

421037-03

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

발간등록번호

11-1543000-004730-01

스마트팜용 탄소연료전지 기반
초고효율 열병합발전 시스템 개발

최
종
보
고
서

2024

스마트팜연구개발사업단
농림식품기술기획평가원
농촌진흥청
농림축산식품부
과학기술정보통신부
농림축산식품부

스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발

2024.05.28

주관연구기관 / 비에이치아이(주)
공동연구기관 / 고등기술연구원연구조합
공동연구기관 / 부산대학교 산학협력단
공동연구기관 / 서울대학교 산학협력단
공동연구기관 / 대구대학교 산학협력단

농림축산식품부
과학기술정보통신부
농촌진흥청
(전문기관)농림식품기술기획평가원
스마트팜연구개발사업단

제출문

제 출 문

농림축산식품부 장관 · 과학기술정보통신부 장관 · 농촌진흥청장 귀하

본 보고서를 “스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발”(개발기간 : 2021.04. ~ 2023.12.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2024.05.28

주관연구기관명 : 비에이치아이(주) (대표자) 우 종 인

공동연구기관명 : 고등기술연구원 연구조합 (대표자) 김 선 용

공동연구기관명 : 부산대학교 산학협력단 (대표자) 강 정 은

위탁연구기관명 : 서울대학교 산학협력단 (대표자) 김 재 영

위탁연구기관명 : 대구대학교 산학협력단 (대표자) 김 흥 석

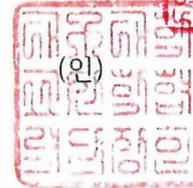
주관연구책임자 : 장 계 환

공동연구책임자 : 엄 성 현

공동연구책임자 : 강 점 순

위탁연구책임자 : 차 석 율

위탁연구책임자 : 김 대 기



「국가연구개발혁신법」제17조에 따라 보고서 열람에 동의 합니다.

최종보고서										보안등급	
										일반[<input checked="" type="checkbox"/>], 보안[<input type="checkbox"/>]	
중앙행정기관명		농림축산식품부			사업명		사업명			스마트팜 다부처 패키지 혁신기술 개발사업	
전문기관명 (해당 시 작성)		농림식품기술기획평가원 (스마트팜연구개발사업단)					내역사업명 (해당 시 작성)			차세대 융합·원천기술 연구사업	
공고번호		제농축 2021-45호			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)						
					연구개발과제번호		421037-03				
기술분류	국가과학기술표준분류	EF0610	60%	LB0506	30%	LB0805	10%				
	농림식품과학기술분류	RC0102	70%	CA0106	20%	AA0204	10%				
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문	스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발								
		영문	High-efficiency Carbon Fuel Cell Based Cogeneration for Smart Farm								
연구개발과제명		국문	스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발								
		영문	High-efficiency Carbon Fuel Cell Based Cogeneration for Smart Farm								
주관연구개발기관		기관명	비에이치아이(주)			사업자등록번호		615-81-08287			
		주소	(우52063) 경상남도 함안군 군북면 장지리 165-2			법인등록번호		194311-0006262			
연구책임자		성명	장계환			직위		연구소장			
		연락처	직장전화			휴대전화					
			전자우편			국가연구자번호					
연구개발기간		전체		2021. 04. 07 - 2023. 12. 31(2년 9개월)							
		단계 (해당 시 작성)		1단계	2021. 04. 07 - 2022. 12. 31(1년 9개월)						
				2단계	2023. 01. 01 - 2023. 12. 31(1년 0개월)						
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비		기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금		합계			연구개발 비 외 지원금
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계		
총계		3,200,000	111,800	745,900			3,311,800	745,900	4,057,700		
1단계	1년차	900,000	34,100	227,500			934,100	227,500	1,161,600		
	2년차	1,150,000	37,500	249,900			1,187,500	249,900	1,437,400		
2단계	1년차	1,150,000	40,200	268,500			1,190,200	268,500	1,458,700		
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고		
									역할	기관 유형	
공동연구개발기관		고등기술연구원	엄성현	수석연구원					공동	전문연	
		부산대학교	강점순	교수					공동	대학	
위탁연구개발기관		서울대학교	차석원	교수					위탁	대학	
		대구대학교	김대기	교수					위탁	대학	
연구개발담당자 실무담당자		성명	이종욱		직위		차장				
		연락처	직장전화			휴대전화					
			전자우편			국가연구자번호					

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

2024 년 02 월 29 일

주관연구책임자 비에이치아이(주) 연구소장 정 계 환



주관연구개발기관의 장 비에이치아이(주) 무 증 인



공동연구개발기관의 장 고등기술연구원연구조합 김 신 봉



공동연구개발기관의 장 부산대학교 산학협력단 최 경 민 (직인)



공동연구개발기관의 장 서울대학교 산학협력단 김 세 영 (직인)



공동연구개발기관의 장 대구대학교 산학협력단 원 희 철



농림축산식품부장관 과학기술정보통신부장관 농촌진흥청장 농림식품기술기획평가원장

< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명	스마트팜 다부처패키지 혁신기술개발사업	총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)					
내역사업명 (해당 시 작성)	차세대 융합·원천기술 연구사업	연구개발과제번호	421037-03				
기술분류	국가과학기술 표준분류	EF0610	60%	LB0506	30%	LB0805	10%
	농림식품 과학기술분류	RC0102	70%	CA0106	20%	AA0204	10%
총괄연구개발명 (해당 시 작성)	스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발						
연구개발과제명	스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발						
전체 연구개발기간	2021.04.01. ~ 2023.12.31.(2년 9개월)						
총 연구개발비	총 4,057,700 천원 (정부지원연구개발비: 3,200,000 천원, 기관부담연구개발비: 857,700 천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)						
연구개발단계	기초[] 응용[<input checked="" type="checkbox"/>] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]	기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준(4) 종료시점 목표(7)			
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)							
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)							
연구개발 목표 및 내용	최종 목표	<ul style="list-style-type: none"> ○ 스마트팜(원예, 축산) 적용을 위한 탄소기반 연료전지 열병합 발전시스템 개발 - 연료전지 모듈화를 통한 4 kW급 고효율 연료전지 시스템 개발 및 사업화 방안 구체화 - 탄소연료전지 기반 열병합발전 운전 신뢰성 확보 및 적용방안 구체화 - 농산부산물 확장성을 고려한 가스화 및 연료전지 내구성 향상을 위한 요소기술 개발 					
	전체 내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원유 수요회복과 OPEC+국가의 감산이행률 준수 등의 요인으로 2021년 국제유가는 전년 대비 16.4% 상승한 배럴당 약 48달러로 전망되므로 유가 상승이 예상됨 ○ 스마트팜 온실의 난방에너지원의 대부분을 유류로 충당하는 상황에서 국제 유가의 지속적인 상승은 스마트팜 농가의 경영에 큰 어려움을 주고 있음 ○ 농업 스마트팜 확산 및 보급이 에너지의 효율적인 사용 기술 수준이 정착되지 않은 상태에서 이루어져 기존 에너지 사용량 대비 전기 및 유류 사용량이 증가하고 있음 ○ 유가상승 대응 및 국가차원의 온실가스 감축 목표에 부응과 전기에너지의 효율적인 사용을 위해 농업부문에서 농업부산물 활용 신재생에너지를 통한 농업용 에너지 자립의 시스템 도입이 필요 ○ 따라서 스마트팜 온실에서 난방비용 절감 및 전기를 동시 생산하는 농업부산물 활용 연료전지 열병합 발전 시스템 개발이 요구됨에 따라 본 과제를 통해 4 kW급 스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발·확장하고 사업화를 도모하고자 함 					

	1단계 (해당 시 작성)	목표	<ul style="list-style-type: none"> - 연료전지 모듈화를 통한 4 kW급 고효율 연료전지 시스템 개발 - 일산화탄소-수소 혼합연료 공급 운전조건에 따른 연료전지 성능 분석 - 농업부산물의 특성 파악 및 탄화 공정 최적화 - 탄소연료전지 연료화 공정 구축 및 열병합발전 열관리 최적화 - 탄소연료전지 발전 시스템의 스마트팜 온실에서의 난방/냉방 대응능력 평가
		내용	<ul style="list-style-type: none"> - 4 kW급 탄소연료전지기반 열병합발전 시스템 개념 설계 - 4 kW 탄소연료전지기반 열병합발전 BOP 주요장치 개발 - 탄소연료전용 스택/반탄화 연료화 연동 실험 - 4 kW 탄소연료전지기반 열병합발전 시스템 종합 및 운전 - 탄소연료전지 기반 열병합발전 시스템 실증 준비 - 일산화탄소-수소 혼합연료 공급 테스트 셋업 구축 및 운전조건에 따른 성능 분석 - 일산화탄소-수소 혼합연료 공급 운전조건 변수에 따른 열화 분석 및 내구성 평가 - 일산화탄소-수소 혼합연료를 위한 연료극 개발 - 농업부산물의 특성 및 탄화/가스화 효율 평가 - 농업부산물의 탄화/가스화 연계 공정의 수소 생성 효율 최적화 - 농산부산물을 이용한 반탄화 기초 설계인자 도출 - 농산부산물을 이용한 반탄화 반응기 개념 설계 - 0.3톤/일급 스마트팜 부산물 적용 컴팩트 가스화 시스템 설계/제작/구축 및 시운전 - 연료전지 연계 열네트워크 물성 및 열에너지 특성 파악 - 열네트워크 시스템 최적화 기술을 통한 연료전지 연계 냉/난방 시스템 개념 설계 - 농산부산물을 이용한 반탄화 시스템 실시설계 및 제작 - 농산부산물을 이용한 반탄화 0.5 TPD 실증 plant 설계 및 제작 - 단위설비 시운전 및 반탄화 연료 적용 가스화 성능 평가 - 연료전지 연계 냉/난방 시스템 실시설계 및 제작 - 탄소연료전지 발전 시스템 적용 스마트팜 온실에서의 난방 대응능력 평가 - 탄소연료전지 발전 시스템 적용 스마트팜 온실에서의 냉방 대응능력 평가 - 스마트팜 온실에 탄소연료전지 열병합 발전시스템에 활용에 의한 CO2 공급 효과 검정
	2단계 (해당 시 작성)	목표	<ul style="list-style-type: none"> - 탄소연료전지 기반 열병합발전 시스템 현장 실증 및 사업화 방안 구체화 - 유동적 연료 공급 상황에 따른 연료전지 운전 변수 및 나노 구조 최적화 - 탄화/가스화 연계 공정의 수소 생성 효율 최적화 - 열병합발전 운전기술 최적화 및 대용량 열병합발전 시스템 설계플랫폼 개발 - 탄소연료전지 열병합 발전기의 농가보급형 상용화 능력 평가
		내용	<ul style="list-style-type: none"> - 탄소연료전지 기반 열병합발전 시스템 실증 - 사업화 대비 용량 탄력성 향상을 위한 설계 플랫폼 개발 - 일산화탄소-수소 혼합연료 유동적 공급에 따른 연료전지 운

			<p>전 변수 최적화</p> <ul style="list-style-type: none"> - 나노구조 서멧 연료극 적용 및 성능/내구성 평가 - 농업부산물 탄화-가스화 연계 공정 최적화 및 Biochar 활용 방안 - 태양열 연계 농업부산물 건조장치 제작, 설치 및 운전 - 탄소기반 연료전지 열병합발전시스템 연계 반탄화 0.5 TPD 실증 Plant 통합운전 데이터 확보 및 반응생성물 특성 평가 - 탄소기반 연료전지 열병합발전시스템 연계 반탄화 0.5 TPD 실증 Plant 통합운전 데이터를 이용한 상용Plant설계 및 운전인자 도출 - 컴팩트 가스화 시스템 개선 및 스마트팜 실증 적용 통합시스템 성능 평가 - 연료전지 연계 냉/난방 시스템 운전 데이터 확보 - 연료전지 연계 대용량 열병합발전 시스템 설계 플랫폼구축 - 탄소연료전지 열병합 발전 시스템의 농가보급형 상용화 모형 구축
--	--	--	--

연구개발성과	<정성적 성과>																																																																																							
	<ul style="list-style-type: none"> - 2kW급 탄소연료전지 기반 열병합발전 BOP주요장치 개발을 통하여 4kW급 탄소연료전지 시스템 설계, 제작을 진행하였으며, 탄소연료전용 스택/반탄화 연료화 연동 분석과 메탄을 이용한 시스템 종합 운전을 통하여 4kW급 탄소연료전지 시스템 구축 및 성능 평가 진행 (시스템 발전효율 55.0%, 종합효율 92.4%, 단위모듈간 성능편차 2.2% 이하) - 반탄화 원료 가스화 시스템 기본 설계를 통하여 농산부산물 반탄화 고체 생성물의 Energy densification 분석 진행 및 0.3톤/일급 스마트팜 부산물 적용 컴팩트 가스화 시스템 구축 및 시작품 제작 구축 및 성능 평가 진행(고형연료 냉가스 효율 64.01%, Energy Densification 1.49, 반탄화 고체연료 생산량 372 kg/day) - 스마트팜 온실 & 탄소연료전지 열병합발전에 대한 작물 생육과 냉/난방 에너지 절감효과 분석 및 빅데이터 R&D 플랫폼 연계 생육 데이터 수집(탄소연료전지 발전시스템 이용 온실 10a기준 에너지 비용 절감 81% 달성) - 혼합연료의 변수 제어 가능한 SOFC 테스트 셋업 구축을 통한 CO-H₂ 혼합연료 공급 운전 조건 변수에 따른 열화 분석 및 내구성 평가를 통한 연료극 개발 - 국내외 바이오매스 발전현황 조사 및 농업부산물의 탄화 반응에 대한 효율 평가로 biochar 특성 파악 및 가스화 효율 평가를 통한 가스화 효율 향상 - 밀양스마트팜 혁신밸리 실증단지 내 탄소연료전지 열병합발전 시스템 구축 후 운전을 통한 실증 실험 Data 확보, 장기운전성능 및 경제성 평가 진행(장기운전시험 32.3, 776시간) 																																																																																							
	<정량적 성과>																																																																																							
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="3">성과 목표</th> <th colspan="6">사업화지표</th> <th colspan="4">연구기반지표</th> </tr> <tr> <th colspan="2">지식 재산권</th> <th colspan="2">기술실시 (이전)</th> <th colspan="2">사업화</th> <th colspan="3">학술성과</th> <th>정책 활용·홍보</th> </tr> <tr> <th>특허출원</th> <th>특허등록</th> <th>건수</th> <th>기술료</th> <th>매출액</th> <th>고용창출</th> <th colspan="2">논문</th> <th>학술발표</th> <th>홍보전시</th> </tr> <tr> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th></th> <th>SCI</th> <th>비SCI</th> <th>논문평균 IF</th> <th></th> <th></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>단위</td> <td>건</td> <td>건</td> <td>건</td> <td>백만원</td> <td>백만원</td> <td>명</td> <td>건</td> <td>건</td> <td></td> <td>건</td> <td>건</td> </tr> <tr> <td>최종 목표</td> <td>10</td> <td>6</td> <td>3</td> <td>10</td> <td>200</td> <td>4</td> <td>10</td> <td>1</td> <td>3</td> <td>18</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>최종 실적</td> <td>11</td> <td>7</td> <td>2</td> <td>8</td> <td>194</td> <td>5</td> <td>11</td> <td>4</td> <td>10.44</td> <td>30</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table>											성과 목표	사업화지표						연구기반지표				지식 재산권		기술실시 (이전)		사업화		학술성과			정책 활용·홍보	특허출원	특허등록	건수	기술료	매출액	고용창출	논문		학술발표	홍보전시							SCI	비SCI	논문평균 IF			단위	건	건	건	백만원	백만원	명	건	건		건	건	최종 목표	10	6	3	10	200	4	10	1	3	18	2	최종 실적	11	7	2	8	194	5	11	4	10.44	30
성과 목표	사업화지표						연구기반지표																																																																																	
	지식 재산권		기술실시 (이전)		사업화		학술성과			정책 활용·홍보																																																																														
	특허출원	특허등록	건수	기술료	매출액	고용창출	논문		학술발표	홍보전시																																																																														
						SCI	비SCI	논문평균 IF																																																																																
단위	건	건	건	백만원	백만원	명	건	건		건	건																																																																													
최종 목표	10	6	3	10	200	4	10	1	3	18	2																																																																													
최종 실적	11	7	2	8	194	5	11	4	10.44	30	2																																																																													

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	1) 연구개발성과의 활용방안 <ul style="list-style-type: none"> - 탄소연료전지 열병합 발전 시스템 적용으로 스마트팜 온실에서 난방 에너지 절감 - 탄소연료전지 열병합 발전 시스템 개발에 의한 스마트팜 농가의 재배 안정성 확보 - 탄소연료전지 열병합 발전기의 개발로 스마트팜 산업의 활성화를 견인 - 농가보급형 탄소연료전지 열병합 발전기는 국내는 물론 세계시장 선점이 가능 - 탄소연료전지 열병합 발전기의 원천기술은 국제특허 출원하여 지적소유권 확보
	2) 연구개발성과의 기대효과 (1) 기술적 측면 <ul style="list-style-type: none"> - 스마트팜 온실의 냉방/난방 에너지 절감 - 탄소연료전지 열병합 발전 시스템 개발에 의한 스마트팜 작물의 건전한 생육유도 - 농가보급형 탄소연료전지 열병합 발전기를 경남스마트팜혁신밸리에 실증시험하여 보급 확산 유도 (2) 경제적.산업적 측면 <ul style="list-style-type: none"> - 탄소연료전지 열병합 발전기를 이용한 스마트팜 재배기술 정착으로 스마트팜 산업의 활성화 유도 - 농가보급형 탄소연료전지 열병합 발전기 이용으로 스마트팜 농가의 동력 에너지 절감 - 탄소연료전지 열병합 발전기 산업의 활성화 유도 (3) 사회적 측면 <ul style="list-style-type: none"> - 탄소연료전지 열병합 발전기를 이용한 스마트팜 재배기술의 확보로 작물의 재배 안정화 및 국민보건 증진에 기여 - 탄소연료전지 열병합 발전기를 이용한 고기능성 작물의 스마트팜 재배 활성화로 농촌 일자리 창출

연구개발성과의
비공개여부 및 사유

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설 ·장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	11	18										
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설 ·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
국문핵심어 (5개 이내)	연료전지		열병합발전		배열		반탄화		태양열			
영문핵심어 (5개 이내)	Fuelcell		Cogeneration		Exhaust heat		Torrefraction		Solar heat			

< 목 차 >

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

별첨 자료 (참고 문헌 등)

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 고유가 및 기후변화 대응 농업 에너지 공급 시스템 개발 필요성

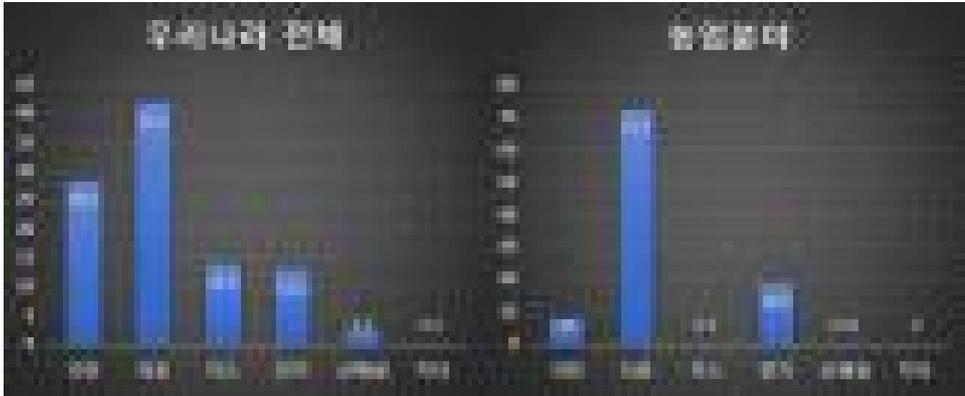


그림 18. 농업분야 에너지원별 소비량 구성(2009년)

참고문헌: 에너지관리공단, 신재생에너지 보급통계, 2010

- 국내 농업분야의 에너지 소비량 대부분이 석유에 집중, 두 번째로 높은 전기에너지 소비량
 - 농업분야 중 토마토 및 오이 등 과채류 농가에서는 석유류 중 경유, 등·중유 및 벙커C유의 사용량이 높음
 - 과채류 농가의 에너지원의 사용용도는 과채류 하우스 내 가온 용도가 대부분이며 전기 사용량 및 목재펠릿 수요도 높은 편임
 - 지난 20년간 우리나라 원예시설의 면적은 비해 2.1배 증가한 반면에 난방면적은 7.4배 증가하여 최근 가온면적이 지속적으로 증가하고 있음
 - 이에 따라 유류소비가 늘어나고 있는데 시설원예 난방연료의 약 89%는 유류난방에 의존하고 있는 실정임. 반면 친환경적인 신재생에너지 사용비율은 약 0.7%에 불과함
- 우리나라 시설원예 작물재배에 경영비중 난방비의 차지하는 비율은 30-40% 농가경영 악화의 원인이 되고 있음
 - 경영비 중 난방비 비율 : 시설가지 44%, 시설고추 41%, 파프리카 33%, 오이 39%, 토마토 36%, 장미 44%

표 1 토마토 및 오이 농가의 작형별 석유류 사용량

단위: *리터, **리터/3.3 m²

토마토						
구분	경유		등·중유, 병커C유		휘발유	
	연간사용량 *	단위사용량 **	연간사용량 *	단위사용량 **	연간사용량 *	단위사용량 **
축성	37,667	19.6	17,949	17.4	227	0.15
반축성	17,800	12.9	13,541	12.3	255	0.21
억제	22,109	8.8	12,500	2.5	163	0.47
평균	31,446	16.7	26,073	10.8	222	0.19
오이						
축성	28,294	20.1	20,340	10.7	998	0.62
반축성	15,264	13.1	7,250	6.8	223	0.18
억제	4,296	3.7	250	0.6	153	0.05
평균	22,495	16.7	12,045	7.2	664	0.42

참고문헌: 농업부문 에너지 수급전망과 청정에너지 농업시스템 구축 방안, 2011

표 2 토마토 및 오이 농가의 에너지 사용용도

단위: %

토마토	농기계	가온	선별·저장	수송	기타	계
경유(면세)	3.5	96.0	0.0	0.5	0.0	100
경유(구입)	0.8	99.2	0.0	0.0	0.0	100
등유, 중유, 병커C유	1.1	98.7	0.0	0.0	0.2	100
휘발유	100.0	0.0	0.0	0.0	0.0	100
전기	27.5	64.3	2.2	0.0	6.0	100
목재펠릿	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100
오이	농기계	가온	선별·저장	수송	기타	계
경유(면세)	8.4	91.2	0.0	0.3	0.1	100
경유(구입)	7.2	92.8	0.0	0.0	0.0	100
등유, 중유, 병커C유	1.3	98.7	0.0	0.0	0.0	100
휘발유	93.6	6.4	0.0	0.0	0.0	100
전기	8.8	70.6	0.0	0.0	20.6	100
목재펠릿	0.0	100.0	0.0	0.0	0.0	100

참고문헌: 농업부문 에너지 수급전망과 청정에너지 농업시스템 구축 방안, 2011

- 2020년 러시아-우크라이나 전쟁이 장기화되면서 국제 유가 강세가 지속되고 있고, 이에 연동해 농업용 면세유 가격도 급등
 - 휘발유 연평균 대비 49%, 경유 52%, 등유 39% 올라 2012년 이후 최고가격 기록
 - 농업용 면세유 가격이 천정부지로 치솟은 가운데 올 하반기까지 지속되면 지난해 1조 1350 억원 수준이었던 농가들의 면세유 구입액이 2조원을 넘어설 것으로 우려됨

- 스마트팜 온실의 난방에너지원의 대부분을 유류로 충당하는 상황에서 국제 유가의 지속적인 상승은 스마트팜 농가의 경영에 큰 어려움을 주고 있음



그림 19. 전국 면세유 평균 가격 추이
(출처 : 한국농어민신문, <http://www.agrinet.co.kr>)

1-2. 신재생에너지 및 에너지 절감시설 활용을 통한 농업부문 에너지자립 필요성

- 농업 스마트팜 확산 및 보급이 에너지의 효율적인 사용 기술 수준이 정착되지 않은 상태에서 이루어져 기존 에너지 사용량 대비 전기 및 유류 사용량이 증가하고 있음

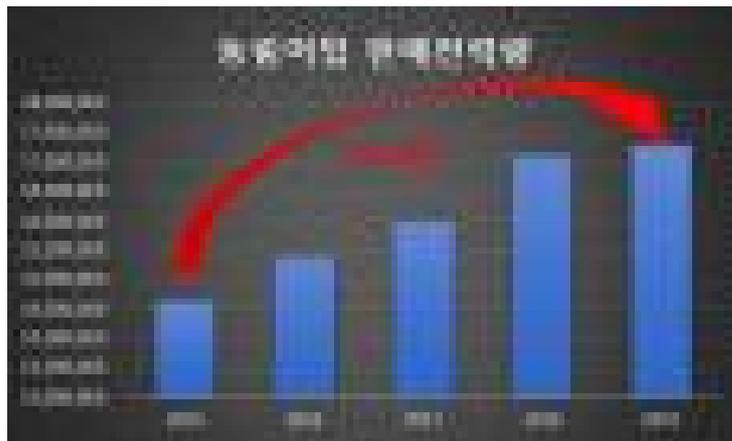


그림 20. 한국전력공사 용도별 판매 전력량 현황

참고문헌: 한국전력공사, “한국전력통계”

- 전기 및 유류 사용량 증가에 따른 면세유 및 농사용 전력의 정부보조금액과 전력공사의 손해액이 증가하여 국익 창출을 위해 이를 절감할 수 있는 기술 도입이 필요함
- 스마트팜의 화석 에너지 의존도를 낮추기 위해 면세유 및 농사용 전력량을 효율적으로 저감할 수 있는 방안 마련을 위해 에너지 절감시설 및 에너지 자립시설의 개발이 필요
- 농업부문 신재생에너지 및 에너지 절감시설의 보급에 의한 효과

- 면세유 공급 감축을 통한 정부재정지출 절감 효과
- 경유 등 화석연료 사용 감소로 석유류 대체 및 온실가스 감축 효과
- 경유 등 에너지 투입비용 감소로 경영비 절감 및 생산성 증대 효과

- 하지만 기존 농업분야의 에너지 절감시설은 열에너지 절감시설에 집중하여 지원되고 있음

표 3 신재생에너지 및 에너지 절감시설 도입에 따른 파프리카 석유대체 효과

	절감율 (%)	절감량 (L/10헥타르)	면적 (헥타르)	총 절감량 (천 L)
지열	31	1,137	232	2,637
배기열회수장치	16	578	182	1,052
열회수형환기장치	50	1,806	64	1,156
다겹보온커튼	46	1,662	9,535	158,426
수막시설	6	209	7,290	15,272
다중피복	10	376	12,674	47,610
우드펠렛	49	1,770	684	12,106

참고문헌: 박지연 외, 한국산학기술학회 논문지, 20(1), 224-235, 2019

표 4 신재생에너지 및 에너지 절감시설 도입에 따른 토마토 석유대체 효과

	절감율 (%)	절감량 (L/10헥타르)	면적 (헥타르)	총 절감량 (천 L)
지열	4	81	232	188
배기열회수장치	16	292	182	531
열회수형환기장치	50	911	64	583
다겹보온커튼	46	838	9,535	79,915
수막시설	6	106	7,290	7,704
다중피복	10	189	12,674	24,016
우드펠렛	49	893	684	6,107

참고문헌: 박지연 외, 한국산학기술학회 논문지, 20(1), 224-235, 2019

- 유가상승 대응 및 국가차원의 온실가스 감축 목표에 부응과 전기에너지의 효율적인 사용을 위해 농업부문에서 농업부산물 활용 신재생에너지를 통한 농업용 에너지 자립의 시스템 도입이 필요

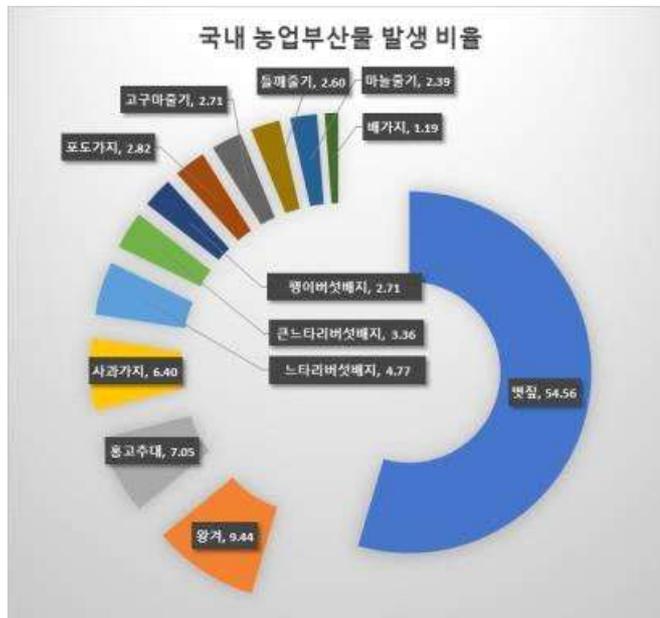


그림 21. 국내 농업부산물 발생 비율 [%]
 참고문헌: 안난희 외, 유기물자원화, 27(4), 71-81, 2019

- 농업부산물의 발생량을 통한 바이오매스 연료 부가가치 창출
 - 2017년 통계 농업부산물 발생량 10,536,000톤 이상 발생
 - 전체 농업부산물 중 벼 부산물이 64.0%로 큰 부분을 차지하나, 사료 및 축사 재활용 등으로 활용률이 높아 바이오매스 자원으로 사용하기 어려움
 - 이외 농업부산물은 작목별 발생 시기, 지역 영향을 받아 지속적인 활용 가능성 고려 필요
 - 벼šet배지 폐 배지의 경우 1,036,200톤이 발생하며 전체의 10.84%로 비교적 높음
 - 벼 부산물을 제외하면 약 24%로 높은 비율을 차지하고 연중 일정량 발생하므로 지속적인 활용이 가능함
- 따라서 에너지 공급 인프라 접근성이 어려운 스마트팜 시설의 난방부하 및 전력부하를 동시에 해결할 수 있는 자립형 열병합발전 시스템 개발이 요구되는 실정임

1-3. 농업부산물 활용 연료전지 열병합발전 시스템 기술 개발

- 농업부산물 기반 완전한 에너지 자급형 열병합발전 시스템 구축을 위해서는 한정적인 수량의 원료로 운영되어야하므로 높은 발전효율은 물론 단열기술 및 열 분배 최적화를 통해 종합효율을 극대화 하는 것이 중요함
- 농업부산물 처리를 통해 열병합발전을 연계하려면 고온의 발전 시스템이 적합하며 고온의 배열을 함께 활용할 수 있는 고체산화물 기반 연료전지 시스템을 적용하는 것이 바람직함
- 현재 활용되고 있는 연료전지 열병합발전 시스템은 천연가스 수소추출시스템과 연계하여 수소를 원료로 고온의 연료전지 시스템을 통해 발전하고, 배출되는 배열을 회수하여 건물의 온수 등에 사용되는 형태가 대부분임

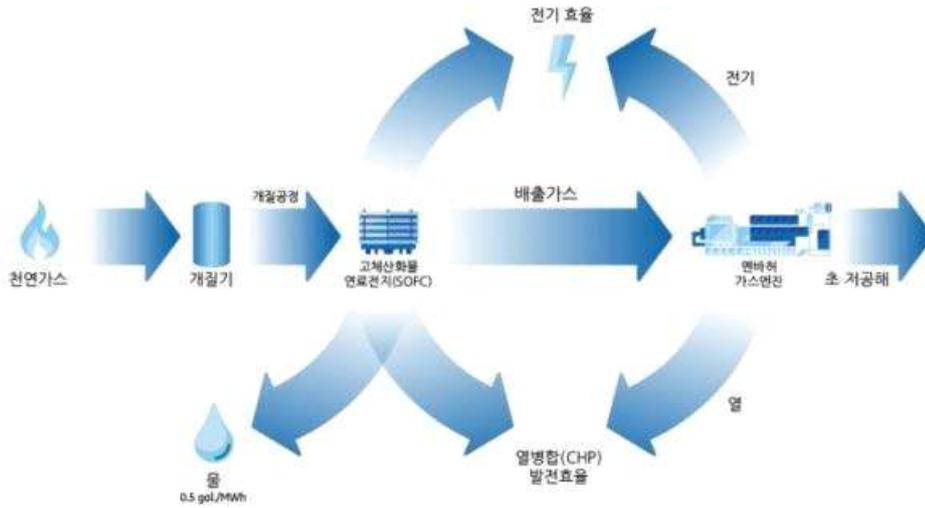


그림 22. 천연가스 수소추출시스템 기반 연료전지 열병합발전 개요도

참고문헌: GE 리포트 코리아, 2016

- 도시가스 및 전기 인프라 연계가 어려운 농업분야의 분산형 에너지 자립을 위해 연료전지 열병합발전 시스템 적용하기 위해서는 고효율의 배열 활용도가 매우 중요함

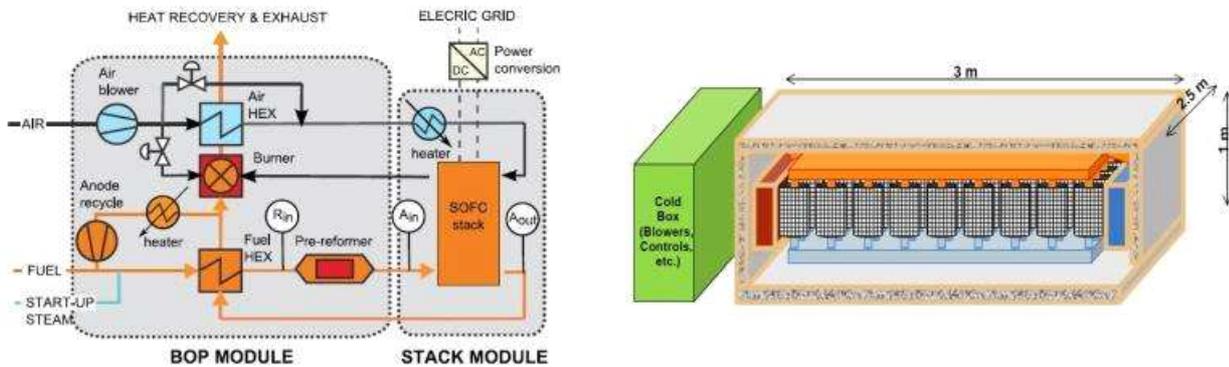


그림 23. SOFC 발전 시스템의 Hot BoP 예시와 스택 연계 모델링

참고문헌: M.Halinen, Hydrogen energy, 39, 552-561(좌), 미국 TIAX 사(우)

- 자립형 연료전지 열병합발전의 에너지효율, 즉, 종합효율을 올리기 위해서는 연료전지 열병합발전 시스템에서의 열활용율을 향상시키는 Hot-BoP 시스템 설계와 연계하여 농업부산물의 건조, 반탄화 및 가스화에 이르는 전 과정에서 요구되는 열에너지를 배열회수를 통해 공급해야 하므로 이에 대한 열네트워크 설계가 필요함

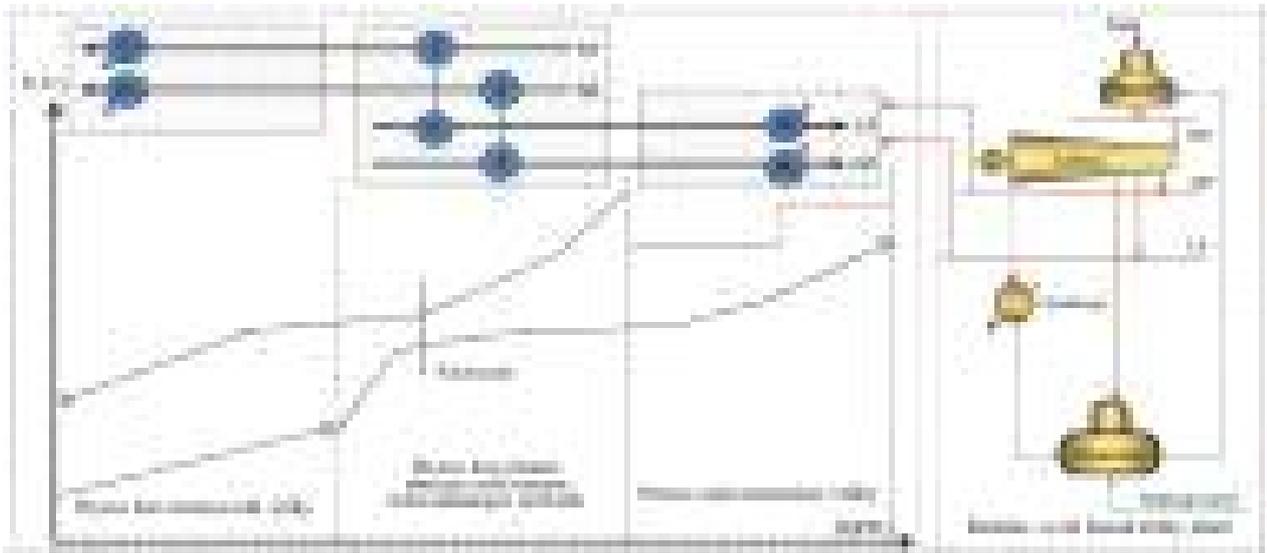


그림 24. 공정 내 열네트워크 설계 예시

- 농업부산물을 수집하여 반탄화 설비를 통해 연료화시키고, 이를 가스화 설비에서 합성가스로 전환한 후, 연료전지 연료로 공급하여 전력을 생산함과 동시에 배출되는 배열을 계절 간 편차 없이 열 활용률을 향상시키기 위해 히트펌프 및 흡수식 냉동기에 공급하여 시설 내 적정 온도를 제어하는 시스템을 제시하고자 함

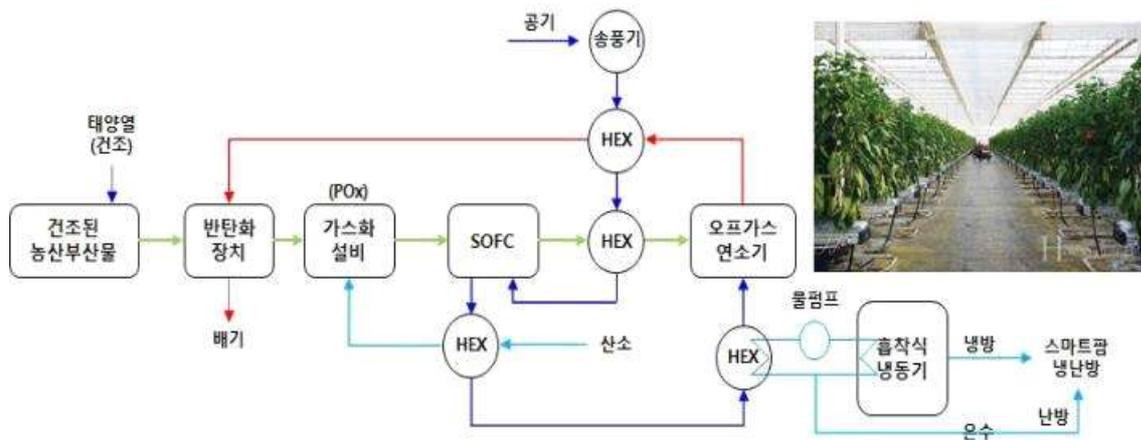


그림 25. 실증용 탄소연료전지 기반 열병합발전 시스템 예시

- 본 연구에서는 상기한 시장의 요구를 충족하기 위해 4 kW급 탄소연료전지 열병합발전 시스템을 개발, 스마트팜 온실에서 실증시험하여 작물의 생육 및 생산성과 난방 에너지 절감 등 실용성을 평가하는데 있으며, 이를 기반으로 20 kW급 시스템의 설계를 진행하여 사업화를 통해 국내외 농가에 보급할 계획임

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

I. 주관연구기관 (비에이치아이(주))

1. 4kW급 탄소연료전지 기반 열병합발전 시스템 개념 설계

1-1. 연료전지 시스템 설계를 위한 스택 성능평가 및 성능 모델링

- 연료전지 시스템 설계는 Aspen을 이용하여 수행하였으며 스택을 모사하기 위해 실제 스택의 성능을 작동온도 650, 700°C에서 평가하고 이를 예측할 수 있도록 모델링하였음. 표 1-1은 시스템에 적용하고자 하는 SOFC 스택에 대한 사양이며, 그림 1-1은 SOFC 스택 형상임.

표 1-1 5kW 40 cell stack specification

Item		Specification
Performance of Power Generation	Generation Power (initial performance)	Rated Power : 1500W (700°C, 48A, Uf=70%, Fuel: Dry H2)
	Output Voltage Current range under generation	OCV: more than 40V at rated Power output: 32V 2A to 50A
	Normal Fuel utilization	70% at 48A
Cell	Cell Type to be used	Anode Support type cell
Dimention and Weight	Dimensions	W150mm X D150mm X H230mm W176.5mm X D150mm X H230mm (including current/voltage terminals)
	Weight	18kg
Operation Temperature		650°C to 700°C



그림 1-1. 연료전지 스택

- 그림 1-2은 모델링한 스택 성능곡선인 I-V Curve이며 연료조성이 변경되어도 성능을 예측할 수 있도록 모델링에 반영하였으며 표 1-2, 표 1-3에서 보듯이 실험 결과와 1.34% 오차 이내로 잘 일치하여 시스템 해석의 신뢰성을 높였음.

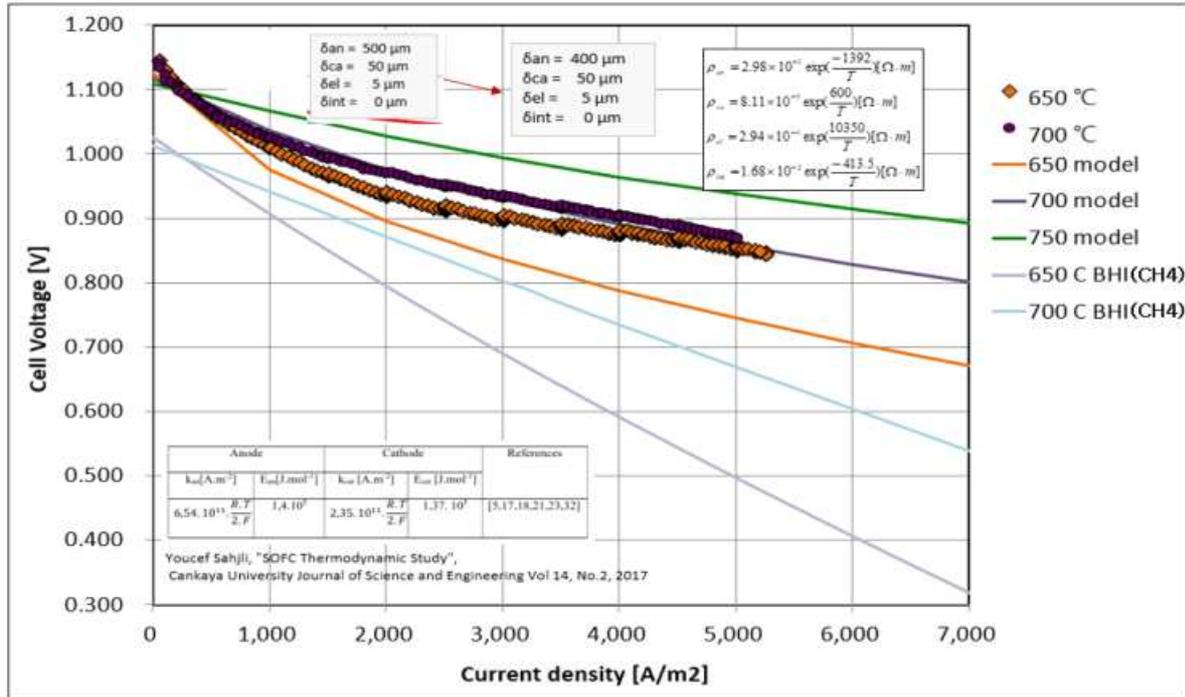


그림 1-2. SOFC 스택 모델링(실험데이터 비교)

표 1-2 650°C 조건 시스템 해석 결과 비교

Item	Unit	Experiment Data	Model	% Deviation
Furnace_Temp.	°C	651	650	0.15%
Jig_Upper_Temp.	°C	655	651	0.61%
Jig_Mid_Temp.	°C	632	631	0.16%
Jig_Lower_Temp.	°C	619	626	1.12%
Anode_IN_Pressure	kPa	0.45	0.40	12.50%
Cathode_IN_Pressure	kPa	4.70	5.05	6.93%

표 1-3 700°C 조건 시스템 해석 결과 비교

Item	Unit	Experiment Data	Model	% Deviation
Furnace_Temp.	°C	700	700	0.00%
Jig_Upper_Temp.	°C	691	688	0.44%
Jig_Mid_Temp.	°C	673	671	0.30%
Jig_Lower_Temp.	°C	662	671	1.34%
Anode_IN_Pressure	kPa	0.48	0.43	11.63%
Cathode_IN_Pressure	kPa	5.00	5.32	6.02%

1-2. 연료전지 시스템 설계 및 최적화

- 연료전지 시스템 기초설계를 위하여 공정흐름도(PFD, Process Flow Diagram)에 대한 개념설계를 수행하고 시스템의 열교환망 요소에 대한 최적화를 위하여 공정모사 Case Study 실시함.
- 도출된 시스템의 개략도는 그림 1-3과 같음. SOFC Stack의 형태는 평판형으로 2kW급 스택을 2단으로 병렬로 연결하여 사용하였으며, 스택에 공급되는 연료는 H₂, CO, CH₄임. 본 시스템에서 스택에 공급되는 연료는 도시가스를 기준으로 외부개질기를 사용하는 것으로 설계하였음.

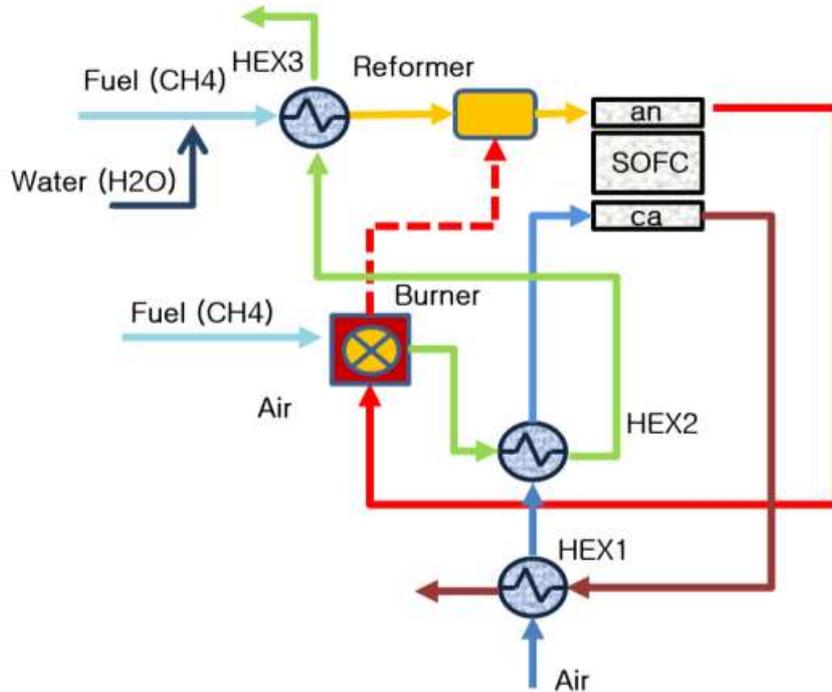


그림 1-3. SOFC 시스템 개략도

- 개질기에서 S/C Ratio는 2.5, 스택에서의 연료이용률은 70%로 모델링하였음. 또한 개질에 필요한 열량은 버너를 이용하여 공급하고, 버너 및 스택에서 발생하는 열에너지를 회수 활용하기 위하여 열교환기를 각각 배치하여 시스템에서 재사용함.
- Anode off gas는 다시 버너로 투입되어 버너에서 사용되는 연료소모량을 최소화 함. Cathode로 공급되는 공기는 Cathode off gas와 열교환기 #1에서 1차 열교환을 거친 후, 버너 출구 가스와 열교환기 #2에서 2차 열교환을 거친 후 cathode로 공급됨. 2차 열교환 후 버너 출구 가스는 열교환기 #3 개질기 유입 전 연료가스와 3차 열교환 후 외부로 배출됨.
- 조건은 표 1-4와 같으며 각 Case는 스택 출력 1.6, 1.8, 2.0 kW 조건에서의 연료 사용량과 개질에 필요한 열량을 전달한 후 버너 후단 가스의 온도를 각각 650, 700, 750 °C로 설정하였을 때의 연료 사용량을 비교하여 전체 시스템 효율을 계산됨. BOP의 경우 스택 출력의 10%로 계산하였고, AC로 동작하고 DC to AC 변환이 되는 Inverter의 효율은 통상적인 수준인 97%로 가정하여 계산함.

표 1-4 시스템 해석 조건

Item	Unit	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9
Operating temp.	°C	700	700	700	700	700	700	700	700	700
Active area	cm ²	95	95	95	95	95	95	95	95	95
Number of cell	ea	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Number of Stack	ea	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Current density	A/cm ²	0.35	0.3	0.25	0.35	0.3	0.25	0.35	0.3	0.25
Burner out Temp.	°C	750	750	750	700	700	700	650	650	650

- Case 1은 셀전압 0.77V, 전류밀도 0.35A/cm² 조건에서 스택 출력은 2kW이며, 버너 후단 온도 750°C로 가정하여 계산하였고, BOP를 고려하지 않은 시스템 효율은 42.74%로 계산됨.
- Case 2는 셀전압 0.8V, 전류밀도 0.3A/cm² 조건에서 스택의 출력은 1.8kW이며, 버너 후단의 온도 750 °C로 가정하여 계산하였고, BOP를 고려하지 않은 시스템 효율은 43.39%로 계산됨.
- Case 3은 셀전압 0.84V, 전류밀도 0.25A/cm² 조건에서 스택의 출력은 1.6kW이며, 버너 후단의 온도 750°C로 가정하여 계산하였고, BOP를 고려하지 않은 시스템 효율은 43.59%로 계산됨.
- Case 4은 셀전압 0.77V, 전류밀도 0.35A/cm² 조건에서 스택의 출력은 2kW이며, 버너 후단의 온도 700°C로 가정하여 계산하였고, BOP를 고려하지 않은 시스템 효율은 43.82%로 계산됨.
- Case 5은 셀전압 0.8V, 전류밀도 0.3A/cm² 조건에서 스택의 출력은 1.8kW이며, 버너 후단의 온도 700°C로 가정하여 계산하였고, BOP를 고려하지 않은 시스템 효율은 44.56%로 계산됨.
- Case 6은 셀전압 0.84V, 전류밀도 0.25A/cm² 조건에서 스택의 출력은 1.6kW 이며, 버너 후단의 온도 700°C로 가정하여 계산하였고, BOP를 고려하지 않은 시스템 효율은 44.87%로 계산됨.
- Case 7은 셀전압 0.77V, 전류밀도 0.35A/cm² 조건에서 스택의 출력은 2kW이며, 버너 후단의 온도 650°C로 가정하여 계산하였고, BOP를 고려하지 않은 시스템 효율은 44.94%로 계산됨.
- Case 8은 셀전압 0.8V, 전류밀도 0.3A/cm² 조건에서 스택의 출력은 1.8kW이며, 버너 후단의 온도 650°C로 가정하여 계산하였고, BOP를 고려하지 않은 시스템 효율은 45.8%로 계산됨.
- Case 9은 셀전압 0.84 V, 전류밀도 0.25 A/cm² 조건에서 스택의 출력은 1.6kW 이며, 버너 후단의 온도 650°C로 가정하여 계산하였고, BOP를 고려하지 않은 시스템 효율은 46.17%로 계산됨.
- 계산 결과는 아래와 같으며 버너에서의 연료소모량이 동일한 조건에서는 스택의 출력이 작을 경우 전체적인 시스템 효율이 증가되며, 동일한 스택 출력 조건에서는 버너에서의 연료소모량이 작을 경우 전체적인 시스템 효율이 증가됨. 최적의 조건은 Case 9의 스택 전류밀도 0.25A/cm², 버너 출구온도 650°C 조건임을 확인하였음.

표 1-5 해석 조건에 따른 시스템 해석 결과

Item	Unit	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8	Case 9
Operating temperature	°C	700	700	700	700	700	700	700	700	700
Active area	cm ²	95	95	95	95	95	95	95	95	95
Number of cell	ea	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Number of Stack	ea	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Current density	A/cm ²	0.35	0.3	0.25	0.35	0.3	0.25	0.35	0.3	0.25
Current	A	33.25	28.5	23.75	33.25	28.5	23.75	33.25	28.5	23.75
Cell voltage	V	0.77	0.8	0.84	0.77	0.8	0.84	0.77	0.8	0.84
Power_Stack	W	1022.52	915.28	795.39	1022.52	915.28	795.39	1022.52	915.28	795.39
Power_Total	W	2045.05	1830.56	1590.79	2045.05	1830.56	1590.79	2045.05	1830.56	1590.79
S/C Ratio	-	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
CH ₄ usage_stacks	kg/h	0.29	0.25	0.21	0.29	0.25	0.21	0.29	0.25	0.21
Burner out Temperature	°C	750	750	750	700	700	700	650	650	650
CH ₄ usage_burner	kg/h	0.0555	0.056	0.0562	0.047	0.048	0.0487	0.0386	0.04	0.0415
Efficiency_system	%	42.74	43.37	43.59	43.82	44.56	44.87	44.94	45.8	46.17

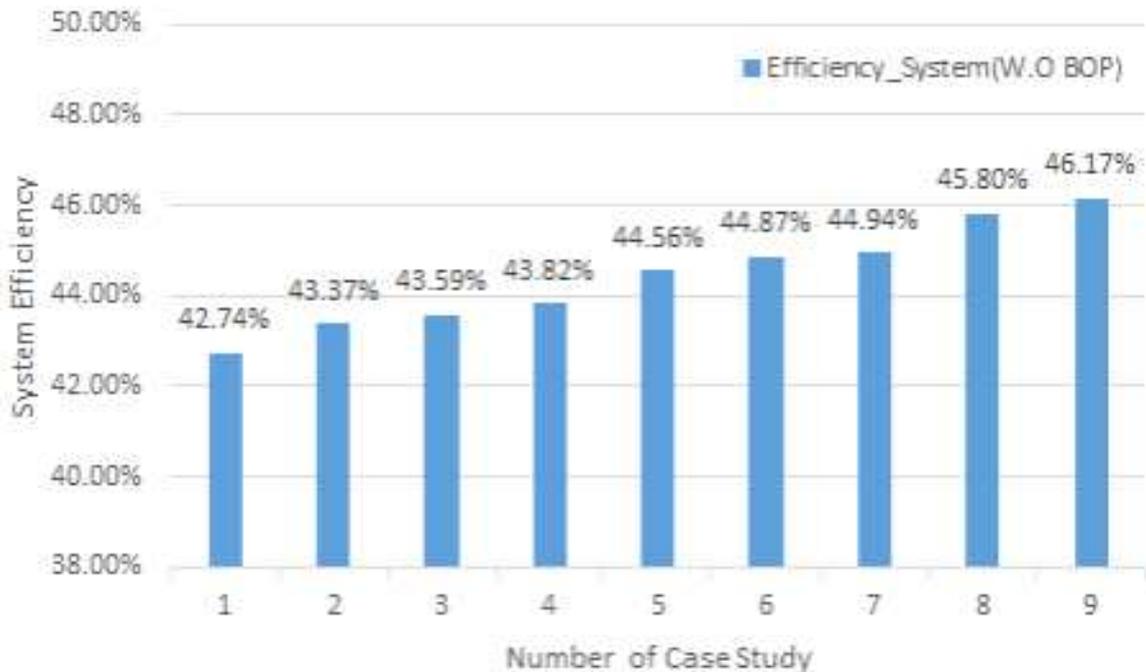


그림 1-4. 해석 조건에 따른 시스템 효율 비교

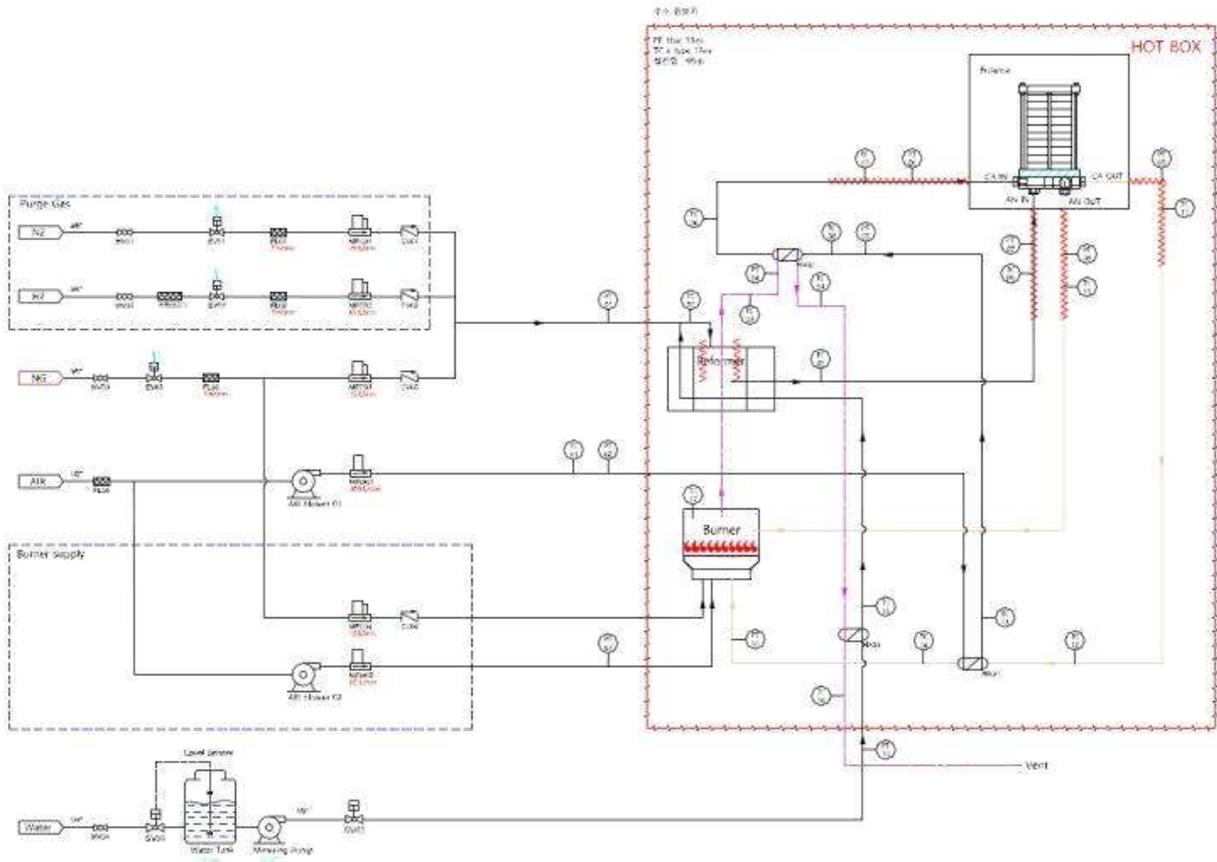


그림 1-5. SOFC 2kW 시스템 P&ID

- 시스템 해석을 통해 2kW 시스템에 대한 개념설계를 완료하고 그림 1-15와 같이 시스템에 대한 P&ID를 설계하였으며 Cathode Air 승온용 열교환기 2개와 개질용 물의 승온용 열교환기 1개, 개질기(Steam Reformer), 버너, 스택으로 구성되어 있음.
- 시스템의 입구배관은 연료부(NG, AIR, Water)와 비상연료부(H₂), Purge용(N₂)이 있으며 각 가스의 유량을 제어 할 수 있도록 MFC, MFM을 장착하고 개질용 물은 pump로 유량이 제어 됨. H₂주입 노즐에는 화염생성을 방지하는 역화방지기를 추가하였음. AIR는 2개의 Blower를 이용하여 버너와 Cathode에 공급됨. 개질기로 인입되는 연료인 NG는 Anode의 연료로 작용 하며, 버너로 인입되는 연료는 AIR, NG로 버너의 열량으로 소모되어 Hot-Box 를 승온시킴.
- NG는 개질기로 주입이 되며 버너의 열과 열교환 후 개질된 가스(H₂, CO, H₂O)가 스택의 Anode로 주입이 됨.
- AIR는 Cathode와 Burner의 연료로 사용되며, Cathode부로 주입되는 AIR는 Cathode Off-Gas와 1차 열교환후 Burner Off-Gas와 2차열교환 하여 승온시켜 스택의 Cathode부로 주입됨.
- Purge용 N₂는 초기 기동시 개질기 촉매 및 스택의 산화를 방지하기 위해 개질기로 주입이 되며 전체 시스템을 승온 시키며 과도한 온도차의 발생을 방지함.
- 비상용 연료인 수소는 개질기 문제가 발생시 메탄연료를 차단될 때 스택을 보호하기 사용됨

2. 탄소연료전용 스택 및 반탄화 연료 활용 검토

2-1. 바이오연료 활용 시스템 모델링

- 그림 1-7은 바이오연료-SOFC 하이브리드 시스템 개략도이며 다양한 연료를 사용할 수 있는 SOFC Stack의 연료에 따른 반응성 및 효율을 확인하기 위한 개념설계를 수행하고 공정모사를 실시함.

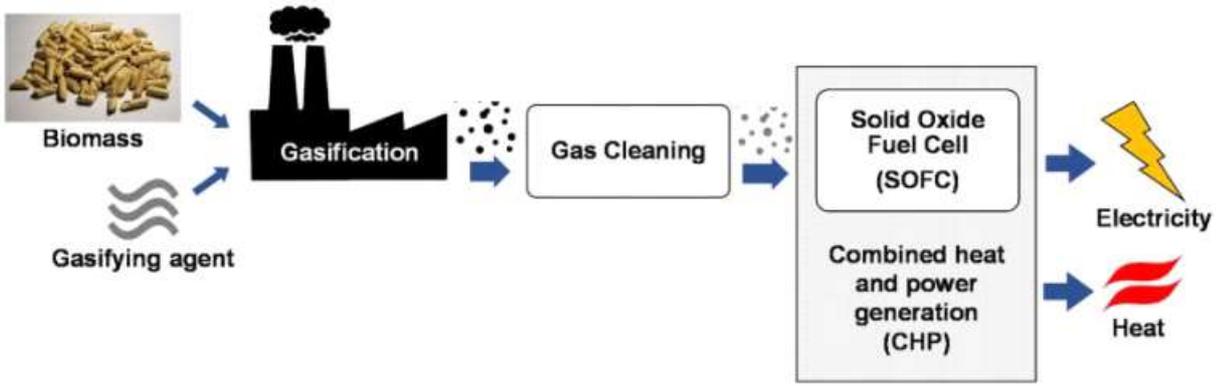


그림 1-6 바이오연료를 활용한 연료전지 연계 하이브리드시스템 개략도

2-1-1. 바이오연료 특성 검토

- 일반적으로 바이오연료의 경우 가스화기의 출구조건에 따라 온도조건이 상이하며, 가스화기 출구 조건도 온도 실험 조건에 따라 가스온도의 변동은 200°C에서 500°C 수준으로 매우 큰 차이를 보임.
- 바이오 연료에 따른 차이를 확인하기 위하여 ASPEN을 이용한 조성에 따른 열량을 분석하였음. 본 모델링에 사용된 연료 조건은 STP 조건에서 계산하여 CASE 별 연료의 상태를 파악하였음.
- 연료의 체적유량에 따른 조건을 파악하기 위하여 15Nm³/hr, 18Nm³/hr, 20Nm³/hr로 나누어 계산하였으며, CASE 1의 ETC는 질소로 대체하여 계산에 사용하였음.

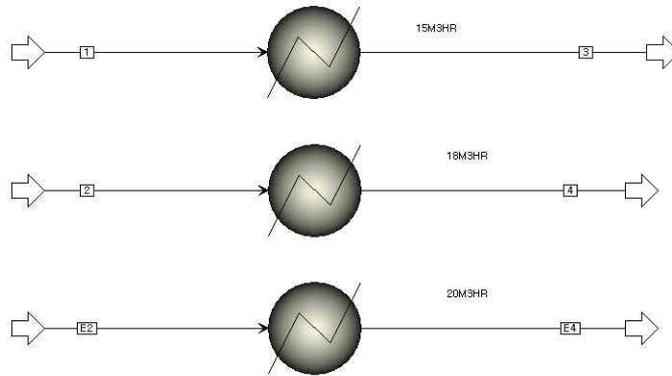


그림 1-7 연료 조건에 따른 히터 모델링

- 바이오매스 조건 및 유량에 따른 인입합성가스 발열량 결과는 아래 표 1-6과 같으며, 순수 메탄으로 구성된 CASE 0의 경우 가장 많은 에너지가 투입되는 것을 알 수 있음.
- CASE 1은 20Nm³/hr에서 40.98kW가 투입되며, 유량 15Nm³/hr에서 30.74kW가 투입됨.
- CASE 2는 20Nm³/hr에서 65.61kW가 투입되며, 유량 15Nm³/hr에서 49.21kW가 투입됨.
- CASE 3은 20Nm³/hr에서 67.73kW가 투입되며, 유량 15Nm³/hr에서 50.80kW가 투입됨.
- 주요 열량으로 사용되는 성분에 따라 각 열량은 변화하며, CASE 2와 CASE 3은 큰 차이가 없는 것으로 파악됨. 하지만 본 과제의 성능지표 중 연료전지 발전효율 및 열병합발전종합효율의 경우 인입합성가스 발열량에 따라 결과가 크게 달라질 수 있으며, 표 1-6과 같이 해석결과에 제시된 유량 및 조성 조건에서의 인입합성가스발열량은 연료전지에 활용하기에 매우 많은 열량인 것을 표에서 확인할 수 있음.
- 발열량은 순수 메탄을 사용하는 CASE 4가 매우 높고 CASE 1이 가장 낮으며, CASE 2와 3은 비슷한 것을 확인하였음.

표 1-6 가스화설비 출구조건(연료전지 유입 연료 조성비율)

Flow rate(Nm ³ /hr)	CASE 0 (kW)	CASE 1 (kW)	CASE 2 (kW)	CASE 3 (kW)
15	147.7	30.7	49.2	50.7
18	177.2	36.8	59.0	60.9
20	196.9	40.9	65.6	67.7
Heating value(kJ/kmol)	802,820	167,398	268,087	276,842

- 순수 메탄을 사용할 경우 스택으로 유입되는 연료와 바이오연료와의 차이점을 확인하기 위하여 개질반응에 대한 분석을 수행하였음. 그림 1-8와 같이 RGibbs 반응기를 이용하여 개질기를 모사하였으며, 공급되는 메탄의 양은 40% 효율을 가정, 사용되는 물의 양은 2.5 비율로 계산하여 투입함.

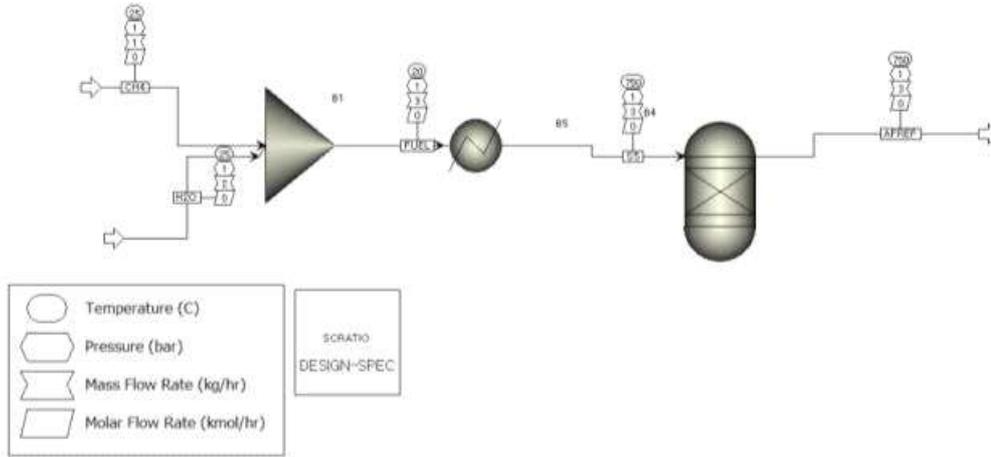


그림 1-8 메탄 개질 후 연료 조성 시뮬레이션(S/C Ratio 2.5)

- 개질온도 400°C에서 900°C까지의 범위에서 개질 후 가스의 조성비 변화를 그림 1-9과 같이 도출하였음. 작동온도 750°C에서 수소 0.59936 으로 가장 많이 개질이 되는 것을 확인 하였으며, 이후 800°C에서 떨어지는 것을 확인 할 수 있음.
- 온도가 증가되면 CH₄의 양은 줄어들고 CO의 양은 늘어나지만, 투입되는 열량이 많아지기 때문에 효율성을 생각하였을 때는 750°C가 가장 효율적인 온도임.

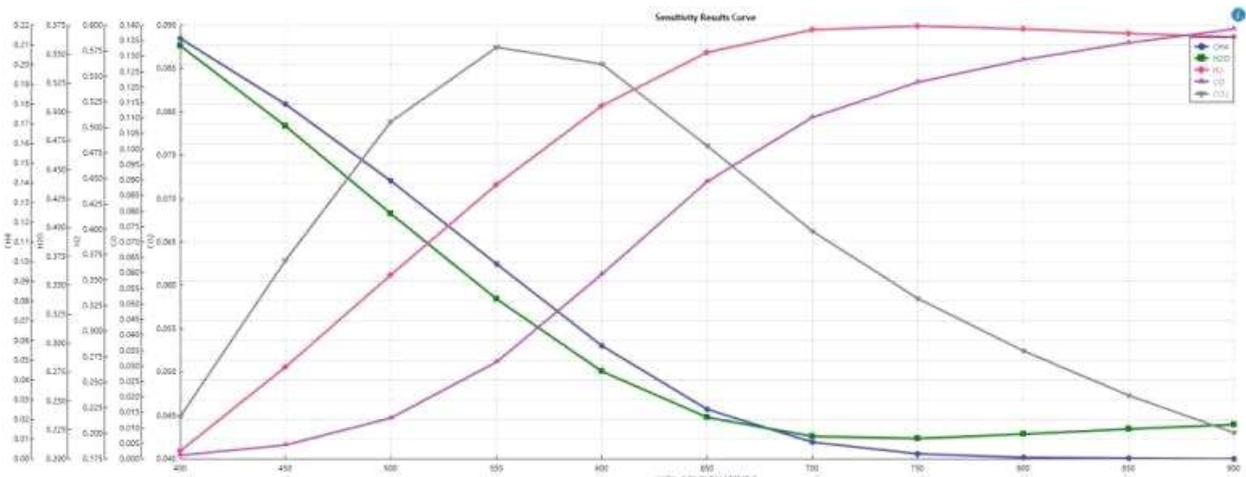


그림 1-9 개질기 반응 온도에 따른 개질 후 가스 조성비 비교 결과

2-1-2. 바이오연료 활용 연료전지 시스템 모델링

- 목재 펠릿, 버섯 폐배지의 가스화 후 출구조건은 아래 표 1-7과 같으며, 가스화 설비의 출구조건은 연료전지 유입 연료 조성비율과 같음.

표 1-7 가스화설비 출구조건(연료전지 유입 연료 조성비율)

가스화기 출구조건	CASE 0	CASE 1	CASE 2	CASE 3	
가스 조성(%)	CO	0	35	19.5	21.57
	H ₂	0	25	54.69	60.4
	CO ₂	0	15	16.77	9.96
	O ₂	0	5		
	CH ₄	100	1	7.61	7.19
	C ₂ H ₄			0.72	0.28
	C ₂ H ₆			0.72	0.59
	ETC		19		
출구가스 유량(Nm ³ /hr)	15~20				
가스온도(°C)	200~500				

- CASE 0은 CH₄ 100%로 구성되어있음.
- CASE 1은 목재 펠릿 기준 가스화 실험 결과로 CO 35%, H₂ 25%, CO₂ 15%, O₂ 5%, CH₄ 1%, ETC 19%로 구성되어 있음.
- CASE 2는 버섯 폐배지를 250°C에서 수열탄화한 후 800°C도의 가스화반응 후의 결과로 CO 19.5%, H₂ 54.69%, CO₂ 16.77%, CH₄ 7.61%, C₂H₄ 0.72%, C₂H₆ 0.72%로 구성되어 있음.
- CASE 3은 버섯 폐배지를 400°C에서 수열탄화한 후 800°C도의 가스화반응 후의 결과로 CO 21.57%, H₂ 60.4%, CO₂ 9.96%, CH₄ 7.19%, C₂H₄ 0.28%, C₂H₆ 0.59%로 구성되어 있음.
- CASE 3은 CASE 2 대비 CO, H₂의 양이 더 많고 CO₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆이 상대적으로 적은 것을 확인하였으며, SOFC 특성상 메탄은 연료극에서의 촉매로 인한 내부개질이 잦각 발생할 것으로 판단되며, 전기화학반응에 참여하는 CO, H₂의 양은 CASE3 > CASE 2> CASE 1으로 확인할 수 있음.
- SOFC에서 연료로 사용되는 H₂와 CO의 비율로 보았을 때 그림 1-10과 같이 목재펠릿을 사용하여 동작하는 경우 매우 낮은 효율 및 성능이 도출될 것으로 판단되고, 수열탄화의 경우 기존 시스템에서 도출한 결과와 큰 차이가 없을 것으로 판단됨.

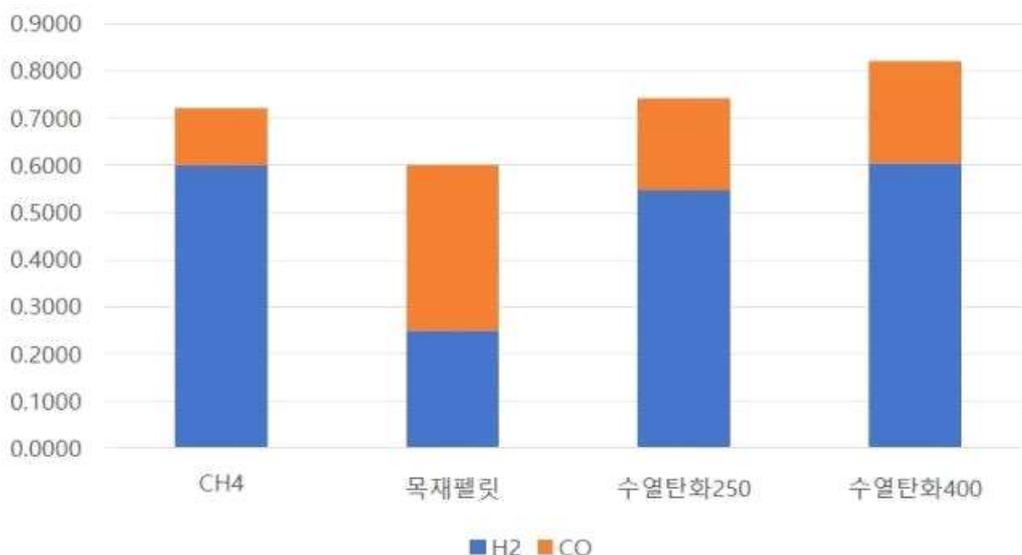


그림 1-10 연료 상태에 따른 H₂ 및 CO 몰 비율

- 메탄을 사용하여 작동하는 연료전지 대비 수열탄화를 통해 가스화된 연료의 조성비는 H₂의 양에서는 큰 차이는 없으나 CO의 차이가 기존 대비 2배 정도 차이가 나기 때문에 WGS 등의 반응 등의 영향이 있을 수 있을 것으로 판단되며, 기존 내부개질에 필요했던 열량을 활용하여 타 시스템으로의 전달을 통해 에너지 절감 및 시스템 효율을 향상시킬 수 있을 것으로 판단됨.

2-1-3. 바이오연료 활용 연료전지 시스템 모델링

- 연료전지 시스템의 Stack은 Magnex 사의 제품을 기준으로 하였으며, Stack의 상세 정보는 표 1-1과 같으며, 스택의 해석조건은 표 1-8와 같음.

표 1-8 Stack 해석 조건

Parameter	Unit	Value	Comment
Number of Cell	EA	80	
Active area of cell	cm ²	95	
Fuel utilization	%	70	H ₂ , CO
Fuel			표 1-8
Operation Temperature	°C	650, 700	
S/C Ratio		2.5	

- 모사스택의 셀 수는 M사의 2배인 80장으로 가정하였으며, 반응면적은 90 cm²으로 순수소를 연료로 사용하였을 때 700°C, 48A에서 3.0kW의 출력이 가능함.
- 각 CASE별 650°C 및 700°C에서 SACK 전류밀도 및 전력량은 그림 1-11 및 그림1-12과 같음.
- 700°C, 5,000 A/m²에서 전압결과는 CASE0 0.7868V, CASE1 0.69867V, CASE2 0.8177V, CASE3 0.8316V로 측정이 되었음.

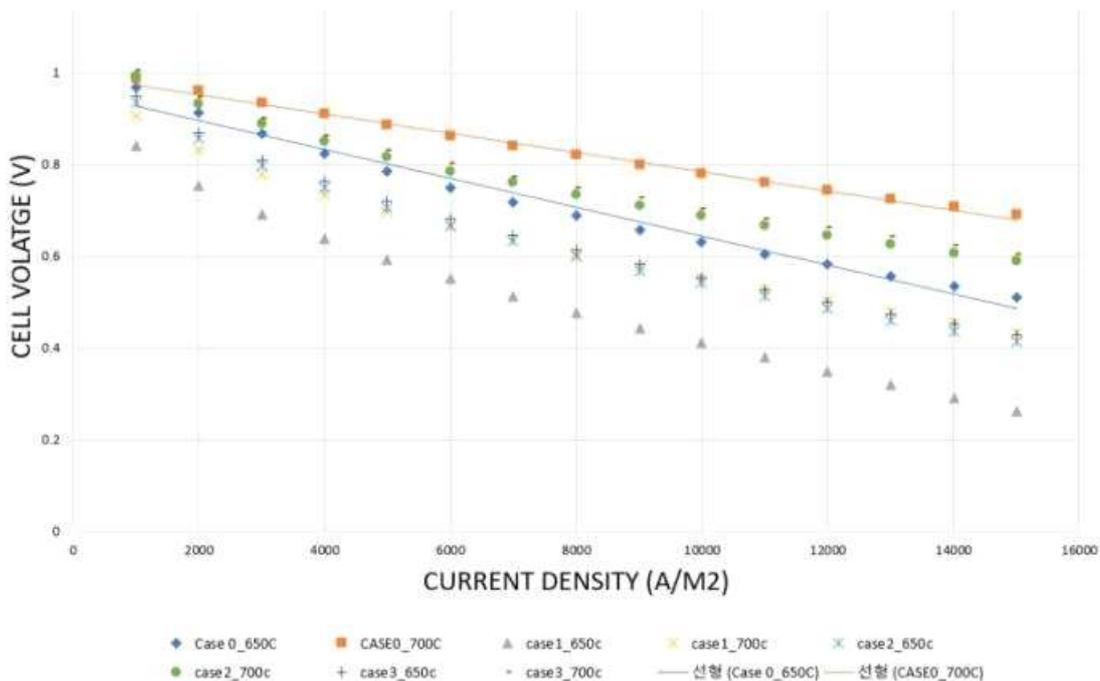


그림 1-11 바이오연료 조성비에 따른 전압-전류 성능곡선

- 700°C, 5,000 A/m²에서 전력결과는 CASE0 3369W, CASE1 2654W, CASE2 3107W, CASE3 3160W로 측정이 되었음.

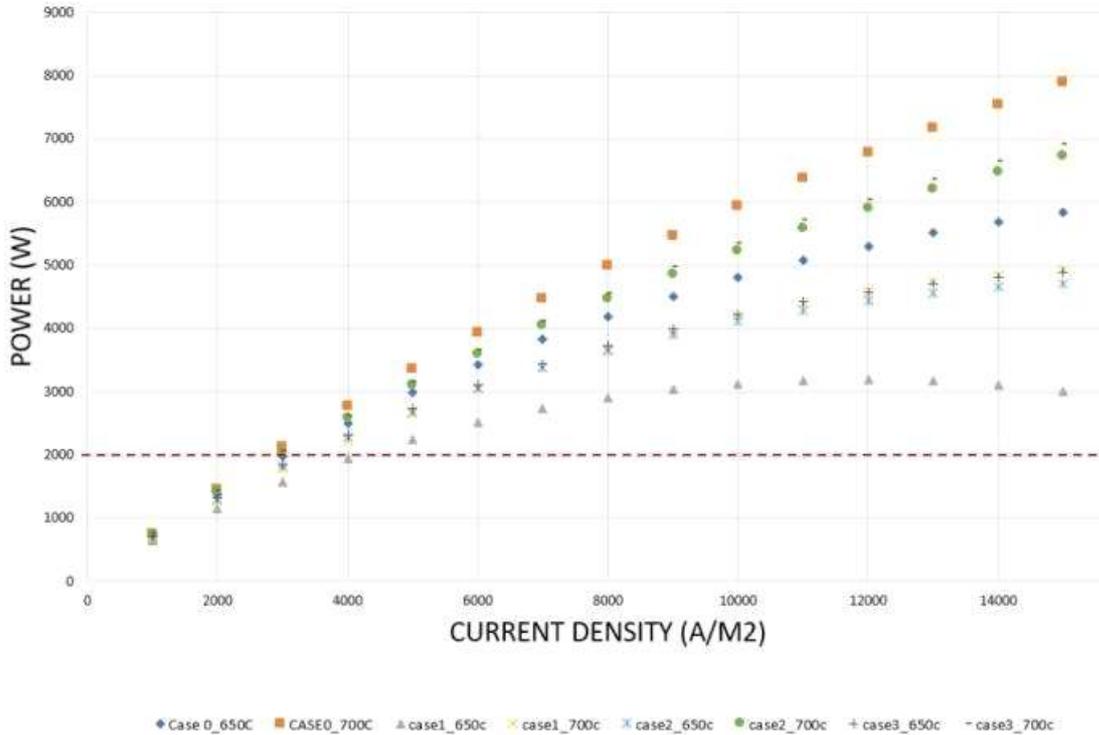


그림 1-12 바이오연료 조성비에 따른 전력 곡선

- Magnex Stack의 성능은 700°C, 5,000 A/m²에서 0.8V, 3,000W으로 해석결과와의 오차는 약 10%가 발생하였음.
- 빨간 점선의 경우 본 과제에서 해결해야 할 스택 당 필요 전력량인 2kW이며, 실제 BOP전력까지 감안할 경우 약 110~120% 수준의 출력을 내야함.
- 2kW 전력생산을 위하여 4,000 A/m²영역에서의 운전이 필요할 것으로 판단되며, 이는 정격전력보다 낮은 영역대로 스택의 운전 및 성능에 큰 문제는 없을 것으로 판단됨.

3. 열병합발전 시스템 BOP 주요장치 개발

3-1. 열교환기 설계 및 제작

- Cathode Air 승온용 열교환기는 판형열교환기 형태로 설계 하였으며 사양은 표 1-9와 같음. 그림 1-13은 연료전지 시스템용 열교환기 모델링이며 그림 1-14은 열교환기 제작품임.

표 1-9 연료전지 시스템용 열교환기 설계 사양

Descriptions		Units	Values
Size	Nozzle Diameter	mm	34
	Thickness	mm	71
	Pitch	mm	124
	Length	mm	323
Face Area		m ²	0.45
Max. Work Press		bar	2
Plate Material		-	STS 316L

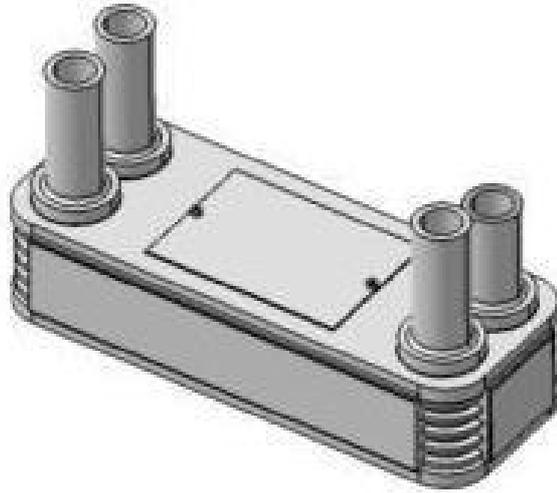


그림 1-13. 연료전지 시스템용 열교환기 3D Modeling



그림 1-14. 연료전지 시스템용 열교환기 제작품

3-2. 버너 & 개질기

3-2-1. 설계 및 제작

- 연료전지 시스템의 구성품인 개질기의 열효율을 향상시키고, 크기를 소형화하기 위해 수증기 발생용 열교환기를 포함하는 일체형 형태로 구상하였음. 버너의 배가스가 충분히 촉매에 열을 전달 가능한 유로로 설계하였으며 수증기 개질 반응에서 수반하는 큰 흡열반응(단위 mole당 205.8 kJ)에서 온도편차를 줄이기 일 수 있도록 버너의 배기가스가 촉매층 사이로 이동하며 촉매층에 열을 전달하게 구성하였음.
- 하단부에 버너가 위치하며, 상단부는 열교환기형 개질기로 제작되었으며 그 사양은 표 1-10과 같음
- 버너는 불꽃이 균일하게 분포할 수 있도록 Mesh망을 결합한 형태로 그림 1-15에 나타내었음.
- 개질용 열교환기(그림 1-16, 1-17)는 배가스가 충분히 촉매에 열을 전달 가능한 스파이얼 형태의 유로로 설계하였으며 개질용 촉매는 상용 Ru(루테늄)를 사용하였음.

표 1-10 연료전지 시스템용 열교환기 설계 사양

Descriptions			Units	Values
개질기 Size	외부 원통 (연소실)	내경	mm	159.2
		외경	mm	165.2
	내부 원통 (개질부)	높이	mm	280
		지름	mm	101.6
	연료 주입 및 토출부 노즐	내경	mm	3.95
		외경	mm	4.75
	Water 인입 노즐 지름		mm	4.75(3/8")
개질 촉매			-	Ru(루테늄)



그림 1-15. 연료전지 시스템용 버너



그림 1-16. 연료전지 시스템용 개질기 3D Modeling



그림 1-17. 연료전지 시스템용 개질기

3-2-2. 버너, 개질기 단동 실험

- 버너의 연소에 문제점이 없는지 확인하기 위해 실험하였으며 공급공기와 연료비는 10:1을 적용하였을 때 연소상 문제는 없었으며 그림 1-18과 같이 불꽃이 Mesh 망에 의해 비교적 균일하게 분포하는 것을 확인 할 수 있었음.



그림 1-18. 버너 연소 실험

- 개질기의 온도 승온시험을 수행하기 위해 그림(1-19, 1-20)과 같이 버너, 개질기를 결합하고 외부에 단열재를 감싸 열손실을 최소화 하였음. 온도센서를 버너 연소실, 개질기 내부에 설치하였고 온도 상승량을 확인하였음.



그림 1-19. 일체형 버너 & 개질기 제작품



그림 1-20. 2차 버너 & 개질기 제작품 시험

- 그림(1-21)는 개질기 승온 시험에서 주입연료 유량을 나타낸 그림이며 버너에 CH₄는 6LPM, Air는 64LPM, 개질기 내부에는 N₂를 2.8LPM 주입하였음.
- 그림(1-22)는 개질기 승온 시험 결과를 나타낸 그림이며 버너연소에 의해 연소실은 약 1,000도가까이 상승하였으며 개질기 내부는 약 400°C에 도달하였음. 개질에 필요한 온도인 600°C 이상에 도달하지 못하였으며 이는 단열문제로 HOT BOX 내부에 개질기를 설치하면 연소실 온도가 높아 문제가 없을 것으로 판단됨.

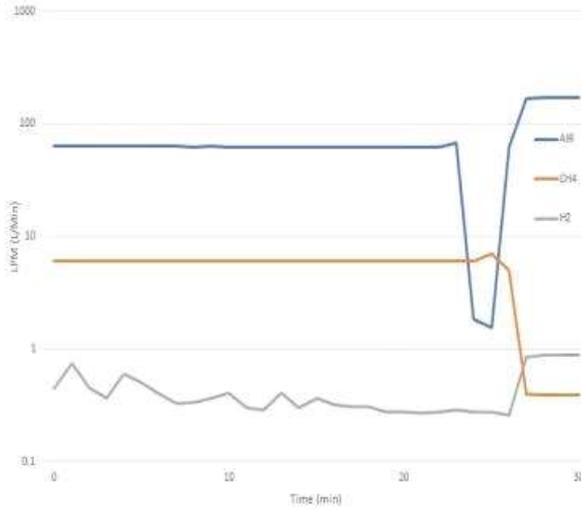


그림 1-21. 시간에 따른 주입연료유량 변화

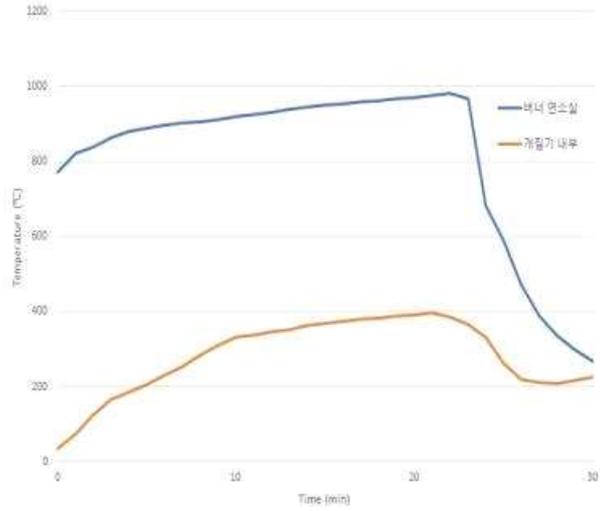


그림 1-22. 온도변화량 측정결과

3-3. 연료전지 시스템

3-3-1. 설계 및 제작

- Hot-Box는 연료전지 고온구동을 위한 열교환기, 버너, 기화기, 개질기, 스택으로 구성되었으며 적절한 배치를 통해 공간을 최소화 하고 100t 단열재로 외부를 감싸 열손실을 최소화 하도록 설계하였음. 또한 효율적인 열관리를 위해 운전시 스택에서 발생하는 반응열과 미반응 가스를 연소시켜 얻은 열을 이용하여 스택의 온도유지, 반응물의 예열 및 연료개질에 필요한 열량을 공급할 수 있도록 구성하였음. 각 부분의 온도를 고려하여 그림 1-23과 같이 Hot-Box를 설계 하였으며 그림 1-24과 그림 1-25과 같이 제작하였음.

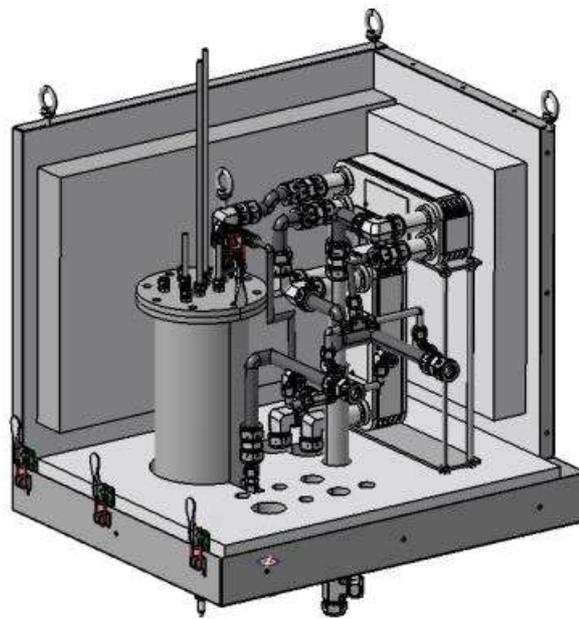


그림 1-23. 연료전지 시스템 Hot-Box 3D Modeling



그림 1-24. 연료전지 시스템 Hot-Box 제품



그림 1-25. 연료전지 시스템 Furnace 내부 스택 체결

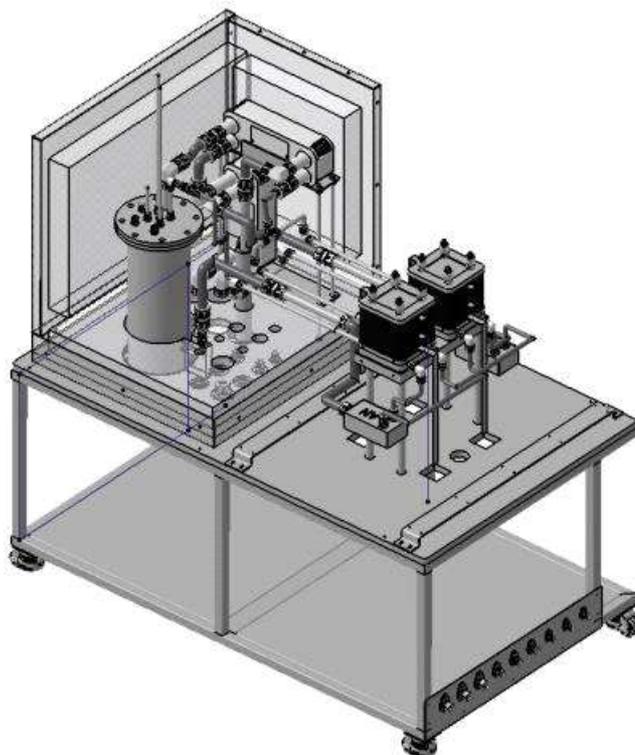


그림 1-26. 연료전지 시스템 시작품 3D Modeling



그림 1-27 연료전지 시스템 2kW 시작품

- 그림 1-26는 연료전지 스템 시작품 3D Modeling이며 그림 1-27는 제작된 연료전지 시스템 2kW 시작품임. 고온의 Hot-Box 아래에 위치한 저온의 시스템 주변장치(Cold BOP) 부분에는 공기 블로워, 물펌프 등 반응물 공급 장치가 있음. 배가스에 다량으로 함유된 물을 회수하여 다시 개질 반응에 사용하기 위한 기액분리기 및 이온수지층전탑, 데이터 수집을 위한 각종 보드 등이 위치하고 있음.

3-3-2. 시스템 승온 시험

- Hot-Box, Cold BOP 연동시험을 통해 각 구성 기기의 이상 유무를 확인하고 개질 시험을 수행 하였음. 그림 1-28는 연료전지 시스템 제어 모니터와 각 위치에 대한 센서(온도, 압력)의 위치를 나타낸 그림임.
- 초기 기동 절차에 따라 버너를 통해 승온하였으며 그림 1-29은 시스템 성능시험 결과를 나타낸 그림임. 100분 이후 개질기는 600°C에 도달하며 80분 이후 개질기 내부로 물을 주입할 때 버너출구 온도가 낮아지나 개질기는 온도는 일정하게 유지하는 것을 볼 때 설계한 시스템은 개질기 운전에 문제가 없을 것으로 판단됨.

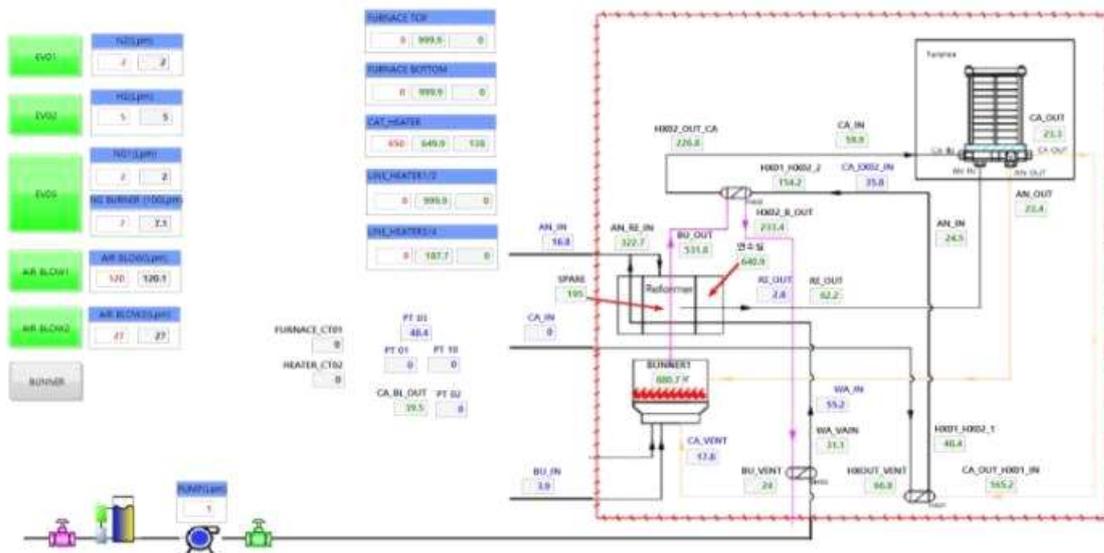


그림 1-28. 연료전지 시스템 제어 모니터 및 센서

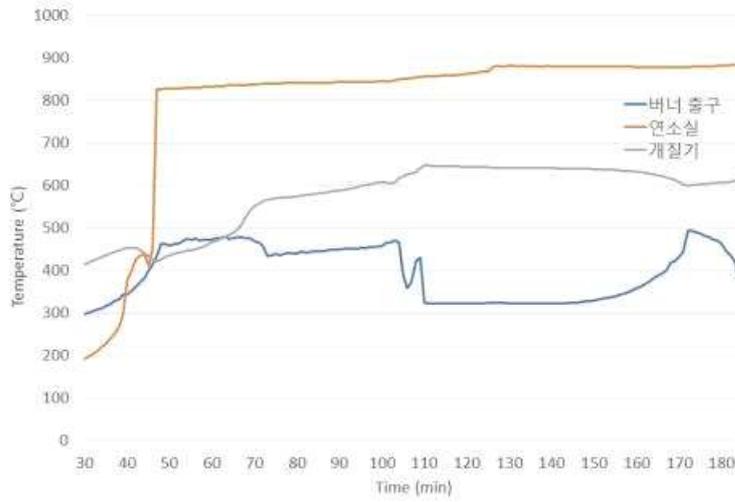


그림 1-29. 연료전지 시스템 성능시험 그래프

3-4. 4kW급 단위모듈형 연료전지 시스템

3-4-1. 4kW급 단위모듈형 연료전지 시스템 제작

- 2kW SOFC 시스템 개발에서 확보한 설계 및 제작, 제어 등 기술을 활용하여 4kW 연료전지 시스템을 설계하였으며, P&ID는 그림 1-30과 같음. 연료전지 시스템은 연료공급, HOT-BOX(개질기 및 연료전지), 배열회수 등 크게 3개의 파트로 구성되어 있음.
- 연료공급 파트는 Air, CH₄, N₂, H₂, Water에 대해 각 유량제어를 위한 MFC와 유량계측을 위한 MFM을 설치하였음. 연료전지 시스템의 주 연료인 CH₄는 스택으로 들어가기 전 가열된 물과 함께 스택의 Anode 출구배관에서 나오는 배열과 열교환을 거쳐 개질기로 들어가게 됨. 개질 후 생성된 수소 및 탄화계열의 가스는 연료전지 스택의 전기화학반응 연료로 사용되어짐.
- 개질기 및 연료전지 파트에서 개질기는 개질효율을 증가시킬 수 있도록 개질기 4개를 직렬 연결하여 개질내 온도편차를 최소화 할 수 있도록 구성하였음. 스택은 2kW급 2개를 병렬로 연결하여 총 4kW 시스템으로 구성함. 운전시 온도 안정성을 확보하기 위해 라인히터 5개가 있으며 공급되는 연료 및 공기 예열을 위한 열교환기 2개가 설치되어 있음.

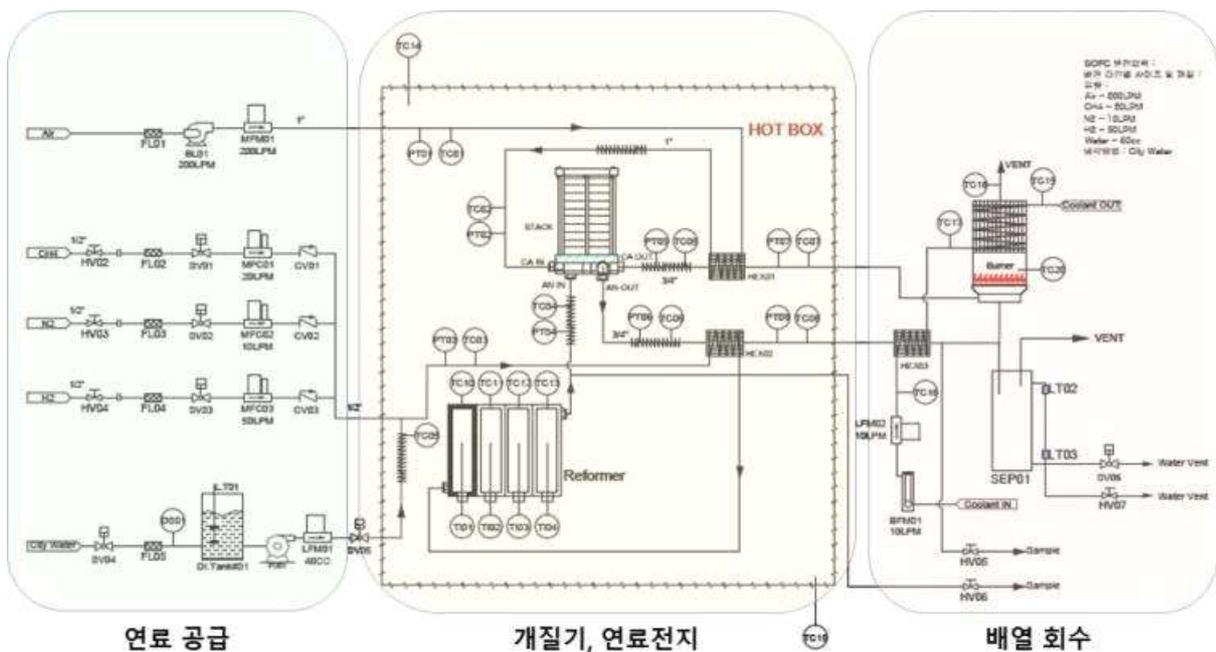


그림 1-30 4kW 탄소연료전지 시스템 P&ID

- 폐열회수 파트는 버너, Spiral type의 열교환기로 구성됨. 버너에 스택의 Anode 출구배관에서 배출된 미반응 연료(수소, 메탄 등)를 이용해 연소하여 얻는 열원과 Cathode 배관에서 배출되는 고온(750°C)의 공기를 온수를 승온하기 위한 열원으로 사용함.
- 설계된 P&ID를 바탕으로 시스템을 제작하였으며 전체 외형 3D Modeling은 그림 1-31에 나타내었음. 상부는 H-BOP, 하부는 E-BOP로 구성하였음. 스택은 H-BOP 내부 개질기 4개 및 연료 열교환기 2개와 함께 구성되며 그림 1-32와 같음.

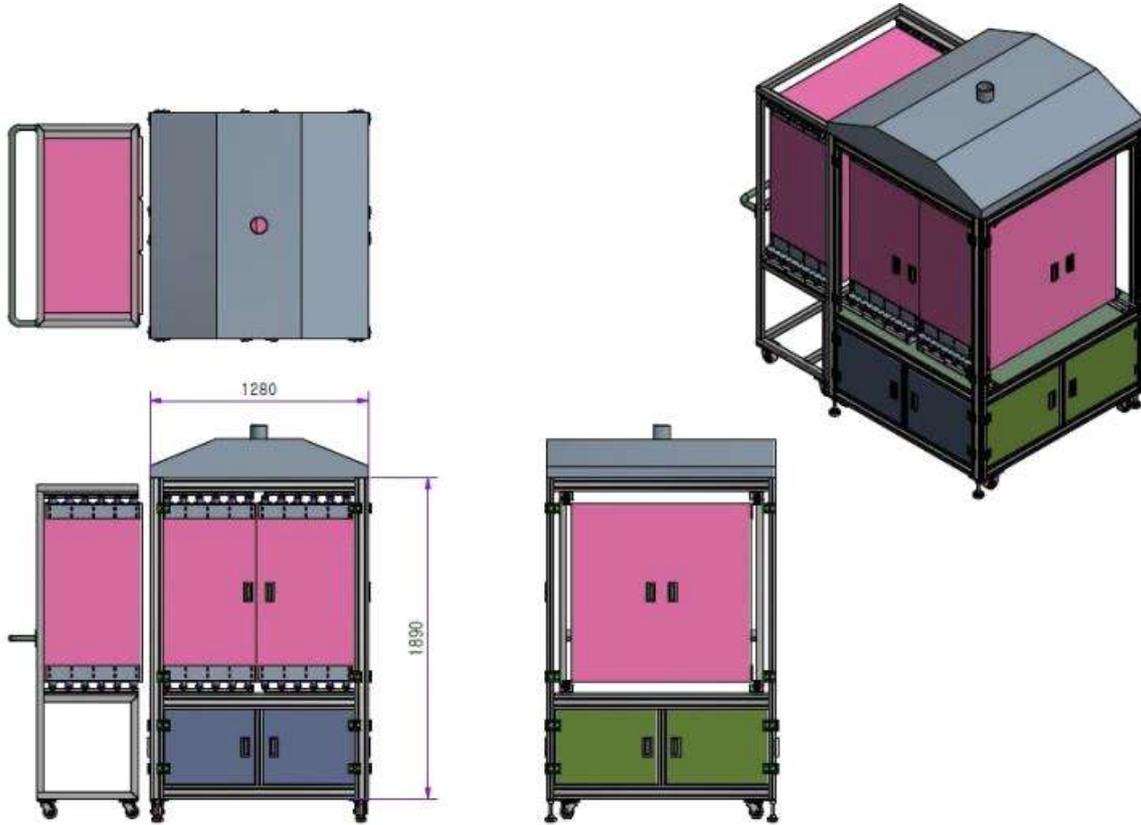


그림 1-31 시스템 전체 외형 3D Modeling

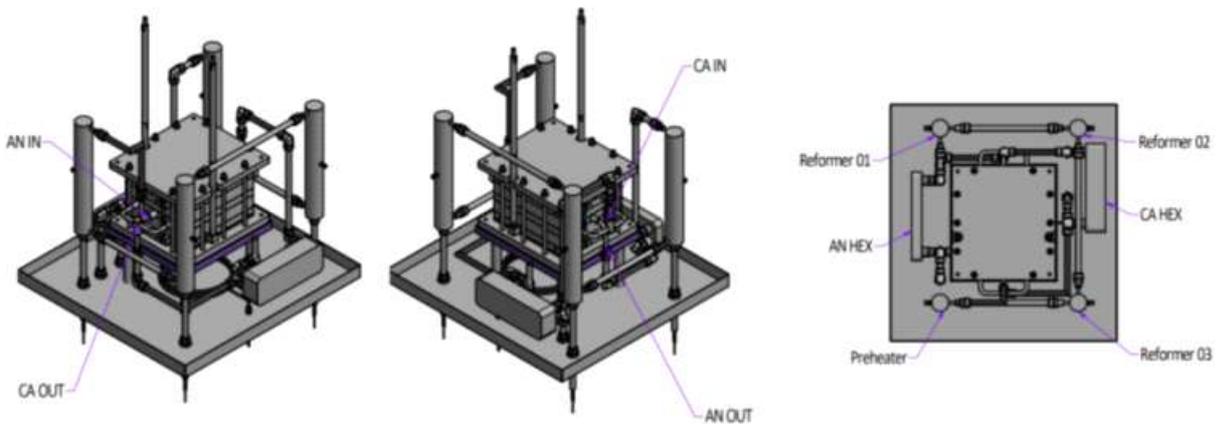


그림 1-32 H-BOP 내부 3D Modeling

- H-BOP 내부 스택 및 제작된 개질기, 열교환기는 그림 1-33과 같고, 전체 외형은 그림 1-34에 나타내었음.



그림 1-33 H-BOP 내부 스택 및 제작품



그림 1-34 4kW 탄소연료전지 시스템

- 배열회수를 위한 설비는 그림 1-35과 같으며, 연료전지 시스템 후단부 배열회수 보일러로 Anode 및 Cathode 배가스라인이 연결되어 있고 발열체를 이용하여 배가스의 연소가 진행되어 상단부 물 순환 배관을 통하여 열교환 후 온수를 생성하여 농가에 보급할 수 있는 시스템임.



그림 1-35. 탄소연료전지 농가보급용 배열회수시스템

- MFC, MFM 및 전자부하기, 전력변환을 위한 장비의 교정을 진행하였으며, 장비 목록은 표 1-11과 같으며 성적서는 그림 1-36과 같이 발급하였음.

표 1-11 장비 검교정 목록

	기기명	제작회사	교정일자
액체 질량유량계	Temperature Indicator	ICP CON	22.10.25
	액체용 터빈 유량계	AICHI TOKEI DENKI	22.10.31
가스 질량유량계	기체용 질량유량계	Bronkhorst	22.10.28
	기체용 질량유량계	Bronkhorst	22.11.03
Shunt 신호변환기	신호변환기	MIRAE E&I	22.10.06
	신호변환기	MIRAE E&I	22.10.06
	신호변환기	MIRAE E&I	22.10.06
	신호변환기	MIRAE E&I	22.10.06
전자부하기	DC Electronic Load	KIKUSUI	22.10.31
	DC Electronic Load	KIKUSUI	22.10.31
	DC Electronic Load	KIKUSUI	22.10.31
	DC Electronic Load	KIKUSUI	22.10.31



액체 질량유량계(2ea) 교정성적서

가스 질량유량계(2ea) 교정성적서



Shunt 신호변환기(4ea) 교정성적서



4kW 시스템 전자부하기(4ea) 교정성적서

그림 1-36 4kW 탄소연료전지 시스템 사용 장비 교정성적서

4. 4kW급 탄소연료전지 기반 열병합발전 시스템 운전

4-1. 4kW급 탄소연료전지 시스템 운전

- 사용된 닝보스택의 전처리 조건은 과정에 따라 상이하하며 총 H₂ 15LPM, N₂ 10LPM, Air 80LPM을 사용하며, 55시간에 걸쳐 700°C까지 승온하였으며, 그림 1-37과 같음.
- 승온 시 Furnace 상하부 및 Reformer 1~4, Stack 상부의 온도는 균일하게 승온이 되는 것을 확인하였으며, Stack의 하부 온도는 승온 초반 상대적으로 낮은 온도로 측정이 되었으나, 500도 구간부터는 다른 부분과 온도편차가 크게 나지 않으며 승온 완료 단계에서는 모든 위치의 온도가 균일한 것을 확인하였음.
- 각 출력에 따른 조건은 표 1-12와 같으며, Steam to Carbon ratio는 2로 균일하게 설정하였고 H-BOP 내 전기로의 온도는 720°C로 설정하였음.

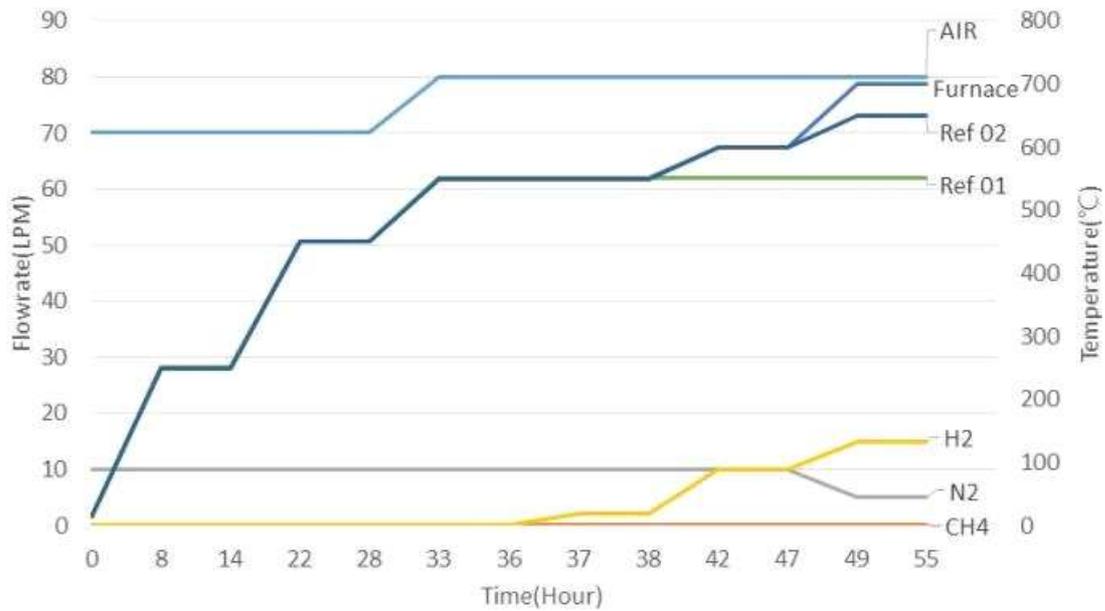


그림 1-37. 4kW급 시스템 승온 스케줄

표 1-12 4kW SOFC System 운전 조건

Item		Unit	2kW	4kW	5kW
Fuel consumption	CH4	LPM	3.7	7.5	9
	H2	LPM	-	-	-
	N2	LPM	-	-	-
	Air	LPM	100	100	100
	H2O	cc/min	7.4	15	21
	S/C	-	-	2	-
Temperature	Furnace	°C	-	720	-
	Reformer	°C	-	720	-

- 닝보스택을 이용하여 출력 2kW, 4kW, 5kW 에 대하여 각각 실험을 진행하였으며, 시스템 측정값 및 제어화면은 그림 1-38, 그림 1-39, 그림 1-40과 같음.

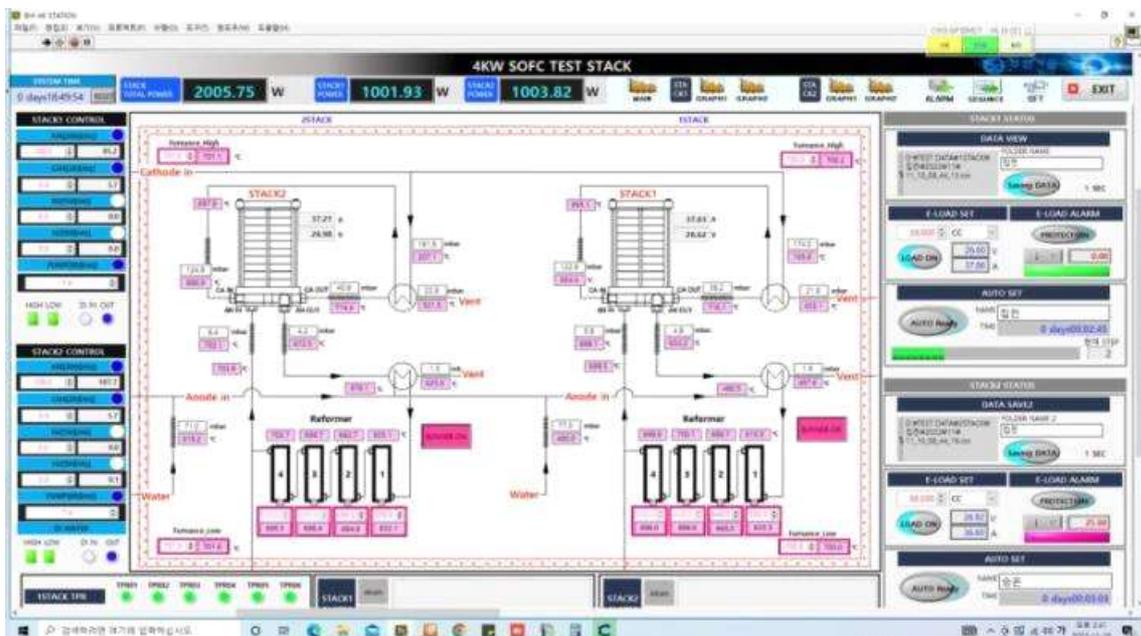


그림 1-38 탄소연료전지 시스템 출력 2kW 제어 화면

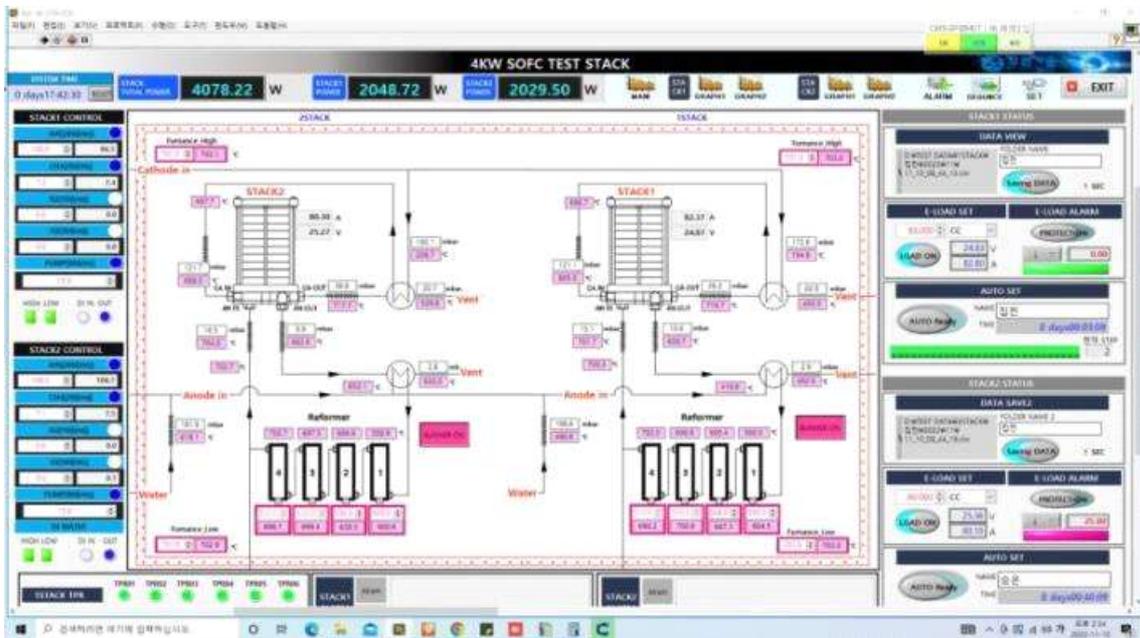


그림 1-39 탄소연료전지 시스템 출력 4kW 제어 화면

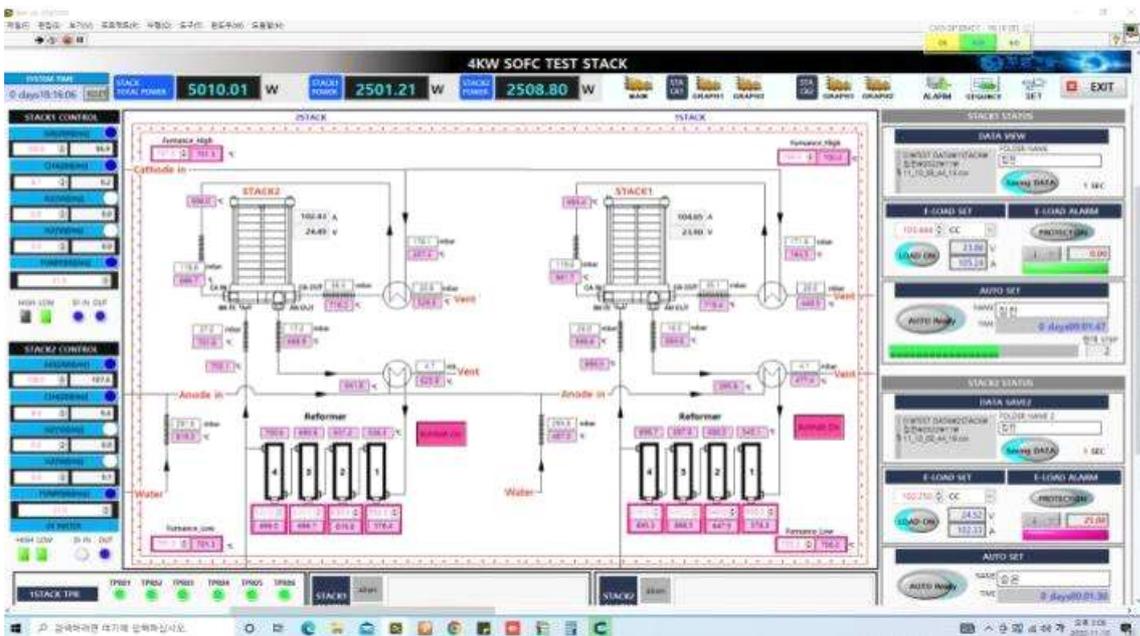


그림 1-40 탄소연료전지 시스템 출력 5kW 제어 화면

- 그림 1-41는 탄소연료전지 시스템의 운전데이터임. 스택 2개로 구성되어 있어 각 스택의 안정적인 운전이 가능한 조건에 맞게 연료량과 출력을 제어하고 있으며 전기집전이 시작되는 초기 기동에서 18,000 초까지는 스택#1의 출력보다 스택#2의 출력이 큰 것을 확인 할 수 있음. 18,000 초 이후는 스택#1의 출력도 스택#2와 비슷해 졌으며 최대 출력인 5kW에서 동일한 각 스택에서 2.5kW의 출력을 확인하여 시스템이 안정적으로 거동됨을 확인하였음.

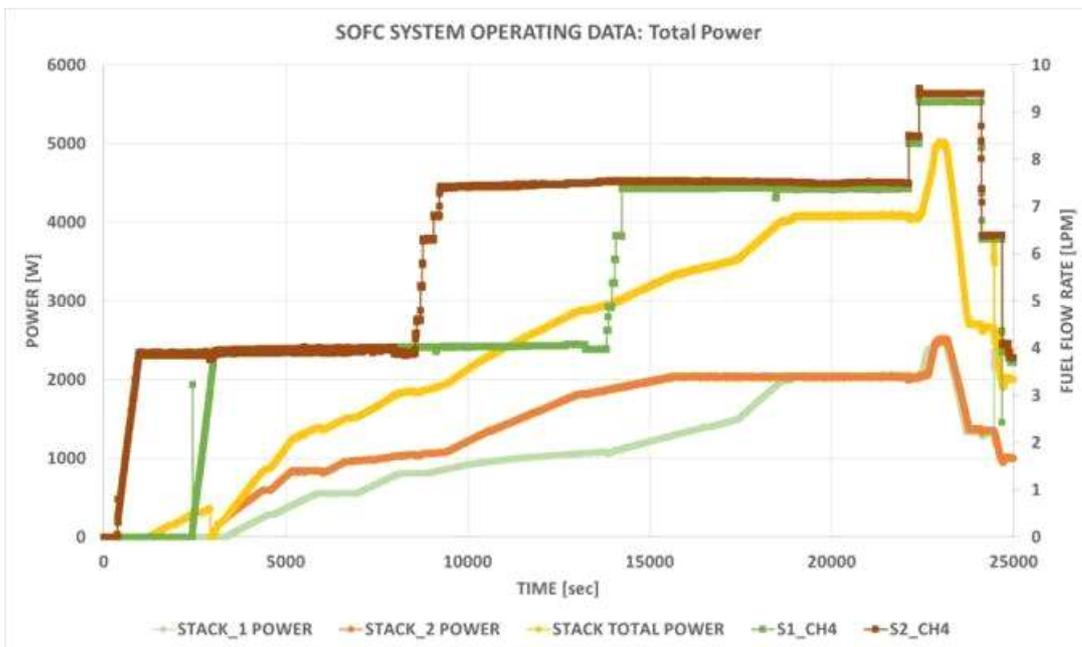


그림 1-41 탄소연료전지 시스템 운전 데이터: 스택별 전기 출력

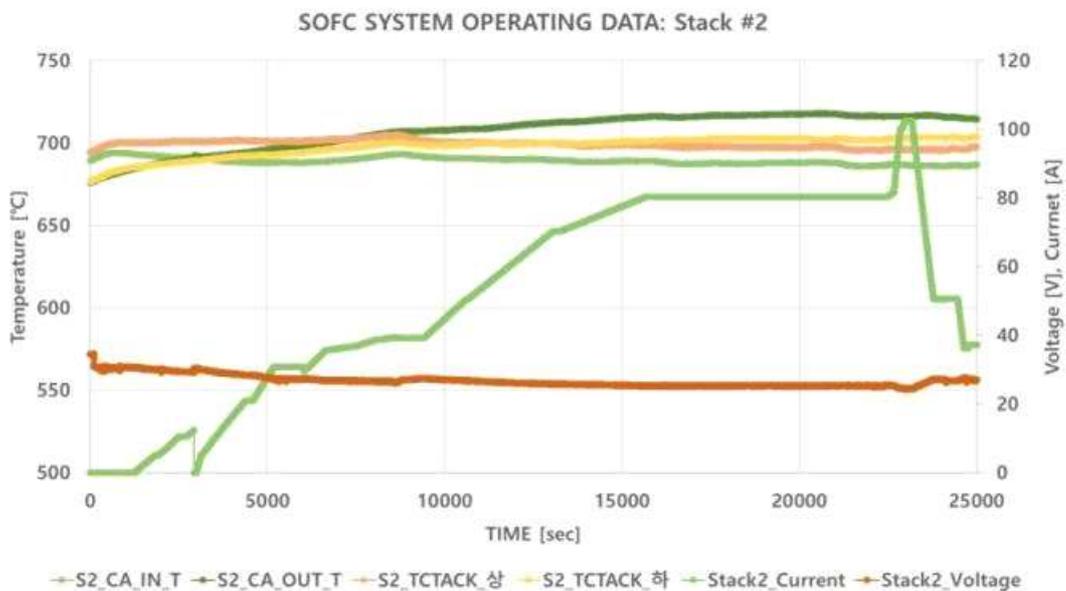
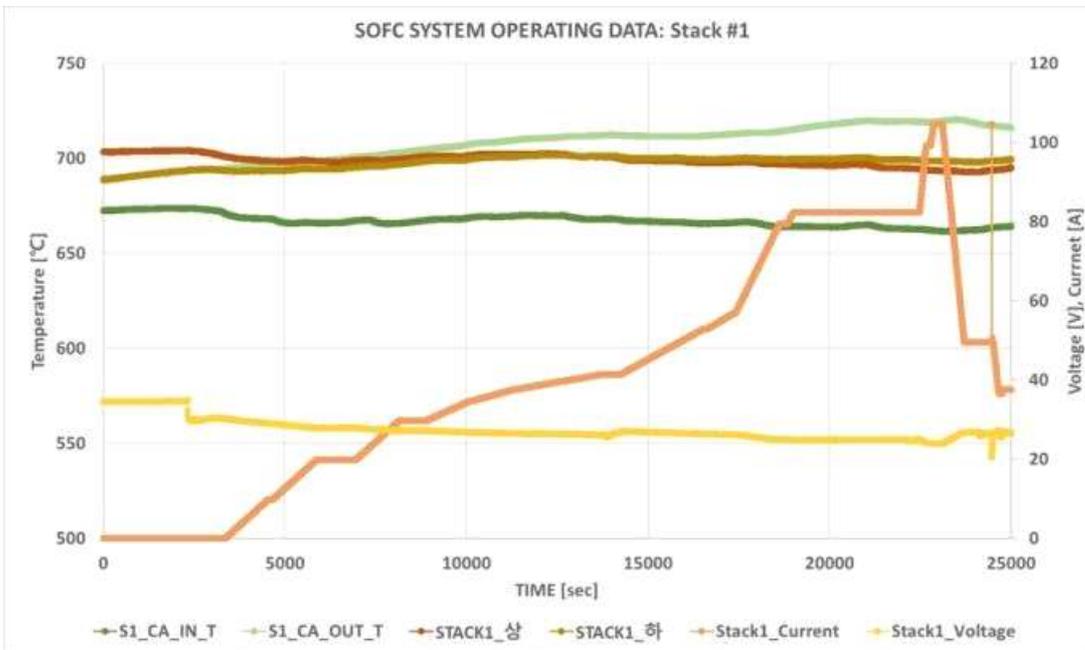


그림 1-42 탄소연료전지 시스템 운전 데이터: 스택별 I-V 성능 및 온도

- 각 스택모듈의 I-V Curve는 그림 1-42과 같음. 전기출력이 증가할 때 스택에 발생하는 전류가 증가하며 전압은 낮아지고 있음. 전기출력 증가에 따른 스택의 상하부 온도는 증가하나 Cathode의 Air에 의해 스택의 온도는 730°C 이하로 잘 제어 되고 있음.
- 탄소연료전지 시스템의 발전효율은 식 1-1으로 종합효율은 식 1-2로 계산하였으며, 시스템 출력에 따른 결과는 표 1-13과 같음. 발전효율은 출력 4kW에서 가장 높은 49.7%이며, 5kW(46.9%), 2kW(47.2%)로 순서로 확인하였음. 배열회수 열량은 시스템 출력 5kW에서 가장 높은 33.3% 으로 확인이 되었으며 이는 스택에서 출력증가를 위한 연료투입이 증가함에 따라 미반응 연료의 양도 함께 증가하였기 때문으로 판단됨. 종합효율이 가장 높은 시스템 출력은 4kW에서 82.3%로 확인됨.

$$\text{발전효율(\%)} = \frac{\text{발전량 (kW)}}{\text{인입합성가스 발열량 (kcal/h)}} \times 100 \quad \text{----- 식 (1-1)}$$

$$\text{종합효율(\%)} = \frac{\text{발전량 (kW)} + \text{열에너지활용량(kcal/h)}}{\text{인입합성가스 발열량 (kcal/h)}} \times 100 \quad \text{--- 식 (1-2)}$$

표 1-13 시스템 출력에 따른 필요 유량

시스템 출력	2kW		4kW		5kW	
	Stack 1	Stack 2	Stack 1	Stack 2	Stack 1	Stack 2
측정전력값(W)	1001.9	1003.8	2045.3	2032.6	2501.2	2508.8
CH4(LPM)	3.7	3.7	7.2	7.1	9.2	9.4
인입합성가스발열량(W)	2123.0	2123.0	4068.8	4131.4	5278.7	5393.5
스택별 발전효율(%)	47.2	47.3	50.3	49.2	47.4	46.5
발전효율(%)	47.2		49.7		46.9	
배열회수열량(W)	1329		2678		3553	
배열회수열량 효율(%)	31.3		32.6		33.3	
종합효율(%)	78.5		82.3		80.2	

- 단위모듈간 성능편차는 각 모듈간의 발전효율의 편차값을 계산하며 식 (1-3)과 같음. 각 출력에 따라 표 1-14와 같이 모든 출력에서 최대 2.2% 이내의 성능편차가 발생하는 것을 확인하였으며 이를 통해 탄소연료전지 시스템의 제어가 잘 작동하는 것으로 판단됨.

$$\text{성능편차(\%)} = \frac{|\text{모듈(1)성능(\%)} - \text{모듈(2)성능(\%)}|}{\text{모듈간평균성능(\%)}} \times 100 \quad \text{--- 식 (1-3)}$$

표 1-14 시스템 출력에 따른 단위모듈간 성능편차

	2kW		4kW		5kW	
	Stack 1	Stack 2	Stack 1	Stack 2	Stack 1	Stack 2
발전효율(%)	47.2	47.3	49.5	49.9	47.4	46.5
단위모듈간 성능편차(%)	0.2		2.2		1.8	

- 4kW 탄소연료전지 시스템의 발전효율 및 단위모듈간 성능편차의 공인시험 성적서는 그림 1-43에서 그림 1-46에 나타내었음.



시험결과

질서번호 : KIER-221020006
페이지(2) / (총8)

제품명: 4kW 연료전지 모사시스템	회사명: 비에이치아이
시험항목: 연료전지 모사시스템의 발전효율	
시험세부항목: 고온연료전지 (버저탈) 측정	
시험장비: KIKUSUI-PLZ1004W/KIKUSUI-PLZ2004WB	
<p>4kW 연료전지 모사시스템의 평가방법</p> <p>■ DC발전효율(%) : $\frac{Power_{DC}}{n_{CH_4} \cdot Q} \times 100$</p> <p>• 주입된 CH₄의 몰수(moles) : $PI = n_{CH_4} RT$</p> <p>P : 압력 (1 atm)</p> <p>V : CH₄ 가스부의 (주입유량 LPM)</p> <p>n : CH₄ 가스 몰수 (moles)</p> <p>R : 기체상수 (0.082057 Latm/molK)</p> <p>T : 온도 (MFC 보정온도 + 273.15 K)</p> <p>• 1 mol의 CH₄ 가스가 완전 산화될 때의 발열량 :</p> <p>$Q = n_{H_2O} \times \Delta H_f^{\circ}(H_2O) + n_{CO_2} \times \Delta H_f^{\circ}(CO_2) - (n_{CH_4} \times \Delta H_f^{\circ}(CH_4) + n_{O_2} \times \Delta H_f^{\circ}(O_2)) = -802.310 \text{ kJ/mol}$</p> <p>$\Delta H_f^{\circ}(H_2O) : -241.820 \text{ kJ/mol}$</p> <p>$\Delta H_f^{\circ}(CO_2) : -393.520 \text{ kJ/mol}$</p> <p>$\Delta H_f^{\circ}(O_2) : 0 \text{ kJ/mol}$</p> <p>$\Delta H_f^{\circ}(CH_4) : -74.850 \text{ kJ/mol}$</p> <p>Enthalpy of formation : 25 °C, 1 atm * JANAF, Thermochemical Tables</p> <p>■ 배열회수 효율(%) : $\frac{\text{몰의비열} \times \text{온수량(kg)} \times (\text{배수온도(°C)} - \text{입수온도(°C)})}{\text{입열량(kg) \times 발열량(kJ/kg)}} \times 100$</p> <p>몰의비열 : 4.186 kJ/kgK</p>	

- * 첨부 1. 4kW 연료전지 모사시스템의 시험결과 (표)
- * 첨부 2. 4kW 연료전지 모사시스템 (사진)
- * 첨부 3. 4kW 연료전지 모사시스템의 운전패널 (사진)
- * 첨부 4. 4kW 연료전지 모사시스템의 전파루하기 (사진)
- * 첨부 5. 4kW 연료전지 모사시스템의 공급가스 (사진)
- * 첨부 6. 4kW 연료전지 모사시스템의 MFC 교정성적서 (사진)
- * 첨부 7. 4kW 연료전지 모사시스템의 유량센서 및 온도센서 (사진)

그림 1-43 발전효율 및 종합효율 평가방법



시험결과

질서번호 : KIER-221020006
페이지(3) / (총8)

* 첨부 1. 4kW 연료전지 모사시스템의 시험결과 (표)

시험동명	시험결과	비고
스택발전효율 [%]	49.7	- 측정온도 : 702 °C - 발전량 : 4077.9 W stack module1 : 2045.3 W stack module2 : 2032.6 W - CH ₄ 유량 : 14.3 LPM - CH ₄ MFC 보정상수 : stack1 MFC : 21.9 °C stack1 MFC : 22.1 °C - 공기과 유량 : 205.4 LPM - 주입가스 CH ₄ 의 발열량 : 4135.2 W
배열회수 효율 [%]	32.6	- 입수온도 : 24.4 °C - 배수온도 : 41.0 °C - 열회수유량 : 2.3 LPM (0.039 kg/s) - 배열회수 열량 : 2678 W

그림 1-44 발전효율 및 종합효율 평가방법



시험결과

질서번호 : KIER-221020007
페이지(2) / (총8)

제품명: 4kW 연료전지 모사시스템	회사명: 비에이치아이
시험항목: 연료전지 모사시스템의 단위모듈간 성능편차	
시험세부항목: 고온연료전지 (버저탈) 측정	
시험장비: KIKUSUI-PLZ1004W/KIKUSUI-PLZ2004WB	
<p>4kW 연료전지 모사시스템의 평가방법</p> <p>■ 발전효율(%) : $\frac{Power_{DC}}{n_{CH_4} \cdot Q} \times 100$</p> <p>• 주입된 CH₄의 몰수(moles) : $PI = n_{CH_4} RT$</p> <p>P : 압력 (1 atm)</p> <p>V : CH₄ 가스부의 (주입유량 LPM)</p> <p>n : CH₄ 가스 몰수 (moles)</p> <p>R : 기체상수 (0.082057 Latm/molK)</p> <p>T : 온도 (MFC 보정온도 + 273.15 K)</p> <p>• 1 mol의 CH₄ 가스가 완전 산화될 때의 발열량 :</p> <p>$Q = n_{H_2O} \times \Delta H_f^{\circ}(H_2O) + n_{CO_2} \times \Delta H_f^{\circ}(CO_2) - (n_{CH_4} \times \Delta H_f^{\circ}(CH_4) + n_{O_2} \times \Delta H_f^{\circ}(O_2)) = -802.310 \text{ kJ/mol}$</p> <p>$\Delta H_f^{\circ}(H_2O) : -241.820 \text{ kJ/mol}$</p> <p>$\Delta H_f^{\circ}(CO_2) : -393.520 \text{ kJ/mol}$</p> <p>$\Delta H_f^{\circ}(O_2) : 0 \text{ kJ/mol}$</p> <p>$\Delta H_f^{\circ}(CH_4) : -74.850 \text{ kJ/mol}$</p> <p>Enthalpy of formation : 25 °C, 1 atm * JANAF, Thermochemical Tables</p> <p>■ 단위모듈간 성능편차 : $\frac{\text{스택모듈1 효율(%) - 스택모듈2 효율(%)}}{\text{평균 효율(%)}} \times 100$</p>	

- * 첨부 1. 4kW 연료전지 모사시스템의 단위모듈간 성능편차 (표)
- * 첨부 2. 4kW 연료전지 모사시스템 (사진)
- * 첨부 3. 4kW 연료전지 모사시스템의 운전패널 (사진)
- * 첨부 4. 4kW 연료전지 모사시스템의 전파루하기 (사진)
- * 첨부 5. 4kW 연료전지 모사시스템의 공급가스 (사진)
- * 첨부 6. 4kW 연료전지 모사시스템의 MFC 교정성적서 (사진)

그림 1-45 단위모듈간 성능편차 평가방법



시험결과

질서번호 : KIER-221020007
페이지(3) / (총8)

* 첨부 1. 4kW 연료전지 모사시스템의 단위모듈간 성능편차 성적서

시험동명	시험결과	비고
단위모듈간 성능편차 [%]	2.2	스택모듈1 - 측정 온도 : 703 °C - 스택 전압 : 24.8 V - 스택 전류 : 82.4 A - 스택 출력 : 2045.3 W - CH ₄ 유량 : 7.4 LPM - CH ₄ MFC 보정상수 : 21.9 °C - 공기과 유량 : 97.3 LPM - 주입가스 CH ₄ 의 발열량 : 4068.8 W - η_{DC} : 50.3 % 스택모듈2 - 측정 온도 : 703 °C - 스택 전압 : 25.3 V - 스택 전류 : 80.3 A - 스택 출력 : 2032.6 W - CH ₄ 유량 : 7.5 LPM - CH ₄ MFC 보정상수 : 22.1 °C - 공기과 유량 : 108.1 LPM - 주입가스 CH ₄ 의 발열량 : 4131.4 W - η_{DC} : 49.2 %

그림 1-46 단위모듈간 성능편차 성적서

- 연속 운전 및 발전/종합 효율 목표 달성을 위하여 단위모듈에 대한 실험을 진행하였으며, 운전을 위한 조건은 아래 표 1-15와 같음.

표 1-15 4kW SOFC System 운전 조건 및 결과

Item		Unit	Value
Fuel consumption	CH4	LPM	7.5
	H2	LPM	-
	N2	LPM	-
	Air	LPM	110
	H2O	cc/min	15.5
	S/C	-	2
Temperature	Furnace	°C	720
	Reformer	°C	720

- 1차 실험을 통하여 연료전지 스택의 이상현상을 확인하였으며 S/C Ratio의 적정값 미설정 및 H2O의 미공급으로 인한 탄소 코킹 현상이 주 원인으로 그림 1-47과 같이 연료인입부 배관 내 탄소의 증착현상으로 배관막힘 현상이 발생하였으며, 그림 1-48과 같이 연료 미공급 및 Stack의 전압 및 전력이 감소하였음.



그림 1-47 탄소 코킹현상으로 배관 막힘 현상 발생

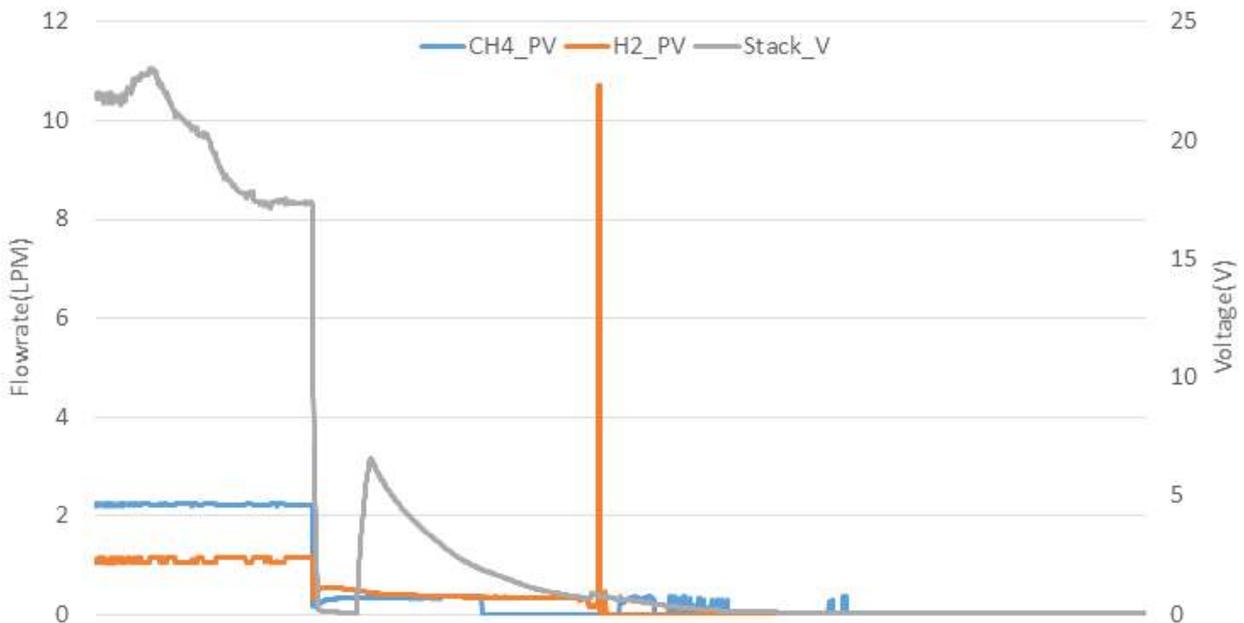


그림 1-48 탄소 코킹현상으로 인한 연료량 및 전압값 저하

- 탄소 코킹 발생된 배관을 수정 후 재가동을 진행하였을 경우 그림 1-49와 같이 스택의 OCV값이 기존 36.0V에서 19.4V로 현저히 감소한 것을 확인하였고 스택의 교체 필요성을 확인함.

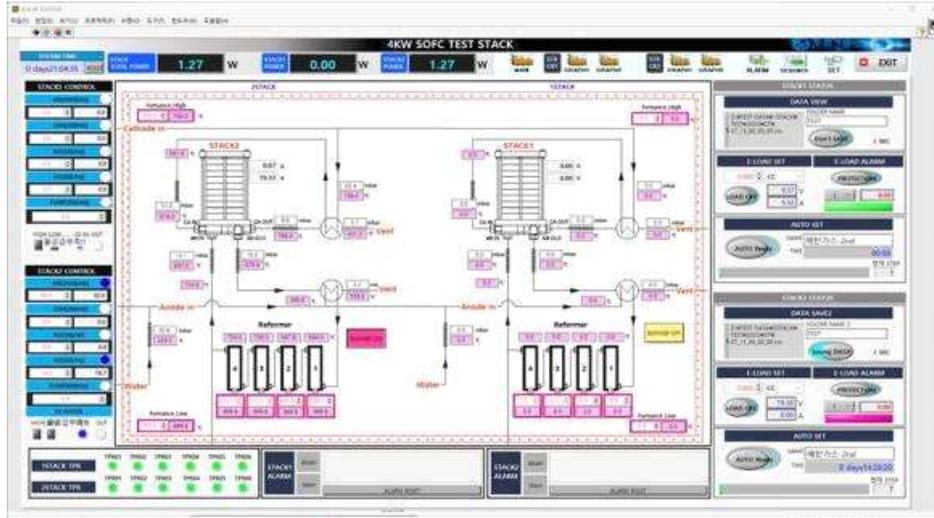


그림 1-49 탄소 코킹현상 발생 Stack 출력 화면

- 해당 문제를 해결을 위하여 스택 교체와 함께 적절한 물공급 위한 물펌프 배관의 직경의 확관 및 개질기 수정 작업을 통하여 2차 실험을 진행하였음. 그림 1-50과 같이 IV Curve를 통한 OCV 35.6V를 확인하였고 전류 92A 인가할 경우 24.4V 및 2.23kW의 출력 성능을 확인함.

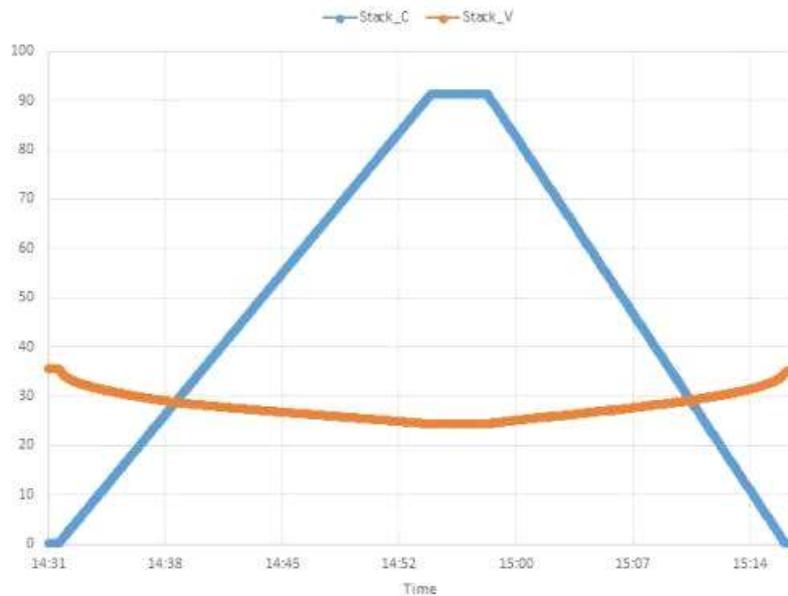


그림 1-50 연료전지 시스템 스택 최대 출력에 대한 IV Curve

- Stack 운전 시 물공급 및 메탄/물 공급 중지에 따른 Voltage 변화를 측정하였으며, 748시간 운전에 따른 장기운전 Test를 진행하여 연료전지 단일 시스템에 대한 운전 성능을 확인하였음.
- 결과 값은 아래 표 1-16로 발전효율 55.0%, 종합효율 92.4%, 내부 장기 운전 748시간 달성하였음. SOFC System 발전/종합 효율에 대한 공인시험 성적서는 그림 1-51 및 그림 1-52와 같으며, 장기운전에 대한 성적서는 그림 1-53 및 그림 1-54에 나타내었음.

표 1-16 4kW SOFC System 운전 조건 및 결과

Item	Unit	Value
측정전력값	W	2263.6
인입합성가스발열량	W	4415.5
발전효율	%	55.0
배열회수열량	W	1540
배열회수열량 효율	%	37.4
종합효율	%	92.4
장기운전 시간	Hr	748

(별표 제4호 가-02)



시험결과

성적서 번호 : KIER-230530006
페이지(2) / (총10)

제품명: 2kW 연료전지 모사시스템	회사명: 비에이치아이
시험항목: 연료전지 모사시스템의 발전효율	
시험세부항목: 고온연료전지 (비치형) 측정	
시험장비 : KIKUSUI-PLZ1004W/KIKUSUI-PLZ2004WB	
<p>2kW 연료전지 모사시스템의 평가방법</p> <ul style="list-style-type: none"> DC발전효율(%) : $\frac{Power_{DC}}{n_{CH_4} \times Q} \times 100$ 구입된 CH₄의 몰수(mol/s) : $PF = n_{CH_4} RT$ P : 압력 (1 atm) V : CH₄ 가스부피 (주입유량 LPM) n : CH₄ 가스 몰수 (mol/s) 표 : 기체상수 (0.082057 Latm/molK) T : 온도 (MFC 보정온도 + 273.15 K) 1 mol의 CH₄ 가스가 완전 산화될 때의 발열량 : $Q = n_{H_2O} \times \Delta H_f^0(H_2O) + n_{CO_2} \times \Delta H_f^0(CO_2) - (n_{CH_4} \times \Delta H_f^0(CH_4) + n_{O_2} \times \Delta H_f^0(O_2)) = -802.319 \text{ kJ/mol}$ $\Delta H_f^0(H_2O) : -241.820 \text{ kJ/mol}$ $\Delta H_f^0(CO_2) : -393.520 \text{ kJ/mol}$ $\Delta H_f^0(O_2) : 0 \text{ kJ/mol}$ $\Delta H_f^0(CH_4) : -74.850 \text{ kJ/mol}$ Enthalpy of formation : 25 °C, 1 atm * JANAF, Thermochemical Tables 배열회수 효율(%) : $\frac{\text{몰의비열} \times \text{온수양}(Q_p) + (\text{온수온도}(T) - \text{입수온도}(T))}{\text{인입합성가스발열량}(Q_{in})} \times 100$ 몰의비열 : 4.186 kJ/kg·K 일련합발전 종합효율 : 연료전지 발전효율 + 배열회수 효율	

그림 1-51 발전효율 및 종합효율 평가방법

(별표 제4호 가-02)



시험결과

성적서 번호 : KIER-230530006
페이지(4) / (총10)

※ 일부 1. 2kW 연료전지 모사시스템의 시험결과 (표)

시험항목	시험결과	비고
스태발전효율 [%]	55.0	- 측정온도 : 720 °C - 발전량 : 2263.6 W - CH ₄ 유량 : 14.3 LPM - CH ₄ MFC 보정상수 : 20 °C
배열회수 효율 [%]	37.4	- 풍기류 유량 : 111.7 LPM - 구입가스 CH ₄ 의 발열량 : 4415.5 W
일련합발전 종합효율 [%]	92.4	* 시험결과 값: 23/06/08 13:53 ~ 23/06/08 15:28 동안에서의 평균값으로 산정함.

그림 1-52 발전효율 및 종합효율 성적서

(별표 제4호 가-02)



시험결과

성적서 번호 : KIER-230828001
페이지(2) / (총10)

제품명: 연료전지 모사시스템	회사명: 비에이치아이
시험항목: 연료전지 모사시스템의 연속운전	
시험세부항목: 고온연료전지 (비치형) 측정 및 누기 연속운전	
시험장비 : KIKUSUI-PLZ1004W / KIKUSUI-PLZ2004WB	
<p>연료전지 모사시스템의 평가방법</p> <ul style="list-style-type: none"> 시험 온도 : 700 °C 연료극 가스 : H₂, CH₄ 풍기류 가스 : dry air 누기 연속운전 : Electric load를 이용하여 일정한 전류 (20 ~ 40 A)를 유지하여 연료전지 모사시스템의 누기 운전 시간을 계산함. 	

- ※ 일부 1. 연료전지 모사시스템의 누기 연속운전 시험결과 (표)
- ※ 일부 2. 연료전지 모사시스템의 누기 연속운전 시험방법 (표)
- ※ 일부 3. 연료전지 모사시스템의 누기 연속운전 시험결과 (그래프)
- ※ 일부 4. 연료전지 모사시스템 (사진)
- ※ 일부 5. 연료전지 모사시스템의 운전패널 (사진)
- ※ 일부 6. 연료전지 모사시스템의 전자부하기 (사진)
- ※ 일부 7. 연료전지 모사시스템의 공급가스 (사진)
- ※ 일부 8. 연료전지 모사시스템의 H₂, CH₄ MFC (사진)

그림 1-53 장기운전 평가방법

(별표 제4호 가-02)



시험결과

성적서 번호 : KIER-230828001
페이지(3) / (총10)

※ 일부 1. 연료전지 모사시스템의 누기 연속운전 시험결과 (표)

시험항목	시험결과	비고
연속운전 시간 [h]	781	- 측정온도 : 700 °C - H ₂ 유량 : 0 ~ 16 LPM - CH ₄ 유량 : 0 ~ 3.7 LPM - air 유량 : 100 LPM - 인가전류 : 20 ~ 40 A

- 이하어제 -

그림 1-54 장기운전 성적서

5. 스마트팜 실증단지 탄소연료전지 열병합발전 시스템 구축 및 운전

5-1. 실증단지 열병합발전 시스템 구축

- 과제 주요 항목인 실증을 통한 data 확보 및 인증을 위하여 경남 밀양스마트팜 혁신밸리 부지에 입주하여 스마트팜용 탄소연료전지 기반 열병합발전 시스템 구축을 진행하였음.
- 오프가스 버너 및 흡착식 냉난방기를 포함한 농산부산물 반탄화 연료 가스화 시스템(Torrefied Fuel Gasification system)과 SOFC(Solid Oxide Fuel Cell) 연료전지시스템을 이용하여 밀양스마트팜 혁신밸리 시설과의 연계성을 위해 전기용량 증설 및 배관 시설 구축 필요성을 확인하고 전력량 설계, 전기 공사 진행 및 연료공급을 위한 배관 설계 및 배관 공사를 진행하였음.
- 해당 부지의 추가노지 사용을 위해 밀양시 인허가를 통한 외부 노지 장비 배치를 진행하였음.
- 실증단지 내 장비 배치안은 그림 1-55와 같으며, 온실 내부 냉난방시설 및 간이온실 2동을 배치하고 외부노지에는 연료전지, 가스화, 오프가스버너, 가스보관실 및 제어실을 배치하였음.

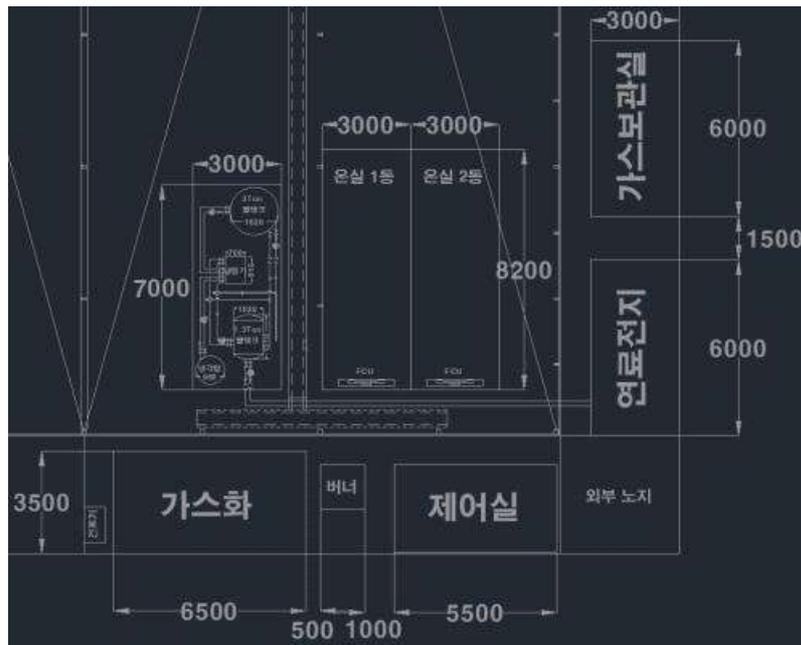
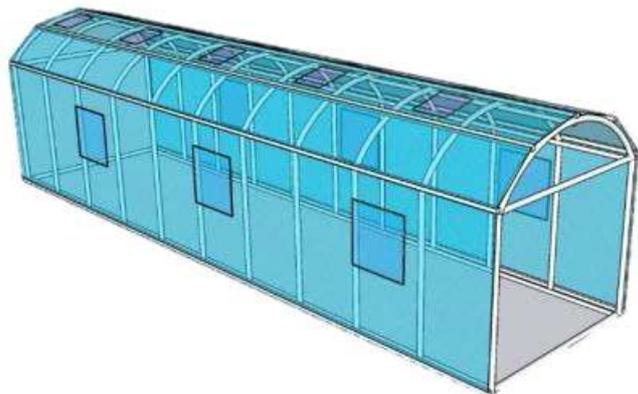


그림 1-55 스마트팜 혁신밸리 장비 배치안

- 혁신밸리 온실 내부 미니온실을 2동을 제작하였으며, 연료전지 연계용 생육환경 측정을 위한 미니온실과 등유난방을 통한 환경평가 미니온실 각 1동을 구축하여 경제성 평가를 진행할 수 있도록 하였으며, 해당 미니온실의 건축 형상 및 건축 현장은 사진 1-56과 사진 1-57과 같음.



8평형 온실 골조 형태



8평형 온실 전체 형상

그림 1-56 스마트팜 혁신밸리 온실 내부 미니온실 구축 모델링 형상



그림 1-57 스마트팜 혁신밸리 미니온실 구축 현장

- 도면과 같이 현장 구축을 통하여 실증단지 외부 노지에 그림 1-58과 같이 연료전지 시스템을 구축하였으며, 연료전지 시스템은 모듈형태로 구성하고 이송/설치가 편리하도록 컨테이너에 시스템을 배치하였음. 연료전지 시스템 및 가스화 시스템의 승온, 정지, 비상운전에 필요한 가스 공급(Air, N2, O2, H2, CH4, LPG 등)을 위하여 사진 1-59과 같이 가스보관실을 구축 하였음.



그림 1-58 스마트팜 혁신밸리 연료전지 시스템 구축 현장



그림 1-59 스마트팜 혁신밸리 가스보관실 구축 현장

- 밀양스마트팜 혁신밸리 부지 내 그림 1-60과 같이 현장 구축을 진행하였으며, 연료전지 시스템 좌측으로 제어실 및 가스화시스템을 배치하였음.
- 밀양 스마트팜 혁신밸리 내부 작물 생육 환경 조성을 위한 전경은 그림 1-61과 같으며, 거터 가장자리 끝부분에 미니온실을 구축하여 실증 현장 조성을 진행하였음.



그림 1-60 스마트팜 혁신밸리 외부 노지 장비 구축 현장



그림 1-61 스마트팜 혁신밸리 내부 전경

5-2. 스마트팜용 탄소연료전지 기반 열병합발전 시스템 운전

- 스마트팜용 탄소연료전지 기반 열병합발전 시스템의 성능 평가의 일환으로 실증단지 내에서의 시스템에 대한 연속운전일수 평가를 진행하고 결과를 확인하였음.
- 평가 방법은 반탄화, 가스화 시스템을 통해 생산된 합성가스를 연료전지 시스템과 오프가스 버너를 통해 열병합발전하여 스마트팜에 전기 및 냉난방을 공급하고 제품의 30일 이상 장기실증 검증을 진행하여 연속운전일수를 확인하였음.
- 운전 시간은 약 776시간으로 그림 1-62와 같이 운전시간에 따른 전압, 전류, 출력에 대한 변화 그래프를 통하여 장기 운전 성능을 확인하고, 그림 1-63 및 그림 1-64과 같이 실증운전에 대한 장기성능시험 성적서를 발행하였음.



그림 1-62 장기운전에 따른 전압, 전류, 출력 변화 그래프

BEYOND ASIAN HUB. TOWARD GLOBAL WORLD



TEST REPORT

우 13810 경기도 과천시 교육원로 96(중앙동) TEL (02)2164-0011 FAX (02)2634-1008

성적서번호 : TBK-2023-010790 접수 일자 : 2023년 12월 05일
 대표 자 : 우종안, 조원래 시험완료일자 : 2023년 12월 29일
 업체 명 : 비에이치아이(주)
 주 소 : 경남 함안군 군북면 장백로 122

시 료 명 : 스마트팜용 탄소연료전지 열병합발전 시스템

시험결과				
시험항목	단위	시료구분	결과치	시험방법
연속운전일수	-	-	보고서 참조	보고서 참조

- 용 도 : 재출용

비 고 : 1. 이 성적서는 의뢰자가 제시한 시료 및 시료명으로 시험한 결과로써 전체 제품에 대한 품질을 보증하지 않으며, 성적서의 진위확인용 홈페이지(www.ktr.or.kr) 또는 QR code로 확인 가능합니다.
 2. 이 성적서는 홍보, 선전, 광고 및 소송용 등으로 사용할 수 없으며, 용도 이외의 사용을 금합니다.
 3. 이 성적서는 원본(재발행 포함)만 유효하며, 사본 및 전자 인쇄본/파일본은 결과치 참고용입니다.

Yun Youngjun
 작성자 : 윤영준
 Tel : 02-2092-3791

Han Sang-woon
 기술책임자 : 한상원
 Tel : 1577-0891(ARS ①-④)

2023년 12월 29일

KTR 한국화학융합시험연구원장



위변조 확인용 QR code

Page : 1 of 1

전자문서본은 시험결과에 대한 참고용입니다.

전자문서본(Electronic Copy)

그림 1-63 실증단지 장기운전 시험 성적서

시험 정보 요약

[Summary]

시험번호 : TBK-2023-010790

[Test number]

시험제목 : 스마트팜용 탄소연료전지 열병합발전 시스템 평가

[Test title]

시험기간 : 2023. 11. 20. ~ 2023. 12. 22.

[Test Period]

시료명 : 스마트팜용 탄소연료전지 열병합발전 시스템

[Sample Name]

시험의뢰자 [Client]

명 칭 : 비에이치아이(주)
소재지 : 경남 함안군 군북면 장백로 122
의뢰인 : 김민규
연락처 : Tel. 055-580-6376

시험기관 [Test facility]

명 칭 : 한국화학융합시험연구원
소재지 : (13810) 경기도 과천시 교육원로 98
시험자 : 윤영준
연락처 : Tel. 02-2092-3791, Fax. 02-2635-6108
기술책임자 : 한상원
연락처 : Tel. 02-2092-3804, Fax. 02-2635-6108

본 결과를 신청인으로부터 제공받은 시료에 대한 보고서로 제출합니다.

4.1.4 결과 산출

※ 연속운전일수 : 시스템 시작 및 종료 시점의 총 시간으로 확인

표.3 연속운전일수 산출 인자

시작 시점	종료 시점	결과
23년 11월 20일 오후 15시	23년 12월 22일 오후 12시	32.3일 (776 시간)

5. 고찰 및 결론

표.4 평가결과 정리

전체지름	단위	결과
연속운전일수	일	32.3 (776 시간)

본 평가는 입회하에 진행되었으며, 보고서는 그 결과를 토대로 작성된 것입니다.

6. 참고 문헌

1) 의뢰자 제공 시험 방법

이 보고서는 한국화학융합시험연구원의 용역시험 결과입니다. 이 기술 내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 한국화학융합시험연구원의 용역시험 결과임을 밝혀야 합니다.

저작권자(c)한국화학융합시험연구원. 무단전제-재배포금지

II. 공동연구기관 (고등기술연구원)

1. 농산부산물을 이용한 반탄화 기초 설계

- 농산부산물과 같은 바이오매스는 낮은 밀도와 발열량, 높은 함수율, 파쇄 및 분쇄의 어려움이 있으며, 다양한 종류와 성장환경으로 함량의 불균일성, 수분 재흡수성 등의 바이오매스 자체의 특징과 ash 성분으로 인해 연소 시 발생하는 Slagging, Fouling, Agglomeration, Corrosion 등의 문제가 발생함.
- 아울러 열분해 및 가스화 적용 시 타르 발생으로 인한 운전 문제 등으로 다른 고체연료에 비해서 적용에 어려움이 있어 안정적인 사용을 위해서는 전처리 과정이 필요함.
- 반탄화 기술은 상기 문제를 해결하기 위해 바이오매스를 저온 무산소 조건에서 탄화반응을 통해 농산부산물 기반 가스화 연료의 균질성을 높여 생산되는 합성가스의 조성을 일정하게 유지하고 타르 발생을 최소화하는 최적의 전처리 기술임.

1-1. 농산부산물 기반 반탄화 이론 설계인자 도출

- 반탄화 반응공정은 원료 투입공정, 반탄화 공정, 열원공급 공정, 반탄화물 배출 및 냉각 공정, 폐열 회수용 열교환 공정, 가스 후처리 공정으로 구분됨.
- 중요요소는 반탄화 반응기 설계와 열원공급 방법으로 반탄화 반응기 크기 결정에 필요한 원료 처리량, 원료 밀도, 체류시간, 회전속도, 반응기의 원료 체적비율(충진율), 반응기의 길이와 직경, 반탄화 운전온도와 열원공급 방법 등의 변수를 고려하여 설계인자를 도출하였음.

표 2-1 반탄화 반응기 설계인자 항목

항목	
반탄화 반응기 설계인자	처리용량
	시료공급 방법
	밀도
	체류시간
	회전속도
	원료 체적비율
	반탄화 반응온도
	열원공급방식
	열원

- 반탄화 반응기 크기 설계를 위해 농산부산물 처리량을 결정해야하며, 처리량 계산을 위해 SOFC 필요 합성가스량을 기반으로 반탄화 수율 50%(350 °C 운전 기준) 가정 하에 역산하여 0.5 톤/일의 용량을 선정하였음.
- 처리용량 기준 농산부산물의 펠릿연료의 밀도를 국내 바이오매스 펠릿연료 평균밀도인 0.5 kg/L으로 가정하고, 반탄화 반응기 원료 체적비율 15%로 부피를 280 L로 도출함.
- 반탄화 운전온도와 체류시간은 상용 조건인 250~350 °C와 60 min으로 선정하였고, 향후 Lab scale 실험을 통해 농산부산물의 최적 반응온도와 시간을 도출할 예정임.
- 통상의 로타리 킬른 반응기는 1~5 rpm의 회전속도로 운전하고 체류시간에 따라 회전속도를 조절하여 운전하나, 본 반응기 설계에서는 회전속도를 1~2 rpm으로 선정함.
- 원료 공급방법으로 연속식 운전을 선택하였고, 회분식 형태는 동일 처리용량에서 반응기 용량이 커지고 가온과 냉각을 반복해야 하므로 에너지 소비가 큰 단점이 있음.
- 열원 공급은 열효율이 높은 직접가열 대신, 환원 분위기 유지 필요로 간접가열 방식 선택.
- 열원으로 공정 후단의 SOFC 폐열과 외부열원 2가지 방안을 고려하여 설계를 진행하였으며, SOFC 폐열의 온도가 낮아 600 °C 기준으로 설계인자를 도출함.

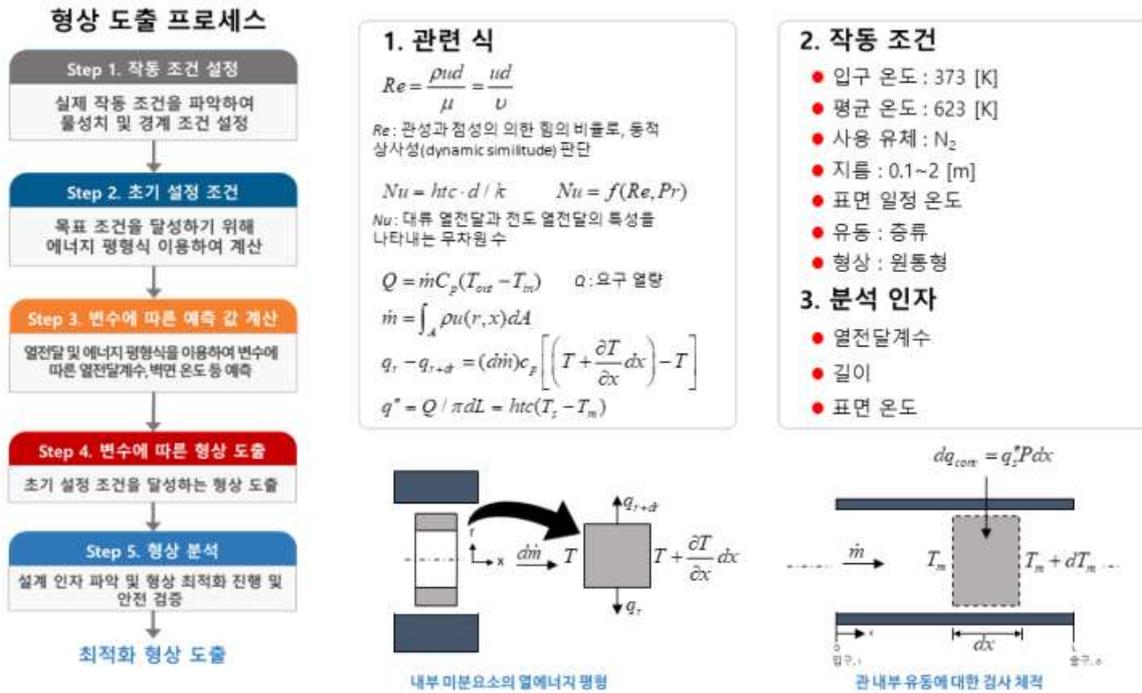
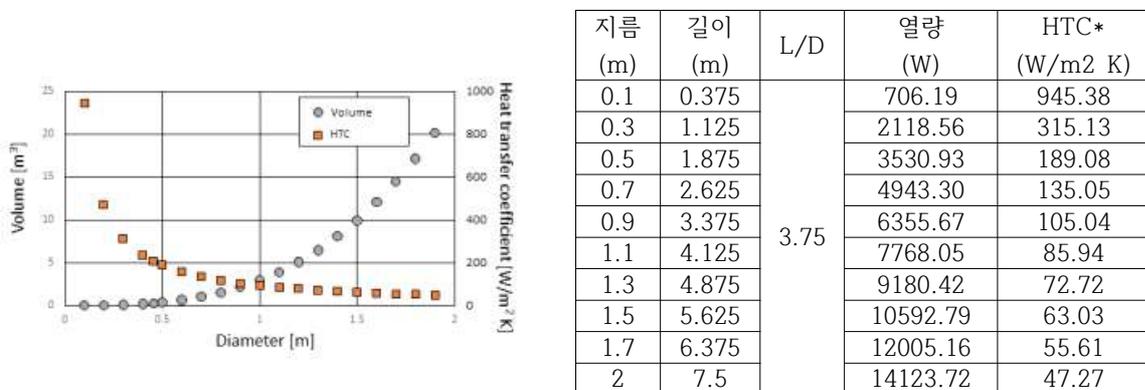


그림 2-1. 이론적 반응기 L/D 형상 도출방법

- 상용 조건에서 시료 보관 호퍼 및 공급장치의 환원 분위기를 위해 반응기 내부는 질소 공급 이후 미량의 유체 흐름이 존재하여 난류가 아닌 층류로 가정함.
- 실제 운전조건 및 경계 조건을 고려하여 반탄화 반응기 L/D 값 도출을 위해 반응기 초입 온도는 100 °C, 외부 열원 온도는 600 °C로 일정하다고 가정하였으며, 반응기 내부 온도는 최대 운전조건인 350 °C로 설정하여 그림 1-1과 같이 L/D 값을 도출하였음.



*Heat Transfer Coefficient

그림 2-2. 열전달 및 에너지 평형식 적용 반탄화 반응기 L/D 및 열전달 계수 도출 결과

- 지름(0.1~2 m)에 따른 열량, 열전달계수, 반응기 길이 변수 결과는 그림 2-2에 나타내었음.
- 반응기 내부 온도 달성을 위해 각 지름에 따른 요구 열량의 범위는 약 0.7~14.1 kW로 계산되었고, 층류이므로 지름이 작은 반응기의 경우 비교적 높은 유속으로 인해 열전달 계수가 높게 나타났고, 지름 증가 시 유량이 감소함에 따라 열전달 계수가 낮은 경향을 나타내었음.
- 각 지름에 따라 유동과 온도가 안정화되는 거리를 고려한 결과, 최적 반탄화 반응기 L/D는 3.75로 도출되며, 반응기 부피인 280 L를 적용하면 지름 0.456 m, 길이 1.712 m의 반응기 설계 인자를 도출함.



그림 2-3. 로타리 킬른 반응기 내부 사진

- 로타리 킬른 반응기 내부에는 농산부산물의 유입, 혼합, 이송이 가능하도록 그림 2-3과 같이 screw와 vane이 존재함.
- 반응기 내부의 screw 간격 및 개수 결정 방법은 식(1)을 통해 계산되며, 체류시간 60 min과 회전속도 1 rpm 조건에서 상기에서 도출한 킬른 길이(L)를 적용하면 screw 간격은 28.5 mm, 킬른 내 screw의 개수는 60개로 설계인자가 도출됨.

$$RT(\text{체류시간}) = \frac{L(\text{킬른길이})}{(P(\text{screw 간격}) \times R(\text{회전속도}))}$$

1-2. 농산부산물 기반 반탄화 실험을 통한 설계인자 도출

- 농산부산물 기반 Lab scale 반탄화 실험을 통해 최적 반탄화 운전조건을 도출하였으며, 이를 이론 설계인자와 비교하여 보완하였음.
- Lab scale 반탄화 반응기는 그림 2-4와 같이 회분식 반응기 형태로 농산부산물의 반탄화 운전조건 별 탄화물 특성을 파악하고 운전인자를 도출하기 위한 실험을 진행함.
- 반응기는 반탄화 반응기, 전기히터, 냉각 시스템과 제어시스템으로 구성되며, $\pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ 이내로 조절 가능하고, 온도, 압력, 교반속도, 소비전력 저장 및 모니터링이 가능함.



그림 2-4. Lab scale 반탄화 반응기

- 반응기는 체적이 3 L로 설계 사양 및 세부 규격은 표 2-2에 나타내었음. 농산부산물을 적용한 반탄화 실험은 대구대학교에서 진행하고, 고등기술연구원에서는 원료조달이 원활한 국내 미활용 바이오매스 펠릿을 활용하였음.
- 미활용 바이오매스 펠릿은 과수원의 과실전지 부산물과 임목부산물을 활용하여 생산되는 펠릿으로 실제 실증 시 사용을 고려하여 설계인자 도출 실험을 진행하였음.

표 2-2 Lab scale 반탄화 반응기 사양 및 세부 규격

반응기 파트	사양 및 세부규격
Reactor	Capacity : 3 L Design Pressure : 110 bar (50~80 bar) Materials : STS316L Seal: Metal Graphite Gasket Operating Temperature : 100~600 °C
Heater	Electric heater : 2.5 kW Max temperature : 1000 °C
Agitator	Magnetic drive Speed 200~600 rpm Pitched Blade Turbine
Accessory Equipment	Auto control valve for cooling system Digital Tachometer, DC Motor Controller Pressure Gauge & Transmitter PID Temp. Controller Relief Valve 7" TFT Touch Panel Module

표 2-3 미활용 바이오매스 펠릿 반탄화 고체 생성물 공업분석, 원소분석, 발열량 분석 결과

분석방법	분석항목	Raw material	반탄화시료 250 °C	반탄화시료 300 °C	반탄화시료 350 °C	반탄화시료 400 °C
공업분석 (%)	Moisture	6.74	4.67	1.21	-	-
	Volatile	76.84	67.23	49.19	31.06	39.42
	Fixed Carbon	15.76	26.83	47.94	67.30	58.89
	Ash	0.66	1.26	1.66	1.64	1.70
원소분석 (%)	Carbon	49.39	53.27	70.74	75.59	82.51
	Hydrogen	6.05	5.90	4.90	4.42	3.38
	Nitrogen	-	0.21	0.26	-	0.15
	Oxygen	43.07	30.96	17.00	17.18	9.20
	Sulfur	-	-	-	-	-
발열량 분석 (kcal/kg)	Higher heating value (HHV)	4,670	5,660	6,590	7,020	7,480

- 미활용 바이오매스 펠릿을 이용한 반탄화 고체생성물의 특성을 표 2-3에 나타내었음.
- 반응온도가 증가할수록 휘발분의 감소와 고정탄소의 증가를 확인 할 수 있으며, 원시료와 300 °C 반탄화 시료를 비교하면 탄소 (49.39% → 70.74%) 약 43% 증가, 수소 (6.05% → 4.90%) 약 19% 감소, 산소 (43.07% → 17.00%) 약 60%의 감소를 확인함.
- 이는 일반적인 반탄화 특성으로 반응온도가 증가할수록 탄화반응으로 열분해/가스화 시 타르를 발생시키는 휘발분은 감소하고 고정탄소가 증가함을 보임(표 2-3).
- 반탄화 반응 온도 조건을 400 °C까지 승온할 경우 원소분석 결과를 통해 탄소 (49.39% → 82.51%) 약 67% 증가, 수소 (6.05% → 3.38%) 약 44% 감소, 산소 (43.07% → 9.20%) 약 78% 감소했으며 300 °C 이상의 온도에서 수소, 산소의 급격한 감소를 확인함.
- 고정탄소 비율과 탄소 함량 증가와 산소함량 감소로 바이오매스 펠릿의 고위발열량 (HHV)는 300 °C까지 반응온도를 증가시켰을 경우 약 41% 증가하여 400 °C까지 승온할 시 약 60.2% 증가하여 펠릿의 연료특성이 개선됨을 확인함.



그림 2-5. 미활용 바이오매스 펠릿과 반탄화 고체생성물

- 그림 2-5와 같이 반응온도 증가에 따라 탄화반응으로 반탄화 고체생성물 색깔이 숲과 같이 검게 변화하고, 바이오매스 조직이 약화되어 휘발분이 기체 형태로 분해됨에 따라 펠릿 형태 유지되지 못함을 확인하였고, 이는 기존 문헌의 분쇄성 향상 반응특성과 일치함.

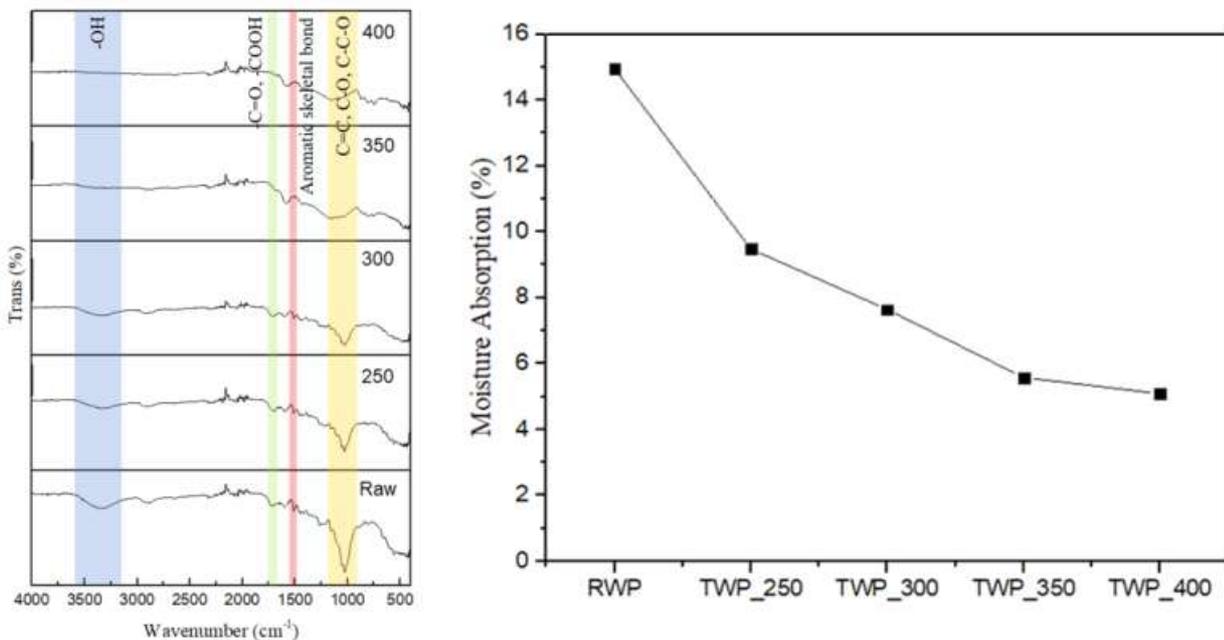


그림 2-6. 반탄화 펠릿의 FT-IR 결과와 흡습도 분석 결과

- 그림 2-6의 FT-IR 결과, 원소분석의 결과와 마찬가지로 반응온도가 높아짐에 따라 수소와 산소를 포함하는 친수성 작용기인 hydroxyl group과 carboxyl group이 감소하는 것을 확인했으며, 기존 문헌의 소수성 개선 특성결과와도 일치함.
- 반탄화 고체생성물의 소수성 개선 효과를 확인하기 위해서 수분 재흡습성 실험을 항온항습기 (HB-105SG, Han Baek Scientific Co., Korea)에서 진행함.
- 목재 흡습성 국가 표준 규격인 KS F2205에 따라 105 ± 2 °C에서 48시간 건조된 대상시료 2 g을 흡습성 시험 조건인 온도 40 ± 1 °C, 상대습도 $75 \pm 1\%$ 로 고정된 환경에 24시간 동안 노출시켜 조습한 후 수분에 의한 중량 변화를 측정하였음.
- 그림 2-6의 흡습도 실험 결과를 통해서 원 시료 대비 300 °C 시료는 약 49%, 400 °C 시료는 약 66% 흡습도가 감소함을 확인할 수 있었고 이는 반탄화 온도가 증가할수록 표면의 친수성기 제거에 따른 소수성화 되는 것을 의미함.

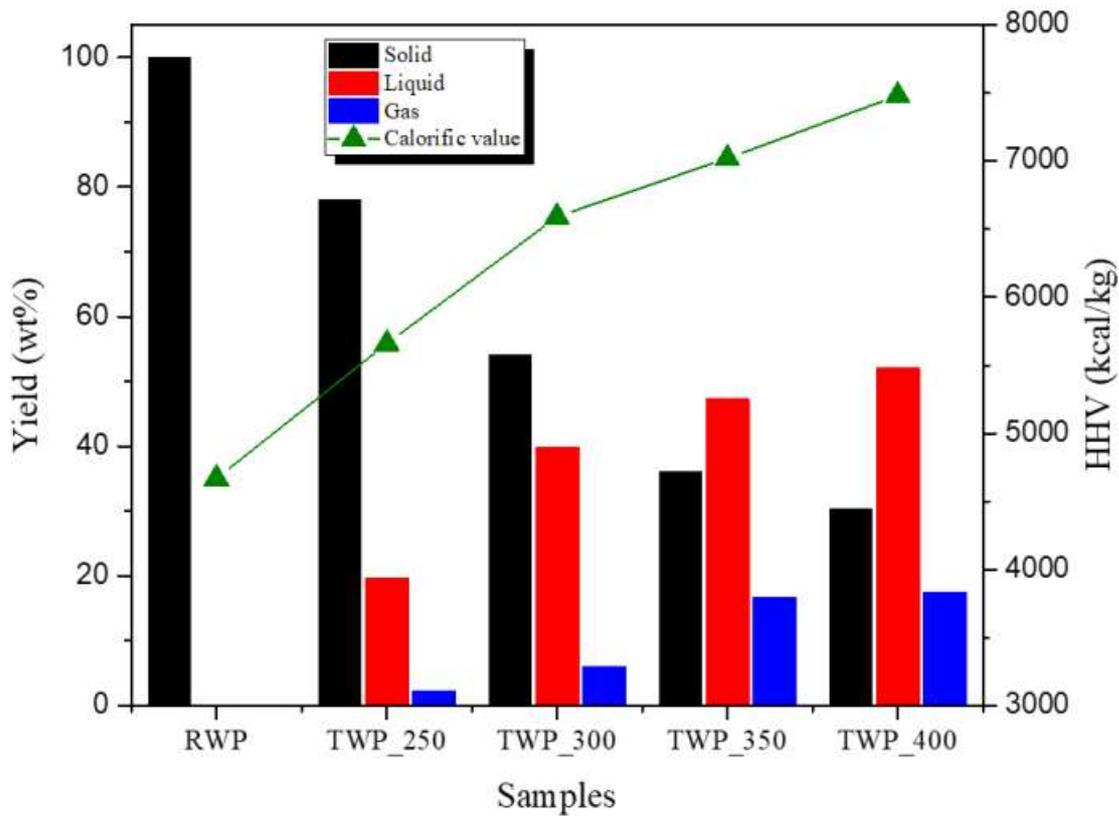


그림 2-7. 반탄화 온도에 따른 생성물의 3상 수율과 발열량 변화 추이

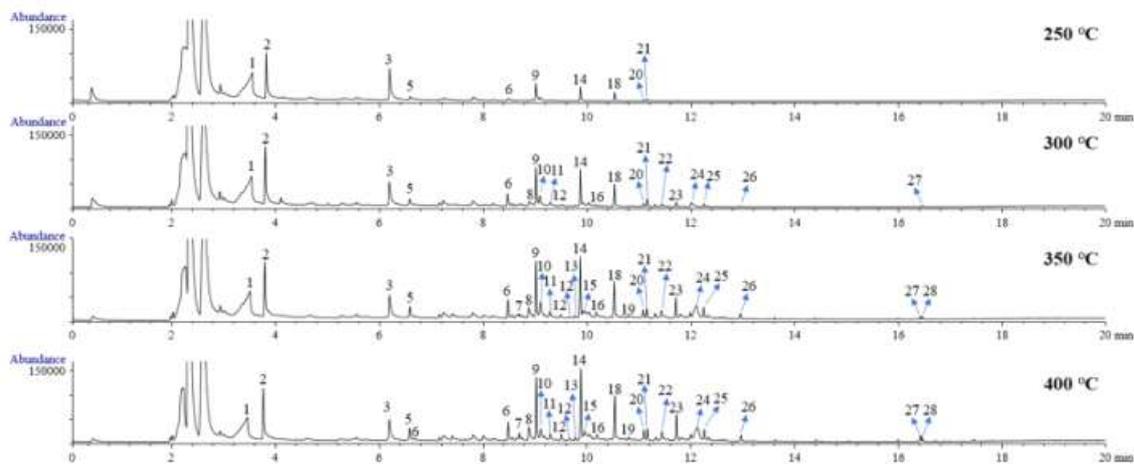
- 그림 2-7의 결과에서 반탄화 반응온도 증가에 따라 반탄화 고체생성물의 연료특성은 향상되지만 수율은 감소하는 경향을 확인할 수 있는데, 이는 온도 증가에 따라 고정탄소 증가보다 열분해가 더 진행되며 액체, 기체로 변환되기 때문임.
- 따라서 가스화 연료를 위한 최적 반응조건은 반탄화 고체생성물의 연료특성 향상, 수율, 소비 에너지와 가스화 시 합성가스의 조성 등을 고려가 필요하며, 향후 온도별 반탄화 시료의 가스화 실험 결과를 토대로 가스화 반응용 최적 반탄화 반응조건을 선정할 계획임.

표 2-4 농산부산물을 활용한 반탄화 고체 생성물의 Energy densification 분석 결과

분석항목	시료	Raw material	반탄화시료 250 °C	반탄화시료 300 °C	반탄화시료 350 °C	반탄화시료 400 °C
발열량 분석 (HHV, kcal/kg)	목질계 미활용 바이오매스	4,670	5,660	6,590	7,020	7,480
	버섯폐배지	3,871	4,658	5,314	5,406	5,443
energy bush densification	목질계 미활용 바이오매스	-	1.21	1.41	1.50	1.60
	버섯폐배지	-	1.20	1.37	1.39	1.41

- 반탄화 고체생성물의 Energy densification은 미활용 바이오매스 펠릿(RWP, 4670 kcal/kg) 대비 250, 300, 350, 400 °C에서 각각 1.21, 1.41, 1.50, 1.60으로 연료특성이 개선되어 성능지표인 1.1을 모든 조건에서 초과하였으며, 버섯폐배지(3,871 kcal/kg)도 각 반응온도에서 1.2, 1.37, 1.39, 1.41로 목표 달성함(표 2-4).
- 다만 버섯폐배지는 버섯 재배과정을 통해서 분해와 부패 등의 과정을 거치기 때문에 목질계 미활용 바이오매스보다 상대적으로 초기 발열량도 낮고 반탄화 후 연료특성 향상도 적은 것으로 판단됨.
- 그러나 반탄화 기술에 적용에는 큰 문제가 없을 것으로 판단되며, 유기물 함량이 낮은 농산부산물의 경우 다른 농산부산물과 혼합을 통해서 문제 해결이 가능할 것으로 판단됨.

$$E_D = \frac{\text{반탄화연료 발열량}}{\text{feedstock(EFB) 발열량}}$$



Peak no.	Compound	RT (min)
1	Acetic acid	3.56
2	Hydroxypropanone	3.83
3	2-Furfural	6.20
4	2-Furanmethanol	6.54
5	2,3-Butanedione	6.60
6	2-Hydroxy-1-methylcyclopenten-3-one	8.48
7	m-Cresol	8.70
8	p-Cresol	8.89
9	Guaiacol	9.02
10	Unknown	9.09
11	2-Hydroxy-3,4-dimethyl-2-cyclopenten-1-one	9.29
12	Dimethylphenol	9.51
13	2-Methoxy-3-methylphenol	9.77
14	Creosol	9.87
15	Ethoxyphenol	9.95
16	5-Hydroxymethylfurfural	10.18
17	Methylcatechol	10.43
18	Ethylguaiacol	10.53
19	Vinylguaiacol	10.79
20	Eugenol	11.10
21	Propylguaiacol	11.16
22	Propenylguaiacol	11.44
23	Isoeugenol	11.72
24	Levogluconan	12.01
25	4-Hydroxy-3-methoxyphenyl acetone	12.25
26	Homovanillic acid	12.96
27	Unknown	16.42
28	Unknown	16.46

그림 2-8. 반탄화 반응 액체상 시료의 GC-MS 성분 분석 결과

- 반탄화 반응 중 발생한 액체상 생성물의 조성을 GC/MS (7890A/ 5975C, Agilent Technology)를 활용하여 분석한 결과 아세트산이 가장 많이 존재하였고 구아이아콜, 크레오솔, 에틸구아이아콜 등 고분자량 페놀족이 반응온도가 증가할수록 증가하는 것을 확인하였음.
- 따라서 반탄화 액체생성물에도 유용한 물질들이 있어서 처리보다는 활용을 목적으로 추가 연구가 필요함(그림 2-8).

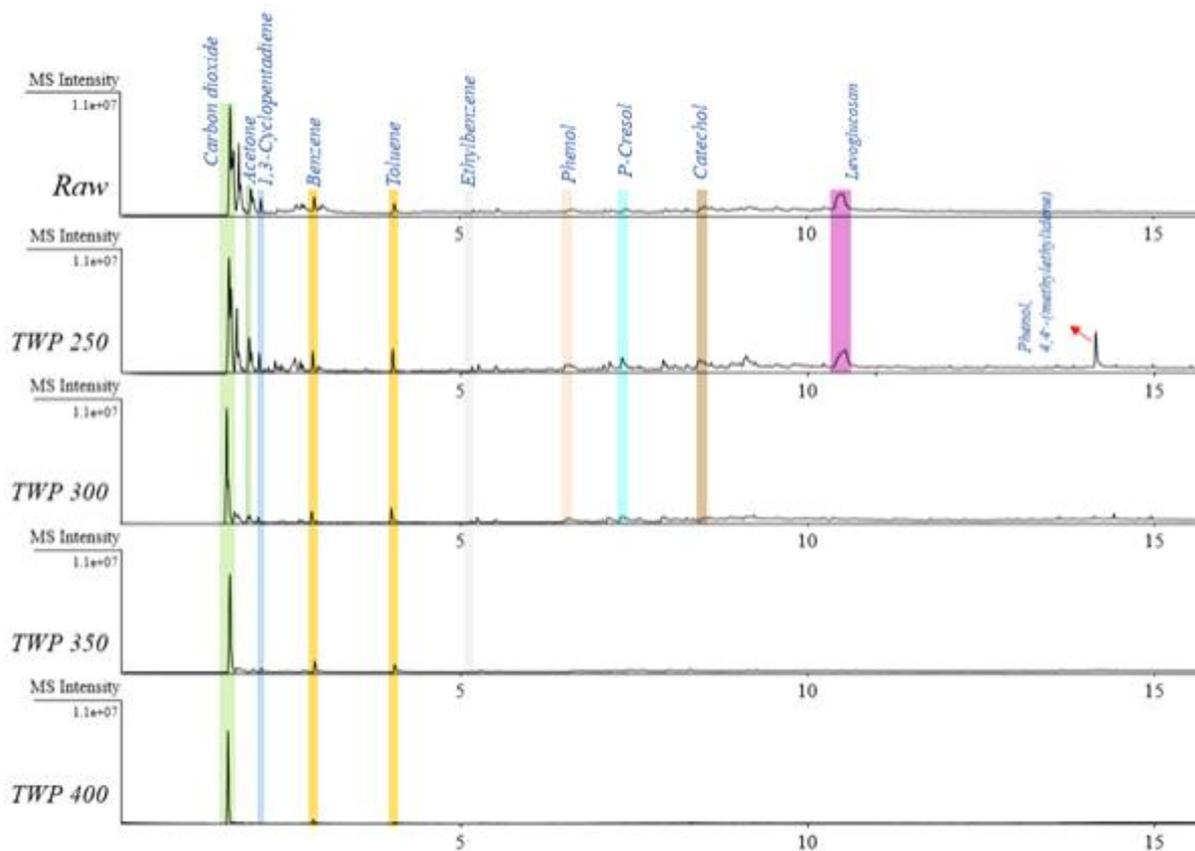


그림 2-9. 반탄화 시료 800 °C 열분해 발생 가스 GC-MS 분석 결과

- 반탄화 시료를 Pyrolyzer를 이용해 800 °C에서 가스화시킨 후 생성물을 분석한 결과 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 페놀, 카테콜 등의 타르 발생의 원인이 되는 고분자량 방향족 발생이 감소하는 것을 확인했으며, 이를 통해 반탄화를 통해서 가스화 시 타르 발생 저감 가능성을 확인함 (그림 2-9).

1-3. 농산부산물 기반 반탄화 0.5 TPD 실증 plant 설계

1) 농산부산물의 반탄화

- 목적 : 농산부산물에 저온 무산소 조건의 탄화반응을 통해 투입 원료의 균일성을 포함하여 연료로 활용 가능한 반탄화물로의 전환
- 기능 : 열회수 및 공급장치에서 발생한 연소가스를 활용하여 열원을 공급하며, 발생된 반탄화물과 탄화가스(부생가스)를 분리하여 각각 배출 구성
- 사양 : 향류 방식의 간접식 열원 공급 시스템
- 설계인자 : 반탄화 반응기(원료 체류시간, 로 회전속도, 반응로 내 원료 체적비율, 반응기 길이, 직경, 기울기), 공급열원(반탄화 운전온도, 원료특성, 열손실율, 열전달율, 열풍온도, 전열계수, 전열면적), 원료공급 및 반탄화물 배출(정량공급 및 배출량)

2) 열회수 및 공급

- 목적 : 공급 연료의 연소를 통해 반탄화 반응로의 필요한 열원 생산
- 기능 : 탄화가스(부생가스)를 연료로 공급하여, 연소 반응으로 발생된 연소가스를 반탄화 반응로에 필요한 열원으로 공급
- 사양 : 버너 방식의 연소
- 설계인자 : 연소로 설계인자(연소가스 유량, 연소가스 체류시간, 연소로 내부온도, 연소로 길이, 직경, 대상연료의 양, 연소 공기비)

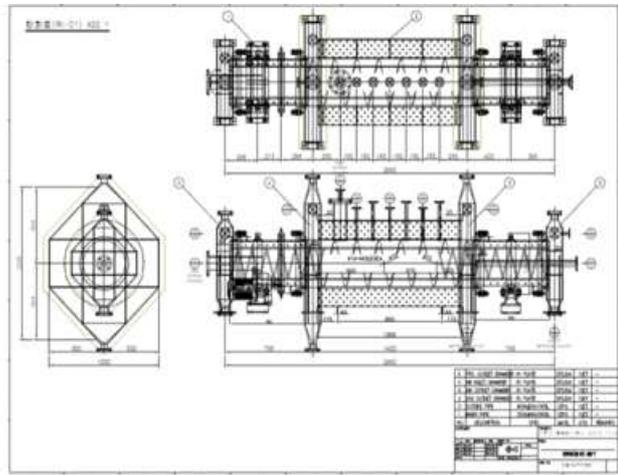
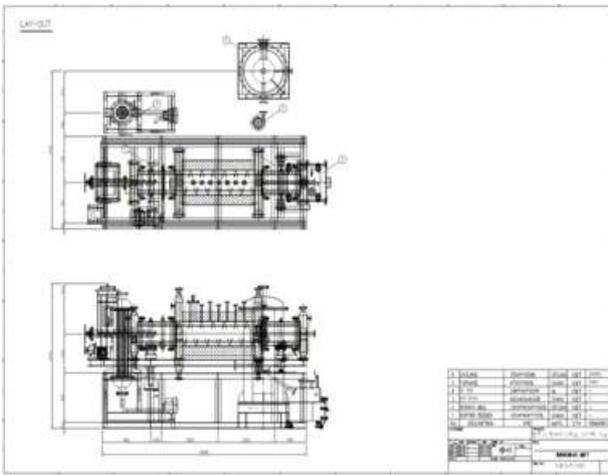


그림 2-11. 반탄화로 Lay-out 및 상세설계도면

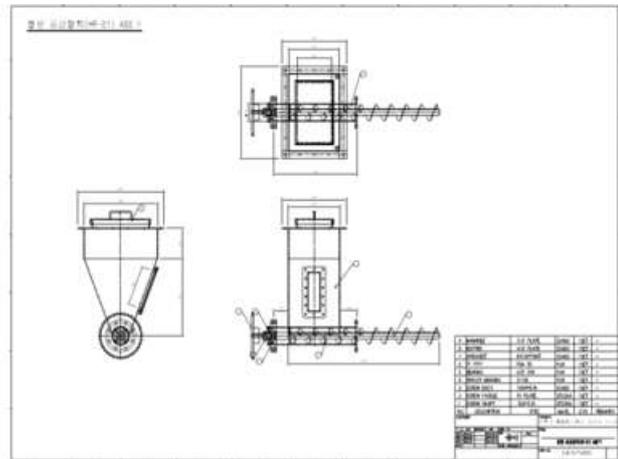
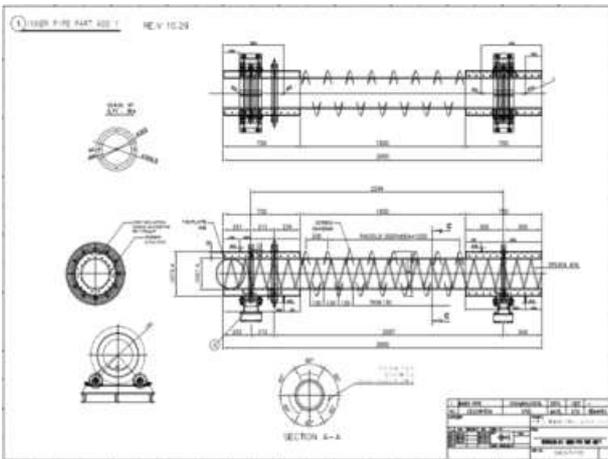


그림 2-12. 반탄화로 내부 및 정량 공급장치 상세설계도면

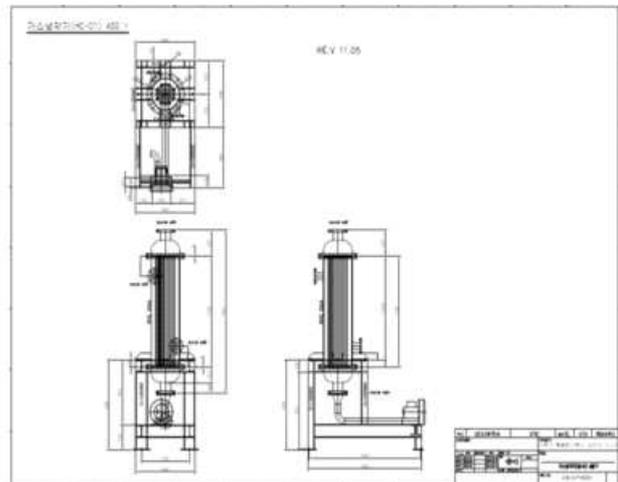
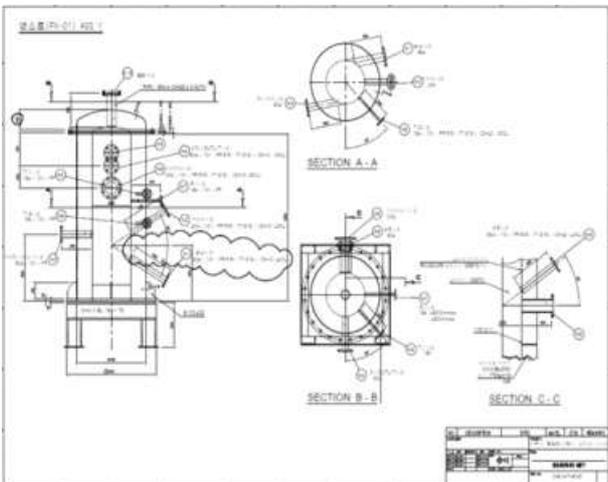


그림 2-13. 연소로 및 가스냉각기 상세설계도면

표 2-5 농산부산물을 활용한 0.5 TPD 반탄화 반응기 도출 설계인자

반응기 설계인자	설계요소	설계 값
반응기 size	Kiln shell inner ID	0.50 m
	Section area	0.20 m ²
	Product charge ratio	15~30%
	Charge area	0.03 m ²
	Inclined of shell	0.030
	RPM	0.80 rpm
	Retention time	47.50 min
	Shell Length	3.00 m
	Charge Volume	0.09 m ³
	Capacity	0.11 m ³
Heat capacity (투입 시료 및 대기온도 10 °C 기준)	Solid heating	527 kcal/hr
	Water heating	450 kcal/hr
	Evaporation	2,695 kcal/hr
	Radiant heat loss	11,304 kcal/hr
	Exhaust gas loss	39,600 kcal/hr
	여유열량(15%)	8,186 kcal/hr
Hot gas volume	Qt	62,763 kcal/hr
	Heat capacity	62,763 kcal/hr
	Heat gas temperature	400 °C
Burner	Heat gas volume	475 Nm ³ /hr
	Heat capacity	62,763 kcal/hr
	LPG LHV	21,800 kcal/Nm ³
	LPG consumption	2.9
	Combustion air	9.1 Nm ³ /Nm ³

2-4. 농산부산물 기반 반탄화 0.5 TPD 실증 시스템의 제작

- 농산부산물 기반 반탄화 0.5 TPD 실증 시스템은 향류 방식의 간접식 열원 공급 시스템으로 제작하였으며, 전체 시스템은 크게 반탄화 로터리 킬른, 열 공급 보일러 및 열 회수 라인, 연소가스 쿨러(열교환기), 시료 투입 2단 스크류 피더로 구성되어 있으며, 각 장치별 특징은 표 2-6과 같음.

표 2-6 반탄화 시스템 요소 장치별 특징

설비	주요 특징
로터리 킬른	간접가열 방식의 로터리 킬른으로, 연소 보일러의 가열 공기를 통한 내부 온도 제어 킬른 회전속도 제어를 통한 원료 체류시간 조절이 가능하도록 반응기 길이, 직경, 기울기 설계/제작
열 공급 보일러	도시가스 버너 방식으로 반탄화 반응에 필요한 열원 생산 반응 시 발생한 탄화가스(부생가스 및 타르)를 회수하여 재연소시켜 도시가스 사용량 저감 및 악취/배출가스 제거
열 회수 라인	반탄화 반응 시 발생한 고온의 탄화가스를 통해 공급 가스 예열에 활용하고 보일러로 이동 로터리 킬른 전/중/후단 밸브 개폐 제어를 통해 균일한 열공급 가능
연소가스 열교환기	반응로로부터 배출되는 연소가스에 의한 후단 ID-FAN 열부하 방지
원료 투입 스크류 피더	원료 투입은 2단 스크류 방식으로 원료 호퍼에서 킬른 내로 시료 공급 1단과 2단 스크류 사이 수직형 배관 내 원료 질량 측정 레버를 통해 유입 원료량 확인 가능

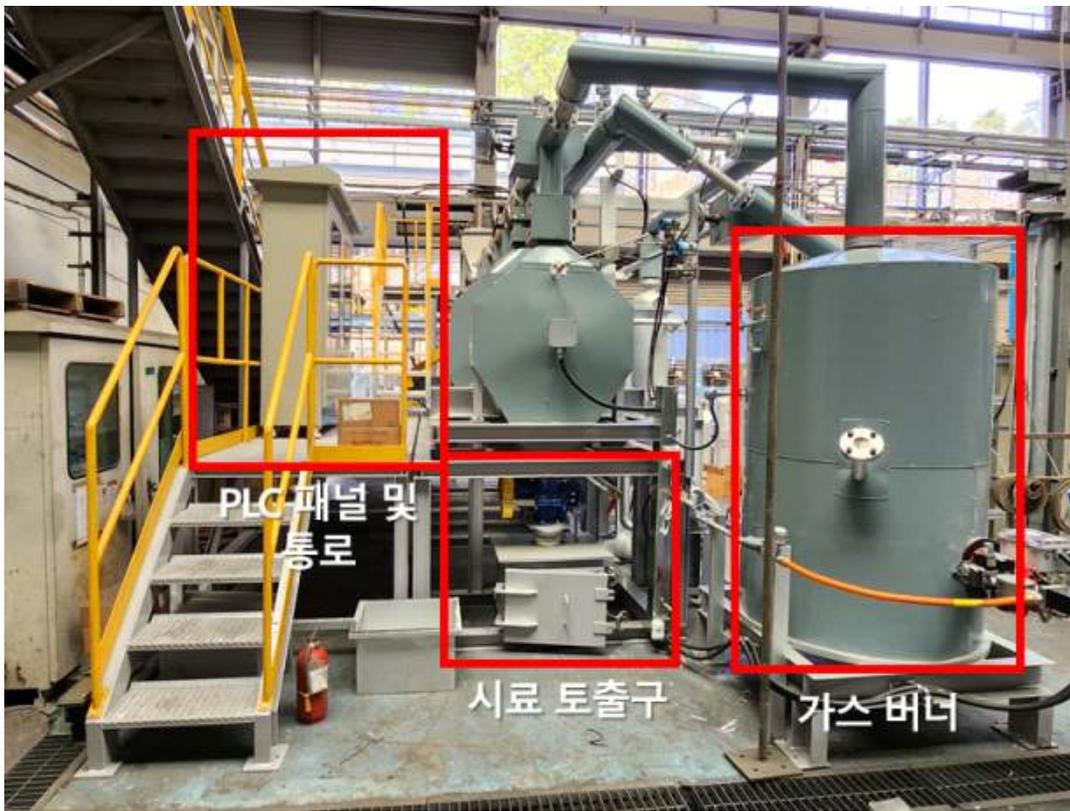


그림 2-14. 0.5 TPD 반탄화 시스템 측면



그림 2-15. 0.5 TPD 반탄화 시스템 정면

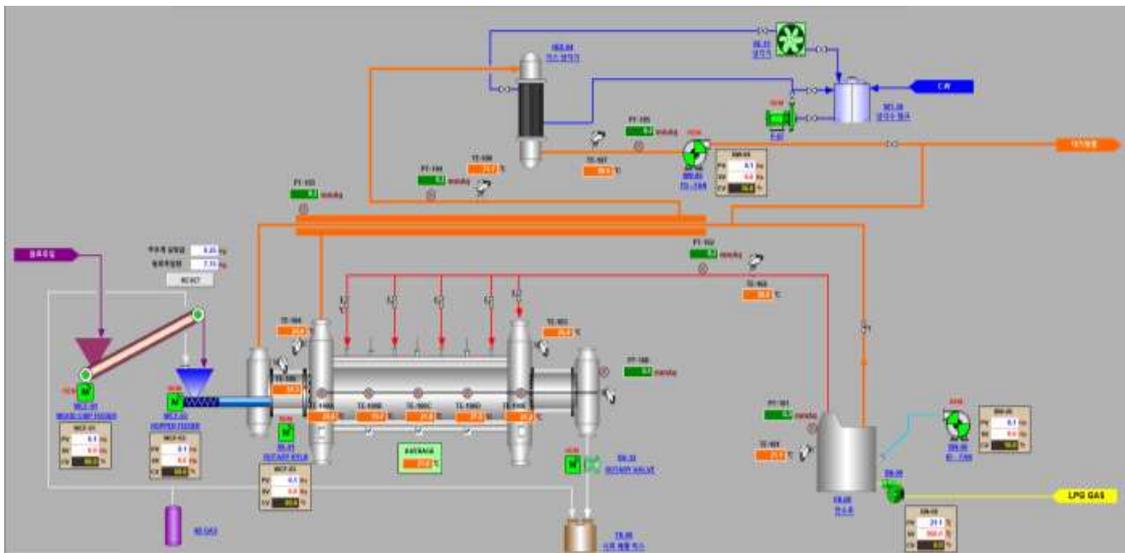


그림 2-16. 0.5 TPD 반탄화 시스템 HMI 운전제어 구축 화면

- 운전제어 HMI 프로그램은 CIMON을 사용하였고 TCP/IP 통신 모듈을 통해 PLC 제어 패널과 연결되어 설비의 PV, SV를 운전자가 PC를 통해 확인, 제어가 가능하고 모든 모니터링 값은 데이터로 저장되도록 구성하였음(그림 2-16).
- 스크류피더의 Hz와 로터리킬른 구동 모터 Hz 제어를 통해 각각 시간당 시료 투입 속도와 원료의 로 내 체류시간을 조절하고, 보일러의 FD-Fan, 가스 버너 출력, 후단의 ID-Fan을 통해 로터리 킬른 내부 온도를 제어함.



그림 2-17. 보일러 가스 버너

- 반탄화 킬른의 간접가열을 위한 연소공기는 도시가스 버너에 의해 보일러 내 유입 공기가 가열되어 킬른 이중자켓에서 열전달이 발생하는 방식으로 온도 유지 및 흡열 반응에 의한 온도 저하 대응을 위해 공급 열량 조절이 필수적임.

- 그림 2-17에서 확인할 수 있듯이 PID 제어와 연계된 공기 주입량 조절 댐퍼를 통해 공기 주입량을 조절하여 열전달 속도를 제어하고 반탄화 반응에 의해 발생한 타르와 탄화가스 유입에 의한 보일러 내 온도 상승에 대응할 수 있도록 설계됨.



그림 2-18. 간접가열 공기 라인 및 탄화가스 흡인 라인

- 반탄화 킬른의 승온 및 반응온도 유지를 위한 열원 가스 공급 라인은 킬른의 전/중/후단으로 공급되며(그림 2-18), 각 유입구의 메뉴얼 개폐 밸브를 통해 균일한 온도를 유지시키기 위해 유량을 제어하고, 킬른 내의 반탄화 반응에 의해 발생한 타르와 탄화가스를 보일러로 이동시키기 위한 탄화가스 흡인 라인을 통해 킬른 내 음압 상태를 유지시킴.
- 탄화가스에 포함된 타르 성분이 배관을 통해 이동하며 응축되어 배관을 막는 현상을 방지하기 위해 고온의 공기가 통과하는 이중배관 형식으로 구성함.



그림 2-19. 시료 배출구 및 질소 공급 라인

- 반응 후 배출되는 고온의 시료는 산소 접촉 시 발화 가능성이 있어 시료 배출구 내로 질소 분위기를 형성해 산소 접촉을 방지, 안전하게 발화점 이하로 시료를 냉각시킨 후 회수함(그림 2-19).



그림 2-20. 배가스 냉각용 열교환기 및 냉각수 탱크

- 보일러에서 연소를 통해 타르와 탄화가스를 제거한 고온의 배가스는 음압 유지를 위한 ID-Fan 을 통과하며 열 손상을 발생 될 수 있어 ID-Fan 전단에 배가스 냉각용 열교환기를 설치하여 냉각수를 이용해 50 °C 이하로 냉각시킨 후 배출시킴.

1-5. 농산부산물 기반 반탄화 0.5 TPD 실증 시스템의 운전

- 반탄화 시스템 구축 후 장치 운전인자를 도출하고자 시운전을 진행해 반탄화 온도별 적정 체류 시간, 가스 버너 온도, 열풍 공급 유량, 탄화가스 흡인 밸브 개폐 정도, 후단 ID-Fan 유량 등의 운전 조건을 도출하였고, 운전 성능과 시료 균질성을 확인해본 결과 Lab-scale 회분식 반응기의 시료와 유사한 물성을 보였으며 균일한 반탄화물 성상을 확인할 수 있었음(표 2-7).
- 반탄화 시스템을 통해 생산한 반탄화물은 200 °C 반응 시 4,950 kcal/kg, 250 °C 반응 시 5,340 kcal/kg의 고위발열량을 나타내었으며, 이는 원시료인 목재펠릿(Raw WP)의 고위발열량 4,670 kcal/kg 대비 각각 1.06, 1.14의 에너지 밀도로 질량 대비 고형연료 특성이 개선되었음을 의미함.
- 공업분석 결과 Lab-scale 반탄화 반응물(TWP; Torrefied Wood Pellet) 대비 0.5 TPD 반탄화 시스템 생산 반탄화물(Bulk 샘플)은 250 °C에서 반탄화 반응 시 수분함량 0.43%로 Lab-scale 반탄화물 대비 더 낮음을 확인함. 이는 로터리 킬른의 경우 내부 음압 유지를 위해 상시 흡기 팬을 통해 발생한 탄화가스와 타르 등의 증기를 상시 제거하기 때문에 반탄화물에 응축되어 배출되는 수분이 감소한 것이 원인으로 판단됨.

표 2-7 목재펠릿 반탄화 고체생성물의 물리화학적 특성분석 결과

구분		Raw WP	TWP 250	TWP 300	Bulk 200	Bulk 250
Proximate Analysis (dry-basis wt%)	Moisture	6.74	4.67	1.21	4.65	0.43
	Volatile matter	76.84	67.23	49.19	77.53	75.30
	Fixed carbon	15.76	26.83	47.94	17.54	23.92
	Ash	0.66	1.26	1.66	0.28	0.36
Ultimate Analysis (dry-basis wt%)	C	49.39	53.27	70.74	50.30	52.60
	H	6.05	5.90	4.90	5.97	5.70
	O	43.07	30.96	17.00	39.4	37.2
	N	-	0.21	0.26	-	-
	S	-	-	-	-	-
Heating Value (kcal/kg)	HHV	4,670	5,660	6,590	4,950	5,340
	LHV	4,260	5,120	6,310	4,390	4,730
Energy densification	HHV	-	1.21	1.41	1.06	1.14
	LHV	-	1.20	1.48	1.03	1.11

(WP: 원시료(목재펠릿), TWP: Lab-scale 반탄화물, Bulk: 반탄화시스템 생산 반탄화물)

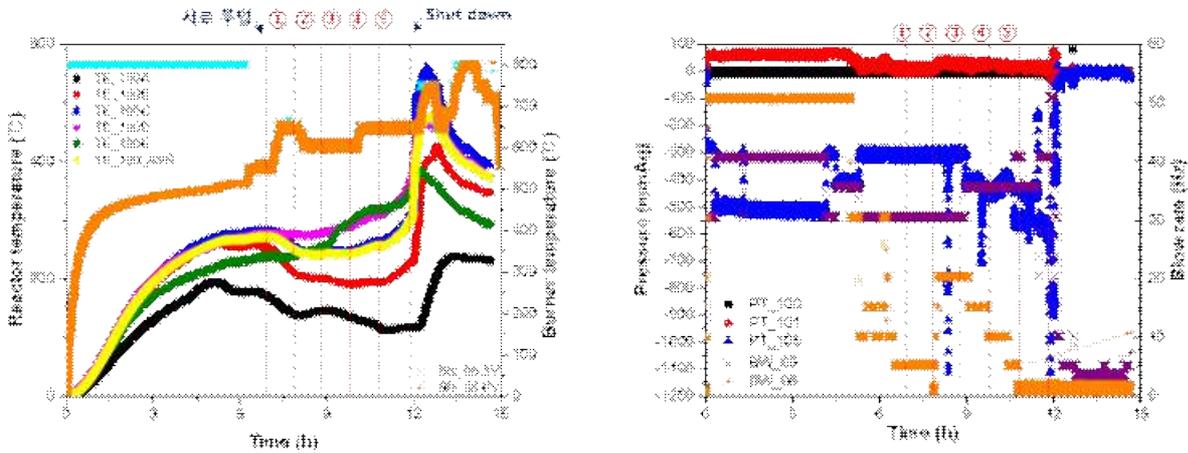


그림 2-21. 반탄화 0.5 TPD 실증 시스템 운전 데이터

- 로터리 킬른의 구조적 특성상 킬른 내부는 약한 음압 상태를 유지하여 탄화가스 등의 leak 문제에 대응하여야 하기에 내부 및 보일러 음압 상태 확인을 위한 압력계를 설치하여 모니터링하였고 반응시 발생하는 탄화가스와 타르 증기에 의한 압력 상승에 대비해 후단 흡인 ID-Fan의 유량을 늘려 대응함(그림 2-21).

표 2-8 반탄화 0.5 TPD 실증 시스템 로터리 킬른 내부 평균 온도

조건	시간	평균 온도 (°C)					Avg(B, C, D)
		A	B	C	D	E	
①	16:13 ~ 17:13	A	B	C	D	E	263
②	17:13 ~ 18:13	156	236	273	279	238	242
③	18:13 ~ 19:13	141	204	246	277	248	242
④	19:13 ~ 20:13	143	195	246	286	277	251
⑤	20:13 ~ 21:13	127	194	256	303	313	271

- 표 2-8에서 확인할 수 있듯이 반탄화 킬른 내부 평균온도는 240~300 °C에서 반탄화물 실험을 진행했으며, 실제 반응영역인 B, C, D 구역의 평균온도를 기준으로 실험을 수행하였으며 이때 보일러 내부 온도는 500~700 °C 영역에서 제어하였으며, ①-⑤ 각 조건의 시간이 끝나는 시점에 배출구를 통해 배출된 시료를 확보하여 무게를 측정하였음.

- 반탄화 반응의 특성상 흡열반응에 의해 원료가 반응기 내로 투입된 후 킬른 내부의 열을 흡수하며 반응기 온도가 감소하는 것에 감안하여 21 kg/hr(≈0.5 Ton/day)의 속도로 원료를 투입하며 연속운전을 수행해 안정적으로 원료를 반탄화 시킬 수 있는 최적의 운전조건을 도출함.

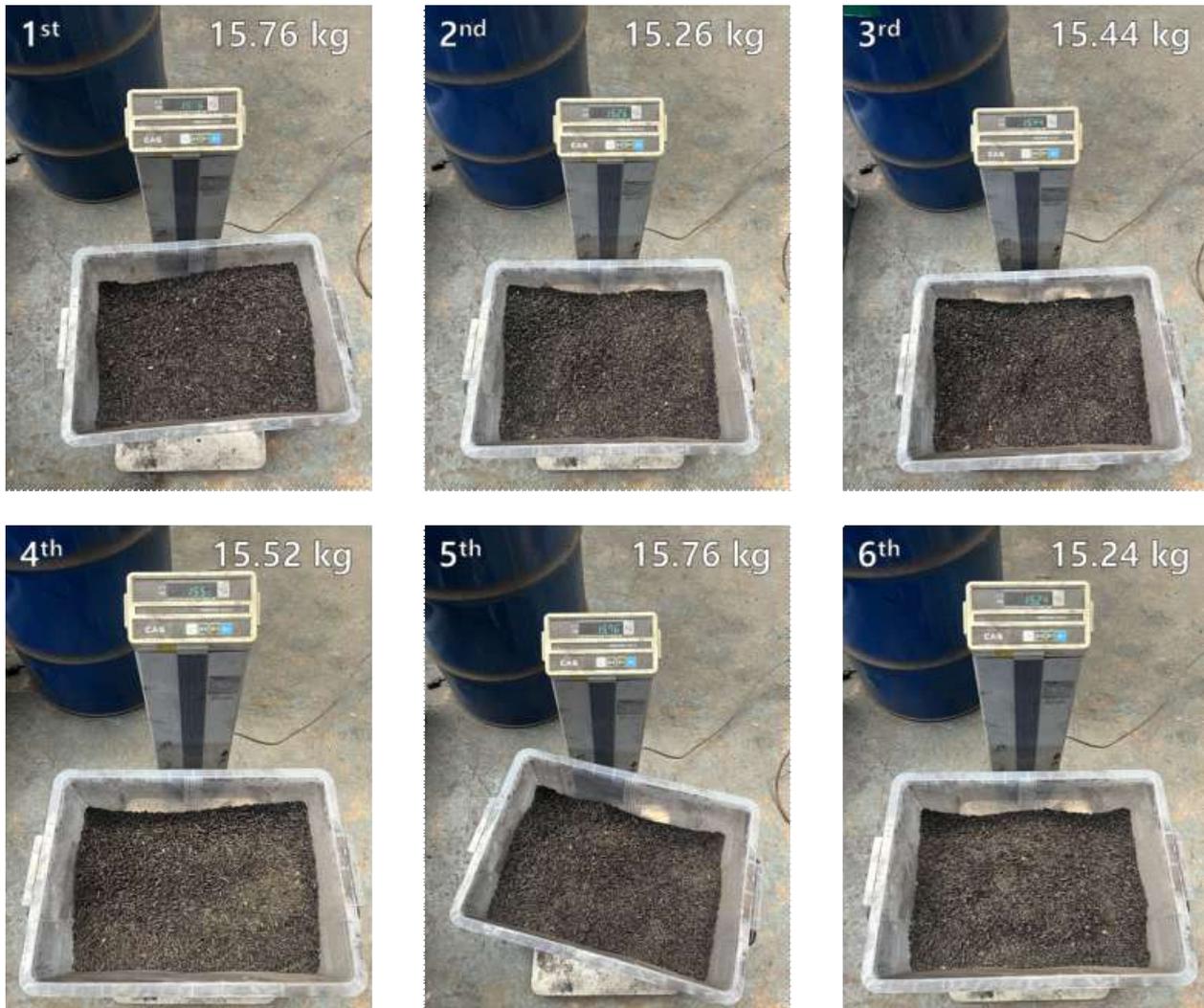


그림 2-22. 0.5 TPD 반탄화 실증 시스템 생산량 측정 결과

- 반탄화 실증 시스템의 생산량을 파악하기 위해 1시간 간격으로 생산된 반탄화물을 회수해 질량 및 원료 균질성을 확인한 결과 15.24 - 15.76 kg/h 범위 내로 평균 15.50 kg/h의 반탄화물을 생산했으며, 이는 약 372 kg/day으로 정량목표 달성을 확인함(그림 2-22).
- 0.5 TPD 반탄화 반응기 반탄화 고체연료 생산량 목표인 360 kg/day를 확인하기 위해서 공인 인증시험평가를 통해 반탄화 반응온도 270 °C에서 반탄화 고체연료 생산량은 372 kg/day으로 목표를 달성하였음. 유입원료의 발열량은 평균 4,603.7 kcal/kg, 반탄화 반응온도 270 °C에서 반탄화물은 6,875.6 kcal/kg으로 반탄화 시스템을 통해 생산한 반탄화물의 에너지밀도는 원시료 대비 1.49로 정량목표인 1.2를 달성하였음. 이것은 반탄화 반응을 통해서 목재펠릿은 고체연료 특성 향상이 크게 향상된 것을 확인 할 수 있음.

시험 성적서 (TEST REPORT)



성적서 번호 : 23-071451-01-1
Report No.

페이지 (1) / (총 2)
Page of Pages



1. 의뢰자 (Client)

기관명 (Name) : 고등기술연구원연구조합
주소 (Address) : 경기도 용인시 처인구 백암면 고안로51번길 175-28
의뢰일자 (Date of Receipt) : 2023. 11. 06.

2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) : R&D 성과물검증

3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample)

제품명 (Description) : 탄화 및 가스화 시스템
제작회사 (Manufacturer) : 고등기술연구원연구조합
모델명 (Model Name) : -
제조번호 (Serial Number) : -
기타 (Remark) : -

4. 시험기간 (Date of Test) : 2023년 11월 06일 ~ 2023년 12월 07일

5. 시험장소 (Location of Test) :

KTL 고정시험실
 현장시험 (주소 : 경기도 용인시 처인구 백암면 고안로 51번길 175-28)

6. 시험규격/방법 (Test Standard/Method) : 시험의뢰자가 제시한 시험방법에 준함.

7. 시험결과 (Test Results) : 후면참조

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

확 인 Affirmation	작성자(Tested by)	기술책임자(Technical Manager)
	성 명(Name): 정상철  (Signature)	성 명(Name): 전용우  (Signature)

2023. 12. 26.

한국산업기술시험원



서울특별시 구로구 디지털로26길 87 (구로동) 187, Digital-ro 26-gil, Guro-gu, Seoul, KOREA | Tel.02-860-1273 Fax. 02-860-1679

시험 결과 (Test Results)

1. 시험항목 및 방법

시험 항목	단위	시험방법
고형연료 냉가스 효율	%	냉가스 효율 = $\frac{\text{합성가스 발열량(kcal/h)}^1}{\text{유입원료 발열량(kcal/h)}} \times 100(\%)$
에너지밀도 (Energy densification)	-	에너지밀도(E_D) = $\frac{\text{반탄화연료 발열량}}{\text{유입원료 발열량}}$
반탄화 고체연료 생산량	kg/일	24시간 동안 생산된 반탄화 고체연료 무게

¹ 합성가스 발열량은 시험의뢰자가 제시한 값(Dulong 식을 이용한 이론값)을 사용함.

2. 시험결과

시험 항목	단위	시험결과
고형연료 냉가스 효율	%	64.01
에너지밀도 (Energy densification)	-	1.49
반탄화 고체연료 생산량	kg/일	372

운전조건(현장운전 값) 및 고체연료 발열량
 - 반탄화연료 공급량: 12 kg/h
 - 반탄화연료 발열량: (평균) 6875.6 kcal/kg
 - 유입원료 발열량: (평균) 4603.7 kcal/kg
 - 합성가스 유량: 20.12 Nm³/h

3. 시험품 사진



(끝)

2. 0.3톤/일급 스마트팜 부산물 적용 컴팩트 가스화 시스템

2-1. 농산부산물 기반 가스화 반응 이론

- 바이오매스 가스화는 유기성 물질(C, H, O, N, S)을 화학반응 시켜 C, H, O 성분은 일산화탄소와 수소가 주성분인 합성가스로 변환시키고 N, S 공해물질 유발성분은 제거와 재활용이 용이한 형태로 발생되어 청정연료 기술임.
- 가스화를 통해 화학에너지 및 현열로부터 에너지 회수가 가능하고, 생성된 합성가스는 청정가스 연료, 고순도 일산화탄소나 수소, 전기 생산에 효율적으로 활용이 가능함.
- LNG와 원유를 저렴한 청정가스 에너지원인 합성가스로 빠르게 대체 가능한 미래 수소사회의 기반 기술이며, 모든 유기물질에 적용이 가능하여 산업적 파급효과가 매우 큼.

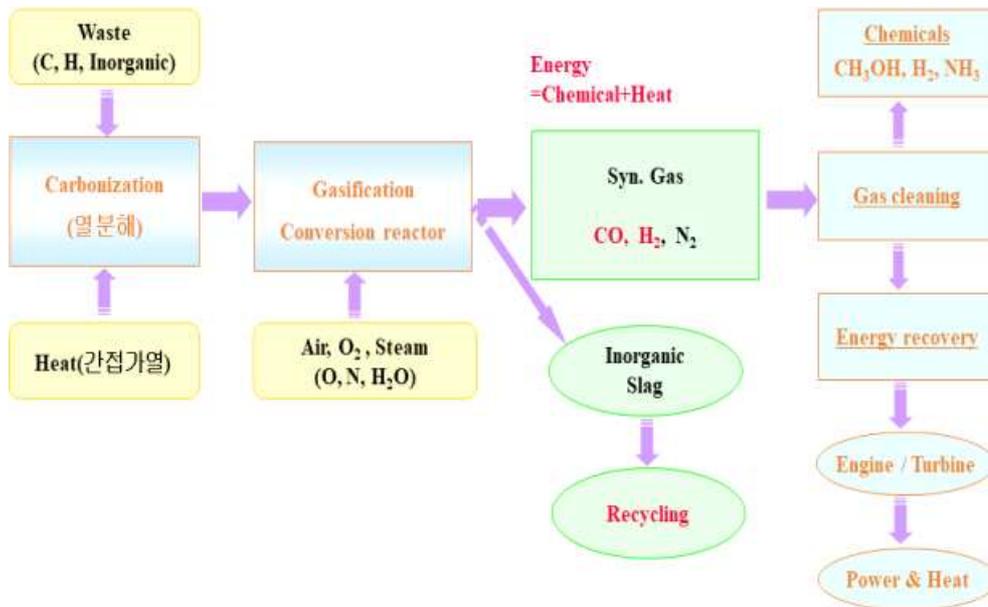


그림 2-23. 바이오매스 가스화 공정 개략도

- 바이오매스 원료의 종류 및 반응 조건에 따라 생성가스의 성분과 성질이 달라지기 때문에 최적화가 가장 중요 부분이며, 주요 가스화 반응은 다음과 같음.

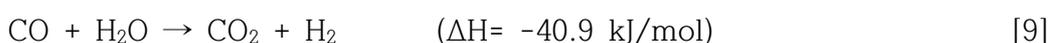
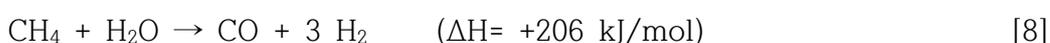
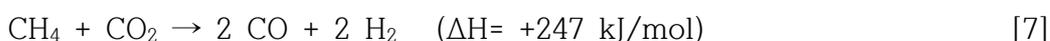
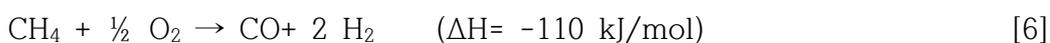
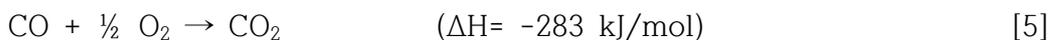
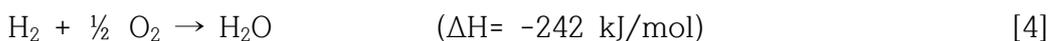
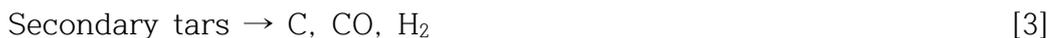
[Primary devolatilization]



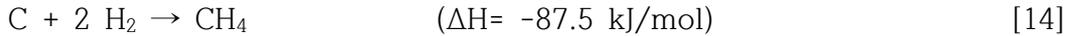
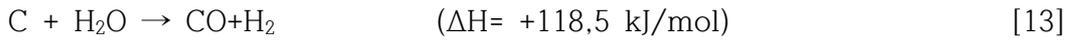
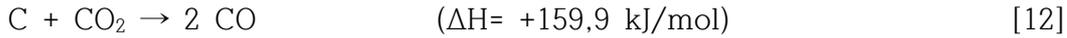
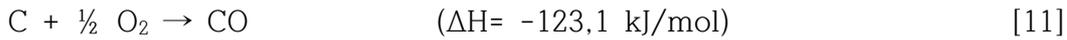
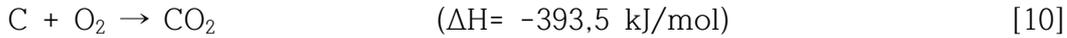
[Tar cracking and reforming]



[Homogeneous gas-phase-reactions]



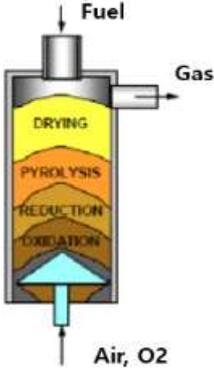
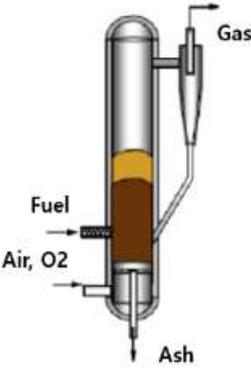
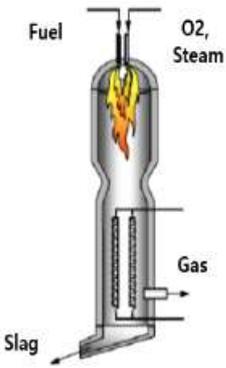
[Heterogenous reactions]



2-2. 농산부산물 기반 반탄화 연료 가스화기 설계인자 도출

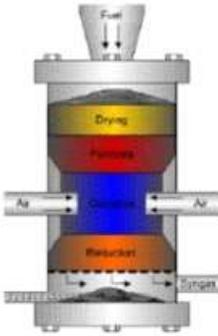
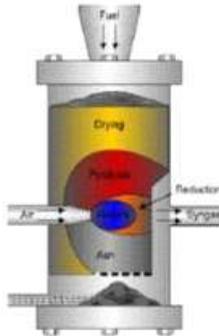
- 가스화기는 가스화를 통한 합성가스 생산의 핵심 설비로써 산화제와 반응으로 합성가스를 생산하고 화학 원료 제조, 발전, 연료전지 등 목적에 맞게 정제하여 활용하는데, 아래 표와 같이 가스화기 타입은 원료의 내부 거동에 따라 고정층, 분류층, 유동층 등으로 구분되나 바이오매스와 같이 다양한 크기 및 성상의 원료에 적합한 것은 고정층 형태임.

표 2-9 가스화기 종류 및 특징

가스화기 타입		고정층(Fixed bed)	유동층(Fluidized bed)	분류층(Entrained flow)
투입 원료	사이즈(mm)	5~100 (5~300)	10~100	<1
	수분(wt.%)	< 60	< 40	< 15
	회분(wt.%)	< 25	< 20	< 20
	형태	대부분 균일	균일	균일
체류시간(s)		300~3000	5~50	1~10
가스화기 형태				
특징		<ul style="list-style-type: none"> - 설계가 용이하고 운전비가 낮음. - 운전이 용이하고 운전 경험이 많음. - 체류시간이 길고 타르, 분진 함량이 많음. 	<ul style="list-style-type: none"> - 유동매체 열전달 특성을 활용하여 전체 열전달 효율 우수함. - 타르 및 미연탄소 발생량 적음. - 기고접촉/열전달/합성 가스 품질이 우수함. 	<ul style="list-style-type: none"> - 설계가 복잡하고 운전비가 높음. - 탄소전환율, 냉가스 효율 높고 합성가스 내 타르 함량이 적음. - 체류 시간이 짧고, 스케일 업이 용이함.
상업용 가스화 방식		Thermoselect(slagging) Lurgi(Non-slagging) BGL(slagging)	GTI HT Winkler KRW	GE Energy Shell Conoco Philips

- 고정층 가스화기의 투입 원료는 가스화기 내부에서 건조, 열분해, 연소, 환원 4단계의 반응이 일어나며, 합성가스 이동 방향에 따라 상향류식(Updraft), 하향류식(Downdraft), 크로스식(Crossdraft)으로 분류되며, 상용에서는 주로 상향 및 하향류식을 적용하고 있으며, 본 연구에서는 고정층 타입의 상향류 방식을 적용하였음.

표 2-10 고정층 가스화로 운전 변수 및 연료 조건

구 분		상향류식 (Updraft)	하향류식 (Downdraft)	크로스식 (Crossdraft)
타입	가스화기 형태			
	운전 변수			
	시동 시간(min)	15~60	10~20	10~20
	원료에 대한 민감도	낮음	높음	높음
	타르 함량(g/Nm ³)	1~15	< 0.5	< 0.1
	정제 설비 규모	큼	작음	작음
	잔존 타르량	많음	적음	매우 적음
	부하변동에 따른 민감도	낮음	높음	높음
	Turn down ratio	5~10	3~4	2~3
	합성가스 발열량(MJ/Nm ³)	5.0~6.0	4.5~5.0	4.0~4.5
연료 요구	크기(mm)	5~00	20~100	40~80
	수분 함량(% w.b.)	< 50	< 15~20	< 7
	회분 함량(% d.b.)	< 15	< 5	< 6
	형태	reasonable uniform	uniform	uniform
	벌크 밀도(kg/m ³)	> 400	> 500	> 400
	회 용융점(°C)	> 1,250	> 1,250	> 1,250

2-3. 농산부산물 기반 반탄화 연료의 가스화 특성 예측

표 2-11 농산부산물 연료 조성

구분		함량	단위
Proximate Analysis	Moisture	0.0	%
	Volatile Matter	60.0	%
	Fixed Carbon	30.0	%
	Ash	5.0	%
	Sum(%)	95.0	%
Elemental Analysis	Moisture	0.0	%
	C	51.57	%
	H	7.30	%
	N	2.23	%
	S	0.0	%
	O	28.83	%
	Ash	10.07	%
	Sum(%)	100	%
	HHV	5,000	Kcal/kg
	LHV	4,619	Kcal/kg

- 자체적으로 개발한 설계 프로그램을 이용하여 농산부산물 기반 반탄화 연료 가스화 특성인 합성가스 조성 및 발열량 예측 결과 CO 34.15%, H₂ 25.96%와 유량은 16.54 Nm³/h(dry basis) 생산되며, 탄소전환율(Carbon conversion)은 90%, 냉가스효율(Coldgas efficiency)은 61%로 예측됨.



그림 2-24. 농산부산물 기반 반탄화 연료 가스화 특성 예측 결과

표 2-12 합성가스 예측 조성

Syngas composition	mass flow rate(kg/h)	mass fraction(%)	Volume flow rate (Nm ³ /h,wet basis)	Volume fraction (% ,wet basis)	Volume flow rate (Nm ³ /h, dry basis)
CO	9.05	43.92	7.23	34.150	7.23
H ₂	0.49	2.40	5.50	25.963	5.50
CO ₂	7.05	34.21	3.59	16.928	3.59
H ₂ O	3.73	18.12	4.64	21.906	0.00
N ₂	0.28	1.35	0.22	1.052	0.22
H ₂ S	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
COS	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
CH ₄	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
SUM	20.60	100.00	21.18	100.000	16.54

표 2-13 합성가스 예측 발열량

Syngas composition	LHV (kcal/kg)	Flow rate (kg/h)	LHV Flow rate (kcal/h)
CO	2413.04	9.05	21837.65
H ₂	33861.94	0.49	16723.21
SUM	36174.98	9.54	38560.86

2-4. 농산부산물 기반 반탄화 연료 가스화 시스템 실시설계

- 농산부산물 기반 반탄화 연료 적용 가스화 시스템은 고정층 상향류 방식으로 반탄화 용량에 맞춰 0.3톤/일급으로 설계하였고 반탄화 연료공급 시스템, 가스화 반응기, 정제(집진)설비, 합성가스 연소장치로 구성하였으며, 합성가스 정제는 세라믹 필터를 적용한 집진장치를 통해 미세분진을 제거 후 합성가스 연소장치로 연소 배출될 수 있도록 하였음.

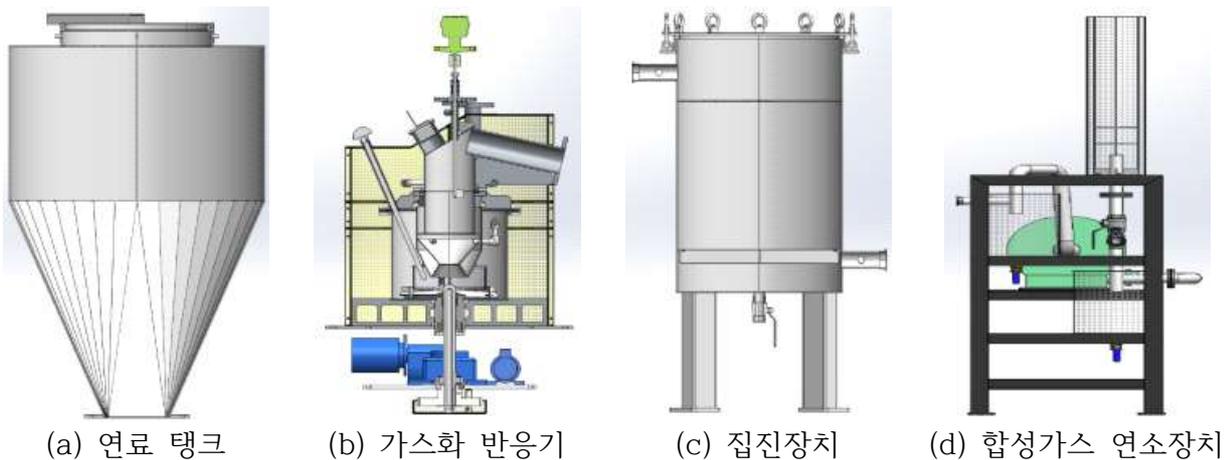


그림 2-25. 0.3톤/일급 반탄화 연료 가스화 시스템 주요 설비 형상

표 2-14 0.3톤/일급 반탄화 연료 가스화 시스템 설계기준

항 목	내 용
설계 용량 및 가스화 원료	○ 설계용량 : 0.3톤/일(12.5 kg/h) 이상 ○ 가스화 원료 : 농산부산물 기반 반탄화 연료
가스화 시스템 설계기준	○ 실험장치의 시설 설계기준 - 가스화 용량 : 정격 부하 0.3톤/일, 20% 과부하 0.36톤/일 - 가스화로 방식 : 고정층 updraft 방식 - 정제설비 : 세라믹필터 적용 집진장치 - 여열 이용 방식 : 반탄화 공정 열원으로 활용 - 가스화로 운전 온도 : 1000 °C 이상

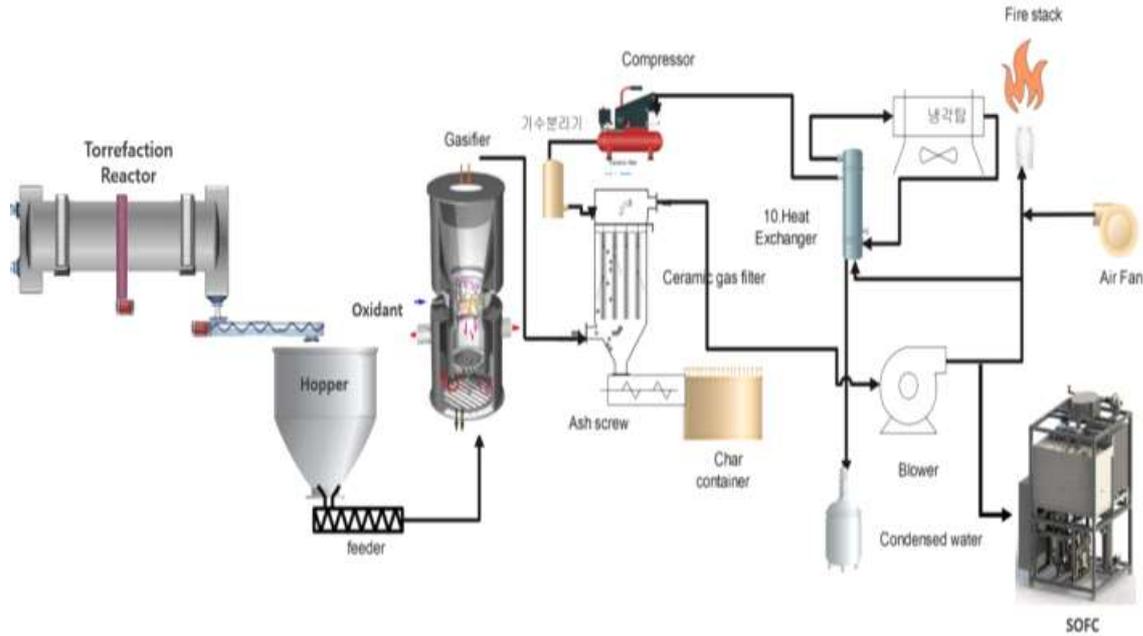


그림 2-26. 0.3톤/일급 반탄화 연료 가스화 시스템 P&ID

- 투입 연료 12.5 kg/h 기준 밀폐형 구조로 반응기 하부에서 인버터 제어를 통해 투입스크류로 공급되며, 산화제는 가스화로 내부 온도 균일화를 위해 하부와 중간부 노즐에서 MFC로 정량적 공급이 되도록 함.
- 고정층 가스화 반응기는 온도가 불균일할 경우 환열 효과가 떨어져 출구의 합성가스 열량 값이 낮아지며, 합성가스 유효성분(CO, H₂) 함량에 영향을 주어 전체 가스화 효율이 낮아지고 타르 함량이 높아지는 문제점이 있음.
- 가스화 반응기 투입 가스화제는 합성가스 수율 향상을 위해 등가비(equivalence ratio, 산소의 실제 소비량/완전 산화 필요한 산소의 이론량)에 의해 결정되는데 가스화로 반응 영역별 내부 온도에 대응하여 산화제 공급량을 자동 조절하여 공급되도록 구성함.

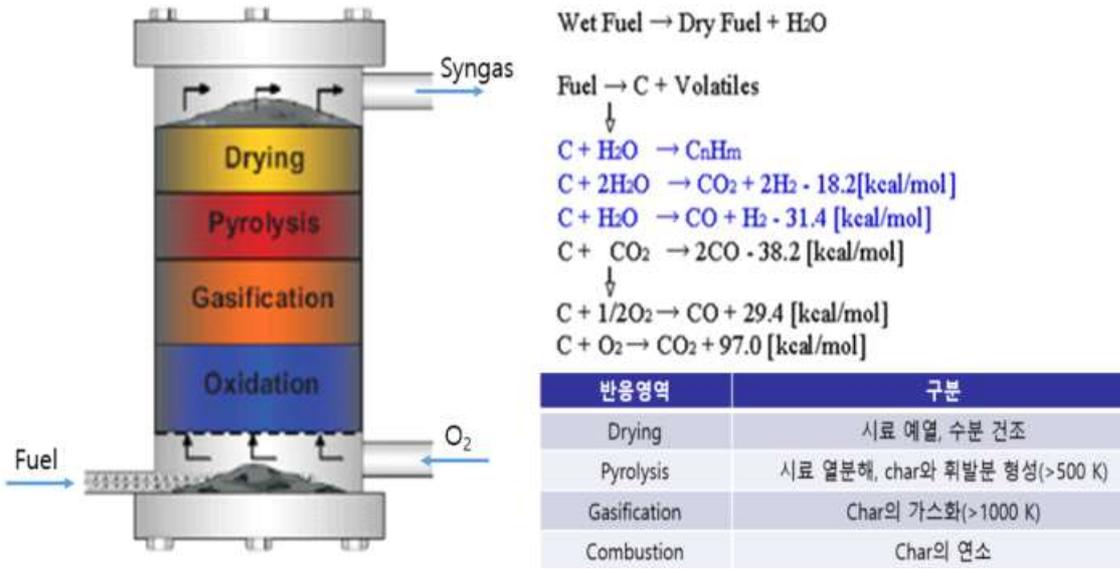


그림 2-27. 고정층 상향류 가스화 반응기 특징

- 고정층 가스화 반응기는 상부 반응온도 증가 시 생성물 쪽으로 반응이 일어나기 때문에 타르 함량이 급격히 감소하게 되며, H₂는 증가하고 이에 반해 CH₄은 감소하게 됨.
- 따라서 상부 반응온도의 변화가 타르 저감에 더욱 효과적이므로 화염 열분해 영역에서 발생한 타르 포함 열분해 가스를 부분가스 연소 영역에서 스팀과 반응하여 가스화로 출구 배가스의 온도를 고온 상태로 유지함으로써 타르 발생을 억제하여 배관 점착에 따른 막힘 현상 등이 방지 되도록 구성함.

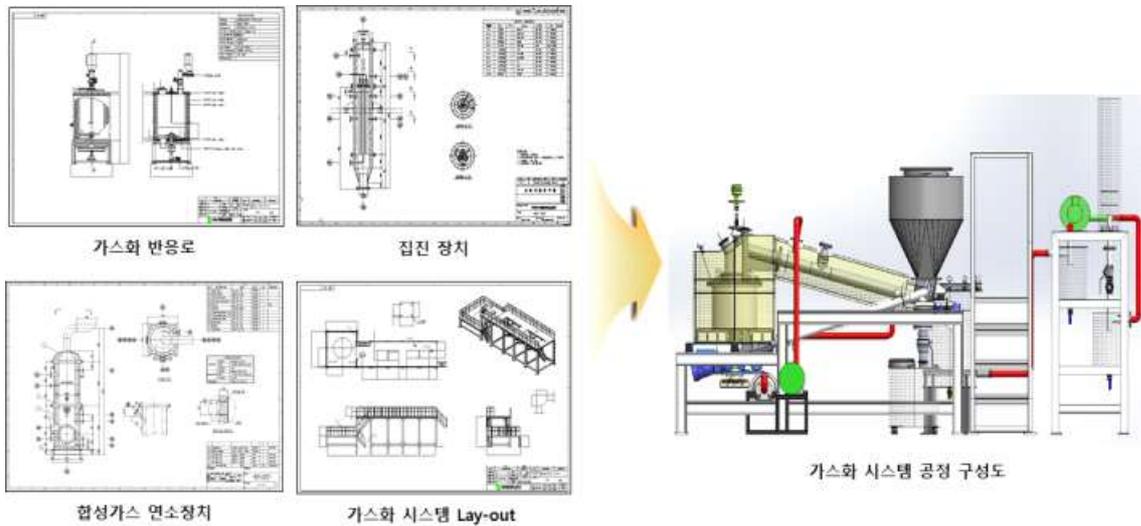


그림 2-28. 0.3톤/일급 반탄화 연료 가스화 설계도면 및 공정 구성도

- 가스화 시스템 제어 공정은 중앙제어 방식을 적용하여, 단위 공정간 유기적 연계로 가스화로의 안정적 연속 운전이 가능하도록 주요 설비의 저장 및 공급설비, 가스화 반응기, 합성가스 정제 설비, 합성가스 연소설비 등의 제어 및 모니터링이 수월한 PLC(Programmable Logic Controller)를 이용하고, 제어신호를 운전자에 의해 제어 가능하도록 HMI(Human Machine Interface) 소프트웨어를 통해 시스템을 운전함.

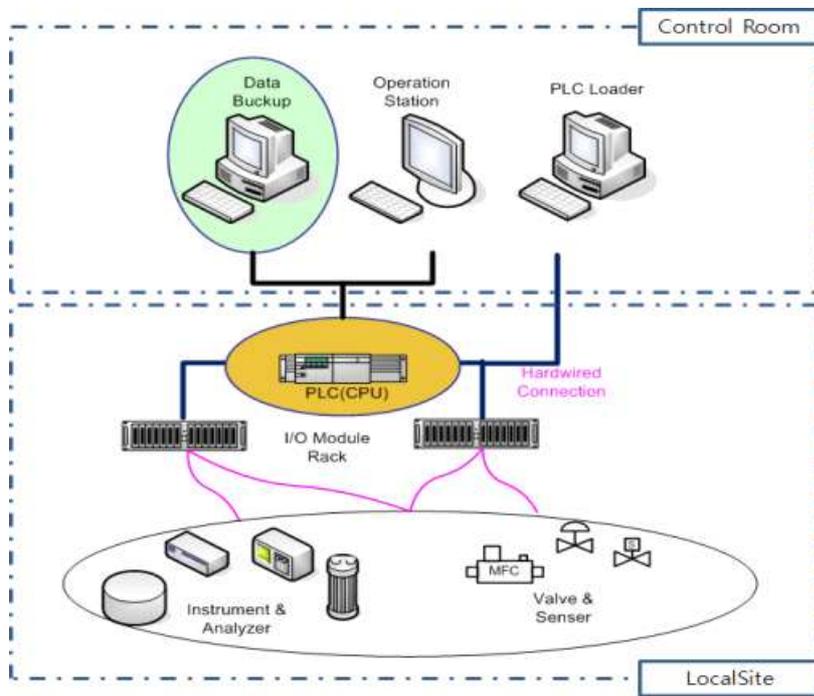


그림 2-29. 가스화 시스템 제어 공정도

2-5. 농산부산물 기반 반탄화 연료 가스화 시스템 제작/구축

- 농산부산물 기반 반탄화 연료 가스화 시스템은 고정층 상향류 방식으로 0.3톤/일급으로 제작하였으며, 전체 시스템은 연료공급 설비, 가스화 반응기, 정제설비, 고온 송풍기, 합성가스 연소설비로 구성하였으며 주요 설비별 특징은 다음과 같음.

표 2-15 0.3톤/일급 반탄화 연료 가스화 시스템 주요 설비별 특징

항 목	주요 특징
연료공급 설비	<ul style="list-style-type: none"> ○ 원료 투입 방식은 스크류 방식 적용 가스화로 하부로 정량공급 ○ 외부의 공기가 차단될 수 있는 밀폐형 구조로 설계/제작 ○ 레벨 근접센서를 통해 제어화면에서 연료 잔량 확인
가스화 반응기	<ul style="list-style-type: none"> ○ 가스버너 방식으로 초기 가스화 반응기 캐스타블 건조 및 예열 ○ 6시간 내 1,000 °C 까지 예열가능 하도록 구성 ○ 상/중/하부로 산화제 분산 공급량 자동제어
정제 설비	<ul style="list-style-type: none"> ○ 고온 가스에 적용 가능한 세라믹 필터 적용 ○ Pulse-jet 방식의 탈진 시스템 적용
고온 송풍기	<ul style="list-style-type: none"> ○ 500 °C 이상 고온 합성가스에 적용 가능 구조로 제작 ○ 합성가스 유량을 제어할 수 있도록 인버터 제어방식 적용
합성가스 연소설비	<ul style="list-style-type: none"> ○ 초기 수동 점화 후 합성가스 연소열에 의한 연소 구조 방식 ○ 이중 구조로 합성가스 연소열 이용 가능
제어 설비	<ul style="list-style-type: none"> ○ PLC 적용, HMI를 통한 운전자 제어 구조로 구성 ○ 각 장치 작동상태 실시간 모니터링 및 운전 트렌드 분석

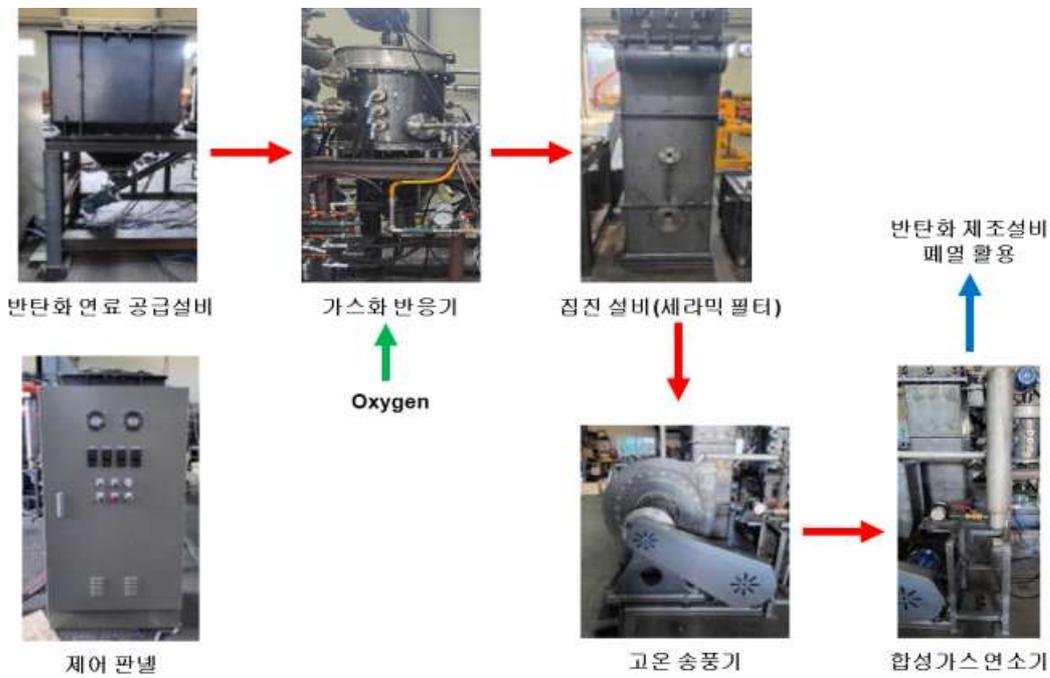


그림 2-30. 0.3톤/일급 반탄화 연료 가스화 시스템 공정구성

2-5 0.3톤/일급 반탄화 연료 가스화 시스템 공정 구성

2-5-1. 반탄화 연료공급 설비

- 반탄화 연료공급 설비는 외부 공기가 차단될 수 있는 밀폐형 구조로 제작하였으며 가스화 반응로 하부로 스크류 피더를 이용하여 정량 공급될 수 있도록 하였고 호퍼 내 반탄화 연료의 레벨 잔량은 근접센서를 이용하여 운전제어 화면에서 실시간 확인할 수 있도록 하였음.

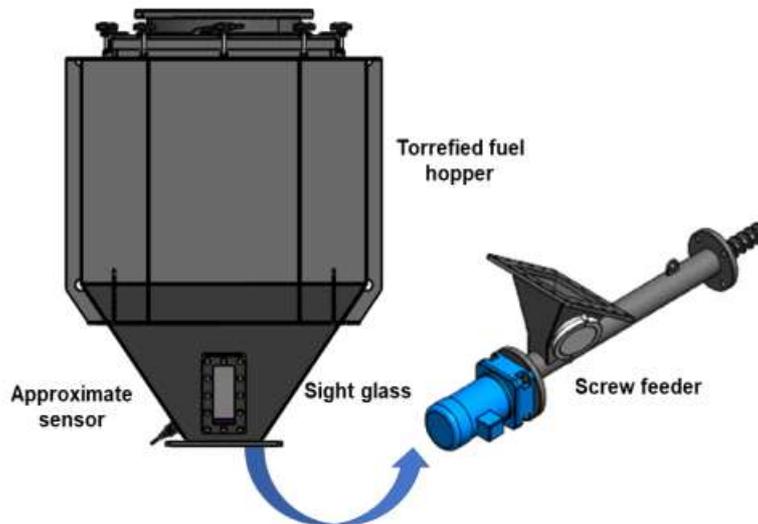


그림 2-31. 반탄화 연료공급 설비

2-5-2. 가스화 반응기

- 가스화 반응기 설계 시 연소 및 환원반응이 일어나는 반응부 체적 결정은 투입연료의 발열량, 열부하량과(가스화장치의 반응부 1 m³당 1시간에 발생하는 평균 열량)의 관계를 통해 산정하였으며, 가스화 반응기 체적은 $V = [M \times Q \times (1 - \eta)] / K$ 식을 이용하였음.

(V: 반응부 체적(m³), M: 처리량, Q: 단위중량당 열량, η: 냉가스 효율, K: 열부하량)

- 가스화 반응기 길이는 지배반응 특성에 따라 결정하는데 반응물의 확산이 지배적인 경우와 고체 표면과의 화학반응이 지배적인 경우를 가중 평가하여 산정하였으며, 연소 및 환원반응이 일

어나는 반응부는 상부로 갈수록 직경이 커지는 형태로 제작함.

- 가스화 반응에 필요한 산화제는 합성가스 수율 향상을 위해 등가비(equivalence ratio) 기준으로 결정하였으며 가스화 반응부 상/중/하부에서 접선방향으로 16 mm 직경 구멍을 통해 영역별 내부 온도에 대응하여 산화제 공급량을 자동 조절하여 공급되도록 구성함.

$$(ER = \frac{\text{실제 가스화반응에 투입된 산소량}(kg/h)}{\text{완전 연소반응시 필요한 화학양론적인 산소량}(kg/h)})$$

- 가스화 반응에 있어서 열 손실은 반응 내부 온도에 직접적인 영향을 미치게 되므로 반응로 외부에 세라크울을 이용하여 50 mm 단열재를 시공함.

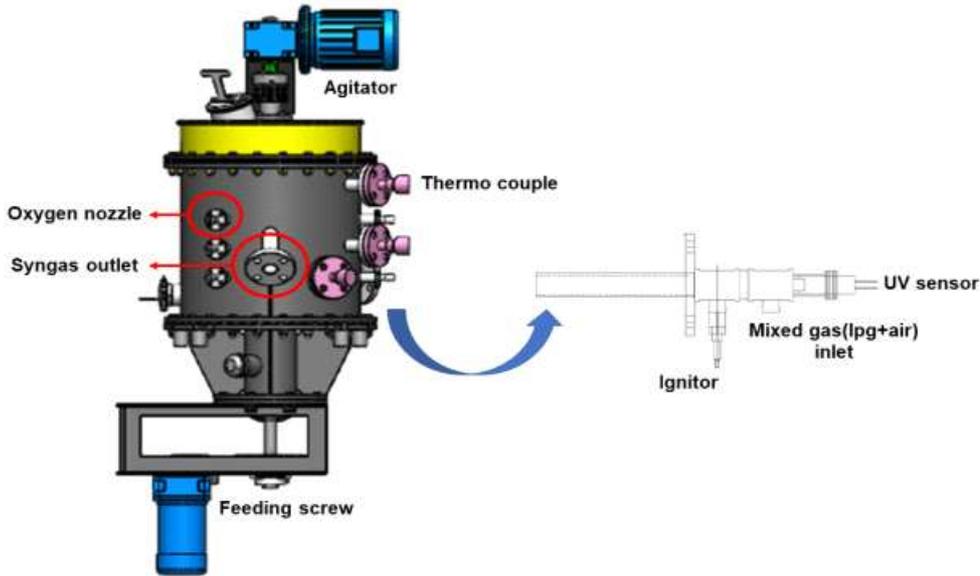


그림 2-32. 가스화 반응기

2-5-3. 정제 설비

- 합성가스 중에 포함된 분진을 제거하기 위하여 900 °C 이상의 고온 가스에도 적용 가능한 1000 mm 크기의 국산 세라믹 필터를 적용하였으며 역세 방법은 3×2 배열 기준으로 차압신호에 의해 2개/회 역세정 후 순차적으로 자동 역세하도록 구성함.
- 집진장치 내부에서 유입되는 가스의 속도가 너무 빠르면 역세정 시 분진의 낙하를 방해하고 다시 부유되면서 필터에 달라붙는 현상이 발생하여 집진 효율이 감소하게 되므로, 필터를 통과하는 가스의 속도인 상승속도(can velocity)는 미세입자 평균입경을 1 μm 이하 크기로 가정하고 여유율을 적용하여 0.3 m/sec 이하가 되도록 집진장치 몸체의 내경을 결정함.

$$Vc(m/s) = \frac{(\text{Process gas volume})}{(\text{Vessel cross-sectional area}) - (\text{Filter cross-sectional area})}$$

- 세라믹 필터 수량은 합성가스 중 분진을 99% 이상 제거해야하며, 필터에서 압력손실 발생 시 안정적인 운전에 방해요인이 되므로 여유율을 고려하여 수량은 6개로 적용하였으며, 필터의 압력손실은 허용 차압인 0.1 kg/cm² 이하로 설정하였음.
- 운전 중 필터 표면에 분진층이 형성되면 주기적으로 역세를 통해 분진을 탈리시키기 위하여 고순도 질소를 이용하여 필터를 탈진할 수 있는 pulse-jet 방식을 적용하였음.

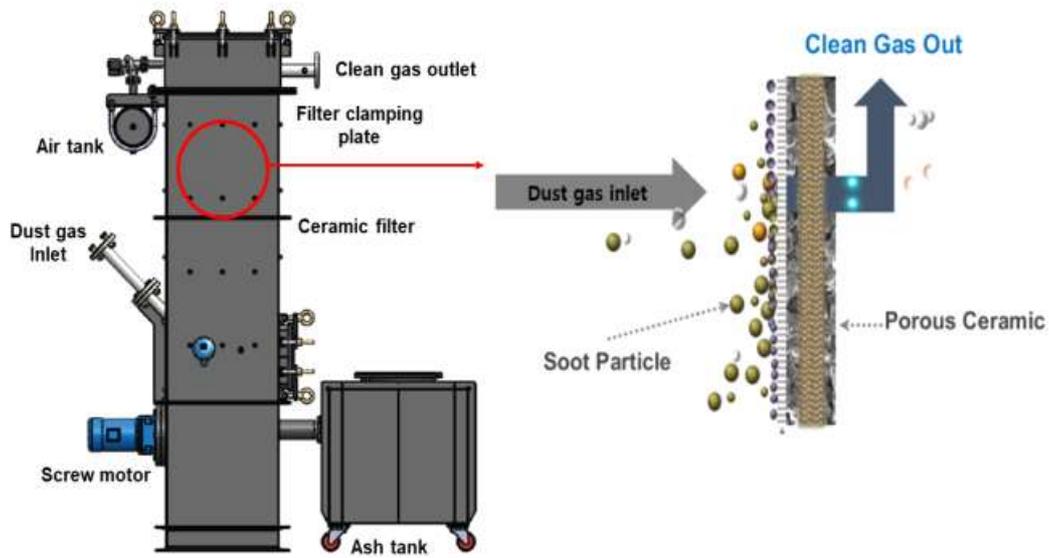


그림 2-33. 세라믹 필터 적용 집진설비

표 2-16 집진설비 제작 조건

항 목	설계 조건
합성가스 유량 [Nm ³ /h]	15
합성가스 Actual 유량 [Am ³ /h]	0.52
여과속도(Face velocity) [cm/sec]	0.83
상승속도(Can velocity) [m/sec]	0.3 이하
필터 압력손실 [kg/cm ²]	0.1 이하

표 2-17 세라믹 필터 사양

항 목	사 양
몸체 재질	Al ₂ O ₃
세라믹필터 OD [mm]	60
세라믹필터 ID [mm]	48
세라믹필터 길이 [mm]	1,000
필터 여과면적 [m ² /개]	1.049



세라믹 필터 시작품

필터 표면 형상

필터 단면 형상

그림 2-34. 세라믹 필터 시작품 및 형상

2-5-4. 고온 송풍기

- 가스화 반응을 통해 생성된 합성가스는 정제설비인 집진장치에서 미세분진을 제거 후 약 500 °C의 고온의 가스를 배출하게 되므로 가스화 공정에 적용 가능하도록 고온용 송풍기를 설계/제작하였음.
- 고온 송풍기는 V-belt 타입을 적용하였고 고온에 의한 구동부의 손상을 방지하기 위하여 냉각 장치를 구성하였고 합성가스 유량을 제어할 수 있도록 인버터 제어방식을 적용하였음.

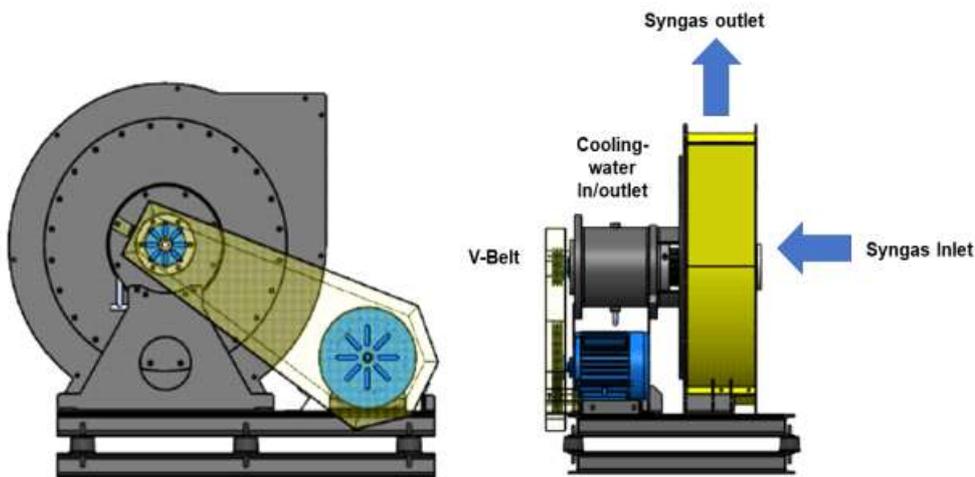


그림 2-35. 고온용 송풍기

2-5-5. 합성가스 연소기

- 고농도의 합성가스 유입 시 초기 수동 점화 후 합성가스 연소열에 의한 연소 방식을 적용하여 안전하게 연소되어 대기 중으로 배출되도록 하였고 이중 자켓 구조로 일부 합성가스 연소 폐열을 반탄화 연료 제조 설비의 건조 공정 등에 이용 가능하도록 제작하였음.

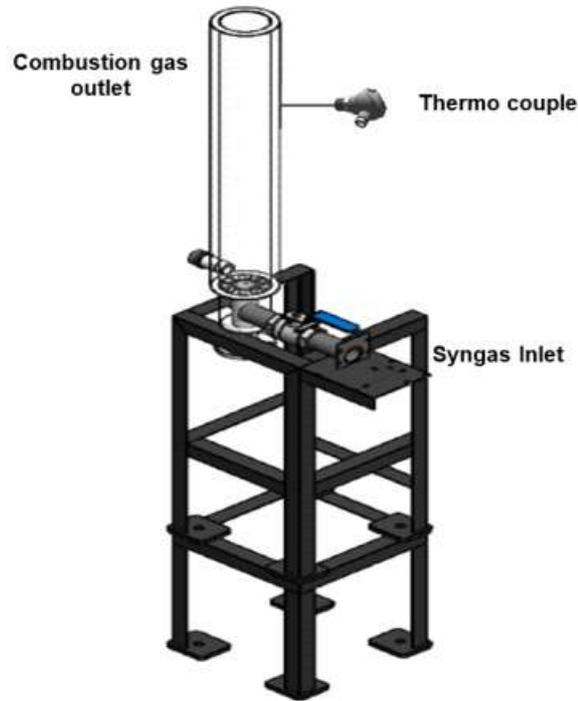


그림 2-36. 합성가스 연소기

2-5-6. 제어 설비

- 반탄화 연료 가스화 시스템을 운전 및 제어하기 위한 제어설비는 system overview, trend, alarm, data file, EMG stop으로 구성되어 있으며 전체 시스템의 제어, 운전 성능평가 데이터의 실시간 저장과 출력이 가능함.
- 운전용 HMI 소프트웨어는 CIMON program을 적용하였고 TCP/IP 통신 모듈을 통해 PLC와 연결되어 SCADA 역할과 동시에 PLC에서 수집된 공정변수를 감시하며 제어신호를 운전자가 용이하게 제어 가능함.

표 2-18 제어설비 설계 조건

항 목	사 양
기본 제어방식	단위설비 자체제어 및 주요 신호 제어실 전송
경제성	가격대비 성능이 우수한 PLC 시스템 선정
호환성 및 확장성	향후 확장이 가능한 통신방식 선정
운전 용이성	그래픽 운전화면 방식
데이터 수집	데이터 베이스 프로그램 사용
비상조치	이상 시 알람 및 인터록 구성
운전 상태 파악	운전 상태 및 가스 조성 등 실시간 파악

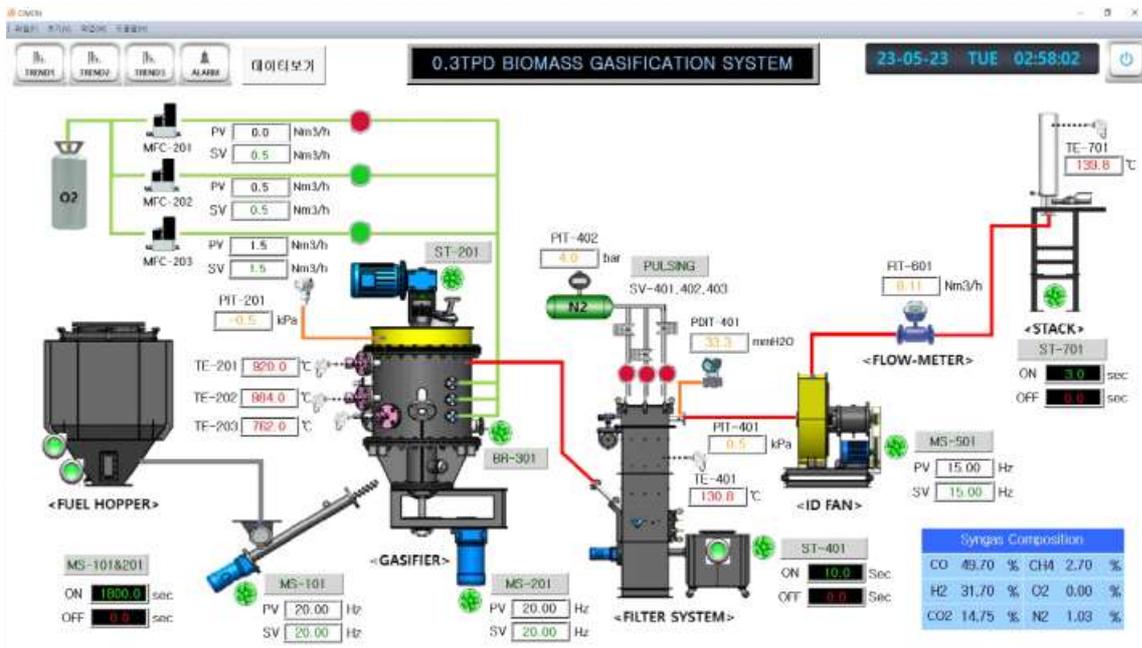


그림 2-37. 제어설비 HMI 운전제어 구축 화면

- 가스화 시스템 상세 실시설계 및 제작 도면을 기준으로 단위 설비별 시작품을 제작하였고 전체 시스템을 연계한 0.3톤/일급 반탄화 연료 가스화 시스템 및 제어실을 구축 완료함.

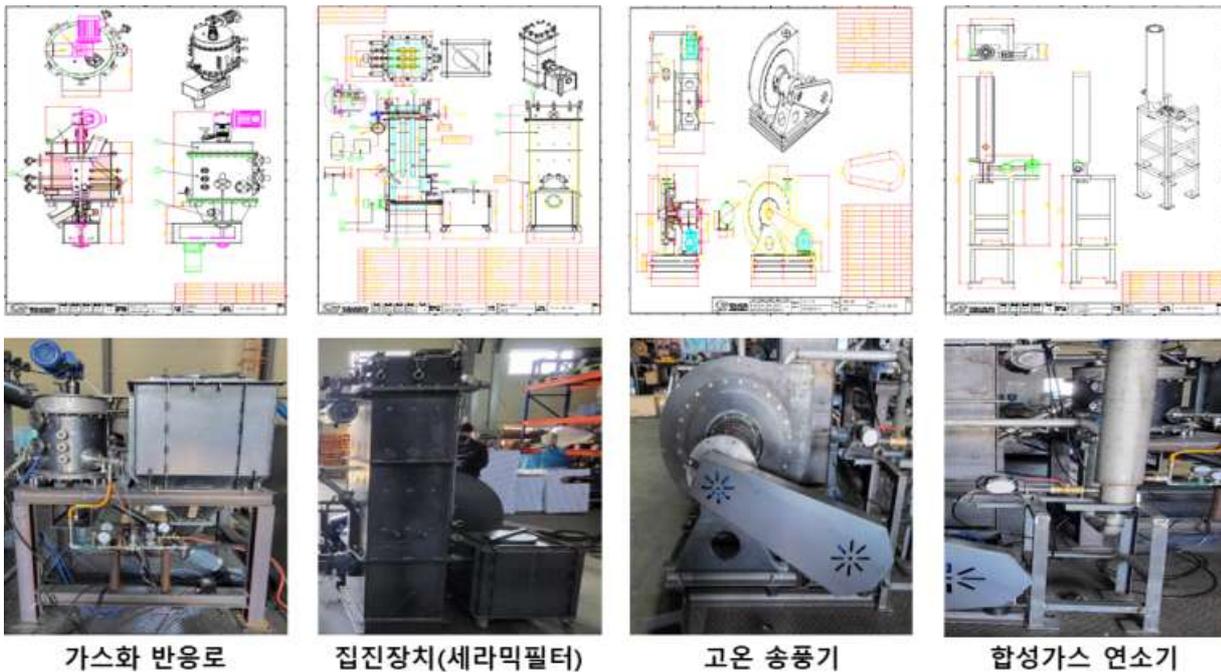


그림 2-38. 0.3톤/일급 반탄화 연료 가스화 시스템 주요 설비 제작도면 및 시작품



<0.3 TPD 반탄화 가스화 시스템 설치 전경>

<운전 제어실 설치 전경>

그림 2-39. 0.3톤/일급 반탄화 연료 가스화 시스템 및 제어실 설치 전경

2-6. 시운전을 통한 반탄화 연료 가스화 특성 및 운전성능 파악

2-6-1. 시운전을 통한 반탄화 연료 가스화 반응 특성 파악

- 0.3톤/일급 반탄화 연료 가스화 시스템 구축 후 반탄화 연료에 대한 가스화 특성 및 운전 인자를 파악하고자 시운전을 통해 운전조건을 도출하였고 운전 성능을 확인함.
- 1차 시운전을 통해 반탄화 연료 Feed 투입 속도(30~60 Hz)에 따른 가스화 반응 특성 확인 결과 투입 속도가 증가할수록 H₂/CO비는 증가하는 경향을 보이고 CO 농도는 감소하는 경향을 나타내었는데 이는 가스화 반응에 필요한 체류시간의 영향으로 실험을 통해 적절한 합성가스 생산비 도출 및 운전 온도 유지를 위한 운전 인자를 파악함.



Sample	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Sulfur
#1	57.89	5.07	27.45	0.83	0.0
#2	57.7	5.14	28.1	0.74	0.0
Avg	57.8	5.11	27.78	0.79	0.0

그림 2-40. 반탄화 연료 형상 및 성분 분석 결과

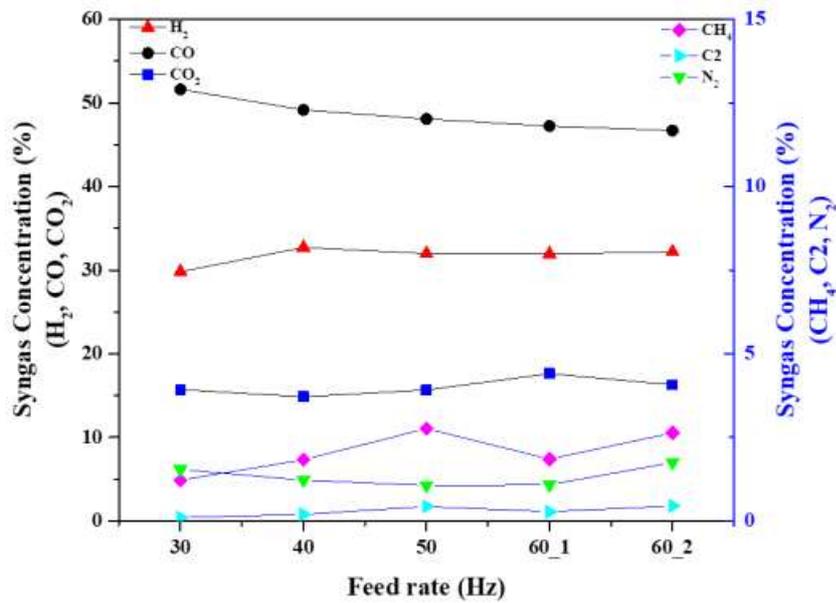


그림 2-41. 반탄화 연료 투입 속도에 따른 가스화 반응 특성

표 2-19 반탄화 연료 투입 속도에 따른 합성가스 조성 변화

실험결과		Feed rate(Hz)				
		30	40	50	60_1	60_2
조성 (%)	H ₂	29.82	32.72	31.98	31.94	32.19
	CO	51.63	49.17	48.09	47.23	46.70
	CO ₂	15.70	14.86	15.68	17.63	16.28
	N ₂	1.54	1.22	1.06	1.08	1.75
	CH ₄	1.22	1.83	2.76	1.85	2.64
	C ₂ H ₄	0.04	0.10	0.25	0.13	0.28
	C ₂ H ₆	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02
	C ₂ H ₂	0.06	0.09	0.18	0.15	0.14
H ₂ /CO		0.58	0.67	0.67	0.68	0.69
H ₂ + CO (%)		81.44	81.89	80.07	79.17	78.89

- 2차 시운전을 통해 반탄화 연료 가스화 운전 성능 확인 결과 정상운전 구간에서 반응기 운전 온도 1000~1100 °C 조건에서 합성가스 조성은 평균 CO 51.1%, H₂ 23.3%, CO₂ 17.2%, CH₄ 1.4%, O₂ 0.1%, C_xH_y 1.4%로 분석됨.
- 가스화 반응의 열역학적 효율을 나타내는 지표인 냉가스 효율(cold gas efficiency)은 55.6%로서 1단계 성능 목표인 50% 이상을 만족하는 것으로 분석됨.

$$(CGE(\%)) = \frac{\text{생산된 합성가스 발열량(kcal/h)}}{\text{투입된 반탄화연료 발열량(kcal/h)}} \times 100$$

- 시운전 결과를 바탕으로 단위설비별 운전 특성을 파악하였고 운전 중 파악된 trouble shooting을 통해 가스화 공정 개선 사항 및 가스화 공정의 주요 영향인자(반응온도, ER, 수분 함량) 등 비교 분석을 통해 연료전지에 적합한 최적 가스화 운전 조건을 도출함.

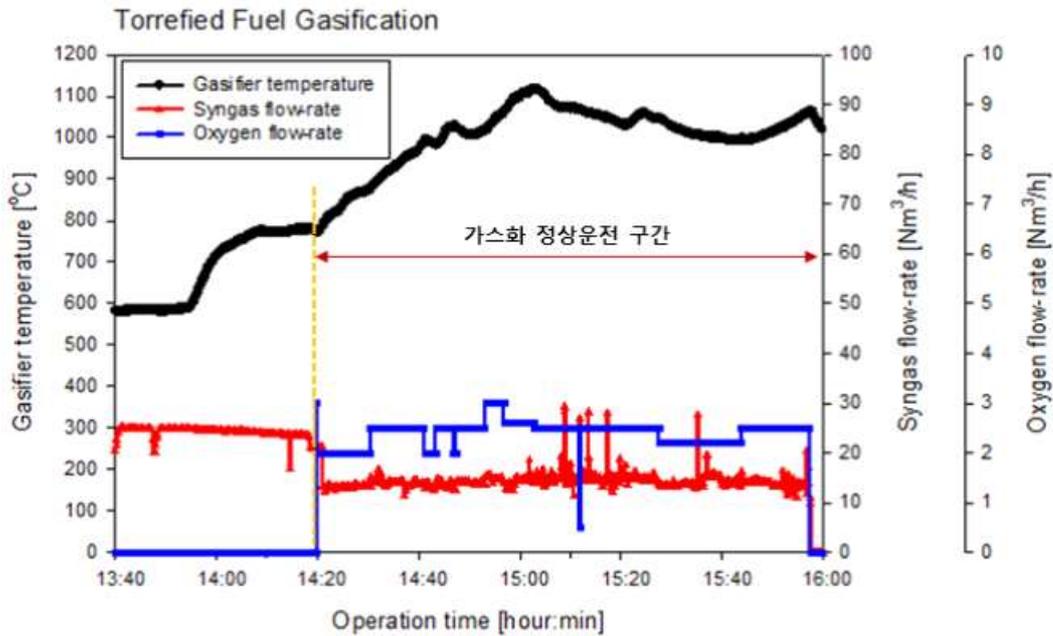


그림 2-42. 반탄화 연료 가스화 시운전 결과

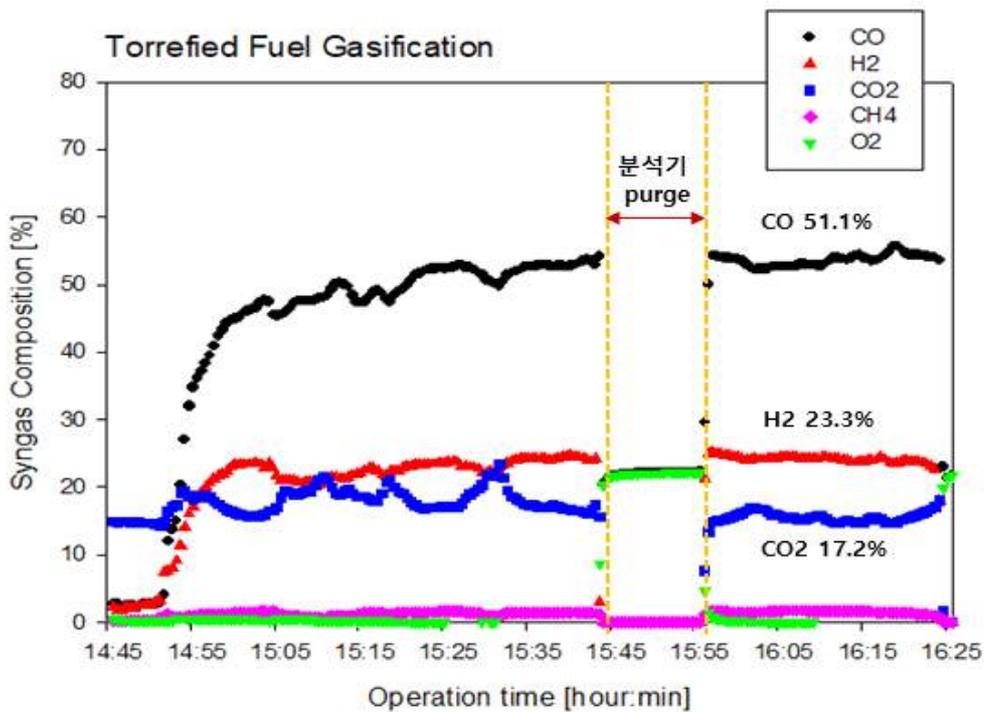


그림 2-43. 반탄화 연료 가스화 합성가스 조성

2-6-2. 운전인자 도출을 위한 Trouble shooting 파악

- 시운전을 통해 반탄화 연료 가스화 운전 및 주요 설비 inspection 과정을 통해 실측자료를 기반으로 trouble shooting 요인을 찾고 해결방안을 도출하여 장기 성능평가 시 발생할 수 있는 Issue들을 시스템 개선을 통해 사전 조치함.
- 가스화 운전 시 발생 가능한 기계적 요인은 주로 원료공급 문제로서 설비 개선을 통해 해결 방안을 도출하였으며, 운전 요인은 안정적인 가스화 반응조건 유지를 위해 실시간 data trend 분석을 통해 상태를 확인하고 운전 상태에 따른 sequence 적용을 통해 해결함.

표 2-20 반탄화 연료 가스화 시스템 trouble shooting

발생 원인		문제점	해결 방안
기계적 요인	원료 브릿징	반탄화 연료 브릿징 현상에 따른 정량 공급 문제 발생	연료탱크 내 브릿징 방지를 위한 설비 추가 설치
	모터 부하 및 스크류 파손	반탄화 연료 수분함량이 높을 경우 모터 과부하 발생에 따른 스크류 파손 현상 발생	반탄화연료 건조를 통한 수분함량 조절 및 감속기 교체
	연료탱크 잔량	부정확한 연료탱크 잔량에 의해 리필 시 공급에 따른 운전 조건 부하 변동 현상 발생	연료탱크 내 센서 이중화를 통해 low limit 전 연료 리필 진행
운전 요인	반응기 하부 슬랙 발생	가스화기 운전온도 고온 상승 시 슬랙발생에 따른 하부 연료고착화 현상 발생	가스화기 하부 산화제 공급량 자동제어 통한 반응온도 유지

2-6-3. 반탄화 연료 가스화 시스템 운전성능 파악

- 반탄화 연료 가스화 시스템 개선 후 실험을 통해 최적 운전조건을 도출하였고 합성가스 생산 및 오염물질 발생 특성 분석을 통해 가스화 성능을 파악하였으며, 공인분석기관 평가를 통해 운전성능을 검증함.
- 합성가스 조성은 MRU(MRU, NOVA prime) 분석기를 이용하여 1초 단위로 실시간 연속 측정하였고, Tedlar bag에 포집하여 가스크로마토그래피(Nexis GC-2030, Shimadzu)를 이용하여 정량 분석함.



(a) MRU



(b) GC

그림 2-44. 합성가스 분석기

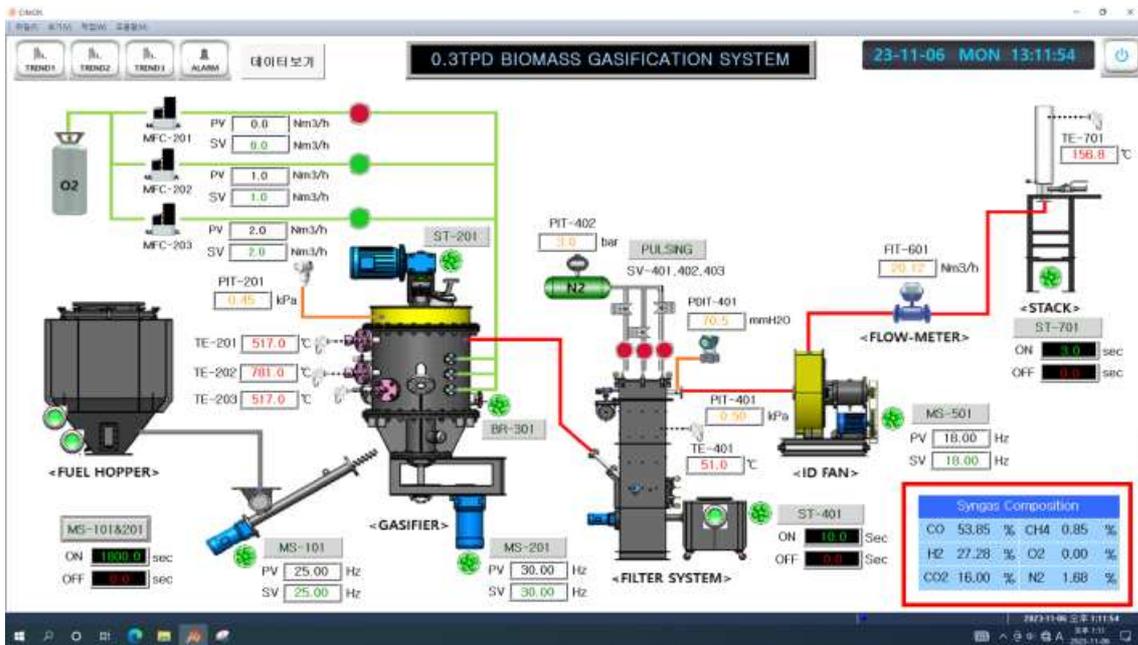


그림 2-45. 반탄화 연료 가스화 운전 성능 실험 제어화면

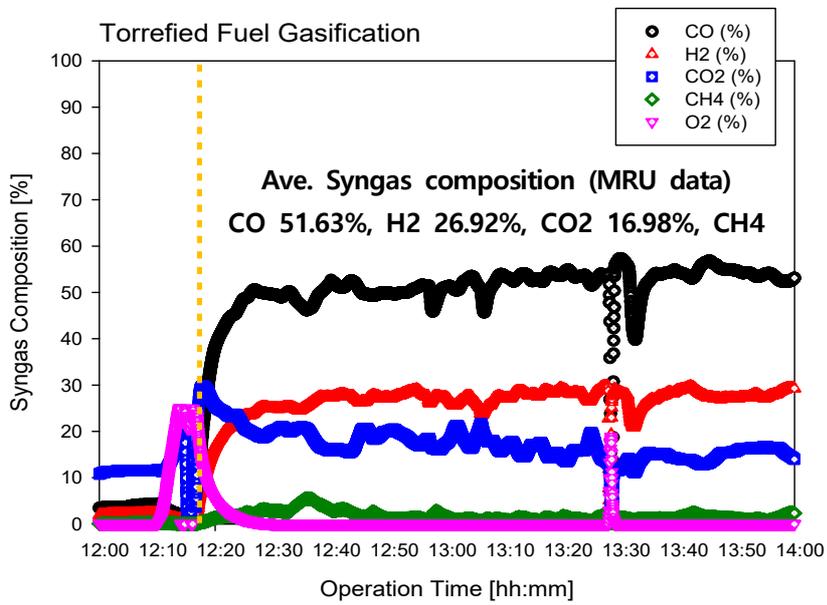


그림 2-46. 반탄화 연료 가스화 합성가스 조성(MRU)

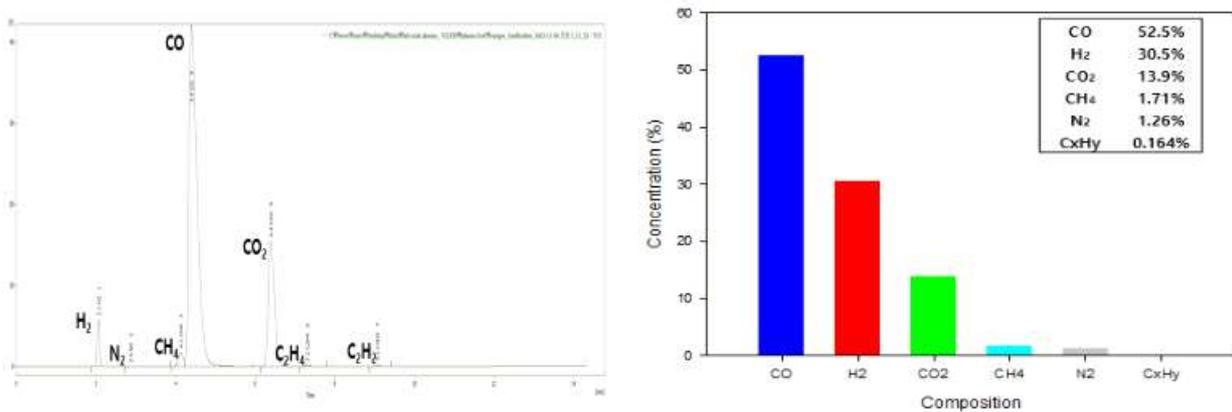


그림 2-47. 반탄화 연료 가스화 합성가스 조성(GC)

시험 성적서 (TEST REPORT)



성적서 번호 : 23-071451-01-1
Report No.

페이지 (1) / (총 2)
Page of Pages



1. 의뢰자 (Client)

기관명 (Name) : 고등기술연구원연구조합

주소 (Address) : 경기도 용인시 처인구 백암면 고안로51번길 175-28

의뢰일자 (Date of Receipt) : 2023. 11. 06.

2. 시험성적서의 용도 (Use of Report) : R&D 성과물검증

3. 시험대상품목/물질/시료명 (Test Sample)

제품명 (Description) : 반탄화 및 가스화 시스템

제조회사 (Manufacturer) : 고등기술연구원연구조합

모델명 (Model Name) : -

제조번호 (Serial Number) : -

기타 (Remark) : -

4. 시험기간 (Date of Test) : 2023년 11월 06일 ~ 2023년 12월 07일

5. 시험장소 (Location of Test) :

KTL 고정시험실

현장시험 (주소 : 경기도 용인시 처인구 백암면 고안로 51번길 175-28)

6. 시험규격/방법 (Test Standard/Method) : 시험의뢰자가 제시한 시험방법에 준함.

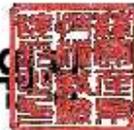
7. 시험결과 (Test Results) : 후연참조

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

확 인 Affirmation	작성자 (Tested by)	기술책임자 (Technical Manager)
	성명 (Name) : 정상철 <i>Jeong Sang-cheol</i> (Signature)	성명 (Name) : 전용우 <i>Jeon Yong-woo</i> (Signature)

2023. 12. 26.

한국산업기술시험원



서울특별시 구로구 디지털로26길 87 (구로동) (87, Digital-ro 26-gil, Guro-gu, Seoul, KOREA) Tel.02-860-1273 Fax: 02-860-1679

FP104-05-00

시험 결과 (Test Results)

1. 시험항목 및 방법

시험 항목	단위	시험방법
고형연료 냉가스 효율	%	$\text{냉가스 효율} = \frac{\text{합성가스 발열량(kcal/h)}^1}{\text{유입원료 발열량(kcal/h)}} \times 100(\%)$
에너지밀도 (Energy densification)	-	$\text{에너지밀도}(E_D) = \frac{\text{반탄화연료 발열량}}{\text{유입원료 발열량}}$
반탄화 고체연료 생산량	kg/일	24시간 동안 생산된 반탄화 고체연료 무게

¹ 합성가스 발열량은 시험의뢰자가 제시한 값(Dulong 식을 이용한 이론값)을 사용함.

2. 시험결과

시험 항목	단위	시험결과
고형연료 냉가스 효율	%	64.01
에너지밀도 (Energy densification)	-	1.49
반탄화 고체연료 생산량	kg/일	372

운전조건(현장운전 값) 및 고체연료 발열량
 - 반탄화연료 공급량: 12 kg/h
 - 반탄화연료 발열량: (평균) 6075.6 kcal/kg
 - 유입원료 발열량: (평균) 4603.7 kcal/kg
 - 합성가스 유량: 20.12 Nm³/h

3. 시험품 사진



(끝)

- 실시간 농도 측정 결과 정상운전 구간에서 합성가스 조성은 평균 CO 51.63%, H2 26.92%, CO2 16.98%, CH4 1.72%, O2 0.13였으며, GC 분석 결과 CO 52.5%, H2 30.5%, CO2 13.9%, CH4 1.71%, CxHy 0.164%로 분석됨.
- 공인분석기관 평가 결과 CO 57%, H2 26.9%, CO2 14.9%, CH4 1%, N2 0.2%였으며, 합성가스 생산 성능 비교 분석 결과 모든 조건에서 냉가스효율은 과제 성능 목표인 60% 이상 만족하는 것을 확인함.

표 2-21 반탄화 연료 가스화를 통한 합성가스 생산 성능 분석 결과

Item	MRU	GC	공인분석	unit
Fuel Feed Rate		12		kg/h
Syngas flow rate, dry* ¹⁾		20.12		Nm ³ /h
Calorific Value(Raw Material)		6875.6		kcal
CO	51.63	52.5	57	volume %
H ₂	26.92	30.5	26.9	volume %
CO ₂	16.98	13.9	14.9	volume %
CH ₄	1.72	1.71	1.0	volume %
O ₂	0.13	-	-	volume %
N ₂	2.62	1.39	0.2	volume %
Cold gas efficiency* ²⁾	61.54	64.82	64.01	%

*¹⁾ 합성가스 유량계 지시 값 평균(온도/압력 조건 보정된 값)

*²⁾ Cold gas efficiency

= (생산된 합성가스 발열량) / (투입연료 발열량)

= [합성가스 유량(Nm³/h) x (합성가스 열량(kcal/Nm³))] / [(연료 공급량(kg/h) x 원료 발열량(kcal/kg)] x 100(%)

3. 스마트팜 실증을 위한 연료전지 연계 가스화 및 열병합발전 시스템 구축

3-1. 반탄화 연료 가스화 시스템 실증 연계 구축

- 본 과제 목표인 농산부산물 기반 연료전지 열병합발전 통합 시스템 장기실증(30일)을 달성하기 위해 실증사이트인 밀양스마트팜혁신밸리에 농산부산물 반탄화 연료 가스화 시스템을 연계 구축함



그림 2-48. 농산부산물 반탄화 연료 가스화기 스마트팜 실증사이트 연계 이송 및 설치작업

- 농산부산물 반탄화 연료를 가스화기에 투입 전 가스화기 호퍼 투입구에서 수분에 의한 연료 브릿징 현상을 방지하기 위하여 건조장치를 이용하여 수분을 제거함. 수분제거는 60 °C 온도에서 약 72시간 동안 건조되어 가스화기에 투입하였음.



그림 2-49. 농산부산물 반탄화 연료 건조장치 설치 사진

- 가스화기에서 생산된 합성가스를 탄소연료전지에 공급하기 위하여 가스화기 후단부에 배관을 설치하고, 탄소연료전지 공급라인과 잉여 합성가스 연소기 공급라인 두 갈래로 분기하여 연결하였음. 배관 중간에 응축수 배출라인을 충분히 설치하고 압력강화로 인한 유량 저하 또는 과도한 합성가스 공급을 제어하기 위해 밸브를 설치하여 유량을 조절하였음.



그림 2-50. 농산부산물 반탄화 연료 가스화기 생산 합성가스 공급 연결라인

3-2. 스마트팜 온도제어를 위한 흡착식 냉난방 시스템

- 고농도의 합성가스 유입 시 초기 수동 점화 후 합성가스 연소열에 의한 연소 방식을 적용하여 안전하게 연소되어 대기 중으로 배출되도록 하였고 이중 자켓 구조로 일부 합성가스 연소 폐열을 반탄화 제조 설비의 건조 공정 등에 이용가능 하도록 제작함
- 표 2-22의 합성가스 조성은 연소 시 약 43~55 kW의 열이 발생하는 것으로 분석됨
- 배가스 연소열을 활용하여 냉/난방에 활용하여 열병합발전시스템의 에너지 효율에 기여
- 냉난방 부하에 따라, 여유율을 포함하여 약 13.7 kW의 열회수가 가능하도록(60 °C, 20 LPM 운수 생산 기준) 그림 2-51과 같이 연소기 설계를 변경함
- 유사 Shell & tube 타입 열교환기-액이 가능하도록 배열회수 열교환기를 내부에 탑재함

표 2-22 합성가스 조성 및 유량

합성가스 조성 (vol%)					유량 (Nm ³ /h)	
CO	H ₂	CO ₂	CH ₄	N ₂	총 유량	인입 유량
57	26.9	14.9	1	0.2	20	14~18

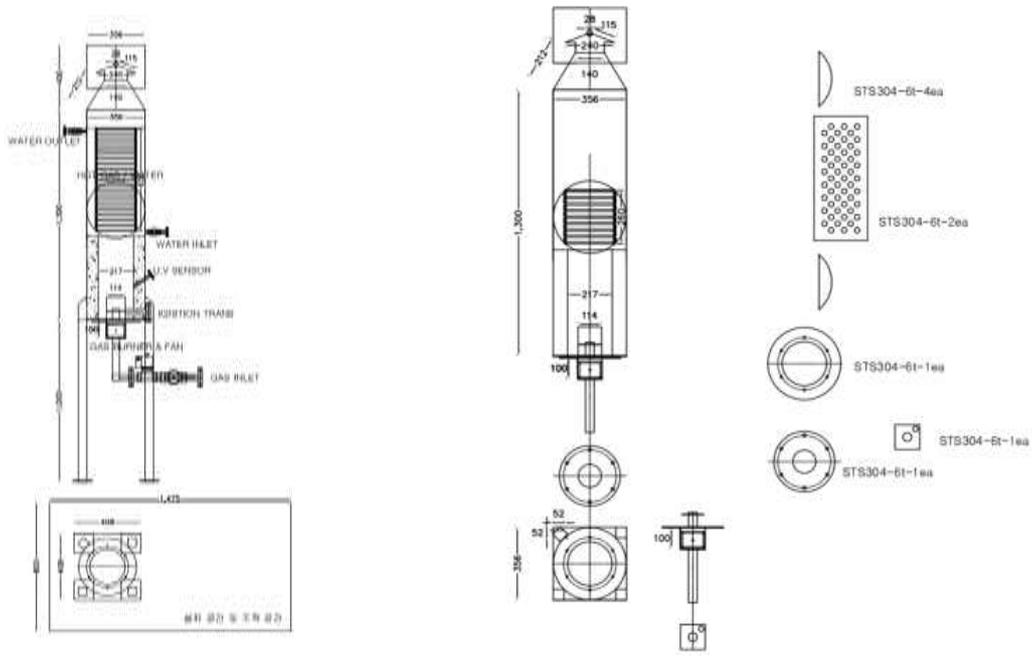


그림 2-51. 합성가스 연소기

- 온실 적용 복층유리 열관류율은 이중으로 구성된 6 mm 맑은 유리와 중공층의 두께가 12 mm 로써 건조공기가 포함된 이중유리를 사용한다고 가정하여 분석하였으며, 이를 토대로 필요한 냉난방 부하를 아래 식을 통해 산출함.

$$q = K \cdot A \cdot \Delta t$$

(K: 열관류율 (W/m²·K), A: 온실의 유리 면적 (m²), Δt: 온도차(K))

- 냉난방의 총 부하는 온실의 유리에서 취득되는 열량과 바닥 면으로부터 취득되는 열량과 기타 (출입문 및 침기) 열량이 전체의 50%라고 가정하여 산출함.
- 냉난방 시스템의 구성을 위해, 열원을 합성가스 연소기로 변경하였고, 가스화 기기의 유지보수 등의 상황을 고려하여, 온수 및 냉수 축열조를 도입하는 것으로 설계함. FCU는 온실 내부 공기 유동을 고려하여 여유율을 적용한 설비용량을 갖는 제품으로 선정함. 냉난방 부하 및 시스템 설계의 사양을 아래 표 2-23에 정리함.

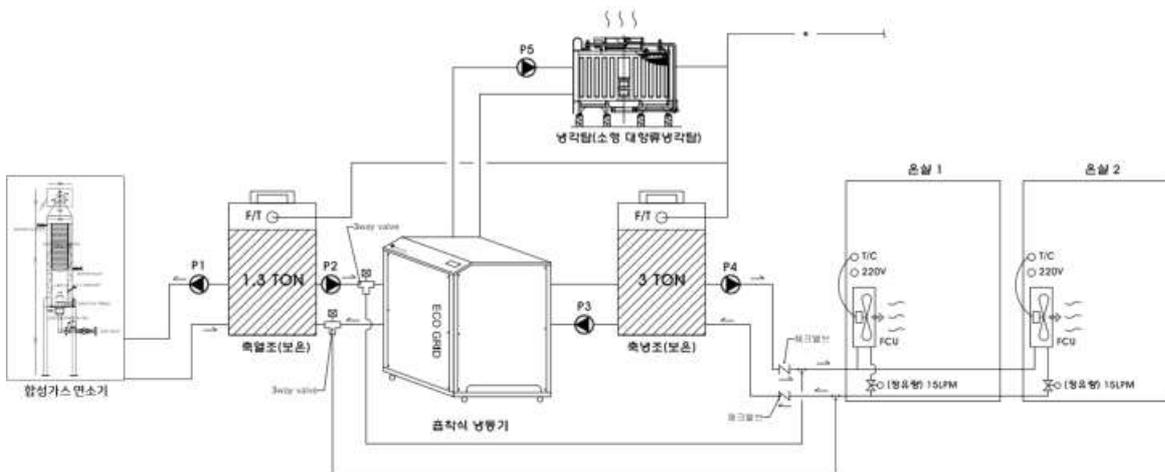


그림 2-52. 냉난방 시스템 개념도

표 2-23 냉난방 시스템 설계 사양

명칭	역할	값	비고
냉방부하	냉방	5 kW	온실 1개소 기준 (바닥면적 116 m ²)
난방부하	난방	13 kW	상동
FCU (Fan Coil Unit)	냉난방 공기조화기	냉방 시 6 kW 난방 시 14 kW	1대 기준
흡착식 냉동기	냉방용 냉수 생산	5 kW	냉각수 공급을 위한 냉각탑 설비
축열조(온수)	냉난방용 온수 저장	1.3 Ton	난방부하의 33%
축열조(냉수)	냉방용 냉수 저장	3 Ton	냉방부하의 33%

- 난방운전은 열원으로부터 열을 생산하여, 온수 축열조에 저장하고, 온수 축열조를 통해 60 °C 의 온수를 FCU(Fan Coil Unit)에 공급하여 온실 내부에 대류난방을 실행하도록 되어 있으며, 실내온도 20 °C를 목표로 운전/정지를 반복하도록 설계함.
- 냉방운전은 열원으로부터 열을 생산하여, 온수 축열조에 저장, 온수 축열조의 60 °C 열로 흡착식 냉동기를 통해 12~15 °C의 냉수를 생산, 냉수 축열조에 저장하며, 저장된 냉수를 FCU에 공급하여 온실 내부에 대류 냉방을 실행하도록 되어 있으며, 실내온도 25 °C를 목표로 운전/정지를 반복하도록 설계함.

3-2-3. 현장 설치 및 운전

- 아래 사진과 같이 합성가스 연소기 및 냉난방 시스템의 설치를 진행하였으며, 실증 운전 일정에 따라 난방 시스템을 통해 온실 내부의 실내 온도를 20 °C로 일정하게 유지함.





그림 2-53. 합성가스 연소기 및 냉난방 시스템 설치 모습

3-3. 반탄화 연료 가스화 시스템의 탄소연료전지 연계 실증 운전

- 탄소연료전지 열병합발전 시스템 연계 반탄화 연료 가스화 시스템, 합성가스 연소기 및 냉난방 시스템의 통합 실증 시스템 구축 후 30일 이상 장기실증 실험을 진행함.

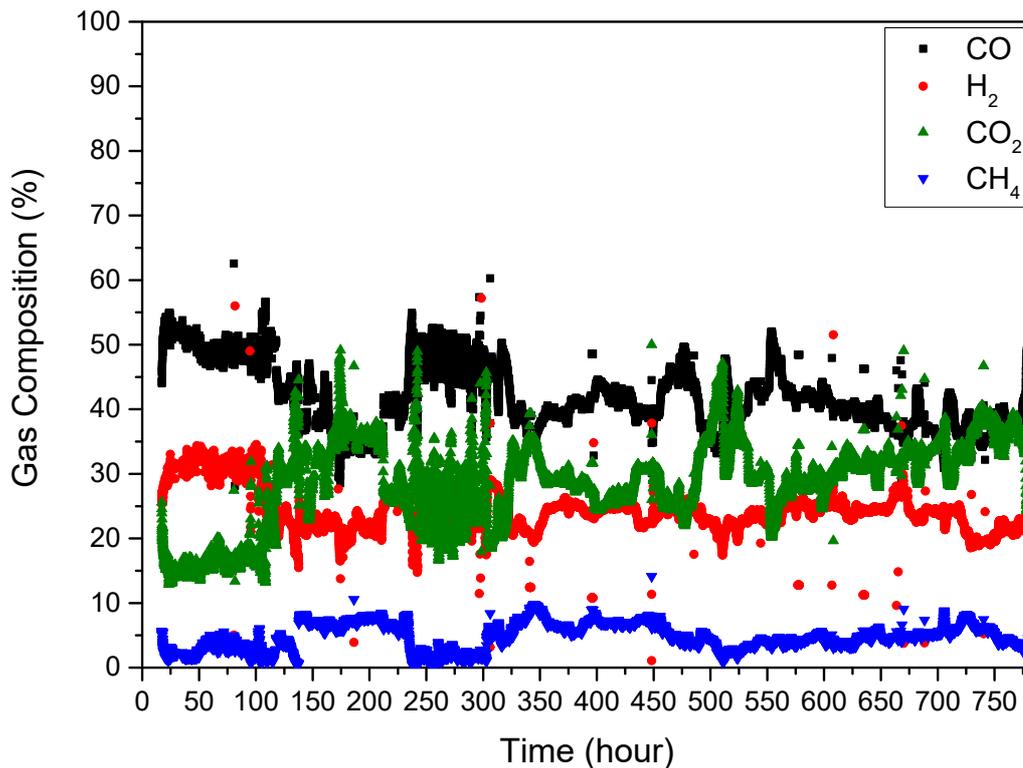


그림 2-54. 농산부산물 반탄화 연료 가스화 생성가스 조성 분석데이터

- 농산부산물 반탄화 연료 가스화 시스템의 장기운전 중 가스화기 내부 온도는 크게 3가지 범위로 나뉘어 합성가스 조성변화가 일어나는 것을 확인함.
- 가스화기 내부 온도 700~800 °C 구간에서 합성가스의 유량은 평균 11.16 Nm³/h 정도로 비교적 안정적으로 생산됨을 보이나 CO₂의 농도가 높아 연료전지 연료로써 품질이 낮음.
- 가스화기 내부 온도 800~900 °C 구간에서 합성가스의 유량은 평균 8.82 Nm³/h 정도로 낮게

생산되고 CO2의 농도도 높아 가스화 운전조건으로는 사용되기 어려움.

- 가스화기 내부 온도 900~1000 °C 구간에서 합성가스의 유량은 평균 10.55 Nm³/h, CO2 농도 22.11%로 연료전지 연료로써 합성가스 질이 좋고 범위 내 최적의 운전조건으로 확인됨.

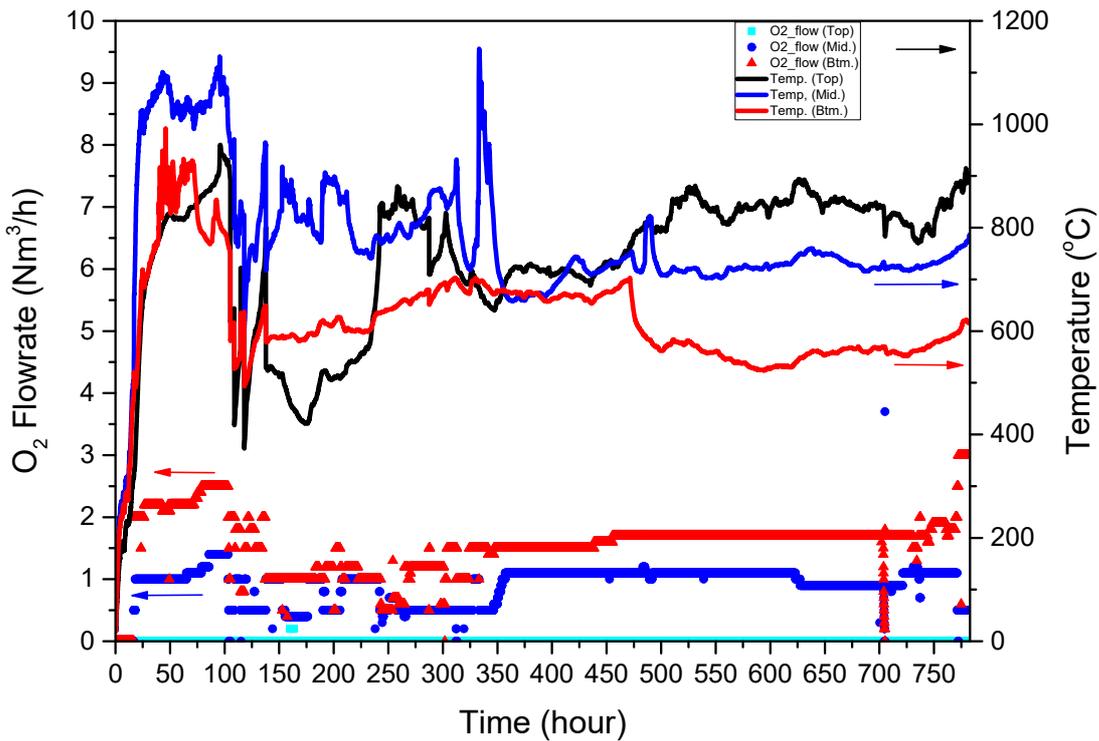


그림 2-55. 농산부산물 반탄화 연료 가스화기 내부 상중하단 공급 산소 유량 및 온도

표 2-24 가스화기 중단부 온도범위에 따른 합성가스 조성 특성

온도범위(°C)	CO(%)	H ₂ (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	합성가스 평균유량 (Nm ³ /h)
700~800	41.05	23.32	30.90	4.73	11.16
800~900	41.73	23.64	29.80	4.84	8.82
900~1000	47.70	26.63	22.11	3.56	10.55

4. 농산부산물 기반 탄소연료전지 열병합발전 시스템 공정 설계

4-1. 농산부산물 기반 연료전지 열병합발전 시스템 공정 모델링

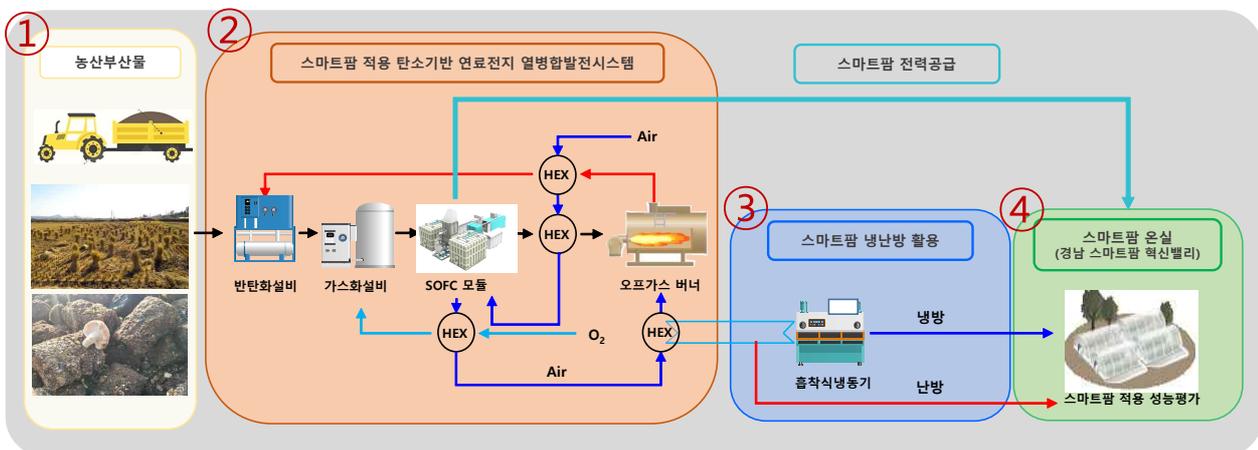


그림 4-56. 농산부산물 기반 탄소연료전지 열병합발전 공정의 개요도

- 농산부산물물을 이용한 반탄화 시스템, 반탄화된 고형물을 가스화 하는 가스화 시스템, 가스화된 합성가스를 이용한 탄소연료전지인 고체산화물 연료전지(SOFC), 연료전지로부터 생산되는 전기/열과 미반응 가스를 이용한 스마트팜 냉/난방 시스템의 전체 공정을 설계 진행함.
- 탄소연료전지 4 kW 발전 기준 전체 시스템 설계 위한 물질, 에너지 수치 분석 진행하고, 전체 열 네트워크 공정 구성을 위한 상호 요인 분석 및 기능 분석과 함께 시스템 최적화를 위한 설계 인자 분석을 진행함.

4-2. 탄소연료전지 기반 전체 시스템 물질, 에너지 수치 계산

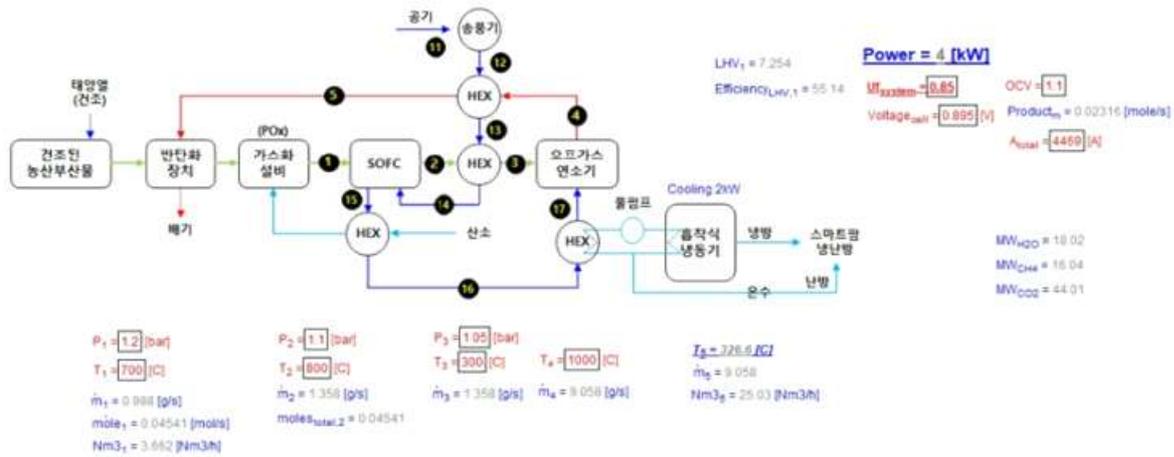


그림 4-57. 4 kW급 연료전지 열병합발전 물질수지 모델

- 탄소연료전지의 용량은 4 kW, 연료이용률은 85%, 각 열교환기의 열효율은 70%, 합성가스 조성은 가스화 시운전 결과 조건인 CO 51.1%, CO2 17.2%, H2 23.3%로 설정하여 합성가스 필요량을 아래 식에 의해 추산함.

$$\text{전력}(W) = P = I \times V$$

$$(P = 4 \text{ kW}, V = 0.895 \text{ V})$$

$$H_2 + CO \text{ 사용량} = I / (2 \times F)$$

$$(F = 96,485 \text{ J} / V \cdot \text{mol})$$

$$\text{합성가스 필요량} = \frac{(H_2 + CO \text{ 사용량}) / \text{연료이용률}}{H_2 \text{ mol}\% + CO \text{ mol}\%}$$

- 표 4-25과 같이 가스화 후 합성가스 중 H2와 CO의 분율이 각각 23.3%와 51.1%일 때 합성가스 필요량은 2.95 Nm3/h로 추산됨.

표 4-25 연료전지 조건 및 합성가스 필요량 계산 결과

전력	연료이용률	합성가스 H2 분율	합성가스 CO 분율	합성가스 필요량
4 kW	85%	23.3%	51.1%	2.95 Nm ³ /h

4-3. 농산부산물 기반 탄소연료전지 열병합발전 시스템 열물질수지 기반 공정모델링

- 계산식을 통해 구성된 농산부산물 기반 4 kW급 탄소연료전지 열병합발전 시스템의 열 및 물질 수지 모델의 열 및 물질수지 검증을 위해 공정 시뮬레이션 툴인 Unisim R480을 활용하여 모델을 구성하고 해석을 진행함.

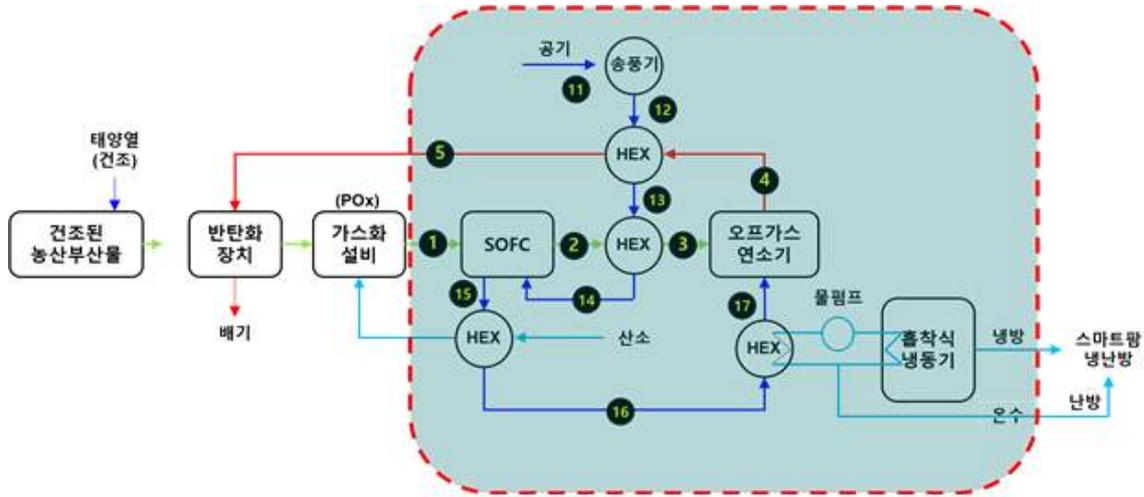


그림 4-58. 농산부산물 기반 탄소 연료전지 열병합발전 공정모델링 범위

- 시뮬레이션 툴의 특성 상 불특정 물질이 함유된 농산부산물 및 반탄화 연료의 모사가 어려우므로 원소 분율에 기반하여 모델링을 진행하였고, 가스화 후단(SOFC의 인입)부터 열교환망을 포함하여 해석을 진행함.

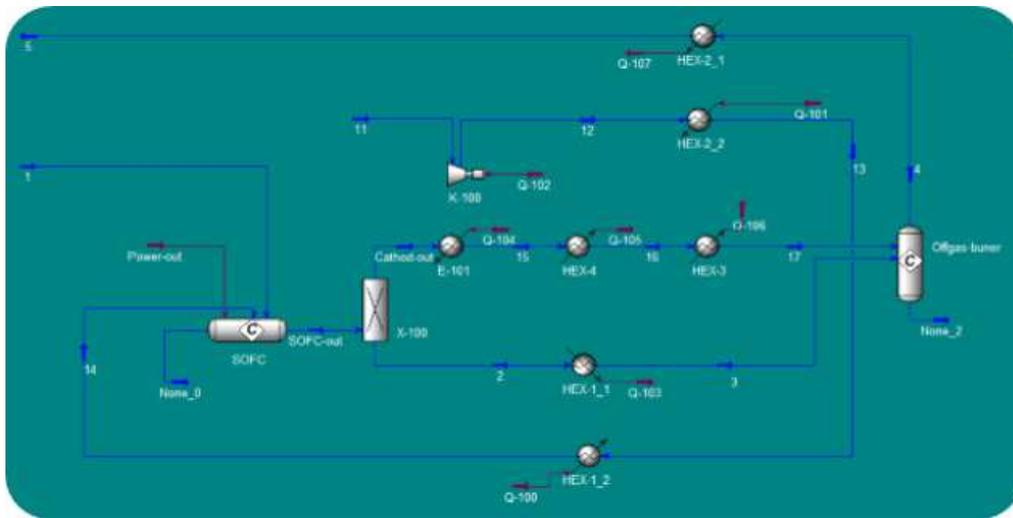


그림 4-59. 농산부산물 기반 탄소연료전지 열병합발전 공정모델 초안

- 농산부산물 기반 탄소연료전지 열병합발전 시스템 열교환망을 구성하기 위해 물질수지에 맞는 공정흐름을 구성하고 각 부분에서 필요열량을 가열기와 냉각기를 배치하여 열수지에 맞는 공정 구성을 모델링하였음.

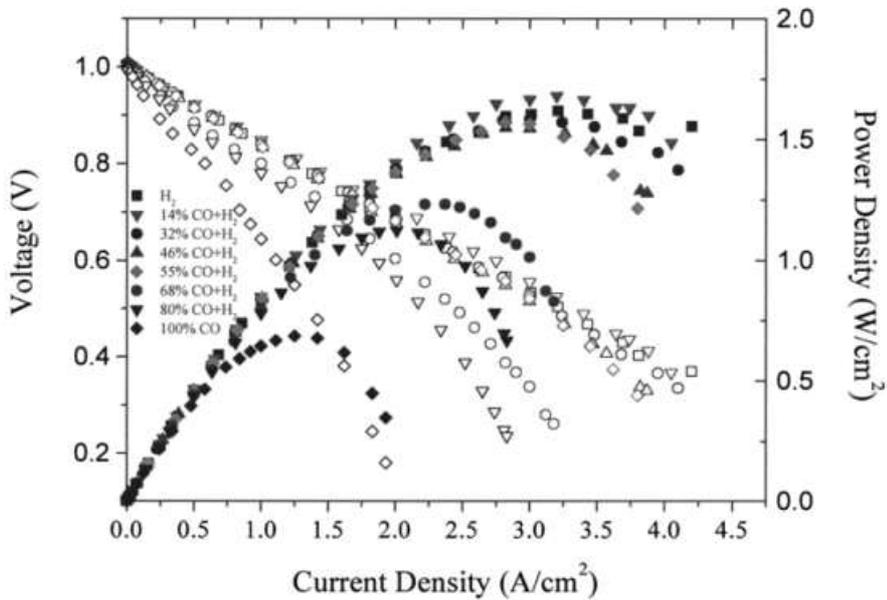


그림 4-61. 탄소연료전지 연료 중 H₂/CO 비에 따른 출력 거동
(Y. Jiang and A.V. Virkar, J. Electrochem. Soc., 150, A942-A951 2003)

- 가스화 후단 합성가스 중 CO의 51.1%로 H₂에 비해 약 2배 이상의 분율을 가지며, 기존 문헌에서는 탄소연료전지로 공급되는 H₂:CO의 비가 45:55보다 CO가 높은 영역에서는 출력저하가 급격히 진행됨을 보임(그림 4-61).
- 탄소연료전지로 공급되는 합성가스 중 H₂ 분율을 높이기 위해 가스화 후단 합성가스 흐름 일부를 분기하여 WGS (Water gas shift) 반응기를 구성하였고, 이를 통해 최적의 합성가스 비가 공급될 수 있도록 함.

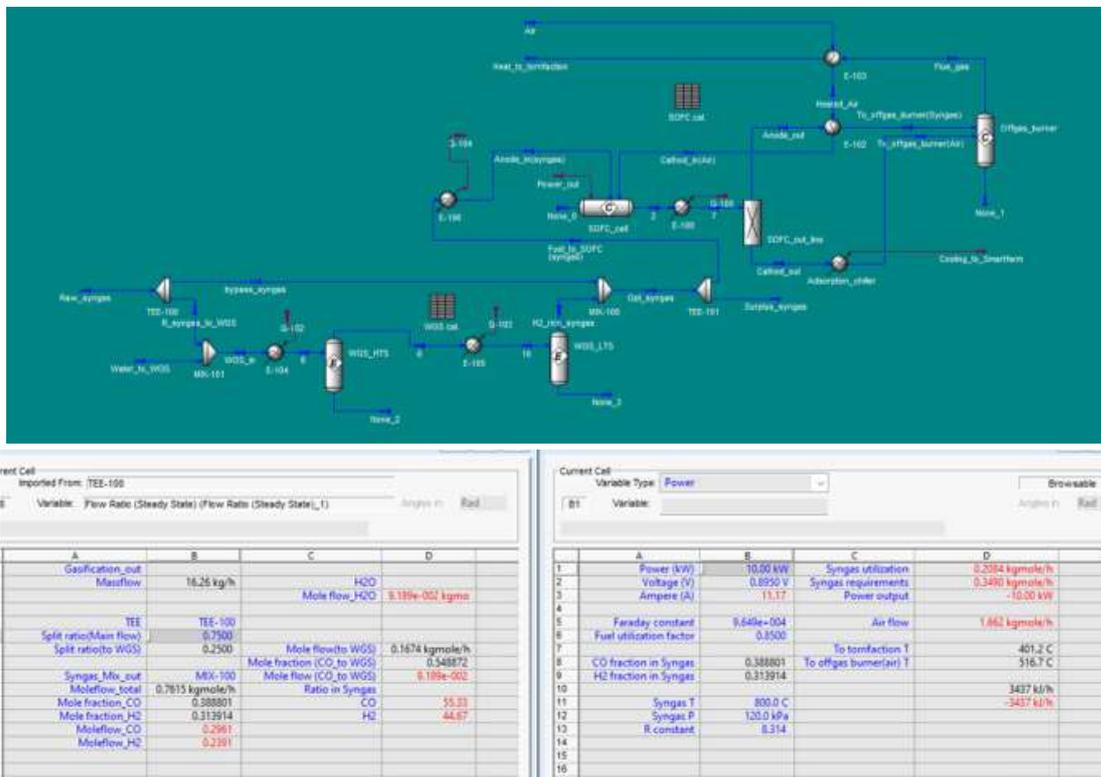


그림 4-62. 확장성 검토를 위한 탄소연료전지 열병합발전 공정 모델(합성가스 15 Nm³/h 기반)

4-4. 시스템 확장성을 고려한 탄소연료전지 용량별 열네트워크 구성 도출

- 탄소연료전지 열병합발전 공정의 확장성을 고려하여 용량별 열네트워크 최적구성을 도출하고 자 AEA (Aspen Energy Analyzer)를 활용하기 위해 Aspen HYSYS V11를 활용함.

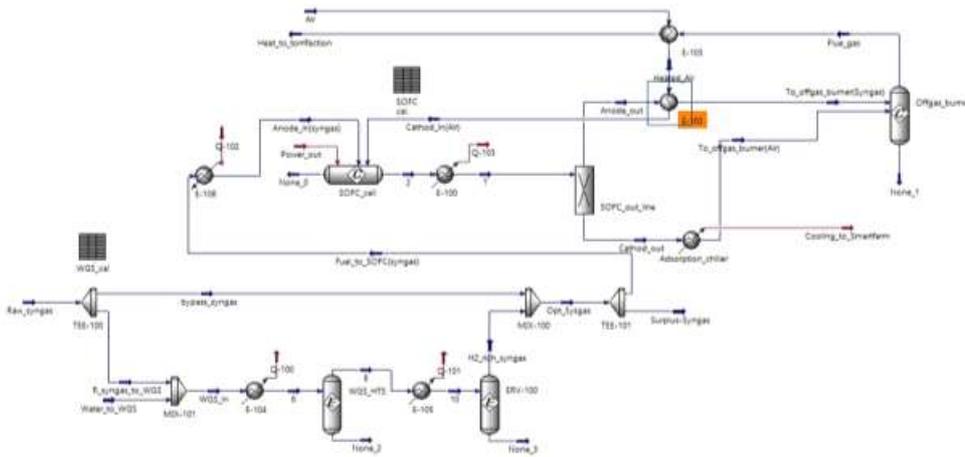


그림 4-63. Aspen HYSYS V11로 변환한 4 kW급 탄소연료전지 열병합발전 모델

- 가열기와 냉각기 등 유틸리티를 포함하지 않는 공정 구성에서 4, 12 및 20 kW 탄소연료전지 용량을 변수로 ΔT_{min} 은 모든 용량 케이스에서 10 °C로 지정하여 열교환망 최적화를 진행함.

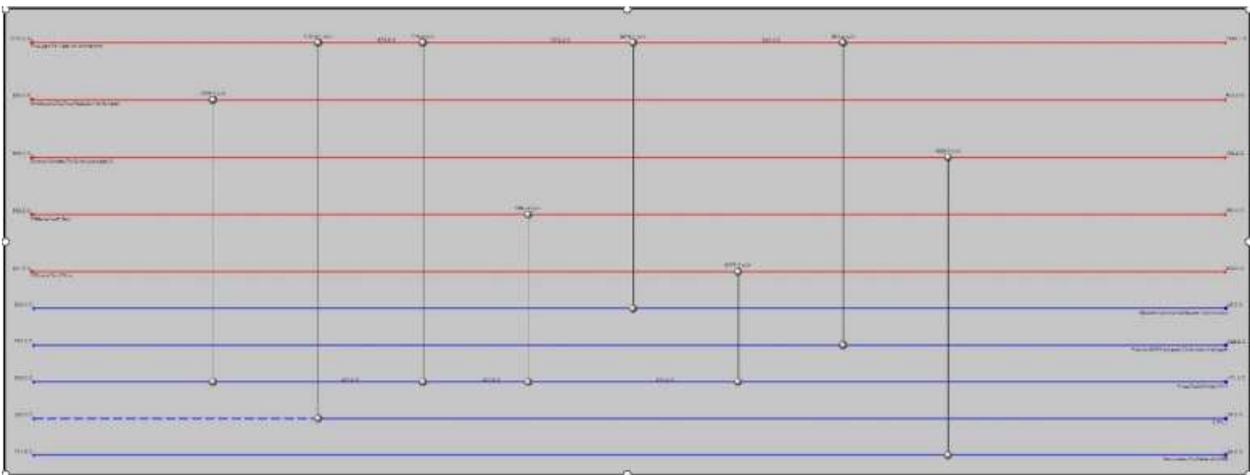


그림 4-64. 4 kW급 탄소연료전지 열병합발전 모델의 Base grid diagram

- 4 kW급 모델의 경우 잉여 합성가스량이 증가하여 offgas burner로 유입되는 양이 많아 이론 공기비를 맞추기 위해 과잉 공기 공급이 필수적이며, 새로운 공기 흐름을 120% 과잉량에 맞춰 0.8 kmole/h 추가 공급함(그림 4-65).

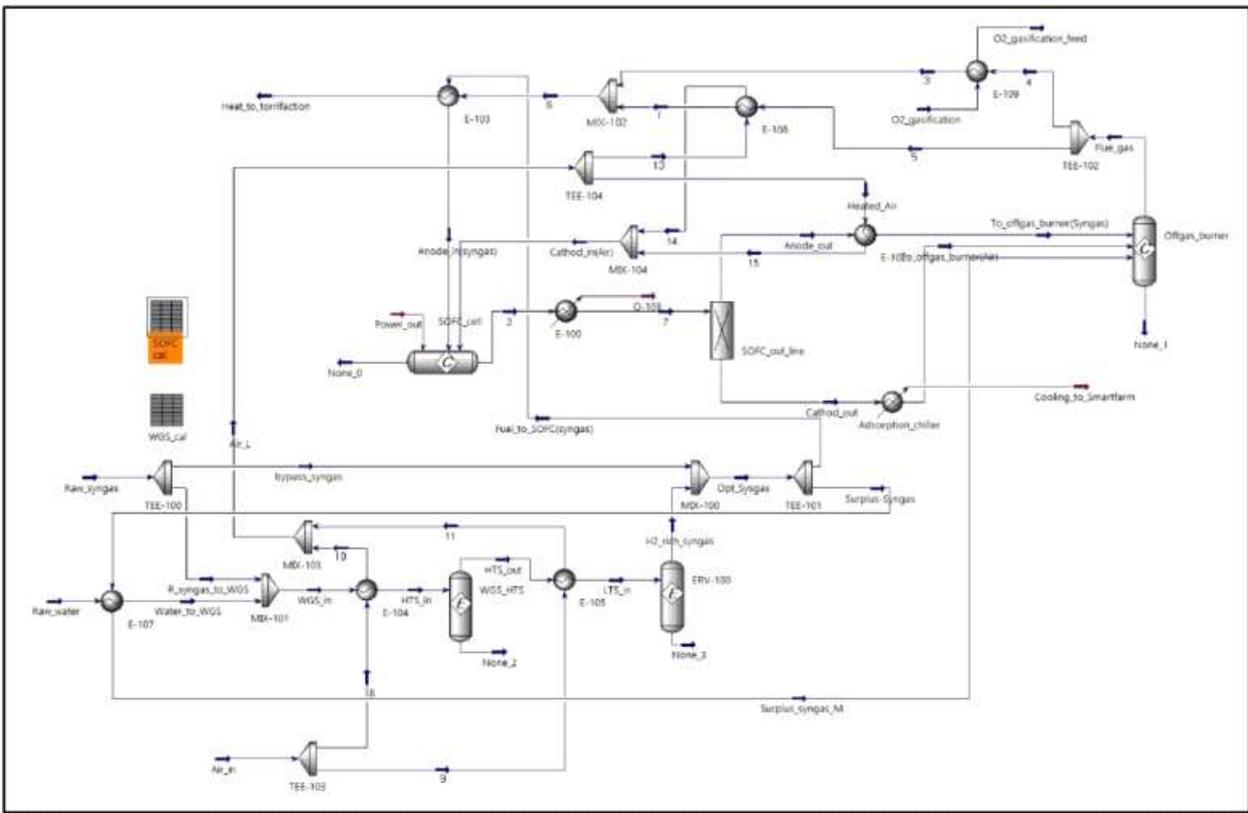


그림 4-67. 열교환망이 최적화된 12 kW급 탄소연료전지 열병합발전 모델의 구성도

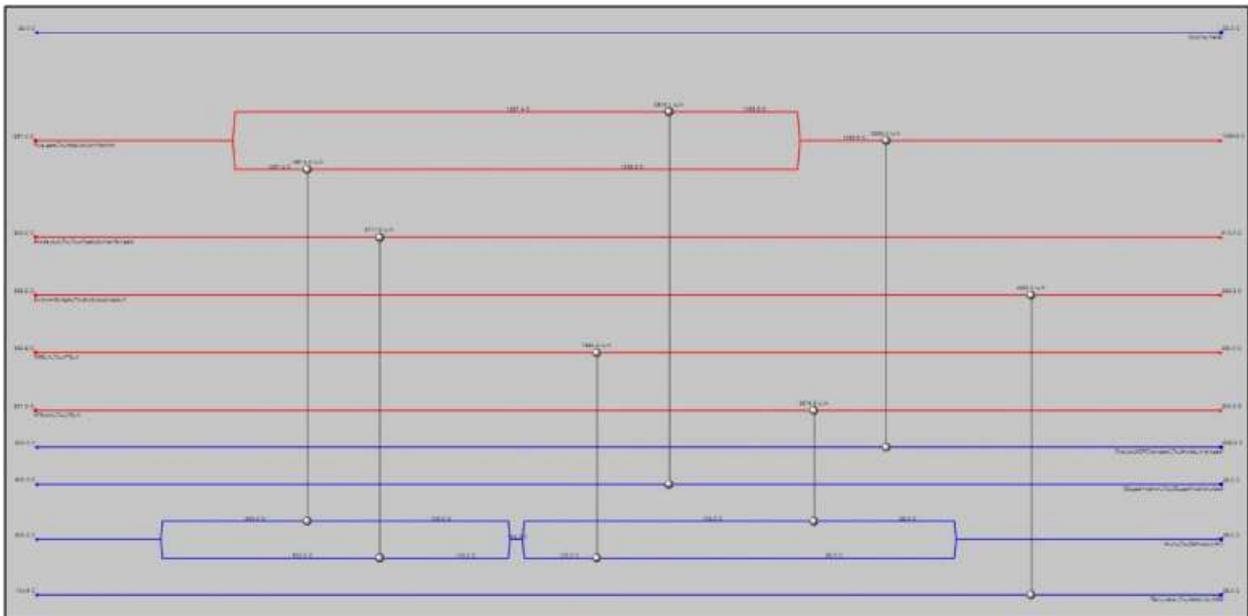


그림 4-68. 12 kW급 탄소연료전지 열병합발전 모델의 최적화된 Grid diagram

- 20 kW급 모델의 경우 탄소연료전지의 용량이 증가함에 따라 잉여 합성가스의 양이 감소하여 WGS로 공급되는 스팀의 기화 열량을 감당할 수 없어 base 모델과는 다른 새로운 열교환망을 구성하여 진행함(그림 4-69).

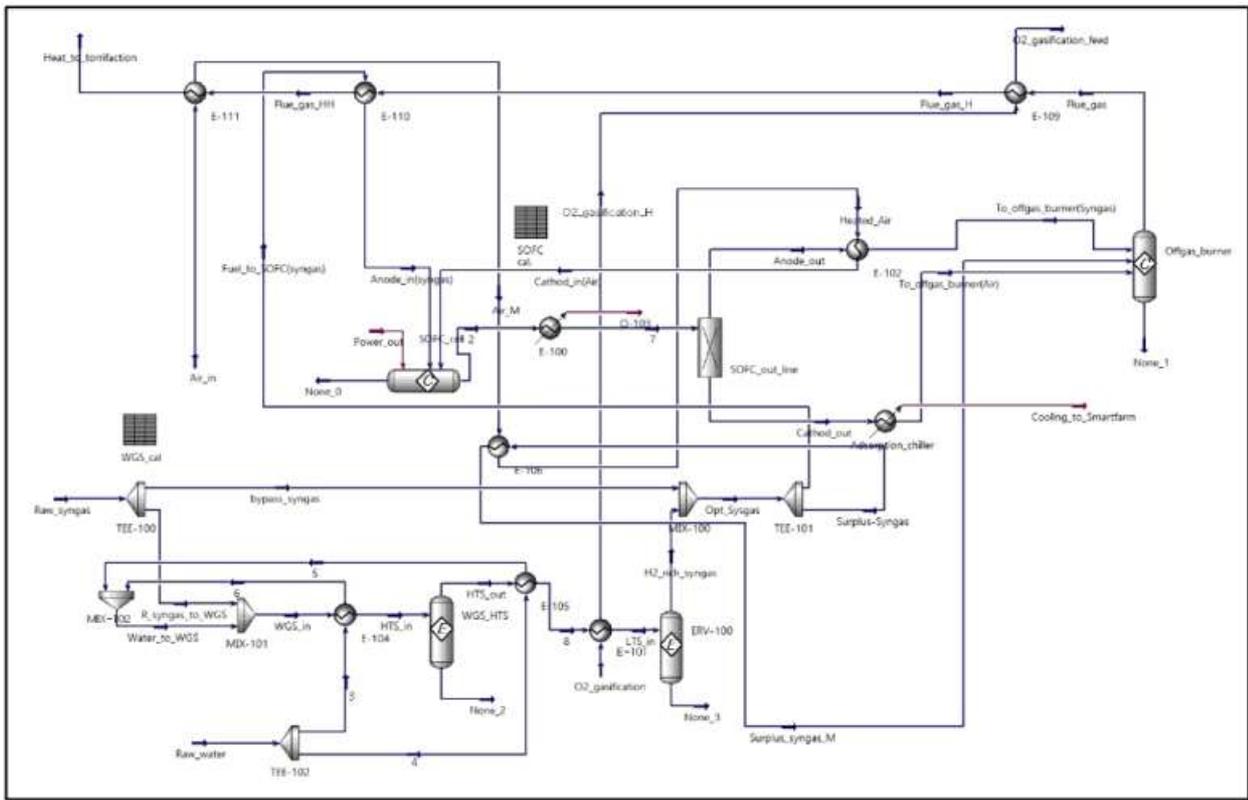


그림 4-69. 열교환망이 최적화된 20 kW급 탄소연료전지 열병합발전 모델의 구성도

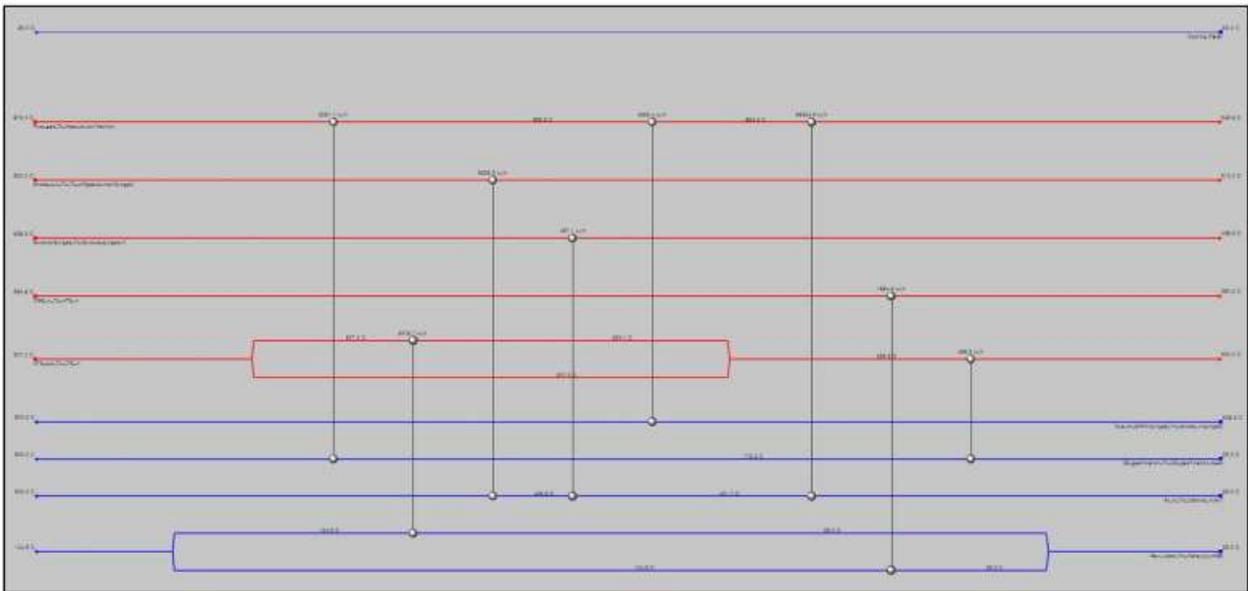


그림 4-70. 20 kW급 탄소연료전지 열병합발전 모델의 최적화된 Grid diagram

표 4- 26 열교환망이 최적화된 탄소연료전지 열병합발전 모델의 용량별 열교환망 조건 및 구성요소

	4 kW	12 kW	20 kW
총 열교환 면적(m ²)	2.702	3.816	11.41
열교환기의 개수	8	7	8
Shell의 개수	9	7	10

- 본 과제에서 구성하고 있는 농산부산물 기반 4 kW급 탄소연료전지 열병합발전 모델에서 필요한 열네트워크 조건 및 구성요소는 총 열교환 면적 2.702 m², 열교환기의 개수는 8기, Shell의 개수는 9개로 구성됨을 열교환망 최적화를 통해 도출함.

4-5. 농산부산물 기반 탄소연료전지 열병합발전 시스템 설계 플랫폼 구축

4-5-1. 공정 변수 및 주요 공정 정보

- 공정에서 조작할 수 있는 변수들을 파악하고, 출력할 주요 정보를 조사하였으며 주요 공정 변수는 다음과 같음.

표 4-27 가스화 설비에서 공급되는 합성가스 조성

Variables	Description
Fuel cell power	연료전지의 출력은 공정에 있어 가장 중요한 부분이며, 변수로 지정될 필요가 있음
Absorption chiller power	흡착식 냉동기에 필요한 에너지는 스마트팜 규모에 따라 결정되는 부분이므로 변수로 고려함
O ₂ gasification flowrate	전단의 가스화 공정에 필요한 O ₂ 를 공급하는 양으로, 가스화 공정의 크기에 따라 결정되는 변수임
Raw syngas flowrate	합성가스는 공정의 주요 feed이며, 반탄화 용량에 대응하는 변수로 지정될 필요가 있음
Raw syngas split ratio	Feed 합성가스 중 WGS로 가는 유량의 결정 요인이며, CO:H ₂ ratio를 달성하기 위한 변수로 지정함

- SOFC에 필요한 Air나 WGS에 사용되는 물의 경우, 변수로 이용될 수 있으나, 각각 SOFC 출력과 합성가스 중 WGS로 이동하는 유량에 종속되므로, 변수로서 사용하지 않음.
- 위와 같은 공정 변수 조작을 통해 변하는 공정 정보를 파악할 수 있어야 하며, 유효한 값을 출력하는지 확인해야 함. 주요 공정 정보는 다음과 같음.

표 4-28 공정 내 주요 정보

Part of Process	Description
Heat for torrefaction	반탄화 제공 열량은 반탄화 시설에 에너지를 제공하는 본 공정에서 중요한 공정 정보 중 하나임
Utility	WGS 및 SOFC에서 요구하는 물 및 air에 대한 정보를 표시해야 함
Syngas	SOFC에서 요구하는 합성가스 양 등을 표시할 필요가 있음 합성가스의 양에 의해 air 및 물의 유량이 달라짐
Heat exchanger status	열교환기는 공정에서 feasibility를 결정하는 가장 큰 요인이므로 열교환기의 작동상태를 표시할 필요가 있음
Stream temperature	
Air to off-gas burner	SOFC에서 나오는 고온의 Air는 off-gas burner로 이동하면서 흡착식 냉동기에 열의 형태로 에너지를 공급함
Flue gas	Off-gas burner에서 발생하는 flue gas는 SOFC에 필요한 Air를 heating하는데 이용하므로 높은 온도를 요구함
Heat to torrefaction	반탄화 온도는 300 °C 이상의 고온이므로, 이 이상의 온도를 제공할 필요가 있음

4-5-2. 모니터링 플랫폼 제작

- 위의 공정 정보를 이용하여 엑셀 상의 플랫폼을 제작함. 제작된 엑셀 플랫폼은 간단하게 공정 변수들을 조작할 수 있어야 하며, 변화하는 공정 정보들을 쉽게 파악할 수 있어야 함.
- 또한 공정이 정상 작동이 가능한 상태에 대한 주요 공정 정보를 표시해 주어야 함.
- SOFC 열교환망 엑셀 플랫폼화는 위 공정의 주요 조사를 엑셀 상에서 조작하기 위한 작업으로, 전체 공정의 변수 파악 및 분석이 필요함.
- 주요 공정 변수를 시뮬레이션 모델을 통해 조사하였으며, 다음과 같음.

표 4-29 SOFC 발전 시스템의 주요 공정 변수

Variables	Description
Fuel cell power	연료전지의 출력은 공정에 있어 가장 중요한 부분이며, 변수로 지정될 필요가 있음.
Absorption chiller power	흡착식 냉동기에 필요한 에너지는 스마트팜 규모에 따라 결정되는 부분이므로 변수로 고려함.
O ₂ gasification flowrate	전단의 가스화 공정에 필요한 O ₂ 를 공급하는 양으로, 가스화 공정의 크기에 따라 결정되는 변수임.
Raw syngas flowrate	합성가스는 공정의 주요 feed이며, 반탄화 용량에 대응하는 변수로 지정될 필요가 있음.
Raw syngas split ratio	Feed 합성가스 중 WGS로 가는 유량의 결정 요인이며, CO:H ₂ ratio를 달성하기 위한 변수로 지정함.

- Fuel cell power는 SOFC에서 요구하는 합성가스의 양에 직접적인 영향을 미치며, 필요한 합성가스의 양이 가스화 공정에서 공급되는 합성가스의 양보다 많도록 조절해 주어야 함.
- Absorption chiller power는 스마트팜의 냉/난방에 이용하는 에너지를 의미함. 따라서 스마트팜의 규모에 따라 필요한 에너지를 결정할 필요가 있음.
- O₂ gasification flowrate는 전단의 가스화 공정에서 사용하는 순 산소로 전단의 가스화 공정의 규모에 따라 결정하여야 함. 가스화 공정에 공급하는 산소의 경우 800 °C의 온도로 공급되므로, 반탄화 시설에 공급하는 열에너지가 줄어들 수 있음.
- 합성가스의 유량은 전단의 반탄화 시설과 가스화 설비의 규모에 따라 결정됨. 합성가스의 양이 SOFC에서 요구하는 양보다 적을 경우 SOFC의 출력이 줄어들 수 있으며, 많을 경우 off_gas_burner에서 연소 잉여 합성가스의 양이 증가하여 잔여 열에너지가 증가할 수 있음.
- 합성가스의 split ratio는 SOFC에서 요구되는 최적의 CO:H₂ 비율을 맞추기 위해 WGS에서 반응하는 합성가스의 양을 조절하는 역할을 함. 현재 가장 이상적인 비율인 45:55의 비율을 맞추도록 조정되어 있지만, SOFC의 성능 변화나 요구치 변화에 따라 대응이 가능하도록 변수로 지정함.
- SOFC에서 요구하는 air나 WGS에서 사용하는 물의 경우, 공정의 입력 변수로 활용할 수도 있으나, 각각 SOFC 출력과 WGS반응에 참여하는 합성가스의 유량에 종속되므로, 변수로써 사용하지 않음.
- 공정 플랫폼에서는 위와 같은 공정 변수를 조작함과 동시에 변하는 공정 정보들을 파악할 필요가 있으며, 공정의 정상 작동 상태를 확인할 수 있어야 함. 따라서 위 공정의 주요 정보를 시뮬레이션 모델 조사를 통해 확인하였으며, 다음과 같음.

표 4-30 SOFC 발전 시스템의 주요 공정 정보

Variables	Description
반탄화 제공 열량	반탄화 제공 열량은 반탄화 시설에 에너지를 제공하는 본 공정에서 중요한 공정 정보 중 하나임.
Utility	WGS 및 SOFC에서 요구하는 물 및 air에 대한 정보를 표시해야 함.
합성가스	SOFC에서 요구하는 합성가스 양 등을 표시할 필요가 있음. 합성가스의 양에 의해 air 및 물의 유량이 달라짐.
Heat exchanger status	열교환기는 공정에서 feasibility를 결정하는 가장 큰 요인이므로 열교환기의 작동 상태를 표시할 필요가 있음.
Stream temperature	
Air to off-gas burner	SOFC에서 나오는 고온의 Air는 off-gas burner로 이동하면서 흡착식 냉동기에 열의 형태로 에너지를 공급함.
Flue gas	Off-gas burner에서 발생하는 flue gas는 SOFC에 필요한 Air를 heating에 이용하므로 높은 온도를 요구함.
Heat to torrefaction	반탄화 온도는 300 °C 이상의 고온이므로, 이 이상의 온도를 제공할 필요가 있음.

- 위 공정 정보를 활용하여 플랫폼을 제작하기 위해, Excel과 Aspen HYSYS를 이용하였음. 두 프로그램을 연결하기 위해 ASW (Aspen Simulation Workbook)을 활용하였음. ASW는 Excel과 HYSYS의 연동을 위한 프로그램 중 하나로, Excel에서의 입력 변수 조정을 통해 변화하는 HYSYS 내부의 주요 공정 정보들을 다시 엑셀로 출력하는 기능을 함.

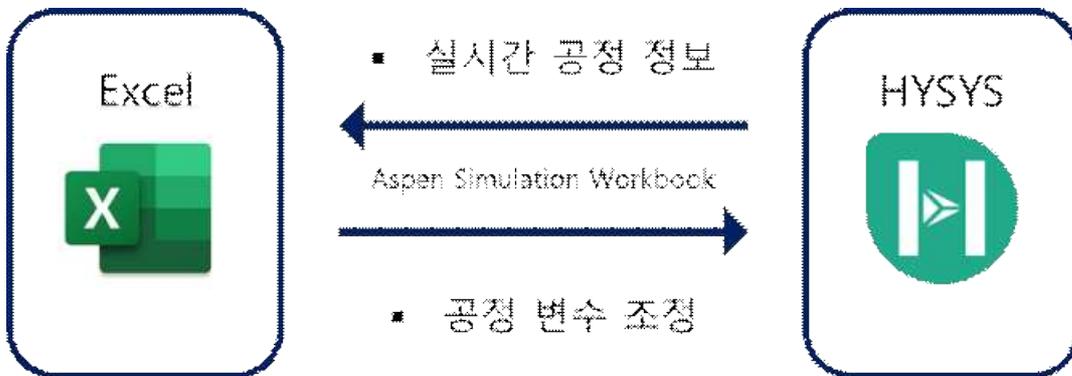


그림 4-71. 공정 플랫폼화의 개요도

- Excel은 공정 변수를 입력하는 칸과 주요 공정 정보를 출력하는 visualization sheet와 Excel과 HYSYS와의 연동 및 연산을 담당하는 calculation sheet로 구분하여 플랫폼의 가시성을 높임. Excel에서 제작된 플랫폼의 visualization sheet는 다음과 같음.

Fuel cell Power		Adoption chiller Power		Raw syngas		HEX status	
Power	20.00 kW	Power	4.00 kW	Molar flowrate	0.67 kgmole/hr	OK	
Voltage	0.90 V			Split ratio(Main flow)	0.75	Manipulate variables	
Multiplying factor		O2 gasification flowrate					
Not using		Molar flowrate					
SOFC power:CHiller power, Syngas flow, O2 flow Multiplied							
SOFC information		Raw syngas information		Syngas mix information		Heat information	
Power	20.00 kW	Moleflow to bypass	0.50 kgmole/hr	Syngas to SOFC moleflow	0.70 kgmole/hr	Air to Offgas burner	659.00 C
Voltage	0.90 V	Moleflow to WGS	0.17 kgmole/hr	Surplus syngas moleflow	0.06 kgmole/hr	Flue gas temperature	872.53 C
Ampere	22.35 A	Total raw syngas moleflow	0.67 kgmole/hr	Total syngas mix moleflow	0.76 kgmole/hr	Heat to torification	546.69 C
Syngas utilization	0.42 kgmole/hr	Raw syngas composition		Syngas mix composition		20.29 kW	
Syngas requirement	0.70 kgmole/hr	Methane	54.89	Methane	38.88		
Faraday constant	96485.00	CO	18.47	CO	25.63		
Fuel utilization factor	0.85	CO2	0.00	CO2	2.68		
R constant	8.31 kJ/moleK	Hydrogen	25.03 %	Hydrogen	31.39 %		
		H2O	1.50	H2O	1.32		
		Nitrogen	0.00	Nitrogen	0.00		
		Oxygen	0.11	Oxygen	0.09		
				Syngas mix CO/H2 ratio			
				CO	55.33 %		
				H2	44.67 %		
Utility information							
Water to WGS	0.09 kgmole/hr						
Air to SOFC	3.32 kgmole/hr						

그림 4-72. 엑셀을 통해 구현한 공정 플랫폼의 visualization sheet

- Visualization sheet에는 조작 가능한 공정 변수를 입력하는 칸과 주요 공정 정보를 표시하는 칸으로 이루어져 있음. 위 그림에서 노란색으로 표시된 칸은 조작 가능한 변수들이며, 해당하는 칸의 숫자를 조정하는 것으로 간단하게 조작할 수 있음. 조작 변수에는 연료전지 출력, 흡착식 냉동기의 전력 요구량, 가스화 공정에서 사용하는 산소의 유량, 합성가스의 유량 및 WGS로 이동하는 비율이 있음.
- Sheet 하단에는 주요 공정 정보들이 표시되며, 이는 공정 변수의 변화에 맞춰 자동으로 출력되는 값들임. 출력되는 정보에는 SOFC에서 활용하는 합성가스의 유량과 유입되는 합성가스의 조성 및 유량, 공정에서 요구하는 물과 air 유량, 공정 내 주요 stream 온도 등이 있음.
- 엑셀 플랫폼에서는 구동중인 시뮬레이션이 정상 작동 중인지 확인 가능해야 함. 따라서 우측 상단에 열교환기의 temperature cross를 확인할 수 있는 기능을 추가하여 간접적으로 운전 상태를 확인할 수 있도록 함. 모든 열교환기에서 temperature cross가 발생하지 않을 때, 즉 공정이 정상적으로 작동 중일 때는 초록색 바탕에 'ok' 라는 글씨가 나타나며, 한 개 이상의 열교환기가 정상 작동상태가 아닐 때는 주황색 바탕에 'temperature cross'라는 글씨가 나타남.
- 위 엑셀 플랫폼에는 추후 공정의 scale up을 고려하여 공정 전체의 scale을 조정하는 기능이 있음. 좌측의 scaling factor 조작을 통해 공정 전체의 scale을 조정할 수 있으며, 0 혹은 1이 입력되어 있을 때는 'not using'이라는 표시와 함께 scale 조정이 일어나지 않음.
- 유효한 양의 값이 입력되었을 때는 'working'이라는 표시와 함께 공정의 scale 조정이 일어남. 음의 값이 입력되었을 때는 'invalid'라는 표시와 함께 scale 조정이 일어나지 않음.
- Scale factor를 조정함으로써 SOFC의 출력, 흡착식 냉동기 공급 에너지, 합성가스 유량, heating 되는 산소의 양을 한 번에 조정할 수 있음. Calculation sheet는 아래 그림과 같이 구성됨.

Simulation Variables			Simulation Variables			Simulation Variables		
UnitOps.SOFC cal	20 kW	Specified	Cal D1	54.88714511	Calculated	Heat exchanger status cal A1: Minimum Approach	0.125941809 C	Calculated
UnitOps.SOFC cal	0.416888259 kgmole/h	Calculated	Cal D2	18.47478153	Calculated	Heat exchanger status cal A2: Minimum Approach	100.4225125 C	Calculated
UnitOps.SOFC cal	0.697943173 kgmole/h	Calculated	Cal D3	0	Calculated	Heat exchanger status cal A3: Minimum Approach	325 C	Calculated
UnitOps.SOFC cal	946.6758568 C	Calculated	Cal D4	25.02687407	Calculated	Heat exchanger status cal A4: Minimum Approach	290.9698637 C	Calculated
UnitOps.SOFC cal	669.9501777 C	Calculated	Cal D5	1.503796406	Calculated	Heat exchanger status cal A5: Minimum Approach	33.20416719 C	Calculated
UnitOps.SOFC cal	0.388804501	Calculated	Cal D6	0	Calculated	Heat exchanger status cal A6: Minimum Approach	72.52382107 C	Calculated
UnitOps.SOFC cal	0.313913347	Calculated	Cal D7	0.107599893	Calculated	Heat exchanger status cal A7: Minimum Approach	56.12953346 C	Calculated
UnitOps.SOFC cal	800 C	Specified	Cal E1	38.88040014	Calculated	Heat exchanger status cal A8: Minimum Approach	420.4118749 C	Calculated
UnitOps.SOFC cal	120 kPa	Specified	Cal E2	29.62911413	Calculated			
UnitOps.SOFC cal	3.22530917 kgmole/h	Calculated	Cal E3	2.682372324	Calculated			
WGS_calB2: Mass Flow	16.27111236 kg/h	Calculated	Cal E4	31.3913367	Calculated			
WGS_calD7: Molar Flow	0.1675 kgmole/h	Calculated	Cal E5	1.822338323	Calculated			
WGS_calD8: Master Comp. Mole Frac. (CO)	0.548871451	Calculated	Cal E6	0	Calculated			
WGS_calD9	0.091925968	Calculated	Cal E7	0.09444019	Calculated			
WGS_calD11	35.32869704	Calculated	Cal A1: Molar Flow	0.697943173 kgmole/h	Calculated			
WGS_calD12	44.67125386	Calculated	Cal A2: Molar Flow	0.662392628 kgmole/h	Calculated			
WGS_calD10: Molar Flow	0.761941799 kgmole/h	Calculated	Cal A3: Molar Flow	0.5028 kgmole/h	Calculated			
WGS_calB11: Master Comp. Mole Frac. (CO)	0.388804501	Calculated	Cal A4: Molar Flow	0.1675 kgmole/h	Calculated			
WGS_calB12: Master Comp. Mole Frac. (Hydrogen)	0.313913347	Calculated	Cal A5: Temperature	872.5228211 C	Calculated			
WGS_calB13: Molar Flow	0.29624602	Calculated	Q=100 Heat Flow	20.23519753 kW	Calculated			
WGS_calB14	0.2301837	Calculated	Cooling_to_Smartfarm Heat Flow	-4 kW	Specified			
Raw_syngas Phase Molar Flow Overall	0.67 kgmole/h	Specified	WGS_cal B6: Flow Ratio (Flow Ratio, Z)	0.75	Specified			
			CO_gasification Phase Molar Flow Overall	0.1116 kgmole/h	Specified			

그림 4-73. 엑셀을 통해 구현한 공정 플랫폼의 calculation sheet

- Calculation sheet는 visualization sheet와 HYSYS simulation을 연결하는 페이지로, 공정 변수들과 주요 공정 정보들의 입출력을 담당함.
- Aspen simulation workbook의 organizer 기능을 통해 불러온 시뮬레이션 변수들은 Excel에서 직접 조작이 가능함. Calculation sheet에 불러온 공정 정보들은 직접 혹은 간단한 수식을 통해 visualization sheet에서 필요한 정보를 제공하게 됨.
- 또한 공정 내 열교환기의 minimum approach 정보를 통해 열교환기의 정상 작동상태를 파악하고, 전체공정이 정상 작동하는지 정보를 제공함.

4-5-2. 결과 분석 및 추후 고려사항

- 농산부산물 기반 SOFC 발전 시스템의 열교환망에 대한 분석을 진행함. 완성된 PFD 및 Grid diagram을 바탕으로 전체 시스템의 주요 공정변수와 공정 정보들을 파악하였음. 각 공정변수들이 공정의 성능 및 운전 상태에 미치는 영향을 확인하였음.
- 위에서 파악한 공정변수와 주요 공정 정보를 이용하여 연동 플랫폼을 제작하였음. Aspen simulation workbook을 이용하여 Excel과 HYSYS를 연동하였으며, Visualization sheet과 Calculation sheet를 구분하여 제작된 플랫폼의 가시성을 향상하였음.
- Visualization sheet는 공정 변수를 입력하는 부분과 공정 변수를 확인하는 부분으로 이루어져 있어, 공정 변수 조작으로 변하는 공정 정보를 실시간으로 파악할 수 있도록 구성함. 또한 공정의 정상 작동 상태를 열교환기의 temperature cross 발생 여부를 통해 확인하고, 이를 시각적으로 보여주는 기능을 추가하였음.
- 추후 SOFC 발전 시스템의 scale up을 고려하여, scale factor 기능을 도입하였음. 이 기능을 통해 공정의 scale을 자유롭게 조정할 수 있으며, feasibility를 쉽게 파악할 수 있음. 또한 scale factor가 이용 중인지 확인할 수 있는 기능을 도입함.

Ⅲ. 공동연구기관 (부산대학교)

● 1, 2차년도

가. 연구수행 내용

1) 스마트팜 온실에 탄소연료전지 발전시스템 활용에 의한 작물생육 및 난방능력 검정

가) 연구목적

- 시설채소의 연중 수요 확대 추세 등으로 동계 가온시설 면적이 증가하고 있음. 시설농가의 경영비 중 난방비가 차지하는 비중은 지대별, 품목별, 시설구조별로 편차가 있을 수 있으나 광열 동력비가 전체 경영비에 차지하는 비중은 약 30~35% 정도인 것으로 파악되고 있음. 농가에서 소비되고 있는 난방연료의 약 89%는 유류난방이며, 그 외 연탄 등 고체연료 6.6%, 전기 3.7%, 신재생에너지 0.4%로 순임. 따라서 시설원에 난방에너지원의 대부분을 유류로 충당하는 상황에서 국제 유가의 지속적인 상승은 면세유 가격을 상승시켜 시설원에 농가의 경영에 큰 어려움을 주고 있음.
- 따라서 본 연구는 겨울철 시설재배에 난방비를 절감하기 위한 탄소연료전지 발전기를 가동하여 연소하는 과정 중에 발생하는 이산화탄소를 온실의 엽채류 재배에 공급하여 생육 및 품질에 미치는 영향을 평가하여 탄소연료전지 발전기를 시설 재배농가에 도입을 위한 기초 자료를 얻기 위해 수행되었음.

나) 재료 및 방법

(1) 공시품종 및 실험장소

- 본 연구에 사용된 공시작물은 상추(권농종묘, 품종: 열풍적치마)와 배추(팜한농, 품종: 불암플러스배추)였음. 파종은 100구의 플러그트레이에 2021년 8월 25일에 파종하였고, 정식은 본엽이 2매 출현한 9월 11일에 정식하였음. 실험은 정식 일로(2021년 9월 11일) 생육 70일이 경과된 11월 20일까지 수행됨. 실험장소는 부산대학교 벤로형 첨단온실에서 수행되었음. 실험이 수행된 온실 규모는 40m² 벤로형 유리온실에서 고설벤치를 설치하여 포트 재배로 실험을 수행함.

(2) CO₂ 처리 및 생육환경

- 본엽이 2매 전개된 상추는 1/5,000 와그너 포트에 정식하였고, 배추는 1/2,000 와그너 포트에 정식하였음. 상토는 원예용상토(팜한농)를 사용하여 와그너 포트의 80%를 충전한 후 작물을 정식하였음. 재배기간 중 양액은 400배로 희석한 물푸레 1호 엽채류용(Dae-yu, korea)를 사용하여 자동 타이머로 하루에 점적튜브를 통해 총 50mL을 공급하였음. 양액의 pH는 5.6였으며, EC는 1.4 dS m⁻¹였음. 온실의 온도환경은 주간/야간온도는 20°C로 설정하여 재배하였음.
- 유류난방기를 탄소연료전지 발전기로 대체할 수 가능성을 모색하기 위해 연소하는 과정에서 발생하는 배기가스 중 작물생육을 촉진하는 이산화탄소를 작물 재배에 공급하여 작물의 생육반응을 평가하고자 하였음. 이를 정식 후 수확까지 전 생육기간 동안 CO₂ 1,500ppm을 처리한 것과 처리하지 않은 대조구(360ppm)를 설정하였음. CO₂ 공급은 액화탄소를 봄베 형태로 공급하였음. 시험구는 완전임의 배치였고 처리구당 25주씩 4반복 실시함.



그림 3-1. 탄소연료발전기의 배가스인 CO₂ 공급에 의한 상추와 배추의 생육



그림 3-2. CO₂ 공급 조절장치와 CO₂ 공급형태

(3) 생육 조사항목

- 생육조사는 정식 후 15, 30, 45일 및 60일째에 실시함. 조사방법은 반복 당 3주의 식물체를 채취하여 엽수, 엽면적, 엽장, 엽폭, 초장, 근장, 생체중, 건물중, 엽록소 함량, 안토시아닌 함량, 상대생장률 및 엽면적지수를 조사하였음.
- 엽수는 잎의 길이가 1cm 이상인 것을 조사하였으며 엽면적은 엽면적 측정기(LI-3000, LI Cor., USA)를 이용하였음. 엽장과 엽폭은 3번째로 난 본엽을 측정하였으며, 엽록소는 잎의 3부분을 따로 측정하여 평균값을 산정함. 근장은 뿌리를 물로 완전히 씻어 흙을 제거한 후 뿌리

의 가장 긴 부분을 측정하였으며 생체중은 생체 무게를, 건물중은 70°C에서 24시간 건조 후 측정하였음.

- 안토시아닌 함량은 각 처리별로 수확한 후 동결시킨 상추 시료 1g을 채취하여 Ethanol과 1.5N HCl을 85:15(v/v)로 혼합한 용액을 10ml 넣어 막자사발을 이용하여 추출하였음. 이후 5000rpm으로 10분간 원심분리(Hanil, MICRO 17TR, KR)하여 상등액을 취한 후 Whatman no.2 여과지에 여과시켜 실험에 이용하였음. 상등액에 Potassium chloride buffer(0.025M, pH1.0)와 Sodium acetate buffer(0.4M, pH4.5)를 1:1 비율로 각각 혼합하여 희석하였음. 희석 15분 후 Spectrophotometer(Mecasys, Optizen 3220UVbio, KR)를 이용하여 520nm와 700nm에서 흡광도를 측정한 후 안토시아닌 함량을 측정하였음. 흡광도(A)와 안토시아닌 함량은 다음과 같이 계산하였음.

$$A(\text{Absorbance})=(A_{520}-A_{700})_{\text{pH}1.0}-(A_{520}-A_{700})_{\text{pH}4.5}$$

$$\text{Antocyanin content}(\text{mg/L})=(A \cdot \text{MW} \cdot \text{DF} \cdot 1000)/(\varepsilon \cdot 1)$$

MW : molecular weight of cyanidine-3-glucoside=449.2

DF : dilution factor

ε : molar absorptivity=26900

상대생장률은 다음과 공식을 이용하여 산출 하였고,

$$\text{RGR} = \text{Ln}(W_a) - \text{Ln}(W_b)/t_a - t_b$$

[RGR: 상대생장률, W_a : 정식 후 t_a 의 식물체 건물중(g), W_b : 정식 후 t_b 의 식물체 건물중(g)]
엽면적 지수는 다음의 식을 이용하여 산출함.

$$\text{LAI} = A_t/A_a$$

[LAI: 엽면적지수, A_t : 엽면적지수 전체 잎의 면적(cm^2), A_a : 지표 면적(cm^2)]

2) 빅데이터 R&D 플랫폼 연계 난방 생육환경 데이터 분석

가) 연구목적

- 시설원예 재배에 복합환경 제어시스템을 이용한 온도 및 습도, 일사량, 풍량, 풍속 등 빅데이터 구축은 작물생육을 과학적으로 제어하여 고품질 작물생산에 활용됨. 장소의 제약 없이 원격 제어 및 모니터링을 통해 온실을 관리하여 편의성을 추구하는 1세대 스마트팜과 달리 2세대 스마트팜은 빅데이터를 수집하여 생산량을 증대하거나 품질을 높이고 비용을 절감하는 등 목적에 맞는 정밀관리를 통해 농가의 생산성을 높일 수 있음. 이러한 관점에서 본 실험을 통해 얻어진 생육 환경정보를 한국형 스마트팜 빅데이터를 구축하고 작물 생육에 최적화된 환경을 구현하기 위해 본 실험을 수행함.

나) 실험방법

(1) 조사항목

- 본 실험이 수행중인 2021년 9월 12일부터 2021년 11월 11일까지 (주)농정사이버 소트에웨어(농촌진흥청, korea)를 이용해 온도, 습도, 일사량을 조사하였고 온실은 환경은 주간/야간온도로 나누어 20°C로 설정함. 2°C가 증가할 경우 천·측창을 개방하고 환기팬을 작동시켰고 2°C가 감소할 경우 난방이 되도록 설정하였음. 온실내부의 온도 변화를 측정하기 위하여 온습도기록계(TR-72Ui, TSD Corporation, Japan)를 식물체의 50cm 위치에 설치하여 1시간 간격으로 측정하였음.



구분	실내온도		일시량
	실내온도	실내습도	
01:00	21.0	58	0
02:00	20.9	57	0
03:00	21.0	56	0
04:00	21.2	57	0
05:00	21.2	57	0
06:00	20.8	57	0
07:00	20.9	56	1
08:00	20.9	55	13
09:00	21.3	56	47
10:00	22.2	55	276
11:00	20.0	43	464
12:00	18.1	47	202
13:00	17.7	48	200
14:00	19.4	44	344
15:00	17.7	45	162
16:00	16.3	50	153
17:00	17.1	50	63
18:00	20.9	54	0
19:00	21.5	54	0
20:00	21.5	52	0
21:00	21.5	51	0
22:00	21.3	50	0
23:00	21.4	50	0
24:00	21.6	51	0

그림 3-3. 온실 환경 제어 장치 계측 데이터

3) 탄소연료 발전기에 난방에너지 경제성 분석

가) 연구목적

- 2020년 기준 우리나라 원예시설의 재배면적은 1990년에 비해 2.1배 증가한 반면에 난방면적은 7.4배 증가하였으며, 이처럼 최근 가온면적이 증가함에 따라 유류소비가 늘어나고 있는데 시설원에 난방연료의 약 89%는 유류난방에 의존하고 있는 실정임. 반면 친환경적인 신재생에너지 사용비율은 약 0.7%에 불과하여 화석연료 대체용 자연에너지 이용 기술 개발이 매우 절실한 실정임. 신재생에너지를 활용한 지열 히트펌프 시스템은 높은 에너지 절감율(78%)에도 불구하고 초기 투자비(14.5억원/ha) 과다하여 대부분 시설농가에서는 사업을 기피하고 있는 실정임.
- 겨울철 시설재배에서 경영비 가운데 난방비가 차지하는 비중이 큼. 따라서 재배농가는 경영비 상승을 우려하여 난방을 하지 않고 보온위주의 경영이 선호하고 있음. 하지만 경쟁력을 높이기 위해서는 난방을 도입하여 적정 온도관리를 유지하여 수량을 증대시키고 품질을 향상시켜 경영효과를 높이는 것이 바람직 할 것이며, 또한 난방을 할 경우에는 비용을 절감하면서 난방효율을 극대화하는 것이 중요함.
- 시설원에 농가에서 이용하고 있는 난방방법으로는 연료를 연소시켜 따뜻한 공기를 불어넣는 온풍난방, 연료를 연소시켜 가열한 물을 파이프를 순환시켜 공기를 데우는 온수난방, 태양열로 물을 가열하여 공기를 데우는 태양열난방 등이 있음.
- 저연성 작물인 경우 보조난방 방법으로는 경유온풍기가 주로 사용되고 있으나 국제 유가 상승에 따라 생산비를 증가시키는 요인으로 작용하여 등유 온풍기보다 난방비 부담이 적은 난방방법이 필요함. 최근에는 시설원에 선진국인 네덜란드에서는 열병합발전(CHP(Combined Heat

and Power) 시스템을 이용하여 하나의 에너지원으로부터 열과 전기를 동시에 생산하여 시설 재배에 활용하고 있음. 열병합발전시스템은 보통 천연가스를 이용하며 전기와 열을 자급하고 있으며, 90년대부터 보급률이 급속히 증가하고 있음. 가스터빈으로 전기를 생산하고 터빈에서 나오는 폐열을 활용하여 온수난방하고, 연소 가스인 이산화탄소는 작물재배에 활용하고 있음. 이와 유사한 개념인 탄소연료전지 발전시스템을 시설재배에 활용한다면 난방비를 절감하는 효과가 있을 것임.

- 따라서 본 연구는 겨울철 시설재배에 난방비를 절감하기 위한 탄소연료전지 발전기와 기존 난방방식인 등유난방기로 가동 했을 때 소요되는 난방비를 산출하여 난방비 절감 효과를 구명하기 위해 수행되었음.

나) 재료 및 방법

(1) 탄소연료전지 발전기의 난방 에너지 절감효과 분석

- 본 연구에 사용된 공시작물은 상추(권농종묘, 품종: 열풍적치마)와 배추(팜한농, 품종: 불암플러스스배추)임. 실험은 2021년 9월 11일부터 2021년 11월 20일까지 부산대학교 40m² 벤로형 유리온실에서 고설벤치를 설치하여 포트 재배로 실험을 수행함.
- 난방 에너지 절감 효과 분석은 기존 시설재배 농가에서 가장 보편적으로 사용되는 등유 온풍기(160,000kW)와 탄소연료전지 발전기(4kW)를 가동 했을 경우의 재배작물 기간 동안의 연료사용량을 환산하여 하였음. 등유 온풍기(160,000kW)의 연료소모량은 주야간 온도 20°C로 설정된 밀양의 가지 시설재배 농가(양지봉형 플라스틱하우스)를 기준 하였음. 온실의 온도 측정은 온습도기록계(TR-72Ui, TSD Corporation, Japan)를 식물체의 50cm 위치에 설치하여 1시간 간격으로 측정하였음.
- 경제성 분석은 등유 온풍기의 연료비는 2021년도 11월의 면세유를 기준으로 산출하였고, 10a 당 온풍난방기의 설치 대수 및 설치가격 등을 비교하였음.

4) 스마트팜 온실에 탄소연료전지 발전시스템 활용에 의한 작물생육 및 냉방능력 검정

가) 연구목적

- 대부분의 엽채류의 생육적온은 18~25°C인 경우가 많으며, 30°C이상의 고온이 계속되면 잎이 녹거나 황화되는 등의 생리장해가 발생함. 그러나 여름철 온실의 온도는 35~45°C를 웃도는 경우가 많으며 원예작물의 연중재배를 위해서는 고온기에 온실내에 온도를 낮추는 서실이 필요함.
- 따라서 본 연구는 여름철 시설재배에 냉방비를 절감하기 위한 탄소연료전지 발전기를 가동하여 엽채류의 생육에 미치는 영향을 평가하여 탄소연료전지 발전기를 시설 재배농가에 도입하기 위한 기초 자료를 얻기 위해 수행되었음.

나) 재료 및 방법

(1) 공시품종 및 실험장소

- 본 연구에 사용된 공시작물은 상추였으며 품종은 (주)권농종묘 '토말린'과 '선풍골드'임. 파종은 128구의 플러그트레이에 2022년 8월 25일에 파종하였고, 정식은 본엽이 2매 출현한 9월 7일에 정식하였음. 실험은 정식일(2022년 9월 7일)부터 생육이 45일 경과된 10월 21일까지 수행되었고, 실험장소는 부산대학교 벤로형 첨단온실에서 수행됨. 실험이 수행된 온실 규모는 40m² 벤로형 유리온실에서 고설벤치를 설치하여 포트 재배로 실험을 수행함.

(2) 생육환경

- 본엽이 2매 전개된 상추는 1/5,000 와그너 포트에 정식하였고, 상토는 원예용상토(팜한농)를 사용하여 와그너 포트의 80%를 충진한 후 작물을 정식함. 재배기간 중 양액은 400배로 희석한 물푸레 1호 엽채류용(Dae-yu, Korea)를 사용하여 자동 타이머로 하루에 점적튜브를 통해 총 50mL을 공급함. 양액의 pH는 5.6 였으며, EC는 1.4 dS m⁻¹임.
- 탄소연료전지의 냉방 능력을 평가하기 위해 각 온실의 온도를 18°C와 20°C로 나누어 작물의 생육반응을 평가하고자 하였음. 시험구는 완전임의 배치였고 처리구당 20주씩 4반복 실시함.



그림 3-4. 생육환경이 18°C에서의 상추의 생육



그림 3-5. 생육환경이 25°C에서의 상추의 생육

(3) 생육 조사항목

- 생육조사는 정식 후 15, 30일 및 45일째에 실시하였음. 조사방법은 반복 당 3주의 식물체를 채취하여 엽수, 엽면적, 엽장, 엽폭, 초장, 근장, 생체중, 건물중, 엽록소 함량, Hunter L, A, B, 상대생장률 및 엽면적지수를 조사하였음.
- 엽수는 잎의 길이가 1cm 이상인 것을 조사하였으며 엽면적은 엽면적 측정기(LI-3000, LI Cor., USA)를 이용하였음. 엽장과 엽폭은 3번째로 난 본엽을 측정하였으며, 엽록소는 잎의 3부분을 따로 측정하여 평균값을 내었음. 근장은 뿌리를 물로 완전히 씻어 흙을 제거한 후 뿌리

의 가장 긴 부분을 측정하였음. 생체중은 생체 무게를, 건물중은 70°C에서 24시간 건조 후 측정하였음. 엽의 색도를 측정하기 위해 색도계(CM-3500d, Minolta, Japan)을 이용하여 Hunter L, a, B값을 측정하고 평균을 내었음.

상대생장률은 다음과 공식을 이용하여 산출하였고,

$$RGR = \frac{\ln(Wa) - \ln(Wb)}{ta - tb}$$

[RGR: 상대생장률, Wa : 정식 후 ta의 식물체 건물중(g), Wb : 정식 후 tb의 식물체 건물중(g)]

엽면적 지수는 다음의 식을 이용하여 산출하였음.

$$LAI = At/Aa$$

[LAI: 엽면적지수, At : 엽면적지수 전체 잎의 면적(cm²), Aa : 지표 면적(cm²)]

5) 빅데이터 R&D 플랫폼 연계 냉방 생육환경 데이터 분석

가) 연구목적

- 시설원예 재배에 복합환경 제어시스템을 이용한 온도 및 습도, 일사량, 풍량, 풍속 등 빅데이터 구축은 작물생육을 과학적으로 제어하여 고품질 작물생산에 활용됨. 장소의 제약 없이 원격제어 및 모니터링을 통해 온실을 관리하여 편의성을 추구하는 1세대 스마트팜과 달리 2세대 스마트팜은 빅데이터를 수집하여 생산량을 증대하거나 품질을 높이고 비용을 절감하는 등 목적에 맞는 정밀관리를 통해 농가의 생산성을 높일 수 있음. 이러한 관점에서 본 실험을 통해 얻어진 냉방 생육 환경정보를 한국형 스마트팜 빅데이터를 구축하고 작물의 생육에 최적화된 환경을 구현하기 위해 본 실험을 수행하였음.

나) 실험방법

(1) 조사항목

- 본 실험이 수행중인 2022년 9월 7일부터 2022년 10월 21일까지 (주)농정사이버 소프트웨어(농촌진흥청, korea)를 이용해 온도, 습도, 일사량을 조사하였고 온실은 환경은 각각 18°C와 25°C로 설정하였음. 2°C가 증가할 경우 천·측창을 개방하고 환기팬을 작동시켰고 2°C가 감소할 경우 난방이 되도록 설정하였음.



구분	실내온도		일시량
	실내온도	실내습도	
01:00	21.0	58	0
02:00	20.9	57	0
03:00	21.0	56	0
04:00	21.2	57	0
05:00	21.2	57	0
06:00	20.8	57	0
07:00	20.9	56	1
08:00	20.9	55	13
09:00	21.3	56	47
10:00	22.2	55	276
11:00	20.0	43	464
12:00	18.1	47	202
13:00	17.7	48	200
14:00	19.4	44	344
15:00	17.7	45	162
16:00	16.3	50	153
17:00	17.1	50	63
18:00	20.9	54	0
19:00	21.5	54	0
20:00	21.5	52	0
21:00	21.5	51	0
22:00	21.3	50	0
23:00	21.4	50	0
24:00	21.6	51	0

그림 3-6. 온실 환경 제어 장치 계측 데이터

6) 탄소연료 발전기의 냉방효율 경제성 분석

가) 연구목적

- 여름철 온실 내 온도는 30-40°C까지 상승함. 엽채류는 온도에 민감하며 생육적온보다 높은 온도에 노출되면 잎이 녹아내리거나 황화현상 등의 생리 장애현상이 발생함. 따라서 엽채류 시설 재배 농가들은 연중재배를 실현하기 위해서는 고온기인 여름철에 냉방에너지 비용을 절감할 수 있는 냉방설비를 구축해야 함.
- 시설원예 농가에서 이용하고 있는 냉방방법으로는 에어컨사용, 수냉식냉방, 지열히트펌프 등이 있고 소극적인 방법이기도 하지만 차광을 통해 햇빛을 가려 온도를 낮추는 등의 방법이 있음.
- 따라서 본 연구는 여름철 시설재배에 탄소연료전지 발전기와 기존 에어컨을 사용하였을 때와의 냉방비용을 산출하여 냉방비 절감효과를 구명하기 위해 수행되었음.

나. 주요 수행결과

1) 스마트팜 온실에 탄소연료전지 발전시스템 활용에 의한 작물생육 및 난방능력 검정

- 탄소연료전지 발전기를 시설재배 온실에 실용적으로 이용하기 위한 기초 시험으로 탄소연료가 연소하는 과정 중에 발생하는 배기가스인 이산화탄소를 온실의 엽채류 재배에 공급하여 생육 및 품질에 미치는 영향을 평가 하고자 하였음.

가) 상추

- 상추를 생육적온인 20°C에서 재배하였을 때 엽수와 엽면적, 엽장, 엽폭, 초장 등의 지상부 생육은 대부분 CO₂ 1,500ppm을 처리한 처리구가 대조구에 비해 생육이 우수하였음. 이러한 경향은 60일간의 전 생육기간에서 유지됨(표 3-1).
- 정식 후 60일째에서 1,500ppm CO₂ 처리구의 엽수는 50.92개 였으나 대조구의 엽수는 31.17로 CO₂ 처리에 의해 엽수가 증가됨. 대조구의 엽면적은 3,598.65cm² 였으나 CO₂ 처리구는 4,852.0cm²으로 대조구의 비해 1.27배 엽면적이 높았음. 반면 초장과 엽폭은 처리구와 대조구간의 유의적인 차이가 없음.
- 60일간 생육시킨 처리구의 생체중과 건물중은 CO₂ 처리에 따라 큰 차이가 있었으며. 처리구의 생체중은 350.89g으로 대조구인 174.54g보다 2배 이상 높았으며 건물중 또한 15.27g으로 대조구인 10.93에 비해 약 1.4배 높음.(표 3-2).
- 상대생장률은 일정 기간동안 식물체의 건물생산 능력을 나타내는 것으로 개체의 성장속도와 관련이 있음. 정식 후 15일째의 상대생장률은 처리구와 대조구가 각각 0.05로 비슷한 속도로 식물이 성장함. 그러나 CO₂ 처리구의 상대생장률은 정식 후 30일째에 0.22로 증가하였으며 전 생육기간동안 비슷한 수치를 유지하였음. 반면 대조구의 상대생장률은 정식 후 30일째 0.25로 증가하였으며 생육 60일째에는 0.48로 30일째보다 1.9배 증가하였으나 처리구와 대조구간에는 유의적인 차이는 없음(표 3-3).
- 엽면적지수는 단위면적당 잎의 면적을 나타내는 것이며, 엽면적지수는 생육기간이 진전될수록 증가하는 경향을 보였으며 처리구가 대조구보다 높음. 정식 후 60일째 엽면적지수는 CO₂ 처리구가 24.26, 대조구가 17.93으로 CO₂ 처리구가 대조구보다 1.4배 높았음(표 3-3).
- 엽록소 함량은 CO₂ 처리구가 대조구보다 높은 경향이었으나 통계적인 유의성은 없음. 반면 대조구의 엽록소 함량은 정식 후 생육기간이 진전될수록 증가하는 경향을 보임(표 3-4).

표 3-1. Effect of CO₂ supply treatment on number of leaves, leaf area, leaf length, leaf width, plant height and root height for various growth state of 'Yeolpung jeokchima' lettuce at 20°C in greenhouse.

CO ₂ supply (ppm)	No. of Leaves	Leaf area (cm ²)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Plant height (cm)	Root height (cm)
<i>0 days after transplanting</i>						
Control	4.3	8.75	2.33	2.43	4.08	6.08
1,500	4.3	8.75	2.33	2.43	4.08	6.08
LSD ^{z)}	-	-	-	-	-	-
<i>15 days after transplanting</i>						
Control	7.42	397.54	6.30	3.83	18.57	18.38
1,500	8.08	434.77	10.83	4.31	20.58	20.61
LSD	NS	NS	NS	NS	1.26	NS
<i>30 days after transplanting</i>						
Control	20.25	1856.84	9.56	6.88	28.95	38.69
1,500	21.08	1956.21	12.15	7.85	30.04	45.25
LSD	NS	NS	1.25	0.52	NS	6.29
<i>45 days after transplanting</i>						
Control	25.75	2438.93	17.29	8.71	30.63	44.81
1,500	26.83	2571.99	18.19	9.21	32.43	51.69
LSD	NS	NS	NS	NS	1.63	2.34
<i>60 days after transplanting</i>						
Control	31.17	3598.65	24.21	13.58	33.67	47.01
1,500	50.92	4852.00	26.82	14.06	33.98	55.13
LSD	2.19	597.88	1.75	NS	NS	3.13

^{z)} Means separation within columns of each growth stage by least significant difference(LSD) test at $P = 0.05$

- 안토시아닌 함량은 정식직후인 처리 0일째에는 0.1mg/100g으로 가장 낮았음. 이는 본 실험에 사용된 적치마의 경우 엽색이 적색으로 발현되려면 일정 시일이 경과하여야 하는데 정식 0일째에는 생육이 왕성하게 일어나는 성장기라 안토시아닌이 발현되지 않았기 때문으로 판단됨. 그러나 정식 후 45일째까지 대조구 및 CO₂ 처리구에서 안토시아닌 함량이 증가되어 60일째에는 약간 감소하는 경향을 보였으며, 또한 전 생육기간 동안 CO₂ 처리구가 대조구에 비해 안토시아닌 함량이 높았으며 60일째에는 처리구가 0.74mg/100g으로 대조구의 0.43mg/100g 보다 약 1.72배 높았음(표 3-4).
- 상추는 잎이 주로 사용되는 엽채류임. 상추의 생육적온인 20°C에서 CO₂를 처리하면 광합성을 증가하여 축적된 동화산물들이 새로운 기관형성을 위해 재분배되어 생장이 촉진된 것으로 판단됨(표 3-1 및 그림 3-7, 3-8, 3-9).

표 3-2. Effect of CO₂ supply treatment on number of fresh weight and dry weight for various growth state of 'Yeolpung jeokchima' lettuce at 20°C in greenhouse.

CO ₂ supply (ppm)	Fresh weight (g/plant)			Dry weight (g/plant)		
	Shoot	Root	Total	Shoot	Root	Total
<i>0 days after transplanting</i>						
Control	0.32	0.23	0.55	0.00	0.00	0.01
1,500	0.32	0.23	0.55	0.00	0.00	0.01
LSD ^{z)}	-	-	-	-	-	-
<i>15 days after transplanting</i>						
Control	16.22	16.16	17.83	0.61	0.08	0.70
1,500	18.01	17.57	19.76	0.73	0.11	0.84
LSD	NS	NS	NS	0.05	0.01	0.05
<i>30 days after transplanting</i>						
Control	75.88	9.79	85.67	3.39	0.54	3.92
1,500	97.42	7.05	104.46	3.53	0.99	4.52
LSD	15.20	NS	16.92	NS	0.39	0.50
<i>45 days after transplanting</i>						
Control	124.22	15.48	139.70	6.19	1.29	7.47
1,500	131.89	16.94	148.83	6.65	1.52	8.18
LSD	NS	NS	NS	NS	NS	NS
<i>60 days after transplanting</i>						
Control	155.21	19.33	174.54	9.86	1.67	10.93
1,500	335.57	15.31	350.89	13.12	2.15	15.27
LSD	24.65	3.88	25.51	3.55	NS	3.78

^{z)} Means separation within columns of each growth stage by least significant difference(LSD) test at $P = 0.05$

표 3-3. Effect of CO₂ supply treatment on relative growth rate, leaf area index, chlorophyll and anthocyanin content for various growth state of 'Yeolpung jeokchima' lettuce at 20°C in greenhouse.

CO ₂ supply (ppm)	RGR (g g ⁻¹ day ⁻¹)	LAI (cm ² /cm ⁻²)	Chlorophyll (SPAD unit)	Anthocyanin content (mg/100g)
<i>0 days after transplanting</i>				
Control	-	0.04	-	0.10
1,500	-	0.04	-	0.10
LSD ^{z)}	-	-	-	-
<i>15 days after transplanting</i>				
Control	0.05	1.99	16.76	0.13
1,500	0.05	2.17	19.45	0.20
LSD	NS	NS	1.16	0.03
<i>30 days after transplanting</i>				
Control	0.22	9.28	18.46	0.13
1,500	0.25	9.78	19.60	0.22
LSD	NS	NS	NS	0.05
<i>45 days after transplanting</i>				
Control	0.24	12.19	19.11	0.51
1,500	0.24	12.86	19.71	0.80
LSD	NS	NS	NS	0.06
<i>60 days after transplanting</i>				
Control	0.23	17.99	19.23	0.43
1,500	0.48	24.26	19.24	0.74
LSD	NS	3.00	NS	0.07

^{z)} Means separation within columns of each growth stage by least significant difference(LSD) test at $P = 0.05$

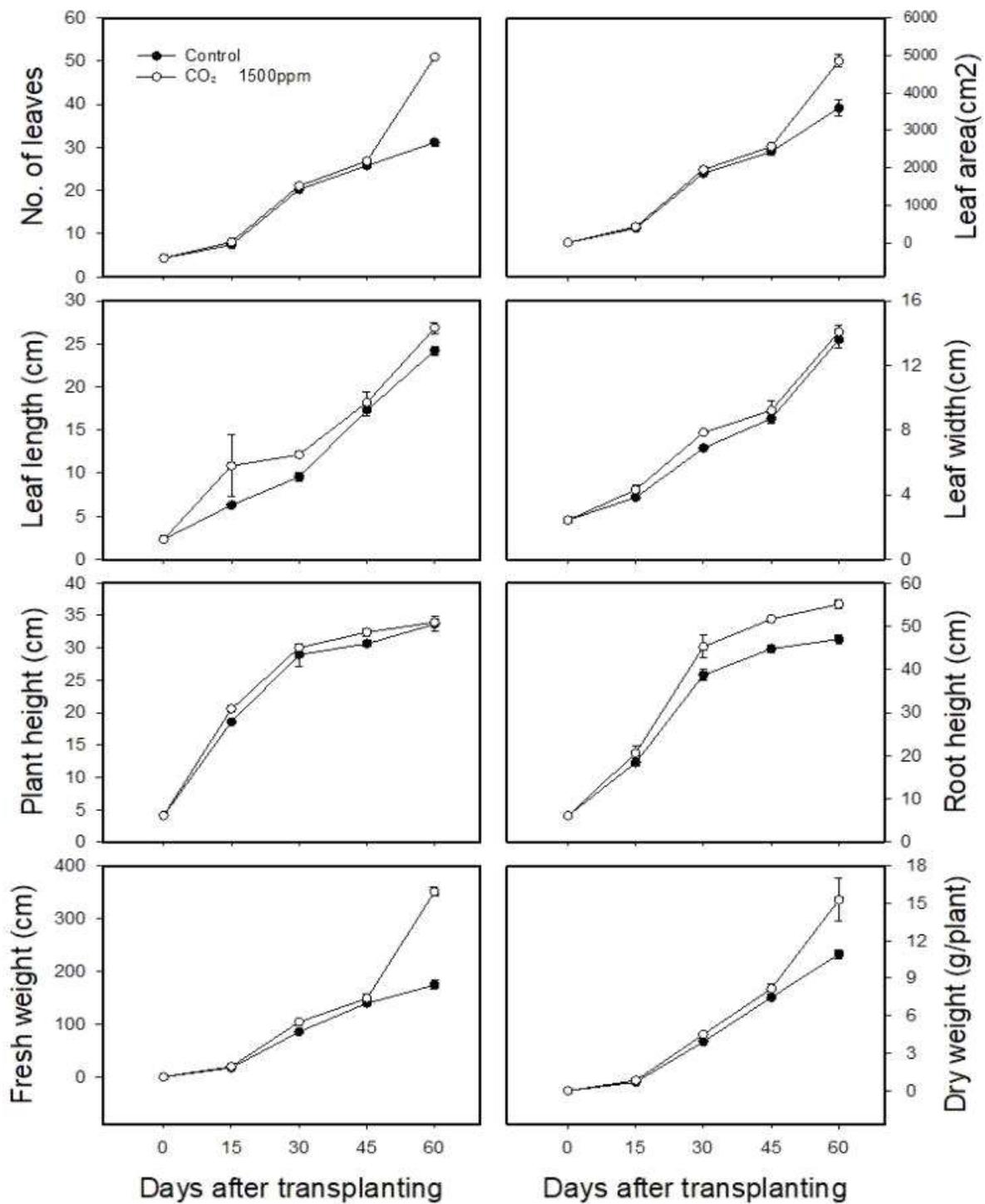


그림 3-7. Changes in number of leaves, leaf area, leaf length, leaf width, plant height and root height by the CO₂ supply treatment for various growth state of 'Yeolpung jeokchima' lettuce at 20°C in greenhouse.

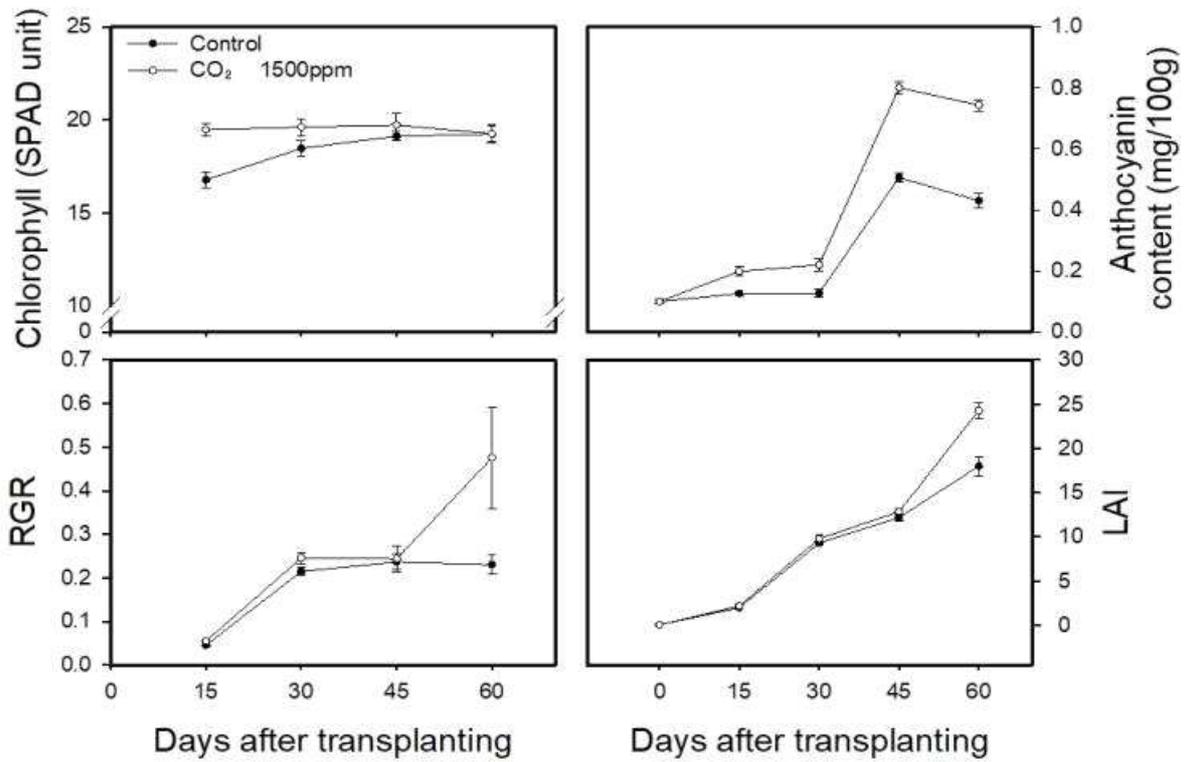


그림 3-8. Changes in chlorophyll, anthocyanin content, relative growth rate and leaf area index by the CO₂ supply treatment for various growth state of 'Yeolpung jeokchima' lettuce at 20°C in greenhouse.

15



30



Control

1,500

Growth stage
(days)

CO₂ supply(ppm)

그림 3-9. Changes in growth of 'Yeolpung jeokchima' lettuce seedling by CO₂ treatment 15 and 30 days after transplanting.

45



60



Control

1,500

Growth stage
(days)

CO₂ supply(ppm)

그림 3-10. Changes in growth of 'Yeolpung jeokchima' lettuce seedling by CO₂ treatment 45 and 60 days after transplanting.

나) 배추

- 배추를 생육적온인 20°C에서 재배하였을 때 엽수와 엽면적, 엽장, 엽폭, 초장 등의 지상부 생육은 CO₂ 1,500ppm을 처리한 처리구가 대조구에 비해 우수하였음. 이러한 경향은 60일간의 전 생육기간에서 유지되었으며 처리구와 대조구 모두 전 생육기간 동안 엽수, 엽면적, 엽장, 엽폭, 초장 및 근장이 증가함(표 3-4).
- 정식 후 60일째의 CO₂ 처리구의 엽수는 44.75개 였고, 대조구의 엽수는 51.83로 처리간의 유의미한 결과를 보임. 대조구의 엽면적은 4476.26cm²인 반면 CO₂ 처리구는 5161.79cm²로 대조구보다 엽면적이 높았으며, 반면 초장, 엽폭, 근장은 CO₂ 처리구의 대조구간의 유의미한 차이가 없음.

- 60일간 생육시킨 처리구의 생체중과 건물중은 CO₂ 처리구가 대조구보다 더 높으며, CO₂ 처리구의 생체중은 403.66g으로 대조구인 334.84g보다 높았으며 건물중 또한 15.27g으로 대조구인 10.93보다 높음(표 3-5).
- 상대생장을 또한 처리구가 대조구에 비해 높은 경향을 나타냈음. 대조구의 상대생장은 정식 후 30일째에 0.27, 45일째에 1.74로 증가하였으나 60일째에 1.05로 감소함. 처리구의 상대생장은 정식 후 30일째 0.33, 45일째 3.68로 약 11배 증가하였지만 60일째는 1.56으로 감소하였음(표 3-6). 이는 처리구와 대조구 모두 정식 후 30일과 45일 사이의 생장이 다른 기간보다 더 왕성했다는 것을 의미함.
- 엽면적지수는 전 생육기간동안 증가하였으며 처리구가 대조구보다 높으며, 정식 후 60일째 엽면적지수는 처리구가 10.32, 대조구가 8.95으로 처리구가 대조구보다 높음(표 3-6).
- 엽록소 함량은 전 생육기간동안 CO₂ 처리구가 대조구보다 높으며, 대조구는 정식 후 30일째에 엽록소 함량이 26.80 SPAD 였고, 60일째에 28.41 SPAD로 약간 높아졌음. 반면 CO₂ 처리구는 정식 후 30일째까지 엽록소 함량이 26.62 SPAD 였으나 정식 60일째에 32.09 SPAD로 약간 높아지는 경향을 보임(표 3-6). 이는 엽채소인 배추에서 엽록소 함량의 증가는 광합성 증가와 직결되므로 이러한 결과들이 배추에서 생장을 촉진시킨 원인으로 판단됨.
- 배추의 생육적온인 20°C에서 CO₂ 1,500ppm을 처리하면 광합성이 촉진되어 전체적인 생장이 향상되었음. 따라서 엽채인인 배추와 상추에서 광합성의 주 원소인 CO₂를 1,500 ppm 처리하면 생장이 촉진됨(표 3-4 및 그림 3-11, 3-12). 이러한 결과는 탄소연료전지 발전시스템을 시설재배에 활용하게 되면 발전과 동시에 열을 발생되므로 생산된 전기는 전기회사가 판매가 가능함. 또한 발전 과정 중에 발생하는 열은 난방용으로, 주요 연소가스인 CO₂를 온실에 공급하여 작물생산에 유용하게 활용할 수 있음을 시사하는 결과임.

Æ 3-4. Effect of CO₂ supply treatment on number of leaves, leaf area, leaf length, leaf width, plant height and root height for various growth state of 'Bulam Plus' Chinese cabbage at 20°C in greenhouse.

CO ₂ supply (ppm)	No. of Leaves	Leaf area (cm ²)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Plant height (cm)	Root height (cm)
<i>0 days after transplanting</i>						
Control	8	86.75	6.05	3.36	9.76	14.17
1,500	8	86.75	6.05	3.36	9.76	14.17
LSD ^{z)}	-	-	-	-	-	-
<i>15 days after transplanting</i>						
Control	11.58	648.49	6.45	3.43	23.97	16.42
1,500	13.00	889.68	10.33	4.76	21.80	18.48
LSD	0.97	153.91	0.57	0.41	1.49	NS
<i>30 days after transplanting</i>						
Control	27.75	2014.97	14.13	5.18	30.86	20.85
1,500	28.83	2653.37	15.38	5.84	29.28	27.69
LSD	1.02	267.73	NS	NS	NS	5.20
<i>45 days after transplanting</i>						
Control	44.08	3970.41	16.28	7.60	33.63	28.99
1,500	45.67	4467.04	17.62	8.20	32.43	31.78
LSD	NS	409.17	NS	NS	NS	NS
<i>60 days after transplanting</i>						
Control	44.75	4476.26	22.50	12.72	34.68	34.03
1,500	51.83	5161.79	25.08	13.55	35.56	36.53
LSD	2.65	658.60	2.27	NS	NS	NS

^{z)} Means separation within columns of each growth stage by least significant difference(LSD) test at $P = 0.05$

Æ 3-5. Effect of CO₂ supply treatment on number of fresh weight and dry weight for various growth state of 'Bulam plus' Chinese cabbage at 20°C in greenhouse.

CO ₂ supply (ppm)	Fresh weight (g/plant)			Dry weight (g/plant)		
	Shoot	Root	Total	Shoot	Root	Total
<i>0 days after transplanting</i>						
Control	2.91	0.20	3.11	0.07	0.02	0.09
1,500	2.91	0.20	3.11	0.07	0.02	0.09
LSD ^{z)}	-	-	-	-	-	-
<i>15 days after transplanting</i>						
Control	33.62	1.11	34.73	1.60	0.07	1.66
1,500	41.91	0.87	42.78	2.31	0.07	2.38
LSD	6.94	NS	6.88	0.20	NS	0.20
<i>30 days after transplanting</i>						
Control	126.04	2.00	128.05	5.50	0.18	5.68
1,500	150.77	3.86	154.63	7.00	0.30	7.30
LSD	19.51	0.68	19.92	0.79	0.07	0.79
<i>45 days after transplanting</i>						
Control	303.85	17.91	321.76	29.25	2.54	31.79
1,500	333.61	21.65	355.25	58.80	3.68	62.48
LSD	NS	NS	NS	14.30	0.75	14.49
<i>60 days after transplanting</i>						
Control	313.43	21.40	334.83	38.02	2.07	40.08
1,500	378.06	25.60	403.66	61.08	3.53	64.61
LSD	40.77	NS	42.74	11.72	1.05	11.87

^{z)} Means separation within columns of each growth stage by least significant difference(LSD) test at $P = 0.05$

表 3-6. Effect of CO₂ supply treatment on relative growth rate(RGR), leaf area index(LAI) and chlorophyll for various growth state 'Bulam plus' Chinese cabbage at 20°C greenhouse.

CO ₂ supply (ppm)	RGR (g g ⁻¹ day ⁻¹)	LAI (cm ² /cm ⁻²)	Chlorophyll (SPAD unit)
<i>0 days after transplanting</i>			
Control	-	0.17	-
1,500	-	0.17	-
LSD ^{z)}	-	-	-
<i>15 days after transplanting</i>			
Control	0.11	1.30	26.80
1,500	0.15	1.78	28.32
LSD	0.01	0.31	1.29
<i>30 days after transplanting</i>			
Control	0.27	4.03	24.32
1,500	0.33	5.31	26.62
LSD	0.06	0.54	1.37
<i>45 days after transplanting</i>			
Control	1.74	7.94	25.88
1,500	3.68	8.93	26.24
LSD	0.95	0.82	NS
<i>60 days after transplanting</i>			
Control	1.05	8.95	28.41
1,500	1.56	10.32	32.09
LSD	0.46	1.32	1.30

^{z)} Means separation within columns of each growth stage by least significant difference(LSD) test at $P = 0.05$

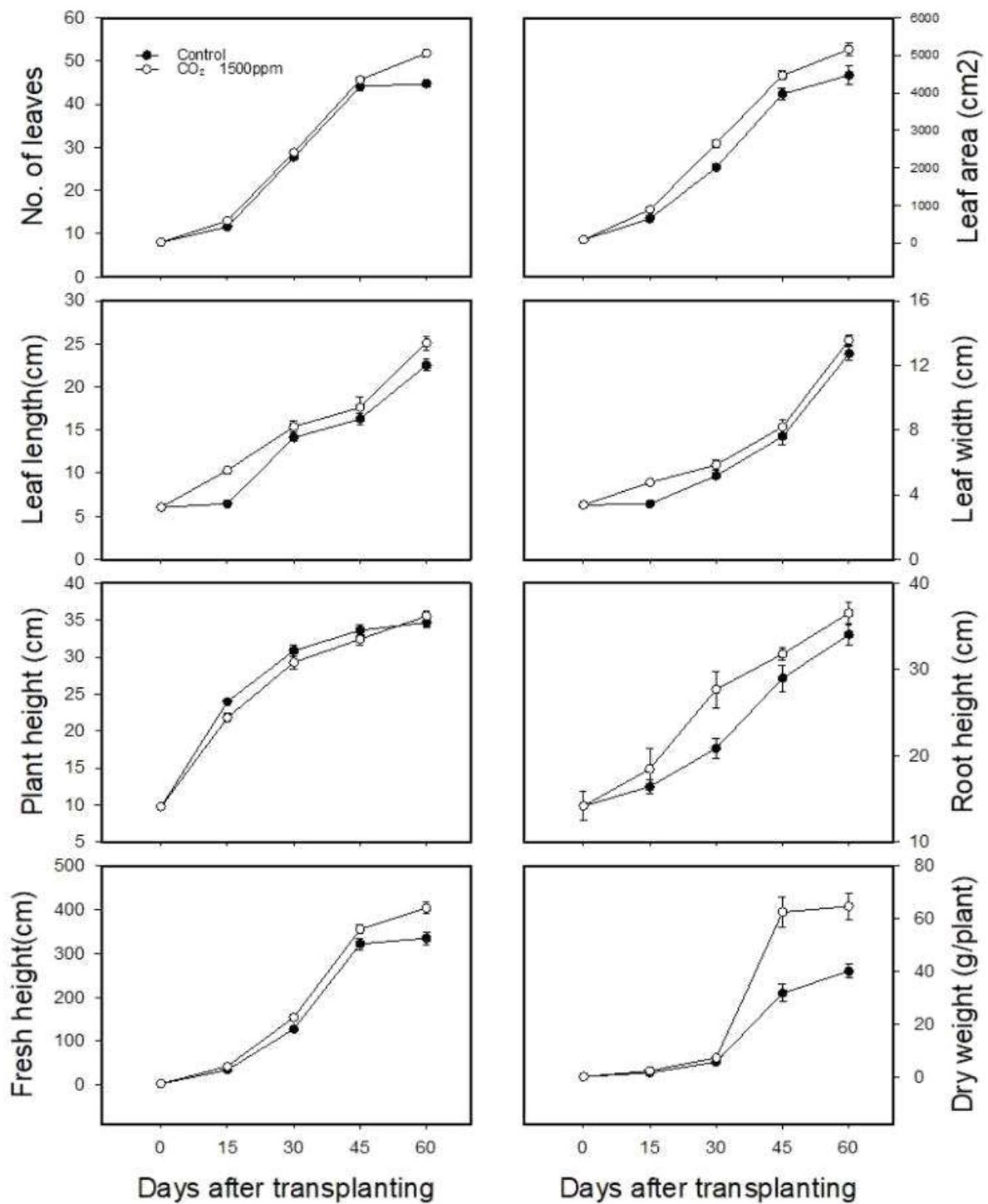


그림 3-11. Changes in number of leaves, leaf area, leaf length, leaf width, plant height and root height by CO₂ treatment for various growth state of 'Bulam plus' Chinese cabbage at 20°C in greenhouse.

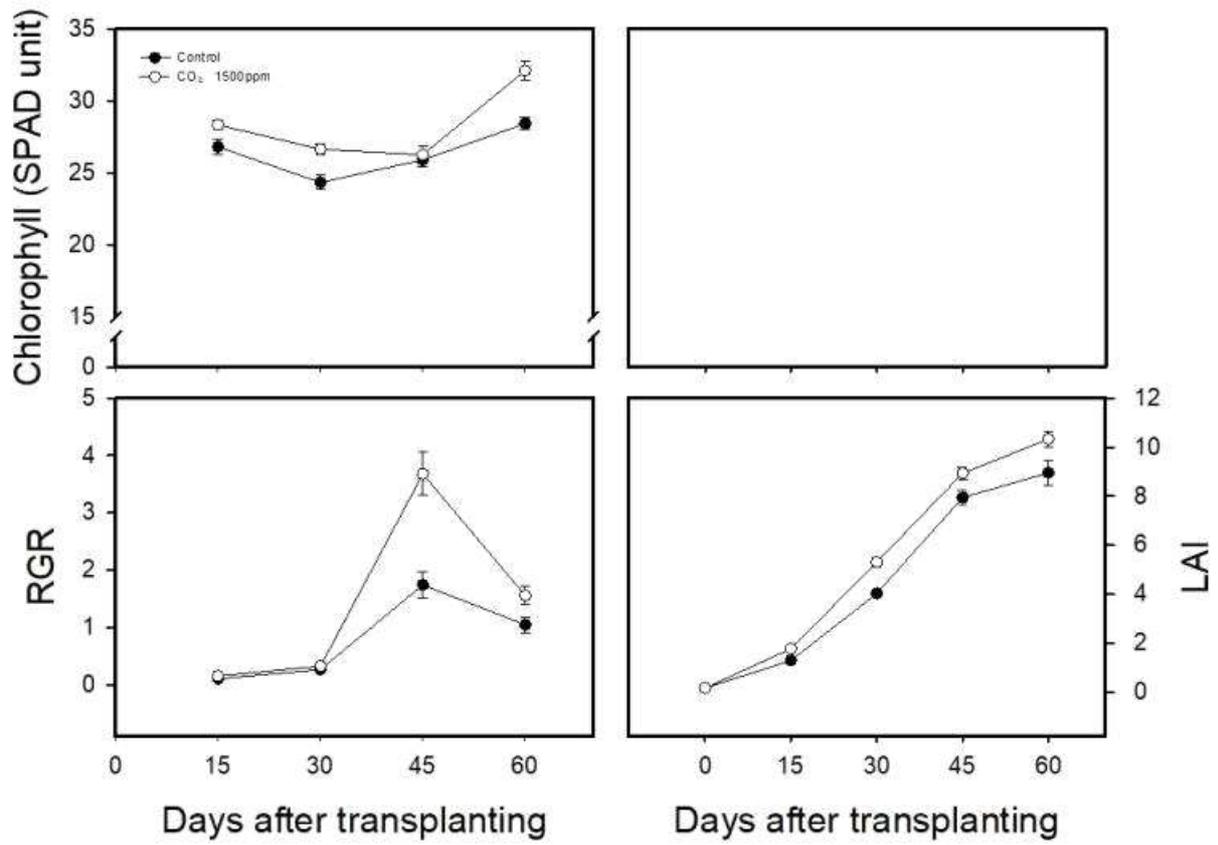


그림 3-12. Changes in chlorophyll content, relative growth rate and leaf area index by CO₂ treatment for various growth state of 'Bulam plus' Chinese cabbage at 20°C in greenhouse.

15



30



Control

1,500

Growth stages
(days)

CO₂ supply (ppm)

그림 3-13. Changes in growth of 'Bulam plus' Chinese cabbage seedling by CO₂ treatment 15 and 30 days after transplanting.

45



60



Control

1,500

Growth stage
(days)

CO₂ supply (ppm)

그림 3-14. Changes in growth as treatment CO₂ of 'Bulam plus' Chinese cabbage 15 and 30 days after transplanting.

2) 빅데이터 R&D 플랫폼 연계 난방 생육환경 데이터 분석

- 시설원예의 복합환경에 관한 빅데이터 구축은 작물생육을 과학적으로 제어하여 고품질 작물생산에 활용됨. 본 실험은 작물의 전 생육기간동안 환경정보를 포함한 빅데이터를 구축하여 작물생육에 최적화된 환경을 구현하기 위해 실시되었음.
- 실험 수행 기간동안 온실의 온도는 20°C로 설정하였으며 공급하는 양액의 pH는 5.6, EC는 1.4ds/m로 설정함.
- 본 실험이 수행되는 동안 온실의 일사량, 온도 및 습도 변화는 나타낸 결과는 그림 1.9 및 1.10과 같음. 평균 온도는 20.8°C 였으며, 하루를 주간(오전 6시-오후 6시)과 야간(오후 6시-오전 6시)로 구분하였을 때, 주간 및 야간 평균온도는 각각 21.1°C 및 20.1°C임. 하루 평균습도는

71.3%였으며 주간/야간 평균습도는 60.8% 및 82.3%임. 누적일사량의 평균은 2750.2 W/m² 이고, 1000W/m² 이하로 내려간 날은 비가 오고 매우 흐린 날이었으며 아주 맑은 날은 3000-4500W/m² 사이의 수치를 보였음.

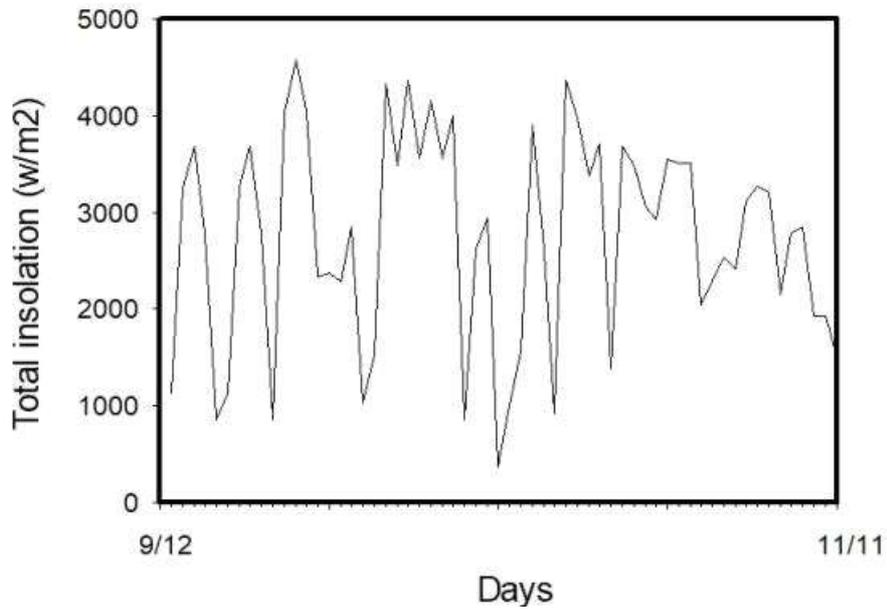


그림 3-15 Changes in insolation during 60 days period of cultivation crop in the greenhouse (2021.9.12.~2021.11.11.).

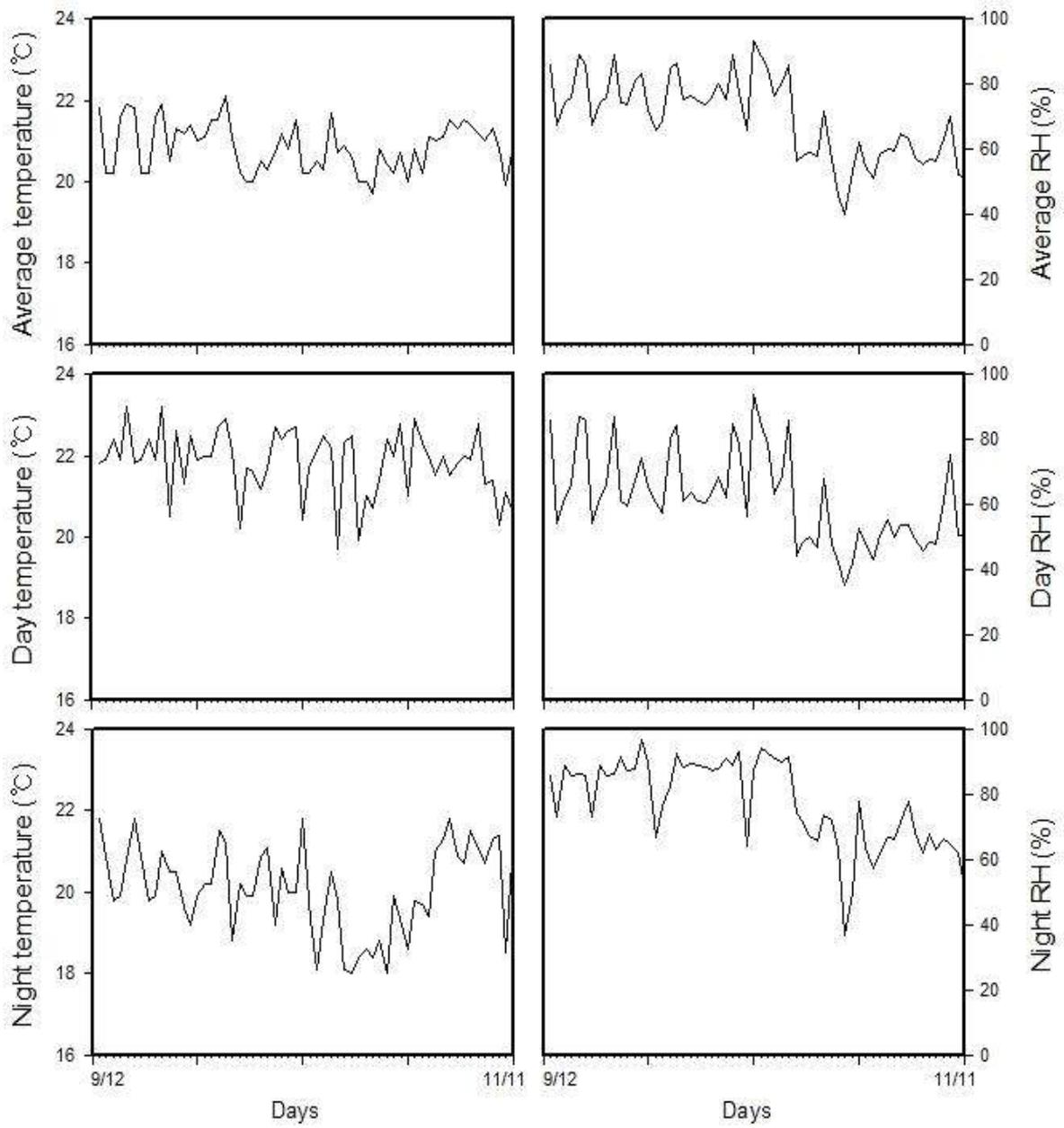


그림 3-16. Changes in temperature and relative humidity during experiment periods. (2021.9.12.~2021.11.11.)

3) 탄소연료 발전기의 난방 효율 경제성 분석

가) 탄소연료전지 발전기의 난방 에너지 절감 효과 분석

- 국내외적으로 시설원예 분야에서 석유에너지를 대체할 수 있는 에너지 개발과 이용에 관한 많은 연구가 있어왔으며, 우리나라처럼 에너지 부존자원이 극히 부족한 경우에는 에너지 소비가격 변동 폭이 커질 수밖에 없기 때문에 난방 연료의 종류나 기존 열관리 시스템의 복합적으로 연계시킬 수 있는 실용적인 에너지 절감 기술의 개발이 시급함.
- 시설 업체류 재배에 난방 시스템이 온실 내부의 환경 변화를 측정한 결과는 표 3-7과 같음. 주간 평균온도와 상대습도는 21.8°C와 61.6%이며 야간온도는 20.1°C였고, 상대습도는 77.1%로 야간의 상대습도가 높았음. 실험기간중 온실 외부의 야간 평균기온은 12.9°C인 점을 감안한다면 탄소연료전지 발전기(5kW)로 난방을 하더라도 야간온도를 18°C 이상 유지할 수 있을 것으로 판단됨.

표 3-7. Mean temperature and relative humidity during the days and night as affected by the heating system used during the experimental periods(2021. 10.10- 2021. 11.20).

Measurement location	Night ^z		Day ^y	
	Temperature (°C)	RH (%)	Temperature (°C)	RH (%)
Inside	20.1	77.1	21.8	61.6
Outside	12.9	87.1	17.4	63.6

^z) Night 19:00-08:59.

^y) Day 09:00-18:59.

^x) No measurement

표 3-8. Estimated monthly periods heating costs of Venlo type 10a greenhouse with two heating system, based on the assumption that out air temperature of 12.9°C and set point temperature air in the greenhouse day of 20°C and night temperature(2021. 10.10- 2021. 11.20).

	Heating system	
	Oil heater(EH)	Carbon fuel cell heat and power(CFCHP)
Daily consumption	1.34 liter x 3 unit x 10 hours = 40.2 liter	0.5kg x 16 unit x 10 hours = 80 kg
Monthly consumption	40.2 liter x 30 days = 1,206 liter	80 kg x 30 days = 2,400 kg
Energy unit price	910 won/liter	100 won/kg
Monthly charge	40.2 liter x 910 won x 30 days = 1,097,460 won	80kg x 100 won x 30 days = 240,000 won
Saving against EH(%)	100	22.0
Heater unit price	3 unit x 6,500,000 won = 19,500,000 won	16 unit x 30,000,000 won = 480,000,000 won

- 탄소연료전지 발전시스템과 등유온풍기의 난방효과 및 난방비용 절감율을 비교하였음(표 3-8). 시설 재배에서는 야간기온이 낮아지기 시작하는 11월부터 이듬해 4월까지 난방이 필요함.

- 탄소연료전지 발전시스템을 이용한 난방은 온실 10a을 기준하였을 하루 연료 소모량은 80kg 이었고, 한달 소모량은 2,400kg 였음. 따라서 한달간 난방에는 240,000원이 소요됨.
- 등유 온풍기의 경우 온실 10a당 3대의 온풍기가 필요하고, 하루 연료소비량은 40.2 리터 였으며, 한달간 연료소모량은 1,206 리터임. 이를 한달간 연료비용으로 산출하면 240,000원이 소요 되었음. 전기온풍기(160,000kWh 기준)의 경우 한 대당 가격은 6,500,000원 정도이며, 10a을 기준하면 3대에 19,500,000원이 필요함반면 탄소연료전지 발전시스템(5kWh 기준) 1대당 가격은 30,000,000원이 소요되고, 설치가격은 16대 설치에 480,000,000원이 소요됨. 그러나 탄소연료전지 발전시스템은 에너지원으로부터 열과 전기를 동시에 생산하기 때문에 전기생산을 통해 연료비용을 절감할 수 있는 이점이 있음.
- 또한 탄소연료전지 발전시스템을 대량으로 생산한다면 단가를 절감할 수 있고, 설치비용을 농가보조금으로 충당한다면 시설재배 영농현장에 실용적으로 이용될 수 있을 것으로 판단됨.

4) 스마트팜 온실에 탄소연료전지 발전시스템 활용에 의한 작물생육 및 냉방능력 검증

- 탄소연료전지의 냉방능력을 평가하고자 상추의 생육온도보다 낮은 18°C와 높은 25°C에서의 상추의 생육 및 품질에 미치는 영향을 평가하고자 하였음.

가) 토마린

- ‘토마린’ 품종은 엽수와 엽면적, 엽장, 엽폭, 초장 등의 지상부 생육이 대부분 18°C 처리구가 25°C 처리구보다 생육이 우수하였고, 이러한 경향은 45일간의 전 생육기간에서 유지됨(표 3-9).
- 정식 후 45일째에서 18°C 처리구의 엽수는 27.1개였으나 25°C 처리구의 엽수는 25.6개로 18°C 처리구가 많았지만 유의적인 차이가 없었음. 반면 엽수를 제외한 엽면적, 초장, 근장, 생체중 및 건물중 등 모든 조사항목에서 18°C 처리구가 25°C 처리구보다 2배 이상의 차이를 보였음. 엽면적에서 18°C 처리구는 4840.30cm²였으며 25°C 처리구는 2338.72cm²임.
- 또한, 45일간 생육시킨 처리구의 생체중과 건물중은 온도처리에 따라 큰 차이가 있었으며, 18°C 처리구의 생체중은 201.51g으로 25°C 처리구의 생체중인 87.35g보다 2배 이상 높았고 건물중 또한 10.35g으로 5.13g에 비해 2배 높았음(표 3-10).
- 상대생장률은 일정 기간동안 식물체의 건물생산 능력을 나타내는 것으로 개체의 성장속도와 관련이 있음. 18°C 처리구의 상대생장률은 정식 후 15일째 0.16으로 가장 높았으며 시간이 지날수록 감소하는 경향을 보임. 반면 25°C 처리구는 정식 후 15일째 0.11, 정식 후 30일째는 0.14로 상대생장률이 증가하였으나 정식 후 45일째는 0.05로 가장 낮았음(표 3-11).
- 엽면적지수는 단위면적당 잎의 전 면적을 나타내는 것 임. 엽면적지수는 전 생육기간동안 증가하는 경향을 보였으며 18°C 처리구가 25°C 처리구보다 높았음. 정식 후 45일째 엽면적지수는 18°C 처리구가 24.20, 25°C 처리구가 11.69으로 2배 이상 높음(표 3-3).
- 엽록소 함량은 정식 후 15일과 45일째에는 18°C 처리구가 25°C 처리구보다 높았으나 정식 후 30일째에는 25°C 처리구가 18°C 처리구보다 높음.
- Hunter L값은 정식 후 15일과 30일째에 25°C 처리구가 18°C 처리구보다 높은 경향이었고 정식 후 45일째에는 낮았으나 유의적인 차이는 없었음. 또한 a값은 전 생육기간동안 18°C 처리구가 25°C 처리구보다 높았고, B값은 대체적으로 25°C 처리구가 18°C 처리구보다 높았으나 통계적으로 유의미한 차이를 나타내지 않음(표 3-12).
- ‘토마린’은 생육온도인 20°C보다 낮은 18°C 처리구가 25°C 처리구에 비해 생육이 우수하였음.

Æ 3-9. Effect of temperature treatment on number of leaves, leaf area, leaf length, leaf width, plant height and root height for various growth state of 'Tormalin' lettuce in greenhouse.

Temperature	No. of Leaves	Leaf area (cm ²)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Plant height (cm)	Root height (cm)
<i>0 days after transplanting</i>						
18°C	6.0	29.66	2.43	1.77	6.43	7.50
25°C	6.0	29.66	2.43	1.77	6.43	7.50
<i>15 days after transplanting</i>						
18°C	9.3 a ^{z)}	367.14 a	5.87 b	3.53 a	19.17 a	29.38 a
25°C	8.1 b	228.48 b	6.96 a	4.03 a	16.41 b	15.29 b
<i>30 days after transplanting</i>						
18°C	17.4 a	1770.74 a	7.89 a	4.41 a	29.80 a	49.64 a
25°C	17.2 a	1280.29 b	7.18 a	4.13 a	24.05 b	28.26 b
<i>45 days after transplanting</i>						
18°C	27.1 a	4840.30 a	12.86 a	6.63 a	38.89 a	52.33 a
25°C	25.6 a	2338.72 b	10.09 b	5.55 b	25.22 b	30.39 b

^{z)} Means separation in columns by Duncan's multiple range test at $P=0.05$.

Æ 3-10. Effect of temperature treatment on number of fresh weight and dry weight for various growth state of 'Tormalin' lettuce in greenhouse.

Temperature	Fresh weight (g/plant)			Dry weight (g/plant)		
	Shoot	Root	Total	Shoot	Root	Total
<i>0 days after transplanting</i>						
18°C	0.92	0.37	1.29	0.05	0.03	0.08
25°C	0.92	0.37	1.29	0.05	0.03	0.08
<i>15 days after transplanting</i>						
18°C	15.21 a ^{z)}	1.86 a	17.07 a	0.65 a	0.11 a	0.76 a
25°C	7.24 b	0.85 b	8.09 b	0.32 b	0.04 b	0.35 b
<i>30 days after transplanting</i>						
18°C	76.55 a	7.43 a	83.98 a	3.06 a	0.28 a	3.34 a
25°C	42.08 b	3.41 b	45.50 b	2.23 b	0.16 b	2.38 b
<i>45 days after transplanting</i>						
18°C	201.51 a	11.94 a	213.45 a	9.67 a	0.68 a	10.35 a
25°C	87.35 b	6.29 b	93.64 b	4.79 b	0.35 b	5.13 b

^{z)} Means separation in columns by Duncan's multiple range test at $P=0.05$.

Æ 3-11. Effect of temperature treatment on RGR, LAI for various growth state of 'Tomalin' lettuce in greenhouse.

Temperature	RGR (g g ⁻¹ day ⁻¹)	LAI (cm ² cm ⁻²)
<i>0 days after transplanting</i>		
18°C	-	0.15
25°C	-	0.15
<i>15 days after transplanting</i>		
18°C	0.16 a ^{z)}	1.84 a
25°C	0.11 b	1.14 b
<i>30 days after transplanting</i>		
18°C	0.10 b	8.85 a
25°C	0.14 a	6.40 b
<i>45 days after transplanting</i>		
18°C	0.08 a	24.20 a
25°C	0.05 b	11.69 b

^{z)} Means separation in columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

Æ 3-12. Effect of temperature treatment on chlorophyll, LAB for various growth state of 'Tomalin' lettuce in greenhouse.

Temperature	Chlorophyll (SPAD unit)	L	A	B
<i>0 days after transplanting</i>				
18°C	24.03	44.82	-17.14	26.03
25°C	24.03	44.82	-17.14	26.03
<i>15 days after transplanting</i>				
18°C	25.42 a ^{z)}	36.21 b	-14.58 a	24.23 b
25°C	24.92 a	48.85 a	-19.34 b	31.32 a
<i>30 days after transplanting</i>				
18°C	20.14 b	44.07 b	-18.33 a	29.00 a
25°C	23.44 a	46.73 a	-18.53 a	29.02 a
<i>45 days after transplanting</i>				
18°C	23.68 a	48.51 a	-18.67 a	30.16 a
25°C	20.41 b	47.25 a	-19.86 b	30.29 a

^{z)} Means separation in columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

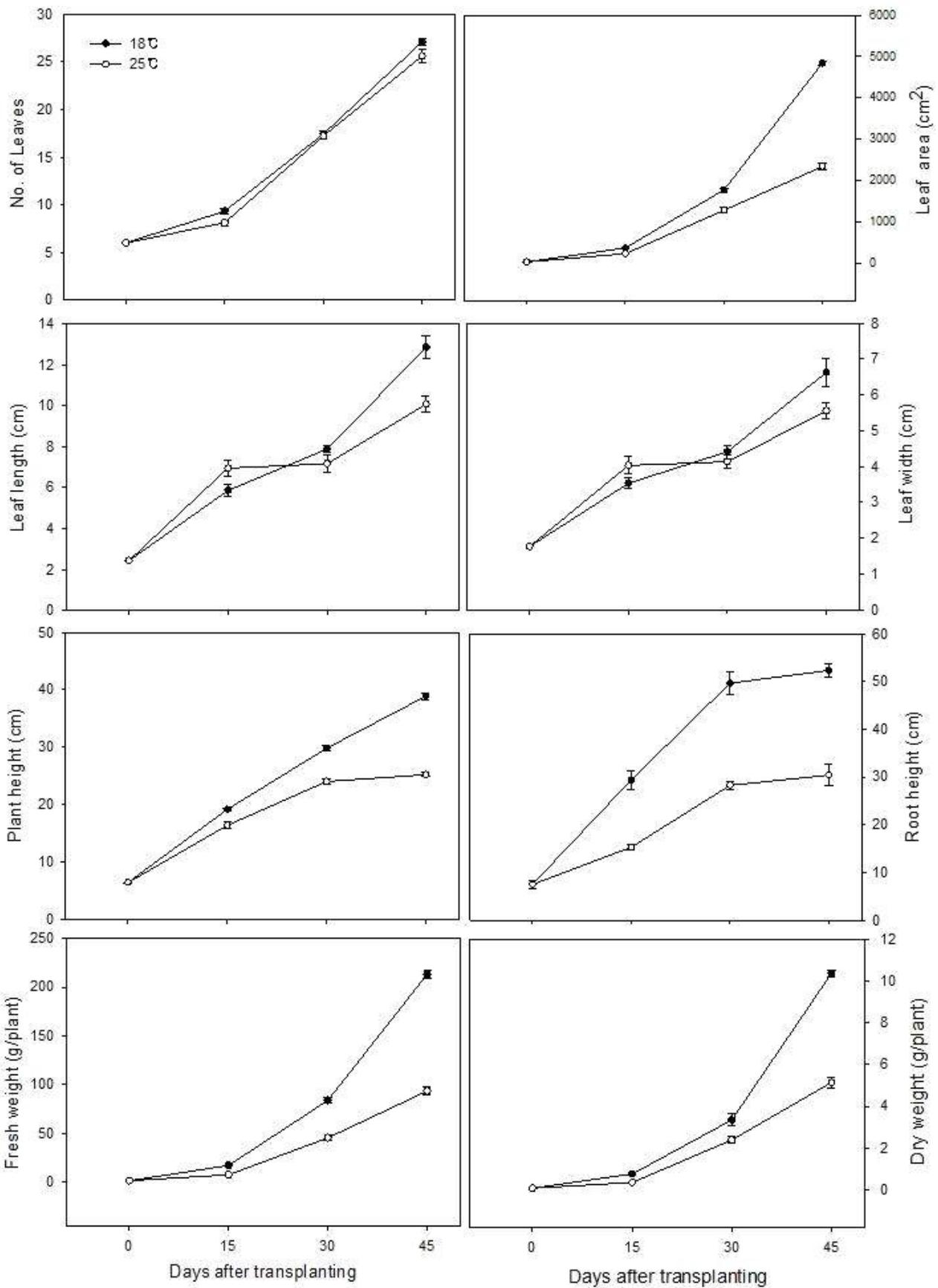


그림 3-17. Changes in number of leaves, leaf area, leaf length, leaf width, plant height and root height by temperature treatment for various growth state of 'Tomalin' lettuce in greenhouse.

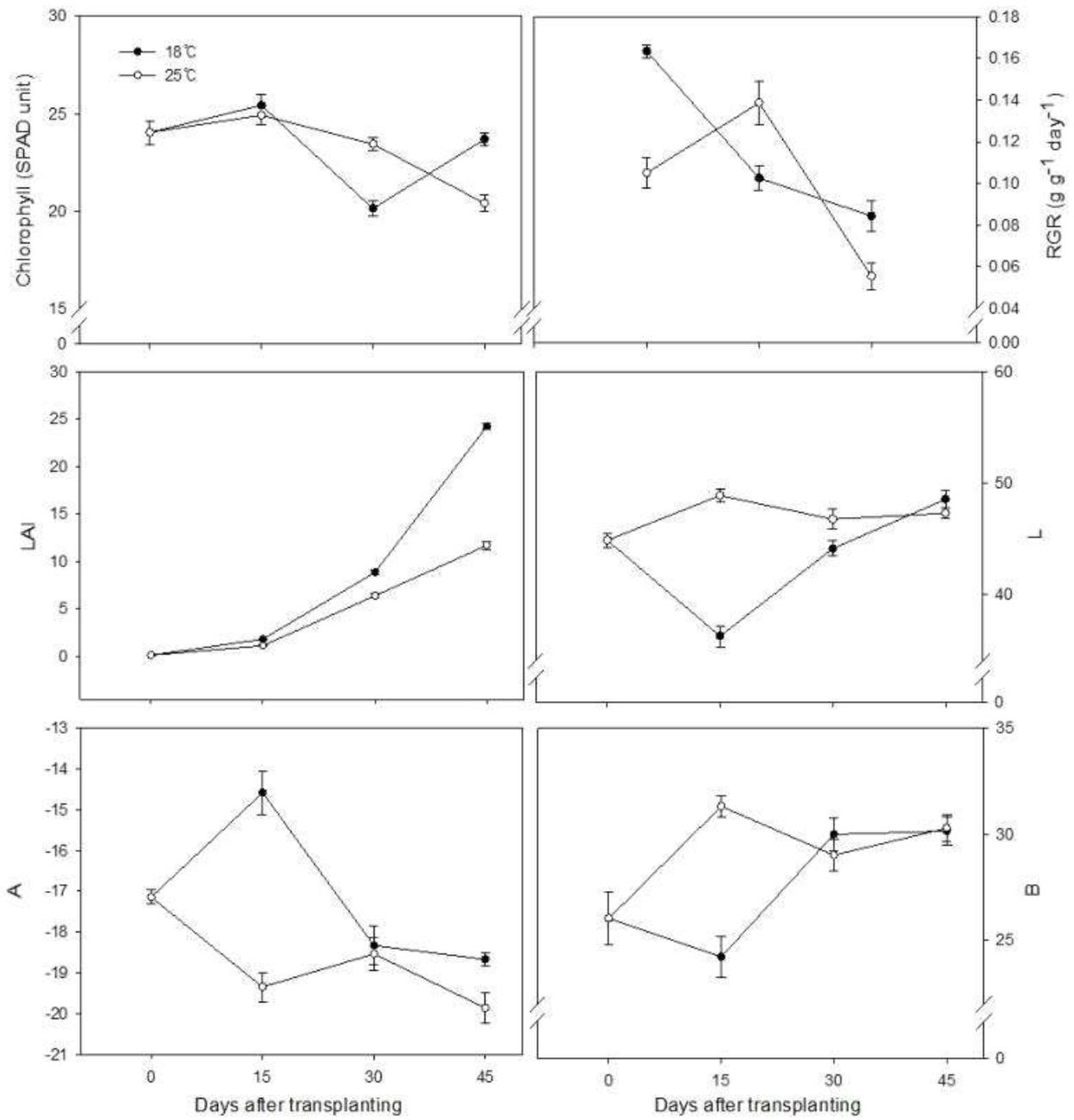
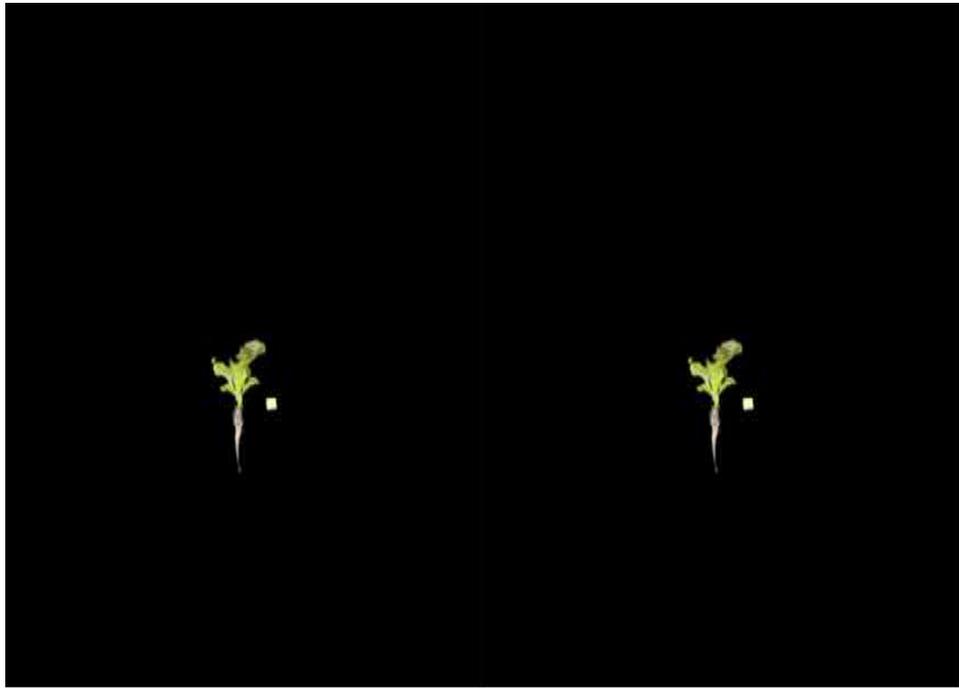


그림 3-18. Changes in chlorophyll content, relative growth rate and leaf area index, Hunter L,A,B by temperature treatment for various growth state of 'Tomalin' lettuce in greenhouse.

0



15



18°C

25°C

Growth stage
(days)

Temperature

그림 3-19. Changes in growth of 'Tomalin' lettuce seedling by temperature treatment 0 and 15 days after transplanting.

30



45



18°C

25°C

Growth stage (days)

Temperature

그림 3-20. Changes in growth of 'Tomalin' lettuce seedling by temperature treatment 30 and 45 days after transplanting.

나) 선풍골드

- '선풍골드' 품종은 엽수와 엽면적, 엽장, 엽폭, 초장 등의 지상부 생육이 대부분 25°C 처리구가 18°C 처리구보다 생육이 우수하였음. 이러한 경향은 45일간의 전 생육기간에서 유지됨(표 3-13).
- 정식 후 45일째 25°C 처리구의 엽수는 19.5개 였고, 18°C 처리구의 엽수는 17.0개로 25°C의 생육온도에서 엽수가 많음. 또한 25°C 처리구의 엽면적은 2111.00cm²인 반면 18°C 처리구는 1676.95cm²의 엽면적을 보여 25°C 처리가 엽생산량이 많음. 반면 엽장, 엽폭은 온도 처리구간에 유의미한 차이가 없었음.

- 초장은 전 생육기간동안 25°C 처리구가 18°C 처리구보다 높았고 정식 후 45일째에는 25°C 처리구가 46.78cm, 18°C 처리구가 24.08cm로 약 1.9배 높았음. 그러나 근장은 전 생육기간동안 18°C 처리구가 25°C 처리구보다 높았음(표 3-13).
- 45일간 생육시킨 처리구의 생체중은 18°C 처리구가 98.49g로 25°C 처리구인 92.97g에 비해 높았으나 유의적인 차이가 없었고 건물중은 25°C 처리구가 4.79g으로 18°C 처리구인 3.59g보다 높음(표 3-14).
- 정식 후 15일째의 상대생장률은 두 처리구 모두 0.12임. 18°C 처리구는 시간이 경과할수록 감소하는 경향이었고 정식 후 45일째 0.08임. 그러나 25°C 처리구는 정식 후 30일째까지 같은 생장율을 보이다가 정식 후 45일째 0.07으로 감소하였음. 이는 18°C 처리구는 정식 후 15일까지의 생장이 가장 왕성했으며 25°C 처리구는 정식 후 30일까지의 생장이 왕성하다 그 이후로는 생장이 감소하는 결과를 나타냄.
- 엽면적지수는 전 생육기간동안 증가하였으며 25°C 처리구가 18°C 처리구보다 높았음. 정식 후 45일째 엽면적지수는 25°C 처리구가 10.55, 18°C 처리구가 8.38으로 25°C 처리구가 18°C 처리구보다 높음(표 3-15).
- 엽록소 함량은 정식 후 30일째까지는 유의미한 차이를 보이지 않았으나 정식 후 45일째 25°C 처리구가 15.38 SPAD로 18°C 처리구인 13.27 SPAD보다 높으며, 또한 전 생육기간 동안 두 처리구 모두 엽록소 함량이 감소하는 경향을 보임.
- Hunter L값은 정식 후 30일과 45일째에 25°C 처리구가 18°C 처리구보다 높음. 또한 a값은 정식 후 15일째 18°C 처리구가 -21.09로 가장 낮은 수치를 보였으며 25°C 처리구는 정식 후 45일째 -20.04로 가장 낮은 수치였으나 유의미한 차이는 없었음. B값은 정식 후 30일까지 18°C 처리구가 25°C 처리구보다 높았으나 정식 후 45일째에는 25°C 처리구가 39.52로 18°C 처리구인 35.91에 비해 높은 수치를 보임(표 3-16).
- ‘선풍골드’는 여름철 고온에서도 잘 견디는 품종 중 하나로 25°C인 고온의 환경에서도 전체적인 생장이 18°C에서보다 좋음. 따라서 여름철 온실 내부의 온도를 25°C로 유지해준다면 상추를 안정적으로 생산할 수 있다고 판단됨.

⌘ 3-13. Effect of temperature treatment on number of leaves, leaf area, leaf length, leaf width, plant height and root height for various growth state of 'Sonpungold' lettuce in greenhouse.

temperature	No. of Leaves	Leaf area (cm ²)	Leaf length (cm)	Leaf width (cm)	Plant height (cm)	Root height (cm)
<i>0 days after transplanting</i>						
18°C	6.0	19.45	2.00	2.07	3.77	4.90
25°C	6.0	19.45	2.00	2.07	3.77	4.90
<i>15 days after transplanting</i>						
18°C	7.3 b ^{z)}	178.21 b	4.09 b	4.33 a	11.86 b	14.23 a
25°C	8.3 a	258.42 a	4.71 a	4.56 a	18.26 a	10.13 b
<i>30 days after transplanting</i>						
18°C	11.2 b	722.89 b	5.40 a	5.66 a	18.71 b	21.13 a
25°C	14.3 a	1061.48 a	4.91 a	5.37 a	33.46 a	20.21 a
<i>45 days after transplanting</i>						
18°C	17.0 b	1676.95 b	9.33 a	8.33 a	24.08 b	34.34 a
25°C	19.5 a	2111.00 a	10.31 a	7.51 a	46.78 a	22.73 b

^{z)} Means separation in columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

⌘ 3-14. Effect of temperature treatment on number of fresh weight and dry weight for various growth state of 'Sonpungold' lettuce in greenhouse.

temperature	Fresh weight (g/plant)			Dry weight (g/plant)		
	Shoot	Root	Total	Shoot	Root	Total
<i>0 days after transplanting</i>						
18°C	0.87	0.12	1.00	0.04	0.02	0.07
25°C	0.87	0.12	1.00	0.04	0.02	0.07
<i>15 days after transplanting</i>						
18°C	8.35 a ^{z)}	0.78 a	9.13 a	0.33 a	0.04 a	0.36 a
25°C	9.11 a	0.43 b	9.55 a	0.32 a	0.02 b	0.34 a
<i>30 days after transplanting</i>						
18°C	30.38 b	2.79 a	33.17 b	1.15 b	0.12 a	1.27 b
25°C	50.42 a	2.33 a	52.75 a	1.89 a	0.10 a	1.99 a
<i>45 days after transplanting</i>						
18°C	98.49 a	7.97 a	106.46 a	3.59 b	0.34 a	3.94 b
25°C	92.97 a	4.82 b	97.79 a	4.79 a	0.27 b	5.06 a

^{z)} Means separation in columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

⚭ 3-15. Effect of temperature treatment on RGR, LAI for various growth state of 'Sonpungold' lettuce in greenhouse.

Temperature	RGR (g g ⁻¹ day ⁻¹)	LAI (cm ² cm ⁻²)
<i>0 days after transplanting</i>		
18°C	-	0.10
25°C	-	0.10
<i>15 days after transplanting</i>		
18°C	0.12 a ^{z)}	0.90 b
25°C	0.12 a	1.29 a
<i>30 days after transplanting</i>		
18°C	0.09 b	3.61 b
25°C	0.12 a	5.31 a
<i>45 days after transplanting</i>		
18°C	0.09 a	8.38 b
25°C	0.07 a	10.6 a

^{z)} Means separation in columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

⚭ 3-16. Effect of temperature treatment on chlorophyll, LAB for various growth state of 'Sonpungold' lettuce in greenhouse.

temperature	Chlorophyll (SPAD unit)	L	A	B
<i>0 days after transplanting</i>				
18°C	22.90	47.07	-18.06	29.04
25°C	22.90	47.07	-18.06	29.04
<i>15 days after transplanting</i>				
18°C	21.27 a	53.34 a	-21.09 b	38.27 a
25°C	21.38 a	50.67 b	-18.83 a	34.19 b
<i>30 days after transplanting</i>				
18°C	18.13 a	51.16 a	-19.06 a	34.16 a
25°C	18.79 a	52.43 a	-18.09 a	30.86 b
<i>45 days after transplanting</i>				
18°C	13.27 b	53.64 b	-19.68 a	35.91 b
25°C	15.38 a	57.71 a	-20.04 a	39.52 a

^{z)} Means separation in columns by Duncan's multiple range test at $P = 0.05$.

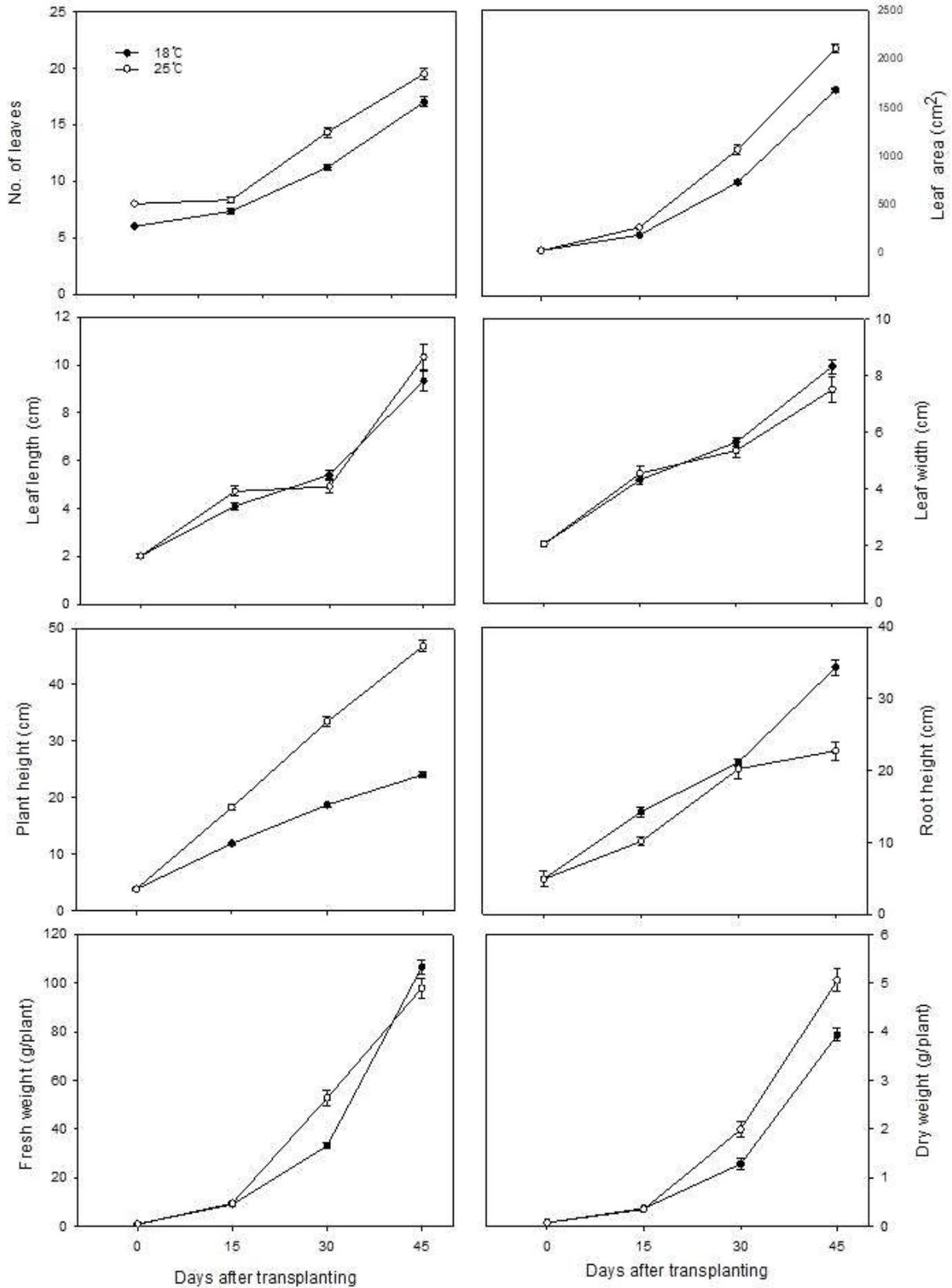


그림 3-21. Changes in number of leaves, leaf area, leaf length, leaf width, plant height and root height by temperature treatment for various growth state of 'Sonpungold' lettuce in greenhouse.

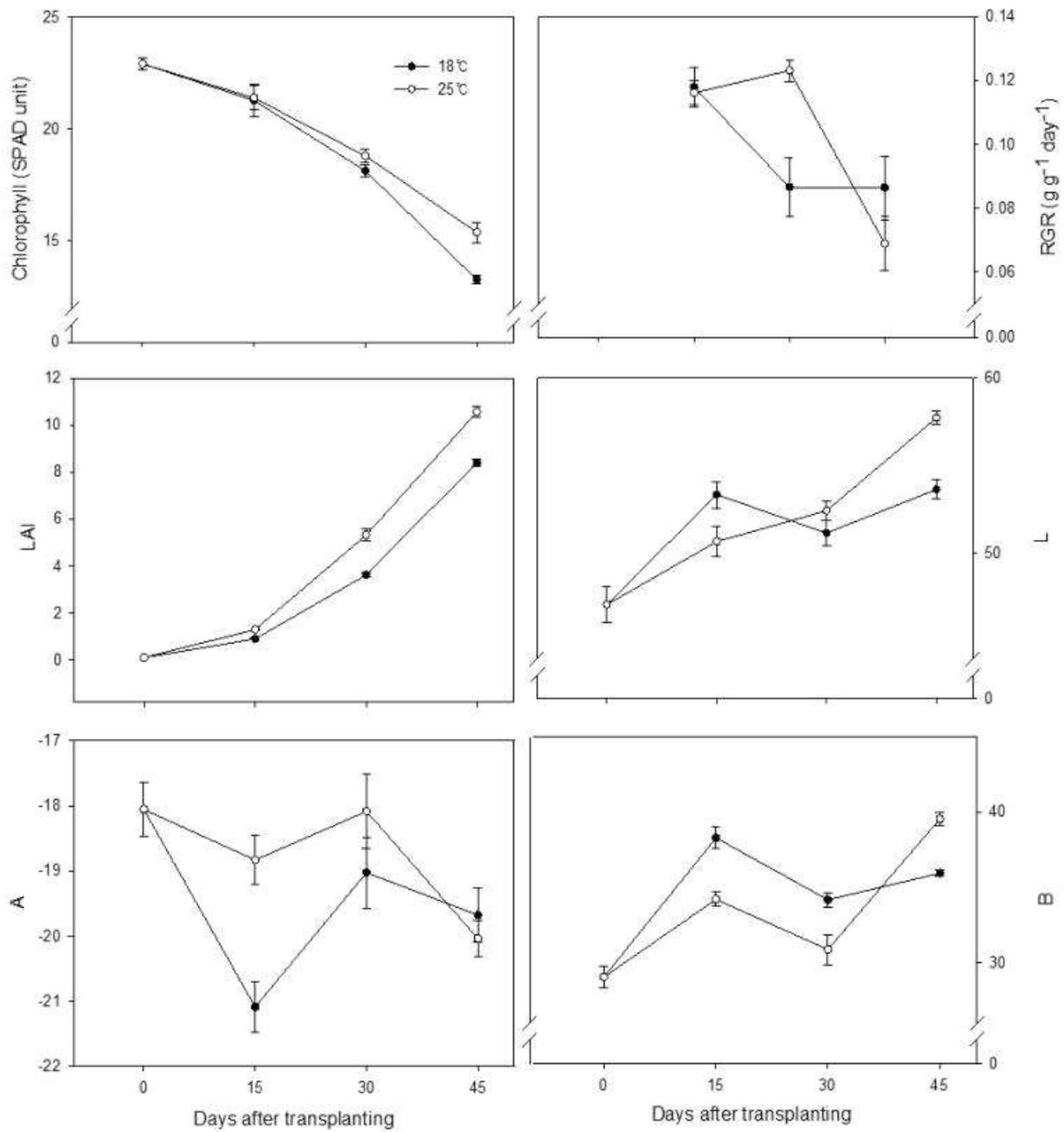
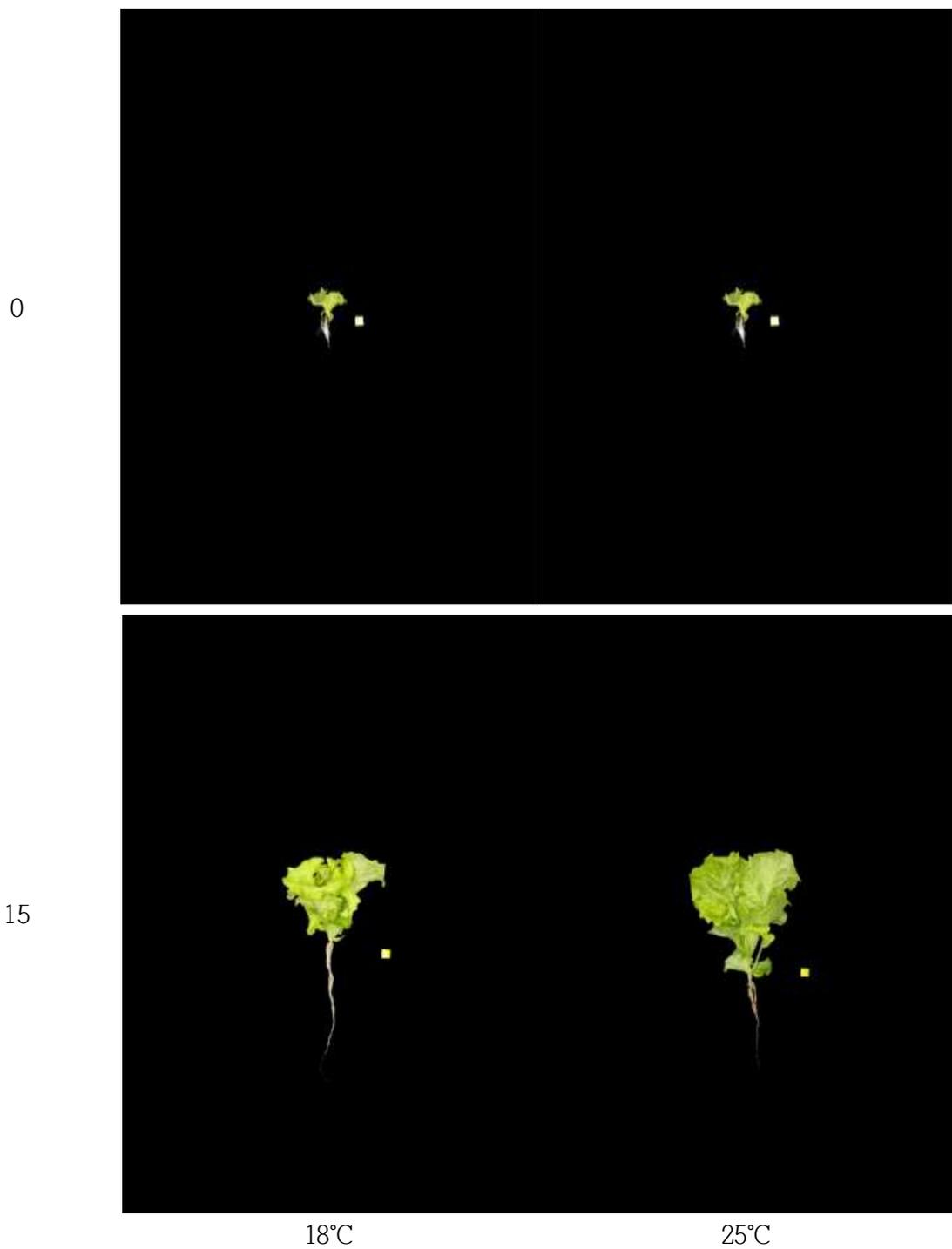


그림 3-22. Changes in chlorophyll content, relative growth rate and leaf area index, Hunter L,A,B by temperature treatment for various growth state of 'Sonpungold' lettuce in greenhouse.



Growth stage
(days)

temperature

그림 3-23. Changes in growth of 'Sonpungold' lettuce seedling by temperature treatment 0 and 15 days after transplanting.

30



45



18°C

25°C

Growth stage
(days)

temperature

그림 3-24. Changes in growth of 'Sonpungold' lettuce seedling by temperature treatment 30 and 45 days after transplanting.

2) 빅데이터 R&D 플랫폼 연계 냉방 생육환경 데이터 분석

- 시설원예의 복합환경에 관한 빅데이터 구축은 작물생육을 과학적으로 제어하여 고품질 작물생산에 활용됨. 본 실험은 작물의 전 생육기간동안 환경정보를 포함한 빅데이터를 구축하여 작물생육에 최적화된 환경을 구현하기 위해 실시되었음.
- 실험 수행 기간 동안 온실온도는 18°C와 25°C로 각각 설정하였으며 공급하는 양액의 pH는 5.6, EC는 1.4ds/m로 설정함.
- 본 실험이 수행되는 동안 온실의 일사량, 온도 및 습도 변화는 나타낸 결과는 그림 3-25 및 3-26과 같음. 온도를 18°C로 설정한 온실의 평균온도는 19.5°C였고, 하루를 주간(오전 6시-오

후 6시)과 야간(오후 6시-오전 6시)로 구분하였을 때 주간 및 야간 평균온도는 각각 22.2°C 및 16.8°C 임. 온도를 25°C로 설정한 온실의 평균온도는 24.5°C이었고 주간 및 야간 평균온도는 각각 27.1°C 및 21.8°C 임.(그림 3-27).

- 하루 평균습도는 53.4%였으며 주간/야간 평균습도는 56.4% 및 50.3%이었고, 누적일사량의 평균은 3365.0 W/m² 임.

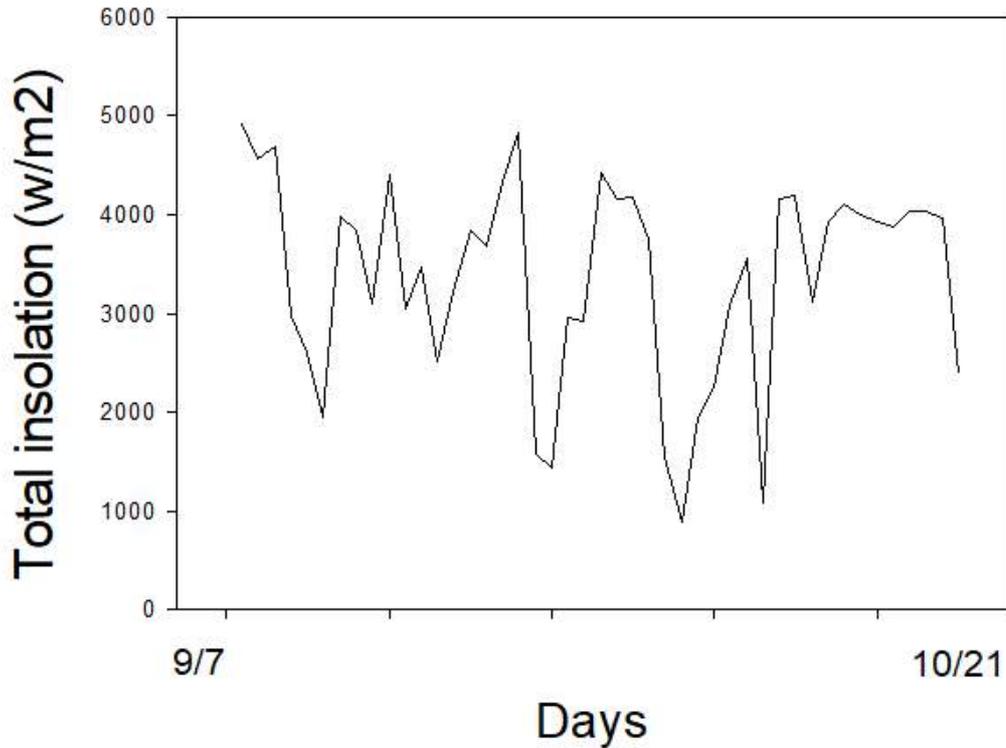


그림 3-25. Changes in insolation during 45 days period of cultivation crop in the greenhouse(2022.9.7~2022.10.21).

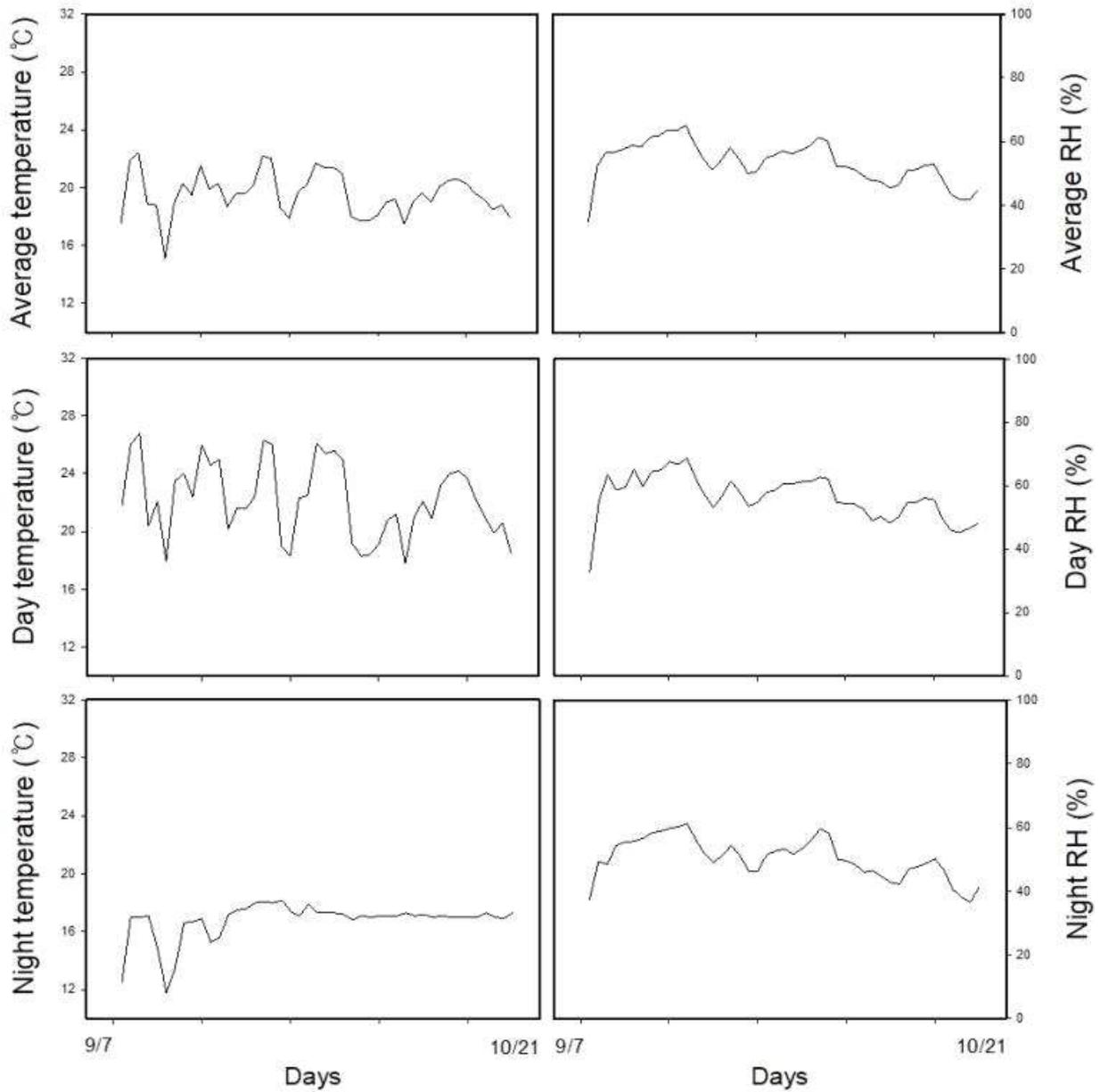


그림 3-26. Changes in temperature and relative humidity during experiment periods at 18°C greenhouse. (2022.9.7~2022.10.21)

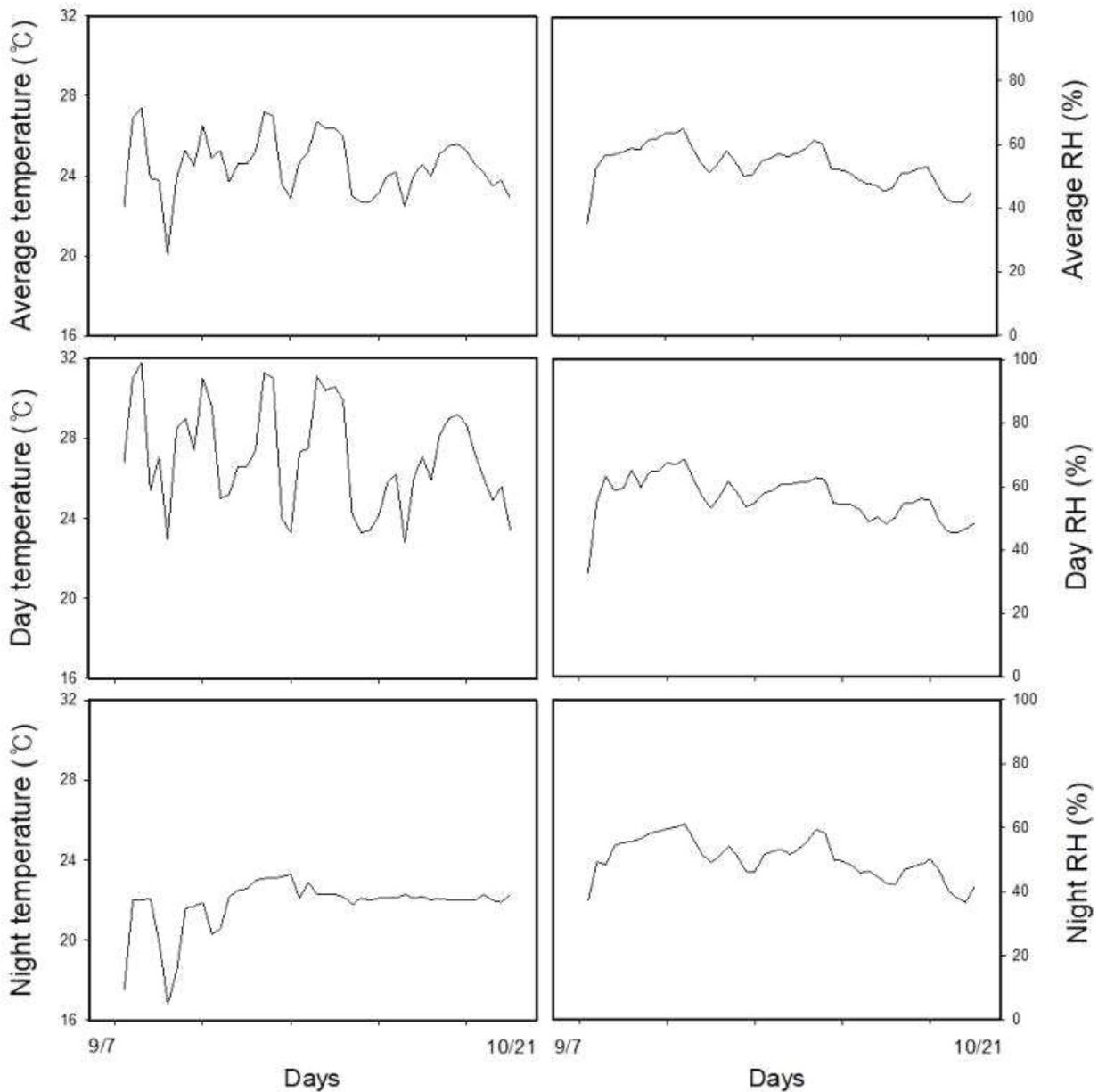


그림 3-27. Changes in temperature and relative humidity during experiment periods at 25°C green house. (2022.9.7~2022.10.21)

3) 탄소연료 발전기의 냉방 효율 경제성 분석

가) 탄소연료전지 발전기의 난방 에너지 절감 효과 분석

- 시설 업체류 재배에 온실 내부의 환경변화를 측정된 결과는 표 3-17과 같음. 주간의 평균온도와 상대습도는 25.1°C와 50.1%였음. 야간온도는 21.8°C였고, 상대습도는 56.4%로 야간의 상대습도가 높음. 실험기간중 온실 외부의 야간 평균기온은 26.1°C인 점을 감안한다면 탄소연료전지 발전기(5kW)로 냉방을 하더라도 야간온도를 25°C로 유지할 수 있을 것으로 판단됨.

표 3-17 Mean temperature and relative humidity during the days and night as affected by the heating system used during the experimental periods(2022.8.1 - 2022.8.31).

Measurement location	Night ^{z)}		Day ^{y)}	
	Temperature (°C)	RH (%)	Temperature (°C)	RH (%)
Inside	21.8	56.4	25.1	50.3
Outside	26.1	74.8	30.5	66.9

^{z)} Night 19:00-08:59.

^{y)} Day 09:00-18:59.

표 3-18 Estimated monthly periods heating costs of Venlo type 10a greenhouse with two cooling system, based on the assumption that out air temperature of 35°C and set point temperature air in the greenhouse day of 25°C and day temperature(2022.8.1 - 2022.8.31).

	Cooling system		
	Air conditioner(AC)	Geothermal heat pump(GHP)	Carbon fuel cell heat and power(CFCHP)
Daily consumption	12kWh × 3 unit × 10 hours = 360kW	105kW	0.5 x 16 unit x 10 hour = 80kg (80kW)
Monthly consumption	360kW × 30 days = 10,800 kW	105kW × 30 days = 3,150kW	800kg x 30 days = 2,400kg
Energy unit price	49.2 won/kW	49.2 won/kW	100 won/kg
Monthly charge	49.2 won/kW × 10,800 kW = 531,360 won	49.2 won/kW × 3,150 = 154,980 won	80kg x 100 won x 30 days = 240,000 won
Saving against EH(%)	100	29.0	45.0
Cooling unit price	3 unit x 12,500,000 won = 37,500,000 won	Total : 140,000,000 won Public grant : 84,000,000 won Local grant : 28,000,000 won Loan : 14,000,000 won Contribution : 14,000,000 won	160 unit x 30,000,000 won = 480,000,000 won

- 여름철 고온기에 엽채류 재배를 위해 탄소연료전지 발전시스템과 대부분 농가에서 사용하는 에어컨 및 지열히트펌프의 냉방효과 및 냉방비용 절감율을 비교함(표 3-18).
- 농가용 에어컨의 경우 온실 10a당 3대의 에어컨이 필요하며 하루 전기 소비량은 360kW였고 한달간 전기 소비량은 10,800kW임. 2022년 한전 전기료 기준, 농업용 전기료는 kW 당 49.2원으로 한 달간 전기 사용료는 531,360원이며, 농가용 에어컨은 한 대당 가격이 12,500,000원으로 10a에 필요한 3대를 설치할 경우 37,500,000원 정도의 가격이 산출됨.
- 지열히트펌프는 수평밀폐형을 기준으로 하여 계산하였고, 지열히트펌프는 1대당 25평의 냉방을 할 수 있으며 8.75kW의 전기가 소비됨. 따라서 10a당 총 12대가 필요하며 하루 전기 소비

량은 105kW임. 한 달 동안의 전기 소비량은 3,150kW로 154,980이 전기료로 소요되었음. 지열히트펌프는 현재 농축산식품부 원예경영과에서 국비 지원을 해주고 있어 자부담금이 10%, 용자가 10%임. 그러므로, 10a의 지열히트펌프 설치비는 140,000,000 이지만 국가보조금이 84,000,000원, 지방보조금이 28,000,000원, 용자가 14,000,000원, 자부담금이 14,000,000원으로 책정됨.

- 탄소연료전지 발전시스템을 이용한 난방은 온실 10a을 기준하였을 하루 연료 소모량은 80kg 이었고, 한달 소모량은 2,400kg임. 따라서 한달간 난방에는 240,000원이 소요됨. 냉방 에너지 비용은 에어컨 냉방에 비교했을 때 45%에 불과하여 55%의 에너지 비용을 절감 할 수 있음.
- 반면 탄소연료전지 발전시스템(5kWh 기준) 1대당 가격은 30,000,000원이 소요됨. 10a 설치가 격은 16대 설치에 480,000,000원이 소요되며, 그러나 탄소연료전지 발전시스템은 에너지원으로부터 열과 전기를 동시에 생산하기 때문에 전기생산을 통해 연료비용을 절감할 수 있는 이점이 있음. 또한 탄소연료전지 발전시스템을 대량으로 생산한다면 단가를 절감할 수 있을 것임. 또한 지열히트펌프 경우처럼 농림부나 지자체의 설치비를 보조해주고 10-20% 정도의 자부담을 충당한다면 시설재배 영농현장에 실용적으로 이용될 수 있을 것으로 판단됨.

● 3차년도

가. 연구수행 내용

1) 스마트팜 온실에 탄소연료전지 발전시스템 활용에 의한 작물생육 및 난방능력 검증

가) 연구목적

- 시설채소의 연중 수요 확대 추세 등으로 동계 가온시설 면적이 증가하고 있음. 시설농가의 경영비 중 난방비가 차지하는 비중은 지대별, 품목별, 시설구조별로 편차가 있을 수 있으나 광열 동력비가 전체 경영비에 차지하는 비중은 약 30~35% 정도인 것으로 파악되고 있음. 농가에서 소비되고 있는 난방연료의 약 89%는 유류난방이며, 그 외 연탄 등 고체연료 6.6%, 전기 3.7%, 신재생에너지 0.4%로 순임. 따라서 시설원에 난방에너지원의 대부분을 유류로 충당하는 상황에서 국제 유가의 지속적인 상승은 면세유 가격을 상승시켜 시설원에 농가의 경영에 큰 어려움을 주고 있음.
- 따라서 본 연구는 겨울철 시설재배에 난방비를 절감하기 위한 탄소연료전지 발전기를 가동하여 연소하는 과정 중에 발생하는 이산화탄소를 온실의 엽채류 재배에 공급하여 생육 및 품질에 미치는 영향을 평가하여 탄소연료전지 발전기를 시설 재배농가에 도입을 위한 기초 자료를 얻기 위해 수행됨.

나) 재료 및 방법

(1) 공시품종 및 실험장소

- 본 연구에 사용된 공시작물은 상추의 2품종인 적축면(권농종묘)과 적치마(권농종묘) 였음. 육묘장에서 100구의 플러그트레이에서 본엽이 2매 출현한 모종을 사용하였고, 2023년 12월 01일에 정식하였음. 실험은 정식 일로부터 생육 42일이 경과된 2024년 1월 12일까지 수행함. 실험장소는 밀양시에 위치한 경상남도 스마트팜 혁신밸리 실증 연구단지의 벤로형 유리온실 내부에 설치한 미니온실에서 수행함. 실험이 수행된 온실 규모는 62.5m² 폴리카보네이트(PC) 온실이었으며 탄소연료전지를 사용한 전기난방을 한 온실 1동과 경유 난방을 이용한 온실 1동으로 총 2동의 온실에서 실험 작물을 재배함. 온실 내부는 행잉거터를 설치하여 포트 재배로 실험을 수행함.

(2) 양액처리 및 생육환경

- 본엽이 2매 전개된 상추 적축면과 적치마는 1/5,000 와그너 포트에 정식하였고, 상토는 원예용상토(성화)를 사용하여 와그너 포트의 80%를 충진한 후 작물을 정식하였음. 재배기간 중 양액은 표 3-19과 같음.
- 양액 급액은 오전 9시 30분부터 오후 22시까지 1시간 간격으로 50cc를 공급함. 양액의 pH는 6.0 이었으며, EC는 1.1 dS m⁻¹ 임. 온실의 온도환경은 주간/야간온도는 20°C로 설정하여 재배함.

표 3-19. Properties of nutrient solution used in the experiment.

Tank	Types of fertilizer		Usage quantity
	Fertilizer	Formula	
A	Calcium nitrate	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	30.62kg
	Potassium nitrate	KNO_3	21.07kg
	Ammonium nitrate	NH_4NO_3	0.01kg
	Fe-EDTA 13%	$[\text{CH}_2\text{N}(\text{CH}_2\text{CO}_2\text{H})_2]_2$	2.61kg
B	Magnesium nitrate	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	16.60kg
	Potassium nitrate	KNO_3	15.34kg
	Potassium sulfate	K_2SO_4	8.45kg
	Ammonium phosphate	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	7.47kg
	Boric acid	H_3BO_3	368.6g
	Manganese sulphate	$\text{MnSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	335.0g
	Ammonium molybdate	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.9g
	Zinc sulfate	$\text{ZnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	11.8g
C	Potassium bicarbonate	KHCO_3	5.74kg



그림 3-28. 경상남도 스마트팜 혁신밸리 실증 연구단지의 벤로형 유리온실의 모습과 실험을 수행하기 위해 내부에 설치한 미니 온실의 모습



그림 3-29. 탄소연료발전기를 사용한 온실(왼쪽)과 경유 난방을 사용한 온실(오른쪽)

(3) 생육 조사항목

- 생육조사는 정식 후 21, 42일째에 실시하였음. 조사방법은 반복 당 3주의 식물체를 채취하여 엽수, 엽면적, 엽장, 엽폭, 초장, 근장, 생체중, 건물중, 엽록소 함량을 조사하였음.
- 엽수는 잎의 길이가 1cm 이상인 것을 조사하였으며 엽면적은 엽면적 측정기(LI-3000, LI Cor., USA)를 이용하였음. 엽장과 엽폭은 3번째로 난 본엽을 측정하였으며, 엽록소는 잎의 3부분을 따로 측정하여 평균값을 내었음. 근장은 뿌리를 물로 완전히 씻어 흙을 제거한 후 뿌리의 가장 긴 부분을 측정하였고, 생체중은 생체 무게를, 건물중은 70°C에서 24시간 건조 후 측정함.

나. 주요 수행결과

1) 스마트팜 온실에 탄소연료전지 발전시스템 활용에 의한 작물생육 및 난방능력 검정

- 탄소연료전지 발전기를 시설재배 온실에 효율성을 검정하기 위한 기초 시험으로 탄소연료를 사용한 온실과 경유 난방을 사용한 온실에서 엽채류 재배를 통해 탄소연료전지의 작물 생육 및 품질에 미치는 영향을 평가 하고자 하였음.

가) 적축면 상추

- 적축면 상추를 생육적온인 20°C에서 재배하였을 때 엽수와 엽면적, 엽장, 엽폭, 초장 등의 지상부 생육은 탄소연료전지를 이용한 난방의 처리구가 경유를 이용한 난방의 대조구와 유의적인 차이가 나타나지 않음. 이러한 경향은 42일간의 전 생육 기간에서 유지되었음(표 3-20.).

표 3-20. Effect of carbon fuel cell on number of leaves, leaf area, leaf length, leaf width, plant height, root length, chlorophyll for various growth state of 'Jeokchookmyeon' lettuce at 20°C in greenhouse.

Heating system	No. of leaves	Leaf area (cm ²)	Leaf		Plant height (cm)	Root length (cm)	Chlorophyll (SPAD unit)
			Length (cm)	Width (cm)			
<i>0 day after transplanting</i>							
Control	6.5	137.5	9.0	6.5	11.5	10.6	18.2
LSD	-	-	-	-	-	-	-
<i>21 days after transplanting</i>							
Carbon fuel cell	8.7	588.1	16.5	13.9	18.9	13.7	13.1
Diesel	9.3	599.8	13.9	11.6	18.3	11.9	11.6
LSD ²⁾	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
<i>42 days after transplanting</i>							
Carbon fuel cell	14.7	1680.1	9.6	7.3	26.1	22.6	7.8
Diesel	15.0	2605.4	12.2	9.0	26.8	21.2	11.0
LSD	NS	NS	NS	1.3	NS	NS	2.5

²⁾ Means separation within columns of each growth stage by least significant difference(LSD) test at $P = 0.05$

- 정식 후 21일째에서 탄소연료전지 처리구의 엽수는 8.7개 였으나 경유 난방을 한 대조구의 엽수는 9.3으로 엽수가 증가되었으나 유의성은 확인 되지 않음. 경유 난방을 사용하여 재배한 대조구의 엽면적은 599.8cm² 였으나 탄소연료전지 처리구는 588.1cm²으로 대조구의 비해 0.98 배로 큰 차이를 나타내지 않았음. 엽장과 엽폭은 처리구가 대조구에 비해 다소 감소하였으나 처리구와 대조구간의 유의적인 차이가 없음. 초장은 처리구가 18.9cm로 나타났고 대조구는 18.3cm로 차이가 불과 0.6cm였으며 이 역시 통계적 유의성은 없음.
- 엽록소 함량은 탄소연료전지를 사용한 처리구가 경유 난방을 사용한 대조구보다 높은 경향이였으나 통계적인 유의성은 없음. 반면 처리구와 대조구의 엽록소 함량은 정식 후 생육기간이 진전될수록 감소하는 경향을 보임(표 3-20). 이는 유리 온실 내부에 설치한 미니 온실에서 상추를 재배하여 자외선 차단에 의한 영향으로 판단됨.

표 3-21. Effect of carbon fuel cell on number of fresh weight and dry weight for various growth state of 'Jeokchookmyeon' lettuce at 20°C in greenhouse.

Heating system	Fresh weight (g/plant)			Dry weight (g/plant)		
	Shoot	Root	Total	Shoot	Root	Total
<i>0 day after transplanting</i>						
Control	7.5	1.8	9.3	0.6	0.2	0.8
LSD	-	-	-	-	-	-
<i>21 days after transplanting</i>						
Carbon fuel cell	35.5	1.4	37.0	1.0	0.2	1.3
Diesel	33.1	1.7	34.7	1.2	0.1	1.3
LSD ^{z)}	NS	NS	NS	NS	0.1	NS
<i>42 days after transplanting</i>						
Carbon fuel cell	159.2	6.9	166.1	5.6	0.4	6.0
Diesel	192.7	7.0	221.0	6.6	0.4	6.9
LSD	NS	NS	NS	NS	NS	NS

^{z)} Means separation within columns of each growth stage by least significant difference(LSD) test at $P = 0.05$

- 42일간 생육시킨 처리구의 생체중과 건물중은 정식 후 21째 생육조사 결과와 비교하였을 때 처리구와 대조구간의 차이가 증가됨. 탄소연료전지 처리구의 생체중은 166.1g으로 대조구인 221.0g보다 0.75배 이상 낮았으며 건물중 또한 6.0g으로 대조구인 6.9g에 비해 약 0.87배 낮았음(표 3-21). 그러나 생체중과 건물중 모두 통계적 유의성은 나타나지 않음.

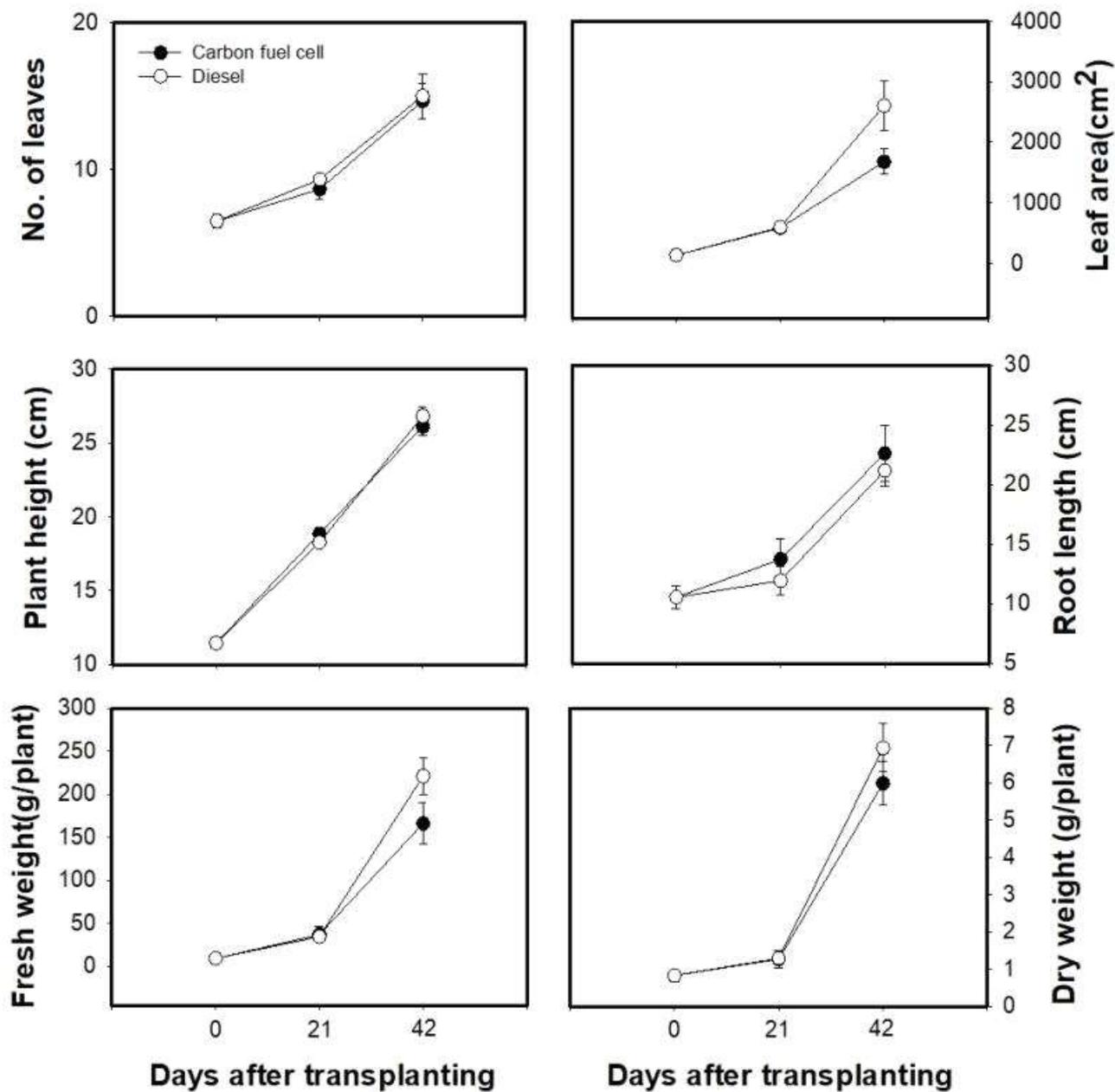


그림 3-30. Changes in number of leaves, leaf area, plant height and root height by the carbon fuel cell treatment and diesel heating treatment for various growth state of 'Jeokchookmyeon' lettuce at 20°C in greenhouse.

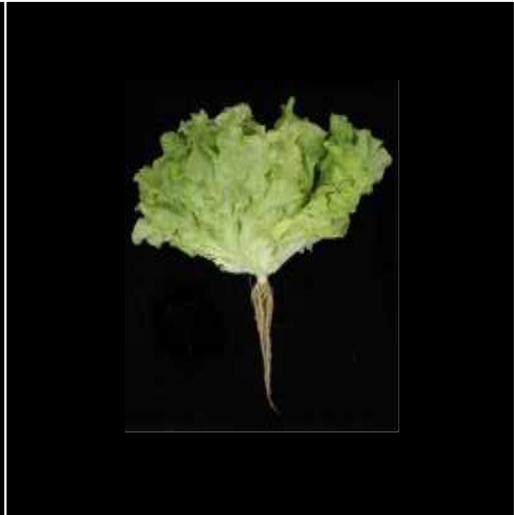
0



21



42



Carbon fuel cell

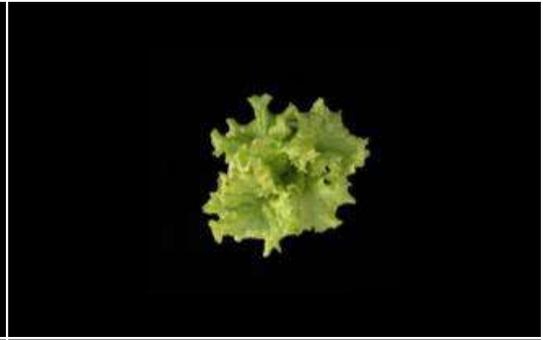
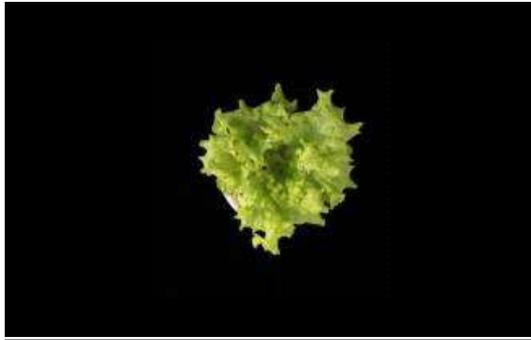
Diesel

Growth stage
(days)

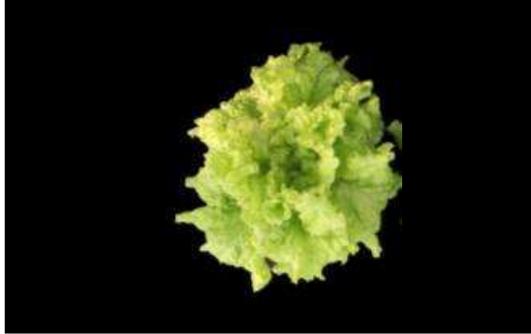
Heating system

그림 3-31. Changes in growth of 'Jeokchookmyeon' lettuce seedling by carbon fuel cell treatment and diesel treatment 21 days and 42 days after transplanting.

21



42



Carbon fuel cell

Diesel

Growth stage
(days)

Heating system

그림 3-32. Changes in growth of 'Jeokchookmyeon' lettuce seedling by carbon fuel cell treatment and diesel treatment 21 days and 42 days after transplanting.

21



42



Carbon fuel cell

Diesel

Growth stage
(days)

Heating system

그림 3-33. Changes in growth of 'Jeokchookmyeon' lettuce seedling by carbon fuel cell treatment and diesel treatment 21 days and 42 days after transplanting.

나) 적치마 상추

- 적치마 상추를 생육적온인 20°C에서 재배하였을 때 엽수와 엽면적, 엽장, 엽폭, 초장 등의 지상부 생육은 탄소연료전지를 이용한 난방의 처리구가 경유를 이용한 난방의 대조구보다 생육이 다소 부진한 결과를 보였음. 이러한 경향은 42일간의 전 생육 기간에서 유지되었으며 대부분의 조사항목에서 통계적으로 유의미한 차이는 없음(표 3-21, 표 3-22).
- 정식 후 42일째의 탄소연료전지 처리구의 엽수는 30.3개 였고, 경유 난방을 사용한 대조구는 34.7로 정식 후 21일째의 결과와 마찬가지로 처리구의 엽수가 대조구에 비해 감소하는 결과를 보임. 대조구의 엽면적은 2855.6cm²인 반면 탄소연료전지를 사용한 처리구는 2855.6cm²로 대조구보다 엽면적이 낮음. 반면 근장은 처리구와 대조구간의 비교를 해볼 때 처리구의 수치가 대조구의 수치보다 높았으나 유의성은 나타나지 않음(표 3-21).
- 21일간 생육시킨 처리구의 생체중과 건물중은 탄소연료전지 처리구가 경유 난방 대조구보다 낮음. 탄소연료전지 처리구의 생체중은 47.0g으로 대조구인 62.7g보다 낮았으며 건물중은 2.5g으로 대조구인 2.6g보다 경미하게 낮음(표 3-22). 42일째 조사한 생체중과 건물중은 정식 후 21일째 수행한 생육조사 결과와 마찬가지로 처리구가 대조구보다 수치가 낮게 나타났지만 통계적으로 유의미한 차이는 보이지 않음.
- 엽록소 함량은 21일째 생육 조사에서 처리구가 20.5이고 대조구가 33.0 SPAD 로 처리구가 대조구에 비하여 높게 측정됨. 반면 42일째에 수행한 생육 조사 결과에서는 처리구는 18.2 SPAD, 대조구는 14.4 SPAD로 처리구가 대조구보다 감소함. 탄소연료전지를 사용한 난방 처리구의 엽록소 함량은 정식 후 21일째와 42일째의 수치를 비교하였을 때 0.89배로 낮았고, 대조구는 정식 후 21일째에 엽록소 함량이 42일째의 엽록소 함량의 0.44배로 더 많이 낮아진 경향을 보임(표 3-21). 이와 같은 결과는 적축면 상추와 마찬가지로 유리 온실 내부에 설치한 미니 온실에서 상추를 재배하여 자외선 차단에 의한 영향으로 판단됨.

표 3-21. Effect of carbon fuel cell on number of leaves, leaf area, leaf length, leaf width, plant height, root length, chlorophyll for various growth state of 'Jeokchima' at 20°C in greenhouse.

Heating system	No. of leaves	Leaf area (cm ²)	Leaf		Plant height (cm)	Root length (cm)	Chlorophyll (SPAD unit)
			Length (cm)	Width (cm)			
<i>0 day after transplanting</i>							
Control	7.0	111.3	7.8	2.9	12.8	10.5	24.4
LSD	-	-	-	-	-	-	-
<i>21 days after transplanting</i>							
Carbon fuel cell	15.3	1004.2	8.9	4.8	19.7	14.6	20.5
Diesel	16.3	837.1	12.0	5.8	21.5	10.8	33.0
LSD ²⁾	NS	NS	NS	NS	NS	3.6	3.7
<i>42 days after transplanting</i>							
Carbon fuel cell	30.3	1955.5	13.6	6.5	25.8	25.2	18.2
Diesel	34.7	2855.6	13.2	7.4	27.3	23.9	14.4
LSD	NS	694.4	NS	NS	NS	NS	2.8

²⁾ Means separation within columns of each growth stage by least significant difference(LSD) test at $P = 0.05$

㉟ 3-22.

Effect of carbon fuel cell on number of fresh weight and dry weight for various growth state of 'Jeokchima' at 20°C in greenhouse.

Heating system	Fresh weight (g/plant)			Dry weight (g/plant)		
	Shoot	Root	Total	Shoot	Root	Total
<i>0 day after transplanting</i>						
Control	2.6	1.5	4.1	0.2	0.1	0.4
LSD	-	-	-	-	-	-
<i>21 days after transplanting</i>						
Carbon fuel cell	44.3	2.7	47.0	2.2	0.3	2.5
Diesel	59.8	2.9	62.7	2.5	0.2	2.6
LSD ^{z)}	NS	NS	NS	NS	0.1	NS
<i>42 days after transplanting</i>						
Carbon fuel cell	162.2	7.6	169.8	7.0	0.4	7.4
Diesel	194.9	8.8	203.7	8.7	0.5	9.2
LSD	NS	NS	NS	NS	NS	NS

^{z)} Means separation within columns of each growth stage by least significant difference(LSD) test at $P = 0.05$

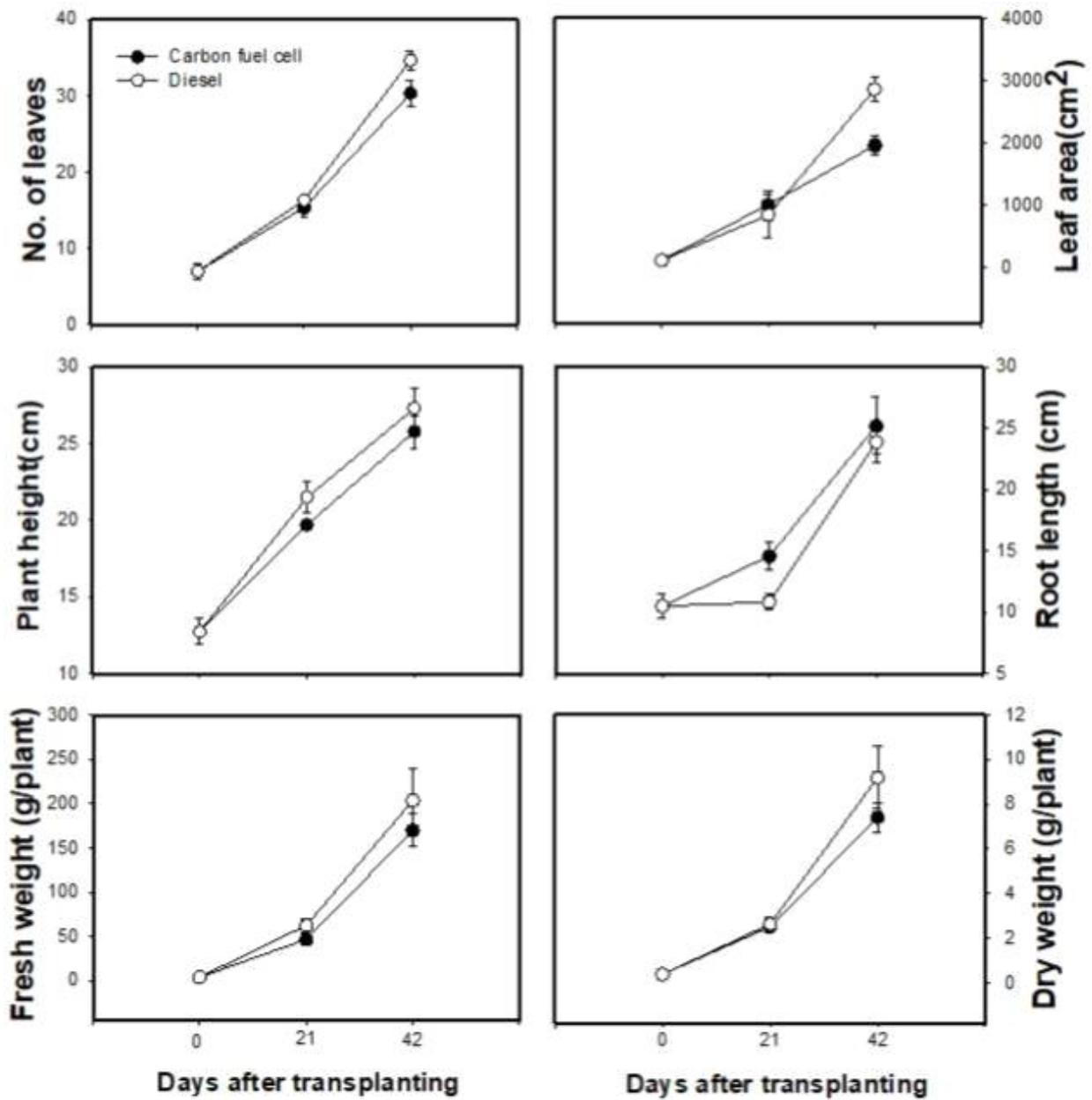
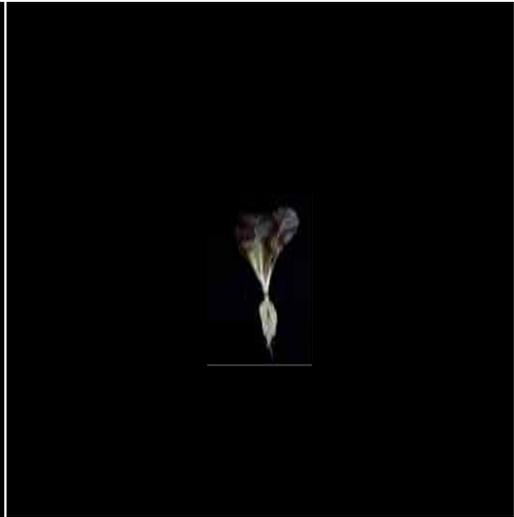
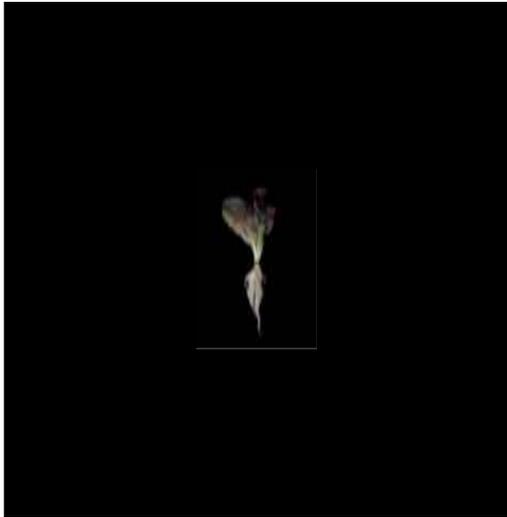
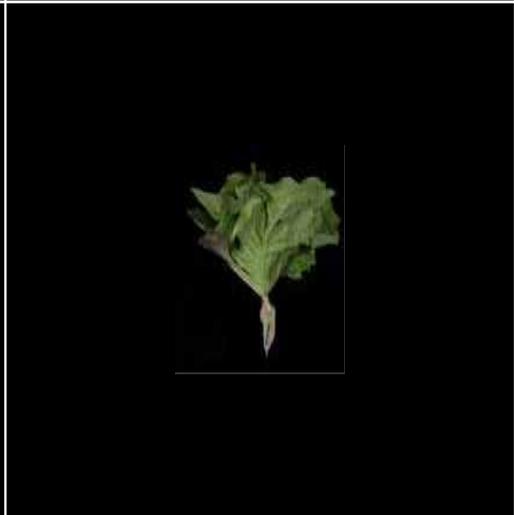
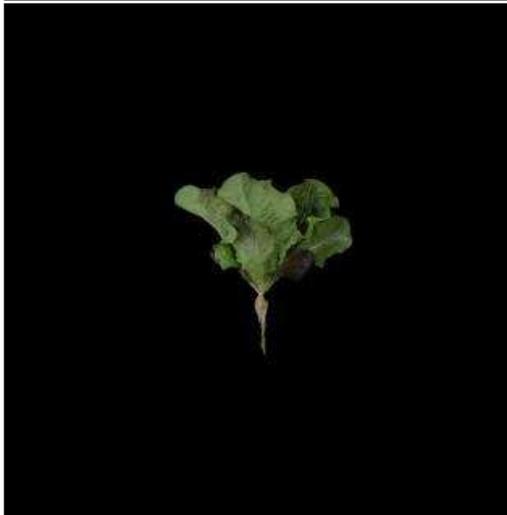


그림 3-34 Changes in number of leaves, leaf area, plant height and root height by the carbon fuel cell treatment and diesel heating treatment for various growth state of 'Jeokchima' lettuce at 20°C in greenhouse.

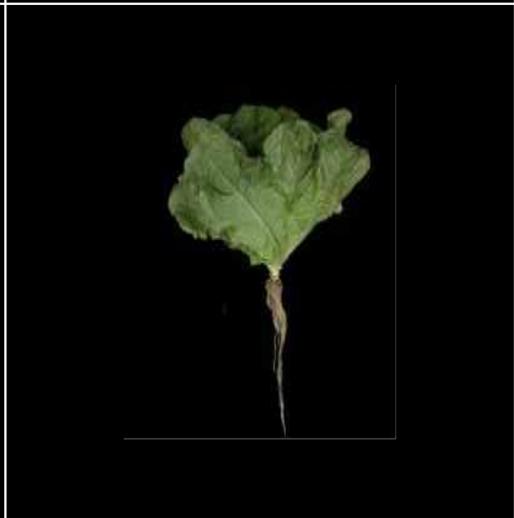
0



21



42



Carbon fuel cell

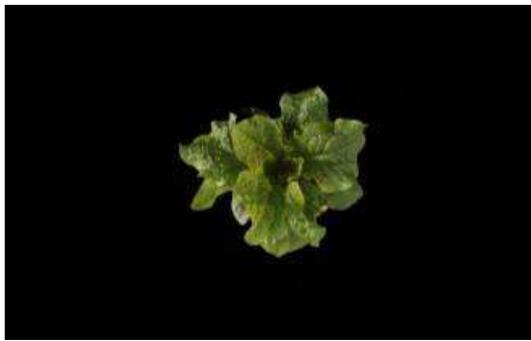
Diesel

Growth stage
(days)

Heating system

그림 3-35. Changes in growth of 'Jeokchima' lettuce seedling by carbon fuel cell treatment and diesel treatment 21 days and 42 days after transplanting.

21



42



Carbon fuel cell

Diesel

Growth stage
(days)

Heating system

그림 3-36. Changes in growth of 'Jeokchima' lettuce seedling by carbon fuel cell treatment and diesel treatment 21 days and 42 days after transplanting.

21



42



Carbon fuel cell

Diesel

Growth stage
(days)

Heating system

그림 3-37. Changes in growth of 'Jeokchima' lettuce seedling by carbon fuel cell treatment and diesel treatment 21 days and 42 days after transplanting.

2) 탄소연료 발전기의 난방 효율 경제성 분석

가) 탄소연료전지 발전기의 난방 에너지 절감 효과 분석

- 국제유가 폭등으로 시설원예 등 농업용 에너지 비용이 크게 상승하여 농업인의 경영비 부담이 증가하고 있어 겨울철 시설원예 작물재배에 투입되는 난방비를 절감할 수 있는 시스템 구축이 필요함. 또한 기후변화에 대비한 세계기후협약에 대처하기 위하여 국가적 차원에서 신재생에너지 보급정책이 이루어지고 있으며 이에 따라 시설원예 분야에서도 적극적인 노력이 필요함.
- 석유, 석탄, 천연가스 등 화석연료는 산업혁명 이후 전 세계적인 주요 에너지원으로 사용되어 왔음. 그러나 이들 화석연료는 점차 고갈되고 있으며 대기오염, 수질오염, 토양오염 등의 여러 가지 환경문제를 야기하고 있음. 따라서 화석연료를 대체할 수 있는 에너지 자원을 발굴하고 다양화하기 위한 노력은 당연한 귀결이라 할 수 있음. 특히 우리나라의 경우 이들 화석연료를 거의 대부분 수입에 의존하고 있어 경제적인 부담이 가중되고 있는 실정임.
- 농업용 에너지 소비의 약 65%가 난방용으로 사용되고 있으며, 주로 등유 등 화석연료를 사용하고 있으며, 시설원예 난방에너지원은 면세, 사용의 편의성 등으로 대부분 유류로 충당하는 상황에서 국제유가의 지속적인 상승 문제는 면세유 가격을 상승시켜 시설원예 농가의 경영에 큰 어려움을 주고 있음.
- 우리나라 시설원예도 겨울철에 화석연료나 전기 등을 열원으로 이용해 난방을 하는 가운데 재배 면적도 매년 증가해 전체면적의 34%를 차지하고 있음. 시설원예용으로 사용되고 있는 난방연료로는 유류 82% 이상이며, 고체연료가 9%, 전기 9%, 기타 신재생에너지와 가스가 약 1%를 차지하고 있음.
- 이처럼 유류 의존도가 높다보니 시설원예 농가는 유가변동에 매우 민감하고 경쟁력도 취약한 실정이며, 시설재배 농가의 전체경영비 중에서 겨울철 난방비가 차지하는 비중이 30 - 50% 정도로 매우 높아 난방비를 절감하는 것이 곧 농가의 소득을 높이는 최선의 방법이라 할 수 있음.
- 시설원예에서 난방 에너지를 절감하기 위한 방법 중 하나가 에너지 절감시설의 구축과 더불어 유류를 대체 할 수 있는 방안으로 신재생에너지를 들 수 있는데 그중 바이오메스를 활용한 탄소연료전지 발전시스템임.
- 이러한 관점에서 본 연구는 신재생에너지인 탄소연료전지 발전시스템을 활용하여 스마트팜 혁신밸리의 실증단지에서 온실 난방 에너지 절감효과를 분석함.
- 스마트팜 혁신밸리의 실증온실의 재배환경을 측정한 결과는 표 3-6과 같음. 상추재배를 위해 온실의 내부 온도를 20°C로 설정하였고, 작물재배 기간 동안 데이터로거를 통해 측정한 온실 내부의 평균온도는 낮 온도는 21.4°C이었고, 야간 온도는 19.8°C 이었음.
- 반면 온실 외부의 평균온도는 낮에는 11.8°C이었고, 야간은 5.7°C 이었음. 또한 온실의 내부의 상대습도 낮에는 61.6%이었고, 야간은 77.1% 이었음. 반면 온실의 외부의 상대습도 낮에는 63.6%였고, 야간은 87.1%임.

표 3-23. Mean temperature and relative humidity during the days and night as affected by the heating system used during the experimental periods(2023. 11.1- 2024. 1.12).

Measurement location	Night ^z		Day ^y	
	Temperature (°C)	RH (%)	Temperature (°C)	RH (%)
Inside	19.8	77.1	21.4	61.6
Outside	5.70	87.1	11.8	63.6

^{z)} Night 19:00-08:59.

^{y)} Day 09:00-18:59.

^{x)} No measurement

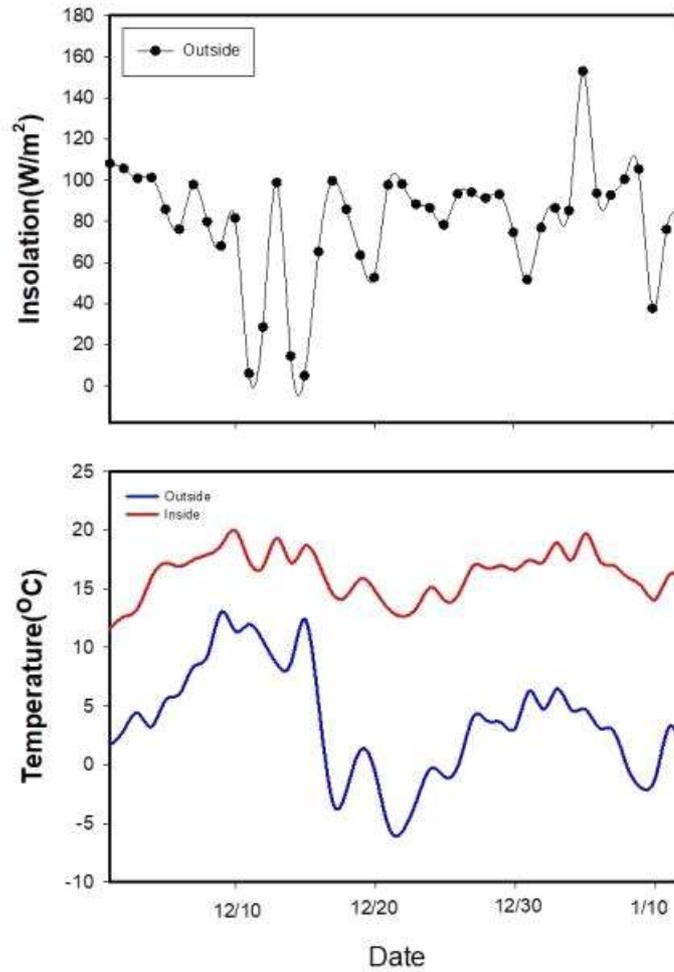


그림 3-38. 실험기간(2023.12.01.~2024.01.12.)동안 경상남도 스마트팜 혁신밸리에서 측정된 일사량과 온실 내·외부 온도

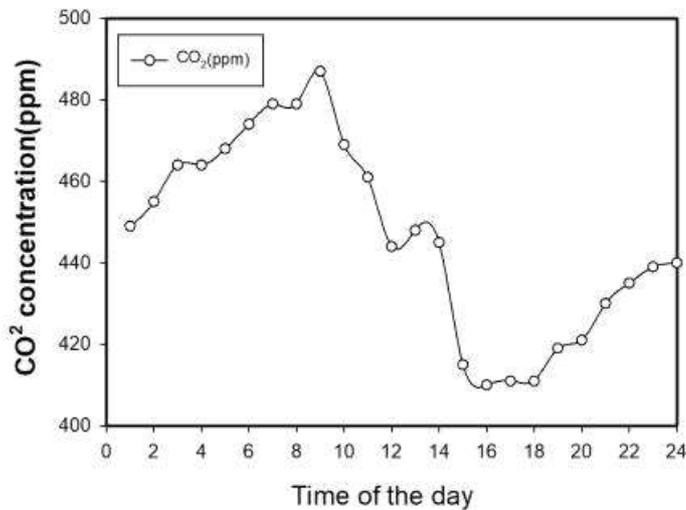


그림 3-39. 실험기간(2023.12.01.~2024.01.12.)동안 경상남도 스마트팜 혁신밸리의 온실 내부에서 측정된 CO₂ 농도

- 탄소연료전지 발전시스템의 난방비 절감율을 경유온풍기와 비교함(표 3-24). 시설 재배에서는 야간기온이 낮아지기 시작하는 10월부터 난방이 시작하였고, 이듬해 4월까지 난방이 필요함. 특히 외부 기온이 하강하는 12월부터 난방 에너지 사용량이 증가하여 1월에는 연료 사용량이 가장 많음.

- 이러한 특성 때문에 국제 유가상승의 영향은 노지작목에서는 크지 않으나, 시설원예 작목에서는 크게 나타나며 시설원예 작목이 유가상승의 영향을 크게 받는 이유는 경영비 중 유류비의 비중이 높기 때문임.
- 시설온실 작물의 경쟁력 제고를 위해서는 무엇보다도 난방비의 비중을 줄이는 것이 시급한 과제임. 아울러 장기적인 관점에서 화석연료 에너지를 대체 또는 절감할 수 있는 신재생에너지인 탄소연료전지 발전시스템 개발이 필요함.
- 따라서 신재생에너지인 탄소연료전지 발전시스템 활용한 스마트팜 혁신밸리 온실의 에너지를 절감효과를 분석함. 난방비 산출은 2023년 12월 1일부터 2024년 1월 12일까지 40일개월간 경유(면세유) 사용량 대조군으로 하여 탄소연료전지 발전시스템의 에너지 사용량을 근거하였음.
- 탄소연료전지 발전시스템을 이용한 난방은 온실 10a을 기준하였을 하루 연료 소모량은 104kg 이었고, 한달 소모량은 3,120kg 임. 따라서 한달간 난방에는 249,000원이 소요됨.
- 경유 온풍기의 경우 온실 10a당 3대의 온풍기가 필요하고, 하루 연료소비량은 43.5 리터 였으며, 한달간 연료소모량은 1,305 리터임. 이를 한달간 연료비용으로 산출하면 1,335,000원이 소요됨.
- 탄소연료전지 발전시스템의 시설온실에서 에너지 효율성을 분석한 결과 반탄화 고체를 에너지 연료로 활용하는 탄소연료전지 발전시스템은 경유(면세유) 난방에 비해 난방에너지 비용은 19%에 불과하여 등유 난방 대비 81%의 난방에너지 절감효과가 있음(그림 3-40).
- 또한 탄소연료전지 발전시스템은 설치비용이 높다는 단점이 있으나 탄소에너지로부터 열과 전기를 동시에 생산하기 때문에 전기생산을 통해 연료비용을 절감할 수 있는 이점이 있음.
- 또한 탄소연료전지 발전시스템을 대량으로 생산한다면 단가를 절감할 수 있고, 설치비용을 농가보조금으로 충당한다면 시설재배 영농현장에 실용적으로 이용될 수 있을 것으로 판단됨.

표 3-24. Estimated monthly periods heating costs of Venlo type 10a greenhouse with two heating system, based on the assumption that out air temperature of 8. 2°C and set point temperature air in the greenhouse day of 20°C and night temperature(2023. 12.01- 2024. 01.12).

	Heating system	
	Oil heater(Diesel)	Carbon fuel cell heat and power(CFCHP)
Daily consumption	1.45 liter x 3 unit x 10 hours = 43.5 liter	0.65kg x 16 unit x 10 hours = 104 kg
Monthly consumption	43.5 liter x 30 days = 1,305 liter	104 kg x 30 days = 3,120 kg
Energy unit price	1,000 won/liter	80 won/kg
Monthly charge	44.5 liter x 1,000 won x 30 days = 1,335,000 won	104kg x 80 won x 30 days = 249,600 won
Saving against EH(%)	100	19.0

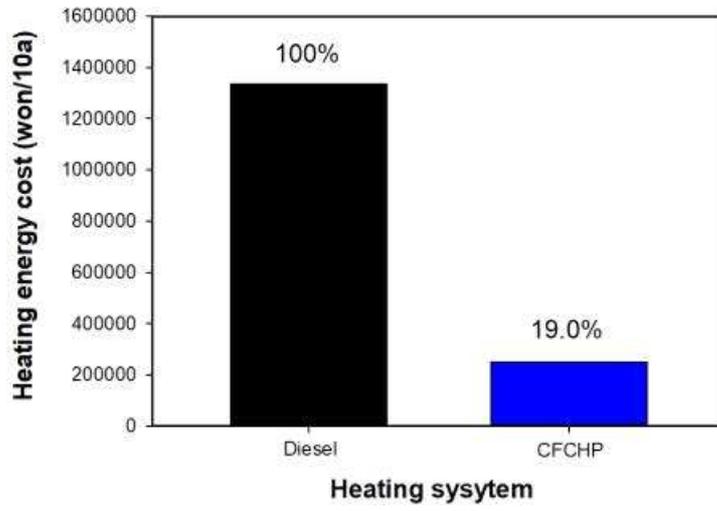


그림 3-40. 경유 대비 탄소연료전지 사용에 따른 월 난방 비용 및 에너지 절감 효율

IV. 위탁연구기관 (서울대학교)

● 1차년도

1. 일산화탄소-수소 혼합연료 변수 제어 가능한 SOFC 테스트 셋업 구축

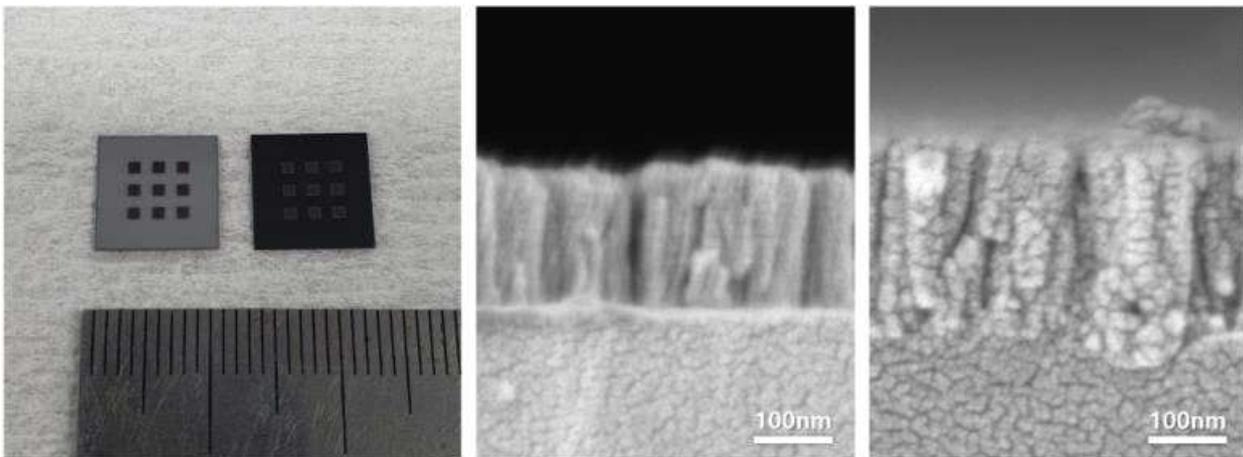
- 유해물질(CO)을 연료로 사용하기 위해 안전성이 확보된 테스트 스테이션 및 주변 장치 설계와 제작을 위해 일산화탄소 안전 가스 캐비닛 증설함. 일산화탄소 전용 공급라인을 설치하고 일산화탄소 경보기, 검출기 등을 설치함.
- 고온(800°C 이상) 실험이 가능한 SOFC 전기로를 설치하고 혼합연료용 테스트 지그 제작함. 기존 전기화학 분석 장비와의 호환성을 확인함.
- 유량 및 습도 조절이 가능하도록 각 연료별 질량유량계(MFC) 및 컨트롤 유닛을 설치하고 수소 연료의 경우 가습기를 거치는 경로를 별도 설치함.



[그림 4-1 (좌) 혼합연료 SOFC 테스트 스테이션, (중) 일산화탄소&수소 가스라인 및 MFC와 컨트롤러, 일산화탄소 경보기 및 검출기, (우) 일산화탄소&수소 안전 가스 캐비닛 설치 사진]

2. 니켈 계열 연료극-전해질 지지체 바탕 대조군 SOFC 제작

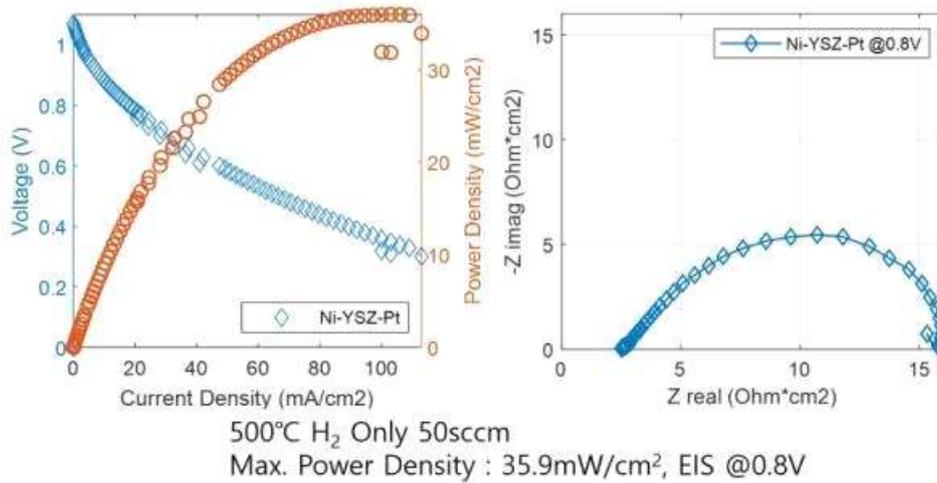
- 이트리아 안정화 지르코니아(YSZ), 스칸디아 안정화 지르코니아(ScSZ) 전해질 지지체에 니켈 (Ni) 연료극 적용한 대조군 SOFC를 제작함.



[그림 4-2 (좌) YSZ, ScSZ 전해질 지지체 셀(공기극 면), (중) YSZ 전해질 위 Pt 공기극 단면 SEM, (우) Ni 연료극 단면 SEM]

3. 연료전지 운전 성능 측정 및 전기화학적 분석

- 전해질 지지체 기반 레퍼런스 SOFC의 전기화학적 분석(OCV, i-V curve 등)을 시행함.
- 추후 Syngas 및 온도, 전극 종류 다양화 등에 따른 결과 대조군으로 사용할 예정.

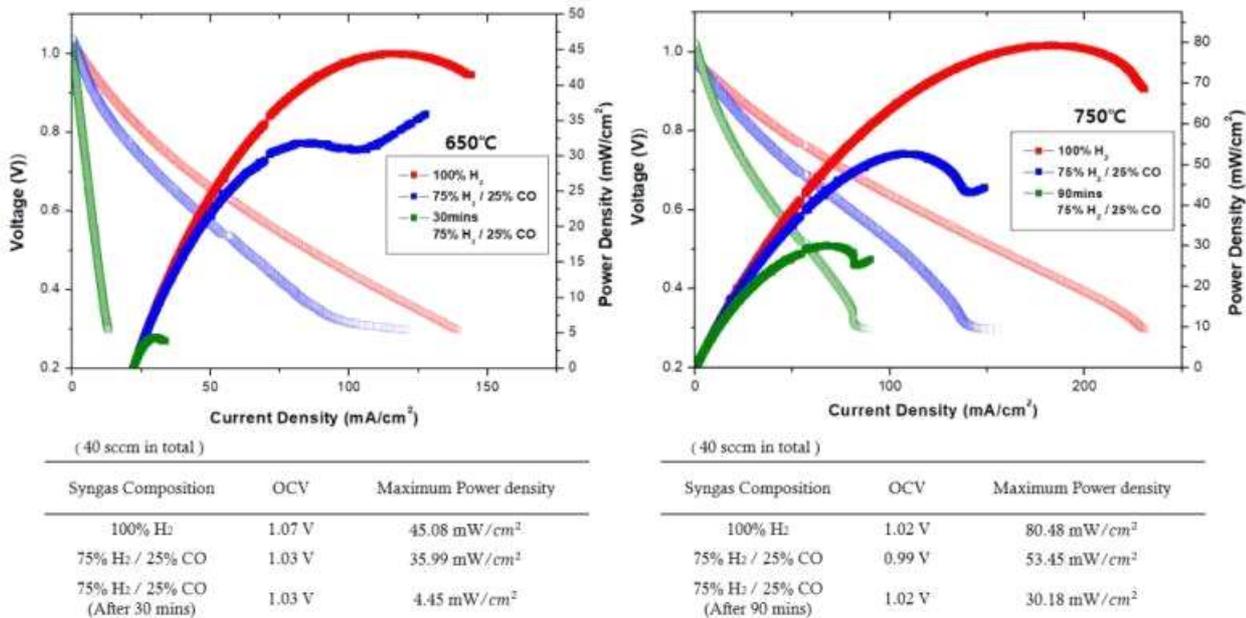


[그림 4-3 전해질 지지체 기반 Pt-YSZ-Ni SOFC의 전기화학 분석 결과(i-V-P curve, EIS)]

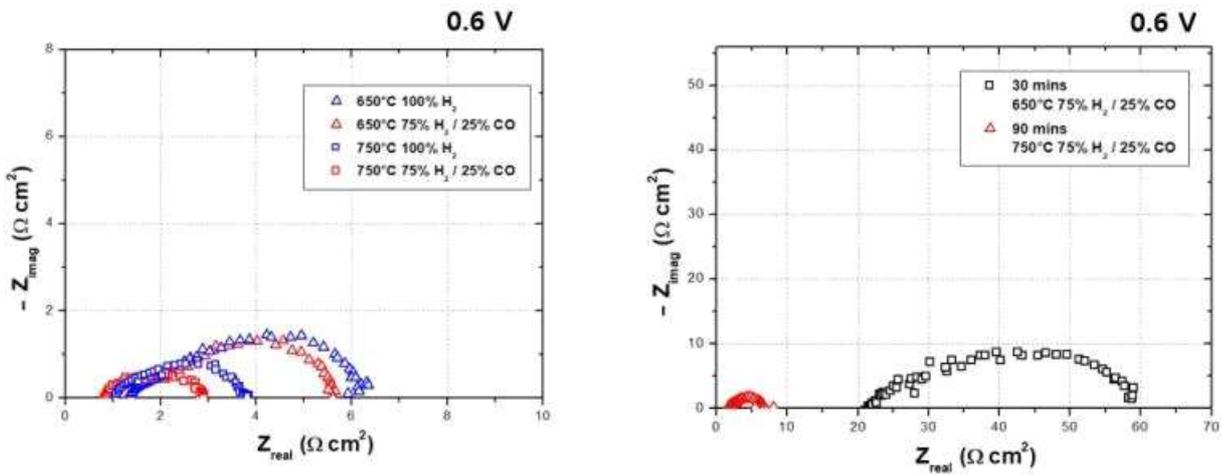
● 2차년도

1. 일산화탄소-수소 혼합연료 공급 운전 조건 변수에 따른 열화 분석 및 내구성 평가

- 800°C 이상에서의 안정적인 작동이 가능한 전해질 지지체 형 고체산화물 연료전지 제작을 위해 Pt-LSCF-GDC 공기극 및 Ni-YSZ 연료극 전극을 성공적으로 도입함. 이때의 전극 면적 역시 25 제곱밀리미터까지 확대함.
- 일산화탄소-수소 공급 비율 및 작동 온도대에 따른 성능 평가를 시행함.



[그림 4-4 650/750°C 에서의 혼합가스 유량 비율 별 전해질 지지체 기반 Pt/LSCF-GDC/GDC/ScSZ-Ni/YSZ SOFC의 전기화학 성능 평가 결과(i-V-P curve)]



[그림 4-5 650/750°C 에서의 혼합가스 유량 비율 별 전해질 지지체 기반 Pt/LSCF-GDC/GDC/ScSZ-Ni/YSZ SOFC의 전기화학 성능 평가 결과(EIS)]

- 낮은 온도대 및 높은 CO 유량 비율에서 탄소 코킹 발생으로 인한 열화 현상이 발생하는 것을 장기 성능(~90분)에서 확인하였으며, 이때 현격한 성능저하가 발생하여 연료극에서의 음저항과 패러데이 저항이 급격하게 증가하는 것을 확인함.
- 탄소 코킹 현상 분석을 위해 실험 전 후 연료극 표면에서의 SEM/EDS 분석을 통해 탄소 코킹 정도를 확인함. 그 결과 아래와 같이 연료극 구조가 무너지거나 표면에 탄소가 침착 되면서 박막 전극에서의 전기전도도와 촉매 반응성을 급격히 떨어뜨리는 것으로 분석함.

	Before	650 °C (30 mins)	750 °C (90 mins)
EDS Carbon (Atom%)		46.46%	14.21%
EDS Mapping Carbon			
Nickel			
SEM 150K			

[그림 4-6 실험 전 후 공기극 표면에서의 탄소 코킹 열화 분석을 위한 SEM/EDS 분석 자료]

- 탄소 코킹으로 인해 니켈의 구조가 무너지고 이것이 니켈의 뭉침(agglomeration) 현상과 맞물려 전체적인 연료극 구조에 크랙을 발생시키는 것으로 분석.
- 탄소 코킹이 육안으로 확인이 가능할 정도로 발생하기도 하였으며 탄소 코킹층을 XPS 분석을 통해 주로 탄소로 이루어진 층임을 확인함.



Anode (Ni-YSZ) XPS after the cell test

Element	Atomic %
Ni	< 0.1 %
Y	< 0.1 %
Zr	0.2 %
O	25.2 %
C	74.7 %

[그림 4-7 실험 후 탄소 코킹 현상이 발생한 연료극 사진과 탄소층의 XPS 원소별 정량 분석 결과]

2. 일산화탄소-수소 혼합연료를 위한 연료극 개발

- 박막 공정(Co-sputtering)을 이용한 니켈 베이스 서멧 (Ni-YSZ) 연료극 개발을 위해 비율이 다른 박막 전극을 도입 및 장기 성능 평가를 시행하여 최적의 전극 비율을 도출함.
- 공동 스퍼터링 공정 중 각각의 타겟에 다른 비율의 전력을 인가함으로써 각기 다른 비율을 갖는 Ni-YSZ 서멧을 XPS 정량 비율 분석을 통해 확인함.

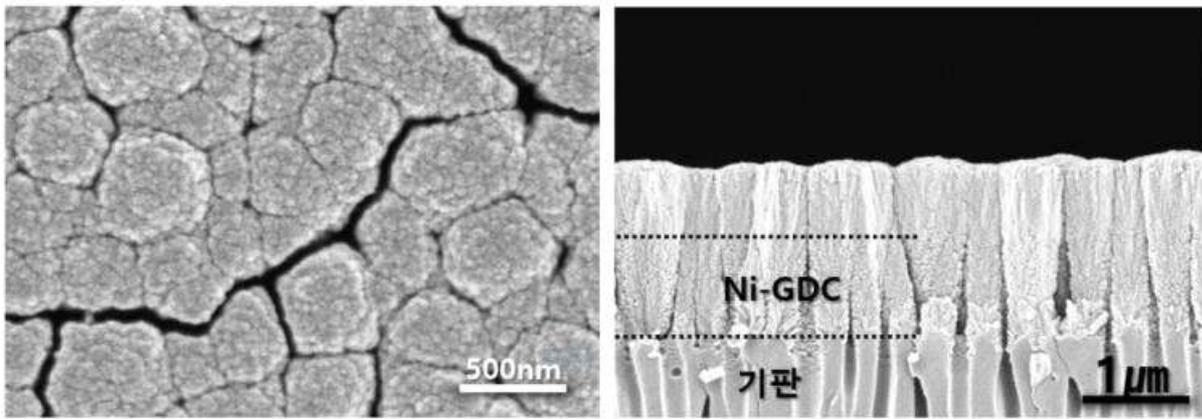
	Molar ratio (Ni:YSZ)	Volume ratio (Ni:YSZ)
Ni/YSZ25 (200W / 25W)	97.46 : 2.54	84.5 : 15.5
Ni/YSZ50 (200W / 50W)	92.17 : 7.83	62.7 : 37.3
Ni/YSZ100 (200W / 100W)	78.48 : 21.52	34.2 : 65.8

[그림 4-8 각기 다른 공동 스퍼터링 공정으로 제작된 공기극의 XPS 정량 분석 비율 결과]



[그림 4-9 세가지 비율의 Ni-YSZ 박막 연료극이 도입된 ESC SOFC의 750°C 일산화탄소-수소 혼합가스 작동시의 성능 및 열화 비율 비교 결과]

- 세리아 계열의 서멧 도입으로 탄소 코킹 억제 및 열화 성능 저하 억제를 위한 Ni-GDC 박막 전극 공정을 개발하고 다공성 구조로 박막이 증착된 구조를 확인함.

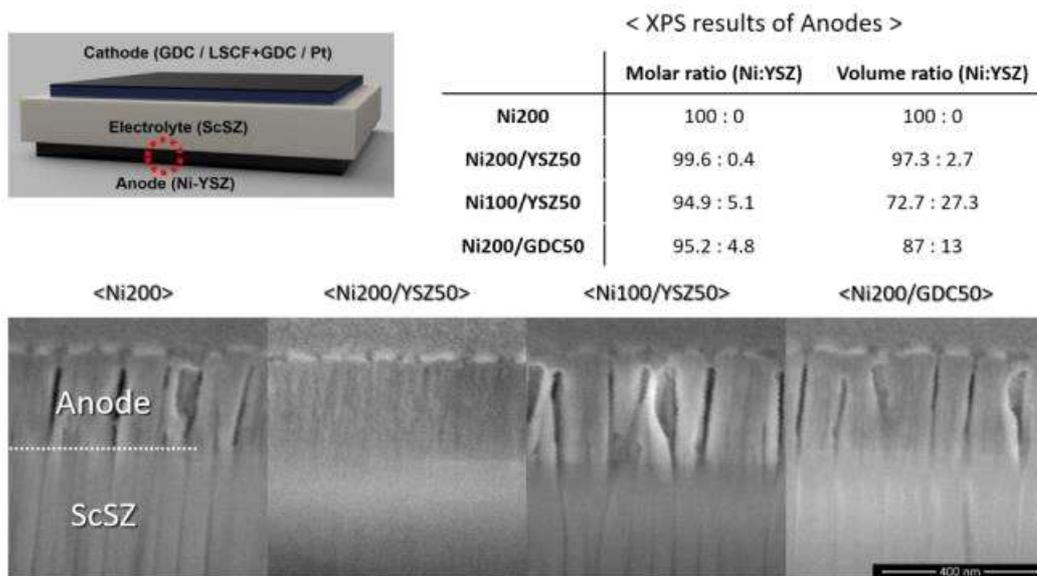


[그림 4-10 박막 공정으로 제작된 Ni-GDC 박막 연료극의 표면 및 단면 SEM 분석 결과]

● 3차년도

1. Ni-YSZ 기반의 연료극을 이용한 일산화탄소-수소 혼합연료 연료전지의 성능 최적화 및 열화 현상 분석

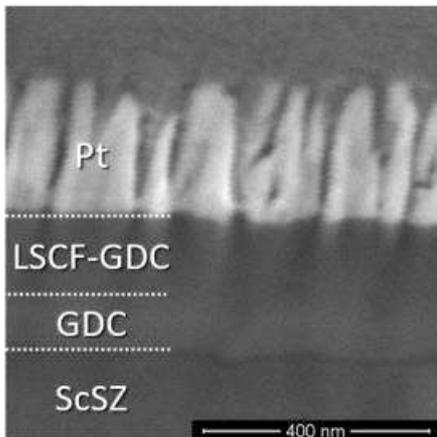
- 박막 공정(Co-sputtering)을 이용한 ScSZ 전해질 지지체 기반 SOFC 제작 공정의 고도화를 통해 성능 최적화된 공기극과 연료극의 물질 비율 및 구조를 다음과 같이 개발함.
- 연료극 : 약 350nm 두께의 Ni-YSZ, Ni-GDC 박막 공기극을 제작하였으며 공기극의 단면과 조성 비율을 각각 FIB-SEM 단면 분석, XPS 정량 비율 분석을 통해 분석함.



[그림 4-11 네 가지 비율의 Ni-YSZ, Ni-GDC 박막 연료극의 XPS 정량 분석을 통한 원소별 조성비와 FIB-SEM을 이용한 단면 분석 결과]

- 공기극 : GDC/LSCF+GDC/Pt 3중으로 레이어된 박막 공기극을 제작하였으며 역시 FIB-SEM 단면 분석과 XPS 정량 분석을 통해 분석함. 단, XPS의 경우 분석 원소 수가 많아짐에 따라 노이즈가 심해지는 관계로 GDC 층과 LSCF 층에 대해 각기 분석하였음. 단면 분석에 따라 약 100nm의 조밀한 GDC 층이 전해질과 먼저 맞닿아 있으며, 이는 200nm 두께의 LSCF-GDC 촉매 층과 전해질 층 사이를 차단함으로써 SrZrO3 같은 불필요한 지르코니아 계열의 합성 물질이 생성되는 것을 방지하기 위함임.1) 가장 위에 Pt 300nm를 증착하여 집전층으로써의 역할을 수행하게 제작함.

1) Kindermann L, Das D, Nickel H, Hilpert K. Chemical compatibility of the LaFeO3 base perovskites (La0.6Sr0.4)zFe0.8M 0.2O3-δ (z = 1, 0.9; M = Cr, Mn, Co, Ni) with yttria stabilized zirconia. Solid State Ionics 1996;89:215-20



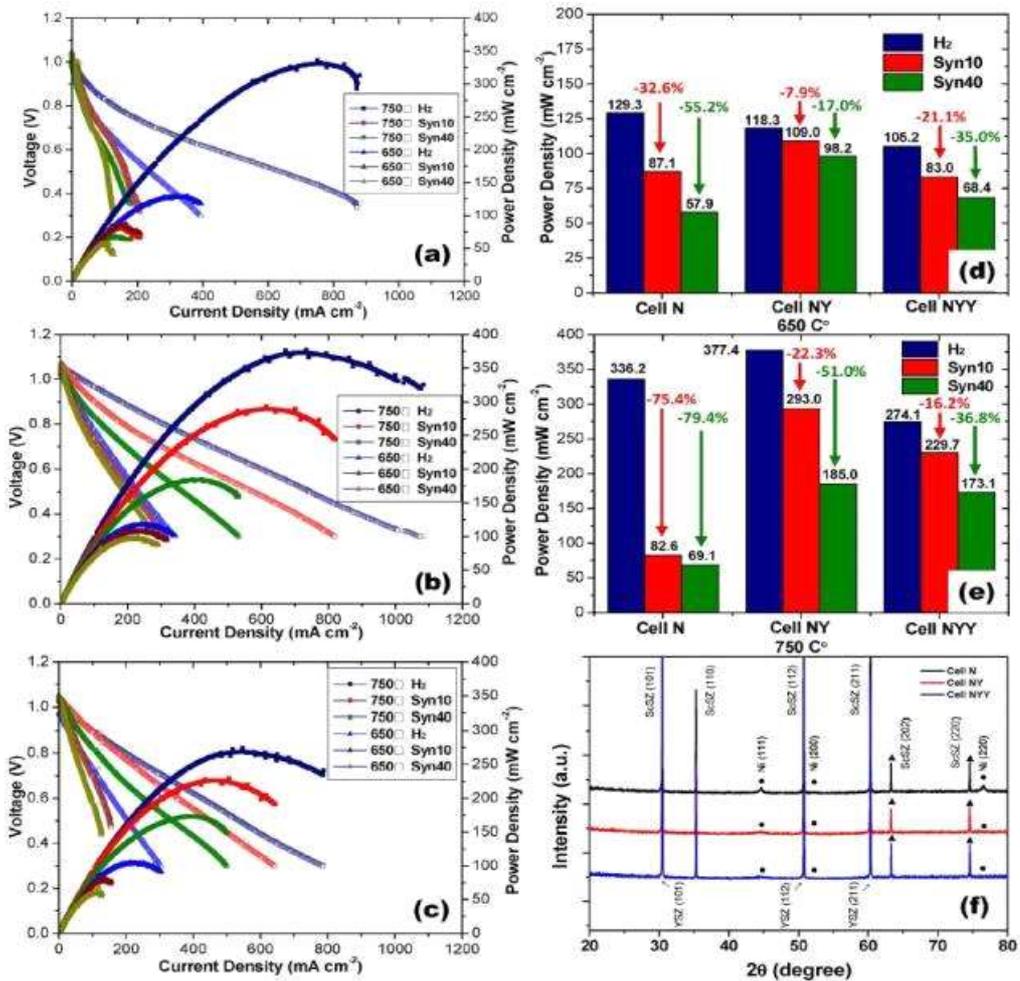
< XPS results of GDC/LSCF >

Elements	Atomic %
O	67.5
Ce	20.5
Gd	12.0

Elements	Atomic %
La	15.2
Sr	11.3
Co	1.8
Fe	8.4
O	63.2

[그림 4-12 공기극 3중 박막 층일 이루는 요소의 XPS 정량 분석 결과 및 FIB-SEM 단면 분석 결과]

- 위의 제작된 SOFC를 수소-일산화탄소 혼합가스(25:75 vol.%)를 40 sccm 유량 단위로 연료극에 흘려주고 공기극은 상압의 대기에 노출시킨 후 각각 650도와 750도에서 실험한 결과 값은 다음과 같음.

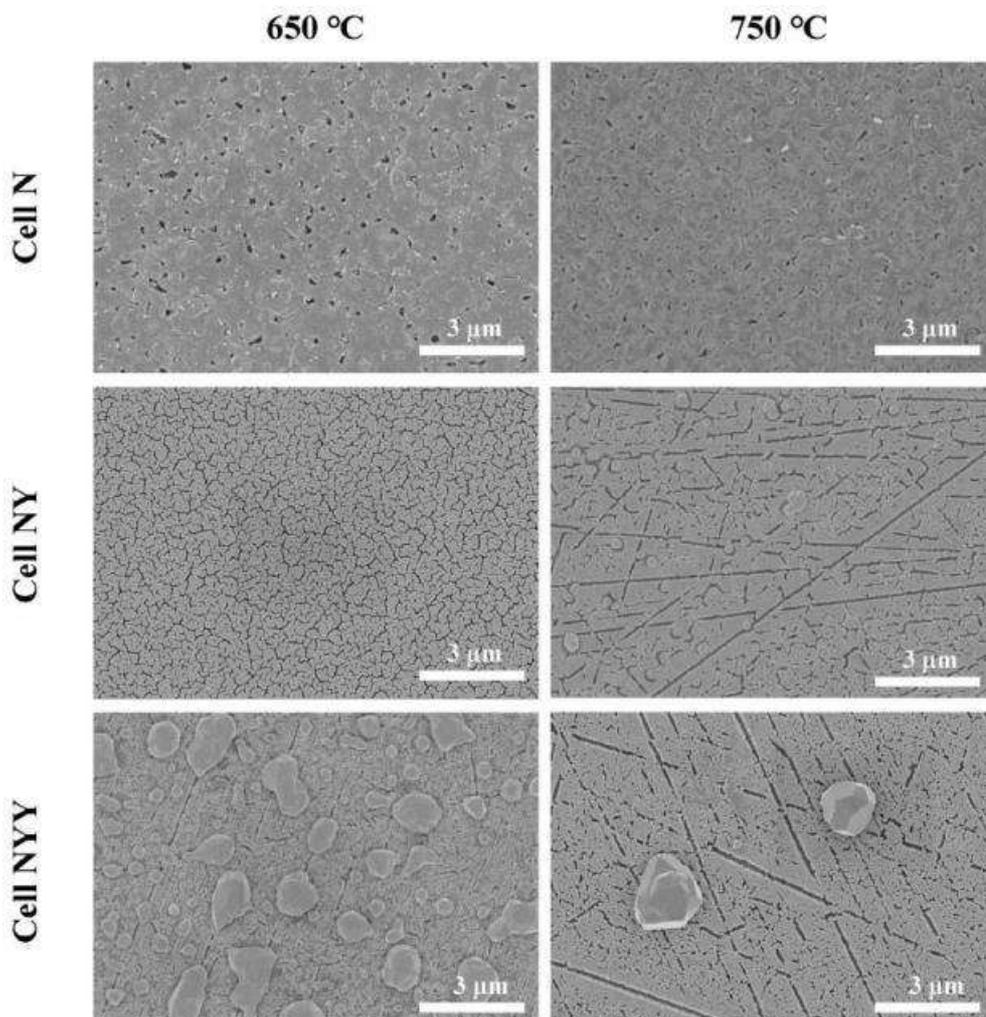


[그림 4-13 (a) ~ (c) 각 조건별 전기화학적 성능 분석 결과 (J-V-P), (d), (e) 최대 전력 밀도로 정리한 도표 및 (f) 세 박막 공기극의 XRD 분석 결과]

- 위의 표에서 H2 조건은 실험을 위해 테스트 스테이션을 승온하는 동안 수소를 흘려준 후 목표 실험 온도에 도달하여 측정된 조건이며, Syn10, Syn40은 각각 혼합연료를 흘려준 후 10분, 40분 후 측정된 값임.
- 위의 표에서 Cell N, Cell NY, Cell NYY는 연료극 제작 시 비율을 각각 Ni200, Ni200/YSZ50, Ni100/YSZ50 조건으로 제작한 셀에 대한 구분임.
- 여러 셀들의 전기화학적 실험 결과에 따르면 Ni200/YSZ50 조건의 연료극을 가진 셀이 혼합연료 조건에서 가장 높은 성능을 보이는 것이 확인되었으며, 40분의 성능 테스트 이후에는 각기 다른 비율로 성능 저하가 발생함을 확인함.
- 이에 성능 저하 원인(셀의 열화 과정)을 분석하기 위해 아래와 같이 테스트 후의 연료극의 표면 SEM 분석과 EDS 분석을 통한 탄소 원소 비율 분석을 실시함.

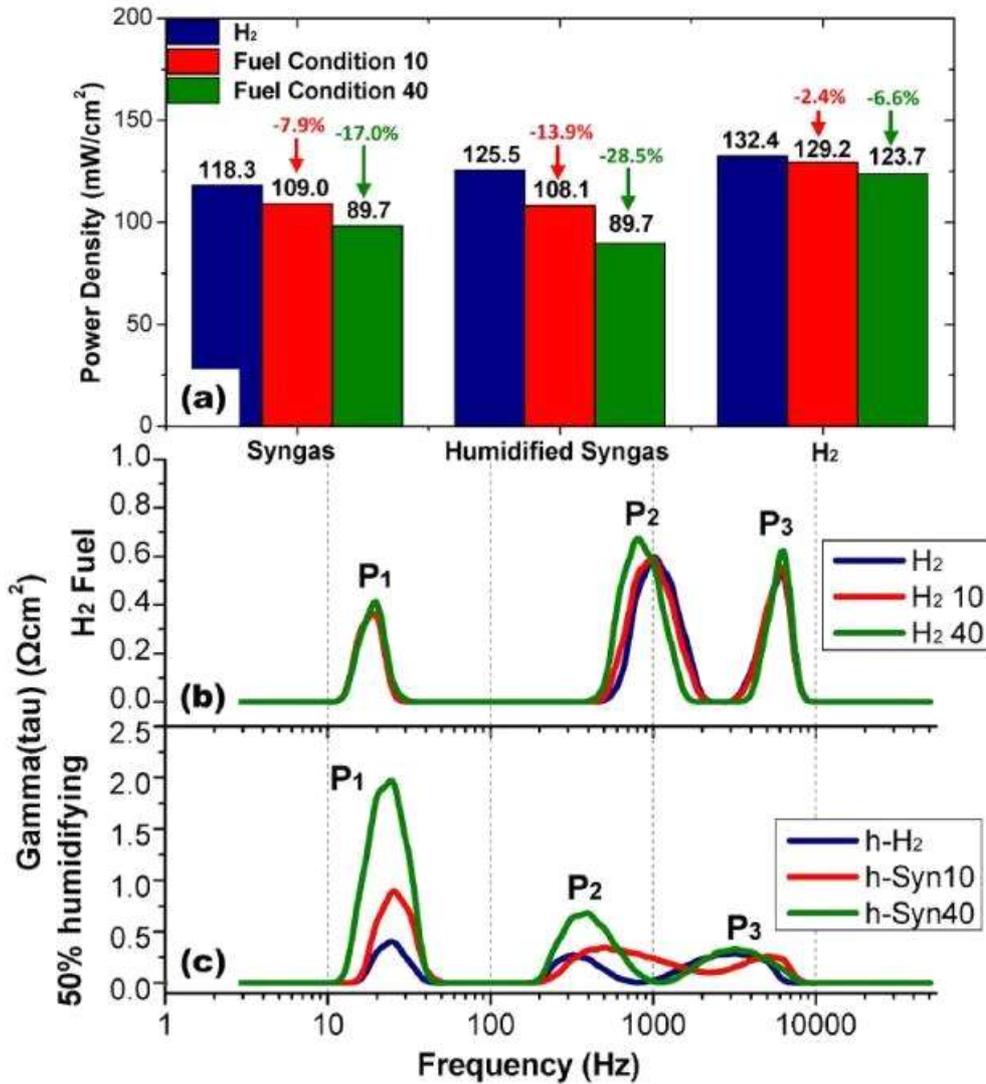
Cell Type	As-Deposited	After Cell Test	
	(Carbon Atom %)	650 °C (Carbon Atom %)	750 °C (Carbon Atom %)
Cell N	20.26	61.59	45.12
Cell NY	18.03	24.86	22.18
Cell NYY	16.98	22.53	20.47

[그림 4-14 각 조건에서 실험한 셀 연료극 표면의 EDS를 통한 탄소 원소 비율 분석 결과]



[그림 4-15 각 조건에서 실험한 셀 연료극 표면을 SEM을 통해 찍은 이미지]

- 표면 분석에 따르면 니켈만 이용하여 제작한 연료극의 경우 심각한 탄소 코킹 현상이 발생하여 성능이 저하되는 것으로 판단됨. 또한 고온 조건보다 저온 조건에서 탄소 코킹 현상이 더 많이 발생하는 경향이 관측됨.
- 모든 셀에서 공통적으로 니켈이 주된 원소로 이루어진 만큼 고온 실험으로 인한 원소 뭉침 현상(Ni agglomeration)이 발생하는 것 역시 성능 저하의 원인으로 볼 수 있음. 이에 따라 이를 혼합연료의 영향으로부터 분리하기 위하여 수소 조건, 혼합 연료 조건, 50% 가습된 혼합 연료 조건의 세 조건에 노출하여 추가적인 실험을 진행하였으며 그 결과는 아래와 같음.



[그림 4-16 (a) 세 연료 조건에서 650도에서 실험한 Ni200/YSZ50 셀의 최대 전력 밀도와 (b), (c) 전기화학 분석 결과로부터 변환된 DRT 결과]

- 결과 값을 보면 수소 연료 조건에서보다 혼합 연료 조건에서 초기 성능이 낮게 측정될 뿐만 아니라 성능 저하 비율도 더 빠른 것을 알 수 있음. 특히 일반적으로 탄소 비율이 높은 연료를 사용할 때 가습된 수증기의 비율이 높아지면 탄소 코킹 발생을 억제할 수 있는 것으로 알려져 있으나,²⁾ 니켈 원소 비율이 높은 박막 연료극 사용 조건에서는 탄소 코킹이 발생하지 않는 대신 니켈 연료극의 열화 연상을 촉진시켜 보다 급격한 성능 저하를 보이게 되는 것으로 보임.³⁾

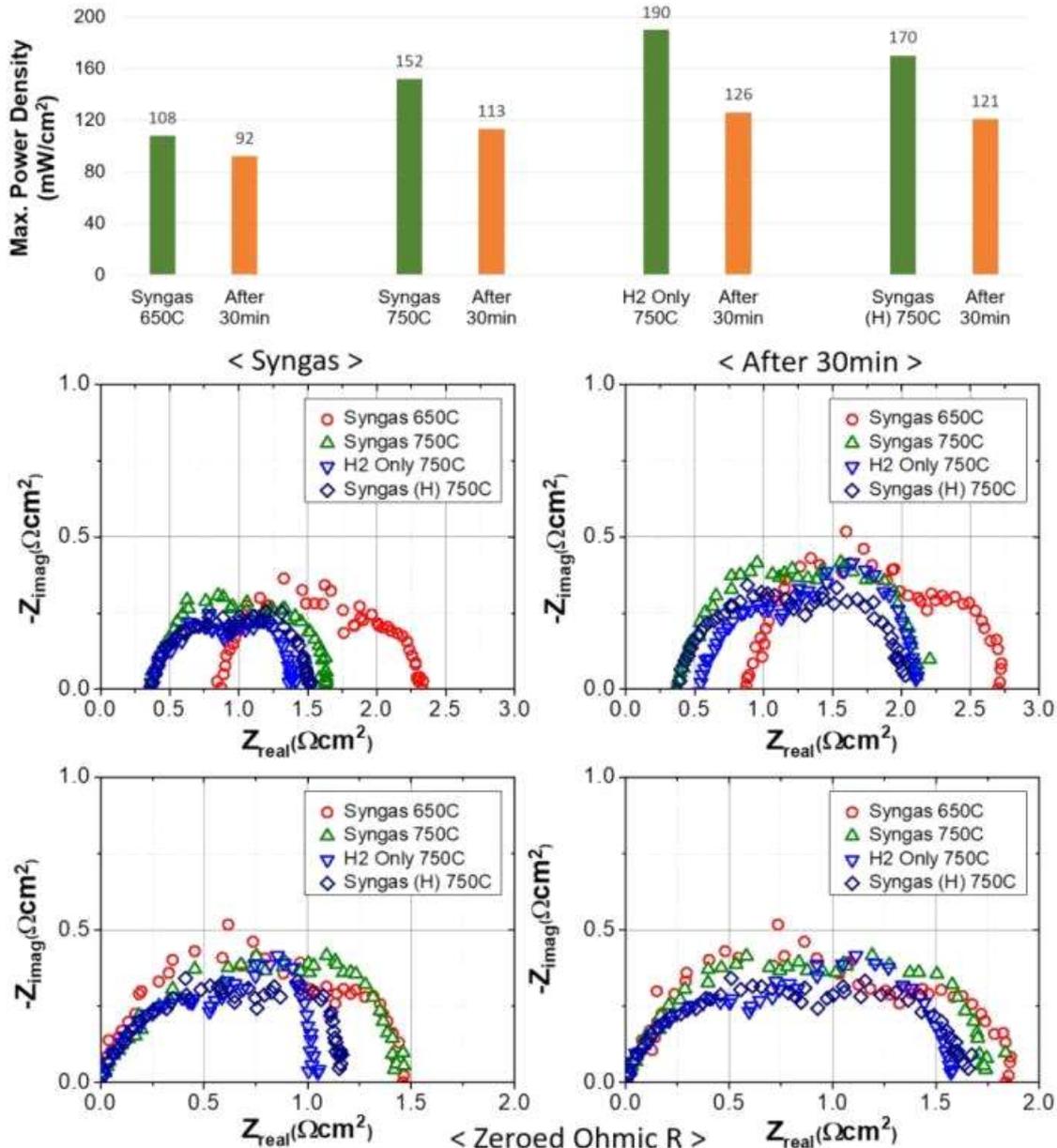
2) Nikolla E, Schwank J, Linic S. Direct electrochemical oxidation of hydrocarbon fuels on SOFCs: improved carbon tolerance of Ni alloy anodes. *J Electrochem Soc* 2009;156:B1312., Esquirol A, Brandon NP, Kilner JA, Mogensen M. Electrochemical Characterization of La_{0.6}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}O₃ Cathodes for Intermediate-Temperature SOFCs. *J Electrochem Soc* 2004;151:A1847.

3) Holzer L, Iwanschitz B, Hocker T, Münch B, Prestat M, Wiedenmann D, et al. Microstructure degradation of cermet anodes for solid oxide fuel cells: quantification of nickel grain growth in dry and in humid atmospheres. *J Power Sources* 2011;196:1279-94.

- 이에 따라 탄화수소 계열 혼합 연료를 포함한 SOFC 작동 환경에서는 탄소 코킹에 의한 열화 현상이 충분히 억제되는 환경에서라면 니켈 뭉침 현상으로 인한 성능 저하를 줄일 수 있는 전략이 필수적으로 고려되어야 한다는 결론을 얻음.
- 위의 실험과정 및 결과는 위탁연구기관(서울대학교) 및 주관기관(BHI) 연구원의 공동 저자로 국제 SCIE 저널인 International Journal of Hydrogen Energy에 출간되었음.⁴⁾

2. Ni-GDC 기반의 연료극의 일산화탄소-수소 혼합연료 연료전지에의 적용

- Ceria 계열의 물질을 이용한 연료극은 일반적으로 탄소 코킹에 큰 저항성을 갖는 것으로 알려져 있음.⁵⁾ 이에 따라 1.의 연구에서 최적화된 Ni-YSZ 연료극과 동일한 조건을 갖는 Ni-GDC 연료극을 이용하여 제작한 SOFC를 여러 운전 조건에서 실험한 결과는 다음과 같음.



[그림 4-17 Ni200/GDC50 조건의 박막 연료극을 이용한 SOFC의 각 조건별 최대 전력 밀도 그래프(위) 및 각 조건에서의 EIS 전기화학 분석 값과 이의 음 저항 값을 영점 조절한 그래프(아래)]

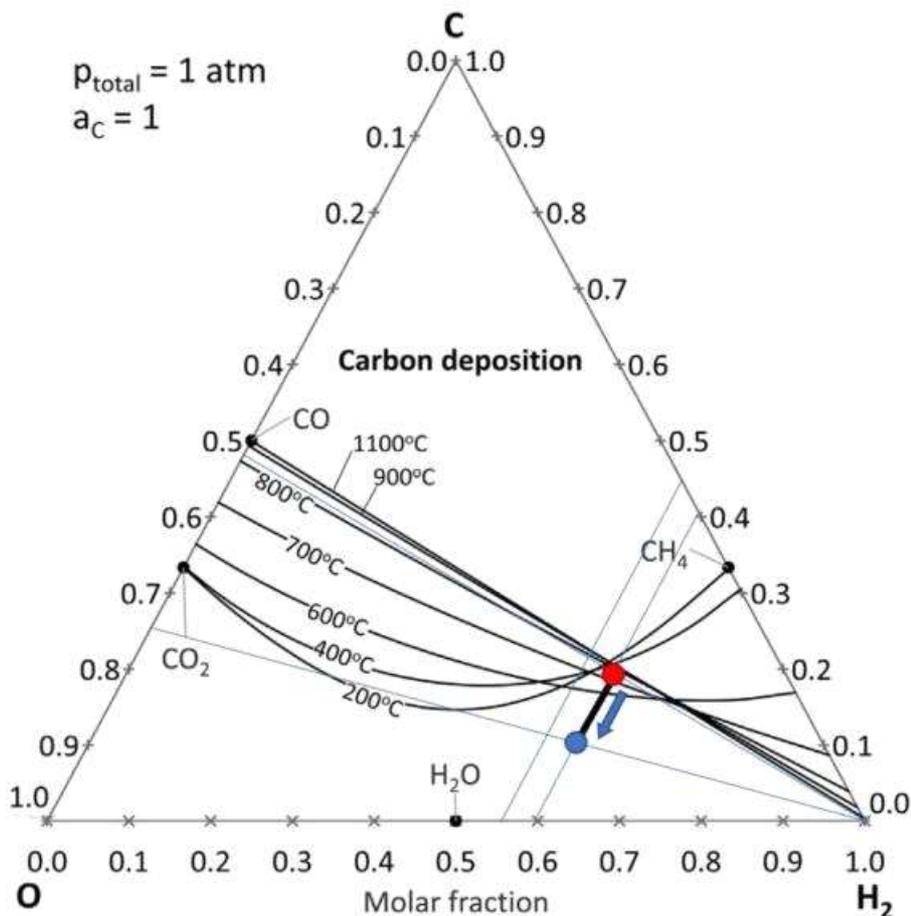
4) International Journal of Hydrogen Energy 57 (2024) 1408-1418

5) X. Zhou et al., Journal of Power Sources 201 (2012) 128- 135

- Ni-YSZ 박막 연료극을 이용한 결과와 비교하였을 때 Ni-GDC 박막 연료극을 이용한 SOFC는 저온(650도) 작동 조건에서는 비슷하거나 이를 조금 상회하는 결과값을 얻었으나 고온(750도)에서는 대체적으로 성능이 낮게 측정되는 것을 확인함. 이는 GDC가 갖는 기본적인 특성에 의한 영향으로, GDC는 일반적으로 YSZ에 비해 SOFC의 저온 작동 영역(400~600도)에서 더 높은 산소 이온 전도도를 갖고 있음.⁶⁾ 이에 따라 반응 영역에서의 분극 저항 증가로 인한 성능 저하를 보이는 것으로 추측됨.
- 다만 Ni-YSZ 셀에 비해서 혼합 연료 주입 후 작동 시 더 적은 열화 성능을 보이는 것으로 확인되며, 이를 통해 Ceria 계열의 연료극 재료를 이용한 성능 향상이 어느정도 합당한 것으로 확인됨.

3. 혼합 연료 사용시 C-O-H₂ 삼각 도표를 이용한 온도에 따른 탄소 증착 예측

- 관련 연구에 따라,⁷⁾ 탄화수소 계열 연료를 포함하여 사용하는 연료의 각 원소 비율에 따라 탄소 코킹의 발생 가능성을 예측할 수 있는 모델을 통해 각 연구 조건에서의 탄소 코킹 발생 가능성을 확인함.
- 위의 1., 2. 조건에서 사용한 혼합 연료와 이의 50% 가습 조건에서의 위치를 각각 빨간 점과 파란 점으로 아래와 같이 표기함. 앞선 문헌 조사와 같이 가습 조건에서는 탄소 코킹 발생 가능성이 매우 낮아지는 것으로 확인함.

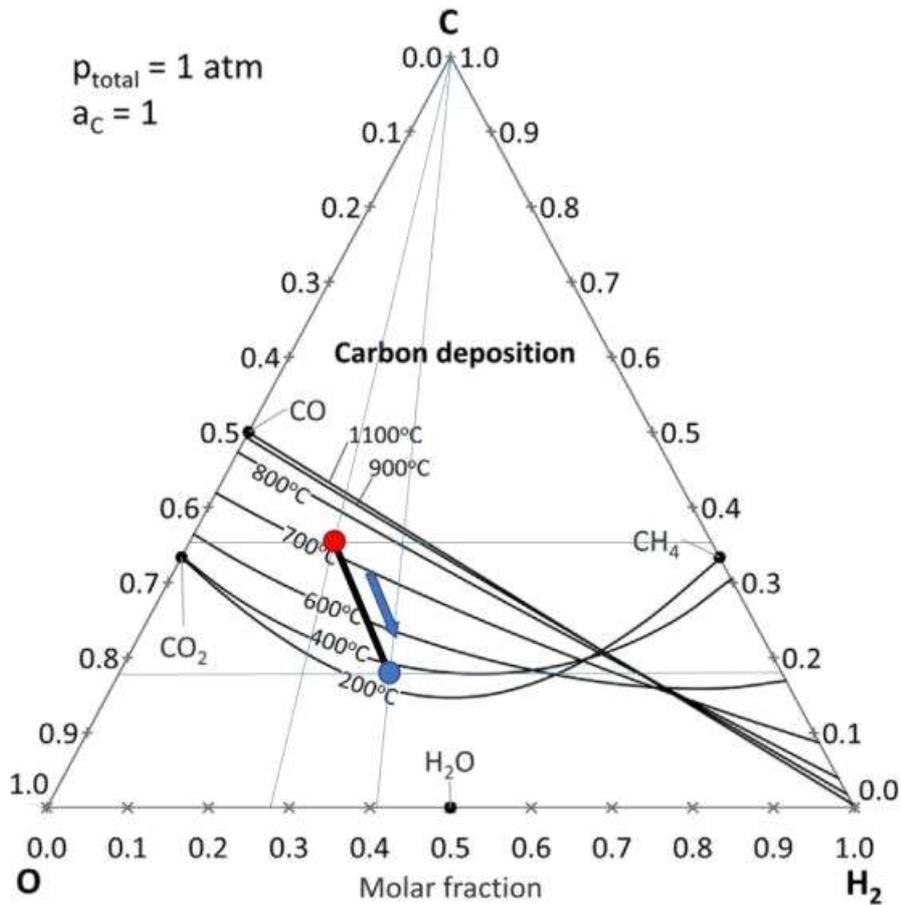


[그림 4-18 수소-일산화탄소 (25:75 vol.%) 혼합 연료의 비가습 및 가습 조건에서의 온도별 탄소 코킹 발생 가능성 도표]

6) Zhang, J., Lenser, C., Menzler, N. H. & Guillon, O. Comparison of solid oxide fuel cell (SOFC) electrolyte materials for operation at 500°C. Solid State Ionics 344, 115138 (2020)

7) C-O-H₂ ternary diagram for evaluation of carbon activity in CH₄-containing gas mixtures. Journal of Materials Research and Technology 2021:13:1576-1585.

- 마찬가지로 방법으로 본 연구에서 실제로 사용될 수 있는 가스화된 연료의 탄소 증착 예측 모델은 아래와 같으며, 이때 각 연료의 비율은 각각 CO : 49.2%, H₂ : 27.5% CO₂ : 19.3%, CH₄ 1.3%, O₂ 0.1%, N₂ 2.6% 임. 이 역시 비가습 조건과 50% 가습 조건을 각각 빨간색 점과 파란색 점으로 표기함.
- 무가습 조건 시 720°C에서 탄소 증착 영역(삼각 도표 상 온도별 실선의 윗부분)과의 경계선일 것으로 예상됨. 또한 가습하여 S/C 비율을 높이면 탄소 증착 영역에서 멀어지는 것으로 예측됨.



[그림 4-19 가스화된 혼합 연료의 비가습 및 가습 조건에서의 온도별 탄소 코킹 발생 가능성 도표]

V. 위탁연구기관 (대구대학교)

1. 실험 대상

- 2017년 통계 농업부산물 발생량 10,536,000톤 이상 발생하며, 전체 농업부산물 중 볏짚이 50.3%, 왕겨가 8.7%로 벼 재배 후 발생하는 부산물이 전체 59.0%로 대부분을 차지하고 있음. 이 벼재배에서 발생하는 농업부산물은 사료, 축사 등에 재활용 활용하는 비율이 높음.
- 최근 벼싯재배 후 발생하는 폐배지의 경우, 대표적인 벼싯인 느타리, 새송이, 팽이가 각각 4.4%, 3.1%, 2.5%로 전체의 10%로 높게 나타났으며, 볏짚을 제외하면 24%로 높은 비율을 차지하며, 1,036,200톤/연 발생하고 있음.

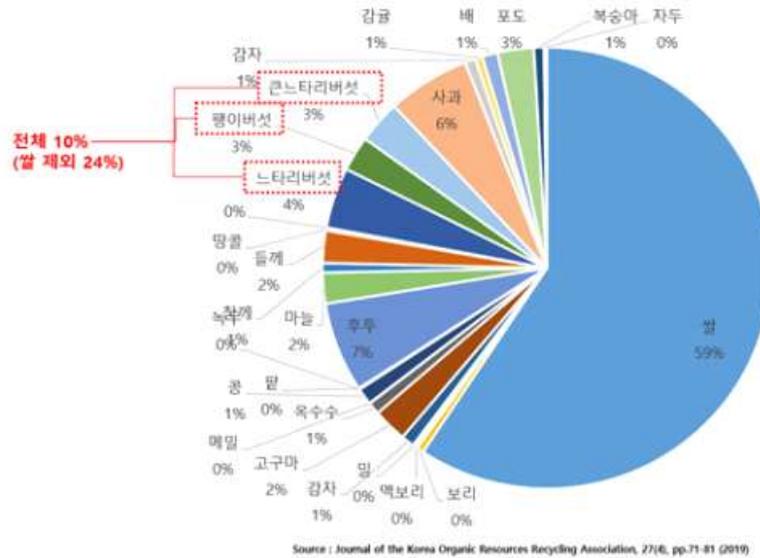


그림 5-1. 농업부산물 발생 비율 (2017년 기준)

- 이번 연구에서는 아래의 그림 5-2와 같은 안정적인 에너지원으로 활용 가능할 것으로 판단되는 벼싯폐배지를 대상으로 연구를 진행하였음.



그림 5-2. 새송이 벼싯 폐배지 (경상남도 하동군)

2. 탄화 실험 결과

2-1. 실험 방법

① 일반탄화 실험 방법

- 일반탄화의 경우, 온도 조건을 300, 400, 500°C의 조건으로 시료는 원시료를 건조한 후 사용하였음. 시료를 넣고 질소를 흘려보내 무산소 조건에서 30분의 반응시켜 생성하였음.
- 분석 항목은 수열탄화 후 분석하였던, 원소분석, 공업분석, 발열량, TGA, FT-IR 분석으로 동일하게 진행하여 화학적 특성을 파악하였으며, 이를 이용해 고체연료 또는 가스화를 통한 가스 성분 발생 효율을 평가하였음.



그림 5-3. 일반탄화 장비 및 방법

② 수열탄화 실험 방법

- 수열처리 (Hydrothermal carbonization)는 고온·고압의 아임계수 (sub-critical water)를 사용하여 운전 조건에 따라 다른 물리적·화학적 특성을 나타냄. 이번 연구에서는 반응 온도는 180, 200, 220, 250, 270, 300°C 총 6가지 조건으로 온도의 변화에 따른 변화 등을 분석하였음. 시료와 물의 비율은 1:1로 잘 섞이게 혼합해준 뒤 질소를 주입한 후 각각의 온도 조건에서 반응을 하였음. 반응이 끝나면 액체와 고체가 혼합된 형태의 시료가 생성되는데, 이를 고체와 액체 형태로 분리한 후 건조 시킨 시료를 대상으로 분석을 실시함.
- 분석 항목은 원소분석, 공업분석, 발열량, TGA, FT-IR 분석을 화학적 특성을 파악하였으며, 이를 이용해 고체연료 또는 가스화를 통한 가스 성분 발생 효율을 평가하였음.

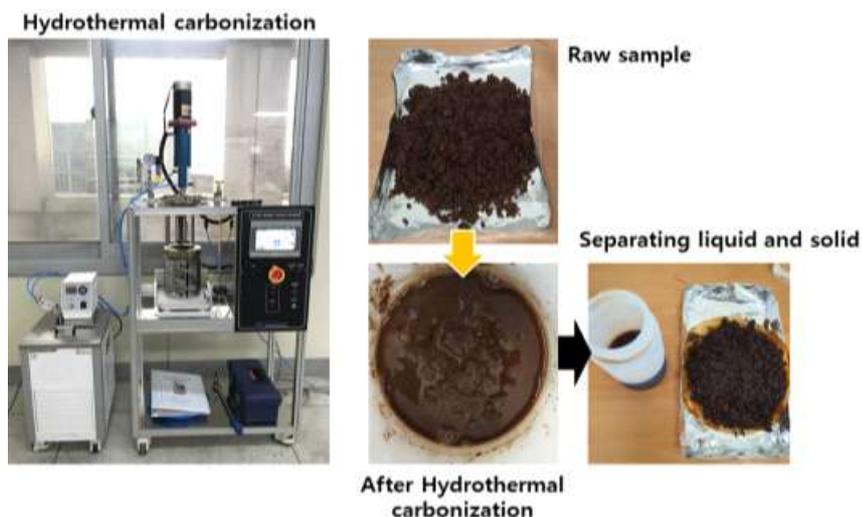


그림 5-4. 수열탄화 실험 장치 및 방법

2-2. 탄화 실험 실험 결과

① 일반탄화 실험 결과

- 일반적으로 탄화는 무산소 조건에서 약 300-500°C의 조건을 탄화의 온도로 판단하며, 최근 바이오매스와 같이 휘발분이 다량 함유한 물질의 경우는 고온에서 탄화를 할 경우 수율이 낮아지는 문제를 보완하기 위해 반탄화 (200-300°C)를 적용함. 본 연구에서는 일반적인 탄화의 온도를 적용하여 실험하였고. 일반탄화를 적용한 결과를 아래의 그림 5-5와 같음.



그림 5-5. 일반탄화 적용 결과

- 일반탄화 후 원소분석 결과, 수소와 산소 함량은 반응 온도가 높아질수록 함량이 감소하였으며 탄소 함량은 반응 온도가 올라갈수록 증가하였음. 반응 온도 400°C에서 탄소 함량은 48.3%로 높았으며, 반응 온도 500°C부터는 가스화 반응 시작으로 고체의 수율은 감소하면서 탄소 함량도 낮아지는 것으로 판단됨.
- 공업분석 결과에서도 반응 온도가 높아짐에 따라서 휘발분은 71.59%에서 18.15%로 낮아지는 결과를 나타냈으며 고정탄소와 Ash의 경우 각각 20.77%에서 최대 59.90%로, 7.63%에서 28.21%로 탄화 반응 온도가 높아질수록 증가하는 것을 확인할 수 있음. 탄소와 마찬가지로 고정탄소 또한 400°C에서 함량이 가장 높게 나타났으며 탄소와 고정탄소 모두 500°C에서 감소하는 것을 볼 수 있는데 이는 500°C대에서 열분해로 인해 탄소 성분이 휘발되어 고정탄소와 탄소가 감소한 것으로 판단됨.
- 고위발열량은 3,870.97 kcal/kg에서 반응 온도의 상승에 따라 4394.49kcal/kg로 상승하였으나, 발열량 역시 500°C 이상 반응 온도에서 낮아지는 결과를 보임.

표 5-1. 일반탄화 원소분석 결과

Sample	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Sulphur
RAW	41.0150	5.3307	43.0835	2.6570	0.1953
300	45.9497	3.7023	33.4001	2.8503	0.2570
400	48.3003	2.5127	28.2288	2.6373	0.2007
500	46.6620	1.6750	20.9970	2.2757	0.1763

표 5-2. 일반탄화 공업분석 결과

Sample	Fixed Carbon (%)	Volatile matter (%)	Ash (%)	Calorific value (kcal/kg)
RAW	20.77	71.59	7.63	3870.97
300	41.03	45.12	13.84	4251.75
400	59.90	21.97	18.12	4394.49
500	53.63	18.14	28.21	3722.53

- FT-IR 분석 결과 300°C 이상 처리 온도에서 3400cm⁻¹-3200cm⁻¹의 peak가 낮아지는 결과를 보였으며, 이는 탄화에 의해 O-H 구조가 사라지면서 소수성의 특성을 갖는 것으로 확인됨. 반응 온도가 높아짐에 따라서 1680cm⁻¹-1600cm⁻¹에서 나타나는 peak(C=C)가 감소하였으며, 1025cm⁻¹의 C-O구조 역시 약해진 것으로 확인되었음. 이 구조는 decarboxylation 반응에 의해 분해가 되었기 때문으로 보임. 2970cm⁻¹-2840cm⁻¹의 peak는 C-H이며, 카보닐기는 1800cm⁻¹-1650cm⁻¹에서 나타나는데 peak가 감소한 것으로 보아 C=O의 구조가 분해된 것으로 보임.

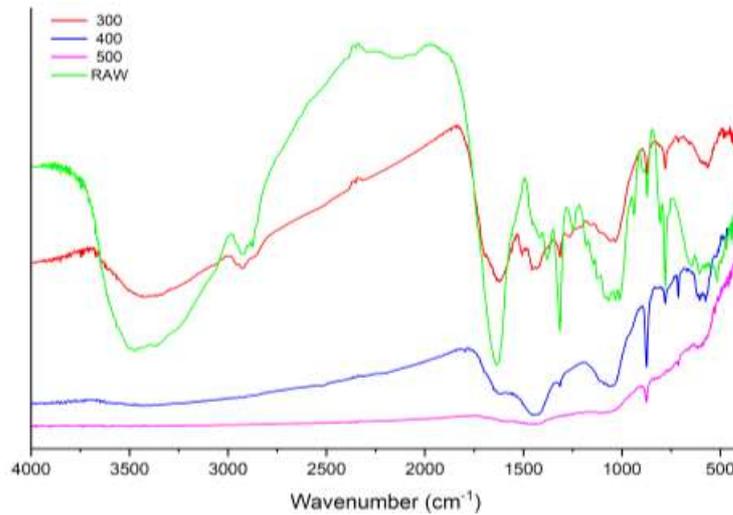


그림 5-6. 일반탄화 FTIR 결과

- 열중량분석기 (thermogravimetric analysis, TGA)의 분석 결과에서도 수열탄화의 결과와 비슷한 흐름을 보여주고 있음. 탄화 이후 약 200°C에서 연소가 시작되어 500°C에서 종결되는 특성을 보임. 탄화한 경우는 서서히 첫 번째 반응 구간이 높은 온도대로 이동함을 보이고 있으며, 2번째 반응 온도대는 낮아지고 있음을 확인하였음. 연소속도는 석탄화가 더 높은 석탄에서 더 낮은 특징으로 탄화를 진행하여 연소 특성이 조금씩 상향하고 있음을 확인하였음.

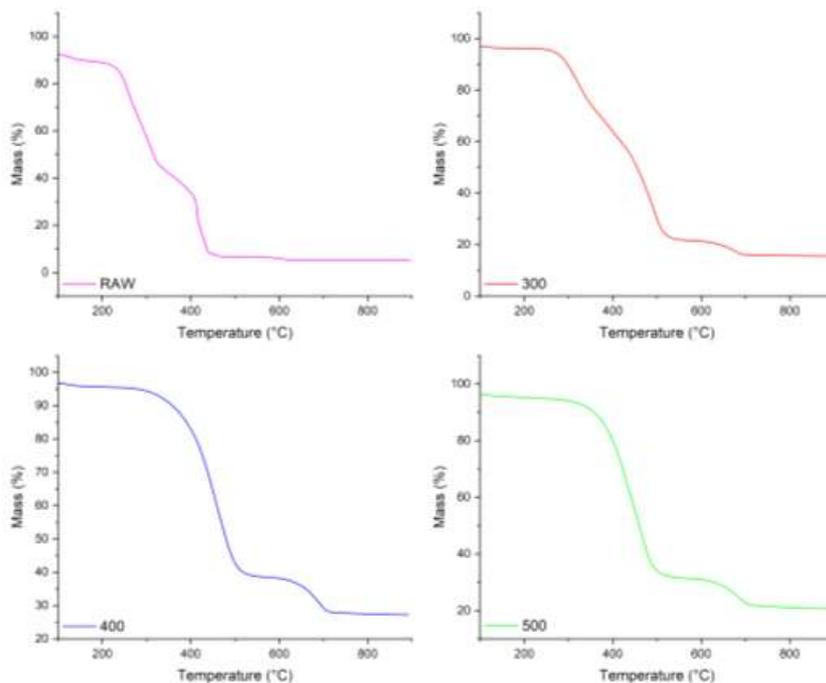


그림 5-7. 일반탄화 결과물 열중량 분석 (TGA) 결과

② 수열탄화 실험 결과

- 수열탄화에는 수분함량이 높은 바이오매스가 적용하기 용이한 탄화 방식임. 물은 반응물과 용매로써 작용하는데, 운전 조건에 따라서 다른 물리적·화학적 특성을 나타냄. 227-327°C 온도에서 물은 이온성이 최대가 되어서 산과 염기로 작용하게 됨. 또한 물의 유전율이 감소하게 되어 비극성 용매와 같은 반응을 보임. 수열탄화를 통해 생성된 biochar는 평형습수율이 낮아져 저장과정에서 부패할 가능성을 낮출 수 있음. 또한 biochar는 파쇄성이 좋아져서 가스화로나 석탄발전소에서 사용할 수 있는 펠릿 형태로 제조가 가능하게 됨. 이외에 바이오매스의 수열탄화는 몇 가지 장점을 지니게 됨. 우선 수열탄화는 아임계수를 반응 매체로 사용하기 때문에 같은 온도 조건에서 진행할 경우 열분해, 가스화 등의 방법보다 좋은 효율을 보임. 즉, 다른 전처리 방법보다 낮은 온도 범위에서 가능함. 또한 물이 반응 매체로 사용되기 때문에 이전에 건조 작업이 필요하지 않을 뿐만 아니라 이산화탄소, 질산화물, 황산화물과 같은 가스가 산과 염의 형태로 물에 용해되어 방출되기 때문에 이후 연소과정에서 발생될 수 있는 대기오염 문제를 줄일 수 있음. 이 과정에서 물은 바이오매스의 세척 물질로 작용함.

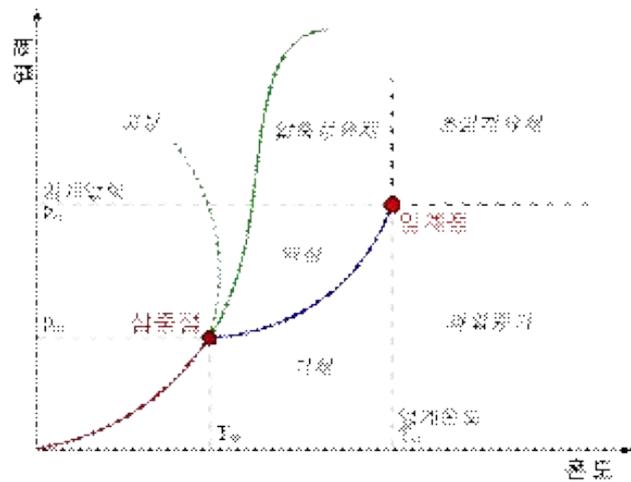


그림 5-8. 온도와 압력에 따른 물의 상평형도

- 아래의 그림 5-9와 같이 수열탄화 온도에 따라 탄화되어 지는 정도를 물리적 변화 (색깔) 확인할 수 있었음.

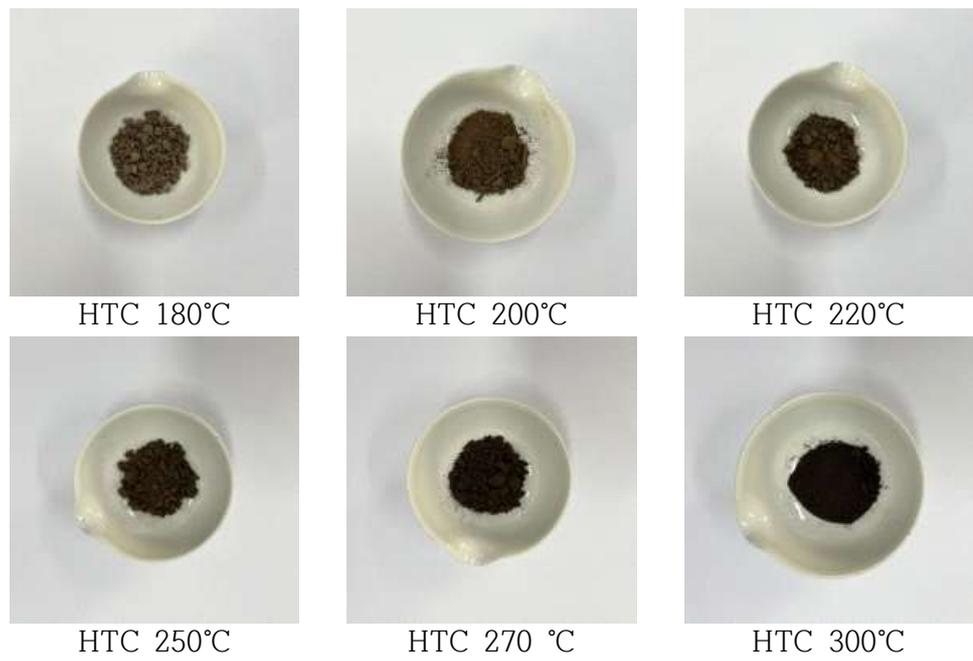


그림 5-9. 수열탄화 변화 결과

- 수열탄화의 온도가 높아짐에 따라서 탄화도의 증가는 원소분석 결과를 통해 확인할 수 있으며, Raw 샘플의 경우는 41.01%에서 반응 온도가 상승함에 따라서 59.02%까지 증가하는 결과를 볼 수 있었음. 반대로 수소와 산소의 함량은 감소하는 결과를 얻었음. 이는 수열탄화 반응에서 decarboxylation과 dehydration 반응에 의해 H₂O와 CO₂의 생성으로 상대적으로 탄소 대비 산소와 수소의 함량이 낮아지는 결과를 얻음.

표 5-3. 수열탄화 원소분석 결과

Sample	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Sulphur
RAW	41.0150	5.3307	43.0835	2.6570	0.1953
180°C	42.9483	4.8290	41.6747	2.5053	0.0860
200°C	46.6080	4.6947	36.5968	2.8487	0.1077
220°C	48.5683	4.7137	34.4854	2.7050	0.1290
250°C	53.2040	4.5480	27.2276	3.3377	0.1180
270°C	57.4440	4.6743	21.5602	3.6527	0.1643
300°C	59.0253	4.8530	18.7264	3.6770	0.1483

- 원소분석의 결과의 흐름과 같이 고정탄소 함량이 20.77%에서 44.8%로 증가하는 결과를 확인할 수 있었음. 반대로 휘발분의 경우는 가스 및 액상으로 변화를 통해 감소하는 결과를 보였음. 일반적으로 무기물인 재 (Ash)의 함량은 휘발분의 감소로 상대적으로 증가하는 결과를 나타내기 때문에 본 연구에서도 비슷한 결과를 보임.
- 발열량은 수분을 제거한 고위발열량을 기준으로 3,870.97kcal/kg에서 반응 온도의 상승에 따라 5,849.33kcal/kg까지 증가하는 결과를 확인하였음.

표 5-4. 수열탄화 공업분석 결과

Sample	Fixed Carbon (%)	Volatile matter (%)	Ash (%)	Calorific value (kcal/kg)
RAW	20.77	71.59	7.63	3870.97
180°C	24.59	67.48	7.91	3943.78
200°C	29.05	62.16	8.77	4355.70
220°C	29.62	61.26	9.10	4527.06
250°C	37.80	50.62	11.56	5002.18
270°C	44.80	42.65	12.54	5341.93
300°C	41.48	44.03	14.47	5849.33

- 원소분석과 공업분석 외에 biochar의 화학적 구조 변화를 측정하고자 FT-IR spectrum 분석 (Fourier Transform Infrared Spectroscopy)을 하였음. FT-IR은 고체의 물리 화학적 구조를 분석하기 위해 적용하는 분석 방법임. 고체의 원자들의 진동에 필요한 에너지를 흡수하고 투과시키는 빛을 가지고 IR Spectrum을 얻을 수 있음.

- 3400cm⁻¹-3200cm⁻¹의 peak는 주로 O-H 구조의 존재 여부를 나타냄. 사용된 바이오매스의 FTIR spectrum의 결과에서 수열탄화 반응 온도가 높아짐에 따라서 biochar의 경우 peak의 감소가 나타남. 이 peak는 카복실기와 수산화기의 구조를 나타내는데, 해당 peak가 감소한 것은 수열탄화 후에 dehydration의 결과 발생한 결과로 판단됨. 수열탄화 이후 1680cm⁻¹-1600cm⁻¹에서 나타나는 peak(C=C)가 감소하였으며, 1025cm⁻¹의 C-O구조 역시 약해진 것으로 확인됨. 이 구조는 decarboxylation 반응에 의해 분해가 되었기 때문으로 보임. 2970cm⁻¹-2840cm⁻¹의 peak는 C-H이며, 카보닐기는 1800cm⁻¹-1650cm⁻¹에서 나타나는 peak가 감소한 것으로 보아 C=O의 구조가 분해된 것으로 보임. 1035cm⁻¹-1020cm⁻¹에서 나타난 peak는 C-O를 의미하는데 이것이 수열탄화 온도가 상승함에 따라 점차 감소하는 경향을 나타냈음. 이는 decarboxylation 반응에 의해 C-O구조가 파괴된 것으로 판단됨.

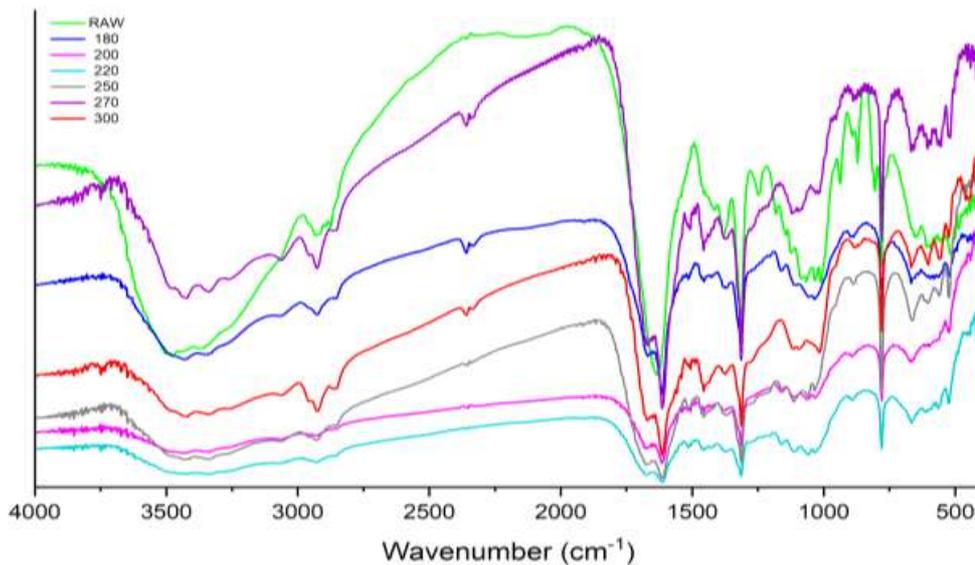
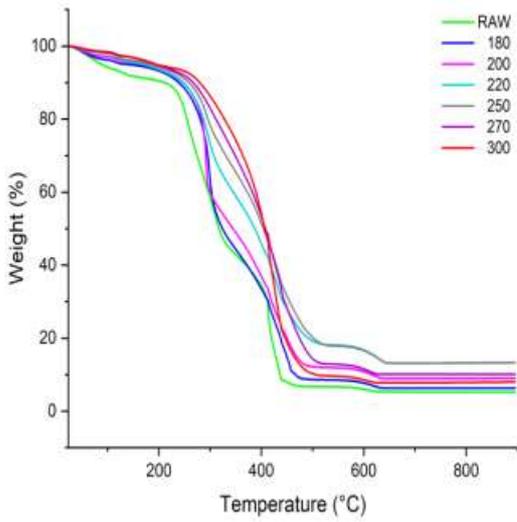
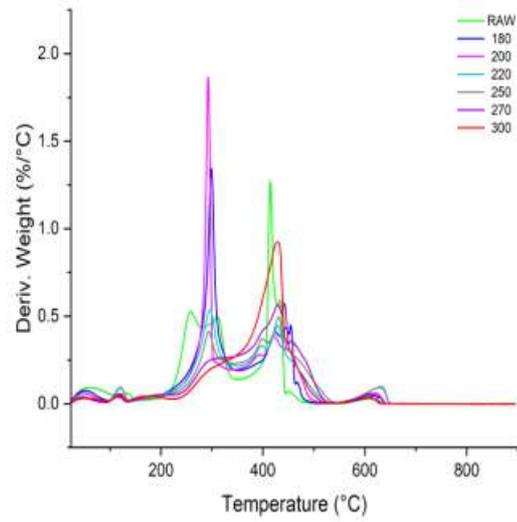


그림 5-10. 수열탄화 FTIR 결과

- 가장 좋은 에너지 회수율 보인 온도에서의 연소 특성을 확인하기 위해 열중량분석기 (thermogravimetric analysis, TGA)를 사용하였음. TGA는 연료 특성 등 열에 의한 분해 정도 및 속도 등을 파악할 수 있음.
- 본 연구에서도 연료로 사용할 경우에 대한 분석을 위해 공기 조건에서의 열중량 분석을 실시하였음. 수열탄화 온도별 생성된 biochar의 열중량분석 그래프를 나타냄. 초기 온도부터 100°C 이하의 온도에서 바이오매스와 biochar의 질량이 감소하였는데 이는 시료 내에 있는 수분의 증발로 인한 것으로 보임. biochar에서 수분 증발로 인한 중량 감소가 나타나는 부분이 줄어든 것을 통해 수열탄화 후 시료의 수분 제거 효율이 개선되었음을 알 수 있음. 또한, 수열탄화 이후 unburn carbon 함량이 감소한 것을 확인할 수 있었고 이는 연소 시 발생하는 Ash의 저감을 기대할 수 있게 하는 결과임. 수열탄화 이후 약 200°C에서 연소가 시작되어 500°C에서 종결되는 특성을 보임. 수열탄화 한 경우는 서서히 첫 번째 반응 구간이 높은 온도대로 이동함을 보이고 있으며, 2번째 반응 온도대는 낮아지고 있음을 확인하였음. 연소속도는 석탄화가 더 높은 석탄에서 더 늦은 특징으로 수열탄화를 진행하여 연소 특성이 조금씩 상향하고 있음을 확인함.



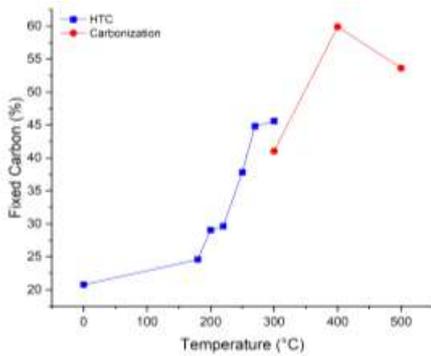
a) TGA Curve



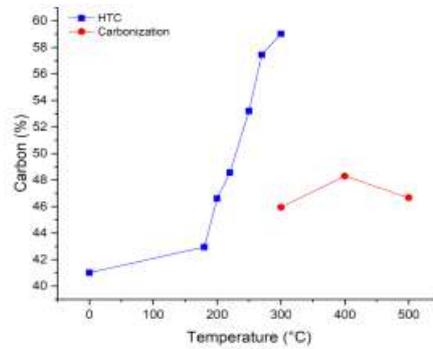
b) DTG Curve

그림 5-11. 수열탄화 열중량 분석 (TGA) 결과

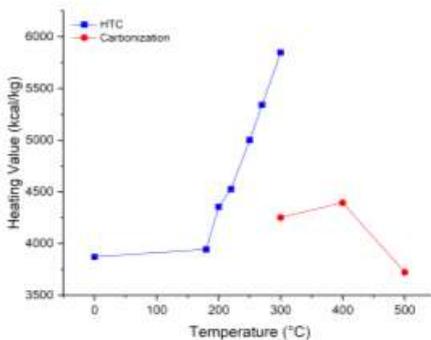
- 아래의 그림 5-12는 수열탄화와 일반탄화를 비교한 그래프로 고정탄소, 탄소 함량, 발열량, 고체수율을 나타냄. 고정탄소 함량은 일반탄화의 결과가 수열탄화의 결과보다 높은 경향을 보이고 있음. 그런 탄소 함량의 경우는 일반탄화보다 낮은 온도의 biochar가 더 높은 함량을 보이고 있음. 이러한 결과도 발열량인 일반탄화 대비 높은 결과를 보임.
- Product yield에서 탄화의 온도가 높아짐에 따라서 열분해에 의해 고체 함량의 줄어듦을 보임. 발열량의 연계성을 봤을 때 고체 생성물을 위해서는 수열탄화가 더 효과적인 결과라는 것을 판단할 수 있음.



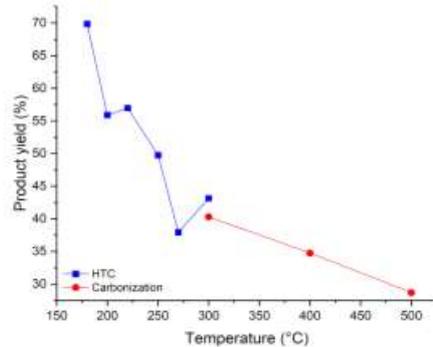
a. Fixed Carbon (wt %)



b. Carbon content (wt %)



c. High Heating Value



d. Product Yield

그림 5-12. 수열탄화-일반탄화 비교

3. 가스화 결과

3-1. 실험 방법

- 탄화 후 가스화 효율 향상 평가를 위해서 수열탄화 200°C, 300°C에서 생성된 biochar와 탄화 온도 400°C에서 생성된 biochar를 가스화에 적용하였으며, 이는 생성에 따른 수열탄화와 일반 탄화에서 최적으로 조건이라고 판단된 샘플을 적용함.
- 전기로는 장치 내 설치된 열선을 이용하여 온도를 상승시키는 기기로서, 설정 가능한 최대 온도는 800°C이며 승온율은 30°C/min임. 오일 회수 장치는 생성 오일을 유기용제를 이용하여 회수하기 위함이며, 사용된 유기용제는 디클로로메탄 (Dichloromethane, DCM)을 100 mL 용량으로 총 3개를 설치하였고 생성되는 가스를 흘려주었음. 가스 회수 장치는 유기 용제를 통과하고 난 후의 경질 가스를 회수하기 위함임. 5 L 용량의 테들러백을 사용하여 생성 가스를 포집하였음.
- 마이크로파 열분해의 실험 장치 구성임. 이는 고주파 발생 장치, wave guide, 석영관, 온도 센서이며, 열원인 마이크로파를 생성하는 마그네트론의 사양은 2450 Mhz, Max 1 kW임. 마이크로파 열분해는 직접적인 내부 가열을 일으키기 때문에 내부 온도 조절 및 측정이 중요함. 온도 센서는 내부 온도 측정을 위한 K-type 열전대와 외부 온도 측정을 위한 적외선(IR) 센서로 구성되었으며, 열분해 설정 온도는 슬러지 시료의 내부 온도 측정이 가능한 K-type 열전대를 기준으로 적용되었음



그림 5-13. 일반 가스화 반응 장치 구성도

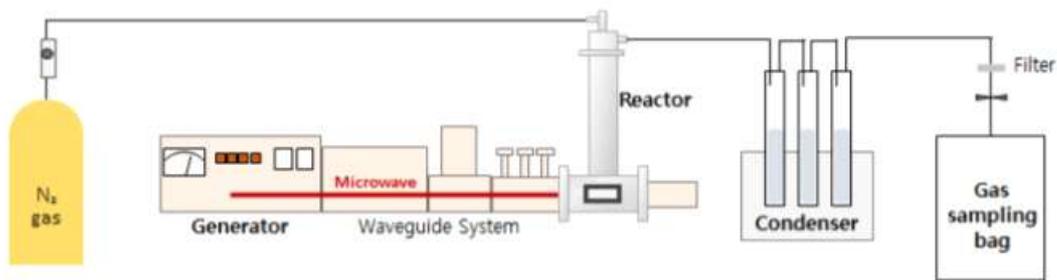


그림 5-14. 마이크로파 열분해 실험장치

- 기체 생성물인 Gas는 GC-TCD (Gas Chromatography-Thermal Conductivity Detector)를 이용하여 미지 혼합 가스 시료의 성분을 분석하였음. 해당 기기는 두 가지 컬럼을 이용해 분석을 진행하였음. Molecular sieve 13X 컬럼을 이용하여 H₂, CO, CH₄ 성분을 분석하였고, Porapak N 컬럼을 이용하여 CO₂, C₂H₄, C₂H₆ 성분을 분석하였음. 오븐 온도는 50°C에서 5분 동안 유지하고, 이후 20°C/min의 승온율로 온도를 최종 120°C까지 상승시켜 2분 동안 유지하여 기체 생성물의 성분을 분석하였음.

3-2. 가스화 실험 결과

- 아래의 그림은 일반 열분해를 적용하여 샘플의 종류에 따른 생성 가스 성분의 변화를 정리하였음. 탄화 전 (Raw)의 농업부산물에 비해 탄화 이후의 biochar의 가스화 조성에서 H₂와 CO의 비율이 상승하는 결과를 얻음. 수열탄화를 한 biochar의 경우는 CH₄의 증가를 보였으며, CO₂는 감소하는 결과를 얻음. 일반탄화 후 얻어진 biochar의 경우는 H₂의 함량이 상대적으로 상승하였음을 확인함. 이러한 결과를 바탕으로 H₂+CO의 함량을 비교한 결과, Raw에 비해 탄화를 한 경우가 더 높게 나타났으며 일반탄화가 수열탄화 biochar에 비해서 높은 생성율을 나타내었음.
- 마이크로파 열분해를 적용하여 같은 조건에서의 H₂, CO의 생성률을 비교함. 마이크로파를 열원을 사용하는 마이크로파 열분해의 경우에는 기존 열분해와 마찬가지로 탄화 전 (Raw)의 농업부산물에 비해 탄화 이후의 Biochar의 가스화 조성에서 H₂와 CO의 비율이 상승하는 결과를 얻음. 탄화한 Biochar를 중심으로 일반가스화와 마이크로웨이브 가스화의 비교한 경우는 CH₄와 CO₂의 함량이 일반탄화보다 낮게 나타났으며, 탄소의 전환률에 따라서 CO의 함량이 증가하는 결과를 얻을 수 있었음. 탄화를 한 Biochar의 경우가 CO 수율은 증가하고 CO₂ 수율은 감소하는데, 열적 탄화 공정으로 인해 Biochar의 CO₂의 환원 작용이 증가한 것으로 판단됨. 또한 마이크로파 열분해를 통해 생성된 가스에서가 기존 열분해의 경우보다 H₂ 수율이 높았음. 이는 마이크로파의 직접적인 내부 가열로 인한 영향으로 판단됨.

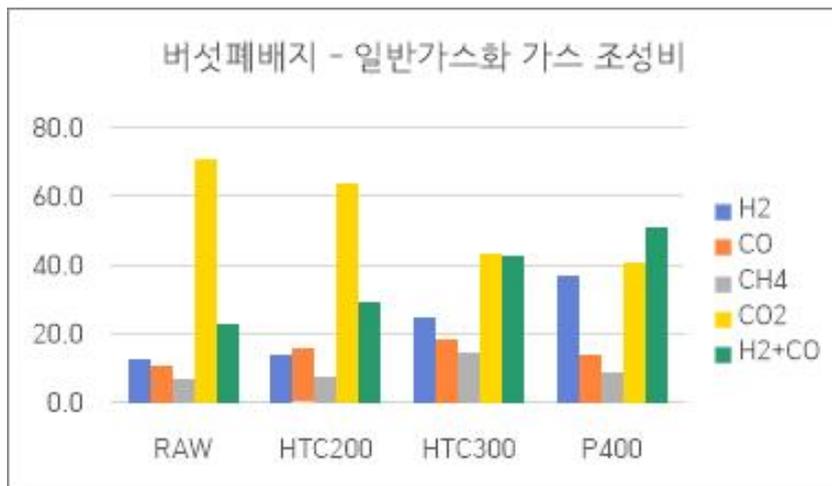


그림 5-15. 일반 가스화를 통한 가스 조성 결과

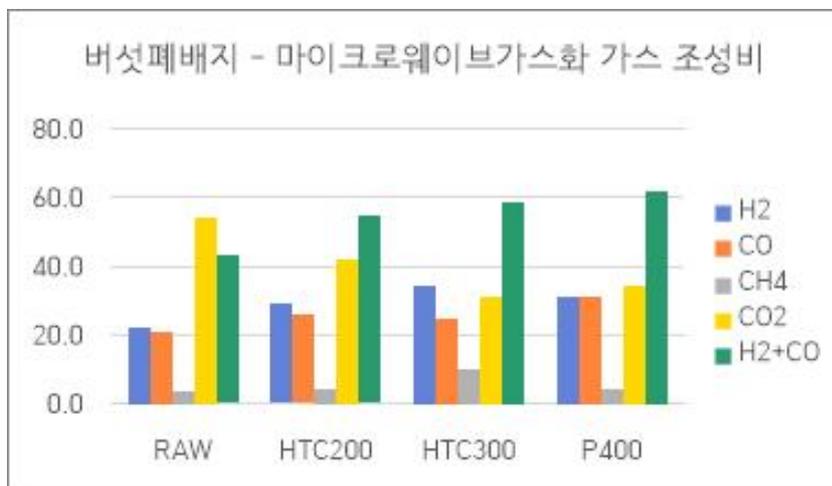


그림 5-16. 마이크로파 열분해 가스 조성결과

4. 탄화의 형태 및 반응기에 따른 변화 비교 분석

4-1. 일반탄화 실험 결과

- 온도 변화에 따른 변화를 분석하기 위해 일반 탄화 반응 온도 250, 350, 450°C를 추가로 진행하였으며 아래에 250, 350, 450°C와 기존에 진행한 탄화 실험의 원소분석, 공업분석 결과를 나타냄.
- 원소분석 결과 수열탄화와 동일하게 반응 온도가 증가할수록 탄소의 함량은 증가하고 수소와 산소의 비율은 감소하는 추세를 나타내었으며, 탄소의 경우 반응 온도 450°C에서 53.81%로 가장 높은 함량을 나타냈으며 500°C에서 그 값이 다시 감소하는 모습을 보이는데 이는 500°C에서 일어난 열분해로 인한 탄소 성분의 휘발로 인한 결과로 판단됨.

표 5-5. 일반탄화 원소분석 결과

Sample	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Sulphur
RAW	41.0150	5.3307	43.0835	2.6570	0.1953
250	44.5213	4.4443	34.4328	3.6780	0.1830
300	45.9497	3.7023	33.4001	2.8503	0.2570
350	48.8500	3.4355	23.7983	3.6070	0.0620
400	50.3670	2.6590	23.5432	2.6010	0.2090
450	53.8100	2.4360	15.5216	3.3590	0.0000
500	49.1470	1.7160	18.3970	2.3250	0.2010

- 공업분석 결과 고정탄소의 비율이 증가하고 상대적으로 휘발분이 감소하는 것을 알 수 있는데 이는 반응 온도가 증가할수록 산소와 수소의 휘발로 인해 휘발분이 감소한 것으로 판단됨. 또한 원소분석 결과 탄소의 함량이 증가하였고 공업분석 결과 고정탄소가 증가한 것을 통해 발열량 또한 향상된 것을 알 수 있는데 3870.97 kcal/kg에서 최대 5542.51 kcal/kg로 증가한 것을 확인하였음. 500°C에서 발열량이 감소한 것은 앞서 원소분석 결과에서 열분해로 인한 탄소의 휘발로 인한 것으로 판단됨.

표 5-6. 일반탄화 공업분석 결과

Sample	Fixed Carbon (%)	Volatile matter (%)	Ash (%)	Calorific value (kcal/kg)
RAW	20.7718	71.05977	7.6305	3870.97
250	28.6252	58.6342	12.7406	4657.75
300	40.7472	44.7734	14.4793	5314.15
350	47.0781	30.1525	20.2472	5406.42
400	48.4848	30.8943	20.6208	5443.36
450	54.5350	20.5917	24.8734	5542.51
500	55.7367	17.2571	27.0063	4733.09

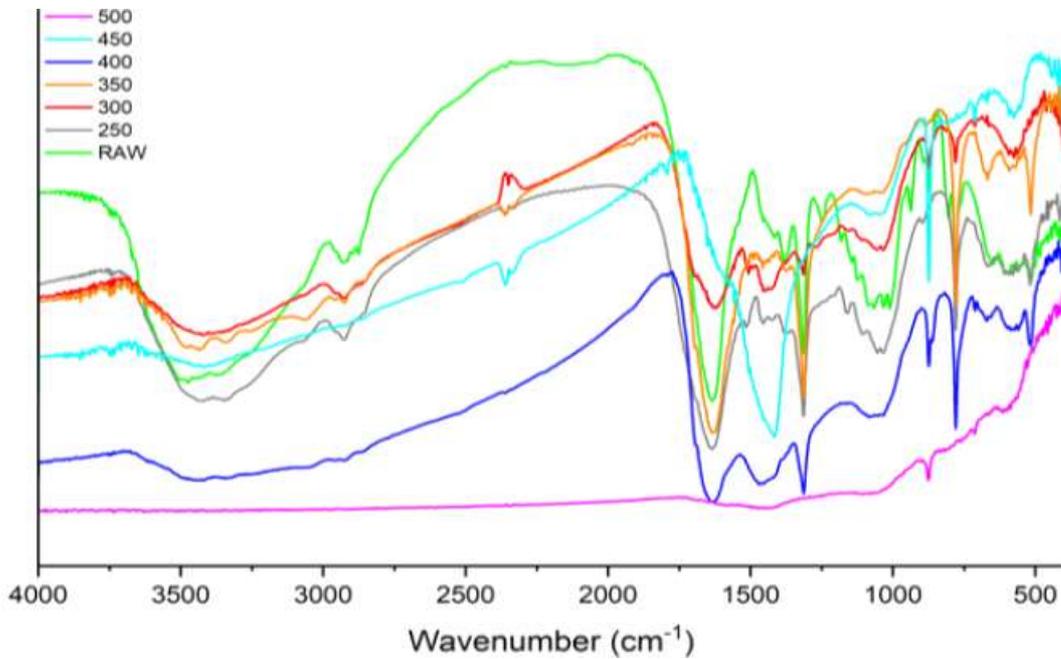
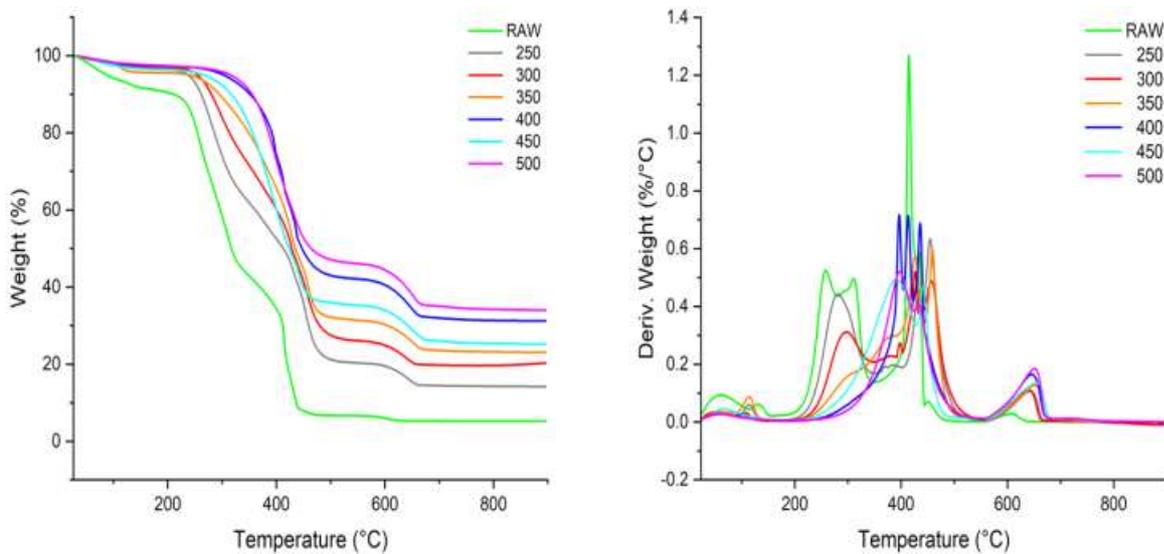


그림 5-17. 일반탄화 FT-IR Curve

- FT-IR 분석 결과 3400cm⁻¹-3200cm⁻¹ 구간에서 반응 온도 300°C 이상의 조건에서 peak가 줄어드는 것을 확인하였으며 O-H 구조의 분해가 일어나 소수성으로 전환된 것으로 판단됨. 1025cm⁻¹, 1680cm⁻¹-1600cm⁻¹ 구간에서 Decarboxylation으로 인한 C-O와 C=C peak의 감소로 추정됨.
- 열중량분석 결과 원시료와 비교하였을 때 반응 온도가 증가할수록 100°C 주변의 온도감소 구간이 줄어드는 것을 볼 수 있는데 이는 시료 내 수분이 증발한 것으로 판단되며 탄화 반응 온도가 증가할수록 첫 번째 구간의 시작 온도가 증가하고 있음을 확인하였으며 이는 연소가 시작 되는 시간이 늦어지는 것으로 연소 특성이 향상되고 있음을 확인하였음.



a) TGA Curve

b) DTG Curve

그림 5-18. 일반탄화 열중량 분석 (TGA) 결과

4-2. Microwave 탄화

- Microwave를 통한 탄화 반응은 마이크로웨이브 (Multiwave 5000, Anton paar) 장비를 이용하여 반응 온도 180, 200, 220, 240, 250°C에서 진행되었으며 수열탄화와 동일하게 물과 시료를 1:1 비율로 혼합하였으며 30분 동안 반응을 진행함. 반응이 끝나면 고체, 액체가 혼합된 시료가 생성되는데 이를 고액 분리하여 분리시킨 후 고체 시료를 건조하여 분석에 이용함.



그림 5-19. 마이크로웨이브 장치

4-2-1. 마이크로웨이브 실험 결과

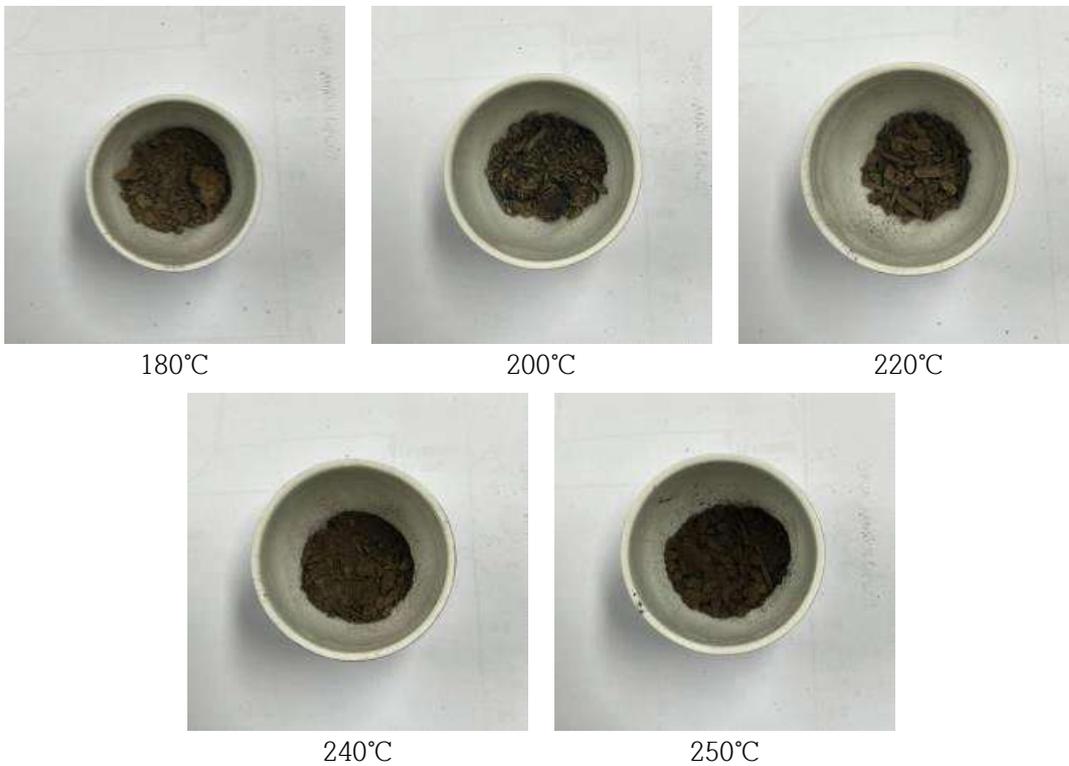


그림 5-20. 마이크로웨이브 결과

- 원소분석 결과 반응 온도가 높아질수록 산소와 수소의 함량은 각각 약 8%와 1%씩 감소하고 탄소 함량은 41.02%에서 44.22%까지 증가함. 마이크로웨이브 결과 또한 수열탄화와 탄화 반응과 비슷한 추세를 나타내었음.
- 공업분석 결과 또한 반응 온도의 증가에 따라 휘발분의 감소와 고정탄소 함량의 증가가 일어났으며 고정탄소는 20.77%에서 27.17%까지 약 7% 가량 증가하였으며 고정탄소와 탄소 함량의 증가를 통해 발열량 또한 3870.97 kcal/kg에서 4733.10 kcal/kg까지 증가한 것을 확인함.

표 5-7. 마이크로웨이브 원소분석 결과

Sample	Carbon	Hydrogen	Oxygen	Nitrogen	Sulphur
RAW	41.0150	5.3307	43.0835	2.6570	0.1953
180	40.7410	5.1550	40.8866	3.1583	0.2923
200	41.7570	5.0597	39.6755	3.1803	0.2917
220	42.6790	5.0370	39.0731	3.1993	0.2923
240	42.9187	4.2203	37.2751	3.8057	0.3040
250	44.2163	4.3337	35.1828	3.6003	0.2920

표 5-8. 마이크로웨이브 공업분석 결과

Sample	Fixed Carbon (%)	Volatile matter (%)	Ash (%)	Calorific value (kcal/kg)
RAW	20.7718	71.05977	7.6305	3870.97
180	21.7525	68.4808	9.7667	3993.98
200	22.8751	67.0891	10.0359	4046.54
220	24.9783	65.3025	9.7192	4181.21
240	26.9238	61.5999	11.4763	4500.84
250	27.1646	60.4606	12.3748	4733.10

- 열중량분석 결과 반응 온도가 증가할수록 100°C 이하의 감소 구간이 줄어드는 것을 확인할 수 있는데 이는 시료 내 수분의 증발로 인한 것으로 판단되며 수열탄화와 마찬가지로 시료의 수분 제거 효율이 개선되었음을 알 수 있음. 마이크로웨이브 온도가 증가할수록 반응 온도가 늦춰지는 것을 통해 마이크로웨이브 반응을 통해 탄화도가 증가하였음을 확인함.

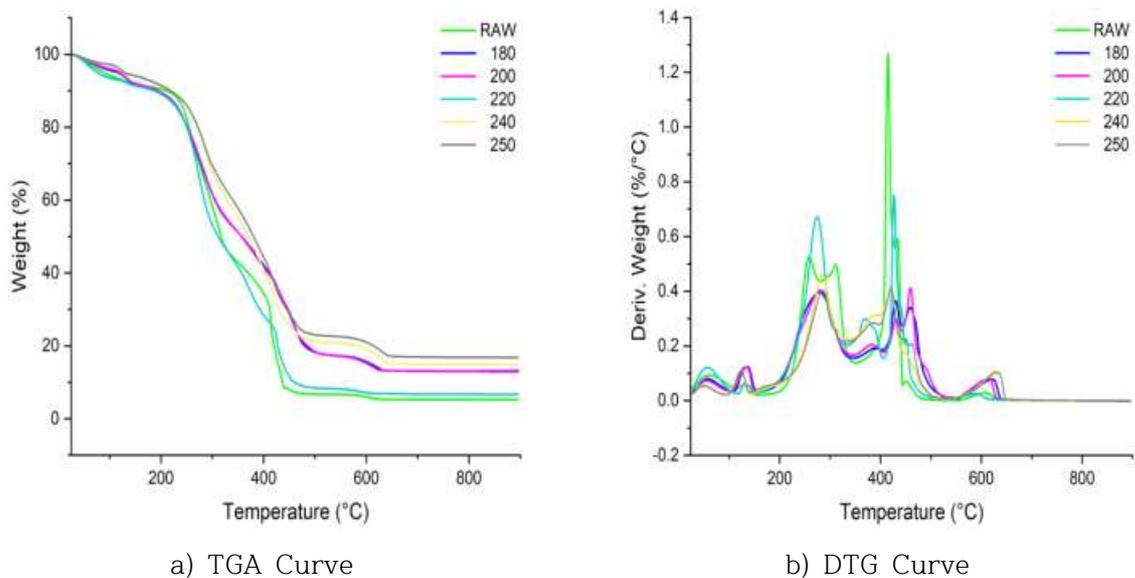


그림 5-21. 마이크로웨이브 열중량 분석 (TGA) 결과

- 세 가지 반응의 고정탄소, 탄소 함량과 발열량, 고체수율 결과를 비교하여 아래의 그래프에 나타내었음. 동일한 반응 온도 조건인 250°C에서 비교하였을 때 고정탄소와 탄소 함량은 수열탄화>일반탄화>마이크로웨이브 순으로 일반탄화와 마이크로웨이브의 경우에는 큰 차이가 없었지만 수열탄화는 다른 반응에 비해 비교적 높은 결과 값을 나타냄. 발열량의 경우 고정탄소와 탄소의 함량이 높은 수열탄화가 세가지 반응 중 가장 높은 발열량 값을 나타내었으며 고체수율은 수열탄화가 가장 낮고 일반탄화가 가장 높은 수율을 나타내었는데 이는 수열탄화 반응의 탈수로 인한 결과라고 판단됨.

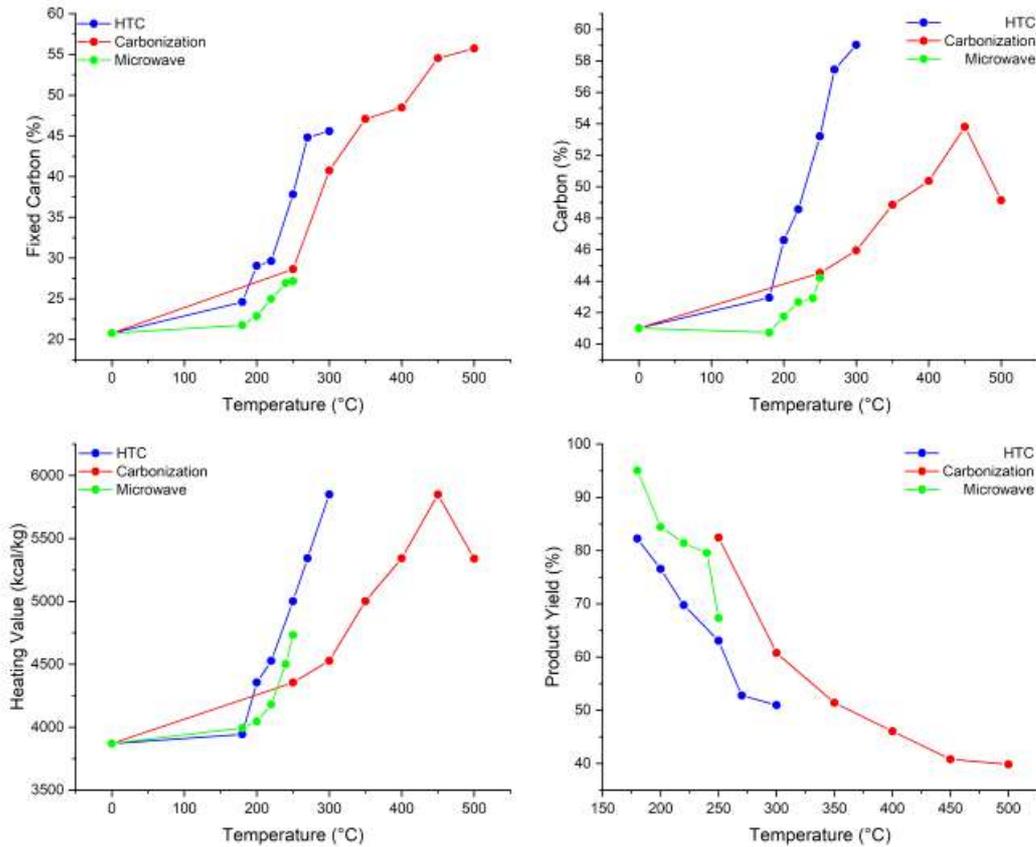


그림 5-22. 고정탄소, 탄소, 발열량, 고체수율 비교

- TGA Curve를 바탕으로 Biochar의 활성화 에너지와 점화 온도, 연소 온도를 산출하였음. 점화 온도 (Ignition Temperature)는 시료를 연소할 때 점화되는 최소 온도를 뜻하며 연소 온도 (Burnout Temperature)는 시료가 완전히 소모된 온도를 뜻함. 연료의 소비량이나 연소기 설계 등에서 중요한 매개 변수로 작용하며 연료 특성을 조사할 때 중요한 역할을 함.
- 활성화 에너지의 산출은 Kissinger method와 Ozawa method를 사용하였으며 식은 아래 표에 나타내었음.

표 5-9. 활성화에너지 계산 방법

Method	Equation
Kissinger	$\ln\left(\frac{\beta}{T_p^2}\right) = -\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_p}\right) + \ln\left(\frac{RA}{E}\right)$
Flynn-Wall-Ozawa	$\ln\beta = \ln\left(\frac{AE}{Rg(\alpha)}\right) - 5.331 - 1.052\frac{E}{RT}$

표 5-10. 활성화에너지 산출 결과

Sample		Activation Energy (KJ/mol)	
		Kissinger method	Ozawa method
RAW		129.32	129.56
HTC	180°C	241.54	211.68
	200°C	191.13	156.04
	220°C	180.47	181.95
	250°C	185.60	186.26
	270°C	222.28	270.61
	300°C	164.26	172.07
Carboni zation	250°C	137.61	142.90
	300°C	124.10	95.04
	350°C	115.98	116.29
	400°C	137.35	143.08
	450°C	129.42	130.91
Micro wave	500°C	126.89	131.77
	180°C	148.89	153.48
	200°C	104.15	160.46
	220°C	178.42	186.04
	240°C	186.28	204.89
	250°C	192.08	198.65

- 활성화 에너지는 그 값이 증가할수록 반응 속도가 느려지고 작을수록 지속적인 연소가 가능함을 의미함. 활성화 에너지 산출 결과 동일한 온도 조건인 250°C를 비교하였을 때 마이크로웨이브가 Kissinger, Ozawa method 각각 192.08 KJ/mol, 198.65 KJ/mol로 가장 높은 값을 나타내었으며 일반탄화가 가장 낮은 활성화에너지 값을 나타냄. 수열탄화의 경우 시료 모두 원시료보다 높은 활성화에너지 값을 나타냄. 동일한 온도 조건인 250°C를 비교하였을 때 수열탄화는 각각 185.60, 186.26 KJ/mol 탄화는 137.61, 142.90 KJ/mol로 탄화 반응이 더 낮은 에너지값을 나타내었음을 알 수 있음.

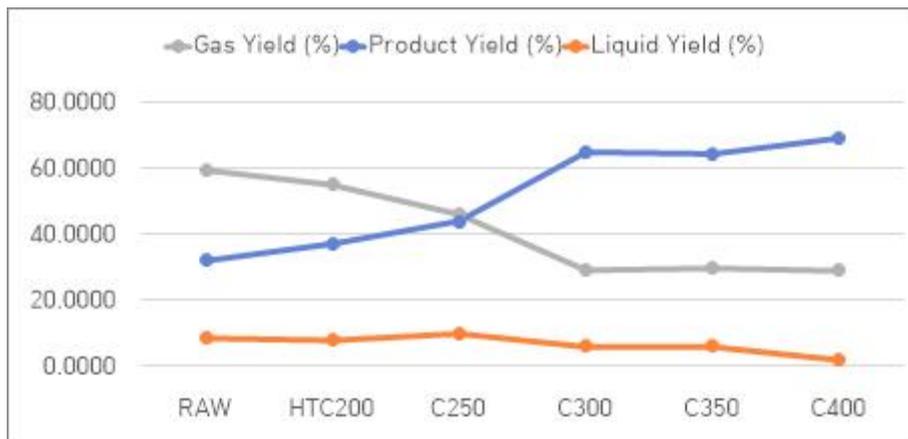
5. 가스화 실험 방법

- 탄화에 따른 가스화 효율 향상을 확인하기 위해 가스화 실험을 진행하였으며 수열탄화와 탄화를 통해 생성된 biochar의 가스화를 진행한 뒤 그 특성을 비교하였음. 가스화 반응은 800°C, 1000°C에서 진행하였으며 반응 장치는 전기로를 이용함. 석영관 안에 시료를 넣은 뒤 질소를 200 ml/min으로 10분 동안 흘려준 뒤 30분 동안 반응을 진행하였음. 반응을 진행하는 동안에는 질소를 100 ml/min으로 고정하였으며 반응기 뒤에는 오일 회수를 위해 포집병을 설치함. 오일 회수는 디클로로메탄 (Dichloromethane, DCM) 100 ml를 넣고 총 3개의 병을 설치하고 생성된 가스를 흘려주었음. 최종적으로 생성된 가스는 10 L 테들러백에 포집하였으며 가스 크로마토그래피 (GC-2014, Shimadzu) 를 이용하여 조성을 비교함.

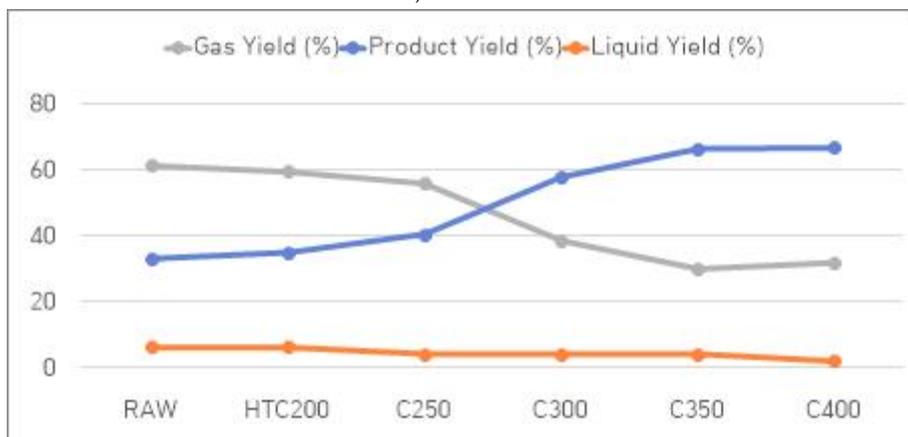


그림 5-23. 가스화 장치

5-1. 가스화 실험 결과



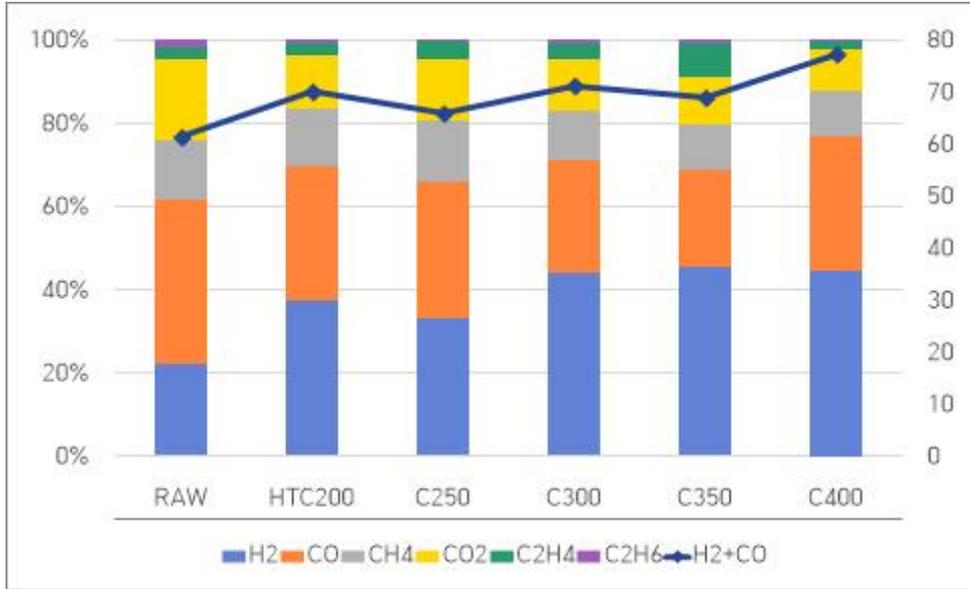
a) 800 °C



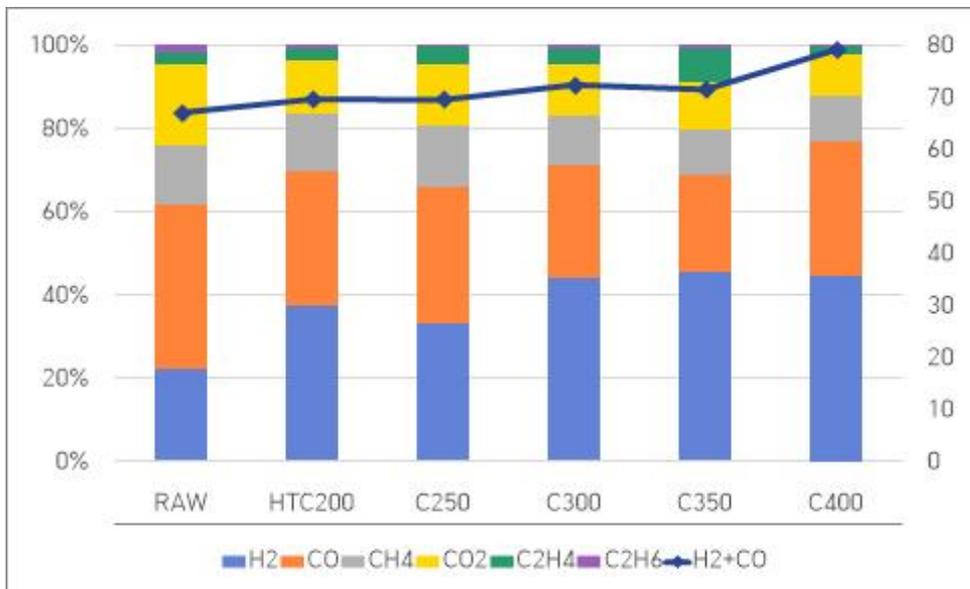
b) 1000 °C

그림 5-24. 버섯폐배지 가스화 수율

- 수율 계산 결과 두 반응 온도 모두 탄화 반응 온도가 증가할수록 고체 수율은 증가하고 가스 수율은 감소하는 추세를 나타냄. 가스화 반응 800°C에서 고체 수율은 31.91%에서 69.02%까지 증가하였으며 가스 수율은 59.47%에서 28.99%까지 감소하였음. 또한 1000°C에서는 800°C보다 낮은 고체 수율과 높은 가스 수율이 나타났는데 고체 수율의 경우 32.95%에서 66.48%로 800°C보다 낮은 고체 수율을 보였으며 가스 수율은 61.05%에서 31.72%까지 감소하였으나 800°C보다 높은 가스 수율을 나타냄.



a) 800 °C



b) 1000 °C

그림 5-25. 버섯폐배지 가스화 방법에 따른 연료비율

- 가스화 실험 결과 탄화 반응 온도가 증가할수록 H₂의 함량이 증가하는 것을 확인하였으며 CO의 경우 원시료에 비해 감소한 것을 확인함. 원시료와 비교하였을 때 반응 온도 800°C에서는 H₂가 22.28%에서 최대 45.13%까지 증가하였으며 1000°C의 경우 30.56%에서 45.48%까지 증가한 것으로 나타남.

- H_2+CO 를 계산한 결과 800°C에서는 61.30%에서 77.07%까지 증가하였으며 1000°C의 경우 67.05%에서 79.17%로 800°C보다 높은 것을 확인하였음. 수열탄화 200°C와 일반탄화 250°C를 비교하였을 때는 반응 온도는 일반탄화가 더 높았지만 H_2 의 함량은 수열탄화에서 더 높게 나왔으며 H_2+CO 값 또한 수열탄화 200°C에서 더 높게 나온 것을 확인하였음.

5-2. 가스화 조성 분석 결과

- 가스화 반응 이후 나온 가스, 고체 (Biochar), 액체 (Tar) 수율을 아래의 그림 5-26, 5-27에 나타냄. 800°C와 1000°C 모두 탄화 반응 온도가 증가할수록 고체 수율은 증가하고 가스 수율은 감소하는 추세를 나타내었으며 액체 수율의 경우 탄화 반응 온도가 증가함에 따라 감소하는 추세를 보였으나 큰 차이는 존재하지 않음.
- 고체 수율의 경우 800°C가 1000°C보다 높았으며 각 반응별로 가장 높은 탄화 온도에서 가장 높은 수율을 나타냄. 그와 반대로 가스 수율은 1000°C가 800°C보다 높은 것을 확인하였으며 가장 낮은 탄화 반응 온도에서 더 높은 수율을 보였음.
- 동일한 온도 조건인 250°C를 기준으로 가스 수율을 비교하였을 때 800°C, 1000°C 모두 마이크로웨이브가 각각 53.93%, 57.03%로 가장 높은 가스 수율 나타내었으며 그 다음으로 일반탄화>수열탄화 순으로 나타남. 고체 수율의 경우 가스와 반대로 수열탄화>일반탄화>마이크로웨이브 순으로 나타남.

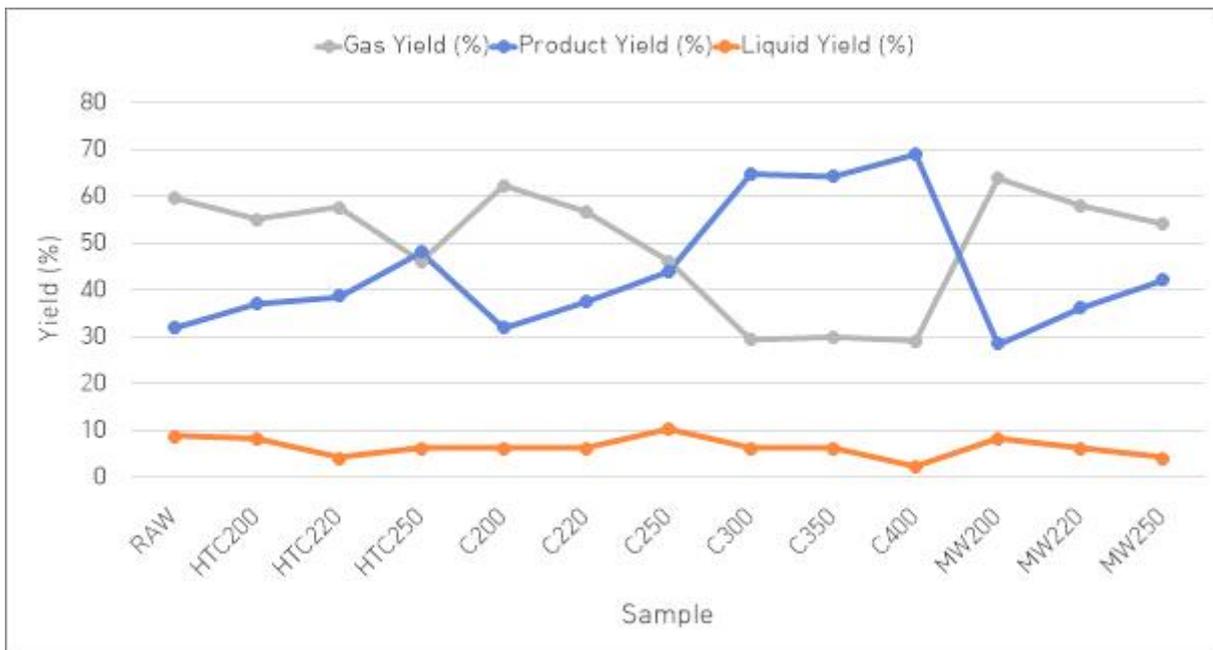


그림 5-26. 가스화 800°C의 가스, 고체, 액체 수율

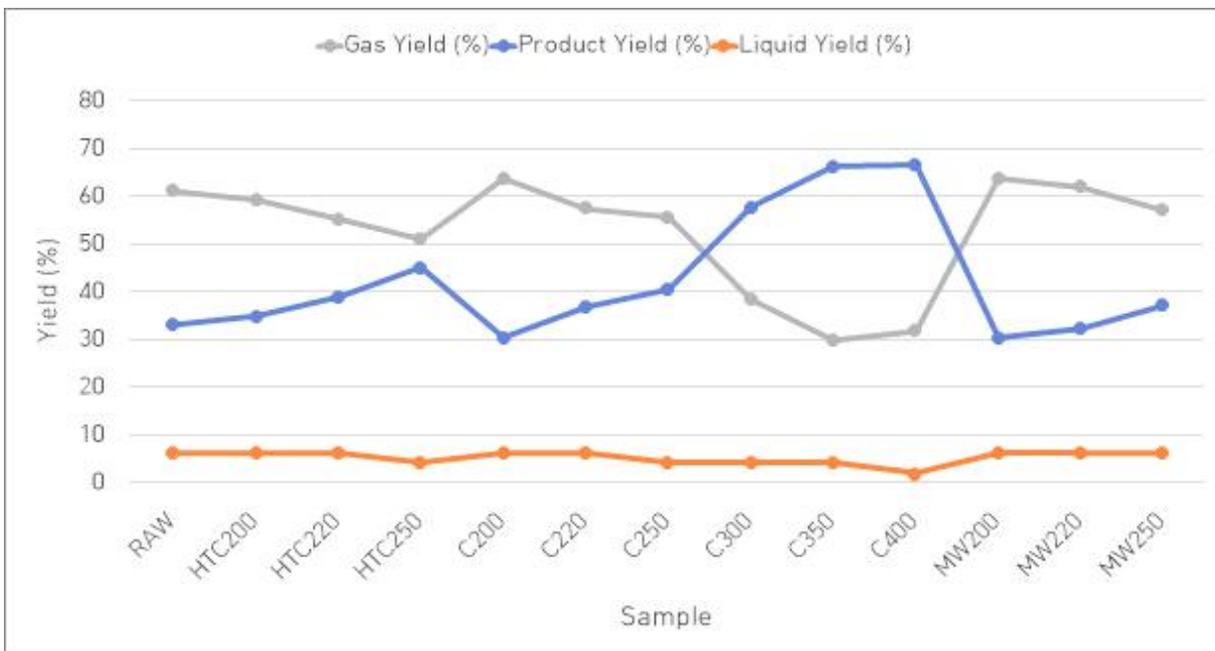


그림 5-27. 가스화 1000°C의 가스, 고체, 액체 수율

- 가스화 반응을 통해 생성된 합성가스의 GC 조성 결과를 아래의 그림 5-28, 5-29에 가스화 온도별로 나타내었음. 탄화 반응 온도가 증가할수록 수소의 함량이 증가하는 추세를 보였으나 일반탄화의 경우 일부 온도에서 수소 함량이 다시 감소하는 모습을 나타내었음.
- 800°C와 1000°C의 수소 함량을 비교하였을 때 1000°C가 조금 더 높은 수소 함량을 보였으며 약 5~10% 정도의 차이를 보임. 800°C에서 일반탄화 350°C가 45.13%로 가장 높은 수소 함량을 보였으며 동일한 탄화 반응 온도인 250°C에서 비교하였을 때는 수열탄화가 42.8%로 가장 높았으며 일반탄화가 36.05%로 가장 낮은 수소 함량을 보임. 1000°C의 경우 수열탄화 250°C가 46.80%로 가장 높은 수소 함량을 나타내었으며 동일한 반응 온도인 250°C에서 비교하였을 때 수소 함량은 수열탄화>일반탄화>마이크로웨이브 순으로 나타남.
- 수소 함량의 변화에 따라 H₂와 CO의 합도 변화하는 것을 확인하였음. 800, 1000°C 모두 원시료에 비해 H₂+CO의 값이 증가한 것을 확인하였으며 가스화 반응 온도 800°C에서 일반탄화 400°C에서 77.07%로 가장 높은 값을 보였으며 50.88%인 원시료와 비교하였을 때 17%까지 증가한 것을 확인함. 탄화 반응 온도 250°C에서 비교하였을 때 수열탄화가 70.02%로 가장 높았으며 일반탄화와 마이크로웨이브가 각각 68.94%, 69.08%로 수열탄화>마이크로웨이브>일반탄화 순으로 나타나는 것을 확인함.
- 1000°C의 경우 원시료의 H₂+CO 값이 67.05%로 800°C에 비해 17% 정도 증가한 것을 확인 할 수 있었음. 또한 800°C와 마찬가지로 일반탄화 400°C에서 79.17%로 가장 높은 값을 보였으며 동일한 탄화 반응 온도인 250°C에서 비교하였을 때 수열탄화와 일반탄화가 71.7056%와 71.7054%로 거의 동일하였으며 마이크로웨이브는 73.04%로 가장 높은 H₂+CO 값을 나타내었음.

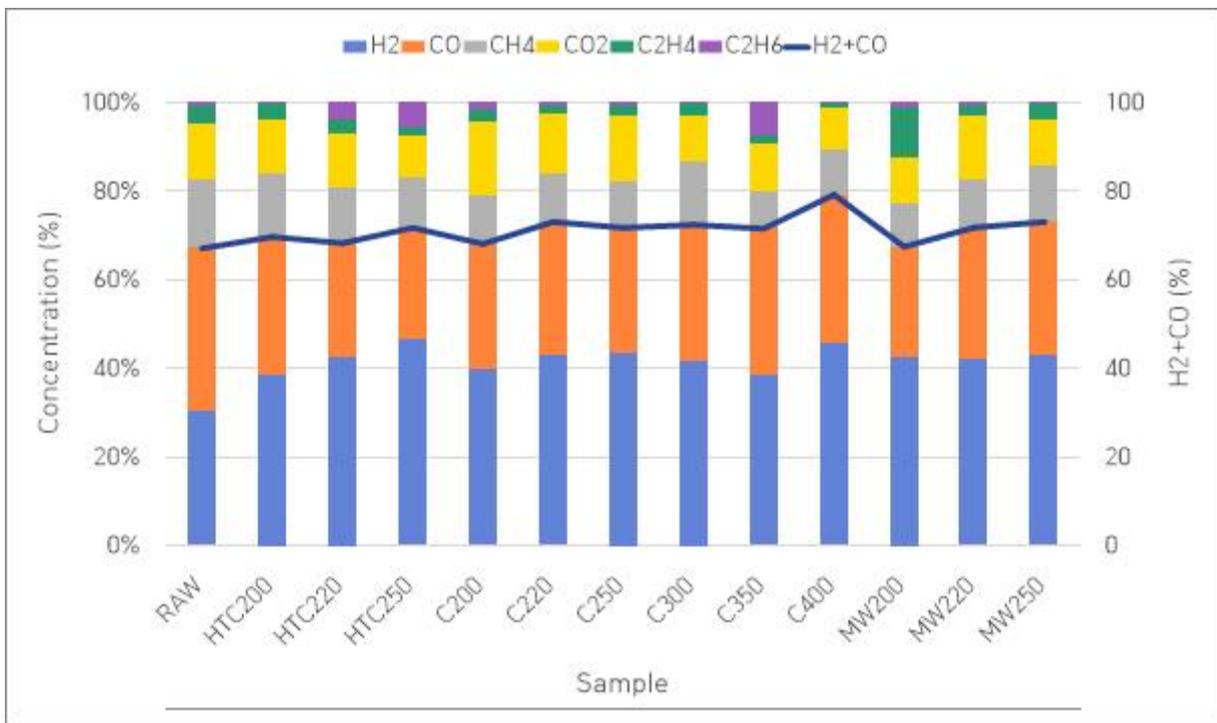


그림 5-28. 가스화 800°C의 합성가스 조성

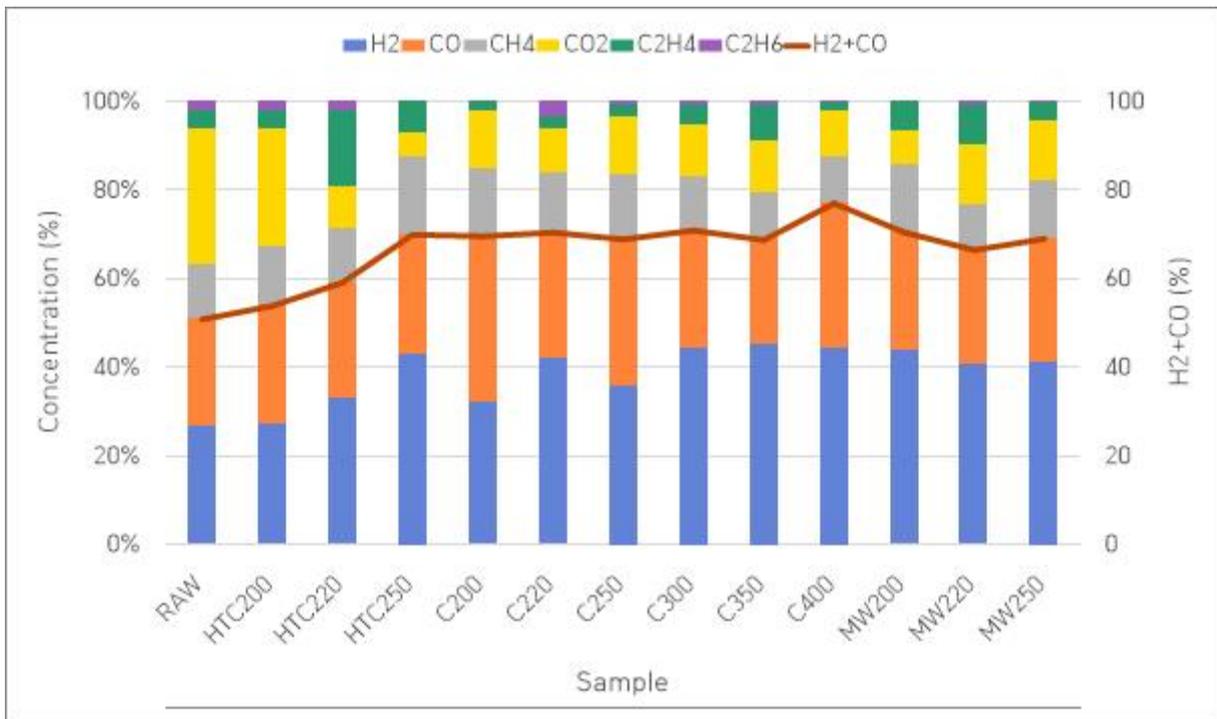


그림 5-29. 가스화 1000°C의 합성가스 조성

5-3. 가스화 Biochar 분석 결과

- 가스화 이후 남은 Biochar의 화학적 특성을 알아보기 위해 원소분석과 공업분석, 발열량 측정을 수행하였으며 아래의 표 11과 12에 가스화 온도별 원소분석 결과를, 표 13, 14에 공업분석과 발열량 측정 결과를 나타내었음.

표 5-11. 가스화 800°C Biochar 원소분석 결과

	Elemental Analysis (wt.%)					H/C ratio	O/C ratio
	C	H	O	N	S		
RAW	49.34	0.73	20.93	1.45	0.21	0.1783	0.3181
HTC200	54.00	0.92	23.36	2.03	0.05	0.2052	0.3245
HTC220	54.80	0.92	17.45	1.89	0.10	0.2008	0.2388
HTC250	58.94	0.93	13.83	2.75	0.14	0.1885	0.1759
C200	52.30	0.63	15.82	1.59	0.23	0.1439	0.2269
C220	53.08	1.23	16.53	2.25	0.18	0.2774	0.2336
C250	47.40	0.79	28.27	1.65	0.18	0.2007	0.4473
C300	50.31	0.78	20.43	1.77	0.08	0.1867	0.3046
C350	53.85	0.95	15.53	1.95	0.12	0.2126	0.2163
C400	47.20	1.14	10.60	1.81	0.18	0.2889	0.1685
MW200	55.65	0.84	19.38	1.79	0.14	0.1818	0.2612
MW220	51.66	0.85	19.45	1.90	0.10	0.1985	0.2823
MW250	52.95	0.81	21.37	1.85	0.09	0.1839	0.3027

표 5-12. 가스화 1000°C Biochar 원소분석 결과

	Elemental Analysis (wt.%)					H/C ratio	O/C ratio
	C	H	O	N	S		
RAW	52.60	0.48	16.34	0.74	0.17	0.1106	0.2330
HTC200	53.70	0.57	16.35	1.20	0.03	0.1275	0.2283
HTC220	55.51	0.37	14.91	0.87	0.06	0.0809	0.2015
HTC250	58.75	0.40	13.13	1.47	0.11	0.0818	0.1676
C200	55.82	0.60	13.41	0.76	0.24	0.1285	0.1802
C220	57.96	0.59	12.30	0.98	0.32	0.1226	0.1592
C250	48.67	0.40	12.39	0.74	0.19	0.0992	0.1910
C300	53.26	0.45	13.58	0.87	0.09	0.1012	0.1913
C350	51.32	0.56	16.22	0.76	0.10	0.1311	0.2371
C400	50.17	0.42	6.55	0.83	0.24	0.1001	0.0980
MW200	54.46	0.51	14.22	0.80	0.15	0.1119	0.1958
MW220	50.19	0.36	19.87	0.72	0.07	0.0861	0.2969
MW250	53.58	0.53	16.22	0.77	0.05	0.1183	0.2271

- 가스화 이후 생성된 Biochar의 원소분석 결과 800, 1000°C 모두 대부분의 Biochar의 탄소 함량이 증가한 것을 확인하였음.
- 가스화 온도 800°C에서 원시료의 탄소 함량은 49.34%로 일반탄화 250°C와 400°C에서 각각 47.40%, 47.20%로 원시료보다 낮은 탄소 함량을 지닌 것을 확인함. 또한 수열탄화 250°C에서 가장 높은 탄소 함량인 58.94%를 나타내었으며 동일한 반응 온도인 250°C의 결과를 비교해보았을 때, 일반탄화가 47.40%로 가장 낮은 값을 보였으며 58.94%인 수열탄화가 가장 높은 탄소 함량을 보임.
- 가스화 1000°C의 탄소 함량의 경우 800°C와 비교하였을 때 큰 차이는 나타나지 않았으며 1~5% 정도의 차이를 보임. 일반탄화 250, 350, 400°C에서 원시료보다 낮은 탄소 함량을 나타내었으며 그 외의 Biochar는 원시료보다 높은 탄소 함량을 보였음. 800°C와 마찬가지로 수열탄화 250°C에서 58.75%로 가장 높은 탄소 함량을 보였으며 원시료에 비해 6% 정도 증가한 것을 확인하였음. 동일한 반응 온도에서 비교하였을 때 전체적으로 수열탄화를 통해 생성된

Biochar가 가장 높은 탄소 함량을 보였으며 그 다음으로 마이크로웨이브, 일반탄화 순으로 나타남.

표 5-13. 가스화 800°C Biochar 공업분석 및 발열량

	Proximate Analysis (wt.%)			Calorific Value (kcal/kg)
	Fixed Carbon	Volatile matter	Ash	
RAW	52.21	20.46	27.34	4754.94
HTC200	66.60	13.77	19.63	4980.34
HTC220	65.08	10.07	24.85	4877.77
HTC250	53.61	22.98	23.41	5274.95
C200	56.54	14.03	29.43	4569.75
C220	54.89	18.38	26.73	4735.44
C250	56.59	21.70	21.72	4327.94
C300	57.27	16.12	26.61	4592.80
C350	57.69	14.72	27.59	4866.69
C400	50.10	10.82	39.08	3443.11
MW200	55.07	22.74	22.19	4592.11
MW220	50.78	22.99	26.24	4734.62
MW250	56.23	20.84	22.92	4435.72

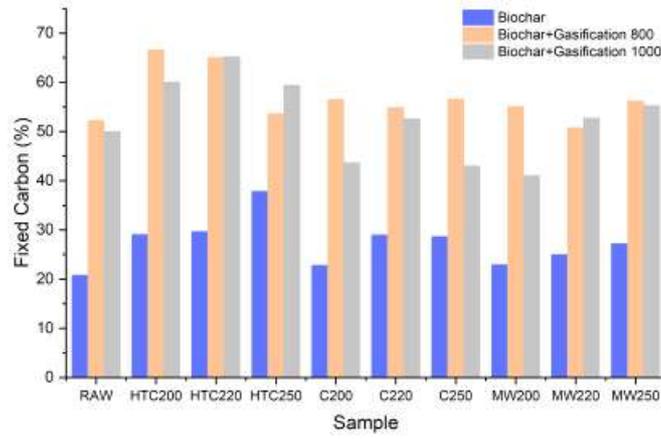
표 5-14. 가스화 1000°C Biochar 공업분석 및 발열량

	Proximate Analysis (wt.%)			Calorific Value (kcal/kg)
	Fixed Carbon	Volatile matter	Ash	
RAW	49.97	20.37	29.66	5042.05
HTC200	60.00	11.84	28.16	5361.58
HTC220	65.18	6.54	28.28	5014.28
HTC250	59.37	14.49	26.14	5141.06
C200	43.66	27.17	29.17	4789.41
C220	52.53	19.63	27.84	4815.18
C250	43.00	19.40	37.60	3956.73
C300	47.58	20.68	31.75	4796.76
C350	48.69	20.27	31.04	4407.39
C400	39.95	18.27	41.79	4032.93
MW200	41.05	29.08	29.87	4449.18
MW220	52.70	18.51	28.80	3970.70
MW250	55.27	15.88	28.85	4396.45

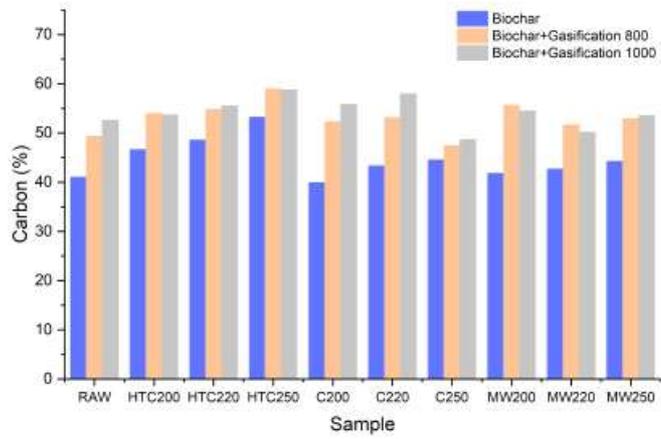
- 가스화 이후 Biochar의 공업분석, 발열량 결과를 표 3과 4에 나타내었음. 가스화 온도 800°C의 경우 일반탄화 400°C와 마이크로웨이브 220°C를 제외하고는 모두 원시료보다 높은 고정탄소를 나타내었으며 수열탄화 200°C에서 66.60%로 가장 높은 고정탄소 함량을 가진 것을 확인하였음. 또한 동일한 반응 온도에서 비교하였을 때 250°C를 제외하고는 수열탄화가 가장 높은 고정탄소를 나타내었으며 그다음으로 일반탄화, 마이크로웨이브 순으로 나타남.
- 가스화 1000°C Biochar의 경우 일반탄화로 생성된 Biochar가 800°C에 비해 낮은 고정탄소 함량을 나타내고 있으며 수열탄화로 생성된 Biochar와 마이크로웨이브 220°C가 800°C보다 고정탄소 함량이 증가한 것을 확인하였음. 수열탄화 220°C에서 65.18%로 가장 높은 고정탄소 함

량을 보였으며 원시료에 비해 약 5% 정도 증가함. 일반탄화 400°C의 경우 39.95%로 가장 낮은 고정탄소 함량을 지닌 것을 확인하였음.

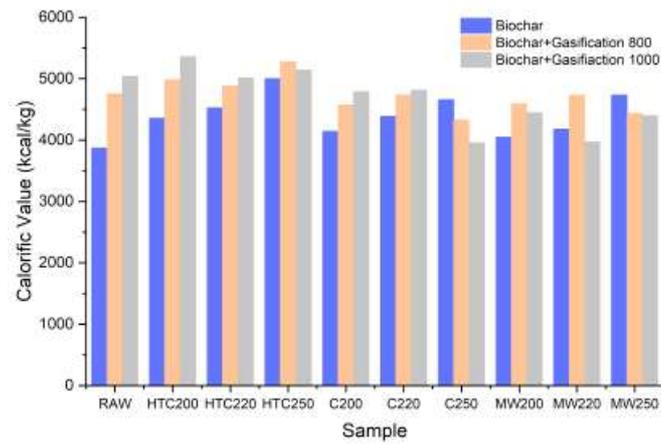
- 탄소와 고정탄소 함량의 변화에 따라 발열량 또한 변화하는 것을 확인하였으나 기존의 탄화 반응만 거쳤을 때와 달리 불규칙적인 변화를 나타내었음. 800°C의 경우 수열탄화 Biochar는 원시료보다 높은 발열량을 나타내었으나 일반탄화와 마이크로웨이브의 경우 일부 반응 온도를 제외하고는 원시료보다 낮은 발열량을 나타내었음. 특히 일반탄화 400°C에서 3443.11kcal/kg으로 가장 낮은 발열량을 나타내었음. 동일한 온도인 250°C에서 비교하였을 때 수열탄화>마이크로웨이브>일반탄화 순으로 각각 5274.95, 4435.72, 4327.94kcal/kg의 발열량을 보임.
- 1000°C의 발열량 측정 결과 원시료는 5042.05kcal/kg으로 800°C보다 약 300kcal/kg 정도 높은 발열량을 나타내었음. 수열탄화 반응의 경우 5000~5300kcal/kg 정도의 발열량을 나타냈으나 일반탄화와 마이크로웨이브는 5000kcal/kg 이하의 발열량을 나타내었음. 수열탄화 200°C에서 5361.58kcal/kg으로 가장 높은 발열량을, 일반탄화 250°C에서 3956.73kcal/kg으로 가장 낮은 발열량을 보였음.
- 그림 5-30은 탄화로 생성된 Biochar와 탄화와 가스화를 거치고 남은 Biochar의 고정탄소, 탄소, 발열량을 비교한 그래프임. 먼저 고정탄소의 경우 탄화 반응만 거쳤을 때보다 가스화 이후 Biochar 고정탄소의 함량이 크게 증가한 것을 알 수 있었으며 가스화 온도를 비교하였을 때 800°C가 1000°C보다 높은 고정탄소 함량을 나타내었음.
- 탄소 함량을 비교하였을 때, 가스화 이후 탄소 함량이 증가하였으나 고정탄소에 비해서는 적게 증가한 것을 확인함. 또한 일부 Biochar를 제외하고는 가스화 1000°C에서 더 높은 탄소 함량을 나타내었음.
- 탄소와 고정탄소 함량의 변화로 발열량을 변화 또한 확인하였는데 일반탄화 250°C와 마이크로웨이브 250°C의 경우 탄화만 거쳤을 때 가장 높은 발열량을 보였으며 가스화 1000°C에서는 탄화 반응 온도가 증가할수록 발열량은 감소하는 추세를 나타내었음.



a. Fixed Carbon



b. Carbon



c. Calorific Value

그림 5-30. 탄화, 가스화 Biochar의 고정탄소, 탄소, 발열량 비교

5-4. BET 분석 결과

- 표 15는 반응기별 버섯폐배지 탄화 이후 Biochar의 BET 분석 결과를 나타낸 표임. 탄화 반응 온도가 증가할수록 비표면적이 증가하는 추세를 보였으며 수열탄화와 마이크로웨이브는 가장 높은 반응 온도에서 가장 큰 비표면적을 나타내었음. 일반탄화의 경우 450°C에서 152.0890m²/g로 최대였으며 500°C에서 감소하였음. 동일한 반응 온도인 250°C에서 비교해보았을 때 수열탄화가 36.0968m²/g로 가장 높았으며 수열탄화>마이크로웨이브>일반탄화 순으로 마이크로웨이브와 일반탄화가 각각 30.2592m²/g, 10.9618m²/g로 나타남.

표 5-15. 버섯폐배지 Biochar의 BET 분석 결과.

Sample	BET surface Area (m ² /g)
RAW	2.5063
HTC180	13.3496
HTC200	16.1963
HTC220	25.4919
HTC250	36.0968
HTC270	52.4661
HTC300	64.3983
C250	10.9618
C300	11.7393
C350	20.9801
C400	57.9723
C450	152.0890
C500	125.1224
MW180	10.4624
MW200	10.5449
MW220	18.9293
MW240	22.0804
MW250	30.2592

5-5. SEM 분석 결과

- 탄화 반응과 가스화 반응 이후 Biochar의 표면 구조 변화를 파악하기 위해 SEM 분석을 수행함. 그림 5-31, 그림 5-32, 그림 5-33 각각 버섯폐배지 원시료의 SEM 결과와 탄화 이후 반응기별 Biochar, 가스화 이후 남은 Biochar의 SEM 분석 결과를 나타내었음.
- 원시료와 비교하였을 때 탄화 반응 이후 표면이 거칠어지고 일부 Biochar에서는 세공 구조가 발달한 것을 확인하였으며 이는 버섯폐배지 내에 존재하는 셀룰로오스와 리그닌이 분해된 것으로 판단됨. 그림 5-33은 탄화 반응 이후 가스화를 거친 Biochar의 SEM 결과를 나타냄. 가스화 이후 남은 Biochar 또한 표면이 거칠어진 것을 확인하였으며 일부 Biochar에서는 세공 구조가 발달한 것을 확인하였음.

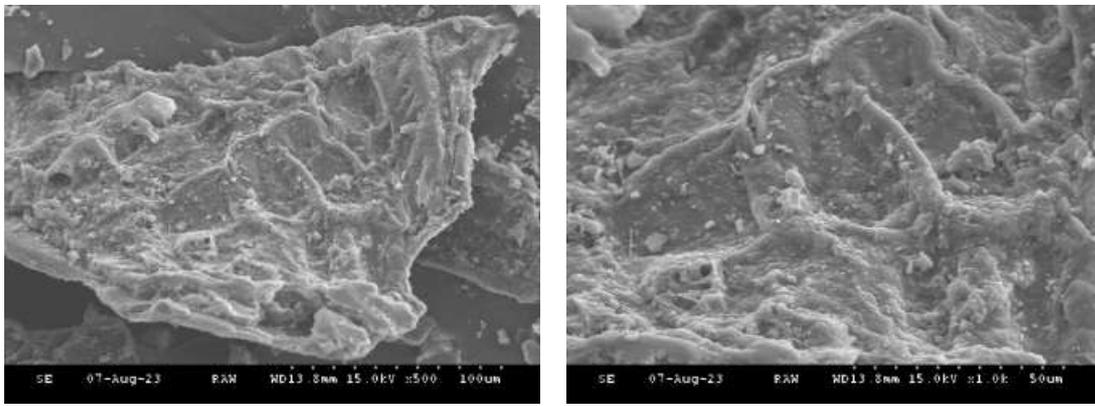
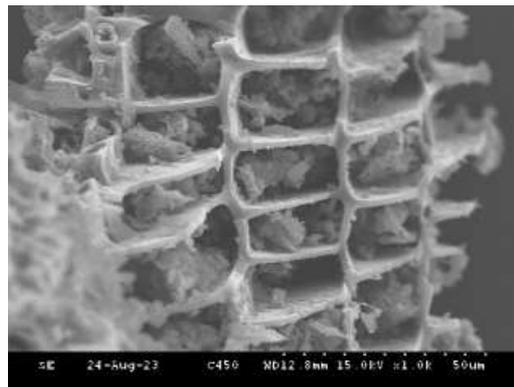
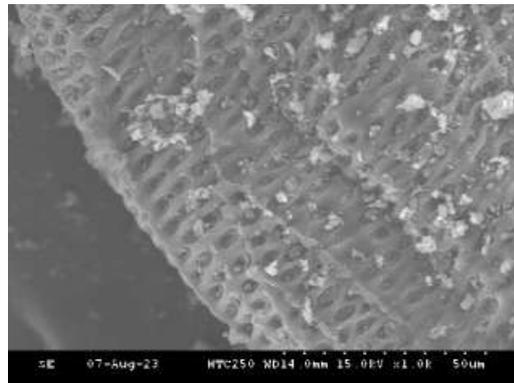


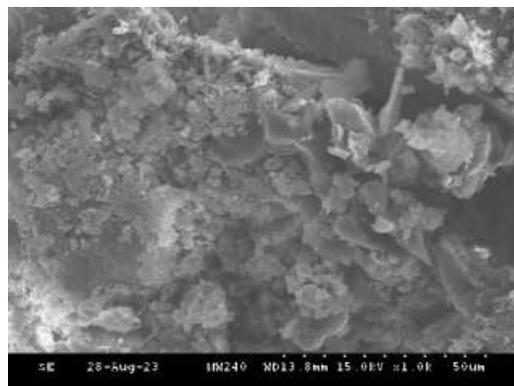
그림 5-31. 버섯폐배지 원시료의 SEM



a. 일반탄화

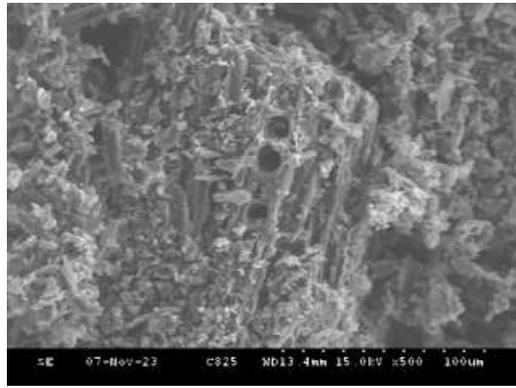


b. 수열탄화

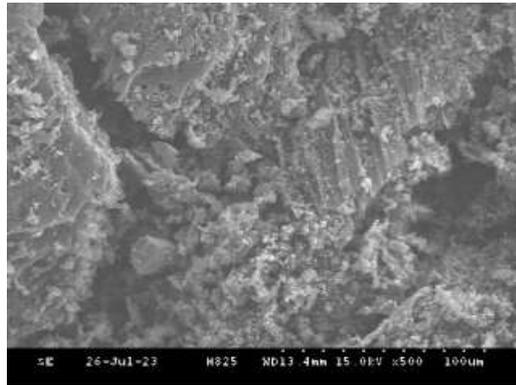


c. 마이크로웨이브

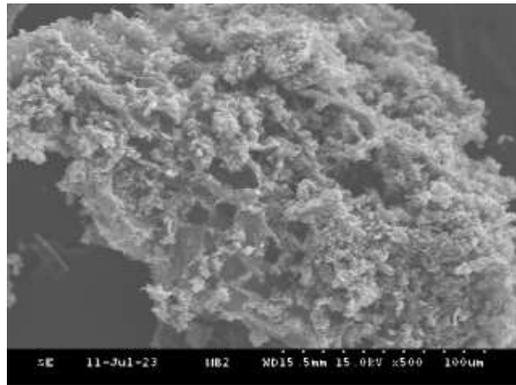
그림 5-32. 반응기별 버섯폐배지 Biochar의 SEM 분석 결과



a. 일반탄화



b. 수열탄화



c. 마이크로웨이브

그림 5-33. 가스화 이후 반응기별 버섯폐배지 Biochar의 SEM 분석 결과

6. Biochar 흡착 실험

6-1. 흡착 실험 방법

- 탄화 이후 생성된 Biochar를 흡착제로 사용하기 위한 가능성을 알아보기 위해 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 흡착 실험을 진행함. 농도 변화에 따른 흡착 능력을 확인하기 위해 농도에 변화를 주어 흡착 실험을 진행하였으며 10, 20, 40, 100ppm의 조건에서 실험을 수행하였음. 실험에는 원시료와 수열탄화 250°C, 일반탄화 300°C 그리고 일반탄화 300°C Biochar를 이용하여 800°C에서 가스화를 진행한 후 생성된 Biochar를 사용함. 흡착 실험은 NH_4Cl 을 이용하여 각 농도에 맞게 $\text{NH}_4\text{-N}$ 용액을 제조한 뒤 바이오차 1g을 넣은 코니컬튜브에 100ml를 주입한 뒤 25°C에서 150rpm으로 24시간 동안 진탕하였음. 24시간이 지난 후 고체와 액체를 분리하고 분리된 액체를 HACH (DR6000, HACH, USA)를 이용하여 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도를 측정하였음. HACH를 통해 측정된 농도를 이용하여 암모늄 이온의 흡착량과 제거효율을 계산함.

6-2. 흡착 실험 결과

- 그림 5-34와 5-35는 각각 농도에 따른 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 흡착량과 제거효율에 대해 나타낸 그래프임. $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도가 높아질수록 더 많은 양의 흡착이 이루어지는 것을 확인할 수 있으며 100ppm에서 가장 높은 흡착량을 보였음. 제거효율 또한 농도가 증가할수록 효율이 증가하는 추세를 보였으며 10mg/L 기준 원시료가 42.67%로 가장 낮은 효율을 보였으며 탄화 이후 Biochar를 비교하였을 때 수열탄화가 73%로 가장 높았으며 그 다음으로 일반탄화, 가스화 순으로 각각 71.00%, 56.33%를 나타내었음.

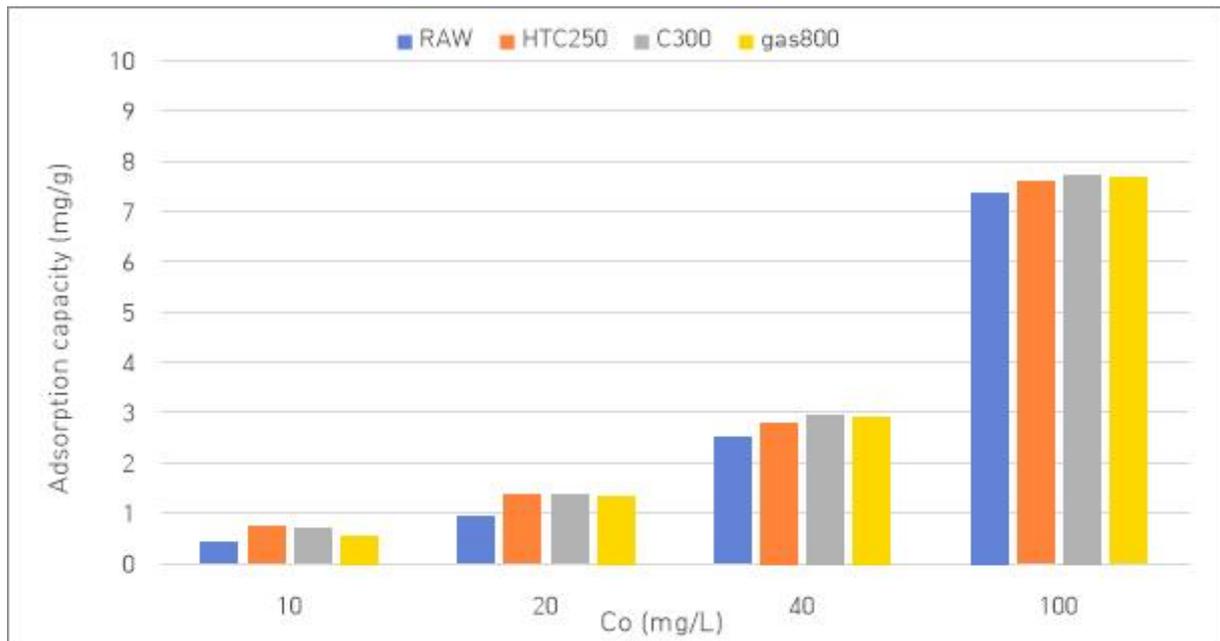


그림 5-34. $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도에 따른 Biochar의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 흡착량

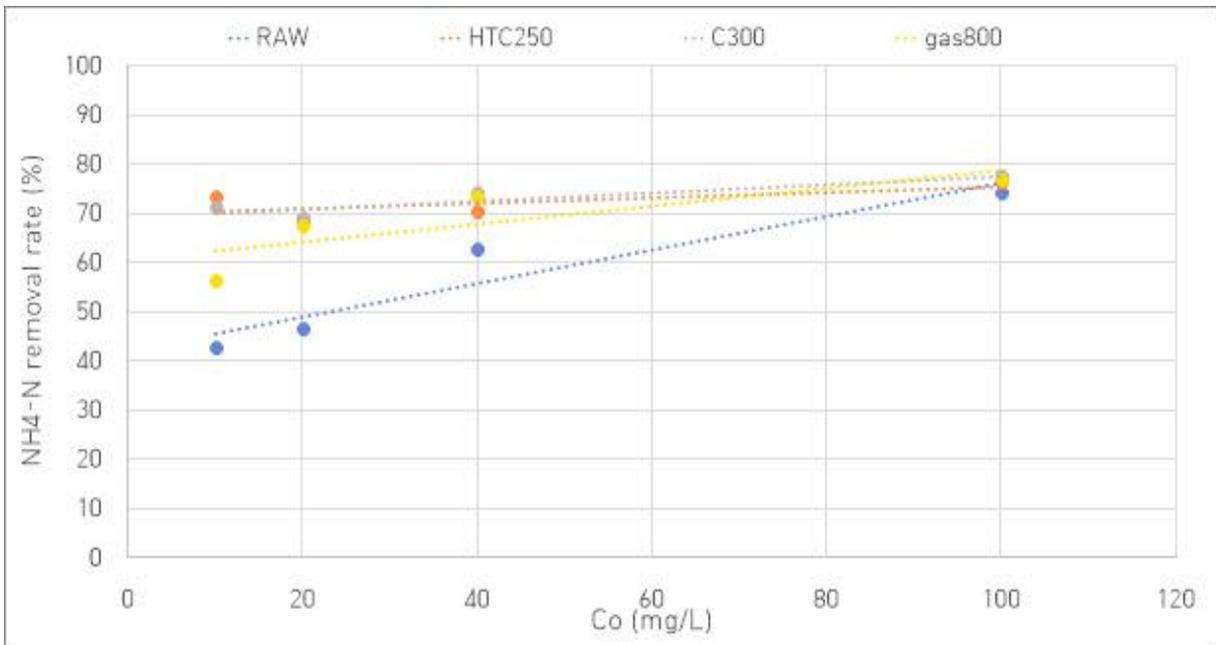


그림 5-35. NH₄-N 농도에 따른 Biochar의 NH₄-N 제거효율

- NH₄-N의 흡착능력을 평가하기 위해 Langmuir 흡착등온식을 적용하여 그림 5-36에 나타내었으며 식을 이용하여 산출한 q_m과 b, R_L을 구하여 아래의 표 6에 나타내었음. 최대 단분자층 흡착량 (q_m)은 수열탄화 250°C에서 27.21mg/g으로 가장 높았으며 그 다음으로는 일반탄화가 높은 값을 나타내었음. 흡착 친화도인 b 값은 대부분 비슷한 값을 나타내었으며 가스화 Biochar가 0.05L/mg으로 가장 높고 수열탄화와 일반탄화가 0.01L/mg으로 가장 낮았음.
- 무차원 상수인 R_L 값은 0.17~0.91 사이로 0~1의 범위에 포함되기 때문에 흡착에 효과적인 것으로 보임.

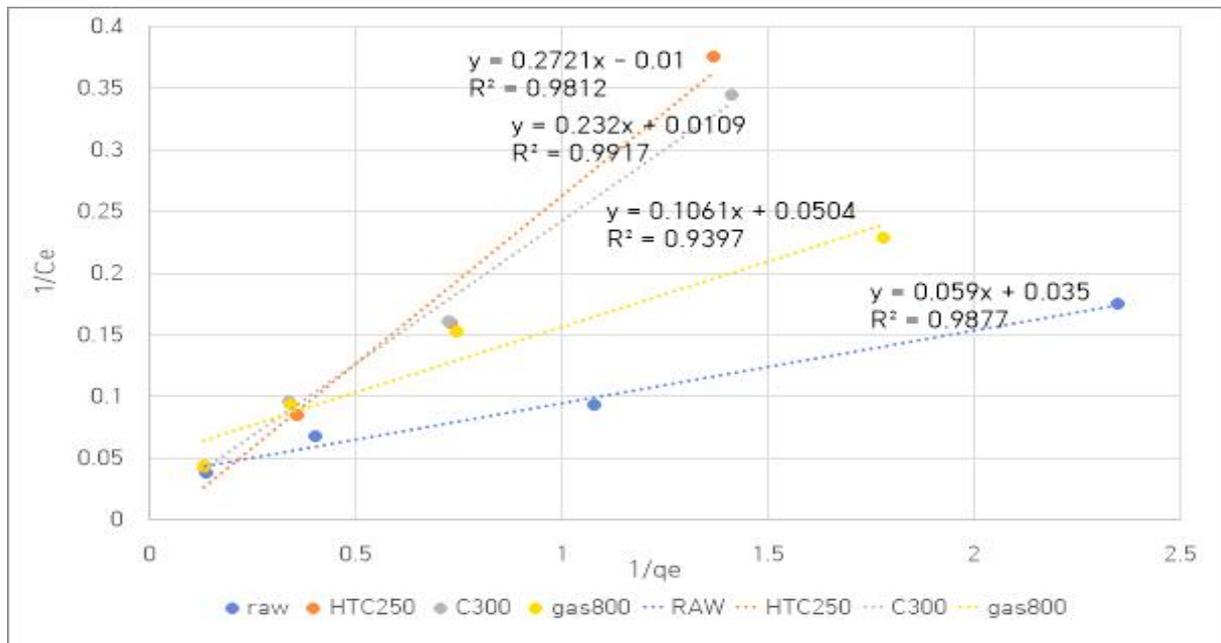


그림 5-36. Langmuir 흡착등온식을 적용한 탄화 온도별 직선식

표 5-16. NH₄-N 농도에 따른 Langmuir isotherm parameters.

Temp.	q _m (mg/g)	b (L/mg)	r ²	R _L			
				NH ₄ -N Concentration			
				10	20	40	100
RAW	1.69	0.04	0.99	0.74	0.59	0.42	0.22
HTC250	27.21	0.01	0.98	0.91	0.83	0.71	0.50
C300	21.28	0.01	0.99	0.90	0.82	0.70	0.48
gas800	2.11	0.05	0.94	0.67	0.50	0.33	0.17

6. 사업화 추진 계획

(1) 사업화 전략

○ 사업화 개발로드맵

- 주관연구기관인 BHI사에서는 연구 개발되는 연료전지 시스템 어플리케이션의 전력소비 용량에 따라 목표 고객 군을 선정하였으며, 용량 및 설치장소에 따라 스마트팜 온실, 건물용, 발전용으로 구분하여 설정함

표 사업화 개발로드맵

타겟 시장	제품 규모 (적용 규모)	적용 고객
스마트팜 온실 ¹⁾	3 kW급 (10평)	고기능성 식물공장(인삼 등), 컨테이너재배(버섯 등)
	6 kW급 (50평)	식물공장(육묘장 등), 소형 온실 및 시설원에
	12 kW급 (100평)	중형 시설원에
	150 kW급 (1000평)	대형 시설원에
건물용 ²⁾	3 kW급	레스토랑, 카페, 편의점 등
	12 kW급	공공건물, 학교, 일반건물 등
	150 kW급	아파트, 병원, 정부청사 등
발전용 ³⁾	150 kW급	발전사업자, 집단에너지사업자

¹⁾ 시설 온실의 크기에 따라 제품을 제공

²⁾ 단독상가, 다세대주택, 공공건물 등의 중소 용량 제품을 제공

³⁾ 150 kW급 이상의 중대형 용량의 발전사업자에게 제품을 제공

표 목표 고객 선정 사유 및 대응방안 전략

구분	선정 사유	제품에 대한 고객 요구 사항/수준	고객 요구사항에 대한 대응방안
스마트팜 온실	<ul style="list-style-type: none"> · 시설원에 난방연료의 약 89%는 유류 난방에 의존하고 있으며 시설원에 작물재배에 경영비중 난방비의 차지하는 비율은 30-40% 농가경영 악화 원인이 되고 있음 · 농어업용 면세유 제도 일몰기한은 '21년 12월31일 임박 · 정부의 2050년 탄소 중립 선언에 맞춰, 농업 분야에서도 저탄소화 압박 받고 있음 	<ul style="list-style-type: none"> · 온실시설 용량 및 농산품 종류에 따른 시스템 커스터마이징 필요 · 농산품 생육에 긍정적인 효과로 소득증대 기대 · 온실 내 냉난방비 절감 · 높은 내구성 및 가동률을 보증해야 함 · 신속한 AS 대응 및 정기적 예방정비 필요 	<ul style="list-style-type: none"> · 단위모듈 확장을 통한 시스템 용량 다변화 · 농산부산물 연료화를 통해 연료전지 운영비에 높은 비중을 차지하는 연료비 절감이 가능(표 18 고행연료 현황 참조) · 단위모듈~통합모듈 Data 모니터링 및 제어서비스 제공 · 정지점검 및 유지보수 실시 · 배가스의 CO₂를 이용 재배식물 생산성 향상
건물용	<ul style="list-style-type: none"> · 현재 정부의 정책 사업에 의해 시장이 형성되어 있으며 기존의 1세대 연료전지의 보급으로 인하여 신규 진입은 어렵지만 차세대 연료전지인 SOFC 시스템의 보급률을 올릴 수 있다는 장점과 발전효율이 중요한 구매 요인으로 작용하는 고객(편의점, 공공건물 등)을 점유할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> · 실내설치조건에 부합해야 하며 가동률 보증해야 함 · 높은 내구성 필요 · 신속한 AS 대응 및 정기적 예방정비 필요 	<ul style="list-style-type: none"> · 모듈형 시스템 도입 및 기본 가동률 담보 · 자동제어 로직 탑재를 통한 비상시 시스템 보호 · 실시간 모니터링 및 원격제어 서비스 제공
발전용	<ul style="list-style-type: none"> · HPS 정책에 의해 안정적인 수요처가 확보되어 있으며 연료전지 전용 도시가스 요금제가 신설됨에 따라 높은 경제성을 가능 · 정부 수소경제 활성화 로드맵에 의해 발전용 시스템의 내수시장을 선점할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> · 발전소 시스템에서 대형 용량이 요구됨 · 통합제어를 통한 용량 다변화가 가능해야 함 · 시스템 내구성 담보 필요 · 높은 경제성 요구 	<ul style="list-style-type: none"> · 단위모듈 확장을 통한 시스템 용량 다변화 · 단위모듈~통합모듈 Data 모니터링 및 제어 서비스 제공 · 정지점검 및 유지보수 실시 · 전기판매 뿐만 아니라 열판매를 통한 수익률 증대

구분	지속적 운영을 위한 고품연료(농산부산물) 연료수급 여부 검토																																												
스마트팜 온실용 탄소연료전지	<p>○ 연료수급이 쉬운 농산부산물 검토: 수경재배용 코이어 배지, 버섯 폐톱밥배지</p> <ul style="list-style-type: none"> 수경재배용 코이어 배지(코코넛)는 대부분 사용한 후 방치, 소각처리 하고 있음 <ul style="list-style-type: none"> 국내의 시설원예의 발달로 수경재배 농가가 증가하고 있음 또한 본 개발시스템에 축분도 연료로 활용이 가능할 것으로 판단됨 <p style="text-align: center;">수경재배용 코이어 배지 면적</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>년도</th> <th>수경재배용 코이어 배지 면적</th> <th>출처</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2015년</td> <td>918 ha</td> <td>농림축산식품부</td> </tr> <tr> <td>2016년</td> <td>1,145 ha</td> <td>농사백과</td> </tr> <tr> <td>2017년</td> <td>1,339 ha</td> <td>월간원예</td> </tr> <tr> <td>2018년</td> <td>1,568 ha</td> <td>통계청</td> </tr> </tbody> </table> <p>참고문헌: 월간원예, 2019</p> <ul style="list-style-type: none"> 표고버섯 폐톱밥배지는 연간 2,530만 개로 일부 사료와 퇴비 활용되고 대부분 소각처리되고 있어 탄소기반연료전지의 연료로 수급성이 좋음 <ul style="list-style-type: none"> 버섯 톱밥배지 재배는 생산효율이 높은 방식으로 농가에서 선호가 높음 <p style="text-align: center;">표고버섯 재배농가 현황(출처: 통계청, 농림어업총조사)</p> <p style="text-align: right;">(단위: 가구)</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>구분</th> <th>2010</th> <th>2015</th> <th>CAGR</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>노지</td> <td>1,376</td> <td>2,595</td> <td>17.2%</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">시설</td> <td>톱밥배지</td> <td>855</td> <td>28.1%</td> </tr> <tr> <td>원목</td> <td>2,307</td> <td>-1.0%</td> </tr> <tr> <td>합</td> <td>4,001</td> <td>5,662</td> <td>9.1%</td> </tr> </tbody> </table> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="text-align: center;">  <p>그림 코이어 배지</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>그림 톱밥 배지</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">폐톱밥배지 연간 수량</p> <p style="text-align: right;">(단위: 개)</p> <table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>구분</th> <th>2015</th> <th>2018</th> <th>비교</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>폐톱밥배지</td> <td>21,057,644</td> <td>25,293,537</td> <td>생표고 생산 성장률 6.3%로 추산</td> </tr> </tbody> </table>			년도	수경재배용 코이어 배지 면적	출처	2015년	918 ha	농림축산식품부	2016년	1,145 ha	농사백과	2017년	1,339 ha	월간원예	2018년	1,568 ha	통계청	구분	2010	2015	CAGR	노지	1,376	2,595	17.2%	시설	톱밥배지	855	28.1%	원목	2,307	-1.0%	합	4,001	5,662	9.1%	구분	2015	2018	비교	폐톱밥배지	21,057,644	25,293,537	생표고 생산 성장률 6.3%로 추산
	년도	수경재배용 코이어 배지 면적	출처																																										
	2015년	918 ha	농림축산식품부																																										
	2016년	1,145 ha	농사백과																																										
	2017년	1,339 ha	월간원예																																										
	2018년	1,568 ha	통계청																																										
	구분	2010	2015	CAGR																																									
	노지	1,376	2,595	17.2%																																									
	시설	톱밥배지	855	28.1%																																									
		원목	2,307	-1.0%																																									
합	4,001	5,662	9.1%																																										
구분	2015	2018	비교																																										
폐톱밥배지	21,057,644	25,293,537	생표고 생산 성장률 6.3%로 추산																																										

표 BHI사의 판매 전략 로드맵

판매 전략 로드맵									
연료전지	활동	연도							
		2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
스마트팜 온실	개발 및 실증	■	■						
	실증판매 (10대)			■					
	국내시장 진입				■	■	■	■	■
	해외시장 진입						■	■	■
건물용	개발/인증	■	■						
	실증판매 (10대)			■					
	국내시장 진입				■	■	■	■	■
	해외시장 진입						■	■	■
발전용	개발	■	■	■	■	■			
	실증판매 (10대)						■		
	국내시장 진입							■	■
	해외시장 진입								■
*BHI 2단계*2%규모 설치 사업	실증시험 (10대)						■	■	■
	*2%규모 설치							■	
	*5%규모 설치								■

*BHI(비에이치아이(주))는 발전용 연료전지 사업을 진행하고 있음.
 ○ 1단계 : 2021 ~ 2022(해외 연료전지 사용 발전사업 ; REC판매 사업)
 → 진행 중
 → 발전용량 : SOFC 20 MW급
 ○ 2단계 : 2028 ~ (국내 연료전지 사용 발전사업 ; 과제 개발제품 활용 계획)
 → 진행 예정
 → 발전용량 : SOFC 40 MW급
 → 10% 규모 설치 : 4 MW 용량 기준 (2029 판매목표 대수의 약 4.7%)
 → 20% 규모 설치 : 8 MW 용량 기준 (2030 판매목표 대수의 약 10%)

○ 제품홍보, 판로확보, 판매전략 등의 사업화 추진전략

- 제품홍보 방안

· 전시회

- 전시회는 바이어들이 집약된 공간으로 면대면 마케팅을 위한 최적지임
- 전시회를 통하여 구매 결정을 구체화할 수 있는 정보를 제공
- 자사 제품의 영업 단계를 단축시킬 수 있음

- 판로확보 방안

· 규제시장

- 정부 정책 중 공공건물 신재생에너지설치 의무화제도로 인하여 1,000 m² 이상의 건축물에 대해 총 에너지 사용량의 24%이상을 신재생에너지로 공급해야함

: 연료전지는 타 신재생에너지에 비해 동일면적 대비 높은 가동율과 효율을 보유하고 있어 각

광받고 있음

: 조달청 나라장터를 이용하여 신축, 증축 또는 개축하는 건물에 건물용 SOFC 시스템을 공급할 예정임

· 민간시장

- 초기 규제시장 진입을 통하여 자사 제품의 인지도를 향상

- 신재생에너지 공급인증서(HPS)를 이용한 발전사업자에게 시스템 공급 예정

: 자가소비를 위한 발전 및 잉여전력을 판매할 수 있도록 계통-연계형의 시스템 공급

- 판매전략

· 시설원에 스마트팜 시장에 진입하기 위해 현재 조성중인 경남스마트팜혁신밸리 실증단지에서 실증실험을 통해 성능 및 안전성 검증하여 제품성 확보

· 다만, 현재까지 농업용 연료전지 보급에 대한 정책적 지원이 없고 기술에 대한 수요자의 인식 수준이 낮아 바로 사업을 추진하기에 어려움이 있어 시장 진입이 우선 가능한 건물용 및 발전용 분야에서 제품을 출시

· 비에이치아이 발전용 연료전지 사업을 통한 내수시장 진입 및 Track record 확보

구분	1단계 (`21~`26)		2단계 (`27~)
사업	소형 스마트팜 / 건물용	대단위 스마트팜 / 분산 발전용 (REC 판매)	대단위 스마트팜 연계 발전사업 (과제 개발품 활용, HPS)
내용	<ul style="list-style-type: none"> 발전 용량: SOFC(4kW) 일정: `21~`23 부지: 밀양 스마트팜 혁신 밸리 장비조달계획 BHI, IAE 	<ul style="list-style-type: none"> 발전용량 : SOFC 20 MW 부지 : BHI 모로공장(1,800평) 장비조달 계획 : SK-블룸에너지(美) 진행사항 - 발전사업 허가완료(산업부) - 남동발전 사업참여 SPFC 설립 	<ul style="list-style-type: none"> 발전용량 : SOFC 40 MW 부지 : BHI 장지본사 (10만 평) 장비조달계획 : 개발 연료전지 해외시장 진입로 확보
연구 / 투자	<ul style="list-style-type: none"> 스마트팜 연료전지 개발(`21~`23) 		<ul style="list-style-type: none"> 신뢰성 확보 및 대량생산체제 구축
설치 장소			

○ 비에이치아이 함안모로연료전지 발전사업

- 건설타당성조사 보고서(한국전력기술(주), 2018.07)

- 남동발전발전사업 참여의향서(18.10.08)

- 발전사업 허가(산업부, 18.10.17)

한국남동발전주식회사	산업통상자원부	건설타당성조사 보고서 (함안모로 연료전지 발전소)
		

(2) 투자 계획

○ 예상 판매에 따른 투자 계획

항목		(2027년) 개발 종료 후 3년	(2028년) 개발 종료 후 4년	(2029년) 개발 종료 후 5년
예상 매출액		102억	1,011억	1,487억
자본적 지출	토지		-	-
	건물/건축물	150억	-	-
	기계장치등	100억	300억	300억
자본적지출 합계		250억	300억	300억

- '27년 기준에 맞춰 설비 구축계획이며, 수소경제 활성화 로드맵 내 내수 보급량에 따른 연간 점유율 '28 2%, '29년 3%로 산정
- 기계장치 등 생산설비는 연차별 점유율에 따라 증설

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

< 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	1단계 (2021~2022)	2단계 (2023~202Y)	
1 연료전지 발전효율	%	20	Bloom energy (미국)	59	45	≥45	≥55	KS C 8569:2020
2 열병합발전 종합효율	%	20	HITACHI (일본)	89	-	-	≥85	KS C 8569:2020
3 연속운전일수	일	15	-	-	-	-	≥30	업체류 성장기준
4 단위모듈 간 성능편차	%	10	-	5	5	≤10	≤5	시장요구 기준(RFP)
5 고행연료 냉가스효율	%	10	스웨덴/Foster Wheeler	60	50	≥50	≥60	시장요구 기준(RFP)
6 Energy densification	-	10	독일/Biolake	1.2~1.4	-	1.1	1.2	시장요구 기준(RFP)
7 반탄화 고체연료 생산량	kg/ day	10	-	-	-	-	360	시장요구 기준(RFP)
8 스마트팜 에너지절감	%	15	-	-	-	≥50	≥60	시장요구 기준(RFP)

* 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.

추진 목표	달성 내용	달성도 (%)
연료전지 발전효율	55.0% 달성 (p.37 그림 1-52 참조) 탄소연료전지 시스템 발전량 대비 인입합성가스발열량 발전효율(%) = $\frac{\text{발전량}(kW)}{\text{인입합성가스발열량}(kcal/h)} \times 100$	100
열병합발전 종합효율	92.4% 달성 (p.37 그림 1-52 참조) 탄소연료전지 시스템 발전량 및 열에너지활용량 합계 대비 인입합성가스발열량 종합효율(%) = $\frac{\text{발전량}(kW) + \text{열에너지활용량}(kcal/h)}{\text{인입합성가스발열량}(kcal/h)} \times 100$	100
연속운전일수	32.3일(776hr) 실증 운전 연속운전일수 달성 (p.42 그림 1-63 참조)	100
단위모듈 간 성능편차	2.2% 달성 (p.34 그림 1-46 참조) 성능편차(%) = $\frac{ \text{모듈(1)성능}(\%) - \text{모듈(2)성능}(\%) }{\text{모듈간평균성능}(\%)} \times 100$	100
고행연료 냉가스효율	64.01% 달성 (p.83) 생산된 합성가스 발열량 대비 투입된 반탄화연료 냉가스 효율 냉가스효율(%) = $\frac{\text{합성가스발열량}(kcal/h)}{\text{투입연료발열량}(kcal/h)} \times 100$	100
Energy densification	1.49 달성 (p.83) 농산부산물 활용 반탄화 고체 생성물의 Energy densification $E_D = \frac{\text{반탄화연료 발열량}}{\text{feedstock(EFB) 발열량}}$	100
반탄화 고체연료 생산량	372 kg/day 달성 (p.83) 하루에 생산된 반탄화 고체연료 무게	100
스마트팜 에너지절감	81% 달성 (p.167 그림 3-40 참조) 탄소연료전지 발전시스템 이용 온실 10a 기준 에너지 비용 절감 달성 에너지절감율(%) = $\frac{\text{기존경유소비열량} - \text{시스템적용소비열량}(kcal/h)}{\text{기존경유소비열량}(kcal/h)} \times 100$	100

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

< 정량적 연구개발성과표 >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명		연도	1단계 (2021~2022)	2단계 (2023)	계	가중치 (%)	
전담기관 등록·기탁 지표 ¹⁾	특허출원	목표(단계별)	8	2	10	10	
		실적(누적)	9.5	1.5	11		
	특허등록	목표(단계별)	3	3	6	15	
		실적(누적)	4	3	7		
	논문SCI	목표(단계별)	7	3	10	-	
		실적(누적)	6	5	11		
	논문평균IF	목표(단계별)	3	3	3	10	
		실적(누적)	4.27	6.17	10.44		
	논문비SCI	목표(단계별)		1	1	-	
		실적(누적)	1	3	4		
	학술발표	목표(단계별)	12	6	18	5	
		실적(누적)	23	7	30		
	연구개발과제 특성 반영 지표 ²⁾	기술이전	목표(단계별)	2	1	3	10
			실적(누적)	2		2	
기술료		목표(단계별)	6,000	4,000	10,000	10	
		실적(누적)	8,000		8,000		
매출액		목표(단계별)	100,000	100,000	200,000	20	
		실적(누적)	194,000		194,000		
고용창출		목표(단계별)	3	1	4	15	
		실적(누적)	4	1	5		
홍보전시		목표(단계별)	1	1	2	5	
		실적(누적)	1	1	2		
계							

* 1) 전담기관 등록·기탁 지표: 논문[에스시아이 Expanded(SCIE), 비SCIE, 평균Impact Factor(IF)], 특허, 보고서원문, 연구시설·장비, 기술요약정보, 저작권(소프트웨어, 서적 등), 생명자원(생명정보, 생물자원), 표준화(국내, 국제), 화합물, 신물질 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).

- (1) 주관연구개발기관(비에이치아이(주)): 특허출원 2건, 특허 등록 2건, 매출액 194,000 천원, 고용창출 4건, 홍보전시 2건
- (2) 공동연구개발기관(고등기술연구원연구조합): 특허출원 6건, 등록 5건, 논문 SCI(E) 1건, 비SCI 3건, 학술발표 7건, 기술실시(기술이전) 2건, 기술실시 기술료 8백만 원, 학술발표 7건
- (3) 공동연구개발기관(부산대학교 산학협력단): 특허출원 1건, 논문 SCI 1건, 학술발표 2건
- (4) 위탁연구개발기관(서울대학교 산학협력단): 특허출원 1건, 논문 SCI 4건, 학술발표 13건
- (5) 위탁연구개발기관(대구대학교 산학협력단): 논문 SCI 5건, 비 SCI 1건, 학술발표 11건

(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	바이오매스 활용 연료전지 열병합발전시스템을 위한 연료화 공정	Appl. Chem. Eng	홍기훈 외 2인	4	대한민국	한국공업화학회	비SCIE	2022.08.10	1225-0112	100
2	The Temperature effect on the production of liquid and solid fuel via wood pellet torrefaction	Korean J. Chem. Eng.	박철우 외 3인	40	대한민국	한국화학공학회	SCIE	2023.02.10	0256-1115	100
3	The Impact of Fasciation on Maize Inflorescence Architecture	Journal of Plant Biology	Da Eun Kim, Yu Mi Kang	65	대한민국	한국식물학회	SCIE	2022.01.04	1226-9239	100
4	Effect of nanostructured grains in co-sputtered Ni-GDC thin-film anode on methane conversion kinetics for low temperature solid oxide fuel cells operating on nearly dry methane	Ceramics International	In Won Choi	48	영국	Elsevier Sci. Ltd.	SCIE	2021.11.11	1873-3956	25%
5	Effect of Ni-GDC Anode Thickness by Co-Sputtering on the High-performance Thin Film Solid Oxide Fuel Cells on a Nanoporous Substrate for Low-Temperature Operation	Journal of Power Sources	Myung Seok Lee	555	네덜란드	Elsevier Sci. Ltd.	SCIE	2022.11.06	0378-7753	50%
6	Enhanced hydrogen production from anaerobically digested sludge using microwave assisted pyrolysis	Fuel	김대기	15	영국	Elsvier	SCIE	2022.04.01	0016-2361	100%
7	Enhancement of the Biofuel Characteristics of Empty Fruit Bunches through Hydrothermal Carbonization by Decreasing the Inorganic Matters	Energies	류도윤, 장계환, 이종욱, 김대기	15(21)	스위스	MDPI	SCIE	2022.11.01	1996-1073	100%
8	Influence of Different Pretreatment Methods and Conditions on the Anaerobic Digestion Efficiency of Spent Mushroom Substrate	Sustainability	이종근, 류도윤, 장계환, 이종욱, 김대기	14	스위스	MDPI	SCIE	2022.11.28	2071-1050	100
9	농산부산물 기반 SOFC 열병합발전 시스템 열교환망 최적화	한국가스학회	홍기훈 외 3명	28(1)	대한민국	한국가스학회	비SCIE	2023.12.27	1226-8402	100
10	Impact of Yttria-Stabilized Zirconia Contents in Nickel Cermet Anodes for Intermediate Temperature-Operated Syngas-Fueled Thin Film Solid Oxide Fuel Cells	International Journal of Hydrogen Energy	길다니엘 외 6명	57	영국	Elsevier Sci. Ltd.	SCIE	2024.01.19	0360-3199	100
11	Corrosion behavior of Ta and TiN double-layer-coated SUS316L for PEMFC bipolar plates using plasma-enhanced atomic layer deposition and magnetron sputtering	Journal of Alloys and Compounds	장유재 외 9명	977	네덜란드	Elsevier Sci. Ltd.	SCIE	2023.12.29	0925-8388	100

12	Grouping of Unused Agricultural By-product Biomass for Fuel Conversion in South Korea through Multivariate Analysis	Waste Management	주유진 외 5명	accepted	영국	Elsevier Sci. Ltd.	SCIE	2024.01.03	1879-2456	100
13	수단그라스 Biochar를 적용한 수중 암모니아성 질소(NH4-N) 흡착 특성	Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association	류도윤 외 2명	31	대한민국	한국폐기물자원순환학회	비SCIE	2023.06.14	1225-6498	100
14	Fuel-Flexible Anode Architecture for Solid Oxide Fuel Cells	공업화학	김환 외 1명	34	대한민국	공업화학	비SCIE	2023.03.20	1225-0112	100

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	한국정밀공학회 추계학술대회	김양재	2021.11.25	부산 BEXCO	대한민국
2	한국정밀공학회 추계학술대회	이명석	2021.11.25	부산 BEXCO	대한민국
3	한국정밀공학회 추계학술대회	장유재	2021.11.25	부산 BEXCO	대한민국
4	한국정밀공학회 추계학술대회	최인원	2021.11.25	부산 BEXCO	대한민국
5	한국정밀공학회 추계학술대회	황재원	2021.11.25	부산 BEXCO	대한민국
6	2021 추계 한국화학공학회	홍기훈	2021.10.28	광주 김대중컨벤션센터	대한민국
7	2021년 추계 한국가스학회	홍기훈	2021.11.26	대전 인터시티호텔	대한민국
8	6th Asian SOFC Symposium and Exhibition	곽현주	2021.11.08	제주 메종글래드제주	대한민국
9	한국폐기물자원순환학회	김대기, 류도윤, 주유진, 우선영	2021.12.02	엘리시안 강촌	대한민국
10	한국열환경공학회	김대기, 류도윤, 주유진, 우선영	2021.12.16	제주 그라벨 호텔	대한민국
11	한국화학공학회	홍기훈	2022.04.22	제주국제컨벤션센터	대한민국
12	한국가스학회	홍기훈	2022.05.27	제주 오리엔탈호텔	대한민국
13	한국정밀공학회 춘계학술대회	길다니엘	2022.05.12	라마다프라자제주호텔	대한민국
14	한국정밀공학회 춘계학술대회	김양재	2022.05.12	라마다프라자제주호텔	대한민국
15	한국정밀공학회 춘계학술대회	장유재	2022.05.12	라마다프라자제주호텔	대한민국
16	한국정밀공학회 춘계학술대회	정인영	2022.05.12	라마다프라자제주호텔	대한민국
17	제 19회 자원순환분야 젊은 연구자 학술연구발표회	우선영, 주유진, 임가희, 류도윤, 김대기	2022.07.07	이순신 리더십 국제센터	대한민국
18	2022년도 추계 한국폐기물자원순환학회	우선영, 주유진, 류도윤, 장계환, 이종욱, 김대기	2022.11.03	한국과학기술회관 사이언스 플라자/ 국제회의장	대한민국
19	2022년도 춘계 열환경공학회	류도윤, 주유진, 우선영, 장계환, 이종욱, 김대기	2022.06.16	대한상공회의소(서울)	대한민국
20	2022년도 춘계 유기성자원학회	우선영, 주유진, 류도윤, 김대기	2022.05.27	건국대학교 신공학관 B106	대한민국
21	2022년도 춘계 폐기물자원순환학회	우선영, 주유진, 류도윤, 김대기	2022.05.11	소노벨 제주	한국
22	2022 한국공업화학회 추계 총회 및 학술대회	홍기훈	2022.11.04	대전컨벤션센터	대한민국
23	2022 한국공업화학회 추계 총회 및 학술대회	박철우	2022.11.04	대전컨벤션센터	대한민국
24	2023년 한국생물환경조절학회	김현도	2023.04.20	롯데리조트 부여	대한민국
25	2023년 한국생물환경조절학회	김현도	2023.04.20	롯데리조트 부여	대한민국
26	한국정밀공학회 2023 춘계학술대회	길다니엘	2023.05.11	라마다프라자제주호텔	대한민국
27	한국정밀공학회 2023 춘계학술대회	김양재	2023.05.11	라마다프라자제주호텔	대한민국
28	한국정밀공학회 2023 춘계학술대회	정인영	2023.05.11	라마다프라자제주호텔	대한민국
29	한국정밀공학회 2023 춘계학술대회	황재원	2023.05.11	라마다프라자제주호텔	대한민국
30	27th Korea-Japan Joint International Session	류도윤	2023.05.18	한화리조트 현대	대한민국
31	한국환경에너지공학회 춘계학술대회 및 춘계총회	우선영	2023.06.15	한국과학기술회관	대한민국
32	제20회 자원순환분야 젊은 연구자 학술연구발표회	우선영	2023.06.29	인제스피디움	대한민국
33	제20회 자원순환분야 젊은 연구자 학술연구발표회	주유진	2023.06.29	인제스피디움	대한민국

[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	연료전지의 오프가스 연소 시스템	대한민국	곽현주 외 2인	21.08.31	10-2021-0115339		곽현주 외 2인	22.10.18	10-2457726	100	
2	통합형 바이오매스 반탄화 가스화 장치 및 가스화 방법	대한민국	장은석 외 2인	21.09.07	10-2021-0119320		장은석 외 2인	22.05.23	10-2402473	100	
3	스택 출구 백연저감 시스템	대한민국	비에이치 아이 주식회사	21.11.22	10-2021-0161652		비에이치 아이 주식회사	22.10.17	10-2457099	50	
4	스택 출구 백연저감 시스템	대한민국	비에이치 아이 주식회사	21.11.22	10-2021-0161653		비에이치 아이 주식회사	22.08.19	10-2435812	50	
5	고체 산화물 연료전지의 연료극, 고체산화물 연료 전지 및 고체 산화물 연료 전지의 제조 방법	대한민국	김한 외 1인	22.09.27	10-2022-0122398					100	
6	바이오매스 및 폐기물의 열화학적 전환을 통한 효율적인 연료전지 연료공급 방법	대한민국	홍기훈 외 1인	22.10.18	10-2022-0133957		고등연구원연구조합	23.07.11	10-2555778	100	
7	유해어종을 이용한 유기질 비료의 제조방법	대한민국	부산대학교 산학협력단	22.10.20	10-2022-0135943					100	
8	대면적 박막 전극을 적용한 전해질 지지체 기반 고체산화물 연료전지의 고온 실험 장치	대한민국	서울대학교 산학협력단/비에이치아이 주식회사	22.11.08	10-2022-0148123					100	
9	고체 산화물 연료 전지의 연료극, 고체산화물 연료전지 및 고체 산화물 연료 전지의 제조 방법	PCT (대한민국)	김한 외 1인	22.11.11	PCT/KR2022/017737					100	
10	스택 출구 백연저감 시스템	일본	비에이치 아이 주식회사	22.11.16	2022-183002						
11	작동 유체 가열 설비용 소음 방지 시스템	대한민국	비에이치 아이 주식회사	23.01.25	10-2023-0009428		비에이치 아이 주식회사	23.08.24	10-2571966	50	
12	고체 산화물 연료전지의 연료극, 고체산화물 연료 전지 및 고체 산화물 연료 전지의 제조 방법	대한민국	고등연구원연구조합	23.03.16	10-2023-0034587		고등연구원연구조합	23.04.20	10-2525346	100	

○ 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

[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	노하우	통합형 바이오매스 반탄화 가스화 장치 및 가스화 방법	고등기술연구원 연구조합	2022.10.31	4,000,000원	-
2	노하우	연료전지의 오프가스 연소 시스템	고등기술연구원 연구조합	2022.10.31	4,000,000원	-

* 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등

□ 사업화 투자실적

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

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식 ¹⁾	사업화 형태 ²⁾	지역 ³⁾	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (천원)		
1	자기실시	기존 제품 개선	국외	내부식성 에나멜 코팅(cool bundle 외 1건)	부식성 환경에서 사용되는 열교환기 제품에 적용	KC코트렐주식회사	-	194,052	2022	-

* 1) 기술이전 또는 자기실시

* 2) 신제품 개발, 기존 제품 개선, 신공정 개발, 기존 공정 개선 등

* 3) 국내 또는 국외

□ 매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(천원)		
내부식성 에나멜 코팅 (cool bundle 외 1건)	2022		194,052	194,052	-
합계			194,052	194,052	-

□ 사업화 계획 및 무역 수치 개선 효과

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

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)			합계
			2021년	2022년	2023년	
1	내부식성 에나멜 코팅	비에이치아이(주)	2	2	1	5
합계			2	2	1	5

□ 고용 효과

구분		고용 효과(명)	
고용 효과	개발 전	연구인력	7
		생산인력	5
	개발 후	연구인력	9
		생산인력	8

[사회적 성과]

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	기타	6 th Asian SOFC Symposium and Exhibition	6 th Asian SOFC Symposium and Exhibition 홍보	21.10.06
2	전시회	스마트팜코리아	SOFC System	23.06.08
3	전시회	제 10회 나노융합산업전	스마트팜 연료전지	23.09.21~22

[인프라 성과]

[그 밖의 성과](해당 시 작성합니다)

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

<참고 1> 연구성과 실적 증빙자료 예시

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

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

구분	대상	등록 및 기탁 범위
등록	논문	국내외 학술단체에서 발간하는 학술(대회)지에 수록된 학술 논문(전자원문 포함)
	특허	국내외에 출원 또는 등록된 특허정보
	보고서원문	연구개발 연차보고서, 단계보고서 및 최종보고서의 원문
	연구시설·장비	국가연구개발사업을 통하여 취득한 3천만 원 이상 (부가가치세, 부대비용 포함) 연구시설·장비 또는 공동활용이 가능한 모든 연구시설·장비
	기술요약정보	연차보고, 단계보고 및 최종보고가 완료된 연구개발성과의 기술을 요약한 정보
	생명자원 중 생명정보	서열·발현정보 등 유전체정보, 서열·구조·상호작용 등 단백질체정보, 유전자(DNA)칩·단백질칩 등 발현체 정보 및 그 밖의 생명정보
	소프트웨어	창작된 소프트웨어 및 등록에 필요한 관련 정보
기탁	표준	「국가표준기본법」 제3조에 따른 국가표준, 국제표준으로 채택된 공식 표준정보[소관 기술위원회 포함] 공식 국제표준화기구(ISO, IEC, ITU)가 공인한 단체 또는 사실표준화기구에서 채택한 표준정보를 포함한다]
	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 (%)
연료전지 발전효율	<p>55.0% 달성 (p.37 그림 1-52 참조)</p> <p>탄소연료전지 시스템 발전량 대비 인입합성가스발열량</p> $\text{발전효율}(\%) = \frac{\text{발전량}(kW)}{\text{인입합성가스 발열량}(kcal/h)} \times 100$	100
열병합발전 종합효율	<p>92.4% 달성 (p.37 그림 1-52 참조)</p> <p>탄소연료전지 시스템 발전량 및 열에너지활용량 합계 대비 인입합성가스발열량</p> $\text{종합효율}(\%) = \frac{\text{발전량}(kW) + \text{열에너지활용량}(kcal/h)}{\text{인입합성가스 발열량}(kcal/h)} \times 100$	100
연속운전일수	32.3일(776hr) 실증 운전 연속운전일수 달성 (p.42 그림 1-63 참조)	100
단위모듈 간 성능편차	<p>2.2% 달성 (p.34 그림 1-46 참조)</p> $\text{성능편차}(\%) = \frac{ \text{모듈(1)성능}(\%) - \text{모듈(2)성능}(\%) }{\text{모듈간평균성능}(\%)} \times 100$	100
고형연료 냉가스효율	<p>64.01% 달성 (p.83)</p> <p>생산된 합성가스 발열량 대비 투입된 반탄화연료 냉가스 효율</p> $\text{냉가스 효율}(\%) = \frac{\text{합성가스 발열량}(kcal/h)}{\text{투입연료 발열량}(kcal/h)} \times 100$	100
Energy densification	<p>1.49 달성 (p.83)</p> <p>농산부산물 활용 반탄화 고체 생성물의 Energy densification</p> $E_D = \frac{\text{반탄화연료 발열량}}{\text{feedstock(EFB) 발열량}}$	100
반탄화 고체연료 생산량	<p>372 kg/day 달성 (p.83)</p> <p>하루에 생산된 반탄화 고체연료 무게</p>	100
스마트팜 에너지절감	<p>81% 달성 (p.167 그림 3-40 참조)</p> <p>탄소연료전지 발전시스템 이용 온실 10a 기준 에너지 비용 절감 달성</p> $\text{에너지절감율}(\%) = \frac{\text{기존경유소비열량} - \text{시스템적용소비열량}(kcal/h)}{\text{기존경유소비열량}(kcal/h)} \times 100$	100

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성합니다)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

2) 자체 보완활동

3) 연구개발 과정의 성실성

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

< 연구개발성과 활용계획표(예시) >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내 매년 목표치
국외논문	SCIE	
	비SCIE	
	계	
국내논문	SCIE	
	비SCIE	
	계	
특허출원	국내	
	국외	
	계	
특허등록	국내	
	국외	
	계	
인력양성	학사	
	석사	
	박사	
	계	
사업화	상품출시	
	기술이전	
	공정개발	
제품개발	시제품개발	
성과홍보		
포상 및 수상실적		
정성적 성과 주요 내용		

< 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	별첨 자료
1. IRIS 등록 별첨자료	1) 자체평가의견서 2) 연구성과 활용계획서
2.스마트팜연구개발사업단 요청 별지자료	1) 사업화계획서 2) 실증 성과보고서 3) 빅데이터 플랫폼 연계 활용계획서
3.	1) 2)

자체평가의견서

1. 과제현황

		과제번호		421037-03	
사업구분	스마트팜 다부처 패키지 혁신기술 개발사업				
연구분야	스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발		과제구분	단위	
사업명	스마트팜다부처패키지혁신기술개발(R&D)사업			주관	
총괄과제	기재하지 않음		총괄책임자	기재하지 않음	
과제명	스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발		과제유형	개발	
연구개발기관	비에이치아이(주)		연구책임자	장계환	
연구기간 연구개발비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1차년도	2021.04.07. ~ 2021.12.31	900,000	261,600	1,161,600
	2차년도	2022.01.01. ~ 2022.12.31	1,150,000	287,400	1,437,400
	3차년도	2023.01.01. ~ 2023.12.31	1,150,000	308,700	1,458,700
	계	2021.04.07. ~ 2023.12.31	3,200,000	857,700	4,057,700
참여기업	고등기술연구원연구조합, 부산대학교, 서울대학교, 대구대학교				
상대국	-	상대국연구개발기관	-		

※ 총 연구기간이 5차년도 이상인 경우 셀을 추가하여 작성 요망

2. 평가일 : 2024.02.26

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
비에이치아이(주)	연구소장	장계환

4. 평가자(연구책임자) 확인 :

본인은 평가대상 과제에 대한 연구결과에 대하여 객관적으로 기술하였으며, 공정하게 평가하였음을 확약하며, 본 자료가 전문가 및 전문기관 평가 시에 기초자료로 활용되기를 바랍니다.

확약	
----	---

I. 연구개발실적

※ 다음 각 평가항목에 따라 자체평가한 등급 및 실적을 간략하게 기술(200자 이내)

1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

- 개발한 SOFC 연료전지는 55% 이상의 높은 발전효율과 폐열을 활용까지 계산할 경우 종합효율이 90%에 이를 정도로 제품 효율이 매우 높음.
- 밀양 스마트팜혁신밸리에 실증운전을 통해 제품의 신뢰성을 확인하고 용량 확장이 가능한 모듈 형태의 플랫폼으로 개발되어 대형온실에 적용한 가능하도록 설계됨.
- 미활용하는 농산부산물을 바이오매스 연료화를 통해 온실 10a기준 유류난방에 비해 운영비용을 약 81%을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 온실가스 약 8.8ton/Month의 저감되어 탄소배출권 판매도 가능함. 또한, 연료전지를 발전을 통해 정전 등의 사고에도 안전정 온실 운영이 가능할 뿐만 아니라 남는 매전(REC 가중치 1.9)을 통해 농가의 추가 수익을 확보를 통해 농가의 스마트팜 보급 확산을 유도할 수 있으며, 관련 연관 산업제품에 활용이 가능함.

2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

- 탄소연료전지 열병합 발전 시스템 적용으로 스마트팜 온실에서 난방 에너지 절감이 가능
- 개발품의 용량이 일반적인 농가 평수에 비해 작고 현재는 제품 가격이 경유 보일러에 비하여 너무 높아 당장 농가 보급 활성화 효과는 다소 제한적임.

3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

- 수급이 쉬운 농업부산물(수경재배용 코이어 배지, 버섯폐배지, 산림 등)에 대해 연료 사용이 가능하도록 개발되어 있어 다양한 농가에 적용이 가능함
- 외부 환경에 따른 돌발사고(정전, 강추위, 기온 상승) 대응이 가능한 시스템 개발을 통한 스마트팜 농가의 재배 안정성 확보가 가능함.
- 연료전지의 내구성과 가스화기의 안정적 연속 운전에 대한 장기 실증 추가 연구가 필요함
- 연료전지는 일반적으로 폐열을 사용하는 경우 경제성이 충분히 나오기 때문에 특히 중대규모 스마트팜에는 활용이 높을 것으로 판단됨.

4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

- 연구 난이도가 높은 반탄화 가스화에 대한 연구와 이런 탄소성분의 합성가스를 활용한 SOFC 연료전지에 대하여 각 components를 개발하고 실증까지 진행한 것은 부단한 연구수행 노력의 결과임.

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

- 특허: 국내출원 11건, 국내등록 7건, 해외출원 1건
- 기술실시 이전 계약 2건
- 사업화 매출액 194백만원
- 논문: SCI 10편(IF 10.44), 비SCI 4건, 학술발표 30건
- 홍보전시: 3건

II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가 (공인시험성적서)
연료전지 발전효율	20	100	- 양호 (연료전지 발전효율, 55% 이상 달성)
열병합발전 종합효율	20	100	- 양호 (스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 종합효율 85%이상 달성)
연속운전일수	15	100	- 양호 (스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 연속운전, 30일 이상 달성)
단위모듈 간 성능편차	10	100	- 양호 (연료전지 단위모듈 간 성능편차, 5% 이하 달성)
고형연료 냉가스효율	10	100	- 양호 (가스화 설비 고형연료 냉가스 효율 60% 이상 달성)
Energy densification	10	100	- 양호 (농산부산물 활용 반탄화 고체 생성물의 Energy densification 1.49 달성)
반탄화 고체연료 생산량	10	100	- 양호 (하루에 생산된 반탄화 고체연료 무게 372 kg/day 달성)
스마트팜 에너지절감	15	100	- 양호 (스마트팜 온실 에너지 절감(경유대비) 60% 이상 달성)
합계	100	100	

III. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

- 주요 연구 기술 목표 KPI에 대한 달성도와 특허, SCI 논문 등 정량적 기술성과는 매우 양호한 편임.
- 본 연구개발의 최종단계 기술성숙도는 TRL7으로 농부산물로 반탄화, 가스화로 통한 연료화, 음 연료전지 열병합 발전에 이라는 새로운 시도에 대하여 상용화 전단계에 로서의 원천적 기술 연구 결과는 양호함.
- 다만 농가에 실제 제품을 보급하기 위해서는 가스화기 연속성 운전 안정성, 연료전지는 내구성과 가격, 경제성에 대한 추가 연구가 필요함,

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

- 특이사항 없음

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 개발시스템의 대형 온실적용에 대한 실증 및 운전 신뢰성 확보, 사업화 방안 구체화
- 농산부산물 확장성을 고려한 가스화 및 연료전지 내구성 향상을 위한 요소기술 개발
- 다양한 연료확보를 위해 버섯폐배지 등 농산부산물 뿐만 아니라 목재, 축분 등도 고려

IV. 보안성 검토

o 없음(일반보안과제)

※ 보안성이 필요하다고 판단되는 경우 작성함.

1. 연구책임자의 의견

2. 연구개발기관 자체의 검토결과

연구성과 활용계획서

1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input type="checkbox"/> 자유응모과제 <input checked="" type="checkbox"/> 지정공모과제	분 야		
연구과제명	스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발			
주관연구개발기관	비에이치아이(주)		주관연구책임자	장계환
연구개발비	정부지원 연구개발비	기관부담연구개발비	기타	총연구개발비
	3,200,000,000	857,700,000	-	4,057,700,000
연구개발기간	2021.04.07. ~ 2023.12.31.			
주요활용유형	<input type="checkbox"/> 산업체이전 <input type="checkbox"/> 교육 및 지도 <input type="checkbox"/> 정책자료 <input checked="" type="checkbox"/> 기타(사업화) <input type="checkbox"/> 미활용 (사유:)			

2. 연구목표 대비 결과

당초목표	당초연구목표 대비 연구결과
① 스마트팜 적용 위한 탄소기반 연료전지 열병합발전 시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 연료전지 모듈화를 통한 4 kW급 고효율 연료전지 시스템 개발 및 사업화 방안 구체화 - 탄소연료전지 기반 열병합발전 운전 신뢰성 확보 및 적용방안 구체화 - 농산부산물 확장성을 고려한 가스화 및 연료전지 내구성 향상을 위한 요소기술 개발
② 사업화 대비 용량 탄력성 향상을 위한 설계 플랫폼 개발	<ul style="list-style-type: none"> - 20 kW급 연료전지 연계 대용량 열병합발전 시스템 설계 플랫폼 구축 - 실측자료 기반 통합시스템 설계 플랫폼 기술 구축 - 용량 다변화 위한 설계 플랫폼 기술 구축
③ 핵심 기술 목표 달성	<ul style="list-style-type: none"> - 연료전지 발전효율, 55% 이상 달성 - 스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 종합효율, 85% 이상 달성 - 스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 연속운전, 30일 이상 달성 - 연료전지 단위모듈 간 성능편차, 5% 이하 달성 - 가스화 설비 고품연료 냉가스 효율, 60% 이상 달성 - 스마트팜 온실 에너지 절감(경유대비), 60% 이상 달성

* 결과에 대한 의견 첨부 가능

3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표											연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화					표준 화		학술성과			교육지도	인력양성	정책 활용·홍보		기타 (타연구활용명)
	특허출원	특허등록	SW저작권	SMART	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출	투자유치	국내	국제	논문		논문평균IF			학술발표	정책 활용	
														SCI	비SCI						
단위	건	건	건	건	건	백만원	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	건	건	명	건	건	건	
가중치	10	15			10	10	20	15							10	5				5	
최종 목표	10	6			3	10	200	4						10	1	3	18			2	
1단계 실적	9.5	4			2	8	194	4						6	1	4.27	23			1	
2단계 실적	1.5	3						1						5	3	6.17	7			1	
달성률 (%)	110	116			67	80	97	125						110	400	348	167			100	

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

4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	탄소연료전지 시스템
②	농업부산물 반탄화 설비
③	반탄화 연료 가스화 설비

5. 연구결과별 기술적 수준

구분	핵심기술 수준					기술의 활용유형(복수표기 가능)				
	세계 최초	국내 최초	외국기술 복제	외국기술 소화·흡수	외국기술 개선·개량	특허 출원	산업체이전 (상품화)	현장으로 해결	정책 자료	기타
①의 기술										v
②의 기술										v
③의 기술										v

* 각 해당란에 v 표시

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	연료전지 내구성과 가격, 가스화기 연속 운전성 등 제품 보급을 위한 경제성 보원과 장기 실증에 대하여는 추가적인 연구가 필요함.
②의 기술	
③의 기술	

7. 연구종료 후 성과창출 계획

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표											연구기반지표								
	지식 재산권			기술 실시 (이전)		사업화				표준 화		학술성과				교육지 도	인력양 성	정책 활용·홍보		기타 (타연구활 용비)
	특 허 출 원	특 허 등 록	S W 저 작 권	S M A R T	건 수	기술 료	제 품 화	매 출 액	수 출 액	고 용 창 출	투 자 유 치	국 내	국 제	논 문				학 술 발 표	정 책 활 용	
														S C I	비 S C I	논 문 평 관 I F	정 책 활 용			홍 보 전 시
단위	건	건	건	건	건	백 만 원	백 만 원	백 만 원	명	백 만 원	건	건	건	건	건	명	건	건	건	
가중치	10	15			10	10	20		15					10	5				5	
최종목표	10	8			3	10	5,200		6					10	1	3	18		2	
연구기간내 달성실적	11	7			2	8	194		5					11	4	10.44	30		2	
연구종료후 성과창출 계획		1					5,000		1											

8. 연구결과의 기술이전조건(산업체이전 및 상품화연구결과에 한함)

핵심기술명 ¹⁾	통합형 바이오매스 반탄화 가스화 장치 및 가스화 방법		
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input checked="" type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	4,000천원
이전방식 ²⁾	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input checked="" type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타()		
이전소요기간	-	실용화예상시기 ³⁾	2028년
기술이전시 선행조건 ⁴⁾	별도 없음		

핵심기술명 ¹⁾	연료전지의 오프가스 연소 시스템		
이전형태	<input type="checkbox"/> 무상 <input checked="" type="checkbox"/> 유상	기술료 예정액	4,000천원
이전방식 ²⁾	<input type="checkbox"/> 소유권이전 <input checked="" type="checkbox"/> 전용실시권 <input type="checkbox"/> 통상실시권 <input type="checkbox"/> 협의결정 <input type="checkbox"/> 기타()		
이전소요기간	-	실용화예상시기 ³⁾	2028년
기술이전시 선행조건 ⁴⁾	별도 없음		

- 1) 핵심기술이 2개 이상일 경우에는 각 핵심기술별로 위의 표를 별도로 작성
- 2) 전용실시 : 특허권자가 그 발명에 대해 기간·장소 및 내용을 제한하여 다른 1인에게 독점적으로 허락한 권리
통상실시 : 특허권자가 그 발명에 대해 기간·장소 및 내용을 제한하여 제3자에게 중복적으로 허락한 권리
- 3) 실용화예상시기 : 상품화인 경우 상품의 최초 출시 시기, 공정개선인 경우 공정개선 완료시기 등
- 4) 기술 이전 시 선행요건 : 기술실시계약을 체결하기 위한 제반 사전협의사항(기술지도, 설비 및 장비 등 기술이전 전에 실시기업에서 갖추어야 할 조건을 기재)

사업화 계획서

연구개발과제명	스마트팜 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발			과제번호	421037-03		
주관연구개발기관	비에이치아이(주)			주관연구책임자	장계환		
공동연구개발기관	고등기술연구원연구조합, 부산대학교, 서울대학교, 대구대학교			공동연구책임자	엄성현, 김원준, 차석원, 김대기		
제품명	스마트팜용 탄소연료전지 기반 열병합발전 시스템			제품 형태	H/W	√	S/W
관련 선행기술	종류 (해당 시)	특허명 (등록번호)	특허1 10-2402473, 특허2 10-2457728				
		기술이전명	1. 통합형 바이오매스 탄산화 가스화 장치 및 가스화 방법 2. 연료전지의 오프가스 연소 시스템				
사업화 종류	구분	수입품 대체	신규시장 창출	√	기존 상품 개선		
	내용	농산부산물의 빈번화 가스화 연계 연료전지 열병합발전 시스템					
개발 제품 주요 경쟁력	목표 수요처	시장규모	연료전지 발전시장(2022년 1.5GW) 약 9조 연료전지 건물용시장(2022년 50MW) 약 0.5조 * 수소경제활성화 로드맵(2019.01)				
		기술개발 필요성	고유가 및 기후변화 대응 농업 에너지 공급 시스템 개발 필요성				
		목표 시장 예상 점유율	연료전지 건물용시장 500억 규모(10% 점유율)				
	기술 차별성	구분	비용 절감	연료비	기술 고도화		
	내용	이익 증대	매전	기타	온실가스감축		
			1. 농산부산물 연료화를 통한 연료비 절감 및 탄소배출권 판매 수익 2. 연료전지를 통한 발전(임여전력 매진) 및 온수생산(온실 난방 및 병방)				
타사 제품 비교	제품명	열풍기(통유)					
	단가						
예상 매출액 (백만원)	구분	2021	2022	2023	2024		
	연구개발계획서		100	100	500		
	매출액		194				
	수출액		-				
생산계획	생산능력	· 현재 20kW급 5대					
	양산 체계 구축 계획	· 2030년 까지 10MW급 생산시설 구축					
판매전략	판로확보 방안	· 시설원에 스마트팜 시장에 진입하기 위해 현재 조성중인 경남스마트팜혁신밸리 실증단지에서 실증실험을 통해 성능 및 안전성 검증하여 제품성 확보 · 다만, 현재까지 농업용 연료전지 보급에 대한 정책적 지원이 없고 기술에 대한 수요자의 인식수준이 낮아 바로 사업을 추진하기에 어려움이 있어 시장 진입이 우선 가능한 건물용 및 발전용 분야에서 제품을 출시					
	마케팅 전략	· 규제시장 - 정부 정책 중 공공건물 신재생에너지설치 의무화제도로 건축물에 대해 총 에너지 사용량의 24%이상을 신재생에너지로 공급해야함. 조달청 나라장터를 이용하여 신속, 중속 또는 개속하는 건물에 건물용 SOFC 시스템을 공급할 예정임 · 민간시장 - 초기 규제시장 진입을 통하여 자사 제품의 인지도를 향상 - 신재생에너지 공급인증서(HPS)를 이용한 발전사업자에게 시스템 공급 예정 · 자가소비를 위한 발전 및 잉여전력을 판매할 수 있도록 계통-연계형의 시스템 공급					
기타 부가설명							
· 통유난방(기준비닐온실)에 비해 난방비 81% 절감가능							

사업화 계획을 위와 같이 제출합니다.
2024년 02월 29일

주관연구개발기관 :
주관연구책임자 :

비에이치아이(주)
장계환



실증 성과보고서

연구개발과제명	스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발			과제번호	421037-03			
주관연구개발기관	비에이치아이(주)			주관연구책임자	장계환			
공동연구개발기관	고등기술연구원, 부산대학교, 서울대학교, 대구대학교			공동연구책임자	엄상현, 강정순, 차석원, 김대기			
실증개요	실증성과명	스마트팜용 열병합발전 연료전지 시스템			구분	H/W	√	S/W
	실증장소	제3자농장	해당	√	미해당	실증장소유형	스마트팜혁신밸리	√
		장소명	밀양스마트팜 혁신밸리				일반(법인)농가	
		실증면적(㎡)	33				정부출연·지자체	
		주소	경남 함안군 장백로 122				기타	
실증품목(종)		업체류(상추)						
실증조건	필수기자재	연료전지 기반 열병합발전 시스템, 가스화 시스템, 냉난방기, 오프가스 버너						
	기타필수조건	시스템 구동 및 작물 생육 환경 관리 위한 전력 및 부대 시설						
실증목적	구분	성과물 성능에 대한 검·인증	√	트랙레코드·실증데이터 확보				
		목표 환경 신뢰성·재현성 검증		제품서비스 시연(시범농가)				
	내용	스마트팜용 탄소연료전지 기반						
실증현황	활용기술	인공지능		빅데이터		사물인터넷		
		지능형로봇		신재생에너지	√	기타		
	수집데이터	환경데이터		생육데이터	√	제어데이터		
		경영데이터		기타		장비 운전 데이터		
내용	<ul style="list-style-type: none"> - 탄소기반 연료전지 열병합발전 시스템 개발 - 스마트팜 부산물 활용 탄소 연료화·이용 가스화 기술 개발 - 탄소연료전지 열병합발전 시스템 실증 실험 <ul style="list-style-type: none"> · 밀양스마트팜 혁신밸리 내 성능 실험 · 탄소 연료 발전기 난방 효율 경제성 분석 							
실증결과	내용	<ul style="list-style-type: none"> - 4kW급 열병합발전 연료전지 시스템 개발 - 부산물 활용 반탄화 & 가스화 시스템 개발 및 연료화 진행 - 탄소연료전지 열병합발전 시스템 실증 실험 <ul style="list-style-type: none"> · 밀양스마트팜 혁신밸리 30일 장기운전을 통한 Data 및 성적서 확보 · 실증 Data 활용 탄소연료전지 시스템 경제성 분석 · 사업화 관련 비즈니스 모델 정립 						

결과를 위와 같이 제출합니다.

2024 년 02 월 29 일

주관연구개발기관 :

비에이치아이(주)

주관연구책임자 :

장 계 환



스마트팜 R&D 빅데이터 플랫폼 연계/활용 계획서

연구개발 과제명	스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발			과제번호	421037-03		
주관연구 개발기관	비에이치아이(주)			주관연구 책임자	장계환		
기본 정보							
데이터 용량(MB)	정형	영상	음향	이미지	3D	분광 데이터	기타
	7.2265			18.1			
수집							
구분	양식명	유형	부류품목	용량	수집 시 작일	수집 종료일	등록일시 (예정)
1	상추 생육 데이터	정형	선형골드 토말린	0.0265	21.09.	21.11.	24.10.
2	연료전지 운전데이터 DB 구축	정형	선형골드 토말린	7.2	22.11.	23.12.	23.12.
3	상추 생육 이미지 DB 구축	이미지	선형골드 토말린	18.1	21.11.	24.01.	24.01.
분석							
정상 파일 수		타입오류		범위오류			
6		0		0			
모델							
구분	양식명	유형	운영체제	개발언어	라벨링 도구	성능지표/ 결과	등록일시 (예정)
1							
2							
활용							
구분	양식명	유형	대분류	사이트 URL	동영상 URL	등록일시 (예정)	
1	스마트팜(생육환경) 적용을 위한 탄소 기반 연료전지 열병합 발전시스템 운전 최적화 제어	장치 개발	제어	http://www.cheil.com	http://www.cheil.com	23.12.	
2							
기타 부가설명							
본 과제에서는 탄소 연료전지 시스템 개발을 통한 생육환경 및 장비 DB 구축으로 성과목표 항목을 설정하였으며, 이에 별도 모델은 구축되지 않아 등록 누락되었음.							

결과를 위와 같이 제출합니다.

2024 년 02 월 29 일

주관연구개발기관 : 비에이치아이(주)

주관연구책임자 : 장 계 환



주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부·과학기술정보통신부·농촌진흥청에서 시행한 “스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업”의 “스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발” 연구개발과제 최종보고서입니다.
2. 이 연구개발 내용을 발표하는 때에는 반드시 농림축산식품부·과학기술정보통신부·농촌진흥청((재)스마트팜연구개발사업단)에서 시행한 “스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업”의 “스마트팜용 탄소연료전지 기반 초고효율 열병합발전 시스템 개발” 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.