

120093-
3

태양열을 활용한 에너지 생산·저장·관리 및
실증모델 구축

2023

농림축산식품부

농림식품기술기획평가원

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개() 발간등록번호(O)
농업에너지자립형산업모델기술개발사업 2023년도 최종보고서

발간등록번호

11-1543000-004464-01

태양열을 활용한 에너지 생산·저장·관리 및 실증모델 구축

2023.12.14.

주관연구기관 / 한국에너지기술연구원
공동연구기관 / 세한에너지(주)
/ (주)에스앤지에너지
/ 대전대학교 산학협력단
/ 경상북도농업기술원

농림축산식품부
(전문기관)농림식품기술기획평가원

제출문

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “태양열을 활용한 에너지 생산·저장·관리 및 실증모델 구축”(개발기간 : 2020.4.29 ~ 2023.6.30)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2023.12.14

주관연구기관명 : 한국에너지기술연구원 이창근 (인)



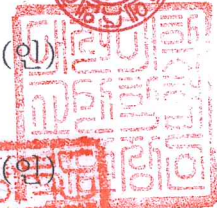
공동연구기관명 : 세한에너지(주) 권영호



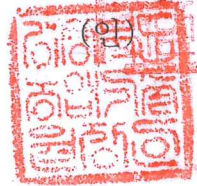
공동연구기관명 : (주)에스앤지에너지 박종일 (인)



공동연구기관명 : 대전대학교 산학협력단 이영환 (인)



공동연구기관명 : 경상북도농업기술원 조영숙 (인)



주관연구책임자 : 한국에너지기술연구원 이경호

공동연구책임자 : 세한에너지(주) 정재용

공동연구책임자 : (주)에스앤지에너지 윤석철

공동연구책임자 : 대전대학교 산학협력단 신우철

공동연구책임자 : 경상북도농업기술원 이현숙

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의 합니다.

< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명		농업에너지 자립형 산업모델 기술개발사업			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)											
내역사업명 (해당 시 작성)					연구개발과제번호		120093-3									
기술 분류	국가과학기술 표준분류	EF0602	50 %	LB0203	25 %	EA707	25%									
	농림식품 과학기술분류	CA0201	50 %	RC0102	25 %	AA0204	25%									
총괄연구개발명 (해당 시 작성)																
연구개발과제명		태양열을 활용한 에너지 생산·저장·관리 및 실증모델 구축														
전체 연구개발기간		2020. 04. 29 ~ 2023. 06. 30 (3년 1개월)														
총 연구개발비		총 4,890,000천원 (정부지원연구개발비: 3,666,000천원, 기관부담연구개발비 : 1,224,000천원, 지방자치단체: 0천원, 그 외 지원금: 0천원)														
연구개발단계		기초[] 응용[] 개발[<input checked="" type="checkbox"/>] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준(6) 종료시점 목표(6)										
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)																
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)																
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	시설원예에 태양열 계간축열 기반 복합열원히트펌프 융합 열공급 시스템 구현으로 난방에너지 공급 100% 실증을 통하여 아열대작물 에너지비용절감형 산업화 모델 제시 - 실증기간 : 7개월 이상(2022년 6월 ~ 2022년 12월) - 시설규모 : 1,000 평형 시설원예 - 실증 시설원예 난방에너지 비용 절감 80% 이상 ※ 기존 재배조건과 동일한 환경조건으로 조절한 상태에서 1개월 운전하여 비교(그 외기간은 재배환경 개선운전 적용 예정)														
	전체 내용	■ 주요 기능 <ul style="list-style-type: none"> ▪ 평판형 및 진공관형 태양열 집열기 복합구성 : 저온 및 고온 집열 영역에서의 태양열 생산 ▪ 태양열 집열 구조 최적화 : 태양열 집열기 시설원예 설치 가능 최대 집열 면적 도출 ▪ 계간축열시스템 : 생산된 태양열 장기 열저장 및 히트펌프 열원 공급 ▪ 복합열원히트펌프 : 공기 및 태양열 열원 복합 활용 시설원예 열공급 ▪ 운영관리시스템 : 전체 시스템의 모니터링 및 효율적 운영 제어 ■ 주요 성능 <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 5%;"></th> <th style="width: 25%;">집열효율</th> <th style="width: 25%;">정상축열운전율</th> <th style="width: 20%;">복합열원히트펌프 SCOP</th> <th style="width: 25%;">태양열 시스템 고장진단 정확도</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">성능 지표</td> <td style="text-align: center;">KS 인증 효율 대비 90% 달성¹⁾</td> <td style="text-align: center;">98% 이상²⁾</td> <td style="text-align: center;">4 이상³⁾</td> <td style="text-align: center;">90 % 이상⁴⁾</td> </tr> </tbody> </table> 1) 실증 시설원예에 적용된 태양열 집열기의 데이터를 기준으로 KS인증 집열기 성능시험 유사 조건에서의 태양열 집열기 효율을 분석하여 KS 인증 효율과 비교하여 제시 (KS 인증 효율 대비 90 %)태양열 집열효율은 KS 인증 시험 유사 (입사각, 온도) 조건에서 실증 운전 데이터로 분석 2) 정상축열운전율은 3차년도 실증 데이터로 산정하며, 태양열 과열 일수 7일 이하가 되는 조건, 즉 전체 운전일수 중							집열효율	정상축열운전율	복합열원히트펌프 SCOP	태양열 시스템 고장진단 정확도	성능 지표	KS 인증 효율 대비 90% 달성 ¹⁾	98% 이상 ²⁾	4 이상 ³⁾
	집열효율	정상축열운전율	복합열원히트펌프 SCOP	태양열 시스템 고장진단 정확도												
성능 지표	KS 인증 효율 대비 90% 달성 ¹⁾	98% 이상 ²⁾	4 이상 ³⁾	90 % 이상 ⁴⁾												

		<p>과열이 발생하지 않고 정상 축열운전이 이루어지는 비율로 정의</p> <p>3) SCOP(Seasonal Coefficient Of Performance)는 복합열원 히트펌프의 계절난방 성능 지표로서 실증운전 데이터로 계산</p> <p>4) 태양열시스템의 고장진단 정확도는 실증 설비의 인위적인 고장과 유사한 상태를 계획하여 운영관리시스템에서 진단한 결과의 정확도를 산정</p> <p>■ 주요 성능</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 시설원에 적용을 위한 태양열 구조 최적화 설계 기술 (국내 최초) ▪ 시설원에 태양열 계간축열 연계 복합열원 히트펌프 열공급 시스템 기술 (국내 최초) ▪ 태양열 계간축열기반 시설원에 열공급 시스템 최적 운영관리 기술 (국내 최초) ▪ 시설원에 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템 통합 설계 기술 실증시설원에 적용 ▪ 실증 시설원에 여건에 따른 태양열 및 계간축열시스템 모델 도출 ▪ 태양열 계간축열 기반 복합열원 히트펌프 열공급 시스템 통합 설계·구축 및 실증 ▪ 열공급 시스템 최적 운영제어 로직 개발 및 적용 ▪ 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템 모니터링 시스템 구축 ▪ 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템 장기 실증 운영 ▪ 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템 통합 해석 기법 실증 시설원에 적용 분석 ▪ 계간축열조 연계 태양열 설비 사후관리 운영계획 수립 ▪ 계간축열 설비 사후관리 운영계획 수립 ▪ 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템 시뮬레이션 성능분석 ▪ 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템 고장 진단 알고리즘 및 프로그램 개발 ▪ 태양열 계간축열 기반 열공급 모니터링 프로그램 실증시설원에 적용 ▪ 농가소득 증대를 위한 사업화모델(비즈니스모델, BM) 개발 ▪ 실증 시설원에 재배 작물의 수확량 증대 방안 도출 ▪ 재배 환경에 따른 작물 생육 조사·분석 ▪ 실증 시설원에 생산성 분석 및 장기재배 영농기법 연구
	<p>1단계 (해당 시 작성)</p>	<p>목표 1,000 평형 규모 아열대작물 시설원예를 대상으로 난방에너지 100% 공급 가능 태양열 계간축열 기반 복합열원히트펌프 융합 열공급 시스템 1차 구축</p> <p>내용</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 실증시설원에 계간축열조 기반 태양열 열공급 시스템 구축을 위한 인프라(기초, 기계실, 전력, 상수도) 설계 및 구축 완료 ▪ 실증시설원에 태양열 열공급 시스템 적용을 위한 지반조사 완료 ▪ 계간축열조 및 버퍼조 적용을 위한 기계실 하부 기초파일 설계 및 구축 완료 ▪ 실증시설원에 태양열 열공급 시스템 적용을 위한 기계실 설계 및 구축 완료 ▪ 실증 시설원에 태양열 열공급 시스템 운영을 위한 200 kW 급 전력 증설 완료 ▪ 계간축열 기반 태양열 열공급 시스템 운영을 위한 상수도 설비 설계 및 구축 완료 ■ 계간축열 기반 태양열 열공급 실증 시스템 상세 설계 및 1차 구축 완료 ▪ 시뮬레이션을 이용한 실증시설원에 난방 부하 예측, 설비용량 산정, 시스템 운영비용 및 이산화탄소 절감 분석 완료 ▪ 계간축열 기반 태양열 열공급 시스템 상세 실시 설계를 통

			<p style="text-align: right;">요약문 (5쪽 중 3)</p> <p>한 도면화 완료</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 시설원에 적용을 위한 태양열 시스템 음영분석을 통한 태양열 시스템 상세 설계 기술 ▪ 태양열 열공급 시스템 적용을 위한 350 m³ 용량의 계간축열조 및 100 m³ 용량의 버퍼조 설계 및 구축 기술 ▪ 계간축열조 및 버퍼조 내부 성층화 향상을 위한 디퓨저 설계 기술 ▪ 계간축열 기반 태양열 열공급 시스템 운전 기법 및 제어 방안 설계 및 도출 ▪ 계간축열 기반 태양열 열공급 시스템 모델예측기반 최적운전제어 기법 개발 ▪ 계간축열조 연계 평판형 태양열 시스템 설계 및 구축 기술 ▪ 실증시설원에 난방에너지 공급을 위한 계간축열조 기반 태양열 열공급 시스템 설계 및 구축 기술 확보(1차 구축 완료) <p>■ Edge Computing 방식의 모니터링 프로그램 설계 및 제작</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ OpenHAB 기반 원격 모니터링 및 고장검출 시스템 알고리즘 설계 및 구현 기술 ▪ 웹 기반 실시간 원격 모니터링 및 고장검출 시스템 구축 <p>■ 실증시설원에 재배환경 및 작물생육 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 태양열 기반 열공급 시스템 시설원에 연계 방안 분석 ▪ 실증시설원에 재배환경 및 작물 생육 데이터 수집 및 분석
		목표	<p>1,000 평형 규모 아열대작물 시설원예를 대상으로 난방에너지 난방 에너지 공급 100% 할 수 있는 태양열 계간축열 기반 복합 열원히트펌프 융합 열공급 시스템 구축 완료, 검증 및 실증운전을 통한 난방 에너지 비용 절감 80% 이상 달성</p>
	2단계 (해당 시 작성)	내용	<p>■ 실증시설원에 계간축열 기반 태양열 열공급 시스템 실증설비 구축, 실증운전 및 분석</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 계간축열 기반 태양열 열공급 시스템 적용 히트펌프 시스템 구축 ▪ 하이브리드 GTES 2차 구축(수평형) ▪ 진공관형 태양열 시스템 2차 구축으로 태양열설비 구축 ▪ 실증시설원에 내부 난방에너지 공급을 위한 온수공급배관 및 FCU 구축 ▪ 통합 모니터링 및 제어 시스템 실시 설계 및 구축 ▪ 실증운전 중 비난방기의 태양열 축열 운전, 난방기의 태양열과 히트펌프를 이용한 온실 열공급운전 분석 및 태양열 의존율과 에너지비용절감을 등 산정 <p>■ 실증운전 결과 및 개성사항을 반영한 계간축열 기반 태양열 열공급 시스템 운영기술 확보</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 시스템 용량에 따른 의존율 분석 등 시스템에 대한 최적 설계 가이드라인 및 통합 모니터링시스템 운영가이드라인 제시 ▪ 보급형 시설원에 열공급 시스템 해석틀 개발 ▪ 설비의 사후관리 운영계획 마련 <p>■ 아열대작물 에너지비용 절감형 산업화 모델 제시</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 사업모델을 위한 시스템모델 도출 ▪ 시스템모델에 대한 시스템 시뮬레이션을 통한 에너지비용 분석과 초기비용을 고려한 경제성 분석

연구개발성과	<p>○정성적 성과</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ 1,000평 규모의 아열대 작물을 재배하는 비닐하우스를 대상으로 태양열 계간축열식 히트펌프 융합 열공급시스템을 개발하고 실증모델을 구축하여 1년간 실증운전을 수행 ▪ 계간축열설비는 온수탱크방식으로 기존 보급 중인 히트펌프 버퍼조 설비에 추가적으로 연계하여 설치가 가능한 방식으로 구축 ▪ 실증대상 온실 일부를 기계실 공간으로 변환하여 기계실 옥상과 내부 그리고 주
--------	--

변부에 열공급설비를 컴팩트하게 설치하여 실증설비를 구축, 향후 **에너지플랫폼형 기술개발위한 개념 도출** (농업용 4)

- 온수탱크식 계간축열 외에 얕은깊이의 지중축열과 지중열교환기 수직복합형 방식의 소규모 설비개념을 도출하고 실증
- 시스템 주요 구성요소는 시뮬레이션 기반으로 용량을 산정하여 설계하였고, 재배작물이 기존 설비계획단계에서 바나나와 천혜향에서 한라봉과 천혜향으로 변경되어 난방부하가 다소 낮아짐에 따라 열공급량 중 태양열의존율은 약 75%로 매우 높게 나타났으며, 기존 등유보일러방식에 비하여 약 80%의 에너지비용절감효과를 확인 (전력량요금만 고려, 기후환경요금 및 연료비조정액 포함시 75.5%)
- 사업화를 위한 사업모델과 시스템모델을 도출하였고, 실증운전 데이터를 활용하여 시스템 시뮬레이션 모델을 보정한 후 경제성 분석을 수행 (작물은 애플망고와 천혜향 가정)

○정량적 성과

- 연구개발성과

특허출원	고용창출	SCI논문	비SCI논문	학술발표	정책제안	홍보전시	기타활용
3건	9명	2건	6건	7건	2건	15건	0건

- 핵심기술 성능지표 및 정량적연구목표

지표	목표	달성
집열효율(%)	> 90	○ ISO 24194 방법적용, 안전계수고려 및 입사각 약0° 조건, 단일집열기 KS시험 효율 대비 현장설비 집열효율로서, 평판형 100.6%, 진공관형 98.7%
정상축열운전율(%)	> 98	○ 실증시간에 걸쳐 과열일수를 제외한 정상축열운전일수
복합열원 히트펌프 SCOP	> 4	○ KS B 6275 방법 적용, 실증기간 중 난방기간에 걸쳐 복합열원히트펌프 운전 SCOP 4.38
태양열 시스템 고장진단 정확도(%)	> 90	○ 태양열설비에 대한 인위적 고장발생에 따른 감지시험 회수 총 57회 중 성공 55회로 정확도 96.5%
시설원에 태양열 설비 구축 (건)	1	1
계간축열 구축 (건)	1	1
실증시스템 구축 (건)	1	1
태양열 고장진단 프로그램 (건)	1	1
운영관리시스템 구축 (건)	1	1
통합 모니터링 시스템 구축 (건)	1	1
경제성 평가분석 (건)	1	1
사업화 모델 (건)	1	1

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과

- * 농업에너지이용효율화사업에 태양열설비 포함을 위한 정책제안에 활용
- * 중소형 온실 작업동 에너지플랫폼화 또는 리모델링 정책제안에 활용
- * 히트펌프와 융합하여 온실 난방열에너지수요의 효율적 전기화에 기여
- * 기존 보급형 히트펌프와 버퍼조 설비에 추가보급 방식으로 활용 가능
- * 추가 실증으로 기존 지열히트펌프 성능저하 해소에 기여 검증 및 활용 가능
- * 보급사업 추진가능한 기업에 기술이전하여 사업화 기술지도에 활용

연구개발성과의 비공개여부 및 사유

해당사항 없음

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설·장비	기술 요약 정보	소프트웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
SCIE 2건,	출원 3건	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	비SCIE									요약문 (5쪽 중 5)	
	6RJS	구입 기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	
국문핵심어 (5개 이내)	태양열시스템		계간축열		열공급시스템		히트펌프 융합		시설원예		
영문핵심어 (5개 이내)	Solar thermal system		Seasonal storage		Heat supply system		Heat pump integrated		Greenhouse horticulture		

최종보고서

최종보고서						보안등급					
						일반[<input checked="" type="checkbox"/>], 보안[<input type="checkbox"/>]					
중앙행정기관명			사업명	사업명		농업에너지자립형 산업모델기술개발사업					
전문기관명 (해당 시 작성)			내역사업명 (해당 시 작성)								
공고번호	농림축산식품부 공고 제 농축 2020-136호		총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)								
			연구개발과제번호			120093-3					
기술분류	국가과학기술 표준분류	EF0602	50%	LB0203	25%	EA707	25%				
	농림식품과학 기술분류	CA0201	50%	RC0102	25%	AA0204	25%				
총괄연구개발명 (해당 시 작성)	국문		영문								
연구개발과제명	국문		태양열을 활용한 에너지 생산·저장·관리 및 실증모델 구축								
	영문		Energy production, storage, management and establishment of demonstration model using solar thermal energy								
주관연구개발 기관	기관명	한국에너지기술연구원		사업자등록번호		314-82-02242					
	주소	(위)34129, 대전 유성구 가정로 152		법인등록번호							
연구책임자	성명		이경호		직위		책임연구원				
	연락처	직장전화	042-860-3525		휴대전화		010-6472-0409				
		전자우편	khlee@kier.re.kr		국가연구자번호		10168963				
연구개발기간	전체		2020. 04. 29 - 2023. 06. 30 (3년 1개월)								
	단계 (해당 시 작성)	1단계	2020. 04. 29 - 2021. 12. 31 (1년 7개월)								
		2단계	2022. 01. 01 - 2022. 06. 30 (1년 6개월)								
연구개발비 (단위: 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				합계		연구개발비 외 지원금	
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계		
	총계	3,666,000	44,500	1,179,500					3,710,500	1,179,500	4,890,000
	1단계	1년차	1,000,000	0	334,000					1,000,000	334,000
2년차		1,333,000	0	445,000					1,333,000	445,000	1,778,000
n단계	1년차	1,333,000	44,500	400,500					1,333,000	400,500	1,778,000
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)	기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고					
						역할	기관유형				
	공동연구 개발기관	세한에너지(주)	정재용	상무	053-381-2143	sehan55@hanmail.net	공동	중소기업			
		쥬에스앤지에너지	윤석철	이사	02-333-9545	g-sng@s-sng.kr	공동	중소기업			
		대전대학교 산학협력단	신우철	교수	042-280-2516	shinuc@dju.ac.kr	공동	대학			
경상북도농업기술원	이현숙	팀장	053-320-0467	lhs222@korea.kr	공동	공립연					
연구개발담당자 실무담당자	성명		주홍진		직위		선임연구원				
연락처	직장전화	042-860-3336		휴대전화		010-5047-5797					
	전자우편	joo@kier.re.kr		국가연구자번호		11220133					

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

2023년 12월 14일

연구책임자: 이 경 호

주관연구개발기관의 장: 한국에너지기술연구원 (직인)

공동연구개발기관의 장: 세한에너지(주) (직인)

공동연구개발기관의 장: 쥬에스앤지에너지 (직인)

공동연구개발기관의 장: 대전대학교 산학협력단 (직인)

공동연구개발기관의 장: 경상북도농업기술원 (직인)

농림축산식품부장관·농림식품기술기획평가원장 귀하

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	2
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	3
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	3
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	16
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	16
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	17

별첨 1. 연구수행 과정 및 내용 보고서

별첨 2. 자체평가의견서

별첨 3. 연구성과활용계획서

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 최종목표

- 시설원예에 태양열 계간축열 기반 복합열원히트펌프 융합 열공급 시스템 구현으로 난방에너지 공급 100% 실증을 통하여 아열대작물 에너지비용절감형 산업화 모델 제시
 - 실증기간 : 7개월 이상(2022년 6월 ~ 2022년 12월)
 - 시설규모 : 1,000 평형 시설원예
 - 실증 시설원예 난방에너지 비용 절감 80% 이상
 - ※ 기존 재배조건과 동일한 환경조건으로 조절한 상태에서 1개월 운전하여 비교(그 외기간은 재배환경 개선운전 적용 예정)

1-2 세부목표

- 주요 기능
 - 평판형 및 진공관형 태양열 집열기 복합구성 : 저온 및 고온 집열 영역에서의 태양열 생산
 - 태양열 집열 구조 최적화 : 태양열 집열기 시설원예 설치 가능 최대 집열 면적 도출
 - 계간축열시스템 : 생산된 태양열 장기 열저장 및 히트펌프 열원 공급
 - 복합열원히트펌프 : 공기 및 태양열 열원 복합 활용 시설원예 열공급
 - 운영관리시스템 : 전체 시스템의 모니터링 및 효율적 운영 제어

▪ 주요 성능치

	집열효율	정상축열운전율	복합열원히트펌프 SCOP	태양열 시스템 고장진단 정확도
성능 지표	KS 인증 효율 대비 90% 달성1)	98% 이상2)	4 이상3)	90 % 이상4)

- 1) 실증 시설원예에 적용된 태양열 집열기의 데이터를 기준으로 KS인증 집열기 성능시험 유사 조건에서의 태양열 집열기 효율을 분석하여 KS 인증 효율과 비교하여 제시 (KS 인증 효율 대비 90 %)태양열 집열효율은 KS 인증 시험 유사(입사각, 온도) 조건에서 실증 운전 데이터로 분석
- 2) 정상축열운전율은 3차년도 실증 데이터로 산정하며, 태양열 과열 일수 7일 이하가 되는 조건, 즉 전체 운전일수 중 과열이 발생하지 않고 정상 축열운전이 이루어지는 일수의 비율로 정의
- 3) SCOP(Seasonal Coefficient Of Performance)는 복합열원 히트펌프의 계절난방 성능 지표로써 실증운전 데이터로 계산
- 4) 태양열시스템의 고장진단 정확도는 실증 설비의 인위적인 고장과 유사한 상태를 계획하여 운영관리시스템에서 진단한 결과의 정확도를 산정

▪ 핵심 기술

- 시설원예 적용을 위한 태양열 구조 최적화 설계 기술 (국내 최초)
- 시설원예 태양열 계간축열 연계 복합열원 히트펌프 열공급 시스템 기술 (국내 최초)
- 태양열 계간축열기반 시설원예 열공급 시스템 최적 운영관리 기술 (국내 최초)

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

[별첨 1] “연구수행 과정 및 내용 보고서” 참고

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

-
- 1,000평 규모의 아열대 작물을 재배하는 비닐하우스를 대상으로 태양열 계간축열식 히트펌프 융합 열공급시스템을 개발하고 실증모델을 구축하여 1년간 실증운전을 수행
 - 계간축열설비는 온수탱크방식으로 설계하였으며, 기존 보급 중인 히트펌프 버퍼조 설비에 추가적으로 연계하여 설치가 가능한 방식으로 계간 온수탱크와 버퍼조로 구성되도록 시스템을 구성하여 구축
 - 시스템 주요 구성요소는 시뮬레이션 기반으로 용량을 산정하여 설계하였고, 실증설비 구축 후 1년에 걸쳐 비난방기의 태양열 계간축열운전과 난방기의 태양열과 히트펌프를 이용한 난방을 위한 열공급운전을 수행하였으며, 재배작물이 설비설계단계에서 바나나/한라봉과 애플망고이었으나 농장주 사정으로 한라봉과 천혜향으로 변경되어 난방부하가 다소 낮아져 열공급량 중 태양열의존율은 다소 높게 나타남
 - 실증대상 온실에 태양열설비를 충분한 면적확보와 집중형 열공급설비 설치의 어려움을 해소하기 위한 일환으로 온실 일부를 기계실 공간으로 변환하였고, 기계실 옥상과 내부 그리고 주변부에 열공급설비를 컴팩트하게 설치하여 실증설비를 구축함으로써, 향후 온실 작업동을 에너지플랫폼형으로 개발할 수 있는 기술적 기반 마련
 - 온수탱크식 계간축열 외에 얕은깊이의 지중축열과 지중열교환기 수직복합형 방식의 소규모 설비를 설치하여 태양열의 일부를 저장하여 지열히트펌프 지열원의 온도를 재생할 수 있는 열공급 운전을 단기간에 걸쳐 확인하였고, 히트펌프 열원으로 공급하기 위한 적정온도 조절을 위하여 활용할 수 있는 기술적 개념을 도출하고 실증
 - 태양열설비에 대한 고장을 감지할 수 있는 프로그램을 개발하여 실증설비에 적용하여 우수한 고장진단정확도를 확인하였음
 - 사업화를 위한 사업모델과 시스템모델을 도출하였고, 실증운전 데이터를 활용하여 시스템 시뮬레이션 모델을 보정한 후 경제성 분석을 위한 에너지시뮬레이션을 수행하였으며, 보급형 시스템모델을 위한 주요 구성요소별 초기 설치비용함수를 도출한 후 농업에너지이용효율화사업에 태양열설비가 포함이 되는 조건을 가정하고 경제성 분석을 수행 (재배작물은 애플망고와 천혜향 조건)
-

(2) 정량적 연구개발성과(해당 시 작성하며, 연구개발과제의 특성에 따라 수정이 가능합니다)

-
- 시스템 주요 구성요소는 시뮬레이션 기반으로 용량을 산정하여 설계하였고, 실증설비 구축 후 1년에 걸쳐 비난방기의 태양열 계간축열운전과 난방기의 태양열과 히트펌프를
-

- 이용한 난방을 위한 열공급운전을 수행하였으며, 재배작물이 설비설계단계에서 바나나/한라봉과 애플망고이었으나 농장주 사정으로 한라봉과 천혜향으로 변경되어 난방부하가 다소 낮아짐에 따라 열공급량 중 태양열의존율은 약 75%로 매우 높게 나타나게 되었고, 기존 등유보일러방식에 비하여 약 80%(전력량요금만 고려, 기후환경요금 및 연료비조정액 포함시 75.5%)의 에너지비용절감효과를 확인하였음
- 현장 설치한 태양열집열설비에 대하여 단일집열기의 성능을 기준으로 안전계수 등을 고려한 성능비교방법인 ISO 24194에서 제시한 방법으로 분석한 결과, 평판형집열기의 경우 100.6%, 진공관집열기의 경우 98.7%
 - 계간축열에 대한 태양열집열설비와 연계하여 과열이 발생되지 않는 정상축열운전일수의 전체실증일수의 비율인 정상축열운전을 99%
 - 계간축열로부터의 잔열을 열원으로 이용한 복합열원히트펌프의 계절성적계수 SCOP 4.38
 - 태양열시스템의 고장진단시스템의 고장진단 정확도 96.5%

< 정량적 연구개발성과표 >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명		연도	1단계	2단계	계	가중치 (%)
			(2020~2021)	(2022~2023)		
지식재산권	특허출원	목표(단계별)	1	1	2	20
		실적(누적)	1	2	3	20
	특허등록	목표(단계별)	0	0	0	10
		실적(누적)	0	0	0	10
기술실시	건수	목표(단계별)	0	0	0	10
		실적(누적)	0	0	0	10
	기술료	목표(단계별)	0	0	0	10
		실적(누적)	0	0	0	10
사업화	고용창출	목표(단계별)	1	1	2	20
		실적(누적)	5	4	9	20
		목표(단계별)				
		실적(누적)				
학술성과	논문(SCI)	목표(단계별)	-	1	1	-
		실적(누적)	-	2	2	-
	논문(비SCI)	목표(단계별)	3	3	6	-
		실적(누적)	1	5	6	-
	논문(학술발표)	목표(단계별)	3	3	6	10
		실적(누적)	1	6	7	10
정책활용홍보	정책활용	목표(단계별)	1	1	2	15
		실적(누적)	1	1	2	15
	홍보전시	목표(단계별)	1	1	2	4
		실적(누적)	11	4	15	4
기타	타연구활용	목표(단계별)	0	1	1	1
		실적(누적)	0	1	1	1
		목표(단계별)				
		실적(누적)				
계						

* 1」 전담기관 등록·기탁 지표: 논문[에스시아이 Expanded(SCIE), 비SCIE, 평균Impact Factor(IF)], 특허, 보고서원문, 연구시설·장비, 기술요약정보, 저작권(소프트웨어, 서적 등), 생명자원(생명정보, 생물자원), 표준화(국내, 국제), 화합물, 신제품 등을 말하며, 논문, 학술발표, 특허의 경우 목표 대비 실적은 기재하지 않아도 됩니다.

* 2」 연구개발과제 특성 반영 지표: 기술실시(이전), 기술료, 사업화(투자실적, 제품화, 매출액, 수출액, 고용창출, 고용효과, 투자유치), 비용 절감, 기술(제품)인증, 시제품 제작 및 인증, 신기술지정, 무역수지개선, 경제적 파급효과, 산업지원(기술지도), 교육지도, 인력양성(전문 연구인력, 산업연구인력, 졸업자수, 취업, 연수프로그램 등), 법령 반영, 정책활용, 설계 기준 반영, 타 연구개발사업에의 활용, 기술무역, 홍보(전시), 국제화 협력, 포상 및 수상, 기타 연구개발 활용 중 선택하여 기재합니다 (연구개발과제 특성별로 고유한 성과지표를 추가할 수 있습니다).

< 연구개발성과 성능지표 >

평가 항목 (주요성능 ¹⁾)	단위	전체 항목에서 차지하는 비중 ² (%)	세계 최고		연구개발 전 국내 성능수준	연구개발 목표치		목표설정 근거	
			보유국/보유기관	성능수준		1단계 (2020~2021)	2단계 (2022~2023)		
1	집열 효율	%	10	-	-	-	-	> 90	* KS B 8295 * ISO 24194
2	정상 축열 운전율	%	10	-	-	-	-	> 98	* 과열 7일 미만
3	복합 열원 히트펌프 SCOP	-	10	-	-	-	-	> 4	*복합열원 히트펌프 성적서, 열원 및 부하온도 40/10℃ COP 기준
4	태양열 시스템 고장진단 정확도	%	10	-	-	-	-	> 90	*진단에러 10% 미만
5	시설원에 태양열 설비 구축	건	7.5	-	-	-	1	-	*실증설비 구축 요건
6	계간축열 구축	건	7.5	-	-	-	1	-	*실증설비 구축 요건
7	실증 시스템	건	7.5	-	-	-	1	-	*실증설비 구축 요건
8	태양열 고장진단 프로그램	건	7.5	-	-	-	-	1	*실증설비 구축 요건
9	운영관리시스템 구축	건	7.5	-	-	-	1	-	*실증설비 구축 요건
10	통합 모니터링시스템 구축	건	7.5	-	-	-	1	-	*실증설비 구축 요건
11	경제성 평가분석	건	7.5	-	-	-	-	1	*사업화 모델 분석 요건
12	사업화 모델	건	7.5	-	-	-	-	1	*사업화 모델 도출 요건

* 1」 정밀도, 인장강도, 내충격성, 작동전압, 응답시간 등 기술적 성능판단기준이 되는 것을 의미합니다.

* 2」 비중은 각 구성성능 사양의 최종목표에 대한 상대적 중요도를 말하며 합계는 100%이어야 합니다.

(3) 세부 정량적 연구개발성과(해당되는 항목만 선택하여 작성하되, 증빙자료를 별도 첨부해야 합니다)

[과학적 성과]

논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	고온 지중 계간축열시스템을 갖는	한국태양 에너지학	임희원	41	대한민국	한국태양에너지	비SCIE	2021.12.01	1598-6411	100

	온실의 태양열 난방시스템 장기 열성능평가	회 논문집				지학회				
2	Simulation-based fault detection remote monitoring system for small-scale Photovoltaic systems	Energies	임희원	15	스위스	MDPI	SCIE	2022.12.13	1996-1073	100
3	Data-driven heat pump operation strategy using rainbow deep reinforcement learning for significant reduction of electricity cost	Energy	한광우	270	영국	Elsevier	SCIE	2023.05.01	0360-5442	100
4	넷-제로에너지주택의 공기열원 히트펌프시스템 동적거동 및 에너지성능분석	한국태양에너지학회 논문집	임희원	42	대한민국	한국태양에너지학회	비SCIE	2022.12.01	1598-6411	100
5	기상청 개방형-API 기상정보 기반 중소규모 태양광발전 성능평가 및 고장감지 원격 모니터링시스템	한국태양에너지학회 논문집	임희원	43	대한민국	한국태양에너지학회	비SCIE	2023.04.01	1598-6411	100
6	현장설치 태양열 집열설비 열성능 확인을 위한 국제표준 기반의 실증적 분석	설비공학 논문집	이경호	35	대한민국	대한설비공학회	비SCIE	2023.04.01	1229-6422	100
7	TRNSYS를 이용한 온실 적용 태양열 연계 지열히트펌프 융복합 난방시스템 열성능 해석	설비공학 논문집	임희원	35	대한민국	대한설비공학회	비SCIE	2023.06.01	1229-6422	100
8	시뮬레이션 기반 실시간 평판형 태양열집열기 성능해석	설비공학 논문집	김일권	35	대한민국	대한설비공학회	비SCIE	2023.07.01	1229-6422	100

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2021 한국태양에너지학회 추계 학술발표대회	임희원	2021.11.10	광주 김대중컨벤션센터	대한민국
2	한국신재생에너지학회 2022년 춘계학술대회	이경호	2022.04.14	대구EXCO	대한민국
3	한국신재생에너지학회 2022년 춘계학술대회	임희원	2022.04.14	대구EXCO	대한민국
4	한국신재생에너지학회 2022년 춘계학술대회	이현숙	2022.04.14	대구EXCO	대한민국
5	2022 한국태양에너지학회 추계 학술대회	한광우	2022.10.20	제주 오리엔탈호텔	대한민국
6	The 11 th Asia-pacific forum on renewable energy	한광우	2022.09.29	제주 라마다플라자	대한민국
7	한국신재생에너지학회 2023년 춘계학술대회	한광우	2023.06.01	부산 파라다이스호텔	대한민국

기술 요약 정보

연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용여부	허용방식

보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호

생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신제품, 프로그램)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록인	등록일	등록 번호		
1	수직방식의 하이브리드 지중열교환기 및 그의 매설방법	대한민국	한국 에너지기술 연구원	2021. 11.05	10 -2021- 0151025	-	-	-	100	미활용
2	태양열 복합 열저장식 열공급시스템	대한민국	한국 에너지기술 연구원	2022. 11.10	10- 2022- 0149424	-	-	-	100	미활용
3	강화학습 기반 히트펌프 제어방법, 장치 및 이를 이용한 냉난방시스템	대한민국	한국 에너지기술 연구원	2022. 12.16	10- 2022- 0177204	-	-	-	100	미활용

지식재산권 활용(예정) 유형

※ 활용의 경우 현재 활용 유형에 √ 표시, 미활용의 경우 향후 활용 예정 유형에 √ 표시합니다(최대 3개 중복선택 가능).

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	기타
1	√			√						
2				√						
3				√						

저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율

신기술 지정

번호	명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증 번호		

표준화

국내표준

번호	인증구분 ¹⁾	인증여부 ²⁾	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류 ³⁾	제안/인증일자

- * 1) 한국산업규격(KS) 표준, 단체규격 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 2) 제안 또는 인증 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 3) 신규 또는 개정 중 해당하는 사항을 기재합니다.

국제표준

번호	표준화단계구분 ¹⁾	표준명	표준기구명 ²⁾	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식 ³⁾	제안자	표준화 번호	제안일자

- * 1) 국제표준 단계 중 신규 작업항목 제안(NP), 국제표준초안(WD), 위원회안(CD), 국제표준안(DIS), 최종국제표준안(FDIS), 국제표준(IS) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 2) 국제표준화기구(ISO), 국제전기기술위원회(IEC), 공동기술위원회1(JTC1) 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 3) 국제표준(IS), 기술시방서(TS), 기술보고서(TR), 공개활용규격(PAS), 기타 중 해당하는 사항을 기재합니다.

[경제적 성과]

시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료 (해당 연도 발생액)	누적 징수 현황

- * 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등

사업화 투자실적

번호	추가 연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계	투자 자금 성격*

사업화 현황

번호	사업화 방식 ¹⁾	사업화 형태 ²⁾	지역 ³⁾	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

- * 1) 기술이전 또는 자기실시
- * 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등
- * 3) 국내 또는 국외

매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
합계					

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후	
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
국외					
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획					
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
	수출				

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)			합계
			2020년	2021년	2022년	
1		세한에너지(주)	3	1	4	8
2		(주)에스앤지에너지	1	0	0	1
합계			4	1	4	9

□ 고용 효과

구분		고용 효과(명)	
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

□ 비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

□ 경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수)	기타
해당 연도							
기대 목표							

□ 산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원

□ 기술 무역

(단위: 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	기 징수액	총 계약액	해당 연도 징수액	향후 예정액	수출/ 수입

[사회적 성과]

□ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용
1	제안	아열대 작물 시설원에 태양열 열공급시스템의 설계 및 성능예측용 시뮬레이션 모델 도입	경상북도 (에너지산업과)	2021	제안 검토
2	제안	시설원에대상 작업동을 활용한 태양열 융복합 열공급 모델(안)	한국농어촌공사 (농어촌연구원)	2022	제안 검토

□ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황													
			학위별				성별		지역별							
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타			

□ 산업 기술 인력 양성

번호	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비
1	산업통상자원부	신재생에너지 표준화 및 인증고도화 지원사업	단일 집열기 및 현장설치 태양열 집열어레이 성능평가 기반구축 연구	이경호	817,850천원

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	지방일간지	전기신문	경북 포항에 에너지자립형 스마트팜 개발실증 박차	2021.05.30
2	지방일간지	경북온뉴스	경북 포항에 에너지자립형 스마트팜 - 태양열 활용 에너지 생산,저장,관리시스템 구축 및 실증연구 본격 착공	2021.05.30
3	지방일간지	경상매일신문	경북도, 포항에 에너지자립형 스마트팜 개발실증 박차	2021.05.30
4	지방일간지	경상투데이	경상북도, 에너지자립형 스마트팜 모델 개발 '박차'	2021.05.30
5	지방일간지	경북매일	경북도, 에너지자립형 스마트팜 개발실증 박차	2021.05.30
6	지방일간지	군위넷	경북 포항에 에너지자립형 스마트팜 개발실증 박차	2021.05.30
7	지방일간지	뉴스매거진	태양열 활용 에너지 생산,저장,관리시스템 구축 및 실증연구 본격 착공	2021.05.31
8	지방일간지	경북in뉴스	경북 포항에 에너지자립형 스마트팜 개발실증 박차	2021.05.31
9	지방일간지	경북연합방송	포항에 에너지자립형 스마트팜 개발실증 박차	2021.05.31
10	기타	홍보물	경북 한라봉(부지화) 재배와 월별 관리	2021.06.21
11	지방일간지	인더스트리뉴스	에너지연, 태양열로 한라봉 수확 난방비 절감 기대	2023.04.14
12	지방일간지	투데이에너지	태양열 온실 아열대 작물 생산 새로운 패러다임 제시	2023.04.14
13	지방일간지	에너지데일리	태양열로 아열대 작물 생산 새로운 패러다임 제시	2023.04.14
14	월간잡지	KHARN	에너지연, 태양열 계간축열 설비 준공	2023.04.18
15	전시회	2021 대한민국 에너지대전	태양열집열기, 자연순환식 태양열온수기, 계간축열조를 활용한 태양열시스템	2021.10.13

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

구축기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)

* 「과학기술기초법 시행령」 제42조제4항제2호에 따른 연구시설·장비 종합정보시스템을 의미합니다.

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항(해당 시 작성합니다)

<참고 1> 연구성과 실적 증빙자료 예시

성과유형	첨부자료 예시
연구논문	논문 사본(저자, 초록, 사사표기)을 확인할 수 있는 부분 포함, 연구개발과제별 중복 첨부 불가)
지식재산권	산업재산권 등록증(또는 출원서) 사본(발명인, 발명의 명칭, 연구개발과제 출처 포함)
제품개발(시제품)	제품개발사진 등 시제품 개발 관련 증빙자료
기술이전	기술이전 계약서, 기술실시 계약서, 기술료 입금 내역서 등
사업화 (상품출시, 공정개발)	사업화된 제품사진, 매출액 증빙서류(세금계산서, 납품계약서 등 매출 확인가능 내부 회계자료) 등
품목허가	미국 식품의약국(FDA) / 식품의약품안전처(MFDS) 허가서
임상시험실시	임상시험계획(IND) 승인서

<참고 2> 국가연구개발혁신법 시행령 제33조제4항 및 별표 4에 따른 연구개발성과의 등록·기탁 대상과 범위

구분	대상	등록 및 기탁 범위
등록	논문	국내외 학술단체에서 발간하는 학술(대회)지에 수록된 학술 논문(전자원문 포함)
	특허	국내외에 출원 또는 등록된 특허정보
	보고서원문	연구개발 연차보고서, 단계보고서 및 최종보고서의 원문
	연구시설·장비	국가연구개발사업을 통하여 취득한 3천만 원 이상 (부가가치세, 부대비용 포함) 연구시설·장비 또는 공동활용이 가능한 모든 연구시설·장비
	기술요약정보	연차보고, 단계보고 및 최종보고가 완료된 연구개발성과의 기술을 요약한 정보
	생명자원 중 생명정보	서열·발현정보 등 유전체정보, 서열·구조·상호작용 등 단백질체정보, 유전자(DNA)칩·단백질칩 등 발현체 정보 및 그 밖의 생명정보
	소프트웨어	창작된 소프트웨어 및 등록에 필요한 관련 정보
	표준	「국가표준기본법」 제3조에 따른 국가표준, 국제표준으로 채택된 공식 표준정보[소관 기술위원회를 포함한 공식 국제표준화기구(ISO, IEC, ITU)가 공인한 단체 또는 사실표준화기구에서 채택한 표준정보를 포함한다]
기탁	생명자원 중 생물자원	세균, 곰팡이, 바이러스 등 미생물자원, 인간 또는 동물의 세포·수정란 등 동물자원, 식물세포·종자 등 식물자원, DNA, RNA, 플라스미드 등 유전체자원 및 그 밖의 생물자원
	화합물	합성 또는 천연물에서 추출한 유기화합물 및 관련 정보
	신물질	생물자원 중 국내외에 출원 또는 등록된 농업용 신물질 및 관련 정보

2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
○ 【1단계 목표】 1,000평형 규모	○태양열 계간축열 기반 복합열원히트펌프 융합	○100

<p>아열대 작물 시설원예를 대상으로 난방에너지 100% 공급 가능한 태양열 계간축열 기반 복합열원히트펌프 융합 열공급시스템 1차 구축</p>	<p>열공급시스템 1차 구축</p> <ul style="list-style-type: none"> · 실증시설원예에 계간축열조 기반 태양열 열공급시스템 구축을 위한 인프라(기초, 기계실, 전력 및 상수도) 설계와 구축 · 계간축열 기반 태양열 열공급시스템 상세 설계 및 1차 구축 	
<p>○ 【2단계 및 최종 목표】 시설원예에 태양열 계간축열 기반 복합열원 히트펌프 융합 열공급시스템 구현으로 난방에너지 공급 100% 실증을 통하여 아열대 작물 에너지비용절감형 산업화 모델 제시</p> <ul style="list-style-type: none"> · 실증기간: 7개월 이상 (2022년 6월~2022년 12월) · 시설규모: 1,000평형 시설원예 · 실증 시설원예 난방에너지 비용 절감 80% 이상 	<p>○ 실증설비 구축 완료 및 실증기간 1년 이상 실증운전 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> · 실증기간: 2022.04.05 ~ 2023.06.04 · 실증대상지 시설규모: 1,160평 · 재배작물: 한라봉과 천혜향 · 실증 시설원예 난방에너지비용 절감율 80.6% 달성 (전력량요금 반영, 기후환경요금 및 연료비조정액 포함시 75.5%) · 실증기간 중 전기에너지소비량을 기준으로 실증기간에 발생한 난방부하와 동일한 조건에서 기존 등유보일러 에너지소비량을 비교하여 실증기간의 에너지단가를 이용하여 절감율 산정 	○ 100
<p>○ 【세부목표 1 및 정량적 연구목표 1】 평판형 및 진공관형 태양열 집열기 복합구성과 태양열 집열 구조 최적화</p> <ul style="list-style-type: none"> · 저온 및 고온 집열 영역에서의 태양열 생산 · 태양열 집열기 시설원예 설치가능한 최대 집열 면적 도출 · 성능치: 집열효율 KS인증효율 대비 90% 이상 달성 	<p>○ 평판형과 진공관형으로 복합 구성된 태양열 집열설비 구축 완료 및 실증운전 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> · 기존 온실 일부를 기계실 변경하여 기계실을 구축하고 지붕면적을 이용하여 집열설비 설계 · 주변부 음영이 최소화될 수 있도록 설치 각도 및 집열기 배치 · 각 집열기의 KS인증효율을 기준으로 ISO 24194에서 제시하는 보정계수를 적용한 현장 집열설비 성능확인 방법을 통하여 입사각이 약 0°조건인 청명한 조건인 시험일 12일에 대하여 분석결과, 평판형의 경우 100.6%, 진공관형의 경우 98.7% 달성 	○ 100
<p>○ 【세부목표 2 및 정량적 연구목표 2】 계간축열시스템</p> <ul style="list-style-type: none"> · 생산된 태양열 장기 열저장 및 히트펌프 열원 공급 · 성능치: 정상축열 운전율 98% 이상 	<p>○ 계간축열 온수조설비 구축 완료 및 실증운전 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> · 계간축열설비는 온수탱크 350m³ 과 버퍼조 100m³ 으로 구축하여 기존 버퍼조가 있는 경우에도 통합적용 가능하도록 구성 · 실증기간 비난방기간에 걸쳐서 계간온수탱크와 버퍼조를 이용하여 태양열 	○ 100

	<p>저장 실증운전 실시</p> <ul style="list-style-type: none"> · 난방기간 중 계간온수탱크의 온도가 40℃에 도달한 이후 복합열원히트펌프 열원으로 공급운전 수행 · 실증기간 405일 중 태양열의 과열일수는 4일이 발생되어 정상축열 운전율 99% 달성 	
<p>○ 【세부목표 3 및 정량적 연구목표 3】 복합열원히트펌프</p> <ul style="list-style-type: none"> · 공기 및 태양열 열원 복합 활용 시설원에 열공급 · 성능치: SCOP 4 이상 	<p>○ 복합열원히트펌프 구축 및 실증운전 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> · KS B 8295와 KS B 6275 방법 적용 · 난방기 중 태양열을 이용한 버퍼조로부터 열공급을 보충하여 복합열원 히트펌프를 이용하여 열공급 · 계간열저장조의 40℃미만 잔열을 이용하여 히트펌프 열원으로 지중축열과 연계하여 20~30℃수준으로 조절하여 공급하면서 복합열원 히트펌프 COP를 산정한 결과, 실증기간 중 복합열원 운전일수 6일에 걸쳐 SCOP 4.38 달성 	○ 100
<p>○ 【세부목표 4 및 정량적 연구목표 4】 운영관리시스템</p> <ul style="list-style-type: none"> · 전체시스템의 모니터링 및 효율적 운영제어 · 성능치: 태양열시스템 고장진단 정확도 90% 이상 	<p>○ 운영관리 시스템 구축 및 실증운전 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> · 전체시스템 모니터링과 제어가 가능한 시스템 구축 완료 및 실증운전 수행 · 태양열 고장진단시스템을 운영관리시스템에 통합 설치 적용 및 실증운전 수행 · 실증기간 중 인위적으로 고장을 발생시켜 태양열시스템 고장진단시험을 수행한 결과, 고장을 일으킨 총 57회 중 비정상적 진단 2회로 고장진단 정확도 96.5% 달성 	○ 100
<p>○ 【정량적 연구목표 5】 시설원에 태양열 설비 구축</p>	<p>○ 태양열설비 약 200㎡ 설치 및 열저장조 연계 실증운전 완료</p> <ul style="list-style-type: none"> · 실증설비용 기계실 지붕에 설치 · 평판형 집열기 108㎡ 설치 · 진공관형 집열기 96㎡ 설치 · 집열설비는 계간열저장조와 버퍼조에 연결되어 계절과 운전모드에 따라 제어되어 축열되도록 설치 및 집열과 축열 운전 완료 	○ 100
<p>○ 【정량적 연구목표 6】 계간축열 구축</p>	<p>○ 탱크형 계간축열 구축 및 실증운전 완료</p> <ul style="list-style-type: none"> · 350㎡ 용량의 탱크식 계간열저장조 구축 · 100㎡ 버퍼조에는 계간축열 후반부에 열저장하도록 구축 · 비난방기 계간축열 및 난방기 열공급운전 	○ 100

	실증운전 완료	
○ 【정량적 연구목표 7】 실증시스템	○ 실증시스템 구축 및 실증운전 완료 · 태양열 계간축열식 히트펌프 융합 열공급시스템 구축 완료 · 온실 실내 온기 공급과 배분을 위한 FCU 설치 완료 · 센서 설치 및 모니터링과 운영관리시스템에 연계하여 실증운전 완료	○ 100
○ 【정량적 연구목표 8】 태양열 고장진단 프로그램	○ 태양열고장진단 프로그램 개발 및 설치 완료 · 태양열고장진단 프로그램 개발 완료 · 현장에서 고장진단 정확도 시험 및 목표 달성 완료	○ 100
○ 【정량적 연구목표 9】 운영관리시스템 구축	○ 운영관리시스템 구축 완료 · PLC기반의 운영관리시스템 구축 완료 · 센서 및 열공급설비 그리고 실내 FCU 등 전체시스템에 대한 제어알고리즘 탑재 완료 · 비난방기 및 난방기에 걸쳐 실증운전 완료	○ 100
○ 【정량적 연구목표 10】 통합모니터링 시스템 구축	○ 통합모니터링시스템 구축 완료 · 모니터링시스템 개발 및 운영관리시스템의 입력값 화면과 통합연계하여 구축 완료	○ 100
○ 【정량적 연구목표 11】 경제성 평가 분석	○ 경제성 평가 분석 완료 · 재배작물은 애플망고와 한라봉으로 선정 · 사업화모델을 위한 시스템모델을 도출하고 비교기준모델로서 등유보일러 난방을 선정 · 실증데이터를 이용하여 계간조와 버퍼조, 온실난방부하모델에 대한 보정을 실시 · 보정된 시뮬레이션 모델을 이용하여 연간 난방부하 및 에너지소비량 산정 · 실증기간 중 에너지단가(전기 및 등유)를 적용하여 에너지비용 산정 · 시스템 모델에 대하여 초기비용함수를 개발하고 적용하여 초기비용 산정 · LCC분석을 통하여 순가치현가(NPV, Net Present Value)를 산정하여 경제성 평가	○ 100
○ 【정량적 연구목표 12】 사업화 모델	○ 사업화 모델 도출 완료 · 사업화모델을 위한 시스템모델을 포함 도출 · 사업화를 위한 추진 일정 도출 · 사업화를 위한 참여 주체와 역할 도출 · 사업경제성확보를 위한 보급지원사업 후보	○ 100

	도출과 정책제안 방안 도출	
--	----------------	--

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성합니다)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

	해당사항 없음
--	---------

2) 자체 보완활동

	해당사항 없음
--	---------

3) 연구개발 과정의 성실성

	해당사항 없음
--	---------

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 온실 주변에 집열설비 설치공간이 충분하지 않은 경우를 극복하기 위하여 온실면적 일부를 기계실 공간으로 변환하여 실증하므로써, 국내 온실의 약 99%를 차지하는 비닐온실 등과 같은 중소형 온실에 적용이 가능한 컴팩트한 구조를 갖는 작업동 기반의 에너지플래폼형 모델을 도출하였으며, 이를 통하여 향후 중소형 온실에 재생에너지 보급을 위한 기술적 기반 제시가능할 것으로 기대하며, 태양열 등 재생에너지 보급에 기여 기대
- 히트펌프와 융합한 태양열 계간축열시스템을 개발함으로써 농업분야 난방에너지수요의 효율적 전기화에 기여할 수 있으며, 이로 인하여 탄소배출저감에 기여 기대
- 기존에 농업에너지이용효율화사업의 보급대상인 히트펌프와 버퍼조 등 설비에 추가로 태양열과 계간축열을 설치하는 구조의 실증연구를 수행하였으며, 이를 통하여 기존에 보급된 히트펌프 난방시스템에 추가로 태양열 설비를 보급하는 방식의 기술방식 정책 제안 가능
- 기존 지열히트펌프 방식의 경우 난방위주의 운전으로 지중온도가 지속적으로 감소하여 성능 저하 및 고장의 원인이 될 수 있으며, 본 실증시스템에서는 이러한 지중온도를 해소하는데 기여가능한 소규모의 지중설비를 구축하여 시험하였고, 향후 지열히트펌프와 태양열 계간축열설비의 융합 보급을 통하여 지열히트펌프의 단점을 보완하고 태양열을 통하여 설비 효율향상과 에너지소비 절감 그리고 탄소배출 저감에 기여 기대

(단위 : 백만원, %)

총괄과제명	세부과제명	기관명	유형	총 연구개발비 (A)	정부지원 연구개발비 (B)	정부지원 연구개발비 비율 (C=B/A)	성과 유형	기술기여도	
								산정 근거	비율
태양열을 활용한 에너지 생산·저장·관 리 및 실증모델 구축		한국에너지 기술연구원	출연연 (비영리)	1,500	1,500	1.000	신규 기술개발	해당 없음	-
		대전대학교	대학 (비영리)	456	0	1.000	신규 기술개발	해당 없음	-
		경북농업 기술원	공립연 (비영리)	150	0	1.000	신규 기술개발		
		세한에너지(주)	중소기업 (영리)	1,591,209	941.188	59.149	기존 공정개선	①-①	59.15
		(주)에스앤지 에너지	중소기업 (영리)	1,101.791	630.000	57.179	기존 공정개선	①-①	57.18
계				1,594,416. 791	3,071.188	-	-	-	-

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- * 농업에너지이용효율화사업에 태양열설비 포함을 위한 정책제안에 활용
- * 중소형 온실 작업동 에너지플랫폼화 또는 리모델링 정책제안에 활용
- * 히트펌프와 융합하여 온실 난방열에너지수요의 효율적 전기화에 기여
- * 기존 보급형 히트펌프와 버퍼조 설비에 추가보급 방식으로 활용 가능
- * 추가 실증으로 기존 지열히트펌프 성능저하 해소에 기여 검증 및 활용 가능
- * 보급사업 추진가능한 기업에 기술이전하여 사업화 기술지도에 활용

< 연구개발성과 활용계획표 >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내				
		2023	2024	2025	2026	2027
국외논문	SCIE					
	비SCIE					
국내논문	SCIE					
	비SCIE					
특허출원	국내					
	국외					
특허등록	국내	1	1			
	국외					
인력양성	학사					
	석사					
	박사					
사업화	시제품개발					
	상품출시					
	기술이전			1		
	공정개발					
	매출액(단위 : 천원)	0	500,000	1,000,000	1,100,000	1,400,000
	기술료(단위 : 천원)	0	1,430	2,908	3,214	4,101
비임상시험 실시						
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상				
		2상				
		3상				
	의료기기					
진료지침개발						
신의료기술개발						
성과홍보						
포상 및 수상실적						
정성적 성과 주요 내용						

< 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	별첨 자료
1.	1) 연구개발과제의 수행과정 및 수행내용 보고서
	2) 자체평가의견서
	3) 연구성과 활용계획서
2.	1)
	2)

태양열을 활용한 에너지 생산·저장·관리 및 실증모델 구축

Energy production, storage, management and establishment of demonstration model
using solar thermal energy

2023. 11. 15.

주관연구기관 : 한국에너지기술연구원

참여연구기관 : 세한에너지(주)
(주)에스앤지에너지
대전대학교산학협력단
경상북도농업기술원

【보고서 목차】

- 1. 서 론 1**
 - 가. 최종목표 1
 - 나. 세부목표 2
 - 다. 사업 기대효과 2
- 2. 성과 요약 4**
 - 가. 연구목표 4
 - 나. 세부 목표 6
 - 다. 과학적 성과 9
 - 라. 기술적 성과 10
 - 마. 경제적 성과 10
 - 바. 사회적 성과 11
- 3. 태양열 활용 에너지 생산·저장·관리 기술 개요 13**
 - 가. 기술의 개요 13
 - 나. 국내·외 동향 21
- 4. 실증 모델 구축 및 성능 분석 29**
 - 가. 실증모델 개요 : 시스템의 특징 29
 - 나. 실증대상 온실 31
 - 다. 실증모델 용량산정 시뮬레이션 및 지능형 운전기술 개발 34
 - 라. 실증을 위한 설비 구축 57
 - 마. 실증모델 시스템 운전 및 성능 분석 102
 - 바. 실증설비 보완 130
 - 사. 실증시설 재배환경 및 작물생육 분석 139
 - 아. 개발지표 분석 147
- 5. 가이드라인 및 사후관리 178**
 - 가. 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템 설계 가이드라인 178

- 나. 태양열 계간축열 및 집열시스템 사후관리 182
- 다. 원격모니터링 및 제어 가이드라인 183
- 라. 통합 시스템 사후관리 189

- 6. 보급을 위한 사업모델 191**
 - 가. 사업모델 개요 191
 - 나. 사업모델 경제성 분석 195
 - 다. 사업화 계획 206

- 7. 결 론 211**
 - 가. 사업 요약 211
 - 나. 제언 212

- 부록 1. 세부목표 성능지표와 정량적 연구목표 달성 증빙 223**

【그림 목차】

[그림 1-1] 실증 시설원에 태양열 계간축열기반 열공급 시스템 개념도	1
[그림 1-2] 실증 시설원에 태양열 계간축열기반 열공급 시스템 구성도	1
[그림 2-1] 전체실증기간에 걸친 계간조의 온도변화와 실증 중요 사항	5
[그림 2-2] KS 인증 집열기 효율곡선과 실증설비의 집열효율 비교	7
[그림 2-3] 실증 평판형 태양열 집열기 출구온도('22년 4월 25일 ~ '23년 6월 4일)	7
[그림 2-4] 실증 진공관형 태양열 집열기 출구온도('22년 4월 25일 ~ '23년 6월 4일)	8
[그림 3-1] 과제제안요구서의 연구내용	13
[그림 3-2] 과제제안요구서의 연구 추진 시 고려사항	13
[그림 3-3] 설비형 태양열(ST, Solar Thermal)시스템 개념도(액체식)	14
[그림 3-4] 저온형 태양열 집열기 (a)평판형 집열기, (b)진공관형 집열기	15
[그림 3-5] 대규모 태양열의 계간 열저장 개념	17
[그림 3-6] 적용되고 있는 계간 열저장기술의 종류	17
[그림 3-7] 대규모 태양열 열공급시스템 개념	19
[그림 3-8] 대규모 태양열과 계간축열을 이용한 열공급시스템 개념 사례	20
[그림 3-9] 여름철 잉여 태양열을 활용한 히트펌프 융합 열공급시스템의 두가지 개념적 접근, (a)태양열 계간열저장식 히트펌프 융합 열공급시스템, (b)태양열 지열원 재생식 히트펌프 융합 열공급시스템	21
[그림 3-10] 국내 온실유형과 난방방식 현황 (2019)	22
[그림 3-11] 국내외 집열기 효율 비교	23
[그림 3-12] 스위스 TVPSolar 사의 진공식 평판형 집열기 설치 모습 (자료출처: TVPSolar systems, the clean energy production that saves money, Solar Process Heat, January 2020)	23
[그림 3-13] 이스라엘 TIGI 사의 투명단열재를 이용한 허니콤 집열기 (자료출처: TIGI 사 홈페이지)	24
[그림 3-14] 중국의 온실용 난방을 위하여 태양열과 지열원 히트펌프를 통한 계절간 지열원 재생기술 적용 사례	26
[그림 3-15] 태양열 계간축열식 히트펌프 열공급시스템을 적용한 진천 친환경에너지타운 (자료출처: 한국에너지기술연구원)	27

[그림 3-16] 국내 2018년 태양열 계간축열 열공급 기술 실증연구 사례 27

[그림 4-1] 태양열을 활용한 계간열저장식 히트펌프 융합 열공급시스템 실증모델 개념도 29

[그림 4-2] 실증대상 후보지 비교(1/3) 32

[그림 4-3] 실증대상 후보지 비교(2/3) 32

[그림 4-4] 실증대상 후보지 비교(3/3) 33

[그림 4-5] 실증 대상지 로드뷰 모습 및 설비구축 전 모습 34

[그림 4-6] TRNSYS 모델로 계산한 연간 월별 난방부하 35

[그림 4-7] TRNSYS 모델로 계산한 연간 시간별 난방부하 35

[그림 4-8] TRNSYS 시뮬레이션으로 분석한 계간조의 열적인 동적 거동 37

[그림 4-9] 기존 히트펌프 운전 방식에서 시간에 따른 열수요 및 열저장장치의 축열상태
프로파일 39

[그림 4-10] 기존 히트펌프 제어의 한계 극복방안 39

[그림 4-11] 강화학습 활용 히트펌프 대수제어 프레임워크 40

[그림 4-12] 부하예측에 활용된 데이터: 일사량, 단열커튼 스케줄, 상대습도, 외기온도,
설정온도와 이에 따른 온실별 열수요 41

[그림 4-13] 부하예측에 하이퍼파라미터 튜닝과정: (a) n_layer & hid_dim metric
comparison, (b) dropout & L2 regularization metric comparison, (c) dropout & L2
regularization loss profile 43

[그림 4-14] 개발 딥러닝 모델 부하예측 결과: 시계열 차트 43

[그림 4-15] Rainbow Deep Q network 활용 히트펌프 대수 제어알고리즘 44

[그림 4-16] Rainbow DQN 학습과정 알고리즘 구현 코드 중 일부 45

[그림 4-17] Rainbow DQN 검증과정 알고리즘 구현 코드 중 일부 46

[그림 4-18] 4 가지 경우에 대한 분석 결과: 히트펌프 작동대수 47

[그림 4-19] 케이스 스터디 결과: (좌) 열수요와 버퍼조 SOC, (우) 히트펌프 COP 48

[그림 4-20] 5년 검증결과: (좌) 기존 규칙기반제어, (우) 개발 AI 제어 48

[그림 4-21] 연평균 전기요금 비교: 규칙기반제어와 개발 AI 제어 49

[그림 4-22] 예측모델기반 최적운전제어를 위한 시스템 단순화 모델 50

[그림 4-23] 단순화모델 대상 버퍼조 단독이용 최적운전기법 적용 결과 [(a)기존운전방식에서
히트펌프 및 태양열 열공급과 난방부하, (b)기존운전방식에서 버퍼조 열량상태와 히트펌프
전력소비, (c)에너지최소화 운전방식에서 히트펌프 및 태양열 열공급과 난방부하,
(d)에너지최소화 운전방식에서 버퍼조 열량상태와 히트펌프 전력소비, (e)피크최소화

운전방식에서 히트펌프 및 태양열 열공급과 난방부하, (f)피크최소화 운전방식에서 버퍼조 열량상태와 히트펌프 전력소비, (g)운전방식별 히트펌프 전력소비량 및 피크전력 비교, (h)운전방식별 버퍼조 열량상태 변화의 비교] 54

[그림 4-24] 단순화모델 대상 버퍼조와 계간조 상부 이용 최적운전기법 적용 결과 55

[그림 4-25] 최대난방부하일 가정 단순화모델 대상 버퍼조와 계간조 상부 이용 최적운전기법 적용 결과 56

[그림 4-26] 실증시스템 열공급 시스템 설계 업그레이드 도면화 진행 57

[그림 4-27] 실증시스템 태양열 시스템 음영 분석을 위한 3D 모델 구현 59

[그림 4-28] 실증시스템 태양열 집열기 설치 타입별 음영분석 결과 일부 59

[그림 4-29] 실증시스템 태양열 시스템 유무에 따른 음영 비교 60

[그림 4-30] 실증시스템 기계실 상부 태양열 집열기 실시 설계 도면 61

[그림 4-31] CFD 를 이용한 100 m³ 버퍼조 내부 디퓨저가 열성층화 형성에 미치는 영향 분석 62

[그림 4-32] 100 m³ 버퍼조 내부 디퓨저 설계를 위한 해석 기법 63

[그림 4-33] 350 m³ 계간조 내부 디퓨저 설계를 위한 해석 기법 64

[그림 4-34] 계간조 및 버퍼조 디퓨저 고정을 위한 지지대 설계 64

[그림 4-35] 실증시설원에 지질조사 시추공 위치 및 시추 작업 65

[그림 4-36] 실증시설원에 시추주상도 65

[그림 4-37] 기초파일 비교 66

[그림 4-38] 실증지 기계실 구축을 위한 SRP 말뚝 시공 기법 67

[그림 4-39] 실증지 기계실 구축을 위한 기초말뚝 설계 도면 67

[그림 4-40] 실증대상지 주변 철도에 대한 변위 수치해석 결과 67

[그림 4-41] 실증대상지 기계실 구축을 위한 기초 시공 모습 69

[그림 4-42] 기계실 부지 치수 70

[그림 4-43] 기계실 구조 검토 70

[그림 4-44] 실증 시설원에 기계실 설계 및 구축 73

[그림 4-45] 상수도 관로 단면도 73

[그림 4-46] 상수도 신설 공사구간(안) 74

[그림 4-47] 200 kW 수전설비 증설 단선 결선도 및 시공도 74

[그림 4-48] 200 kW 수전설비 증설 75

[그림 4-49] 실증시스템 적용 이중진공관 및 평판형 태양열 집열기 세부 사양 76

[그림 4-50] 평판형 태양열 집열기 구조물 고정 공법 77

[그림 4-51] 계간조 및 버퍼조 설치 80

[그림 4-52] 실증시스템 기계실 내부 및 외부 82

[그림 4-53] 실증 운영 시스템 열 흐름도 85

[그림 4-54] 전체 운전 모드 및 루프별 하위제어 86

[그림 4-55] 비난방 기간 제어 모드 별 계통도 87

[그림 4-56] 난방 기간 제어 모드 별 계통도(1/2) 89

[그림 4-57] 난방 기간 제어 모드 별 계통도(2/2) 90

[그림 4-58] 난방 기간 제어 비상축열모드 계통도 90

[그림 4-59] 태양열 집열기 축열 루프 91

[그림 4-60] 한라봉 온실 내 센서 및 열공급시스템 모식도 92

[그림 4-61] 천혜향 온실 내 센서 및 열공급시스템 모식도 93

[그림 4-62] 온실 환수온도 3 방밸브 PID 제어 게인값 튜닝 과정 중 93

[그림 4-63] 히트펌프 루프 내 센서 및 열공급시스템 모식도 94

[그림 4-64] (위) 계간조~버퍼조 열이송, (아래) 계간조~수평/수직형 GTES 열이송 클래스 95

[그림 4-65] 전기 및 제어 배관 배선도 96

[그림 4-66] 제어를 위한 MCC 및 PLC 판넬 전경 사진 97

[그림 4-67] 실증시스템 제어 및 모니터링을 위한 센서 위치 및 개수 98

[그림 4-68] 실증시스템 적용 인버터 펌프 및 유량계 98

[그림 4-69] 실증시스템 제어 및 모니터링을 위한 센서 설치 및 교정] 99

[그림 4-70] 한라봉 온실 온도센서 적용 101

[그림 4-71] 천혜향 온실 온도센서 적용 101

[그림 4-72] 작업동 내부 및 온실 내부 온도 설정을 위한 제어 판넬 101

[그림 4-73] 비난방기 태양열 축열 과정 중 에너지흐름도 (평판형 및 진공관형 설비의 직렬연결) 103

[그림 4-74] 비난방기 일별 단위면적당 경사면 진공관형 집열기 집열량, 평판형 집열기 집열량 104

[그림 4-75] 비난방기 일별 경사면 진공관형 집열기, 평판형 집열기의 평균 열효율 104

[그림 4-76] 비난방기 일별 1 차측, 2 차측 펌프 소모 전력량 105

[그림 4-77] 비난방기 계간조 온도 프로파일 (ST07 이 최상단 온도센서) 107

[그림 4-78] 비난방기 계간조로부터 수평형 GTES 로의 열이송에 따른 온도, 유량 프로파일 107

[그림 4-79] 비난방기 일별 계간조 축열량, GTES 로의 열 이송량, 계간조 열손실량 108

[그림 4-80] 난방기 태양열 집열기 축열 루프 110

[그림 4-81] 난방기 일별 경사면 일사량, 집열기 종류별 2 차측 집열량 110

[그림 4-82] 난방기 집열기 종류별 2 차측 기준 일별 평균 열효율 111

[그림 4-83] 난방기 기간 1 분단위 버퍼조, 계간조, 수평/수직 지중온도 및 유량 변화 113

[그림 4-84] 난방기 기간 1 일단위 열이동/공급 114

[그림 4-85] 난방기 기간 1 일단위 축열량, 열손실량 115

[그림 4-86] 난방기 기간 1 일단위 온실별 난방부하 및 배관손실 115

[그림 4-87] 한라봉 온실 공급배관 및 온실 내부 전경 116

[그림 4-88] 1 분단위 온실 별 공급/환수 온도 및 유량 ('23년 4월 27일) 116

[그림 4-89] 1 분단위 온실 별 설정온도, 레이어별 온도, 외기온도 및 일사량 117

[그림 4-90] 본 열공급 시스템 내 수열원 히트펌프 작동 특성: (상) 부하측 입/출수 온도, 부하측 순환유량 (중) 열원측 입출수 온도, 히트펌프 성능계수, (하)히트펌프 소비전력, 히트펌프 생산 열량 118

[그림 4-91] 히트펌프 종류, 일별 전력소비량과 생산열량 119

[그림 4-92] 히트펌프 종류, 일별 COP 120

[그림 4-93] 난방기 전체기간 동안의 히트펌프 종류별 평균 COP 120

[그림 4-94] 공기열원 히트펌프의 제상운전 특성에 기인한 부하측 열생산 온도 변화 121

[그림 4-95] 전체 시스템의 실증운전을 통한 연간 에너지 흐름도 (a)구성요소 구분, (b)구성요소 단순화 128

[그림 4-96] 난방부하 중 태양열의존율 산정을 위한 에너지흐름도 개념 129

[그림 4-97] 모서리부위 보강 방법 131

[그림 4-98] 커버부위 보강 방법 131

[그림 4-99] 계간조 접합부 보강 후 사진 131

[그림 4-100] 태양열 과열방지 시스템 구성도 132

[그림 4-101] 태양열 과열방지 시스템 제어를 위한 판넬 수정 및 전선 포설 작업 133

[그림 4-102] 태양열 과열방지를 위한 집열기 1 차측 방열기 설치 사진 133

[그림 4-103] 태양열 과열방지 시스템 제어 시운전 134

[그림 4-104] 자연대류 방지를 위한 자동밸브 추가 내용 135

[그림 4-105] 평판형 열교환기 온도 프로파일 비교 (위) 자연대류 손실 존재 시 (아래) 자연대류 해결 후 136

[그림 4-106] 평판형 집열기 온도 프로파일 비교 (위) 자연대류 손실 존재 시 (아래) 자연대류 해결 후 136

[그림 4-107] 포항 계간조 월별 열손실량, 평균 UA, 평균 U 값 비교 137

[그림 4-108] 히트펌프 동파방지 작동에 따른 히트펌프 부하측 온도, 유량 프로파일 138

[그림 4-109] 만감류 한라봉의 월별 생육관리(경상북도 농업기술원, 2021) 142

[그림 4-110] 포항지역 기온(기상청, 2022. 10. 1 ~ 2023. 5. 31) 143

[그림 4-111] 실증재배지 내부 온도(2022. 10.1~2023. 5.31) 143

[그림 4-112] 실증재배지의 년차별 동절기 온도(2020~2023) 144

[그림 4-113] 실증재배지의 광합성유효 광량변화(2022. 10.1~2023. 5.31) 144

[그림 4-114] 실증재배지 토양수분 변화(2022. 10.1~2023. 5.31) 145

[그림 4-115] KS 인증 집열기 효율곡선과 현장 집열설비에 대한 보정된 효율의 비교 151

[그림 4-116] 실증 시설원에 적용 태양열설비 개략적인 구성도 152

[그림 4-117] 실증 시설원에 적용 태양열 집열기 설치 모습 152

[그림 4-118] 계간축열조 설계도면 153

[그림 4-119] 계간조 내부 모습 153

[그림 4-120] 계간조 단열 시공 전 사진 154

[그림 4-121] 계간조 단열 시공 후 사진 154

[그림 4-122] 집열면 일사강도(2022년 4월 25일~2023년 6월 4일) 156

[그림 4-123] 계간축열조 내부 온도 분포(2022년 4월 25일~2023년 6월 4일) 156

[그림 4-124] 실증시스템 평판형 태양열 집열기 출구 온도(2022년 4월 25일~2023년 6월 4일) 157

[그림 4-125] 실증시스템 진공관형 태양열 집열기 출구 온도(2022년 4월 25일~2023년 6월 4일) 157

[그림 4-126] 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템 및 복합열원 히트펌프 시스템 구성도 158

[그림 4-127] 실증시설원에 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템내 복합열원 히트펌프 구축 전경 159

[그림 4-128] 진공관 집열기의 입사각 수정계수 인자 163

[그림 4-129] 평판형 및 진공관형 집열기 입사각 수정계수 166

[그림 4-130] 실증 태양열 설비 측정센서 위치도 166

[그림 4-131] 실증에 설치된 일사계 사진 167

[그림 4-132] 실측 경사면 일사량에 따른 시뮬레이션 예측 결과 168

[그림 4-133] 평판형 집열기 실측 및 시뮬레이션 예측 집열량 비교 168

[그림 4-134] 진공관형 집열기 실측 및 시뮬레이션 예측 집열량 비교 169

[그림 4-135] 원격 모니터링 구현 평판형 집열기 실측 및 예측 집열량 비교 그래프 170

[그림 4-136] 원격 모니터링 구현 진공관형 집열기 실측 및 예측 집열량 비교 그래프 170

[그림 4-137] 맑은 날 평판형집열기 실측 및 예측 집열량에 따른 모니터링시스템의 슈하르트 관리도 171

[그림 4-138] 이중 진공관형집열기 실측 및 예측 집열량에 따른 모니터링시스템의 슈하르트 관리도 171

[그림 4-139] 실증시설원에 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템 계통도 172

[그림 4-140] 슈하르트의 2 σ 법 관리도 구성 173

[그림 4-141] 진공관형 집열기 집열성능 저하 모사: 집열면적의 50% 가림막 설치 174

[그림 4-142] 평판형 집열기 집열성능 저하 모사: 집열면적의 50% 가림막 설치 175

[그림 4-143] 집열펌프 차단기 175

[그림 4-144] 진공관형 집열기 고장진단 데이터 176

[그림 4-145] 평판형 집열기 고장진단 데이터 177

[그림 4-146] (좌)집열기 고장알림 및 (우)펌프고장 알림 메시지 결과 177

[그림 5-1] 우리나라 아열대 기후대 예측 (예시) 179

[그림 5-2] 우리나라 아열대작물 재배면적 추이 179

[그림 5-3] 시뮬레이션 기반 설계를 위한 재배 작물 및 지역 특성 고려 난방 부하 예측 (예시) 181

[그림 5-4] 웹 모니터링 시스템 메인 화면 184

[그림 5-5] 비난방 모드 운전 계통도 185

[그림 5-6] 난방 모드 운전 계통도 186

[그림 5-7] 제어모드 선택 및 알리미 서비스 활성화 기능 186

[그림 5-8] 제어 설정 탭 화면 187

[그림 5-9] 실시간 CCTV 화면 187

[그림 5-10] 차트 탭의 그래프(데이터 이력) 188

[그림 5-11] DB 탭의 데이터 테이블 188

[그림 5-12] 실증설비 구축 협약서 사본 189

[그림 6-1] 사업모델 수립을 위한 대상 기술 및 시스템모델 (a) 실증과 동일 모듈, (b) 지열 및 공기열 히트펌프와 융합 모델 192

[그림 6-2] 온실용 작업동을 구비한 시스템모델 193

[그림 6-3] 사업모델을 위한 참여자 역할별 추진 방안 194

[그림 6-4] 경제성분석을 위한 시스템모델 1 안 196

[그림 6-5] 경제성분석을 위한 시스템모델 2 안 196

[그림 6-6] 경제성분석을 위한 시스템모델 3 안 197

[그림 6-7] 경제성분석을 위한 시스템 1 안 모델에 대한 에너지시물레이션의 연간 에너지밸런스 199

[그림 6-8] 시스템 1 안에 대한 초기비 지원비율에 따른 운영기간에 대한 순수익현가환산치와 투자회수기간 (a)지원비율 50%, (b)지원비율 65%, (c)지원비율 80% 202

[그림 6-9] 시스템 2 안에 대한 초기비 지원비율에 따른 운영기간에 대한 순수익현가환산치와 투자회수기간 (a)지원비율 50%, (b)지원비율 65%, (c)지원비율 80% 203

[그림 6-10] 시스템 3 안에 대한 초기비 지원비율에 따른 운영기간에 대한 순수익현가환산치와 투자회수기간 (a)지원비율 50%, (b)지원비율 65%, (c)지원비율 80% 204

[그림 6-11] 태양열 계간축열기반 시설원에 에너지 공급 시스템 사업화 전략 207

[그림 6-12] 태양열 계간축열기반 시설원에 구축을 위한 사업화 전략계획(CSP) 수립 207

[그림 6-13] 태양열 계간축열기반 시설원에 비즈니스 추진전략 및 핵심가치 208

【표 목차】

<표 1-1> 태양열 계간축열 기반 열공급시스템의 실증을 통한 주요 성능지표	2
<표 2-1> 과제 사업기간 및 실증기간	4
<표 2-2> 실증설비 구축 현황	4
<표 2-3> 실증 시설원에 규모	5
<표 2-4> 실증 시설원에 난방에너지 절감량 및 비율	6
<표 2-5> 실증 시스템 적용 복합열원히트펌프 수열원 모드 난방 성능계수	8
<표 2-6> 태양열시스템 집열성능 및 펌프 고장진단(감지) 시험 결과 요약	9
<표 3-1> 융복합지원사업의 태양열에너지 설비 지원단가	28
<표 3-2> 신재생에너지공급의무화제도에서 의무화 비율	28
<표 3-3> 신재생에너지공급의무화제도에서 태양열의 단위에너지생산량 및 보정계수	28
<표 4-1> 실증 후보지의 주요 특징 비교	31
<표 4-2> 포항지역 월별 온도 및 일사량 분포 (국가참조표준기상데이터: TMY3)	35
<표 4-3> 계간축열시스템을 갖는 온실의 재생에너지 난방시스템	36
<표 4-4> 한라봉 재배시 온실 설정온도 조건	36
<표 4-5> 망고 재배시 온실 설정온도 조건	36
<표 4-6> 온실 부하 시뮬레이션 입력 조건	37
<표 4-7> 시스템 설계를 위한 TRNSYS 시뮬레이션 해석 결과	38
<표 4-8> 학습에 활용된 하이퍼파라미터 종류와 범위	42
<표 4-9> 개발 딥러닝 모델 부하예측 결과: 정량적 비교 (MAE, R2score)	44
<표 4-10> 규칙기반 제어에 활용된 SOC 설정값	49
<표 4-11> 태양열 집열기 주요 사양	76
<표 4-12> 실증시스템 태양열 집열기 설치 진행 모습	78
<표 4-13> (좌) 한라봉 온실 열별 유량, (우) 천혜향 온실 열별 유량	92
<표 4-14> 실증 시설원에 난방온도 조건	102
<표 4-15> 비난방기 총합 태양열 집열	105
<표 4-16> 비난방기 태양열 구동을 위해 소모된 전력 총합	105
<표 4-17> 비난방기 열공급 시스템 열량 총합 정리	109

<표 4-18> 난방기 총합 태양열 집열 111

<표 4-19> 난방기 열공급 시스템 열량 총합 정리 122

<표 4-20> 전체 실증 기간 열공급 시스템 열량 총합 정리 (a) 열생산, 열이송, 히트펌프 및 열공급 125

<표 4-21> 태양열 계간축열 히트펌프 열공급 시스템 소모 전력 총합 정리 127

<표 4-22> 연간 온실 공급에너지 130

<표 4-23> 등유온풍기 에너지비용 130

<표 4-24> 실증설비 에너지비용 130

<표 4-25> 히트펌프 동파방지에 사용된 전력량과 전력량요금 산정 139

<표 4-26> 경북의 지역별 난방비 및 연료소비량(추정) 140

<표 4-27> 실증 재배지(온실)의 일반현황 140

<표 4-28> 주요 만감류 품종의 장단점(자료 : 제주특별자치도 농업기술원('20) 141

<표 4-29> 만감류 생육단계별 적정온도 141

<표 4-30> 실증재배지의 토양 화학성분 분석 142

<표 4-31> 만감류 나무 및 과실크기('22) 145

<표 4-32> 한라봉 과실특성 145

<표 4-33> 천혜향 과실특성 146

<표 4-34> 실증재배지의 만감류 생육('23) 146

<표 4-35> 주요 아열대과수의 생육적온과 최저 한계온도 147

<표 4-36> 과실특성 및 품질비교 147

<표 4-37> 국내 망고시장의 원산지별 평균가격('05 ~ '20) 147

<표 4-38> 실증 시스템 적용 태양열집열기 효율 계수 149

<표 4-39> 선정된 시험일의 일자와 오후 2 시에서의 최소 입사각 150

<표 4-40> 현장 집열설비 안전을 산정 150

<표 4-41> 태양열 집열 설비 실증 데이터 타당성 검토 결과 150

<표 4-42> 실증 시설원에 적용 태양열 집열 설비 151

<표 4-43> 실증 시설원에 적용 태양열 계간축열조 151

<표 4-44> 측정 센서 list up 155

<표 4-45> 태양열 집열 설비 실증 데이터 타당성 검토 결과 156

<표 4-46> 실증 시스템 적용 복합열원히트펌프 수열원 모드 난방 성능계수> 160

<표 4-47> 복합열원 히트펌프 실증 데이터 타당성 검토 결과 160

<표 4-48> ISO 24194 제안하는 수준별 측정불확도 164

<표 4-49> 실증 태양열 설비 사양 165

<표 4-50> 실증에 적용된 태양열 열매체 특성 167

<표 4-51> 태양열집열기 평균값과 표준편차 169

<표 5-1> 시뮬레이션 기반 설계를 위한 한라봉 재배시 온실 설정온도 입력 조건 (예시) ... 179

<표 5-2> 시뮬레이션 기반 설계를 위한 망고 재배시 온실 설정온도 입력 조건 (예시) 179

<표 5-3> 시뮬레이션 기반 설계를 위한 바나나 재배시 온실 설정온도 입력 조건 (예시) ... 180

<표 5-4> 시뮬레이션 기반 설계를 위한 온실 부하 시뮬레이션 입력 조건 (예시) 180

<표 5-5> 시뮬레이션 기반 설계를 위한 지역적 특성을 고려한 연간 난방 부하 예측 (예시) ...
..... 181

<표 5-6> 태양열 집열 시스템 고장원인 및 해결방법 183

<표 6-1> 본 사업모델의 가치제언, 상품, 수익모델 및 하부구조 195

<표 6-2> 경제성분석을 위한 온실의 재배작물 및 설정온도 조건 197

<표 6-3> 경제성분석을 위한 온실 부하 시뮬레이션 입력 조건 197

<표 6-4> 경제성분석을 위한 시스템모델의 주요 구성요소 용량 198

<표 6-5> 경제성분석을 위한 난방에너지 요금 및 이산화탄소 배출분석 조건 199

<표 6-6> 경제성분석을 위한 연간 에너지 소비량 및 비용 계산 결과 200

<표 6-7> 경제성분석을 위한 LCC 분석 조건(시장 및 금융 조건) 200

<표 6-8> 경제성분석을 위한 LCC 분석 조건(설치비용 및 은행 대출 조건) 201

<표 6-9> 사업모델별 경제성분석 결과로서의 투자회수기간 요약 205

<표 6-10> 집열면적 용량에 따른 연간 열생산량과 의존율 206

<표 6-11> 태양열 계간축열기반 난방시스템 적용 시설원에 비즈니스 모델 구현방안 209

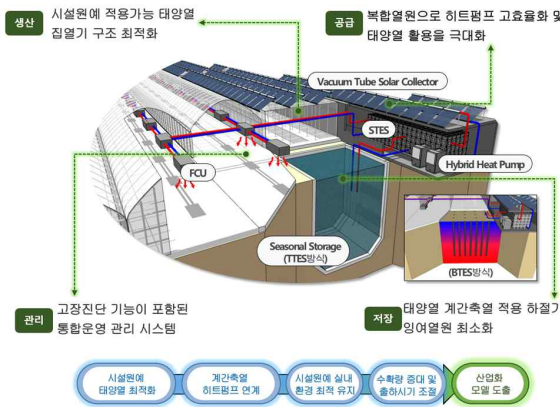
<표 6-12> 태양열 계간축열기반 난방시스템 적용 시설원에 마케팅 전략 210

1. 서론

당초 사업계획서에서 제시한 최종목표와 세부목표는 다음과 같다. 과제기간을 당초 2022년 12월에서 2023년 6월 30일로 연장함으로써, 실증운전은 2022년 4월말부터 2023년 6월 초까지 1년 이상 수행할 수 있었다.

가. 최종목표

- 시설원에 태양열 계간축열 기반 복합열원히트펌프 융합 열공급 시스템 구현으로 난방 에너지 공급 100% 실증을 통하여 아열대작물 에너지비용절감형 산업화 모델 제시
 - 실증기간 : 7개월 이상(2022년 6월 ~ 2022년 12월)
 - 시설규모 : 1,000 평형 시설원에
 - 실증 시설원에 난방에너지 비용 절감 80% 이상
- ※ 기존 재배조건과 동일한 환경조건으로 조절한 상태에서 1개월 운전하여 비교(그 외 기간은 재배환경 개선운전 적용 예정)



[그림 1-1] 실증 시설원에 태양열 계간축열기반 열공급 시스템 개념도



[그림 1-2] 실증 시설원에 태양열 계간축열기반 열공급 시스템 구성도

나. 세부목표

(1) 주요 기능

- 평판형 및 진공관형 태양열 집열기 복합구성 : 저온 및 고온 집열 영역에서의 태양열 생산
- 태양열 집열 구조 최적화 : 태양열 집열기 시설원에 설치 가능 최대 집열 면적 도출
- 계간축열시스템 : 생산된 태양열 장기 열저장 및 히트펌프 열원 공급
- 복합열원히트펌프 : 공기 및 태양열 열원 복합 활용 시설원에 열공급
- 운영관리시스템 : 전체 시스템의 모니터링 및 효율적 운영 제어

(2) 주요 성능치

<표 1-1> 태양열 계간축열 기반 열공급시스템의 실증을 통한 주요 성능지표

구분	집열효율	정상축열운전을	복합열원히트펌프 SCOP	태양열 시스템 고장진단 정확도
성능 지표	KS 인증 효율 대비 90% 달성 ¹⁾	98% 이상 ²⁾	4 이상 ³⁾	90 % 이상 ⁴⁾

- 1) 실증 시설원에 적용된 태양열 집열기의 데이터를 기준으로 KS인증 집열기 성능시험 유사 조건에서의 태양열 집열기 효율을 분석하여 KS 인증 효율과 비교하여 제시 (KS 인증 효율 대비 90 %)태양열 집열효율은 KS 인증 시험 유사(입사각, 온도) 조건에서 실증 운전 데이터로 분석
- 2) 정상축열운전은 3차년도 실증 데이터로 산정하며, 태양열 과열 일수 7일 이하가 되는 조건, 즉 전체 운전일수 중 과열이 발생하지 않고 정상 축열운전이 이루어지는 일수의 비율로 정의
- 3) SCOP(Seasonal Coefficient Of Performance)는 복합열원 히트펌프의 계절난방 성능 지표로써 실증운전 데이터로 계산
- 4) 태양열시스템의 고장진단 정확도는 실증 설비의 인위적인 고장과 유사한 상태를 계획하여 운영관리시스템에서 진단한 결과의 정확도를 산정

(3) 핵심 기술

- 시설원에 적용을 위한 태양열 구조 최적화 설계 기술 (국내 최초)
- 시설원에 태양열 계간축열 연계 복합열원 히트펌프 열공급 시스템 기술 (국내 최초)
- 태양열 계간축열기반 시설원에 열공급 시스템 최적 운영관리 기술 (국내 최초)

다. 사업 기대효과

(1) 원천기술 확보

- 태양열생산 : 시설원에 태양열 집열기 설치구조 최적화 설계기법 및 다양한 현장 적용가능 기술 도출
- 태양열저장 : 기존 태양열 시스템 대비 태양열저장 활용률 및 에너지 절감률 극대화 방안 도출
- 태양열관리 : 태양열 계간축열 기반 복합열원 히트펌프의 연중 통합 최적운영 기술

(2) 성과홍보 활용

- 보급확대 본 사업 시스템 실증 대상지를 국내 기초 및 광역 지자체 단위로 보급 확대

위한 성과 홍보로 활용

(3) 영농활용

- ▣ 아열대작물영농모델 : 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템을 이용한 아열대작물 영농기법 모델 확립

2. 성과 요약

가. 연구목표

(1) 실증 기간 (목표 : 7개월 이상, 달성)

본 사업은 '20년 4월 29일에 시작하여 '23년 6월 30일 약 39개월간 수행한 연구과제로, 실증기간은 '22년 4월 25일부터 '23년 6월 04일까지 1년(12개월) 이상을 수행하였으며, 과제종료 후인 현재('23년 08월)에도 모니터링을 지속적으로 운영하고 있다. <표 2-1>에 과제사업기간과 실증기간을 정리하여 나타내었다.

<표 2-1> 과제 사업기간 및 실증기간

구분	기간	비고
총 사업기간	2020.04.29. ~ 2023.06.30 (39개월)	* 6개월 과제연장
실증기간	2022.04.25. ~ 2023.06.04 (14개월)	* 현재('23.08) 모니터링 운영중

실증 시설원예에 구축된 태양열 계간축열 기반의 열공급 시스템의 주요구성은 <표 2-2>와 같다.

<표 2-2> 실증설비 구축 현황

구분	내 용	주요 구성품	구축 여부
1	통합 운영관리실(기계실)	- MCC 및 PLC - 사용자 입력 화면 - 원격 제어 시스템 - 원격 고장진단시스템	○
2	태양열 설비 및 시스템	- 평판형, 진공관형 집열기 - 팽창탱크, 보충탱크 등	○
3	계간축열기반 열공급시스템	- 계간축열조 및 버퍼조 - (복합열원) 히트펌프 등	○
4	(온실내부) 열공급시스템	- 온실 어레이별 배관구성 - FCU(Fan coil unit) 등	○
5	모니터링 시스템	- 원격 모니터링시스템 등	○

(2) 실증 시설원예 규모 (목표 : 1,000평 이상, 달성)

실증 대상지인 포항 동서네농장은 <표 2-3>에 나타난 바와 같이, 한라봉과 천혜향 2개의 온실로 이루어져 있으며, 면적은 한라봉 온실 약 2,090㎡(630평), 천혜향 온실 약 1,760㎡(530평)으로 총 3,850㎡(1,160평) 규모이다. 실증설계 설계단계에서는 바나나와 천혜향을 재배하고 있었으나 농장주의 경영상 사정으로 실증기간 중에 한라봉과 천혜향으로 재배작물이 변환되었다.

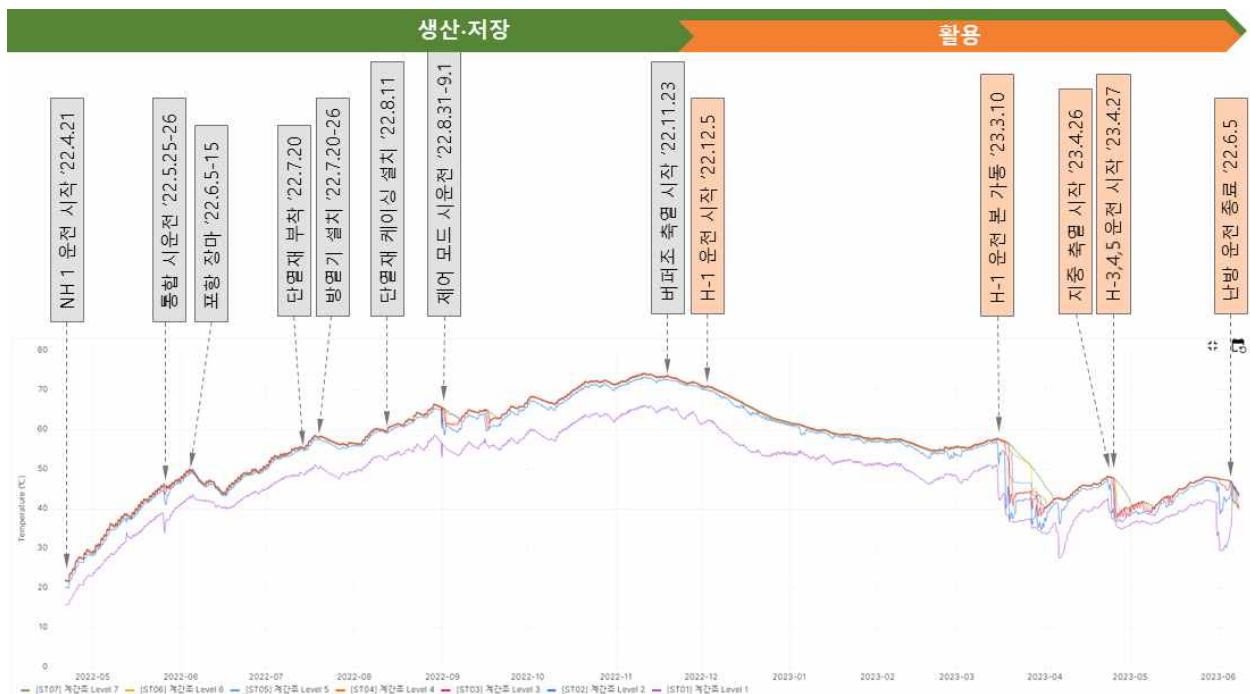
<표 2-3> 실증 시설원에 규모

구분	규모	비고
온실 1	2,090㎡ (약 630 평)	한라봉
온실 2	1,760㎡ (약 530 평)	천혜향
총 실증 온실면적	3,850㎡ (약 1,160 평, 0.38 ha)	

(3) 실증 시설원에 난방에너지 (목표 : 비용 절감 80% 이상, 달성)

전체 실증기간에 걸친 운전 중 중요사항을 표시하여 계간조의 온도변화와 함께 [그림 2-1]에 나타내었다. 당초 설비설계단계에서 재배 중이던 바나나와 천혜향 대신 농장주의 경영상 사정으로 한라봉과 천혜향으로 작물이 변경되었고, 이로 인하여 난방부하가 설계설계단계에서 반영하였던 부하에 비하여 상당히 감소한 탓에 난방기에서도 계간조에 저장한 열에 대한 활용이 낮아지게 되었으며, 계간조의 최종온도는 잔열을 이용할 수 있는 양을 남긴채 실증이 종료된 측면이 있어 초기온도와 최종온도는 차이를 가지고 있다. 계간조의 성능측면에서 단열재 보강이 다소 뒤늦게 이루어져 효율저하가 반영이 된 상태이며, 이후 계간조 성능개선위한 연결배관부 보완이 이루어져 다음해부터는 더욱 향상된 성능이 기대된다.

한편, NH-1, H-1, H-3, H-4, H-5 등은 운전제어시스템에 사용한 운전모드 이름으로서 [그림 4-54]의 설명을 참고할 수 있다.



[그림 2-1] 전체실증기간에 걸친 계간조의 온도변화와 실증 중요 사항

실증기간 중 전기에너지 소비량을 기준으로 실증기간에 발생한 난방부하와 동일한 조건에서 기존 등유보일러의 에너지소비량을 계산하고 비교하여 실증기간의 에너지단가를 이용하여 전력량요금기준으로 절감율을 산정한 결과 <표 2-4>와 같이 실증 시설원예의 난방에너지

지 절감율은 80.6%로 산정되었다.

<표 2-4> 실증 시설원에 난방에너지 절감량 및 비율

구분		내용
실증 시설원에 공급에너지		31,460 kWh
비용	(기존) 등유온풍기	3,989,085 원
	태양열 계간축열기반 공급시스템	774,330 원
절감률	난방에너지비용 (전력량요금)	80.6 %

(4) 참여기관별 역할 및 수행 내용

본 실증연구에 참여기관은 주관기관으로서 한국에너지기술연구원, 참여기관으로 세한에너지(주), (주)에스앤지에너지, 대전대학교, 경북농업기술원 등 총 5개 기관이 참여하였다. 한국에너지기술연구원은 실증 전반에 걸친 설계와 설치, 성능분석과 사업화모델 수립 등의 내용을 연구하였다. 세한에너지(주)는 진공관형 태양열설비 설계와 설치, 계간조 및 버퍼조와의 연계 그리고 설비 운영 등에 참여하였고, (주)에스앤지에너지는 계간조 설계와 설치, 평판형 태양열설비 설계와 설치, 계간조 및 버퍼조와의 연계 그리고 설비 운영 등을 수행하였다. 대전대학교는 시스템의 설계를 위한 시뮬레이션과 사업화 모델 경제성분석을 위한 시뮬레이션, 태양열시스템 고장진단 실증 등을 수행하였다. 또한 경북농업기술원은 작물재배와 관련한 실내환경 측정과 수확량 증대방안 연구를 수행하였다.

<표 2-5> 1차년도 각 기관별 목표와 수행내용

기관	목표	수행내용
전체	실증 시설원에 적용 태양열 계간축열 기반 열공급시스템 설계 및 제작	통합설비설계 및 일부제작
한국에너지기술연구원	실증 시설원에 적용 열공급 통합시스템 설계	설비설계
세한에너지(주)	시설원에 적용 태양열 설비 실시설계	설비설계
(주)에스앤지에너지	시설원에 적용 계간축열 설비 실시설계	설비설계
대전대학교	시설원에 태양열 기반 열공급시스템 통합해석기법 개발	시뮬레이션 툴 개발
경북농업기술원	실증단지 재배 작물의 수확량 증대 방안 도출	방안 도출

<표 2-6> 2차년도 참여기관별 목표와 수행 내용

기관	목표	수행내용
전체	실증 시설원에 적용 태양열 계간축열 기반 열공급시스템 부분 구축 및 시운전	부분구축, 시운전
한국에너지기술연구원	실증 시설원에 적용 열공급 시스템 통합 구축 및 시운전	부분통합구축, 시운전
세한에너지㈜	실증 시설원에 태양열 시스템 부분 구축 및 시운전	부분 구축, 시운전
㈜에스앤지에너지	실증 시설원에 계간축열시스템 구축 참여 및 시운전	부분 구축, 시운전
대전대학교	시설원에 태양열 계간축열 기반 열공급시스템을 위한 Edge Computing 방식의 모니터링 프로그램 설계	모니터링 프로그램 설계
경북농업기술원	실증 시설원에 재배환경 및 작물생육 분석	분석

<표 2-7> 3차년도 참여기관별 목표와 수행 내용

기관	목표	수행내용
전체	실증 시설원에 적용 태양열 기반 계간축열식 열공급 시스템 구축완료 및 장기실증	구축완료, 1년 이상 실증
한국에너지기술연구원	실증 시설원에 적용 열공급 통합시스템 구축완료, 장기 실증 및 성능평가	구축완료, 실증 및 성능평가
세한에너지㈜	실증 시설원에 태양열(진공관형)과 계간축열 설비 실증 운전 및 운영가이드라인 개발	실증, 가이드라인 작성
㈜에스앤지에너지	실증 시설원에 태양열(평판형)과 계간축열 설비 실증 운전 및 운영가이드라인 개발	실증, 가이드라인 작성
대전대학교	TRNSD기반 시설원에 열공급시스템 해석툴 개발 및 고장진단 프로그램 실증	시스템 해석, 고장진단 실증
경북농업기술원	실증 시설원에 생산성 분석 및 장기재배 영농기법 연구	재배기법 연구

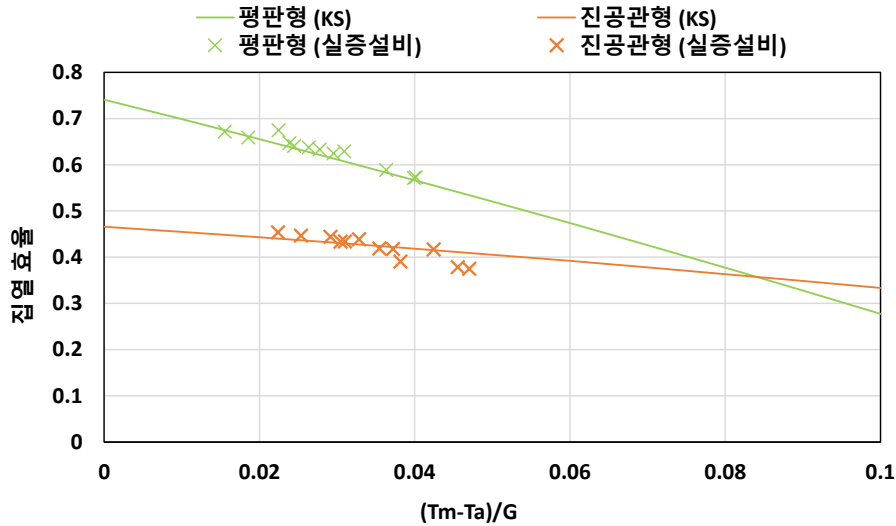
나. 세부 목표

본 과제에서 실증을 통한 주요 성능지표는 <표 1-1>과 같으며, 본 장에서는 세부 목표의 달성 정도를 요약하여 정리하였다. 각 세부 목표별 자세한 분석방법은 본 보고서의 [‘3장 아.’항의 “개발지표 분석”]를 참고할 수 있다.

(1) 집열효율 (성능지표 목표: KS인증 효율 대비 90% 이상)

실증시스템에 적용된 태양열 집열 설비의 성능을 객관적으로 평가하기 위해 ISO 24194에서 제시한 단일집열기 성능과 안전계수 등이 고려되는 현장설치 집열설비 성능을 비교확인할 수 있는 방법을 적용하였다. 실증 데이터를 기준으로 KS 인증 집열기 성능시험 유사 조건에서의 태양열 집열기 효율을 분석하였으며, 평판형 태양열 집열기 및 진공관형 태양열 집열기 설비의 설치, 데이터 정확성 및 현장 집열설비 집열효율 성능 평가 방법의 적절성 확인을 위해 한국산업기술시험원의 확인을 통해 태양열 집열 설비 실증시스템의 실증 성능 평가 방법의 적절성을 검증하였다.

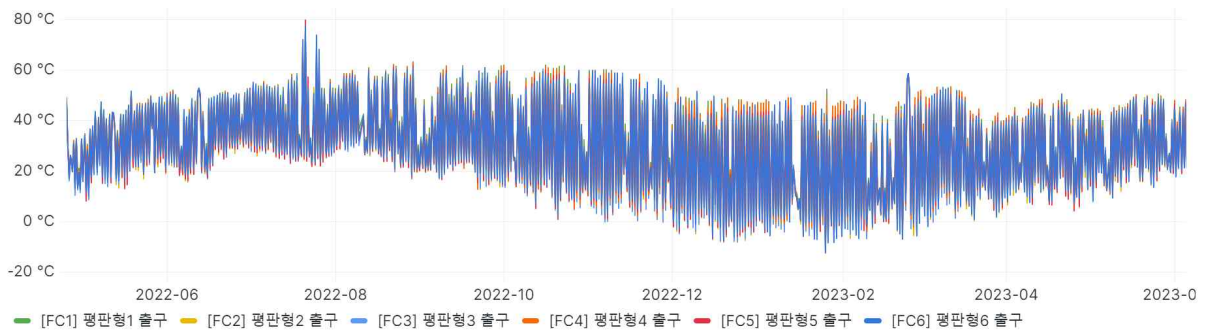
그 결과, [그림 2-2]와 같이 각 집열설비 열성능의 KS인증시험의 성능과의 비교를 통한 달성도의 평균은 평판형 집열기는 약 100.6%, 진공관 집열기는 약 98.7%로 분석되었다.



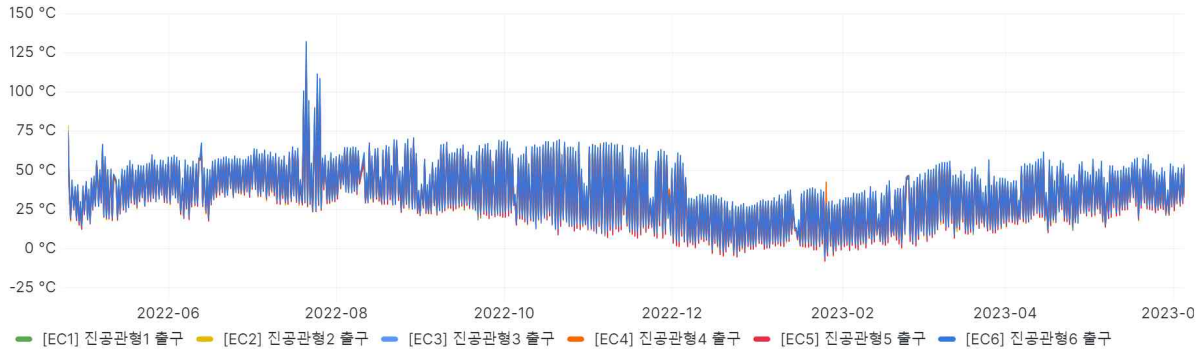
[그림 2-2] KS인증 집열기 효율곡선과 실증설비의 집열효율 비교

(2) 정상축열운전을 (성능지표 목표: 98% 이상)

정상축열운전은 3차년도 실증 데이터로 산정하였으며, 태양열 과열 일수 365일 중 7일 이하가 되는 조건, 즉 전체 운전일수 중 과열이 발생하지 않고 정상 축열운전이 이루어지는 일수의 비율로 목표수준을 정의하였으며, 2022년 4월 25일부터 2023년 6월 4일까지 실증 시스템의 과열된 일수는 평판형 태양열 1차 측의 경우 0회 진공관형 태양열 1차 측의 경우 4일로 실측되었으며 이를 통해 정상축열운전은 99%로 분석되었다. [그림 2-3]과 [그림 2-4]에 실증기간 중 측정된 평판형과 진공관형 집열설비의 출구온도를 각각 나타내었다.



[그림 2-3] 실증 평판형 태양열 집열기 출구온도('22년 4월 25일 ~ '23년 6월 4일)



[그림 2-4] 실증 진공관형 태양열 집열기 출구온도(‘22년 4월 25일 ~ ‘23년 6월 4일)

(3) 복합열원히트펌프 SCOP (성능지표 목표: 4 이상)

실증시스템에 적용된 복합열원 히트펌프의 계절난방 성능은 실증데이터를 기준으로 복합 열원 히트펌프의 SCOP(Seasonal COP)계산 값을 도출하였으며, 한국냉동공조인증센터의 확인을 통해 적절성을 검증하였다.

복합열원 히트펌프 난방계수 산정 방법은 (식 2-1)과 같다.

$$\text{난방 성능계수} = \text{난방용량} / \text{유효 소비전력} \quad (\text{식 2-1})$$

실증시설원예에 설치된 복합열원 히트펌프의 실증기간 중 난방용으로 작동한 전체 일수인 6일 간의 난방 시험일에 대한 복합열원 히트펌프의 수열원 모드에서의 전체 시험시간에 걸쳐 측정된 1분 간격의 데이터 값을 평균한 결과 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템에 적용한 복합열원 히트펌프의 수열원 모드의 난방 성능계수 SCOP는 <표 2-8>와 같이 4.38로 분석되었다.

<표 2-8> 실증 시스템 적용 복합열원히트펌프 수열원 모드 난방 성능계수

시험항목	정미용량 (W)	유효 소비전력 (W)	계절간 성능계수(SCOP) (W/W)
난방시험 전체	151,691	34,647	4.38

(4) 태양열시스템 고장진단 정확도 (성능지표 목표: 90% 이상)

실증 시설원예에 구축한 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템의 태양열집열기 집열 성능 및 집열펌프 운영시스템의 고장진단 시스템의 정확도 확인을 위해 한국태양열융합협회의 확인을 통해 적성성을 검증하였다.

실증시설원예에 적용된 태양열 시스템의 고장진단은 집열성능 고장진단과 기계적 결함인 펌프 고장진단으로 나뉘며, 평판형과 진공관형 집열설비로 분류하여 평가하였다. 그 결과 통합 고장진단 정확도는 <표 2-9>에서와 같이 96.5 %로 분석되었다.

<표 2-9> 태양열시스템 집열성능 및 펌프 고장진단(감지) 시험 결과 요약

시험항목		(인위적) 고장 발생	고장 진단(감지) 정상알림 발생	고장진단 정확도
집열성능	평판형	16	16(정상)	100 %
	진공관형	15	13(정상), 2(비정상)	86.7 %
펌프	평판형	13	13(정상)	100 %
	진공관형	13	13(정상)	100 %
통합 고장진단 정확도		57	55(정상), 2(비정상)	96.5 %

다. 과학적 성과

(1) 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	고온 지중 계간축열시스템을 갖는 온실의 태양열 난방시스템 장기 열성능평가	한국태양에너지학회 논문집	임희원	41	대한민국	한국태양에너지학회	비SCIE	2021.12.01	1598-6411	100
2	Simulation-based fault detection remote monitoring system for small-scale Photovoltaic systems	Energies	임희원	15	스위스	MDPI	SCIE	2022.12.13	1996-1073	100
3	Data-driven heat pump operation strategy using rainbow deep reinforcement learning for significant reduction of electricity cost	Energy	한광우	270	영국	Elsevier	SCIE	2023.05.01	0360-5442	100
4	넷-제로에너지주택의 공기열원 히트펌프시스템 동적거동 및 에너지성능분석	한국태양에너지학회 논문집	임희원	42	대한민국	한국태양에너지학회	비SCIE	2022.12.01	1598-6411	100
5	기상청 개방형-API 기상정보 기반 중소규모 태양광발전 성능평가 및 고장감지 원격 모니터링시스템	한국태양에너지학회 논문집	임희원	43	대한민국	한국태양에너지학회	비SCIE	2023.04.01	1598-6411	100
6	현장설치 태양열 집열설비 열성능 확인을 위한 국제표준 기반의 실증적 분석	설비공학논문집	이경호	35	대한민국	대한설비공학회	비SCIE	2023.04.01	1229-6422	100
7	TRANSYS를 이용한 온실 적용 태양열 연계 지열히트펌프 융복합 난방시스템 열성능 해석	설비공학논문집	임희원	35	대한민국	대한설비공학회	비SCIE	2023.06.01	1229-6422	100
8	시뮬레이션 기반 실시간 평판형 태양열집열기 성능해석	설비공학논문집	김일권	35	대한민국	대한설비공학회	비SCIE	2023.07.01	1229-6422	100

(2) 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2021 한국태양에너지학회 추계 학술발표대회	임희원	2021.11.10	광주 김대중컨벤션센터	대한민국
2	한국신재생에너지학회 2022년 춘계학술대회	이경호	2022.04.14	대구EXCO	대한민국
3	한국신재생에너지학회 2022년 춘계학술대회	임희원	2022.04.14	대구EXCO	대한민국
4	한국신재생에너지학회 2022년 춘계학술대회	이현숙	2022.04.14	대구EXCO	대한민국
5	2022 한국태양에너지학회 추계 학술대회	한광우	2022.10.20	제주 오리엔탈호텔	대한민국
6	The 11 th Asia-pacific forum on renewable energy	한광우	2022.09.29	제주 라마다플라자	대한민국
7	한국신재생에너지학회 2023년 춘계학술대회	한광우	2023.06.01	부산 파라다이스호텔	대한민국

라. 기술적 성과

(1) 지식재산권(특허)

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		
1	수직방식의 하이브리드 지중열교환기 및 그의 매설방법	대한민국	한국 에너지 기술 연구원	2021. 11.05	10-2021-0151025	-	-	-	100	미활용	-
2	태양열 복합 열저장식 열공급시스템	대한민국	한국 에너지 기술 연구원	2022. 11.10	10-2022-0149424	-	-	-	100	미활용	
3	강화학습 기반 히트펌프 제어방법, 장치 및 이를 이용한 냉난방시스템	대한민국	한국 에너지 기술 연구원	2022. 12.16	10-2022-0177204	-	-	-	100	미활용	

마. 경제적 성과

(1) 매출실적

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
여주 푸르메 스마트팜	2021	113,098		113,098	조달청나라장터 납품판매 실적
합계		113,098		113,098	

(2) 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)			합계
			2020년	2021년	2022년	
1		세한에너지(주)	3	1	4	8
2		(주)에스앤지에너지	1	0	0	1
합계			4	1	4	9

바. 사회적 성과

(1) 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용
1	제안	아열대 작물 시설원에 태양열 열공급시스템의 설계 및 성능에측용 시뮬레이션 모델 도입	경상북도 (에너지산업과)	2021	제안 검토
2	제안	시설원에대상 작업등을 활용한 태양열 융복합 열공급 모델(안)	한국농어촌공사 (농어촌연구원)	2022	제안 검토

(2) 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비
1	산업통상자원부	신재생에너지 표준화 및 인증고도화 지원사업	단일 집열기 및 현장설치 태양열 집열어레이 성능평가 기반구축 연구	이경호	817,850천원

(3) 홍보실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	지방일간지	전기신문	경북 포항에 에너지자립형 스마트팜 개발실증 박차	2021.05.30
2	지방일간지	경북온뉴스	경북 포항에 에너지자립형 스마트팜 - 태양열 활용 에너지 생산,저장,관리시스템 구축 및 실증연구 본격 착공	2021.05.30
3	지방일간지	경상매일신문	경북도, 포항에 에너지자립형 스마트팜 개발실증 박차	2021.05.30
4	지방일간지	경상투데이	경상북도, 에너지자립형 스마트팜 모델 개발 '박차'	2021.05.30
5	지방일간지	경북매일	경북도, 에너지자립형 스마트팜 개발실증 박차	2021.05.30
6	지방일간지	군위넷	경북 포항에 에너지자립형 스마트팜 개발실증 박차	2021.05.30
7	지방일간지	뉴스매거진	태양열 활용 에너지 생산,저장,관리시스템 구축 및 실증연구 본격 착공	2021.05.31
8	지방일간지	경북in뉴스	경북 포항에 에너지자립형 스마트팜 개발실증 박차	2021.05.31
9	지방일간지	경북연합방송	포항에 에너지자립형 스마트팜 개발실증 박차	2021.05.31
10	기타	홍보물	경북 한라봉(부지화) 재배와 월별 관리	2021.06.21
11	지방일간지	인더스트리뉴스	에너지연, 태양열로 한라봉 수확 난방비 절감 기대	2023.04.14
12	지방일간지	투데이에너지	태양열 온실 아열대 작물 생산 새로운 패러다임 제시	2023.04.14
13	지방일간지	에너지데일리	태양열로 아열대 작물 생산 새로운 패러다임 제시	2023.04.14

14	월간잡지	KHARN	에너지연, 태양열 계간축열 설비 준공	2023.04.18
15	전시회	2021 대한민국 에너지대전	태양열집열기, 자연순환식 태양열온수기, 계간축열조를 활용한 태양열시스템	2021.10.13

3. 태양열 활용 에너지 생산·저장·관리 기술 개요

가. 기술의 개요

(1) 과제제안요구 내용

본 연구에서 해당기술인 태양열 활용 에너지 생산, 저장, 관리 기술은 [그림 3-1]에 나타난 바와 같이 과제제안요구서에서 제시한 태양열을 활용한 에너지 생산·저장·관리 및 실증모델 구축에 대한 내용을 최대한 반영하여 개발될 수 있도록 기술적 개념을 제시하고자 고안되었다. 본 장에서는 본 연구를 통하여 개발하여 실증하고자 하는 기술에 대한 배경과 개념을 설명하고자 한다.

과제제안요구서에서 제시한 연구내용은 다음과 같다. 에너지 생산적인 측면에서 태양열을 활용하여 열을 생산하며 태양열 집열구조를 최적화하여 시스템을 적용하고 에너지생산기술을 확보하는 내용을 담고 있다. 또한 생산한 태양열에너지를 계간축열시스템을 활용하여 저장하기 위한 기술의 고효율화가 필요하며, 생산하고 저장한 태양열에너지를 최적으로 관리하고 운영하기 위한 관리·운영시스템을 적용하여 현장에 실증하는 것이다.

- (생산) 태양열 집열구조 최적화 및 시스템 적용을 통한 에너지 생산기술 확보
- (저장) 계간축열시스템(축열조)을 활용한 열에너지 저장기술 고효율화
- (관리·실증) 생산·저장에너지의 최적 관리·운영시스템 적용 및 현장 실증
- ※ 축열조·태양열 설치비용 편성 가능

[그림 3-1] 과제제안요구서의 연구내용

또한 과제제안요구서에서 언급한 추진시 고려사항으로 [그림 3-2]와 같이 핵심요소기술 개발을 가급적 지양하면서 기존에 개발된 기술을 활용하고 시설원예에 활용하기 위한 적용성을 향상하여 기술을 고도화하고 최적화하는 것에 중점을 두도록 하였다. 그리고 실증규모는 약 1,000평 이상의 시설원예농가를 대상으로 하도록 하며, 구축한 실증설비의 사후관리 등 유지보수 방안을 제시하도록 하였다. 또한 적용할 신재생에너지설비는 에너지관리공단에서 인증한 설비를 적용하되 국산 제품을 중심으로 설치하도록 하였다.

- ※ 핵심 요소기술 개발은 가급적 지양하고, 기 개발기술을 활용하여 시설원예의 적용성을 향상하기 위한 기술 고도화 및 최적화 등에 중점
- 시설원예농가 규모 약 1,000평(0.3ha) 이상 단지에서 실증 필수
- 수행기관은 구축 설비의 사후관리 등 유지·보수 지원 방안 제시
- 신재생에너지 설비 에너지관리공단에서 인증한 설비로, 국내 신재생에너지 설비의 테스트베드로의 활용을 감안, 국산 제품 중심으로 설치
- * 신·재생에너지 설비의 지원 등에 관한 규정 제19조 등

[그림 3-2] 과제제안요구서의 연구 추진 시 고려사항

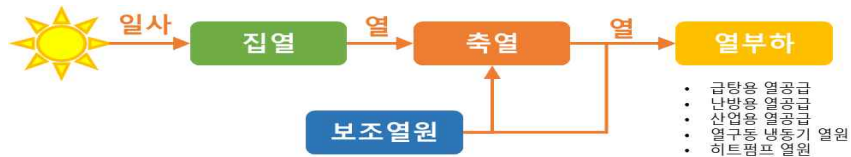
(2) 태양열 계간축열식 히트펌프 융합 열공급시스템 기술

(가) 태양열기술 개요

본 연구에서는 태양열 계간열저장기술을 기본적인 구성요소기술로 하고 계간열저장의 저효율적 이용으로 저장이용용량 증대를 위하여 계간열저장에너지의 저온 잔열을 히트펌프의 열원으로 활용하는 방식의 히트펌프와 융합한 열공급시스템을 기술개념으로 수립하였다.

국내외적으로 살펴보면 열에너지 수요는 최종에너지수요의 50% 이상을 차지하는 것으로 알려져있으므로 열에너지를 통한 에너지소비저감기술은 탄소배출저감과 에너지소비절감을 위한 상당한 가능성을 가지고 있으며, 최근 국내외적으로 열에너지수요의 전기화와 재생전력기술의 보급을 통하여 탄소배출저감에 기여하고자 하는 로드맵 등이 제시되면서 메가트렌드를 보이고 있다. 따라서 태양열 계간열저장시스템을 통하여 에너지소비량 저감을 도모하고, 히트펌프를 적용하여 기존 화석연료를 이용하는 난방시스템을 대체함으로써 열에너지수요를 고효율 전기화가 가능하므로 탄소배출저감에 효과적으로 기여가 가능한 기술적 개념이 될 것이다.

태양열기술은 2022년 신재생에너지백서를 참고하면 [그림 3-3]과 같이 기본적으로 태양열 집열기술, 태양열저장기술, 태양열시스템 열공급기술 등으로 구분이 이루어지며, 아래 그림과 같이 설비형 태양열시스템의 개념은 집열과 축열 그리고 보조열원 등을 이용하여 열부하에 열공급이 이루어지는 기술이다.



[그림 3-3] 설비형 태양열(ST, Solar Thermal)시스템 개념도(액체식)

태양열시스템의 효율은 집열설비에 작용하는 일사량에 대한 태양열시스템에서 공급한 열량으로 정의하고, 일사량은 경사면의 일사량을 기준으로 한다.

$$\begin{aligned}
 \text{태양열시스템 효율} &= \frac{\text{시스템 공급열량}}{\text{집열면 일사량}} && \text{(식 3-1)} \\
 &= \frac{\text{질량유량} \times \text{비열} \times (\text{시스템 공급온도} - \text{환수온도})}{\text{집열면 단위면적당 일사량} \times \text{집열기면적}}
 \end{aligned}$$

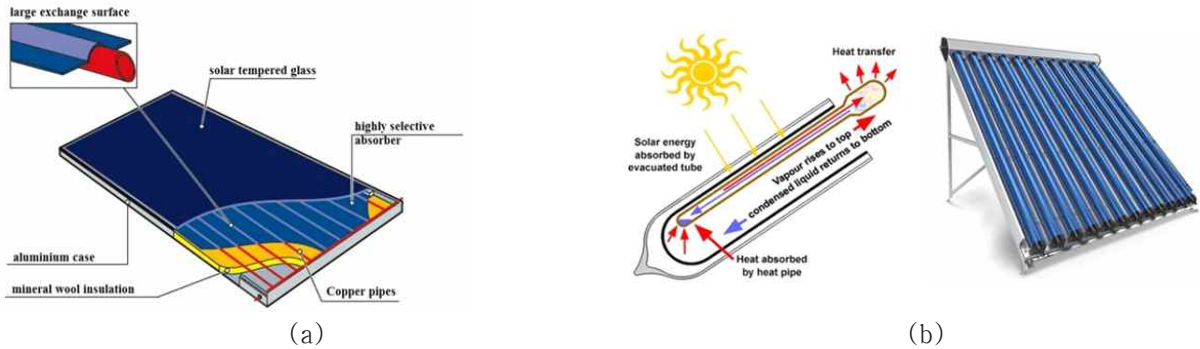
한편 난방부하에서 태양열시스템에서 공급한 열량의 비율은 태양열의존율(Solar fraction, SF)로 정의한다.

$$\begin{aligned}
 \text{태양열의존율} &= \frac{\text{연간 태양열시스템 공급열량}}{\text{연간 열부하량}} && \text{(식 3-2)} \\
 &= \frac{\text{질량유량} \times \text{비열} \times (\text{시스템 출구온도} - \text{입구온도}) \text{의 연간합}}{\text{연간 열부하량의 합}}
 \end{aligned}$$

(나) 태양열에너지 생산기술

태양열에너지 생산기술은 태양열 집열기술로 볼 수 있다. 태양열 집열기술은 태양 복사

에너지를 열에너지로 변환하여 모으는 기술이며, 이러한 장치로 태양열 집열기를 이용한다. 태양열 집열기는 집열하는 온도에 따라서 저온용, 중저온용, 중온용, 고온용 집열기로 구분하고 있으며, 난방에 활용하기에 적합한 90℃ 이하의 온도범위의 집열기는 저온용 집열기에 해당한다. 저온용 집열기로는 평판형 집열기와 진공관형 집열기가 주로 사용되고 있다. [그림 3-4]에 평판형 집열기와 진공관형 집열기에 대한 모습과 대략적인 구조를 나타내었다.



[그림 3-4] 저온형 태양열 집열기 (a)평판형 집열기, (b)진공관형 집열기
 (자료출처: 신재생에너지백서 2022 및 Greco et al, A comparative study on the performance of flat plate and evacuated tube collectors deployable in domestic solar water heating systems in different climate areas, Climate, 8, 2020.

집열기의 성능은 국제표준인 ISO 9806에서 제시하는 성능표현 방식으로 나타낼 수 있으며, 아래의 식과 같이 집열기의 열출력을 표현할 수 있다.

$$\dot{Q} = A_G \left[\eta_{0,b} K_b (\theta_L, \theta_T) G_b + \eta_{0,b} K_d G_d - a_1 (\vartheta_m - \vartheta_a) - a_2 (\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - a_5 \left(\frac{d\vartheta_m}{dt} \right) \right] \quad (\text{식 3-3})$$

위 식에서 \dot{Q} 는 집열기 열출력, A_G 는 집열기 전면적(Gross area), $\eta_{0,b}$ 는 집열기 입출구 평균온도와 외기온도가 동일한 조건에서의 효율인 최대효율, θ_L 과 θ_T 는 횡방향과 종방향에 대한 직달일사의 입사각, K_b 는 직달일사에 대한 입사각수정계수, K_d 는 산란일사에 대한 입사각수정계수, G_b 는 직달일사, G_d 는 산란일사, ϑ_m 는 집열기 열전달유체의 입출구 평균온도, ϑ_a 는 외기온도, a_1 는 열손실계수(W/m²K), a_2 는 열손실에 대한 온도의존도 계수(W/m²K²), a_5 는 집열기의 유효열용량을 나타낸다.

태양열 집열기의 효율은 집열면에 작용하는 일사량에 대한 집열량으로 표현된다. 일사량은 집열면 즉 경사면의 일사량을 기준으로 한다. 한편, 태양열시스템의 효율은 집열기 어레이 설비에 작용하는 일사량에 대한 태양열시스템에서 공급한 열량으로 정의하고, 일사량은 경사면의 일사량을 기준으로 한다.

$$\begin{aligned} \text{태양열집열기 효율} &= \frac{\text{집열기 집열량}}{\text{집열면 일사량}} && (\text{식 3-4}) \\ &= \frac{\text{질량유량} \times \text{비열} \times (\text{집열기 출구온도} - \text{입구온도})}{\text{집열면 단위면적당 일사량} \times \text{집열기 면적}} \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{AG} = \frac{\dot{m}_f C_{p,f} (T_{f,out} - T_{f,in})}{AG} \tag{식 3-5}$$

위 식에서 $T_{f,in}$ 과 $T_{f,out}$ 은 집열기로 들어가는 열전달유체의 입구와 출구온도, \dot{m}_f 은 열전달 유체의 질량유량, $C_{p,f}$ 는 열전달유체의 정압비열, G 는 집열기에 작용하는 일사강도, A 는 집 열기 면적(전면적 또는 투과면적 기준 적용 가능)이다.

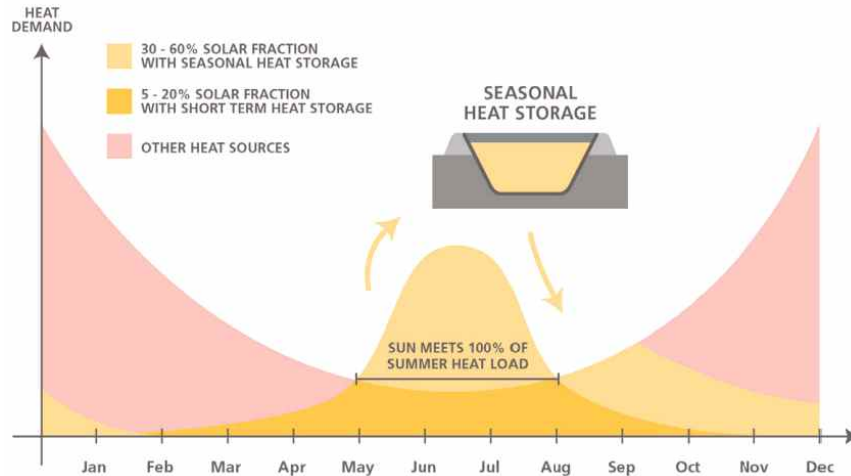
한편, 국내의 경우 2015년에 제정된 평판형, 집광형 및 고정집광형 등에 대한 태양열집열 기 표준 KS 8295에서는 태양열 집열기의 집열효율에 대하여 $\frac{t_m - t_a}{G}$ 변수값을 x축으로 하는 2차 방정식으로 표시하고 있다.

$$\eta = \eta_0 - a_1 \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right) - a_2 G \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right)^2 \tag{식 3-6}$$

여기서 t_m 은 집열기 열매체의 입출구 평균 온도, t_a 는 주변 외기온도, G 는 입사각이 0인 상 태에서 집열면에 작용하는 전일사강도이다. η_0 과 a_1, a_2 등의 계수값은 열성능시험을 통하여 구해지며, KS인증을 위한 시험성적서에 표기가 되어있다.

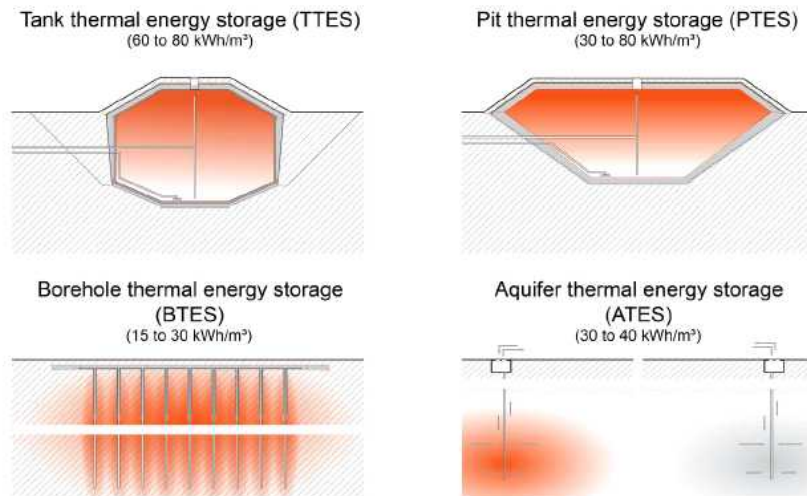
(다) 태양열 계간 열저장 기술

태양열 계간 열저장기술은 주로 대규모 태양열설비와 함께 유럽지역을 위주로 하여 지역 난방과 연계가 이루어지고 있으며 지속가능한 열공급원을 위한 수단으로 관심을 받고 있다. IEA SHC에서 제시한 태양열 계간 열저장기술의 개념은 [그림 3-5]와 같다. 에너지전환의 한 부분으로서 태양열 지역난방은 그 적용이 확대되고 있으며, 열 분야의 탄소중립화를 위 한 중요한 수단으로 고려되고 있다. 태양열설비는 버퍼열저장조와 함께 히트펌프, 보일러, 산업체 등으로부터의 미활용 배열 등과 같은 다양한 열공급원과 함께 활용이 가능하다. 또 한 계간열저장조와 함께 대규모 태양열 집열설비를 설치하여 열공급비중에서 태양열의존율 을 높여 에너지저감과 탄소배출저감을 더욱 향상시킬 수 있으며, 태양광과 풍력 등에서 생 산된 재생전력이 잉여상태가 될 경우에 히트펌프를 이용하여 열로 변환한 후 저장하여 사용 함으로써 재생에너지의 이용을 향상시키고 전력계통의 안정화에도 크게 기여할 수 있다.



[그림 3-5] 대규모 태양열의 계간 열저장 개념

현재 실제 적용되고 있는 계간 열저장기술은 IEA SHC 자료인 [그림 3-6]과 같이 탱크 방식, 지중 보어홀 방식, 피트 방식 그리고 대수층 방식 등 4가지 정도의 방식이 있다.



[그림 3-6] 적용되고 있는 계간 열저장기술의 종류

탱크방식 계간열저장 기술은 적절히 안정적인 지반구조 위에 설치되며 지중 5m에서 15m 깊이까지 지중수가 흐르지 않는 범위 내에서 전체를 묻거나 일부를 묻는 방식으로 지상에 미관을 고려하여 설치가 되기도 한다. 탱크의 재질은 콘크리트나 스테인레스 스틸, 강화플라스틱 등이 적용가능하다. 대체로 1,000 m³ 규모에서도 내압이 작용하므로 지중에 설치하여 압력을 지지할 수 있는 장점도 있다. 그렇지만 지중에 설치할 경우 습기가 단열재를 침투하여 단열성능이 낮아지게 되므로 습기제어에 대하여 세심하게 대처하여야 한다. 열저장 효율적인 측면과 초기 비용측면에서는 물저장 등가용량으로 1,000 m³ 이상의 규모가 바람직한 것으로 알려져 있다. 탱크에 저장하는 온수의 온도는 98 ℃까지 가열이 가능하고 가압형으로 스팀이 새는 것을 방지할 수 있는 구조일 경우 더 높은 온도까지 저장을 고려할 수 있다. 탱크 방식의 열저장용량은 60에서 80 kWh/m³의 범위에 있으며, 탱크의 형상을 설계적으로 조절가능하므로 체적에 대한 표면적 비율을 조절하여 최적화할 수 있는 방식이다.

유럽 등에서 수행한 연구를 참고하면 탱크 방식 계간열저장조의 효율은 12,000 m³ 규모의 경우¹⁾ 86.43%, 10,000m³의 경우와 5,000 m³의 경우²⁾ 각각 63.12%와 51.39%, 500 m³의 경우³⁾ 55.40% 수준으로 알려져 있다.

최근 덴마크, 독일, 중국 등에서는 대규모 태양열 설비와 피트(Pit)방식의 대규모 계간열 저장(Seasonal thermal energy storage)을 함께 적용하는 방식에 대한 적용이 증가하고 있다. 피트는 인공으로 만들어진 풀이라고 볼 수 있는데, 내부에 물을 채우고 리드를 덮어 설치한다. 내부의 측면 경사진 면은 방수와 단열 기능의 플라스틱 포일을 깔아 놓으며 단열 지붕으로 덮어 마무리 한다. 간혹 자갈 60~70% 비율로 물과 섞어 채우기도 한다. 적당한 설치위치는 안정된 지반 구조 위에 설치하고 지중 깊이는 지중수를 피하는 조건에서 5m 내지 15m 깊이 정도이다. 자갈과 물을 섞은 피트 방식의 열저장용량은 30에서 50 kWh/m³의 범위이며 온수 저장 방식과는 1.3에서 2 m³ 정도로 등가가 되는데 온수 저장 방식에 비하여 1.3배, 온수로 이루어진 피트 방식에 비하여 2배 정도 더 크게 해야 열저장용량이 비슷해 진다는 의미이다. 피크 열저장의 상부는 주차장 등으로 활용이 가능하다는 장점이 있고 최대 저장온도는 약 80 °C 이다.

지중 보어홀 방식 계간 열저장은 지중에 U자 형상의 열교환 배관을 수직방향으로 대규모로 설치하는 방식이다. 열전달유체가 U저형 열교환기 배관을 흘러 열을 지중으로 전달하면서 지중에 열을 저장하게 된다. 축열 과정에서는 중심부에서 가장자리부로 유동의 방향이 필요하고 방열 과정에서는 반대로 유동 방향을 잡아준다. 열저장부의 상부는 단열을 하게 되고 가열된 지중이 열저장부를 형성하게 된다. 적절한 설치 위치는 암석, 포화상태의 토양이나 아주 속도가 낮은 지중수가 흐르는 조건이 필요하며, 열용량이 높고 투수성이 높은 토양 특성이 유리하다. 지중의 온도는 80 °C 까지 가열할 수 있고 탱크 방식 열저장보다 3에서 5배 정도 더 체적이 커야 열저장용량이 비슷해지는데 따라서 열저장용량은 15에서 30 kWh/m³ 수준이다. 에너지효율이나 비용 측면에서 20,000 m³ 이상의 규모가 적절한 것으로 알려져 있으며, 축열속도나 방열속도가 높지 않기 때문에 버퍼조와 함께 사용하여야 한다. 지중 보어홀 방식의 장점은 모듈 구조로 설치가 가능하여 서로 연결이 유리하고 설치 이후 부하가 늘어나는 경우에 축열 용량을 이후에 더 키우기 위하여 추가로 설치하여 연결하는 것이 가능하다는 점이다. 열전달유체는 물과 부동액이 혼합된 유체를 지중 열교환기로 순환 시키게 되며 여름 냉방과 겨울 난방을 위하여 적용이 가능하며 겨울에는 히트펌프 열원으로 여름에는 냉방용으로 바로 공급이 가능하다.

대수층 계간 열저장 방식은 대수층이 형성이 된 지역에 한하여 적용이 가능하며 대수층 지역의 한 지점은 차가워지고 다른 한 지점은 데워지는 방식으로 냉열과 온열의 저장이 가능하다. 설치가 적합한 조건은 지중수의 속도가 낮아야 하므로 아무 위치에서나 설치할 수는 없다. 그렇지만 투자회수기간이 상대적으로 더 낮다는 장점이 있다.

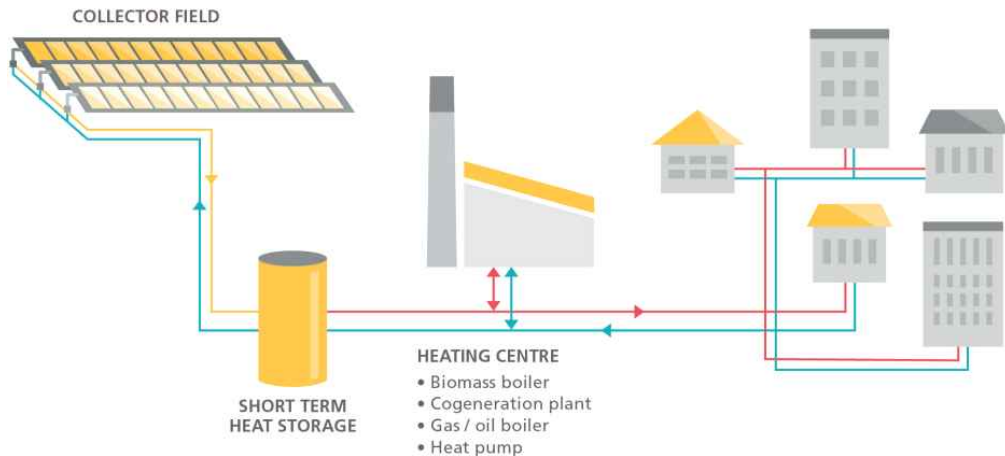
(라) 대규모 태양열 및 히트펌프 융합 열공급시스템 기술

태양열 기술은 전 세계적으로 25년 이상 보급이 이루어지고 있는 검증된 신뢰할 수 있는

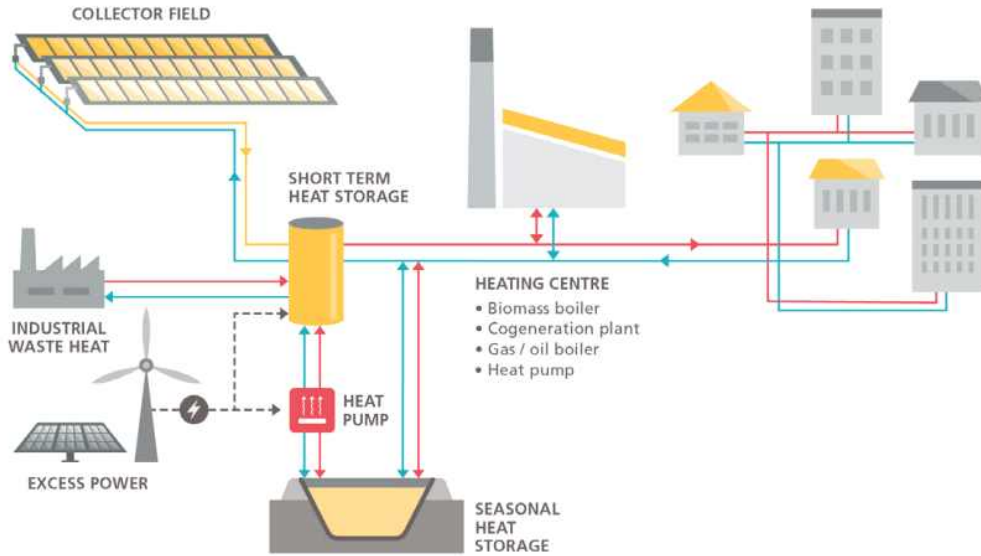
-
- 1) A.Novo et al, Review of seasonal heat storage in large basins: Water tanks and gravel-water pits, Applied Energy, 2020.
 - 2) J.Dalenbäck and T.Jilar, Swedish solar heating with seasonal storage - design, performance and economy, International Journal of Ambient Energy, 1985.
 - 3) G.Oliveti et al, First experimental results from a prototype plant for the interseasonal storage of solar energy for the winter heating of buildings, Solar Energy, 1998.

열공급시스템 기술이다. 최근에는 덴마크에서 2019년까지 1,600만 m² 이상의 태양열 집열 설비가 지역난방과 연계하기 위하여 설치되어 크게 보급이 증가하고 있다. 그렇지만 여전히 전 세계적으로 열공급망에서 태양열이 차지하는 비중은 1% 미만의 수준이다.

대규모 태양열시스템은 주로 지역에 열공급시스템으로 유럽을 위주로 하여 많이 적용되고 있으며, [그림 3-7]과 같이 단기저장용 버퍼조와 열공급 배관망을 연결하여 열공급하는 경우와 계간 열저장조와 열공급배관망 그리고 히트펌프를 복합적으로 구성하여 열공급하는 경우로 구분할 수 있다. 태양열 집열설비를 설치하는 방식에 따라서는 중앙형과 분산형으로 구분할 수 있는데, 중앙형은 집열설비를 열공급 플랜트와 가까운 위치에 집중적으로 대규모 설치하여 열공급 배관망과 연결하는 방식이며, 분산형은 열공급 배관망의 여러 위치에서 소규모로 집열설비가 설치 가능한 위치에 설치한 후 연결하여 열공급에 일조하는 방식이다. [그림 3-8]은 대규모 태양열 계간열저장기술과 히트펌프 융합을 통한 열공급시스템 개념이다.

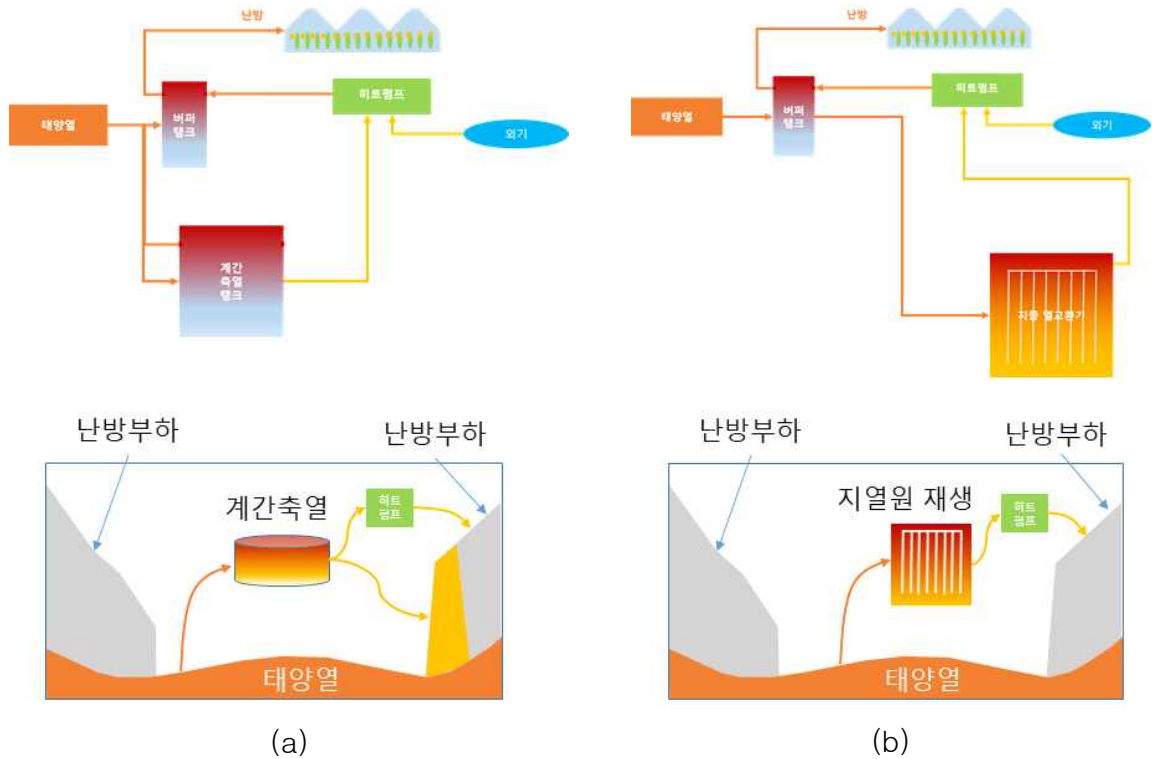


[그림 3-7] 대규모 태양열 열공급시스템 개념



[그림 3-8] 대규모 태양열과 계간축열을 이용한 열공급시스템 개념 사례

여름철의 태양열을 활용하여 히트펌프의 효율화를 위한 융합 열공급시스템은 [그림 3-9]에 나타난 것과 같은 두 가지 개념적인 접근을 고려해 볼 수 있다. 하나는 태양열 잉여열을 계간열저장조에 저장한 후에 겨울철에 공급한 후에 계간열저장에 남은 잔열을 히트펌프 열원으로 활용하는 열공급시스템이고, 다른 하나는 태양열 잉여열을 지열원 히트펌프의 지중 열교환기로 보내 지중을 가열한 후에 겨울철에 지중온도가 상승된 상태에서 지열원 히트펌프의 성능을 향상시켜 주는 열공급시스템이다. 온실과 같이 냉방 운전 없이 지열원 히트펌프가 난방으로만 사용되는 경우 지중의 온도는 시간이 지날수록 지속적으로 낮아지게 되고 이로 인하여 히트펌프의 성능이 낮아지는 것은 물론이고 고장의 원인이 될 수 있어 이에 대한 해결책을 잉여 태양열로 제공하는 방식이다.



[그림 3-9] 여름철 잉여 태양열을 활용한 히트펌프 융합 열공급시스템의 두가지 개념적 접근, (a)태양열 계간열저장식 히트펌프 융합 열공급시스템, (b)태양열 지열원 재생식 히트펌프 융합 열공급시스템

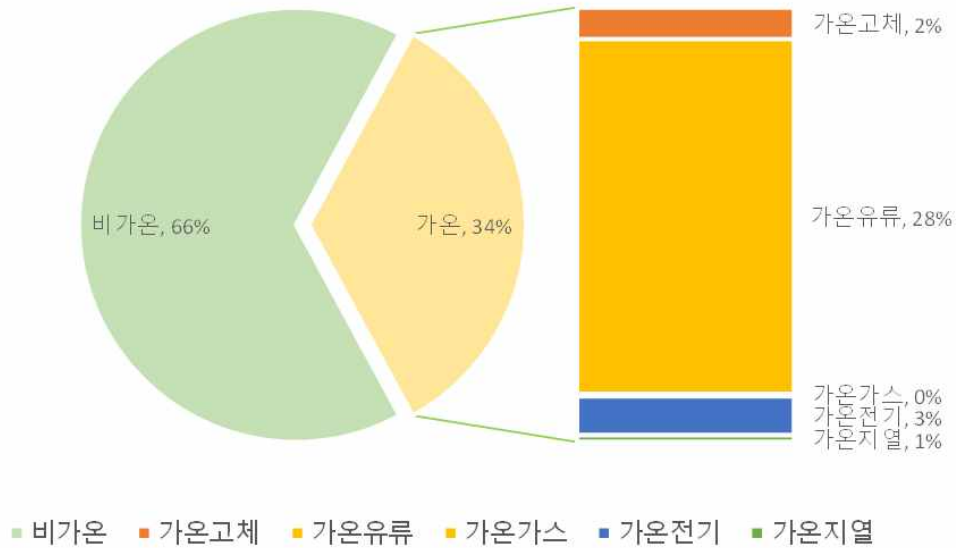
나. 국내·외 동향

(1) 국내외 시설원에 난방기술 동향

국내 농업분야의 온실가스 배출량은 국가 전체의 약 2.9% 수준인 20.4백만톤 정도로 알려져 있으며, 농림축산식품부에서는 농업분야의 탄소중립을 위한 추진계획 목표로 온실가스 발생 최소화 및 재생에너지 전환으로 농업과 농촌 탄소중립에 기여하고 기후변화 대응 역량을 제고하는 것으로 하고 있다. 이를 위하여 농업분야 온실가스 발생량을 최소화하고 농촌 지역을 에너지 전환 및 에너지순환 공간으로 재구성하여 탄소중립을 선도하며, 농업과 농촌의 기후변화 적응 능력과 재해예방 기반을 강화하는 것을 강조하고 있다. 2022년 3월에는 농업 및 농촌 분야 탄소중립 목표 실현을 위한 실천계획을 담은 “제2차 농업·농촌분야 기후변화 대응 기본계획”을 수립하고 발표한 바 있다. 2030년까지 농축산업, 농촌, 식품유통 및 산림 등 4대 부문의 온실가스 감축과 흡수, 기후변화 적응을 위한 목표와 과제를 제시하고, 과제로는 예시로 농축산업의 저탄소 생산기반 확충, 계절성 극복 기술 및 기후변화 적응형 아열대 소득 작목 육성, 기상재해 조기경보서비스 전국 확대 등이다.

국내 온실유형별 재배면적 현황을 2019년 발표된 시도별 온실유형별 재배면적 현황자료를 통하여 살펴보면 전체온실면적은 54,000 ha정도이다. 온실 중 비닐온실의 비중이 99%이고, 온실 중 가온온실은 34%를 차지하고 있으며, [그림 3-10]과 같이 화석연료인 유류를 이용한 난방방식이 82%를 차지하고 있어, 이러한 화석연료기반의 난방방식을 친환경 난

방방식으로 전환하기 위한 솔루션으로서의 기술개발과 보급이 중요하다.



[그림 3-10] 국내 온실유형과 난방방식 현황 (2019)

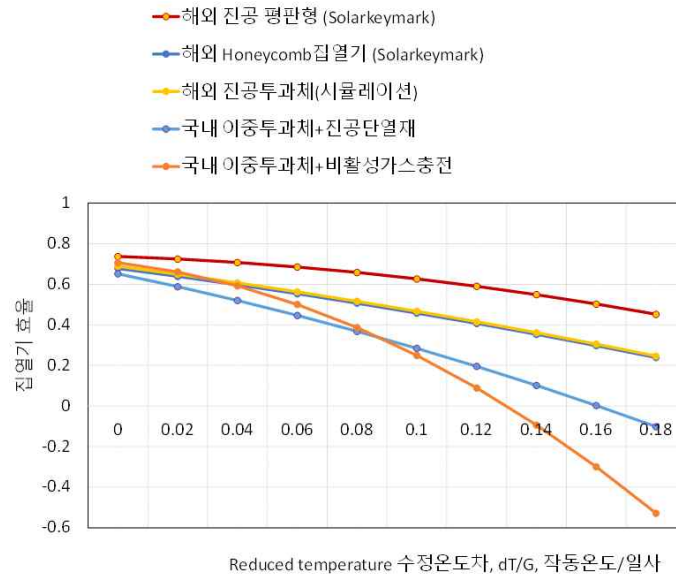
(2) 태양열 생산 기술 동향

최근 스위스에서는 평판형 집열기의 내부를 진공으로 하여 열손실을 극소화시킴으로써 비 집광형 집열기 중에서 세계최고수준의 효율을 가지는 집열기를 개발하고 보급 중에 있다.

[그림 3-11]의 태양열집열기 효율곡선에서는 TVPSolar사의 진공식 평판형 집열기, TIGI사의 허니콤 집열기, 진공투과체를 적용한 집열기 시뮬레이션 성능, 국내에서 개발한 이중투과체를 적용하고 비활성가스를 충전한 방식과 진공단열재를 적용한 두가지 방식의 평판형 집열기에 대한 효율을 비교하여 나타내었다.

스위스 TVPSolar사에서 개발한 진공식 평판형 집열기로서 65℃에서 200℃ 범위의 온도 조건에서 유럽 인증인 Solar Keymark를 취득한 초고효율 집열기이다. 산업공정 가열용 태양열, 지역난방용 태양열, 해수담수화 가열용 태양열, 태양열 냉방용 등에 설치가능한 집열기로서, 현재 보급된 사례를 [그림 3-12]에서 나타내었다. 이스라엘 TIGI사에서는 투명한 단열재를 허니콤 포양으로 투과체를 대신하여 효율을 향상시킨 평판형 집열기를 보급하고 있으며, [그림 3-13]이다.

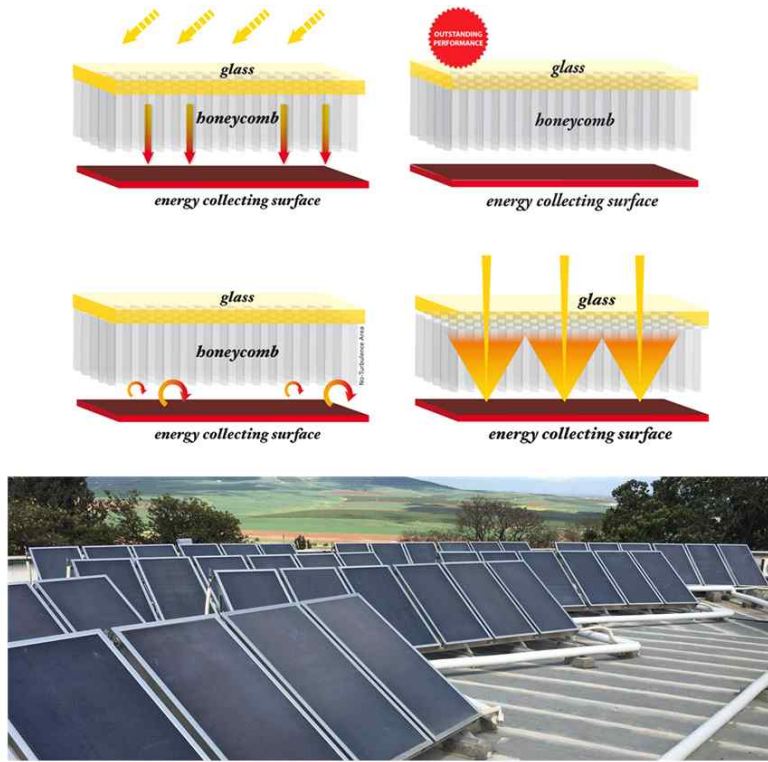
국내에서는 현재 산업통상자원부의 지원으로 산업공정에 적용가능한 고효율 태양열집열기와 열저장조 개발이 한국에너지기술연구원에서 맡아 진행 중에 있다. 평판형 집열기를 개발 대상으로 하고 있으며, 기존에 개발된 집열기의 투과체를 이중투과체로 변경하고 투과체사이의 공간을 비활성가스를 충전하는 방식을 개선하여 진공으로 개량하는 기술을 통한 성능 향상을 시도하고 있다.



[그림 3-11] 국내외 집열기 효율 비교



[그림 3-12] 스위스 TVPSolar사의 진공식 평판형 집열기 설치 모습 (자료출처: TVPSolar systems, the clean energy production that saves money, Solar Process Heat, January 2020)



[그림 3-13] 이스라엘 TIGI사의 투명단열재를 이용한 허니콤 집열기 (자료출처: TIGI사 홈페이지)

(3) 태양열 계간 열저장 및 히트펌프 융합 열공급시스템 기술 동향

중국에서는 2022년 온실의 효율적 난방을 위하여 지열원 히트펌프와 태양열 집열설비를 설치하고, 여름철 잉여 태양열을 지열원으로 사용되는 지중열교환기로 보내어 지중의 온도를 회복시키는 방식으로 지열원 히트펌프의 난방기간 중 성능을 향상시키는 기술을 실험용 온실을 대상으로 실증시험하였다⁴⁾. 온실은 벤로형 유리온실로서 면적은 112 m²이고, 지열 히트펌프는 난방능력 38.4 kW, 난방소비전력 10.66 kW, 태양열 집열기 면적은 40 m²이었다. 아래 그림에 시스템의 태양열 집열설비, 온실, 지열히트펌프와 지중열교환기 등의 구성과 에너지흐름을 포함한 개념도 그리고 집열설비, 온실, 히트펌프, 실내용 FCU(Fan Coil Unit), 버퍼열저장탱크 등 설비의 사진을 나타내었다. 시험결과, 기존 지열히트펌프를 이용한 난방으로 지중온도는 약 1 °C 정도 상승하는 것을 알 수 있었으며, 비난방기에 태양열을 이용하여 지중을 가열한 후에 지중온도는 0.3 °C 정도 상승하여 지중온도가 재생되는 것을 확인하였고, 이로 인하여 난방기 지열원 히트펌프의 COP는 기존 2.79에서 태양열 지중재생 적용 후에 3.19로 나타나 약 14.3% 정도 향상됨을 확인하였다. [그림 3-17]에 기술적 개념과 사진을 나타내었다.

국내에 태양열 계간열저장 기술은 2019년 한국에너지기술연구원 주관으로 진천 친환경에너지타운에 적용된 바 있다. 주변 고등학교 건물과 보건지소, 공공도서관, 청소년문화센터, 국공립어린이집 등 소규모 공공건물의 난방용으로 공급되었고, 계간열저장방식은 탱크식이었다. 집열기 설치면적은 평판형 798 m²와 진공관형 807.84 m²로서 총 1,605 m², 직육면체

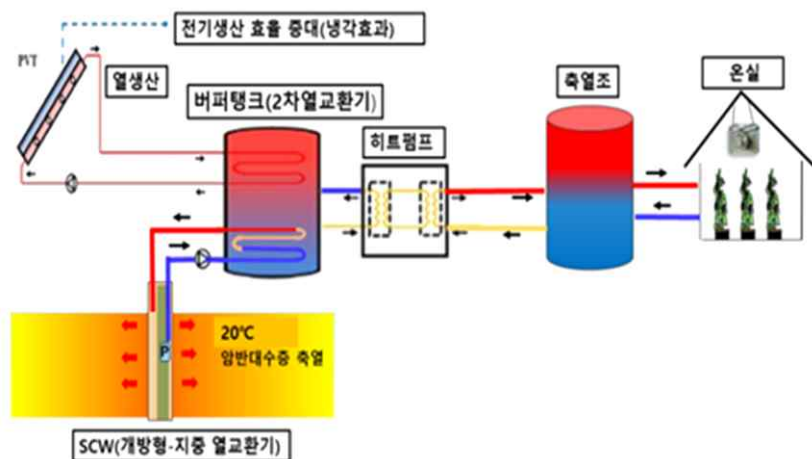
4) X.Yang et al, Demonstration study on ground source heat pump heating system with solar thermal energy storage for greenhouse heating, Journal of Energy Storage, 2022, 54.

형의 계간열저장 탱크 4,200 m³, 버퍼조 200 m³. 계간열저장 잔열을 열원으로 이용하기 위한 히트펌프 350 kWt, 지열히트펌프 175 kW로 1대, 하수열 히트펌프 181 kW의 2대 등이 설치되어 운영되었다. [그림 3-18]에는 주요 설비의 사진이다.

국내에서는 2018년 인하대학교의 주관으로 탱크방식으로 태양열을 여름철 계간축열조에 저장한 후에 난방기에 기존 보일러와 함께 저장한 태양열을 이용하여 난방하는 기술을 실증 연구하였다. 실증대상 온실의 면적은 300 m², 태양열 집열기의 설치면적은 179 m², 계간열 저장탱크는 170 m³이었으며, 계간열저장탱크는 지상에 위치하여 실외에 설치하였다. [그림 3-19]은 관련 설비 사진과 개념도를 나타낸다.

한편, 농업진흥청에서는 2023년 10월자로 [그림 3-14]에 나타난 기술개념의 태양광열 및 지열 복합열원의 히트펌프 냉난방시스템을 개발하였다고 발표하였다. 기존 지열히트펌프의 경우 난방용으로 장기간 사용지 지중의 온도가 낮아져 히트펌프 성능이 저하되는 문제점을 해소하기 위하여, 온실 주변에 태양광열 설비를 설치하여 비난방기에 생산한 태양열을 지하 대수층으로 보내어 온도를 재생시켜 저장하였다가 난방기에 히트펌프 열원으로 활용하는 시스템이다. 175 m² 면적의 딸기 재배 온실에 적용하여 기존 등유 보일러 방식의 난방방식에 비하여 약 78%까지 난방에너지비용 절감 가능하며, 태양광열 모듈은 온실부지의 약 10% 수준 면적의 부지에 설치하였고, 온실 난방부하 공급열량의 태양열 공급 비율인 태양열의존율을 약 30% 수준으로 발표하였다. 기존 지열히트펌프와 비교하여 에너지소비량 약 20% 절감 가능한 것으로 발표하였다. 농업진흥청은 신기술보급사업으로 개발한 본 시스템을 농가에 보급할 계획이며, 태양광열 모듈의 활용을 농업분야에 확대하기 위하여 다양한 기술과 접목하는 방안을 추가 연구 중으로 소개하였다.

본 기술은 계간열저장탱크 방식을 이용한 기술은 아니며, 여름철에 생산한 태양열에너지를 지중으로 보내어 지중열원의 온도를 재생하는 개념으로 본 기술개발에서 개발한 계간열 저장탱크와 지중열재생의 복합개념에 있어서 지중열재생개념에 대한 시스템을 개발한 기술이라고 할 수 있다.

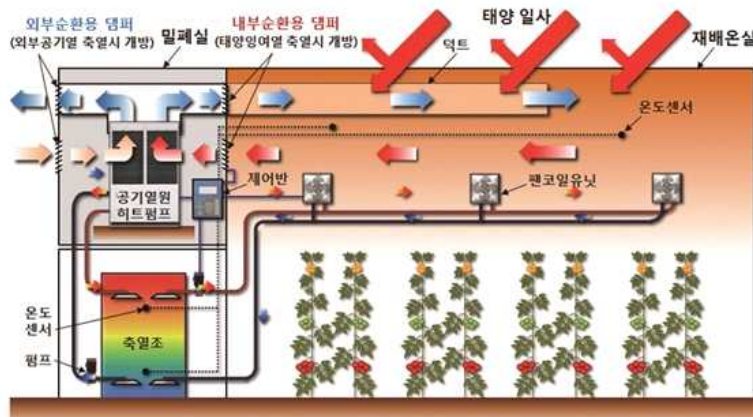


[그림 3-14] 태양광열 및 지열 복합열원 히트펌프 온실 냉난방시스템 개념도

농업진흥청의 관련한 연구개발 사례로 [그림 3-16]와 [그림 3-16]에 시스템 개념도와 설치농가를 나타낸 태양잉여열 축열식 히트펌프 시스템을 개발하였다고 2014년 11월에 발

표하였다. 기존에는 겨울철 낮 동안 태양열로 과열된 온실 내부의 더운 공기는 배출하는 방식인데 비하여, 개발 시스템에서는 버려지던 더운 공기를 히트펌프를 이용해 난방용 온수로 만들었다가 밤에 온실 난방에 이용하는 기술이다. 계절간 열저장을 이용한 기술은 아니며, 온실 상부의 열을 태양으로 부터의 복사에너지가 변환한 열에너지로 활용하는 개념이다. 시스템의 구성은 온실 내부와 외부 공기열에서 열에너지를 모아 온수를 생산하는 히트펌프, 생산한 온수를 저장해 이용하는 축열조, 온실 내외부의 공기를 선택적으로 이용하는 공기순환장치, 난방시스템을 자동으로 조절하는 제어부 등으로 구성된다. 바깥 공기를 열원으로 사용하는 기존의 공기열 히트펌프는 바깥 기온이 내려가면 성능이 크게 떨어졌으나 이 시스템은 낮동안 태양열로 데워진 실내공기를 주로 이용하고 부족하면 바깥 공기를 열원으로 사용함으로써 성능을 크게 향상되는 특징을 가지고 있다.

본 기술은 계간열저장을 이용한 기술방식은 아니며, 겨울철 일간열저장을 이용한 기술이라고 할 수 있다.



[그림 3-15] 태양 잉여열 축열식 히트펌프 개념도



[그림 3-16] 태양 잉여열 축열식 히트펌프 설치농가

(4) 국내 태양열의 보급지원사업 동향

(가) 태양열 보급지원 및 의무화 관련 사업

국내에 재생에너지원의 하나인 태양열 기술에 대한 보급 지원사업은 한국에너지공단 신재생에너지센터에서 시행하는 건물지원사업, 주택지원사업, 융복합지원사업 등이 해당된다.

융복합지원사업은 동일한 건축물 등 장소에 2종 이상 신재생에너지원의 설비를 동시에 설치하는 “에너지원 융합사업”이며, 주택·공공·상업(산업) 건물 등 지원대상이 혼재되어 있는 특정지역에 1종 이상 신재생에너지원의 설비를 동시에 설치하는 “구역 복합사업”이다. 지원대상 신재생에너지설비는 자가소비용에 한해 지원이 이루어진다. 지원범위는 총 사업비의 50% 이내에서 지원이 이루어지며, 총사업비에는 신재생에너지설비의 설치비와 모니터링비, 시스템 설계비 등으로 구성이 되며, 에너지원별 설비단가는 공지가 된다. 태양열설비의 설비단가는 2023년 융복합지원사업 설비 및 지원단가(2022년 수요조사) 참고를 참고하여 <표 3-1>과 같다.

한편, 신재생에너지설비설치의무화사업에서는 공공기관이 신축·증축 또는 개축하는 연면적 1,000 m² 이상의 건축물에 대하여 예상에너지사용량의 공급의무비율 이상을 신재생에너지로 공급토록 의무화사업을 시행하고 있다. 신재생에너지공급비율은 <표 3-2>와 같다. 신재생에너지공급의무비율은 예상에너지사용량에 대한 신재생에너지생산량의 비율로 정의하고 있으며, 예상에너지사용량은 건축연면적과 단위에너지사용량 그리고 지역계수의 곱으로 산정하도록 하고 있으며, 신재생에너지생산량은 원별설치규모와 단위에너지생산량 그리고 원별보정계수의 곱으로 구한다.

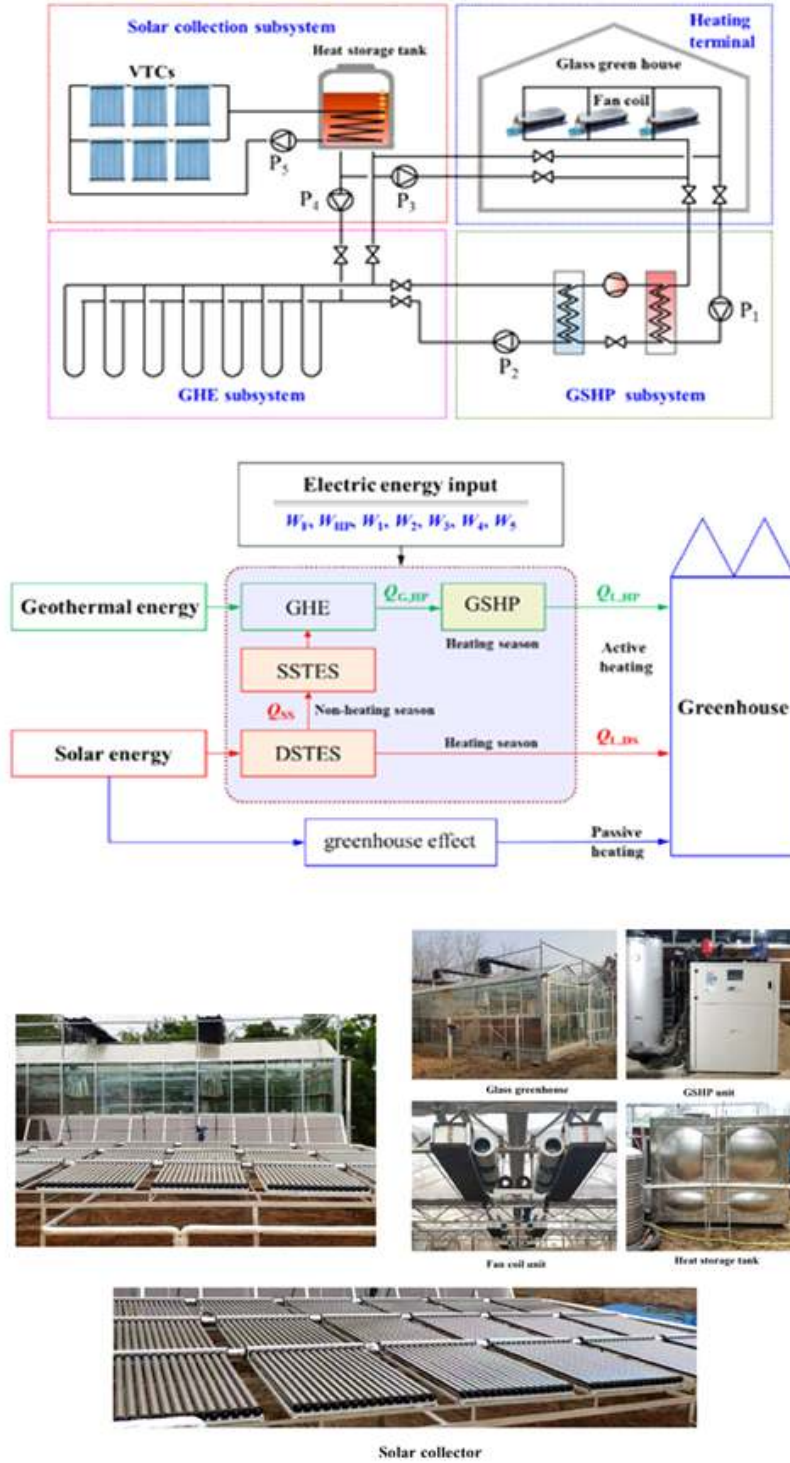
(나) 농업에너지이용효율화사업

본 사업은 신재생에너지 이용기술의 농업분야 적용을 통한 온실가스 감축과 농자재 가격 상승으로 인한 농가 경영비 부담 경감을 위한 에너지 절감자재 지원을 목적으로 하고 있다.

사업내용 중 신재생에너지시설로는 지열냉난방시설과 폐열재이용시설, 공기열냉난방시설, 목재펠릿난방기와 저탄소에너지공동이용시설 등이 명시되어 있고, 태양열설비는 구체적으로 명시되어 있지 않은 상황이다.

사업의 지원자격은 냉난방이 필요한 고정식 시설에서 채소, 화훼, 버섯류를 재배하고 생산하는 농업인, 농업법인, 생산자단체 또는 시,군 자치구 그리고 돼지, 닭, 오리 가축사육업 허가 또는 등록 농가(지열 및 폐열에 한함)로 제한하고 있다.

지원금의 비율은 신재생에너지시설의 경우, 국고보조 60%, 국고융자 10%, 지방비 20%, 자부담 10%이며, 공기열냉난방시설은 국고보조 40%, 국고융자 20%, 지방비 30%, 자부담 10%이다.



[그림 3-17] 중국의 온실용 난방을 위하여 태양열과 지열원 히트펌프를 통한 계절간 지열원 재생기술 적용 사례



[그림 3-18] 태양열 계간축열식 히트펌프 열공급시스템을 적용한 진천 친환경에너지타운 (자료출처: 한국에너지기술연구원)



[그림 3-19] 국내 2018년 태양열 계간축열 열공급 기술 실증연구 사례

<표 3-1> 융복합지원사업의 태양열에너지 설비 지원단가

구분	용량	설비가격 (육지)	지원단가 (육지)	지원단가 (도서)
주택 (7㎡이하)	10.0(MJ/㎡·day) 초과	1,085	765	879
	7.5 초과~10	1,085	726	834
	7.5 이하	1,085	682	784
주택 (7㎡초과 ~14㎡)	10 초과	1,107	734	844
	7.5 초과~10	1,107	700	805
	7.5 이하	1,107	662	761
주택 (7㎡초과 ~20㎡)	10 초과	917	559	642
	7.5 초과~10	917	526	604
	7.5 이하	917	490	563
주택 (6㎡/대)	자연순환식 온수기	6,151	4,027	4,631
건물 (1,500㎡이하)	10 초과	1,144	639	734
	7.5 초과~10	1,144	600	690
	7.5 이하	1,144	558	641
건물 (1,500㎡이하)	냉난방	1,709	943	1,084
건물 (6㎡/대)	자연순환식 온수기	6,286	3,207	3,688

<표 3-2> 신재생에너지공급의무화제도에서 의무화 비율

해당년도	'20~'21	'22~'23	'24~'25	'26~'27	'28~'29	'30~
공급의무비율(%)	30	32	34	36	38	40

<표 3-3>에 태양열에너지설비에 대한 방식별 단위에너지생산량과 원별 보정계수를 나타내었다.

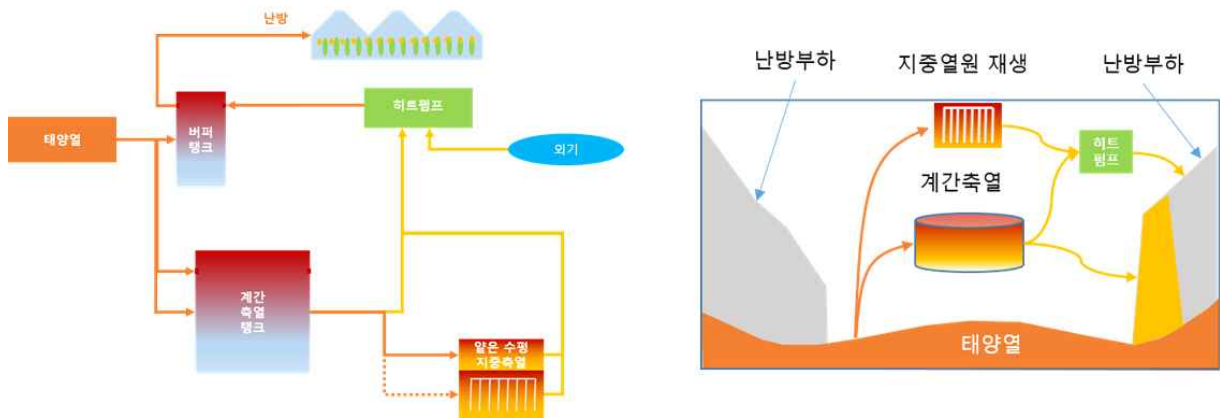
<표 3-3> 신재생에너지공급의무화제도에서 태양열의 단위에너지생산량 및 보정계수

에너지원	방식	단위에너지생산량 (kWh/㎡·yr)	원별 보정계수
태양열	평판형	596	1.78
	단일진공관형	745	1.42
	이중진공관형	745	1.42

4. 실증 모델 구축 및 성능 분석

가. 실증모델 개요 : 시스템의 특징

본 연구에서 태양열을 활용한 에너지 생산, 저장 및 관리시스템으로 개발하여 실증하고자 하는 실증모델의 주요 구성적인 구성과 개념은 [그림 4-1]과 같다. 개념적 구성상의 특징을 10가지로 정리하여 설명하였다.



[그림 4-1] 태양열을 활용한 계간열저장식 히트펌프 융합 열공급시스템 실증모델 개념도

(특징 1) 태양열 계간열저장과 얇은지중축열 지열원재생 하이브리드 기술로 구성

- 태양열 계간열저장방식과 히트펌프 융합시스템을 기본구성방식으로 설정
- 얇은 지중열저장과 얇은 지열원 방식의 소규모 설비를 추가하여 하이브리드 방식으로 잉여 태양열을 활용하여 실증할 수 있는 모델로 구성
- 태양열 집열설비와 계간열저장의 용량은 주어진 가용예산 범위와 설치가능한 공간 조건이 만족하는 범위에서 최대한 설치하고, 얇은지중축열 지열원 설비는 가용예산 범위에서 소규모 실험적 검증이 가능한 설비로 구성

(특징 2) 열저장조는 버퍼조와 계간조로 구성

- 기존 공기열원 히트펌프 시설원에 열공급시스템의 버퍼조에 태양열 계간조가 추가 설치될 수 있는 보급 모델로 가능
- 신축 모델 적용에도 적합
- 버퍼조와 계간조의 열손실 최소화를 위하여 기계실 실내에 배치

(특징 3) 히트펌프는 공기열원과 공기 및 수열원의 복합열원 히트펌프로 구성

- 복합열원 중 효율이 높은 수열원 활용을 위하여 계간조의 40℃ 미만 저장된 열을 열원으로 활용 (10℃ 수준까지 이용 계획)
- 얇은 지중축열에 저장된 열에너지도 복합열원 수열원으로 활용 가능하며, 계간조에 저장된 열을 난방용으로 공급한 상태인 40℃미만의 잔열을 히트펌프 열원으로 이용하기 위해서는 히트펌프에서 요구하는 온도수준 즉 예를 들면 30℃ 미만 수준으로 조절하여 공급하여야 하므로 얇은 지중축열은 이러한 온도를 낮추어 조절하기 위한 버퍼역

할도 수행이 가능

(특징 4) 태양열 집열루프를 각각 분리한 집열 및 축열 방식

- 태양열 효율 향상을 위하여 버퍼조와 계간조에 각각 집열특성이 다른 집열기를 연결
- 용량이 작은 버퍼조에 중온영역 효율이 좋은 진공관형 집열기 연결
- 용량이 큰 계간조에 저온영역 효율이 좋은 평판형 집열기 연결

(특징 5) 태양열 순차적 효율적 축열 운전

- 단열 성능이 상대적으로 버퍼조보다 우수한 계간조의 특성을 활용
- 여름철 태양열 축열은 계간조만을 이용하여 진공관형 및 평판형 집열기를 이용하여 우선 축열
- 계간조에 축열이 이루어진 후 버퍼조로 열을 전달

(특징 6) 태양열 과열방지용 미활용열을 저장하여 활용

- 얇은 지중축열을 설치하여 태양열 과열방지 또는 고온열 단기 저장에 활용
- 저가형으로 설치하여 장기열저장 효율이 좋지 못한 특성을 고려하여 열저장은 축열기 간 마지막 단계(과열 발생 또는 축열 마지막 이전 기간)에 단기간에 걸쳐 이루어지도록 하고
- 축열종료 후 난방이 시작된 후 가능한 바로 히트펌프 열원으로 활용

(특징 7) 지중축열은 수평 및 수직형의 하이브리드 신개념 적용

- 동일면적에서 효율적인 지중축열을 이용하기 위한 개념으로서 도입
- 초기 비용 절감을 위하여 수평형을 상부에 배치하고 터파기용 포크레인을 그대로 사용하여 비용 절약
- 태양열 과열발생시 과열방지용으로 활용할 수직형 보어홀을 수평형 지열교환기 하부 지중에 설치하고 얇은 깊이의 수직 보어홀 방식으로 설치

(특징 8) 혹한기 난방을 위한 계간조 이용 히트펌프 축열식 운전 적용

- 혹한기 히트펌프와 버퍼조로 온실 난방이 어려울 수도 있으므로, 혹한기가 예상이 되는 경우 혹한기 시점 이전에 히트펌프를 이용 버퍼조와 계간조 상부를 모두 미리 축열한 후에 난방에 이용가능하도록 설계
- 혹한기에 대비하여 계간조 저장된 열을 버퍼조에 전달하는 방식으로 난방에 활용 가능
- 혹한기에 대비하여 히트펌프 1대 용량으로 공급가능한 난방열량을 계간조로 대체하기 위해서는 계간조 상부를 히트펌프를 이용하여 55도까지 가열 필요

(특징 9) 히트펌프 활용 냉방 가능한 시스템

- 히트펌프의 주기능은 태양열 계간축열과 함께 겨울철 온실 난방용 열공급 기능
- 최근 폭염 등 기후이상으로 여름철 온실 냉방에 대한 수요 증가
- 히트펌프를 이용하여 공기열원 운전으로 여름철 냉수생산 공급 가능하도록 설계
- 실제 운전을 위해서는 세부적인 배관 변경 공사가 필요

(특징 10) 버퍼조 열성층화 향상을 위한 배관 구성

- 버퍼조의 열성층화 효율 향상을 위하여 온실부하측 배관과 히트펌프 온수공급측 배관을 연결하여 버퍼조 유출입 유량 및 유속 저감화
- 버퍼조로부터 온실부하로 공급하는 배관 루프에서, 공급온수의 환수온도를 설정온도로 제어하도록 하고 이를 위하여 모터구동 3방밸브를 적용함으로써 버퍼조로 유입하는 유량 및 유속 저감화

- 히트펌프에서 생산한 온수를 버퍼조로 공급하는 배관 루프에서, 온실부하가 발생하고 있는 동안에는 히트펌프 공급온수의 버퍼조 입구측 온도를 일정하게 (약 50℃ 정도) 유지하도록 모터구동 3방밸브를 적용함으로써 버퍼조로 유입하는 유량 및 유속을 저감화하고 상층부의 온도와 유사한 온도로 공급하여 성층화 성능이 향상되도록 설계

나. 실증대상 온실

여러 실증대상 후보지 중에서 몇 군데의 실증대상 후보지에 대해서 비교 및 적정성을 평가하였으며, 실증대상지 선정을 위해서 시설원에 일반사항, 지반상태, 수전설비, 냉난방설비, 태양열 집열기 설치조건, 모니터링, 설계고려사항, 기반시설 구축, 과제목표 부합성을 고려하였다. 고려한 후보지는 총 3군데이었으며, 각 후보지에 대한 특징을 정리하여 <표 4-1>과 [그림 4-2]부터 [그림 4-4]에 나타내었다.

<표 4-1> 실증 후보지의 주요 특징 비교

구분	특징
후보지 1	경북 포항에 위치한 시설원으로 한라봉과 바나나 작물을 재배하며 온실형태는 연동형 비닐온실로 약 1,100평 온실면적은 갖추고 있다. 온실난방은 등유온풍난방기 290kW급 2대와 비닐덕트를 이용하였다. 이 후보지는 농장주가 공유한 연간 난방운전비는 약 3천만원으로 파악되었다.
후보지 2	전남 담양군에 위치한 시설원으로 딸기 작물을 재배하며 온실형태는 벤로형 유리온실로 약 2,800평 온실면적을 갖추고 있다. 온실난방은 전기온수보일러 400kW급 2대와 바닥복사를 위한 튜브레일을 이용하고 있다. 이 후보지의 연간 난방운전비는 약 2천만원으로 파악되었다.
후보지 3	경북 문경시에 위치한 시설원으로 애플망고, 한라봉 작물을 재배할 계획단계이며 온실형태는 연동형 비닐온실로 약 1,100평 온실면적을 갖추고 있다. 온실난방은 구축되지 않았으며 전기식 난방설비를 계획하고 있다.

구분	항목	후보(1) - (주)동서네	후보(2) - 스마트베리팜(주)	후보(3) - (주)복산
시설 원예	주소	경북 포항시 흥해읍 망천리 306-4	전남 담양군 월산면 중월리 89-8	경북 문경시 산양면 반곡리 304
	온실 형태	연동형 비닐온실	벤로형 유리온실	연동형 비닐온실
	온실 공사비	약 1.4억원 (지자체 7천, 본인 7천)	약 30억원 (정부용자)	약 3.3억원 (정부 2.3억, 본인 1억 원)
	재배작물	한라봉, 바나나	딸기	애플망고, 한라봉
	온실면적	약 1,100평	약 2,800평 (분할로 1,000평 실 증)	약 1,100평
	유희부지 유무	없음 (일부 철거로 확보 가능)	있음 (이용가능)	있음 (이용가능)
	실증부지 면적	약 115평 (381㎡) ※ 온실 철거 면적	약 205평 (678㎡)	약 194평 (640㎡)
실증부지 평면				

[그림 4-2] 실증대상 후보지 비교(1/3)

구분	항목	후보(1) - (주)동서네	후보(2) - 스마트베리팜(주)	후보(3) - (주)복산
지반 상태	투수 계수	10 ⁻⁶ m/s (퇴적토층 12.2~15.5m)	확인 불가	확인 불가
	N치 50 이상 깊이	약 32m (기초말뚝공사 필요)	약 1.5 m	약 2.0 m
수전 설비	사용전력 종류	농사용 전력	농사용 전력	농사용 전력
	수전설비 용량	20kW	990kW	50kW
	전력증설 여부	필요 (예산 협의)	불필요	필요 (자부담)
	농업용수	빗물 (지하수 천공 중)	지하수	지하수
냉난방 설비	난방설비 종류/용량	등유온풍난방기 290kW 2대	전기온수보일러 400kW 2대	없음 (20년 하반기 구축 예정)
	난방 방식	비닐덕트	바닥복사류브레일	현재 환기 활용(개폐장치 on/off), 전기식 난방설비 설치예정
	축열조 용량	없음	150톤 (원형탱크)	없음
	난방설정 온도	18 ~ 25℃	20 ~ 25℃	-
	난방운전비용	약 3천만원 (평당 27,270원)	약 2천만원 (평당 7,140원)	-
	냉방설비 유무	없음	없음	없음
	냉방공급 요구	있음	있음	-
기계실	필요	불필요 (기존시설 이용 가능)	필요	
집열기	설치 가능 위치	기계실 등 실증지 상부	기계실 등 실증지 상부	기계실 등 실증지 상부
	집열기 배치 방향	장변 배치	장변 배치	단변 배치
	내풍압 고려 풍속 (최대순간풍속, m/s)	22.4 (서남서, '22.4.3)	28.7 (남남동, '12.8.28-순창군)	20.9 (북서, '12.11.26)

[그림 4-3] 실증대상 후보지 비교(2/3)

구분	항목	후보(1) - (주)동서네	후보(2) - 스마트베리팜(주)	후보(3) - ㈜록산
모니터링	모니터링 프로그램	누리스마트코리아	프리바	제트팜
	제어/운영 방법	모바일 원격 제어 (차양막, 단열커튼, 용수, 알람 등)	PC/모바일 원격 제어 (양액 등 대부분 자동제어)	모바일 원격 제어 (차양막, 단열커튼, 용수, 알람 등)
	측정 항목	온도, 습도 등	온도, 습도, 일사량, 풍속, 풍향 등	온도, 습도 등
설계 고려 사항	실증부지 형상	동서간 장변 사각 (온실복측)	동서간 장변 삼각 (온실복측)	남북간 장변 삼각 (온실서측)
	실증부지 높이	도로 보다 1.2m 높음 (온실과 동일)	도로/온실과 동일	도로보다 약 2m 낮음 (온실과 동일)
	실증부지 진입	인근도로 폭 약 3m	진입도로 폭 약 3m	진입도로 폭 약 3.4m
	민원 요소	실증지 인접 도로	없음 (온실 부지내 실증)	실증지 인접 민가/축사 1채
기반 시설 추가 예산	기초 말뚝공사	필요 (전문가 의견)	불필요 (추정)	불필요 (추정)
	추가 토공사	필요 (성토제거 or 옹벽/석축 공사)	불필요	불필요
	수전설비 증설	필요 (과제 부담)	불필요	필요 (농가 부담)
	추가 공사	온실일부 철거 공사	불필요	불필요
과제 목표 부합 여부	아열대 작물	○	×(딸기)	○
	시설 1,000평 이상	○	○	○
	난방에너지 공급 100% 접근방법	○	○	○
	난방에너지비용 절감 80% 접근방법	유리 (경유연료)	다소 불리(전기)	다소 불리(전기)
	산업화 모델 제시	온실일부 철거부지 활용모델	기존 여휴부지 활용모델	기존 여휴부지 활용모델

[그림 4-4] 실증대상 후보지 비교(3/3)

(2) 실증 대상지 선정

본 실증연구를 위하여 최종적으로 선정한 실증대상지는 포항에 위치한 (주)동서네 농장(후보지 1)으로 이 실증지는 기초 말뚝공사와 수전설비 증설 등이 필요한 상황이었지만, 아열대 작물, 시설원에 면적 1,000 평 이상, 난방에너지 절감 접근 방법, 산업화 모델제시 등 과제 목표부합성에서 적합한 대상지로 결정하였다.

실증대상지에서의 로드뷰와 실증설비 구축 전의 모습을 [그림 4-5]에 나타내었다.



(a) 시설원에 부지

(b) 실증지 부지



(c) 실증지 주변 전경

[그림 4-5] 실증 대상지 로드뷰 모습 및 설비구축 전 모습

다. 실증모델 용량산정 시뮬레이션 및 지능형 운전기술 개발

(1) 실증모델 용량 산정을 위한 시뮬레이션

(가) 온실 난방부하 모델링

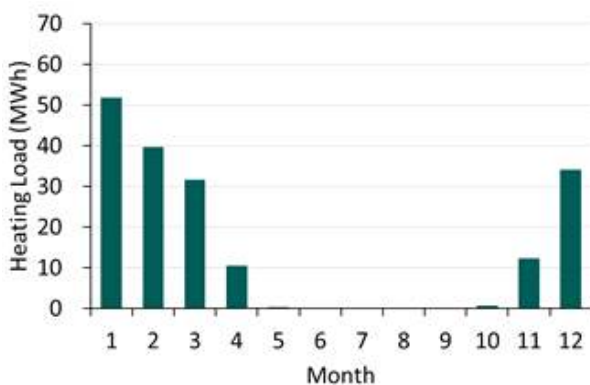
태양열 계간축열을 기반으로 한 복합열원 히트펌프 열공급 시스템에 대해 동적 시뮬레이션 프로그램인 TRNSYS를 이용한 사전 시뮬레이션을 수행하여 온실의 부하를 산정하였다. 온실에 대한 현열 난방부하는 만감류와 망고의 최저 생육온도를 설정조건으로 지중 및 외피를 통한 관류열전달 및 침기, 일사 등을 고려하여 비정상 해석을 통해 계산하였다. 시뮬레이션에 사용된 기후조건은 <표 4-2>에 요약한 실증시스템이 위치한 포항지역 표준형 기상 자료를 적용하였으며 실증시설원에서 재배하고자 하는 작물인 만감류와 망고의 생육 조건을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다.

온실면적은 총 3,855 m²(만감류 2,093 m², 망고 1,762 m²)로 외피는 1중 폴리에틸렌 필름이며, 반밀폐형 구조로 동절기 열손실을 줄이기 위하여 온실 내부의 상부와 측면에 개폐 가능한 단열커튼이 설치되어있으며, 계산 모델에 이를 반영하여 모델링하였다.

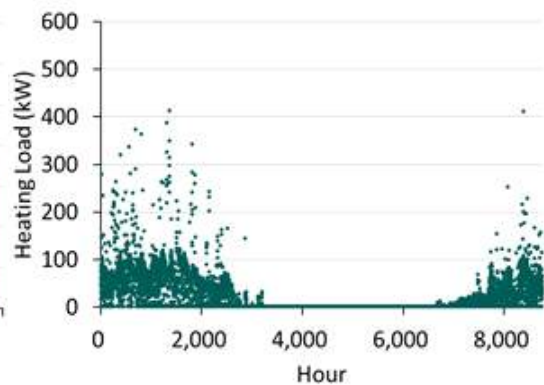
만감류 및 망고 재배 실증 온실의 연간 시간별 난방 부하와 월별 난방부하는 [그림 4-6]과 [그림 4-7]과 같다. 난방부하는 11월 초부터 4월 말까지 지속적으로 발생하며, 최대 부하는 411 kW로 2월 말에 발생하는 것으로 계산되었다. 따라서 시뮬레이션에 의하면 만감류와 망고의 저온 피해온도는 5℃ 이하로 동절기 온도관리가 매우 중요하며, 포항시의 기후조건을 고려할 때 11월부터 4월까지 지속적인 난방공급이 필요하다는 것을 알 수 있었다. 200 kW 이하의 난방부하가 연간 난방 작동시간의 96.4%를 차지하는 것으로 나타났으며, 연간 총 난방부하는 180.8 MWh/Yr 이며, 1월이 52 MWh로 가장 크게 나타났다. <표 4-3>은 시뮬레이션에서 결정한 시스템의 주요 구성요소 용량을 나타내며, <표 4-4>와 <표 4-5>는 각각 한라봉과 애플망고 재배를 위한 연간 실내온도이다. 실증설비설계단계에서 계획된 재배작물은 한라봉과 애플망고이었으나, 농장주의 경영사정으로 이후에 한라봉과 천혜향으로 변경이 이루어졌다. <표 4-6>은 온실부하 계산을 위하여 적용한 시뮬레이션모델의 입력조건을 나타낸다.

<표 4-2> 포항지역 월별 온도 및 일사량 분포 (국가참조표준기상데이터: TMY3)

월		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
온도 (℃)	최대	11.3	16.3	21	28	29	30	35	37	31	29	23	18
	최소	-7.3	-7.5	-5	4	10	13	18	19	13	9	-2	-7
	평균	2.2	4.4	9	14	18	22	25	25	22	17	10	6
월별 일사량 (kWh/m ²)		74	93	118	137	175	146	140	139	103	106	82	70



[그림 4-6] TRNSYS모델로 계산한 연간 월별 난방부하



[그림 4-7] TRNSYS모델로 계산한 연간 시간별 난방부하

<표 4-3> 계간축열시스템을 갖는 온실의 재생에너지 난방시스템

구성	용량	비고
이중진공관형 집열기	96m ²	전면적 (집열기 42매)
평판형 집열기	108m ²	전면적 (집열기 54매)
복합열원 히트펌프	40RT	수열 및 공기열 히트펌프
공기열원히트펌프	2*40RT	
태양열축열조	100m ³	버퍼탱크
계간축열조	300m ³	축열조

<표 4-4> 한라봉 재배시 온실 설정온도 조건

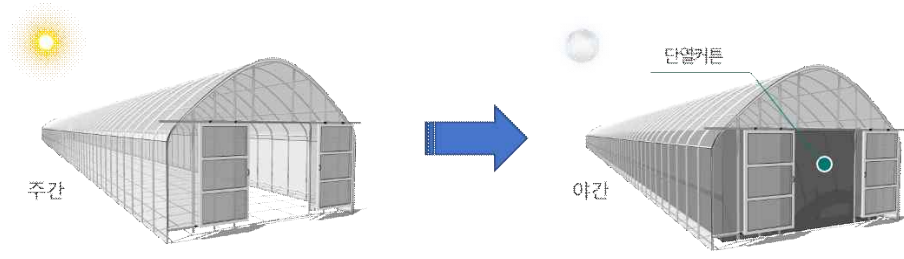
구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
생육상태	성숙기		발아기	개화기	생리낙과		과실비대기			착색개시	착색기	성숙기
온도 ℃	최고	자연온도	25	27~30	28~30	30	자연온도				20	10~15
	최저	0~2 (5)	15				자연온도				15	0~2 (5)

<표 4-5> 망고 재배시 온실 설정온도 조건

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
생육상태	출뢰기		개화결실기	과실비대기	과실수확기	영양생장기				화아분화기	가온개시	
온도 ℃	최고	25	35	자연온도								25
	최저	17	22	자연온도							5	17

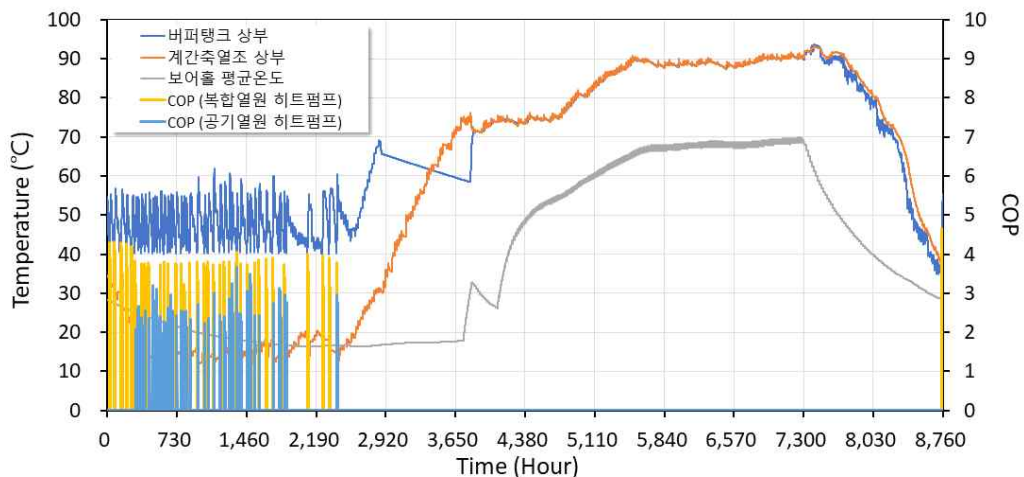
<표 4-6> 온실 부하 시뮬레이션 입력 조건

구 분		내 용	비 고
온실	크기	한라봉 74.5m x 28.1m x 5m	-기후조건 : 포항 TMY3 (한국표준연구원) - 면적 : 2093㎡ (634평) + 1762㎡(534평) = 1,168평 - 단열커튼 작동시간 : PM 04:00 ~ AM 09:00 - 바닥 지중 열 전달 고려 각 작물의 최저온도 설정
		망고 62.7m x 28.1m x 5m	
	외피 U-value	5.72W/㎡K	
	g-value	0.837	
	단열커튼 U-value	2.5W/㎡K	
	침기횟수	0.5회/h	



(나) 시스템 동적 거동 시뮬레이션

시뮬레이션 결과(시스템 동적거동)는 연간 계간조 온도 및 히트펌프 COP 성능을 나타낸 [그림 4-8]에서 알 수 있듯이 난방부하가 감소하는 4월 초부터 잉여 태양열에 의한 계간축열조의 축열이 이루어지며, 6월 초부터 버퍼탱크에 의한 열저장과 지중방열이 병행되어 8월 중순 이후 계간축열조의 상부온도는 약 90℃에 도달하는 것으로 계산되었다. 난방공급이 이루어지는 11월 중순 이후 버퍼탱크와 계간축열조의 온도는 점차 저하되기 시작하며, 계간축열조의 온도가 40℃ 이하로 떨어지는 12월 말부터 수열원 히트펌프를 작동할 수 있는 것으로 계산되었다.



[그림 4-8] TRNSYS시뮬레이션으로 분석한 계간조의 열적인 동적 거동 시뮬레이션 해석결과는 <표 4-7>에 나타내었다. 연간 총 난방부하 (180 MWh)에서 태양

열 직접공급 열량과 히트펌프 (복합 및 공기열원 히트펌프)의 공급열량은 각각 71.5 MWh와 106.4 MWh로 본 연구에서 개발하고자 하는 열공급 시스템으로 100% 난방용 열공급이 가능할 것으로 분석되었다.

진공관형 집열기 연평균 집열효율은 40.0 %로 계산되었고, 평판형 집열기의 37.4 %에 비하여 다소 우수한 성능을 보이고 있으며, 연간 태양의존율 (Solar fraction)은 58.9 %로 예측 되었다.

계간조의 잔열을 이용하여 히트펌프 열원으로 공급하기 위한 수열원 운전 시 복합열원 히트펌프와 공기열원 히트펌프의 난방성능 (COP)는 각각 3.56과 2.40으로 수열원으로 히트펌프를 운전하는 것이 효율적 측면에서 더 우수함을 알 수 있다.

<표 4-7> 시스템 설계를 위한 TRNSYS 시뮬레이션 해석 결과

집열기 효율 (%)		히트펌프 성능 (COP)		열공급 (MWh)				전기소비량 (MWh)	
평판형	진공관형	복합 열원	공기 열원	태양열	복합 열원 히트 펌프	공기 열원 히트 펌프	보조 열원 (계산 밸런스 용)	히트펌프	순환펌프
40.0	37.4	3.56	2.40	71.5	46.4	60.0	2.6	38.1	14.2

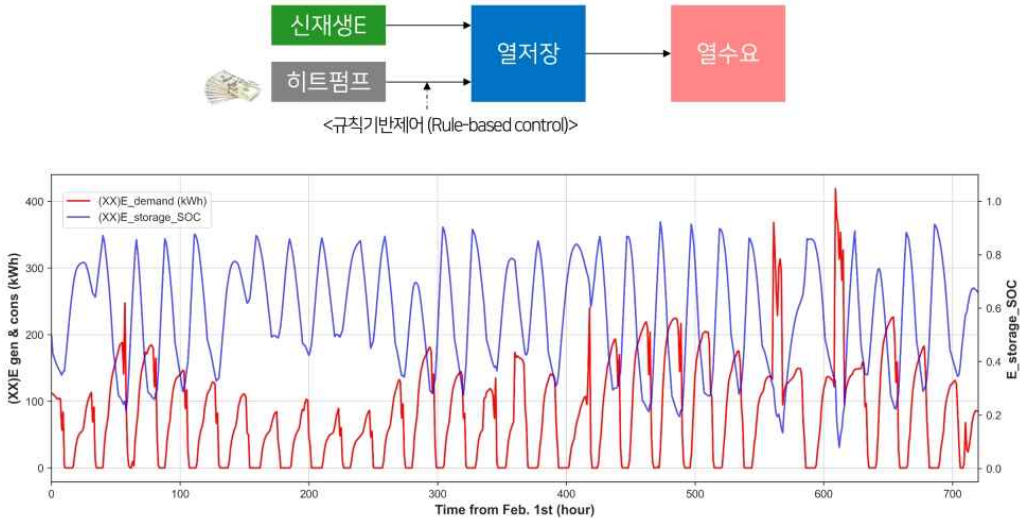
(2) 지능형 운전 기술개발

(가)강화학습 기반 운전최적화

【문제정의】

기존 신재생에너지를 이용한 열저장 연계형 히트펌프의 규칙기반 제어방식은 [그림 4-9]에 보인 바와 같이 열수요의 양에 상관없이 열저장장치의 축열상태를 일정수준으로 유지하기 위해 히트펌프를 가동한다. 본 규칙기반제어는 축열조의 열저장 상태를 외부 조건에 관계없이 유지할 수 있다는 장점은 있으나, 전력량 요금과 기본요금으로 구성된 전기요금이나 열 생산, 수요조건에 대한 정보를 반영할 수 없어 히트펌프의 제어를 통해 전기요금을 줄이는데 한계가 있다. 특히, 열저장 연계형 히트펌프는 대수제어를 통해 축열상태를 제어하는데 최대 대수로 작동하게 되면 기본요금이 이에 비례하여 상승하여 고정되므로 농가에 미치는 전기요금 부담이 크게 작용할 수 있다.

이러한 기존의 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 [그림 4-10]에 나타낸 것과 같이 강화학습을 활용한 새로운 개념의 히트펌프 대수제어방법론을 제안한다.



[그림 4-9] 기존 히트펌프 운전 방식에서 시간에 따른 열수요 및 열저장장치의 축열상태 프로파일

기존 히트펌프 제어의 한계 극복방안

* COP: Coefficient of performance
* SOC: State of charge

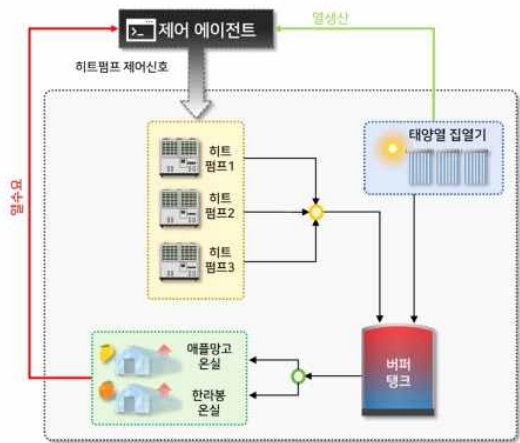
- > 히트펌프 제어를 위해 **핵심 정보**를 제어에 반영
 - 재생에너지를 통한 열생산
 - 히트펌프의 성능계수 (COP)
 - 열저장장치의 축열상태 (SOC)
 - 어플리케이션의 열수요
- > 전기요금 최소화 위한 목적함수
 - 연간 피크 출력 최소화
 - 연간 누적 소비 전력량 최소화

한국전기요금체계, 한국전력공사

기본요금 + 전력량요금 + 기우량경요금 + 연료비조정요금

농사용전기요금, 한국전력공사

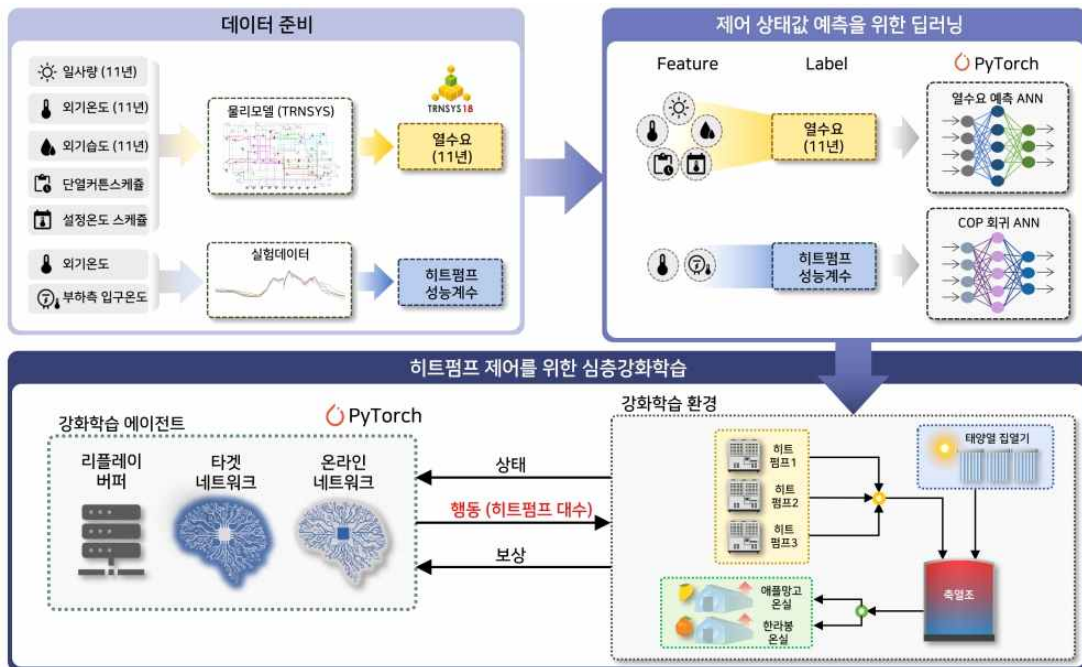
구분	비율	비율	비율
기본요금	30%	20%	50%
전력량요금	1.100	1.100	1.100



[그림 4-10] 기존 히트펌프 제어의 한계 극복방안

기존에는 열저장장치의 이전 타임스텝의 열저장장치 축열상태 (SOC)만 관측하여 히트펌프를 제어하였다면, 본 연구에서는 버퍼조에 해당하는 열저장장치 제어에 필요한 다음의 핵심정보를 상태변수로 활용한다. 즉 현재부터 미래의 시간단계에서의 태양열 집열기를 통한 열생산, 현재 시간단계의 히트펌프의 성능계수 (COP), 현재부터 미래의 시간단계에서의 온실의 열수요, 현재 시간에서의 축열상태량(SOC) 등이다. 전기요금 최소화를 위한 목적함수는 다음의 두 항목으로 구성하였다. 즉 1) 연간 피크출력 최소화와 2) 연간 누적 소비 전력량 최소화의 두 가지 항목이다. 전기요금은 한국전력공사에 공시된 '2022년 10월 1일자에 값을 활용하였다. 제어 해석 기간은 본 시스템의 운전모드 중 난방기 기간에서 계간조에 활용된 모든 열을 활용한 뒤 공기열원 히트펌프를 활용한 버퍼조 연계형 축열난방의 경우로 한정하였다. 이는 1년의 기본 요금 즉 최대전력 부하와 관련한 요금을 결정하고, 태양열로 저장된 열을 활용할 수 없으 전력량 요금의 비중이 가장 큰 경우가 이 기간이기 때문이다.

본 연구에서 제안된 강화학습 활용 히트펌프 대수제어 프레임워크는 [그림 4-11]과 같다. 전체 구성은 데이터 준비 파트, 제어 상태값 예측을 위한 딥러닝 파트, 히트펌프 제어를 위한 심층 강화학습 파트로 구성된다. 데이터 준비 파트에서는 딥러닝으로 예측할 열수요와 히트펌프 성능계수에 대한 입, 출력 데이터를 준비한다. 온실 열수요 계산을 위해서는 일사량, 외기온도/습도, 단열커튼스케줄, 설정온도 스케줄이 필요하며 이에 대한 데이터는 실제 포항의 기상청 지상 종관 ASOS 데이터 11년치와, 온실의 실제 스케줄을 설정하였다. 이에 대한 열수요 데이터는 상세물리모델 기반인 TRNSYS시뮬레이션 프로그램을 활용하였다. 히트펌프 성능계수는 공기열원 히트펌프이므로 외기온도와 부하측 입구온도에 따라 결정되는 COP에 대한 실험 데이터를 활용하였다. 이렇게 준비된 Feature, label을 활용하여 Pytorch 딥러닝 프레임워크를 활용하여 부하예측 ANN (Artificial neural network) 모델과 COP 회귀 ANN 모델을 개발하였다. 딥러닝 ANNs를 통해 산정된 상태값들이 강화학습 환경으로 반영되었다. 각 타임스텝에서의 SOC와 태양열 집열기 열 생산량은 물리모델을 활용하였다. 강화학습 에이전트는 Rainbow Deep Q network (RainbowDQN) 알고리즘을 기반으로 개발하였으며, 딥러닝 모델 연계성, GPU 병렬계산 확장성을 위해 Pytorch 프레임워크를 활용하였다. 강화학습 에이전트는 개발 강화학습 환경으로부터 상태를 받고 대수제어 행동을 한 뒤 이에 따른 보상을 받았으며, 누적 보상이 최대화되는 방향으로 학습이 진행되었다.



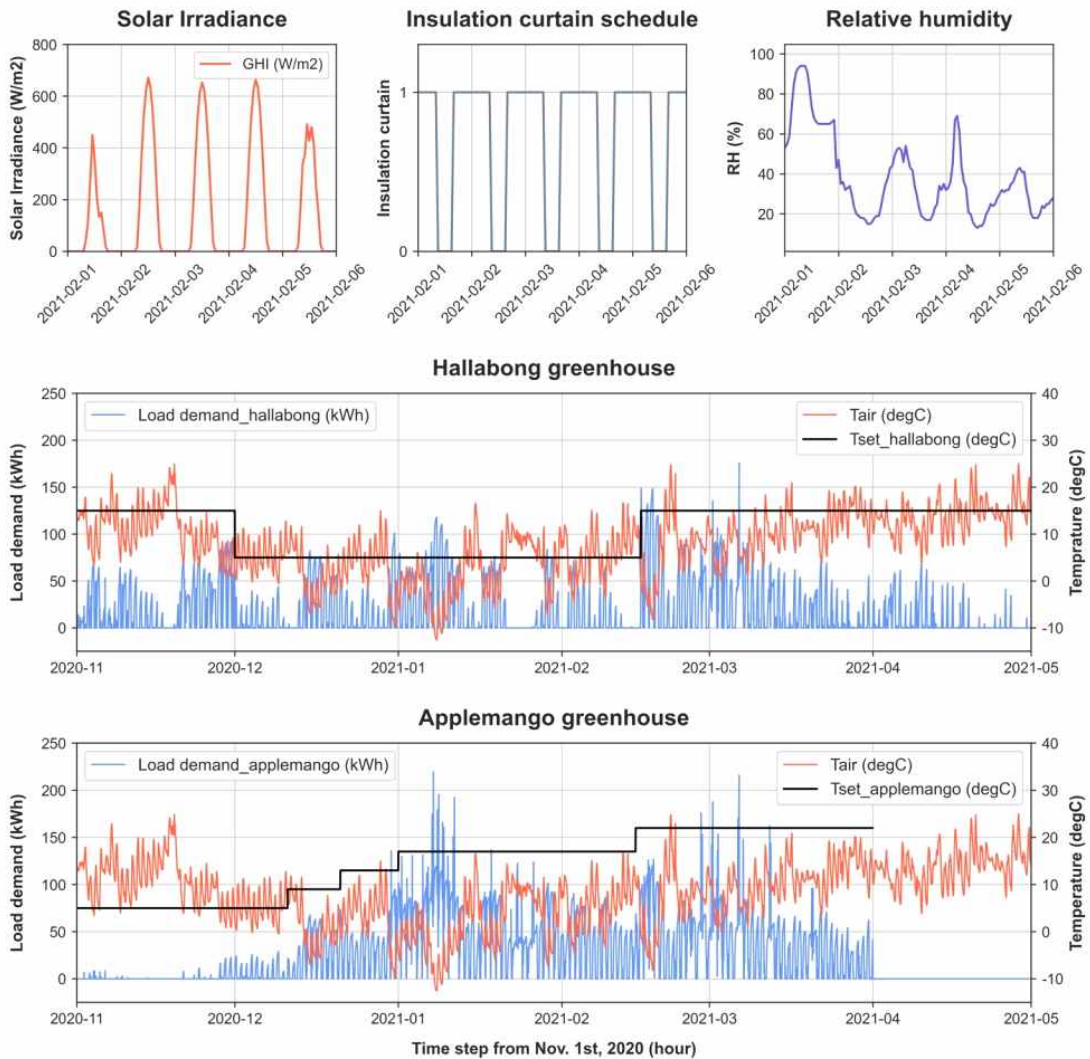
[그림 4-11] 강화학습 활용 히트펌프 대수제어 프레임워크

[부하예측 모델 개발]

[그림 4-12]는 부하예측에 활용된 난방기 데이터에 대한 1시간 단위 그래프들을 나타낸다. 2020~2021년 난방기의 온실 열수요 데이터를 살펴보면, 외기온도가 가장 낮은 1월 10 일경, 가온난방의 설정온도가 가장 높은 3월 초에 가장 높은 것을 알 수 있다. 본 5개의 입력변수 (일사량, 외기온도, 외기습도, 단열커튼 스케줄, 설정온도 스케줄)에 대한 온실별 열

수요 출력변수를 예측하는 딥러닝 모델을 개발하였다. 2011년부터 2017년 까지의 데이터셋을 학습에 활용하였으며, 2018~2020년 까지의 데이터셋을 검증, 2021년의 데이터셋을 테스트로 활용하였다. 딥러닝 아키텍처는 MLP (Multi-layer perceptron)이며 이에 대한 하이퍼파라미터의 종류와 범위는 <표 4-8>과 같다. 예측 평가지표로는 MAE (Mean absolute error), R2 score로 설정하였다. [그림 4-13]과 같이 하이퍼파라미터들의 변수를 바꿔가며 케이스 스터디를 진행하였으며, MAE와 R2 score가 모두 좋게 평가되는 조건들의 조합을 설정하였다.

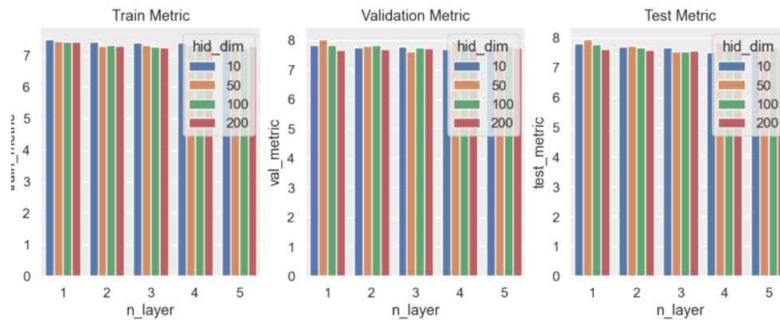
[그림 4-14]와 <표 4-9>는 개발 딥러닝 모델의 예측성능을 나타낸다. 테스트 셋에 대한 R2-score는 두 온실 모두 0.9 이상의 값으로 평가되었고, 평균절대오차인 MAE는 3.5269, 4.4294로 각각 평가되었으며, 시간당 열수요가 온실 100 kWh 오더임을 감안할 때 제어의 상태값으로 활용할 수 있을 수준으로 판단된다.



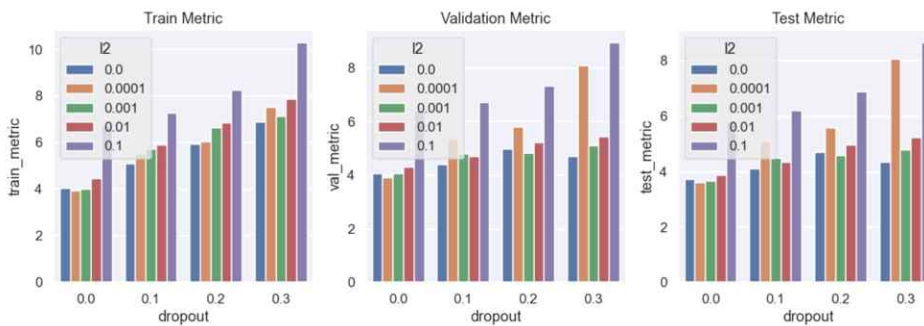
[그림 4-12] 부하예측에 활용된 데이터: 일사량, 단열커튼 스케줄, 상대습도, 외기온도, 설정온도와 이에 따른 온실별 열수요

<표 4-8> 학습에 활용된 하이퍼파라미터 종류와 범위

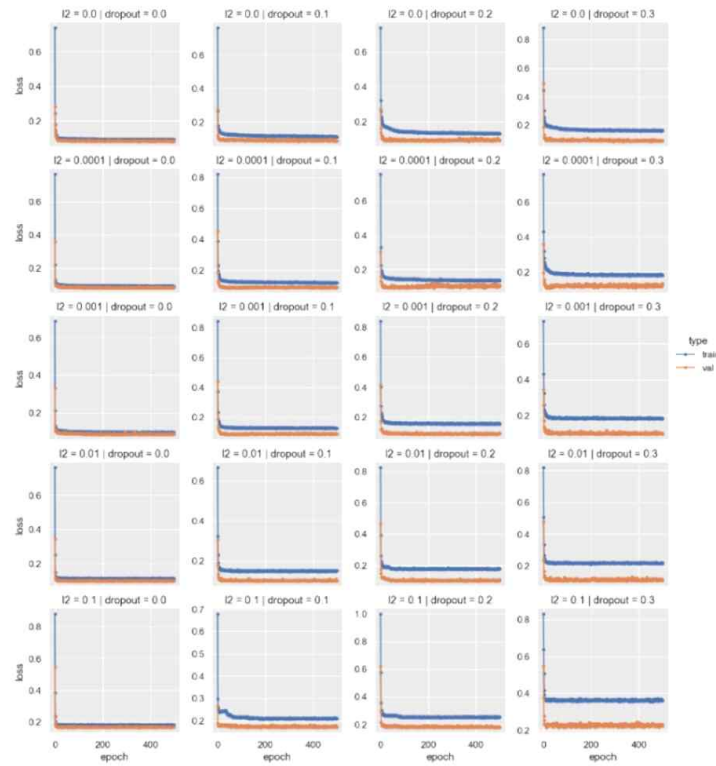
Hyperparameters	Range
Number of hidden layers	[1,2,3,4]
Number of neurons in hidden layer	[10, 50, 100, 200]
Activation function	[relu, tanh, sigmoid, leakyrelu, selu]
Kernel initializer	[False, xavier, he]
Batch normalization	[True, False]
L2 coefficient	[0, 0.001, 0.005, 0.01, 0.05, 0.1]
Dropout ratio	[0, 0.1, 0.2, 0.3]
Optimizer	[Adam, SGD, RMSprop]
Learning rate	[0.0001, 0.0005, 0.001, 0.005, 0.01]



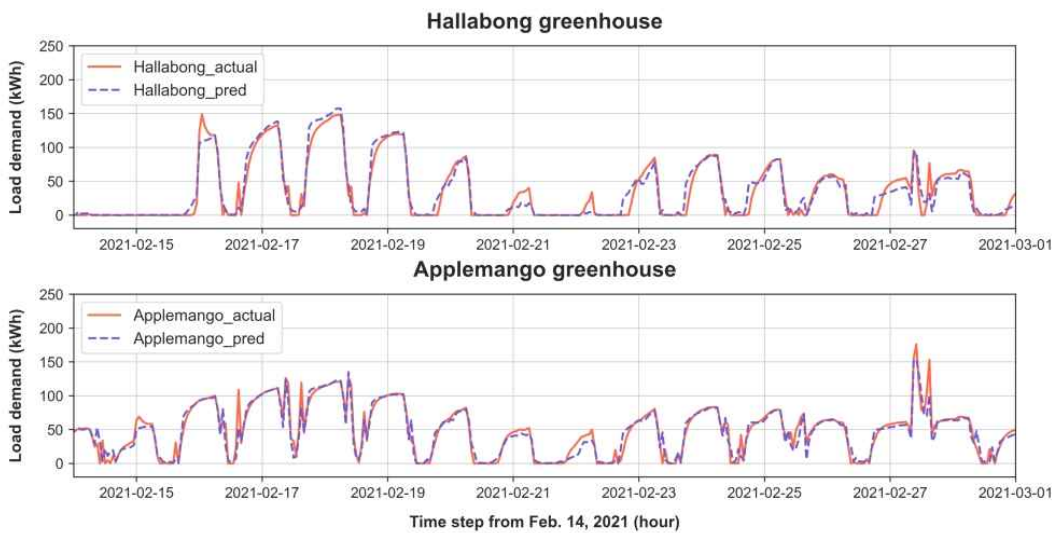
(a)



(b)



[그림 4-13] 부하예측에 하이퍼파라미터 튜닝과정:
 (a) n_layer & hid_dim metric comparison, (b)
 dropout & L2 regularization metric comparison, (c)
 dropout & L2 regularization loss profile



[그림 4-14] 개발 딥러닝 모델 부하예측 결과: 시계열 차트

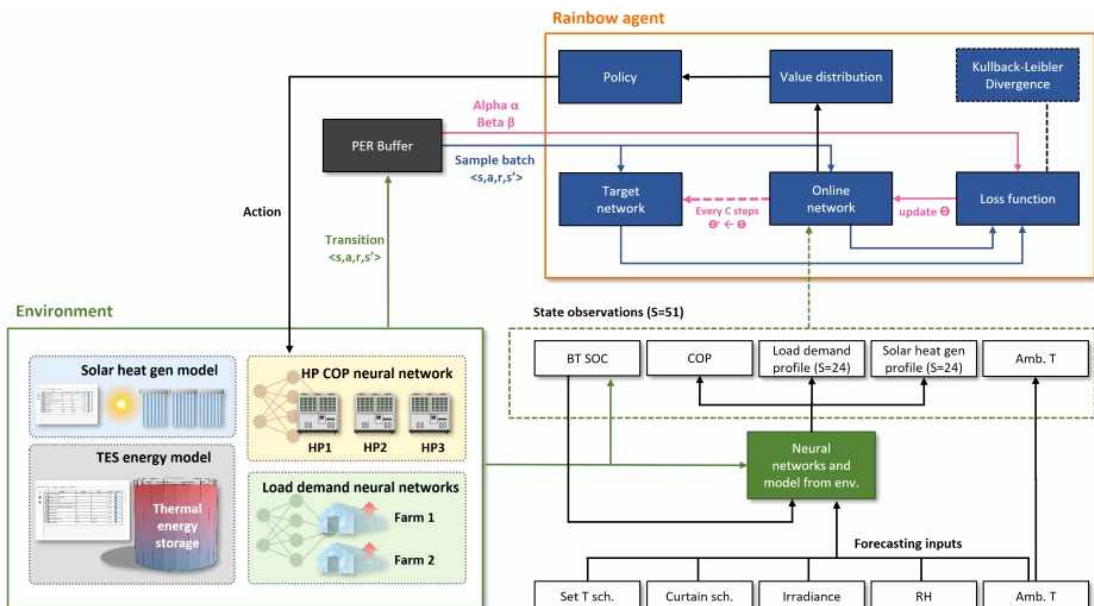
<표 4-9> 개발 딥러닝 모델 부하예측 결과: 정량적 비교 (MAE, R2score)

	MAE	R2score
한라봉 농장 난방부하	3.5269	0.9023
애플망고 농장 난방부하	4.4294	0.9233

【강화학습모델 개발】

[그림 4-15]는 Rainbow DQN 활용 개발 제어 알고리즘을 나타낸다. 강화학습의 환경은 앞선 챕터에서 개발한 온실 부하예측 ANNs와 히트펌프 COP 회귀 ANN, 집열량 산정 물리 모델, 축열조 물리모델로 구성하였다. 에이전트가 관측하는 상태변수는 아래와 같이 51종이다: 24시간 타임스텝의 온실부하, 24시간 타임스텝의 집열량, 1타임 스텝의 버퍼조 SOC, 외기온도, 히트펌프 COP. 1에피소드 학습과정의 알고리즘은 다음의 과정을 따르며, 이에 대한 코드 중 일부 내용을 [그림 4-16]에 표시하였다.

- ① 초기화: $t=0$ 에서의 상태를 환경으로부터 받음
- ② 행동: 에이전트가 온라인 네트워크 기반 정책으로 행동 실행
- ③ 스텝: 환경에서 다음상태, 보상, 종료조건 수령
- ④ 업데이트 : 오차함수 기반 온라인 네트워크, PER (Priority replay) 버퍼 업데이트
- ⑤ 노이즈 초기화: 온라인/타겟 네트워크 초기화
- ⑥ 타겟 네트워크 업데이트: 온라인 네트워크 가중치로 동기화
- ⑦ 2~6 과정 반복
- ⑧ 모델 저장: 평가지표가 최고치 갱신 시 온라인 모델 저장
- ⑨ 1에피소드 종료: SOC 범위 벗어나거나, 난방기 기간 종료 시



[그림 4-15] Rainbow Deep Q network 활용 히트펌프 대수 제어알고리즘

```

while not done:
    action = self.select_action(state)
    episode_actions.append(action)
    next_state, reward, done = self.step(action)

    # === Metric Update === #
    score += reward
    metric_1 += (action*env.hp_nominal_elec)*env.elec_price/env.bt_cha_eff # 누적값 기
    metric_2 = max(episode_actions)*env.hp_nominal_elec*env.peak_price/env.bt_cha_eff
    # ===== #

state = next_state

# NoisyNet: removed decrease of epsilon
# PER: increase beta
fraction = min(frame_idx / num_frames, 1.0)
self.beta = self.beta + fraction * (0.1 - self.beta)

# if training is ready
if len(self.memory) >= batch_size:
    loss = self.update_model()
    losses.append(loss)
    update_cnt += 1

# if hard update is needed
if update_cnt % self.target_update == 0:
    self._target_hard_update()

# if episode ends
if done:
    scores.append(score)
    episode_actions.clear()
    break

==== Model save ==== #
if score >= max(scores):
    PATH = './weights/'
    torch.save({
        'episode': frame_idx,
        'optimizer_state_dict': self.optimizer.state_dict(),
        'model_state_dict': self.dqn.state_dict()
    }, PATH + save_model)
    print('Highest score: {:.3f} achieved!, Saving model ...'.format(max(scores)))
    ===== #

def update_model(self) -> torch.Tensor:
    """Update the model by gradient descent."""
    # PER needs beta to calculate weights
    samples = self.memory.sample_batch(self.beta)
    weights = torch.FloatTensor(
        samples["weights"].reshape(-1, 1)
    ).to(self.device)
    indices = samples["indices"]

    # 1-step Learning loss
    elementwise_loss = self._compute_dqn_loss(samples, self.gamma)

    # PER: Importance sampling before average
    loss = torch.mean(elementwise_loss * weights)

    # N-step Learning loss
    if self.use_n_step:
        gamma = self.gamma ** self.n_step
        samples = self.memory.n_sample_batch_from_idxs(indices)
        elementwise_loss_n_loss = self._compute_dqn_loss(samples, gamma)
        elementwise_loss += elementwise_loss_n_loss

    # PER: Importance sampling before average
    loss = torch.mean(elementwise_loss * weights)

    self.optimizer.zero_grad()
    loss.backward()
    clip_grad_norm_(self.dqn.parameters(), 10.0)
    self.optimizer.step()

    # PER: update priorities
    loss_for_prior = elementwise_loss.detach().cpu().numpy()
    new_priorities = loss_for_prior + self.prior_eps
    self.memory.update_priorities(indices, new_priorities)

    # NoisyNet: reset noise
    self.dqn.reset_noise()
    self.dqn_target.reset_noise()

    return loss.item()
    
```

[그림 4-16] Rainbow DQN 학습과정 알고리즘 구현 코드 중 일부

학습된 강화학습 기반 히트펌프 대수제어 모델의 검증과정은 다음의 절차로 이루어졌으며, 이를 구현한 코드 중 일부는 [그림 4-17]과 같다.

- ① 온라인 네트워크 로딩: 학습 시 저장된 온라인네트워크 로딩
- ② 환경 로딩: 다른 기상데이터로 셋팅된 환경 로딩
 - 강화학습 학습 시에는 TMY 환경조건을 활용
 - 검증 시에는 2021년의 실제 기상데이터 활용
- ③ 초기화: t=0에서의 상태값을 환경으로부터 수령
- ④ 행동: 에이전트가 온라인네트워크 기반 정책으로 행동 실행
- ⑤ 스텝: 환경에서 다음상태, 보상, 종료조건 수령
- ⑥ 3~5 반복
- ⑦ 평가지표를 통한 평가
 - 평가지표1: 3개월 누적 전력량 요금
 - 평가지표2: 피크부하 기준 기본요금

```
def select_action(self, state: np.ndarray) -> np.ndarray:
    """Select an action from the input state."""
    if self.is_test:
        # === Model load === #
        PATH = './weights/'
        checkpoint = torch.load(PATH + load_model)
        self.dqn.load_state_dict(checkpoint['model_state_dict'])
        # ===== #
        # NoisyNet: no epsilon greedy action selection
        selected_action = self.dqn(
            torch.FloatTensor(state).to(self.device)
        ).argmax()
        selected_action = selected_action.detach().cpu().numpy()

    if not self.is_test:
        selected_action = self.dqn(
            torch.FloatTensor(state).to(self.device)
        ).argmax()
        selected_action = selected_action.detach().cpu().numpy()
        self.transition = [state, selected_action]

test_model = 'all_130'
filename = './weights/{}'.format(test_model)
for f in glob.glob(filename):
    checkpoint = torch.load(f)
    print('episode:{:3} loss: {:.4f}'.format(checkpoint['episode'], checkpoint['loss']))

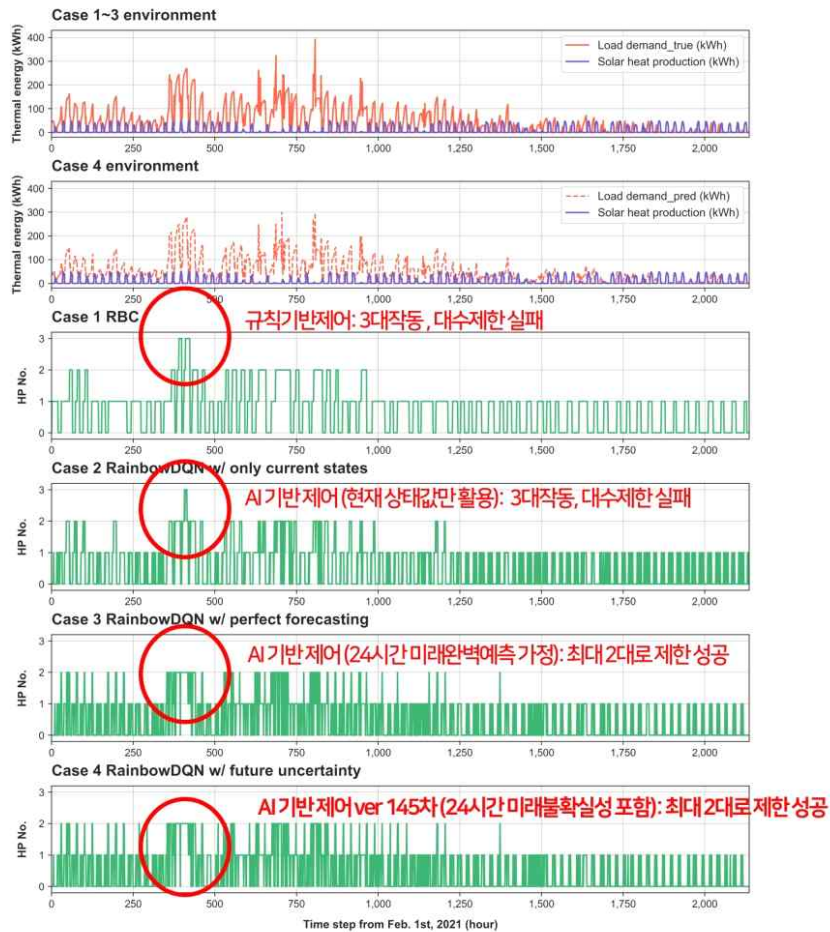
load_model = 'all_130_60.tar'
agent = DQNAgent(env, memory_size, batch_size, target_update, is_transfer, transfer_model, save_model, load_model)
df = agent.test()
```

[그림 4-17] Rainbow DQN 검증과정 알고리즘 구현 코드 중 일부

개발된 히트펌프 대수제어 모델의 성능을 정량적으로 평가하기 위해 다음과 같은 경우 4가지에 대한 분석을 진행하였다.

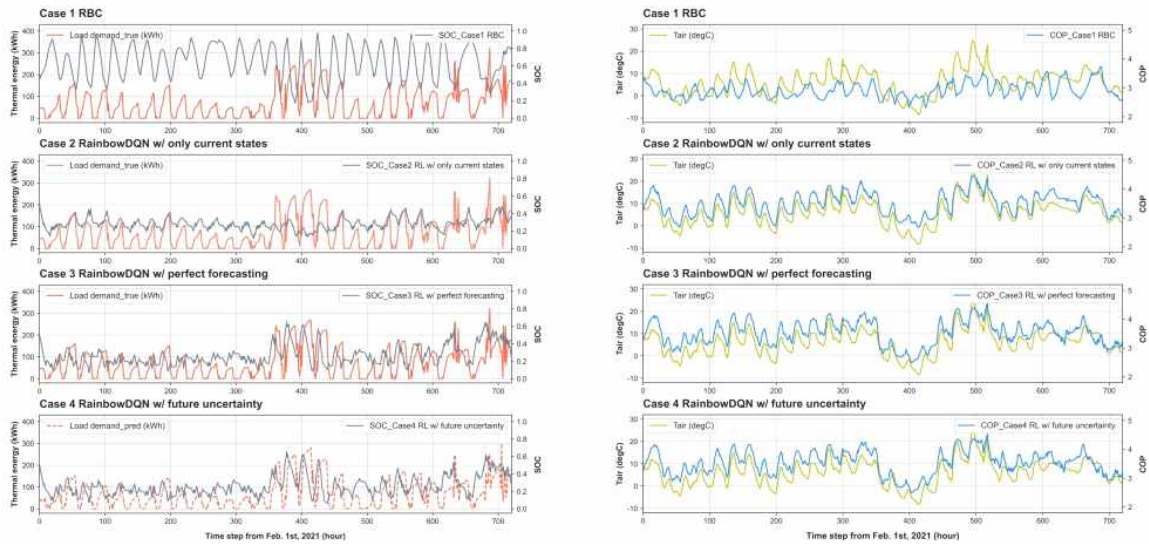
- Case1: 대조군, 규칙기반 제어 (RBC)
- Case2: RainbowDQN 실험군, 현재값만 상태값으로 활용
- Case3: RainbowDQN 실험군, 완벽히 예측가능한 미래값을 상태값에 포함
- Case4: RainbowDQN 실험군, 24시간 미래 불확실성 포함한 미래값을 상태값에 포함 (딥러닝 예측값)

[그림 4-18]은 위에서 설명한 4가지 경우에 대한 히트펌프 히트펌프 작동대수를 나타낸다. Case1과 2의 경우에는 온실 열부하가 연속적으로 큰 날의 경우 히트펌프의 3대 가동이 이루어졌다. 이는 기본요금에 히트펌프 1대분이 증가되어 부가됨을 의미한다. 그러나, Case3과 4의 경우에는 전 기간동안 히트펌프를 2대로 제한할 수 있었다. 특히, 24시간의 미래 불확실성이 포함된 경우에도 대수제한에 성공하는 것을 확인하였다.



[그림 4-18] 4가지 경우에 대한 분석 결과: 히트펌프 작동대수

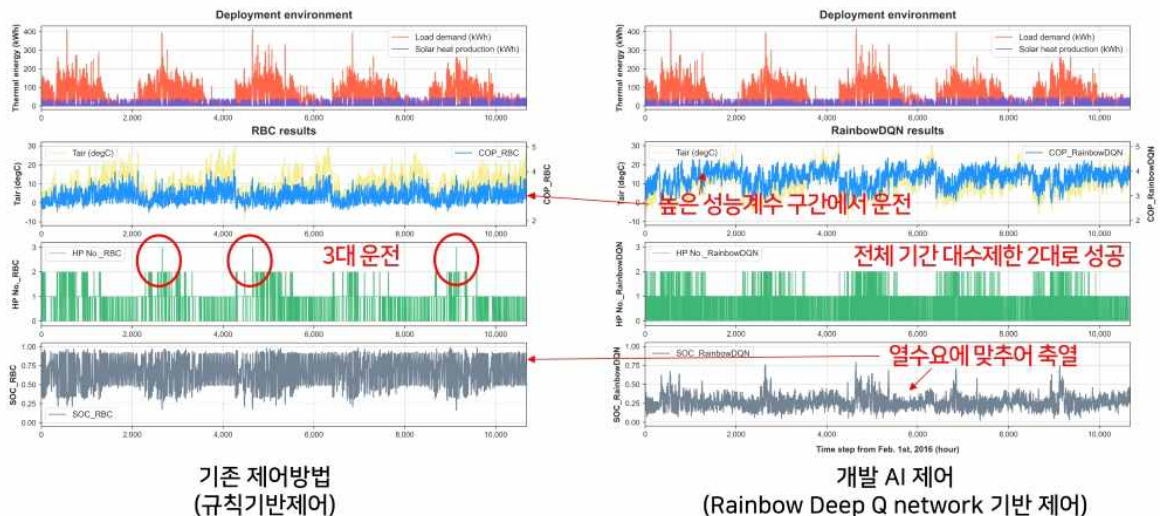
[그림 4-19]는 버퍼조의 SOC와 히트펌프 COP를 나타낸다. Case 1의 경우 SOC가 온실부하에 관계없이 일정 수준을 유지하는 것을 알 수 있다. 그러나 Case2~4의 경우 온실부하에 따라 SOC가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 특히, Case3,4의 경우에는 미래 부하가 클 때 SOC를 미리 높여두는 것을 확인할 수 있다. 이러한 미래의 열수요에 맞춰 미리 축열하는 제어기법을 터득하여 히트펌프를 3대를 가동시키지 않고 2대만으로 제한할 수 있었다. 이는 기본요금의 절감을 의미한다. 또한, 히트펌프 COP 측면에서는 전반적인 영역에서 기존 RBC보다 높은 COP 조건에서 더 자주 운전되는 것을 확인할 수 있다. 이는 전력량 요금 절감을 유도한다. 이러한 전략은 개발자가 에이전트에게 사전 지식으로 부과한 것이 아니며, 히트펌프 대수를 제한하기 위해 강화학습 에이전트가 스스로 터득한 전략임을 알 수 있다.



[그림 4-19] 케이스 스터디 결과: (좌) 열수요와 버퍼조 SOC, (우) 히트펌프 COP

[그림 4-20]은 제어 강건성을 검증하기 위해 2016~2020년도의 기상데이터를 활용하여 연속적인 5년 동안의 제어특성을 확인하였다. 기존 규칙기반제어 대비 전 영역에서 COP가 더 높은 구간에서 유지되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 규칙기반제어는 기상조건에 따라 열수요가 피크를 찍는 시점에 3대운전이 포함되는 것을 알 수 있는데, 개발 AI제어는 전체 기간동안 히트펌프 대수를 2대로 제한하는데 성공하였다. 이에 대한 방법으로 에이전트가 SOC를 열수요에 맞추어 축열하는 전략을 효과적으로 구사함을 그래프로 확인할 수 있다.

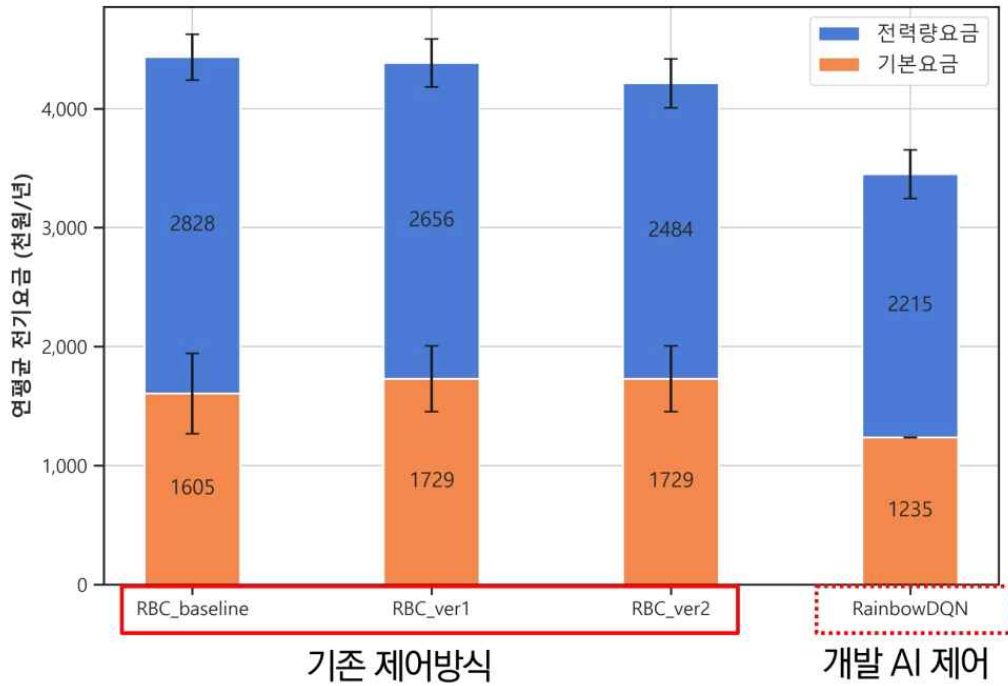
[그림 4-21]은 개발 제어 기술의 효과를 정량적으로 평가하기 위해 연평균 전기요금을 규칙기반제어와 비교하였다. 규칙기반 제어에 활용된 SOC 설정값은 <표 4-10>과 같으며, SOC를 높게 유지하는 조건과 낮게 유지하는 조건에 대한 시나리오를 모두 반영하였다. 그림에 나타내었듯이 RBC는 설정값 시나리오에 따라 연평균 전기요금을 절감하는데 한계가 있음을 알 수 있다. 이에 반해, 개발 AI제어는 기존 방식 대비 전기요금을 연간 22% 절감할 수 있음을 확인하였다.



[그림 4-20] 5년 검증결과: (좌) 기존 규칙기반제어, (우) 개발 AI제어

<표 4-10> 규칙기반 제어에 활용된 SOC 설정값

	RBC_Baseline	RBC_Ver1	RBC_Ver2
SOC_set,0	0.90	0.70	0.70
SOC_set,1	0.50	0.50	0.30
SOC_set,2	0.35	0.35	0.20
SOC_set,3	0.20	0.20	0.10



[그림 4-21] 연평균 전기요금 비교: 규칙기반제어와 개발 시제어

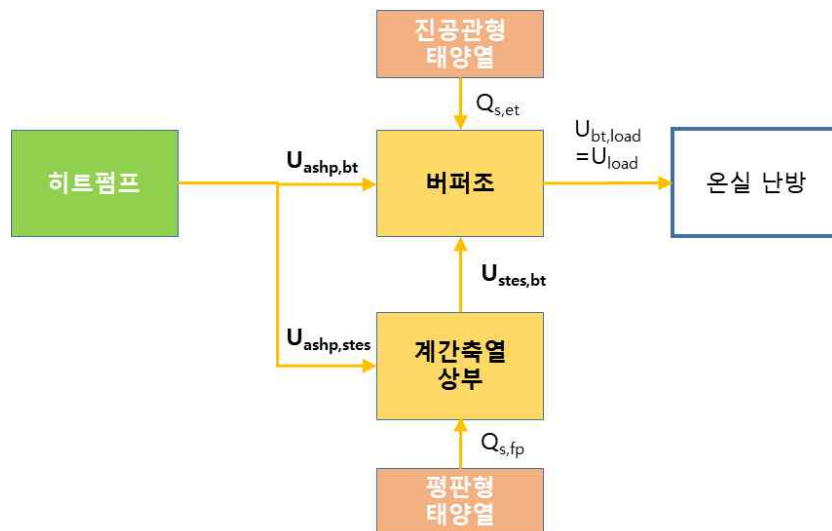
(나) 물리모델 기반 운전최적화

본 연구에서는 계간축열 기반 태양열 열공급시스템의 운전을 학습에 필요한 데이터양이 상대적으로 작은 장점을 가지는 모델기반의 방법으로 최적화하기 위한 기법을 개발하였다, [그림 4-22]에는 예측모델 기반의 물리모델 운전최적화를 위한 시스템적 개념 구성도이다. 버퍼조와 히트펌프를 이용하여 난방하는 모드 또는 버퍼조 및 계간조 상부와 히트펌프를 이용하여 난방하는 모드에 적용가능할 것이다. 복합열원에 대한 최적화 운전제어 방안은 복합 열원 중 수열원은 계간열저장조의 잔열상태의 열저장에너지의 제한된 열에너지를 이용하기 때문에 열손실을 고려하여 공기열원에 우선하여 수열원을 적용하는 방식으로 결정하였다.

【운전최적화 문제설정을 위한 가정】

운전최적화를 위한 문제설정에 필요한 가정은 다음과 같다.

- (가정 1) 계간조 하부는 그 이전에 히트펌프 열원으로 사용하기에는 충분히 소진한 상태로 가정한다. 따라서, 공기열원으로만 히트펌프 운전, 버퍼조에서 온실로 공급하는 열량은 부하와 동일한 것으로 가정한다.
- (가정 2) TRNSYS 시뮬레이션으로부터 계산된 난방부하를 이용하여 가장 난방부하가 높은 기간 2일을 선정하여 개발한 운전제어기법 성능평가에 활용하였다.
- (가정 3) 시스템 성능모델은 예측물리모델을 단순화하여 수립하였다.
- (가정 4) 외기온도, 온실부하는 정확하게 예측가능한 것으로 가정하였다.



[그림 4-22] 예측모델기반 최적운전제어를 위한 시스템 단순화 모델

【시스템 모델 및 변수 정의】

상태방정식은 시스템모델에 에너지밸런스를 적용하면, 다음 지배식이 도출된다.

$$U_{bt,load} = Q_{load} \tag{식 4-1}$$

$$X_{bt}(k) = X_{bt}(k-1) + [U_{ashp,bt}(k)]\Delta t + [U_{stes-bt}(k)]\Delta t + [Q_{sol,et}(k)]\Delta t - [U_{bt,load}(k)]\Delta t \tag{식 4-2}$$

$$X_{stes,upper}(k) = X_{stes,upper}(k-1) + [U_{ashp,stes}(k)]\Delta t - [U_{stes-bt}(k)]\Delta t + [Q_{sol,fp}(k)]\Delta t \quad (\text{식 4-3})$$

히트펌프 제어변수 값의 설정은 다음과 같다. 히트펌프 열원과 부하공급 특성상 다음 조건이 필요하다.

$$\begin{aligned} U_{ashp,bt} &= [U_{ashp,bt,max}, \dots, U_{ashp,bt,min}] \\ U_{ashp,stes} &= [U_{ashp,stes,max} - U_{ashp,bt}, \dots, \\ &\quad U_{ashp,stes} - U_{ashp,bt}, \dots, U_{ashp,stes,max}] \end{aligned} \quad (\text{식 4-4})$$

히트펌프 COP를 이용하여 전력소비 모델링은 다음과 같다.

$$P_{wshp}(k) = Q_{wshp}(k) / COP \quad (\text{식 4-5})$$

$$P_{ashp}(k) = Q_{ashp}(k) / COP \quad (\text{식 4-6})$$

본 연구에서 최적운전은 최적화기법을 적용하여 최적의 $U_{ashp,bt}^*$, $U_{ashp,stes}^*$, $U_{stes,bt}^*$ 와 X_{bt}^* , X_{stes}^* 를 결정하는 것으로 정의할 수 있다.

목적함수는 히트펌프 전력소비량 또는 최대전력수요를 최소화할 수 있는 2가지 방법을 적용할 수 있도록 구성하였다.

$$\begin{aligned} \min J &= (\alpha) \sum_{k=1}^K [P_{ashp,bt}(k) + P_{ashp,stes}(k) + P_{etc}(k)] \Delta t * r(k) \\ &+ (\beta) \max [P_{ashp,bt}(k) + P_{ashp,stes}(k) + P_{etc}(k)] \end{aligned} \quad (\text{식 4-7})$$

위 식에서 $\alpha = 1, \beta = 0$ 이면 전력소비최소화, $\alpha = 0, \beta = 1$ 이면 피크수요최소화 운전으로 적용이 가능하다.

시스템에 대한 제어변수는 아래와 같이 3개를 정의하였으며, 제1제어변수는 히트펌프-버퍼조 열전달율이다.

$$\begin{aligned} U_{ashp,bt,max} &= 45 RT = 175 kW_t \\ \text{☞ 3대 적용, } U_{ashp-bt,max} &= 175 * 3 = 525 kW_t \end{aligned} \quad (\text{식 4-8})$$

제2제어변수는 히트펌프-계간조 열전달율이다.

$$\begin{aligned} U_{ashp,stes,max} &= 45 RT = 175 kW_t \\ \text{☞ 3대 적용, } U_{ashp-stes,max} &= 175 * 3 = 525 kW_t \end{aligned} \quad (\text{식 4-9})$$

제3 제어변수는 계간조-버퍼조 열전달율로서 계간조 상부에서 버퍼조 하부로 전달하는 열출력이다.

$$\begin{aligned}
 U_{stes-bt,max} &= C_p \dot{m} \Delta T_{max} && \text{(식 4-10)} \\
 &= 4.18 (kJ/kgK) * 990.3 (kg/m^3) * 6 (m^3/hr) * (55 - 35) K \\
 &= 496,695 kJ/hr \\
 &= 138 kW_t
 \end{aligned}$$

시스템의 상태변수는 버퍼조의 축열량과 계간조의 이용가능한 축열량 등 2개를 정의하여 적용하였다.

제1상태변수는 버퍼조에 대한 축열량 상태변수로서 최대값은 다음으로 적용한다.

$$X_{bt,max} = dT(kWh/m^3) * V_{bt} (m^3) = (55 - 35) * 100 = 2,000 kWh_t \quad \text{(식 4-11)}$$

제2상태변수는 계간조 상부의 히트펌프 열원으로 사용되는 열량으로서의 상태변수로서 최대값은 다음으로 적용하였다.

$$X_{stes,max} = dT(kWh/m^3) * V_{stes,upper} (m^3) = (55 - 35) * 100 = 2,000 kWh_t \quad \text{(식 4-12)}$$

【운전기법】

최적화 운전기법은 다차원 동적계획법(Multi-dimensional Dynamic Programming)을 적용하여 개발하였다.

성능을 비교하고 평가할 운전방식은 기존운전방식, 에너지최소화, 피크최소화 등의 3가지를 적용하였으며, 최적화운전은 추운 겨울철 2일을 선택하였고, 극도로 추운 겨울철을 가정하여 2일 중 두 번째 날의 난방부하가 1.5배 정도 더 큰 난방부하일로 계산한 3가지 경우로 적용하였다.

기존운전방식은 히트펌프와 버퍼조만을 이용하여 난방부하 공급방식으로 히트펌프 운전은 버퍼조 상태에 따라 기동과 정지 운전, 에너지최소화 운전은 2일간에 대하여 히트펌프 전력 소비량을 최소화, 피크최소화는 2일간에 대하여 히트펌프 전력소비 최대값을 최소화하는 운전방식으로 정의하였다.

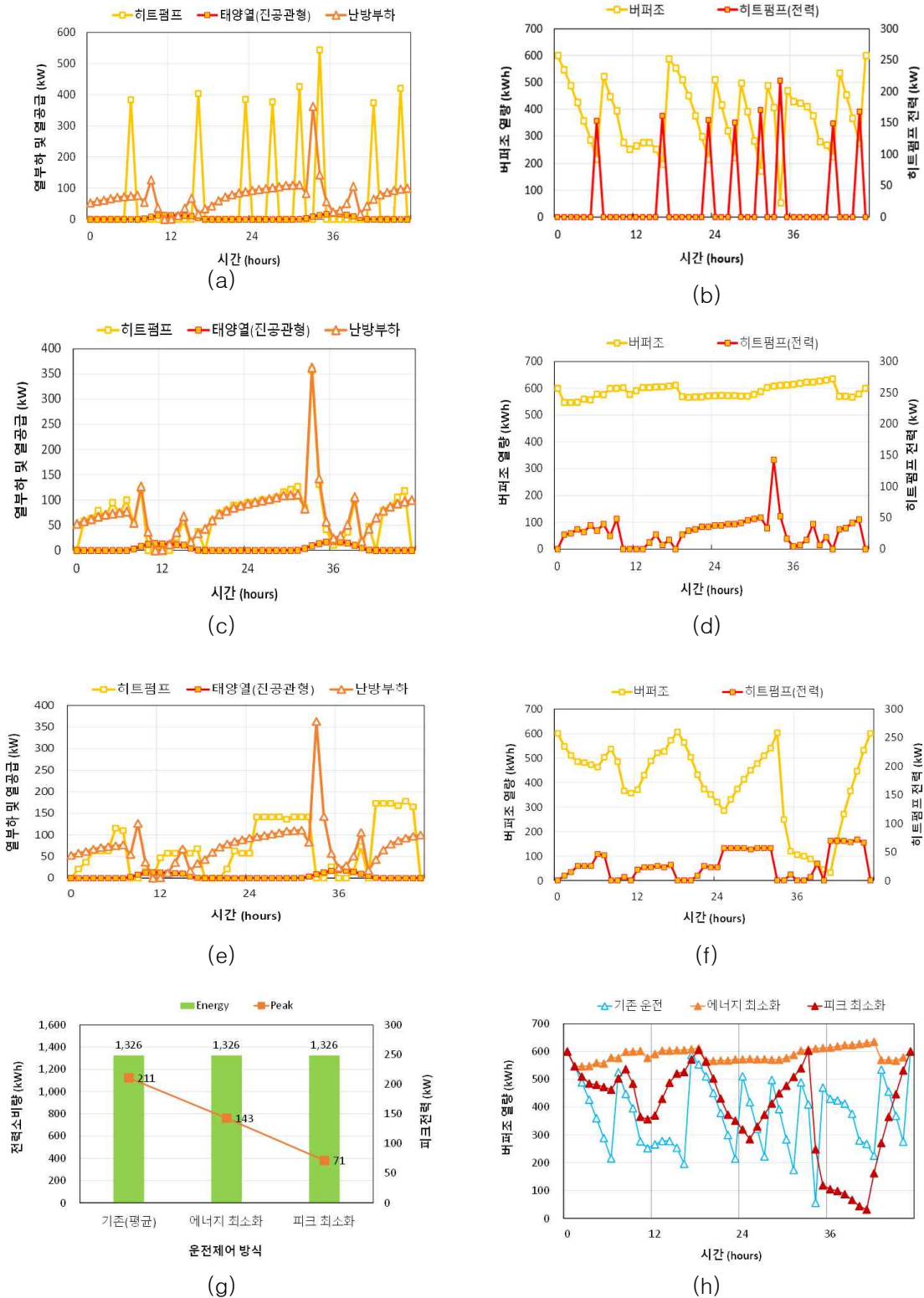
최적화 운전에서 버퍼조만을 이용하는 경우, 버퍼조 및 계간조 상부를 모두 이용하는 경우 등 2가지를 적용하였다.

버퍼조 및 계간조 상부의 초기 상태량과 2일 후 최종상태량은 동일하도록 조건을 부가하였고, 최대난방부하일의 경우 계간조의 이용을 최대화하여야 하므로 이 조건을 미적용하였다.

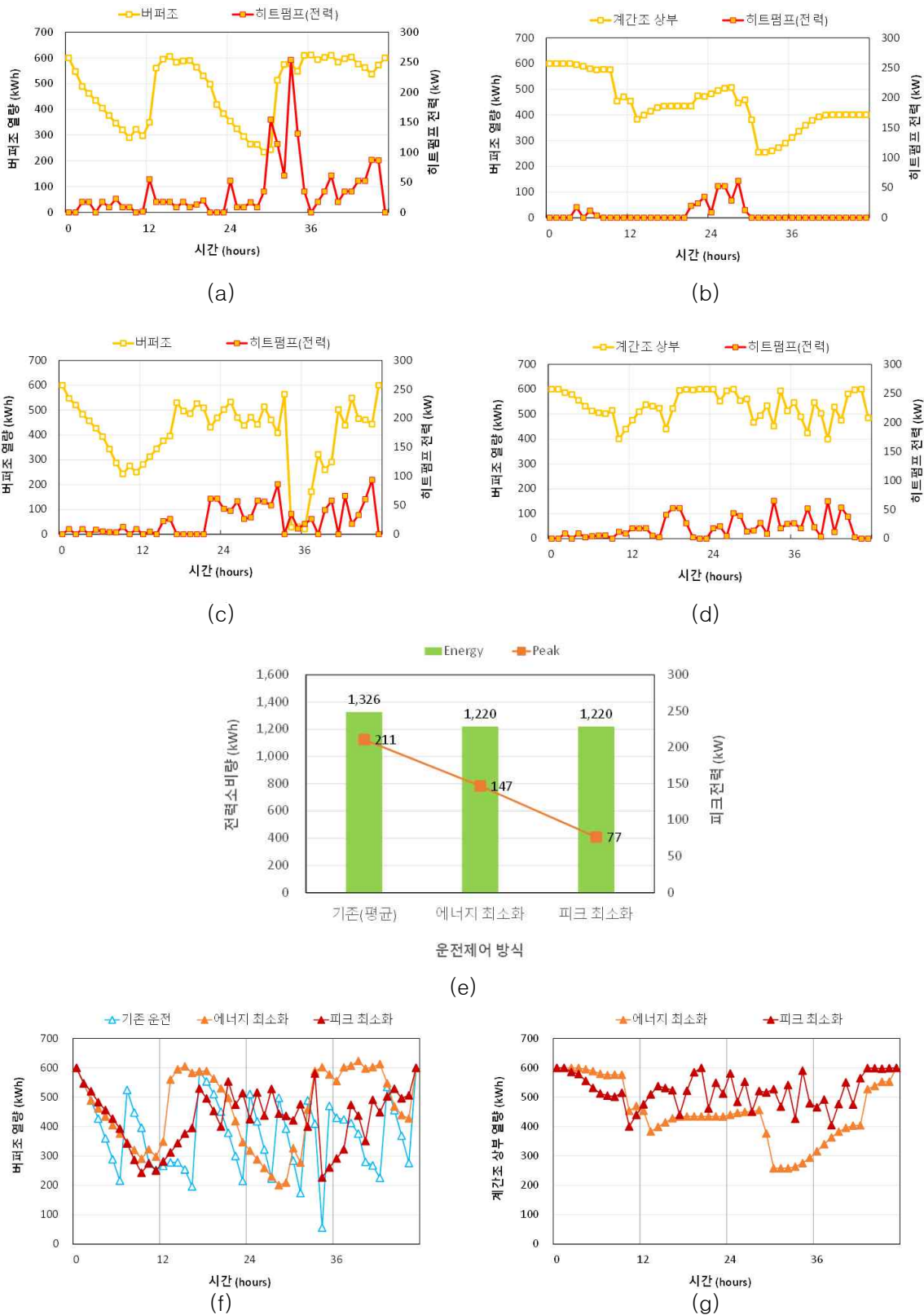
【최적운전기법 적용 결과】

최적화 운전기법을 단순화 모델에 적용한 결과, 기존운전방식에 비하여 에너지최소화 운전의 효과는 거의 나타나지 않았으나 피크최소화 운전의 효과는 뚜렷하게 나타났다. [그림 4-23]과 같이 버퍼조만을 이용하는 경우 히트펌프 전력피크부하는 기존 운전방식에서 211 kW로 나타났으며, 피크최소화운전을 통하여 71kW로 약 66% 절감되는 것으로 계산되었다. [그림 4-24]와 같이 버퍼조와 계간조 상부를 모두 이용할 경우에도 유사한 수준으로 전력 피크부하를 줄일 수 있는 것으로 나타났으나 전력소비량 절감량이 더 높게 나타났다. [그림 4-25]와 같이 최대난방부하일을 가정한 경우에 전력피크부하는 298 kW에서 94 kW로 약 68% 정도 절감되는 것으로 계산되었다.

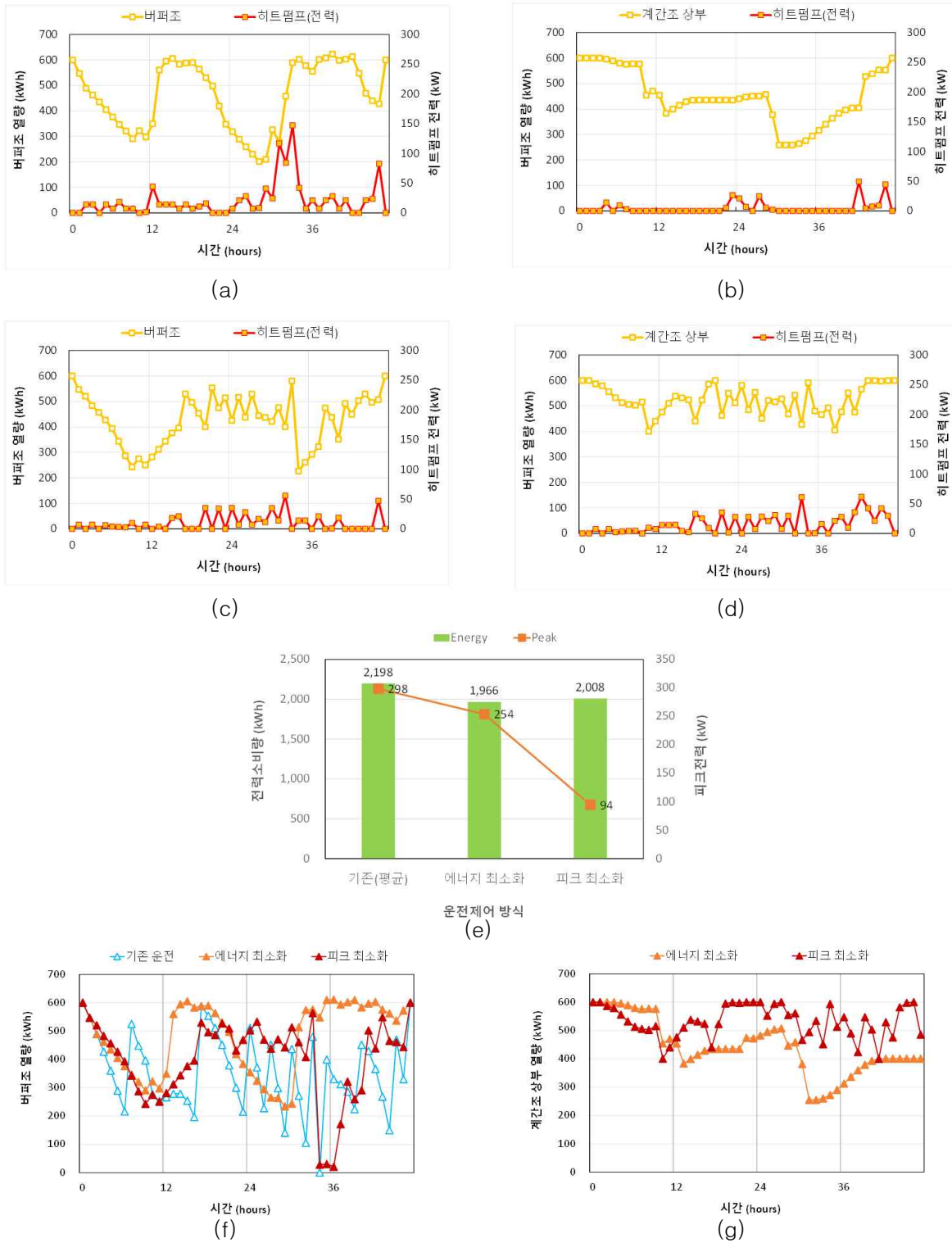
따라서, 계간축열 기반 태양열 열공급시스템의 최적운전은 버퍼조와 계간조의 상부를 모두 이용하면서 피크최소화 제어기법을 적용함으로써 피크전력부하를 크게 절감할 수 있을 것으로 기대되며, 이로 인하여 기본요금 절감 또한 기대할 수 있다. 참고로 본 실증대상의 용량수준의 원예시설은 기본요금이 설비용량에 따라 정해지고 사용하는 전력수요와는 관계가 없는 경우이다.



[그림 4-23] 단순화모델 대상 버퍼조 단독이용 최적운전기법 적용 결과
 [(a)기준운전방식에서 히트펌프 및 태양열 열공급과 난방부하, (b)기준운전방식에서 버퍼조 열량상태와 히트펌프 전력소비, (c)에너지최소화 운전방식에서 히트펌프 및 태양열 열공급과 난방부하, (d)에너지최소화 운전방식에서 버퍼조 열량상태와 히트펌프 전력소비, (e)피크최소화 운전방식에서 히트펌프 및 태양열 열공급과 난방부하, (f)피크최소화 운전방식에서 버퍼조 열량상태와 히트펌프 전력소비, (g)운전방식별 히트펌프 전력소비량 및 피크전력 비교, (h)운전방식별 버퍼조 열량상태 변화의 비교]



[그림 4-24] 단순화모델 대상 버퍼조와 계간조 상부 이용 최적운전기법 적용 결과
 [(a)에너지최소화 운전방식에서 버퍼조 열량 상태와 히트펌프 전력소비, (b)에너지최소화 운전방식에서 계간조 상부 열량상태와 히트펌프 전력소비, (c)피크최소화 운전방식에서 버퍼조 열량 상태와 히트펌프 전력소비, (d)피크최소화 운전방식에서 계간조 상부 열량상태와 히트펌프 전력소비, (e)운전방식별 히트펌프 전력소비량 및 피크전력 비교, (f)운전방식별 버퍼조 열량 상태 비교, (g)운전방식별 계간조 상부 열량 상태 비교]



[그림 4-25] 최대난방부하일 가정 단순화모델 대상 버퍼조와 계간조 상부 이용 최적운전기법 적용 결과

[(a)에너지최소화 운전방식에서 버퍼조 열량 상태와 히트펌프 전력소비, (b)에너지최소화 운전방식에서 계간조 상부 열량상태와 히트펌프 전력소비, (c)피크최소화 운전방식에서 버퍼조 열량 상태와 히트펌프 전력소비, (d)피크최소화 운전방식에서 계간조 상부 열량상태와 히트펌프 전력소비, (e)운전방식별 히트펌프 전력소비량 및 피크전력 비교, (f)운전방식별 버퍼조 열량 상태 비교, (g)운전방식별 계간조 상부 열량 상태 비교]

라. 실증을 위한 설비 구축

(1) 설계

(가) 시스템 구성 및 주요 요소의 용량 산정

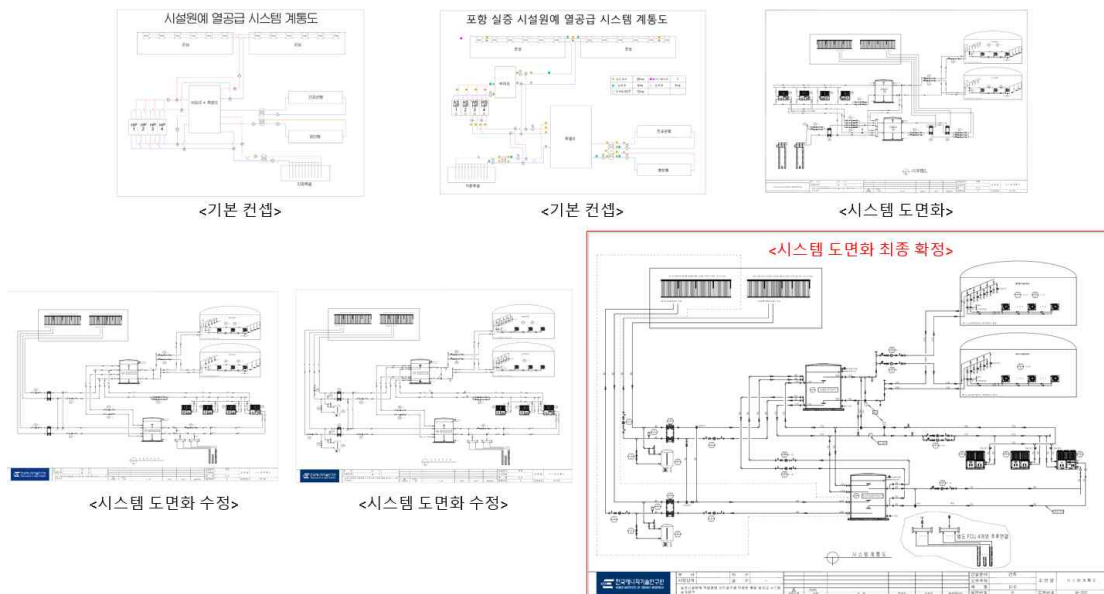
본 연구에서 개발한 시스템의 개념적 구성도를 [그림 4-26]에 나타내었다. 주요 구성요소는 진공관형 태양열 집열설비, 평판형 태양열 집열설비, 버퍼조, 계간축열조(이하 계간조), 공기열원 및 복합열원 히트펌프, 수직방식 하이브리드 얇은지중축열로 구성되었다.

본 시스템에서는 히트펌프가 주요한 열공급시스템 구성요소 중의 하나이며, 히트펌프의 특성상 난방용 온수 뿐만 아니라 냉수 생산이 가능하므로 여름철에는 온실 냉방에도 활용할 수 있도록 설계 및 구축되었다.

시스템의 주요 구성요소인 집열기 설치면적, 계간조와 버퍼조의 용량, 히트펌프 용량 등의 용량은 시뮬레이션을 이용하여 결정하였다.

(나) 태양열 계간축열 기반 난방 열공급 시스템 상세 설계

TRNSYS 시뮬레이션을 이용한 실증시설원예의 부하 예측 및 열공급 시스템의 용량에 따른 성능 분석을 기반으로 실제 실증시설원예의 계간축열 기반 태양열 열공급 시스템(이하 실증 시스템)의 주요 구성요소에 대한 용량 산정이 진행되었다. 실증시스템의 난방에너지 공급을 위한 열공급 시스템은 시설원예의 난방 부하, 재배작물, 시설원에 내부 열 공급 방안 등을 고려하여 기본 개념을 도출 하였으며, 도출된 기본 개념을 기반으로 실증시스템의 열공급 시스템의 기본, 상세 실시설계가 진행되었으며 지속적으로 수정 보완되었다.



[그림 4-26] 실증시스템 열공급 시스템 설계 업그레이드 도면화 진행

실증시스템의 주요 구성방식은 시뮬레이션 해석 모델에서 산정한 것과 동일하게 태양열 집열기를 통해 하절기 태양열을 계간조(350m³), 버퍼조(100m³) 및 얇은 지중축열 GTES(300 m³)에 장기 및 단기에 걸쳐 열저장 후 동절기 난방 부하가 발생되면 저장된 열에너지를 시

설원예에 공조기기(예로서 FCU)를 통해 직접 공급하는 방식과 함께 계간조의 열을 히트펌프의 열원으로 사용하는 간접 공급 방식을 사용 할 수 있도록 설계가 이루어져 있다.

실증시스템에 적용된 공기열원 히트펌프 및 복합열원 히트펌프의 용량은 공기열원 45 RT 급 2기, 복합열원 45 RT 급 1기로 설계하였으며 이를 통해 동절기 진공관형 태양열 시스템과 함께 100 m³ 버퍼조에 열을 공급하는 방식으로 설계하였다.

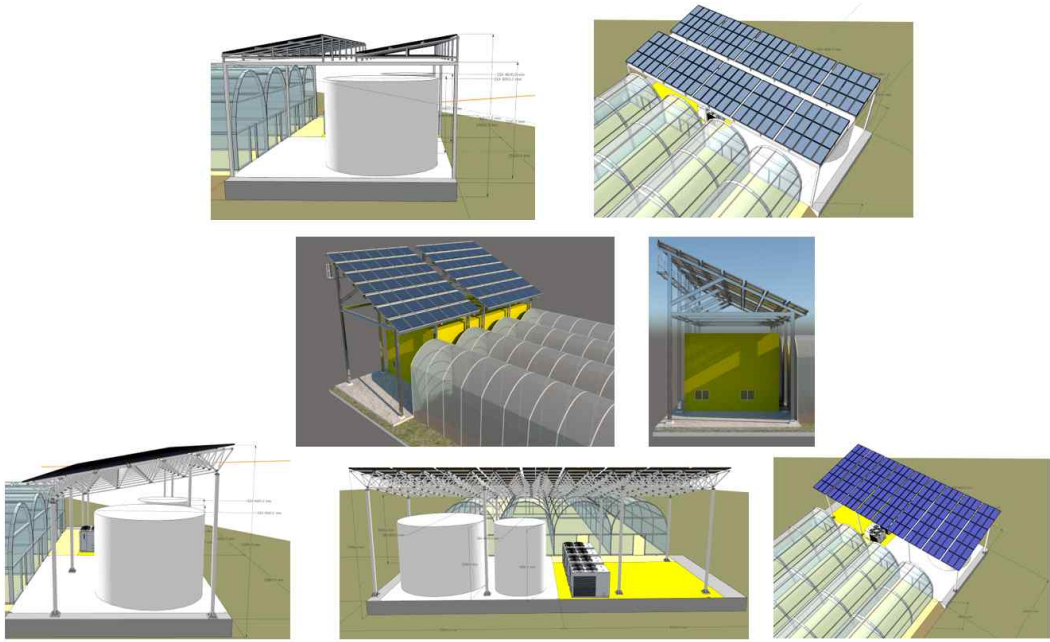
복합열원 히트펌프의 경우 동절기 350 m³ 계간조 내부 온도가 시설원예에 직접 공급하는 조건보다 낮은 40 ℃ 이하로 낮아지게 되면 복합열원 히트펌프의 수열원으로 계간조 내부의 온수를 사용하며 또한 실증시설원예에 구축된 300 m³ 규모의 얇은GTES(지중열저장)에 저장된 열에너지도 복합열원 히트펌프의 수열원으로 사용이 가능하도록 시스템을 구성하였다.

실증시스템에 적용된 태양열 시스템은 협동연구기관인 세한에너지(주)의 히트파이프를 적용한 이중진공관형 태양열 집열기 54 매(108 m²)와 (주)에스앤지에너지의 평판형 태양열 집열기 42 매(96 m²)를 적용하였으며, 평판형 태양열 집열기는 350 m³ 용량의 계간조에만 태양열을 저장하는 방식이며 진공관형 집열기는 버퍼조 또는 계간조 내부의 온도 조건에 따라 선택하여 열을 저장하는 방식으로 설계되었다.

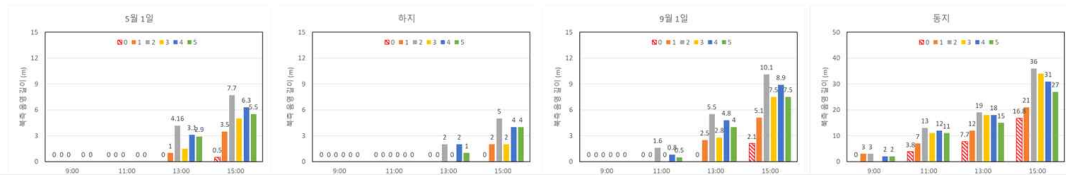
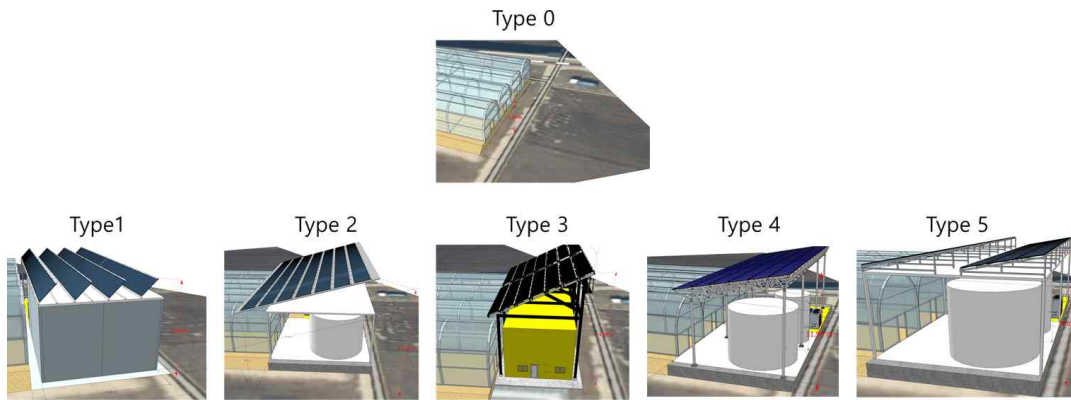
(다) 태양열 집열기

계간축열 기반 태양열 열공급 시스템이 적용된 실증시설원예의 경우 시설원예의 유희부지가 충분하지 않아 온실 일부를 철거 후 기계실을 구축하였으며, 기계실 상부에 평판형 및 진공관형 집열기를 적용하는 방식으로 태양열 시스템을 설계하였다.

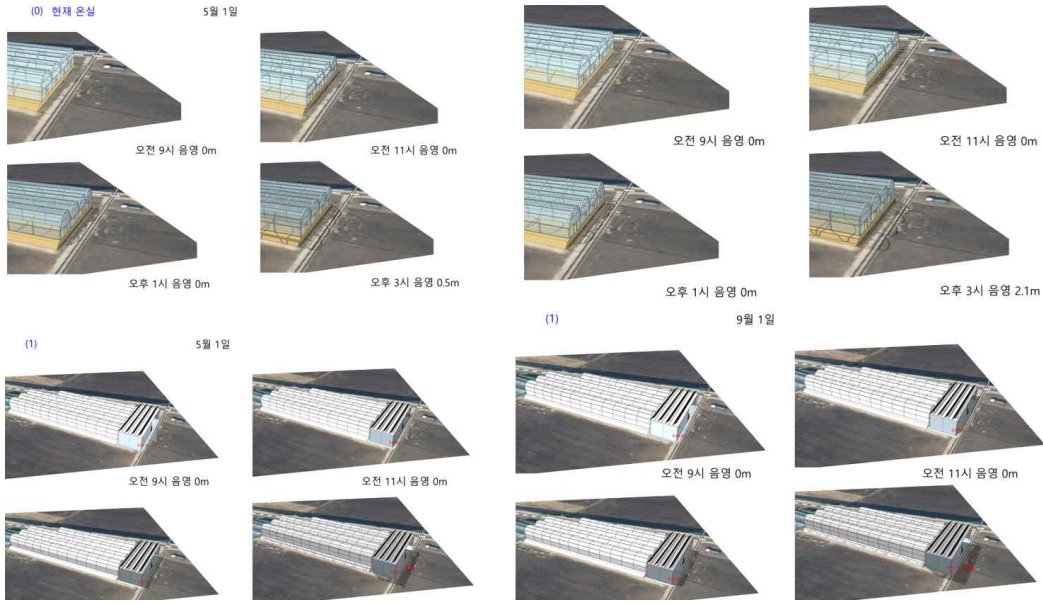
실증시설원예의 경우 주위에 시설원예 주변에 현재 작물을 재배하는 논으로 2면이 둘러싸여 있는 지리적 위치적 특성을 갖고 있으며 따라서 기계실 및 태양열 시스템에 의한 주변논에 음영에 따른 작물 재배의 문제가 발생할 수 있어 이를 방지하기 위해 태양열 시스템 설계 방안에 따른 음영 분석을 수행하였다. [그림 4-27]은 음영분석을 위한 계산모델을 나타내었으며, [그림 4-28]은 설치유형별 음영분석 결과의 일부를 나타내었다. [그림 4-29]는 기계실 옥상에 태양열 집열설비를 설치한 경우와 기존에 온실의 경우에 대하여 주변에 나타나는 음영을 비교한 결과 일부를 나타내었다.



[그림 4-27] 실증시스템 태양열 시스템 음영 분석을 위한 3D 모델 구현



[그림 4-28] 실증시스템 태양열 집열기 설치 타입별 음영분석 결과 일부

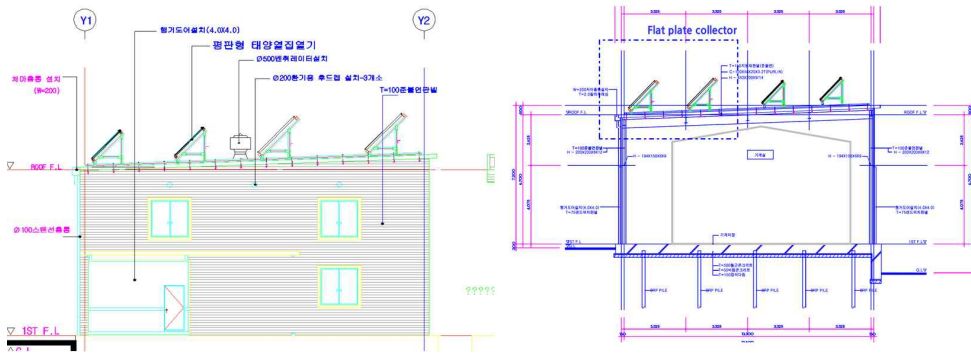


[그림 4-29] 실증시스템 태양열 시스템 유무에 따른 음영 비교

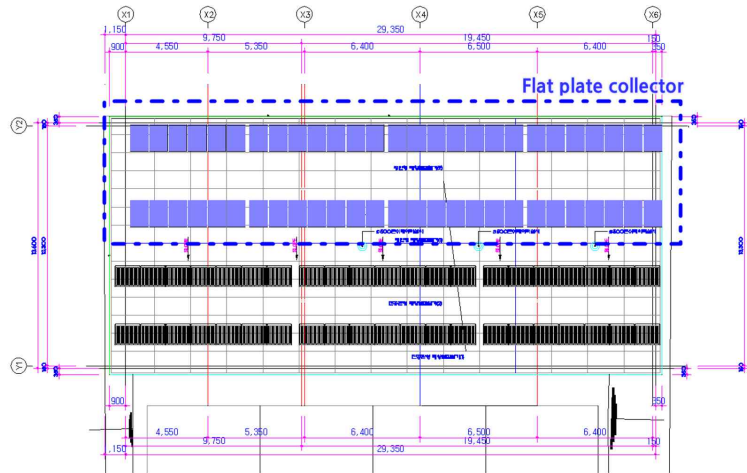
실증시설원예의 기계실 및 상부에 적용된 태양열 집열기를 통해 기계실 북측에 위치한 눈에 음영이 발생될 경우, 이로 인한 주변 농가로부터의 민원이 발생될 가능성이 있을 것으로 판단하여 태양열 시스템 설계시 음영 발생량을 최소화하고자 여러 가지 태양열 시스템 설치 방식에 대한 설계 방안을 도출하였으며 각각의 태양열 집열기 설치 방식에 따른 시간별 음영 분석을 수행하였다.

음영 분석 결과 기존 시설원에 비닐하우스 구조물에 의한 음영 길이와 가장 유사한 태양열 집열기 설치 방식을 선정하여 실증시스템 설계에 반영하였다. 즉 평판형 집열기를 기계실 상부의 온실에 가까운 위치에 배치하고 투명한 부분의 비중이 더 높은 진공관형 집열기를 기계실 상부에서 북측의 눈에 가까운 위치에 배치하는 것으로 결정하였다. 이러한 음영 분석결과를 기반으로 실증시스템 기계실 상부에 태양열 집열기 배치 설계를 포함한 상세 설계를 수행하였으며, 이와 함께 태양열 집열기 및 구조물 하중에 따른 구조 검토도 수행하여 태양열 시스템 설치에 따른 기계실 안정성 영향도 함께 고려하였다.

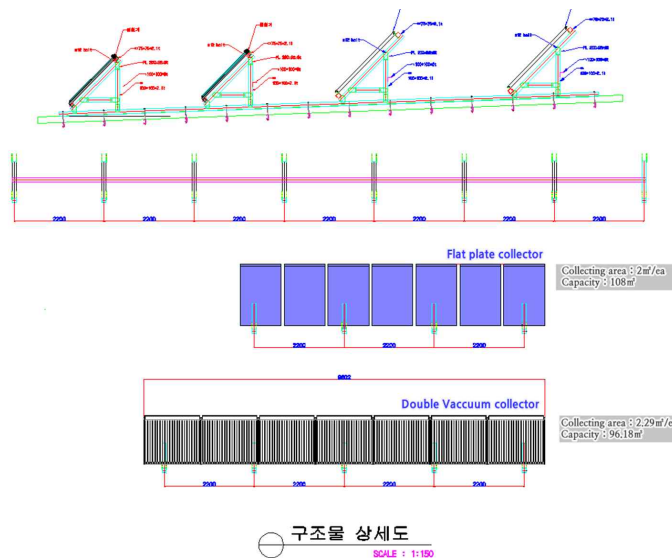
실증시스템에 설치하기 위한 히트파이프 이중진공관형 태양열 집열기는 시험성적서에 따르면 투과면적 기준 단위면적당 출력이 600 W/m^2 이상, 전면적 기준 집열량 $8.5 \text{ MJ/(m}^2 \cdot \text{day)}$ 이상의 성능을 보유하고 있으며 집열기의 크기는 전면적 기준 2 m^2 , 투과면적 기준 1.2 m^2 임, 평판형 집열기는 단위 면적당 출력이 600 W/m^2 이상, 전면적 기준 집열량 $8.61 \text{ MJ/(m}^2 \cdot \text{day)}$ 이상의 성능을 보유하고 있으며 집열기의 크기는 전면적 기준 2 m^2 , 투과면적 기준 1.86 m^2 이다. [그림 4-30]은 태양열 집열설비에 대하여 제작한 상세설계 도면 일부를 나타내었다.



(a)실증시스템 기계실 태양열 집열기 설계 도면(1)



(b)실증시스템 기계실 태양열 집열기 설계 도면(2)



(c)실증시스템 기계실 태양열 집열기 설계 도면(3)

[그림 4-30] 실증시스템 기계실 상부 태양열 집열기 실시 설계 도면

(라) 계간조 및 버퍼조 상세설계

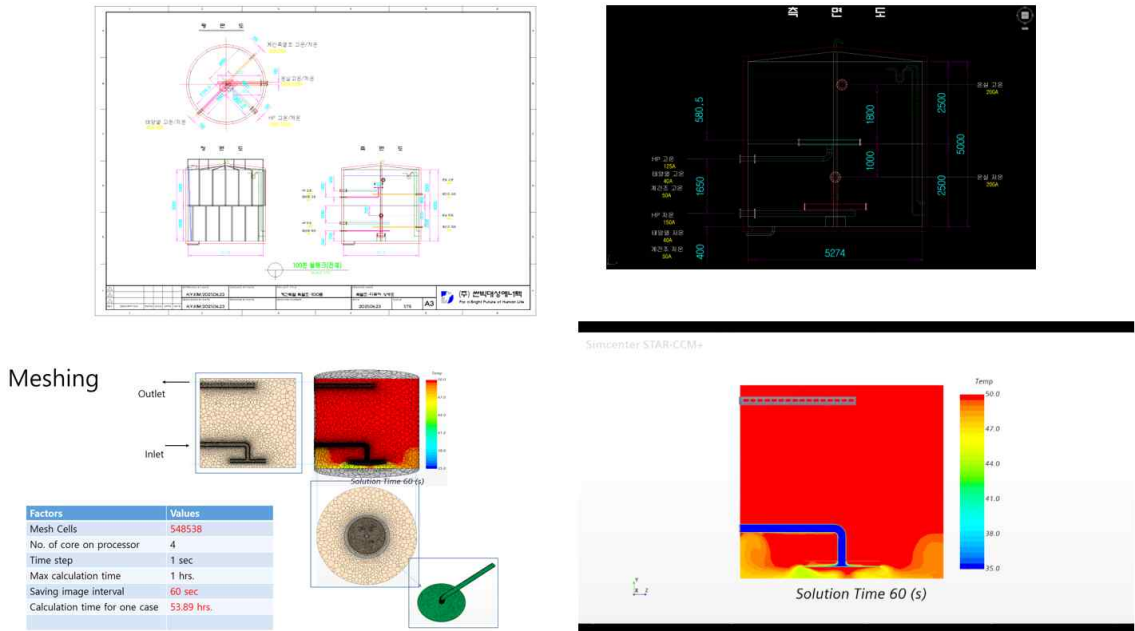
실증시스템에 적용을 위한 계간조 및 버퍼조의 경우 축열조 내부의 열에너지를 효율적으로 사용하기 위하여 온도성층화를 향상시킬 수 있는 디퓨저(Diffuser)가 적용되었다. 계간조 및 버퍼조에 적용된 디퓨저는 원판 디스크 타입의 디퓨저와 슬롯 타입의 디퓨저를 적용하여

계간축열조 및 버퍼조의 온도성층화가 효과적으로 나타날 수 있도록 축열조를 설계 및 구축하였다.

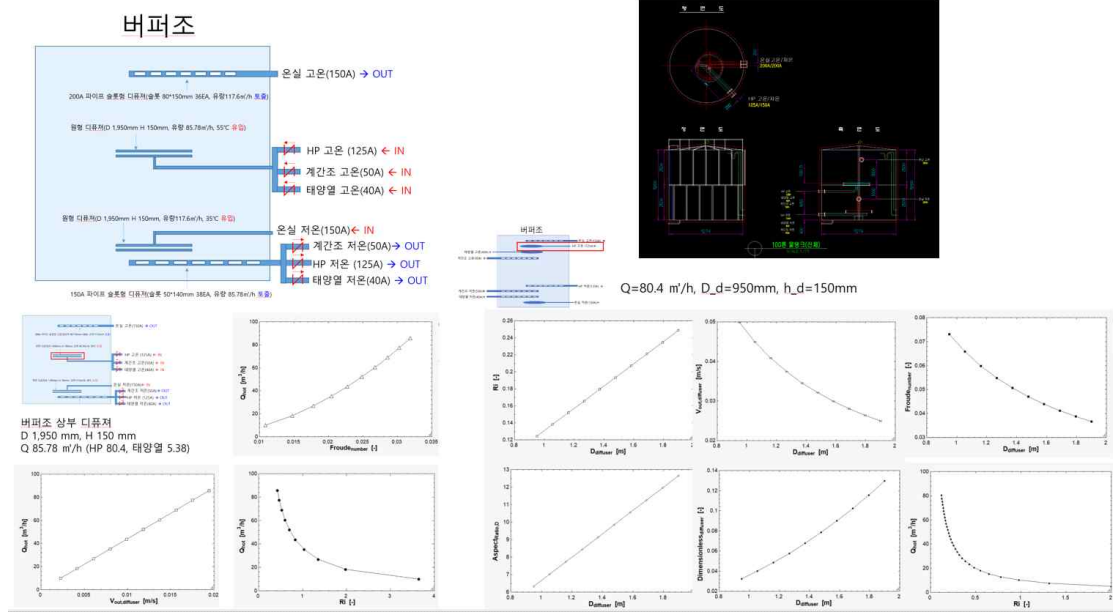
기존 축열조에 적용되는 단순한 원판형 디스크 방식과 달리 본 연구에서는 디퓨저 제작비용을 감소하는 동시에 성층화 형성에 도움을 줄 수 있는 슬롯 형태의 디퓨저를 적용하였음. 버퍼조와 계간조로 유입하는 온수에는 디스크형 디퓨저를 적용하고, 유출하는 온수 배관에는 슬롯형 디퓨저를 적용하였음. 따라서 슬롯 타입 및 원형 디퓨저를 사용하였을 때 탱크 내부 유체의 성층화 형성에 어느 정도 영향을 주는지에 대한 정량적 평가를 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 이용하여 수행하였다.

CFD 해석을 통하여 도출된 해석 결과를 기반으로 계간조 및 버퍼조 내부의 디퓨저 상세 설계를 진행하였으며 계간조의 경우 디스크형 디퓨저 3기, 슬롯형 디퓨저 2기로 설계되었으며 버퍼조의 경우 디스크형 디퓨저 2기, 슬롯형 2기의 디퓨저를 적용하였다.

[그림 4-31], [그림 4-32]와 [그림 4-33]은 버퍼조 내부 온도에 대한 수치계산 관련하여 분석한 내용을 예시로 나타내었다.



[그림 4-31] CFD를 이용한 100m³ 버퍼조 내부 디퓨저가 열성층화 형성에 미치는 영향 분석

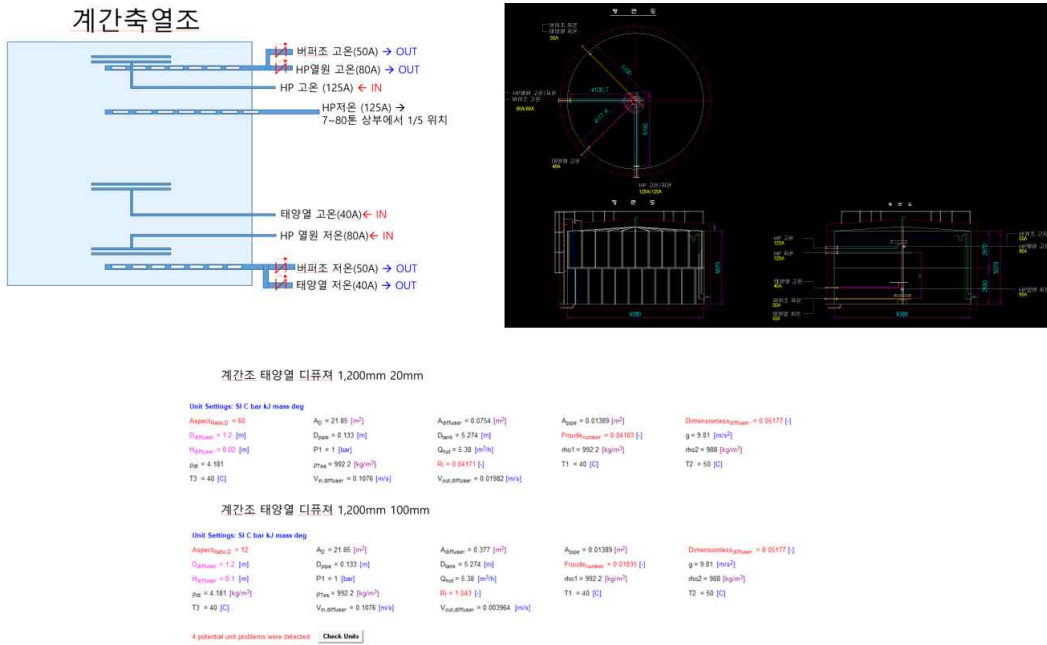


[그림 4-32] 100 m³ 버퍼조 내부 디퓨저 설계를 위한 해석 기법

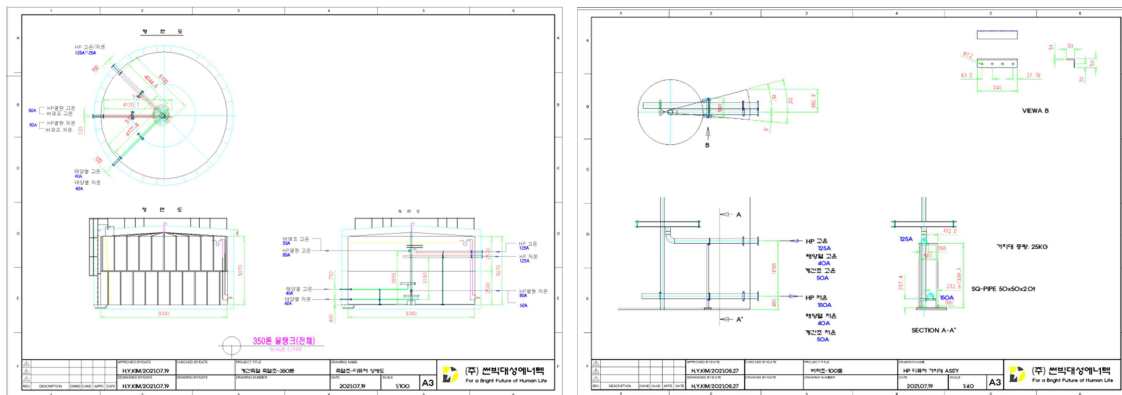
실증시설원에 동절기 난방에너지 공급을 위해 본 연구에서는 하절기 태양열을 통해 획득한 잉여 열에너지를 계절간의 열저장이 가능한 350 m³ 규모의 수축열 탱크 방식의 계간조로 설계하였다.

실증시스템에 적용된 계간조는 계절간 즉 장기간의 열저장을 효율적으로 운영하기 위하여 기존 태양열 시스템에 주로 사용되는 단기 축열조와 달리 외부와의 열손실을 최소화하기 위하여 계간조 상부 및 측면부에는 500 mm, 하부의 경우 300mm의 단열재가 사용되었으며 이와 함께 단기 열저장용인 100 m³ 버퍼조는 150 mm의 단열재를 적용하였으며 계간조 및 버퍼조는 외기에 의한 열손실을 최소화 하기 위하여 기계실 내부에 설치할 수 있도록 시스템을 설계하였다.

실증시스템의 버퍼조 및 계간조에 적용된 디퓨저의 무게가 개당 최대 200 kg 및 4 m 이상임에 따라 탱크 내부에 별도의 디퓨저를 고정하기 위한 구조물을 설계하였으며, [그림 4-34]는 계간조 디퓨저 설치를 위한 구조물을 적용한 설계 도면의 일부를 나타내었다.



[그림 4-33] 350 m³ 계간조 내부 디퓨저 설계를 위한 해석 기법



[그림 4-34] 계간조 및 버퍼조 디퓨저 고정을 위한 지지대 설계

(2) 인프라 구축

(가) 실증시설원에 태양열 열공급 시스템 적용을 위한 지반조사

계간축열기반 태양열 열공급 시스템이 적용될 실증 원예시설은 포항시 북구 흥해읍 망천리 304-3번지에 위치하고 있는 동서네바나나체험농장으로 350m³ 및 100m³의 용량의 계간조 및 버퍼조가 적용됨에 따라 탱크의 무게를 지탱할 수 있는지를 파악하기 위하여 실증 시설원예의 지반 조사가 필요하였으며 지질조사를 수행하였다.

수리 지질학적 특성 조사를 위해 실증시설원예의 길이 방향에 총 3공의 시추 작업을 수행하였으며 그 결과 포항시 북구 흥해읍 망천리 304-3 지반의 경우 매립토층과 퇴적토 층이 심도 16 m 까지 형성되어 있음. 시추 작업이 수행된 3공 모두 심도 30 m 이상에서만 N치 값이 50 이상 도달 되는 것으로 나타났으며, 이에 따라 실증시설원예에 계간축열 기반 태양열 열공급 시스템 적용을 위해서는 반드시 기초 파일 공사가 진행되어야 하는 것으로 판단하였다. 지질조사를 위한 실증지 주변의 위치와 시추작업 모습 그리고 시추주상도 결과서의

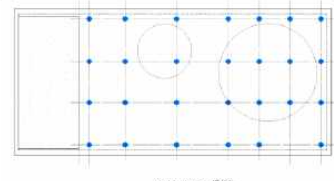
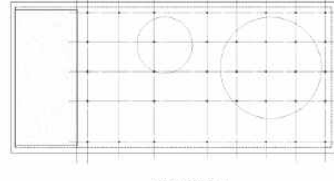
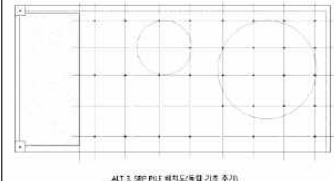
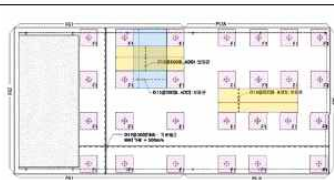
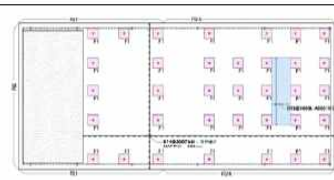
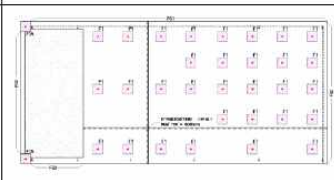
입말뚝)) [그림 4-37]은 적용을 위하여 검토한 기초파일의 특징을 비교한 것이다.

PHC 파일은 실증지 조건상 장비진입로 확보, 인근 철도시설물 영향 등을 고려하여 시공이 어렵다고 판단하였고, SRP에 독립기초를 추가한 모델이 실증지 조건상 가장 적합한 것으로 판단하였으며, 독립기초를 외곽부 하중이 집중되는 곳으로 배치하여 보강영역을 최소화시켰다.

선정된 SRP 말뚝에 대해서 연직 및 수평방향 등에 대한 구조안정성을 검토하였으며, 구조물기초설계기준 해설(2018,03), 건축기초구조설계 기준(2005), 도로교통설계기준 해설(2008) 등의 적용기준을 활용하였다.

말뚝의 허용압축하중 검토 결과는 허용압축응력 213 MPa, 항복(관리)강도는 355 MPa로 나타났으며, 허용 연지지력 예측은 허용연직지지력 481.8 kN, 작용하중 421 kN 나타나 SRP 말뚝은 안전한 것으로 검토되었다. [그림 4-38]은 SRP 말뚝시공기법을 나타내는 개념도이고, [그림 4-39]은 기초설계 도면의 일부를 나타내었다.

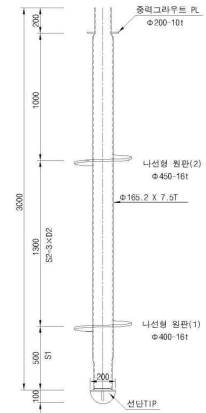
좌굴안정성 검토는 일반적인 건축구조 부재인 기둥과 같은 조건으로서 강과 자체의 강성인 세장비를 고려하여 검토하며, 검토결과 세장비 90.77, 한계세장비 122.68로 나타났고 한계 좌굴하중이 694 kN 으로 사용하중 421 kN 보다 높아 좌굴안정이 확보되는 것을 확인하였다.

ALT 1. PHC PILE	ALT 2. SRP PILE	ALT 3. SRP PILE + 독립기초
		
PHC PILE Φ500 : 27ea	SRP PILE Φ165.2 : 35ea	SRP PILE Φ165.2 : 33ea
		
ALT 1. 기본 배근 및 보강 영역 (PHC 파일)	ALT 2. 기본 배근 및 보강 영역 (SRP 파일)	ALT 3. 기본 배근 및 보강 영역 (SRP 파일 + 독립기초 추가)
기본 파일 보강 외, 보강영역 : 3구간 1.5m*1.8m 높이 지중보 : 4면	기본 파일 보강 외, 보강영역 : 1구간 1.5m*1.8m 높이 지중보 : 4면	기본 파일 보강 외, 보강영역 : 없음 1.5m*1.8m 높이 지중보 : 3면

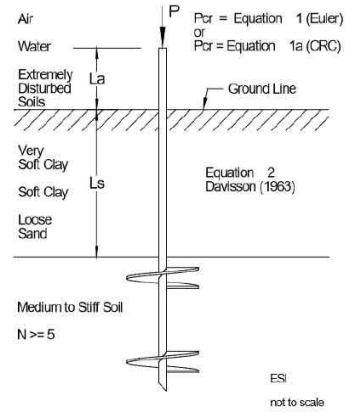
[그림 4-37] 기초파일 비교

위와 같은 안정성 검토를 통해서 기초말뚝 설계를 위한 사용하중은 698 kN/톤으로 지반의 허용지지력 750 kN 이하를 만족하였고, 인발지지력, 침하량, 수평지지력, 수평변위 검토 결과 모두 안정성을 확보하는 것으로 나타났다.

또한 실증사이트 부지 인근에 있는 철도시설물의 안정성영향을 평가를 진행하였으며, 분석은 시공단계별 수치해석을 실시하였고, 실증사이트에 건물하중 작용시 철도의 발생변위는 허용범위 기준에 모두 만족하는 것으로 나타났다. [그림 4-40]를 변위 검토를 위한 수치계산 결과의 일부를 나타내었다. 평가결과 (분석최대값/허용범위(단위:mm)) 고저틀림 -0.048/±4, 방향틀림 -1.772/, 수평틀림 0.009/±3, 꺾기틀림 0/±3 으로 나타났다.

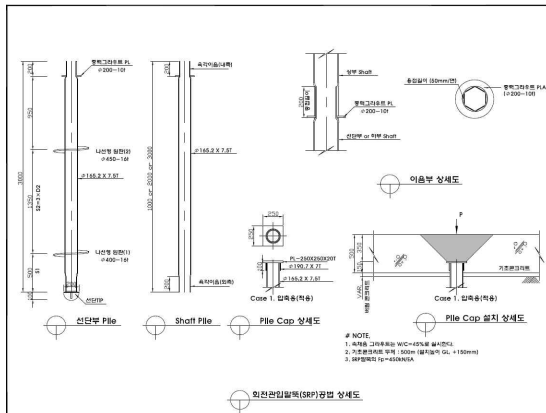


(a)말뚝 선단부

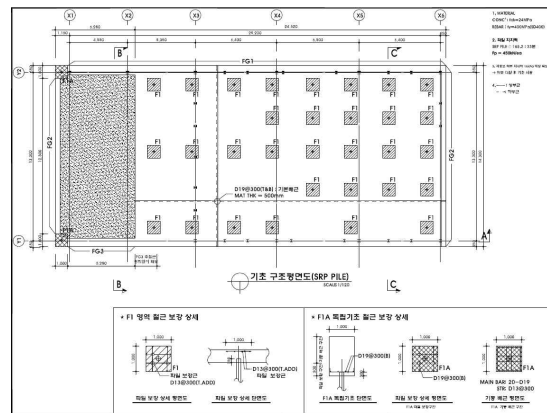


(b)말뚝의 좌굴검토 조건

[그림 4-38] 실증지 기계실 구축을 위한 SRP 말뚝 시공 기법

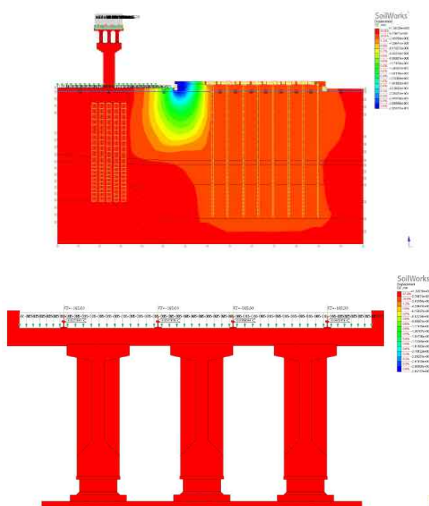


(a)기초말뚝 상세도

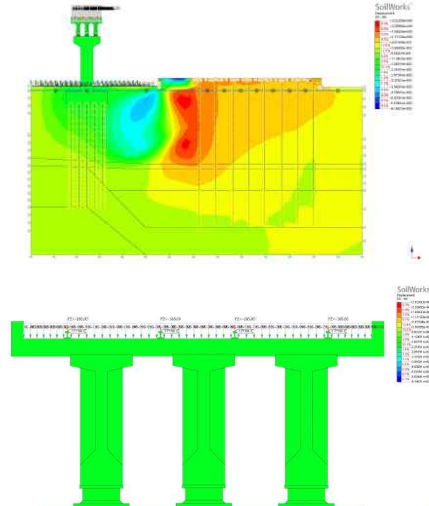


(b)기초말뚝 평면도

[그림 4-39] 실증지 기계실 구축을 위한 기초말뚝 설계 도면



(a)연직변위 검토 결과



(b)수평변위 검토 결과

[그림 4-40] 실증대상지 주변 철도에 대한 변위 수치해석 결과

기계실을 구축하고자 하는 위치의 기초말뚝을 설계한 후 시공을 진행하였으며, [그림 4-41]은 기초 시공의 모습을 시간순서에 따라 나타내었다.

(다) 기계실 설계 및 구축

실증설비가 구축될 기계실은 실증사이트의 유휴 부지가 부족한 것으로 분석되었고, 기존 온실 일부를 철거하여 실증 부지를 확보하였으며, 제한된 실증 부지의 활용과 인근 농사 부지에 음영 등 실증설비로 인한 영향을 최소화할 수 있도록 설계를 진행하였다. 기계실 내부에는 축열조(버퍼조 100 m³과 계간조 350 m³)와 열공급배관 등이 구축되고, 외부 지붕에는 집열기가 설치되므로 기계실의 크기는 축열조의 크기, 집열기의 설치 높이 등을 고려하여 입면과 평면 치수를 설계하였다. 기계실의 설계 면적은 [그림 4-42]에 보듯이 396.24 m² (약 120평)이며 너비 29.3 m, 폭 13.6, 높이 7.2m로 설계하였으며, 외장 판넬은 벽체 100 mm, 지붕 150 mm 두께의 조립 샌드위치 패널로 설계하였다. 기계실의 크기와 지붕에 설치할 태양열집열기 등을 고려하여 기계실 구조에 대한 안정성 검증을 구조 전문기업을 통해서 구조검토를 진행하였으며, 구조검토 방법은 구조 해석프로그램(MIDAS) 이용하여 설계한 부재의 구조변형 등을 검토하였고, [그림 4-43]는 구조 검토한 내용의 일부를 나타낸 것이다.

구조검토를 바탕으로 기계실 기둥과 보에 대한 설계요약은 다음과 같으며, [그림 4-44]은 기계실의 설계도면 일부와 기계실이 구축되는 모습을 시간 순서에 따라 나타내었다.

- 기계실 기둥 : H-200X200X8X12(SM355), H-194X150X6X9(SS275), L-100X7(SS275) 부재를 사용
- 보 : H-300X150X6.5/9(SS275), H-450X200X9/14(SM355), H-300X150X6.5/9(SS275), H-250X125X6/9(SS275), C-125X65X6/8(SS275), L-75X6, L-100X7(SS275) 부재 사용



(a) 말뚝기초 허용지내력 현장 시험



(b) 말뚝기초 시공



(c) 말뚝기초 내부 몰탈 충전



(d) 말뚝기초 시공 후



(e) 매트기초 철근배근



(f) 철근배근 검수

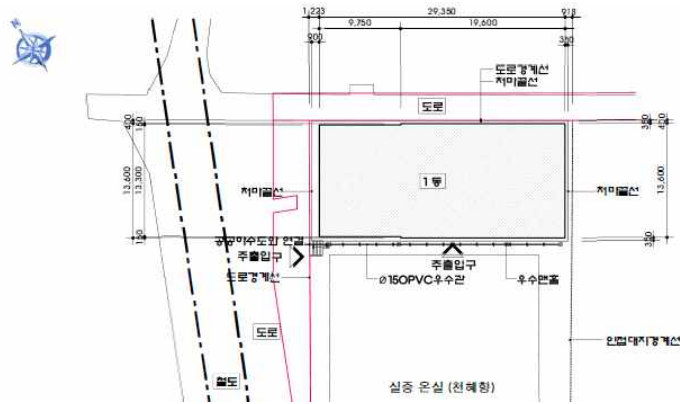


(g) 콘크리트 타설



(h) 매트기초 시공 후

[그림 4-41] 실증대상지 기계실 구축을 위한 기초 시공 모습



[그림 4-42] 기계실 부지 치수



[그림 4-43] 기계실 구조 검토

(라) 열공급시스템용 상수공급을 위한 상수도 설계 및 구축

실증설비의 열원 공급 용수와 열원공급시스템의 운영으로 인한 온수 증발에 따른 보충수가 필요하나 실증 시설원예에 상수 공급 시설이 없어 상수도 시설 구축을 구축하였다. [그림 4-45]와 [그림 4-46]에는 상수도 관로 단면도 모습과 공사를 위한 부지 주변을 분석하였던 내용의 일부를 나타낸 것이다.

상수도 신설배관 길이는 기존 상수도 원수배관으로 부터 실증설비 까지 약 270 m, 상수 배관 두께는 32 mm, 상수도 매립 을 위한 토사 깊이 0.8 m, 너비 0.6 m 이다.

상수도 신설 공사구간은 인근 철도로부터 약 4.5 m 이격시켜 1구간, 2구간, 3구간으로 나눠 연속 공사를 진행하였다.

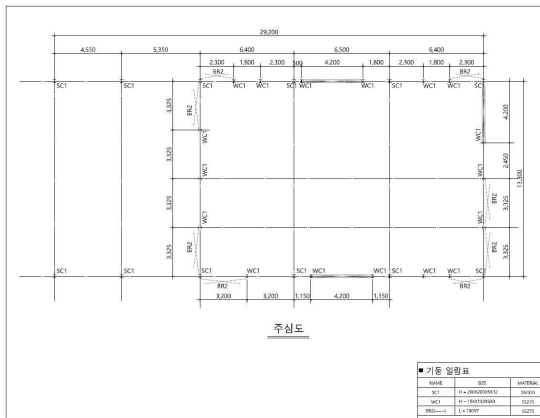
상수도 신설 공사에 따른 철도에 미치는 구조영향평가를 수 구조 전문기업(바른지반연구소)을 통해서 수행하였으며, 평가 결과 철도 교각 구조물의 근입 깊이가 3.22 m이며 강관 말뚝으로 지지되고 있어 철도의 굴착안정성에는 문제가 없는 것으로 평가되었다.

(마) 수전설비 설계 및 구축

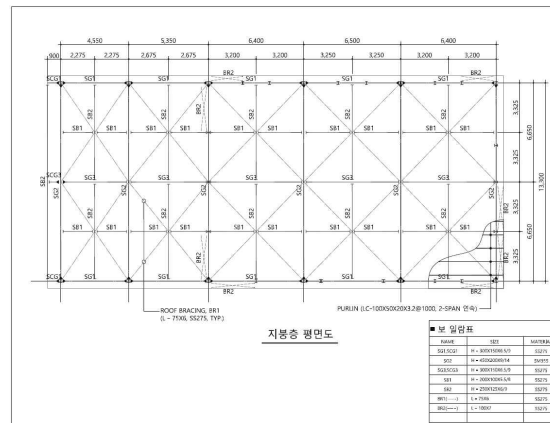
실증 열공급 시스템은 히트펌프 등 전기를 이용하는 설비로 구성이 되어 있으며 이의 운영을 위해서는 기존 시설원예에 적용된 20 kW 저압으로는 시스템의 가동이 불가할 것으로 예상됨에 따라 실증시스템을 위한 별도의 수전설비 증설을 수행하였다.

실증 시스템의 경우 45 RT 급 공기열원 히트펌프 2기, 45 RT 급 복합열원 히트펌프 1기, 다수의 펌프, 전동밸브 및 제어장치가 구현됨에 따라 전체전력수요 200 kW의 전력 공급이 필요할 것으로 분석되었다.

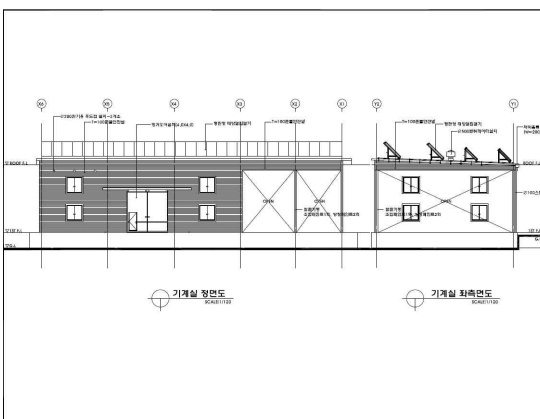
실증시설원에 주변에는 농가 및 상업용 시설이 존재하지 않아 별도의 전력증설을 위한 전신주 도입이 필요하였으며 이에 한국전력에 전기 증설 및 전신주 신규 증설 공사를 요청하여 수행하였다. [그림 4-47]과 [그림 4-48]에 수전설비 시공도와 설비가 구축되어 가는 모습을 나타내었다.



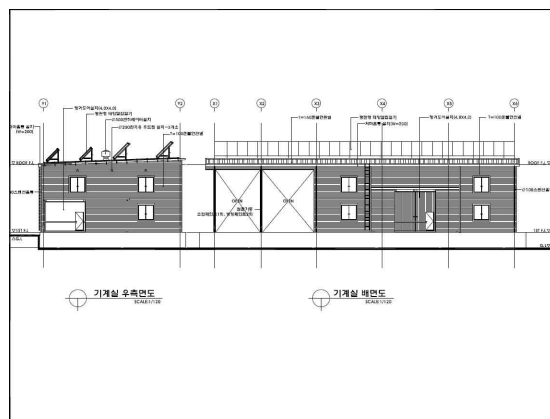
(a)주심도



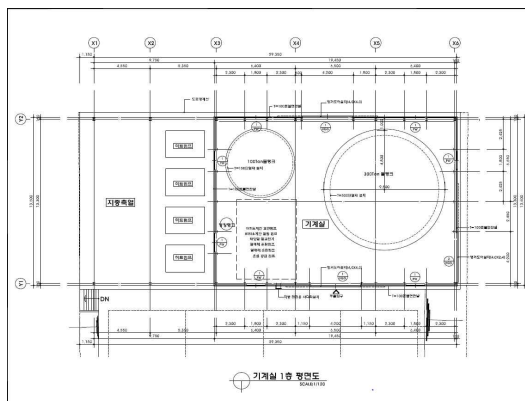
(b)지붕층 평면도



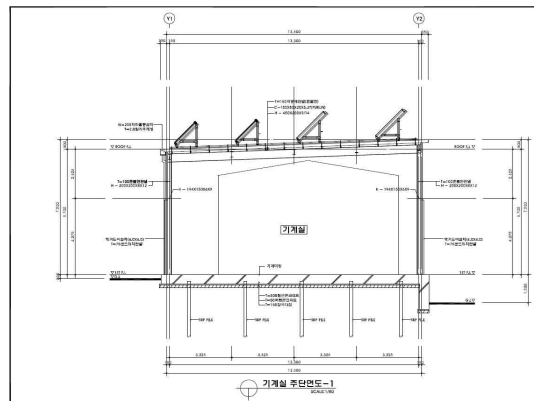
(c)정면도/좌측면도



(d)우측면도/배면도



(d)1층 평면도



(e)주단면도



(f)기둥 철골구조물 설치



(g)보 철골구조물 설치



(h)벽체 패널 설치



(i)지붕 패널 설치

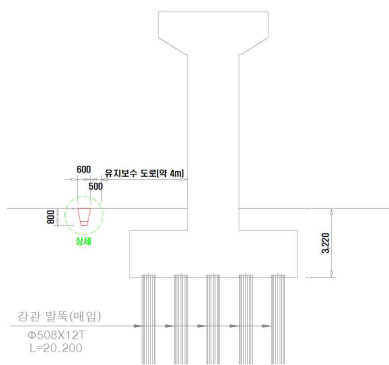


(j)기계실 설치 후 (서측)

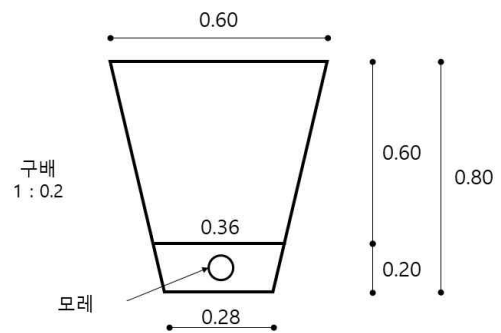


(k)기계실 설치 후 (동측)

[그림 4-44] 실증 시설원에 기계실 설계 및 구축

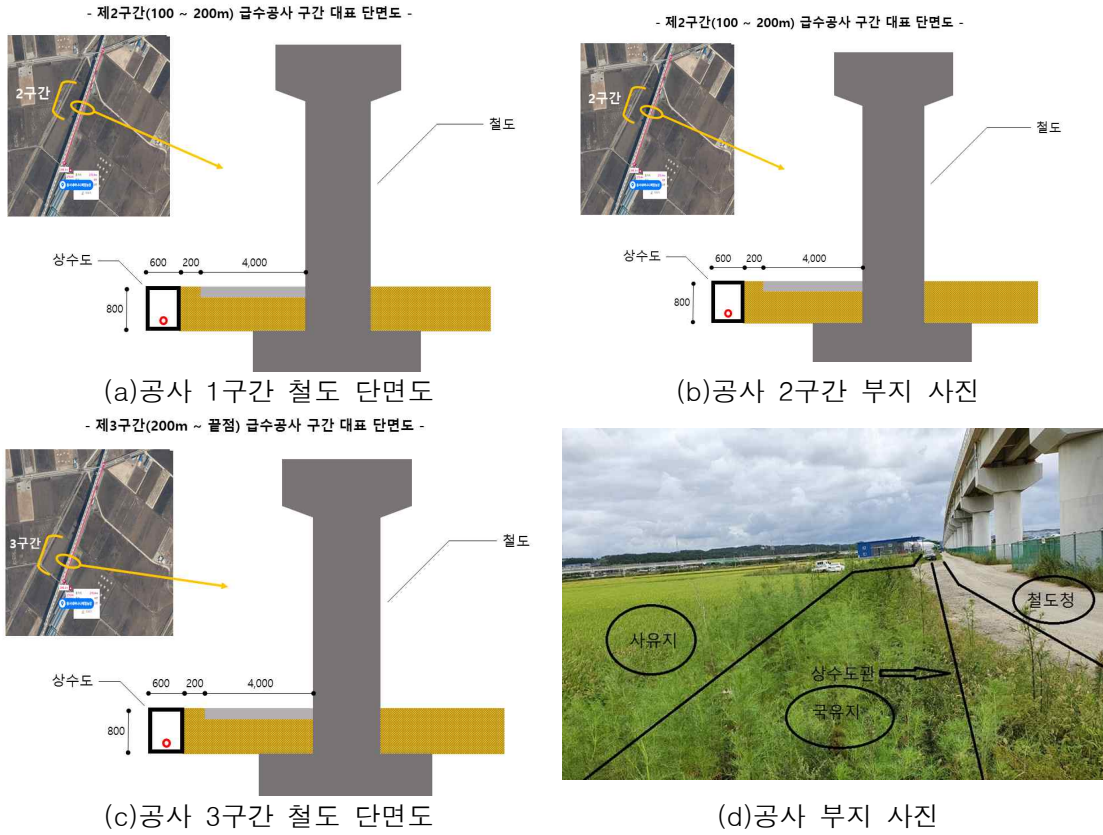


(a)토사구간 위치

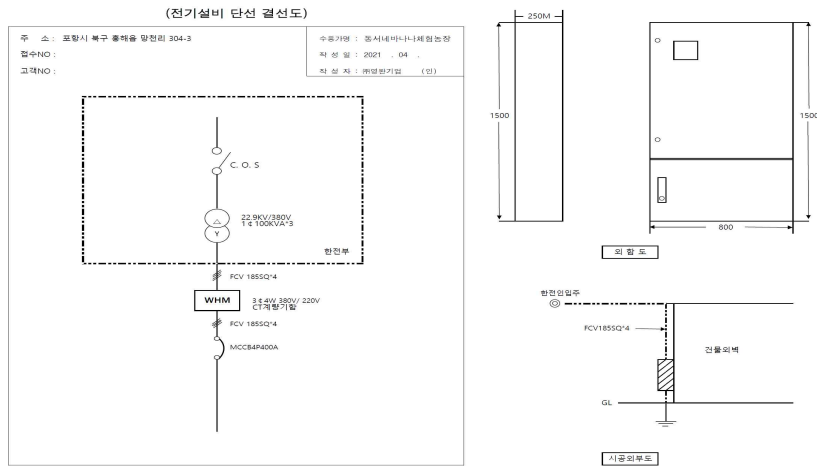


(b)토사구간 단면도

[그림 4-45] 상수도 관로 단면도



[그림 4-46] 상수도 신설 공사구간(안)



[그림 4-47] 200 kW 수전설비 증설 단선 결선도 및 시공도



(a)전력증설용 전신주 설치



(b)변압기 설치



(c)외부 분전함 설치



(d)내부 분전함 설치

[그림 4-48] 200 kW 수전설비 증설

(3) 열공급시스템

(가) 태양열 집열기 구축

연구과제 연차별 연구비의 동일 배분 특성상 연차별 연구비 활용 범위의 한계로 1단계(1차 및 2차년도)연구의 실증설비 구축 과정에서는 평판형 태양열 집열기를 설치하였고, 진공관형 태양열 집열기는 2단계(3차년도) 연구 시작과 동시에 기계실 상부 평판형 태양열 집열기 후면에 추가적으로 설치되었다.

평판형 태양열 집열기는 기계실 상부에 협동연구기관인 (주)에스앤지에너지의 평판형 태양열 집열기 50 매가 경사각 45°로 설치되었으며, 실증시스템 기계실 상부 지붕은 샌드위치 패널 마감 형태로 평판형 태양열 집열기 설치를 위해 별도의 구조물 및 체결 공법을 적용하였으며 기계실 상부의 지붕 마감재와는 관통볼트 및 용접을 통해 구조물을 고정하는 방법을 채택하였다. <표 4-11>은 실증에 적용된 태양열 집열기의 주요 사양이며, [그림 4-49]는 집열기 시험성적서의 일부를 나타낸 것이다.

집열설비는 기계실 옥상에 설치되었으며, 구조물 고정에 의한 기계실 상부 지붕 누수 방지를 위해 고무방수 패드, 볼트 캡 및 실리콘 처리를 통해 빗물 침투를 방지할 수 있는 시공 방법으로 설치하였다. [그림 4-50]에는 적용된 공법을 간략히 나타낸 것이며, <표 4-12>에는 태양열 집열설비가 기계실 옥상에 설치되는 모습을 시간순서에 따라 나타내었다.

<표 4-11> 태양열 집열기 주요 사양

구분	설치규모		구조	주요자재내역
	집열기	용량		
평판형집열기	2m ² /1매	108m ² (50매)	9직렬/ 6병렬	평판형 태양열집열기 : 50매 (1,000*2,000*76mm)
이중진공관 히트파이프식 (상변화식) 집열기	2.29 m ² /1매	96 m ² (42매)	7직렬/ 6병렬	이중진공관 히트파이프식(상변화식) 집열기 : 42매 (1,400*1,635*116mm)



시험결과

성적서 번호 : KIER-18-4-002호
페이지(3) / 총(12)



시험결과

성적서 번호 : KIER-18-4-001호
페이지(3) / 총(12)



1. 제품 사양

- 제조회사 : 세한에너지(주)
- 모델명 : SHCHP1522

1.1 일반 사양

항목	내용
형식	이중진공관 상변화식 집열기(히트파이프 제품)
집열기 규격	규격 : 가로 1 400 mm, 세로 1 635 mm, 높이 116 mm
면적	전면적 : 2.29 m ² 부피면적 : 1.46 m ²
작동 온도	최대 180 ℃ 적정 (10 ~ 80) ℃ 최소 -30 ℃
설계 기준	열매체 유량 최대 0.07 kg/s 적정 (0.04 ~ 0.05) kg/s 최소 0.03 kg/s 최대사용압력 785 kPa
설치 권장사항	설치 각사각 15° ~ 90° 사용 열매체 부동액

1.2 부품 사양

구분	부품명	사양	비고
메니폴드	외장함	재질 : 알루미늄, 두께 2.0 mm 규격 : 길이 1 328 mm, 너비 130.5 mm, 높이 116 mm	봉입처리(sealing)
	주관	열매체관 : 불린(외경 540 mm, 두께 1.5 mm, 길이 1 390 mm, 수량 1) 연결구 : 불린(외경 522 mm, 두께 0.8 mm)	실리콘
진공관 집열부	단열	구분 : 세경 두께(mm) 밀도(kg/m ³) 내열온도(℃) 1차 : 글라스울 30 110 ~ 120 300 0.030 ~ 0.047	열전도율(W/m·K)
	부피재	재질 : 아연-알루미늄합금, 두께 2.0 mm 규격 : 외경 547 mm, 내경 537 mm, 길이 1 500 mm, 수량 22	투과율 : 91 %
	흡열판	재질 : 알루미늄, 두께 0.4 mm 규격 : 537.0 mm, 길이 1 400 mm, 수량 22 도장 방식 : 유리 위 선택흡수막 증착 흡열판제조방식 : 관통입□ 도관침탈□ 담출제상입□ 관탈식□ 기타	도장재 : PU 991E 코팅 흡수율 : 94±1 % 방사율 : 4.0±1 %
	저관	재질 및 용량 : 동관 규격 : 총길이 620.0 mm, 두께 0.8 mm, 길이 60 mm, 수량 22 기화부 59.0 mm, 두께 0.5 mm, 길이 1 400 mm, 수량 22	
진공관 홀더부	홀더	재질 : 스테인리스	
	홀더지지	재질 : 알루미늄 규격 : 길이 1 328 mm, 너비 78 mm	

KIER-QP-22-01-B(Rev.11)

1. 제품 사양

- 제조회사 : (주)에스엔지에너지
- 모델명 : SNG-CS1

1.1 일반 사양

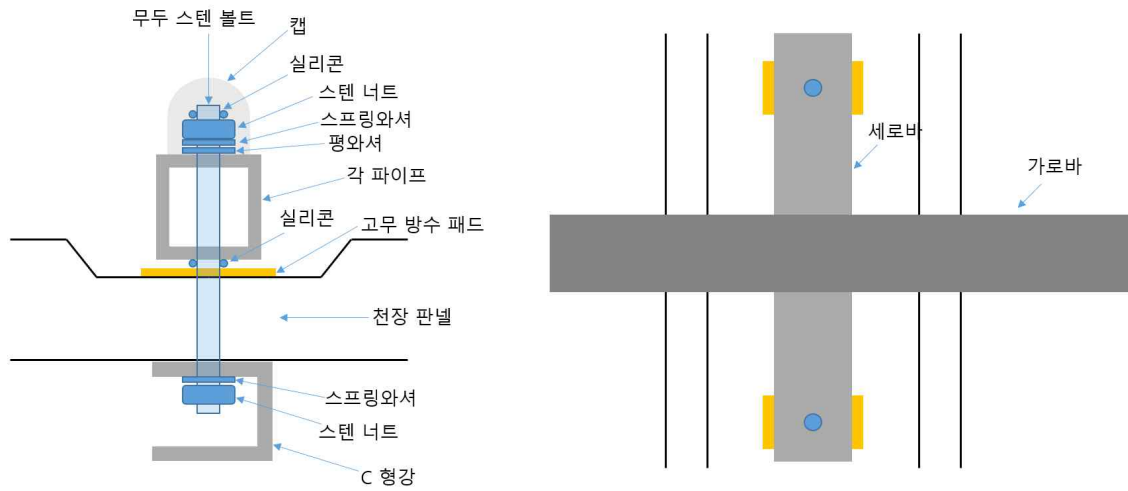
항목	내용
형식	평판형 집열기
집열기 규격	규격 : 가로 1 000 mm, 세로 2 000 mm, 높이 76 mm
면적	전면적 : 2.0 m ² , 부피면적 : 1.66 m ²
설계 기준	작동 온도 최대 150 ℃ 적정 (10 ~ 80) ℃ 최소 -30 ℃ 열매체 유량 최대 0.1 kg/s 적정 (0.03 ~ 0.06) kg/s 최소 0.02 kg/s 최대사용압력 980 kPa
설치 권장사항	설치 각사각 15° ~ 60° 사용 열매체 프트필렌글리콜수용액

1.2 부품 사양

구분	부품명	사양	비고
외장함	제조방식	프래일 조립	봉입처리(sealing)
	판	재질 : 알루미늄 AL6063 T5, 두께 : 1.3 mm, 이중벽 구조	투과율 : EDPM & 실리콘
집열부	폼지,바닥	재질 : 알루미늄, 두께 : 0.35 mm	연결구 : EDPM
	연결구	불린, 외경 : 22 mm(인축냉각 원화 가변형흡수막 2개(상부))	
	투과재	재질 : 세정분 강화유리 규격 : 가로 994 mm, 세로 1 994 mm, 두께 3.2 mm, 수량 1개	투과율 : 94.5 %
	흡열판	재질 : AL1060 H18 규격 : 가로 950 mm, 세로 1 950 mm, 두께 0.4 mm, 수량 1개 도장 방식 : 흡열판 위 선택흡수막(Magnetron sputtering) 흡열판제조방식 : 관통입□ 도관침탈□ 담출제상입□ 관탈식□ 기타	도장재 : 선택흡수막 흡수율 : 95 % 방사율 : 5 %
저관	주관	재질 : 동관 규격 : 외경 522 mm, 두께 1.2 mm, 길이 1 050 mm, 수량 2개	
	단열	재질 : 동관 규격 : 외경 48 mm, 두께 0.8 mm, 길이 1 882 mm, 수량 13개	
단열재	구분	세경 두께(mm) 밀도 내열온도(℃) 열전도율(W/m·K)	
	측벽	Polyester 15 30 kg/m ³ 300 0.032	
	바닥	Polyester 40 30 kg/m ³ 300 0.032	





KIER-QP-22-01-B(Rev.11)

[그림 4-49] 실증시스템 적용 이중진공관 및 평판형 태양열 집열기 세부 사양



[그림 4-50] 평판형 태양열 집열기 구조물 고정 공법

<표 4-12> 실증시스템 태양열 집열기 설치 진행 모습

공정	추진내용	시공사진	
기초패드 작업	시공기초작업 옥상 슬라브 천공작업 - 14mm*120공 방수패드작업 : 20m 기초지지대 접합작업 - M14/250mm*120공		
구조물 설치	재질 : 포스맥, 스틸아연 용융도금 기초베이스 : 75*75 집열기거치대 : 100*100 전/후면지지대 : 75*75 기타사향 - 구조안전검토서 : 적합		
집열기 설치	집열기 형식 : 평판형 집열면적 : 108㎡ 1열/2열 : 9매*3섹터 직렬 경사각:45도 기타사향 - 대상지 풍압고려 집열기 체결 브라켓 3중 보강		
배관작업	태양열 집열부 - 40A/32A/25A/15A 기계실1차 - 집열부→기계실 라인 기계실2차 - 기계실 내부 센서류 및 에어벤트 구축 - 집열기6p, 1차:2p 2차:2p		

(나) 계간조 및 버퍼조 구축

탱크방식으로서 체적 350 m³ 용량이 계간조는 장기간 열을 저장해야 하는 특성상 열손실 저감이 중요하며 150 m³ 버퍼조에 비하여 더욱 강화된 단열을 적용하여 500 mm 단열재 및 증발에 의한 열손실 감소를 방지하기 위한 증기 트랩을 적용하였다. 또한 100 m³ 버퍼조 역시 단기 저장조의 역할을 수행해야 하므로 열손실을 고려하여 100 mm의 고무발포 보온 단열재를 적용하였다.

실증시스템에 적용된 350 m³ 계간조 및 100 m³ 버퍼조는 실증시스템의 외관 및 열손실 방지 차원에서 기계실 내부에 위치하도록 설계 구축하였다.

본 실증에 적용된 계간조 및 버퍼조 탱크는 일반 용접식 탱크 방식이 아닌 무용접식 볼트 조립식 원통형 타입이며 부식 방지 및 유지관리 편의성 증대를 위하여 재질은 STS304 재질을 채택하였다.

계간조 및 버퍼조 내부에는 탱크 내부의 열 에너지 사용을 극대화를 위해 다수의 디스크형 디퓨저 및 슬롯형 디퓨저가 적용되었으며, 디퓨저의 떨림 진동 및 이탈 방지를 위해 각각의 디퓨저 설치용 구조물 설계하여 장착하였다.

기계실 내부에 설치된 계간조 및 버퍼조의 열손실 방지를 위한 단열재 시공은 탱크 내부의 물 보충 및 시운전 이후 누수 테스트를 장기간 걸쳐 누수 및 크랙 유무 시험을 장기간 수행하였으며 누수 테스트가 완료된 2022년 7월 이후 계간조 및 버퍼조의 단열 시공을 완료할 수 있었다.

[그림 5-51]은 계간조와 버퍼조가 기계실 내부에 설치되는 모습을 시간에 따라 간략하게 나타낸 것이다.



(a)계간조 350ton 설치(외부)-2



(b)버퍼조 100ton 설치(내부)



(c)버퍼조 100ton 설치(외부)-1



(d)버퍼조 100ton 설치(외부)-1



(e)버퍼조 디퓨저(150A 출수)-외부



(f)버퍼조 디퓨저(150A 출수)-내부



(g)버퍼조 디퓨저(125A 입수)-외부



(h)버퍼조 디퓨저(125A 입수)-내부



(i)버퍼조 디퓨저(200A 출수)-외부



(j)버퍼조 디퓨저(200A 출수)-내부



(k)버퍼조 디퓨저(200A 입수)-외부



(l)버퍼조 디퓨저(200A 입수)-내부



(m)계간조 디퓨저(80A 입수)-외부



(n)계간조 디퓨저(80A 입수)-내부



(o)계간조 디퓨저(80A 출수)-외부



(p)계간조 디퓨저(80A 출수)-내부



(q)계간조 디퓨조(40A 입/출수)-외부



(r)계간조 디퓨조(40A 입/출수)-내부

[그림 4-51] 계간조 및 버퍼조 설치

(다) 기계실 내부 열공급 배관 시스템 구축

실증시스템 기계실 내부의 경우 온실, 평판형 태양열 시스템, 진공관형 태양열 시스템, 얇은 지중축열, 계간축열조, 버퍼조, 펌프 등과의 온수 이동을 위한 다양한 형태의 열배관이 설치되었으며, 태양열 집열을 위한 배관은 강관을 적용하였고, 기계실 내부의 배관은 외관 및 관리의 편리성으로 흑관으로 시공하였다.

얇은 지중축열 GTES(300 m³)는 장기 및 단기에 걸쳐 열저장 후 동절기 난방 부하가 발생하면 저장된 열을 직접 시설원예에 공급하거나 복합열원 히트펌프의 열원으로 사용할 수 있도록 설계하였으며, 배관은 수평형은 HDPE, 수직형은 동관을 적용하였다.

기계실 내부 배관의 위치는 작업자 및 관리자의 이동 편의성을 고려하여 중량의 펌프 및 열교환기를 제외한 모든 배관을 2 m 높이에 별도의 거치대를 설계 및 제작하여 배관 시스템을 구성하였다. 실증시스템 1단계 구축 항목으로 공기열원 히트펌프 45 RT 1기가 실증시스템에 현재 실증지에 설치가 되어 있으며, 3차년도 2단계 연구에서 공기열원 히트펌프 45 RT 1기, 복합열원 45 RT 1기가 설치될 수 있도록 배관망을 구성하였다.

실증 시스템의 실내 및 실외 열공급 배관은 열손실 방지를 고려하여 모든 배관에 50mm 우레탄 단열재를 활용하여 단열 작업을 수행하였다.



(a)순환펌프 설치



(b)열공급배관 설치(1)



(c) 열공급배관 설치(2)



(d) 열공급배관 설치(3)



(e) 열공급배관 설치(4)



(f) 공기열 히트펌프 및 배관 설치(1)



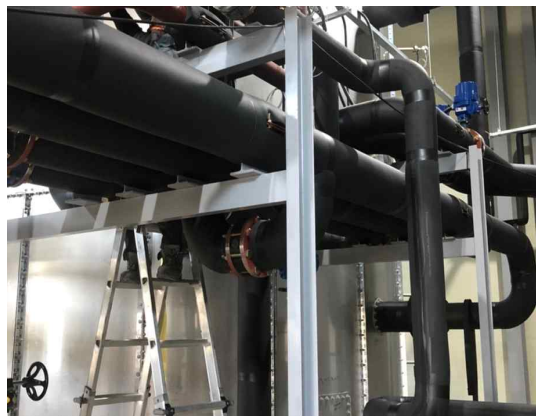
(g) 공기열 히트펌프 및 배관 설치(2)



(h) 공기열 히트펌프 및 배관 설치(3)



(i) 기계실 내부 배관망 단열재 적용(1)



(j) 기계실 내부 배관망 단열재 적용(2)



(k)실증설비 외관(1)



(l)실증설비 외관(2)



(m)실증설비 외관(3)



(n)실증설비 외관(4)

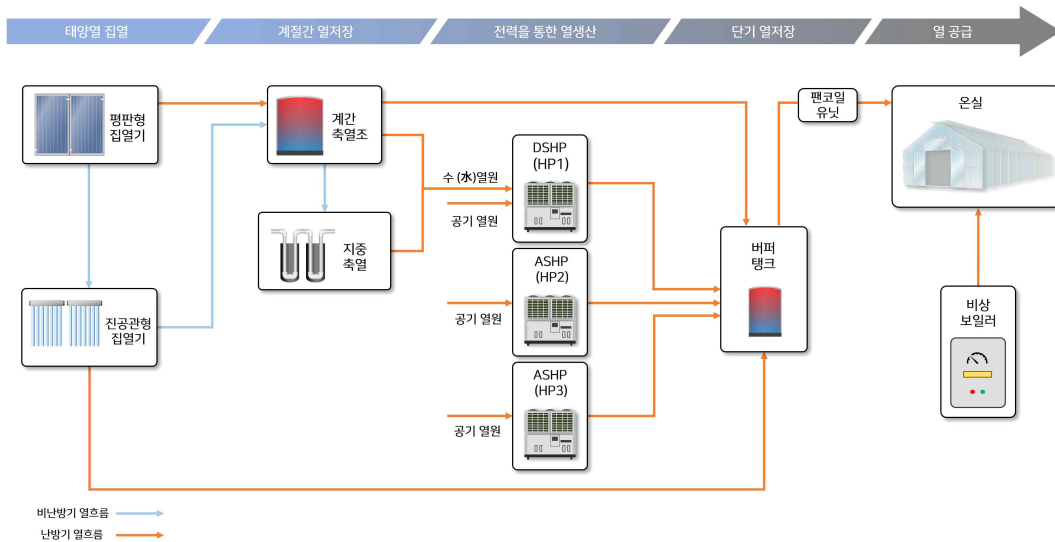
[그림 4-52] 실증시스템 기계실 내부 및 외부

[그림 4-52]는 기계실 내부에 열공급 배관 등이 설치되는 모습과 외관의 모습을 나타낸 것이다.

(4) 운영관리제어시스템

(가) 모니터링 및 제어 시스템

본 실증모델인 태양열 계간축열 히트펌프 열공급시스템의 열 흐름도는 [그림 4-53]과 같다. 비난방기에는 평판형 집열기와 진공관형 집열기가 직렬로 연결되어 생산된 열을 계간조, 얇은지중축열, 버퍼조에 저장한다. 계간조부터 열을 저장하고 이후에 계간조의 온도가 어느정도 올라가면 계간조로부터 버퍼조로 열을 이송할 수 있도록 하였다. 난방기에는 버퍼조와 계간조에 저장된 열을 우선적으로 활용하여 온실 난방을 진행한다. 온실 난방 시 온수는 항상 버퍼조에서 공급되도록 운영된다. 온실로 열공급 방식은 팬코일유닛 (이하 FCU)을 활용한 공기-물 열교환 방식이다. 계간축열조와 지중 온도조건에 따라 3종의 히트펌프 (복합열원히트펌프 1대, 공기열원 히트펌프 2대)를 구동하여 버퍼조로 생산한 열을 공급한다.



[그림 4-53] 실증 운영 시스템 열 흐름도

시스템 운영, 제어를 위한 전체 운전 모드 및 루프별 하위제어는 [그림 4-54]와 같다. 비 난방기는 3종류의 상위모드 (NH-1, NH-2, NH-3)로 구성되어 있으며, 난방기에는 총 7종류의 상위모드 (정규모드 H-1, H-2, H-3, H-4, H-5, H-6, 비상모드 E-1)로 구성이 된다.

본 제어 알고리즘에 활용된 기호와 설명은 다음과 같다.

- NH: 비난방기
- H: 난방기
- SOL1: 진공관형 집열기
- SOL2: 평판형 집열기
- STES: 계절조
- BT: 버퍼조
- GTES_Hor: 수평형 얇은 지중축열 (이하 수평형 얇은GTES)
- GTES_Ver: 수직형 얇은 지중축열 (이하 수직형 얇은GTES)
- WSHP: 복합열원 히트펌프의 수열원 운전
- ASHP: 공기열원 히트펌프 및 복합열원 히트펌프의 공기열원 운전

모드와 세부 루프는 객체지향형 모드-클래스 형식으로 프로그래밍 되었으며, 개발 알고리즘은 PLC&MCCB 패널 하드웨어로 구현이 되었다. PLC에서의 실시간 데이터 및 설정값을 웹 기반 HMI로 통신이 되어 동기화하였으며, HMI로 제어 설정값 변경이 가능하도록 구현하였다.

각 모드 운영 및 모드 간 변경조건은 if~ else 기반의 조건문에 의거한 규칙기반 제어가 적용되었고, 클래스 내 제어는 규칙기반 제어와 설정값 기반의 PID제어가 필요조건에 맞게 적용되었다.

태양열 계간축열 히트펌프 열공급시스템
상위 운전모드(NH-1~3, H1~4) 및 루프별 하위제어

기간	상위 모드	태양열 집열루프 (하위제어)	축열조-히트펌프 루프 (하위제어)	부하 루프 (하위제어)	유지보수 루프 (하위제어)
비난방	NH-1	SOL1/SOL2 → STES	-	-	Anti-corrosion Anti-freeze
	NH-2		STES → BT	-	
	NH-3		STES → GTES_Ver	-	
난방	H-1	SOL1 → BT SOL2 → STES	STES → BT	BT → LOAD	Anti-freeze
	H-2		STES (30~40°C) → GTES_Hor + N x ASHP → BT		
	H-3		GTES_Hor → WSHP → BT		
	H-4		GTES_Ver → WSHP → BT		
	H-5		STES → WSHP + N x ASHP → BT		
	H-6		N x ASHP → BT		
	E-1		N _e x ASHP → STES		

* N x ASHP: 공기열원히트펌프 대수제어 * N_e: 1 or 2

[그림 4-54] 전체 운전 모드 및 루프별 하위제어

【비난방 기간 상위 운전 모드】

비난방 기간의 상위운전모드에 대한 개략적인 계통도를 [그림 4-55]에 나타내었다. 비난방 기간 동안의 운전모드는 NH-1, NH-2 그리고 NH-3 등으로 구성하였다.

◦ **NH-1 모드 : 계간조 축열**

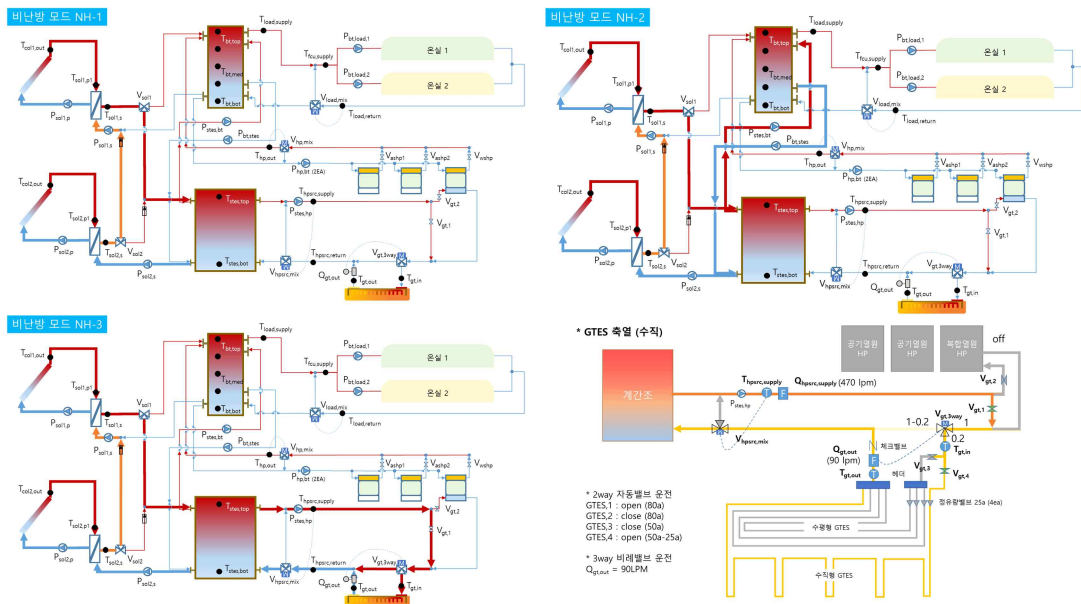
시작조건은 운전자가 비난방기로 설정하면 시작이 되며, 모드 내 실행 클래스로는 집열기 2종 모두 계간조로 축열하는 클래스가 있다. NH-1모드의 목적은 계간조의 온도를 2종의 집열기에서 집열된 열을 안정적이고 지속적으로 활용하여 저장하는데 있다. NH-2 모드 (버퍼조 축열)로 넘어가는 조건은 계간조 상부의 온도가 최대 설정값 (85°C) 초과이면서 버퍼조 상부온도가 버퍼조 최대 설정 값 (80°C) 이하인 경우이다. NH-3 모드 (수직형 얇은GTES)로 넘어가는 조건은 계간조 상부의 온도가 계간조 최대 설정값 (85°C) 초과이면서 버퍼조 상부 온도가 버퍼조 최대 설정값 (80°C)을 초과하는 경우이다.

◦ **NH-2 모드 : 버퍼조 축열**

시작조건은 NH-1의 조건문이며, 모드 내 실행 클래스로는 집열기 2종 모두 계간조로 축열하는 클래스와 계간조의 열을 버퍼조로 보내는 클래스로 구성된다. NH-2모드의 목적은 계간조의 축열상태가 목표대로 높아진 경우, 계간조에서 버퍼조로 열을 이송하여 버퍼조의 축열상태를 높이는데 있다. 이 때, NH-1 모드로 회귀하는 조건문은 계간조 열을 버퍼조로 이송함에 따라 계간조의 온도가 낮아지는데, 계간조 상부온도가 계간조 중간 설정값 (65°C) 이하로 낮아지는 경우이다. NH-3 모드로 넘어가는 조건문은 버퍼조 상부의 온도가 버퍼조 최대 설정값 (85°C)초과인 경우이다.

◦ NH-3 모드 : 수직형 얽은지중축열

시작조건은 NH-1모드나 NH-2의 조건문이 만족되는 경우이며, 모드 내 실행 클래스로는 집열기 2중 모두 계간조로 축열하는 클래스와 계간조의 열을 수직형 얽은GTES로 보내는 클래스로 구성된다. NH-3모드의 목적은 계간조와 버퍼조의 축열상태가 모두 가득찬 경우, 추가로 집열되는 열은 방열을 해야하므로 계간조의 열을 수직형 얽은GTES로 이송시켜 열을 방열하는데 있다. 수직형 얽은GTES 장치는 파이프가 동 재질이므로 상대적으로 수평형 얽은GTES보다 열전도도가 높다. 또한, 수직형 얽은GTES이 설치된 위치에는 일부 물이 흘러 안정적인 방열이 가능할 것으로 판단하였다. NH-1모드로 회귀하는 조건으로는 계간조 상부와 GTES출구의 차온이 설정값 (3°C)미만으로 작아지거나 수직형 GTES 지중온도가 최대 설정값 (70°C) 초과인 경우이다.



[그림 4-55] 비난방 기간 제어 모드 별 계통도

【난방 기간 상위 운전 모드】

난방 기간에 대한 상위 운전모드의 계통도를 [그림 4-56]과 [그림 4-57], [그림 4-58]에 나타내었다. 운전모드는 H-1에서부터 H-6 모드 그리고 비상운전모드인 E-1로 구성하였다.

◦ H-1 모드 : 계간조에서 버퍼조로 열 이동

시작조건은 운전자가 난방기로 설정하면 시작이 되며, 모드의 목적은 버퍼조로부터 우선적으로 온실로 난방열량을 공급하며, 버퍼조의 축열상태가 낮아지면 계간조의 열량을 버퍼조로 이송시켜 버퍼조의 축열상태를 높이기 위함이다. 모드 내 실행 클래스로는 평판형 집열기는 계간조로 축열, 진공관형 집열기는 버퍼조로 축열하는 클래스, 계간조에 저장된 열을 버퍼조로 이동시키는 클래스, 버퍼조로부터 온실로 열을 공급하는 클래스로 구성된다. H-2모드로 넘어가는 조건문은 계간조 상부온도 (ST06) 기준으로 계간조 상부의 열량이 버

퍼조로 이송된 후 버퍼조에서 공급하는 온도가 온실난방에 활용할 수 없을 만큼 낮아진 경우 (40°C)이다.

◦ H-2 모드 : 계간조->수평형 GTES 축열 + 공기열원 히트펌프 대수제어 운전

시작조건은 H-1의 조건문이며, H-2 모드의 목적은 계간조 상부의 온도가 3~40°C의 경우 직접 온실 난방으로 공급하기에는 온도가 너무 낮고, 수열원 히트펌프의 열원으로 활용하기에는 너무 높은 온도의 열량을 수평형 지중축열에 활용하기 위함이다. 모드 내 실행 클래스로는 평판형 집열기는 계간조로 축열, 진공관형 집열기는 버퍼조로 축열하는 클래스, 계간조의 열을 수평형 GTES로 보내는 클래스, 공기열원 히트펌프의 대수제어를 통해 버퍼조를 축열하는 클래스, 버퍼조로부터 온실로 열을 공급하는 클래스로 구성된다. H-3모드로 넘어가는 조건문은 계간조 상부온도 (ST06)가 복합열원 히트펌프 열원 입수온도 최대치 (30°C) 미만으로 낮아진 경우이다.

◦ H-3 모드 : 수평형 얇은GTES 방열 + 수열원 히트펌프 운전

시작조건은 H-2모드의 조건문이며, H-3 모드의 목적은 수평형 얇은GTES에 저장된 열과 계간조에 저장된 열을 수열원 히트펌프의 열원으로 활용하여 버퍼조의 축열상태를 높이기 위함이다. 모드 내 실행 클래스로는 평판형 집열기는 계간조로 축열, 진공관형 집열기는 버퍼조로 축열하는 클래스, 수평형 얇은GTES에 축열된 열을 복합열원 히트펌프의 열원으로 활용하여 버퍼조를 축열하는 클래스, 버퍼조로부터 온실로 열을 공급하는 클래스로 구성된다. H-4모드로 넘어가는 조건문은 GTES 입구와 출구 차온이 설정값 (2°C) 미만으로 낮아지면서 수평형 GTES 지중온도가 설정값 미만 (10°C)으로 낮아지는 경우이다.

◦ H-4 모드 : 수직형 얇은GTES 방열 + 수열원 히트펌프 운전

시작조건은 H-3모드의 조건문이며, H-3 모드의 목적은 수직형 얇은GTES에 지열과 계간조에 저장된 열을 수열원 히트펌프의 열원으로 활용하여 버퍼조의 축열상태를 높이기 위함이다. 모드 내 실행 클래스로는 평판형 집열기는 계간조로 축열, 진공관형 집열기는 버퍼조로 축열하는 클래스, 수직형 얇은GTES에 지열을 복합열원 히트펌프의 열원으로 활용하여 버퍼조를 축열하는 클래스, 버퍼조로부터 온실로 열을 공급하는 클래스로 구성된다. H-4모드로 넘어가는 조건문은 GTES 입구와 출구 차온이 설정값 (2°C) 미만으로 낮아지면서 수직형 GTES 지중온도가 설정값 미만 (10°C)으로 낮아지는 경우이다.

◦ H-5 모드 : 계간조 열원기반 수열원 히트펌프 운전 + 공기열원 히트펌프 대수제어

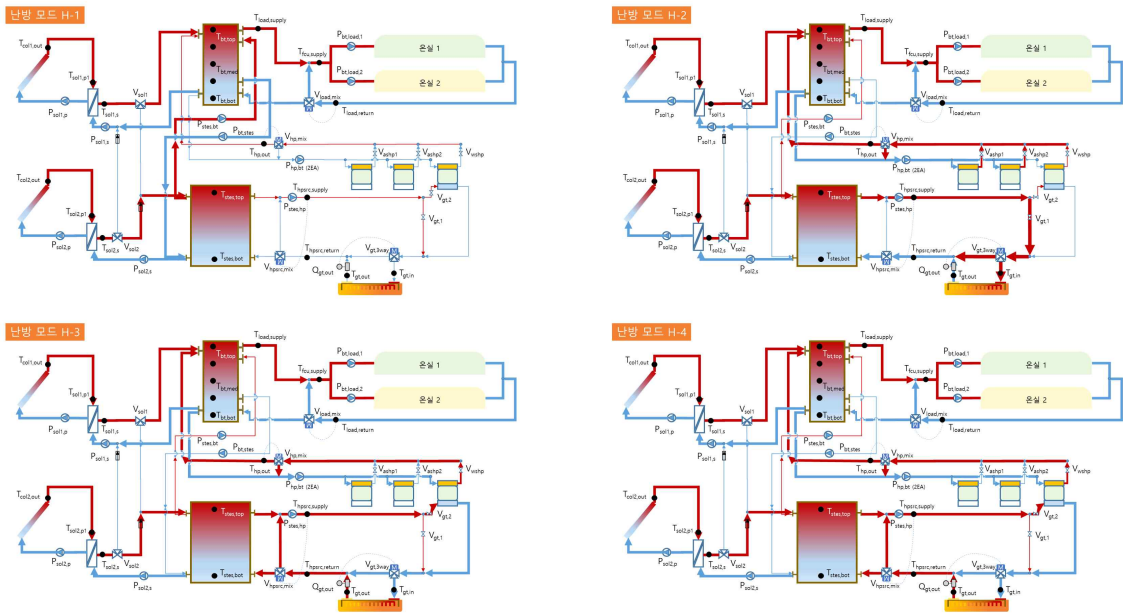
시작조건은 H-4모드의 조건문이며, H-5 모드의 목적은 계간조의 열원을 기반으로 수열원 히트펌프의 운전을 우선적으로 하되, 수열원 히트펌프의 생산열량이 난방부하보다 모라 버퍼조의 축열상태가 낮아지는 경우 공기열원 히트펌프를 대수제어 하여 버퍼조의 축열상태를 높이기 위함이다. 모드 내 실행 클래스로는 평판형 집열기는 계간조로 축열, 진공관형 집열기는 버퍼조로 축열하는 클래스, 계간조에 축열된 열을 활용하여 수열원 히트펌프를 구동하며, 공기열원 히트펌프 대수제어를 통해 버퍼조를 축열하는 클래스, 버퍼조로부터 온실로 열을 공급하는 클래스로 구성된다. H-6모드로 넘어가는 조건문은 계간조 상부온도가 수열원 히트펌프의 열원으로 활용할 수 없을만큼 낮아진 경우 (10°C) 이다.

◦ H-6 모드 : 공기열원 히트펌프 대수제어

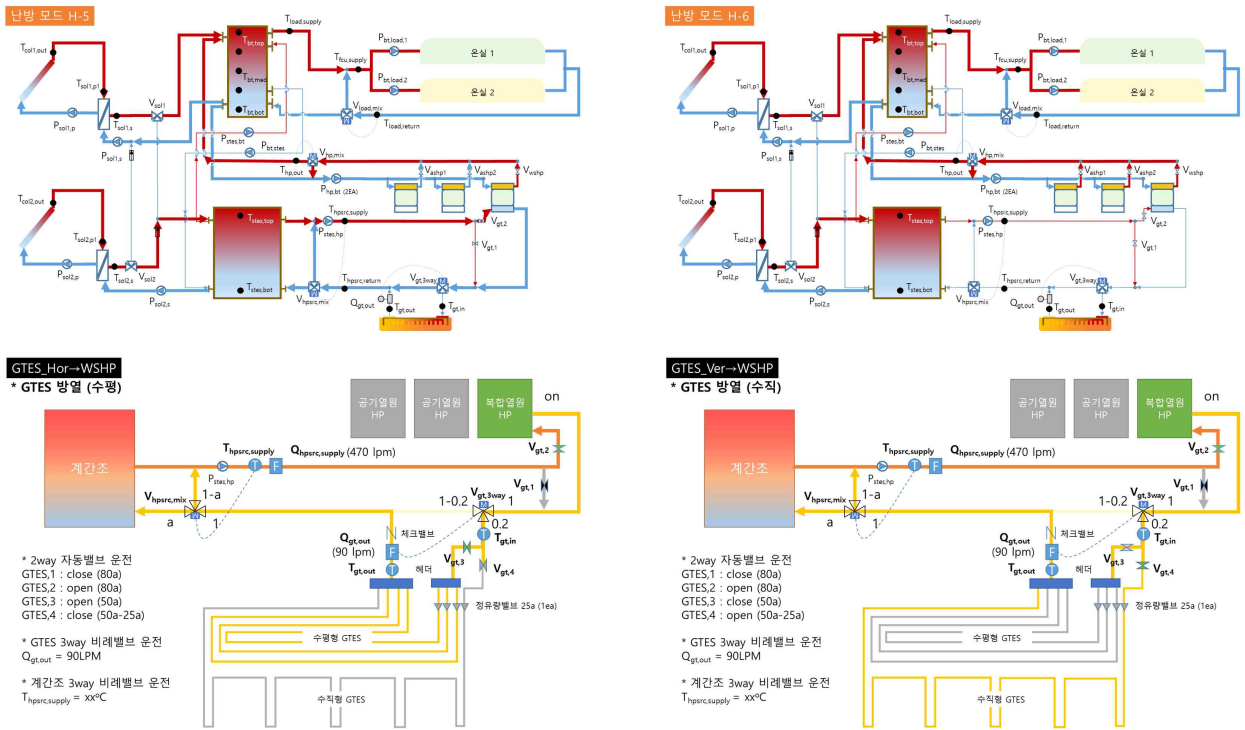
시작조건은 H-5모드의 조건문이며, H-6 모드의 목적은 모든 축열조에 저장된 열을 모두 활용한 경우, 공기열원 히트펌프로 버퍼조의 축열상태를 높이는데 있다. 모드 내 실행 클래스로는 평판형 집열기는 계간조로 축열, 진공관형 집열기는 버퍼조로 축열하는 클래스, 공기열원 히트펌프 대수제어를 통해 버퍼조를 축열하는 클래스, 버퍼조로부터 온실로 열을 공급하는 클래스로 구성된다. H-5모드로 회귀하는 조건문은 계간조 상부의 온도가 평판형 집열기의 집열량으로 상승하여 설정 온도 (25°C)이상인 경우이다. 또한, 난방기를 종료하는 조건은 운전자가 난방기 조건을 해제하는 경우이다.

◦ E-1 모드 : 비상축열모드

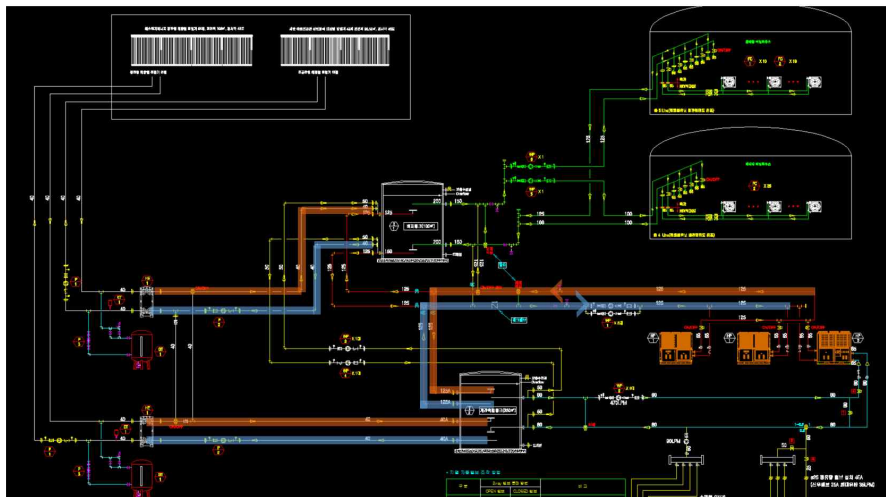
시작조건은 운전자가 비상축열모드를 설정하는 경우이며, E-1모드의 경우 히트펌프 3대의 생산열량과 버퍼조에 저장된 열량이 부족하다고 판단될 경우 계간조의 상부의 온도를 미리 히트펌프를 가동시켜 높여두는 모드이다. 모드 내 실행 클래스는 평판형 집열기는 계간조로 축열, 진공관형 집열기는 버퍼조로 축열하는 클래스, 공기열원히트펌프 1대 혹은 2대를 구동하여 계간조 상부를 축열하는 클래스이다. E-1 모드를 종료하는 조건문은 운전자가 비상축열모드를 해제하는 경우이다.



[그림 4-56] 난방 기간 제어 모드 별 계통도(1/2)



[그림 4-57] 난방 기간 제어 모드 별 계통도(2/2)



[그림 4-58] 난방 기간 제어 비상축열모드 계통도

아래에는 하위제어 클래스에 대하여 설명하며, 하위제어 클래스는 태양열 축열, 온실 난방공급, 히트펌프 그리고 기타 클래스로 나누어 설명한다.

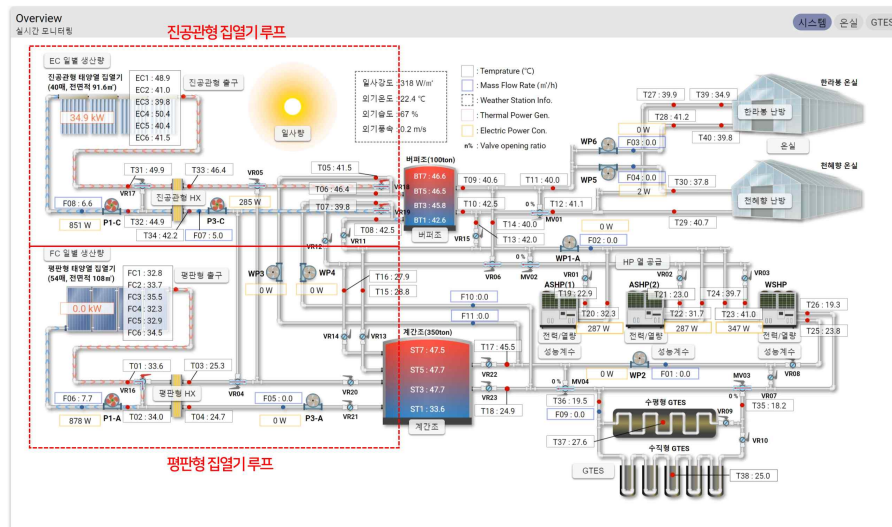
【클래스 (하위제어)】

◦ 태양열 축열 클래스

태양열 축열 클래스 비난방기에 있어서 두 종류의 집열설비를 직렬로 축열하는 1개의 클래스와 난방기에 있어서 진공관형 집열설비는 버퍼조로, 평판형 집열설비는 계간조로 축열

하는 병렬연결 클래스가 각각 1개씩 구현되어 총 3개의 클래스로 구성된다. 각 개별 클래스에는 아래 내용들이 구현되었다. [그림 4-59]는 태양열 집열설비로부터 축열이 이루어지는 축열 루프를 나타내었다.

- 1,2차측 펌프/밸브 기동정지: 일사량, 차온제어
- 1차측 bypass 밸브운전: 평판형 계간조 열량손실 최소화, 평판형/진공관형 열교환기 열충격 방지
- 평판형 야간방열 운전
- 난방기 동파방지 : 1차측 bypass 후 열매체 강제 순환
- 비상정지 : 중요 온도지점 4point의 stagnation 온도조건 활용
- 비상방열 : 1차측 bypass 후 강제방열
- 펌프 교번 운전



[그림 4-59] 태양열 집열기 축열 루프

◦ 온실 난방부하 공급 클래스

대공간인 온실의 실내온도를 높이와 위치에 걸쳐 균일하게 관리하면서, 투입 에너지를 최소한으로 유지하기 위한 제어로직이 적용되었다. 한라봉 온실은 너비 방향으로 총 5열의 레이어, 천혜향 온실은 총 4열의 열로 구성하였다. 각 레이어 마다 FCU가 아래 그림과 같이 번들로 연결되어 있다 (Ex, 한라봉 온실은 7EA의 FCU). [그림 4-60]과 [그림 4-61]은 한라봉과 천혜향 온실에 대한 열공급 계통도를 나타내었다. 각 열에 있는 FCU는 동시에 on/off가 되는 제어로 구성되어 있으며, 각 열 앞단에는 2-way 자동밸브가 설치되어 있다. <표 4-13>은 온실 내에 구역별로 나누어 둔 FCU 열별 유량 설정값이다.

본 클래스에는 아래 내용이 구현되었다.

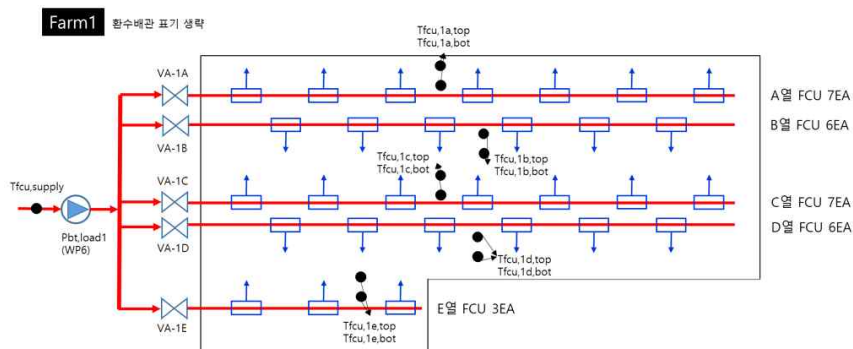
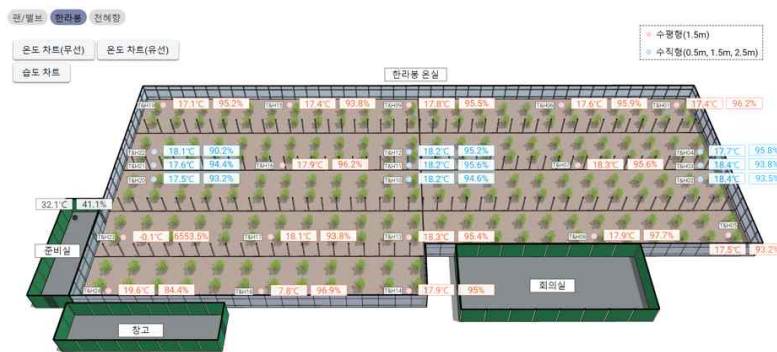
- 농장주가 입력한 온실 별 설정온도 수령
- 각 열별 밸브 및 FCU 제어 : 데드밴드 갭 (0.5°C) 제어, 각 레이어별 중간온도센서의 계측 온도가 농장주가 설정한 설정온도보다 데드밴드 갭 이하로 온도가 낮아지는 경우의 열만 밸브 on, FCU on, 데드밴드 갭 이상으로 온도 높아지는 열은 밸브

off, FCU off

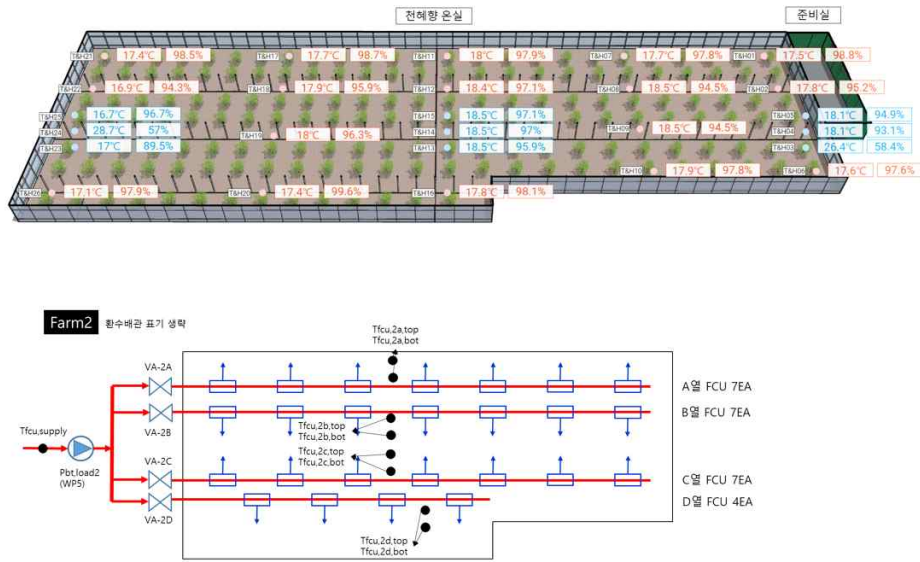
- 펌프 기동/정지/인버터 유량제어: <표 4-13>과 같이 열별 요구 유량에 맞게 인버터 펌프의 유량을 제어
- 3방밸브 제어: [그림 4-62]와 같이 환수온도 설정값 (40°C)에 맞게 버퍼조를 바이패스하는 3방모터밸브의 개도율을 제어, 환수온도 기준 PID 제어, Kp, Ki, Kd (각각 오차에 대한 비례게인값, 적분 게인값, 미분 게인값)을 튜닝해가며 과도응답 (Maximum overshoot, delay time, rise time, settling time)이 최소화 되고 정상상태 오차가 0에 수렴하는 값을 실험적으로 획득
- 녹방지 제어: 비난방기 난방 수요 없을 때 부하루프 내 밸브/펌프 기동/정지

<표 4-13> (좌) 한라봉 온실 열별 유량, (우) 천혜향 온실 열별 유량

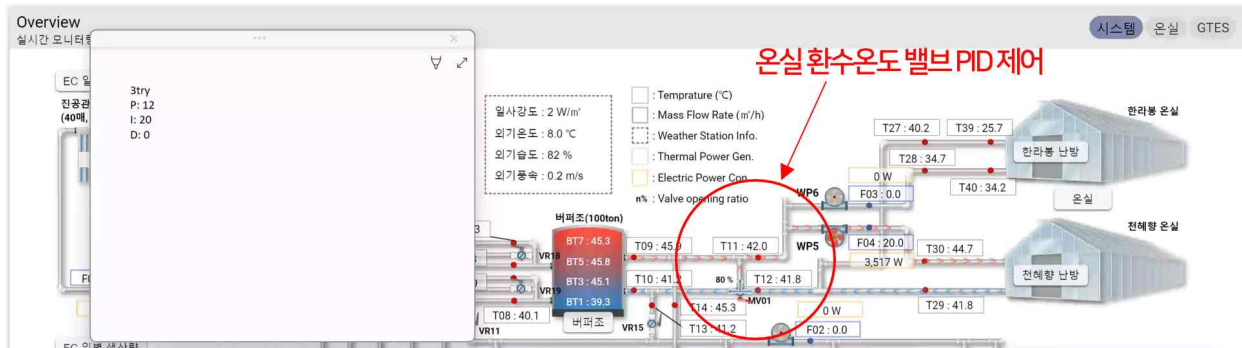
한라봉 온실		천혜향 온실	
열	유량 [m3/hr]	열	유량 [m3/hr]
1A	8	2A	10
1B	8	2B	10
1C	8	2C	10
1D	8	2D	5
1E	3	-	-
총합	35	총합	35



[그림 4-60] 한라봉 온실 내 센서 및 열공급시스템 모식도



[그림 4-61] 천혜향 온실 내 센서 및 열공급시스템 모식도



[그림 4-62] 온실 환수온도 3방밸브 PID 제어 게인값 튜닝 과정 중

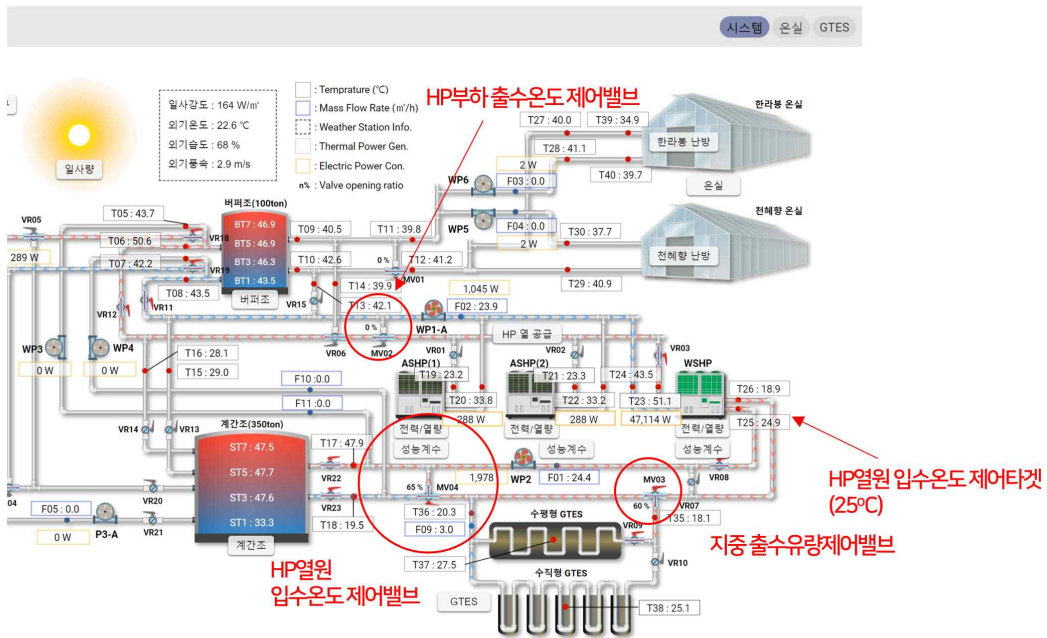
• 히트펌프 클래스

히트펌프에서 생산한 열이 전달되는 루프의 구성과 센서 및 제어 기능은 [그림 4-63]과 같다. 히트펌프 관련 클래스는 복합열원 히트펌프의 열원 종류에 따라 다음과 같이 구분되어 총 4개의 클래스로 구성된다. 즉 수직형 얇은GTES 열원 기반 수열원 히트펌프 운전, 수평형 얇은GTES 열원 기반 수열원 히트펌프 운전, 계간조 열원 기반 수열원 히트펌프 운전, 공기열원 히트펌프 대수제어 운전. 각 개별 클래스에는 아래 내용들이 구현되었다.

- 대수제어 기동/정지
- 부하/열원펌프 인버터 유량제어
- 3방밸브 제어
 - : 히트펌프 열원 입수온도 설정값제어 3방 모터밸브 개도율 PID 제어
 - : GTES 출수유량 설정값제어 3방 모터밸브 개도율 PID 제어
 - : 히트펌프 부하 출수온도 설정값제어 3방 모터밸브 개도율 PID 제어
 - : 위 3종 밸브들에 대하여서도 Kp, Ki, Kd (각각 오차에 대한 비례 게인값, 적분 게인값, 미분 게인값)을 튜닝해가며 과도응답 (Maximum overshoot, delay time, rise

time, settling time)이 최소화 되고 정상상태 오차가 0에 수렴하는 값을 실험적으로 획득하였다.

- 동파방지
 - : 히트펌프 열원루프 강제 순환
 - : 히트펌프 부하루프 강제 순환
- 녹방지 제어
 - : 비난방기 히트펌프 열원루프 기동/정지
 - : 히트펌프 부하루프 기동/정지

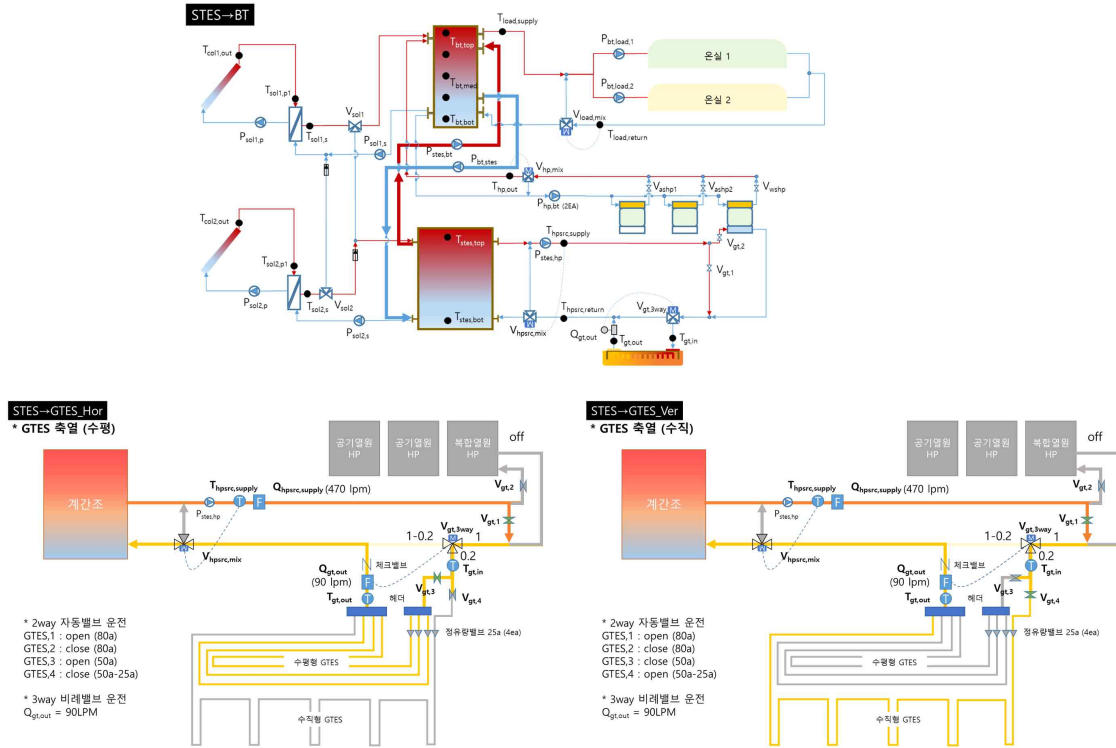


[그림 4-63] 히트펌프 루프 내 센서 및 열공급시스템 모식도

◦ 기타 클래스

위 3종의 클래스 외 기타 클래스는 다음과 같이 구성된다. [그림 4-64]에 관련한 열이송과 배관 계통을 나타내었다.

- 계간조~버퍼조 열 이송
 - : 클래스는 NH-2 모드와 H-1 모드에서 실행되며 계간조 상부 (ST06)과 버퍼조 중간부분 (BT04)의 차온을 바탕으로, 차온이 설정값 (5°C)을 초과하는 경우 기동, 차온이 설정값 (2°C) 미만인 경우 정지함
- 계간조~수평형 얇은GTES 열이송
 - : 계간조 상부와 GTES 출구의 차온을 바탕으로, 차온이 설정값 (5°C)을 초과하는 경우 기동, 차온이 설정값 (2°C) 미만인 경우 정지함
- 계간조~수직형 얇은GTES 열이송
 - : 계간조 상부와 GTES 출구의 차온을 바탕으로, 차온이 설정값 (5°C)을 초과하는 경우 기동, 차온이 설정값 (2°C) 미만인 경우 정지함



[그림 4-64] (위) 계간조~버퍼조 열이송, (아래) 계간조~수평/수직형 GTES 열이송 클래스

(나) 제어장치 및 제어판넬 구축

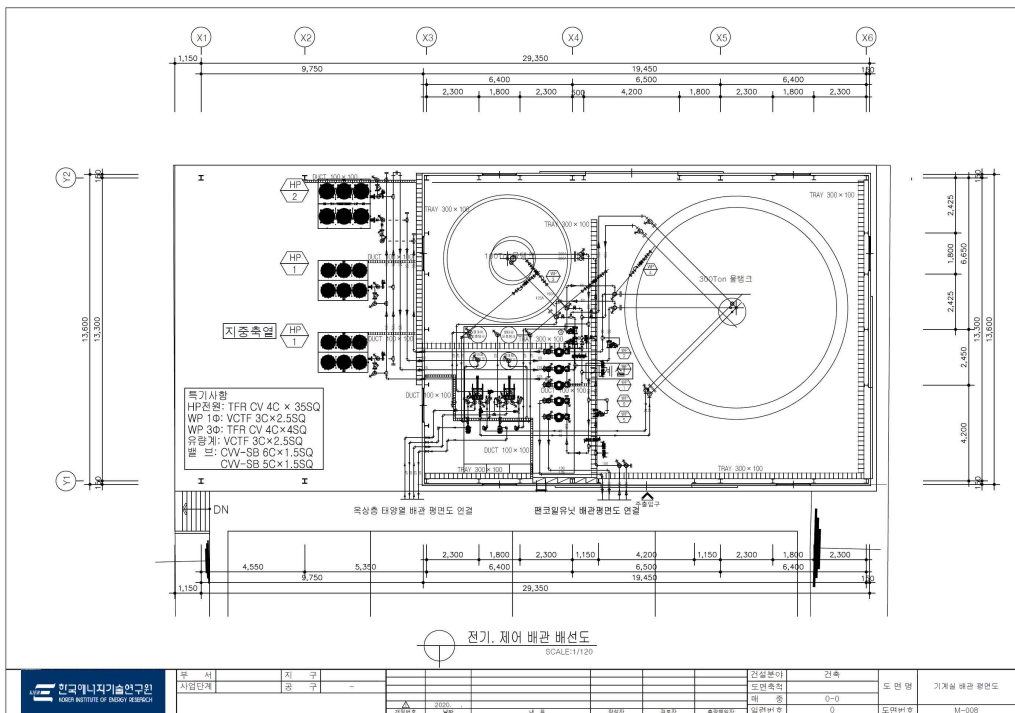
계간축열 기반 태양열 열공급 실증 시스템의 자동 제어를 위해 본 연구에서는 실증시스템 기계실에 총 전원을 공급 및 차단 할 수 있는 CP 전력 판넬, 각각의 펌프 및 각종 설비의 전원을 공급할 수 있는 MCC 판넬, 제어의 로직을 담당하는 PLC 판넬을 구분하여 설계 및 구축하였으며, [그림 4-65]와 [그림 4-66]에 전기 및 제어 배선도 일부와 MCC, PLC 판넬 사진을 나타내었다.

MCC 제어판넬의 구성은 메인 전력 판넬 700 * 2,000 * 400mm. MCC-1전력 판넬 700 * 2,000 * 400 mm 1EA, MCC-2 전력 판넬 700 * 2,000 * 400 mm 1EA, CP-1 전력 판넬 600 * 2,000 * 400 1EA, CP-2 전력 판넬 600 * 2,000 * 400 mm 사이지의 판넬로 구성하였다. MCC-2 제어 판넬에는 조광형 3단 스위치 9 EA, TRIP 알람기 9 EA, 밸브 개폐 스위치 9 EA로 구성되었으며, 각각의 용량은 12 kW 1 EA, 0.1 * 6 8 EA, 2 kW 4 EA로 구성되어야 하며 내부 케이블은 CV165SQ * 4C 및 CV1.5SQ * 3C(16C)를 이용하여 결선되었다. 각각의 메인 전원 판넬, MCC 판넬 및 CP 판넬에는 펌프, 밸브 등을 수동, 자동, 정지 할 수 있는 조광형 3단 스위치 및 TRIP을 확인 할 수 있도록 각각의 스위치 램프를 설치하였다. 메인 전원 판넬에는 181 KW 1EA, 44 kW 3 EA, 4 kW 4 EA, 5.5 kW 2 EA, 10 kW 2 EA, 5 kW 2 EA의 용량을 갖는 MCCB가 장착되었으며, 내부 케이블은 CV35SQ * 4C(36C)을 이용하여 결선되었다.

각각의 제어파넬의 통신은 RS-232C, 이더넷(FTP Cable) 및 485 통신이 가능하도록

PLC를 구성하며 PLC-1의 디지털 출력, 디지털 입력, 아날로그 출력, 아날로그 입력 포인트로는 디지털 출력 (기동/정지 25 EA, 밸브 10 EA, 댐퍼 6 EA) 디지털 입력(펌프상태 13 EA, 밸브상태 15 EA, 장비상태 12 EA, 경보 27 EA) 아날로그 출력(밸브 11 EA), 아날로그 입력(온도 66 EA, 유량 3 EA, 전력 2 EA)로 구성되었다.

실증시설원에 기계실 내부 및 외부에 설치된 평판형 및 진공관형 태양열 시스템, 지중축열, 공기식 및 복합열원 히트펌프 시스템에 연계된 각종 펌프류 및 유량배분을 위한 삼방 및 이방 전동밸브류의 전원 공급 및 동작을 제어 할 수 있도록 모든 설비와의 전선 및 데이터 케이블은 사용자의 이동 동선에 영향을 최소화 시키기 위하여 2 m 높이 상부에 케이블 덕트를 별도로 구축하여 포설을 진행하였다.



[그림 4-65] 전기 및 제어 배관 배선도



[그림 4-66] 제어를 위한 MCC 및 PLC 판넬
전경 사진

(5) 온실 및 열공급시스템 측정센서 및 제어설비

(가) 온도센서 설계 및 설치

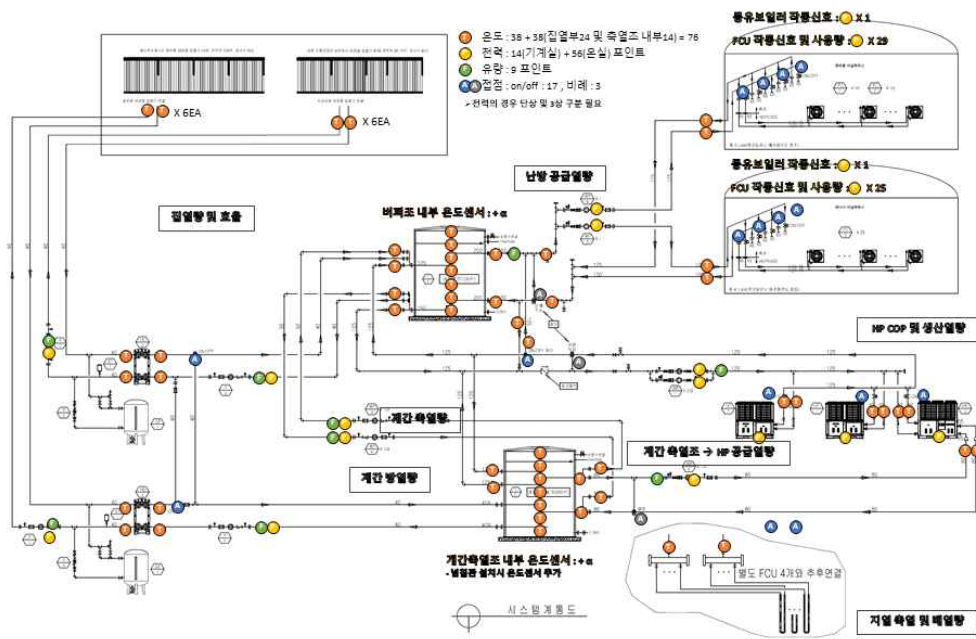
실증시스템에는 온도센서, 전력량계, 일사량계, 웨더스테이션, 유량계 등 실증시스템의 성능을 정량적으로 분석할 수 있는 각종 센서류 들이 적용되었으며, 시스템 계통상에 센서의 위치와 개수는 [그림 4-67]에 나타내었고, [그림 4-68]에 인버터 펌프와 유량계, 그리고 [그림 4-69]에는 센서 설치 및 교정 작업 등의 사진을 나타내었다.

실증시스템은 유체의 이동을 통해 열을 운송, 저장 및 활용하는 시스템으로 구성되었기 때문에 특히 온도 및 유량 센서의 정확도 및 신뢰성이 충분히 입증되어야 함으로 온도센서는 설치전 현장에서 온도보정을 수행하여 각각의 온도센서 하나마다 온도 보정계수를 산출하여 모니터링 시스템에 연동하였다. 실증시스템에 사용된 온도센서는 4 Wire RTD 타입을 사용하였으며 온도 보정을 통해 각각의 온도센서의 정확도는 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 이내에 들어 올 수 있도록 온도 보정을 수행하였다.

배관 내부의 공급되는 유량을 측정 할 수 있는 유량계는 전자식 유량계인 KFCM-1000 모델의 유량계를 각각의 배관 사이즈에 맞게 적용하였으며 적용된 유량계의 정확도는 $\pm 0.5 \%$ 이다.

실증시스템의 기계실, 태양열 집열기, 얇은GTES, 계간조 및 버퍼조와 같은 온실을 제외한 설비에 적용된 온도센서는 총 88개의 4선식 RTD가 적용되었다.

온도센서 이외에도 전력측정 16개, 밸브 및 펌프 등과 같은 설비의 동작 확인을 위한 접전 출력 54개, 유량계 11개, 일사량계 2개 등 실증시스템의 성능 확인을 위한 센서류가 약 150여개 적용되었다.



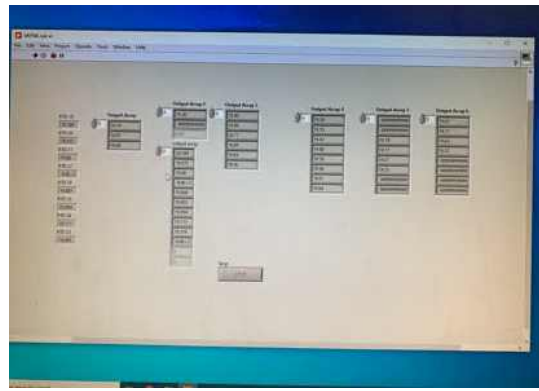
[그림 4-67] 실증시스템 제어 및 모니터링을 위한 센서 위치 및 개수



[그림 4-68] 실증시스템 적용 인버터 펌프 및 유량계



(a)온도센서 검교정(1)



(b)온도센서 검교정(2)



(c)축열조 온도센서 설치(1)



(d)축열조 온도센서 설치(1)



(e)집열기 온도센서 케이블 설치(1)



(f)집열기 온도센서 케이블 설치(2)



(g)집열기 출수 온도센서 설치 전



(h)집열기 출수 온도센서 설치 후

[그림 4-69] 실증시스템 제어 및 모니터링을 위한 센서 설치 및 교정]

(나) 온실 난방을 위한 FCU 제어 장치 설계 및 구축

실증시스템이 구축된 한라봉 및 천혜향 재배 시설원예의 온실 내부의 온도균일도 및 온실 내부의 온도를 제어하기 위하여 한라봉 및 천혜향 온실 내부에 격자무늬 형태로 온도센서를 배치하여 온실 난방 작동 시 온실 내부의 온도 균일이 이루어지는지 확인 할 수 있도록 온도센서를 구축하였다. [그림 4-70]부터 [그림 4-72]에는 한라봉 및 천혜향 온실 실내에 온도센서 위치와 작업동 및 온실 실내온도 설정을 위한 화면 등을 나타내었다.

한라봉 온실의 경우 유선온도 센서 24개 유선온도 센서 10개가 설치되었으며 유선 온도 센서의 경우 라인별 높이차를 두어 온실 내부의 공기 온도에 따른 성층화 현상도 확인 할 수 있도록 높이차를 1m 간격의 높이차를 두어 각각의 포인트 5곳에 총 10개의 4선식 RTD 유선온도센서가 적용되었다.

천혜향 온실에도 한라봉 온실과 동일하게 격자무늬 간격으로 무선 온도센서 26개가 적용 되었으며 유선온도센서는 총 8개의 온도센서가 1m 높이 간격으로 4곳에 적용되었다.

이러한 다양한 온도센서의 값을 통해 한라봉 및 천혜향 온실의 각각의 라인별 장방향 방향의 평균 온도를 도출 할 수 있었으며 도출된 평균온도 값을 해 온실 내부의 난방 온도를 설정 할 수 있도록 제어 시스템을 구성하였다.

온실 내부의 FCU 작동은 한라봉 및 천혜향을 직접 관리하는 농장주가 손쉽게 유지관리 할 수 있도록 기계실과 온실 내부의 FCU 작동 및 온도 유지를 위한 별도의 자동제어 PLC 판넬을 한라봉 온실과 천혜향 온실 사이에 위치한 작업동 내부에 설치하여 농장주가 언제든지 온실 내부 온도를 제어 할 수 있도록 시스템을 구축 하였다.

한라봉 및 천혜향 온실의 설정 온도 유지를 위해 적용된 FCU는 물-공기 열교환 방식의 팬코일 유닛을 적용하였다. 한라봉 및 천혜향 온실의 온실 부하량과 보일러방식에 비하여 더 낮은 공급온도 수준을 감안하여 10,000 kcal/h 및 20,000 kcal/h 2가지 타입의 FCU 열 교환기를 적용하였으며 한라봉 온실 30개, 천혜향 온실 25개의 FCU가 적용되었다. FCU의 설치 방향은 온실 내부에서 공기 유동이 원활하도록 장방향으로 FCU를 엇갈리게 설치하여 온실 내부의 공기 유동을 고려하여 FCU를 설계 및 구축하였다.

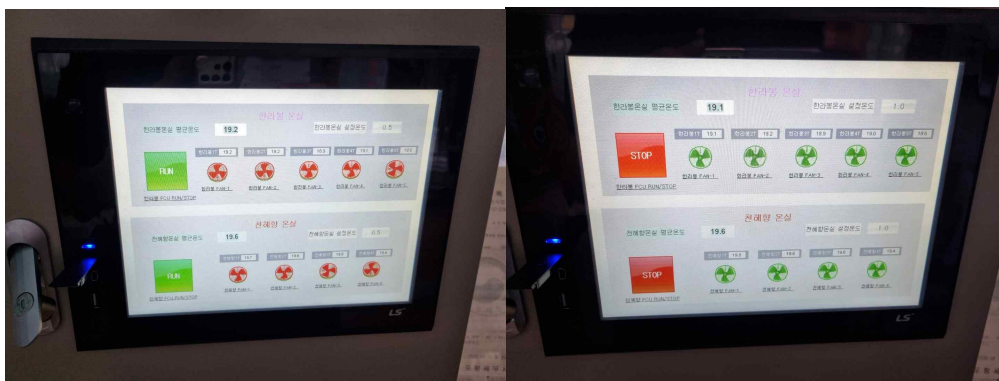
한라봉 및 천혜향 온실에 적용된 FCU는 동절기 난방 모드에서 작동 이외에도 하절기 온실 내부의 원활한 공기 유동을 유도할 수 있도록 온실에 난방을 공급하지 않는 기간에도 별도로 FCU의 팬만 작동 할 수 있도록 제어시스템을 적용하였다. 이를 통해 하절기 온실 작물의 고온 피해를 방지 할 수 있는 역할을 수행할 수 있다.



[그림 4-70] 한라봉 온실 온도센서 적용



[그림 4-71] 천혜향 온실 온도센서 적용



[그림 4-72] 작업동 내부 및 온실 내부 온도 설정을 위한 제어 패널

마. 실증모델 시스템 운전 및 성능 분석

(1) 재배작물 난방조건

실증온실은 한라봉과 바나나가 재배되고 있었으나 농장주의 경영사정으로 인하여 바나나 작물을 철거하고 천혜향을 재배하게 되었다. 실증온실은 바나나 작물을 이용하여 바나나체험 프로그램을 운영하고 있었으나 코로나19 영향으로 프로그램을 중단하게 되면서 바나나 재배를 더 이상 할 수 없게 되었고, 실증온실은 바나나 작물 대신 한라봉과 같은 난방조건을 갖는 천혜향 작물을 재배하는 것으로 변경된 것이다.

한라봉 작물의 당초 난방조건은 동절기인 1-2월, 11-12월에 5℃, 3-5월에 15℃, 나머지 월에는 자연온도로 운영하고자 하였으나 실제로 동절기인 1-2월, 11-12월에 2℃, 3-5월에 18℃, 나머지 월에는 자연온도로 운영하였다.

천혜향 작물의 난방조건도 한라봉 작물과 동일하게 동절기인 1-2월, 11-12월에 2℃, 3-5월에 18℃, 나머지 월에는 자연온도로 운영하였다. <표 4-14>에 실증운전 중 실내 난방온도 조건을 월별로 나타내었다.

<표 4-14> 실증 시설원에 난방온도 조건

구분		1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
기존	한라봉	5℃		15℃			자연온도				5℃		
	바나나	17℃					자연온도			17℃			
변경 (농장주 설정 온도)	한라봉	2℃		18℃			자연온도				2℃		
	천혜향	2℃		18℃			자연온도				2℃		

(2) 비난방기 태양열 계간축열 운전 및 성능 분석

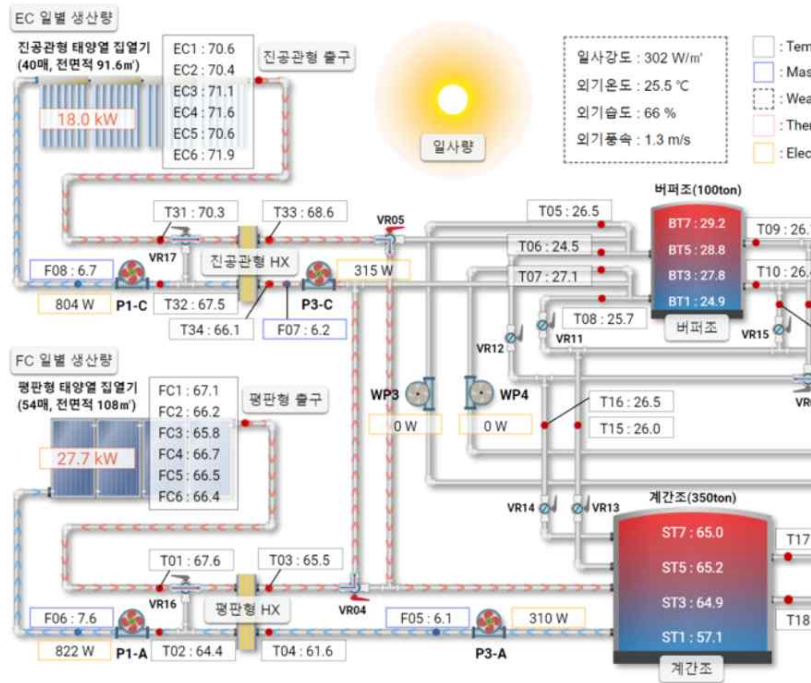
본 보고서에서 다루는 태양열 계간축열 히트펌프 열공급 실증 시스템의 실증 운전분석 기간은 아래와 같으며, 시작일정은 통합 설비 구축과 비난방기 운전에 필수적인 제어 시운전(태양열 축열 클래스)이 완료된 후로 설정하였으며, 비난방기 종료일정은 농장주가 원하는 작물생장 스케줄에 맞추어 진행하였다. 난방기 종료일정 역시 농장주가 필요로 하는 온실 설정온도 중 야간의 온실 온도가 난방이 필요없이 자연온도에 수렴하는 시점으로 맞추어 진행하였다.

- 실증운전 전체일정: '22년 04월 25일 ~ '23년 06월 04일
- 실증운전 비난방기: '22년 04월 25일 ~ '22년 12월 04일
- 실증운전 난방기: '22년 12월 05일 ~ '23년 06월 04일

(가) 태양열 집열

비난방기 기간 동안 계간조와 태양열 루프는 아래 [그림 4-73]과 같이 2차측에서 평판형 집열기에서 획득된 열이 진공관형 집열기를 거쳐 계간조로 축열하는 루프로 구성하였다. 이는 온도가 높아질수록 진공관형 집열기의 효율저하가 상대적으로 평판형보다 작은 이점을

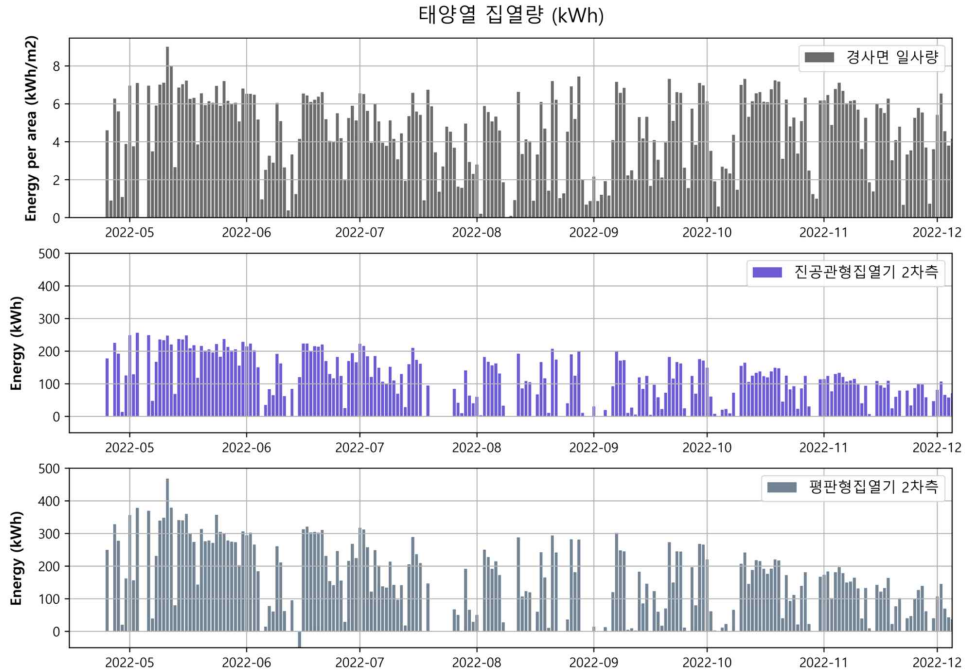
활용하기 위함이다.



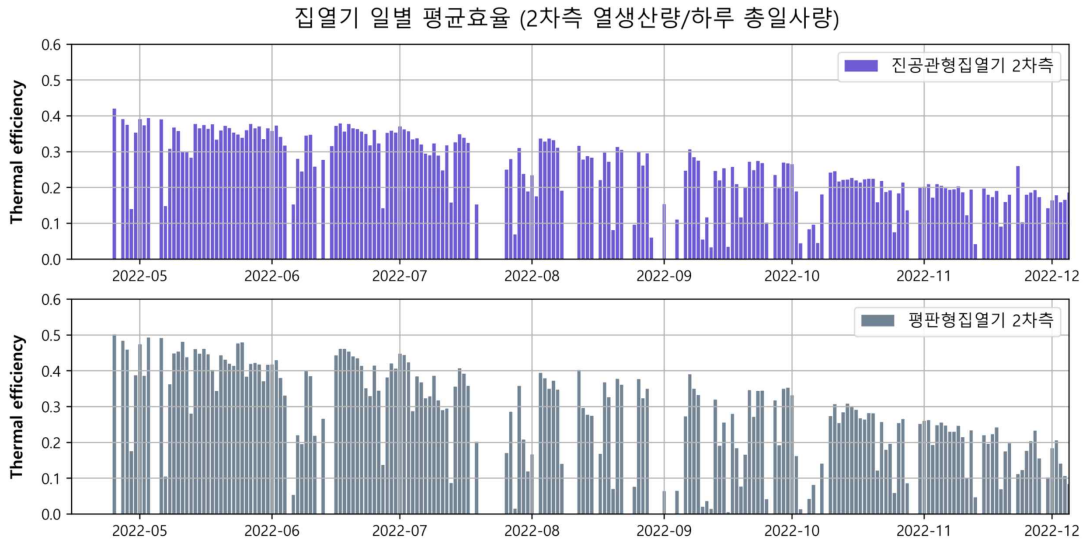
[그림 4-73] 비난방기 태양열 축열 과정 중 에너지흐름도 (평판형 및 진공관형 설비의 직렬연결)

[그림 4-74]는 하루단위의 시간에 따른 비난방기 기간동안의 집열면에 투입되는 단위면 적당 경사면일사량과 각 집열기의 2차측 루프에서 획득되는 열량을 나타낸다. 경사면 일사량은 일사량계 센서 측정값을 활용하였다. 1분당 각 2차측 집열기의 획득 열량은 열교환기 입출수 작동유체의 엔탈피 차이를 활용하여 계산하였다. 엔탈피 계산에 활용되는 열교환기 입,출구 온도 (평판형의 경우 T04, T03, 진공관형의 경우 T34, 33)는 1분단위 DB에 저장된 측정값을 활용하였으며, 2차측 작동유체인 물의 비열은 4차식의 polynomial 방정식과, 밀도는 3차식의 polynomial 방정식을 활용하였다.

[그림 4-75]는 하루단위의 시간에 따른 비난방기 기간동안의 진공관형 집열기의 효율과 평판형 집열기의 평균 집열효율을 나타낸다. 집열효율은 하루단위 집열기 별 2차측 열생산량을 집열면에 투입된 일사량으로 나누어 구하였다. 초기 집열효율은 평판형 집열기의 집열효율이 더 높은 것을 확인할 수 있으며, 12월 경부터는 진공관형 집열기의 집열효율이 더 높게 나타난 것으로 파악되었다. 이는 고온으로 갈수록 진공관형 집열기의 효율저하가 평판형 집열기 보다 더 작은 특성에 기인한다.



[그림 4-74] 비난방기 일별 단위면적당 경사면 진공관형 집열기 집열량, 평판형 집열기 집열량



[그림 4-75] 비난방기 일별 경사면 진공관형 집열기, 평판형 집열기의 평균 열효율

<표 4-15>는 비난방기 전체 기간동안의 태양열 축열 데이터를 정리한 내용을 나타낸다. 평판형 집열면적이 진공관형 집열기 보다 약간 더 크게 설계되었으며, 평균 효율로는 평판형 집열기가 3.75%p 더 효율이 높게 측정되었다.

<표 4-16>은 비난방기 태양열 구동을 위해 소모된 전력 총합을 나타낸다. 태양열 집열 시스템을 구동하기 위한 전력으로는 총 2.78 MWh가 소모되었으며, 이를 통해 획득된 집열량은 56.63 MWh임을 파악할 수 있다. 집열 펌프로 인한 전력소비량은 집열량의 5% 미만

수준으로 나타났다.

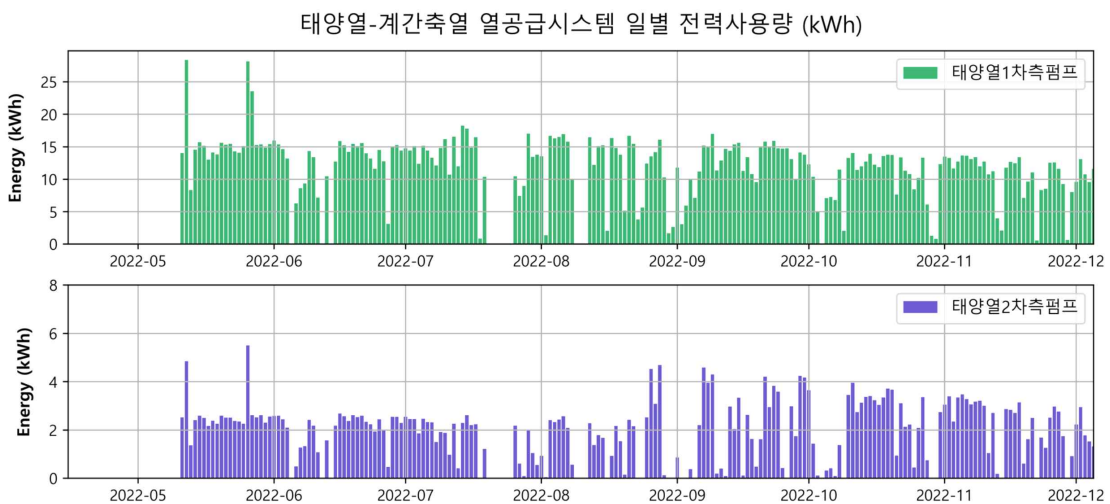
<표 4-15> 비난방기 총합 태양열 집열

	집열면적 (m ²)	집열면 일사량 (MWh)	집열량 (MWh)	평균 집열효율
진공관형	91.6	92.36	24.12	0.2611
평판형	108	108.89	32.51	0.2986
총합	-	201.25	56.63	-

<표 4-16> 비난방기 태양열 구동을 위해 소모된 전력 총합

	펌프 전력소비량 (MWh)
태양열 1차측	2.38
태양열 2차측	0.40
총합	2.78

[그림 4-76]은 비난방기 일별 1,2차측 태양열 루프 펌프 전력소비량을 나타낸다. 각 기기별 전력 측정은 분전반에 GEMS와 CT센서를 설치하여 측정하였으며, 센서 설치 일정상 '22년 5월 11일부터 전력사용량이 계측되었다. 1차측 펌프는 기계실 외부 옥상까지 열매체가 순환해야 하므로 상대적으로 기계실 내부로만 순환하는 2차측 펌프에 비해 소모동력이 큰 것을 알 수 있다. 8월 말부터 태양열 2차측 펌프 소모동력이 증가한 것을 볼 수 있는데, 이는 [그림 4-73]의 흐름도에서 P3-C 펌프를 추가로 가동하여 2차측 루프에 흐르는 유량을 증가시키기 위함이다. 유량을 증가시키면 1차측 루프에서 흐르는 작동유체의 온도를 낮출 수 있어 온도 증가에 따른 집열기 효율저하를 낮추고자 하였다.



[그림 4-76] 비난방기 일별 1차측, 2차측 펌프 소모 전력량

(나) 계간조 축열 및 열손실

비난방기 기간 동안 계간조는 아래 일정과 같이 단열재 및 케이싱이 시공을 진행해가며

계간조 축열 실증평가를 진행하였다.

- 비난방기 축열일정: '22년 04월 25일 ~ '22년 12월 04일
- 계간조 단열재 보완공사 완료시점: '22년 07월 20일
- 계간조 케이싱 공사 완료시점: '22년 08월 11일

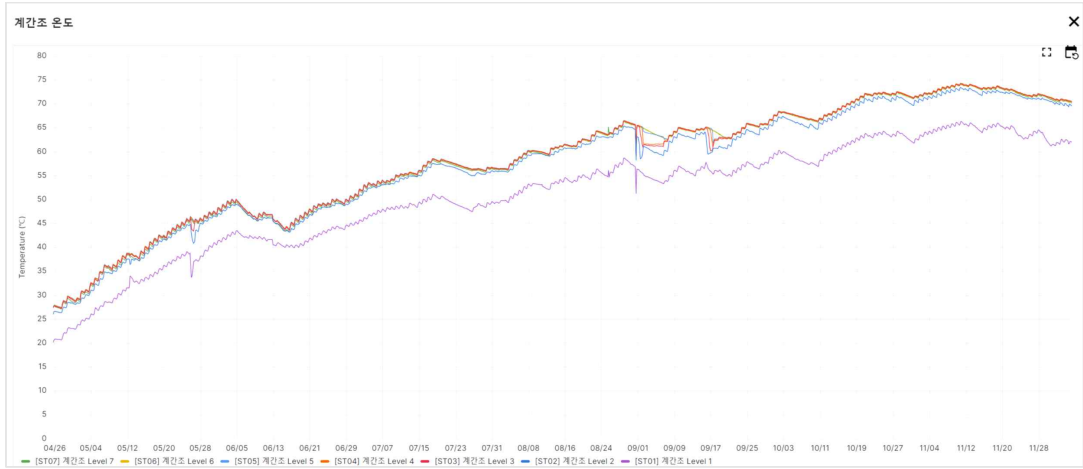
[그림 4-77]은 시간에 따른 계간조의 온도변화를 나타낸다. 집열하는 낮시간에는 계간조의 온도가 증가하다가 밤 시간에 온도가 하락하는 경향을 전체적으로 보여준다. 단열재 공사 완료 전에는 밤시간에 온도가 하락하는 기울기가 상대적으로 가파른 것을 확인할 수 있다. 6월 초와 7월 말에 온도가 상승하지 않고 감소하는 부분은 여름철 장마가 지속되어 집열량이 없는 경우이다.

[그림 4-78]은 시간에 따른 계간조에서 수평형 얇은GTES로 8월 31일과 9월 16일의 이틀간 두 차례에 걸쳐 열을 이송하는 실험을 한 결과를 나타낸다. 계간조로부터 약 65°C의 온도가 수평형 얇은GTES로 공급이 되었을 때 수평형 얇은GTES의 지중온도의 경우 최대 52°C (9월 17일) 까지 상승함을 파악할 수 있었다. 그러나, 9일 후의 온도가 34°C 까지 18°C가 떨어졌으며, 수평형 얇은지중으로 공급된 열이 당초 예상한 바와 같이 수직형으로 이동되었고, 일부는 지중으로 손실되었을 것으로 파악되었다. 한편, 수직형 지중의 온도는 동일 기간 19°C에서 23°C로 상승한 것으로 수평형 얇은GTES로 열을 축열할 시 수직형 지중의 온도상승 효과를 확인할 수 있었다. 이러한 시험의 목적은 기존 난방전용 지열히트펌프의 운전기간에 따른 지중온도 저하와 이로 인한 성능저하를 해소하기 위한 일환으로 태양 열의 일부를 지중으로 보내어 온도를 상승시켜 지중열원을 재생시켜주기 위한 것이었다. 본 시험을 통하여 얇은지중을 이용하여 장기간 단기간의 열저장 효과를 이용하는 동시에 지열원 재생이 가능할 것으로 보인다.

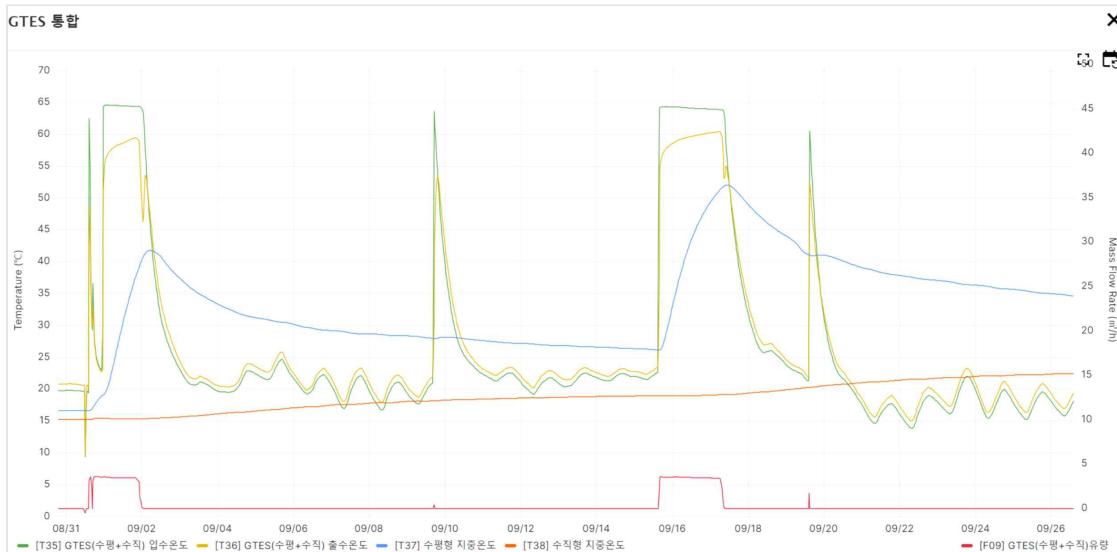
비난방기에 계간조에 저장된 고온의 열을 수평형 얇은GTES로 이송하여 장기간 열저장에 활용하는 것은 비효율적이며 지중열원재생을 겸한 단기간 열저장운전으로 활용하는 것이 바람직할 것이다,

본 실증에서는 수직형 얇은GTES는 지열히트펌프의 지중열교환기로는 적합하지 않은 얇은 깊이로 설치되었으나 이것은 예산범위를 고려한 실험규모로 설치한 것이며, 향후 사업화 모델로 적용시 지열원 히트펌프의 난방운전으로 인한 지중온도 감소 문제를 해소하기 위한 용도로 지중으로 열을 보내어 지중을 재생하기 위한 운전으로 활용하기 위한 목적으로 본다면 수직형 GTES는 기존 지중열교환기로 적용할 수 있을 것이다.

이전에 설명한 운영관리시스템의 제어모드에서와 같이 수평형 얇은GTES로 열 이송하는 것은 난방기에 계간조의 열을 버퍼조로 이송하는데 일차적으로 활용한 뒤 계간조의 열을 활용하기 어려운 40°C 미만의 경우만 시행하는 것으로 적용하였다. 이를 통해 수평형 얇은GTES로 열을 축열함과 동시에 수직형 지중열의 온도를 재생하는 용도를 실험적으로 확인하고자 하였다.

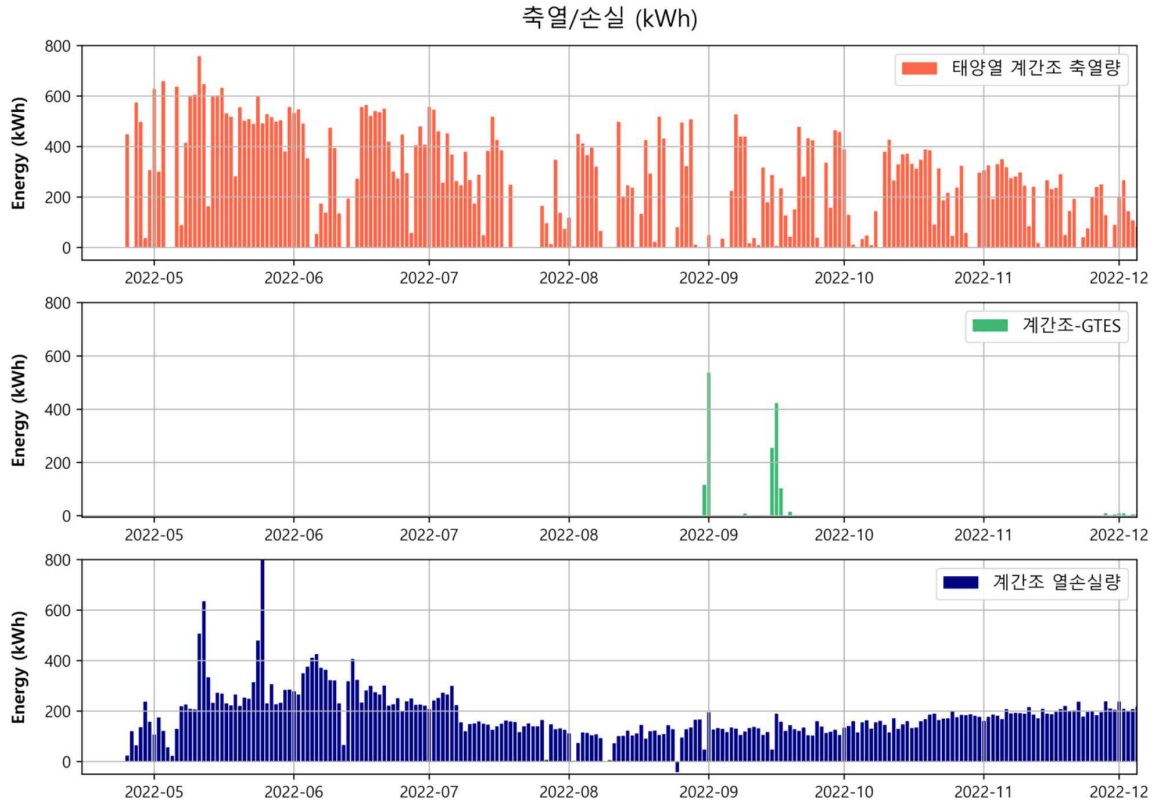


[그림 4-77] 비난방기 계간조 온도 프로파일 (ST07이 최상단 온도센서)



[그림 4-78] 비난방기 계간조로부터 수평형 GTES로의 열이송에 따른 온도, 유량 프로파일

[그림 4-79]는 일별 계간조 축열량과 수평형 얇은 GTES로의 열 이송량, 계간조의 열손실량을 나타낸다. 시간이 갈수록 태양열집열설비로부터 계간조로의 축열량이 줄어드는 이유는 계간조의 온도가 상승함에 따라 집열기 효율이 낮아지기 때문이다. 계간조 열손실량에서 5월에 높은 열손실량을 보이는 경우가 있는데 이는 버퍼조 열이송 시운전이나 계간조 설비 보완 등을 위해 시수보충 등의 외란이 더해진 경우이다. 계간조 열손실량이 7월 둘째 주부터 낮아지는 경향을 볼 수 있는데, 이는 단열공사가 진행되어 열손실이 줄었기 때문이다. 9월에서 12월로 갈수록 열손실량이 증가하는 이유는 외기 온도로 인한 기계실 실내온도가 낮아지기 때문이다.



[그림 4-79] 비난방기 일별 계간조 축열량, GTES로의 열 이송량, 계간조 열손실량

<표 4-17>은 단열재 공사기간별, 전체 비난방기 운영일정에 따른 축열 운전 성능에 관련한 내용을 정리한 것이다. 계간조에 대한 열에너지밸런스는 다음과 같이 일정기간에 대하여 적용하고 열저장조의 내부에너지의 적분량과 입출입 열에너지의 적분량으로부터 열손실량을 산정하였다.

$$\Delta Q_{ST} = Q_{IN} - Q_{OUT} - Q_{LOSS} \tag{식 4-13}$$

위 식에서 ΔQ_{ST} 는 열저장조 내부열에너지 변화량으로 측정값, Q_{IN} 는 열저장조로 공급되어 들어온 열에너지로 측정값, Q_{OUT} 는 열저장조로부터 공급되어 나간 열에너지로 측정값, Q_{LOSS} 는 열저장조로부터의 열손실로서 열에너지밸런스로부터 계산하여 구한다. 계간조 등 열저장의 효율 Eff_{TES} 은 다음의 식으로 정의하였다.

$$Eff_{TES} = 1 - \frac{Q_{LOSS}}{Q_{IN}} \tag{식 4-14}$$

단열재 공사가 진행됨에 따라 계간조 효율이 증가하길 기대하였지만, 열손실량이 줄어들었음에도 불구하고 계간조 축열량 역시 줄어들어 계간조 효율이 그다지 증가하지 않는 경향을 파악하였다. 또한, 기존 문헌들에서 보고되는 500톤 규모의 소규모 계간조 탱크 효율 50% 수준 대비 상대적으로 낮은 효율값을 보여주는데, 단열재 이외의 외란이 열손실에 작

용하는 것으로 파악하였다. 이러한 이슈사항을 해결한 뒤 계간조 효율을 향상시키는 내용은 ‘바. 실증설비 보완’ 에서 설명하였다.

<표 4-17> 비난방기 열공급 시스템 열량 총합 정리

대분류	구분	계간조 단열재 공사 완료 이전 (220425~230720)	계간조 외부 케이싱 공사 완료 이전 (220720~220811)	계간조 단열, 케이싱 완료이후 (220811~221204)	비난방기 전체기간 (220425~221204)
열생산	태양열-계간조 축열량 (MWh)	33.05	2.96	23.47	59.48
	계간조 열손실 (MWh)	21.53	2.20	17.76	41.49
	계간조 열효율	0.3486	0.2576	0.2434	0.3025
열이송	계간조~GTES 이송량 (MWh)	-	-	1.50	1.50

(3) 난방기 운전 및 성능 분석

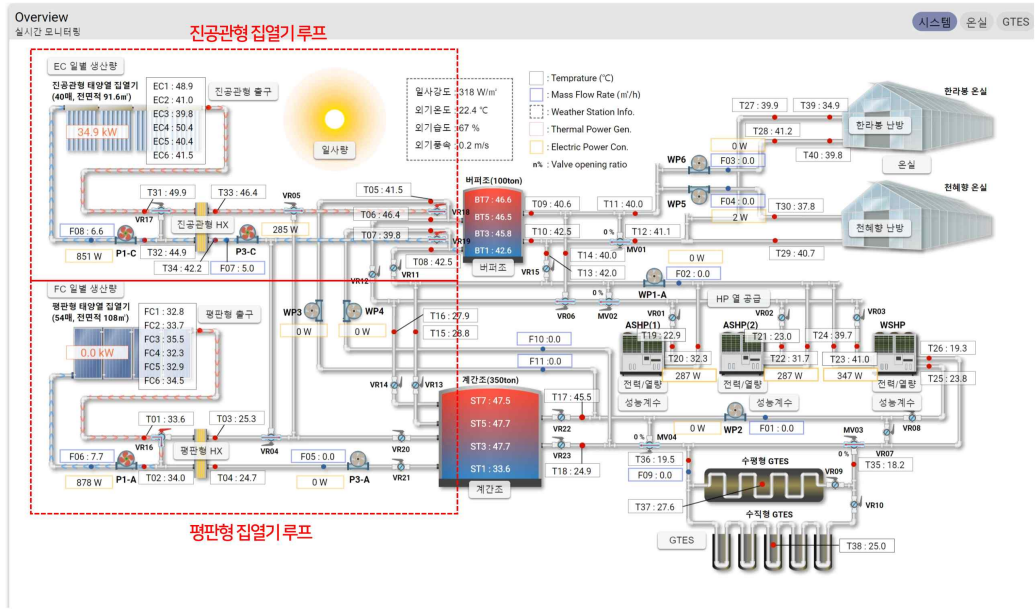
(가) 태양열 집열

난방기 기간 동안 계간조와 태양열 루프를 [그림 4-80]과 같이 진공관형 집열기의 2차측은 버퍼조를 축열할 수 있도록 구성하였고, 평판형 집열기는 계간조와 연계되도록 구성하였다. 이는 비난방기와는 다르게 버퍼조, 계간조 모두 열을 활용하므로 서로 다른 2종의 집열설비의 1차측의 집열기 유입 온도를 모두 낮게 유지하여 집열기의 열효율을 높이기 위함이다.

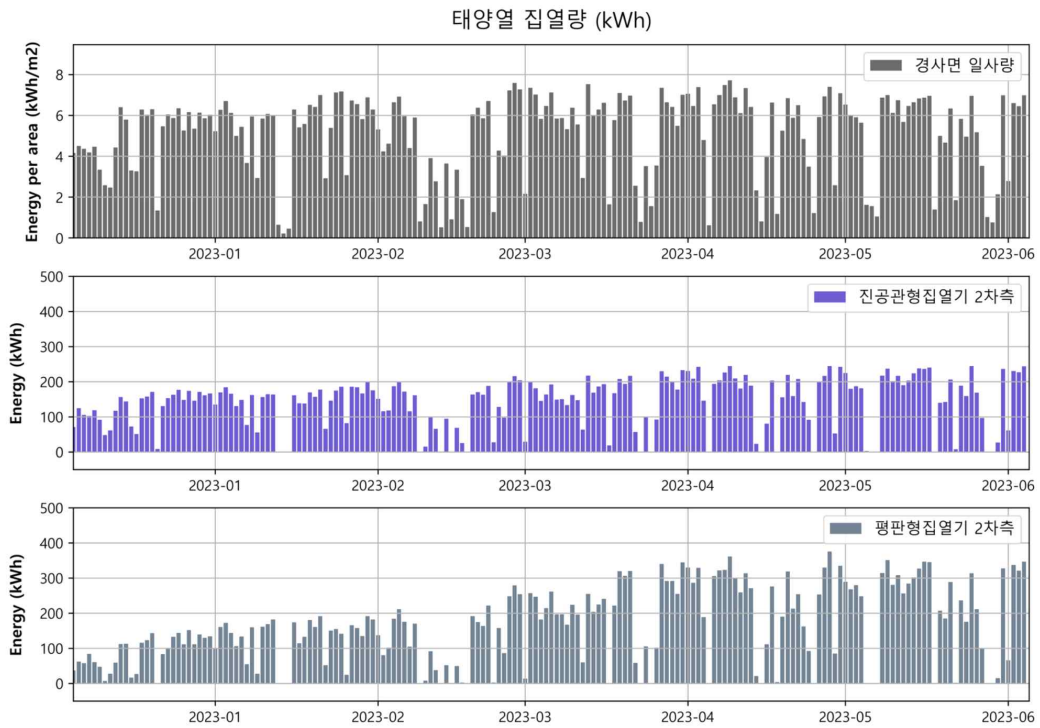
[그림 4-81]은 하루 단위의 시간에 따른 난방기 기간동안에 집열면에 작용하는 단위면적당 경사면일사량과 각 집열설비의 2차측 루프에서 획득되는 열량을 나타낸다. 열량 계산방식은 비난방기와 동일하게 진행되었다. [그림 4-82]는 하루 단위의 시간에 따른 평균 집열효율을 나타낸다. 집열효율은 하루 단위의 집열기별로 2차측 열생산량을 집열면에 투입된 일사량으로 나누어 구하였다.

평판형 집열설비의 경우 집열량과 집열효율은 난방기 초기에서 후기로 갈수록 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 계간조에 저장된 열량을 활용함에 따라 계간조 온도가 낮아져 집열설비 입구온도도 낮아져 집열효율이 증가하기 때문이다. 진공관형 집열기의 경우 집열량과 효율의 등락이 크지 않는데, 이는 버퍼조의 축열상태를 일정수준 유지하기 때문에 나타나는 결과이다. 버퍼조의 축열상태는 온도가 너무 높으면 열손실이 커져 비효율적이고, 너무 낮아지면 온실 설정난방이 이루어지지 않을 수 있다. 이에 따라 본 실증에서는 온실 가온난방을 진행하는 시점에는 버퍼조의 레퍼런스 온도(BT04)를 35~55°C의 범위로 유지하였다.

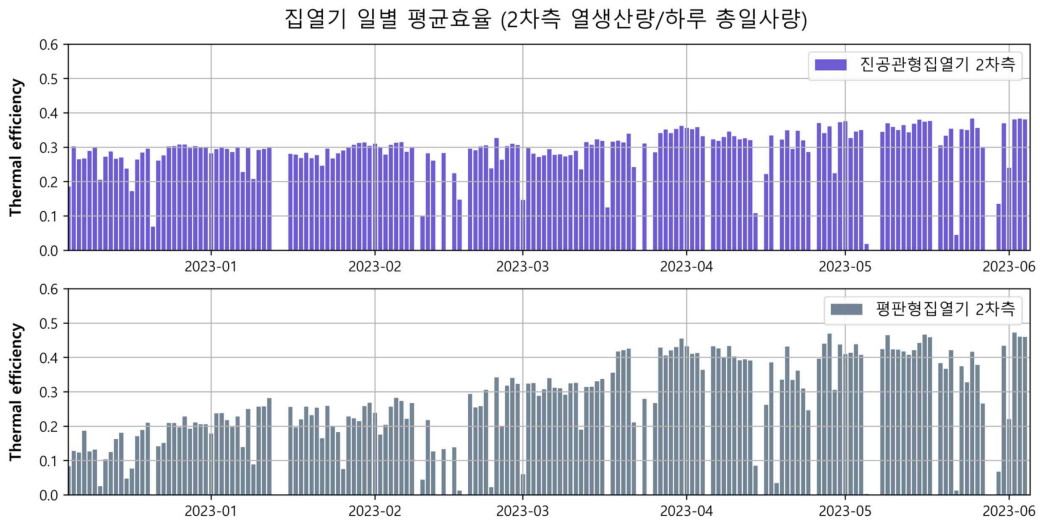
<표 4-18>은 난방기 기간의 태양열 집열량을 정리한 결과를 나타낸다. 평판형 집열기는 비난방기와 거의 동일한 평균효율을 보였고, 진공관형 집열기는 4.15%p 평균효율이 상승한 것을 확인할 수 있다.



[그림 4-80] 난방기 태양열 집열기 축열 루프



[그림 4-81] 난방기 일별 경사면 일사량, 집열기 종류별 2차측 집열량



[그림 4-82] 난방기 집열기 종류별 2차측 기준 일별 평균 열효율

<표 4-18> 난방기 총합 태양열 집열

	집열면적 (m2)	집열면 일사량 (MWh)	집열량 (MWh)	평균 집열효율
진공관형	91.6	88.99	25.42	0.3026
평판형	108	99.03	29.50	0.2979
총합	-	188.02	54.92	-

(나) 계간조, 버퍼조 및 얇은지중축열

본 실증운전 중 난방기에는 운영관리제어시스템에서 다룬 6개의 모드 중 아래 일정에 따라 3개의 모드에 대한 실증운전이 진행되었다. 기본적으로 버퍼조에서 온실 난방부하를 우선적으로 담당하고, 각 모드별로 계간조에서 버퍼조로 열을 이송하거나, 계간조에서 얇은 GTES로 열을 이송하므로 여기에서는 계간조, 버퍼조, 얇은GTES에서의 운전 특성과 결과에 대하여 설명한다.

- H-1 모드: '22년 12월 05일 ~ '23년 04월 26일
계간조에서 버퍼조로 열 이동
- H-2 모드: '23년 04월 27일 ~ '23년 05월 08일
계간조->수평형 얇은GTES 축열 + 공기열원 히트펌프 대수제어 운전
- H-3 모드: '23년 05월 09일 ~ '23년 06월 04일
수평형 얇은GTES 방열 + 수열원 히트펌프 운전

난방기 기간 동안의 계간조, 버퍼조, 수평 및 수직 얇은GTES의 지중 온도의 변화를 세부적으로 파악하기 위해 [그림 4-83]과 같이 온도변화를 나타내었다. 각 열저장조의 온도가 감소하는 부분은 열활용, 열이동 또는 열손실에 의한 것이며, 계간조의 온도가 상승하는 부분은 평판형 집열기로 부터의 축열에 의한 것이다.

온실의 실질적인 가온 난방 (설정온도 10~18°C 범위)은 '23년 3월 10일부터 이루어졌으며, 이전의 '22년 12월 5일부터 '23년 3월 10일 전까지는 온실설정온도를 1.5°C 수준으로

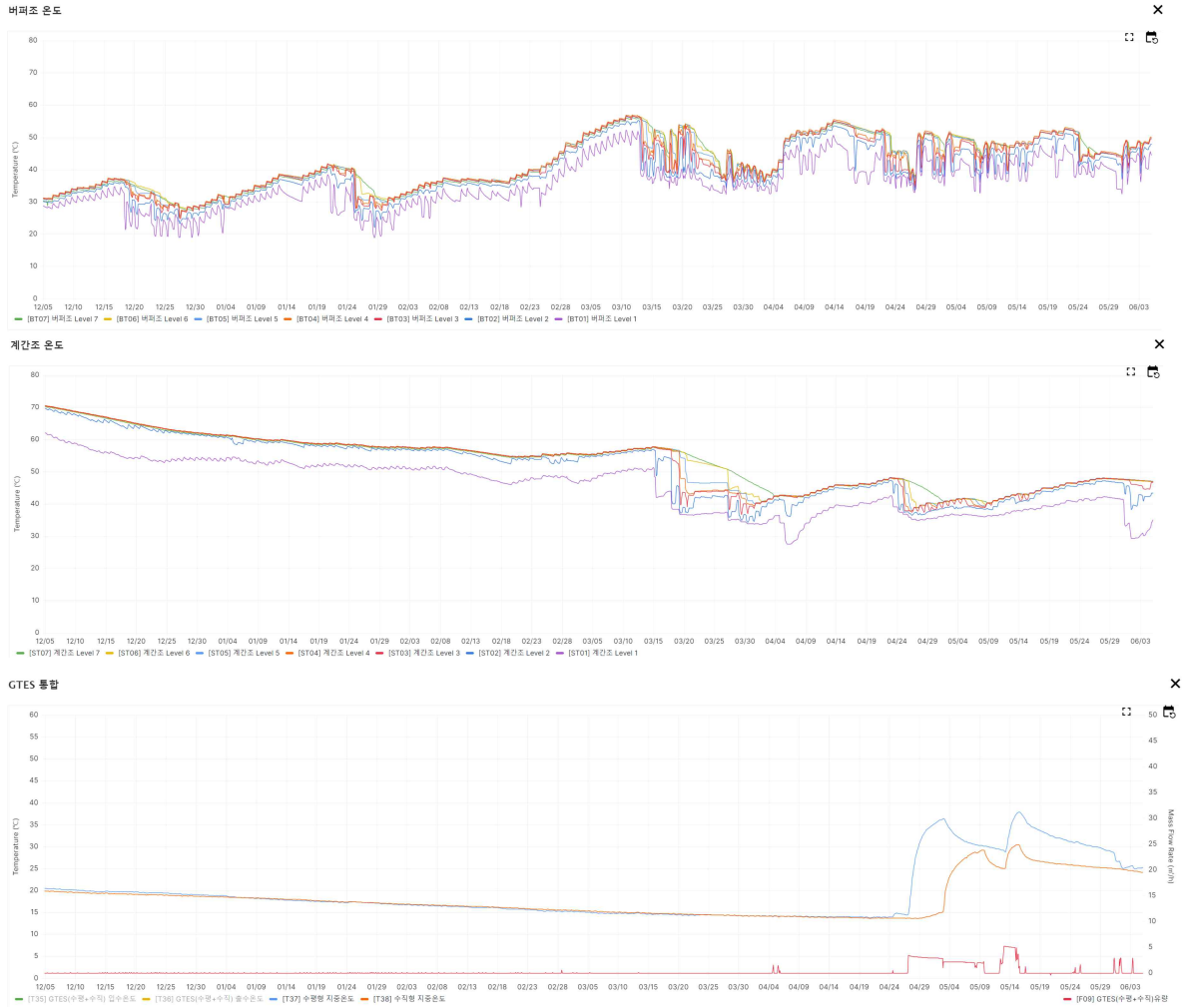
만 낮게 유지하였다. 이는 작물 생장에 필요한 난방시점에 기인한다. 이에 따라 3월 10일 이전에는 버퍼조의 온도를 온실공급을 위한 범위인 35~55°C로 유지하지 않고, 진공관형 집열기로 축열되었다가 야간에 일부의 열이 공급되는 운전을 유지하였다.

[그림 4-84]는 1일 단위 버퍼조에서 온실로 공급한 열량과, 계간조에서 버퍼조로 이송한 열량, 계간조에서 얇은GTES로 이송한 열량을 나타낸다. 3월 10일 전까지는 상대적으로 작은 열량만 온실로 공급되었고, 이후 작물 가온난방 성장 스케줄에 맞춰 본격적인 열량이 버퍼조로부터 공급된 것을 알 수 있다. 버퍼조의 축열상태가 낮아짐에 따라, H-1모드의 계간조에서 버퍼조로 열 이동 클래스가 4월 26일까지 발생하였다. 4월 27일 부터는 계간조의 온도가 직접난방으로 활용되기 어려운 온도 이하로 낮아져, 계간조의 열을 수평형 얇은 GTES로 이송하였다.

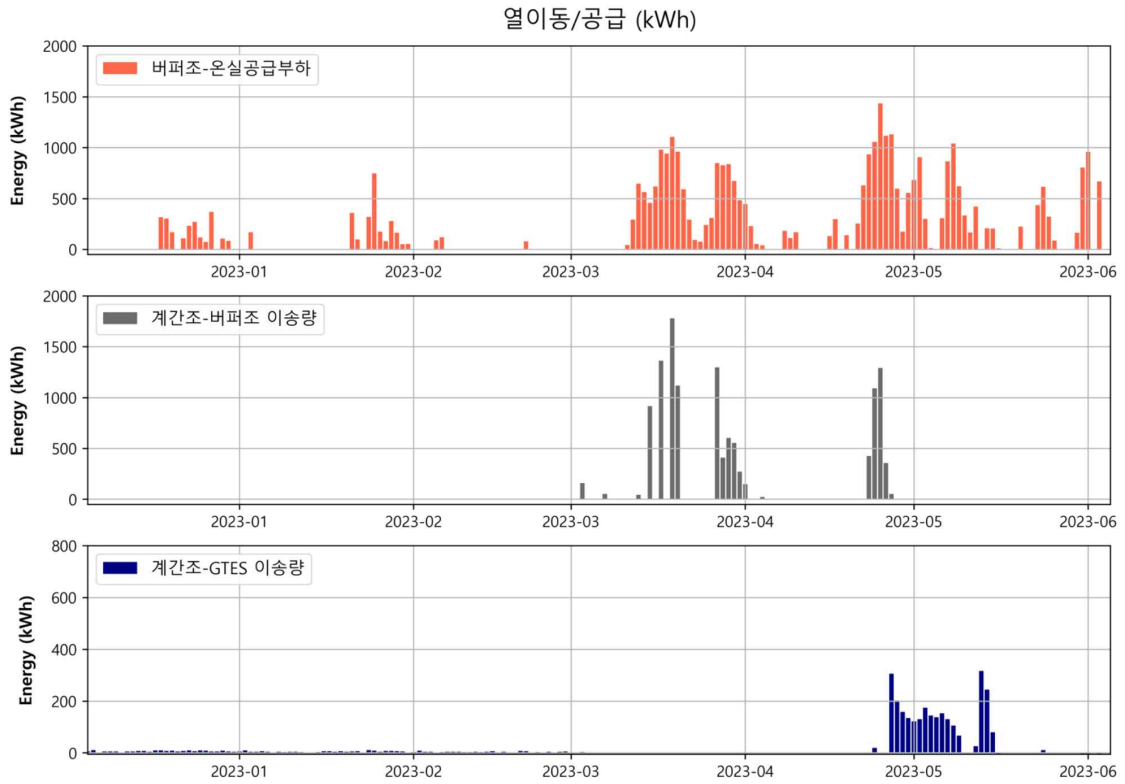
[그림 4-85]는 1일 단위 계간조와 버퍼조로 태양열로부터 축열된 축열량과 열손실량을 나타낸다. 특이사항으로는 '23년 2월 25일에 계간조와 버퍼조의 입출구 포트 배관에 2-way 자동밸브를 추가하여 유량이 발생하지 않는 시점에는 밸브를 닫아두는 기능을 추가하였다. 이에 대한 이유와 분석은 실증설비 보완 부분에서 자세히 설명할 예정이다. 이러한 밸브설치로 인하여 26일부터의 시운전 이후 특히 계간조의 열손실량이 크게 감소함을 확인할 수 있다.

(다) 온실 난방부하 공급

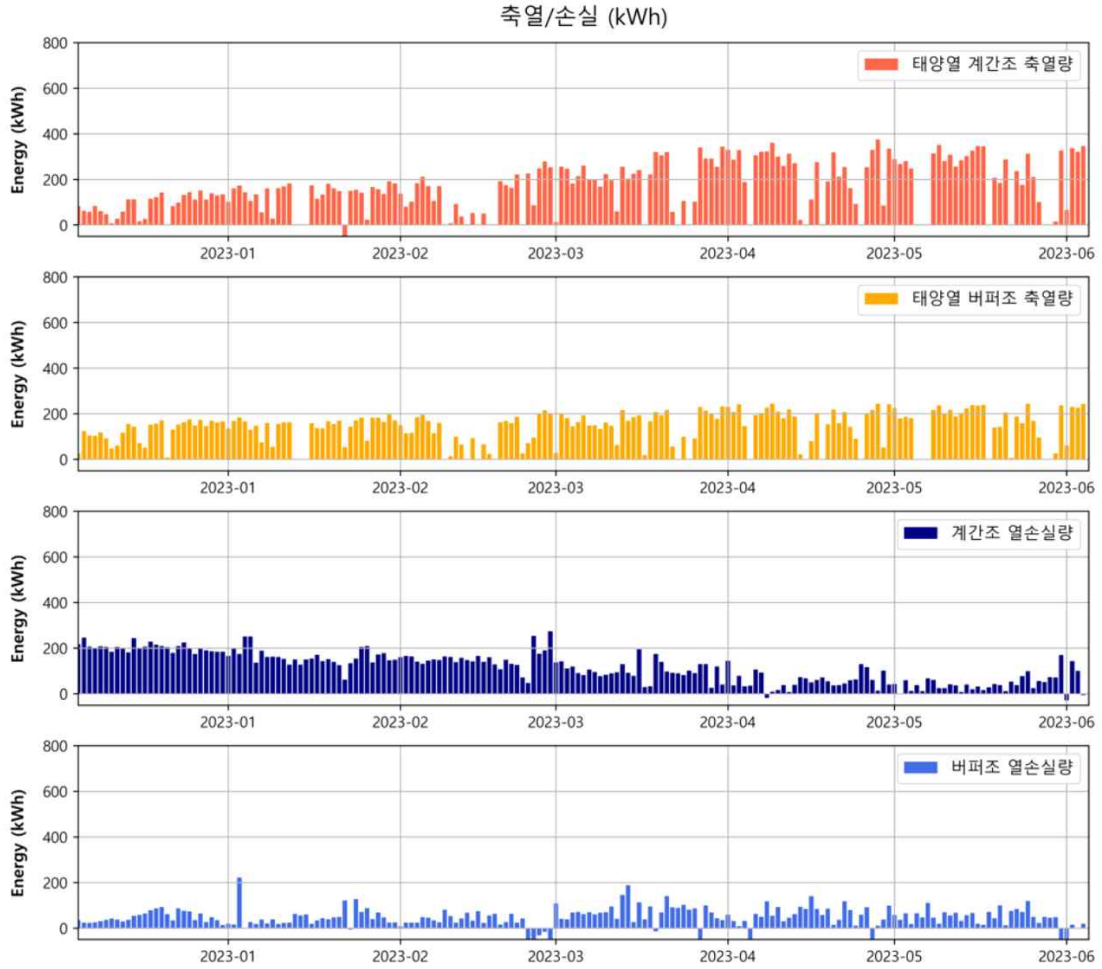
온실의 본격적인 가온난방은 한라봉 온실의 경우 3월 10일, 천혜향 온실의 경우 3월 20일부터 시작되었다. 작물 성장 특성상 초기에는 10°C로부터 하루에 1°C 올려 최종 18°C까지 올려 유지를 한다. 이후 생식성장 촉진을 위해 온도를 12°C로 낮추어 일정기간 유지한다. 이후 다시 온도를 최종 18°C 까지 유지한 뒤 야간의 자연온도가 설정온도 18°C가 되는 시점부터 난방기를 종료한다. 이에 따른, 일별 난방부하 및 배관손실량을 정량화하여 [그림 4-86]에 나타내었다. 한라봉 온실의 경우 배관손실이 천혜향 온실보다 2배이상 큰 것을 확인할 수 있다. [그림 4-87]에 보인 바와 같이 이는 천혜향 온실은 기계실과 가까운데 반해, 한라봉온실은 천혜향 온실의 단열커튼과 온실 사이 공간을 지나고 작업동 이후에 위치하여 그 거리가 상당하다. 또한, 천혜향의 온실을 지나는 부분 또한 단열커튼과 온실 사이의 난방이 이루어지지 않는 공간에 있어 야간의 열손실이 커지게 된다.



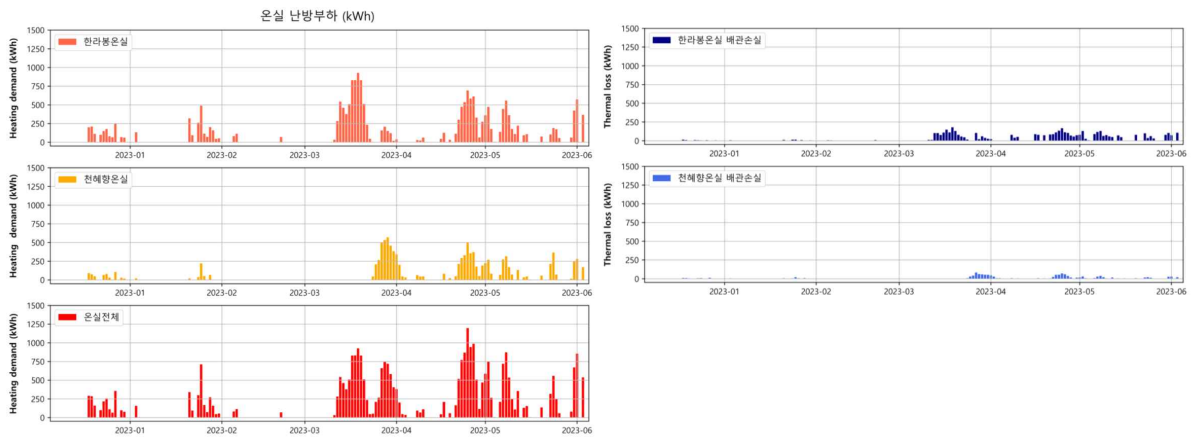
[그림 4-83] 난방기 기간 1분단위 버퍼조, 계간조, 수평/수직 지중온도 및 유량 변화



[그림 4-84] 난방기 기간 1일단위 열이동/공급



[그림 4-85] 난방기 기간 1일단위 축열량, 열손실량



[그림 4-86] 난방기 기간 1일단위 온실별 난방부하 및 배관손실

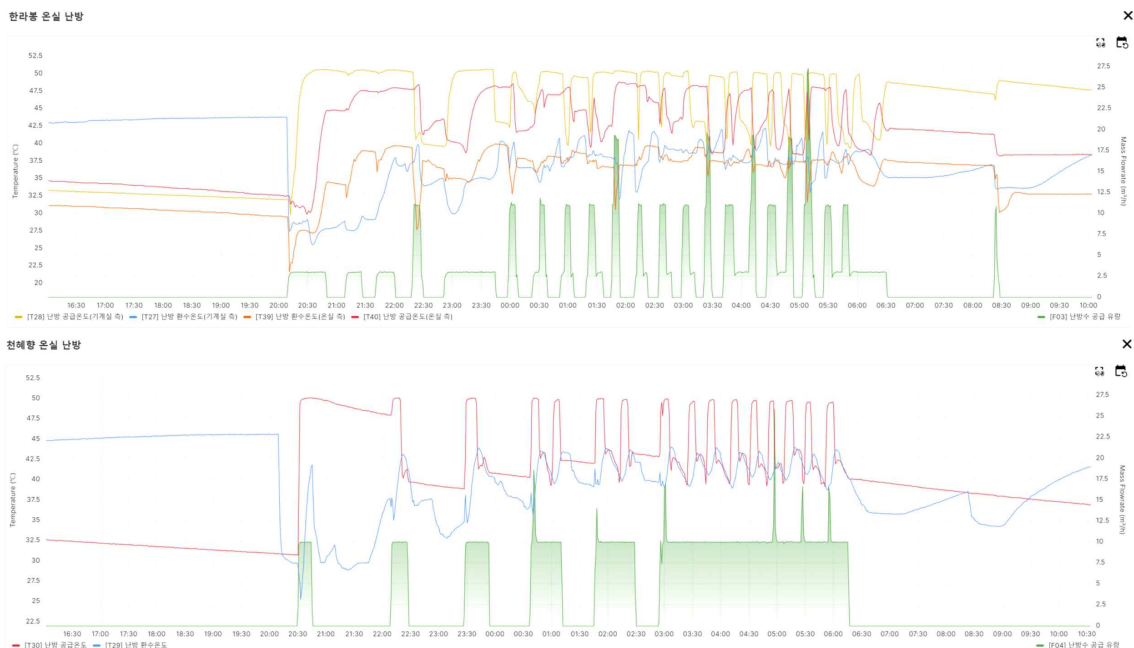


한라봉 온실공급배관

온실내부 전경

[그림 4-87] 한라봉 온실 공급배관 및 온실 내부 전경

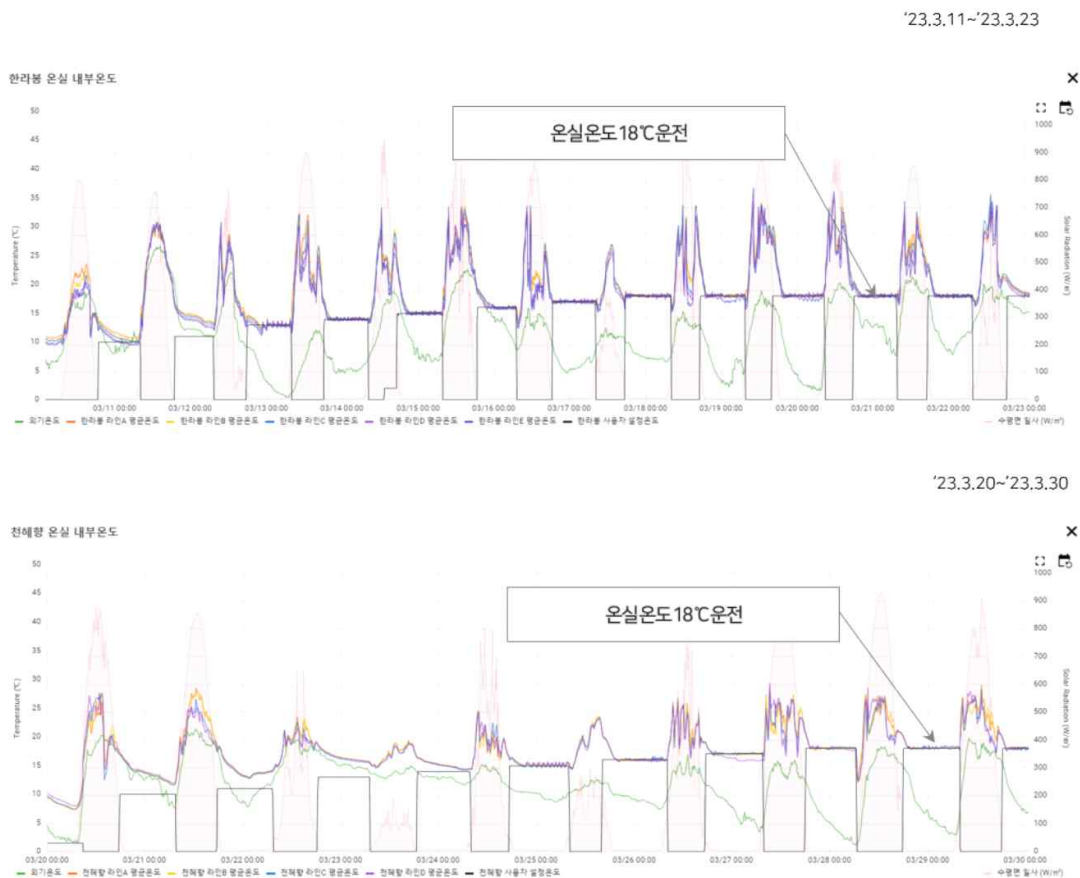
[그림 4-88]은 '23년 4월 27일의 1분 단위 한라봉 온실과 천혜향 온실로 공급되는 온수의 입수 및 환수 온도와 유량을 나타낸다. 유량을 보면 한라봉 온실의 경우 3, 11, 27 m³/hr 등 천혜향 온실의 경우 10, 15, 25 m³/hr 등으로 변하는 것을 알 수 있는데 이는 각 온실의 대공간 균일 난방을 위해 존별 온도제어를 하기 때문이다. 각 존별로 필요한 시기에 필요한 정도만 난방을 하므로 온실의 온도가 위치에 따라 균일하게 유지될 수 있다. 온실의 공급온도와 환수온도를 보면 일정 범위를 유지하는 것을 확인할 수 있는데 이는 환수온도를 기준으로 온실공급온수를 환수와 믹스하는 삼방밸브의 개도를 PID제어가 적절히 작동했음을 시사한다.



[그림 4-88] 1분단위 온실 별 공급/환수 온도 및 유량 ('23년 4월 27일)

[그림 4-89]는 가온 난방기의 각 온실별로 1분 단위의 농장주의 설정온도 (검정)와 각 레

이어별 온도, 외기온도, 일사량 데이터를 종합적으로 나타낸다. 중요한 점은 농장주 설정온도에 따라 한라봉 온실의 경우 5어레이(A~E)의 온도가 균일하게 유지되는 것과 천혜향 온실의 경우 4어레이(A~D)의 온도가 균일하게 유지되는 것이다. 온도가 한부분이 낮으면 작물생장이 불균일 적으로 발생해 과실 관리에 애로사항이 생긴다. 온도가 한부분이 높으면 그만큼 에너지가 낭비되고 있다는 의미이다. 아래 그림에 따르면 설정온도에 맞게 전영역 고르게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 개발 열공급시스템의 온실 난방 제어 안정성과 높은 제어성능 (온도 유지 응답성, 설정온도 정상상태 오차)을 확인할 수 있었다.

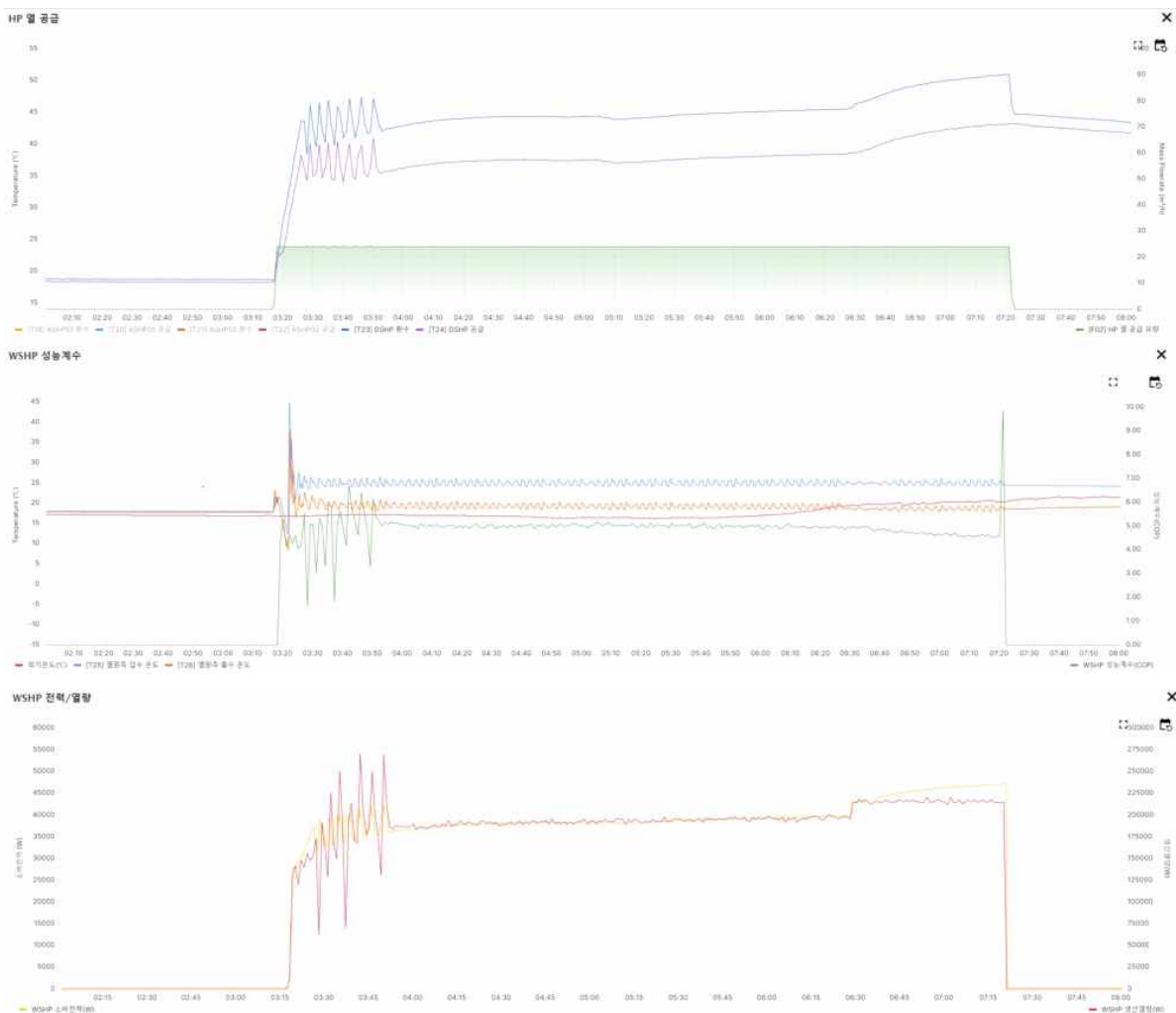


[그림 4-89] 1분단위 온실 별 설정온도, 레이어별 온도, 외기온도 및 일사량

(라) 히트펌프 운전

[그림 4-90]은 개발 열공급시스템의 복합열원 중 수열원으로 동작한 히트펌프의 작동특성을 나타낸다. 그림의 상부에는 부하측 1분 단위 입출수 온도와 순환 유량을 나타내며, 히트펌프 부하측은 버퍼조와 연결이 되어 버퍼조의 축열상태를 높이는 역할을 한다. 초기 온도 맥동은 버퍼조와 히트펌프 부하측 배관에 연결된 바이패스 삼방 모터밸브 MV02의 PID 제어작동에 기인한다. 히트펌프 스타트업 시 발생하는 파이프에 존재하는 낮은 온도의 열이 버퍼조로 유입되는 것을 방지하고, 히트펌프의 부하측 생산온도를 빠르게 높이고 버퍼조로 유입하는 유량의 영향을 줄이기 위하여 적용한 방식이다. 중간부의 그림은 히트펌프 수열원 입출수의 온도와 순환유량을 나타낸다. 본 연구에서는 히트펌프 열원측 입수온도를

25°C를 설정온도로 바이패스 삼방 모터밸브 MV 04 PID 제어를 하였다. 히트펌프의 열원은 H-3모드의 경우 수평형 얇은GTES에 저장된 열과 계간조의 열을 동시에 활용하였다. 다만 펌프의 용량이 부족하여 수평형 GTES 배관 내 흐를 수 있는 유량이 히트펌프 구동 유량의 1/10 수준으로 지중으로 흐르는 유량이 상당히 부족한 수준이다. 그렇지만 PID제어를 통하여 히트펌프 열원 입구온도를 안정적으로 유지하는데 그 목적이 있으며, 히트펌프 열생산 운전간 안정적으로 입구온도를 설정온도로 유지함을 확인할 수 있다. 운전 간 획득되는 성능계수는 작동 초기에는 4.9수준이었으며, 부하측 출수 온도 초기 40°C에서 50°C수준으로 높아짐에 따라 4.2 수준으로 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

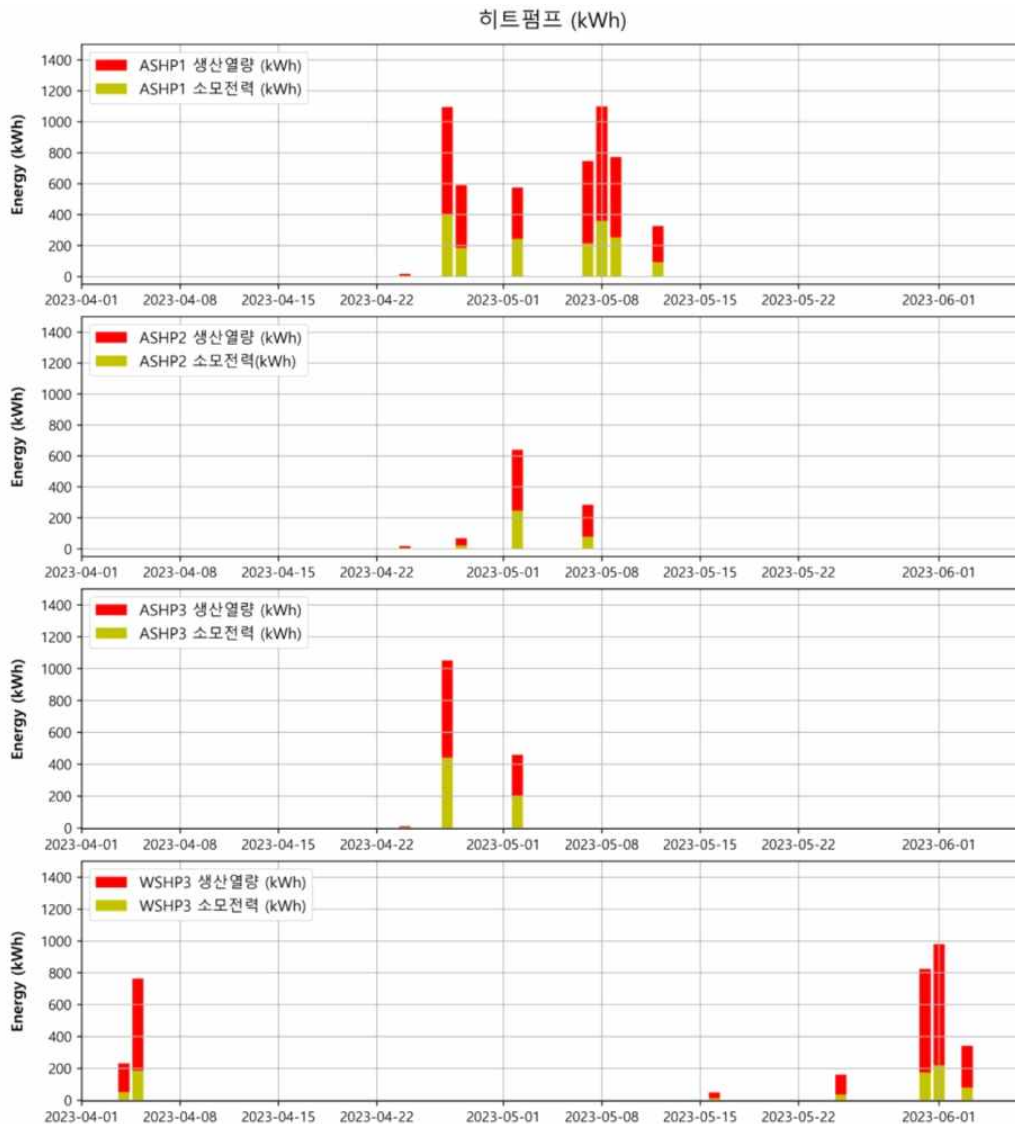


[그림 4-90] 본 열공급 시스템 내 수열원 히트펌프 작동 특성: (상) 부하측 입/출수 온도, 부하측 순환유량 (중) 열원측 입출수 온도, 히트펌프 성능계수, (하)히트펌프 소비전력, 히트펌프 생산 열량

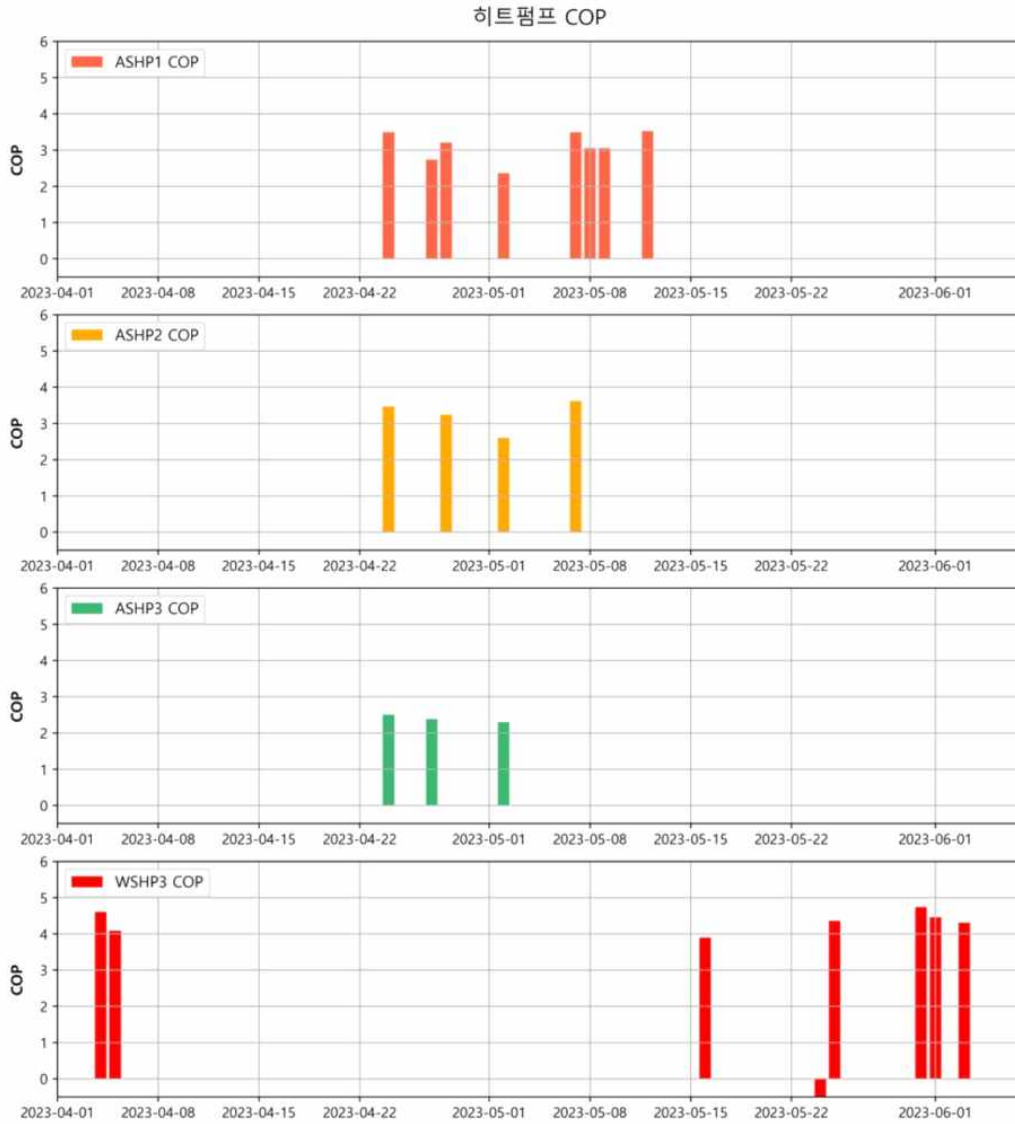
[그림 4-91]은 난방기 전체 기간 동안 히트펌프 종류에 따른 일별 전력소비량와 생산열량을 나타낸다. H-1모드 기간이었지만, 수열원 히트펌프의 연계 시운전을 위해 작동이 되었다. 5월 8일까지는 H-2모드로 공기열원 히트펌프가 운전이 되었으며, 5월 9일부터 6월 4일까지 H-3모드로 수열원 히트펌프가 운전이 되었다. [그림 4-92]는 난방기 전체 기간 동안

히트펌프 종류별 일별 평균 COP를 나타낸다. 본 COP 산정에는 CT센서로 측정된 히트펌프에 소모된 전력량 대비 부하측에 생산된 열량 (입출수 온도, 유량을 통한 엔탈피 차이로 계산)을 활용하였다.

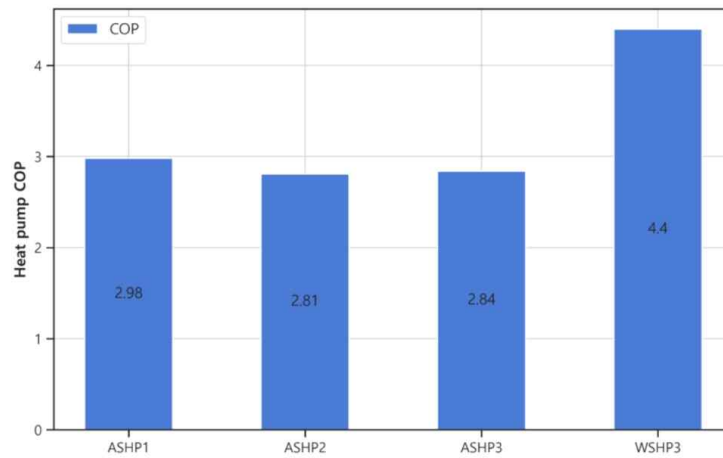
[그림 4-93]은 난방기 전체 기간동안의 히트펌프 종류별 평균 COP를 나타낸다. 공기열원 히트펌프 1,2,3은 각각 2.98, 2.81, 2.84를 나타내었으며, 수열원히트펌프 3은 4.4로 공기열원 히트펌프보다 높은 값을 보였다. 공기열원 히트펌프의 평균 COP가 낮은 이유는 [그림 4-94]와 같이 히트펌프 작동 중 히트펌프 자체 제어로직에 따라 열생산 사이클이 반대로 돌아 난방기간 동안 히트펌프에 맺힌 성에를 제거하기 위한 제상운전이 가동되었기 때문이다. 약 3시간의 운전기간동안 본 조건에서는 2번 히트펌프의 경우 6회, 1번 히트펌프의 경우는 4회의 제상이 회당 15분 이상 걸리는 것을 확인하였다. 이를 통하여 안정적으로 열원이 주어지는 경우 더 효율적으로 열을 생산할 수 있는 수열원 히트펌프의 효과를 확인할 수 있었다.



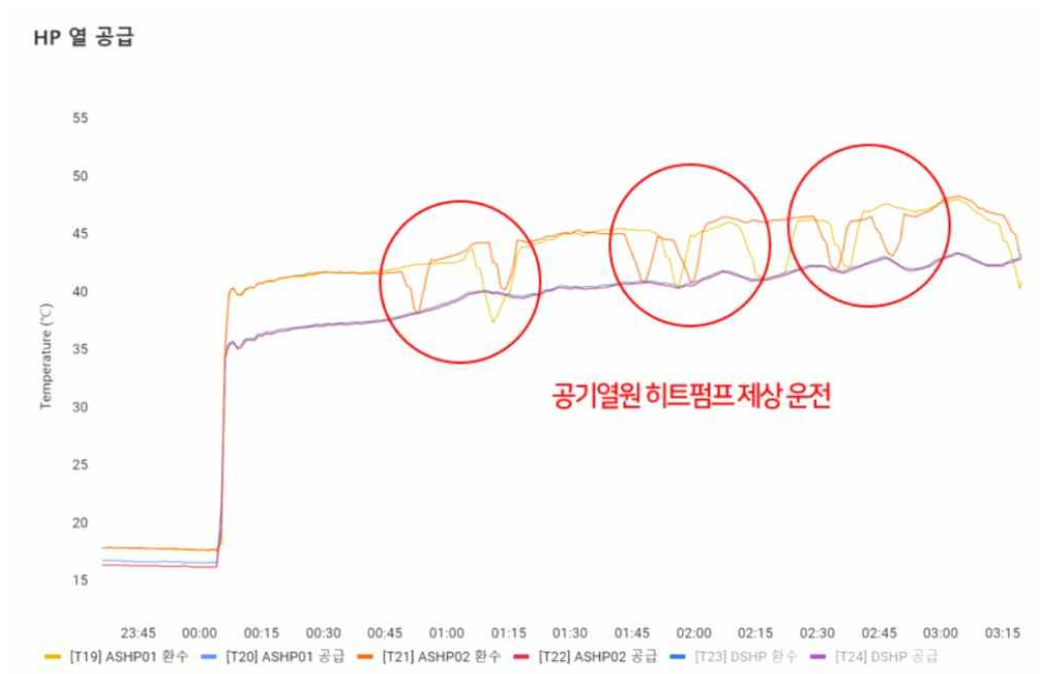
[그림 4-91] 히트펌프 종류, 일별 전력소비량과 생산열량 (생산열량 막대그래프에서 상단이 생산열량값에 해당)



[그림 4-92] 히트펌프 종류, 일별 COP



[그림 4-93] 난방기 전체기간 동안의 히트펌프 종류별 평균 COP



[그림 4-94] 공기열원 히트펌프의 제상운전 특성에 기인한 부하측 열생산 온도 변화

난방기간 중 열생산량과 열이동량 그리고 열공급량을 정리하여 <표 4-19>에 정리하여 나타내었다.

<표 4-19> 난방기 열공급 시스템 열량 종합 정리

대분류	구분	계간조/버퍼조 밸브 추가 전 (221205~230225)	계간조/버퍼조 밸브 추가 후 (230226~230604)	난방기 전체기간 (221205~230604)
열생산	태양열-계간조 축열량 (MWh)	8.49	20.94	29.43
	태양열-버퍼조 축열량 (MWh)	9.83	15.41	25.24
	계간조 열손실 (MWh)	13.88	7.32	21.20
	버퍼조 열손실 (MWh)	3.64	5.00	8.64
	계간조 열효율	-0.6346	0.6507	0.2799
	버퍼조 열효율	0.6292	0.8701	0.8211
열이송	계간조~버퍼조 이송량 (MWh)	-	11.98	11.98
	계간조~GTES이송 량 (MWh)	0.44	2.61	3.06
	계간조~히트펌프 수열원 (MWh)	0.02	2.82	2.85
	계간조 out 총합 (MWh)	0.46	17.42	17.88
히트펌프	ASHP1 생산열량 (MWh)	-	5.23	5.23
	ASHP2 생산열량 (MWh)	-	1.01	1.01
	ASHP3 생산열량 (MWh)	-	1.52	1.52
	WSHP1 생산열량 (MWh)	-	3.36	3.36
	히트펌프 생산열량 총합 (MWh)	-	11.12	11.12
열공급	한라봉온실 열공급 (MWh)	3.71	16.73	20.44
	천혜향온실 열공급 (MWh)	0.98	9.55	10.53
	한라봉온실 배관손실 (MWh)	0.17	4.53	4.70
	천혜향온실 배관손실 (MWh)	0.12	1.18	1.29
	버퍼조 out 총합 (MWh)	4.97	31.99	36.96

(마) 실증기간 전체시스템의 에너지 밸런스 및 태양열의존율

버퍼조와 계간조 등 열저장조의 비난방기, 난방기 그리고 전체실증기간에 설치된 열에너지 입출입량 등을 정리하여 <표 4-20>에 나타내었고, 히트펌프 등 전력소비량 등을 <표 4-21>에 정리하여 나타내었다. 정리한 내용과 같이 계간조와 버퍼조를 포함한 본 실증모델에 적용된 전체 탱크식 열저장의 실증기간에 걸친 효율은 약 43% 정도로 나타났다. 비난방기와 난방기1에 걸쳐서 단열이 부족했던 기간과 열저장조 연결배관부 내부의 자연대류로 인한 열손실 등에 의하여 기존 연구사례의 유사한 용량의 열저장조에 대한 효율 수준인 50%보다는 다소 낮게 나타났지만, 다음 해의 운전부터는 크게 향상된 효율을 나타낼 것으로 예상된다.

실증시스템의 연간 운전에 대한 에너지밸런스 확인을 위한 에너지흐름도는 다음과 같다. 온실의 난방부하를 만족시키기 위하여 공급된 총 난방열량은 37.47 MWh이며, 이 중에서 태양열로 공급된 열량을 구하기 위하여 에너지밸런스로부터 다음의 식을 도출하였다.

$$Q_{load} = Q_{sol,dir} + Q_{wshp} + Q_{ashp} \tag{식 4-15}$$

$$= Q_{sol,dir} + Q_{sol,s} + W_{wshp} + Q_{air,s} + W_{ashp}$$

$$Q_{sol} = Q_{sol,dir} + Q_{sol,s} \tag{식 4-16}$$

$$= Q_{load} - (W_{wshp} + Q_{air,s} + W_{ashp})$$

$$= Q_{load} - (W_{wshp} + Q_{ashp})$$

위 식에서 $Q_{sol,dir}$ = 온실부하에 직접공급된 태양열량,
 $Q_{sol,s}$ = 복합열원히트펌프의 수열원으로 공급된 태양열량,
 Q_{load} = 온실부하량,
 Q_{wshp} = 복합열원 히트펌프의 수열원 모드 동작시 열공급량,
 Q_{ashp} = 복합열원 히트펌프의 공기열원 모드 동작시 및 공기열원 히트펌프의 열공급량,
 W_{wshp} = 복합열원 히트펌프의 수열원 모드 동작시 전력소비량,
 W_{ashp} = 복합열원 히트펌프의 공기열원 모드 동작시 및 공기열원 히트펌프의 전력소비량,
 $Q_{ashp,s}$ = 공기열원 히트펌프의 공기열원으로 공급된 공기열량을 의미한다.
 온실에 공급된 태양열량은 위 식에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$Q_{sol} = 37.48 - (0.76 + 3.01 + 5.78) \tag{식 4-17}$$

$$= 37.48 - (0.76 + 8.79) = 27.93 \text{ MWh}$$

따라서, 온실난방을 위한 열공급량 중에서 태양열이 차지하는 비율인 태양열의존율(SF, Solar Fraction)은 다음과 같이 74.5%로 계산되었다.

$$SF = \frac{27.93 \text{ (MWh)}}{37.47 \text{ (MWh)}} = 0.745 = 74.5\% \tag{식 4-18}$$

그렇지만 계간조에 남은 잔량의 열에너지가 각각 7.14 MWh 정도가 있는 점을 고려하면 더 높은 난방부하가 발생하는 경우를 가정하여 계간조의 잔열을 히트펌프 열원으로 더 공급하여 태양열의존율은 더 높아질 수 있는 상태라고 볼 수 있다.

<표 4-20> 전체 실증 기간 열공급 시스템 열량 총합 정리 (a) 열생산, 열이송, 히트펌프 및 열공급

대분류	구분	비난방기 (220425~231204)	난방기 (221205~230604)	전체 실증기간 (220425~230604)
열생산	태양열-계간조 축열량 (MWh)	59.48	29.43	88.91
	태양열-버퍼조 축열량 (MWh)	0.11 (시운전)	25.24	25.35
	계간조 열손실 (MWh)	41.19	21.20	62.39
	버퍼조 열손실 (MWh)	1.16	8.64	9.80
	계간조 열효율	0.3075	0.2796	0.2983
	버퍼조 열효율	-	0.8020	0.8020
열이송	계간조~버퍼조 이송량 (MWh)	-	11.98	11.98
	계간조~GTES이송 량 (MWh)	1.50	3.06	4.56
	계간조~히트펌프 수열원 (MWh)	-	2.85	2.85
	계간조 out 총합 (MWh)	1.50	17.88	19.38
히트펌프	ASHP1 생산열량 (MWh)	0.03 (시운전)	5.23	5.26
	ASHP2 생산열량 (MWh)	0.44 (시운전)	1.01	1.45
	ASHP3 생산열량 (MWh)	0.58 (시운전)	1.52	2.11
	WSHP1 생산열량 (MWh)	-	3.36	3.36
	히트펌프 생산열량 총합 (MWh)	1.05 (시운전)	11.12	12.18
열공급	한라봉온실 열공급 (MWh)	0.35 (시운전)	20.44	20.79
	천혜향온실 열공급 (MWh)	0.14 (시운전)	10.53	10.67
	한라봉온실 배관손실 (MWh)	0.01 (시운전)	4.70	4.70
	천혜향온실 배관손실 (MWh)	0.02 (시운전)	1.29	1.31
	버퍼조 out 총합	0.52 (시운전)	36.96	37.48

<표 4-20> (표 계속) 전체 실증 기간 열공급 시스템 열량 총합 정리 (b)계간조

항목	비난방기	난방기			전체기간
		난방기 1	난방기 2	전체난방기	
ΔQ_{ST}	16.79	-5.85	13.62	8.23	7.14
Q_{IN}	59.48	8.49	20.94	29.43	88.91
Q_{OUT}	1.5	0.46	17.42	17.88	19.38
Q_{LOSS}	41.19	13.88	7.32	21.20	62.39
$Q_{IN} - Q_{LOSS}$	18.29	-5.39	13.62	8.23	26.52
$Q_{OUT} + \Delta Q_{ST}$	18.29	-5.39	13.62	8.23	26.52
Eff_{ST}	0.3075	-0.6346	0.6504	0.2796	0.2983

<표 4-20> (표 계속) 전체 실증 기간 열공급 시스템 열량 총합 정리 (c) 버퍼조

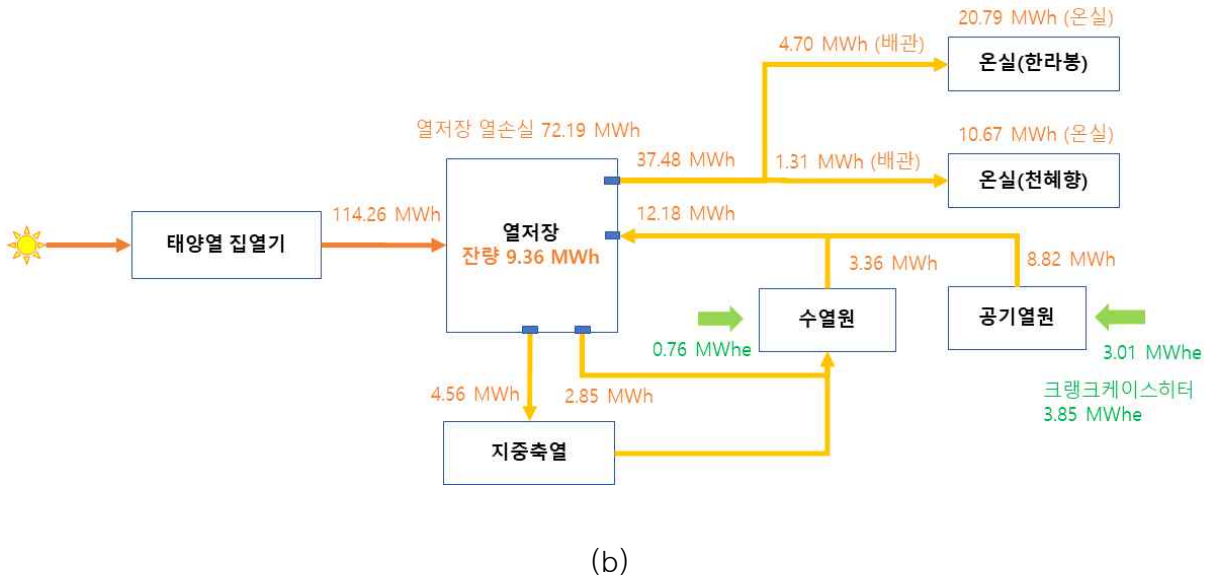
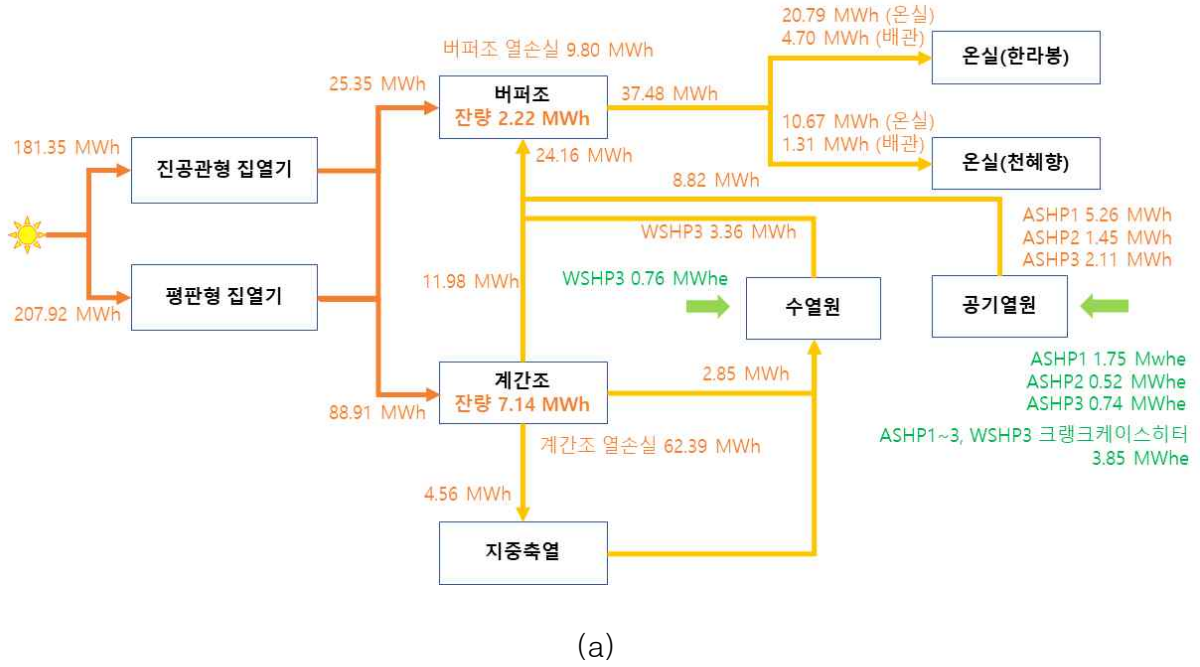
항목	비난방기	난방기			전체기간
		난방기 1	난방기 2	전체난방기	
ΔQ_{ST}	0	1.22	1.52	2.74	2.22
Q_{IN}	1.16	9.83	38.51	48.34	49.50
Q_{OUT}	1.16	4.97	31.99	36.96	37.48
Q_{LOSS}	0	3.64	5.00	8.64	9.80
$Q_{IN} - Q_{LOSS}$	0	6.19	33.51	39.70	39.70
$Q_{OUT} + \Delta Q_{ST}$	0	6.19	33.51	39.70	39.70
Eff_{ST}	-	0.6297	0.8702	0.8213	0.8020

<표 4-20> (표 계속) 전체 실증 기간 열공급 시스템 열량 총합 정리 (d) 계간조와 버퍼조 전체 열저장

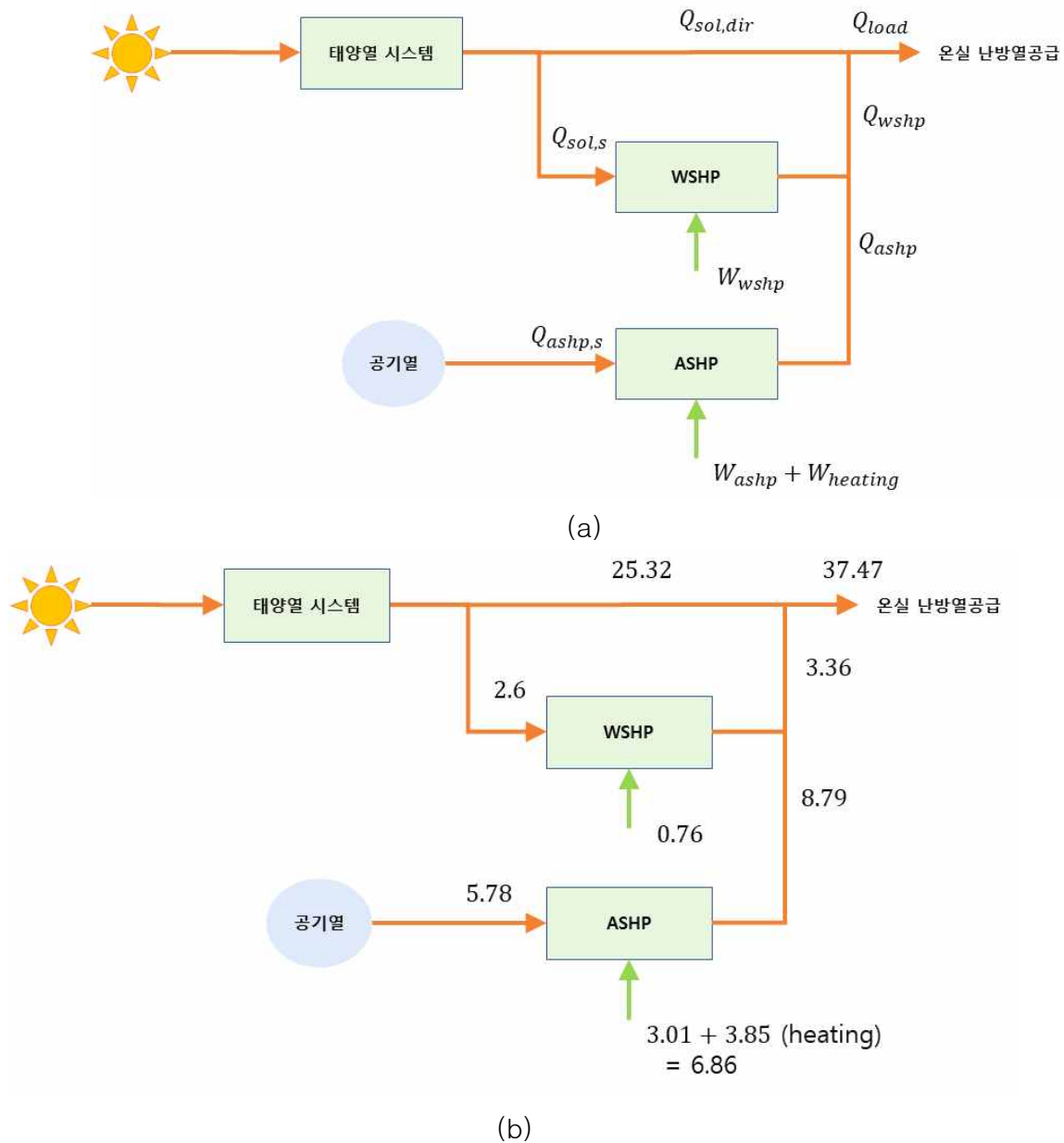
항목	비난방기	난방기			전체기간
		난방기 1	난방기 2	전체난방기	
ΔQ_{ST}	16.79	-0.18	-7.25	-7.43	9.36
Q_{IN}	60.64	17.52	12.32	29.84	126.43
Q_{OUT}	1.5	0.98	42.40	43.38	44.88
Q_{LOSS}	42.35	17.52	12.32	29.84	72.19
$Q_{IN} - Q_{LOSS}$	18.29	0.8	35.15	35.95	54.24
$Q_{OUT} + \Delta Q_{ST}$	18.29	0.8	35.15	35.95	54.24
Eff_{ST}	0.3016	0.0437	0.7405	0.5464	0.4290

<표 4-21> 태양열 계간축열 히트펌프 열공급 시스템 소모 전력 총합 정리

대분류	구분	비난방기 (220425~231204)	난방기 (221205~230604)	전체 실증기간 (220425~230604)
열생산	태양열 1차측 펌프 (MWh)	2.38	2.04	4.42
	태양열 2차측 펌프 (MWh)	0.40	0.51	0.91
열이송	계간조~버퍼조 열 이송펌프 (MWh)	-	0.04	0.04
	계간조~GTES로의 열이송 & 히트펌프 열원측 겸용 펌프 (MWh)	0.09	0.52	0.61
히트펌프	히트펌프 부하측 펌프 (MWh)	-	0.28	0.28
	히트펌프 유지 시 (크랭크케이스 히터) 소모전력 (MWh)	0.18	3.67	3.85
	히트펌프 (MWh)	0.26	3.51	3.77
	온실 부하 펌프 (MWh)	0.01	0.86	0.87
열공급	FCU (MWh)	0.01	0.40	0.41



[그림 4-95] 전체 시스템의 실증운전을 통한 연간 에너지 흐름도 (a)구성요소 구분, (b)구성요소 단순화



[그림 4-96] 난방부하 중 태양열의존율 산정을 위한 에너지흐름도 개념

(a) 에너지흐름 개념도, 에너지흐름 수치도

(4) 에너지비용 절감율

실증운전을 통한 실증시스템의 기존 난방방식 대비 에너지비용 절감율은 지난 난방기간 동안 온실에 공급된 에너지를 기준으로 등유온풍기를 이용한 난방 에너지비용 대비 실증설비를 이용한 난방 에너지비용을 이용하여 산정하였다.

<표 4-22>에 나타낸 바와 같이 난방기간 동안 온실에 공급된 순수 공급된 에너지 즉 배관열손실을 제외한 난방용 열공급량은 한라봉 온실 20,790 kWh, 천혜향 온실 10,670 kWh로 총 31,460 kWh가 공급되었다.

총 공급된 열에너지를 기준으로 등유온풍기를 이용하여 난방을 할 경우에는 총 에너지비용 33,989,082 원이 발생하였고 등유가격은 난방기간 동안의 경북지역 평균 등유면세 가격

을 적용하였으며, <표 4-23>에 등유온풍기로 인한 에너지비용 추산값을 나타내었다..

본 실증설비를 이용하여 난방을 한 경우에는 <표 4-24>와 같이 총 에너지비용은 전력량 요금으로 774,330 원이며 전련 소비량은 난방기간 동안 운영한 펌프, 히트펌프, 팬코일유닛 등 난방시 사용된 모든 실증설비의 전력소비량을 더하였으며 전기 요금은 순수 전력량 요금을 적용하였고 기후환경요금과 연료비조정액은 제외하였다.

따라서 기존 등유온풍기 대비 실증설비의 에너지비용 절감율은 80.6%로 계산되었다. 한편, 기후환경요금과 연료비조정액까지 포함할 경우 75.5% 정도가 된다.

<표 4-22> 연간 온실 공급에너지

작물	공급 열에너지 (kWh)
한라봉	20,790
천혜향	10,670
소계	31,460

<표 4-23> 등유온풍기 에너지비용

구분	내용
등유면세 가격	1,296 원/liter
등유발열량	8,790 kcal/liter
에너지비용 (등유비용)	3,989,085 원

<표 4-24> 실증설비 에너지비용

구분	내용
전력소비량	14,610 kWh
전력량 요금단가	53 원/kWh
에너지비용 (전력량요금)	774,330 원

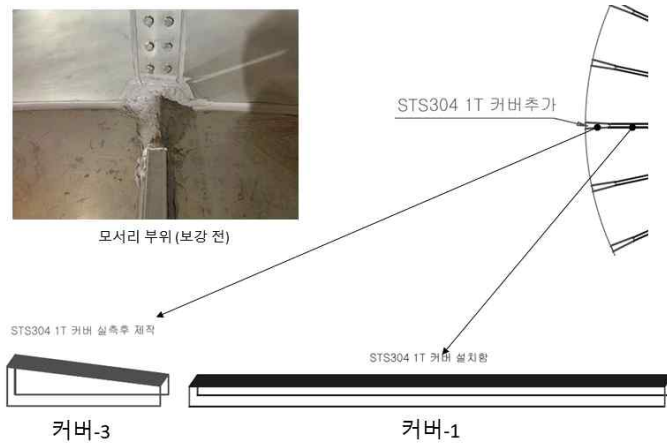
바. 실증설비 보완

(1) 열공급시스템

(가) 계간조 내부 접합부 보완

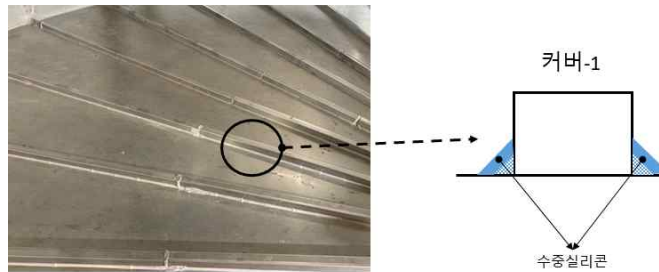
계간조의 접합부위로 인한 누수를 방지하기 위해서 계간조와 동일한 재료를 이용하여 중앙부위와 모서리 부위에 커버를 덧대고 실리콘으로 추가 보강하였다. 중앙부위 보강 방법은 노출된 실리콘 상부에 커버-2 를 덧대고, 원판을 덮은 후에 접합부 및 틈새는 수중실리콘(SIMP SEAL 640) 으로 보강하였다. 모서리부위 보강 방법은 [그림 4-97]에 나타낸 것과 같이 노출된 실리콘 상부에 커버-3 을 덧대고 후에 접합부 및 틈새는 수중실리콘(SIMP

SEAL 640) 으로 보강하였다.



[그림 4-97] 모서리부위 보강 방법

기존 커버부위 보강 방법은 [그림 4-98]과 같이 커버-1 좌우에 기 시공된 실리콘 상부에 수중실리콘(SIMP SEAL 640)을 추가 보강하였다. 접합부와 모서리 시공 후의 사진은 [그림 4-99]에 나타내었다.



[그림 4-98] 커버부위 보강 방법



(b) 중앙부위 접합부 보강 후 (b) 모서리부위 접합부 보강 후

[그림 4-99] 계간조 접합부 보강 후 사진

(나) 집열기 과열방지 추가 보완

태양열 계간축열 기반 열공급 시스템은 시설원예의 난방에너지 공급이 필요없는 기간 동안 획득되는 태양열 에너지를 계간조에 장기가 저장 후 난방 부하가 발생하는 시점에 저장된 열을 활용하는 시스템으로 열생산 및 열저장 시스템이 열공급 설비에 있어서 매우 중요한 요소이다.

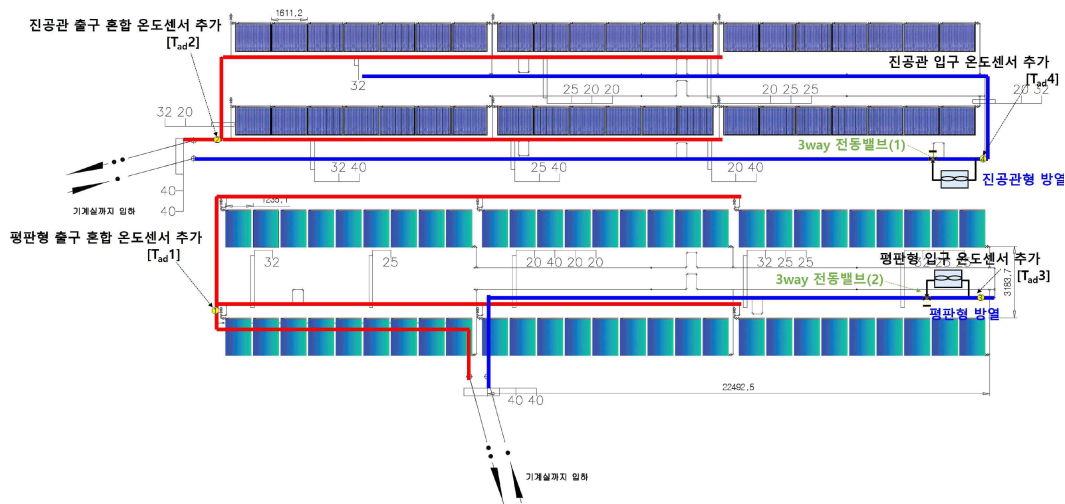
따라서 이러한 열생산 및 열저장 시스템의 지속적이고 안정적인 운영을 위해 계간조와 태양열 시스템의 과열을 방지하기 위한 별도의 시스템을 구축하였다.

태양열 집열기의 과열로 인한 계간조 등 설비에서 발생가능한 문제를 방지하기 위해 평판형 및 진공관형 태양열 집열기 1차측 라인에 30,000 kcal/h의 방열기 2기를 3 way 전동밸브 2기와 연계하여 계간축열조의 온도 및 태양열 집열기의 어레이 전체 평균 출구 온도 감지를 통해 과열방지 시스템이 동작되도록 시스템을 구성하였다.

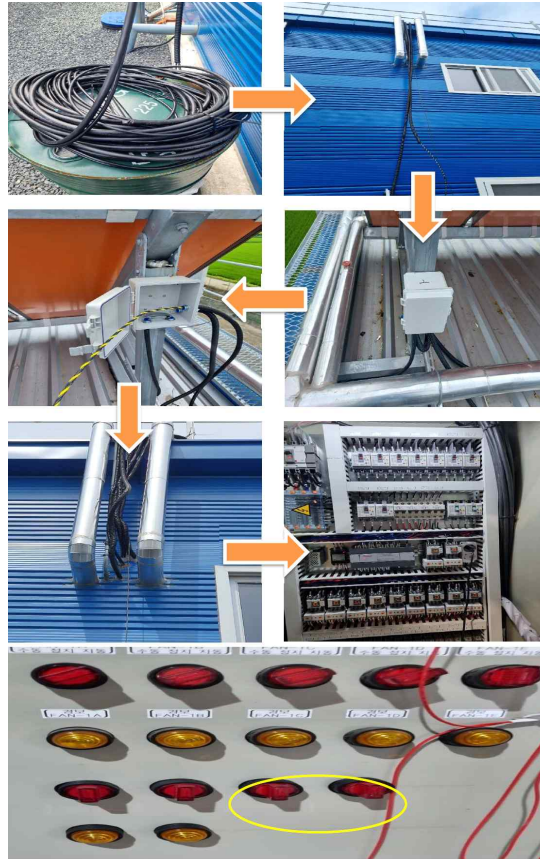
태양열 1차측 라인에 구성된 집열기 과열방지 시스템은 계간축열조의 온도가 예를 들면 90 °C 이상 상승하여 더 이상 태양열을 획득 할 수 없는 상황에 도달하면 태양열 1차측 라인에 장착된 방열기와 3 way 밸브를 통해 방열기로부터 1차측 열매체의 온도를 인위적으로 낮추는 방식으로 과열을 방지 할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

과열방지 시스템에 사용된 30,000 kcal/h 방열기는 물대 공기 식 방열기로 구성되어 있으며 정상적인 1차측 운전 상태에서는 열매체가 방열기 내부로 유입되지 않고 과열 조건에 도달 할 때만 방열기 내부로 열매체가 유입된 후 방열기가 가동 되도록 시스템을 구성하였다.

태양열 집열 라인 1차측에 설치된 과열방지 시스템의 자동제어를 위해 기존 기계실 내부에 설치된 MCC 판넬 및 PLC 판넬에 방열기, 3 Way 전동 밸브 가동을 위한 별도의 램프, 스위치, OCR, 마그네틱 스위치 릴레이 등을 추가로 설치하였으며 기존 자동제어 시스템 모니터링 시스템에 연동하여 과열방지 시스템을 작동 하도록 시스템을 구성하였다. 과열방지 시스템의 구성도를 [그림 4-100]에 나타내었고, [그림 4-101]부터 [그림 4-103]까지는 관련한 제어판넬, 설비 설치와 시운전 등의 사진을 나타내었다.



[그림 4-100] 태양열 과열방지 시스템 구성도



[그림 4-101] 태양열 과열방지 시스템
제어를 위한 패널 수정 및 전선 포설
작업



[그림 4-102] 태양열 과열방지를 위한 집열기 1차측
방열기 설치 사진



[그림 4-103] 태양열 과열방지 시스템 제어 시운전

(2) 계간조 및 히트펌프 열공급시스템 보완

(가) 계간조 자연대류 열손실 저감을 위한 보완

앞서 설명하였던 비난방기, 난방기 운전 및 성능 분석 부분에서 설명하였던 계간조에서의 열손실에 의한 낮은 열효율을 향상시키기 위하여 원인을 분석하고 보완을 하였다. 보완한 내용의 핵심은 계간조에 연결된 배관 내부에서 발생하는 자연대류에 의한 열손실을 저감하기 위한 자동밸브 설치로서 [그림 4-104]에 자동밸브 설치 등에 대한 위치 등을 구성도에 나타내었다.

우선 계간조의 손실저감을 분석하기 위한 일환으로 계간조의 단열재를 분석한 결과 단열재는 일반적인 시공방법으로 적절히 수행되었다 판단하여 추가적인 열손실 이슈가 있는지 파악하고자 하였다. [그림 4-105]는 평판형 열교환기와 평판형 집열기에서의 온도변화를 나타낸다. 온도 변화를 분석하여 전 구간에 걸쳐서 아래와 같은 점을 파악할 수 있었다.

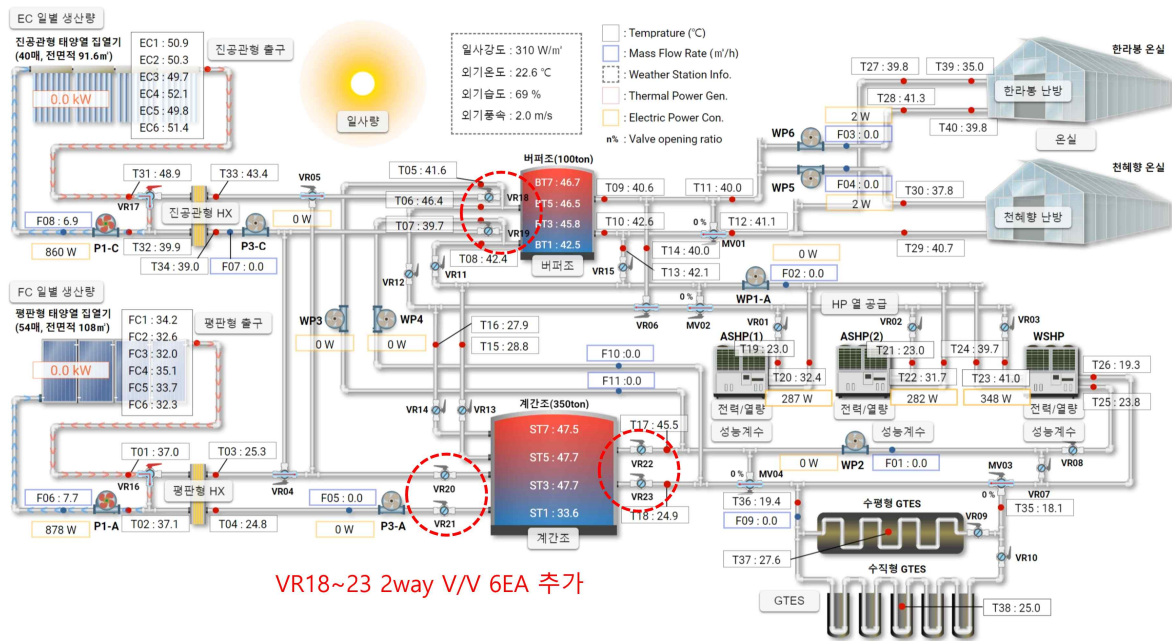
- 야간에 계간조에서 평판형 집열설비 연계 열교환기로 자연대류로 인한 열흐름 발생
: 열교환기의 T03, T04 온도가 정상적인 경우라면 실외온도 수준으로 수렴해야 하나, 계간조의 온도 수준인 65°C 수준으로 유지됨
- 야간에 평판형 집열기의 일부분에서 자연대류로 인한 열흐름 발생
: 평판형 집열기의 FC01, FC04 온도가 정상적인 경우라면 실외온도 수준으로 계속적으로 낮아져야 하나, 중간에 온도가 갑자기 증가하는 구간 발생

따라서 야간에 계간조~평판형 열교환기~평판형 집열기로 연결되는 배관 내부에서 자연대류로 열손실이 발생할 수 있다는 점을 파악하였고 이를 해결하고자 계간조 입출구 포트에

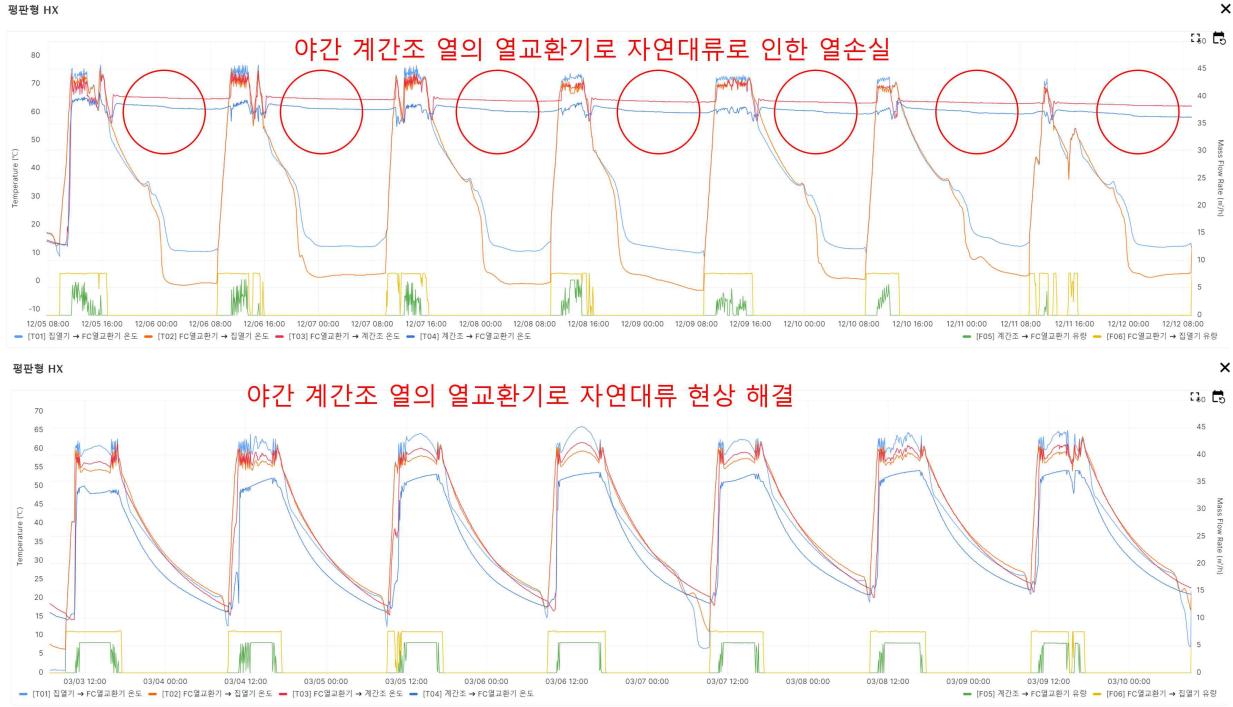
가까운 배관에 [그림 4-104]와 같이 2way 자동밸브를 설치하였고 집열 혹은 열이송 시에만 본 밸브가 열리도록 제어로직을 적용하였다.

'23년 2월 26일 본 제어밸브 설치 및 시운전이 완료되었으며, 이 이후로 평판형 열교환기와 집열기의 온도 변화를 확인하였다. 열교환기 및 집열기 내에서 기존에 문제가 되었던 온도가 상승하는 부분이 모두 해결된 것을 [그림 4-106]과 같이 확인할 수 있다.

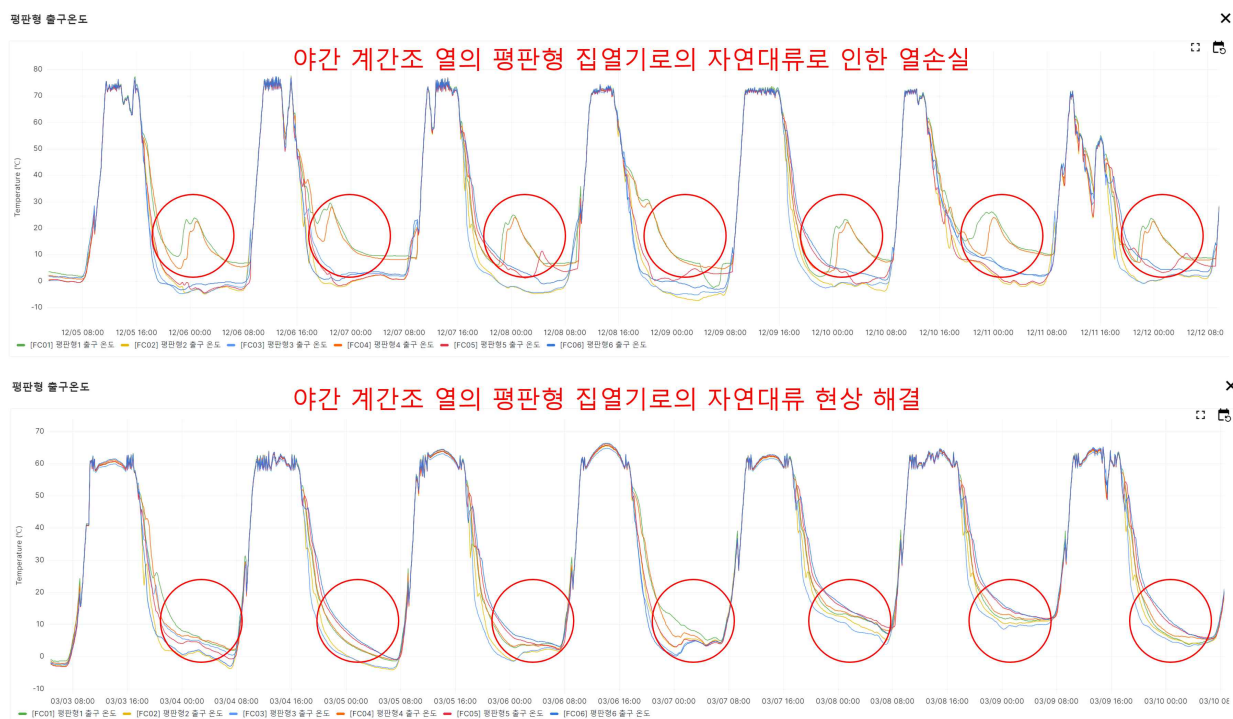
더 저렴한 방식으로는 배관을 U자 형상으로 트랩과 같이 설치하는 방식을 배관설계 설치 단계에서부터 고려하는 것이 바람직하다.



[그림 4-104] 자연대류 방지를 위한 자동밸브 추가 내용



[그림 4-105] 평판형 열교환기 온도 프로파일 비교 (위) 자연대류 손실 존재 시 (아래) 자연대류 해결 후



[그림 4-106] 평판형 집열기 온도 프로파일 비교 (위) 자연대류 손실 존재 시 (아래) 자연대류 해결 후

본 자연대류 방지용 밸브와 제어로직을 적용 후 계간조의 열손실이 정량적으로 얼마나 줄었는지 파악하기 위해 [그림 4-107]과 같이 월별 열손실량과, 월평균 열전달계수와 표면적

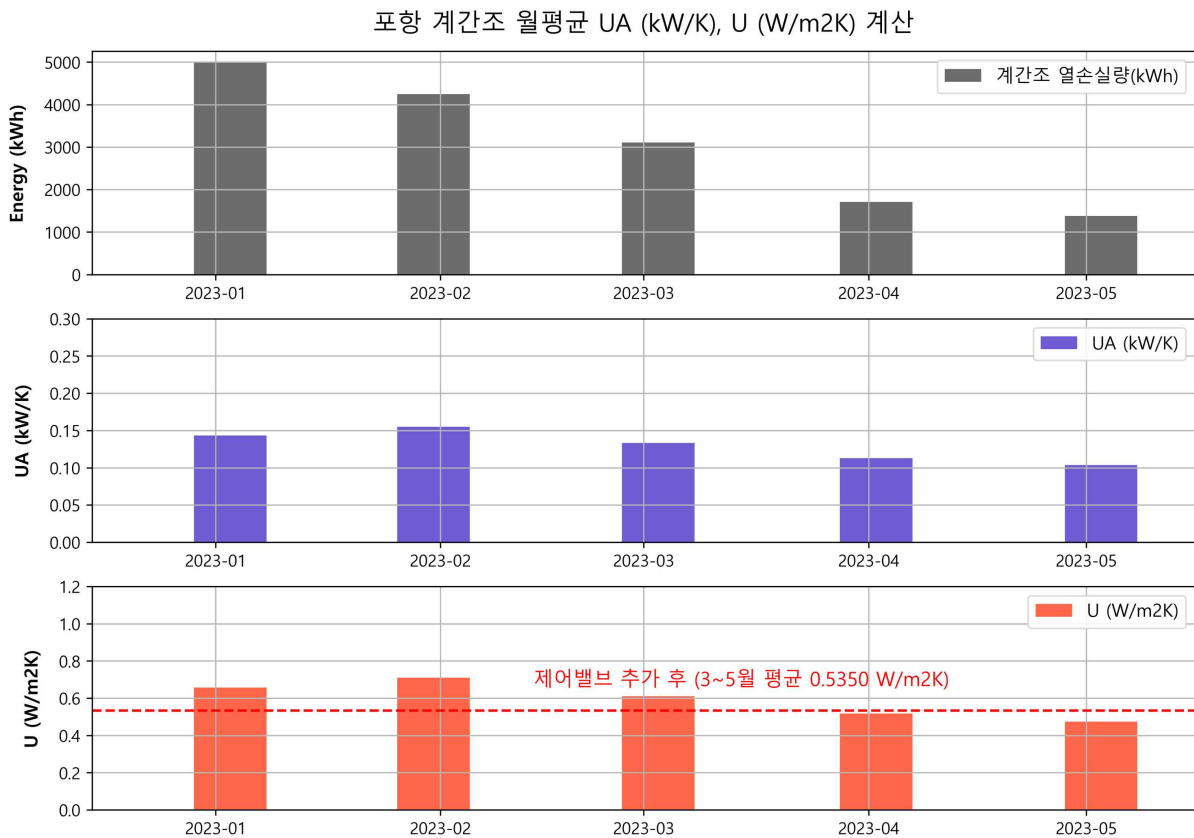
의 곱 UA , 열전달계수 U 를 추산하여 비교하였다. 열손실량은 계간조의 내부에너지 변화량, 계간조의 열출입 엔탈피를 기반으로 1분 단위(DB저장 주기 기준)로 계산한 뒤 이를 시간에 따라 적분하여 활용하였다. A 는 계간조의 표면적으로 포항 계간조 설계치의 실제값을 활용하였다. U 값은 (식 4-19)와 같이 열전달식을 통해 도출하였다.

$$Q_{loss} = UA(T_{stes,ave} - T_{facil,room}) \tag{식 4-19}$$

위식에서 Q_{loss} =계간조 열손실, $T_{stes,ave}$ =계간조 내부 ST1~ST7 평균온도, $T_{facil,room}$ =기계실 내부온도이다.

계산한 결과, 계간조 자연대류 열손실 보완 전후의 평균 U 값은 다음과 같다.

- 보완 전 : 0.6843 W/m²·K ('23년 1~2월 평균 데이터)
- 보완 후 : 0.5350 W/m²·K ('23년 3~5월 평균 데이터)



[그림 4-107] 포항 계간조 월별 열손실량, 평균 UA, 평균 U 값 비교

(나) 히트펌프 동파방지

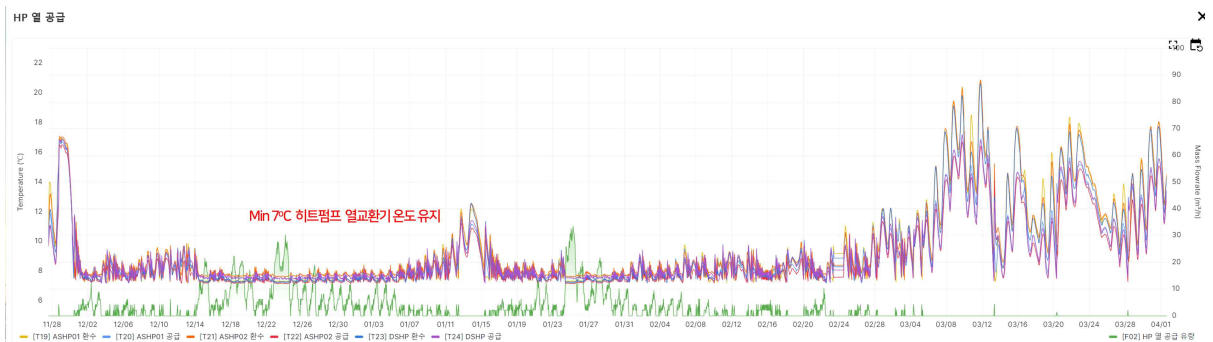
본 실증에서는 3대의 히트펌프가 실외에 설치되어 있어, 난방기 차가운 외기에 노출이 된다. 본 실증에서는 경제적 운영을 위하여 히트펌프 열원과 부하측 작동유체로 물을 활용하였으며, 동파방지 운영이 필수적으로 고려되어야 한다. 특히, 히트펌프 내부에 있는 열교환기 내부에는 관경이 작아지므로 동파에 취약하며, 이를 고려하지 않으면 시스템 유지보수 비용 및 안정성이 크게 저하되는 이슈가 있다.

이를 극복하기 위해 본 연구에서는 다음의 제어전략을 도입하였다.

- 히트펌프 열원측 온도 (T25, T26) 중 하나의 온도가 7°C 이하로 낮아지면 열원 측 펌프 (WP-2) 5분간 강제순환
- 히트펌프 부하측 온도 (T19~23) 중 하나의 온도가 7°C 이하로 낮아지면 부하 측 펌프 (WP1-A) 5분간 강제순환
- 각 루프별 MV04, MV02를 활용하여 축열조 (계간조, 버퍼조) 바이패스
 - : 계간조와 버퍼조의 열을 활용하여 배관 온도를 유지하면 열손실이 커져 시스템 효율이 저하되므로, 축열조의 열을 활용 하지 않는 방법을 택함
 - : 펌프 강제순환 시 발생하는 모터의 열로만 최저온도를 7°C 맞추고자 하였음

본 제어전략의 타당성과 효과를 검증하기 위해 실제 제어를 적용하여 그 효과를 파악하였다. 외기 온도가 7°C 이하로 낮아지는 경우가 ‘2022년 11월 28일~’2023년 4월 1일에 있었으며 이 때의 히트펌프 열원 및 부하측 온도와 펌프 유량을 [그림 4-108]에 나타내었다.

난방기 기간 동안 설정온도 7°C 이하로 낮아지지 않고 히트펌프 배관 내 온도가 안정적으로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 특히 1월 23~27일 외기온도 -15°C 이하로 낮아지는 한파가 찾아왔을 때에도 펌프 제어가 이에 맞게 작동하여 온도를 유지할 수 있었다.



[그림 4-108] 히트펌프 동파방지 작동에 따른 히트펌프 부하측 온도, 유량 프로파일 ('2022년 11월 28일~'2023년 4월 1일)

<표 4-25>는 본 동파방지 제어전략을 위해 투입된 펌프 2대의 전력소비량과 실제 실증지의 전력량 요금을 산정한 결과를 나타낸다. 2대의 펌프가 ‘2022년 11월 28일~’2023년 4월 1일동안 사용한 소모 전력량은 0.23 MWh로 예측되었으며, 이를 실제 요금으로 환산하면 12,190원이다. 해당 수천만원의 히트펌프의 초기비용을 생각하면 1년 난방기 기간동안의 유지보수에 활용한 요금으로는 적절한 것으로 판단되었다.

<표 4-25> 히트펌프 동파방지에 사용된 전력량과 전력량요금 산정

	소모전력량 (MWh)	전력량 요금 농사용 저압(을) 기준 (‘23년 5월 16일)
히트펌프 부하 측 펌프	0.18	9,540 원
히트펌프 열원 측 펌프	0.05	2,650 원
동파방지 유지에 소요된 에너지, 비용 총합	0.23	12,190 원

사. 실증시설 재배환경 및 작물생육 분석

(1) 시설재배 시 난방방법에 따른 일반적 특성

시설재배에 사용되는 난방방법으로 온풍난방과 온수난방을 비교하면 다음과 같다.

- 온풍난방
 - 공기를 직접 가열하여 예열시간이 짧지만 정지할 경우 보온성이 적고 시설내부가 건조해지기 쉽다.
- 온수난방
 - 순환온수를 온풍으로 변화하여 실내에 균등하게 분포시키기에 유리하고 여열이 많아서 정지 후에도 보온성이 높다.

난방열원으로 유류사용 비중이 제일 높으나 최근 대체 에너지로 전기보일러, 태양열 집열 설비 등의 이용이 증가하는 추세이다. 경북 내의 지역별 난방비와 연료소비량 추정값은 <표 4-26>과 같다. 경북지역은 제주에 비하여 난방연료가 42.1~115.4%가 더 소비되고 있는 실정이다. 농업연구 관련분야의 환경변화는 다음과 같다.

- 우리나라 아열대 기후 지역은 2020년 경지 면적의 10.1%를 차지하며, 2080년에는 62.3%로 늘어날 것이라 예측됨에 따라 기후변화 대응, 신 소득 작물 육성의 필요성이 부각되고 있다.
- 경북 아열대작물재배 면적
(’20) 40.5ha → (’22) 47.1ha(채소 8.1, 과수 39.0)
- 아열대과수는 만감류 중심으로 재배면적 확대되고 있다.
(’20) 27.2ha → (’22) 39.0ha(만감류 27.3ha, 아열대과수의 70%)
- 노지재배가 불가하고 동절기 시설재배가 필수조건임을 볼 때, 난방비 절감이 절실히 필요하다.

<표 4-26> 경북의 지역별 난방비 및 연료소비량(추정)

구 분		난방비(원)	연료소비량 (ℓ/10a)	대비(A/B)
경북지역(A)	포항	9,454,142	20,652	142.1
	대구	9,986,395	21,814	150.1
	구미	11,583,153	25,309	174.1
	의성	13,133,340	28,869	197.4
	봉화	14,330,909	31,307	215.4
제주지역(B)	서귀포	6,653,161	14,536	-

*난방비 산출 : 등유 보일러 사용, 20℃로 난방, 남상운 외, 2016, 온실의 냉난방 시스템 설계용 외부기상조건 분석

(2) 실증재배지의 환경 및 재배작물 생육상황

실증재배지의 일반현황은 <표 4-27>과 같다. 실증재배지는 한라봉, 천혜향 등 만감류를 식재하여 가온은 등유온풍기를 사용하여 온도관리를 하고 있다.

<표 4-27> 실증 재배지(온실)의 일반현황

재배작물	재배규모	시설형태	보온방법	식재년도	식재거리	토성
만감류 (한라봉, 천혜향)	1,000평	4연동하우스 (온풍난방)	보온커튼	2017년	3m×3m	식양토

【만감류의 생육특성】

만감류의 장단점을 <표 4-28>에 정리하였으며, 만감류는 감귤과 오렌지를 교배하여 육성한 감귤류로 ‘늦게 익는 감귤’이라는 뜻으로 감귤보다 출하시기가 늦고 대체로 과실크기가 크다. 연중 잎이 녹색인 상록과수로 동절기에 얼어 죽지 않도록 온도 관리하는 것이 중요하다. 대표적인 품종으로 부지화(한라봉), 감평(레드향), 세토카(천혜향) 등이 있다.

국민 생활수준 향상, 식품소비의 다양화, 만감류를 신 소득 작목으로 확대하기 위한 정책적 노력 등으로 급격히 성장하여 최근 우리나라의 대표적인 겨울과일 중 하나로 자리 잡고 있다.

<표 4-28> 주요 만감류 품종의 장단점(자료 : 제주특별자치도 농업기술원('20)

품종명(상품명)	장 점	단 점
부지화 (한라봉)	특 쓰는 진한 맛과 향기 아삭아삭한 맛 독특한 생김새(꼭지)	열매 품질이 고르지 못함. 수세가 약해지면 회복이 어려움. 일찍 수확하면 신맛이 강함.
감평 (레드향)	높은 당도 낮은 산 함량 아삭하고 부드러운 과육 열매 품질이 균일함.	열과, 황화과 발생이 많음. 해거리가 심함. 유통기간이 짧음.
세토카 (천혜향)	독특한 맛과 향기 부드러운 과육 색택이 곱고 감산 빠름.	가시발생 많고 바이러스에 약함. 과피 장해 발생, 수세가 약함. 동해에 취약함.
에히메과시제28 호 (황금향)	독특한 맛, 신맛이 적음. 균일한 품질	낮은 당도와 산 함량, 바이러스에 약함. 유통기간이 짧음.
남진해 (카라향)	상큼한 맛과 향기 수세가 강함, 착과성이 좋음. 경쟁과실이 적음.	월동대책 필요. 부피과 발생 주의 과피탈색, 궤양병과 더덩이병 에 약함.

【만감류 나무의 생육주기】

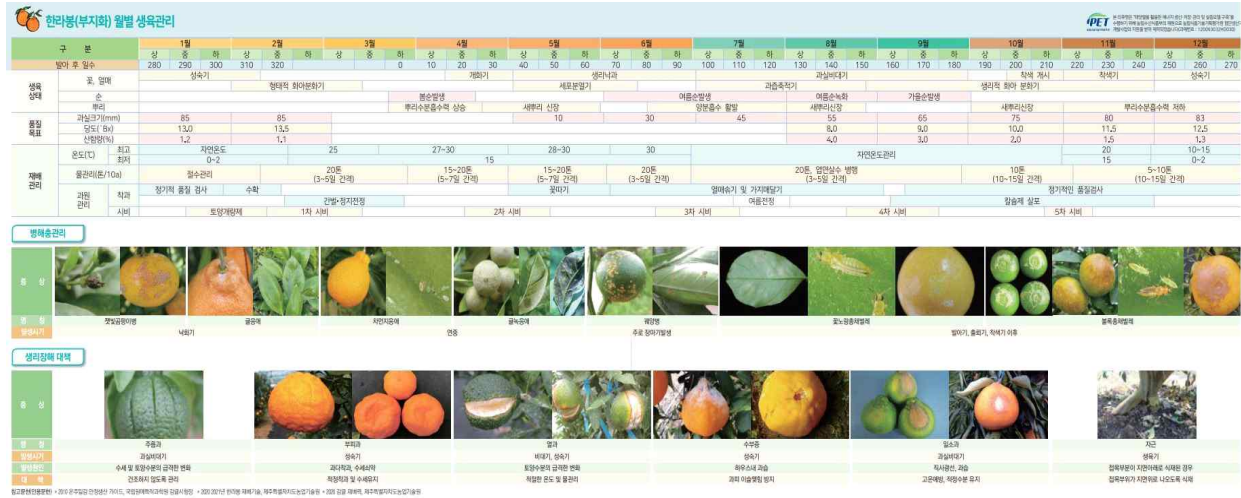
만감류 나무의 생육주기는 다음과 같다.

(3월 중순) 나무가 활동시작 → (3월 하순) 새순이 나오고 → (4월 하순) 꽃이 피며 → (5~7월) 생리낙과가 일어나고 → (7~10월) 열매가 비대 → (10월 경) 착색을 시작하여 → (12월 까지) 완전 착색, 과피 선숙형 → (2월 ~) 수확 이루어지고 → (3월~활동기) 휴면기를 가진다.

만감류는 온도요구도가 높은 작물로 노지보다 가온시설재배가 신초가 길어지고 잎이 커지며 과실비대도 좋아진다. 만감류의 생육단계별로 필요한 적정 실내온도를 <표 4-29>에 나타내었다. 만감류인 한라봉의 월별 생육관리 방법을 [그림 4-109]에 생육상태, 품질목표, 재배관리 방법 등과 함께 정리하였다.

<표 4-29> 만감류 생육단계별 적정온도

발아기	생육기	과실비대기	주야간 온도차	최고한계 온도	최저한계 온도
15℃ 이상	20~30℃	20~25℃	15℃ 내외	35℃ 이상	5℃ 이하



[그림 4-109] 만감류 한라봉의 월별 생육관리(경상북도 농업기술원, 2021)

【실증재배지의 환경】

실증재배지의 토양에 대한 분석결과를 <표 4-30>에 정리하여 나타내었다. 토양 pH는 6.2(약산성)과 7.9(약알칼리)로 적정수준이고 전기전도도(EC)는 8.6, 6.3으로 높아 염류가 집적된 토양이었다.

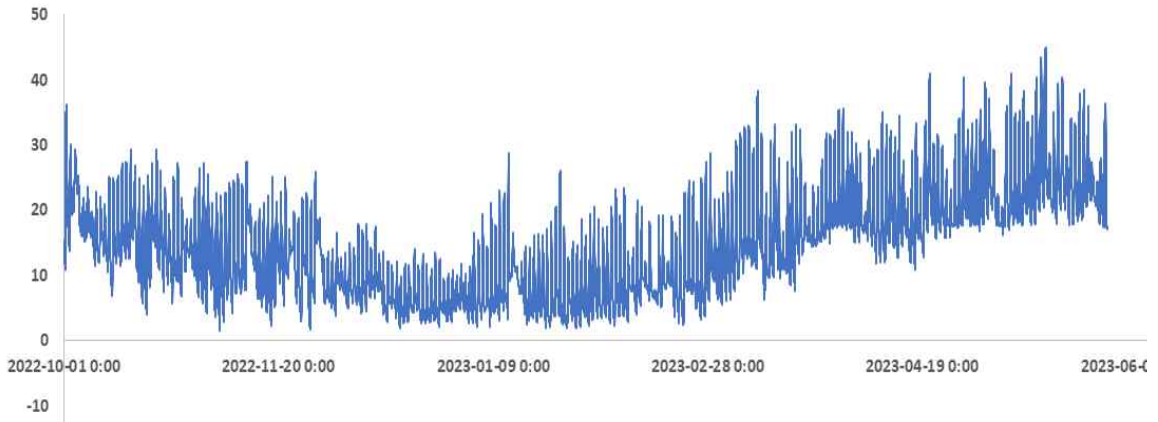
<표 4-30> 실증재배지의 토양 화학성분 분석

구분	pH	EC	OM	P2O5	K	Ca	Mg	Na	Sand	Silt	Clay	토성
	(1:5)	(dS/m)	(g/kg)	(g/kg)	(cmolc/kg)							
A구역	6.2	8.6	59.0	0.9	4.4	51.2	6.2	1.7	33.5	36.1	30.4	식양토
B구역	7.9	6.3	55.6	1.2	4.3	18.6	6.5	1.4	36.3	39.7	23.9	양토

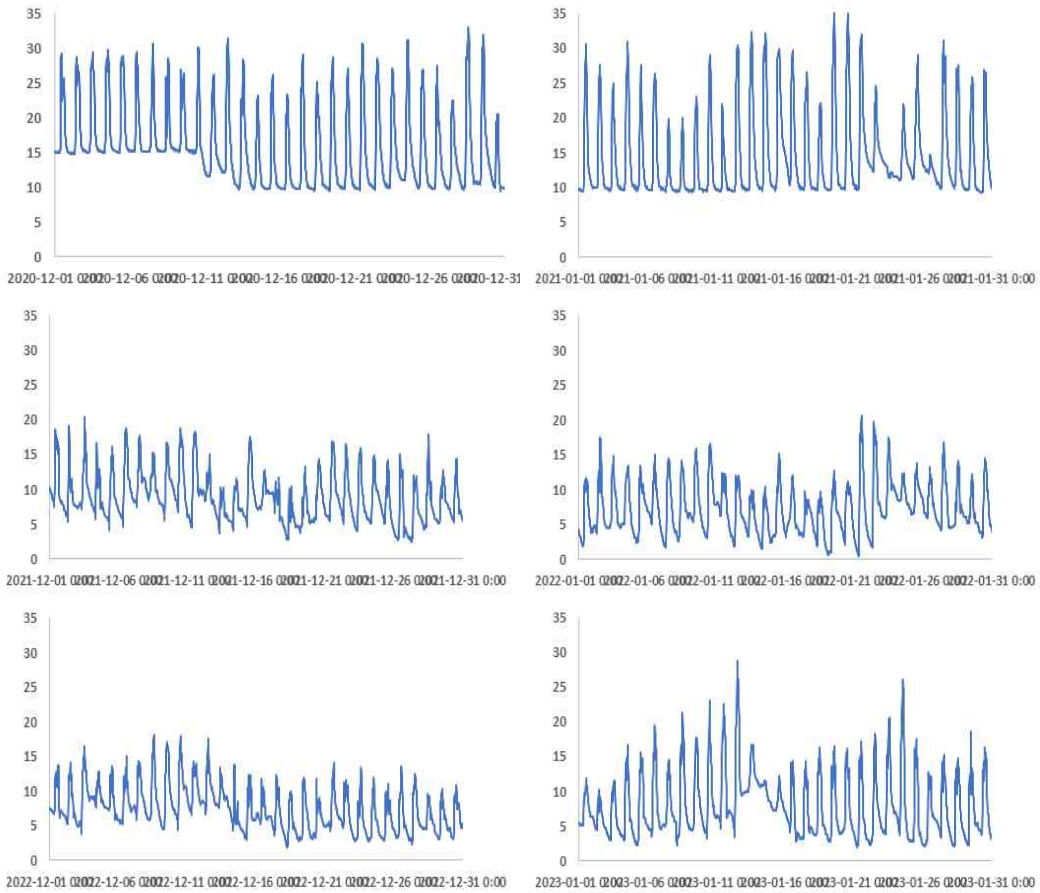
실증재배 실내 온도와 관련한 생육환경을 분석하였다. [그림 4-110]에 나타난 바와 같이 포항지역의 저온기 기온은 최저온도가 1월 중순에 -10 °C 내외이고, 최고온도는 만감류가 열매 맺기 시작하는 5월 초순으로 35 °C 내외이다. 실증지 재배환경인 실내의 온도를 2022년 10월 1일에서 2023년 5월 31일까지 측정한 결과는 <그림 4-111>과 같다. 실증재배지 내부는 외부기온과 최대 12 °C 이상까지 차이가 있으며, 동절기의 난방비 부담으로 최저 한계온도 5 °C 전후를 유지하고 있는 것으로 조사되었다. 만감류의 생육적온 20 °C로 관리가 되면 나무 생육이 더욱 왕성할 것으로 판단된다. 실증지의 년차별 동절기 온도를 <그림 4-112>에 나타내었다.



[그림 4-110] 포항지역 기온(기상청, 2022. 10. 1 ~ 2023. 5. 31)



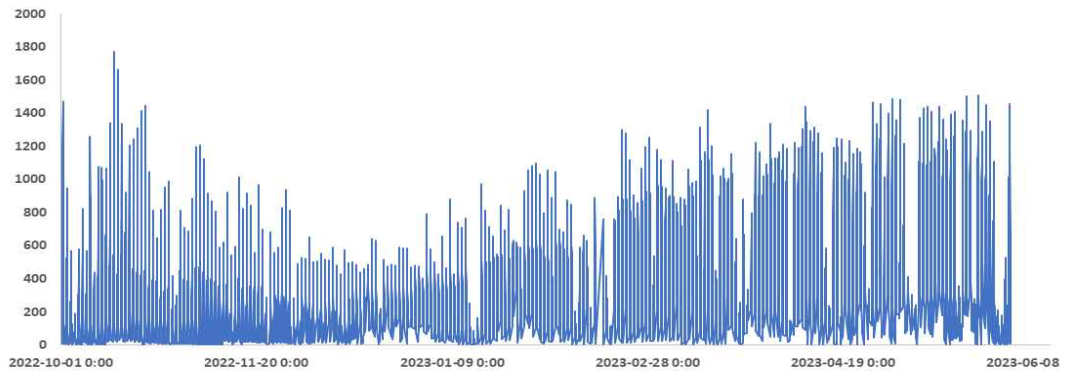
[그림 4-111] 실증재배지 내부 온도(2022. 10.1~2023. 5.31)



[그림 4-112] 실증재배지의 년차별 동절기 온도(2020~2023)

수관 확보를 위하여 1년차 재배는 최저온도 10 °C로 관리하고, 2·3년차 재배는 최저 5 °C 전후로 관리하였다.

작물에 있어서 광은 탄소원이며 특히 광합성에 유효한 광량은 재배지 요건에 매우 중요하다. [그림 4-113]에 2022년 10월 1일부터 2023년 5월 31일까지의 기간에 대한 경북지역의 광합성 유효광량 변화를 나타내었다. 경북은 전국평균보다 64시간이 더 길고 경남지역 다음으로 일조시간이 길어 만감류 재배에 매우 유리하다고 할 수 있다(기상청, '10~'20).



[그림 4-113] 실증재배지의 광합성유효 광량변화(2022. 10.1~2023. 5.31)



[그림 4-114] 실증재배지 토양수분 변화(2022. 10.1~2023. 5.31)

실증재배지의 토양에 대한 수분 변화를 2022년 10월 1일부터 2023년 5월 31일까지 측정 한 결과를 [그림 4-114]에 나타내었다. 만감류의 토양수분관리는 10월 이후 착색이 되면 서서히 관수량을 줄여서 당도는 올리고 산 함량은 줄이는 기술이 필요하며 수확기(1~2월 상순)까지는 관수량을 계속 줄여 화아분화를 촉진시킨다. 2월 중순 가온개시 7~10전부터 관수를 실시하는데 2, 3회 나누어 충분히 관수한다. 개화기부터 1차 생리적 낙과기에는 관 수량을 줄여 습도가 높으면 발생하는 잣빛곰팡이 발생을 억제시킨다. 실증재배지의 토양수 분관리는 토양표면장력변화를 수치화한 그래프를 보면 비교적 관리가 양호함을 알 수 있다.

【실증재배지의 만감류 생육】

한라봉과 천혜향은 아직 어린나무이므로 착과량을 적게 하여 수세 확보 중에 있다. 만감 류는 생육에 따라 적정 착과량을 유지하여야 당도가 높고 품질이 좋은 과실을 생산할 수 있 다. 만감류의 나무와 과실크기, 한라봉과 천혜향의 과실 특성을 <표 4-31>부터 <표 4-34> 에 정리하였다. 과실은 색도계(color meter JS-555)를 사용하여 상, 중, 하 3곳을 3반복으 로 측정하여 Hunter 값의 L(lightness), a(redness), b(yellowness)로 나타내었으며 한라봉과 천혜향을 비교해보면 b값이 큰 한라봉이 더 노란색을 띄고 있고 a값이 큰 천혜향은 한라봉 보다 붉은색을 띄고 있다. 만감류는 과피착색이 이루어지고 난 후에 과실이 성숙해지므로 적정 수확기 판단에 유의하여야 한다.

<표 4-31> 만감류 나무 및 과실크기('22)

구 분	나무높이 (cm)	나무굵기 (mm)	착과량 (개/주)	과고 (mm)	과폭 (mm)
한라봉	198	56	35	85.2	101.1
천혜향	157	37	30	64.1	79.9

<표 4-32> 한라봉 과실특성

꼭지깃 (mm)	과중 (g)	당도 (°Brix)	산함량 (%)	색도		
				L	a	b
15.9	376.7	14.2	1.3	65.2	33.0	65.8

<표 4-33> 천혜향 과실특성

과중 (g)	당도 (°Brix)	산함량 (%)	과피		색도		
			두께(mm)	무게(g)	L	a	b
220.6	12.6	1.5	3.1	45.8	65.7	36.5	63.3

<표 4-34> 실증재배지의 만감류 생육('23)

구 분	발아기	개화기	과실크기		
			과고(mm)	꼭지깃(mm)	과폭(mm)
한라봉	3월하순	4월하순	74.6	10.5	68.6
천혜향	3월하순	4월하순	49.0	-	54.3

※ 과실크기는 비대기에 접어든 8월 중순에 조사한 결과임.

(3) 작물 수량증대 효과

조기개화는 실증 설비를 통해서 동절기 온도를 기존 15 °C에서 적정하게 18 °C 로 3°C 높여 운영한 결과로 수확량이 약 20% 개선시킬 것으로 예상된다.

만감류의 생산량은 기존 등유보일러 난방시스템을 이용하여 중앙부 위주의 국부적인 난방 방식 보다 팬코일유닛을 이용하여 온실의 중앙부위와 외주부위 등 전체적인 기온 분포가 고른 난방방식으로 기대되는 효과는 **작물의 꽃이 동시에 피게 되면 재배환경조절의 편이성 증가와 병해충의 집약적 방제로 생산비절감을 얻을 수 있고 지속적으로 균일한 작물생육유지가 가능하여 과실 수확 시 품질이 좋은 상등품의 생산비율이 높아 전체적으로 약 20% 이상의 증대효과가 예상된다.**

작물의 출하시기는 적정한 난방온도 운영 효과로 인해서 한라봉은 지난 2023년 1월 10일 경에서 2024년 12월 20일 경으로 약 40일 정도 단축이 예상되며 천혜향은 지난 2023년 3월 15일 경에서 2024년 1월 25일 경으로 약 50일 정도 단축할 수 있어 다른 지역보다 일찍 출하하여 높은 소득을 올릴 수 있을 것으로 예상된다.

이와 같이 실증 설비로 인해 개화시기 개선(조기개화), 과실수량 증대, 과실품질향상(균일한 과실크기, 당도증가 등), 출하시기 단축 등의 효과로 농장의 소득은 약 30% 이상 향상 될 것으로 기대된다.

(4) 향후 검토해야 할 사항

<표 4-35>에 주요 아열대 과수의 생육적온과 최저 한계온도를 비교하여 나타내었다. 만감류 재배의 경우, 동절기 온도관리를 높였을 때 조기개화, 생육기간단축, 조기수확 등의 향상에 대한 상세한 검토가 필요하다.

- 조기수확이 가능한 작형개발 → 가격 경쟁력확보 → 소득창출

만감류 재배의 경우, 동절기 온도관리를 높였을 때 조기개화가 이루어질 수 있다. 만감류를 제외한 다른 작물에 개발한 시스템을 적용하여 경제적 효과를 극대화할 필요가 있다.

<표 4-36>에 만감류 과실특성과 품질을 비교하였고, 망고의 원산지별 평균가격을 <표

4-37>에 나타내었다.

만감류 재배의 경우, 동절기 온도관리를 높였을 때 조기개화, 국내산 망고와 수입산 망고의 특성을 비교하면, 국내산 망고가격은 수입산에 비하여 3.7~7.9배가 높고 수입량이 늘어나도 국내산 망고의 맛, 향기, 신선도, 외관 등이 우수하여 가격변동은 크지 않다.

<표 4-35> 주요 아열대과수의 생육적온과 최저 한계온도

구 분	생육적온	최저한계온도	저온피해온도
아열대성 망고(애플망고) 패션프루트(자색계), 스타프푸트	20~30℃	8℃	4℃ 이하
용과, 리치, 용안, 아보카도	20~30℃	4℃	0℃ 이하
석류, 무화과, 비파	15~28℃	2℃	-4℃ 이하
올리브, 페이조아, 무스카딘 포도	15~28℃	0~2℃	-5℃ 이하

자료: 농촌진흥청 온난화대응농업연구소

<표 4-36> 과실특성 및 품질비교

구 분	품종 (상품명)	과중 (g)	당도 (°Brix)	산함량 (%)	경도 (N)	주요특성
국내산 (제주)	어원 (애플망고)	437	14.0~ 15.8	0.55	0.19	향기 강, 식미 우수 저장성 강(5일)
수입산 (대만)	어원 (애플망고)	361	10.5~ 13.2	0.74	0.10	향기 없음, 과육붕괴 저장성(2일)
수입산 (필리핀)	카라바오	185	12.8~ 15.0	1.65	0.06	향기 없음, 과육붕괴 저장성(2일)

자료: 온난화대응농업연구소, 2010

<표 4-37> 국내 망고시장의 원산지별 평균가격('05 ~ '20)

국내산	필리핀산	태국산	대만산	베트남산
24,394원/kg	3,085	4,861	6,452	4,004

자료: 서울시농수산물유통공사, 수출입무역통계

주)한국은행 연평균환율 적용, 국내산은 가락시장 거래가격

아. 개발지표 분석

(1) 태양열 집열 운전

실증시스템에 적용된 태양열 집열 설비의 성능을 객관적으로 평가하기 위해 ISO 24194에서 제시한 방법을 적용하였다. 즉 단일집열기의 성능을 이용하여 현장설치된 집열설비의 적

정한 성능을 평가하고 확인하는 방법이다. 실증 데이터를 기준으로 KS 인증 집열기 성능시험 유사 조건에서의 태양열 집열기 효율을 분석하였다.

실증대상지 기계실 상부에 방위각 +56°, 경사각 30°로 설치된 평판형 태양열 집열설비 및 진공관형 태양열 집열설비의 설치, 데이터 정확성 및 현장 집열설비 집열효율 성능 평가 방법의 적절성 확인을 위하여 한국산업기술시험원의 입회시험을 통해 태양열 집열 설비 실증 시스템의 실증 성능평가 방법의 적절성을 검증하였다.

실증시스템의 현장 집열설비 집열효율 성능 평가 방법으로는 ISO 24194 현장 집열설비 성능평가 방법을 적용하였으며 평가 방법 및 집열성능 산정 방법은 아래와 같다.

- 실증연구에 설치된 태양열 집열기(평판형 54 매, 진공관형 40 매) 설비의 집열효율 성능을 동일 모델의 단일 집열기 시험성적서상의 집열효율을 현장설비에 적합하도록 보정한 성능을 기준 집열성능으로 하여 비교
- 현장 집열설비의 ISO 24194 (Solar energy - Collector fields - Check of performance, 2022)를 참고하여 기준 집열성능과 실증설비 집열성능을 비교
- 단일 집열기의 집열효율 성능은 현장 적용 집열기 모델의 KS B 8295 시험성적서에 제시된 집열 효율을 활용
- 비집광 집열기에 대한 Formula(1)을 (식 4-18)과 같이 적용

$$\dot{Q}_{estimate} = A_{GF} \left[\eta_{0,hem} K_{hem} (\theta_L, \theta_T) G_{hem} - a_{1,\Delta Q} (\vartheta_m - \vartheta_a) \right] \cdot f_{safe} \quad (식 4-19)$$

$$\left[- T_{\Delta Q} (\vartheta_m - \vartheta_a)^2 - a_5 (d\vartheta_m/dt) \right]$$

(식 4-17)을 $A_{GF} G_{hem}$ 로 나누어, 집열설비 효율인 (식 4-20)으로 표현가능하다.

$$\eta_{estimate} = \frac{\dot{Q}_{estimate}}{A_{FG} G_{hem}} = \left[\eta_{0,hem} K_{hem} (\theta_L, \theta_T) - a_{1,\Delta Q} \left(\frac{\vartheta_m - \vartheta_a}{G_{hem}} \right) \right] \cdot f_{safe} \quad (식 4-20)$$

$$\left[- T_{\Delta Q} \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)^2}{G_{hem}} - a_5 \left(\frac{d\vartheta_m/dt}{G_{hem}} \right) \right]$$

(식 4-18)에서 정상상태 데이터를 사용, 비정상상태의 항을 제거하고 KS B 8295 시험성적서에서 제시한 각 계수 적용 시 KS 성적서에 따르는 집열효율 표현할 수 있고, 이때 (식 4-18)에 적용된 안전계수 f_{safe} 는 3가지 계수로 나뉘며 (식 4-21)과 같다.

$$\eta_{estimate} = \frac{\dot{Q}_{estimate}}{A_{FG} G_{hem}} \quad (식 4-21)$$

$$= \left[\eta_{0,hem} K_{hem} (\theta_L, \theta_T) - a_{1,\Delta Q} \left(\frac{\vartheta_m - \vartheta_a}{G_{hem}} \right) - T_{\Delta Q} \frac{(\vartheta_m - \vartheta_a)^2}{G_{hem}} \right] \cdot f_{safe}$$

$$f_{safe} = f_p \cdot f_v \cdot f_o \quad (식 4-22)$$

배관 열손실을 구하기 위한 실험적 수식은 (식 4-23), (식 4-2와)과 같다.

$$q_{l-pipe} (W/m) = 0.32 \left(\frac{V_{pipe}}{L_{pipe}} \right)^{0.22} \quad (식 4-23)$$

$$\dot{Q}_{pipe,d}(W) = q_{l-pipe} \cdot L_{pipe} \cdot (\bar{\vartheta}_m - \bar{\vartheta}_a) \tag{식 4-24}$$

현장 집열설비 집열효율 산정을 위한 방법은 다음과 같다.

- KS 시험성적서상의 집열효율과 비교하기 위하여 유사한 조건에서 측정한 현장 집열 설비 집열량을 측정이 필요
- 현장 집열설비 운전 중 입사각이 0°에 가까운 시간대를 선정하여 전후 낮은 입사각 이 유지되는 시간대에 대하여 집열량을 측정하고 (식 4-25)와 같이 효율을 산정

$$\eta_{field} = \frac{\dot{Q}_{field}}{A_{FG}G_{hem}} = \frac{\rho c_p \dot{v}(T_{f,e} - T_{f,i})}{A_{FG}G_{hem}} \tag{식 4-25}$$

현장 집열 성능의 비교를 위한 방법은 다음과 같다.

- SO 241094에서 제시한 현장 집열설비의 성능평가 방법으로 (식 4-26)과 같이 비교

$$\begin{aligned} \text{달성율}(\%) &= \left[1 - \left(\frac{\eta_{estimate} - \eta_{field}}{\eta_{estimate}} \right) \right] \times 100 \quad \text{또는} \\ &= \left[1 - \left(\frac{\dot{Q}_{estimate} - \dot{Q}_{field}}{\dot{Q}_{estimate}} \right) \right] \times 100 \end{aligned} \tag{식 4-26}$$

성능 분석일 선정을 위한 방법으로 아래의 세 가지 조건을 만족하는 시간대로 선정한다.

- 집열설비 경사면에서의 입사각을 따져서 입사각수정계수 값이 1에 가까운 값이 되는 0°이내(10° 이내)에 가까운 입사각을 갖는 날짜와 시간대
- 단위면적당 일사량이 800W/m² 이상이 유지되는 시간대
- 정상적인 집열 시작과 종료가 이루어진 시험일
- 선정일 : 5월, 6월, 7월 및 8월 중 상기 조건을 만족하는 평가일 12개 시험일을 선정
- 시간대 : 12개 시험일 중 입사각이 가장 낮은 시각 전후 10분씩 20분간의 정상상태 시간대 선정

실증에 사용된 집열기의 효율식에 있어서의 계수값은 <표 4-38>과 같다. 선정된 시험일의 일자와 오후 2시에서의 최소 입사각현장 집열설비 안전율 산정값을 <표 4-39>와 <표 4-40>에 나타내었다.

<표 4-38> 실증 시스템 적용 태양열집열기 효율 계수

집열기 종류	$\eta_{0,hem}$	$a_{1,\Delta Q}$	$T_{\Delta Q}$
평판형 집열기	0.7409	4.1791	0.00057
진공관형 집열기	0.466	1.0953	0.0029

<표 4-39> 선정된 시험일의 일자와 오후 2시에서의 최소 입사각

월	5				6		7		8			
일	3	6	16	26	3	20	1	2	12	19	21	26
θ	0.9	1.7	4.3	6.4	7.6	8.9	8.7	8.6	7.7	2.3	2.7	4.1

<표 4-40> 현장 집열설비 안전을 산정

안전율	적용 방법	비고
f_p	·(식 4-20)과 (식 4-21)에서 배관열손실을 추산하고 집열량 대비 비율로 안전율 추정	각 시험일별로 추산
f_v	·레벨 1 등급의 측정시스템 조건 적용	0.95
f_u	·산란일사를 측정하지 않은 조건 적용	0.95

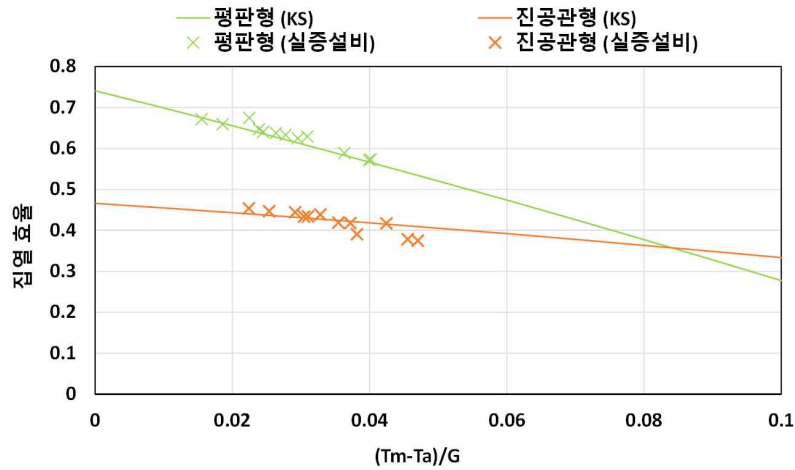
분석한 결과는 다음과 같으며, 타당성 검토결과를 <표 4-41>에 정리하였다.

- 분석 결과는 아래와 같이 집열기 종류별로 각각 정리하였으며, 오후 2시 전후 20분 간의 1분 간격의 측정 데이터값에 대한 분석값을 평균하여 산정하였다.
- 전체 12개 시험일에 대한 각 집열설비 열성능의 KS인증시험의 성능과의 비교를 통한 달성도의 평균은 각각 평판형 집열기의 경우 100.6%와 진공관 집열기의 경우 98.7%로 분석되었다.

단일집열기의 효율과 현장설치 태양열설비의 보정된 효율을 [그림 4-115]에 비교하여 나타내었다.

<표 4-41> 태양열 집열 설비 실증 데이터 타당성 검토 결과

평가 항목	결과	비고
태양열 집열 설비 설치 확인	설치 확인	현장 방문을 통해 설치 확인
실증 데이터 처리 장치 설치 확인	설치 확인	현장 방문을 통해 설치 확인
실증 데이터 항목 선정 적절성	적절	KS B 8295 표준에서 규정하는 항목
실증 데이터의 센서 설치 및 위치 적절성	적절	센서 위치 및 설치 확인 동작 상태 점검
실증 데이터의 신뢰성	신뢰성 확보	교정 성적 성적서 확인
현장 집열설비 집열 효율 평가방법의 적절성	적절	ISO 24194에서 제시한 시험 평가방법



[그림 4-115] KS인증 집열기 효율곡선과 현장 집열설비에 대한 보정된 효율의 비교

(2) 태양열 축열 운전

실증시스템에 적용된 태양열 시스템의 정상축열운전을 성능 지표 검증을 위해 실증데이터를 기준으로 실증 시설원예에 적용된 태양열 시스템의 정상축열운전을 도출하였으며 한국 태양열융합협회를 통해 적절성을 검증하였다.

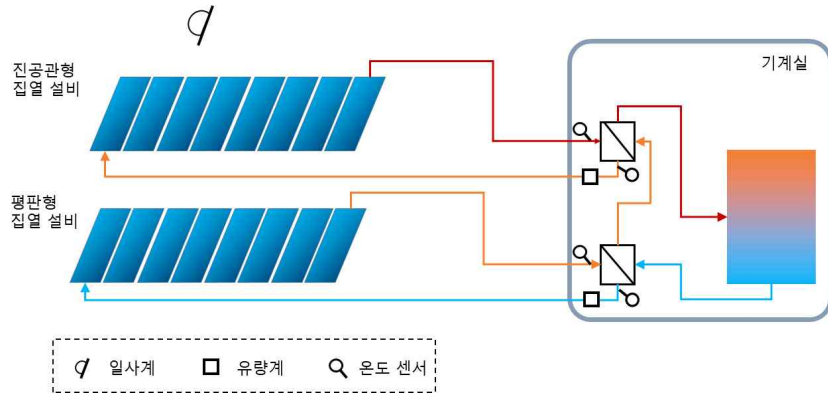
실증대상지 기계실 옥상에 설치된 태양열 집열기 전면적 기준 199.6 m²와 기계실 내부에 설치된 350 m³ 용량의 계간조에 대한 상세 항목은 <표 4-42>과 <표 4-43>과 같다.

<표 4-42> 실증 시설원예 적용 태양열 집열 설비

집열기 종류	설치면적(전면적)	갯수	모델명
평판형 집열기	108.0m ²	54 매 (직병렬)	(주)에스앤지에너지 SNG-CS1
진공관형 집열기	91.6m ²	40 매 (직병렬)	세한에너지(주) SHCHP1522

<표 4-43> 실증 시설원예 적용 태양열 계간축열조

계간축열조 종류	용량	갯수	용도
온수 탱크	350.0 m ³	1 EA	비난방기 태양열 획득 열 에너지 축열 및 시설원예 난방 열공급 직접 활용 및 복합열원 히트펌프 열원으로 활용

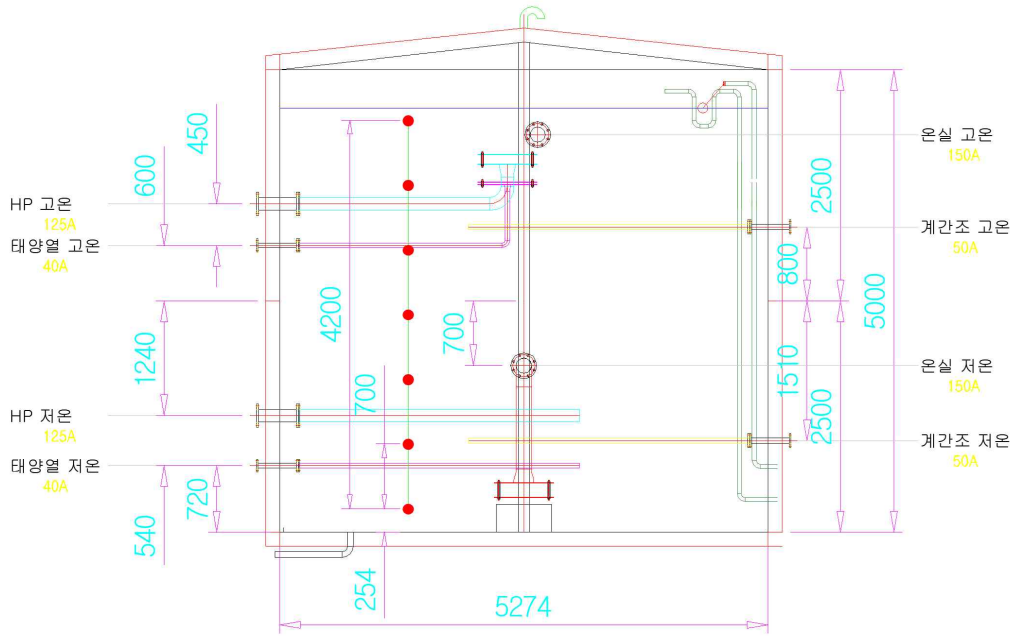


[그림 4-116] 실증 시설원에 적용 태양열설비 개략적인 구성도



[그림 4-117] 실증 시설원에 적용 태양열 집열기 설치 모습

측 면 도



[그림 4-118] 계간축열조 설계도면



[그림 4-119] 계간조 내부 모습



[그림 4-120] 계간조 단열 시공 전 사진



[그림 4-121] 계간조 단열 시공 후 사진

<표 4-44> 측정 센서 list up

측정센서 항목	명칭
일사량	G
외기온도	Tabm
평판형 집열기 집열루프 입구 온도	Tfp,in
평판형 집열기 집열루프 출구 온도	Tfp,out
진공관형 집열기 집열루프 입구 온도	Tet,in
진공관형 집열기 집열루프 출구 온도	Tet,out
평판형 집열기 집열루프 열매체 유량	Ffp
평판형 집열기 집열루프 열매체 유량	Fet
계간축열조 Level 1 온도	ST01
계간축열조 Level 2 온도	ST02
계간축열조 Level 3 온도	ST03
계간축열조 Level 4 온도	ST04
계간축열조 Level 5 온도	ST05
계간축열조 Level 6 온도	ST06
계간축열조 Level 7 온도	ST07

정상축열운전율은 3차년도 실증 데이터로 산정하며, 태양열 과열 일수 365일 중 7일 이하가 되는 조건, 즉 전체 운전일수 중 과열이 발생하지 않고 정상 축열운전이 이루어지는 일수의 비율로 지표 목표를 정의하였다.

실증시설원예에 적용된 태양열 시스템의 정상축열운전을 분석을 위해 태양열 시스템이 가동된 2022년 4월 25일부터 2023년 6월 4일까지 405일 동안의 실측 데이터를 기반으로 태양열 시스템의 과열 발생일수를 산정하였다.

실증운전이 진행된 2022년 4월부터 9월까지의 태양열 1차 축 열매체로 물을 사용하여 운전을 수행하였기 때문에 태양열 1차 축 열매체의 온도가 100 °C 이상 올라갈 경우를 과열된 일수로 산정하였으며, 부동액을 1차 축에 공급한 2022년 10월부터는 1차 축의 열매체 온도가 110°C 이상 올라갈 경우를 과열된 일수로 산정하였다.

그 결과 2022년 4월 25일부터 2023년 6월 4일까지 실증시스템의 과열된 일수는 평판형 태양열 1차 축의 경우 0회 진공관형 태양열 1차 축의 경우 4일로 실측되었으며 이를 통해 정상축열운전율은 99%로 실측되었다.

진공관형 태양열 집열기 1차 축의 과열 일수는 실제 정상적인운전 상태에서의 과열이 진행된 것이 아니고 태양열 계간축열기반 열공급 시스템의 설비 변경 및 작업을 위해 가동을 중지 시킨 기간 동안 열매체의 온도가 100 °C 이상 올라간 것으로 실제 정상 운전 기간에서의 정상축열운전율은 100%에 근접하는 것으로 나타났다.

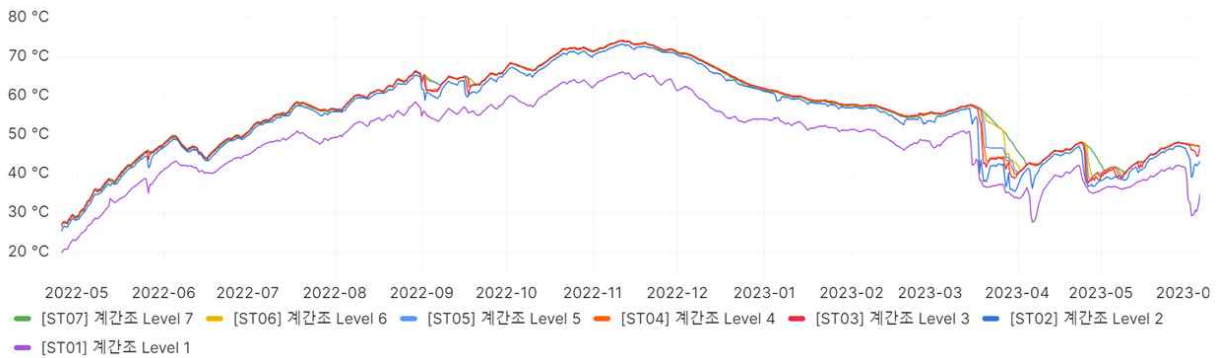
태양열 집열 설비 실증 데이터 타당성 검토 결과를 <표 4-45>에 정리하였다. [그림 4-122]부터 [그림 4-125]에 실증기간인 2022년 4월 25일~2023년 6월 4일에 걸쳐서 집열면 일사강도, 계간축열조 내부 온도 분포, 평판형 태양열 집열기 출구 온도, 진공관형 태양열 집열기 출구 온도를 나타내었다.

<표 4-45> 태양열 집열 설비 실증 데이터 타당성 검토 결과

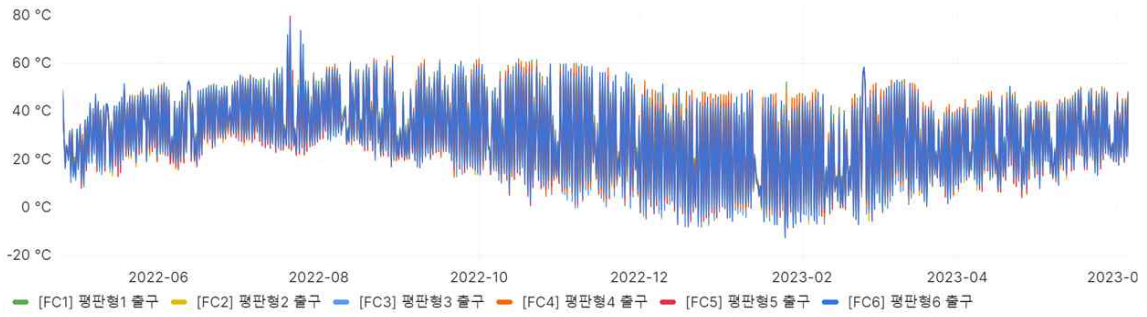
평가 항목	결과	비고
태양열 집열 설비 설치 확인	설치 확인	현장 방문을 통해 설치 확인
실증 데이터 처리 장치 설치 확인	설치 확인	현장 방문을 통해 설치 확인
실증 데이터 항목 선정 적절성	적절	KS B 8295 표준에서 규정하는 항목
실증 데이터의 센서 설치 및 위치 적절성	적절	센서 위치 및 설치 확인 동작 상태 점검
실증 데이터의 신뢰성	신뢰성 확보	교정 성적 성적서 확인
실증시설원에 적용 태양열 시스템정상축열운전을 평가방법의 적절성	적절	실증운전 실측데이터 기반 과열일수 산정



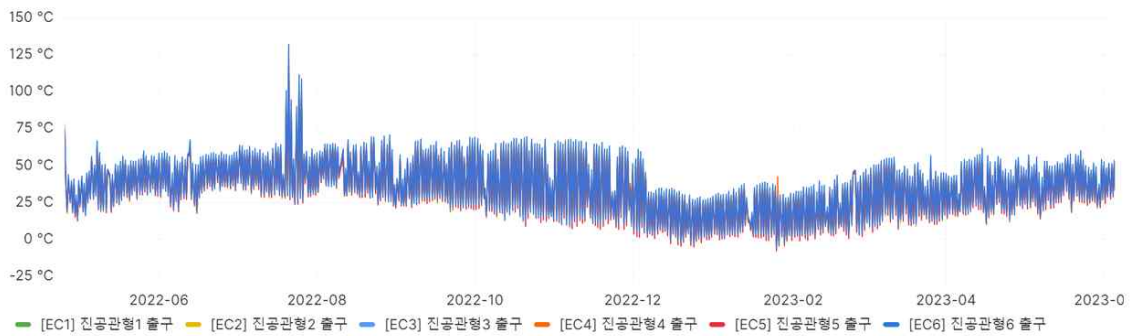
[그림 4-122] 집열면 일사강도(2022년 4월 25일~2023년 6월 4일)



[그림 4-123] 계간축열조 내부 온도 분포(2022년 4월 25일~2023년 6월 4일)



[그림 4-124] 실증시스템 평판형 태양열 집열기 출구 온도(2022년 4월 25일~2023년 6월 4일)

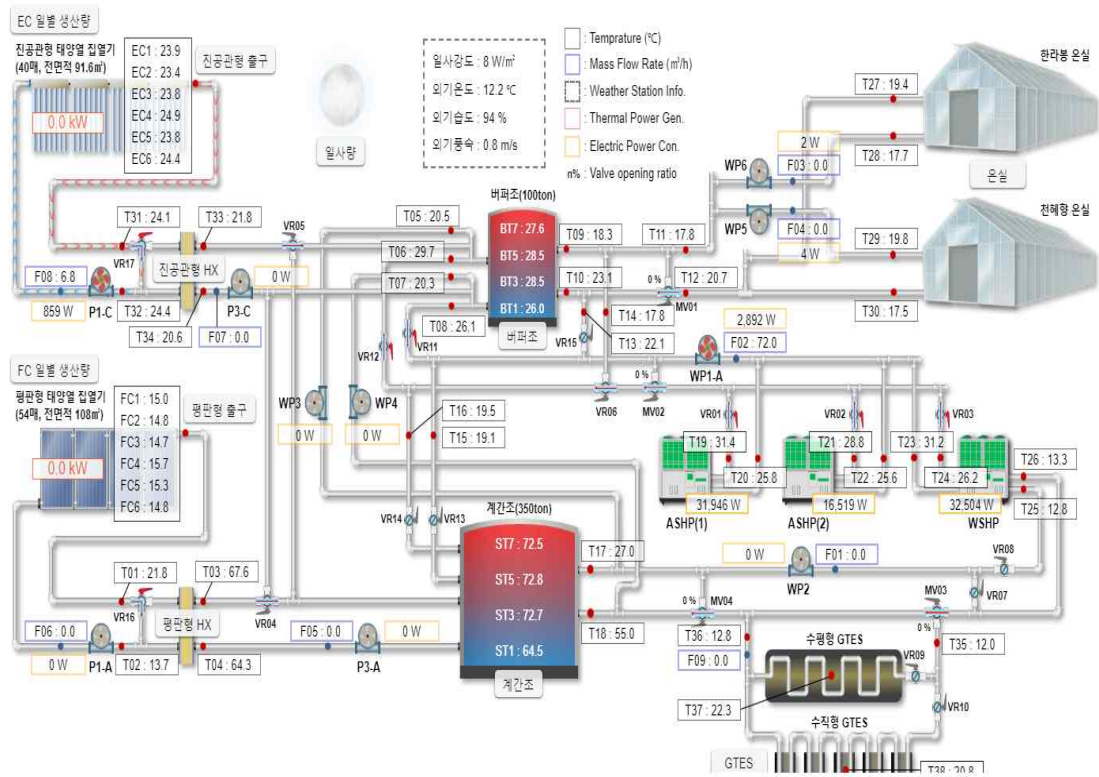


[그림 4-125] 실증시스템 진공관형 태양열 집열기 출구 온도(2022년 4월 25일~2023년 6월 4일)

(3) 복합열원 히트펌프 성능

실증시스템에 적용된 복합열원 히트펌프의 계절난방 성능 지표검증을 위해 실증데이터를 기준으로 복합열원 히트펌프의 SCOP 계산 값을 도출하였으며 한국냉동공조인증센터를 통해 적절성을 검증하였다.

실증대상지 기계실 외부에 설치된 복합열원 히트펌프는 계간조로부터 열원을 공급 받는 수열원 모드와 외부 공기로부터 열원을 공급 받는 공기열원 모드로 운전이 가능한 복합열원 히트펌프를 적용하였으며 시스템 구성은 [그림 4-126]과 같다.



[그림 4-126] 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템 및 복합열원 히트펌프 시스템 구성도

실증시스템에 적용된 복합열원 히트펌프는 45RT 용량의 대성히트에너지사사의 DHAW 45N-C4-01 모델이 적용되었으며 40RT 공기열원 히트펌프 2대와 함께 운영 할 수 있도록 실증시스템을 구성하였다. 복합열원 히트펌프 수열원 모드시 태양열 계간축열조 및 얇은지중축열로부터 수열원을 공급 받을 수 있으며 수열원 모드 동작시 열원의 온도를 적정하게 유지 시킬 수 있도록 계간축열조와 얇은지중축열의 열을 혼합하여 사용 할 수 있도록 시스템을 구성하였다.

실증시설원에 적용 복합열원 히트펌프 성능 평가 방법으로는 복합열원 히트펌프의 수열원 모드 공인 성능 평가 방법인 KS B8292:2015 물-물 지열원 열펌프 유닛 시험 방법과 히트펌프의 공기열원 모드 성능평가 방법인 KS B 6275 : 2018 시험 평가 방법을 동시에 적용하여 성능 검증을 수행하였다.

[그림 4-127]에는 설치된 복합열원 히트펌프 모습을 나타내었다.



[그림 4-127] 실증시설원에 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템내 복합열원 히트펌프 구축 전경

실증시스템에 적용된 복합열원 히트펌프의 작동 모드별 난방 성능계수는 실증운전 데이터를 활용하여 산정하였으며 KS B 8292 및 KS B 6275와 달리 실증 운전에서의 계절간성능 계수이므로 일부 정상상태에서의 구간 평균이 아닌 복합열원 히트펌프의 총 동작 시간에 거쳐 획득한 모든 데이터를 평균하여 난방성능 계수를 산정하였다.

실증시설원에 복합열원 히트펌프 난방계수 산정 방법은 다음과 같다.

$$\text{난방 성능계수} = \text{난방열출력} / \text{히트펌프 소비전력} \quad (\text{식 4-27})$$

(식 4-27)에서 난방용량은 실증데이터의 복합열원 히트펌프 부하측 입출구 온도와 공급 유량을 통해 계산되며, 유효 소비전력은 히트펌프에 공급되는 전력량을 측정하여 산정한다.

성능 분석일 선정 방법은 다음과 같다.

실증시설원에 난방기간 중 복합열원 히트펌프 공기열원 및 수열원 모드 동작 기간 전체 데이터를 사용한다.

- 실증시설원에 설치된 복합열원 히트펌프의 난방모드 동작 구간 전체에 대한 데이터를 평균

- 선정일 : 복합열원 히트펌프의 수열원 모드로 동작한 2023년 4월 5일, 5월 16일, 5월 25일, 5월 31일, 6월 1일 및 6월 3일 총 6일에 걸친 데이터를 활용 (공기열원 모드는 난방 기간 중 동작하지 않고, 시운전 기간에만 동작하여 위 시험일에는 수열원 모드로만 동작하였음, 복합열원 히트펌프의 공기열원 모드는 실증 현장 시운전 결과 수열원 모드보다 낮은 성능계수가 나오는 것을 확인하였음 따라서 본 실증연구에서는 복합열원 히트펌프의 공기열

원 모드의 정상 가동은 이루어지지 않았으며 복합열원 히트펌프 설치 후 공기열원 모드의 정상 작동 유무 시운전만 수행하였음)

- 시간대 : 6일에 걸친 복합열원 히트펌프 수열원 모드로 동작한 시작 시간과 종료시간까지의 전체 시간에 걸쳐 측정된 1분 간격의 데이터를 활용

복합열원 히트펌프 계절간 성능 분석 결과는 다음과 같다.

실증시설원에 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템에 적용된 복합열원 히트펌프의 공기열원 모드는 시운전 기간에 정상운전을 확인하기 위한 용도로 운전되었으며, 난방기간에는 동작하지 않아 성능분석에는 포함되지 않았다.

실증시설원에 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템에 적용된 복합열원 히트펌프의 수열원 모드 성능 분석을 위해 총 6일에 걸쳐 수열원 모드로 복합열원 히트펌프를 가동하였으며 수열원 모드 동작시 실증시설원에 설치된 계간조 및 얇은 지중열을 활용하여 복합열원 히트펌프의 열원을 공급하였다.

실증시설원에 설치된 복합열원 히트펌프의 전체 6일 간의 난방 시험일에 대한 복합열원 히트펌프의 수열원 모드에서의 전체 시험시간에 걸쳐 측정된 1분 간격의 데이터 값을 평균한 결과, <표 4-46>과 같이 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템에 적용한 복합열원 히트펌프의 수열원 모드의 난방 성능계수는 4.38로 분석되었다.

<표 4-46> 실증 시스템 적용 복합열원히트펌프 수열원 모드 난방 성능계수>

시험항목	정미용량 (W)	유효 소비전력 (W)	계절간 성능계수(SCOP) (W/W)
난방시험 전체	151,691	34,647	4.38

실증시설원에 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템 복합열원 히트펌프 실증 데이터 타당성 검토 결과는 <표 4-47>과 같다.

<표 4-47> 복합열원 히트펌프 실증 데이터 타당성 검토 결과

평가 항목	결과	비고
복합열원 히트펌프 설치 확인	설치 확인	현장 방문을 통해 설치 확인
실증 데이터 처리 장치 설치 확인	설치 확인	현장 방문을 통해 설치 확인
실증 데이터 항목 선정 적절성	적절	KS B 8292 및 KS B 6275 표준에서 규정하는 항목
실증 데이터의 센서 설치 및 위치 적절성	적절	센서 위치 및 설치 확인 동작 상태 점검
실증 데이터의 신뢰성	신뢰성 확보	교정 성적 성적서 확인

(4) 태양열시스템 고장진단

(가) 태양열시스템 성능평가 및 고장감지 원격 모니터링시스템 개요

태양열시스템은 태양에너지의 변동성과 저밀도로 인해 백업 보일러 시스템을 필요로 한다. 백업시스템은 태양열시스템이 요구되는 부하를 충족시키지 못할 때 온수를 자동 공급하며 시스템이 안정적이고 효과적인 상태를 유지하도록 기능한다. 한편 백업시스템의 항상성 유지 기능은 태양열시스템의 오작동과 파손으로 인한 기능 공백 또한 자동적으로 보상하여 사용자가 시스템 오류를 장기간 인지하지 못하고 경제적 손실을 입게되는 상황을 초래하기도 한다. 따라서 태양열시스템의 핵심기술 요소인 집열기의 현장 성능 예측을 통해 시스템 설치 초기 성능을 검증하고 운영 중 성능저하 및 고장을 감지하는 방안이 필요하다.

이에 따라 본 연구에서는 태양열시스템의 실시간 성능평가 및 고장감지 방안으로, 시뮬레이션 기반 태양열집열기 성능해석 알고리즘을 탑재한 원격 모니터링시스템을 구축하였다. 시뮬레이션 모델은 ISO 24194:2022의 집열기 어레이 성능추정식이 적용되었으며, 1분 간격으로 측정되는 기상자료와 집열기 열매체 유량 및 입·출구 온도를 이용하여 실시간 해석하고 실측 집열량과 비교하게 된다. 실제 집열량이 시뮬레이션에 비해 비정상적으로 낮아질 때 시스템 고장으로 인지하고 통보하게 되며 이를 통해 운영자는 적시에 시정 조치를 취할 수 있다.

(나) 집열기 동적 열성능 해석

모니터링시스템을 통해 수평면 일사강도와 외기온, 집열기 열매체 온도 등이 수집되면, 직산분리를 통해 경사면 일사량을 추정하고 태양열집열기의 열성능을 실시간 해석한다.

【일사분석】

비등방성 산란 모델 (Anisotropic diffuse model) 기반 경사면 총 일사, I_T 를 (식 4-28)과 같이 추정할 수 있으며,

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_{d,T} + I \rho_g \frac{1 - \cos \beta}{2} \tag{식 4-28}$$

입사각 손실을 고려할 때 경사면 총일사, $I_{T,IAM}$ 는 다음 식과 같이 계산된다.

$$I_{T,IAM} = (I_b + I_d A_i) R_b K_b + I_{d,T} K_d + I \rho_g K_g \frac{1 - \cos \beta}{2} \tag{식 4-29}$$

수평면 총일사, I 로 부터 직달과 산란성분을 분리하기 위해 Erbs et al. 의 제안식을 사용하였다.

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09 K_T & (K_T \leq 0.22) \\ 0.9511 - 0.1604 K_T + 4.388 K_T^2 - 16.638 K_T^3 + 12.336 K_T^4 & (0.22 < K_T \leq 0.80) \\ 0.165 & (K_T \geq 0.80) \end{cases} \tag{식 4-30}$$

여기서, K_T 는 청명지수 (Clearness index)로 다음 식과 같이 정의된다.

$$K_T = \frac{I}{I_o} \tag{식 4-31}$$

여기서, I_o 는 수평면 외계일사 (Extraterrestrial radiation)로 다음 식과 같이 계산된다.

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \tag{식 4-32}$$

여기서, 일적위 (Declination)은 다음 식과 같이 정의된다.

$$\delta = (180/\pi)(0.006918 - 0.399912 \cos B + 0.070257 \sin B - 0.006758 \cos 2B + 0.000907 \sin 2B - 0.002697 \cos 3B + 0.00148 \sin 3B) \tag{식 4-33}$$

여기서 B 는 다음과 같이 주어진다.

$$B = (n - 1.0) \left(\frac{360}{365} \right) \tag{식 4-34}$$

따라서 수평면 직달일사, I_b 를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$I_b = I - I_d \tag{식 4-35}$$

Reindl et al.은 비등방성 산란모델로 경사면 천공산란일사, $I_{d,T}$ 을 다음과 같이 제안하였다.

$$I_{d,T} = I_d \left\{ (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + A_i R_b \right\} \tag{식 4-36}$$

여기서, 비등방성 지수, A_i 와 f 는 다음과 같이 각각 정의된다.

$$A_i = \frac{I_b}{I_o} \tag{식 4-37}$$

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I_o}} \tag{식 4-38}$$

【입사각 수정인자】

입사각 수정인자 (Incident angle modifier)는 법선면으로 입사되는 일사강도 대비 흡열판

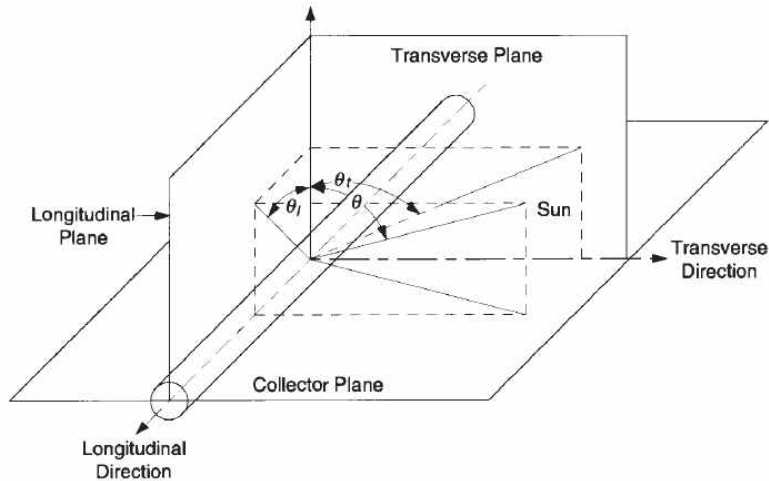
에 실제로 도달하는 일사강도의 비를 의미하며, 입사각에 따라 증가하는 유리 투과체의 반사에 주로 기인한다.

평판형 집열기의 경우 일사의 성분별 입사각 수정인자는 다음과 같이 주어진다.

$$K(\theta_i) = 1 - b_0 \left(\frac{1}{\cos \theta_i} - 1 \right) \tag{식 4-39}$$

한편 Theunissen et al.은 하나의 단일 입사각에만 의존하지 않는 진공관형 집열기의 광학적 성능을 평가하는 방법을 제안하였다. 이들의 기하학적 구조는 아래 그림과 같이 원통형 흡열판 또는 평평한 흡열판을 포함하는 진공관으로 구성된다. 입사되는 직달일사는 진공관에 대한 종방향 (Longitudinal direction) 및 횡방향 (Transverse direction)의 두 가지 성분으로 분할되고 각각의 입사각에 따른 2축 (Biaxial)에 대한 IAM이 계산되면, 이중 진공관형 집열기의 IAM은 다음과 같이 그들의 곱이 된다. [그림 4-128]은 진공관 집열기의 입사각 수정계수 인자를 설명한 그림이다.

$$K(\theta_i) = K(\theta_t)K(\theta_l) \tag{식 4-40}$$



[그림 4-128] 진공관 집열기의 입사각 수정계수 인자

경사면에 대한 직달일사의 입사각, θ_b 는 다음과 같다.

$$\theta_b = \cos^{-1}(\cos(\phi - \beta)\cos\omega + \sin(\phi - \beta)\sin\delta) \tag{식 4-41}$$

Brandemuehl et al.는 천공산란 및 지면반사 일사에 대한 단일 상당 입사각 (Single equivalent angle), θ_d 와 θ_g 을 다음과 같이 제안하였다.

$$\theta_d = 59.68 - 0.1388\beta + 0.001497\beta^2 \tag{식 4-42}$$

$$\theta_g = 59 - 0.5788\beta + 0.002693\beta^2 \tag{식 4-43}$$

【태양열집열기 열성능】

ISO 24194:2022 (Solar energy-Collector fields-Check of performance)에서는 태양열집열기 어레이의 집열량, \dot{Q}_P 을 다음과 같이 제안하고 있다.

$$\dot{Q}_P = A_c \left[\eta_0 I_{T, IAM} - a_1 (T_m - T_a) - a_2 (T_m - T_a)^2 - a_3 \left(\frac{dT_m}{dt} \right) \right] f_{safe} \quad (\text{식 4-44})$$

안전계수 (Safe factor), f_{safe} 는 3가지 요인의 곱으로 다음과 같다.

$$f_{safe} = f_P \cdot f_U \cdot f_O \quad (\text{식 4-45})$$

<표 4-48>은 ISO 24194에서 제안하는 수준별 측정불확도를 나타낸 것이다.

<표 4-48> ISO 24194 제안하는 수준별 측정불확도

Level	Accuracy
I	Measured solar radiation: ±3% and power output ±2%
II	Measured solar radiation: ±5% and power output ±2%
III	Measured solar radiation: ±5% and power output ±5%

모니터링 데이터를 기반으로 실측 집열량, \dot{Q}_M 은 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{Q}_M = C_p \cdot \rho \cdot \dot{V} (T_{out} - T_{in}) \quad (\text{식 4-46})$$

한편 집열기의 성능지표로서 집열효율, η 는 다음 식과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{M \text{ or } P}}{I_T} \times 100 \quad (\text{식 4-47})$$

【고장감지 알고리즘】

본 연구에서는 PV 시스템의 고장감지를 위한 벤치마크 (Benchmark)로 슈하르트 관리도 (Shewhart control chart)를 사용하였다. 슈하르트 관리도는 통계적 공정관리 (Statistical process control) 기법의 일종으로 기준선 (Center line, 이하 CL)과 제어상한 (Upper control limit, 이하 UCL), 제어하한 (Lower control limit, 이하 LCL) 등 3개의 참조선을 갖는 시계열 그래프이다. UCL 과 LCL 은 다음과 같이 각각 설정되고 관측값이 제어한계선을 벗어날 때 이를 고장으로 감지하게 된다.

$$UCL = CL + 2\sigma \quad (\text{식 4-48})$$

$$LCL = CL - 2\sigma \quad (\text{식 4-49})$$

여기서, CL 은 관측값의 평균, σ 는 관측값의 표준편차를 나타낸다.

(다) 실증 태양열 시스템

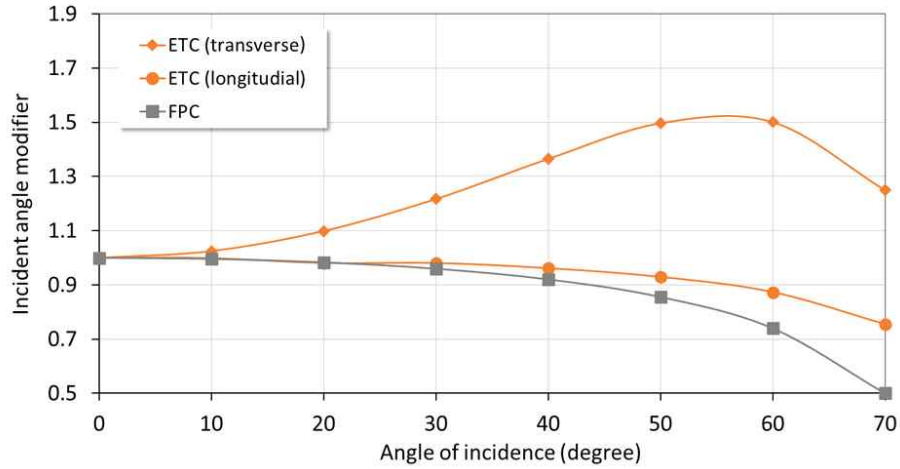
실증시스템을 대상으로 시뮬레이션 기반 실시간 태양열집열기 열성능 해석 및 고장감지 알고리즘을 검증하였으며, 여기에 적용된 평판형과 이중 진공관형 집열기는 각각 참여업체인 (주)에스앤지에너지와 세한에너지(주)의 인증제품으로 방위각 56°에 45°의 경사각으로 기계실 지붕에 설치되다.

인증시험 기준 (KS B 8295 태양열집열기)에 따른 집열기의 주요 사양은 <표 49>와 같다. 54매 (전면적기준 총 설치면적 108m²)의 평판형 집열기가 9직렬/6병렬로 배치되었으며. 40매 (전면적기준 총 설치면적 91.6m²)의 이중 진공관형 집열기는 6,7직렬/6병렬로 설치되었다.

<표 4-49> 실증 태양열 설비 사양

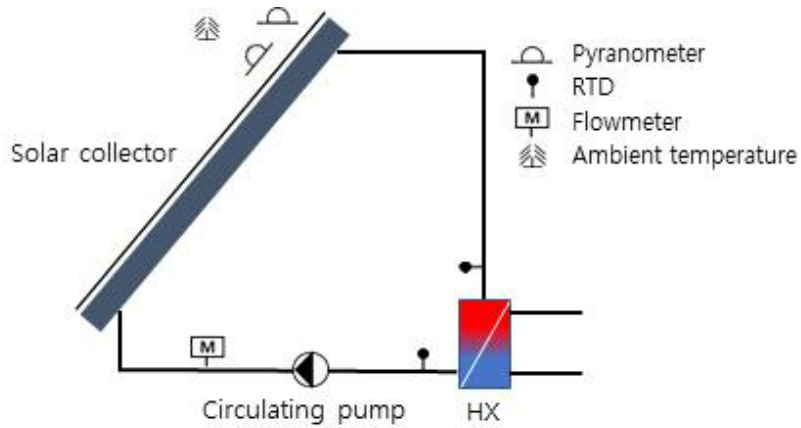
시스템 구성요소		사양	비고
평판형 집열기	크기	2.0m × 1.0m × 0.07m	전면적 2.0 m ²
	최대광학효율	0.7409	
	효율식 1차계수	4.1791 W/m ² K	
	효율식 2차계수	0.0057 W/m ² K ²	
	열용량	17.7 kJ/K	
진공관형 집열기	크기	1.635m × 1.4m × 0.116m	전면적 2.29 m ²
	최대광학효율	0.466	
	효율식 1차계수	1.0953 W/m ² K	
	효율식 2차계수	0.0029 W/m ² K ²	
	열용량	93.5 kJ/K	

[그림 4-129]는 두 집열기의 입사각 수정계수 (Incident angle modifier, 이하 IAM)를 나타낸 것이다. 여기서 이중 진공관집열기의 IAM은 세로 (Longitudinal)와 가로 (Transverse) 성분으로 구분된다.



[그림 4-129] 평판형 및 진공관형 집열기 입사각 수정계수

집열량 측정을 위해 실증모델에 설치된 측정센서 및 그 위치를 아래 그림과 같이 표시하였다. 집열라인 (평판형 및 이중 진공관형 집열기) 별로 2개의 열매체 온도센서와 1개의 유량계가 각각 설치되었다. 또한 외기온 측정을 위한 백엽상과 2개의 일사계 (수평 및 경사면)를 일사가 차폐되지 않는 주변에 [그림 4-130]과 같이 배치하였고, [그림 4-131]은 실증용으로 설치된 일사계 모습이다. 또한 <표 4-50>에 실증에 적용된 태양열 열매체 특성을 정리하였다.



[그림 4-130] 실증 태양열 설비 측정센서 위치도



[그림 4-131] 실증에 설치된 일사계 사진

<표 4-50> 실증에 적용된 태양열 열매체 특성

Composition	Density	Specific heat	Freezing temperature
Propylene glycol-to-water ratio of 40%/60%	1,016 kg/m ³	3.75 kJ/kg·K	-22℃

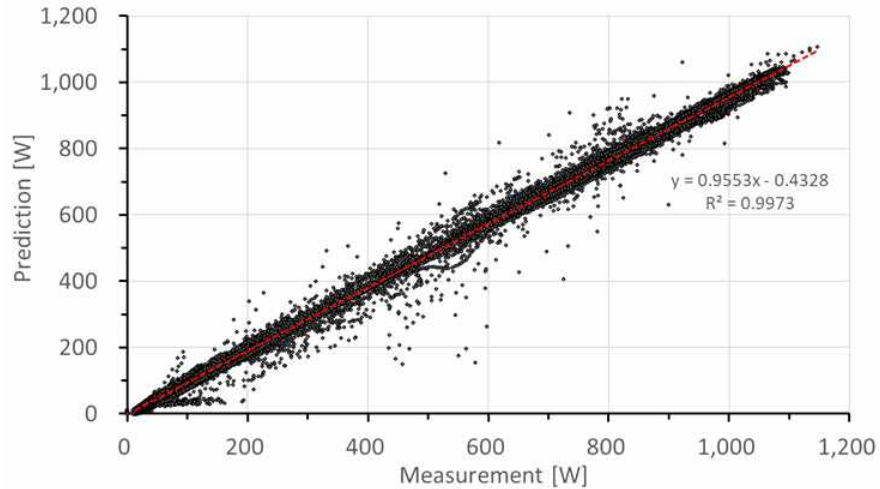
(라) 실증 데이터 검증

【직산분리 모델】

본 보고서에서는 22일간 실측된 1분 간격의 경사면 일사와 수평면 일사로부터 추정된 예측결과를 선형회귀분석과 아래 식과 같이 평균 제곱근 오차 (Root mean square error, 이하 RMSE)을 통해 비교하였다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_c} \sum_{i=1}^{n_c} (p_i - m_i)^2} \tag{식 4-50}$$

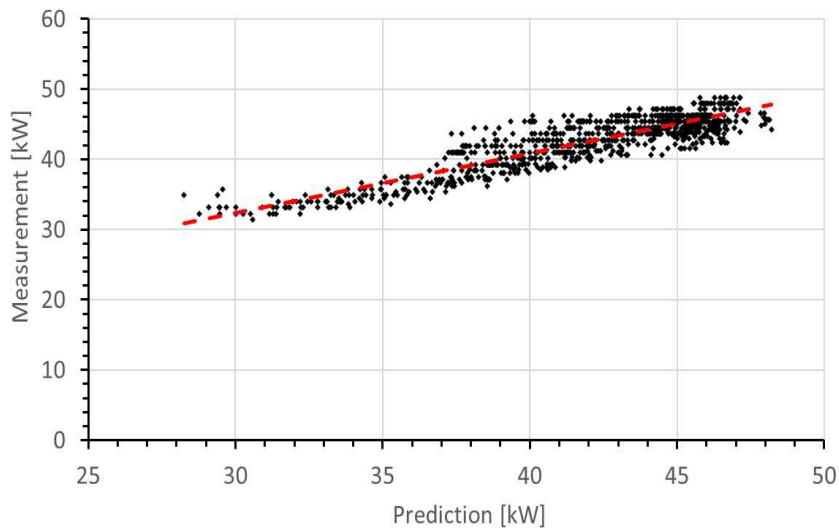
[그림 4-132]는 실측 경사면 일사량에 따른 시뮬레이션 예측 결과를 나타낸 것이다. 선형회귀분석에 따른 결정계수(R²)와 RMSE는 각각 0.9973와 24.7W로 직산분리 모델의 적합성을 확인할 수 있다.



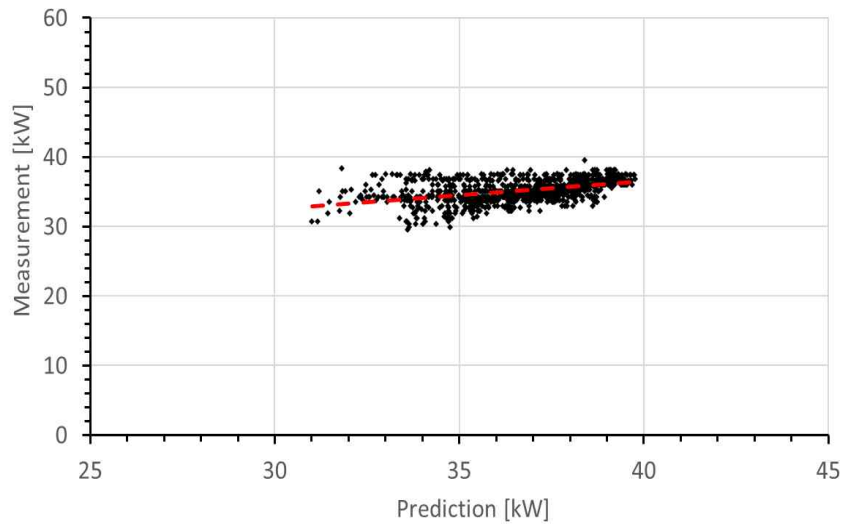
[그림 4-132] 실측 경사면 일사량에 따른 시뮬레이션 예측 결과

【집열기 해석 알고리즘 타당성】

[그림 4-133]와 [그림 4-134]는 5일간의 평판형 집열라인과 진공관형 집열라인 실측 및 시뮬레이션 예측 집열량을 각각 비교한 것이다. 여기에서 일사강도가 낮아 펌프의 작동 및 정지가 빈번히 발생하는 이른 아침 및 늦은 오후의 데이터는 제외하였다. 실측 및 예측 집열량의 동적거동이 거의 동일한 가운데 평판형 집열라인과 진공관형 집열라인의 RMSE는 각각 1.90 kW와 2.34 kW로 나타나 해석 알고리즘의 정확성을 확인할 수 있다.



[그림 4-133] 평판형 집열기 실측 및 시뮬레이션 예측 집열량 비교



[그림 4-134] 진공관형 집열기 실측 및 시뮬레이션 예측
집열량 비교

【고장감지 제어한계】

아래 식과 같이 시뮬레이션 예측 집열량($P_{prediction}$)에 대한 실측 집열량 ($P_{measurement}$)의 비, RP (Ratio of performance)을 슈하르트 관리도의 관측값으로 설정하였다.

$$RP = \frac{P_{measurement}}{P_{prediction}} \tag{식 4-51}$$

<표 4-51>은 검증데이터를 통해 도출된 평판형 및 이중 진공관형 태양열 집열기 RP 에 대한 평균값과 표준편차를 나타낸 것이다. 따라서 슈하르트 관리도에 따른 평판형 및 이중 진공관형 태양열시스템의 정상운전 한계를 아래 식과같이 각각 설정할 수 있다.

제어 한계선이 $RP \pm 3\sigma$ 이 될 때 정상운전 관측치(RP)의 99.73%가 이 범위 내에 있게 된다. 데이터의 측정 간격이 1분이기 때문에 제어한계선을 넘는 RP 값이 30분 이상 지속되면 고장이라 판단할 수 있다.

$$0.907 \leq RP_{FPC} \leq 1.096 \tag{식 4-52}$$

$$0.922 \leq RP_{ETC} \leq 1.152 \tag{식 4-53}$$

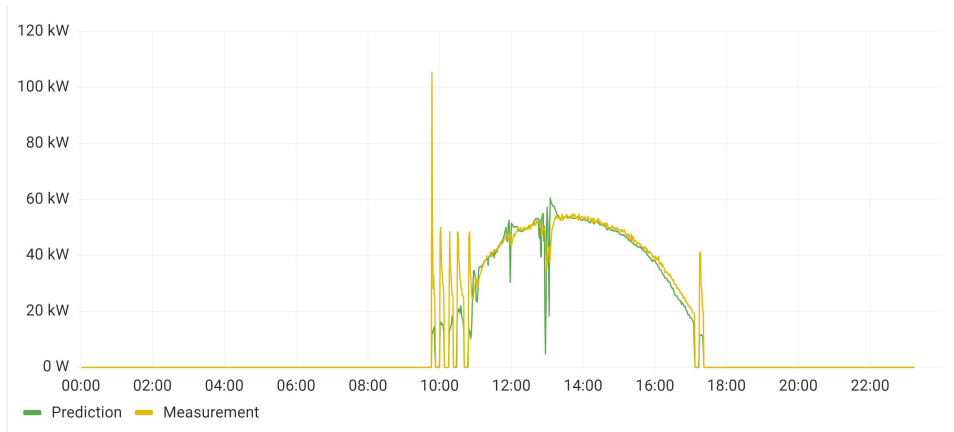
<표 4-51> 태양열집열기 평균값과 표준편차

	Mean	Standard deviations [σ]	3σ
RP_{FPC}	1.0	0.0313	0.0941
RP_{ETC}	1.037	0.0382	0.1146

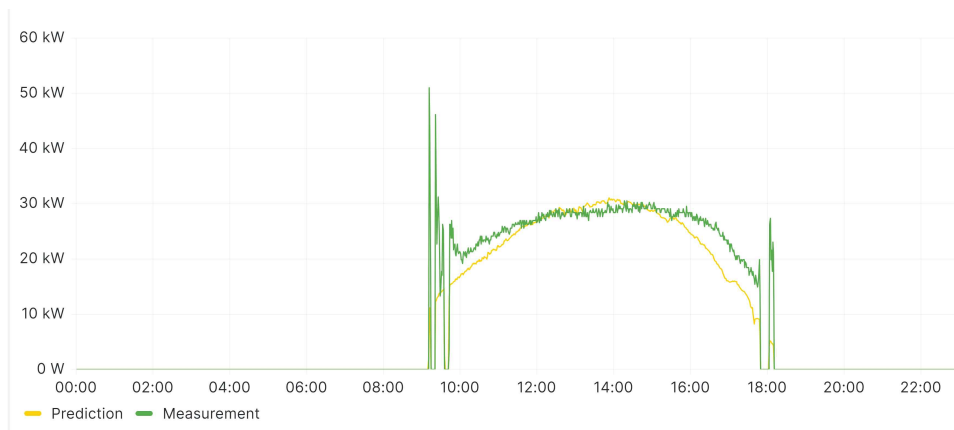
(마) 고장감지 태양열시스템 원격 모니터링시스템 구현

【원격 모니터링시스템 구현】

[그림 4-135]와 [그림 4-136]은 실증 태양열시스템에 구축된 원격 모니터링시스템의 평판형 및 진공관형 집열라인의 실측 및 예측 집열량을 각각 나타낸 것이다. 슈하르트 관리도와 더불어 실측과 시뮬레이션에 따른 집열기의 순간 집열량 및 집열효율 등이 실시간으로 표시된다.



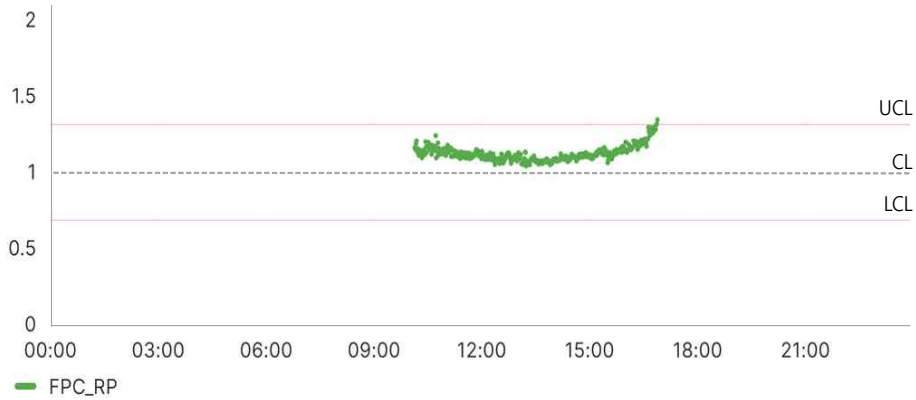
[그림 4-135] 원격 모니터링 구현 평판형 집열기 실측 및 예측 집열량 비교 그래프



[그림 4-136] 원격 모니터링 구현 진공관형 집열기 실측 및 예측 집열량 비교 그래프

【고장감지 시스템】

[그림 4-137]은 평판형 집열라인의 맑은 날 일일 실측 및 예측 집열량에 따른 모니터링 시스템의 슈하르트 관리도를 나타낸 것이다. 실측과 시뮬레이션 예측 집열량에 따른 RMSE와 일일 총 집열량의 상대오차는 각각 1.08 kW와 0.5%로 거의 일치하고 있으며, 슈하르트 관리도는 정상운전 상태를 정확하게 표시하고 있다.



[그림 4-137] 맑은 날 평판형집열기 실측 및 예측 집열량에 따른 모니터링시스템의 슈하르트 관리도

[그림 4-138]은 이중 진공관형 집열라인의 맑은 날 일일 실측 및 예측 집열량에 따른 모니터링 시스템의 슈하르트 관리도를 나타낸 것이다. 실측과 시뮬레이션 예측 집열량에 따른 RMSE와 일일 총 집열량의 상대오차는 각각 1.64 kW와 1.3%로 거의 일치하고 있으며, 슈하르트 관리도 또한 정상운전 상태를 정확하게 보이고 있다.



[그림 4-138] 이중 진공관형집열기 실측 및 예측 집열량에 따른 모니터링시스템의 슈하르트 관리도

(바) 주요 결과 요약

전술한 바와 같이 시뮬레이션 기반 태양열집열기 성능해석 알고리즘을 탑재한 원격 모니터링시스템을 제안하고 실증을 통해 그 타당성을 분석하였다. 시뮬레이션 모델은 ISO 24194:2022의 집열기 어레이 성능추정식이 적용되었으며, 1분 간격으로 측정된 기상자료(수평면 일사량 및 외기온)와 집열기 유량 및 입·출구 온도를 이용하여 해석하였다. 실증단계에 구축된 태양열 계간축열기반 열공급시스템을 통해 분석된 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 실측된 1분 간격의 경사면 일사와 수평면 일사로부터 추정된 예측결과를 비교한 결

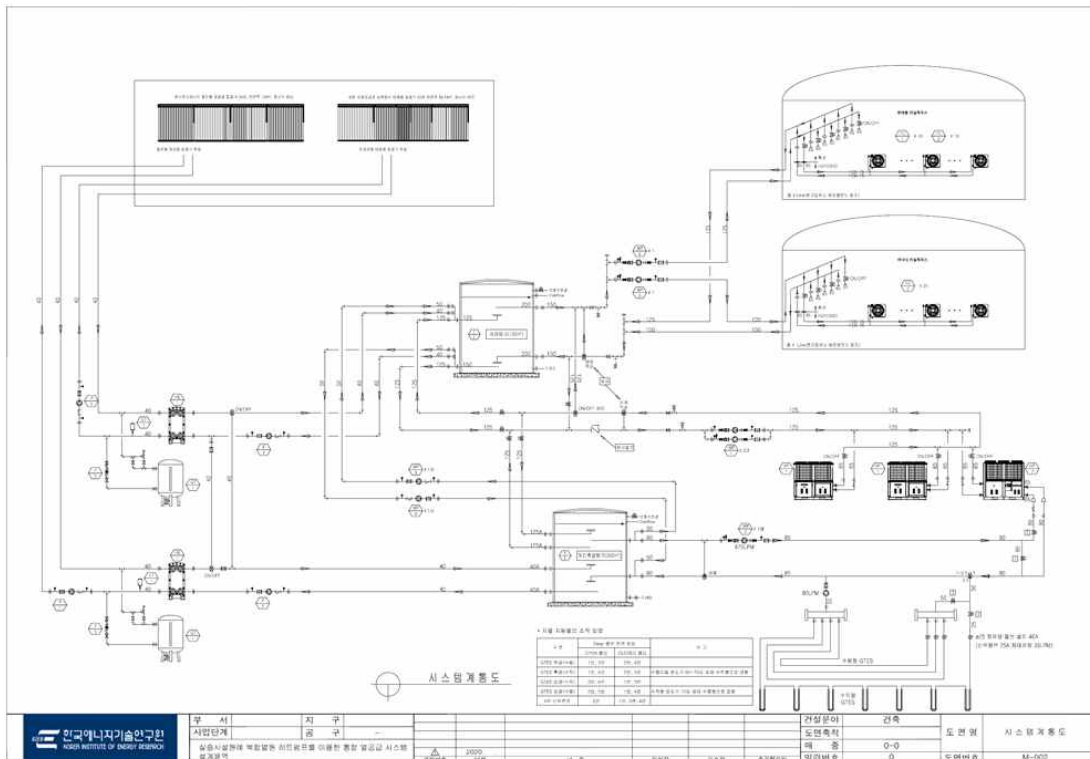
과, 선형회귀분석에 따른 결정계수와 평균 제곱근 오차는 각각 0.9973와 24.7 W로 직산분리 모델의 적합성을 확인하였다.

- ISO 24194 기반 시뮬레이션 모델의 실시간 순간 집열량과 순간효율은 기상 및 작동 조건이 상이한 상태에서도 실측을 정확하게 추종하는 것으로 나타났다. 5일간의 평판형 집열라인과 진공관형 집열라인의 RMSE는 각각 1.90 kW와 2.34 kW로 분석되었다.
- 고장감지 벤치마크는 정상작동 조건에서 실측 발전량에 대한 시뮬레이션 예측 발전량의 비를 관측치로 슈하르트 관리도를 사용하였다. 실증 태양열시스템을 대상으로 한 시험 결과, 정상운전 여부를 정확하게 감지하는 것으로 나타났다.

(사) 고장진단 정확도 시험평가

실증 시설원예에 구축한 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템의 태양열집열기 집열 성능 및 집열펌프 운영시스템의 고장진단 시스템의 정확도 확인을 위해 한국태양열융합협회를 통해 정확도를 검증하였다.

실증대상지 기계실 외부와 내부에 설치된 진공관형 태양열집열기, 평판형 태양열집열기, 버퍼조 및 계간축열조와 연계된 태양열 시스템의 작동을 위한 각종 설비와 시스템 구성은 [그림 4-139]와 같다.



[그림 4-139] 실증시설원예 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템 계통도

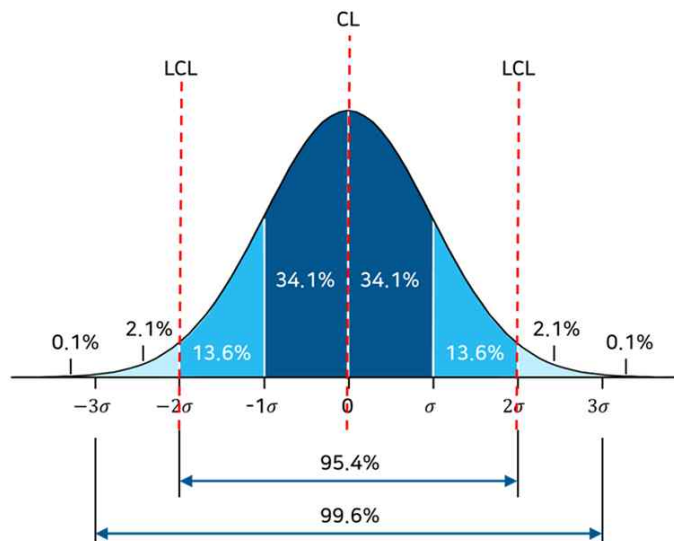
태양열 집열량 해석 알고리즘을 기반으로 실제 태양열시스템의 고장 여부 판단 위해 벤치마크인 슈하르트 관리도(Shewhart control chart)를 활용하였다. 슈하르트 관리도는 프로세

스의 품질을 모니터링하고 제어하기 위해 사용되는 통계적 공정관리(Statistical process control) 기법 중 하나이다. 이 관리도는 공정에서 발생하는 변동성을 추적하고, 이상 상태를 식별하며, 필요한 조치를 취함으로써 공정을 안정화시키는 작업에 활용된다. 슈하르트 관리도는 원리적으로는 공정에서 발생하는 무작위한 변동성과 특정한 원인에 의한 변동성을 구분하기 위해 사용된다. 이를 위해 주어진 측정값의 시계열 데이터를 사용하여 관리도를 구성한다. 일반적으로 슈하르트 관리도는 공정의 성능을 나타내는 관리 통계량(예: 평균, 범위)을 추적하기 위해 사용되며 대표적으로 사용되는 평균관리도 및 범위 관리도 등 두 가지 유형의 관리도가 있다. 평균 관리도는 공정의 평균값을 추적하며 주어진 시간 간격마다 샘플을 추출하고, 추출한 샘플의 평균을 구한 후, 이를 관리도에 표시한다. 이를 통해 평균이 정상 범위 내에서 안정적으로 유지되는지를 확인할 수 있다. 범위 관리도(R-차트)는 공정의 변동성을 추적한다. 주어진 시간 간격마다 샘플을 추출하고, 추출한 샘플의 범위(최대값과 최소값의 차이)를 구한 후, 이를 관리도에 표시한다. 이를 통해 변동성이 정상 범위 내에서 안정적으로 유지되는지를 확인할 수 있다.

슈하르트 관리도는 일반적으로 상한선과 하한선으로 구성된다. 이 선들은 정상적인 변동성 범위를 나타내며, 관리도 상에서 벗어나는 측정값이 관리 조치를 취해야 할 이상 상태를 나타낼 수 있다. 일반적으로 관리도의 경계선은 3σ 규칙을 기반으로 설정되며, 이는 정상 범위 안에 약 99.7 %의 데이터가 포함되도록 한다.

슈하르트 관리도는 [그림 4-140]에 보인 바와 같이 시계열 그래프로, 기준선(Center line, 이하 CL)과 제어상한(Upper control limit, 이하 UCL), 그리고 제어하한(Lower control limit, 이하 LCL)과 같은 세 개의 참조선을 포함한다. 이 관리도는 관측값이 제어한계선을 벗어날 때 해당 관측값을 고장으로 감지한다.

따라서 실험에서는 시뮬레이션을 통한 태양열 집열량 예측값과 측정된 열생산량의 비를 슈하르트 관리도에 근거하여 관측값으로 설정하게 되며 이 관측값이 제어한계선을 벗어날 때 해당 관측값을 고장으로 감지한다.



[그림 4-140] 슈하르트의 2σ법 관리도 구성

실증시설원예에 적용된 태양열 시스템의 고장진단은 집열성능 고장진단과 기계적 결함인 펌프 고장진단으로 나뉘며 각각의 고장진단 실험방법은 아래와 같다.

【집열성능 고장진단】

- 일사가 500W/m²를 초과하며 집열펌프가 켜져 있을때를 기준으로 진공관형 집열기와 평판형 집열기의 열생산 성능 저하에 대해서 각각 평가 및 고장진단을 실행하였다.
- 실측 집열량을 이론해석 집열량으로 나눈 값을 PPR(power performance ratio)이라 명명하며, 1분 단위로 데이터를 수집하였다.
- 일주일 이상의 PPR 값을 확보하여 모집단으로 지정하고 평균값과 표준편차를 구하여 임계 상한선과 임계 하한선을 산정하였다.
- PPR 값이 임계 상한선 값 보다 크거나 임계 하한선 값보다 작은 경우 고장이라 판단함 이때 임계값은 정규분포의 2σ 사용하였다.
- 임의의 고장을 위해 집열기의 절만을 [그림 4-141]과 [그림 4-142]에 나타낸 사진과 같이 가림막으로 가리고 고장진단 실행하였다.
- 1분마다 고장진단 알고리즘 실행 후 고장으로 판단되는 경우 지정된 번호로 문자 알림 서비스를 발송하였다.



[그림 4-141] 진공관형 집열기 집열성능 저하 모사:
집열면적의 50% 가림막 설치



[그림 4-142] 평판형 집열기 집열능력 저하 모사: 집열면적의 50% 가림막 설치

【펌프 고장진단 (기계적 결함)】

- 진공관형 태양열 집열 펌프와 평판형 집열 펌프가 가동 중 즉, 제어로 인한 펌프 IO 값이 1일 때 [그림 4-143]과 같은 차단기를 통하여 전력을 차단하여 임의의 고장을 발생시켰다.
- 1분마다 고장진단 알고리즘 실행 후 고장으로 판단되는 경우 지정된 번호로 문자 알림 서비스를 발송하였다.

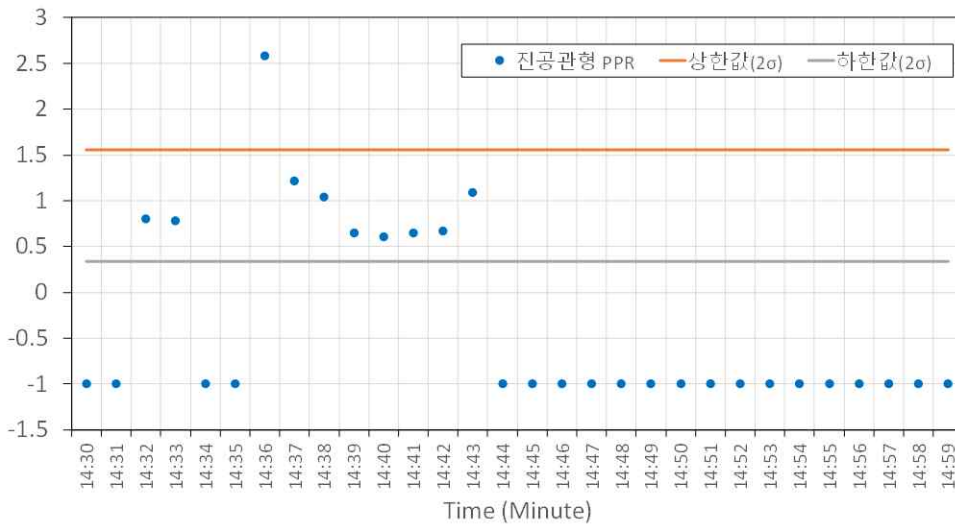


[그림 4-143] 집열펌프 차단기
 ① 진공관형 집열펌프, ② 평판형 집열펌프

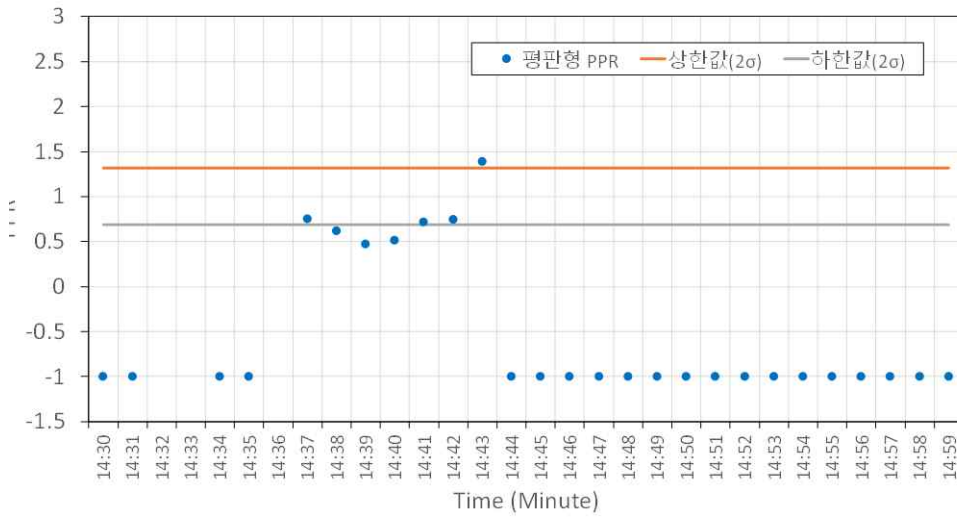
태양열 시스템의 고장진단 실험을 통한 정확도 결과는 아래와 같으며, [그림 4-144]에 진

공관형 집열기 고장진단 데이터, [그림 4-145]에 평판형 집열기 고장진단 데이터, [그림 4-146]에 집열기 고장알림과 펌프고장 알림 메시지 결과 화면을 나타내었다.

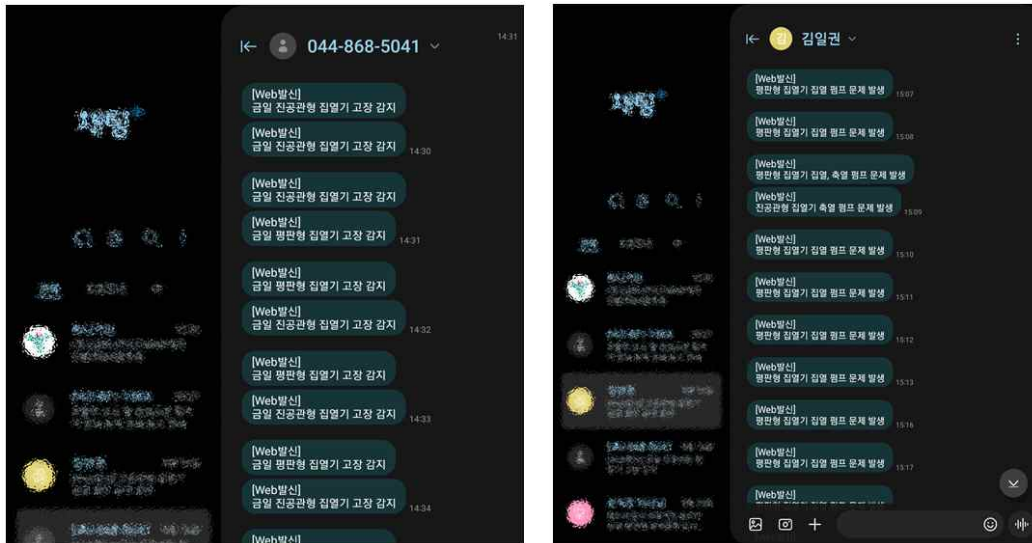
- 진공관형 태양열 집열기의 열생산 성능 저하에 대한 고장 진단 결과 총 15회의 인위적인 고장 신호에 대해서 알림 서비스 문자 15회가 발송되었으나, 2회의 비정상 알림 서비스를 제외한 13회에 정상 알림 서비스를 발송으로 정확도는 87% 를 갖는 것으로 확인하였다.
- 평판형 태양열 집열기의 열생산 성능 저하에 대한 고장 진단 결과 총 16회의 인위적인 고장 신호에 대해서 정상 알림 서비스 문자 16회가 발송되어 정확도는 100% 를 갖는 것으로 확인하였다.
- 진광관형 태양열 집열 펌프의 가동성능에 대한 고장 진단 결과 총 13회의 인위적인 고장 신호에 대해서 정상 알림 서비스 문자 13회가 발송되어 정확도는 100% 를 갖는 것으로 확인하였다.
- 평판형 집열 펌프의 가동성능에 대한 고장 진단 결과 총 13회의 인위적인 고장 신호에 대해서 정상 알림 서비스 문자 13회가 발송되어 정확도는 100% 를 갖는 것으로 확인하였다.
- 따라서 통합 고장진단 정확도는 전체 고장 신호 57회 중 비정상 알람 2회, 정상 알람 55회로 96.5% 성능을 발휘하는 것으로 확인하였다.



[그림 4-144] 진공관형 집열기 고장진단 데이터



[그림 4-145] 평판형 집열기 고장진단 데이터



[그림 4-146] (좌)집열기 고장알림 및 (우)펌프고장 알림 메시지 결과

5. 가이드라인 및 사후관리

가. 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템 설계 가이드라인

아열대 작물 재배농가 증가에 따른 난방에너지 사용량 및 온실가스 배출량이 지속적으로 증가되고 있으며 동절기 아열대 작물의 냉해 방지 및 생육 온도 조건 유지를 위해 화석연료 및 전기보일러가 활용되고 있다.

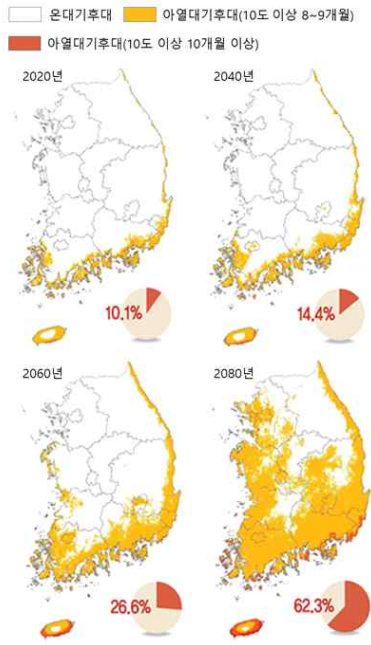
이에 따라 저탄소농업으로의 전환을 위해서는 아열대 작물 재배시설에 태양열과 같은 재생에너지 도입 필요하며, 아열대 작물 재배에 필요한 기술적 기반 조성을 위한 정책적 지원이 필요하고, 태양열에너지 융합 난방에너지 공급 설비 설계 및 적용을 위한 과학적이고 객관적인 접근 방식 도입 필요하다.

아열대 작물 재배 시설의 열공급 설비는 지역적 특성이 반영된 재배 현지 기후 조건이 아닌 타 지역의 설계 경험에 따른 난방에너지 공급용 설비의 용량 산정 및 설계가 이루어지고 있으며, 따라서 보다 공학적이고 에너지 분석을 기반으로 한 아열대 작물 시설원에 난방 시스템의 설계가 필요하며, 특히 지역 기후와 기상에 적합한 재생에너지를 적용할 수 있는 지역 맞춤형 열 공급 시스템 설계 및 성능 예측을 위한 시뮬레이션 모델 도입이 필요하다.

아열대 작물의 생육 환경을 맞춰 주기 위한 동절기 온실 내부 설정온도 조건은 작물에 따라 차이가 있으며 대표적 고부가가치 작물인 망고, 바나나의 경우 최저 17 °C에서 최대 25 °C를 유지해야 한다.

지역적, 기후적 특성이 반영된 아열대 작물 생육 조건 유지를 위한 열 공급 시스템 설계 방법의 체계적 정보 제공 및 활용계획이 부재함으로 태양열 계간축열 기반 열공급 시스템이 적용되는 시설원의 지역 특성을 고려한 과학적인 설계가 필요하다.

[그림 5-1]에는 우리나라 아열대 기후대 예측 예시자료를 나타내었고, [그림 5-2]에는 우리나라 아열대작물 재배면적 추이, 그리고 <표 5-1>은 시뮬레이션 기반 설계를 위한 한라봉 재배시 온실 설정온도 입력 조건 예시, <표 5-2>와 <표 5-3>은 시뮬레이션 기반 설계를 위한 망고와 바나나 재배시 온실 설정온도 입력 조건 예시를 나타내었다.



[그림 5-1] 우리나라 아열대 기후대 예측 (예시)



[그림 5-2] 우리나라 아열대작물 재배면적 추이

<표 5-1> 시뮬레이션 기반 설계를 위한 한라봉 재배시 온실 설정온도 입력 조건 (예시)

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	
생육상태	성숙기		발아기		개화기	생리낙과		과실비대기			착색개시	착색기	성숙기
온도 ℃	최고	자연온도		25	27~30	28~30	30	자연온도			20	10~15	
	최저	0~2 (5)		15			자연온도			15	0~2 (5)		

<표 5-2> 시뮬레이션 기반 설계를 위한 망고 재배시 온실 설정온도 입력 조건 (예시)

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
생육상태	출퇴기		개화결실기	과실비대기		과실수확기		영양생장기			화분화기	가온개시
온도 ℃	최고	25	35	자연온도								25
	최저	17	22	자연온도							5	17

<표 5-3> 시뮬레이션 기반 설계를 위한 바나나 재배시 온실 설정온도 입력 조건 (예시)

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
온도 ℃	적정	25					자연온도			25		
	최저	17					자연온도			17		

지역 농업 발전을 위해 아열대 작물 재배를 위한 난방에너지 공급용 설비의 분석적이고 과학적인 방법에 기반한 시뮬레이션 툴을 활용한 객관적 설계방안이 적용되어야 하며 아래와 같은 항목을 통해 설계되어야 한다. <표 5-4>는 시뮬레이션 기반 설계를 위한 온실 부하 시뮬레이션 입력 조건 예시를 나타내었고, <표 5-5>는 시뮬레이션 기반 설계를 위한 지역적 특성을 고려한 연간 난방 부하 예측 예시이다. [그림 5-3]은 시뮬레이션 기반 설계를 위한 재배 작물 및 지역 특성 고려 난방 부하 예측 결과를 예시로서 나타내었다.

- 아열대 작물 시설원예에 대한 시뮬레이션 모델을 활용한 난방부하 예측
- 아열대 작물 재배 난방시스템에 대한 시뮬레이션 모델을 활용한 시스템 설계 및 성능 예측
- 아열대 작물 재배시설을 위한 재생에너지 융합 열공급 시스템에 대한 시뮬레이션 모델을 활용한 성능예측과 최적 설계
- 아열대 작물 시설 및 재생에너지 융합 난방시스템에 대한 시뮬레이션 통합 모델을 활용하여 연간 부하 분석, 용량 설계 및 에너지 분석

태양열 계간축열조 기반 열공급 시스템의 설계 가이드라인을 통해 제안한 방식을 활용할 경우 다음과 같은 장점을 기대할 수 있다.

- 농업분야 재생에너지 시스템 및 열공급 시스템에 대한 최적화 설계가 가능하며, 설비 용량 과설계에 의한 초기투자비 상승 억제로 경제성 향상 가능
- 아열대 작물 시설원예의 연간 에너지비용 및 이산화탄소 배출량 예측 가능
- 시설투자비 자료를 활용하여 경제성 분석에 활용 가능

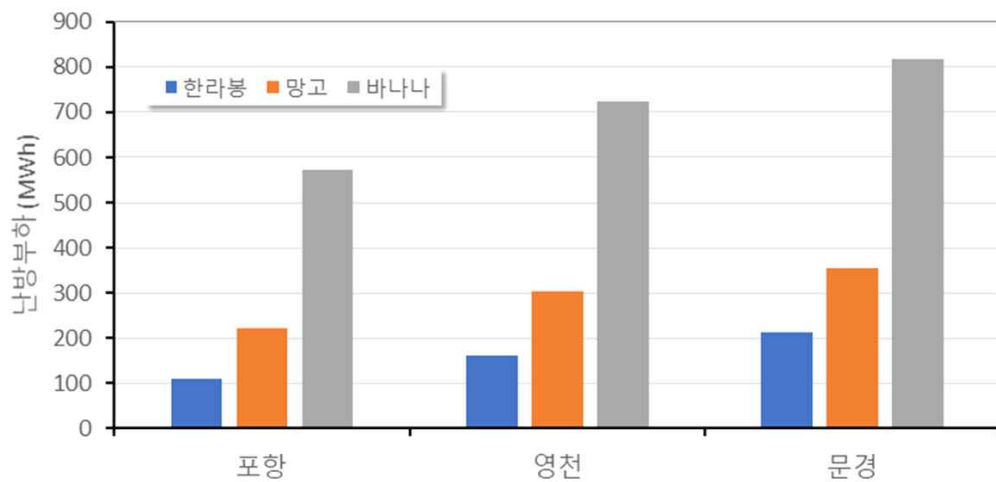
아열대 작물 시설원예의 난방부하 예측을 위한 시뮬레이션 모델 구현에 있어서 전 세계적으로 검증된 부하예측 시뮬레이션 툴을 사용, 실제 시설원예에 사용된 자재, 지형 및 기후적 특성을 반영하여 부하 예측이 수행되어야 한다.

<표 5-4> 시뮬레이션 기반 설계를 위한 온실 부하 시뮬레이션 입력 조건 (예시)

구분	내용	비고	
온실	크기	100m x 23.1m x 6.4m	-기후조건 : 문경, 영천, 포함 TMY3 (한국표준연구원) - 면적 : 2,310㎡ (700평) - 단열커튼 작동시간 : PM 04:00 ~ AM 09:00 - 바닥 지중 열 전달 고려 각 작물의 최저 및 적정온도 설정
	외피 U-value	2.7W/㎡K	
	g-value	0.84	
	단열커튼 U-value	2.5W/㎡K	
	침기횟수	0.5회/h @50Pa	

<표 5-5> 시뮬레이션 기반 설계를 위한 지역적 특성을 고려한 연간 난방 부하 예측 (예시)

	포항	영천	문경
한라봉(MWh)	109	162	212
망고(MWh)	222	304	354
바나나(MWh)	572	724	816



[그림 5-3] 시뮬레이션 기반 설계를 위한 재배 작물 및 지역 특성 고려 난방 부하 예측 (예시)

위와 같은 객관적이고 과학적인 시뮬레이션 모델을 이용한 아열대 작물 재배를 위한 시설원에 난방 부하 예측을 통한 시설원예의 열공급 시스템 설계는 시설원예의 열공급 시스템 과대용량 설계를 방지 할 수 있어 농가의 초기투자비 감소, 경제성분석 가능, 온실가스 저감량 도출 가능, 난방에너지 저감 극대화 가능, 인프라 구축비용 감소 등과 같은 경제효과를 유발하여 농가수익 극대화에 기여 할 수 있다.

나. 태양열 계간축열 및 집열시스템 사후관리

실증시설원예에 설치된 태양열 설비와 계간열저장 시스템이 효과적으로 운전되기 위해서는, 운전자가 수시로 시스템을 점검할 필요가 있으며, 태양열 시스템 비효율적으로 운전되거나 고장 또는 파손이 발생하는 것은 대부분 점검 소홀이 원인이므로, 수시로 시스템을 점검하는 것이 반드시 필요하다.

<표 5-6>은 일반적인 태양열 집열시스템에서 발생 가능한 고장의 원인과 해결방법을 정리한 내용이다.

(1) 계간조 및 버퍼조 점검

- 계간조와 버퍼조의 내부 온도를 확인한다. 비난방기에 대한 집열통전으로 인한 적정 축열온도 범위 등을 확인한다. 또한 난방기 버퍼조의 적정 설정온도 범위를 확인한다.
- 계간조와 버퍼조의 누수 상태를 점검한다. 탱크 주변의 누수 흔적을 육안으로 관찰할 수 있다.
- 계간조와 버퍼조에 설치된 수위 상태를 점검한다.
- 계간조의 상부온도가 과열경보온도에 근접하는지 확인한다.
- 일정한 기간 운전 후에는 측정된 데이터를 이용하여 열저장 탱크의 열전달계수를 추산하여 변화여부를 확인하여, 단열재의 흡습 등으로 인한 성능저하 여부를 간접적으로 확인할 수 있다.

(2) 태양열 시스템 정상작동 여부확인

- 시스템에 각 밸브의 개폐 상태를 확인한다.
- 열매체의 양이 적정한지 점검 한다.
- 시스템이 정상 작동중인 상태에서 열매체 수위 표시기 하단에서 5cm 높이 이상 열매체 잔류상태가 정상인지 확인한다.
- 열매체의 농도가 적정한지 점검한다.
- 열매체의 농도는 원액과 물의 비율이 1대3 정도면 정상이며, 열매체가 부족하여 보충시는 반드시 상기비율로 희석하여 보충해야한다.

(3) 제어장치 정상작동 여부확인

- 시스템의 정상작동 확인은 패널의 터치스크린 또는 관제실 PC에서 확인이 가능하다.
- 집열기 순환펌프를 점검한다.
- 집열기 순환펌프를 수동으로 구동시켜 이상이 없으면 자동 위치에 고정하여 제어기에 의해 집열기 순환펌프가 작동 되도록 한다.
- 제어 조건에 의해서 각 순환 펌프가 작동 할 때 순환 펌프 구동 램프에 불이 켜지는 것을 확인한다.
- 시스템 작동중에 자동 제어 패널의 터치 스크린에 펌프가 작동 중 인지를 확인한다.

<표 5-6> 태양열 집열 시스템 고장원인 및 해결방법

현상	원인	해결방법
시스템 작동 중지	정전	전기가 들어 올 때 까지 기다림
	제어기 센서 고장	점검/의뢰 (제어기 센서 교체)
	집열회로의 스트레이너 막힘으로 과부하 트립	점검/의뢰
	제어기내 기기 및 부품고장	점검/의뢰
	순환펌프 고장	점검/의뢰 (순환펌프 교체)
누수 현상 발생	배관 및 열결부위 파손	점검/의뢰
	제어기의 각 설정 온도가 적정하지 않음	점검/의뢰 (제어기의 설정 온도를 기준에 맞게 조정)
	열매체 부족	점검/의뢰 (열매체를 적정수위로 보충)
	온수 배관 누수	점검/의뢰 (배관 누수 점검 보완)
	온수 사용량 증가	점검/의뢰 (온수사용증가 원인 확인 및 점검 조치)
펌프 소음 증가	펌프 베어링 고장	점검/의뢰 (펌프 베어링 교체)
	열매체 부족에 의한 공회전	점검/의뢰 (열매체 보충)
집열 열매체 감소	배관 누수	점검/의뢰 (누수부위 점검 및 보완)
	과열에 의한 팽창	온수 사용량 조절

다. 원격모니터링 및 제어 가이드라인

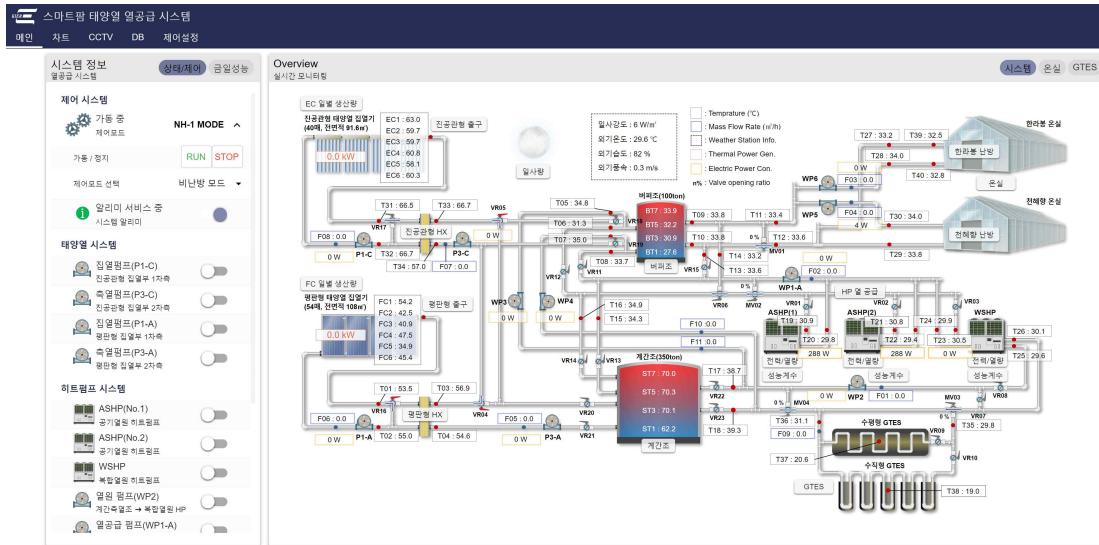
(1) 모니터링시스템 개요

본 시스템은 포항에 위치한 스마트팜 태양열 열공급 시스템의 전반적 사항을 모니터링 하기위해 구축되었다. 각 측정 요소의 데이터를 실시간으로 모니터링 가능하며, TSDB(시계열 데이터 베이스)에 저장하여 사용자가 지정한 시간범위의 데이터를 확인할 수 있다. 시스템 제어를 위해 현장에 설치된 PLC와 TCP/IP(ModBus 프로토콜)방식을 통해 1s(1000 millisecond) 간격으로 데이터를 주고 받으며 읽고 쓰기가 동시에 가능해 화면의 버튼 터치 나 클릭 한번으로 연동된 기기의 제어가 가능하다. 인터넷을 통해 web원격 제어가 가능하

도록 시스템을 구축하여 사용자가 어디에 위치해 있는 인터넷이 가능한 포터블 기기를 통해 모니터링 시스템에 접속하여 시스템 모니터링 및 기기 제어가 가능하다. 또한, 시스템의 주요 이벤트에 대한 상태 알림 기능을 제공하며 경고성 메시지를 통해 사용자가 현 작동상태를 인지하고 즉각적인 대응이 가능하도록 설계하였다.

(2) 웹 모니터링 시스템의 인터페이스 구성

[그림 5-4]는 모니터링 시스템의 메인 화면을 나타낸 것이다. 메인 화면 중 좌측 영역(시스템 정보)에서 시스템의 실시간 및 일일 작동성능을 확인할 수 있으며 펌프 등의 기기를 제어할 수 있다. 우측 영역(Overview)은 시스템의 작동상태를 사용자가 파악하기 용이하게 주요 컴포넌트를 개념화시켜 표현한 것으로 열공급 시스템 및 온실의 현황에 대하여 확인이 가능하다. 차트 탭에서는 각 요소별 데이터 이력을 확인할 수 있으며 CCTV 탭을 통해 보안과 시스템 안전상태에 대하여 실시간 확인이 가능하다. 또한, 제어 설정 탭을 통해서 시스템 운전에 요구되는 여러 설정값을 확인하여 변경할 수 있도록 하였다.



[그림 5-4] 웹 모니터링 시스템 메인 화면

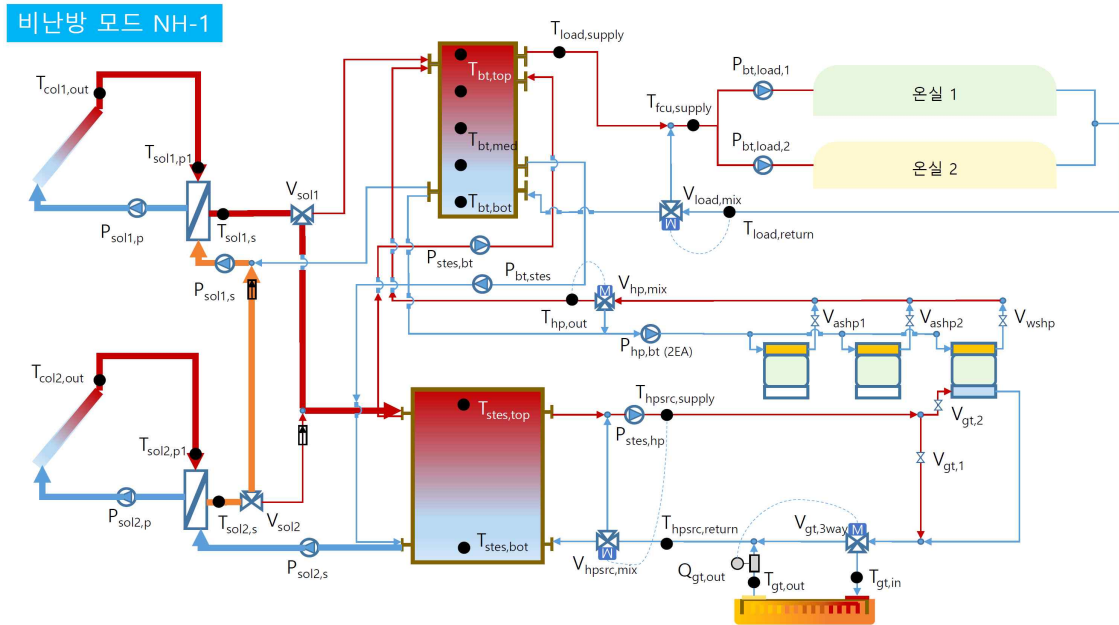
(3) 제어 시스템

본 시스템의 제어 방식은 자동 및 수동운전으로 구분되며 자동일 경우 미리 설정해 놓은 제어로직을 통해 운전되고, 수동일 경우 사용자의 입력을 통해 운전되게 된다. 자동 제어 로직은 크게 비난방 모드, 난방 모드, 비상축열 모드로 구분된다.

(가) 비난방 모드(하절기)

비난방 모드는 온실에 난방이 필요하지 않을 때 운영되는 로직으로 평판형 및 이중 진공관형 집열기에서 생산된 열이 계간축열조에 저장되는 방식으로 [그림 5-5]에 비난방 운전모드에 대한 계통도를 나타내었다. 제어 모드가 비난방 모드로 설정된 경우 일사량계를 통해 측정된 일사량이 제어 설정 값 이상면 집열기 1,2차측 펌프(P1-A, P3-A, P1-C,

P3-C)가 켜지고 일사량이 중지 일사량 미만 이면서 진공관형 집열기 1차측 열교환기 입구와 계간조 하부의 온도차가 제어 설정값 미만인 경우 펌프가 중지하게 된다. 아래 그림은 비난방 모드의 이해를 돕기 위한 계통도이다.



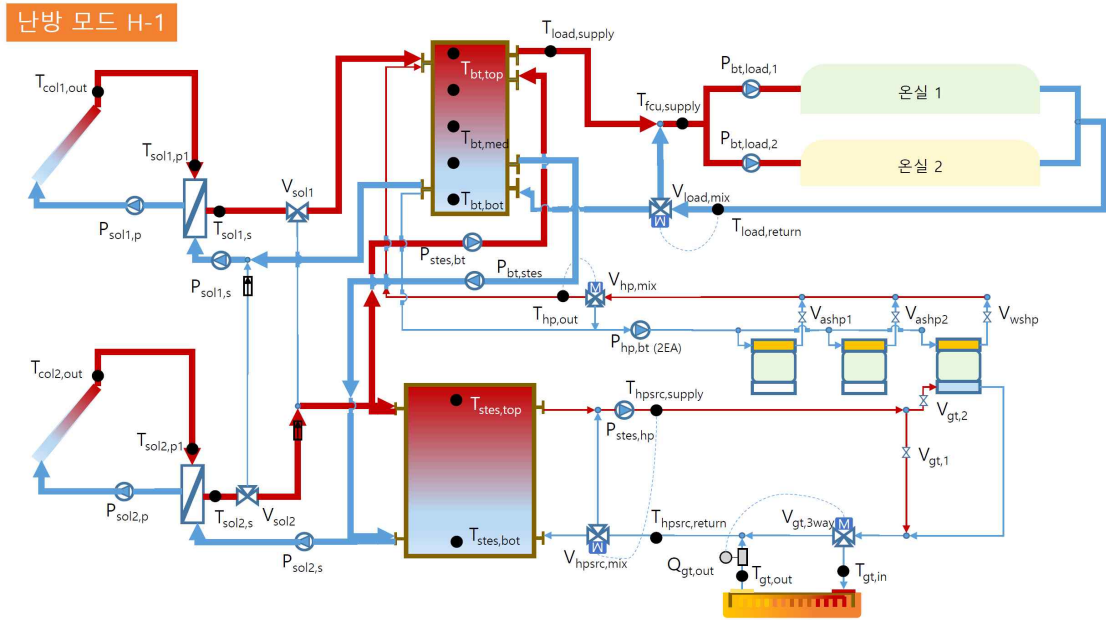
[그림 5-5] 비난방 모드 운전 계통도

비난방 모드에서 두가지 형태의 집열기가 계간조에 축열하게 되는데 이를 ‘NH-1’모드로 설정하고 계간조의 상부 온도가 설정값을 넘어가게 되면 계간조에서 버퍼조로 열이송 모드인 ‘NH-2’, 얇은수직형지중 축열 모드 ‘NH-3’ 모드로 조건에 의해 넘어가게 된다.

(나) 난방 모드(동절기)

난방 모드는 H-1부터 H-6모드 까지 6개의 모드와 축열기에 사용할 E-1 등 총 7개의 운전모드로 구성되어 있다. H-1 모드에서는 계간조에서 버퍼조로 열을 이송, H-2 모드에서는 계간조의 열을 얇은지중축열로 이송, H-3과 H-4 모드에서는 지중축열로부터 히트펌프 열원으로 공급, H-5 모드에서는 계간조에서 히트펌프 열원으로 공급, H-6모드는 공기열원히트펌프로 버퍼조에 열공급하는 모드이다.

계간조의 온도가 40℃에 도달하면 난방용으로 사용하기 어려운 조건으로 하였고, 남은 잔열은 히트펌프 열원으로 활용하게 되며, 열원으로는 히트펌프에서 요구하는 조건인 30℃ 미만으로 공급하여야 하므로, 계간조로부터 지중축열을 거쳐 공급할 수 있으며 이 경우 지중축열의 온도는 어느 정도 상승하게 되며 5℃ 수준까지는 열원공급용으로 활용가능하다, 또 다른 방식으로는 계간축열에서 지중축열로 열을 전달한 후에 지중축열로 히트펌프 열원을 먼저 공급하고 계간축열의 열을 히트펌프 열원으로 공급하는 방식으로도 고려할 수 있다.



[그림 5-6] 난방 모드 운전 계통도

(다) 비상 축열 모드

온실의 공급할 열에너지가 부족할 때 설정하는 모드로 난방 모드와 비난방 모드처럼 기간에 따라 변하는 것이 아니고 사용자가 판단하여 설정하는 모드이다. 비상 축열 모드는 이중진공관형 집열기는 버퍼조에 축열하고 평판형 집열기와 히트펌프가 계간 축열조에 축열하는 방식이다.

위 설명된 모드는 시스템 제어가 자동인 상태에서 운영되는 로직으로 모니터링 페이지 시스템 정보의 상태/제어 탭에서 변경이 가능하다. [그림 5-7]에서 'RUN'버튼을 누르면 현재 환경에 맞게 위 로직이 적용되어 시스템이 운영되며, 'STOP'을 누르면 자동제어가 아닌 수동제어로 바뀌게 되어 사용자가 각 기기 제어를 할 수 있다. 또한, 알리미 서비스는 시스템 작동과 관련하여 주요 알림 사항을 사용자에게 문자로 알리는 기능으로써 기본적으로 활성화 되어 있지만 사용자가 원치 않을 경우 수동으로 기능을 정지할 수 있는 버튼이 존재한다.



[그림 5-7] 제어모드 선택 및 알리미 서비스 활성화 기능

테이블 형식으로 확인할 수 있으며 이 또한 사용자가 원하는 기간을 설정하여 CSV 형태의 파일로 추출할 수 있다.

(5) 데이터 다운로드 방법

모니터링 되고 있는 모든 데이터는 데이터베이스에 10초 간격으로 저장되며 사용자는 원하는 시간 간격의 평균 데이터를 추출할 수 있다. 데이터를 다운로드 하기 위해서는 메인화면에서 상단바의 DB 탭으로 이동하여 데이터를 표시하고자하는 기간을 지정해준다. 이후 데이터 테이블의 우측 모서리 부분에 마우스 커서를 hover시키면 옵션 버튼이 생기는데 그 버튼 클릭을 통해 ‘inspect’ 창에 진입한다. 그 다음 데이터의 형태를 지정(panel transformation) 및 확인 후 ‘Download CSV’ 버튼을 클릭하여 데이터를 다운로드 받을 수 있다.



[그림 5-10] 차트 탭의 그래프(데이터 이력)

날짜 및 시간	집열면 일사 (MJ/m²)	수평면 일사 (W/m²)	외기온도 (°C)	외기상대습도 (%)	외기풍속 (m/s)	외기보정풍향	외기풍향	외기노점온도	외기노점온도	외기노점온도	외기노점온도	외기노점온도	외기노점온도	외기노점온도	외기노점온도	외기노점온도	외기노점온도	외기노점온도
2023-08-23 01:00...	6.41	6.84	26.1	88.7	1.92	198	175	24.1	1004	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2023-08-23 02:00...	6.52	6.79	25.9	89.4	1.61	206	113	24.1	1004	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2023-08-23 03:00...	6.44	6.81	25.9	89.2	1.66	197	186	24.1	1004	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2023-08-23 04:00...	6.00	6.25	25.4	90.9	1.15	166	248	23.9	1004	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2023-08-23 05:00...	6.40	6.51	25.2	91.7	1.38	193	229	23.8	1004	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2023-08-23 06:00...	8.16	9.14	24.5	92.9	0.866	212	156	23.3	1005	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2023-08-23 07:00...	39.3	92.5	24.8	91.6	0.591	217	204	23.4	1005	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2023-08-23 08:00...	79.7	284	28.4	81.3	0.499	178	198	24.9	1005	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2023-08-23 09:00...	193	489	31.2	70.9	1.63	216	109	25.4	1005	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Max	801	898	34.6	92.9	3.27	217	309	27.0	1007	0	0	0	0	0	0	0	0	0

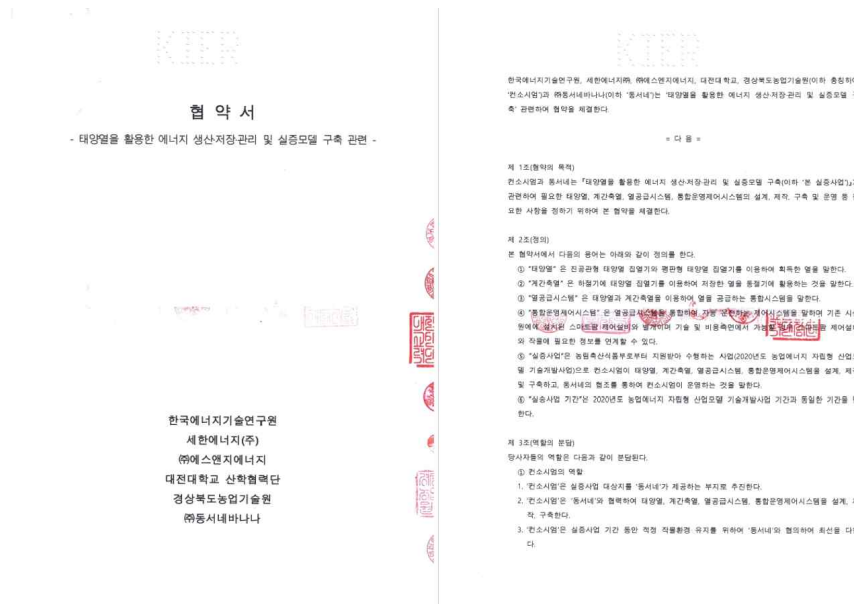
[그림 5-11] DB 탭의 데이터 테이블

라. 통합 시스템 사후관리

(1) 실증설비 소유권 이전

연구사업으로 구축된 실증설비 구축은 연구과제 참여기관인 연구팀 컨소시엄과 실증사이트 시설원에 농장주간 상호협력을 목적으로 협약을 체결하였다. 협약 내용에는 실증설비 구축에 필요한 태양열, 계간축열, 열공급시스템, 통합운영제어시스템의 설계, 제작, 구축 및 운영 등 필요한 사항을 다루었다.

연구 과제 종료 후 사후관리를 위한 소유권에 대해서는 협약서 제3조 ①-7에 따라 연구팀 컨소시엄은 본 실증사업에 따른 실증설비의 소유권을 보유하되, 본 실증사업 종료 후 지체없이 실증설비에 대한 소유권을 농장주에 이전하기로 하였고, 농장주는 제3조 ②-9에 따라 본 실증사업 종료 후 실증설비에 대한 소유권을 연구팀 컨소시엄으로부터 이전 받기로 하였다. [그림 5-12]는 협약서 사본의 일부 모습을 나타낸다.



[그림 5-12] 실증설비 구축 협약서 사본

(2) 실증설비 구축 참여기업 협력 유도 및 현장 정기점검

연구과제 종료 후 실증설비의 AS 등 원활한 유지보수를 위해서 실증설비 구축 참여기업 목록을 관리하고 협력과 지원이 중요하다. 설비구축과 관련하여 참여한 기업의 목록으로 설비에 대한 문의가 필요할 경우 연락할 수 있도록 농장주에게 제공될 것이다.

연구과제 참여기관 뿐만 아니라 실증설비 운영 중 문제가 발생할 경우 농장주가 즉각 문제를 해결할 수 있도록 적극적으로 대응하여 지속적이고 안정적인 농장 운영이 필요할 것이다. 실증설비 중 축열조를 시공한 기업(삼정SBT)는 실증과제 종료후 5년 뒤에 누수와 상관없이 무상점검을 약속하였다. 실증설비의 자체 오작동 등 결함으로 인한 고장 하자발생시 참여 기업이 발생한 하자증권을 활용하여 최대한 농장주의 부담 없이 실증설비가 보수될 수 있도록 조치할 예정이다. 뿐만 아니라 주관기관은 과제종류 후에도 적절한 실증설비 정기점

검을 통해서 설비 점검 뿐만 아니라 농장주에게 지속적으로 효율적인 운영 등 기술 노하우를 전수할 예정이다.

라. 실증설비의 연구종료 후 활용 방안

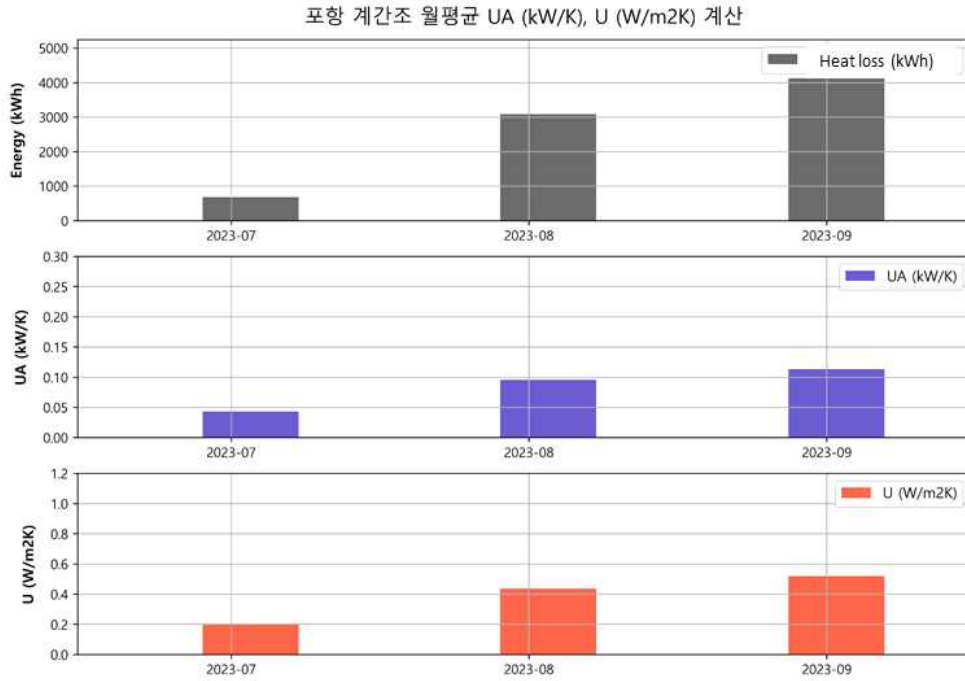
(1) 지속적인 성능 모니터링 및 분석에 활용

실증연구사업이 종료가 된 이후에도 구축한 모니터링시스템과 원격제어시스템을 통하여 시설의 운전관리가 원활히 이루어질 수 있도록 관찰과 분석을 진행할 계획이다.

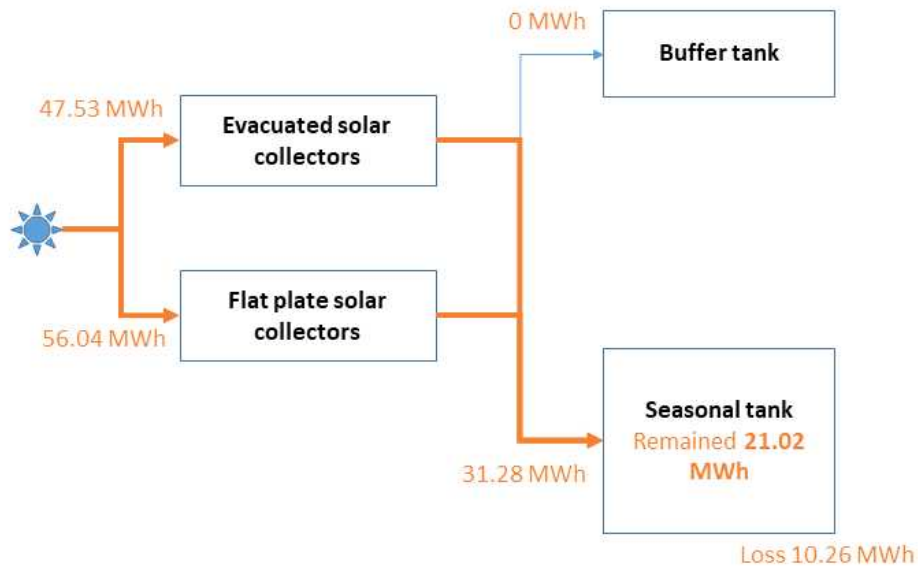
일례로 2023년 3월 실증기간 중 계간열저장 탱크의 열손실을 저감하기 위하여 탱크에 연결된 배관부위 자연대류에 의한 열손실을 줄이려는 목적으로 자동밸브를 설치한 바가 있다. 실증운전이 종료된 6월 이후 6월 24일부터 10월 16일까지의 운전 데이터를 분석하여 계간조 탱크의 열손실계수를 계산하여 [그림 5-13]에 나타내었고, 에너지밸런스를 검토한 결과를 [그림 5-14]에 나타내었다. 또한 [그림 5-15]는 실증종료 후 여름철 축열기간을 지나 10월 31일까지의 계간열저장 탱크의 온도 추이를 나타내었다.

실증연구 종료 이후인 2023년 6월 24일부터 10월 16일까지의 기간에 대한 계간열저장 탱크에 대한 효율을 산정한 결과 67.2%로 나타났으며, 실증기간 중 축열운전기간의 효율 계산값인 약 30% 수준에 비하여 2배 이상 향상되었다는 것을 알 수 있었다. 본 실증연구에 적용한 계간열저장 탱크는 350 톤 규모로 계간열저장으로서는 매우 작은 소용량으로서 체적 대비 표면적 비율이 높아 열손실 측면에서는 불리하고 단위체적당 비용이 상대적으로 더 높게 나타날 수 있으므로 일반적으로는 1,000 톤 규모 이상에 대해서 계간열저장이 적용되고 있다. 그렇지만, 본 연구를 통하여 축열효율이 약 67%로서 기존연구사례인 55.4%⁵⁾ 수준에 비하여 더 우수한 효율을 나타낼 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 실증종료 후 1년간의 추가 기간에 대한 연간 에너지밸런스 분석을 통하여 연간 계간열저장 그리고 버퍼조를 포함한 통합열저장조의 효율을 분석하여 그 효과를 확인하는 작업을 수행할 계획이며, 분석 결과의 수준에 따라 우수한 논문지 등에 발표하여 기술에 대한 객관적인 검증을 진행하고자 한다.

5) Oliveti et al, First experimental results from a prototype plant for the interseasonal storage of solar energy for the winter heating of buildings, 1998, Solar Energy, 62,4



[그림 5-13] 실증종료 후 여름철 축열운전 기간의 계간조 탱크 열손실계수 분석



[그림 5-14] 실증종료 후 여름철 축열운전 기간의 계간조 탱크에 대한 에너지밸런스 분석



[그림 5-15] 실증종료 후 여름철 축열운전기간의 계간조 탱크 온도 추이 분석

(2) 농축산 분야 및 타연구개발에 활용

본 실증사업의 연구결과는 시설원에 온실 뿐만 아니라 축사나 계사 그리고 건물이나 건물 군에 대한 열공급 등에 필요한 친환경열공급시스템을 위한 실증연구 등에도 활용이 가능할 것이다.

본 연구를 통하여 모니터링시스템에서는 매시간 운전데이터가 추적이 되고 있다. 장기간에 걸친 운전데이터를 데이터 기반의 운영 지능화 기술을 위한 유용한 데이터 자원으로도 활용이 가능하다. 본 연구에서는 학습기반의 모델예측제어와 인공지능제어 기법에 대한 연구도 진행하였다. 학습을 위해서는 양질의 데이터가 필요하며 본 실증설비를 통하여 획득할 수 있는 데이터는 이러한 디지털화 기술개발을 위한 데이터로서 매우 유용하게 활용할 수 있다.

또한 실증지에 설치된 태양열 집열설비의 센서 및 데이터취득 시스템을 이용하여 현장에 설치된 태양열 집열설비의 성능을 단일 집열기에 대한 KS인증시험성과 비교하고 확인하는 연구에도 활용이 가능하다.

(3) 주변 온실온계 열공급 설비로 활용

본 실증설비의 배관 시스템의 일부는 향후 추가사업을 위하여 배관연결이 용이하도록 구성하여 둔 부분이 있다. [그림 5-16]의 좌측 그림에 나타난 연결용 배관부위 사진은 향후 온실에 냉방운전으로 냉수를 공급할 필요성이 있거나, 또는 추가 온수 열공급을 위한 배관 연결이 필요할 경우를 대비하여 준비해 둔 설비 모습이다. 현재 가능성이 있는 대안은 온실 주변의 여유부지에 온실을 새로이 설치한 후에 이 온실에 필요한 난방열을 공급하는 방안이다. 현재 실증설비의 난방 열공급은 재배작물의 종류에 따라서는 2배 이상 추가로 공급이 가능한 수준이며 이를 활용하는 방안에 대하여 구체적인 검토가 이루어질 수 있다.

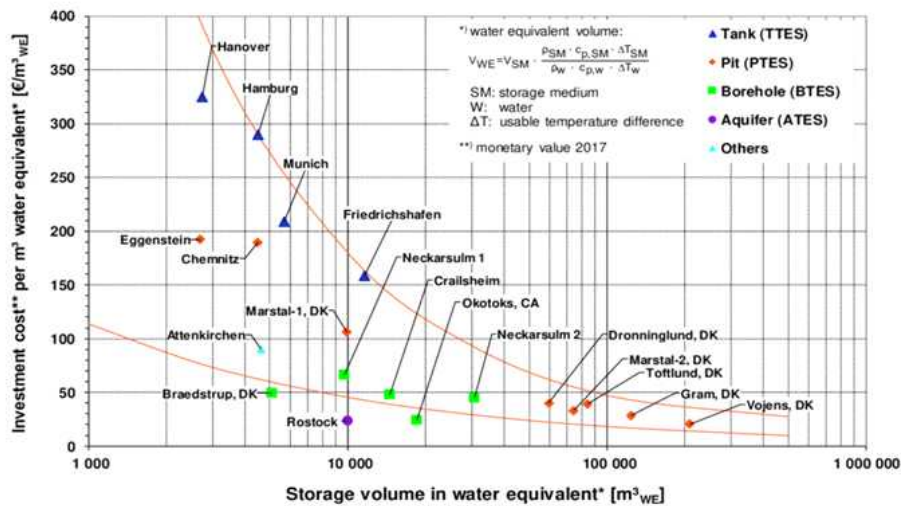
여름철 냉방 공급 또는 주변 온실 열공급 대비 연결용 배관부



[그림 5-16] 실증대상 온실 주변 부지를 이용한 열공급 연계 활용 방안 개념

(4) 보급사업 및 정책제안에 활용

본 실증사업을 통하여 개발한 실증시스템은 사업화를 위한 시스템모델로 개발하였으며 사업성이나 경제성에 대해서는 다음 장에서 다루었다. 이러한 사업화 시스템모델을 이용하여 농업에너지이용효율화사업에 태양열 계간열저장 시스템을 지원대상으로 포함이 될 수 있도록 정책적 제안에 활용할 것이다. 또한 산업부의 신재생에너지 융복합지원사업을 위한 시스템 모델로도 활용하여 태양열 계간열저장기술의 보급이 이루어질 수 있도록 노력할 것이다. 본 실증사업에서 적용한 350톤 규모의 소규모 계간열저장은 효율과 비용 측면에서 향상을 이루어 적용성 측면에서 매우 이점을 지니고 있어 온실 뿐만 아니라 건물, 계사 및 축사 등에 대한 보급사업호를 위한 검토가 필요할 것이다. 본 실증연구에서의 계간열저장 탱크 구축비용은 단위체적당 약 460천원/m³ 수준으로 유로 로 환산하면 환율 1,400원/유로를 적용하여 약 332 Euro/m³ 수준이다. [그림 5-16]은 IEA에서 제시한 계간열저장의 단위체적당 초기비용으로 본 실증연구에서 구축한 350톤 규모의 계간열저장탱크의 초기비용은 3,000톤 규모의 계간열저장 탱크의 비용과 유사한 수준으로 구축이 가능하였음을 알 수 있다.



[그림 5-17] IEA에서 제시한 계간열저장 단위체적당 구축 비용

(5) 규모가 확장된 적용에 대한 활용 방안

본 실증연구 대상의 실증온실 대비 규모가 확장되었을 경우, 현재 실증시스템의 난방공급 능력은 천혜향과 한라봉을 재배 중인 온실 난방부하의 2배 규모 수준에 대하여 추가로 공급할 수 있을 것으로 보인다. 당초 시스템을 설계할 당시 애플망고 또는 바나나 그리고 한라봉을 재배할 것으로 보고 온실 실내 설정온도 스케줄을 계획하여 시스템 용량을 산정하였으나, 코비드19가 발생하여 바나나체험농장을 경영하기에 어려운 상황이 되었고 이에 따라 애플망고로 작물을 변경하려 하였으나 농장주 사정으로 여의치 못하여 천혜향으로 재배작물을 결정하게 되었다. 천혜향의 실내온도는 바나나나 애플망고에 비하여 더 낮은 온도로 재배가 가능하여 난방부하는 상당히 줄어든 상태로 실증운전이 이루어졌다. 따라서 현재 농장주는 주변 농지를 구입하여 온실을 구축하고 실증시스템의 온수공급배관을 연계하여 난방열공급에 활용하는 방안도 검토 중에 있다.

또한 향후 실증규모 1,160평 보다 더욱 큰 규모의 온실에 실증모델을 적용하고자 하는 경우 온실면적의 10% 수준의 실증시스템 기계실과 같은 에너지센터를 신축하거나 온실일부 공간을 리모델링하는 방식으로 변경할 필요가 있다. 또한 현재의 실증시스템에서는 태양열 집열기 단위면적당 약 1.75배 즉 $1.75 \text{ m}^3/\text{m}^2$ 수준의 계간조 탱크를 적용하는 것으로 하였고 계간조의 열손실 저감을 위하여 기계실 내부에 배치하는 것으로 하였으므로 기계실 높이를 고려할 때에 높이는 5 m 수준 이내로 제한할 필요가 있다. 따라서 계간조의 규모는 높이 5 m로 한정하고 필요한 용량에 맞추어 계간조 바닥면적을 넓히는 방식으로 설계가 가능할 것이다. 이보다 더 큰 규모의 계간조가 요구되거나 하는 경우에는 하나의 표준형 설비 모듈로 설계하고 온실 난방용으로는 다수의 모듈을 구축하여 연계하는 것이 효율적인 접근 방법이 될 것으로 사료된다.

6. 보급을 위한 사업모델

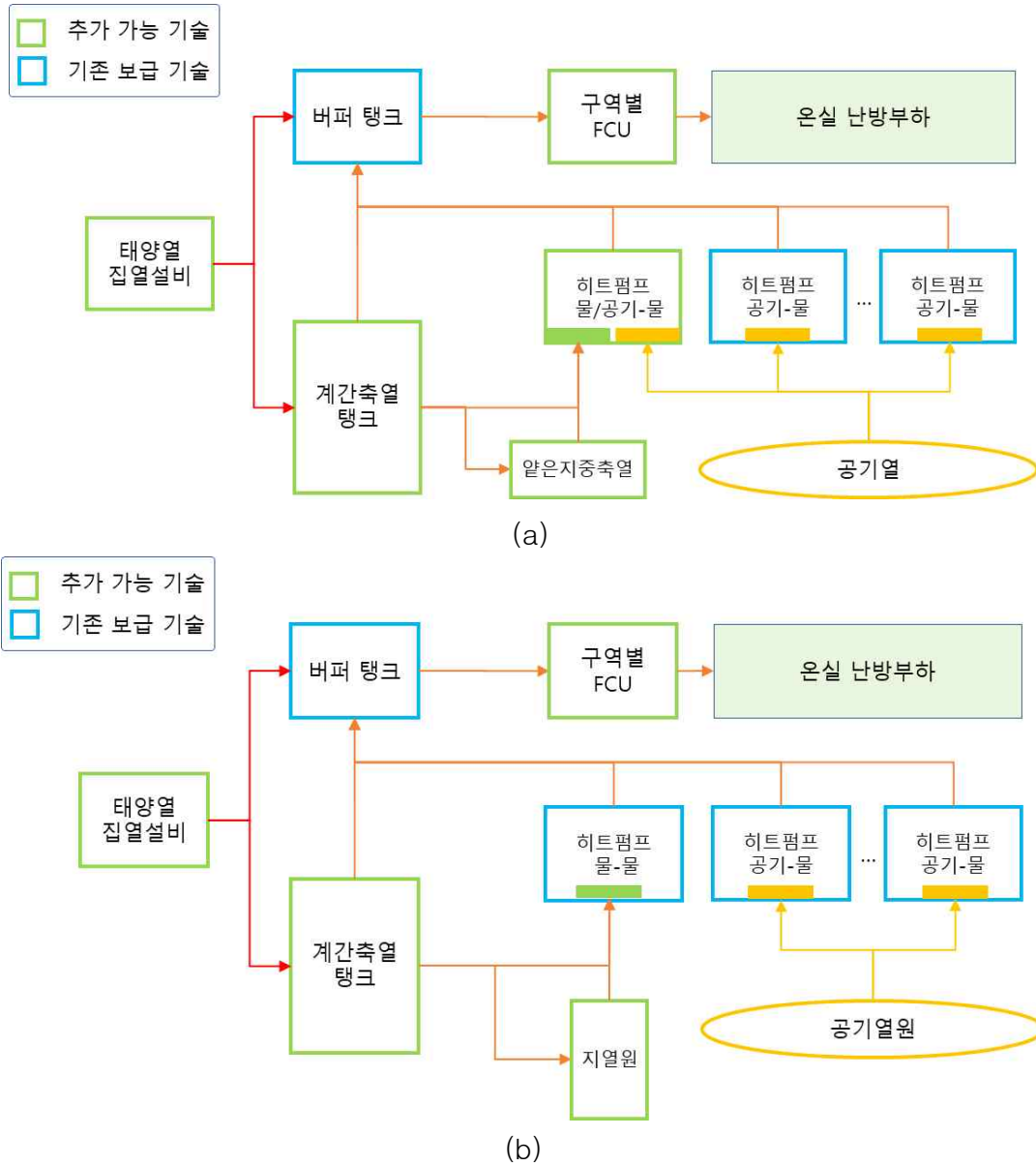
가. 사업모델 개요

(1) 사업모델을 위한 대상 기술 모델

태양열 계간열저장을 활용한 히트펌프 융합 열공급시스템의 사업화를 위한 사업모델을 수립하고 분석하였다. 사업모델을 위한 대상 기술 및 시스템 구성은 다음과 같다. 기존에 온실용 난방시스템으로는 보일러 등이 많이 사용되고 있으나, 본 사업모델에서는 기본적으로 열에너지수요를 고효율 전기화하는 것을 고려하여 히트펌프 융합 열공급시스템으로 구성하였다. 그러므로 지열원 히트펌프가 기존 보급기술로 고려할 수 있으며 이러한 경우 기존 “지중열교환기+히트펌프+버퍼탱크”가 기존 보급설비로 볼 수 있고, “태양열 집열설비+계간열저장탱크+얕은지중축열”을 추가 보급가능한 설비로 고려할 수 있다. 또한 “태양열 집열설비+계간열저장탱크+얕은지중축열+지중열교환기+히트펌프+버퍼탱크”를 포함한 전체 설비를 보급을 위한 설비로 고려할 수도 있으며, 얕은지중축열을 선택적기술로 하여 “태양열 집열설비+계간열저장탱크+지중열교환기+히트펌프+버퍼탱크”로 모델을 구성할 수도 있다. 또한 “지중열교환기+히트펌프+버퍼탱크”는 농업에너지이용효율화사업의 지원대상설비로서 고려할 수 있다.

본 사업모델에서 추가설비라고 볼 수 있는 “태양열 집열설비+계간열저장탱크+얕은지중축열” 설비 또한 재생에너지설비로서 농업에너지이용효율화사업의 지원대상설비로 포함이 될 수 있도록 정책제안 등을 통한 노력이 필요하다.

[그림 6-1]에 대상기술과 시스템모델 두 가지 방식을 구성적 개념도로 나타내었다.



[그림 6-1] 사업모델 수립을 위한 대상 기술 및 시스템모델 (a) 실증과 동일 모델, (b) 지열 및 공기열 히트펌프와 융합 모델

본 사업화모델을 위한 기술모델의 특징은 다음과 같다.

(특징 1) 기존 농업에너지이용효율화사업의 지원대상설비인 버퍼조를 포함한 히트펌프에 태양열 집열설비와 계간축열탱크 등을 추가적으로 설치가능한 사업모델로 보급

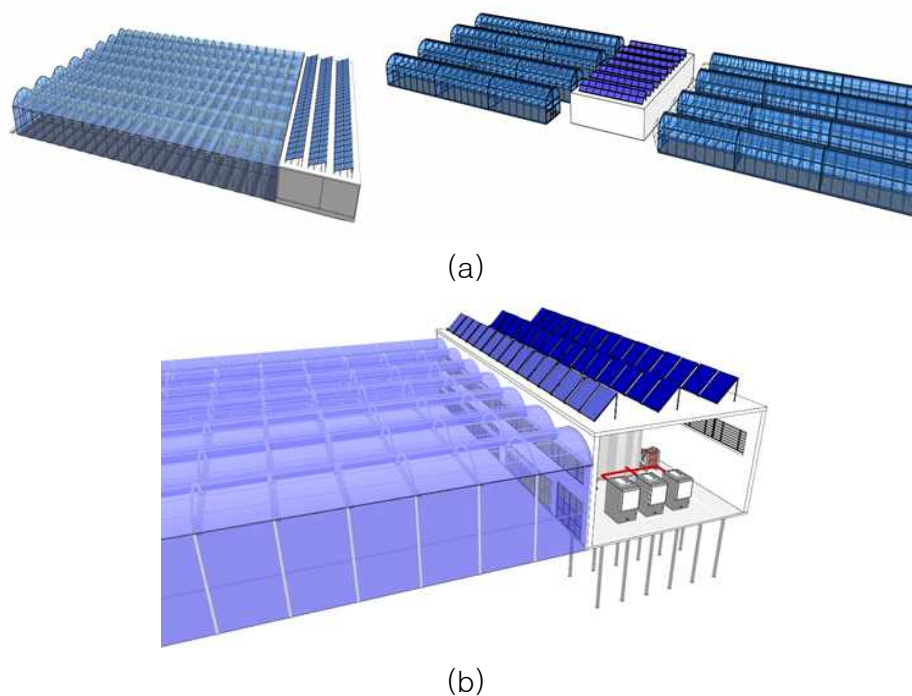
- 태양열 집열설비 + 계간축열탱크도 효율화 사업에 추가될 수 있도록 정책제안 필요
- 히트펌프 열원은 지열원으로 하며, 지열원 상부는 얕은지중축열과의 하이브리드 구성도 가능

(특징 2) 기존 온실 주변의 여유공간을 이용하여 태양열 집열설비와 계간축열탱크를 설치하거나 작업동을 신규설치하여 옥상에 집열설비와 실내에 계간축열탱크를 설치하는 방안, 그리고 온실 일부를 작업동으로 리모델링하여 옥상에 집열설비와 실내에 계간축열탱크를 설치

하는 방안 등을 고려하여 보급 가능한 모델

- 이를 위하여 온실에 재생에너지설비 보급확대를 위한 리모델링사업을 정책제안 필요
- (특징 3)** 온실의 실내 FCU를 중앙부와 외주부 등의 구간별로 열공급이 개별적으로 이루어질 수 있도록 설치하여 실내 온도의 균일한 분포가 가능한 기술모델로 보급
- 기존 FCU 방식 대비 동일한 난방부하에 대응하면서 더욱 효과적으로 열공급 가능
- 실내온도균일화와 재배량 증대 효과 기대

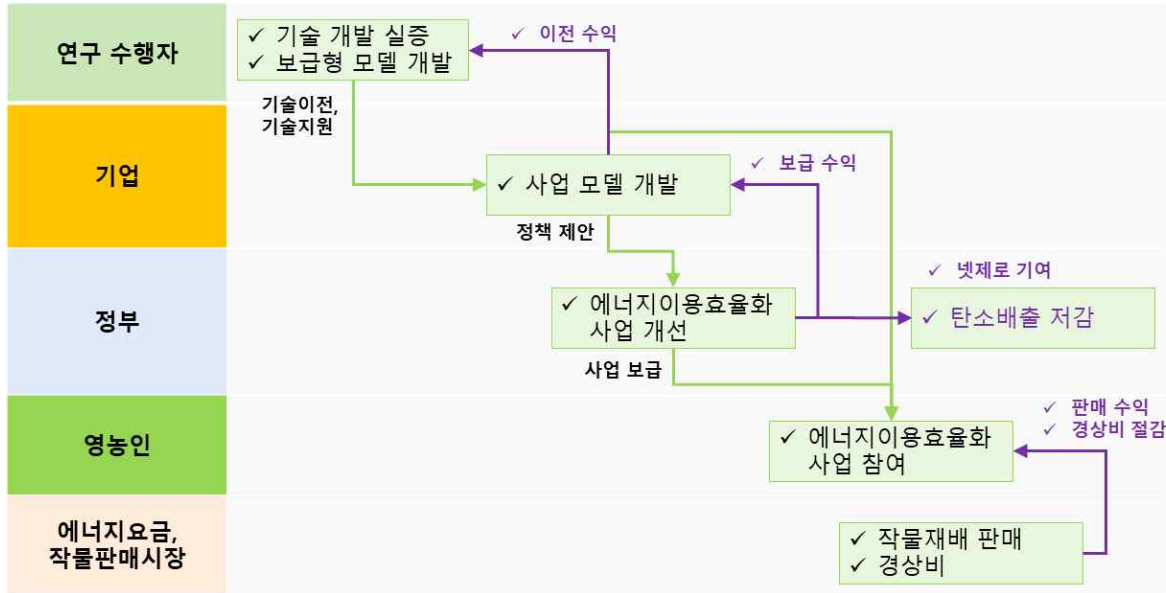
[그림 6-2]에 온실용 작업동을 구비한 경우에 작업동을 에너지플랫폼화한 개념을 표시하였다.



[그림 6-2] 온실용 작업동을 구비한 시스템모델

(2) 사업모델 추진 방안

사업모델을 추진하기 위해서는 [그림 6-3]에 나타난 것과 같이 연구수행자, 사업추진 기업, 정부, 영농인 등의 역할을 고려한 추진 방안이 필요할 것이다. 연구수행자는 보급할 기술모델에 대한 기술적 타당성을 검증하기 위한 연구노력과 보급형 모델을 개발하는 역할이 필요하다. 사업추진 기업에서는 연구수행자로부터 기술이전을 받거나 기술지원을 받아 사업모델을 더욱 구체화하고 정책 제안 등을 통한 보급지원제도 확대를 위하여 노력하며 보급을 통한 수익은 사업모델의 개선 등에 활용한다. 정부에서는 농업에너지이용효율화사업의 개선과 본 기술의 보급을 통한 탄소배출저감효과 등을 고려하여 검토한다. 영농인은 에너지이용효율화사업 참여를 통하여 난방 등의 경상비 절감과 판매수익 증대 등을 위한 노력이 필요하며, 에너지요금과 작물판매시장 등의 환경적 요인을 고려한다.



[그림 6-3] 사업모델을 위한 참여자 역할별 추진 방안

본 사업모델의 가치, 상품, 수익모델과 하부구조에 대하여 <표 6-1>에 요약하여 설명하였다. 사용자에게는 온실의 저탄소 난방을 위한 기술을 보급하는 것이며, 기존의 화석연료에 의존한 방식에서 탈피하여 친환경 난방시스템으로 전환할 수 있도록 기술적 솔루션을 제공하는 것이 될 것이다. 또한 미세먼지 저감이나 작물생산 증대 등을 통한 환경개선, 수익향상 등의 효과도 기대할 수 있을 것이다. 한편, 사용자에게 설치비의 부담을 크게 줄일 수 있도록 정부지원대상이 가능한 난방시스템으로 저비용 설치가 가능할 수 있도록 제도 개선이 기본적으로 병행되어야 한다.

또한 본 사업모델의 가치와 상품, 수익모델과 하부구조에 대한 내용을 포함하였다. 본 사업모델을 통하여 고객에게 제공되는 것은 난방시스템 적용성 분석자료와 설비 계획 그리고 난방시스템 설비 HW와 운영 SW 등이 될 것이다.

제공한 가치는 정부의 설치지원금과 온실 작업동 리모델링 사업 지원 등이 될 것이며, 생산량 증대를 통한 수익향상도 포함될 수 있다.

사업의 하부구조로는 태양열설비, 열저장설비, 지열히트펌프 설비 등의 설비기업이 포함될 수 있으며, 그 외에도 설비의 효과적인 운영과 관리에 필요한 모니터링 및 제어시스템 설비기업과 작물재배관리를 위한 컨설팅 기업 등도 해당이 될 수 있다.

<표 6-1> 본 사업모델의 가치제언, 상품, 수익모델 및 하부구조

<p>가치제언 (Value Proposition)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 재생에너지 난방시스템으로 전환 • 탄소배출 저감형 난방시스템으로 전환 • 미세먼지 저감형 난방시스템으로 전환 • 열수요 전기화 난방시스템으로 전환 • 작물생산증대로 수익향상형 난방시스템으로 전환 • (계획) 정부지원사업 대상 가능한 난방시스템으로 저비용으로 설치 제공 	<p>사용자에게 어떤 가치를 주는가?</p>
<p>상품 서비스 (Offering)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 난방시스템 적용성 분석자료 • 기존 온실에 적용가능한 설비 계획 • 난방시스템 설비 및 운영 SW 	<p>고객에게 무엇을 제공하는가?</p>
<p>수익모델 (Return)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • (계획) 정부 설치지원금을 통한 수익 • (계획) 온실 작업동 리모델링 사업 지원금 수익 	<p>제공한 가치의 대가를 어떻게 받는가?</p>
<p>사업 하부구조 (Business Infrastructure)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 태양열 설비 업체 • 열저장조 제작 업체 • 지열 설비 업체 • 히트펌프 제작 업체 • 모니터링 및 자동제어시스템 업체 • 작물재배관리 컨설팅 업체 	<p>사업이 진행되기 위해 필요한 시스템, 기능, 협력 업체 등 어떤 구성 요소가 있나?</p>

나. 사업모델 경제성 분석

(1) 사업모델을 위한 시스템 모델 개요

사업모델 추진을 위한 시스템모델은 기존 에너지이용효율화사업 보급설비인 히트펌프+버퍼탱크에 태양열집열설비+계간축열탱크를 추가적으로 설치 가능한 융복합시스템 대표 보급 모델 2가지(시스템 1안, 시스템 2안) 안을 도출하였다.

태양열집열설비+계간축열탱크 적용은 기존 온실 주변의 여유공간을 이용하여 작업동에 신규로 설치하거나 온실 일부를 작업으로 리모델링하여 설치하여 보급이 가능하다.

이 융복합시스템을 활용한 열공급은 온실 실내 FCU를 중앙부와 외주부별로 열공급이 가능하도록 배치할수 있고 실내온도의 균일한 분포가 가능하도록하여, 기존방식 대비 동일한 난방부하에 대응하면서 더욱 효과적으로 열공급이 가능하다.

히트펌프 열원은 공기열원과 지열원으로 이용 할 수 있으며 지열원을 사용시 지열원 상부는 얇은 지중축열과 하이브리드 방식으로 구성이 가능하다.

본 연구에서 경제성분석을 위한 시스템모델을 2가지로 구성하였다. 첫 번째 시스템모델(시스템 1안)은 공기열원 히트펌프+버퍼조와 태양열+계간축열로 구성된 시스템, 두 번째 시스템모델(시스템 2안)은 지열원 히트펌프+버퍼조와 태양열+계간축열을 적용하는 모델로 구성하였다. 시스템 3안은 태양열집열설비+계간축열을 적용하지 않은 지열히트펌프 방식의 안으로서 에너지이용효율화사업 보급 대상 모델이라고 볼 수 있다.

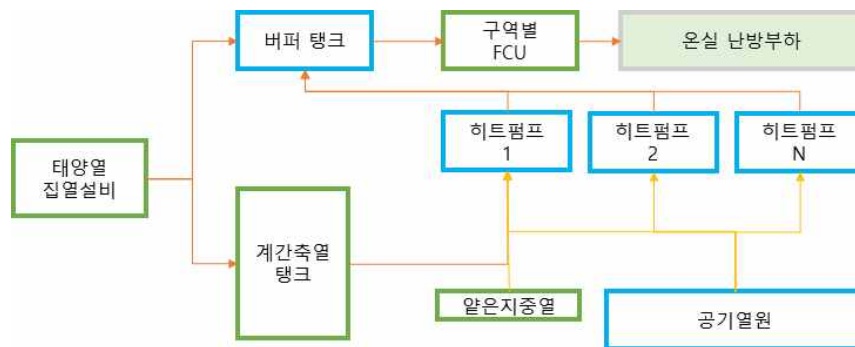
[그림 6-4]부터 [그림 6-6]에 시스템모델 1안부터 3안을 개념도의 형식으로 나타내었다.

(2) 경제성분석 방법 및 시스템성능분석 결과

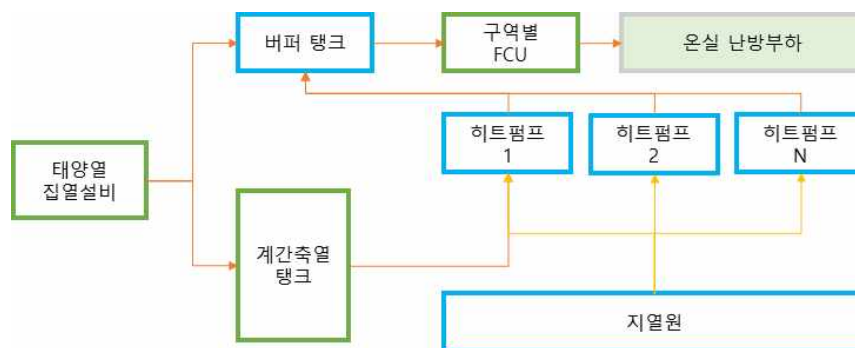
재배작물은 만감류인 한라봉과 애플망고를 대상으로 하였고, 연간 온실의 실내 설정온도 스케줄은 해당 작물 재배를 위하여 필요한 실내온도조건으로 하였으며, <표 6-2>에 재배작물에 따른 설정온도의 연간 월별 스케줄을 나타내었다.

시설원에 규모는 한라봉 2,090㎡(630평), 망고 1,760㎡(530평)으로 총 3,850㎡(1,160평)을 대상으로 하였다.

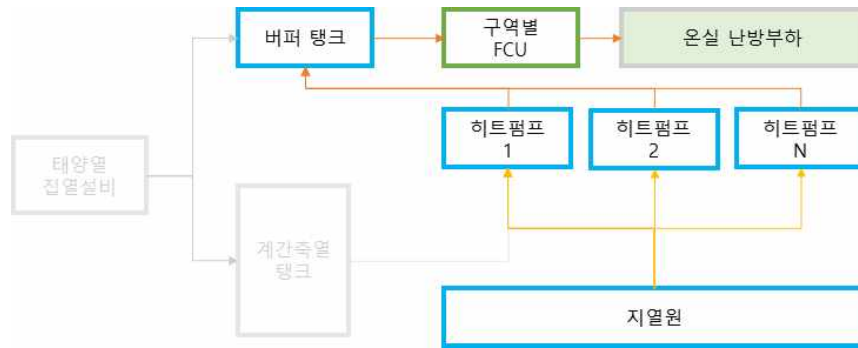
시스템 대안별 연간 난방부하 분석은 TRNSYS18 시뮬레이션 프로그램을 이용하였다. 난방부하 산정을 위한 시뮬레이션 입력조건은 <표 6-3>에 나타내었다. 시뮬레이션 모델은 난방부하모델과 시스템모델로 구성되어 있으며, 시스템 모델의 중요구성요소인 집열기, 버퍼조, 계간조 등의 모델파라미터는 실증시험에서 얻은 데이터를 이용하여 실제와 유사하도록 파라미터 값을 조정하였다. 시뮬레이션 대상 시스템모델별 주요 구성요소의 용량을 <표 6-4>에 나타내었다.



[그림 6-4]경제성분석을 위한 시스템모델 1안



[그림 6-5] 경제성분석을 위한 시스템모델 2안



[그림 6-6] 경제성분석을 위한 시스템모델 3안

<표 6-2> 경제성분석을 위한 온실의 재배작물 및 설정온도 조건

작물	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
한라봉	5℃		15℃			자연온도				5℃		
망고	17℃					자연온도				17℃		

<표 6-3> 경제성분석을 위한 온실 부하 시뮬레이션 입력 조건

구분		내 용		비 고
규모	한라봉	2,090㎡ (630평)	폭: 28.1m 길이: 74.5m 높이: 5m	-기후조건 : 포항 및 영천 TMY3 (한국표준과학연구원) - 단열커튼 작동시간 : PM 04:00 ~ AM 09:00 - 바닥 지중 열 전달 고려 및 각 작물의 최소온도 설정
	망고	1,760㎡ (530평)	폭: 28.1m 길이: 62.7m 높이: 5m	
외피 U-value		5.72W/㎡K		
g-value		0.837		
단열커튼 U-value		2.5W/㎡K		
침기횟수		0.5회/h		

<표 6-4> 경제성분석을 위한 시스템모델의 주요 구성요소 용량

		시스템 모델 1안	시스템 모델 2안	시스템 모델 3안	비고
태양열 집열설비	진공관형	96.18 m ²			전면적 기준
	평판형	104 m ²			
열저장	버퍼조	100 m ³			온수탱크식
	계간조	350 m ³			
히트펌프 시스템	복합열원 히트펌프	140 kW 1대	-	-	수열(태양열) 및 공기열
		-	140 kW 1대	-	수열(태양열) 및 지열원
	공기열원 히트펌프	157.5 kW 2대	-	-	
	지열원 히트펌프		140 kW 2대	140 kW 3대	
	지중열교환기	-	150m 깊이, 40개 보어홀		

시뮬레이션 결과를 이용하여 시스템모델 1에 대한 연간 에너지밸런스를 [그림 6-6]에 나타내었다. 버퍼조의 효율은 약 89%, 계간조의 효율은 약 65%, 난방부하에 대한 열공급량 중 태양열에 의한 비율인 태양열의존율은 32%로 계산되었다. 에너지절감율과 비용 그리고 탄소배출량 등 계산을 위한 조건과 결과는 <표 6-5>와 <표 6-6>에 정리하여 나타내었다. 기존 등유보일러 난방방식과 비교하여 시스템모델별 연간 난방에너지비용 절감율은 82%, 83%, 83%로 계산되었고, 탄소배출량저감율은 56%, 61%, 52%로 나타났다.

경제성 평가를 위한 LCC(Life Cycle Cost) 분석은 기존 등유온풍기 대비 사업모델 시스템의 난방비용을 고려하여 분석하였으며, 분석조건은 <표 6-7> 및 <표 6-8>에 시장, 금융조건과 설치비 관련한 조건 등을 포함하여 나타내었다.

기존 등유온풍기의 시스템 등유 면세가격은 난방기간 동안의 경북지역 평균 가격을 반영하였고, 농업용 전기요금은 농사용을 저압을 적용하였다.

LCC 분석조건을 신재생에너지 지원비율에 따른 투자회수 기간을 분석하였으며 지원비율은 농업에너지이용효율화사업 대상인 신재생에너지시설의 지원비율 80%(국고보조 60%, 지방비 20%)와 신재생에너지보급지원(융복합지원) 50%의 두 가지 경우 외에도 추가적으로 65%를 지원받을 경우에 대한 총 3가지 지원금 수준을 고려하여 분석하였다.

기존 시스템의 설치비는 등유온풍난방기 기준으로 산정하였으며 융복합시스템 설치비는 사업모델별로 구성되는 설비들의 설치비로 산정하였다.



[그림 6-7] 경제성분석을 위한 시스템 1안 모델에 대한 에너지시뮬레이션의 연간 에너지밸런스

<표 6-5> 경제성분석을 위한 난방에너지 요금 및 이산화탄소 배출분석 조건

항목	값	비고
등유온풍기 및 시스템 효율(%)	80	
등유온풍기 총 발열량(MJ/liter)	37.5	
등유 면세가격(원/liter)	1,296	경북지역 평균가격
농업용 전기요금(원/kWh)	67	농사용 을 저압 (전략량요금 53원, 기후환경요금 9원, 연료비조정액 5원)
농업용 전기 기본료(원/kWh)	1,150	
등유 이산화탄소 배출량(tCO2/MWh)	0.2587	
전기 이산화탄소 배출량(tCO2/MWh)	0.4594	

<표 6-6> 경제성분석을 위한 연간 에너지 소비량 및 비용 계산 결과

구분			사업모델		
			1안	2안	3안
연간 난방부하(MWh)			180.9	180.9	180.9
계약전력(kW)			150	150	150
연간 전력사용량(kWh)			55,900	49,900	61,200
연간 난방요금 (천원)	기존 시스템	등유 온풍기	28,134	28,134	28,134
	융복합시스템	전기 기본료	2,070	2,070	2,070
		연간 전기료	2,963	2,645	3,244
		합계	5,033	4,715	5,314
	절감율(%)		82	83	83
CO2발생량 (tCO2)	기존 시스템		58.5	58.5	58.5
	융복합시스템		25.7	22.9	28.1
	절감율(%)		56	61	52

<표 6-7> 경제성분석을 위한 LCC 분석 조건(시장 및 금융 조건)

항목	값	비고
실질 할인율(%)	1.15	
물가 상승율(%)	1.48	운영유지비용
전기요금 상승율(%)	1.48	
유가 상승율(%)	4	
내구연한(년)	20	최대 30년
대출기간(년)	10	
대출금리(%)	2.0	

<표 6-8> 경제성분석을 위한 LCC 분석 조건(설치비용 및 은행 대출 조건)

항목	값			비고
	1안	2안	3안	
기존 시스템 설치비(천원)	36,300	36,300	36,300	
융복합시스템 총 설치비(천원)	727,070	1,027,070	866,820	
신재생에너지 지원비율(%)	50/65/80	50/65/80	50/65/80	최대 100%
융복합시스템 순시설비(천원)	145,414	205,414	173,364	
자가부담 은행대출 비율(%)	50	50	50	최대 100%
초기 자가부담(천원)	72,707	102,707	86,682	
연간 융복합시스템 유지관리비(천원)	7,270	10,270	8,668	총 설치비의 1%

(3) 경제성 분석 결과

<그림 6-8>부터 <그림 6-10>에 시스템모델 1안, 2안, 3안에 대하여 기존 등유보일러 난방방식과 비교하여 순수익현가환산치를 운영기간에 대하여 어떻게 변화하는지를 나타내었고, 투자회수기간도 표시하였다.

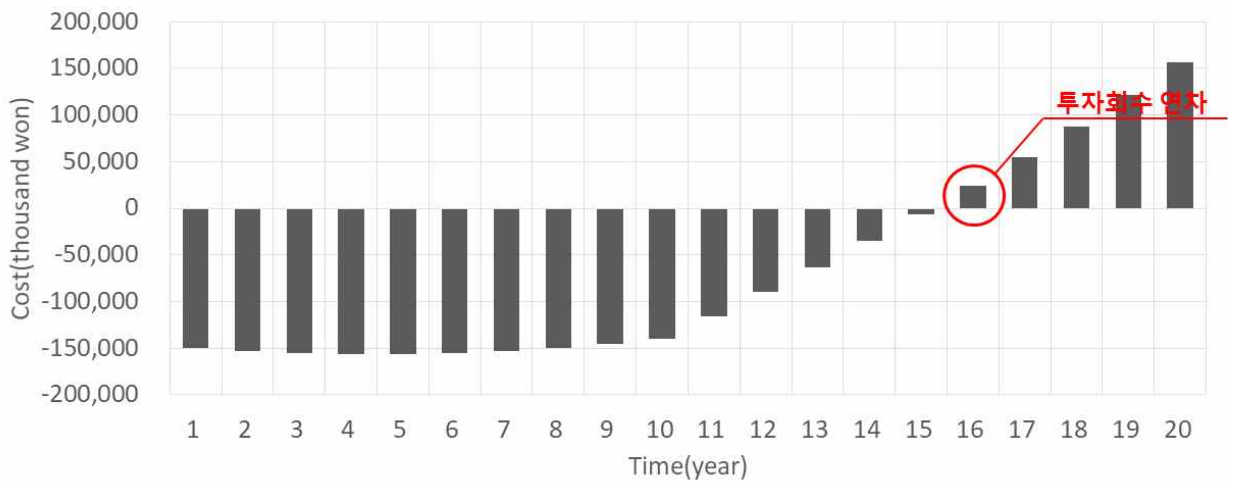
사업모델별 투자회수 기간은 시스템모델 1안이 가장 짧은 것으로 나타났으며 80%를 지원 받을 경우 시스템모델 1안 4년, 시스템 2안 11년, 시스템 3안 7년으로 투자비 회수가 가능한 것으로 분석되었으며, <표 6-9>에 결과를 요약하였다.

위 분석 결과는 기존 에너지이용효율화사업 보급설비인 공기열 히트펌프+버퍼조에 태양열 집열설비+계간조를 적용하여 신재생에너지시설로 정부지원을 받았을 경우에 나타는 효과이다.

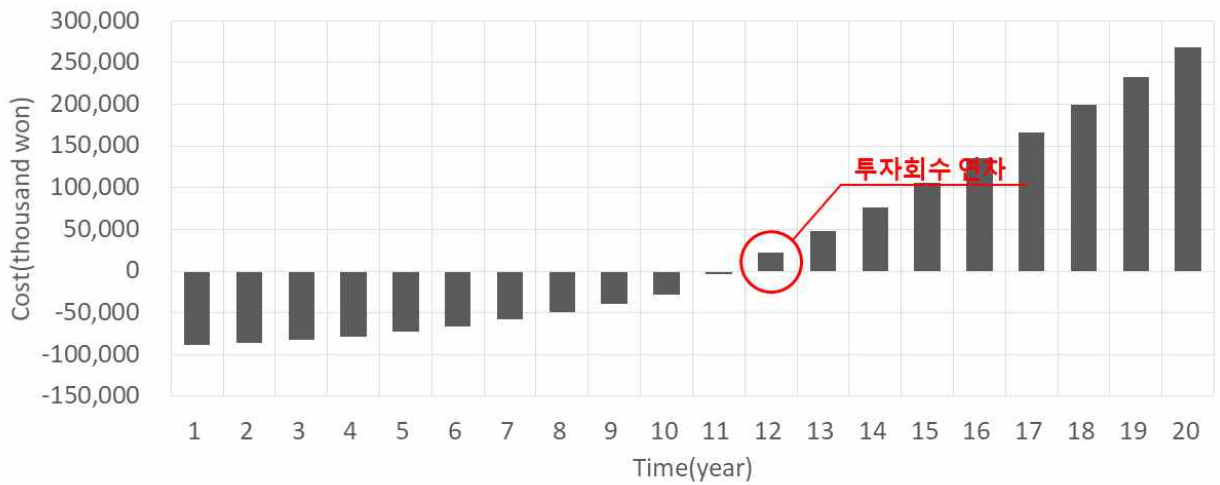
본 실증을 통해서 분석된 LCC 분석결과는 투자비에 대한 에너지절감 비용을 고려한 것으로 융복합시스템 적용에 따른 작물 재배량 증대 효과를 반영한다면 경제적 이득 효과는 더 클 것으로 판단된다.

융복합시스템이 실증을 통해서 검증된 만큼 태양열집열설비+계간조 설비가 농업에너지이용효율화사업의 신재생에너지시설로 포함되게 된다면 농가에 경영비 절감 효과가 크게 있을 것으로 판단된다.

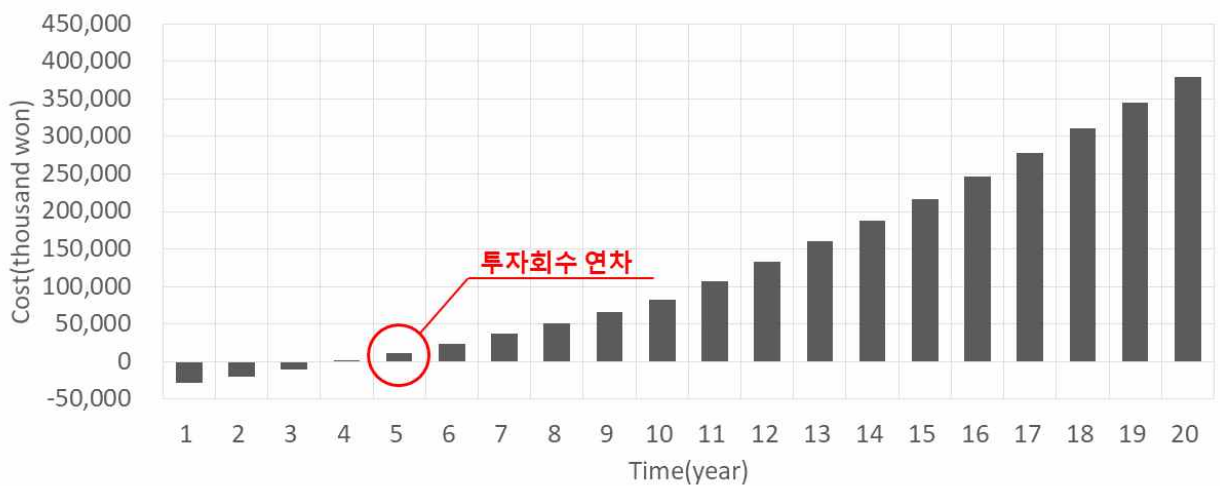
농업 분야 시설원예에 신재생에너지 적용으로 융복합시스템이 기존 등유난방설비 대비 CO2 절감효과 50% 이상 높은 만큼 농업부문에 국가탄소중립 목표에 기여할 수 있을 것으로 보인다.



m
(a)

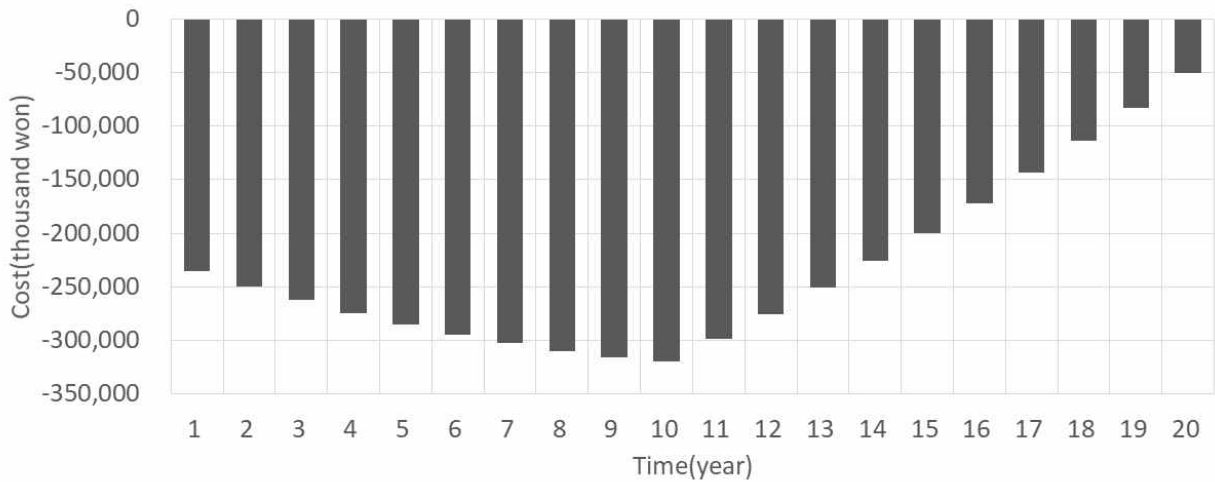


(b)

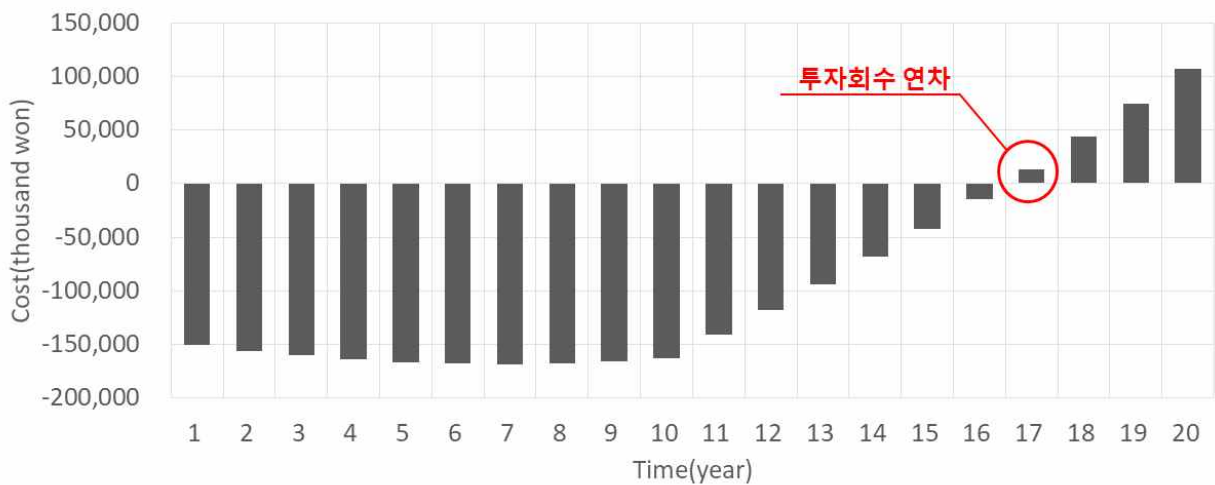


(c)

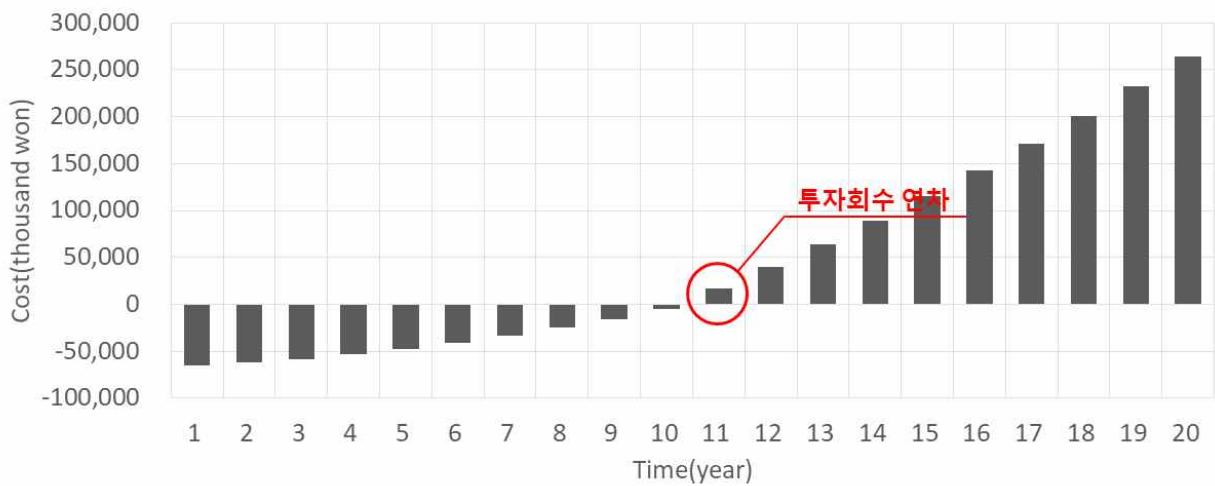
[그림 6-8] 시스템 1안에 대한 초기비 지원비율에 따른 운영기간에 대한 순수익현재가환산치와 투자회수기간 (a)지원비율 50%, (b)지원비율 65%, (c)지원비율 80%



(a)

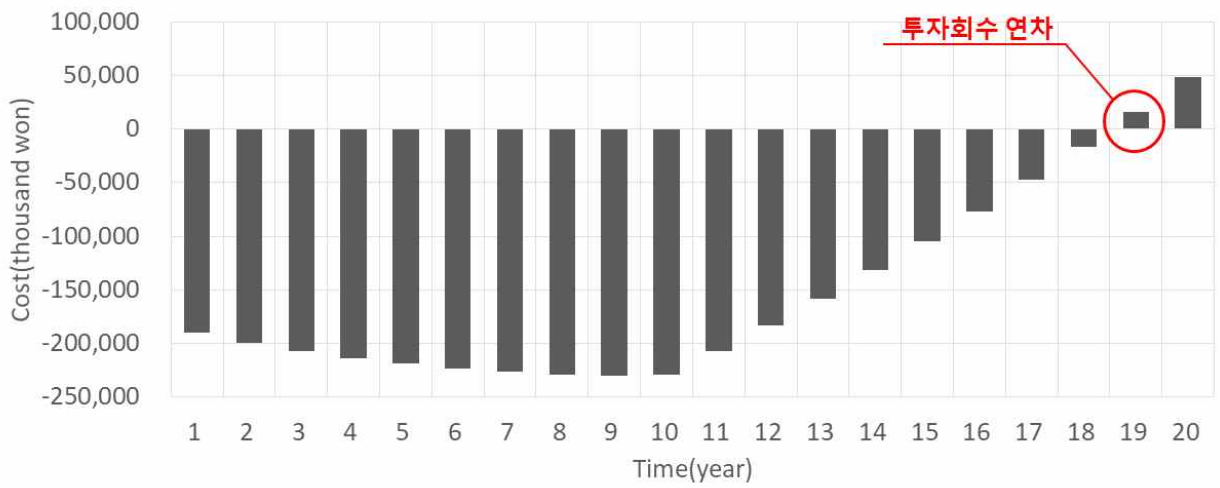


(b)

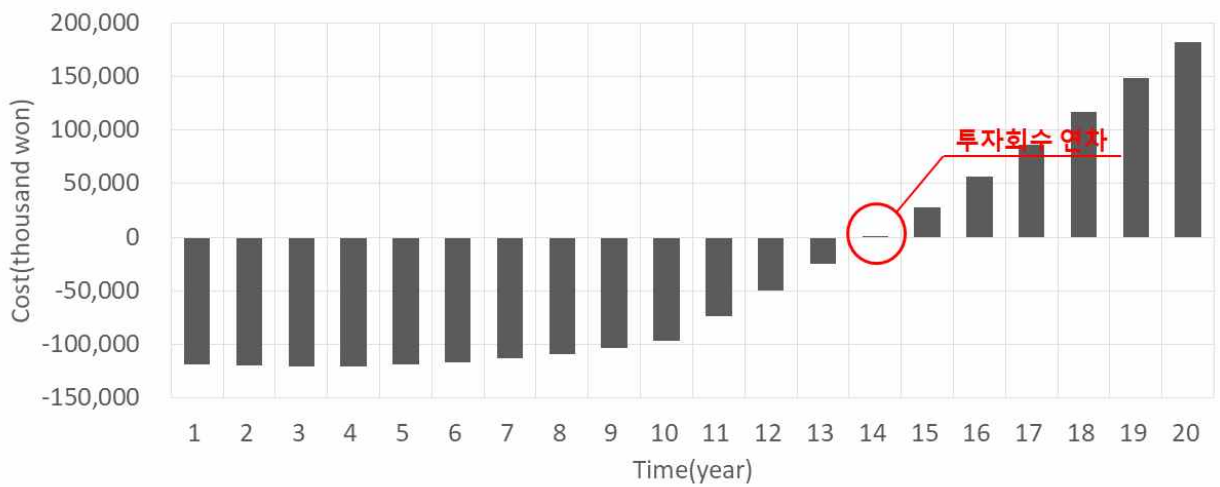


(c)

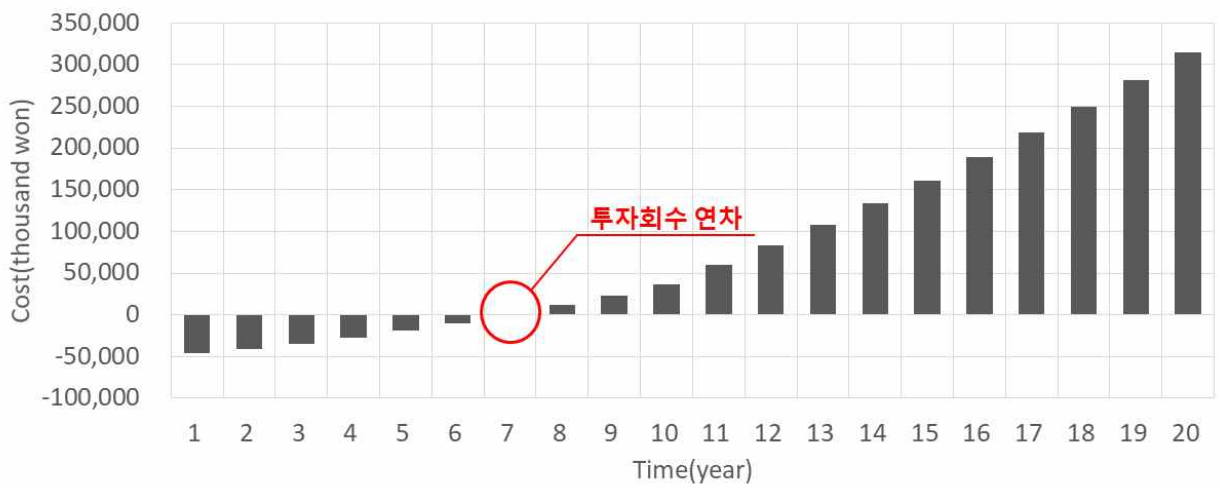
[그림 6-9] 시스템 2안에 대한 초기비 지원비율에 따른 운영기간에 대한 순수익현가환산치와 투자회수기간 (a)지원비율 50%, (b)지원비율 65%, (c)지원비율 80%



(a)



(b)



(c)

[그림 6-10] 시스템 3안에 대한 초기비 지원비율에 따른 운영기간에 대한 순수익현가환산치와 투자회수기간 (a)지원비율 50%, (b)지원비율 65%, (c)지원비율 80%

<표 6-9> 사업모델별 경제성분석 결과로서의 투자회수기간 요약

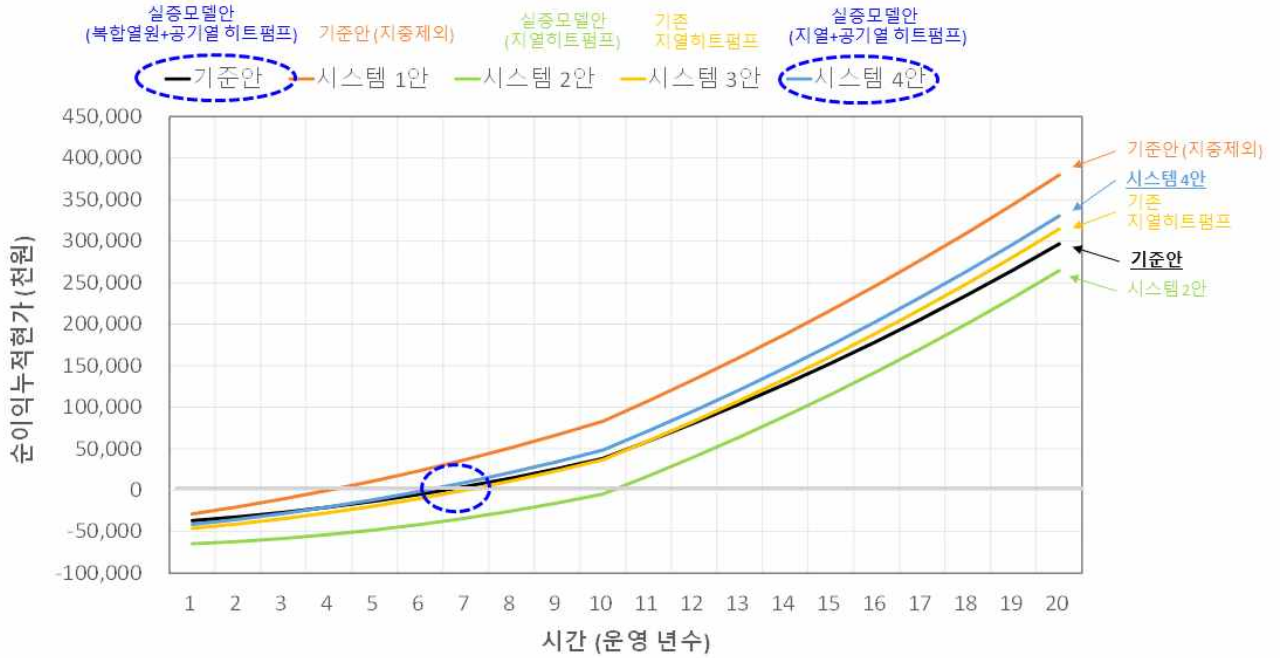
사업모델	지원비율		
	50%	65%	80%
시스템 1안	16	12	4
시스템 2안	-	17	11
시스템 3안	19	14	7

(4) 농업에너지이용효율화 사업에 대한 정책제안을 위한 경제성 비교

현재 농업에너지이용효율화사업에서는 지열 히트펌프를 지원대상으로 포함하고 있으며, 태양열 설비는 포함하지 않고 있다. 본 연구에서 제안하고자 하는 태양열과 계간축열을 기반으로 한 히트펌프 융합시스템에 대한 시스템 모델에 대한 경제성을 지열히트펌프와 상대적인 비교를 수행하였다. [그림 6-11]에는 실증모델안인 기준안, 그리고 기준안에서 지중축열 설비 비용을 제외한 시스템 1안, 실증모델에서 히트펌프를 모두 지열히트펌프로 구성한 시스템 2안, 기존 지열히트펌프인 시스템 3안, 그리고 실증모델에서 복합열원 히트펌프를 지열히트펌프로 교체한 시스템 4안에 대하여 순이익누적현가를 비교하였다. 그림에 나타난 바와 같이 시스템 1안이 가장 경제성이 우수한 것으로 나타났지만 지중열 설비를 제외하였으므로 지중열설비가 없이 계간조 열원을 이용할 수 있는 히트펌프 특성이 필요한 모델이어야 한다. 그리고 경제성이 가장 낮게 나타난 것은 시스템 2안으로서 실증모델에서 히트펌프를 모두 지열 히트펌프로 대체한 방식인데 지열히트펌프를 위한 지중열교환기 설치비용이 높아 경제성이 낮아진 것으로 보인다. 그 외에 실증모델안과 기존 히트펌프인 시스템 3안, 그리고 실증모델에서 복합열원 히트펌프를 지열히트펌프로 교체한 시스템 4안 등 3가지 방식은 경제성 측면에서 모두 비슷한 투자회수기간을 나타내고 있다.

따라서 지열히트펌프 방식과 경제성 측면에서 유사한 실증모델안과 수정 실증모델안인 시스템 4안의 경우 에너지이용효율화사업의 지원대상으로 포함되는 것이 적절한 것으로 판단된다. 또한 탄소배출량 저감 효과 측면에서도 지열히트펌프 시스템 3안에 비하여 실증모델 방식이 약간 더 우수한 것으로 <표 6-6>에서도 비교하였던 것을 종합적으로 검토한다면, 태양열 계간축열식 히트펌프 융합시스템은 농업에너지이용효율화사업의 지원대상에 적합한 재생에너지시스템이라고 할 수 있다.

본 연구 종료 이후에 태양열 계간축열식 히트펌프 융합시스템의 확대보급을 위하여 농업에너지이용효율화사업에 설치지원대상으로 포함이 될 수 있도록 효과 등을 지속적으로 정책적에 반영될 수 있도록 정책제안을 노력할 계획이다.



[그림 6-11] 농업에너지이용효율사업 정책제안을 위한 경제성 비교

(5) 탄소배출저감 효과 등을 고려한 비용절감효과 분석

「온실 가스 배출권의 할당 및 거래에 관한 법률」 제30조, 제31조 및 같은 법 시행령 제39조, 제40조에 따른 「외부사업 타당성 평가 및 감축량 인증에 관한 지침」에 의거 농업부문 배출권거래 외부사업 방법을 통해서 태양열을 이용한 열생산 및 공급으로 화석연료 및 전력 사용량 절감에 따른 CO2 절감에 대해서 배출권 거래가 가능하다.



[그림 6-12] 농업부문 배출권거래제 외부사업 사업 중 태양열 방법론 개념

본 연구에서 도출한 사업모델별 CO2 절감량에 따른 절감비용을 산출하였으며, 배출권거래제 외부사업 시장거래 단가는 배출권시장 정보플랫폼(<https://krx.co.kr/>)에서 제공하는 시세를 반영하였다. 적용단가는 난방기간 동안 KOC 종목 평균단가 16,314 원을 사용하였다. 그 결과 모델 2안의 절감비용이 가장 많았고 다음으로 1안, 4안은 동일한 절감비용을 보였으며, 3안이 가장 낮았다. CO2 절감량에 따른 절감비용 효과는 난방비 절감 효과 보다 낮았지만 태양열을

이용하여 농업부문 배출권거래제 외부사업을 활용 가능하다는 것을 알 수 있다. 배출권거래제 외부사업 유형에 따른 단일 또는 묶음 감축사업으로 규모에 따라 추진할 경우에는 절감효과가 더 클 것으로 기대된다.

<표 6-10> CO2 절감 효과

구분	사업모델			
	1안	2안	3안	4안
CO2 절감량 (tCO2)	32.8	35.6	30.3	32.8
절감비용 (원)	535,110	580,790	494,324	535,110

(6) 난방열 공급방식에 따른 검토

온실 실내에 난방열을 공급하는 방식은 온수를 생산한 후에 실내의 팬코일유닛(FCU)에 온수를 전달하고 FCU에서 온풍으로 분배하는 방식과 실외의 AHU(Air Handling Unit)에서 온풍을 생산한 후에 실내의 덕트로 온풍을 전달하여 분배하는 온풍난방 방식을 고려할 수 있다. 본 실증연구에서는 실증재배온실의 작물에 적합하며, 초기비용과 열매체 분배를 위한 전력소비 등의 비용 측면을 고려하여 팬코일유닛 방식을 적용하였다,

공조기를 이용한 온풍난방 방식과 팬코일유닛을 이용한 난방 방식은 열원 공급방식 방법에 따른 차이가 있다. 따뜻한 바람을 이용한 온풍 난방 방식은 온실 내부 온도제어가 빨라 대형 온실에 적합하며 운영제어가 간단하지만 공조기 및 덕트 구성으로 설치비가 높다. 팬코일유닛 난방 방식은 온수를 이용하기 때문 온실 내부 온도제어가 온풍난방 방식 보다는 느리고 소형 온실에 적합하며 팬코일유닛의 간단한 구성으로 설치비가 낮다. 경제성을 고려한 난방방식 선택은 온실의 유형 및 설비 유지관리 방법 등에 따라 두 난방방식의 장단점과 재배작물의 특성에 따른 설치 적합성 등을 우선적으로 고려한 후에 경제성을 추가적으로 고려하는 것이 타당할 것으로 보인다.

<표 6-11> 온풍 및 팬코일유닛 이용 난방방식 사례 비교

구분	온풍난방 방식	팬코일유닛 방식
재배작물	파프리카	한라봉, 천혜향
재배면적	8.500 평	1,200 평
지역	경남 진주	경북 포항
난방용량	지열히트펌프 50RT 15대	공기열히트펌프 40RT 2대 복합열원히트펌프 45RT 1대
축열조	700 ton	450 ton (버퍼조 100ton, 계간조 300ton)
축열조 설정온도	45 ℃	55 ℃
난방방식	공조기+비닐덕트	팬코일유닛
난방방식 장단점	대형온실 적용 유리 운영제어 간단 설치비 높음	소형온실 적용 유리 운영제어 복잡 설비 부식 설치비 낮음
설치비 (1000평 기준)	5천만원 (공조기/덕트)	2천만원 (FCU)
온실내부 적용사례		

(7) 시스템용량에 따른 태양열공급 분석 결과

시스템 용량에 따른 의존율 분석은 시스템모델 1안에 대하여 태양열 집열설비의 면적 1안 100%, 2안 75%(150㎡), 3안 50%(50㎡) 등 3가지 용량에 따라 연간 열생산량과 의존율을 분석하였으며, <표 6-12>에 정리하여 나타내었다. 연간 난방부하조건은 180.9 kW로서 동일한 부하조건에서 분석하였다.

열공급시스템을 구성하는 열생산 요소인 태양열시스템, 복합열원 히트펌프, 공기열원 히트펌프에 대해서 각각 생산열량과 의존율을 분석하였으며 1안의 경우 태양열 시스템의 직공급열량은 12.5%(22.6 kWh), 복합열원 히트펌프는 34.5%(62.4 kWh), 태양열 열원공급은 25.8%(46.7 kWh), 공기열원 히트펌프는 53% (95.9 kWh)의 의존율을 갖게 되어 전체열공급량 중 태양열의존율은 38.8%로 분석되었다.

2안은 경우 태양열 시스템의 직공급열량은 7.5%(13.6 kWh), 복합열원 히트펌프는 28.7%(52.0 kWh), 태양열 열원공급은 21.5%(38.9 kWh), 공기열원 히트펌프는 63.7% (115.3 kWh)으로서 전체열공급량 중 태양열의존율은 29.0%를 갖는 것으로 나타나 태양열 집열기 용량이 감소함에 따라 복합열원 히트펌프의 생산열량이 다소 감소하였고 공기열원

히트펌프의 열생산 의존율이 크게 상승하였다.

3안도 1안 보다 태양열시스템 용량이 50% 감소된 경우로 2안과 같이 복합열원 히트펌프의 생산열량이 다소 감소하고 공기열원 히트펌프의 생산열량이 크게 상승하였다.

따라서 태양열시스템 용량이 감소함에 따라 시스템의 생산열량과 의존율이 크게 영향을 받기 때문에 융복합시스템의 최적 설계시 생산열량과 의존율의 관계를 고려하는 것이 매우 중요할 것으로 판단된다. [그림 6-10]부터 [그림 6-12]에 집열면적을 달리한 3가지 용량 경우에 따른 열공급비율을 그림으로 나타내었다.

<표 6-12> 집열면적 용량에 따른 연간 열생산량과 의존율

시스템	시스템용량 1안		시스템용량 2안		시스템용량 3안	
	생산열량 (MWh)	의존율 (%)	생산열량 (MWh)	의존율 (%)	생산열량 (MWh)	의존율 (%)
태양열 직공급	22.6	12.5	13.6	7.5	2.9	1.6
복합열원 히트펌프	62.4	34.5	52.0	28.7	42.5	23.5
태양열원 공급	46.7	25.8	38.9	21.5	32.0	17.7
공기열원 히트펌프	95.9	53.0	115.3	63.7	135.5	74.9
태양열 공급	69.3	38.3	52.5	29.0	34.9	19.3

다. 사업화 계획

(1) 비즈니스 개요

본 연구에서 개발·실증된 성과를 기반으로 시설원에 및 다양한 농어촌 산업군에 적용 가능한 지역 특화형 스마트 농업기술 보급에 이은 인프라 구축과 선진형 농산업 육성을 위한 거버넌스 체계를 구축한다.

또한 국내 현행되고 있는 재생에너지 보급사업 및 농촌형 에너지 이용효율 사업 등에 시설원에 기반 열공급 시스템 기술을 적용, 환경, 자원, 에너지 문제 해결에 직간접으로 기여하고 새로운 시장과 부가가치를 창출하는 신사업 아이템을 확보한다.

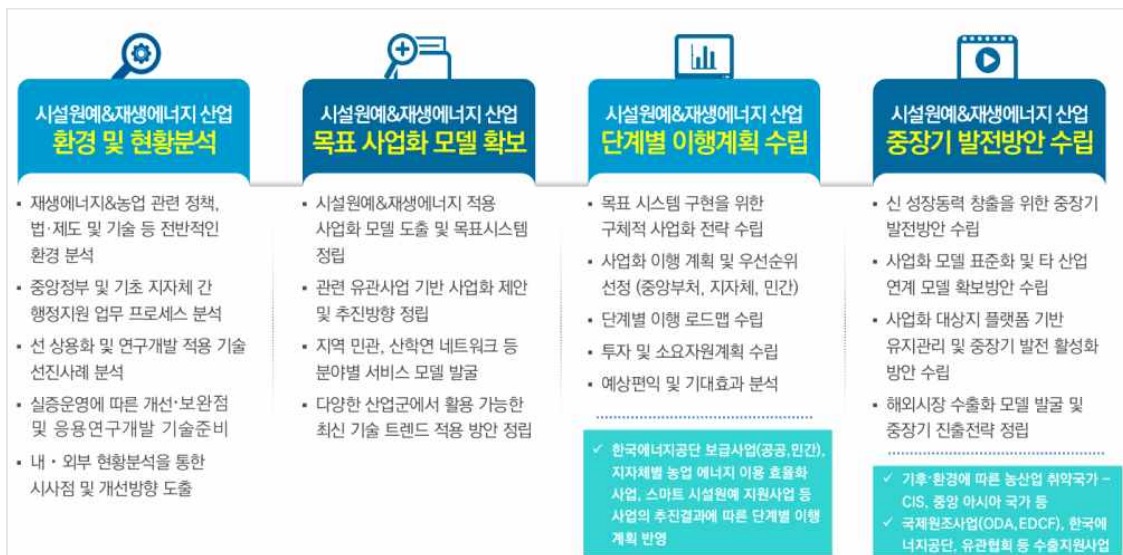
그리고 농산업 기반 작물 및 원예에 적용되는 다양한 재생에너지 융합 적용 실증단지 (재생에너지+ICT 등)를 구축하여 에너지 절감 및 운영·관리 최적화 수익모델을 개발한다.

민관, 유관기관 네트워크 자원을 기반으로 현장·수용자 중심의 단계적 사업화 전략을 수립하여 검증된 기술과 서비스로 신산업 시장을 선도한다.

마지막으로 지역사회 공동 네트워크가 추진하는 주거 및 농업 재배시설에 공동으로 관리·운영되는 복합 에너지 기술적용으로 사회적 기반 미래 지향적인 비즈니스 모델을 창출한다. 사업화전략의 주요 구성요소, 전략적 계획, 핵심가치 등을 [그림 6-13]부터 [그림 6-15]에 나타내었다.



[그림 6-13] 태양열 계간축열기반 시설원에 에너지 공급 시스템 사업화 전략



[그림 6-14] 태양열 계간축열기반 시설원에 구축을 위한 사업화 전략계획(CSP) 수립



[그림 6-15] 태양열 계간축열기반 시설원에 비즈니스 추진전략 및 핵심가치

(2) 비즈니스 모델 구현방안, 마케팅 및 판매전략

참여기업에서 추구하는 태양열 계간축열 기반 난방시스템 적용 시설원에 비즈니스 모델 구현방안은 <표 6-13>과 같으며, 마케팅 및 판매전략은 <표 6-14>와 같다.

<표 6-13> 태양열 계간축열기반 난방시스템 적용 시설원에 비즈니스 모델 구현방안

<p>기술·제품의 차별성</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 「태양열+계간축열 생산,저장,관리」 시설원에 통합운영 관리가 가능한 실증연구 기술 선점으로 신사업 발굴 유리 ◦ 성공적인 실증연구 성과 및 지식재산권 확보에 이은 사업화 추진 및 실행전략 우위 선점 ◦ 시설원에&재생에너지 규모·용량 별 사업화 모델 적용으로 연계산업 및 타산업 분야 적용이 가능 ◦ 시뮬레이션 분석에 이은 단계적인 실증 시스템 구축과 성과도출로 단계적 사업화 리스크 감소 ◦ 스마트팜 재생에너지 융합시스템 적용으로 효율적인 에너지 공급 및 관리체계 용이 ◦ 친환경 에너지 기술 적용 시설원에 농가 보급확산에 따른 화석 에너지 절감 및 농가수익 증대
<p>사업화 실행역량</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 신재생에너지센터 KS인증제품인 『이중진공관-히트파이프 고효율 태양열 집열기』 핵심기술 및 관련기술 노하우를 보유 <ul style="list-style-type: none"> - 국내 태양열 집열기 중 최고등급 효율(10.15 MJ/(m²/day)) - 태양열 시스템 및 집열기 관련 지식 재산권 : 10건 ◦ 국내 재생에너지 보급사업 참여업체로서 지역산업 내 매년 사업점 유율 70%이상 확보 <ul style="list-style-type: none"> - 태양열 보급실적 : 57,000m² 이상 (공공/민간포함) ◦ 15년 이상 국내 재생에너지 보급사업 참여기업으로 수행능력, 전문성 및 업계 최고 기술력 보유 <ul style="list-style-type: none"> - 한국에너지공단 8대 보급사업 경상북도 관내 최다 수행기업 ◦ 시공에서 사후관리까지 통합지원 서비스가 가능한 자원보유 <ul style="list-style-type: none"> - 한국에너지공단 신재생에너지설비 AS전담기업 (2008년~현재) ◦ 지방자치단체 및 산학연 구성 네트워크를 기반으로 한 농촌형 신사업 시장 발굴 중점 추진전략 강화 <ul style="list-style-type: none"> - 유사사업으로 국내 최초 「아열대 시설원에 적용 재생에너지 융합모델」 연구개발 진행중 (지자체+민간 공동협력)
<p>공공적 가치목표</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 신기술 적용에 따른 농산업 생산·유통·관리 개선 및 농가 경영성과 제고 <ul style="list-style-type: none"> - 시설원에 스마트팜 + 신재생에너지 융복합 기술접목으로 에너지 절감 및 운영·관리 최적화 수익모델 개발 ◦ 농촌지역 주민수용성 및 환경성을 고려한 지속적인 농산업 성장과 혁신역량강화에 기여 ◦ 선진화된 농산업 인프라 조성과 전문인력 양성으로 농가소득 증대 및 지역경제 활성화에 기여 ◦ 재생에너지 적용 스마트팜과 주거·문화·복지서비스가 연계된 실증단지 구축으로 에너지 절감 및 공공편익효과 상승 ◦ 농촌지역에 신기술이 적용된 첨단화 된 스마트 농업단지 조성으로 신규 일자리 창출 유도

<표 6-14> 태양열 계간축열기반 난방시스템 적용 시설원에 마케팅 전략

목표고객		마케팅/판매전략
중앙& 지방정부/ 공기관 등	한국에너지공단, 농림축산 식품부, 경상북도2 3개 시군	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 정부지원 시범사업(한국에너지공단) 이후 경상북도 관내 지역별 농촌 신사업 보급사업 추진전략 수립 ◦ 현행하고 있는 시군별 「농촌 에너지이용 효율화 사업」에 신사업 아이템 제안 및 시범보급사업 발굴 ◦ 시범사업 이후 기술이전 및 납품·판매권 정책 등 구체화 ◦ 각 지역별 특성에 적합한 사업 대상지, 적용모델 선정 등 사업에 대한 전반적인 컨설팅 시행 ◦ 실증 플랜트 사업 수출을 위한 공동연구 및 기술협력추진 ◦ 농어촌 적용 전국기관 대상으로 지자체를 활용한 마케팅 및 홍보 강화 ◦ 국내 전시회 및 에너지 학술대회 등을 통하여 제품 우수성 홍보, 시장 판매망 확대 ◦ 정부조달, 대형 시범보급사업 연계 사업화 추진 ◦ 재생에너지 참여기업 대상으로 우수사례 홍보 ◦ 관계기관 및 협회를 통한 정기적인 세미나, 학술대회 참가로 지속적인 기술 및 제품 마케팅 실시
	농축산, 임어업 관련 기관, 협동조합 등	<ul style="list-style-type: none"> ◦ 기업·관공서·협동조합과의 상생 마케팅 실시 ◦ 협동조합 소매 판매시스템 개선을 통한 제품 신뢰성 확보 및 단가 절감 ◦ 연계기술+산업 부가가치 창출을 위한 신사업 개발 ◦ 지자체 및 농어촌공사 부지등을 활용한 임대형 스마트팜 수익모델 확보 ◦ 전국적인 사업 확대전략 마케팅 계획 수립 ◦ 실증단지 중심으로 민관공동 R&D 추진전략 확보 ◦ 도시재생, 주거,문화,복지서비스 사업등과 연계한 상생 플랫폼 사업화 모델 제안 ◦ 스마트 원예단지 및 시설 현대화에 따른 재생 에너지를 비롯한 ICT 등 연계 산업 군 파생 수익판매 전략 확보

7. 결론

가. 사업 요약

본 태양열을 활용한 에너지 생산·저장·관리 및 실증모델 구축사업을 통한 연구 내용을 요약하면 다음과 같다.

- 1,000평 규모의 아열대 작물을 재배하는 비닐하우스를 대상으로 태양열 계간축열식 히트펌프 융합 열공급시스템을 개발하고 실증모델을 구축하여 1년여에 걸쳐 실증운전을 수행하였다.
- 시스템 주요 구성요소는 시뮬레이션 기반으로 용량을 산정하여 설계하였고, 실증설비 구축 후 1년에 걸쳐 비난방기의 태양열 계간축열운전과 난방기의 태양열과 히트펌프를 이용한 난방을 위한 열공급운전을 수행하였으며, 재배작물이 설비설계단계에서 바나나/한라봉과 애플망고이었으나 농장주 사정으로 한라봉과 천혜향으로 변경되어 난방부하가 다소 낮아짐에 따라 열공급량 중 태양열의존율은 약 75%로 다소 높게 나타나게 되었고, 기존 등유보일러방식에 비하여 약 80%(전력량요금만 고려, 기후환경요금 및 연료비조정액 포함시 75.5%)의 에너지비용절감효과를 확인하였다.
- 계간축열설비는 온수탱크방식으로 설계하였으며, 기존 보급 중인 히트펌프 버퍼조 설비에 추가적으로 연계하여 설치가 가능한 방식으로 계간 온수탱크와 버퍼조로 구성되도록 시스템을 구성하여 구축하였다.
- 실증대상 온실에 태양열설비를 충분한 면적확보와 집중형 열공급설비 설치의 어려움을 해소하기 위한 일환으로 온실 일부를 기계실 공간으로 변환하였고, 기계실 옥상과 내부 그리고 주변부에 열공급설비를 컴팩트하게 설치하여 실증설비를 구축함으로써, 향후 온실 작업동을 에너지플랫폼형으로 개발할 수 있는 기술적 기반 마련하였다.
- 온수탱크식 계간축열 외에 얕은깊이의 지중축열과 지중열교환기 수직복합형 방식의 소규모 설비를 설치하여 태양열의 일부를 저장하여 지열히트펌프 지열원의 온도를 재생할 수 있는 열공급 운전을 단기간에 걸쳐 확인하였고, 히트펌프 열원으로 공급하기 위한 적정 온도 조절을 위하여 활용할 수 있는 기술적 개념을 도출하고 실증하였다.
- 태양열설비에 대한 고장을 감지할 수 있는 프로그램을 개발하여 실증설비에 적용하여 우수한 고장진단정확도를 확인하였다.
- 사업화를 위한 사업모델과 시스템모델을 도출하였고, 실증운전 데이터를 활용하여 시스템 시뮬레이션 모델을 보정한 후 경제성 분석을 위한 에너지시뮬레이션을 수행하였으며, 보급형 시스템모델을 위한 주요 구성요소별 초기 설치비용함수를 도출한 후 농업에너지 이용효율화사업에 태양열설비가 포함이 되는 조건을 가정하고 경제성 분석을 수행하였다. (재배작물은 애플망고와 천혜향 조건)

나. 제언

- 본 실증모델 구축 연구에서는 태양열 등 열공급설비 설치를 위한 공간이나 면적, 설치 방향 등 설치여건 측면에서는 다소 열악하였지만, 국내 원예시설의 대부분을 차지하고

있는 비닐하우스를 대상으로 하였고 1,000평 정도 소규모의 비닐하우스를 대상으로 실증 연구를 성공적으로 수행하여 향후 보급대상 원예시설로서 중소규모 온실을 위한 모델수립과 보급 효과 등을 고려하여 실증을 추진하였다.

- 본 실증대상지는 설계초기단계에 주변 고속철도차량 운행지역으로 인한 설비설치 허가를 위한 행정처리, 연약지반을 극복하기 위한 기술적 조사와 말뚝 공사, 상수도와 전기 공급을 위한 인프라 설비 설치 등 설비구축 사전에 진행하여야 하는 사항과 설비설치에 필요한 환경을 성공적으로 구축하고 마련함으로써, 향후 사업화를 대비하여 사전 검토에 필요한 다양한 경험을 축적할 수 있었다.
- 실증이 이루어진 2022년 4월부터 2023년 6월의 난방기에는 농가의 사정으로 당초 한라봉/바나나와 애플망고에서 한라봉과 천혜향으로 변경되어 난방부하가 낮게 나타나게 되었고, 당초 계획하였던 높은 온도를 요구하는 작물을 재배했을 경우를 가정하여 보정된 시뮬레이션툴을 이용하여 계산한 결과 비슷한 수준의 에너지소비량 절감이 이루어질 것으로 계산된다.
- 계간축열 탱크의 단열이 실증시작 이후로 다소 지연되어 전체기간에 걸친 성능과 최고 도달온도의 감소에 영향을 끼쳤으며, 버퍼조와 계간조 등의 전체 탱크식 열저장의 효율은 유사한 용량 500ton 규모의 기존연구사례인 50% 수준보다 다소 낮은 약 43%로 나타났으나, 이후 단열보강 및 연결배관부 개선 등으로 효율이 개선된 상태로 열저장운전을 하게 되는 실증종료 이후의 2023년 하절기의 태양열축열은 더욱 효율적으로 진행될 것이다.
- 실증모델을 기반으로 도출한 사업모델은 기존 지열히트펌프나 공기열히트펌프에 추가하여 통합되는 설비로도 보급이 가능한 방식으로 시스템모델을 도출하였고, 경제성 향상을 위해서는 신재생에너지보급사업의 태양열 계간축열설비를 지원하는 융복합지원사업을 통한 보급사업이나 농업에너지이용효율화사업에 태양열계간축열설비가 포함될 수 있도록 지속적 정책적 제안이 필요하다.
- 본 실증대상의 작물은 아열대 작물로서 난방 위주의 작물이고, 최근 국내 기후변화 대응에 적합한 작물로 선정하여 수행하였으며, 향후 보급을 위한 대상 온실은 점차 확대될 것으로 기대된다.

부록 1. 세부목표 성능지표와 정량적 연구목표 달성 증빙

본 연구에서 세부목표에 대한 성능지표와 정량적 연구목표는 다음과 같다. 평가항목 중 집열효율, 정상축열운전을, 복합열원 히트펌프 COP, 태양열시스템 고장진단 정확도는 세부목표 성능지표에도 해당하며 달성내용은 앞서 1장에서 설명하였다.

<정량적 연구 목표>

평가항목	단위	연구지표			성과 형태
		1차년	2차년	3차년	
집열효율1)	%			> 90	실증데이터(입회시험성적서)
정상축열운전율2)	%			> 98	실증데이터(입회시험성적서)
복합열원 히트펌프 SCOP3)	-			> 4	실증데이터(입회시험성적서)
태양열 시스템 고장진단 정확도4)	%			> 90	실증데이터(입회시험성적서)
시설원에 태양열 설비 구축	건		1		실증설비
계간축열 구축	건		1		실증설비
실증시스템	건		1		실증설비
태양열 고장진단 프로그램	건			1	소프트웨어
운영관리시스템 구축	건		1		구축
통합 모니터링 시스템 구축	건		1		구축
경제성 평가분석	건			1	보고서
사업화 모델	건			1	보고서

- 1) 실증 시설원에 적용된 태양열 집열기의 데이터를 기준으로 KS인증 집열기 성능시험 유사 조건에서의 태양열 집열기 효율을 분석하여 KS 인증 효율과 비교하여 계시 (KS 인증 효율 대비 90 %) 태양열 집열효율은 KS 인증 시험 유사(입사각, 온도) 조건에서 실증 운전 데이터로 분석
- 2) 정상축열운전율은 3차년도 실증 데이터로 산정하며, 태양열 과열 일수 7일 이하가 되는 조건, 즉 전체 운전일수 중 과열이 발생하지 않고 정상 축열운전이 이루어지는 일수의 비율로 정의
- 3) SCOP(Seasonal Coefficient Of Performance)는 복합열원 히트펌프의 계절난방 성능 지표로써 실증운전 데이터로 계산
- 4) 태양열시스템의 고장진단 정확도는 실증 설비의 인위적인 고장과 유사한 상태를 계획하여 운영관리시스템에서 진단한 결과의 정확도를 산정

또한 그 외의 시설원에 태양열설비구축, 계간축열 구축, 실증시스템, 태양열 고장진단 프로그램, 운영관리시스템 구축, 통합모니터링시스템 구축, 경제성 평가분석, 사업화 모델에 대한 달성내용은 아래 표에 정리하였다.

평가항목	단위	연구지표	성과형태	증빙
집열효율	%	> 90	입회시험성적서	증빙 1
정상축열운전율	%	> 98	입회시험성적서	증빙 2
복합열원 히트펌프 SCOP	-	> 4	입회시험성적서	증빙 3
태양열시스템 고장진단 정확도	%	> 90	입회시험성적서	증빙 4
시설원에 태양열 설비 구축	건	1	실증설비	증빙 5
계간축열 구축	건	1	실증설비	증빙 6
실증시스템	건	1	실증설비	증빙 7
태양열 고장진단 프로그램	건	1	소프트웨어	증빙 8
운영관리시스템 구축	건	1	구축	증빙 9
통합 모니터링 시스템 구축	건	1	구축	증빙 10
경제성 평가 분석	건	1	보고서	본 보고서 6장
사업화 모델	건	1	보고서	본 보고서 6장

가. 지표의 목표 설정 근거

1. 태양열집열효율

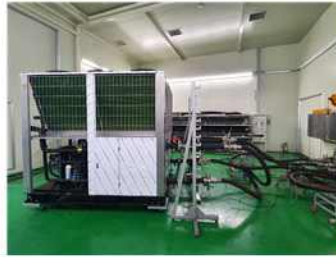
- 태양열집열기 성능에 대한 현장 태양열집열설비에 대한 국내 또는 국제적인 성능기준은 확립되어 있지 않음
- 본 과제에서는 ISO 24194에서 제시하는 방법을 적용하여 집열효율 수준을 비교평가하였으며, 배관열손실, 측정불확도, 평가모델의 불확도 등을 고려하여 단일집열기로부터 현장 태양열설비에 대한 추정열성능을 보정하고 현장측정 열성능과 비교하는 방법임
- 본 과제에서는 실증연구시설임을 감안하고,
- 에너지시스템 성능예측모델에 대한 ASHRAE에서 제시하는 모델 오차 수준은 MBE 10% 미만 즉 정확도 90% 이상을 요구하므로,
- ASHRAE기준에서의 에너지모델 성능수준을 참고하여 90% 수준으로 목표를 설정

2. 정상축열운전을

- 태양열시스템에서 허용가능한 과열발생일수에 대한 설계 등에 필요한 자료는 제공되지 않고 있음
- 정상축열운전은 태양열집열설비에서 과열이 발생하지 않는 일수의 일년 365일에 대한 비율로 정의하여 98%이상으로 목표 설정
- 본 과제에서는 실증연구시설에 대한 운전임을 감안하고,
- 본 과제에서는 신뢰성평가에서 사용되는 일반적인 95%와 99.99%의 평균수준인 98%를 목표로 설정

3. 복합열원히트펌프 COP

- 본 과제에서 적용한 복합열원히트펌프는 태양열계간열저장조로부터 공급받은 온열을 수열원으로 사용하거나 바깥공기를 공기열원으로 사용하는 운전모드가 가능한 방식임
- 실증운전 기간 중 복합열원히트펌프의 실제 운전에 따른 전력소비량에 대한 열생산량의 비율 평균으로 산정하고자 하였으며,
- 운전전략은 가능한 태양열계간조로부터의 10℃ 이상의 온열을 열원으로 활용하기 위한 목적이었음
- 따라서 실증설비로 구축한 히트펌프 판매사의 성능데이터를 참고하여 열원온도 10℃ 조건에서의 COP 값인 3.99 즉 4.0을 목표값으로 설정



<연구개발시험 실시(한국농업과학기술원)>

2) 복합열원 히트펌프 지열조건 성능시험

복합열원 히트펌프 지열조건 성능시험을 진행하였으며, 성능시험 결과는 아래<표 8>와 같다.

<표 8> 복합열원 히트펌프 지열조건 성능시험

구분	부하 입구 온도(°C)	열원 입구 온도(°C)	유량 [L/min]	정미능력 [kW]	소비전력 [kW]	COP
냉방	12	25	470	139.8	30.2	4.62
	12	40	470	123.8	40.2	3.08
	12	15	470	150.4	25.2	5.96
난방	15	15	470	203.9	27.7	7.34
	40	5	470	154.5	41.7	3.7
	40	10	470	171.7	43.0	3.99
	50	5	470	153.7	51.0	3.01
	53	5	470	149.1	54	2.76

4.태양열시스템 고장진단 정확도

- 고장진단기법의 정확도 평가를 위한 국내 및 국제적인 기준이 제공되지 않는다고 있음
- 본 과제에서는 실증연구 수준임을 감안하고,
- 에너지진단모델에 대한 ASHRAE 캘리브레이션 모델 오차 MBE 10% 미만 즉 정확도 90% 이상을 요구하는 것을 고려하며,
- 태양열시스템에 대한 고장진단에 대한 논문 참고시 90% 이상 성능을 발표하고 있어,
 - * L.Feierl et al, Fault detective: Automatic fault-detection for solar thermal systems based on artificial intelligence, Solar Energy Advances, 2023.
 - ☞ 91% 고장진단 정확도 (R2 0.91에서 1.0 사이)
 - * S.Ruiz-Moreno et al, A cascade neural network methodology for fault detection and diagnosis in solar thermal plants, Renewable Energy, 2023
 - ☞ 89% 이상 정확도 (모델기반 진단법), 맑거나 흐린 날 90% 근처의 정확도
- 위의 내용을 종합적으로 고려하여 90% 고장진단정확도를 목표값으로 설정

나. 지표의 달성 증빙


1. 태양열 집열효율

태양열 집열효율에 대한 목표 달성은 아래의 확인서 표지와 같이 한국산업기술시험원 김필규 책임연구원으로부터 검토와 확인을 받아 증빙한다.

중요 문서 무단 반출시 관련 규정에 의해 처벌받을 수 있습니다

태양열 집열 설비 실증 시스템의
실증 성능평가 방법의 적절성에 대한 확인서

작성자 : 한국산업기술시험원 김필규 책임 연구원

확인 : 한국산업기술시험원 김필규 책임 연구원 

김-규 / 신재생에너지기술센터 / 2024-08-14 16:41:54

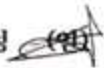
2. 정상축열 운전율

태양열 정상축열 운전율에 대한 목표 달성은 아래의 확인서 표지와 같이 한국태양열융합협회 이도성 부회장으로부터 검토와 확인을 받아 증빙한다.

**실증 시설원에 태양열 시스템 정상축열운전율
실증데이터에 대한 확인서**

작성자 : 한국태양열융합협회 이도성 부회장

2023. 06

확인 : 이도성 

3. 복합열원 히트펌프 SCOP

복합열원 히트펌프 SCOP에 대한 목표 달성은 아래의 확인서 표지와 같이 한국냉동공조인증센터 서정식 본부장으로부터 검토와 확인을 받아 증빙한다.

실증시설원에 태양열 계간축열 기반 열공급
시스템 복합열원 히트펌프 계절간 성능 SCOP
(Seasonal Coefficient of Performance)
실증데이터에 대한 확인서

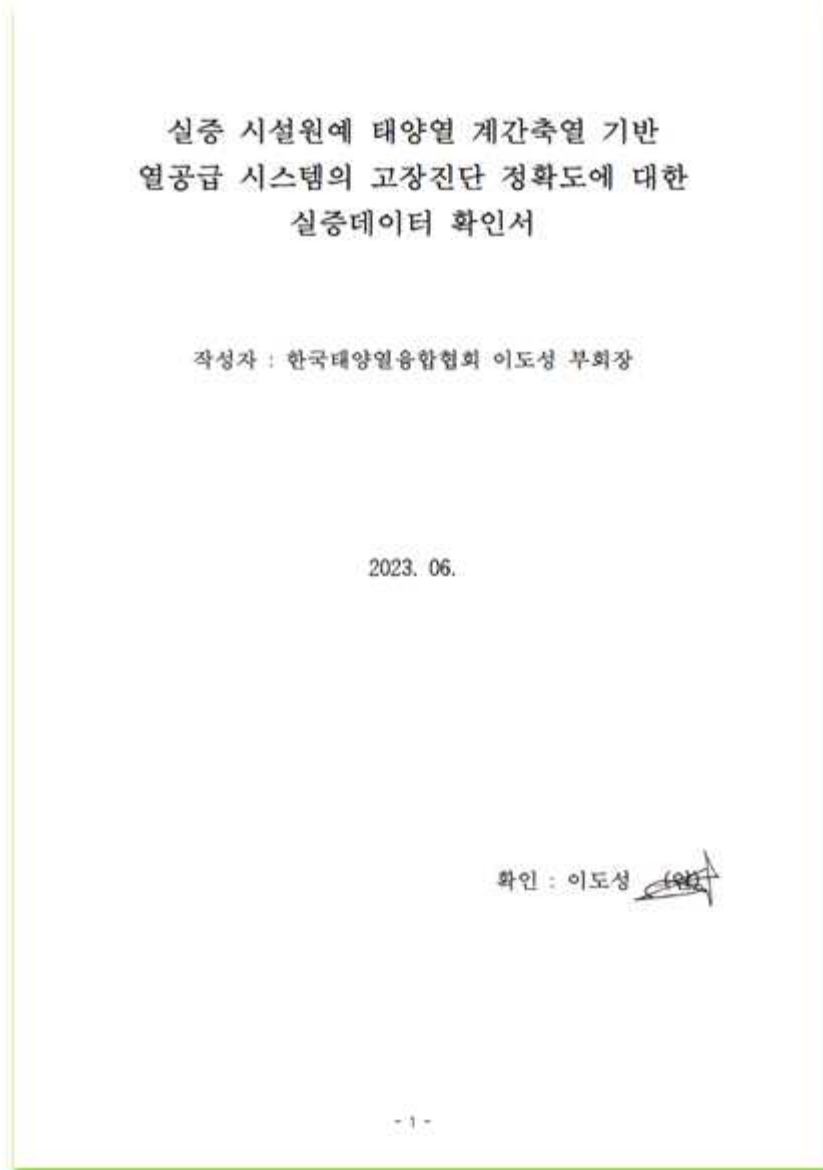
작성자 : 서정식 본부장 (한국냉동공조인증센터)

2023. 06. 27

확인 : 서정식 (인)

4. 태양열시스템 고장진단 정확도

태양열시스템 고장진단 정확도에 대한 목표 달성은 아래의 확인서 표지와 같이 한국태양열융합협회 이도성 부회장으로부터 검토와 확인을 받아 증빙한다.



5. 시설원에 태양열 설비 구축

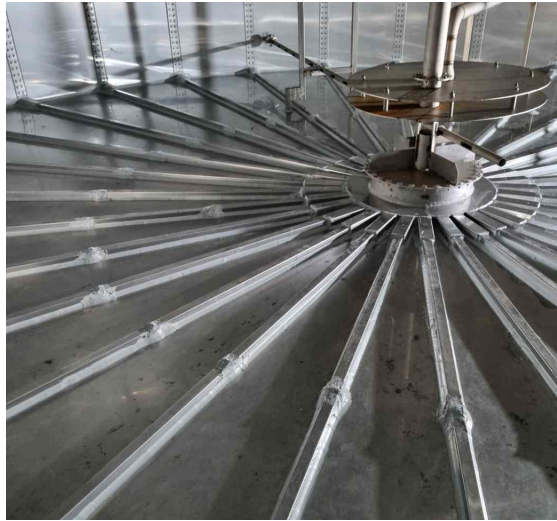


태양열설비(평판형) 모습



태양열설비(진공관형) 모습

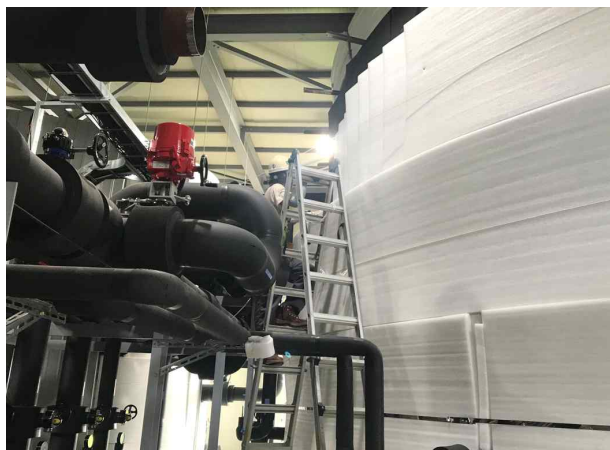
6. 계간축열 구축



<계간조 내부 바닥 구축 모습>



<계간조 내부 모서리 이음매 구축 모습>



<계간조 외부 단열재 설치 모습>



<계간조 외부 케이싱 후 구축 모습>

7. 실증시스템



<실증설비 기계실 구축 전후 모습>



<버퍼조 탱크 구축 모습>



<계간조 탱크 구축 모습>



<히트펌프 모습>



<실내 FCU 모습>

8. 태양열 고장진단 프로그램

```

import influxdb_client
from influxdb_client.client.write_api import SYNCHRONOUS
from urllib.parse import urlencode, unquote
from datetime import datetime, time, timedelta
from dateutil.relativedelta import relativedelta
import coolsms_send_messages as sms

send_num = '01012345678' # 메시지 발송번호

user1_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 1
user2_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 2
user3_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 3
user4_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 4
user5_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 5
user6_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 6
user7_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 7
user8_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 8

bucket = "data"
org = "heunghae"
token =
"FS11133trDKUFafn4j bHzeXp_iQfrOSfgFB-n3LBkWkoO_WpLVqPxggOMCXy1GZlq5WZzj69GMbfgEHgE30Q1Q=="
# Store the URL of your InfluxDB instance
url="http://heunghae.iptime.org:8086/"

client = influxdb_client.InfluxDBClient(
    url=url,
    token=token,
    org=org
)

current = datetime.now()

current_unix = int(current.timestamp())
timeline = str(current_unix)

target_start_time = time(11, 0, 0)

if current.minute < 30:
    target_end_time = time(0, 0, 0)
else:

```

```

target_end_time = time(0, 30, 0)

focus_day = current - timedelta(days=0)

end = datetime(focus_day.year, focus_day.month, focus_day.day, focus_day.hour,
target_end_time.minute, target_end_time.second)

ST = end - relativedelta(minutes=1) - relativedelta(hours=9)
ET = end - relativedelta(hours=9)

starttime = ST.strftime('%Y-%m-%dT%H:%M:00Z')
stoptime = ET.strftime('%Y-%m-%dT%H:%M:00Z')

print(starttime)
print(stoptime)

query_api = client.query_api()
query = 'from(bucket:"data")\
|> range(start:' + starttime + ', stop:' + stoptime + ')\
|> filter(fn: (r) => r["_measurement"] == "Fault_PPR_FPC")\
|> aggregateWindow(every: 10m, fn: mean, createEmpty: false)'
result = query_api.query(org=org, query=query)

Fault_PPR_FPC = []

for table in result:
    for record in table.records:
        Fault_PPR_FPC.append((record.get_value()))

print(Fault_PPR_FPC)

UCL_FPC = 1.319 # 임계 상한값
LCL_FPC = 0.689 # 임계 하한값

count_fault_FPC = 0
fault_FPC = False

for value in Fault_PPR_FPC:
    if UCL_FPC < value or (value < LCL_FPC and value > -1.0):
        count_fault_FPC += 1
        if count_fault_FPC >= 2:
            fault_FPC = True
            break
    else:

```

```

count_fault_FPC = 0 # 연속 카운트 초기화

if fault_FPC:
    print("평판형 고장")
    sms.send_message(user1_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user2_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user3_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user4_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user5_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user6_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user7_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user8_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
else:
    print("평판형 정상")
    sms.send_message(user1_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user2_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user3_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user4_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user5_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user6_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user7_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user8_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")

query_api = client.query_api()
query = 'from(bucket:"data")\
|> range(start:' + starttime + ', stop:' + stoptime + ')\
|> filter(fn: (r) => r["_measurement"] == "Fault_PPR_ETC")\
|> aggregateWindow(every: 10m, fn: mean, createEmpty: false)'
result = query_api.query(org=org, query=query)

Fault_PPR_ETC = []

for table in result:
    for record in table.records:
        Fault_PPR_ETC.append((record.get_value()))

print(Fault_PPR_ETC)

UCL_ETC = 1.553397 # 임계 상한값
LCL_ETC = 0.3344 # 임계 하한값

count_fault_ETC = 0
fault_ETC = False

```

```

for value in Fault_PPR_FPC:
    if UCL_ETC < value or (value < LCL_ETC and value > -1.0):
        count_fault_ETC += 1
        if count_fault_ETC >= 2:
            fault_ETC = True
            break
    else:
        count_fault_ETC = 0 # 연속 카운트 초기화

if fault_ETC:
    print("진공관형 고장")
    sms.send_message(user1_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user2_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user3_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user4_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user5_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user6_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user7_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
    sms.send_message(user8_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
else:
    print("진공관형 정상")
    sms.send_message(user1_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user2_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user3_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user4_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user5_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user6_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user7_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
    sms.send_message(user8_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")

```



```
C:\Users\USER > Downloads > 고장진단 소프트웨어 프로그램.py > ...
1 import influxdb_client
2 from influxdb_client.client.write_api import SYNCHRONOUS
3 from urllib.parse import urlencode, unquote
4 from datetime import datetime, time, timedelta
5 from dateutil.relativedelta import relativedelta
6 import coolsms_send_messages as sms
7
8 send_num = '01012345678' # 메시지 발송번호
9
10 user1_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 1
11 user2_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 2
12 user3_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 3
13 user4_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 4
14 user5_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 5
15 user6_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 6
16 user7_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 7
17 user8_num = '01012345678' # 메시지 수신번호 8
18
19 bucket = "data"
20 org = "heunghae"
21 token = "FS1133trDKUf4fn4jBHzXp_iQfr05fgFB-n3LbKwko0_WpLVqPxxgOMCxy1GZlq5WzZj69GMBfgEHgE3001Q=="
22 # Store the URL of your InfluxDB instance
23 url="http://heunghae.iptime.org:8086/"
24
25 client = influxdb_client.InfluxDBClient(
26     url=url,
27     token=token,
28     org=org
29 )
30
31 current = datetime.now()
32
33 current_unix = int(current.timestamp())
34 timeline = str(current_unix)
35
36 target_start_time = time(11, 0, 0)
37
38 if current.minute < 30:
39     target_end_time = time(0, 0, 0)
40 else:
41     target_end_time = time(0, 30, 0)
42
43 focus_day = current - timedelta(days=0)
44
45 end = datetime(focus_day.year, focus_day.month, focus_day.day, focus_day.hour, target_end_time.minute, target_end_time.second)
46
47 ST = end - relativedelta(minutes=1) - relativedelta(hours=9)
48 ET = end - relativedelta(hours=9)
49
50 starttime = ST.strftime('%Y-%m-%dT%H:%M:00Z')
51 stoptime = ET.strftime('%Y-%m-%dT%H:%M:00Z')
52
53 print(starttime)
54 print(stoptime)
55
56 query_api = client.query_api()
57 query = 'from(bucket:"data")\
58 |> range(start:' + starttime + ', stop:' + stoptime + ')\
59 |> filter(fn: (r) => r["_measurement"] == "Fault_PPR_FPC")\
60 |> aggregateWindow(every: 10m, fn: mean, createEmpty: false)'
61 result = query_api.query(org=org, query=query)
62
63 Fault_PPR_FPC = []
64
65 for table in result:
66     for record in table.records:
67         Fault_PPR_FPC.append((record.get_value()))
68
69 print(Fault_PPR_FPC)
70
71 UCL_FPC = 1.319 # 임계 상한값
72 LCL_FPC = 0.689 # 임계 하한값
73
74 count_fault_FPC = 0
75 fault_FPC = False
76
77 for value in Fault_PPR_FPC:
78     if UCL_FPC < value or (value < LCL_FPC and value > -1.0):
79         count_fault_FPC += 1
80     if count_fault_FPC >= 2:
```

```

81         fault_FPC = True
82         break
83     else:
84         count_fault_FPC = 0 # 연속 카운트 초기화
85
86     if fault_FPC:
87         print("평판형 고장")
88         sms.send_message(user1_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
89         sms.send_message(user2_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
90         sms.send_message(user3_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
91         sms.send_message(user4_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
92         sms.send_message(user5_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
93         sms.send_message(user6_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
94         sms.send_message(user7_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
95         sms.send_message(user8_num, send_num, "금일 평판형 집열기 고장 감지")
96     else:
97         print("평판형 정상")
98         sms.send_message(user1_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
99         sms.send_message(user2_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
100        sms.send_message(user3_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
101        sms.send_message(user4_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
102        sms.send_message(user5_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
103        sms.send_message(user6_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
104        sms.send_message(user7_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
105        sms.send_message(user8_num, send_num, "금일 평판형 집열기 정상 작동")
106
107    query_api = client.query_api()
108    query = 'from(bucket:"data")\
109    |> range(start:' + starttime + ', stop:' + stoptime + ')\
110    |> filter(fn: (r) => r["_measurement"] == "Fault_PPR_ETC")\
111    |> aggregateWindow(every: 10m, fn: mean, createEmpty: false)'
112    result = query_api.query(org=org, query=query)
113
114    Fault_PPR_ETC = []
115
116    for table in result:
117        for record in table.records:
118            Fault_PPR_ETC.append((record.get_value()))
119
120    print(Fault_PPR_ETC)
121
122    UCL_ETC = 1.553397 # 일계 상한값
123    LCL_ETC = 0.3344 # 일계 하한값
124
125    count_fault_ETC = 0
126    fault_ETC = False
127
128    for value in Fault_PPR_ETC:
129        if UCL_ETC < value or (value < LCL_ETC and value > -1.0):
130            count_fault_ETC += 1
131            if count_fault_ETC >= 2:
132                fault_ETC = True
133                break
134        else:
135            count_fault_ETC = 0 # 연속 카운트 초기화
136
137    if fault_ETC:
138        print("진공관형 고장")
139        sms.send_message(user1_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
140        sms.send_message(user2_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
141        sms.send_message(user3_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
142        sms.send_message(user4_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
143        sms.send_message(user5_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
144        sms.send_message(user6_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
145        sms.send_message(user7_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
146        sms.send_message(user8_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 고장 감지")
147    else:
148        print("진공관형 정상")
149        sms.send_message(user1_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
150        sms.send_message(user2_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
151        sms.send_message(user3_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
152        sms.send_message(user4_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
153        sms.send_message(user5_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
154        sms.send_message(user6_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
155        sms.send_message(user7_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")
156        sms.send_message(user8_num, send_num, "금일 진공관형 집열기 정상 작동")

```

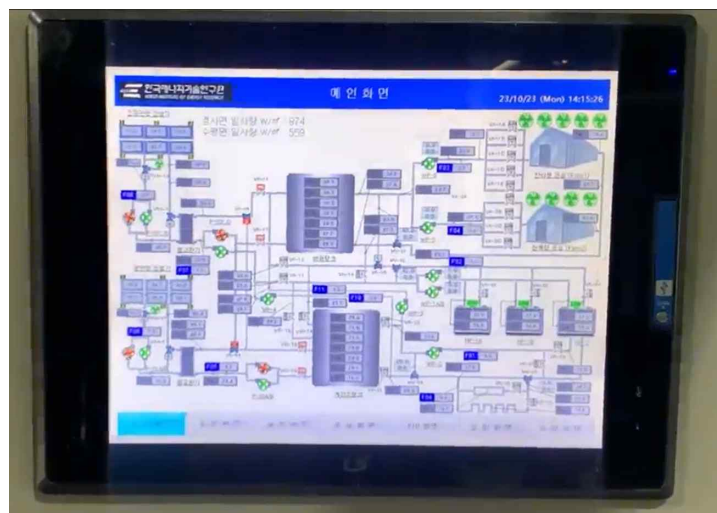
9. 운영관리시스템 구축



<운영관리시스템을 위한 PLC 판넬 모습>



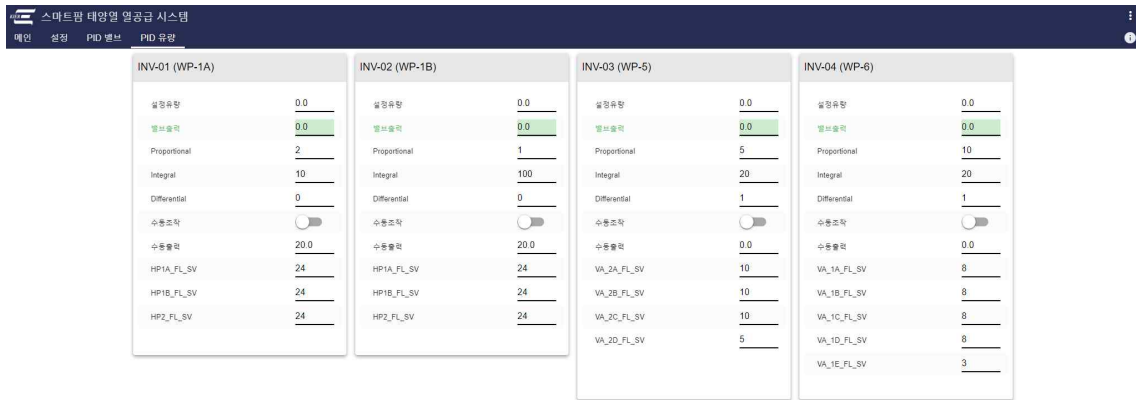
<운영관리시스템을 위한 PLC 판넬과 컴퓨터>



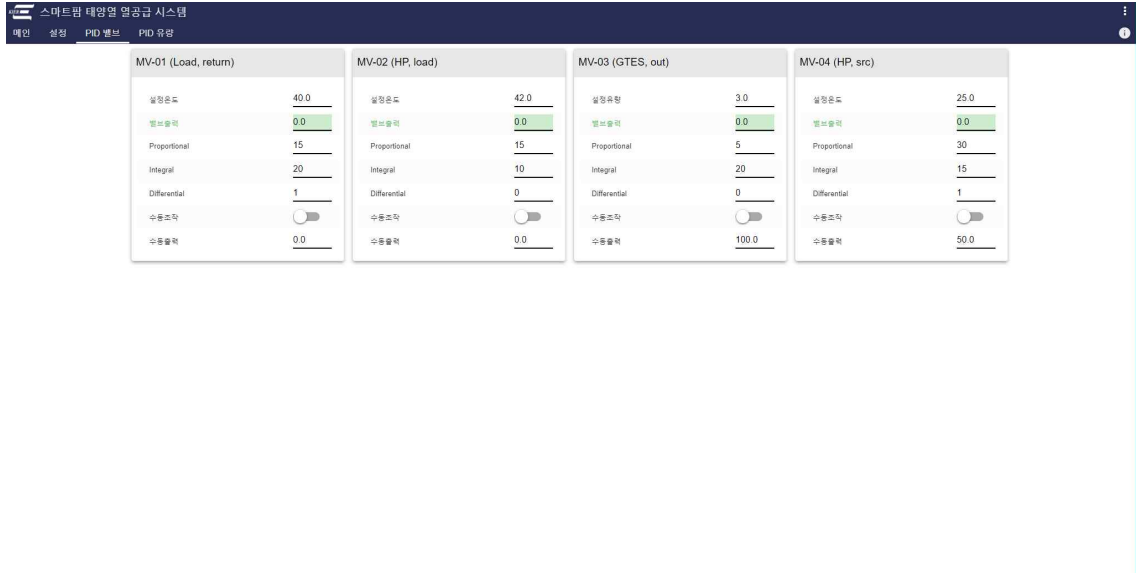
<운영관리시스템을 위한 PLC 화면 모습>



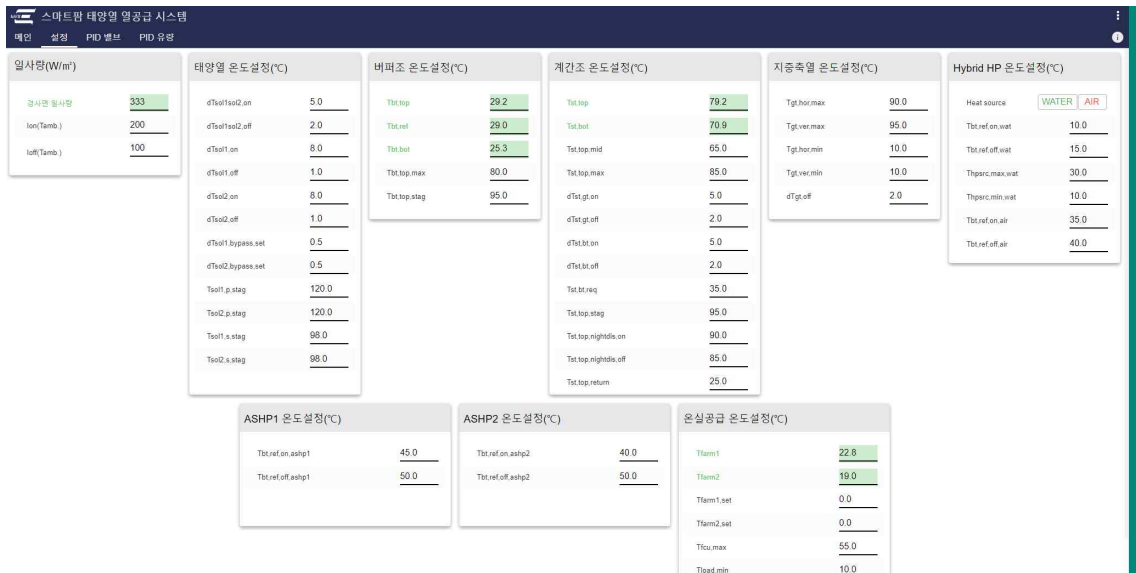
<운영관리시스템을 위한 온실 실내 관리시스템 화면>



<원격제어 운영관리시스템 밸브유량상태값 화면>

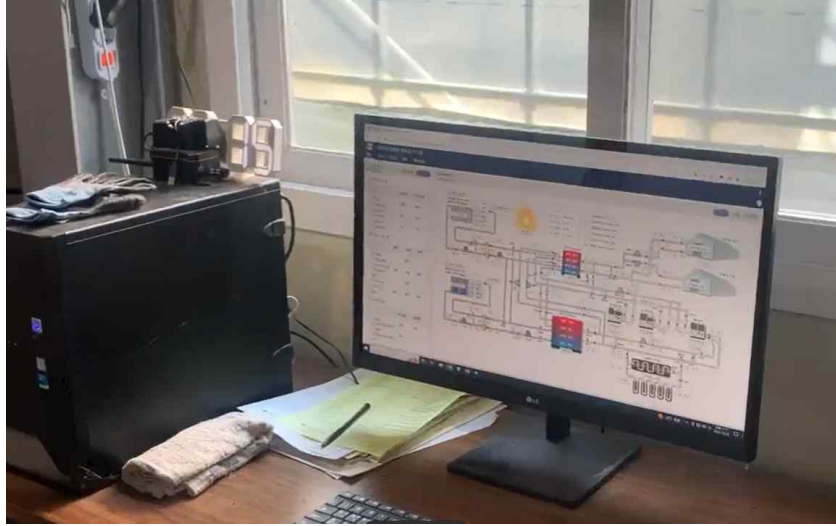


<원격제어 운영관리시스템 밸브제어 설정값 입력 화면>

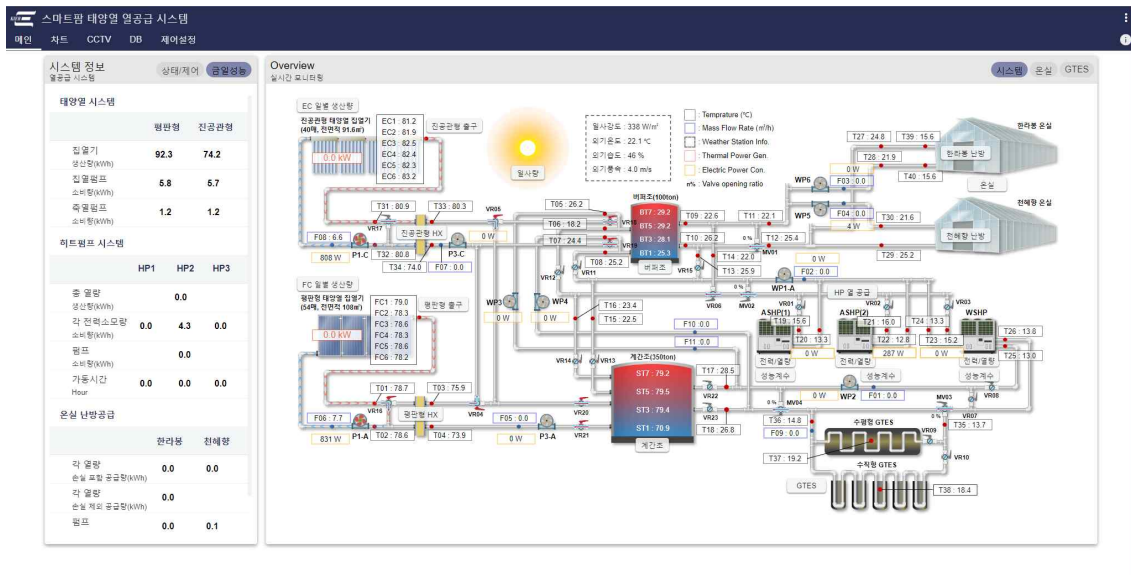


<원격제어 운영관리시스템 설정값 입력 화면>

10. 통합 모니터링 시스템 구축



<실증설비 현장에 설치된 모니터링 컴퓨터와 화면 모습>



<원격으로 볼 수 있는 모니터링 시스템 화면 모습>

자체평가의견서

1. 과제현황

		과제번호		120093-3	
사업구분	농림축산식품연구개발사업				
연구분야				과제구분	단위
사업명	2020년도 농업에너지 자립형 산업모델 기술개발사업				주관
총괄과제	기재하지 않음		총괄책임자	기재하지 않음	
과제명	태양열을 활용한 에너지 생산·저장·관리 및 실증모델 구축		과제유형	(기초,응용,개발)	
연구개발기관	한국에너지기술연구원		연구책임자	이경호	
연구기간 연구개발비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	2020.04.29.~ 2020.12.31	1,000,000	334,000	1,334,000
	2차년도	2021.01.01.~ 2021.12.31	1,333,000	445,000	1,778,000
	3차년도	2022.01.01.~ 2023.06.30	1,333,000	400,500	1,733,500
	계	2020.04.29.~ 2023.06.30	3,666,000	1,179,500	4,845,500
참여기업	세한에너지(주), (주)에스앤지에너지, 대전대학교, 경북농업기술원				
상대국			상대국연구개발기관		

※ 총 연구기간이 5차년도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망


2. 평가일 : 2023.08.25

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
한국에너지기술연구원	책임연구원	이경호

4. 평가자(연구책임자) 확인 : 이경호

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

확약	
----	---

I. 연구개발실적

※ 다음 각 평가항목에 따라 자체평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

- 태양열설비 설치공간이 부족한 중소형 온실을 위하여 온실 일부를 기계실로 변환·설치 실증모델 (온실에 보편적 보급이 예상되는 작업동을 에너지플랫폼화하는 기술적 개념 도출)
- 기존 보급형 히트펌프+버퍼조형 난방설비에 태양열+계간축열을 추가할 수 있는 실증모델
- 태양열 계간축열 온수의 40℃이하 수준에서 10℃수준까지 잔열을 얇은 지중축열과 연계하여 30℃미만 수준으로 복합열원 히트펌프 열원으로 이용 가능한 실증모델

2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

- 아열대 작물형 중소 비닐온실을 위한 친환경난방 보급화 기대
- 실내 주변부와 중심부로 FCU를 구성·제어하여, 기존 보일러와 비닐 온풍방식 보다 균일한 온도유지로 작물 조기출하와 작물생산량 향상 기대
- 중소형 온실 작업동에 컴팩트한 열공급설비 설치 또는 기존 온실 일부 기계실로 리모델링 방식 제안으로 국내 다수 차지하는 중소형 비닐온실 등 보급대상 확대 기대
- 계간축열의 연결배관 내 열손실저감 위한 가이드라인 제시로 계간축열 효율향상 기여

3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

- ‘농업에너지이용효율화사업’에 태양열계간축열설비 포함되어야 보급활용 가능성 향상 기대
- 한국에너지공단의 신재생에너지보급을 위한 ‘융복합지원사업」 태양열 계간축열 보급사업 추진
- 기존 난방용 지열히트펌프의 지속적 지중온도 감소로 성능저하 해소 가능하도록 지중설비 포함 모델을 도출로 지열히트펌프와 연계하여 보급활용 기대
- 겨울철 공기열 히트펌프 성능저하를 태양열 계간축열과 연계하여 보급활용 기대
- 기존 중소형 온실 작업동 에너지플랫폼화 또는 온실 일부 작업동 리모델링 사업화 필요

4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

- 실증대상설비 농장주와 긴밀하게 필요사항과 애로사항을 수시로 청취하여 반영 노력
- 실증설비 모니터링시스템과 기계실 내외부 모습을 원격으로 모니터링하여 매일 운전과 상태 점검
- 연구추진내용을 전자연구노트에 총 85회 작성하여 시점인증 문서기록화
- 실증설비 착공식(2021년)과 준공식(2023년) 개최로 홍보와 연구팀 사기진작, 농장주 신뢰확보 노력
- 당초 과제종료 2022.12.31에서 2023.06.30으로 연장하여 1년 이상의 충분한 실증 노력

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히불량)

- JCR 상위 5% 우수SCI 논문(Energy)에 인공지능방식 태양열 융합 히트펌프 제어 내용으로 1건 및 SCIE 국제 학술지(Energies)에 태양에너지설비 고장진단 내용으로 게재 1건
- 국제표준 ISO 24194(2022) 현장태양열설비 성능시험방법을 국내최초 적용하여 국내논문 게재 2건
- 태양열 복합열저장시스템, 복합식 얇은지중열저장, 인공지능 히트펌프운전제어 등 국내특허출원 3건
- 국내 학술발표 5건 및 국제발표 1건

II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
<p>○ [2단계 및 최종 목표] 시설원예에 태양열 계간축열 기반 복합열원 히트펌프 융합 열공급시스템 구현으로 난방에너지 공급 100%실증을 통하여 아열대 작물 에너지비용절감형 산업화 모델 제시</p> <ul style="list-style-type: none"> · 실증기간: 7개월 이상 (2022년 6월~2022년 12월) · 시설규모: 1,000평형 시설원예 · 실증 시설원예 난방에너지 비용 절감 80% 이상 	20	100	<p>○ 실증설비 구축 완료 및 실증기간 1년 이상 실증운전 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> · 실증기간: 2022.04.25~2023.06.04 · 실증대상지 시설규모: 1,160평 · 실증 시설원예 난방에너지비용 절감율 80.6% (전력량요금만 고려, 기후환경요금 및 연료비조정액 포함시 75.5%) · 실증기간 중 전기에너지소비량을 기준으로 실증기간에 발생한 난방부하와 동일한 조건에서 기존 등유보일러 에너지소비량을 비교하여 실증기간의 에너지단가를 이용하여 절감율 산정
<p>○ 평판형 및 진공관형 태양열 집열기 복합 구성 및 태양열 집열구조 최적화</p> <ul style="list-style-type: none"> · 성능치: KS 인증 효율 대비 집열효율 90% 달성 	20	100	<p>○ 평판형과 진공관형으로 복합 구성된 태양열 집열설비 구축 완료 및 실증운전 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> · 기존 온실 일부를 기계실 변경하여 기계실을 구축하고 지붕면적을 이용하여 집열설비 설계 · 주변부 음영이 최소화될 수 있도록 설치 각도 및 집열기 배치 · 각 집열기의 KS인증효율을 기준으로 ISO 24194에서 제시하는 보정계수를 적용한 현장 집열설비 성능확인 방법을 통하여 입사각이 약 0°조건 의 청명한 조건의 시험일 12일에 대하여 분석결과, 평판형의 경우 100.6%, 진공관형의 경우 98.7% 달성

<p>○ 계간축열시스템: 생산된 태양열 장기 열저장 및 히트펌프 열원 공급 ·성능치: 정상축열운전을 98% 이상</p>	<p>20</p>	<p>100</p>	<p>○ 계간축열 온수조설비 구축 완료 및 실증운전 수행 · 계간축열설비는 온수탱크 350m³ 과 버퍼조 100m³으로 구축하여 기존 버퍼조가 있는 경우에도 통합적용 가능하도록 구성 · 실증기간 비난방기간에 걸쳐서 계간온수탱크와 버퍼조를 이용하여 태양열 저장 실증운전 실시 · 난방기간 중 계간온수탱크의 온도가 40℃에 도달한 이후 복합열원히트펌프 열원으로 공급운전 수행 · 실증기간 405일 중 태양열의 과열일수는 4일이 발생되어 정상축열 운전율 99% 달성</p>
<p>○ 복합열원히트펌프: 공기 및 태양열 열원 복합 활용 시설원에 열공급 ·성능치: 복합열원히트펌프 SCOP 4 이상</p>	<p>20</p>	<p>100</p>	<p>○ 복합열원히트펌프 구축 및 실증운전 수행 · KS B 8295와 KS B 6275 방법 적용 · 난방기 중 태양열을 이용한 버퍼조로부터 열공급을 보충하여 복합열원 히트펌프를 이용하여 열공급 · 계간열저장조의 40℃미만 잔열을 이용하여 히트펌프 열원으로 지중축열과 연계하여 20~30℃수준으로 조절하여 공급하면서 복합열원 히트펌프 COP를 산정한 결과, 실증기간 중 복합열원 운전일수 6일에 걸쳐 SCOP 4.38 달성</p>
<p>○ 운영관리시스템: 전체 시스템의 모니터링 및 효율적 운영 제어 ·성능치: 태양열 시스템 고장진단</p>	<p>20</p>	<p>100</p>	<p>○ 운영관리 시스템 구축 및 실증운전 수행 · 전체시스템 모니터링과 제어가 가능한 시스템 구축 완료 및</p>

<p>정확도 90% 이상</p>			<p>실증운전 수행</p> <ul style="list-style-type: none"> • 태양열 고장진단시스템을 운영관리시스템에 통합 설치 적용 및 실증운전 수행 • 실증기간 중 인위적으로 고장을 발생시켜 태양열시스템 고장진단시험을 수행한 결과, 고장을 일으킨 총 57회 중 비정상적 진단 2회로 고장진단 정확도 96.5% 달성
<p>합계</p>	<p>100점</p>	<p>100</p>	

III. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

- 본 연구를 통하여 태양열을 활용한 에너지 생산·저장·관리 기술을 위한 실증모델을 설계하고 실증설비를 구축완료하였음
- 실증모델은 중소규모 온실에 적용가능한 모델수립을 위하여 온실 주변 작업동으로 모델화할 수 있도록 새로이 기계실을 구축하여 에너지설비를 설치하는 방식으로 개발하였음
- 구축한 실증모델에 대한 실증운전을 1년 이상에 걸쳐 수행하였으며, 최종목표인 구축한 실증설비를 통하여 실증대상 온실의 난방용 에너지공급 100%를 달성하였고, 기존 등유보일러를 이용한 방식 대비 전력량요금을 기준으로 한 난방에너지 비용 절감율은 80.6% 정도로 분석되었음.
- 또한 과제 세부목표의 항목을 모두 달성하였음

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

- 본 실증모델 구축 연구에서는 태양열 등 열공급설비 설치를 위한 공간이나 면적, 설치 방향 등 설치여건 측면에서는 다소 열악하였지만, 국내 원예시설의 대부분을 차지하고 있는 비닐하우스를 대상으로 하였고 1,000평 정도 중소규모의 비닐하우스를 대상으로 실증연구를 성공적으로 수행하여 향후 보급대상 원예시설로서 중소규모 온실을 위한 모델수립과 보급 효과 등을 고려하여 실증 추진한 부분을 고려하는 것을 요청 드림
- 본 실증대상지는 설계초기단계에 주변 고속철도차량 운행지역으로 인한 설비설치 허가를 위한 행정처리, 연약지반을 극복하기 위한 기술적 조사와 말뚝 공사, 상수도과 전기 공급을 위한 인프라 설비 설치 등 설비구축 사전에 진행하여야 하는 사항과 설비설치에 필요한 환경을 성공적으로 구축하고 마련함으로써, 향후 사업화를 대비하여 사전 검토에 필요한 다양한 경험을 축적한 부분을 고려 요청 드림
- 실증이 이루어진 2022년 4월부터 2023년 6월의 난방기에는 농가의 사정으로 당초 한라봉/바나나와 애플망고에서 한라봉과 천혜향으로 변경되어 난방부하가 낮게 나타나게 되었고, 난방을 위한 열공급량 중 태양열의 비중은 약 75%로서 높게 나타났으며, 전력량요금만 고려한 전기에너지비용은 등유로 인한 에너지비용에 비하여 약 80% 정도 절감되는 것을 확인하였으며, 당초 계획하였던 높은 온도를 요구하는 작물로 재배시에도 유사한 수준의 에너지소비량 절감이 이루어질 것으로 기대되는 사항 고려 요청 드림
- 계간축열 탱크의 단열이 실증시작 이후로 다소 지연되어 전체기간에 걸친 성능과 최고도달온도의 감소에 영향을 끼쳤으나, 이후 단열보강 및 연결배관부 개선 등으로 효율이 개선되어 실증완료이후 2023년 하절기의 태양열축열은 더욱 효율적으로 진행 중인 상황을 고려 요청 드림
- 실증모델을 기반으로 도출한 사업모델은 기존 지열히트펌프나 공기열히트펌프에 추가하여 통합되는 설비로도 보급이 가능한 방식으로 시스템모델을 도출하였고, 경제성 향상을 위해서는 신재생에너지보급사업의 태양열 계간축열설비를 지원하는 융복합지원사업을 통한 보급사업이나 농업에너지이용효율화 사업에 태양열계간축열설비가 포함될 수 있도록 지속적 정책적 제안 필요한 부분을 고려 요청 드림

- 본 실증대상의 작물은 아열대 작물로서 난방 위주의 작물이고, 최근 국내 기후변화 대응에 적합한 작물로 선정하여 수행하였으며, 향후 보급을 위한 대상 온실은 점차 확대될 것으로 기대되는 부분의 고려를 요청 드림

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 본 연구과제를 통하여 구축한 실증설비는 과제 종료 후에도 준자동운전이 가능한 제어 시스템으로 설치하였으며, 원격 모니터링이 가능하여 지속적인 데이터 분석 및 유지관리 지원이 가능할 것임
- 본 연구과제에서 제시한 산업화 모델은 기존 등유보일러를 태양열을 이용한 난방시스템으로 교체할 수 있도록 제안하였으며, 경제성 확보를 위하여 농업에너지이용효율화사업 등의 지원대상 시설이 될 수 있도록 지속적인 제안과 홍보가 필요함
- 본 실증설비는 태양열 집열설비와 계간열저장 설비, 복합열원 히트펌프 그리고 소규모의 실험용 규모의 얇은 지중축열 등 설비로 구성이 되어있으며, 이로부터 생산되는 데이터는 설비의 성능평가를 위한 타연구주제의 연구설비로도 활용이 가능함
- 본 과제에서 계간열저장은 상대적으로 소용량급의 탱크 방식으로서 열손실의 저감이 대용량 방식에 비하여 더 많은 영향을 미치는 것으로 보이며, 본 연구에서는 연결배관부의 열손실 저감대책을 통하여 손실개선을 이루었고, 설계가이드 등에 이러한 내용이 반영이 될 수 있도록 하여, 향후 설비가 보급이 이루어질 경우 효율적인 시스템이 될 수 있도록 할 계획임
- 본 실증설비를 통하여 온실 실내의 균일한 난방 등 실내열환경 개선이 가능한 것으로 보이며, 이로 인한 작물재배량에 미치는 긍정적 효과는 보다 장기적으로 관찰이 이루어져야 할 것으로 판단됨

IV. 보안성 검토

○ 연구책임자의 보안성 검토의견, 연구개발기관 자체의 보안성 검토결과를 기재함

※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성함.

1. 연구책임자의 의견

2. 연구개발기관 자체의 검토결과

3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표											연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화					기술 인증	학술성과			교육 지도	인력 양성	정책 활용·홍보		기타 (타연구활용비)	
	특허 출원	특허 등록	품종 등록	S M A R T P R O T E C T I O N	건 수	기술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출	투 자 유 치		논 문		학 술 발 표			정 책 활 용	홍 보 전 시		
												SCI	비 SCI	논 문 평 균 I F		정 책 활 용	홍 보 전 시				
단위	건	건	건	건	건	백 만 원	건	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	명	건	건				
가중치	0.2	0.1			0.1	0.1				0.2				0.1			0.15	0.04	0.01		
최종 목표	2	2			1	50				4		2	6	6			4	4	1		
당해 년도	목표	2	-	-	-	-	-	-	-	2	-	-	1	6	-	6	-	-	2	2	1
	실적	3	-	-	-	-	-	-	-	9	-	-	2	6	-	7	-	-	2	2	1
달성률 (%)	100	-	-	-	-	-	-	-	-	100	-	-	100	100	-	117	-	-	100	100	100

4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	시설원에 적용을 위한 태양열 구조 최적화 설계 기술
②	시설원에 태양열 계간축열 연계 복합열원 히트펌프 열공급시스템 기술
③	태양열 계간축열기반 시설원에 열공급시스템 최적 운영관리 기술

5. 연구결과별 기술적 수준

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

* 각 해당란에 v 표시

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	<ul style="list-style-type: none"> * 기존온실의 작업동을 재생에너지 설치 플랫폼으로 활용위한 기술개념으로 활용 * 기존온실 일부면적을 작업동으로 전환하는 그린리모델링 기술위한 기술개념으로 활용 * 설치면적이 부족한 중소규모 온실에 태양열 등 재생에너지설비 설치 확대에 기여가능
②의 기술	<ul style="list-style-type: none"> * 농업에너지이용효율화사업에 기존 히트펌프와 연계하여 태양열 계간축열 기술을 보급대상에 포함될 수 있도록 정책제안을 위한 기술자료로 활용 * 보급사업을 위한 사업모델의 시스템모델로서 활용 * 보급사업을 위한 기업에 시스템 특허와 노하우 등 기술이전 추진 * 계간축열의 잔열을 히트펌프 열원으로 활용하여 효율향상이 가능하여 시설원에 난방 열에너지수요의 더욱 효율적인 전기화에 기여가능
③의 기술	<ul style="list-style-type: none"> * 기존 히트펌프 난방시스템의 효율적인 에너지관리제어시스템 개발과 적용을 위한 기반기술로 활용 * 개발한 운영관리제어시스템의 지능화 기술 개발과 적용을 위한 기반기술로 활용 * 건물이나 축사 등 냉난방이 필요한 대상의 냉난방시스템에 대한 지능형 운전제어기술 개발과 적용을 위한 기반기술로 활용 * 핵심기술②의 보급사업에 포함하여 기업에 시스템 특허와 노하우 등 기술이전 추진 * 시설원에 난방 등 운영의 지능화 경영비의 효과적인 절감에 기여가능

7. 연구종료 후 성과창출 계획

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표										연구기반지표										
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				기술인증	학술성과			교육 지도	인력양성	정책 활용·홍보		기타 (타연구활용등)		
	특허출원	특허등록	품종등록	S M A R T	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출		투자유치	논문 SCI	논문 비SCI			논문 평균 I F	학술발표		정책 활용	홍보 전시
단위	건	건	건	평가대상	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	명	건	건			
가중치	0.2	0.1			0.1	0.1				0.2				0.1				0.15	0.04	0.01	
최종목표	2	2			1	50				4				2	6		6		4	4	1
연구기간내 달성실적	3	0			0	0				9				2	6		6		2	15	1
연구종료후 성과창출 계획	0	2			1	55				0				0	0		0		2	2	0

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

핵심기술명 ¹⁾	태양열 복합 열저장 열공급시스템 기술		
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input checked="" type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	55,000천원
이전방식 ²⁾	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input type="checkbox"/> 전용실시권 <input checked="" type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타()		
이전소요기간	6개월	실용화에상시기 ³⁾	2026년 이내
기술이전시 선행조건 ⁴⁾	기술지도		

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

<기술료 산정 근거>

- * 위 기술이전은 2023년 10월 31일 세한에너지(주)와 계약이 체결되었으며, 정액기술료 55,000천원은 기술이전기업과 한국에너지기술연구원의 협의에 의하여 결정된 정액기술료이며, 경상기술료는 총매출액의 1.5%로 산정하였다.
- * 통상실시권에 의한 이전방식은 2022년 6월 29일 시행되었고 2022년 6월 28일에 개정된 ‘기술의 이전 및 사업화 촉진에 관한 법률 시행령 (약칭: 기술이전법 시행령)’ 제26조(공공연구개발 성과의 귀속 및 이용 허락 등) 제④항에 따라 진행되었다. 제④항의 내용은 다음과 같다. ‘④ 공공연구기관은 제2항에 따라 귀속된 기술을 일반인에게 이용하게 하는 경우에는 통상의 실시 또는 사용에 관한 권리를 허락함을 원칙으로 한다. 다만, 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 경우에는 전용의 실시 또는 사용에 관한 권리를 허락할 수 있다. 1. 다른 법령 또는 협약에서 전용의 실시 또는 사용을 정한 경우, 2. 제9조제3항 또는 이 조 제2항에 따라 해당 기술의 이전·사업화에 관한 정보가 기술진흥원에 등록된 날부터 1년(신속한 기술이전·사업화의 필요성이 인정되는 경우에는 공공연구기관의 장이 6개월 이상 1년 이하의 범위에서 정한 기간) 이내에 통상의 실시 또는 사용에 관한 권리를 허락받으려는 자가 없는 경우, 3. 기술의 특성상 불가피하다고 인정되는 경우
- * 기술이전계약서 표지 사본과 관련한 부분의 사본은 아래와 같다.

기술 실시 계약서

실시기업명 : 세한에너지 주식회사
계약기술 : 태양열 복합 열저장 열공급시스템 기술에 관한 특허 및
노하우

한국에너지기술연구원

KIER

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 농업에너지자립형산업모델기술개발사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 농업에너지자립형산업모델기술개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.