

RS-2021
-IP8210
49

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

발간등록번호

11-1543000-004749-01

수중
플라즈마
방전 방식
농업용
보일러
상품화
기술 개발

수중 플라즈마 방전 방식 농업용 보일러 상품화 기술 개발

2024

2024.07.29.

주관연구기관 / (주)지에이
공동연구기관 / 공주대학교

농림식품기술기획평가원
농림축산식품부

농림축산식품부
(전문기관)농림식품기술기획평가원

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “수중 플라즈마 방전 방식 농업용 보일러 상품화 기술 개발”
(개발기간 : 2021. 04. 01 ~ 2023. 12. 31)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2024. 07. 29.

주관연구기관명 : (주)지에이 김길호 (인)

공동연구기관명 : 공주대학교 김송자 (인)

주관연구책임자 : 김길호 (인)

공동연구책임자 : 강태환 (인)

국가연구개발사업의 관리 등에 관한 규정 제18조에 따라 보고서 열람에 동의합니다.

< 요약 문 >

사업명	기술사업화지원사업			총괄연구개발 식별 번호 (해당 시 작성)			
내역사업명 (해당 시 작성)	[민간중심 R&D 사업화지원] 지원분야 시스템			연구개발과제번호		821049-03	
기술 분류	국가과학기술 표준분류	1순위 소분류 코드명	60%	2순위 소분류 코드명	20%	3순위 소분류 코드명	20%
	농림식품 과학기술분류	1순위 소분류 코드명	60%	2순위 소분류 코드명	20%	3순위 소분류 코드명	20%
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		-					
연구개발과제명		수중 플라즈마 방전 방식 농업용 보일러 상품화 기술 개발					
전체 연구기간		2021. 04. 01 - 2023 . 12. 31(2년 9개월)					
해당 단계		2021. 04. 01 - 2022. 12. 31(1년 9개월)					
총 연구개발비		총 966,300천원 (정부지원연구개발비:803,000천원, 기관부담연구개발비 : 163,300천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)					
해당 단계		총 627,000천원 (정부지원연구개발비:511,000천원, 기관부담연구개발비 :116,000천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)					
연구개발단계		기초[] 응용[] 개발[<input checked="" type="checkbox"/>] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도 (해당 시 작성)		착수시점 기준(5단계) 종료시점 목표(9단계)	
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)							
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)							
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		수중 플라즈마 방전 방식을 이용한 고효율 플라즈마 보일러 유닛 및 시제품 개발				
	전체 내용		항 목 별	플라즈마 보일러 유닛	플라즈마 보일러 양산 시제품		
			전기입력(kW)	10/20/30	30/60/90		
			발열량 (kcal/hr)	8,400/16,800/25,300±1 %	25,200/50,400/75,60±1%		
			열효율 (%)	98±1	좌 등		
			히터수명 (년)	10	좌 등		
			누전전압 (V)	1V 이하	1V 이하		
			급탕방식	직수 연속식	좌 등		
			시제품 사이즈 (mm)	Φ100-220mm height/ Φ130-294mm height/ Φ170-310mm height	1100W x 400D x 1350H		
	1단계[]		목표	<ul style="list-style-type: none"> ○ 농가 보급형 발열량 10kW, 20kW급 고효율 플라즈마 보일러 유닛 개발 ○ 농가 보급형 발열량 10kW, 20kW급 고효율 플라즈마 보일러 유닛 기초 성능평가 ○ 각 플라즈마 보일러 유닛을 3개씩 직렬 구성으로 농가 보급형 발열량 30kW, 60kW급 고효율 농업용 플라즈마 보일러 시제품 개발 			

		내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 30kW, 60kW급 고효율 농업용 플라즈마 보일러 실증 테스트 및 난방특성 분석 ○ 30kW, 60kW급 고효율 농업용 플라즈마 보일러 경제성 분석 □ 농가 보급형 발열량 10kW, 20kW급 고효율 플라즈마 보일러 코어, 유닛 및 30kW, 60kW급 플라즈마 보일러 양산 시제품 개발 <ul style="list-style-type: none"> ▷ 10kW, 20kW급 PPS 히터코어 및 히터하우징 설계, mock-up 개발 <ul style="list-style-type: none"> - R,S,T 삼상 + N상 혼합 구조 플라즈마 보일러 유닛 설계 - mock-up 제작 성능시험, 개발목표 사양 부합 확인 ▷ 10kW, 20kW급 PPS히터코어 및 히터하우징용 사출금형 개발 <ul style="list-style-type: none"> - R,S,T상 히터코어가 120도 등간격으로 히터하우징 내에 함께 구성되고 유닛간 직렬배열이 용이한 구조 - 금형 종류 : 히터코어, 하우징 바디, 하우징 헤드, 입출수 니플 ▷ 10kW급 PPS히터코어 및 히터하우징 다중도금 공정 및 지그 개발 <ul style="list-style-type: none"> - PPS 사출성형품의 도금면 표면개질 후 Pd, Ru 및 Pt 등 백금족 물질의 다중도금 기술 - 실시 예 : PPS 표면개질 후 Cu→Ni→Pd→Pt 순서로 다중도금 ▷ 10kW, 20kW급 플라즈마 보일러 유닛 및 30kW, 60kW급 보일러 시제품용 열가형 제어반 개발 <ul style="list-style-type: none"> - HW : micom 디지털 제어 PCB 및 주전원 제어반 설계, 제작 - SW : 목표온도, 입출수 온도, 펌프운전 등 필수 제어인자로 자동제어 □ 농가 보급형 발열량 30kW, 60kW급 플라즈마 보일러 양산 시제품 기초 성능평가 <ul style="list-style-type: none"> ▷ 플라즈마 보일러 양산 시제품의 개발목표 사양에 대한 기초 성능평가 <ul style="list-style-type: none"> - 입수온도 및 출수온도에 따른 발열량 평가 - 연속 열효율 평가 - 출수온도의 편차 평가 □ 농가 보급형 발열량 10kW급 고효율 플라즈마 보일러 코어, 유닛 설계 검토 □ 농가 보급형 발열량 30kW급 고효율 플라즈마 보일러 설계 검토 □ 농가 보급형 발열량 30kW, 60kW급 고효율 플라즈마 보일러 실증 테스트 <ul style="list-style-type: none"> ▷ 100~200평 농업용 시설하우스 2개소 선정 및 제품 설치 ▷ 작물재배 비교실험 평가 (엽장, 엽폭, 수고, 식생지수, 엽록소 함량) ▷ 고효율 농업용 보일러의 난방 특성 분석 (하우스 내부 온도 및 습도, 보일러 입출수 온도, 열교환기 배풍온도, 소비전력량) □ 농가 보급형 발열량 30kW급 고효율 플라즈마 보일러 경제성 분석 <ul style="list-style-type: none"> ▷ 기존 제품 대비 기능 및 성능에 대한 비교분석과 가격 경쟁력 분석
			2단계
		내용	<ul style="list-style-type: none"> □ 농가 보급형 발열량 30kW급 고효율 플라즈마 보일러 유닛 및 90kW급 플라즈마 보일러 양산 시제품 개발 <ul style="list-style-type: none"> ▷ 30kW급 PPS히터코어 및 히터하우징 설계, mock-up 개발

		<ul style="list-style-type: none"> - R,S,T 삼상 + N상 혼합 구조 플라즈마 보일러 유닛 설계 - mock-up 제작 성능시험, 개발목표 사양 부합 확인 ▷ 30kW급 PPS히터코어 및 히터하우징용 사출금형 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 금형 종류 : 히터코어, 하우징 바디, 하우징 헤드, 입출수 니플 ▷ 30kW급 PPS히터코어 및 히터하우징 다중도금 공정 및 지그 개발 <ul style="list-style-type: none"> - PPS 사출성형품의 도금면 표면개질 후 Pd, Ru 및 Pt 등 백금족 물질의 다중도금 기술 ▷ 30kW급 플라즈마 보일러 유닛 및 90kW급 보일러 시제품용 제어반 개발 <ul style="list-style-type: none"> - HW : micom 디지털 제어 PCB 및 주전원 제어반 설계, 제작 - SW : 목표온도, 입출수 온도, 펌프운전, 보충수 수위 등 필수 제어인자를 센싱 IoT 기반 원격 display 및 자동제어 ▷ 최종 시제품 설계 및 제작 : 상기 항목별 개발목표 사양 참조 □ 농가 보급형 발열량 90kW급 플라즈마 보일러 양산 시제품 기초 성능평가 <ul style="list-style-type: none"> ▷ 플라즈마 보일러 양산 시제품의 개발목표 사양에 대한 기초 성능평가 <ul style="list-style-type: none"> - 입수온도 및 출수온도에 따른 발열량 평가 - 연속 열효율 평가 - 출수온도의 편차 평가 □ 농가 보급형 발열량 30kW급 고효율 플라즈마 보일러 코어, 유닛 설계 검토 □ 농가 보급형 발열량 90kW급 고효율 플라즈마 보일러 설계 검토 □ 농가 보급형 발열량 90kW급 고효율 플라즈마 보일러 실증 테스트 <ul style="list-style-type: none"> ▷ 200~300평 농업용 시설하우스 2개소 선정 및 제품 설치 ▷ 작물재배 비교실험 평가 (엽장, 엽폭, 수고, 식생지수, 엽록소 함량) ▷ 고효율 농업용 보일러의 난방 특성 분석 (하우스 내부 온도 및 습도, 보일러 입출수 온도, 열교환기 배풍온도, 소비전력량) □ 농가 보급형 발열량 90kW급 고효율 플라즈마 보일러 경제성 분석 <ul style="list-style-type: none"> ▷ 기존 제품 대비 기능 및 성능에 대한 비교분석과 가격 경쟁력 분석
--	--	--

연구개발성과	<ul style="list-style-type: none"> □ 농가 보급형 발열량 10kW급 고효율 플라즈마 보일러 코어, 유닛 및 30kW급 플라즈마 보일러 양산 시제품 개발 <ul style="list-style-type: none"> ▷ 10kW급 Ti+Ir 히터코어 및 히터하우징 설계, mock-up 개발 ▷ 10kW급 히터하우징용 사출금형 개발 ▷ 10kW급 플라즈마 보일러 유닛 및 30kW급 보일러 시제품용 염가형 제어반 개발 □ 농가 보급형 발열량 30kW급 플라즈마 보일러 양산 시제품 기초 성능평가 □ 농가 보급형 발열량 30kW급 고효율 플라즈마 보일러 실증 테스트
--------	---

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<ul style="list-style-type: none"> ○ 산업용 및 농업용 발열량 10kW급 고효율 플라즈마 보일러 유닛 및 30kW급 플라즈마 보일러 양산 제품화, 내수시장 출시 예정 ○ 전극코어 합금기술과 전해수 조성기술을 확보하여 전극보일러의 결함을 완전히 배제하고, R,S,T 및 N상 전부를 활용하면서도 누전이 전혀 없이 안전한 플라즈마 보일러에 대한 원천기술을 획득 ○ 물 자체가 발열하는 고효율 전극보일러 분야 독자적 원천기술 확보에 따른 다양한 제품 전개로 글로벌 신에너지 산업으로의 적극 진출 가능 ○ 해외시장 진출 : 제품화 완료 후 기존에 확보된 바이어를 통한 해외시장 출시 및 우수 농어업용기계전시회에 참가하여 관련업계 메이저 상담 및 수주
---------------------	---

국문핵심어 (5개 이내)	플라즈마	방전	난방기	시설하우스	에너지
영문핵심어 (5개 이내)	plasma	discharge	heater	green house	energy

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	8
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	11
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	159
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	183
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	183
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	184

별첨 자료 (참고 문헌 등)

최종보고서										보안등급		
										일반[], 보안[]		
중앙행정기관명		농림축산식품부			사업명		사업명			기술사업화지원사업		
전문기관명 (해당 시 작성)		농림식품기술기획평가원			사업명		내역사업명 (해당 시 작성)			민간중심 R&D 사업화지원(시스템)		
공고번호		농축2021-41호			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)							
					연구개발과제번호		821049-03					
기술 분류	국가과학기술 표준분류	1순위 소분류 코드명	60%	2순위 소분류 코드명	20%	3순위 소분류 코드명	20%					
	농림식품과학기술분류	1순위 소분류 코드명	60%	2순위 소분류 코드명	20%	3순위 소분류 코드명	20%					
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문										
		영문										
연구개발과제명		국문		수중 플라즈마 방전 방식 농업용 보일러 상품화 기술 개발								
		영문		Development of manufacturing technology for the agricultural boiler using underwater plasma discharge method								
주관연구개발기관		기관명		(주)지에이			사업자등록번호					
		주소		(우)12730 경기도 광주시 초월읍 산수로 709-102			법인등록번호					
연구책임자		성명		김길호			직위		대표이사			
		연락처		직장전화		휴대전화						
				전자우편		국가연구자번호						
연구개발기간		전체		2021. 04. 01 - 2023. 12. 31(2년 9개월)								
		단계 (해당 시 작성)		1단계		2021. 04. 01 - 2022. 12. 31(1년 9개월)						
				n단계		2023. 01. 01 - 2023. 12. 31(1년 개월)						
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비		기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금 지방자치단체		기타()		합계		연구개발비 외 지원금
		현금		현금		현금		현금		현금		현금
		현금		현금		현금		현금		현금		현금
총계		803,000		4,800		158,500				807,800		158,500
1단계		1년차				73,000				219,000		73,000
		n년차				43,000				292,000		43,000
n단계		1년차		4,800		42,500				296,800		42,500
		n년차								339,300		
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명		책임자		직위		휴대전화		전자우편		비고
		공주대		강태환		교수						역할 공동
												기관유형 대학
위탁연구개발기관												
연구개발기관 외 기관												
연구개발담당자 실무담당자		성명		강상구			직위		연구원			
		연락처		직장전화		휴대전화						
				전자우편		국가연구자번호						

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

2024년 07월 29일

연구책임자: 김길호 (인)

주관연구개발기관의 장: 김길호 (직인)

공동연구개발기관의 장: 김송자 (직인)

농림축산식품부장관 · 농림식품기술기획평가원장 귀하

1. 연구개발과제의 개요

국내 시설하우스 재배면적은 2019년 기준 81,195ha, 난방면적은 15,878ha이고, 이중 화석연료를 사용하여 난방하는 온실 면적은 13,864ha로서 전체 난방면적의 87%를 차지하고 있다. 특히 겨울철 자동화 온실에서 난방기를 사용하여 채소 및 화훼류를 재배할 경우 생산비 중에 난방비가 차지하는 비중이 40%를 상회하는 실정이다. 국내 시설 농가에서는 동절기 작물을 재배하기 위하여 온풍난방기, 라디에이터, 온수난방, 태양열난방 시스템 등을 사용하고 있고, 이중 농업용 난방기는 유류버너가 장착된 온풍기가 80% 이상 차지하고 있으며, 공통적인 당면과제는 고품질 작물의 다수확과 온실 난방비 절감에 있다.

전기온풍 난방기는 초겨울과 초봄 등 외부기온이 크게 낮지 않은 시기에 난방효과가 있으나 100 kW 초과 시 유지비 증가, 한겨울 또는 고온성 작물 재배시 발열량 부족 등의 문제점이 있으며, 경유용 온풍 난방기는 최근 급증한 유가로 인해 시설 농가의 난방비 부담이 큰 실정이다. 또한 규모화 된 시설하우스의 경우 비닐 닥트를 이용하여 난방용 공기를 이송시키고 있으나, 난방기 입구로부터 배출되는 공기 온도가 50℃ 내외로 낮고, 비닐 닥트를 출구 쪽에서의 온도 편차가 크기 때문에 온실 내부 기온분포가 균일하지 못한 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 에너지 효율이 높고, 급속가열이 가능하며, 토출 공기의 온도가 높아 시설 온실 내부 온도를 균일하게 유지할 수 있는 수중 플라즈마 방전 방식의 농업용 온풍 난방기를 개발하였다

표 1 국내 시설하우스 난방 면적 (단위 : ha)

연도	온풍난방 면적	온수난방 면적	
		방열관	팬코일
2015	11,632	1,785	397
2016	11,734	1,244	289
2017	12,300	1,249	470
2018	12,209	1,209	446

○ 수중 플라즈마 방전 방식 고효율 보일러 주요 구성 및 핵심기술

미량의 전해질이 있는 물에 전극을 넣어 교류 전기 에너지를 직접 공급하면 전해수(물+전해질)는 전기분해에 의하여 수소이온(H⁺)과 수산이온(OH⁻)으로 분해되면서 동시에 직경 1미크론 이하의 나노 버블(nano bubble)이 발생하여 수중 플라즈마 상태를 형성한다. 전해 과정에서 발생된 이온들은 교류전원의 주파수에 따라 전극 극성이 바뀌므로 각 전극과 이온들 간 인력과 반발력에 의하여 진동이 발생되면서 이온 주변 물분자들의 진동 마찰을 유도하고, 이러한 현상으로서 전극의 가열이 아닌 전해수 자체가 발열되는 원리이다. 또한 나노 버블(nano bubble)은 내부 기압이 수십 기압 이상으로 물속에서 폭발할 때 에너지가 발생하여 부가적으로 물을 가열한다.

이 같은 원리의 수중 플라즈마 방전방식 히터는 전극 간 전하 이동, 즉 전류 흐름이 전해질 이온을 매개로 하므로 전해수를 통한 누설전류가 없도록 구조를 갖추는 것이 안전 상 매우 중요하며, 이것은 플라즈마 히터의 R, S, T 상 코어와 하우징에 N상 사이에 상호의 형상 및 물리적 구조에 의하여 결정된다. R, S, T 상 코어와 하우징의 N상 간 플라즈마 방전을 유도하는 것은 전극 보일러 분야의 독자적인 수중 플라즈마 발열 기술이며, 누전전압을 1V 이하로 낮추어 가용 전기 에너지를 극대화 할 수 있을 뿐 아니라, 나노 버블(nano

bubble) 폭발 시 발생하는 에너지가 부가되어 전기에너지의 열에너지로 변환율을 100% 또는 초과하여 발휘할 수 있다.

한편, 수증 플라즈마 발열 기술의 핵심 부품으로서 히터코어 재료는 지금까지 스테인레스강, 탄소가 주류를 이루고 있으나, 플라즈마 방전 시 전기분해에 의한 전해부식이 발생하여 히터코어 합금재료 내의 철성분이 석출되어 산화되면서 원수를 오염시킬 뿐 아니라 전해질과 결합 후 히터코어 표면에 고착되면서 방전 강도를 저하시키는 치명적 결점으로 작용한다. 이러한 문제의 해결을 위하여 히터코어 base metal과 방식도금 방법과 함께 부식 현상을 방지할 수 있는 전해수가 개발되어야 한다.

니크롬 발열체는 자체의 온도가 올라서 물을 가열시키므로 발열량은 700kcal/kW 이하 수준이나, 플라즈마 발열체는 물의 상태변화를 동반하므로 발열량이 Joule 발열량인 860kcal/kW에 이르러 니크롬발열 대비 120~130% 효율이 높으며, 오일 연료비 대비하면 25~30% 에너지비용을 절감할 수 있을 것으로 판단된다.

플라즈마 보일러의 핵심부품으로서 PPS히터코어 및 히터하우징(이하 PPS히터코어로 칭함)은 코어 베이스를 부도체로 구성하여 전해부식의 근본적 원인인 부식전위 제로화로써 전해부식을 방지할 수 있다. 또한 표면에 백금, 팔라듐, 루테튬과 같은 비활성 특성의 백금족 금속으로 다중도금을 하여 어떠한 금속보다도 높은 전기전도도를 가지며 고강도의 도금막을 형성한다. 이러한 특성으로 면전류밀도 0.2~0.3A/cm², 에너지밀도 44~66W/cm²가 가능하여 통상의 전기히터 방식 대비 1/3~1/4 사이즈의 콤팩트한 히터코어 설계 가능하다.

플라즈마 보일러는 유입수 온도 70℃ 이상에서 목표온도를 용이하게 제어할 수 있도록 플라즈마 보일러 유닛의 병렬 시스템을 개발한다. 본 플라즈마 보일러 유닛은 1차년도 과제로서 10kW급을 목표로 하며, 히터하우징 내 R,S 및 T상 히터코어가 함께 구성되고, 히터하우징의 내면이 N상으로 구성되는 특징이 있다.

특히 R,S,T상이 120도 등간격 배치될 경우 히터코어 주위의 방전형상이 왜곡될 수 밖에 없어서 누설전류가 발생하여 안전상의 문제가 발생하지만, 히터하우징을 N상으로 구성하여 왜곡된 방전을 완전히 흡수하는 구조로서 누설전류를 1V 이하로 억제할 수 있다.

10kW급 플라즈마 보일러 유닛은 단독 또는 2개 이상 복수로 직렬 연결될 수 있으므로 최대 수십kW급의 플라즈마 보일러 제작이 가능하며, 이러한 구성은 목표 온도 제어를 위하여 입력전류 제어 시 각 유닛별 ON-OFF 방법으로 용이하게 달성되는 보일러 시스템이다.

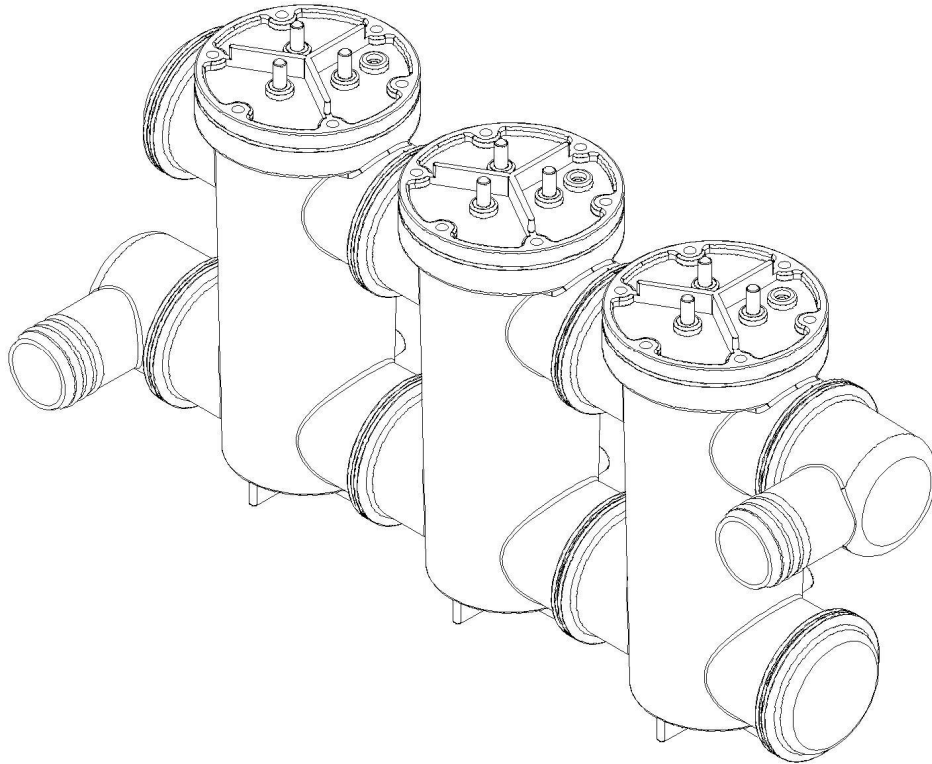


그림 1. 10, 20, 30 kW급 병렬 유로 플라즈마 보일러 발열부 개략도

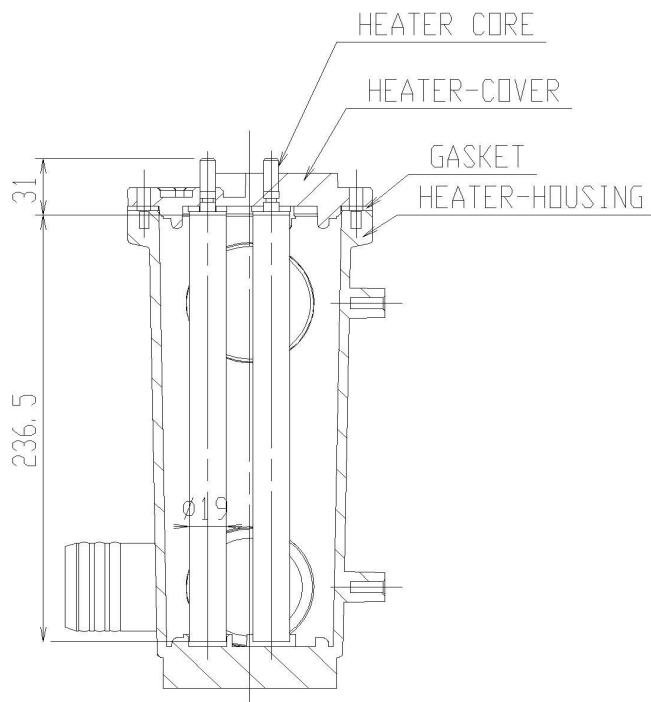


그림 2. 10, 20, 30 kW급 병렬 유로 플라즈마 보일러 유닛 내부 개략도

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

○ 연구개발 목표

<1단계-1차년도>

- 주관연구기관 ((주)지에이)

수중 플라즈마 방전 방식을 이용한 고효율 플라즈마 보일러 유닛 및 플라즈마 보일러 양산 시제품 개발

□ 농가 보급형 발열량 10 kW 급 고효율 플라즈마 보일러 코어, 유닛 및 30 kW 급 플라즈마 보일러 양산 시제품 개발

- ▷ 10 kW 급 PPS 히터코어 및 히터하우징 설계, mock-up 개발
 - R,S,T 삼상 + N상 혼합 구조 플라즈마 보일러 유닛 설계
 - mock-up 제작 성능시험, 개발목표 사양 부합 확인
- ▷ 10 kW 급 PPS히터코어 및 히터하우징용 사출금형 개발 - R,S,T상 히터코어가 120도 등간격으로 히터 하우징 내에 함께 구성되고 유닛간 직렬배열이 용이한 구조
 - 금형 종류 : 히터코어, 하우징 바디, 하우징 헤드, 입출수 니플
- ▷ 10 kW 급 PPS히터코어 및 히터하우징 다중도금 공정 및 지그 개발
 - PPS 사출성형품의 도금 면표면개질 후 Pd, Ru 및 Pt 등 백금족 물질의 다중도금 기술
 - 실시 예 : PPS 표면개질 후 Cu→Ni→Pd→Pt 순서로 다중도금
- ▷ 10 kW 급 플라즈마 보일러 유닛 및 30kW급 보일러 시제품용 엮가형 제어반 개발
 - HW : micom 디지털 제어 PCB 및 주전원 제어반 설계, 제작
 - SW : 목표온도, 입출수 온도, 펌프운전 등 필수 제어인자로 자동제어
- ▷ 최종 시제품 설계 및 제작 : 상기 항목별 개발목표 사양 참조

□ 농가 보급형 발열량 30 kW 급 플라즈마 보일러 양산 시제품 기초 성능평가

- ▷ 플라즈마 보일러 양산 시제품의 개발목표 사양에 대한 기초 성능평가
 - 입수온도 및 출수온도에 따른 발열량 평가
 - 연속 열효율 평가
 - 출수온도의 편차 평가

○ 연구개발 수행과정 및 내용

1. 재료 및 방법

가. PPS 히터코어 수명시험용 시제품 제작

본 연구에서는 수중 플라즈마 방전 방식 보일러 개발을 위한 기초 단계로서 600 W 급 플라즈마 방전 PPS 히터유닛을 그림 3과 같이 설계, 제작하여 기초 성능 및 수명시험을 수행하였다. 히터코어와 히터하우징 재료는 PPS(폴리페닐렌 설파이드)로서 다중도금을 위하여 표면개질 후 Cu→Ni→Pd→Pt 순으로 그림에 표시된 것과 같이 히터코어 외측면과 히터하우징 내측면을 다중으로 도금하였다.

PPS 히터유닛을 설계와 같이 조립하고 난방수 탱크로부터 1.2L/min 유량으로 히터유닛을 통하여 순환되도록 시험장치를 구성하였다. 전극코어와 하우징 간 AC 220 V 인가 시 운전전류 3A가 일정하게 흐르면서 총 전력량 660 W 급, 면전류밀도 0.2 ~ 0.3 A/cm² 로 플라즈마 방전상태가 양호한 것으로 판단되었고, PPS 히터유닛의 재료와 다중도금의 수명시험을 실시하였다.

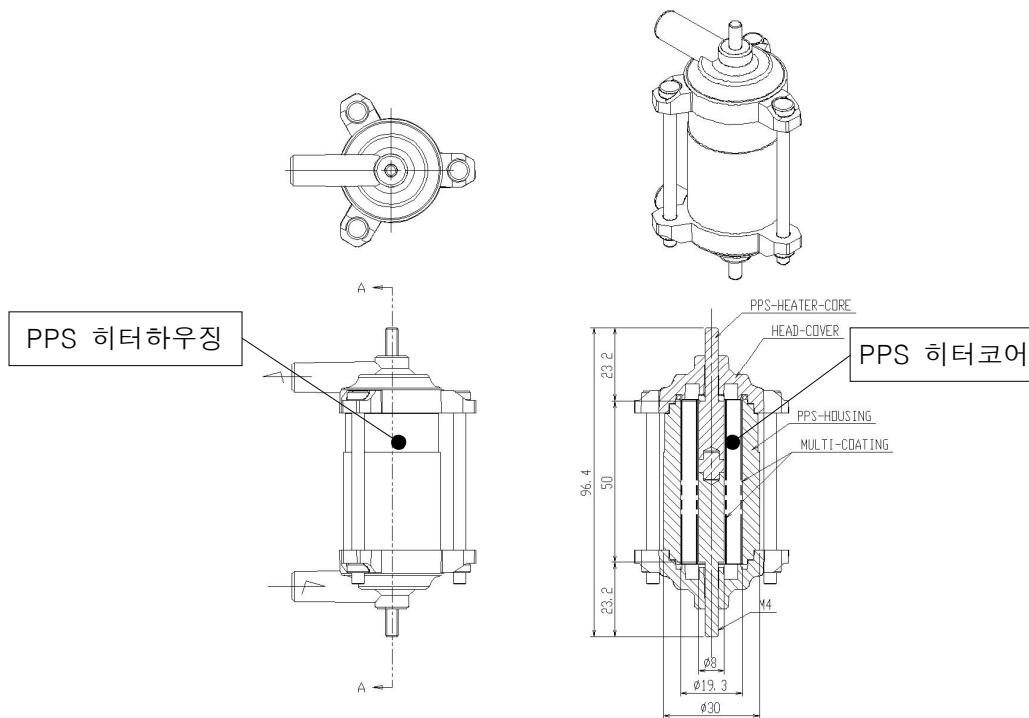


그림 3. 플라즈마 방전 PPS히터유닛 구조 및 외관도

나. Ti+Ir 코팅 히터코어 10kW 플라즈마 보일러 유닛 시제품 설계

600 W 급 PPS 히터코어 시제품 수명시험 결과를 참조하면, PPS히터코어의 플라즈마 보일러 적용이 불가하므로 전극봉 보일러용 히터코어 재료로서 적용되었던 사례를 조사한 결과, 미국 특허 4422917에서 제시된 티타늄 재료의 히터코어에 이리듐을 코팅한 방법이 유력한 해결 방안이라 판단하였다.

이러한 히터코어는 현재에도 발전소용 대형 스팀발생기의 전극봉으로 적용되고 있으며, 본 연구를 통하여 최초로 민수용 기술로의 전환 가능성을 확인하였다. Ti+Ir 히터코어를 적용한 플라즈마 보일러 유닛은 그림 4와 같이 1차년도 연구목표인 10 kW 급 플라즈마 보일러 유닛 시제품을 제작하였으며, 티타늄은 grade 2, 이리듐 코팅은 5 μm 두께로 실시하였다. 이리듐 코팅 후의 전극코어 표면은 사진과 같이 무광 검회색을 띄며, R,S,T상 전극코어 사이즈는 ø19*238.5L 이다.

이와 같은 신구조의 플라즈마 보일러용 히터코어의 수명과 신뢰성을 확인하기 위하여 그림 5와 같이 수명 시험 장치를 제작하여 PPS히터유닛과 같은 면전류밀도 $0.2 \sim 0.3 \text{ A/cm}^2$ 인가의 방법으로 수명시험을 진행하였다.

10 kW 급 플라즈마 보일러 유닛 시제품에 3상 AC 380 V 를 인가하고, 순환수 온도를 감지하여 60°C 를 유지하도록 magnet contactor(전자접촉기)로써 전원을 ON-OFF 제어하였다. 수명시험 장치의 순환수 탱크 용량은 20 L 이며, 플라즈마 보일러 유닛에 의하여 가열된 전해수 방열을 위하여 방열량 11 kW (9,460 kcal/hr)급의 Fan Coil Unit을 설치하고 순환유량 30 LPM 의 펌프로 순환시켰다.

순환수는 플라즈마 방전이 가능한 전해수로서 미국 특허(US3,469,074)에 티타늄 기초 전극 보일러에 적용하여 부식 방지 전해수로서 수용성 알칼리금속 인산염이 바람직하다는 기술을 참조하여 헥사메타인산나트륨 (NaPO_3)₆ 200 ~ 300 ppm 농도의 용액을 적용하였다.



그림 4. Ti+Ir 코팅 히터코어 시제품

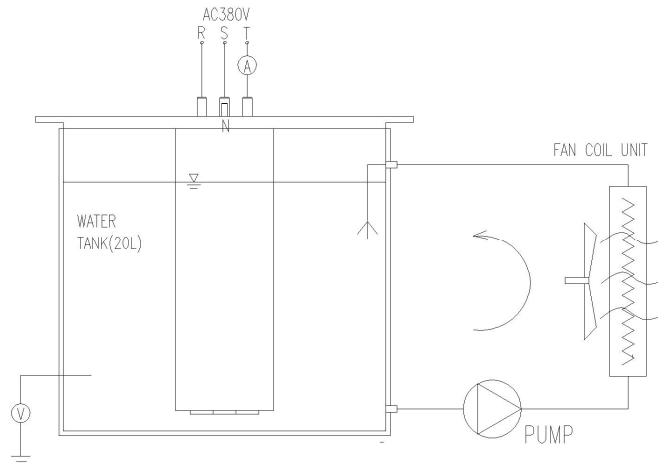


그림 5. Ti+Ir 코팅 히터코어 수명시험장치

다. Ti+Ir 코팅 히터코어 10kW 플라즈마 보일러 유닛 누설전압 시험장치

Ti+Ir 히터코어 10 kW 급 플라즈마 보일러 유닛의 누설전압을 1 V 이하로 극소화 하며, 최적의 열효율을 확보하기 위하여 R,S,T상의 히터코어와 N상의 하우징 간의 상대 위치를 결정하기 위하여 그림 6과 같은 실험 장치를 구상하여 제작하였다. 3상 히터코어는 N상 하우징 중심 기준 120도 등간격으로 배치하고, 중심경은 $\phi 33.9 \sim \phi 49.9$ 까지 9단계로 변경할 수 있다.

이와 같은 누설전압 시험장치를 그림 5의 수명시험장치에 설치하고, 전해수는 탈이온수에 헥사메타인산염 나트륨 200 ~ 300 ppm 을 용해시켜서 20 L 순환수탱크에 충수하였다.

히터코어 위치를 중심경 $\phi 33.9$ 부터 $\phi 49.9$ 까지 반경 1 mm 씩 증가시키면서 120도 등간격으로 배치하고, 3상 AC 380 V 인가 시 플라즈마 방전 운전전류와 전해수와 접지 간 누설전압을 측정하였고, 주관기관의 특허 출원 기술의 N상 하우징의 유무에 따른 누설전압의 변화를 측정하였다.

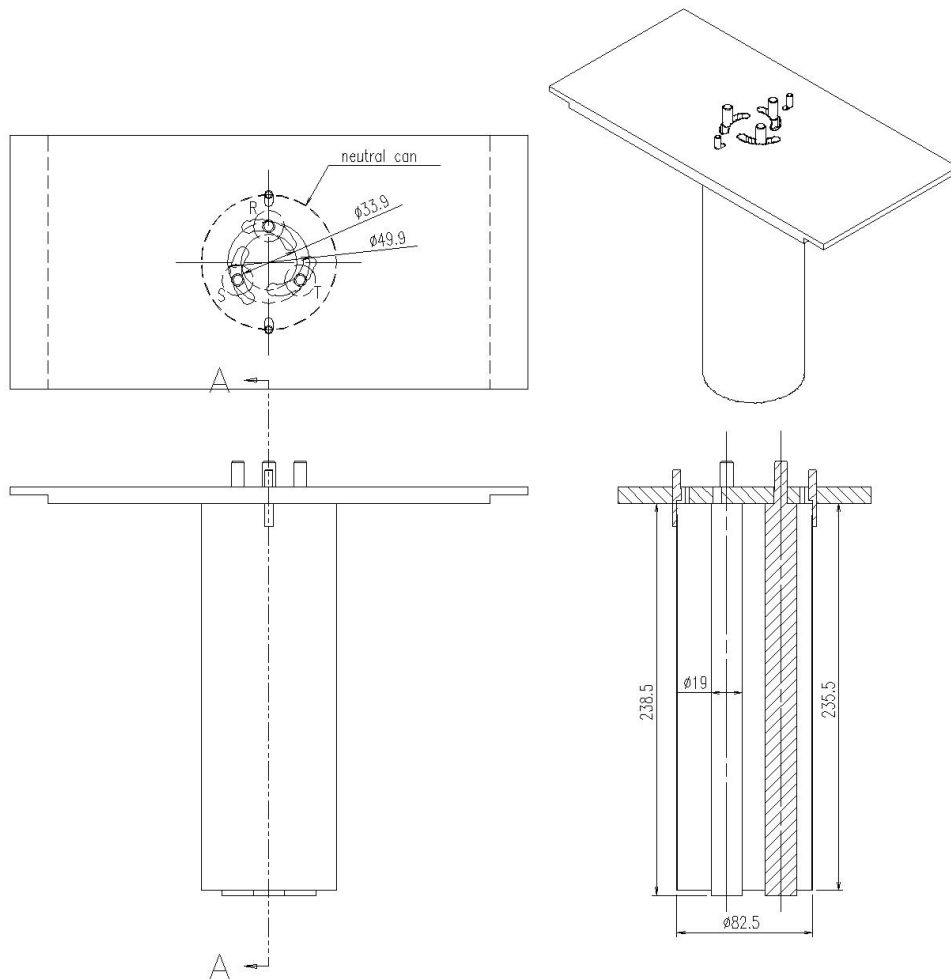


그림 6. Ti+Ir 코팅 히터코어 10kW 시제품 누설전압 시험장치

라. 30 kW 급 플라즈마 보일러 기초성능 시험장치

10 kW 플라즈마 보일러 유닛 3개를 장착한 30 kW 급 플라즈마 보일러 시제품을 그림 7과 같이 제작하였고, 플라즈마 보일러 시제품의 발열량, 소비전력 및 성능계수(에너지효율) 등을 정밀하게 측정하기 위하여 그림 8과 같은 기초성능 시험장치를 제작하였다.

본 장치는 30 kW 급 플라즈마 보일러와 기초성능 시험장치 사이에 구성된 50,000 kcal/hr 급 판형 열교환

기를 경계로 플라즈마 보일러 가온수 순환유로와 1톤 난방수 탱크 및 1 kgf/cm² - 30 L/min 순환 성능의 순환 펌프로 구성된 난방수 순환유로를 조합하여 가온수로부터 난방수로 효율적인 열교환이 이루어지도록 하였다.

난방수 순환유로에는 그림 9와 같은 초음파유량계 및 열량계의 복합측정기(FSUTW 801, Flstronic, Korea)를 설치하여 난방수 순간 및 적산유량과 열량을 정밀하게 측정하였다.

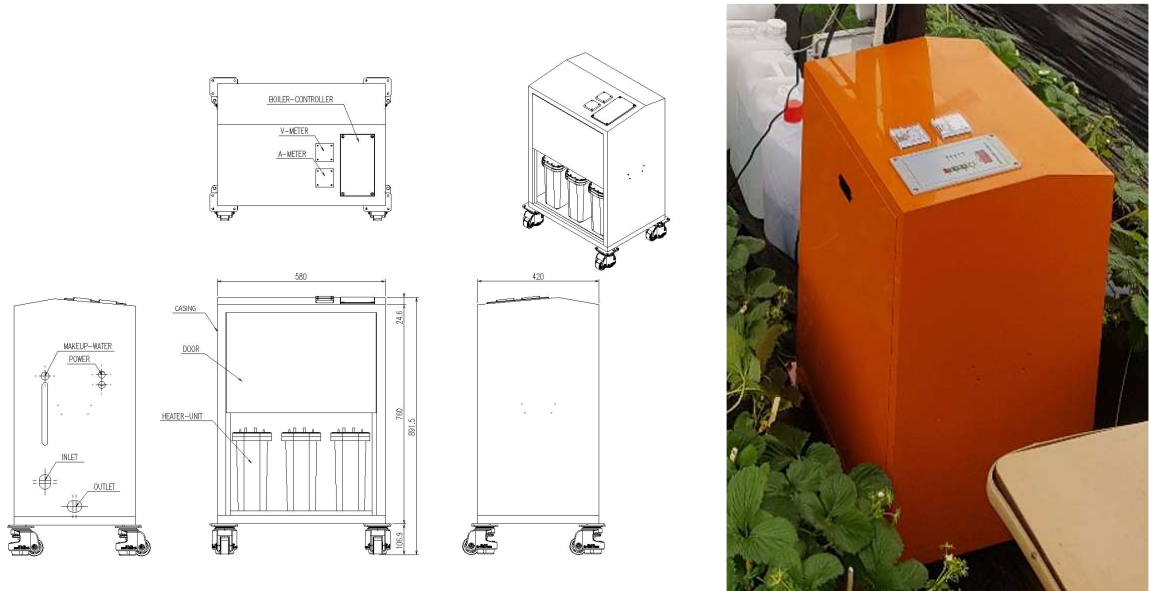
플라즈마 보일러의 기초성능을 산출하기 위하여 1000 L 의 순환수를 유량 24.3~27.7 L/min 로 유지한 상태에서 플라즈마 보일러 출수온도 약 100℃ 까지 상승시킬 경우 입출수 온도, 유량, 소비전력, 투입열량, 방출열량 및 성능계수를 측정하였다.

플라즈마 보일러의 소비전력량 측정은 그림 10과 같은 3상유도전력측정기(HIOKI 3169-20, HIOKI, Japan)를 사용하였다. 시험장치가 정상 가동 후 매 5분마다 각 측정항목을 기록하였으며, 측정된 유량과 입,출수 온도 데이터를 이용하여 다음의 식 (1)과 (2)로부터 플라즈마 보일러의 발열량과 열효율을 산정한다.

$$\text{발열량}(Kcal/h) = \text{유량}(L/min) \times \text{유체밀도}(Kg/m^3) \times \text{유체비열}(Kcal/Kg \cdot ^\circ C) \times \text{난방수 온도차}(^\circ C) \quad (1)$$

$$COP = \frac{\text{발열량}(Kcal/h)}{\text{소비전력량}(KW) \times 860(Kcal/KW)} \quad (2)$$

위의 식에서 물의 밀도와 비열은 미국표준연구소(NIST)에서 제공하는 REPPROP ver.9.1을 이용하여 난방수의 입,출수온도 평균값에서의 값을 구하여 사용하였다.



(a) 30 kW 플라즈마 보일러 설계도면

(b) 30 kW 플라즈마 보일러 시제품

그림 7. 30 kW 플라즈마 보일러 시제품 및 기초성능 시험장치



그림 8. 플라즈마 보일러 시제품 기초성능 시험장치



그림 9. 초음파유량계 및 열량계의 복합측정기



그림 10. 3상유도 전력측정기

2. 결과 및 고찰

가. PPS 히터코어 수명시험 결과

600 W 급 PPS 히터코어 시제품은 PPS(폴리페닐렌 설파이드) 표면개질 후 Cu→Ni→Pd→Pt의 다중도금후 전극코어 및 하우징의 최초의 표면상태는 그림 11의 좌측 하우징의 상하단 형상과 같았다. 이와 같은 시제품을 난방수 탱크로부터 1.2 L/min 유량으로 히터유닛을 통하여 순환, 방열되도록 구성된 시험장치를 제작하여 AC 220 V 인가 시 운전전류 3 A 가 일정하게 흐르면서 총 전력량 660 W 급, 면전류밀도 0.2~0.3 A/cm² 로 수명시험을 실시하였다.

수명시험 시작 후 80일간 상기 운전조건은 변함없이 지속되다가 서서히 운전전류가 감소하여, 90일 차 운전전류는 2.3A로 하락하였고, 운전 종료 후 분해한 결과 전극표면과 하우징 내측의 도금층이 그림 11의 우측 히터코어 외부측면과 같이 박리된 상태로 확인되었다.

이는 PPS 재질이 240℃ 의 내열성을 가지고 있으나 플라즈마 방전에 의한 표면 온도 상승을 견디지 못하여 열부식이 발생되었고, 그에 따른 다중도금층 파괴의 원인으로 판단되며, PPS 다중도금 전극은 플라즈마 보일러용 히터코어로서 적용이 불가한 것으로 판정되었다.

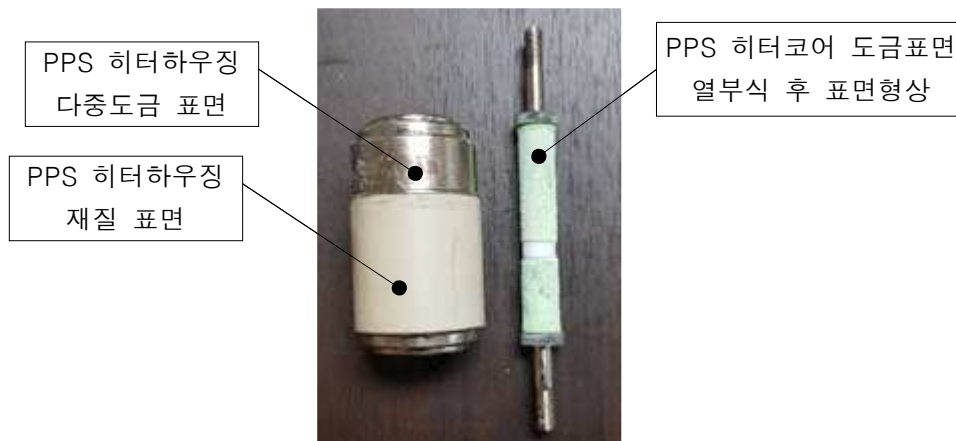


그림 11. PPS 히터코어 유닛 수명시험 결과

나. Ti+Ir 코팅 히터코어 10 kW 플라즈마 보일러 유닛 수명시험 결과

Ti+Ir 히터코어를 적용한 10 kW 플라즈마 보일러 유닛을 제작하여 그림 5와 같은 수명시험 장치와 함께 설치하고, 플라즈마 보일러 유닛에 3상 AC 380 V, 면전류밀도 0.2~0.3 A/cm² 를 인가하면서 순환수 온도를 감지하여 60℃를 유지하도록 전원을 ON-OFF 제어하였다.

20 L 순환수 탱크의 순환수는 전해수로서 헥사메타인산나트륨 (NaPO₃)₆ 200 ~ 300 ppm 농도의 용액을 적용하였고, 플라즈마 보일러 유닛에 의하여 가열된 후 방열량 11 kW (9,460 kcal/hr)급의 Fan Coil Unit에 의하여 지속적으로 방열되면서 10 kW 급 Ti+Ir 히터코어의 수명시험을 수행하였다.

그림 12에서 보는 바와 같이 2021년 4월 10일 ~ 2021년 10월 10일까지 6개월간 지속된 수명시험 결과 티타늄 히터코어에 5 μm 두께로 코팅된 이리듐 코팅표면의 손상을 육안으로 관찰할 수 없었다. 이로써 Ti grade2 코어에 이리듐 5 μm 코팅의 플라즈마 히터코어와 (NaPO₃)₆ 200 ~ 300 ppm 농도 전해수는 플라즈마 보일러 유닛용 핵심부품으로서 적절하다고 판단된다.



그림 12. Ti grade2 + Ir 5 μm 코팅 플라즈마 히터코어 수명시험 결과

다. Ti+Ir 코팅 히터코어 10kW 플라즈마 보일러 유닛 누설전압시험 결과

그림 6의 누설전압 시험장치를 그림 5와 같은 수명시험장치에 설치하고, 히터코어 위치를 중심경 $\phi 33.9$ 부터 $\phi 49.9$ 까지 반경 1 mm 씩 증가시키면서 120도 등간격으로 배치하고, 3상 AC 380V 인가 시 플라즈마 방전 운전전류와 전해수와 접지 간 누설전압을 측정하였고, 주관기관의 특허 출원 기술의 N상 하우징의 유무에 따른 누설전압의 변화를 측정한 결과를 표 2에 제시하였다.

전해수 온도 60°C 하 중심경 $\phi 43.9$ 경우 방전전류는 18.3 A 였으며 반경이 1 mm 씩 증가함에 따라 약 1.8 A 씩 감소하였다. 반경이 1 mm 씩 감소될 경우 1.8~2.3 A 씩 증가하다가 반경이 5 mm 감소된 중심경 33.9 mm 에서는 운전전류가 30 A 를 초과하면서 과전류 보호장치가 작동하여 실험이 중단되었다.

누설전압은 중심경 $\phi 37.9 \sim \phi 49.9$ 범위는 모두 0~1.8 V 였고, 중심경 $\phi 35.9$ 에서 5.9 V, $\phi 33.9$ V에서는 순간적으로 20 V 이상이 측정되다가 작동 정지되었다.

N상 하우징을 제거하면 중심경 $\phi 43.9$ 에서 누설전압이 58 V 에 달하였고, 이로써 N상 하우징이 플라즈마 방전의 왜곡을 방지하여 발열 에너지로 변환시키는 중요한 기능이 있음을 증명되었다.

본 시험을 통하여 Ti+Ir 히터코어 10 kW 급 플라즈마 보일러 유닛 설계는 $\phi 19 \times 238.5\text{L}$ 의 히터코어를 중심경 $\phi 43.9$ 에 120도 등간격으로 배치하고, N상 하우징 사이즈는 $\phi 82.5 \times 235.5\text{L}$ 으로 하며, 전해수는 0.2 %w/v 헥사메타인산염 나트륨으로 결정할 수 있었다.

이와 같은 설계 사양으로 제작된 시제품에 3상 AC 380 V 인가 시 순환수의 온도가 $55 \sim 65^{\circ}\text{C}$ 로 변함에 따라 운전전류는 17.2~18.3 A 가 인가되었고, 이는 총 전력량 10,176~10,827 W 급으로 10 kW 급 플라즈마 보일러로서 방전상태가 양호한 것으로 확인되었다.

표 2 Ti+Ir 코팅 히터코어 10 kW 시제품 누설전압 시험결과

번호	중심경 mm	인가전압 V	인가전류 A	순환온도 ℃	누설전압 V	비 고
1	49.9	382	12.8	60.3	0.0	N상 유
2	47.9	382	14.7	60.6	0.2	
3	45.9	382	16.5	60.8	0.2	
4	43.9	382	18.3	61.0	0.3	
5	41.9	382	20.1	62.2	1	
6	39.9	382	22.1	62.5	1.4	
7	37.9	382	24.3	63.1	1.8	
8	35.9	382	26.8	63.6	5.9	
9	33.9	382	30 over	63.9	20 over	
10	43.9	382	17.9	62.2	58.3	N상 무

라. 30kW 급 플라즈마 보일러 시제품 및 기초성능 시험

플라즈마 보일러의 기초성능을 산출하기 위하여 1000 L 의 순환수를 유량 24.3~27.7 L/min 으로 유지한 상태에서 플라즈마 보일러 출수온도 약 100℃ 까지 상승시킬 경우 입출수 온도, 유량, 소비전력, 투입열량, 방출열량 및 성능계수를 측정하였다.

다음의 표 3은 물탱크의 최초온도 약 40℃ 에서 70℃ 까지 상승될 때 각 전극봉 재질별 성능 인자를 5분마다 측정하여 기록한 데이터와 그 측정치로 계산된 투입열량, 발열량 및 성능계수 결과이다.

표 3 30 kW 급 플라즈마 보일러 기초성능 시험결과

Core : Ti+Ir coating

date 2021-12-22

time	보일러 in(℃)	보일러 out(℃)	순환수 out(℃)	순환수 온도차 ΔT(℃)	Q (l/min)	input (kW)	input kcal/hr	output kcal/hr	COP
14:35	18.1	27.8	21.5	7.8	24.3	17	14,620	11,372	0.78
14:40	22.3	32.2	25.8	11	24.4	17.4	14,964	16,104	1.08
14:45	25.9	36.1	29.7	12.5	26.1	18	15,480	19,575	1.26
14:50	29.7	40.5	34.1	12.9	26.3	18.7	16,082	20,356	1.27
14:55	33.8	45.5	38.9	13.8	26.2	19.5	16,770	21,694	1.29
15:00	27.7	49.9	43	14.5	26.8	20.3	17,458	23,316	1.34
15:05	41.9	55.1	48.1	15.1	27.4	21.3	18,318	24,824	1.36
15:10	47.2	61.5	54.2	16.2	27.7	22.3	19,178	26,924	1.4
15:15	53.5	68.7	61.9	16.4	26.9	23.4	20,124	26,470	1.32
15:20	64.7	87.8	78.5	19.1	24.4	24.7	21,242	27,962	1.32
15:25	76.2	102.6	89.1	20.7	23.5	26.3	22,618	29,187	1.29

그림 13 ~ 16은 30 kW 급 플라즈마 보일러의 운전을 시작하여 60분간 측정된 순환수의 출수 온도와 온도차, 투입열량, 방출열량 및 성능계수 등의 변화를 나타내었다.

총 1,000 L 의 순환수에 별도의 부하가 연결되어 있지 않아서 순환수는 축열 상태로 실험이 진행되므로 입,출수 온도가 지속적으로 상승하였고, 이 때 5분마다 승온율은 20 ~ 55℃ 까지 4℃ 에서 5℃ 로 비례적으로 상승하였다. 이 후 입력전류의 상승과 함께 발열량이 증가하면서 승온율이 크게 증가하다가 순환수 상한 온도를 100℃ 정도로 제한하였으므로 실험 시작 55분 후 순환수 출수온도 102.6℃ 에서 실험이 종료되었다.

이러한 현상은 수중 플라즈마 방전방식의 특성 상 물 자체가 가열되므로 온도 상승에 따라 물의 저항값이 저하되고, 방전전류가 상승하므로 투입전력의 증가에 따른 발열량 증가에 기인한다.

그림 15와 그림 16에서 본 연구의 플라즈마 보일러 성능이 선행 연구과제 결과를 능가하고 있는 것을 보여 준다. 선행 연구과제에서 40 kW 급 플라즈마 보일러가 나타낸 성능계수는 최대 1.2 이었지만, 본 연구의 30 kW 급 플라즈마 보일러의 성능계수는 보일러의 운전 온도범위인 60 ~ 70℃ 에서 COP는 1.3 ~ 1.4 에 이른다. 이는 선행연구과제에서 플라즈마 히터코어 트레인이 직렬구조로서 R,S,T 상이 각각 N상과 교류 220 V 에 의한 플라즈마 방전이 발생되지만, 본 연구의 플라즈마 히터유닛은 N상 하우스링 내에 3상 히터코어가 120 도 등간격으로 배치되어 R,S,T 각 상의 히터코어 간에는 교류 380 V 방전이 이루어지고, 대면 방전 외 외측으로는 N상 하우스링과 220 V 방전이 동시에 발생하는 구조에 의한 열효율 개선으로 판단된다. 이에 주관연구 기관에서는 이러한 복합 방전 플라즈마 히터유닛 구조와 제어방법에 대한 특허를 당해 연구년도에 출원하였다. (특허출원번호 ; 10-2021-0193174)

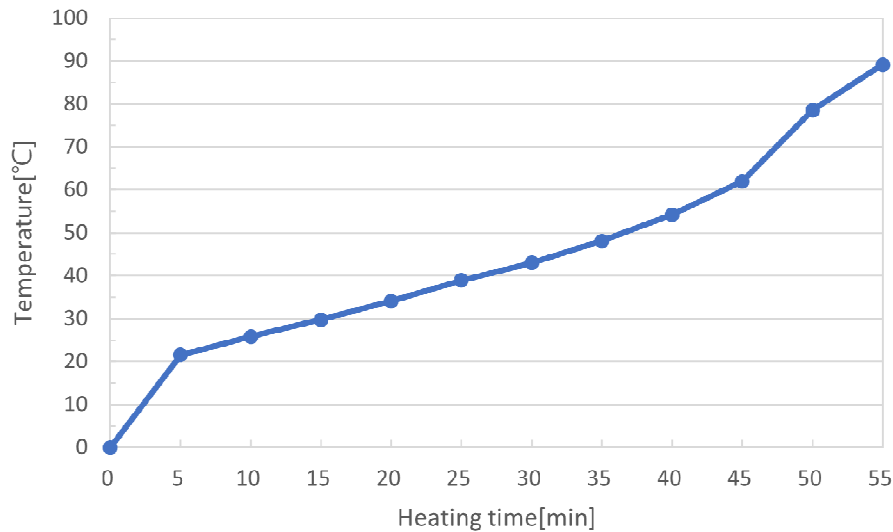


그림 13. 순환수 출수 온도

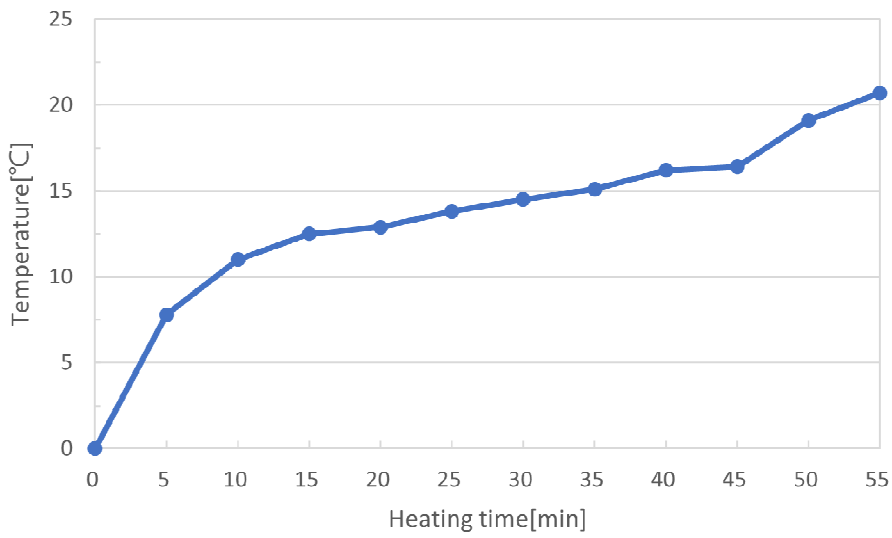


그림 14. 순환수 온도차

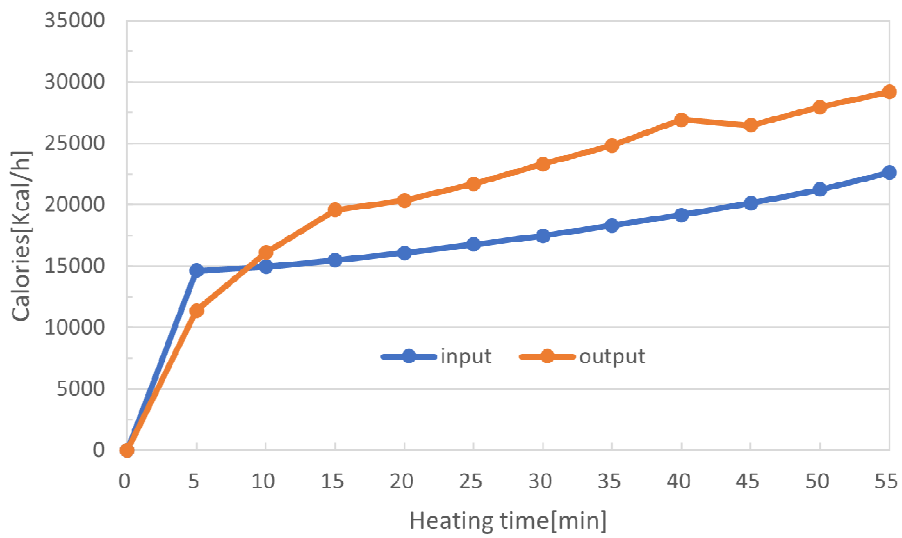


그림 15. 투입열량 및 방출열량

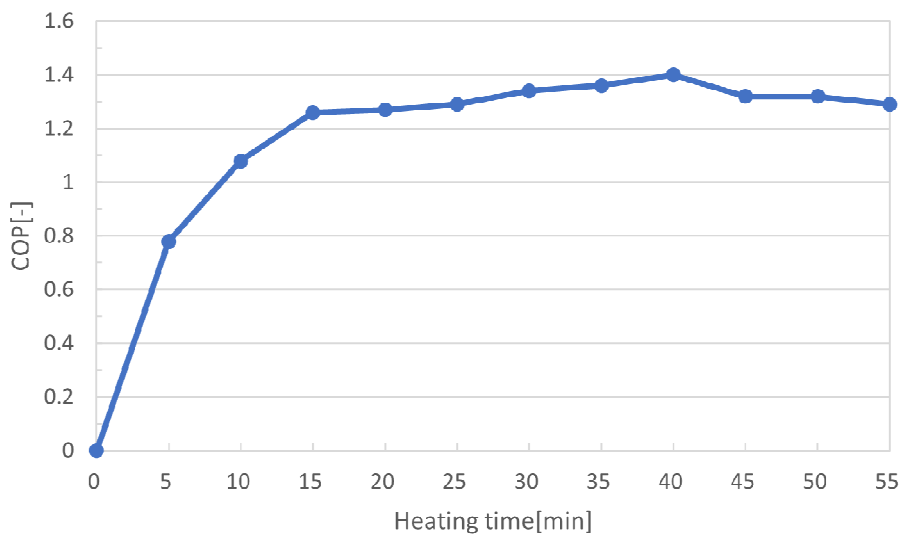


그림 16. 성능계수

<1단계-2차년도>

○ 연구개발 목표

- 주관연구기관 ((주)지에이)

수중 플라즈마 방전 방식을 이용한 고효율 플라즈마 보일러 유닛 및 플라즈마 보일러 양산 시제품 개발

□ 농가 보급형 발열량 20 kW 급 고효율 플라즈마 보일러 코어, 유닛 및 60 kW 급 플라즈마 보일러 양산 시제품 개발

- ▷ 20 kW 급 PPS히터코어 및 히터하우징 설계, mock-up 개발
 - R,S,T 삼상 + N상 혼합 구조 플라즈마 보일러 유닛 설계
 - mock-up 제작 성능시험, 개발목표 사양 부합 확인
- ▷ 20 kW 급 PPS히터코어 및 히터하우징용 사출금형 개발
 - 금형 종류 : 히터코어, 하우징 바디, 하우징 헤드, 입출수 니플
- ▷ 20 kW 급 PPS히터코어 및 히터하우징 다중도금 공정 및 지그 개발
 - PPS 사출성형품의 도금면 표면개질 후 Pd, Ru 및 Pt 등 백금족 물질의 다중도금 기술
- ▷ 20 kW 급 플라즈마 보일러 유닛 및 60 kW 급 보일러 시제품용 열가형 제어반 개발
 - HW : micom 디지털 제어 PCB 및 주전원 제어반 설계, 제작
 - SW : 목표온도, 입출수 온도, 펌프운전 등 필수 제어인자로 자동제어
- ▷ 최종 시제품 설계 및 제작 : 상기 항목별 개발목표 사양 참조

□ 농가 보급형 발열량 60 kW 급 플라즈마 보일러 양산 시제품 기초 성능평가

- ▷ 플라즈마 보일러 양산 시제품의 개발목표 사양에 대한 기초 성능평가
 - 입수온도 및 출수온도에 따른 발열량 평가
 - 연속 열효율 평가
 - 출수온도의 편차 평가

○ 연구개발 수행과정 및 내용

1. 재료 및 방법

가. Ti+Ir 코팅 히터코어 20kW 플라즈마 보일러 히터코어 시제품

그림 1과 그림 2는 2차년도 연구목표인 20 kW 급 플라즈마 보일러 히터코어 시제품 3종을 설계 제작한 것을 나타낸 것이다. 또한 그림 3과 그림 4와 같이 히터코어를 조합하여 히터유닛을 제작하였다.

히터코어 기초재료는 티타늄 grade 2 (Ti Gr2), 표면의 이리듐(Ir) 코팅은 5 μm 두께로 실시하였다. 히터코어의 설계인자는 방전면적으로서 히터코어 외경을 결정하면 코어길이와 히터코어 배치에 따른 N상 내경이 결정된다. 본 연구에서는 히터코어의 방전면적을 동일하게 하되 경장비(diameter-length ratio)가 발열성능에 미치는 효과를 찾기 위하여 코어 직경은 10 kW 와 동일한 $\phi 19$ 와 $\phi 25$ 두 종류로 설계하였으며, 방전면적은 10 kW 히터코어 대비 약 135% 로 설계하여 $\phi 19$ 히터코어 사이즈는 $\phi 19 \times 320\text{L}$, $\phi 25$ 히터코어 사이즈는 $\phi 19 \times 239\text{L}$ 로 설계 제작하였다.

방전면적을 10 kW 히터코어 대비 135% 증가에 따라 면전류밀도는 기존 면전류밀도 0.2~0.3 A/cm^2 에서 0.3~0.44 A/cm^2 로 높아졌으며, 이는 Ti-Ir 코팅 히터코어의 수명시험 결과, Ir 코팅층 부착 강도가 충분히 강하므로 면전류밀도를 50% 정도 증가시켜도 견딜 수 있다고 판단하였다.

또한 $\phi 25$ 히터코어의 경우 그림 1 의 HEATER-20 kW (2) 와 같이 히터코어 외주면에 M25-P1.5의 나사를 성형하였으며, 이는 동일한 외경을 가진 HEATER-20 kW (3) 에 비하여 방전면적을 40% 정도 방열면적을 증가시킬 수 있도록 주름 형상으로 설계 제작하여 발열효율 변화를 확인하고자 하였다.

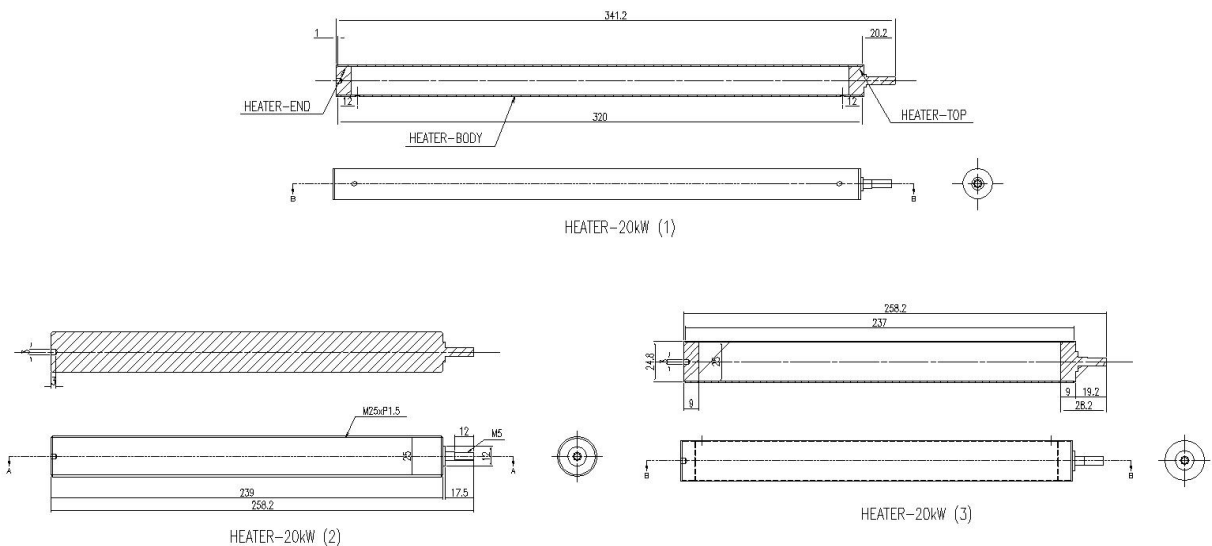


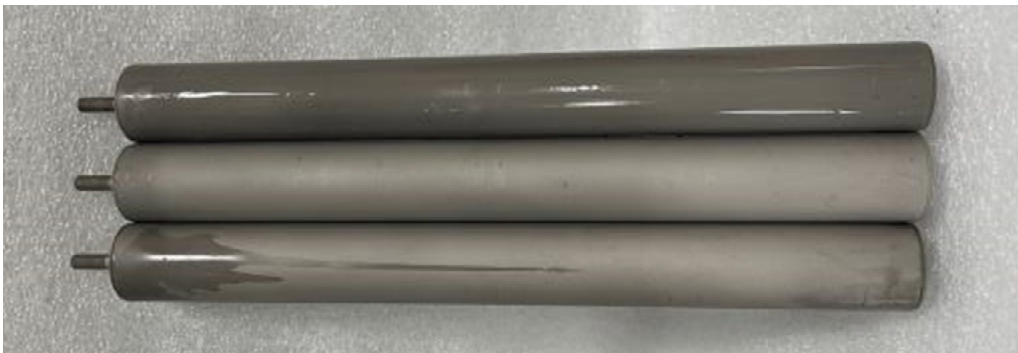
그림 1. 20 kW 플라즈마 보일러 히터코어 설계도



(a) Heater-20KW(1)

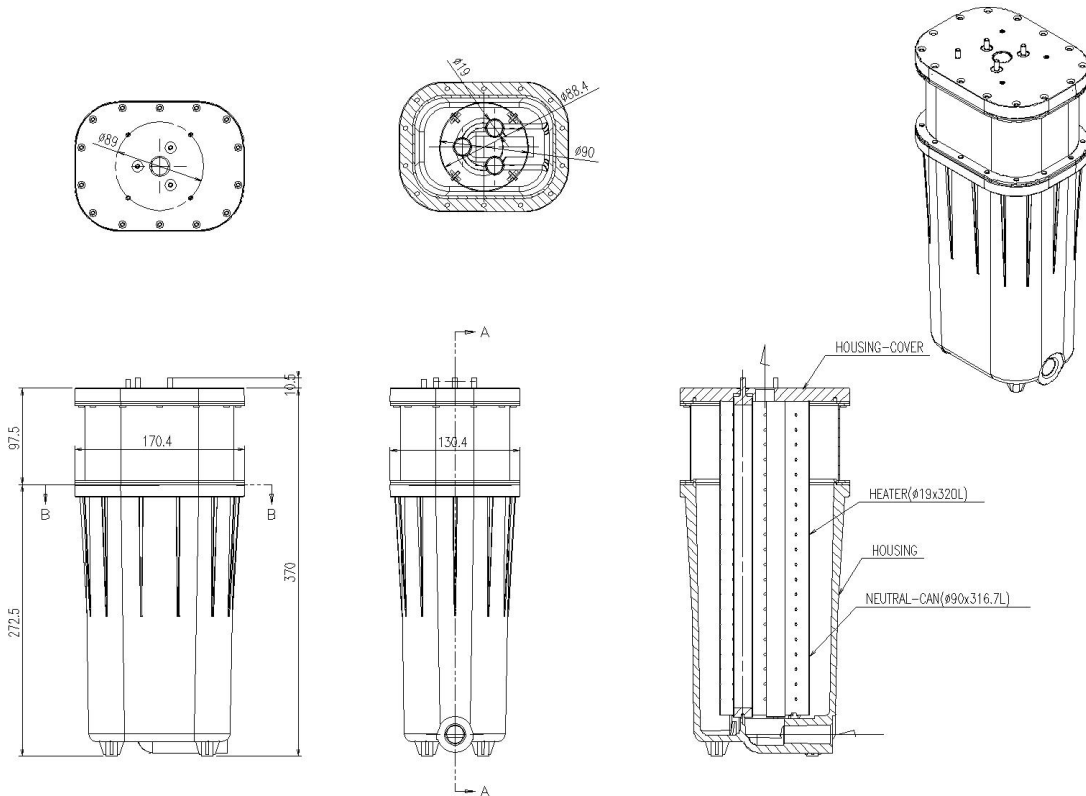


(b) Heater-20KW(2)

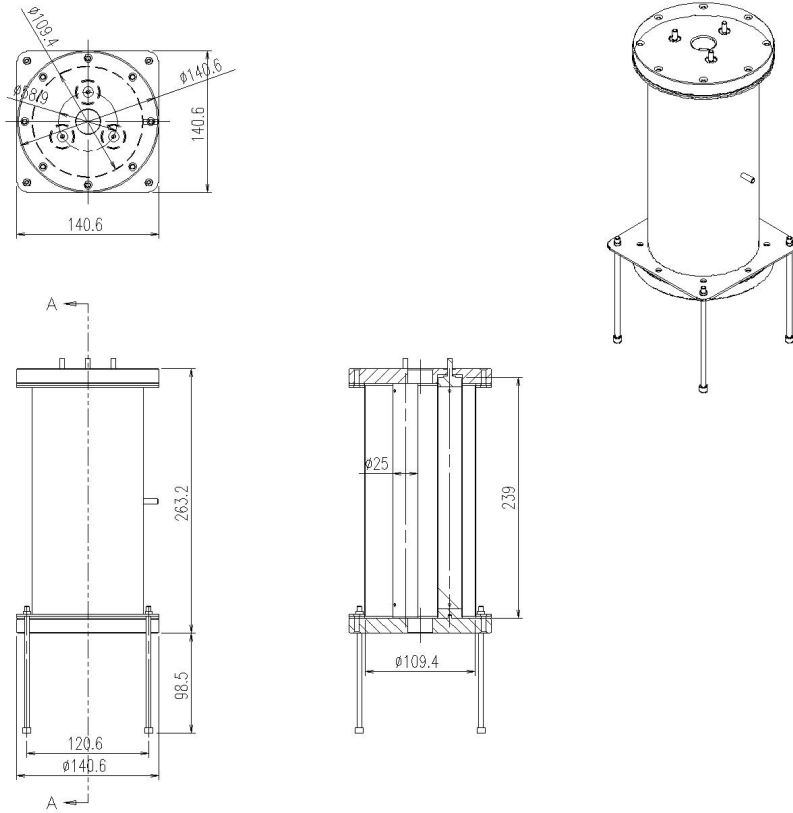


(c) Heater-20KW(3)

그림 2. 20 kW 플라즈마 보일러 히터코어 시작품



(a) φ19*320L 히터코어 적용 플라즈마 보일러 히터유닛 설계도



(b) $\phi 25 \times 239$ L 히터코어 적용 플라즈마 보일러 히터유닛 설계
 그림 3. 20 kW 급 플라즈마 보일러 히터유닛 시제품 설계도



(a) $\phi 19 \times 320$ L 히터 유닛



(b) $\phi 25 \times 239$ L 히터 유닛

그림 4. 20 kW 급 플라즈마 보일러 히터 유닛 시제품 사진

나. 20 kW 플라즈마 보일러 유닛 시제품 기초 성능시험장치

플라즈마 보일러 시제품의 발열량, 소비전력 및 성능계수(에너지효율) 등을 정밀하게 측정하기 위하여 그림 5와 그림 6과 같은 기초성능 시험장치를 설계 제작하였다.

본 장치는 1차년도 30 kW 급 플라즈마 보일러의 기초성능 시험장치를 개선한 것으로 각 실험조건을 짧은 시간에 수행하기 위하여 난방수 탱크 용량을 1 ton 에서 200 L 로 축소하였으며, 발열량 측정 시 가장 참값에 민감한 난방수 유량을 정확히 측정하기 위하여 기존의 초음파 유량계를 아날로그 방식 플로트 유량계 (Z4005, Flowtech, China)로 교체하였다. 교체된 플로트 유량계는 매 실험 로트 전에 표시치와 실제 유량을 비교하여 유량 참값을 구하였다.

또한 30 kW 급 플라즈마 보일러 시제품과 난방수 탱크 사이에 50,000 kcal/hr 급 판형 열교환기를 설치하여 플라즈마 보일러 가온수 순환유로와 난방수 탱크의 난방수 순환유로 간 효율적인 열교환이 이루어지도록 하였으며, 가온수 유로 상에 터빈유량계 (F2S-E, Flstronic, Korea) 를 별도로 설치하여 가온순환수 유량과 난방수 유량을 독립적으로 20 ~ 30 L/min 로 조절하였다.

플라즈마 보일러의 발열량 등 기초성능을 산출하기 위하여 200 L 의 가온 순환수 및 난방 순환수 유량을 20 ~ 30 L/min 로 유지한 상태에서 가온 순환수의 열교환기 입출수 온도와 난방 순환수의 입출수 온도를 측정하고, 플라즈마 보일러로 인가되는 소비전력을 측정함으로써 투입열량, 방출열량 및 성능계수를 계산하였다.

플라즈마 보일러의 소비전력량 측정은 1차년도 기초성능 시험장치의 구성과 같은 3상 유도전력측정기 (HIOKI 3169-20, HIOKI, Japan)를 사용하였다. 시험장치가 정상 가동 후 매 5분마다 각 측정항목을 기록하였으며, 측정된 유량과 입,출수 온도 데이터를 이용하여 전술한 바와 같이 식 (1)과 (2)로부터 플라즈마 보일러의 발열량과 열효율을 산출하였다.

$$\text{발열량}(Kcal/h) = \text{유량}(L/min) \times \text{유체밀도}(Kg/m^3) \times \text{유체비열}(Kcal/Kg \cdot ^\circ C) \times \text{난방수 온도차}(^\circ C) \quad (1)$$

$$COP = \frac{\text{발열량}(Kcal/h)}{\text{소비전력량}(KW) \times 860(Kcal/KW)} \quad (2)$$

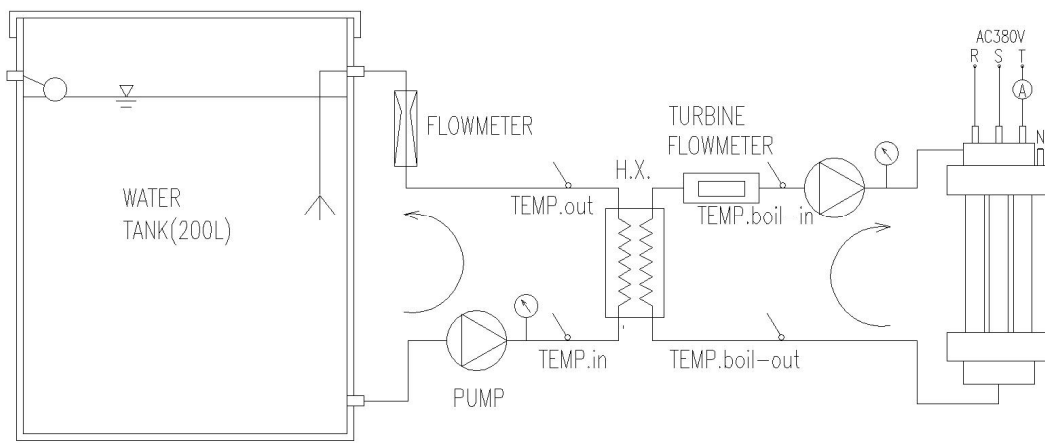


그림 5. 20 kW 급 플라즈마 보일러 히터 유닛 기초성능시험 장치 구성도



그림 6. 20 kW 급 플라즈마 보일러 히터 유닛 기초성능 시험 장치

2. 결과 및 고찰

가. 전해수 농도에 따른 10 kW 급 플라즈마 보일러 유닛 기초성능 평가

20 kW 급 플라즈마 보일러 유닛을 제작하기 위하여 기초 성능 평가의 일환으로 10 kW 급 유닛을 이용하여 전해수 농도에 따라 전류값과 온도변화를 측정하였다.

보일러 유닛에 사용하기 위한 전해수 농도는 증류수에 헥사메탄인산염 희석 후 TDS 측정기를 이용하여 전해수에 용해된 인산염의 농도를 120 ~ 190 ppm 으로 조절하여 보일러 유닛에 공급한 후 실험을 진행하였다.

다음 표 1 ~ 8은 전해수의 농도가 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190 ppm 단위로 변화시키면서 보일러를 가동하였을 때 물탱크의 최초온도에서 최종온도까지 상승될 때 각 성능인자를 5분마다 측정하여 기록한 데이터와 측정치로 계산된 투입열량 및 방출열량, 성능계수 결과이다.

1) 급탕온도 변화

그림 7은 플라즈마 보일러 전해수 농도가 120 ppm ~ 190 ppm 까지 10 ppm 씩 증가시킬 경우 급탕온도 변화를 나타낸 것이다.

그림 7에서 보는 바와 같이 플라즈마 보일러 전해수 농도가 높은 경우 설정온도인 $50 \pm 1^\circ\text{C}$ 이상 승온시키는데 걸리는 시간이 단축되는 것으로 나타났다.

급탕온도 승온시간은 전해수 농도가 120 ~ 190 ppm에서 각각 170분, 115분, 130분, 105분, 105분, 120분, 110분 및 110분이 소요된 것으로 나타났다.

이와 같이 플라즈마 보일러 전해수 농도가 높을수록 급탕온도의 승온 시간이 짧아지는 이유는 전해수 농도가 높을수록 전기전도도가 높아져 방전전류가 상승하기 때문에 짧은 시간에 물의 가열이 가능한 것으로 판단된다.

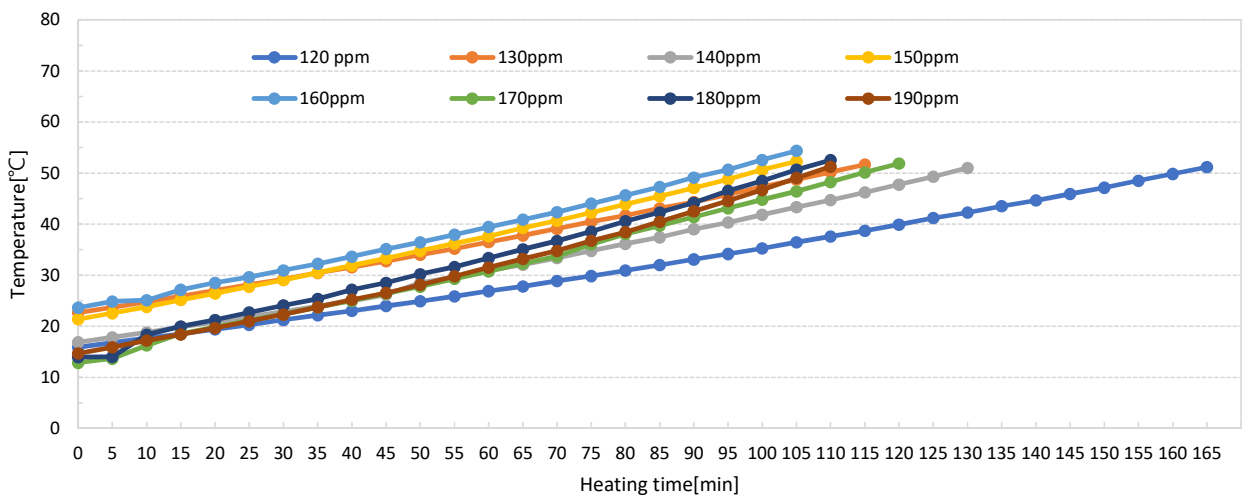


그림 7. 플라즈마 보일러 전해수 농도에 따른 급탕 온도 변화

2) 투입 및 방출열량 변화

그림 8에 플라즈마 보일러 전해수 농도에 따른 투입열량과 방출열량 차이를 나타낸 것이다.

그림 8에 나타낸 바와 같이 플라즈마 보일러 전해수 농도가 높을수록 투입된 열량 대비 방출된 열량이 낮은 경향을 나타내었으나 플라즈마 보일러 전해수 농도가 190 ppm 의 경우에는 투입열량 대비 방출열량이 높아 플라즈마 방전효과 높은 것으로 나타났다.

전해수 농도에 따른 투입열량 대비 방출열량은 120 ~ 190 ppm 에서 각각 -735, -1048, 108, 분, -1054, -1252, -1687, -1850 및 1183 Kcal/h 로 190 ppm 에서 다른 전해수 농도 조건보다 투입되는 열량 대비 방출된 열량이 높은 것으로 나타났다.

이와 같이 플라즈마 보일러 전해수 농도가 190 ppm 에서 열효율이 좋은 이유는 전해수 농도가 높을수록 전기전도도가 높아져 가열효율이 높은 것으로 판단되며, 향후 20 KW 급 보일러 유닛 제작시 적정 전해수 농도를 통한 가열효율이 높은 전해수 농도 조건을 구명해야 할 것으로 판단된다.

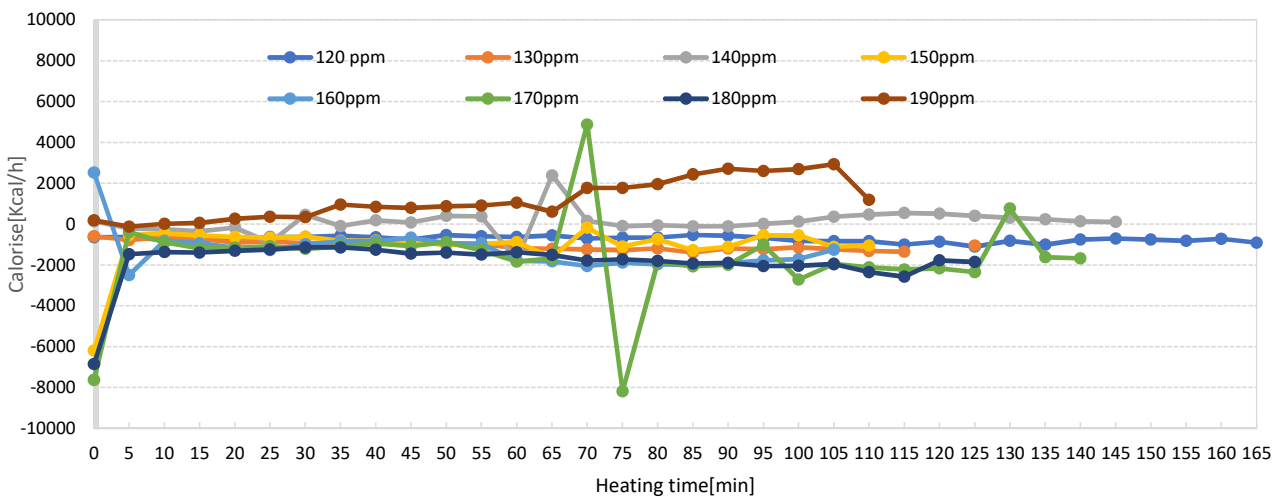


그림 8. 플라즈마 보일러 전해수 농도에 따른 투입 및 방출열량 변화

3) 에너지 소비량 변화

플라즈마 보일러 전해수 농도에 따른 소비전력량 변화를 그림 9에 나타내었다.

그림 9에서 보듯이 플라즈마 보일러 전해수 농도별 소비전력량은 전해수 농도가 증가할수록 높은 경향을 나타내었으나 플라즈마 보일러 전해수 농도가 190 ppm 의 경우에는 다른 조건과 비교하여 소비전력량이 가장 낮은 것으로 나타났다.

전해수 농도에 따른 투입열량 대비 방출열량은 120 ~ 180 ppm 에서 17.08 ~ 22.89 kW/h 로 나타났다. 전해수 농도 190 ppm 에서는 16.74 kW/h 로 다른 전해수 농도 조건보다 소비전력량이 가장 낮게 나타났다.

이와 같이 플라즈마 보일러 전해수 농도가 190 ppm 에서 소비전력량이 가장 낮게 소비된 이유는 전술한 투입열량 대비 방출열량이 다른 조건보다 가장 높았기 때문으로 판단된다.

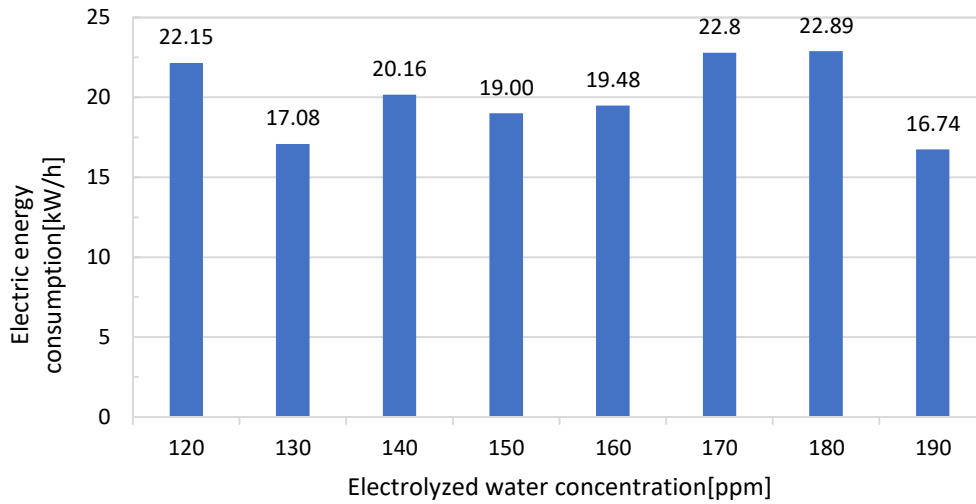


그림 9. 플라즈마 보일러 전해수 농도에 따른 소비전력량 비교

4) 성능계수 변화

그림 10는 플라즈마 보일러 전해수 농도에 따른 COP 값을 나타낸 것이다.

그림 10에서 나타낸 바와 같이 플라즈마 보일러 전해수 농도별 COP 값은 180 ppm 에서 가장 낮은 것으로 나타났고, 190 ppm 에서 가장 높게 나타났다.

전해수 농도에 따른 COP 값은 120 ~ 180 ppm 에서 0.82 ~ 0.99 로 나타났고, 190 ppm 에서는 1.13 으로 나타나 다른 전해수 농도 조건보다 약 13% 이상 높은 것으로 나타났다.

이것은 열교환기의 열교환 효율까지 포함한 COP 값으로 실제 플라즈마 보일러 성능만을 고려할 경우 COP 값은 더 높아질 것으로 판단된다.

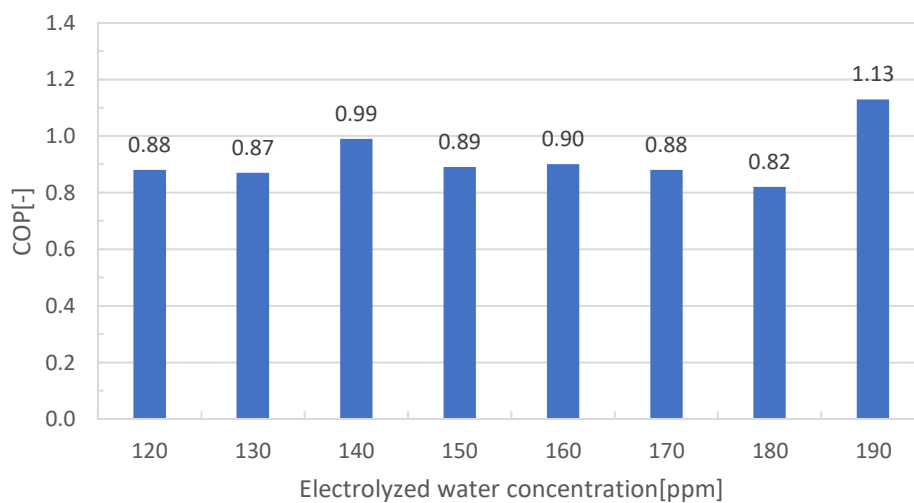


그림 10. 플라즈마 보일러 전해수 농도에 따른 COP 비교

표 1 전해수 농도 120 ppm에서 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

Time	T out (°C)	T in (°C)	ΔT (°C)	Q (l/min)	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
14:02	0	16.79	16.79	24.56	0.00	0	0.00	0.00
14:07	15.89	18.7	2.81	24.27	0.89	9184.80	4092.25	0.45
14:12	16.77	19.63	2.86	23.96	1.35	4747.20	4110.69	0.87
14:17	17.67	20.51	2.84	23.85	1.82	4850.40	4064.24	0.84
14:22	18.48	21.41	2.93	23.89	2.30	4953.60	4200.51	0.85
14:27	19.39	22.38	2.99	24.22	2.79	5056.80	4344.52	0.86
14:32	20.29	23.37	3.08	24.51	3.29	5160.00	4530.05	0.88
14:37	21.21	24.38	3.17	24.88	3.81	5366.40	4732.22	0.88
14:42	22.15	25.34	3.19	25.07	4.33	5366.40	4797.62	0.89
14:47	23.01	26.27	3.26	25.21	4.87	5572.80	4930.60	0.88
14:52	23.97	27.27	3.30	25.34	5.43	5779.20	5017.97	0.87
14:57	24.89	28.32	3.43	25.45	5.99	5779.20	5237.34	0.91
15:02	25.84	29.34	3.50	25.70	6.57	5985.60	5396.89	0.90
15:07	26.89	30.41	3.52	25.84	7.16	6088.80	5456.98	0.90
15:12	27.82	31.43	3.61	26.06	7.76	6192.00	5643.88	0.91
15:17	28.86	32.47	3.61	26.30	8.38	6398.40	5696.72	0.89
15:22	29.85	33.59	3.74	26.46	9.02	6604.80	5938.59	0.90
15:27	30.92	34.71	3.79	26.61	9.67	6708.00	6051.95	0.90
15:32	31.99	35.92	3.93	26.67	10.33	6811.20	6288.71	0.92
15:37	33.1	37.07	3.97	26.66	11.00	6914.40	6349.39	0.92
15:42	34.18	38.22	4.04	26.62	11.69	7120.80	6452.04	0.91
15:47	35.22	39.3	4.08	26.58	12.40	7327.20	6506.63	0.89
15:52	36.43	40.57	4.14	26.53	13.12	7430.40	6590.52	0.89
15:57	37.55	41.76	4.21	26.54	13.85	7533.60	6704.55	0.89
16:02	38.71	42.98	4.27	26.72	14.61	7843.20	6845.98	0.87
16:07	39.91	44.23	4.32	26.97	15.37	7843.20	6989.51	0.89
16:12	41.18	45.52	4.34	27.09	16.16	8152.80	7053.50	0.87
16:17	42.26	46.73	4.47	27.34	16.95	8152.80	7333.01	0.90
16:22	43.53	47.98	4.45	27.88	17.77	8462.40	7444.69	0.88
16:27	44.66	49.29	4.63	28.46	18.61	8668.80	7906.32	0.91
16:32	45.91	50.65	4.74	28.71	19.47	8875.20	8165.25	0.92
16:37	47.16	51.99	4.83	28.71	20.35	9081.60	8319.48	0.92
16:42	48.49	53.43	4.94	28.57	21.25	9288.00	8468.30	0.91
16:47	49.85	54.86	5.01	28.50	22.15	9288.00	8566.33	0.92
16:52	51.17	56.24	5.07	28.22	23.07	9494.40	8584.92	0.90
16:57	52.41	57.76	5.35	27.64	24.02	9804.00	8873.13	0.91

표 2 전해수 농도 130 ppm 에서 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

Time	T out (°C)	T in (°C)	ΔT (°C)	Q (l/min)	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
9:22	0	25.08	25.08	25.01	0.00	0	0.00	0.00
9:27	22.66	26.27	3.61	25.35	0.59	6088.80	5491.25	0.90
9:32	23.7	27.36	3.66	25.55	1.21	6398.40	5610.86	0.88
9:37	24.74	28.49	3.75	25.64	1.83	6398.40	5769.72	0.90
9:42	25.88	29.7	3.82	25.67	2.47	6604.80	5883.45	0.89
9:47	27	30.82	3.82	25.74	3.13	6811.20	5900.53	0.87
9:52	28.09	31.99	3.90	25.90	3.80	6914.40	6061.42	0.88
9:57	29.2	33.2	4.00	26.22	4.50	7224.00	6293.38	0.87
10:02	30.44	34.49	4.05	26.29	5.21	7327.20	6387.84	0.87
10:07	31.55	35.69	4.14	26.28	5.94	7533.60	6528.61	0.87
10:12	32.73	36.96	4.23	26.37	6.67	7533.60	6691.58	0.89
10:17	34.01	38.34	4.33	26.30	7.43	7843.20	6831.45	0.87
10:22	35.19	39.6	4.41	26.28	8.20	7946.40	6953.72	0.88
10:27	36.48	40.95	4.47	26.41	9.00	8256.00	7084.46	0.86
10:32	37.77	42.27	4.50	26.51	9.81	8359.20	7158.28	0.86
10:37	39.09	43.65	4.56	26.76	10.64	8565.60	7320.41	0.85
10:42	40.48	45.08	4.60	27.17	11.49	8772.00	7497.73	0.85
10:47	41.71	46.42	4.71	27.55	12.36	8978.40	7786.43	0.87
10:52	43.12	47.86	4.74	27.78	13.26	9288.00	7900.12	0.85
10:57	44.36	49.3	4.94	28.01	14.18	9494.40	8302.15	0.87
11:02	45.76	50.8	5.04	28.38	15.13	9804.00	8581.19	0.88
11:07	47.35	52.47	5.12	28.52	16.09	9907.20	8762.46	0.88
11:12	48.69	53.97	5.28	28.39	17.08	10216.80	8993.55	0.88
11:17	50.2	55.6	5.40	28.41	18.10	10526.40	9203.66	0.87
11:22	51.68	57.24	5.56	28.09	19.14	10732.80	9372.05	0.87

표 3 전해수 농도 140 ppm 에서 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

Time	T out (°C)	T in (°C)	ΔT (°C)	Q (l/min)	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
10:21	0	18.96	18.96	27.58	0	0	0.00	0.00
10:26	16.84	20.07	3.23	27.58	1.17	12074.40	5344.10	0.44
10:31	17.82	21.12	3.30	27.09	1.71	5572.80	5364.17	0.96
10:36	18.78	22.16	3.38	26.72	2.26	5676.00	5418.90	0.95
10:41	19.86	23.33	3.47	26.60	2.83	5882.40	5537.53	0.94
10:46	20.78	24.35	3.57	26.67	3.4	5882.40	5711.81	0.97
10:51	21.83	25.48	3.65	26.96	4.06	6811.20	5905.23	0.87
10:56	22.85	26.55	3.70	27.62	4.61	5676.00	6131.38	1.08
11:01	23.93	27.76	3.83	28.32	5.25	6604.80	6507.66	0.99
11:06	24.97	28.87	3.90	29.03	5.89	6604.80	6792.91	1.03
11:11	26.15	30.11	3.96	29.43	6.56	6914.40	6993.51	1.01
11:16	28.53	32.69	4.16	29.70	7.24	7017.60	7412.73	1.06
11:21	29.63	33.91	4.28	29.58	7.94	7224.00	7596.35	1.05
11:26	30.88	35.25	4.37	29.50	8.86	9494.40	7734.37	0.81
11:31	32.07	36.64	4.57	29.00	9.4	5572.80	7952.91	1.43
11:36	33.34	37.99	4.65	28.67	10.16	7843.20	7999.93	1.02
11:41	34.76	39.48	4.72	28.46	10.95	8152.80	8061.22	0.99
11:46	36.15	40.99	4.84	28.59	11.76	8359.20	8301.53	0.99
11:51	37.44	42.38	4.94	28.86	12.6	8668.80	8554.00	0.99
11:56	38.97	44	5.03	29.05	13.46	8875.20	8768.59	0.99
12:01	40.32	45.43	5.11	29.66	14.34	9081.60	9093.03	1.00
12:06	41.82	47.02	5.20	30.17	15.24	9288.00	9413.09	1.01
12:11	43.31	48.72	5.41	31.02	16.18	9700.80	10068.92	1.04
12:16	44.7	50.18	5.48	31.55	17.14	9907.20	10372.30	1.05
12:21	46.22	51.8	5.58	31.80	18.12	10113.60	10648.09	1.05
12:26	47.76	53.49	5.73	31.82	19.13	10423.20	10938.14	1.05
12:31	49.29	55.07	5.78	31.80	20.16	10629.60	11028.42	1.04
12:36	50.99	56.89	5.90	31.19	21.2	10732.80	11041.04	1.03
12:41	52.4	58.45	6.05	30.79	22.26	10939.20	11175.37	1.02
12:46	53.91	60.12	6.21	30.54	23.35	11248.80	11378.01	1.01

표 4 전해수 농도 150 ppm 에서 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
15:42	0	23.96	23.96	24.45	0.00	0.00	0.00	0.00
15:47	21.38	25.46	4.08	24.88	1.19	12280.80	6090.62	0.50
15:52	22.55	26.79	4.24	25.52	1.87	7017.60	6492.19	0.93
15:57	23.79	28.14	4.35	25.90	2.57	7224.00	6760.50	0.94
16:02	25.17	29.57	4.40	26.06	3.29	7430.40	6880.84	0.93
16:07	26.44	30.93	4.49	25.99	4.03	7636.80	7002.57	0.92
16:12	27.75	32.43	4.68	25.93	4.80	7946.40	7280.32	0.92
16:17	29.03	33.8	4.77	25.97	5.58	8049.60	7432.78	0.92
16:22	30.49	35.31	4.82	26.06	6.39	8359.20	7536.38	0.90
16:27	31.85	36.8	4.95	25.81	7.21	8462.40	7667.04	0.91
16:32	33.28	38.34	5.06	25.84	8.05	8668.80	7844.70	0.90
16:37	34.75	39.81	5.06	25.89	8.91	8875.20	7860.30	0.89
16:42	36.19	41.47	5.28	25.95	9.80	9184.80	8219.88	0.89
16:47	37.64	42.97	5.33	26.29	10.70	9288.00	8408.39	0.91
16:52	39.25	44.67	5.42	26.75	11.70	10320.00	8699.00	0.84
16:57	40.66	46.23	5.57	27.26	12.60	9288.00	9110.76	0.98
17:02	42.23	47.83	5.60	27.45	13.60	10320.00	9224.53	0.89
17:07	43.89	49.62	5.73	27.89	14.60	10320.00	9589.42	0.93
17:12	45.46	51.41	5.95	28.22	15.70	11352.00	10074.63	0.89
17:17	47.1	53.15	6.05	28.19	16.80	11352.00	10232.38	0.90
17:22	48.74	55.12	6.38	28.21	17.90	11352.00	10797.94	0.95
17:27	50.66	57.03	6.37	28.26	19.00	11352.00	10802.57	0.95
17:32	52.29	58.95	6.66	28.20	20.20	12384.00	11268.14	0.91

표 5 전해수 농도 160 ppm 에서 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
16:36	0	24.42	24.42	-	0	0.00	0.00	0.00
16:41	21.67	25.7	4.03	24.53	0.33	3405.60	5931.35	1.74
16:46	22.65	25.69	3.04	25.92	1.03	7224.00	4727.81	0.65
16:51	23.79	28.12	4.33	25.86	1.76	7533.60	6718.43	0.89
16:56	25.14	29.57	4.43	25.61	2.51	7740.00	6807.14	0.88
17:01	26.33	30.82	4.49	25.55	3.29	8049.60	6883.17	0.86
17:06	27.55	32.12	4.57	25.88	4.1	8359.20	7096.30	0.85
17:11	28.82	33.6	4.78	26.44	4.93	8565.60	7582.99	0.89
17:16	30.19	35.12	4.93	27.15	5.79	8875.20	8030.97	0.90
17:21	31.65	36.62	4.97	27.66	6.67	9081.60	8248.21	0.91
17:26	32.95	38.05	5.10	27.84	7.56	9184.80	8519.04	0.93
17:31	34.52	39.66	5.14	27.78	8.48	9494.40	8567.35	0.90
17:36	35.88	41.26	5.38	27.41	9.43	9804.00	8847.95	0.90
17:41	37.36	42.78	5.42	25.26	10.4	10010.40	8214.55	0.82
17:46	38.81	44.36	5.55	25.80	11.41	10423.20	8591.40	0.82
17:51	40.44	46.09	5.65	25.91	12.46	10836.00	8783.49	0.81
17:56	42	47.9	5.90	26.16	13.54	11145.60	9260.64	0.83
18:01	43.67	49.65	5.98	26.46	14.65	11455.20	9493.85	0.83
18:06	45.41	51.62	6.21	26.75	15.81	11971.20	9967.05	0.83
18:11	46.92	53.26	6.34	27.26	17	12280.80	10369.70	0.84
18:16	48.67	55.18	6.51	27.69	18.22	12590.40	10815.71	0.86
18:21	50.49	57.22	6.73	27.96	19.48	13003.20	11290.25	0.87

표 6 전해수 농도 160 ppm 에서 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
8:25	0	12.7	12.70		0	0.00	0.00	0.00
8:30	13.4	13.55	0.15	24.53	0.76	7843.20	220.77	0.03
8:35	14.51	19.04	4.53	25.92	1.48	7430.40	7045.06	0.95
8:40	15.91	20.19	4.28	25.86	2.21	7533.60	6640.85	0.88
8:45	17.25	21.58	4.33	25.61	2.97	7843.20	6653.48	0.85
8:50	18.49	22.91	4.42	25.55	3.74	7946.40	6775.86	0.85
8:55	19.75	24.3	4.55	25.88	4.53	8152.80	7065.24	0.87
9:00	21.22	25.79	4.57	26.44	5.35	8462.40	7249.85	0.86
9:05	22.54	27.19	4.65	27.15	6.19	8668.80	7574.85	0.87
9:10	23.91	28.75	4.84	27.66	7.06	8978.40	8032.46	0.89
9:15	25.31	30.23	4.92	27.84	7.96	9288.00	8218.37	0.88
9:20	26.84	31.94	5.10	27.78	8.87	9391.20	8500.68	0.91
9:25	28.29	33.47	5.18	27.41	9.82	9804.00	8519.03	0.87
9:30	29.84	35.16	5.32	25.26	10.78	9907.20	8062.99	0.81
9:35	31.32	36.7	5.38	25.80	11.75	10010.40	8328.24	0.83
9:40	32.77	38.03	5.26	25.91	12.07	3302.40	8177.20	2.48
9:45	34.39	39.76	5.37	26.16	13.68	16615.20	8428.75	0.51
9:50	35.96	41.41	5.45	26.46	14.7	10526.40	8652.42	0.82
9:55	37.62	43.15	5.53	26.75	15.76	10939.20	8875.65	0.81
10:00	39.3	45.02	5.72	27.26	16.86	11352.00	9355.63	0.82
10:05	41.04	46.83	5.79	27.69	17.89	10629.60	9619.51	0.90
10:10	42.64	48.65	6.01	27.96	19.13	12796.80	10082.38	0.79
10:15	44.44	50.48	6.04	28.23	20.31	12177.60	10230.55	0.84
10:20	46.34	52.51	6.17	28.28	21.53	12590.40	10469.26	0.83
10:25	47.9	54.3	6.40	28.36	22.8	13106.40	10890.24	0.83
10:30	49.99	56.62	6.63	28.27	24.1	13416.00	11245.81	0.84
10:35	51.86	58.64	6.78	28.21	25.44	13828.80	11475.83	0.83
10:40	53.71	60.84	7.13	28.08	26.53	11248.80	12012.62	1.07

표 7 전해수 농도 180 ppm 에서 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

Time	T out (°C)	T in (°C)	ΔT (°C)	Q (l/min)	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
10:34	0	13.94	13.94		0	0.00	0.00	0.00
10:39	13.81	13.93	0.12	23.50	0.68	7017.60	169.20	0.02
10:44	14.76	18.9	4.14	24.42	1.41	7533.60	6065.93	0.81
10:49	16.2	20.56	4.36	24.37	2.16	7740.00	6375.19	0.82
10:54	17.48	22.03	4.55	24.40	2.94	8049.60	6661.20	0.83
10:59	18.73	23.47	4.74	24.82	3.75	8359.20	7058.81	0.84
11:04	20.22	25.04	4.82	25.33	4.58	8565.60	7325.44	0.86
11:09	21.47	26.47	5.00	25.78	5.44	8875.20	7734.00	0.87
11:14	23.12	28.28	5.16	26.00	6.33	9184.80	8049.60	0.88
11:19	24.47	29.79	5.32	26.16	7.26	9597.60	8350.27	0.87
11:24	26.07	31.53	5.46	26.13	8.23	10010.40	8560.19	0.86
11:29	27.45	33.12	5.67	26.23	9.23	10320.00	8923.45	0.86
11:34	29.18	35.06	5.88	26.19	10.27	10732.80	9239.83	0.86
11:39	30.88	36.9	6.02	26.16	11.32	10836.00	9448.99	0.87
11:44	32.48	38.61	6.13	26.22	12.4	11145.60	9643.72	0.87
11:49	34.21	40.52	6.31	26.35	13.54	11764.80	9976.11	0.85
11:54	36.2	42.71	6.51	26.76	14.72	12177.60	10452.46	0.86
11:59	37.91	44.56	6.65	27.31	15.95	12693.60	10896.69	0.86
12:04	39.73	46.56	6.83	27.54	17.23	13209.60	11285.89	0.85
12:09	41.93	48.98	7.05	27.95	18.56	13725.60	11822.85	0.86
12:14	43.77	51.01	7.24	28.29	19.95	14344.80	12289.18	0.86
12:19	45.86	53.45	7.59	28.38	21.4	14964.00	12924.25	0.86
12:24	47.68	55.57	7.89	28.36	22.89	15376.80	13425.62	0.87
12:29	50.02	58.04	8.02	28.14	24.43	15892.80	13540.97	0.85
12:31	52.16	60.62	8.46	27.95	24.86	16770.00	14187.42	0.85

표 8 전해수 농도 190 ppm 에서 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

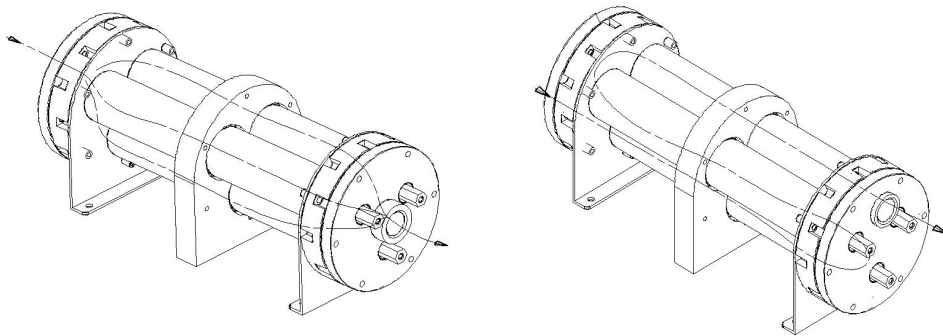
Time	T out (°C)	T in (°C)	ΔT (°C)	Q (l/min)	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
10:25	0	21.87	21.87		0	0.00	0.00	0.00
10:30	19.89	23.38	3.49	25.02	0.49	5056.80	5239.49	1.04
10:35	21.27	24.88	3.61	24.72	1.02	5469.60	5353.84	0.98
10:40	22.57	26.34	3.77	24.72	1.56	5572.80	5591.83	1.00
10:45	23.94	27.84	3.90	24.94	2.12	5779.20	5835.68	1.01
10:50	25.38	29.48	4.10	25.40	2.7	5985.60	6248.54	1.04
10:55	26.74	31.02	4.28	25.93	3.31	6295.20	6658.21	1.06
11:00	28.33	32.76	4.43	26.52	3.96	6708.00	7049.58	1.05
11:05	29.8	34.39	4.59	26.73	4.58	6398.40	7361.63	1.15
11:10	31.33	36.17	4.84	26.73	5.25	6914.40	7761.17	1.12
11:15	32.97	37.99	5.02	26.62	5.95	7224.00	8018.70	1.11
11:20	34.76	40	5.24	26.42	6.67	7430.40	8305.54	1.12
11:25	36.56	42.02	5.46	26.41	7.42	7740.00	8650.80	1.12
11:30	38.24	43.88	5.64	26.57	8.19	7946.40	8990.38	1.13
11:35	40.07	45.92	5.85	27.02	9.05	8875.20	9484.27	1.07
11:40	42.08	48.09	6.01	27.53	9.84	8152.80	9928.65	1.22
11:45	43.83	50.16	6.33	28.05	10.7	8875.20	10654.72	1.20
11:50	45.94	52.52	6.58	28.47	11.6	9288.00	11240.92	1.21
11:55	48.13	55.13	7.00	28.89	12.54	9700.80	12132.58	1.25
12:00	50.26	57.59	7.33	29.16	13.52	10113.60	12823.10	1.27
12:05	52.53	60.19	7.66	29.01	14.56	10732.80	13332.96	1.24
12:10	55.07	63.03	7.96	28.75	15.63	11042.40	13728.78	1.24
12:15	57.61	66.02	8.41	28.52	16.74	11455.20	14391.40	1.26

다. 플라즈마 히터 코어 조립 형태(직렬, 병렬형)에 따른 기초성능 평가

그림 11은 플라즈마 히터 코어 조립 형태에 따른 가열된 물의 유동 형태를 나타낸 것이다.

플라즈마 보일러 히터 코어 조립 형태에 따른 성능평가는 탱크 용량 200 L 의 순환수를 유량 35 ~ 37 L/min 으로 유지한 상태에서 설정온도 40℃ 까지 상승시키는 동안 5분 단위로 측정된 입출수 온도, 유량, 소비전력량, 투입열량 및 방출열량을 측정하여 성능계수(COP)를 산출하였다.

표 9와 10은 물탱크의 최초온도 약 21도에서 40±1℃까지 상승될 때 각 성능인자를 5분마다 측정하여 기록한 데이터와 측정치로 계산된 투입열량 및 방출열량, 성능계수 결과이다.



(a) 병렬 조립 형태

(b) 직렬 조립 형태

그림 11. 플라즈마 코어 조립 형태에 따른 가열수 유동

1) 급탕온도 변화

그림 12는 플라즈마 히터 코어의 조립 형태에 따른 급탕온도 변화를 나타낸 것이다.

그림 12에서 보는 바와 같이 플라즈마 히터코어를 직렬형태와 병렬 형태로 조립하여 가열할 경우 급탕온도는 직렬 형태의 조립 유닛이 병렬 형태의 조립 유닛보다 1℃ 정도 약간 높은 것으로 나타났으나 큰 차이는 없었다.

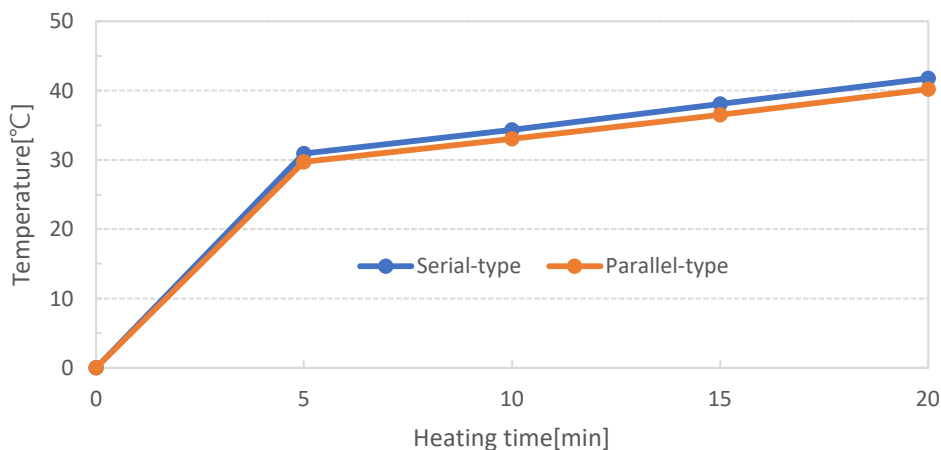


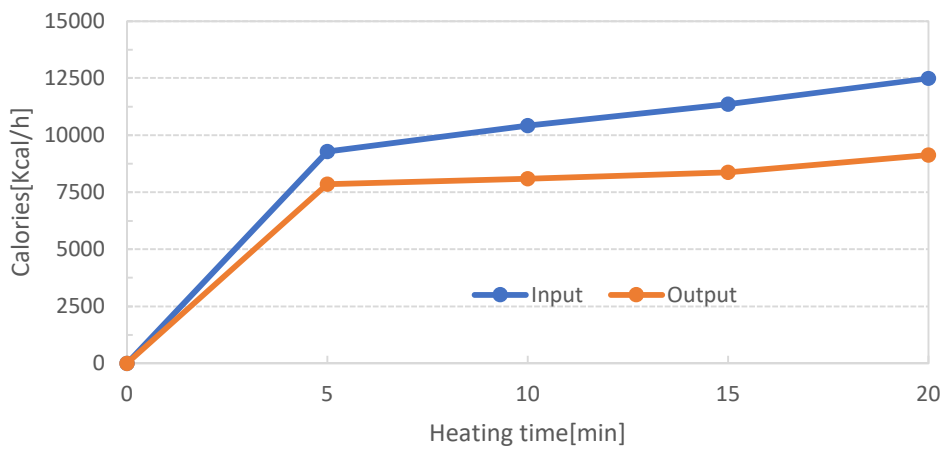
그림 12. 플라즈마 코어 조립 형태에 따른 보일러 급탕 온도 변화

2) 투입 및 방출열량 변화

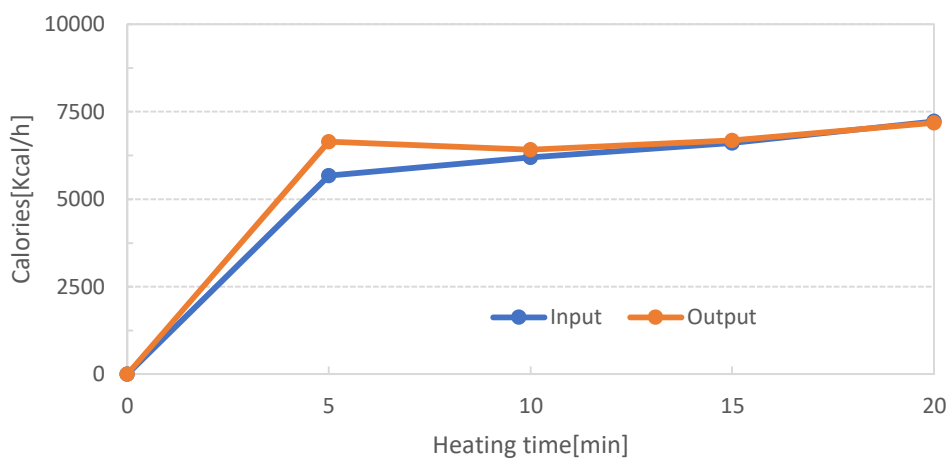
그림 13에 플라즈마 히터 코어의 조립 형태에 따른 투입 열량 대비 방출열량 변화를 나타내었다.

그림 13에 나타낸 바와 같이 플라즈마 히터코어를 직렬형태와 병렬 형태로 조립하여 가열할 경우 투입 열량 대비 방출열량은 병렬형태의 조립이 직렬 형태의 조립보다 에너지 효율이 높은 경향을 나타내었다.

투입 열량 대비 방출열량은 직렬형태의 경우 1,429 ~ 3,352 Kcal/h 정도 적게 나타났고, 병렬 조립의 경우에는 73 ~ 962 Kcal/h 정도 높게 나타나 플라즈마 히터코어의 병렬 조립 형태가 직렬보다 에너지 효율이 높은 것으로 나타났다.



(a) 직렬형



(b) 병렬형

그림 13. 플라즈마 코어 조립 형태에 따른 투입 및 방출열량

3) 에너지 소비량 변화

플라즈마 히터 코어의 조립 형태에 따른 에너지 소비량 변화를 그림 14에 나타내었다.

그림 14에 나타낸 바와 같이 플라즈마 히터코어를 직렬형태와 병렬 형태로 조립하여 가열할 경우 에너지 소비량은 병렬형태의 조립이 직렬 형태의 조립보다 낮은 경향을 나타내었다.

플라즈마 히터 코어 조립 형태에 따른 소비전력량은 직렬형태가 4.22 kW/h, 병렬형태가 2.49 kW/h로 나타나 병렬 형태가 직렬 형태보다 1.73 kW/h 낮은 것으로 나타났다.

이것은 전술한 바와 같이 투입열량 대비 방출열량이 직렬보다 병렬 형태 조립이 열효율이 높았기 때문으로 판단된다.

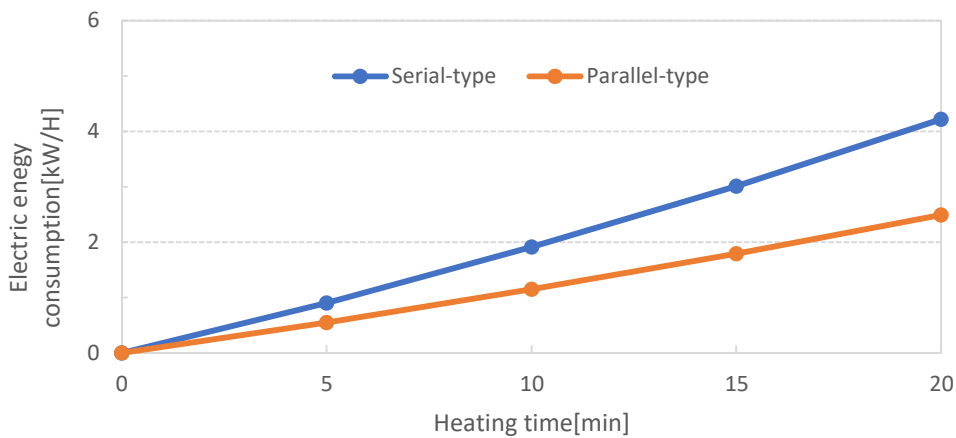


그림 14. 플라즈마 코어 조립 형태에 따른 에너지 소비량

4) 성능계수 변화

그림 15은 플라즈마 히터 코어의 조립 형태에 따른 성능계수 변화를 나타낸 것이다.

그림 15에서 보는 바와 같이 플라즈마 히터코어를 직렬형태와 병렬 형태로 조립하여 가열할 경우 성능계수는 병렬 형태의 조립 유닛이 1.0 ~ 1.2로서 직렬 형태의 조립 유닛보다 0.28 높은 것으로 나타났고, 이것은 전술한 바와 같이 병렬 형태 조립이 직렬 형태 조립보다 에너지 효율이 높았기 때문으로 판단된다.

따라서 향후 20 KW 급 플라즈마 히터 코어의 조립 형태는 병렬 형태의 조립이 바람직한 것으로 판단된다.

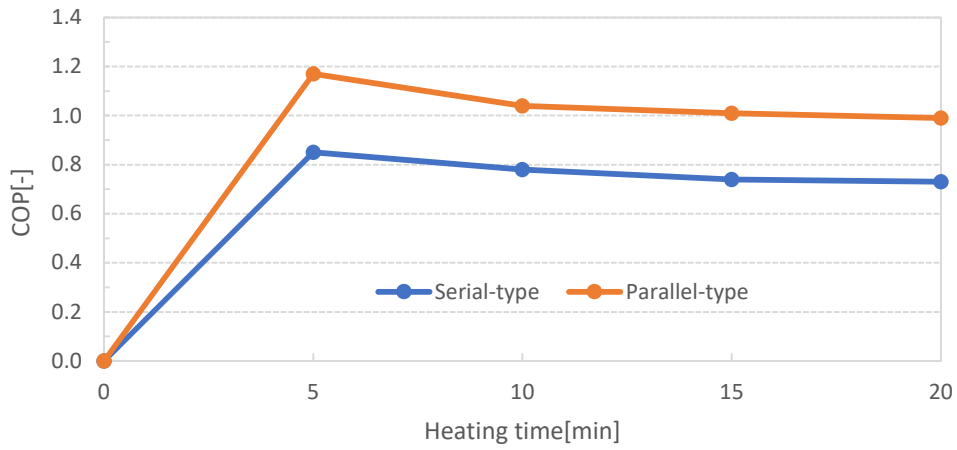


그림 15. 플라즈마 코어 조립 형태에 따른 성능계수

표 9 직렬형 유닛 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
11:48	27.8	29.22	1.42	37.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11:53	30.94	34.48	3.54	37.00	0.90	9288.00	7858.80	0.85
11:58	34.35	38.1	3.75	36.00	1.91	10423.20	8100.00	0.78
12:03	38.07	42.06	3.99	35.00	3.01	11352.00	8379.00	0.74
12:08	41.75	46.1	4.35	35.00	4.22	12487.20	9135.00	0.73

표 10 병렬형 유닛 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

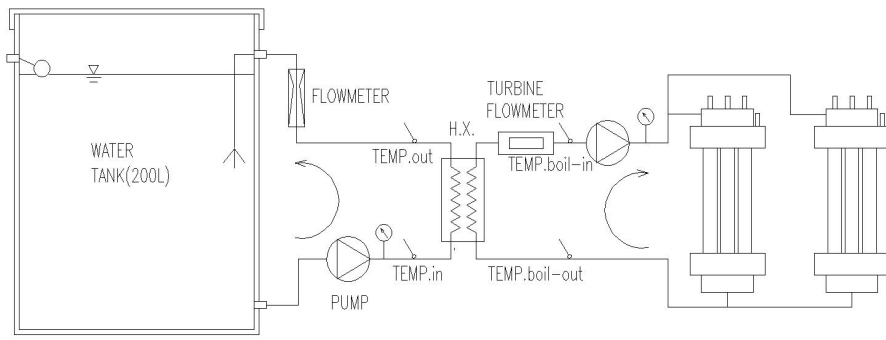
Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
11:02	26.76	27.18	0.42	37.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11:07	29.71	32.7	2.99	37.00	0.55	5676.00	6637.80	1.17
11:12	33.03	36	2.97	36.00	1.15	6192.00	6415.20	1.04
11:17	36.52	39.7	3.18	35.00	1.79	6604.80	6678.00	1.01
11:22	40.22	43.64	3.42	35.00	2.49	7224.00	7182.00	0.99

라. 플라즈마 보일러 유닛 조립형태(직렬, 병렬형)에 따른 기초성능 평가

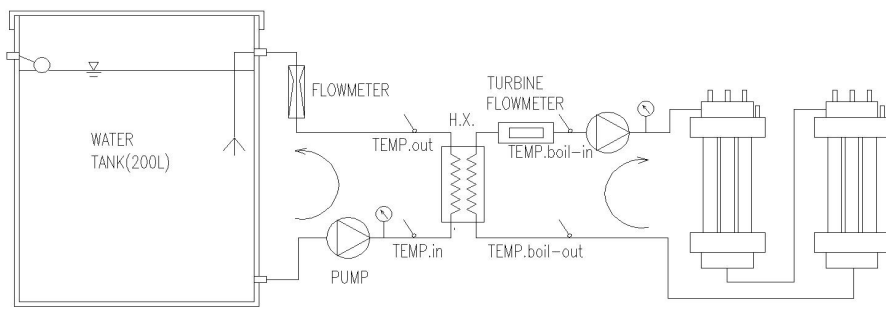
그림 16은 플라즈마 보일러 유닛 조립 형태에 따른 기초성능 시험 장치 개략도를 나타낸 것이다. 그림 16에서 보는 바와 같이 단위 유닛을 직렬과 병렬 형태로 유로를 구성하여 단위 유닛 구성에 따른 가열 특성을 분석하고자 하였다.

플라즈마 보일러 유닛 조립 형태에 따른 성능평가는 탱크 용량 200 L 의 순환수를 유량 25 ~ 30 L/min 으로 유지한 상태에서 설정온도 $50\pm 1^\circ\text{C}$ 까지 상승시키는 동안 5분 단위로 측정된 입출수 온도, 유량, 소비전력량, 투입열량 및 방출열량을 측정하여 성능계수(COP)를 산출하였고, 보일러 내부 순환수 경로는 병렬과 직렬형 2가지로 나누어 성능평가를 수행하였다.

표 11과 12는 물탱크의 최초온도 약 21도에서 $50\pm 1^\circ\text{C}$ 까지 상승될 때 각 성능인자를 5분마다 측정하여 기록한 데이터와 측정치로 계산된 투입열량 및 방출열량, 성능계수 결과이다.



(a) 병렬 형태 유로 구조



(b) 직렬 형태 유로 구조

그림 16. 플라즈마 히터 유닛 조립 형태에 따른 실험장치 개략도

1) 급탕온도 변화

그림 17은 플라즈마 히터 유닛의 조립 형태에 따른 급탕온도 변화를 나타낸 것이다.

그림 17에서 보는 바와 같이 플라즈마 히터 유닛을 직렬형태와 병렬 형태로 조립하여 가열할 경우 급탕온도는 직렬 조립 유닛이 병렬 조립 유닛보다 설정온도 50°C 에 도달하는 시간은 5분 더 빠른 것으로 나타났다.

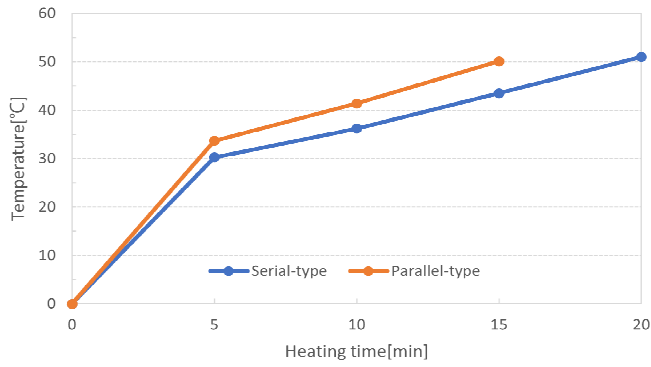


그림 17. 플라즈마 유닛 조합에 따른 급탕 온도 변화

2) 투입 및 방출열량 변화

그림 18에 플라즈마 히터 유닛의 조립 형태에 따른 투입 열량 대비 방출 열량 변화를 나타내었다.

그림 18에 나타낸 바와 같이 플라즈마 히터코어를 직렬형태와 병렬 형태로 조립하여 가열할 경우 투입 열량 대비 방출 열량은 직렬형태의 조립이 병렬형태의 조립보다 에너지 효율이 높은 경향을 나타내었다.

투입 열량 대비 방출 열량은 직렬형태의 경우 274 ~ 499 Kcal/h 정도 높게 나타났고, 병렬 조립의 경우에는 2,318 ~ 6,127 Kcal/h 정도 낮게 나타나 플라즈마 히터유닛의 직렬 조립 형태가 병렬 조립 형태보다 에너지 효율이 높은 것으로 나타났다.

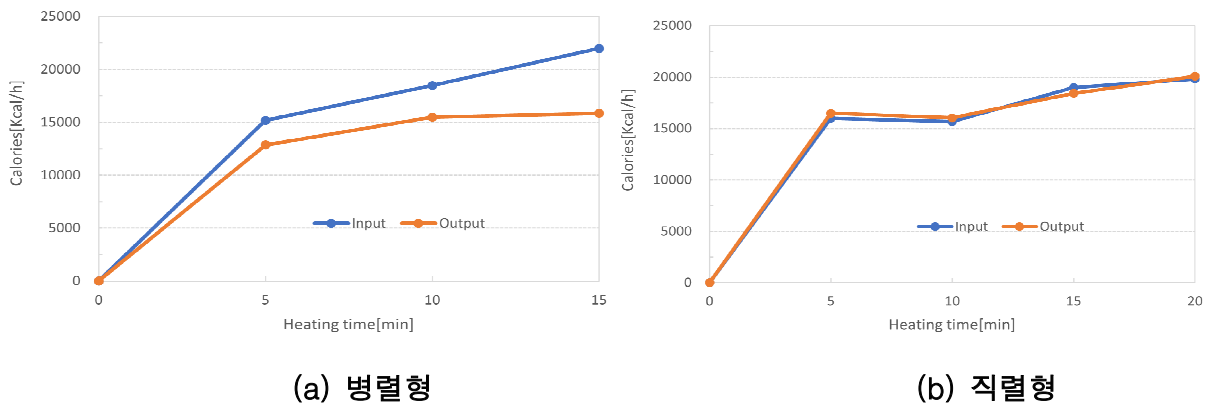


그림 18. 플라즈마 유닛 조합에 따른 투입 및 방출열량

3) 에너지 소비량 변화

플라즈마 히터 유닛의 조립 형태에 따른 에너지 소비량 변화를 그림 19에 나타내었다.

그림 19에 나타낸 바와 같이 플라즈마 히터유닛을 직렬과 병렬 형태로 조립하여 가열할 경우 에너지 소비량은 병렬형태의 조립이 직렬 형태의 조립보다 약간 낮은 경향을 보였으나 큰 차이는 없었다. 플라즈마 히터 코어 조립 형태에 따른 소비전력량은 직렬형태가 6.83 kW/h, 병렬 형태가 5.39 kW/h로 나타나 병렬 형태가 직렬 형태보다 1.44 kW/h 낮은 것으로 나타났다. 그러나

전술한 투입 열량 대비 방출열량에서 보듯이 투입된 열량이 물을 가열하는데 소비되는 열효율은 병렬보다 직렬이 더 우수한 것으로 판단된다.

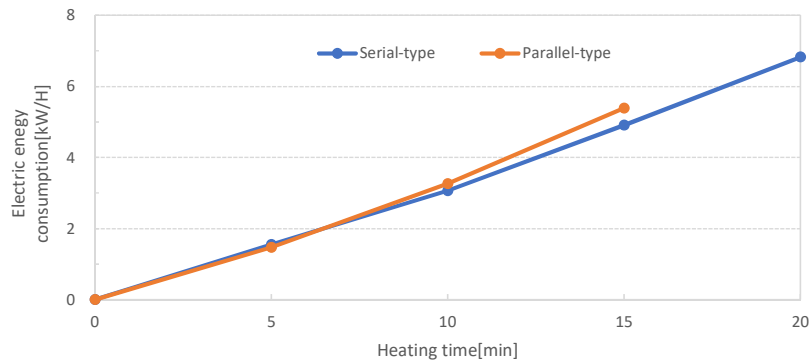


그림 19. 플라즈마 유닛 조합에 따른 에너지 소비량

4) 성능계수 변화

그림 20은 플라즈마 히터 유닛의 조립 형태에 따른 성능계수 변화를 나타낸 것이다.

그림 20에서 보는 바와 같이 플라즈마 히터코어를 조립 형태에 따른 성능계수는 직렬 형태의 조립 유닛이 병렬 형태의 조립 유닛보다 높은 경향을 나타내었다.

직렬 형태의 유닛 조립의 성능계수는 가열 시간 동안 0.97 ~ 1.03으로 나타났고, 병렬 조립의 경우에는 0.72 ~ 0.85로 나타나 직렬이 병렬보다 0.18 ~ 0.25 높게 나타났다.

이것은 전술한 바와 같이 직렬 형태 조립이 병렬 형태 조립보다 에너지 효율이 높았기 때문으로 판단된다.

따라서 향후 20 kW 급 플라즈마 히터 유닛의 조립 형태는 직렬 형태의 조립이 바람직한 것으로 판단된다.

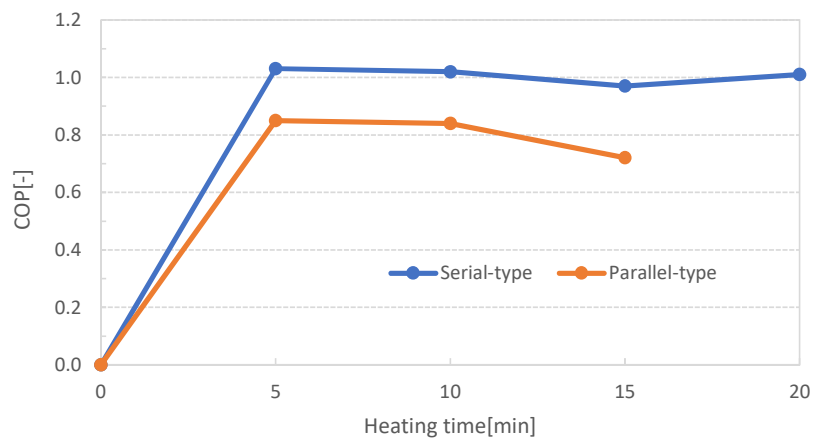


그림 20. 플라즈마 유닛 조합에 따른 성능계수

표 11 순환수 유로 직렬형 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
11:02	23.1	23.54	0.44	29.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11:07	30.25	39.73	9.48	29.00	1.55	15996.00	16495.20	1.03
11:12	36.21	45.43	9.22	29.00	3.07	15686.40	16042.80	1.02
11:17	43.51	54.1	10.59	29.00	4.91	18988.80	18426.60	0.97
11:22	51.03	62.19	11.16	30.00	6.83	19814.40	20088.00	1.01

표 12 순환수 유로 병렬형 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
17:05	27.2	27.43	0.23	30.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17:10	33.68	40.82	7.14	30.00	1.47	15170.40	12852.00	0.85
17:15	41.36	51.68	10.32	25.00	3.26	18472.80	15480.00	0.84
17:20	50.14	60.71	10.57	25.00	5.39	21981.60	15855.00	0.72

마. 20 kW 급 플라즈마 보일러 유닛 기초성능 평가

20 kW 급 플라즈마 보일러 유닛 기초성능 평가는 히터코어 방전부 크기가 각각 $\phi 19 \times 340L$, $\phi 25 \times 258L$ 으로 수행하였다. 또한 전해수 농도를 250, 300, 350, 400 ppm 으로 조절하여 성능 평가를 수행하였다.

20 kW 급 플라즈마 보일러 히터코어의 기초성능 실험은 200 L 의 물을 유량 27.85 L/min 으로 유지한 상태에서 설정온도 55°C 까지 상승시킬 경우 입출수 온도, 유량, 소비전력, 투입열량, 방출열량 및 성능계수를 측정하였다.

표 13~16은 히터코어 크기 $\phi 19 \times 340L$, $\phi 25 \times 258L$ 에 대한 실험결과를 나타낸 것이다.

1) 급탕온도 변화

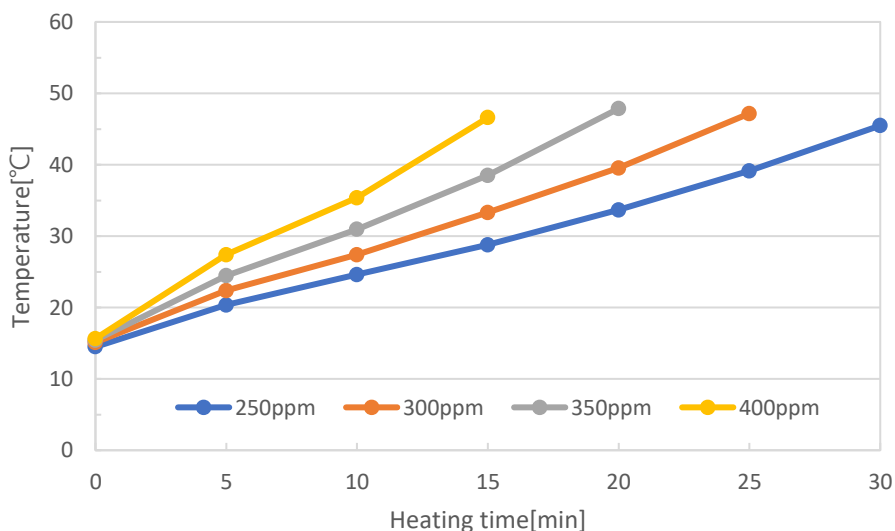
그림 21은 $\phi 19 \times 320L$ 과 $\phi 25 \times 258L$ 크기의 히터코어를 사용하고, 250 ~ 400 ppm 까지 50 ppm 단위로 전해수 농도를 변화시켜 플라즈마 보일러를 운전하여 목표온도에 도달하였을 때 급탕온도 변화를 나타낸 것이다.

그림 21에서 보는 바와 같이 급탕온도는 전해수 농도가 높을수록 설정온도 도달시간이 짧아 빠르게 가열되는 경향을 나타내었다.

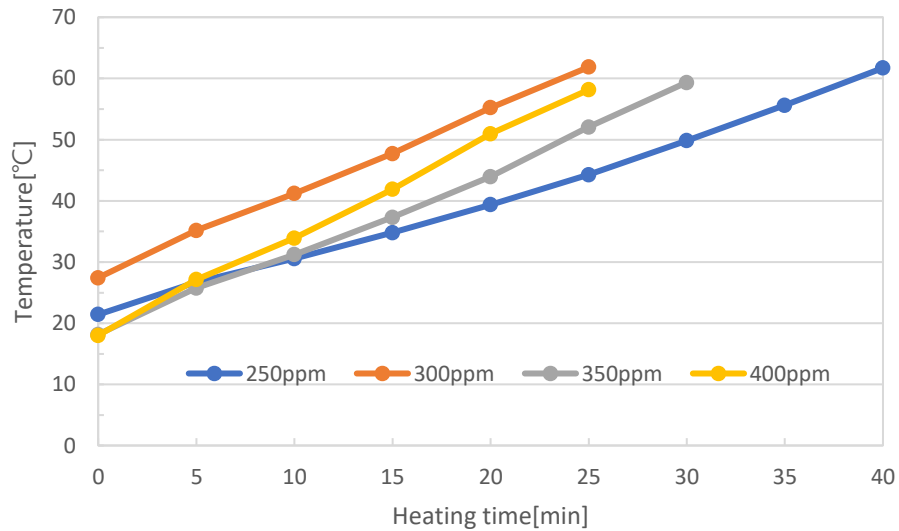
그림 21(a)에서 히터코어 크기 $\phi 19 \times 320L$ 에 전해수 농도에 따라 급탕온도 $47 \pm 2^\circ C$ 까지 도달하는데 소요된 시간은 250 ~ 400 ppm 에서 각각 30, 25, 20 및 15분 소요되는 것으로 나타나 전해수 농도 400 ppm 이 다른 조건보다 급속 가열이 가능한 것으로 나타났다.

그림 21(b)에서 히터코어 크기 $\phi 25 \times 258L$ 에 전해수 농도별 급탕온도 $60 \pm 2^\circ C$ 까지 도달하는데 소요된 시간은 250 ~ 400 ppm 에서 각각 40, 30, 22 및 25분 소요되는 것으로 나타나 전해수 농도 300 ppm 과 400 ppm 조건이 다른 조건보다 급속 가열이 가능한 것으로 나타났다.

이것은 전술한 바와 같이 전해수의 농도가 높아질수록 히터 내부 순환수의 전기전도도가 상승하게 되면서 방전 전류가 증가하기 때문으로 판단된다.



(a) 히터코어 크기 $\phi 19 \times 320L$



(b) 히터코어 크기 $\phi 25 \times 258L$

그림 21. 히터코어 크기 및 전해수 농도별 급탕온도 변화

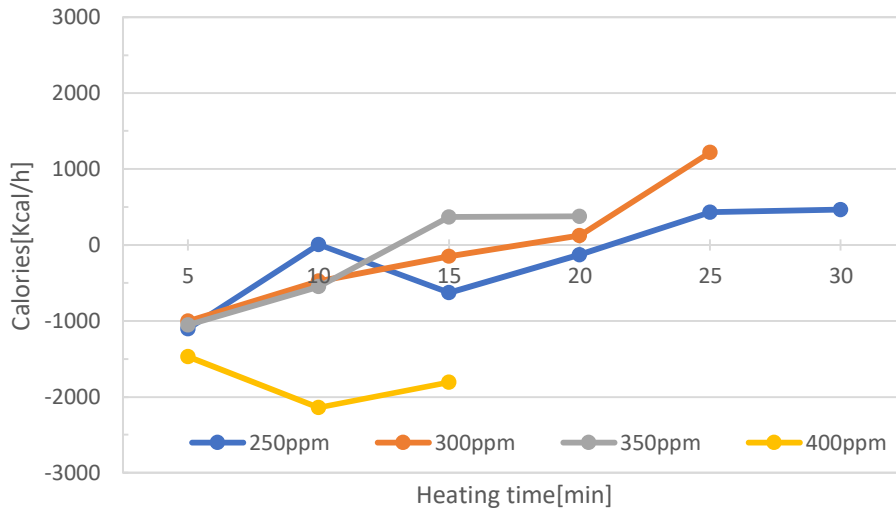
2) 투입 및 방출열량 변화

그림 22에 플라즈마 히터 코어 크기와 전해수 농도에 따른 투입열량 대비 방출열량 변화를 나타내었다.

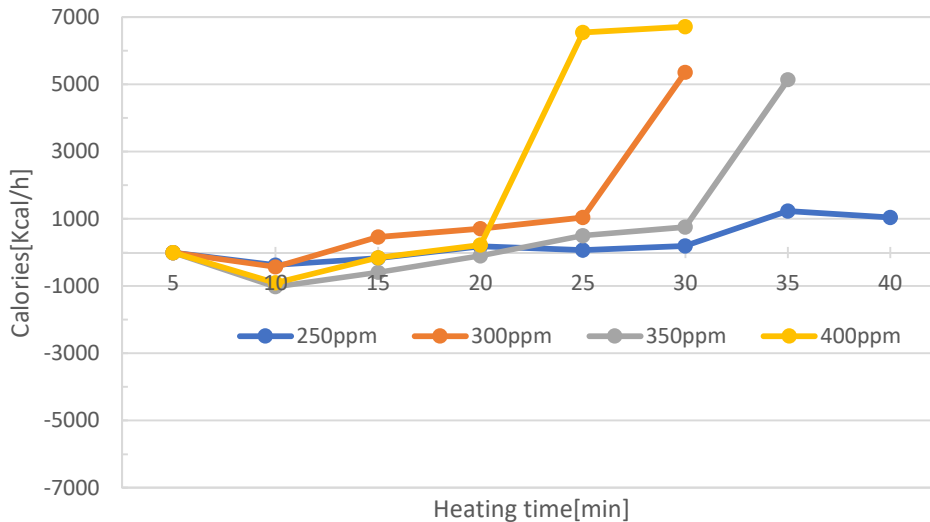
그림 22(a)에 나타낸 바와 같이 히터 코어 크기 $\phi 19 \times 320L$ 의 전해수 농도에 따른 투입 열량 대비 방출열량은 250 ~ 300 ppm 에서는 유사한 경향을 보였고, 전해수 농도 400 ppm 투입 열량 대비 방출열량이 가장 높게 나타나 에너지 효율이 높은 경향을 나타내었다.

히터 코어 크기 $\phi 19 \times 320L$ 의 투입 열량 대비 방출 열량은 250 ppm 에서는 6.99 ~ -1,106.6 Kcal/h, 300 ppm 에서는 1,218.2 ~ -1,002.6 Kcal/h, 350 ppm 에서는 369.84 ~ -1,053.93 Kcal/h 정도로 나타났다. 전해수 농도 400 ppm 에서는 -1,471.05 ~ -2,139.90 정도로 나타나 가열 시간 동안 투입열량보다 방출열량이 더 높은 것으로 나타났다.

히터코어 크기 $\phi 25 \times 258L$ 의 투입 열량 대비 방출열량은 250 ppm 에서는 1,249.89 ~ -377.19 Kcal/h, 300 ppm 에서는 5,361.48 ~ -429.36 Kcal/h, 350 ppm 에서는 5,138.22 ~ -1,021.29 Kcal/h 및 400 ppm 에서는 6,715.77 ~ -911.43 정도로 나타나 유사한 경향을 나타내었다.



(a) 히터코어 크기 ø19*320L



(b) 히터코어 크기 ø25*258L

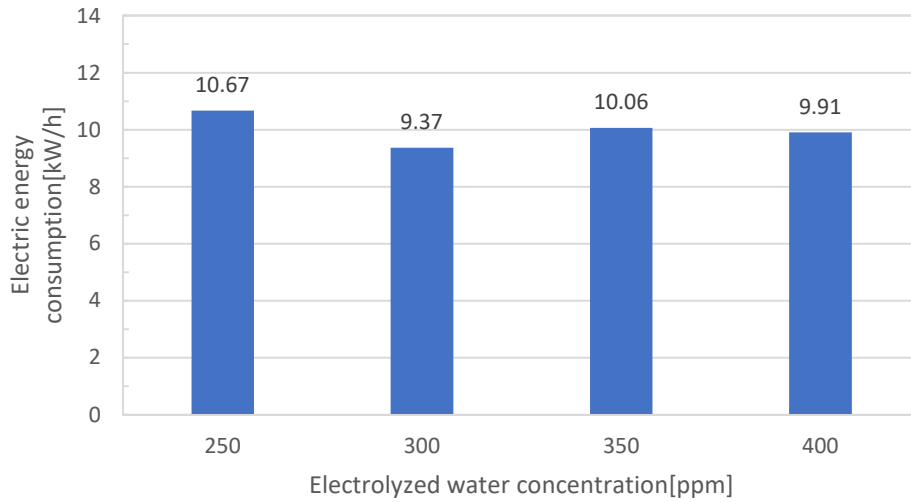
그림 22. 히터코어 크기 및 전해수 농도별 투입 및 방출열량 변화

3) 에너지 소비량 변화

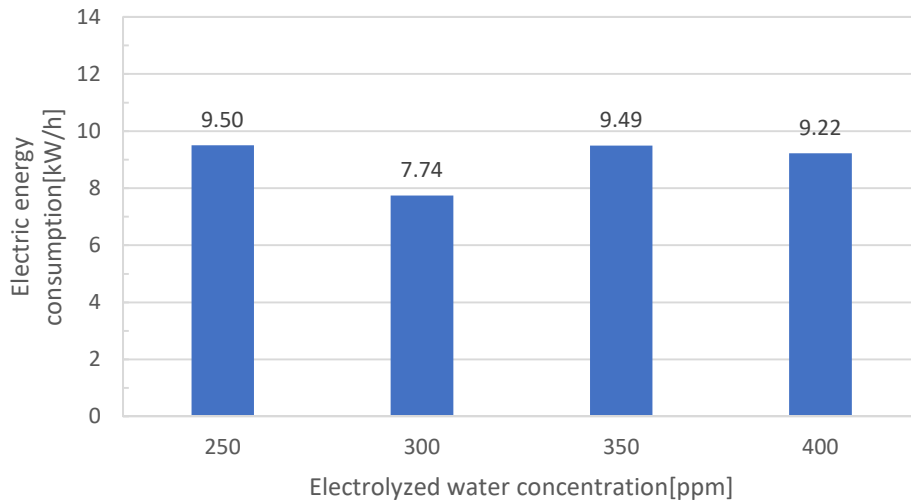
그림 23은 히터코어 크기별 전해수 농도에 따른 에너지 소비량을 나타낸 것이다.

그림 23(a)에서 보는 바와 같이 ø19*320L 히터코어의 소비전력량은 250 ppm 에서 10.67 kW/h 로 가장 높게 나타났고, 300 ppm 에서 9.37 kW/h 로 가장 낮게 나타났다. 또한 350 ppm 과 400 ppm 에서는 각각 10.06 kW/h 와 9.91 kW/h로 유사한 경향을 보였다.

그림 23(b)에서 보듯이 ø25*258L 히터코어의 소비전력량은 250 ppm 에서 9.50 kW/h 로 가장 높게 나타났고, 300 ppm 에서 7.44 kW/h 로 가장 낮게 나타났다. 또한 350 ppm 과 400 ppm 에서는 각각 9.48 kW/h 와 9.22 kW/h로 유사한 경향을 보였다.



(a) 히터코어 크기 ø19*320L



(b) 히터코어 크기 ø25*258L

그림 23. 히터코어 크기 및 전해수 농도별 투입 및 방출열량 변화

4) 성능계수 변화

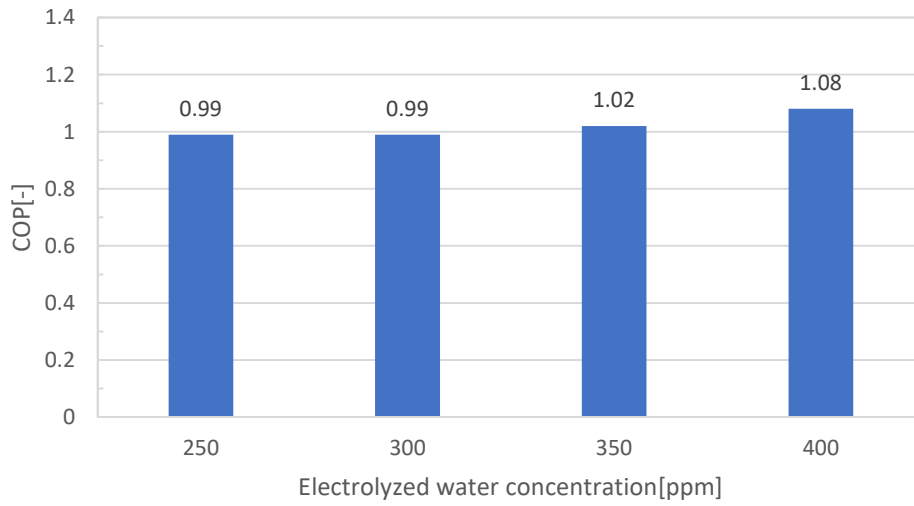
그림 24는 히터코어 크기별 전해수 농도에 따른 성능계수를 나타낸 것이다.

그림 24(a)에서 보는 바와 같이 ø19*320L 히터코어의 전해수 농도에 따른 성능계수는 전해수 농도가 높을수록 높은 경향을 보였다.

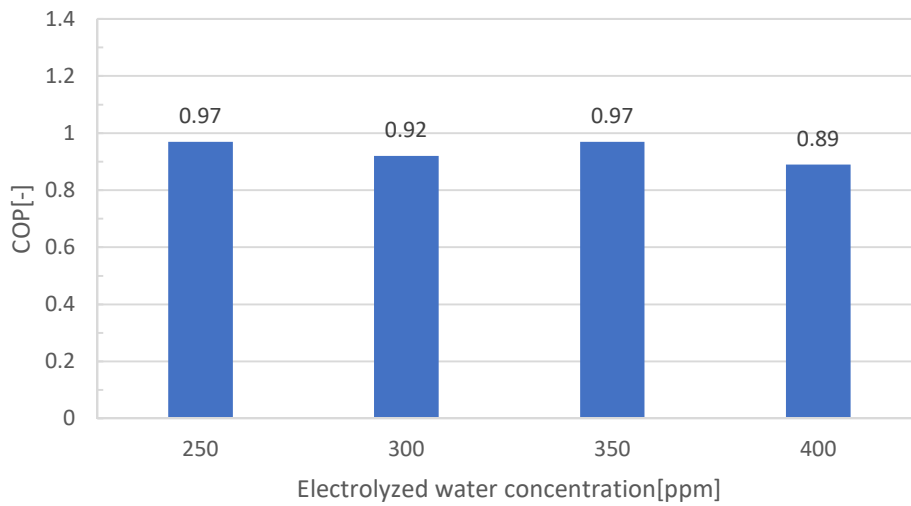
전해수 농도에 따른 성능계수는 250 ppm 에서 0.99 로 가장 낮게 나타났고, 400 ppm 에서 1.08 로 가장 높게 나타났다.

그림 24(b)에서 보듯이 ø25*258L 히터코어의 성능계수는 전해수 농도에 따른 성능계수는 250 ~ 400 ppm 에서 0.89 ~ 0.97로 전해수 농도가 높을수록 낮은 경향을 보였고, 히터코어의 크기 ø19*320L 보다 낮은 경향을 보였다.

따라서 20 kW 급 플라즈마 보일러의 히터코어 크기는 ø25*258L 보다는 ø19*320L 이 적절한 것으로 판단된다.



(a) 히터코어 크기 ø19*320L



(b) 히터코어 크기 ø25*258L

그림 24. 히터코어 크기 및 전해수 농도별 성능계수 비교

표 13 20 kW 급 ø19*340L 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
15:05	20.07	18.57	1.50	20.00	0	0.00	0	0.00
15:10	29.63	22.36	7.27	27.85	1.08	11145.60	12148.17	1.09
15:15	35.51	27.38	8.13	27.85	2.35	13106.40	13585.23	1.04
15:20	42.21	33.29	8.92	27.85	3.78	14757.60	14905.32	1.01
15:25	49.41	39.54	9.87	27.85	5.39	16615.20	16492.77	0.99
15:30	57.98	47.16	10.82	27.85	7.26	19298.40	18080.22	0.94
15:35	65.61	55.06	10.55	30.82	9.37	21775.20	19509.06	0.90

표 14 20 kW 급 ø19*340L 플라즈마 보일러 기초성능 총 열량

초기온도	가온 이후 온도	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
18.57	55.06	9.37	8058.20	7298.00	0.90566

표 15 20 kW 급 ø25*258L 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
17:05	25.24	27.15	1.91	20.00	0.00	0.00	2292.00	0.00
17:10	42.86	35.13	7.73	27.85	14.52	12487.20	12916.83	1.03
17:15	49.8	41.18	8.62	27.85	17.28	14860.80	14404.02	0.97
17:20	57.22	47.7	9.52	27.85	19.32	16615.20	15907.92	0.96
17:25	65.93	55.19	10.74	27.85	22.08	18988.80	17946.54	0.95
17:30	68.75	61.83	6.92	27.85	19.68	16924.80	11563.32	0.68

표 16 20 kW 급 ø25*258L 플라즈마 보일러 기초성능 총 열량

초기온도	가온 이후 온도	E.E.C (kW/h)	Input (kcal/h)	Output (kcal/h)	COP
27.15	61.83	7.74	6656.40	6936.00	1.04200

바. 60kW 플라즈마 보일러 시제품

이상의 결과로부터 R, S, T 3삼상을 이용하는 플라즈마 히터코어는 크기가 $\phi 19 \times 340L$ 로 제작하여 병렬형으로 조립하여 각각의 20 KW/h 의 단위 유닛을 제작하고, 제작된 유닛은 직렬형태로 유로를 형성하여 400 ppm 에서의 운전이 가장 적절한 조건으로 판단된다.

따라서 $\phi 19$ 히터코어의 20 kW 플라즈마 보일러 유닛 3개를 장착한 60 kW 급 플라즈마 보일러 시제품을 그림 38과 같이 설계하였으며, 시제품 제작 후 시설하우스에 설치하여 동급의 일반 전기보일러와 비교하여 성능 실증실험을 수행할 예정이다.

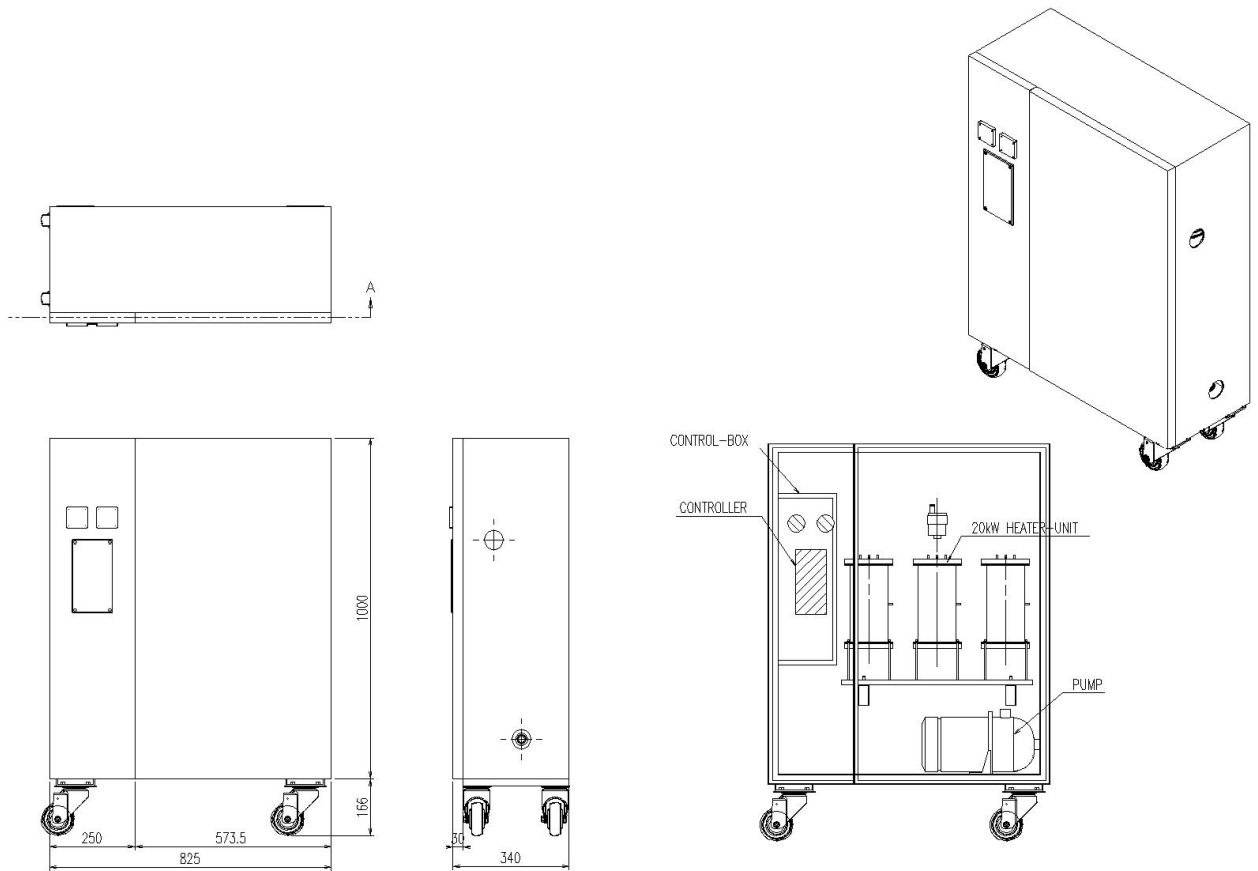


그림 25. 60 kW 급 플라즈마 보일러 설계도

<2단계-1차년도>

○ 연구개발 목표

- 주관연구기관 ((주)지에이)

수중 플라즈마 방전 방식을 이용한 고효율 플라즈마 보일러 유닛 및 플라즈마 보일러 양산 시제품 개발

□ 농가 보급형 발열량 30 kW 급 고효율 플라즈마 보일러 코어, 유닛 및 90 kW 급 플라즈마 보일러 양산 시제품 개발

▷ 30 kW 급 PPS히터코어 및 히터하우징 설계, mock-up 개발

- R,S,T 삼상 + N상 혼합 구조 플라즈마 보일러 유닛 설계
- mock-up 제작 성능시험, 개발목표 사양 부합 확인

▷ 30 kW 급 PPS히터코어 및 히터하우징용 사출금형 개발

- 금형 종류 : 히터코어, 하우징 바디, 하우징 헤드, 입출수 니플

▷ 30 kW 급 PPS히터코어 및 히터하우징 다중도금 공정 및 지그 개발

- PPS 사출성형품의 도금면 표면개질 후 Pd, Ru 및 Pt 등 백금족 물질의 다중도금 기술

▷ 30 kW 급 플라즈마 보일러 유닛 및 90 kW 급 보일러 시제품용 제어반 개발

- HW : micom 디지털 제어 PCB 및 주전원 제어반 설계, 제작
- SW : 목표온도, 입출수 온도, 펌프운전, 보충수 수위 등 필수 제어인자를 센싱 IoT 기반 원격 Display 및 자동 제어

▷ 최종 시제품 설계 및 제작 : 상기 항목별 개발목표 사양 참조

□ 농가 보급형 발열량 90 kW 급 플라즈마 보일러 양산 시제품 기초 성능평가

▷ 플라즈마 보일러 양산 시제품의 개발목표 사양에 대한 기초 성능평가

- 입수온도 및 출수온도에 따른 발열량 평가
- 연속 열효율 평가
- 출수온도의 편차 평가

□ 농가 보급형 발열량 30 kW 급 플라즈마 보일러 코어, 유닛 설계 검토

□ 농가 보급형 발열량 90 kW 급 플라즈마 보일러 설계 검토

□ 농가 보급형 발열량 90 kW 급 플라즈마 보일러 실증 테스트

○ 연구개발 수행과정 및 내용

1. 재료 및 방법

가. SUS 316L + Pt 도금 30 kW 급 단일 유닛 플라즈마 보일러 히터코어 시제품

그림 1과 2는 3차년도 연구목표인 30 kW 급 플라즈마 보일러 히터코어 시제품을 설계 제작한 것을 나타낸 것이다. 또한 그림 3과 그림 4와 같이 히터 유닛을 제작하여 기초성능실험을 수행하였다.

히터코어 기초재료는 SUS 316L 표면에 백금(Pt) 도금을 5 μm 두께로 실시하였다. 히터코어 설계에 있어서 중요한 설계 인자는 방전면적으로서 히터코어 외경을 결정하면 히터코어 길이와 배치에 따른 N상 하우징과 히터코어의 간격이 결정된다. 면전류밀도는 기존 면전류밀도 20 kW 급 단일 유닛에서는 0.3~0.44 A/cm²이었고, 현재 30 kW 급 히터코어에서 0.44~0.58 A/cm²로 높아져 방전상태가 양호한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 히터코어와 N상 하우징 간격과 전해수 농도에 따른 발열 성능을 확인하기 위해 히터코어 사이즈는 $\phi 37.5 \times 324\text{L}$, N상 하우징은 히터코어와 3 mm, 6 mm 의 간격을 가질 수 있도록 $\phi 48.6 \times 315\text{L}$, $\phi 54.5 \times 315\text{L}$ 로 설계 제작하였다. 또한 체결 후 간격을 일정하게 유지시키기 위하여 ABS 재질의 가공품을 N상 하우징 내외부에 고정시켰고, 누수를 방지하기 위해 실리콘 패드와 브랜크 부품을 사용하여 히터코어와 N상 하우징을 조립하였다.

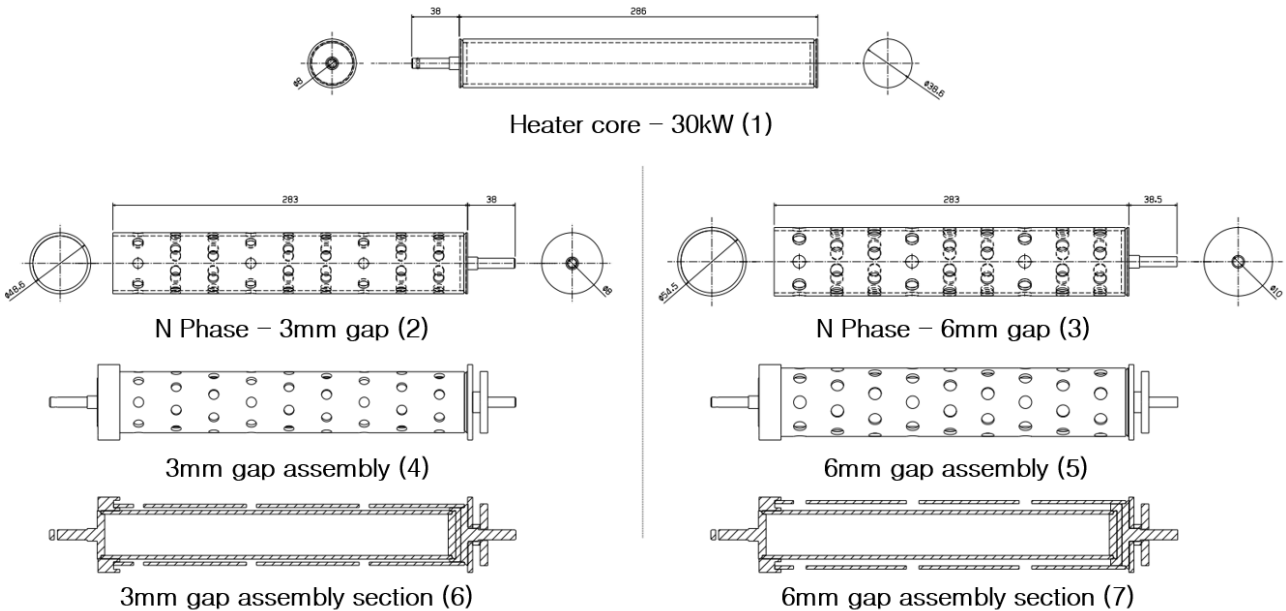


그림 1. 30 kW 급 히터코어, N상 하우징 설계도



(a) 30 kW 급 히터코어 시제품



(b) 30 kW 급 N상 하우징 시제품(3mm gap)



(c) 30 kW 급 N상 하우징 시제품(6mm gap)

그림 2. 30 kW 급 히터코어와 N상 하우징 시제품

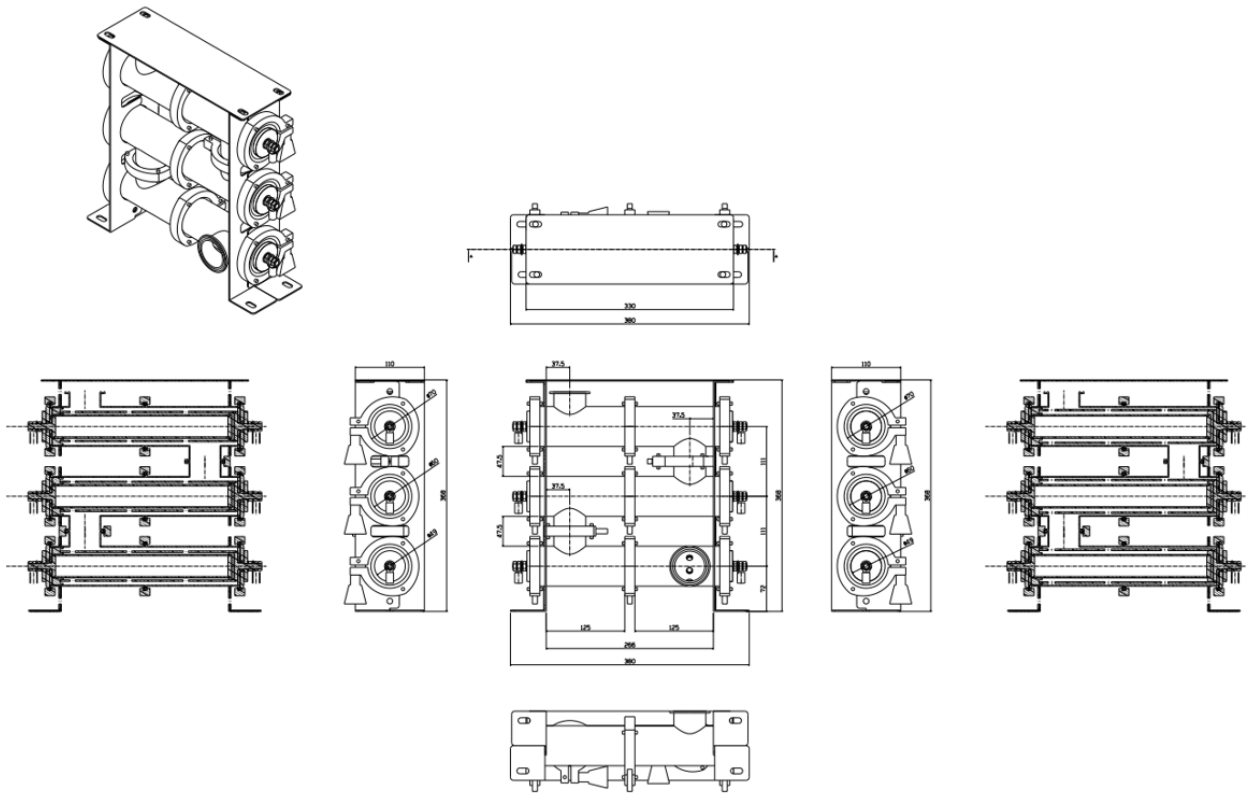


그림 3. 30 kW 급 플라즈마 보일러 단일 유닛 설계도



그림 4. 30 kW 급 플라즈마 보일러 단일 유닛 시제품

나. 30 kW 급 플라즈마 보일러 단일 유닛 시제품 기초성능시험장치

플라즈마 보일러 시제품의 발열량, 소비전력량 및 성능계수(에너지효율)를 정밀하게 측정하기 위하여 그림 5와 그림 6과 같이 기초성능시험장치를 제작하였다.

본 장치는 2차년도 60 kW 급 플라즈마 보일러의 기초성능시험장치를 개선한 것으로 30 kW 플라즈마 보일러 단일 유닛 시험을 위해 히터유닛과 난방수 탱크 사이에 70,000 kcal/hr 급 판형 열교환기를 설치하여 플라즈마 보일러 가온수와 탱크의 난방수 간 효율적인 열교환이 이루어지도록 하였다.

플라즈마 보일러의 온도 변화를 분석하기 위해 데이터로거(midi-LOGGER GL840, GRAFTEC, MALAYSIA)를 사용하여 히터 유닛의 가온수와 물탱크의 난방수 관에 PT 100 Ω 열전대를 삽입하여 측정하였다.

플라즈마 보일러의 소비전력량은 3상유도전력측정기(HIOKI 3169-20, HIOKI, JAPAN)를 사용하였고, 시험 장치가 정상 가동 후 매 5분마다 각 측정 항목을 기록하였으며, 가온수 유량은 디지털 터빈 유량계(F2S, FLSTRONIT, KOREA), 난방수 유량은 아날로그 방식 플로트 유량계(Z4005, FLOWTECH, CHINA)를 사용하여 측정하였다.

30 kW 플라즈마 보일러 단일 유닛의 기초성능을 산출하기 위해 200 L 가온수 및 난방수 유량을 30 ~ 40 L/min으로 유지한 상태에서 가온수와 난방수의 열교환기 입출수 온도와 플라즈마 보일러 유닛으로 인가되는 소비전력과 유량을 통해 투입열량 및 방출열량을 계산하고, 성능계수를 산출하였다.

$$\text{발열량}(Kcal/h) = \text{유량}(L/min) \times \text{유체밀도}(Kg/m^3) \times \text{유체비열}(Kcal/Kg \cdot ^\circ C) \times \text{난방수 온도차}(^\circ C) \quad (1)$$

$$COP = \frac{\text{발열량}(Kcal/h)}{\text{소비 전력량}(KW) \times 860(Kcal/KW)} \quad (2)$$

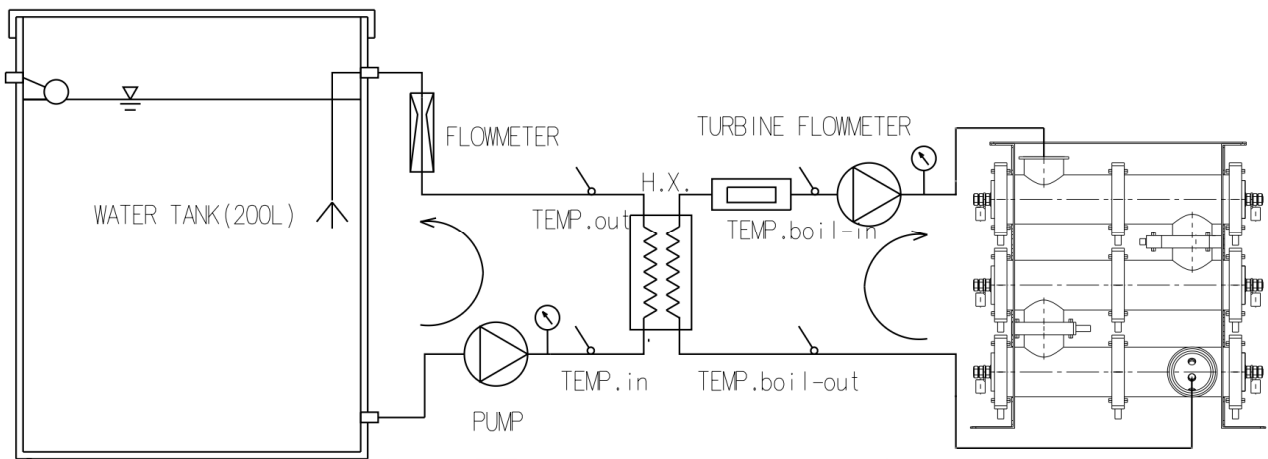


그림 5. 30 kW 급 플라즈마 보일러 단일 유닛 기초성능시험 장치 구성도



그림 6. 30 kW 급 플라즈마 보일러 단일 유닛 기초성능 시험 장치

다. 90 kW 급 플라즈마 보일러 시제품 제작

그림 7과 8은 플라즈마 보일러의 히터코어와 N상 하우징의 간극을 3 mm 로 맞추어 30 kW 급 단일 유닛을 3개 제작하고, 3개의 단일 유닛을 직렬형태 유로를 형성하도록 조립하여 플라즈마 보일러 내부 순환수의 발열이 효율적으로 이루어질 수 있도록 90 kW 급 플라즈마 보일러 시제품을 나타낸 것이다. 또한 그림 9 와 같이 회로를 구성하여 플라즈마 보일러 내부 순환수의 설정 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 하였다.

90 kW 급 플라즈마 보일러 시제품을 세종시 전의면에 위치한 시설하우스에 설치하고, 동일한 용량의 상용 전기보일러를 사용하여 시설하우스의 난방 특성, 생육, 소비전력량 등을 비교하는 실증실험을 진행하였다.

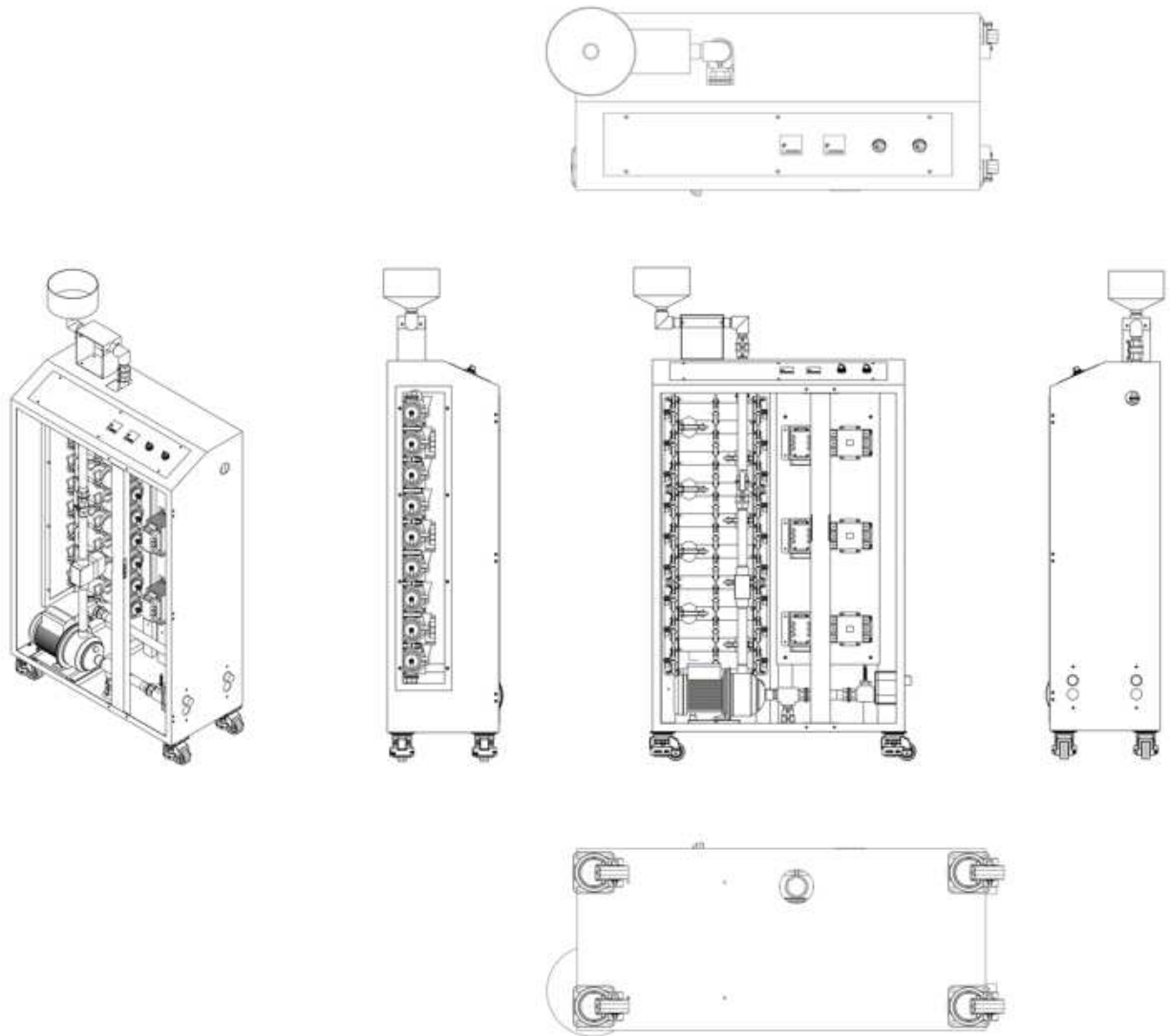


그림 7. 90 kW 급 플라즈마 보일러 시제품 설계도



그림 8. 90 kW 급 플라즈마 보일러 시제품

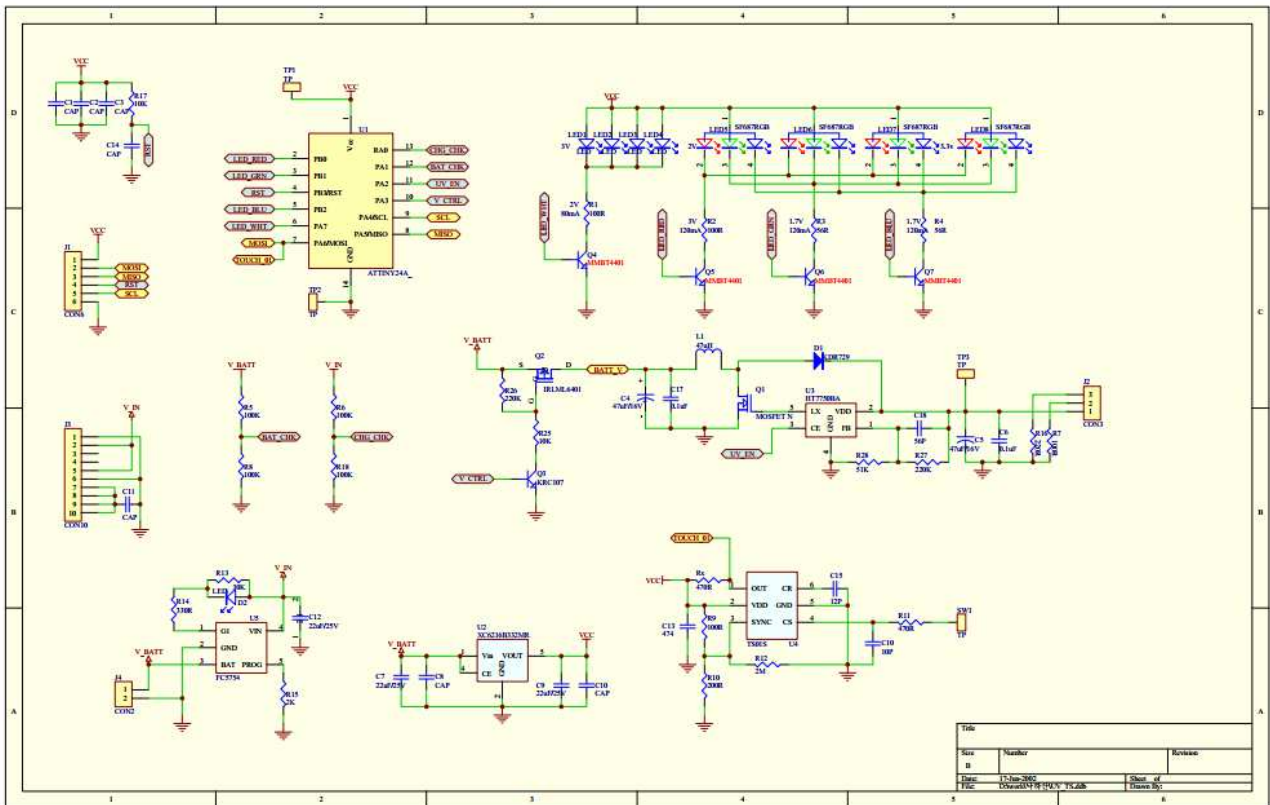


그림 9. 90 kW 급 플라즈마 보일러 시제품 회로도

2. 결과 및 고찰

가. 전해수 농도에 따른 30kW 급 플라즈마 보일러 유닛 기초성능 평가

30 kW 급 플라즈마 보일러 유닛을 제작하기 위해 기초 성능 평가의 일환으로 플라즈마 히터코어, N상 하우징 간극이 각각 3 mm, 6 mm 를 유지시킬 수 있도록 부품을 이용하여 조립 후 전해수 농도에 따라 급탕온도 변화, 투입 및 방출열량, 전류 변화, 에너지 변화량, 성능계수를 측정하였다.

표 1 ~ 5은 히터코어와 N상 하우징의 간격이 3 mm 일 때 전해수의 농도를 30, 40, 50, 60, 70 ppm 단위로 변화시켰을 때 각 성능인자를 측정하여 기록한 데이터와 측정치로 계산된 투입열량, 방출열량 및 성능계수 결과를 나타낸 것이다.

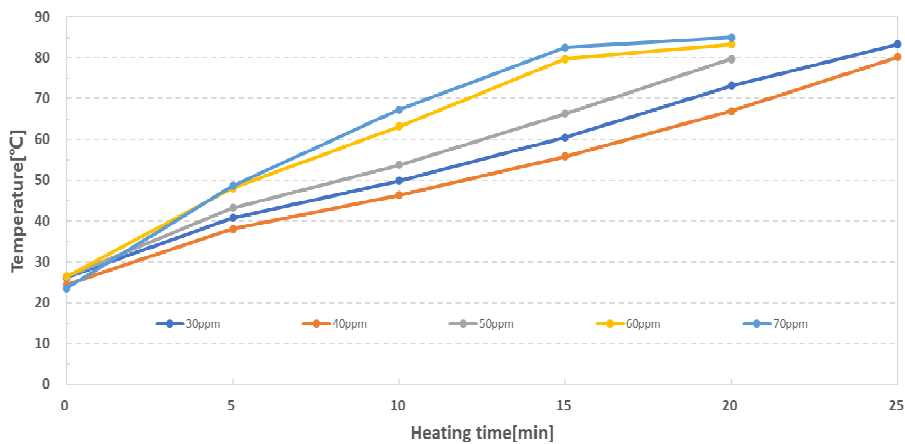
표 6 ~ 16은 히터코어와 N상 하우징의 간격이 6 mm 일 때 전해수 농도를 증류수, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 150 ppm 단위로 변화시켰을 때 각 성능인자를 측정하여 기록한 데이터와 측정치로 계산된 투입열량 및 방출열량, 성능계수 결과이다.

1) 급탕온도 변화

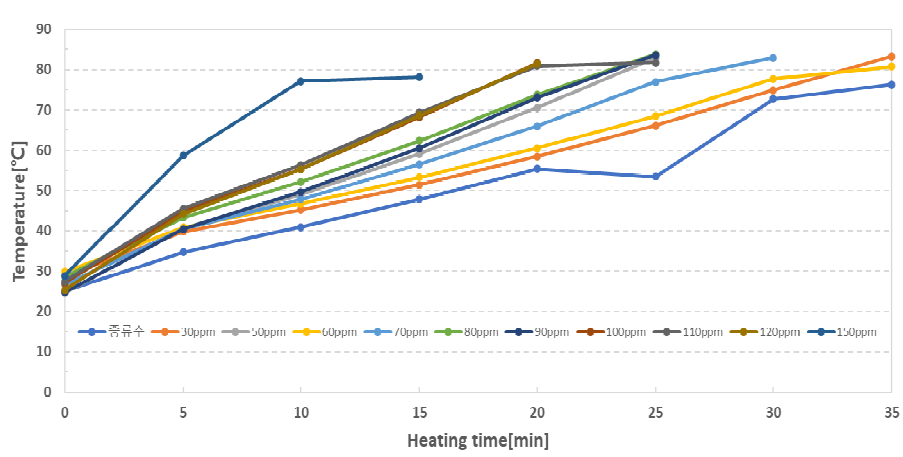
그림 10은 플라즈마 히터 코어와 N상 하우징 간극이 3 mm 와 6 mm 인 주요 부품을 사용하고, 간극이 3 mm 인 경우 30 ~ 70 ppm 까지 10 ppm 단위로, 6 mm 인 경우 0 ~ 150 ppm까지 전해수 농도를 변화시켜 목표 온도에 도달하였을 때 급탕온도 변화를 나타낸 것이다.

그림 10(a)에서 간극이 3 mm 인 경우 전해수 농도의 따라 목표 온도 $80 \pm 2^\circ\text{C}$ 까지 도달하는 소요 시간은 30 ~ 70 ppm 에서 각각 25, 20분 소요되는 것으로 나타났다.

그림 10(b)에서 간극이 6 mm 인 경우 전해수 농도의 따라 목표 온도 $80 \pm 2^\circ\text{C}$ 까지 도달하는 소요 시간은 0~150 ppm 에서 각각 35, 30, 25, 15분 소요되는 것으로 나타났다.



(a) 부품 간극 3mm



(b) 부품 간극 6mm

그림 10. 히터코어, N상 하우스링 간극 및 전해수 농도별 급탕온도 변화

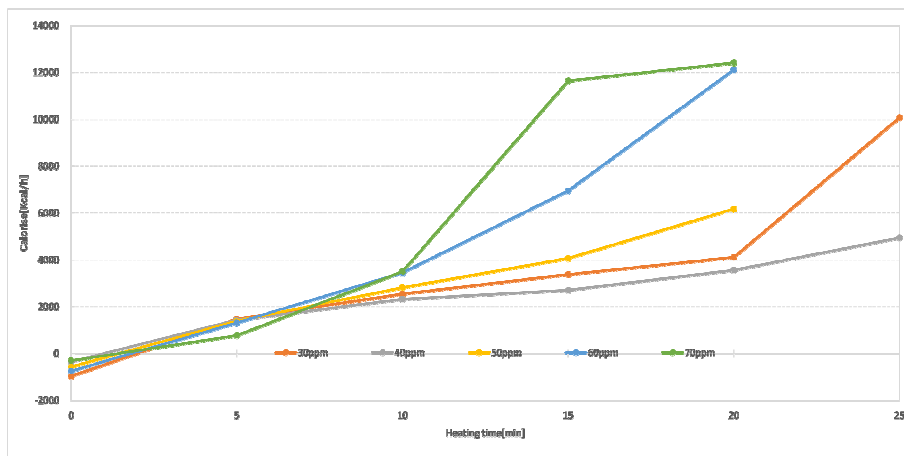
2) 투입 및 방출열량 변화

그림 11은 플라즈마 히터 코어와 N상 하우징 간극이 3 mm, 6 mm 인 주요 부품을 사용하여 전해수 농도를 변화시켰을 때 투입 열량 대비 방출 열량을 나타낸 것이다.

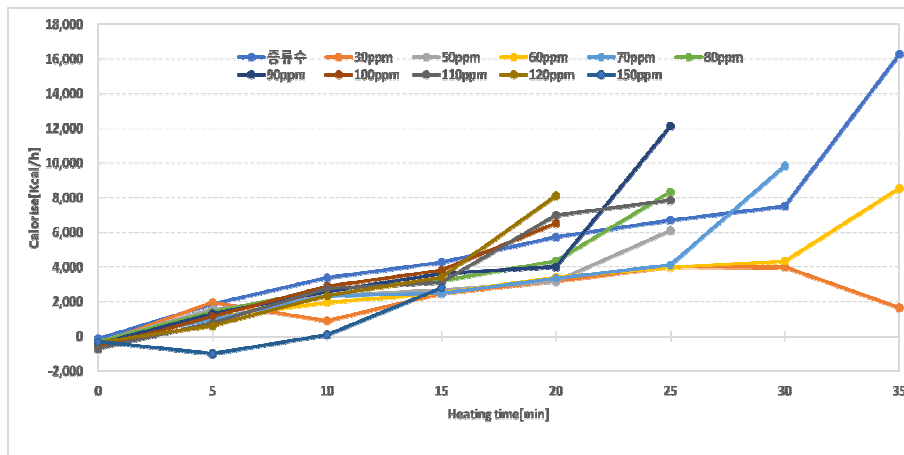
그림 11(a)와 11(b)에 나타낸 바와 같이 플라즈마 히터코어와 N상 하우징 간극에 따른 투입 열량 대비 방출열량은 3 mm 간극이 6 mm 간극보다 에너지 효율이 높은 경향을 나타내었다.

투입 열량 대비 방출열량은 3 mm의 경우 4,944 ~ 12,410 Kcal/h, 평균 9,142 Kcal/h 정도 나타났고 6 mm 인 경우에는 2,791 ~ 16,273 Kcal/h, 평균 8,229 Kcal/h 정도 나타났으며, 보일러 주요 부품인 히터코어와 N상 하우징 간극이 3 mm 일 때 투입되는 열량 대비 방출된 열량이 높은 것으로 나타났다.

이와 같이 플라즈마 보일러 주요 부품의 간극이 3 mm 일 때 열효율이 좋은 이유는 간극이 가까울수록 통전되는 전류의 양이 상승하여 플라즈마 방전이 원활하게 이루어지기 때문으로 판단된다.



(a) 부품 간극 3mm



(b) 부품 간극 6mm

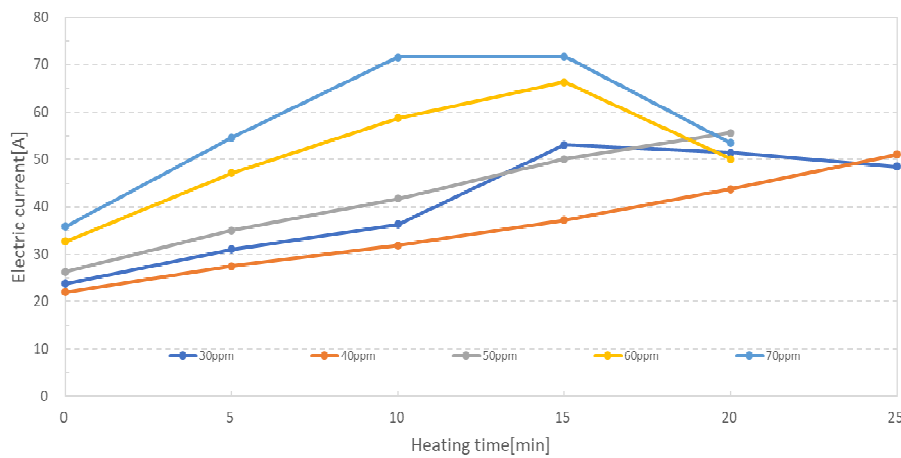
그림 11. 히터코어, N상 하우징 간극 및 전해수 농도별 투입 열량 대비 방출 열량 변화

3) 통전 전류 변화

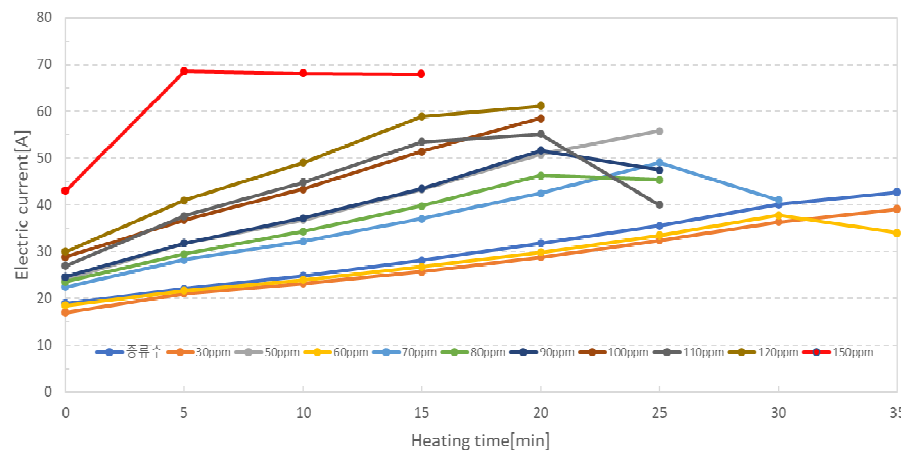
그림 12는 플라즈마 히터 코어와 N상 하우징 간극이 3 mm 와 6 mm 인 주요 부품을 사용하고, 전해수 농도를 변화시켜 목표 온도까지 도달하였을 때 전류의 변화를 나타낸 것이다.

그림 12(a)에서 보는 바와 같이 부품의 간극이 3 mm 인 경우 70 ppm 에서 72 A 로 가장 높게 나타났고, 30 ppm 에서 49 A 로 가장 낮게 나타났다. 또한, 40 ~ 60 ppm 에서는 각각 51 A, 55 A, 50 A 로 나타났다.

그림 12(b)에서 부품의 간극이 3 mm 인 경우 150 ppm 에서 68 A 로 가장 높게 나타났고, 60 ppm 에서 37 A 로 가장 낮게 나타났다. 또한, 증류수 ~ 50 ppm 은 각각 42 A, 39 A, 55 A 로 나타났고, 70 ~ 120 ppm 에서는 각각 49 A, 46 A, 51 A, 58 A, 55 A, 61 A로 나타났다.



(a) 부품 간극 3mm



(b) 부품 간극 6mm

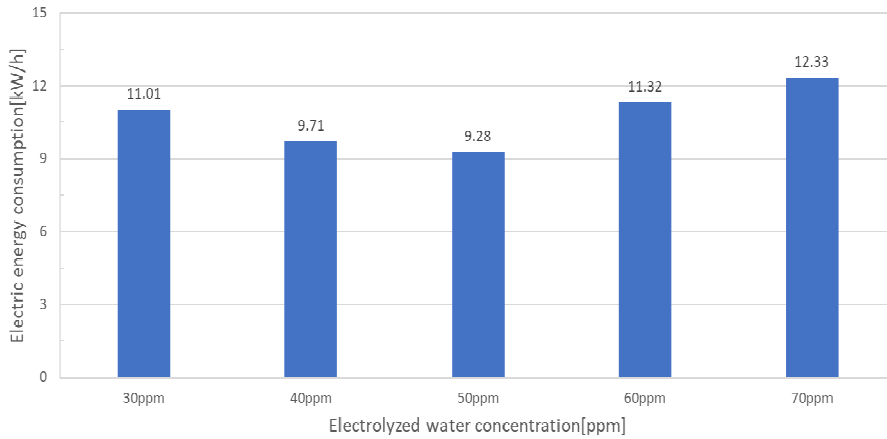
그림 12. 히터코어, N상 하우징 간극 및 전해수 농도별 전류 변화

4) 에너지 변화량 변화

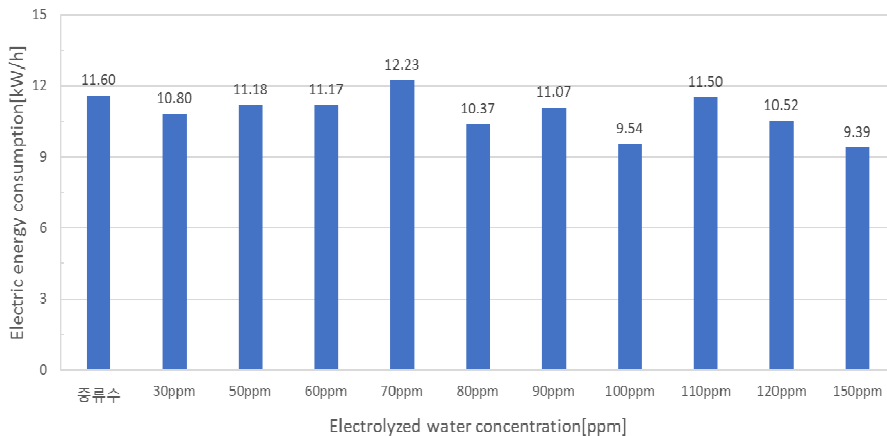
그림 13 은 플라즈마 히터 코어와 N상 하우스징 간극이 3 mm 와 6 mm 인 주요 부품을 사용하고, 전해수 농도를 변화시켰을 때 에너지 변화량을 나타낸 것이다.

그림 13(a)에서 보는 바와 같이 70 ppm 에서 12.33 kW/h 로 가장 높게 나타났고, 50 ppm 에서 9.28 kW/h 로 가장 낮게 나타났다. 또한, 30, 40, 60 ppm 에서는 각각 11.01, 9.71, 11.32 kW/h 로 나타났다.

소비전력량은 그림 13(b)에서 보는 바와 같이 70 ppm 에서 12.23 kW/h 로 가장 높게 나타났고, 150 ppm 에서 9.39 kW/h로 가장 낮게 나타났다. 또한, 증류수 30, 50, 60, 80, 90, 100, 110, 120 ppm 에서는 각각 11.6, 10.8, 11.18, 11.17, 10.37, 11.07, 9.54, 11.5, 10.52 kW/h 로 나타났다.



(a) 부품 간극 3mm



(b) 부품 간극 6mm

그림 13. 히터코어, N상 하우스징 간극 및 전해수 농도별 소비전력량 변화

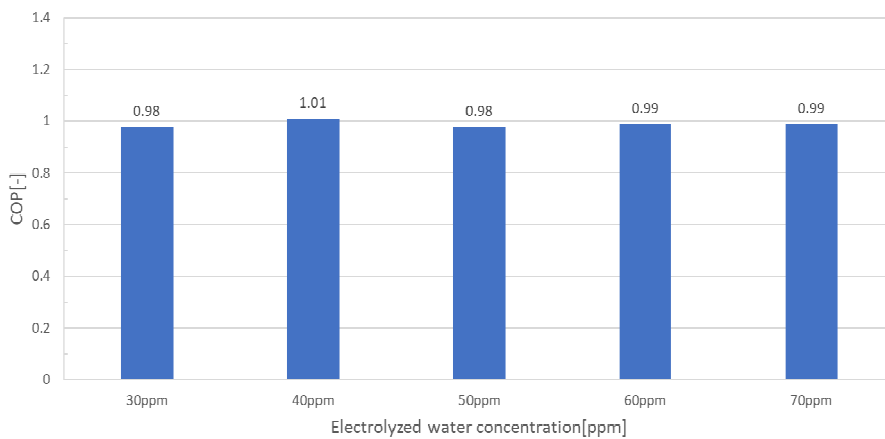
5) 성능계수 변화

그림 14는 플라즈마 히터 코어와 N상 하우징 간극이 3 mm 와 6 mm 인 주요 부품을 사용하고, 전해수 농도를 변화시켰을 때 성능계수를 나타낸 것이다.

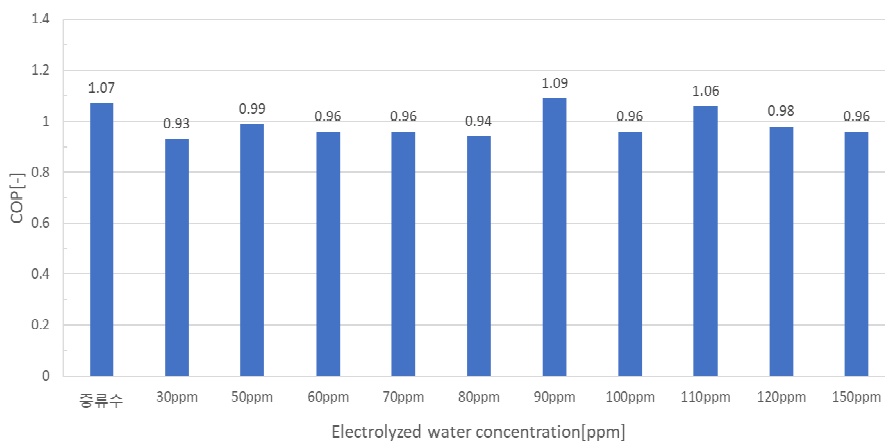
그림 14(a)에서 보는 바와 같이 성능계수는 간극이 3 mm 일 때 40 ppm 에서 1.01 로 가장 높게 나타났고, 30, 50 ppm 에서 0.98 로 가장 낮게 나타났다. 또한, 60 ~ 70 ppm 에서는 0.99 로 나타났다.

그림 14(b)에서 보는 바와 같이 간극이 6 mm 일 때 성능계수는 90 ppm 에서 1.09 로 가장 높게 나타났고, 30 ppm 에서 0.93 으로 가장 낮게 나타났다. 또한, 증류수, 50, 60, 70, 80, 100, 110, 120, 150 ppm 에서는 1.07, 0.99, 0.96, 0.96, 0.94, 0.96, 1.06, 0.98, 0.96 으로 나타났다.

이와 같이 부품의 간극이 6 mm 일 때 성능계수가 높게 나온 것으로 나타났지만, 전해수 농도 대비 성능계수는 3 mm 의 간극일 때 성능계수가 좋고, 간극이 가까울수록 히터코어에 흐르는 전류의 양이 증가하여 플라즈마 방전이 더욱 원활하게 이루어지는 것으로 판단되어, 향후 90 kW 급 시제품 제작 시 주요 부품의 간극이 3 mm 를 유지할 수 있도록 제작하여 실증 실험하는 것이 좋다고 판단된다.



(a) 부품 간극 3mm



(b) 부품 간극 6mm

그림 14. 히터코어, N상 하우징 간극 및 전해수 농도별 성능계수 변화

표 1 30 kW 급 간극 3mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(30ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
09:45	24.62	25.03	24.26	39.68	0.00	0.00	976.13	
09:50	30.87	37.04	31	39.51	1.56	16099.20	14626.60	
09:55	38.74	45.74	39.03	39.42	3.41	19092.00	16556.40	
10:00	47.88	56.02	48.48	39.36	5.60	22600.80	19223.42	
10:05	58.52	68.07	59.3	39.29	8.18	26625.60	22513.17	
10:10	70.08	78.23	70.65	39.13	11.01	29205.60	19134.57	0.98

표 2 30 kW 급 간극 3mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(40ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
9:40	23.93	24.08	0.15	40	0.00	0.00	0.00	0.00
9:45	29.42	34.71	5.29	40.03	1.37	14138.40	12705.52	0.95
9:50	36.65	42.68	6.03	39.81	2.99	16718.40	14403.26	1.02
9:55	44.78	51.78	7.00	39.76	4.87	19401.60	16699.20	1.04
10:00	54.18	62.3	8.12	39.72	7.09	22910.40	19351.58	1.03
10:05	65.4	74.72	9.32	39.51	9.71	27038.40	22093.99	1.01

표 3 30 kW 급 간극 3mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(50ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
10:25	25.65	25.89	0.24			0.00	0.00	0.00
10:30	32.36	39.21	6.85	39.82	1.72	17750.40	16366.02	0.94
10:35	41.26	49.18	7.92	39.68	3.82	21672.00	18855.94	0.95
10:40	51.91	61.28	9.37	39.58	6.37	26316.00	22251.88	0.97
10:45	64.07	74.15	10.08	39.45	9.28	30031.20	23859.36	0.98

표 4 00 30 kW 급 간극 3mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(60ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
11:05	25.29	25.6	0.15			0.00	0.00	0.00
11:10	33.73	42.73	5.29	40.38	2.24	23116.80	21805.20	0.89
11:15	46.13	57.04	6.03	40.30	5.13	29824.80	26380.38	0.96
11:20	60.76	72.87	7.00	40.15	8.63	36120.00	29172.99	0.97
11:25	72.51	79.02	8.12	40.06	11.32	27760.80	15647.44	0.99

표 5 30 kW 급 간극 3mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(70ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
9:10	23.05	23.18	0.13			0.00	0.00	0.00
9:15	32.49	42.78	10.29	39.87	2.46	25387.20	24615.74	0.93
9:20	46.69	60.06	13.37	39.77	5.89	35397.60	31903.49	0.97
9:25	63.42	75.67	12.25	39.48	9.83	40660.80	29017.80	0.97
9:30	74.38	80.04	5.66	39.43	12.33	25800.00	13390.43	0.99

표 6 30 kW 급 간극 6mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(증류수)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
17:00	24.62	24.65	0.03	80.18	0.00	0.00	144.32	
17:05	29.53	31.59	2.06	80.12	1.14	11764.80	9902.83	
17:10	35.28	37.45	2.17	79.49	2.47	13725.60	10349.60	
17:15	41.59	43.9	2.31	79.38	3.95	15273.60	11002.07	
17:20	48.64	51.08	2.44	79.99	5.64	17440.80	11710.54	
17:25	56.23	58.88	2.65	79.89	7.52	19401.60	12702.51	
17:30	64.83	67.83	3.00	79.79	9.64	21878.40	14362.20	
17:35	72.89	73.73	0.84	78.46	11.60	20227.20	3954.38	1.07

표 7 30 kW 급 간극 6mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(30ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
14:30	28.08	28.26	0.18			0.00	0.00	
14:35	32.98	37.14	4.16	40.15	1.16	11971.20	10021.44	
14:40	37.97	42.45	4.48	40.05	2.29	11661.60	10765.44	
14:45	43.61	48.35	4.74	39.95	3.63	13828.80	11361.78	
14:50	50	55.14	5.14	39.87	5.13	15480.00	12295.91	
14:55	57.01	62.62	5.61	39.85	6.82	17440.80	13413.51	
15:00	64.73	71.23	6.50	39.74	8.71	19504.80	15498.60	
15:05	71.24	79.62	8.38	39.62	10.80	21568.80	19920.94	0.93

표 8 30 kW 급 간극 6mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(50ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
14:00	24.11	24.24	0.13	39.90		0.00	311.22	
14:05	30.53	36.83	6.30	39.59	1.60	16512.00	14965.02	
14:10	37.71	44.93	7.22	39.40	3.48	19401.60	17068.08	
14:15	46.16	54.64	8.48	39.19	5.67	22600.80	19939.87	
14:20	55.53	65.4	9.87	39.10	8.22	26316.00	23155.02	
14:25	66.84	77.32	10.48	38.88	11.18	30547.20	24447.74	0.99

표 9 30 kW 급 간극 6mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(60ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
16:20	26.09	26.2	0.11			0.00	0.00	
16:25	31.2	37.01	5.81	39.25	1.42	14654.40	13682.55	
16:30	37.73	44.13	6.40	39.03	3.10	17337.60	14987.52	
16:35	45.01	52.38	7.37	38.98	5.01	19711.20	17236.96	
16:40	53.19	61.49	8.30	38.89	7.21	22704.00	19367.22	
16:45	62.59	72.09	9.50	38.77	9.75	26212.80	22098.90	
16:50	71.98	78.79	6.81	38.56	12.23	25593.60	15755.62	0.96

표 10 30 kW 급 간극 6mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(70ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
16:20	26.09	26.2	0.11			0.00	0.00	
16:25	31.2	37.01	5.81	39.25	1.42	14654.40	13682.55	
16:30	37.73	44.13	6.40	39.03	3.10	17337.60	14987.52	
16:35	45.01	52.38	7.37	38.98	5.01	19711.20	17236.96	
16:40	53.19	61.49	8.30	38.89	7.21	22704.00	19367.22	
16:45	62.59	72.09	9.50	38.77	9.75	26212.80	22098.90	
16:50	71.98	78.79	6.81	38.56	12.23	25593.60	15755.62	0.96

표 11 30 kW 급 간극 6mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(80ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
16:50	28.08	28.21	0.13			0.00	0.00	
16:55	33.89	39.73	5.84	40.14	1.50	15480.00	14065.06	
17:00	41.59	48.12	6.53	39.96	3.28	18369.60	15656.33	
17:05	50.35	57.98	7.63	39.90	5.36	21465.60	18266.22	
17:10	60.11	68.88	8.77	39.21	7.78	24974.40	20632.30	
17:15	71.33	79.07	7.74	39.61	10.37	26728.80	18394.88	0.94

표 12 30 kW 급 간극 6mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(90ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
10:00	24.24	24.42	0.18			0.00	0.00	
10:05	30.4	36.57	6.17	39.69	1.55	15996.00	14693.24	
10:10	38.56	45.63	7.07	39.44	3.42	19298.40	16730.45	
10:15	47.94	55.89	7.95	39.37	5.59	22394.40	18779.49	
10:20	58.44	67.86	9.42	39.28	8.13	26212.80	22201.06	
10:25	71.33	79.1	7.77	39.06	11.07	30340.80	18209.77	1.09

표 13 30 kW 급 간극 6mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(100ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
10:45	26.25	26.51	0.26			0.00	0.00	
10:50	33.34	40.51	7.17	40.03	1.78	18369.60	17220.91	
10:55	42.45	50.64	8.19	39.91	3.96	22497.60	19611.77	
11:00	53.34	62.82	9.48	39.95	6.53	26522.40	22723.56	
11:05	65.87	76.22	10.35	39.52	9.54	31063.20	24541.92	0.96

표 14 30 kW 급 간극 6mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(110ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
9:50	26.82	27.13	0.31	38.00	0.00	0.00	706.80	
9:55	33.55	41.36	7.81	37.98	1.80	18576.00	17797.43	
10:00	42.55	51.73	9.18	37.53	4.07	23426.40	20671.52	
10:05	53.19	64.13	10.94	37.39	6.75	27657.60	24542.80	
10:10	65.25	76.06	10.81	37.12	9.76	31063.20	24076.03	
10:15	74.38	78.97	4.59	36.7	11.50	17956.80	10107.18	1.06

표 15 30 kW 급 간극 6mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(120ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
11:30	24.91	25.06	0.15			0.00	0.00	
11:35	31.74	39.65	7.91	40.44	1.92	19814.40	19192.82	
11:40	41.02	50.3	9.28	40.29	4.32	24768.00	22433.47	
11:45	52.12	62.98	10.86	40.24	7.19	29618.40	26220.38	
11:50	64.94	75.88	10.94	40.00	10.52	34365.60	26256.00	0.98

표 16 30 kW 급 간극 6mm 플라즈마 보일러 기초성능 실험결과(150ppm)

Time	T out ('C)	T in ('C)	ΔT ('C)	Q (l/min)	E.E.C (KW/h)	Input (Kcal/h)	Output (Kcal/h)	COP
15:10	28.03	28.16	0.13			0.00	0.00	
15:15	38.36	51.81	13.45	39.60	3.00	30960.00	31957.20	
15:20	52.48	69.32	16.84	39.13	6.84	39628.80	39536.95	
15:25	63.03	73.05	10.02	39.13	9.39	26316.00	23524.96	0.96

<공동연구기관: 공주대학교>

○ 연구개발 목표<1단계-1차년도>

수중 플라즈마 방전 방식을 이용한 고효율 농업용 보일러 설계 검토 및 실증 테스트

○ 연구개발 내용

- 농가 보급형 발열량 10 kW 급 고효율 플라즈마 보일러 코어, 유닛 설계 검토
- 농가 보급형 발열량 30 kW 급 고효율 플라즈마 보일러 설계 검토
- 농가 보급형 발열량 30 kW 급 고효율 플라즈마 보일러 실증 테스트
 - ▷ 100~150평 농업용 시설하우스 2개소 선정 및 제품 설치
 - ▷ 작물재배 비교실험 평가
(엽장, 엽폭, 수고, 식생지수, 엽록소 함량)
 - ▷ 고효율 농업용 보일러의 난방 특성 분석
(하우스 내부 온도 및 습도, 보일러 입출수 온도, 열교환기 배풍온도, 소비전력량)
- 농가 보급형 발열량 30kW급 고효율 플라즈마 보일러 경제성 분석
 - ▷ 기존 제품 대비 기능 및 성능에 대한 비교분석과 가격 경쟁력 분석

○ 연구개발 수행과정 및 내용

1. 재료 및 방법

가. 공시 보일러

그림 1은 본 실험에 사용한 농업용 고효율 플라즈마 보일러와 일반 시중에 판매되는 상용 전기온풍기를 나타낸 것이다.

보일러 실증 테스트에 사용된 보일러는 실험구의 경우 주식회사 (주) GA에서 개발한 수중 플라즈마 방전 방식 보일러를 사용하였고, 대조구는 일반 시설하우스 농가에서 사용되는 상업용 전기 온풍기(DS-K135, 두성농기, 한국)를 사용하여 테스트를 수행하였다.

그림 2에서 보는 바와 같이 실험구에 설치한 농업용 고효율 플라즈마 보일러는 입수부, 발열부, 출수부 및 제어부로 구성되어 있고, 가열된 물은 출수부에서 배출된 후 하우스 중앙에 설치된 열교환기를 거쳐 하우스 내부 난방에 사용된 후 입수부로 들어온다. 가열된 물의 순환은 0.95 kW 순환펌프(PU-951M , Wilo, KOREA)를 이용하였다.

대조구 하우스에 설치한 상용 전기 온풍기의 구조는 발열부의 경우 히터에서 발생하는 열을 이용하여 공기를 가열하는 방식으로 하우스 입구쪽에 2대를 설치하여 난방 하였다.

본 실험에 사용한 농업용 고효율 플라즈마 보일러와 일반 상용 전기온풍기의 발열량은 각각 30 KWh, 27KWh 로 동일하였다.



(a) 플라즈마 보일러 모습



(b) 상용 전기 온풍기 모습

그림 1. 실증테스트에 사용된 플라즈마 보일러 및 전기 온풍기

나. 실험용 하우스

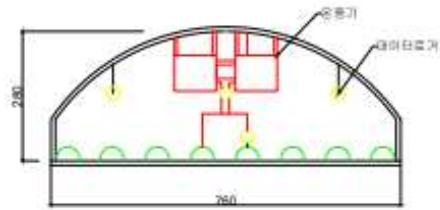
그림 2는 수증 플라즈마 방전 방식 보일러를 설치하여 실증 테스트에 사용된 비닐하우스의 개략도와 온습도 측정용 센서의 설치 위치를 나타낸 것이다.

그림 3과 같이 보일러 실증 테스트에 사용한 하우스는 70,000×2,800×7,400mm(L×H×W)크기로서, 하우스 중앙에 폴리염화비닐(PVC)커튼을 1m 간격으로 이중으로 설치하여 실험구와 대조구로 분리한 후 난방 특성 실험을 수행하였다.

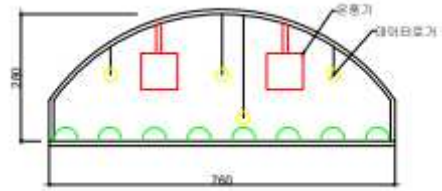
한편, 그림 2에서 보는 바와 같이 실험구와 대조구 하우스 내부의 온습도 측정은 딸기(매향) 재배 두둑에서 10cm 위에서 측정하였다. 또한 지상에서 1,500mm에서 입구 기준 1,000mm, 1,750mm, 3,400mm에 실험구와 대조구별 각각 9개씩 총 18개의 온습도 측정기(SK-L200TH II α, SATO, JAPAN)를 설치하였다(그림 3 참조). 온습도 측정주기는 5분 간격으로 측정하였다.



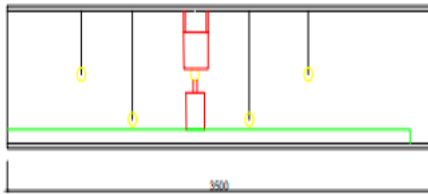
(a) 실험용 하우스 전경



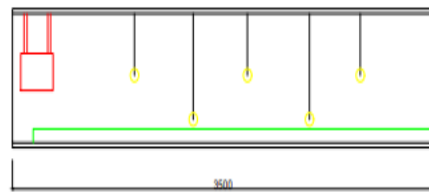
(b) 실험구 정면도



(c) 대조구 정면도



(d) 실험구 측면도



(e) 대조구 측면도

그림 2. 실증 테스트에 사용된 비닐하우스 전경과 개략도



그림 3. 실험용 하우스 내부에서 온습도 센서 및 설치모습

다. 실험용 보일러 가열 특성 분석용 온도 측정

그림 4는 실험용 보일러의 가열 특성을 분석하기 위해 사용된 온도 데이터 로거(midi LOGGER GL840, GRAPTEC, MALAYSIA)를 나타낸 것이다.

실험용 보일러 난방 특성 분석용 온도 측정은 출수부, 입수부, 하우스 내부에 설치한 열교환기로부터 배출되는 공기온도를 측정하였다.

입출수 온도데이터는 입출수 관에 PT 100 Ω 열전대를 입출수 관에 삽입하여 측정하였고, 열교환기로부터 배출되는 공기온도도 동일한 센서를 이용하여 공기배출구에 설치한 후 측정하였다.

플라즈마 보일러 실증 테스트를 위해 사용된 온도 데이터는 일일기준(2021년 12월 3일)과 일정기간 기준(2021년 12월 3일~ 2021년 12월 10일)으로 나누어 분석하였다. 일반 보일러 데이터 경우에도 일정기간 기준(2021년 12월 3일~ 2021년 12월 10일)로 같은 기간으로 분석하였다. 일정기간에 온도데이터는 동일 시간대의 온도를 평균하여 분석에 이용하였다.



(a) 온도 데이터 로거



(b) 출수관 온도 측정



(c) 입수관 온도 측정

그림 4. 실험용 보일러 가열 특성 분석용 온도 측정

라. 실험용 보일러 소비전력량 측정

실험용 보일러의 소비전력량 측정은 그림 5에서 보는 바와 같이 3상유도전력측정기(HIOKI 3169-20, HIOKI, JAPAN)을 사용하였다.



그림 5. 소비전력 측정기 및 설치모습

마. 작물 재배 실험과 생육 측정

작물 재배실험은 실험대상 작물로 딸기(매향)를 이용하였고, 고랑을 만들어 600 화수를 균일하게 배치하여 재배하였으며, 이중 대조구와 실험구에 각각 80 화수를 무작위로 선정하여 엽장, 엽폭, 수고 등의 생육 변화를 스케일을 이용하여 측정하였다. 또한 분광스펙트럼 측정기(AVANTES, Spectrometer and Avalight-CAL Line, Netherlands)를 이용하여 반사광을 측정 후 정규화식생지수인 NDVI, GNDVI 를 산출하였다. 한편, 작물의 클로로필 함량을 예측할 수 있는 SPAD값을 SPAD 측정기(SPAD-502, KONICA MINOLTA, JAPAN)를 이용하여 측정하였다. 생육 측정은 일주일 간격으로 측정하였다.



(a) 실험용 하우스 내부 모습



(b) 생육 측정 모습



(c) 분광스펙트럼 측정



(d) SPAD 측정기



(e) 분광스펙트럼 측정기

그림 6. 생육정보 측정기기 및 측정 모습

바. 고효율 농업용 보일러의 열 특성 분석

온실 내 수평면의 태양강도는 수도권기상대에서 측정된 일평균 태양강도를 시간대별로 평균하여 이용하였다.

손실열량은 그린 하우스 피복재 외부로 손실되는 열량(Q_{Loss})을 주간의 경우 식 (4)를 이용하고, 야간의 경우 식 (5)을 이용하여 산출한다. 또한 지면으로 저장되거나 방열되는 (Q_{Soil})은 식 (6)을 이용하여 산출한다.

$$Q_{Loss-day} = A_g \times h_t \times (T_{in} - T_{ambi}) \dots\dots\dots(4)$$

$$Q_{Loss-night} = A_g \times h_t \times (1 - f_r) \times (T_{in} - T_{ambi}) \dots\dots\dots(5)$$

$$Q_{Soil} = \sum_{i=1}^n m_{soil} \times C_{p,soil} \times \Delta T \dots\dots\dots(6)$$

여기서,

- h_t : Heat transfer coefficient of greenhouse cover
- h_v : Ventilation heat transfer coefficient of greenhouse
- T_{in} : Inside temperature of the greenhouse ($^{\circ}\text{C}$)
- T_{ambi} : Ambient temperature of the greenhouse ($^{\circ}\text{C}$)
- A_g : Wall area of greenhouse (m^2)
- m_{soil} : Mass of soil ($\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$)
- $C_{p.soil}$: Specific heat at constant pressure of soil ($0.96\text{kJ}/\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)
- ΔT : Difference temperature between soil layers ($^{\circ}\text{C}$)
- f_r : Saving factor
(Aluminum+Polyethylene: 0.55, Non-woven fabric: 0.30)

2. 결과 및 고찰

가. 주야간 하우스 외부로 손실되는 열량 분석

1) 일일 기준 하우스 외피로 손실되는 열량(Q_{Loss})

그림 7은 각각 일일 기준 실험구 및 대조구 하우스의 외피를 통해 외부로 방출된 손실열량과 누적 손실열량을 주야간(18:00~06:00)으로 나타낸 것이다.

그림 7에 나타낸 바와 같이 하우스 외피를 통한 손실열량은 대조구가 실험구보다 더 큰 경향을 보였으나 큰 차이는 없는 것으로 나타났다.

일일 기준 하우스 외피로 손실되는 누적열량이 실험구는 5,347 kJ/h 대조구는 5,471 kJ/h로 나타나 대조구가 실험구보다 약 124 kJ/h의 손실열량이 더 많은 것으로 나타났다.

이와 같이 대조구가 실험구보다 하우스 외피로 손실된 열량이 더 많은 이유는 대조구 하우스의 내부온도 변화가 실험구와 비교하여 더 크기 때문으로 판단된다.

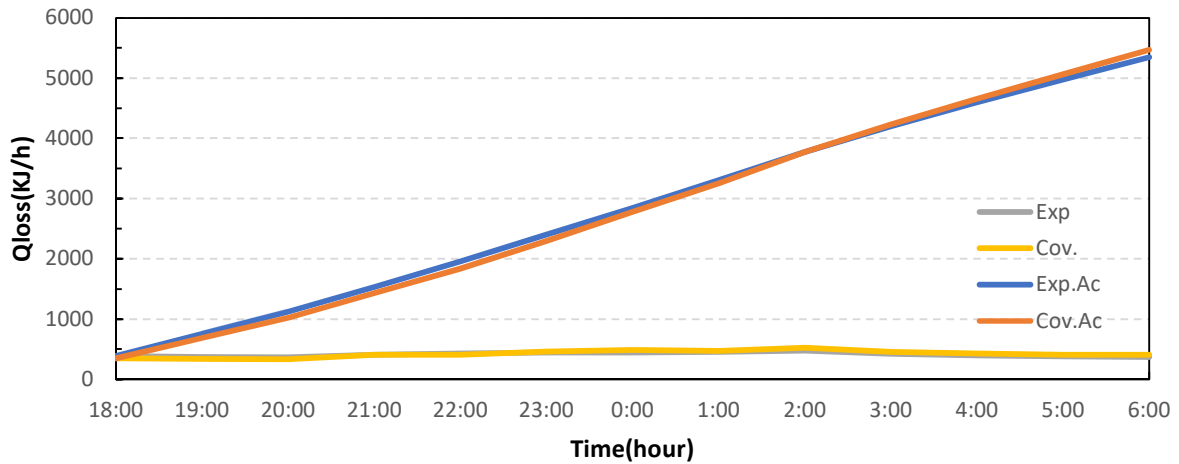


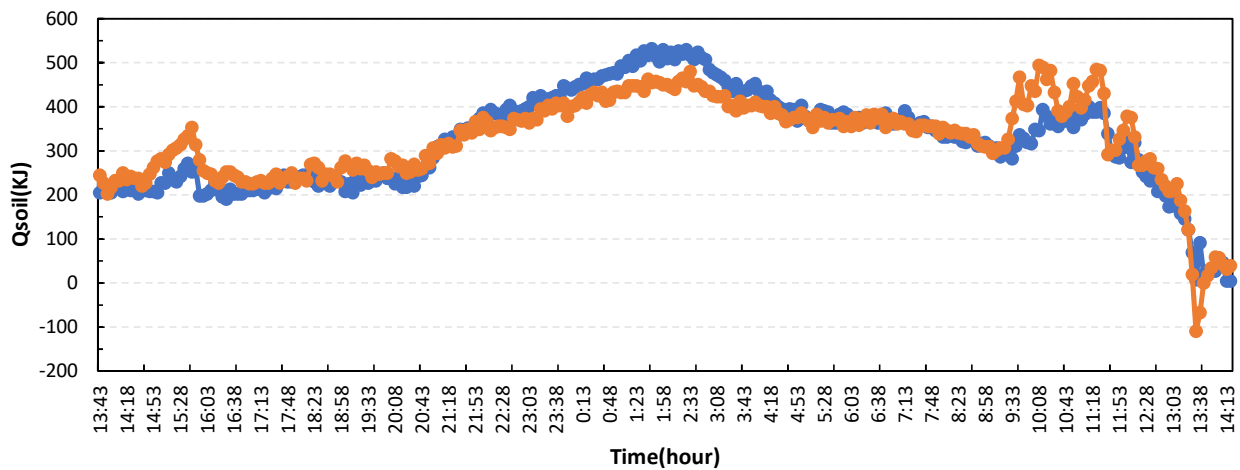
그림 7. 일일 기준 주야간 기준 하우스 외피로 손실되는 열량

2) 일일 기준 하우스 지면을 통한 손실열량(Q_{Soil})

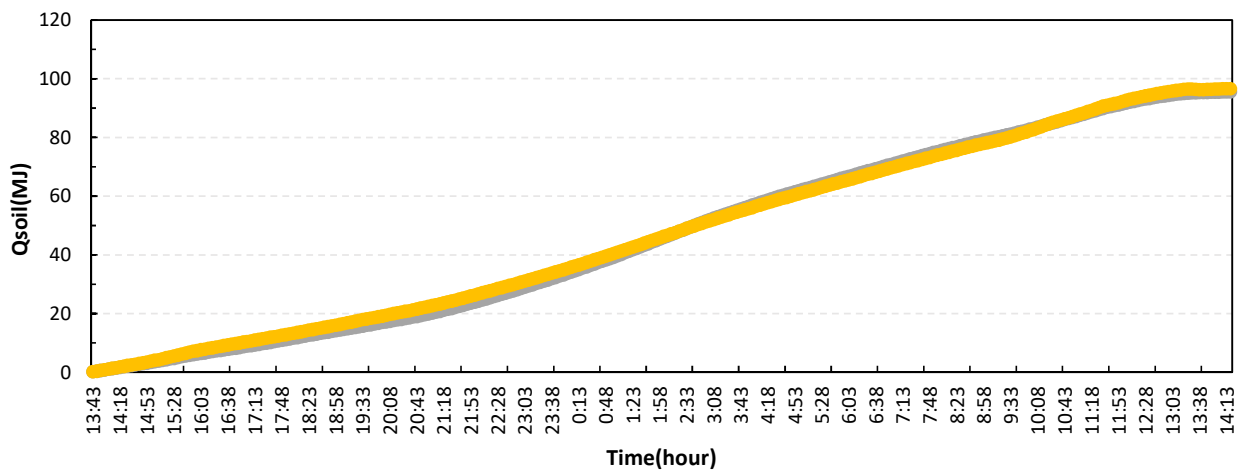
그림 8은 일일 기준 실험구와 대조구의 지면을 통한 열손실량과 누적열손실량을 나타낸 것이다.

그림 8에서 보는 바와 같이 하우스의 지면을 통한 열손실량은 실험구가 대조구보다 대체로 적은 경향을 보였으나 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 또한 야간의 경우에는 토양으로부터 하우스 내부 공간으로 열량이 공급되는 경향을 보였고, 주간의 경우에는 토양으로 열량이 공급되어 손실열량이 발생하는 것으로 나타났다.

실험구와 대조구 하우스의 지면을 통한 열손실량은 각각 320.513MJ와 326.846MJ로 서 약 6.333MJ로 대조구가 많은 것으로 나타났으나 큰 차이는 없었다.



(a) 지면으로의 손실열량



(b) 누적 손실열량

그림 8. 일일 기준 하우스 지면을 통한 손실열량

나. 설정온도 기준 온실 내부 온도 변화

1) 일일 기준 야간 온실 내부 온도 변화

그림 9는 일일 기준 온실내의 야간 온도변화를 나타낸 것이다. 본 실험에서 온실 내부온도는 15°C 로 설정하였다.

그림 9에서 보는 바와 같이 대조구의 내부온도는 설정온도 기준으로 편차가 설정온도보다 높게 나타났고, 실험구의 경우 시간이 흐르면서 설정온도보다 1~3°C 낮게 유지했지만 온도편차 작은 경향을 나타내었다.

실험용 하우스 내부온도 변화는 대조구의 경우 최대 16.7°C 에서 최소 12.9°C 의 온도 분포를 나타내었고, 실험구는 최대 15.5°C 에서 최소 13.4°C 의 온도 분포를 나타내었다. 설정온도 대비 온실내의 온도 편차는 대조구는 최대 3.3°C 를 보였고, 실험구는 최대 2.1°C 로 나타났다.

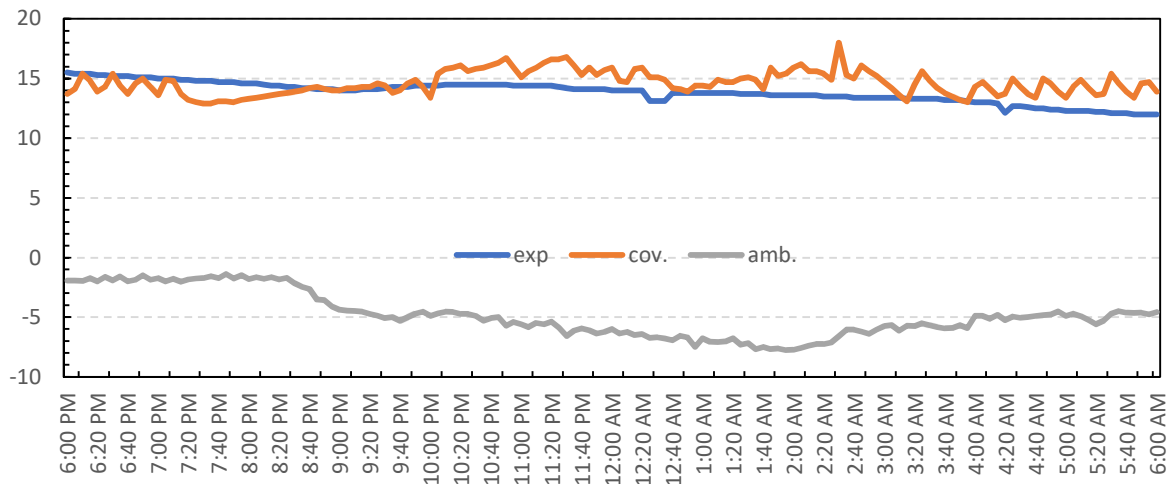


그림 9. 일일 기준 야간 온실내의 온도변화

다. 전기보일러와 플라즈마 보일러의 입출수온도 변화

그림 10은 플라즈마 보일러의 입출수온도 변화를 나타낸 것이다.

그림 10에서 보는 바와 같이 플라즈마 보일러 출수온도의 변화는 최대 102.05°C, 최소 19.85°C 로 온도편차는 82°C 로 나타났고, 출수 온도는 평균 75.3°C, 입수온도의 경우에는 16.0°C 낮은 것으로 나타났다.

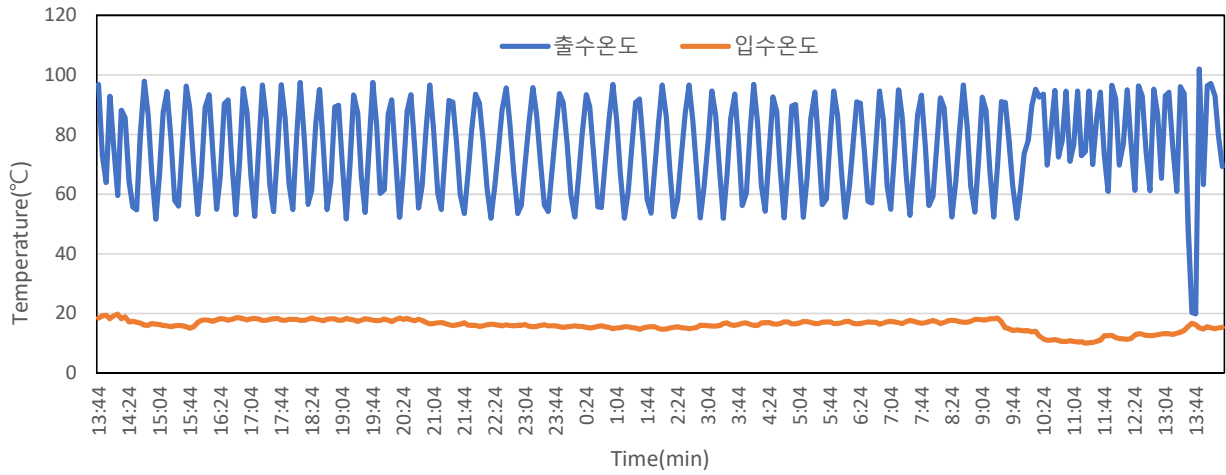


그림 10. 플라즈마 보일러의 출수온도 변화

라. 플라즈마 보일러의 설정 출수 온도 상승 시간

그림 11은 플라즈마 보일러의 설정 출수온도 도달 시간을 나타낸 것이다. 그림 15에서 보는 바와 같이 설정 출수온도 도달시간은 플라즈마 보일러가 10분이 소요되는 것으로 나타났다. 이것은 본 연구과제 전에 수행한 연구 결과와 동일한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

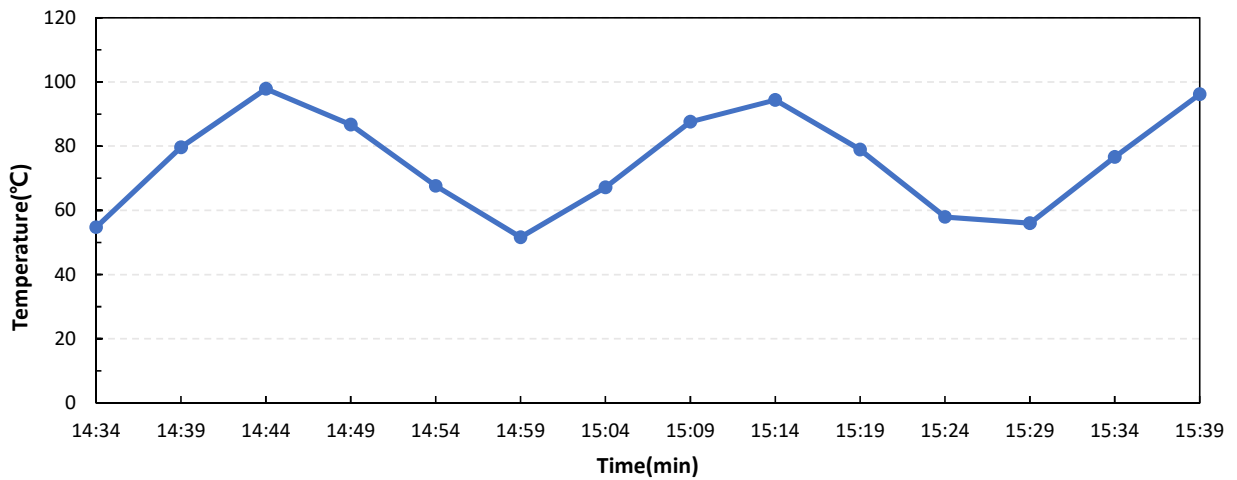


그림 11. 플라즈마 보일러의 급탕 온도 도달 시간 변화

마. 열교환기 배풍온도

그림 12에 플라즈마 보일러 열교환기와 상용 전기 온풍기에서 배출되는 공기 온도 변화를 나타낸 것이다.

그림 12에서 보는 바와 같이 플라즈마 보일러 열교환기와 상용 전기 온풍기에서 배출되는 공기 온도는 대조구가 실험구보다 높은 경향을 보였다.

플라즈마 보일러 열교환기에서 배출되는 공기 온도는 평균 25.1℃ 로 나타났고, 상용 전기 온풍기의 경우에는 28.1℃ 로 나타나 상용 전기 온풍기가 플라즈마 보일러 열교환기에서 배출되는 공기 온도보다 3℃ 높은 것으로 나타났다.

이와 같이 상용 전기온풍기의 배풍온도가 높은 이유는 플라즈마 보일러의 경우 보일러에서 약 75℃ 로 가열된 물이 열교환기에서 간접 열교환이 이루어지지만 상용 전기온풍기의 경우 히터 코일에 직접적으로 공기가 접촉하여 열교환이 이루어지기 때문으로 판단된다.

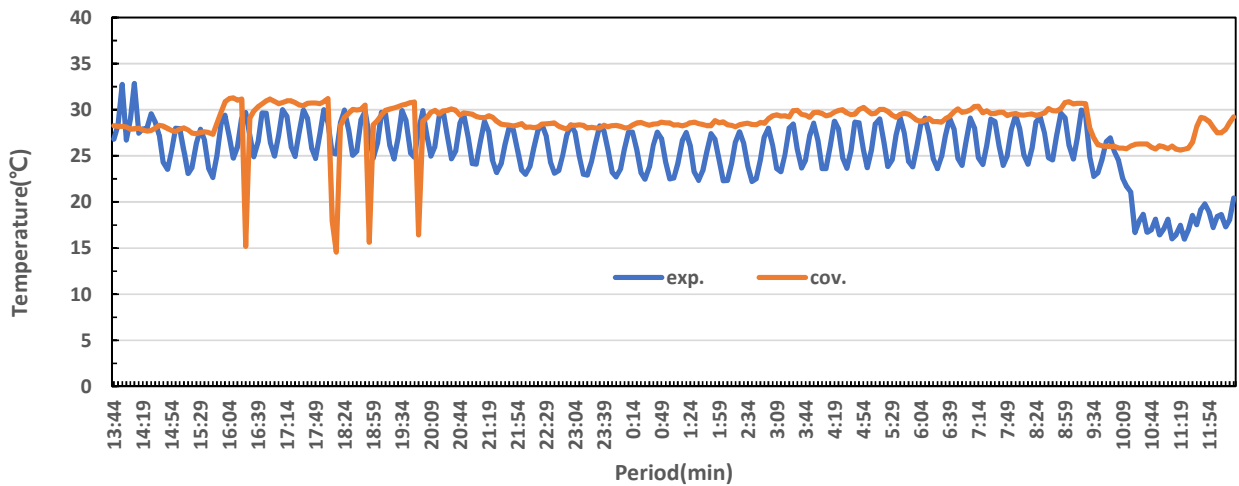


그림 12. 열교환기 배풍온도 변화

바. 식물 재배 실험

1) 정규화식생지수(NDVI)

그림 13은 실험구와 대조구 온실에서 재배한 딸기(매향)를 분광스펙트럼 측정기(AVANTES, Spectrometer and Avalight-CAL Line, Netherlands)를 이용하여 1주 간격으로 측정한 정규식생지수(NDVI) 값을 나타낸 것이다.

그림 13에서 보는 바와 같이 실험구인 플라즈마 보일러를 설치 한 구역과 일반적인 전기 온풍기를 설치한 대조구와 비교하여 2021년 12월 10일 실험구의 정규식생지수(NDVI)이 높은 것으로 나타났으나 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

실험구의 정규식생지수값(NDVI)은 평균 0.911 정도를 나타내었고, 대조구의 정규식생지수는 평균 0.909 정도로서 실험구가 대조구와 비교하여 약 0.002 정도 높은 것으로 나타났다.

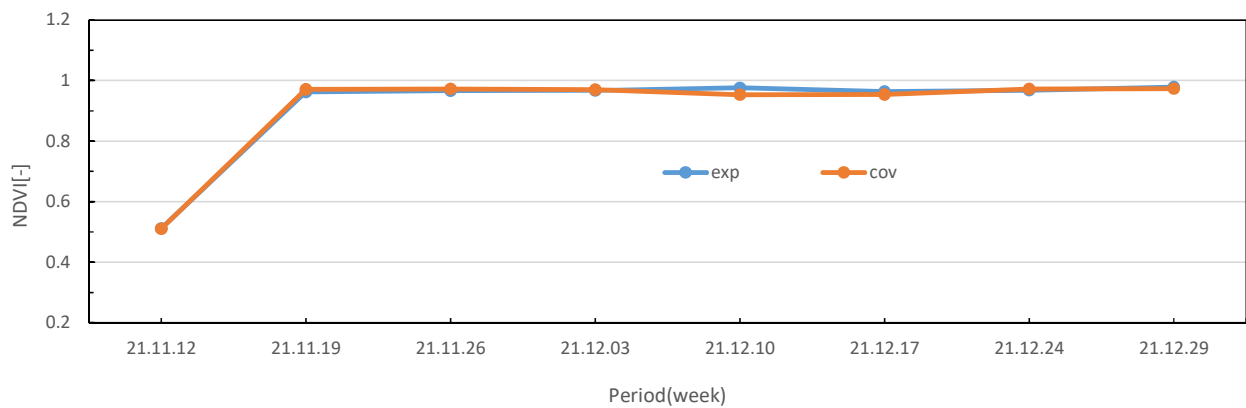


그림 13. 실험구와 대조구의 정규식생지수(NDVI)

2) 녹색정규식생지수(GNDVI)

그림 14은 분광스펙트럼 측정기(AVANTES, Spectrometer and Avalight-CAL Line, Netherlands)를 이용하여 1주 간격으로 측정한 녹색정규식생지수(GNDVI) 값을 나타낸 것이다.

그림 14에서 보는 바와 같이 실험구인 플라즈마 보일러를 설치 한 구역은 일반적인 전기식 온풍기를 설치한 대조구와 비교하여 대조구가 실험구보다 높게 성장하는 경향을 보였지만 실험구도 지속적으로 대조구와 같은 비율로 성장하는 경향을 보였다.

실험구의 녹색정규식생지수(GNDVI)은 평균 0.668 정도를 나타내었고, 대조구의 녹색정규식생지수(GNDVI)는 평균 0.660 정도를 나타내 실험구가 대조구와 비교하여 0.008 높게 나타났다.

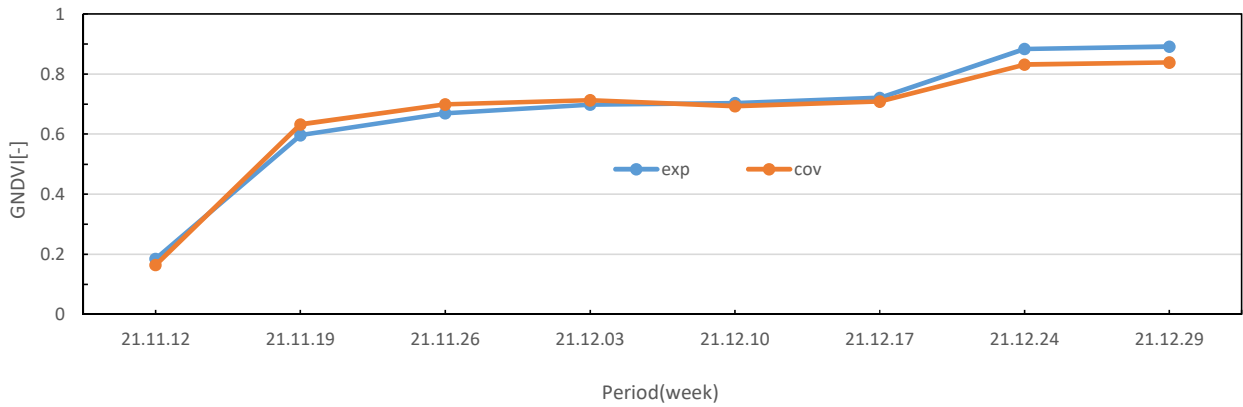


그림 14. 실험구와 대조구의 녹색정규식생지수(GNDVI)

3) SPAD 값

그림 15은 실험구와 대조구에서 재배한 딸기(매향)의 SPAD 값을 나타낸 것이다. 일반적으로 SPAD 값은 작물의 클로로필 함량을 예측할 수 있기 때문에 농업분야의 작물 생육정보로 활용되고 있다.

SPAD 값은 실험구의 경우 32.937 이었고, 대조구는 35.733 으로 대조구가 실험구보다 2.796 높은 것으로 나타났다. 이후 실험 7주차에서는 실험구가 경우 44.020 이었고, 대조구는 44.106 으로 큰 차이는 없었고, 7주간 클로로필 함량의 증가는 실험구가 11.083 증가하였고, 대조구의 경우에는 8.373 증가한 것으로 나타나 실험구가 대조구보다 2.71 정도 증가량이 더 높은 것으로 나타났다.

이와 같이 실험구가 대조구보다 클로로필 함량의 증가율이 높은 이유는 대조구보다 실험구의 내부 온도변화가 적어 생육 온도의 안정화로 인하여 생장이 더 좋은 것으로 판단된다.

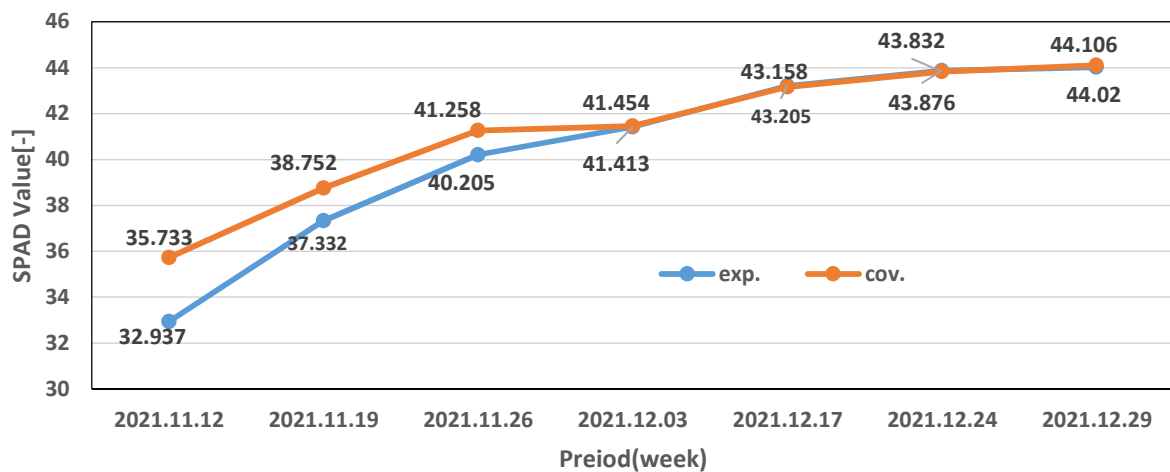


그림 15. 실험구와 대조구의 SPAD값 비교

3) 수고 성장량

그림 16와 17은 7 주간 실험구와 대조구 온실에서 재배한 딸기(매향)의 수고 변화와 누적 성장량을 나타낸 것이다.

그림 16에서 보는 바와 같이 수고 성장량은 실험구가 대조구보다 더 높은 경향을 보였고, 특히, 실험시작 3주차부터 실험구가 대조구보다 성장량이 급격히 변화한 것으로 나타났다.

수고 성장량은 1주차에서는 대조구가 실험구보다 16.76 mm 더 높은 경향을 보였으나 1주차 이후로 실험구가 급격하게 성장하여 3주차 이후 대조구와 비교하여 더 높은 성장량을 나타내었다.

그림 17에서 보는 바와 같이 실험 7주차에서의 누적 성장량은 실험구에서 253.85 mm 이었고, 대조구의 경우에는 240.21 mm 로 나타나 실험구가 대조구 보다 약 13.64 mm 높게 성장한 것으로 나타났다.

이것은 전술한 바와 같이 실험구가 대조구보다 내부 온도변화가 적어 생육 온도의 안정화로 인하여 생장이 더 좋은 것으로 판단된다.

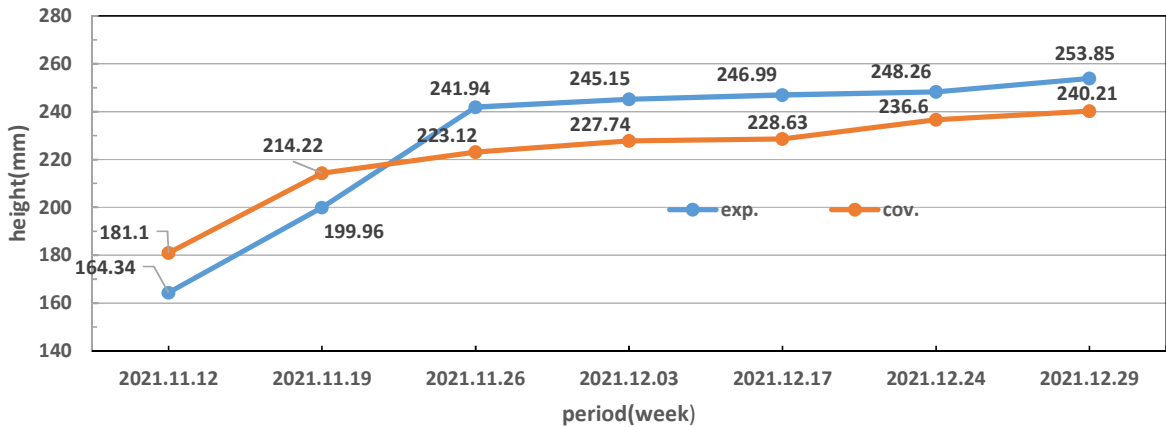


그림 16. 주간 딸기 수고(높이) 변화

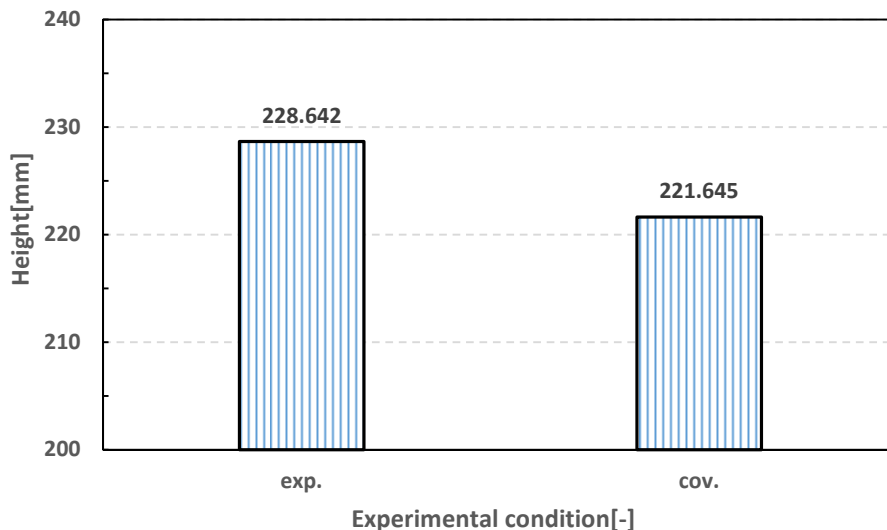


그림 17. 딸기 누적 수고(높이) 성장량

4) 엽장 성장량

그림 18과 19는 실험구과 대조구에서 재배한 딸기(매향) 엽장 성장량과 7주간 누적 엽장 성장량을 비교하여 나타낸 것이다.

그림 18에서 나타낸 바와 같이 0~3주차에서는 실험구가 대조구보다 엽장 성장량은 17.89 mm 정도 더 높은 경향을 나타내었고, 그 이후 기간에서는 성장량 변화 추이가 유사한 것으로 나타났다.

그림 19에서 보는 바와 같이 7주간 실험구 딸기의 누적 성장량은 9.564 mm 이었고, 대조구의 경우에는 78.674mm 로 나타나 실험구가 대조구 보다 약 17.89 mm 정도 엽장 성장량이 높은 것으로 나타났다.

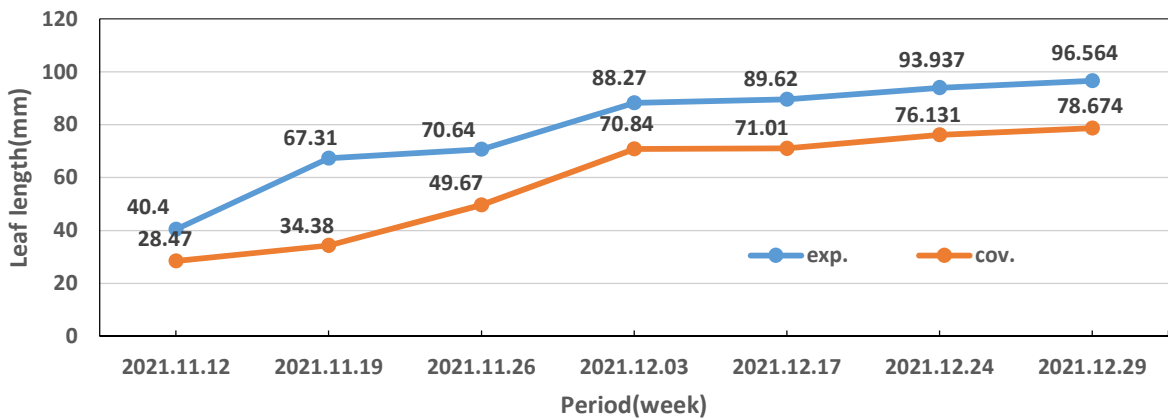


그림 18. 주간 딸기의 엽장 성장량

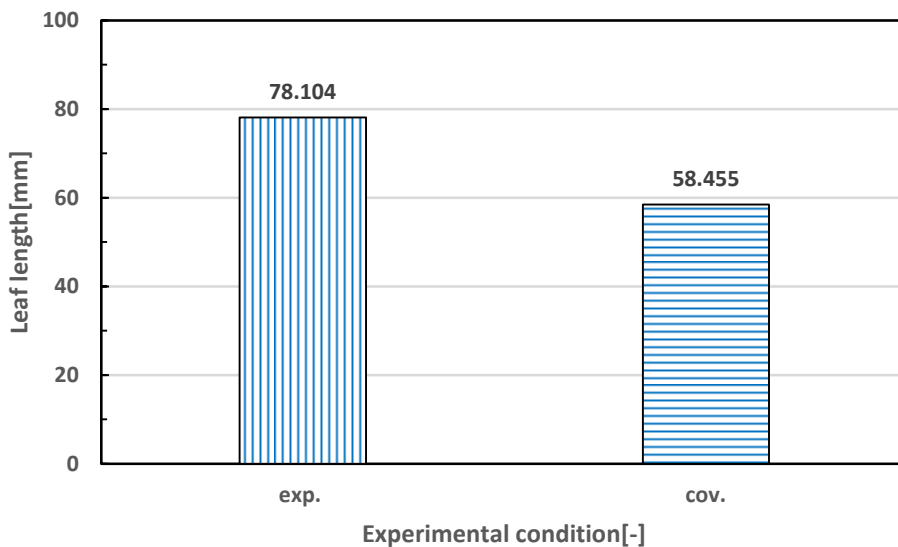


그림 19. 딸기의 누적 엽장 성장량

5) 엽폭 성장량

그림 20과 21은 실험구과 대조구의 딸기(매향) 엽폭 성장량과 7주간의 누적 성장량을 나타낸 것이다.

그림 20에서 나타낸 바와 같이 실험구와 대조구에서 재배한 딸기의 엽폭 성장량은 실험구가 대조구보다 7.909 mm 정도 더 높은 경향을 나타냈다.

그림 21에서 보는 바와 같이 7주간 실험구 딸기의 누적 성장량은 69.742 mm 이었고, 대조구의 경우에는 61.833 mm 로 나타나 실험구가 대조구보다 약 7.909 mm 정도 엽장 성장량이 높은 것으로 나타났다.

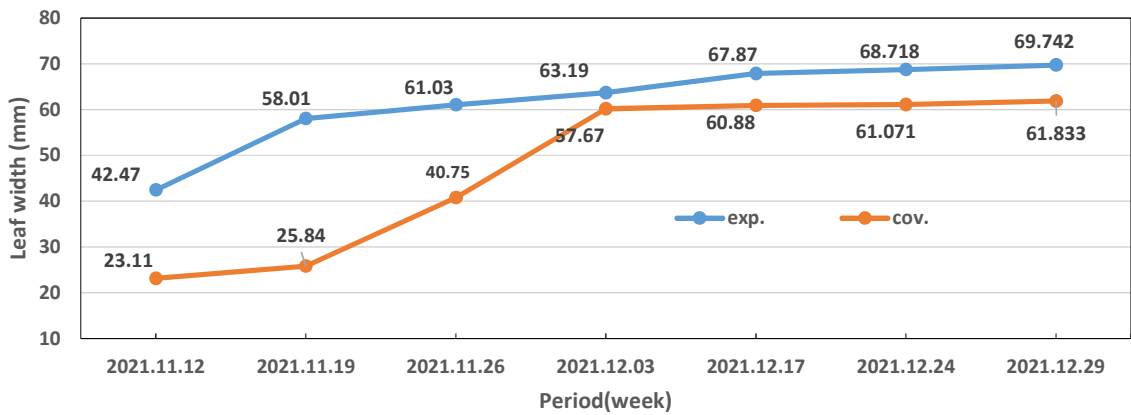


그림 20. 주간 딸기의 엽폭 성장량

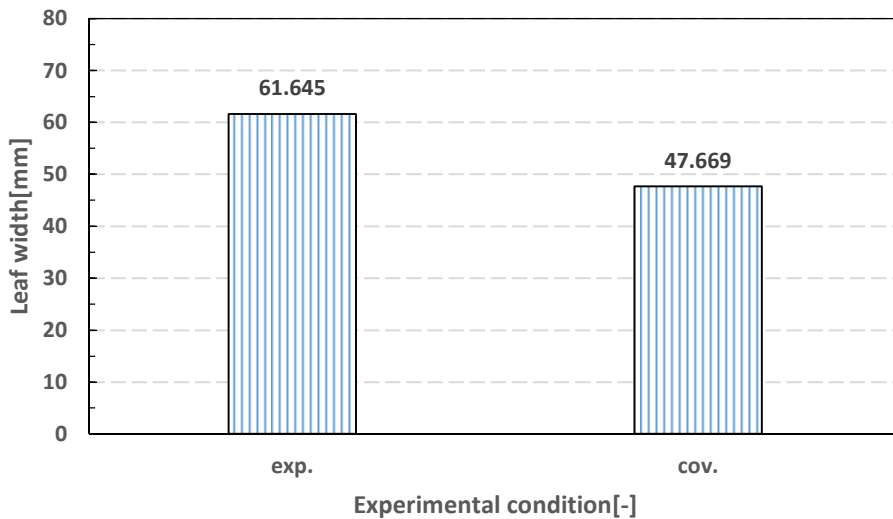


그림 21. 딸기의 누적 엽폭 성장량

사. 플라즈마 보일러와 일반 전기 온풍기의 평균 소비 전력

그림 22는 일일 기준 실험구 보일러와 대조구 온풍기가 소모한 소비 전력량을 나타낸 것이다.

그림 22에 나타난 바와 같이 온실 내부를 난방하기 위해 사용된 소비전력량은 실험구가 대조구보다 더 적게 소비되는 것으로 나타내었다.

일일 기준 플라즈마 보일러와 상용 전기온풍기의 소비전력량은 각각 78.718 kW/h, 116.842 kW/h 로서 플라즈마 보일러가 상용 전기온풍기보다 약 38.124 kW/h 적게 소비되어 플라즈마 보일러가 전기 온풍기 보다 약 33% 정도 에너지 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 플라즈마 보일러가 상용 전기온풍기보다 동일한 난방조건에서 에너지 소비량은 적은 이유는 전술한 바와 같이 플라즈마 방식 가열 메커니즘이 일반 전도방식 가열 메커니즘 보다 가열 능력이 우수했기 때문으로 판단된다.

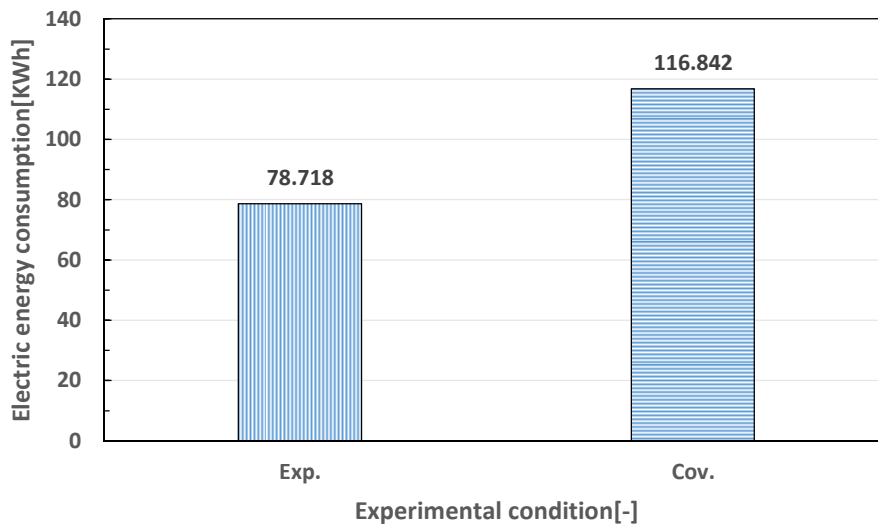


그림 22. 일정기간 플라즈마 보일러와 상용 전기온풍기의 소비 전력량 비교

아. 경제성 분석

1) 경제성 분석방법

플라즈마 보일러 설치에 따른 경제성 분석은 다음의 항목과 가정을 바탕으로 상용 전기보일러와 비교하여 분석하였다.

- (1) 인건비 포함 보일러 설치비용(100평 기준)
- (2) 보일러 가격(30 kWh 기준)
- (3) 보일러 내구 연수(20년 기준)
- (4) 소비전력량 감소에 따른 이득 비용

2) 경제성 분석

(가) 기초자료 분석

표 1은 본 연구에 사용된 플라즈마 보일러를 상용 전기온풍기와 비교하여 인건비 포함 보일러 설치비용, 보일러 가격, 보일러 내구 연수 기초 조사 자료를 나타낸 것이다.

표 1에서 보는 바와 같이 보일러 설치비용은 플라즈마 보일러와 상용 전기온풍기가 100평 기준 2,500,000원이 소비되는 것으로 나타났다. 보일러 가격의 경우 30 kWh 기준 플라즈마 보일러가 2,500,000원, 상용 전기온풍기가 3,000,000원(1,500,000원×2대) 이었고, 내구연수는 플라즈마 보일러가 20년, 전기보일러가 5년으로 나타났다.

표 1 플라즈마 보일러와 상용 전기보일러 경제성 분석

구분	플라즈마 보일러	상용 전기보일러
설치비용[원]	2,500,000	2,500,000
가격[원]	2,500,000	3,000,000
내구연수[년]	20	5

(나) 내구연수에 따른 경제성 분석

내구연수에 따른 경제성을 분석해 보면 플라즈마 보일러가 20년으로서 상용 전기보일러의 내구연수 5년보다 4배 높은 것으로 나타나 5년에 1번씩 보일러를 교체할 경우 4번의 보일러 교체와 설치비용이 소요되는 것으로서 20년 기준으로 보일러 설치비용과 보일러 가격은 다음과 같이 산출된다.

- 플라즈마 보일러

$$2,500,000\text{원(설치비용)}+2,500,000\text{원(보일러 가격)}= 5,000,000\text{원}$$

- 상용 전기보일러

$$2,500,000\text{원(설치비용)}+3,000,000\text{원(보일러 가격)}\}\times 4\text{회}= 22,00,000\text{원}$$

(다) 소비전력량 감소에 따른 이득 비용

경제성 분석 중 소비전력 감소에 대한 전기 요금은 그림 23에 나타난 바와 같이 한국전력공사에서 책정한 농사용 전력 ‘을’ 중 고압(A,B)를 사용하였다. 그 이유는 한국전력공사의 농사용 전력 ‘을’은 ‘농사용 육묘 또는 전조재배에 사용하는 전력으로 계약 전력이 1,000 KW 미만’ 이 농사용 전력으로 정의하고 있고, 본 플라즈마 보일러 실증테스트를 수행한 시설하우스가 여기에 해당되기 때문이다. 또한 1년 중 난방기간은 11월 ~ 3월까지 5개월 간 난방을 수행하는 것으로 가정하여 1 KW 당 36.9원을 적용하여 전기요금을 산출하였다.

구분		기본요금(원/kW)	전력량 요금(원/kWh)	
갑		360	16.6	
나	저압	1,150	34.2	
	고압(A,B)	1,210	여름철(6~8월)	36.9
			봄·가을철(3~5, 9~10월)	34.9
겨울철(11~2월)			36.9	

그림 23. 한국전력공사에서 책정한 농용 전기요금

연간 사용되는 소비 전력 비교는 본 연구 결과인 일주일간 사용된 소비전력을 기준으로 산출하였다. 전술한 바와 같이 플라즈마 보일러를 설치한 실험구의 경우 일일 소비된 소비전력량은 78.718 kW/h 이고, 시중에 판매되는 상용 전기보일러를 설치한 대조구의 소비 전력량은 116.842 kW/h 이었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 연간 전기요금을 산출하면 다음과 같다.

- 플라즈마 보일러

$$78.718 \text{ kW/h} \times 30 \text{ 일} \times 4 \text{ 개월} \times 36.9 \text{ 원} = 348,563 \text{ 원}$$

- 상용 전기보일러

$$116.842 \text{ kW/h} \times 30 \text{ 일} \times 4 \text{ 개월} \times 36.9 \text{ 원} = 517,376 \text{ 원}$$

따라서 플라즈마 보일러를 사용할 경우 일반 전기보일러보다 168,813원을 절약할 수 있는 것으로 나타났다.

(라) 플라즈마 보일러 총 이득 비용

플라즈마 보일러 사용에 따른 총 이득비용을 표 2에 나타내었다.

표 2에서 보는 바와 같이 일반 전기온풍기 대신 플라즈마 보일러를 설치할 경우 초기 기계가격과 설치비용에서 플라즈마 보일러가 약 500,000원 적게 소요되고, 내구연구는 4배 길기 때문에 일반 전기온풍기보다는 플라즈마 보일러가 경제적인 것으로 나타났고, 소비전력량 감소에 따른 전기요금도 연간 약 168,813원을 절약할 수 있기 때문에 플라즈마 보일러의 내구연구 20년은 기준으로 총 이득비용을 산출하여 연간 이득비용으로 환산하면 연간 약 1,018,813원의 경제적 효과가 있는 것으로 판단된다.

표 2 내구연수 20년 기준 플라즈마 보일러와 상용 전기온풍기 경제성 분석

구분	플라즈마 보일러	상용 전기보일러
설치비용[원]	2,500,000	10,000,000(2,500,000×4회)
가격[원]	2,500,000	12,000,000(3,000,000×4회)
전기요금[원]	6,971,260(348,563원×20년)	10,347,520(517,376원×20년)
총 소요비용[원]	11,971,260[A]	32,347,520[B]
이득비용[원]		20,376,260[C]
(A-B)		
연간 이득비용[원]		1,018,813
(C/20년)		

○ 연구개발 목표<1단계-2차년도>

수중 플라즈마 방전 방식을 이용한 고효율 농업용 보일러 설계 검토 및 실증 테스트

○ 연구개발 내용

- 농가 보급형 발열량 20kW급 고효율 플라즈마 보일러 코어, 유닛 설계 검토
- 농가 보급형 발열량 60kW급 고효율 플라즈마 보일러 설계 검토
- 농가 보급형 발열량 60kW급 고효율 플라즈마 보일러 실증 테스트
 - ▷ 150~200평 농업용 시설하우스 2개소 선정 및 제품 설치
 - ▷ 작물재배 비교실험 평가
(엽장, 엽폭, 수고, 식생지수, 엽록소 함량)
 - ▷ 고효율 농업용 보일러의 난방 특성 분석
(하우스 내부 온도 및 습도, 보일러 입출수 온도, 열교환기 배풍온도, 소비전력량)
- 농가 보급형 발열량 60kW급 고효율 플라즈마 보일러 경제성 분석
 - ▷ 기존 제품 대비 기능 및 성능에 대한 비교분석과 가격 경쟁력 분석

○ 연구개발 수행과정 및 내용

1. 재료 및 방법

가. 공시 보일러

그림 1은 실증 테스트 하우스에 설치할 플라즈마 보일러와 상용 전기보일러를 나타낸 것이다.

그림 1에서 보는 바와 같이 1단계 2차년도 보일러 실증 테스트는 실험구의 경우 주식회사 (주) GA에서 개발한 20 KW 유닛이 3개 장착된 60 KW 급 수중 플라즈마 방전 방식 보일러를 사용하고, 대조구는 일반 시설하우스 농가에서 사용되는 60 KW 급 상업용 전기 온풍기 (DI-M9040KH, 동일브레이싱, 한국)를 사용하여 테스트를 수행할 예정이다. 현재 실험용 온실에 11월 중순까지 설치하여 플라즈마 보일러의 난방특성 및 생육 특성 실험을 수행할 예정이다.

실험구에 설치한 농업용 고효율 플라즈마 보일러는 입수부, 발열부, 출수부 및 제어부로 구성되어 있고, 가열된 물은 출수부에서 배출된 후 하우스 중앙에 설치된 열교환기를 거쳐 하우스 내부 난방에 사용된 후 입수부로 들어온다. 가열된 물의 순환은 0.95 kW/h 순환펌프 (PU-951M, Wilo, KOREA)를 이용하였다.

대조구 하우스에 설치한 상용 전기보일러는 플라즈마 보일러와 유사한 구조이나, 발열부의 경우 일반 코일형 발열기가 설치되어 물을 가열시키는 구조로서 플라즈마 보일러의 발열부와 상이하고, 입출수 및 내부순환 펌프는 동일한 사양의 제품을 사용할 예정이다.



(a) 60 KW 급 플라즈마 보일러



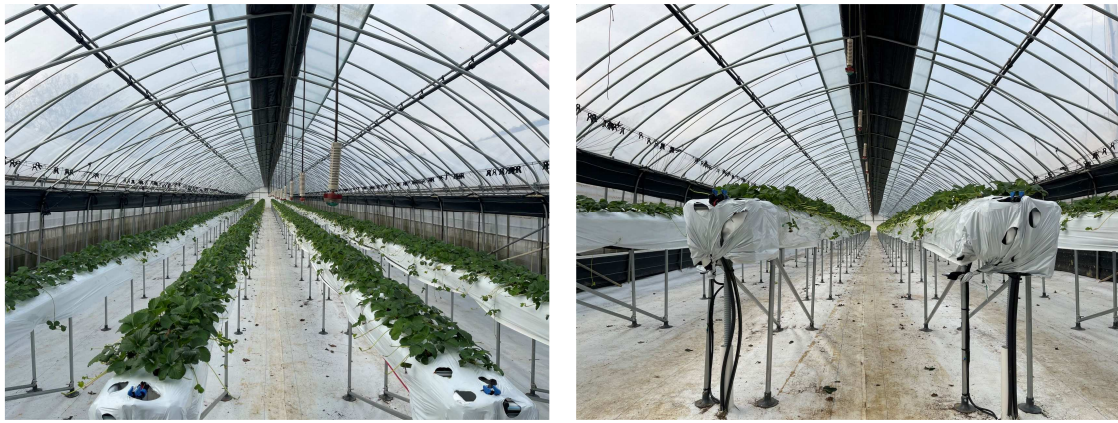
(b) 상용 전기 온풍기

그림 1. 실증테스트에 사용된 플라즈마 보일러 및 전기 온풍기

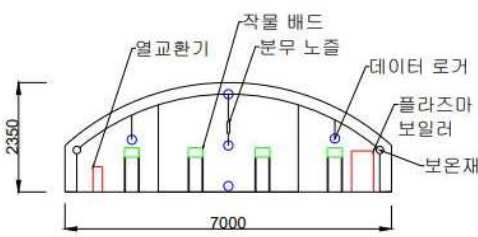
나. 실험용 하우스

그림 2는 수중 플라즈마 방전 방식 보일러를 설치하여 실증 테스트에 사용된 비닐하우스의 개략도와 온습도 측정용 센서의 설치 위치를 나타낸 것이다.

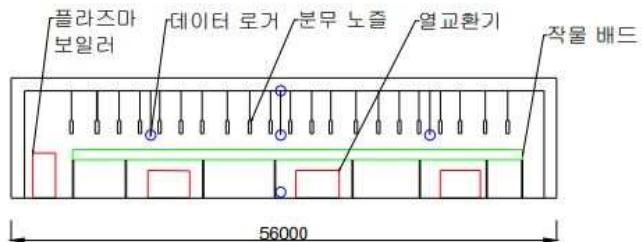
그림 2과 같이 보일러 실증 테스트에 사용한 하우스는 56,000×2,350×7,000mm(L×H×W)크기로서, 1층 하우스 내부에 보온스크린이 설치된 비닐하우스 온실이다. 한편, 그림 2에서 보는 바와 같이 실험구와 대조구 하우스 내부에는 10월초에 딸기(매향)를 고설재배 배드에 정식하였다.



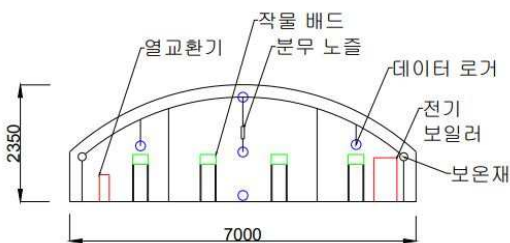
(a) 실험용 하우스 전경



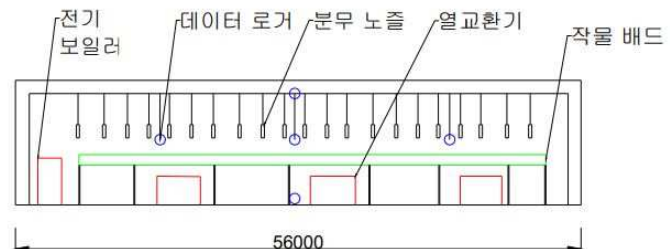
(b) 실험구 정면도



(c) 실험구 측면도



(d) 대조구 정면도



(e) 대조구 측면도

그림 2. 실증 테스트에 사용된 비닐하우스 전경과 개략도

다. 실험용 보일러 가열 특성 분석용 온도 측정

그림 2에서 보는 바와 같이 실험구와 대조구 하우스 내부의 온습도 측정은 딸기(매향) 재배 두둑에서 10cm 위에서 측정한다. 또한 지상에서 1,500 mm 에서 입구 기준 14,000 mm, 28,000 mm, 42,000 mm 에 실험구와 대조구별 각각 9개씩 총 18개의 온습도 측정기 (SK-L200THII α, SATO, JAPAN)를 설치하여 측정주기는 5분 간격으로 온습도를 측정한다. 또한 하우스 외부의 외기온과 하우스 중앙에 10 cm 간격으로 지하 50 cm 까지 PT 100 Ω 열전대를 매몰하여 지중온도변화를 측정 후 난방특성을 분석한다.

그림 3은 실험용 보일러의 난방 특성을 분석하기 위해 사용된 온도 데이터 로거(midi LOGGER GL840, GRAPTEC, MALAYSIA)를 나타낸 것이다.

실험용 보일러 난방 특성 분석용 온도 측정은 출수부, 입수부, 하우스 내부에 설치한 열교환

기로부터 배출되는 공기온도를 측정한다.

입출수 온도데이터는 입출수 관에 PT 100 Ω 열전대를 입출수 관에 삽입하여 측정하였고, 열교환기로부터 배출되는 공기온도도 동일한 센서를 이용하여 공기배출구에 설치한 후 측정할 예정이다.

플라즈마 보일러 실증 테스트를 위해 사용된 온도 데이터는 1단계 1차년도와 동일하게 일일 기준과 1주일 간격의 일정기간 기준으로 나누어 분석한다.



그림 3. 실험용 보일러 가열 특성 분석용 온도 측정기

라. 고효율 농업용 보일러의 열 특성 분석

온실 내 수평면의 태양강도는 수도권기상대에서 측정된 일평균 태양강도를 시간대별로 평균하여 이용한다.

손실열량은 그린 하우스 피복재 외부로 손실되는 열량(Q_{Loss})을 주간의 경우 식 (1)을 이용하고, 야간의 경우 식 (2)를 이용하여 산출한다. 또한 지면으로 저장되거나 방열되는 (Q_{Soil})은 식 (3)을 이용하여 산출한다.

$$Q_{Loss-day} = A_g \times h_t \times (T_{in} - T_{ambi}) \dots\dots\dots(1)$$

$$Q_{Loss-night} = A_g \times h_t \times (1 - f_r) \times (T_{in} - T_{ambi}) \dots\dots\dots(2)$$

$$Q_{Soil} = \sum_{i=1}^n m_{soil} \times C_{p,soil} \times \Delta T \dots\dots\dots(3)$$

여기서,

- h_t : Heat transfer coefficient of greenhouse cover
- h_v : Ventilation heat transfer coefficient of greenhouse
- T_{in} : Inside temperature of the greenhouse (°C)
- T_{ambi} : Ambient temperature of the greenhouse (°C)
- A_g : Wall area of greenhouse (m²)
- m_{soil} : Mass of soil (kg/m²·hr)
- $C_{p,soil}$: Specific heat at constant pressure of soil (0.96kJ/kg·°C)
- ΔT : Difference temperature between soil layers (°C)
- f_r : Saving factor
(Aluminum+Polyethylene: 0.55, Non-woven fabric: 0.30)

마. 실험용 보일러 소비전력량 측정

실험용 보일러의 소비전력량 측정은 그림 4에서 보는 바와 같이 3상유도전력측정기(HIOKI 3169-20, HIOKI, JAPAN)을 사용한다.



그림 4. 소비전력 측정기

바. 실증테스트 하우스 기초 생육조사 샘플링

그림 5는 실험구 및 대조구 하우스에 정식된 딸기의 생육정보 측정을 위해 전술한 ‘충청남도 농업기술원 농업 빅데이터 수집 사업 딸기 생육조사 매뉴얼’에 의거하여 3번 앞을 결정하고, 80개씩 샘플링에 대한 마킹 모습을 나타낸 것이다. 생육정보 조사는 2022년 11월 11일부터 측정하여 일주일 간격으로 생육정보를 측정하였다.

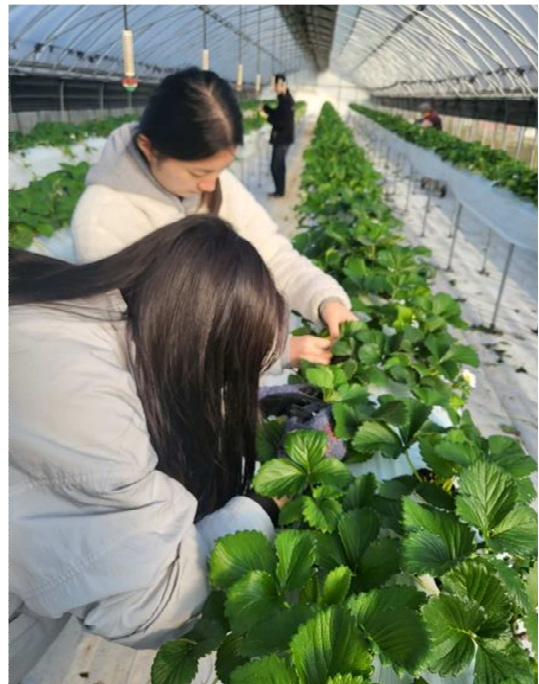
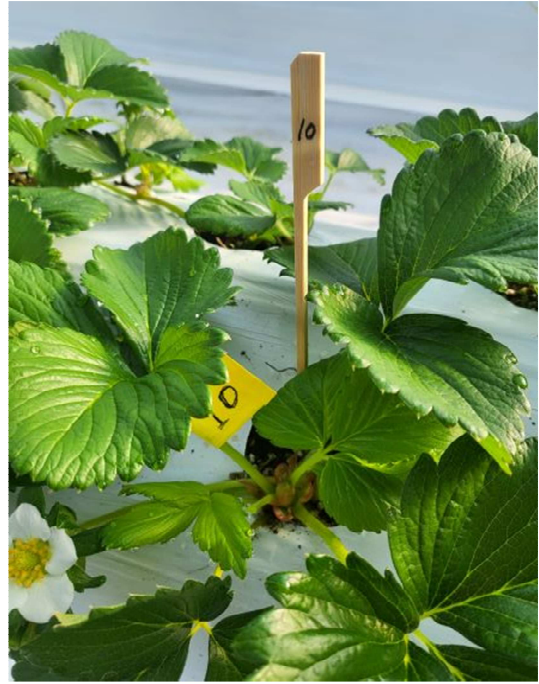


그림 5. 실험구 및 대조구 하우스 생육측정 샘플 마킹

사. 실증테스트 하우스 기초 생육조사

그림 6~10은 실험구 및 대조구 하우스에 정식된 딸기의 물리적 생육정보 측정 모습을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 실험구와 대조구의 각각 80개 샘플링에 대하여 엽장, 엽폭, 엽병장, 관부직경 및 엽장을 측정하였다. 향후 개화가 시작되면 꽃봉우리수, 개화수, 적화수, 적과수 및 수확수 등 화방별 총 개수를 측정한다.



그림 6. 엽장 측정



그림 7. 엽폭 측정



그림 8. 엽병장 측정



그림 9. 관부직경 측정



그림 10. 엽장 측정

아. 실증테스트 하우스 광학적 생육조사

그림 11과 12는 실험구 및 대조구 하우스에 정식된 딸기의 광학적 생육정보 측정 모습을 나타낸 것이다. 그림 18과 19에서 보는 바와 같이 실험구와 대조구의 각각 80개 샘플링에 대하여 분광스펙트럼 측정기(AVANTES, Spectrometer and Avalight-CAL Line, Netherlands)와 SPAD 측정기(SPAD-502, KONICA MINOLTA, JAPAN)를 이용하여 반사광을 측정한 후 정규화식생지수인 NDVI, GNDVI 를 산출하고, 클로로필 함량을 예측할 수 있는 SPAD값을 를 이용

하여 측정하였다. 측정 주기는 전술한 물리적 생육정보 측정과 동일하게 일주일 간격으로 측정한다.



그림 11. SPAD 측정기를 이용한 광학적 생육측정



그림 12. 분광스펙트럼 측정기를 이용한 광학적 생육측정

자. 물리적 및 광학적 생육 측정

플라즈마 보일러 실증 실험 온실에서의 작물 생육 실험은 재배 품종은 딸기(매향)를 대상으로 하였고, 10월 초에 정식하여 휴면기를 거쳐 11월 11일 초기 생육정보를 측정하였다.

한편 딸기 생육정보는 현재 충청남도 농업기술원에서 수행하고 있는 ‘충청남도 농업기술원 농업 빅데이터 수집 사업 딸기 생육조사 매뉴얼’에 의거하여 대조구 80주, 실험구 80주를 일

주일 간격으로 다음과 같은 항목을 측정하였다.

광학적 생육측정은 분광스펙트럼 측정기(AVANTES, Spectrometer and Avalight-CAL Line, Netherlands)를 이용하여 반사광을 측정한 후 정규화식생지수인 NDVI, GNDVI 를 산출하였다. 한편, 작물의 클로로필 함량을 예측할 수 있는 SPAD값을 SPAD 측정기(SPAD-502,KONICA MINOLTA, JAPAN)를 이용하여 측정하였다. 생육 측정은 일주일 간격으로 측정하였다.



(a) SPAD 측정기



(b) 분광스펙트럼 측정기

그림 13. 생육정보 측정기기

차. 실증테스트 하우스 난방특성 및 경제성 분석

실험구 및 대조구 하우스의 플라즈마 보일러 난방특성 분석은 11월 18일 실증테스트 하우스에 2차년도에 개발한 60 KW 급 플라즈마 보일러와 동일 출력의 상용 전기보일러를 설치할 예정이다. 실증 테스트용 보일러가 실험구와 대조구에 설치가 완료되면 온실 내 수평면의 태양 강도, 하우스 내부 온도, 외기온도, 지중온도 및 소비전력량을 1일 기준과 1주일 기준으로 2월 말까지 측정할 예정이다.

경제성 분석은 1차년도와 동일하게 온실난방 특성을 바탕으로 설치비와 소비전력비용 등을 산출하여 연간 이득비용을 산출할 예정이다.

2. 측정항목

가. 엽수

엽수는 한 개체당 잎의 수로서 잎자루 부분의 3장의 잎을 한 장으로 계산하여 완전히 전개한 잎만 측정한다.

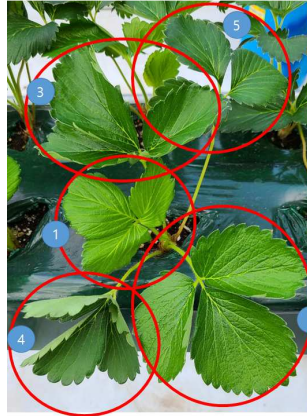


그림 14. 엽수 측정

나. 엽장

엽장은 그림 14의 3번 측정 잎을 기준으로 엽육이 시작되는 지점부터 잎 끝부분까지의 길이를 측정한다.

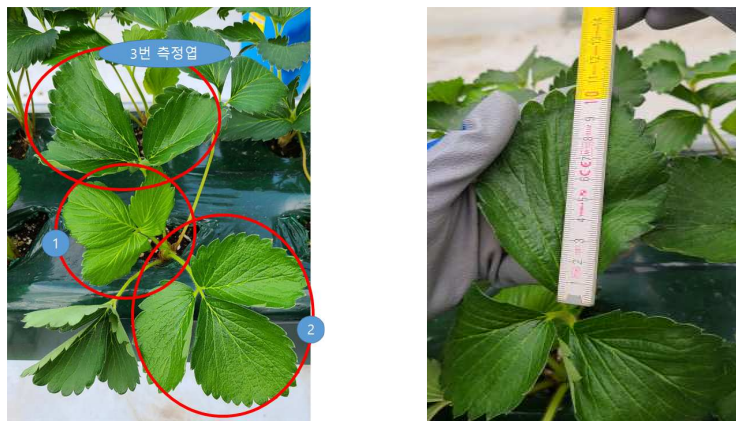


그림 15. 엽장 측정

다. 엽폭

엽폭은 그림 23의 3번 측정 잎을 기준으로 엽장과 수직방향이며 폭이 가장 넓은 부분 측정한다.



그림 16. 엽폭 측정

라. 엽병장

엽병장은 3번 측정 엽을 기준으로 엽장 조사한 잎의 관부에서 잎 하단까지 길이를 측정한다.



그림 17. 엽병장 측정

마. 관부직경

관부직경은 엽병장은 원줄기 관부에서 가장 굵은 부분의 두께를 측정한다.



그림 18. 관부직경 측정

바. 화방별 총 개수

화방별 총 개수는 해당화방의 총 꽃수와 과실 개수를 측정하는 것으로서 꽃봉우리수, 개화수, 적화수, 적과수 및 수확수를 측정한다.



그림 19. 화방별 총 개수

2. 결과 및 고찰

가. 주야간 온풍난방기 및 태양으로부터 온실내부로 공급된 전열량 분석

1) 주야간 온풍난방기로부터 온실내부로 공급된 전열량 분석

그림 20은 일일 기준 주간과 야간에 온풍난방기로부터 온실내부로 공급된 시간대 별 전열량과 누적 전열량을 나타낸 것이다.

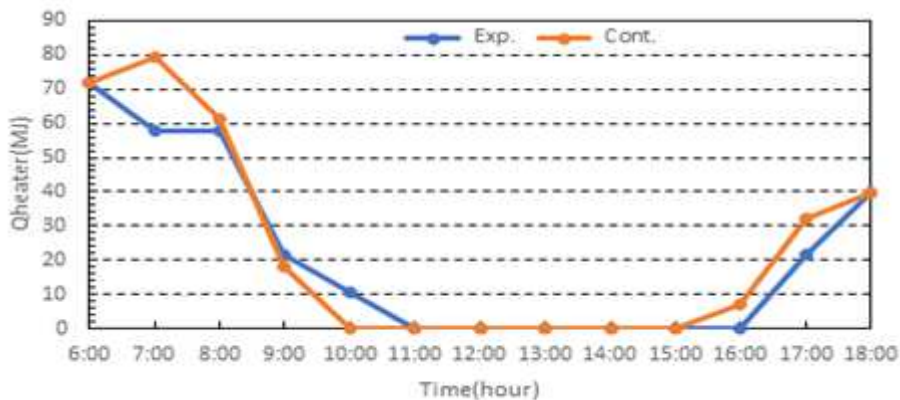
그림 20(A)와 (B)에서 보는 바와 같이 주야간에 온풍 난방기로부터 온실내부로 공급된 전열량은 대조구가 실험구보다 높은 것으로 나타났다.

주간 시간대별 대조구의 온풍난방기로부터 온실내부로 공급된 전열량은 최대 79.2 MJ, 최소 7.2 MJ로 나타났다. 실험구의 온풍난방기로부터 온실내부로 공급된 전열량은 최대 72 MJ, 최소 10.8 MJ로 나타나 실험구가 대조구보다 3.6 ~ 8.2 MJ 적게 공급되는 것으로 나타났다.

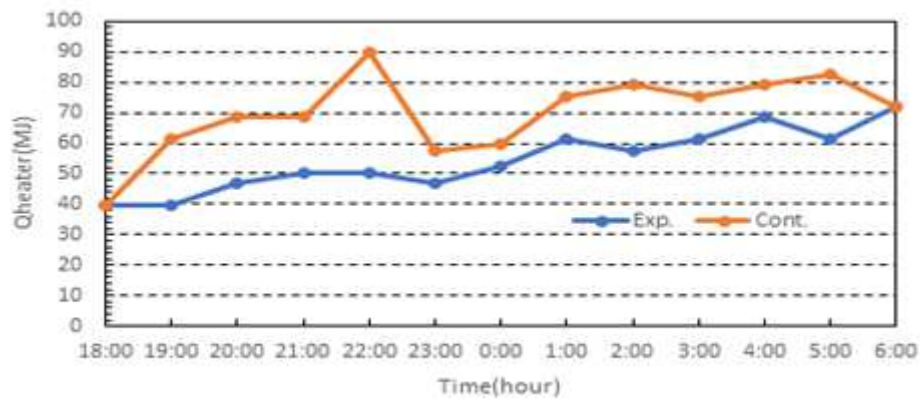
그림 20(C)에서 보듯이 일일 기준 대조구에 공급된 누적 전열량은 1,634 MJ 이고, 실험구에 공급된 누적 전열량은 1,253 MJ 로서 실험구가 대조구보다 382 MJ 적게 공급된 것으로 나타났다.

그림 21은 1주일(2023년 02월 01일 ~ 2023년 02월 7일)간의 실험용 하우스에 공급된 누적 전열량을 나타낸 것이다.

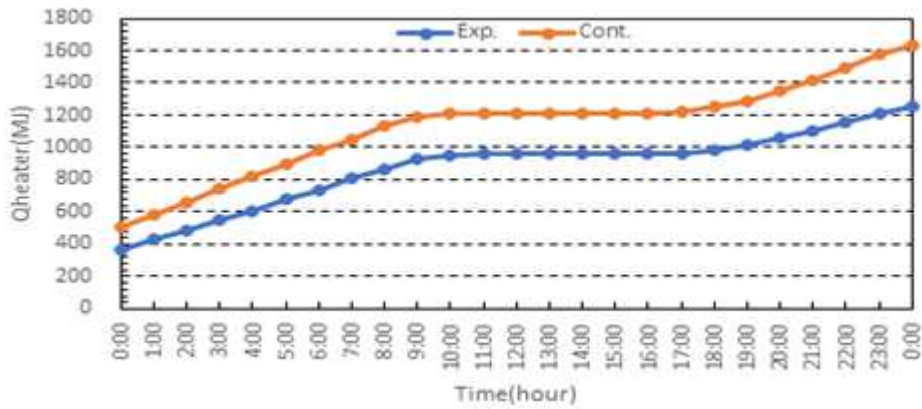
그림 21에서 보는 바와 같이 일주일간 대조구에 공급된 누적 전열량은 5,932.1 MJ 이 공급되었고, 실험구의 경우에는 4,444.2 MJ 의 전열량이 공급되어 실험구가 대조구보다 1,487.9 MJ 적게 공급된 것으로 나타났다.



(a) 주간



(b) 야간



(c) 누적 전열량

그림 20. 일일 기준 주야간 온풍난방기로 공급된 전열량

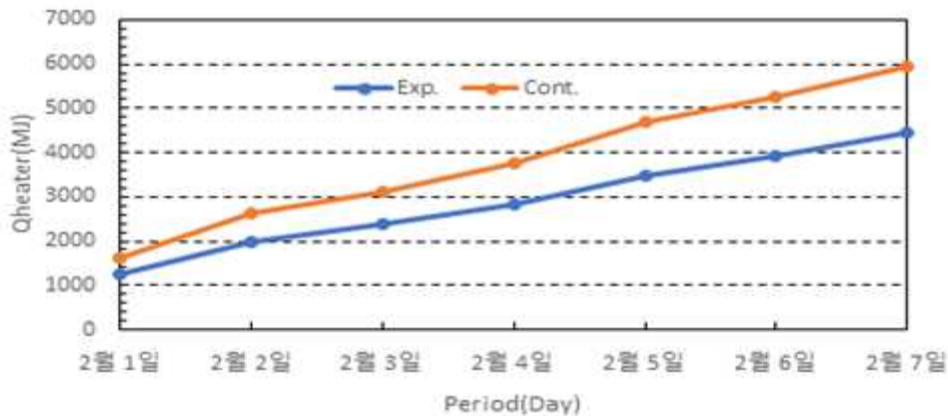


그림 21. 일주일 기준 주야간 온풍난방기로 공급된 누적 전열량

2) 주간 태양으로부터 온실내부로 공급된 일사량

그림 22과 23은 일일(2023.02.01.)기준과 일정기간(2023.02.01. ~ 2023.02.07.) 기준 태양으로부터 실험구 및 대조구 하우스 내부로 공급된 시간대별 열량과 누적 일사량을 나타낸 것이다. 온실 내 수평명의 태양강도는 수원 기상대에서 측정된 일평균 태양강도를 시간대별로 평균하여 산출하였다.

그림 23에서 보는 바와 같이 일일 기준 실험구 및 대조구 하우스 내부로 공급된 시간대별 일사량은 오전 11시에서 오후 3시 사이에 1.4~1.9 MJ/m²의 일사량이 공급된 것으로 나타났다. 또한, 일일 기준 누적 일사량은 그림 11에 나타난 바와 같이 총 12.7 MJ/m²의 열량이 실험구와 대조구 하우스 내부로 공급된 것으로 나타났다.

한편, 일정기간 기준 실험구 및 대조구 하우스 내부로 공급된 시간대별 일사량은 오전 11시에서 오후 3시 사이에 1.4~1.5 MJ/m²의 일사량이 공급된 것으로 나타났다. 또한 일정기간 기준 누적 일사량은 그림 22에 나타난 바와 같이 총 11.3 MJ/m²의 일사량이 실험구와 대조구 하우스 내부로 공급된 것으로 나타났다.

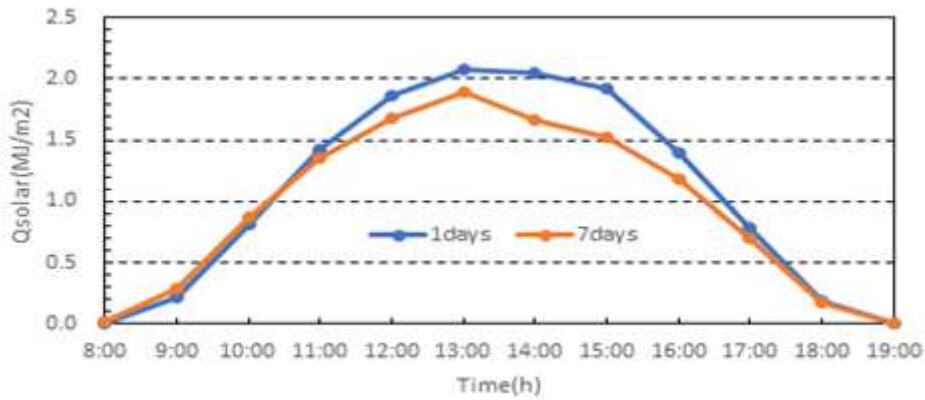


그림 22. 시간별 태양으로부터 공급된 열량

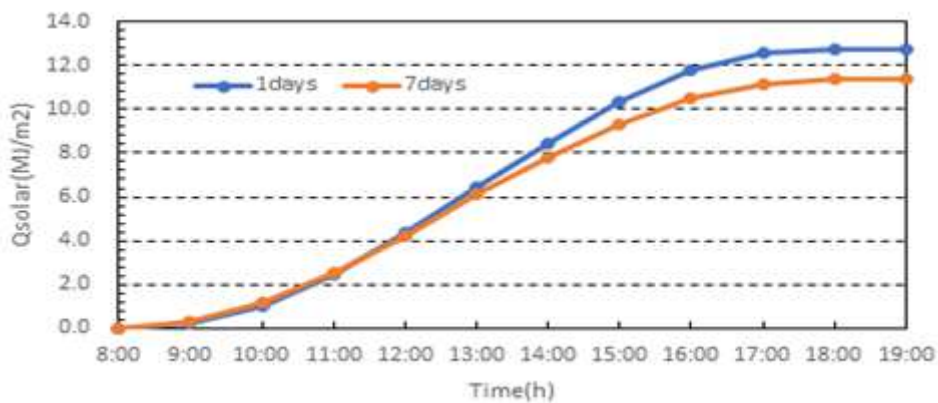


그림 23. 시간별 태양으로부터 공급된 누적 열량

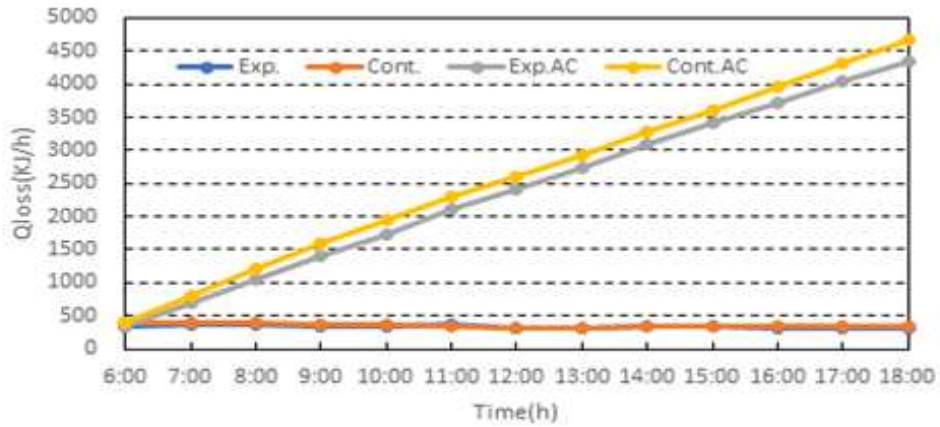
나. 주야간 하우스 외부로 손실되는 열량 분석

1) 일일 기준 하우스 외피로 손실되는 열량

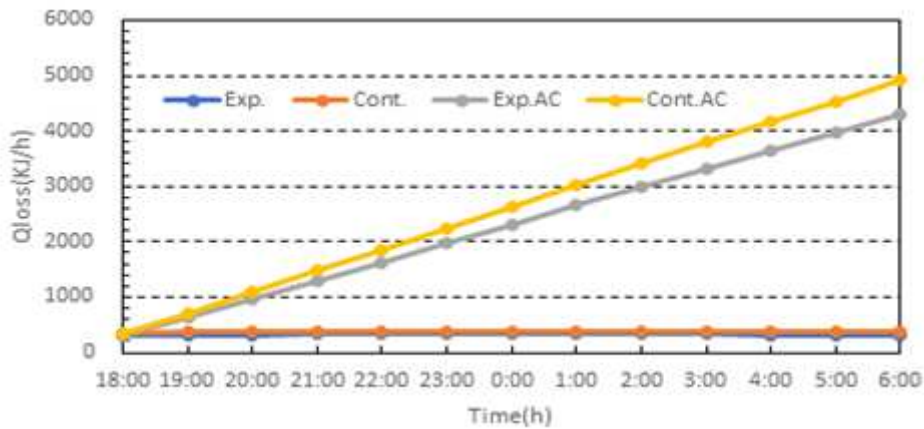
그림 24는 각각 일일 기준 실험구 및 대조구 하우스의 외피를 통해 외부로 방출된 손실열량과 누적 손실열량을 주간(06:00~18:00), 야간(18:00~06:00)으로 나타낸 것이다.

그림 24에 나타낸 바와 같이 하우스 외피를 통한 손실열량은 대조구가 실험구보다 더 많은 경향을 보였으나 큰 차이는 없었고, 주간보다 야간에 열 손실이 더 많이 발생하는 것으로 나타났다.

일일 기준 하우스 외피로 손실되는 누적열량이 주간에 실험구는 4,346 kJ/h 대조구는 4,659 kJ/h로 나타나 대조구가 실험구보다 약 313 kJ/h의 손실열량이 더 큰 것으로 나타났고, 야간에는 실험구는 4,296 kJ/h, 대조구는 4,909 kJ/h 로 나타나 대조구가 실험구보다 약 613 kJ/h 더 큰 것으로 나타났다.



(a) 주간



(b) 야간

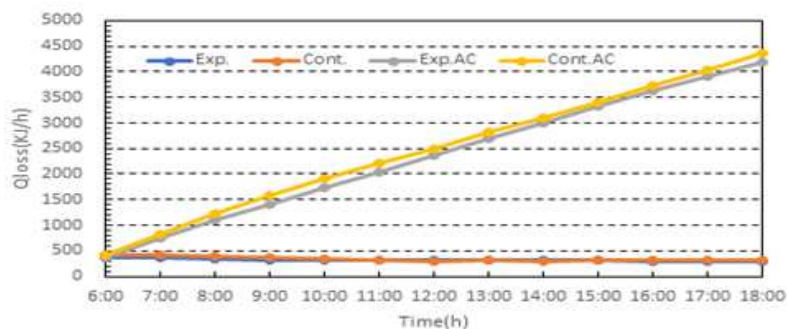
그림 24. 일일 기준 주야간 하우스 외부로 손실되는 열량과 누적 손실열량

2) 일정 기간 기준 하우스 외피로 손실되는 열량

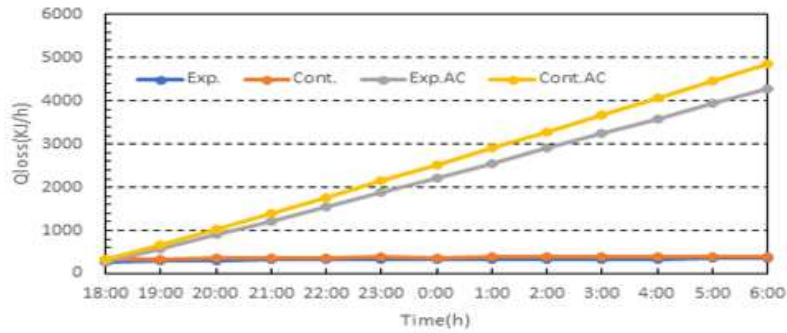
그림 25는 각각 일정 기간 기준 실험구 및 대조구 하우스의 외피를 통해 외부로 방출된 손실열량과 누적 손실열량을 주간(06:00~18:00), 야간(18:00~06:00)으로 나타낸 것이다.

그림 25에 나타난 바와 같이 하우스 외피를 통한 손실열량은 대조구와 실험구에서 동일한 경향을 보였고, 주간보다 야간에 열 손실이 더 많이 발생하는 것으로 나타났으나 큰 차이는 없었다.

일정기간 기준 하우스 외피로 손실되는 누적열량이 주간에 실험구는 4,196 kJ/h 대조구는 4,365 kJ/h로 나타나 대조구가 실험구보다 약 169 kJ/h의 손실열량이 더 큰 것으로 나타났고, 야간에는 실험구는 4,282 kJ/h, 대조구는 4,843 kJ/h 로 나타나 대조구가 실험구보다 약 562 kJ/h 더 큰 것으로 나타났다.



(a) 주간



(b) 야간

그림 25. 일정 기간 기준 주야간 하우스 외부로 손실되는 열량과 누적 손실열량

3) 일일 기준 하우스 지면을 통한 손실열량

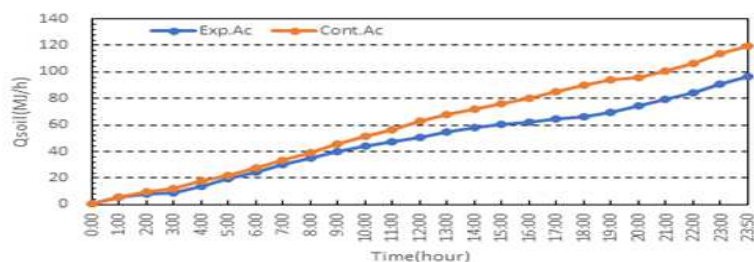
그림 26은 일일 기준 실험구와 대조구의 지면을 통한 열손실량과 누적열손실량을 나타낸 것이다.

그림 26에서 보는 바와 같이 하우스의 지면을 통한 열손실량은 대조구가 실험구보다 약간 많은 경향을 보였으나 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 또한 야간의 경우에는 토양으로부터 하우스 내부 공간으로 열량이 공급되는 경향을 보였고, 주간의 경우에는 토양으로 열량이 공급되어 손실 열량이 발생하는 것으로 나타났다.

실험구와 대조구 하우스의 지면을 통한 열손실량은 각각 96.4 MJ/h와 119.8 MJ/h로서 약 23.5 MJ/h 로 대조구가 많은 것으로 나타났다.



(a) 시간별 지면 손실열량



(b) 누적 지면 손실 열량

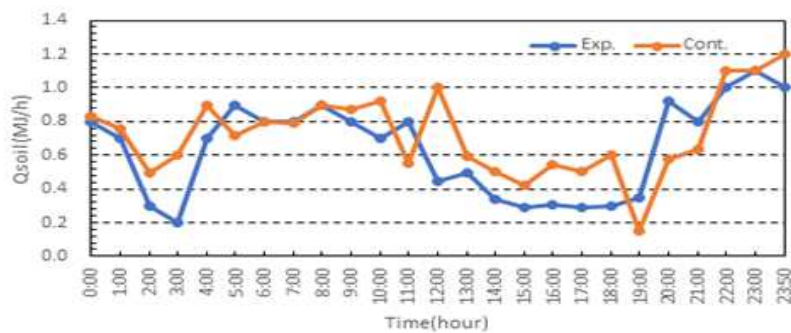
그림 26. 일일 기준 주야간 하우스 지면을 통한 열량과 누적 손실열량

4) 일정기간 기준 하우스 지면을 통한 손실열량(Q_{Soil})

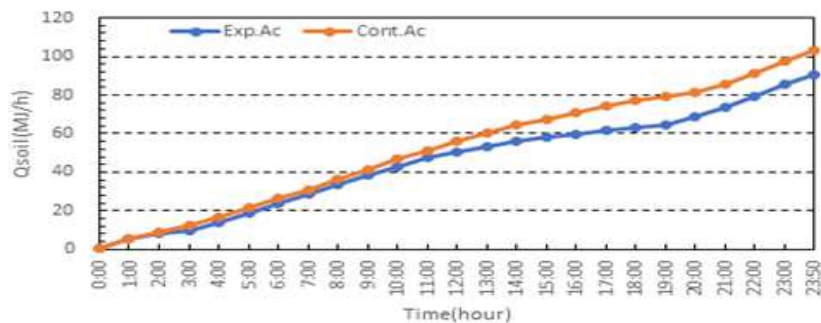
그림 27은 일정 기간 기준 실험구와 대조구의 지면을 통한 열손실량과 누적열손실량을 나타낸 것이다.

그림 27에서 보는 바와 같이 일일 기준 토양 손실열량과 유사하게 실험구와 대조구에서 큰 차이는 없었고, 실험구와 대조구에서 10시부터 15시 사이에 하우스 내부 공간으로부터 토양으로 열이 손실되는 것으로 나타났고, 그 이후부터 토양으로부터 하우스 내부 공간으로 열량이 공급되는 경향을 보였다.

실험구와 대조구 하우스의 지면을 통한 열손실량은 각각 90.8 MJ/h와 103.0 MJ/h로서 약 12.2 MJ/h 정도 대조구가 실험구보다 손실열량이 많은 것으로 나타났다.



(a) 시간별 지면 손실열량



(b) 누적 지면 손실 열량

그림 27. 일정기간 기준 주야간 하우스 지면을 통한 열량과 누적 손실열량

다. 설정온도 기준 온실 내부 온도 변화

1) 일일 기준 야간 온실 내부 온도 변화

그림 28은 일일 기준 온실내의 야간 온도변화를 나타낸 것이다. 본 실험에서 온실 내부온도는 25℃ 로 설정하였다.

그림 28에서 보는 바와 같이 실험구와 대조구의 내부온도는 오후 21시부터 오전 2시까지는 설정온도보다 높게 나타났고, 이후에는 실험구의 경우 설정온도를 유지했지만 대조구의 경우 실험구보다 큰 온도편차를 나타내었다.

오후 20시부터 오전 2시까지 대조구는 최대 31.1℃ 에서 최소 20.0℃ 의 온도 분포가 나타나고, 실험구는 최대 33.1℃ 에서 최소 20.5℃ 의 온도 분포를 나타내었다.

설정온도 대비 온실내의 온도 편차는 대조구는 최대 6.1℃, 최소 -5.0℃, 평균 0.2℃ 의 차이를 보였고, 실험구는 최대 8.1℃, 최소 -4.5℃, 평균 0.1℃ 의 차이가 나는 것으로 나타났다.

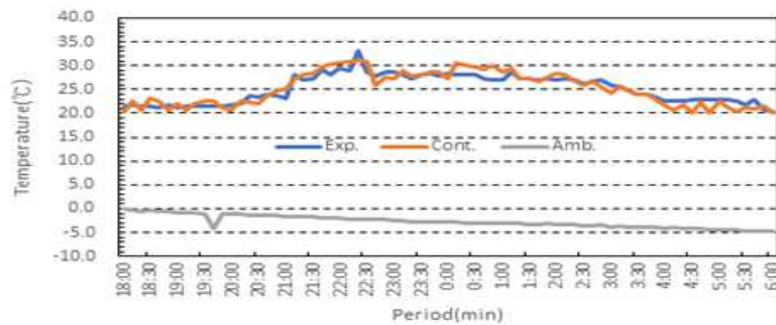


그림 28. 일일 기준 주야간 하우스 내부 온도 변화

2) 일정기간 기준 야간 온실 내부 온도 변화

그림 29는 일정 기간 기준 야간 온실내의 온도변화를 나타낸 것이다.

그림 29에서 대조구는 최대 31.4℃ 에서 최소 19.2℃ 의 온도분포를 나타내었고, 실험구의 경우에는 최대 32.0℃ 에서 최소 19.4℃ 의 온도분포를 나타내었다.

설정온도 대비 대조구, 실험구 온도의 차이는 대조구의 경우는 최대 6.4℃, 최소 -5.8℃, 평균 0.1℃ 의 차이를 보였고, 실험구는 최대 7.0℃, 최소 -5.6℃, 평균 0.4℃ 의 차이를 나타내었다.

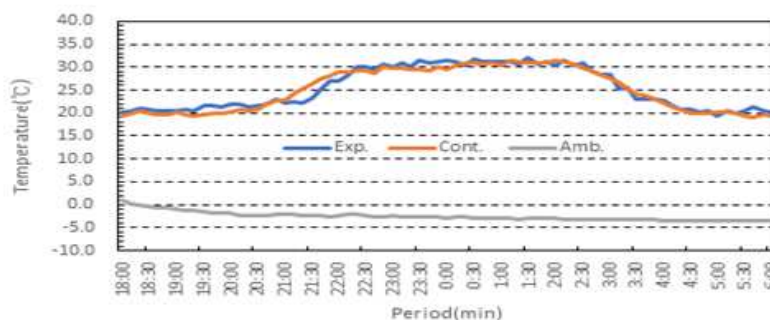


그림 29. 일정기간 기준 주야간 하우스 내부 온도 변화

라. 전기보일러와 플라즈마 보일러의 출수온도 변화

그림 30은 전기보일러와 플라즈마 보일러의 출수온도 변화를 나타낸 것이다.

그림 30에서 보는 바와 같이 출수온도의 변화는 플라즈마 보일러가 일반 상용 전기보일러보다 출수 온도 변화 폭이 작은 것으로 나타났다.

0:00부터 9:00까지의 출수온도의 변화는 대조구가 최대 76℃, 최소 43℃, 평 62℃, 온도편차는 33℃로 나타났고, 실험구의 경우에는 최대 71℃, 최소 55℃, 평균 65℃로 온도편차는 약 16℃로 나타나 플라즈마 보일러가 전기보일러보다 출수온도 편차가 17℃ 낮은 것으로 나타났다.

16:00부터 24:00에서의 출수온도의 변화는 대조구가 최대 75℃, 최소 29℃, 평균 35℃, 온도 편차는 46℃로 나타났고, 실험구는 최대 70℃, 최소 35℃, 평균 41℃, 온도 편차 35℃로 나타났다. 플라즈마 보일러가 전기보일러보다 출수온도 편차가 11℃ 낮은 것으로 나타났다.

출수 온도에 대한 분포를 살펴보면 대조구 보일러에 경우에는 온도의 변동이 심하고 가동을 멈출 때 출수온도가 빠르게 내려가는 반면 실험구 보일러에 경우 온도의 변동이 적고 가동을 멈출 시 출수온도가 천천히 내려가는 것을 알 수 있다.

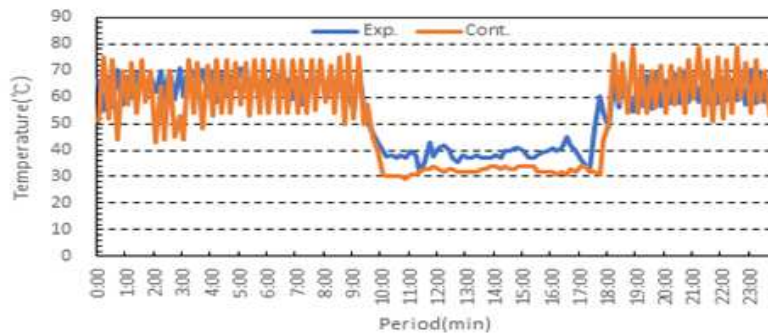


그림 30. 전기보일러와 플라즈마 보일러의 출수온도 변화

마. 전기보일러와 플라즈마 보일러의 설정 출수 온도 상승 시간

그림 31은 전기보일러와 플라즈마 보일러의 설정 출수온도 도달 시간을 비교하여 나타낸 것이다.

그림 31에서 보는 바와 같이 설정 출수온도 도달시간은 플라즈마 보일러가 10분이 소요되는 것으로 나타났고, 일반 상용 전기보일러의 경우에는 약 30분이 소요되는 것으로 나타났다.

이와 같이 설정 출수 온도 도달시간이 플라즈마 보일러가 일반 전기보일러보다 짧은 이유는 플라즈마 보일러 가열 매커니즘이 일반 전기보일러의 전도에 의한 가열 매커니즘보다 우수하기 때문으로 판단된다.

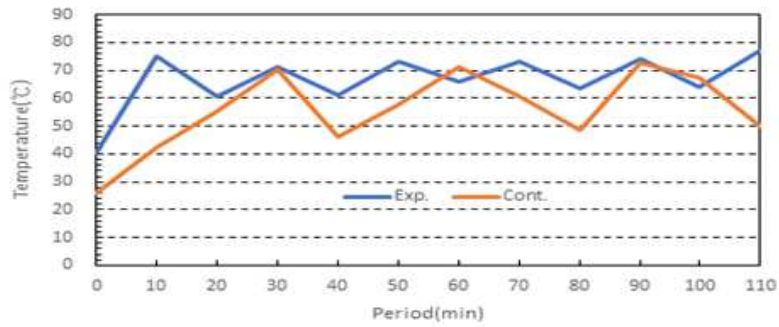


그림 31. 전기보일러와 플라즈마 보일러의 출수온도 상승 시간

바. 식물 재배 실험

1) 정규화 식생지수(NDVI)

그림 32는 실험구와 대조구 온실에서 재배한 매향 딸기를 분광스펙트럼 측정기를 이용하여 7 일 간격으로 0~4주차 동안 측정한 정규식생지수(NDVI)값을 나타낸 것이다.

그림 32에서 보는 바와 같이 실험구인 플라즈마 보일러를 설치한 구역은 상용 전기 보일러를 설치한 대조구와 비교하여 정규식생지수(NDVI)가 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

실험구의 정규식생지수값(NDVI)은 평균 0.99, 대조구의 정규식생지수도 평균 0.99 로 실험구와 대조구가 동일하게 나타났다. 통계분석 결과, 정규화식생지수(NDVI)에서 p값이 0.05 보다 큰 값을 나타내 유의성이 인정되지 않았다.

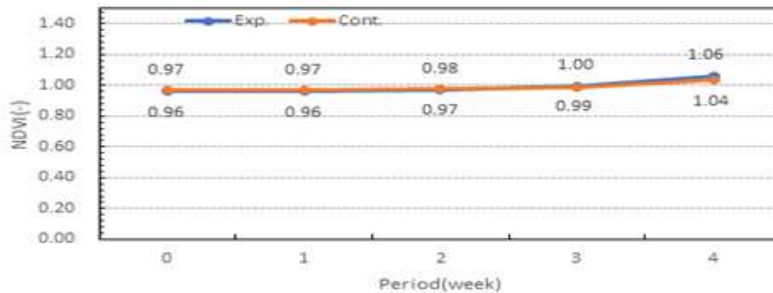


그림 32. 실험구와 대조구 딸기의 정규화식생지수 변화

2) 녹색정규식생지수(GNDVI)

그림 33은 분광스펙트럼 측정기를 이용하여 7일 간격으로 0~4주차동안 측정한 녹색정규식생지수(GNDVI) 값을 나타낸 것이다.

그림 33에서 보는 바와 같이 녹색정규식생지수(GNDVI)는 실험구인 플라즈마 보일러를 설치한 구역이 상용 전기 보일러를 설치한 대조구와 비교하여 높은 경향을 보였다.

실험구의 녹색정규식생지수(GNDVI)은 평균 0.79 정도를 나타내었고, 대조구의 녹색정규식생지수(GNDVI)는 평균 0.72 정도를 나타내 실험구가 대조구와 비교하여 0.07 높게 나타났다.

통계분석 결과 녹색정규식생지수(GNDVI)에서 p값이 0으로 0.05보다 작은 값을 나타내 유의성이 인정되었다.

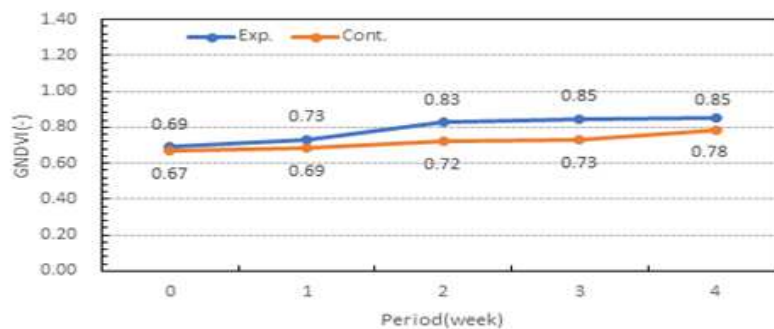


그림 33. 실험구와 대조구 딸기의 녹색 정규화식생지수 변화

3) SPAD 값

그림 34는 0~7주차 동안 실험구와 대조구에서 재배한 매향 딸기의 SPAD 값을 나타낸 것이다. 일반적으로 SPAD 값은 작물의 클로로필 함량을 예측할 수 있기 때문에 농업분야의 작물 생육정보로 활용되고 있다.

그림 34에서 보는 바와 같이 매향딸기의 클로로필 함량을 나타내는 SPAD 값은 3주차 이후 모두 감소하는 경향을 보였으나 실험구가 대조구보다 높은 경향을 나타내었다.

실험구 SPAD값은 평균 53.54 정도를 나타내었고, 대조구는 평균 52.48 로 나타났다. 이것은 실험구가 대조구와 비교하여 평균값 차이는 1.06 으로 실험구 온실이 대조구와 비교하여 온실 내부 온도 변화가 적어 생육이 양호한 것으로 판단된다.

통계분석 결과 SPAD 값(클로로필 함량)에서 p값이 0.004 로 0.05 보다 작은 값을 나타내 유의성이 인정되었다.

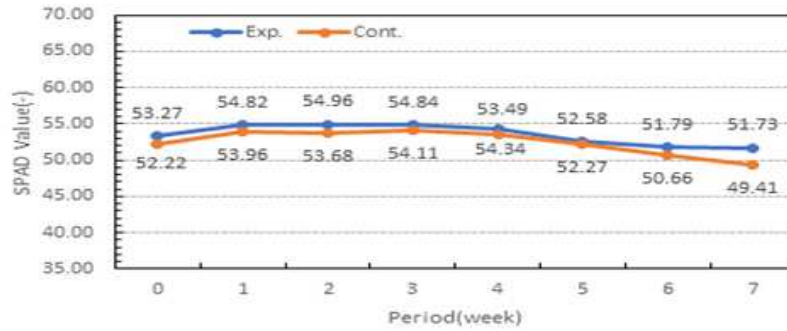


그림 34. 실험구와 대조구 작물의 녹색 정규화식생지수 변화

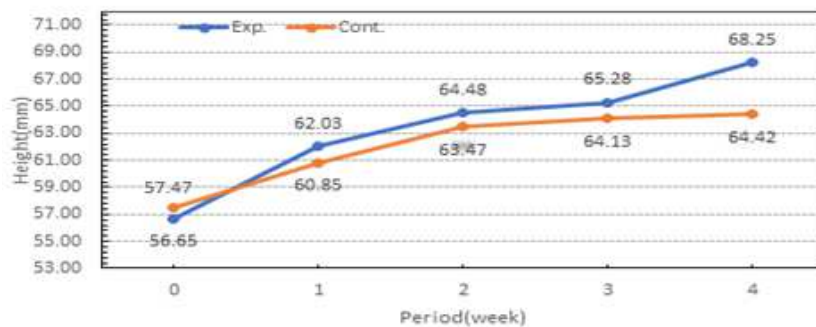
4) 수고 성장량

그림 35는 7주간 실험구와 대조구 온실에서 재배한 매향딸기의 수고 변화와 누적 성장량을 나타낸 것이다.

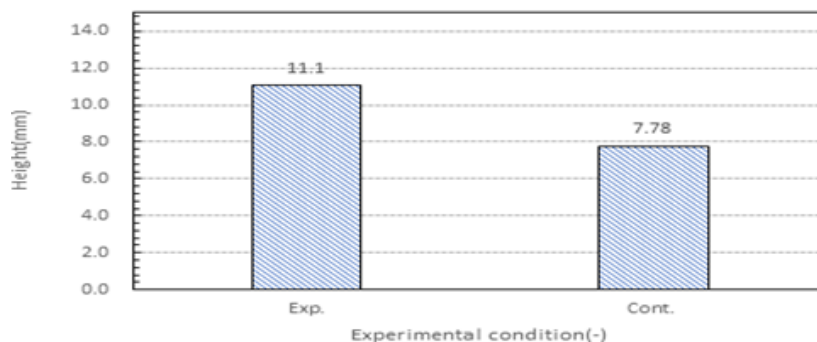
그림 35(A)에서 보는 바와 같이 0주차에서는 실험구보다 대조구가 0.8mm 더 높은 경향을 보였으나 1주차 이후부터는 실험구가 급격하게 성장하며 대조구와 비교하여 더 높은 성장량을 나타냈다.

그림 35(B)에서 보는 바와 같이 실험구에서 매향딸기 누적 수고 성장량은 11.1 mm 이었고, 대조구의 경우에는 7.78 mm 로 나타나 실험구가 대조구 보다 약 3.27 mm 정도 높이 성장량이 양호한 것으로 나타났다.

통계분석 결과, 수고에서 p값이 0.05보다 큰 값을 나타내 유의성이 인정되지 않았다.



(a) 7 주간 수고 성장량 변화



(b) 수고 누적성장량 변화

그림 35. 실험구와 대조구 딸기의 수고 성장량 변화

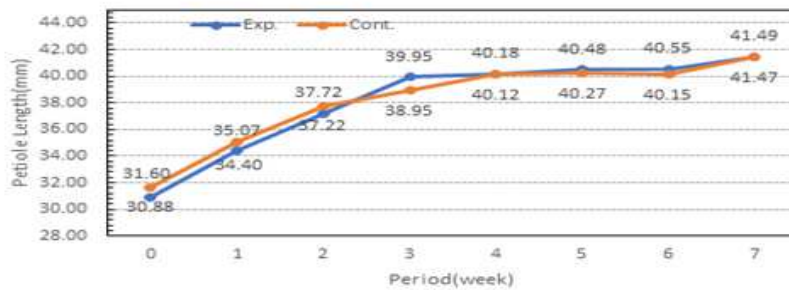
5) 엽병장 성장량

그림 36은 실험구와 대조구에서 재배한 매향 딸기 엽병장 성장량과 7주간 누적 성장량을 비교하여 나타낸 것이다.

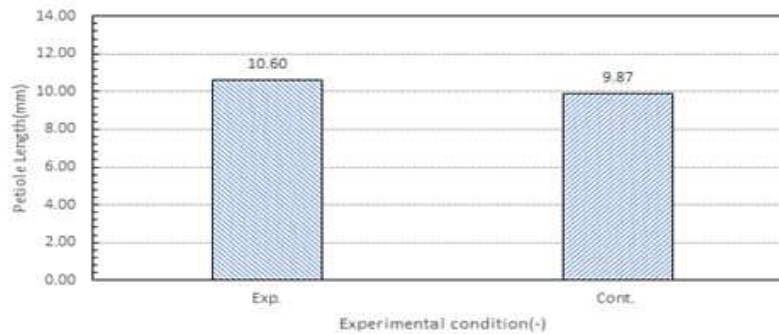
그림 36(A)에서 나타낸 바와 같이 0~2주차에서는 대조구가 실험구보다 엽병장 성장량이 더 높은 경향을 나타내었으나, 그 이후 기간에서는 실험구가 대조구보다 성장량이 우수한 것으로 나타났다.

그림 36(B)에서 보는 바와 같이 7주간 실험구 매향 딸기의 누적 성장량은 10.60 mm 이었고, 대조구의 경우에는 9.87 mm 로 나타나 실험구가 대조구 보다 약 0.73 mm 정도 엽병장 성장량이 높은 것으로 나타났다.

통계분석 결과 엽병장에서 p값이 0.05보다 큰 값을 나타내 유의성이 인정되지 않았다.



(a) 7 주간 엽병장 성장량 변화



(b) 엽병장 누적 성장량 변화

그림 36. 실험구와 대조구 딸기의 엽병장 성장량 변화

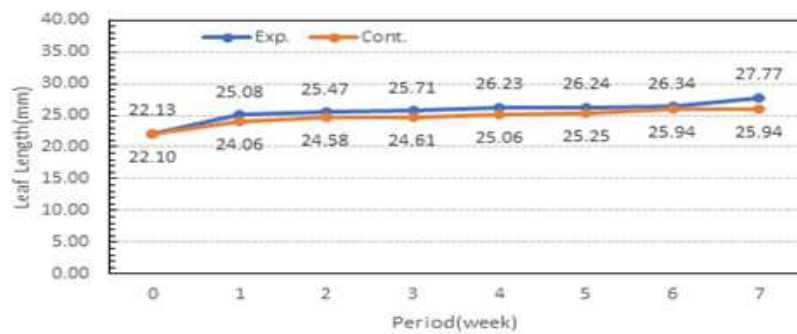
6) 엽장 성장량

그림 37은 실험구과 대조구에서 재배한 매향 딸기의 엽장 성장량과 7주간 누적 성장량을 비교하여 나타낸 것이다.

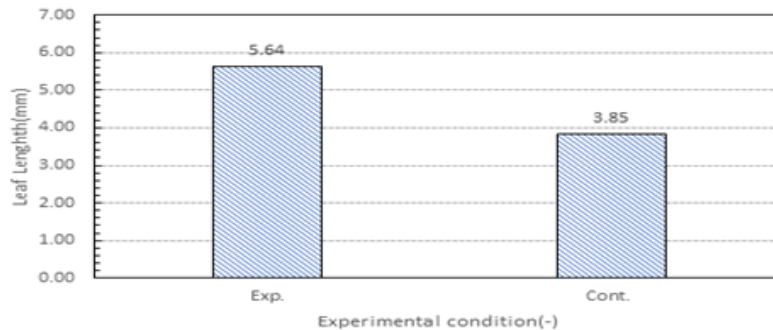
그림 37(A)에서 나타낸 바와 같이 실험구가 대조구의 엽장 성장량 변화가 유사한 것으로 나타났다.

그림 37(B)에서 보는 바와 같이 7주간 실험구 매향 딸기의 누적 성장량은 5.64 mm 이었고, 대조구의 경우에는 3.85 mm 로 나타나 실험구가 대조구 보다 약 1.80 mm 정도 엽장 성장량이 높은 것으로 나타났다.

통계분석 결과 엽장에서 p값이 0.03 으로 0.05 보다 작은 값을 나타내어 유의성이 인정되었다.



(a) 7 주간 엽장 성장량 변화



(b) 엽장 누적 성장량 변화

그림 37. 실험구와 대조구 딸기의 엽장 성장량 변화

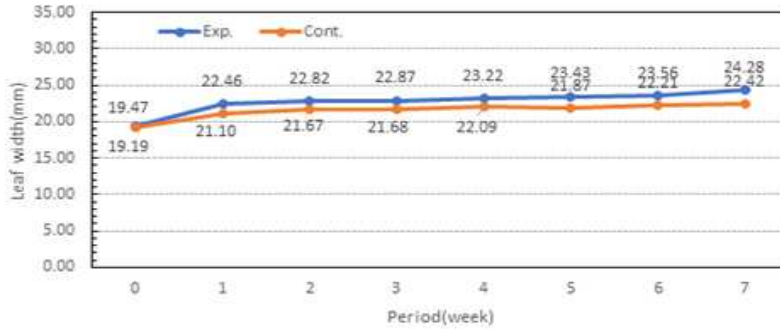
7) 엽폭 성장량

그림 38은 실험구과 대조구의 매향 딸기 엽폭 성장량과 7주간의 누적 성장량을 나타낸 것이다.

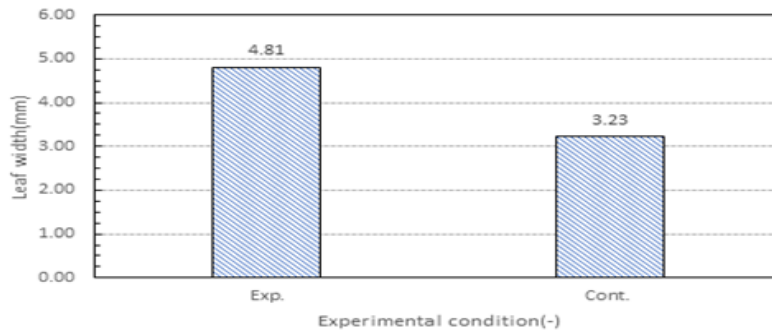
그림 38(A)에서 나타낸 바와 같이 실험구와 대조구에서 재배한 매향 딸기의 엽폭 성장량은 유사한 경향을 보였다.

그림 38(B)에서 보는 바와 같이 7주간 실험구의 엽폭 누적 성장량은 4.81 mm 이었고, 대조구의 경우에는 3.23 mm 로 나타나 실험구가 대조구보다 약 1.58 mm 정도 엽폭 성장량이 높은 것으로 나타났다.

통계분석 결과 엽폭에서 p값이 0 으로 0.05 보다 작은 값을 나타내어 유의성이 인정되었다.



(a) 7 주간 엽폭 성장량 변화



(b) 엽폭 누적 성장량 변화

그림 38. 실험구와 대조구 딸기의 엽폭 성장량 변화

8) 관부직경 성장량

그림 39는 실험구과 대조구에서 재배한 매향 딸기 관부직경 성장량과 7주간 누적 성장량을 비교하여 나타낸 것이다.

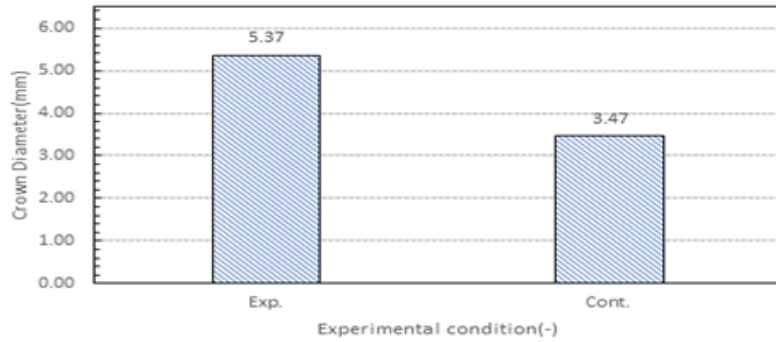
그림 39(A)에서 나타낸 바와 같이 0~3주차에서는 대조구가 실험구보다 엽병장 성장량이 더 높은 경향을 나타내었으나, 그 이후 기간에서는 실험구가 대조구보다 성장량이 우수한 것으로 나타났다.

그림 39(B)에서 보는 바와 같이 7주간 실험구 매향 딸기의 누적 성장량은 5.37 mm 이었고, 대조구의 경우에는 3.47 mm 로 나타나 실험구가 대조구 보다 약 1.90 mm 정도 관부직경 성장량이 높은 것으로 나타났다.

통계분석 결과 관부직경에서 p값이 0.05 보다 큰 값을 나타내어 유의성이 인정되지 않았다.



(a) 7 주간 관부직경 성장량 변화



(b) 관부직경 누적 성장량 변화

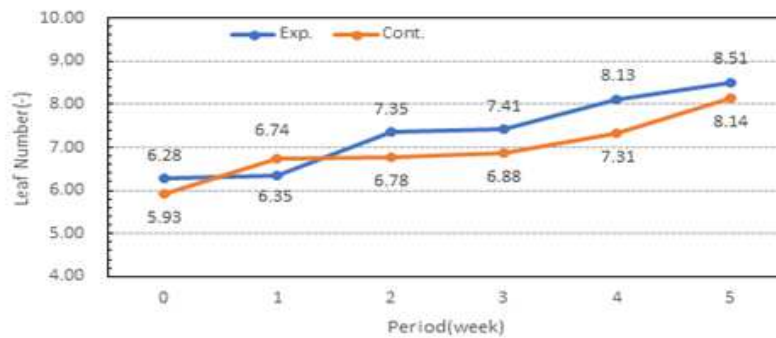
그림 39. 실험구와 대조구 딸기의 관부직경 성장량 변화

9) 엽수 변화

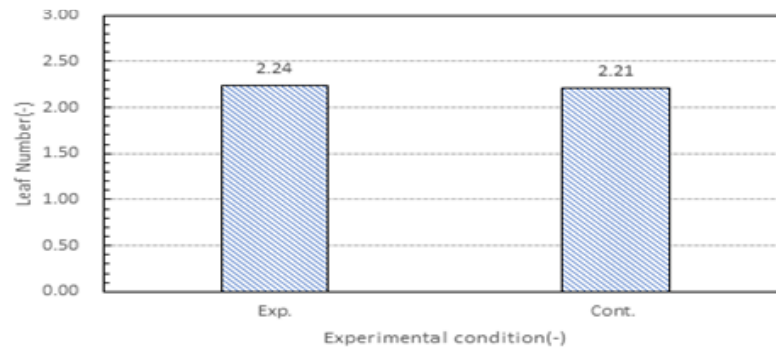
그림 40은 실험구과 대조구에서 재배한 매향 딸기 엽수를 비교하여 나타낸 것이다.

그림 40(A)에서 나타낸 바와 같이 엽수는 0~1주차에서는 대조구가 실험구보다 더 많은 경향을 나타내었으나, 그 이후 기간에서는 실험구가 대조구보다 엽수가 더 많은 것으로 나타났다.

그림 40(B)에서 보는 바와 같이 5주간 실험구 매향 딸기의 누적 엽수는 2.28 개이었고, 대조구의 경우에는 2.21 개로 나타나 실험구가 대조구 보다 약 0.08 개 정도 많은 것으로 나타났다. 통계분석 결과, 엽수에서 p값이 0.02 로 0.05 보다 작은 값을 나타내어 유의성이 인정되었다.



(a) 7 주간 엽수 변화



(b) 엽수 누적 성장량 변화

그림 39. 실험구와 대조구 딸기의 엽수 성장량 변화

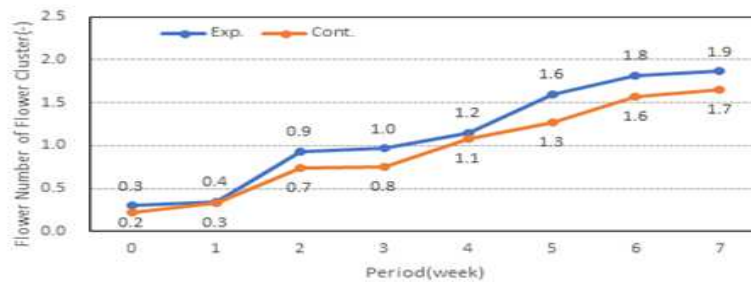
10) 화방 총 개수 변화

그림 41은 실험구과 대조구에서 재배한 매향 딸기 화방 총 개수와 7주간 누적 화방수를 비교하여 나타낸 것이다.

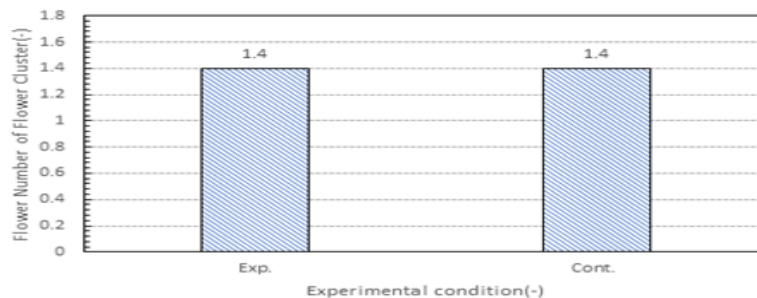
그림 41(A)에서 나타낸 바와 같이 실험구와 대조구에서 재배한 매향 딸기의 화방 총 개수는 유사한 경향을 보였다.

그림 41(B)에서 보는 바와 같이 7주간 실험구와 대조구의 매향 딸기의 누적 화방 총 개수는 각각 1.6개와 1.5개로 큰 차이는 없었다.

통계분석 결과 화방 총 개수에서 p값이 0.05보다 큰 값을 나타내어 유의성이 인정되지 않았다.



(a) 7 주간 화방 총 개수 변화



(b) 화방 총 개수 누적변화

그림 41. 실험구와 대조구 딸기의 화방 총 개수 변화

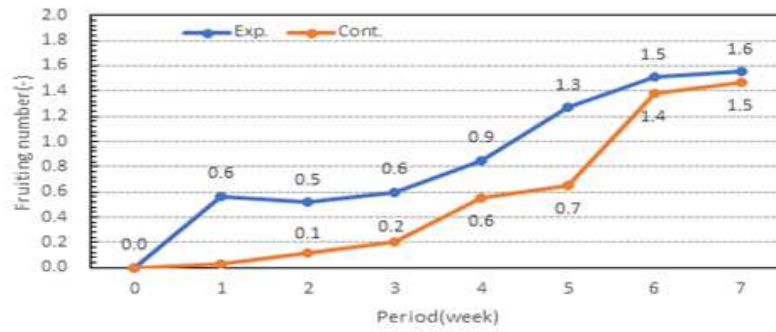
11) 화방 착과수 개수 변화

그림 42는 실험구과 대조구에서 재배한 매향 딸기 화방 착과수와 7주간 누적 화방 착과수를 비교하여 나타낸 것이다.

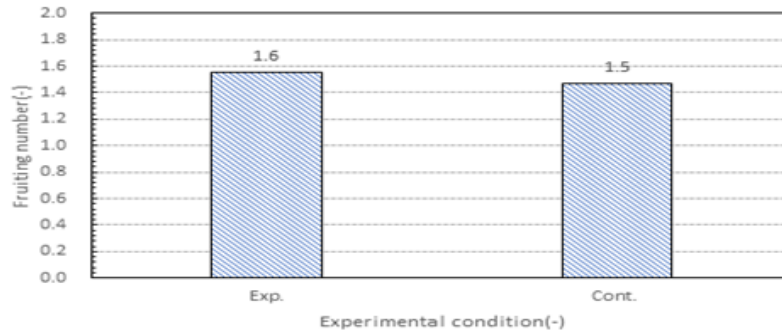
그림 42(A)에서 나타낸 바와 같이 0~5주차에서는 실험구가 대조구보다 화방 착과수가 더 많은 경향을 나타내었고, 그 이후 기간에서는 유사한 것으로 나타났다.

그림 42(B)에서 보는 바와 같이 7주간 실험구 매향 딸기의 누적 화방 착과수는 1.6 개로 나타났고, 대조구의 경우에는 1.5 개로 나타나 실험구가 대조구보다 약 0.1 개 화방 착과수 개수 변화가 큰 것으로 나타났다.

통계분석 결과, 화방 착과수에서 p값이 0으로 0.05보다 작은 값을 나타내어 유의성이 인정되었다.



(a) 7 주간 화방 착과수 개수 변화



(b) 화방 착과수 개수 누적변화

그림 42. 실험구와 대조구 딸기의 화방 착과수 개수 변화

사. 플라즈마 보일러와 일반 전기 보일러의 평균 소비 전력량

그림 43는 일정 기간 기준(2023 02월01일~ 2023년02월08일) 실험구와 대조구 보일러가 소모한 소비 전력량을 나타낸 것이다.

그림 43에 나타낸 바와 같이 온실 내부를 난방하기 위해 사용된 소비전력량은 일정기간동안 실험구가 대조구보다 더 적게 소비하는 것으로 나타났다.

일정 기간(2023년02월01일~2023년02월08일) 플라즈마 보일러와 상용 전기보일러의 소비전력량은 각각 1,293 kW/h, 1,670 kW/h 로서 플라즈마 보일러가 상용 전기보일러보다 약 377 kW/h 적게 소비되어 약 22.6 % 정도 에너지 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 플라즈마 보일러가 상용 전기보일러보다 동일한 난방조건에서 에너지 소비량은 적은 이유는 전술한 바와 같이 플라즈마 방식 가열 메커니즘이 일반 전도방식 가열 메커니즘보다 가열 능력이 우수했기 때문으로 판단된다.

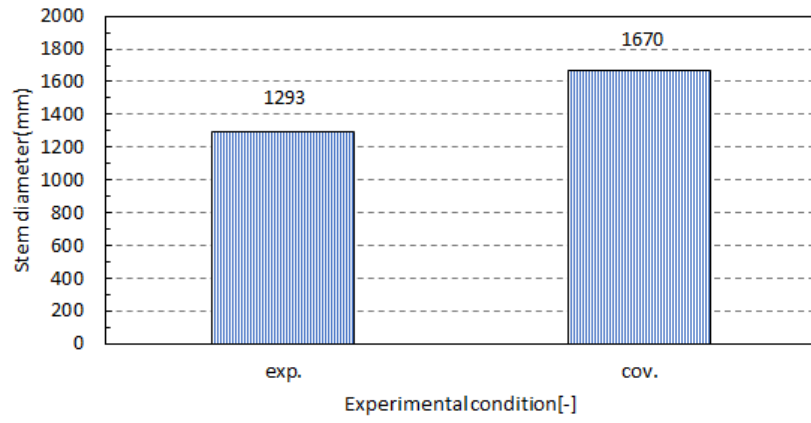


그림 43. 플라즈마 보일러와 일반 보일러의 평균 소비 전력량 비교

아. 경제성 분석

1) 경제성 분석방법

플라즈마 보일러 설치에 따른 경제성 분석은 다음의 항목과 가정을 바탕으로 상용 전기보일러와 비교하여 분석하였다.

- (1) 인건비 포함 보일러 설치비용(100평 기준)
- (2) 보일러 가격(60 kWh 기준)
- (3) 보일러 내구 연수(20년 기준)
- (4) 소비전력량 감소에 따른 이득 비용

2) 경제성 분석

(가) 기초자료 분석

표 1은 본 연구에 사용된 플라즈마 보일러를 상용 전기온풍기와 비교하여 인건비 포함 보일러 설치비용, 보일러 가격, 보일러 내구 연수 기초 조사 자료를 나타낸 것이다.

표 1에서 보는 바와 같이 보일러 설치비용은 플라즈마 보일러와 상용 전기온풍기가 100평 기준 3,000,000원이 소비되는 것으로 나타났다. 보일러 가격의 경우 60 kWh 기준 플라즈마 보일러가 5,000,000원, 상용 전기온풍기가 2,000,000원 이었고, 내구연수는 플라즈마 보일러가 20년, 전기보일러가 5년으로 나타났다.

표 1 플라즈마 보일러와 상용 전기보일러 경제성 분석

구분	플라즈마 보일러	상용 전기보일러
설치비용[원]	3,000,000	3,000,000
가격[원]	2,000,000	2,000,000
내구연수[년]	20	5

(나) 내구연수에 따른 경제성 분석

내구연수에 따른 경제성을 분석해 보면 플라즈마 보일러가 20년으로서 상용 전기보일러의 내수연수 5년보다 4배 높은 것으로 나타나 5년에 1번씩 보일러를 교체할 경우 4번의 보일러 교체와 설치비용이 소요되는 것으로서 20년 기준으로 보일러 설치비용과 보일러 가격은 다음과 같이 산출된다.

- 플라즈마 보일러

$$3,000,000\text{원(설치비용)}+2,000,000\text{원(보일러 가격)}= 5,000,000\text{원}$$

- 상용 전기보일러

$$3,000,000\text{원(설치비용)}+2,000,000\text{원(보일러 가격)}\}\times 4\text{회}= 20,000,000\text{원}$$

(다) 소비전력량 감소에 따른 이득 비용

경제성 분석 중 소비전력 감소에 대한 전기 요금은 한국전력공사에서 책정한 농사용 전력 ‘을’ 중 고압(A,B)를 사용하였다. 그 이유는 한국전력공사의 농사용 전력 ‘을’은 ‘농사용 육묘 또는 전 조재배에 사용하는 전력으로 계약 전력이 1,000 kW 미만’ 이 농사용 전력으로 정의하고 있고, 본 플라즈마 보일러 실증테스트를 수행한 시설하우스가 여기에 해당되기 때문이다. 또한 1년 중 난방기간은 11월~3월까지 5개월 간 난방을 수행하는 것으로 가정하여 1 kW 당 55.0원을 적용하여 전기요금을 산출하였다.

연간 사용되는 소비 전력 비교는 본 연구 결과인 일주일간 사용된 소비전력을 기준으로 산출하였다. 전술한 바와 같이 플라즈마 보일러를 설치한 실험구의 경우 일일 소비된 소비전력량은 3,857 kW/h 이고, 시중에 판매되는 상용 전기보일러를 설치한 대조구의 소비 전력량은 116.842 kW/h 이었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 연간 전기요금을 산출하면 다음과 같다.

- 플라즈마 보일러

$$185 \text{ kW/h} \times 30 \text{ 일} \times 4 \text{ 개월} \times 55.0 \text{ 원} = 1,221,000 \text{ 원}$$

- 상용 전기보일러

$$238 \text{ kW/h} \times 30 \text{ 일} \times 4 \text{ 개월} \times 55.0 \text{ 원} = 1,570,800 \text{ 원}$$

따라서 플라즈마 보일러를 사용할 경우 일반 전기보일러보다 연간 349,000원을 절약할 수 있는 것으로 나타났다.

(라) 플라즈마 보일러 총 이득 비용

플라즈마 보일러 사용에 따른 총 이득비용을 표 2에 나타내었다.

표 2에서 보는 바와 같이 일반 전기온풍기 대신 플라즈마 보일러를 설치할 경우 초기 기계가격과 설치비용에서 동일하게 소요되고, 내구연구는 4배 길기 때문에 일반 전기온풍기보다는 플라즈마 보일러가 경제적인 것으로 나타났다. 한편, 소비전력량 감소에 따른 전기요금도 연간 약 349,000원을 절약할 수 있기 때문에 플라즈마 보일러의 내구연구 20년은 기준으로 총 이득비용을 산출하여 연간 이득비용으로 환산하면 연간 약 1,099,800원의 경제적 효과가 있는 것으로 판단된다.

표 2 내구연수 20년 기준플라즈마 보일러와 상용 전기온풍기 경제성 분석

구분	플라즈마 보일러	상용 전기보일러
설치비용[원]	3,000,000	12,000,000(3,000,000×4회)
보일러 가격[원]	2,000,000	8,000,000(2,000,000×4회)
전기요금[원]	24,420,000 (1,221,000원×20년)	31,416,000 (1,570,800원×20년)
총 소요비용[원]	29,420,000[A]	51,416,000[B]
이득비용[원] (A-B)		21,996,000[C]
연간 이득비용[원] (C/20년)		1,099,800

○ 연구개발 목표<2단계-1차년도>

수중 플라즈마 방전 방식을 이용한 고효율 농업용 보일러 설계 검토 및 실증 테스트

- 농가 보급형 발열량 30kW급 고효율 플라즈마 보일러 코어, 유닛 설계 검토
- 농가 보급형 발열량 90kW급 고효율 플라즈마 보일러 설계 검토
- 농가 보급형 발열량 90kW급 고효율 플라즈마 보일러 실증 테스트
- ▷ 200~300평 농업용 시설하우스 2개소 선정 및 제품 설치
- ▷ 작물재배 비교실험 평가
(엽장, 엽폭, 수고, 식생지수, 엽록소 함량)
- ▷ 고효율 농업용 보일러의 난방 특성 분석
(하우스 내부 온도 및 습도, 보일러 입출수 온도, 열교환기 배풍온도, 소비전력량)
- 농가 보급형 발열량 90kW급 고효율 플라즈마 보일러 경제성 분석
- ▷ 기존 제품 대비 기능 및 성능에 대한 비교분석과 가격 경쟁력 분석

1. 재료 및 방법

가. 실험용 하우스

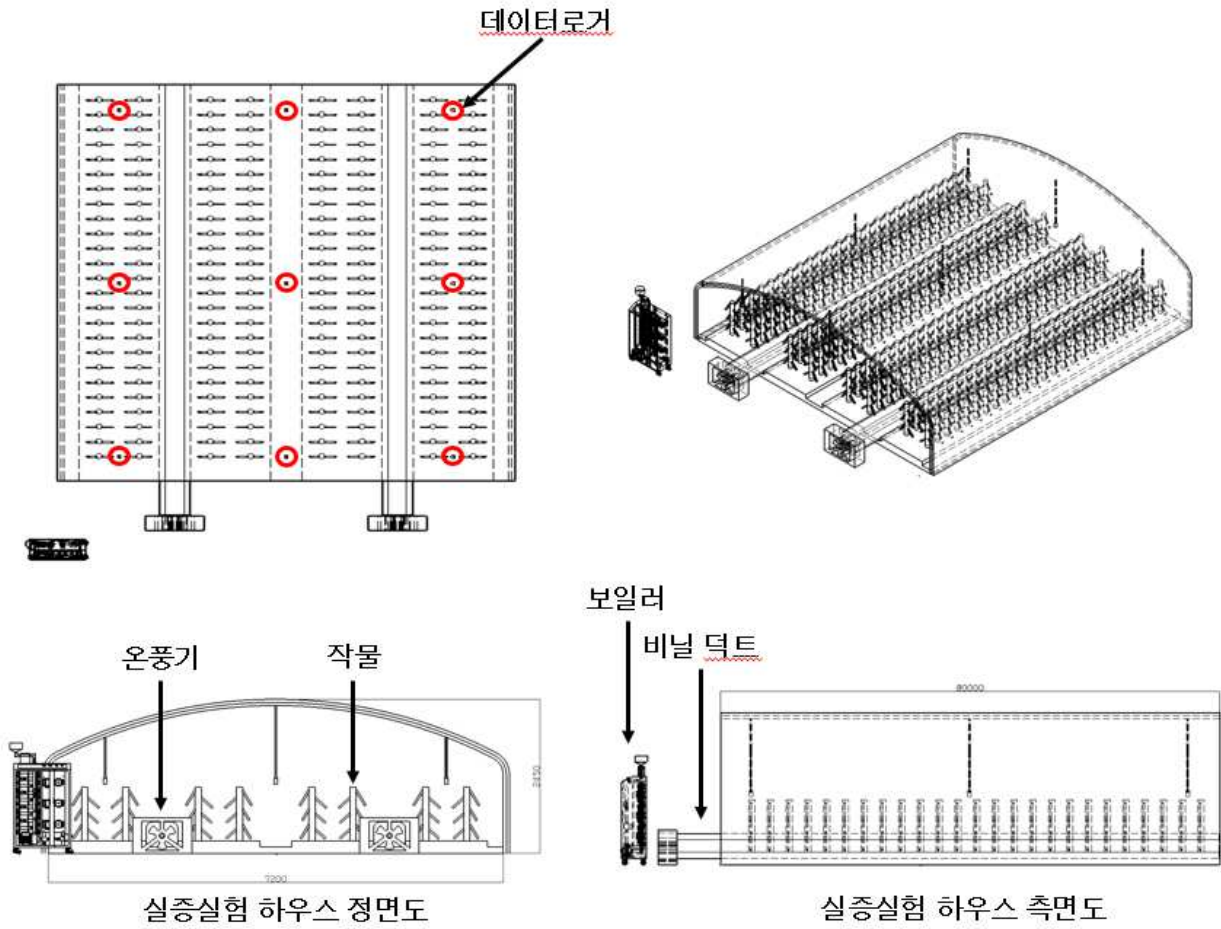
그림 1(a)는 세종시 전의면에 위치한 실험용 하우스 전경을 나타낸 것이다.

그림 1(b)에서 보는바와 같이 하우스 크기는 80,000 × 2,350 × 7,200 mm(LxHxD)의 3중 단열 단동 하우스로 각각 실험구와 대조구로 선정한 후 난방 및 생육 특성 실험을 수행하였다.

그림 2에 나타난 바와 같이 실험구와 대조구 하우스의 내부 온습도 측정은 중간 단열재 아래에서 측정하였고, 측정위치는 지상에서 1,800 mm, 입구 기준 10,000 mm, 40,000 mm, 70,000 mm에 실험구와 대조구별 각각 9개씩 총 18개의 온습도 측정기(SK-L200TH II α, SATO, JAPAN)를 설치하여 측정하였다.



(a) 실증실험 비닐하우스 전경



(b) 실증실험 비닐하우스 개략도

그림 1. 실증 테스트에 사용된 비닐하우스 전경과 개략도



그림 2. 실험용 하우스 내부에서 온습도 센서 및 설치 모습

나. 공시 보일러

그림 3은 본 실험에 사용한 농업용 고효율 플라즈마 보일러와 일반 시중에 판매되는 상용 전기 온풍기를 나타낸 것이다.

보일러 실증 테스트에 사용된 보일러는 실험구의 경우 주식회사 (주) GA에서 개발한 수증 플라즈마 방전 방식 보일러(PB-90, (주)지에이, KOREA)를 사용하였고, 대조구는 일반 시설하우스 농가에서 사용되는 상업용 전기 보일러(DBE-90, 대성, KOREA)를 사용하여 테스트를 수행하였다.

그림 3에서 보는 바와 같이 실험구에 설치한 농업용 고효율 플라즈마 보일러는 입수부, 발열부, 출수부 및 제어부로 구성되어 있고, 가열된 물은 출수부에서 배출된 후 하우스 중앙에 설치된 열교환기를 거쳐 하우스 내부 난방에 사용된 후 입수부로 들어온다. 가열된 물의 순환은 0.75 kW 순환펌프(PH 080M, Wilo, KOREA)를 이용하였다. 대조구에 설치된 상용 전기 보일러는 플라즈마 보일러와 유사한 구조이지만 발열부의 경우 일반 코일형 발열기가 설치되어 물을 가열시키는 구조이고, 입출수 및 내부 순환 펌프는 동일한 사양의 제품을 사용하였다. 본 실험에 사용한 농업용 고효율 플라즈마 보일러와 일반 상용 전기보일러의 발열량은 90 kWh 로 동일하였다.



(a) 플라즈마 보일러 모습



(b) 상용 전기보일러 모습

그림 3. 실증테스트에 사용된 플라즈마 보일러 및 전기보일러

2. 실험 방법

가. 고효율 농업용 보일러의 열 특성 분석

온실 내의 열 특성은 태양열 및 온풍기로부터의 공급열량과 외부로부터 손실된 열량이 동일하다는 가정 하에 주간의 경우 식(1)과 야간의 경우 식(2)를 이용하여 분석하였다.

$$Q_{Solar} + Q_{Hot\ air\ heater} = Q_{Loss - day} + Q_{Soil} \dots\dots\dots(1)$$

$$Q_{Hot\ air\ heater} = Q_{Loss - night} + Q_{Soil} \dots\dots\dots(2)$$

여기서,

- Q_{Solar} : Solar radiation in the greenhouse (kJ/hr)
- $Q_{Hot\ air\ heater}$: Heat gained from hot heater (kJ/hr)
- $Q_{Loss - day}$: Heat loss through the greenhouse cover in day (kJ/hr)
- $Q_{Loss - night}$: Heat loss through the greenhouse cover in night (kJ/hr)
- Q_{Soil} : Heat absorbed and released by the soil in greenhouse (kJ/hr)

공급열량은 주간의 경우 식 (3)을 이용하여 태양으로부터 공급된 열량(Q_{Solar})을 산출하였고, 온풍난방기에 의해 공급된 열량($Q_{Hot\ air\ heater}$)은 소비전력량을 측정하여 환산한다. 야간의 경우에는 온풍난방기로부터 공급된 열량만을 산출하여 열 특성 분석에 사용한다.

$$Q_{Solar} = \tau \times I_s \times A_g \dots\dots\dots(3)$$

여기서,

- τ : Transmissivity of greenhouse cover
- I_s : Solar radiation on the horizontal surface (kJ/m²·hr)
- A_g : Wall area of greenhouse (m²)
- q_{fuel} : Consumption of fuel (ℓ)
- C : Caloric value per unit area (kJ/ ℓ ·hr)

온실 내 수평면의 태양강도는 세종기상대에서 측정된 일평균 태양강도를 시간대별로 평균하여 이용하였다.

손실열량은 그린 하우스 피복재 외부로 손실되는 열량(Q_{Loss})을 주간의 경우 식 (4)를 이용하고, 야간의 경우 식 (5)을 이용하여 산출한다. 또한 지면으로 저장되거나 방열되는 (Q_{Soil})은 식 (6)을 이용하여 산출한다.

$$Q_{Loss-day} = A_g \times h_t \times (T_{in} - T_{ambi}) \dots\dots\dots (4)$$

$$Q_{Loss-night} = A_g \times h_t \times (1 - f_r) \times (T_{in} - T_{ambi}) \dots\dots\dots (5)$$

$$Q_{Soil} = \sum_{i=1}^n m_{soil} \times C_{p.soil} \times \Delta T \dots\dots\dots (6)$$

여기서,

- h_t : Heat transfer coefficient of greenhouse cover
- h_v : Ventilation heat transfer coefficient of greenhouse
- T_{in} : Inside temperature of the greenhouse (°C)
- T_{ambi} : Ambient temperature of the greenhouse (°C)
- A_g : Wall area of greenhouse (m²)
- m_{soil} : Mass of soil (kg/m²·hr)
- $C_{p.soil}$: Specific heat at constant pressure of soil (0.96kJ/kg·°C)
- ΔT : Difference temperature between soil layers (°C)
- f_r : Saving factor
(Aluminum+Polyethylene: 0.55, Non-woven fabric: 0.30)

나. 작물 재배 실험

작물 재배실험은 실험대상 작물로 오이(품종:취청)를 선정하였고, 대조구와 실험구에 각각 80주를 무작위로 선정하여 엽장, 엽폭, 절간장, 줄기직경, 과장, 과폭의 물리적 생육 변화를 측정하였다. 또한, 작물의 클로로필 함량을 예측할 수 있는 SPAD값을 SPAD 측정기(SPAD-502, KONICA MINLOTA, JAPAN)를 이용하여 측정하였다. 생육 측정은 일주일 간격으로 수행하였다.



(a) 실험 샘플 선정



(b) 생육 측정 모습



(c) SPAD 측정기

그림 4. 작물재배 실험 전경 및 광학정보 측정 장치

3. 측정 항목

가. 하우스 내부 온도

하우스 내부온도는 온도 데이터 로거(midi LOGGER GL840, GRAPTEC, MALAYSIA)를 사용하여 측정하였다. 실험용 보일러 난방 특성 분석용 온도 측정은 출수부, 입수부, 하우스 내부에 설치한 열교환기로부터 배출되는 공기온도를 측정하였다. 입출수 온도데이터는 입출수 관에 PT 100 열전대를 입출수 관에 삽입하여 측정하였고, 열교환기로부터 배출되는 공기온도도 동일한 센서를 이용하여 공기배출구에 설치한 후 측정하였다. 보일러 온도 데이터는 2024년 1월 3일~2024년 2월 7일 동안 측정한 데이터를 분석하였다.



(a) 온도 데이터 로거



(b) 입출수관 온도 측정

그림 5. 실험용 보일러 가열 특성 분석용 온도 측정

나. SPAD 값(클로로필 함량)

작물의 클로로필 함량을 예측할 수 있는 SPAD값을 SPAD 측정기(SPAD-502, KONICA MINLOTA, JAPAN)를 이용하여 일주일 간격으로 측정하였다.



그림 6. 오이의 SPAD (클로로필 함량) 측정 모습 및 화면

다. 엽장

엽장은 측정 엽을 기준으로 엽육이 시작되는 지점부터 끝부분까지의 길이를 측정하였다.



그림 7. 오이의 엽장 측정 모습

라. 엽폭

엽폭은 측정 엽을 기준으로 엽장과 수직방향이면서 폭이 가장 넓은 부분을 측정하였다.



그림 8. 오이의 엽폭 측정 모습

마. 절간장

절간장은 마디와 마디 사이의 길이를 측정하는 것으로 줄기에서부터 측정 엽까지의 마디 길이를 측정하였다.



그림 9. 오이의 절간장 측정 모습

바. 줄기직경

줄기직경은 측정 엽의 줄기저름을 측정하였다.



그림 10. 오이의 줄기직경 측정 모습

사. 과장

과장(직선길이)은 수정된 오이의 원물의 직선길이를 측정하였다.



그림 11. 오이의 과장 측정 모습

아. 과폭

과폭(둘레)은 원물의 둘레를 측정하는 것으로 측정 엽과 가장 가까운 과실의 수직 길이를 측정하였다.



그림 12. 오이의 과폭 측정 모습

자. 소비전력량

실험용 보일러의 소비전력량 측정은 3상유도전력측정기(HIOKI 3169-20, HIOKI, JAPAN)를 사용하였다. 소비전력량 측정은 실험구과 대조구 보일러를 동시에 시동한 후 1주일 동안 하우스 난방에 사용된 소비전력량을 적산하여 측정하였다.



그림 13. 3상 유도전력측정기 본체 및 측정선

차. 통계분석

최종 생육 조사를 한 오이의 생육 특성 분석은 엽장, 엽폭, 절간장, 줄기직경, 과장, 과폭, 엽록소(클로로필 함량)를 분석하였다. 생육조사기간 중 수집한 각 처리구별 오이의 생육정보 데이터 통계 분석을 위해 SPSS의 분산 분석 일원배치법을 통해 5%($p < 0.05$) 유의 수준에서 유의성을 검증하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 주야간 온풍난방기 및 태양으로부터 온실 내부로 공급된 전열량 분석

1) 주야간 온풍난방기로부터 온실내부로 공급된 전열량 분석(Q_{Heater})

그림 14는 일일 기준 주간과 야간에 온풍난방기로부터 온실내부로 공급된 시간대 별 전열량과 누적 전열량을 나타낸 것이다.

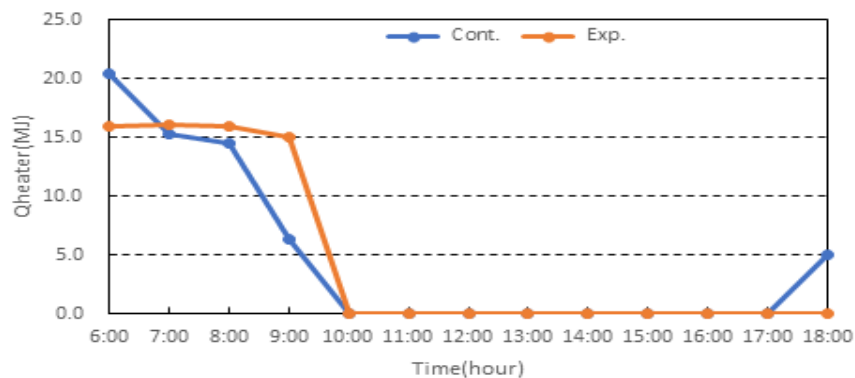
그림 14 (a)와 (b)에서 보는 바와 같이 주야간에 온풍 난방기로부터 온실내부로 공급된 전열량은 큰 차이는 없지만 주간에는 실험구가 야간에는 대조구가 높은 것으로 나타났다.

주야간 시간대별 대조구의 온풍난방기로부터 온실내부로 공급된 전열량은 최대 20.4 MJ, 최소 5.1 MJ로 나타났다. 실험구의 온풍난방기로부터 온실내부로 공급된 전열량은 최대 16 MJ, 최소 13.6 MJ 로 나타났다.

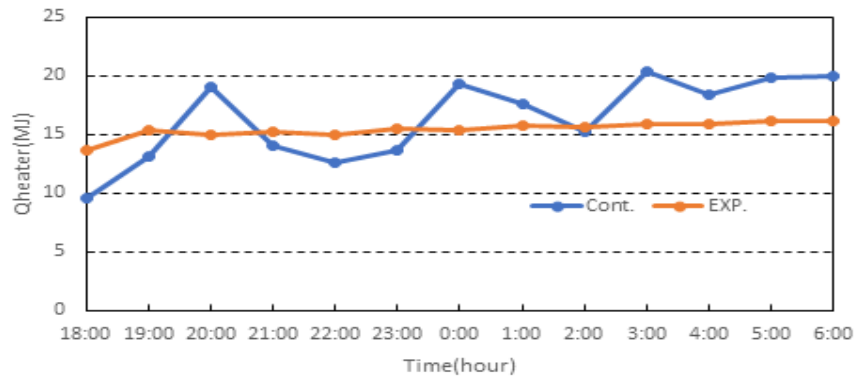
그림 14(c)은 1주일(2024.01.31.~ 2024.02.07)간의 실험용 하우스에 공급된 누적 전열량을 나타낸 것이다.

그림 14에서 보듯이 일일 기준 실험구에 공급된 누적 전열량은 2,041 MJ 이고, 대조구에 공급된 누적 전열량은 2,141 MJ 로서 대조구가 실험구보다 100 MJ 적게 공급된 것으로 나타났으나 큰 차이는 없었다.

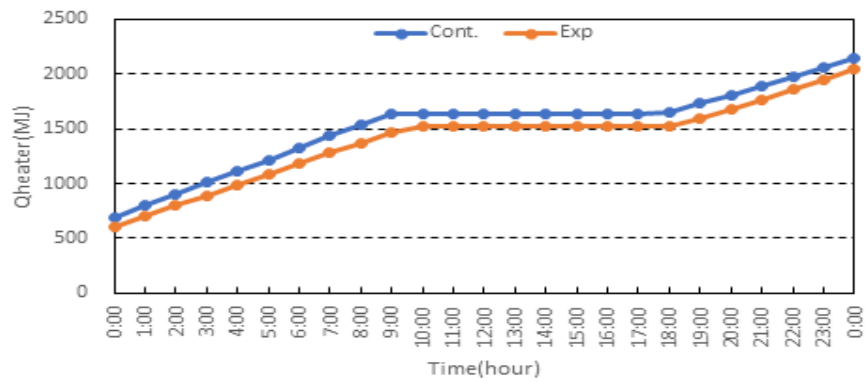
그림 15에서 보는 바와 같이 일주일간 실험구에 공급된 누적 전열량은 6,038 MJ 이 공급되었고, 대조구의 경우에는 9,172 MJ 의 전열량이 공급되어 실험구가 대조구보다 3,134 MJ 적게 공급된 것으로 나타났다.



(a) 주간



(b) 야간



(c) 누적 공급 전열량

그림 14. 주야간 온풍난방기로부터 온실 내부로 공급된 전열량

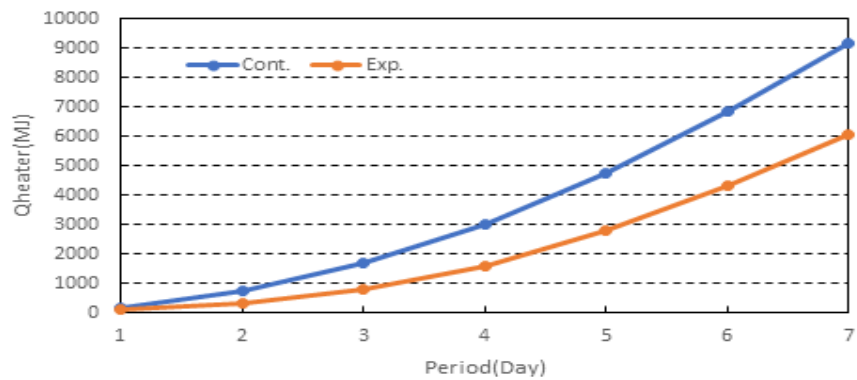


그림 15. 일주일 기준 주야간 온풍난방기로부터 온실 내부로 공급된 누적 전열량

2) 주야간 태양으로부터 온실내부로 공급된 일사량 분석(Q_{Solar})

그림 16과 17은 일일(2024.02.07.)기준과 일주일(2024.01.31~2024.02.07) 기준 태양으로부터 실험구 및 대조구 하우스 내부로 공급된 시간대별 열량과 누적 일사량을 나타낸 것이다. 온실 내 수평면의 태양강도는 세종 기상대에서 측정된 일평균 태양강도를 시간대별로 평균하여 산출하였다.

그림 16에서 보는 바와 같이 일일 기준 실험구 및 대조구 하우스 내부로 공급된 시간대별 일사량은 오전 11시에서 오후 3시 사이에 3.9 MJ/m^2 의 일사량이 공급된 것으로 나타났다.

또한, 일일 기준 누적 일사량은 그림 16에 나타낸 바와 같이 총 4.7 MJ/m^2 의 열량이 실험구와 대조구 하우스 내부로 공급된 것으로 나타났다.

한편 일주일 기준 실험구 및 대조구 하우스 내부로 공급된 시간대별 일사량은 오전 11시에서 오후 3시 사이에 5.5 MJ/m^2 의 일사량이 공급된 것으로 나타났다. 또한 일주일 기준 누적 일사량은 그림 17에 나타낸 바와 같이 총 7.1 MJ/m^2 의 일사량이 실험구와 대조구 하우스 내부로 공급된 것으로 나타났다.

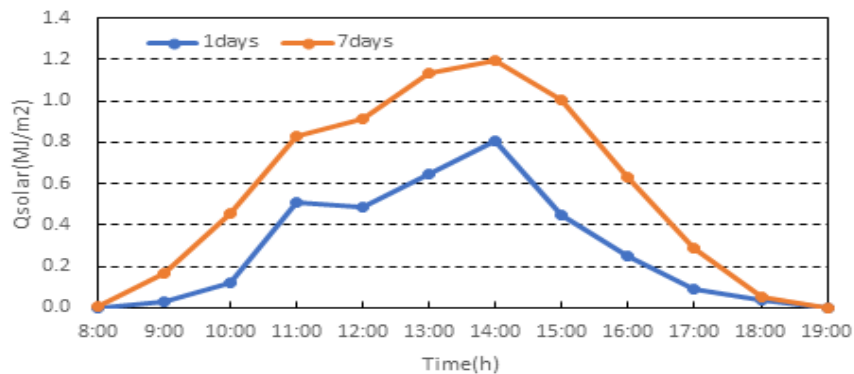


그림 16. 일일 및 일주일 기준 태양으로부터 공급된 일사량

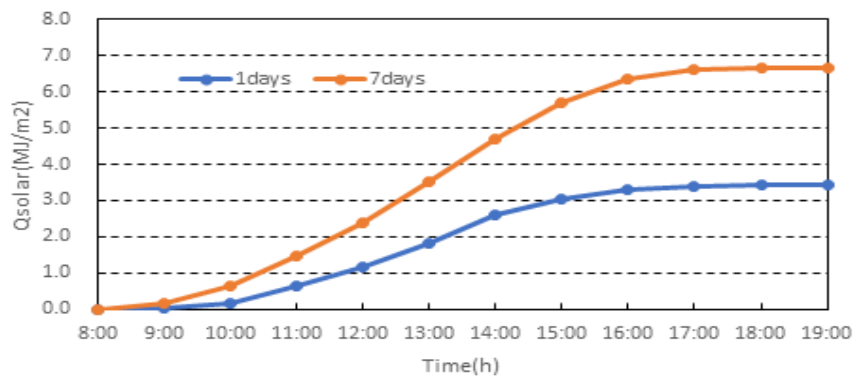


그림 17. 일일 및 일주일 기준 태양으로부터 공급된 누적 일사량

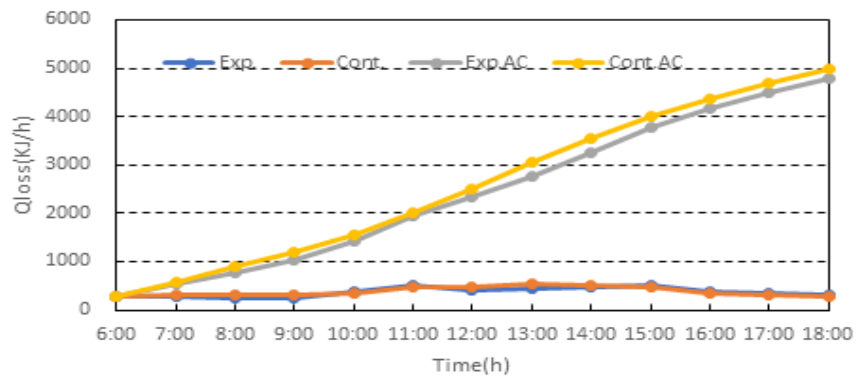
나. 주야간 하우스 외부로 손실되는 열량 분석

1) 일일 기준 하우스 외피로 손실되는 열량(Q_{Loss})

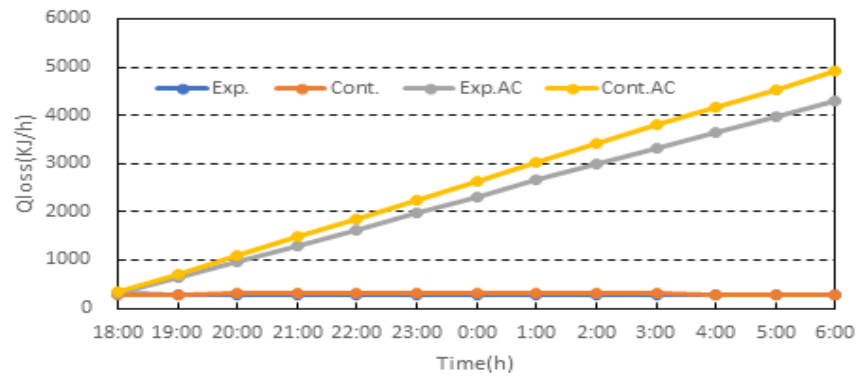
그림 18은 각각 일일 기준 실험구 및 대조구 하우스의 외피를 통해 외부로 방출된 손실열량과 누적 손실열량을 주간(06:00~18:00), 야간(18:00~06:00)으로 나타낸 것이다.

그림 18에 나타낸 바와 같이 하우스 외피를 통한 손실열량은 대조구가 실험구보다 더 많은 경향을 보였으나 큰 차이는 없었고, 주간보다 야간에 열 손실이 더 많이 발생하는 것으로 나타났다.

일일 기준 하우스 외피로 손실되는 누적열량이 주간에 실험구는 4,346 kJ/h 대조구는 4,659 kJ/h로 나타나 대조구가 실험구보다 약 313 kJ/h의 손실열량이 더 큰 것으로 나타났고, 야간에는 실험구는 4,296 kJ/h, 대조구는 4,909 kJ/h 로 나타나 대조구가 실험구보다 약 613 kJ/h 더 큰 것으로 나타났으나 큰 차이는 없었다.



(a) 주간



(b) 야간

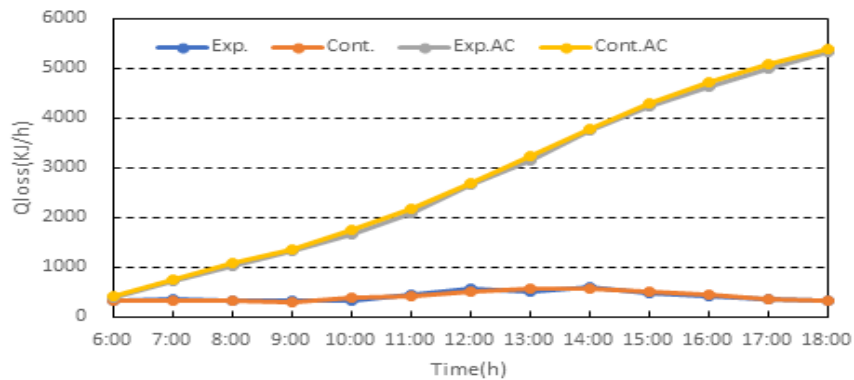
그림18. 일일 기준 주야간에 하우스 외피로 손실되는 열량

2) 일주일 기준 하우스 외피로 손실되는 열량(Q_{Loss})

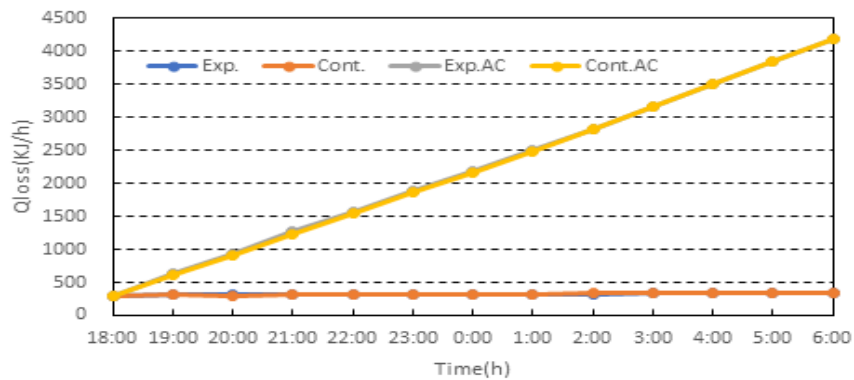
그림 19는 각각 일주일 기준 실험구 및 대조구 하우스의 외피를 통해 외부로 방출된 손실열량과 누적 손실열량을 주간(06:00~18:00), 야간(18:00~06:00)으로 나타낸 것이다.

그림 19에 나타낸 바와 같이 하우스 외피를 통한 손실열량은 주간에 대조구와 실험구에서 동일한 경향을 보였고, 야간은 대조구가 실험구보다 열 손실이 많이 발생하는 것으로 나타났다. 주간보다 야간에 열 손실이 더 많이 발생하는 것으로 나타났다.

일주일 기준 하우스 외피로 손실되는 누적열량이 주간에 실험구는 4,196 kJ/h 대조구는 4,365 kJ/h로 나타나 대조구가 실험구보다 약 169 kJ/h의 손실열량이 더 큰 것으로 나타났으나 큰 차이는 없었다. 야간에는 실험구는 4,282 kJ/h, 대조구는 4,843 kJ/h로 나타나 대조구가 실험구보다 약 562 kJ/h 더 큰 것으로 나타났으나 큰 차이는 없었다.



(a) 주간



(b) 야간

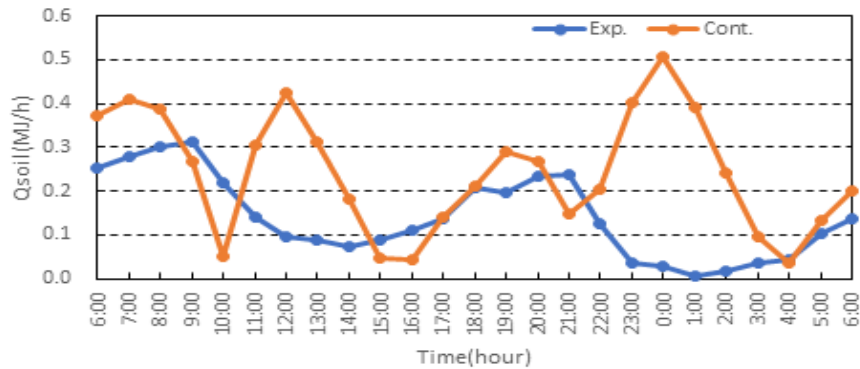
그림 19. 일주일 기준 주야간 기준 하우스 외피로 손실되는 열량

3) 일일 기준 하우스 지면을 통한 손실열량(Q_{Soil})

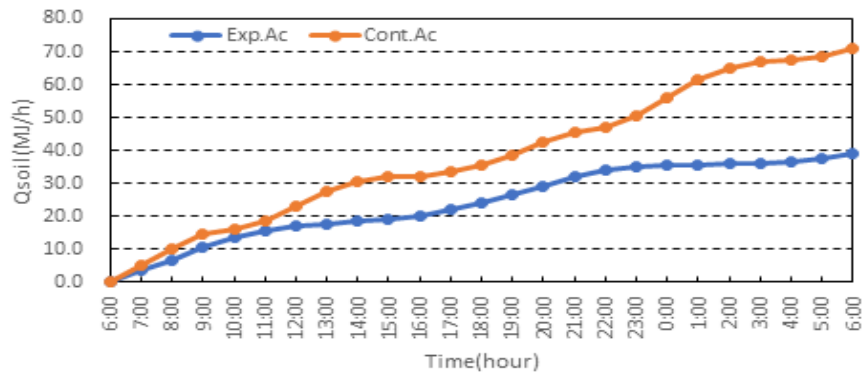
그림 20은 일일 기준 실험구와 대조구의 지면을 통한 열손실량과 누적열손실량을 나타낸 것이다.

그림 20에서 보는 바와 같이 하우스의 지면을 통한 열손실량은 대조구가 실험구보다 많은 경향을 보였다. 또한 야간의 경우에는 토양으로부터 하우스 내부 공간으로 열량이 공급되는 경향을 보였고, 주간의 경우에는 토양으로 열량이 공급되어 손실열량이 발생하는 것으로 나타났다.

실험구와 대조구 하우스의 지면을 통한 열손실량은 각각 39.0 MJ/h 와 70.8 MJ/h 로서 약 31.8 MJ/h 로 대조구가 많은 것으로 나타났으나 큰 차이는 없었다.



(a) 손실열량



(b) 누적 손실열량

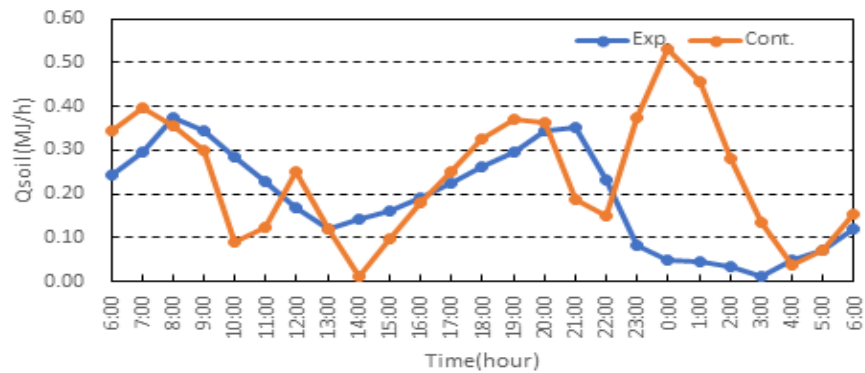
그림 20. 일일 기준 하우스 지면을 통한 손실열량

4) 일주일 기준 하우스 지면을 통한 손실열량(Q_{Soil})

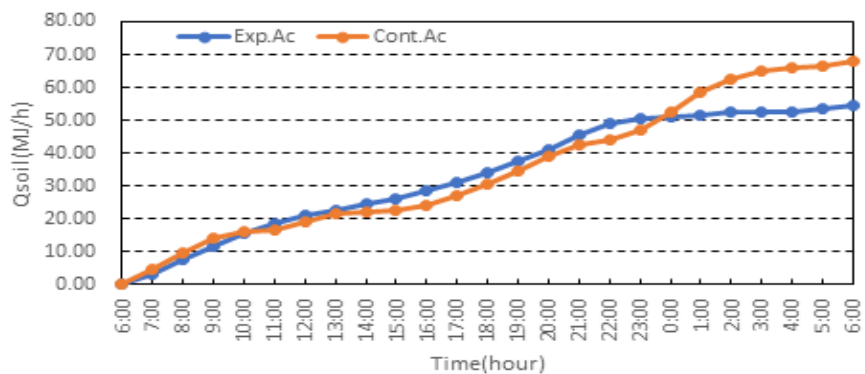
그림 21은 일주일 기준 실험구와 대조구의 지면을 통한 열손실량과 누적열손실량을 나타낸 것이다.

그림 21에서 보는 바와 같이 실험구와 대조구가 유사하게 나타났으나 대조구의 열 손실량이 조금 더 많은 것으로 나타났다. 실험구와 대조구에서 10시부터 15시 사이에 하우스 내부 공간으로부터 토양으로 열이 손실되는 것으로 나타났고, 그 이후부터 토양으로부터 하우스 내부 공간으로 열량이 공급되는 경향을 보였다.

실험구와 대조구 하우스의 지면을 통한 열손실량은 각각 54.67 MJ/h 와 67.85 MJ/h 로서 약 13.18 MJ/h 정도 대조구가 실험구보다 손실열량이 많은 것으로 나타났으나 큰 차이는 없었다.



(a) 손실열량



(b) 누적 손실열량

그림 21. 일주일 기준 하우스 지면을 통한 손실열량

다. 설정온도 기준 온실 내부 온도 변화

1) 일일 기준 야간 온실 내부 온도 변화

그림 22는 일일 기준 온실 내의 야간 온도변화를 나타낸 것이다. 본 실험에서 온실 내부온도는 15℃ 로 설정하였다.

그림 22에서 보는 바와 같이 실험용 하우스 내부온도 변화는 대조구의 경우 최대 15.2℃ 에서 최소 12℃ 의 온도 분포를 나타내었고, 실험구는 최대 14.8℃ 에서 최소 11.4℃ 의 온도 분포를 나타내었다. 설정온도 대비 온실내의 온도 편차는 대조구는 최대 3℃ 를 보였고, 실험구는 최대 3.3.℃ 로 나타났다. 실험구의 경우 설정온도보다 1~3.6℃ 낮게 유지했지만 온도편차가 대조구 에 비해 작은 경향을 보이며 온실 내의 온도를 일정하게 유지한 것으로 나타났다.

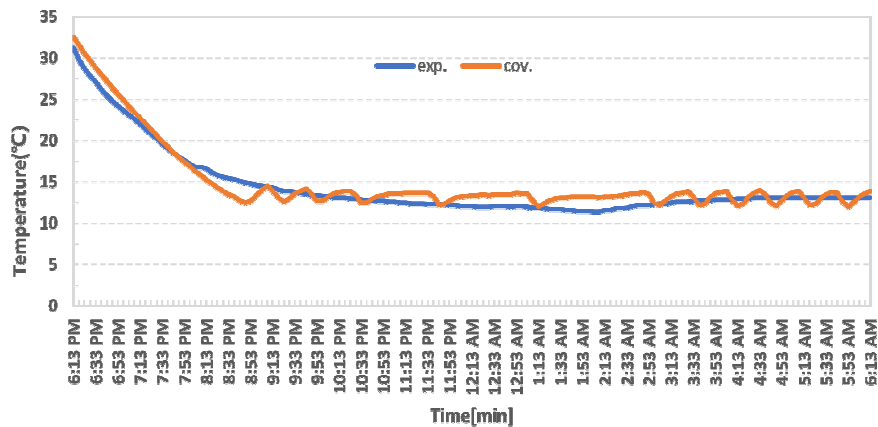


그림 22. 일일 기준 야간 온실 내의 온도변화

라. 전기보일러와 플라즈마 보일러의 입출수온도 변화

그림 23은 플라즈마 보일러의 입출수온도 변화를 나타낸 것이다. 본 실험에서 플라즈마 보일러 의 설정 출수온도는 76℃ 로 하였다.

그림 23에서 보는 바와 같이 플라즈마 보일러 출수온도의 변화는 최대 75.22℃, 최소 9.7℃ 로 온도편차는 65℃ 로 나타났고, 출수 온도는 평균 56℃, 입수온도의 경우에는 3℃ 낮은 것으로 나타났.

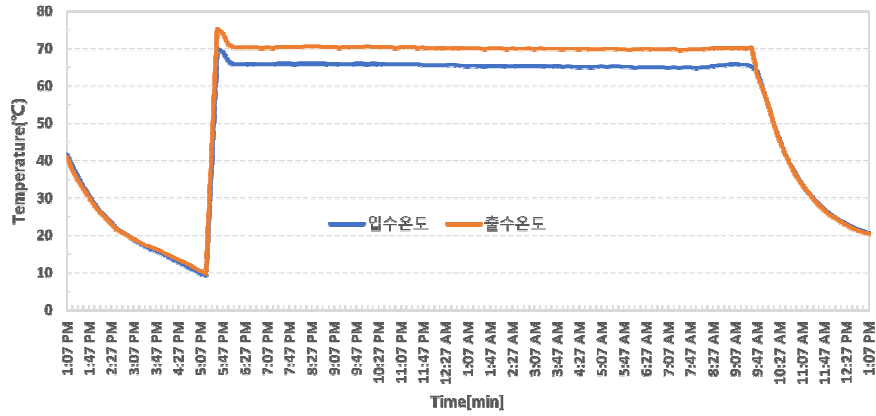


그림 23. 플라즈마 보일러의 출수온도 변화

마. 플라즈마 보일러의 설정 출수 온도 상승 시간

그림 24는 플라즈마 보일러의 설정 출수온도 도달 시간을 나타낸 것이다.

그림 24에서 보는 바와 같이 플라즈마 보일러가 설정 출수온도까지 도달시간은 20분이 소요되는 것으로 나타났고, 축열조식인 상용 전기보일러는 초기 출수온도 도달시간은 40분 정도 소요되어 플라즈마 보일러의 가온 능력이 우수한 것으로 나타났다.

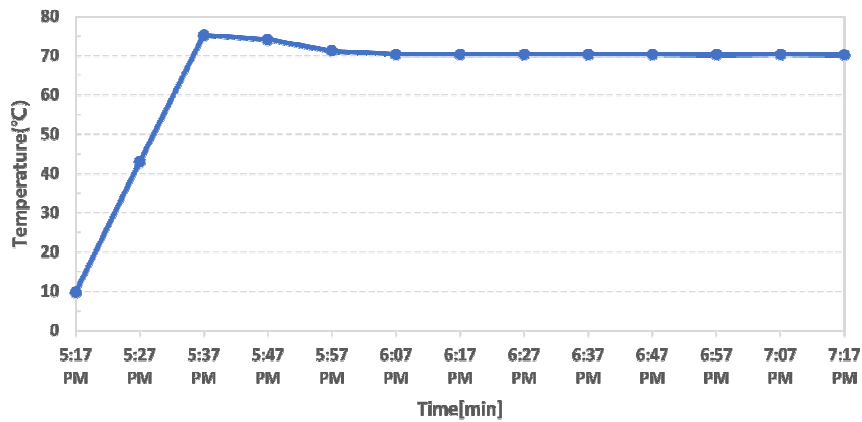


그림 24. 플라즈마 보일러와 사용 전기보일러의 급탕 온도 도달 시간 변화

바. 열교환기 배풍온도

그림 25는 플라즈마 보일러 열교환기와 상용 전기보일러 열교환기에서 배출되는 공기 온도 변화를 나타낸 것이다.

그림 25에서 보는 바와 같이 플라즈마 보일러 열교환기와 상용 전기보일러 열교환기에서 배출되는 공기 온도는 실험구가 대조구보다 높은 경향을 보였다.

플라즈마 보일러 열교환기에서 배출되는 공기 온도는 평균 56.48°C 로 나타났고, 상용 전기보일러 열교환기의 경우에는 51.52°C 로 나타나 플라즈마 보일러 열교환기에서 배출 되는 공기가 상용 전기보일러 열교환기에서 배출되는 공기 온도보다 5°C 높은 것으로 나타났다.

이와 같이 플라즈마 보일러의 배풍온도가 높은 이유는 플라즈마 보일러의 경우 보일러가 작동하는 동안 설정 출수 온도인 76°C 를 유지할 수 있도록 시스템을 구성하여 플라즈마 보일러의 입수온도와 출수온도의 편차가 적기 때문으로 판단된다.

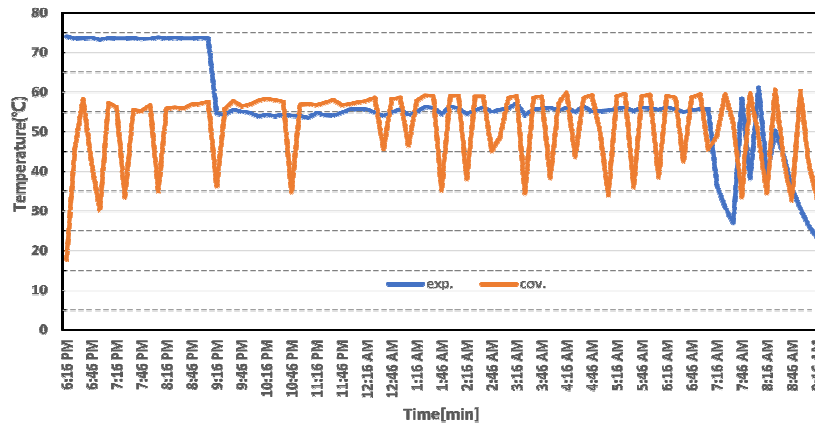


그림 25. 열교환기 배풍온도 변화

사. 식물 재배 실험

1) 엽장 성장량

그림 26 은 실험구와 대조구에서 재배한 오이의 1주간 누적 엽장 성장량을 비교하여 나타낸 것이다.

그림 26에서 보는 바와 같이 1일차 기준 대조구 59.44 mm, 실험구 47.85 mm으로 대조구가 실험구보다 약 11.59 mm 큰 것으로 나타났다. 7일차 기준 대조구 90.96 mm, 실험구 99.38 mm로 실험구가 대조구 보다 8.42 mm 로 엽장 성장량이 우수한 것으로 나타났다.

그림 26에서 보는 바와 같이 1주간 실험구 오이의 누적 엽장 성장량은 51.53 mm 이었고, 대조구의 경우에는 31.52 mm 로 나타나 실험구가 대조구보다 약 20.01 mm 정도 엽장 성장량이 높은 것으로 나타났다.

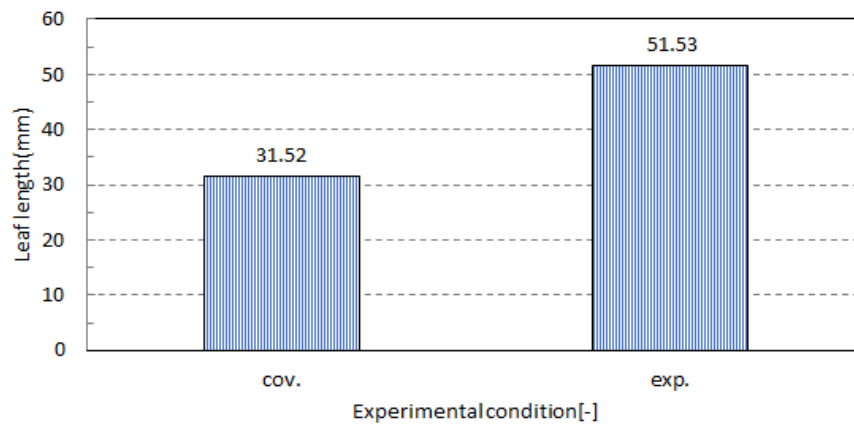


그림 26. 오이의 누적 엽장 성장량

2) 엽폭 성장량

그림 27은 실험구와 대조구에서 재배한 오이의 1주간 누적 엽폭 성장량을 비교하여 나타낸 것이다. 1일차 기준 대조구 74.06 mm, 실험구 58.07 mm으로 대조구가 실험구보다 약 15.99 mm 큰 것으로 나타났다. 7일차 기준 대조구 114.18 mm, 실험구 128.66 mm 로 실험구가 대조구보다 14.48mm 큰 것으로 나타났다.

그림 27에서 보는 바와 같이 1주간 실험구 오이의 누적 엽폭 성장량은 70.59 mm 이었고, 대조구의 경우에는 40.12 mm 로 나타나 실험구가 대조구보다 약 30.47 mm 정도 엽폭 성장량이 좋은 것으로 나타났다.

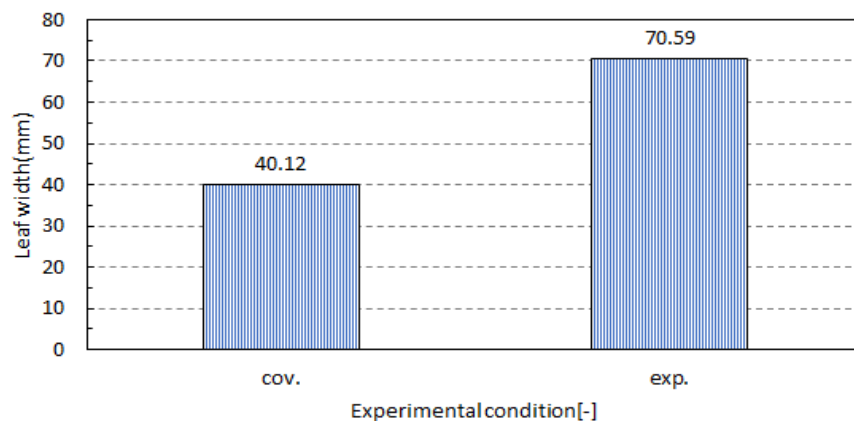


그림 27. 오이의 누적 엽폭 성장량

3) 절간장 성장량

그림 28은 실험구와 대조구에서 재배한 오이의 1주간 누적 절간장 성장량을 비교하여 나타낸 것이다.

그림 28에 나타난 바와 같이 1일차 기준 대조구 22.8 mm, 실험구 16.84 mm으로 대조구가 실험구보다 약 5.96 mm 큰 것으로 나타났다. 7일차 기준 대조구 44.48 mm, 실험구 50.09 mm 로 실험구가 대조구 보다 5.61 mm 큰 것으로 나타났다.

그림 28에서 보는 바와 같이 1주간 실험구 오이의 누적 절간장 성장량은 33.25 mm 이었고, 대조구의 경우에는 21.68 mm 로 나타나 실험구가 대조구보다 약 11.57 mm 정도 절간장 성장량이 높은 것으로 나타났다.

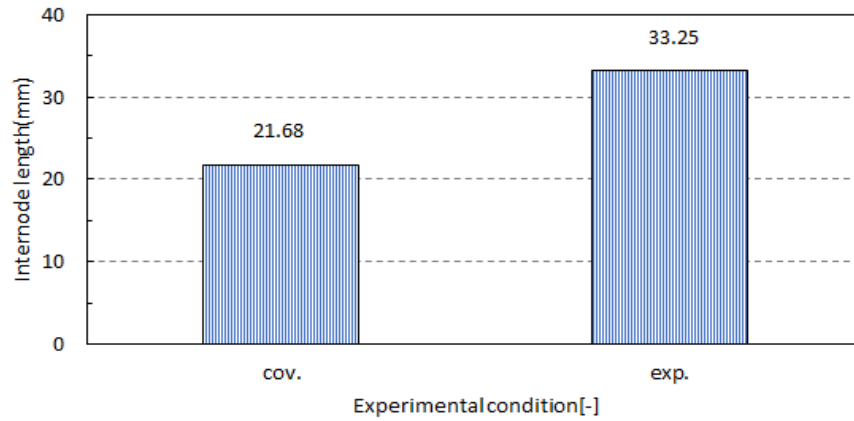


그림 28. 오이의 누적 절간장 성장량

4) 줄기직경 성장량

그림 29는 실험구와 대조구에서 재배한 오이의 1주간 누적 줄기직경 성장량을 비교하여 나타낸 것이다.

1일차 기준 대조구 3.1 mm, 실험구 2.15 mm 으로 대조구가 실험구보다 약 0.95 mm 큰 것으로 나타났다. 7일차 기준 대조구 3.29 mm, 실험구 3.31 mm 로 실험구가 대조구 보다 0.02 mm 큰 것으로 나타났다.

그림 29에서 보는 바와 같이 1주간 실험구 오이의 누적 줄기직경 성장량은 1.16 mm 이었고, 대조구의 경우에는 0.19 mm 로 나타나 실험구가 대조구보다 약 0.97 mm 정도 줄기직경 성장량이 높은 것으로 나타났다.

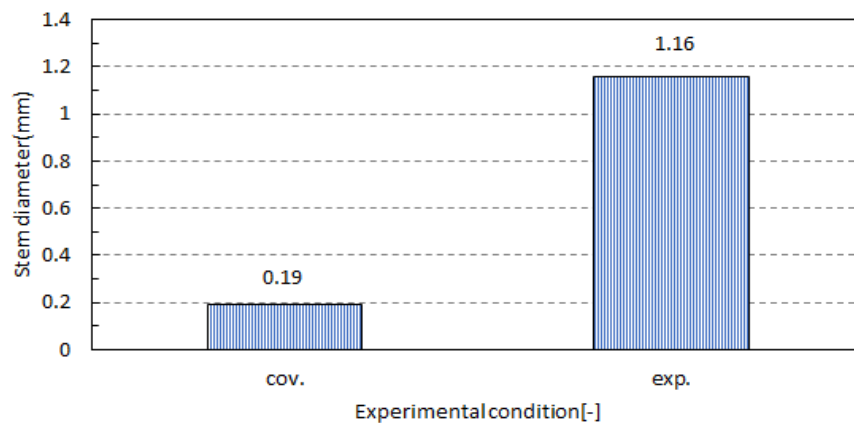


그림 29. 오이의 누적 줄기직경 성장량

5) 과장 성장량

그림 30은 실험구와 대조구에서 재배한 오이의 1주간 누적 과장 성장량을 비교하여 나타낸 것이다.

그림 30에 나타냈듯이 1일차 기준 대조구 19.29 mm, 실험구 15.76 mm 으로 대조구가 실험구보다 약 3.53 mm 큰 것으로 나타났다. 7일차 기준 대조구 24.06 mm, 실험구 37.73 mm 로 실험구가 대조구 보다 13.67 mm 큰 것으로 나타났다.

그림 30에서 보는 바와 같이 1주간 실험구 오이의 누적 과장 성장량은 21.97 mm 이었고, 대조구의 경우에는 4.76 mm 로 나타나 실험구가 대조구보다 약 17.21 mm 정도 과장 성장량이 높은 것으로 나타났다.

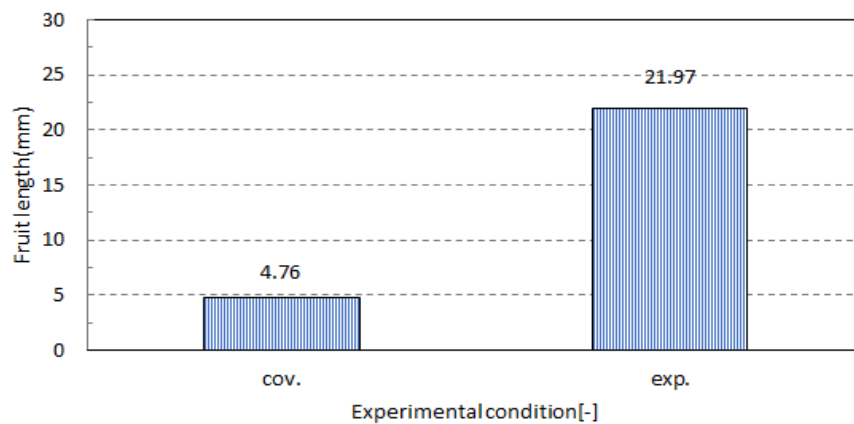


그림 30. 오이의 누적 과장 성장량

6) 과폭 성장량

그림 31은 실험구와 대조구에서 재배한 오이의 1주간 누적 과폭 성장량을 비교하여 나타낸 것이다. 1일차 기준 대조구 2.59 mm, 실험구 2.22 mm 으로 대조구가 실험구보다 약 0.37 mm 큰 것으로 나타났다. 7일차 기준 대조구 3.76 mm, 실험구 3.81 mm 로 실험구가 대조구 보다 0.05 mm 큰 것으로 나타났다.

그림 31에서 보는 바와 같이 1주간 실험구 오이의 누적 과폭 성장량은 1.59 mm 이었고, 대조구의 경우에는 1.17 mm 로 나타나 실험구가 대조구보다 약 0.42 mm 정도 과폭 성장량이 높은 것으로 나타났다.

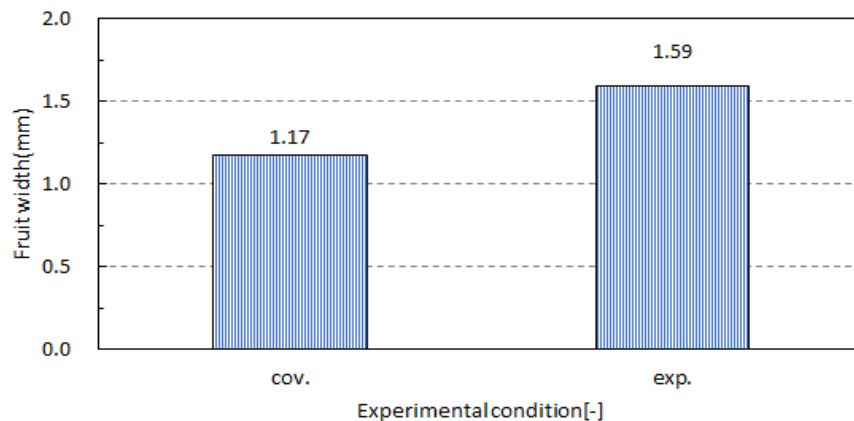


그림 31. 오이의 누적 과폭 성장량

아. 플라즈마 보일러와 일반 전기보일러의 소비 전력량 비교

그림 32는 일정 기간 기준(기간: 2024년 01월 01일~2024년 01월 18일) 실험구와 대조구 보일러가 소모한 소비 전력량을 나타낸 것이다.

그림 21에 나타낸 바와 같이 온실 내부를 난방하기 위해 사용된 소비전력량은 기간 에서는 실험구가 대조구보다 더 적게 소비하는 것으로 나타났다.

18일 간 플라즈마 보일러와 상용 전기보일러의 소비전력량은 각각 7,368 kW/h, 8,770 kW/h 로서 플라즈마 보일러가 상용 전기보일러보다 약 1,402 kW/h 적게 소비되어 약 16 % 정도 에너지 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 플라즈마 보일러가 상용 전기보일러보다 동일한 난방조건에서 에너지 소비량은 적은 이유는 전술한 바와 같이 플라즈마 방식 가열 메커니즘이 일반 전도방식 가열 메커니즘보다 가열 능력이 우수했기 때문으로 판단된다.

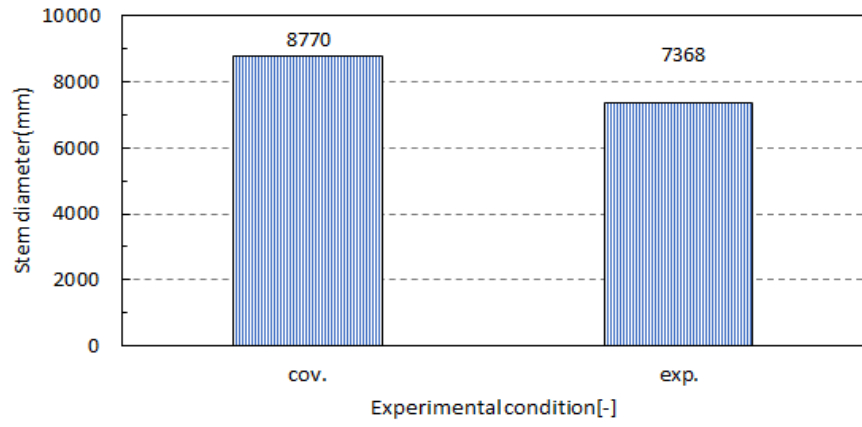


그림 32. 일정기간 플라즈마 보일러와 상용 전기 보일러의 소비 전력량 비교

자. 경제성 분석

1) 경제성 분석방법

플라즈마 보일러 설치에 따른 경제성 분석은 다음의 항목과 가정을 바탕으로 상용 전기보일러와 비교하여 분석하였다.

- (1) 인건비 포함 보일러 설치비용(100평 기준)
- (2) 보일러 가격(90 kWh 기준)
- (3) 보일러 내구 연수(20년 기준)
- (4) 소비전력량 감소에 따른 이득 비용

2) 경제성 분석

(가) 기초자료 분석

표 1은 본 연구에 사용된 플라즈마 보일러를 상용 전기온풍기와 비교하여 인건비 포함 보일러 설치비용, 보일러 가격, 보일러 내구 연수 기초 조사 자료를 나타낸 것이다.

표 1에서 보는 바와 같이 보일러 설치비용은 플라즈마 보일러와 상용 전기온풍기가 100평 기준 3,300,000원이 소비되는 것으로 나타났다. 보일러 가격의 경우 90 kWh 기준 플라즈마 보일러가 3,000,000원, 상용 전기온풍기가 2,500,000원 이었고, 내구연수는 플라즈마 보일러가 20년, 전기보일러가 5년으로 나타났다.

표 1 플라즈마 보일러와 상용 전기보일러 경제성 분석

구분	플라즈마 보일러	상용 전기보일러
설치비용[원]	3,300,000	3,300,000
가격[원]	3,000,000	2,500,000
내구연수[년]	20	5

(나) 내구연수에 따른 경제성 분석

내구연수에 따른 경제성을 분석해 보면 플라즈마 보일러가 20년으로서 상용 전기보일러의 내수연수 5년보다 4배 높은 것으로 나타나 5년에 1번씩 보일러를 교체할 경우 4번의 보일러 교체와 설치비용이 소요되는 것으로서 20년 기준으로 보일러 설치비용과 보일러 가격은 다음과 같이 산출된다.

- 플라즈마 보일러

$$3,300,000\text{원(설치비용)}+3,000,000\text{원(보일러 가격)}= 6,600,000\text{원}$$

- 상용 전기보일러

$$\{3,300,000\text{원(설치비용)}+2,500,000\text{원(보일러 가격)}\}\times 4\text{회}= 23,200,000\text{원}$$

(다) 소비전력량 감소에 따른 이득 비용

경제성 분석 중 소비전력 감소에 대한 전기 요금은 한국전력공사에서 책정한 농사용 전력 ‘을’ 중 고압(A,B)를 사용하였다. 그 이유는 한국전력공사의 농사용 전력 ‘을’은 ‘농사용 육묘 또는 전 조재배에 사용하는 전력으로 계약 전력이 1,000 kW 미만’ 이 농사용 전력으로 정의하고 있고, 본 플라즈마 보일러 실증테스트를 수행한 시설하우스가 여기에 해당되기 때문이다. 또한 1년 중 난방기간은 11월~3월까지 5개월 간 난방을 수행하는 것으로 가정하여 1 kW 당 55.0원을 적용하여 전기요금을 산출하였다.

연간 사용되는 소비 전력 비교는 본 연구 결과인 일주일간 사용된 소비전력을 기준으로 산출하였다. 전술한 바와 같이 플라즈마 보일러를 설치한 실험구의 경우 일일 소비된 소비전력량은 409 kW/h 이고, 시중에 판매되는 상용 전기보일러를 설치한 대조구의 소비 전력량은 487 kW/h 이었다. 이와 같은 결과를 바탕으로 연간 전기요금을 산출하면 다음과 같다.

- 플라즈마 보일러

$$409 \text{ kW/h} \times 30 \text{ 일} \times 4 \text{ 개월} \times 55.0 \text{ 원} = 2,699,400 \text{ 원}$$

- 상용 전기보일러

$$487 \text{ kW/h} \times 30 \text{ 일} \times 4 \text{ 개월} \times 55.0 \text{ 원} = 3,214,200 \text{ 원}$$

따라서 플라즈마 보일러를 사용할 경우 일반 전기보일러보다 연간 514,800원을 절약할 수 있는 것으로 나타났다.

(다) 플라즈마 보일러 총 이득 비용

플라즈마 보일러 사용에 따른 총 이득비용을 표 2에 나타내었다.

표 2에서 보는 바와 같이 일반 전기온풍기 대신 플라즈마 보일러를 설치할 경우 초기 기계가격과 설치비용에서 동일하게 소요되고, 내구연구는 4배 길기 때문에 일반 전기온풍기보다는 플라즈마 보일러가 경제적인 것으로 나타났다. 한편, 소비전력량 감소에 따른 전기요금도 연간 약 514,800원을 절약할 수 있기 때문에 플라즈마 보일러의 내구연구 20년은 기준으로 총 이득비용을 산출하여 연간 이득비용으로 환산하면 연간 약 1,389,800원의 경제적 효과가 있는 것으로 판단된다.

표 2 내구연수 20년 기준플라즈마 보일러와 상용 전기온풍기 경제성 분석

구분	플라즈마 보일러	상용 전기보일러
설치비용[원]	3,300,000	13,200,000(3,300,000×4회)
보일러 가격[원]	3,000,000	10,000,000(2,500,000×4회)
전기요금[원]	53,388,000 (2,699,400원×20년)	64,284,000 (3,214,200원×20년)
총 소요비용[원]	59,688,000[A]	87,484,000[B]
이득비용[원] (A-B)		27,796,000[C]
연간 이득비용[원] (C/20년)		1,389,800

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

<주관연구기관: ㈜지에이>

○ 1단계 1차년도

1. 시설원에 난방용 고효율 수증 플라즈마 방전 방식 보일러를 개발하기 위해 PPS (Polyphenylene Sulfide)와 타이타늄(Ti) 재질의 히터코어에 이리듐(Ir)을 코팅한 히터 유닛의 수명시험과 누설전압 분석하여 최적의 히터 유닛을 개발하였다.
 2. 플라즈마 보일러 히터 유닛의 수명시험 결과, PPS 히터 유닛은 플라즈마 방전에 의한 표면 온도 상승을 견디지 못하고 열부식이 발생되어 다중도금층이 파괴되는 것으로 나타났다.
 3. Ti-Ir 히터 유닛의 경우에는 수명시험 기간 동안 표면 부식 없이 정상적으로 작동하는 것으로 나타났다.
 4. Ti-Ir 히터 코어의 플라즈마 방전시 누설전압은 N상 하우징이 있는 경우가 없는 경우보다 누설전압이 낮은 경향을 보였다. 또한 N상 하우징과 히터코어와의 거리가 가까울수록 누설전압이 증가하는 경향을 나타내었다.
 5. 30 kW 급 플라즈마 보일러의 기초 성능을 산출하기 위하여 1000 L 의 순환수를 유량 24.3~27.7 L/min 로 유지한 상태에서 플라즈마 보일러 출수온도 약 100℃까지 상승시킬 경우 보일러의 운전 온도범위인 60~70℃에서 COP는 1.3~1.4로 나타났다.
 6. 이상의 결과로부터 플라즈마 보일러의 히터 유닛은 전해수인 헥사메타인산염 나트륨이 0.2 %(w/v)의 조건에서 Ti-Ir 히터 코어의 직경은 $\phi 19$ mm, 길이 238.5 mm 를 중심경 $\phi 43.9$ mm 에 120°등간격 배치와 N상 하우징 직경 $\phi 82.5$ mm, 길이 235.5 mm 조건이 플라즈마 방전의 최적조건으로 판단된다.
-

<주관연구기관: (주)지에이>

○ 1단계 2차년도

1. 시설원에 난방용 고효율 수증 플라즈마 방전 방식 보일러를 개발하기 위해 티타늄 grade 2 (Ti Gr2), 표면의 이리듐(Ir) 코팅은 5 μm 두께로 Ti+Ir 히터코어를 적용한 20 kW 플라즈마 보일러 히터코어 시제품 3종과 히터유닛을 제작하였다. 또한 플라즈마 보일러 시제품의 발열량, 소비전력 및 성능계수(에너지효율) 등을 정밀하게 측정하기 위하여 기초성능 시험장치를 설계 제작하였다.

2. 전해수 농도에 따른 10 kW 플라즈마 보일러 기초성능 평가

(전해수 농도: 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190 ppm)

가. 급탕온도 변화는 플라즈마 보일러 전해수 농도가 높을수록 승온시키는데 걸리는 시간이 단축되는 것으로 나타났다.

나. 투입된 열량 대비 방출된 열량은 플라즈마 보일러의 전해수 농도가 높을수록 낮아 플라즈마 방전에 의한 열효율이 우수한 것으로 나타났다.

다. 소비전력량은 전해수 농도가 증가할수록 높은 경향을 나타내었으나 전해수 농도가 190 ppm 의 경우에는 다른 조건과 비교하여 소비전력량이 가장 낮은 것으로 나타났다.

라. 성능계수는 190 ppm 에서는 1.13으로 나타나 다른 전해수 농도 조건보다 약 13% 이상 높은 것으로 나타났다.

3. 플라즈마 히터 코어 조립 형태(직렬, 병렬형)에 따른 기초성능 평가

가. 급탕온도는 동일 실험조건에서 직렬 형태의 조립 유닛이 병렬 형태의 조립 유닛보다 1 $^{\circ}\text{C}$ 정도 약간 높은 것으로 나타났으나 큰 차이는 없었다.

나. 투입 열량 대비 방출열량은 병렬형태의 조립이 직렬 형태의 조립보다 에너지 효율이 높은 경향을 나타내었다.

다. 에너지 소비량은 병렬형태의 조립이 직렬 형태의 조립보다 1.73 KW/h 낮은 경향을 나타내었다.

라. 성능계수는 병렬 형태 조립이 1.0~1.2로 나타났고, 직렬 형태의 조립 유닛보다 0.28 높은 것으로 나타났다.

마. 따라서 향후 20 KW 급 플라즈마 히터 코어의 조립 형태는 병렬 형태의 조립이 바람직한 것으로 판단된다.

4. 플라즈마 보일러 유닛 조립형태(직렬, 병렬형)에 따른 기초성능 평가

가. 급탕온도는 직렬 조립 유닛이 병렬 조립 유닛보다 설정온도에 도달하는 시간은 5분 더 빠른 것으로 나타났다.

나. 투입 열량 대비 방출열량은 직렬형태의 조립이 병렬형태의 조립보다 에너지 효율이 높은 경향을 나타내었다.

다. 에너지 소비량은 병렬형태의 조립이 직렬 형태의 조립보다 약간 낮은 경향을 보였으나 큰 차이는 없었다.

라. 성능계수는 직렬 형태의 조립 유닛이 0.97~1.03로 직렬 형태의 조립 유닛보다 0.18~0.25 높게 나타났다.

마. 따라서 향후 20 KW 급 플라즈마 히터 유닛의 조립 형태는 직렬 형태의 조립이 바람직한 것으로 판단된다.

5. 20 kW 급 플라즈마 보일러 유닛 기초성능 평가

(히터 코어 크기: 히터코어 크기 $\phi 19 \times 340L$, $\phi 25 \times 258L$)

((전해수 농도: 250, 300, 350, 400 ppm)

가. 급탕온도는 전해수 농도가 높을수록 설정온도 도달시간이 짧아 빠르게 가열되는 경향을 나타내었고, 히터코어 크기가 $\phi 19 \times 340L$ 과 $\phi 25 \times 258L$ 에서 큰 차이는 없었다.

나. 투입 열량 대비 방출열량은 히터코어 크기 $\phi 19 \times 340L$ 과 전해수 농도 400 ppm 에서 가장 높게 나타나 에너지 효율이 높은 경향을 나타내었다.

다. 에너지 소비량은 히터코어 크기가 $\phi 25 \times 258L$ 조건이 $\phi 19 \times 340L$ 보다 낮은 경향을 보였다.

라. 성능계수는 히터코어 크기가 $\phi 19 \times 340L$ 이 $\phi 25 \times 258L$ 조건보다 높게 나타났고, 특히 히터코어 크기가 $\phi 19 \times 340L$ 의 전해수 농도 400 ppm 에서 1.08로 가장 높게 나타났다.

마. 따라서 20 KW 급 플라즈마 보일러의 히터코어 크기는 $\phi 19 \times 320L$, 전해수 농도 400 ppm 에서의 운전이 가장 적절한 것으로 판단된다.

6. 20 KW 급 플라즈마 보일러 시작품

이상의 결과로부터 R, S, T 3삼상을 이용하는 플라즈마 히터코어는 크기가 $\phi 19 \times 340L$ 로 제작하여 병렬형으로 조립하여 각각의 20 KW/h 의 단위 유닛을 제작하고, 제작된 유닛은 직렬형태로 유로를 형성하여 400 ppm 에서의 운전이 가장 적절한 조건으로 판단된다.

○ 2단계 1차년도

1. 시설원에 난방용 고효율 수증 플라즈마 방전 방식 보일러를 개발하기 위해 SUS 316L 표면에 백금(Pt) 코팅은 5 μm 두께로 SUS 316L+Pt 히터코어를 적용한 30 kW 플라즈마 보일러 히터코어 시제품과 히터유닛을 제작하였다. 또한 30 kW 급 플라즈마 보일러 시제품의 발열량, 소비전력 및 성능계수(에너지효율) 등을 정밀하게 측정하기 위하여 기초성능 시험장치를 설계 제작하였다.

2. 간극과 전해수 농도에 따른 30 kW 플라즈마 보일러 기초성능 평가

- 3mm 간극 전해수 농도 : 30, 40, 50, 60, 70ppm
- 6mm 간극 전해수 농도 : 증류수, 30, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 150ppm

가. 급탕온도 변화는 플라즈마 보일러 전해수 농도가 높을수록 목표 온도까지 도달하는 시간이 단축되는 것으로 나타났다.

나. 투입된 열량 대비 방출된 열량은 플라즈마 히터 코어와 N상 하우징의 간격이 3mm 일 때 플라즈마 방전에 의한 열효율이 우수한 것으로 나타났다.

다. 통전 전류 변화는 부품의 간극이 가까울수록, 전해수의 농도가 높을수록 통전되는 전류량이 많은 것으로 나타났다.

라. 소비전력량은 부품의 간극 3mm, 6mm 모두 70ppm에서 가장 높은 것으로 나타났고, 3mm 간극에서는 50ppm에서 가장 낮은 것으로 나타났으며, 6mm 간극에서는 150ppm에서 가장 낮은 것으로 나타났다.

마. 성능계수 변화는 3mm 간극일 때 40ppm에서 1.01 로 가장 높게 나타났고, 6mm 간극 일 때 90ppm에서 1.09 로 가장 높게 나타났다. 이와 같이 부품의 간극이 6mm 일 때 성능계수가 높은 것으로 나타났지만, 전해수 농도 대비 성능계수는 3mm 간극 일 때 성능계수가 좋고, 간극이 가까울수록 히터코어에 흐르는 전류의 양이 증가하여 플라즈마 방전이 더욱 원활하게 이루어지는 것으로 판단된다.

3. 90 kW 급 플라즈마 보일러 시제품 제작

이상의 결과로부터 히터코어와 N상 하우징의 간극을 3mm로 맞추어 각각 30 kW 급 단일 유닛 3개를 조합하고, 3개의 단일 유닛을 직렬형태 유로를 형성하도록 조립하여 플라즈마 보일러 내부 순환수의 발열이 효율적으로 이루어질 수 있도록 90 kW 급 플라즈마 보일러를 제작하였다.

<공동연구기관: 공주대학교>

○ 1단계 1차년도

1. 하우스 내부온도 분석

하우스 내부온도 변화는 실험구는 최대 15.5℃에서 최소 13.4℃의 온도 분포를 나타내었고, 대조구의 경우 최대 16.7℃에서 최소 12.9℃의 온도 분포를 나타내으며, 설정온도 대비 온실내의 온도 편차는 대조구는 최대 3.3℃를 보였고, 실험구는 최대 2.1.℃로 나타났다.

2. 생육분석

가. 실험구의 녹색정규식생지수(GNDVI)은 평균 0.668 정도를 나타내었고, 대조구의 녹색정규식생지수(GNDVI)는 평균 0.660 정도를 나타내 실험구가 대조구와 비교하여 0.008 높게 나타났다.

나. 7주간 클로로필 함량의 증가는 실험구가 11.083 증가하였고, 대조구의 경우에는 8.373 증가한 것으로 나타나 실험구가 대조구보다 2.71 증가량이 더 높은 것으로 나타났다.

다. 7주간 실험구 딸기의 누적 수고 성장량은 224.4 mm 이었고, 대조구의 경우에는 218.5 mm로 나타나 실험구가 대조구보다 약 5.9 mm 정도 높이 성장량이 양호한 것으로 나타났다.

라. 7주간 실험구 딸기의 누적 엽장 성장량은 71.2 mm 이었고, 대조구의 경우에는 50.8 mm로 나타나 실험구가 대조구보다 약 20.4 mm 정도 엽장 성장량이 높은 것으로 나타났다.

마. 7주간 실험구 딸기의 누적 엽폭 성장량은 60.2 mm 이었고, 대조구의 경우에는 45.3 mm로 나타나 실험구가 대조구보다 약 14.9 mm 정도 엽폭 성장량이 높은 것으로 나타났다.

3. 소비전력량 분석

소비전력량은 플라즈마 보일러가 상용 전기온풍기보다 38.124 KWh 적게 소비되어 플라즈마 보일러가 전기 온풍기 보다 약 33% 정도 에너지 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

4. 경제성 분석

플라즈마 보일러의 내구연수 20년은 기준으로 총 이득비용은 20,376,260원으로 나타났다. 연간 이득비용으로 환산하면 연간 약 1,018,813원의 경제적 효과가 있는 것으로 판단된다.

<공동연구기관: 공주대학교>

○ 1단계 2차년도

본 연구는 수증 플라즈마 방전 방식 농업용 보일러의 난방 특성과 딸기의 생육 특성을 분석하여 보일러의 성능을 실험하고자 수행하였다.

1. 하우스 내부온도 분석

난방 특성 분석 결과 공급된 누적 전열량은 대조구 5,932.1 MJ/h, 실험구 4,444.2 MJ/h로 실험구가 대조구보다 1,487.9 MJ/h 적게 공급된 것으로 나타났다.

출수온도 편차는 플라즈마 보일러가 전기보일러보다 약 11~17℃ 낮은 것으로 나타났다.

설정 출수온도 도달시간은 플라즈마 보일러가 20분 적게 소요되어 플라즈마 보일러의 가열 메커니즘이 전기 보일러의 전도에 의한 가열 메커니즘보다 우수한 것으로 판단된다.

2. 생육분석

정규화식생지수인(NDVI)는 실험구와 대조구의 값이 동일하게 나타났고, 녹색정규식생지수(GNDVI)는 실험구가 대조구와 비교하여 0.07 높게 나타났다.

SPAD(클로로필 함량)는 실험구가 대조구보다 높은 경향을 나타냈다. 매향 딸기의 생육특성을 분석한 결과 대체적으로 실험구가 대조구보다 양호한 것으로 나타났다.

3. 소비전력량 분석

난방 방식에 따른 소비전력량은 대조구 2.7 MWh, 실험구 2.265 MWh의 값으로 실험구가 대조구에 비해 약 16% 정도 에너지 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

4. 경제성 분석

경제성 분석 결과 플라즈마 보일러가 일반 전기 온풍기 보다 내구연수가 4배 길기 때문에 설치 비용과 보일러 비용에서 경제적인 것으로 나타났다. 소비전력량 감소에 따른 전기요금도 연간 약 연간 349,000원을 절약할 수 있었다. 플라즈마 보일러의 내구연수 20년은 기준으로 총 이득비용을 산출하여 연간 이득비용으로 환산하면 일반 전기보일러 보다 연간 약 1,099,800원의 경제적 효과가 있는 것으로 판단된다.

○ 2단계 1차년도

본 연구는 수증 플라즈마 방전 방식 농업용 보일러의 난방 특성과 오이의 생육 특성을 분석하여 보일러의 성능을 실험하고자 수행하였다.

1. 하우스 내부온도 분석

일주일간 실험구에 공급된 누적 전열량은 6,038MJ이 공급되었고, 대조구의 경우에는 9,172MJ의 전열량이 공급되어 실험구가 대조구보다 3,134MJ 적게 공급된 것으로 나타났다.

플라즈마 보일러가 설정 출수온도까지 도달시간은 20분이 소요되는 것으로 나타났다.

플라즈마 보일러 열교환기에서 배출 되는 공기가 상용 전기 보일러 열교환기에서 배출되는 공기 온도보다 5℃ 높은 것으로 나타났다.

이와 같이 플라즈마 보일러의 배풍온도가 높은 이유는 플라즈마 보일러의 경우 보일러가 작동하는 동안 설정 출수 온도인 76℃를 유지할 수 있도록 시스템을 구성하여 플라즈마 보일러의 입수온도와 출수온도의 편차가 적기 때문으로 판단된다.

2. 생육분석

4주간 실험구 오이의 누적 엽장 성장량은 71.2mm 이었고, 대조구의 경우에는 59.1mm 로 나타나 실험구가 대조구보다 약 12.1mm 정도 엽장 성장량이 높은 것으로 나타났다.

4주간 실험구 오이의 누적 엽폭 성장량은 111.1mm 이었고, 대조구의 경우에는 77.4mm 로 나타나 실험구가 대조구보다 약 33.7mm 정도 엽폭 성장량이 높은 것으로 나타났다.

실험구에서 오이 누적 절간장 성장량은 56.3mm 이었고, 대조구의 경우에는 64.9mm로 나타나 대조구가 실험구보다 약 8.6mm 정도 높아 성장량이 양호한 것으로 나타났다.

실험구에서 오이 누적 줄기 직경 성장량은 1.7mm 이었고, 대조구의 경우에는 2.36mm로 나타나 대조구가 실험구보다 약 0.66mm 정도 높아 성장량이 양호한 것으로 나타났다.

4주간 실험구 오이의 누적 과장 성장량은 18.4mm 이었고, 대조구의 경우에는 42.6mm로 나타나 대조구가 실험구보다 약 24.2mm 정도 과장 성장량이 높은 것으로 나타났다.

4주간 실험구 오이의 누적 과폭 성장량은 2.53mm 이었고, 대조구의 경우에는 4.33mm 로 나타나 대조구가 실험구보다 약 1.8mm 정도 과폭 성장량이 높은 것으로 나타났다.

3. 소비전력량 분석

소비전력량은 각각 7,368 KWh, 8,770 KWh 로서 플라즈마 보일러가 상용 전기보일러보다 약 1,402 KWh 적게 소비되어 약 16% 정도 에너지 절감효과가 있는 것으로 나타났다.

4. 경제성 분석

경제성 분석 결과 플라즈마 보일러가 일반 전기 온풍기 보다 내구연수가 4배 길기 때문에 설치 비용과 보일러 비용에서 경제적인 것으로 나타났다. 소비전력량 감소에 따른 전기요금도 연간 약 연간 514,800원을 절약할 수 있었다. 플라즈마 보일러의 내구연수 20년은 기준으로 총 이득비용을 산출하여 연간 이득비용으로 환산하면 일반 전기보일러 보다 연간 약 1,389,800원의 경제적 효과가 있는 것으로 판단된다.

(2) 정량적 연구개발성과(해당 시 작성, 연구개발과제의 특성에 따라 수정 가능합니다)

< 정량적 연구개발성과표 >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명		연도	1단계,1년차	1단계,2년차	계	가중치 (%)
			(21.09-21.12)	(22.07-22.12)		
전담기관 등록·기탁 지표 ¹⁾	논문	목표(단계별)				5
		실적(누적)		1		
	특허	목표(단계별)		1		10
		실적(누적)	1		1	
	학술발표	목표(단계별)	1	1	2	10
		실적(누적)	1	1	2	
연구개발과제 특성 반영 지표 ²⁾	기술이전	목표(단계별)		1	1	5
		실적(누적)				
	고용창출	목표(단계별)	2		2	10
		실적(누적)	2		2	
	시제품 제작	목표(단계별)	1		1	10
		실적(누적)	1		1	
	제품화	목표(단계별)	2	5	7	15
		실적(누적)	2	5	7	
	계	목표(단계별)	6		6	70
		실적(누적)	7		7	

* 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	성능수준	1년차 목표 21.09-21.12	1년차 성과 21.09-21.12	
1 전기입력	kW	20	러시아/갈란사	30	30	30	30	동일입력 기준
2 발열량	kcal/hr	20	“	24,510	23,220	25,800	33,540	
3 열효율	%	20	“	95	90	98 이상	130 이상	
4 히터수명	년	20	“	5	2	10	10	정기세척 기준
5 누설전압	V	20	“	20~30	20~30	1 이내	1 이내	

* 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	Performance evaluation of plasma heater core for facility horticultural house heating	Precision Agriculture Science and Technology	Sang-Gu Kang	4(3)	대한민국	정밀농업학회	비SCIE	2022. 09.27	2672-0086 2713-5632	
2	Analysis of Heating and Plant Growth Characteristics with Agricultural Plasma Discharge Boiler Unit	Agricultural Mechanization In Asia	Sang-Gu Kang	9(54)	대한민국	AMA	SCIE	2023. 09. 09	00845841	

국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	2021 한국농업기계학회 추계공동학술대회	강태환	2021. 10. 29.	제주 소노벨	대한민국
2	2022 한국농업기계학회 추계공동학술대회	강태환	2022. 11. 03.	대구 EXCO	대한민국
3	2023 한국정밀농업학회 추계공동학술대회	강상구	2023. 10. 04.	익산 한국농업기술진흥원	대한민국
4	2023 한국정밀농업학회 추계공동학술대회	이다희	2023. 10. 04.	익산 한국농업기술진흥원	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	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		
1	전극보일러 구조 및 이를 이용한 전류제어방법	대한민국	지에이	2021.12.21	10-2021-0193174					90%	여

○ 지식재산권 활용 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	√									

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		

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

(30쪽 중 8쪽)

Proceedings of the KSAM & ARCs 2021 Autumn Conference

2021년 추계 공동학술대회 초록집

Vol.26, No.2

2021.10.27(수)~ 10.30(토) 소노벨 제주



주최



(사)한국농업기계학회
Korea Society for Agricultural Machinery



발농업기계개발연구센터
UPLAND MACINERY RESEARCH CENTER



농업생산무인자동화연구센터
Agricultural Robotics and Automation Research Center



스마트팜 연구센터
Smart Farm Research Center

P1-77	251	양액 내 질산이온의 측정을 위한 미세유체 센싱 플랫폼 개발 Development of a microfluidic sensing platform for measuring NO ₃ - 홍영길, 장경재
P1-78	252	ANSYS를 이용한 토마토 수확 매니플레이터의 구조해석을 통한 취약점 분석 Finding Weak Point via Structural Analysis of Tomato Harvesting Manipulator Using ANSYS 김재현, 황경재, 신창섭
P1-79	253	산업용 로봇 매니플레이터의 시간-저크 궤적 계획에 관한 연구 분석 A Study on the Time-Jerk Trajectory Planning of Industrial Robot Manipulator 한승재, 황경재, 신창섭
P1-80	254	클러치 압력 커맨드에 따른 트랙터 변속기용 클러치 압력 특성 분석 Analysis of Clutch Pressure Characteristics for Tractor Transmission According to Clutch Pressure Command 안디빈, 김경재, 최규정, 이진웅, 박진권, 천수환, 박영준
P1-81	255	토양소독액 자동분사 제어를 위한 노즐 특성에 대한 연구 I - 해석 Study on Spraying Characteristics for Soil Disinfectant Automatic Spray Control I - Analytical Study 오주선, 유한주, 박두신, 심성보
P1-82	256	트랙터 변속기용 전자비례감압밸브 시뮬레이션 모델 개발 Development of an Simulation Model for an Electronic Proportional Pressure Reducing Valve for Tractor Transmission 최규정, 안디빈, 김경재, 이진웅, 박진권, 천수환, 박영준
P1-83	257	트랙터 전자식 정유압 변속기 시뮬레이션 모델 개발 Development of Simulation Model for Electric Hydro-static Transmission of Tractor 박진권, 천수환, 유지훈, 최규정, 이진웅
P1-84	258	포도원 기계화 작업을 위한 무인 자율주행차 개발 Development of Autonomous Vehicle for Mechanize Operation in Vineyards 송현진, 오현수, 강태환
P1-85	259	수중 플라즈마 방전 방식 농업용 보일러 유닛 개발 Development of Agricultural Plasma Discharge Boiler Unit 김상구, 박인철, 김길호, 홍지훈, 차두환, 이다희, 김영천, 신준환, 권다현, 강태환
P1-86	260	수중 플라즈마 방전 방식 농업용 보일러 실증 평가 Field Evaluation of Agricultural Plasma Discharge Boiler 김상구, 박인철, 김길호, 홍지훈, 차두환, 이다희, 김영천, 신준환, 권다현, 강태환
P1-87	261	구조-음향 연성 해석을 이용한 농업용 UTV 기어박스 하우징의 형상 최적화 Optimization of Agricultural UTV Gearbox Housing Shape Using Structural-Acoustic Coupled Analysis 김남수, 한현우, 정우진, 유희길, 박정호, 이기훈, 박영준

수중 플라즈마 방전 방식 농업용 보일러 유닛 개발 Development of Agricultural Plasma Discharge Boiler Unit

강상구 ¹	박인철 ¹	김길호 ¹	홍지웅 ²	차두환 ²	이다희 ²
S.G. Kang ¹	I.C. Park ¹	G.H. Kim ¹	J.W. Hong ²	D.H. Cha ²	D.H. Lee ²
	김영천 ²	신준환 ²	곽다현 ²	강태환 ^{2*}	
	Y.C. Kim ²	J.H. Shin ²	D.H. Kwak ²	T.H. Kang ^{2*}	

¹주식회사 지에이

¹GA Co., Ltd, Gwangju-City, Gyeonggi-do, Korea

²공주대학교 스마트팜공학과

²Dept. of SmartFarm Engineering, Kong ju National University, Yesan, Korea

초록(Abstract)

수중 플라즈마 방전 방식 농업용 보일러 개발은 기존 하우스 농가의 시설하우스 단위면적별, 재배작물별 필요 열량에 최적으로 다치하기 위해 보일러 가열부를 유닛으로 만들어 조합함으로써 작물재배시 과도한 소비전력 사용 방지와 적정 생육환경을 조성하여 생산비 절감 및 생산성 향상을 목적으로 개발하였다.

본 연구에서 개발한 플라즈마 보일러 유닛은 전극코어와 하우징으로 구성되고, 재질은 PPS(폴리페닐렌 설파이드)로서 전극코어 및 하우징의 표면을 개질 후 Cu-Ni-Pd-Pt 순으로 다중 도금하였다. 전극코어와 하우징 간 AC220V 인가 시 운전전류 3A가 일정하게 흐르면서 총 전력량 660W급으로 설계 제작하여 기초평가 한 결과, 초기에는 플라즈마 방전상태가 양호한 것으로 나타났다. 그러나 장시간 운전시 서서히 운전전류가 감소하여, 90일차 운전전류는 2.3A로 하락하였고, 운전 종료 후 분해한 결과 전극표면과 하우징 내측의 도금층이 박리된 상태로 변화하였다. 이것은 PPS 재질이 플라즈마 방전에 의한 표면 온도 상승을 견디지 못하고 열부식이 발생되어 다중 도금층이 파괴된 원인으로 판단되며, PPS 다중도금 전극은 적용이 불가능한 것으로 판정되었다. 따라서 보일러 유닛의 전극코어와 하우징 재질을 그레이드 2의 타이타늄(Ti)을 베이스 재질로 제작한 후 표면에 백금족 원소인 이리듐(Ir)을 5 μm의 두께로 도금하여 플라즈마 방전시 표면온도 상승으로 인하여 발생하는 박리현상을 제거하였고, 3상 AC380V 인가시 운전전류는 17.2~18.3 A, 총 전력량 10,176~10,827 W 급으로 플라즈마 방전상태가 양호한 것으로 나타났다. 또한 운전시 하우징에 N상을 인가하지 않은 경우 누설전류는 약 58V로 나타났고, N 상을 인가할 경우 0.0~1.8V의 전기가 누설되는 것으로 나타나 N 상 하우징이 플라즈마 방전의 왜곡을 방지함으로써 에너지 변환율을 높이는 것으로 판단된다.

키워드(Keywords)

온실난방, 플라즈마, NDVI, SPAD, 소비전력량, 시설하우스

사사(Acknowledgement)

본 연구는 농림식품기술기획평가원 기술사업화지원사업(과제번호: 821049031HD020)의 지원에 의해 수행되었음

*교신저자: 강태환(lamokth@kongju.ac.kr)

Proceedings of the KSAM & ARCs 2022 Autumn Conference

2022년 추계 공동학술대회 초록집

Vol.27, No.2

2022.11.2(수)~11.4(금) 대구 EXCO



주최



(사)한국농업기계학회
Korea Society for Agricultural Machinery



스마트팜 연구센터
Smart Farm Research Center



밭농업기계개발연구센터
UPLAND-FIELD MACHINERY RESEARCH CENTER

P1-47	239	마늘파종기용 배종 버킷 크기에 따른 마늘 이송에 관한 연구 Study on Garlic Transfer Rate according to Bucket Size for Garlic Planter 이준구 최승렬 문태익 유승화
P1-48	240	멀칭 동시 마늘 정밀 파종기 시작기 개발 Development of Prototype Garlic Precision Planter with Mulching 이준구 최승렬 문태익 유승화
P1-49	241	모듈형 직진 자동조향 장치를 활용한 승용형 관리기의 직진 주행특성 분석 Analysis of Straight Driving Characteristics of Riding Type Farm Master Using Modular Straight Automatic Steering System 원진호 천진택 김국환 권경도 양항주 이기범 홍영기
P1-50	242	배추 수확 기계화 기술 개발을 위한 연구 동향 분석 Analysis of Research Trends for the Development of Chinese cabbage harvest mechanizing technology 문석표 최용 장상혁 이상희
P1-51	243	변량시비기를 이용한 입상 비료의 시비량 제어기법 연구 A study on the method of controlling the application amount of granular fertilizer using a variable fertilization machine 양항주 강예지 홍영기 김국환 김경철 권경도
P1-52	244	변량시비장치 도입을 위한 축조시비장치 비용편익분석 연구 A Study on The Cost-Benefit Analysis of Side Dressing Using The Variable Rate Fertilizer Applicator 강예지 홍영기 김국환 김경철 권경도 양항주
P1-53	245	보통형 콤바인을 이용한 들깨의 기계 수확 Mechanical Harvest by Full Feed Combine Harvester 강연구 우재근 전현중 최용 최일수
P1-54	246	비산 예측 모델 개발을 위한 실평 약제 선정에 관한 연구 Study on the Spray Product Selection for Developing Drift Prediction Model 이준구 이지근 홍세문 유승화
P1-55	247	수중 플라즈마 방전 방식 농업용 보일러 유닛 성능평가 Performance Evaluation of Agricultural Plasma Discharge Boiler 강상구 박인철 김길호 최두환 이다희 김영천 신준환 옥다현 김지훈 강태환
P1-56	248	시공간적 안정성을 통한 자동 관개시스템의 토양수분 대표지점 선정 연구 A Study on the Selection of Representative Soil Moisture Points for Automatic Irrigation Systems based on Time and Spatial Stability 김상현 김민영 김영진 김희태 이상봉
P1-57	249	시뮬레이션 환경 기반 과수 수확용 로봇팔의 작업 계획 연구 A Study of Task Planning for Harvesting Robot Arm based on Simulation Environment 전진택 원진호 홍영기 권경도 양항주 김국환

수중 플라즈마 방전 방식 농업용 보일러 유닛 성능평가 Performance Evaluation of Agricultural Plasma Discharge Boiler

강상구 ¹ S.G. Kang ¹	박인철 ¹ I.C. Park ¹	김길호 ¹ G.H. Kim ¹	차두환 ² D.H. Cha ²	이다희 ² D.H. Lee ²	김영천 ² Y.C. Kim ²
	신준환 ² J.H. Shin ²	곽다현 ² D.H. Kwak ²	김지훈 ² J.H. Kim ²	강태환 ² T.H. Kang ²	

¹주식회사 지에이

¹GA Co., Ltd, Gwangju-City, Gyeonggi-do, Korea

²공주대학교 스마트팜공학과

²Dept. of SmartFarm Engineering, Kong ju National University, Yesan, Korea

초록(Abstract)

본 연구는 (주)GA에서 개발한 플라즈마 보일러의 발열체인 단위 유닛(S-10, (주)GA, KOREA)을 사용하여 유닛 조합에 따른 내부 순환수 경로 형태에 따라 보일러 성능 특성을 분석하여 플라즈마 보일러의 적정 운전 조건을 구명하고자 하였다.

본 연구에서 사용된 플라즈마 보일러 유닛은 정격용량이 10 kW/h 로 설계 제작한 2개의 유닛을 사용하였으며, 전극 코어와 하우징으로 구성되었다. 재질은 타이타늄(Ti) Grade2 소재를 기본으로 백금족의 이리듐(Ir)을 도금하였다. 플라즈마 보일러 유닛의 성능평가는 탱크 용량 200 L 의 순환수를 유량 25 ~ 30 L/min 으로 유지한 상태에서 설정온도 60℃ 까지 상승시키는 동안 5분 단위로 측정된 입출수 온도, 유량, 소비전력량, 투입열량 및 방출열량을 측정하여 성능계수(COP)를 산출하였고, 보일러 내부 순환수 경로는 병렬과 직렬형 2가지로 나누어 5 반복으로 성능평가를 수행하였다.

실험 결과 AC 3상 4선식 380V 전원 인가 시 순환수 경로가 병렬 형태의 경우에는 운전 전류는 평균 35.88 A 로 측정되었고, 이 때 총 투입열량과 방출열량은 각각 21,981 Kcal/h, 15,855 Kcal/h 로 계산되어 성능계수가 0.8로 나타났다. 순환수 경로가 직렬인 경우에는 운전 전류는 평균 33.31A로 측정되었고, 총 투입열량과 방출열량은 각각 19,814Kcal/h, 20,088Kcal/h 로 계산되었으며, 성능계수는 1.01 로 나타나 병렬 형태보다 COP가 약 0.21 높게 나타났다. 이로써 직렬형 경로가 병렬형 경로에 비해 평균 운전전류가 2.57A 적게 소비됨에 따라 소비전력이 감소하여 성능계수는 0.21 높게 측정된 것으로 판단된다. 따라서 순환수가 2개의 보일러 유닛에 병렬로 나뉘어 공급되는 병렬형 연결 구조보다 2개의 유닛을 직렬하여 순환수를 1차와 2차로 나누어 연속으로 가열하는 직렬형 연결 구조가 플라즈마 보일러에 적합한 것으로 판단된다.

키워드(Keywords)

플라즈마, 온실난방, 소비전력량, 시설하우스, 성능계수

사사(Acknowledgement)

본 연구는 농림식품기술기획평가원 기술사업화지원사업(과제번호: 821049-03)의 지원에 의해 수행되었음

*교신저자: 강태환(lamokth@kongju.ac.kr)

RESEARCH ARTICLE

Performance evaluation of plasma heater core for facility horticultural house heating

Sang-Gu Kang¹, In-Cheol Park², Kil-Ho Kim², Tae-Hwan Kang^{1*}¹Dept. of SmartFarm Engineering, Kongju National University, Chungnam, Republic of Korea²GA Co., Ltd., Gyeonggi, Republic of Korea

*Corresponding author: lamokth@kongju.ac.kr

Abstract

The purpose of this study is to develop a high-efficiency underwater plasma discharge boiler for facility horticultural house heating. A plasma discharge heater core using underwater plasma discharge boiler was manufactured using a titanium (Ti) heater core coated with iridium (Ir) and a Polyphenylene Sulfide(PPS) heater unit. Therefore, it was attempted to develop an optimal heater unit by performing life test and leakage voltage analysis. The results are summarized as follows. As a result of the life test of the plasma boiler heater unit, it was found that the PPS heater unit could not withstand the rise in surface temperature due to plasma discharge, and thermal corrosion occurred and the multi-plating layer was destroyed. In the case of the Ti-Ir heater unit, it was found to operate normally without surface corrosion during the life test period. The leakage voltage during plasma discharge of the Ti-Ir heater core showed a tendency to be lower than that in the case where there was no N-phase housing. Also, as the distance between the N-phase housing and the R, S, T phase heater core decreased, the leakage voltage showed a tendency to increase. From the above results, the heater unit of the plasma boiler has a diameter of $\phi 19$ mm, a length of 238.5 mm and a center diameter of $\phi 43.9$ mm at a 120 degree equal spacing and N-phase housing diameter $\phi 82.5$ mm and length 235.5 mm are considered optimal conditions for plasma discharge under the condition of 0.2% (w/v) sodium hexametaphosphate.

Keywords: Plasma, Boiler, Leakage current, Life test**OPEN ACCESS**DOI: <https://doi.org/10.12972/pastj.20220010>

Received: August 23, 2022

Revised: September 27, 2022

Accepted: September 27, 2022

Copyright: © 2022 Korean Society of Precision Agriculture



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Introduction

최근 국내 시설원에 하우스의 가온 재배 면적 중 유류난방 비중은 감소 추세에 있음에도 불구하고 80% 이상을 차지하여 여전히 비중이 높고, 농가들은 유가 변동에 취약한 상황이다(MAFRA, 2020). 특히 겨울철 자동화 온실에서 난방기를 사용하여 채소 및 화훼 작물을 재배할 경우 생산비 중에 난방비가 차지하는 비중이 40%를 상회하는 실정이다. 국내 시설 농가에서는 동절기 작물을 재배하기 위하여 온풍난방기, 라디에이터, 온수난방, 태양열난방 시스템 등을 사용하고 있고, 이중 농업용 난방기는 유류버너가 장착된 온풍기가 80% 이상 차지하고 있다. 특히 전기온풍 난방기는 초겨울과 초봄 등 외부기온이 크게 낮지 않은 시기에 난방효과가 있으나, 100kW 초과시 유지비 중

Analysis of Heating and Plant Growth Characteristics with Agricultural Plasma Discharge Boiler Unit

S.G. Kang¹, G. H. Kim¹, T. H. Kang^{2,1}

GA Co., Ltd., Kyeonggi-do 12730, Republic of Korea¹

Department of Smart Farm Engineering, Kongju National University, Yesan 32439, Republic of Korea²

Industrial Department Institute, Kongju National University, Yesan 32439, Republic of Korea¹



Keywords:

Energy consumption, Greenhouse heating, Heat loss, Vegetation index, *Zamioculcas zamiifolia*

ABSTRACT

We aimed to compare underwater plasma discharge type boiler (Group 1) and conventional electric boiler (Group 2) for the heating energy saving in greenhouses. Two type boilers were installed in *Zamioculcas zamiifolia* growing greenhouse. As a result, the temperature differences from the set temperature were 2.1°C, 2.5°C for Group 1 and Group 2. The water temperature difference of Group 1 was about 23–47°C lower than Group 2, and the water temperature in Group 1 rose faster to the set temperature. The heating energy supplied to greenhouse tended to be high in Group 2, and there was no significant difference in the amount of heat loss according to heating methods. In addition, growth characteristics of *Zamioculcas zamiifolia* were investigated according to the heating methods, and leaf length, leaf width, tree height, and NDVI (Normalized difference vegetation index) were measured. As a result, it was confirmed that there is no significant difference according to the heating methods. Thus, we considered that the underwater plasma discharge type boiler can be used to heat greenhouse. The energy consumption were 5,051 kWh, 6,073 kWh for Group 1 and Group 2, so it was found that the underwater plasma discharge type boiler had about 17% heating cost saving effect.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution Non-Commercial 4.0 International License.

1. INTRODUCTION

Recent climate change has led to a decrease in daylight hours each year, whereas solar irradiation and mean temperature have shown an increasing trend. As a result, year-round cultivation of agricultural products has become a challenge, and notably, crop productivity has rapidly decreased during high-temperature periods owing to poor cultivation conditions [1]. In addition, climate conditions in South Korea, which is characterized by high mean temperatures of 31–37°C during summer and low temperatures of 3–26°C during winter, pose considerable difficulties for crop cultivation in greenhouses without cooling during summer and heating or thermal insulation during winter. Heating is thus essential for horticultural facilities to ensure stable crop production in addition to high quality and quantity of harvest. Furthermore, in response to changes in cultivation conditions, new techniques are required to optimize cultivation conditions to allow optimal crop management even during high-temperature periods [2].

표준화

○ 국내 표준

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.

○ 국제 표준

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
1	10kW 히터유닛	21.10.20	(주)게인	(주)지에이	보일러 시제품 제작	90일
2	30kW 보일러	21.12.15	“	“	실증시험	40일
3	20kW 히터유닛	22.10.30	(주)게인	(주)지에이	보일러 시제품 제작	90일
4	60kW 보일러	22.12.10	“	“	실증시험	40일

사업화 투자실적

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

- * 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.

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	자기실시	신제품 개발	국내	30kW 플라즈마 보일러	양산 시제품 개발	(주)지에 이	8,360		2021	10년
2	자기실시	신제품 개발	국내	60kW 플라즈마 보일러	양산 시제품 개발	(주)지에 이	300,00 0		2022	10년
3.	자기실시	신제품 개발	국내	90kW 플라즈마 보일러	양산 시제품 개발	(주)지에 이				10년

- * 1) 기술이전 또는 자기실시 중 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.
- * 3) 국내 또는 국외 중 해당하는 사항을 기재합니다.

□ 매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(달러)		
30kW 플라즈마 보일러	2021	8,360		8,360	판매가+VAT
60KW 플라즈마 보일러	2022	300,000		300,000	판매가+VAT
합계		308,360		308,360	

□ 사업화 계획 및 무역 수치 개선 효과

성과		수중 플라즈마 방전방식 농업용 보일러 상품화			
사업화 계획	사업화 소요기간(년)	3년			
	소요예산(천원)	1,478,000			
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후	
		322,000	1,980,000	6,600,000	
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내	1	30	50
국외		-	1 이하	5	
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획		플라즈마 방전방식 보일러 30, 60, 90kW급 3종 플라즈마 방전방식 히터유닛 10, 20, 30kW급 3종			
무역 수치 개선 효과(천원)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
	수 출	-	1,000,000	2,000,000	
		-	300,000	2,700,000	

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			2021년	2024년	
1	수중 플라즈마 방전방식 농업용 보일러 상품화	(주)지에이	2	1	3
합계			2	1	3

□ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	1
		생산인력	0
	개발 후	연구인력	3
		생산인력	0

□ 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	30kW 플라즈마 보일러			8,360		2	
기대 목표	“			0		2	

□ 산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원

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

(30쪽 중 10쪽)

□ 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

□ 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
1	설계기준	신규	플라즈마 방전 히터유닛 설계 기준	2021.12.20	신규 설계기준서 작성

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	기준 연도	현황											
			학위별				성별		지역별					
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타	
		2022			1			1		1				
		2024		1			1							

□ 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

국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

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	국내의 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
	신품종	생물자원 중 국내외에 출원 또는 등록된 농업용 신품종 및 관련 정보

2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
○ 10, 20, 30kW급 PPS 히터 코어 및 히터하우징 설계, 금형, 시제품 개발, 열효율 98±1% 누설전압 1V 이하	○ 10, 20, 30kW급 Ti-Ir 히터코어 및 히터하우징 설계, 금형, 시제품 개발 완료 열효율 99% 이상, 누설전압 1V 이하	○ 100
○ 10, 20, 30kW급 PPS히터코어 및 히터하우징 다중도금 공정 및 지그 개발	○ 10, 20, 30kW급 Ti-Ir 히터코어 및 N상 하우징 Ir 코팅 공정 및 지그 개발 완료	○ 100
○ 10, 20, 30kW급 플라즈마 보일러 유닛 및 30, 60, 90kW급 보일러 시제품용 염가형 제어반 개발	○ PIC16F77-I/PT micom 기반 main PCB 및 display PCB 설계, 개발 완료	○ 100
○ 30, 60kW 농업용 플라즈마 보일러 시제품 개발, 시설하우스 설치, 실증테스트	○ 30, 60kW 농업용 플라즈마 보일러 시제품 개발 및 실증 테스트 완료	○ 100
○ 농가 보급형 발열량 30, 60, 90kW급 고효율 플라즈마 보일러 경제성 분석	○ 30, 60, 90kW급 고효율 플라즈마 보일러 경제성 분석 완료	○ 100
○ 30, 60, 90kW 농업용 플라즈마 보일러 시제품 개발, 시설하우스 설치, 실증테스트	○ 30, 60, 90kW 시제품 개발 완료 및 실증테스트 완료 열효율 99% 이상	○ 100
○ 농가 보급형 고효율 플라즈마 보일러 경제성 분석	○ 실증실험 후 경제성 분석 결과 대조구 대비 약 16 ~ 33%의 전기에너지 소비량 절감.	○ 100

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성합니다)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

2) 자체 보완활동

3) 연구개발 과정의 성실성

- 플라즈마 방전방식 고효율 보일러의 민수용 상품화는 전 세계적으로 성공사례를 거의 찾아 볼 수 없는 분야로서 핵심부품에 대한 철저한 성능 및 내구성 확인과 최적의 운전조건을 찾는 연구가 필요하므로 연구보고서의 내용과 같이 무수한 실험과정을 반복함으로써 연구 목표를 달성하였다
 - 시제품 개발의 성능과 효율성을 입증하고, 농업 분야 에너지 절감을 확인하기 위한 시설 하우스 실증실험을 철저히 수행하여 단순한 에너지 설비 개발이 아닌 플라즈마 신에너지의 첨단 기술을 확보했다
-

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 전극코어 합금기술과 전해수 조성기술을 확보하여 전극보일러의 결함을 완전히 배제하고, R, S, T 및 N상 전부를 활용하면서도 누전이 전혀 없이 안전한 플라즈마 보일러에 대한 원천기술을 획득
 - 물 자체가 발열하는 고효율 플라즈마 보일러 분야 독자적 원천기술 확보에 따른 다양한 제품 전개로 글로벌 신에너지 산업 기반 확보
-

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

(1) 학계 활용방안

- ① 연구결과에 대한 학술발표
- ② 플라즈마 고효율 보일러에 대한 강의 및 강연
- ③ 플라즈마 고효율 보일러에 대한 다양한 제품 활용 연구

(2) 산업계 활용방안

- ① 플라즈마 고효율 보일러의 상품화 및 보급
- ② 플라즈마 고효율 보일러 관련 응용기술 확보
- ③ 기존 보일러에 부가되는 모듈형 플라즈마 보일러 개발
- ④ 플라즈마 보일러에 대한 수출 돌입
- ⑤ 플라즈마 보일러 활용 기술을 관련 축수산, 기타 산업분야로의 확대
- ⑥ 인입 전기용량이 낮은 수요처에 적용, 700W~30kW급 플라즈마 보일러 상품화

(3) 사업화 추진

- 연구과제 결과물로서 획득되는 10kW, 20kW, 30kW급 플라즈마 보일러 유닛 3종과 발열량 30kW, 60kW, 90kW급 플라즈마 보일러의 양산, 내수시장 출시

연도별 제품출시 계획

구 분	플라즈마 보일러 유닛			플라즈마 보일러		
용량 (kW)	10	20	30	30	60	90
출시연도	2022	2022	2023	2022	2022	2023

① 생산 계획

- 10kW, 20kW, 30kW급 플라즈마 보일러 유닛 3종과 발열량 30kW, 60kW, 90kW급 플라즈마 보일러의 연차별 생산계획은 다음 표와 같음

항 목 별	2023		2024		2025		2026	
	내수	수출	내수	수출	내수	수출	내수	수출
보일러 생산량(30kW)	60		80	30	140	90	200	150
보일러 생산량(60kW)	40		60	30	80	60	120	100
보일러 생산량(90kW)	10		20		40		60	50
유닛 생산량(10kW)	120		200		300		400	
유닛 생산량(20kW)	40		80		160		200	
유닛 생산량(30kW)	10		20		40		40	100
내수/수출(대)	280		460	60	760	150	1020	300

② 해외시장 진출 계획

- 10kW, 20kW, 30kW급 플라즈마 보일러 유닛 3종과 발열량 30kW, 60kW, 90kW급 플라즈마 보일러의 상품화 완료 후 2024년 하반기부터 기 확보된 바이어를 통한 해외시장 출시

- 2025년부터 국제농어업용기계전시회 및 에너지기기 관련 전시회에 참가하여 관련 업계 메이저 업체 상담 및 수주

③ 사업화에 따른 기대효과

- 플라즈마 방전 방식 고효율 보일러의 상품화 및 보급
- 내수 출시 : '2024', 해외 출시 : '2024'
- 플라즈마 방전 방식 고효율 보일러 관련 응용기술 확보 : 10kW~수백kW급 다양한 제품 구현
- 플라즈마 방전 방식 고효율 보일러에 대한 수출 증대 효과 : 2024년부터 해외시장 진출, 2026년 까지 3년간 \$100만불 이상 수출액 기대

< 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	붙임(별첨) 자료
1. 공통요구자료	1) 자체평가의견서
	2) 연구성과 활용계획서
	3) 연구부정행위 예방 확인서
2.	1)
	2)

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 기술사업화지원사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부에서 시행한 기술사업화지원사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.