

(옆면)

(앞면)

421038-03

시설온실용 연료전지배열에너지순환및 CO2 자원화 기술개발 최종보고서

2024

농림축산식품부
과학기술정보통신부
농촌진흥청
농림식품기술기획평가원
스마트팜연구개발사업단

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

발간등록번호

11-1543000-004731-01

시설온실용 연료전지 배열에너지 순환 및 CO2 자원화 기술개발

2024.05.28

주관연구기관 / (주)바이오프랜즈
공동연구기관 / 스마트그린에너지(주)
(재)전라남도환경산업진흥원
가나안복지회
상지대학교 산학협력단
울산대학교 산학협력단

농림축산식품부
과학기술정보통신부
농촌진흥청
(전문기관)농림식품기술기획평가원
스마트팜연구개발사업단

제출문

제 출 문

농림축산식품부 장관 · 과학기술정보통신부 장관 · 농촌진흥청장 귀하

본 보고서를 “시설 온실용 연료전지 배열 에너지 순환 및 CO2 자원화 기술개발”(개발기간 : 2021.04.01. ~ 2023.12.31)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2024.05.28

주관연구기관명 : (주)바이오프렌즈

(대표자) 조 위 준



공동연구기관명 : 스마트그린에너지(주)

(대표자) 김 개 수 (인)

(재)전라남도환경산업진흥원

(대표자) 김 흥 준 (인)

(재)가나안복민회

(대표자) 김 범 일 (인)

상지대학교 산학협력단

(대표자) 김 장 호 (인)

위탁연구기관명 : 울산대학교 산학협력단 (대표자) 이 채 신 (인)

주관연구책임자 : (주)바이오프렌즈

조 위 준

공동연구책임자 : 스마트그린에너지(주)

이 수 행

(재)전라남도환경산업진흥원

김 흥 인

(재)가나안복민회

김 태 은

상지대학교 산학협력단

황 선 구

위탁연구책임자 : 울산대학교 산학협력단

임 옥 택

「국가연구개발혁신법」 제17조에 따라 보고서 열람에 동의 합니다.

최종보고서										보안등급	
										일반[√], 보안[]	
중앙행정기관명		농림축산식품부			사업명		사업명		스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업		
전문기관명 (해당 시 작성)		농림식품기술기획평가원 스마트팜연구개발사업단			내역사업명 (해당 시 작성)		차세대융합원천기술 연구사업				
공고번호		제농축 2021-45호			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)						
					연구개발과제번호		421038-03				
기술분류	국가과학기술 표준분류		1순위 EF0610 연료전지	40%	2순위 EF0101 CO ₂ 포집기술	40%	3순위 LB203 원예작물 시설/재배		20%		
	농림식품과학기술분류		1순위 AA0204 원예작물시설	50%	2순위 CA0201 농산에너지 생산 활용	50%					
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문	시설 온실용 연료전지 배열 에너지 순환 및 CO ₂ 자원화 기술개발								
		영문	Development of Energy High-Efficiency Circulation and CO ₂ from Fuel Cell and Carbon Capture Utilization for Smart Farm								
연구개발과제명		국문	시설 온실용 연료전지 배열 에너지 순환 및 CO ₂ 자원화 기술개발								
		영문	Development of Energy High-Efficiency Circulation and CO ₂ from Fuel Cell and Carbon Capture Utilization for Smart Farm								
주관연구개발기관		기관명	(주)바이오프렌즈			사업자등록번호		192-86-00453			
		주소	(34025)대전시 유성구 테크노2로 187, 512호 (용산동, 미건테크노월드2차)			법인등록번호		160111-0439219			
연구책임자		성명		조원준		직위		대표이사			
		연락처	직장전화		[REDACTED]		휴대전화		[REDACTED]		
			전자우편		[REDACTED]		국가연구자번호		[REDACTED]		
연구개발기간		전체		2021. 04. 07 - 2023. 12. 31(2년 9개월)							
		단계 (해당 시 작성)		1단계		2021. 04. 07 - 2021. 12. 31(9개월)					
				2단계		2022. 01. 01 - 2022. 12. 31(1년)					
						2023. 01. 01 - 2023.12. 31(1년)					
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비		기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금				연구 개발비 외 지원 금	
		합계		지방자치단체		기타()		합계			
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계		
총계		3,100,000	54,683	492,147			3,154,683	492,147	3,646,830		
1단계		1년차		800,000	14,942	134,478			814,942	134,478	949,420
		2년차		1,150,000	20,324	182,916			1,170,324	182,916	1,353,240
2단계		1년차		1,150,000	19,417	174,753			1,169,417	174,753	1,344,170
공동연구개발기관 등		기관명	책임자	직위	휴대전화	전자우편	비고				
공동연구개발기관		스마트 그린에너지(주)	이수행	이사	[REDACTED]	[REDACTED]	공동	중소기업			
		(재)전라남도 환경산업진흥원	김홍인	팀장	[REDACTED]	[REDACTED]	공동	전라남도 출연기관			
		가나안복지민회	김태은	부교장	[REDACTED]	[REDACTED]	공동	재단법인			
		상지대학교	황선구	교수	[REDACTED]	[REDACTED]	공동	대학교			
위탁연구개발기관		울산대학교	임옥택	교수	[REDACTED]	[REDACTED]	위탁	대학교			
연구개발담당자 실무담당자		성명		이준우		직위		과장			
		연락처	직장전화		[REDACTED]		휴대전화		[REDACTED]		
			전자우편		[REDACTED]		국가연구자번호		[REDACTED]		

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

연구책임자:

조 원 준



주관연구개발기관

(주)바이오프랜즈 의 장:

조 원 준



공동연구개발기관

스마트그린에너지(주)의 장:

김 재 수



(재)전라남도환경산업진흥원 의 장 :

김 형 순

(직인)

(재)가나안복민회 의 장 :

김 범 일



상지대학교산학협력단의 장 :

김 상 호

(직인)



위탁연구개발기관

울산대학교산학협력단의 장:

이 재 신

(직인)



농림축산식품부장관·과학기술정보통신부장관·농촌진흥청장·농림식품기술기획평가원장 귀하

< 요약 문 >

사업명	스마트팜 다부처패키지 혁신기술개발사업			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)			-
내역사업명 (해당 시 작성)	차세대융합·원천기술 연구사업			연구개발과제번호			421038-03
기술 분류	국가과학기술 표준분류	1순위 EF0610 연료전지	40%	2순위 EF0101 CO2 포집기술	40%	3순위 LB203 원예작물 시설/재배	20%
	농림식품 과학기술분류	1순위 AA0204 원예작물시설	50%	2순위 CA0201 농산에너지 생산활용	50%		
총괄연구개발명 (해당 시 작성)	시설 온실용 연료전지 배열 에너지 순환 및 CO2 자원화 기술 개발						
연구개발과제명	시설 온실용 연료전지 배열 에너지 순환 및 CO2 자원화 기술개발						
전체 연구개발기간	2021. 04. 07 ~ 2023. 12. 31 (2년 9개월)						
총 연구개발비	총 3,646,830 천원 (정부지원연구개발비: 3,100,000 천원, 기관부담연구개발비 : 546,830 천원, 지방자치단체지원연구개발비: 천원, 그 외 지원연구개발비: 천원)						
연구개발단계	기초[] 응용[] 개발[<input checked="" type="checkbox"/>] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]			기술성숙도 (해당 시 작성)		착수시점 기준() 종료시점 목표()	
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)	-						
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)	-						
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		<ul style="list-style-type: none"> ○ 20kW급 수소연료전지와 배열회수 순환설비 시스템 개발과 배기 CO2 고순도 포집 및 스마트팜(식물공장 포함) 실증 적용 ○ 재생열 연계 축열시스템 개발 ○ 연료전지 배기 폐열 및 CO2의 과채류 및 엽채류 스마트팜 적용 성능 시험 				
	전체 내용		<ul style="list-style-type: none"> ○ 20kW급 수소연료전지와 배열회수 순환설비 시스템 개발과 배기 CO2 고순도 포집 및 스마트팜(식물공장 포함) 실증 적용 <ul style="list-style-type: none"> - 수소연료전지-재생열 연계 중고온 축열 및 에너지 순환 이용 기술개발 및 실증 - 연료전지용 고순도, 저비용 CO2 포집·이용 기술개발과 실증 - 개발된 기술의 실증실험 ○ 재생열 연계 축열시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> - 재생열 연계 축열시스템 구축 · 고온형 태양열 집열 이용 축열 설비 구축 · 전기식 히트펌프 설비 구축 - 대용량 바이오매스 활용 대규모 스마트팜 적용 사업성 분석 ○ 연료전지 배기 폐열 및 CO2의 과채류 및 엽채류 스마트팜 적용 성능 시험 <ul style="list-style-type: none"> - 연료전지의 성능변화 분석 및 스택에의 영향성 예측 - 센서 빅데이터 분석을 통한 최적의 맞춤형 스마트팜 실증기술개발 - 연료전지 배기 폐열 및 CO2의 스마트팜 적용 시스템 성능, 생산성, 경제성 평가 				

<p style="text-align: center;">연구개발 목표 및 내용</p>	<p style="text-align: center;">1단계</p>	<p>목표</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ DME 수소연료전지 시스템 구축 ○ 연료전지 배기가스 중 CO2 포집·이용 기술개발 ○ 수소연료전지발전과 축열 시스템 연계 ○ 스마트팜 탄산시비, 삼중열병합 구축 ○ 재생열 연계 축열 시스템 구축 ○ 연료전지 연계 축열 시스템 및 통합제어시스템 개발 ○ 스마트팜 농작물 선정, 작물별 특성 분석 ○ DME 공급시설 구축 ○ 연료전지시스템의 주변에 발생 가능한 불순물 분석 ○ DME 개질가스의 성분 분석 및 성능 평가 ○ 스마트팜 센서 빅데이터를 기반으로 실시간 모니터링 시스템 구축 ○ 연료전지 배기 폐열 및 CO2의 스마트팜 적용 시스템의 설계인자 도출 및 성능 평가 ○ 연료전지와 축열시스템 연계 실증 ○ 스마트팜 탄산시비, 삼중열병합 실증 ○ 농가 보급 사업화 모델, 경제성 분석 ○ 재생열 연계 축열시스템 구축 ○ 연료전지 연계 축열 시스템 및 통합제어시스템 개발 ○ 연료로 사용되는 개질가스의 연료전지시스템에의 영향성에 대한 실험적 분석 ○ 공기 중 불순물들의 연료전지 성능에의 영향성 분석 ○ 스마트 온실규모의 스마트팜 분석을 위한 머신러닝 기술 적용 ○ 배기 폐열 및 CO2의 과채류, 엽채류 재배 기술 생산성 및 경제성 평가
		<p>내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ DME 수소개질기 및 고선택성 CO2 분리정제 시스템 구축 ○ 연료전지(20kW급) 시스템 구축 및 배열 회수 장치 설치 ○ 스마트팜 내 연료전지-배열회수-축열 시스템 설치 ○ 탄산가스시비, 삼중열병합 시스템 구축 ○ 농가 적용 청정연료 전주기 분석(LCA) ○ 고온형 태양열 집열이용 축열설비 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 유리온실 100평, 열량 10,000kcal/h * 24h 공급 ○ 물질별 축열 이론 모델 수립 및 보정 <ul style="list-style-type: none"> - 축열 반응 메커니즘 및 영향인자 분석 - 축열물질 PCM, Zeolite 등에 대한 반응 메커니즘과 영향인자 도출 ○ Aspen-Plus를 활용한 축열 모델링 ○ 축열성능 및 효율 향상을 위한 Lab-Scale 실험연구 및 하이브리드형 고효율 축열재 설계 ○ 스마트팜에 적절한 과채류, 엽채류 선정 <ul style="list-style-type: none"> - 스마트팜 Test-Bed에 적합한 특성을 가진 작물 선정 - 생육기간이 짧은 작물을 선정 ○ 수소연료전지용 DME 공급시설 구축 ○ 부하별 DME 개질가스의 성분 변화량 측정 ○ 연료전지 설치 장소의 주변 공기 오염물 분석 ○ 스마트팜의 온도, 습도, 조도 등 Sensing 정보를 빅데이터 베이스에 저장 및 실시간 모니터링 시스템 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 적외선 기반 CO2 농도 측정 및 분석 ○ 온실 내·외부 기상환경 및 작물 생육환경 측정·조사·분석 <ul style="list-style-type: none"> - 과채류 및 엽채류 성능, 효과 분석

<p>연구개발 목표 및 내용</p>	<p>2단계</p>	<p>목표</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 스마트팜 탄산시비, 삼중열병합 실증 ○ 재생열 연계 축열시스템 구축 ○ 식물공장, 스마트팜(온실) 적용 시스템 구축 및 실증 ○ 최적의 맞춤형 스마트팜 고도화(영향성 실증평가) ○ 연료전지 연계 축열시스템 및 통합제어시스템 개발 ○ 선정된 작물의 최적의 생육환경조성 방법 개발 ○ 개질 가스의 연료전지시스템에의 영향성에 대한 실험적 분석 ○ 공기 중 불순물들의 연료전지 성능에 대한 영향성 분석 ○ 스마트 온실 규모의 스마트팜 분석을 위한 머신러닝 기술 적용 ○ 배열 및 CO2의 과채류, 엽채류 재배에 따른 생산성 및 경제성 평가 ○ 농가 보급 상용화 및 설치사업 ○ 대용량 바이오매스 활용, 대규모 스마트팜 적용 사업성 분석 및 상용화 ○ 실증 온실의 작물 생산성, 경제성 분석 및 스마트팜 농가 보급 모델 설정
		<p>내용</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ 연료전지와 축열시스템 연계 삼중열병합 발전 시스템을 이용한 스마트팜 실증 ○ 난방분석을 위한 DME 발전기와 DME 수소연료전지 발전시스템 비교 ○ 농가 적용 사업화 모델 제시, 경제성 확보 방안 도출 및 상용화 준비 ○ 식물공장 및 스마트팜(온실) 적용 시스템 1개소 신설 및 실증 ○ 전기식 히트펌프 설비 구축 ○ 최적의 생육환경을 조성하기 위한 조건 마련 ○ DME 개질 가스의 성분, 공기 중의 불순물 농도 및 노출시간, 부하 변동에 따른 연료전지시스템에의 영향성에 관한 전기화학적 분석 ○ 저장된 센서 정보의 머신러닝 분석 ○ 정보 간의 연관 관계 및 중요 센서 정보 파악, 온실 내외부 환경정보 및 제어데이터 서비스 개발 ○ 기술 이전 또는 매출을 위한 국내외 판매 활동 ○ 상용화 사업을 위한 시스템 양산화, 제품 판매, 국내외 판매 ○ 연료전지·DME 열병합발전 배열 이용 고효율 축열시스템 Test-bed 실증연구 <ul style="list-style-type: none"> - Pilot-Scale 실증연구, 축열 에너지 공급 (식물공장, 컨테이너 농장, 시설하우스) ○ 다단계 열 이용 기술 최적 통합제어시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> - Modular 공정개발 및 최적화, 축열-방열 제어 시스템 최적화 및 상용 급 시스템 개발 - 축열용량 1GJ급 축열 공정 완성, 실증 Test-Bed 운영 - 연료전지시스템에의 악영향을 줄이는 방법에 관하여 분야별 협업을 통한 완화 방향 모색 ○ 소득을 증가하게 시키기 위한 다양한 통계와 분석자료 제공 ○ 잎채소불이 및 육묘장 중심 농작물 재배 ○ 농가의 저비용, 고소득을 위한 지능형 농장 고도화 수행 <ul style="list-style-type: none"> - 배기 폐열 및 CO2의 지능형 농장 현장 적용 농가 생산성 및 경제성 평가 - 축적된 데이터에 의한 최적의 맞춤형 지능형 농장 실증화 - 지능형 농장 농가 보급 모델 규명

<p>연구개발성과</p>	<p><정성적 성과></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 수소연료전지 시스템 설비구축, 생산 수소 순도 99.94% ○ 수소연료전지 시스템 설비구축, 시간당 수소 생산량 15Nm³/hr ○ DME 발전기 설비구축 및 운전 완료 ○ 고온형 태양열 집결 이용 축열 설비구축 ○ 전기식 히트펌프 설비구축 ○ 연료전지 성능변화 분석 ○ 센서 빅데이터 기술과 CO₂ 공급을 통한 작물별 맞춤형 지능형 농장 실증 기술개발 ○ 축열조의 1GJ급 축열 성능 확보 <p><정량적 성과></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 특허출원 7건 (PCT 출원 포함) ○ 기술 실시(이전) 4건 <ul style="list-style-type: none"> - 기술 면허 계약 (특허출원, 통상실시) - CO₂ 등 온실가스 포집 관련 개선공정 적용 DME 생산(Know-How, 직접 실시) ○ 기술료 75,000,000원 성과 달성 ○ 제품화 2건 ○ 매출액 311,000,000원 성과 달성 ○ 수출액 109,000,000원 성과 달성 ○ 고용 창출 34명 ○ 투자유치 8,000,000,000원 성과 달성 ○ 논문발표 15건 (SCI 논문 5건, 비SCI 논문 10건), 논문 평균 IF 9.01 ○ 학술발표 26건 ○ 홍보 및 전시 6건 ○ 정책활용 1건 <ul style="list-style-type: none"> - ‘포집된 CO₂로부터 제조되는 DME 청정연료를 농업용 대체 연료로 보급’ 충북도청에 제안
<p>연구개발성과 활용계획 및 기대 효과</p>	<p><활용계획></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 국내외 학술발표, 논문게재를 통한 연구결과의 발표는 스마트팜 기술의 기초지식을 제공해주며, 관련 기술 국내외 특허출원을 통하여 지적·산업적 재산권을 확보할 수 있음 ○ 실증 구축한 시스템을 농림축산식품부 사업유형으로 채택하도록 관련 부처에 건의하며 지자체 및 영농단체에 홍보 및 교육을 통하여 기술의 확산을 유도하며 지속적인 스마트팜의 전문 인력을 양성과 R&D 투자를 통해 국내 선진기술을 넘어 글로벌 스마트팜 확산에 기여함 ○ 최적의 맞춤형 스마트팜 실증 기술개발을 통해 작물의 최적 생육환경을 제공하여 농가의 소득 증대를 가능하게 함 ○ 연구결과는 스마트팜을 운영 및 관리 할 수 있는 인재 육성과 교육에 활용될 것이며, 가나안복지회(가나안농군학교)에 최적의 맞춤형 스마트팜 실증 기술을 개발함으로써 타 농가의 스마트팜 확산에 활용 가능함 <p><기대효과></p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 기존의 LPG 연소장치를 통한 CO₂의 공급은 CO의 발생 위험성을 가지고 있으며 ppm 단위의 적정 농도를 일정한 수준으로 공급하기에 어려움이 있음. 하지만 스마트팜의 센서시스템은 온도와 기후에 따라 시간당 적절한 CO₂를 공급할 수 있게 할 것임 ○ 최근 농가에서 생산성 증대를 위한 고설재배를 수행하고 있음. 하지만 하단의 위치에 작물 재배 시 수광량이 적고 관리가 어려워 적절한 수량성을 얻기가 힘들. 적절한 CO₂의 공급은 스마트팜과 같은 시설재배 때 광합성의 효율을 높이고 생산량을 증대시킬 것임 ○ CO₂ 공급 시스템은 자원순환을 통한 고순도의 정제된 이산화탄소를 공급함으로써 경제적 이득을 발생시키며 안정적인 공급이 가능함. 따라서 작물별

<p>연구개발성과 활용계획 및 기대 효과</p>	<p>CO2의 적정량을 연구함으로써 최적의 광합성을 위한 농도를 설정할 수 있게 함</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ CO2를 스마트 온실에서 재배에 사용함으로써 CO2를 처리하여 대기 중 CO2 농도를 저감하는 등 환경문제를 최소화해주며 농업생태계 물질의 선순환을 통한 생산활동을 가능하게 함 ○ 최종적으로 지속 가능한 농업이 가능하게 되고 지역 내 환경부하 문제가 어느 정도 해결될 것임. 또한, 지역 내 폐열 및 CO2의 자원순환을 위한 스마트팜 농업환경 시스템 구축을 위한 농가 교육·훈련프로그램 및 기술 개발·보급을 위한 인프라 구축이 실현될 것임 											
<p>연구개발성과의 비공개여부 및 사유</p>	-											
<p>연구개발성과의 등록·기탁 건수</p>	<p>논문</p>	<p>특허</p>	<p>보고서 원문</p>	<p>연구시설·장비</p>	<p>기술 요약 정보</p>	<p>소프트웨어</p>	<p>표준</p>	<p>생명자원</p>		<p>화학물</p>	<p>신품종</p>	
	15	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<p>연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황</p>	<p>구입 기관</p>	<p>연구시설·장비 명</p>		<p>규격 (모델명)</p>	<p>수량</p>	<p>구입 연월일</p>	<p>구입가격 (천원)</p>	<p>구입처 (전화)</p>	<p>비고 (설치 장소)</p>	<p>ZEUS 등록번호</p>		
<p>국문핵심어 (5개 이내)</p>	<p>연료전지</p>		<p>태양열</p>		<p>용융염</p>		<p>열저장</p>		<p>CO₂ 포집</p>			
<p>영문핵심어 (5개 이내)</p>	<p>Fuel cell</p>		<p>Solar heat</p>		<p>Molten salt</p>		<p>Thermal storage</p>		<p>CO₂ capture</p>			

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	pp.1 - 3
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	pp.4 - 181
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	pp.182 - 192
4. 목표 미달 시 원인분석	pp.192
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	pp. 195
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	pp.196 - 198
별첨 자료	

1. 연구개발과제의 개요

1-1. 연구과제의 최종 목표

- 20KW급 수소연료전지와 배열회수 순환설비시스템 개발, 배기 CO2 고순도 포집 및 스마트팜(식물공장 포함) 실증 적용
 - 수소연료전지-재생열 연계 중고온 축열 및 에너지 순환 이용 기술개발 및 실증
 - 연료전지용 고순도, 저비용 CO2 포집·이용 기술개발 및 실증
 - 개발된 기술의 실증 실험
- 재생열 연계 축열시스템 개발
 - 재생열 연계 축열시스템 구축
 - 고온형 태양열 집열판을 이용한 축열설비 구축
 - 전기식 히트펌프 설비 구축
 - 대용량 바이오매스 활용, 대규모 스마트팜 적용 사업성 분석
- 연료전지 폐열 및 CO2의 과채류 및 엽채류 스마트팜 적용 성능 시험
 - 연료전지의 성능변화 분석 및 스택에의 영향성 예측
 - 센서 빅데이터 분석을 통한 최적의 맞춤형 스마트팜 실증 기술개발
 - 연료전지 폐열 및 CO2의 스마트팜 적용시스템 성능, 생산성, 경제성 평가

1-2. 연구과제의 단계별 목표

연차	개발목표	개발내용
(1단계) 1차년도	<바이오프랜즈> <ul style="list-style-type: none"> • DME 수소연료전지 시스템 구축 • 배기가스 중 CO2 포집·이용기술개발 • 수소연료전지발전과 축열시스템 연계 • 스마트팜 탄산시비, 삼중염병합 구축 	<바이오프랜즈> <ul style="list-style-type: none"> • DME 수소개질기 및 고선택성 CO2 분리정제 시스템 구축 • 연료전지(20kW급) 시스템 구축 및 배열 회수 장치 설치 • 연료전지-배열회수-축열시스템 설치 • 탄산가스시비, 삼중염병합 시스템 구축 • 농가 적용 청정연료 전주기 분석(LCA)
	<스마트그린에너지> <ul style="list-style-type: none"> • 재생열 연계 축열시스템 구축 	<스마트그린에너지> <ul style="list-style-type: none"> • 고온형 태양열 집열이용 축열설비 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 유리온실 100평 - 열량 : 10,000 Kcal/hr×24hr 공급
	<전남환경산업진흥원> <ul style="list-style-type: none"> • 연료전지 연계 축열시스템 및 통합제어 시스템 개발 	<전남환경산업진흥원> <ul style="list-style-type: none"> • 물질별 축열 이론 모델 수립 및 보정 <ul style="list-style-type: none"> - 축열 반응 메커니즘 및 영향인자 분석 - 축열 물질 PCM, Zeolite 등에 대한 반응 메커니즘과 영향인자 도출 • CFD를 활용한 축열 모델링 • 축열성능 및 효율향상을 위한 Lab-Scale 실험연구, 하이브리드 고효율 축열재설계
	<가나안복지회(가나안농군학교)> <ul style="list-style-type: none"> • 스마트팜 농작물 선정, 작물별 특성분석 • DME 공급시설 구축 	<가나안복지회(가나안농군학교)> <ul style="list-style-type: none"> • 스마트팜에 적절한 과채류, 엽채류 선정 <ul style="list-style-type: none"> - 스마트팜 Test-Bed에 적합한 특성을 가진 작물 선정 - 생육기간이 짧은 작물을 선정 • 수소연료전지용 DME 공급시설 구축
	<상지대학교> <ul style="list-style-type: none"> • 연료전지스택 주변에 발생 가능한 불순물 분석 • DME 개질가스 성분 분석 및 성능평가 • 스마트팜 센서 빅데이터를 기반으로 실시간 감시 체계 구축 • 연료전지 배열 및 CO2의 스마트팜 적용을 위한 시스템의 설계 인자 도출 및 성능평가 	<상지대학교> <ul style="list-style-type: none"> • 연료전지 설치 장소 주변공기 오염물분석 • 스마트팜의 온도, 습도, 조도 등 Sensing 정보를 빅데이터 베이스에의 저장 및 실시간 감시 체계 구축 <ul style="list-style-type: none"> - 적외선 기반 CO2 농도 측정 및 분석 • 온실 내외부 기상환경 및 작물 생육환경 측정·조사·분석 <ul style="list-style-type: none"> - 과채류 및 엽채류에의 효과 분석

(1단계) 2차년도	<p><바이오프랜즈></p> <ul style="list-style-type: none"> 연료전지와 축열시스템 연계 실증 스마트팜 탄산시비, 삼중열병합 실증 농가 보급 사업화 모델, 경제성 분석 	<p><바이오프랜즈></p> <ul style="list-style-type: none"> 삼중열병합 발전 시스템을 이용한 스마트팜 실증 (과채류 및 엽채류에 성능 시험 및 효과 분석) 난방분석을 위한 DME 발전기와 DME 수소연료전지 발전 시스템 비교 수소연료전지의 농가 적용에 대한 전주기 분석(LCA 평가 완료) 농가 적용 사업화 모델 제시 경제성 확보 방안 도출 및 상용화 준비 대용량 바이오매스 활용, 대규모 스마트팜 적용 사업성 분석
	<p><스마트그린에너지></p> <ul style="list-style-type: none"> 재생열 연계 축열시스템 구축 	<p><스마트그린에너지></p> <ul style="list-style-type: none"> 전기식 히트펌프 설비구축 <ul style="list-style-type: none"> 컨테이너 식물공장 10평×2동
	<p><전남 환경산업진흥원></p> <ul style="list-style-type: none"> 연료전지 연계 축열시스템 및 통합제어 시스템 개발 	<p><전남 환경산업진흥원></p> <ul style="list-style-type: none"> 연료전지 배열 이용, 고효율 축열시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> (배열) 40~140℃ (축열) PCM 잠열 축열 (방열) In-situ/Ex-situ (축열) Max 1GJ (공정) Tank, Modular (유닛) Heat-Stick / Plate / Stack 태양열 이용, 고효율 축열시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> (배열) 130~250℃ (축열) Zeolite 화학축열 (방열) In-situ/Ex-situ (축열) Max 0.1 GJ(공정) Tank, Modular(유닛) Heat-Stack 상용급 시스템 설계 완성 <ul style="list-style-type: none"> Lab-Scale 실험연구, Pilot-Scale 실험연구, P&ID, PDP, 3D 설계, 열유동 CFD 해석
	<p><가나안북민회(가나안농군학교)></p> <ul style="list-style-type: none"> 선정된 작물의 최적 생육환경 조성 방법 개발 	<p><가나안북민회(가나안농군학교)></p> <ul style="list-style-type: none"> 최적의 생육환경을 조성하기 위한 조건 등 마련
	<p><상지대학교></p> <ul style="list-style-type: none"> 개질가스의 연료전지스택에의 영향성에 대한 실험적 분석 공기 중 불순물들의 연료전지 성능에 대한 영향성 분석 스마트 온실 규모의 스마트팜 분석을 위한 머신러닝 기술 적용 배열 및 CO2의 과채류, 엽채류 재배에 따른 생산성 및 경제성 평가 	<p><상지대학교></p> <ul style="list-style-type: none"> DME 개질가스의 성분, 공기 중의 불순물 농도 및 노출시간이, 부하 변동에 따른 연료전지 스택에의 영향성에 관한 전기화학적 분석 <ul style="list-style-type: none"> 연료전지스택의 분석에는 많은 시간과 비용이 소모되므로, 단위전지를 이용하여 분석 저장된 센서 정보의 머신러닝 분석 <ul style="list-style-type: none"> 최적의 작물 생육 환경을 제공하기 위해 결정트리, 앙상블 학습, 랜덤 포레스트, XGBoost 머신러닝 모델 등을 이용한 최적의 환경분석 정보 간의 연관 관계 및 중요 센서 정보 파악, 온실 내외부 환경정보 및 제어데이터 서비스 개발 <ul style="list-style-type: none"> 에너지 소비량, 경제성 조사·분석 CO2 처리에 대한 작물별 생육 검정 CO2 공급을 위한 작물별 재배 기술 체계화 및 사용 매뉴얼 도출

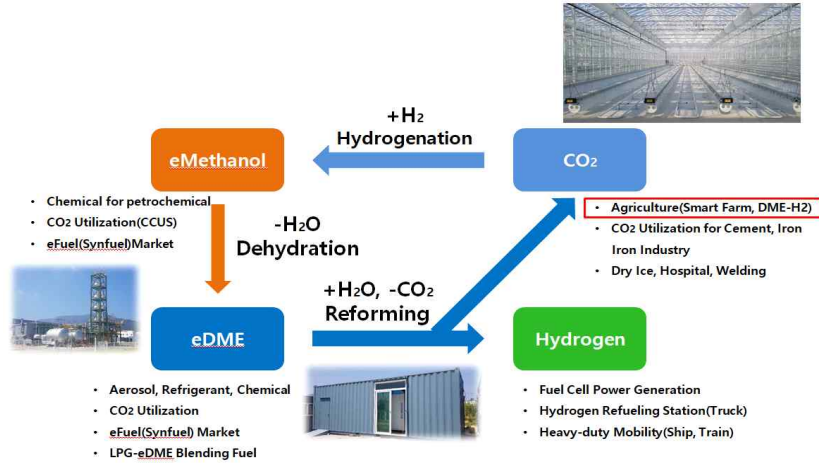
연차	개발목표	개발내용
(2단계) 1차년도	<바이오프랜즈> <ul style="list-style-type: none"> 식물공장, 스마트팜(온실) 적용시스템 구축 및 실증 농가 보급 상용화 및 설치사업 	<바이오프랜즈> <ul style="list-style-type: none"> 식물공장 및 스마트팜(온실) 적용시스템 1개소 신설 및 실증 기술이전이나 매출을 위한 국내외 판매 활동(1개소 이상 설치) 상용화 사업을 위한 시스템 양산화, 제품 판매, 국내외 판매(해외전시회 참석 등)
	<스마트그린에너지> <ul style="list-style-type: none"> 대용량 바이오매스 활용, 대규모 스마트팜 적용 사업성 분석 및 상용화 	<스마트그린에너지> <ul style="list-style-type: none"> 대용량 바이오매스 활용, 대규모 스마트팜 적용 사업성 분석 바이오매스 또는 농가폐자원(폐플라스틱, 폐비닐 등)을 가스화하여 합성가스 제조, 수소추출 또는 합성연료를 제조하여, 에너지 통합시스템(연료전지 포함 분산발전 등)과 연계하는 사업성 분석
	<전남환경산업진흥원> <ul style="list-style-type: none"> 연료전지 연계 축열시스템 및 통합제어시스템 개발 	<전남환경산업진흥원> <ul style="list-style-type: none"> 배열 이용 축열시스템 Test-Bed 실증연구 <ul style="list-style-type: none"> Pilot-Scale 실증연구, 축열에너지 공급(식물공장, 컨테이너, 시설하우스) 다단계 열이용 기술을 이용한 최적의 통합제어시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> Modular 공정 개발 및 최적화, 축열-방열 제어시스템 최적화 상용급 시스템 개발 <ul style="list-style-type: none"> 축열용량 1GJ급 축열 공정 완성, 실증 Test-Bed 운영 
	<가나안복지회(가나안농군학교)> <ul style="list-style-type: none"> 스마트팜 실증 	<가나안복지회(가나안농군학교)> <ul style="list-style-type: none"> 엽채류 및 육묘장 중심 농작물 재배 스마트팜 Test-Bed 실증
	<상지대학교> <ul style="list-style-type: none"> 최적의 맞춤형 스마트팜의 고도화 <ul style="list-style-type: none"> 시스템에의 영향성 실증평가 실증온실의 작물 생산성 및 경제성 분석 <ul style="list-style-type: none"> 스마트팜 농가 보급 모델 설정 	<상지대학교> <ul style="list-style-type: none"> 농가의 저비용 고소득을 위한 스마트팜 고도화 수행 <ul style="list-style-type: none"> 연료전지시스템에의 영향성을 줄이는 방법에 관한 각 파트별 협업을 통한 완화방향 모색 축적된 데이터를 통한 최적의 맞춤형 스마트팜 실증화 배기 및 CO2의 스마트팜 현장 적용에 따른 농가의 생산성 및 경제성 평가 농가소득을 향상시키기 위한 다양한 통계분석자료 제공 (정보의 시각화) 스마트팜 농가 보급 모델 구명

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 1단계 - 1차년도

가. 주관연구개발기관 : (주)바이오프랜즈

- (주)바이오프랜즈에서 생산하는 DME는 포집 CO2를 기반으로 한 메탄올로부터 제조하는 청정케미칼로써, 이를 통해 제조한 수소와 연료전지 발전을 통해 전력을 생산하며, 발생하는 CO2는 재순환 필터(막분리)을 활용하여 스마트팜내 탄산재배용 원료로 활용하게 됨



[Methanol → DME → H₂ → 스마트팜 탄산재배(CO₂)]



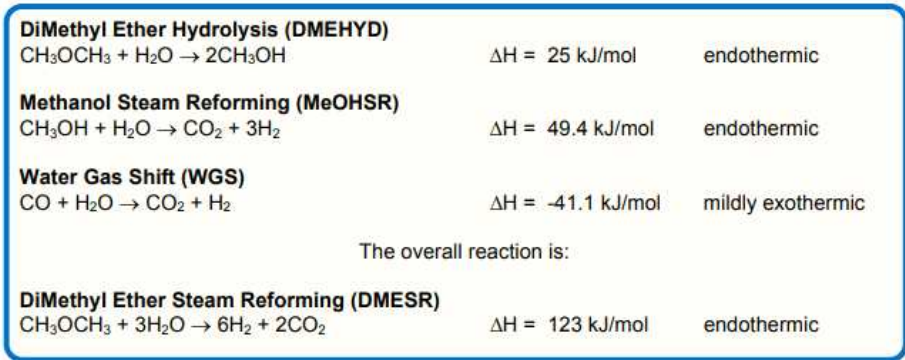
[DME로부터 스마트팜 적용시스템]

- 연료전지 발전과 탄산재배를 위한 연구 진행

- (1) CO₂ 기반 DME 연료로부터 수소제조
- (2) 수소연료전지 시스템 설계(5kW × 6개 = 30kW)
- (3) 스마트팜(가나안농군학교)내 시스템 구축을 위한 Layout 도출

- (수소제조) CO₂ 기반 청정연료 DME로부터 수소생산 기술

- (1) 촉매개발
 - DME로부터 수소 제조 화학반응식은 다음과 같으며, DME는 메탄올 수증기 개질반응을 중간반응으로 하여 최종적으로 수소 75%와 이산화탄소 25%로 반응물을 생산함
 - DME 스팀 개질은 두 가지 순차적인 흡열 반응으로 구성되고, WGS 반응은 화학양론적인 변환과정에서 항상 일어나는 반응임



[DME로부터 수소제조 화학식]

- DME 추출수소 촉매는 Cu-Zn 계열의 촉매를 사용하며, 기존의 촉매는 아래와 같이 상용촉매로 성형하여 실 공정에 투입 및 수소를 제조하였음

Sample	Cu [%]	Zn [%]	Ce [%]	BET area [m ² g ⁻¹]	d _p [nm]	Cu ⁰ area [m ² g ⁻¹ catalyst]	Cu ⁰ area [m ² g ⁻¹ Cu]
CZC5	4.4	44.6	51.0	96	12.3	0.9	51.4
CZC15	12.1	44.3	43.6	102	11.5	1.8	25.8
CZC25	23.9	37.6	38.5	94	12.7	1.8	12.2
CZC35	31.0	32.7	36.3	83	13.0	1.5	7.6



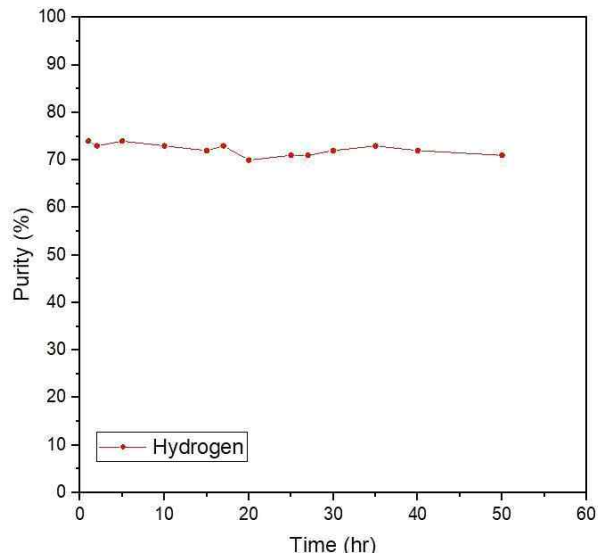
[DME 추출수소 촉매]

- 상기에서 제조된 DME 추출수소 촉매로부터 15Nm³/hr 생산되는 반응시스템을 아래 그림과 같이 제작하여 반응실험을 수행하였으며, 이때 반응조건은 온도 500~600℃, 압력 5~10기압에서 DME 유량 33~66g/min, 스팀 유량 42~83g/min, S/C 비율은 3.6으로 50시간 실험 진행



[DME 수소 개질시스템]

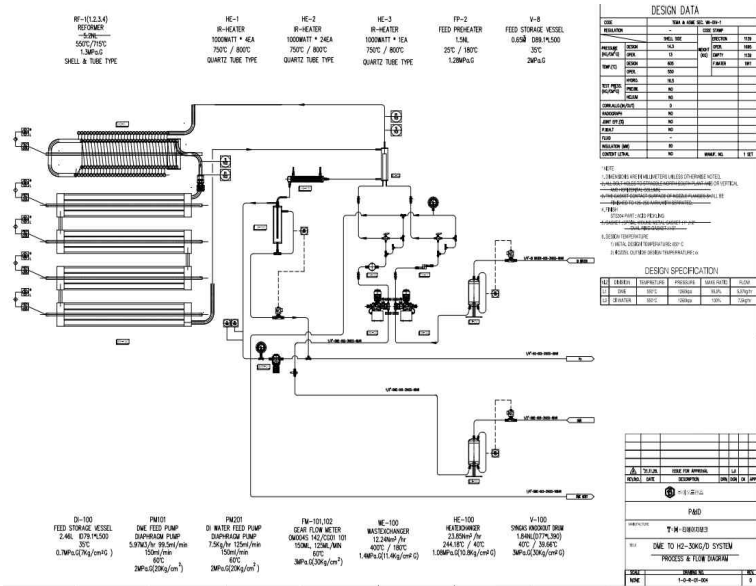
- 실험을 통하여 GC 분석장치로 분석한 결과 평균적으로 H₂:73.42%, CO:3.68%, CH₄:0.16%, CO₂:22.3%, DME:0.42%의 조성으로 나타남



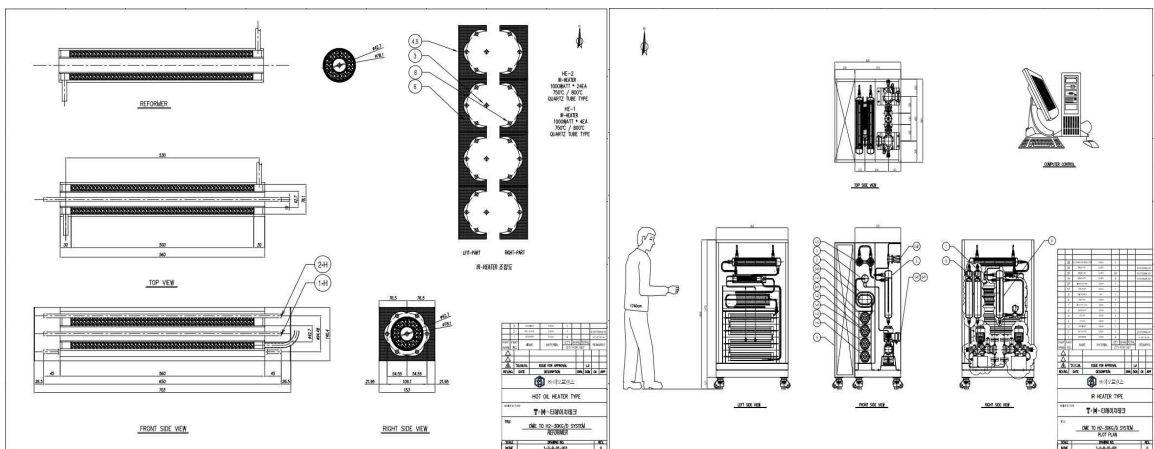
[수소 순도 분석 결과_약 50시간]

(2) 반응시스템 및 시제품 설계

- DME-수소장치는 온도, 압력, 유량을 자동제어 할 수 있는 시스템으로 구성되어 있으며, 유량계로부터 유량을 미세 조절하고, 압력은 연료전지 발전시스템으로 연계되도록 하여 운영하여 시제품 설계도면을 도출함



[시제품 30kg/day DME 추출장치 P&ID]



[시제품 개질기]

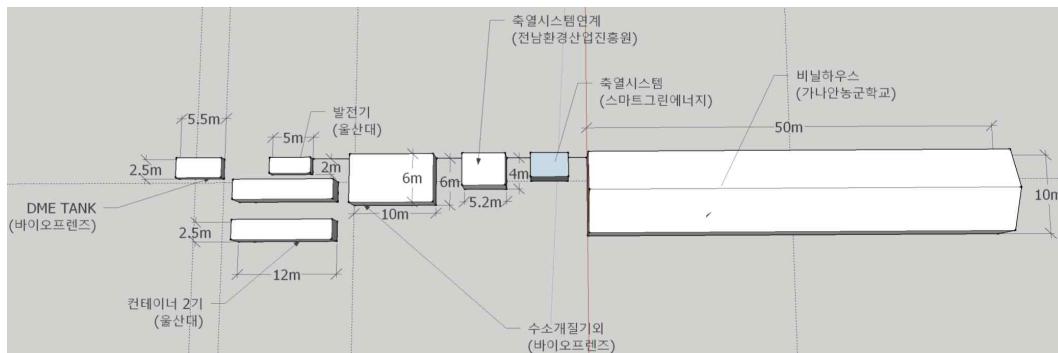
[시제품 2D 도면]

- (수소연료전지 시스템) 국내 연료전지 상용제품은 시스템 비용이 높기에, 글로벌 연료전지회사인 Horizon社와 농촌에 들어가는 연료전지시스템을 합리적인 가격에 도입하는 것이 합의되어, 5kW급 연료전지 6개를 연결한 PEM연료전지(Proton Exchange Membrane Fuel Cell)를 제작하여 설치함
 - CO2 기반 청정연료 DME로부터 수소생산 후 CO2 분리막을 통과한 수소로부터 연료전지 발전을 하도록 시스템 설계를 하였으며, 1차년도에는 순수수소로부터 연료전지를 가동하는 시스템으로 운영하고, 2차년도 DME로부터 제조된 수소와 연료전지를 연계한 시스템으로 운영하고자 함



[총 30kW급 수소연료전지 시스템]

- (시스템 설치를 위한 스마트팜 구축) 1차년도에는 스마트팜 인프라시스템을 가나안농학교에 구축하기 위하여 DME 저장탱크, 공급설비, DME 수소장치(순수수소장치 포함), 연료전지 시스템 등 배치도를 아래와 같이 하여 구축하고 함



[실증 Test-bed 유틸리티 시스템 배치도]

- 특히, 상주 혁신스마트팜 200평을 추가로 임대하여 다양한 인프라 구성 시험을 하고자 하며, 가온시설, 탄산재배, 연료전지 연계 등을 이용한 농가의 생산성을 높이기 위한 설비를 지속적으로 구축하고자 함



[경북 상주 스마트팜 혁신밸리 실증 지원센터]

- DME 저장탱크 : DME저장탱크는 수소를 제조하기 위한 DME를 보관하는 설비로 아래 사진과 같이 구성하여 설치하고자 함



[DME 저장탱크와 디스펜서]

○ 농가적용 청정연료 적용에 대한 전주기적 분석 진행(LCA평가)

- (1) 기존 스마트팜 탄산시비농법에 대한 전과정(연료의 사용~최종배출)에 대한 환경영향 분석
 - 스마트팜 탄산시비농법 전 과정에 걸쳐 발생하는 물질들이 환경에 미치는 영향에 대한 잠재적인 환경오염 영향을 객관적 근거를 토대로 정성적, 정량적으로 분석
 - 전과정 평가 프로그램을 이용한 탄산시비농법에 대한 환경영향 분석
 - 전과정 평가 프로그램을 이용하여 기존 탄산시비 농법에서 난방에너지원에 따른 온난화가스,배기가스(SOx,NOx,PM등) 및 에너지 사용량 분석
- (2) 재배 규모는 100평의 온실로 가정하고, 농작물의 종류에 따라 CO2 시비량을 3가지 조건으로 하여 Case study 진행. 기존의 난방 및 CO2 시비 방식은 LPG를 이용하는 보일러와 DME 연료전지를 이용한 난방 및 CO2 시비공정을 비교함
- (3) 식물의 CO2 시비량이 1,000m3당 3~4kg, 5kg,10kg이 소요 될 때 LPG 보일러는 CO2 배출량이 4.576kg,4.246kg, 2.596kg DME연료전지는 5.066kg,4.736kg, 3.086kg의 배출량이 나타남
- (4) 연료 생산공정에서 CO2 Reforming을 통해 제조한 DME 연료를 사용하였을 때, CO2 배출량은 4.136kg으로 기존 메탄올의 합성을 통해 생산하던 공정에 비해 CO2 배출량 감축이 가능함

DME 연료전지 CO ₂ 이용한 생산						
배출물질	WTP	생산공정 CO ₂ 이용	Fuel cell	Fuel 배출량	CO ₂ 시비	총 배출량
CO ₂ (kg)	1.85	-1.19	4.796	5.456	-1.32	4.136
VOC (g)	0.87		-	0.87		0.87
CO (g)	1.73		30.41	1.73		1.73
NOx (g)	2.53		-	5.571		5.571
PM10 (g)	0.958		-	0.958		0.958
PM2.5 (g)	0.655		-	0.655		0.655
SOx (g)	1.69		-	1.69		1.69
CH ₄ (g)	10.7		-	10.7		10.7
N ₂ O (g)	0.293		-	0.293		0.293

[DME 연료 생산공정에 따른 CO2 시비공정의 전체공정의 배출량 비교표]

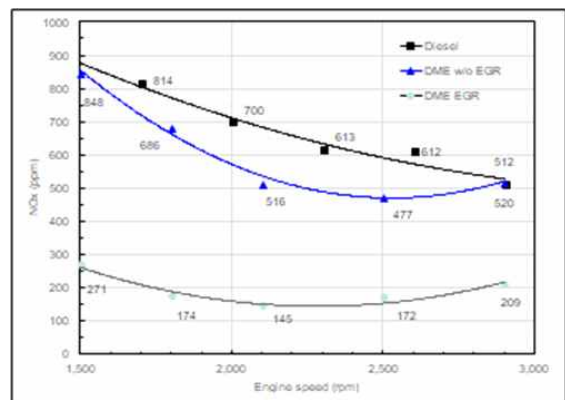
나. 위탁연구개발기관 : 울산대학교 산학협력단

○ 50kW급 DME 삼중열병합 시스템 개발

- (1) 목표: 발전출력 50kW 이상, 시스템 발전효율 30% 이상, 엔진 배기성능 PM≒0, NOx 디젤 이하, 시스템 내 구성 100 Hr 이상
- (2) 발전기에 사용되는 DME용 D4GA 엔진을 통하여 평가 실시
- (3) 해당 연도 목표였던 엔진 배기성능 PM≒0, NOx 디젤 이하 달성
 - NEDC 모드를 통하여 배출가스 측정을 수행한 결과, PM 배출량은 0.0036g/km을 확인
 - DME의 엔진 회전수에 따른 NOx 배출량이 디젤 NOx 배출량보다 낮음을 확인

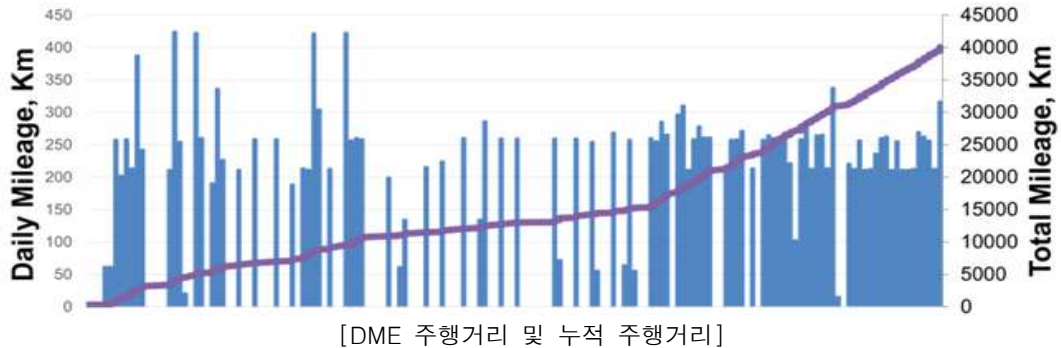
구분	시험결과(g/km)			시험방법
	CO	NOx	PM	
Euro 4 (디젤상용차 기준)	1.5	3.5	0.02	NEDC 모드
DME 개조 엔진	0.179	1.577	0.0036	

[DME와 EURO 4의 배기가스 배출 농도 비교]



[디젤 대비 NOx 배출가스 농도 비교]

- DME엔진 적용 차량 실도로 주행을 통해 내구성 100Hr이상 확인(현대 2,5T Mity 적용)
- 운행 경로는 울산-대전(약 260km), 대전-보은(약 60km), 보은-울산(약 60km)인 경부 고속도로, 상주-영천 고속도로임
- 7개월간 하루평균 약 7시간, 약 500km 주행을 통해 총 주행거리 40,000km 주행 달성
- 주행을 통하여 DME D4GA엔진과 DME 연료 공급 장치의 내구성 확인



○ DME 삼중열병합 시스템의 경제성 평가

- (1) 기존의 발전시스템에서 DME 삼중열병합 시스템으로 개조 및 경제성 평가
- (2) 50 kW 급 DME 삼중열병합 시스템의 발전효율, 연소효율 향상 연구
- (3) 기존의 배출가스 저감 장치의 사용 유무 등의 파악 발전기의 배출가스 저감 대책 수립

○ 기존의 발전시스템에서 DME 삼중열병합 시스템으로 개조

- 연비 계산은 2008년, Constantine Arcoumanis의 논문의 DME 기준 물성치를 참조하여 식

$$FE(km/L) = \frac{0.801 \times 667}{0.801 \times CH + 0.429 \times CO + 0.273 \times CO_2} \text{을 통하여 계산}$$

- 이론적으로 계산된 연비 5.468 km/L, 실측 DME 연비 5.699 km/L임을 확인
- DME의 발열량은 디젤 발열량과 동일 설정 시, DME 연비는 디젤 대비 104%임을 계산함

구분	FE(km/L)
ECE15	5.053
EUDC	6.170
NEDC(ECE15+EUDC)	5.699

[NEDC 모드에서 측정된 연비표]

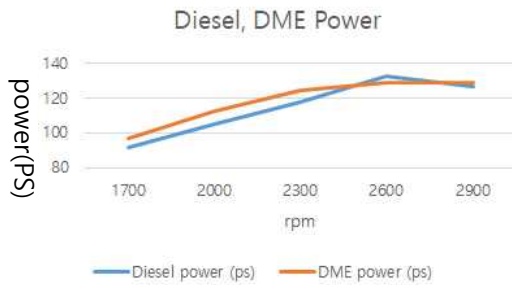
	발열량(MJ/m3)	연비(Km/L)	디젤대비 연비(%)
디젤	35,484	10.1	104%
DME	19,210	5.468	
실측 DME		5.699	

[연비 비교표]

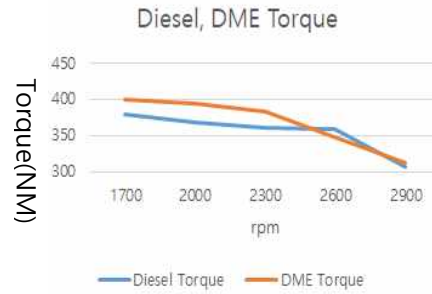
- 전부하 엔진실험을 통해 경유엔진, DME 개조엔진의 출력 및 Torque를 비교함
- DME 개조엔진의 출력이 Diesel 출력과 Torque가 좀 더 높게 나오며 거의 동일함을 확인

시험항목		시험결과					시험방법
		1700	2000	2300	2600	2900	
경유엔진	RPM	1700	2000	2300	2600	2900	전부하시험
	Torque(Nm)	381	369	361	360	308	
	Power(PS)	92	105	118	133	127	
	Trottle(%)	100	100	100	100	100	
DME 개조엔진	RPM	1700	2000	2300	2600	2900	
	Torque(Nm)	401	395	384	348	313	
	Power(PS)	97	113	125	129	129	
	Trottle(%)	100	100	100	100	100	

[엔진시험 결과]

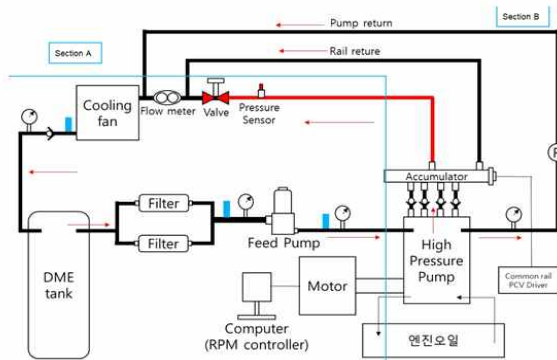


[DME, Diesel 출력]



[DME, Diesel Torque]

- 50 kW 급 DME 삼중열병합 시스템의 발전효율, 연소효율 향상 연구
 - DME 삼중열병합 시스템의 효율 향상을 위한 고압연료펌프 성능평가 및 최적화
 - 두원 정공에서 제작한 DME 고압연료펌프의 유량 측정 수행, 펌프의 토출압력 700bar 확보, 300 bar와 1,000 rpm 조건에서 최대유량 90.7 LPH 확보
 - 고압펌프의 최대분사압 40 MPa 이상, 2,000 Hr 이상 내구성 확보



[고압펌프 유량 검증 실험장치 구성도]



(Section A)



(Section B)

[실제 유량검증 실험장치]

- 고압연료펌프 최적화를 위해 Taguchi 수치 해석을 통해 수행을 하여 유량에 영향을 주는 메인 요소인 플런저의 직경 파악
- 고압연료펌프의 최적화를 위해 AMESim을 통해 최적의 플런저 설계 수행, 유속을 최적화하기 위한 요인의 최적의 조건은 2000RPM과 20mm의 플런저 직경임

Analysis of Variance

Parameters	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribution
RPM	2	99003	99003	49502	6,20	0,059	17,21%
Diam. Plunger	2	444235	444235	222118	27,82	0,004	77,23%
Error	6		440158	6002	73,33	0,000	
Residual Error	4	31936	31936	7984			
Total	8	575175					

ANOVA 결과

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-813	138	-5,90	0,001	
RPM	0,2552	0,0628	4,06	0,007	1,00
Diam. Plunger	54,17	6,33	8,56	0,000	1,00

	RPM	Diam. Plunger
Level		
1	46,42	42,29
2	50,50	50,81
3	52,44	56,27
Delta	6,02	13,98
Rank	2	1

Regression Equation

$$\text{Flow Rate} = -813 + 0,2552 \text{ RPM} + 54,17 \text{ Diam. Plunger}$$

regression equation 계수 및 결과

노이즈와 신호 반응 비율

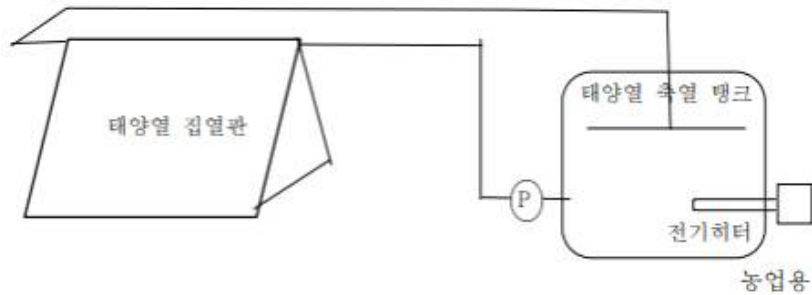
[Taguchi 해석 및 ANOVA 분석결과]

다. 공동연구개발기관 : 스마트그린에너지㈜

○ 고온형 태양열 집열이용 축열설비 구축

- 태양열 집열판의 경우 낮 시간(3.5시간)에 생산된 열을 축열탱크에 축열하여 사용. 날씨 영향을 받지 않도록 농사용 전기를 이용하여 축열 탱크에 필요시 난방에 사용할 열을 공급하여 식물에 냉해를 받지 않도록 난방하며, 겨울철 동파 방지 기능과 여름철 과열 방지 기능을 내장하는 신재생에너지를 활용하는 시스템
- 태양열 집열판 및 축열조는 필요시 이동 설치 가능
- 난방 필요 용량에 의해서 태양열 집열판과 축열 용량이 결정되며, 태양열 집열 시간은 지역에 따라서 차이가 나지만 일일 약 3.5시간으로 계산
- 태양열 집열판
 - 3㎡(약6,000kcal/3㎡day)로 기준으로 100평 난방용이며 축열 탱크 용량은 100 x 600kcal/평 = 60,000kcal/100평,hr이 필요하지만 10,000kcal/hr 로 태양열 이용으로 계산하면 10,000kcal/hr x 24h/day = 240,000kcal/day 3,5시간에 축열해야하므로, 240,000kcal/day ÷ 3.5h = 68,571kcal ÷ 6,000kcal/1조 = 11.4이므로 태양열 집열판 12조 설치함

시스템 구성도



[고온형 태양열 집열이용 축열설비]

라. 공동연구개발기관 : (재)전라남도환경산업진흥원

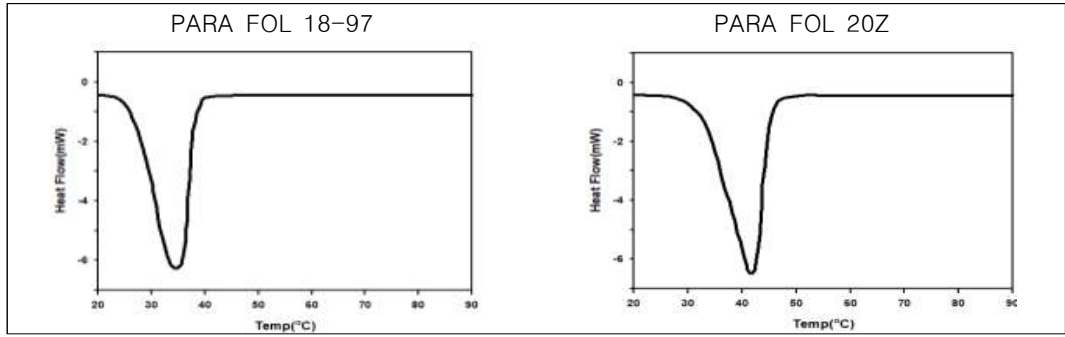
○ 물질별 축열 이론 모델 수립 및 보정

(1) 상변화 물질(PCM) 선정 및 특성 파악

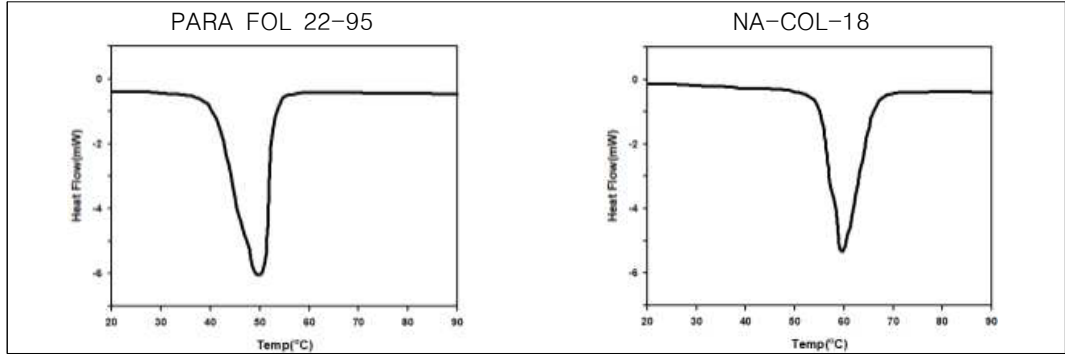
- 배열 축열에 적합한 물질 선정 및 특성 파악
- 폐열의 온도, 화학적 안정성, 축 열량 등을 고려해 PARA FOL 22-95 선정
- 밀도 측정 결과 온도에 따라 비선형적 감속 곡선을 보임. 75℃~150℃에서 최대 13.15% 정도의 부피 변화가 있음

Material	PARA FOL 18-97	PARA FOL 20Z	PARA FOL 22-95	NA-COL 18	PEG 1000	Sodium Sulfate Carbohydrate
chemical structure	C ₁₈ H ₃₈ (n-octadecane)	C ₂₀ H ₄₂ (n-eicosane)	C ₂₂ H ₄₆ (n-docosane)	C ₂₂ H ₃₈ O (1-octadecanol)	HO(C ₂ H ₄ O) _n H	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O
Melting Point / range	30 - 34 °C (32 °C)	38 - 42 °C (40 °C)	56 - 50 °C (48 °C)	56 - 60 °C (58 °C)	35-40 °C (37 °C)	30 - 35 °C (32 °C)
Density	approximately 0.768g/ml at 40 °C	approximately 0.789g/ml at 40 °C	approximately 0.777g/ml at 60 °C	approximately 0.815g/ml at 60 °C	approximately 1.2/ml at 20 °C	approximately 1.46g/ml at 25 °C
Latent Heat Capacity	> 220 Jig	> 200 Jig	> 220 Jig	> 200 Jig	155 Jig	180 Jig
Flash Point	165 °C	176 °C	186 °C	174 °C	171 °C	-
Water Solubility	insoluble	insoluble	insoluble	insoluble	soluble	soluble

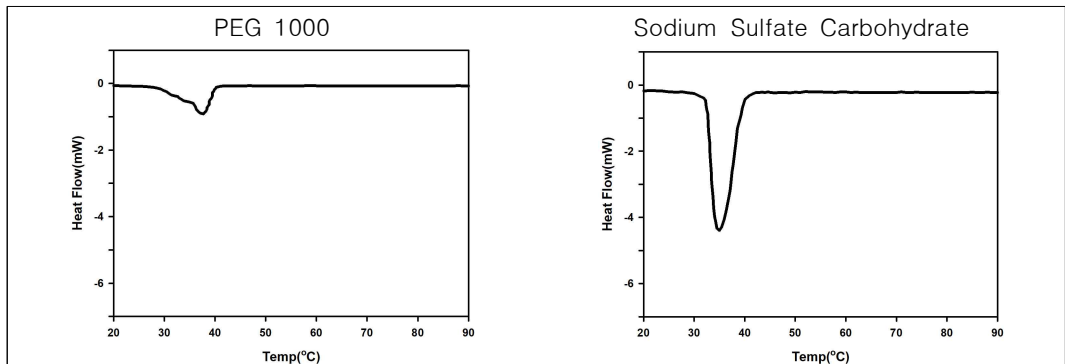
[PCM 후보 물질 표]



[후보물질의 열분석 측정 및 밀도변화]



[후보물질의 열분석 측정 및 밀도변화]



[열분석 측정 및 밀도변화]

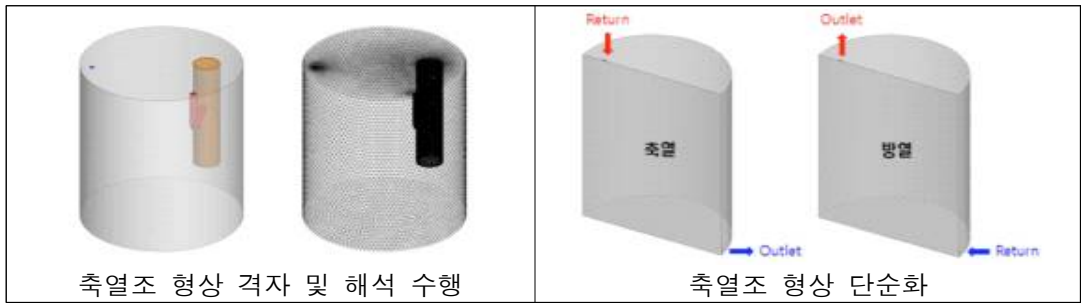
PARA FOL 22-95 밀도 측정				
질량 (g)	32.191			
온도 (°C)	75	100	125	150
부피 (mL)	38	41	42	43
겉보기 밀도 (g/mL)	0.8471	0.7851	0.7665	0.7486

[PCM 물질 N-22 밀도 측정표]

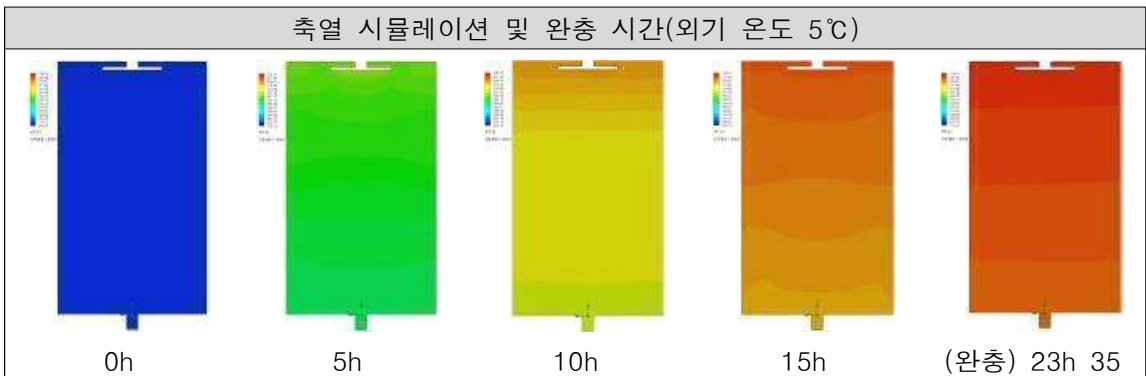
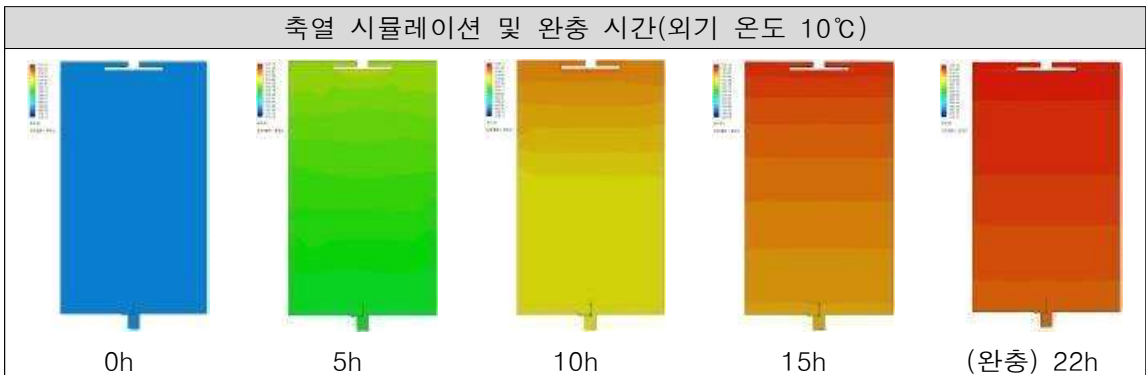
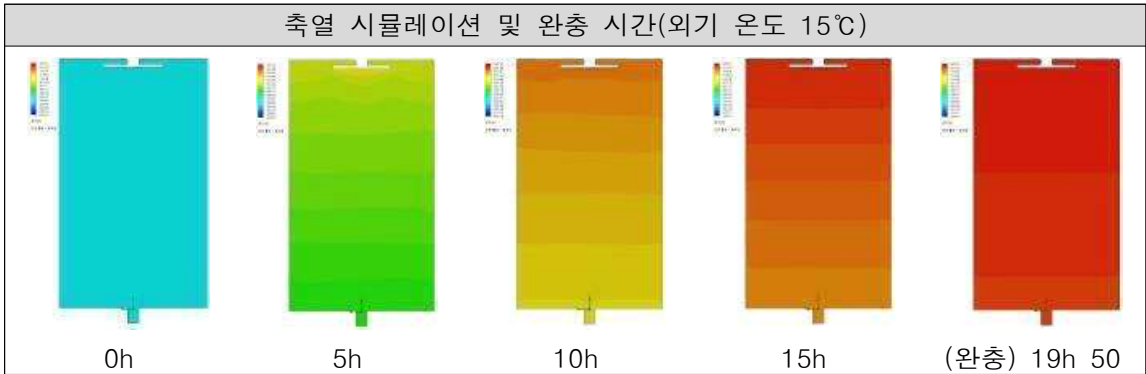
○ CFD(Solidworks Flowsimulation) 모델링을 활용한 축열모델링

지표	입력값
온수 온도	50°C
온수 유입 체적유량	0.00004167 m ³ /s
모델링 온도 파라미터	325.15K ~ 275.15K
내부 시작 온도	15°C, 10°C, 5°C
축열조 용량	∅1,010×1,660 mm (1000 리터)

[CFD 파라미터]



[축열조 CFD 해석]



[외기 온도별 축열 완충 시간]

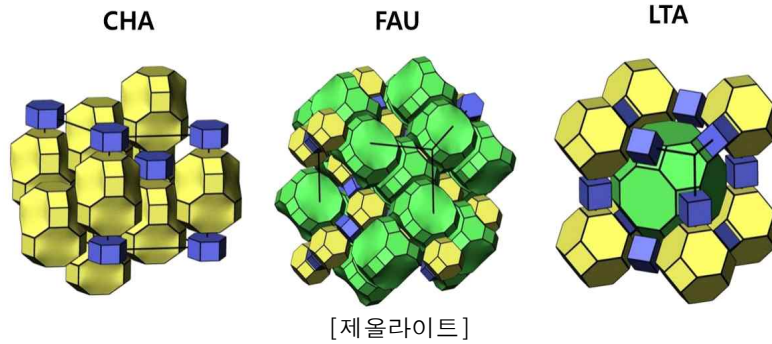
○ 축열 성능 및 효율 향상을 위한 Lab 실험연구

(1) 하이브리드형 고효율 축열재 설계

- 연료전지 배열의 열 저장효율을 높이기 위해 제올라이트와 활성알루미나를 혼합하여 하이브리드형 고효율 축열재 설계

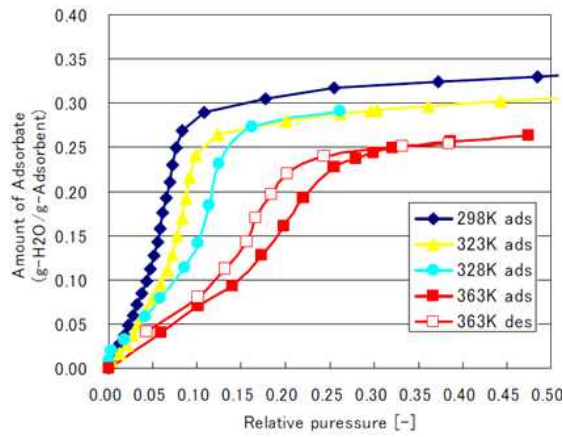


- 축열 물질 후보군 선정: 우수한 수분흡착 성능을 보이는 zeolite 13X(FAU), zeolite 4A(LTA), SAPO-34(CHA), SSZ-13(CHA) 제올라이트를 선정



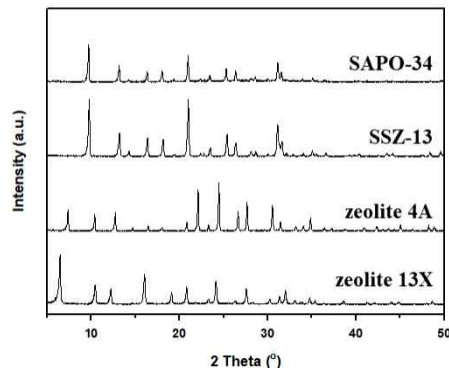
(2) 수분흡착 성능 평가를 위한 기준 물질 선정

- 상업용 SAPO-34의 경우 P/P0가 0.1~0.2인 영역에서 흡착제 1g당 0.2 ~0.3g의 수분을 흡착

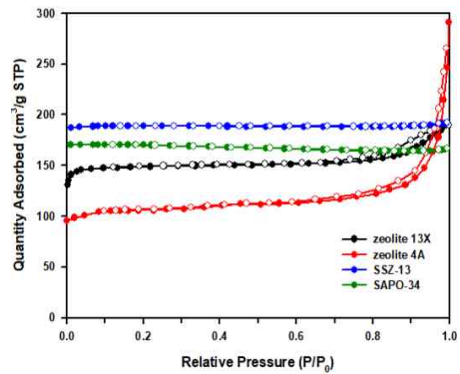


[상업용 SAPO-34의 온도와 압력에 따른 수분 흡착]

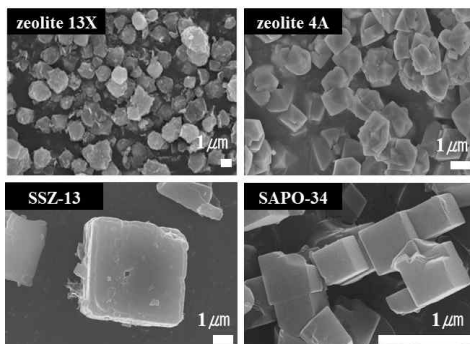
- 축열 물질의 물리화학적 특성 분석: X-선 회절법, 질소 흡탈착 등온선, 주사전자현미경 등의 분석법을 통해 분석하였으며, 수분흡착 성능은 열중량분석법(TGA)으로 측정



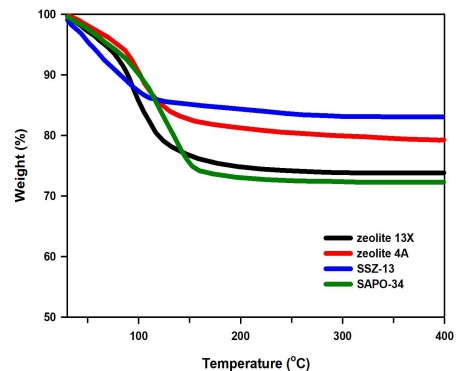
[X-선 회절분석]



[질소 흡탈착 등온선]



[주사전자현미경]



[열중량분석법(TGA)]

(3) 표면적 특성

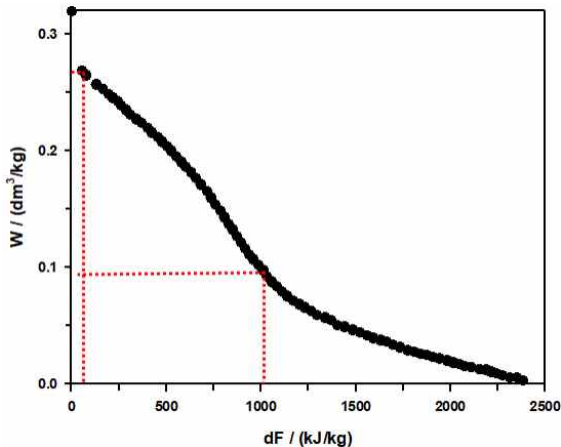
- zeolite 13X는 10Å의 큰 세공크기를 가지고 있으며 흡착과 탈착 속도에서 유리하기 때문에 zeolite 13X를 축열 물질로 선정

	zeolite 13X	zeolite 4A	SSZ-13	SAPO-34
SBET (m ² g ⁻¹)	612	558	606	531
Vp (cm ³ g ⁻¹)	0.29	0.25	0.30	0.26

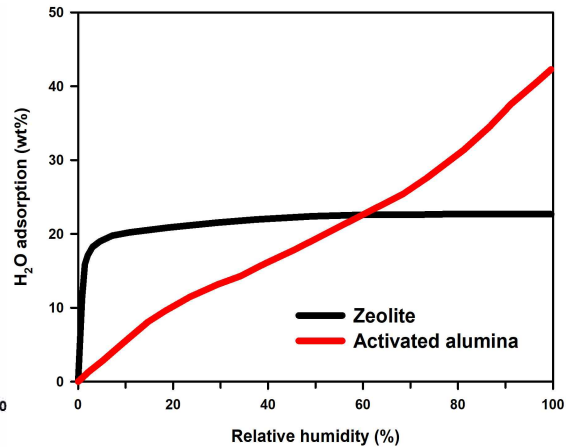
[제올라이트 종류에 따른 표면적 특성]

(4) zeolite 13X의 상전이에 따른 자유에너지의 변화

- 기체상의 물 입자는 흡착 시 약 1000kJ의 엔탈피를 방출
- 하이브리드형 고효율 축열재 설계를 위한 추가 축열 물질 선정: 제올라이트의 상대습도에 따른 수분흡착 특성은 낮은 습도에서 빠르게 수분을 흡착하지만, 높은 습도에서는 흡착력이 다소 부족하므로 추가 축열 물질 필요



[흡착 시 엔탈피 변화량]



[흡착물질 수분 흡착량]

(5) 상업용 활성알루미나와 zeolite 13X의 기계적 특성

- 상업용 활성알루미나는 높은 비표면적과 세공이 잘 발달 되어 있고, 충격과 마찰에 대한 기계적 강도가 우수하며, 낮은 재생온도를 가지고 있어 추가 축열 물질로 선정

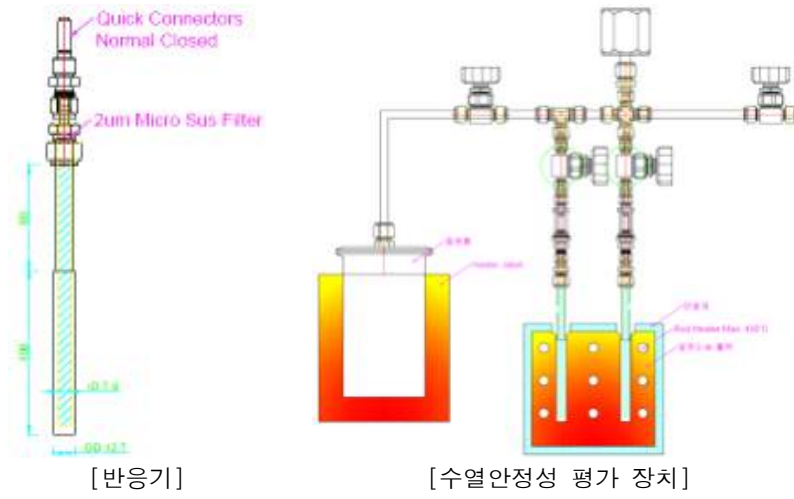
	Activated alumina	zeolite 13X
Surface area (m ² /g)	340	612
Pore volume (cc/g)	0.5	0.3
Bead size range (mm)	4.7	2.5 - 5.0
Bulk density (g/L)	769	655 - 700
Crush strength (N/bead)	Min 55	Min 50
Attrition (wt%)	Max 0.1	Max 0.2

[상업용 활성알루미나와 zeolite 13X의 물리화학적 특성]

○ 축열 물질 성능평가 장치 설계

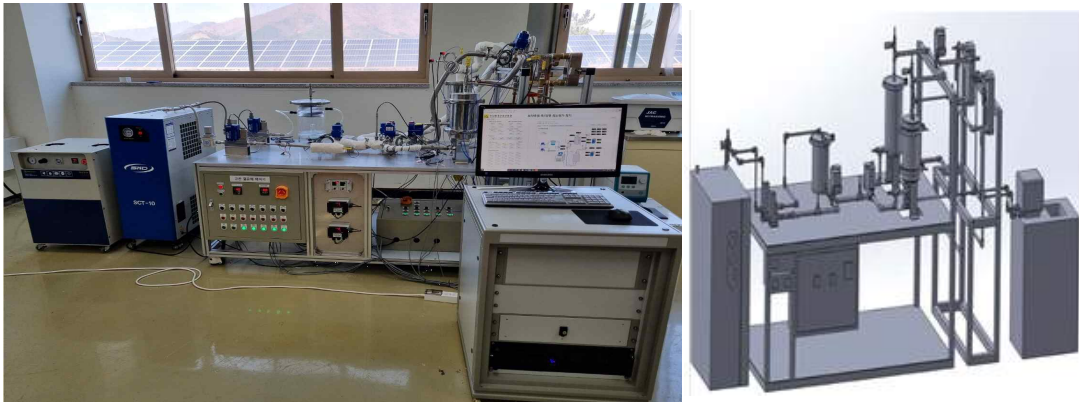
(1) 축열재의 수열안정성 평가 장치 설계: 축열재의 흡착성능 저하(수열조건) 및 수명을 평가하기 위한 온도와 수증기 압력을 제어할 수 있는 수열안정성 평가 장치 설계

- 가열 온도: 350°C ± 2.5°C
- 수증기 발생부 온도: 5 ~ 70 °C
- 압력 센서: Setra 730 사용(압력범위 정확도 100kPa ± 0.25%)
- 진공펌프: 2 × 10⁻⁴ kPa
- 2µm 금속필터
- 샘플 시료 양: 5 g
- 수증기압: 19.93 kPa(수조 온도 60 °C)

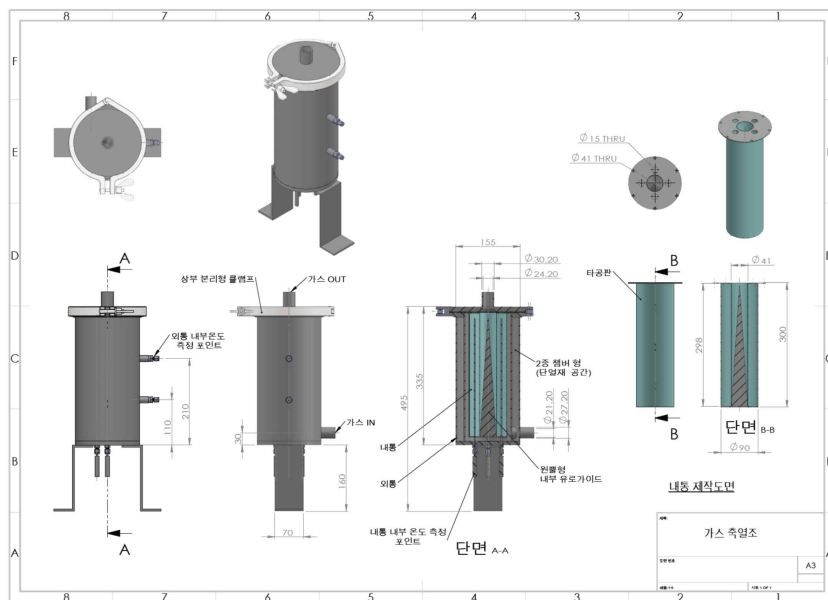


○ 가스 및 온수 축열 용량 테스트 시스템 제작

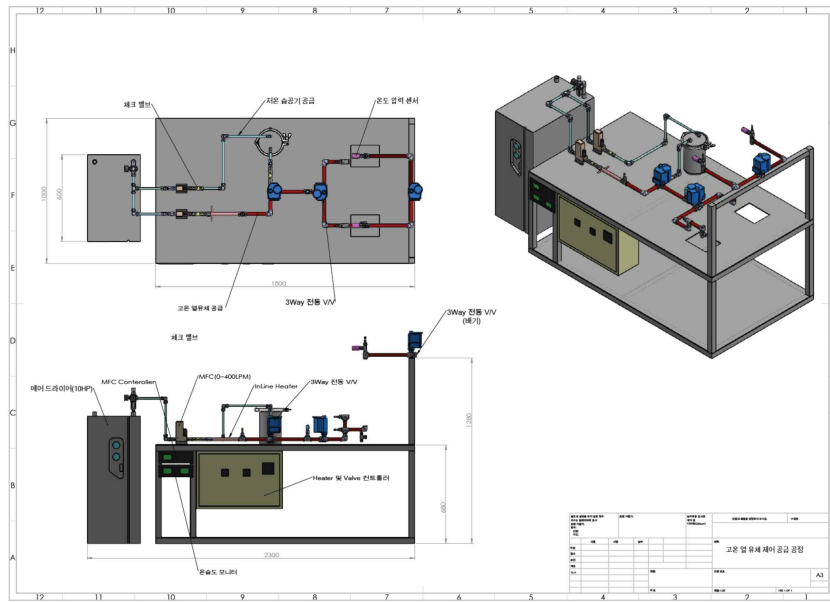
- 열분석 장비 : TGA, DSC
- 축열물질
- zeolite 13X, 2.5~5mm
- Activated alumina, 4.7mm
- 충전형태 : bead or pellet
- heater, water bath, thermo-hygrometer, pressure sensor



[가스 및 온수 축열 성능시험 장치]



[가스 축열조]



[고온 열 유체 제어 공급 시스템]

마. 공동연구개발기관 : (재)가나안복민회

○ 실증 스마트팜 온실 구축

- 스마트팜 온실 Test-bed 구축을 위한 실증 부지 및 유틸리티 위치 선정 완료 12월 말 구축 완료 예정

○ 스마트팜에 적절한 과채류 및 엽채류 선정

- 스마트팜 Test-bed에 적합한 특성을 가진 작물을 아래 그림과 같이 선정



[스마트팜 Test-bed에 사용할 과채류 및 엽채류]

○ 수소연료전지시스템용 DME 공급 시설 구축

- 수소 연료전지 시스템에 사용할 DME 연료 4,000Nm³ 용량의 탱크 및 디스펜서를 아래 그림과 같이 실증 Test-bed에 구축



[DME 연료 탱크 및 디스펜서]

바. 공동연구개발기관 : 상지대학교 산학협력단

○ 에너지

(1) 스마트팜주변의 대기중 오염원을 예측하고 그에 대한 연료전지성능에 미치는 영향을 문헌조사를 통하여 예측

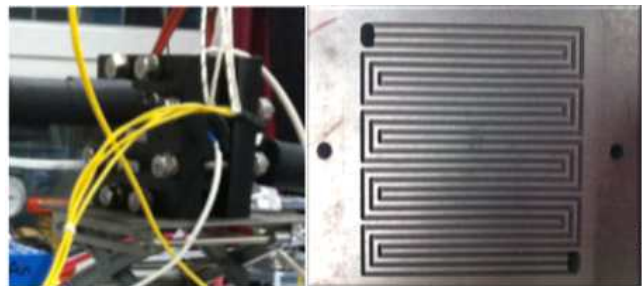
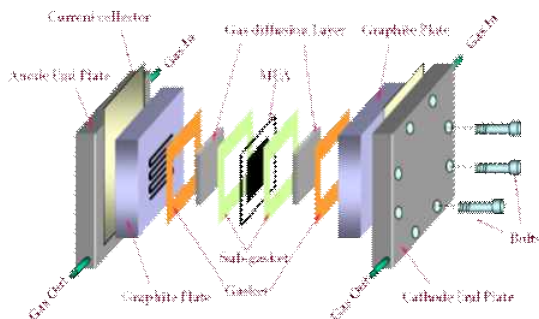
- 연료측 및 공기측으로 유입되는 오염물질조사
- 양극과 음극 부분의 습도
- 스마트팜 내의 연료전지시스템 설치장소의 미정으로 인한 주변의 예상이 어려운 관계로 대기 중의 흔한 오염물질인 NOx, SOx 등을 우선적인 실험대상으로 실험 설정 및 가스 주문 후 적절한 농도를 측정함
- 실제의 연료전지 시스템에 있어서 일반적인 운전환경의 범위 내에서는 CO2 의 존재는 연료전지 자체의 성능에 큰 영향을 미치지 않는지만, 경우에 따라 CO로 역변환되는 과정을 거쳐 촉매에 치명적인 영향을 끼치기도 함. 하지만 이런 현상은 쉽게 나타나지는 않기 때문에 본 과제에서는 CO에 관한 성능의 영향은 배제하기로 함.
- 또한, 농장주변의 대기환경은 일반적인 도시에서와는 다를 것으로 판단하여 본 과제에서는 공기극에서 발생 가능한 불순물을 토대로 문헌조사를 실시하여 가장 강한 영향성이 있는 오염원을 주제로 연구를 진행함. 오염원의 종류와 가능성 및 운전 가능한 농도는 아래의 표에 나타내었다. 이는 ISO 14687-2를 토대로 작성함

Characteristics (assay)	Type I ,Type II
	Grade D
Hydrogen fuel index (minimum mole fraction)	99.97%
Total non-hydrogen gases	300 μmol/mol
Maximum concentration of individual contaminations	
Water (H2O)	5 μmol/mol
Total hydrocarbons (Methane basis)	2 μmol/mol
Oxygen (O2)	5 μmol/mol
Helium (He)	300 μmol/mol
Total Nitrogen (N2) and Argon (Ar)b	100 μmol/mol
Carbon dioxide (CO2)	2 μmol/mol
Carbon monoxide (CO)	0.2 μmol/mol
Total sulfur compoundsc (H2S basis)	0.004 μmol/mol
Formaldehyde (HCHO)	0.01 μmol/mol
Formic acid (HCOOH)	0.2 μmol/mol
Ammonia (NH3)	0.1 μmol/mol
Total halogenated compoundsd (Halogenate ion basis)	0.05 μmol/mol
Maximum particulates concentration	1 mg/kg

[불순물 종류별 한계치 (ISO 14687-2)]

(2) PEMFC 제작

- MEA를 주문 제작하여 cell을 제조
- 연료전지 aging 작업 중 성능이 너무 낮게 나옴
- 가습장치 내부의 부식과 MFC의 유량 제어가 불안정함
- 제조업체 방문하여 가습장치 수리 및 MFC 유량 제어 수리 완료



[연료전지 단위셀의 개념도(좌), 실제 단위셀과 단위셀에 사용된 유로(우)]

(3) 오염모사가스 제작

- 각종 발생가능하고 연료전지의 성능에 강하게 영향을 미칠 수 있는 불순물과 오염가능온도, 그리고 분석방법에 관하여 아래의 표에 정리하였음
- 여러 문헌 조사결과 농지 주변의 발생가능한 오염원을 특정하여서 가스 제작 (100 ppm SO₂, NO₂)
- 100 ppm의 SO₂, NO₂ 가스를 희석하여 차기년도에 실험예정

불순물 종류	가능한 농도 (ppm)	Methods
Methanol (CH ₃ OH)	10~500	CV
Formaldehyde (HCHO)	1	CV
	5	CV
	30~500	CV
Formic acid (HCOOH)	2	CV
	100	EIS/CV
	600~1000	CV
Methyl-chlorid (CH ₃ Cl)	1	CV
	19	CV
Acetaldehyde (CH ₃ CHO)	30	CV
Acetylene (C ₂ H ₂)	0.5,1.4,2.3	CV
	300	CV/GC
Ethylene (C ₂ H ₄)	1%	CV
	5%	CV
	100	CV/MSP
Acrylic (C ₃ H ₆)	2,20,100	EIS
Toluene (C ₇ H ₈)	20	CV
	20	GC
	0.1,1,3	CV/EIS
	1,5,10,50	CV
	2	CV
Benzene (C ₆ H ₆)	10	CV
	20	GC
	2	CV
	2	CV
Nitrogen (N ₂)	80%	EIS
	25%~75%	CV/GA
	80%	GA
Nitric oxide (NO)	2	CV
	1,10,15	CV/EIS
Nitrogen dioxide (NO ₂)	0.1~0.75	CV/SIM
	2	CV
	2	F NMR
	2.5,5	CV
	1,10,15	CV/EIS
	2	CV
Methane (CH ₄)	100	CV
	10%~30%	GC/EIS
Ethane (C ₂ H ₆)	1,3,8	CV/EIS
Carbon oxysulfide (COS)	1	CV
	/	SIM
Naphthalene (C ₁₀ H ₈)	0.5,1.4,2.3	CV
	2.3	CV
Acetonitrile (CH ₃ CN)	2,20,100	CV

[PEMFC의 성능에 영향을 줄 수 있는 불순물 종류와 농도 및 분석방법]

이온	농도(ppm)	Methods
Na ⁺	/	CV
	/	X-ray/Ag-AgCl
	/	CMI
	/	SIM
	/	CV
	/	CMI
	5	SEM
	2,5,10	CV/EIS

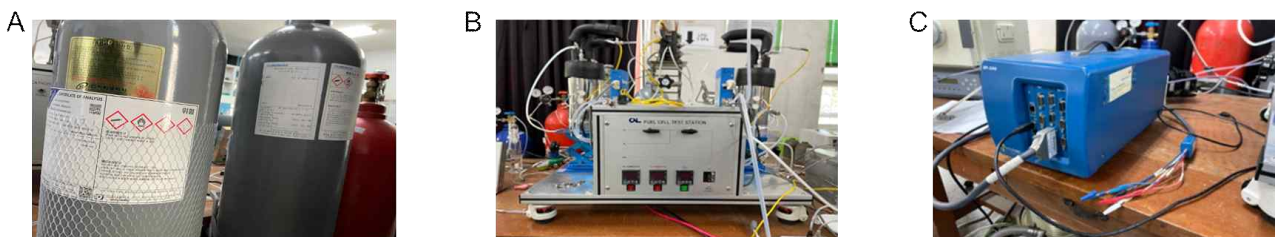
Fe ³⁺	/ / 0.1~100 /	/ CMI/X-ray EDX CMI
Fe ²⁺	/ 1,5,10	CMI CV
Li ⁺	/ / /	SIM X-ray/Ag-AgCl CMI
Co ²⁺	/ / 5~300	SIM EIS CV
Cu ²⁺	/ / 0.1~100	CMI CMI EDX
K ⁺	/ / /	CMI X-ray/Ag-AgCl SIM
Rb ⁺	/ /	CMI X-ray/Ag-AgCl
Cs ⁺	/ / /	CMI X-ray/Ag-AgCl XRF
Zn ²⁺	/	CMI
Ba ²⁺	/	CMI
Sr ²⁺	/	CMI
Al ³⁺	5 0.58 mM 1,5,10	SEM CV/EIS CV
Cr ³⁺	5,10	CV
Mg ²⁺	50~500 10,100	SEM/EDS/EPMA/XRD CV
Cl ⁻	/ 20 μM / 1,4,20 4	CV CV CV CV/SEM/EDX/XRD CV

[PEMFC 내부의 불순물관련 이온의 종류와 농도 및 분석방법]

※ CMI-Conductivity measuring instrument; EDX - Energy dispersive X-ray; SEM - Scanning electron microscopy; EPMA - Electron probe microanalysis; XRD - X-ray diffraction

(4) Electrochemical set up

- Potentiostat (SP-240) 장비와 Electric loader를 연결후 PC를 이용하여 Cyclic voltammetry (CV), Electrochemical impedance spectroscopy (EIS) test set up 완료

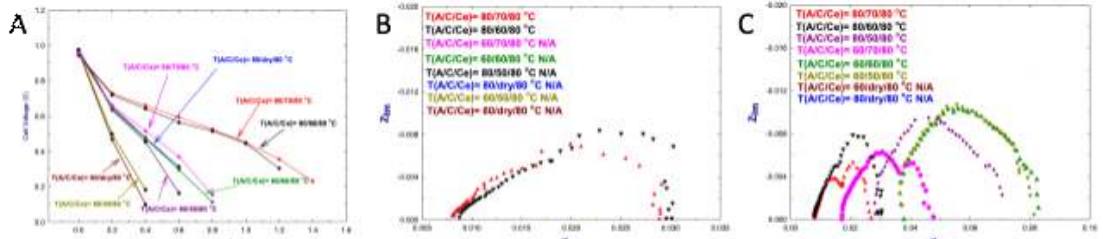


[연료전지 성능에 영향을 미치는 가스 분석을 위한 장비 설비. A, 오염모사가스. B, PEMFC 평가장치. C, Electrochemical impedance spectroscopy(EIS)]

(5) PEMFC 평가장치의 작동

- 증류수의 전기전도도가 너무 높게 나옴 (67μS/cm)
- 필터 교체 후 전기전도도가 정수기의 성능 범위안에 들어왔지만 (0~35μS/cm), 연료전지에서 사용하기에는 여전히 높은 전기전도도를 보이고 있음 (25~26μS/cm)
- Cathode의 유량 컨트롤러의 문제가 반복적으로 발생하여 관련된 교정 및 수리가 필요
- 조건에 따른 연료전지의 성능 테스트를 실시하여 연료전지의 성능과 관련된 EIS 분석을

실시함. 본 실험에서는 순수한 수소와 공기를 주입하여 연료전지의 성능평가와 EIS분석을 수행하여 그 결과를 비교함. 저전류밀도에서는 습도는 연료전지의 성능에 크게 영향을 주지 않으나, 고전류밀도에서는 크게 영향을 주는 것으로 평가됨



[각 조건별 연료전지 성능평가 결과. A, 연료전지성능평가(i-V curve). B, 저전류밀도(0.2A/cm²) EIS. C, 고전류밀도(1.2A/cm²) EIS]

○ 하우스 채소 재배 농가 환경조사

(0) 지역별 및 작물별 내외부 환경요인 조사

- 작물의 생산성 향상을 위해 일중 평균온도, 주간·야간 평균온도, 습도, 이산화탄소 등 환경요인들의 상호관계를 통한 최적화 기준이 필요함
- 광합성에 중요한 대기 중의 평균 이산화탄소 농도는 평균 400ppm로 작물 생육에 충분하지 않음. 작물 재배에서 적정 이산화탄소 농도를 설정하기 위해서는 온실 내외부 이산화탄소 농도를 측정하는 것이 중요함. 지역별 농가 비닐하우스 내외부 기상을 이산화탄소, 온도 기상 환경과 토양 환경으로 pH와 EC 조사를 조사함.
- 본 연구는 4개 지역 5개 작물 재배 하우스의 내부 및 외부 환경요인을 비교 분석하기 위하여 실시함. 우리나라 비닐하우스 내부의 이산화탄소 농도 현황을 정확히 파악하여 작물별 최적 이산화탄소 농도 설정에 의한 이산화탄소 공급의 효율성을 높여야 함. 특히, 작물별 이산화탄소 요구도가 차이가 있으므로 지역별, 작물별 하우스 내외부 환경요인 조사를 시행함.
- 시설 하우스 내외부 환경 요인 조사는 경기도 여주, 충남 보령, 충북 괴산, 강원도 홍천에서 실시함. 경기도 여주는 가지 21 농가, 고추 8 농가 / 보령은 오이 6 농가, 고추 11 농가 / 강원도 홍천에서 부추 6 농가를 대상으로 실시함

지역	조사 작물	조사 농가수
경기도 여주	가지	21
	고추	8
충남 보령	오이	6
	고추	11
강원 홍천	부추	6
합계		52

[비닐하우스 내외부 환경 조사 농가 현황]

(1-1) 여주지역 가지 재배 농가 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 조사

- 여주지역 비닐하우스 가지 재배 하우스 안과 밖의 이산화탄소 농도, 대기 중 온도, 광도 및 토양의 pH와 EC를 농가별, 월별로 조사함. 경기도 여주는 가지 21 농가를 대상으로 실시함



[여주 하우스 가지 재배 농가]



[가지 생육 상황]

연번	농가명	주소	면적(m ²)	품종
1	김광영	대신면 옥촌리 349-2	6,612	축양(톨반비)
2	김연화	가남읍 송림리 292	-	-
3	김인수	흥천면 다대리 644-1	-	-
4	김희선	흥천면 내사리 180	2,512	축양
5	노병호	흥천면 내사리 300	-	-
6	노장호	흥천면 내사리 187-7	5,620	축양(톨반비)
7	류해균	가남면 정단리 51-7	2,706	축양(톨반대목)
8	박성기	흥천면 외사리 97-8	-	-
9	성기운	흥천면 복대리 48-1	1,950	축양, B-K
10	염인수	흥천면 내사리 250	1,980	축양, B-K
11	이명재	흥천면 다대리 659-4	9,900	축양(톨반비)
12	이원식	흥천면 외사3리 422	-	-
13	임원운	흥천면 다대리 651-1	3,385	-
14	장동주	흥천면 내사리 217-2	2,310	축양
15	장동헌	흥천면 내사리 217-5	3,630	축양
16	전두병	흥천면 대상2리 259-13	7,203	-
17	정명기	흥천면 문장리 321-5	2,128	축양
18	조종호	가남읍 금당리 279	1,983	축양(오토킹-꽃수정)
19	조태욱	대신면 후포리 425-2	1,818	축양대목·톨반
20	최종준	흥천면 대당리 496-1	21,125	축양대목·톨반
21	한철희	대신면 옥촌리 857-3	-	-

[여주지역 비닐하우스 가지 재배 농가 현황]

- 여주 지역 가지 농가별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경을 농가별로 6월부터 수확종료기인 11월 동안 내외부 환경 요인의 차이를 관찰함. 조사 기간 동안 하우스 내외부 이산화탄소 농도를 조사한 비닐하우스 내부는 417.3 ppm, 외부 이산화탄소 농도는 467.7 ppm으로 하우스 내부에 이산화탄소 농가가 3.6 ppm 높음. 조사 기간 동안 하우스 내외부 온도 차이를 살펴본 결과 하우스 내부에서 30.6 ℃, 외부에서는 29.7 ℃로 하우스 내부 온도가 1.0 ℃정도 높음. 조사 기간 동안 재배 토양의 pH, EC 변화를 관찰함. 가지 재배 농가의 평균 pH는 6.0이었고 EC는 0.7 dS/m를 나타냄

농가명	조사일	이산화탄소 농도(ppm)			온도 (℃)			광도 (lux)	토양 pH	토양 EC (dS/m)
		하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)			
김광영	7월 9일	477.0	464.0	13.0	36.0	34.9	1.1	-	-	1.2
	8월 26일	484.0	481.0	3.0	30.8	30.8	0.0	10,830.0	6.8	1.5
	평균	480.5	472.5	8.0	33.4	32.9	0.6	10,830.0	6.8	1.3
김연화	8월 6일	503.0	500.0	3.0	39.8	38.7	1.1	-	7.1	0.3
	8월 27일	523.0	520.0	3.0	23.4	22.3	1.1	-	-	0.1
	평균	513.0	510.0	3.0	31.6	30.5	1.1	-	7.1	0.2
김인수	8월 12일	455.0	452.0	3.0	35.2	35.0	0.2	-	-	-
	9월 11일	343.0	340.0	3.0	31.3	30.2	1.1	19,890.0	7.2	0.2
	평균	399.0	396.0	3.0	33.3	32.6	0.7	19,890.0	7.2	0.2
김희선	8월 12일	446.0	443.0	3.0	34.0	33.8	0.2	-	-	-
	9월 11일	471.0	468.0	3.0	36.3	35.2	1.1	-	6.5	2.7
	11월 19일	441.0	436.0	5.0	19.8	18.3	1.5	-	-	-
	평균	452.7	449.0	3.7	30.0	29.1	0.9	-	6.5	2.7
노병호	11월 19일	447.0	446.0	1.0	19.8	18.3	1.5	-	-	-
	8월 12일	446.0	443.0	3.0	34.5	34.0	0.5	-	-	-
	9월 11일	497.0	494.0	3.0	37.3	36.2	1.1	-	5.2	0.3
	평균	463.3	461.0	2.3	30.5	29.5	1.0	-	5.2	0.3
노장호	8월 12일	446.0	443.0	3.0	34.1	34.0	0.1	-	-	-
	9월 11일	506.0	503.0	3.0	32.9	31.8	1.1	-	5.1	0.6
	11월 19일	487.0	483.0	4.0	19.1	18.1	1.0	-	-	-
	평균	479.7	476.3	3.3	28.7	28.0	0.7	-	5.1	0.6
류해균	7월 23일	486.0	469.0	17.0	27.0	25.9	1.1	-	-	0.4
	8월 27일	552.0	524.0	28.0	26.3	25.5	0.8	1,147.0	7.5	0.2
	11월 4일	600.0	597.0	3.0	19.3	18.2	1.1	-	-	-
	평균	546.0	530.0	16.0	24.2	23.2	1.0	1,147.0	7.5	0.3

박성기	8월 12일	510.0	507.0	3.0	33.0	32.0	1.0	-	-	-
	9월 11일	530.0	527.0	3.0	36.3	35.2	1.1	-	7.0	0.4
	11월 19일	512.0	510.0	2.0	18.3	17.9	0.4	-	-	-
	평균	517.3	514.7	2.7	29.2	28.4	0.8	-	7.0	0.4
성기윤	8월 12일	396.0	393.0	3.0	40.7	35.6	5.1	-	-	-
	9월 11일	383.0	380.0	3.0	28.3	27.2	1.1	16,650.0	6.5	1.2
	평균	389.5	386.5	3.0	34.5	31.4	3.1	16,650.0	6.5	1.2
염인수	8월 12일	410.0	407.0	3.0	38.0	36.0	2.0	-	-	-
	9월 11일	427.0	424.0	3.0	34.9	33.8	1.1	-	7.5	0.3
	11월 19일	537.0	533.0	4.0	18.1	17.4	0.7	-	-	-
	평균	458.0	454.7	3.3	30.3	29.1	1.3	-	7.5	0.3
이명재	7월 8일	484.0	481.0	3.0	32.0	30.9	1.1	-	-	0.4
	7월 8일	486.0	483.0	3.0	33.0	31.9	1.1	-	-	0.1
	8월 12일	480.0	477.0	3.0	38.6	36.0	2.6	-	-	-
	9월 11일	484.0	483.0	1.0	33.9	33.8	0.1	-	6.6	0.7
	평균	483.5	481.0	2.5	34.4	33.2	1.2	-	6.6	0.4
이원식	8월 12일	460.0	457.0	3.0	32.0	31.7	0.3	-	-	-
	평균	460.0	457.0	3.0	32.0	31.7	0.3	-	-	-
임원윤	8월 12일	469.0	466.0	3.0	39.0	35.0	4.0	-	-	-
	9월 11일	471.0	468.0	3.0	32.9	31.8	1.1	-	6.7	0.1
	평균	470.0	467.0	3.0	36.0	33.4	2.6	-	6.7	0.1
장동주	8월 12일	460.0	457.0	3.0	37.0	35.8	1.2	-	-	-
	9월 11일	483.0	480.0	3.0	36.3	35.2	1.1	-	5.9	1.3
	11월 19일	416.0	454.0	-38.0	19.5	18.6	0.9	-	-	-
	평균	453.0	463.7	-10.7	30.9	29.9	1.1	-	5.9	1.3
장동현	8월 12일	486.0	483.0	3.0	38.0	36.0	2.0	-	-	-
	9월 11일	482.0	486.0	-4.0	35.9	35.9	0.0	-	6.6	0.9
	11월 19일	491.0	488.0	3.0	18.6	17.4	1.2	-	-	-
	평균	486.3	485.7	0.7	30.8	29.8	1.1	-	6.6	0.9
전두병	7월 8일	443.0	440.0	3.0	21.0	19.9	1.1	-	-	0.4
	평균	443.0	440.0	3.0	21.0	19.9	1.1	-	-	0.4
정명기	8월 26일	513.0	495.0	18.0	30.3	30.6	-0.3	16,450.0	7.0	0.6
	평균	513.0	495.0	18.0	30.3	30.6	-0.3	16,450.0	7.0	0.6
조종호	7월 23일	496.0	493.0	3.0	31.0	29.9	1.1	-	-	2.4
	8월 27일	510.0	501.0	9.0	23.4	23.0	0.4	7,300.0	7.4	1.2
	9월 16일	455.0	452.0	3.0	31.9	30.8	1.1	-	6.4	1.3
	11월 4일	521.0	518.0	3.0	26.1	25.0	1.1	-	-	-
	평균	495.5	491.0	4.5	28.1	27.2	0.9	7,300.0	6.9	1.7
조태욱	7월 9일	482.0	446.0	36.0	29.0	27.9	1.1	-	-	1.2
	8월 26일	485.0	489.0	-4.0	29.9	30.1	-0.2	17,220.0	7.1	0.9
	평균	483.5	467.5	16.0	29.5	29.0	0.4	17,220.0	7.1	1.1
최종준	7월 8일	485.0	482.0	3.0	31.0	29.9	1.1	-	-	0.3
	8월 12일	470.0	467.0	3.0	39.5	35.1	4.4	-	-	-
	9월 11일	323.0	421.0	-98.0	28.3	28.8	-0.5	17,140.0	6.6	1.4
	평균	426.0	456.7	-30.7	32.9	31.3	1.7	17,140.0	6.6	0.9
한철희	7월 9일	467.0	466.0	1.0	33.0	31.9	1.1	-	-	0.2
	8월 26일	501.0	465.0	36.0	30.3	33.9	-3.6	-	6.0	0.7
	평균	484.0	465.5	18.5	31.7	32.9	-1.3	-	6.0	0.5

[여주지역 가지 농가별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 조사]

- 조사기간 동안 비닐하우스 내부 이산화탄소 농도는 11월 494 ppm으로 가장 높았고 9월에 450.4 ppm으로 가장 낮음. 가지 재배 토양의 평균 pH는 6.75이었고 EC는 0.6 dS/m를 나타냄

월	이산화탄소 농도(ppm)			온도 (°C)			광도 (lux)	토양 pH	토양 EC(dS/m)
	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)			
7	478.4	469.3	9.1	30.3	29.2	1.1	-	-	0.7
8	476.4	470.0	6.4	33.7	32.6	1.1	10,589	7.0	0.3
9	450.4	455.8	-5.5	33.6	32.8	0.8	17,893	6.5	0.9
11	494.7	496.1	-1.4	19.8	18.8	1.0	-	-	-
평균	475.0	472.8	2.2	29.4	28.4	1.0	14,241	6.75	0.6

[여주 지역 가지 농가의 월별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 평균 비교]

(1-2) 여주지역 고추 재배 농가 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 조사

- 여주지역 비닐하우스 고추 재배 농가 하우스 안과 밖의 이산화탄소 농도, 대기 중 온도, 광도 및 토양의 pH와 EC를 농가별, 월별로 조사함. 경기도 여주는 고추 8농가를 대상으로 실시함



[여주 하우스 고추 농가 포장]



[고추 재배 하우스]

연번	농가명	주소	면적(㎡)	품종
1	김연화	가남읍 송림리 292	-	칼탄스타
2	심병섭	대신면 송촌리 355-1	661	-
3	우광호	흥천면 계신리 516-3	396	-
4	원용관	가남읍 금당리 733-1	2640	돌격탄
5	장동주	흥천면 내사리 217-2	2,310	-
6	전두병	흥천면 대상2리 259-13	495	-
7	조병민	가남읍 송림리 300-3	990	아이66
8	최양희	북내면 석우리 273-1번지	1739	푸루스타

[여주지역 비닐하우스 고추 재배 농가 현황]

- 여주 지역 고추 농가별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경을 농가별로 6월부터 수확종료기인 11월 동안 내외부 환경 요인의 차이를 관찰함. 조사 기간 동안 하우스 내외부 이산화탄소 농도를 조사한 비닐하우스 내부는 490.6 ppm, 외부 이산화탄소 농도는 478.7 ppm으로 하우스 내부에 이산화탄소 농가가 11.8 ppm 높음. 조사 기간 동안 하우스 내외부 온도 차이를 살펴본 결과 하우스 내부에서 30.9 °C, 외부에서는 20.0 °C로 하우스 내부 온도가 0.8 °C정도 높음. 조사 기간 동안 재배 토양의 pH, EC 변화를 관찰함. 가지 재배 농가의 평균 pH는 6.7이었고 EC는 0.4 dS/m를 나타냄

농가명	이산화탄소 농도(ppm)			온도 (°C)			광도 (lux)	토양 pH	토양 EC(dS/m)
	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)			
김연화	525.0	513.0	12.0	30.5	29.4	1.1	-	7.5	0.1
심병섭	476.5	462.5	14.0	31.6	30.5	1.2	-	6.5	0.3
우광호	487.5	454.0	33.5	31.4	31.5	0.0	10,420.0	6.8	0.2
원용관	471.8	443.3	28.5	26.9	28.8	-1.9	2,780.0	7.5	0.3
장동주	481.0	474.0	7.0	32.8	31.7	1.1	-	5.4	1.3
전두병	464.0	456.7	7.3	34.9	31.6	3.3	18,120.0	6.2	0.5
조병민	578.7	571.7	7.0	30.8	29.7	1.1	-	6.9	0.4
최양희	440.0	454.7	-14.7	28.0	27.1	0.8	8,560.0	6.5	0.3
평균	490.6	478.7	11.8	30.9	30.0	0.8	9,970.0	6.7	0.4

[여주지역 고추 농가별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 조사]

- 조사기간 동안 비닐하우스 내부 이산화탄소 농도는 11월 548 ppm으로 가장 높았고 9월에 432.3 ppm으로 가장 낮음. 고추 재배 토양의 평균 pH는 6.8이었고 EC는 0.4 dS/m를 나타냄

월	이산화탄소 농도(ppm)			온도 (°C)			광도 (lux)	토양 pH	토양 EC(dS/m)
	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)			
7	474.0	467.2	6.8	31.0	29.9	1.1	-	-	0.2
8	531.9	515.1	16.8	31.6	31.1	0.5	6,600.0	6.9	0.4
9	441.0	432.3	8.7	28.7	28.0	0.7	11,746.7	6.7	0.5
11	548.0	536.0	12.0	29.1	28.0	1.1	-	-	-
평균	498.7	487.6	11.1	30.1	29.3	0.8	9,173.3	6.8	0.4

[여주 지역 고추 농가의 월별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 평균 비교]

(2-1) 충남 보령지역 오이 재배 농가 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 조사

- 보령지역 비닐하우스 안과 밖의 이산화탄소 농도, 대기 중 온도, 광도 및 토양의 pH와 EC를 농가별, 월별로 조사함. 보령 오이 6농가를 대상으로 조사를 실시함



[보령 오이 농가 포장]



[오이 포장]

연번	농가명	주소
1	고풍열	충남 보령시 천북면 흥보로 445-14
2	이원규	충남 보령시 천북면 사호장은로 493-12
3	이장우	충남 보령시 천북면 궁포리 1137-1
4	최광일	충남 보령시 천북면 하만리 545
5	최태열	천북면 흥보로 765-17
6	황운성	충남 보령시 천북면 하만리 1180-5

[보령지역 비닐하우스 오이 재배 농가 현황]

- 보령 지역 오이 농가별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경을 농가별로 6월부터 수확종료기인 11월 동안 내외부 환경 요인의 차이를 관찰함. 조사 기간 동안 하우스 내외부 이산화탄소 농도를 조사한 비닐하우스 내부는 506.2 ppm, 외부 이산화탄소 농도는 500.5 ppm으로 하우스 내부에 이산화탄소 농도가 5.7 ppm 높음. 조사 기간 동안 하우스 내외부 온도 차이를 살펴본 결과 하우스 내부에서 26.2 ℃, 외부에서는 25.8 ℃로 하우스 내부 온도가 0.4 ℃정도 높음. 조사 기간 동안 재배 토양의 pH, EC 변화를 관찰함. 가지 재배 농가의 평균 pH는 7.1 이었고 EC는 1.4 dS/m를 나타냄

농가명	조사일	이산화탄소 농도(ppm)			온도 (℃)			광도 (lux)	토양 pH	토양 EC(dS/m)
		하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)			
고풍열	7월 16일	515.0	522.0	-7.0	28.0	27.6	0.4	-	-	0.9
	8월 20일	474.0	469.0	5.0	25.9	25.5	0.4	-	6.8	1.0
	9월 30일	511.0	508.0	3.0	23.6	24.1	-0.5	4,250.0	6.9	0.8
	11월 25일	508.0	458.0	50.0	21.7	20.9	0.8	-	-	-
	평균	502.0	489.3	12.8	24.8	24.5	0.3	4,250.0	6.8	0.9
이원규	9월 30일	536.0	523.0	13.0	21.6	21.7	-0.1	12,340.0	8.0	0.7
	10월 28일	517.0	494.0	23.0	25.9	25.5	0.4	4,820.0	7.1	0.7
	11월 25일	510.0	507.0	3.0	16.5	16.1	0.4	-	-	-
	평균	521.0	508.0	13.0	21.3	21.1	0.2	8580.0	7.5	0.7
이장우	9월 30일	469.0	479.0	-10.0	31.9	32.0	-0.1	19,999.0	7.5	1.0
	10월 28일	515.0	486.0	29.0	28.0	27.6	0.4	18,400.0	-	1.4
	평균	492.0	482.5	9.5	30.0	29.8	0.1	19,199.5	7.5	1.2
최광일	7월 16일	524.0	522.0	2.0	28.0	27.6	0.4	-	-	0.3
	8월 20일	474.0	480.0	-6.0	30.4	31.5	-1.1	-	6.6	0.5
	11월 25일	546.0	545.0	1.0	23.6	20.5	3.1	-	-	-
	평균	514.7	515.7	-1.0	27.3	26.5	0.8	-	6.6	0.4
최태열	8월 20일	484.0	477.0	7.0	31.5	31.1	0.4	-	6.5	2.1
	9월 30일	513.0	499.0	14.0	26.1	26.6	-0.5	19,999.0	7.4	2.3
	11월 25일	507.0	504.0	3.0	19.6	18.4	1.2	-	-	-
	평균	501.3	493.3	8.0	25.7	25.4	0.4	19,999.0	6.9	2.2
황운성	7월 16일	506.0	514.0	-8.0	28.0	27.6	0.4	-	-	2.0
	평균	506.0	514.0	-8.0	28.0	27.6	0.4	-	-	2.0

[오이 농가별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 조사]

- 조사기간 동안 비닐하우스 내부 이산화탄소 농도는 7월 515 ppm으로 가장 높았고 8월에 475.3 ppm으로 가장 낮음. 오이 재배 농가의 평균 pH는 7.0이었고 EC는 1.1 dS/m를 나타냄

월	이산화탄소 농도(ppm)			온도 (°C)			광도 (lux)	토양 pH	토양 EC(dS/m)
	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)			
7	515.0	519.3	-4.3	28.0	27.6	0.4	-	-	1.1
8	477.3	475.3	2.0	29.3	29.4	-0.1	-	6.6	1.2
9	507.3	502.3	5.0	25.8	26.1	-0.3	14,147.0	7.4	1.2
10	516.0	490.0	26.0	27.0	26.6	0.4	11,610.0	7.1	1.1
11	517.8	503.5	14.3	20.4	19.0	1.4	-	-	-
평균	506.7	498.1	8.6	26.1	25.7	0.4	12878.5	7.0	1.1

[보령 지역 오이 농가의 월별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 평균 비교]

(2-1) 충남 보령지역 고추 재배 농가 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 조사

- 보령지역 비닐하우스 고추 농가에서 하우스 안과 밖의 이산화탄소 농도, 대기 중 온도, 광도 및 토양의 pH와 EC를 농가별, 월별로 조사함. 보령 고추 11농가를 대상으로 조사를 실시함



[보령 하우스 고추 농가 포장]



[고추 재배 하우스]

연번	농가명	주소
1	김덕호	충남 보령시 청라면 돌모루길 28
2	김영운	충남 보령시 청라면 원마을길 85
3	김정극	천북면 궁포리 251 외
4	안창규	천북면 궁포리 95-21
5	윤영철	충남 보령시 천북면 낙동리 301-1
6	김영운	충남 보령시 청라면 원마을길 85
7	이선구	충남 보령시 청라면 의평리 287-3
8	이장우	충남 보령시 천북면 궁포리 1137-1
9	이행원	충남 보령시 청라면 내현리 382-1/509-2
10	전영수	충남 보령시 청라면 신산리 188-6
11	한창규	천북면 궁포리 95-21

[보령지역 비닐하우스 고추 재배 농가 현황]

- 보령 지역 고추 농가별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경을 농가별로 6월부터 수확종료기인 11월 동안 내외부 환경 요인의 차이를 관찰함. 조사 기간 동안 하우스 내외부 이산화탄소 농도를 조사한 비닐하우스 내부는 500.0 ppm, 외부 이산화탄소 농도는 491 pm으로 하우스 내부에 이산화탄소 농가가 9.0 ppm 높음. 조사 기간 동안 하우스 내외부 온도 차이를 살펴본 결과 하우스 내부에서 28,5 °C, 외부에서는 28.0 °C로 하우스 내부 온도가 0.4 °C정도 높음. 조사 기간 동안 재배 토양의 pH, EC 변화를 관찰함. 고추 재배 농가의 평균 pH는 6.9 이었고 EC는 0.5 dS/m를 나타냄

농가명	조사일	이산화탄소 농도(ppm)			온도 (°C)			광도 (lux)	토양 pH	토양 EC(dS/m)
		하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)			
김덕호	7월 15일	504.0	498.0	6.0	36.0	35.4	0.6	-	-	0.3
	8월 19일	464.0	459.0	5.0	37.1	36.5	0.6	-	6.6	0.1
	11월 26일	473.0	470.0	3.0	4.3	4.8	-0.5	-	-	-
	평균	480.3	475.7	4.7	25.8	25.6	0.2	-	6.6	0.2

김영운	7월 15일	494.0	489.0	5.0	29.0	28.4	0.6	-	-	0.1
	8월 19일	488.0	483.0	5.0	29.9	29.3	0.6	-	6.8	0.2
	9월 29일	523.0	469.0	54.0	23.6	22.8	0.8	19,660.0	7.5	0.3
	11월 26일	595.0	586.0	9.0	7.9	7.9	0.0	-	-	-
	평균	525.0	506.8	18.3	22.6	22.1	0.5	19,660.0	7.1	0.2
김정극	7월 16일	574.0	570.0	4.0	31.0	30.4	0.6	-	-	1.3
	8월 19일	510.0	505.0	5.0	29.4	28.8	0.6	-	6.9	0.7
	9월 30일	471.0	474.0	-3.0	29.2	30.1	-0.9	19,610.0	6.9	2.3
	평균	518.3	516.3	2.0	29.9	29.8	0.1	19,610.0	6.9	1.4
안창규	7월 16일	519.0	516.0	3.0	33.0	32.4	0.6	-	-	0.2
	9월 30일	494.0	493.0	1.0	29.4	28.8	0.6	19,220.0	6.8	0.3
	평균	506.5	504.5	2.0	31.2	30.6	0.6	19,220.0	6.8	0.3
윤영철	8월 19일	467.0	462.0	5.0	32.4	31.8	0.6	-	6.9	0.5
	7월 16일	567.0	562.0	5.0	36.0	35.4	0.6	-	-	0.4
	9월 30일	533.0	515.0	18.0	23.0	23.9	-0.9	7,610.0	7.5	0.0
	11월 25일	523.0	514.0	9.0	19.4	18.8	0.6	-	-	-
	평균	522.5	513.3	9.3	27.7	27.5	0.2	7,610.0	7.2	0.3
이상기	7월 15일	468.0	449.0	19.0	35.0	34.4	0.6	-	-	0.5
	평균	468.0	449.0	19.0	35.0	34.4	0.6	-	-	0.5
이선구	8월 19일	511.0	506.0	5.0	26.9	26.3	0.6	-	6.9	0.4
	9월 29일	518.0	513.0	5.0	23.6	23.0	0.6	5,030.0	7.6	0.4
	11월 26일	564.0	512.0	52.0	9.6	8.9	0.7	-	-	-
	평균	531.0	510.3	20.7	20.0	19.4	0.6	5030.0	7.2	0.4
이장우	7월 16일	509.0	503.0	6.0	35.0	34.4	0.6	-	-	1.0
	8월 19일	517.0	482.0	35.0	29.4	29.0	0.4	-	7.1	0.5
	9월 30일	469.0	479.0	-10.0	29.9	32.0	-2.1	-	7.1	1.3
	10월 28일	487.0	486.0	1.0	28.3	27.0	1.3	18,400.0	-	-
	평균	495.5	487.5	8.0	30.7	30.6	0.0	18400.0	7.1	0.9
이행원	8월 19일	508.0	503.0	5.0	28.2	27.6	0.6	-	6.9	0.4
	평균	508.0	503.0	5.0	28.2	27.6	0.6	-	6.9	0.4
전영수	8월 19일	488.0	483.0	5.0	33.0	32.4	0.6	-	5.5	0.5
	평균	488.0	483.0	5.0	33.0	32.4	0.6	-	5.5	0.5
한창규	8월 19일	457.0	452.0	5.0	29.1	28.5	0.6	-	7.0	0.4
	평균	457.0	452.0	5.0	29.1	28.5	0.6	-	7.0	0.4

[고추 농가별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 조사]

- 보령 지역 고추 농가의 조사기간 동안 비닐하우스 내부 이산화탄소 농도는 9월 538 ppm으로 가장 높았고 10월 487.0 ppm으로 가장 낮음. 고추 재배 농가의 평균 pH는 6.90이었고 EC는 0.6 dS/m를 나타냄

월	이산화탄소 농도(ppm)			온도 (°C)			광도 (lux)	토양 pH	토양 EC(dS/m)
	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)			
7	519.3	512.4	6.9	33.6	33.0	0.6	-	-	0.5
8	490.0	481.7	8.3	30.6	30.0	0.6	-	6.7	0.4
9	501.3	490.5	10.8	26.5	26.8	-0.3	14,26.0	7.2	0.8
10	487.0	486.0	1.0	28.3	27.0	1.3	18,00.0	-	-
11	538.8	520.5	18.3	10.3	10.1	0.2	-	-	-
평균	507.3	498.2	9.1	25.8	25.4	0.5	16313.0	6.9	0.6

[보령 고추 농가의 월별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 평균 비교]

(3) 강원 홍천 부추 농가 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 조사

- 홍천지역 비닐하우스 부추 재배 6 농가에서 하우스 안과 밖의 이산화탄소 농도, 대기 중 온도, 광도 및 토양의 pH와 EC를 농가별, 월별로 조사함. 하우스 내부의 측정 위치는 두둑 상면 높이에서 이산화탄소 및 온도를 조사하였으며, 하우스 외부의 측정 위치는 지면에서 1m 높이에서 조사함



[홍천 부추 농가 포장]



[부추 재배 하우스]

연번	농가 명	주소
1	김태수	강원도 홍천군 남면 월천리 235
2	박유환	홍천군 남면 유목정리 234-9
3	박주안	강원도 홍천군 남면 시동리 34
4	암만 용	강원도 홍천군 남면 유치리 1142
5	이재복	강원도 홍천군 남면 유치리 1144-2
6	황동만	강원도 홍천군 남면 유치리 1656

[홍천지역 비닐하우스 부추 재배 농가 현황]

- 홍천지역 부추 재배 농가별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경을 농가별로 6월부터 수확 종료기인 11개월 동안 내외부 환경요인의 차이를 관찰함. 조사 동안 하우스 내외부 이산화탄소 농도를 조사한 비닐하우스 내부는 518.9 ppm, 외부 이산화탄소 농도는 506.8 ppm으로 하우스 내부에 이산화탄소 농도가 12.2ppm 높음. 부추 재배 농가의 평균 pH는 7.0이었고 EC는 0.6 dS/m를 나타냄

농가 명	조사일	이산화탄소 농도(ppm)			온도 (°C)			광도 (lux)	토양 pH	토양 EC(dS/m)
		하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)			
김태수	07월 22일	449.0	411.0	38.0	33.0	32.5	0.5	-	-	-
	07월 22일	424.0	421.0	3.0	32.0	31.5	0.5	-	-	-
	09월 02일	488.0	496.0	-8.0	31.9	31.1	0.8	-	7.2	0.2
	10월 06일	487.0	485.0	2.0	23.9	23.3	0.6	12,130.0	6.4	0.2
	평균	462.0	453.3	8.8	30.2	29.6	0.6	12,130.0	6.8	0.2
박유환	07월 30일	576.0	564.0	12.0	33.0	32.5	0.5	-	-	0.3
	09월 02일	491.0	466.0	25.0	31.5	32.5	-1.0	-	7.1	0.4
	10월 06일	546.0	538.0	8.0	23.8	23.4	0.4	10,480.0	6.2	0.8
	평균	537.7	522.7	15.0	29.4	29.5	0.0	10,480.0	6.7	0.5
박주안	09월 02일	519.0	504.0	15.0	31.7	31.2	0.5	16,430.0	6.7	1.0
	10월 06일	573.0	560.0	13.0	23.6	22.8	0.8	9,410.0	7.1	1.2
	평균	546.0	532.0	14.0	27.7	27.0	0.7	12,920.0	6.9	1.1
엄남용	07월 22일	530.0	523.0	7.0	32.0	31.5	0.5	-	-	2.5
	09월 02일	525.0	496.0	29.0	31.4	31.2	0.2	-	7.1	0.1
	10월 06일	530.0	523.0	7.0	23.3	22.9	0.4	4,220.0	7.2	0.7
	평균	528.3	514.0	14.3	28.9	28.5	0.4	4,220.0	7.2	1.1
이재복	07월 22일	514.0	510.0	4.0	32.0	31.5	0.5	-	-	0.2
	09월 02일	518.0	486.0	32.0	31.1	31.4	-0.3	17,270.0	7.1	0.5
	10월 06일	575.0	554.0	21.0	23.4	22.0	1.4	4,280.0	7.5	0.4
	평균	535.7	516.7	19.0	28.8	28.3	0.5	10,775.0	7.3	0.4
황동문	10월 06일	504.0	502.0	2.0	22.9	22.6	0.3	10,550.0	7.4	0.1
	평균	504.0	502.0	2.0	22.9	22.6	0.3	10,550.0	7.4	0.1

[부추 농가별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 조사]

- 홍천 지역 부추 농가의 조사기간 동안 비닐하우스 내부 이산화탄소 농도는 10월 535 ppm으로 가장 높았고 7월 498.6 ppm으로 가장 낮음. 부추 재배 농가의 평균 pH는 7.0이었고 EC는 0.7 dS/m를 나타냄

월	이산화탄소 농도(ppm)			온도 (°C)			광도 (lux)	토양 pH	토양 EC(dS/m)
	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)			
7	498.6	485.8	12.8	32.4	31.9	0.5	-	-	1.0
9	508.2	489.6	18.6	31.5	31.5	0.0	16850.0	7.0	0.4
10	535.8	527.0	8.8	23.5	22.8	0.7	8511.7	7.0	0.6
평균	514.2	500.8	13.4	29.1	28.7	0.4	12680.8	7.0	0.7

[홍천 지역 부추 농가 월별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 평균 비교]

(4) 충북 괴산 고추 농가 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 조사

- 괴산지역 비닐하우스 고추 재배 4개 농가에서 하우스 안과 밖의 이산화탄소 농도, 대기 중 온도, 광도 및 토양의 pH와 EC를 농가별, 월별로 조사함. 하우스 내부의 측정위치는 두둑 상면 높이에서 이산화탄소 및 온도를 조사하였으며, 하우스 외부의 측정위치는 지면에서 1 m 높이에서 조사함



[괴산 고추 포장]



[농가 고추 포장 생육]

연번	농가명	주소
1	곽호석	청안면 부흥리 108
2	김봉구	사리면 사리로소매2길 125
3	서인범	사리면 모래재로 산정길 32-3
4	손석화	사리면 하도길 5

[괴산지역 비닐하우스 고추 재배 농가 현황]

- 괴산 지역 고추 재배 조사 기간 동안 하우스 내외부 이산화탄소 농도를 조사한 비닐하우스 내부는 482.7 ppm, 외부 이산화탄소 농도는 460.3 ppm으로 하우스 내부에 이산화탄소 농가가 13.2 ppm 높음

농가명	조사일	이산화탄소 농도(ppm)			온도 (°C)			광도 (lux)	토양 pH	토양 EC(dS/m)
		내부 (A)	외부(B)	차이(A-B)	내부 (A)	외부(B)	차이(A-B)			
곽호석	7월 28일	462.0	465.0	-3.0	31.0	30.5	0.5	-	-	0.5
	8월 13일	449.0	454.0	-5.0	27.9	28.6	-0.7	8,660.0	6.9	0.5
	9월 9일	470.0	465.0	5.0	31.7	30.6	1.1	-	6.4	0.8
	평균	460.3	461.3	-1.0	30.2	29.9	0.3	8,660.0	6.6	0.6
김봉구	8월 13일	474.0	465.0	9.0	29.2	29.4	-0.2	5,540.0	6.8	0.4
	9월 9일	490.0	458.0	32.0	31.2	31.0	0.2	4,220.0	6.8	0.3
	10월 7일	483.0	480.0	3.0	23.9	24.3	-0.4	5,140.0	7.0	0.1
	평균	482.3	467.7	14.7	28.1	28.2	-0.1	4,966.7	6.9	0.3
서인범	8월 13일	563.0	472.0	91.0	29.3	29.1	0.2	8,690.0	5.6	0.4
	9월 9일	484.0	462.0	22.0	31.4	32.2	-0.8	-	6.3	0.3
	10월 7일	479.0	471.0	8.0	23.8	24.0	-0.2	15,770.0	6.6	-
	10월 23일	499.0	496.0	3.0	28.8	28.2	0.6	18,080.0	-	-
평균	506.3	475.3	31.0	28.3	28.4	-0.1	14,180.0	6.2	0.2	
손석화	8월 13일	474.0	459.0	15.0	28.9	29.1	-0.2	16,600.0	6.6	0.6
	9월 9일	493.0	483.0	10.0	31.3	32.0	-0.7	12,240.0	6.5	0.4
	10월 7일	479.0	480.0	-1.0	23.6	23.4	0.2	3,460.0	6.3	2.1
	평균	482.0	474.0	8.0	27.9	28.2	-0.2	10,766.7	6.5	1.0

[고추 농가별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 조사]

- 괴산 지역 고추 농가의 조사기간 동안 비닐하우스 내부 이산화탄소 농도는 8월 490.0 ppm으로 가장 높았고 7월 462.0 ppm으로 가장 낮음. 조사 기간 동안 하우스 내외부 온도 차이를 살펴본 결과 하우스 내부 온도가 0.5 ℃정도 높음. 조사 기간 동안 재배 토양의 pH, EC 변화를 관찰함. 가지 재배 농가의 평균 pH는 6.5이었고 EC는 0.5 dS/m를 나타냄

월	이산화탄소 농도(ppm)			온도 (℃)			광도 (lux)	토양 pH	토양 EC(dS/m)
	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)	하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)			
7	462.0	465.0	-3.0	31.0	30.5	0.5	-	-	0.5
8	490.0	462.5	27.5	28.8	29.1	-0.2	9,872.5	6.5	0.5
9	484.3	467.0	17.3	31.4	31.5	-0.1	8,230.0	6.5	0.5
10	485.0	481.8	3.3	25.0	25.0	0.1	10,612.5	6.6	0.7
평균	480.3	469.1	11.3	29.1	29.0	0.1	9,571.7	6.5	0.5

[괴산 지역 고추 농가의 월별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경 평균 비교]

(5) 지역별 비닐하우스 내외부 이산화탄소 농도 비교

- 지역별, 작물별 비닐하우스 내외부 이산화탄소 농도를 조사한 결과 조사 기간 동안 비닐하우스 내부 이산화탄소 농도는 496.4 ppm이었고, 하우스 밖 외부의 이산화탄소 농도는 486.3 ppm를 나타냄. 대기 중의 이산화탄소 농도는 300-500범위에 있고 세계적으로 이산화탄소 농도는 평균 400 ppm이라고 알려져 있는데 우리나라 하우스 재배 농가의 하우스 내부 이산화탄소 농도가 496.4 ppm를 나타내어 상당히 높은 결과를 나타냄. 하우스 내외부 이산화탄소 농도 비교 결과 비닐하우스 내부 이산화탄소 농도가 외부보다 10.1 ppm 높음. 지역별로는 홍천 부추 농가의 평균 이산화탄소 농도가 518.9 ppm으로 가장 높음

지역	작물	이산화탄소 농도(ppm)		
		하우스 내부 (A)	외부 (B)	차이 (A-B)
여주	가지	471.3	467.7	3.6
	고추	490.6	478.7	11.1
	평균	480.9	473.2	7.8
보령	오이	506.2	500.5	5.7
	고추	500.5	491.0	9.0
	평균	503.4	495.7	7.6
홍천	부추	518.9	506.8	12.2
괴산	고추	482.7	469.6	13.2
평균		496.4	486.3	10.1

[지역별, 작물별 비닐하우스 내외부 이산화탄소 농도 평균 비교]

(6) 결론

- 작물 재배에서 적정 이산화탄소 농도를 설정하기 위해서는 온실 내외부 이산화탄소 농도를 측정하는 것이 중요함. 지역별 농가 비닐하우스 내외부 기상을 이산화탄소, 온도, 기상 환경과 토양 환경으로 pH와 EC 조사를 조사함. 본 연구는 4개 지역 5개 작물 재배 하우스의 내부 및 외부 환경요인을 비교 분석하기 위하여 실시함. 우리나라 비닐하우스 내부의 이산화탄소 농도 현황을 정확히 파악하여 작물별 최적 이산화탄소 농도 설정에 의한 이산화탄소 공급의 효율성을 높여야 함. 특히, 작물별 이산화탄소 요구도가 차이가 있으므로 지역별, 작물별 하우스 내외부 환경요인 조사를 실시함.
- 시설 하우스 내외부 환경 요인 조사는 경기도 여주, 충남 보령, 충북 괴산, 강원도 홍천에서 실시함. 경기도 여주는 가지 21농가, 고추 8농가를 대상으로 실시함. 보령은 오이 6 농가, 고추 11농가 실시하였고 강원도 홍천에서 6농가를 대상으로 실시함.
- 월별 비닐하우스 내외부 기상 및 토양 환경을 농가별로 7월부터 수확종료기인 11월 동안 내외부 이산화탄소 농도의 변화를 조사함. 조사 기간 동안 비닐하우스 내부 이산화탄소 농도는 11월 520.2 ppm으로 가장 높았고 7월 491.3 ppm으로 가장 낮음. 조사 기간 동안 비닐하우스 외부 이산화탄소 농도는 11월 514.7 ppm으로 가장 높았고 9월 496.2 ppm으로 가장 낮음.
- 지역별, 작물별 비닐하우스 내외부 이산화탄소 농도를 조사한 결과 조사 기간 동안

비닐하우스 내부 이산화탄소 농도는 496.4 ppm이었고, 하우스 밖 외부의 이산화탄소 농도는 486.3 ppm를 나타냄. 대기 중의 이산화탄소 농도는 300-500범위에 있고 세계적으로 이산화탄소 농도는 평균 400 ppm이라고 알려져 있는데 우리나라 하우스 재배 농가의 하우스 내부 이산화탄소 농도가 496.4 ppm를 나타내어 상당히 높은 결과를 나타냄. 하우스 내외부 이산화탄소 농도 비교 결과 비닐하우스 내부 이산화탄소 농도가 외부보다 10.1 ppm 높음. 지역별로는 흥천 부추 농장의 평균 이산화탄소 농도가 518.9 ppm으로 가장 높음

○ 이산화탄소 시비 스마트팜 제어 시스템을 통한 작물생육 검정

(1) 이산화탄소 센서 정보를 빅데이터베이스에 저장하여 실시간 모니터링 시스템 구축

- 이산화탄소 균일 처리를 위한 시스템을 개발함. 이는 이산화탄소 관련 환경데이터의 자동생성과 실시간 저장 및 관리, 농도 제어가 가능
- 비닐하우스 안의 CO2 농도를 센서가 감지하여 농도가 낮을 경우, 설정 농도에 맞게 공급해 주며, CO2 데이터는 1분 간격으로 실시간 저장되며, 인터넷으로 전송



[이산화탄소 센서 데이터 실시간 모니터링 시스템 구축]

(2) 스마트 팜을 위한 이산화탄소 데이터 생성 및 이산화탄소 자동 제어

- 이산화탄소 센서 시스템 제어
 - : 아두이노 우노 WiFi 보드
 - : 오픈 소스를 기반으로 한 단일 보드 마이크로컨트롤러와 개발 도구
 - : ESP8266 기반의 무선 전송 기능이 포함되어 있어 무선 전송이 가능
 - : Atmega328 마이크로컨트롤러와 ESP8266은 TCP/IP 프로토콜 스택이 통합된 SoC로 WiFi 네트워크에 접속
- 온습도 측정
 - : 고정밀 디지털 온습도센서(AM2302), 방수 온습도 센서
 - : AM2302센서는 DHT22 센서의 와이어 장착 버전
 - : 온도 : -40℃ ~ +80℃ 측정 가능
- 릴레이 모듈
 - : SSR 릴레이 모듈
- 이산화탄소 측정
 - : CM1108, MH-Z14A, UART 적외선 이산화탄소 센서, 그루부 이산화탄소 센서
 - : 0 ~ 5000ppm 데이터 측정
- 이산화탄소 생성
 - : 이산화탄소 고압 볼베기(2KG/3.4L)
- 기타 센서

(3) 이산화탄소 센싱 데이터 실시간 저장 및 관리

- 서버 구축에 필요한 하드웨어
 - : IBM x3500 서버
 - : 유무선 wifi 공유기

- 서버 구축에 필요한 소프트웨어
 - : 운영체제 Ubuntu 20.04 LTS
 - : 데이터베이스 : Mysql 14.14
 - : 웹 서버 : Apache 2.4.18
 - : 웹 서버 언어 : PHP 7.0

(4) 이산화탄소 센싱 데이터 실시간 모니터링

- 이산화탄소 데이터를 실시간으로 모니터링하기 위해 1분 간격으로 저장
- 이산화탄소 380 ppm ~ 420 ppm과 이산화탄소 780 ppm ~ 820 ppm의 2개의 재배 시스템 구축
- 웹 서버를 통한 웹에서 실시간 모니터링
- 무선(wifi) 통신을 이용한 스마트 폰에서 실시간 모니터링

(5) 이산화탄소 380 ppm ~ 420 ppm 측정 데이터 분석

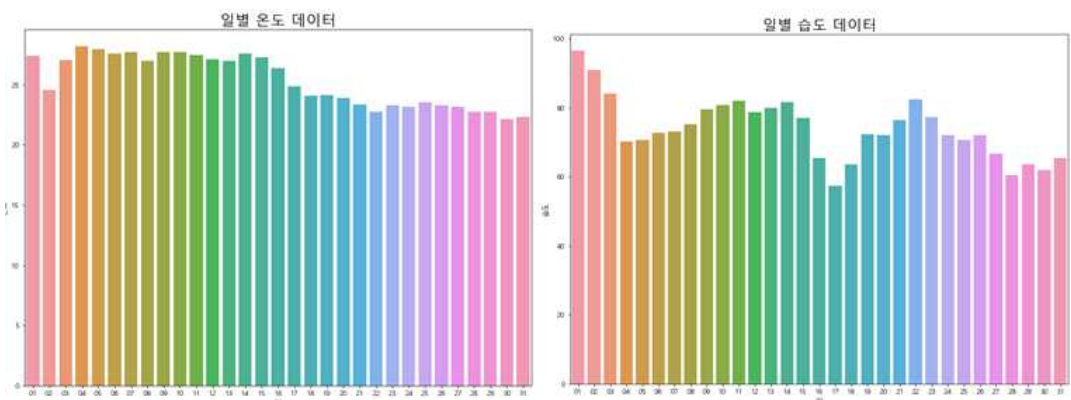
- 측정 데이터의 통계적 분석
 - : 측정 일자와 시간 : 2021년 8월 27일 14시 33분 ~ 10월 31일 13시 32분
 - : 측정된 원시(source) 데이터를 분석한 결과 정상 범주에서 크게 벗어난 이상치(outlier)가 존재하여 제거함.
 - : 재배 작물의 온도 데이터는 평균 25.08℃, 중위값은 26.2℃, 25% 값은(1사분위) 22.1℃, 75% 값은(4사분위) 27.5℃, 최소값 16.7℃, 최대값은 30.3℃
 - : 습도 데이터의 평균은 72.76%, 중위값은 78.3%, 25% 값은(1사분위) 57.6%, 75% 값은(4사분위) 88.9%, 최소값 29.6%이고 최대값은 99.9%
 - : 이산화탄소의 평균은 366.32 ppm, 중위값은 376 ppm, 25% 값은(1사분위) 348 ppm, 75% 값은(4사분위) 397 ppm, 최소값 200 ppm 이고 최대값은 512 ppm

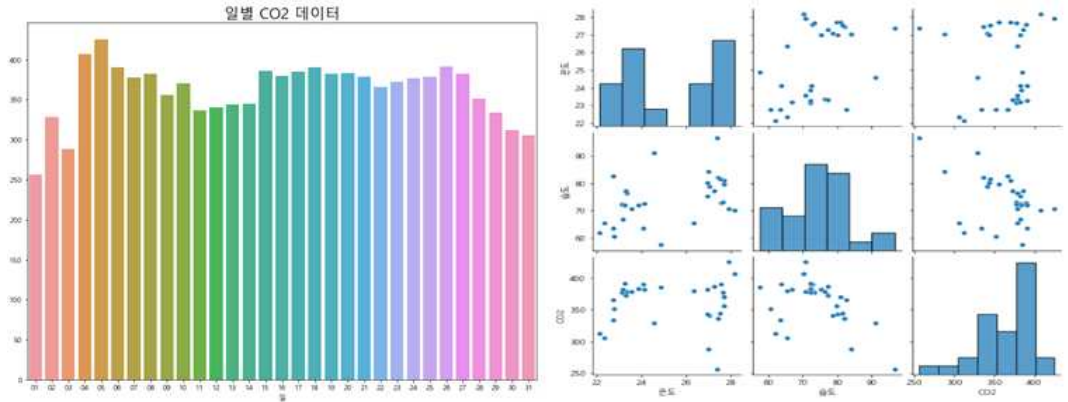
	온도(Temperature)	습도(Humidity)	CO2 concentration (ppm)
Count	72086.000000	72086.000000	72086.000000
Mean	25.082907	72.760576	366.329648
Std	3.367354	18.938003	53.886230
Min	16.700000	29.600000	200.000000
25%	22.200000	57.600000	348.000000
50%	26.200000	78.300000	376.000000
75%	27.500000	89.900000	397.000000
Max	30.300000	99.900000	512.000000

[이산화탄소 380 ppm ~ 420 ppm 측정 데이터의 통계적 정보]

- 측정 데이터의 일별 데이터 그래프 분석

- : 측정 일자와 시간 : 2021년 8월 27일 14시 33분 ~ 10월 31일 13시 32분
- : 극단치 경계를 벗어난 이상치 값을 제거후 측정 데이터는 72,086 개로 일별(1일 ~ 31일) 온도, 습도, 이산화탄소 데이터와 각 측정 데이터의 상관 관계 그래프를 보여주고 있음



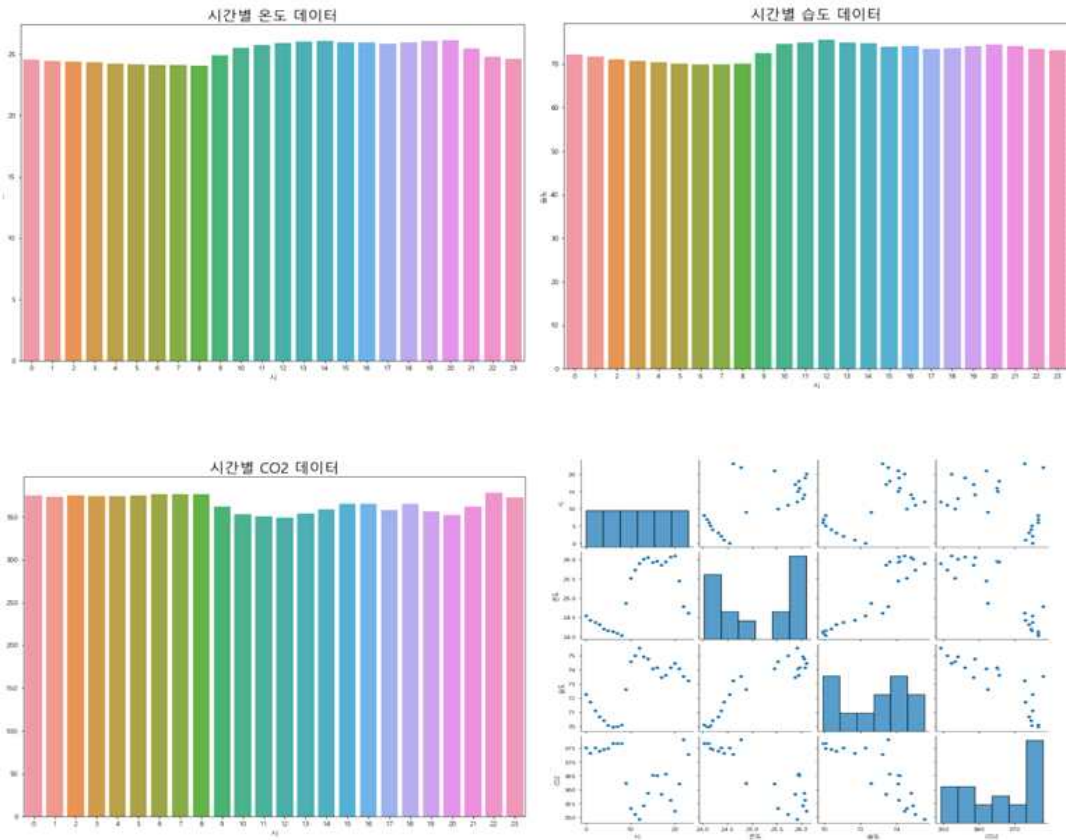


[이산화탄소 380 ppm ~ 420 ppm 측정 데이터의 일별 그래프 분석]

- 측정 데이터의 시간별 데이터 그래프 분석

: 측정 일자과 시간 : 2021년 8월 27일 14시 33분 ~ 10월 31일 13시 32분

: 극단치 경계를 벗어난 이상치 값을 제거후 측정 데이터는 72,086 개로 시간별(0시 ~ 23시) 온도, 습도, 이산화탄소 데이터와 각 측정 데이터의 상관 관계 그래프를 보여주고 있음



[이산화탄소 380 ppm ~ 420 ppm 측정 데이터의 시간별 그래프 분석]

(6) 이산화탄소 780 ppm ~ 820 ppm 측정 데이터 분석

- 측정 데이터의 통계적 분석

: 측정 일자과 시간 : 2021년 8월 06일 13시 40분 ~ 10월 31일 13시 32분

: 측정된 원시(source) 데이터 중 분석한 결과 정상 범주에서 크게 벗어난 이상치(outlier)가 존재하여 제거함.

: 극단치 경계를 벗어난 이상치 값을 제거하면 측정 데이터는 96,461 개

: 재배 작물의 온도 데이터는 평균 26.68℃, 중위값은 26.6℃, 25% 값은(1사분위) 25.4도, 75% 값은(4사분위) 28도, 최소값 20.2도이고 최대값은 32.4℃

: 습도 데이터의 평균은 88.92%, 중위값은 90.7%, 25% 값은(1사분위) 85.4%, 75% 값은(4사분위) 94.7%, 최소값 62.9%이고 최대값은 94.7%

: 이산화탄소의 평균은 690.81 ppm, 중위값은 787 ppm, 25% 값은(1사분위) 593

ppm, 75% 값은(4사분위) 807 ppm, 최소값 84 ppm 이고 최대값은 1210 ppm

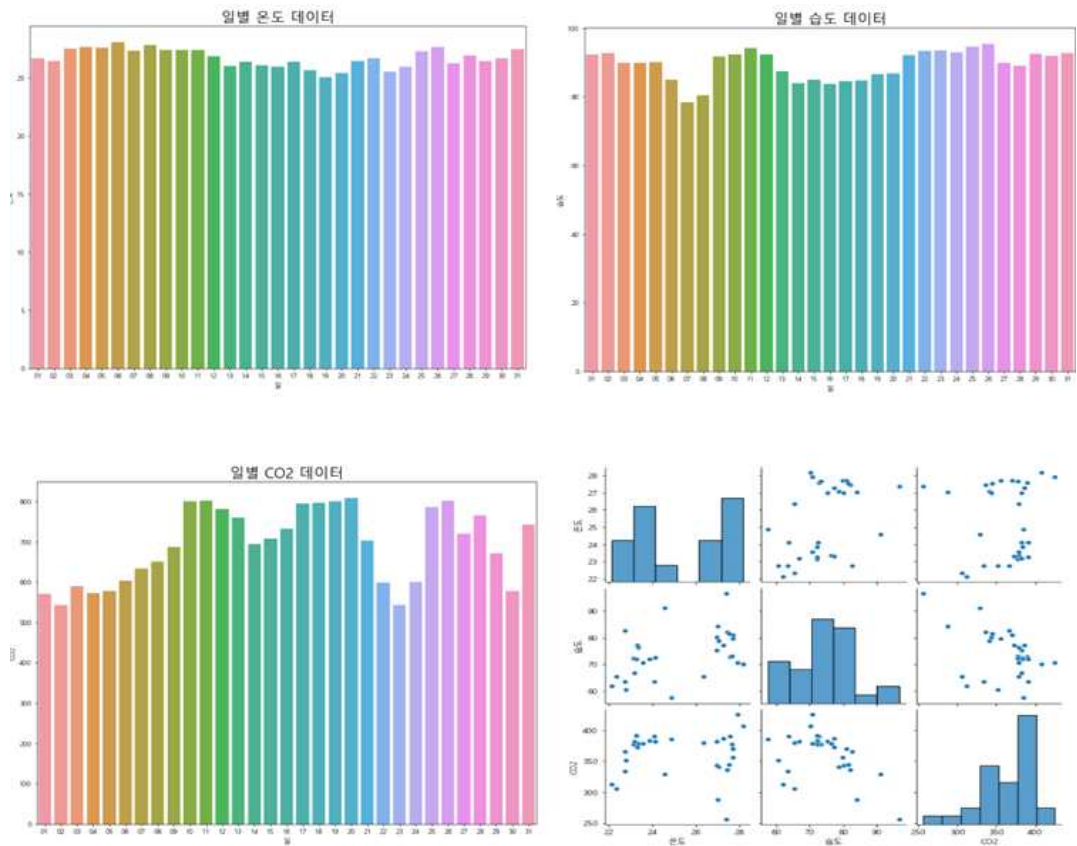
	온도(Temperature)	습도(Humidity)	CO2 concentration (ppm)
Count	96461.000000	96461.000000	96461.000000
Mean	26.688198	88.924243	690.810483
Std	2.028640	7.699154	182.205339
Min	20.200000	62.900000	84.000000
25%	25.400000	85.400000	593.000000
50%	26.600000	90.700000	787.000000
75%	28.000000	94.700000	807.000000
Max	32.400000	99.800000	1,210.000000

[이산화탄소 780 ppm ~ 820 ppm 측정 데이터의 통계적 정보]

- 측정 데이터의 일별 데이터 그래프 분석

: 측정 일자와 시간 : 2021년 8월 06일 13시 40분 ~ 10월 31일 13시 32분

: 극단치 경계를 벗어난 이상치 값을 제거후 측정 데이터는 96,461 개로 일별(1일 ~ 31일) 온도, 습도, 이산화탄소의 데이터와 각 측정 데이터의 상관 관계 그래프를 보여주고 있음

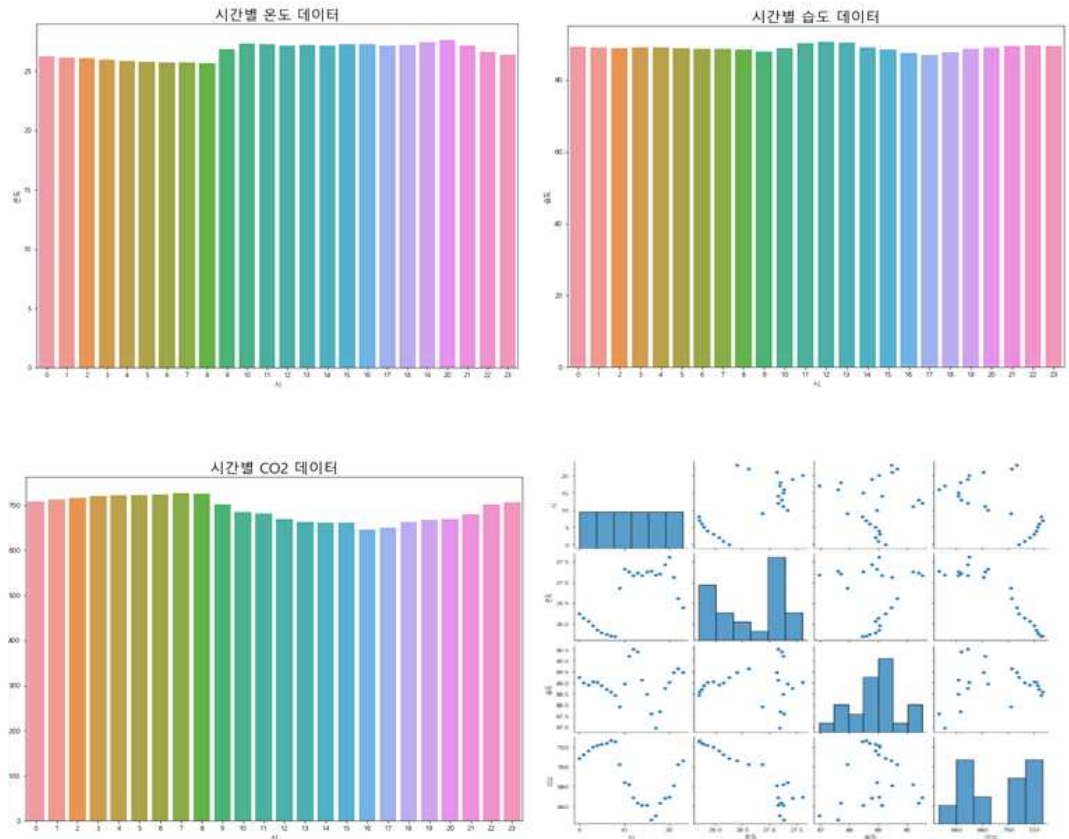


[이산화탄소 780 ppm ~ 820 ppm 측정 데이터의 일별 그래프 분석]

- 측정 데이터의 시간별 데이터 그래프 분석

: 측정 일자와 시간 : 2021년 8월 06일 13시 40분 ~ 10월 31일 13시 32분

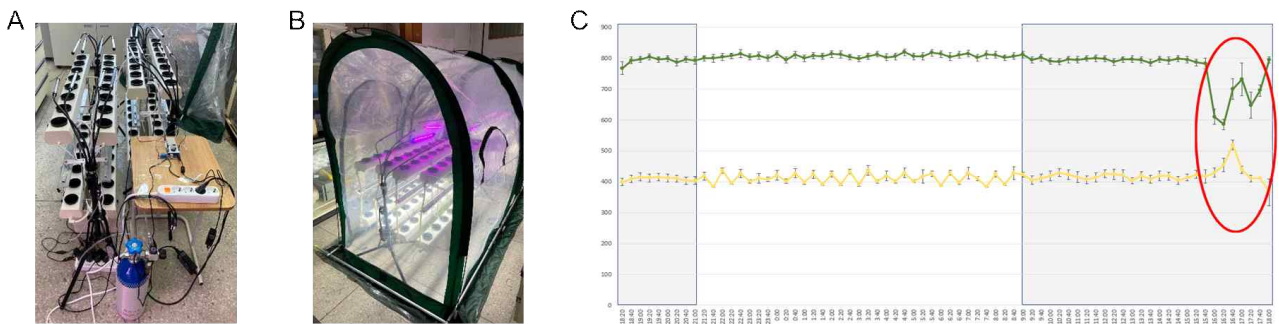
: 극단치 경계를 벗어난 이상치 값을 제거후 측정 데이터는 96,461 개로 시간별(0시 ~ 23시) 온도, 습도, 이산화탄소의 데이터와 각 측정 데이터의 상관 관계 그래프를 보여주고 있음



[이산화탄소 780 ppm ~ 820 ppm 측정 데이터의 시간별 그래프 분석]

(7) 이산화탄소 농도별 작물 생육 검정

- 설비된 이산화탄소 제어 시스템을 통하여 400 ppm 과 800 ppm의 일정한 농도의 이산화탄소를 처리함. 이산화탄소의 농도 유지에 대한 확인을 위하여 밀폐형 소형 하우스에서 이산화탄소 의 농도를 측정함. 그 결과, 수경 재배시설의 양액 교체를 위하여 하우스를 개방하는 시간 이외에는 처리를 위한 400 ppm과 800 ppm의 이산화탄소 농도가 유지됨



[밀폐형 하우스의 수경재배 시스템. A, 수경재배기와 이산화탄소 공급 제어 시스템. B, 밀폐형 하우스. C, 시간대별 400 ppm과 800 ppm 처리구 하우스의 이산화탄소 농도. 붉은 원은 양액 교체를 위한 개방 시간을 나타냄. 선의 색은 각 처리구를 나타냄(노란색: 400 ppm, 녹색: 800 ppm)]

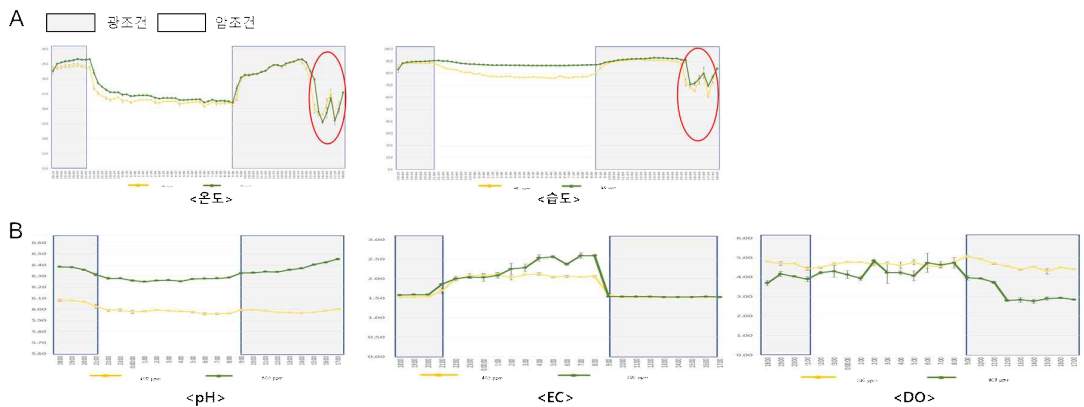
(8) 작물 생육 조사

- 이산화탄소 적용 작물은 향산화 효과가 높은 특용 작물 중에서 회향(*Foeniculum vulgare*)과 쌈채소 목적으로 이용되는 엽채류 상추(*Lactuca sativa*)를 재배하였음. 식물의 종자는 아람씨앗으로부터 구입하여 26도씨에서 빛 14/ 암 10의 조건에서 2주 동안 발아시켰음. 발안된 종자는 수경재배기로 정식하여 생육의 변화를 관찰함. 수경재배시 사용되는 양액의 조성은 다음과 같음

회향 양액 (g)		상추 양액 (g)	
KNO_3	12.12	KNO_3	80.8
$NH_4H_2PO_4$	2.3	$NH_4H_2PO_4$	1.14
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	4.72	$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	4.72
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	4.92	$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	2.46
Fe-EDTA	0.452	Fe-EDTA	0.452
H_3BO_3	0.058		
$MnCl_2 \cdot 4H_2O$	0.036		
$ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	0.004		
$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0.0016		
$NH_4MoO_4 \cdot 2H_2O$	0.0006		

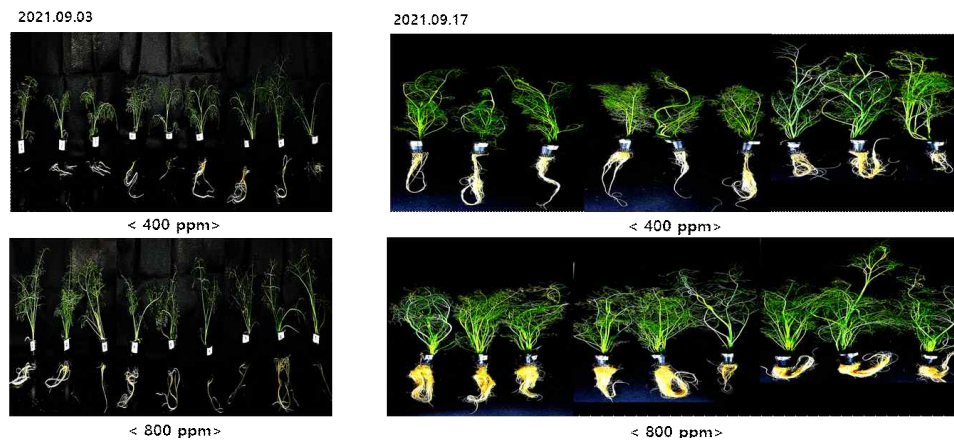
[회향과 상추 양액 조성표. 20 L 기준]

- 정식 이후 40일 동안 생장한 회향의 하우스 내 온도 습도를 관찰하였음. 그 결과, 광조건에서 암조건에 비하여 높은 온도를 보였으며, 800 ppm 처리구에서 400 ppm과 비교하여 높은 대기 온도를 나타냄. 습도의 경우, 광조건에서 암조건과 비교하여 높은 수치를 보이며 800 ppm 처리시 증가된 습도를 나타냄. 이는 회향의 800 ppm 처리시 향상된 증산작용 때문으로 보임.
- 처리구간에 따른 양액 조성의 변화 분석을 위하여 시간대별 산성도(pH), 전기전도도(EC), 용존산소량(DO)의 양을 조사함. 그 결과, 800 ppm 처리시 양액에서 시간대별로 높은 수준의 pH를 나타내었으며 광조건에서 더욱 높은 pH 수치를 나타냄. 이는 회향의 높은 이산화탄소처리에 의한 생육발달과 광합성량이 증대되어 양액 속의 중탄산염 분해 활성이 증가하였기 때문으로 보임. 또한, EC의 경우 암조건에서 800 ppm 처리시 수치가 증가하였으나 큰 차이를 보이지 않음. DO의 경우 800 ppm에서 양액내 낮은 용존 산소량을 보였음. 이는 400 ppm에 비하여 뿌리생육이 발달한 800 ppm 처리 식물의 증가한 산소 소모량을 보임



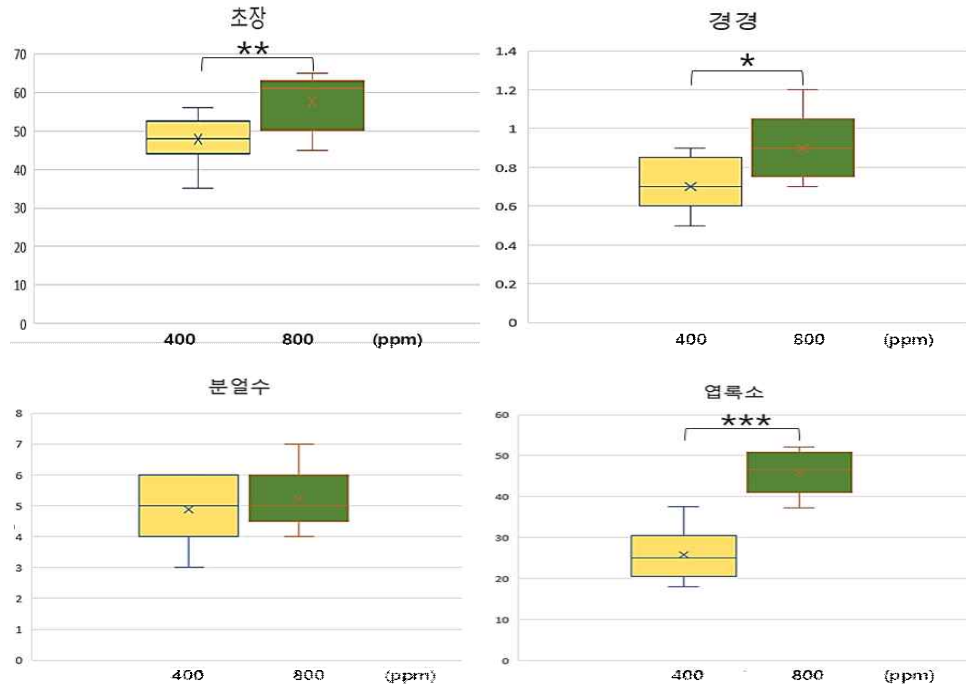
[정식 이후 35일 동안 생육한 회향의 시간대별 환경조건 변화. A, 처리별 온도와 습도. B, 처리별 양액 내 pH, EC, DO. 붉은 원은 양액 교체를 위한 개방 시간을 나타냄. 선의 색은 각 처리구를 나타냄(노란색: 400 ppm, 녹색: 800 ppm)]

- 식물의 생육상태를 관찰한 결과 정식 후 21일과 35일된 회향에서 800 ppm 처리시 식물 성장 속도가 증가하는 것을 확인함. 특히 잎과 뿌리가 800 ppm에서 높은 생육 증가 효과를 나타냄



[정식 후 21일(09.03)과 35일(09.17) 된 회향의 생육 변화 탐색]

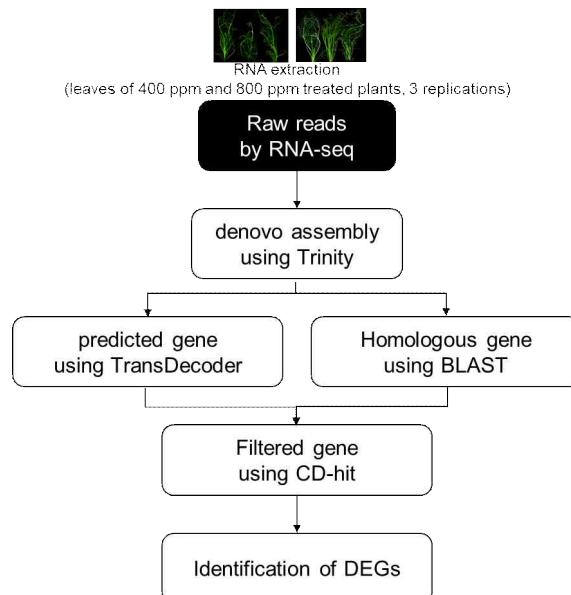
- 생육 특성에 대한 정확한 수치 비교를 위하여 초장, 경경, 분얼수, 엽록소를 정식후 35일된 회향에서 관찰함. 그 결과 초장, 경경, 엽록소에서 400 ppm 처리와 비교하여 800 ppm 처리된 회향의 유의하게 증가한 수치를 확인함. 초장은 400 ppm에서 평균 48 cm, 800 ppm에서 61 cm이었으며 증가된 이산화탄소 처리에 의하여 평균 13 cm의 증가된 수치를 보였으며 경경은 400 ppm에서 0.7 cm, 800 ppm에서 0.9 cm로 길이가 증가됨. 엽록소 수치(SPAD)는 400 ppm에서 25.1, 800 ppm에서 46.7의 수치를 나타내었으며 800 ppm 처리시 유의하게 증가하였음.



[400 ppm과 800 ppm 이산화탄소 처리시 초장, 경경, 분얼수, 엽록소의 변화. 통계적 유의성은 two-tailed student's t-test에 의하여 수행함]

(9) 이산화탄소의 농도 증가에 따른 생리적 변화 탐색

- 400 ppm과 800 ppm 처리시 회향에서 유전자의 생리적 변화를 탐색하게 위하여 전사체 분석을 실시함. 전사체 분석을 위하여 각 처리구 식물체를 3반복하여 RNA를 추출한 뒤 전사체의 염기서열을 해독함. 해독된 염기서열은 denovo assembly 방식으로 회향의 유전자 정보를 확보한 뒤 UniProtKB (<https://www.uniprot.org/help/uniprotkb>) 데이터베이스의 아미노산 서열과 비교하여 회향 유전자를 주석화함. 전사체 분석을 통하여 회향의 84,084개의 유전자를 해독하였으며 평균 1,250 bp의 길이를 나타냄



[400 ppm과 800 ppm 처리시 나타나는 전사체 변화 탐색을 위한 denovo assembly]

- 400 ppm과 800 ppm 처리시 특이적으로 다른 발현량을 보이는 유전자군을 선발함(FDR < 0.05). 그 결과, 400 ppm에서 증가하는 유전자는 1,017개, 800 ppm에서 증가하는 유전자는 2,146개로 나타남. 각 처리구에서 증가하는 유전자의 특이적 기능 탐색을 위하여 DAVID(<https://david.ncifcrf.gov/>)를 이용함(p-value < 0.05 & FDR < 0.05)
- 400 ppm에서 증가하는 유전자들은 에틸렌 신호 경로와 전사 기능, 세포벽 관련 기능, syncytium 형성 기능에 특이적으로 분포하였음

Term	Count	%	PValue	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
IPR001471:AP2/ERF domain	18	2.521008	2.80E-07	687	57	9530	4.380602	2.44E-04	2.44E-04	2.44E-04
GO:0009873~ethylene-activated signaling pathway	21	2.941176	4.92E-07	610	78	8331	3.676986	4.07E-04	4.08E-04	4.07E-04
SM00380:AP2	18	2.521008	7.06E-07	303	57	3885	4.048984	1.02E-04	1.02E-04	1.02E-04
DNA-binding region:AP2/ERF	14	1.960784	1.57E-06	347	42	5250	5.043228	0.001227	0.00123	0.00123
IPR016177:DNA-binding, integrase-type	18	2.521008	1.71E-06	687	64	9530	3.901474	0.001494	7.47E-04	7.47E-04
Ethylene signaling pathway	18	2.521008	5.39E-06	711	69	9850	3.614016	0.001599	8.00E-04	7.87E-04

Term	Count	%	PValue	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
GO:0003700~transcription factor activity, sequence-specific DNA binding	98	13.72549	1.09E-13	603	621	8262	2.162232	5.54E-11	5.54E-11	5.54E-11
GO:0006355~regulation of transcription, DNA-templated	107	14.98599	2.58E-06	610	946	8331	1.544756	0.002141	8.54E-04	8.53E-04
GO:0006351~transcription, DNA-templated	102	14.28571	3.74E-05	610	946	8331	1.472571	0.030525	0.006325	0.006318
Transcription regulation	104	14.56583	4.00E-05	711	980	9850	1.470191	0.011802	0.003957	0.003891
GO:0003677~DNA binding	95	13.30532	8.68E-05	603	888	8262	1.465813	0.042965	0.014638	0.014638
DNA-binding	89	12.46499	1.12E-04	711	830	9850	1.48552	0.032631	0.008277	0.008138
Transcription	105	14.70588	1.39E-04	711	1023	9850	1.421937	0.040545	0.008277	0.008138

Term	Count	%	PValue	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
Cell wall	18	2.521008	7.31E-04	711	100	9850	2.493671	0.195142	0.036168	0.035559

Term	Count	%	PValue	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
GO:0006949~syncytium formation	6	0.840336	2.02E-04	610	9	8331	9.104918	0.154189	0.027907	0.027873

Term	Count	%	PValue	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
GO:0006949~syncytium formation	6	0.840336	2.02E-04	610	9	8331	9.104918	0.154189	0.027907	0.027873

[400 ppm 처리에서 증가하는 유전자의 특이적 기능 탐색(FDR < 0.05)]

- 800 ppm 처리시 400 ppm 처리와 비교하여 증가하는 발현양상을 보이는 유전자는 주로 광합성 관련 기능(엽록체, 틸라코이드, 광계, 광반응 유전자, 탄소 고정), 지질 대사체, 아미노산 합성, 플라보노이드 합성 기능에 특이적 분포를 보임

Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
Chloroplast	380	28.25279	1.38E-83	Q9SR70, C	1340	1078	9850	2.591172	5.38E-81	5.38E-81	4.84E-81
Plastid	381	28.32714	2.86E-83	Q9SR70, C	1340	1085	9850	2.58123	1.12E-80	5.59E-81	5.03E-81
GO:0009507~chloroplast	436	32.41636	9.15E-60	Q9M9H3,	1275	1579	9320	2.018413	2.27E-57	2.27E-57	2.01E-57
Transit peptide	387	28.77323	8.16E-54	O22056, C	1340	1379	9850	2.0629	3.18E-51	1.06E-51	9.55E-52

Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
GO:0005576~extracellular region	164	12.19331	3.43E-21	Q9C7Z9, C	1275	584	9320	2.052753	8.50E-19	1.42E-19	1.26E-19
Secreted	110	8.178439	5.38E-19	Q9C7Z9, C	1340	343	9850	2.357382	2.10E-16	4.19E-17	3.77E-17
signal peptide	133	9.888476	3.55E-16	Q9C7Z9, C	671	529	5250	1.967129	4.20E-13	2.24E-13	2.23E-13
Signal	219	16.28253	3.00E-14	Q9LZL3, Q	1340	998	9850	1.61304	1.17E-11	1.95E-12	1.75E-12
glycosylation site:N-linked (GlcNAc...)	115	8.550186	9.41E-11	Q9C7Z9, C	671	506	5250	1.778214	1.19E-07	2.97E-08	2.95E-08
Glycoprotein	177	13.15985	5.68E-08	Q9C7Z9, C	1340	892	9850	1.458612	2.22E-05	1.85E-06	1.66E-06

Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
GO:0009543~chloroplast thylakoid lumen	32	2.379182	5.69E-15	O23403, P	1275	51	9320	4.586544	1.40E-12	1.57E-13	1.39E-13
transit peptide:Thylakoid	26	1.933086	3.82E-12	O23403, P	671	44	5250	4.623357	4.82E-09	1.61E-09	1.60E-09
GO:0031977~thylakoid lumen	21	1.561338	4.39E-10	P82538, O	1275	33	9320	4.651693	1.09E-07	9.07E-09	8.05E-09

Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
IPR001087:Lipase, GDSL	19	1.412639	6.84E-09	Q3ECP6,	1284	31	9530	4.54904	1.08E-05	1.08E-05	1.07E-05
GO:0052689~carboxylic ester hydrolase activity	28	2.081784	2.84E-08	Q8LFJ9, C	1154	64	8262	3.132257	2.45E-05	2.45E-05	2.42E-05
GO:0016042~lipid catabolic process	24	1.784387	1.97E-05	O48723, C	1164	67	8331	2.563779	0.024198	0.002722	0.002691
Lipid degradation	24	1.784387	2.88E-05	O48723, C	1340	70	9850	2.520256	0.011179	4.89E-04	4.40E-04
GO:0016788~hydrolase activity, acting on ester bonds	19	1.412639	4.06E-05	Q3ECP6,	1154	48	8262	2.833947	0.034421	0.007005	0.006916
Lipid metabolism	57	4.237918	0.001774	O48723, C	1340	281	9850	1.491077	0.499624	0.021618	0.019456

Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
GO:0005840~ribosome	39	2.899628	2.65E-08	O24415, C	1275	111	9320	2.568309	6.58E-06	4.38E-07	3.89E-07
Ribosomal protein	39	2.899628	2.22E-06	O24415, C	1340	130	9850	2.205224	8.64E-04	5.40E-05	4.86E-05
ath03010:Ribosome	26	1.933086	4.77E-06	Q9MAP3,	365	70	2541	2.585753	0.001401	0.001402	0.001354
GO:0003735~structural constituent of ribosome	44	3.271375	2.41E-05	O24415, C	1154	165	8262	1.909185	0.020541	0.005189	0.005122
GO:0006412~translation	47	3.494424	4.61E-05	Q9MAP3,	1164	185	8331	1.81832	0.055851	0.005224	0.005166
rRNA-binding	16	1.189591	4.44E-04	Q9ASV6,	1340	44	9850	2.672999	0.159001	0.006925	0.006233
Ribonucleoprotein	49	3.643123	5.48E-04	Q9MAP3,	1340	221	9850	1.629803	0.192621	0.007922	0.00713

Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
Photosynthesis	29	2.156134	3.50E-12	Q40459, C	1340	51	9850	4.179836	1.37E-09	1.95E-10	1.76E-10
Photosystem II	19	1.412639	7.67E-10	Q40459, C	1340	28	9850	4.988006	2.99E-07	3.32E-08	2.99E-08
IPR022796:Chlorophyll A-B binding protein	11	0.817844	9.66E-08	Q8LCQ4,	1284	12	9530	6.803609	1.52E-04	7.62E-05	7.56E-05
Photosystem I	14	1.040892	1.57E-07	P27521, C	1340	20	9850	5.145522	6.11E-05	4.37E-06	3.93E-06
GO:0009523~photosystem II	14	1.040892	1.67E-07	P27521, C	1275	20	9320	5.116863	4.15E-05	2.44E-06	2.16E-06
GO:0016168~chlorophyll binding	14	1.040892	2.13E-07	P27521, C	1154	20	8262	5.011612	1.84E-04	9.19E-05	9.08E-05
GO:0009522~photosystem I	12	0.892193	2.41E-07	Q8LCQ4,	1275	15	9320	5.847843	5.97E-05	3.32E-06	2.94E-06
IPR023329:Chlorophyll a/b binding protein domain	10	0.743494	6.03E-07	Q8LCQ4,	1284	11	9530	6.74738	9.51E-04	3.17E-04	3.15E-04
IPR001344:Chlorophyll A-B binding protein, plant	9	0.669145	8.40E-07	Q8LCQ4,	1284	9	9530	7.422118	0.001322	3.31E-04	3.28E-04
GO:0031409~pigment binding	9	0.669145	1.11E-06	Q8LCQ4,	1154	9	8262	7.159445	9.58E-04	3.19E-04	3.15E-04
GO:0009768~photosynthesis, light harvesting in photosystem I	9	0.669145	4.89E-06	Q8LCQ4,	1164	10	8331	6.441495	0.00607	0.001015	0.001003
Chromophore	15	1.115242	1.19E-05	P27521, C	1340	30	9850	3.675373	0.004621	2.44E-04	2.19E-04
Chlorophyll	11	0.817844	1.63E-05	Q8LCQ4,	1340	17	9850	4.756365	0.006346	3.03E-04	2.73E-04
GO:0018298~protein-chromophore linkage	14	1.040892	3.48E-05	P27521, C	1164	28	8331	3.578608	0.04241	0.004333	0.004285
ath00196:Photosynthesis - antenna proteins	5	0.371747	0.00184	Q8LCQ4,	365	5	2541	6.961644	0.418139	0.049184	0.047511

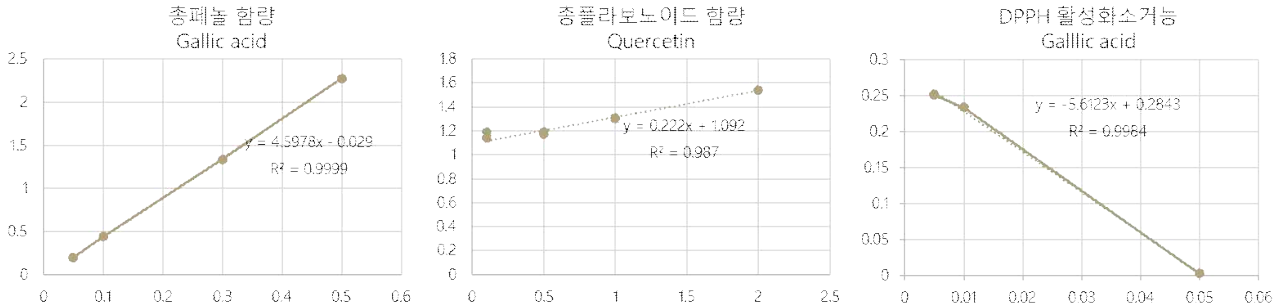
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
ath01230:Biosynthesis of amino acids	27	2.007435	4.53E-05	O65581, I	365	83	2541	2.264631	0.013231	0.003638	0.003515
ath01130:Biosynthesis of antibiotics	43	3.197026	1.20E-04	Q38799, I	365	169	2541	1.771306	0.034595	0.005029	0.004858
ath01200:Carbon metabolism	27	2.007435	3.66E-04	Q38799, I	365	93	2541	2.021122	0.102153	0.013467	0.003009
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
GPI-anchor	20	1.486989	9.81E-06	Q22126, I	1340	49	9850	3.000305	0.003819	2.13E-04	1.91E-04
GO:0046658~anchored component of plasma membrane	21	1.561338	1.01E-05	O22126, I	1275	53	9320	2.896337	0.002504	1.19E-04	1.06E-04
propeptide:Removed in mature form	19	1.412639	4.00E-05	O22126, I	671	52	5250	2.858822	0.049221	0.007216	0.007176
GO:0031225~anchored component of membrane	19	1.412639	7.85E-05	O22126, I	1275	51	9320	2.72326	0.019278	8.11E-04	7.20E-04
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
GO:0005975~carbohydrate metabolic process	40	2.973978	9.11E-06	Q9STV0, I	1164	139	8331	2.059631	0.011289	0.001622	0.001604
GO:0004553~hydrolase activity, hydrolyzing O-glycosyl compound	23	1.710037	8.24E-05	O48766, I	1154	68	8262	2.421577	0.068592	0.010151	0.010021
Glycosidase	31	2.304833	0.001121	O48766, I	1340	125	9850	1.822985	0.354414	0.014578	0.013121
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
ath03010:Ribosome	26	1.933086	4.77E-06	Q9MAP3, I	365	70	2541	2.585753	0.001401	0.001402	0.001354
GO:0022626~cytosolic ribosome	16	1.189591	0.003176	Q9MAP3, I	1275	52	9320	2.24917	0.545655	0.026855	0.023823
GO:0022625~cytosolic large ribosomal subunit	13	0.966543	0.007016	O24415, I	1275	41	9320	2.317743	0.825543	0.056127	0.04979
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
GO:0009654~photosystem II oxygen evolving complex	13	0.966543	8.06E-07	Q40459, I	1275	19	9320	5.001445	2.00E-04	1.05E-05	9.33E-06
IPR002683:Photosystem II PsbP, oxygen evolving complex	8	0.594796	6.53E-05	P82538, C	1284	10	9530	5.937695	0.09778	0.017149	0.017018
GO:0030095~chloroplast photosystem II	7	0.520446	1.41E-04	P82538, C	1275	8	9320	6.396078	0.034398	0.0014	0.001242
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
IPR008972:Cupredoxin	11	0.817844	9.66E-05	Q9FJD5, C	1284	20	9530	4.082165	0.141189	0.021743	0.021577
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
Membrane	458	34.05204	2.01E-05	Q944H5, I	1340	2885	9850	1.166947	0.007824	3.57E-04	3.21E-04
Transmembrane	356	26.4684	8.39E-04	Q944H5, I	1340	2272	9850	1.151789	0.279161	0.011686	0.010517
Transmembrane helix	354	26.3197	9.23E-04	Q944H5, I	1340	2261	9850	1.150891	0.302371	0.01241	0.011169
GO:0016021~integral component of membrane	342	25.42751	0.001983	Q944H5, I	1275	2191	9320	1.14101	0.38869	0.01821	0.016154
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
GO:0010218~response to far red light	11	0.817844	5.48E-04	Q8LCQ4, I	1164	23	8331	3.423017	0.49461	0.045483	0.044972
ath00196:Photosynthesis - antenna proteins	5	0.371747	0.00184	Q8LCQ4, I	365	5	2541	6.961644	0.418139	0.049184	0.047511
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
GO:0010598~NAD(P)H dehydrogenase complex (plastoquinone)	10	0.743494	2.42E-06	Q9CAC5, I	1275	12	9320	6.091503	6.00E-04	3.00E-05	2.66E-05
Plastoquinone	7	0.520446	0.002769	Q9CAC5, I	1340	12	9850	4.287935	0.660932	0.031766	0.02859
Quinone	7	0.520446	0.004556	Q9CAC5, I	1340	13	9850	3.958094	0.831531	0.045563	0.041006
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
FAD	28	2.081784	0.002076	B5WWZ8, I	1340	113	9850	1.821424	0.555336	0.024533	0.022208
Flavoprotein	31	2.304833	0.00442	B5WWZ8, I	1340	136	9850	1.675538	0.822272	0.045563	0.041006
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
GO:0009813~flavonoid biosynthetic process	13	0.966543	1.18E-04	Q9SJL0, C	1164	27	8331	3.446067	0.137035	0.010527	0.010408
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
ath00630:Glyoxylate and dicarboxylate metabolism	11	0.817844	0.001411	P0DKC4, I	365	25	2541	3.063123	0.339718	0.041479	0.040069
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
IPR008972:Cupredoxin	11	0.817844	9.66E-05	Q9FJD5, C	1284	20	9530	4.082165	0.141189	0.021743	0.021577
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
Sigma factor	5	0.371747	0.004058	Q8LD95, I	1340	6	9850	6.125622	0.795231	0.045219	0.040697
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
IPR008949:Terpenoid synthase	8	0.594796	1.59E-04	Q76F55, C	1284	11	9530	5.397904	0.221205	0.031248	0.03101
IPR000092:Polyprenyl synthetase	6	0.446097	2.34E-04	Q76F55, C	1284	6	9530	7.422118	0.308559	0.040993	0.040681
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
ath00710:Carbon fixation in photosynthetic organisms	10	0.743494	8.97E-04	O65581, I	365	20	2541	3.480822	0.231874	0.029298	0.028302
Term	Count	%	PValue	Genes	List Total	Pop Hits	Pop Total	Fold Enrich	Bonferroni	Benjamini	FDR
Nitrate assimilation	8	0.594796	0.004729	Q05085, I	1340	17	9850	3.459175	0.84256	0.046108	0.041498

[800 ppm 처리에서 증가하는 유전자의 특이적 기능 탐색(FDR < 0.05)]

- 플라보이드와 같은 항산화 물질 관련 유전자가 800 ppm 이산화탄소 처리시 증가하는 것을 확인하여 이를 검증하기 위하여 총플라보노이드, 총페놀, DPPH 활성화 소거능 분석을 실시함. 분석을 위하여 400 ppm과 800 ppm 처리 식물체를 60°C 24시간 건조(건조기) 후 마쇄함. 건조된 샘플 0.5 g에 Methanol 25 ml 첨가 후 58°C에서 24시간 교반 추출 58°C함. 추출 후 13000 rpm으로 15분간 원심분리 후 상등액만 항산화물질 검정에 사용함.
- 총페놀 함량 분석을 위하여 Gallic acid (GAE/g)로 정량곡선을 작성함. 0.5g Gallic acid를 50ml Methanol에 녹여 0.5% Gallic acid solution 제조한 뒤 Methanol로 0.05 mg/ml, 0.1 mg/ml, 0.3 mg/ml, 0.5 mg/ml의 농도별로 희석함. 50µl 시료 (추출물 또는 희석된 Gallic acid) 추출물에 250 µl 증류수와 50 µl Folin-Ciocalteu reagent를 넣은 후, 암조건에서 6분간 반응함. 이후 0.5 ml 3.5% sodium carbonate 용액과 250 µl 증류수를 혼합하여 암조건에서 90분 동안 상온에서 반응한 뒤 760 nm로 분광광도계를 이용하여 흡광도를 측정함.
- 총플라보노이드 함량은 Quercetin으로 정량곡선을 작성함. 0.1g Quercetin을 10ml Methanol에 녹여 0.1% Quercetin solution 제조한 후 Methanol로 0.1 mg/ml, 0.5 mg/ml, 1 mg/ml, 2 mg/ml의 농도로 희석함. 100 µl 시료 (추출물 또는 희석된 Quercetin) 추출물과 500 µl 증류수, 100 µl 2.5% Sodium nitrate를 혼합한 후 6분간

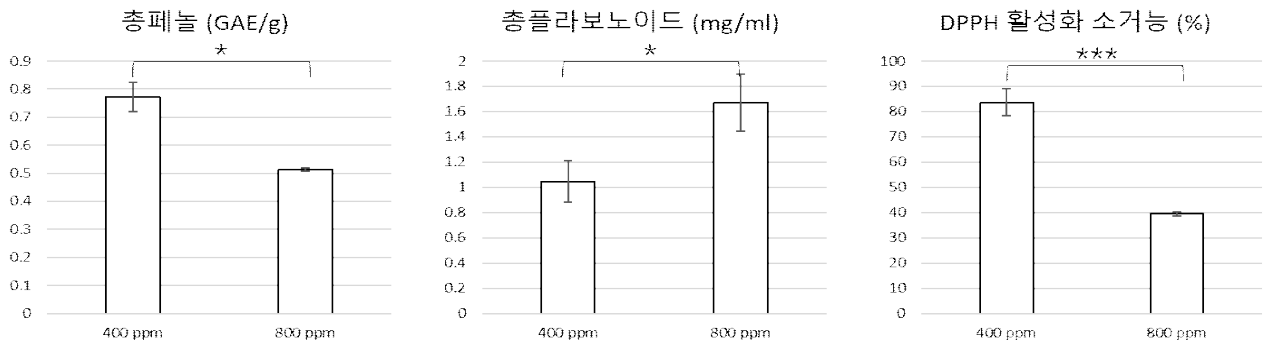
- 상온에서 반응함. 이후 150 μ l 5% Aluminium chloride solution을 혼합하여 5분간 상온에서 반응하여 200 μ l 1M Sodium hydroxide solution 혼합한 후 510 nm로 측정
- DPPH 활성화소거능은 Gallic acid을 희석하여 정량 곡선을 작성함. DPPH와 50ml Methanol을 혼합하여 solution 제조한 후 Methanol로 0.001 mg/ml, 0.005 mg/ml, 0.01 mg/ml, 0.05 mg/ml의 농도별 희석함. 100 μ l (시료 또는 대조구 Gallic acid)와 900 μ l DPPH solution을 혼합한 후 암조건에서 10분 동안 반응 뒤 515nm에서 측정

$$\text{DPPH 라디칼 소거활성 (\%)} \text{ 계산} = (1 - \text{시료흡광도} / \text{대조구 흡광도}) \times 100$$
- 항산화 물질 분석을 위하여 표준시료를 통한 정량곡선을 분석한 결과, 위의 실험 모두에서 R2의 값이 0.98 이상으로 나타났으며 농도에 따른 수치의 변화가 높은 상관관계를 보였음



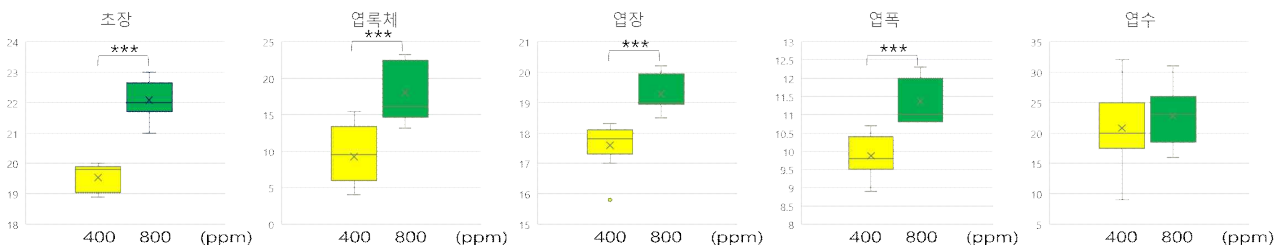
[항산화 물질 분석을 위한 표준물질의 정량 곡선]

- 400 ppm과 비교하여 800 ppm처리시 총페놀함량은 유의하게 감소하였으며, 총플라보노이드 함량은 증가함. 총페놀과 유사한 경향을 보이는 DPPH 활성화 소거능 역시 유의하게 감소하였음. 이러한 결과는 높은 농도의 이산화탄소 처리가 광합성 효율 증대를 통한 식물세포 성장에는 긍정적인 영향을 미쳤지만 총페놀 함량과 DPPH 활성화 소거능에는 부정적 영향을 준 것으로 보임. 또한 전사체 발현량 분석을 통하여 관찰된 플라보노이드 유전자의 발현량 증가는 함량의 증가에 또한 영향을 주었음



[총페놀, 총플라보노이드, DPPH 활성화 소거능 분석. 통계적 유의성은 two-tailed student's t-test에 의하여 수행함(*;p<0.05, **;p<0.01, ***;p<0.001)]

- 정식 후 37일된 상추 또한 각 처리구에서 회향과 유사한 생육변화를 보임. 800 ppm 처리시 초장, 엽록체, 엽장, 엽폭에서 유의하게 증가된 수치를 보였으나 엽수에서는 큰차이를 보이지 않았음.



[상추의 생육 변화. 통계적 유의성은 two-tailed student's t-test에 의하여 수행함(*;p<0.05, **;p<0.01, ***;p<0.001)]

1) 1단계 - 2차년도

- 본 과제는 주관기관으로 (주)바이오프랜즈, 공동연구기관으로 스마트그린에너지(주), (재)가나안복민회, (재)전라남도환경산업진흥원, 상지대학교 산학협력단, 위탁기관으로 울산대학교 산학협력단, 6개 기관으로 구성되어 있고, 강원도 원주에 위치한 가나안농균학교와 경상북도 상주에 위치한 스마트팜 혁신밸리를 Test-Bed로 진행중에 있음



[강원도 원주 가나안농균학교]



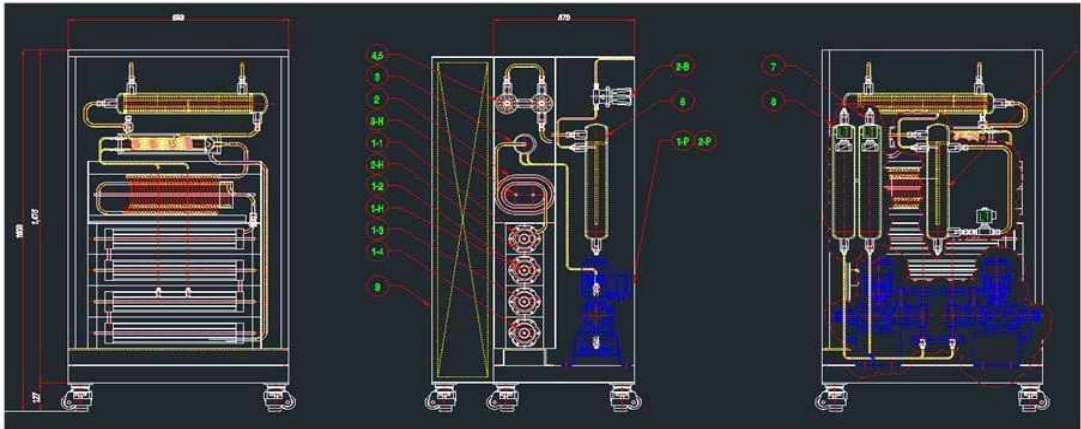
[경북 상주 스마트팜혁신밸리]

가. 주관연구개발기관 : (주)바이오프랜즈

- (주)바이오프랜즈에서 생산되고있는 DME는 포집 CO₂ 기반의 메탄올로부터 제조된 청정화학물질로써, 이를 이용한 수소의 제조 및 연료전지발전을 통하여 전기를 생산하고, 발생하는 CO₂는 스마트팜내 탄산시비용 원료로 활용함
- 1단계(1~2차년도)에서는 다음과 같은 연구를 수행하였음
 - (1) DME-H₂ 개질기의 설계, 제작, 평가
 - (2) CO₂ 분리정제시스템(PSA) 설계, 제작, 평가
 - (3) 멤브레인을 이용한 CO₂ 포집·이용 기술개발
 - (4) 연료전지시스템 구축
- DME-H₂ 개질기 및 CO₂ 분리정제시스템(PSA) 구축
 - (1) DME 특성
 - DME는 상온, 상압에서 무색의 가스
 - 상온에서 6기압이상으로 가압시, 쉽게 액화되어 액체로서 취급이 가능함
 - 연소시, 배출되는 NO_x, SO_x의 양이 적어 청정연료로 간주됨
 - 탄화수소 개질(Reforming)을 통해 생성되는 그레이 수소는 고온에서 진행되며 여러 가지 CO 변성장치와 탈황장치 등으로 인해 소형화에 한계가 있음. 또한 고온·고압의 수소생산 총전소 설치 시, 소요부지확보 및 고압가스안전법 규정 등의 제약으로 인해 저온·저압하에서의 수소추출기술이 필요
 - DME의 수증기 개질반응은 저압과 400℃ 이하에서 수소추출이 가능할 뿐 아니라, 황 성분이 없어 탈황장치 및 CO 전환장치가 필요없어 소형화가 가능

(2) DME-H2 개질기 설계, 제작 및 구축

- Reformer 가열방식 : Burner-type → Electric Heater-type



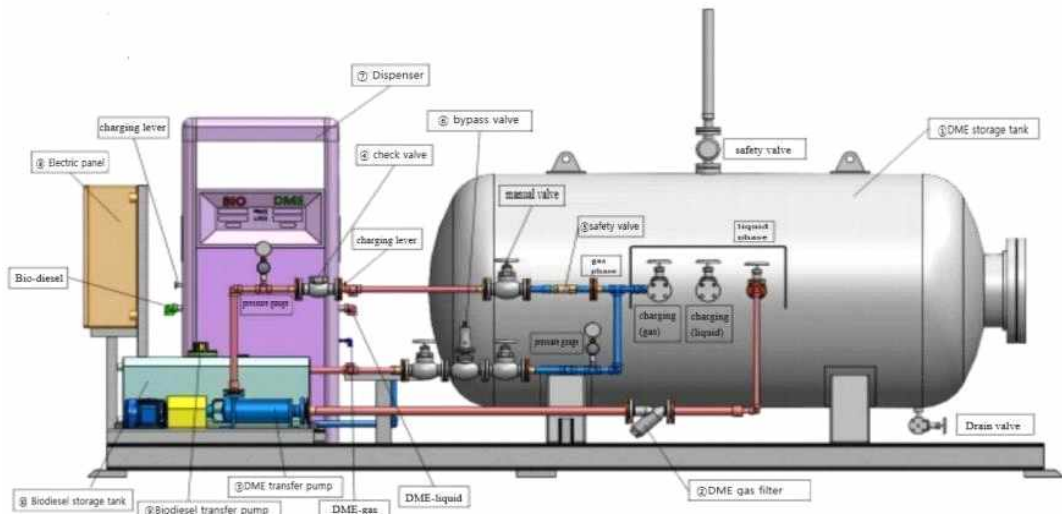
[DME-H2 개질기 설계 (893×820×1,800(H))]

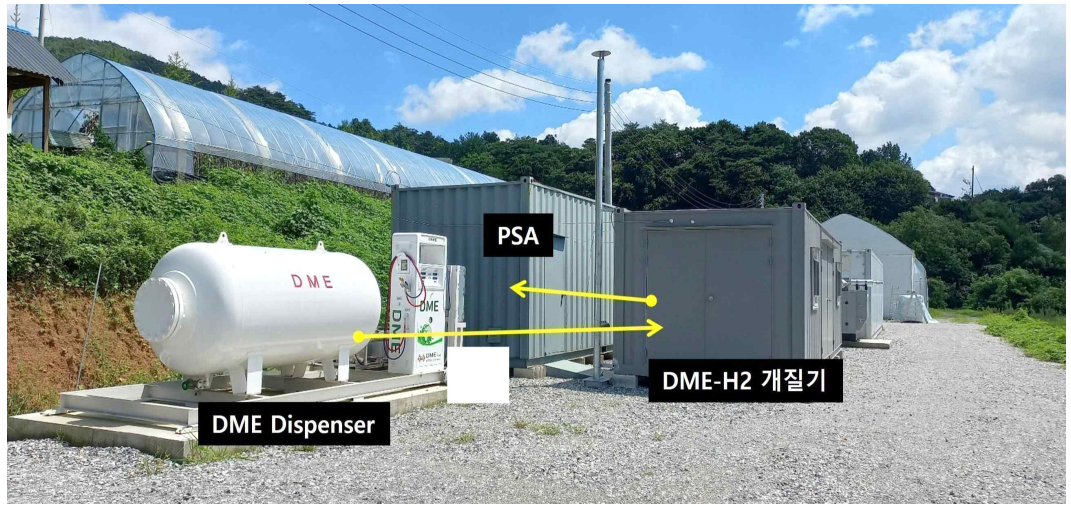


[DME-H2 개질기 (15Nm³/hr)]

(3) DME Dispenser와 DME-H2 개질기 연결작업

- DME 공급을 위한 DME Dispenser와 DME-H2 개질기의 연결작업 수행





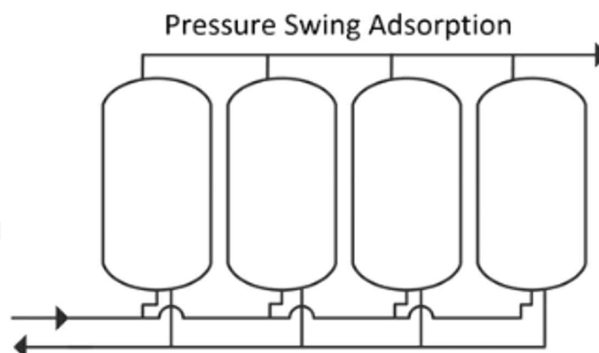
[DME 탱크와 연결된 배관과 DME-H2 개질기의 Feed Gas 주입구를 연결하여, DME-H2 개질기에서 연속적으로 Reforming이 가능하도록 Setting 하였음]

(4) CO2 분리정제시스템(PSA) 구축

- DME를 수증기로 개질한 가스의 원료를 흡착하여 수소와 이산화탄소를 분리하기 위한 시스템
- PSA(Pressure Swing Adsorption) 설계, 제작 및 구축
 - 유량(In) - Max. 28Nm³/hr
 - 유량(Out) - 15Nm³/hr

In (Volume)

- H₂ > 75%
- CO₂ < 20%
- CO < 0.8%
- N₂, O₂ < 10ppm
- CH₄ < 3%
- H₂O < 0.5%



Out (Volume)

- H₂ > 99.95%
- CO₂ < 100ppm
- CO < 20ppm
- CH₄ < 100ppm
- H₂O < 10ppm

[CO2 분리정제시스템(PSA) 모식도]



[CO₂ 분리정제시스템(PSA) 구축]

(5) DME-H₂ 개질기 및 PSA 평가

- DME-H₂ 개질기를 Load 10%(H₂O : 13.66g/min, DME : 17.38g/min)부터 30%(H₂O : 41g/min, DME : 52.16g/min)까지, Reformer 온도 400℃, 압력 5~10Bar 조건에서 시운전 실시

→ 결과 : H₂ 60%, CO 28%, CH₄ 7%, CO₂ 5%

Date	Time	Feed		개질기								Press ^a bar
		H ₂ O ml/min	DME ml/min	히터1 ℃	히터2 ℃	히터3 ℃	히터4 ℃	히터1 리포머 ℃	히터2 리포머 ℃	히터3 리포머 ℃	히터4 리포머 ℃	
2022-08-25	15:37	13.66	17.38	452.0	453.0	454.0	451.0	432.0	428.0	420.0	413.0	4.7
2022-08-25	16:03	27.33	34.77	450.0	453.0	451.0	452.0	422.0	427.0	443.0	438.0	5.0
2022-08-25	16:46	41.00	52.16	645.0	603.0	506.0	491.0	346.0	445.0	451.0	477.0	5.0

GC(농도, wt%)						계산(mol%)						
H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂	DME	Total	H ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂	DME
1.228	1.4033	1.565	2.107	5.007	15.598							
4.5			0.3		0.1	2.27	99.079	0.000	0.000	0.826	0.000	0.096
11.2	2.9	72.8	13.1			9.23	60.699	2.245	28.182	8.874	0.000	0.000
7.6		50.8	7			6.05	62.791	0.000	29.979	7.229	0.000	0.000

[DME-H₂ 개질기 및 PSA 평가 결과표]

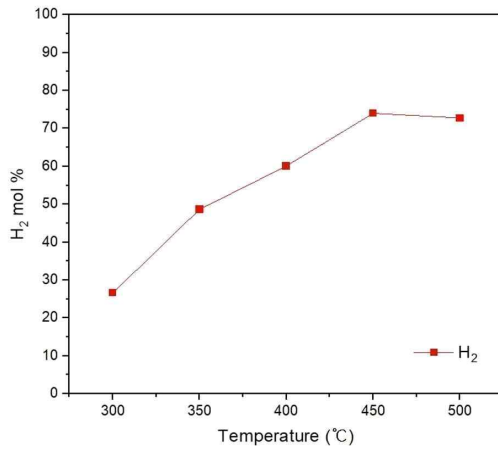
- 온도변화에 대한 평가 진행

- (실험조건)

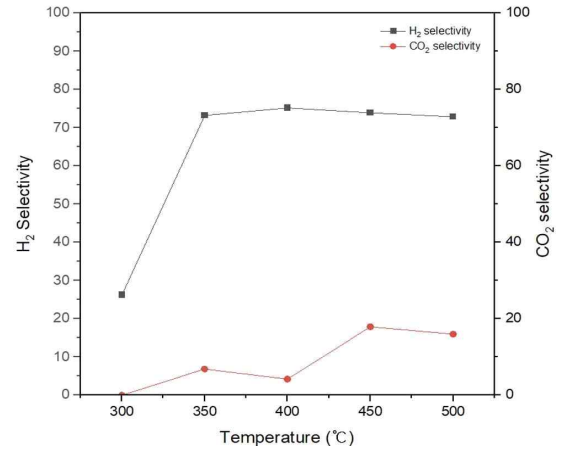
→ 온도 : 300~500℃ / 압력 : 7Bar / 유량 : DME 52.2g/min , H2O 41g/min /
공간속도 : 1,200 Hr-1

- (실험결과)

→ Gas Chromatography를 이용하여 가스분석 진행



[온도에 따른 H2 농도 변화]



[온도에 따른 H2, CO2 Selectivity]

→ 온도가 올라감에 따라 수소농도가 높아지는 경향이 나타났고, 450℃에서 수소 농도 74%로 가장 높은 농도를 보였음. 500℃에서는 수소농도가 72%로 감소하는 경향을 보였음

→ 450℃에서의 개질가스 조성 → H₂ 74%, CO₂ 18%, CO 7%, CH₄ 0.5%, DME 0.5%

→ 온도에 따른 H₂, CO₂ 선택도의 경우, H₂ 선택도는 350℃부터 70%이상으로 나타났고, CO₂ 선택도는 450℃에서 18%의 높은 선택도를 보였음

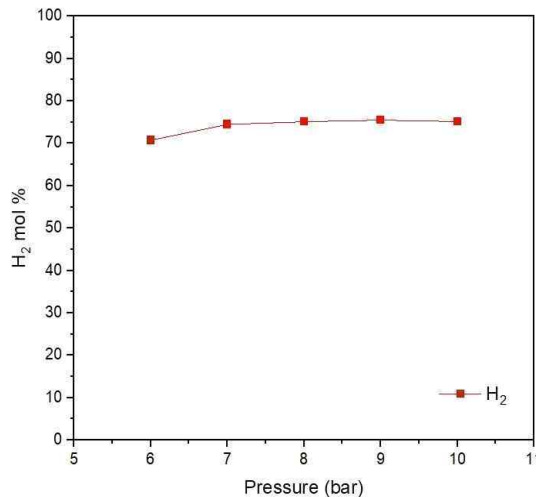
- 압력변화에 대한 평가 진행

- (실험조건)

→ 온도 : 450℃ / 압력 : 6~10bar / 유량 : DME : 52.2g/min , H₂O : 61g/min ,
S/C(Steam/Carbon) Ratio : 3.1 / 공간속도 : 1,200 Hr-1

- (실험결과)

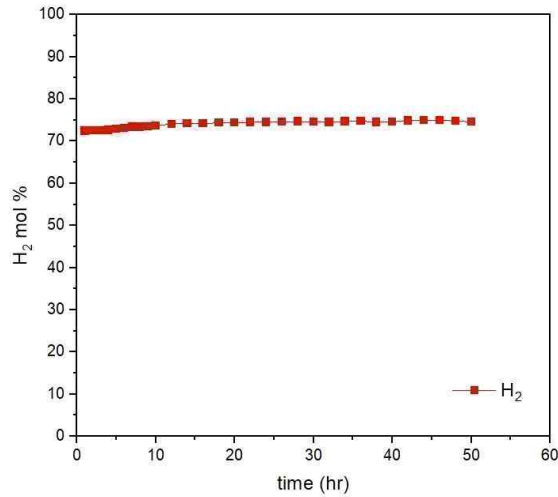
→ Gas Chromatography를 이용하여 가스분석 진행



[압력에 따른 H2 농도]

→ 압력변화에 따라 수소농도는 큰 차이가 없었고, 수소농도 74%로 나타남

- 50시간 연속평가 진행
- (실험조건)
 - 온도 : 450°C / 압력 : 8~9Bar / GHSV : 1,200hr-1
- (실험결과)
 - 74% 정도의 수소 순도로, 이론상 나올 수 있는 수소 순도 75%에 근접하는 결과를 보였음
 - $CH_3OCH_3 + 3H_2O \rightarrow 6H_2 + 2CO_2$ [75% : 25%]



[연속평가에 따른 H2 농도]

- 공인기관(KTL)과 평가 진행
 - DME-H2 개질기의 수소생산량, PSA의 수소생산순도를 공인인증기관인 한국산업기술시험원(KTL)의 입회하에 평가하였으며, 수소생산량은 PSA 후단에 설치된 질량유량계(MFC) 지시값을 확인하여 평가하였고, 수소생산순도는 Gas Chromatography를 이용하여 데이터를 추출한 후, 고순도 수소(99.999%)의 분석결과와 비교하였음
 - 평가결과, 목표치였던 수소생산량 15Nm³/hr를 만족하였으며, 수소생산순도는 목표치였던 99.95%보다 0.01% 낮은 99.94%의 결과치를 얻었음

시험성적서 (TEST REPORT)

1. 시험명 (Title)
2. 시험대상물/시험시료명 (Test Sample)
3. 시험일자 (Date of Test)
4. 시험장소 (Location of Test)
5. 시험방법 (Test Standard/Method)

시험항목	시험결과	단위
수소 순도	99.94	%
수소 생산량	15.0	Nm ³ /hr

1. 시험명
2. 시험대상물
3. 시험결과

시험항목	시험결과	단위
수소 순도	99.94	%
수소 생산량	15.0	Nm ³ /hr

4. 시험사진

1. 수소 생산량 측정용 MFC (질량유량계)
2. PSA 분리기 (수소 순도 상승)
3. 가스 분석용 GC (가스 크로마토그래피)
4. 수소 순도 측정용 가스 분석기

[KTL 시험성적서]

○ 고순도, 저비용 CO2 포집·이용 기술개발

(1) CO2 분리 고분자 분리막 및 Module 개발 (Target)

- Module의 선택도 : CO2/H2 선택도 6 이상
- Module의 처리용량 : 2Nm3/hr
- CO2 제거율 : 단일 Module 50% 이상 (Multi-Stage 90% 이상)

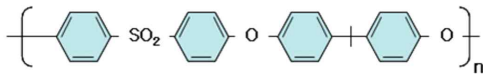
(2) 개발 Process

- CO2 분리용 분리막 지지체 제조
- 분리막 지지체의 고분자 코팅소재 선정 및 CO2 분리용 복합막 개발
- CO2 분리용 분리막 Module 개발 및 성능 최적화

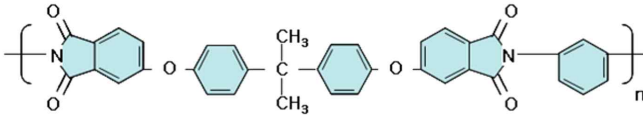
(3) CO2 분리용 분리막 지지체 제조

- 소재의 특성 및 기체투과도에 대한 성능평가를 통해 PEI(Polyetherimide)를 지지체로 선정하였음

Polysulfone (PSf)



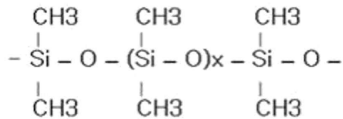
Polyetherimide (PEI)



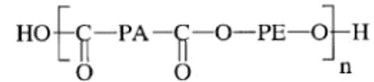
(4) 분리막 지지체의 고분자 코팅소재 선정 및 CO2 분리용 복합막 개발

- 중공사 복합막의 제조 및 기체투과성능평가를 통해 PDMS를 코팅소재로 선정하였음

PDMS

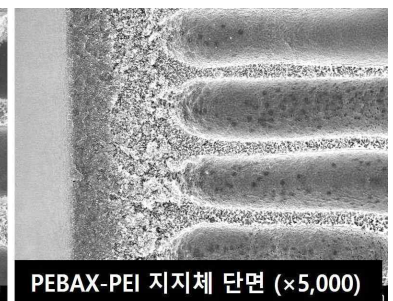
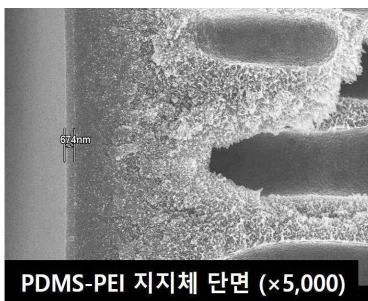
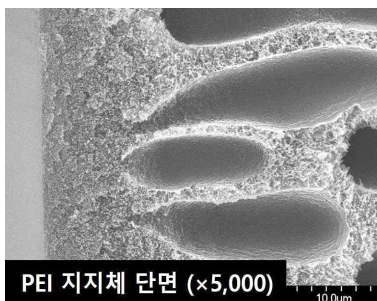
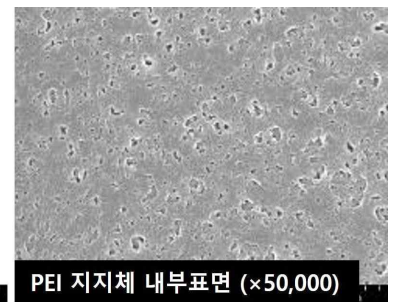
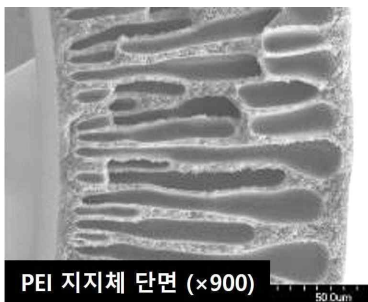
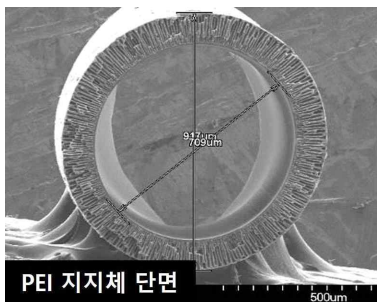


PEBAX



PA : Polyamide group (Hard block)

PE : Poly(ethylene oxide) 또는 Poly(Tetramethylene oxide) (Soft block)



[분리막 지지체 및 코팅소재 복합막의 확대사진(SEM)]

(5) CO2 분리용 분리막 Module 개발 및 성능 최적화

- 복합막 Module 제작

→ Housing material : Aluminum, PVC, SUS

→ Potting material : Epoxy

→ O-Ring : NBR

→ Packing Density : 40% [(Area of Hollow Fiber Membranes)/(Area of Housing×100)



Φ1.5-inch / ℓ=12-inch / 0.5Nm3/hr



Φ2.0-inch / ℓ=12-inch / 1.0Nm3/hr



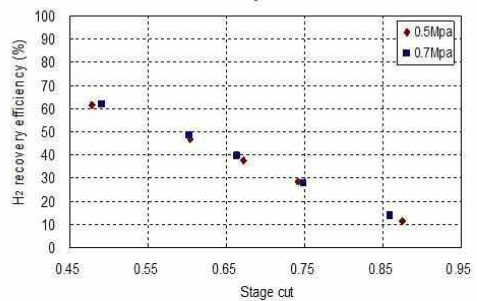
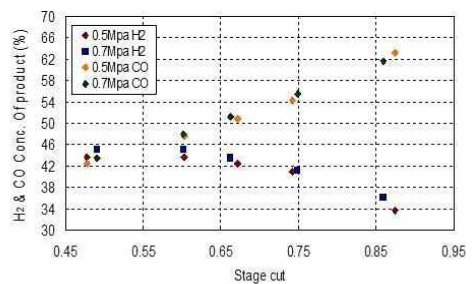
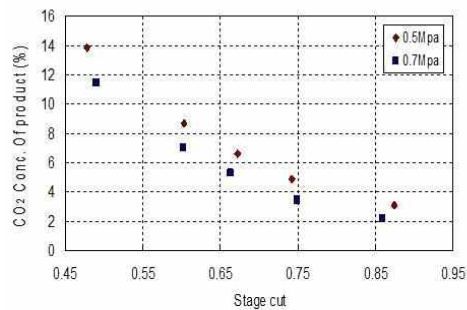
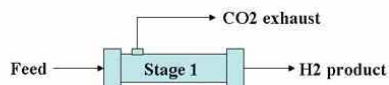
Φ2.0-inch / ℓ=22-inch / 2.0Nm3/hr



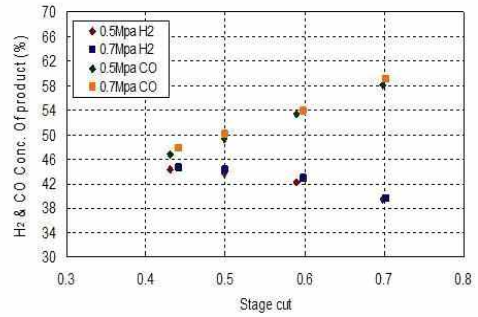
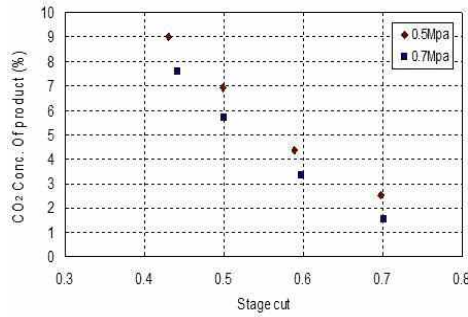
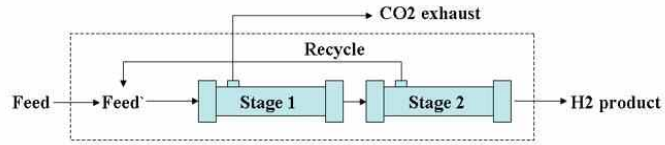
Φ2.0-inch / ℓ=22-inch / 2.0Nm3/hr / Max. Pressure 30Bar

- 복합막 Module 혼합가스 분리성능평가

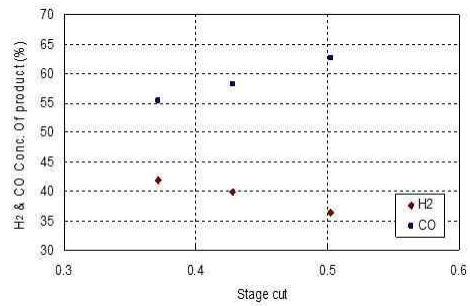
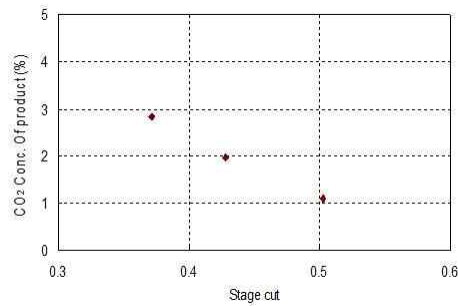
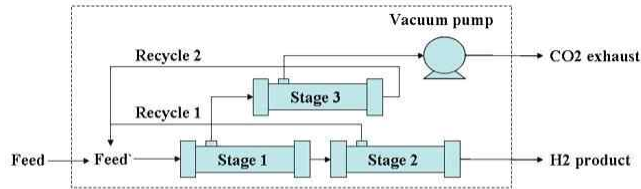
→ 1단 성능평가 (Single Stage, 25°C)



→ 2단 성능평가 (2-Stage Serial, 25°C)



→ 3단 성능평가 (3-Stage Serial & Parallel, 25°C)



- 합성모사가스 분리성능 평가결과 (2Nm³/hr급 Module)

→ Membrane Module의 개수 및 조합에 따라, H₂ 회수율이 변화하였고 CO₂ 제거율에는 큰 차이를 보이지 않았음. 위 데이터를 기초자료로 DME-H₂ 개질기 및 PSA의 발생가스로부터 CO₂를 분리하는 시스템을 구성

분리막 단수		1단	2단 직렬	3단 직렬+병렬
Product 가스농도 (%)	H ₂	39	42	42.5
	CO	58	55	54.5
	CO ₂	3	3	3
H ₂ 회수율 (%)		20	47	85
CO 회수율 (%)		40	69	96
CO ₂ 제거율 (%)		94.5	97	94
Stage cut		0.8	0.62	0.36

(6) CO2 시비를 위한 Membrane Module Setting

- DME-H2 개질기 및 PSA를 통해 배출되는 가스라인에 Membrane Module을 적용하여 CO2를 분리하고, 이를 비닐하우스 내부에 설치되어 있는 CO2 공급 배관과 연결
→ 비닐하우스 내부는 CO2 시비효과를 실증하기 위하여 2동으로 분리되어 있으며, 1동에 CO2 공급 배관이 설치되어 있음



○ 스마트팜내 연료전지-배열회수-축열시스템 설치

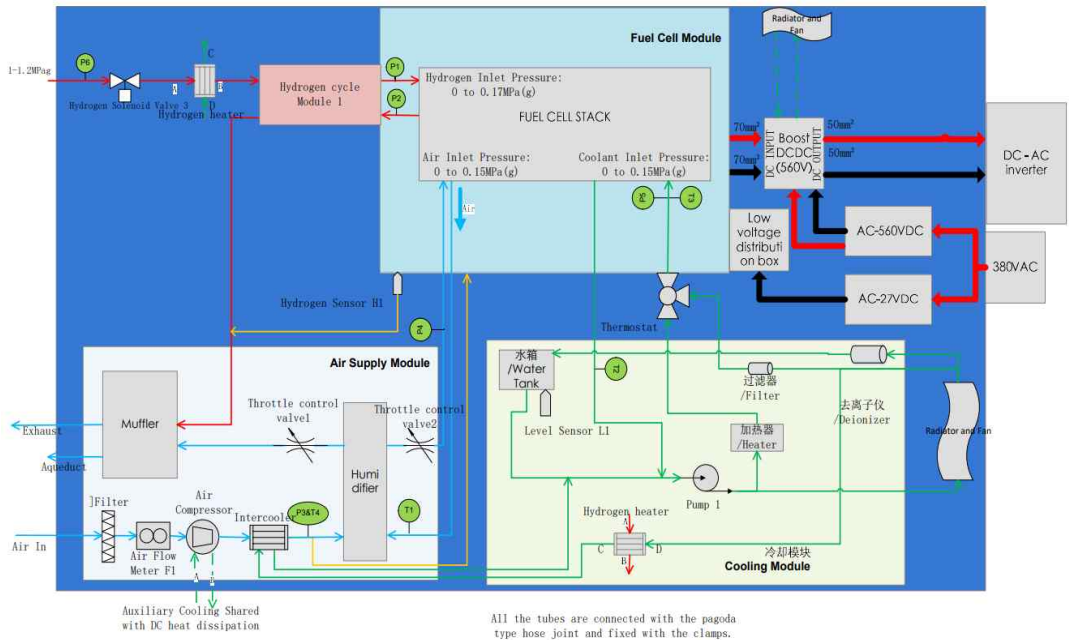
(1) 농업용으로 적용하기 위해, 연료전지에 대한 조사 실시

- 경제성을 고려하여 연료전지시스템은 Horizon으로부터 구입하여, DME-H2 개질기와 연계, 스마트팜 탄소농업에 적용하기로 함

	인산형 연료전지 (두산퓨얼셀)	고분자 연료전지 (에스퓨얼셀)	고분자 연료전지 (호라이즌)
특징	 <ul style="list-style-type: none"> - 천연가스, 화석연료 활용 - 440KW (대용량) 	 <ul style="list-style-type: none"> - 천연가스, 화석연료 활용 - 50, 100KW 	 <ul style="list-style-type: none"> - 30KW, 100KW - 천연가스, 수소
장점	<ul style="list-style-type: none"> - 국내 보급률 1위 - 전력생산 성능보장 - 대용량 - 국내기업 	<ul style="list-style-type: none"> - 빌딩 등 적용 최적화 - 국내기업(유지보수 유리) 	<ul style="list-style-type: none"> - 빌딩 등 - 최저가 (1,000만원/KW) : 30KW PEM 기준 → 농촌적용 최적합
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 높은 가격 (25-30억) - 농촌적용 어려움 (천연가스 배관 ×) - 빌딩전용, 대용량 	<ul style="list-style-type: none"> - 5KW PEMFC 기준 (1억원/KW) → 높은 가격 	<ul style="list-style-type: none"> - 해외제품 (수입, 유지보수 취약)

(2) PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) 30KW 선정

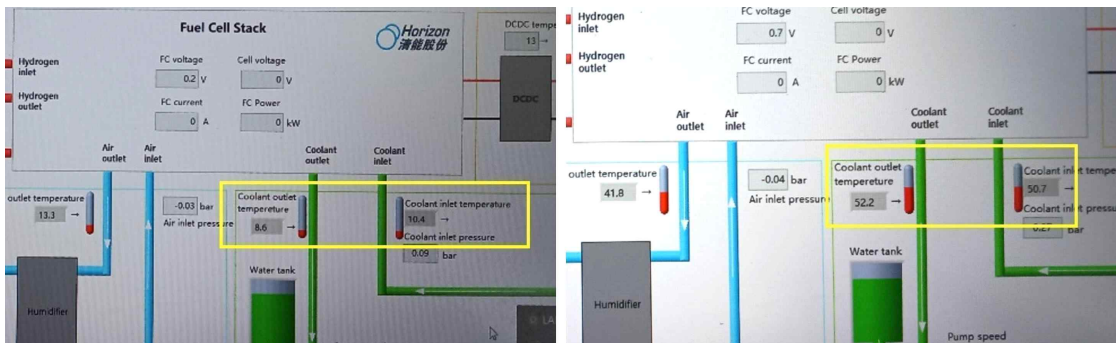
- Cooling Module이 장착되어있어, Cooling Module을 축열시스템과 연계
- 연료전지에서 발생하는 직류(DC)를 교류(AC)로 변환하기 위한 Inverter Setting
- 연료전지-배열회수-축열시스템 구축을 위한 개별장비 Setting 중



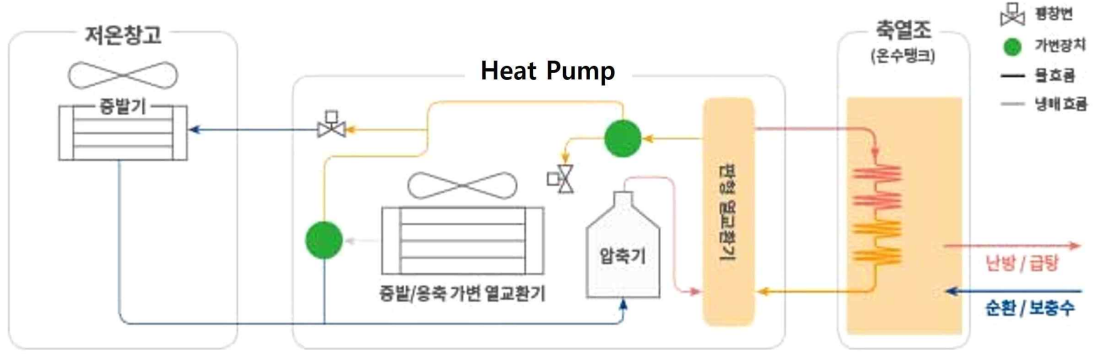
[연료전지시스템]



[연료전지, 인버터 / 연료전지 내 Cooling Module]



- 연료전지의 Stack을 통과하고 나온 냉각수의 온도가 약 60℃로, 축열시스템과 연계하여 비닐하우스의 난방에 사용하기에는 충분하지 않다고 판단되어 이를 보완 할 수 있는 방법으로 히트펌프를 검토중에 있음



[연료전지-배열회수-축열시스템 LayOut]

○ 난방분석을 위한 DME 발전기와 DME 수소연료전지 발전시스템 비교

(1) 탄소농업(Carbon Farming)

- 탄소배출을 줄이고, 광합성으로 만들어진 탄소를 토양에 격리하고 저장하는 농업
- 대기중의 탄소를 토양과 작물, 뿌리, 나무 등에 격리해 최종적으로 탄소를 땅으로 되돌리는 것
- 대기중 탄소의 순손실을 만들어 토양과 식물 재료로 격리되는 속도를 높이는 것



[CO2 탄산재배]

- DME 분산발전은 수소경제가 활성화되기 30년전에 농업용으로 전력을 공급하기 위한 설비로 연료전지와 비교하는 실험이 수행됨
- DME 분산발전은 Tri-Generation용으로 농업에 활용가능
- 현재와 같은 농업에의 연료전지 상용화 前단계에서는 DME 발전시스템과 CO2 발생기를 적용하는 것이 효율적임

	연료전지시스템	rDME 발전기	CO2 발생기 (rDME 연료사용)
특징			
장점	<ul style="list-style-type: none"> - 수소경제 - 탄소중립 	<ul style="list-style-type: none"> - 저탄소연료 rDME 활용 - 저비용 고효율 시스템 - 전력, 냉난방 적용 	<ul style="list-style-type: none"> - 겨울철 난방용 - 딸기재배최적
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 고비용 - 기술개발 - 사업화 방안 필요 		

- 2단계에서는 평가를 진행할 수 있도록, 식물공장 Setting 중에 있음



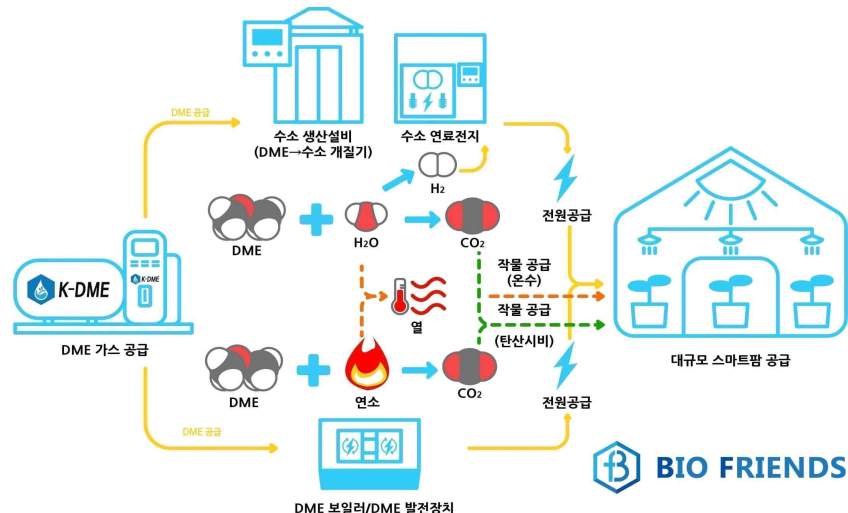
[식물공장으로 Setting중에 있는 컨테이너]

○ 농가적용 사업화 모델제시

(1) 사업화 모델

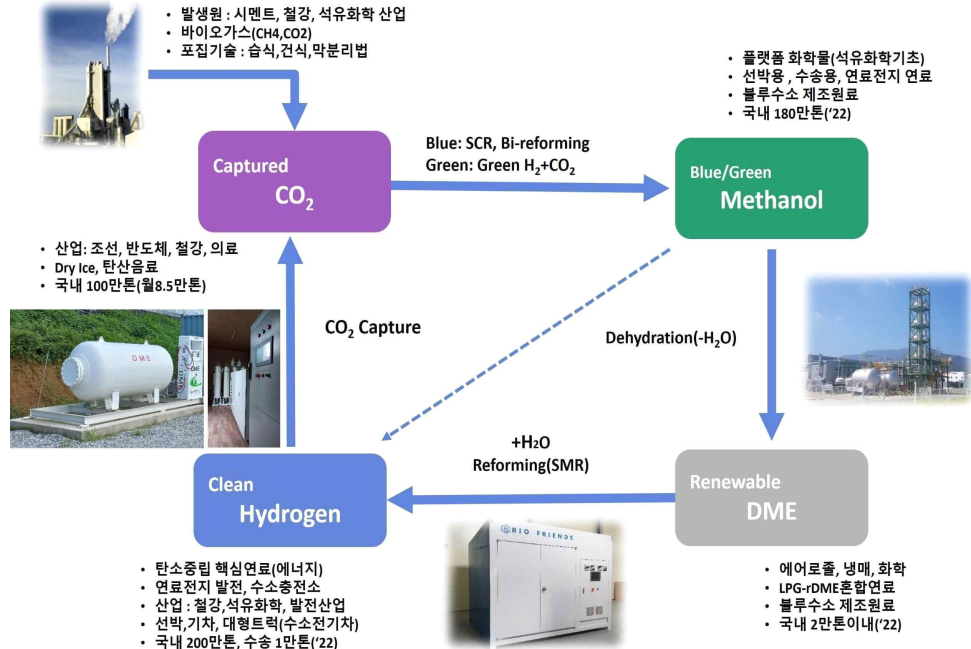
- [스마트팜 농가 보급] 포집된 CO2로부터 eDME를 제조하여 농가용 연료로 보급하고, eDME를 활용하여 스마트팜, 식물공장에 ①수소연료전지 보급(배열회수), ②전력공급(친환경 농법 제공), ③CO2 탄산재배 등, 본 과제를 통한 기술개발제품으로 농가에 적용하는 사업화 모델을 완성함

농업용 대규모 스마트팜용 에너지 공급 인프라 시스템 구상도



- [CO2 자원화와 활용 사업모델] 대규모 eDME를 생산하기 위한 CO2 발생원(시멘트, 철강, 석유, 화학 산업단지)에서 포집한 CO2로부터 eDME를 제조하고, 이를 농가에 적용하는 사업모델 도출

→ 2021.11월부터 시멘트 배출 CO2 포집으로부터 저탄소 연료(DME, 메탄올 등) 정부사업 수행중, 총 예산 360억원, '25년 eDME 10,000톤 생산 예정이며, (주)바이오프랜즈는 이를 대비한 1만톤 eDME 생산공장 건설 완료함)



[(주)바이오프랜즈 제2공장 조감도]



[(주)바이오프랜즈 제2공장 공사현장]

○ 친환경 DME 연료전지보급

- 친환경에너지(DME)를 천연가스 미공급지역인 농업분야에 보급, 농작물재배의 30%가 에너지인 식물에 깨끗한 연료사용
- DME 연료전지를 스마트팜에 설치하여 전기, 냉·난방, CO2 시비를 통한 에너지솔루션 제공
- CCS(Carbon Capture Storage) 기술을 적용한 DME를 연료전지 발전으로 활용
- 현재 Test-Bed 2개소에서 장비 Setting 및 작물재배를 실시하고 있음
 - 강원원주 가나안농군학교, 경북상주 스마트팜혁신밸리



[지열히트펌프 / 축열시스템]



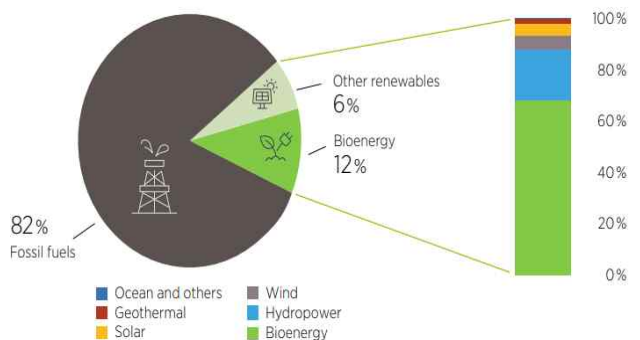
[상주스마트팜 혁신밸리]

○ 대용량 바이오매스 활용 대규모 스마트팜 적용 사업성 분석

- 바이오매스(bio-mass, 생물연료)는 태양에너지를 받아 유기물을 합성하는 식물체와 이들을 식량으로 하는 동물, 미생물 등 생물유기체, 화학적 에너지로 이용되는 생물을 가리킴
- 바이오매스는 바이오가스, 바이오 알코올, 바이오디젤 등으로 구성됨
- 세계적으로 바이오에너지는 최종 에너지 소비의 12% 정도를 차지하며, 여전히 가장 큰 재생에너지를 점유하고 있음

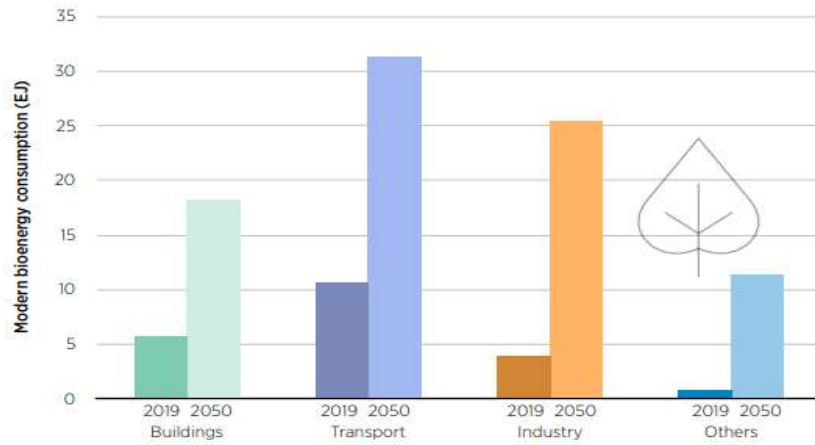


[바이오매스의 종류 및 용도]



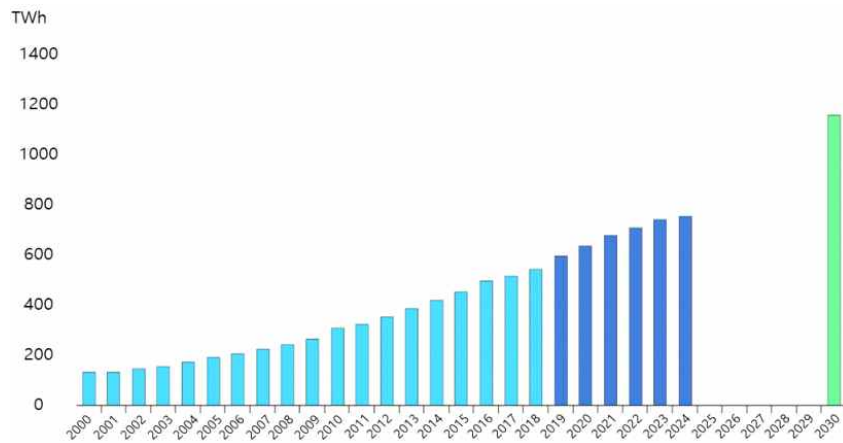
[2019년 세계 최종에너지 소비 대비, 바이오에너지 비율]

- 현대 바이오에너지 이용은 2018년보다 3배 정도 증가하여 153EJ에 이를 전망이며, 세계 총 1차 에너지 공급의 25%를 차지하게 될 것으로 전망



[IRENA의 1.5°C 시나리오에서 2019년과 2050년 현대 바이오에너지 소비]

- (세계) 바이오에너지 시장규모는 '11년 2,820만toe에서 '18년 4,695만toe로 연평균 약 5% 속도로 성장하였으며, '24년 6,543만toe, '30년 10,043만toe로 꾸준히 확대될 것으로 전망

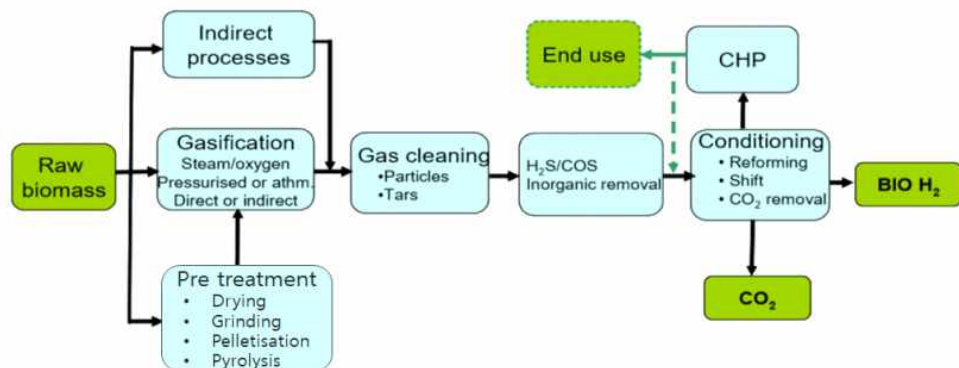


※ 출처: IEA 홈페이지

[세계 바이오에너지 시장규모 (2020-2030)]

- 바이오매스를 활용한 수소생산기술

- 느린 산소발생반응(OER) 속도 및 낮은 수소생산효율을 지닌 물의 전기분해를 보완하기 위해 바이오매스를 포함한 타 자원을 활용하여 수소를 생산하는 기술 연구·개발 활성화
- 바이오매스에 포함된 수소는 약 6% 수준에 불과하지만, 바이오 가스화에 의한 수소생산과 함께 고부가가치 물질을 생성 가능한 기술이 상용화된다면 충분히 경쟁력 보유 예상



※ 출처 : 고등기술연구원(2019), 합성가스 기반 수소생산의 국내외 기술현황과 전망 [바이오매스를 이용한 수소생산 개념도]

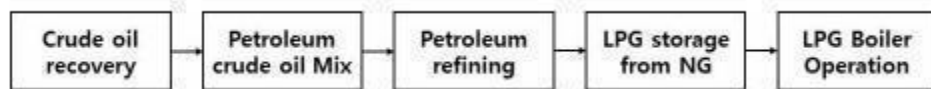
- 농가적용 사업성 분석

- DME 연료전지를 활용하여 스마트팜 등 농업용 친환경 에너지 시스템을 적용하는 것과 분산발전기를 활용하는 경우, 한국형 스마트팜 규모로 500평 이상~3300평(1ha) 이하에 적용하는 것이 최적 규모임

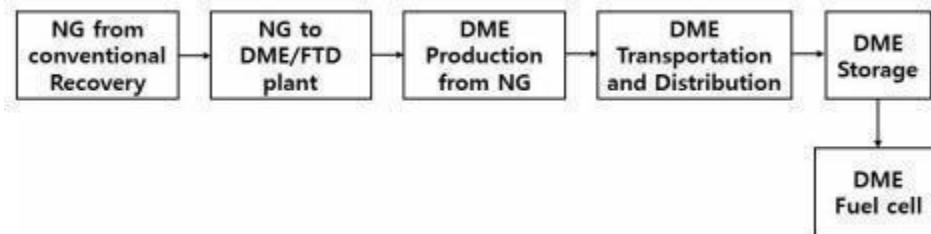
- 연료전지의 경우, 제조·생산 단가가 아직은 월등히 높아서, 1kW당 500만원 수준으로 형성될 때 까지는 DME 분산발전을 활용하여 운영하는 것이 바람직함
- 농가 1인 가구 수익성을 고려할 경우, 연간 5,000만원의 소득을 달성하기 위하여, 대형 스마트팜의 경우, 기업형으로 운영하는 것이 바람직함

	시스템	적용면적	연계기술	경제성
DME 연료전지 (DME 보급탱크) - 수소제조시스템 - 연료전지	100KW	500평 (농가 1가구의 경작면적)	태양열 지열 축열시스템	- 설비설치비용 : 12억원 (임대 방식) - 생산품목 ① 옥묘장 : 2.5억원/년 ② 토마토, 딸기 : 2억원/년 - 경제성 ① 1인가구수익 : 연 5000만원 ② 에너지절감 : 5%절감 - 친환경에너지 활용 - CO2 활용
	440KW	3,000평 (기업형 농가)	태양열 태양광 지열 축열시스템	- 설비 설치비용 : 30억원(장기임대) - 생산품목 ① 옥묘장 : 15억원/년 ② 토마토, 딸기 : 15억원/년 - 경제성 (종업원 10명) ① 1인가구수익 : 연 5,000만원 ② 에너지절감 : 10% 수준절감 - 친환경에너지 활용 - CO2 활용
DME 분산발전기	150KW	1,000평 (식물공장)	태양열 축열시스템	- 시설설치비용(임대) : 2억원 - 생산품목 특수작물 (한방 등) : 5억원/년 - 경제성 ① 1인당 가구수익 : 1억원 ② 에너지절감 : 20% 절감

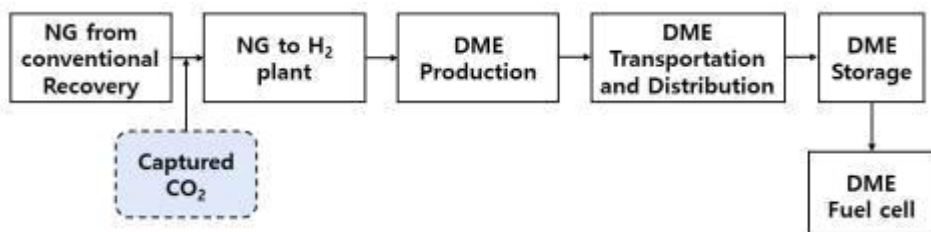
- LPG-eDME 혼합연료 활용 시 온실가스 감축 효과에 대한 전주기 분석 (LCA분석)
 - LPG 보일러와 DME 연료전지 활용 시, CO2 발생량 외에 오염물질의 배출량을 연료의 종류와 생산방법에 따라 LCA 분석실행
 - 천연가스로부터 합성가스 생산과 DME 합성반응공정
 - 포집된 CO2로부터 DME 합성반응공정 (eDME)
 - 바이오가스로부터 DME 합성반응공정 (rDME)
 - LCA 분석모델
 - Model 1. 석유생산-LPG 생산공정 및 보일러 사용



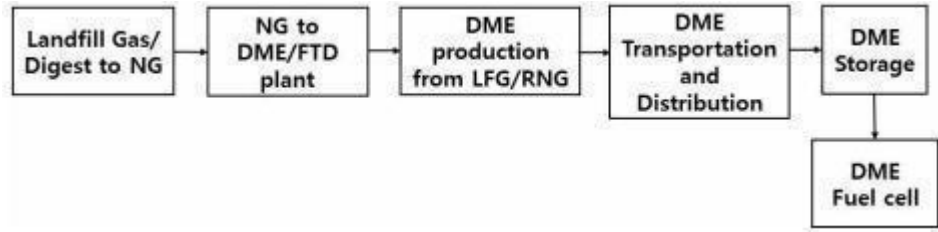
- Model 2. 천연가스생산-DME 생산-DME 연료전지 사용



- Model 3. 천연가스생산-수소생산-CO2 이용 DME 생산 - DME 연료전지 사용

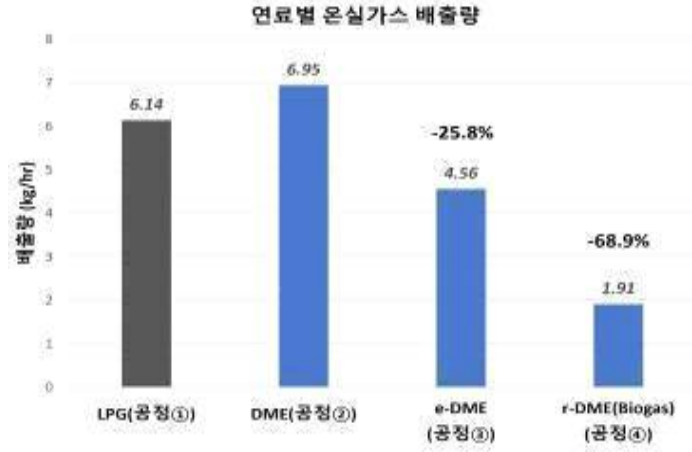


→ Model 4. 바이오가스 생산 - LNG로부터 DME 생산 - DME 연료전지 사용

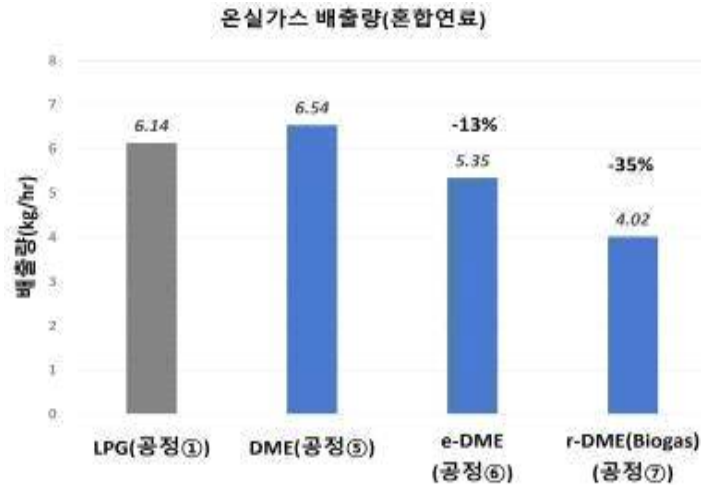


- 분석결과

→ LPG, DME, eDME, rDME의 생산에서 활용까지의 온실가스 배출량



→ LPG와 DME, e-DME/r-DME 혼합 연료공정에서의 온실가스 배출량



나. 위탁연구개발기관 : 울산대학교 산학협력단

○ 컨테이너형 스마트팜 구축

(1) DME 삼중열병합 시스템(Tri-Generation System) 제작 및 설치

- 전력, 냉·난방을 동시에 제공하는 DME 삼중열병합 시스템은 대용량의 시설 농가 및 식물공장 등에 적용 가능하며, 농촌시설 현대화 및 사계절 작물 재배가 가능하게 할 수 있음
- 기존에 농가에서는 전력 생산기, 냉·난방기 등 각각의 에너지 장치를 독립적으로 설치하여 공간이 협소하여지고, 에너지 발생장치 구축비용이 부담이 되었지만, 삼중열병합 시스템은 전력, 냉·난방, CO2 공급이 동시에 가능하여 기존의 에너지 발생장치들에 비해 이점이 있음
- 대형 컨테이너를 식물공장으로 꾸미기위해 DME 삼중열병합 시스템을 적용, 경유 및 등유에 비하여 저렴하며 청정한 연료인 DME를 사용함으로써 에너지 및 설비비용을 줄일 수 있음



[DME 삼중열병합 시스템]

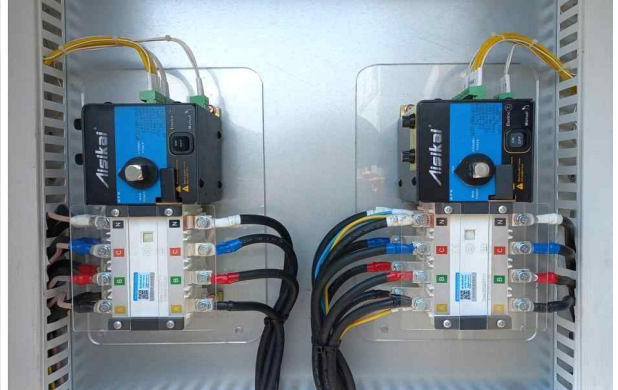
(2) DME 삼중열병합 시스템 및 컨테이너 현장 설치

- DME 발전기 2대, 40ft 컨테이너 2대 (강원원주 가나안농군학교 Test-Bed)



[DME 발전기 / 컨테이너 현장 설치 前 · 後]

- 한전전력과 발전기전력을 전환시킬 수 있는 ATS(Auto Transfer Switch) 설치



[전력전환장치 ATS 설치]

- 현장에 설치된 DME 발전기의 성능평가 실시

→ DME 발전기의 출력 및 출력별 배출가스측정

→ DME 발전기의 내구성 평가



Certificate of Test

수요처(CUSTOMER)		출산처(FACTORY)	
발전기 세팅 모델	EGS400HE	발전기 발원번호	EMW0014
엔진모델(Engine Model)	50AF (2000cc)	발전기용량(Generator Class)	10 KW
엔진출력(Engine Power)	-	주파수(Frequency)	60 Hz
엔진회전속(Engine Rpm)	1400/3000	회전수(Revolution)	1,800 rpm
발전기번호(Generator No.)	20110A000005	전력인자(Power Factor)	0.8
발전기출력(Prime)	40KW	발전기용량(KVA/Max. Appx.)	3000 / 75A
Test Date	2022년 10월 31일	발전기용량(KVA/Max. Appx.)	3 Phase / 75A

● 전압, 주파수 변동률 (VOLTAGE, FREQUENCY REGULATION)							
부하율 (LOAD)	전압 변동률 (%)	주파수 변동률 (%)	주파수 조정 범위 (Hz)	주파수 조정 범위 (Hz)	주파수 조정 범위 (Hz)	주파수 조정 범위 (Hz)	주파수 조정 범위 (Hz)
0%	0.1%	0.1%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100%	0.1%	0.1%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

● 부하 특성 시험 (LOAD CHARACTERISTIC TEST)							
부하율 (%)	전압 (V)	주파수 (Hz)	전력 (kW)	전력 (kVA)	전력 (kWh)	전력 (kWh)	전력 (kWh)
0%	10	0	300	0	1.00	60	67
25%	10	30	300	15	1.00	60	73
50%	10	60	300	30	1.00	60	79
75%	10	90	300	45	1.00	60	82
100%	10	120	300	60	1.00	60	82

● 배출 가스 시험 (EMISSION TEST)							
부하율 (%)	CO (ppm)	CO2 (ppm)	HC (ppm)	NOx (ppm)	NO2 (ppm)	NO (ppm)	Temperature (°C)
0%	10	10	7	222	212	2.78	219
25%	10	6	89	277	172	4.52	233
50%	10	7	13	304	168	8.58	278
75%	10	10	8	351	206	8.24	313
100%	10	10	9	448	403	13.81	348

발행 일자: 2022. 10. 31 | 시험장: 강릉시 | 회사: 엔진테크윈



다. 공동연구개발기관 : 스마트그린에너지㈜

- 전기식 Heat-Pump 설비 구축
 - 컨테이너 식물공장 10평×2동 구축



[컨테이너형 식물공장 내부]



[Air-Flow를 고려하여 Heat-Pump 배치 및 설치]

구 분	제 원	비 고
소비전력 (표준/최대)	냉방시 (2.94/3.96KW) 난방시 (3.22/5.2KW)	
제품크기	실내기 (525×1,850×320mm) 실외기 (940×998×330mm)	

라. 공동연구개발기관 : (재)전라남도환경산업진흥원

○ 열저장기술의 분류 : 열을 저장하기위한 방법으로 현열축열, 잠열축열, 화학축열 세가지 방법이 주로 활용되고 있음

- (1) (현열축열) 물질의 상태변화없이, 물질의 온도차이와 열용량을 이용하는 방법
 - 액체, 고체 등을 축열물질(물, 자갈 등)을 가열/냉각하여 열에너지를 저장
- (2) (잠열축열) 물질의 상태변화에 따라 열에너지를 축열, 방열하는 방법
 - 상변화물질(파라핀, 용융염 등) - PCM(Phase Change Material)을 이용하여 열에너지를 저장
- (3) (화학축열) 화학반응을 통하여 열에너지를 저장하고 방출하는 방법
 - 흡수된 물질(Sorbate)과 흡착제(Sorbent)의 화학반응을 이용하여 열에너지를 저장
 - 제올라이트는 수증기와 제올라이트의 흡·탈착 반응을 이용하며, 제올라이트가 수증기가 탈착되는 과정에서 열에너지를 저장, 반대로 수증기가 제올라이트에 흡착되는 과정에서 열에너지를 방출

○ 선정된 축열물질의 물리화학적 특성

(1) 잠열축열물질 : N-22 (PARAFOL 22-95, C22H46)

Material	PARAFOL 18-97	PARAFOL 20Z	PARAFOL 22-95	NACOL 18	PEG 1000	Sodium Sulfate Decahydrate
chemical structure	C ₁₈ H ₃₈ (n-octadecane)	C ₂₀ H ₄₂ (n-eicosane)	C ₂₂ H ₄₆ (n-docosane)	C ₂₂ H ₃₈ O (1-octadecanol)	HO(C ₂ H ₄ O) _n H	Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O
Melting Point / range	30 - 34 °C (32 °C)	38 - 42 °C (40 °C)	56 - 50 °C (48 °C)	56 - 60 °C (58 °C)	35-40 °C (37 °C)	30 - 35 °C (32 °C)
Density	approximately 0.768g/mL at 40 °C	approximately 0.789g/mL at 40 °C	approximately 0.777g/mL at 60 °C	approximately 0.815g/mL at 60 °C	approximately 1.2g/mL at 20 °C	approximately 1.46g/mL at 25 °C
Latent Heat Capacity	> 220 J/g	> 200 J/g	> 220 J/g	> 200 J/g	155 J/g	180 J/g
Flash Point	165 °C	176 °C	186 °C	174 °C	171 °C	-
Water Solubility	insoluble	insoluble	insoluble	insoluble	soluble	soluble

[PCM 후보 물질표]

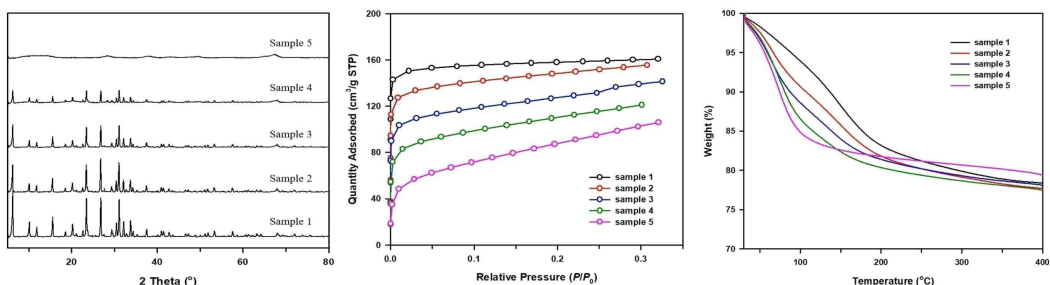
(2) 화학축열물질 : 제올라이트 13X, 활성알루미나(Activated Alumina, F-200)

	Activated alumina	zeolite 13X
Surface area (m2/g)	340	612
Pore volume (cc/g)	0.5	0.3
Bead size range (mm)	4.7	2.5 - 5.0
Bulk density (g/L)	769	655 - 700
Crush strength (N/bead)	Min 55	Min 50
Attrition (wt%)	Max 0.1	Max 0.2

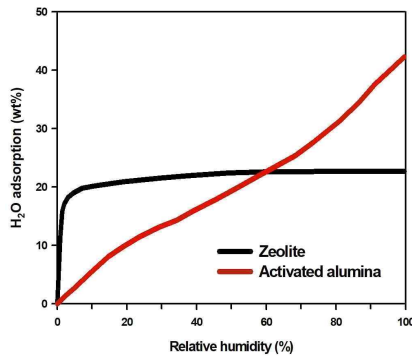
[산업용 활성알루미나와 zeolite 13X의 물리화학적 특성]

○ 하이브리드형 고효율 축열재 설계

- 흡착제의 수분흡착특성이 다른 점을 이용하여 하이브리드형 축열재를 설계함
- 제올라이트 13X(BASF)와 활성알루미나(F-200, BASF)를 혼합비율을 변경하여 물리화학적 특성 및 수분 흡착 특성을 평가 → 평가 결과, Sample 4의 수분 흡착 특성과 열량이 가장 우수하였음



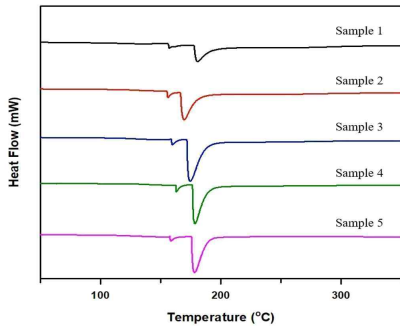
[혼합비율에 따른 X선 회절분석 / 비표면적 분석(질소흡착 등온선) / 열중량분석(TGA)]



[흡착물질의 수분흡착량]

No	혼합비율(wt%)	
	Zeolite	Alumina
1	100	0
2	70	30
3	50	50
4	30	70
5	0	100

[혼합비율 조정별 Sample 제조]



[혼합비율에 따른 시차주사열량분석(DSC)]

No	Surface Area (m ² /g)	Weight Loss (%)	ΔH (J/g)
1	474.4	21.5	139.1
2	474.9	22.3	205.8
3	421.0	21.9	273.1
4	374.7	22.6	298.2
5	327.4	20.6	282.3

[혼합비율에 따른 물리화학적 특성]

○ 배열 이용 고효율 축열시스템 개발

(1) 대형 축열조 설계 및 제작(1GJ급)

- 상변화 물질의 잠열 활용을 통해, 열에너지 저장이 가능한 1GJ급 대형 축열조 설계 및 제작
- 1GJ 용량 충족이 가능한 PCM(Phase Change Materials) 2,500Kg 충전 및 열팽창에 의한 여유 안전 용량을 반영한 내부 공간 설계
- 신재생에너지 배열(연료전지 및 태양열) 온도에 적용하기 적합한 녹는점 70°C의 PCM 적용
- SUS 304 재료의 열팽창에 대응 가능한 지지구조설계
- 내부의 안전작동압력은 5Bar로 설계하고, 압력초과를 대비한 자동 Relief Valve 설치
- 열손실 최소화를 위해 축열조 최외각 벽면 단열재 50T 시공 및 외관 케이싱
- 축열성능확인을 위한 열전대(축열조 내부 6-point, 입출구) 설치와 입출구에 압력계를 장착하여 온도 및 압력 계측 가능



[열저장장치(TES) 설계 및 제작]

구 분	제 원	비 고
Cylinder 직경	1,200 mm	축열 배관 : 50A 방열 배관 : 150A 응축수 배관 : 40A 안전 압력 : 5Bar 온도측정 : 열전대
TES Cylinder 길이	3,000 mm (충진공간 3.4m ³)	
상변화 물질 무게	2,500 Kg	
TES 자중 (PCM 포함)	약 4.0 Ton	
TES 재질	SUS 304	

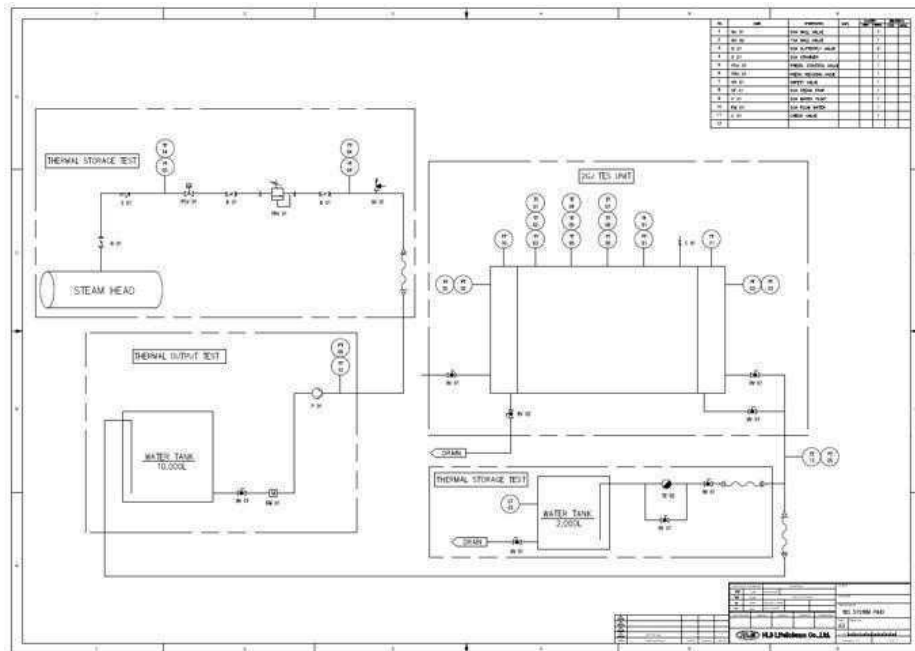
[열저장장치(TES) 본체의 제원]

물질의 특성	특성치
화학 구조	C22H46O
녹는점	70°C
인화점	227°C
밀도	0.8 g/mL (80°C)
잠열량	200 KJ/Kg 이상
수용성 여부	비수용성

[열저장장치(TES) 상변화 물질(PCM)의 특성]

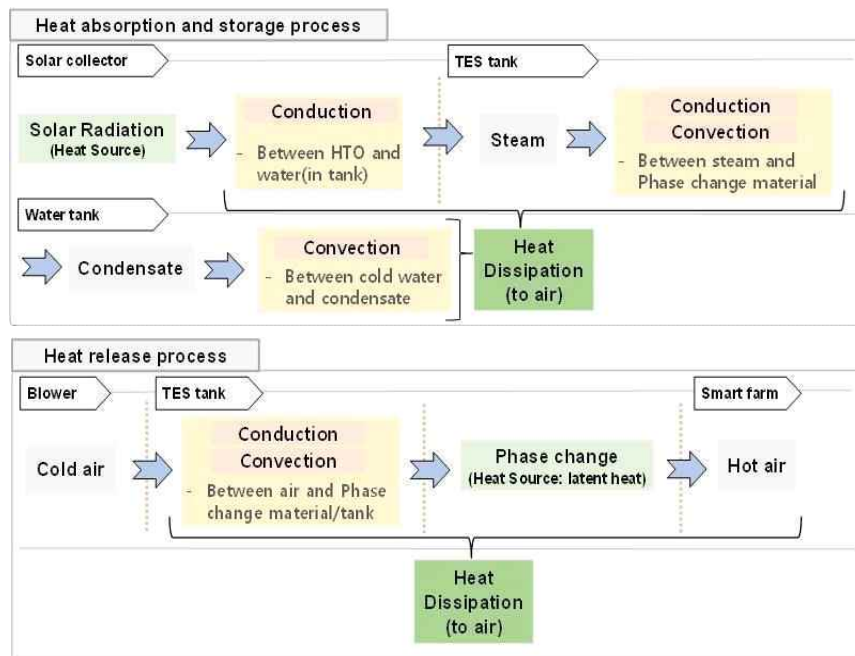
(2) 축열 및 방열 공정 P&ID 설계

- 축열 및 방열을 위한 시스템 통합 P&ID 설계
- 스팀 라인 및 축열조에 안전 압력 초과시, 압력 배출을 위한 Relief Valve 장착
- 방열 공정前, 응축수 배출을 위한 스팀 트랩 및 제어 밸브 구성
- 방열 입출구, 응축수 배출부, 스팀 공급부에는 안전사양의 Butterfly Valve를 장착하여 스팀 공급 및 차단 제어 가능



[축열 및 방열공정 P&ID 설계]

- 공정 P&ID 설계에 따른 열흐름 및 열손실을 반영한 구성요소 선정

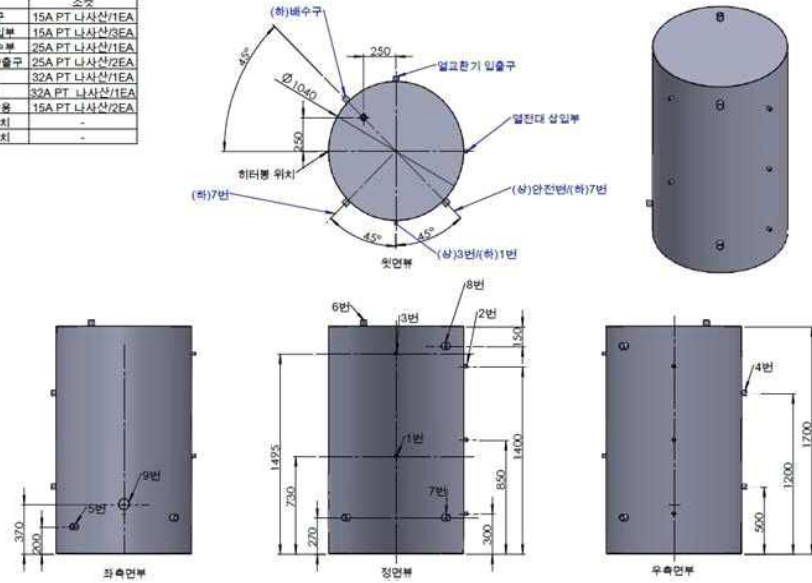


[열저장 시스템(TES)의 열 흐름도]

(3) 수축열 탱크 설계 및 제작 (1,000ℓ)

- 스팀 발생에 필요한 열매체 저장과 축열 공정후 배출되는 응축수를 회수하기 위한 수축열 탱크의 설계 및 제작
- 응축수 회수를 통해 탱크내부의 열매체의 온도를 상승시켜 스팀 발생에 필요한 총열량을 감소시킬 수 있는 내부구조 및 배관 설계
- 신재생에너지 발생 배열(연료전지 및 태양열)을 혼합시킬 수 있는 배관구조 설계

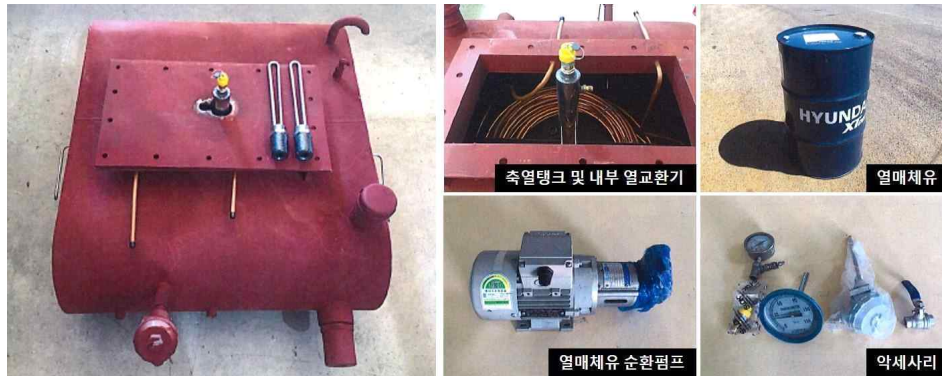
번호	명칭	소재
1	온수 출구	15A PT 나사산/1EA
2	열전대 상입부	15A PT 나사산/3EA
3	응축수 회수부	25A PT 나사산/1EA
4	열교환기 입출구	25A PT 나사산/2EA
5	배수구	32A PT 나사산/1EA
6	급수구	32A PT 나사산/1EA
7	타 열원 열출	15A PT 나사산/2EA
8	열전대 위치	-
9	히터봉 위치	-



[수축열 탱크 설계 도면]

(4) 고온 태양열 축열조 설계 및 제작

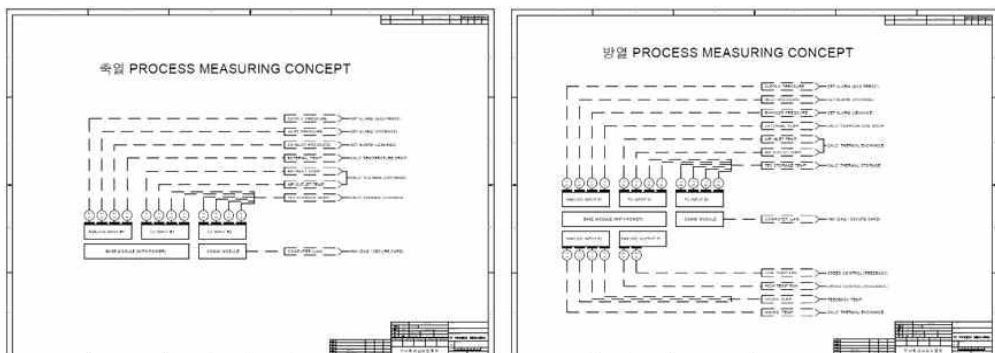
- 태양열 집열을 통해 스팀 발생이 가능한 고온 태양열 축열조 설계 및 제작
- 수축열 탱크 열매체와 고온 태양열 축열조 내부 열매체유 의 열교환으로 스팀 발생가능
- 열매체유 안전 사용온도(약 300℃) 초과시, 순환펌프정지 및 안전압력초과에 따른 자동 압력배출 Relief Valve 장착

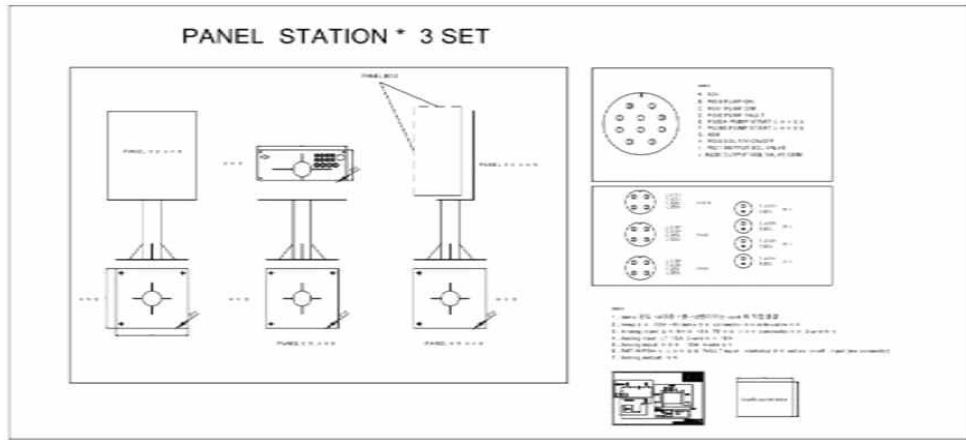


[고온 태양열 축열조 제작 및 구성품]

(5) 축열 및 방열 통합 제어 및 모니터링 시스템 개발

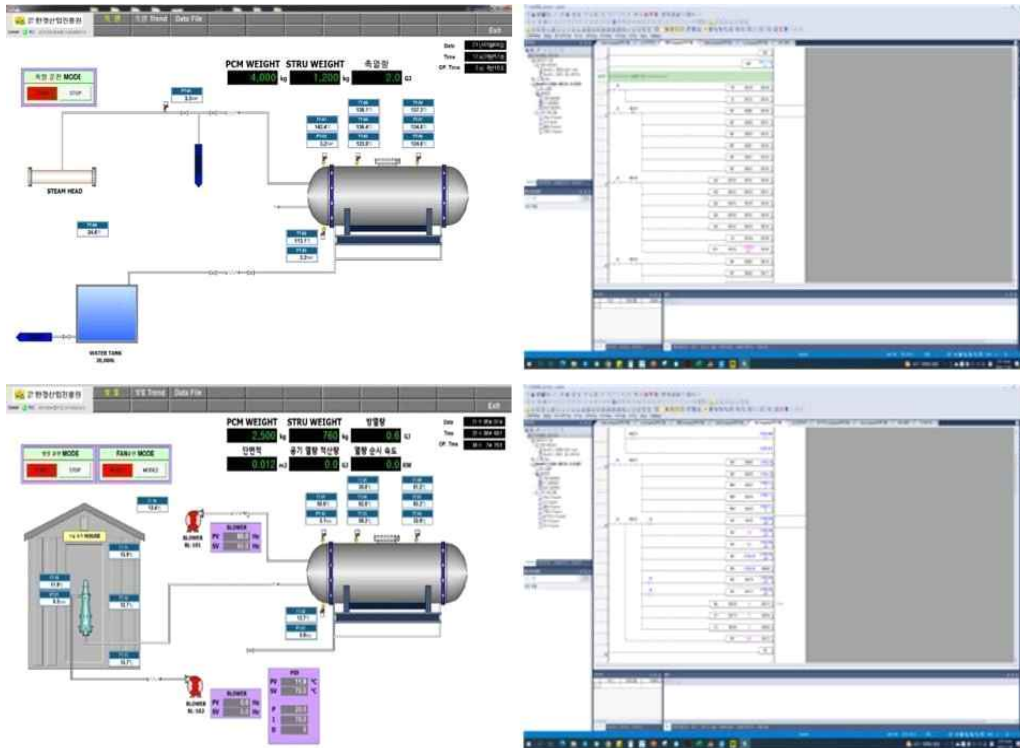
- PLC(Programmable Logic Controller) 기반 제어 및 데이터 계측 하드웨어 구축
- SCADA 기반 축방열 공정 제어 및 데이터 모니터링 프로그램 개발





[축방열 공정 통합제어반의 제어 Concept 및 제어반 구조설계]

- 축열공정 시 열전대 신호를 받아 데이터 모니터링 및 축열량을 산정하고, 일부 전자제어가 가능한 SCADA(Supervisory Control And Data Acquisition) 프로젝트 작화
- 방열공정 시 초기 온도와 최종 온도차를 계측하여 방열량을 산정하고, 방열부 온도 및 스마트팜 내부온도 피드백을 통한 Blower PID 제어
- 모든 데이터와 제어 요소의 작동상태는 자동저장되고, SCADA 화면에서 모니터링 가능
- 각 축열 및 방열공정 프로젝트와 통합공정 프로젝트 작화



[축방열 공정 모니터링 및 제어프로그램]

공정 구분	센서/장치	모니터링/제어	위 치
축열	열전대	온도 계측	축열조 내부(6p) 축열조 입출구(2p) 외기(1p)
	압력계	압력 계측	축열조 입출구(2p)
	유량계	유량 계측	수축열조 출수부
방열	열전대	온도 계측	축열조 내부(6p) 축열조 입출구(2p) 스마트팜 내부(3p) 방열부(1p) 외기(1p)
	압력계	압력 계측	축열조 입출구(2p)
	유속계	유속 계측	축열조 방열부
	블로워	PID 제어	축열조 방열부

[SCADA 데이터 모니터링 및 제어요소]

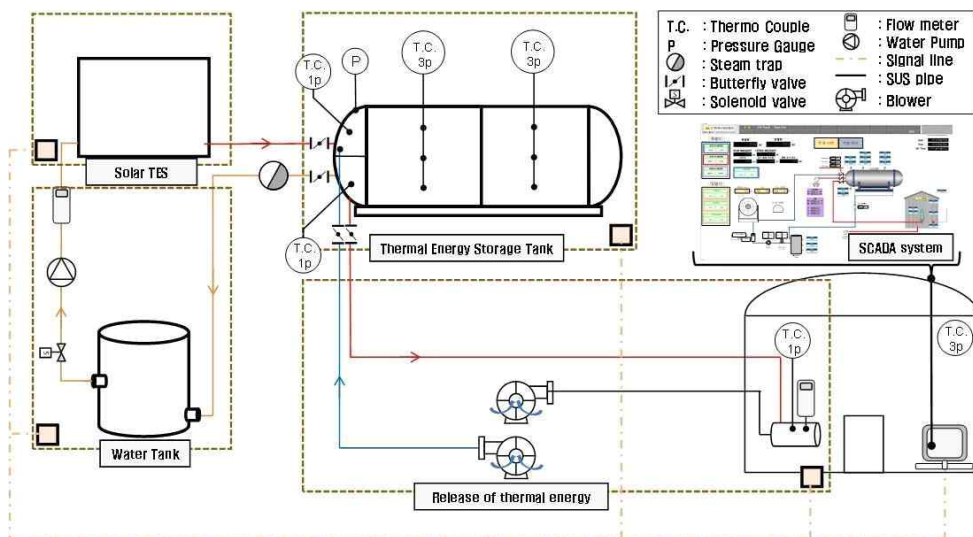
○ 상용급 시스템 설계 완성 및 현장 설치

(1) 스팀 축열공정

- 태양 일사에 따른 고온 태양열 축열조내 열매체유 온도상승
- 열매체유 온도상승에 따라 스팀이 발생하고, 발생한 스팀은 축열조 내부에서 열교환이 되며, 최종적으로 응축수만이 배출
- 이때 전열튜브를 통해 스팀의 열에너지는 PCM으로 전달되어 PCM에서 현열 및 잠열 형태의 열에너지로 저장
- 응축수 배출시, 기상의 스팀 유출방지를 위해 응축수 배출구 전단에 스팀 트랩을 설치
- 배출된 응축수는 수축열 탱크로 이송되어 내부의 열매체와 혼합되어 수축열이 가능
- 수축열조 출수부에 위치한 유량계의 적산량을 통해, 스팀 소비량 및 공급열량계산
- 축열조 내부 열전대의 초기 및 최종 온도 차이를 통해, 축열량 계산 및 스팀 공급 열량 비교

(2) 방열공정

- 방열공정은 Blower를 통해 스마트팜 내기를 흡입하고, 축열조 내부로 송풍한 뒤, PCM의 상변화를 유도해 잠열을 방출하는 과정으로 구성
- 중앙에서 스마트팜 내기를 흡입한 뒤, 3.7KW Blower를 통해 축열조 내부로 송풍하여, 고온의 열풍을 생성
- 0.75KW Blower를 통해 스마트팜 내기 일부를 혼합 믹서로 송풍하여 열풍과 혼합해, 적정온도를 유지할 수 있는 난방열 공급
- 혼합믹서 내부 온도를 피드백하여 3.7KW Blower 풍량 제어를 통해 일정온도 유지 가능



[축·방열 시스템 현장 실증 실험장치 구성도]

(3) 실증 Test-Bed 운영을 위한 실험장치 구축

- 대형 축열조, 수축열 탱크 등, 축열 및 방열장치 현장설치



[실증현장 축·방열 시스템 구축]



[실증현장 축·방열 시스템 설치 세부요소]

- Blower 및 스마트팜 열풍 공급을 위한 배관설치, 열손실 최소화를 위한 배관 단열재 시공



[축열 및 방열장치 현장설치]

(3) 통합제어 및 모니터링 시스템 구축

- LAN통신을 통한 PLC제어반과 SCADA 구동 PC 연결
- PC에서 SCADA 프로젝트 조작을 통해, 각 축열 및 방열 모드에 대한 선택적 모니터링 및 제어가 가능하고, PC 외부접속을 통해 원격 감시제어가 가능하도록 구성

○ 실증 현장 Test-Bed 시운전

(1) 축열공정 시운전

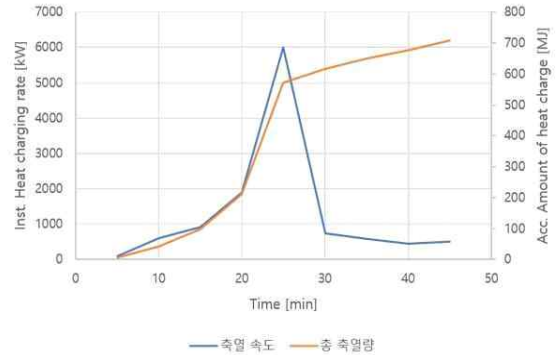
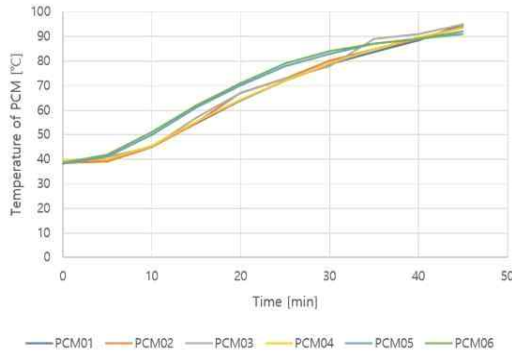
- 고온 태양열 축열조에서 공급되는 스팀을 축열조 내로 주입하고, 장치내 온도 및 PCM의 온도에 따라 축열량 산정을 함. 축열 과정 중 소비된 스팀의 양은 공급된 유량계의 적산량을 바탕으로 예측하여 축열 소비에너지를 산정
- 축열공정은 고온 태양열 축열조내 열매체유 온도가 200℃ 이상이 되었을 때 작동하며, SCADA 프로그램에서 산정되는 축열량이 1GJ 이상이 되었을 때 정지
- 축열공정 이후, 안전을 위해 축열조 내부의 잔존 스팀을 배출하는 공정 수행
- 축열공정에서 예측되는 데이터는 PLC/SCADA 기반 프로그램을 통해 저장 및 모니터링



[1GJ급 축·방열 시스템 및 운전화면]

(2) 축열공정 시운전 요약

- 스팀 공급압력 2.17Bar 조건, PCM 평균온도 38.4℃에서 90.2℃에 도달할 때까지 축열
- 축열시간은 48분 소요, 0.65GJ의 열량을 축열하였고, 축열 속도는 286KW



[상변화물질 온도분포]

[축열속도 및 누적 축열량]

[1GJ급 열저장 장치 시운전 결과]

Heat Balance of PCM Tank			
PCM	Amount of PCM [Kg]		2,500
	Heat Capacity of PCM [KJ/Kg·K]	Solid	1.659
		Liquid	2.63
	Latent Heat of PCM [KJ/Kg]		244
	Temperature of PCM [°C]	Initial	38.4
		Final	90.2
	Sensible Heat of PCM [MJ]		267.25
	Melting Heat of PCM [MJ]		365.42
Total Heat of PCM [MJ]		632.67	
Structure (SUS304)	Mass of Tube [Kg]		762.6
	Heat Capacity of SUS304 [KJ/Kg·K]		0.5
	Temperature of Tube [°C]	Initial	38.4
		Final	90.2
	Sensible Heat of Tube [MJ]		19.91
Total Heat Storage [MJ]		652.58	
Heat Charging Time [min]		48	

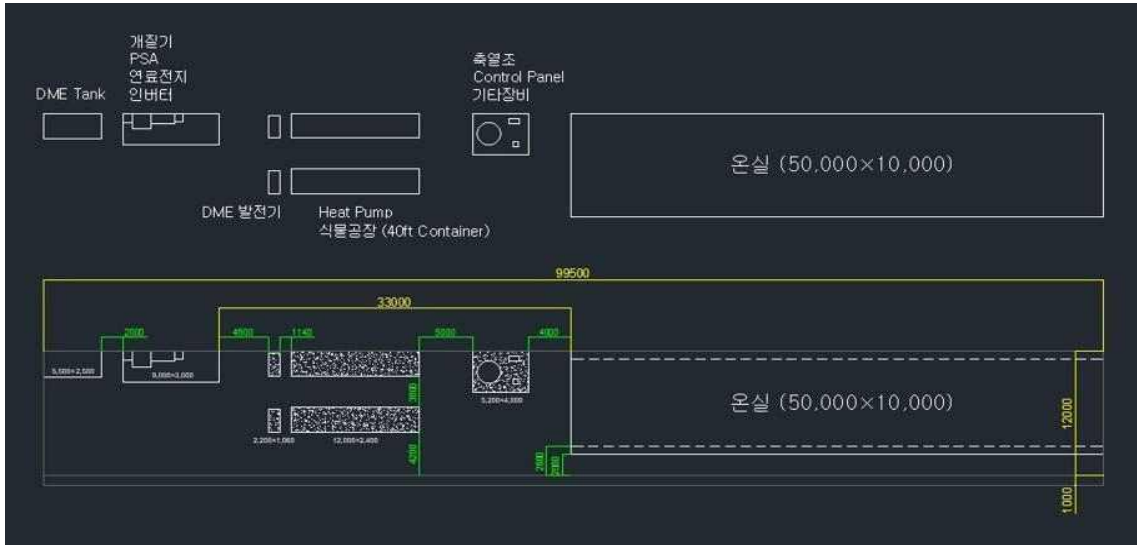
[1GJ급 스팀 축열 열수지(Heat Balance)]

(3) 축열시스템 실증

- 실험결과, 하이브리드형 축열재(Sample 4)의 열용량은 298.2J/g으로 PCM(N-22)의 220J/g보다 높지만, 축열공정에서 300℃이상의 건조한 공기의 공급이 필요함
- 가나안농군학교 현장실증을 위한 검토 결과, PCM을 이용한 축열시스템의 적용이 적합하여 PCM 기반의 축열시스템을 구축하였음

마. 공동연구개발기관 : (재)가나안복민회

○ 실증을 위한 스마트팜 Test-Bed LayOut



[LayOut (가나안농학교)]

○ 스마트팜에 적절한 과채류 및 엽채류 선정

- 스마트팜 Test-Bed에 적합한 특성을 가진 작물을 아래와 같이 선정



○ 선정된 작물에 대한 최적의 생육환경조성 방법 개발

- 선정된 작물의 생육 최적화를 위한 배지 선정

→ 펄라이트 배지 - 로메인, 청상추, 적상추, 오크

→ 코코피트 배지 - 대추방울토마토

- 작물별 양액배합 등, 생육에 대해 최적의 환경조건을 도출하기 위한 실증 재배



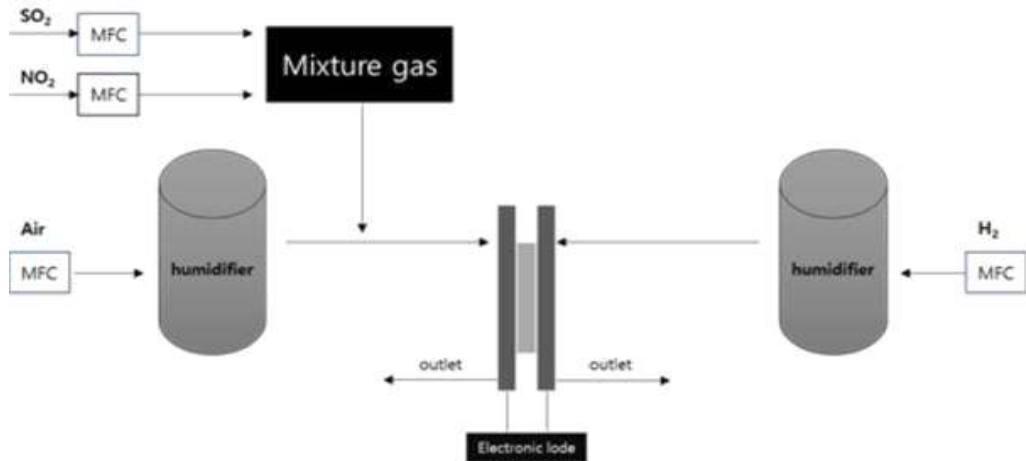
[실증재배 (2022년 8월 / 10월)]

바. 공동연구개발기관 : 상지대학교 산학협력단

○ 연료전지 공기극의 불순물 영향에 의한 성능저하분석

(1) 실험을 위한 모사가스 설정

- 공기 중의 각종 불순물 중 NO₂와 SO₂를 오염원으로 설정
- 각 오염원의 농도에 따른 영향성을 분석하여 어느 오염원이 성능저하의 주된 원인이 되는지에 관한 파악을 위해 진행



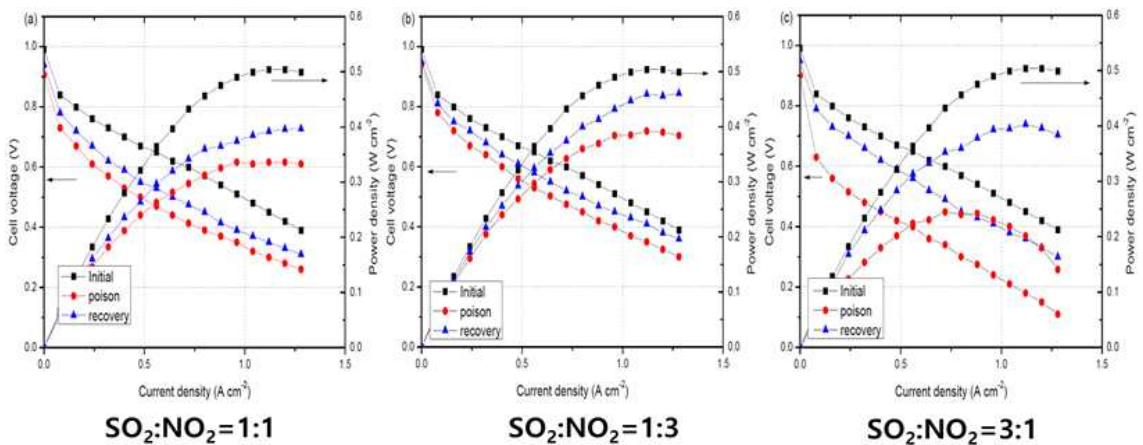
[각 오염원의 농도에 따른 영향성 분석을 위한 장치 LayOut]

(2) 오염원의 영향성 분석을 위한 농도설정

- 현실적으로 가능한 오염원의 농도는 실험의 진행 속도가 매우 느리기 때문에 실제의 오염원 농도에 비하여 높은 농도를 투입하여 가속 성능평가를 실시함
- 실험에 투입된 오염원의 농도는 아래와 같음
[전체 100ppm (NO₂ : SO₂ = 1:1, 3:1, 1:3)]
→ NO₂ : SO₂ = 1:1 의 경우, 각각 50ppm
→ NO₂ : SO₂ = 3:1 의 경우, NO₂ 75ppm, SO₂ 25ppm
→ NO₂ : SO₂ = 1:3 의 경우, NO₂ 25ppm, SO₂ 75ppm
- 5시간 동안 오염원 투입 후, 깨끗한 공기를 다시 공기극에 투입하여 성능의 복귀 실시

(3) 각 오염원 비율별 성능

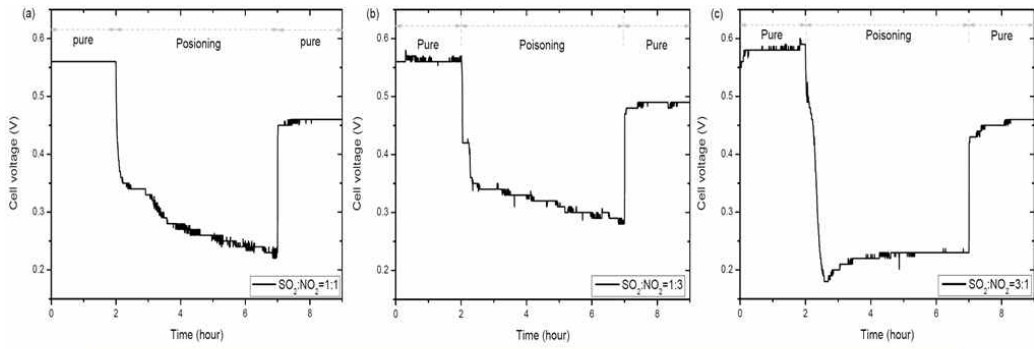
- 전류 vs. 전압 / 전류 vs. 출력 곡선으로 성능 변화를 비교
- 성능 변화를 비교한 결과, 전반적으로 오염원이 투입에 따른 성능의 변화는 NO₂에 비하여 SO₂의 농도가 높은 경우에 영향을 받음을 확인할 수 있었음



[전류 vs. 전압 / 전류 vs. 출력 곡선으로 성능 변화 비교]

- 오염원을 투입한 결과와 깨끗한 공기를 투입하여 회복되는 과정의 성능변화도 확인할 수 있었음. 이러한 경우에는 성능의 저하를 확인할 수 있었는데 일정하게 전류를 투입하는 과정에 있어서 중간에 오염원은 공급하고, 그에 따른 전압의 저하를 확인한 후 다시 깨끗한 공기를 투입하여 성능을 회복시키는 과정을 통하여 본래의 성능 대비,

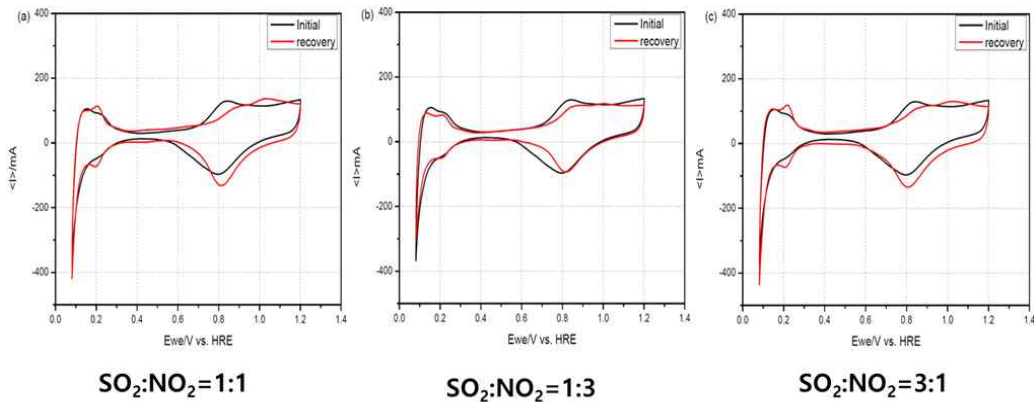
성능의 감소폭을 확인할 수 있었음. 또한 오염원을 투입한 후에 다시 깨끗한 공기를 투입하여 회복하는 과정을 거쳤으나, 본래의 성능을 회복하지는 못하였음. 그림에서 SO₂의 농도가 높을수록 성능의 감소도 더 크며 회복률도 낮은 것을 확인할 수 있었고, 각 오염원의 농도에 따른 회복률은 아래와 같음



SO ₂ : NO ₂	1:1	1:3	3:1
Recovery	82.14%	85.96%	77.96%

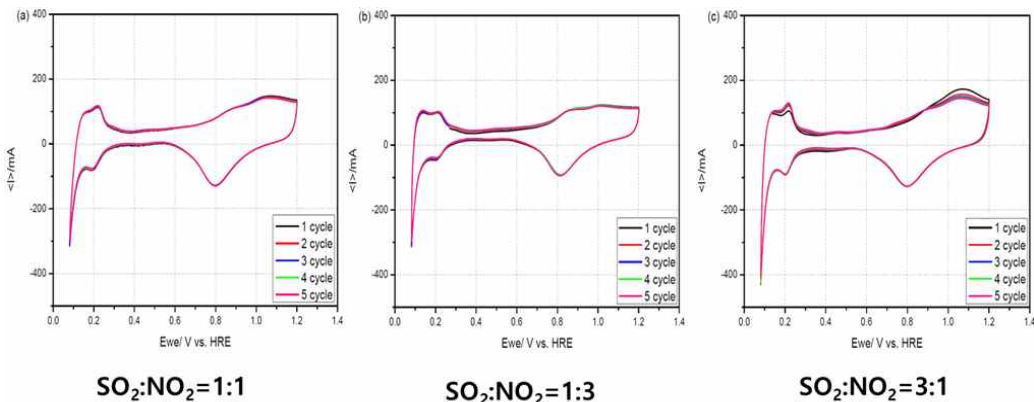
[각 오염원의 농도에 따른 회복률]

- 성능저하의 원인을 순환전압법(Cyclic Voltametry)을 이용하여 분석하였음. 오염원은 초기에 비하여 오염 후 회복된 후의 순환전압 분석법의 결과에 의하면 NO₂의 흡착/탈착의 피크는 SO₂의 그것에 비하여 약한 것을 확인할 수 있었으며, 이는 SO₂의 흡착/탈착이 보다 강력하므로 SO₂의 영향력이 큰 것으로 판단됨



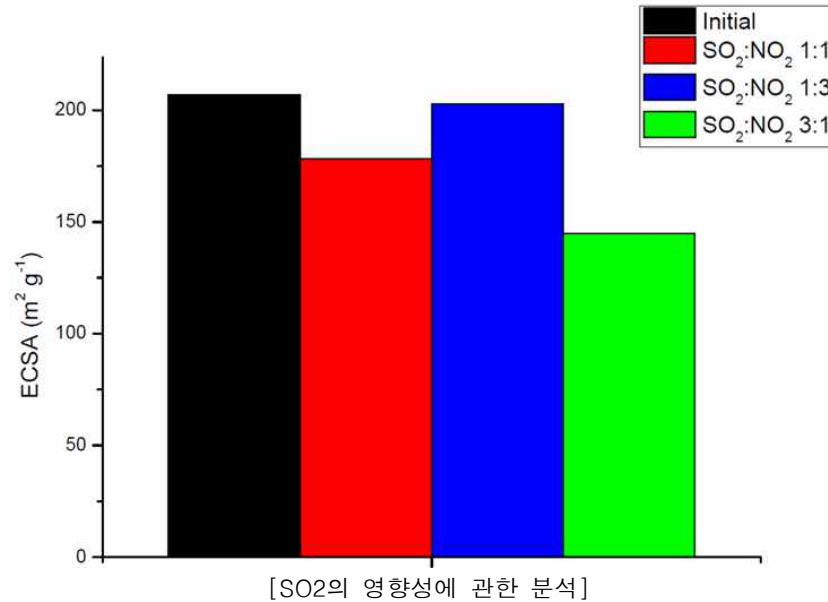
[순환전압법을 이용하여 성능저하의 원인 분석]

- 오염원의 투입중 성능저하의 원인의 파악은 순환전압법을 여러 차례 반복하여 반복 횟수에 따른 순환전압법의 결과를 확인한 결과임. 순환전압의 횟수가 증가함에 따라 표면에 흡착된 SO₂의 산화가 이루어져 1.1V 근방에서 나타나는 피크는 횟수가 진행됨에 따라 감소 되는 것을 확인할 수 있음. 또한 SO₂의 농도가 높아짐에 따라 1.1V 근방의 피크들도 좀 더 강한 것을 볼 수 있었으나, NO₂의 영역인 0.8V 근방의 피크는 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있었음



[오염원의 투입 성능저하의 원인파악을 위한 반복 횟수에 따른 순환전압법의 결과]

- SO2의 영향성이 더 강한 것을 전기화학적 분석법을 통하여 확인할 수 있었으며, 반응 면적의 변화 역시 순환전압법을 이용하여 확인할 수 있었음. 이 역시 반응 면적의 감소는 SO2의 농도가 증가함에 따라 큰 감소가 큰 것을 확인할 수 있었음
- SO2의 영향성에 관한 분석은 전기화학적 임피던스(Electrochemical Impedance Spectroscopy)를 이용하여 분석한 결과, 촉매 표면에 흡착된 불순물의 영향성으로 인하여 활성화 저항이 더 커진 것을 확인할 수 있었는데, 이 역시 SO2의 영향성이 더 강한 것을 전기화학적 분석법을 통하여 확인할 수 있었음



○ 지역 및 작물별 시설하우스 내외부 환경요인 조사

(1) 비닐하우스 내외부 환경특성조사 농가현황

- 4개의 지역 5개의 작물 재배 하우스의 내부 및 외부 환경요인을 비교 분석하기 위해 실시. 우리나라 비닐하우스 내부의 이산화탄소(CO2) 농도 현황을 정확히 파악하여 작물별 최적 CO2 농도 설정에 의한 CO2 공급의 효율성을 높여야 함. 특히 작물별 CO2 요구도가 차이가 있으므로 지역별, 작물별 비닐하우스 내외부 환경요인 조사 시행
- 시설하우스의 내외부 환경요인 조사는 경기도 여주, 충청남도 보령, 충청북도 괴산, 강원도 홍천에서 실시함. 경기도 여주는 가지 21 농가, 고추 8 농가, 보령은 오이 6 농가, 고추 11 농가, 강원도 홍천에서 부추 6 농가 대상으로 총 54 농가를 조사함

지역	조사 작물	조사 농가수
경기도 여주	가지	21
	고추	8
충남 보령	오이	8
	고추	11
강원 홍천	부추	6
합계		54

[비닐하우스 내외부 환경 조사 농가 현황]

(2) 지역별, 작물별 비닐하우스 내외부 CO2 농도 비교

- 경기도 여주, 충청남도 보령, 강원도 홍천, 충청북도 괴산지역의 비닐하우스 안과 밖의 CO2 농도를 비교함. 그 결과 경기도 여주지역의 가지 재배 하우스 내부의 CO2 농도는 471.3 ppm이며 외부의 CO2 농도는 467.7 ppm임. 내부와 외부의 CO2 농도차이는 3.6 ppm임. 고추 재배 하우스의 내부 CO2 농도는 490.6 ppm, 외부는 478.7임. 차이는 11.1 ppm임. 여주지역의 가지, 고추 재배의 비닐하우스 평균의 내부 CO2 농도는 480.9 ppm 외부는 473.2 ppm이며, 내부와 외부의 차이 평균 농도는 7.8 ppm임
- 충청북도 보령지역의 오이 재배 시설하우스 내부의 CO2 농도는 506.2 ppm, 외부는 500.5 ppm. 내부와 외부의 CO2 농도 차이는 5.7 ppm임. 고추 재배의 시설하우스의 내부 CO2 농도는 505.5 ppm, 외부는 491ppm, 내외부 차이는 9 ppm임. 오이와 고추

비닐하우스의 평균 내부 CO₂ 농도는 503.4 ppm, 외부는 495.7, 내부와 외부의 차이는 7.6 ppm임

- 강원도 홍천지역의 부추 재배 시설하우스의 내부 CO₂ 농도는 518.9 ppm, 외부는 506.8 ppm 내외부 농도의 차이는 7.6 ppm임
- 충청북도 괴산지역의 고추 재배 시설하우스의 내부 CO₂ 농도는 482.7 ppm, 외부는 469.6 ppm, 내부와 외부의 차이는 12.2 ppm임
- 여주, 보령, 홍천, 괴산지역의 작물 재배 시설하우스의 평균적인 내부 농도는 496.4 ppm, 외부 농도는 486.3 ppm으로 내부가 외부보다 CO₂ 농도가 10.1 ppm 높은 값을 나타냄. 또한 강원도 홍천지역 부추 재배 하우스 내부의 CO₂ 농도는 518.9 ppm으로 가장 높았음

지역	작물	CO ₂ 농도 (ppm)		
		하우스 내부(A)	외부 (B)	차이 (A-B)
여주	가지	471.3	467.7	3.6
	고추	490.6	478.7	11.1
	평균	480.9	473.2	7.8
보령	오이	506.2	500.5	5.7
	고추	500.5	491	9
	평균	503.4	495.7	7.6
홍천	부추	518.9	506.8	12.2
괴산	고추	482.7	469.6	12.2
평균		496.4	486.3	10.1



[지역별, 작물 비닐하우스 내·외부 CO₂ 농도 비교와 작물 사진]

(3) 여주지역 농가 비닐하우스 내·외부 환경비교

- 경기도 여주지역 아스파라거스, 가지 및 애호박 품목별 비닐하우스 내, 외부 CO₂ 농도와 온도 환경을 2022년 3월부터 2022년 6월까지 조사함. 아스파라거스 재배 비닐하우스의 경우 내, 외부 CO₂ 농도를 조사한 결과 내부의 평균 농도는 506.4 ppm, 외부는 499.1 ppm을 나타내어 하우스 내부의 CO₂ 농도가 외부보다 7.3 ppm 정도 높았음. 비닐하우스의 최대 CO₂ 농도는 520ppm으로 나타났으며, 최소 CO₂ 농도는 489 ppm으로 나타남. 조사 기간동안 하우스 내, 외부 온도 차이를 살펴본 결과 하우스 내부에서 31.5 ℃, 외부에서 32 ℃로 하우스 외부 온도가 0.5 ℃ 높았음
- 가지재배 비닐하우스의 경우 내부의 평균 CO₂ 농도는 530.6 ppm, 외부 CO₂ 농도는 527.7 ppm으로 하우스 내부의 CO₂ 농도가 2.9 ppm정도 높았음. 하우스 내부의 최대 CO₂ 농도는 814 ppm이었고, 최소 CO₂ 농도는 470 ppm으로 최대, 최소 CO₂ 농도의 차이가 344 ppm으로 매우 큰 차이를 보임. 조사기간 동안 시설하우스 내, 외부 온도 차이를 살펴본 결과 하우스 내부에서 24.6 ℃, 외부에서 22.7 ℃로 하우스 내부 온도가 1.9 ℃ 높았음
- 애호박재배 비닐하우스의 경우 내부의 평균 CO₂ 농도는 530.6 ppm,외부 CO₂ 농도는 514.8 ppm으로 하우스 내부의 CO₂ 농도 농도가 20.2 ppm 정도 높았음. 하우스 내부의 최대 CO₂ 농도는 753ppm 이었고 최소 농도는 464 ppm으로 최대, 최소 CO₂ 농도의 차이는 289 ppm으로 가지 다음으로 큰 차이를 보임. 조사 기간 동안 하우스 내외부 온도 차이를 살펴본 결과, 시설하우스 내부에서 22 ℃, 외부에서 20.8 ℃로 하우스 내부 온도가 1.2 ℃ 높았음

Crop	Items	CO ₂ concentration (ppm)			Temperature (°C)		
		Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)	Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)
아스파라거스	Min.	489.0	488.0	1.0	28.6	29.3	-0.7
	Max.	520.0	506.7	13.3	35.2	34.1	1.1
	Mean	506.4±13.6*	499.1±10.1	7.3	31.5±2.5	32.0±2.1	-0.5
가지	Min.	470.0	461.0	9.0	13.9	12.3	1.6
	Max.	814.0	828.0	-14.0	39.8	39.6	0.2
	Mean	530.6±63.4	527.7±53.5	2.9	24.6±7.2	22.7±7.8	1.9
애호박	Min.	464.0	453.0	11.0	13.9	13.4	0.5
	Max.	753.0	582.0	171.0	35.3	35.1	0.2
	Mean	535.0±81.3	514.8±40.7	20.2	22.0±7.3	20.8±7.4	1.2

[여주지역 조사작물 비닐하우스 내외부 CO₂ 농도 및 온도]

- 여주 지역 아스파라거스, 가지 및 애호박 재배 농가의 월별 비닐하우스 내, 외부 CO₂ 농도 및 온도를 조사한 결과임. 아스파라거스 재배 하우스 내부의 CO₂ 농도는 5월에 511.3 ppm로 높게 나타났고, 6월 499 ppm으로 가장 낮았음. 하우스 내,외부 온도 차이를 살펴본 결과 하우스 내부 하우스 내부 온도가 0.3~0.7 °C 정도 낮았음
- 가지재배 비닐하우스 내부 CO₂ 농도는 4월에 543 ppm로 높게 나타났고, 6월에 495.5 ppm으로 가장 낮았음. 하우스 내, 외부 평균 CO₂ 농도 차이는 0.2 ppm으로 차이가 거의 없었음. 하우스 내, 외부 온도 차이를 살펴본결과 하우스 내부 온도가 1.5 °C정도 높았음
- 애호박재배 비닐하우스 내부 CO₂ 농도는 4월 566.5 ppm로 가장 높았으며 5월에 493 ppm으로 가장 낮았음. 하우스 내, 외부 평균 CO₂ 농도 차이는 내부 온도가 1.4 °C정도 높았음

Crop	Month	CO ₂ concentration (ppm)			Temperature (°C)		
		Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)	Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)
아스파라거스	May	511.3	494.0	17.3	30.0	30.6	-0.7
	Jun.	499.0	506.7	-7.7	33.8	34.1	-0.3
	Mean	505.2±8.7*	500.3±9.0	4.8	31.9±2.7	32.4±2.4	-0.5
가지	Mar.	540.1	528.9	11.2	21.4	17.2	4.2
	Apr.	543.0	540.6	2.4	20.1	19.1	1.0
	May	506.8	510.7	-3.9	35.9	35.0	0.9
	Jun.	495.5	504.3	-8.8	30.3	30.2	0.1
	Mean	521.3±23.8	521.1±16.7	0.2	26.9±7.5	25.4±8.6	1.5
애호박	Mar.	514.0	512.7	1.3	18.1	15.0	3.1
	Apr.	566.5	527.2	39.3	19.1	18.4	0.7
	May	493.0	492.3	0.7	31.6	31.2	0.4
	Mean	524.5±37.9	510.7±17.5	13.8	22.9±7.5	21.5±8.5	1.4

[여주지역 조사작물의 월별 비닐하우스의 내,외부 CO₂ 농도 및 온도]

(4) 충청남도 보령지역 비닐하우스 내·외부 환경비교

- 충청남도 보령지역 비닐하우스에서 재배하고 있는 재배작물은 채소류(방울토마토, 배추, 오이, 고추, 수박, 및 애호박), 두류(호랑이강낭콩), 화훼류(프리지아)를 재배 농가를 대상으로 비닐하우스 내, 외부 CO₂ 농도와 온도 환경을 2022년 3월부터 2022년 9월까지 조사하였으며, 품목별 조사 결과는 다음과 같음

Crop	Items	CO ₂ concentration (ppm)			Temperature (°C)		
		Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)	Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)
토마토	Min.	501.0	510.0	-9.0	25.1	25.6	-0.5
	Max.	523.0	554.0	-31.0	39.3	37.5	1.8
	Mean	517.2±8.8 [*]	524.8±17.2	-7.7	32.4±6.2	32.2±4.5	0.2
배추	Min.	428.0	468.0	-40.0	15.3	15	0.3
	Max.	796.0	727.0	69.0	29.8	29.1	0.7
	Mean	527±94.0	526.0±66.9	1.2	22.8±4.5	21.3±4.4	1.5
호랑이강낭콩	Min.	485.0	471.0	14.0	20.4	22.5	-2.1
	Max.	539.0	534.0	5.0	31.5	33.8	-2.3
	Mean	506.8±16.9	499.2±22.5	7.6	27.2±3.6	28.0±3.8	-0.8
오이	Min.	464.0	440.0	24.0	10.4	10.7	-0.3
	Max.	963.0	790.0	173.0	35.1	38.8	-3.7
	Mean	532.0±102.3	513.9±65.3	18.2	27.7±5.6	27.3±6.2	0.3
프리지아	Min.	502.0	472.0	30.0	18.6	18.3	0.3
	Max.	533.0	512.0	21.0	23.3	20.7	2.6
	Mean	519.0±15.7	492.3±20.0	26.7	20.9±2.4	20.0±1.5	0.8
고추	Min.	467.0	459.0	8.0	21.1	22.5	-1.4
	Max.	554.0	536.0	18.0	39	38.8	0.2
	Mean	505.7±17.7	499.8±17.2	5.9	31.4±4.2	31.7±4.4	-0.3
수박	Min.	490.0	490.0	0.0	19.1	20	-0.9
	Max.	617.0	643.0	-26.0	39.4	37.8	1.6
	Mean	554.6±50.7	550.8±61.2	3.8	27.36±8.3	26.96±7.4	0.4
애호박	Min.	476.0	483.0	-7.0	14	13.8	0.2
	Max.	592.0	641.0	-49.0	34.2	35.2	-1
	Mean	514.5±31.5	517.4±46.7	-2.8	27.2±5.8	26.8±6.0	0.4

[보령지역 조사작물 비닐하우스의 내, 외부 CO₂ 농도 및 온도]

- 충청남도 보령지역 작물별 하우스의 월별 하우스 내외부 환경조사 결과는 다음과 같음

Crop	Month	CO ₂ concentration (ppm)			Temperature (°C)		
		Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)	Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)
토마토	May	522.0	528.0	-6.0	25.9	25.6	0.3
	Jun.	512.0	533.3	-21.3	30.1	31.1	-1.0
	Jul.	522.5	510.5	12.0	39.2	37.3	1.9
	Mean	518.8±5.9 [*]	523.9±11.9	-5.1	31.7±6.8	31.3±5.9	0.4
배추	Mar.	565.5	565.3	0.3	24.2	22.5	1.7
	Apr.	491.2	498.0	-6.8	19.4	17.9	1.5
	May	536.0	520.3	15.7	26.7	25.3	1.4
	Mean	530.9±30.5	527.9±28.0	3.0	23.4±3.0	21.9±3.1	1.5
호랑이강낭콩	Apr.	518.0	529.0	-11.0	26.8	27.0	-0.2
	May	513.8	502.8	11.0	25.5	25.5	0.0
	Jun.	485.0	480.0	5.0	27.6	30.2	-2.6
	Jul.	494.5	485.0	9.5	31.4	33.7	-2.4
Mean	502.8±15.7	499.2±22.1	3.6	27.8±2.5	29.1±3.6	-1.3	
오이	Mar.	747.8	658.3	89.5	18.5	16.9	1.6
	Apr.	553.2	530.9	22.3	23.3	23.1	0.2
	May	510.9	497.4	13.5	27.3	27.3	0.0
	Jun.	522.0	541.7	-19.7	33.3	33.5	-0.2
	Aug.	485.9	480.3	5.6	33.3	34.6	-1.3
	Sep.	491.7	479.1	12.6	30.2	28.5	1.7
Mean	551.9±98.9	531.3±67.4	20.6	27.6±5.9	27.3±6.6	0.3	
프리지아	May	519.0	492.3	26.7	20.9	20.0	0.8
	Mean	519.0±0.0	492.3±0.0	26.7	20.9±0.0	20.0±0.0	0.8
고추	Apr.	509.0	512.0	-3.0	26.2	25.7	0.4
	May	520.3	501.1	19.1	26.3	26.2	0.1
	Jun.	499.0	502.7	-3.7	32.6	33.4	-0.8
	Jul.	510.9	507.0	3.9	34.8	35.1	-0.3
	Aug.	497.4	489.8	7.7	32.2	32.7	-0.5
	Sep.	490.4	486.2	4.2	29.1	29.2	-0.1
Mean	504.5±10.8	499.8±10.0	4.7	30.2±3.6	30.4±3.9	-0.2	
수박	Apr.	586.0	574.0	12.0	19.1	21.0	-1.9
	May	555.7	558.7	-3.0	26.1	25.3	0.8
	Jun.	520.0	504.0	16.0	39.4	37.8	1.6
	Mean	553.9±33.0	545.6±36.8	8.3	28.2±10.3	28.0±8.7	0.2
애호박	Mar.	567.5	590.5	-23.0	18.0	17.2	0.7
	Apr.	507.3	520.0	-12.7	27.7	27.3	0.4
	May	505.3	495.7	9.7	28.2	27.3	0.9
	Aug.	495.7	487.7	8.0	32.0	32.2	-0.2
	Mean	519.0±32.8	523.5±46.8	-4.5	26.5±6.0	26.0±6.3	0.5

[보령지역의 조사작물 월별 비닐하우스의 내, 외부 CO₂ 농도 및 온도]

(5) 지역별 비닐하우스 내외부 (CO2) 농도 비교

- 경기도 여주와 충청남도 보령지역의 작물별 시설하우스의 내, 외부 CO2 농도 및 온도를 조사한 결과는 다음과 같음

Region	Crop	CO2 concentration (ppm)			Temperature (°C)		
		Inside	Outside	Difference	Inside	Outside	Difference
		(A)	(B)	(A-B)	(A)	(B)	(A-B)
여주	아스파라거스	506.4	499.1	7.3	31.5	32.0	-0.5
	가지	530.6	527.7	2.9	24.6	22.7	1.9
	애호박	535.0	514.8	20.2	22.0	20.8	1.2
	Mean	524.0	513.9	10.1	26.0	25.2	1.6
보령	토마토	517.2	524.8	-7.7	32.4	32.2	0.2
	배추	527.0	526.0	1.2	22.8	21.3	1.5
	호랑이강낭콩	506.8	499.2	7.6	27.2	28.0	-0.8
	오이	532.0	513.9	18.2	27.7	27.3	0.3
	프리지아	519.0	492.3	26.7	20.9	20.0	0.8
	고추	505.7	499.8	5.9	31.4	31.7	-0.3
	수박	554.6	550.8	3.8	27.4	27.0	0.4
	애호박	514.5	517.4	-2.8	27.2	26.8	0.4
	Mean	522.1	515.5	10.6	27.1	26.8	0.6

[지역별, 작물별 비닐하우스 내외부 CO2 농도 및 온도 평균 비교]

○ 이산화탄소(CO2) 농도 처리가 토마토와 엽채류 생산에 미치는 영향 연구

(1) 연구목적

- 본 연구는 이산화탄소(CO2) 농도가 토마토와 엽채류 작물의 성장환경에 미치는 영향을 해석하고자 하였음. 스마트팜의 성장환경을 구성함에 있어 내부 환경의 CO2 농도가 토마토와 엽채류 작물의 성장환경 (초장, 옆수, 엽장, 엽폭, 착과군, 꽃 개수 등)에 얼마나 작용하는지에 대한 자료를 분석하고 그 결과를 토대로 실제 농가에서 작물 재배를 실시함

(2) 재료 및 방법

- 본 시험은 강원도 원주시 신림면 연봉정길 5에 소재한 가나안 농군학교 스마트팜 비닐하우스(100평 규모)에서 수행함

1) 공시품종

- 대추형 토마토 (TY 아이템)
- 쌈채소 : 적상추 (선충포착), 청상추 (탑그린), 로메인 (청로메인), 오크

2) 공시비료

- 대추형 토마토 양액재배 배양액의 조성

구분	KNO ₃	5{Ca(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O}. NH ₄ NO ₃	KH ₂ PO ₄	MgSO ₄ ·7H ₂ O	K ₂ SO ₄
사용량	36.16	86.92	17.82	52.50	16.43

구분	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
비료염	Fe-EDTA	MnSO ₄ ·4H ₂ O	CuSO ₄ ·5H ₂ O	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	H ₃ BO ₃	NaMoO ₄ ·2H ₂ O
사용량	2900	237	28	115	324	19

[대추형 토마토 양액재배 배양액의 조성표]

- 쌈채소 양액재배 배양액의 조성

구분	KNO ₃	5{Ca(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O}. NH ₄ NO ₃	KH ₂ PO ₄	MgSO ₄ ·7H ₂ O	K ₂ SO ₄
사용량	43.56	42.18	10.92	27.14	3.83

구분	Fe	Mn	Cu	Zn	B	Mo
비료염	Fe-EDTA	MnSO ₄ ·4H ₂ O	CuSO ₄ ·5H ₂ O	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	H ₃ BO ₃	NaMoO ₄ ·2H ₂ O
사용량	2430	305	16	33	260	9

[쌈채소 양액재배 배양액의 조성표]

- 조제 요령(토마토, 쌈채소 공통)

A 탱크(1톤들이
100배기준)

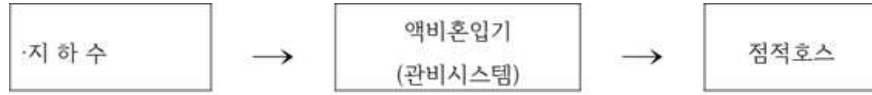
- 질산칼륨 : 1/2량
- 질산칼슘
- 킬레이트철

B 탱크(1톤들이
100배기준)

- 질산칼륨 : 1/2량
- 제일인산칼륨
- 황산마그네슘
- 황산칼륨
- 망간
- 구리
- 아연
- 붕소
- 몰리브덴

[토마토, 쌈채소 공통 조제 요령표]

→ 배양액 혼입 개략도 (토마토, 쌈채소 공통)



3) 양액재배 개요

- 양액관리는 우성하이텍의 양액공급기 “인젝션마스터”·복합환경제어시스템을 이용하여 급액 EC 1.0~1.4dS·m⁻¹, pH 6.0으로 설정한 후, 네타핌 점적호스 (STREAMLINE 16080, 점적간격 20cm, 1.6 L/Hr, NETAFIM, Israel)로 급액함
- 대추형 토마토

구분	개요
정식	-2022년 7월 11일 (1차)
	-2022년 8월 29일 (2차)
재식거리	-40~45cm/주당 간격 -정식 후 7일부터 EC 1.5~2.2까지 순차적으로 높여 공급함.
시비방법	-1일 10회 관비공급 -pH 6.2 보정공급(질산60% 사용) -배액은 30~50%로 유지. -1차 재배 : 수확없음.
수확	-2차 재배 : 2022년 11월 4일 현재 수확없음(예상일 11월 10~15일경 첫수확)

→ 쌈채소(적상추, 청상추, 로메인, 오크)

구분	개요
정식	-2022년 7월 20일 (1차)
	-2022년 9월 14일 (2차)
재식거리	-20*25cm -정식 후 7일부터 EC 0.6~1.3까지 순차적으로 높여 공급함.
시비방법	-1일 10회 관비공급 -pH 6.0 보정공급(질산60% 사용) -배액은 30~50%로 유지.
수확	-1차 재배 : 8월 주기적(판매 있을 때)
	-2차 재배 : 10월 주기적 (판매 있을 때)

→ 조사항목

- : 대추형 토마토 : 초장, 경경 (줄기두께), 엽장, 엽폭
- : 쌈채소 : 엽장, 엽폭, 엽수

(3) 가나안 농군학교 농업용수 분석

- 가나안 농군학교에서 작물을 재배하기전, 가나안 농군학교 농업용수 분석시험 결과임

분석항목	분석결과
NH ₄ -N	흔적 mg/l
NO ₃ -N	7.29 mg/l
인 (P)	0.02 mg/l
칼륨 (K)	2.26 mg/l
칼슘 (Ca)	42.93 mg/l
마그네슘 (Mg)	9.87 mg/l
황 (S)	5.04 mg/l
염소 (Cl)	55.66 mg/l
나트륨 (Na)	17.52 mg/l
중탄산 (HCO ₃)	86.00 mg/l
철 (Fe)	흔적 mg/l
망간 (Mn)	0.001 mg/l
붕소 (B)	0.006 mg/l
아연 (Zn)	0.005 mg/l
구리 (Cu)	0.001 mg/l
몰리브덴 (Mo)	0.001 mg/l
전기전도도 (EC)	0.38 mS/cm
pH	7.35

[가나안 농군학교 농업용수분석 시험결과]

(4) 토마토 배양액 조성

- 채소류인 토마토 작물을 재배하기 위해 사용된 생육초기용 배양액 조성표임

코코배지 - 원수기준 - 생육초기용		
재배작물(배양액종류)	대추방울토마토 (Grodan - 1 ~ 2화방용) - EC 2.1 적용	
비료 염의 종류	100배 원액 (1000ℓ당)	
A액	KCl (염화칼륨)	- kg
	5{Ca(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O}·NH ₄ NO ₃ (질산칼슘 10수염)	86.92 kg
	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O (질산칼슘 4수염)	- kg
	NH ₄ NO ₃ (질산암모늄)	- kg
	HNO ₃ (60%) (질산)	18.15 kg
	KNO ₃ (질산칼륨)	2.90 kg
	Fe EDTA (13%) (철-EDTA)	
B액	KH ₂ PO ₄ (제1인산칼륨)	17.82 kg
	MgSO ₄ ·7H ₂ O (황산마그네슘)	52.50 kg
	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O (질산마그네슘)	- kg
	K ₂ SO ₄ (황산칼륨)	16.43 kg
	HNO ₃ (60%) (질산)	2.40 kg
	KNO ₃ (질산칼륨)	18.01 kg
	MnSO ₄ ·H ₂ O (황산망간)	237.00 g
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O (황산아연)	115.00 g
	H ₃ BO ₃ (붕산)	324.00 g
	CuSO ₄ ·5H ₂ O (황산구리)	28.00 g
	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O (몰리브덴산나트륨)	19.00 g

[토마토 작물의 생육초기용 배양액 조성표]

- 다음은 토마토의 생육생육이 지난후 토마토 3~5화방용 배양액 조성표를 나타냄

재배작물(배양액종류)		대주방울토마토 (Grodan - 3 ~ 5화방용) - EC 2.2 적용	
비료염의 종류		비료 용해순서	100배 원액 (1000ℓ당)
A액	KCl (염화칼륨)	4 번	- kg
	5[Ca(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O]·NH ₄ NO ₃ (질산칼슘 10수염)	2 번	82.30 kg
	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O (질산칼슘 4수염)	1 번	- kg
	NH ₄ NO ₃ (질산암모늄)	5 번	- kg
	HNO ₃ (60%) (질산)	-	- kg
	KNO ₃ (질산칼륨)	3 번	26.71 kg
	Fe EDTA (13%) (철-EDTA)	6 번	2.75 kg
B액	KH ₂ PO ₄ (제1인산칼륨)	3 번	19.45 kg
	MgSO ₄ ·7H ₂ O (황산마그네슘)	1 번	44.88 kg
	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O (질산마그네슘)	2 번	- kg
	K ₂ SO ₄ (황산칼륨)	4 번	25.55 kg
	HNO ₃ (60%) (질산)	-	2.40 kg
	KNO ₃ (질산칼륨)	5 번	18.84 kg
	MnSO ₄ ·H ₂ O (황산망간)	8 번	262.00 g
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O (황산아연)	10 번	115.00 g
	H ₃ BO ₃ (붕산)	6 번	306.00 g
	CuSO ₄ ·5H ₂ O (황산구리)	7 번	24.00 g
	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O (몰리브덴산나트륨)	9 번	16.00 g

[토마토 3~5화방용 배양액 조성표]

(5) 쌈채소용 배양액 조성

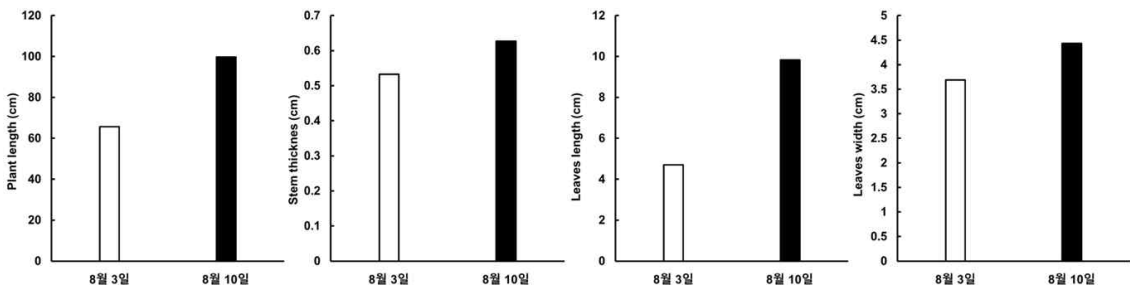
- 다음은 엽채류인 상추의 쌈채소용 배양액 조성표를 나타냄

재배작물(배양액종류)		쌈채소비용 (표준용저방) - EC 1.3 적용	
비료염의 종류		100배 원액 (1000ℓ당)	
A액	KCl (염화칼륨)		- kg
	5[Ca(NO ₃) ₂ ·2H ₂ O]·NH ₄ NO ₃ (질산칼슘 10수염)		42.18 kg
	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O (질산칼슘 4수염)		- kg
	NH ₄ NO ₃ (질산암모늄)		- kg
	HNO ₃ (60%) (질산)		- kg
	KNO ₃ (질산칼륨)		21.81 kg
	Fe EDTA (13%) (철-EDTA)		2.43 kg
B액	KH ₂ PO ₄ (제1인산칼륨)		10.92 kg
	MgSO ₄ ·7H ₂ O (황산마그네슘)		27.14 kg
	Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O (질산마그네슘)		- kg
	K ₂ SO ₄ (황산칼륨)		3.83 kg
	HNO ₃ (60%) (질산)		2.20 kg
	KNO ₃ (질산칼륨)		21.75 kg
	MnSO ₄ ·H ₂ O (황산망간)		308.00 g
	ZnSO ₄ ·7H ₂ O (황산아연)		33.00 g
	H ₃ BO ₃ (붕산)		260.00 g
	CuSO ₄ ·5H ₂ O (황산구리)		16.00 g
	Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O (몰리브덴산나트륨)		9.00 g

[쌈채소용 배양액 조성표]

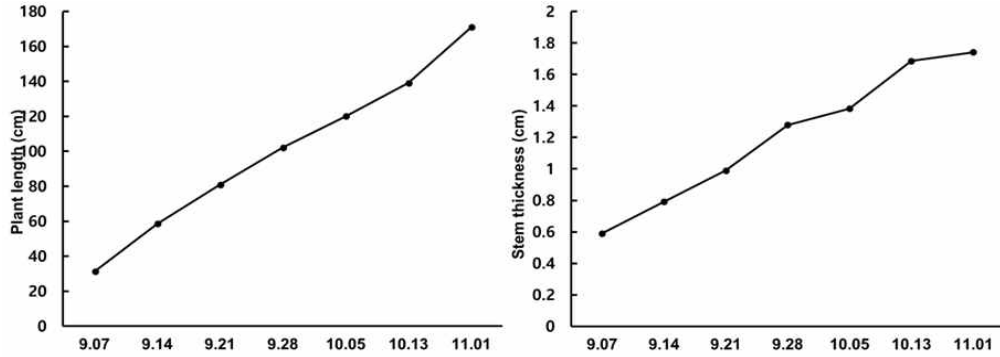
(6) 작물의 생육 및 과실 품질 특성

- 재배작물인 토마토와 엽채류인 상추 (적상추, 청상추, 로메인, 오크)를 가지고 생육조사를 실시함
- 토마토의 생육조사 항목은 초장, 엽장, 엽폭, 경경 4가지를 2022년 8월 한달간 1차적으로 생육 조사를 실시함



[1차 토마토의 생육조사]

- 토마토의 생육조사 항목은 초장, 경경 2가지를 9월부터 10월까지 2차적으로 생육조사를 실시함. 그 결과 시간이 지남에 따라 토마토의 초장과 줄기두께가 증가함



[9월부터 현재까지의 2차 생육조사]

- 토마토의 생육 사진



토마토 9월 14일 (2차 재배)



토마토 9월 14일 (2차 재배)



토마토 10월 5일 (2차 재배)



토마토 10월 5일 (2차 재배)

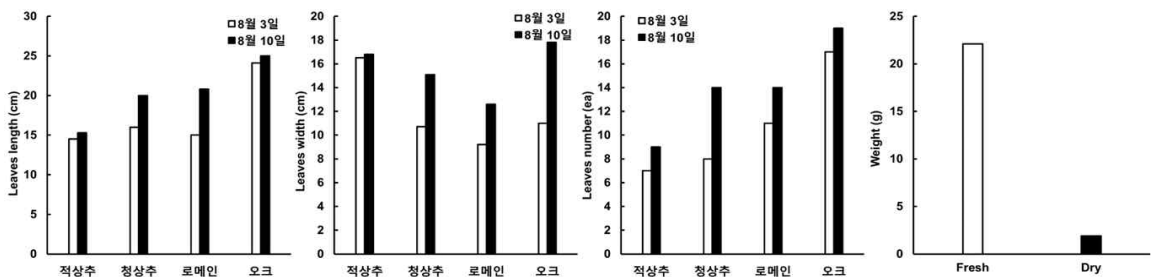


토마토 10월 13일 (2차 재배)



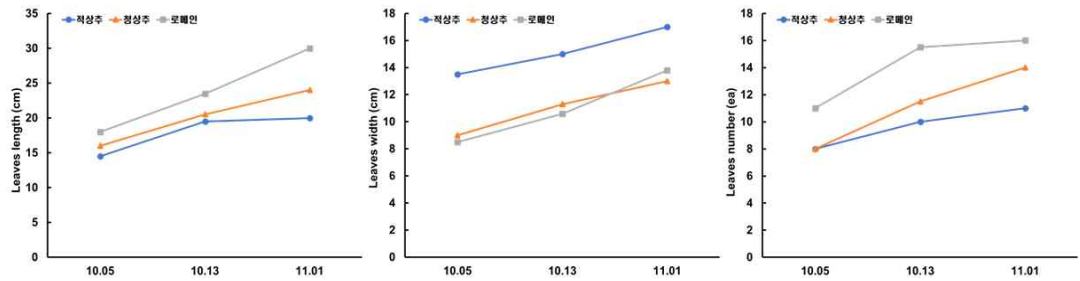
토마토 11월 1일 (2차 재배)

- 다음은 엽채류인 상추(적상추, 청상추, 로메인, 오크)의 생육조사를 실시했으며, 생육조사 항목은 엽장, 엽폭, 엽수 3가지를 2022년 8월 한달 동안 1차적으로 생육조사함. 적상추는 추가적으로 생체중과 건물중도 측정하였음. 그 결과, 엽장은 오크, 로메인, 청상추, 적상추 순으로 높았으며, 엽폭은 오크, 적상추, 청상추, 로메인 순으로 높았음. 엽수는 오크, 청상추는 로메인과 같은 결과를 보였으며, 그다음으로는 적상추 순으로 높은 결과를 보임



[엽채류 (적상추, 청상추, 로메인, 오크)의 생육 조사]

- 상추(적상추, 청상추, 로메인)의 생육 조사항목은 1차 생육조사 항목과 같은 3가지 항목을 2차적으로 생육조사를 실시함. 그 결과, 엽장과 엽수는 로메인이 제일 높으며 그다음으로 청상추와 적상추 순으로 나타남. 엽폭의 경우는 반대로 적상추가 제일 높은 값을 보였으며 그다음으로는 청상추, 로메인 순으로 나타남



[10월 5일 엽채류 (적상추, 청상추, 로메인)의 생육조사]

- 상추의 생육 사진



상추 10월 5일 (2차 재배)



상추 10월 5일 (2차 재배)



상추 10월 13일 (2차 재배)



상추 10월 13일 (2차 재배)



상추 11월 1일 (2차 재배)

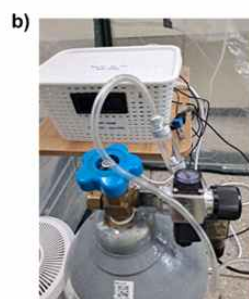
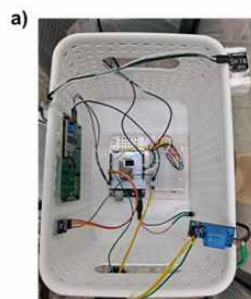


상추 11월 1일 (2차 재배)

○ 이산화탄소 시비 스마트팜 센서 머신러닝(딥러닝) 정보분석

(1) 스마트팜을 위한 이산화탄소 센싱 데이터 실시간 모니터링

- 이산화탄소 관련 환경 데이터의 자동 생성과 실시간 저장 및 관리, 농도 제어가 가능한 시스템을 이용하여 이산화탄소 데이터를 실시간 모니터링을 위해 1분 간격으로 저장함
- 이산화탄소 농도는 380~420 ppm, 780~820 ppm의 2개의 재배 시스템을 구축
- 웹 서버를 통한 웹에서 실시간 모니터링
- 무선(Wifi) 통신을 이용한 스마트폰에서 실시간 모니터링



온도, 습도, 조도, CO2

일시	위치	온도(°C)	습도(%)	조도(Lux)	CO2(ppm)
11:00	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:01	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:02	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:03	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:04	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:05	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:06	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:07	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:08	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:09	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:10	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:11	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:12	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:13	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:14	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:15	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:16	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:17	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:18	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:19	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:20	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:21	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370
11:22	2022-04-04	13.00	57.0	1000	370

[이산화탄소 농도 제어 시스템과 실시간 모니터링 결과]

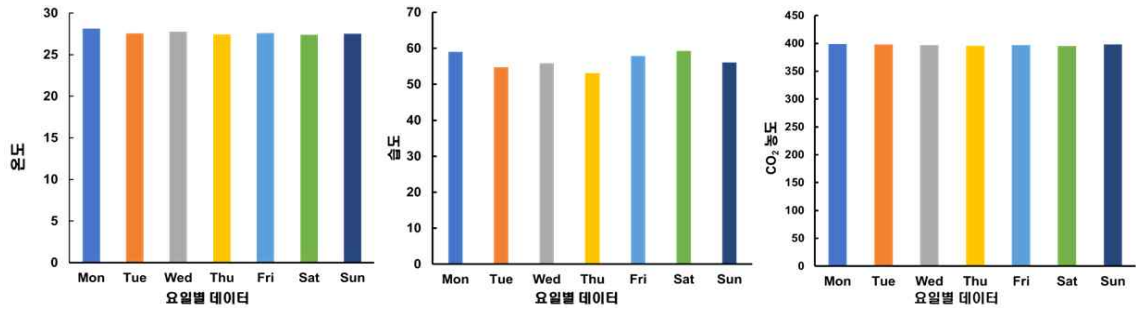
(2) 이산화탄소 380~420 ppm 측정 데이터 분석

- 측정 데이터의 통계적 분석

- 측정 일자과 시간 : 2022년 4월 8일 17시 10분 ~ 2022년 7월 18일 20시 44분
- 측정된 원시(Source) 데이터를 분석한 결과, 정상 범주에서 크게 벗어난 이상치(outlier)가 존재하여 제거함
- 작물의 재배 온도 데이터는 평균 27.63 °C, 습도 데이터는 평균 56.56 % 이산화탄소 평균은 397.13 ppm

- 측정 데이터의 요일별 데이터 그래프 분석

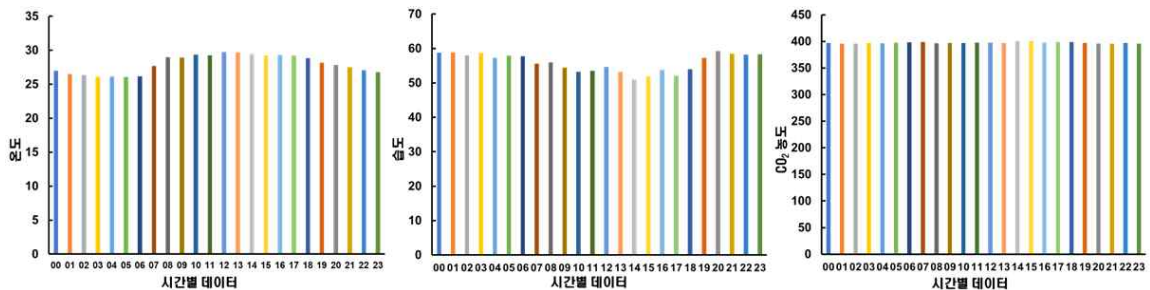
- 측정 일자과 시간 : 2022년 5월 23일 0시 0분 ~ 5월 29일 11시 59분
- 극단치 경계를 벗어난 이상치를 제거 후, 측정 데이터는 요일별 (월요일~일요일)의 온도, 습도 이산화탄소 데이터를 나타냄



[이산화탄소 380~420 ppm 측정 데이터의 요일별 그래프 분석]

- 측정 데이터의 시간별 데이터 그래프 분석

- 측정 일자 및 시간 : 2022년 5월 25일 0시 0분 ~ 5월 25일 11시 59분
- 극단치 경계를 벗어난 이상치를 제거 후 측정 데이터는 시간별 (0시 ~11시)의 온도, 습도, 이산화탄소 데이터를 나타냄



[이산화탄소 380~420ppm 측정 데이터의 시간별 그래프 분석]

(3) 이산화탄소 380~420 ppm 측정 데이터 분석

- 실증분석을 위해 가나안 농군학교에 이산화탄소 관련 환경 데이터의 자동 생성과 실시간 저장 및 관리
- 머신러닝 중, 인공신경망 모델을 이용한 딥러닝 기술을 통해 식물 표현형을 분석



[이산화탄소 센서 데이터 실시간 모니터링과 식물의 표현형분석]

(4) 실증분석을 위한 이산화탄소 Sensing 데이터 실시간 저장 및 관리

- 가나안 농군학교의 실증분석을 위해 CO2 Sensing 및 Sensing 데이터 실시간 저장
- 필요 하드웨어
 - IBM X3500 서버
 - 유무선 WIFI 공유기
- 필요 소프트웨어
 - 운영체제 Ubuntu 20.04 LTS
 - 데이터베이스 : MYSQL 14.14
 - 웹 서버 : Apache 2.4 18
 - 웹 서버 언어 : PHP 7.0

(5) 실증 분석을 위한 이산화탄소 Sensing 데이터 실시간 저장 및 관리

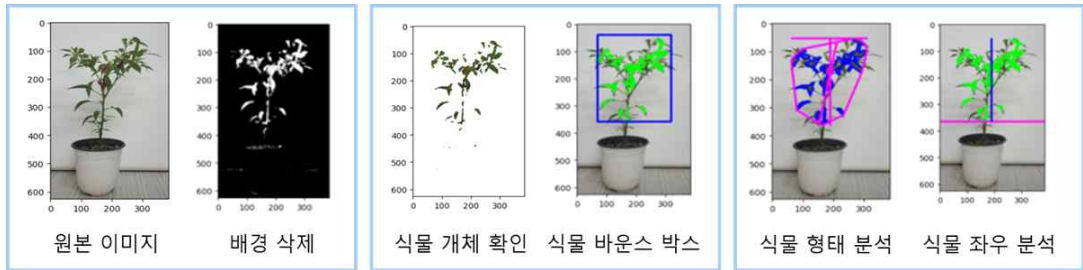
- 가나안 농군학교의 실증 분석을 위해 이산화탄소 데이터를 실시간으로 모니터링 하기 위해 1분 간격으로 저장
- 웹 서버를 통한 웹에서 실시간 모니터링
- 무선(Wifi) 통신을 이용한 스마트 폰에서 실시간 모니터링



[실증 분석을 위한 실시간 모니터링]

(6) 실증분석을 위한 딥러닝 기반 식물 표현형분석

- 이미지 인식 기술은 컴퓨터가 스스로 외부 데이터를 조합하고 분석하여 학습하는 기술을 말하며 딥러닝이라고도 함. 이미지 인식 기술은 이미지의 분류, 찾기, 인식, 대상분할 등으로 다양하게 분류되고 있음. 식물 인식 기술은 이미지 인식 기술 중에 이미지 분류 기술로 주로 활용되고 있음. 식물에서 이미지를 분류하는 것은 식물의 종류를 인식하기 때문에 이미지 분류만으로도 충분히 사용성이 높아짐. 딥러닝 기술의 발전에 따라 식물의 인식 분야에서도 딥러닝 기술이 널리 사용됨.
- 실증 분석을 위한 딥러닝은 식물 표현형(phenotyping) 분석에 관한 연구임. 식물의 표현형은 식물의 성장, 개발, 관용, 저항, 건축학, 생리학, 수확량, 색 구별 및 더 복잡한 특성의 기초를 형성하는 개별 정량 매개 변수의 기본 측정과 같은 복잡한 식물 특성의 종합적인 평가임. 식물의 수확을 향상시키기 위해서는 식물의 표현형분석을 포함한 많은 측정 기법들이 필요함. 사람이 직접 식물의 생육을 측정하는 방식은 많은 시간과 노력이 필요하고, 식물에 손상을 줄 수 있는 문제점이 있음. 하지만 딥러닝의 식물 표현형분석은 식물의 개화, 식물의 수확, 시간 등 자동화에 도움을 줄 수 있음. 또한, 꽃잎의 색은 식물의 종을 구분할 수 있으며, 꽃잎의 확인으로 꽃의 개화 시간을 확인하는 데 사용될 수 있음
- 고추를 대상으로 식물 표현형을 분석함. 식물의 길이는 대략 50cm임. 원본 이미지에서 대상 식물을 분리하기 위해 배경을 삭제한 것이 배경 삭제 이미지임. 식물 개체 확인 이미지는 원본 이미지에서 배경을 삭제한 이미지에서 배경색을 흰색 바탕으로 처리하고 식물의 이미지를 배경과 분리하여 주는 이미지임. 식물 바운드 박스 이미지는 식물 개체를 결정하기 위해 식물이 포함된 이미지 개체 바운드 박스를 포함한 이미지임. 식물 형태 분석 이미지는 식물 개체 형태의 이미지의 특성을 나타내는 것임. 식물 좌우 분석 이미지는 식물체의 중앙에 중심선을 기점으로 양측 대칭도를 파악할 수 있으며, 대략적인 식물의 크기를 알 수 있음

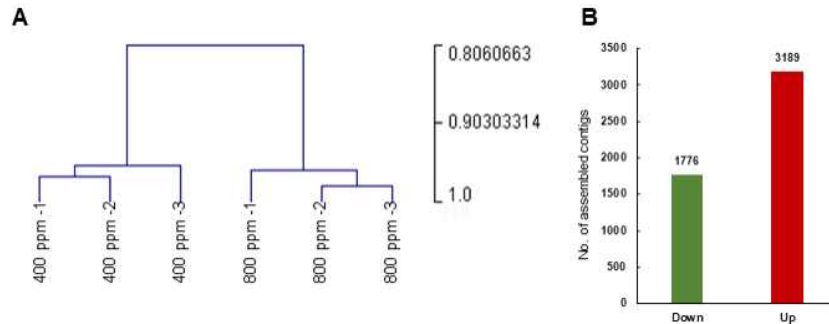


[이미지 인식 기술 중 딥러닝 기술을 이용한 식물 표현형 사진]

○ CO2 시비 스마트팜 제어시스템을 통한 작물생육 검정 (회향)

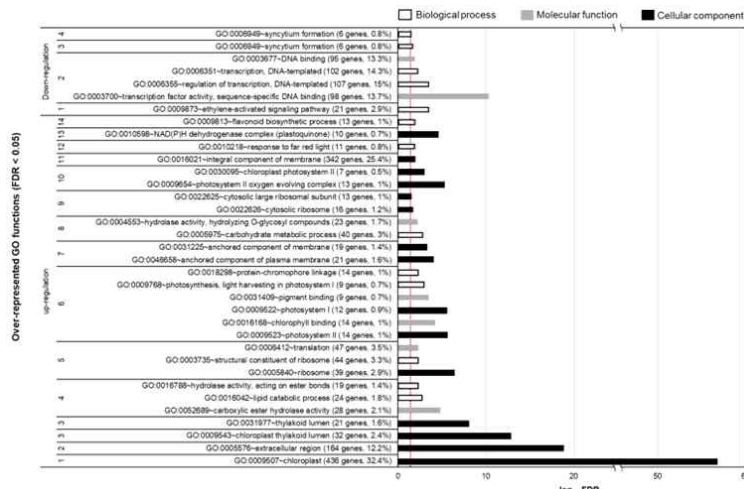
(1) CO2 농도 증가에 따른 생리적 변화 탐색

- CO2 농도에 따른 400 ppm과 800 ppm 처리 시 회향에서 유전자의 생리적 변화를 탐색하기 위해 RNA sequencing 분석함. RNA sequencing 분석 결과 평균 Contig 의 길이가 1,250bp인 총 174,266,880개의 염기를 조립했으며, 139,352개의 전사체가 감지됨. 31,373개의 조립된 Contig을 분석하여 DEG(차등 유전자 발현)를 결정했으며 조립된 Contig는 400ppm과 800ppm 조건에서 각 실험에서 높은 상관관계를 보임. 1,776개의 하향 조절된 유전자의 3,189개의 상향 조절된 유전자를 포함하여 총 4,965개의 DEG가 다양한 CO2 농도에서 재배된 회향에서 검출됨



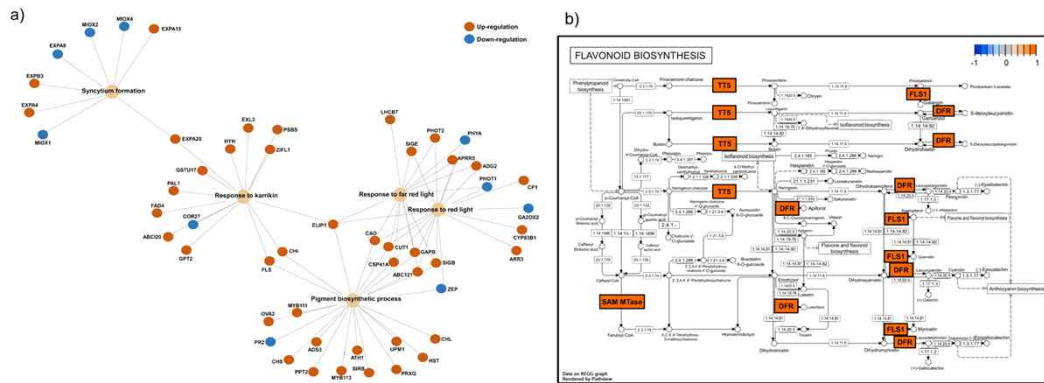
[400ppm과 800ppm의 RNA sequencing]

- DEG의 상당히 증가한 유전자 기능을 결정하기 위해 800ppm 에서 upregulated와 downregulated 된 유전자를 functional enrichment 분석
- 유전자의 세포 내외 위치(CC), 유전자가 관련된 세포 기작(BP) 및 유전자가 가지는 분자 기능(MF)을 포함하여 과도하게 표현된 gene ontology(GO) 의 17개의 그룹(각각 14개 및 3개)을 발견함. 많은 그룹이 엽록체의 광합성 메커니즘, 틸라코이드, 루멘 관련된 CC, 광계에 관련된 기능 및 빛에 대한 반응과 관련이 있었음. 또한 지질 이화 과정, 번역 관련 기능, 가수분해효소 활성화 및 플라보노이드 생합성과 관련된 DEG는 800 ppm 조건에서 유의하게 향상 조절된 것을 확인할 수 있음. 그러나 3 에틸렌 활성화 신호 경로, 전사 및 syncytium 형성은 800ppm 그룹에서 downregulated 되었음



[Over-represented Go function of CO2-responsive genes (FDR < 0.05)]

- 사전에 정의된 gene set에서 과도하게 발현되는 경로를 감지하기 위해 gene set enrichment analysis (GSEA)을 수행하고 관여하는 GO biological process (pigment biosynthetic process, response to far-red/red light, response to Karrikin, and syncytium formation)을 분석함. 4개의 경로의 DEG는 주로 800 ppm에서 upregulated 되었으며, 39개에 DEG는 upregulated 되고, 6개는 downregulated 되었음. syncytium 형성과 관련된 8개의 DEG는 4개의 upregulated 된 유전자와 4개의 downregulated된 유전자를 보여줌. 상대적으로 높은 CO2 농도(800ppm)가 회향의 바이오매스 증가에 영향을 미치는지 여부를 확인하기 위해 플라보노이드 생합성에서 유전자 발현 패턴을 관찰함. 특히 플라보노이드 생합성 경로에 관여하는 여러 유전자가 upregulated 된 반면 downregulated된 유전자는 없었으며, 이는 플라보노이드 함량이 800ppm 이하로 증가함을 시사함



[CO2 반응에 따른 gene set enrichment analysis (GSEA). a는 enrich GO function 간의 유전자 연결. b는 KEGG에 기반한 회향의 플라보노이드 생합성 경로에서 DEG 발현패턴 (21.1.104 > SAM MTase, 5.5.16 > TT5, 1.1420.6 > FLS1, 1.1.1.219 > DFR, 1.1.1234 > DFR)]

(2) 이산화탄소 농도에 따른 향산화 물질 검정 (회향)

- CO2 농도에 따른 회향의 잎과 줄기의 향산화 물질을 검정하기 잎과 줄기의 추출물을 제조하여 향산화 실험에 사용함. 잎과 줄기의 추출물은 400ppm과 800ppm 식물체를 잎과 줄기를 분리하여 60℃에서 24시간 동안 건조기를 이용해서 건조한 후 마쇄함. 건조된 샘플을 0.5g에 Methanol 25ml 첨가한 추출물을 Shaking incubator에서 58℃로 24시간 동안 교반함. 이후 원심분리기로 13,000 xg로 15분간 원심분리후 상등액만 추출하여 향산화 물질 검정에 사용함
- 1년차에 실시한 총 폴리페놀 함량, 총 플라노보이드 함량, free radical scavenging (DDPH 소거능) 분석 외 Nitrite scavenging (아질산염 소거능), FRAP, Reducing power (환원력 분석)을 추가적으로 분석함
- Nitrite scavenging activity (아질산염 소거능)분석을 위해 50 μL 샘플 추출물에 1mM Sodium nitrite solution 50 μL 와 HCl (pH 1.2) 300 μL을 첨가한 후, 총 부피를 400 μL로 맞춤. 반응물을 Incubator에서 37℃로 맞춤 후 1시간 동안 반응함. 이후 반응물에 2% Acetic acid 1ml와 Griess reagent 100 μL를 섞어 총 부피를 1.5ml로 맞춤 후 분광광도계를 이용하여 흡광도 520nm에서 측정함. 아질산염 소거능 함량 계산식은 다음과 같음.

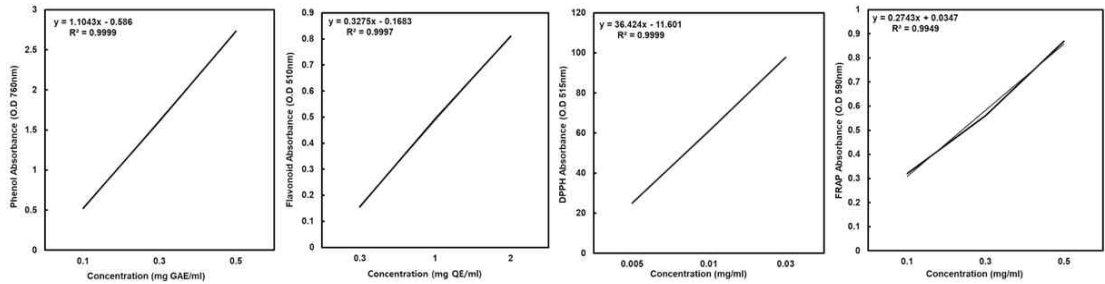
$$[\text{Nitrite scavenging activity (아질산염 소거능) (\%)} = (1 - (A - C) / B) \times 100]$$

→ A는 Sodium nitrite solution + sample + Griess reagent absorbance이며, B는 Sodium nitrite solution + Griess reagent absorbance, C는 Sodium nitrite solution + sample + Distilled water absorbance임

- FRAP (Ferric ion reducing antioxidant power) 분석은 Gallic acid를 사용하여 정량곡선을 작성함. 0.5g의 Gallic acid를 50ml Methanol에 녹여 0.5%의 Gallic acid solution을 제조한 후, Methanol을 이용하여 (0.05, 0.1, 0.3, 0.5) mg/ml의 농도별로

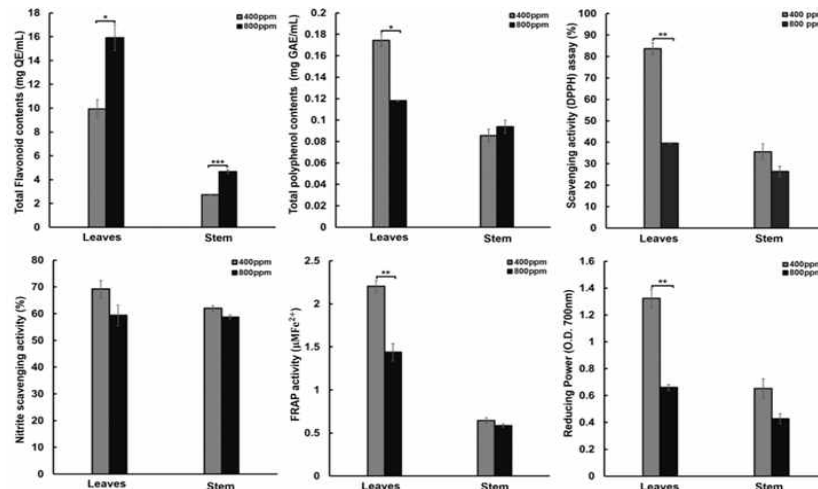
희석함. 300mM Aectate buffer (pH 3.6), 10mM TPTZ (2,4,6-tripridyl-s-triazin), 20mM ferrous chloride를 10:1:1 비율로 섞어 FRAP solution을 제조함. 실험직전 30 μ L 샘플 (추출물 또는 희석된 Gallic acid) 추물물, 900 μ L FRAP solution과 90 μ L 증류수를 섞은 후 Incubator에서 37 $^{\circ}$ C로 맞춘 후 10분간 반응함. 이후 분광광도계를 이용하여 흡광도 590 nm에서 측정함.

- Reducing power(환원력 분석) 실험을 위해 300 μ L 샘플 추출물과 300 μ L 200mM Phosphate buffer (pH 6.6), 300 μ L 1 % Potassium ferricyanide solution을 혼합한 후, 50 $^{\circ}$ C의 Water bath에서 20분간 반응함. 이후 혼합물에 300 μ L 10 % TCA solution을 첨가한 후 원심분리기로 14,000 rpm으로 15분간 원심분리 후 상등액 300 μ L 추출함. 300 μ L 상등액 추출물에 300 μ L 증류수와 300 μ L 0.1 % Ferric chloride solution을 혼합 한 후 분광광도계를 이용하여 흡광도 700nm에서 측정함.
- 항산화 물질 분석을 위하여 표준물질을 통한 표준곡선을 분석한 결과, 위의 실험에서 R2의 값이 0.99 이상으로 나타났으며, 농도에 따른 수치의 변화가 높은 상관관계를 보였음. 표준곡선은 총 폴리페놀 함량, 총 플라보노이드 함량, DPPH 소거능, FRAP을 나타냄



[항산화 물질 분석을 위한 표준물질의 정량 곡선]

- 회향의 잎과 줄기 추출물에서 총 플라보노이드 함량이 유의하게 증가함을 확인하여 플라보노이드 경로 관련 DEG가 upregulated 된 것을 확인했음. 총 플라보노이드 함량은 잎 추출물에서 400ppm과 800ppm에 대해 각각 9.93 vs. 15.92 mg QE/mL 이었으며, 줄기에서는 400 ppm과 800 ppm에 대해 각각 2.73 vs. 4.86 mg QE/mL로 유의하게 증가한 것을 볼 수 있음. 그러나 나머지 항산화 활성 분석은 800ppm의 앞에서 활성이 현저하게 감소한 것으로 나타남. 400 ppm과 800 ppm을 비교하여 800 ppm 항산화 활성은 총 폴리페놀 분석에서 35.29% (400 ppm 0.17 vs. 800 ppm 0.11 mg GAE/mL). Reducing power (환원력) 분석에서 50.76%, (400 ppm 1.32 vs. 800 ppm 0.65 O.D), DPPH scavenging 분석에서 52.8% (400 ppm 55.66% vs. 800 ppm 39.48), FRAP 분석에서 35% (400 ppm 2.2 vs. 1.43 μ MFe²⁺)으로 감소함. 800 ppm에서 회향은 아질산염 소거능 활성이 약간 증가했지만 잎사이에서는 유의미한 차이가 감지되지 않았음



[회향 메탄올 추출물에 대한 회향의 항산화 분석. 통계적 유의성은

two-tailed student's t-test에 의하여 수행함

(*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$)]

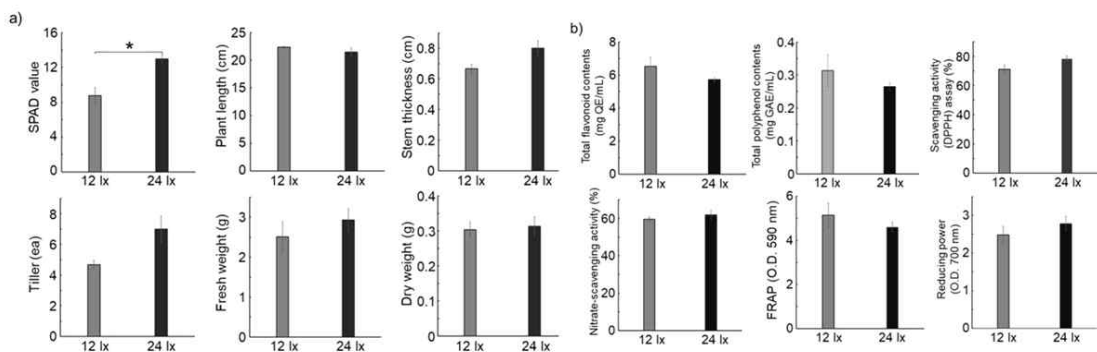
(3) 광 세기에 따른 회향의 성장 및 항산화 활성

- 식물이 수경재배 시스템에서 자라면서 회향은 인공조명과 성장 공간 사이의 제한된 공간 범위 때문에 강한 빛 세기에 노출됨. 회향의 길이는 작년에 언급한 바와 같이 800 ppm CO₂ 조건에서 증가함



[빛의 세기(12, 24 lx)에 따른 실험]

- 따라서 다양한 광도(12 및 24 lx)에서 회향의 식물 성장 및 항산화 활성을 관찰하여 개선된 식물 특성이 광도 또는 증가된 CO₂ 농도에 더 강하게 영향을 받는지 조사함
- 동일한 CO₂ 농도(230 ppm)에서 SPAD value, 초장, 경경, 분얼수, 생체중, 건물중을 포함한 6가지 생육조사를 실시함
- 12 lx 보다 24 lx에서 회향의 SPAD value가 상당히 증가함을 발견함 (p < 0.001). 두 가지 조건에서 SPAD value를 제외한 초장, 경경, 분얼수, 생체중, 건물중은 유의미한 차이는 관찰되지 않았음.
- 정식 후 4주 된 회향의 초장의 평균 길이는 400 및 800 ppm에서 각각 32 vs. 48 cm임. 그러나 빛 세기에 따른 회향은 성장실의 낮은 CO₂ 농도 때문에 12 및 24 lx에서 각각 22.33 vs. 21.43cm로 짧은 초장을 보임. 동일한 식물의 성장 기간(정식 후 4주)동안 증가된 CO₂ 농도와 달리 빛 세기 조건은 회향 식물의 길이나 식물 추출물의 항산화 활성에 미치지 않음. 이러한 결과는 CO₂가 빛 세기보다 식물 개량에 더 강한 영향을 미친다는 것을 시사함

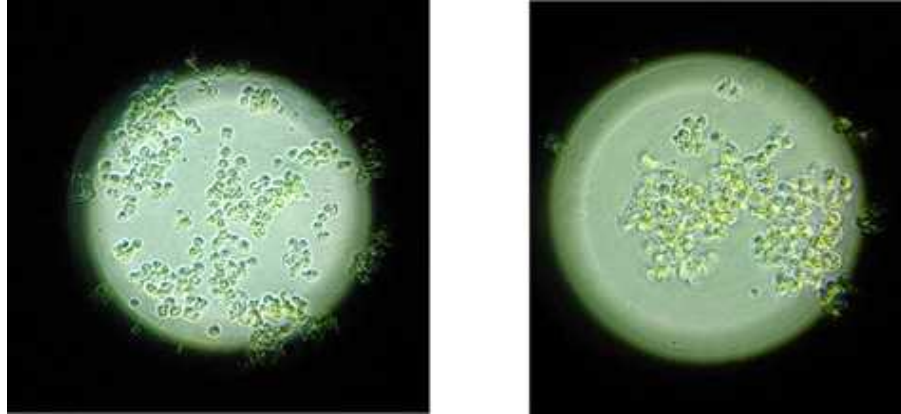


[광 세기에 따른 회향의 생육조사와 항산화분석 결과 통계적 유의성은 two-tailed student's t-test에 의하여 수행함 (*: p < 0.05, **: p < 0.01, ***: p < 0.001)]

(4) 이산화탄소 농도에 따른 항염 WST 분석

- 회향은 식용으로도 쓰이나 구충제, 이노제, 항염증제, 항균제 및 최유제로서의 의약품으로 많이 사용됨. 이산화탄소 농도에 따른 (400 및 800 ppm)의 회향 추출물이 RAW 264.7 세포의 생존율에 미치는 영향을 알아보기 위해 실험함
- WST 분석은 연속 희석한 시료를 처리한 세포를 일정 시간 배양한 후 세포 내 기관인 미토콘드리아가 탈수소효소와 EZ-Cytox시약을 반응시켜 색 변화를 일으키고 변화 정도를 측정해 세포 생존율을 알아보는 방법이며, WST 분석 하기 위해 RAW 264.7을 사용하여 Cell culture를 실시함. 445 mL DMEM에 10% FBS 50mL, 1%

Penicillin/Streptomycin (P/S) 5ml 첨가하여 총 부피 500mL의 DMEM media를 제조함. Cell culture dish에 멸균된 DMEM media 10mL 분주 후 CO2 incubator에서 (37°C, CO2 농도 5%) 15분 이상 미리 배양함. Cell 해동을 위해 water bath (37°C)에 2분 동안 반응 후 pipetting 함. 15mL tube로 옮겨 원심분리기를 이용하여 1,400 rpm에서 3분동안 원심분리 후 상등액을 제거함. 이후 D-PBS 5mL를 추가하여 pipet 으로 cell을 pipetting함. pipetting한 cell을 1,400 rpm으로 한번더 원심분리한 후에 상등액 제거함. CO2 incubator에서 15분간 배양한 cell dish를 꺼낸 후 1mL DMEM media를 cell pellet tube에 추가함. 이후 pipette으로 cell pipetting 후 cell dish에 1mL 씩 분주. Cell dish를 상하좌우로 약하게 흔들어 Cell을 골고루 퍼뜨림. 현미경을 이용해서 Cell 분리된 것을 확인 후 CO2 Incubator에 넣고 2일 동안 배양



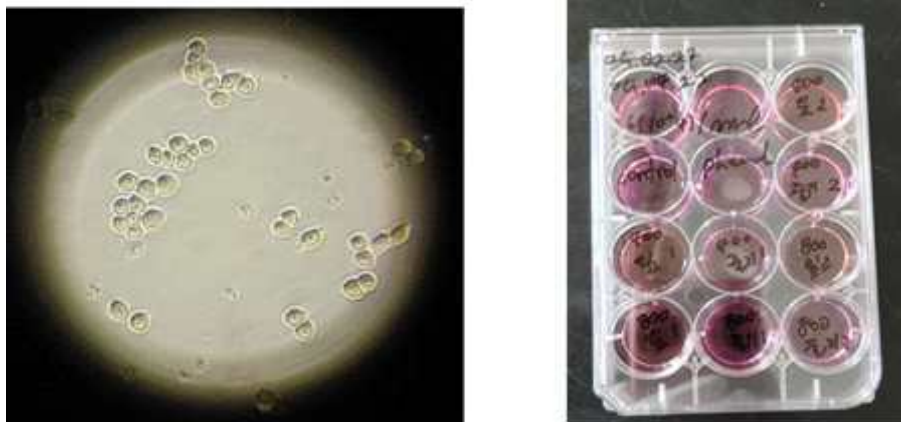
[Cell culture 한 사진]

- Cell culture 한 후 WST 분석을 진행함. 세포 현탁액을 12 well plate에 well 당 1000 μ L씩 분주 후 CO2 incubator에서 24시간 동안 미리 배양함. 이후 샘플 (추출물)을 well에 농도별(200, 400, 800 μ L)로 첨가한 후 CO2 incubator에서 24시간 동안 배양함. 샘플이 첨가된 well에서 상등액을 제거한 후 100 μ L D-PBS를 벽면으로 조심히 주입 후 cell washing하고 pipette으로 D-PBS 제거함. 두 번 washing 후 well에 100 μ L 새로운 멸균된 DMEM media를 주입 후 EZ-Cytox를 용량별로 첨가함. 2시간 정도 CO2 incubator에서 배양 후 cell을 scraping 함. 이후 1.5 mL에 옮겨 1분간 pipetting 후 분광광도계를 이용하여 흡광도 450 nm 에서 측정. Blank는 멸균된 DMEM media 1000 μ L (cell 없는 것) 와 EZ-Cytox 100 μ L을 섞어 사용함 (2시간 반응 시 흡광도 값은 0.3 내외로 측정됨).

- 세포 생존성 식은 아래와 같음

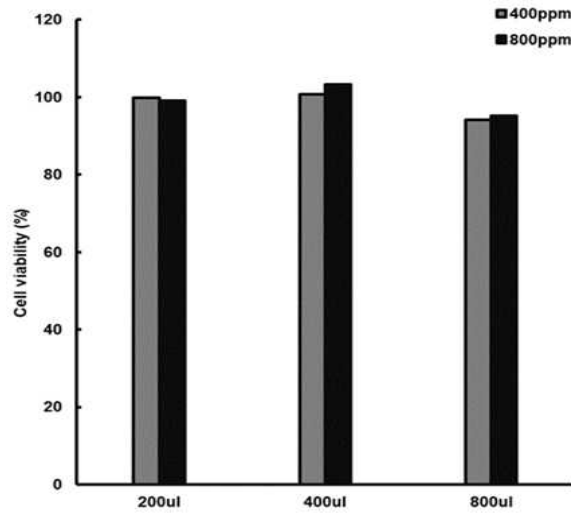
$$[\text{Viability (\%)} = \{(\text{Exp.} - \text{Blank}) / (\text{control} - \text{Blank})\} \times 100]$$

- Blank는 well 안에 멸균된 DMEM media와 EZ-Cytox 의 (NO cell) 흡광도, Control은 well 안에 Cell과 EZ-Cytox 의 흡광도 (NO sample) 이며, EXP.는 well 안에 cell, sample과 EZ-Cytox를 첨가한 흡광도임



[RAW 246.7 cell을 이용한 WST 분석]

- 회향 추출물 (400 및 800 ppm)이 RAW 264.7 세포의 세포 생존율에 미치는 영향을 실험한 결과는 다음과 같음. 추출물의 농도 (200, 400, 800 μl)에 따라 24시간 동안 세포에 처리한 결과, 대식세포의 세포 독성 및 세포 생존율은 90 % 이상임. 그러나 세포 생존율의 차이는 유의한 차이는 보이지 않음



[회향 추출물의 세포 독성 및 세포 생존율 분석]

○ CO2 시비 스마트팜 제어시스템을 통한 작물생육검정(케모마일, 바질)

(1) 작물선정

- CO2 농도에 따른 2년차의 작물 재배실험 적용의 작물은 향산화와 항염의 효과가 높은 약용식물이며 허브 종류의 향신료인 케모마일 (*Matricaria chamomilla*) 과 바질 (*Ocimum basilicum*)를 재배 작물로 선정함. 허브종류인 케모마일은 대표적으로 의약품(약용)으로 많이 쓰이는 로만케모마일 (*Chamaemelum nobile*) 과 식품으로 많이 쓰이는 저먼 케모마일(*Matricaria chamomilla*)을 재배함. 로만 케모마일의 종자는 아시아종묘로부터 구입하여 온도 22 °C에서 습도 60 %에서 광주기(광12/ 암12)의 조건에서 2주동안 발아시켰으며 저먼 케모마일의 종자는 청농종묘에서 구입하여 로만 케모마일과 같은 조건으로 2주동안 발아시켰음. 스위트바질은 아시아종묘로부터 구입하여 온도 20 °C 습도 70 %에서 광주기(광12/ 암12)의 조건에서 2주동안 발아시켰음. 발아된 케모마일과 바질은 수경재배기로 정식하여 수확전까지 생육의 변화를 관찰함. 수경재배시 작물을 키우기 위한 양액은 케모마일과 바질 둘다 허브용 양액을 사용하였으며, 허브용 양액의 조성은 다음과 같음
- 수경재배시 공급한 양액은 케모마일과 바질 둘다 허브용 양액을 사용하였으며, 양액의 조성은 다음과 같음

허브용 양액 (케모마일, 바질) (g)	
KNO_3	12.13
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	13.12
$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	4.6
MgSO_4	2.41
H_3BO_3	0.06183
ZnSO_4	0.0115024
H_2MoO_4	0.0016195

[케모마일과 바질의 양액 조성표 (20 L 기준)]

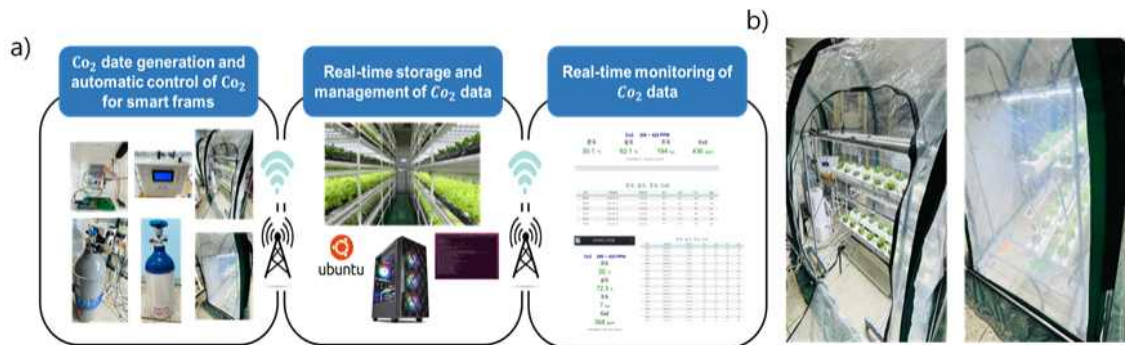
- 회향을 재배했던 밀폐형 소형하우스내에 설치되어있는 의료용 이산화탄소를 설비된 이산화탄소 제어시스템에 연결하여 이산화탄소를 자동 공급함. 정식 이후부터 수확까지 밀폐형 소형하우스에서 케모마일(로만, 저먼)과 바질을 재배함



[밀폐형 소형하우스 내부 / 케모마일과 바질의 사진]

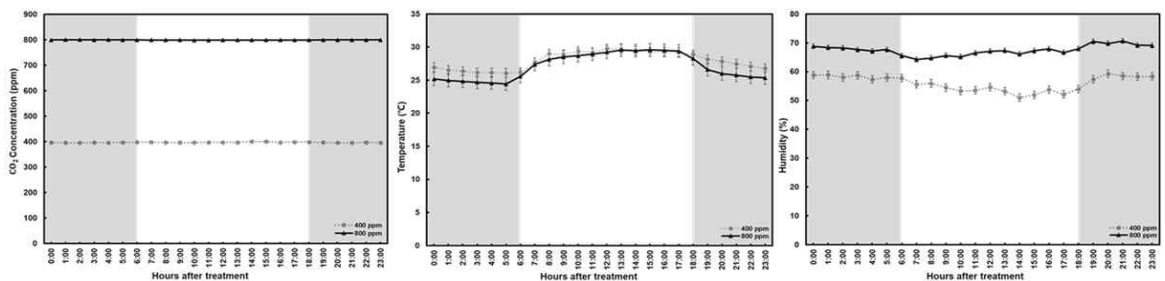
(2) 정식이후 소형하우스내 환경분석 (케모마일)

- 설비가 된 이산화탄소 제어 시스템을 통하여 400 ppm과 800ppm의 일정한 농도의 CO2를 처리함. CO2 농도 유지에 대한 확인을 하기 위해 밀폐형 소형하우스에서 CO2 농도를 측정함 (수경재배기의 양액 교체를 위하여 하우스를 개방하는 시간 데이터는 제외함). 그 결과, 400 및 800 ppm의 CO2 농도는 일정하게 공급이 되어 유지됨



[CO2 데이터 모니터링과 밀폐형 하우스의 수경재배시스템 a는 CO2 센서 데이터 실시간 모니터링 b는 밀폐형 소형하우스 (CO2 농도 400 ppm, 800 ppm)]

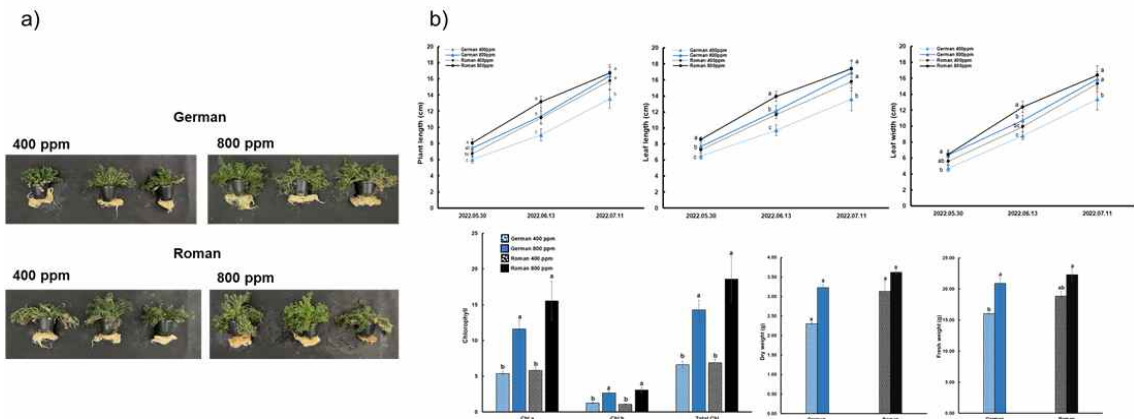
- 정식 이후 5주 동안 생장한 케모마일의 하우스 내 온도, 습도를 관찰하였음. 그 결과 온도에서 광조건은 암조건에 비하여 높은 온도를 보였으며, 400 ppm과 800 ppm을 비교하여 광조건에서 400 ppm이 높은 대기 온도를 나타냈으나, 800 ppm과 비교하여 비교적 큰 차이는 보이지 않음. 습도의 경우 광조건과 암조건에서 비교하여 암조건에서 비교적 높은 습도를 보였으며, 400 ppm과 800 ppm을 비교한 결과 800 ppm에서 높은 습도를 보이며, 400 ppm과 큰 차이를 보임. 온도와 습도를 같이 비교하였을 때 광조건과, 암조건은 반대되는 결과를 보였으며, CO2 농도에 대해서도 400 ppm과 800 ppm은 반대되는 결과를 보임. 케모마일의 하우스내 온도, 습도를 관찰한 결과, 하우스내에서 CO2 농도가 800 ppm일 때 일반적으로 광주기에 관계없이 온도와 습도가 증가하는 것을 발견하였으며, 이는 상대적으로 낮은 CO2 농도에서 습도가 감소함을 알 수 있음. 따라서 이러한 결과는 상대적으로 높은 온도와 습도가 증가된 CO2에서 식물의 성장 및 기공 감소의 개선으로 인해 발생 된 것으로 보임



[정식 이후 5주 동안 생육한 케모마일의 시간대별 환경조건(CO2 농도, 온도, 습도)의 변화선의 색은 각 처리구를 나타냄(회색 : 400 ppm, 검정색 : 800 ppm / 회색 바탕색: 암조건, 흰색 바탕색: 광조건)]

(3) 작물 생육조사 (케모마일)

- 정식 후 52일 된 로만과 저먼의 케모마일의 생육상태를 관찰한 결과 400 ppm과 800 ppm을 비교하였을 때 800 ppm 처리시 잎과, 줄기, 뿌리 발달의 차이가 육안으로 뚜렷하게 나타났으며, 저먼과 로만을 비교했을 때 로만 800 ppm 처리시 생육이 높은 것으로 나타남. 특히 잎과 줄기가 800ppm에서 높은 생육 증가 효과를 나타냄
- 생육 특성에 대한 정확한 수치 비교를 위해 생육조사를 실시함. 생육조사의 항목은 초장, 엽장, 엽폭, 생체중, 건물중, chlorophyll의 함량 6개의 항목을 정식 후 24일부터 2주 간격으로 정식 후 66일까지의 생육은 저먼 케모마일과 로만 케모마일에서 관찰함. 그 결과 전체적으로 생육데이터는 CO2 농도에 비교하였을 때 800ppm에서 높은 함량을 나타냄. 저먼 케모마일과 비교하여 로만 케모마일에서 전체적으로 높은 결과를 보였으며, 유의한 차이를 보였음. 초장, 엽장, 엽폭은 정식후 22일과 66일을 비교하였을 때 400 ppm과 비교하여 300ppm에서 높은 값을 보였으며, 저먼과 비교하여 로만에서 높은 값을 나타냈으며 유의한 차이를 보임. 정식 후 66일에 수확을 하여 생체중과 건물중은 측정된 결과 생체중과 건물중 역시 CO2농도 800 ppm에서 400 ppm보다 높은 값을 나타냈으며, 저먼과 로만 케모마일을 비교하여 로만 케모마일에서 더 높은 값을 보였으나, 유의한 차이는 보이지 않음
- 케모마일의 특성한 잎은 가늘고 길어 SPAD value를 이용하여 측정하는 것에는 어려움이 있어 Chlorophyll의 함량 (엽록소 함량)을 실험함.
- Chlorophyll의 함량 분석 방법은, 생 시료의 20 mg을 100 %의 DMSO (Dimethyl sulphoxide) 5 mL에 침적시킴. 이후 waver bath에 온도를 65 °C로 맞추고 6시간 동안 반응시킴. 6시간 반응 후 분광광도계를 이용하여 흡광도 665 nm와 648 nm에서 측정
- 저먼과 로만 케모마일의 클로로필 함량 실험을 한 결과, 클로로필 함량 역시 저먼과 로만을 비교하여 로만에서 높은 값을 나타냈으며, CO2 농도를 비교하였을 때 400 보다 800 ppm에서 높은 값을 보였음
- a는 52일 된 케모마일의 생육변화
- b는 정식 후 22일부터 2주 간격으로 초장, 엽장, 엽폭, 클로로필 함량 측정



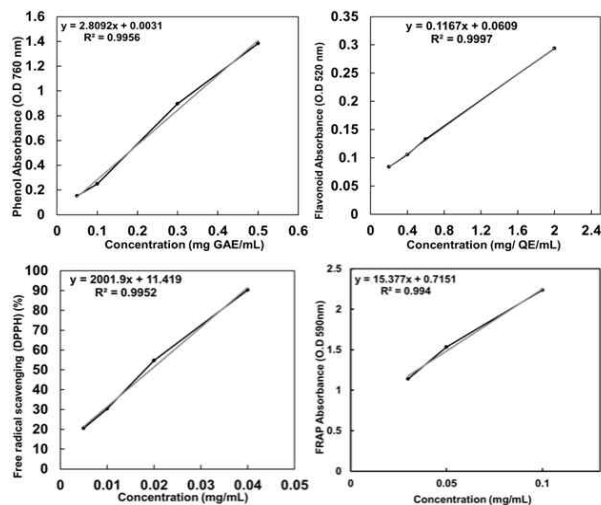
[저먼, 로만의 케모마일의 생육변화와 생육조사]

- 통계적 유의성은 R package Agicolae을 이용하여 Duncan의 다중범위검정법(Duncan's new multiperage test)을 통해 통계처리 하였으며, 평균제곱오차를 고려해 평균값을 5% 유의수준에서 비교

(4) CO2 농도에 따른 향산화 분석 (케모마일)

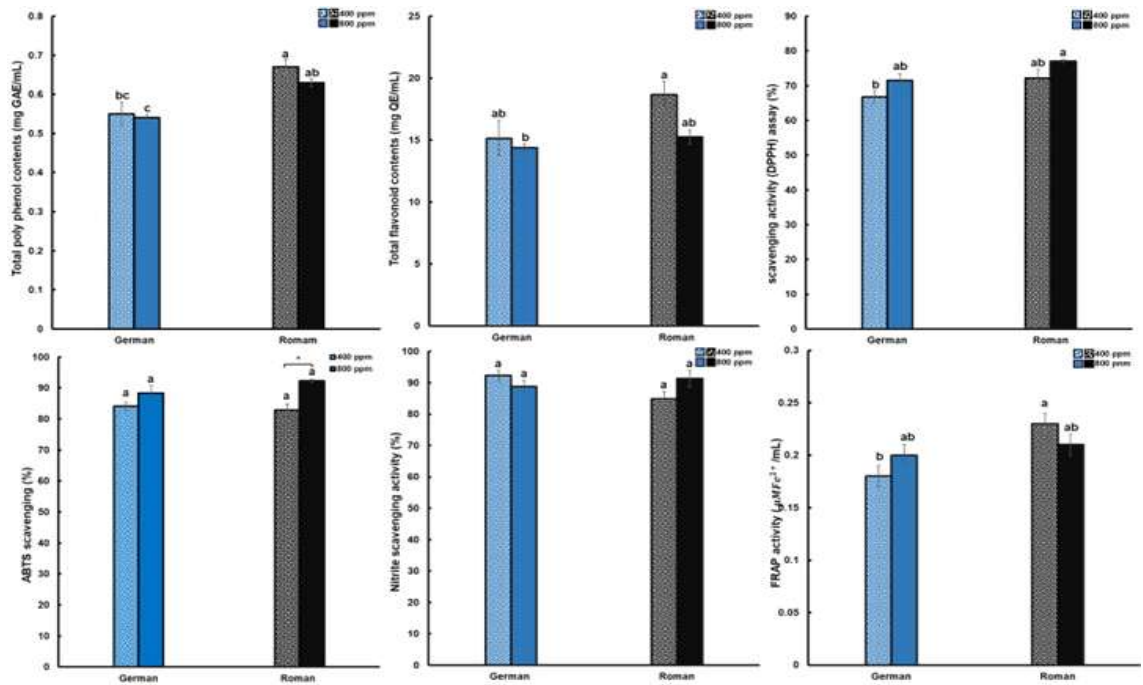
- 케모마일은 약용식물로 약용 및 향산화 효과가 뛰어난 것으로 알려져 있으며, 저먼 케모마일은 주로 식용으로 사용되며, 로만 케모마일은 주로 약용으로 사용되어 CO2 농도에 따라 저먼과 로만 케모마일의 향산화 물질도 변화는지 알기 위해 향산화 분석을 실시함.
- 저먼과 로만 케모마일의 향산화 물질 함량을 검증하기 위해 총 폴리페놀, 총 플라보노이드, Free radical scavenging (DPPH 소거능 분석), ABTS radical scavenging (ABTS 소거능 분석), FRAP 분석 총 6개의 향산화 물질 함량을 분석함.

- 항산화 분석을 위해 (로만, 저먼) 케모마일의 뿌리를 제외한 식물체를 60°C로 24시간 동안 건조기로 건조 후 마쇄함. 마쇄한 샘플 0.5g에 Methanol 25mL 첨가 후 shaking incubator에서 58°C로 24시간 동안 교반함. 이후 원심분리기를 이용하여 13,000 xg로 15분간 원심분리 후 상등액만 추출 후 항산화물질 검정에 사용함.
- 총 폴리페놀의 함량 분석을 위하여 Gallic acid (GAE/g)로 표준곡선을 작성함. 0.5 g Gallic acid를 50 mL Methanol에 녹여 0.5% Gallic acid solution을 제조한 뒤 Methanol을 이용하여 0.05, 0.1, 0.3, 0.5 mg/mL의 농도별로 희석함. 50 μ L 샘플 (추출물 또는 희석된 Gallic acid) 추출물에 250 μ L 증류수와 50 μ L Folin-Ciocalteu reagent를 넣은 후, 암조건에서 6분간 반응함. 이후 0.5mL 3.5% Sodium carbonate solution 과 250 μ L의 증류수를 혼합하여 암조건에서 90분 동안 상온에서 반응 후 분광광도계를 이용하여 흡광도 760nm에서 측정함.
- 총 플라보노이드 함량 분석을 위하여 Quercetin (QE/g)으로 표준곡선을 작성함. 0.1 g의 Quercetin을 10 mL Methanol에 녹여 0.1% Quercetin solution을 제조한 후 Methanol로 0.2, 0.1, 0.8, 2 mg/L의 농도로 희석함. 100 μ L 샘플 (추출물 또는 희석된 quercetin) 추출물과 500 μ L 증류수, 100 μ L 2.5% Sodium nitrite를 혼합한 후 6분간 상온에 반응함. 이후 150 μ L 5% Aluminium chloride solution을 혼합하여 5분간 상온에서 반응하여 200 μ L 1M Sodium hydroxide solution 혼합한 후 Incubator (37°C)에서 1시간 동안 기다린 후 분광광도계를 이용하여 흡광도 510 nm로 측정함.
- DPPH 소거활성은 Gallic acid를 희석하여 표준곡선을 작성함. 표준곡선의 농도는 phenol과 같은 방법으로 진행함. DPPH와 50mL 의 Methanol을 혼합하여 DPPH solution을 제조함. 100 μ L 샘플 (추출물과 희석된 Gallic acid)와 900 μ L의 DPPH solution을 혼합한 후 암조건에서 10분 동안 반응함. 분광광도계를 이용하여 흡광도 515 nm에서 측정함.
- Nitrite scavenging activity (아질산염 소거능 분석), FRAP 분석은 CO2 농도에 따른 회황의 항산화 물질 검정에 사용된 방법을 동일한 방법으로 분석함.
- 이후 추가적으로 ABTS radical scavenging activity (ABTS 소거능 분석)도 진행함. ABTS 소거능은 DPPH와 실험 방식과 계산식은 비슷하나 조금 다름. DPPH는 음이온을 갖고 분석을 하나 ABTS는 양이온을 가지고 실험을 하며 pH의 영향이 적기 때문임. 이렇기 때문에 DPPH 소거능 함량과 ABTS 소거능 함량의 값은 다르게 나올 수 있음.
- ABTS 분석하기 위해 ABTS solution과 2.6mM Potassium persulfate를 1:1로 혼합하고 15시간 동안 암실에서 반응함. 실험직전 15시간 반응했던 시약을 흡광도 0.7±0.03이 되도록 증류수로 희석함. 이후 60 μ L 샘플 추출물과 900 μ L ABTS + Potassium persulfat solution을 혼합한 후 20분간 반응함. 분광광도계를 이용해서 흡광도 734nm에서 측정함.
- 항산화 물질 분석을 위해 총 폴리페놀, 총 플라보노이드, DPPH 소거능 실험, FRAP은 표준물질을 통한 표준곡선을 분석한 결과 위의 실험에서 R2의 값이 0.99 이상으로 나타났으며, 농도에 따른 수치의 변화가 높은 상관관계를 보였음



[케모마일 추출물 항산화 물질 분석을 위한 표준물질의 표준곡선]

- CO2 농도에 따른 저먼과 로만 케모마일의 항산화 분석을 한 결과 저먼과 로만을 비교했을 때 로만이 전체적으로 높은 함량을 나타냄. 또한 CO2 농도에 따른 결과는 400 ppm과 비교하여 800 ppm에서 높은 값을 보임. DPPH 소거능과, ABTS 소거능, 아질산염 소거능은 CO2 농도를 비교했을 때 800ppm이 400ppm보다 높은 함량을 나타냈으며, DPPH 소거능에서는 유의한 차이를 보였으나, ABTS 소거능과 아질산염 소거능에서는 유의한 차이를 보임. DPPH 소거능에서 로만 케모마일만 비교했을 때 400 ppm과 800ppm은 유의한 차이를 보임.
- 총 폴리페놀 함량과, 총 플라보노이드 함량은 CO2 농도를 비교했을 때 400 ppm이 800ppm 보다 높은 함량을 보였으며, 소거능 분석들과 반대되는 값을 나타냄. 또한 저먼과 로만을 비교했을 때 로만 함량이 높았으며, 유의한 차이를 보임.
- FRAP 분석은 CO2 농도를 비교했을 때 저먼에서는 800 ppm이 400 ppm보다 높은 함량을 나타냈으며, 로만은 저먼과 반대로 400ppm이 800 ppm보다 높은 함량을 나타냄



[CO2 농도에 따른 저먼과 로만 케모마일의 항산화 분석]

(5) 이산화탄소 농도에 따른 항염 WST 분석

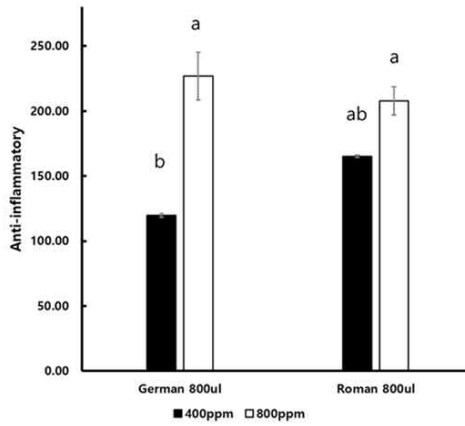
- 의약품(약용)으로 많이 쓰이는 로만 케모마일과 식품으로 많이 쓰이는 저먼 케모마일의 CO2 농도가 다르게 재배되었을 때, 세포 생존율의 차이를 보기 위해 실험을 진행함
- Cell culture와 WST 분석은 회향의 cell culture와 WST 분석의 동일한 방법으로 진행함



[Cell culture 사진과 WST 분석한 사진]

- CO2 농도에 따른 저먼과 로만 케모마일의 WST 분석결과는 다음과 같음. 이번 WST 실험은 추출물에 농도에 따른 분석이 아닌, 추출물의 800μl 농도를 갖고 24시간 동안

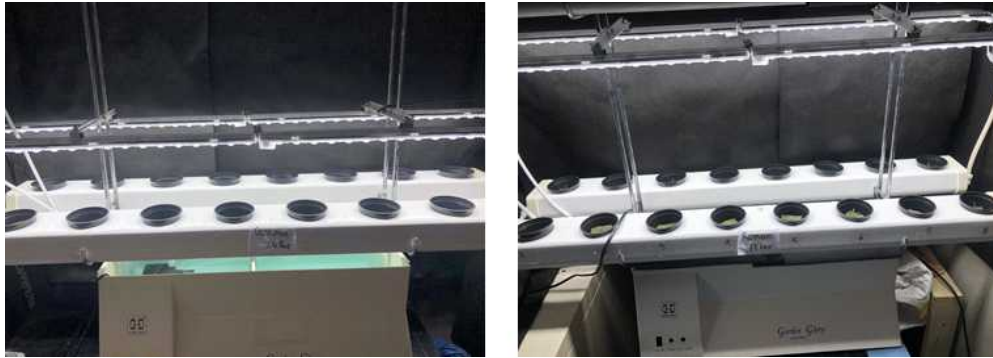
실험한 결과, RAW 246.7 (대식세포)의 생존율은 90 % 이상으로 나타남



[CO2 농도에 따른 케모마일의 WST 분석]

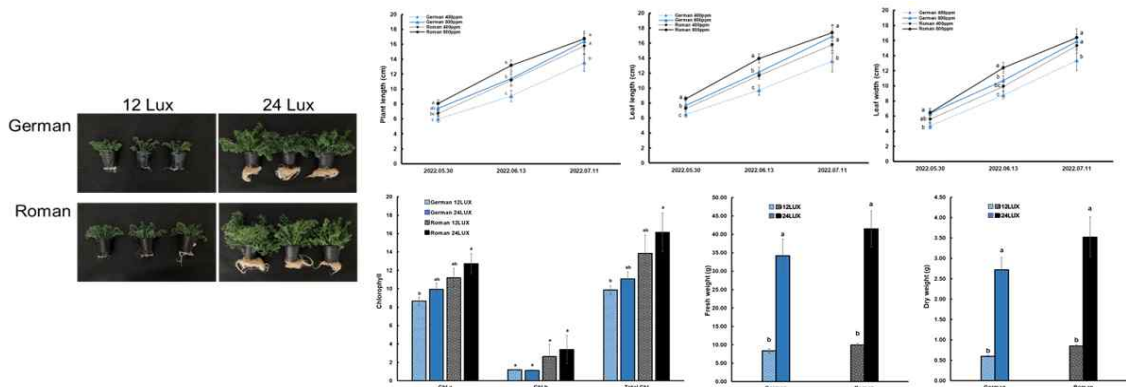
(6) 광 세기에 따른 작물의 성장 및 항산화 활성 (케모마일)

- 저먼과 로만 케모마일은 서로 다른 광합성 매커니즘을 가지고 있는 결과는 있으나 증가된 CO2가 케모마일의 다른 종 간의 광합성 차이를 유발했는지의 여부는 아직 알려진 바가 없기에 광 세기에 따른 저먼과 로만 케모마일의 성장 및 항산화 활성 실험을 진행함. 광 세기에 따른 실험은 회향의 광 실험과 동일한 방법으로 실험진행



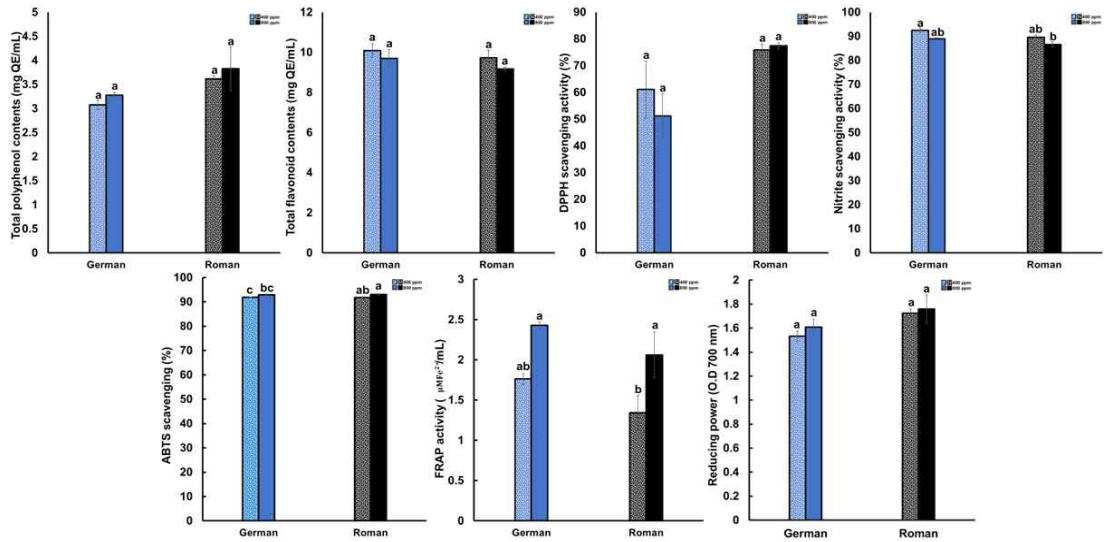
[빛의 세기에(12, 24 lx) 따른 실험]

- 회향에서 광 실험했던 것과 같이 동일한 CO2 농도 (230ppm)에서 저먼과 로만 케모마일의 생육조사 항목인 초장, 엽장, 엽폭, 클로로필 함량, 생체중, 건물중을 생육 조사함. 그 결과 12 lx에 비해 24 lx에서 초장, 엽장, 엽폭에서 식물이 발달된 것을 육안으로 확인함. 정확한 수치를 비교하기 위해 생육 조사를 실시한 결과 로만 케모마일에서 식물 성장에 대한 24 lx 처리한 식물의 특성이 가장 높은 측정값을 보였으며 유의한 차이를 보임. 증가된 CO2 농도와 높은 광도에서 로만케모마일이 식물발달이 증가한 것을 확인했으며, 높은 광도와 증가된 CO2를 비교적 강하게 처리하면 엽록소 함량이 증가한 것을 알 수 있음. 저먼보다 로만에서 더 높은 클로로필의 함량을 확인함



[광 세기에 따른 케모마일의 생육변화와 생육조사]

- 광세기에 따른 케모마일의 항산화 물질 검정을 위해 항산화 분석을 실시함. 항산화 분석은 CO2 농도에 따른 케모마일의 항산화 분석방법과 동일한 방법으로 진행함.
- 항산화 물질 분석을 한 결과, 로만과 저먼에서 폴리페놀과 DPPH 소거능, ABTS 소거능, FRAP, Reducing power 분석에서 항산화에 대한 유의한 차이가 관찰되었으며, 12 lx보다 24 lx에서 높은 함량을 나타냄. 플라보노이드와 아질산염 소거능은 24 lx와 비교하여 12 lx에서 높은 함량을 보였으며 유의한 차이는 보이지 않았음

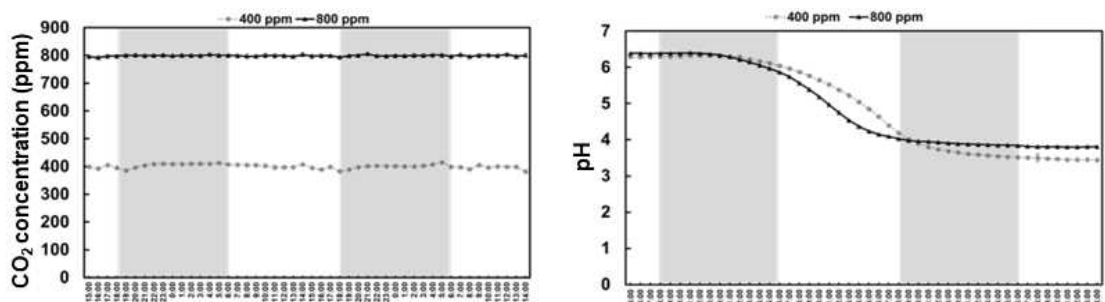


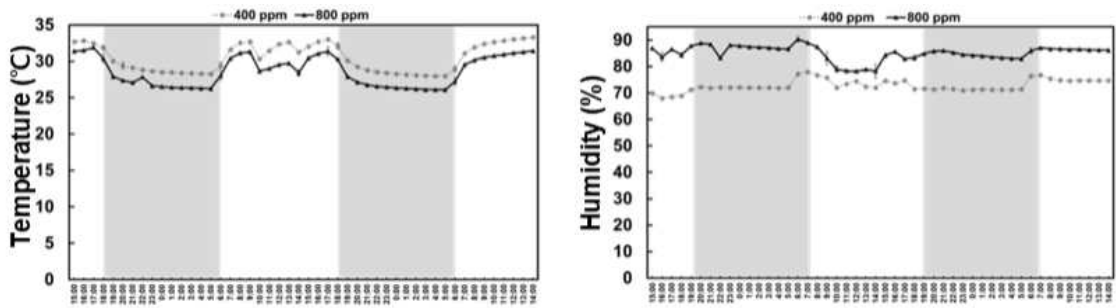
[빛 세기에 따른 케모마일의 항산화 물질 분석 결과]

- 증가된 CO2 농도와 높은 광도에서 로만 케모마일의 식물이 더 발달한 것을 확인할 수 있었으며, CO2의 항산화 분석과 비교했을 때 폴리페놀, 플라보노이드, DPPH 소거능, ABTS 소거능에서는 비슷한 결과를 보였음. 아질산염 소거능과 FRAP 분석은 저먼에서 CO2 농도 처리시 같은 결과를 보였으나, 로만에서는 다르게 나타났음. 특히 FRAP 분석에서 유의한 차이를 보임

(7) 정식 이후 소형 하우스 내 환경 분석 (바질)

- 케모마일과 같은 방법으로 설비된 CO2 농도 제어 시스템을 통하여 400 ppm과 800 ppm의 일정한 농도의 이산화탄소를 처리함. CO2 농도 유지에 대한 확인을 위해 밀폐형 소형 하우스에서 CO2 농도를 측정함 (수경재배시설의 양액 교체를 위해 하우스 개방한 시간은 CO2값에서 제외함). 그 결과 400, 800 ppm의 CO2 농도는 일정하게 유지됨
- 밀폐형 소형 하우스 내에서 정식 이후 45일 부터 3일 동안 하우스 내 온도, 습도를 관찰함. 그 결과, 광조건이 암조건에 비해 높은 온도를 보였으며, 800 ppm과 400 ppm을 비교하였을 때 400 ppm에서 높은 대기 온도를 나타냄. 습도의 경우 광조건보다 암조건에서 높은 수치를 보였으며, 800 ppm처리시 증가된 습도를 나타냄. 400 및 800 ppm을 비교하였을 때, 온도와 습도는 반대되는 경향을 보임. 이러한 결과는 이산화탄소에서 식물이 성장 및 기공 감소로 인해 발생되었을 것이라고 생각됨
- 수경재배의 양액의 조성 변화 분석을 위해 정식 이후 45일부터 3일 동안 시간대별 pH의 변화를 조사함. 그 결과, 1일차에는 400과 800 ppm에서 6.29로 동일한 값을 보였으나, 시간이 지나 2일차에는 400 ppm이 800 ppm보다 높은 값을 나타냄. 이후 3일차에는 2일차와 반대로 800ppm (3.81) 이 400ppm (3.44) 보다 높은 값을 나타냄

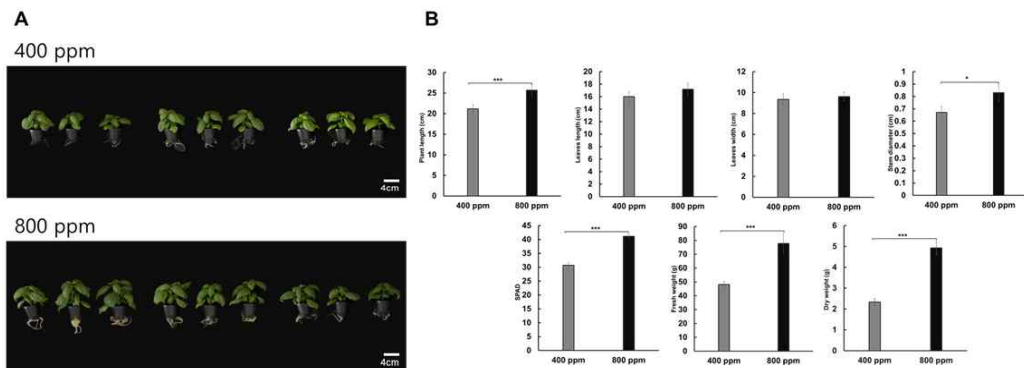




[정식 후 45일부터 3일 동안의 바질의 시간대별 환경조건 및 양액의 pH 변화. 선의 색은 각 처리구를 나타냄(회색 : 400ppm, 검정색 : 800ppm / 회색 바탕색 : 암조건, 흰색 바탕색 : 광조건)]

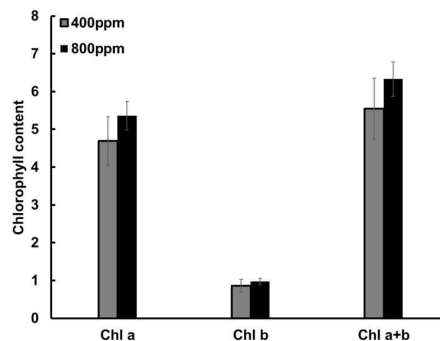
(8) 작물의 생육조사 (바질)

- 정식 후 45일 된 바질의 생육상태를 관찰한 결과 400 ppm과 800 ppm을 비교하였을 때 800 ppm 처리시 잎과 줄기, 뿌리 발달의 차이가 육안으로 뚜렷하게 나타남. 생육 특성에 대한 정확한 수치 비교를 위하여 초장, 경경, 엽장, 엽폭, SPDA value를 정식 후 45일 된 바질에서 관찰함. 모든 생육조사 항목에서 400 ppm과 비교하여 800 ppm 처리된 바질의 생육이 유의하게 증가된 수치를 보임. 초장에서 400 ppm에서 평균 22.17cm, 800 ppm에서 평균 25.67 cm 이며, 증가된 이산화탄소 처리에 의하여 평균 3.5 cm의 증가된 수치를 보였으며, 경경은 400 ppm에서 0.67 cm, 800 ppm에서 0.83 cm로 두께가 증가됨. SPAD value는 400 ppm에서 30.69 cm, 800 ppm에서 41.12 cm 수치를 나타냈으며 800 ppm 처리시 유의하게 증가하였음. 엽장과 엽폭 또한 800 ppm에서 증가된 것을 확인하였으나, 유의한 차이는 보이지 않음
- 수경재배기에서 수확한 바질의 생체중과 건물중을 조사함. 생체중과 건물중 또한 400 ppm과 비교하여 800 ppm에서 유의하게 증가된 것을 확인할 수 있음. 생체중은 400 ppm에서 48.11g, 800 ppm에서 77.67 cm로 800 ppm에서 높은 값을 보임. 건물중은 400 ppm에서 2.33 g, 800 ppm에서 4.93 g으로 800 ppm에서 증가함



[정식 후 45일된 바질의 생육 변화]

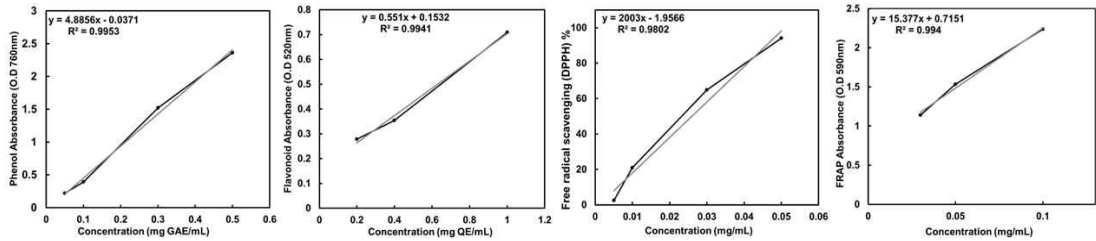
- 정식 후 45일 된 바질에서 SPAD value의 정확한 수치를 비교하기 위해, 추가적으로 chlorophyll 함량 실험을 실시함. 클로로필 함량의 실험은 케모마일의 클로로필 함량 분석과 동일한 방법으로 실험을 진행함. 그 결과, 클로로필 함량은 400과 800 ppm을 비교하여 400 ppm에서 5.55 mg/mL, 800 ppm에서 6.33 mg/mL로 800 ppm에서 높은 함량을 나타냈으며 유의한 차이는 보이지 않았음



[바질의 chlorophyll 함량 실험]

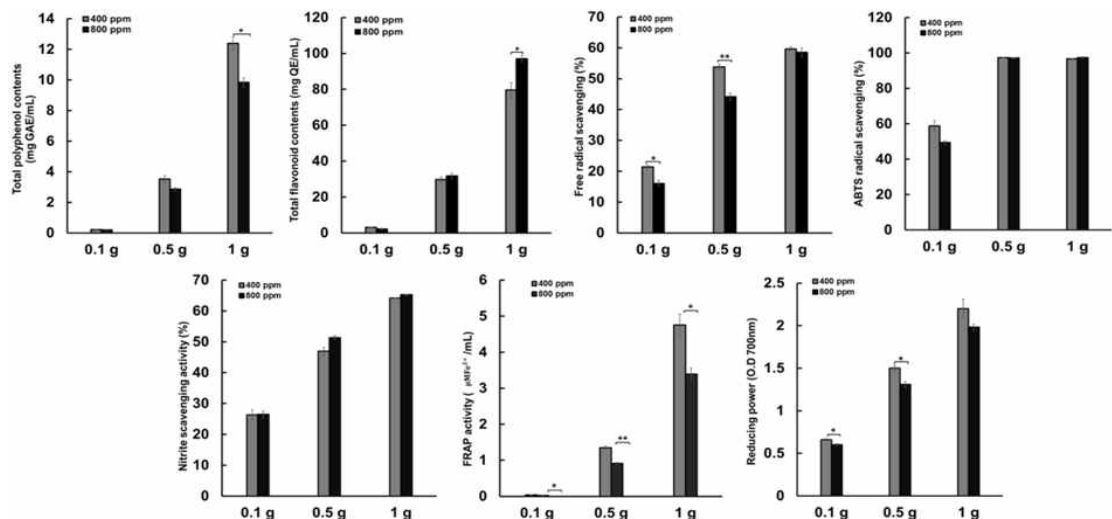
(9) 이산화탄소 농도에 따른 항산화 분석 (바질)

- 바질 또한 항산화 물질이 높은 것으로 알려져 있어 CO2 농도에 따른 바질의 항산화 함량을 검증하기 위해 분석함
- 바질의 항산화 분석 항목은 총 폴리페놀 함량, 총 플라보노이드, DPPH 소거활성, ABTS 소거활성, 아질산염 소거활성, FRAP, Reducing power 분석으로 총 7개의 방법으로 실험함. 7개의 시험방법은 회향과 케모마일의 항산화 분석 방법과 동일하게 진행하였으나 추가적으로 추출물의 농도별 (0.1, 0.5, 1 g)로 분석을 진행함.
- 항산화 물질 분석을 위해 표준물질을 통한 총 폴리페놀, 총 플라보노이드, DPPH 소거활성, FRAP의 표준곡선을 분석한 결과, 표준곡선의 R2의 값이 0.98 이상으로 나타났으며, 농도에 따른 수치의 변화가 높은 상관관계를 보였음



[바질 추출물 항산화 물질 분석을 위한 표준물질의 정량 곡선]

- 이산화탄소의 농도와 추출물의 농도별로 분석한 결과, 폴리페놀, DPPH 소거능, FRAP, Reducing power 분석은 전체적으로 400ppm과 800ppm을 비교했을 때 400ppm이 높은 값을 나타냈으며, 플라보이드와 아질산염 소거능은 400ppm과 비교하여 800ppm에서 높은 값을 나타냄
- 폴리페놀의 경우 0.1g에서는 400ppm과 800ppm이 비슷한 값을 보였으나 0.5g에서는 400ppm이 800ppm보다 높은 값을 나타내며 1g에서는 0.5g과 같이 400ppm이 800ppm보다 높은 값을 나타냈으며, 유의한 차이를 보임. DPPH 소거능, FRAP, Reducing power은 0.1, 0.5, 1g에서 400ppm이 800ppm 보다 높은 값을 나타냈으며 유의한 차이를 보임
- 플라보노이드 함량은 0.1g에서 800ppm이 400ppm보다 높은 값을 나타냈으나 유의한 차이를 보이지 않았으며, 0.5g에서는 0.1g과 반대로 400ppm이 800ppm보다 높은 값을 나타냄. 1g에서는 0.1g과 같이 800ppm 400ppm 보다 높은 값을 보였으며 유의한 차이를 보임. 아질산 소거능은 0.1, 0.5, 1g에서 800ppm에서 400ppm 보다 높게 나왔으나 유의한 차이를 보이지 않았음
- ABTS 소거능은 0.1g에서 400ppm이 800ppm보다 높았으나, 0.5, 1g에서는 400ppm과 800ppm에서 비슷한 값을 나타냄



[이산화탄소 농도에 따른 바질의 항산화 분석]

※ 통계적 유의성은 two-tailed student's t-test에 의하여 수행함
 (*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$, ***: $p < 0.001$)

1) 2단계 - 1차년도

가. 주관연구개발기관 : (주)바이오프랜즈

○ 추진 내용

- (1) 식물공장 및 스마트팜(온실) 적용 시스템 1개소 신설 및 실증
- (2) 기술이전 또는 매출을 위한 국내외 판매활동
- (3) 상용화 사업을 위한 시스템 양산화, 제품판매, 국내외 판매

○ 친환경 DME 연료보급 실증

- (주)바이오프랜즈는 주관기관으로서 2단계 1차년도 정량적 성과 목표 달성을 위해 참여기관의 역무를 상기시키고 특허출원, 논문 게재, 표준화, 정책활용 등 진행할 수 있도록 독려함
- 천연가스 미공급 지역인 농업 분야에 보급하기 위한 실증연구로, 경북 상주 스마트팜 혁신밸리에 DME를 연료로 한 발전으로 난방을 공급하였고 동일 연료의 CO2 발생기를 통해 CO2 시비를 실시하여 작물을 재배하였음



[상주 스마트팜 혁신밸리 DME연료이용 CO2 발생기]

- 과채류로 멜론을 작물로 선정했으며, 모종을 구매하여 배지에 정식하여 CO2 탄산시비 실증 및 생육 관찰 진행 (4~6월 재배)
- 재배실 내부 CO2 농도는 900ppm 이상으로 유지하였음



[상주 스마트팜 혁신밸리 CO2 탄산시비 실증]

○ 스마트팜(온실) 적용 시스템 1개소 신설 및 실증

- (주)바이오프랜즈는 1차년도 목표인 스마트팜 적용 시스템 1개소 신설을 위해 당사 공장 내에 DME 삼중열병합 시스템을 적용한 약 100평 규모의 스마트팜 실증센터를 구축하였고, 자체 스마트팜 사업화 모델을 구축하였음
- 보은 1공장 스마트팜 실증센터 건축시공 진행



공사명 바이오프랜즈 스마트팜 공사
공종 기초공사
위치 바이오프랜즈1공장내
내용 기초레이아웃설

(기초 레미콘 타설)

공사명 바이오프랜즈 스마트팜 공사
공종 기초공사
위치 바이오프랜즈1공장내
내용 스마트팜 거푸집해체

(거푸집 해체)

공사명 바이오프랜즈 스마트팜 공사
공종 기초공사
위치 바이오프랜즈1공장내
내용 스마트팜 철골작업

(철골 작업)

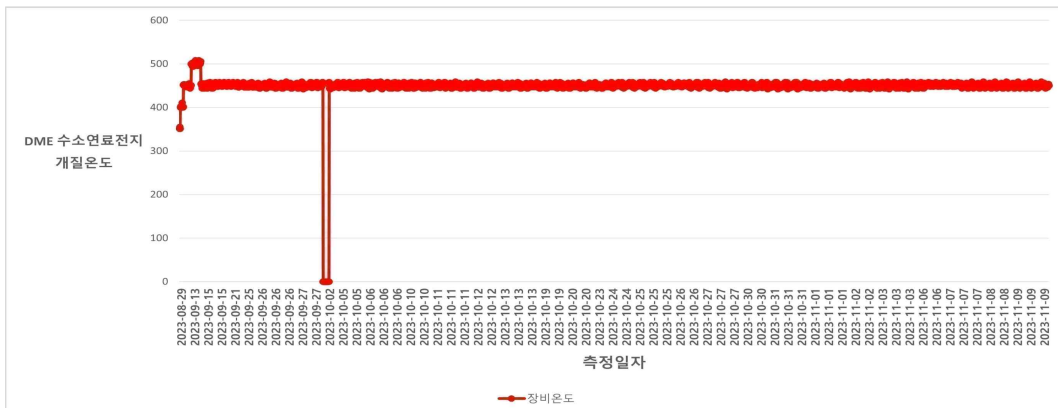


- DME 삼중열병합시스템 연계 스마트팜 실증센터 1개소 구축



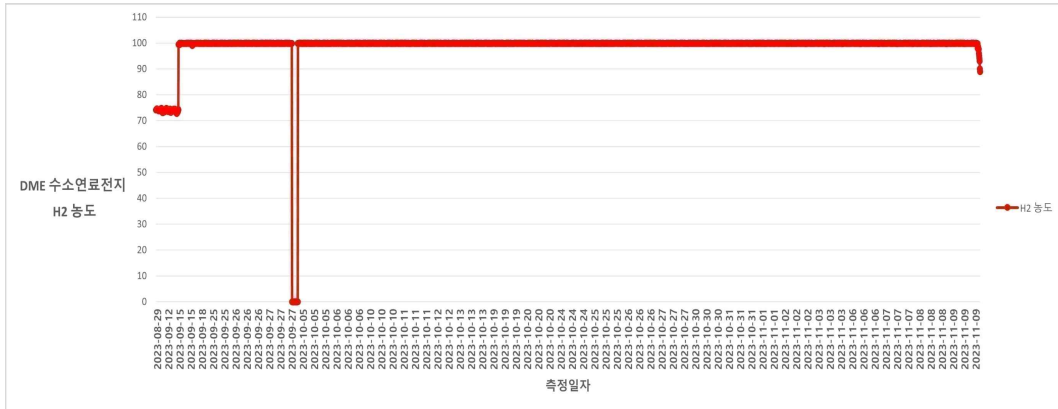
[보은 1공장 스마트팜 실증센터 구축 완료 사진]

- DME 수소연료전지, 삼중열병합시스템이용 스마트팜 실증 결과는 다음과 같음
- DME 수소연료전지의 부하 100% 가동에 따른 개질온도는 400~500℃ 사이에서 개질 반응이 이루어졌으며, 평균 H2 농도 73~74%, CO2 20~22%, CO 1~3%, CH4 0~1%로 개질율은 평균 73%로 나타남



[DME 수소연료전지 개질 온도]

- DME-H2 개질기를 통해 생산한 수소를 연료전지로 공급하기 위해 정제과정(PSA)을 거쳐 연료전지에 수소를 공급하였음
- PSA를 통해 정제한 수소연료전지의 H2 농도는 평균 99.994%의 고순도를 유지함



[DME 수소연료전지 H2 농도]

- 정제한 수소를 연료전지의 연료로 투입하여 수소연료전지의 전력 생산량을 측정한 결과는 아래와 같음
- CO2가 필요한 시기에는 부하량 30kw로 가동하였고 평상시에는 0~10% 정도로 유지하였음



[DME 수소연료전지 전력 생산량]

○ 스마트팜 실증센터 작물 탄산재배 비교실증

- DME 연료를 통한 발전으로 스마트팜 실증지 내 전기, 냉·난방(EHP) 공급과 연소 시 발생한 고순도의 CO2를 포집하여 재배 1실, 2실을 구분하여 재배 2실에 CO2 탄산재배 비교 실증 진행
- 스마트팜 내 환경제어시스템 설치를 통해 외부 기상 정보 및 재배실 내 환경데이터 획득과 내부 공기순환 및 양액 공급 등 원격제어 시스템 적용

종량	풍속(m/s)	일사(w/m2)	외부온도(°C)	외부습도(%)
동	0	372	-2	71.9

	온도 (°C)	습도 (%)	CO2 (ppm)
1번 센서	17.4	33.3	459
2번 센서	16.9	28.7	613
3번 센서	0	0	0
4번 센서	0	0	0

[스마트팜 환경제어시스템 적용(Web)]

채널	상태
1 채널	0%
2 채널	17%
6 채널	17%
7 채널	17%

채널	상태
1 채널	수동/자동
2 채널	수동/정지
6 채널	수동/정지
7 채널	수동/정지

[App]

상태조회

상태조회 | 데이터 이력 보기 | 경보 결과 보기

시작일 2023-10-10 ~ 종료일 2024-01-30 | 이전일 | 다음일 | 1일 | 3일 | 7일 | Excel 출력

시간대별-환경데이터 | 시간대별-작동데이터 | 환경정보 그래프 | 기상대 그래프

날짜	시간	온도1	온도2	온도3	온도4	습도1	습도2	습도3	습도4	Co2 1	Co2 2	Co2 3	Co2 4	풍향	풍속	일사	외부온도	외부습도
20240130	10:44:55	19.1°C	19.4°C	0.0°C	0.0°C	32.1%	26.6%	0%	0%	441ppm	600ppm	0ppm	0ppm	북동	0	392	-0.5	67.6
20240130	10:34:42	18.8°C	19.0°C	0.0°C	0.0°C	32.6%	27%	0%	0%	444ppm	593ppm	0ppm	0ppm	북동	0.8	428	-0.9	68.1
20240130	10:24:42	18.5°C	18.6°C	0.0°C	0.0°C	31.8%	27.3%	0%	0%	444ppm	610ppm	0ppm	0ppm	북	0	419	-1.1	70.3
20240130	10:14:42	18.5°C	18.4°C	0.0°C	0.0°C	31.2%	27.4%	0%	0%	462ppm	613ppm	0ppm	0ppm	북서	0	322	-1.4	70.9
20240130	10:04:42	18.9°C	18.8°C	0.0°C	0.0°C	29.7%	26.6%	0%	0%	465ppm	613ppm	0ppm	0ppm	북동	0	399	-1.9	71
20240130	09:54:42	17.3°C	16.9°C	0.0°C	0.0°C	31%	28.5%	0%	0%	469ppm	606ppm	0ppm	0ppm	동	0	376	-1.9	71.7
20240130	09:44:42	18.4°C	17.6°C	0.0°C	0.0°C	28.6%	26.8%	0%	0%	451ppm	606ppm	0ppm	0ppm	남동	0	364	-2.4	73.8
20240130	09:34:43	17.5°C	16.4°C	0.0°C	0.0°C	28.2%	27.8%	0%	0%	459ppm	606ppm	0ppm	0ppm	북동	0	333	-3.1	74.5
20240130	09:24:42	18.7°C	17.6°C	0.0°C	0.0°C	26%	26.4%	0%	0%	462ppm	616ppm	0ppm	0ppm	남동	0	280	-3.3	75.8
20240130	09:14:42	18.6°C	17.3°C	0.0°C	0.0°C	25.7%	26.5%	0%	0%	472ppm	616ppm	0ppm	0ppm	남동	0	268	-3.7	79.6
20240130	09:04:42	18.4°C	16.7°C	0.0°C	0.0°C	25.4%	26.8%	0%	0%	469ppm	616ppm	0ppm	0ppm	서	0	235	-4.5	80
20240130	08:54:42	18.2°C	16.3°C	0.0°C	0.0°C	25.3%	27.2%	0%	0%	465ppm	613ppm	0ppm	0ppm	남동	0	194	-4.5	81.3
20240130	08:44:42	18.0°C	16.0°C	0.0°C	0.0°C	25.1%	27%	0%	0%	472ppm	621ppm	0ppm	0ppm	남	0	162	-5	83.7
20240130	08:34:42	17.3°C	15.2°C	0.0°C	0.0°C	25.6%	27.7%	0%	0%	485ppm	620ppm	0ppm	0ppm	남	0	129	-5.7	85.4
20240130	08:24:42	16.1°C	14.1°C	0.0°C	0.0°C	26.6%	29%	0%	0%	499ppm	628ppm	0ppm	0ppm	남	0	102	-6.3	86.1

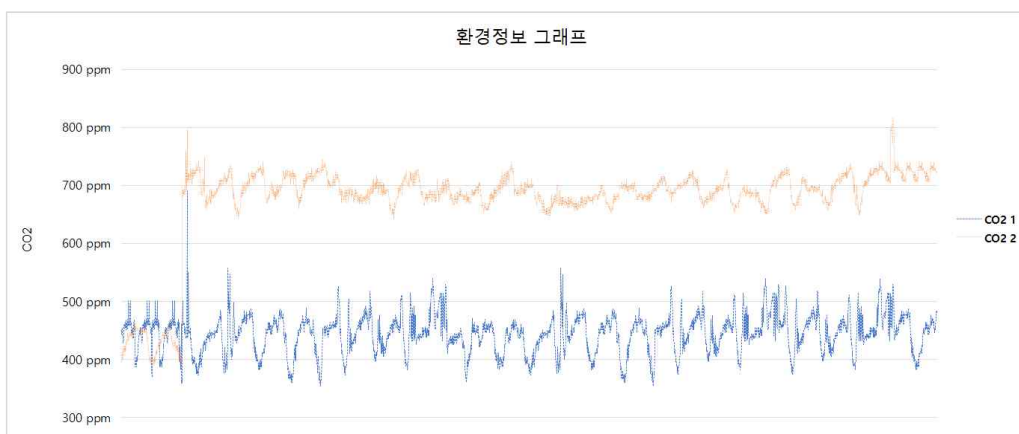
1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 다음 >

[환경제어시스템 재배실 내외부 환경 Data Log]

- 실증 작물은 온도와 재배 일정을 고려하여 청치마 상추(청풍여름)와 적치마 상추(선풍포합 적축면)으로 선정하였으며, 재배실마다 50구씩 총 100구를 정식하여 작물의 성장 관찰 진행
- DME 수소연료전지 시스템 미사용 시 온실 내부 CO2는 400~500ppm로 유지되었으며, 광합성에 의한 작물의 CO2 소모는 오후(13:00~16:00)에 가장 높은 것을 확인하였음. 이에 따라 CO2 소모량이 높은 시간대에 맞춰 탄산재배 비교를 위해 2실에 고순도 CO2를 공급하였음









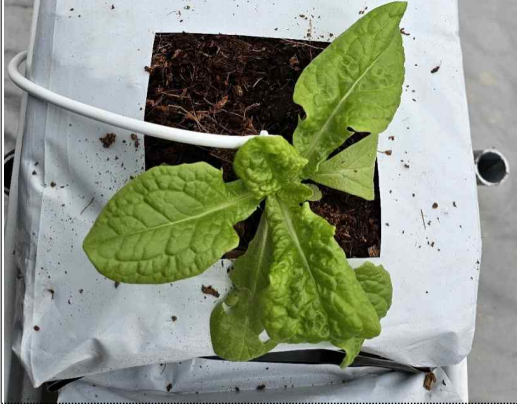

[재배 1실, 2실 작물의 CO2 소모 주기 측정_요구시간대 고순도 CO2 공급]



[재배실 별 CO2 농도 유지표_탄산시비에 따른 생육 계속실험 실증]

- 작물의 생육 관찰 (10~11월 재배)

- 재배 1실 내부 CO2는 별도의 CO2 공급 없이 작물 생육을 관찰하였으며, 수소연료전지를 통한 탄산시비로 재배 2실의 CO2 농도는 600~700ppm로 유지 및 생장을 관찰하였음

일자	재배 1실 (탄산시비 無)	재배 2실 (탄산시비 有)
2023. 10.10. (정식)		
2023. 10.23.		
2023. 10.30.		
2023. 11.07.		



[탄산시비 유무에 따른 생육 성장데이터 계측]

- 실증결과 CO2 탄산시비를 한 2실의 작물의 성장 속도가 빠른 편을 보였으며, 엽구의 높이와 폭, 엽수, 생체중의 증가에 따라 DME 삼중열병합시스템의 CO2 탄산시비 효율성과 작물의 생산성 및 경제성 향상에 이로운 영향을 끼치는 것을 확인할 수 있었음
- 재배실 별 청치마, 적치마 각 50구(총 200구) 중 30구씩 선별하여 탄산시비 유무에 따른 생육 계측 평균값 계산

구 분	품 종	엽구 높이(mm)	엽구 폭(mm)	엽수(장)	생체중-주중(g)
재배 1실 (탄산시비 無)	청치마	117	208	13.7	143.1
	적치마	98	187	7.7	142.8
재배 2실 (탄산시비 有)	청치마	132	232	15.3	151.9
	적치마	106	219	10.3	161.7

[탄산시비 유무에 따른 비교군 생육조사표]

○ 실증 온실의 작물 생산성, 경제성 평가

- ㈜바이오프랜즈의 스마트팜 실증센터를 통해 획득한 업체류 생육 데이터를 토대로 CO2 탄산재배에 따른 DME 삼중열병합 시스템 적용의 작물 생산성 및 경제성 평가 실시
- 농림식품기술기획평가원과 KIST(한국과학기술원) 전문가 매칭을 통해 탄산시비 비교 작물 재배에 대한 실험방법 자문과 생육 계측을 통한 생산성, 경제성 평가 진행
- 일반적인 CO2 수치인 350ppm(재배 1실)에서 이산화탄소 농도를 1,000ppm으로 증가시키면 상대 수확률이 약 35% 증가하였으며, 실험 후 생체중(생중량) 무게 측정으로 CO2가 대조군 대비 얼마나 더 생산에 효과적인지 관측 및 획득 데이터를 토대로, DME 삼중열병합 시스템의 적용은 작물의 생산성과 경제성 향상에 효과가 있는 것으로 확인하였음
- 추후, CO2 공급 대응 생산량 증가를 정확히 측정하기 위해서는 본사업 일정상 제한되었던 과채류를 대상으로 반복 실험을 진행할 계획임

1차 R&D 코디네이터 온라인 상담보고서				2차 R&D 코디네이터 활동보고서			
과제번호	42108-04	과제명	지용온실용 열원전지 개발을 위한 CO2 전환기 기술개발	과제명	지용온실용 열원전지 개발을 위한 CO2 전환기 기술개발	수행일시	23/10/25 (08:00) ~ 23/10/25 (09:30)
지원기업	㈜바이오프랜즈	코디네이터성명	이주영	지원기업	㈜바이오프랜즈	코디네이터성명	이주영
요청일자	2023.10.04	상담 완료일자	2023.10.04	구분	자문 내용	비고	
구분	신규사업	■ 연구개발지원 (사업지원금 + 기타기술인출)		구분	자문 내용	비고	
상담내용	<p>㈜바이오프랜즈는 현재 스마트팜 다목적시설을 진행하고 있으며, 에서 개발되고 있는 CO2 공급장치에 관한 스마트팜에 직접 연계된 작물생산성에 대한 구체적인 결과도 도출하기 위한 방안에 대해 전문 자문을 받고자 함</p> <p>주: 바이오프랜즈는 다목적 시설에서 상시대와 함께 CO2공급에 대한 스마트팜 수준의 생산량 증가에 대한 실험을 수행하고 있으나 여기서 결과와 현재 구체적인 실험 스마트팜 시설에서 생산량에 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단되고 이를 데이터 현실화하기 위한 도움이 절실함</p>			구분	자문 내용	비고	
예로서항	<p>주: 바이오프랜즈는 다목적 시설에서 상시대와 함께 CO2공급에 대한 스마트팜 수준의 생산량 증가에 대한 실험을 수행하고 있으나 여기서 결과와 현재 구체적인 실험 스마트팜 시설에서 생산량에 영향을 미칠 수 있는 것으로 판단되고 이를 데이터 현실화하기 위한 도움이 절실함</p>			예로서항	<p>현재 다목적시설을 수행중 고조, 현재 현실에서 수집된 CO2 데이터를 바탕으로 생산량의 증대보다는 시설을 운영할 때 발생하는 CO2에 대한 구체적인 실험 결과도 도출되어 있다고 하는 상황임. 이에 대해서 구체적인 실험 결과도 CO2 공급장치에 대해서 스마트팜에서 직접적인 생산량 증대를 확인할 수 있는 실험방법 인지에 대한 자문을 요청함</p> <p>단, 현재 수행중 데이터들을 보면 현재의 수질별 데이터는 생산량 증감을 증명할 수 있는 직접적인 데이터가 아닌 것으로 보이며, CO2 데이터 수집 뿐만 아니라 생산량 계측을 위한 데이터도 포함되어 있어야 함. 또한 현재 현장에서 설치되어 있는 CO2 공급장치에 대해 시료를 통해 확인되었고, 일반적으로 스마트팜에서 공급되는 CO2 공급장치에 대한 현재 실험을 하는 CO2 센서의 위치등을 자문을 통해 알려주고, 현재 상태로는 생체류 지 계측이 어려운 상황이라고 이야기를 들었지만, 생산량 증대를 위해서는 생체계측은 필수적인 수 밖에 없을 것으로 보임</p> <p>또한 현재 코디네이터가 보유하고 있는 CO2 잘 생체류 인자가 있는지, 우선 확인이 필요하고, 그 사례를 향후 영입을 계획함</p>		
답변내용	<p>주: 바이오프랜즈가 요청하는 실험실 스마트팜에서 수행해서 주는 데이터수준을 검토하고, 실험실 스마트팜에 데이터에 한계와 스마트팜에서 필요한 데이터 항목에 대해서 시문함, 우선 피자문 보고하고 싶은 CO2 농도에 대한 데이터는 400ppm 센터인출을 포함한 값 입력하는 방식이며, 이것을 통해서 스마트팜에서 실험할 것으로 판단됨. 실제 CO2농도도 호환을 보기 위해서는 실온 값 설정, 식물생장으로 설정하기에 대한 구체적인 대응책과 센서이고, 이를 통해 CO2 공급장치에 대한 데이터도 필요할 것으로 보임. 이에 대한 대조군 실험에 대한 실험계획을 지원하고, 우선 2차 현장자문을 진행할 예정임</p>			항우 일정 및 계획	10월 31일 예정임		
위와 같이 자문이 수행되었음을 확인합니다.				위와 같이 자문이 수행되었음을 확인합니다.			
2023년 10월 04 일				2023년 10월 25 일			
R&D 코디네이터 : 이주영				R&D 코디네이터 : 이주영 이영			

3차 R&D 코디네이터 활동보고서				4차 R&D 코디네이터 활동보고서				5차 R&D 코디네이터 활동보고서			
과제명	지용온실용 열원전지 개발을 위한 CO2 전환기 기술개발	수행일시	23/10/25 ~ 23/10/25	과제명	지용온실용 열원전지 개발을 위한 CO2 전환기 기술개발	수행일시	23/11/10 ~ 23/11/10	과제명	지용온실용 열원전지 개발을 위한 CO2 전환기 기술개발	수행일시	23/11/17 ~ 23/11/17
지원기업	㈜바이오프랜즈	코디네이터성명	이주영	지원기업	㈜바이오프랜즈	코디네이터성명	이주영	지원기업	㈜바이오프랜즈	코디네이터성명	이주영
구분	자문 내용	비고		구분	자문 내용	비고		구분	자문 내용	비고	
상담내용	<p>현재 수행중에 있는 다목적 시설에 상수스마트팜 확산 방지에 관한 CO2 실험결과와 CO2 실험 데이터에 대해 실험한 결과를 보고 현재 데이터상에서 생산량 증가에 대한 구체적인 분석과 경향에 보이는 것인지에 대한 구체적인 결과도 도출할 수 있도록 지원함</p>			상담내용	<p>현재 수행중에 있는 다목적 시설에 상수스마트팜 확산 방지에 관한 CO2 실험결과와 CO2 실험 데이터에 대해 실험한 결과를 보고 현재 데이터상에서 생산량 증가에 대한 구체적인 분석과 경향에 보이는 것인지에 대한 구체적인 결과도 도출할 수 있도록 지원함</p>			상담내용	<p>현재 수행중에 있는 다목적 시설에 상수스마트팜 확산 방지에 관한 CO2 실험결과와 CO2 실험 데이터에 대해 실험한 결과를 보고 현재 데이터상에서 생산량 증가에 대한 구체적인 분석과 경향에 보이는 것인지에 대한 구체적인 결과도 도출할 수 있도록 지원함</p>		
예로서항	<p>우선 사전상에 보이는 실험 Setup 부분에 관해서는 일부 실험장치가 우리가 준비 할 수 있는 실험장치는 다소 상당한 부분이 있음. 다소 불완전하지만 가능 한 Setup이 되어 있기 때문에 일부에 대한 실험방법을 제시하였음. 또한 실험 데이터의 경우 단순한 CO2 공급량만 측정이 있지 작물에 대한 영향을 보는 부분에 대한 연구결과도 다소 부족한 것으로 보이며 이에 대한 구체적인 데이터 개발을 제시하였음</p>			예로서항	<p>일반적으로 현장에서 사용하는 이산화탄소 공급량 큰 분자로 700~1000ppm을 사용하며, 비용은 10g 당 300~400원인 정도의 가격으로 공급되고 있음. 시설에 적용된 탄산가스 적정농도는 업체와 같이, 오이, 딸기, 가지, 토마토 등은 700~1000ppm, 멜론과 딸기는 500~1000ppm 정도로 협의해서 사용하고 있음. 일반적으로 통제수에서 300ppm에서 이산화탄소 농도를 1000ppm으로 증가시키면 상대 수확률이 약 35% 증가하는 것은 KIST 연구결과도 보유하고 있음</p>			예로서항	<p>CO2 공급 대응 생산량 증가를 측정하기 위해서는 일반적으로 과채류 대상으로 실험을 해야하는데 본사에서 현재 CO2 대응 실험을 위해 판매용 대상으로 실험을 대안으로 제안하는 것을 고려하며, 생체류 측정용 CO2(200) 대조군 대비 얼마나 더 생산에 미치는지 등 우선 관측해야 함. 추후 반복실험을 통해 생산량이 얼마나 증가할 수 있는지 장기적으로 나타낼 수 있어야 함</p>		
항우 일정 및 계획	11월 10일 예정임			항우 일정 및 계획	11월 17일 예정임			항우 일정 및 계획	11월 17일 예정임		
위와 같이 자문이 수행되었음을 확인합니다.				위와 같이 자문이 수행되었음을 확인합니다.				위와 같이 자문이 수행되었음을 확인합니다.			
2023년 10월 31 일				2023년 11월 10 일				2023년 11월 17 일			
지원기업 연구책임자(책임자) 후임자 : 표 순 신				지원기업 연구책임자(책임자) 후임자 : 표 순 신				지원기업 연구책임자(책임자) 후임자 : 표 순 신			
R&D 코디네이터 : 이주영 이영				R&D 코디네이터 : 이주영 이영				R&D 코디네이터 : 이주영 이영			

[R&D 전문 코디네이터를 통한 DME 삼중열병합시스템 생산성, 경제성 평가]

○ 공인기관(KTL) DME-H2 개질 시스템 평가 진행

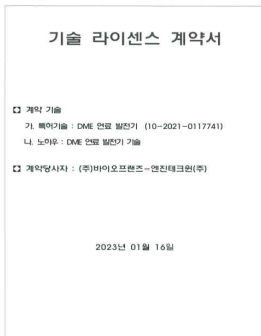
- 1단계 2차년도 (2022년)에 이어 정량적 성과 목표 달성을 위해 DME-H2 개질기의 수소생산량, PSA의 수소생산 순도를 공인인증기관인 한국산업기술시험원(KTL)의 입회하여 평가하였으며, 수소생산량은 PSA 후단에 설치된 질량유량계(MFC) 지시값을 확인하여 평가하였고, 수소생산순도를 분석 장비인 Gas Chromatography의 검출기 TCD를 이용하여 고순도 수소(99.999%)의 분석 결과와 비교하였음
- 평가 결과, 수소생산량 5Nm³/hr의 결과를 나타냈으며, 수소생산 순도는 목표치였던 99.95%보다 2% 낮은 97.47%의 결과치를 얻었음



[DME-H2 개질 시스템 공인시험성적서]

○ 기술이전 또는 매출을 위한 국내외 판매활동

- (주)바이오프랜즈가 개발한 DME 삼중열병합시스템 기술을 통해 2023.01.16.부 기술 라이선스 계약 체결을 완료하였으며, 본 기술을 통한 양산화로 제품 판매 이력 보유(약 2억원 매출 발생)

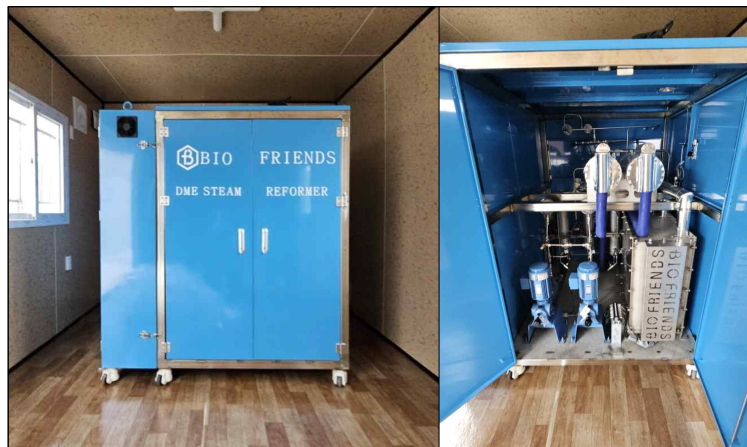


[기술 라이선스 계약서]



[DME 삼중열병합시스템 제품]

- (주)바이오프랜즈가 최초 개발한 DME-H2 개질기를 양산화 하여 국내 판매 진행



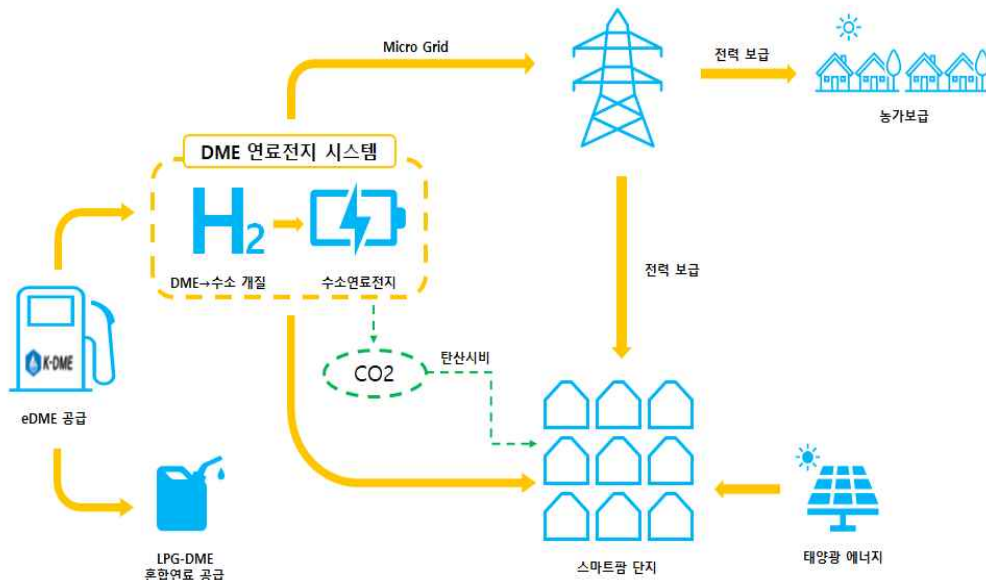
[DME-H2 개질기 양산화 제품 (20Nm³/hr)]

- 당사는 DME 수소연료전지 및 삼중열병합시스템을 과제 종료 후에도 지속적으로 농가에 적용하기 위해, 보은 영농조합과의 스마트팜 실증화 사업을 위한 기술 교류와 스마트팜 신축 및 탄소중립 에너지 DME의 농업용 연료 적용 사업화 등 상호 협력 MOU를 체결하였음 ('23.09)



[DME 농업용 연료적용 사업화 MOU 체결식]

- 또한, 당사는 개발한 DME 수소연료전지 및 삼중열병합시스템 실증을 통하여 얻은 결과를 기반으로 다가오는 미래에 적용할 예정임
- CCU 기술을 통해 제조된 eDME를 개질하여 생산된 청정수소를 연료전지의 연료로 사용하여 MW급 연료발전단지를 구성할 것이며 전력의 사용자가 생산도 겸하는 것뿐 아니라 사용 후 남은 전력을 다른 곳에도 사용할 수 있도록 특정 소규모 전력 공동체를 결성하여 전력의 자급자족을 실현하고자 하며, 탄소중립 연료인 DME를 보급하여 수소 연료단지 또는 DME 분산발전 사업으로 확대하여 농업 분야에 새로운 청정 탄소중립 연료를 보급하여 미래에 기후 위기에 따른 에너지 문제와 식량문제를 동시에 해결하는 농가 중심의 연료로 사업 확장을 하고자 함



[바이오프랜즈 MW급 스마트팜 예상도]

나. 위탁연구개발기관 : 울산대학교 산학협력단

○ 발전기의 성능평가 수행

(1) 발전기 제어기 교체 및 발전기 재배치



(2) 컨테이너형 스마트팜 연결 시 발전기의 성능평가 수행

- 배출가스 시험, 연료 소모율 시험 데이터 측정

Certificate of Test								
수요처 (CUSTOMER) :		울산대학교						
발전기 세트 모델 :		EGD40ME		성격서 발행번호 :		EGW5272-01		
연진형식 (Engine Model) :	D44F (DME엔진)		절연등급 (Insulation Class) :	H 품				
연진출력 (Engine Power) :	-		주파수 (Frequency) :	60 Hz				
연진번호 (Engine No.) :	D44FF J590442		회전수 (Revolution) :	1,800 rpm				
동계번호 (Generator No.) :	BK6-42		역률 (Power Factor) :	0.8				
정격 출력 (Prime) :	40KW		전압/극수 (V/ Max. Amp.) :	380V / 76A				
Test Date :	2023년 07월 20일							
◆ 전압, 주파수 변동율 (VOLTAGE, FREQUENCY REGULATION)								
부하	역률 (PF)	전압 (V)	전압변동율 (%) (VOLTAGE REGULATION)	주파수 (Hz)	주파수변동율 (%) (FREQUENCY REGULATION)	전압 조정 범위 (V) (VOLTAGE ADJUST RANGE)		
무부하 (NO LOAD)	0	380	0.15%	60	0.25%	340~420V		
정격부하 (FULL LOAD)	1	380						
◆ 부하 특성 시험 (LOAD CHARACTERISTIC TEST)								
부하 (%)	시간 (분)	출력 (kW)	전압 (V)	전류 (A)	주파수 (Hz)	냉각수 온도 (°C)	연료소비율 (gpm)	
0%	10	0	380	0	1.00	60	5.0	
25%	10	10	380	15	1.00	60	5.5	
50%	10	20	381	30	1.00	60	6.1	
75%	10	30	381	46	1.00	60	6.7	
100%	10	39	382	59	1.00	60	8.2	
◆ 배출 가스 시험 (EMISSION TEST)								
부하 (%)	시간 (분)	CO (ppm)	HC (ppm)	NOx (ppm)	T _{amb} (°C)	O ₂ (%)	NO ₂ (ppm)	Sample No
0%	5	3	15	104	167	2.68	69	44
25%	5	4	19	186	200	4.30	68	118
50%	5	5	5	300	267	7.89	124	176
75%	5	7	0	457	410	11.78	385	72
100%	5	3	88	74	575	16.57	74	0
일자 (Date) :	2023. 7. 20		시험장 :	값 북 빌		승인 :	김재진 대표이사	
ENGINE TECHWIN CO., LTD.								

- 산업기술평가를 통한 연료소모율 공인인증시험 수행

기술지원신청서(일반)

접수번호	접수일	원래예약일	실부차	기술책임자
			(인)	(인)

시험신청서
 KLSAS
 일반
 * 본 신청서의 접수일은 접수일이며 접수일입니다.

신청서
 회사명 : 울산대학교산학협력단 | 사업장명 : 610-82-10640 | 대표자 : 이 재 신
 주소 : 울산광역시 남구 대학로 839 무가동

기재정보
 용도 : 품질관리 자체검교 제품개발(제품명 :)
 고객물류관리기재 생산물류관리기재 기타()

발달정보
 발달방법 : 발문출 우편 발송 온라인 (종류(사) : 발문) 발문

제조사
 회사명 : 울산대학교산학협력단 | 사업장명 : 610-82-10640 | 대표자 : 이 재 신
 발급 주소 : 울산광역시 남구 대학로 839 무가동 | E-mail : jockdupus3@naver.com

신청인 정보
 부서명 : 내연구팀연구원 | 연락처 : 010-4508-1643 | FAX :
 신청인 : 임 옥 덕 | 휴대전화 : 010-4508-1643 | E-mail : jockdupus3@naver.com

시표정보
 발문출 | 택전출 | KTL 표기

기 재 : ()
 (신청서) * KLSAS 자동 분야(에너지, 물리실험장치) 발문 출하는 경우 시표용 기재와 주기가 가능합니다.
 (사유 :)

No	품 명	모델명	정격/대용량	시험 항목(1종)	수량	수요부
1	DME 발전기	40kW		출력 성능	1	

* 상기 기재사항이 부족한 경우 발지를 사용하여 주시기 바랍니다.
 * 표시사항
 - 시험용 제조사명 : 엔진테크윈(주)
 - 시험용 제조사 주소 : 경기도 화성시 남양읍 현대거리로 658-7

신청된 규격 또는 표준에 대한 적합성 진술 및 검사결과 규격을 확인하였으며 이에 동의합니다.
 2023년 06월 21일
 신청인 임 옥 덕
 한국산업기술시험원 귀하


* 유의사항
 - 시험용(가) 및 시험용(가)의 시험규격은 의무적이며 확인하여 제시된 범위 및 시험용 규격으로 시험이 진행됩니다.
 - 신청서 및 기재정보의 오류, 누락, 불일치 등은, 신청서 접수 후 5일 이내 KTL에 문의하여 수정을 하여 주시기 바랍니다.
 - 신청서 작성 시 유의사항 : 신청서 기재정보의 정확성을 책임지고 기재하여야 합니다.
 - 시험용(가) 상의 불량 등 발생 시, 신청서 기재정보의 정확성을 책임지고 기재하여야 합니다.
 - 발문출서 요구 시 신청서 기재정보에 "회사명" 과 "주소" 를 명문으로 기재바랍니다.

FP116-01-09


시험성적서 (TEST REPORT)

한국산업기술시험원 Korea Test & Research Laboratory	성적서 번호 : 23-039009-01-1 Report No. 페이지 (1 / 1) (총 5) Test of Error	한국산업기술시험원
	1. 의뢰자 (Client) 기 명 (Name) : 울산대학교 산학협력단 주 소 (Address) : 울산광역시 남구 대학로 839 무가동 계약일자 (Date of Receipt) : 2023. 06. 22	
2. 시험용(가)의 용도 (Use of Report) : 자체보고용		
3. 시험용(가)명/용량/시표명 (Test Sample) 제 회사 (Manufacturer) : ENGINE TECHWIN Co. Ltd. 모델명 (Model Name) : EGD40ME 제조번호 (Serial Number) : ETW20001 기 재 (Remarks) : -		
4. 시험일자 (Date of Test) : 2023년 07월 21일 ~ 2023년 07월 21일		
5. 시험장소 (Location of Test) : <input type="checkbox"/> KTL 공인시험실 <input checked="" type="checkbox"/> 현장시험 (주소 : 경기도 화성시 남양읍 현대거리로 5) 6. 시험규격/방법 (Test Standard/Method) : 제 회사 규격 및 시험방법		
7. 시험결과 (Test Results) : 후원결과보고		
* 유의사항 : 본 성적서는 시험용(가)에 대한 시험결과를 나타내며, 제품 및 기타정보에 대한 참고용 보고서로 발행된 바입니다. 본 성적서의 유효성은 신청서 기재정보의 정확성에 기반하며, 신청서 기재정보의 불일치로 인해 불합격 판정을 받을 수 있습니다. * 본 성적서의 유효성은 신청서 기재정보의 정확성에 기반하며, 신청서 기재정보의 불일치로 인해 불합격 판정을 받을 수 있습니다. * 본 성적서의 유효성은 신청서 기재정보의 정확성에 기반하며, 신청서 기재정보의 불일치로 인해 불합격 판정을 받을 수 있습니다.		
승인 (Authorized) 성 명 (Name) : 이주열	승인 (Authorized) 성 명 (Name) : 김명석	기술책임자 (Technical Manager) 성 명 (Name) : 김명석
한국산업기술시험원		
한국산업기술시험원 (주) 서울특별시 강남구 테헤란로 1223 Representative: 김명석 Assistant: 김명석 KTEL TEL: 011-450-2549 FAX: 011-450-2511		

FP116-01-09


 한국산업기술시험원
 Korea Testing Laboratory

상세이 번호: 22-026909-01-1
 Report No.
 페이지 (2) / (총 5)
 Page of Pages



시험 결과 (Test Results)

1. 시험 개요

이 시험결과는 의뢰자가 제시한 DME발전기 출력시험에 대하여 한국산업기술시험원에서 수행한 시험 결과임

2. 시험 제품

제품명	DME발전기
모델명	EG35DME
명격	40 kW, 380 V, 76 A, 60 Hz

3. 시험 기준 및 방법


의뢰자가 제시한 시험방법으로 아래와 같다.

- DME발전기를 380 V 50 kW LOAD BANK에 연결한다.
- 발전기를 무부하로 동작시킨 후 LOAD BANK의 부하를 조절하여 동작한다.
- LOAD BANK의 부하를 상승시켜 발전기의 출력을 확인한다.
- 발전기 정격출력의 25 %, 50 %, 75 %, 95 %에서 각 5분간 운전하여 측정한다.


4. 측정장비

No.	장비명	모델명	제조사	교정일자
1	POWER METER	CW240	YOKOGAWA	2022.12.28

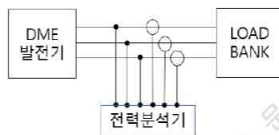
FP104-06-00


 한국산업기술시험원
 Korea Testing Laboratory

상세이 번호: 22-026909-01-1
 Report No.
 페이지 (3) / (총 5)
 Page of Pages



5. 시험구성도



<발전기 및 출력전력 측정구성도>

6. 시험 결과

발전량	전압 (V)	전류 (A)	전력 (kW)
25 %	379.74	16.40	10.80
50 %	379.70	30.98	20.40
75 %	379.92	45.74	30.16
95 %	380.08	57.22	37.70

1) 의뢰자의 요청으로 95 %까지 시험을 진행함

FP104-06-00


 한국산업기술시험원
 Korea Testing Laboratory

상세이 번호: 22-026909-01-1
 Report No.
 페이지 (4) / (총 5)
 Page of Pages



7. 사진(1/2)



<DME발전기 사진>



<DME발전기 명판>

FP104-06-00


 한국산업기술시험원
 Korea Testing Laboratory

상세이 번호: 22-026909-01-1
 Report No.
 페이지 (5) / (총 5)
 Page of Pages



7. 사진(2/2)



<발전기 시험용 부하장비(LOAD BANK)>



<발전기 시험 사진>

FP104-06-00

다. 공동연구개발기관 : 스마트그린에너지㈜

○ 대용량 바이오매스 활용 대규모 스마트팜 적용 사업성 분석

(1) 연구배경 및 필요성

- 화석연료를 중심으로 발전해 왔던 현재의 경제 시대는 대체에너지로의 발 빠른 전환을 요구하고 있으며 환경문제에 대한 사회적, 경제적 중요성은 더욱 부각되고 있음
- 특히 농지면적의 감소, 농촌인구 감소와 고령화, 기후변화와 온실가스저감에 적극적으로 대응하기 위한 청정에너지원을 활용한 그린뉴딜사업중 하나인 넷제로(Net Zero) 사업의 일환으로 스마트팜 사업 추진 및 이를 지원하는 적절한 에너지원 보급안이 마련되어야 함
- 스마트팜은 환경을 인공적으로 관리할 수 있고, 지구온난화와 기후변화로 예측하기 어려운 농작물재배환경을 가장 효과적으로 제어하면서 최소의 면적에서 최대의 효과를 거둘수 있을 것으로 기대됨
- 농작물의 33%이상이 에너지를 통해서 얻어지는 것을 감안하면, 청정에너지원을 기반으로 한 기술개발과 경제성을 갖추는 첨단 농업기술개발과 아울러 국가 에너지 기본계획에 부합하는 농업부문 대체 에너지 보급 확대 방안 확립이 필요함
- 신재생에너지 활용 및 스마트 농업 구조 확립으로 농업분야 온실 가스 감축 가능하며 한국형 스마트팜 확산은 정부가 국정 핵심과제의 하나로 추진하는 주요사업으로 스마트팜 기반 에너지 효율성 연구 추진이 필요함
- 2000년 이후 급격한 유가급등과 화석연료의 매장량의 한계, 온실가스에 의한 지구 온난화 등의 문제로 인하여, 전 세계적으로 신재생 에너지를 포함한 에너지 다변화 정책과 연구가 진행되고 있음
- 특히 전력생산 목적으로 개발되는 풍력, 태양광 발전에 비해 바이오매스는 석유, 석탄 등이 사용되는 발전 분야는 물론 현재 사용되는 대부분의 에너지 전환 공정에 직접 이용될 수 있을 뿐만 아니라, 바이오매스로부터의 연료 또는 전력생산은 국제 환경협약에 따라 이산화탄소 배출 기여가 없는 것으로 간주되고 있어, 바이오매스의 이용이 더욱 확대되고 있음
- 동식물로 대표되는 바이오매스로부터 생산 가능한 바이오에너지는 열, 전기뿐만 아니라 석유가 직접적으로 소비되는 수송용 연료도 생산할 수 있다는 장점이 있어 고유가에 대한 대처 효과가 높다고 할 수 있음
- 특히, 농촌을 중심으로 하는 스마트팜의 보급과 맞물려서 향후 에너지자립과 제로에너지기술이 접목되는 수직농장, 식물공장 사업에 경제성을 확보할 수 있는 신재생에너지원으로써 새로운 에너지원 제공, ICT기반의 첨단농업기술과 접목이 절대적으로 필요한 시기가 도래하고 있음
- 이미 미국, 캐나다, EU(스웨덴, 핀란드, 네덜란드 등) 등은 바이오매스의 에너지화 기술개발에 많은 연구비를 투입하고 있으며, 국내에서도 신재생에너지 보급을 목표를 수립하고 이를 달성하기 위한 제반 지원 및 규제 등이 이루어지고 있어 관련 산업이 빠르게 성장하고 있음
- 이에 본 연구에서는 스마트팜 에너지 공급을 위한 대체에너지로서 바이오매스를 활용한 바이오매스 에너지의 활용가능성을 제시하기 위해 관련 시장현황에 대한 분석 및 사업화 계획을 제시하고자 함

(2) 연구목적 및 방법

- 본 연구보고서는 스마트팜 에너지 공급을 위해 바이오매스 에너지 변환기술을 활용한 바이오매스 에너지 전환 기술과 시장 분석 및 사업화 계획을 제시하는 것을 목표로 하며, 연구내용은 크게 네가지 내용으로 구성됨
- 2장에서는 바이오매스 관련 국내외 시장 현황 및 기술동향 분석 내용을 제시함
- 2-1~2-2에서는 바이오매스 에너지 및 바이오매스 주요 기술에 대해 제시함
- 2-3~2-4에서는 바이오매스 에너지 변환 기술 및 국내외 바이오매스 기술개발 현황에 대해 제시함
- 2-5~2-6에서는 국내외 바이오매스 시장 현황 및 주요 바이오매스 기업 동향에 대해서 기술함

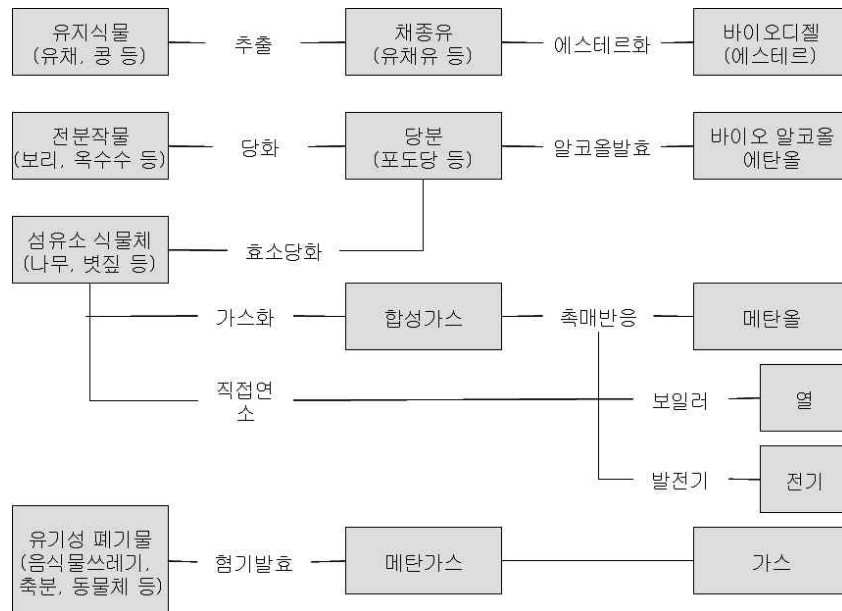
- 3장에서는 스마트팜 에너지 활용 동향에 대해서 분석함
- 3-1~3-2는 농업부문 스마트팜 동향 및 농업부문 에너지 사용 현황에 대해 제시함.

○ 바이오매스 관련 국내외 기술 현황 및 시장 동향

(2-1) 바이오매스 에너지(바이오매스 개요)

가. 바이오매스 정의

- 바이오매스(biomass)란 어느 시점에 임의의 공간 내에 존재하는 특정한 생물군의 양을 중량이나 에너지 양으로 나타낸 현상. 생물체량 또는 생물량이라고도 함
- 건조중량을 사용하는 경우가 많지만, 습중량이나 때로는 생물체의 주요한 구성성분인 탄소나 질소량으로 나타내기도 함. 현존량과 같은 뜻으로 사용하는 경우도 많으며, 식물에서는 특히 그런 경향이 강함
- 생물량은 생물생산에 따라 증가하는데 군집의 호흡량·고사탈락량·피식량 등을 공제한 것이 축적량이 됨, 생태계에 있어서는 영양단계가 낮은 생물군의 생물량이 많고, 이것을 먹는 고차의 생물군의 생물량은 적음
- 바이오매스의 전환과정은 아래 그림에 나타나 있음



[바이오매스의 전환과정]

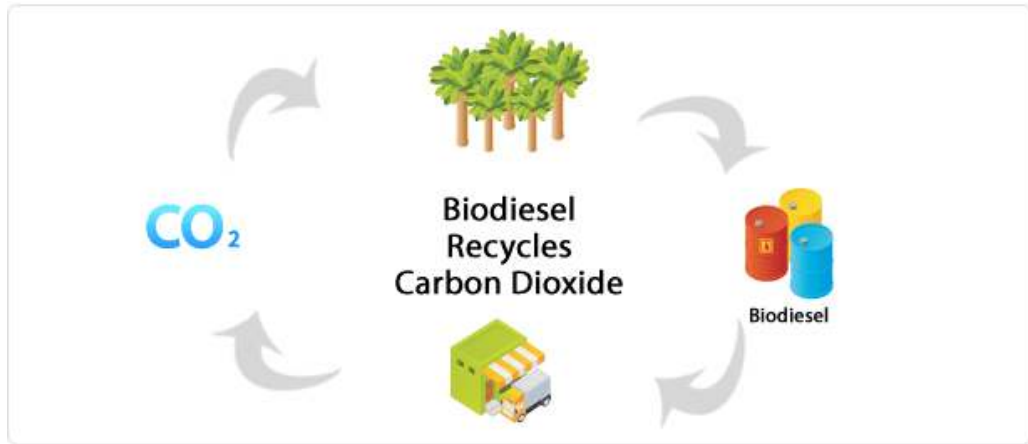
- 바이오매스는 직접적인 연소나 가스화, 열분해 등의 열화학적 변환과 혐기성 분해 또는 발효 등의 미생물과 박테리아를 이용한 생화학적 변환, 직접적인 기름 추출 방식 등을 통해 가공됨
- 직접 연소를 통해서는 나무찌꺼기나 농작물 찌꺼기를 태워서 직접 열을 얻거나 연소열로 증기를 만들어서 난방열과 전기에너지를 얻음. 또한 산소가 소량 공급되는 상태에서 가열하면 중질의 가스가 만들어지고 이를 정화한 후 열병합 발전기를 통해 난방열과 전기를 생산하는 데 이용할 수 있음
- 열분해는 공기를 완전히 차단한 상태에서 섭씨 500 정도의 고온으로 가열하여 바이오기름, 가스, 목탄 등을 만드는 데 가스와 기름은 전기와 열을 생산하는 데에, 목탄은 연료로 이용됨
- 특히 전력생산 목적으로 개발되는 풍력, 태양광 발전에 비해 바이오매스는 석유, 석탄 등이 사용되는 발전 분야는 물론 현재 사용되는 대부분의 에너지 전환 공정에 직접 이용될 수 있을 뿐만 아니라, 바이오매스로부터의 연료 또는 전력생산은 국제 환경협약에 따라 이산화탄소 배출 기여가 없는 것 (neutral)으로 간주되고 있어, 바이오매스의 이용이 더욱 확대되고 있음
- 이미 미국, 캐나다, E U(스웨덴, 핀란드, 네덜란드 등) 등은 바이오매스의 에너지화 기술개발에 많은 연구비를 투입하고 있으며, 국내에서도 신재생에너지 보급율 11% 목표를 수립하고 이를 달성하기 위한 제반 지원 및 규제 등이 이루어지고 있어 관련 산업이 빠르게 성장하고 있음

- 하지만 바이오매스의 특성상 화석연료에 비해 이용에 많은 제한이 따른다. 석탄과 달리 바이오매스는 대부분 높은 함수율과 미분화가 힘들기 때문에, 이를 원활하게 이용하기 위해서는 가스상이나 액체상 연료로의 전환공정이 필수적임
- 바이오매스의 에너지 전환공정은 크게 열화학적 공정과 생물학적 공정으로 나눌 수 있으며, 다양한 에너지로의 전환이 가능한 열화학적 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상황임
- 바이오매스의 원천이 되는 지구상의 생물량에 대한 관심은 자원문제가 부각되면서 높아지게 되었으며, 많은 연구자가 생물량의 추정을 시도하고 있으나 그 추정 값에는 많은 차이가 있음
- 현재 비교적 널리 채용되고 있는 것은 1973년에 R. H. 휘타카가 추정한 값임. 이 값에 의하면 단위면적당 생물량이 가장 큰 것은 삼림이며, 그 중에서도 열대다우림은 평균 약 $45\text{kg}/\text{m}^2$ ($6\sim 80\text{kg}/\text{m}^2$)로 가장 큰 값을 나타내고 있음. 그 다음에 열대계절림 · 온대상록수림의 순임
- 초본이나 수종의 플랑크톤 군집 등은 생산력이 높지만 생산한 유기물을 유지 · 축적하는 수단이 없기 때문에 생물량은 적음
- 지구 전체로서의 생물량도 열대다우림이 $765\times 10^9\text{t}$ 로 가장 많고, 지구 전체 생물량의 41.6%를 차지함. 그 다음에 열대계절림 · 북방침엽수림 · 온대낙엽수림의 순이다. 놀라운 것은 점유면적이 지구의 10%전후에 불과한 삼림이 지구전체 생물량의 90%이상을 차지한다는 사실임
- 그러나 동남아시아 등지의 대규모적인 삼림벌채나 개발 등으로 지구상의 생물량은 해마다 달라지고 있으며, 이와 관련한 지구규모의 환경변화가 지적되고 있음

나. 바이오매스 에너지

- 2000년 이후 급격한 유가급등과 화석연료의 매장량의 한계, 온실가스에 의한 지구 온난화 등의 문제로 인하여, 전 세계적으로 신재생 에너지를 포함한 에너지 다변화 정책과 연구가 진행되고 있음
- 특히 전력생산 목적으로 개발되는 풍력, 태양광 발전에 비해 바이오매스는 석유, 석탄 등이 사용되는 발전 분야는 물론 현재 사용되는 대부분의 에너지 전환 공정에 직접 이용될 수 있을 뿐만 아니라, 바이오매스로부터의 연료 또는 전력생산은 국제 환경협약에 따라 이산화탄소 배출 기여가 없는 것 (neutral)으로 간주되고 있어, 바이오매스의 이용이 더욱 확대되고 있음
- 동식물로 대표되는 바이오매스로부터 생산 가능한 바이오에너지는 열, 전기뿐만 아니라 석유가 직접적으로 소비되는 수송용 연료도 생산할 수 있다는 장점이 있어 고유가에 대한 대처 효과가 높다고 할 수 있음
- 바이오에너지를 사용함에 의해 발생한 이산화탄소는 바이오에너지 생산 원료인 식물이 자라면서 광합성에 의해 흡수하므로 대기중으로 이산화탄소 배출 효과는 크지 않아 국제사회에서는 지구 온난화 대처에 도움이 되는 에너지로 인정하고 있음
- 바이오에너지 사용에 의한 대기중 이산화탄소 양 증가 효과는 다른 신재생에너지원에 비해 오히려 낮은 것으로 분석되었음. 또한 바이오매스식물은 계속 자라거나 생성되므로 석유나 석탄과 같이 한번 사용하면 없어지는 화석에너지와는 달리 재생성을 가져 자원의 고갈문제가 없음. 이외에도 현재 국내외에서 바이오에너지 생산 원료로 사용되는 바이오매스는 농업작물(예:유채, 옥수수, 콩 등)이거나 농임산 부산물(간벌목, 볏짚, 왕겨 등) 또는 유기성 폐기물(음식쓰레기, 축산 분뇨)등이어서 바이오에너지는 농업과 매우 밀접한 관계인 취약점이 있음
- 이미 미국, 캐나다, E U(스웨덴, 핀란드, 네덜란드 등) 등은 바이오매스의 에너지화 기술개발에 많은 연구비를 투입하고 있으며, 국내에서도 신재생에너지 보급율 11% 목표를 수립하고 이를 달성하기 위한 제반 지원 및 규제 등이 이루어지고 있어 관련 산업이 빠르게 성장하고 있음
- 하지만 바이오매스의 특성상 화석연료에 비해 이용에 많은 제한이 따름. 석탄과 달리 바이오매스는 대부분 높은 함수율과 미분화가 힘들기 때문에, 이를 원활하게 이용하기 위해서는 가스상이나 액체상 연료로의 전환공정이 필수적임

- 바이오매스의 에너지 전환공정은 크게 열화학적 공정과 생물학적 공정으로 나눌 수 있으며, 다양한 에너지로의 전환이 가능한 열화학적 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상황임
- 하지만 환경오염에 따른 사회 간접비용 증가 및 에너지 안보 등을 고려할 때 바이오에너지의 보급 필요성이 부각되고 이를 충분히 인식한 미국, EU, 일본 등 선진국에서는 바이오에너지 보급을 늘리기 위해 적극적인 지원 정책을 마련 시행하고 있음
- 그 결과 전 세계적으로 바이오에너지 보급은 매우 활성화되고 있으며 앞으로 지속적으로 증가할 전망임



이산화탄소의 순환 개념도 (바이오에너지 사용에 의해 발생한 만큼의 이산화탄소가 바이오매스 성장 과정에서 광합성에 의해 대기로부터 흡수된다.)

[바이오매스 에너지 기술 개요]

다. 바이오매스 에너지 특징

(장점)

- 국내 자급이 가능하고 폐자원을 유효 활용할 수 있음
- 화석연료에 비해 공해물질의 배출이 적음
- 바이오에너지의 원료인 바이오매스는 성장성을 가지고 있어 재생성이 있음. 특히 석유나 석탄 같은 화석연료와는 다르게 원료 고갈의 문제가 없다는 점에서 지속가능한 에너지임
- 다른 에너지와는 달리 저장이 용이함
- 다른 연료의 형태로 생산이 가능하여 에너지의 활용도가 높음
- 바이오에너지의 원료인 바이오매스는 성장할 때 대기의 이산화탄소를 흡수하여 대기 중 이산화탄소 증가율이 낮고 순환형 이용이 가능함

(단점)

- 과도한 개발 시에 환경 파괴 가능성이 있음
- 바이오에너지의 원료를 얻기 위해서는 넓은 면적의 토지가 필요함
- 자원의 지역차가 큼
- 비료, 토양, 물과 에너지의 투입이 필요함
- 다양한 자원에 따른 이용 기술의 다양성과 개발의 어려움이 있음

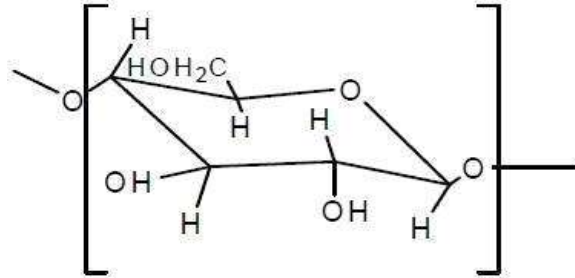
라. 바이오매스의 구성성분

- 바이오매스의 물리 화학적 특성은 향후 바이오매스의 에너지 또한 화학물질로의 이용에 있어서 매우 중요한 요소를 차지함
- 식물 바이오매스의 주성분은 거대 고분자인 다당류(Polysaccharides)와 리그닌(Lignin)이며, 이외에 저분자 유기화합물 혼합체인 추출물 성분과 회분이 소량 포함되어 있음. 다당류는 전섬유소(holocellulose)라고도 하며, 셀룰로오스와 헤미셀룰로오스로 세분될 수 있음(배윤주, 2012).
- 생물체와 부산물 등을 액체, 가스, 고체연료나 전기 열에너지 형태로 변환한 에너지를 말한다. 바이오매스는 식용여부에 따라 2가지로 분류할 수 있음.
- 사람이 식량으로 사용할 수 있는 당질계, 전분질(녹말)계, 바이오매스(사탕수수, 고구마,

옥수수, 콩 등)와 식량으로 사용할 수 없는 셀룰로스계 바이오매스(나무, 볏짚, 기타 폐기물 등)으로 분류할 수 있음

- Cellulose

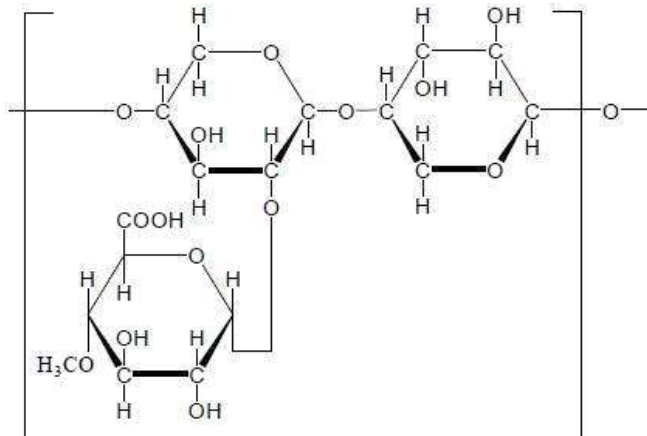
- 셀룰로오스는 식물의 세포막을 이루는 기본적인 물질로서 β-D-glucopyranose 단위분자들이 1→4 글루코시드 결합을 하여 생성되는 선상구조를 가짐
- 셀룰로오스는 그 중합도(重合度)가 10,000~15,000 이며 원소조성은 탄소가 44.2%, 수소가 6.3%, 그리고 산소가 49.5%이므로 분자식이 (C₆H₁₀O₅)_n 으로 표시되며, 분자량은 162로, 1개의 글루코오스(glucose) 잔기(殘基) 1번 탄소에 다른 글루코오스 잔기의 4번 탄소가 결합되어 이루어진 것임
- 결합을 이루는 셀룰로오스는 긴 사슬모양의 구조를 나타냄. 목재조직내의 세포막에서 셀룰로오스 분자가 집합하여 결정구조를 형성하고 있으며, 형태학적으로는 셀룰로오스가 세포막의 골격물질 역할을 함



[β-D-glucopyranose(셀룰로오스)의 분자 구조]

- Hemicellulose

- 세포막을 구성하고 있는 성분 가운데는 셀룰로오스 이외에도 여러 종류의 다당류가 존재하고 있는데, 물에는 추출되지 않으나 약알칼리에 용해되는 다당류를 통틀어 헤미셀룰로오스라고 함
- 헤미셀룰로오스는 D-xylose, D-mannose, Dgalactose등의 6탄당과 D-xylose, L-arabinose등과 같은 (C₅H₈O₄)_n의 5탄당이 서로 결합하여 만들어진 불균일 다당류로 정의되며 구성되어 있는 단당류에 따라 글루코만난(glucomanan), 자일란(xylan), 아라비갈락탄(arabigalactane)등으로 불리며, 일반적으로 셀룰로오스에 비하여 낮은 고분자도를 가짐
- 침엽수의 헤미셀룰로오스는 주로 자일란만을 내포하고 있다. 헤미셀룰로오스의 분자구조는 셀룰로오스와 유사한 것으로 수산기(水酸基)및 카르복실(carboxyl)기 등의 친수성기를 많이 가지고 있으나 중합도가 500이하로서, 작은 편이며 또 자일란에서는 셀룰로오스의 CH₂OH 부분이 수소로 되어 있음
- 셀룰로오스는 결정과 비결정의 2가지 상태로 되어 있는데 반하여 헤미셀룰로오스는 보통 비결정의 상태로만 이루어져 있음. 헤미셀룰로오스는 수산기와 카르복실기로 인하여 셀룰로오스와 함께 소수성(疏水性)의 아세틸(acetyl)기 등에 의하여 리그닌과는 소수 성인 친화력을 가지고 있다고 여겨짐



[자일란(헤미셀룰로오스)의 분자 구조]

- Lignin

- 셀룰로오스 및 헤미셀룰로오스는 다당류로 구성되어 있지만 리그닌은 페닐프로판(phenylpropane)을 기본물질로 하여 구성되어 있으며, 세부구조는 식물종마다 달라진다. 리그닌은 목본 및 초본 식물의 세포막에 주로 분포되어 있으며 보통 침엽수, 활엽수, 초본 식물의 세 등급으로 넓게 분류될 수 있음
- 침엽수 리그닌은 대체로 구아이아실리그닌(guaiacyllignin)으로 구성되어 있고, 활엽수 리그닌은 구아이아 실리그닌과 시린길리그닌(syringyllignin)의 두 가지로 구성되어 있음
- 한편 초본식물의 리그닌은 구아이아실리그닌과 시린길리그닌, 그리고 p-하이드록시 페닐리그닌(p-hydroxy phenyllignin)으로 구성되어 있음. 이러한 리그닌은 양균식물, 종자식물 및 이끼류의 세포막에서만 형성되어 있으며 세포막과 세포막을 서로 접착시켜 주거나 세포막의 강도를 높여주는 역할을 함

마. 바이오매스의 원리와 구조

- 바이오 에너지는 살아있는 생물체로부터 생겨나는 에너지를 이용하는 것으로 나무를 사용해 펄프용으로 사용하기도 하고 식물에서 기름을 추출해 액체 연료로 만드는 등 동·식물의 에너지를 이용하여 자연환경을 깨끗하게 유지할 수 있음



[바이오에너지 개요]

- 쓰레기매립지에서 발생하여 환경오염의 원인이 되기도 하는 매립지가스(LFG : Landfill Gas)를 원료로 발전 설비를 가동하고 전력을 생산하는 과정을 통하여 매립지 주변의 환경오염(메탄가스 대기방출)을 저감하고, 폐기물을 자원으로 재활용 할 수 있음
- 매립가스를 포집 보일러에서 메탄(CH₄)를 연소하여 과열 증기 생산
- 메탄(CH₄)를 보일러로 공급하여 보일러에서 연소
- 쓰레기매립지에서 발생하는 매립지가스(Landfill Gas)중 가연성 기체인 메탄(CH₄)을 포집하여 발전의 열원으로 사용함
- 과열증기로 터빈과 발전기 가동 및 전력생산보일러에서 공급되는 과열 증기로 터빈 발전기를 가동시켜 전력을 생산하고 송전 계통을 통해 이를 한전으로 공급함
- 잔열의 재사용 터빈과 발전기 가동 시 증기의 일부가 급수의 가열에 재 사용되고 나머지 폐열은 복수기를 통해 순환수 계통으로 방출 됨 이를 한전으로 공급함



[바이오에너지 원리 및 구조]

(장점)

- 첫째, 바이오매스의 탄소고정능력 때문이다. 바로 지구환경에서 이산화탄소의 균형을 파괴하지 않는다는 점 (carbon neutral)에 주목할 만함
 - 지구환경에서 지금 현재 가장 문제가 되고 있는 것이 이산화탄소 인데, 이런 이산화탄소의 균형을 깨뜨리지 않고 현재 인류생활과 더불어 산업 활동을 할 수 있다는 것은 바이오매스가 가지는 가장 큰 매력 아닐까 생각됨
 - 지구상의 이산화탄소의 균형을 깨뜨리지 않는 이유는 식물바이오매스가 가지고 있는 탄소고정능력 때문임
 - 탄소 고정능력이란, 식물체가 대기 중의 이산화탄소를 고정할 수 있는 능력을 말한다. 에너지 사용 시 발생하는 이산화탄소를 식물바이오매스가 탄소동화작용(광합성)을 통해 대기 중의 이산화탄소를 흡수하고 산소와 물을 배출함
 - 결국 연소 시 나오게 되는 이산화탄소를 바이오에너지 이용을 목적으로 조성된 식물바이오매스 자원으로 인해 다시 고정되는 것임
 - 즉, 바이오매스에너지를 생산, 사용하게 되는 경우에는 지구온난화의 원인이 되는 이산화탄소의 배출량이 증가하지 않는 결과를 가져오게 됨
- 둘째, 바이오매스는 여러 대체 에너지들 중에서 다목적으로 이용할 수 있다는 점임
 - 단지 다른 대체 에너지 들이 발전기를 돌려서 전기적인 에너지만을 만들어내는 것에 비해, 바이오매스는 여러 가지 용도로 적용 및 이용할 수 있다는 것임
 - 이는 바이오매스와 화석연료가 공통적으로 가지고 있는 탄소 때문임. 바이오매스는 공통적으로 글루코오스를 기본 단당물질로 이루어져 있음. 글루코오스는 탄소원자 6개를 가지며 알데히드기를 가지는 단당류임. 기본물질이 탄소로 이루어져 있어서 전지적인 에너지를 만들어 내는 것뿐만 아니라, 석유화학으로 만들 수 있는 화학공업의 원료로도 이용이 가능한 것임. 이론적으로는 석유화학을 이용한 모든 제품생산이 가능해 진다는 것임
- 셋째, 바이오매스는 친환경적인 청정에너지자원(clean energy)임. 즉 분해 시 부산물을 생성하지 않고, 오염원을 배출해 내지 않으므로, 친환경적이라는 것임
 - 석유화학으로 만들어진 합성 고분자 물질의 경우 지구상에서 분해되는데 적게는 수십 년, 많게는 수백 년을 넘기는 경우가 많음
 - 식물바이오매스로부터 나온 천연 고분자물질은 분해 시간이 짧아 자연으로 돌아가기가 쉬움. 또한 분해 시 자연계에 존재하는 물질로 분해되어 환경적인 피해를 일으키지 않게 되는 것임
 - 그러나, 바이오에너지가 신 재생에너지로 주목 받은 이후, 많은 기술 발전이 있었음에도 불구하고 널리 상용화되고 있지 않은 이유는 아래의 요인임

(단점)

- 첫째, 바로 낮은 효율 때문임
 - 단위 중량당 에너지를 생성해 내는 효율이 대규모 발전소에 의한 전력 등에 비해 효율이 좋지 못한 이유에서임. 즉, 바이오매스 자원으로부터 전력생산이 가능하다는 하나, 그에 비해 투입되는 바이오매스의 양이 많다는 점임
 - 많은 양의 바이오매스를 조달하기도 만만치 않다는 점 때문임. 바이오매스 자원의 경우 분포지역이 넓어 조달하기도 어려울뿐더러, 수확할 수 있는 시기가 정해져 있기 때문임
 - 또한 환경 변화에 따라 생산적인 변동이 있어 안정적인 원료의 공급이 어려움
- 둘째, 바이오매스 연료의 가격이 비싸다는 점임
 - 아직도 석유에 비하여 바이오연료의 가격이 비쌌. 석유의 가격이 높아 한숨을 쉬고 있는 사람들에게 바이오연료는 매력적이지 못한 것임
 - 바이오매스를 에너지로 사용하려면 대규모의 설비가 필요함. 대규모 설비 구축 시 많은 비용이 들어가게 되고, 그에 비해 효율이 떨어지므로 많이 소외되고 있는 것임
- 셋째, 계절에 따라 공급이 불안정하고 식량과의 경합(競合)성을 갖고 있어 수급에 한계를 지님
 - 과도한 벌채는 바이오매스 에너지의 친환경적인 측면에도 불구하고 자연생태계를 파괴할 우려가 있음

→ 하지만 무엇보다 바이오매스의 낮은 에너지 밀도와 높은 수분함량으로 인한 낮은 발열량은 에너지로서의 이용을 어렵게 하는 원인임

바. 바이오매스의 종류

- 바이오매스는 나무, 농작물, 쓰레기, 알코올연료, 쓰레기 매립지 가스 등으로 분류될 수 있으며 나무 부스러기와 목재생산 산업의 잔류물은 전기를 발전하기 위한 가장 경제적인 바이오매스 연료로 사용되고 있음. 크게 아래와 같이 구분됨
- 농경 폐기물
 - 미국에서는 매해 9,500만 톤 이상의 농경 폐기물이 발생하며, 밀짚, 옥수수 사료, 과수의 베어낸 것과 같은 농경 잔류물로 구성되며, 옥수수로만 모든 바이오매스의 종류 보다 더 많이 소비됨
 - 미국 농부들은 매해 8,000만 에이커의 땅에 옥수수를 심으며, 가능성 있는 사료로 1억 2천만 톤을 수확함. 이것은 나무 폐기물과 종이로부터 얻어지는 유용한 바이오매스의 양보다 4배 정도가 크며, 가장 큰 공급 재료의 범주에 들어감
- 산림폐기물
 - 미국에서 매해 모여지는 산림폐기물은 1억~2억 8천만 톤에 이르며, 사용하지 않는 나무와 벌목 잔류물, 불완전한 상용나무, 썩어주어야 하거나, 약하며, 타기 쉬운 나무들인 비상용 나무로 구성됨
 - 숲을 썩어주는 것은 미국의 서부 침엽수림 숲이 자연적인 건강을 회복하도록 도울 뿐 아니라, 바이오매스 전력 또는 바이오연료로 변환 될 수 있는 폐기나무를 대량 공급해 줌
- 도시의 고형 산업 폐기물
 - 2000년 미국에서 대략 1억 1,600만 톤의 도시 고형 폐기물이 발생한다. 매해 미국산업체는 약 120억 톤의 폐기물을 발생시켜, 그에 해당하는 양을 처리하거나 매립해야 함
 - 산업체나 개인 가정에서 발생하는 폐기물은 거대한 양이기 때문에 쓰레기 처리장은 점점 증가하여, 운영을 규제하는 엄격한 법으로 인하여 많은 쓰레기 처리장들이 폐쇄되고 있음
 - 이러한 폐기물을 쓰레기 처리장에 매립하는 대신에, 그중에 많은 양이 바이오연료를 만들거나 바이오전력을 발생시키는데 사용될 수 있음
- 에너지 농작물
 - 미국에서 약 1억 9천만 에이커의 땅에서 에너지 농작물을 생산하기 위하여 사용될 수 있음. 에너지 농작물은 연료용으로 특별히 개발하여 성장시키는 농작물로 잡종 포플러, 바가수, 버드나무, 스위치풀과 같은 빨리 성장하는 나무, 관목, 풀 등을 포함하며 에너지 농작물은 음식, 사료, 섬유 용도로 사용하지 않는 농경토양에서 재배 될 수 있음
 - 농부들은 강기슭을 따라 호숫가 또는 농장과 숲 주위, 습지에 에너지 농작물을 재배할 수 있으며, 이러한 습지는 야생동물 서식지를 만들며, 토양을 재생하고, 생물학적으로 다양성을 촉진함. 나무들은 10년 동안 성장이 가능하고, 그 후에 에너지 용도로 수확됨.
 - 미국 농산성은 21세기에 약 1억 에이커가 에너지 농작물 재배 용도로 유용할 것이라고 예측함. 또 에너지 농작물의 장점은 농부들에게 다양한 생산을 통하여, 변동하는 시장으로부터의 위험을 감소시켜 안정된 수입을 얻을 수 있게 함
 - 일반적인 현대적 농장은 옥수수, 콩, 우유, 또는 육류와 같이 대개 하나 또는 두 개의 주요한 품목을 생산함. 이러한 운영 방식을 통한 순수한 수입은 시장의 수요, 예기치 않은 생산비용, 날씨, 또는 다른 인자들에 따라 변동이 심한 약점을 갖고 있음. 또한 에너지 농작물은 질병과 전염병에 대한 저항이 커서 재배 비용이 상대적으로 낮음

사. 바이오매스의 종류별 이용형태

- 바이오매스는 다양한 용도만큼이나 분류 또한 다양함. 원료의 종류에 따라 ① 전분질계

자원 : 곡물, 감자류 등, ② 셀룰로오스계 자원 : 초본, 임목과 벗짚, 왕겨 등 농부산물, ③ 당질계 자원 : 사탕수수, 사탕무 등, ④ 동물단백질계 자원 : 가축분뇨, 사체, 미생물 균체 등으로 분류할 수 있음

- 용도에 따라서는 ① 에너지(바이오 에탄올, 바이오 디젤, 바이오 가스, 메탄올, 직접연소 열과 전기생산)와 ② 각종 제품 등으로 분류할 수 있음

분류	변환 후 형태	주된 용도	이용 가능 바이오매스	
에너지 이용	직접연소(합성 가스, 열분해)	장작, chip, pellet, briquet	발전·열원용 연료	나무, 목재, 폐목재, 간벌재, 제재공장 등 잔재, 농산부산물, 음식물 쓰레기, 초본류 등
	가스화	메탄	발전·열원용 연료	가축폐설물, 식품폐기물, 하수오니, 농산부산물과 잔사 등
	액체화	바이오디젤	디젤차 연료	폐식용유, 유채기름, 유지식물과 나무, 식물유, 동물성 지방 등
		에탄올	자동차연료	옥수수, 사탕수수, 사탕무, 건설발생목재, 감자, 고구마 등
	메탄올	발전·열원용 연료, 연료전지 연료	왕겨, 톱밥, 제재공장 잔재 등	
제품 이용	비료	퇴비	퇴비로 이용	가축폐설물, 식품폐기물, 하수오니
	사료	사료	가축·양어용 사료 이용	식품폐기물, 수산폐기물
	공업용 원료	프라스틱	식품접시, 농림수산물자재	식품폐기물, 옥수수, 감자녹말, 쌀
		재생목질보드	가구, 합판	간벌재, 제재공장 등 잔재
기능성 식품원재료	DHA, EPA	영양제	수산폐기물	

[바이오매스의 종류별 이용형태]

- 바이오매스는 발생지를 중심으로 보면, ① 도시계 폐기물 : 생활 쓰레기, 식품잔사, 폐식유, 하수오니, 펄프폐액, 건설폐자재 등, ② 농촌계 폐기물 : 농업 폐기물(왕겨, 짚 등), 축산폐기물(축산분뇨, 가공잔사 등), 임업폐기물(폐목, 톱밥 등), ③ 미이용자원 : 간벌재, 임지잔재 등으로 분류됨
- 통상적으로 ① 각종 부산·폐기물 : 짚, 왕겨, 겨, 간벌재, 숲 가꾸기시 소경목, 잔재, 톱밥이나 각종 유기성 폐기물 등, ② 바이오매스 작물 : 단기순환목(버드나무, 포플러), 정기벌채목, 초본식물, 각종 유지식물, 옥수수와 사탕수수(무), 감자 등, ③ 미이용물 : 휴경지나 야산 등에 방치되어 있는 유기성 자원 등이 바이오매스에 해당됨
- 특별히 에너지 생산에 한전할 경우, FAO에 의한 바이오연료의 3가지 구분, 즉 목질연료와 농업연료, 그리고 도시부산물로의 분류가 일반적이라 할 수 있음

생산측 : 공급	일반 그룹	이용측 : 수요
직접연료목	목질연료	고형 : 연료목(원목, 칩, 톱밥, 펠릿), 목탄
간접연료목		액체 : 흑유, 메탄올, pyrolytic oil
회수연료목		가스 : 가스화로부터의 산물, 위연료로부터의 pyrolysis 가스
목질이용연료		고형 : 짚, 줄기, 껍질, bagasse, 위바이오연료로부터의 목탄
연료작물	농업연료	액체 : 에탄올, 채원유, oil diester, 메탄올, pyrolytic oil from solid agrofuels
농업부산물		가스 : 바이오가스, producer gas, pyrolysis gases from agrofuels
동물부산물		고형 : 도시고형폐기물
농산업부산물		액체 : 오폐수 슬러지, pyrolytic oil from municipal by-product
도시부산물	도시부산물	가스 : 매립지가스, 슬러지가스

[한국의 2015~2050 수소비전]

(바이오매스 에너지 자원조사 방법)

- 바이오매스 에너지 자원지도 작성을 위한 기본 통계자료는 아래와 같음

부문	통계명	작성기관 또는 보유기관	자료명(년도)	세부자료명(항목)
임산 자원	산림기본 통계	산림청 임업정책국 정보통계과	산림기본통계 조사결과 (2004)	활엽, 침엽, 혼효림 임목축적분석
농산 자원	작물통계 조사	농산물품질관리원 농업정보통계과	작물통계(2004)	작물별 재배면적
축산 폐기물	가축통계 조사	농산물품질관리원 농업정보통계과	가축통계(2005)	축종별 사육두수
도시 폐기물	전국폐기물 통계조사	환경부 국립환경연구원	전국폐기물 발생 및 처리현황(2004)	폐기물 성상별 발생 및 처리 현황

[바이오매스 에너지 기본 통계자료]

(바이오매스 에너지 잠재량 추정방법)

- 국내에 부존하는 임산 바이오매스, 농업부산물 바이오매스, 축산폐기물 바이오매스, 도시(가연성)폐기물 바이오매스 자원은 그 부문별로 자원의 성상이 다르고 각 부문 내에서도 수종별, 작목별, 가축종류별 그리고 폐기물의 종류별로 각기 그 성상이 다르며 따라서 그 이용 방법에도 차이가 있음
- 다음 표에는 각 부문별 주요 자원의 종류와 그 전환 이용방법을 나열하고 현재의 기술로 가능한 최종 에너지 형태를 제시함

부문	주요자원의 종류	전환 이용기술 (우선 순위 나열)	최종에너지원 형태
임산 자원	활엽수, 침엽수, 초목류	연소, 가스화 열병합발전 연소 보일러(고형연료) 목질계 에탄올, 바이오디젤	열, 가스, 전기, 바이오 연료
농산 자원	논벼(벼짚, 왕겨), 맥류, 두류, 서류(고구마), 과수(사과)	연소, 가스화 열병합발전 연소 보일러(고형연료) 목질계 에탄올, 바이오디젤	열, 가스, 전기, 바이오 연료
축산 폐기물	소, 돼지, 닭/오리의 분뇨	Biogas(메탄발효) 발전 Biogas 열공급	가스, 열, 전기
도시 폐기물	종이류, 나무류, 고무피혁류, 플라스틱류, 기타(섬유 등)	소각 발전 연소 보일러(RDF연료) 목질계 에탄올, 바이오디젤	열, 전기, 바이오 연료

[바이오매스 자원별 전환 이용기술 및 최종에너지원]

아. 바이오매스 에너지 응용

- 녹색 화학물

- 유기 화학제품, 정제 화학제품, 중간생성물의 다수가 바이오매스 자원으로 만들어짐
- 유기 화학제품에는 솔벤트, 연료첨가제, 윤활제, 계면활성제, 접착제, 잉크 등이 있음. 주요 정제 화학제품군으로는 효소, 기능성식품(nutraceuticals), 의약품(pharmaceuticals) 이 있으며 중간생성물로는 당, 유기산(레볼산), 그리고 단위체(monomers) 혹은 단위체 전구물질(monomer precursors) 등이 있음

- 재생 프라스틱

- 바이오매스 자원에서 생산되는 프라스틱은 석유화학제품에서 나오는 프라스틱을 대체하리라는 큰 기대를 보여줌
- 일반적인 범주로 식물을 기초한 분해가능 고분자, 탄수화물(섬유질, 녹말, 키틴질) 고분자, 리그닌 고분자가 있다. 구체적인 예를 들면 녹말 에스테르, 섬유질 초산염 혼합물, 폴리락타이드(PLA polylactide), 폴리하이드로옥시부테인산(PHB polyhydroxybutyric acid), 열가소성 단백질 등임

- 천연섬유

- 종이 제품, 직물류, 다양한 종류의 줄, 실, 섬유들이 바이오매스 섬유질로부터 만들어진다. 펄프와 제지 공정이 향상되고 있고, 다른 공급원을 이용하는 새로운

공정 기술이 개발되고 있음

→ 천연섬유를 기초해서 개발되는 새로운 제품들에는 절연재와 토양 부식 제어용 지질섬유(geotextiles)가 있다. 이런 섬유들은 또한 여러 제품의 내용물로 재생불가능한 물질들을 대체하는 과정에 있음

- 천연 구조 물질

→ 강화 목재와 나뭇결 판넬과 같은 건축자재들은 일차적으로 나무로 만들어짐. 다른 유기성분(예. 플라스틱)과 무기성분(예. 시멘트)의 내용물로 바이오매스 섬유질을 결합시킨 새롭게 합성된 구조 물질이 만들어지고 있음

- 생물회복(bioremediation)

→ 생물회복은 오염된 토양과 물에서 오염물질을 제거하여 성질을 개선하고 본래의 상태를 유지토록하는 생물학 시스템의 적용이라고 할 수 있음. 효소, 미생물, 식물들이 생물회복 촉매제의 주종을 이룸

→ 새롭고 개선된 바이오매스 공정 기술의 개발로 바이오매스 자원에서 화학물질을 생성하는 일이 확산되고 있으며, 주로 화학 공정, 바이오처리, 열화학 공정, 기계 공정에서 진행되고 있음

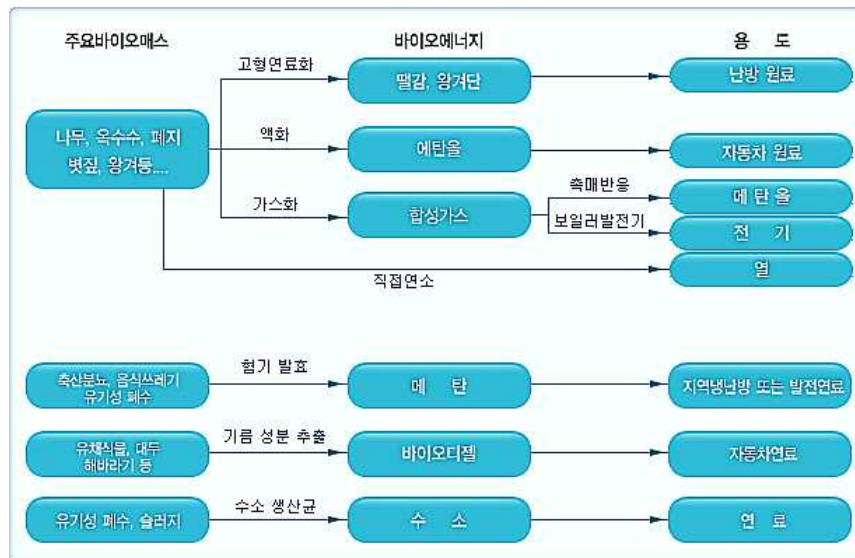
→ 공정의 합성과 혼합이 상업적 성공의 가장 좋은 기회를 제공할 수도 있음. 현재 공정을 합성한 예를 들면, 옥수수 습식 재배 공장이나 일부의 펄프 공장이 있다. 또한 화학물질, 중간생성물, 단일 혹은 복합 공정을 통해 바이오매스에서 분류된 물질을 분해하는 기술이 새로운 기술의 상업적 실현가능성의 열쇠라 할 수 있음

(2-2) 바이오매스 주요 기술(바이오매스 에너지 기술의 종류)

가. 바이오에너지의 종류 및 용도

- 앞에서 언급한 바와 같이 바이오매스는 썩을 수 있는 모든 물질을 지칭하며 따라서 그 종류가 매우 다양하지만 바이오매스의 근원은 식물이며, 이러한 식물은 성상에 따라 크게 두 가지로 분류됨
- 즉 사람이 식량으로 사용할 수 있는 당질계, 전분질(녹말)계 바이오매스(예: 사탕수수, 고구마, 옥수수, 콩 등)와 식량으로 사용할 수 없는 셀룰로스계 바이오매스(나무, 볏짚, 기타 농임산 폐기물 등)임
- 따라서 바이오매스 에너지 기술은 원료 바이오매스의 성상에 따라 각각 다른 활용 기술이 적용되고 있음

주요 바이오에너지의 종류 및 용도



[바이오에너지의 종류 및 용도]

나. 바이오매스 에너지 기술의 종류

- 바이오에너지 이용기술이란 바이오매스를 직접 또는 생화학적, 물리적 변환과정을 통해 액체, 가스, 고체연료와 전기, 열에너지 형태로 이용하는 화학/생물/연소공학 등의 기술을 말함

- 바이오에너지 기술은 크게 1)바이오 액체연료 생산기술, 2)바이오매스 가스화 기술, 3)바이오매스 생산/가공기술로 분류할 수 있음
 - 바이오 액체연료 생산기술 분야에서는 바이오가스로부터 자동차의 액체연료인 휘발유, 디젤을 생산하는 기술이 대표적임
 - 바이오매스 가스화기술 분야에서는 바이오가스를 활용해 수소를 생산하는 기술이 대표적임
 - 바이오매스 생산 및 가공기술 분야에서는 바이오에너지 작물을 재배하고 육조, 수집 운반, 가공하는 등의 기술이 있음

대분류	중분류	내용
바이오 액체연료 생산기술	<ul style="list-style-type: none"> • 연료용 바이오 에탄올 생산기술 • 바이오디젤 생산기술 • 바이오매스 액화기술(열적전환) 	<ul style="list-style-type: none"> • 당질계, 건분질계, 육질계 • 바이오디젤 전환 및 연진적용기술 • 바이오매스 액화, 연소, 연진이용기술
바이오매스 가스화기술	<ul style="list-style-type: none"> • 혐기소화에 의한 메탄가스화 기술 • 바이오매스 가스화기술(열적전환) • 바이오 수소 생산기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 유기성 폐수의 메탄가스화 기술 및 메릴지 가스 이용 기술 (LFG) • 바이오매스 열분해, 가스화, 가스화발전 기술 • 생물학적 바이오 수소 생산기술
바이오매스 생산,가공 기술	<ul style="list-style-type: none"> • 에너지 작물 기술 • 생물학적 CO2 고정화 기술 • 바이오 고형연료 생산, 이용기술 	<ul style="list-style-type: none"> • 에너지 작물 재배, 육조, 수집, 운반, 가공 기술 • 바이오매스 저배, 산림녹화, 미세조류 배양 기술 (왕겨탄, 칩, RDF(폐기물연료) 등)

[바이오에너지 기술의 분류]

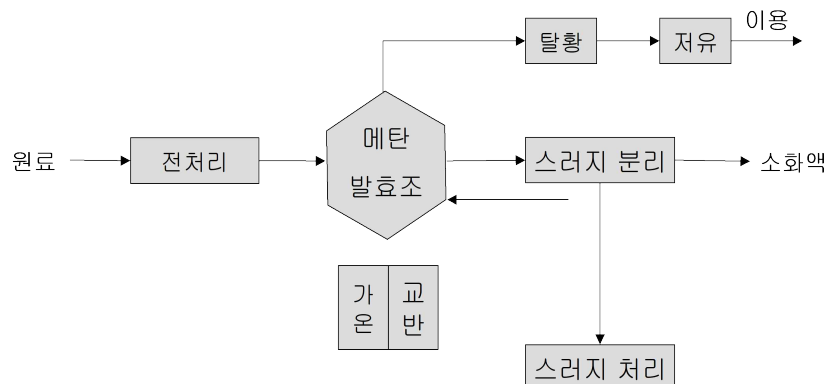
(2-3) 바이오매스 에너지 변환 기술

(생화학적 방법)

- 이 방법은 주로 미생물이나 효소의 생물기능을 이용하는 것으로서, 반응이 상온, 상압 하에서 진행되는 관계로 온화하고도 에너지 소비가 적은 것이 특징임
- 통상, 수중반응에 의하므로 특히 수분함량이 많은 원료처리에 적합하다. 바이오매스의 생화학적 처리 시에 생성되는 에너지 물질에는 메탄 알코올 수소가 있으며, 이들 연료물질의 전환방법은 아래와 같음

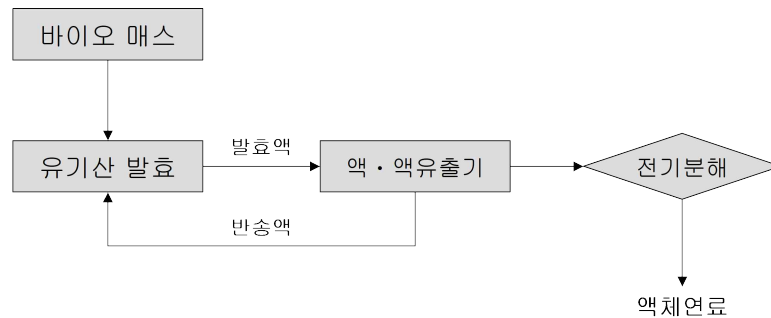
가. 메탄발효

- 메탄발효는 유기물이 혐기적 환경 하에서 분해되는 보편적인 미생물반응임. 관여 미생물은 통성혐기균과 절대혐기성균으로 나뉘며, 이들 균군의 복잡한 공생계를 통하여 고분자유기물의 가수분해를 거쳐, H₂, CO₂, Formate, Acetate 등이 최종적으로 메탄가스로 전환됨
- 메탄 발효의 특징은 관여 미생물이 복잡한 만큼 폭 넓은 기질에 적용할 수 있어 혼합물 처리가 가능하며 혼합물 처리가 가능하며, 발효장치는 비교적 간단하고, 소규모로도 처리될 생성물은 가스이므로 회수가 쉬움. 그러나 유기물중의 탄소의 50~70%정도가 가스화 되고, 많은 양의 잔사를 남기므로 에너지효율이 낮고 이차처리가 필요함
- 메탄발효의 기본처리공정은 아래 그림과 같이 발효조를 중심으로 하여 슬러지의 분해, 반송, 생성가스의 저유 등에 관한 제설비로 구성됨



[메탄발효의 기본적 처리공정]

- 메탄발효는 각종의 유기질폐기물 처리와 에너지회수를 위하여 이미 실용화되고 있으나, 그 효율향상을 위하여 폐기물의 성질에 따라 다양한 발효조가 개발되고 있음
 - 재래형은 일반적으로 보급됨
 - 고효율형은 스러지를 반송하여 조내고농도의 균체유지, 저농도폐수에 적합함
 - 스러지층형(상승류식)은 제당공장 폐수처리에 적용(네덜란드)되고, 바이오필터형은 작은 돌, 플라스틱 단편 등에 미생물부착·회박 폐수나 고형물 농도가 낮은 폐수에 적합하며 유동층형은 소립자의 유동체에 미생물 부착, 조내사각공간 최소화에 적합함
 - 그 외에도 Ghosh.s 등의 발상에 기초를 둔 이단분리 발효법이 개발되고 있어 유망시되고 있음 이 산생성발효와 메탄발효를 각각 별개의 발효조에서 분리·실시하여 관여 미생물의 최적 환경조건을 조성해줌에 의해 처리능력을 높이는 방법임
 - 메탄 발효는 실용화 된지 오래이나 관여미생물과 그 대사메타니즘에 불명확한 점이 많고, 안정된 고효율발효를 위하여서는 이들의 해명이 필요함. 메탄의 에너지효율은 높으나 사용에 편리한 액체가 아니므로 이를 CO+H₂의 합성가스로 개질하여 메탄올로 전환하는 등의 방법이 고려되고 있음
 - 이 점을 고려하여 메탄발효를 변형한 액체연료 전환방법이 개발되고 있음

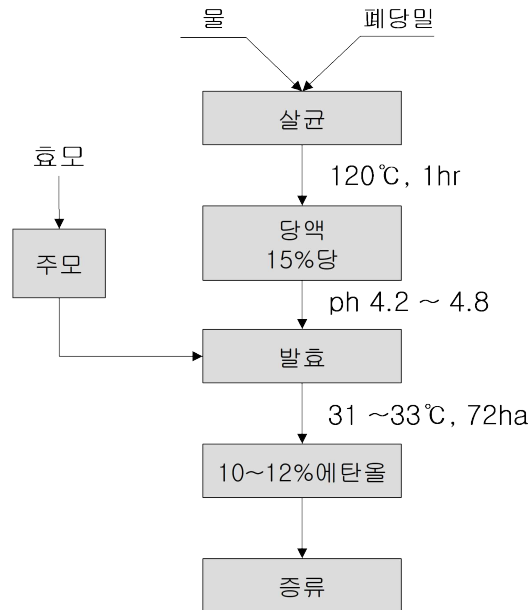


[유기산 발효-전기분해-액체연료화 시스템]

- 이는 메탄생성균의 증식을 억제시켜 산생성 반응만을 진행시키고 생성되는 유기산을 추출 농축하여 전기분해에 의해 액상의 탄화수소로 전환하는 방법임

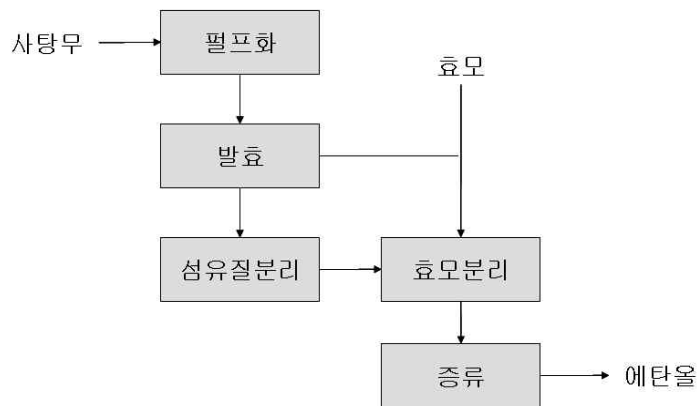
나. 알코올발효

- 브라질의 국가알코올계획(PROALCOOL) 미국의 가소홀(GASOHOL)계획등 농산 자원이 풍부한 나라에서는 대량의 알코올 생산계획이 개시되고 있고, 동남아시아와 그 외의 나라에서도 연료알코올 생산이 계획되고 있음
- 알코올발효의 원료는 탄수화물의 종류에 의해 당질원료, 전분질원료, 섬유질원료의 세 종류로 대별되며 원료의 종류에 따른 발효공정은 다음과 같음
- 당질원료의 알코올발효
 - 당질원료는 알코올 제조 시에 당화공정이 생략되는 큰 이점이 있다. 당(주로 단당류와 2당류)을 많이 함유하는 바이오매스에는 사탕수수, 사탕무 등이 있으나 저가, 장기저장의 점에서 설탕제조 부산물인 당밀이 널리 쓰이고 사탕수수 착즙을 직접 농축한 당밀이 사용되기도 함
 - 당질의 새로운 원료에는 스위트 솔감(sweet sorghum)과 사료용 사탕무(fodder beet), 그 외에 치즈 헤이(cheese whey)가 알코올원료로 시험되고 있음
 - 이들 원료는 단당류와 2당류를 주로 함유하며, 직접 Ssccharomyces 등의 효모균과 Zymomonas 등의 세균에 의해 혐기적으로 알코올로 전환되며 사탕수수 등은 압착 또는 온수추출로 10~15%정도의 당액이 제조되고, 일반적으로 살균과 정제의 반복으로 열 농축시켜 발효공정의 원료로 쓰임



[페당밀의 알코올 제조과정]

- 이에 대하여 당 추출과 발효를 동시에 행하는 방법으로 EX-FERM법, CSIRO법이 개발되어 있음
- 과테말라의 C.Rolz 등이 개발한 EX-FERM법은 사탕수수 줄기의 잘게 자른 짚을 물과 혼합(1 : 1.4)하고 끓여서 살균한 후 30°C로 냉각하여 효모를 접종 발효시켜 발효액을 분리하고 그 남은 고형물을 압착한 착은 발효액과 혼합하여 발효조에 반송, 새 원료를 첨가 발효하는 과정을 3회 반복하면 발효는 종료됨
- 시험성적에 의하면 함유당의 알코올 전환효율이 높고 설비도 간단하여 생산가 저하됨이 특징임
- CSIRO법은 오스트랄리아 K.DKirby 와 G.J.Mardon이 개발한 방법으로 전술한 EX-FERM법과 유사한 것임. 처리 공정은 아래 그림과 같이 사탕무를 기계적으로 펄프화하여 황산액으로 PH를 4.5로 조절한 후 10%(중량)의 효모압착액을 첨가·발효시킨 후 펄프를 압착·섬유를 제거하고 효모액은 원심 분리한 다음 발효에 재이용함. 약 9.5%의 알코올을 함유하는 효모를 분리한 발효액을 증류함



[CSIRO 공정]

- 전분질의 알코올 발효

- 고구마, 옥수수, 카사바 등의 전분질 원료는 당질과는 달리 산 또는 효소에 의한 가수분해로 당화하여 알코올발효에 이용된다. 전분당화제의 종류에 의해 분류한 대표적인 당화법에는 산당화법, 누룩당화법, 아미로 당화법, 효소당화법 등이 있음
- 이 중에서 중요한 당화법에 의한 알코올발효는 다음과 같음
- 누룩당화에 의한 알코올발효는 고구마 등의 원료를 분쇄한 후에 증기찜(120°C, 1hr)함. 이를 당화조에 이송하고 전 분량에 대해 10%내외의 누룩을 투입하여 당화함. 당액을 발효탱크에 투입, 냉각(33°C)한 후에 효모의 순수배양액(주모)을 첨가(5~10%)하여 효모를 실시함

- 효모액을 증류하여 95%이상의 에탄올을 얻는다. 아미로 당화법은 프랑스의 Calmette 가 분리한 곰팡이의 일종인 *Amylomyces rouxii*(현명, *Mucor rouxii*)를 최초로 전분당화에 사용하는데 연유되어 아미로 법이라 칭함
- 아미로 당화법은 누룩법과는 달리 *Amylomyces*균을 발효탱크에 넣고 증식시켜 당화와 효모첨가에 의한 알코올발효를 실시하는 방법으로, 발효가 강력하여 잡균의 오염이 적고 발효공정이 순수하여 대규모공장에 적합함
- 효모당화법은 전분질로부터 glucose의 공업적 생산에 *Rhizopus niveus* 나 *Aspergillus niger* 등에서 정제한 glucoamylase 효모제품이 비교적 싼값으로 입수가능하게 되어, 이를 알코올효모에 많이 사용하고 있음
- 전분의 당화법에 의해 고구마로부터 95%의 에탄올 1kl를 생산하는데 요하는 에너지를 당밀의 경우와 비교하면 전분질원료는 당질의 경우보다 배에 가까운 에너지를 소비하고 있음

- 셀룰로스의 알코올

- 식물체의 35~50%를 차지하는 섬유질의 알코올발효는 2차대전 중에 이미 공업화되고 있었음
- 공업화된 발효법에는 목재에 살산과 고압을 사용시켜 셀룰로스를 glucose로 전환하는 Scholler법이나 그 개량법인 Madison법, Bergius법이나 그 개량법인 Peoria법등이 있으나 그 당시는 에너지 생산적 견지에서 경제적인 문제는 그다지 인식하지 않았으나 현재는 경제성을 감안한 산이나 효소(Cellulase), 또는 양자의 혼합처리에 의한 에너지절약형의 셀룰로스 알코올 효소법이 연구·개발되고 있음
- 자연 상태의 셀룰로스의 원료는 리그닌과 복합구조를 형성한 리그노 - 셀룰로스 형으로 존재하며, 이는 효소만으로는 분해가 곤란함
- 그 때문에 알카리나 산, 또는 오존 등에 의한 화학적 전 처리, 기계적 분쇄, 동결분쇄, r-선 등의 물리적 전 처리가 필요하고 이들 전 처리가 경제적으로 에너지수지를 만족시킬 수 있는 공정으로 되기까지는 아직 많은 시간과 노력이 필요할 것으로 봄
- 이 방면의 균주개발에 있어서는 셀룰로스를 알코올로 전환하는 균이 탐색되고 있으며 고온성의 *Clostridium thermocellum* 등은 유망시되고 있으며 최근에 *Trichoderma reesei* 등의 강력한 Cellulase생산에 관여하는 유전자를 알코올 생산균에 도입하는 연구가 행해지고 있음

- 세균에 의한 알코올 발효

- 효모이외에 알코올을 생산하는 세균인 *Zymomonas mobilis* 가 알코올생산성이 우수하여 주목되고 있음
- Rogers 등의 연구에 의하면 에탄올의 비생산정도에 있어서 *Sacharomyces carlsbergensis*가 0.87(g에탄올/hr/g균체)인데, 비해 *Z.mobilis*는 2.53g으로 2배 이상 우수함
- 그러나 *Z.mobilis*는 효모에 비해 알코올내성이 약하고, 균체의 안정성이 떨어지는 등의 문제점이 있으며 이를 해결하기 위하여 유전 공학적인 균주개발이 실시되고 있음

- 알코올의 증류분리

- 발효액의 알코올함량은 보통 10%(중량)정도이고 이를 95~100%의 알코올로 농축할 필요가 있으며, 그 방법으로는 증류법과 추출증류법이 행해지고 있음
- 증류법은 다중효용법, 증기압축법, 제 3물질을 첨가하여 기체평형을 변경시키는 방법, 또 추출증류대신에 물 흡착제를 사용한 탈수법등이 고려되고 있음
- 그 외에 임계점부근의 이산화탄소를 용제로 하여 에탄올을 추출하는 SCFE(Super Critical Fluid Extracstion)법, 물 또는 에탄올을 선택적으로 분리하는 막분해법 등이 개발되고 있으며, 용제추출법에서는 가솔린을 용제로 하여 그대로 가소화로 하는 방법도 시험되고 있음

다. 광생물학적 수소생산

- 태양에너지의 유효사용법이 하나로 광합성미생물에 의한 수소생산이 주목되고 있음
- Biophotolysis(또는 Biosolar conversion)라 불리는 이 반응은 미생물의 수소 대사에 기초를 두고 있으며 분자상의 수소를 대사할 수 있는 미생물은 많은 종류가 있으나, 그 중에서 광 에너지를 직접 이용할 수 있는 광합성세균이 Biophotolysis의 대상이 됨
- 전체적으로 동일조 내에서 수소와 산소가 동시에 발생하는 시스템과 수소와 산소가 시간적, 공간적으로 분리되어 발생하는 시스템으로 나누어짐
- 남조의 질소제한 배양계의 수소발생은 질소고정 산소인 nitrogenase에 의해, 이 효소의 활성은 분자상의 효소에 의해 강하게 억제되나, 산소와 수소의 동시발생이 가능한 것은 남조의 특수한 세균구조에 기인함
- 즉, Anabaena속 등의 사상성 남조는 질소결핍상태에 두면 정상으로 분열, 증식하는 세포와는 구조가 전연 다른 이형세포가 분화 형성되며 이 이형세포 내에서 nitrogenase가 유도, 합성되며 이 효소는 산소로부터 보호를 받으면서 수소를 발생됨
- 녹조의 배양계는 산소와 수소를 시간적으로 분리하여 발생할 수 있는 성질을 가지며 수소발생은 hydrogenase에 의해 용매됨. 암 조건에서의 수소발생이 특이하며 이 경우의 전자공여체는 물이 아니고 주간의 태양광하에서 합성된 저장전분 등의 유기물이 사용된다. 주야의 순환에 적용시켜 산소-수소발생을 반복해 나가는 원리이나 아직 성공사례가 없음
- 광합성세균의 수소발생은 조류와는 달리 물 분해 능력이 없고 그 대신, 유산, 사과산등의 유기화합물을 전자공여체로 하여 광화학계와 nitrogenase에 의존한 수소발생을 행함
- 유기화합물이 타생물의 광합성 산물에서 유래하는 것을 고려하면 광의의 Biophotolysis라 할 수 있으며 이 시스템에서 발생하는 가스는 수소이외에 미량의 이산화탄소만이 함유됨
- 수소의 발생속도는 조류에 비해 매우 빠르고 산소를 발생치 않으므로 수소의 순수분리가 용이하며 이러한 우수한 특징을 지닌 광합성세균에 의한 수소생산의 성패는 기질인 유기물을 함유하나 질소 화합물은 함유하지 않는 원료의 확보정도에 달려있음
- 광에 의한 수소발생장치는 비교적 단순한 형으로 족하고 수광면은 투명한 유리 또는 플라스틱제여야 함. 남조의 수소생산실험에 이용한 기포탑형의 수소 생산 장치임. Ar, 이산화탄소, 질소의 혼배가스가 배양액 중에 연속 유입됨에 의해 배양계는 질소 제한 상태를 유지하고 발생하는 산소와 수소를 제거함과 동시에 조체를 균일하게 현탁 시킴
- 수소전환효율을 높이고 더욱이 안정된 수소 발생계를 확립하기까지는 해결해야 할 많은 과제가 남아 있음광합성미생물의 대사생리에 관한 연구의 진전과 유전 공학적 수단에 의한 균체의 대사기능강화가 근본적으로 중요하다고 볼 수 있음

(열화학적 방법)

- 열화학적처리에 적당한 원리로서는 목재나 수분함량이 적은 바이오매스인 종이류를 주성분으로 하는 도시쓰레기가 이용가능하며, 이러한 바이오매스에도 석탄과 마찬가지로 가스화와 액화가 적용됨
- 가스화 방법에는 건류, 부분산화, 수증기분해가 있고, 이러한 방법에 의해서 생성되는 가스는, 직접연료로 이용하거나 메탄올-가솔린의 합성원료, 또는 액화시에 필요한 가스로 이용된다. 액화는 석탄과 같은 액화방법을 적용할 수 있음

가. 가스화

- 건류는 옛날부터 행하여 오던 목탄의 제조방법이며, 목재를 약 300℃에 가열유지 하면 열분해 되어 높은 수율로 탄화물이 얻어지며, 그 외에 CH₄, CO를 함유하는 가스와 메탄올 등을 함유하는 액이 회수된다. 주체는 목탄이며 가스의 수량은 적음
- 부분산화는 산소와 수증기를 이용하여 가스화 하는 방법으로 산소제조장치가 필요하나 가스화로는 비교적 간단한 구조로 충분하며, 분유층 방식과 류동층 방식을 사용함
- 산소대신에 공기를 이용해도 좋으나 생성가스에 질소가 함유됨. 도시쓰레기를 처리할 목적으로 개발된 것으로 이 형에 속하는 것은 제철용용광로와 비슷한 샤프트로 형식이

- 있으며(예, Puro법). 이 형식은 쓰레기를 고온 용융시키므로 잔사가 적은 것이 특징임
- 수증기분해는 반응열을 외부에서 공급할 필요가 있는 전열벽을 통하여 가열하는 방법도 있으나, 모래 등의 불활성물질의 유동층을 이용하여 생성되는 목탄과 모래를 가스화로로부터 이송하며, 연소로 중에서 공기에 의해 목탄을 연소시키고 모래를 재가열하여 가스화로에 반송하는 방식이 많이 이용됨
- 수증기량을 줄여서 분해하면 메탄함량이 많아서 도시가스등에 사용하기에 적당하고 수증기량을 증가시키면 수소함량이 많아 합성가스로서 메탄올 합성원료에 적합함
- 바이오매스는 고체이기 때문에 취급이 불편하고, 수분을 포함하고 있기 때문에 직접 연소를 하는 경우에는 발열량의 일부가 수분 증발에 쓰여 지는 문제를 안고 있다. 바이오매스 가스화는 목재 등의 원료를 공기, 산소, 수증기 등 가스화제로 기체연료를 제조하는 프로세스를 의미함
- 산소가 부족한 환경에서 바이오매스를 가열하면 기본적으로 열분해가 일어나 가스(H₂, CO, CO₂, CH₄), 타르, 숯 등이 생성됨. 가스화에 필요한 반응 온도는 800~1,000℃정도이며 압력은 상압이 많지만 가압하여 가스화하는 경우도 있다. 일반적으로 열분해, 타르의 2차 분해, 차르의 가스화반응의 3단계로 반응이 진행됨
- 반응은 흡열반응이므로, 반응기에는 열을 공급할 필요가 있고 통상적으로는 연소에 불충분한 양의 산소를 가하고 원료의 일부를 태워 열량 원으로 대처하기도 함. 공기에 의한 부분산화로는 포함된 질소로 희석되기 때문에 얻어지는 가스의 발열량은 천연가스 등의 반 정도로 낮아지게 되며 따라서 부분산화를 하지 않고 발생했던 차르를 다른 장소에서 연소하여, 그 열을 이용하는 예도 있음
- 직접가스화: 바이오매스의 가스화는 가스화로의 형식에 따라 고정상형로, 유동상형로, 부유상형로로 분류되며 실험실 수준의 것을 포함하면 200종류 이상이 됨. 가스화는 연소 반응의 이론적 산소량 보다 적은 양의 산소를 공급하여 이루어지는 부분 산화 공정을 의미함. 열분해 반응은 주 목적이 오일과 부산물을 생성하는 것이 주목적이지만 가스화 반응의 주목적은 가스의 생산이며, 가스화제로서 공기나 산소, 수증기를 이용하며 850℃부근에서 실행함
- 산소가 부족한 환경에 바이오매스를 첨가하면 기본적으로 열분해가 일어나지만 수증기를 첨가, 산소의 첨가량을 제어, 급속 가열 등의 조건 설정에 의해 가스 생성량을 크게 하면, 생성물로서 가연성 가스를 얻는 것이 가능해지게 되고 여기에 주로 사용되는 원료는 목질 계 바이오매스, 초목 계 바이오매스를 건조한 바이오매스 등임. 이 같은 공정을 통해 생성되는 제품은 가연성 가스로서 그 조성은 조건에 의해 틀려지지만, 일반적으로 수소, 메탄, 일산화탄소, 이산화탄소가 주성분을 이루게 됨
- 간접가스화: 메탄올 등의 액체 연료는 천연 가스를 수증기 개질 또는 나프타를 부분 산화하여 얻은 합성 가스로부터 합성됨. 이론적으로는 출발 원료를 바이오매스로 치환하는 것이 가능하지만 타르 등의 문제가 발생하는 별도의 해결과제를 안고 있음. 간접가스화의 종류로는 메탄올 합성, 합성가스로부터 가솔린 등의 액상 탄화수소를 합성, 청정한 디젤 연료로 기대되는 디메틸에테르가 있음

나. 합성가스로부터 연료유 제조

- 화학원료용 메탄올합성에 사용되어온 고압 용매 합성법은 꽤 오랜 역사를 가짐 연료용 메탄올의 합성을 위하여 보다 대형화와 저비용화의 방향으로 개조되고 있으며(예, ICI법, Lurgi법 등) 메탄올 이외에도 에탄올 이상의 고급 알코올은 발열량이 크기 때문에 연료용으로 가치가 높으며 그 합성법으로 IFP법등이 알려져 있음
- 메탄올로부터 방향족이 풍부한 탄화 수소유를 제조하는 방법이 Mobil에 의해 개발되었으며, 고정용매법과 류동용매법이 있으며 이는 제오라이트계의 ZSM-5라는 0매의 개발에 의해 가능하게 된 것임. 최근, 합성가스로부터 직접 가솔린을 합성하는 방법이 시험되고 있음

다. 액화법

- 로타리 킬른, 이동층 등을 이용하여 건유보다 저온의 외열식으로 열 분해유(합산소유)를 얻을 수 있음

- 또, 석탄의 액화처럼 수소, 일산화탄소에 의해 액화할 수도 있으며 석탄과는 달리 물을 공급하는 쪽이 효과적이고 수소보다는 CO쪽이 유효함

(직접연소)

- 직접연소는 바이오매스 이용의 가장 간단한 방법의 하나로서 바이오매스를 공기 중 태워 열, 수증기 등을 얻고 궁극적으로는 전기를 일으킬 수도 있는 것임
- 바이오매스는 직접 연소시켜서 열에너지로 전환하는 방법이 가장 값이 싸고 원초적인 방법이며, 직접 연소에는 목재와 같이 수분이 적고 비교적 발열량이 높은 원료가 적당
- 직접연소는 고온에서 운전되는 연소실에서 바이오매스를 이론적 산소 요구량 이상으로 충분히 공급한 후 불꽃산화를 수행함으로써 기체 상태의 이산화탄소와 수증기로 전환하고 이 과정에서 발생한 연소열을 보일러에서 수증기로 회수하는 것임
- 바이오매스를 직접 연소시켜 열을 얻는 것은 물론 전력으로 변환시키는 기술을 포함하며, 이 방법은 바이오매스 변환이 가장 쉬워 널리 이용되는 방법임
- 목재가 난방 등의 열원으로 널리 사용되는 것 외에 폐 목재, 나무부스러기, 나무껍질, 톱밥 등의 목재폐기물을 열원으로 사용하게 되며 또한 왕겨, 콩깍지 등의 농업부산물, 도시폐기물 등도 열원으로 이용할 수 있음
- 열 발생 장치에는 직접 연소의 작은 규모형태로서 가정에서 요리나 난방의 목적으로 사용되는 스토브, 중규모 혹은 대규모산업에서 특수화된 화로나 보일러는 다양한 형태의 바이오매스를 연소시킬 수 있게 개발되어진 화로, 화로와 열교환기가 같이 있는 형태의 보일러, 그리고 많은 산업의 공정에 열을 제공하는 가마등의 방법이 있음
- 현재 직접 연소는 스토커형, 선화류형, 유동상식 연소 등으로 다양한 방법이 있으며 서유럽에서는 열병합 발전에 의한 지역난방 등, 태국 등 자원이 풍부한 개발도상국에서는 바이오매스 발전, 미국, 일본 등에서는 석탄발전소 혹은 도시쓰레기 소각로에서의 혼합 연소 발전 등에 다양하게 활용되고 있음

(가스화 기술)

가. 가스화의 기본 원리

- 앞에서 가스화의 기본 원리는 탄소를 포함한 물질을 반응조 안에서 열, 혼합 증기, 산소, 질소로 H₂와 CO로 전환하는 것임. 그러나 가스화를 거치면 합성가스(H₂, CO) 뿐 아니라 N₂, 미량의 CH₄, 기타 탄화수소, 타르, 미립자, 이산화탄소를 포함함
- 따라서 생성된 합성가스는 개질 과정을 거쳐 회분 집진 사이클론 장치, 솔벤트형 타르 스크러버, 물, 산성/가성 스크러버 등 다양한 정화 장치로 정화될 수 있다. 정화 과정을 거쳐 합성가스는 촉매를 이용한 피셔-트로프슈 공정을 통해 액화 연료로 전환되고 전기 생산을 위해 내연 발전기로 이동함
- 이후 연소과정을 거쳐 열회수, 연료 전지 응용, 화학물질 생산 등에 쓰이게 되며, 이론적으로 모든 형태의 바이오매스는 가스화 과정을 거치게 됨. 그러나 가스화기의 작동 효율성은 높은 수분 함량, 회용융점, 공급계 디자인, 원료 혼합 및 분리의 어려움이라는 한계를 가짐

나. Gasifier 운전 및 성능처리 인자

- 운전 및 성능처리 인자는 공급 산화물과 완전 화학량론 연소를 위해 요구된 산소함량 사이의 비율인 등가비율, 직·간접으로 가열된 기화장치 가동을 위한 주요한 반응기 온도, 반응기의 형태와 설계에 의한 폐기물과 가스 체류시간 및 반응기의 질량과 에너지 평형에 영향을 주는 기화매질의 성분과 입구 온도 등이 있음
- 이러한 인자들의 큰 값은 기존 직접연소에 관련된 가스화 공정의 더 복잡성을 반영함

다. 바이오매스로부터의 합성가스 제조기술

- 바이오매스의 가스화는 탄소나 중질유 등의 가스화와 기본적으로 비슷하며, 부분산화반응과 열분해반응이 있다. 부분 산화반응은 바이오매스 등의 원료와 가스화제(공기, 산소, 스팀 등)와 반응해 주요 생성물로 H₂, CO, CO₂, H₂O와 가타물질, 각종 함산소화합물, CH₄, C₂H₄, 타르, Char 등이 있음

라. 가스화과정에서의 주요 화학반응

- 가스화는 탄소를 포함하는 물질을 가연성 및 합성가스(H₂, CO, CO₂, CH₄)로 전환하는 반응이며 일반적으로, 가스화는 공기, 산소, 스팀, 이산화탄소 또는 이 가스들의 혼합과 함께 탄소의 반응을 포함함
- 가스상 생성물을 더 많이 생성하여 전력과 열 그리고 수소와 같은 다른 가스상 연료 또는 화합물, 액체 연료의 합성을 위한 원료로 제공하기 위해 사용될 수도 있음
- 가스화는 시료보다 더 높은 H₂/CO비를 가지는 생성물을 생산하는 것이 최종목적이지만 최초 대상폐기물/시료가 투입되면, 탄소를 제거하는 열분해 반응이 먼저 일어남
- 이른바 ‘탈휘발화’ 과정을 거친 후에는 산소와 반응하는 연소과정, 대상 시료내의 탄소가 물 등과 반응하여 수소, 메탄, 일산화탄소 등을 형성하는 가스화 반응의 3단계에 의해 가스 생성물이 얻어진다고 알려져 있음
- 그렇지만 가스화 반응은 열화학적 반응이기 때문에 일반적인 화학반응이나 잘 알려진 이론식만으로는 그 반응경로를 규명할 수 없다는 한계점이 있음. 그러나 가장 기본적이고 대표적으로 가스화기 내에서 일어나는 가스화 반응에 대해서 간략히 정리하면 크게 네 가지로 나눌 수 있으며 이는 아래 표에 나타냄

(1)	$C(s) + H_2O \leftrightarrow CO(g) + H_2(g) \Delta H = +132 \text{ kJ/mol}$	WGS
(2)	$CO(g) + H_2O(g) \leftrightarrow CO_2(g) + H_2(g) \Delta H = -41.5 \text{ kJ/mol}$	
(3)	$C(s) + O_2(g) \leftrightarrow CO_2(g) \Delta H = -406 \text{ kJ/mol}$	Oxidation
(4)	$C(s) + 1/2O_2(g) \leftrightarrow CO(g) \Delta H = -123 \text{ kJ/mol}$	
(5)	$C(s) + 2H_2(g) \leftrightarrow CH_4(g) \Delta H = -87 \text{ kJ/mol}$	Methanation
(6)	$CO(g) + 3H_2(g) \leftrightarrow CH_4(g) + H_2O(g) \Delta H = -206 \text{ kJ/mol}$	
(7)	$CO(g) + 4H_2(g) \leftrightarrow CH_4(g) + 2H_2O(g) \Delta H = -565 \text{ kJ/mol}$	
(8)	$C(s) + CO_2(g) \leftrightarrow 2CO(g) \Delta H = 172.9 \text{ kJ/mol}$	Boundouard Reaction

[가스화과정에서의 주요 화학반응]

- 가스화기 내에서 주로 진행되는 2가지 반응은 합성가스를 생성하는 반응과 물-가스 전환 반응(water-gas shift reaction)으로서 반응식은 (1), (2)와 같으며 이 두 반응을 결합시켰을 경우의 반응은 흡열이어서 고온으로 갈수록 반응 속도가 증가함
- (1)의 반응은 합성가스를 얻는 흡열반응으로 화학평형 상 고온, 저압일수록 반응성이 좋으며 이 반응에서는 1,000℃ 이상의 고온일 때는 일산화탄소의 생성이 지배적임
- 산소와의 반응은 흡열반응을 진행시키기 위한 열량을 공급하는 반응으로 산소의 양에 따라 완전 연소 반응이 가스화기 내에서 진행되며 이는 식 (3), (4)를 따름
- 또한 수소와의 반응은 고품물인 좌와 반응하여 메탄을 형성하는 반응과 일산화탄소 및 이산화탄소와 반응하여 메탄과 물이 형성하는 기상반응으로 구별되는데, (5), (6), (7)에 의해 진행이 되며 이는 고압일수록 메탄의 전환율이 높아지는 것으로 알려져 있음
- 마지막으로 이산화탄소에 의한 반응은 (8)에 의해 진행되며 느린 흡열반응으로서 고온, 고압에서 활발하며 900℃ 이하에서는 반응이 형성되지 않음

(가스화 반응 메커니즘)

가. Cellulose의 열적반응모델

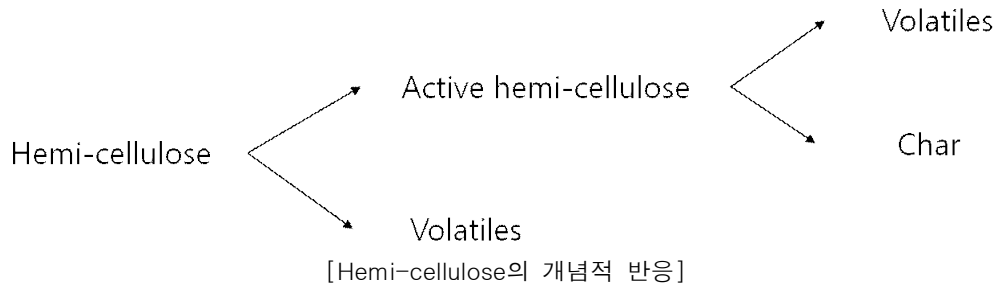
- Cellulose는 탈수반응을 거치면서 활성화 상태의 Cellulose로 전환되고, 활성화 상태 Cellulose는 다시 바이오 오일과 가스, char로 전환됨. 즉, Cellulose 열적반응은 연속, 경쟁반응 형태로 구성되어 있다고 판단됨. 이러한 Cellulose의 개념적 반응은 아래 그림에서 보는 것과 같음



[Cellulose의 개념적 반응]

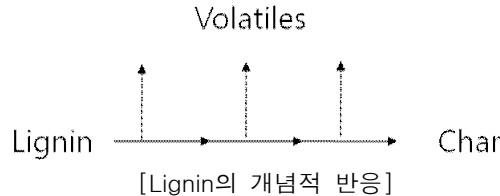
나. Hemi-cellulose의 열적반응모델

- Hemi-cellulose는 열적반응하면서 휘발성물질이 배출되면서 활성화 상태의 Hemi-cellulose로 전환되며 활성화 상태 Hemi-cellulose는 다시 휘발성물질과 고형부산물인 char로 전환됨
- 즉, Cellulose 열적반응은 연속, 경쟁 반응 형태로 구성되어 있다고 판단된다. 이러한 Hemi-cellulose의 개념적 반응은 다음 그림에서 보는 것과 같음



다. Lignin의 열적반응모델

- Lignin의 열적반응은 가스, Tar 등의 휘발성물질이 배출되면서 Char로 전환되는 반응으로 설명될 수 있음
- 그러나 Lignin 열적반응은 반응속도가 상당히 느리며 천천히 탄화되는 반응으로 추정됨. 이러한 Lignin의 개념적 반응은 다음 그림에서 보는 것과 같음



(2-4) 국내외 바이오매스 기술개발 현황

(바이오매스의 에너지 자원의 확대방안)

- 바이오매스를 에너지로서 발전에 이용하려면 그대로 연소하던가 가스화 또는 액화한 연료를 사용 하여서 터빈을 돌리게 됨.
- 식물 바이오매스는 수확현장에서 원료의 집적이나 운반에 어려움이 있다는 특징에서 일본에서는 흑액(黑液)발전을 제외 하면 목재 부스러기나 가축 분뇨 등을 원료로 하여서 목재 산지나 쓰레기 집적지에서 소규모로 행하여지고 있는 것에 지나지 않음
- 그러나 유럽과 미국에서는 연소발전이나 가스화발전 등으로 적극적인 이용 확대를 도모하고 있어서 세계적으로는 앞으로 이에 따른 발전이 기대되고 있음
- 바이오매스에 의한 발전은 아직 설비 규모가 작고, 원료의 수집이나 운반에 비용이 들어 경제성이 뒤떨어지고 있다. 미국이나 브라질에서는 발전에 주력하며, 북유럽에서는 발전보다도 열 이용에 중점을 두고 있음
- 일본에서는 제재공장에서 대팥밥을 이용하는 경우에는 경제성이 있어 열과 소규모발전이 이용되지만, 메탄가스의 이용에 있어서는 잔재의 처리에 비용이 든다는 단점에서 선호성이 낮음
- 일본의 경우 바이오매스 발전의 98%는 펄프 공장에서의 흑액을 원료로 하고 있음. 바이오매스를 발전에 이용하려면 원료를 직접연소, 혼소(混燒)하던가 또는 가스화 열분해하여서 기체나 액체연료를 만들게 되는데 에너지 자원의 발전 방식을 구분하면 다음과 같이 방안에 그 확대 방안을 모색 할 수 있다고 판단됨

가. 직접연소 발전방식

- 목재칩(chip), 폐재, 농업 폐기물 등의 바이오매스를 직접 연소하여서 증기를 만들고 터빈을 돌려 발전하게 되는데 바이오매스 직접연소발전의 규모는 작아 10MW 이하가 주류이지만, 미국이나 북유럽에서는 50MW규모까지 실용화되고 있음
- 발전효율은 10~39%(평균 25%)이고, 연소에는 화격자(火格子), 스토크, 로터리

- 킬른(rotary kiln)을 사용하는 것과, 유동층으로 연소시키는 방식으로 이용됨. 원료를 칩(chip)화하면 취급에 효율화가 도모 되므로 활용성이 높고 평가되는 방안임
- 이때 유동층 연소에는 소규모의 목질 폐기물이나 나무껍질의 연소에 적합한 버블링 유동층(BFB)과 대규모의 바이오매스 및 NOX의 배출 저감에 적합한 순환유동층(CFB)이 사용되며, 사탕수수의 당화 과정으로부터 폐기물 배거스를 원료로 고압유동층 내에 기화반응을 향해서 가스를 생성시켜 기전력원료로 이용하는 예를 들 수 있음
 - 이때 원료로서는 임산 폐기물도 이용할 수 있음. 이 유동상 연소에서는 연료의 혼합물 및 60%까지의 수분을 함유하는 연료도 연소 할 수 있으며, 100MW의 화력자 시스템의 경우 200t/h의 증기를 생산할 수 있음
 - 발전방식의 예로서 300t/day의 계분(鷄糞)처리로 1,960Kw의 발전을 할 수 있는데 톱밥이나 나무껍질 등의 목재류는 펠릿화(pallet 花) 하면 수송성, 저류성이 좋아지므로 압축 성형하여서 펠릿연료(목질 펠릿), 고품연료로서 이용되어지고 있음
 - 일본에서의 예를 보면 펠릿은 2,300t/year 생산되는데 그 가격은 18~26엔/kg 으로서 함유율이 8~13%, 4000kcal/kg 이었고 그 발전설비는 발전 능력이 3MW일 때 효율이 14~18%로서 가격은 3.3~4.8엔/kWh되는 경제성 평가를 보여주고 있음
 - 스웨덴의 목재 화력발전 설비는 칩을 연간 26,000m³ 처리하는데 3.5MW의 능력으로 연간 18,000MWh의 발전을 하고 있는 선진 바이오에너지 활용의 한 예로 나타나고 있음

나. 혼소 발전방식

- 대규모의 석탄화력 발전용 보일러에 폐목재, 대팻밥, 볏짚, 도시쓰레기 등의 바이오매스를 투입하여 발전함
- 이에는 바이오매스와 석탄을 미리 혼합해서 보일러에 투입하는 방식(혼소율5% 이하)과, 따로따로 공급하는 방식(혼소율 10%이상)으로 적용되어짐

다. 가스터빈발전

- 열분해로 얻어진 가스를 연소하여서 직접가스 터빈을 돌린다. 그러면 증기 터빈에 비해서 효율이 높아짐
- 가스 터빈의 배기가스는 고온이므로, 폐열보일러를 설치하여 증기를 얻고 증기 터빈을 돌리는 가스화 복합발전도 함. 743t/day의 처리로 53.1MW 발전가능이 발휘됨

라. 가스화 엔진발전

- 열분해가스화화와 디젤엔진을 조합한 방식으로 합성가스(CO와 H₂)를 냉각하여 가스밀도를 올려 세정 후에 공기와 함께 디젤엔진에 도입하여 발전하는 양식임

마. 바이오매스발전(Bio Power)

- 바이오매스의 연소열을 이용하여 물을 수증기로 해서 터빈을 가동시키게 되는데 $C_6H_{10}O_5 + 6O_2 = 6CO_2 + 5H_2O - 17.5Mcal$ 로서 바이오매스는 함유율이 40~50%로 높고, 단위 중량당의 발열량은 낮음
- 바이오매스의 열분해 유, 직접연소 발생 열을 사용한 종래의 발전에 더해서 바이오매스의 기화에 의하여 생성하는 바이오가스를 이용한 발전도 전개되고 있음
- 촉매와 필터를 사용해서 생성되는 타르의 제거와 저 칼로리 가스 연료의 터빈개발이 과제로 남아있으며 스웨덴에서는 이미 수~수십MW의 발전 시설의 실적을 갖고 있음
- 바이오매스를 800~1,200℃의 가스화화에서 가스화하여 발생한 고온의 가스로 터빈을 돌리고, 이어서 가스 엔진으로 발전하게 되는데 또한 배기가스를 회수하여 증기를 발생시켜 다시 증기 터빈으로부터 발전하는 방식을 들 수 있음.
- 가스화 설비를 가스 터빈과 증기 터빈으로 구성된 복합발전 설비와 합치한 시스템은 통합가스화 콤바인드 사이클 발전방식(Integrated Gasification Combined Cycle, Igcc)이라고 말하며 발전효율은 14~49%(평균 30%)를 볼 수 있음
- 스웨덴에서는 IGCC에 의하여 6MW의 설비로 발전효율 32%를 달성하고 있는데 일본에서의 주요한 바이오매스 발전의 주력은 제지공장에서부터의 흑액, 폐액을 열원화

- 하여서 재이용한 것으로 크래프트 펄프(kraft pulp)의 흑액 3,230만톤에 폐재 36만톤을 합쳐 사용하여, 512억kWh의 발전 실적을 나타내기도 하였음(1996년)
- 또한 그 외의 양식으로 하수 오수를 이용하여 메탄 가스를 발생시켜 화력발전에 사용하며, 또 가스 엔진발전도 하고 있는데 동시에 발생하는 수소는 연료전지에 이용하는 그 예(요코하마시 하수처리장)를 볼 수 있음

(국내외 바이오매스 기술개발 현황 및 동향)

- 지금까지 별로 주목받지 못했던 바이오매스는 광합성에 의해 만들어진 유기물로부터 순환 가능한 원료 및 에너지를 얻을 수 있고 새로운 기술에 의해 활용이 가능하게 되어 자원 순환형 사회 구축, 지구온난화 방지 등에 기여할 수 있으며 고갈됨이 없이 이용할 수 있는 사회실현을 위한 대안으로서 기대되고 있는데, 이를 효율적으로 이용하기 위한 국내외의 현황을 살펴보면 다음과 같음
- 우선 순환형 사회를 지향하는 일본의 폐기물계 바이오매스의 이용 현황을 살펴보면, 일본에서 에너지나 제품으로 활용될 수 있는 바이오매스는 연간 9,100만 톤이 발생하는 축산폐기물과 1,900톤이 발생하는 식품폐기물이 많은 비중을 차지하고 있으며, 그 외에 발생량은 충분하나 수집·운반에 많은 비용이 수반되어 활용되지 않고 있는 임업 및 농업 부산물 등이 있음
- 한편 일본의 경우 1차 에너지 공급에서 이용되고 있는 재생에너지의 비율은 1.2%이며, 그중 바이오매스 에너지의 비율은 68.7%로서, 자원순환형 사회형성, 지구온난화 방지, 농림어업, 농어촌의 재활성화 등의 관점에서 바이오매스를 에너지나 소재로서 이용하는 바이오매스 산업사회 구축을 위한 대책을 적극적으로 추진 중에 있음
- 그 대표적인 것으로서 일본의 환경성, 농림수산성, 문부과학성, 경제산업성, 국토교통성 등 5개 기관이 공동으로 2002.12에 마련한 바이오매스 자원의 종합적인 활용 전략, 즉 “일본의 바이오매스 종합전략”임
- 바이오매스 종합전략의 내용은 “바이오매스 활용기술의 개발촉진”, “지역특성에 적합한 바이오매스 전략”, “순환형 사회형성, 지구온난화 방지를 포함한 전국적인 규모의 바이오매스 전략”으로 각각 구체적인 목표 수치를 제시하고 있음
- 지역특성에 적합한 바이오매스 전략의 경우 “폐기물계 바이오매스를 탄소량 환산으로 90% 이상, 미이용 바이오매스를 40% 이상 활용하는 마을을 약 500개 구축”하는 것을 목표로 설정하고 있으며, 전국적인 규모의 바이오매스 전략추진의 경우, “폐기물계 바이오매스가 탄소량 환산으로 80% 이상 활용되고, 미이용 바이오매스가 25% 이상 활용”될 수 있도록 목표수치를 정하고 있음
- 또한 일본 환경성에서는 최근 석유가격의 급등에 따라 바이오매스 등의 비화석 연료에 대한 관심과 기대가 매우 높아진 사회적 배경 하에 바이오매스 자원을 원료로 하는 에코연료 즉, 바이오에탄올 등의 수송용의 바이오매스 연료나 목질 바이오매스 연료 등의 사용을 확대하여 석유 연료를 대체하기 위한 검토하기 위하여 “에코연료 이용 추진회”를 2005년 12월에 설치하였음
- 또한 지구온난화 방지대책을 위한 교토의정서에 의거, 2008년~2012년 기간에 온실효과 가스의 총배출량을 1990년 기준으로 6% 삭감목표 달성을 위하여 석유 및 에너지 수급구조의 고도화 대책 특별회계(석유특별회계)를 활용하는 등 대책을 강력히 추진하고 있음
- EU(2001/77/EU)에서는 가맹국마다 2010년까지 전력생산에서 재생가능에너지의 비율을 정하고 있는데 독일은 12.5%로 정하고 있음
- 독일의 경우, 연방환경청 장관은 화석 에너지의 대체나 지구온난화방지를 위해서도 기후변동을 일으키지 않는 바이오매스 에너지의 활용이 반드시 필요하다고 강조하고 있으며 2000년에 시행된 재생가능에너지법을 근거로, 경제성과 농림성이 공동으로 바이오매스 명령의 초안을 작성하여 연방의회에 제출하였음
- 이 명령안은 바이오매스로 인정되는 물질의 종류, 법의 적용을 받는 기술의 종류, 전력 생산시 환경기준 등을 정하고 있는데 바이오매스를 이용한 전력생산의 조건이 정해지면 2010년까지 500만 내지 1,000만 톤 분의 CO2 배출량 삭감을 실현할 수 있을 것으로 예상되며 더욱이 장기적으로는 독일 내 에너지 공급량의 1/5을 바이오매스 에너지로

- 대체하여 생산할 수 있을 것으로 추산하고 있음
- 또한, 독일 환경청의 “환경데이터 2005” 보고서에서 에코로지 세계개혁으로 약 25만인분의 고용이 창출되고 CO2 배출량이 200만 톤 삭감되어 교토의정서의 목표를 거의 달성할 수 있다고 기술하고 있으며, 그 외에도 2003년도에 전체 CO₂ 배출량의 약 20%를 차지하는 운송부문 중 95%가 도로교통에 의한 것으로서 1990년에 비해 온실효과가스 배출량은 6.4% 상승하였으나 환경세의 영향으로 2000년 이후에는 조금 감소하고 있는 것으로 보고하고 있음
 - 한편 2005년 8월 10일에 발표된 지속가능한 발전전략의 중간보고서에 해당하는 “지속가능한 발전의 도표 2005”에서도 에너지의 변환을 중요한 테마로서 취급하고 있다. 여기서 재생가능에너지가 전력공급에서 이미 11%를 차지하고 있으며 2020년까지 전력 수요의 20% 이상을 재생 가능한 에너지로 공급할 목적인 바, 재생가능에너지로 발전하기 위한 송전망과 연결하는 것 등은 기술적으로도 경제적으로도 문제없는 것으로 제시하고 있음
 - 위와 같이 독일에서 재생가능 에너지 사용의 목표를 달성하는데 중요한 정책은 재생가능에너지의 장기적인 고정매수가격을 정하고 있는 재생에너지법임
 - 동법은 독일에서 재생 가능한 에너지가 보급되는데 촉진제 역할을 하고 있다. 한편 EU에서는 소규모 지역에서도 바이오매스 등을 이용한 에너지의 생산과 공급이 가능하고 환경 영향 면에서도 긍정적인 역할을 하고 있으며 고용창출에도 공헌하고 경쟁력도 향상되고 있는 재생가능 에너지의 장점을 살리고 이용 확대를 촉진하기 위하여 EU가맹국에 대하여 정치적, 재정적인 지원의 필요성을 강조하고 있으며 매년 재생가능에너지 세계대회를 개최하고 있음
 - 영국의 환경·식량·지방산업성과 무역산업성이 공동으로 작성한 바이오매스 관련 권고안 보고서(2005.10)에 의하면, 현재 영국 전력수요의 약 5%를 바이오매스 발전이 차지하고 있으며, 화석연료에 의한 열 공급을 현재 이용 가능한 바이오매스 자원으로 대체하는 경우 CO의 배출량을 연간 2,100만 톤 삭감할 수 있다고 한다. 또한 에너지 소비량의 40%를 차지하고 있는 열 공급 중 바이오매스를 난방에 이용하는 경우 자동차 325만대분의 배출량에 해당하는 연간 약 300만 톤의 CO₂를 삭감할 수가 있으며 석유가격이 급등하고 있기 때문에 바이오매스에 의한 난방은 경제성이 있고 CO₂ 삭감대책으로서도 다른 방법에 비하여 저렴한 방안으로 제시하고 있음
 - 그 외 연간 2,000만 톤의 바이오매스를 이용할 수 있다고 제시하고 있으며, 바이오매스 난방용 보일러 도입에 대한 보조금 제도의 도입이나 공공시설에서 이용토록 하는 방안 등 42항목에 달하는 권고사항 및 바이오매스 보일러 도입에 의해 에너지 소비량을 75% 이상 삭감한 성공 사례 등을 소개하고 있음
 - 한편 바이오매스의 이용을 확대하는데 최대 걸림돌이 되는 것은 바이오매스에 대한 홍보부족이기 때문에 바이오매스에 관한 통일된 정보 제공시스템을 구축하고 아울러 정부의 건축물에서 우선적으로 사용하는 방안도 소개하고 있음
 - 그러나 이와 같은 많은 장점과 선진외국의 노력에도 불구하고 바이오매스 등을 이용한 재생가능에너지의 사용은 아직 충분하지 않은 것도 사실임
 - 석탄이나 천연가스는 필요한 때에 필요한 만큼 손쉽게 사용할 수 있는 장점이 있으나, 바이오매스를 이용한 에너지는 아직도 기술이 발전과정에 있고 사용상 편리성이 떨어지는 문제점이 있음
 - 특히, 바이오매스 등을 이용한 재생에너지 도입시 최대의 난점은 발전비용이 높다는 것이며 실제 재생에너지 도입시 소용되는 비용부담에 대하여 부담주체에 따라 크게 3가지 제도가 이용되고 있는데 보조금제도(subsidy)와 세제혜택제도(tax incentives), Renewable Portfolio Standards(RPS)가 있음
 - 재생에너지를 도입하는데 소요되는 비용의 일부를 정부가 부담해주는 보조금제도, 재생에너지를 도입한 전력회사에 대하여 세금을 싸게 해주는 세제혜택 방법과 나머지 하나는 전력회사에 비용을 부담시키는 방법으로서 전력회사의 전력량 가운데 일정량은 반드시 재생 에너지로 해야 하는 규제방법으로서 미국에서는 이를 Renewable Portfolio Standards(RPS)라고 하며 캘리포니아, 텍사스를 비롯하여 10개 주가 도입하고 있는 정책임

- 그 외, 소비자가 직접 부담하는 방법을 생각할 수 있는데 우리가 바이오매스를 이용한 재생가능에너지를 사용함으로써 천연자원의 소비를 억제하고 환경부하를 가능한 한 낮추어서 우리자신 및 후손의 쾌적한 삶과 지구환경을 보전하기 위하여 조금 비싸지만 깨끗한 전기를 구입하는 것은 일반 소비자의 환경에 대한 선택으로 가능한 문제임
- 매립지 가스 발전은 1993년 현재 전 세계에 독일의 98개소, 미국의 248개소를 포함한 481개소에서 연간 약 240만 톤의 석유에 해당하는 에너지를 공급하고 있다. 매립지 가스 발전은 매립쓰레기의 성상(수분, 입도, 매립 밀도, 온도 등)에 크게 좌우되며 입지 조건에 따라 이용 방법도 달라짐. 예를 들면, 매립지 가스에서 흡착법 등을 이용하여 CO2와 황화수소 등을 소각하고 메탄가스가 주성분인 도시 가스로 공급하거나(네덜란드) 가스 자동차의 연료로 공급(브라질)할 수도 있음
- 바이오매스 가스화 발전은 나무 칩 등을 직접 연소시켜 난방이나 발전에 이용하던 것을 가스화하여 정제하고 연소시켜 전기를 얻는 기술로서 스웨덴, 브라질, 독일, 미국 등 목재 자원이나 폐기물이 풍부한 국가에서 주로 연구되고 있음. 이 기술은 현재 선진국의 경우도 1 톤/일 정도의 실험공장을 운영하는 단계에 머물러 있음
- 가스화발전의 전단계로도 볼 수 있는 바이오매스 직접 연소 발전 기술은 영국, 덴마크, 스웨덴 등지에서 활발히 보급되고 있음. 덴마크는 밀짚이나 나무 칩을 사용하여 지역난방과 전기를 공급하는 플랜트가 8개나 가동하고 있다. Maabjerg의 열병합 발전소는 연간 15만 톤의 쓰레기와 5만 톤의 밀짚 그리고 3만 톤의 나무 칩을 연소시켜 150GWh의 전력과 1,500 TJ의 열을 공급하고 있음(발전 용량 38MW)
- 우리나라에는 아직 발전 설비를 갖춘 소각장은 없으며 안양 평촌 쓰레기 소각장, 대구 성서 소각장이 열 공급 시설을 가동하고 있으며 바이오매스 소각 발전 혹은 가스화 발전은 2001년까지 계속되는 2단계 대체 에너지 기술 개발 사업에 개발 계획이 포함되어 있음
- 바이오가스 발전과 매립지 가스 발전은 현재 전자는 유럽에서, 후자는 세계적으로 널리 보급되고 있는 폐기물 이용 발전 방식임. 바이오가스 발전은 유기성 폐기물(음식, 동·식물성, 식품공업 쓰레기 등)을 고농도 혐기 반응기에서 소화시켜 메탄을 발생시키고 이를 발전에 이용하는 것임
- 이러한 형태의 쓰레기 처리 및 에너지 생산 공장이 1988년 프랑스 아미앵(Amiens)에 최초로 건설된 이래 1933년 현재 유럽에만 12기 이상 가동되고 있음.. 덴마크에서는 음식 쓰레기를 축산 폐기물과 통합 처리하고 있으며 캘리포니아는 생물 에너지 기술의 개발과 사용에 있어서 미국내에서 가장 우수하며, 해마다 생물량의 1.4조 파운드 이상이 전기를 생산하기 위해 태워지며 캘리포니아 전기의 약 2.77%를 생산함
- 우리나라에서는 대안에너지 기술 개발 사업으로 연구가 진행 중이나 경제성과 매립지 자체의 문제와 수분이 많은 특성 때문에 충분히 실용화되지 못하고 있음
- 그러나 최근에는 매립지 자체의 문제는 많이 해결되었고 한정된 매립지의 효율적인 이용이 요구되고 있기 때문에 앞으로는 보급이 많이 늘어날 것으로 전망됨

(2-5) 국내외 바이오매스 시장 현황

가. 바이오매스 산업의 특성

- 에너지 및 환경 문제가 심화되면서 재생가능한 자원의 일종인 바이오매스가 급부상하고 있으며, 기존 화석연료 자원을 대체할 수 있는 바이오매스 자원의 상업화에 대한 면밀하고 적극적인 대응이 필요한 때임
- 화석연료의 고갈과 지역적 편재로 인한 에너지 체계의 위협 문제는 어제오늘의 이야기가 아니며, 다소 논란이 있긴 하지만 최근의 고유가 체제가 장기적으로 고착화할 것이라는 견해가 더욱 힘을 얻고 있음
- 석유 생산이 집중된 중동의 불안 요인이 사그라지기는커녕 오히려 커지고 있으며, 반면, 지난 세기 말 2차례의 석유 위기 이후 재생가능한 자원에 대한 관심이 높아졌지만, 아직까지 석유를 대체할 만한 뚜렷한 후보는 등장하지 않고 있음
- 교토의정서가 발효되면서 온실가스 감축을 위해 각국 정부 및 기업들은 대체 기술 및 자원 확보에 더욱 발 빠른 행보를 보이고 있음
- 이러한 가운데 우리 주변에서 흔히 볼 수 있는 쓰레기나 곡물, 농업 부산물 등과 같은

- 바이오매스자원이 에너지 및 환경 문제를 해결할 현실적 대안으로 부각되고 있음
- 바이오매스는 인류가 오랫동안 식량이나 에너지, 건축 자재, 생활 용품 등으로 사용해 온 대표적인 자원이지만 이용이 편리하고 값싸게 각종 제품이나 서비스를 만들 수 있는 석유와 같은 화석연료에 가려 그 가치를 제대로 평가받지 못해 왔음
- 그러나 최근 몇 년 동안 상황이 빠르게 바뀌기 시작하였음. 이미 시장에서는 옥수수나 사탕수수에서 만든 연료용 에탄올의 공급이 부족해지기 시작했고, 곡물의 씨앗이나 폐식용유를 가공하여 얻는 바이오디젤이 유럽을 중심으로 빠르게 성장하고 있음
- 또한 바이오매스 유래 플라스틱은 환경과 지속가능성에 대한 소비자 인식이 높아지는 가운데 기술 발달로 가격 경쟁력을 얻기 시작하면서 시장 저변을 넓히고 있으며 바이오매스가 재생 가능한 에너지로서 뿐 아니라 각종 석유화학 기반의 제품을 대체할 수 있는 잠재력을 가진 것으로 평가되고 있음
- 일부에서는 석유나 석탄과 같은 ‘지하자원’을 대체할 수 있는 거의 유일한 ‘지상 자원’으로 바이오매스 자원을 꼽을 정도임
- 바이오매스에서 유래한 제품들은 그 수명이 다하면 다시 지구상의 물질 순환 고리를 타고 새로운 탄생을 준비하게 되며, 이렇게 볼 때 바이오매스가 화석연료 기반의 일방적 물질 순환 체계에서 발생하는 에너지, 환경 등의 문제를 해소하기 위한 효과적인 대안이라는 데에는 의문의 여지가 없음
- 그러나 바이오매스는 높은 성장 잠재력에도 불구하고 상업화에 있어서는 아직 시장 진입 단계라 할 수 있음.
- 바이오연료, 특히 빠르게 성장하고 있는 에탄올과 바이오디젤은 바이오매스 상업화의 첨병 노릇을 톡톡히 해내고 있으며, 에탄올과 바이오디젤 시장은 지난 5년 동안 연 20% 이상의 고성장을 구가해 왔고, 적어도 향후 5년 이상 동안은 과거와 같은 양호한 성장을 지속할 것이라는 예측임
- 고유가와 함께 환경 규제 프로그램의 강화가 강한 모멘텀을 유지할 수 있을 것이며, 기업들의 참여로 기술 발전도 가속되고 있다는 점 등을 많은 전문가들이 낙관적인 전망의 근거로 꼽고 있음
- 최근 전 세계 에탄올 수요 증가세는 가히 폭발적임. 에탄올 시장의 잠재력을 간파한 다양한 기술 기업들은 물론, Archer Daniels Midland 등과 같은 거대 곡물 가공 및 유통 기업의 가세로 상업화가 더욱 가속될 것으로 보임
- 한편, 유럽을 중심으로 지속적인 성장을 해 온 바이오디젤은 정부의 정책적 지원과 기업들의 생산 및 인프라 참여가 증가하면서 바이오디젤 시장은 향후에도 견고한 성장세를 지속하리라는 예측임
- 바이오매스를 산소가 없는 상태에서 발효를 시키면 메탄이 주성분인 바이오가스가 만들어짐. 바이오가스를 연소시켜 곧바로 전기로 바꿀 수 있을 뿐 아니라, 적절히 처리하면 천연가스처럼 활용할 수 있어 향후 그 성장이 주목됨
- 독일에서는 음식물 쓰레기나 가축의 분뇨, 농업 부산물 등을 활용한 바이오가스 발전에서 발생한 전기를 전력회사에 파는 농가들이 급속하게 늘고 있음. 바이오가스 발전 농가가 지속적으로 증가하고 있으며, 바이오가스 발전의 규모도 소규모 자립형에서 대규모 기업형까지 다양하게 분포하고 있음
- 이러한 바이오가스의 부산물로 나오는 액체 비료는 다시 발전의 원료를 생산하는 농지에 뿌려지게 되어 자원의 이용을 극대화하고 있음
- 한편, 스웨덴에서는 유가가 오르자 바이오가스에 대한 관심이 높아짐. 바이오가스로 가는 자동차의 판매가 급증하였고, 지난 3월 말에는 세계 최초로 바이오가스만으로 가는 여객 열차를 운행하기 시작했음
- 스웨덴의 Lackeby Water는 Goteborg시와 조인트벤처 형태로 도시의 폐수 처리 플랜트에서 나오는 바이오가스를 정제하는 대규모 플랜트를 완성하였으며, 향후 유사한 신규 플랜트가 스웨덴에 설립될 전망임
- 바이오매스로부터 만들어진 플라스틱을 그린플라스틱이라고 하는데, 기존 석유화학 기반의 플라스틱을 대체할 수 있는 현실적 대안으로 급부상하고 있음
- 몇 년 전 그린플라스틱은 재생이 어려운 석유화학 유래 제품에 비해 매우 비쌌으나 관련 생명과학 기술의 발달로, 성능이 기존 플라스틱 제품과 동등 수준으로 접근함

- 또한 가격 격차도 꾸준히 줄어들어 최근에는 동종 석유화학 제품의 2.5~7.5배 수준까지 좁혀졌으며, 일부 냉장/냉동 포장재로 쓰이는 폴리유산 제품은 가격은 물론, 성능에서도 기존 제품 이상의 수준으로 성장함
- 전 세계 플라스틱 시장이 연간 1억 6천만 톤을 훨씬 상회한다는 점을 감안할 때, 그린플라스틱의 잠재 시장은 매우 크며, 반면, 그 생산능력은 낮아 아직까지는 성장 초기의 시장이라 할 수 있으며, 향후 5년간 적어도 연평균 20% 이상 높은 성장률을 기록하리라는 게 전문가들의 공통된 견해임
- 시장 조사 기관인 Frost & Sullivan에 따르면, 그린플라스틱은 2015년경 전체 플라스틱의 1.5~4.8%까지 차지하면서 연간 400만~1,250만 톤의 규모에 이르는 것으로 파악하고 있으며 고유가 체제의 심화, 기술 발전 속도, 정부의 지원 정책 변화 등에 따라 더욱 가파르게 성장할 가능성도 배제할 수 없음
- 앞서 상업화가 진전된 부문 이외에도 바이오매스의 원료 조달에서 가공, 다양한 용도로의 제품 개발 및 생산에 이르기까지 다양한 상업화 기회가 움트고 있음. 다. 특히 Biorefinery를 통해 만들어질 수 있는 제품군 중 향후 가장 주목을 끌 만한 분야가 수소를 비롯한 기초 화학 원료를 생산하는 것임. 그러나 여기에는 관련 인프라의 구축과 기술적 난제들이 산적해 있어 현실화에는 상당 기간이 소요될 전망이며 일부 전문가들은 지금의 제반 여건을 고려할 때 적어도 25년 이상은 되어야 실질적인 변화가 나타날 수 있으리라고 지적함.
- 바이오매스 자원이 상업화되기 위해서는 무엇보다 가격 경쟁력이 필요함. 대부분 기존 제품이나 서비스를 대체하는 성격이 강하기 때문임
- 에탄올이나 바이오디젤의 예에서 보듯이, 값싼 대량의 원료를 얼마나 안정적으로 조달하느냐 여부가 상업화의 최대 관건임
- 바이오매스자원은 전 세계적으로 넓고 넓게 분포되어 있어 현재의 대규모 중앙 집중형 사업 형태만으로는 경제성을 확보하기 어려운 점이 많음. 실제 많은 기업들이 곡물이나 작물, 삼림 등 바이오매스 원료가 풍부한 지역에 진출하여 현지 생산 내지는 가공을 하고 있다. 기업들로서는 이를 통해 규모의 경제를 확보함과 동시에 탄소 배출권까지 노릴 수 있어 일거양득임. 우리나라와 자원 여건이 비슷한 일본이 사탕수수 기반 에탄올을 확보하기 위해 브라질 국영 기업과 제휴한다거나, 또 다른 바이오매스 원료를 얻기 위하여 인도네시아 등 동남아시아에 진출하는 것이 좋은 예라고 볼수 있음
- 무엇보다 중요한 것은 지속적으로 바이오매스를 공급받을 수 있어야 한다는 것임. 삼림이 풍부하여 꾸준히 화석연료를 바이오매스로 전환시켜 온 스웨덴은 지역 열 공급의 50%를 목질계 바이오매스로 공급하고 있음
- 그러나 장기적으로 안정적인 바이오매스의 공급이 이루어지지 않는다면 지속되기 어려운 구조라는 관측임
- 최근 기술 개발을 통해 이를 극복하려는 움직임이 있어 눈길을 끌고 있다. 스웨덴의 Agrobrowse라는 기업은 속성으로 자라는 에너지 작물인 'SRC(Short Rotation Coppice) 버드나무'를 개발하였으며 SRC 버드나무는 심은 지 3년이면 베어 내다 팔 수 있을 정도로 자라는 나무로 그 경제성을 높게 평가받고 있음
- 이 제품은 최근 유럽을 중심으로 목재를 연료로 하는 바이오에너지에 대한 수요가 급증하면서 각광을 받고 있으며, 현재 자매사인 영국의 Renewable Fuels를 통해 유럽 국가들을 대상으로 대대적인 마케팅을 벌이는 중임
- 또한 Biorefinery 관련 기술로 가격 경쟁력을 확보하려는 움직임 또한 활발하며, 대표적인 것이 효소를 활용한 기술임
- 캐나다의 logen은 셀룰로오스 분해 효소를 기반으로 하는 대표적인 생명과학 기술 기업으로서 logen은 지구상에 가장 풍부한 바이오매스라 할 수 있는 셀룰로오스를 고효율로 분해할 수 있는 효소를 만들어내는 곰팡이균을 개발하였음
- 볏짚이나 밀짚과 곰팡이균을 혼합, 발효하여 셀룰로오스를 분해, 에탄올을 생산할 수 있으며, logen은 첫 상업용 플랜트를 가동함. 효소 전문 기업인 Novozymes은 다양한 전분의 원료에 따라 최적의 효소를 개발하고 있는데, 이미 2005년에는 기존의 5달러에 이르던 에탄올 갤런당 효소 비용을 10~18 센트까지 낮출 수 있는 옥수수 전분 분해 효소 시스템을 개발하였다고 함. 그 후 곡식의 전분에서 여러 단계의 공정을 거치지

않고 곧바로 에탄올을 만들어낼 수 있는 효소 시스템을 개발하는 등 바이오연료 관련 효소 시장의 주도권을 빼앗기지 않으려 하고 있음

- 바이오매스 상업화는 원료의 확보에서 제품의 응용에 이르기까지 광범위한 영역에 걸쳐 이루어지고 있으며 바이오매스 상업화는 지역 경제 활성화 및 환경 개선, 에너지 문제 완화 등을 해결할 수 있는 사업으로 그 가치를 인정받고 있음
- 게다가 중앙 집중형이 아닌 지역 분산형의 특성을 지니고 있기 때문에 정부나 자치단체, 지역 커뮤니티 등과의 긴밀한 협력 관계가 요구됨
- 미국의 옥수수 기반 에탄올 산업은 Archer Daniels Midland나 Verasun과 같은 소수 대형 기업을 제외하고는 각 지역에 산재된 수많은 협동조합을 통해 원료의 수집과 가공, 생산이 이루어지고 있으며, 바이오디젤의 선두인 독일은 1990년대 초반부터 독일 택시 연합과 공동으로 정책적인 연료 보급 운동을 벌임
- 동시에 아우디, 메르세데스-벤츠, 볼보, 폴크스바겐 등 주요 자동차 메이커들이 바이오디젤의 연료 사용 인증에 앞장섰으며, 인프라 구축도 활발해졌으며, 현재는 1,800 개 이상의 충전소에서 바이오디젤을 공급받을 수 있게 됨
- 생활 폐기물 유래 바이오매스의 경우 해당 지역의 수집 정책 및 인프라를 활용하지 않고서는 상업화를 기대하기 어려움
- 미국 캘리포니아의 Agromin사는 정원 관리에서 나오는 각종 부산물을 수집, 가공하여 파워 플랜트, 원예업자나 묘목상 등에 팔아 매출을 올리고 있으며 시정부 입장에서는 폐기물 처리 비용 절감은 물론 각종 쓰레기 총량의 50%만을 매립할 수 있는 주정부 규정을 지킬 수 있어 양자 모두 유익함
- 기업의 육성 및 상업화 가속이라는 차원에서 보면 정부 혹은 자치단체의 정책과 함께 활성화를 꾀할 수 있는 다양한 인프라의 구축까지도 면밀히 고려해야 함
- 미국 시카고에 자리를 둔 Shorebank는 1997년 비영리 환경 기업인 Ecotrust와 제휴하여 최초의 환경은행인 ShoreBank Pacific을 설립함
- ShoreBank Pacific은 현재 1억 1,000만 달러 이상의 자산을 운용, 이를 에너지 효율, 폐기물 처리 등과 관련한 기업들에게 자금을 대여해주며, 1999년에는 비영리 자매사인 ShoreBank Enterprise Pacific을 통해 기술 자문, 마케팅 서비스를 제공하고 있음
- 이렇듯 Upstream에서 Downstream, 관련 인프라에까지 시장을 활성화시킬 수 있는 다면적이고 통합적인 접근 방식이 필요한 것으로 보임
- 우리나라는 에너지의 해외 의존도는 높지만 이를 흡수할 여력은 부족한 게 현실임. 대규모로 에너지 작물을 생산할 수 있는 여건이 부족한데다, 버려지는 바이오매스 자원량을 정확히 추정하기도 어려움. 수요 잠재력은 충분하지만, 지금까지는 이를 적극적으로 활용하는 노력이 부족했던 게 사실임
- 우리나라에서 발생하는 가축 분뇨의 경우 연간 3,200만 톤을 훨씬 상회하나, 이 중 10% 가량이 해양으로 배출되거나 정화 처리됨. 나머지 90% 가량이 퇴비나 액체 비료로 작물 생산에 사용됨. 다른 나라에 비해 과다한 영양이 농지에 투입되고 있는 현실을 감안한다면, 바이오매스 자원의 흐름을 에너지원으로 돌린다면 보다 효율적일 것임
- 우리나라의 자원과 기술 현실을 고려할 때 장기적인 관점에서 목표를 정하고 일관되고 지속적인 상업화 노력이 요구될 것으로 보임
- 아울러 효율적인 추진을 위해 바이오매스 상업화에 대한 우선순위를 정할 필요가 있을 것임. 도심 폐기물의 활용 극대화, 바이오매스 유래 플라스틱 생산 기술이나 Biorefinery 관련 기술의 확보, 해외 자원 확보 등을 우선적으로 고려해볼 수 있을 것임

(바이오매스 산업의 장점)

- 재생에너지 생산: 바이오매스는 생물학적 기반의 재료로, 생물체의 폐기물이나 농작물 부산물 등을 활용하여 바이오가스, 생물질 연료 등 다양한 형태의 재생에너지를 생성할 수 있으며, 이는 화석 연료에 대한 의존도를 줄이고 온실가스 배출량을 감소시키는데 도움을 제공함
- 농업 부가 가치 창출: 바이오매스 산업은 농작물 부산물과 생물체의 폐기물을 이용해 생물학적 기반의 제품을 생산하므로, 농업 부가 가치를 높일 수 있으며, 이는 농업

경제의 다각화와 지역사회 발전에 긍정적인 영향을 미칠 수 있음

- 친환경 소재 생산: 바이오매스 산업은 생분해 가능한 소재를 생산하므로 일회용품과 포장 소재 등에서 플라스틱 사용을 대체할 수 있으며, 이는 환경 오염을 감소시키는데 기여함

(바이오매스 산업의 단점)

- 경제적 한계: 바이오매스 산업의 기술적 개발과 생산에는 높은 초기 투자가 필요하며, 이로 인해 경제적 부담이 발생할 수 있음. 또한 기술적인 어려움으로 인해 제품 생산이 불안정할 수 있음
- 식량 경쟁: 일부 바이오매스 원료는 농작물 부산물에서 유래하기 때문에 식량 생산과 경쟁할 수 있으며, 이로 인해 식량 가격 상승이나 식량 부족 문제가 야기될 수 있음
- 지속 가능성 문제: 바이오매스 산업은 적절한 관리 없이 대규모 생산되면 자연 생태계에 부정적인 영향을 미칠 수 있으며, 원료 획득과 생산 과정에서 지속 가능성을 고려하는 것이 중요함

나. 바이오에너지 활용 현황 및 전망

(미국)

- 미국은 바이오에너지 분야에서 지속적인 연구와 투자를 진행하고 있으며, 생물질 연료, 바이오가스, 생물질 전환 등에 대한 연구가 활발하게 이루어지며, 재생에너지 생산의 중요한 출처 중 하나로 인식됨
- 주요 작물인 옥수수를 이용한 에탄올 생산이 활발하게 이루어지고 있으며, 바이오매스를 이용한 전력 생산도 증가하고 있음
- 지속 가능한 농업과 에너지 생산의 융합을 통해 미국은 바이오에너지 분야에서 더 큰 발전을 이뤄낼 전망이다

(중국)

- 중국은 에너지 수요 증가와 환경 문제에 대응하기 위해 바이오에너지 분야에 강한 관심을 보이고 있음
- 산업 폐기물과 농업 부산물을 이용한 바이오가스 생산, 대나무 등을 활용한 바이오매스 에너지 생산 등이 활발히 이루어지고 있음
- 특히 중국은 대기오염 개선을 위해 바이오에너지의 역할을 강조하고 있으며, 바이오매스 발전 설비의 확대 및 기술 혁신을 통해 지속 가능한 발전을 추구하고 있음

(브라질)

- 브라질은 바이오에너지 분야에서 선도적인 역할을 하고 있음
- 사탕수수에서 얻는 에탄올을 대표적인 생물질 연료로 생산하며, 수소와 바이오디젤 생산에도 관심을 기울이고 있음
- 브라질은 긴 기간 동안 바이오에너지를 개발해온 나라로, 농업 부산물의 재활용을 통해 경제와 환경의 양립을 추구하고 있음

(유럽 연합(EU))

- 유럽 연합은 지속 가능한 에너지 생산에 강한 관심을 가지고 있으며, 바이오에너지 분야에서도 다양한 노력을 기울이고 있음
- 바이오매스 연소, 바이오가스 발전, 폐기물 재활용 등 다양한 분야에서 연구와 투자를 진행하고 있음
- 생물질 연료의 개발과 바이오에너지의 인프라 구축을 통해 유럽은 지속 가능한 에너지 생산에 큰 발전을 이룰 것으로 기대됨

(인도)

- 인도는 빠르게 증가하는 에너지 수요와 환경 문제에 직면하고 있으며, 이에 대응하기 위해 바이오에너지 분야에 관심을 기울이고 있음
- 바이오매스 발전과 생물질 연료 생산에 주력하고 있으며, 농업 부산물과 생산 폐기물을 효과적으로 이용하여 에너지를 생성하고자 하는 노력이 진행되고 있음

(일본)

- 일본은 에너지 수입 의존도가 높은 상황에서 바이오에너지를 통해 에너지 안정성을 강화하려는 목표를 가지고 있음

- 폐기물과 바이오매스를 이용한 바이오가스 생산, 해조류를 이용한 바이오에너지 연구 등이 활발히 이루어지고 있으며, 수소 생산과 연계한 바이오에너지의 개발도 진행하고 있음

(전반적 전망)

- 전 세계적으로 바이오에너지는 지속 가능한 에너지 생산의 중요한 흐름으로 자리매김하고 있음
- 환경문제와 에너지 보안에 대한 우려가 커지면서 바이오매스를 이용한 에너지 생산의 기술 혁신과 효율성 향상이 계속되고 있음
- 또한 기후변화 대응을 위해 바이오에너지의 역할이 더욱 강조될 전망이며, 정부와 기업의 지원을 받아 지속 가능한 에너지 인프라가 확대될 것으로 예측됨

(2-6) 국내외 주요 바이오매스 기업 동향

가. 해외 주요 바이오매스 기업 동향

- Novozymes (덴마크)
 - 노보자임스는 2000년대부터 바이오매스 관련 분야에서 혁신적인 연구와 개발을 수행해왔음
 - 주로 효소 및 마이크로비얼 솔루션을 개발하여 바이오매스를 변환하고 재생에너지 생산을 지원하고 있으며, 생물학적 기술을 통해 바이오매스의 가치를 끌어올리고 지속 가능한 에너지 및 생산 방식을 제시하는데 주력하고 있음
 - 최근에는 재생에너지 분야에서의 혁신을 위해 글로벌 파트너십을 확대하고 있으며, 바이오매스 분야에서의 리더로서 미래 에너지 시스템의 주요 구성 요소로 인정받고 있음
- Dupont (미국)
 - 듀폰트는 바이오매스 분야에서의 기술 혁신과 다양한 제품 개발을 추구하고 있음
 - 주로 바이오매스 원료를 이용한 생물학적 기술을 연구하며, 에너지, 식품 및 산업 분야에서 다양한 제품을 개발하고 있음
 - 바이오매스를 활용한 에너지 생산 뿐만 아니라 환경 친화적인 화학 물질 및 생물학적 제품 제작에도 주력하고 있으며, 또한 지속 가능한 미래를 위해 연구 협력과 투자를 확대하여 바이오매스 분야에서의 영향력을 확대하고 있음
- Abengoa Bioenergy (스페인)
 - 아벵고아 바이오에너지는 바이오매스를 이용하여 에너지와 화학 물질을 생산하는데 초점을 맞추고 있음
 - 주로 옥수수과 같은 작물을 이용하여 생물질 연료 생산과 바이오매스 에너지 발전을 수행하며, 재생에너지 산업의 선도 업체로 국제적으로 알려져 있음
 - 환경 보호 및 지속 가능성에 대한 열정으로 바이오매스 분야에서의 혁신과 개발을 이어가고 있음
- Enviva (미국)
 - 엔비바는 목재 바이오매스를 이용하여 바이오매스 펠릿을 생산하고 유통하는 분야에서 선두 업체이며, 생산된 펠릿은 전력 발전소와 열 발생소에서 재생에너지로 활용됨
 - 엔비바는 지속 가능한 산림 관리와 바이오매스 생산을 결합하여 환경 보호 및 재생 에너지 생산을 동시에 추구하고 있음
 - 최근에는 효율적인 바이오매스 펠릿 제조 기술을 개발하여 생산량을 늘리는 등 혁신적인 노력을 진행하고 있음
- Enerkem (캐나다)
 - 에너켄은 폐기물을 이용하여 바이오매스 에너지와 화학 물질을 생산하는데 초점을 맞추고 있음
 - 생물학적 기술을 통해 폐기물을 활용하여 재생에너지 및 화학 물질을 생산하며, 환경 문제에 대한 대안 솔루션을 개발하고 있음
 - 바이오매스와 폐기물의 융합을 통해 지속 가능한 에너지 생산에 기여하고 있음

- POET (미국)
 - 포엣은 옥수수와 같은 작물을 이용하여 생물질 연료를 생산하는데 주력하고 있음
 - 바이오매스의 변환 기술을 개발하여 생물질 연료 생산 효율을 높이고, 농업 부산물을 재활용하여 환경 친화적인 에너지 솔루션을 제공하고 있음
 - 또한 생물학적 기술을 바탕으로 다양한 제품 개발에도 투자하며, 바이오매스 분야에서의 혁신을 지속적으로 추구하고 있음

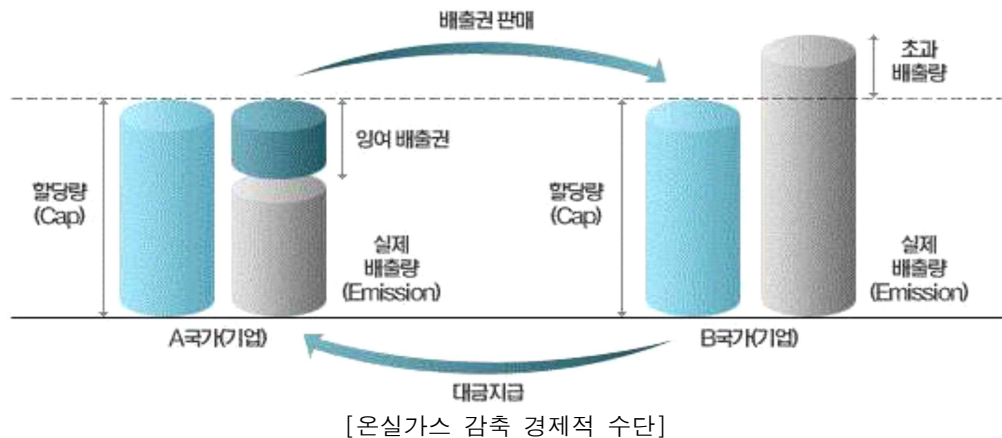
나. 국내 주요 바이오매스 기업 동향

- POSCO (포스코)
 - POSCO는 철강산업을 중심으로 한 대기업으로, 바이오매스 분야에서도 활발한 연구와 개발을 진행하고 있음
 - 주로 목재 바이오매스를 활용하여 열 발전소에서 에너지를 생산하는 바이오매스 발전 사업을 추진하고 있으며, 산업 부산물과 잔여물을 이용하여 친환경 에너지를 생성하는데 주력하고 있음
 - 포스코는 바이오매스 발전 사업을 통해 목재 바이오매스를 이용한 열 발전소를 구축하는 계획을 진행하고 있습니다. 이를 통해 에너지 효율성을 높이고, 탄소 배출량을 감소시키며, 재생 에너지 생산을 확대할 예정입니다
 - 또한 바이오매스 연구소를 운영하여 효율적인 발전 기술 개발과 바이오매스의 활용 방안을 연구하고 있음
- SK케미칼 (SK Chemicals)
 - SK케미칼은 바이오매스 원료를 이용하여 바이오화학 물질 및 생물학적 제품을 생산하는데 주력하고 있음
 - 환경 보호와 친환경 제품 개발에 집중하며, 바이오매스 분야에서의 투자를 확대하고 있으며, 폐기물과 식물성 원료를 이용하여 바이오플라스틱 및 바이오합성 물질을 생산하는 계획을 추진하고 있음
 - 또한, 바이오매스 연구를 통해 친환경적인 화학 물질 및 생물학적 제품을 개발하여 지속 가능한 제조산업을 선도하고자 하고 있음
- 한화솔루션 (Hanwha Solutions)
 - 한화솔루션은 바이오매스 및 폐기물을 이용하여 생물학적 연료와 화학 물질을 생산하는데 주력하고 있음
 - 효율적인 바이오매스 발전 기술과 바이오디젤 생산 기술을 개발하여 지속 가능한 에너지와 화학 물질 생산에 기여하고 있으며, 에너지 효율성을 높이는 연구와 혁신을 추구하고 있음
 - 또한, 해외 바이오매스 연구기관과의 협력을 통해 글로벌 바이오매스 기술을 수용하고 발전시키는 계획을 갖고 있음
- 한국조선해양 (Korea Shipbuilding & Offshore Engineering, KSOE)
 - 한국조선해양은 바이오매스 연료와 관련된 기술 연구를 진행하고 있으며, 특히 해상용 선박 및 발전소에서 사용되는 바이오매스 연료에 대한 기술 개발에 투자하고 있음
 - 최근, 바이오매스 연료의 안전성과 효율성을 높이기 위한 연구를 진행하고 있으며 지속 가능한 해양 분야에서의 역할을 강화하고 있음
- GS Caltex (지에스칼텍스)
 - GS Caltex는 바이오매스 연료와 바이오디젤 등 친환경 연료의 생산을 통해 환경 보호와 에너지 효율성을 추구하고 있음
 - 바이오매스 연료와 바이오디젤 등 친환경 연료의 연구와 생산을 통해 에너지 효율성을 높이고 환경친화적인 제품을 개발하고 있음
 - 또한, 다양한 바이오매스 원료의 활용 방안을 연구하여 친환경 에너지 솔루션을 제공하고자 함

○ 스마트팜 에너지 활용 동향

(3-1) 농업부문 스마트팜 동향

- 국가 에너지 기본계획에 부합하는 농업부문 대체 에너지 보급 확대 방안 확립이 필요함
- 오늘날 유가는 배럴당 90달러 선을 돌파하였으며, 세계 경제연구소들은 유가가 떨어질 가능성은 적다고 밝히고 있음. 현재 기술로 캐널 수 있는 양은 약 1조4000억 배럴 정도로 추정됨. 전 세계 석유생산량이 더 이상 늘어나지 않을 뿐만 아니라 세계 최대 산유국인 사우디의 생산량이 눈에 띄게 줄어들고 있음
- 화석연료를 중심으로 발전해 왔던 현재의 경제 시대는 대체에너지로의 발 빠른 전환을 요구하고 있음. 이와 더불어 환경문제에 대한 사회적, 경제적 중요성은 더욱 부각되고 있음
- 교토의정서에 의하면 일본은 2008년부터 2012년의 제1약속기간동안 1990년도의 온실 효과가스 배출량의 6%를 삭감할 의무를 가지게 됨. 또한 발리로드맵에 따라 2013년부터는 모든 선진국과 개도국이 온실가스 감축에 동참하게 됨
- 교토의정서 비준을 거부해 온 미국은 물론 중국, 인도, 우리나라를 포함한 세계 각국은 자국의 실정에 맞는 온실가스 감축조치를 취해야 하는데 측정, 보고, 검증이 가능한 방법을 동원하도록 로드맵에 규정돼 있음
- 교토의정서를 이행하기 위한 경제적 수단 3가지(배출권거래제, 청정개발체제, 공동이행제도) 중 주된 수단인 배출권거래제(Emission Trading: 국가마다 할당된 감축량 의무달성을 위해 자국의 기업별, 부문별로 배출량을 할당하고 기업들은 할당된 온실가스 감축 의무를 이행하지 못할 경우 다른 나라 기업으로부터 할당량을 매입할 수 있도록 하는 제도)를 통해 아래 그림과 같이 화석연료 중심에서 저탄소 중심의 경제체제로 전환하는 분기점이 될 것이며, 이에 따라 우리나라도 적극적으로 대비하여야 하는 상황임



→ 난방에너지원으로는 전기가 48.2%로 가장 많이 선호되었고, 경유 20.4%, 펠릿 10.9%, 지열 10.2%, 벙커C유 8.8%, 공기열 0.7%이었음. 세부적으로 보면 전기는 완숙토마토에서는 60.8%였으나, 다른 품목에서는 50% 이하였다. 딸기와 방울토마토에서는 경유가 20% 이상 선호되고 있음. 파프리카에서는 지열이 27.6%로 두 번째로 많이 선호되고 있음

(단위 : %)

구분	펠릿	전기	경유	벙커C유	공기열	지열
완숙토마토	7.8	60.8	17.6	5.9	2.0	5.9
딸기	14.6	39.0	24.4	17.1	0.0	4.9
방울토마토	12.5	37.5	37.5	0.0	0.0	6.3
파프리카	10.3	44.8	10.3	6.9	0.0	27.6
전체	10.9	48.2	20.4	8.8	0.7	10.2

[작물의 난방 에너지원]

- 고유가로 인한 시설원에 농업인의 소득보전을 위해서는 석유난방을 대체할 수 있는 새로운 대안의 제시가 필요한 실정이며, 특히 대규모 시설원에단지를 조성하는 경우 연료 전지 배기 가스로 분리된 폐열을 재활용하여 냉난방을 하게 된다면 난방비 절감은 물론이고 CO2 배출 저감에도 크게 기여할 수 있음
- 정부는 수소경제를 3대 전략 투자분야의 하나로 선정하고, 미래 친환경 에너지로서 생산, 저장, 운송, 활용 등 단계별 수소 밸류체인 구축과 수요기반 확충 계획을 발표하였음
- 농업시설 중 에너지 소비량이 가장 많은 온실 적용을 위한 수소 연료전지 열병합시스템 설계 및 스마트 온실 적용 연구 필요함
- 국제사회 저탄소사회 전환에 대응하여 '2050탄소중립' 선언('20.10) 및 탄소 중립 추진 전략 발표('20.12)
- 신재생에너지 활용 및 스마트 농업 구조 확립으로 농업분야 온실 가스 감축 가능하며 한국형 스마트팜 기술개발은 정부가 국정 핵심과제의 하나로 추진하는 주요사업으로 스마트팜 기반 에너지 효율성 연구 추진이 필요함
- 수온과 온도가 상승하고 남극의 빙상이 녹았으며, 해수면이 상승하는 등의 기후변화는 세계가 직면한 가장 심각한 문제 중 하나임. 이러한 기후변화는 주로 이산화탄소와 같이 인위적인 대기오염 물질 배출과 관련이 있으며, 이산화탄소 농도는 산업혁명(270 ~ 400 ppm)이후에 40%이상 증가하였고 현재까지도 1년에 약 2 ppm 증가하고 있음
- 온실가스 총 배출량은 2011년 684.9 백만톤 CO2 eq.에서 매년 증가하는 경향을 보여 2014년에는 총 배출량이 691.9 백만톤 CO2 eq.로 나타났으며, 2018년에는 총 배출량이 727.6 백만톤 CO2 eq.로 나타났음
- 온실가스 총 배출량이 2018년이 2011년보다 약 1.06배 정도 늘어났음. 지구 온난화의 직접적인 원인은 온실기체가 대기 중으로 배출됨으로써 일어나는 온실 효과 때문이며, 온실가스의 주범으로 전체 온실가스 배출 중 80%이상을 CO2가 차지하고 있는데 CO2는 주로 에너지 사용 및 산업공정에서 배출됨
- 에너지와 산업부분에서 발생하는 온실가스 배출량은 전체 온실가스 배출량의 94.1%를 차지하고 있기 때문에 온실가스를 감축하기 위해서는 신·재생 에너지의 개발과 보급이 필요함

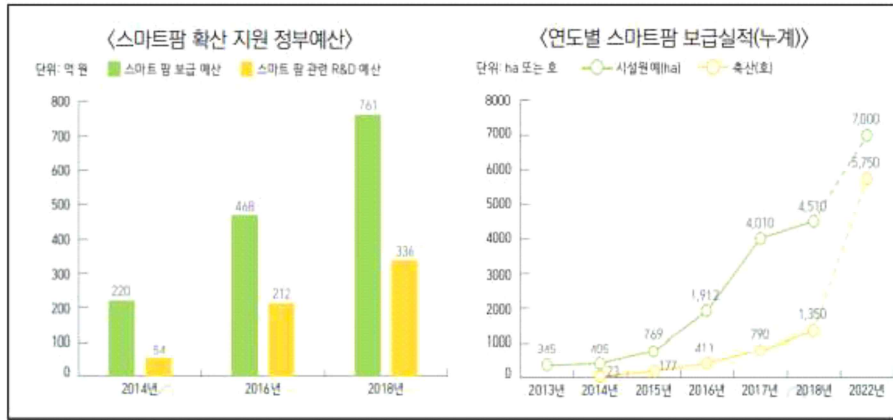
(단위 : 백만톤 CO2 eq.)

(연도)	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
총배출량	684.9	688.3	697.4	691.9	692.5	693.5	709.8	727.6
순배출량	632.3	641.3	654.8	648.7	648.2	648	668.3	686.3
에너지	595.1	596.5	605	597.4	600.7	602.7	615.7	632.4
산업공정	52.9	54.4	54.8	57.5	54.3	53.2	55.9	57
- 농업	21.1	21.5	21.3	21.4	21	20.8	21	21.2
- LULUCF (Land Use, Land Use Change and Forestry)	-52.6	-47	-42.5	-43.3	-44.4	-45.6	-41.5	-41.3
- 폐기물	15.8	15.9	16.2	15.6	16.6	16.8	17.2	17.1
총배출량 증감률(%)	4.4	0.5	1.3	-0.8	0.1	0.1	2.3	2.5

[국가 온실가스 통계]

(3-2) 농업부문 에너지 사용 현황

- 농업현장에서 스마트팜 보급이 점차 늘어나고 있음
 - 작물별 생육정보 빅데이터를 구축하여 운영되는 스마트팜은 국내 농업현장에서 어느 정도의 성과를 나타내고 있으며, 기본 농가뿐만 아니라 귀농민(도시민, 청년들)이 스마트팜을 운영하여 소득창출은 물론 농가에 새로운 활력이 되고 있음
 - 농림축산식품부에 따르면 스마트팜 보급면적과 축사의 보급이 '17년에 크게 증가하여 '16년 1,912 헥타르에서 '17년 4,010 헥타르로 증가하였으며, '22년 예상치로 7,000 헥타르로 증가할 것으로 보고 있음



[연도별 스마트팜 보급현황]

→ 국내스마트팜(식물공장 포함, 10%미만 수준) 시장규모는 '18년 1조 2,755억원에서 연평균 23.44% 성장하며, '23년에는 약 3배가 증가한 3조 6,508억원 규모가 될 것으로 전망하고 있음

구분	2018년	2019년	2020년	2021년	2022년	2023년	CAGR
국내시장	12,755억원	15,680억원	19,424억원	23,988억원	29,650억원	36,508억원	23.4%

[국내스마트팜 시장규모 및 전망]

- 농업 경쟁력 향상을 위한 스마트팜 기술 기반 확립이 필요함

→ 우리나라는 논밭 중심의 전통적인 농가의 영농환경이 악화됨에 따라 작물의 안정적인 재배가 가능한 비닐하우스의 보급이 증가하는 추세지만 우리나라의 스마트팜은 주요 장비를 외국산에 의존하고 있고 재배 작황 및 생장·환경관리기술이 미흡하여 단위 면적당 생산량이 네덜란드의 절반 수준에 머물러 있는 것으로 분석되고 있음

→ 시설원에 부문의 스마트팜 보급면적은 전체 시설면적의 1.9% 수준에 불과하며, 시설원에 농가의 온실형태는 유리온실과 연동온실이 전체의 78% 수준임

(단위 : 호, ha, %)

구분		농가수(호)	시설면적(ha)
전체시설(A)		151,496	64,528
ICT 시설	정부지원	1,047	769
	민간 등	1,578	489
	계(B)	2,625	1,258
비율(B/A)		1.7	1.9

[시설원에 스마트팜 보급현황]

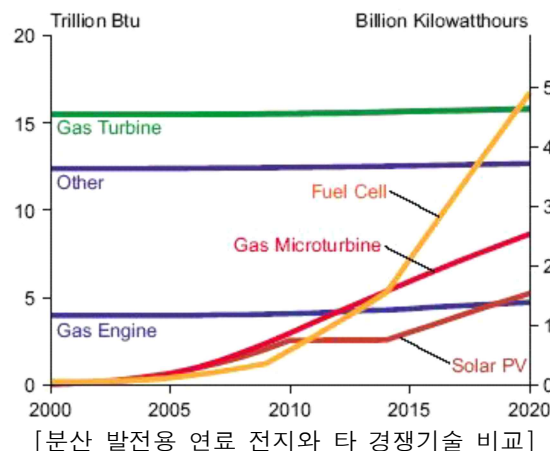
→ 시설원에 부문의 스마트팜 농가는 파프리카와 토마토 농가의 수가 비슷하였지만, 재배 면적은 파프리카가 전체의 절반 수준이며 노지과수는 환경제어가 어렵고 토양 자체의 성분이 다양하므로 시설원예보다 보급이 어려운 편임. 또한, 노지과수 스마트팜은 사과 재배의 비중이 가장 크며, 축산부문의 스마트팜은 양돈을 중심으로 파악되고 있음

구분	한우	젓소	양돈	양계	기타	전체
전체 농가	98,372	8,454	4,991	42,004	2,172	155,993
스마트팜 도입농가	1	37	179	40	2	261
비중(%)	0.0	0.4	3.6	0.1	0.1	0.2

[축산 부분 주요 축종의 스마트팜 보급현황]

→ 원예 부문의 스마트 기술 개발 및 보급은 주로 시설원예나 과수 부문에서 활성화되어있고 노지 채소 부문에는 기술 개발이 미흡한 실정이며, 스마트 설비 및 시설의 도입 비용을 절감하여 도입을 촉진할 수 있는 정책 개발이 필요함

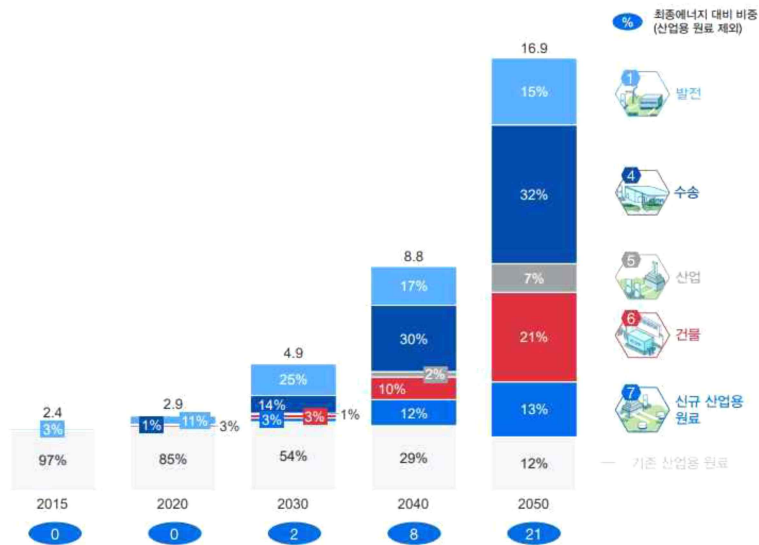
- 농업 부문에 대체에너지 이용 기술의 개발과 적극적인 재활용이 필요함
 - 지구온난화 억제 및 에너지의 안정적인 공급을 위한 화석연료의 대체에너지자원 개발과 이들을 고도로 이용하고 처리할 수 있는 기술의 개발이 절실히 요구되고 있음
 - 이전까지는 원자력, 화력 및 수력 중심의 대규모 에너지 공급과 열병합 분산형 에너지시스템을 혼용하여 에너지 절약을 위한 작업을 시도하였음. 하지만, 원자력 에너지의 위험성에 대한 국제적 경각심이 날로 높아지고 있으며, 여타의 대체 에너지원들은 효율적인 시스템의 개발은 기술적 포화상태로의 접근으로 인하여 더딘 발전 속도를 보임
 - 대체에너지의 느린 발전 속도로 기존 에너지 공급방식의 효율을 증대시키고자 하는 노력이 진행되어 왔으며, 소형엔진, 마이크로 가스터빈 등의 기술이 급속히 발전하여 고효율의 열병합 분산형 시스템이 개발 보급되었음
 - 미국의 Capstone Turbine사의 8 kW급의 가스터빈, 일본 Honda사의 소형가스엔진인 "EcoWil", 독일의 Fichtel & Sachs 사의 5.5 kW급 단기통 가스엔진 유닛 등 다양한 고효율 분산형 발전시스템이 개발되었고, 특히, 독일의 Fichtel & Sachs 사의 단기통 가스엔진 유닛은 집합주택 등 1만여대 공급의 개가를 올렸음
 - 그 외에도 미국, 스웨덴, 스위스 등 많은 나라들이 분산형 발전 시스템의 개발과 보급에 힘쓰고 있음. 하지만 가스터빈이나 소형가스 엔진은 열을 내연기관의 태생적 한계로 인하여 에너지 손실과 화석연료의 이용에 의한 다량의 온실가스 배출이 문제점으로 되고 있음
 - 친환경적이고 경제적인 대체에너지에 대한 관심이 높아지고 있는 가운데, 연료전지는 가장 가능성 있는 대안으로 집중 받고 있음. 연료전지는 연료가 가지는 화학적인 에너지를 직접 전기적인 에너지로 변환하는 장치로 Carnot 효율의 지배를 받지 않음
 - 따라서 연료를 연소하여 열에너지를 발생시키고 이를 기계적 에너지로 전환한 후 다시 이를 전기에너지로 변환하는 가스터빈이나 가스 엔진보다 열역학적으로 전기적 효율을 획기적으로 높일 수 있는 우수성을 가지고 있으며, 또한 소음과 진동이 적고 배기가 깨끗하여 친환경적인 발전 방식임
 - 또한, 향후 풍력이나 태양열, 태양광, 지열 등과 같은 자연에너지 등에서 획득한 전기를 이용하여 물을 분해, 수소를 발생시켜서 발전에 이용할 경우 연료전지는 온실가스에도 자유로워 미래 에너지원으로서의 좋은 대안으로 각광받고 있음. 열병합 발전 방식의 시장전망을 나타낸 것으로서 연료전지가 타 경쟁 기술에 비해 향후 압도적인 증가 추세로 성장할 것을 예측하고 있음
 - 연료전지 기술개발을 통한 새로운 에너지원의 개발은 현재 석유에너지로 집중된 한국의 에너지 공급구조에서 무한한 에너지원인 수소를 활용할 수 있는 전환점이 될 것임. 또한 공기업 분할 및 민영화와 관련하여 예상되는 전력의 가격과 공급의 안전성 문제에 대해 하나의 안전장치로서의 기능을 감당할 수 있을 것이며, 날로 증가하는 전력요구에 대한 부담을 경감할 수 있을 것임
 - 자연친화적인 대체에너지인 연료전지 개발은 향후 세계 경제사회에서 우리나라가 중심적 역할을 수행하는 데 핵심이 되는 열쇠이며, 장차 반드시 다가올 선진국들의 환경 장벽을 헤쳐 나가며 미래 에너지 시장을 선점하는 기능을 담당하게 될 것임



- 대체에너지에 대한 농업현장에서의 수요

- 농업현장에서 수소연료전지와 축열, 태양열을 보조에너지원으로 활용코자 하는 주요 수요처는 스마트팜이며, 전체적 수소연료전지 산업의 수요를 예측하면 다음과 같음
- 2015년 기준 국내 전체 수소 사용량은 약 240만 톤으로, 수소의 대부분은 산업용 원료로 사용되었으며, 매킨지 보고서는 2050년 국내 수소 사용량은 약 1,690만 톤으로 2015년 대비 약 7배 증가할 것으로 전망함
- 농업용 최종 에너지 수요는 10%이내가 될것으로 예상되며, 2050년이면 국내 사용에너지의 약 21%를 수소에너지에 의존하게 될 것으로 예상되며, 이중 농업용 수소연료전지 사업은 '25년에는 성장기에 이를 것으로 예측되고, 발전, 수송, 산업, 건물 부문 및 산업용 원료 등 광범위하게 사용될 것으로 전망되는 수소연료전지 시장에서 농가용(수소연료전지 적용 스마트팜과 농기계)는 국가 전체 발전량의 10%에 해당하는 전력(10GW)를 소비할 것으로 예측됨
- 수소 총수요는 2030년까지 지속적으로 증가 후, 2030년 이후 기술발전, 고객 확보, 누적된 최종소비 수소연료전지 기기 구매로 이어지는 선순환으로 급격히 증가할 것으로 예상됨
- 국내의 고정형 및 이동형 수소연료전지 기술은 선도적 위치로, 발전, 수송, 건물 및 농가에서 특히 높은 수소의 수요가 기대됨

(단위 : 백만 톤, 수소 수요)



[한국의 2015-2050 수소비전]

- 대체에너지에 대한 경제·산업적 측면의 필요성

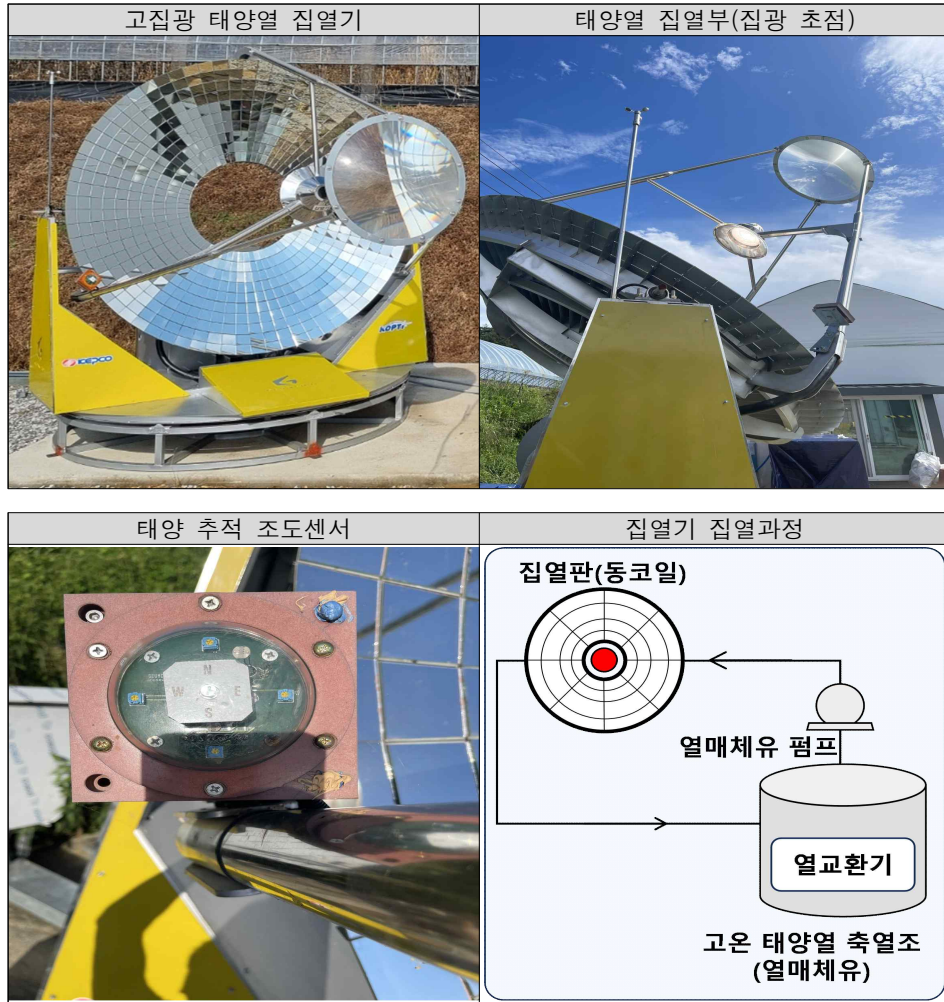
- 일본의 쇼와덴코 그룹은 폐플라스틱에서 추출한 수소를 활용해 채소를 키우는 재배 기술을 발전시킴. 쇼와덴코의 폐플라스틱을 통한 에너지 발전 시스템은 스마트팜의 LED 조명을 위하여 공급되고 지역내 호텔에 작물을 공급함으로써 새로운 자원순환기술의 가능성을 입증함
- 폐플라스틱을 통한 자원순환기술은 호텔의 에너지 사용량의 30%를 공급하며 친환경 작물재배를 가능하게 하였으며, 에너지 생산 과정에서 발생하는 이산화탄소를 드라이아이스로 재활용하여 환경오염을 최소화할 수 있음
- 스웨덴의 유기농업 지역에서 화석연료를 많이 사용하는데 이를 대비하기 위해서 유기농업 중 발생하는 자재를 이용하여 연료전지를 활용해서 에너지를 만들어 연료전지 구동 트랙터에 사용되었음
- 소각장에서 생산된 폐열을 활용하여 작물을 재배하였을 때 경유난방 대비 연간 상당량의 경제적 절감효과를 보임
 - * 완숙토마토: 1.5억원, 파프리카: 0.6억원, 열대화훼류: 1.9억원
- 타이어 공장에서 생산된 폐열을 활용하여 파파야를 재배 시 경유난방 대비 1년에 0.9억원의 절감효과를 보였으며, 화력발전소에서 생산된 폐열을 활용하여 망고와 시설 감귤을 재배하였을 때 경유난방 대비 1년에 3.7억원의 절감효과를 보였음

라. 공동연구개발기관 : (재)전라남도환경산업진흥원

○ 배열 이용 고효율 축열 시스템 개선 및 성능평가

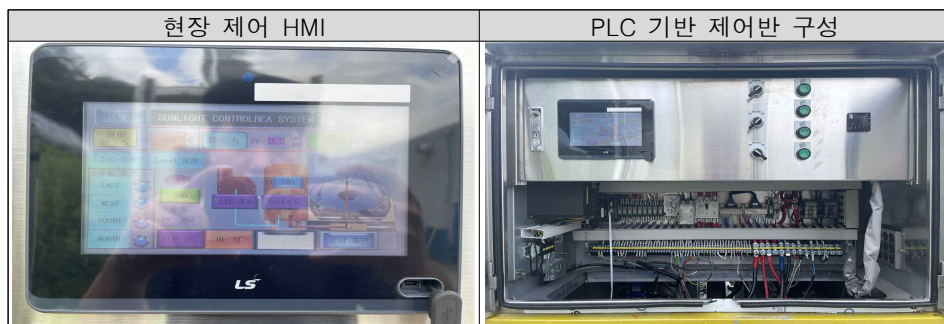
(1) 열에너지원 확보를 위한 고집광 태양열 집열기 구축

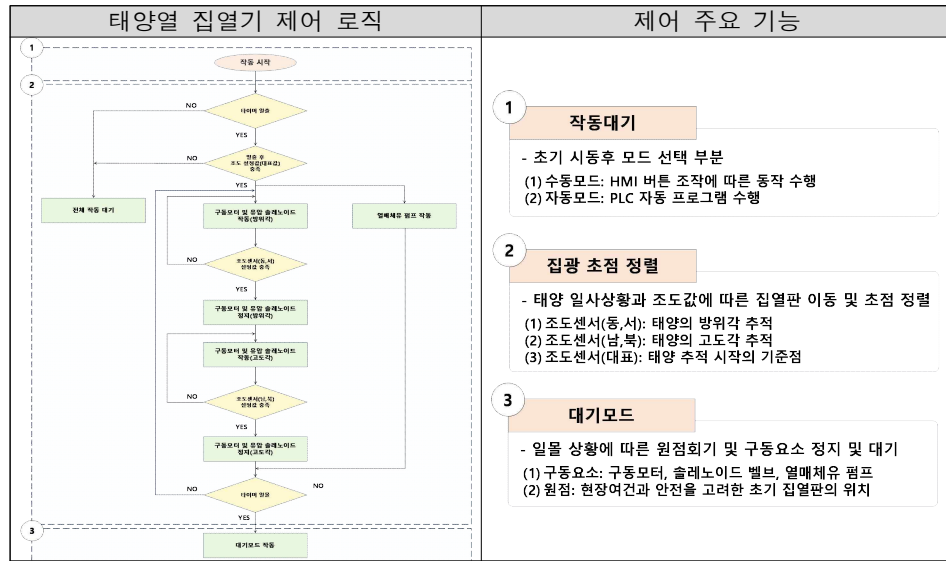
- 태양열을 고집광하여 고온의 열을 생성할 수 있는 태양열 집열기 구축
- 태양의 고도각 및 방위각에 따라 집열판을 회전시킬 수 있는 조도센서 설치
- 조도 센서는 2축(방위각, 고도각) 형태이며 각 방위별로 포토 트랜지스터 센서가 설치되어 아날로그 값을 취득하여 태양의 위치를 판별
- 측정 조도값의 차이를 통해 구동모터로 신호를 보내 태양 2축 추적 수행 가능
- 조도센서 위치 및 센서 감도 조절 등을 통한 집광 초점 정렬
- 가열된 집열판의 코일관 내부로 열매체유를 순환시켜 고온 태양열 축열조 내부에 열을 저장하고, 열교환기를 통해 스팀 생성이 가능한 구조



[고집광 태양열 집열시스템 구축]

- 태양의 일출, 일몰 상황에 대응할 수 있도록 전체시스템 제어로직 설계 및 제어반 구성
- 전체 시스템 구동 및 제어를 위한 PLC 제어반 및 현장 제어 및 조치를 위한 터치패널(HMI) 구성

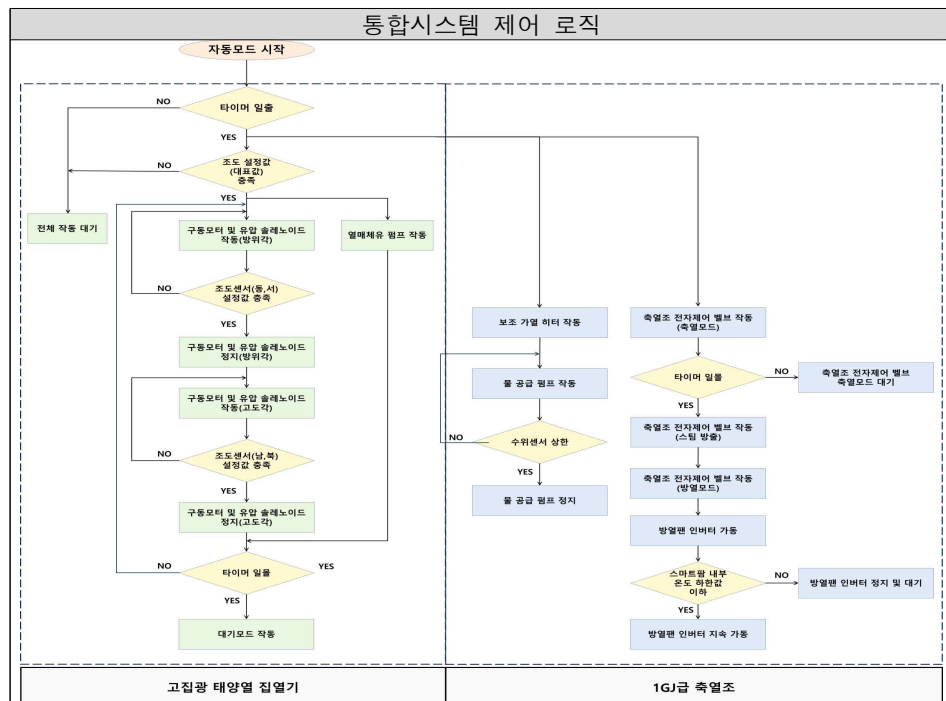
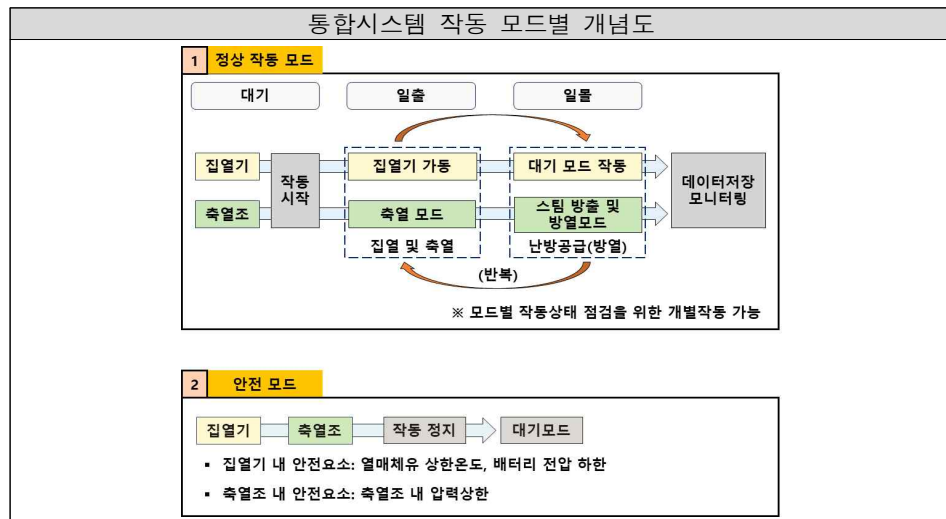


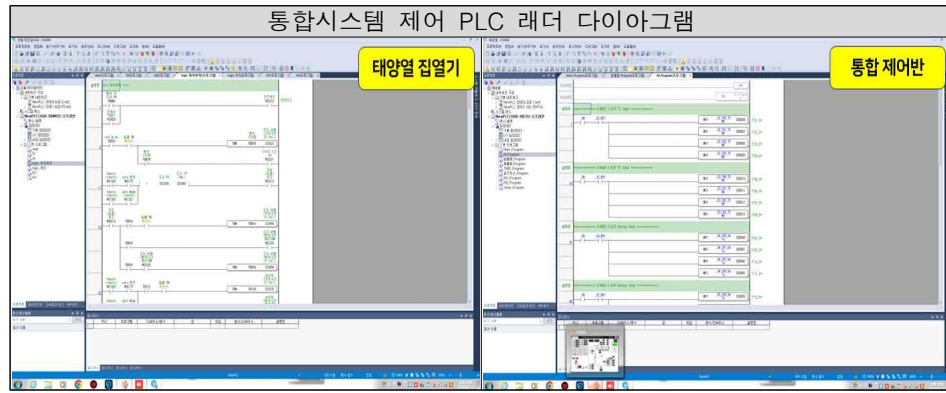


[집열기 제어 로직 및 제어반 구축]

(2) 통합시스템 전자제어 방식 및 시스템 제어 HMI 개선

- 열원인 고집광 태양열 집열기와 열을 저장하고 공급하는 축방열 시스템의 통합 제어·운동을 위한 작동모드 별 제어 구성요소 통합
- 작동 모드별 개념도를 바탕으로 전체 시스템 제어 로직 구성 및 PLC 프로그래밍





[통합 시스템 제어 로직 및 프로그래밍]

(3) 통합시스템 제어 개선(HMI) 및 원격제어

- 통합 제어 시스템 PLC 프로그램을 반영한 SCADA HMI 재구성
- 집열기 제어반의 신호를 통합 제어반에서 취득하고 최종 제어 PC로 송신하여 PC의 SCADA HMI를 통해 원격 구동 및 제어 감시 수행가능
- 실질적으로 육안으로 구동상황 확인을 위한 원격 구동·제어·감시 기능 개선을 위한 CCTV 화면 취득



[통합시스템 제어 시스템 구축]

(4) 축방열 시스템 연계 열 공급망 구축

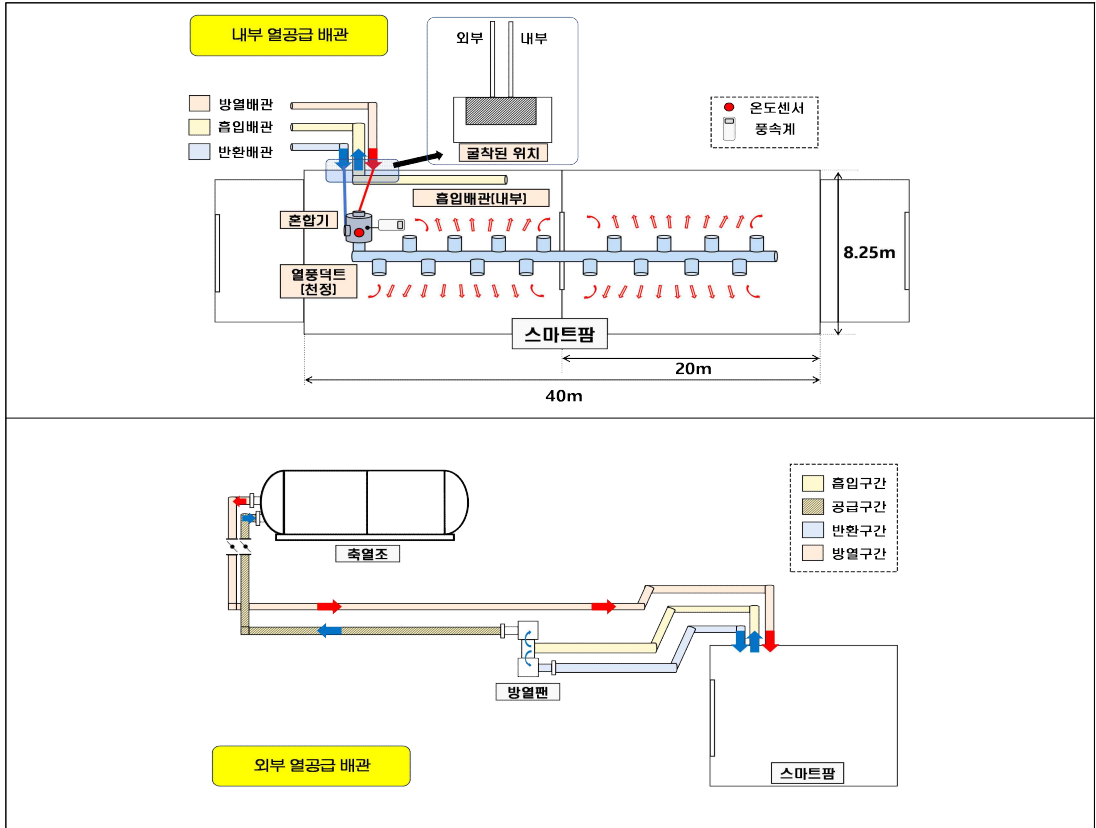
- 온실 내 난방공급을 위한 온실 내외부 열 공급망 구축
- 축열된 상변화물질(PCM)의 열에너지를 공기로 회수하고 온실 내로 공급 가능한 구조
- 공급된 온풍을 상부 덕트를 통해 온실 전체로 공급되어 난방됨



[외부 열공급 배관 구축 및 단열재 설치]



[내부 열공급 배관 구축(천정형 덕트)]



[내외부 열공급 배관 구성도]

○ 배열 이용 고효율 축열 시스템 개선 및 성능평가

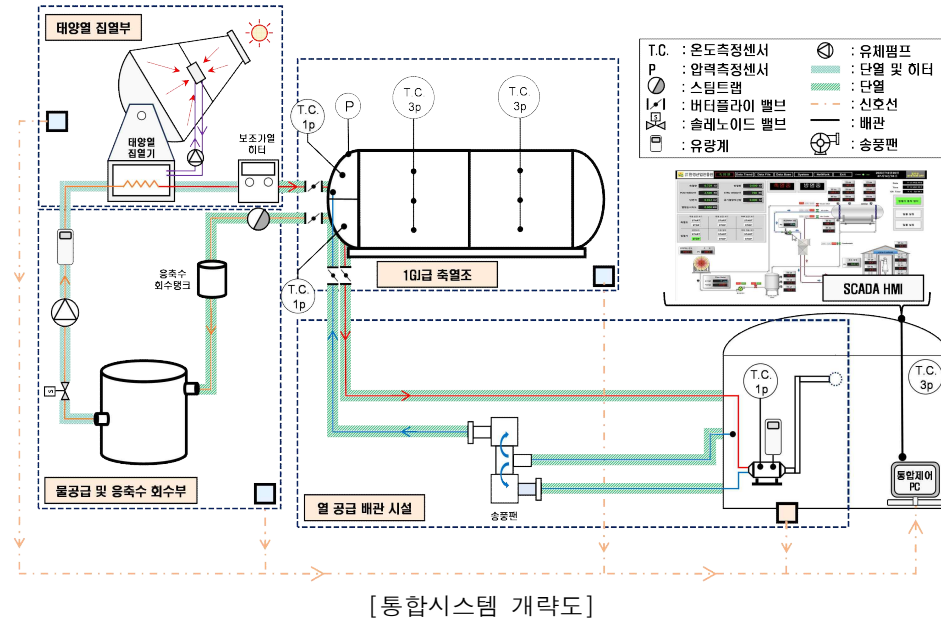
(1) 열에너지원 확보를 위한 고집광 태양열 집열기 구축

- 태양 일사에 따라 태양열 집열기가 태양추적을 시작하여 집열이 되며, 이에 따라 고온 태양열 축열조 내 열매체유 온도 상승
- 고온 태양열 축열조내 열교환기를 통해 공급된 물이 스팀으로 변환되어 1GJ급 축열조 내로 이송
- 방출열에 의해 축열조 내부 PCM의 상변화 및 SUS 구조체에 현열 및 잠열 에너지 저장
- 과공급된 스팀은 스팀트랩에 의해 누설되지 않으며, 응축된 물은 재순환되어 수축열조로 이송되고 시간에 지남에 따라 일부 열이 저장

(2) 방열 및 열공급 공정

- 태양 일몰에 따라 태양열 집열기는 원점으로 회기하며 동작 정지되어 스팀 공급 중단
- 더불어 축열조 입출구의 전자제어 밸브의 변환으로 스팀 배관 차단 및 송풍배관 연결
- 프로그래밍된 시퀀스에 따라 송풍팬 가동이 시작되며, 스마트팜 내 2개의 구획에 설치된 온도센서 하한값을 기준으로 가동 및 정지 결정
- 하한 온도 이하로 되었을 경우 송풍팬을 통해 스마트팜 내부 공기 일부를 흡입하여 축열조 내부로 급기하여 고온의 온풍 생성
- 온풍은 다시 스마트팜 내부로 송풍되고, 내부의 혼합기에서 일부 재순환된 내기와 혼합되어 천정의 열풍 덕트로 공급 및 난방 수행

- 스마트팜 내 2개의 구획에 설치된 온도센서를 통해 하한 온도값을 피드백하여 일정 온도 유지 가능



○ 1GJ급 축열조 실증현장 입회 성능평가

(1) 시험 방식

- 평가 기관: 한국산업기술시험원(KTL)
- 시험 장소: 강원도 원주시 신림면 연봉정길 5 제2가나안농학교(실증부지 내)
- 시험 방식: 1GJ급 축열용량 확인을 위한 연속가동 후 축열량 1GJ 확인
 - 축열조 내부의 온도센서 6개의 평균값과 물성치를 통해 축열량 계산
 - Law data 및 현장 지시 화면을 비교 검증하여 신뢰성 확인
 - 축열된 축열량과 이론적으로 계산한 축열량 비교 제시
- 열량 산정 계산식

- 총 축열량 = PCM 축열량(현열+잠열) + 내부 SUS 구조물 축열량(현열)

$$\Delta H_{charging} = \Delta H_{PCM} + \Delta H_{structure}$$
- PCM 축열량 = PCM 현열량 + PCM 잠열량

$$\Delta H_{PCM} = \Delta H_{sensible, PCM} + \Delta H_{latent, PCM}$$
- PCM 현열량

$$\Delta H_{sensible, PCM} = m_{PCM} \times \{C_{P, PCM(l)} \times (T_f - T_{melting}) + C_{P, PCM(s)} \times (T_{melting} - T_i)\}$$
- PCM 잠열량

$$\Delta H_{latent, PCM} = m_{PCM} \times H_{melt, PCM}$$
- 내부 SUS 구조물 현열량

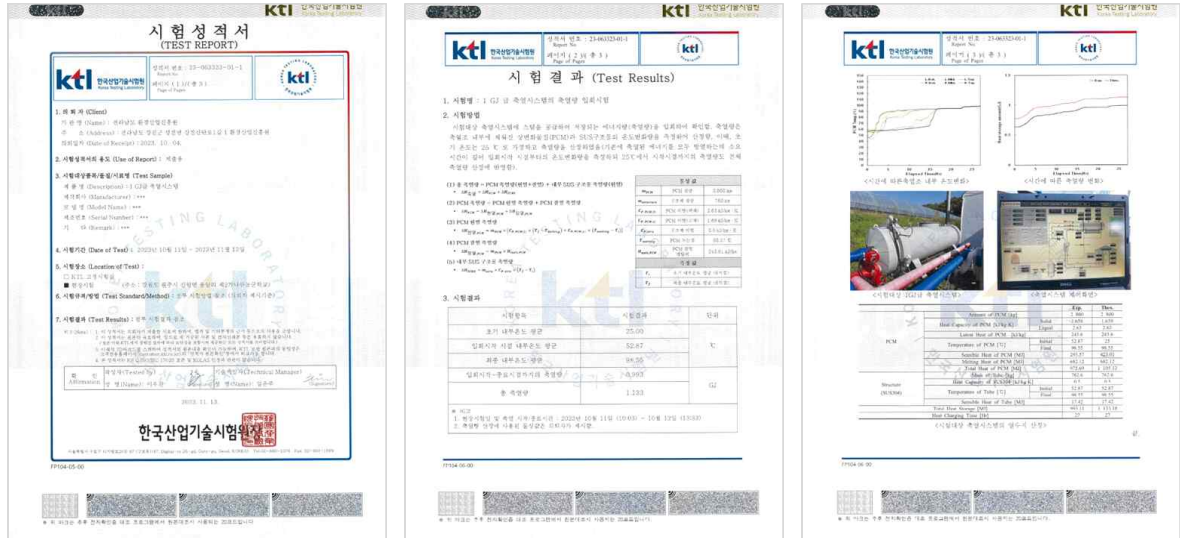
$$\Delta H_{structure} = m_{structure} \times C_{P, structure} \times (T_f - T_i)$$

기호	구분	물성값	단위	비고
m_{PCM}	PCM 질량	2,800	kg	고정값
$m_{structure}$	구조체 질량	760	kg	
$C_{P, PCM(l)}$	PCM 비열(액체)	2.63	kJ/kg·K	
$C_{P, PCM(s)}$	PCM 비열(고체)	1.66	kJ/kg·K	
$C_{P, structure}$	구조체 비열	0.5	kJ/kg·K	
$T_{melting}$	PCM 녹는점	68.57	℃	
$H_{melt, PCM}$	PCM 잠열 엔탈피	243.61	kJ/kg	
T_i	초기 온도	-	℃	초기 PCM 내부온도 평균온도 (6개 지점)
T_f	최종 온도	-	℃	최종 PCM 내부온도 평균온도 (6개 지점)

[SCADA 데이터 모니터링 및 제어 요소]

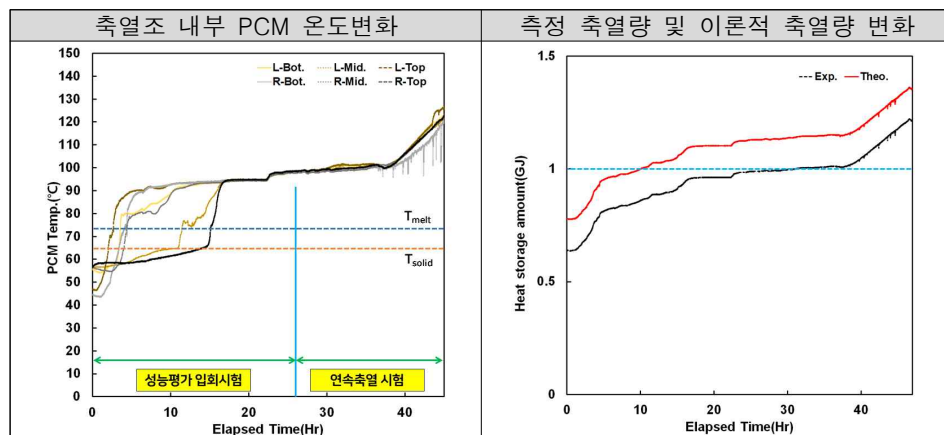
(2) 축열조의 1GJ급 축열성능 확보

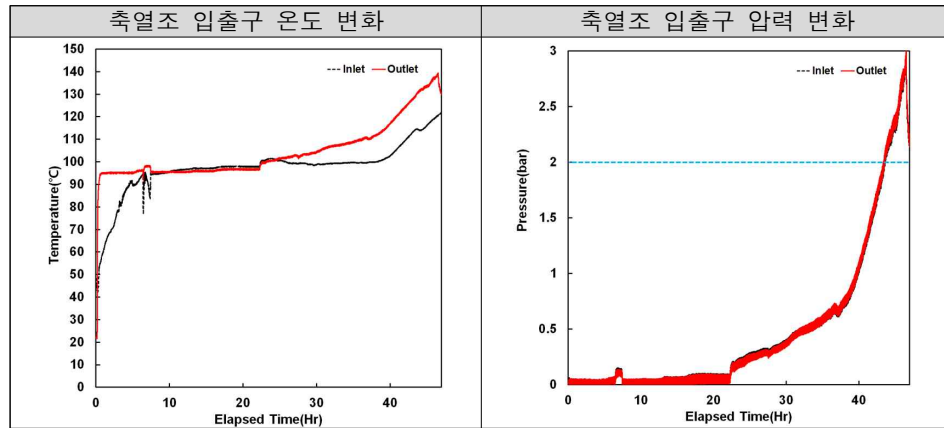
- 축열시스템 연속가동을 통한 축열열량 1GJ 확보(측정값: 0.99GJ, 이론값: 1.13GJ)
- 열용량 및 계산식의 특성상 초기온도에 따라 축열량이 상이함



[1GJ급 축열시스템 성능평가 시험성적서]

- 입회시험과 더불어 연속 작동을 통해 기본 축열조의 성능과 축열에 대한 응답특성 파악
- (축열조 내부온도) 측정 위치별로 상이한 온도 증가를 보이며 일정시간 90℃ 부근에서 유지되며 100℃ 이후 전체적인 상승 추세를 나타냄
- 열전달이 원활하지 않은 지점(R-Top, L-Mid)에서는 PCM의 상변화 온도구간에 진입하기 까지 온도 상승 기간이 길며, 전체적인 축열조의 온도가 100℃ 이상으로 되기까지 소요시간이 길어 지점별로 응답이 느림
 - ※ L: 축열조 왼쪽 중간부, R: 축열조 오른쪽 중간부
- (축열량) 축열량은 PCM 온도를 기반으로 계산되므로 변화 추이는 PCM 온도변화와 유사함
- (입출구 온도) 스팀 공급시 축열조의 입출구 온도는 빠른 응답 특성을 보이며 이후 온도상승은 PCM 온도변화와 유사
- 100℃ 온도구간 이후에는 출구의 온도는 스팀과 응축수의 열이 더해져 입구보다 높게 나타남
- (입출구 압력) 2bar의 스팀이 공급되었으나, 약 22시간 내에는 지속적으로 응축되었으나 이후 온도 상승에 의해 응축보다 공급되는 스팀이 탱크 내부에 가득차기 때문에 급격한 압력 상승을 나타냄





[시간에 따른 축열조 성능평가 실험 결과]

- 1GJ급 축열시스템 열산정 결과, 총 0.99GJ의 열에너지 저장
- 초기온도를 상온으로 설정하여 실질적으로 활용하는한 총 열량을 계산한 이론적 축열량 계산 결과 1.13GJ의 열에너지가 저장됨을 확인

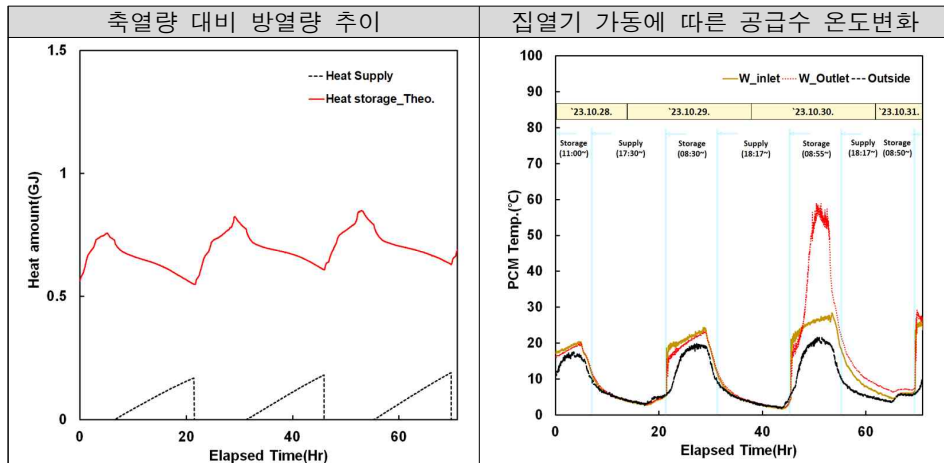
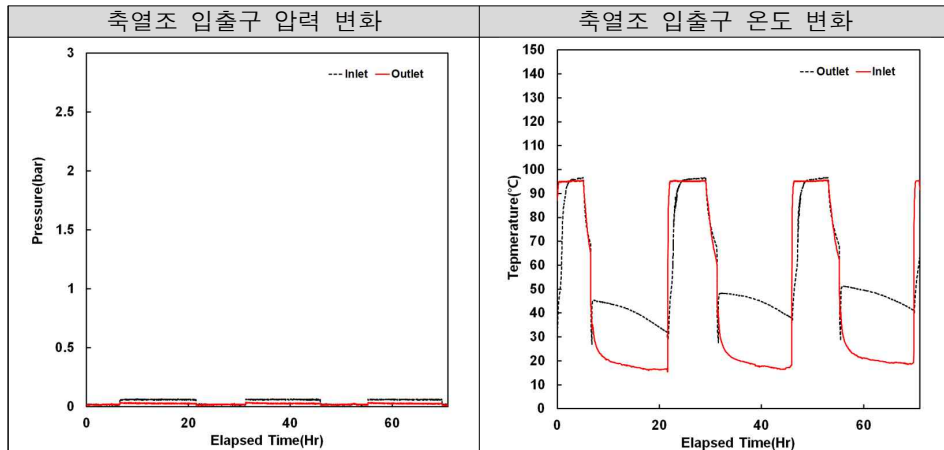
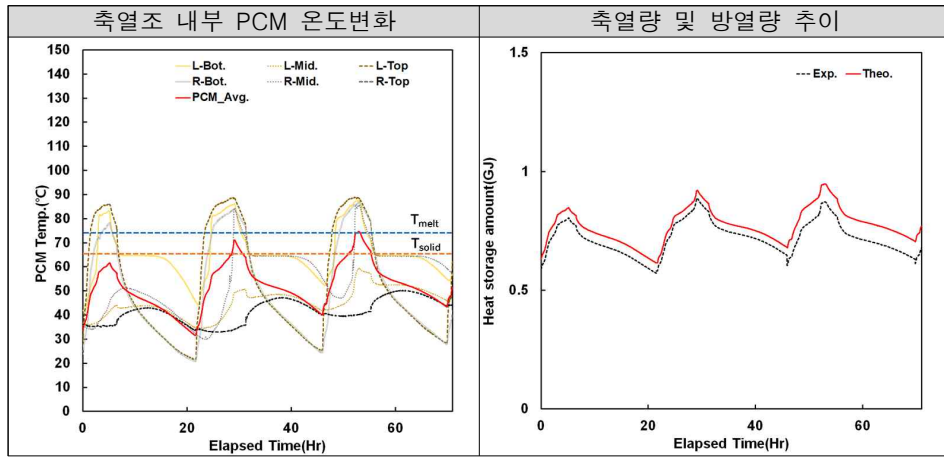
축열조 열수지				
		Exp.	Theo.	
PCM	총 무게 [kg]		2,800	2,800
	비열 [kJ/kg·K]	Solid	1.659	1.659
		Liquid	2.63	2.63
	잠열 엔탈피 [kJ/kg]		243.6	243.6
	온도 [°C]	Initial	52.87	25
		Final	98.55	98.55
	현열 총량 [MJ]		293.57	423.01
잠열 총량 [MJ]		682.12	682.12	
총 축열량 [MJ]		975.69	1105.13	
Structure (SUS304)	무게 [kg]		762.6	762.6
	비열 [kJ/kg·K]		0.5	0.5
	온도 [°C]	Initial	52.87	52.87
		Final	98.55	98.55
총 현열량 [MJ]		17.42	17.42	
총 축열량 [MJ]		993.11	1133.18	
총 축열시간 [Hr]		27	27	

[1GJ급 스팀 축열 열수지(성능평가)]

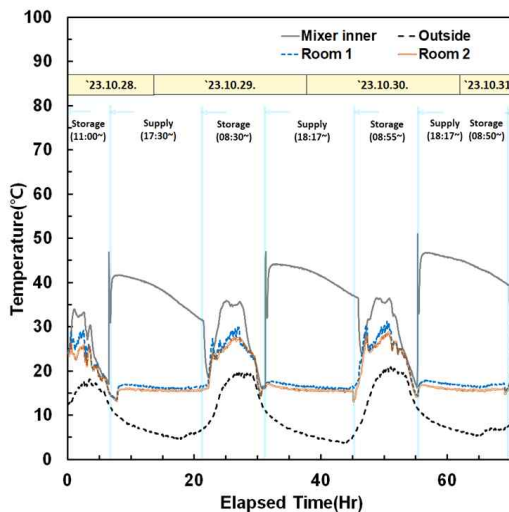
○ 태양열 연계 축방열 시스템 및 난방 공급 현장실증

(1) 난방 공급 실증결과 일몰 후 스마트팜 내부온도 유지 성능 확보(평균 16.2°C)

- 통합 시스템 연속운전 및 일부 대표 데이터 분석
- (축열조 내부온도) 상변화 온도를 기준으로 각 지점별 온도 상승 경향이 다르나 연속 가동결과 w전체 평균온도의 범위는 지속적으로 상승
- 축열시 온도상승이 빠른 지점은 열전달이 원활하기에 방열시에도 빠른 방열특성을 보임
- (축방열량) 내부온도 변화 추이와 유사한 응답특성을 나타냄
- (입출구 온도) 입출구 온도는 스팀축열에 의해 약 95°C까지 승온되며 방열에 의해 감소
- 출구 온도의 경우 방열시 찬공기에 의해 하락 피크를 보이거나 이후 상변화 물질의 응고(열방출) 및 SUS 구조체의 현열에 의해 급격하게 온도상승하고 이후 점차적으로 감소하는 경향을 나타냄
- (입출구 압력) 입출구의 압력은 공급된 스팀의 양이 충분하지 않아 공정에 따라 일부 변화 발생
- (방열량) 방열량은 축열된 에너지를 공급한 것이기에 내부 축열량의 감소 패턴과 반대
- (공급수) 공급수는 지속적으로 물을 공급하였기 때문에 온도상승이 크지 않으나 일사조건에 따라 일사가 원활한날에는 최대 60°C까지 상승함. 이외 방열 구간에서는 외기온도의 경향을 따름
- (스마트팜 내부온도) 일몰 이후 열풍 공급에 따라 약 16°C로 온도로 유지 할수 있었으며 열풍 온도는 연속 작동에 따라 일일 축열량은 유사하나 온도차이가 커져 전체적인 범위가 상승함



[1GJ급 축방열 시스템 실증실험 결과]



[열풍 난방에 따른 스마트팜 내부온도 변화]

(2) 실증 실험결과 열수지 및 효율 산정

- 일 평균 공급에너지 0.423GJ, 0.263GJ 축열, 0.184GJ 방열, 0.152GJ 열풍 공급
- 일 평균 축열효율 63.1%, 방열 효율 71.4%, 방열량 대비 열풍 공급 비율 8.27%
- 스팀 축열의 특성상 스팀의 총 에너지는 포화압력 및 온도에 결정되나 일사조건 등의 영향으로 축열조 크기 대비 생산 가능한 스팀의 양이 충분하지 않아 스팀 응축 등에 의한 열손실이 큰 것으로 나타남

축열조 열수지					
		Day 1	Day 2	Day 3	
PCM	총량 [kg]		2,800	2,800	2,800
	비열 [kJ/kg·K]	Solid	1.659	1.659	1.659
		Liquid	2.63	2.63	2.63
	잠열 엔탈피 [kJ/kg]		243.6	243.6	243.6
	온도 [°C]	Initial	33.58	31.6	40.11
		Final	61.67	71.08	74.62
	현열 총량 [MJ]		111.74	190.2	176.72
	잠열 총량 [MJ]		682.12	682.12	682.12
총 축열량 [MJ]		793.86	872.32	858.84	
Structure (SUS304)	무게 [kg]		762.6	762.6	762.6
	비열 [kJ/kg·K]		0.5	0.5	0.5
	온도 [°C]	Initial	33.58	31.6	40.11
		Final	61.67	71.08	74.62
저장된 현열 총량 [MJ]		10.71	15.05	13.16	
총 축열량 [GJ]		0.804	0.887	0.872	
축열 시간 [Hr]		5.15	7.67	7.17	
축열 효율 산정					
		Day 1	Day 2	Day 3	
Steam	물 공급량	[L]	144.43	218.05	214
		[kg]	144	217.4	213.36
	압력 [barg]		2	2	2
	잠열 엔탈피 [kJ/kg]		2201.33	2201.33	2201.33
총 공급 에너지량 [GJ]		0.32	0.48	0.47	
일일 축열량 [GJ]		0.217	0.306	0.268	
일일 축열 효율 [%] (일일 축열량/총 공급 에너지량)*100		68.58	63.85	56.97	
방열 효율 산정					
		Day 1	Day 2	Day 3	
일일 방열량 [GJ]		0.189	0.184	0.179	
일일 방열 효율 [%] (일일 방열량/일일 축열량)*100		86.92	60.36	67.06	

[난방 실증 열수지 및 효율 산정]

열풍 열수지					
		Day 1	Day 2	Day 3	
혼합기	단면적 [m2]		0.012	0.012	0.012
공기	평균 속도 [kg/s]		7.36	7.4	7.42
	밀도 [kg/m3]		1.293	1.293	1.293
	평균온도 [°C]	온실	15.9	16.2	16.5
		열풍	37.8	41.3	43.8
	열용량 [kJ/kg·K]		1.01	1.01	1.01
총 공급 열량 [GJ]		0.136	0.153	0.166	
방열량 대비 열풍 공급 비율 [%]		72.3	83.05	92.78	

[스마트팜 내로 공급된 열풍의 열량]

마. 공동연구개발기관 : (재)가나안복민회

○ 최적의 생육환경을 조성하기 위한 조건 등 마련

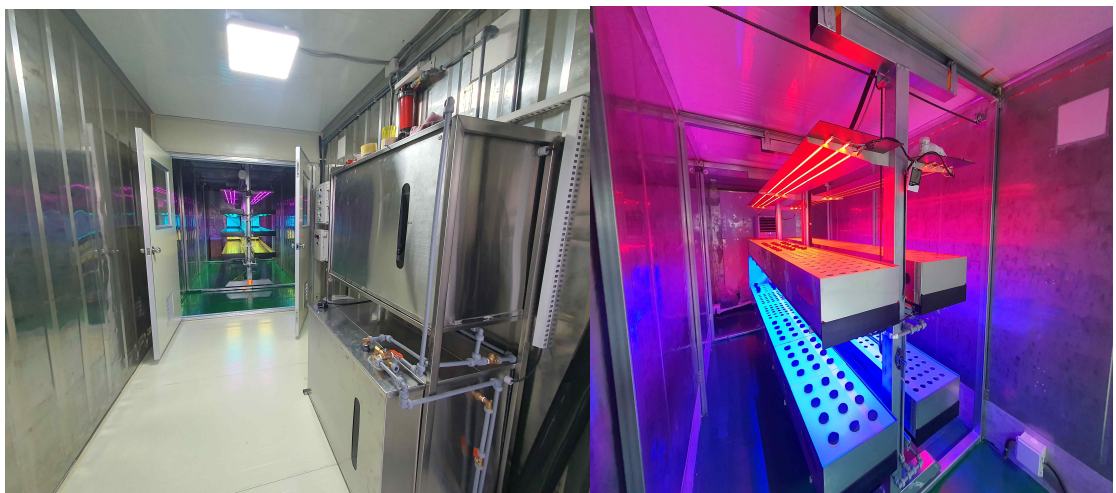
- 식물공장(40ft 냉동컨테이너 2동을 개조) 1개동은 담액경, 1개동은 분무경 타입으로
2023.02.28. 완공



[스마트팜 식물공장 평면도]



[스마트팜 식물공장-담액경 완공사진]



[스마트팜 식물공장-분무경 완공사진]

- 2단계 연구 기간 중 식물공장(담액경, 분무경)에서 새싹삼과 엽채류의 최적의 생육환경 조성조건(광, 온도, 습도, CO2농도) 찾기 위한 실증 수행



[새싹삼 및 엽채류 식물공장 실증]

- 2단계 연구 기간 중 비닐온실(펄라이트 배드)에서 엽채류의 최적의 생육환경 조성조건(광, 온도, 습도, CO2농도) 찾기 위한 실증 수행



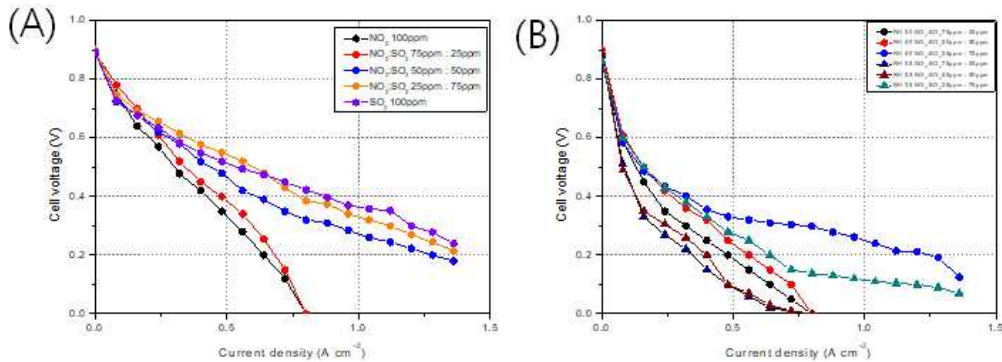
[새싹삼 및 엽채류 비닐온실 실증]

바. 공동연구개발기관 : 상지대학교 산학협력단

○ 연료전지 공기극의 불순물 영향에 의한 성능저하 분석

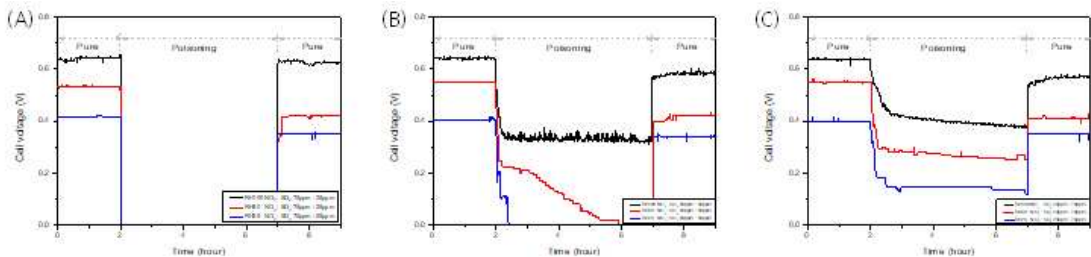
(1) PEMFC 불순물 평가

- NO₂, SO₂를 각각의 비율인 3:1, 1:1, 1:3 비율로 혼합하여 오염원으로 설정하였음. 실험은 상대습도의 변화에 따라 성능변화를 관찰함
- Anode, Cathode의 상대습도가 100%인 조건에서 연료전지의 성능 테스트를 진행했고, 연료전지의 성능과 관련된 I-V curve 분석을 진행함. 분석을 진행한 결과 혼합가스의 오염원 중 NO₂의 농도가 75ppm인 3:1 비율에서 0.8A/cm²의 전류밀도에서 연료전지 성능이 급격히 감소하여 0V에 도달하는 cell 단락이 발생함. NO₂는 감소하고 SO₂가 증가하는 비율인 1:1, 1:3 비율에서는 연료전지 성능이 초기에 급격히 감소 후 천천히 감소되는 것을 확인함.
- 높은 습도가 아닌 낮은 습도의 조건에서 오염물질의 성능변화를 파악하기 위해 Cathode측 상대습도를 25%, 50% 조건으로 설정하여 오염물질의 성능변화를 관찰함



[오염원 성능 평가 결과. A는 상대습도 100% 조건에서 혼합가스 오염원 비율별 성능평가, B는 상대습도 25, 50% 조건에서 혼합가스 오염원 비율별 성능평가]

- 상대습도가 감소 할 때 전류밀도 0.8A/cm² 조건에서 초기 성능이 감소하는 것을 확인함. 이는 0.8A/cm² 조건에서는 상대습도 영향이 큰 것을 확인했으며, 상대습도 100% 조건과 유사하게 NO₂ 비율이 증가할 때 성능이 급격히 감소하는 것으로 확인됨.
- 이러한 결과는 조건과 NO₂의 농도가 높을 때 연료전지 성능에 크게 영향을 주는 것으로 평가됨



[혼합가스 비율별 0.8A/cm² 에서 연료전지 전압 비교. A 3:1, B 1:1, C 1:3 비율]

○ 지역 및 작물별 시설하우스 내외부 환경요인 조사

(1) 실제 농가의 비닐하우스 내외부 환경특성 조사

- 비닐하우스의 내외부 CO₂ 농도와 온도의 변화를 조사하기 위해 비닐하우스 농가를 대상으로 조사함. 비닐하우스 내외부 환경요인 조사는 경기도 여주시에서 가지 재배 21개 농가, 고추 10개 농가를 대상으로, 충청남도 보령시에서 오이 재배 9개 농가, 고추 14개의 농가를 대상으로 조사함. 조사 대상의 비닐하우스는 단동 하우스이며, 1중만의 천·측창 일부 개방은 가능하나 강제 환기장치(환기통, 환기팬, 대류팬) 없음

지역	조사작물	조사 농가의 수
경기도 여주시	Eggplant (가지)	21
	Red pepper (고추)	10
충청남도 보령시	Cucumber (오이)	9
	Red pepper (고추)	14
합계		54

[비닐하우스의 내외부 환경조사 농가 대상]

(2) CO2 농도와 온도 측정

- 비닐하우스 내외부 CO2 농도와 온도를 조사함. 지역, 월별로 CO2 농도와 온도의 특성 패턴을 주 1회 조사했으며, 비닐하우스의 내외부 환경은 동일한 특정 기기로 측정함. 비닐하우스 내부의 측정 위치는 두둑 상면 높이에서, 외부는 밖의 지면에서 1m 높이에서 CO2 농도와 온도를 측정함. 측정 시 온실 내부에 작업자가 없는 상태에서 측정함. 측정 시에는 내부에 작업자가 없는 상태에서 측정하였으며, CO2 농도와 온도 측정은 CO2,온도 복합측정기(GC-2028, Lutron, Taiwan)를 사용하여 조사함

(3) 경기도 여주지역의 비닐하우스 내외부 CO2 농도와 온도 변화

- 경기도 여주지역에서 가지 재배 중인 21개의 농가, 고추 재배 중인 10개의 농가를 대상으로 비닐하우스의 내외부 CO2 농도와 온도를 조사함. 조사기간 동안 비닐하우스 내부의 평균 CO2 농도는 약 496.6ppm, 외부는 496.4ppm을 보여 비닐하우스 내부와 외부의 CO2 농도의 차이를 보이지 않음. 비닐하우스 내부의 최대 CO2 농도는 약 580.1ppm을 나타냈으며, 최소의 농도는 450.4ppm을 나타내, 차이는 129.7ppm으로 외부보다 내부가 높았음. 일반적으로 채소류 시설원에 내부의 CO2 적정 농도는 700~1,000ppm으로 알려져 있으며, 가지 재배 비닐하우스의 내외부 온도의 차이를 살펴본 결과, 하우스 내부의 온도는 29.2℃, 외부는 27.5℃로, 외부보다 내부가 약 1.7℃ 높았음.
- 여주시의 고추 재배 농가의 비닐하우스 내부의 평균 CO2 농도는 약 502.7ppm, 외부는 493.8ppm으로 외부보다 내부의 농도가 약 8.9ppm 높았음. 비닐하우스 내부의 최대 CO2 농도는 555.1ppm, 최소 농도는 441ppm을 나타내, 차이는 약 109ppm으로, 최고와 최소의 농도의 차이가 매우 큼. 고추 재배 중인 비닐하우스 내외부 온도 차이를 살펴본 결과, 비닐하우스 내부의 온도는 28.1℃, 외부는 26.7℃로 외부보다 내부가 약 1.4℃ 정도 높았음

Crops	Items	CO2 concentration (ppm)			Temperature (℃)		
		Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)	Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)
Eggplant (가지)	Min.	450.4	455.8	-5.4	18.4	17.2	1.2
	Max.	550.1	520.6	28.2	33.7	31.8	1.9
	Mean	496.6±16.2 a	496.4±14.4 a	0.2±0.0	29.2±5.8 a	27.5±5.4 a	1.7±0.0
Red pepper (고추)	Min.	441.0	423.3	8.7	21.1	20.0	1.1
	Max.	531.9	525.1	12	31.9	30.3	1.6
	Mean	502.7±44.4 a	493.8±42.5 a	8.9±0.0	28.1±4.4 a	26.7±4.1 a	1.4±0.0

[경기도 여주지역의 가지, 고추 재배 중인 농가 비닐하우스 내외부 환경요인 비교]

- 여주지역의 가지, 고추 재배 농가의 월별 비닐하우스 내외부 CO2 농도, 온도를 조사함. 가지 농가는 2023년 3월부터 2023년 11월까지 데이터 수집하여 분석하였고, 고추 농가는 2023년 7월부터 2023년 11월까지 데이터 수집하여 분석함. 조사한 결과, 월별 비닐하우스 내부의 CO2 농도는 3월과 4월에 각각 550.1ppm, 543으로 연중 가장 높았음. 비닐하우스의 내부 CO2 농도가 3~4월에 높은 이유는 가지의 생육 초기에 식생이 적어 식물의 광합성이 적은 것에 기인한 것으로 생각됨. 또한 작물 재배 전 2~3월에 밀거름으로 퇴비를 살포한 것이 비닐하우스의 CO2 증가의 원인이 된 것으로 판단됨.
- 고추 재배 농가의 월별 비닐하우스 내부의 CO2 농도는 11월에 548ppm으로 가장 높았으며, 9월에는 441ppm으로 가장 낮아, 11월과 9월의 CO2 농도 차이가 107ppm으로 매우 큰 결과를 보임. 계절별 CO2 농도는 겨울에 여름보다 더 높았음. 배경대기관측소 측정 결과에 따르면 2005년 기준 안면도의 CO2 농도는 7월과 8월에 388±11ppm으로 농도가 낮은 것으로 나타남. 최대 농도를 보이는 월 농도는 제각기 달랐음.
- 가지 재배 농가의 월별 비닐하우스 내외부 온도 차이를 살펴본 결과 내부의 온도는 7~9월에 29.2~31.8℃로 가지 생육적온인 22~30℃보다 높았음. 비닐하우스 내부가 외부보다 0.3~2.1℃ 정도 높았으며, 여름인 7~9월에 내부 온도가 1.6~2.1℃ 높았음. 고추 재배시 평년보다 2℃ 증가된 조건에서 수확량이 증가하였으나 그 이상의 기온에서

수확량이 감소되었다는 결과를 보고하였으며, 초기 90일 동안 기온이 생육적온보다 5℃ 높으면 고추의 생장은 촉진되었으나 과실 수확량은 감소되었다고 함

Crops	Items	CO2 concentration (ppm)			Temperature (°C)		
		Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)	Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)
Eggplant (가지)	Mar.	550.1	521.9	28.2	18.4	17.2	1.2
	Apr.	543.0	520.6	22.4	20.1	19.1	1.0
	May.	506.8	510.7	3.9	28.9	28.0	0.9
	Jun.	495.5	504.3	-8.8	30.3	30.0	0.3
	Jul.	487.4	480.3	-1.9	31.3	29.2	2.1
	Aug.	476.4	487.0	-1.6	33.7	31.6	2.1
	Sep.	450.4	455.8	-5.4	33.6	31.8	1.8
	Oct.	482.5	480.3	2.2	27.5	26.2	1.3
	Nov.	494.7	496.1	-1.4	19.8	18.8	1.0
	Mean	496.6±16.2	497.2±14.1	0.8±0.0	29.2±5.8	27.5±5.4	1.7±0.0
Red pepper (고추)	Jul.	474.0	470.2	3.8	31.5	29.4	2.1
	Aug.	531.9	525.1	6.8	31.9	30.3	1.6
	Sep.	441.0	423.3	8.7	28.7	27.5	1.0
	Oct.	518.8	505.5	13.3	27.2	26.3	0.9
	Nov.	548.0	536.0	12.0	21.1	20.0	1.1
	Mean	502.7±44	493.8±42.5	8.9	28.1±4.4a	26.7±4.1	1.3±0.0

[경기도 여주지역의 가지, 고추 재배 농가의 월별 비닐하우스 내부와 외부의 CO2 농도와 온도 비교]



[경기도 여주시 고추 재배 농가]



[고추 생육 상황]



[경기도 여주시 가지 재배 농가]



[가지 생육 상황]

(4) 충청남도 보령지역 비닐하우스 내외부 CO2 농도, 온도 변화

- 충청남도 보령지역의 오이, 고추 재배 중인 농가를 선정하여 2023년 3월부터 2023년 11월까지 비닐하우스 내외부 환경을 조사함.
- 조사한 결과, 비닐하우스 내부의 평균 CO2 농도는 524.4ppm, 외부는 514.6ppm으로 하우스 내부의 농도가 9.8ppm 높았음. 오이 재배 농가의 최대 CO2 농도는 내부에서 600.8ppm, 외부에서 568.3ppm으로 외부보다 내부가 32.5ppm 정도 높았음. 비닐하우스 온실 내의 간헐통기 방식의 우분퇴비화 온실에서 토마토 재배기간 동안 발생 되는 CO2 평균값은 782~1,154ppm으로 관행온실(대조구, control) 400~462ppm 수준에 비해 1.7~2.6배 높은 차이를 보임. 또한 3~4월에 오이 생육 초기에 식생이 적어 광합성이 부진한 시기 때문으로 판단됨. 조사기간 동안 하우스 내외부 온도 차이를 살펴본 결과, 비닐하우스 내부는 26.1℃, 외부는 25.2℃로 하우스 내부 온도가 외부보다 0.9℃ 정도 높았음. 오이 재배 비닐하우스 CO2 농도는 600.8ppm으로 최대값을 나타내었고, 490ppm으로 최소값을 나타내 110.8ppm 차이를 보임.
- 고추 재배 중인 농가의 비닐하우스 내외부 CO2 농도를 조사한 결과 비닐하우스 내부의

CO2 농도는 508.1ppm, 외부는 503.5ppm으로 외부보다 내부의 농도가 4.6ppm 높았음. 조사 기간 동안 하우스 내부와 외부 온도를 살펴본 결과, 비닐하우스 내부는 27℃, 외부는 26.4℃로 하우스 내부의 온도가 외부보다 0.6℃ 정도 높은 결과를 보임

Crops	Items	CO2 concentration (ppm)			Temperature (℃)		
		Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)	Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)
Cucumber (오이)	Min.	477.3	479.3	-2.0	18.5	16.9	1.6
	Max.	600.8	568.3	32.5	33.9	33.5	0.5
	Mean	524.4±16.9	514.6±15.1	9.8	26.1±3.6	25.2±3.7	0.9±0.0
Red pepper (고추)	Min.	487.0	489.0	-2.0	16.3	16.1	0.2
	Max.	538.8	522.4	16.4	34.1	33.5	0.6
	Mean	508.1±21.7	503.5±17.3	4.6±0.0	27.0±4.4	26.4±4.4	0.6±0.0

[충청남도 보령지역의 오이 재배 농가의 비닐하우스 내외부 환경조사]

- 충청남도 보령지역 오이, 고추 재배 중인 농가를 대상으로 월별 비닐하우스 내외부 대기환경(CO2 농도, 온도)을 조사했으며, 오이 재배 농가는 2023년 3월부터 2023년 11월까지, 고추 재배 중인 농가는 2023년 4월부터 2023년 11월까지 주 1회 조사함
- 기간 동안 비닐하우스 내부 CO2 농도는 3~4월에 각 600.8ppm, 553ppm으로 매우 높았음. 오이 재배 하우스의 내부 온도는 7월에 33.1℃로 가장 높았고, 11월에 19℃로 가장 낮았음. 조사기간 동안 하우스 내외부 온도 차이를 살펴본 결과 내부 온도가 0.6~0.7℃ 정도 높았음.
- 충청남도 보령지역의 고추 재배 중인 농가의 조사 결과, 비닐하우스 내부의 CO2 농도는 11월에 538.8ppm으로 가장 높았고, 8월에 487ppm으로 가장 낮았음. 조사기간 동안 하우스 내외부 온도를 살펴본 결과, 하우스 내부의 온도는 7월에 34.1℃로 가장 높았으며, 11월에 16.3℃로 가장 낮았음

Crops	Items	CO2 concentration (ppm)			Temperature (℃)		
		Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)	Inside (A)	Outside (B)	Difference (A-B)
Cucumber (오이)	Mar.	600.8	568.3	32.5	18.5	16.9	-1.3
	Apr.	553.2	530.9	22.3	23.3	23.1	-0.2
	May.	510.9	497.4	13.5	27.3	27.3	0.0
	Jun.	522.0	541.7	-19.7	33.1	33.5	0.6
	Jul.	515.0	519.3	-4.3	33.9	33.2	0.7
	Aug.	477.3	479.3	-2.0	29.9	28.7	1.2
	Sep.	507.3	502.3	5.0	26.9	26.0	0.9
	Oct.	516.0	490.	26.0	25.0	24.5	0.5
	Nov.	517.8	503.5	14.3	20.4	19.0	1.4
	Mean	524.4±16.9	514.6±15.1	9.8±0.0	26.1±3.6	25.2±3.7	0.9±0.0
	Red pepper (고추)	Apr.	509.0	512.0	-3.0	24.2	23.8
May.		520.3	501.1	19.1	26.3	26.2	0.1
Jun.		499.0	502.7	-3.7	32.6	32.4	0.2
Jul.		519.3	522.4	-3	34.1	33.5	0.4
Aug.		487.0	490.0	-3	31.2	29.0	2.2
Sep.		501.3	490.5	10.8	26.5	25.8	0.7
Oct.		490.0	489.0	1.0	25.3	25.0	1.3
Nov.		538.8	520.5	18.3	16.3	16.1	0.2
Mean		508.1±21.7	503.5±17.3	4.6±0.0	27.0±6.7	26.4±6.1	0.6

[충청남도 보령지역 오이, 고추 농가의 월별 비닐하우스 내외부 환경조사]



[보령 하우스 고추 농가 포장]



[고추 재배 하우스]

(5) 지역별 비닐하우스 내외부 CO2 농도와 온도 변화 관찰

- 지역별 작물 재배 중인 농가를 대상으로 비닐하우스 내외부 CO2 농도와 온도를 2023년 3월부터 2023년 11월까지 주 1회 조사하여 평균 비교 분석함.
- 지역별 평균 CO2 농도는 경기도 여주지역의 농가에서 499.6ppm을 나타냈고, 충청북도 보령지역의 농가는 516.2ppm을 나타내 지역별로 다소 차이가 있었음. 대기 중 CO2 농도는 300~500ppm 범위에 있고, 2022년 전 세계적으로 CO2 농도는 평균 417.06ppm으로 알려져 있는데 우리나라 비닐하우스 재배 농가의 하우스 내부 CO2 농도가 499.6~576.2ppm을 나타내 상당히 높은 결과를 나타냄.
- 우리나라의 CO2 연평균 대기 농도는 안면도에서 처음 CO2 농도를 1999년에 관측한 연평균 농도 369.2ppm과 비교하여 21년간 51.2ppm 정도 증가하였으며, 1999년 대비 1.14배로 증가함. 경기도 여주와 충청남도 보령지역에서 조사된 CO2 농도는 각 499ppm, 516ppm을 나타냄. 비닐하우스 내부 온도는 여주지역에서 28.9℃로 하우스 외부의 온도인 27.2℃에 비해 내부가 1.7℃ 정도 높은 온도를 보였음. 작물별 생육을 최적화 하기 위해서 우리나라의 비닐하우스 CO2 농도와 온도를 지속적으로 모니터링하여 최적의 농도를 찾는 것이 필요함

Crops	Items	CO2 concentration (ppm)			Temperature (°C)		
		Inside(A)	Outside(B)	Difference(A-B)	Inside(A)	Outside(B)	Difference(A-B)
경기도 여주	가지 고추	496.6	496.4	0.2	29.2	27.5	1.7
		502.7	496.4	8.9	28.1	26.7	1.4
	Mean	499.6±0.0	495.1±0.0	4.5±0.0	28.9±0.0	27.2±0.0	1.7
충청남도 보령	오이 고추	524.4	514.6	9.8	26.1	25.2	0.9
		508.1	503.5	4.6	27.0	26.4	0.6
	Mean	516.2±0.0	509.0±0.0	7.2±0.0	26.5	25.8	0.7±0.0

[지역별 비닐하우스 내외부 CO2 농도 비교]

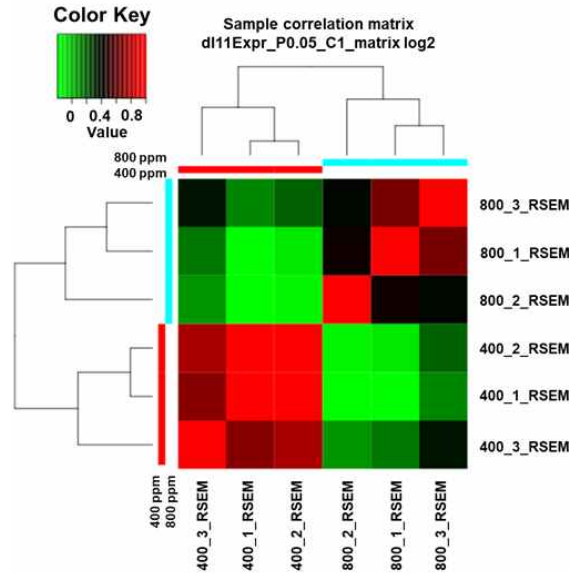
(6) 결과 요약

- 우리나라 비닐하우스는 대부분 송풍과 냉난방 시설이 미비하여 최근 이상기후에 의한 여름철 고온과 CO2 농도의 불균형으로 작물의 생육 불량 및 수확량 감소의 원인이 됨. 가축분뇨 처리 및 시용 시 CH4, NO2, CO2가 발생됨. 본 연구는 비닐하우스의 내외부 재배환경 조건 실태를 파악하여 비닐하우스 시설재배 농가의 환경 개선의 기초자료를 제공하기 위해 수행함. 2021년부터 2023년까지 경기도 여주시, 충청남도 보령지역에서 채소 작물 재배기간 동안 비닐하우스 내외부 CO2 농도와 온도를 조사함. 그 결과 여주지역의 비닐하우스 내부의 CO2 농도는 480.9ppm, 보령지역의 내부 농도는 528.4ppm을 나타냄.
- 비닐하우스 내부의 최소 CO2 농도는 441ppm, 최대 농도는 608.8ppm을 나타냄. 하우스 내부의 CO2 농도가 외부보다 10.1ppm 정도 높았음. 하우스 내부의 월별 CO2 3~4월이 여름 계절인 6~9월보다 높았음. 계절별 농도의 변동 폭이 441~600.8ppm임. 여름철 비닐하우스 내부의 온도는 31.9~33.7℃로 비닐하우스 외부 온도보다 1~3℃ 더 높았으며, 오이, 가지, 고추의 생육적온 보다 높았음. 작물별 생육을 최적화하기 위해서는 우리나라 비닐하우스 CO2 농도와 온도를 모니터링하고 송풍과 냉난방 시설을 개선하여 이상기후에 대비할 필요성이 있다고 판단됨

○ CO2 시비 스마트팜 제어시스템을 통한 작물 생육 검정 (바질)

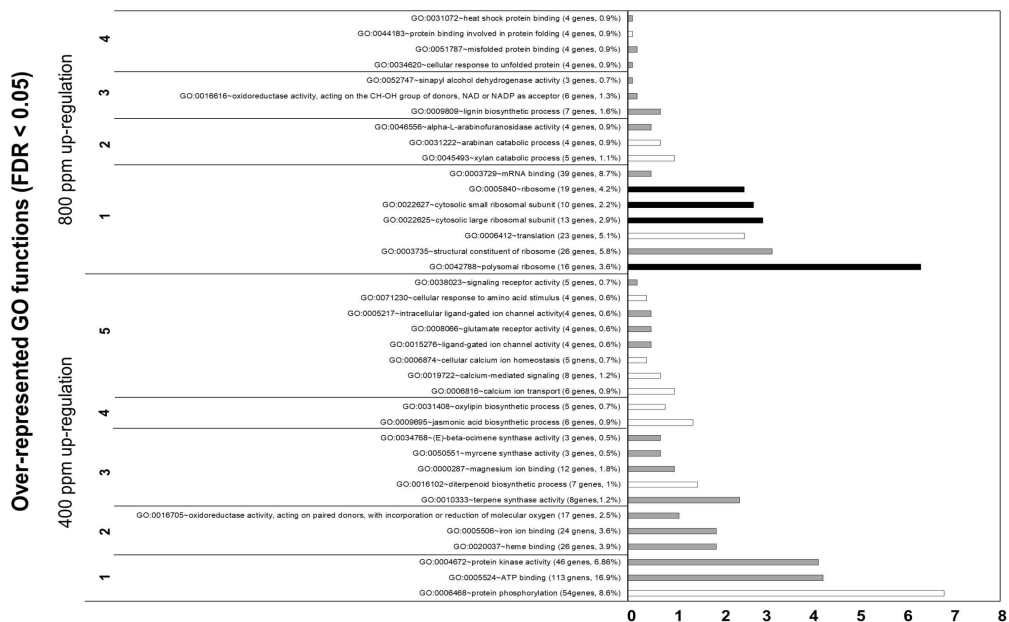
(1) CO2 농도 증가에 따른 생리적 변화 탐색

- CO2 농도(400과 800ppm)에 따른 바질 유전자의 생리적 변화를 탐색하기 위해 RNA sequencing 분석함. 바질의 생육조사가 끝난 뒤, 식물체를 무작위로 선별하여 바질의 RNA를 추출하여 RNA seq분석을 하였음. 분석 결과, 400과 800ppm을 비교하여 각 집단의 유전자들의 반복적인 샘플들이 묶여 있는 것을 보아 CO2 처리와 샘플링이 잘 된 것을 볼 수 있음



[400과 800ppm의 반복적인 샘플들이 묶여 있는 유전자들의 Heatmap]

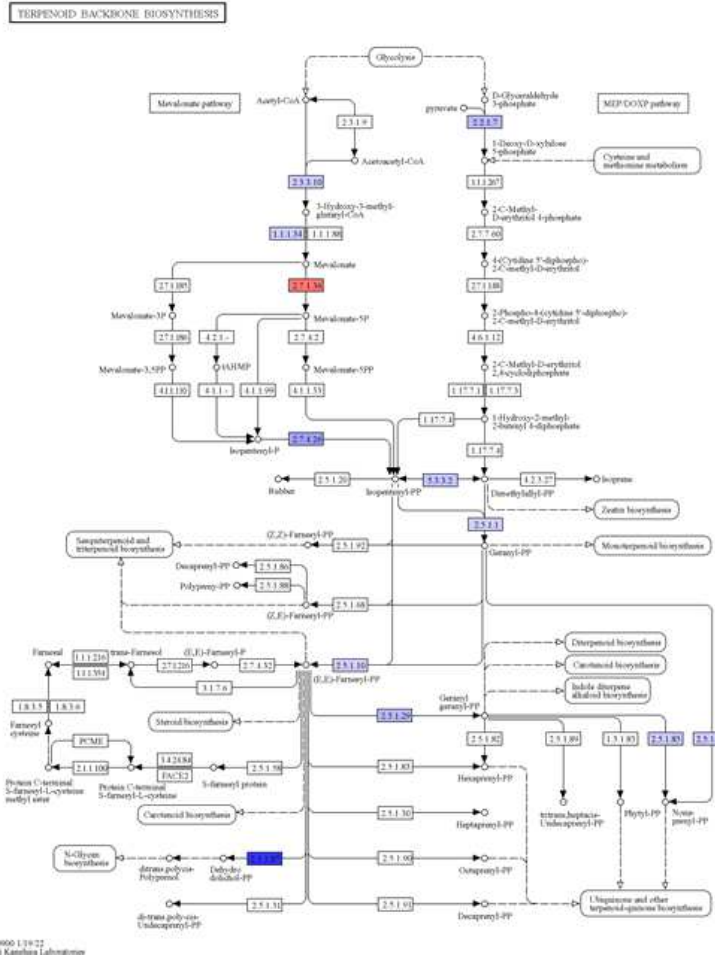
- 400 과 800ppm을 비교하여 다르게 발현하는 유전자 (DEGs, Differentially Expressed Genes)의 증가한 유전자 기능을 결정하기 위해 800ppm에서 up과 down-regulation된 유전자들의 Functional enrichment 분석을 진행함
- CC(Cellular component), BP(Biological Process), MF(Molecular function)을 포함하여 과도하게 표현된 Gene Ontology term (GO)의 800ppm에서 5개의 up-regulation된 유전자와, 4개의 down-regulation된 유전자를 포함한 총 9개의 그룹을 발견함
- 800ppm에서 대부분 Cellular response to unfolded protein, lignin biosynthetic process, cytosolic (small and large) ribosomal subunit 관련 유전자가 유의하게 증가하였으며, 반대로 Diterpenoid biosynthetic process, terpene synthase activity에 관련된 유전자는 800ppm에서 down-regulation 되었음.
- 이러한 결과는 회향과는 반대로, 상대적으로 낮은 CO2 농도에서 향산화에 관련된 유전자가 증가하였으며, 400ppm에서 terpenoid 관련 유전자가 바질에서 증가함을 시사함.



[Over-represented GO function of CO2 responsive genes (FDR < 0.05)]

- DEGs의 결과 400ppm에서 terpenoid 관련 유전자가 증가하는 것을 확인하여, 400ppm에서 바질의 Terpenoid 관련 유전자가 증가하는지 확인하기 테르페노이드 생합성에서 유전자 발현 패턴을 관찰함
- 테르페노이드 생합성 경로 관여하는 유전자 중 (MK) 유전자는 800ppm에서 증가하는

반면, 나머지 유전자 (dxs, HMGS, HMG1, ipk, idi, geranyltranstransferase, hypothetical protein, SPS2, cPT)는 400ppm에서 증가하였음. 이는 테르페노이드 함량이 400ppm에서 증가함을 시사함.



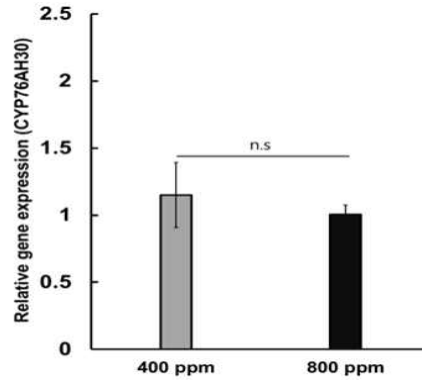
[KEGG에 기반한 바질의 테르페노이드 생합성 경로에서 DEG 발현패턴]

- DEG에서 p-value < 0.05에서 Up-regulation된 유전자를 선별한 결과 400과 800에서 up-regulation된 유전자가 9개가 발견되었으며, 이 유전자는 uniprot (<https://www.uniprot.org/>) 통해 단백질 이름과 기능을 나타냄
- 그 결과, 800ppm에서 abiotic stress, chlorophyll contents, E3 ubiquitin에 관련된 유전자가 발견되었으며, 400ppm에서는 Elongator complex protein, tanshinone biosynthesis에 관여하는 Ferruginol의 유전자가 발견되었음.

	Uniprot	Protein name	Function
400 ppm_upregulation	PHOT1_ARATH	Phototropin-1	Protein kinase that acts as a blue light photoreceptor in a signal-transduction pathway for photo-induced movements. Phosphorylates BLUS1, a kinase involved in stomatal opening. Also mediates rapid membrane depolarization and growth inhibition in response to blue light.
	9DC3_SOLPI	Receptor-like protein 9DC3	Involved in plant defense. Confers resistance to the fungal pathogen <i>C. fulvum</i> through recognition of the AVR9 elicitor protein.
	ELP2_ARATH	Elongator complex protein 2	Component of the elongator complex which is required for multiple tRNA modifications, including mcm5U (5-methoxycarbonylmethyl uridine), mcm5SU (5-methoxycarbonylmethyl-2-thiouridine), and mcm5U (5-carboxymethyl uridine). Prevents abscisic acid (ABA) signaling leading to stomatal closure and seedling growth inhibition. Involved in oxidative stress signaling.
	CYP3H_ISORU	Ferruginol synthase	Cytochrome P450 enzyme (CYP) which catalyzes a unique two-electron oxidation cascade on abietane-8,11,13-triene to produce ferruginol, an intermediate in tanshinone biosynthesis.
	GOGC5_ARATH	Golgin candidate 5 (AIGC5)	Golgi matrix protein playing a role in tethering of vesicles to Golgi membranes and in maintaining the overall structure of the Golgi apparatus.
	GSTU4_ARATH	Glutathione S-transferase U17	Involved in light signaling, mainly phyA-mediated photomorphogenesis and in the integration of various phytohormone signals to modulate various aspects of plant development by affecting glutathione pools.
	CHI4_CRYJA	Endochitinase 4	Has endochitinase activity. Hydrolyzes chitin oligosaccharides, GlcNAc(n), with different degrees of polymerization (n=2-6), a soluble substrate glycol chitin, and an insoluble substrate beta-chitin nanofiber in vitro.
	CPT6_SOLLG	(2Z,6Z)-farnesyl diphosphate synthase CPT6	Uses neryl diphosphate to catalyze the cis-prenyl chain elongation and produce the 15 carbon product (2Z,6Z)-farnesyl diphosphate.
	LONM_MAIZE	Lon protease homolog, mitochondrial	ATP-dependent serine protease that mediates the selective degradation of misfolded, unassembled or oxidatively damaged polypeptides as well as certain short-lived regulatory proteins in the mitochondrial matrix.
800 ppm_upregulation	CTNS_ARATH	Cystinosin homolog	Thought to transport cystine out of lysosomes.
	HCAR_ARATH	7-hydroxymethyl chlorophyll a reductase, chloroplastic	Probable iron-sulfur flavoprotein that converts 7-hydroxymethyl chlorophyll a to a chlorophyll a using ferredoxin as a reducing equivalent. Catalyzes the reduction of a hydroxymethyl group to a methyl group. Belongs to the chlorophyll catabolic enzymes (CCEs).
	VAP42_ARATH	Vesicle-associated protein 4-2	May play a role in vesicle trafficking.
	SKI17_ARATH	F-box protein SKIP17	Component of SCF(ASK-cullin-F-box) E3 ubiquitin ligase complexes, which may mediate the ubiquitination and subsequent proteasomal degradation of target proteins.
	TFA3_ARATH	Transcription factor IIIA	Essential protein. Isoform 1 is a transcription activator that binds both 5S rDNA and 5S rRNA and stimulates the transcription of 5S rRNA gene. Isoform 1 regulates 5S rRNA levels during development.
	RD21B_ARATH	Probable cysteine protease RD21B	Probable thiol protease.
	WDR26_ARATH	WD repeat-containing protein 26 homolog	Acts as a component involved in the crostalk regulation between light, hormone and abiotic stress response.
	GUXC_FUSOX	Putative exoglucanase type C	Hydrolysis of (1->4)-beta-D-glucosidic linkages in cellulose and cellotetraose, releasing cellobiose from the non-reducing ends of the chains.
	JMJ25_ARATH	Lysine-specific demethylase MJM25	Involved in the control of several developmental processes by protecting genes from silencing. Demethylates H3K9me2 in the promoter regions of RDR2 and DCL3 and mediates the repression of ectopic non-CpG methylation at RDR2, DCL3 and APC13 loci. Protects also a large number of transcribed genes from non-CpG methylation. May regulate gene expression via a pathway involving indirect silencing of gene expression through small RNA-directed DNA methylation (RDM)-directed repression. Modulates stomatal development by regulating the methylation-mediated silencing of ERECTA receptor genes (e.g. ER, ERL1 and ERL2) and preventing cell divisions.

[P-value < 0.05에서 Up-regulation된 단백질의 이름과 기능]

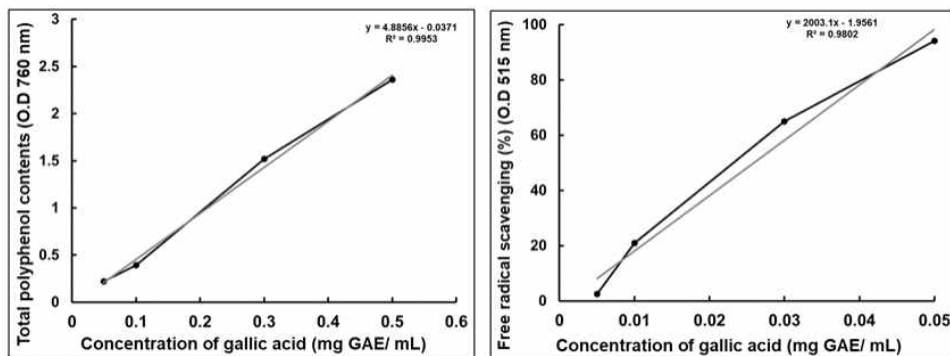
- Ferruginol은 terpenoid의 하위 구조이기 때문에, CO2 농도에서 ferruginol의 유전자의 발현량을 확인하기 위해 qRT-PCR 분석함. qRT-PCR 분석을 위해 Ferruginol에 관련된 유전자 Cytochrome CYP76AH30의 유전자를 결정하여 primer를 제작하였으며, primer는 NCBI의 primer-BLAST (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/tools/primer-blast/>)를 이용하여 Forward primer는 5'-TGCGACACTACCTAACCAC-3', Reverse primer는 5'-AGATTCTCCAGCAAATCTTTCTC-3'
- 바질의 Actin primer는 논문에 나와 있는 primer를 사용하였음. Forward primer는 5'-AGATTCTCCAGCAAATCTTTCTC-3', Reverse primer는 5'-CTTTCTGGTGGAACAGCATCAA-3' 으로 사용함.
- qRT-PCR 분석 결과, 800ppm에 비해 400ppm에서 CYP76AH30 유전자의 발현량이 증가하였지만. 유의한 차이를 보이지 않았음



[Ferruginol 관련 유전자 CYP76AH30의 qRT-PCR 분석 결과]

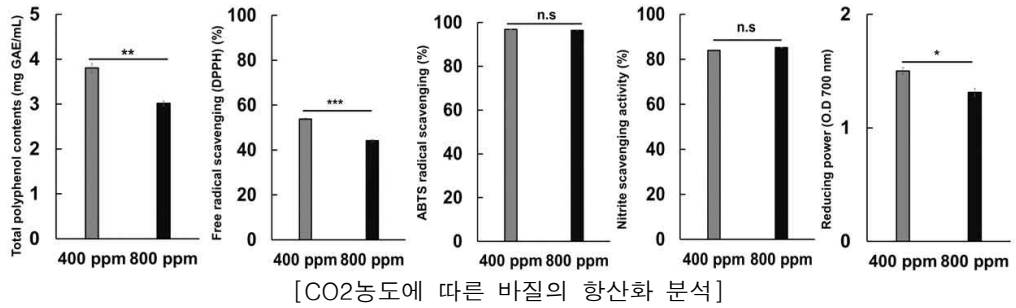
(2) CO2 농도에 따른 바질의 항산화 물질의 함량 분석

- CO2 농도에 따른 바질의 유전자 분석 결과 상대적으로 낮은 CO2(400ppm)에서 항산화에 관련된 terpenoid에 관련된 유전자가 증가하여, 400ppm에서 항산화 물질의 함량이 증가하는지 확인하기 위해 항산화 분석을 함. 바질의 항산화 분석 항목은 총 폴리페놀 함량, DPPH, ABTS, 아질산염의 소거활성, Reducing power 분석을 진행함.
- 총 폴리페놀의 항산화 활성을 알기 위해, 폴리페놀의 대표 표준물질인 Gallic acid를 사용하여 농도별로 희석하여 0.05, 0.1, 0.3, 0.5 GAE mg/ml의 표준곡선을 생성함. 총 폴리페놀의 R2값은 0.9953으로 나타났으며, 농도에 따른 수치의 변화가 높은 상관관계를 보임. 또한 DPPH 소거활성의 표준곡선을 Gallic acid를 이용하여 농도별로 희석하여 0.005, 0.01, 0.03, 0.05 GAE mg/ml의 표준곡선을 생성했으며, R2값은 0.9802로 농도에 따른 수치의 변화가 높은 상관관계를 보임



[바질의 항산화 물질 분석을 위한 표준물질의 정량 곡선]

- CO2 농도에 따른 바질의 추출물 분석한 결과, 상대적으로 800ppm보다 400ppm에서 증가함을 보임. 특히 총 폴리페놀 함량과, DPPH 소거활성, Reducing power 분석에서 400ppm이 증가하였고, 유의한 차이를 보임. 아질산염 소거능의 경우 400 보다 800ppm에서 증가하였지만 유의한 차이를 보이지 않음.
- 대부분의 항산화 함량이 400ppm에서 증가함을 확인하여 항산화에 관련된 테르페노이드 생합성 관련 DEG가 up-regulation된 것을 확인함.



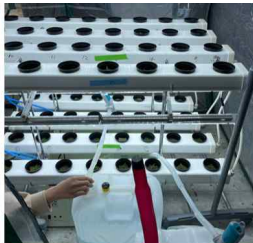
- eCO2의 영향은 대부분의 작물의 생육 및 biomass의 1차 대사를 증가시키며, 이후 2차 대사산물의 폴리페놀, 플라보이드, 카로티노이드, 테르페노이드와 같은 항산화에 관련된 물질은 작물마다 증가하거나 감소하는 결과가 다르다고 생각되며, 추가적인 연구가 필요함.

(3) 다른 비생물적 스트레스 (Heat, drought)에 따른 바질의 항산화 물질 함량

- 식물이 수경재배 시스템에서 자라면서 인공조명(LED)과 성장 공간 사이가 제한된 범위에 가깝기 때문에 강한 빛 세기에 노출 되었으며, 강한 빛으로 인해 비닐하우스 안의 온도가 상대적으로 증가하게 됨. 또한, 회향에서 CO2농도에서 재배하였을 때 생체중의 많은 부분이 수분을 포함하고 있었으며, 이러한 이유가 CO2 때문인지, 빛 세기 때문인지 알 수 없어 추가적으로 빛 세기에 따른 실험을 진행한 결과 유의한 차이를 보이지 않았음. 바질 또한 회향과 같은 결과로 생체중의 많은 부분이 수분을 포함하고 있기 때문에 빛 세기를 제외한 다른 비생물적 스트레스 실험을 추가적으로 진행함.
- Heat와 Drought 실험은 CO2농도 350ppm에서 CO2 재배 조건과 동일하게 이식 후 6주 동안 재배 후 진행하였음. 2월 20일에 발아한 바질을 암면배지에 이식 후 수경재배기에 옮겨서 재배하였음



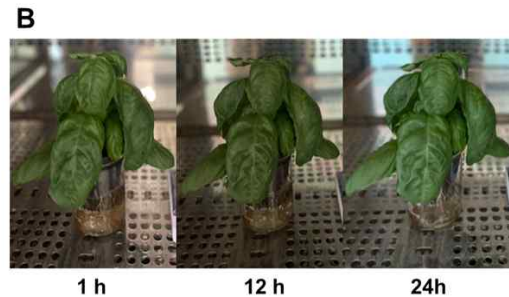
2023년 02월 20일 바질 이식 사진



2023년 3월 3일 바질의 생육 사진

[바질 재배 사진]

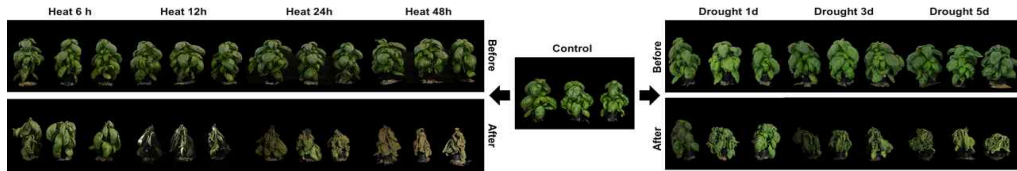
- 수경재배기에서 6주 동안 바질을 재배한 후 Heat stress를 진행하기 몇 개의 식물체를 선별하여 건조기에서 예비 실험을 진행함. 예비 실험을 통해 Heat stress의 온도는 45℃로 결정함



[Heat stress 진행하기 위해 온도 설정. A는 50℃ 실험 진행, B는 40℃에서 실험 진행]

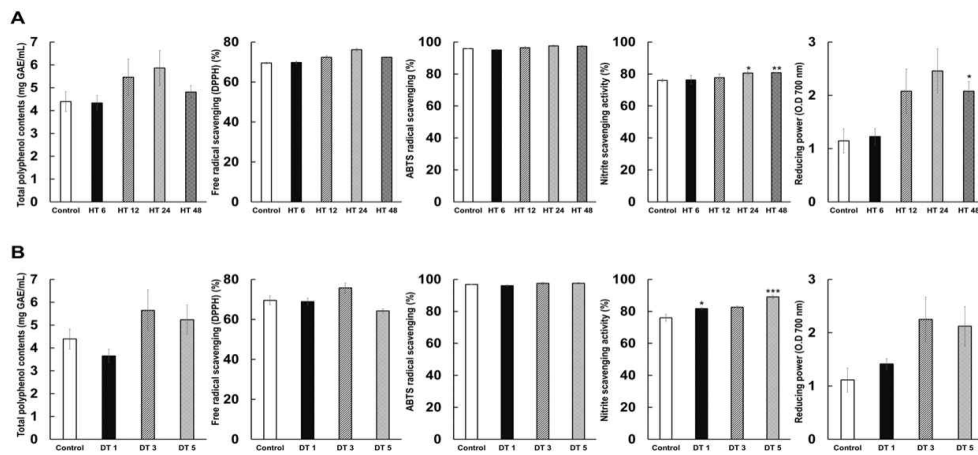
- 무작위로 선택한 식물체를 45℃로 설정된 건조기에서 0, 6, 12, 24, 48시간 동안 진행하였으며, 실험이 진행되는 동안 지속적으로 물을 공급해주었음.
- Drought 스트레스의 경우, 식물체를 무작위로 선택하여, 6주 동안 재배한 공간의 똑같은 조건에서 물 공급 중단하여 0, 1, 3, 5일 동안 실험을 진행함.

- Heat 스트레스의 경우, control과 비교해서 6시간부터 식물체가 시들기 시작했으며, 시간이 지날수록 잎의 색이 갈변되기 시작하고 48시간에서 식물체가 말라 죽은 것을 확인함. Drought 스트레스의 경우, control과 비교하여 1일차부터 잎이 시들기 시작했으며, 시간이 지수록 잎 뿐만 아니라 줄기 까지 시들기 시작함. 이후 5일차에는 완전히 시들었으나, 죽지는 않은 것으로 보임



[Heat와 Drought stress 처리에 따른 식물체 변화 관찰]

- Heat와 Drought 스트레스 처리 후 각 식물체의 항산화 함량을 알기 위해 항산화 분석을 실시함. 항산화 분석 항목은 총 폴리페놀 함량, DPPH, ABTS, Nitrite 소거활성, Reducing power이며, 각 760, 515, 734, 520, 700nm 흡광도에서 측정함.
- Heat 스트레스의 시간별로 항산화 분석을 한 결과, 아질산염을 제외한 모든 항산화에서 시간이 지날수록 항산화 함량이 증가하다가 48시간에는 감소하는 것을 보였으며, 특히 Reducing power에서 Control과 48시간을 비교하였을 때 유의한 차이를 보임. 아질산염 소거활성의 경우, Control과 비교해서 시간이 지날수록 항산화 함량이 증가하였으며, 24시간과 48시간에서 유의한 차이를 보임
- Drought 스트레스의 일별로 항산화 분석 결과, DPPH 소거활성과 Reducing power는 Control과 비교하여 시간이 지날수록 항산화 함량이 증가하다가 5일에는 감소하는 것을 보였으며, 총 폴리페놀의 경우는 Control과 비교하여 1일차에 감소하고 3일차에 증가했다가 다시 5일차에는 감소하는 것을 보이지만 유의한 차이를 보이지 않음. 아질산염 소거활성의 경우, Heat 스트레스와 비슷하게 시간이 지날수록 증가함을 보였으며, Control과 비교하여 1일차와 5일차에 유의한 차이를 보임.
- Heat와 Drought의 항산화 분석을 확인한 결과, 유의한 차이를 보이지 않으므로, 결과적으로 바질의 항산화 함량은 비생물적 스트레스에 영향을 미치지 않았으며, CO2에 영향을 미친 것으로 생각되며, 이는 CO2농도가 바질의 생육과, 항산화 활성에 영향을 미치는 것을 시사함.



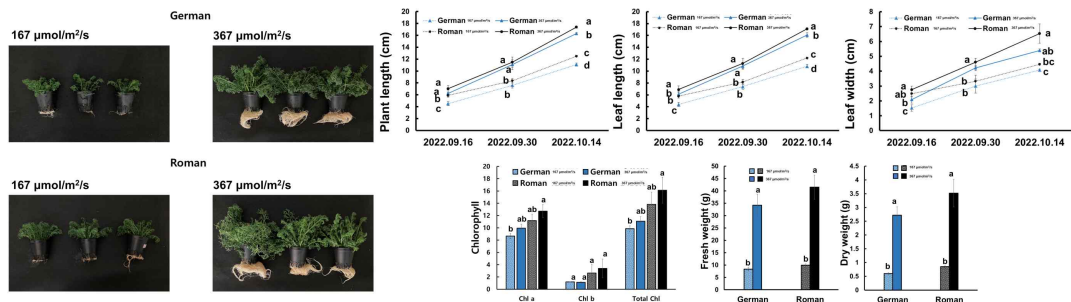
[Heat와 Drought stress의 시간에 따른 항산화 물질 함량 분석]

○ CO2 시비 스마트팜 제어시스템을 통한 작물 생육 검정 (캐모마일)

(1) 작물의 빛 세기(light intensity)에 따른 생육 및 항산화 활성 검정 (캐모마일)

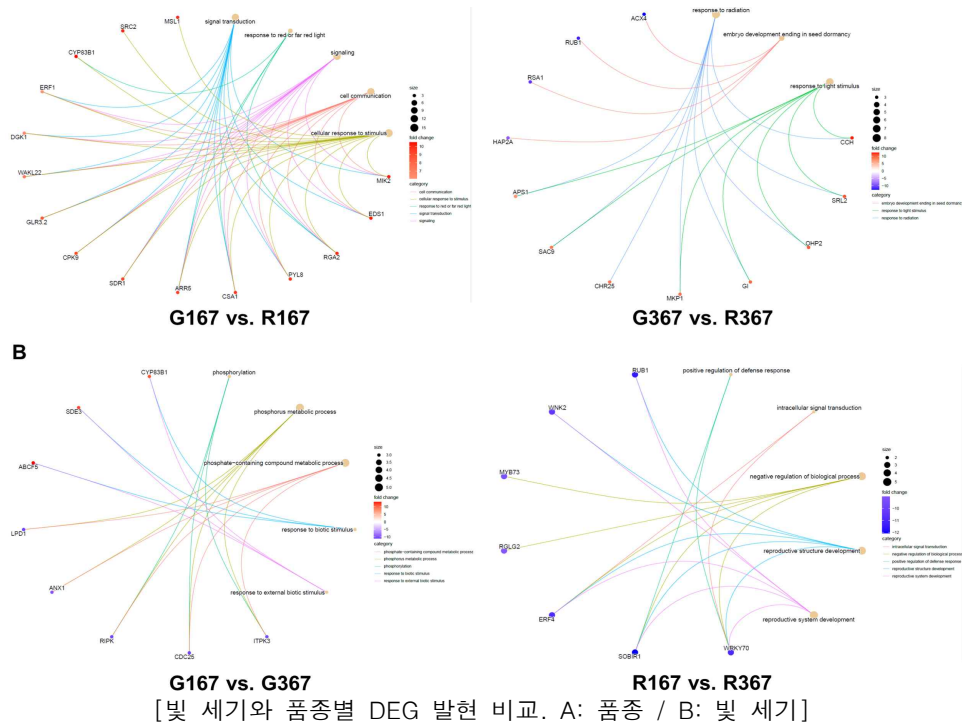
- CO2농도에 따른 저먼과 로만 캐모마일의 생육과 항산화 함량 분석결과, 증가된 CO2를 흡수하였을 때 생육 및 Biomass 증가와, 대부분의 항산화 활성 분석에서 증가한 결과가 나옴. 캐모마일 또한, 회향과 바질과 같은 수경재배 시스템에서 재배하였기 때문에 LED등과 생장 공간 사이가 가깝기 때문에 CO2 영향 인지 빛의 영향인지 확인하기가 어려움. 저먼과 로만의 경우 서로 다른 광합성의 기작을 갖고 있다는 결과가 있어, CO2 농도의 영향인지 빛 세기의 영향인지 알아보기 위해 추가적인 실험을 진행함.

- 빛 조건은 12,000 lux(PPFD; 167 μ mol/m²/s) 와 24,000 lux (PPFD; 367 μ mol/m²/s)으로 설정하였으며, CO₂는 350ppm으로 동일한 농도로 설정함. 그 외에 조건은 CO₂ 재배 실험과 동일한 조건에서 이식 후 8주까지 재배함.
- 빛 세기에 따른 저먼과 로만의 생육을 관찰하기 위해 이식 후 4주, 6주, 8에 생육조사를 실시 했으며, 생육조사는 초장, 엽장, 엽폭, 클로로필, 함량, 생체중, 건물중을 측정함.
- 생육을 관찰한 결과, 상대적으로 367 μ mol/m²/s에서 Shoot와 root가 촉진된 것을 확인했으며, 품종별로 비교했을 때, 저먼보다 로만의 생육이 발달 된 것을 육안으로 확인함
- 정확한 수치로 비교하기 위해 생육조사를 한 결과, 상대적으로 367 μ mol/m²/s에서 생육이 높았으며, 유의한 차이를 보임. 품종별로 비교했을 때, 저먼보다 로만이 높은 값을 나타냈으며, 유의한 차이를 보임. 또한 클로로필 함량의 결과도 저먼보다 로만이, 167보다 367 μ mol/m²/s이 높은 것을 확인함.
- 결과적으로 증가된 CO₂ 농도(800ppm)와, 높은 광도(367 μ mol/m²/s)에서 저먼과 로만의 식물발달이 증가한 것을 확인했으며, 높은 광도와 증가된 CO₂를 강하게 처리하면, 생육, biomass, 클로로필의 함량이 증가한 것을 알 수 있음.

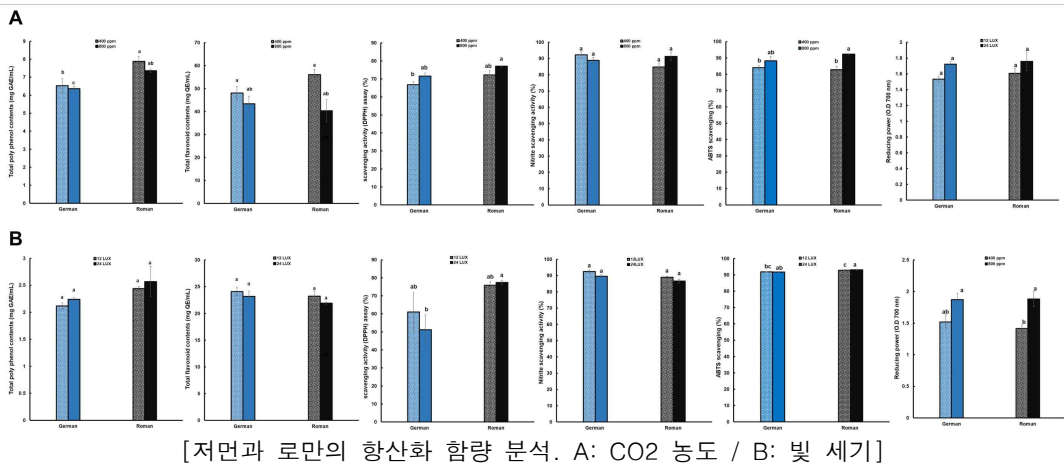


[빛 세기에 따른 캐모마일의 생육관찰. 왼쪽 그림은 이식 후 8주의 표현형. 오른쪽은 이식 후 4, 6, 8주의 생육관찰]

- 저먼과 로만의 경우 광합성 기작의 차이가 있다는 연구 결과가 있어, 저먼과 로만 유전자의 생리적 변화를 탐색하기 위해 RNA Sequencing 분석함. RNA Seq분석을 위해 이식 후 8주의 저먼과 로만의 식물체를 랜덤으로 선별하여 RNA 추출 후 분석함.
- 빛 세기와 품종별로 비교하여 다르게 발현하는 유전자(DEGs, Differentially Expressed Genes)의 증가한 유전자 기능을 결정하기 위해 각 유전자의 up and down-regulated 유전자들의 Functional enrichment 분석을 진행함. G(저먼)167 vs. R(로만)167. G367 vs. R367, G167 vs. G367, R167 vs. R367 광 기작 차이 비교
- G167과 R167을 비교한, 결과 R167에서, red and far-red light response에 관련된 유전자가 유의하게 증가하였으며, G367과 R367을 비교한 결과 R367에서 radiation and light stimulus response 관련 유전자가 증가함을 확인함. 품종 별로 비교한 결과, 저먼보다 로만에서 광합성 관련 유전자가 발견되었으며, 유의하게 증가함을 확인함.
- G167과 G367을 비교한 결과, G367에서, biotic stimulus response, external biotic stimulus response에 관련된 유전자가 증가하였으며, R167과 R367을 비교한 결과, R167에서 Regulation of response to stress, regulation of response to stimulus, positive regulation of defense response, negative regulation of response to stimulus에 관련된 유전자가 증가하였음. 빛 세기에 따라 비교한 결과, 저먼의 경우 367 μ mol/m²/s에서 외부적인 스트레스를 받아 식물체가 증가한 것으로 보이며, 로만의 경우 167 μ mol/m²/s에서 다양한 스트레스로 인해 생육이 억제된 것으로 생각됨.
- 품종별로 비교하였을 때는 로만과 저먼에 빛 관련 스트레스가 긍정적인 영향을 미친 것으로 생각이 되며, 빛 세기에 따라 비교하였을 때 저먼의 경우 367 μ mol/m²/s에서 외부적인 스트레스를 받아 긍정적인 영향을 미쳐 생육과 biomass가 증가한 것으로 생각됨. 로만의 경우 167 μ mol/m²/s에서 다양한 스트레스를 받아 식물체가 성장하는데 억제되어, 367 μ mol/m²/s보다 생육이 감소하고, 반대로 367 μ mol/m²/s은 스트레스를 받지 않아 식물체가 성장하는데 긍정적인 영향을 받아 생육과 biomass가 증가한 것으로 생각됨.

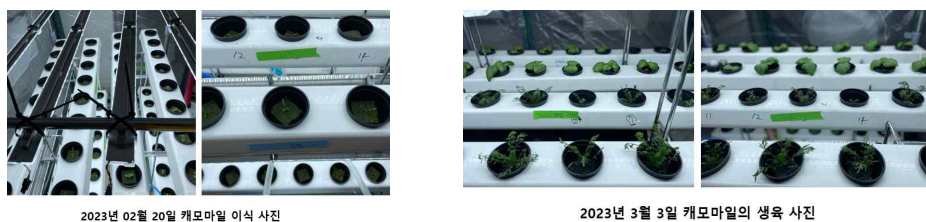


- 빛 세기에 따른 캐모마일의 향산화 함량을 분석한 결과, 저만의 경우 CO2와 비교해서 총 폴리페놀, DPPH 소거활성, ABTS 소거활성에서 반대되는 경향을 나타냈으며, 나머지 향산화는 CO2 비슷한 결과를 보임. 로만의 경우, CO2와 비교해서 총 폴리페놀, 아질산염, ABTS 소거 활성의 경우 반대되는 결과를 보이며, 나머지 향산화의 경우 CO2와 비슷한 결과를 보임



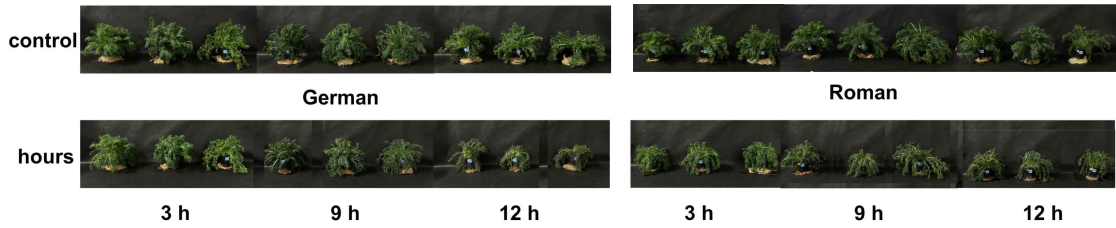
(2) 다른 비생물적 스트레스에 따른 캐모마일의 향산화 물질 변화

- 수경재배 시스템에서 재배했을 때 LED등과 성장 공간 사이의 범위가 제한되어, 증가된 CO2 농도와 강한 빛 세기에서 재배하였을 때 비닐하우스 안 온도가 상대적으로 증가하게 됨. 때문에 CO2, 빛 세기 외의 온도에 영향을 알아보기 위해 추가적인 실험을 진행함.
- CO2는 350ppm으로 설정했으며, 다른 외부적인 성장 조건은 CO2 실험과 동일한 방법으로 이식 후 8주 동안 재배하고, 이후에 Heat stress를 진행함. 2월 20일에 발아한 캐모마일을 암면배지에 이식 후 수경재배기에 옮겨서 재배하였음



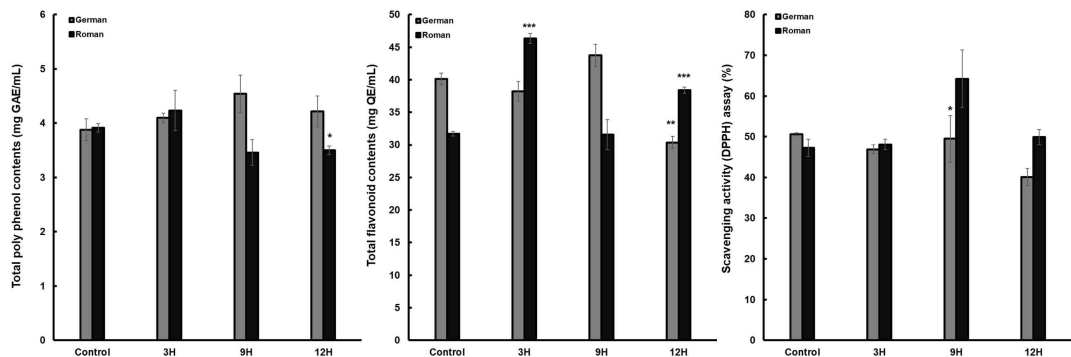
[Heat stress 실험을 위한 캐모마일 이식, 재배 사진]

- Heat 스트레스의 온도 설정을 예비 실험을 통해 40°C로 설정함.
- 이식 후 8주된 식물체를 무작위로 선택하여 40°C로 설정된 건조기에 0, 3, 9, 12시간 동안 실험을 진행하였으며, 주기적으로 물을 공급해주었음.
- Heat 스트레스 저만의 결과, control과 비교하였을 때의 상태는 괜찮아 보였으며, 9시간 이후부터는 차이가 보이기 시작했으며, 12시간 후에는 확연하게 스트레스를 받은 것을 확인함. 로만의 경우, Control과 비교하여 저먼과 다르게 3시간부터 스트레스를 받기 시작했으며, 12시간 이후에는 저먼과 비슷하게 확연하게 스트레스를 받은 것을 확인함



[40°C에서 Heat 처리한 저먼과 로만의 변화 관찰]

- Heat 스트레스 처리가 끝난 이후 항산화 함량의 변화를 알기 위해, 식물체를 건조 시켜 추출물을 제조 후 항산화 분석함. 항산화 분석 항목은 총 폴리페놀, 총 플라보노이드, DPPH 소거 활성임
- 저먼의 경우, 총 폴리페놀에서 시간이 지날수록 항산화의 함량이 증가했으며, 12시간에는 감소함을 보임. 총 플라보노이드와 DPPH 소거 활성의 경우 Control과 비교하여 3시간에는 감소하다가 9시간에는 증가하다가, 12시간에는 감소 확인



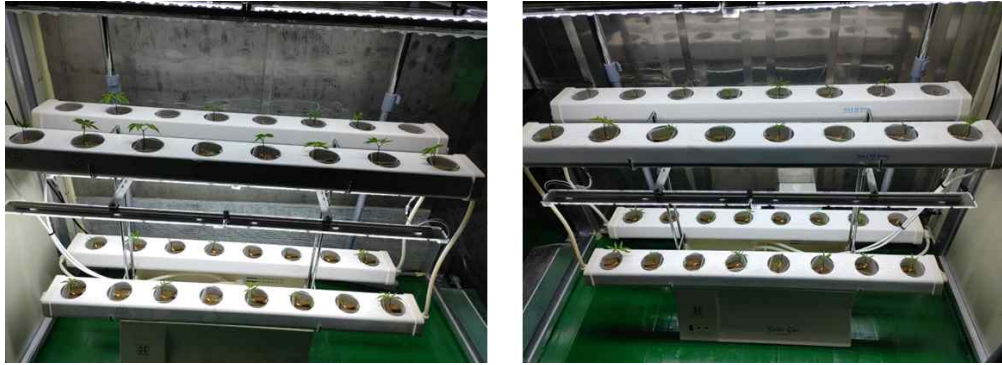
[Heat stress에 따른 저먼과 로만의 항산화 분석]

- 로만의 경우 총 폴리페놀에서 control과 비교해서 3시간에는 증가하다가 9시간에는 감소하고, 12시간은 9시간과 비슷한 값을 보임. 총 플라보노이드의 경우, control과 비교해서, 3시간에 증가하다 9시간에는 감소하고, 12시간에는 증가하는 결과를 보임. DPPH 소거 활성의 경우 control과 비교해서 시간이 지날수록 증가하다 12시간에는 감소하는 결과를 확인함
- 증가된 CO2에서 작물을 재배할 때, 회향의 경우, 1차 대사인 생육 및 biomass는 증가하였으나, 2차 대사산물인 항산화 물질인 플라보노이드를 제외한 나머지 항산화는 감소함. 바질과 새싹삼 또한 생육과 biomass는 증가하나, 항산화 물질은 감소하는 것을 나타냄. 캐모마일의 경우, 1차 대사는 증가하였으나, 2차 대사산물인 항산화 물질은 증가하는 물질이 있는 반면, 감소하는 물질이 동시에 발견됨.
- 이러한 결과는, 증가된 CO2 공급 시 대부분의 작물은 생육과 biomass에 관련된 1차 대사산물은 긍정적인 영향을 보였으나, 이후 2차 대사산물, 예를 들어 폴리페놀, 플라보노이드, 카로티노이드와 같은 항산화 물질에 관련된 대사산물은 작물마다 영향을 받는 것이 다른 것으로 생각됨.
- 아직 CO2 반응에 대한 연구는 계속 진행되고 있으며, CO2 반응에 대한 기작은 완전히 밝혀지지 않았기 때문에 지속적인 연구가 필요함

○ 실증온실의 작물 생산성 및 경제성 분석 및 농가모델

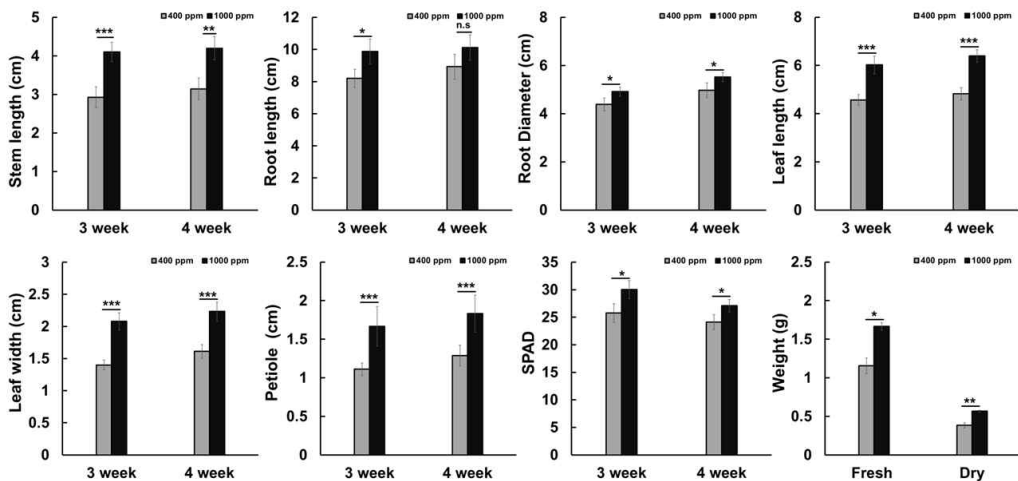
(1) 탄산시비 식물공장에서 새싹삼 생산량 및 품질 분석

- 이번 실험은 CO₂ 농도가 400과 800ppm이 아닌, 400과 1,000ppm에서 작물이 어떠한 영향을 미치는지 확인하기 위해 가나안 농군학교 식물공장에서 실험을 진행함. 새싹삼을 작물로 선정하여 실험을 진행했으며, 바질, 회향, 캐모마일 재배했을 때 사용한 수경재배 시스템을 사용했으며, 빛은 LED 조명을 사용하였고, 광주기는 12/12시간으로 설정하였음. CO₂ 농도는 현재 대기 농도 400ppm과 1,000ppm으로 설정하여 수확 전까지 일정하게 유지함. 양액 대신 물을 공급했으며, 3일에 한번씩 주기적으로 물을 교체 해줌



[CO₂ 농도(400, 1,000ppm)에 따른 새싹삼 재배 사진]

- 새싹삼 모종은 묘삼새싹삼용 개갑씨 모종을 구매하여, 8월 11일에 이식하였으며, 8월 29일에 새싹삼을 수확함. 새싹삼의 생육을 관찰하기 위해 이식 후 3~4주에 새싹삼의 줄기길이, 뿌리길이, 뿌리두께, 엽폭, 엽장, 페티올, 엽록소 함량, 생체중과 건물중을 측정함.
- 이식 후 3주의 새싹삼의 생육을 관찰한 결과, 모든 생육에서 400과 비교해서 800ppm에서 증가하였으며, 유의한 차이를 보임. 이식 후 4주의 경우, 3주와 같은 결과로 800ppm에서 증가하여 유의한 차이를 보였지만, 뿌리길이의 경우 유의한 차이를 보이지 않음. CO₂ 농도를 1,000ppm으로 설정하여 공급하였을 때 새싹삼의 생육과 Biomass를 증가시켜 긍정적인 효과를 보였음.
- 증가된 CO₂ 농도(800, 1,000ppm)는 다른 작물의 생육에도 긍정적인 영향을 미쳐 작물의 생육과 biomass, 수확량을 증가시킬 것을 시사함.

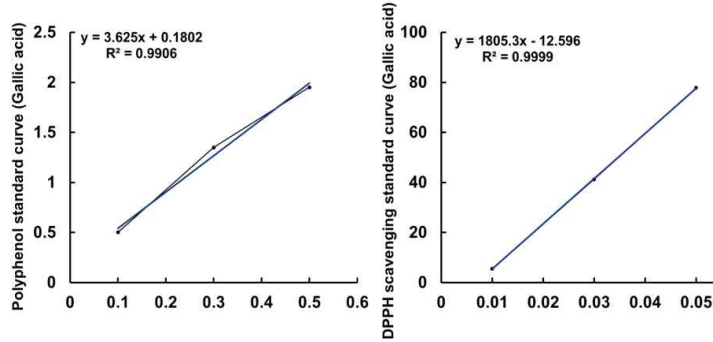


[CO₂ 농도에 따른 새싹삼의 생육 변화 관찰]

- CO₂ 농도를 증가했을 때 새싹삼의 생육, 수확량, biomass 등이 증가한 것을 확인했으며, 2차 대사산물인 항산화 함량의 변화를 관찰하기 위해 새싹삼의 항산화 물질 분석을 진행함. 항산화 분석은 총 폴리페놀, DPPH, ABTS, 아질산염 소거 활성, Reducing power 분석을 진행함.
- 항산화 분석을 위해 새싹삼을 건조시킨 후 지상부(줄기와 잎)와 지하부(뿌리)를 분리하고 분말형태로 만든 후 시료 0.1g, 메탄올 5ml을 첨가하여 추출물 제조함.

- 총 폴리페놀 함량 분석을 위해 표준곡선을 작성했으며, 표준곡선은 폴리페놀의 표준물질인 Gallic acid를 사용하여 1% Gallic acid solution을 농도별(0.1, 0.3, 0.5 GAE mg/ml)로 표준 곡선을 작성함, 표준곡선의 R2 값은 0.9906 이상으로 나왔으며 DPPH 소거 활성은 폴리페놀의 표준물질인 Gallic acid를 희석하여 농도별(0.01, 0.03, 0.05 GAE mg/ml)로 표준 표준곡선을 작성함. 표준곡선의 R2 값은 0.9999 이상으로 나타났으며, 농도에 따른 수치의 변화가 높은 상관관계를 보임
- DPPH scavenging activity(%) 계산방식은 아래의 식에 나타냄.

$$DPPH\ scavenging\ activity\ (\%) = (1 - sample / blank) * 100$$
- Sample의 경우, 시료의 추출물과 DPPH solution의 흡광도 값을, Blank의 경우 메탄올과 DPPH solution의 흡광도 값을 말함.



[총 폴리페놀, DPPH 소거 활성의 농도별 표준곡선]

- 새싹삼의 항산화 분석 결과, 모든 항산화 분석은 전체적으로 1,000ppm보다 400ppm에서 높은 값을 나타냈으나, 유의한 차이를 보이지 않음. 지상부와 지하부의 항산화 물질을 비교한 결과, 지하부보다는 지상부의 항산화 물질이 많이 함유되어 있는 것으로 보임.
- 증가된 CO2에서 새싹삼을 재배했을 때 생육 및 biomass가 증가되어 긍정적인 영향을 미쳤지만, 항산화 물질 함량은 감소함을 보임.
- 400 ppm 탄산시비에 비하여 800 ppm 탄산시비는 밀폐형 식물공장에서 3주간 새싹삼의 성장률을 3~4일간 앞당긴 것으로 평가됨. 이는 새싹삼의 출하를 위한 생산비 절감과 소득 증대에 영향을 줄 것임

(2) 탄산시비 스마트온실에서 토마토와 엽채류 생산량 분석

- 본 연구는 CO2 농도가 토마토와 엽채류의 작물의 성장 환경에 미치는 영향을 조사하고 분석하고자 진행함.
- 스마트팜의 성장 환경을 구성함에 있어 스마트팜 하우스 내부의 CO2 농도가 토마토와 엽채류 작물의 성장 환경(초장, 엽장, 엽폭, 엽수, 착과군, 과실 수 등)에 얼마나 작용하는지에 대한 자료를 분석하고 그 결과를 토대로 실제 농가에서 실험을 진행했을 때 작물의 생육 변화를 관찰하기 위해 진행함.
- 본 연구는 실제 농가로 사용중인 강원도 원주시 신림면 연봉정길 5에 소재한 가나안 농군학교 스마트팜 비닐하우스(100평의 규모)에서 실험을 진행했으며, 2개의 비닐하우스를 소재하고 있어 1동은 400ppm, 2동은 800ppm으로 실험을 진행함.
- 토마토는 대추형 방울토마토인 TY 아이템 품종을, 엽채류인 상추는 적상추(선충포착), 청상추(탑그린), 로메인(청로메인), 오크 품종을 구매하여 작물을 이식함.
- 방울토마토와 상추의 양액은 다음의 표에 나타냄

(1kg/1톤, 100배액)

구분	KNO3	5{Ca(NO3)2·2H2O}·NH4NO3	KH2PO4	MgSO4·7H2O	K2SO4
사용량	31.16	86.92	17.82	52.50	16.43
구분	Fe-EDTA	MnSO4·4H2O	CuSO4·5H2O	ZnSO4·7H2O	NaMoO4·2H2O
사용량	2,900	237	28	115	19
구분	H3BO3				
사용량	324				

[대추형 방울토마토 양액재배 배양액 조성표]

(1kg/1톤, 100배액)

구분	KNO3	5{Ca(NO3)2·2H2O}·NH4NO3	KH2PO4	MgSO4·7H2O	K2SO4
사용량	43.56	42.18	10.92	27.14	3.83
구분	Fe-EDTA	MnSO4·4H2O	CuSO4·5H2O	ZnSO4·7H2O	NaMoO4·2H2O
사용량	2,430	305	16	33	9
구분	H3BO3				
사용량	260				

[엽채류 양액재배 배양액 조성표]

- 방울토마토와 상추의 양액(A, B) 탱크 조성표와 배양액 혼입 개략도는 아래와 같음

A 탱크(1kg/1톤, 100배액)	B 탱크 (1kg/1톤, 100배액)
질산칼륨 : 1/2	질산칼륨 : 1/2
질산칼륨	제일인산칼륨
킬레이트 철	황산마그네슘
	황산칼륨
	망간
	구리
	아연
	붕소
	몰리브덴

[방울토마토, 상추 양액 조제 요령 및 배양액 혼입 개략도]

- 양액 관리와 공급은 우성하이텍의 양액공급기 “인젝션마스터”·복합환경제어시스템을 이용하여 EC 1.0~1.4dS·m⁻¹, pH 6.0으로 설정한 후 네타필름 점적호스(STREAMLINE 16080, 점적간격 20cm, 1.60L/Hr, NETAFIM,Israel)로 공급함.

- 대추형 방울토마토와 상추의 재식거리와 시비 방법은 아래의 표에 나타냄

구분	개요
재식 거리	40~45cm/주당 간격
시비 방법	정식 후 7일부터 EC 1.5~2.2까지 순차적으로 EC를 높여 공급함. 1일 10회 관비 공급. pH 6.2 보정 공급(질산 60% 사용) 배액은 30~50%로 유지

[대추형 방울토마토의 재식거리와 시비 방법]

구분	개요
재식 거리	20*25cm
시비 방법	정식 후 7일부터 EC 0.6~1.3dS·m ⁻¹ 까지 순차적으로 높여서 공급함. 1일 1회 관비 공급. pH 6.0 보정 공급(질산 60% 사용) 배액은 30~50%로 유지

[상추(적상추, 청상추, 로메인, 오크) 재식거리와 시비 방법]

- 가나안 농군학교에서 작물 재배전, 가나안 농군학교 농업용수의 수질을 확인하기 위해 조사했으며, 아래에 분석 결과를 표로 나타냄. 2022년 용수 분석과 2023년의 분석의 결과를 비교한 결과, NO₃-N은 작년보다 올해 2.81mg/L 감소함. Ca(칼슘)는 22년보다 23년에 23.06mg/L 감소함. 대부분이 22년보다 23년에 감소한 결과를 보임.

분석 항목	2022년 분석 결과	2023년 분석 결과
NH ₄ -N	흔적	흔적
NO ₃ -N	7.29mg/L	4.48mg/L
P (인)	0.02mg/L	흔적
K (칼륨)	2.26mg/L	1.95mg/L
Ca (칼슘)	42.93mg/L	19.87mg/L
Mg (마그네슘)	9.87mg/L	4.41mg/L
S (황)	5.04mg/L	6.72mg/L
Cl (염소)	55.66mg/L	39.71mg/L
Na (나트륨)	17.52mg/L	27.43mg/L
HCO ₃ (중탄산)	86.00mg/L	50.00mg/L
Fe (철)	흔적	흔적
Mn (망간)	0.001mg/L	0.002mg/L
B (붕소)	0.006mg/L	0.011mg/L
Zn (아연)	0.005mg/L	0.033mg/L
Cu (구리)	0.001mg/L	0.001mg/L
Mo (몰리브덴)	0.011mg/L	흔적
EC (전기전도도)	0.38mg/L	0.27mg/L
pH	7.35	6.97

[가나안 농군학교 농업용수 분석 결과]

- 방울토마토를 재배하기 위해 생육 초기 배양액과, 초기 생육이 지난 후 3~5 화방 시기의 양액이 다르기 때문에 따로 제조하여 사용하였으며, 초기 배양액 조성표와 3~5 화방용 배양액 조성표는 다음의 표에 나타냄

비료 염의 종류		2022년 코코피트 배지 (100배 원액/ 1,000ℓ 당)	2023년 펄라이트 배지 (100배 원액/ 1,000ℓ 당)
A액	KCl (염화칼륨)	kg	- kg
	5{Ca(NO3)2·2H2O}·NH4NO3	86.92kg	54.40kg
	Ca(NO3)2·4H2O (질산칼륨 4 수염)	- kg	40.00kg
	NH4NO3 (질산암모늄)	kg	kg
	HNO3 (60%) (질산)	kg	kg
	KNO3 (질산칼륨)	18.15kg	12.66kg
B액	Fe-EDTA (13%)	2.9kg	1.49 kg
	KH2PO4 (제 1인산칼륨)	17.82kg	17.44kg
	MgSO4·7H2O (황산마그네슘)	52.5kg	52.86kg
	Mg(NO3)2·6H2O (질산마그네슘)	kg	kg
	K2SO4 (황산칼륨)	16.43kg	12.28kg
	HNO3 (60%) (질산)	2.4kg	-
	MnSO4·H2O (황산망간)	18.01kg	24.47kg
	ZnSO4·7H2O (황산아연)	237g	220g
	H3BO3 (붕산)	115g	115g
	CuSO4·5H2O (황산구리)	324g	306g
Na2MoO4·2H2O	28g	23g	
(몰리브덴산나트륨)	19g	15g	

[방울토마토의 생육초기용 배양액 조성표]

비료 염의 종류		2022년 코코피트 배지 (100배 원액/ 1,000ℓ 당)	2023년 펄라이트 배지 (100배 원액/ 1,000ℓ 당)
A액	KCl (염화칼륨)	kg	kg
	5{Ca(NO3)2·2H2O}·NH4NO3	82.3kg	49.83kg
	Ca(NO3)2·4H2O (질산칼륨 4 수염)	kg	35.16kg
	NH4NO3 (질산암모늄)	kg	kg
	HNO3 (60%) (질산)	kg	kg
	KNO3 (질산칼륨)	27.71kg	25.77kg
B액	Fe-EDTA (13%)	2.75kg	1.29kg
	KH2PO4 (제 1인산칼륨)	19.45kg	19.08kg
	MgSO4·7H2O (황산마그네슘)	44.88kg	45.19kg
	Mg(NO3)2·6H2O (질산마그네슘)	kg	kg
	K2SO4 (황산칼륨)	25.55kg	20.06kg
	HNO3 (60%) (질산)	2.4kg	kg
	KNO3 (질산칼륨)	18.84kg	26.43kg
	MnSO4·H2O (황산망간)	262g	254g
	ZnSO4·7H2O (황산아연)	115g	115g
	H3BO3 (붕산)	306g	287g
CuSO4·5H2O (황산구리)	24g	21g	
Na2MoO4·2H2O	16g	13g	
(몰리브덴산나트륨)			

[토마토 초기 생육 후 3~5 화방용 배양액 조성표]

- 상추를 재배하기 위해 엽채류 배양액 조성표를 사용하였으며, 상추 배양액 조성표는 아래의 표에 나타냄

비료 염의 종류		EC 1.3dS·m ⁻¹ (100배 원액/ 1,000ℓ 당)
A액	KCl (염화칼륨)	kg
	5{Ca(NO3)2·2H2O}·NH4NO3	42.18kg
	Ca(NO3)2·4H2O (질산칼륨 4 수염)	kg
	NH4NO3 (질산암모늄)	kg
	HNO3 (60%) (질산)	kg
	KNO3 (질산칼륨)	21.81kg
B액	Fe-EDTA (13%)	2.43kg
	KH2PO4 (제 1인산칼륨)	10.92kg
	MgSO4·7H2O (황산마그네슘)	27.14kg
	Mg(NO3)2·6H2O (질산마그네슘)	kg
	K2SO4 (황산칼륨)	3.83kg
	HNO3 (60%) (질산)	2.2kg
	KNO3 (질산칼륨)	21.75kg
	MnSO4·H2O (황산망간)	308g
	ZnSO4·7H2O (황산아연)	33g
	H3BO3 (붕산)	260g
CuSO4·5H2O (황산구리)	16g	
Na2MoO4·2H2O (몰리브덴산나트륨)	9g	

[엽채류 (상추)의 배양액 조성표]

(3) CO2 농도 처리가 토마토와 엽채류 생산에 미치는 영향 연구

- 우리나라에서 많이 섭취하는 방울토마토와 상추를 작물로 선정하여 CO2 공급 시 작물에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위해 실험을 진행했으며, 작물의 재배 시기는 2023년 4월부터 2023년 6월까지, 2023년 9월부터 2023년 11월까지 두 번 재배하여 생육을 관찰함.

- 비닐하우스의 CO2 공급은 하루에 한번 오전에 공급하고, 양액은 앞의 표에 나타난 배양액 조성표를 따라 제조하여 주기적으로 공급함.

(4) 작물의 생육 특성 관찰 (엽채류, 4~5월 재배)

- 엽채류는 청상추, 적상추, 로메인, 적근대, 트레비소, 버터헤드, 루꼴라를 작물로 선정했으며, 모종을 구매하여 4월 13일에 펠라이트에 이식했으며, 관비 재배함

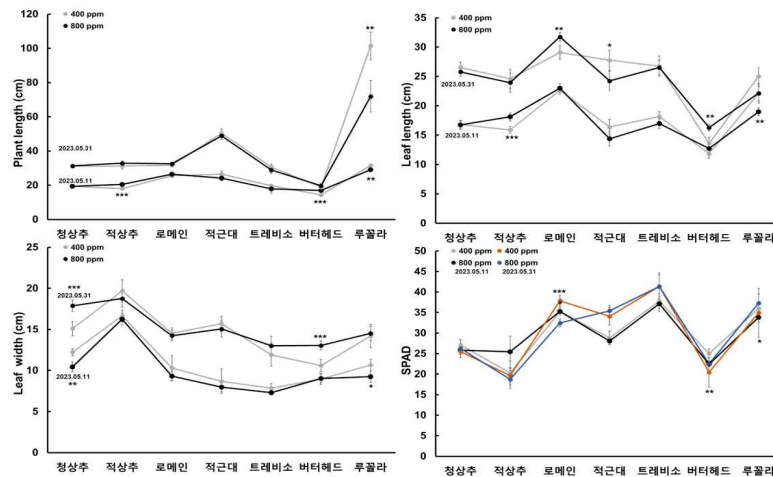


2023년 4월 13일 상추 이식

2023년 5월 11일 상추 생육 조사

[가나안 농군학교 스마트팜 비닐하우스 상추 4월 이식, 생육 조사 사진]

- CO2 농도에 따른 엽채류의 생육을 관찰하기 위해 생육 조사함. 생육 조사항목은 엽장, 엽폭, SPAD value를 측정함.
- 품종별 CO2 농도를 비교한 결과, 이식 후 4주의 청상추, 로메인, 적근대, 트레비소는 전체적으로 유의한 차이를 보이지 않았으며, 적상추와 버터헤드, 루꼴라의 경우, 유의한 차이를 보임. 특히, 적상추와 버터헤드는 상대적으로 800ppm에서 증가한 것을 확인함
- 이식 후 6주의 경우, 초장에서 루꼴라를 제외한 모든 작물에서는 유의한 차이를 보이지 않았으며, 엽폭은 청상추와 버터헤드의 800ppm이 상대적으로 증가하였으며, 나머지 품종은 비슷한 결과로 유의한 차이를 보이지 않음.
- 클로로필 함량은 식물에 함유된 녹색 색소이며, 광합성의 핵심 분자로 빛에너지를 흡수하는 안테나 역할을 하는 색소이며, 엽록소 함량을 측정한 결과, 청상추, 로메인, 트레비소, 루꼴라에서 대체적으로 높게 나왔으며, 적상추와 적근대로 이름과 같이 빨간색을 띠는 작물이기 때문에, 초록색 잎을 갖은 작물보다 적게 나오며, 버터헤드의 경우, 초록색 잎이지만 연한 초록색을 띄기에 엽록소 함량이 낮게 나온 것으로 보임.



[CO2 농도에 따른 상추의 생육 관찰]

- 2023년 4~5월에 재배한 엽채류의 400과 800ppm의 비닐하우스 안 온도와 습도를 관찰한 결과, 온도와 습도는 800ppm에서 더 높은 값을 나타냈는데, 이는 계절적, CO2 농도의 영향을 받아 상대적으로 온도와 습도가 800ppm에서 증가함. 실제 농가에서는 작물의 생산량과 품질을 위해 적절한 온도와 습도를 유지하기 위해 비닐하우스의 자주 환기를 시켜줌. 상대적으로 400ppm은 CO2 농도가 계속 유지했으나, 800ppm은 오전에 한번 CO2 공급과 잦은 환기로 인해 CO2 농도가 유지되지 못함. 이러한 결과로 800ppm의 CO2가 식물에 제대로 흡수하지 못하거나 느리게 영향을 받은 것으로 생각됨.

- 결과적으로 CO2 영향을 확인하기 위해 CO2 농도를 제외한 나머지 환경요인은 동일 조건에서 실험을 진행해야 하나, 가나안 농군학교는 동일 조건이 아닌 상태에서 재배하였으므로, 엽채류의 생육이 CO2에 영향을 받지 않거나, 효과가 느리게 나타나는 것으로 생각됨.

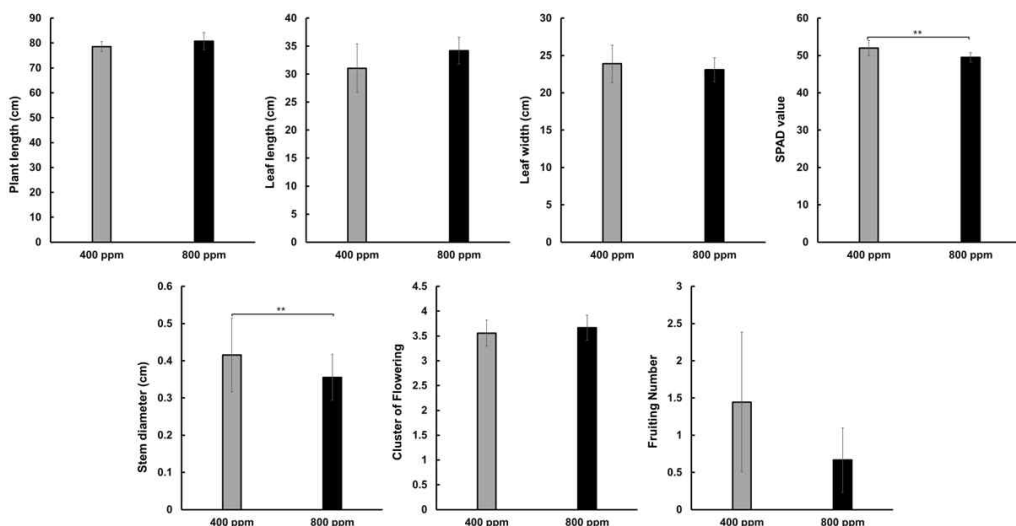
(5) 작물의 생육 특성 관찰 (토마토, 4~6월)

- 방울토마토는 대추형 방울토마토인(TY 아이템) 모종을 구매하여 4월 13일에 코코피트에 이식했으며, 관비 재배함



[230511 방울토마토 생육 조사 사진]

- 방울토마토의 생육을 관찰하기 위해 초장, 엽장, 엽폭, 경경, SPAD value 값을 측정함.
- 이식 후 4주의 방울토마토의 생육을 관찰한 결과, 초장과 엽장, 엽폭에서 400과 800ppm을 비교해서 800ppm에서 증가하였으나, 유의한 차이를 보이지 않았으며, 반대로 엽록소 함량의 경우 400ppm에서 증가했으며, 유의한 차이를 보임. 방울토마토의 화방수는 800ppm에서 증가하였으나, 과실의 수는 감소함. 화방 수와 과실 수는 생산량과 관련있으므로 전체적으로 봤을 때 400과 800ppm은 비슷한 결과를 보임. 이러한 결과는 CO2 영향을 받지 않은 것으로 생각되며, 엽채류와 같은 날에 이식하고 재배 했기 때문에 비닐하우스 안 환경요인은 엽채류와 같은 이유로 CO2에 영향을 미치지 않은 것으로 생각됨.

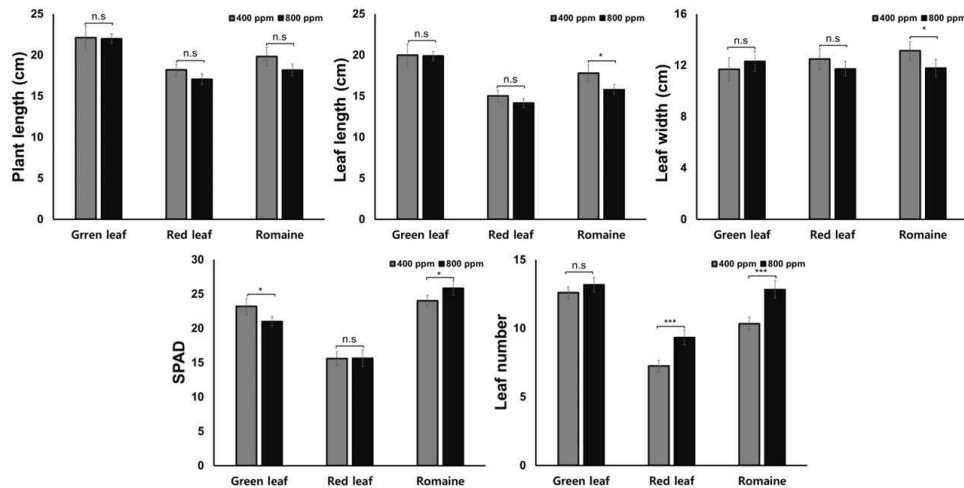


[CO2 농도에 따른 방울토마토의 생육 변화 관찰]

(6) 작물의 생육 특성 엽채류 (상추, 9~11월)

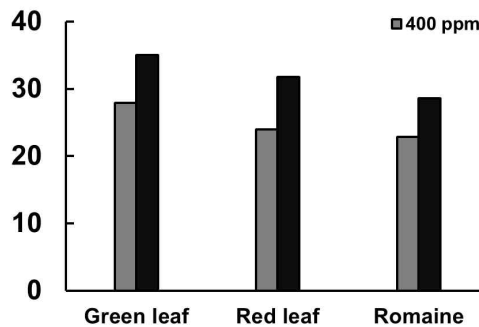
- 여름 계절 특성상 외부의 온도가 높아 비닐하우스에서 재배 시 비닐하우스 내부의 온도, 습도가 증가하기 때문에, 실제 농가에서도 6~8월에는 비닐하우스에서 작물을 재배하지 않기 때문에, 실험을 진행하지 않음.
- 여름 계절을 제외한 9~11월에 비닐하우스에서 상추와 방울토마토를 재배함. 상추의 경우, 청치마, 적아삭이, 솔마유렵풍 모종을 구입하여 8월 29일 펠라이트 관비 재배함

- 지난 실험 결과, 400과 800ppm의 비닐하우스 온도와 습도를 유지 시키기 위해 800ppm의 자주 환기시켰으며, 이번 실험에는 환기시키지 않고 실험을 진행함
- CO2 공급은 오전 9시에 한 번 공급했으며, 작물의 생육을 2달 동안 관찰함. 이식 후 3주에 상추의 생육 변화를 관찰하기 위해 생육 조사를 실시함. 생육조사는 초장, 엽장, 엽폭, 엽록소 함량을 측정함. 생육조사는 한번 진행했으며, 조사 이후 상추의 수확량을 조사하기 위해 수확량을 조사함.
- 상추의 생육을 관찰한 결과, 전체적인 생육은 800ppm과 비교했을 때, 400ppm에서 증가하였으나, 유의한 차이를 보이지 않았으며, 엽수의 경우 800ppm에서 증가함
- 상추의 엽수는 수확량과 같으므로, 800ppm에서 증가했다는 것은 CO2의 영향을 받은 것으로 생각되나, 생육 부분에서는 400ppm과 비교했을 때 차이가 없는 것으로 보아, CO2를 지속적으로 유지된 작물보다 영향을 받은게 느리게 나타나는 것으로 생각됨.



[CO2 농도에 따른 상추의 이식 후 3주의 생육 변화 관찰]

- 상추 작물 특성상 이식 후 2~3주 이후부터는 수확시기이기 때문에, 생육조사 이후, 일주일마다 상추의 수확량을 조사함. 상추의 수확량 조사는 총 10번 수확했으며, 합계로 그림에 나타냄
- 2023년 9월 26일부터 11월 28일까지 수확량을 조사한 결과, 청치마는 400ppm 27.9kg, 800ppm 35kg이며, 적아삭이는 400ppm 24kg, 800ppm 31.79kg, 슬마유립풍은 400ppm 22.9kg, 800ppm 28.6kg을 나타냄. 전체적으로 800ppm에서 높은 수확량을 보였으며, 결과적으로 엽채류는 증가된 CO2에 영향을 미쳤지만, 적게 미쳤거나, 느리게 영향을 미친 것으로 생각됨.



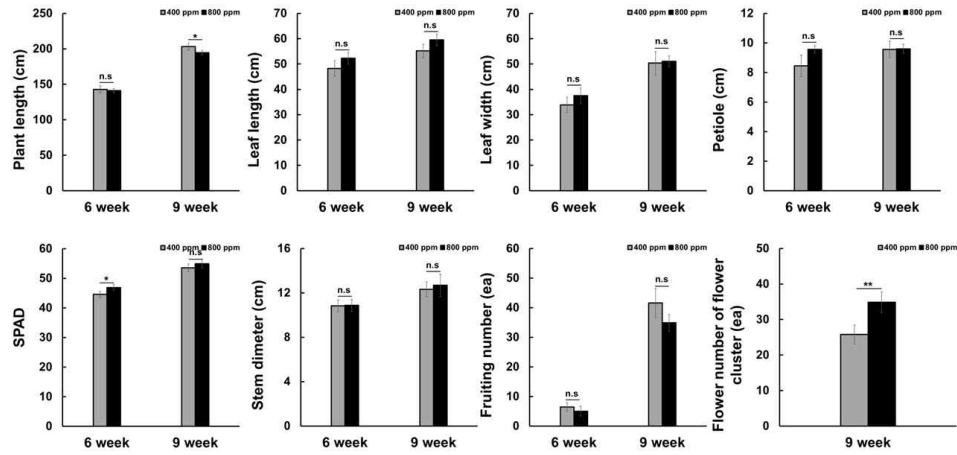
[2달간 상추의 수확량 조사]

(7) 작물의 생육 특성 관찰 (방울토마토, 9-11월)

- 방울토마토는 TY 코코벨 모종을 구입하여 8월 29일에 펄라이트에 이식하여 관비 재배함. 엽채류와 같은 환경에서 재배했으며, CO2 공급도 오전 한 번 공급됨. 방울토마토의 생육은 화방 수가 3개 이상 나오기 시작할 때 생육조사를 실시함. 방울토마토의 생육을 관찰하기 위해 초장, 엽장, 엽폭, 경경, 페티올, 엽록소 함량, 화방 수, 과실 수를 측정함.
- 이식 후 6주의 방울토마토의 생육을 관찰한 결과, 초장, 과실 수를 제외한 나머지 생육은 400ppm과 비교해서 800ppm에서 증가하였고, 반대로 초장과 과실 수는

800ppm에서 감소하였으며, 유의한 차이를 보이지 않음. 이식 후 9주의 생육을 관찰한 결과, 6주와 같은 결과를 보였으며, 과실 수의 경우 800ppm에서 증가하였고, 유의한 차이를 보임.

- 화방, 과실 수는 방울토마토의 생산량과 같기 때문에 합치면, 400ppm에서 약 60개, 800ppm에서 약 70개 정도의 값으로 400보다 800ppm에서 10개 정도 많은 생산량을 보임. 이러한 결과는 CO2가 방울토마토의 생산량을 증가시킨 것으로 생각됨.

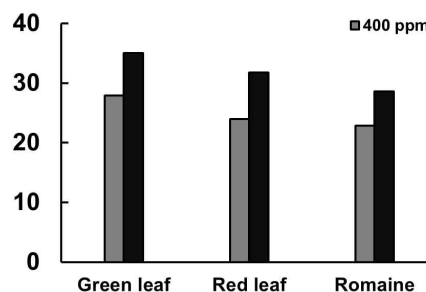


[CO2 농도에 따른 방울토마토의 생육 변화 관찰]

- 가나안 농군학교의 경우, CO2 공급을 하루에 한 번 오전에 공급하는 방식으로, 상추와 방울토마토를 재배한 결과, 생육 초기에는 400ppm이 높거나 800ppm이 비슷한 결과로 유의한 차이를 보이지 않았으며, 수확시기에는 수확량과 관련된 토마토의 과실과 엽채류의 엽수는 상대적으로 800ppm에서 증가한 것을 확인함. 이러한 결과는 생육 초기에 400과 800ppm이 비슷한 성장을 보여 영향을 미치지 않았으나, 생육 후기에 CO2 영향을 받아 800ppm이 증가한 것으로 생각됨.
- 반면, 상지대학교의 경우, CO2 공급을 이식 후 수확 전까지 400과 800ppm으로 계속 유지시켜주는 방식으로 회향, 바질, 캐모마일을 재배한 결과, 생육 초기에 상대적으로 800ppm에서 증가하여 유의한 차이를 보였으며, 생육 후기에 생육 초기와 같은 결과로 800ppm에서 증가하여, 이는 생육 초기부터 CO2의 영향을 받은 것으로 생각됨.
- 위의 실험 결과들은 다른 장소, 방법으로 재배한 것으로 결과가 다르게 나타난 것으로 생각되며, 확실한 결과를 얻기 위해서는 추가적인 연구가 필요함. 추후 실험에서는 하루 한 번 공급과 CO2 농도를 일정하게 유지시키는 방법, 2가지를 동시에 같은 장소에서 실험하여 비교 분석하여 확인해야 할 필요가 있음.

○ 탄산시비 적용 스마트팜의 상추 수확에 대한 경제성 평가

- 상추 작물 특성상 이식 후 2~3주 이후부터는 수확시기이기 때문에, 생육조사 이후, 일주일마다 상추의 수확량을 조사함. 상추의 수확량 조사는 총 10번 수확했으며, 합계로 그림에 나타냄
- 2023년 9월 26일부터 11월 28일까지 수확량을 조사한 결과, 청상추는 400ppm 27.9kg, 800ppm 35kg이며, 적상추는 400ppm 24kg, 800ppm 31.79kg, 로메인상추는 400ppm 22.9kg, 800ppm 28.6kg을 나타냄. 전체적으로 800ppm에서 높은 수확량을 보였으며, 결과적으로 엽채류는 증가된 CO2에 영향을 미쳤지만, 적게 미쳤거나, 느리게 영향을 미친 것으로 생각됨.



[2달간 상추의 수확량 조사]

- 스마트온실의 경우 6 m² 재배 면적에서 생산된 위의 수확량을 기초로 소득금액을 분석한 결과, 800 ppm 이산화탄소 처리시 약 60,000 원/kg 이상의 소득 증가율을 보였음.

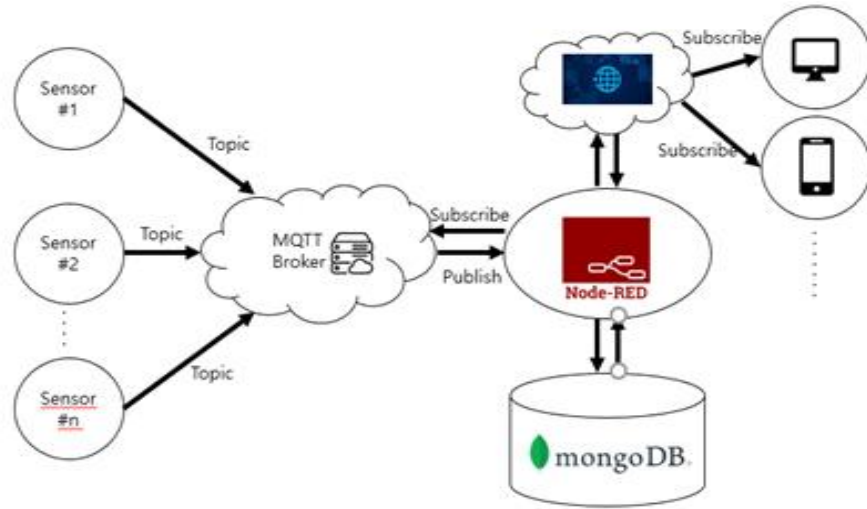
작물 (6 m ² 재배면적 기준)	400 ppm	800 ppm	소득 증감
청상추 (11450 원/kg)	319,455 원/kg	400,750 원/kg	81,295 원/kg
적상추 (8250 원/kg)	198,000 원/kg	262,267.5 원/kg	64,267.5 원/kg
로메인 (13400 원/kg)	306,860 원/kg	383,240 원/kg	76,380 원/kg

○ 탄산시비 적용 농가 보급 모델

- 우리나라 비닐하우스는 대부분 송풍과 냉난방 시설이 미비하여 최근 이상기후에 의한 여름철 고온과 CO₂ 농도의 불균형으로 작물의 생육 불량 및 수확량 감소의 원인이 됨. 가축분뇨 처리 및 시용 시 CH₄, NO₂, CO₂가 발생됨. 본 연구는 비닐하우스의 내외부 재배환경 조건 실태를 파악하여 비닐하우스 시설재배 농가의 환경 개선의 기초자료를 제공하기 위해 수행함. 2021년부터 2023년까지 경기도 여주시, 충청남도 보령지역에서 채소 작물 재배기간 동안 비닐하우스 내외부 CO₂ 농도와 온도를 조사함. 그 결과 여주시지역의 비닐하우스 내부의 CO₂ 농도는 480.9ppm, 보령지역의 내부 농도는 528.4ppm을 나타냄.
- 비닐하우스 내부의 최소 CO₂ 농도는 441ppm, 최대 농도는 608.8ppm을 나타냄. 하우스 내부의 CO₂ 농도가 외부보다 10.1ppm 정도 높았음. 하우스 내부의 월별 CO₂ 3~4월이 여름 계절인 6~9월보다 높았음. 계절별 농도의 변동 폭이 441~600.8ppm임. 여름철 비닐하우스 내부의 온도는 31.9~33.7℃로 비닐하우스 외부 온도보다 1~3℃ 더 높았으며, 오이, 가지, 고추의 생육적온 보다 높았음. 작물별 생육을 최적화하기 위해서는 우리나라 비닐하우스 CO₂ 농도와 온도를 모니터링하고 송풍과 냉난방 시설을 개선하여 이상기후에 대비할 필요성이 있다고 판단됨.
- 이산화탄소의 경우 온도가 상승하는 5~7월의 경우, 식물공장과 같은 밀폐형을 제외한 개방형의 하우스 등에서는 온도유지를 위한 환기 등으로 이산화탄소 시비에 대한 큰 효과를 보기 어려움. 또한 이산화탄소 시비는 광합성과 호흡률 증가를 통해 온도와 습도 유지에 신경을 써야함.
- 이산화탄소의 시비는 작물의 생육 촉진에 큰 효과를 보이므로 개방형 스마트팜 보다는 밀폐형 식물공장에 더 적합함

○ 최적의 맞춤형 스마트팜 고도화

- 농촌의 인구 감소, 고령화에 따른 농촌 인력 부족, 기후 변화에 따른 병해충 증가로 인해 어려움을 겪고 있는 농업에 생산성을 높이고, 농산물의 품질을 향상시키는 기술 중 하나가 IoT를 활용한 스마트팜임
- 최적의 맞춤형 스마트팜을 위해 산업 표준화 프로토콜과 플랫폼 이용함. 사물 인터넷이나 M2M(Machine-to-Machine)에서 사용되는 산업 표준 프로토콜인 MQTT(Message Queueing Telemetry Transport)를 이용함. 사물 인터넷의 대표적인 개발 미들웨어인 Node-RED를 기반으로 스마트팜 고도화를 제작함. MongoDB는 빅데이터베이스 중 가장 많이 사용되는 NoSQL 데이터베이스임.
- 스마트팜에 다양한 센서를 MQTT 브로커 서버에 연결한 후 통신함. 아두이노 센서를 “publisher”하여 MQTT 브로커에 데이터를 넘김 → Node-RED에서 MQTT 브로커를 구독하여 MQTT에서 Node-RED에게 발행 → Node-RED에 아두이노 센서 데이터를 보냄. 보낸 데이터는 Node-RED에서 “localhost:8080”주소로 PC와 스마트폰으로 원격을 통해 시각화하여 볼 수 있음. 또한 센서 데이터를 Node-RED의 노트로 MongoDB에 연결하여 센싱 데이터로 저장함.



[고도화된 스마트팜 시스템 구성도]

- Node-RED 기반 스마트팜 고도화는 Node-RED 데이터 임의 변화에 따른 결과 검증이 이루어져, MongoDB에 실시간으로 저장되며, 이러한 결과는 컴퓨터 또는 스마트폰으로 실시간 스마트팜 모니터링 가능함
- Node-RED로 MQTT서버 토픽 노드를 이용하여 습도, 온도, 이산화탄소, 조도를 시각화하여, 센서들의 데이터를 JSON형태로 변화함으로써 MongoDB에 삽입하는 노드를 보여주고 있음
- 이후 실시간 데이터를 가지고 와서 MongoDB에 삽입하여 저장되고, 스마트팜 정보를 웹 페이지 스마트폰으로 실시간으로 모니터링이 가능함. 가장 먼저 스마트팜에 있는 온도, 습도, 조도, CO2 센서에 측정된 센싱 값이 웹 서버로 전송됨. 웹서버에서 센서로부터 전송받은 센싱 데이터를 MySQL 데이터 베이스에 저장함. 데이터베이스에 저장된 데이터를 PHP를 통해 웹 브라우저로 전송됨.
- 사용자는 컴퓨터나 스마트폰을 이용하여 시간과 공간에 관계없이 언제든지 실시간으로 스마트팜에 센싱 정보를 관계없이 확인할 수 있음.



Node-RED 데이터 임의 변화에 따른 결과 입증

MongoDB에 저장된 실시간 데이터

실시간 스마트팜 모니터링

[고도화된 스마트팜 시스템 저장 및 실시간 모니터링 과정]

- 이러한 기술을 통해 농장 관리자는 스마트팜 시스템을 통해 컴퓨터나 스마트폰을 이용하여 시간과 공간에 제약없이 언제, 어디서든지 실시간으로 스마트팜 센싱 데이터를 확인 할 수 있음

(1) 실증 분석을 위한 이산화탄소 센싱 데이터 실시간 저장 및 관리

- 가나안 농군학교에서 실증분석을 위해 이산화탄소 센싱 및 데이터를 실시간 저장이 가능하도록 제작함. 시스템 구축을 위한 하드웨어와 소프트웨어는 아래에 표로 나타냄

하드웨어	소프트웨어
IBM x3500 서버 유무선 Wifi 공유기	운영체제 Ubuntu 20.04 LTS 데이터베이스 : Mysql 14.14 웹 서버 : Apace 2.4.18 웹 서버 언어 : PHP 7.0

[시스템 구축에 필요한 하드웨어, 소프트웨어]

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

- 수소연료전지 시스템 설비구축, 생산 수소 순도 99.94%
 - 수소연료전지 시스템 설비구축, 시간당 수소 생산량 15Nm³/hr
 - DME 발전기 설비구축 및 운전 완료
 - DME 개질 가스의 성분 분석 및 성능 평가 달성
 - 고온형 태양열 집열 이용 축열 설비구축
 - 전기식 히트펌프 설비구축
 - 연료전지 성능변화 분석(공기 중 불순물들의 연료전지 성능에 대한 영향성 분석)
 - 센서 빅데이터 기술과 모니터링 시스템 구축으로 CO₂ 공급을 통한 작물별 맞춤형 스마트팜 실증 기술 개발
 - 연구개발성과 성능지표 중 실증현장 축열 공정 공인기관 성능 평가를 통해 배열 축열 시스템 용량 1GJ 달성
-

(2) 정량적 연구개발성과

- 특허출원 7건 (PCT 출원 포함)
 - 기술 실시(이전) 4건
 - 기술 면허 계약 (특허출원, 통상실시)
 - CO₂ 등 온실가스 포집 관련 개선공정 적용 DME 생산(Know-How, 직접 실시)
 - 기술료 75,000,000원 성과 달성
 - 제품화 2건
 - 매출액 311,000,000원 성과 달성
 - 수출액 109,000,000원 성과 달성
 - 고용 창출 34명
 - 투자 유치 8,000,000,000원 성과 달성
 - 논문발표 15건 (SCI 논문 5건, 비SCI 논문 10건), 논문 평균 IF 9.01
 - 학술발표 26건
 - 홍보 및 전시 6건
 - 정책 활용 1건
 - '포집된 CO₂로부터 제조되는 DME 청정연료를 농업용 대체 연료로 보급' 충북도청에 제안
-

< 정량적 연구개발성과표 >

(단위 : 건, 천원)

성과지표명		연도	1단계 (2021~2022)	2단계 (2023)	계	가중치 (%)
전담기관 등록·기탁 지표	특허등록 (출원)	목표(단계별)	4 (8)	4 (0)	8 (8)	10
		실적(누적)	0 (6)	0 (1)	0 (7)	4
연구개발과제 특성 반영 지표	논문평균 IF	목표(단계별)	3.0	3.0	40	10
		실적(누적)	4.76	4.25	9.01	10
	수소연료전지 시스템 설비구축 생산수소순도	목표(단계별)	99.95%이상	99.95%이상	99.95%이상	10
		실적(누적)	99.94%	99.94%	99.94%	10
	수소연료전지 시스템 설비구축 시간당 생산량	목표(단계별)	20Nm3/hr	20Nm3/hr	20Nm3/hr	20
		실적(누적)	15Nm3/hr	15Nm3/hr	15Nm3/hr	15
	발전기 성능	목표(단계별)	설비구축 및 운전	내구 성능	내구성능	5
		실적(누적)	설비구축 및 운전완료	내구 성능	설비구축 및 운전완료	5
	고온형 태양열 집열이용 축열 설비 구축 시간당 공급량	목표(단계별)	설비구축	10,000kcal/h	10,000kcal/h	10
		실적(누적)	설비구축	설비구축	설비구축	5
	전기식 히트펌프 설비 구축 시간당 공급량	목표(단계별)	설비구축	10,000kcal/h	10,000kcal/h	10
		실적(누적)	설비구축	설비구축	설비구축	5
	배열축열 시스템용량	목표(단계별)	Max.1GJ	Max. 2GJ	2GJ	10
		실적(누적)	0.5 GJ	1GJ	1GJ	7
	연료전지 성능변화 분석 및 스택의 영향성 분석	목표(단계별)	1	1	1	10
		실적(누적)	1	1	1	10
	센서 빅데이터 기술과 CO2 공급을 통한 작물별 맞춤형 스마트팜 실증 기술 개발	목표(단계별)	1	1	1	15
		실적(누적)	1	1	1	15
	계	목표	50%	50%	100%	100
		실적	46%	43%	89%	76

< 연구개발성과 성능지표 >

평가 항목 (주요성능)	단위	전체 항목에서 차지하는 비중(%)	세계 최고		연구개발 전 국내 성능수준	연구개발 목표치		연구개발 성과	
			보유국/보유기관	성능수준	성능수준	1단계 (2021~2022)	2단계 (2023)		
1	생산 수소 순도	%	15%	-	-	-	99.95%이상	99.95%이상	99.94%
2	수소 생산량	Nm ³ /hr	15%	-	-	-	20Nm ³ /hr	20Nm ³ /hr	15Nm ³ /hr
3	발전기 성능	kW	15%	-	-	-	50	50	40
4	발전기 운전 시간	Hr	15%	-	-	-	100	300	110
5	공급 열량	Kcal/h	40%	-	-	-	5,000kcal/h	10,000kcal	10,000kcal
6	배열 축열 시스템 용량	GJ (300평 1일 난방 기준)	-	-	2GJ	1GJ	0.5GJ	1GJ	1GJ

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	Taguchi Method 을 이용한 DME 고압 연료 펌프에 대한 고성능 수치 해석	KHNES	베르니케 페브리어나 사모서	제32권 제6호	대한민국	한국수소및 신에너지 학회	비SCI	2021.12.30	1738-7264	100
2	A Study the Effect of Biodiesel Blends and the Injection Timing on Performance and Emissions of Common Rail Diesel Engines	Energies	Nguyen Tuan Nghia	15(1)	스위스	Energies	SCI	2022.01.15	1996-1073	100
3	CO2 Methanation of Biogas over Ni-Mg-Al: The Effects of Ni Content, Reduction Temperature, and Biogas Composition	Catalysts	한단비	12(9)	스위스	Catalysts	SCI	2022.09.16	2073-4344	50
4	A Study on the Reducing Fuel Cost of Greenhouse Using the Thermal Energy	한국환경 기술학회 지	김홍인	23(5)	대한민국	한국환경기 술학회	비SCI	2022.10.28	1229-8425	100

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCI 여부 (SCI/비SCI)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
5	Elevated CO2 concentration induces changes in plant growth, transcriptome, and antioxidant activity in Fennel (Foeniculum vulgare Mill.) under hydroponics	Frontiers in Plant Science	조나연	-	국외	Frontiers in Plant Science	SCI	2022.11.24	1664-462X	80
6	가축분뇨 유래 액비가 토마토의 생육 및 황산화 활성에 미치는 영향	축산시설 환경학회 지	심수연	24(3)	대한민국	축산시설환경학회	비SCI	2022.12.31	1226-0274	100
7	DME를 연료로 하는 압축 착화 엔진용 고압연료 펌프의 성능 비교 연구	한국수소 및 신에너지학회 논문집	정재희	34권	대한민국	한국수소및신에너지학회	비SCI	2023.02.10	1738-7264	100
8	MQTT 프로토콜을 이용한 스마트 팜 설계	한국정보통신학회 종합학술발표회 논문집	윤정환	16(1)	대한민국	한국정보통신학회	비SCI	2023.05.27	2288-9302	100
9	ICT 스마트 팜 이상치 탐구 연구	2023 한국정보기술학회 하계 종합학술대회 논문집	윤정환	18(11)	대한민국	한국정보기술학회	비SCI	2023.06.01	2005-7334	100
10	Sensor anomaly detection in smart farm based in Raspberry Pi	MITA 2023	박홍진	1(1)	대한민국	한국멀티미디어학회	비SCI	2023.07.12	1975-4736	100
11	가축분뇨 퇴액비가 적용된 비닐하우스의 내외부 CO2 농도와 온도 변화 실태 조사 연구	축산시설 환경학회 지	변지은	25(2)	대한민국	축산시설환경학회	비SCI	2023.08.31	1226-0274	100
12	Optimization of the Uniformity Index Performance in the Selective Catalytic Reduction System Using a Metamodel	MDPI	김성훈	15,13803	스위스	MDPI	SCI	2023.09.15	2078-2489	50
13	MQTT와 Node-RED를 기반한 MongoDB로 저장 하는 스마트 팜 시스템 구현	한국정보통신학회 논문지	박홍진	16(5)	대한민국	한국정보통신학회	비SCI	2023.10.17	2005-081X	100
14	Analysis of microbial communities in solid and liquid pig manure during the fertilization process	Springer Nature	soo-ryang kim	4(05)	독일	Springer Nature	SCI	2023.12.22	0967-0912	34
15	수소 생산을 위한 Cu/ZnO/Al2O3 촉매상에서 DME의 수증기 개질반응 연구	KHNES	변현승	34(6)	대한민국	한국수소및신에너지학회	비SCI	2023.12.30	1738-7264	100

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명
1	ICAE 2021	Ardhika Setiawan	2021.12.02	태국 방콕(온라인)	국외
2	ICAE 2021	Cahyani Windarto	2021.12.02	태국 방콕(온라인)	국외
3	ICAE 2021	Bernike Febriana Samosir	2021.12.02	태국 방콕(온라인)	국외
4	ICAE 2021	Nguyen Ho Xuan Duy	2021.12.02	태국 방콕(온라인)	국외
5	ICAE 2021	정재희	2021.12.03	태국 방콕(온라인)	국외
6	(사)한국생물환경조절학회 2022년 춘계학술발표회	변현승	2022.05.13	전북 완주군 국립원에 특작과학원	대한민국
7	(사)한국생물환경조절학회 2022년 춘계학술발표회	조나연, 황선구	2022.05.13	전북 완주군 국립원에 특작과학원	대한민국
8	2022 한국공업화학회 춘계 총회 및 학술대회	김선희	2022.05.13	제주특별자치도 서귀포시 ICC제주국제컨벤션센터	대한민국
9	2022 한국공업화학회 춘계 총회 및 학술대회	김선희	2022.05.13	제주특별자치도 서귀포시 ICC제주국제컨벤션센터	대한민국
10	한국수소및신에너지학회 2022년 춘계 학술대회	주영준	2022.05.19	전북 군산시 새만금 컨벤션센터	대한민국
11	한국수소및신에너지학회 2022년 춘계 학술대회	주영준	2022.05.19	전북 군산시 새만금 컨벤션센터	대한민국
12	한국수소및신에너지학회 2022년 춘계 학술대회	김선희	2022.05.19	전북 군산시 새만금 컨벤션센터	대한민국
13	한국수소및신에너지학회 2022년 춘계 학술대회	김선희	2022.05.19	전북 군산시 새만금 컨벤션센터	대한민국
14	2022년 한국육종학회 공동학술발표회	조나연, 황선구	2022.06.30	제주특별자치도 제주시 라마다프라자 제주 호텔	대한민국
15	AFORE 2022	조원준	2022.09.30	제주특별자치도 제주시 라마다프라자 제주 호텔	대한민국 (국외)
16	2023 한국자동차공학회 부산울산경남 지회 춘계학술대회	Cahyani Windarto	2023.04.06	울산광역시 남구 울산대학교	대한민국
17	2023 한국자동차공학회 부산울산경남 지회 춘계학술대회	Ali	2023.04.06	울산광역시 남구 울산대학교	대한민국
18	2023 한국자동차공학회 부산울산경남 지회 춘계학술대회	Warsita I Wayan	2023.04.06	울산광역시 남구 울산대학교	대한민국
19	2023 한국자동차공학회 부산울산경남 지회 춘계학술대회	Quach Nhu Y	2023.04.06	울산광역시 남구 울산대학교	대한민국
20	2023 한국자동차공학회 부산울산경남 지회 춘계학술대회	Nguyen Ho Xuan Duy	2023.04.06	울산광역시 남구 울산대학교	대한민국
21	한국수소및신에너지학회 2023년 춘계 학술대회	변현승	2023.05.25	전남 여주시 여수 엑스포 컨벤션센터	대한민국
22	한국수소및신에너지학회 2023년 춘계 학술대회	조도행	2023.05.25	전남 여주시 여수 엑스포 컨벤션센터	대한민국
23	한국정보전자통신기술학회 2023년도 춘계종합학술대회	윤정한	2023.05.27	강원도 강릉시 가톨릭관동대학교	대한민국
24	2023년도 한국정보기술학회 하계종합학술대회	윤정한	2023.06.01	제주특별자치도 메종글래드 제주	대한민국
25	MITA 2023	박홍진	2023.07.12	VAB-Technical University of Ostrava, Czech Republic	체코
26	2023년 대한환경공학회 국내학술대회	박경호, 김홍인, 김충기, 송근관	2023.11.01	부산광역시 벡스코 컨벤션홀	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	스마트 농장 및 발전소를 위한 DME 개질 시스템	대한민국	(주)바이오 프랜즈	2022.03.08	10-2022-0029048	-	-	-	-	100	0
2	송풍기능을 갖는 공기청정기 및 이를 이용한 스마트팜 시스템	대한민국	상지대학교 산학협력단	2022.03.28	10-2022-0037727	-	-	-	-	100	-
3	스마트 농장 및 발전소를 위한 DME 개질 시스템_PCT 출원	국외	(주)바이오 프랜즈	2022.06.27	PCT/KR 2022/009135	-	-	-	-	100	-
4	연료전지 폐열 및 태양열 집열을 이용한 하이브리드 축열 시스템	대한민국	(재)전라남도환경산업진흥원	2022.10.26	10-2022-0138840	-	-	-	-	100	-
5	태양열 복합 집열을 이용한 축열 및 방열 시스템	대한민국	(재)전라남도환경산업진흥원	2022.10.26	10-2022-0138842	-	-	-	-	100	-
6	태양광 패널을 활용한 히트펌프 시스템	대한민국	스마트그린에너지주식회사	2022.11.11	10-2022-0150635	-	-	-	-	100	0
7	태양광의 집열 효율을 증대시킨 접시형 태양열 집열기	대한민국	(재)전라남도환경산업진흥원	2023.11.22.	10-2023-0163388	-	-	-	-	100	0

○ 지식재산권 활용 유형

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

□ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증 기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증 번호		
1	기타	한국산업기술시험원	탄화수소 개질기의 수소 생산량 및 순도	22-068492-01-1	2022.11.14	대한민국

[경제적 성과]

□ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작 업체명	설치 장소	이용 분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)
1	DME 삼중열병합 시스템	2023.11.30	(주)바이오프랜즈	충북 보은군	발전, CO2 포집, CO2 시비	2년 8개월	-	-

□ 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, 직접실시	CO2 등 온실가스 포집 관련 개선 공정 적용 DME 생산	(주)바이오프랜즈	2022.09.16.	-	-
2	특허출원-통상실시권	기술 라이선스 계약	(주)바이오프랜즈	2022.10.13	350,000	350,000
3	특허출원-통상실시권	기술 라이선스 계약	(주)바이오프랜즈	2023.08.14	-	-
4	특허출원-직접실시	DME 삼중열병합 시스템 상품화	(주)바이오프랜즈	2023.11.30	-	-

□ 사업화 투자실적

번호	추가 연구개발 투자	설비 투자	기타 투자	합계(천원)	투자 자금 성격
1	-	CO2 기반 탄소중립 연료 DME 공장 건설 투자 유치	-	8,000,000	투자 유치

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (천원)		
1	자기실시	기존공정 개선	국내	DME 생산	DME 판매	(주)바이오프랜즈	110,294		2022	-
2	자기실시	기존공정 개선	국외	DME 생산	DME 수출	(주)바이오프랜즈		109,393	2023	-
3	자기실시	신제품 개발	국내	DME 삼중열병합 시스템 출시	DME 삼중열병합 시스템 판매	(주)바이오프랜즈	200,000		2023	-

□ 매출 실적(누적)

사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
		국내(천원)	국외(천원)		
DME 생산	2022	110,294		110,294	-
DME 생산	2023		109,393	109,393	-
DME 삼중열병합 시스템 출시	2023	200,000		200,000	-
합계		310,294	109,393	419,687	-

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과		“미해당” - 삼중열병합 시스템에 한함			
사업화 계획	사업화 소요기간(년)	5			
	소요예산(천원)	10,000,000			
	예상 매출규모(천원)	현재까지	3년 후	5년 후	
		469,687	1,500,000	6,000,000	
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
			국내	0.01	5
국외			-	0.2	3
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획		DME 삼중열병합시스템 발전용량 증설 및 대규모 MW급 농가 분산발전단지 구축 목표			
무역 수지 개선 효과(%)	수입대체(내수)	현재	3년 후	5년 후	
		-	15	50	
	수출	-	3	10	

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)			합계
			2021년	2022년	2023년	
1	고용 창출	(주)바이오프랜즈	5	19	8	32
2	고용 창출	스마트그린에너지 주식회사		2		2
합계			5	21	8	34

□ 고용 효과

구분		고용 효과(명)	
고용 효과	개발 전	연구인력	12
		생산인력	8
	개발 후	연구인력	26
		생산인력	24

[사회적 성과]

□ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용
1	제안	포집된 CO2로부터 제조되는 DME 청정연료를 농업용 대체 연료로 보급	충청북도청 에너지과	2023	CCU 기술을 농업 부분에 적용하는 긍정적 결과를 기대할 수 있는 새로운 시도로 볼 수 있기에, 향후 다양한 농업 현장에서 다각적인 실증결과를 바탕으로 정부지원과 정책 반영에 대해 장기적인 검토가 필요함

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일
1	중앙전문지	한국가스신문	바이오프랜즈, 농림부 주관 '스마트팜 다부처패키지 혁신기술개발사업' 선정	2021.05.21
2	전시회 참가	경북 상주 스마트팜 혁신밸리 준공식 및 입주기업 제품 전시회	DME 가스연소식 온풍 및 CO2 발생기, 수소 제조설비 Hygen-D100	2021.12.15
3	전시회 참가	서울국제가스 & 수소산업전	독립부스 참가 과제 및 기업 홍보, 수소개질기, 연료전지 전시	2022.07.08
4	월간잡지	월간수소경제	스마트팜으로 들어온 DME 개질형 수소연료전지	2022.07.29
5	전시회 참가	2022 국제환경에너지산업전	독립부스 참가 과제 및 기업 홍보, 수소개질기, 연료전지 전시	2022.08.31
6	전시회 참가	Green & Agritech Asia 2023	과제 및 기업 홍보부스 운영, 수소개질기 전시	2023.09.01

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관
제 141967호	표창장	수소경제 활성화 유공자 포상	탄소중립 사회를 위해 다양한 원료로부터 수소생산 기술개발 및 e-Fuel 제조, 활용법 개발을 통해 수소경제 활성화에 기여함	(주)바이오프랜즈 대표이사	2023.11.02.	산업통상자원부장관

2) 목표 달성 수준

추진 목표	달성 내용	달성도(%)
○ DME 수소연료전지 시스템 구축	○ DME 수소개질기 및 고선택성 CO2 분리정제 시스템(PSA) 구축 및 평가 ○ 연료전지, 인버터 구축	100 %
○ DME 개질가스의 성분 분석	○ DME 개질가스 성분 분석 및 평가	100 %
○ 공기중 불순물들의 영향 분석	○ 공기중 불순물들의 연료전지성능에 대한 영향성 분석	100 %
○ 연료전지 연계 축열시스템 구축	○ 연료전지와 축열시스템 연계 시스템 구축	100 %
○ 삼중열병합시스템 연계 스마트팜 탄산시비 실증	○ 삼중열병합시스템 구축 및 평가 ○ 이산화탄소 포집·정제 시스템 구축 ○ 이산화탄소 농도에 따른 작물재배 실증	100 %
○ 전기식 히트펌프 설비구축	○ 전기식 히트펌프 설비구축(컨테이너형 식물공장별 1대, 총 2대)	100 %
○ 재생열 연계 축열시스템 및 통합제어시스템 개발	○ 1GJ급 대형 축열조 설계 및 제작 ○ PLC/SCADA 기반 통합제어/모니터링 제작 ○ 신재생에너지 배열 축열시스템 공정 완성 ○ 상용급 축열시스템 구축	100 %
○ 스마트팜 센터 모니터링 시스템	○ 스마트팜 빅데이터를 기반으로 실시간 모니터링 시스템 구축 및 적용	100 %
○ 머신러닝 기술 적용	○ 스마트 온실 규모의 스마트팜 분석을 위한 머신러닝 기술 적용 ○ 맞춤형 스마트팜 고도화를 위한 시스템 영향성 실증평가 ○ 선정된 작물의 최적의 생육환경조성 방법 개발	100 %
○ 농가보급 사업화 모델, 경제성 분석	○ 대용량 바이오매스 활용, 대규모 스마트팜 적용 사업성 분석 및 상용화 ○ 실증 온실의 작물 생산성, 경제성 분석 및 스마트팜 농가 보급 모델 설정 ○ 배열 및 CO2의 과채류, 엽채류 재배에 따른 생산성 및 경제성 평가	90 %

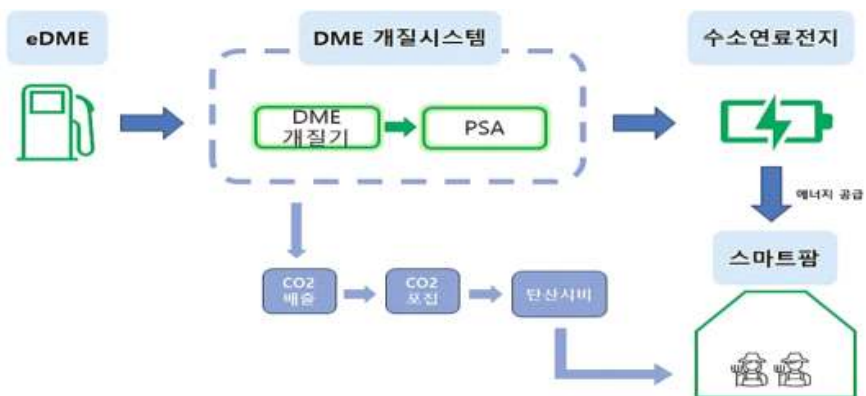
4. 목표 미달 시 원인분석

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- DME 개질기-PSA 연계 수소생산량 및 생산수소 순도
 - 촉매투입 튜브 용량과 반응기 용량이 낮아 생산량이 계획 대비 감소(20 → 15Nm³/hr)하였으며, 고순도 수소 정제를 위한 PSA 운전시간이 짧아 장비 안정화가 미흡하였음
- 축열시스템 용량 부족(2GJ → 1GJ)
 - 예산 부족으로 호라이즌社의 중국산 수소연료전지를 구매하였기에, MFC의 유량 제어가 불안정하였고 개질이 완료된 수소 공급으로 수소연료전지 스택의 발생열이 미미하였음
- 특허등록 및 SCI 논문건수
 - 7개의 특허출원을 했으나, 등록 진행이 미흡함
 - 1단계에서의 시설구축 및 평가가 지연되어 연구기반지표 달성이 미흡함

2) 자체 보완활동

- DME 개질기의 수소생산량 증가를 위한 추가 개발 진행 중(용량 증대 등)이며, PSA 순도 향상을 위해 연관업체와 지속적인 제조공정간 문제점 검토 및 연구 진행 중
- 수소연료전지 배열 활용을 위해 추후 구매 예정인 수소연료전지는 개질반응을 포함한 제품으로 발열량 확인 및 선정·연계 예정
- 사업 종료 후, 출원된 특허의 등록을 위해 지속적으로 노력하겠으며, 구축된 장비들의 이용 및 평가를 통한 사업화를 위해 SCI급 논문을 늘리도록 하겠음
- 3개년 연구 결과의 결과물 공유를 위해 주관기관인 바이오프랜즈에서 주관하여 공동연구개발기관 별 S/W 및 개발자료(회의록 등) 취합을 진행하고 Test-Bed의 H/W 연구장비 존치를 위한 현장 인수인계 협업 진행과 주기적인 가나안복민회 실증지 관리로 시설 장비 점검을 진행할 계획임
- DME 삼중열병합시스템 실용화를 위한 단계적 전략 방안 모색
 - 본 사업에서 진행하였던 DME 개질기-수소연료전지 연계 시스템을 통한 DME 삼중열병합 시스템은 경제성의 문제로 2030년 수소경제 활성화 이후 연료전지 단가가 낮아져야 실용화가 가능할 것으로 판단됨

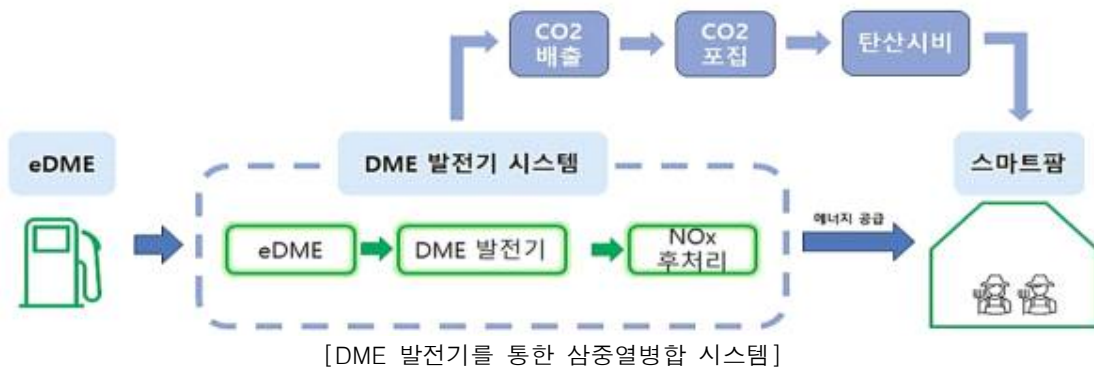


[DME 연료전지를 통한 삼중열병합 시스템]

- 따라서, 농업용 친환경 연료 보급화 및 에너지 자립을 위해 DME 연료전지 시스템 보급 보다 DME 발전기 시스템의 실용화가 시급하며, 실농가에서 요구되는 소비전력에 적합하게 최대 500kW급 DME 발전기의 기술 개발이 필요함. 본 사업에서 개발한 40kW급 발전기를 통해 100kW급, 200kW급의 발전기를 개발 중에 있으며 실제 농가에서 적용 가능하도록 연료 소모량 측정과 제조 단가 절감 방안, 발전효율 개선을 위한 연구를 진행 중에 있음
- 발전과 효율에 대한 실용성의 실증 완료 시, 농가에 활용성을 높이고 제품의 경제성을 향상시키기 위해, DME 발전기에서 삼중열병합 시스템으로 확장 가능하도록 배열에너지의 Heat Pump 활용 기술을 개발할 계획임. 고용량의 발전기에서 발전 시 발생하는 배열을

측정하고 이를 효과적으로 회수하여 확보할 수 있는 열량과 발전기 규격별 용량에 맞는 축조 설비의 플랫폼화로 재배실 내 난방열 공급 열량을 수치적으로 판단할 연구를 진행할 계획이며 이를 통해 경제성 평가에 적용하여 소비자에게 옵션 선택이 가능하도록 배열회수 시스템 및 축조설비를 적용할 계획임

- 또한, 본 과제에서 적용하였던 다공성 분리막 모듈을 DME 발전기를 통한 삼중열병합 시스템에도 적용하여 kW 별 발전기의 정량적인 배기 CO2량(kg/h) 측정으로 시간당 공급량을 실측하고 직접 재배실 공급 조건 시 CO2의 배기 온도도 측정하여 추가적인 난방 활용 가능성도 측정 할 계획임. CO2를 회수하는 시간대만 공급하는 경우 1,500평 규모의 탄산시비 소모량을 분석하여 CO2 생성량 및 해당 용량에 적합한 버퍼탱크의 설비로 저장 및 공급을 할 수 있는 탄산시비 시스템을 고도화 개발하여 농가의 현장에 적합하게 실용화 개발을 진행해 나갈 계획임

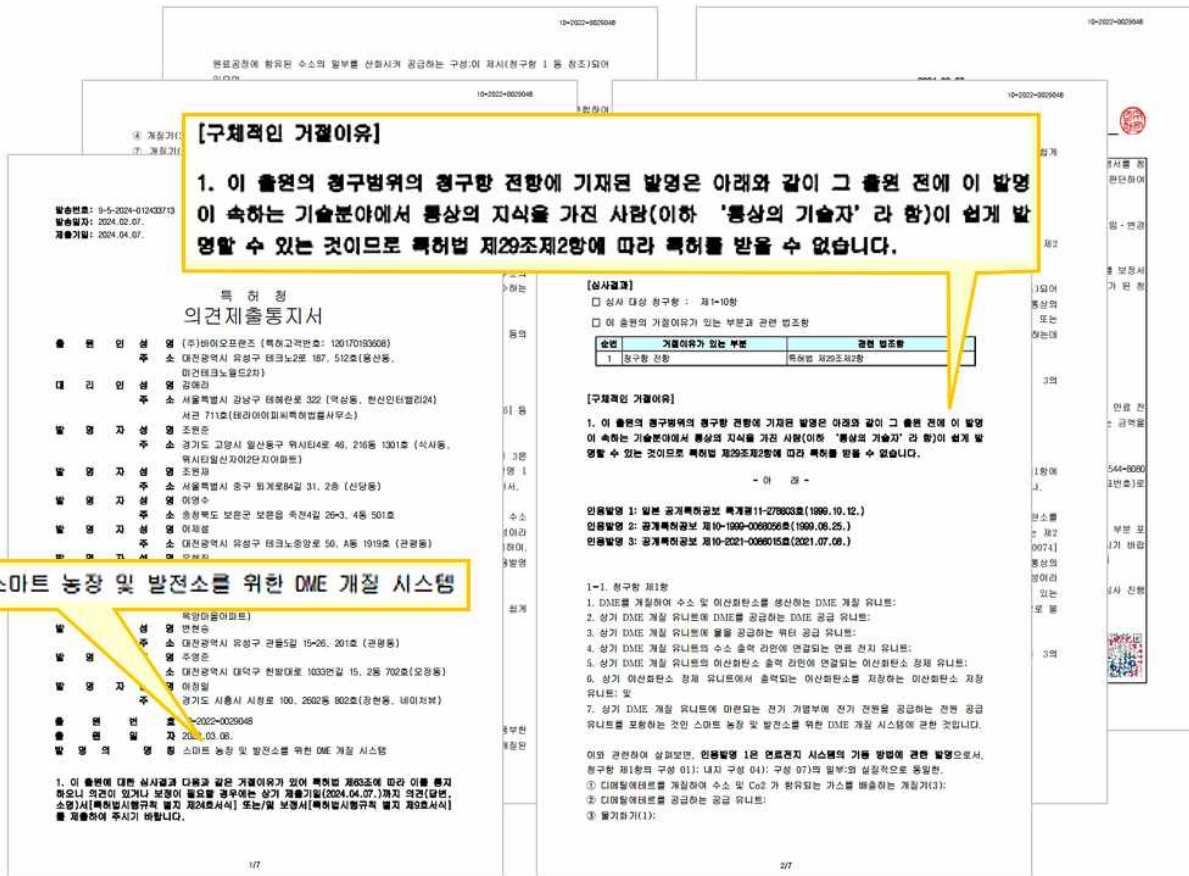


3) 연구개발 과정의 성실성

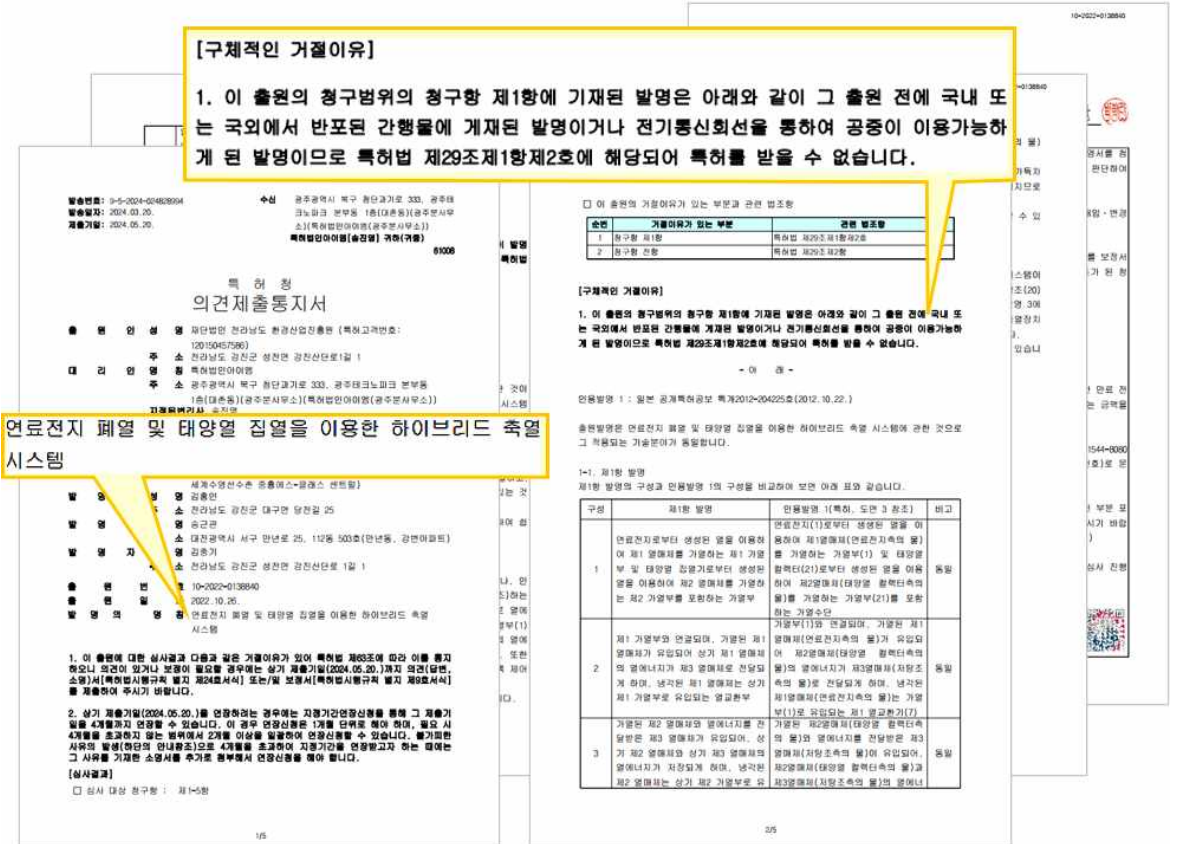
- DME 개질을 통한 수소연료전지 활용 및 배열회수 시스템 구축을 위해, 세계 최초 DME 개질기 개발로 고순도 수소를 생산 및 이와 연계한 수소연료전지 시스템을 구축·실증하였으며, EHP 시스템과 연계한 실증온실 냉난방 시스템 구축을 완료하였음.
- 또한, 수소연료전지의 PEMFC에서 발생하는 낮은 배열량과 높은 전기전도도로 인한 축열량 문제가 있었으나, 태양열 집열·축열 설비와 태양광 트래킹을 통한 지열·축열 설비를 혼합한 축열 활용시스템을 구축하였음.
- 추가로 CO2 자원화를 위해, DME 개질 시 발생한 배가스 중 수소와 CO2를 다공성 모듈로 분리하여(수소는 연료전지에 활용) 고순도 CO2를 실증 온실에 탄산시비로 활용하고 모니터링 시스템과 빅데이터를 통한 작물 생육에 끼치는 영향 분석과 탄산시비의 생산성 향상 평가를 진행하였음. 이와같이 DME 수소연료전지 발전·축열과 배출 CO2 자원화 기술개발 및 작물 생육 연계 실증 등 본사업에 성실히 임하였음.
- 다만, 정량적 성과 미달성 중 지식재산권에 대한 미달성 부분은 사업 종료 후에도 지속적으로 확보를 위한 노력 중에 있음. 지식재산권 출원 목표 수량의 1건 미달에 대해서는 사업 종료 후 2024년 3월 15일 본 사업을 통해 개발 된 DME 트라이젠 시스템과 관련한 ‘농가 시설물에 이산화탄소를 공급하기 위한 DME 트라이젠 시스템 및 방법’의 출원이 완료 되었으며(출원번호: 10-2024-0036503), 특허 8건 등록을 최종 목표로 하였기에 목표달성을 위한 노력을 하였으나 심사결과 ‘거절결정’으로 인한 의견제출통지서 수령으로, 재심사를 위해 거절 청구항에 대한 내용을 보완 중에 있음. 이에 미진행 건과 기진행 중인 지식재산권 재심사를 통한 특허 등록을 완료 할 계획임

출원번호통지서	
출원일자	2024.03.15
특기사항	심사청구(유) 공개신청(무)
출원번호	10-2024-0036503 (접수번호 1-1-2024-0294136-94) (DAS접근코드3C4A)
출원인명칭	(주)바이오프랜즈(1-2017-019360-8)
대리인성명	특허법인 이노(9-2009-100081-8)
발명자성명	조원준 이명수 이재철 유혜진 조도행 표순신 변현승 반재성 오주희 구윤지
발명의명칭	농가 시설물에 이산화탄소를 공급하기 위한 DME 트라이젠 시스템 및 방법

[사업 종료 이후 신규 특허출원 건]



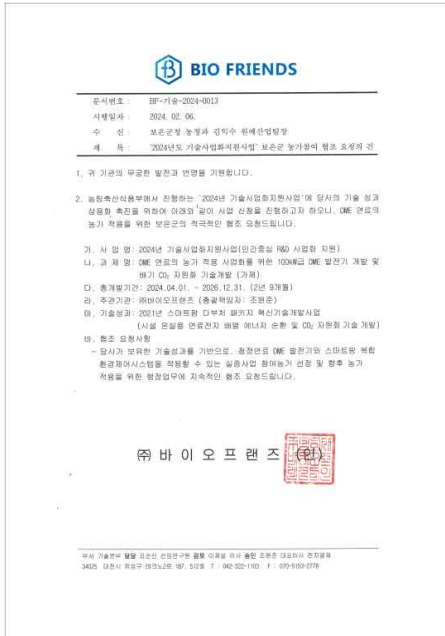
[특허 등록 거절 건_스마트 농장 및 발전소를 위한 DME 개질 시스템]



[특허 등록 거절 건_연료전지 폐열 및 태양열 집열을 이용한 하이브리드 축열 시스템]

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

- 세계 최초로 개발된 DME-H2 개질기의 특허출원, 등록 및 지속적인 평가를 통해 신뢰성을 높이고, 당사의 매출에 기여할 수 있는 사업화 제품으로 발전시킬 계획이며, 현재도 DME-H2 개질기의 양산이 가능한 업체와 Contact 중에 있음
- DME 연료보급설비, 탄산시비 시스템, 축열시스템 등의 보완 및 지속적인 활용을 위해, 주관기관과 협조를 완료한 충북도청, 보은군청과 연계하여 충북지역 농가의 실증을 시작으로 지역별 확대 및 보급으로 사업화를 진행할 계획
- 저렴한 DME 연료를 생산하기 위하여 충북 보은 산업단지 내 1, 2공장을 기반으로 생산된 DME를 농업용 대체 연료로 보급 예정임
- 도서·산간 지역과 같은 에너지 낙후 지역에 DME 삼중열병합시스템 증설로 MW급 발전단지를 구축하여 에너지 자립화 집적단지의 구축에 사업주도 계획
- 국책사업 및 지자체 실농가 실증사업을 통한 추가적인 연구 진행과 보급화 진행



[보은군청 실증 참여농가 협조 요청 및 회신 공문]

- 지자체(보은군청)의 실증농가 협조 및 지원사업 추진 계획에 따라 1,500평 이상 규모의 실제 농가에 DME 발전기를 적용하기 위한 추가적인 연구개발 진행 계획 중
- 본 사업을 통한 40kW급 DME 발전기와 20kW급 DME 연료전지 시스템의 농가 적용은 재생에너지 기술 활용에 있어서 이점이 있으나, 실제 스마트팜 및 식물공장의 전력소모량과 수소연료전지의 경제성을 고려하여 본 연구를 기반으로 대형 농가에 적용할 수 있도록 상용화를 위한 200kW~500kW급 DME 발전기로 Scale up 개발이 요구됨
- 또한, DME 발전기의 미활용 에너지인 배열과 배기 CO2를 적극 활용하여 발전 능력 외 제품의 경제성에 부가적 이점을 확보할 수 있는 미활용 에너지 활용기술 개발을 진행 할 계획임. 이는 본 연구에서는 낮은 용량으로 미비하였던 배열회수 능력을 200~500kW급 DME 발전기 개발 시 발생이 예상되는 배열을 회수하여 축조 설비와 연계 및 이를 농가 난방열로 공급하고, 발전 전력은 상시 발전이 아닌 전력을 저장할 수 있도록 에너지저장시스템(ESS: Energy Storage System)과 연계하여 에너지 자립화를 구현하며, 배기 CO2는 다공성 모듈 정제로 저장 및 정량적으로 작물의 탄산시비에 활용 할 수 있도록 하는 기술을 고도화 개발하여, 경제성 분석에 적용하고 실제 농업 현장에서 필요한 자원을 공급 할 계획임
- 농림축산식품부와 농림식품기술기획평가원, 한국에너지기술평가원 등 기술개발, 사업화 과제 및 투자유치 사업에 지속적으로 지원하여, 제품별 발열량, 연료소모량, 제품단가, CO2 발생량, 발전량, 발생소음, 난방비 절감가능성 측정 및 인증획득 등 연구과제만이 아닌 현실적 문제점 해결로 실제 사업화를 위한 제품화 개발을 진행할 계획임

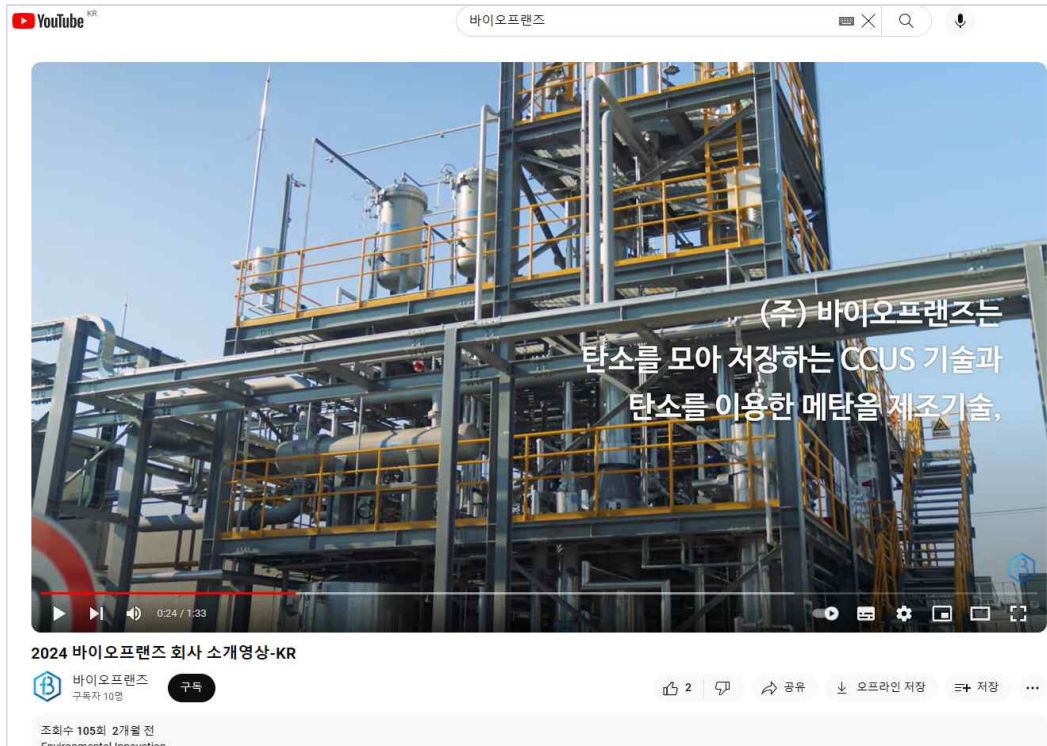
○ 홍보 활용 계획

- 스마트 농업 기술 홍보와 네트워크 구축 및 비즈니스 확보를 위한 2023 Green & Agritech Asia 전시회에 참여를 하였으며, 이후에도 추가적인 농업 전시회에 참여하여 농업용 DME 발전기 관련 제품 홍보를 진행할 계획임



[2023 Green & Agritech Asia 전시회 참가]

- 또한, 세미나와 포럼 개최(참석) 및 업체 홍보 시 활용 할 수 있도록 국문, 영문 홍보물(카달로그) 디자인 제작과 회사 홍보영상 제작 및 유튜브 업로드로 성과홍보를 계획 중



[유튜브 회사 홍보영상]

< 연구개발성과 활용계획표 >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내 (연간)
국외 논문	SCIE	0.2
	비SCIE	0.4
	계	0.6
국내 논문	SCIE	0.6
	비SCIE	1
	계	1.6
특허출원	국내	0.4
	국외	0.2
	계	0.6
특허등록	국내	0.2
	국외	-
	계	0.2
인력양성	학사	15
	석사	4
	박사	2
	계	21
사업화	상품출시	2
	기술이전	1
	공정개발	1
제품개발	시제품개발	3
성과홍보		5
포상 및 수상실적		1
정성적 성과 주요 내용		고용량 DME 개질기 개발 및 수소연료전지 연계 단독 배열회수·공급 시스템 개발로 농가 실증 및 사업화 진행

자체평가의견서

1. 과제현황

		과제번호		421038-03	
사업구분	스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발사업				
연구분야	Plant			과제구분	단위
사업명	차세대 융합·원천기술 연구사업				주관
총괄과제	기재하지 않음			총괄책임자	기재하지 않음
과제명	시설 온실용 연료전지 배열 에너지 순환 및 CO2 자원화 기술개발			과제유형	지정공모 (연구 단계)
연구개발기관	(주)바이오프랜즈			연구책임자	조원준
연구기간 연구개발비 (천원)	연차	기간	정부	민간	계
	1-1차년도	2021.04.01. - 2021.12.31(9개월)	800,000	149,420	949,420
	1-2차년도	2022.01.01. - 2022.12.31(1년)	1,150,000	203,240	1,353,240
	2-1차년도	2023.01.01. - 2023.12.31(1년)	1,150,000	194,170	1,344,170
	계	2021.04.01. - 2023.12.31(2년 9개월)	3,100,000	546,830	3,646,830
참여기업	스마트그린에너지(주)				
	(재)전라남도환경산업진흥원				
	(재)가나안복민회				
	상지대학교 산학협력단				
	울산대학교 산학협력단				
상대국	상대국연구개발기관				

2. 평가일 : 2024. 02. 29

3. 평가자(연구책임자) :

소속	직위	성명
(주)바이오프랜즈	대표이사	조원준

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

1. 연구개발결과의 우수성/창의성

■ 등급 : (우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

포집 CO2로부터 제조된 DME를 활용한 수소연료전지 및 삼중열병합 시스템을 개발하여, 온실에 냉·난방, CO2를 공급하고, 온실환경의 온도/습도/CO2를 제어, 운영함으로써 최적의 농작물 생육 분석과 생산성 향상을 높이는 결과를 얻었으며, 탄소중립 연료인 DME를 향후 대형 농가에 보급하는 데 있어서 상용 사업화를 앞당김

2. 연구개발결과의 파급효과

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

포집 CO2로부터 제조된 DME를 활용한 수소연료전지 및 삼중열병합 시스템의 실제 스마트팜에 CO2 탄산시비를 한 결과, 가나안농군학교, 스마트팜 혁신밸리, 당사 구축 스마트팜 실증센터에 적용하여 업체류, 과채류 등의 우수한 발육 상태와 생산성 향상을 가져옴에 따라서, 기술을 통한 제품 양산화로 CO2 자원화에 따른 탄소중립 달성 및 대규모 스마트팜의 분산발전단지 구축 기술의 기반을 마련함

3. 연구개발결과에 대한 활용가능성

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

CCU 기술을 통해 제조된 eDME를 개질하여 생산된 청정수소를 연료전지의 원료로 사용하여 MW급 연료발전단지를 구성할 것이며, 전력의 사용자가 생산도 겸하는 것뿐 아니라 사용 후 남은 전력을 다른 곳에도 사용할 수 있도록 특정 소규모 전력 공동체를 결성하여 전력의 자급자족을 실현하고자 함. 또한, 탄소중립 연료인 DME를 보급하여 수소 연료단지 또는 DME 분산 발전 사업으로 확대하여 농업 분야에 새로운 청정 탄소중립 연료를 보급하여 기후 위기에 따른 에너지 문제와 식량문제를 동시에 해결하는 농가 중심의 연료로 사업 확장하고자 함

4. 연구개발 수행노력의 성실도

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

본 연구를 수행하는 데 있어서 에너지기업으로서 실제 농장에 적용하기 위한 시설 설치 등 많은 어려움에서도 성공적으로 과제수행을 추진하고 본 과제의 연구 목표를 달성하고자 밤낮으로 연구 수행하여 코로나19, 러-우 전쟁 등으로 인한 경기침체와 같은 여러 어려움에서도 과제를 성실히 완료할 수 있게 되었음

5. 공개발표된 연구개발성과(논문, 지적소유권, 발표회 개최 등)

■ 등급 : 우수, 보통, 미흡, 극히 불량)

본 연구 결과의 성과물에 대한 기술 특허와 전시회, 발표회에서는 매우 우수한 성과로 특허출원 7건, 논문투고 15건 (SCI 논문 5건, 비SCI 논문 10건), 학술발표 26건의 결과를 도출하였으며, 홍보 및 전시회에서도 국내는 물론 국외에서도 높은 관심으로 상용 제품의 판매를 끌어냄

II. 연구목표 달성도

세부연구목표 (연구계획서상의 목표)	비중 (%)	달성도 (%)	자체평가
○ DME 수소연료전지 시스템 구축	30	30	DME 개질기 및 수소연료전지 연계시스템 구축 완료
○ DME 개질가스의 성분 분석	5	5	온도별 개질가스 성분 분석 완료
○ 공기중 불순물들의 영향 분석	5	5	연료전지 스택에의 불순물 영향분석 완료
○ 연료전지 연계 축열시스템 구축	10	10	연료전지 배열 라인(60℃) 연계 및 태양열 축열시스템 추가 구축 완료
○ 삼중열병합시스템 연계 스마트팜 탄산시비 실증	15	15	삼중열병합시스템 배기 CO2 포집 및 정제 모듈 개발과 탄산시비 실증적용 및 작물 생육관찰 완료
○ 전기식 히트펌프 설비구축	5	5	컨테이너형 식물공장 내부 EHP 시스템 구축 완료
○ 재생열 연계 축열시스템 및 통합제어시스템 개발	10	10	SCADA 기반 축방열 공정 제어 및 데이터 통합제어시스템 개발 완료
○ 스마트팜 센터 모니터링 시스템	10	10	이산화탄소 센서 시스템 제어, 온습도 측정 등 모니터링 시스템 개발 완료
○ 머신러닝 기술 적용	5	5	Ubuntu 20.04 LTS로 센싱데이터 저장 및 머신러닝 분석 진행
○ 농가보급 사업화 모델, 경제성 분석	5	3	①수소연료전지 보급(배열회수), ②전력공급(친환경 농법 제공), ③CO2 탄산재배하는 사업화 모델 구축 및 탄산시비 생산성 분석 완료, 탄소중립 시스템 구축 비용상 경제성 비교분석의 어려움
합계	100점	98점	

III. 종합의견

1. 연구개발결과에 대한 종합의견

<ul style="list-style-type: none"> - 국제사회의 저탄소사회 전환 및 온실가스 저감에 대응하여, '탄소중립' 달성을 위해 농업 부분에서도 친환경적인 대체 연료를 농촌에 적용하는 사업으로, 저탄소 청정연료인 DME를 농업용 연료로 전기생산, 냉난방 제어, 배출 CO2 활용으로 탄산시비가 가능한 DME 삼중열병합 시스템을 성공적으로 구현하고 수출시장까지 확대할 것으로 기대됨 - 향후 후속 연구사업으로 DME 삼중열병합 시스템을 대형 농가에 분산 발전 시스템을 적용하여 복합환경제어시스템을 구축하는 에너지 자립형 스마트팜을 구현하고 탄소중립 시대에 걸맞은 선진 농업기술로 발돋움할 것으로 기대됨

2. 평가시 고려할 사항 또는 요구사항

<ul style="list-style-type: none"> - 본 사업을 수행하면서 농촌에 저렴하고 청정연료를 보급하는 계획으로 연구과제를 제안하고 스마트팜에 적용한 설비를 기술개발 하는 데 최선의 노력을 쏟았음 - 다만, 과제 진행 과정에서 코로나19, 러-우 전쟁으로 인해 자재 수급 문제 등 어려움이 있었으나, 청정연료인 DME라는 연료를 직접 생산하는 회사로 성장하여, 본 과제를 통해서 얻은 성과물을 국내 농가는 물론 해외 시장까지 확대하는 교두보를 마련하게 되었음 - 본 사업의 후속으로 DME 삼중열병합 시스템을 대형 농가에 분산 발전으로 적용하여 완전 자립형 스마트 농업단지 구현을 추진하고자 함

3. 연구결과의 활용방안 및 향후조치에 대한 의견

- 본 연구과제를 통하여 얻은 성과물에 대하여 사업화를 위한 스마트팜 기술 실시권을 소유한 당사의 DME 제조공장이 위치한 충남 보은군을 중심으로 중부권 농촌지역에 스마트팜(500 ~ 1,000평)을 구축 및 운영할 계획임. 이로써 CCU 기술을 통해 제조된 eDME를 개질하여 생산된 청정수소를 연료전지의 연료로 사용하여 MW급 연료발전단지를 구성할 것이며 전력의 사용자가 생산도 겸하는 것뿐 아니라 사용 후 남은 전력을 다른 곳에도 사용할 수 있도록 특정 소규모 전력 공동체를 결성하여 전력의 자급자족을 실현하고자 하며, 탄소중립 연료인 DME를 보급하여 수소 연료단지 또는 DME 분산 발전 사업으로 확대하여 농업 분야에 새로운 청정 탄소중립 연료를 보급하고 기후 위기에 따른 에너지 문제와 식량문제를 동시에 해결하는 농가 중심의 연료로 사업 확장하고자 함

IV. 보안성 검토

○ 해당 사항 없음

1. 연구책임자의 의견

○ 해당 사항 없음

2. 연구개발기관 자체의 검토결과

○ 해당 사항 없음

연구성과 활용계획서

1. 연구과제 개요

사업추진형태	<input type="checkbox"/> 자유응모과제 <input checked="" type="checkbox"/> 지정공모과제	분 야	Plant
연구과제명	시설 온실용 연료전지 배열 에너지 순환 및 CO2 자원화 기술 개발		
주관연구개발기관	(주)바이오프랜즈	주관연구책임자	조원준
연구개발비	정부지원연구개발비	기관부담연구개발비	총연구개발비
	3,100,000,000	546,830,000	3,646,830,000
연구개발기간	2021. 04. 01 ~ 2023. 12. 31 (2년 9개월)		
주요활용유형	<input type="checkbox"/> 산업체이전 <input type="checkbox"/> 교육 및 지도 <input type="checkbox"/> 정책자료 <input checked="" type="checkbox"/> 기타(후속사업 추진) <input type="checkbox"/> 미활용 (사유:)		

2. 연구목표 대비 결과

당초목표	당초연구목표 대비 연구결과
① 20kW급 수소연료전지와 배열회수 순환설비 시스템 개발과 배기 CO2 고순도 포집 및 스마트팜(식물공장 포함) 실증 적용	계획대비 30kW급 수소연료전지 구축과 배열 회수 순환설비 적용 및 CO2 포집·정제를 위한 다공성 모듈 적용으로 스마트팜 탄산시비 실증
② 재생열 연계 축열시스템 개발	재생열(연료전지 스택배열, 태양열·태양광 축열) 연계 축열시스템 개발 완료
③ 연료전지 배기 폐열 및 CO2의 과채류 및 엽채류 스마트팜 적용 성능 시험	축열시스템 연계 온실 공급시스템 및 CO2 정제를 통한 스마트팜 적용, 작물 생육 모니터링/평가 완료

3. 연구목표 대비 성과

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과목표	사업화지표													연구기반지표								
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				표준화			학술성과				교육지도	인력양성	정책 활용·홍보		기타 (타연구활용예외)
	특허출원	특허등록	SW 저작권	S M A R T	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출	투자유치	국내	국제	논문		학술발표	정책 활용			홍보 전시		
														SCI	비SCI			논문평균IF	건		건	
단위	건	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건	건	건	명	건	건	건	
가중치	2	5			2	5	10	20	15	10	5	5			5	2			2	2		
최종 목표	8	8			3	150	2	300	100	13	8000	1	1	10	11	40	11			1	2	
1단계 실적	6				1	50	1	111		16	8000	0	0	2	2	3.88	15			0	5	
2단계 실적	1				2	25	1	200	109	8		0	0	2	7	4.25	11			1	1	
달성률 (%)	87.5	0			100	50	100	100	100	100	100	0	0			20.3	100			100	100	

4. 핵심기술

구분	핵심기술명
①	DME 수소연료전지 시스템
②	배열회수 시스템
③	DME 개질 및 CO2 정제를 통한 탄산시비 시스템

5. 연구결과별 기술적 수준

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

6. 각 연구결과별 구체적 활용계획

핵심기술명	핵심기술별 연구결과활용계획 및 기대효과
①의 기술	○ 농업 분야에 새로운 청정 탄소중립 연료를 보급하여 기후 위기에 따른 에너지 문제와 식량문제를 동시에 해결하고 농가중심의 탄소중립 사회 실현이 가능함
②의 기술	○ DME 수소연료전지 시스템에서 발생하는 폐열 및 태양광 시스템으로 농가에서 전력사용의 비중이 가장 높은 난방비용의 해결이 가능함
③의 기술	○ 배기 CO2를 스마트 온실에 재활용함으로써 CO2를 토양으로 되돌리기에 대기 중 CO2 농도 저감으로 환경문제를 최소화해주며 농업생태계 물질의 선순환을 통한 생산활동을 가능하게 함

7. 연구종료 후 성과창출 계획

(단위 : 건수, 백만원, 명)

성과 목표	사업화지표											연구기반지표									
	지식 재산권				기술 실시 (이전)		사업화				표준화		학술성과				교육지도	인력양성	정책 활용 홍보		기타 (타연구활용등)
	특허출원	특허등록	SW저작권	SMART	건수	기술료	제품화	매출액	수출액	고용창출	투자유치	국내	국제	논문 SCI	논문 비SCI	논문 평균IF			학술발표	정책 활용	
단위	건	건	건	건	건	백만원	건	백만원	백만원	명	백만원	건	건	건	건		건	명	건	건	건
가중치	2	5			2	5	10	20	15	10	5	5			5	2			2	2	
최종목표	8	8			3	150	2	300	100	13	8,000	1	1	10	11	40	11		1	2	
연구기간내 달성실적	7	0			3	75	2	311	109	24	8,000	0	0	4	9	8.13	26		1	6	
연구종료후 성과창출 계획	1	2			1	50	1	500	150	10	2,000	1	1	5	5	4.10	10		1	3	

사업화 계획서

연구개발과제명	시설 온실용 연료전지 배열 에너지 순환 및 CO2 자원화 기술개발			과제번호	421038-03			
주관연구개발기관	(주)바이오프랜즈			주관연구책임자	조원준			
공동연구개발기관	스마트그린에너지(주)			공동연구책임자	이수행			
	(재)전라남도환경산업진흥원							
	가나안복민회							
	상지대학교 산학협력단							
제품명	200kW급 DME 발전기			제품 형태	H/W	√	S/W	
관련 선행기술	종류 (해당 시)	특허명 (등록번호)	DME 트라이젠 시스템 (10-2085056)					
		기술이전명	DME 삼중열병합 시스템 상품화					
사업화 종류	구분	수입품 대체		신규시장 창출	√	기존 상품 개선		
	내용	DME 수소연료전지 시스템의 용량 증가로 지자체와 연계하여 대규모 농가의 MW급 분산발전단지 구축 및 에너지 자립화 실현						
개발 제품 주요 경쟁력	목표 수요처	시장규모	<ul style="list-style-type: none"> - 연료전지 기술개발을 통한 새로운 에너지원의 개발은 현재 석유 에너지로 집중된 한국의 에너지 공급구조에서 무한한 에너지원인 수소를 활용할 수 있는 전환점이 될 것임 - 현재 수소 시장은 2050년까지 재생에너지에 지출되는 투자액은 2018년 대비 3배 늘어나며, 화석연료의 에너지 믹스 점유율이 현재 약 80%에서 21세기 중반 50%로 감소, 나머지 절반은 재생에너지에서 공급될 것으로 전망됨. 2050년에는 수소 산업이 연간 2조 5,000만 달러의 부가가치를 가질 것으로 전망되며, 발표기관마다 수소에너지의 시장 전망이 상이하나 2022년경에는 최소 1,500억 달러 이상의 시장이 형성될 것으로 전망됨 - 농림축산식품부에 따르면 스마트팜 보급 면적과 축사의 보급이 '17년에 크게 증가하여 '16년 1,912 헥타르에서 '17년 4,010 헥타르로 증가하였으며, '22년 예상치로 7,000 헥타르로 증가할 것으로 보고 있음 					
		기술개발 필요성	<ul style="list-style-type: none"> - 자연친화적인 대체에너지인 연료전지 개발은 향후 세계 경제사회에서 우리나라가 중심적 역할을 수행하는 데 핵심이 되는 열쇠이며, 장차 반드시 다가올 선진국들의 환경장벽을 헤쳐 나가며 탄소중립 사회에서 미래 에너지 시장을 선점하는 기능을 담당하게 될 것임 - 수소연료전지가 산업용, 건물용, 발전용, 수송용으로 국가 로드맵에 의해서 기술개발과 상용화, 일반 국민들의 청정에너지원으로 적극적으로 보급되고 있는 현실에서, 농촌을 중심으로 하는 스마트팜의 보급과 맞물려서 향후 에너지자립과 제로에너지기술이 접목되는 수직농장, 식물공장 사업에 경제성을 확보할 수 있는 신재생에너지원으로써 새로운 에너지원 제공, ICT기반의 첨단 농업기술과 접목이 절대적으로 필요한 시기가 도래하고 있음 - 식물공장은 환경을 인공적으로 관리할 수 있고, 지구온난화와 기후변화로 예측하기 어려운 농작물 재배 환경을 가장 효과적으로 제어하면서 최소의 면적에서 최대의 효과를 거둘 수 있을 것으로 기대되며, 농작물의 					

개발 제품 주요 경쟁력	목표 수요처	기술개발 필요성	33% 이상이 에너지를 통해서 얻어지는 것을 감안하면, 청정에너지원으로 수소연료전지의 기술개발과 경제성을 갖추는 첨단 농업 기술개발이 절대적으로 필요함 - 적절한 신재생에너지원인 태양광과 수소연료전지의 배열회수 시스템의 고효율 시스템화 함으로써 최적의 원예시설과 스마트팜(식물공장 포함) 기술을 개발함으로써 농업인구 감소와 국토의 도시화로 농지 면적이 감소하는 것에 대한 적극적인 대응 방안을 제시함으로써 국내 농업 분야에 활성화를 꾀하고자 함 - 특히 DME를 이용하여 농가에 보급하는 사업을 준비중에 있어서, 수소를 원활히 생산하고 이송하고 공급하는 시스템을 자체 기술로 개발하여 농업용 연료로 보급하는 기술개발 사업을 꾸준히 수행하여 일 150kg, 일 20kg, 일 10kg의 수소를 제조하는 시스템을 개발하여 양산화를 눈앞에 두고 있음			
		목표 시장 예상 점유율	- 화석연료의 시장 규모가 21세기 중반까지 50%로 감축될 것으로 미루어 보아, 재생에너지 시장 중 DME 수소연료전지 시스템은 20% 점유율을 목표로 하고 있음			
	기술 차별성	구분	비용 절감		기술 고도화	
		내용	이익 증대		기타	√
			포집 CO2를 활용한 DME 연료 사용으로 생산수소를 통한 탄소중립사회 구현을 위한 수소연료전지 분산발전기술			
타사 제품 비교	제품명	EMEAN Gen-30kW, 센추리에어컨 EHP, 동진ENG 가스열풍기 등		DME 수소연료전지 트라이젠시스템		
	단가	81,100,000		287,000,000		
예상 매출액 (백만원)	구분	2021	2022	2023	2024	
	연구개발계획서	0	100	200	3,000	
	매출액	0	160	200	400	
	수출액	0	0	109	200	
생산계획	생산능력	- DME 생산능력은 주관기관인 (주)바이오프랜즈가 보유한 제 1, 2플랜트를 기준으로 연간 15,000톤의 생산능력을 보유하고 있음				
	양산 체계 구축 계획	- DME를 이용한 수소연료전지 기술은 (주)바이오프랜즈가 세계 최초로 기술개발한 DME-H2 수소장치(Hygen100)는 구축이 완료된 DME 청정연료 양산 플랜트를 기반으로, 제품제작 외주업체와의 양산 계획 및 단가 산정 등 협의를 통해 시스템 전반의 양산화를 진행할 것이며, 이후 국내 농촌, 지방도시, 주택, 빌딩용으로 보급 예정임				
판매전략	판로확보 방안	- 인도네시아 PT Dredolf사와 공동투자 방식으로 계약을 체결하고 DME를 인도네시아 바탐섬에 연간 5,000톤 규모로 건설하여 DME시장(연료, 에어로졸)에 진출하고, 더불어 인도네시아 수직농장을 발굴하여 DME를 보급하는 것을 협의하였기에, 본 개발과제에서 완성된 시스템을 보급할 예정임 - 또한, 현재 노르웨이에서 수행 중인 CO2 로부터 DME를 직접 생산하는 프로젝트의 Off taking 하는 사업으로 연계하여 유럽에 수직농장에 본 시설을 수출하는 것을 기획하고 있음 - 추가로, 지난 19년까지 중국 철령시 농가 DME 시설을 보급하여 운영한 이력을 바탕으로, COVID19로 잠정 중단되었던 중국 사업인 (주)바이오프랜즈와 가나안복지회의 중국의 동북3성에 DME를 이용하여 수소연료전지시스템을 설치하는 사업을 재개하여 DME 공장과 스마트팜 연관기술 수출사업을 추진하고자 함				

판매전략	마케팅 전략	<ul style="list-style-type: none"> - 본 사업의 과제중 하나인 대용량 바이오매스 활용 대규모 스마트팜 적용 사업성 분석을 통해 도출된 국내외 바이오매스 에너지 사업 관련 정책 동향 분석과 국내외 바이오매스 에너지 사업 활성화 및 저해 요인에 대한 법 규제 현황 조사, 현재 및 차기 국내외 바이오매스 에너지산업 시장 선점을 위한 정책 및 법 규제 대응 전략 제시 및 전략 도출을 바탕으로 국내뿐만 아닌 해외수출까지 고려한 마케팅을 계획하고 있음
------	--------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

기타 부가설명

- (주)바이오프랜즈는 DME를 농업용 연료로 생산하기 위한 지금까지 50억원을 투자하여 제1공장을 건설하여 판매하고 있으며, 본 사업기간 중 신축한 제2공장과 함께 안정적으로 농가에 농업용 연료로 보급하고자 하며, 특히 해외사업을 위한 인도네시아 DME공장을 건설하여 해외수출 시장에도 기여하고자하며, 노르웨이등 탄소중립을 선한 유럽과 미국을 중심으로 본 사업을 추진하고자 함
- 또한, 농업용으로 보급하는 수소연료전지 시스템을 30~200kW급 수준으로 하고, 배열(태양열 포함) 시스템을 갖춘 설비를 '24년부터 연간 10~20개를 발굴하여 안정적인 냉난방과 농업 시설물, 마을회관, 농기계 수소충전소 보급사업을 지속적으로 수행할 예정이며, 시스템 대당 1억원/10kW 발전기준으로 경제성을 확보할 예정

사업화 계획을 위와 같이 제출합니다.

2024년 02월 29일

주관연구개발기관 : (주)바이오프랜즈

주관연구책임자 : 조 원 준



실증 성과보고서

연구개발과제명	시설 온실용 연료전지 배열 에너지 순환 및 CO2 자원화 기술개발			과제번호	421038-03		
주관연구개발기관	(주)바이오프랜즈			주관연구책임자	조원준		
공동연구개발기관	스마트그린에너지(주)			공동연구책임자	이수행		
	(재)전라남도환경산업진흥원				김홍인		
	가나안복민회				김태은		
	상지대학교 산학협력단				황선구		
실증개요	실증성과명	DME 수소연료전지, 트라이젠 시스템		구분	H/W	○	S/W
	실증장소	제3자농장	해당	미해당	실증장소유형	스마트팜혁신밸리	
		장소명	가나안농군학교			일반(법인)농가	
		실증면적(㎡)	330			정부출연·지자체	
		주소	강원도 원주시 신림면 연봉정길 5			기타	○
실증조건	실증품목(종)	엽채류(상추), 과채류(토마토)					
	필수기자재	DME 수소연료전지, 트라이젠 시스템, Heat pump, Membrane, 축열조설비					
	기타필수조건	환경제어 설비, CO2 Sensor					
실증목적	구분	성과물 성능에 대한 검·인증	○	트랙레코드·실증데이터 확보			
	내용	목표 환경 신뢰성·재현성 검증		제품서비스 시연(시범농가)			
실증현황	활용기술	인공지능		빅데이터		사물인터넷	
		지능형로봇		신재생에너지		기타	○
	수집데이터	환경데이터	○	생육데이터	○	제어데이터	○
		경영데이터		기타			
	내용	<ul style="list-style-type: none"> - 온실가스 감축을 실현할 수 있는 탄소중립 연료인 DME를 농업용 연료로 하여 농업인의 소득보전을 위해 석유(화석연료) 난방을 대체하고, 전기생산, 냉·난방 제어, 포집 CO2를 활용한 탄산시비가 가능한 DME 삼중열병합 시스템을 실증 현장에 설치하여 온실의 환경, 생육데이터, 제어데이터 및 시스템 구축에 대한 실증데이터를 확보함 					
내용	<ul style="list-style-type: none"> - DME 수소연료전지, 삼중열병합 시스템 이용 스마트팜 실증 결과, 당사가 세계최초로 개발한 탄소중립 연료 DME를 활용한 수소연료전지 시스템을 스마트팜에 구축 및 실증하여 수소생산 순도 99.94%, 수소생산량 15Nm³/hr를 공인시험기관의 인증을 받음 - DME 삼중열병합 시스템 적용으로, 발전 전력을 통한 EHP 시스템 연계 실증과 배열 및 재생에너지 활용의 효과성을 실증하였음 - 또한, 실증온실 및 당사의 스마트팜 실증센터를 통해 획득한 엽채류, 과채류 생육 데이터를 토대로 CO2 탄산재배에 따른 작물 생산성 및 경제성 평가 결과 이로온 효과가 있는 것으로 확인하였음 						

결과를 위와 같이 제출합니다.

2024년 02월 29일

주관연구개발기관 :
주관연구책임자 :

(주)바이오프랜즈
조원준



스마트팜 R&D 빅데이터 플랫폼 연계/활용 계획서

연구개발 과제명	시설 온실용 연료전지 배열 에너지 순환 및 CO2 자원화 기술 개발			과제번호	421038-03		
주관연구 개발기관	(주)바이오프랜즈			주관연구 책임자	조원준		
기본 정보							
데이터 용량(MB)	정형	영상	음향	이미지	3D	분광데이터	기타
	10.4			84.38			
수집							
구분	양식명	유형	부류품목	용량	수집 시작일	수집 종료일	등록일시 (예정)
1	유리온실내 환경 및 생육데이터(딸기)	정형	딸기	4.4	22.11.	23.02.	23.06.
2	유리온실내 환경 및 생육데이터 (멜론)	정형	멜론	3.6	23.04	23.07.	23.09.
3	비닐하우스내 환경 및 생육데이터 (방울토마토, 엽채류)	정형	방울토마토	1.5	23.05.	23.09.	23.10.
4	강원도 원주 실외 태양열 데이터 (일사량)	정형	기타	0.85	23.07.	23.11	23.07.
5	열저장 탱크 유입/배출 온도 및 유입압력 데이터 (축열량)	정형	기타	0.016	23.07.	23.11.	23.07.
6	딸기 전 생육기간의 생장 변화 이미지	이미지	딸기	29	22.11.	23.02.	23.06.
7	멜론 전 생육기간의 생장 변화 이미지	이미지	멜론	31.8	23.04.	23.07.	23.09.
8	방울토마토 생육기간의 생장 변화 이미지	이미지	방울토마토	21.38	23.05.	23.09.	23.10.
9	엽채류 생육기간의 생장 변화 이미지	이미지	엽채류	2.2	23.05.	23.09.	23.10.
분석							
정상 파일 수		타입오류			범위오류		
47							
모델							
구분	양식명	유형	운영체제	개발언어	라벨링 도구	성능지표/ 결과	등록일시 (예정)
1	머신러닝모델기반 최적의 작물 생육환경 제공을 위한 환경분석	AI모델 (탐지)	Ubuntu (Linux)	python 3.10.1	-	-	23.12.
활용							
구분	양식명	유형	대분류	사이트 URL	동영상 URL	등록일시 (예정)	
1	바이오프랜즈 개발장비로부터의 CO2 시비에 따른 작물생육평가	기타	생육	-	https://www.youtube.com/embed/Z3QqnBq1fsQ?si=_bQsEmnQWvEmHI1Q	24.01	
2	고효율 축열시스템을 통한 비닐하우스 난방효율증대	기타	생육	-	https://www.youtube.com/embed/jmN9OaNyJgU?si=p5dm9k5x3QsbsfUB	24.01	
기타 부가설명							
<ul style="list-style-type: none"> - 개발한 모델이 아닌 기존에 있던 모델을 이용해서 분석한 것이기 때문에 검증매뉴얼, 모델 성능지표로 분석이 부적절하며, 식물의 이미지를 분석하여 식물 성장량을 측정하는 주요한 요소인 식물 표현형 분석이 이용될 수 있음 - PlentCV를 통해 AI 기반 이미지를 분류하고 지역화(localization) 가능한 자동화된 바인딩 박스 처리 가능 							

결과를 위와 같이 제출합니다.

2024년 02월 29일

주관연구개발기관 :
주관연구책임자 :

(주)바이오프랜즈
조원준



주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부, 과학기술정보통신부, 농촌진흥청에서 시행한 “스마트팜 다부처 패키지 혁신기술개발” 사업의 “시설 온실용 연료전지 배열 에너지 순환 및 CO2 자원화 기술개발” 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부, 과학기술정보통신부, 농촌진흥청((재)스마트팜연구개발사업단)에서 시행한 “시설 온실용 연료전지 배열 에너지 순환 및 CO2 자원화 기술개발” 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.