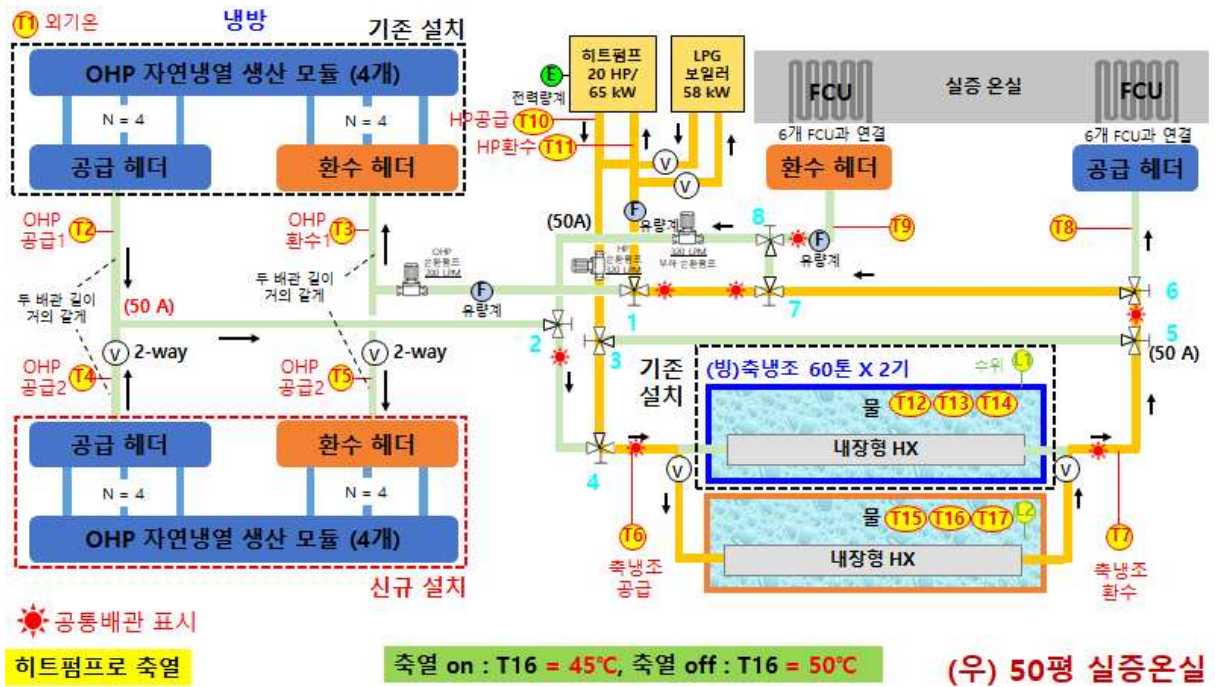
[그림] Case-3 운전 모드

- (Case-4) 하절기 축냉조에 있는 자연냉열을 이용한 냉방공급 운전 모드



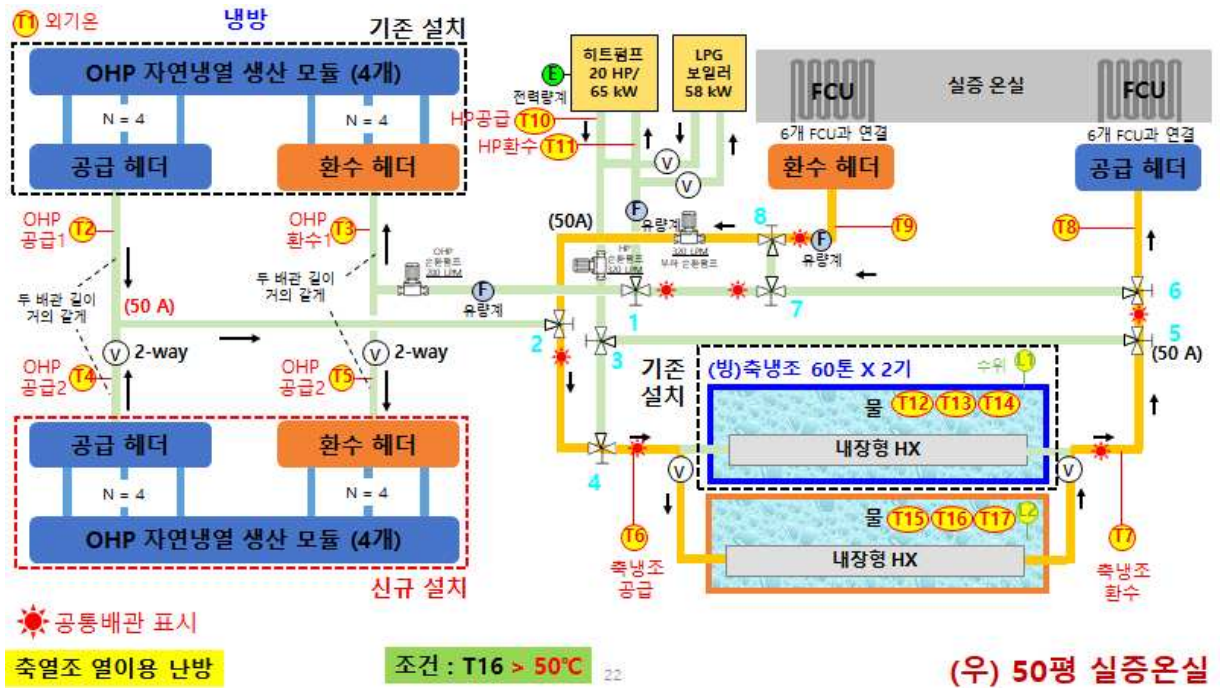
[그림] Case-4 운전 모드

- (Case-5) 동절기 온실 난방을 위한 히트펌프로 축열 운전 모드



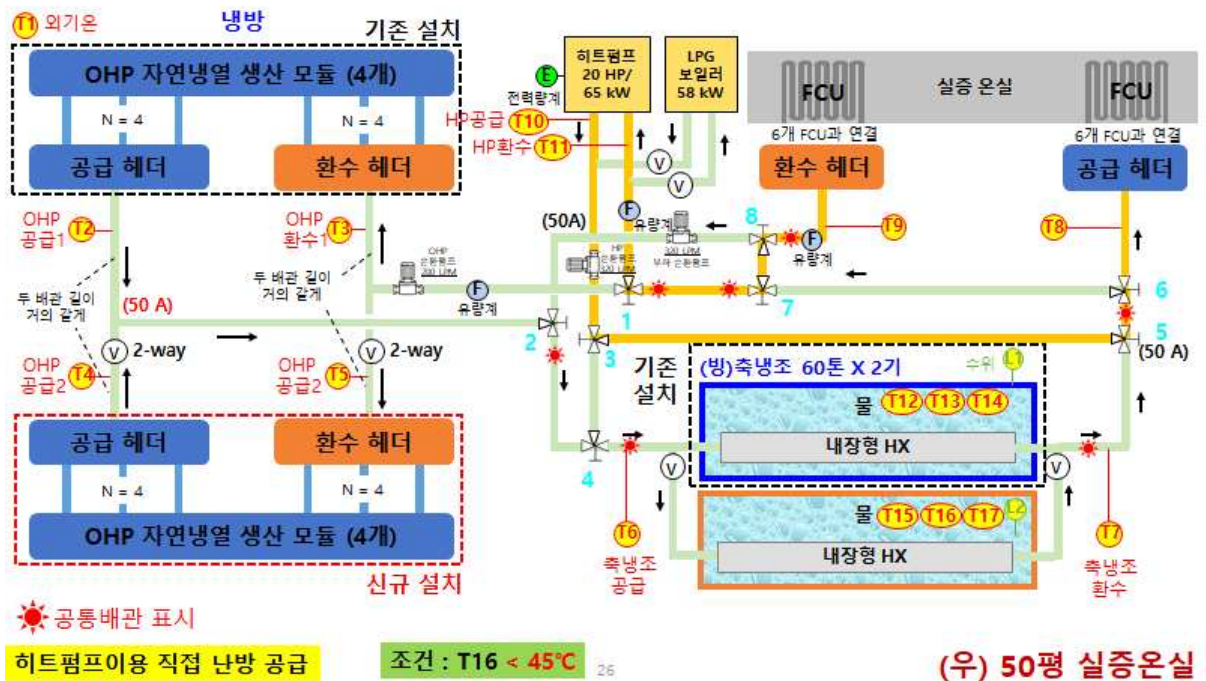
[그림] Case-5 운전 모드

- (Case-6) 동절기 온실 난방을 위한 축열조이용 온실 난방 공급 운전 모드



[그림] Case-6 운전 모드

- (Case-7) 동절기 온실 난방을 위한 전기 히트펌프이용 난방 공급 운전 모드



[그림] Case-7 운전 모드

라. 실증온실 작물 재배

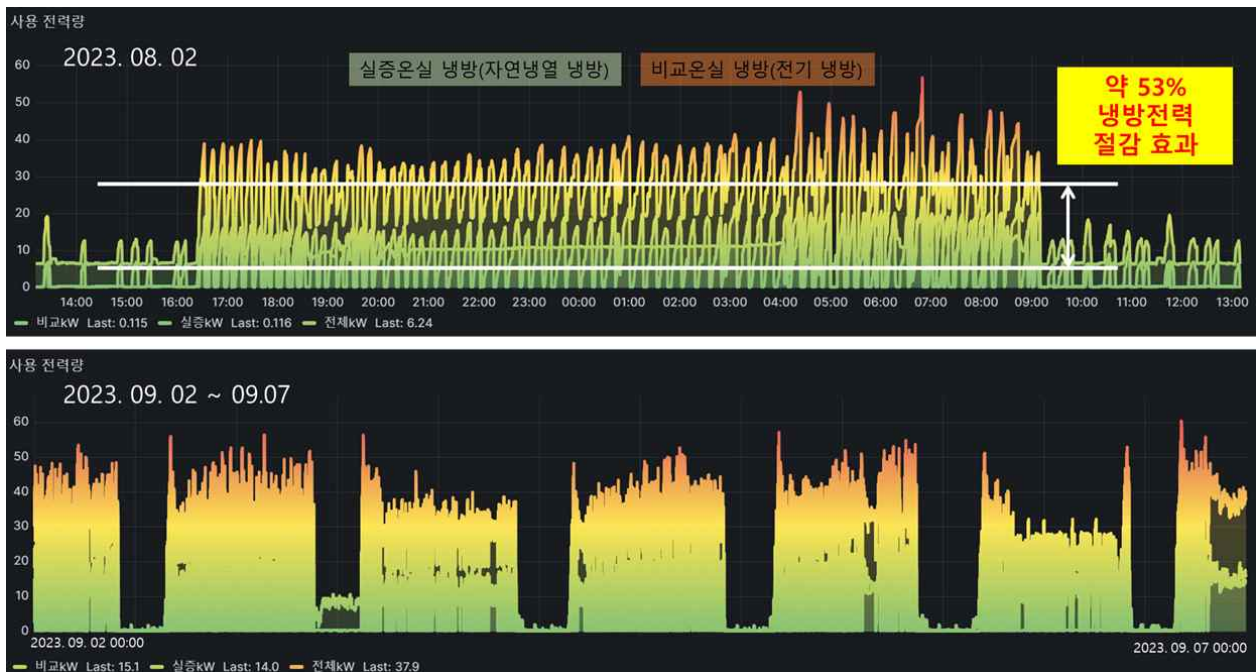
- 본 사업에서 고려한 재배작물은 4계절 딸기(설향)과 여름용 고랭지 딸기(무하, 미하, 장하, 복하, 고슬)임.
- 총 5 종류의 작물에 대해 냉방공급 실증연구를 수행함.



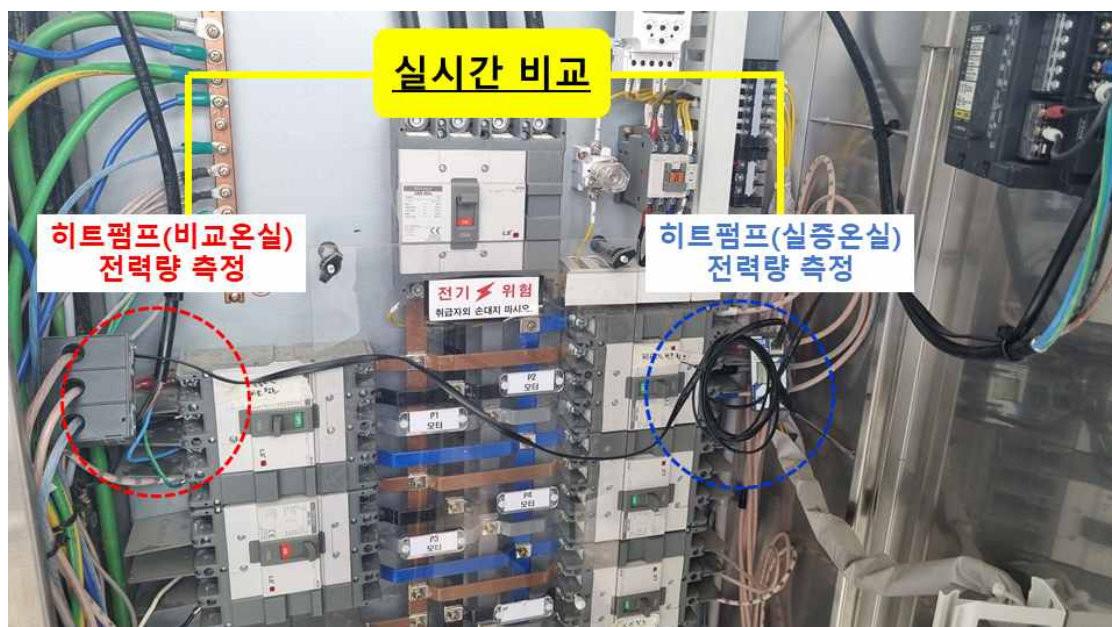
[그림] 강원도 평창 실증온실에서 재배한 딸기 작물 (설향 및 고랭지 딸기)

마. 자연냉열이용 온실 냉방 시스템 실증 결과 분석

- 본 사업에서 신규로 개발한 자연냉열이용 온실냉방 시스템으로 실증온실 냉방공급을 했을 때의 냉방전력 절감 효과를 검증하기 위해 비교온실에는 기존 전기냉방 히트펌프를 이용하여 냉방, 실증온실에는 개발 자연냉열이용 냉방 및 전기냉방 히트펌프를 이용한 냉방방식을 고려함.
- 비교온실 및 실증온실에서의 전기냉방 히트펌프의 실시간 소비전력을 측정하여 실증온실의 냉방 저감 효과를 검증하기 위한 실증 실험을 수행함.
- 실증온실 구축 및 자연냉열 냉방 시스템 설치 완료 후, 2023년 8월부터 실증 냉방 운전을 수행하였고, 실증온실의 히트펌프 전력사용량이 비교온실 보다 약 53%이상 감소하여 자연냉열 냉방 시스템의 냉방전력 절감 효과를 검증 완료함.

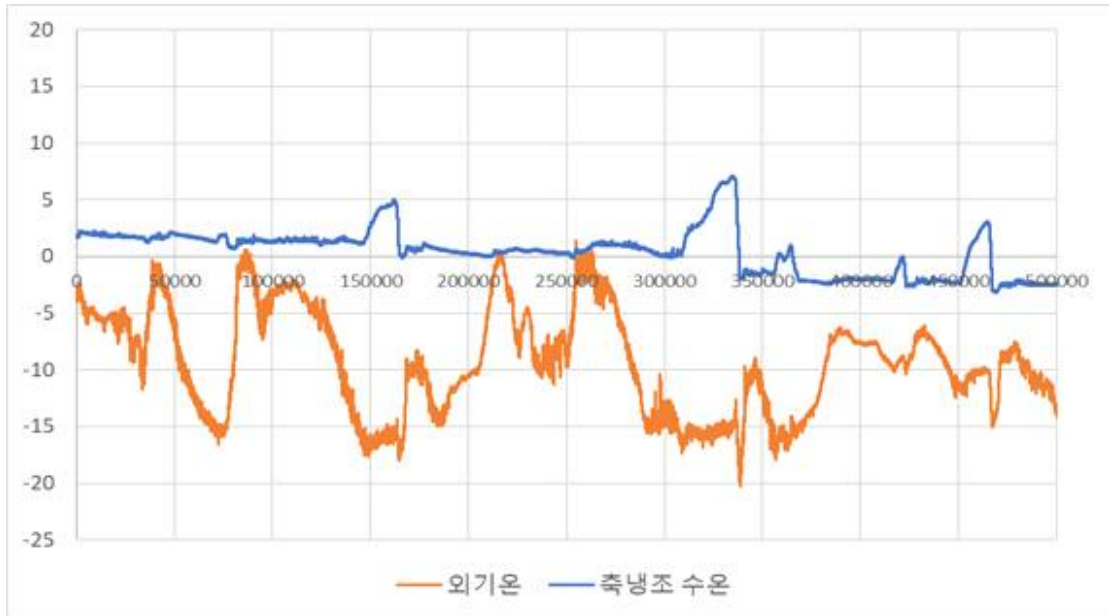


[그림] 실증온실(자연냉열 냉방)과 비교온실(전기냉방) 냉방전력량 비교



[그림] 실증온실(자연냉열 냉방)과 비교온실(전기냉방) 냉방전력량 비교위한 히트펌프 전력량 측정 모니터링 모듈

- 실증기간 동안 축냉조 수온기준 최종 영하 3°C까지 자연냉열 확보 및 저장을 달성하였으며 최종적으로 약 30 MWh의 냉열확보.
- 기존 전력냉방(비교온실) 대비, 약 53% 냉방전력 절감 달성 및 자연냉열 활용률 약 53% 달성

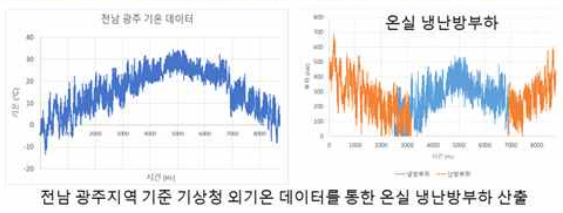


[그림] 자연냉열이용 냉방시스템에서의 냉열생산 및 저장 실증 결과(영하 3도의 냉열저장 확보)

바. 개발 온실 냉방 시스템 경제성 분석

- 본 사업에서 실증연구는 강원도 평창 실증온실 및 숙명여대 실험온실에서 수행을 진행하였음.
- 향후 국내 전지역 보급을 위해서는 개발된 시스템의 경제성 분석이 필요하여 해당 냉방시스템의 초기투자비, 운영비, 수익 등의 경제성 분석을 수행함.
- 본 경제성 분석에서 고려한 온실(3,300 m² 가정) 전체 냉방부하의 50%를 본 과제에서 개발한 신규 냉방시스템을 적용한다고 가정했을 때, 연중 냉방전력 비용 절감 효과를 기존 전기냉방(히트펌프-냉방)을 사용했을 경우와 지열 신재생에너지 냉방을 사용했을 경우와 비교 분석을 수행 함.
- (기존 전기냉방 시스템과 비교) 기존 전기냉방은 COP 3을 갖는 히트펌프 냉방을 고려하였으며 본 과제에서 개발한 신규 냉방시스템은 기존 전기냉방방식 대비 약 50%인 1,120만원의 냉방전력 비용절감 효과 달성이 가능함.
- (기존 지열 신재생 냉방 시스템과 비교) 기존 지열히트펌프 냉방은 COP 5를 갖는 냉방을 고려하였으며 본 과제에서 개발한 신규 냉방시스템은 기존 지열 신재생 냉방방식 대비 약 50%인 640만원의 냉방전력 비용절감 효과 달성이 가능함.
- 본 경제성 분석에서는 농업용(을) 전기 저압(약 643원/kWh)-2023년도 1분기 기준을 사용함.

- (가정) 딸기재배 온실 연면적 : 3,300 m² (0.3 ha, 1,000 평)
 - (가정) 전남 광주지역 기준 연중 총 냉방부하 : 1,109,370 kWh



전남 광주지역 기준 기상청 외기온 데이터를 통한 온실 냉난방부하 산출

냉열저장조 (900 m ²)	작물: 딸기 지역: 전남 광주	온실 (3,300 m ²)
냉열집열기 (80 m ²)		

(실제 비율)

• 총 냉방부하의 50%를 자연 냉열로 냉방 공급 가정
 - 냉열집열장치 (높이 1m 기준) : 80 m² 설치면적 필요
 - 냉열저장장치 (지중 깊이 5m 기준) : 900 m² 설치면적 필요



• 초기 설비 투자비 산정

- 지상 냉열 집열장치 : 2백만원X10ea=2천만원 (아직 상용화X, 향후 상용화 시 가정 비용 산출)
- 지중 냉열 저장장치 : 3억원 (지중 콘크리트 방식)
- 토공 비용 : 약 3천만원 (10만원/평)
- 배관공사 : 약 2천만원
- 총 설비 투자비용 : 3억 7000만원 (뒷장에 기존 전기냉방 및 지열냉방 설비 초기 설비 투자비 비교)

[그림] 기존 전기냉방 및 신재생 지열냉방방식과 경제성 비교 분석 결과

[표] 기존 전기냉방 및 신재생 지열냉방방식과 경제성 비교 분석 결과

작물: 딸기 지역: 전남 광주 온실 규모: 0.3ha/1000평	기존 전기냉방 시스템	기존 지열냉방 시스템	신규 자연냉열 냉방 시스템
성능 COP	냉방기준 COP 3 (업계 최고 성능)	냉방기준 COP 5 (업계 최고 성능)	COP 8.5 (성능시험 결과)
설치비용	1억 5천만원 (70RT기준) (1.5천백만원/10RT)	10억 5천만원 (70RT기준)	3억 7천만원 (상용화 가정 시)
배관공사 비용	2000 만원	2000 만원	2000 만원
총 설비 비용	약 1억 7천만원	약 10억 7천만원	약 3억 9천만원
연간 전기요금 (농업용을 전기요금 64.3원/kWh 적용)	2400 만원	713 만원	70 만원
기존 대비 전력요금 절감	-2330 만원	643 만원	-
생산성 향상 편익	-	-	1000평 딸기온실 연간 매출기준, 7700만원(평당77000원) • 작기 연장 : 1540만원, 20% 상승 (개발 HADES SW 예측) • 생육 제어 : 1155만원, 15% 상승 (실증 결과)
투자비 회수 기간 (기존 전기냉방 대비)	기존 전기냉방 설비비용 절감 : -7천5백만원 • (생산성 고려X) 투자비 회수 기간 : 13년 • (생산성 고려O) 투자비 회수 기간 : 6.3년		

바. 국내 남부지방지역에서의 추가 실증연구 계획

- 동절기 온실 내 미활용 적층 태양열을 회수하여 지중 축열조에 저장 후, 난방공급 필요 시 히트펌프로 승온하여 난방공급. 동절기 외기로부터 자연냉열을 확보하여 지중 축열조에 저장 또는 하절기 야간 외기로부터 자연냉열을 확보하여 지중 축열조에 저장 후 냉방공급 필요 시 히트펌프로 감온하여 냉방공급. 히트펌프 입장에서는 난방 시 열원 측 유입온도가 증가하여 히트펌프 성능(COP)이 증가, 냉방 시 열원 측 유입온도가 감소하여 히트펌프 성능(COP)은 증가하여 전체적으로 상당한 에너지 절감 효과 달성 가능

기술이전확약서(계획서)

본 기관은(공공기술개발주체) 기술사업화지원사업 연구개발과제 「과제명 : 이상기후 대응 온실작물 연중생산을 위한 자연냉열 냉·난방시스템 이용기술 체계화 및 시장 확대」에 참여하면서 과제를 통해 개발한 기술을 연구기간 내 기술이전(실시)할 것을 확약합니다.

공공기술 연구개발기관

한국에너지기술연구원 연구개발 책임자 운영직

원장 이창근

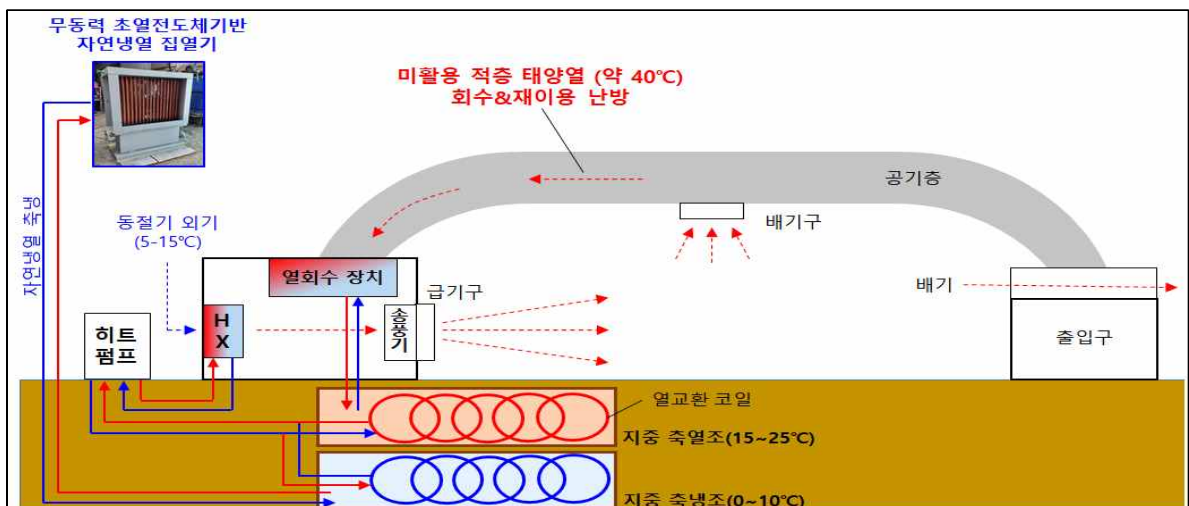


당사는 기술사업화지원사업 연구개발과제 「과제명 : 이상기후 대응 온실작물 연중생산을 위한 자연냉열 냉·난방시스템 이용기술 체계화 및 시장 확대」에 참여하면서 과제를 통해 개발한 기술을 연구기간 내 이 전받고(실시하고) 기술료를 납부할 것을 확약합니다.

기술실시기업 : (주) 하이룸 대표이사 변 옥 주



2024. 2. 14



[그림] 전남 담양지역의 완전밀폐형 딸기 온실대상 실증 계획 개념도

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부, 과학기술정보통신부, 농촌진흥청에서 시행한 “스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발” 사업의 “계절 간 자연냉기 저장·이용 기반 차세대 신재생 스마트 온실 냉방 기술” 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부, 과학기술정보통신부, 농촌진흥청((재)스마트팜연구개발사업단)에서 시행한 “계절 간 자연냉기 저장·이용 기반 차세대 신재생 스마트 온실 냉방 기술” 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.