

RS-2023-
00230130

미활용 바이오가스발전열 이용 농촌복지 및 농가소득 증대 기술 개발

2024

농림축산식품부
농림식품기술기획평가원

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

발간등록번호

11-1543000-004524-01

미활용 바이오가스발전열 이용 농촌복지 및 농가소득 증대 기술 개발

2024.02.08.

주관연구기관 / 고등기술연구원
공동연구기관 / 한국화학연구원
포항산업과학연구원

농림축산식품부
(전문기관)농림식품기술기획평가원

제 출 문

농림축산식품부 장관 귀하

본 보고서를 “미활용 바이오가스발전열 이용 농촌복지 및 농가소득 증대 기술 개발”
(개발기간 : 2023.04.01. ~ 2023.09.30.)과제의 최종보고서로 제출합니다.

2024.02.08.

주관연구기관명 : 고등기술연구원 (대표자) 김 선 용

공동연구기관명 : 한국화학연구원 (대표자) 이 영 국

공동연구기관명 : 포항산업과학연구원 (대표자) 주 세 돈

주관연구책임자 : 김 호

공동연구책임자 : 조 경 호

공동연구책임자 : 이 종 규



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

최종보고서										보안등급 일반[√], 보안[]	
중앙행정기관명		농림축산식품부			사업명		사업명			농업분야창의도전형 융복합모델개발사업	
전문기관명 (해당 시 작성)		농림식품기술기획평가원			내역사업명 (해당 시 작성)		현장문제해결형				
공고번호		농축 2023-22호			총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)						
					연구개발과제번호			RS-2023-00230130			
기술분류	국가과학기술 표준분류	1순위 EA0701	50%	2순위 EF0603	30%	3순위 EF0102	20%				
	농림식품과학기술분류	1순위 CA22	60%	2순위 CA21	40%	3순위 0%					
총괄연구개발명 (해당 시 작성)		국문									
		영문									
연구개발과제명		국문	미활용 바이오가스발전열 이용 농촌복지 및 농가소득 증대 기술 개발								
		영문	Development of technology using waste heat derived from biogas power generation for rural welfare and increase in farming household income								
주관연구개발기관		기관명	고등기술연구원			사업자등록번호		104-82-04565			
		주소	(17180) 경기도 용인시 처인구 고안로 51번길 175-28			법인등록번호		110171-0008240			
연구책임자		성명		김 호		직위		연구위원			
		연락처	직장전화	031-330-7346			휴대전화		010-6397-9774		
			전자우편	hokim@gmail.com			국가연구자번호		10936843		
연구개발기간		전체		2023. 04. 01 - 2023. 09. 30 (6개월)							
		단계 (해당 시 작성)	1단계	2023. 04. 01 - 2023. 09. 30 (6개월)							
연구개발비 (단위: 천원)		정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비	그 외 기관 등의 지원금 지방자치단체 기타()				합계			연구개발비 외 지원금
		현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물	합계
총계		50,000						50,000		50,000	
1단계	1년차	50,000						50,000		50,000	
공동연구개발기관 등 (해당 시 작성)		기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고		
		역할	기관 유형								
공동연구개발기관		한국화학연구원	조경호	선임연구원	010-4754-7684		khcho@kriect.re.kr		공동 책임자	비영리	
		포항산업과학연구원	이종규	수석연구원	010-2814-6614		jglee0032@rist.re.kr		공동 책임자	비영리	
연구개발담당자 실무담당자		성명		최오경		직위		선임연구원			
		연락처	직장전화	031-330-7433			휴대전화		010-8551-7587		
			전자우편	okchoi@iae.re.kr			국가연구자번호		11085576		

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

2023 년 09 월 30 일

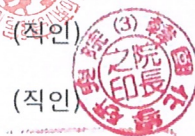
연구책임자: 김 호



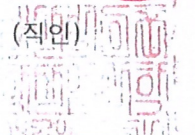
주관연구개발기관의 장: 김 선 용



공동연구개발기관의 장: 이 영 국



공동연구개발기관의 장: 주 세 돈



농림축산식품부장관·농림식품기술기획평가원장 귀하

< 요약 문 >

※ 요약문은 5쪽 이내로 작성합니다.

사업명		농업분야창의도전형융복합모델개발				총괄연구개발 식별번호 (해당 시 작성)	
내역사업명 (해당 시 작성)		현장문제해결형				연구개발과제번호 RS-2023-00230130	
기술 분류	국가과학기술 표준분류	1순위 EA0701	50%	2순위 EF0603	30%	3순위 EF0102	20%
	농림식품 과학기술분류	1순위 CA22	60%	2순위 CA21	40%	3순위	%
총괄연구개발명 (해당 시 작성)							
연구개발과제명		미활용 바이오가스 발전 열 이용 농촌복지 및 농가소득 증대 기술 개발					
전체 연구개발기간		2023.04.01. - 2023.09.30.					
총 연구개발비		총 50,000 천원 (정부지원연구개발비: 50,000 천원, 기관부담연구개발비 : 천원, 지방자치단체: 천원, 그 외 지원금: 천원)					
연구개발단계		기초[] 응용[] 개발[<input checked="" type="checkbox"/>] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도 (해당 시 기재)		착수시점 기준(TRL2) 종료시점 목표(TRL6)	
연구개발과제 유형 (해당 시 작성)							
연구개발과제 특성 (해당 시 작성)							
연구개발 목표 및 내용	최종 목표		미활용 바이오가스 및 수열 융복합 에너지를 이용한 1,000 Gcal/년 0.5 ha 시설온실 실증				
	전체 내용		<ul style="list-style-type: none"> ○ 미활용 바이오가스 엔진 발전열 회수-저장-활용을 통한 에너지 자립형 시설온실 플랜트 구축 ① 바이오가스 엔진 배가스 전열 회수 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 전열(현열 650 Gcal + 잠열 350 Gcal) 회수 - 바이오가스 발전폐열 1.1 (MW_e/MW_{th}) 이상 회수 목표 ② 능동형 에너지 수요 관리 기술 <ul style="list-style-type: none"> - 연간 1,000 Gcal 에너지로 0.5 ha 스마트팜 에너지자립화 - 2,700 m³급 액비저장조 활용 계간축열 기술 - 시간별 열 수요패턴 정밀대응 - 열 수요관리형 이중 작물 재배 - 전기에너지 저소비형 냉방시스템 ③ 융합열 활용 적정 작물 생장 온도 유지에 의한 작물 증산 <ul style="list-style-type: none"> - 파프리카 1.8배 증산 + 구아바 2배 증산 ④ 패시브형 스마트팜 시간별 에너지 수요변화 대응형 제어 ⑤ 2050 농식품부 온실가스 감축 목표의 5% 이상 확보 				
	1단계 (2023)		목표	○ 과제 상세 기획 및 기술로드맵 구축			
		내용	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수/저장 기술 조사 ○ 시간별 열수요 패턴 관리를 이용한 주요 열 수요처의 열 공급 특성 조사/분석/평가 ○ 바이오가스 발전폐열을 활용한 수분 흡착식 냉방 시스템 활용을 통한 냉난방 에너지 절감 가능성 타당성 검토 및 핵심 소재 적용을 위한 수분 흡착제의 요구 성능 검토 ○ 액비저장조 축열 시스템 활용을 위한 계간 축열조 기술 조사 및 활용방안 도출 				

	2단계 (2024)	목표	○ 연구개발 기술 타당성 검증
		내용	○ 미활용 바이오가스 발전 폐열 최대 회수 기술 선정 및 타당성 검토 ○ 열 수요처 특성에 따른 능동형 열 공급방안 도출 ○ 수분 흡착식 냉방 시스템 적용을 위한 핵심 소재 발굴 및 Lab-scale 규모 수분 흡착제 합성 기술개발 ○ 액비저장조 축열 시스템 활용을 위한 축열모델 개발 및 성능 검토
	3-1단계 (2025~2026)	목표	○ 현장적용을 위한 실증 플랜트 설계 및 사업화 검증
		내용	○ 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수 및 활용 기술 현장 실증플랜트 설계인자 확보 ○ 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수 및 활용 기술 현장 실증플랜트 설계/구축 ○ 수분 흡착제의 대량생산을 위한 수열 기반 합성법 개발 및 흡착제 시제품 대량생산 (20 kg 이상) ○ 복합 코팅 기술개발 및 코팅형 열교환기 모듈 제조 기술개발 ○ 액비저장조 축열 시스템 현장 실증 플랜트 설계/구축/시운전
	3-2단계 (2027)	목표	○ 현장 실증플랜트 장기운전 및 사업화 전략 도출
		내용	○ 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수 및 활용 기술 현장 실증플랜트 장기운전에 의한 평가 및 보급 확산 모델 도출 ○ 코팅형 열교환기 적용을 통한 prototype 수분 흡착식 냉방 시스템의 성능 평가 및 효율 향상을 위한 운전조건 최적화 ○ 액비저장조 축열 시스템 장기운전 평가 및 보급 확산 모델 도출

연구개발성과	○ 미활용 바이오가스 발전 폐열 및 수열 융복합에너지 활용 에너지자립형 시설온실 및 농촌 복지시설 활용 기술개발 연구기획 보고서
--------	---

연구개발성과 활용계획 및 기대 효과	<p>1. 활용계획</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ 본 기술개발을 통해 “미활용 바이오가스발전 폐열 활용 에너지자립형 시설온실” 구현 가능 ① 핵심시장 (가축분뇨 바이오가스화시설) <ul style="list-style-type: none"> ○ 시장규모 <ul style="list-style-type: none"> - 가축분뇨/가축분뇨 병합처리 34개소, 처리용량: 9,464 톤/일, - 시설온실 전용면적: 120.8 ha ○ 기대수익 : 257.3억원 (2.13억원/ha·년) ② 확장시장 (일반 바이오가스화시설) <ul style="list-style-type: none"> ○ 시장규모 <ul style="list-style-type: none"> - 가축분뇨/가축분뇨 병합처리 55개소, 처리용량: 30,681 톤/일, - 시설온실 전용면적: 349.8 ha ○ 기대수익 : 745.1억원 (2.13억원/ha·년) <p>2. 정량효과 (바이오가스엔진 발전 0.1 MWe 규모 기준)</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 폐열에너지 회수량: 1,749.6 Gcal/년 ② 냉/난방비 절감액(등유 대체 기준): 31백만원/년 ③ 시설온실 적용가능 규모: 0.5 ha-온실면적 ④ 온실가스 저감량: 426 톤-CO₂/년 ⑤ 작물 증산에 의한 매출 증가액 (파프리카+구아바 기준): 37.5백만원/년 <p>3. 농촌 복지 증대 효과 (바이오가스엔진 발전 0.1 MWe 규모 기준)</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 마을복지 활용 시 에너지 절감액: 75백만원/년 (목욕탕 50인 수용기준)
---------------------------	---

연구개발성과의 비공개여부 및 사유	공개
-----------------------	----

연구개발성과의 등록·기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설 ·장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입 기관	연구시설 ·장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	ZEUS 등록번호			
국문핵심어 (5개 이내)	바이오가스 발전		폐열 회수		전열교환기		축열		흡착식 냉방기			
영문핵심어 (5개 이내)	biogas power generation		waste heat recovery		energy recovery ventilator		thermal energy storage		adsorption cooling system			

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	1
1) 연구개발과제의 최종 목표	1
2) 연구개발과제의 단계별 목표	3
3) 연구개발과제의 해당 연도 목표	4
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용	8
1) 시간별 열수요 패턴 관리를 이용한 주요 열 수요처의 열 공급 특성 조사/분석/평가	8
2) 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수/저장 기술 조사	24
3) 바이오가스 발전 폐열 활용 수분 흡착식 냉방 시스템 적용 타당성 검토	45
4) 흡착식 냉방 시스템 핵심 소재 요구 성능 검토 및 수분 흡착제 후보군 도출	51
5) 액비저장조 현황 파악 및 축열조 활용방안 도출	65
6) 미활용 바이오가스 발전 폐열 활용 사업 타당성 조사	77
7) 농촌·농업 재생에너지 솔루션 개발 전문가 자문	110
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	125
1) 연구수행 결과	125
2) 목표 달성 수준	129
4. 목표 미달 시 원인분석	130
1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용	130
2) 자체 보완활동	130
3) 연구개발 과정의 성실성	130
5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도	131
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	137
7. 참고문헌	143

< 표 차례 >

표 1. 시설원에 경영비 중 난방비 비율	8
표 2. 난방방식에 따른 난방 특성	9
표 3. 보온피복에 의한 열에너지 절감률	10
표 4. 전라북도 정읍시 월평균 온도변화 (2020년~2022년)	10
표 5. 파프리카와 구아바 시설 온실의 월별 냉·난방에너지 요구량	12
표 6. 난방 연료별 국내 시설 온실 가온재배 면적	19
표 7. 국내 농가 적용 중인 열효율 개선 기술 현황	20
표 8. Plate Type 열교환기 비교	27
표 9. 바이오가스 열병합 발전 배가스 조성, 유량 및 전열량	28
표 10. 유체 상별 열교환 형식에 따른 총괄 열전달계수	32
표 11. 전열교환기 접촉 형식에 따른 장·단점	32
표 12. 열원 종류별 성상 및 mol 질량	34
표 13. Lab-scale 세정 흡수탑형 전열교환기 자체 열 손실을	34
표 14. Lab-scale 세정 흡수탑형 전열교환기 실험 결과	37
표 15. 디스크 회전형 전열교환기의 전열교환 효율	40
표 16. 전산 해석을 위한 경계 조건	43
표 17. 전산 해석을 위한 배가스 물성	43
표 18. 바이오가스 발전 공정 후처리 공정 조건별 에너지 회수 용량	45
표 19. 시설하우스 (0.5 ha) 적용을 위한 흡착식 냉방 출력 요구량	47
표 20. 흡착제 성능별 동적 수분 흡착 곡선 기반 SCP 값 도출 결과	48
표 21. 흡착식 냉방시스템의 증발기/흡착/응축기/탈착 온도조건에 따른 흡착제 평형 흡착 특성	51
표 22. 국제 제올라이트 협회에 보고된 AIPO 구조 데이터베이스	55
표 23. BC 구조를 갖는 AIPO 흡착제 후보군에 대한 구조적 특성	57
표 24. 저온 재생형 수분 흡착제 후보군 39종 물성 및 수분 흡착 특성	59
표 25. 대량생산이 가능한 MOF 수분 흡착제 후보 물질의 선행 연구 결과	61
표 26. 3차원 구조를 갖는 48종의 AI-MOF 구조	62
표 27. 원심분리-응집-암모니아 스트리핑 결합공정에 따른 소화액 및 액비 성분 결과	68
표 28. 바이오가스 발전폐열의 열전달매체 가능 후보 물질 특성	68
표 29. 축열 형태에 따른 축열조 건설 비용	75
표 30. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 1)에 따른 월별 축열조 요구 용량	84
표 31. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 2)에 따른 월별 축열조 요구 용량	85

표 32. 시설온실 냉방 에너지 공급 후 잔여 축열 용량 (Case 1)	87
표 33. 시설온실 냉방 에너지 공급 후 잔여 축열 용량 (Case 2)	88
표 34. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 1)별 주민시설 온수 공급량	89
표 35. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 1)에 따른 월별 축열조 가동 개수	90
표 36. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 2)별 주민시설 온수 공급량	90
표 37. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 2)에 따른 월별 축열조 가동 개수	91
표 38. 화석연료 및 바이오가스 발전에 따른 온실가스 배출량 비교	97
표 39. 중탄산암모늄 전환에 의한 온실가스 저감효과 및 경제성 비교 산출 근거	100
표 40. 중탄산암모늄 전환에 의한 온실가스 저감효과 및 경제성 비교 산출 결과	101
표 41. 미활용 열 회수 공급을 통한 시설온실 냉난방 대체에 따른 온실가스 감축효과	102
표 42. 미활용 열 회수 공급을 통한 주민시설(목욕탕) 온수 공급에 따른 온실가스 감축효과	102
표 43. 전과정 평가에 따른 온실가스 감축효과 (108.1 kWe 발전 기준)	103
표 44. 바이오가스 발전폐열 연계 에너지자립형 시설 온실 건설비 산출	105
표 45. 바이오가스 발전폐열 연계 에너지자립형 시설 온실 운영비 산출	107
표 46. 대중목욕탕 규모별 평균 물 사용량	108
표 47. 바이오가스 발전폐열 연계 주민복지시설(목욕탕) 급탕비 절감액	109
표 48. 바이오가스 발전폐열 연계형 시설온실 경제성 평가	109

< 그림 차례 >

그림 1. 구아바 시설 온실 시간별 난방에너지 요구량 (정읍시 2020~2022년 기준)	13
그림 2. 구아바 시설 온실 시간별 난방에너지 요구량 (정읍시 2020~2022년 기준) (계속)	14
그림 3. 파프리카 시설 온실 시간별 난방에너지 요구량 (정읍시 2020~2022년 기준)	15
그림 4. 파프리카 시설 온실 시간별 난방에너지 요구량 (정읍시 2020~2022년 기준) (계속)	16
그림 5. 파프리카 시설 온실 시간별 냉방 에너지 요구량 (정읍시 2020~2022년 5월~10월)	17
그림 6. 시설 온실 면적/가온 면적 변화(a) 및 가온 에너지원 변화(b)	18
그림 7. 난방 유형별 시설 온실 설치 현황. 지상부 난방(a), 지하부 난방(b)	19
그림 8. 지열 및 태양열 축열식 히트펌프	21
그림 9. 순환식 수막시설	21
그림 10. 목재펠릿 난방기	22
그림 11. 열 회수형 환기장치	22
그림 12. 배기열 회수 장치	23
그림 13. 바이오가스 열병합 발전기 시스템 구성도	24
그림 14. Shell & Tube Type 열교환기 구성도	25
그림 15. Plate Type 열교환기 사진	26
그림 16. 바이오가스 열병합 발전기 시스템의 물질·에너지 수지	28
그림 17. 물의 상변화에 따른 현열 및 잠열 구간	29
그림 18. 전열교환기의 순환수 온도에 따른 열 회수 효율 변화	30
그림 19. 간접 접촉식 열교환기	31
그림 20. Lab-scale 세정 흡수탑형 전열교환기	33
그림 21. 잠열 적용을 위한 증기 발생기 및 증기 주입량 산출 근거	34
그림 22. 세정 흡수탑형 전열교환 실험 결과	35
그림 23. 습식 세정탑형 전열교환기 저류조 냉각 및 연속운전을 위한 시스템 구성	36
그림 24. 세정 흡수탑형 전열교환기 연속운전 실험 결과	38
그림 25. 디스크 회전형 전열교환기 (Pilot-scale)	39
그림 26. 디스크 회전형 전열교환기의 열교환 결과 및 효율	40
그림 27. 열교환수 분사 직경과 전열면적의 상관관계	41
그림 28. 전산 해석을 위한 Lab-scale 세정 흡수탑형 전열교환기 구성	42
그림 29. 세정 흡수탑형 전열교환기 충전층의 경계 조건	43
그림 30. 세정 흡수탑형 전열교환기 전산 해석 결과	44
그림 31. 흡착식 냉방 시스템의 장치 구성도 및 흡착-탈착 사이클에 의한 열역학 사이클	46

그림 32. 수분 흡착제의 흡착 용량 및 흡착 속도에 따른 SCP값의 상관관계	48
그림 33. 흡착 속도에 차이를 갖는 모델 흡착제의 동적 수분 흡착 곡선	49
그림 34. 흡착 속도 차이를 갖는 모델 흡착제의 흡착률 및 흡착 시간에 따른 SCP 값의 변화	49
그림 35. 수분 흡착제의 응용 별 이상적인 수분 흡착 등온선의 범위	52
그림 36. AIPO 및 SAPO 계열 흡착제의 구조별 수분 흡착 등온선 패턴	53
그림 37. AIPO-42 (AIPO-LTA) 흡착제의 흡착식 냉방 성능 결과	53
그림 38. SAPO 계열 EMM-8 구조 수분 흡착제의 흡착식 냉방 성능 평가	54
그림 39. 기공 크기에 따른 수분 흡착영역 (P/P0) 및 기공률에 따른 흡착 용량 상관관계	56
그림 40. SFO 구조를 갖는 EMM-8 구조와 AFR 구조를 갖는 SAPO-40의 구조 비교 및 SAPO-40 합성에 활용 가능한 구조 유도체 종류	56
그림 41. ABC 구조를 갖는 AIPO-35 (LEV)의 구조	57
그림 42. 수분 흡착제로 평가된 MOF 흡착제의 주요 흡착영역(α value) 및 최대 수분흡착용량;	58
그림 43. 수분 흡착제 후보 MOF 흡착제의 1kg 생산에 필요한 전구체 비용	60
그림 44. Zn, Co, Ni, Cu 계열의 MOF 흡착제 및 \$100/kg 미만 가격 구조 개수	64
그림 45. 액비의 생산/처리 과정과 토양에서의 물질순환	65
그림 46. 실증사이트(친환경대현그린(주))의 액비화 시설 공정도 및 액비 사진	67
그림 47. 실증사이트의 액비 저장조 사진	70
그림 48. 실증 사이트의 액비저장조 평면도	71
그림 49. 실증 사이트 바이오가스 발전 시설 배치도	72
그림 50. 계간 축열 방식에 따른 축열조 구성	74
그림 51. 정읍시의 1년간 대기 온도 변화	76
그림 52. 액비 저장조의 축열조 구성 방안	76
그림 53. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오별 공정 구성도	77
그림 54. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 1)에 따른 상세 물질·에너지 수지	78
그림 55. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 2)에 따른 상세 물질·에너지 수지	79
그림 56. 폐열 회수에너지의 공급/저장 시스템 구성도	80
그림 57. 구아바 시설온실(0.1 ha)의 월별 냉·난방 에너지 요구량	80
그림 58. 파프리카 시설온실(0.1 ha)의 월별 냉·난방 에너지 요구량	81
그림 59. 배관재질(a) 및 보온재의 보온효율(b)에 따른 열 손실을 변화	82
그림 60. 폐열 회수에너지의 시설온실 및 주민복지시설 공급 시스템 구성도	89
그림 61. 바이오가스 발전 폐열 회수(Case 1)에 따른 월별 에너지 공급 시나리오	92
그림 62. 바이오가스 발전 폐열 회수(Case 2)에 따른 월별 에너지 공급 시나리오	93
그림 63. 발전폐열(배가스) 회수효율에 따른 발전폐열 회수열량 및 시설온실 공급 가능 면적	94
그림 64. 바이오가스 발전폐열 배가스 활용 농가소득 및 농촌복지 향상 기술 연구 목표	95

그림 65. 배가스 내 이산화탄소 발생량 산출결과	98
그림 66. 중탄산암모늄 생성조건 비교 - 암모니아수 농도 및 온도	99
그림 67. 암모니아 농도에 따른 이산화탄소 흡수효율	99
그림 68. 암모니아수 - 배가스 흡수 실험을 통한 중탄산암모늄 생성결과	99
그림 69. 온도 및 pH에 따른 이온 분율 산출결과	101
그림 70. 바이오가스 플랜트 인근 시설온실 및 주민복지시설 예상 후보지	104
그림 71. 바이오가스 플랜트 인근 시설온실 예상 후보지 현장 사진	105

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

(1) 연구개발 목표 내용

○ 최종목표

구분	내용
최종 목표	미활용 바이오가스 및 수열 융복합 에너지를 이용한 1,000 Gcal/년 0.5 ha 시설온실 실증

○ 세부목표

구분	기관	내용
총괄 주관	고등기술 연구원	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미활용 바이오가스와 수열 융복합에너지 활용 에너지자립형 시설온실 플랜트 구축 ○ 전열교환 시스템을 통한 바이오가스 발전폐열 1.1(MW-열회수/MW-발전) 이상 회수 기술개발 ○ 축열 용량 2,700 m³급 액비저장조 활용 계간축열 실증 ○ 바이오수열 이용 저온구동 흡착식 냉방시스템 개발
공동 연구 1	한국화학 연구원	<ul style="list-style-type: none"> ○ 저에너지 구동형 금속유기골격체(Metal organic Framework, MOF) 수분 흡착제 발굴 및 대량 합성 기술 개발 ○ MOF 수분 흡착제를 활용한 흡착식 냉방 시스템 적용 열교환기 모듈 제조 기술 개발 ○ MOF 흡착제 적용 저온 구동형 흡착식 냉방 시스템 성능 확보 및 실증
공동 연구 2	포항산업 과학연구원	<ul style="list-style-type: none"> ○ 액비저장조의 계간 축열조 현황 파악 및 활용방안 도출 ○ 액비저장조 활용 분할 축열조(DTES) 모델 개발 ○ 액비저장조 활용 계간 축열조의 축열 성능 향상 방안 도출 ○ 액비저장조 활용 분할 축열플랜트 구축 및 시운전 ○ 액비저장조 활용 분할 축열조 열관리 시스템 개발 ○ 액비저장조의 분할 축열 플랜트 장기운전 평가 및 시방서 작성

(2) 연구개발 최종 목표 성능

평가항목 (주요 성능 Spec)	단위	전체 항목 중 비중 (%)	세계최고 수준 보유국/보유기업	개발목표치		평가 방법	
				연구개발 전 국내수준	최종 목표 수준		
전열교환 성능	열회수율	MW-열회수/ MW-발전	15	0.75 (USA/Bry-Air)	0.76	1.10	공인시험성적서
흡착식 냉방기 성능	효율(COP)	W/W	15	0.6 (USA/CHX)	0.46	0.60	공인시험성적서
	출력(SCP)	kW/kg	15	0.6 (독일/Invensor)	0.30	1.00	공인시험성적서
축열조 성능	축열성능	kW/m ³	15	60 (독일/Solites)	40	60	공인시험성적서
시설온실 실증 규모	에너지 자립율 (토마토 온실)	ha/MW-발전	15	-	0.9	4.2	실증시설 현장공인시험평가
	적용면적	ha	10	-	1.2	0.5	실증시설 현장공인시험평가
	열공급량	Gcal/년·ha	15	-	7,800	1,000	실증시설 현장공인시험평가

2) 연구개발과제의 단계별 목표

구분	단계	연구개발목표	주요연구내용
개념 연구	1단계 (2023)	- 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수/저장 기술 조사 - 시간별 열수요 패턴 관리를 이용한 주요 열 수요처의 열 공급 특성 조사/분석/평가	- 에너지 다소비형 시설온실 에너지 공급/수요 특성 조사 - 미활용 바이오가스 발전 폐열 발생 현황 조사 - 미활용 바이오가스 발전 폐열 활용 사업 타당성 평가
		- 바이오가스 발전 폐열을 활용한 수분 흡착식 냉방 시스템 활용을 통한 냉난방 에너지 절감 가능성 타당성 검토 및 핵심소재 적용을 위한 수분 흡착제의 요구 성능 검토	- 바이오가스 발전 폐열 활용 수분 흡착식 냉방 시스템 적용 타당성 검토 - 흡착식 냉방 시스템 핵심 소재 요구 성능 검토 및 수분 흡착제 후보군 도출
		- 액비저장조 축열 시스템 활용을 위한 계간 축열조 기술 조사 및 활용방안 도출	- 계간 축열조로의 활용을 위한 액비저장조 현황 파악 - 액비 저장조를 계간 축열조로의 활용방안 도출
선행 연구	2단계 (2024)	- 미활용 바이오가스 발전 폐열 최대 회수 기술 선정 및 타당성 검토 - 열수요처 특성에 따른 능동형 열 공급 방안 도출	- 미활용 바이오가스 발전 열 최대 회수 기술 선정 및 적용성 검토 - 시설온실 에너지 공급/소비 특성 시뮬레이션 및 능동형 공급 방법 연구
		- 수분 흡착식 냉방 시스템 적용을 위한 핵심 소재 발굴 및 Lab-scale 규모 수분 흡착제 합성 기술개발	- 80℃ 바이오가스 발전 폐열을 활용한 저온 재생 특성 및 수분 흡착 용량이 확보된 수분 흡착제 발굴 - 적용 대상 수분 흡착 소재의 특성분석 - 수분 흡착 특성 평가를 통한 흡착식 냉방의 이론적 열역학 계산을 통한 성능 도출
		- 액비저장조 축열 시스템 활용을 위한 축열모델 개발 및 성능 검토	- 액비저장조의 계간 축열조로의 활용을 위한 축열 모델 개발 - 액비저장조 활용 계간 축열조의 축열 성능 향상 방안 도출
심화 연구	3-1 단계 (2025 ~ 2026)	- 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수 및 활용 기술 현장 실증플랜트 설계인자 확보 - 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수 및 활용 기술 현장 실증플랜트 설계/구축	- 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수 및 활용 기술 현장 실증플랜트 설계인자 확보 - 현장 실증플랜트 설계/구축/시운전
		- 수분 흡착제의 대량생산을 위한 수열 기반 합성법 개발 및 흡착제 시제품 대량생산 (20 kg 이상) - 복합체 제조 기술개발을 통한 수분흡착제 적용 열교환기 모듈 제조 기술개발	- 수분 흡착제 대량생산 기술개발 및 열교환기 모듈 제조기술 개발 - 수분 흡착제 적용 열교환기 모듈 제조기술 개발 최적화 및 수분 흡착제 적용 열교환기 시스템 적용성 평가 - MOF 흡착제 적용 열교환기 모듈의 에너지 효율 및 냉방 출력 스크리닝
		- 액비저장조 축열 시스템 현장 실증 플랜트 설계/구축/시운전	- 액비저장조를 계간 축열조로의 활용을 위한 현장 실증 플랜트 설계 - 계간 축열 실증 플랜트 구축 및 시운전
	3-2 단계 (2027)	- 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수 및 활용 기술 현장 실증플랜트 장기운전에 의한 평가 및 보급 확산 모델 도출	- 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수 및 활용 기술의 현장 실증플랜트 장기운전 평가 및 보급 확산 모델 도출
		- 수분흡착제 적용 열교환기 활용 prototype 수분 흡착식 냉방 시스템의 성능 평가 및 효율 향상을 위한 운전조건 최적화	- 수분 흡착제 적용 열교환기 모듈의 흡착식 냉방 시스템 적용 및 냉방 성능평가
		- 액비저장조 축열 시스템 장기운전 평가 및 보급 확산 모델 도출	- 액비저장조의 분할 축열 플랜트 장기운전 평가 및 보급 확산 모델 도출

3) 연구개발과제의 해당 연도 목표

(1) 연구 개발 목표

구분	기관	연구목표	연구내용
총괄 주관	고등기술 연구원	<ul style="list-style-type: none"> - 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수/저장 기술 조사 - 시간별 열수요 패턴 관리를 이용한 주요 열 수요처의 열 공급 특성 조사/분석/평가 	<ul style="list-style-type: none"> - 에너지 다소비형 시설온실 에너지 공급/수요 특성 조사 - 미활용 바이오가스 발전 폐열 발생 현황 조사 - 미활용 바이오가스 발전 폐열 활용 사업 타당성 평가
공동 연구 1	한국화학 연구원	<ul style="list-style-type: none"> - 바이오가스 발전 폐열을 활용한 수분 흡착식 냉방 시스템 활용을 통한 냉난방 에너지 절감 가능성 타당성 검토 - 핵심소재 적용을 위한 수분 흡착제의 요구 성능 검토 	<ul style="list-style-type: none"> - 바이오가스 발전 폐열 활용 수분 흡착식 냉방 시스템 적용 타당성 검토 - 흡착식 냉방 시스템 핵심 소재 요구 성능 검토 및 수분 흡착제 후보군 도출
공동 연구 2	포항산업 과학연구원	<ul style="list-style-type: none"> - 액비저장조 축열 시스템 활용을 위한 계간 축열조 기술 조사 및 활용방안 도출 	<ul style="list-style-type: none"> - 계간 축열조로의 활용을 위한 액비저장조 현황 파악 - 액비 저장조를 계간 축열조로의 활용방안 도출

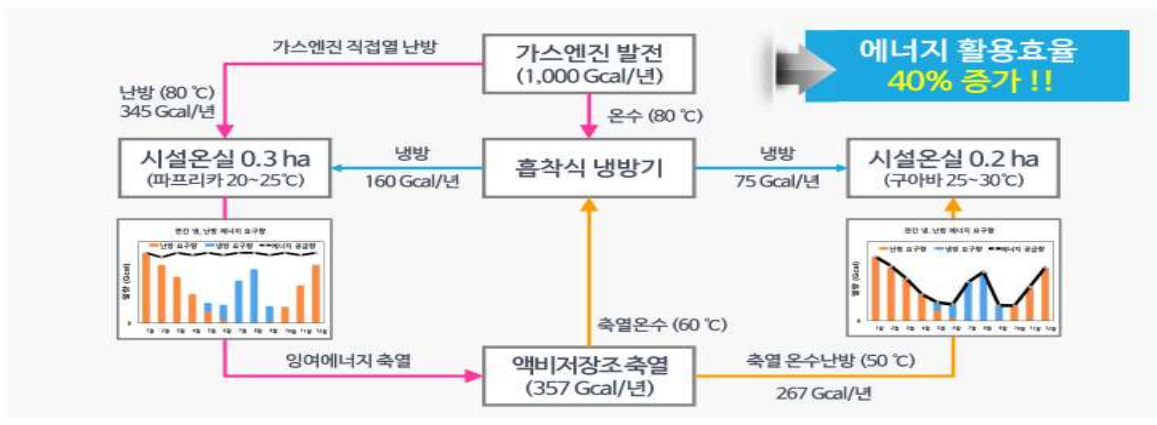
(2) 연구개발내용 및 범위

○ 전체 연구개발 내용

- 본 과제의 최종연구 목표는 미활용 바이오가스 및 수열 융복합 에너지를 이용한 1,000 Gcal/년 0.5 ha 시설온실 실증 구축을 위한 '① 직접접촉형 전열 회수기 개발, ② 저비용 잉여에너지 축열 기술 개발, ③ 저에너지 구동형 MOF 냉방시스템 개발임

최종 목표 상세	세부연구내용 및 목표	연계내용				
직접 접촉식 전열 회수기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 80%급 열교환 효율 전열교환시스템 활용 발전 미활용열 회수 ▪ 미활용 바이오가스 및 수열 융복합에너지 활용 에너지자립형 시설온실 플랜트 구축 ▪ 전열교환 시스템을 통한 바이오가스 발전 폐열 1.1 (MW_{-열회수}/MW_{-발전}) 이상 회수 기술개발 ▪ 축열 용량 2,700m³급 액비저장조 활용 계간축열 실증 ▪ 바이오수열 이용 저온구동 흡착식 냉방시스템 개발 	최대 338% 열회수량 증대				
		구분	일반 현열 교환기		적용 전열 교환기	
		회수온도	120	100	80	60
		잠열 (Gcal/년)	0	0	544 (35%)	544 (30%)
		현열 (Gcal/년)	427 (100%)	712 (100%)	997 (65%)	1,327 (70%)
		전열 (Gcal/년)	427	712	1,541	1,871
저비용 잉여에너지 축열 기술 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 축열용량 2,700m³ 액비저장조 활용 계간 축열 실증 ▪ 액비저장조 활용 분할 축열조(DTES) 모델 개발 ▪ 계간 축열 복합 신소재 개발 ▪ 액비저장조 활용 분할 축열조 열관리 시스템 개발 	축열성능 50% 향상				
		구분	기존	연계		
		축열조성능 (kW/m ³)	40	60		
저에너지 구동형 MOF 냉방시스템 개발	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전기에너지 저소비형 냉방시스템 효율 (COP) 0.6+출력(SCP) 1.0 급 흡착식 냉방기 실증 ▪ MOF 수분 흡착제 발굴 ▪ 열교환기-MOF 코팅 모듈 복합화 기술 개발 ▪ 흡착식 냉방 시스템 운전 최적화 	축열성능 50% 향상				
		구분	기존	연계		
		흡착식 냉방기 성능	효율 (COP, W/W)	0.46	0.60	
		출력 (SCP, kW/kg)	0.30	1.00		

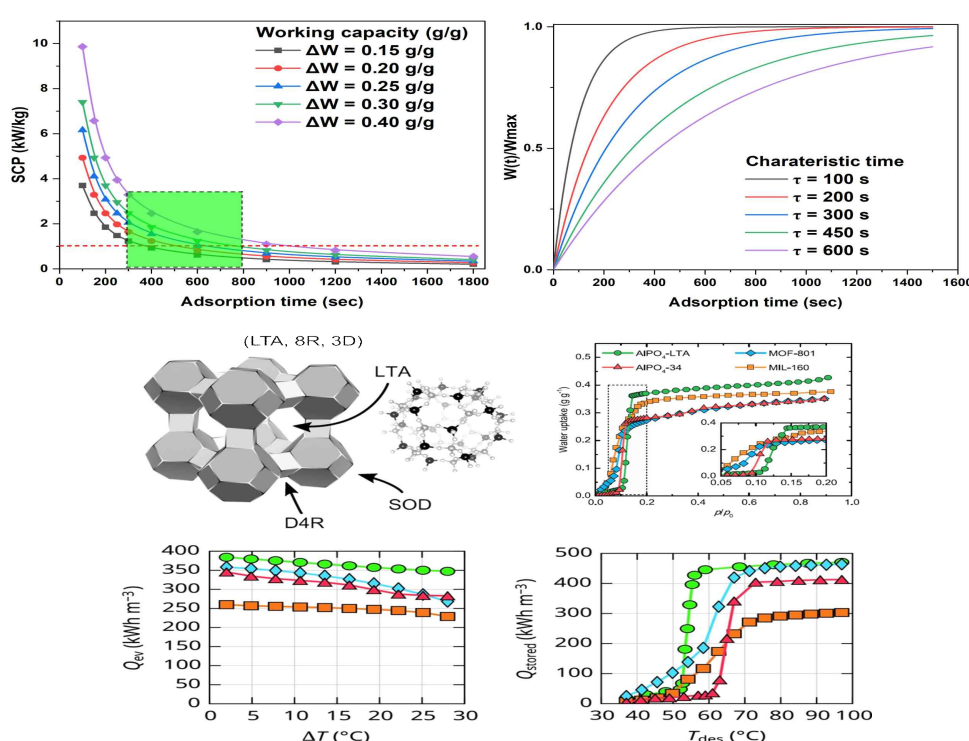
○ 각 요소기술 개발 및 적용을 통한 시설온실 에너지자립을 향상 및 에너지 활용효율 40% 증가



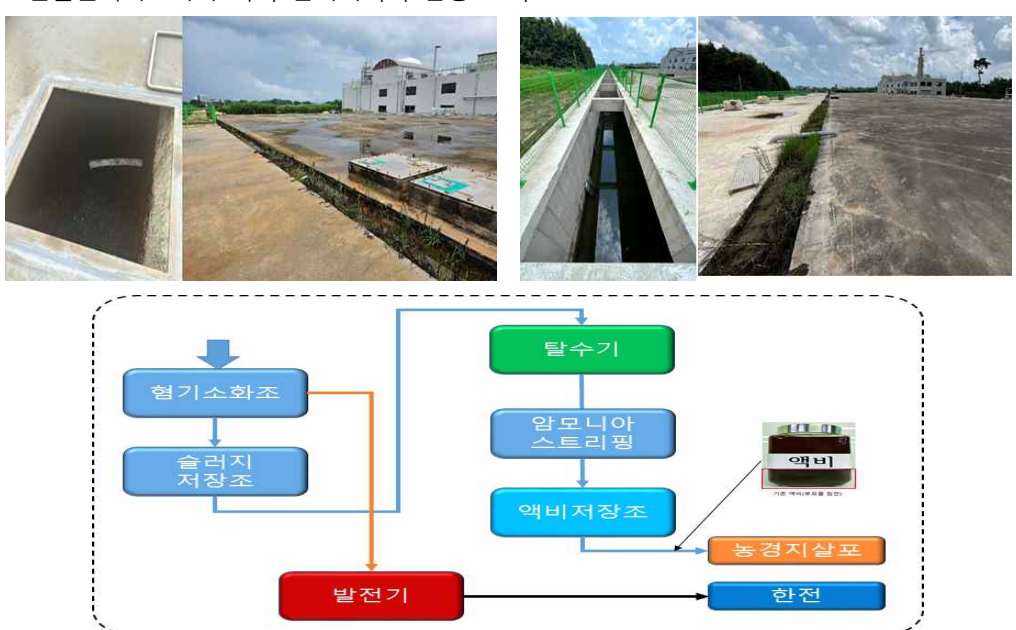
○ 주관연구개발기관 (고등기술연구원)

연구개발기관	고등기술연구원																																																																																																												
	<p>○ 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수/저장 기술 조사</p> <p>○ 시간별 열수요 패턴 관리를 이용한 주요 열 수요처의 열 공급 특성 조사/분석/평가</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 에너지 다소비형 시설 온실 에너지 공급/수요 특성 조사 - 시설 온실 에너지 소비 특성 조사 - 시설 온실 냉·난방에너지 요구량 도출 ■ 기존 시설 온실 난방기 열효율 개선 기술 및 신재생에너지 활용 기술 조사 - 농업경쟁력 향상을 위한 시설 온실 보온/가온 시설 현황 조사 - 시설 온실 난방기 에너지 절감 기술 조사 																																																																																																												
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="406 481 885 817"> <p>1단계 최종 평가온도에 따른 시간별 난방에너지 (Mcal/hr, 2020~2022 평균)</p> </div> <div data-bbox="933 481 1412 817"> <p>8월 최종 평가온도에 따른 시간별 난방에너지 (Mcal/hr, 2020~2022 평균)</p> </div> </div> <p style="text-align: center;">[그림] 1단계 연구내용 - 시설온실 냉·난방에너지 수요 조사</p>																																																																																																												
	<p>○ 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수/저장 기술 조사</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 미활용 바이오가스 발전폐열 활용 기초 조사 - 바이오가스 열병합 발전기 시스템 조사 - 바이오가스 열병합 발전기 시스템 물질·에너지 수지 도출 - 전열교환 시스템 조사/평가 - 실험실 규모 중탄산암모늄 생산기술 평가 ■ 미활용 바이오가스 발전 폐열 활용 사업 타당성 조사 - 농촌복지 및 농가소득 증대 위한 미활용 바이오가스 발전열 활용 시스템 물질·에너지 수지 도출 - 미활용 바이오매스 발전열 활용 통합공정 사업화 평가 																																																																																																												
연구 내용	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div data-bbox="399 1243 750 1579"> <p>가스엔진 발전기 시스템 구성도</p> </div> <div data-bbox="758 1254 885 1579"> <table border="1"> <tr><td>01</td><td>수출 펌프</td></tr> <tr><td>02</td><td>가속 펌프</td></tr> <tr><td>03</td><td>압력계</td></tr> <tr><td>04</td><td>역전방지</td></tr> <tr><td>05</td><td>올레노이드 밸브(방폭)</td></tr> <tr><td>06</td><td>담석 조정기</td></tr> <tr><td>07</td><td>연료제어밸브 송·역서</td></tr> <tr><td>08</td><td>정회로용 송·역회로</td></tr> <tr><td>09</td><td>공기 필터</td></tr> <tr><td>10</td><td>공기회급기 (차보차)</td></tr> <tr><td>11</td><td>공기회 제어밸브</td></tr> <tr><td>12</td><td>인터쿨러 냉각수 순환펌프</td></tr> <tr><td>13</td><td>인터쿨러 캐디에이터</td></tr> <tr><td>14</td><td>배기가스 열교환기</td></tr> <tr><td>15</td><td>배기가스 송수기</td></tr> <tr><td>16</td><td>냉각수 온도 센서</td></tr> <tr><td>17</td><td>상행밸브</td></tr> <tr><td>18</td><td>냉각수 펌프</td></tr> <tr><td>19</td><td>관형 열교환기</td></tr> <tr><td>20</td><td>연료액 순환밸브</td></tr> <tr><td>21</td><td>리모트 모니터링터</td></tr> <tr><td>22</td><td>연료 오일 탱크</td></tr> <tr><td>23</td><td>오일 리미트 스위치</td></tr> <tr><td>24</td><td>오일 유량 조절 장치</td></tr> </table> </div> <div data-bbox="893 1254 1412 1579"> <table border="1"> <tr> <th colspan="2">바이오가스</th> <th colspan="2">바이오가스 발전</th> <th colspan="2">바이오가스 열병합 발전</th> </tr> <tr> <td>발전 전열량</td><td>4,360 kcal/hm³</td> <td>발전 온도</td><td>40 °C</td> <td>발전 온도</td><td>108.1 °C</td> </tr> <tr> <td>발전 가스 조성</td><td>1,247 Nm³/h</td> <td>발전 압력</td><td>101 kPa</td> <td>발전 온도</td><td>75 °C</td> </tr> <tr> <td>CH₄</td><td>745 Nm³/h</td> <td>발전 압력</td><td>14,200 kgf/cm²</td> <td>발전 온도</td><td>398.8 °C</td> </tr> <tr> <td>CO₂</td><td>496 Nm³/h</td> <td>발전 온도</td><td>233 kcal/kg °C</td> <td>발전 온도</td><td>4,374 kcal/kg</td> </tr> <tr> <td>발전 열량</td><td>95 %</td> <td>발전 온도</td><td>233.8 kcal/kg</td> <td>발전 온도</td><td>4,374 kcal/kg</td> </tr> <tr> <td>발전 온도</td><td>370 °C</td> <td>발전 온도</td><td>300 °C</td> <td>발전 온도</td><td>300 °C</td> </tr> <tr> <td>발전 온도</td><td>300 °C</td> <td>발전 온도</td><td>14,200 kgf/cm²</td> <td>발전 온도</td><td>1,000 kcal/kg</td> </tr> <tr> <td>발전 온도</td><td>14,200 kgf/cm²</td> <td>발전 온도</td><td>233 kcal/kg °C</td> <td>발전 온도</td><td>233 kcal/kg °C</td> </tr> <tr> <td>발전 온도</td><td>233 kcal/kg °C</td> <td>발전 온도</td><td>233 kcal/kg °C</td> <td>발전 온도</td><td>233 kcal/kg °C</td> </tr> </table> </div> </div> <div style="text-align: center; margin-top: 20px;"> <p style="text-align: center;">[그림] 1단계 연구내용 - 미활용 바이오매스 발전열 활용 시나리오 분석</p> </div>	01	수출 펌프	02	가속 펌프	03	압력계	04	역전방지	05	올레노이드 밸브(방폭)	06	담석 조정기	07	연료제어밸브 송·역서	08	정회로용 송·역회로	09	공기 필터	10	공기회급기 (차보차)	11	공기회 제어밸브	12	인터쿨러 냉각수 순환펌프	13	인터쿨러 캐디에이터	14	배기가스 열교환기	15	배기가스 송수기	16	냉각수 온도 센서	17	상행밸브	18	냉각수 펌프	19	관형 열교환기	20	연료액 순환밸브	21	리모트 모니터링터	22	연료 오일 탱크	23	오일 리미트 스위치	24	오일 유량 조절 장치	바이오가스		바이오가스 발전		바이오가스 열병합 발전		발전 전열량	4,360 kcal/hm³	발전 온도	40 °C	발전 온도	108.1 °C	발전 가스 조성	1,247 Nm³/h	발전 압력	101 kPa	발전 온도	75 °C	CH₄	745 Nm³/h	발전 압력	14,200 kgf/cm²	발전 온도	398.8 °C	CO₂	496 Nm³/h	발전 온도	233 kcal/kg °C	발전 온도	4,374 kcal/kg	발전 열량	95 %	발전 온도	233.8 kcal/kg	발전 온도	4,374 kcal/kg	발전 온도	370 °C	발전 온도	300 °C	발전 온도	300 °C	발전 온도	300 °C	발전 온도	14,200 kgf/cm²	발전 온도	1,000 kcal/kg	발전 온도	14,200 kgf/cm²	발전 온도	233 kcal/kg °C	발전 온도	233 kcal/kg °C	발전 온도	233 kcal/kg °C	발전 온도	233 kcal/kg °C	발전 온도	233 kcal/kg °C
01	수출 펌프																																																																																																												
02	가속 펌프																																																																																																												
03	압력계																																																																																																												
04	역전방지																																																																																																												
05	올레노이드 밸브(방폭)																																																																																																												
06	담석 조정기																																																																																																												
07	연료제어밸브 송·역서																																																																																																												
08	정회로용 송·역회로																																																																																																												
09	공기 필터																																																																																																												
10	공기회급기 (차보차)																																																																																																												
11	공기회 제어밸브																																																																																																												
12	인터쿨러 냉각수 순환펌프																																																																																																												
13	인터쿨러 캐디에이터																																																																																																												
14	배기가스 열교환기																																																																																																												
15	배기가스 송수기																																																																																																												
16	냉각수 온도 센서																																																																																																												
17	상행밸브																																																																																																												
18	냉각수 펌프																																																																																																												
19	관형 열교환기																																																																																																												
20	연료액 순환밸브																																																																																																												
21	리모트 모니터링터																																																																																																												
22	연료 오일 탱크																																																																																																												
23	오일 리미트 스위치																																																																																																												
24	오일 유량 조절 장치																																																																																																												
바이오가스		바이오가스 발전		바이오가스 열병합 발전																																																																																																									
발전 전열량	4,360 kcal/hm³	발전 온도	40 °C	발전 온도	108.1 °C																																																																																																								
발전 가스 조성	1,247 Nm³/h	발전 압력	101 kPa	발전 온도	75 °C																																																																																																								
CH₄	745 Nm³/h	발전 압력	14,200 kgf/cm²	발전 온도	398.8 °C																																																																																																								
CO₂	496 Nm³/h	발전 온도	233 kcal/kg °C	발전 온도	4,374 kcal/kg																																																																																																								
발전 열량	95 %	발전 온도	233.8 kcal/kg	발전 온도	4,374 kcal/kg																																																																																																								
발전 온도	370 °C	발전 온도	300 °C	발전 온도	300 °C																																																																																																								
발전 온도	300 °C	발전 온도	14,200 kgf/cm²	발전 온도	1,000 kcal/kg																																																																																																								
발전 온도	14,200 kgf/cm²	발전 온도	233 kcal/kg °C	발전 온도	233 kcal/kg °C																																																																																																								
발전 온도	233 kcal/kg °C	발전 온도	233 kcal/kg °C	발전 온도	233 kcal/kg °C																																																																																																								

○ 공동연구개발기관 1 (한국화학연구원)

연구개발기관	한국화학연구원
<p>연구 내용</p>	<p>○ 바이오가스 발전 폐열을 활용한 수분 흡착식 냉방 시스템 활용을 통한 냉난방 에너지 절감 가능성 타당성 검토</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 바이오가스 발전 폐열 활용 수분 흡착식 냉방 시스템 적용 타당성 검토 ■ 핵심소재 적용을 위한 수분 흡착제의 요구 성능 검토 ■ 수분 흡착제 후보군 도출  <p>[그림] 1단계 연구내용 - 흡착제 냉상 성능 검토 결과</p>

○ 공동연구개발기관 2 (포항산업과학연구원)

연구개발기관	포항산업과학연구원
<p>연구 내용</p>	<p>○ 액비저장조 축열 시스템을 활용한 위한 계간 축열조 기술 조사 및 활용방안 도출</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 액비저장조 현황파악 및 축열조 활용방안 도출 ■ 열전달매체로서의 액비 물리화학적 물성 조사  <p>[그림] 1단계 연구내용 - 실증사이트 액비화 시설 및 액비조 조사</p>

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

1) 시간별 열수요 패턴 관리를 이용한 주요 열 수요처의 열 공급 특성 조사/분석/평가

☐ 에너지 다소비형 시설 온실 에너지 공급/수요 특성 조사

○ 시설 온실 에너지 소비 특성

- 우리나라의 시설 온실 재배는 보온 위주로 이루어지고 있으나 많은 작물의 경우에서 보온만으로는 품질 저하와 수량의 감소로 생산성이 크게 떨어지는 단점이 있어, 과채류 등의 시설 재배는 보온과 함께 적극적인 가온 방안을 수립할 필요가 있음
- 시설원에 농가의 가장 큰 애로사항은 이러한 겨울철 난방비 부담으로, 시설원에 농가의 경영비 중 난방비의 비율은 재배작물에 따라 14~28% 수준[1]

표 3. 시설원에 경영비 중 난방비 비율

[단위 : 천원/10a]

구분	경영비(A)	난방비(B)	B/A (%)
시설오이(축성)	16,296	3,257	20%
시설오이(반축성)	6,838	1,106	16%
시설호박	7,077	1,099	16%
시설토마토(축성)	13,584	2,483	18%
채소 시설토마토(반축성)	9,468	1,579	17%
시설방울토마토	10,416	1,636	16%
시설가지	13,547	2,385	18%
파프리카	28,473	6,340	22%
시설고추	7,988	1,467	18%
과수 시설포도	6,201	870	14%
화훼 시설장미	20,840	5,863	28%

- 시설 온실의 난방설비 설계를 위해서는 어떠한 기상 조건에서도 시설 내 작물의 정상적인 생육을 위한 적정 온도를 유지하는 것이 중요하며, 난방설비의 운영 비용은 저렴하여야 함
- 시설 온실의 난방방식에는 온풍난방, 온수난방, 증기난방 및 전열선 난방이 적용되고 있으며, 온풍난방은 공기를 직접 가열하여 시설에 공급하는 방식으로 설치비가 저렴하고 예열시간이 짧은 장점이 있으나 난방 정지 시 공기가 빠르게 식어 보온성이 낮은 단점
- 온수난방은 80~90℃의 온수를 순환하여 방열 되는 열로 난방하는 방식과 온수를 온풍으로 변환하여 공급하는 방식이 있으며, 난방 정지 시에도 비교적 오랫동안 보온성이 유지되는 장점이 있는 반면, 온수의 순환을 위해 고가의 배관 및 방열관이 요구되는 단점으로 주로 대규모 온실에 적용

- 증기난방은 100~110℃의 증기를 순환하여 방열 되는 열로 난방하는 방식과 증기를 온풍으로 변환하여 공급하는 방식이 있으며, 비교적 예열시간이 빠른 장점이 있는 반면, 난방 정지 시 보온성이 낮고 설비비가 온수난방 대비 고가인 단점
- 전열선 난방은 전기온풍 히터로 열을 공급하는 방식으로 설치비가 가장 저렴한 장점이 있으나, 열 차단 시 보온 효과가 거의 없어 주로 소형 온실 또는 보조 난방장치로 적용

표 4. 난방방식에 따른 난방 특성

난방방식	개요	난방효과	설비비	적용대상
온풍난방	공기 직접 가열 예열시간 짧음	정지 시 보온성 낮음	온수난방 대비 저가	비닐하우스
온수난방	80~90℃ 온수를 순환, 또는 온풍으로 변환하여 공급	정지 시 보온성 높음	고가의 배관, 방열관 필요	고급작물 대규모 온실
증기난방	100~110℃ 증기를 순환, 또는 온풍으로 변환하여 공급	정지 시 보온성 낮음	온수난방 대비 고가	대규모 온실
전열선 난방	전기온풍 히터로 난방	정지 시 보온성 없음	가격이 가장 저렴함	소형 온실

○ 시설 온실 난방에너지 부하

- 시설 온실의 난방설계를 위해서는 시설 내 목표 온도를 설정하고, 이를 유지하기 위한 난방 부하(heating load)의 산정 필요
- 특히, 작물 재배기간 동안 온실의 목표 온도를 유지하는데 필요한 열량을 기간난방부하라 하며, 아래 식(1)과 같이 계산

$$q_n = A \times \bar{U} \times (1 - f_r) \times DH_y \quad (1)$$

여기서, q_n = 기간난방부하 (kcal)

DH_y = 난방 필요 적산온도 (℃·hr)

\bar{u} = 평균 난방부하계수 (kcal/m²·hr·℃)

($\bar{u} = 0.75 \times$ 난방부하계수)

A_g = 온실 표면적 (m²)

f_r = 보온피복에 의한 열에너지 절감률

- 상기 식에서 보온피복에 의한 열에너지 절감률(f_r) 및 난방부하계수(U)는 보온 피복재의 종류, 보온 방법에 따라 상이하하며, 통상적으로 표 3에 제시된 값을 사용할 수 있음

표 5. 보온피복에 의한 열에너지 절감률

보온 방법	보온 피복재	열에너지 절감률, f_r		난방부하계수, U (kcal/m ² ·hr·°C)	
		유리온실	비닐온실	유리온실	비닐온실
일중피복	기초피복	0	0	5.30	5.70
이중피복	유리, PVC 필름	0.40	0.45	3.20	3.10
	PE 필름	0.35	0.40	3.40	3.40
	PE 필름	0.30	0.35	3.70	3.70
	PVC 필름	0.35	0.40	3.40	3.40
일층커튼	부직포	0.25	0.30	4.00	4.00
	알루미늄 혼합필름	0.40	0.45	3.20	3.10
	알루미늄 증착필름	0.50	0.55	2.70	2.60
이층커튼	PE 필름 + PE 필름	0.45	0.45	2.90	3.10
	PE 필름 + 알루미늄 필름	0.65	0.65	1.90	2.00
외면피복	짚 거적(섬피)	0.60	0.65	2.10	2.30

- 상기 식에서 난방 필요 적산온도(DH_r)를 산정하기 위하여, 실증 대상 지역인 전라북도 정읍시의 최근 3년(2020년~2022년)의 시간별 온도변화를 조사하였으며[2], 월평균 온도를 표 4에 제시
- 조사 기간 정읍시의 월평균 온도는 동절기(12월~2월) 0.6~2.4°C, 하절기(6월~8월) 22.6~26.1°C의 범위로 조사됨

표 6. 전라북도 정읍시 월평균 온도변화 (2020년~2022년)

기간	정읍시 월 평균 온도 (°C)			
	2020년	2021년	2022년	'20~'22 평균
1월	2.8	-0.4	-0.6	0.6
2월	3.5	3.7	-0.1	2.4
3월	7.3	8.5	7.7	7.8
4월	9.8	13.3	13.4	12.2
5월	17.7	17.1	17.8	17.6
6월	22.5	22.3	23.0	22.6
7월	22.9	26.4	26.4	25.2
8월	27.2	25.1	26.0	26.1
9월	20.5	22.1	21.5	21.3
10월	13.9	15.6	14.2	14.5
11월	8.9	9.0	10.3	9.4
12월	1.1	2.8	-0.7	1.1

- 시설 온실의 온도는 재배작물의 생육조건에 의해 결정됨
- 본 연구에서는 농촌복지 및 농가 소득 증가를 위해 기존 시설하우스 중 구아바, 파프리카 시설하우스를 선정하였으며, 조사된 시설 온실 재배작물의 생육온도 및 재배기간은 다음과 같음[3]

① 파프리카

- 파프리카의 재배 작형은 겨울 재배와 여름 재배로 구분
- 겨울 재배는 7월 중순에서 하순에 파종해 8월 중순에서 9월 상순에 정식하고 11월 상순에서 다음 해 7월 상순까지 수확
- 여름 재배는 2월 중순에서 3월 하순까지 파종하고, 3월 하순부터 4월 중순까지 정식하며, 6월 상순부터 1월 하순까지 수확
- 파종 시 싹을 잘 틔우기 위해서는 20~25℃의 온도를 유지해야 함. 정식 후부터 첫 화방 착과까지는 주간 24~25℃, 야간 21~22℃로 관리하며, 열매가 달린 이후부터는 주간 21~24℃, 야간 18~20℃로 관리하되 15℃ 이하로 내려가거나, 28℃ 이상 오르지 않게 관리함

② 구아바

- 구아바는 온도 적응범위가 넓어 겨울 온도 4.4℃ 지역에서도 견디나, 연평균 기온 27 ~ 30℃의 열대기후에서 재배가 적합하여 하절기 냉방 불필요
- 우리나라에서는 내한성 관계로 노지재배가 어려워 시설 온실에서 재배되며, 가을과 겨울에 2회 수확

- 연간 난방 필요 적산온도(DH_y)는 상기에서 조사된 시설 온실 재배작물의 적정 재배온도 (파프리카 25℃, 구아바 30℃)와 전라북도 정읍시 지역의 시간별 온도변화의 차이로 산출
- 평균 난방부하계수는 PVC 필름을 보온 피복재로 하는 이중피복 온실을 가정하여 열에너지 절감률 0.45, 난방부하계수 3.10 kcal/m²·h·℃를 적용하였을 때, 0.1 ha (1,000 m²) 시설 온실의 난방부하는 1.3 Mcal/℃로 산출
- 시설 온실의 냉방부하는 실외에서 침입하는 열, 실내에서 발생하는 열, 실내공기의 청정도를 유지하기 위하여 환기할 때 침입하는 외기가 냉각부하를 가지게 되므로 계산이 복잡하게 되나, 일반적으로 난방 계수의 3배 이상[4]임을 가정하여 3.9 Mcal/℃로 산출
- 상기에서 산출된 기간 냉·난방부하를 기준으로 시설 온실의 월별 냉·난방에너지 요구량을 산정하여 표 5에 제시함
- 두 시설작물 모두 동절기인 12월과 1월에 난방에너지 요구량이 급격하게 상승하여 파프리카와 구아바의 경우에서 각각 최대 31.73 Mcal/hr, 38.23 Mcal/hr의 난방에너지가 필요한 것으로 조사됨
- 반면, 극하절기인 8월에는 난방에너지 요구량이 파프리카와 구아바의 경우에서 각각 0.70 Mcal/hr, 5.16 Mcal/hr로 감소하였으며, 열대작물인 구아바 시설 온실에는 극하절기에도 일정량의 난방 공급이 지속되어야 함

- 파프리카 시설 온실의 냉방 에너지는 봄에서 여름으로 넘어가는 5월부터 요구량이 발생하기 시작하였으며(월평균 0.07 Mcal/hr), 8월에 최대 2.54 Mcal/hr의 냉방 에너지가 필요한 것으로 조사됨
- 반면, 열대작물인 구아바의 경우 모든 계절에서 냉방의 공급 없이 재배가 가능한 것으로 조사됨

표 7. 파프리카와 구아바 시설 온실의 월별 냉·난방에너지 요구량

기간	냉·난방 에너지 요구량 (Mcal/hr, 0.1ha 기준)			
	파프리카 시설 온실 (25℃ 기준)		구아바 시설 온실 (30℃ 기준)	
	난방에너지 요구량	냉방 에너지 요구량	난방에너지 요구량	냉방 에너지 요구량
1월	31.73±2.82	0.00±0.00	38.23±2.82	0.00±0.00
2월	29.47±3.37	0.00±0.00	35.97±3.37	0.00±0.00
3월	22.34±4.04	0.00±0.00	28.84±4.04	0.00±0.00
4월	16.63±4.77	0.00±0.00	23.10±4.77	0.00±0.00
5월	9.70±4.31	0.07±0.15	16.18±4.34	0.00±0.00
6월	3.69±2.71	1.69±2.52	9.63±3.42	0.00±0.00
7월	1.20±1.25	4.42±5.11	6.24±2.78	0.00±0.00
8월	0.70±0.70	6.28±5.94	5.16±2.54	0.00±0.00
9월	4.97±3.07	0.65±1.14	11.20±3.37	0.00±0.00
10월	13.63±4.21	0.11±0.23	20.09±4.27	0.00±0.00
11월	20.33±3.50	0.00±0.00	27.2±4.26	0.00±0.00
12월	31.08±2.81	0.00±0.00	37.58±2.81	0.00±0.00

- 2020년부터 2022년까지의 정읍시 시간별 온도변화를 토대로 월별-시간별 외기온도에 따른 파프리카 및 구아바 시설 온실의 냉·난방에너지 요구량을 산정하여 그림 1~5에 제시
- 시설 온실의 난방에너지 요구량은 재배작물, 계절과 관계없이 주간(오전 8시~오후 4시)에 급격하게 감소, 야간(오후 5시~오전 7시)에 점차 증가
- 월별 최대 및 평균 난방에너지의 편차는 3.19~9.24 Mcal/hr이며, 냉방 에너지(파프리카)의 편차는 5.48~14.36 Mcal/hr로 실제 필요한 최대 냉·난방기 용량과 평균 냉·난방 용량이 큰 차이가 발생하고 있으며, 특히 냉방기에서 더 큰 편차 발생
- 이는 냉·난방 설비 구축 시 용량이 부족할 경우 재배량 저하 및 추가 공사로 인한 경제성 문제가 발생할 수 있으며, 과잉 용량 구축 시 냉난방 설비 비용이 증가하여 마찬가지로 경제성 문제가 발생할 수 있어, 이에 대한 적정 냉난방기 용량 산정 필요

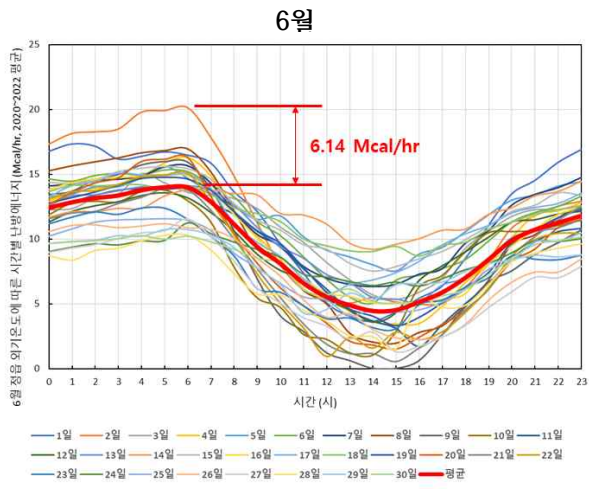
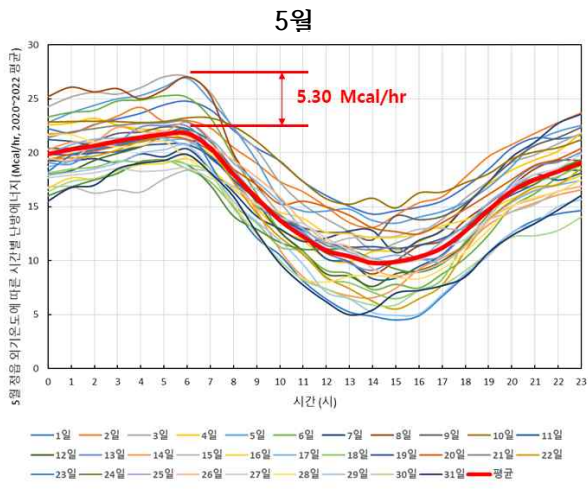
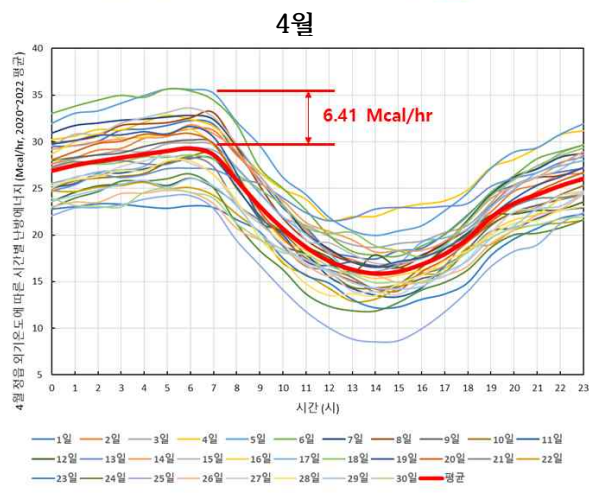
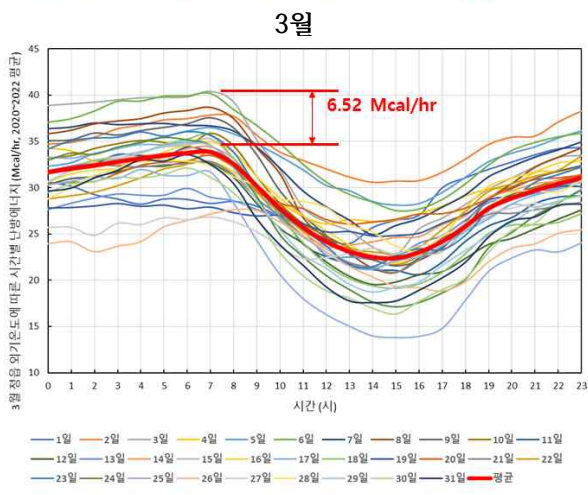
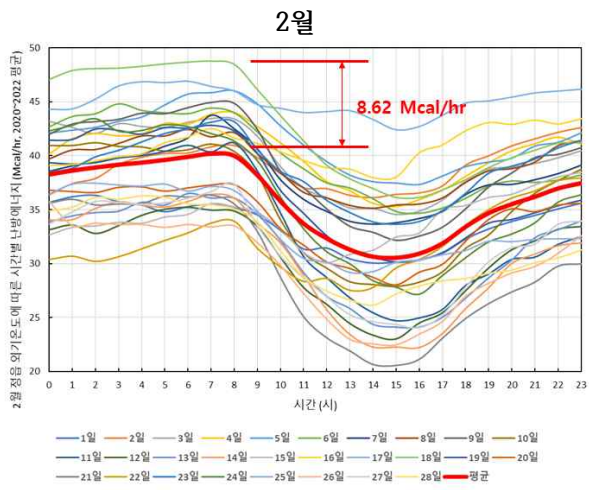
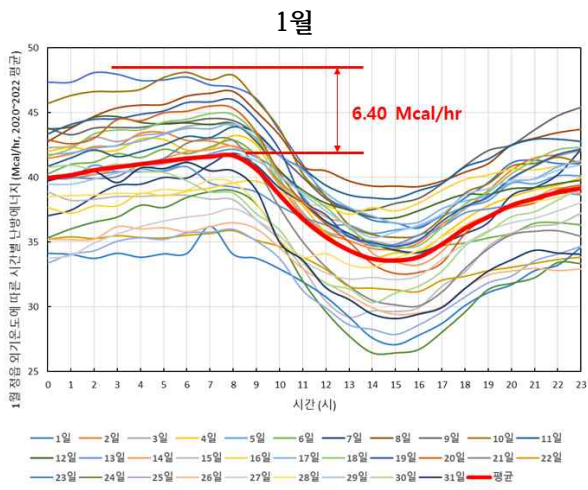


그림 1. 구아바 시설 온실 시간별 난방에너지 요구량 (정읍시 2020~2022년 기준)

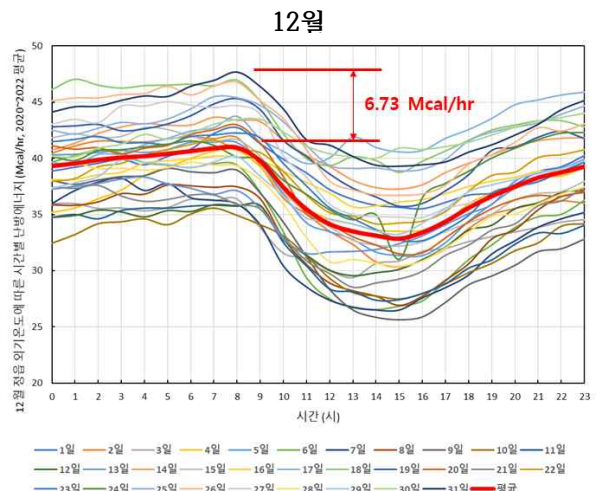
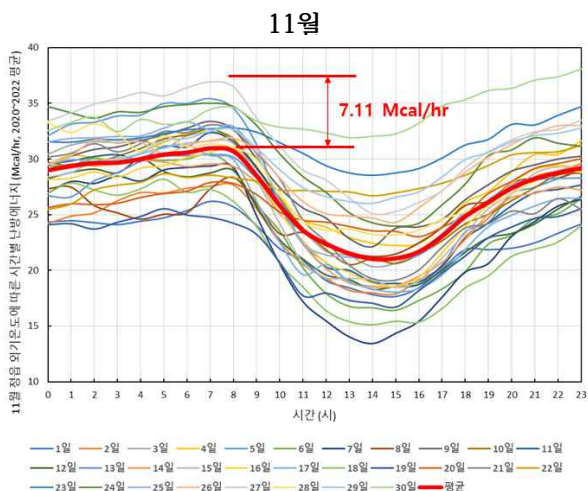
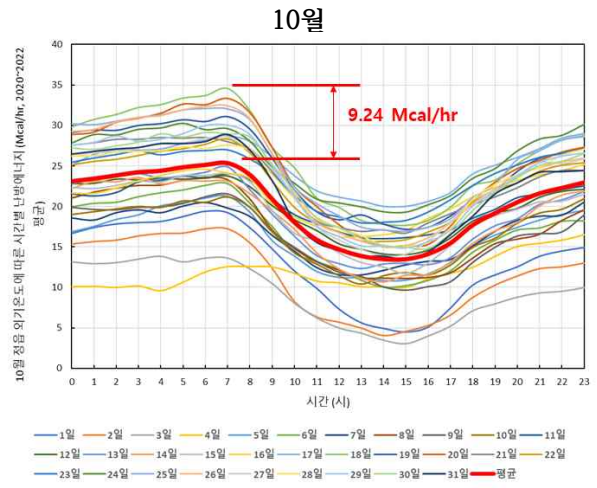
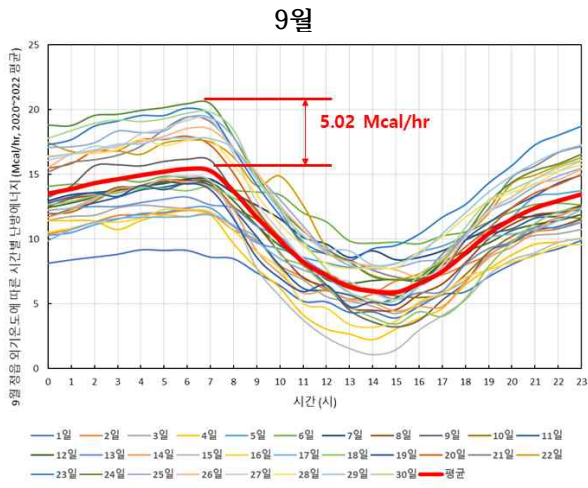
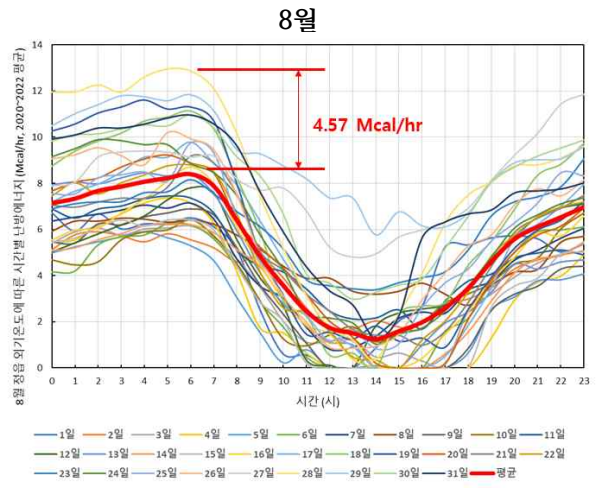
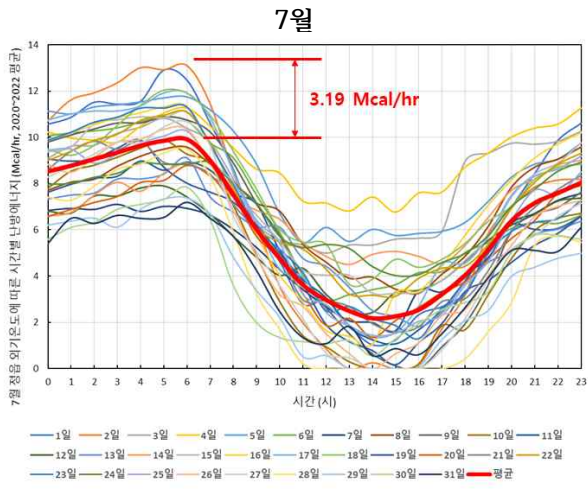


그림 2. 구아바 시설 온실 시간별 난방에너지 요구량 (정읍시 2020~2022년 기준) (계속)

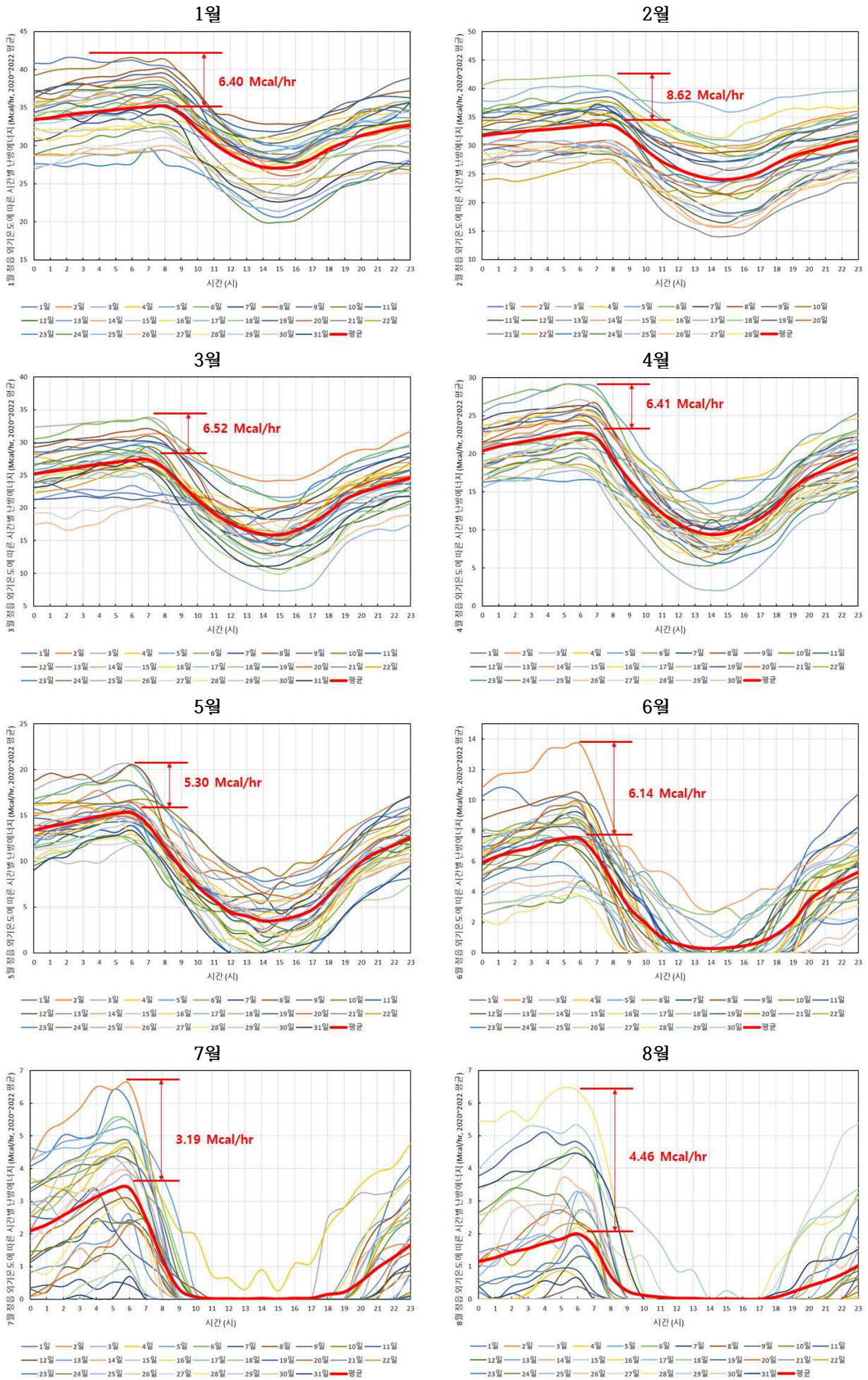


그림 3. 파프리카 시설 온실 시간별 난방에너지 요구량 (정읍시 2020~2022년 기준)

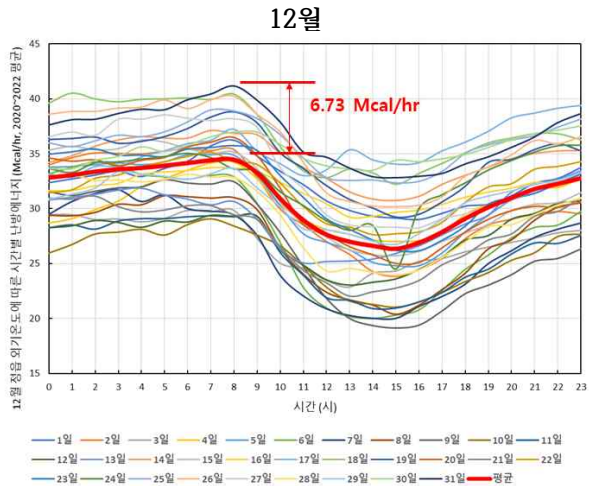
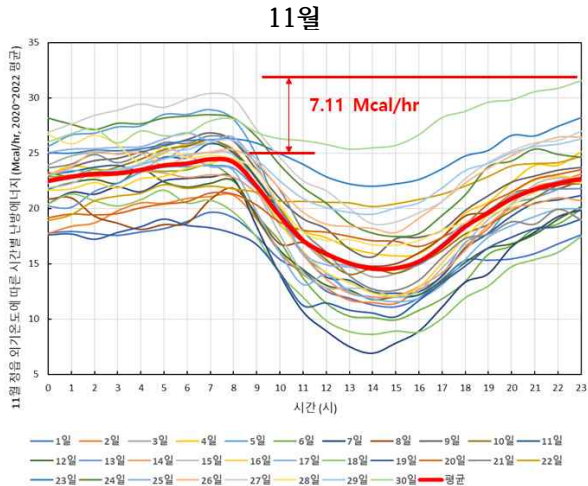
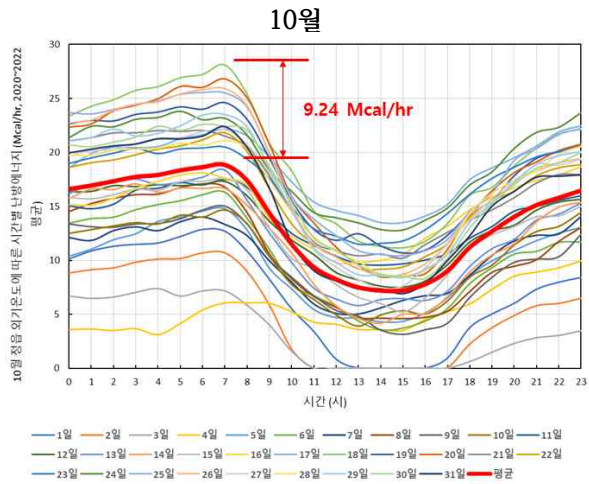
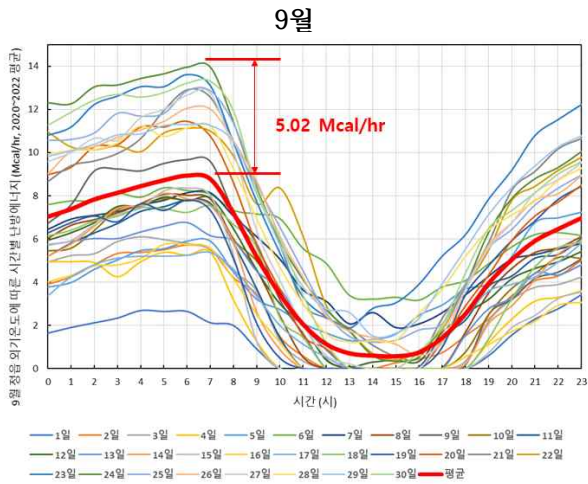


그림 4. 파프리카 시설 온실 시간별 난방에너지 요구량 (정읍시 2020~2022년 기준) (계속)

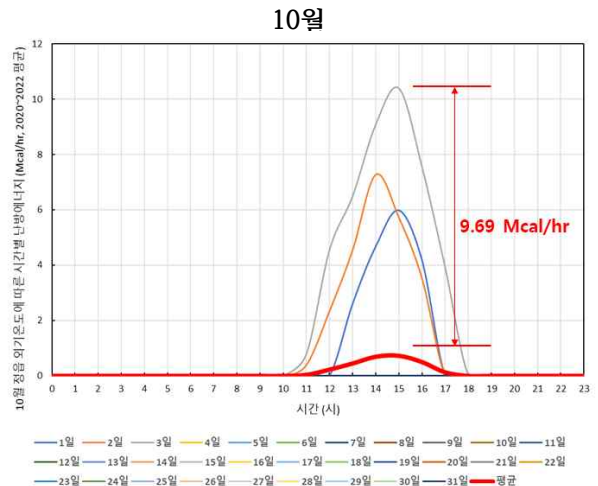
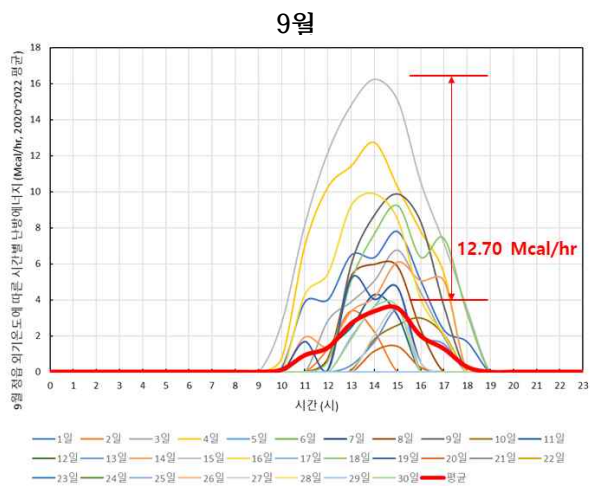
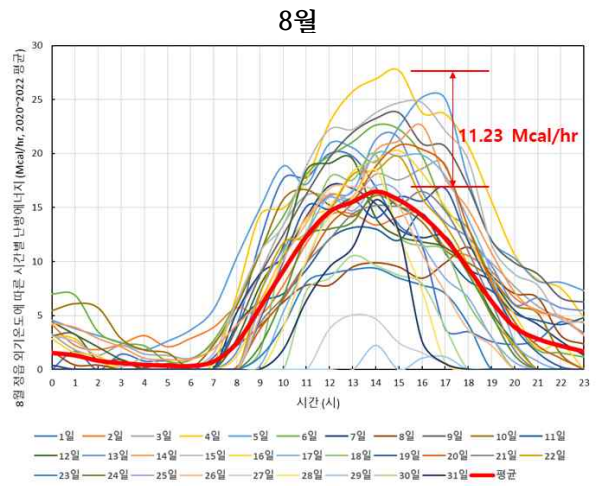
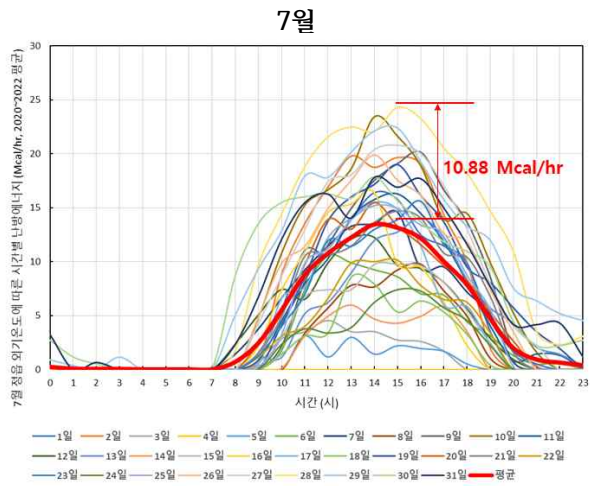
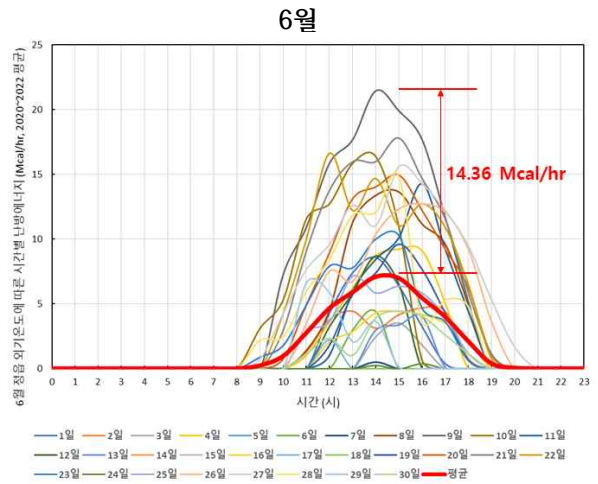
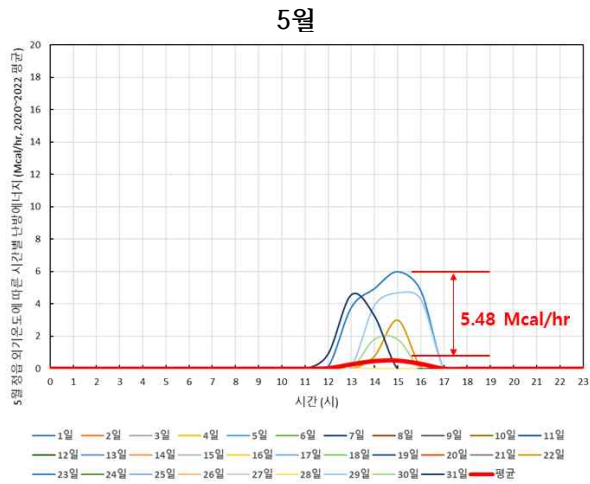


그림 5. 파프리카 시설 온실 시간별 냉방 에너지 요구량 (정읍시 2020~2022년 5월~10월)

□ 기존 시설 온실 난방기 열효율 개선 기술 및 신재생에너지 활용 기술 조사

○ 농업경쟁력 향상을 위한 시설 온실 보온/가온 시설 현황 조사

- 시설 온실은 뛰어난 보온력과 난방열을 활용해 노지에서 농사지을 수 없는 추운 기간에도 많은 수확량을 올릴 수 있는 시설임
- 이러한 생산력 증대에서 가장 중요한 요소는 온도 유지(난방)이며, 최근에는 더운 기간에도 영농활동을 가능하게 하기 위한 냉방에도 점차 관심이 커지는 추세
- 국내 설치된 시설 온실 면적은 2000년 52,189 ha에서 2021년 53,239 ha로 21년간 2.0% 증가에 불과하나, 이 중 가온 면적은 2000년 12,398 ha에서 2021년 16,860 ha로 36.0% 가량 증가하여, 시설 온실의 생산력 향상 및 고부가가치 작물 재배가 이루어지고 있음[5,6]
- 시설 온실의 가온을 위한 에너지원별 소비 구조를 보면 석유류의 비중은 2010년 87.5%에서 2021년 81.8%로 약 5.7%p가량 감소한 반면, 전기와 가스의 비중은 2010년 3.7%에서 2021년 10.1%로 약 6.4%p 증가하는 추세로 유류가격이 상승함에 따라 전력에 의한 가온 시설 증가
- 다만, 최근 농사용 전기가격이 지속적으로 상승함에 따라, 지열 등 신재생에너지를 이용한 가온 방식도 꾸준히 증가 추세
- 시설작물 재배를 위한 경영비 중 약 30~50%를 난방비가 차지함에 따라, 시설 온실에서는 보온 재배를 확대하고 난방비를 절감하기 위하여 신재생에너지 이용 시설 보급 확대 및 대체에너지 개발에 힘쓰고 있음

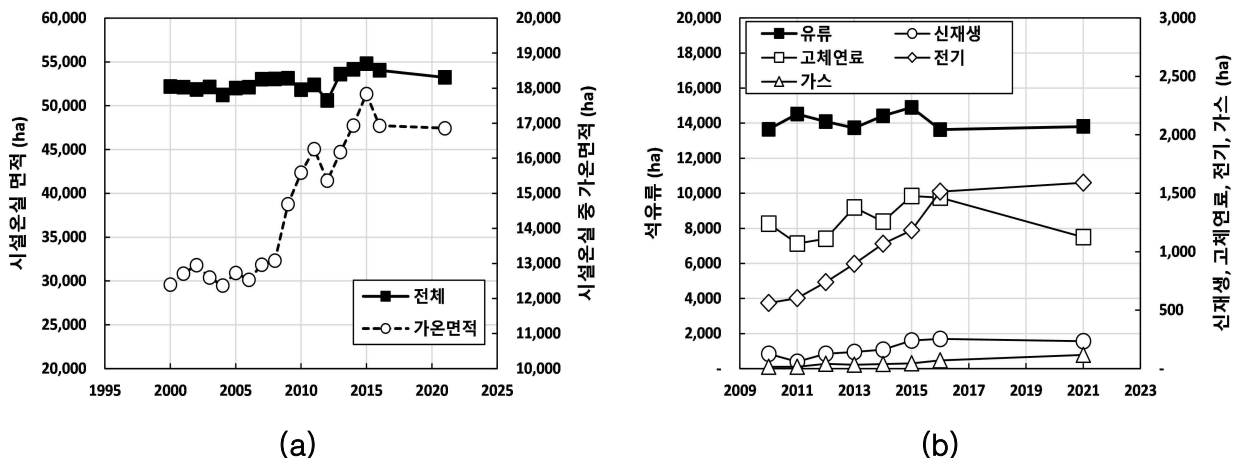
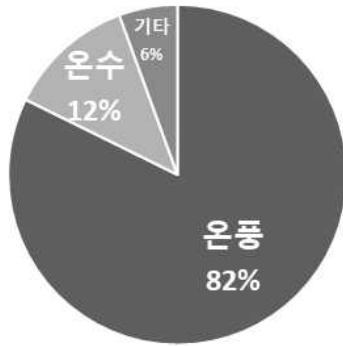
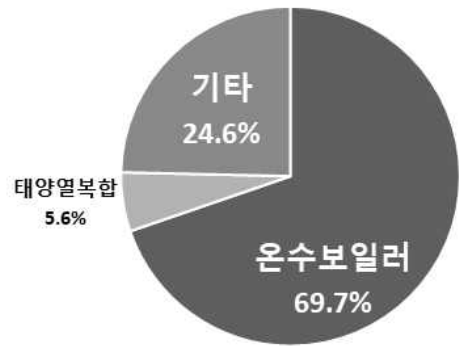


그림 6. 시설 온실 면적/가온 면적 변화(a) 및 가온 에너지원 변화(b)



(a)



(b)

그림 7. 난방 유형별 시설 온실 설치 현황. 지상부 난방(a), 지하부 난방(b)

○ 시설 온실 난방기 에너지 절감 기술

- 우리나라 시설 온실에서 겨울철 난방을 하여 작물을 재배하는 가온재배 면적은 16,860 ha로 전체의 36.0%를 차지하고 있으며, 전체 난방의 81.9%를 유류에 의존하고 있어 국제유가 변동에 취약한 구조임[5]
- 시설 농가 경영비에서 난방비를 포함한 광열비가 전체의 30~50%를 차지하고 있어 냉·난방에 소요되는 에너지의 절감은 농가 경영개선을 위해 필수적임

표 8. 난방 연료별 국내 시설 온실 가온재배 면적

[단위: ha]

구분	계	고체연료							유류					가스류	전기	지열
		폐목	연탄	석탄 코크스	폐타 이어	목재 펠릿	기타	소계	경유	중유	등유	기타	소계			
전국	16,860	124	149	36	1	519	295	1,124	4,391	1,723	7,039	650	13,804	117	1,591	224
서울	4	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	4	0	0	0
부산	548	0	0	0	0	1	0	1	301	171	1	19	492	0	55	1
대구	286	0	2	0	0	1	2	5	47	28	190	0	266	0	16	0
인천	64	0	0	0	0	0	0	0	20	13	31	1	64	0	0	0
광주	254	0	4	0	0	0	56	60	77	0	101	5	184	1	7	2
대전	128	0	0	0	0	7	0	7	84	0	36	1	120	0	1	0
울산	76	1	0	0	0	3	1	5	38	0	13	0	51	0	20	0
세종	115	0	0	1	0	0	0	1	96	5	7	0	107	0	6	0
경기	1,348	0	70	28	0	84	18	200	426	96	430	77	1,029	17	63	39
강원	731	24	0	0	0	87	0	112	175	55	348	26	604	3	12	1
충북	580	0	3	0	0	9	89	101	76	66	188	60	390	0	86	3
충남	2,878	72	3	0	0	134	35	244	1,290	177	874	35	2,374	18	201	41
전북	1,175	13	0	2	0	73	24	113	272	86	524	65	947	15	61	38
전남	2,394	0	8	0	0	40	20	68	622	164	1,180	155	2,121	34	121	50
경북	1,502	12	8	0	0	35	15	69	354	608	367	5	1,334	12	67	21
경남	4,693	0	51	5	1	44	36	137	443	242	2,747	203	3,635	17	876	29
제주	84	0	0	0	0	1	0	1	70	10	3	0	83	0	0	0

- 시설 온실의 난방에너지 개선을 위한 에너지 저감기술은 2000년 이후 꾸준히 개발되어 적용 [7]
- 현재 농가에 적용된 농업용 난방기 열효율 개선 기술은 시설 온실의 보온성 향상, 재생에너지 활용, 열 회수 기술을 이용한 에너지 이용효율 향상 등으로 구분

표 9. 국내 농가 적용 중인 열효율 개선 기술 현황

분류	열효율 개선 기술		특징
보온성 향상	보온·단열 성능이 우수한 피복재 사용	알루미늄 다겹보온 커튼	복사열 손실 최소화, 권취 모터 소형화
		알루미늄 스크린	차광률 조절, 상부 및 측면 보온커튼 병용
		공기막 단열재	복사열과 내외부 공기 차단, 광 이용효율 증진
		상부 개방형 다겹 보온커튼	0.15mm 두께 PO계 연질강화 필름 사용
		기능성 보온덮개	기존 보온덮개에 알루미늄 코팅 부직포 1겹 추가
	순환식 수막 시스템		기존 수막재배 대비 지하수 81% 절감
	하우스 열손실 보완	중앙권취식 보온터널 다겹 보온터널 온실 외부 보온덮개 피복	보온·단열 성능이 우수한 피복재로 천장, 측면 등 열손실 최소화
재생에너지 이용	잉여 태양에너지 축적시스템	이중피복, 축열물주머니, 소형보온터널, 팬코일	외부기온 -5℃에서 가온없이 내부기온 5℃이상 유지
	지중열교환	온실 내부 땅속에 유공관 매설	약 3℃ 냉난방 효과
	태양열 발전 시스템		태양전지판 이용 전기, 열 생산
	지중열 냉난방 시스템		지하수 저장 물탱크 수열을 열원으로 온실 냉난방
에너지 이용효율 향상	온풍난방기		열효율 85% 이상 사용
	배기열 회수 장치	열회수율 61~85%	난방비 16% 절감
	일사감응변온 관리장치	일사량에 따라 밤 온도 자동 관리	향온 관리 대비 난방비 20% 절감
	축열식 공기열 히트펌프		-20℃에서 안정적으로 60℃ 온수 생산
	시설원에 가스 히트펌프		유류 보일러 대비 난방비용 30% 절감
	근권 난방장치	수경재배 베드 슬래브 하부에 온수용 배관 설치	
	온풍기용 이중 덕트		난방비 13% 절감, 열 분배 균일화
온풍난방기 그늘음 제거		연소효율 4% 상승, 난방비 18% 절감	

- 시설 온실에서 적용되고 있는 재생에너지 활용 기술은 히트펌프 (지열, 태양열 축열식), 순환식 수막재배, 목재펠릿 난방기 및 열 회수형 환기장치, 배기열 회수 장치 등이 있음

① 히트펌프

- 냉매의 상변화 순환을 이용하여 지중열, 공기 열 등을 흡수하여 시설난방에 활용 가능한 고온수 생산
- 지열 히트펌프, 태양잉어열 축열식 공기열 히트펌프, 지하수 열원 히트펌프, 발전 폐열 히트펌프 등이 개발됨
- 지열 히트펌프는 경유 온풍난방기 대비 70~80% 난방비 절감 효과

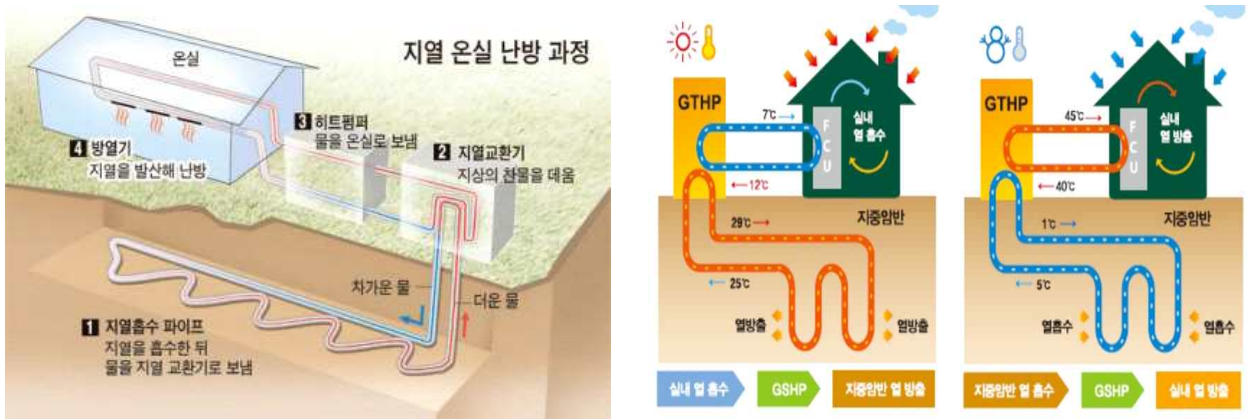


그림 8. 지열 및 태양열 축열식 히트펌프

② 순환식 수막재배

- 수막으로 사용한 지하수를 회수하여 일정한 온도로 가열 재 활용
- 18~20°C로 가온한 지하수를 150~200 L/분/10a 살수 시 최저 외기온 영하 6°C에서 수막 온실 내부 기온 8°C 유지 가능
- 기존 비순환식 수막시설 대비 81% 지하수 절감

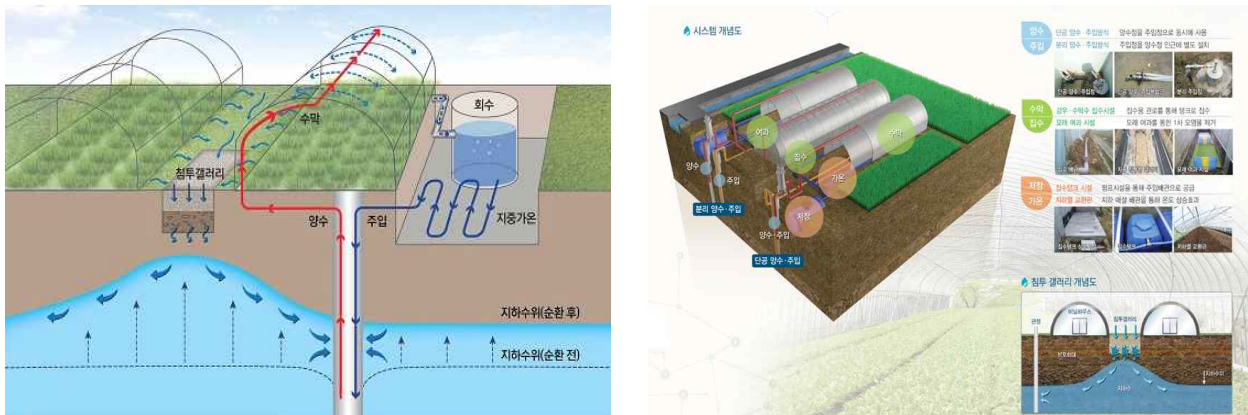


그림 9. 순환식 수막시설

③ 목재펠릿 난방기

- 목재펠릿은 다른 목질계 연료보다 안전성, 균질성, 사용 편리성이 우수하며 연소효율도 타 유류 보일러 수준으로 향상되고 있음
- 보급 확대를 위해서는 목재펠릿의 품질향상과 유류 대비 가격 경쟁력, 난방기 유지보수의 용이성이 요구됨
- 목재펠릿 난방기는 경유 온풍난방기(면세유 1,000원/L) 대비 약 20% 난방비 절감 효과



그림 10. 목재펠릿 난방기

④ 열 회수형 환기장치

- 시설 온실의 환기 시 내부 공기와 함께 버려지는 열을 열교환기에서 흡수하여 외부에서 유입되는 찬 공기를 가열하여 내부 공급
- 열회수율은 63~80% 수준이며, 난방 연료 약 50% 절감 효과

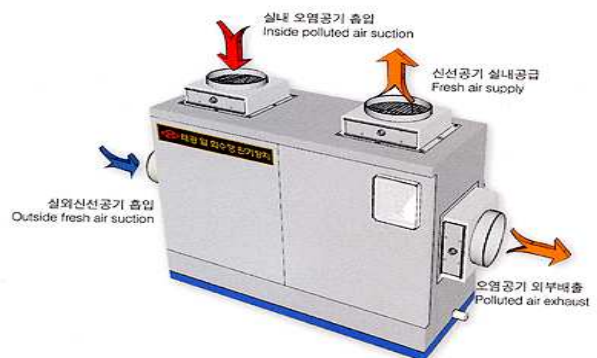
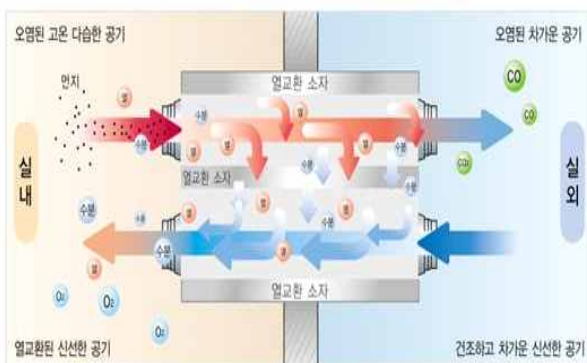


그림 11. 열 회수형 환기장치

⑤ 온풍난방기 배기열 회수 장치

- 온풍난방기의 배가스 폐열(250~300℃)을 열교환기로 회수하여 온실에 공급
- 기존 온풍난방기 배기열의 61~85%를 회수하여, 일 평균 11~25%의 연료 절감 효과



그림 12. 배기열 회수 장치

2) 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수/저장 기술 조사

☐ 미활용 바이오가스 발전 폐열 활용 기초 조사

○ 바이오가스 열병합 발전기 시스템 구성

- 바이오가스 열병합 발전기 시스템은 (주)DNGV에서 운영 중인 바이오가스 발전기 spec을 중심으로 조사 수행
- 바이오가스 열병합 발전을 위한 가스엔진 발전기 시스템은 200~300 kWe급의 엔진 제너레이터, 엔진에 공급되는 연료(바이오가스) 및 연소 공기를 혼합/과급하는 공기과급기(터보차저), 엔진 배가스를 냉각 및 열 교환하는 배기가스 열교환기(Shell & Tube Type), 열 교환된 냉각수를 재냉각하기 위한 냉각수 열교환기(Brazed Weld Plate)로 구성

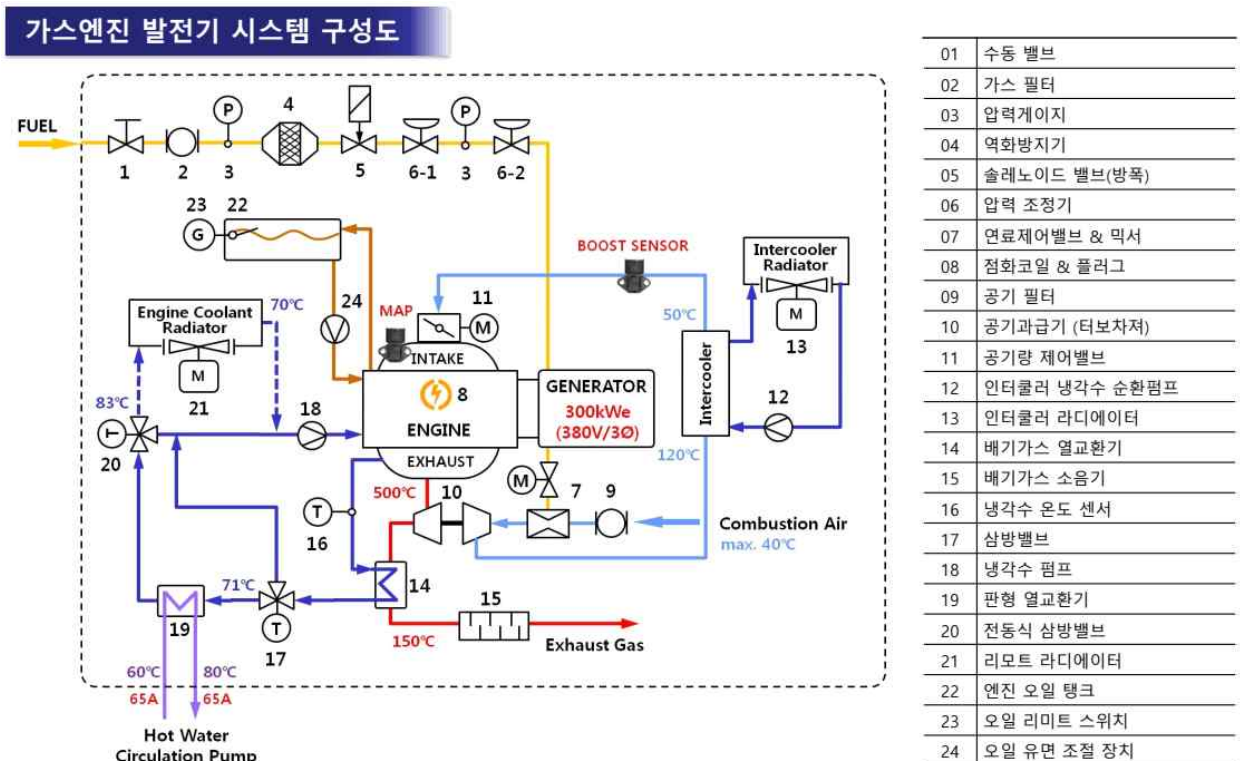


그림 13. 바이오가스 열병합 발전기 시스템 구성도

① 배기가스 열교환기 (Shell & Tube Type)

- Shell & Tube 열교환기는 원형의 셸 속에 원형 관을 설치하여 한쪽의 유체는 원형관 내부를 통해 흐르고, 다른 한 유체는 원형 관을 가로질러 흐르거나 원형 관을 따라 평행하게 흐르는 구조로 구성됨
- Shell & Tube 열교환기 열교환기는 석유 정제 플랜트, 화학 플랜트, 발전 플랜트 등의 액-액, 비등하는 유체와 액체, 응축하는 유체와 액체, 비등하는 유체와 응축하는 유체의 열교환에 많이 사용됨
- 열교환기의 재질로는 STS316L 또는 STS304가 사용되며, 가스 흐름의 최대 온도 700℃, 냉각수 흐름의 최대 온도는 110℃의 범위로 설계되어 있음

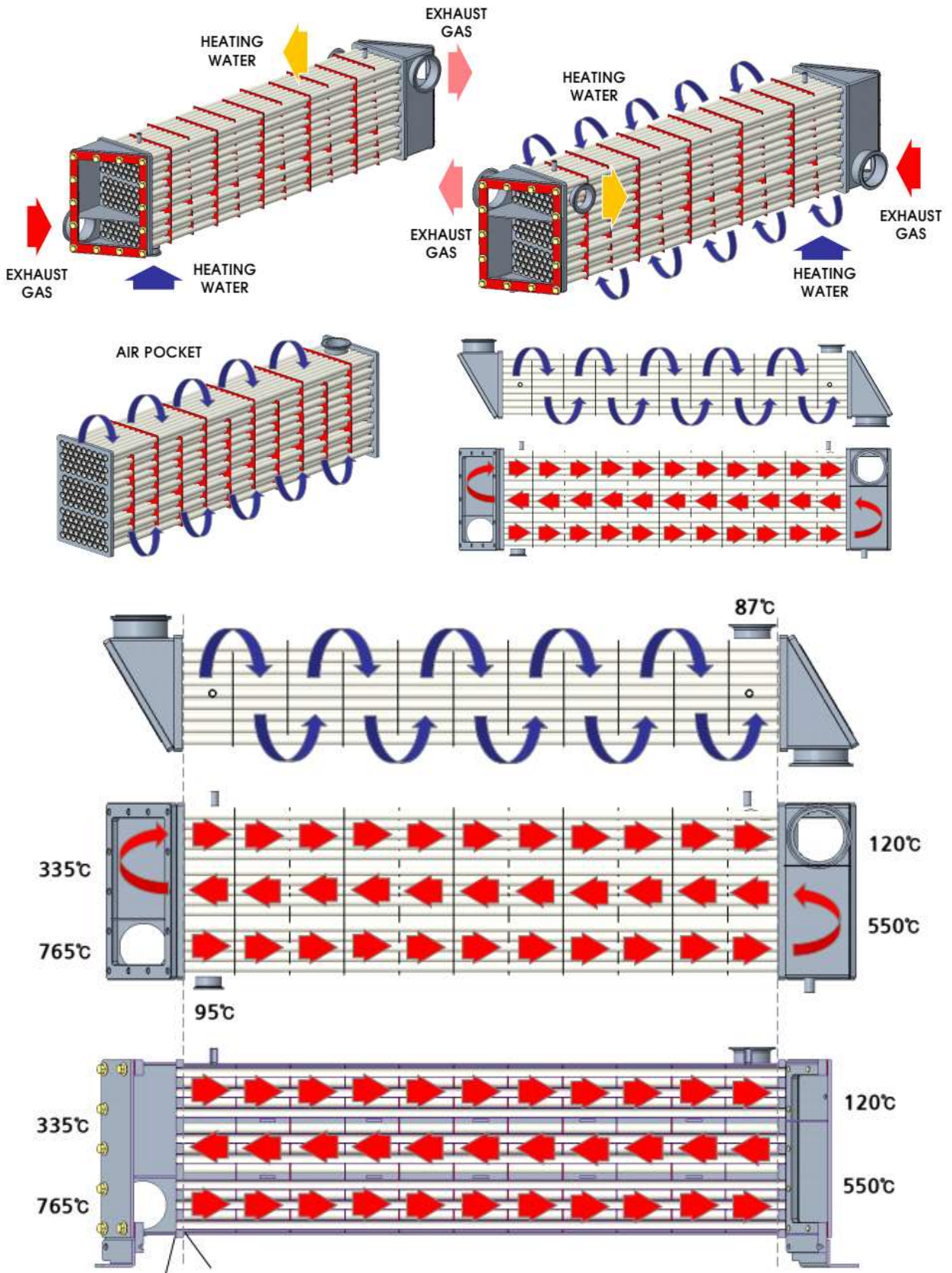
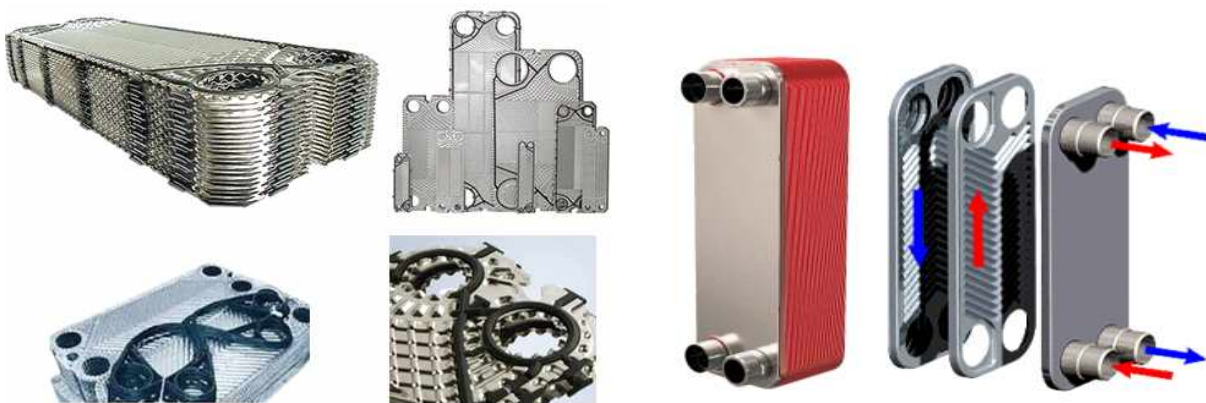


그림 14. Shell & Tube Type 열교환기 구성도

② 냉각수 열교환기 (Plate Type)

- 판형 열교환기는 온도가 다른 두 유체 간에 열에너지를 교환하는 기기로, 주로 난방이나 급탕 공급을 위해 설치
- 1mm 이하 두께의 스테인리스 강철판을 복잡한 형상으로 가공하여, 효율적으로 열이 전달될 수 있도록 유체가 흐르는 공간을 구성하고, 이러한 열판을 필요한 수량에 따라 여러 장 겹쳐 사용
- 유체가 흐르는 채널의 기밀을 유지하는 방법에 따라 '개스킷 판형 열교환기'와 '브레이징 판형 열교환기'로 구분
- 개스킷 판형 열교환기는 유체가 흐르는 누설을 방지하기 위한 밀봉 요소로 에틸렌과 프로필렌을 중합시켜 만든 개스킷(Gasket)을 사용
- 개스킷 판형 열교환기는 볼트를 풀면 분해할 수 있기 때문에 열판과 개스킷의 상태를 육안으로 확인하기 용이하며, 파손된 부분만 별도로 교체 가능한 장점이 있는 반면, 볼트가 가하는 강한 압력 때문에 상대적으로 두꺼운 열판 (0.6mm)을 사용하며, 온도변화에 따른 개스킷 경화 현상으로 주기적인 유지보수가 필요한 단점
- 브레이징 판형 열교환기는 유체가 흐르는 채널의 누설을 방지하기 위해 금속 접합제로 녹는점이 낮은 구리 박판을 주로 사용
- 브레이징 판형 열교환기는 열판과 열판 사이 채널 내부가 조밀하게 접합되어 있으므로 얇은 열판으로도 높은 압력(약 30 bar 이상)에 사용이 용이하며, 크기가 작고 가벼운 장점
- 열에 강하고 유효 전열면적이 넓기 때문에 작은 크기의 열교환기로도 큰 부하를 담당할 수 있으며, 가격이 저렴함



(a) 개스킷 판형 열교환기

(b) 브레이징 판형 열교환기

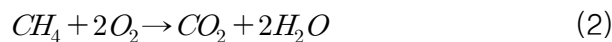
그림 15. Plate Type 열교환기 사진

표 10. Plate Type 열교환기 비교

구분	개스킷 판형 열교환기	브레이징 판형 열교환기
형태	전열판 사이에 개스킷을 사용하여 볼트로 조립	전열판 사이를 구리를 이용하여 접합
전열판 재질	STS316L 또는 STS304	
전열판 두께	0.6 mm	0.4 mm
최고 사용압력	16~20 bar	30~40 bar
최고 사용온도	130~160℃	185~225℃
최대 관경	450A	200A
장점	전열판 해체 및 분해 용이 대형열교환기 보급	컴팩트한 사이즈에 사용압력 높음 가격이 저렴하고 일정한 품질
단점	개스킷 경화에 따른 교체 필요 설치 면적 넓고 가격 비쌈	열교환기 내부 육안 확인 어려움

○ 바이오가스 열병합 발전기 시스템의 물질·에너지 수지

- 바이오가스 열병합 발전기 시스템의 물질·에너지 수지는 (주)DNGV에서 운영 중인 바이오가스 발전기 spec을 기준으로 산정되었으며, 그림 16과 같이 배가스의 온도 및 유량을 이용하여 배가스로부터 회수되는 열량과 냉각수의 유량을 도출
- (주)DNGV에서 운영 중인 바이오가스 열병합 발전기 시스템은 200 kW급 Lean-burn 엔진 및 발전효율 34.0%의 발전기로 정상운전 가정 시 98.5 Nm³/h의 바이오가스가 공급되며, 이때의 바이오가스 내 메탄 함량은 60%(CH₄: 59.1 Nm³/h, CO₂: 39.4 Nm³/h)를 가정
- 메탄을 연소시키기 위한 연소 공기는 1.4의 과잉 공기비로 주입되며, 이때 요구되는 산소의 양은 다음의 연소식에 따라 계산



- 과잉 공기의 조성은 일반공기(O₂: 21%, N₂: 79%)의 조성을 가정하였으며, 이때의 연소 공기 주입량은 788 Nm³/h (O₂: 165.5 Nm³/h, N₂: 62.5 Nm³/h)로 산출
- 공급되는 혼합가스의 유입온도는 40℃이며, 바이오가스와 연소 공기가 원활히 혼합되기 위하여 발전기 공급 전 터보차저에서 바이오가스 발전 배가스(569.7℃)를 이용하여 120℃의 온도로 1차 열 교환되어 공급
- 바이오가스 발전에서 발생하는 배가스는 최초 569.7℃로 배출되며, 이때의 배가스의 전열량은 160,945 kcal/h로 산출
- 발전기에서 배출된 배가스는 상기의 터보차저에서 1차 열 교환되며, 500℃의 온도로 Shell & Tube Type 열교환기로 공급되어 150℃까지 2차 열교환 되며, 이때 회수가능한 열량은 103,538 kcal/h로 산출

- Shell & Tube Type 열교환기에 공급되는 냉각수의 유입온도는 56.3℃이며, 열교환 후 배출되는 냉각수의 배출온도를 65.9℃로 가정할 때, 냉각수의 유량은 10.8 m³/h로 산출
- 상기 65.9℃로 배출된 냉각수는 바이오가스 엔진으로 공급되어 엔진 열 냉각에 이용된 후 최종적으로 84.8℃의 중온수로 배출되며, 중온수는 브레이징 판형 열교환기에서 2차 열교환이 이루어짐
- 브레이징 판형 열교환기에 공급되는 중온수는 56.3℃로 열 교환된 후 Shell & Tube Type 열교환기로 재순환
- 브레이징 판형 열교환기에 공급되는 냉각수는 27.1℃로 유입되며, 열교환 후 배출되는 냉각수의 배출온도를 73.2℃로 가정할 때, 열 교환량은 271,990 kcal/h, 냉각수의 유량은 5.9 m³/h이 요구되는 것으로 산출, 이를 바탕으로 바이오가스 발전시스템의 현열 회수 효율은 53.9%로 산출됨

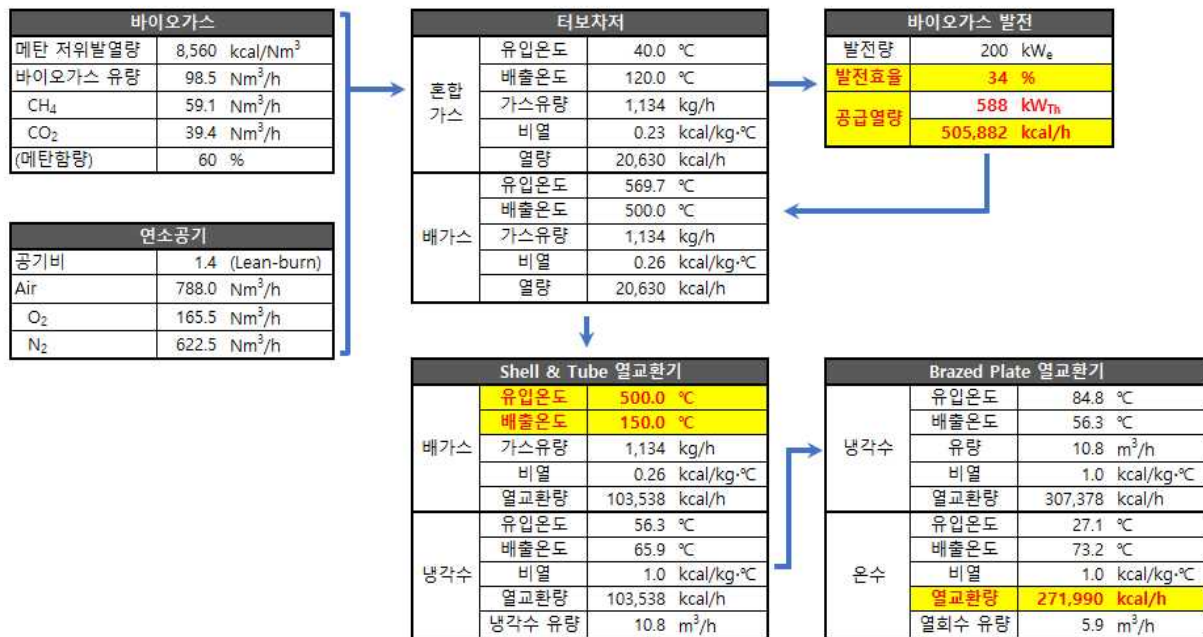


그림 16. 바이오가스 열병합 발전기 시스템의 물질·에너지 수치

표 11. 바이오가스 열병합 발전 배가스 조성, 유량 및 전열량

조성	유량		함량	비열 (kcal/kg·°C)	전열량 (569.7°C) (kcal/h)
	(Nm ³ /h)	(kg/h)			
CO ₂	98.5	193.5	11.1%	0.22	24,194
H ₂ O	118.2	95.0	13.3%	0.45	24,445
O ₂	47.3	67.5	5.3%	0.22	8,446
N ₂	622.5	778.1	70.2%	0.23	103,860
Total	886.5	1134.1	100.0%	0.26	160,945

□ 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수를 위한 전열교환기 적용 타당성 조사

○ 전열교환기 기초 조사

- 전열은 현열과 잠열을 포함한 전체의 열로 열역학 측면에서 계의 내부 에너지와 압력의 곱에서 부피를 더한 값으로 정의
- 전열 중 현열은 물체의 온도가 가열, 냉각됨에 따라 요구되는 열량으로 물질의 상변화가 없는 특징을 가지며 분자운동에너지의 증감으로 표현
- 일반적인 현열은 물질의 상(고체, 액체, 기체)이 변하지 않는 조건에서 열 교환에 따라 변화하게 되며, 식 3과 같이 표현

$$Q = C \times m \times \Delta T \quad (3)$$

여기서, Q = 현열 (kcal)
 C = 비열 (kcal/kg·°C)
 m = 질량 (kg)
 ΔT = 온도차 (°C)

- 잠열은 물질의 상변화에 따른 에너지로 물질의 온도 변화 없이, 고체⇌액체, 액체⇌기체 변화에 따른 열량을 뜻함
- 물질이 고체에서 액체로 변화 시 ‘용해잠열’이라 명하며, 액체에서 기체로 변화 시 ‘기화(증발)잠열’이라 하고, 물의 경우 대기압 하에서 그림 17과 같이 용해잠열 80 kcal, 증발잠열 539 kcal를 가짐
- 0°C 물을 100°C까지 열 교환 시 약 100 kcal의 에너지가 교환되는 반면, 잠열의 경우 100°C 습증기 기준 약 539 kcal의 에너지 교환이 가능하여 잠열의 에너지가 현열 대비 5배 이상 높음

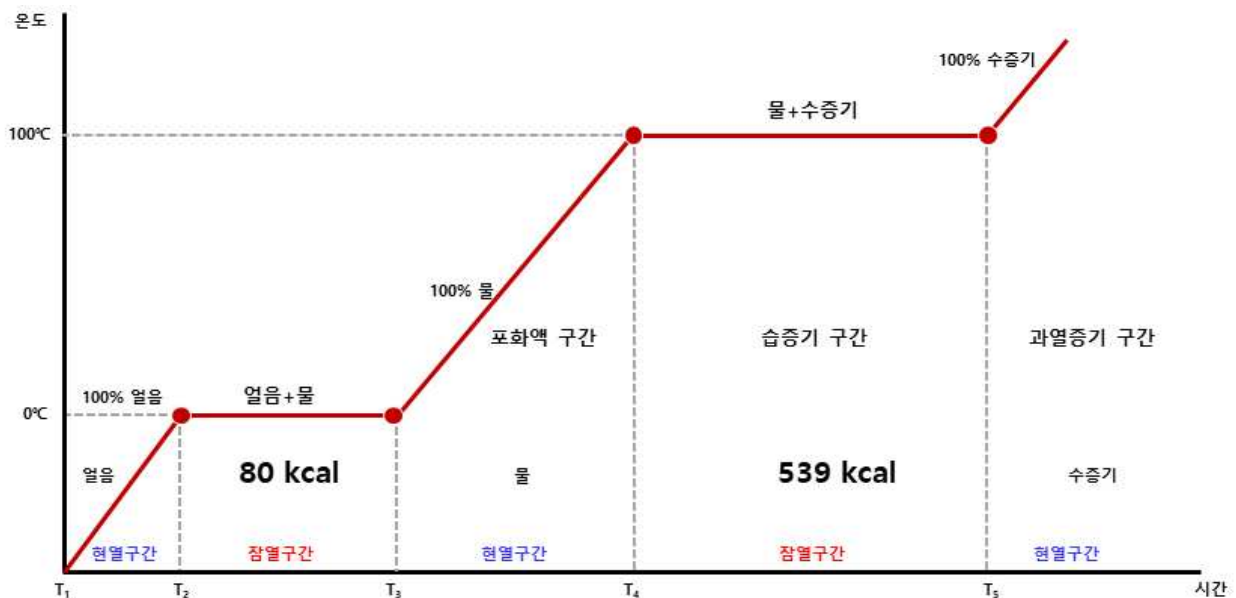


그림 17. 물의 상변화에 따른 현열 및 잠열 구간

- 바이오가스 발전폐열의 열교환 시 순환수의 온도를 60℃ 이상(비응축 구간)으로 유지할 경우, 배가스는 현열만 열교환이 가능하며 이때의 열 회수 효율은 이론적으로 85%를 상회하기 어려움. 반면, 순환수 온도를 60℃ 미만(응축 구간)으로 유지할 경우, 배가스는 현열과 잠열 모두 회수가 가능하여 열 회수효율을 85% 이상 달성이 가능함[8]
- 따라서, 바이오가스 발전폐열을 최대한 회수하기 위하여, 현열뿐만 아니라 잠열의 회수를 통해 열교환 효율을 향상시키는 것이 바람직함

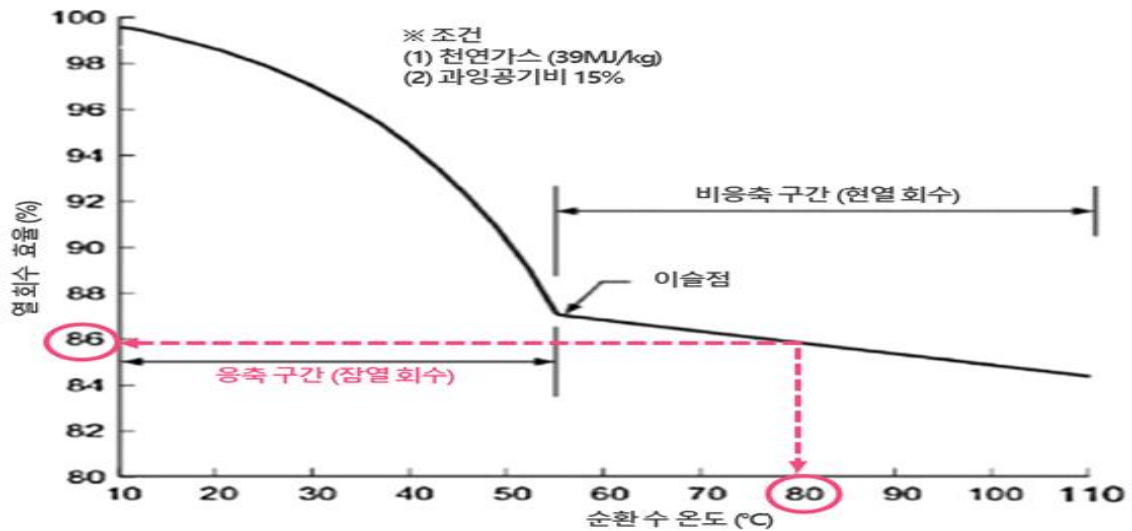


그림 18. 전열교환기의 순환수 온도에 따른 열 회수 효율 변화

- 바이오가스 발전폐열의 전열 회수를 위한 전열교환기는 배가스와 순환수의 접촉 방식에 따라 간접 접촉 열교환기와 직접 접촉 열교환기로 구분

① 간접 접촉 열교환기

- 열교환기란 온도가 다른 두 유체의 열교환을 통해 에너지를 얻는 방법으로 공기조화(공조), 난방, 폐열 회수 등 널리 사용되고 있음
- 열교환기는 기하학적 형태에 따라 원통다관형(Shell & tube), 이중관형(Double pipe type), 평판형(Plate type), 공기냉각형(Air cooler), 가열로형(Fired heater), 코일형(Coil type) 등으로 분류
 - (원통다관형 열교환기) 산업용 열교환기에서 가장 많이 이용되는 형태로서, 원통 내부에 다수의 관이 지나가는 형태로 원통과 관 내 유체의 이동을 통해 간접식 열교환 진행, 한 유체가 관내를 흐르는 동안 다른 유체는 관외 각측을 흐르는 과정에서 열전달
 - (이중관형 열교환기) 지름이 다른 두 개의 동심관으로 구성되며, 각기 다른 유체가 원형부와 이를 둘러싼 환형부 공간을 통과하여 간접 열교환을 진행하게 되고, 교환 효율을 증가시키기 위해 이중관의 유체 흐름을 달리한 평행류(parallel flow), 대향류(counter flow) 형태 존재

- (평판형 열교환기) 케이스, 열교환 소자로 구성되며, plate를 적층하여 열교환 소자로 이용함. 적층 구조로서 제작이 간편하며 plate 사이 유체가 이동할 수 있는 유로가 형성돼 유로를 통해 서로 다른 온도의 유체 이동으로 열교환 발생
- (공기냉각형 열교환기) 주변 공기를 냉각 매체로 사용하여 다수의 냉각핀(cooling fin)에 흐르게 되고, 핀을 관통하는 튜브 내 통과하는 고온의 유체를 냉각 또는 응축시켜 열교환 진행
- (가열로형 열교환기) 액체 또는 기체연료 발전 시 연소에서 발생하는 연소열을 이용하는 열교환기로, 가열로 격벽에 구축된 튜브 내 유체를 통과시켜 연소 시 발생된 열을 간접교환을 통해 회수할 수 있어 가장 큰 열량을 보존하지만 설계가 복잡한 단점을 갖음
- (코일형 열교환기) 코일 형태로 감겨진 유로에 열원을 통과시켜 열교환을 하는 방식으로 코일의 나선상의 간격(공간)이 열을 전달받는 유체의 유로가 되어 주로 탱크나 용기 내 유체를 가열하기 위해 이용함



[원통다관형]



[이중관형]



[판형]



[공기냉각형]



[가열로형]



[코일형]

그림 19. 간접 접촉식 열교환기

- 열교환기는 대부분 간접 열교환으로 유체는 분리된 채 유로로 흐르게 되며 분리된 고체의 벽 내·외부를 통해 열이 전달되게 됨
- 바이오가스 발전 폐열인 배가스를 사용하여 가스-액체 열교환을 진행할 시 표 10에서와 같이 Fan, blower 등을 이용하여 강제 대류 조건에서 총괄 열전달계수는 10~50 kcal/m²·h·°C의 범위를 가질 수 있음

표 12. 유체 상별 열교환 형식에 따른 총괄 열전달계수

열교환 형식	총괄열전달계수U(kcal/m ² ·hr·°C)		액체	장치
	자연 대류	강제 대류		
액체-액체	100-300	700-1,500	물	액체-액체 열교환기
액체-액체	20-50	100-250	기름	액체-액체 열교환기
가스-액체	5-15	10-50	-	공기 냉각기, 절탄기
가스-가스	3-10	10-30	-	수증기 과열기
가스-끓는 액	5-15	10-50	-	보일러

② 직접 접촉 열교환기

- 직접 접촉식 열교환기는 섞이지 않는 두 작동 유체를 직접 접촉을 통해 열교환 시키는 장치로서 고온의 증기, 지하 온천수, 보일러 배기가스 등의 열에너지 전환에 주로 이용되며, 대항류 타입으로 배가스에 물을 분사시켜 열을 교환하는 방식으로 가스 내 수증기(water vapor)까지 회수할 수 있어 현열과 잠열 모두 회수할 수 있는 장점이 있음[9]
- 직접 접촉식 열교환기를 배가스에 적용 시 방출되는 가스 온도를 황이나 질산의 응축점 이하로 낮출 수 있기 때문에 SO_x, NO_x 등 대기오염물질로 방출되는 오염원의 양을 줄일 수 있어 환경 측면에서 이점이 있음[10]

표 13. 전열교환기 접촉 형식에 따른 장·단점

전열교환 형식	장 점	단 점
간접 접촉식	<ul style="list-style-type: none"> 관로가 분리되어 유체의 오염 발생 적음 관로에 흐르는 유체의 유량조절 용이 유체의 상이 변화하여도 접촉 면적이 일정함 	<ul style="list-style-type: none"> 고온의 유체와 저온의 유체 사이의 온도 편차가 적을 시 열전달 속도 감소 유체관로의 열 전달율에 따라 열 교환 효율 편차 큼 열 교환효율 향상을 위해 전열면적 증대 시 설비 규모가 확대 관로 저온부식 방지를 위해 전열관 표면 온도 105~120°C 이상 유지 필요
직접 접촉식	<ul style="list-style-type: none"> 열 전환 효율 증가 대기 오염 방지(SO_x, NO_x, 분진 등) 초기 설비 구축비 저렴(투자 회수 기간 단축) 운전 및 조작용이 전열면적의 다양화 가능 높은 전열계수로 인한 소형화, 경량화 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 저온 부식 가능 제한된 매체에서만 사용 가능 매체 이물질 용해 시 추가 공정 필요

○ Lab/Pilot-scale 전열교환기를 이용한 바이오가스 발전 폐열 전열 회수효율 평가

- 본 연구에서는 바이오가스 발전 폐열 회수 시스템을 구축하기 위하여 직접 접촉 열교환기와 간접 접촉 열교환기를 대상으로 전열교환 효율을 평가함

① 직접 접촉 전열교환기 (세정 흡수탑형)

- 세정 흡수탑형 전열교환기의 바이오가스 발전 폐열 회수율을 산정하기 위해 그림 20과 같이 부피 0.05 m³(∅: 0.2m, H: 1.5m)의 세정 흡수탑, 전열교환수가 순환할 수 있는 0.147 m³(L: 0.7 m, W: 0.7 m, H: 0.3 m), working volume 0.1 m³의 순환조 일체형 반응기를 구성
- 실험 진행 시 반응기 내 열원 유입·배출부와 전열교환수 유입·배출부에 온도 센서를 구축하여 유체 온도 측정을 통해 전열회수율 산정

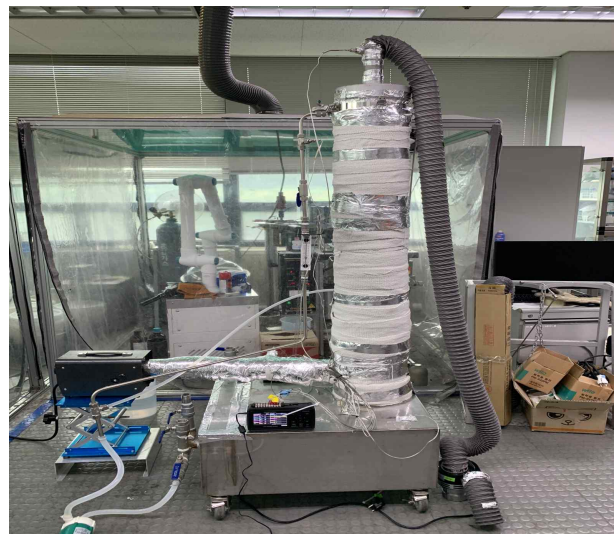
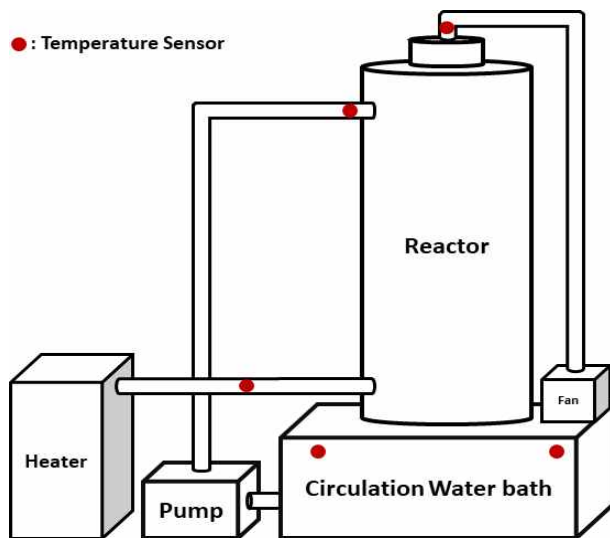


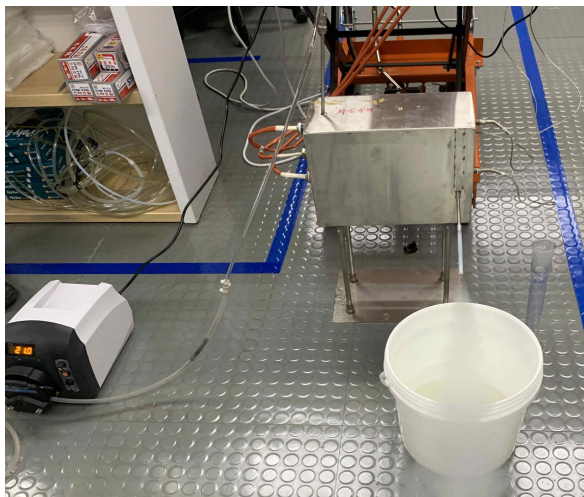
그림 20. Lab-scale 세정 흡수탑형 전열교환기

- 실험실 규모 바이오가스 발전 폐열 전열회수 장치의 구축을 위해 최대 설정온도 600℃의 열풍기(TYWHS2037-U, Teayoung electric heater, Korea)를 이용하여 0.42 CMM의 유량으로 습식 세정탑형 전열 교환장치에 열원을 공급하였으며, 폐열 주입온도 및 배출온도, 전열교환기 저류조 및 순환수 온도는 data logger(GL240, Graphtec, Japan)를 통해 측정
- 바이오가스 발전 엔진에서 발생하는 배가스의 성분은 N₂, H₂O, CO₂, O₂ 순으로 각각 70.2%, 13.3%, 11.1%, 5.3%의 구성비를 가지며, 이를 토대로 배가스의 열원을 실험실 규모로 구현하기 위하여 건공기 내 13.3%의 증기를 주입하여 표 12와 같이 실험실 규모의 배가스를 구현

표 14. 열원 종류별 성상 및 mol 질량

	바이오가스 발전 배가스		건공기(현열)		건공기+스팀(전열)	
	구성비(%)	mol 질량(g/mol)	구성비	mol 질량(g/mol)	구성비	mol 질량(g/mol)
N ₂	70.2	19.66	79.0	22.12	68.5	19.18
H ₂ O	13.3	23.39	-	-	13.3	2.39
CO ₂	11.1	4.88	21.0	6.72	18.2	5.83
O ₂	5.3	1.70	-	-	-	-

- 열원으로 공급되는 증기는 700 W 용량의 카트리지 히터봉을 3단으로 구축 후 H₂O_(aq)를 공급하여 증기로 전환하였으며, 공급 시 그림 21의 산출 근거에 따라 peristaltic pump(BT101S, Leadfluid, China)를 이용하여 50 mL/min의 유속으로 물을 공급, 스팀으로 전환하여 건공기와 혼합 후 열교환 반응기에 투입함



스팀주입량 산출 근거	
열원(건공기) 토출관경:	6.0 cm
토출관 단면적:	28.3 cm ²
열원 유량:	0.42 CMM
현열 질량:	0.47 kg/min
잠열 질량:	0.05 kg/min
전열(열원) 질량:	0.52 kg/min
스팀 주입량(H₂O_(aq)):	0.05 L/min

그림 21. 잠열 적용을 위한 증기 발생기 및 증기 주입량 산출 근거

- 습식 세정탑형 전열교환 시스템의 열 손실은 각각 100, 150, 200℃의 폐열 주입온도에서 순환수를 공급하지 않고 배출되는 배가스 온도를 측정 후, 관계식을 이용하여 최대 600℃에서의 열 손실을 산출

표 15. Lab-scale 세정 흡수탑형 전열교환기 자체 열 손실율

	설정온도(℃)	반응기 내 유입온도(℃)	반응기 후단 배출온도(℃)	열손실율(%)
실측	100	84.5	52.7	37.57
	150	121.4	68.9	43.29
	200	158.8	84.3	46.93
예측	300	233.1	115.9	50.26
	400	307.4	147.5	52.03
	500	381.8	179.0	53.11
	600	456.1	210.6	53.83

*방출온도: $y=0.7435x + 10.044$

*배출온도: $y=0.4243x + 17.041$

- Lab-scale 세정 흡수탑형 전열교환기는 주입되는 폐열 온도가 100℃에서 600℃로 상승할수록 열 손실이 37.57%에서 53.83%까지 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 기보유한 실험실 규모 습식 세정탑이 열 회수 목적으로 제작되지 않았기 때문에, 단열재를 보강하였음에도 불구하고 실증 규모의 단열을 구현하기는 어려웠기 때문으로 판단됨
- 따라서, 2단계 과제 수행 시 SUS304, FRP 등의 재료를 선정 및 추가적인 단열재를 보강하여, 단열 성능이 향상된 반응기 구축을 통해 열 손실의 개선 필요
- 열교환이 진행됨에 따라 저류조 온도가 배가스의 이슬점(50~60℃) 이상으로 상승하여 배출구에서 스팀이 발생하게 되며, 배가스 내 스팀 발생량은 순환조의 부피 변화를 기준으로 식 (4)와 같이 산출

$$\text{증발열량}(kcal) = [\{1 kcal/kg \cdot ^\circ C \times (W \cdot V_1 - W \cdot V_2)\} \times \{100^\circ C - Gas\ out(^{\circ}C)\}] + \{(W \cdot V_1 - W \cdot V_2) \times 540 kcal/kg\} \quad (4)$$

여기서, $W \cdot V_1 = T$ 시간에서 저류조의 부피 (L)

$W \cdot V_2 =$ 저류조의 초기 부피 (L)

540 kcal/kg = 물의 증발잠열

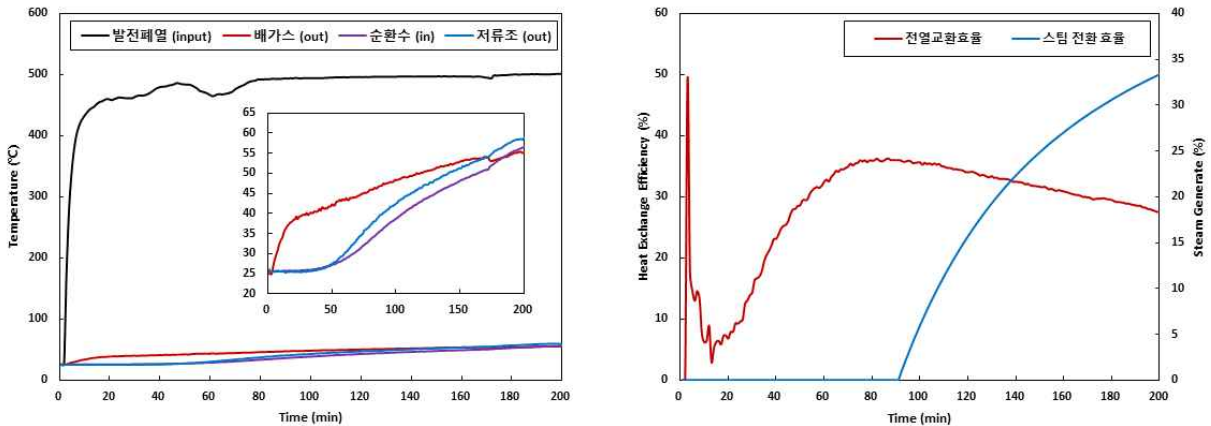


그림 22. 세정 흡수탑형 전열교환 실험 결과

- 배가스에서 스팀이 배출되는 시점에서부터 전열교환 효율은 감소하기 시작하며, 스팀 발생량이 증가함에 따라 열교환 효율은 지속적으로 감소하는 경향을 보임. 이는 주입되는 열원이 반응기에서 충분히 열 교환되지 못하고 스팀으로 직접 배출됨에 따른 것으로 판단됨
- 따라서, 습식 세정탑형 전열교환기 상부에 데미스터(mist eliminator)를 설치하여, 운전 동안 발생하는 스팀이 배가스와 함께 배출되는 것을 최대한 억제하였으며, 저류조에 저장된 공정수를 외부 냉각기로 순환하여 열 교환수를 냉각 후 습식 세정탑형 반응기 상부에 설치된 노즐로 직접 공급하는 연속운전 방식을 통해 스팀 발생 감소 및 열교환 효율 향상을 모색
- 저류조에 저장된 열 교환수는 5 L 용량의 냉각장치(RW3, lab companion, Korea) 2기를 직렬 연결하여 전열 교환수를 냉각하였으며, 냉각 후 재유입되는 열 교환수의 온도는 본 연구에서 기획한 바와 같이 시설온실 및 주민시설에 열을 공급하고 다시 전열교환 장치로 회수되는 온도(약 40℃)가 되도록 설정



냉각관 필요량 산출			
길이:	500.0 mm	냉각전:	62.2 °C
둘레:	120.0 mm	냉각후:	47.0 °C
직경:	38.2 mm	유량:	1.3 L/min
부피:	572.957.8 mm ³	열량(동력):	19.8 kcal/min
	573.0 mL	1kcal/min:	69.7 W
부피(내관 제외):	375.0 mL	A=Q/U·ΔTm	
내관 부피:	198.0 mL	A: 전열면적(m ²)	
내관직경:	22.5 mm	Q: 전열교환 열량(W)	
냉각면적:	17,633.8 mm ²	U: 총괄전열계수(W/m ² ·°C)	
	176.3 cm ²	Tm: 평균온도차(°C)	
냉각관 개수:	3	U: 1,713.6	
실험 냉각면적:	529.0 cm ²		
		40°C 필요열량:	33.3 kcal/min
		필요 냉각면적:	0.1 m ²
			610.4 cm ²
		필요 냉각관 개수:	4 개

그림 23. 습식 세정탑형 전열교환기 저류조 냉각 및 연속운전을 위한 시스템 구성

- 세정 흡수탑형 전열교환기의 열회수효율 및 전열 교환수의 열교환 온도를 산출하기 위하여 실제 바이오가스 발전기의 배가스 온도를 가정하여 500°C 및 150°C의 열원을 주입하여 연속 실험을 진행
- 저류조(100 L) 내 열 교환수는 정량펌프(PM-015NM, Wilo, Korea)를 이용하여 1.5 L/min 유량으로 전열교환기 외부에 설치된 냉각관으로 이송되며, 약 30~40°C의 온도로 냉각된 후 전열교환기 상부에 설치된 순환 노즐에 액기비(L/G) 3.54의 비율로 재공급하여 배가스의 전열 교환 수행
- 열교환 및 전열 회수효율은 아래 식 5와 같이 배가스의 투입 열량(gas_{in}-gas_{out}) 대비 회수(water_{out}-water_{in}) 열량을 기준으로 산정

$$\text{효율}(\%) = \frac{\{Water_o(°C) - Water_i(°C)\} \times 1.00 \text{ kcal/kg} \cdot °C \times 1.5 \text{ kg/min}}{\{Gas_i(°C) - Gas_o(°C)\} \times 0.24 \text{ kcal/kg} \cdot °C \times 0.55 \text{ kg/min}} \times 100 \quad (5)$$

여기서, 1.0 kcal/kg·°C = 물의 비열
 0.55 kg = 유입 가스 질량
 0.24 kcal/kg·°C = 유입 가스 비열

- 초기 운전 시 열풍기의 토출 온도와 저류조 온도의 안정화를 위하여, 순환수의 냉각 없이 회분식 운전을 수행. 열풍기의 토출 온도는 150°C 열원 공급 시 운전 시작 약 27분 후 150°C(± 10°C) 열원이 안정적으로 공급되었으며, 500°C 열원 공급 시 약 71분 후 500°C(± 10°C)의 열원이 안정적으로 공급됨
- 저류조의 온도는 150°C, 500°C 열원 사용 운전 모두 실험 진행 195분을 기점으로 평형을 나타냈으며, 150°C의 경우 32°C(± 1°C), 500°C의 경우 60°C(± 1°C)의 온도에서 열적 평형을 나타냄
- 이에 따라, 운전 시작 205분 시점부터 저류조의 물을 전열교환기 외부에 설치된 냉각관을 통하여 냉각 후 전열교환기 순환수 노즐에 재공급하는 연속운전을 수행하였으며, 전열교환 효율은 연속운전 시 데이터를 이용하여 산출

- 연속운전은 저류조의 용량(100 L)을 기준으로 3 HRT(300 L)를 공급하는 500분간 수행되었으며, 150℃ 운전 시 32℃의 저류조 내 열 교환수는 24℃까지 냉각한 후 재순환, 500℃ 운전 시 60℃의 저류조 내 열 교환수는 40℃까지 냉각한 후 습식 세정탑형 열교환기에 재공급
- 냉각된 열교환수가 재순환됨에 따라, 저류조의 온도(Water_{out})는 150℃ 열원의 경우 46℃에서 평형상태를 나타냈으며, 이때 배출되는 배가스(Gas_{out}) 온도는 30℃를 유지하였고, 500℃ 열원 사용 시 56℃에서 저류조의 열적평형이 나타났으며 열교환 후 배출되는 배가스(Gas_{out}) 온도는 51℃를 유지함

표 16. Lab-scale 세정 흡수탑형 전열교환기 실험 결과

열원	항목	단위	결과
150℃	총 투입에너지 (gas)	kcal	4,342.3
	총 회수에너지 (aqueous)	kcal	3,630.8
	투입 대비 에너지 회수율	%	83.6
500℃	총 투입에너지 (gas)	kcal	8,253.9
	총 회수에너지 (aqueous)	kcal	6,264.6
	투입 대비 에너지 회수율	%	75.9

- 500℃ 열원을 사용한 전열교환 실험은 총 투입에너지 8,253.9 kcal, 총 회수에너지 6,264.6 kcal로 에너지 회수율(전열 회수율)은 75.9%를 나타냄
- 150℃ 열원을 사용한 전열교환 실험은 총 투입에너지 4,342.3 kcal, 총 회수에너지 3,630.8 kcal로 에너지 회수율(전열 회수율)은 83.6%를 나타냄
- 에너지 회수율 측면에서 저온(150℃)의 바이오가스 발전 폐열로부터 전열 회수를 수행하는 것은 본 연구과제에서 목표하였던 전열 회수 효율 80% 이상의 달성이 가능하나, 실제 배출되는 전열 교환수의 낮은 열 품질로 인하여 시설 온실 및 주민시설에서의 활용이 어려울 것으로 판단됨
- 반면, 500℃ 배가스 열원의 전열 교환 시 본 연구과제에서 목표하였던 전열 회수 효율인 80%에 다소 못 미칠 수 있으나, 전열 교환 및 엔진열 회수를 통해 75℃ 이상의 온수를 확보하는 것이 가능하여 시설 온실 및 주민시설에서의 활용 가치가 높음. 따라서, 향후 실증 연구에서는 500℃의 바이오가스 발전 폐열을 직접 열 교환하는 것이 유리할 것으로 판단됨
- 500℃ 배가스 열원에서 상대적으로 낮은 전열 교환 효율은 실험실 규모 습식 세정탑형 전열 교환장치의 높은 방열 손실(약 53%)에 의한 것으로 판단되며, 향후 반응기의 스케일업을 위한 설계에서는 반응기의 방열 손실 보완 및 배가스의 체류시간 증가를 통해 열교환 효율을 향상하는 연구가 필요함

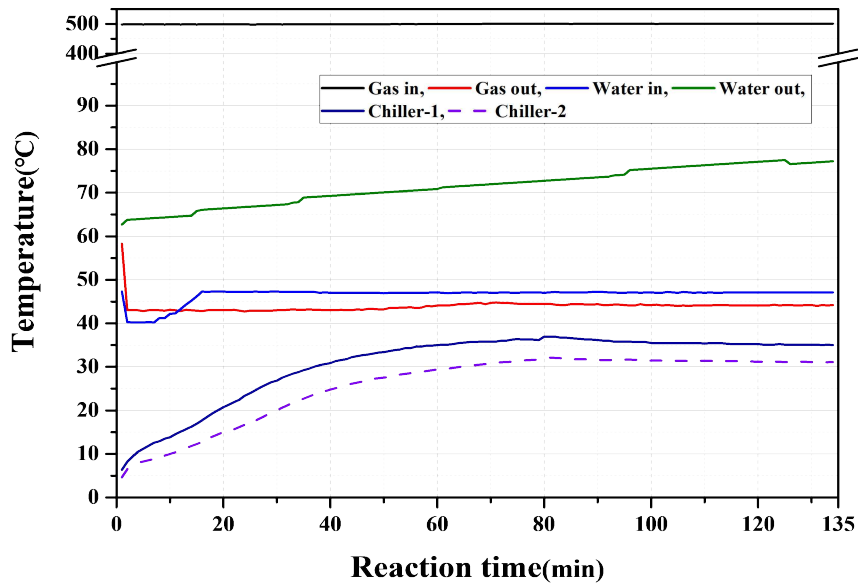
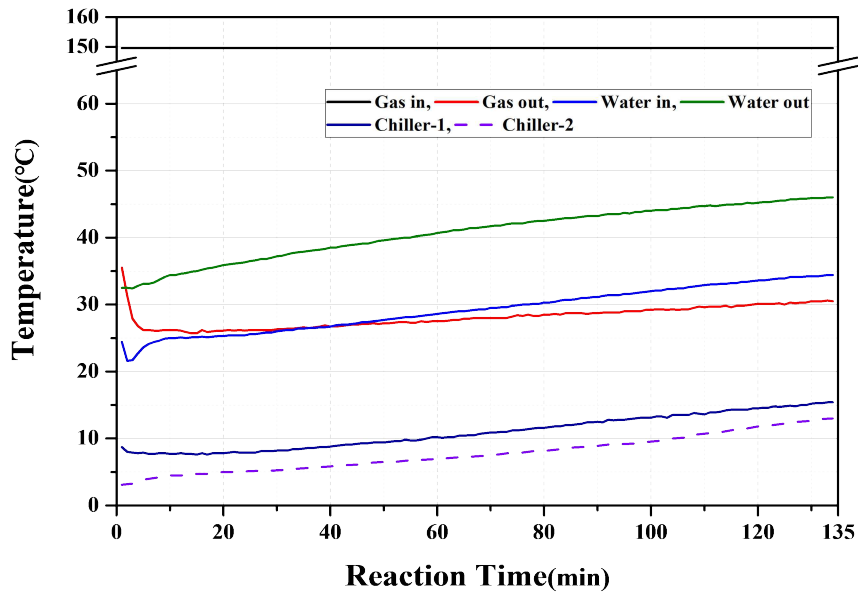


그림 24. 세정 흡수탑형 전열교환기 연속운전 실험 결과

② 간접 접촉 전열교환기 (디스크 회전형)

- 디스크 회전형 전열교환기는 회전하는 열교환 소자를 통해 고온 및 저온의 유체가 대향류 흐름으로 투입되어 회전하는 디스크를 통해 열교환이 진행되며, 배가스 내 잠열 회수율을 최대화하기 위해 고온의 유체가 흐르는 관로에 공정수와 외기를 함께 투입
- 전열교환기 내 디스크의 면적이 전열 교환 면적으로 작용하기 때문에 열교환 유체 흐름(유량)과 함께 디스크의 열전도율, 면적, 회전수(rpm) 등이 전열 교환 효율에 큰 영향을 미침



[전열교환기 내 디스크]

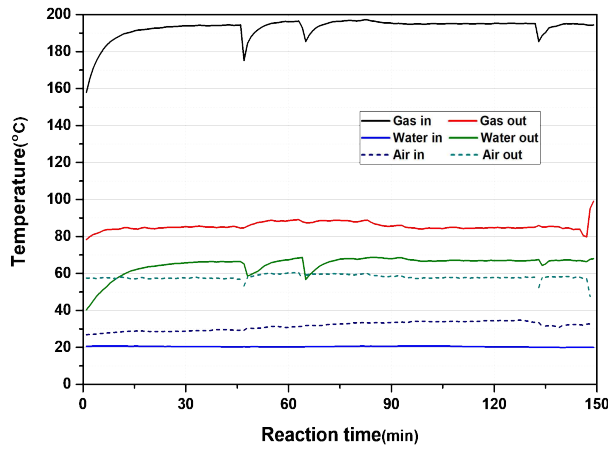
[전열교환기 외관]

그림 25. 디스크 회전형 전열교환기 (Pilot-scale)

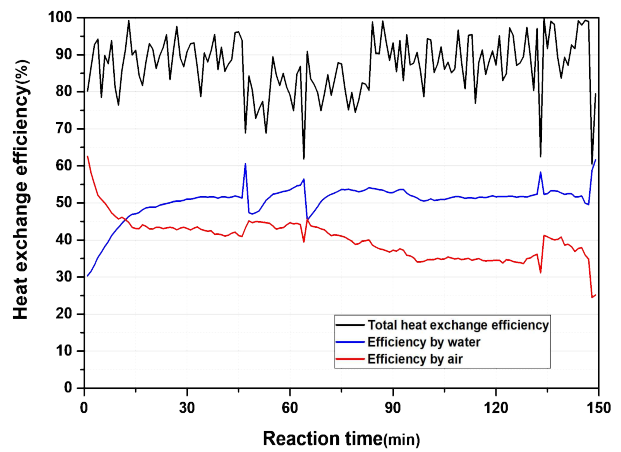
- 바이오가스 발전 폐열 재이용 시 전열교환기 비교 선정을 위해 디스크 회전형 전열교환기의 전열교환 효율을 산정하였으며, 전열 효율은 천안시 사업장폐기물 소각시설에 기설치되어 있는 pilot plant 규모(∅: 600 mm, 60T, STS304)의 전열교환 시스템 데이터 분석을 통해 산출
- 디스크 회전형 전열교환기의 폐열 회수 시 고정식 모터 이용 20 rpm으로 디스크를 회전 시켰으며, 열원은 150-180℃의 배가스(33.9 kg/min)를 공급하였고, 전열교환의 효율을 증대시키기 위해 배가스 유입부 내 노즐 4개를 구축하여 16 L/min의 물 분사를 동시 진행
- 디스크 회전형 전열교환기의 경우 습식 세정탑형 전열교환기와 달리 외기(68.3 kg/min)의 유입이 추가되기 때문에, 식 6과 같이 외기의 전열교환 에너지를 추가하여 전열교환기 효율을 산출

$$\text{효율(\%)} = \left[\frac{\{F_{CWS,CWR} \times 1 \text{ kcal/h} \cdot \text{°C} \times \Delta T(T_{CWA} - T_{CWR})\}}{\{F_{RA,EA} \times 0.297 \text{ kcal/h} \cdot \text{°C} \times \Delta T(T_{EA} - T_{RA})\}} + \frac{F_{OA,SA} \times 0.24 \text{ kcal/h} \cdot \text{°C} \times \Delta T(T_{EA} - T_{SA})}{\{F_{RA,EA} \times 0.297 \text{ kcal/h} \cdot \text{°C} \times \Delta T(T_{EA} - T_{RA})\}} \right] \times 100 \quad (6)$$

여기서, $F_{RA,EA}$ = 배가스 유량 (m³/hr)
 $F_{OA,RA}$ = 외기 유량 (m³/hr)
 $F_{CWS,CWR}$ = 공정수 유량 (m³/hr)
 $\Delta T_{EA,RA}$ = 배가스 온도차 (°C)
 $\Delta T_{EA,SA}$ = 외기 온도차 (°C)
 $\Delta T_{OWA,OWR}$ = 공정수 온도차 (°C)



[전열교환 결과]



[전열교환 효율]

그림 26. 디스크 회전형 전열교환기의 열교환 결과 및 효율

- 현장에 설치된 디스크 회전형 전열교환기의 경우 193°C(±5°C)의 배가스를 사용하여 전열교환을 진행하며 65°C(±5°C)의 전열교환수와 57°C(±5°C)의 열교환 공기를 얻음
- 열교환 효율은 90%(±10%)를 나타냈는데, 공정수와 외기의 평균 열회수효율 분석 시 공정수 50.74%, 외기 40.07%를 나타냄

표 17. 디스크 회전형 전열교환기의 전열교환 효율

항목	단위	결과
총 투입에너지 (gas)	Mcal	160.7
총 회수에너지 (aqueous)	Mcal	146.0
투입 대비 에너지 회수율	%	90.81
공정수 회수 에너지 (aqueous)	Mcal	81.5
공정수 에너지 회수율	%	50.74
외기(air) 회수 에너지 (gas)	Mcal	64.4
외기(air) 에너지 회수율	%	40.07

- 공정수의 전열 회수율은 lab-scale의 500°C 배가스 사용 회수율 46.32% 대비 약 4.42% 높은 결과를 알 수 있었으며, 이는 디스크 회전형 전열교환기의 경우 공정수 노즐 외 디스크 소자에서 회수된 잠열이 추가되어 더 높은 전열 회수율을 나타냈다 판단됨
- 세정 흡수탑형 전열교환기의 열 손실 외 전열면적을 증가시킬 시 디스크 회전형 전열교환기의 열회수율 이상의 효율을 기대할 수 있음
- Lab-scale의 세정 흡수탑형 전열교환기의 경우 스파이럴 노즐이 구축되어 직경 2.4 mm으로 열 교환수가 분사되는데, 이때 열교환 면적은 약 3.7 m²으로 산출됨

- 그림 27과 같이 세정 흡수탑형 전열교환기 노즐에서 분사되는 열교환수의 입자의 직경이 작아질수록 열교환 면적은 반비례하여 크게 증가하게 되므로 전열교환 효율을 증대시키기 위해 추가적으로 열 교환수의 전열면적에 따른 전열교환을 산출이 필요함

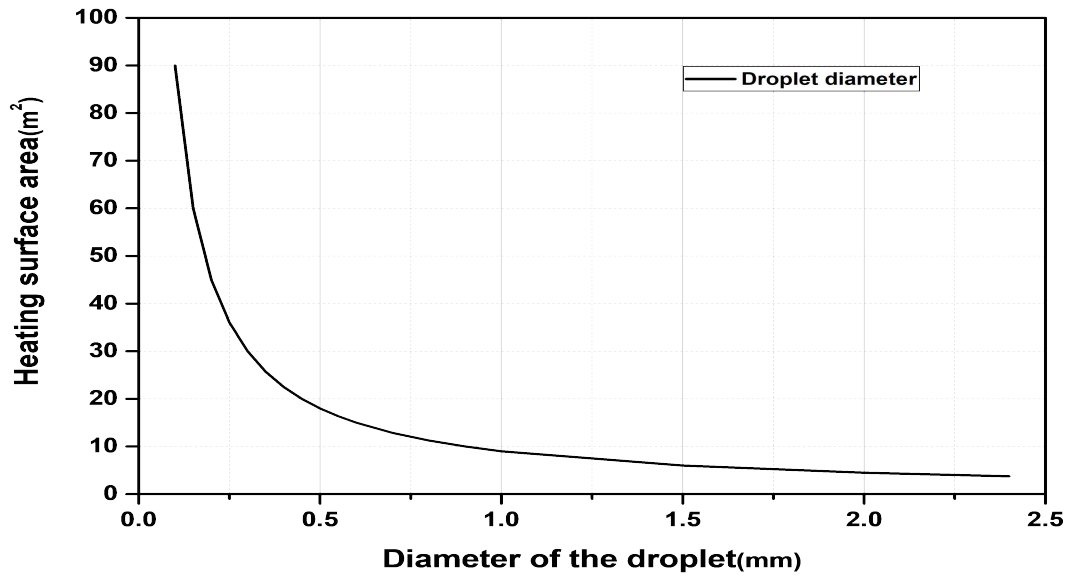


그림 27. 열교환수 분사 직경과 전열면적의 상관관계

- 2단계 과제 수행을 통해 lab-scale 반응기의 세정 흡수탑형 전열교환기의 열 손실 보완, 열 교환수 노즐 변경에 따른 전열면적 산출, 반응기 내 액/기체 비율에 따른 전열교환 효율을 산출하고자 함
- 2단계 과제 수행 시 스팀 활용 Lab-scale 반응기 주입 배가스 내 습공기(잠열) 비율에 따른 전열교환 효율을 도출하고자 하며, 본 과제의 성공적인 수행을 위해 바이오가스 발전 폐열 (배가스) 성상과 동일한 습공기로부터 반응기 내 배가스의 최적 EBCT(empty bed contact time)을 도출, pilot plant 설계 인자 및 운전 인자를 확립하고자 함

○ Lab-scale 전열교환기를 이용한 바이오가스 발전 폐열 전열 회수 전산 해석

- 본 연구에서 수행된 세정 흡수탑형 전열교환기의 상세 설계를 위하여 Lab-scale 반응기의 열전달 속도 및 압력 변화에 대한 전산 해석을 수행함
- 전산해석을 위한 lab-scale 반응기는 상기 실험과 동일하게 100 L (700×300×200)의 저류조와 47 L (φ100×1500)의 흡수탑으로 구성되며, 내부에 충전층(Porous zone)을 포함
- 반응기로 유입되는 배가스는 500℃, 25 m³/hr로 CO₂ 11.1%, H₂O 13.3%, O₂ 5.3%, N₂ 70.2%의 구성비를 가정하였으며, 열교환을 위한 순환 냉각수의 유량은 90 L/hr를 가정함

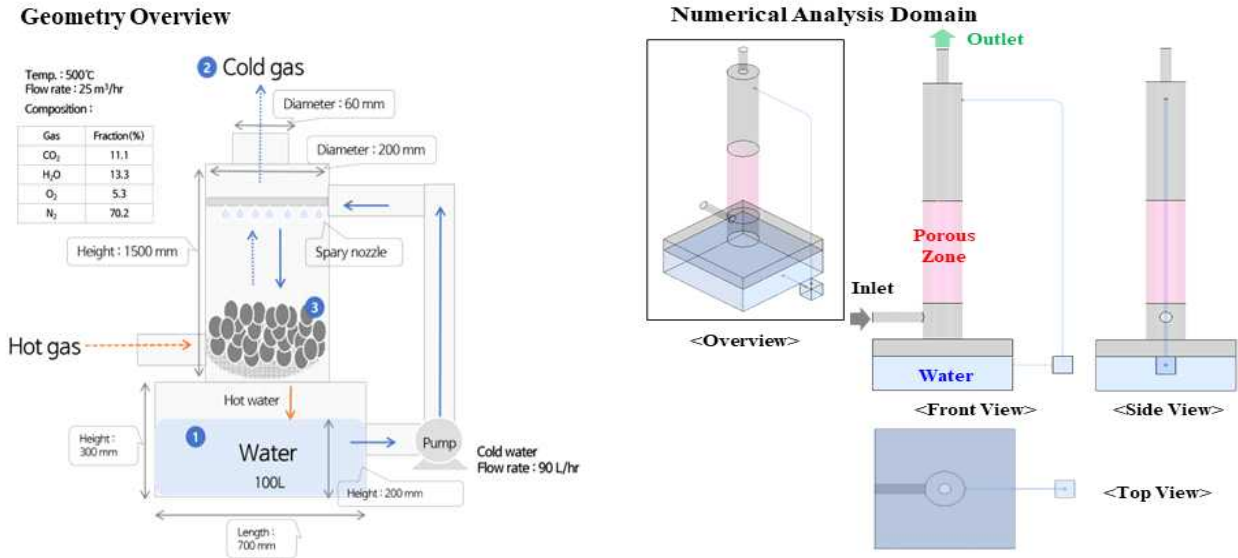


그림 28. 전산 해석을 위한 Lab-scale 세정 흡수탑형 전열교환기 구성

- 전열교환 반응의 전산 해석을 위한 지배 방정식을 다음 식(7)~(11)에 제시하였으며, 경계 조건과 배가스의 물성을 표 16과 17에 제시함

$$\text{Mass conversion Equation: } \frac{\sigma_{\rho}}{\sigma_t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (7)$$

$$\text{Momentum conversion Equation: } \frac{\sigma(\sigma \vec{u})}{\sigma_t} + \nabla \cdot (\sigma \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (u \nabla \vec{u}) + S_u \quad (8)$$

$$\text{Transport Equation for K: } \frac{\sigma(\rho k)}{\sigma_t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{u}) = \nabla \cdot (\Gamma_k \nabla \vec{u}) + G_k - Y_k + S_k \quad (9)$$

$$\text{Transport Equation for } \omega: \frac{\sigma(\sigma \omega)}{\sigma_t} + \nabla \cdot (\rho \omega \vec{u}) = \nabla \cdot (\Gamma_{\omega} \nabla \vec{u}) + G_{\omega} - Y_{\omega} + D_{\omega} + S_{\omega} \quad (10)$$

$$\text{Energy Equation: } \frac{\sigma(\rho C_p T)}{\sigma_t} + \nabla \cdot (\rho C_p T \vec{u}) = -\nabla \cdot (k \nabla T) \quad (11)$$

표 18. 전산 해석을 위한 경계 조건

Boundary	Condition		Value	Unit
Inlet	Velocity Inlet	Velocity	2.46 (25)	m/s (CMH)
		Temperature	500	℃
Outlet	Pressure Outlet	Gauge Pressure	0	Pa

표 19. 전산 해석을 위한 배가스 물성

1 atm, 293 K	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
Density (kg/m ³)	1.66	0.68	1.06	1.21
Viscosity (kg/m·s, 10 ⁻⁵)	1.61	1.08	1.87	2.19
Thermal Conductivity (W/m·K)	0.019	0.020	0.027	0.029
Specific Heat (J/kg·K)	867	1,874	1,042	922
Mass Fraction (-)	0.0368	0.1008	0.7286	0.1247

- 세정 흡수탑 내부에 설치된 충전층에 의한 압력 변화는 다음 식에 의해 산정됨

$$\text{Ergun Equation: } \frac{dP}{dL} = \frac{150\mu(1-\Phi^2)}{\theta^2 D^2 \Phi^3} \nu + \frac{1.75\rho(1-\Phi)}{\theta \cdot D \cdot \Phi^3} \nu^2 \quad (12)$$

$$\text{Fluent Equation: } \frac{dP}{dL} = R_\nu \mu \nu + R_i \frac{\rho}{2} \nu^2 \quad (13)$$

$$\therefore R_\nu = \frac{150(1-\Phi)^2}{\theta^2 D^2 \Phi^3}, R_i = \frac{2 \times 1.75(1-\Phi)}{\theta \cdot D \cdot \Phi^3} \quad (14)$$

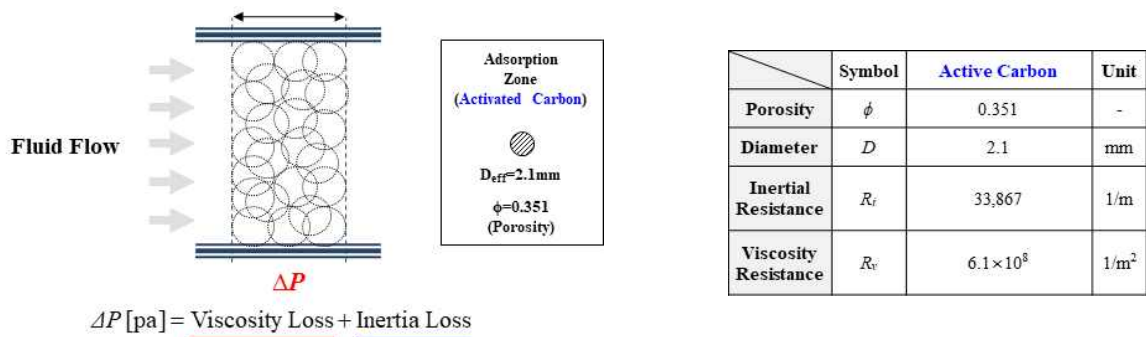


그림 29. 세정 흡수탑형 전열교환기 충전층의 경계 조건

- 상기 제시된 경계 조건을 바탕으로 전산 해석 수행 결과, 세정 흡수탑형 전열교환기 내 배가스의 압력 및 온도 변화는 주입부에서 1,986 Pa, 500℃로 유입되며, 충전층을 통과함에 따라 0 Pa, 230℃의 범위로 배출, 저류조의 수온은 약 60℃로 유지됨
- 전산 해석 결과에서 배출가스 온도가 실험 결과 대비 높은 것은 전산 해석 시 반응기의 방열 손실(약 53%)이 고려되지 않았기 때문으로 판단되며, 향후 실증시설의 전열교환기 제작 시 방열 손실을 최소화하는 방안과 함께 배가스의 체류시간을 증가하여 배출가스 온도를 낮추기 위한 구조변경이 요구됨

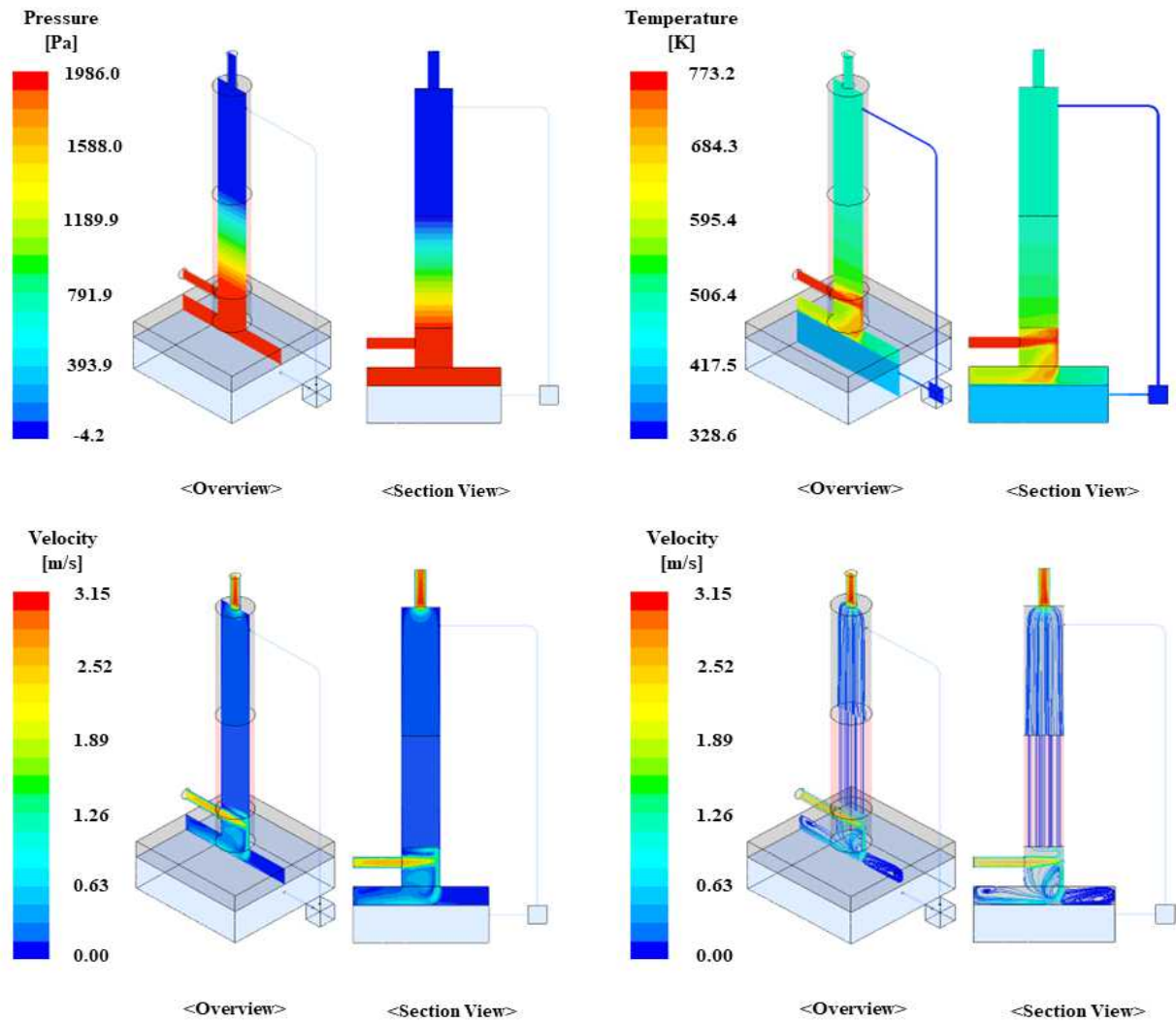


그림 30. 세정 흡수탑형 전열교환기 전산 해석 결과

3) 바이오가스 발전 폐열 활용 수분 흡착식 냉방 시스템 적용 타당성 검토

□ 바이오가스 발전 폐열 활용 수분 흡착식 냉방 시스템 적용 타당성 검토

- 바이오가스 발전을 통해 발생된 폐열 에너지를 활용하여 흡착식 냉방 시스템 구동 가능성과 흡착식 냉방 시스템의 요구되는 냉방 출력 성능 조건 및 유망 흡착제 검토
- 주관연구기관(고등기술연구원)에서 정읍시에 소재한 친환경대형그린(주) 가축분뇨 기반 바이오가스 플랜트를 통해 배출되는 미활용 폐열 에너지양을 산출, 전체 엔진 폐열원의 18% 정도를 활용하는 조건에서 흡착식 냉방 시스템 구동 사이클의 탈착 열원으로 활용하기 위한 온도 조건을 80℃로 설정하여 공급 유체 유량 및 공급 유체의 에너지를 산출 (13.0 Gcal/d 및 4,745 Gcal/y 이상)
- 시설하우스 (0.5 ha) 기준 냉방에 필요한 냉방 에너지 요구량은 48.8 Gcal/y이고 냉방 에너지 수요가 가장 많은 6~7월 기준 냉방 에너지 수요량 (23.3 Gcal/m)을 기준으로 상용 흡착식 냉방기의 평균적인 COP (0.3 ~ 0.5)를 고려할 때 흡착식 냉방장치 구동에 필요한 재생 에너지는 요구량은 2.48 ~ 4.14 Gcal/d 수준으로 확인되었음. 따라서, 폐열 회수를 통해 공급되는 폐열의 에너지는 흡착식 냉방장치 구동에 필요한 재생에너지 열원으로 활용 가능

표 20. 바이오가스 발전 공정 후처리 공정 조건별 에너지 회수 용량

		단위	Case I	Case II
공급 에너지	배가스 전열 교환수	(m ³ /d)	74.3	46.0
		(Mcal/d)	2,225.1	922.5
	엔진 열 교환수	(m ³ /d)	55.7	94.0
		(Mcal/d)	2,568.4	4,335.1
	총공급 에너지	(m ³ /d)	138.1	174.5
		(Mcal/d)	4,793.5	5,257.6
(Gcal/yr)		1,749.6	1,919.0	

□ MOF 수분 흡착제 활용 흡착식 냉방 응용 기술을 위한 기술 개발 수준

- 국내에서는 폐열을 활용한 흡착식 냉방 시스템 개발과 관련하여 한국기계연구원 (이공훈 박사), 한국생산기술연구원 (권오경 박사), 세종대학교 (정재동 교수), 전북대학교(박찬우 교수) 및 삼중테크가 흡착식 냉방 시스템 개발을 위한 연구과제를 수행하고 있으며, 삼중테크에서는 개발 기술에 대한 기술이전을 완료하여 흡착식 냉방 시스템을 상용화하기 위한 최종 연구를 진행하고 있음. 흡착식 냉방을 위한 흡착제로 MOF 수분 흡착제를 적용하였으며, AI계 MOF를 적용하여 대량생산 기술, 코팅 기술 개발을 통한 열교환기 제조 기술의 국산화를 위한 연구를 통해 70kW급 하이브리드 흡착식 냉방 시스템 개발을 진행중 (TRL-4 단계 진행중).
- MOF를 활용한 흡착식 냉방 시스템 연구는 독일의 Fraunhofer 연구소와 Kiel univ, TU univ.를 중심으로 MOF 수분 흡착제 발굴 및 합성 기술 개발과 더불어 소재 대량 합성 연구 및 코팅 기술, 성형 기술을 비롯하여 흡착식 냉방 시스템 개발을 통해 상용화를 위한 기반 기술을 확보하고자 연구를 진행하고 있음.

- 그 밖에 주요 연구기관으로는 이탈리아의 ITEA 연구소, 미국의 UC Berkeley univ. Northwestern univ. 등 해외 연구소 및 대학에서 성능이 향상된 신규 MOF 수분 흡착제 개발을 위한 연구가 지속되고 있음.
- MOF 수분 흡착제로 활용이 가능한 다양한 구조의 흡착제가 보고되었으나, 현재까지 상용화를 위한 저가형 MOF 흡착제의 수는 제한적이며, 신규 MOF 소재의 수분 흡착 특성에 초점을 둔 물질 중심적 연구 개발이 지속되고 있는 상황임 (TRL-3).
- MOF가 적용된 수분 흡착식 냉방 상용화를 위한 연구는 산업계보다는 국내 또는 국외 연구기관에서 주로 수행하고 있어 소재 중심적인 개발과 전통적인 소재(실리카겔, 제올라이트, LiCl가 결합된 흡착제)에 대한 흡착식 냉방 시스템 개발이 개별적으로 진행되는 상황임.
- MOF 수분 흡착제가 적용된 흡착식 냉방 시스템의 상용화를 위한 기술적 제한은 MOF 수분 흡착제의 대량생산 기술과 흡착제 자체의 가격에 대한 낮은 경쟁력과 시스템화를 위한 제품화 기술(성형 및 코팅 등 복합화 기술)의 부재가 있음.

□ 흡착식 냉방 시스템의 요구 성능 검토(냉방 출력 요구 조건)

- 흡착식 냉방 시스템의 출력은 흡착식 냉방 시스템의 구동 조건 및 흡착제의 흡착 용량, 흡착 속도 등에 다양한 변수에 의해 영향을 받음. 흡착식 냉방 시스템의 냉방 성능에 핵심적인 영향을 미치는 인자로는 흡착식 냉방 시스템의 구동 조건인 증발기 온도(T_{ev}), 흡착온도(T_{ads}), 응축기 온도(T_{con}) 및 (T_{des})에서 흡착 장치에 적용된 수분 흡착제의 수분 흡착 용량과 흡착 속도가 매우 밀접한 관련이 있으며 회수되는 열량을 소재의 냉방 에너지 용량 (Q_{ev})로 정의됨. Q_{ev} 의 경우 흡착 소재의 수분 흡착-탈착 사이클 용량 (ΔW) \times 수분 증발열 (ΔH_{ev} , $\sim 2,489$ kJ/kg)에 해당하는 에너지로 소재의 수분 흡착 용량이 클수록 흡착 시스템의 냉방 출력 향상 가능성이 큼
- 이와 더불어 흡착 소재의 흡착 속도 특성과 열교환기 시스템 구성, 배치, 흡착제 적용 방법에 따라서 수분 흡착 속도가 흡착 시스템 냉방 출력의 변수로 작용하여 냉방 출력 (cooling power)에 많은 영향 줌. 따라서, 시스템 냉방 출력 향상을 위해서는 흡착 용량 높고 및 흡착 속도가 빠른 흡착제의 개발 또는 선정이 중요하며 수분 흡착제의 열교환기 적용에 대한 다양한 변수를 고려해야 함

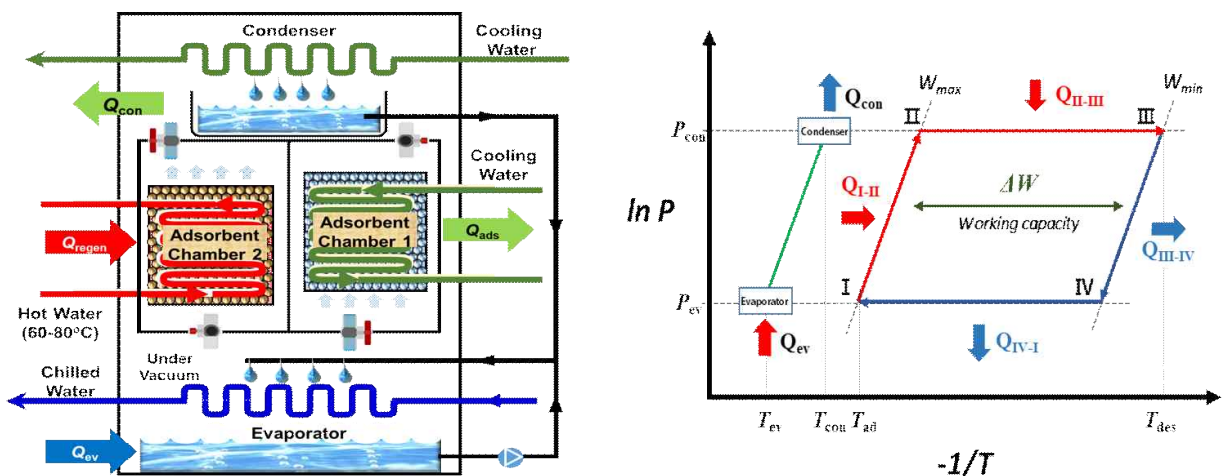


그림 31. 흡착식 냉방 시스템의 장치 구성도 및 흡착-탈착 사이클에 의한 열역학 사이클

- 시설 온실 적용을 위해 냉방 수요가 가장 많은 6~7월 기준의 냉방 에너지 수요량 (23.3 Gcal/m)을 기준으로 냉방 출력 요구량을 도출하였음. 본 연구과제의 최종 목표인 흡착제 단위 무게당 냉방 용량 (SCP, kW/kg)을 1.0으로 고려했을 경우 흡착제 적용량은 60 kg 이상으로 예측

표 21. 시설하우스 (0.5 ha) 적용을 위한 흡착식 냉방 출력 요구량

흡착식 냉동기 소비전력		
출력	최대부하	30 kW
		0.0258 Gcal
에너지 요구량	열에너지	60 kW
COP		0.5
SCP		1.0 kW/kg
흡착제 요구량		60 kg 이상

- 흡착식 냉방 시스템의 냉방 출력 향상을 위해 요구되는 수분 흡착제의 성능 지표인 흡착제의 흡착 용량 및 흡착 속도를 변수로 고려하여 SCP 값을 예측하고자 하였으며, 수분 흡착제의 요구 성능을 도출하고자 하였음. 증발기 (5~15℃), 흡착온도 (30~35℃), 응축기 (30~35℃), 재생 온도(80℃)로 시스템 운전조건을 고정하고 적용 대상의 수분 흡착제의 흡착 용량 및 흡착 속도에 따른 SCP_{max} 값을 예측한 결과 수분 흡착 사이클에서 유효 수분 흡착 용량 0.15g/g인 경우 흡착 속도 300초 이하로 흡착이 이뤄져야 SCP_{max} 값이 1.0 kW/kg 이상의 냉방 용량을 나타낼 수 있음. 흡착 속도 300초 기준 유효 수분 흡착 용량 0.2 g/g 이상일 경우 1.64 kW/kg 이상의 냉방 용량을 나타내는 것을 확인
- 80℃도 이하의 저온 재생형 수분 흡착제의 표면 특성을 고려할 경우 일반적인 흡착 속도는 300초 이상 내지 800초 이내에서 이뤄지며, 흡착 용량이 클수록 흡착 속도가 상대적으로 느린 경향을 보임. 따라서 흡착식 냉방 사이클의 흡착-탈착 시 흡착제의 유효 수분 흡착 용량이 0.3 g/g 이상이거나 0.3 g/g 이하의 수분 흡착 용량을 갖는 흡착제의 경우 흡착 속도가 600초 이하여야 SCP_{max} 1.0 kW/kg 이상을 달성할 수 있을 것으로 판단됨

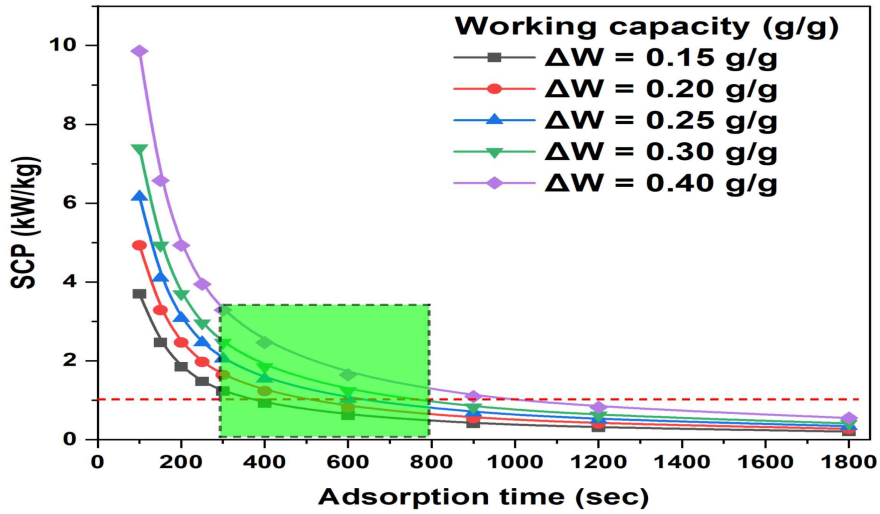


그림 32. 수분 흡착제의 흡착 용량 및 흡착 속도에 따른 SCP값의 상관관계

- 흡착식 냉방 시스템에 적용 예정인 흡착 용량이 동일한 시료 ($W_{max}=0.35 \text{ g/g}$)를 기반으로 흡착 시간 (τ , Characteristic time) 따른 수분 흡착 패턴을 예측하여 수분 흡착 커브를 계산 하였으며 수분 흡착제의 흡착 시간에 따른 흡착 커브는 식 15와 같이 표현됨

$$W(t)/W_{max} = 1 - \exp(-t/\tau) \quad (15)$$

- 흡착 속도가 상이한 흡착제를 기준으로 흡착 커브를 통해 SCP 값을 예측할 수 있으며 해당 커브와 수식을 통해 SPC 값의 결정되며 흡착식 냉방 시스템의 사이클 운전조건인 흡착-탈착 시간의 주기에 따라서 SPC 값을 도출할 수 있음. 표 19의 조건을 기준으로 흡착 용량이 동일한 모델 수분 흡착제 1~5를 기준으로 흡착 속도에 차이를 동적 수분 흡착 커브를 계산

표 22. 흡착제 성능별 동적 수분 흡착 곡선 기반 SCP 값 도출 결과

수분 흡착제	W_{max}	Characteristic time (τ)	$t_{30\%}$	$t_{60\%}$	$t_{80\%}$	SCP_{max}	$SCP_{30\%}$	$SCP_{60\%}$	$SCP_{80\%}$
흡착제 1	0.35	100 s	36	92	161	8.63	7.19	2.81	1.61
흡착제 2	0.35	200 s	72	184	322	4.31	3.60	1.41	0.80
흡착제 3	0.35	300 s	107	275	483	2.88	2.42	0.94	0.54
흡착제 4	0.35	450 s	161	413	725	1.92	1.61	0.63	0.36
흡착제 5	0.35	600 s	214	549	966	1.44	1.21	0.47	0.27

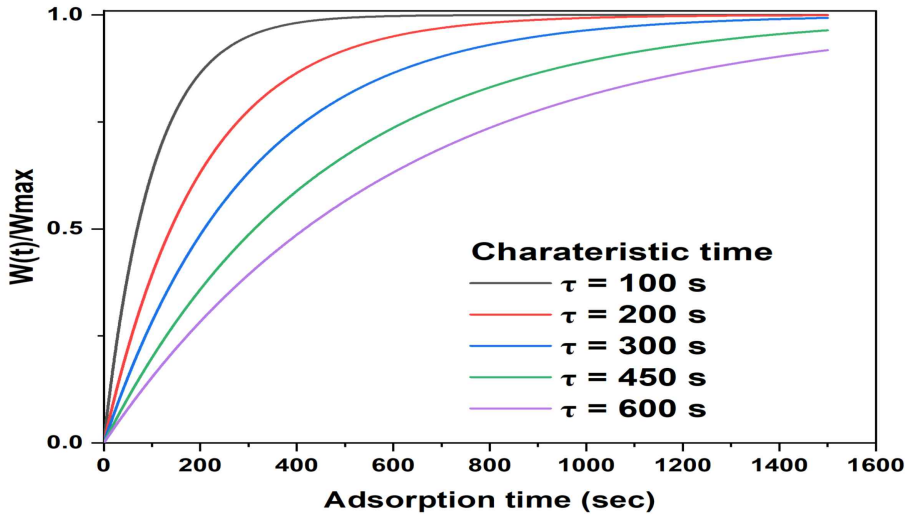


그림 33. 흡착 속도에 차이를 갖는 모델 흡착제의 동적 수분 흡착 곡선

- 모델 흡착제 1~5의 수분 흡착 시스템 구동 조건에 따라서 흡착제 고유의 최대 수분 흡착 용량 대비 수분 흡착률의 차이가 발생하고 이에 따른 흡착률에 따른 SCP 값을 계산한 결과 흡착 속도(Characteristic time 기준)가 가장 빠른 흡착제 1의 경우 흡착제의 흡착률에 따른 SCP 값이 1.6 kW/kg 이상 달성 가능한 것으로 확인되었음. 한편, 흡착 속도가 상대적으로 느린 흡착제 4~5의 경우 흡착률 30% 조건에서 SCP 값이 1.0 kW/kg 이상으로 나타났지만, 더 높은 흡착률에서는 1.0 kW/kg 이하로 관찰
- 흡착식 냉방 시스템 구동을 위한 흡착-재생 사이클 조건을 고려하여 흡착 시간을 300s 및 600초 조건에서 characteristic time 값이 상이한 모델 흡착제 1~5의 SCP 값을 계산하였고, 해당 모델 흡착제 1~5의 경우 흡착 시간 300초 기준 1.13 kW/kg 이상의 SCP 값을 달성 가능함. 한편, 흡착 시간을 600초로 늘릴 경우 SCP 값이 급격히 감소하는 경향이 관찰

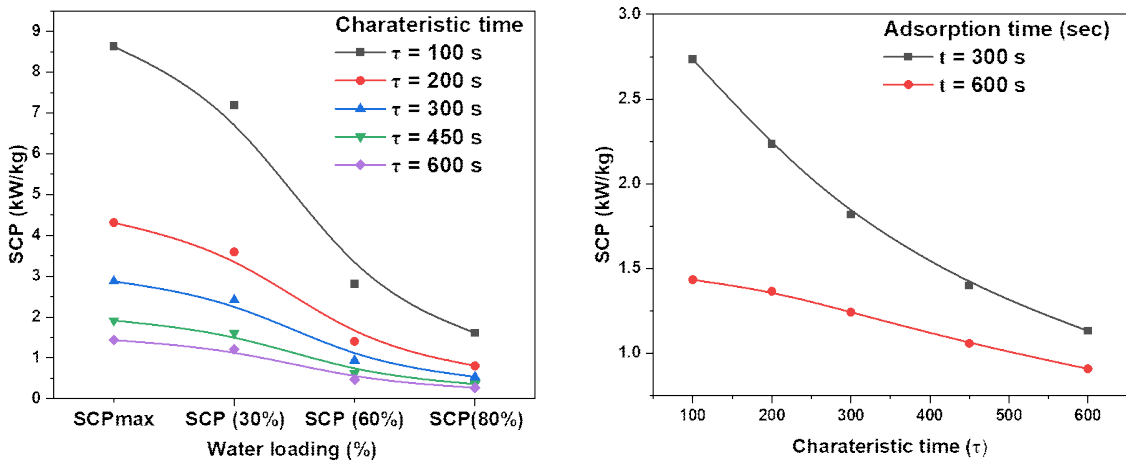


그림 34. 흡착 속도 차이를 갖는 모델 흡착제의 흡착률 및 흡착 시간에 따른 SCP 값의 변화

- 결과적으로 흡착 용량이 높은 흡착제를 개발 및 선정하더라도 SCP_{max} 또는 SCP 값이 저하 될 수 있으므로 흡착 속도가 확보된 흡착제를 선정해야 하므로 후보 선정을 위한 동적 수분 흡착 평가가 수반되어야 할 것으로 판단됨

- 일반적으로 저온 재생형 수분 흡착제의 동적 수분 흡착 곡선의 Characteristic time이 300초 이상인 점과 시스템의 사이클 시간이 600초 미만인 점을 고려하면 연구개발 목표에 부합하는 흡착제를 개발할 경우 도출 가능한 SCP 값은 최대 1.2~1.8 kW/kg으로 판단됨
- 또한, 흡착제 고유 특성 (흡착 용량 및 흡착 속도)에 의한 SCP 값의 경우 흡착식 냉방 시스템 적용을 위한 모듈화 과정 및 냉방 시스템의 구조적인 열 손실 및 열전달 문제 등에 의해 저하가 발생할 수 있으므로 시스템에 의한 냉방 출력 저하를 예측하여 수분 흡착제를 선정하고 시스템 구성을 최적화해야 할 것으로 판단됨

4) 흡착식 냉방 시스템 핵심 소재 요구 성능 검토 및 수분 흡착제 후보군 도출

☐ 수분 흡착제 후보군 도출

- 수분 흡착제 후보군 도출을 위해 저온 재생 가능성과 흡착식 냉방 시스템 구동 조건 (T_{ev} , T_{ads} , T_{con} , T_{des})에 따른 시스템 내부 챔버의 수분 증기압을 고려하여 구동 조건별 흡착제의 수분 흡착 특성 가이드를 계산
- 흡착식 냉방 시스템의 냉각 온도 조건을 고려하여 수분 흡착제의 유효 흡착량이 관찰되어야 하는 $P/P_0(ads)$ 과 탈착 시 유효 탈착량과 연관된 $P/P_0(des)$ 을 도출한 결과, 흡착부 온도 30~35℃를 고려할 때 수분 흡착제는 $P/P_0 < 0.2$ 이하에서 높은 수분 흡착 용량을 나타내야 증발기 냉각 온도를 10℃ 이하로 냉각시킬 수 있음. 또한, 흡착이 완료된 수분 흡착제의 탈착 시 탈착 온도 70~80℃ 적용을 고려할 경우, 10℃ 이하의 냉각을 위해서는 수분 흡착제가 $P/P_0 = 0.09$ 이하에서 수분 흡착이 용량이 최소화 되어야 함

표 23. 흡착식 냉방시스템의 증발기/흡착/응축기/탈착 온도조건에 따른 흡착제 평형 흡착 특성

냉방 시스템 조건	T_{ev}	T_{ad}	T_{con}	T_{des}	P_{ev}	P_{ad}	P_{con}	P_{des}	$P/P_0(ads)$	$P/P_0(des)$
구동조건 1	5	30	30	80	0.866	4.232	4.232	47.27	0.20	0.09
구동조건 2	10	30	30	80	1.221	4.232	4.232	47.27	0.29	0.09
구동조건 3	15	30	30	80	1.698	4.232	4.232	47.27	0.40	0.09
구동조건 4	5	30	30	70	0.866	4.232	4.232	31.09	0.20	0.14
구동조건 5	10	30	30	70	1.221	4.232	4.232	31.09	0.29	0.14
구동조건 6	15	30	30	70	1.698	4.232	4.232	31.09	0.40	0.14
구동조건 7	5	35	35	80	0.866	5.609	5.609	47.27	0.15	0.12
구동조건 8	10	35	35	80	1.221	5.609	5.609	47.27	0.22	0.12
구동조건 9	15	35	35	80	1.698	5.609	5.609	47.27	0.30	0.12
구동조건 10	5	35	35	70	0.866	5.609	5.609	31.09	0.15	0.18
구동조건 11	10	35	35	70	1.221	5.609	5.609	31.09	0.22	0.18
구동조건 12	15	35	35	70	1.698	5.609	5.609	31.09	0.30	0.18

- 그림 35에 제시된 수분 흡착 등온선의 패턴은 흡착식 냉방 시스템의 흡착 및 탈착에 관여하는 상대압력 구동 영역인 $P/P_0 = 0.1 \sim 0.3$ 영역에서 계단형 또는 S-형 형태로 높은 수분 흡착 용량 (0.3 g/g) 이상을 나타내는 것이 바람직할 것으로 예측됨. 제시된 상대 습도 영역에서 흡착제 중량 또는 부피 대비 흡착량이 0.35 g/g 또는 0.35 g/mL 이상의 흡착량을 갖는다면 흡착 소재 고유의 냉방 성능 계수 COP > 0.7 이상을 달성할 수 있을 것으로 판단되며, 흡착-탈착 사이클에서 유효 수분 흡착 용량은 0.3 g/mL 이상 달성 가능할 것으로 판단됨

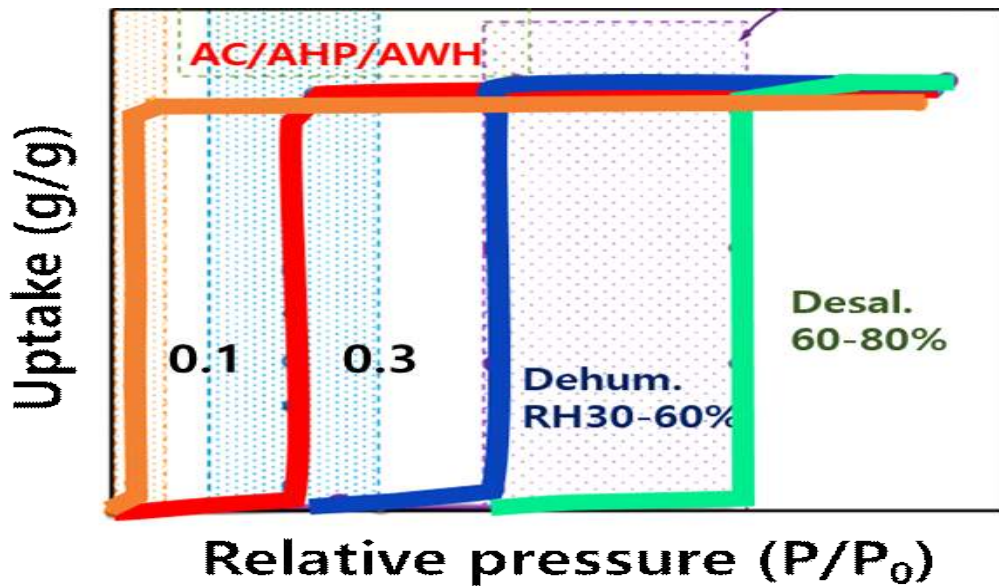


그림 35. 수분 흡착제의 응용 별 이상적인 수분 흡착 등온선의 범위

- 이에 따라, 흡착식 냉방 적용을 위한 수분 흡착제 도출을 위해 저온 재생 가능성이 있는 SAPOs (Silicoaluminophosphates) 또는 AIPOs (Aluminophosphates) 계열의 다공성 무기물 소재를 파악하기 위해 기존에 보고된 문헌 조사를 수행
- SAPO-34의 경우 제올라이트 대비 흡착 에너지가 낮아 재생 열원을 활용한 히트펌프 또는 흡착식 냉방 응용에 활용이 가능한 흡착제로 알려져 있으나, 본 연구과제에서 적용하고자 하는 폐열원의 온도 (70~80°C) 영역에서 COP 값이 0.6 ~ 0.7을 나타내지만, 재생성이 낮아 유효 수분 흡착 용량이 0.3 g/mL 이하를 나타냄[11]
- AIPOs 계열의 흡착제는 상대적으로 표면에 산점이 분포가 낮아 수분 흡착 세기가 SAPO 계열의 물질보다 낮은 것으로 보고되었으나 구조적 특성 세공 구조 등의 영향에 의해 수분 흡착 등온선 패턴이 구조별 상이하게 관찰되었음 (그림 36)[12,13]
- AIPOs 계열의 수분 흡착제 중에서 AIPO-5, AIPO-11, AIPO-17 및 AIPO-20 흡착제의 경우 수분 흡착 패턴이 계단형 형태의 등온선을 나타내지만, 탈착 시 비가역적 탈착 곡선인 히스테리시스(hysteresis)의 탈착 등온선을 보였음. 이는 흡착-탈착 과정에서 흡착된 수분이 탈착되지 않고 흡착제 기공 내에 강하게 흡착되는 것을 의미하므로 흡착식 냉방 응용에서 재생 에너지 증가와 흡착-탈착 횟수 증가에 의한 흡착 용량 저하를 일으킬 수 있음을 의미함[14]

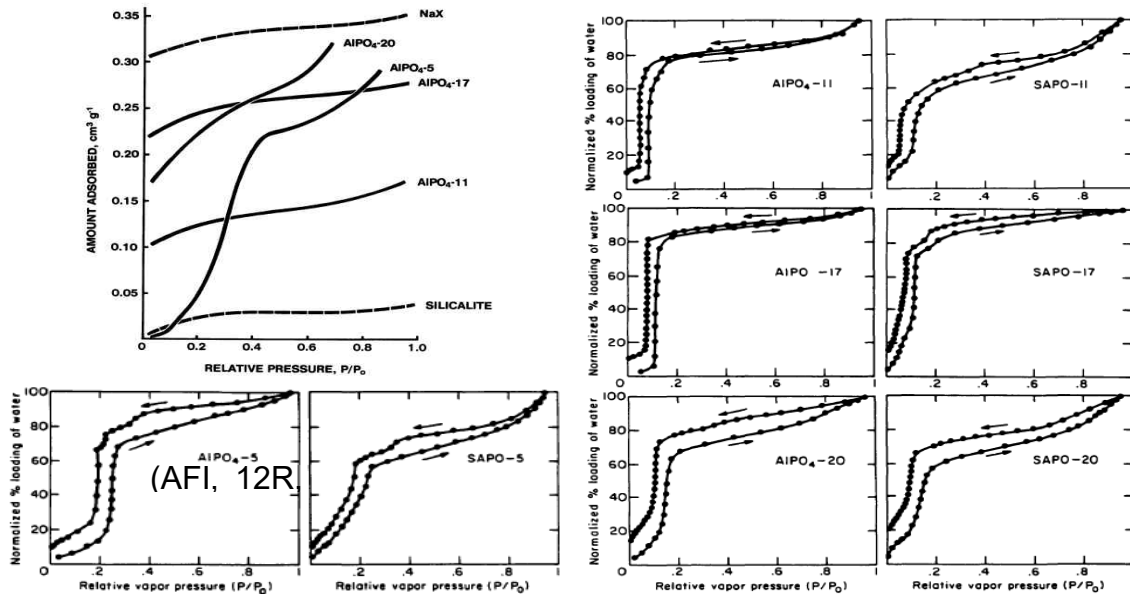


그림 36. AIPO 및 SAPO 계열 흡착제의 구조별 수분 흡착 등온선 패턴

- 최근에는 AIPO 구조 중 AIPO-42 (또는 AIPO-LTA)로 명명되는 수분 흡착제가 개발되었으며 흡착식 냉방 적용을 위한 흡착제 냉방 성능 평가가 보고되었음[15]
- 해당 흡착제의 경우 $P/P_0=0.1\sim0.2$ 영역에서 0.35 g/g 이상의 흡착 용량을 나타내며, $T_{ev}=5^\circ\text{C}$ 및 $T_{ad}=30^\circ\text{C}$ 조건에서 냉방 에너지 용량 (Q_{ev}) 값이 350 Wh/m^3 이상을 나타내어 수분 흡착식 냉방을 위한 소재로 활용하기에 우수한 특성을 나타냄 (그림 37)
- 하지만, 합성 조건에 HF를 사용하고 합성 온도가 190°C 로 높은 단점과 현재까지 개발된 흡착제 합성을 위한 전구체 가격이 $844,202\$/\text{kg}$ 으로 대량 합성 및 상업적 이용을 위해 흡착제 생산을 위한 합성법 개량이 필요함

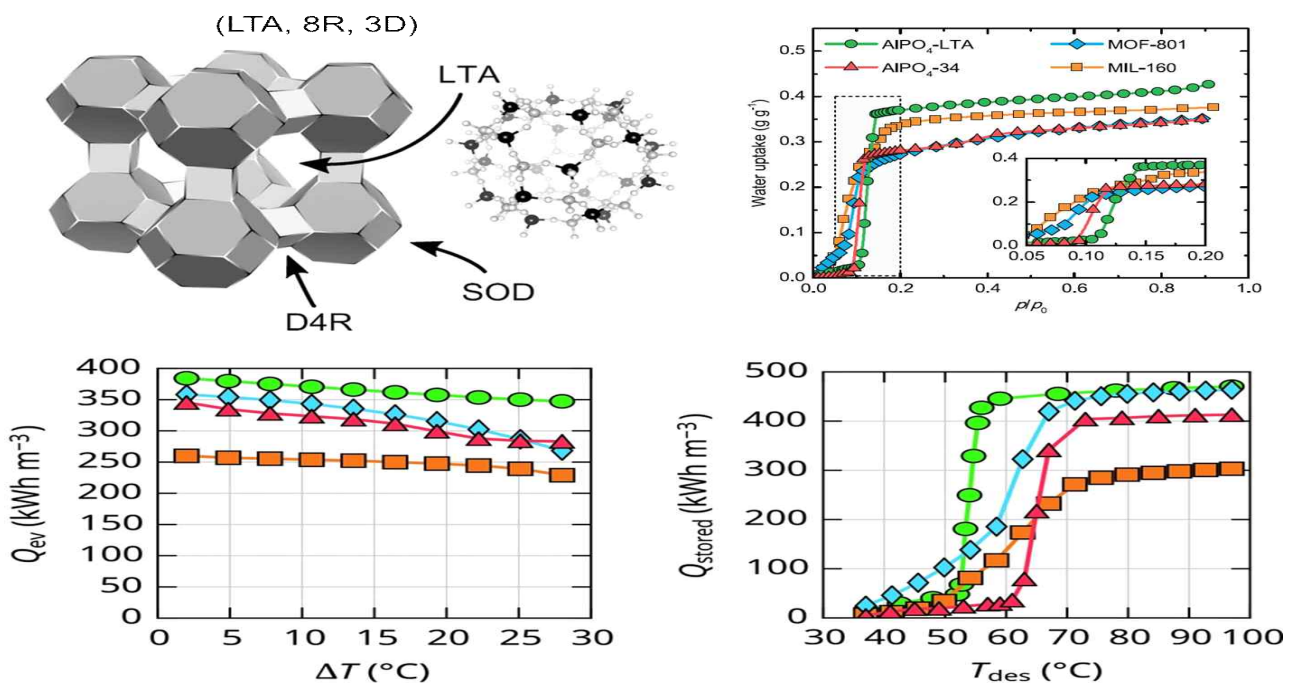


그림 37. AIPO-42 (AIPO-LTA) 흡착제의 흡착식 냉방 성능 결과

- SAPO 계열의 물질 중 EMM-8 흡착제에 대한 수분 흡착 응용에 관한 연구 논문이 보고되었음[16]. EMM-8 흡착제의 경우 기존 AIPO-42 흡착제에 비해 흡착 용량이 낮지만, 70°C 미만의 온도에서 재생이 용이하여 0.84 수준의 COP를 나타내며 $P/P_0=0.1\sim 0.2$ 영역에서 0.4 g/mL 이상의 흡착 용량을 나타내어 흡착식 냉방 적용에 우수한 성능을 나타냄. 해당 물질의 원료 단가는 123\$/kg으로 상대적으로 저렴하여 HF를 배제한 합성법을 통해 EMM-8구조의 흡착제를 대량 생산할 수 있다면 실제 흡착식 냉방장치 적용이 가능할 것으로 판단됨

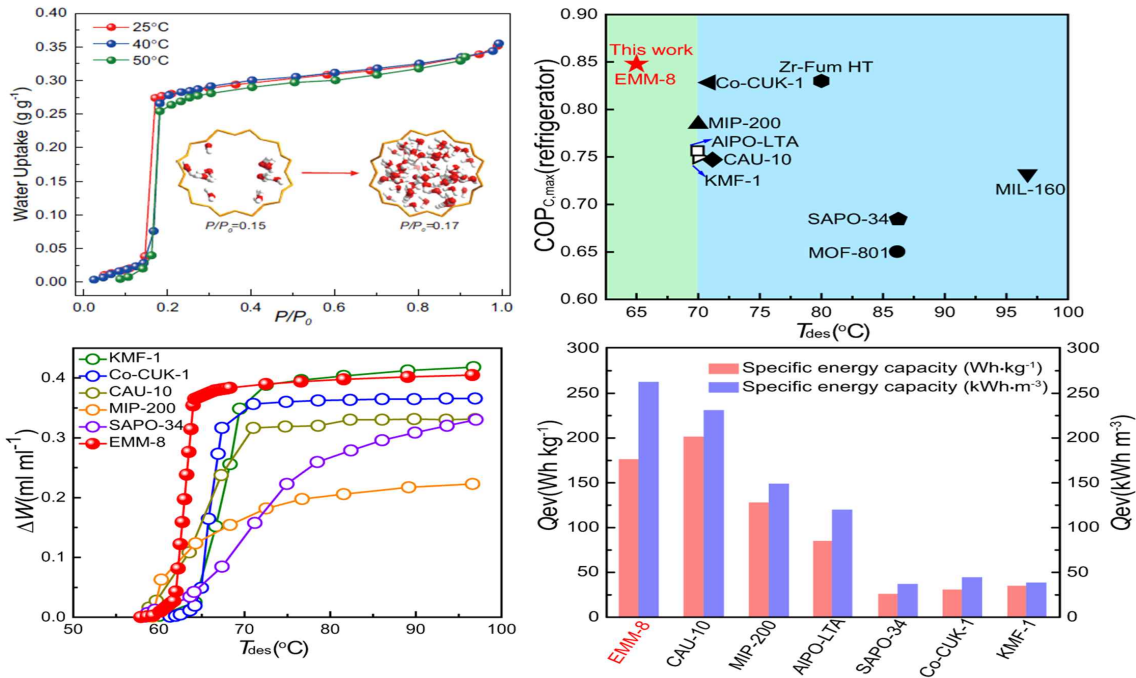


그림 38. SAPO 계열 EMM-8 구조 수분 흡착제의 흡착식 냉방 성능 평가

- 최근 보고된 AIPO 및 SAPO 계열의 수분 흡착제 이외에 유사 성능의 수분 흡착 특성을 갖는 대상 후보 AIPO계열 흡착제를 발굴 가능성을 확인하기 위해 국제제올라이트 협회(IZA)에 보고된 AIPO 구조 데이터베이스를 활용하여, AIPO 구조의 활용 가능성을 파악함. (<http://www.iza-structure.org/databases/>) 그 결과, 데이터베이스에 알려진 AIPO 구조의 종류는 총 40개의 구조로 파악되었으며, 수분 흡착 응용을 위해 연구가 진행된 구조 또는 흡착식 냉방 응용에 적합하지 않은 구조 등이 파악
- AIPO 후보군 도출을 위해 수분 흡착제로 보고된 구조를 배제하였고, 흡착 용량을 고려하여 1차원 세공 구조를 갖는 AIPO 구조와 기공률 12% 이하의 AIPO 구조를 배제하였다. 그 결과 AIPO-30, AIPO-52, AIPO-35 및 STA-2 4종의 구조가 수분 흡착 응용 연구가 진행되지 않은 것으로 파악됨

표 24. 국제 제올라이트 협회에 보고된 AIPO 구조 데이터베이스

Entry	코드명	물질명	Ring size	기공 형태 (차원)	기공크기 (Å)	기공률 (%)
1	AEI	AIPO-18	8	3	3.84	17.31
2	AEL	AIPO-11	10	1	4.63	6.77
3	AEN	AIPO-53	8	2	3.38	4.02
4	AET	AIPO-8	14	1	7.59	12.88
5	AFI	AIPO-5	12	1	7.42	14.07
6	AFN	AIPO-14	8	3	2.85	7.82
7	AFO	AIPO-41	10	1	5.07	7.23
8	AFR	AIPO-40	12	2	6.97	19.62
9	AFT	AIPO-52	8	3	3.68	17.28
10	AHT	AIPO-H2	10	1	2.75	0
11	ANA	AIPO-24	8	3	2.43	0
12	ANO	AIPO-91	8	2	3.26	12.41
13	APC	AIPO-C	8	2	3.16	4.8
14	APD	AIPO-D	8	2	3.63	5.73
15	AST	AIPO-16	6	0	1.91	0
16	ATO	AIPO-31	12	1	5.49	6.93
17	ATS	AIPO-36	12	1	6.82	15.64
18	ATT	AIPO-33	8	2	3.79	9.18
19	ATV	AIPO-25	8	1	3.48	3.92
20	AVE	AIPO-78	8	2	3.26	12.39
21	AWO	AIPO-21	8	2	3.67	5.35
22	AWW	AIPO-22	8	1	4.17	12.04
23	BCT	Metavariscite	8	1	2.91	0.45
24	CHA	AIPO-34	8	3	3.72	17.27
25	ERI	AIPO-17	8	3	3.42	15.1
26	EZT	EMM-3	12	1	6.13	13.14
27	GIS	[Al-P-O]-GIS	8	3	3.32	9.38
28	LEV	AIPO-35	8	2	3.53	14.32
29	LTA	AIPO-LTA (AIPO-42)	8	3	4.21	21.43
30	MSO	Mu-13	6	0	2.09	0
31	OSI	UiO-6	12	1	6.28	9.6
32	PON	IST-1	10	1	4.3	7.04
33	POR	PST-14	8	3	3.74	10.36
34	PSI	PST-6	10	1	4.85	3.84
35	SAF	STA-15	12	1	6.19	9.86
36	SAT	STA-2	8	3	3.25	13.02
37	SFO	SSZ-51 (EMM-8)	12	2	6.95	19.57
38	SOD	AIPO-20	6	0	2.53	0
39	VFI	VPI-5	18	1	11.39	25.4
40	ZON	UiO-7	8	2	3.52	8.07

수분 흡착 보고 (O)
 수분 흡착 보고 (O) 또는 조건 미충족
 수분 흡착 보고 (X) 및 조건 미충족
 수분 흡착 보고 (X) 및 조건 충족

- 수분 흡착제로 보고된 AIPO 구조의 종류에 따른 기공 크기에 따른 주요 수분 흡착 상대 습도 영역 (P/P_0) 영역과 AIPO 구조의 기공률에 따른 흡착 용량에 대한 상관관계를 조사하여 기공 크기와 기공률에 의한 수분 흡착 특성에 대한 성능 예측을 진행함. 기공 크기에 따른 주요 흡착영역에 대한 상관관계는 뚜렷한 경향성은 관찰되지 않았으나 상대적으로 기공률이 15% 이상인 AIPO 구조가 0.3 g/g 이상의 수분 흡착 용량을 갖는 것을 확인하였음. 따라서, 기공의 구조와 크기를 활용한 주요 수분 흡착영역의 상대습도는 데이터베이스를 활용하여 예측하기에는 제한점이 있음

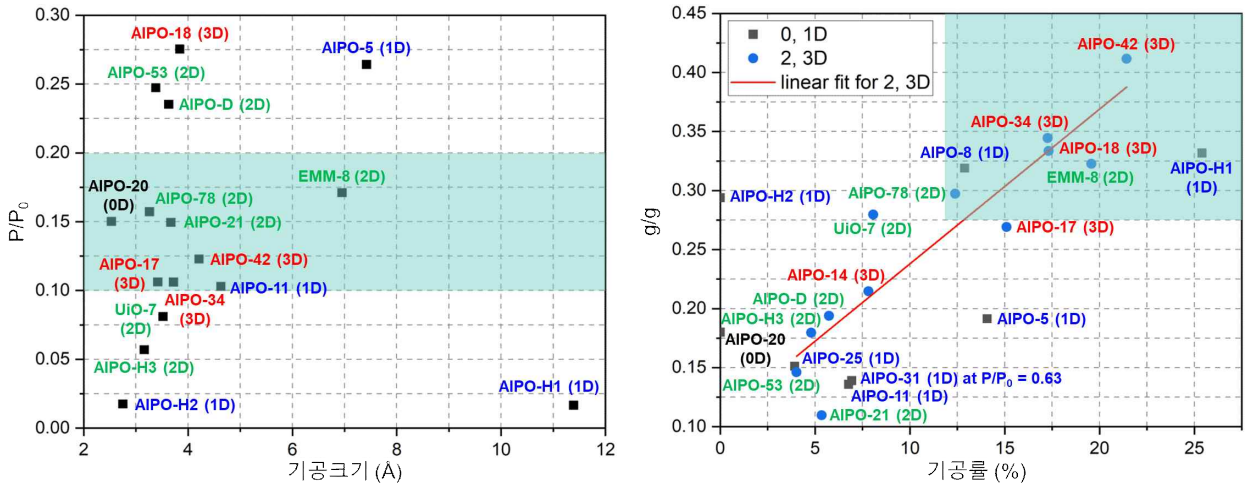


그림 39. 기공 크기에 따른 수분 흡착영역 (P/P_0) 및 기공률에 따른 흡착 용량 상관관계

- AIPO 데이터베이스 중 SFO 코드명으로 알려진 SSZ-51 구조의 EMM-8 구조는 매우 우수한 흡착 용량과 더불어 흡착식 냉방 적용에 적합한 영역에서 수분 흡착이 이뤄지는 것으로 파악한 바 있음. AIPO-40 구조는 SAPO 계열의 EMM-8 (SFO) 구조와 매우 유사한 3차원 구조로 기공 채널이 2차원으로 이뤄져 있으며, 기공률이 19% 수준으로 거의 유사함. 또한, AIPO-40 흡착제의 경우 EMM-8 구조 합성을 위해 사용되는 구조 유도체 (Structure directing Agent, SDA)가 상대적으로 저렴하고 독성이 낮으며, 불산(HF)을 사용하지 않은 조건에서 합성이 가능함. 따라서, 수분 흡착제 연구가 보고되지 않은 AIPO-40 구조에 대한 활용 가능성이 필요하여 AIPO 계열 수분 흡착제 후보군 1로 연구하고자 함

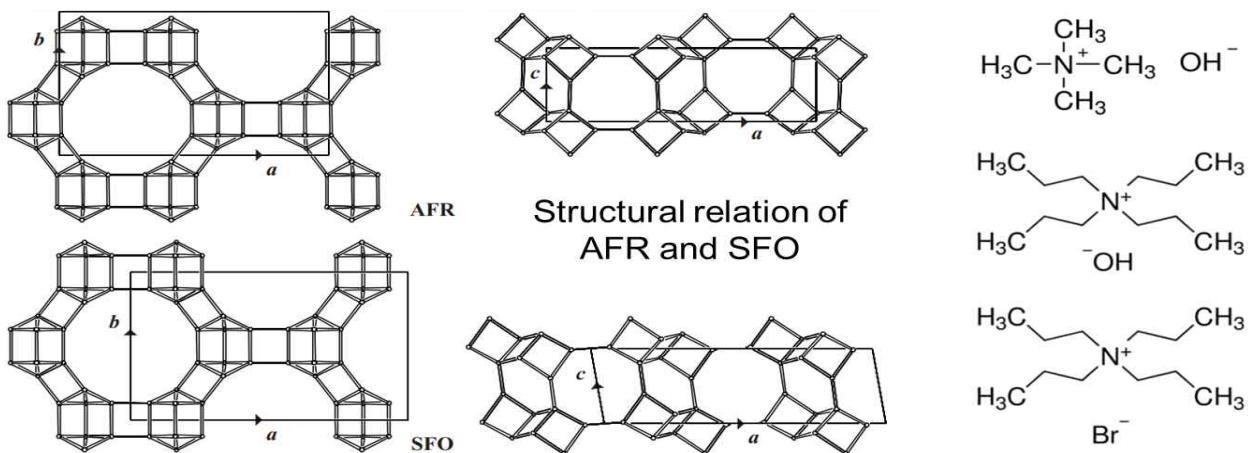


그림 40. SFO 구조를 갖는 EMM-8 구조와 AFR 구조를 갖는 SAPO-40의 구조 비교 및 SAPO-40 합성에 활용 가능한 구조 유도체 종류

- 수분 흡착제로 연구가 되지 않은 AIPO-52 (AFT), AIPO-35 (LEV), 및 STA-2 (SAT) 구조의 경우 ABC stacking 순서에 의해 구조가 결정되는 ABC 구조의 AIPO 구조임 (그림 41 및 표 23). 3 종의 AIPO 구조 중 AIPO-35 구조의 경우 구조 유도체가 매우 고가이며, 합성을 위해 HF가 첨가해야 하는 특성이 있음

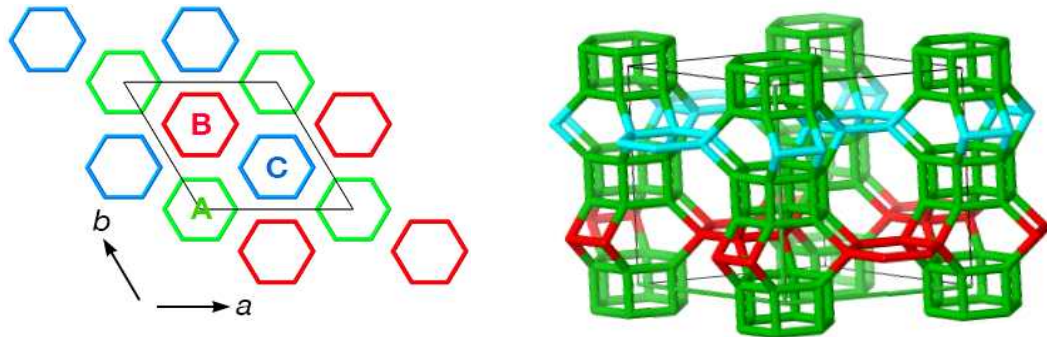


그림 41. ABC 구조를 갖는 AIPO-35 (LEV)의 구조

- 한편, STA-2 구조를 합성하기 위해서는 HF가 사용되지 않으나 구조 유도체가 상업용으로 시판되지 않고 있으며, 합성을 통해 구조 유도체를 제조하여 STA-2 구조를 합성해야 하기 때문에 대량 합성 및 생산 원가가 고가로 예상됨. 따라서, HF를 사용하지 않고 상업용 구조 유도체를 활용하여 합성이 가능한 AIPO-52 구조가 수분 흡착제로 활용 가능성이 큼

표 25. BC 구조를 갖는 AIPO 흡착제 후보군에 대한 구조적 특성

코드명	물질명	Ring size	기공구조 (차원)	기공크기 (Å)	기공률 (%)	ABCsequence
AFT	AIPO-52	8	3	3.68	17.28	AABBCCAACCCBB
LEV	AIPO-35	8	2	3.53	14.32	AABCCABBC
SAT	STA-2	8	3	3.25	13.02	ABBCBCCACAAB

- 결과적으로 AIPO 구조 데이터베이스를 통해 도출된 연구 대상 흡착제는 총 2군으로 도출하였으며, AIPO-40 구조와 AIPO-52 구조에 대한 수분 흡착 특성 평가를 통해 활용 가능성 연구를 통해 판단할 계획임. 해당 흡착제가 수분 흡착 냉방 응용에 적합한 수분 흡착 등온선 패턴 및 흡착 용량을 갖는다면 원천 소재에 대한 응용 기술을 확보할 수 있을 것으로 판단됨
- MOF 수분 흡착제 후보군 도출을 위해 흡착식 냉방 및 물 수확용 흡착제와 관련된 문헌 조사를 수행하였음. 현재까지 보고된 MOF 수분 흡착제의 경우 MOF 흡착제의 구조의 다양성과 내구성, 리간드 가격, 합성 수율, 합성 방법 등과 관련된 지표가 중요하기 때문에 수분 흡착식 냉방에 활용 가능한 흡착제가 제한적임. 최근 보고된 문헌을 바탕으로 수분 흡착에 활용된 MOF 종류별 흡착 용량 및 수분 흡착 주요 흡착 상대 습도 영역에 따른 성능 지표를 도출[17]

- 수분 흡착제로 연구된 MOF 종류는 약 300가지 정도가 보고되었으며, 소재적인 측면에서 MOF 소재의 고유 단점인 수분 안전성, 합성 수율, 합성 방법 (용매 열), 합성을 위한 전구체 가격 (중심 금속, 리간드, 용매) 등을 고려하지 않은 연구 결과가 대다수였음. 그림 42에 나타낸 α value는 MOF의 수분 흡착이 주요하게 일어나는 P/P_0 영역으로 흡착제의 최대 수분 흡착 용량의 50%에 도달하는 P/P_0 값임
- 수분 흡착 특성에 관해 연구된 300여 종의 MOF 흡착제를 대상으로 흡착식 냉방 적용에 가능한 소재 요구 조건을 아래와 같이 정리하여 활용 가능성이 있는 MOF 종류를 분류하였으며, 흡착제의 요구 조건을 만족하는 후보군 39종에 대한 MOF 수분 흡착제를 그림 42에 제시
- 흡착제 요구 조건 : 1) 수분 및 수열 안정성, 2) S-형 또는 계단형 흡착 등온 패턴을 나타내는 흡착제, 3) 높은 유효 수분 흡착 용량, 4) 수분의 가역적인 흡착-탈착, 5) 흡착-탈착 사이클에 대한 장기수명 안정성, 6) 낮은 재생 온도 (90°C 이하)

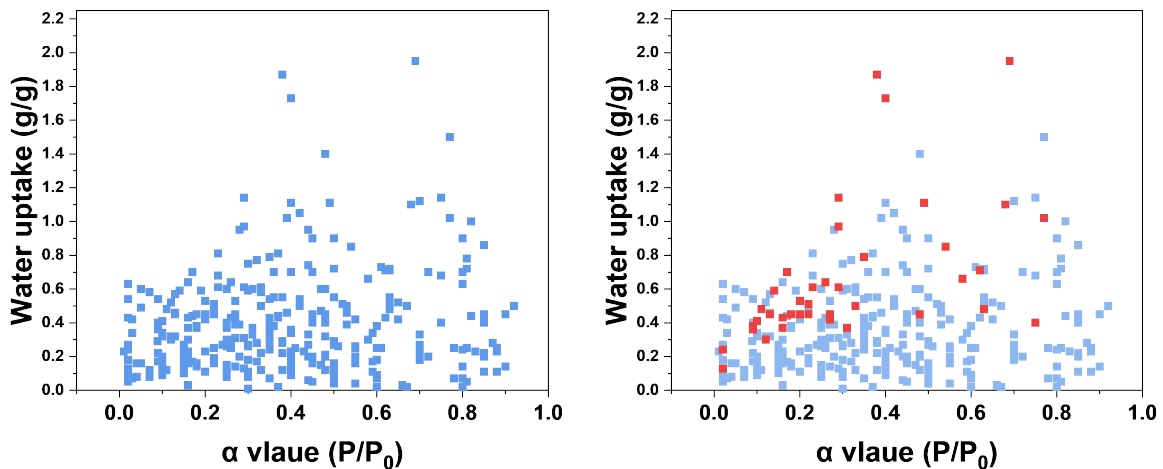


그림 42. 수분 흡착제로 평가된 MOF 흡착제의 주요 흡착영역(α value) 및 최대 수분흡착용량; ■ 수분 흡착제로 평가된 MOF, ■ 수분 흡착제 요구 조건을 만족하는 MOF 후보군

- 문헌 데이터 검색을 기반으로 흡착식 냉방 응용에 적합한 상대 습도 (P/P_0) 영역인 $P/P_0=0.1\sim 0.3$ 영역의 MOF 흡착제를 구분하였으며, 흡착제의 물성 및 수분 흡착 특성을 표 24에 나타냄. 수분 흡착 사이클에 대한 안정성을 확인한 결과 24종의 MOF 수분 흡착제는 장기수명 안정성을 보이는 것으로 확인됨. 또한, 장기수명 안정성을 갖는 24종의 MOF 수분 흡착제 중 대량 합성이 가능한 흡착제 후보 MIL-100(Fe), MOF-303(Al), CAU-10H, MIL-160, Zr-Fum HT (MOF-801), Al-Fumarate, CAU-23, Co-CuK-1 등을 선정

표 26. 저온 재생형 수분 흡착제 후보군 39종 물성 및 수분 흡착 특성

Material	Linker	α (P/P ₀)	W _{max} (g/g)	기공 부피 (cm ³ /g)	기공크기 (Å)	밀도 (g/ml)	수분 흡착 안정성
Cr-SOC-MOF-1	TCPT	0.69	1.95	2.1	17	0.381	100 cycles (no loss)
LiCl@MIL-101(Cr)	BDC	0.38	1.87	0.69	29,33	-	20cycle (no loss)
MIL-101(Cr)	BDC	0.4	1.73	ND	29,34	0.48	50cycle (no loss)
Ni ₂ Cl ₂ (BTDD)	BTDD	0.29	1.14	ND	22	0.852	ND
NU-1500-Cr	PET	0.49	1.11	1.24	14	0.539	20cycle (no loss)
ISO-NU-1000(Zr)	TBAPy-2	0.68	1.1	1.27	13,32	-	22cycle (no loss)
Facac-NU-1000(Zr)	TBAPy	0.77	1.02	1.36	12.7, 27.6	0.631	20cycle (no loss)
Co ₂ Cl ₂ (BTDD)	BTDD	0.29	0.97	ND	22	0.69	30cycle (6.3% loss)
NU-913(Zr)-TFA	L3	0.54	0.85	0.77	14x20		10cycle (7.4% loss)
MIL-100(Fe)	BTC	0.3	0.79	0.82	25, 29	0.72	50cycle (no loss)
BIT-66(V)	BTB	0.62	0.71	0.87	6.5, 25.8	-	50cycle (12% loss)
MOF-808(Zr)-Br	BTC-Br	0.17	0.7	0.67	15.9	1.199	21cycle (7.5% loss)
UiO-67-4Me-NH ₂ -38%	Mixed	0.58	0.66	ND	10.8		10cycle (no loss)
MOF-LA2-1(Al)	PZVDC	0.26	0.64	0.67	11	0.847	150cycle (no loss)
MOF-808(Zr)PDS1.7	BTC/PDS	0.23	0.61	0.62	ND	-	5cycle (20% loss)
MIP-211(Al)	t,t-muconate	0.29	0.61	0.6	8.5	0.807	40cycle (no loss)
MOF-808(Zr)-NDS1.8	BTC/PDS	0.2	0.53	0.56	ND	-	5cycle (13% loss)
MOF-841(Zr)	MTB	0.22	0.51	0.53	13.3	1.05	5cycle (7% loss)
FDM-92(Al)	BPDC	0.33	0.5	0.61	12.2	0.878	5cycle (7% loss)
Y-shp-MOF-5	BTEB	0.63	0.48	0.63	12	0.963	1,000cycle (9% loss)
Zr-adip	ADIP	0.11	0.48	0.47	6.6, 12.8	1.17	300cycles (no loss)
MOF-303(Al)	PZDC	0.13	0.45	0.54	6	1.159	150cycle (no loss)
MIL-125(Ti)-NH ₂	BDC-NH ₂	0.2	0.45	0.51	6, 12	0.81	ND
Al-fumarate	FA	0.27	0.45	0.48	5.7 × 6.0	1.24	4500cycle (no loss)
MIP-200(Zr)	MDIP	0.18	0.45	0.4	6.8, 13	1.16	40cycle (6% loss and no loss)
CAU-1(Al)-OH	BDC-OH	0.48	0.45	0.78	6.2, 8.6	-	500cycle (no loss)
MOF-333(Al)	FDC	0.22	0.45	0.523	9.4	1.122	ND
KMF-1(Al)	PyDC	0.16	0.43	0.473	5.7	1.08	50cycle (no loss)
CAU-23(Al)	TDC	0.27	0.42	0.48	7.6	1.07	5000 cycles (no loss)
Zr-Fum HT	FA	0.1	0.41	0.553	5.8, 11.2	1.59	50 cycle (no loss)
MIL-53(Al)-OH	OH-BDC	0.75	0.4		17x12	-	ND
MIL-160(Al)	FDC	0.09	0.38	0.4	5	1.068	10cycle (no loss)
CAU-10(Al)-H	1,3-BDC	0.16	0.37	0.28	7	1.15	9cycle (no loss)
UiO-66(Zr)	BDC	0.31	0.37	0.35	6, 9, 11	1.23	5 cycle (no loss)
MOF-801(Zr)	FA	0.09	0.36	0.45	4.8, 5.6, 7.4	1.68	5 cycle (no loss)
Co-CUK-1	PDC	0.12	0.3	0.26	13.4x13.0	1.46	50 cycle (no loss)
AIFFIVE-1-Ni	Pyrazine	0.02	0.24	0.102	ND	1.48	14 cycle (no loss)
MWH-1(Zn)	BPY/BTEC	0.02	0.13	ND	3.6	1.839	ND

안정성 확보 흡착제
흡착식 냉방 응용 영역 (P/P₀=0.1-0.3)
상업용 벌크 링커 유무
대량합성 가능 흡착제

- 수분 흡착제 후보로 선정된 8종의 MOF 수분 흡착제의 경우 흡착식 냉방 시스템 적용을 통해 본 과제에서 목표로 하는 COP (냉방 성능 계수) 및 냉방 출력 (SCP)를 갖더라도, 흡착제 가격에 대한 경제성을 확보하기 위해서는 흡착제의 생산 단가를 고려해야 할 필요성이 있음. 따라서, 선정 후보에 대한 흡착제의 생산 단가를 비교하였음 (그림 43). 그 결과 Co-CuK-1, MIL-160 및 MOF-303 3종의 MOF 흡착제의 경우 합성 단가가 매우 고가이기 때문에 향후 가격 측면의 문제로 인해 대량생산이 불가능할 것으로 판단됨. MOF-801, CAU-23의 경우 비교적 가격 경쟁력이 확보되었으나 흡착식 냉방 출력이 Zr-Fum HT, CAU-10, Al-Fum와 같은 저가형 MOF 흡착제에 비해 월등한 수준으로 높지 않다면 대상 후보에서 제외가 바람직함

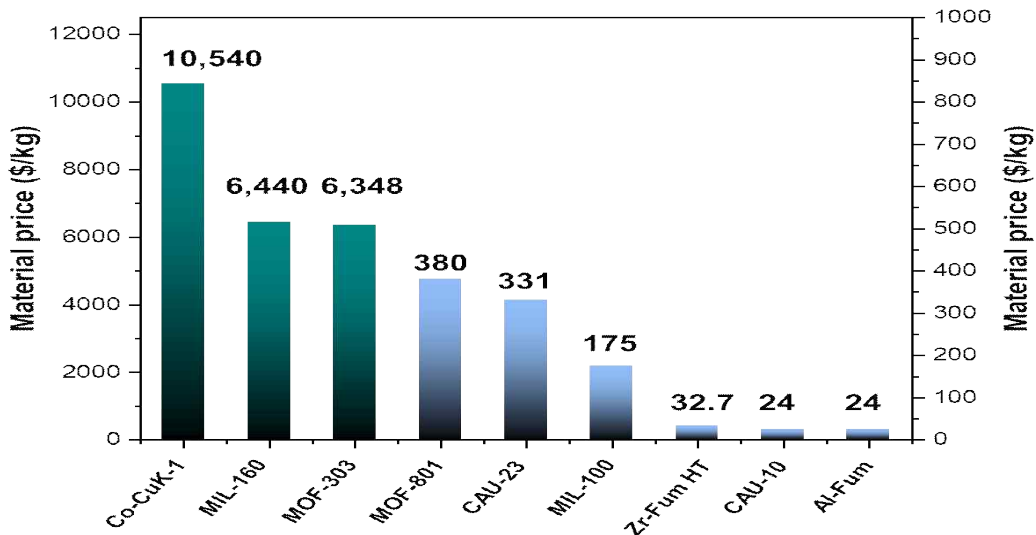


그림 43. 수분 흡착제 후보 MOF 흡착제의 1kg 생산에 필요한 전구체 비용

- 결과적으로 문헌 데이터베이스를 통해 발굴한 수분 흡착용 MOF 흡착제 중 가격 경쟁력과 충분한 흡착 용량, 낮은 재생성, 안정성 등을 고려할 때 Zr-Fum HT, CAU-10, Al-Fum 흡착제를 흡착식 냉방용 소재로 활용하여 연구하는 것이 바람직할 것으로 판단됨.
- 상업화를 목적으로 한 흡착식 냉방용 소재로 Zr-Fum HT (MOF-801), CAU-10 및 Al-Fum 흡착제가 가장 유망한 후보 물질로 파악되었으며, 해당 소재를 수분 흡착식 냉방 응용에 적용한 연구 내용을 추가로 조사하였음 (표 25)[18-21]. 타 연구기관에서 수행한 수분 흡착식 냉방 적용 결과에서 CAU-10, MOF-801 (Zr-Fum), Al-Fum가 해당 연구의 목표값인 COP (0.6 이상)과 SCP (1.0 이상)의 값의 냉방 성능을 나타낸 것으로 확인됨. 해당 냉방 성능은 상업용 흡착제인 SAPO-34의 SCP (0.675 kW/kg) 및 Silica gel의 SCP (0.050-0.23 kW/kg)에 비해 월등히 높은 수준으로 해당 3종의 MOF 흡착제를 활용할 경우 목표 냉방 출력을 달성할 수 있을 것으로 판단됨

표 27. 대량생산이 가능한 MOF 수분 흡착제 후보 물질의 선행 연구 결과

Material	Device type	Binder	coating method	COP	SCP (kW/kg)	Working condition
MOF-801 (Zr-Fum)	Lab scale device (metal supported Hex)	Binder free	Shaped as pellets	0.67	1-2	Tev=5°C Tad, con=30°C Tdes=45
Al-Fum	Fin-tube Hex	Polysiloxane	Dip coating	0.61	1.39	Tev=18°C Tad, con=30°C Tdes=90°C
Al-Fum	Fin-tube Hex	Organic silicon	Dip coating	0.6	1.0	Tev=15°C Tad, con=30°C Tdes=85°C
CAU-10H	Fin-tube Hex	Organic silicon	Dip coating	0.59	1.2	Tev=15°C Tad, con=30°C Tdes=85°C
CAU-10H	Fin-tube Hex	Silicon Resin emulsion (SilRes@MP5E)	Dip coating	ND	1.2	Tev=10°C Tad, con=30°C Tdes=70°C

- 또한, 현재까지 연구되지 않은 MOF 물질을 추가적으로 도출하기 위해서 CCDC (Cambridge Crystallographic Data Center)에 보고된 CoreMOF 데이터베이스를 활용하여 상업화가 가능한 MOF 흡착제를 발굴하고자 함. CoreMOF 데이터베이스는 실험적으로 MOF 구조가 규명된 3차원 구조의 MOF 데이터베이스로 2019년 기준 CCDC에 보고된 CoreMOF 는 약 14,000종에 해당함
- Al-MOF 흡착제는 합성이 수월하고 안정성이 높기 때문에 수분 흡착제 활용 가능성이 큼. 하지만, CoreMOF 데이터베이스에 포함된 3차원 구조의 데이터베이스 기준 257 구조가 보고되어 있으며, 다공성을 갖는 3차원 MOF는 48종임(표 26). 하지만, 대부분의 Al-MOF는 수분 흡착 관련 응용을 위한 연구가 진행되었고, 진행되지 않은 구조의 경우 CAU-10H, Al-Fum 등의 저가형 수분 흡착제에 비해 경제적 이점이 없음
- 따라서, Al 이외의 중심 금속으로 이뤄진 MOF 구조 중 저가형 전이 금속 (Fe, Co, Cu, Ni, Zn)으로 이루어진 MOF 중 수분 안전성, 합성 수율, 합성 생산성, 저가형 전구체 사용 가능성 등에 따라서 MOF 구조를 분류하고 수분 흡착제를 발굴해야 할 것으로 판단됨
- 따라서, Al-MOF 이외의 MOF 수분 흡착제 후보를 발굴하기 위해 CoreMOF 데이터베이스를 활용하여 추가 연구 기간 수분 흡착제로 활용 가능 조건을 기준으로 확인할 예정임

표 28. 3차원 구조를 갖는 48종의 Al-MOF 구조

Material	$S_{\text{BET}}^{[b]}$ ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	ASA ^[c] ($\text{m}^2 \text{g}^{-1}$)	POAV ^[d] ($\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$)	LCD ^[e] (Å)	PLD ^[f] (Å)	VF ^[g]
467-MOF	725	1206	0.3255	5.3814	3.9819	0.3412
				5.9751	3.4374	
515-MOF	2079	3936	1.0547	8.7802	6.3011	0.6521
516-MOF	2006	2685	0.7960	9.1328	7.1731	0.5831
AITCS-2	1506	2359	0.6436	8.6393	4.8033	0.5280
Al(OH)(3,5pydc)	884	1320	0.3256	6.0527	4.8357	0.3738
Al-PMOF	1400	2421	0.6392	7.3713	4.9800	0.5246
Al-soc-MOF-abtc	1500	1429	0.3691	6.1955	5.3724	0.3386
Al-soc-MOF-tcdpn	5162	5091	2.0731	15.4594	12.9282	0.7784
Al-soc-MOF-tcpt	5585	5085	2.2942	15.6136	12.9623	0.7976
CAU-1	1268	2631	0.7929	10.7527	6.0648	0.6065
CAU-1-(OH) ₂	1350	1624	0.4900	10.1847	3.6490	0.4703
CAU-3-bdc	1550	1872	0.5546	10.7747	4.0759	0.4972
CAU-3-bdc-NH ₂	1250	2398	0.6995	10.9342	5.9615	0.5687
CAU-3-ndc	2320	3240	1.0481	14.1093	6.8322	0.6521
CAU-6	620	1373	0.4169	9.5155	4.0777	0.4497
CAU-8-bpdc	1000	1297	0.3353	6.6625	5.0558	0.3112
CAU-8-odb	1000	1576	0.3811	6.7059	5.1239	0.3433
CAU-9	1118	1509	0.4347	5.2939	5.1114	0.4164
				6.5991	4.4524	
CAU-10-H	564	1047	0.2772	5.9884	4.2438	0.3223
CAU-10-NO ₂	440	507	0.1563	5.8174	3.3738	0.2189
CAU-11	350	585	0.1741	5.9210	5.3665	0.2369
CAU-13	380	401	0.1502	4.4918	3.3915	0.1990
CAU-23	1250	1545	0.4446	7.5029	6.0858	0.4795
CYCU-3	2757	2810	1.4986	25.5474	25.3730	0.7198
				8.4419	7.8077	
CYCU-4	1910	2865	1.1111	11.9876	11.7308	0.6538
DUT-4	1308	2219	0.7024	8.9007	8.5128	0.5602
DUT-4-(NO ₂) ₂	578	666	0.1974	5.8607	5.3672	0.2875
DUT-5	1613	2579	0.9686	11.5572	11.2608	0.6362
KMF-1	1130	1397	0.3439	6.1336	4.5895	0.3777
MFM-300	1325	1515	0.4521	7.0459	6.9985	0.4819
MIL-53	1140	1629	0.4868	7.0262	6.8092	0.4791
MIL-53-fa	1080	1576	0.4559	5.7737	5.4192	0.4866
MIL-53-muc	1750	2287	0.6613	7.4098	6.0851	0.5522
MIL-53-tdc	1150	1742	0.5068	7.3922	6.8559	0.5130
MIL-68	1430	1671	0.6504	13.2757	12.9330	0.5507
				5.0309	4.1516	
MIL-68-mes	1040	1013	0.2828	7.4805	6.1550	0.2961
MIL-91	356	261	0.1154	4.0543	3.3539	0.1648
MIL-96	600	827	0.2363	8.3009	4.3381	0.2773
MIL-110	1408	2016	0.9049	15.3646	15.0169	0.6630
MIL-120	308	655	0.2015	4.7188	3.7398	0.3191
MIL-121	162	856	0.2324	5.3051	5.0529	0.3144
MIL-160	1098	1429	0.3715	6.4047	4.8894	0.4158
MOF-303	1343	1762	0.5161	7.5191	6.1282	0.5144
MOF-333	1321	1585	0.4472	6.6523	5.1794	0.4801
MOF-520	3290	3672	1.1798	9.5574	8.6508	0.6774
NU-1501-Al	7310	5639	2.9567	18.7948	18.1397	0.8397
SNNU-5-Al	2077	3930	1.2211	12.1106	5.5928	0.6878
UPC-101-Al	2084	1531	0.4944	9.1109	8.3111	0.3964

[a] Calculated with a probe of radius of 1.655 Å by using the program zeo++, unless otherwise stated.

[b] BET surface area (S_{BET}) experimentally calculated using N₂ sorption at 77 K in the literature.

[c] Accessible surface area.

[d] Probe-occupiable accessible volume.

[e] Largest cavity diameter.

[f] Pore limiting diameter.

[g] Helium void fraction calculated using the program RASPA.

- Al 이외의 중심금속으로 이뤄진 MOF 구조 중 저가형 전이 금속 (Fe, Co, Cu, Ni, Zn)으로 이루어진 MOF 중 수분 안전성, 합성 수율, 합성 생산성, 저가형 전구체 사용 가능성 등에 따라서 MOF 구조를 분류하고 수분 흡착제를 발굴해야 할 것으로 판단됨
- CoreMOF 데이터베이스를 통해 Fe, Co, Cu, Ni, Zn 등으로 이루어진 구조에 대한 검색을 수행하였음. 수분 흡착량과 관련된 다공성 지표로 비표면적 값이 500 m²/g 이상 및 기공 부피 0.3 cm³/g 이상의 값을 갖는 구조를 검색하였고 해당 조건을 만족하는 Zn, Cu, Co, Ni, Fe 계열의 MOF 구조의 개수는 각각 1,161, 761, 364, 182, 98로 확인
- 수분 흡착제 응용을 위해서는 대량 생산성과 관련된 지표로 합성에 사용되는 금속 전구체, 리간드, 용매 가격 및 수율이 매우 중요하기 때문에 해당 분류의 MOF 구조 합성에 필요한 리간드 가격을 기준으로 100\$/kg 미만의 저가형 리간드 사용하는 MOF 구조를 1차적으로 분류함
- 그 결과 활용 가능한 Zn, Co, Ni, Cu 계열의 MOF는 TPA(terephthalic acid), IPA(isophthalic acid), imidazole 링커를 활용하는 MOF가 주로 검색되었음. 특히 ZIFs 계열의 MOF는 imidazole 링커로 합성되는 물질로 낮은 단가와 해당 구조의 높은 비표면적 (1,000 m²/g 이상)에도 불구하고 기공 표면 특성의 약한 친수성으로 인해 활용 수분 흡착영역인 P/P₀=0.1~0.25 영역에서 낮은 수분 흡착으로 인해 수분 흡착제로 활용 가능성이 작았음
- 또한, MOF-5 또는 IR-MOF-5로 명명된 Zn, Co, Ni 금속 기반의 MOF의 경우 흡착제 가격이 \$100/kg 미만으로 예상되지만, 물을 용매로 한 합성이 불가능하고 습도 조건에 노출시 구조의 붕괴로 인한 안정성 문제로 활용이 제한됨. MOF-5 구조에 비해 상대적으로 수분 안전성이 개선된 Cu, Ni 금속 기반의 HKUST-1 MOF가 알려져 있으나 수분에 대한 장기수명 안정성으로 인해 수분 흡착제로 활용이 불가함. 결과적으로 2가 전이 금속인 Zn, Co, Ni, Cu 계열의 저가형 MOF 구조는 수분 안전성 또는 상대적인 구조의 낮은 친수성으로 인해 수분 흡착제로 활용이 어려울 것으로 판단됨
- Fe 계열의 MOF는 MIL-53, MIL-59, MIL-88, MIL-100, MIL-101 등의 구조가 보고되었으며, MIL-53, MIL-88, MIL-101 MOF 구조는 TPA 및 TPA-X (x=-OH, -Cl, -Br, -NH₂, -F, -SO₃H, -CH₃ 등)으로 구조를 다양하게 변화시킬 수 있는 특성이 있음
- 하지만, MIL-53 및 MIL-88 구조의 경우 기공내에 포함된 guest 분자가 (물 또는 유기용매) 없을 경우 기공 구조가 작아지는 특성으로 인해 골격 유연성을 갖는 특성으로 인해 수분 흡착 용량이 0.2 g/g 이하로 관찰되어 수분 흡착제로 활용하는데 제한됨. MIL-101구조의 경우 3,000 m²/g 이상의 초다공성 특성을 갖지만, 수분에 대한 안정성이 매우 낮아 수분 흡착제 후보로 활용 가능성이 작음
- 한편, MIL-59(Fe)의 경우 다공성이 500 m²/g 수준이며, 기공 부피 0.3 cm³/g 수준으로 기존에 보고된 Al-MOF 수분 흡착제에 비해 낮은 편이지만 IPA 유기 리간드를 활용하여 대량 생산이 가능한 장점이 있었음.
- 합성 조건을 고려하여 MIL-59(Fe) 가격은 \$50/kg 수준으로 예측되어 수분 흡착제로 활용 가능성이 있음. 따라서, 해당 MOF에 대한 수분 흡착 평가를 통해 활용 가능성을 연구해 볼 필요성이 있음.

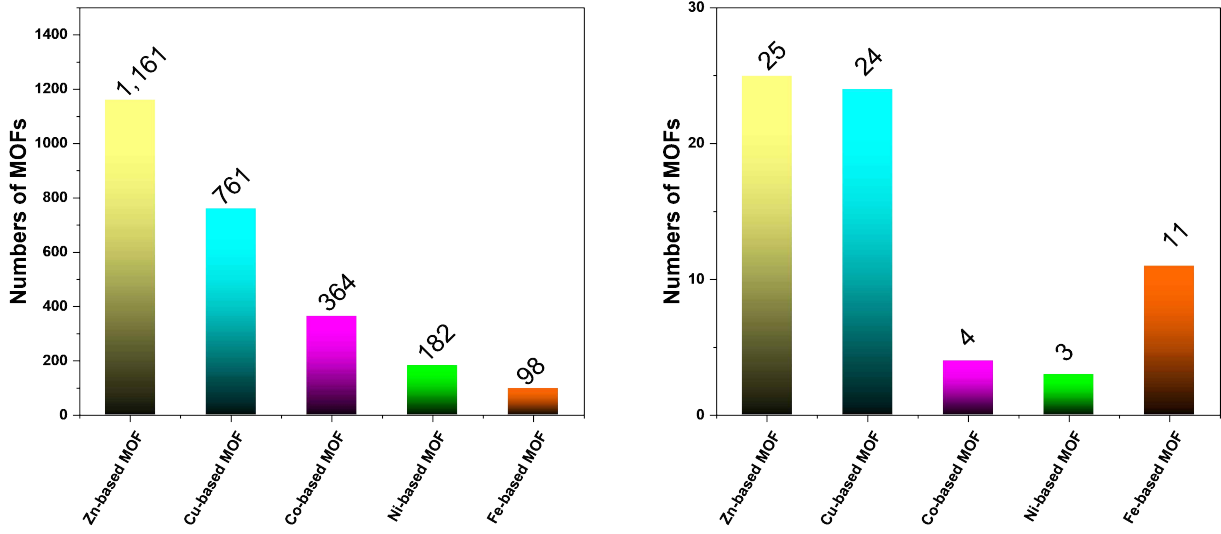


그림 44. Zn, Co, Ni, Cu 계열의 MOF 흡착제 및 \$100/kg 미만 가격 구조 개수

5) 액비저장조 현황 파악 및 축열조 활용방안 도출

☐ 계간 축열조 활용을 위한 액비저장조 현황 파악

○ 액비의 정의 및 제조방법

- (액비의 정의) 가축분뇨 액비라 함은 가축의 사육 과정에서 배출되는 분(糞), 요(尿) 및 청소수의 혼합물 또는 기타 축산 분뇨 처리 과정(혐기발효 폐액, 숙성발효 액상분뇨)에서 발생하는 물질을 비료로 활용할 목적으로 수집, 저장하고 일정 기간 부숙시켜 병원성 미생물, 충란, 잡초 종자 등을 사멸시키고 난분해성 물질 등을 분해하여 환경에 노출되어도 위해성이 없고 경증적으로 안정화된 액상물을 말함. 액비는 작물 생육에 필요한 성분인 질소(N), 인(P), 칼리(K) 이외에도 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg), 나트륨(Na) 등과 같은 미량 원소도 포함하고 있어 비료로서의 가치가 높다고 볼 수 있음

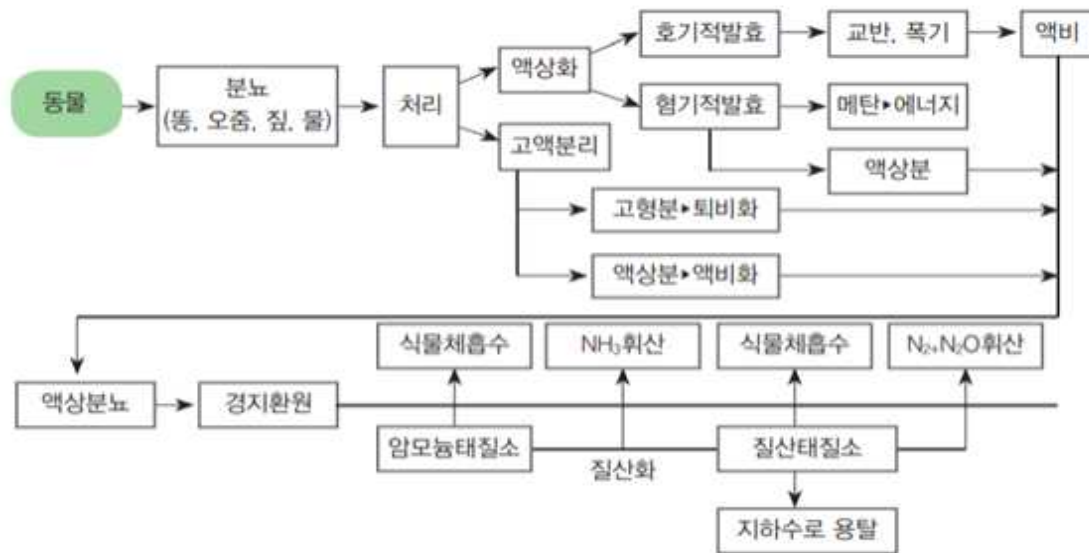


그림 45. 액비의 생산/처리 과정과 토양에서의 물질순환

- (액비 제조방법) 본 실증 사이트에서 생산되는 액비는 혐기성 액비로서, 혐기성 액비 제조방법은 다음과 같음

- 액상 분뇨의 혐기성 부숙에는 호기성 방식과 달리 공기를 차단하는 시설을 설치하는 것 이외에 큰 차이는 없음. 그러나 호기성 액비화는 1~2 단계 분해 과정으로 액비가 제조되나 혐기성은 3단계 분해 과정을 거쳐 최종 액비가 생산되기 때문에 완벽한 혐기 조건이 제시되지 못할 때 액비화에 오랜 시일이 요구됨
- 혐기성 처리 방식은 저장조를 완전 밀폐시켜 공기를 차단함으로 처리하는 주요 목적은 분해 과정 중에서 부수적으로 메탄가스를 생산 이용하는 데 있음. 이와 같은 이점으로 유럽 지역에서는 오래전부터 이 방식을 채택하고 있으며, 미국 등 분뇨 처리에 문제가 없는 지역도 최근에 가축분뇨 종합 관리(Integrated animal wastes management) 개념을 미래 가축분뇨 관리의 기본 수단으로 설정하고 있음
- 이는 가축분뇨를 직접 퇴비나 액비로 이용하지 않고 혐기발효를 거쳐 에너지(메탄가스)를 이용한 후 액비로 활용한다는 것이 기본 개념으로 가축분뇨뿐만 아니라 부패성/유기성 폐기물에서 발생하는 메탄을 이산화탄소로 저감시켜 지구 온난화를 방지하려는 유럽 지역에서 이미 보편화되어 가고 있는 기술 체계임

- 가축분뇨에는 호기성균과 혐기성균이 공존하며, 유기물과 영양원이 있는 액에서는 용액 중에 용존 되어 있는 산소를 호기성 세균이 소모하고 대기 중의 산소가 액상으로 용존되는 속도보다 호기성 세균의 산소 소비량이 클 때 액상은 혐기 상태가 됨
 - 혐기성 조건에서는 지방은 지방 분해균, 섬유소는 섬유소 분해균, 단백질은 단백질 분해균에 의하여 가용성 물질로 전환되며 이를 '1단계 분해'라고 함. 1단계 분해 산물은 산생성균에 의하여 유기산으로 전환이 되며, 최종 단계는 메탄균에 의해 산이 가스로 전환이 되고 난분해성 물질은 잔류함
 - 이와 같이 고분자 유기물이 공기가 없는 상태에서 분해되는 과정을 혐기성 소화라고 하며, 그 대상이 가축분뇨일 때 혐기성 액비화라고 함
 - 따라서 혐기성 액비화 공정은 메탄가스 발생을 수반하기 때문에 메탄 발효라고도 하며, 이론적으로 알 수 있는 바와 같이 혐기성 분해가 완료되면 호기성 액비화와 동일하게 악취가 없는 안정한 액비가 제조될 수 있다. 혐기성 액비화의 필수 조건은 모액, 메탄균 순화, 용액의 pH 조절, 발효 온도 관리 및 유기물의 농도, 용액의 교반이 필수 조건
- ① **모액** : 액상 분뇨를 혐기성으로 부숙시킬 때 초기에 산생성균과 메탄생성균의 밀도 유지가 필요하다. 혐기성 산생성균에 비하여 메탄생성균은 환경 적응성이 약하기 때문에 메탄균이 접종되지 않을 경우 산생성만 촉진되어 혐기성 분해가 진행되지 않는다. 따라서 혐기성 부숙을 시작하기 전에 인근 혐기성 소화조로부터 폐액을 부숙조 부피의 20% 정도를 투입하는 것이 필요하다. 저류조 형태의 액비 부숙조는 메탄균이 활동하지 않으며, 호기성 세균도 서식할 수 없기 때문에 혐기성 중간 분해 생성물에 의하여 악취를 유발
 - ② **메탄균의 순화** : 일반적으로 혐기성 산생성균은 급격한 환경 변화에도 잘 견디나 메탄생성균은 번식이 느리고 환경 변화에 대단히 민감함. 메탄균은 절대 혐기성 세균이기 때문에 용액 속에 용존산소가 0.01mg/L 이상이면 생존이 어려움. 혐기성 부숙조에 유기물을 투입하면 초기에는 산생성으로 pH가 저하되고 시일이 경과함에 따라 다시 상승. 이때 다시 유기물을 투입하면 먼저와 같은 현상이 나타나나, 이때는 제1회 때보다 시간이 단축됨. 이 과정을 반복하면 새로 유기물을 매일 투입하여도 pH 변화가 적어지고 가스 발생량도 균일하게 되며, 이와 같은 조작을 메탄균 순화라고 함
 - ③ **용액의 pH** : 모든 미생물은 기질의 pH에 대단히 민감하다. 메탄균은 특히 pH 변화에 민감하며 최적 pH는 7.5 전후이고, pH 6.6 이하에서는 생육에 저해를 받는다. 혐기성 부숙조의 pH가 6.6 이하로 낮아져 회복되지 않을 때, 석회 물질이나 암모니아수 등으로 교정이 필요하다. 적정 pH 범위를 유지하는 방법은 초기에 일시에 다량의 유기물을 투입하지 않고 충분히 메탄균을 순화시키는 것이 비결
 - ④ **부숙온도** : 혐기성 액비화 방식에는 중온(30~40℃)과 고온(45~55℃) 부숙법이 있다. 혐기 조건에서도 유기물 분해는 중온보다 고온 조건에서 빠르다. 혐기성 부숙 조건에서는 호기 방식과 달리 부숙 과정 중 자체 발열량이 적다. 따라서, 고온 조건을 유지하기 위해서는 외부로부터 가온이 필요하다. 적은 용적으로 다량의 폐기물을 처리하기 위해서는 고온 조건이 유리하나 축분뇨 액비화는 에너지 소요량을 감안하여 중온 조건이 더 경제적

- ⑤ **유기물의 투입량과 희석농도** : 혐기성 액비 부숙조 용적 당 유기물의 투입량과 투입원료의 유기물 농도는 액비 부숙도와 밀접한 관련이 있다. 일반적으로 가축분뇨인 경우는 2~5kg/일/m³가 좋다. 투입되는 분뇨의 유기물 함량은 7~10%까지는 문제가 없는 것으로 평가
- ⑥ **용액의 교반** : 혐기성 부숙조 내 유기물 농도가 높으면 점도가 높아지며 분해 효율은 낮아진다. 이는 발생된 혐기성 가스가 용액 중에 용존 미생물 생육을 저해하기 때문이다. 또 한 점도가 높은 부숙조에서는 층이 생기며 이로 인하여 미생물이 활동이 적어진다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 혐기성 부숙조에서는 교반 시설을 적용하며 교반 시에는 이상의 문제점들이 해결됨

○ 액비의 물리화학적 특성 평가

- 액비의 성분은 ‘비료관리법’에 따른 비료공정규격(질소, 인산, 칼리 성분의 합계 0.3% 이상)과 ‘가축분뇨의 자원화 및 이용 촉진에 관한 규칙’의 질소 최소 함유량 기준(질소 함유량 0.1% 이상)을 모두 충족해야 한다. 가축분뇨 액비는 가축분뇨를 호기성 발효시킨 액상 비료로, 질소·인산·칼리 외에 칼슘·마그네슘 등 각종 미량 영양소를 함유
- 그림 45는 정읍 시설의 가축분뇨 혐기소화 처리과정에서 발생하는 액비화시설 공정도를 보여주고 있다. 혐기소화 시설에서 발생하는 소화액은 원심분리기를 거쳐 고형물을 분리하고, 유량조절조 및 폭기조를 거친 후 액비 저장조에 일정기간 보관한 후 농경지예 살포함. 액비 원액의 색깔은 반투명한 색을 띠고 있어, 액비에는 많은 성분이 함유된 것을 알 수 있음

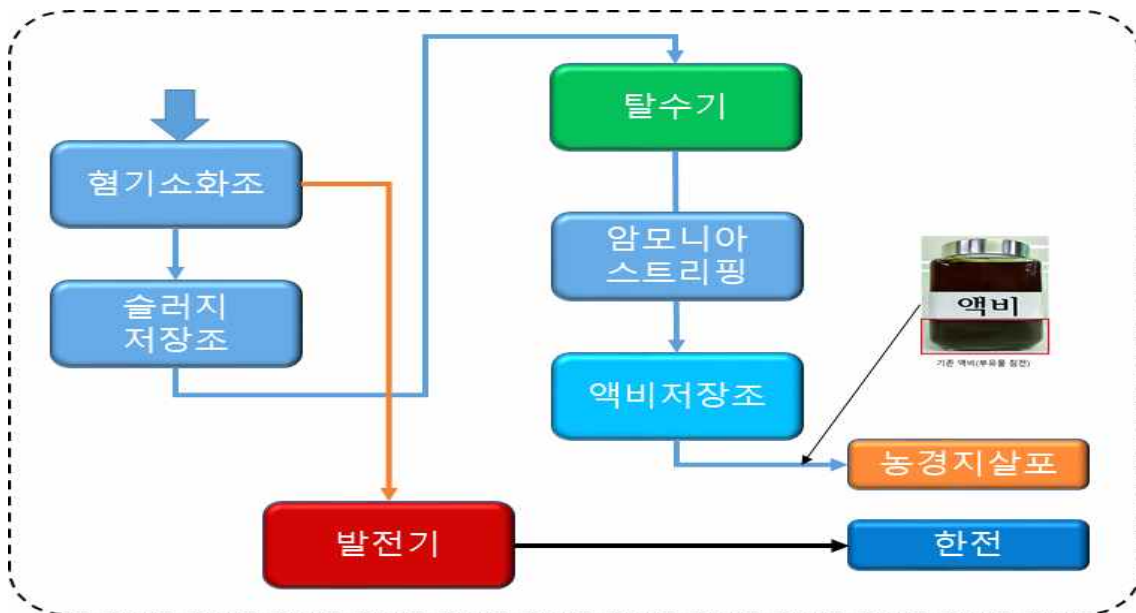


그림 46. 실증사이트(친환경대현그린(주))의 액비화 시설 공정도 및 액비 사진

- 표 27은 소화액 원액(AD)을 원심분리-응집-암모니아 스트리핑 공정을 거친 후 배출되는 소화액(액비:AD_C_C/F_S) 성상에 대해 나타냄

표 29. 원심분리-응집-암모니아 스트리핑 결합공정에 따른 소화액 및 액비 성분 결과

Treatments	TCOD (g/L)	TP (g/L)	TN (g/L)	NH ₃ -N (g/L)
AD	22.40	0.98	5.47	5.15
AD_C_C/F_S	1.85	0.032	0.75	0.63

- 소화액을 원심분리, 응집 및 암모니아 스트리핑 공정을 거치더라도 액비에는 많은 미량의 화합물을 함유하고 있어, 액비를 열전달매체로 사용 시 바이오가스 발전 폐열 회수용 열교환기의 열전달 특성에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단됨
- 또한 액비는 많은 미량의 유기물을 함유하고 있어 미량 유기물의 부반응에 의해 액비 저장조 내에 축적될 수도 있어 축열 성능 저하 요인이 될 수도 있음
- 바이오가스 발전 열의 열전달매체로 액비를 대체할 수 있는 물질은 표 28에 보여주고 있으며 이에 대한 상세한 검토가 필요함[22]

표 30. 바이오가스 발전폐열의 열전달매체 가능 후보 물질 특성

Medium	운전온도 (°C)	밀도 (kg/m ³)	열전도도 (W/mK)	열용량 (kJ/kg)
water	0-100	1,000	0.63 (at 38°C)	4.2
Synthetic Oil (Dowtherm)	12-260	867	0.112 (at 260°C)	2.2
Therminol 66	9-343	-	-	2.4

▣ 실증 사이트 내 액비 저장조 현황

○ 액비저장조의 관리

- 액비를 농경지에 살포하기 위해서는 살포 전까지 액비를 저장, 관리할 수 있는 저장조의 설치가 필요하며 배출되는 분뇨를 6개월 이상 저장할 수 있는 용량이어야 함
- 충분히 부숙된 액비는 사용 전에 항상 성분을 분석하여 작물에 맞는 시비량 내에서 안전하게 농경지에 살포하여야 함

(액비 저장조 설치 전 검토 사항)

- ① 액비 공급자와 저장조를 관리하고 액비를 이용할 농민이나 단체의 입장에서 저장조의 설치 규모 및 장소 등의 결정
- ② 저장조를 설치할 토지 소유자 및 액비를 이용할 경작자의 범위 ·액비의 공급처와 연간 수급량, 공급 시기의 결정
- ③ 저장조의 적합 설치 규모와 살포 장소 분산 범위, 설치 개소 수의 결정
- ④ 저장조 관리에 편리하며 액비를 운반, 살포하기 용이한 장소
- ⑤ 액비의 관리, 이용을 위한 농가의 공동 및 개별 이용 방안 강구
- ⑥ 저장조의 시공 비용 부담, 관리 비용의 부담, 가축분뇨의 운송 비용은 각각 누가 어떻게 부담할 것인지 사전에 고려하여 결정
- ⑦ 액비 저장조의 설치 시 고려 사항 ·내구성이 높고 유지보수, 바닥 침전물의 청소가 용이할 것
- ⑧ 액비에서 발생하는 부식성 가스나 화학적 성분에 의해 부식되지 않고 오래 사용할 수 있을 것
- ⑨ 저장 액비의 압력에 견딜 수 있는 안전한 구조이며 액비의 누출로 인한 토양 및 지하수 오염의 우려가 없을 것 ·마을 부근이나 큰 도로변 등 악취 발생으로 인한 민원 발생의 소지가 없는 곳일 것
- ⑩ 트랙터, 액비 운반 트럭 등이 점차 대형화 추세이므로 대형 운반 및 살포 장비의 출입이 용이한 곳일 것 ·액비 저장조를 설치하여 마을의 경관에 악영향은 미치지 않는 곳일 것
- ⑪ 장마철 상습 침수 지역이나 하천 주변 또는 지반이 연약하여 액비 저장조가 파손되거나 또는 저장한 액비가 유실될 우려가 없는 곳일 것 ·되도록 시공비가 저렴할 것

○ 액비저장조 현황

- 액비 저장조는 호기액비화 시설에서 생산된 액비를 저장하는 시설을 말한다[23]. 일반적으로 액비 저장조는 개방형, 밀폐형 저장조로 구분할 수 있음. 개방형 저장조의 경우 우수의 침투를 방지할 수 있는 구조 또는 여유고를 두고 있으며 또는 인명 및 가축의 추락을 방지하기 위하여 울타리 등을 구비해야함. 밀폐형 저장조의 경우 내부 청소 및 스킴을 제거할 수 있는 맨홀 및 가스배출을 위한 가스 배출구(Vent)를 구비하여야 함. 액비의 균질화를 위하여 고정식 교반기(Propeller 교반기, 수중교반기, 펌프 순환식 교반장치, 폭기식 교반장치 등 교반 목적에 부합되는 시설)를 반드시 구비해야 함

- ① **Propeller 교반기** : 밀폐형 저장조에 적합하며 저장조 내부의 액비가 골고루 혼합될 수 있는 수량을 콘크리트 슬라브 위에 고정한다. 저장량이 적을 때를 고려하여 각 교반기당 Propeller는 2개 이상 설치하고 Propeller의 위치는 조정이 가능해야 함

- ② **수중교반기** : 저장조의 한쪽 측면에 설치하여 반대 방향으로 액비를 분사하도록 한다. 저장조의 길이가 클 경우, 교반기를 양측 면에 설치하여 중앙으로 액비를 분사한다. 저장된 용량에 따라 교반기의 위치를 상하로 이동하여 교반할 수 있도록 함
- ③ **펌프 순환식 교반장치** : 저장조의 측면 하단부에서 액비를 흡입하여 펌프의 토출압으로 스킴 층을 부수고 액비를 혼합한다. 고른 혼합을 위해 펌프의 토출 부분은 위치 이동이 용이한 재질로 함
- ④ **폭기식 교반장치** : 저장조 수표면에 설치하는 표면 폭기 방식, 저장조 바닥에 설치하는 수중 폭기 방식, 저장조 밖에 송풍기를 설치한 후 송풍기에 의해 이송된 공기를 저장조 바닥의 산기관을 통해 살포하여 교반하는 방식이 있으며, 표면 폭기 방식은 수위 변동에 따라 이동할 수 있도록 구비해야 함

- 정읍 시설 내 액비저장조는 폭기식 교반장치로서, 저장조 외부에 송풍기를 설치하여 이송된 공기를 저장조 바닥의 산기관을 통해 살포하는 교반방식임

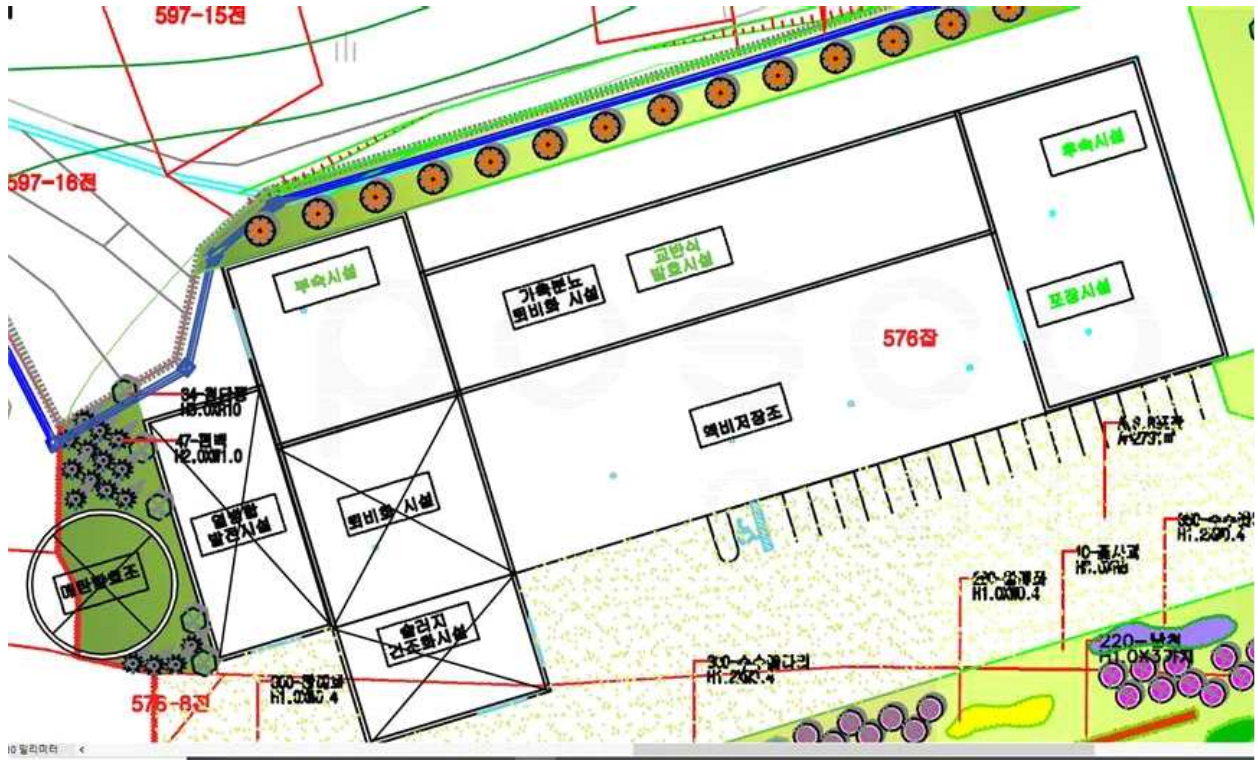


[기존 액비저장조]

[신규 액비저장조]



그림 47. 실증사이트의 액비 저장조 사진



배수계획평면도

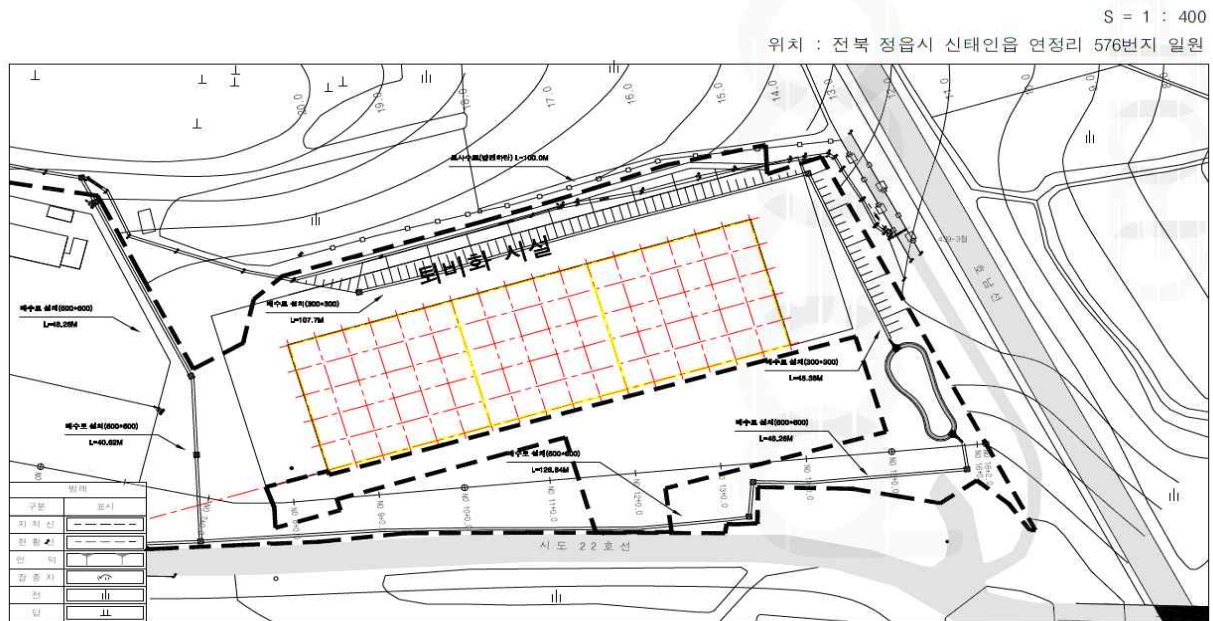


그림 48. 실증 사이트의 액비저장조 평면도

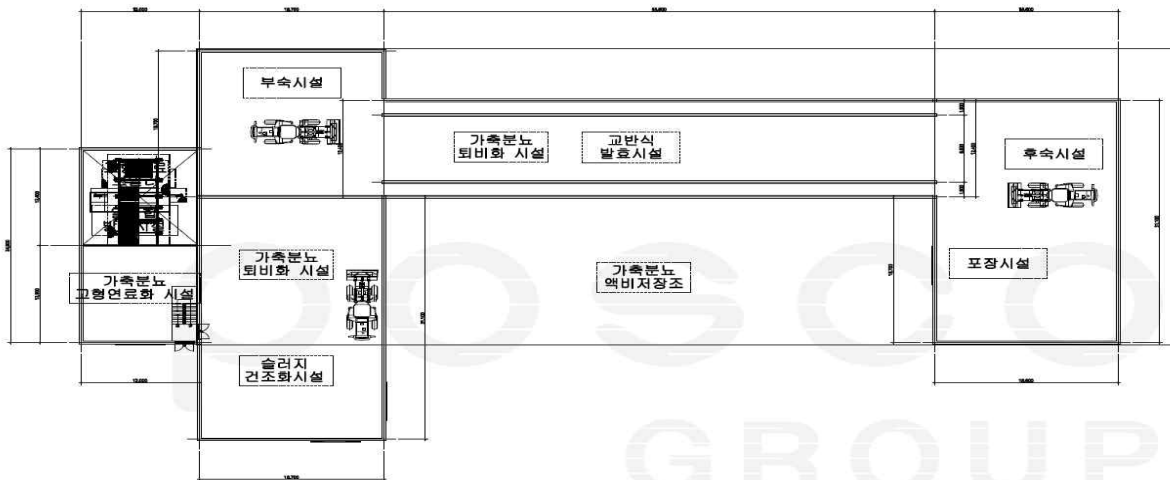
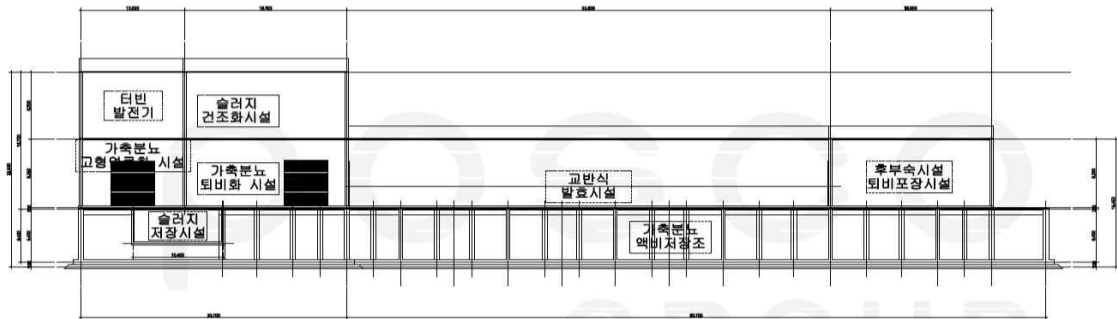
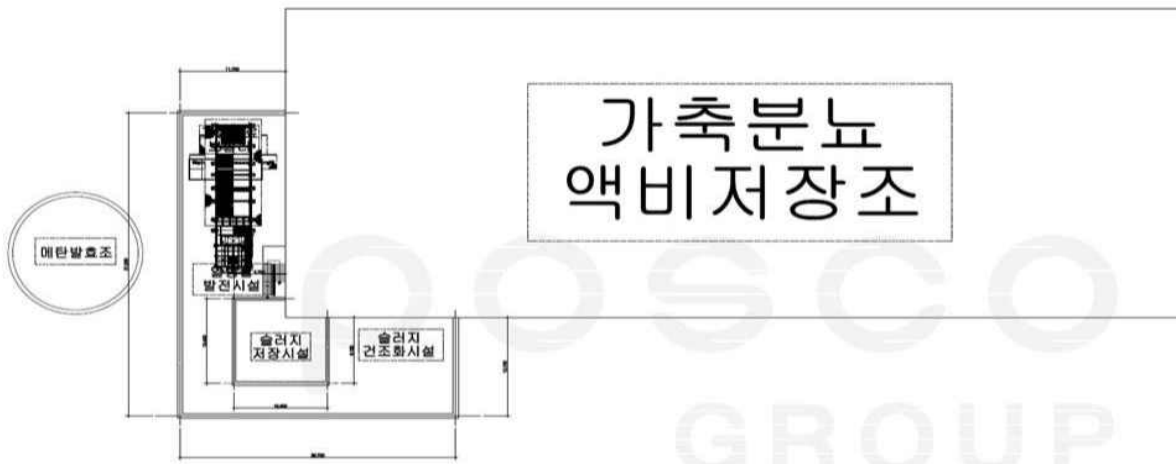
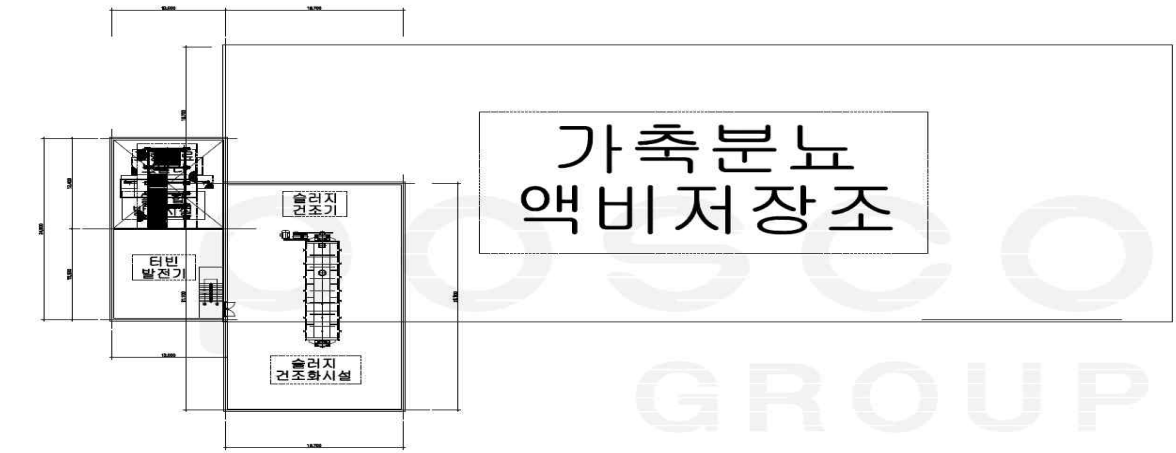


그림 49. 실증 사이트 바이오가스 발전 시설 배치도

▣ 액비 저장조 계간 축열조(온수 저장조) 활용방안 도출

○ 계간 축열 시스템 개요

- 열에너지를 저장하는 축열시스템(Thermal Energy Storage)은 열에너지의 수요와 공급 사이에 발생할 수 있는 시간적·양적 격차를 해소하는 데 이용되며, 전기에너지 저장과 유사한 기능을 하므로 thermal battery라고 할 수 있음
- 이러한 축열 시스템은 열에너지를 저장하는 수단에 따라 현열, 잠열, 화학 축열 및 저장하는 기간에 따라 단기 및 장기 축 열로 구분
- 물의 현열을 이용해서 하루 또는 수일 단위로 열에너지를 저장하였다가 공급하는 단기 축열은 태양열 설비, 심야전력 이용 공조 시스템, 지역난방 등에서 널리 이용
- 계간 축열 시스템은 잉여 열에너지의 저장 수단으로 이용됨. 잉여 열에너지의 공급과 수요 사이에 시간적 격차가 존재하므로 축열 시스템의 활용이 필수적임.
- 예를 들어, 태양에너지는 주야간 수급 격차 및 계절간 수급격차가 존재함. 열에너지 수요가 급격히 줄어드는 여름철에는 태양에너지가 더 많이 생산되며, 겨울철에는 생산된 열에너지의 수요량에 비해 부족한 것이 일반적임. 이 때문에 잉여 열에너지를 축열 시스템을 통해 축열하여 흡수식 또는 흡착식 냉동기의 활용이 고려됨

○ 계간 축열 방식

① 탱크 축열방식(Tank thermal energy storage, TTES)

- 지중 또는 지상에 설치되는 콘크리트(reinforced concrete) 축열조 방식. 탱크 축열 방식의 축열 용량은 약 60~80 kWh/m³ 범위이고 다른 축열 방식에 비해 가장 열손실이 적음
- 체적 대비 표면적에 대한 기술적 최적화가 용이한 방식이라고 할 수 있으나, 지중수를 피해야 하고 설치비용이 상대적으로 높은 단점

② 피트 축열방식((Pit thermal energy storage, PTES)

- 인공 또는 자연의 웅덩이에 축열재를 채우고 뚜껑을 닫는 방식
- 일반적으로 경사진 피트 벽체에 단열재가 설치되고 방수형 플라스틱 포일로 라이닝 처리가 이루어짐
- 피트형 축열조는 물을 사용하거나 자갈과 물의 혼합재로 채워지는 방식을 적용할 수 있다. 이때 자갈의 비율은 약 60~ 70% 정도이며 지붕의 설치가 용이하다는 장점이 있으나, 저장 열량이 약 30~50 kWh/m³ 정도로 탱크 방식에 비해서 적은 단점
- 자갈을 이용하는 경우 축열조 상부의 공간을 다른 용도, 예를 들어 축열조 지상공간을 주차 공간으로 이용할 수도 있음
- 저장 가능한 최고 온도는 약 80℃이며, 역시 지중수가 없는 곳을 선택해야 함

③ 관정 축열방식(Borehole thermal energy storage, BTES)

- 수분이 포화상태로 존재하는 토양에 열을 직접적으로 저장하는 방식
- 지열 히트펌프의 지열 열교환기와 같이 대용량 열교환기를 지중에 설치하기 위하여 U자형 튜브가 수직형 관정에 삽입
- 축열 운전기간에는 유동 방향이 중앙부에서 축열 지점의 경계부위로 이루어져 높은 온도는 중앙부에서 나타나고 가장자리로 갈수록 온도는 낮아지도록 하며, 방열 운전 기간에는 유동의 방향이 반대가 됨
- 이 축열 방식에서는 가열된 지중의 체적이 축열 체적이 되며, 축열부의 상단부 표면은 단열되어야 한다.

④ 대수 축열방식(Aquifer thermal energy storage, ATES)

- 자연적으로 생성된 대수층(aquifer)을 이용하여 축열하는 방식
- 축열 기간에는 차가운 지중수를 냉수층에서 뽑은 후에 가열시켜 온수 층에 집어넣고, 방열 기간에는 유동 방향을 반대로 하여 온수층에서 온수를 뽑아내어 사용 후 온도가 낮아지면 냉수층에 보내는 방식
- 이와 같이, 서로 다른 유동 방향으로 인해 냉수층과 온수 층에는 펌프가 연결되어야 하고 배관망이 필요하게 된다.

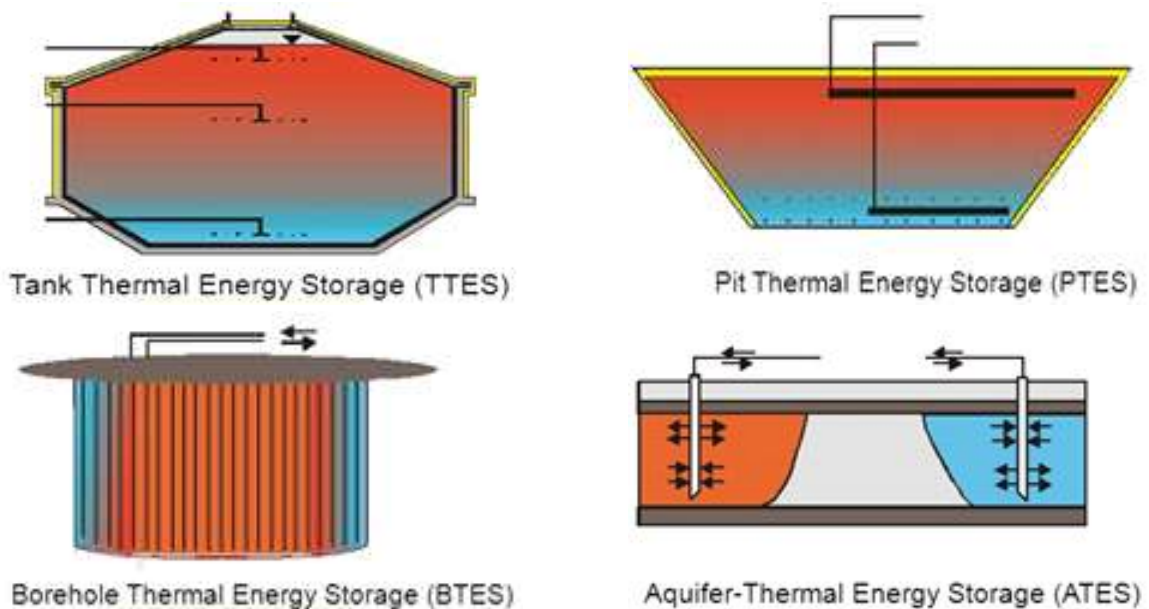


그림 50. 계간 축열 방식에 따른 축열조 구성

- 표 29에서 보는 바와 같이 축열방식에 대해 축열기술 검토결과, 본 과제에서는 기존에 운영되고 있는 액비 저장조를 축열조로 활용하는 데 있어서 액비 저장조는 탱크 축열방식에서 제시한 지중 콘크리트 축열방식과 동일한 형태를 갖추고 있어 기존 액비 저장조를 축열조를 활용한다면 축열조 건설 비용 절감 효과를 볼 수 있음
- 하지만, 기존 액비 저장조를 축열조로 활용하기 위해서는 축열수 공급 배관 및 외부와의 온도차로 인한 열 손실을 최소화하기 위한 단열 시공이 필요함

표 31. 축열 형태에 따른 축열조 건설 비용

축열 형태	단위	단위투자비 범위	비고
탱크 축열	원/m ³	200,000	기존 액비저장조 형태와 유사
피트 축열	원/m ³	198,000	높은 축열조 비용
관정 축열	원/m ³	80,000	지열에너지 적용 가능하나, 본 과제에 해당 사항 없음
대수층 축열	원/m ³	53,000	적정 대수층 온도 안정화 요구 시간 최소 2년 이상 (사업기간 내 활용 어려움)

☐ 액비 저장조 축열 성능 향상을 위한 축열조 구성요소 조사/평가

- 액비 저장조를 축열조로 활용하기 위해서는 외부(외기)온도에 따른 열손실을 최소화 할수 있는 방안 도출이 필요함
- 그림 51은 정읍시의 대기 기상온도 변화를 보면 잉여 열 에너지를 저장하는 축열조에 있어서 외기온도로는 최저기온을 고려하여 축열조의 외부 열 손실을 고려해야 함
- 연중 최저기온 동절기에는 최대 -10°C 인 반면, 하절기에는 25°C 의 온도를 보여주고 있음



그림 51. 정읍시의 1년간 대기 온도 변화

- 그림 52에서는 액비 저장조를 축열조로 활용하는 데 있어서 축열 성능 향상을 위한 방안을 도식적으로 보여주고 있음
- 액비 저장조에 축열수가 상부로 공급된다면, 정읍시의 외기온도로 인한 열 손실이 매우 크게 작용할 것이므로 외기온도로의 열 손실을 억제하기 위해서는 액비 저장조 상부에 단열재를 사용하여 액비 저장조 상부로의 열 손실을 억제함에 따라 축열 성능을 향상시킬 수 있음
- 또한 축열조에 온수인 열에너지를 저장하는 데 축열조 내부의 상부와 하부에는 온도차가 발생하게 되며, 이를 성층화라고도 함
- 축열조의 상부와 하부 온도차를 최소화할 수 있으면, 축열수 출구 온도를 일정하게 유지할 수 있는 장점이 있음
- 액비 저장조에 설치되어 운영 중인 산기관을 적절하게 이용하게 되면 축열조의 상부와 하부 온도차를 최소화할 수 있을 것으로 판단됨

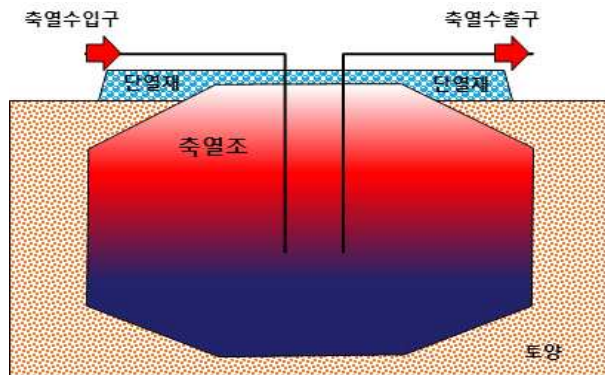


그림 52. 액비 저장조의 축열조 구성 방안

6) 미활용 바이오가스 발전 폐열 활용 사업 타당성 조사

☐ 농촌복지 및 농가 소득증대를 위한 미활용 바이오가스 발전 열 활용 시스템 물질·에너지 수지

○ 바이오가스 발전 폐열 회수 공정 시나리오

- 실증 대상 지역인 전라북도 정읍시 위치한 친환경대현그린(주)이 운영 중인 바이오가스 플랜트는 250톤/일 규모(돈분뇨 175톤/일, 음폐수 75톤/일) 가축분뇨 처리시설로, 연간 13,800 Nm³의 바이오가스를 생산, 가스엔진 열병합 발전을 통해 생산된 약 17.5 GWh/년의 전기를 한전에 매전하고 있지만, 약 12,935 Gcal/년의 발전 열은 미활용
- 본 연구에서는 미활용 에너지 중 약 7.7%에 해당하는 1,000 Gcal/년의 발전 폐열을 회수하여 0.5 ha 규모의 시설 온실의 난방에너지로 활용, 잉여에너지는 축열 후 흡착식 냉난방기를 이용하여 하절기 시설 온실의 냉방 에너지 활용, 잔여 에너지는 주민 친화 시설(수영장, 목욕탕 등)에 공급 가정
- 바이오가스 발전 엔진에서 발생하는 배가스는 그림 53과 같이 최초 569.7℃의 온도로 배출되며, 터보차저를 거치며 유입 가스(바이오가스+연소 공기)를 예열하기 위해 열교환 된 후 500℃의 온도로 배출
- 500℃의 배가스는 상용 바이오가스 발전시스템에서 Shell & Tube 열교환기를 거쳐 최종적으로 150℃로 배출되나, 본 연구에서는 Shell & Tube 열교환기를 거치지 않은 500℃의 배가스로부터 전열교환기를 통해 폐열을 회수하는 시나리오(Case 1)와 Shell & Tube 열교환기를 거친 후 150℃로 배출되는 배가스로부터 전열교환기를 통해 폐열을 회수하는 시나리오(Case 2)에 대하여 각각의 회수 가능한 에너지 총량을 물질·에너지 수지를 통해 산출

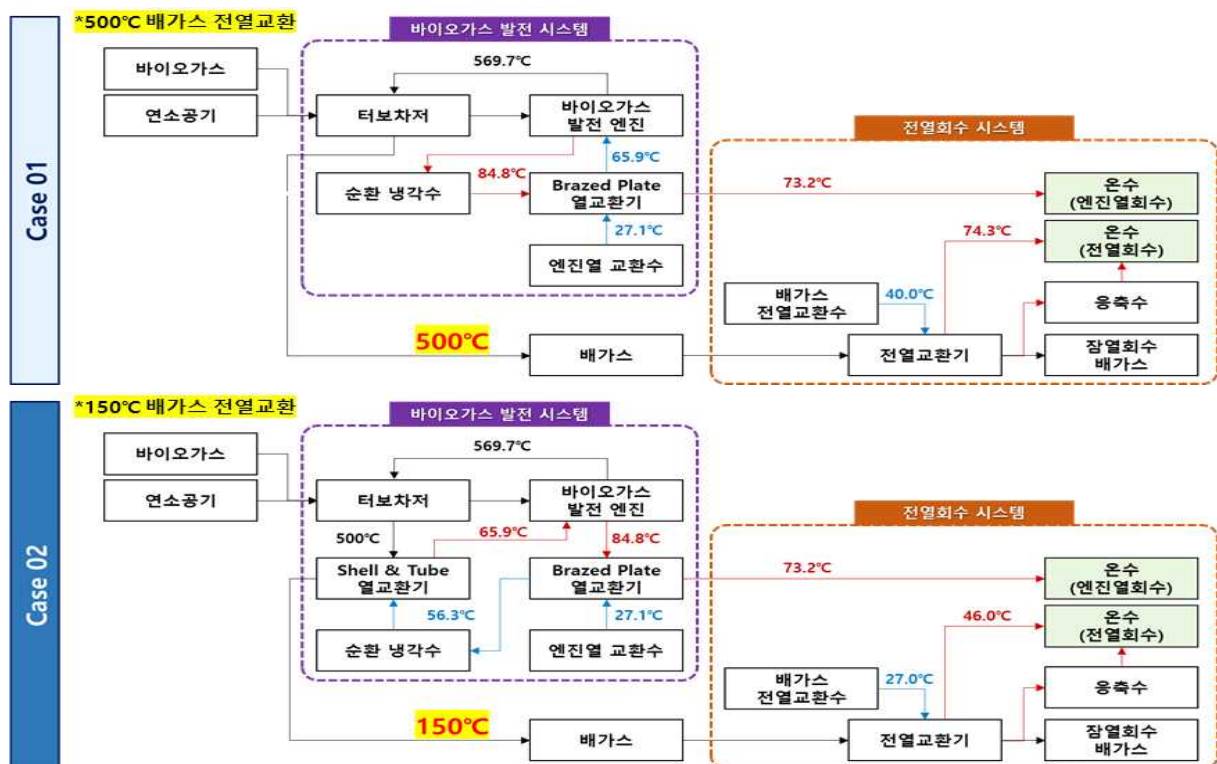


그림 53. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오별 공정 구성도

① Case 1 (500℃ 배가스 전열 교환 시나리오)

- 1,000 Gcal/년의 폐열 에너지를 회수하는 데 필요한 바이오가스 발전량은 108.1 kW로, 이 때 소모되는 바이오가스는 1,241 Nm³/일 (CH₄ 745 Nm³/일, CO₂ 496 Nm³/일, 메탄 함량 60% 가정) 및 연소 공기 9,928 Nm³/일 (O₂ 2,085 Nm³/일 N₂ 7,843 Nm³/일, 공기 중 산소 함량 21%, 과잉 공기비 1.4 가정)로 산출
- 바이오가스 엔진 열 냉각을 위한 순환냉각수는 135.9 m³/일의 유량으로, 엔진 열 냉각 전/후 각각 84.8℃와 65.9℃의 온도로 순환
- 엔진 열 순환냉각수의 재냉각을 위한 엔진 열 교환수는 브레이징 판형 열교환기를 통해 27.1℃의 온도로 유입되어, 열교환 후 73.2℃로 배출되며, 이때의 열 교환량은 2,568.4 Mcal/일, 유량은 55.7 m³/일로 산출
- 500℃의 연소 배가스는 전열교환기에서 47.1℃의 전열 교환수와 열 교환하여 전열 교환수의 온도를 74.3℃까지 가온하며, 최종적으로 배출되는 배가스 온도는 44.2℃로 산출
- 이때, 전열 교환수의 유량은 82.4 m³/일, 현열 회수에너지는 2,225 Mcal/일로 산출되며, 응축수 발생량은 588.3 kg/일, 잠열 회수에너지는 317.1 Mcal/일로 산출
- 본 시나리오에서 회수가능한 폐열 에너지는 엔진 열 교환수 (55.7 m³/일, 2,568.4Mcal/일) 및 전열 교환수 (82.4 m³/일, 2,225 Mcal/일)로, 총 138.1 m³/일, 4,793 Mcal/일의 온수를 공급 가능

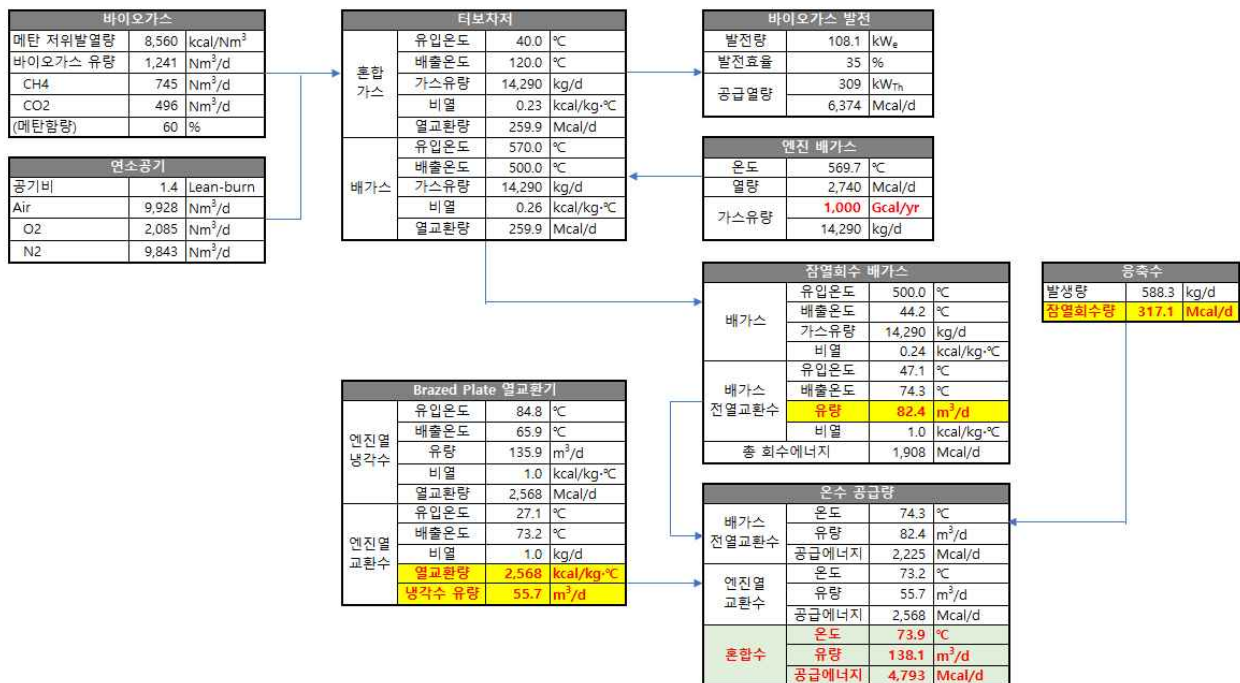


그림 54. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 1)에 따른 상세 물질·에너지 수지

② Case 2 (150℃ 배가스 전열 교환 시나리오)

- 바이오가스 발전량 및 소모되는 바이오가스의 유량은 Case 1과 동일함
- 터보차저를 거쳐 배출되는 500℃의 배가스는 바이오가스 엔진 열 냉각을 위한 순환냉각수와 열 교환되며, 순환냉각수는 135.9 m³/일의 유량으로, 배가스 열교환 전/후 각각 56.3℃와 65.9℃의 온도로 유입 및 유출되며, 배가스 열교환 후 바이오가스 엔진을 거친 후 최종 84.8℃로 순환
- 엔진 열 순환냉각수의 재냉각을 위한 엔진 열 교환수는 브레이징 판형 열교환기를 통해 27.1℃의 온도로 유입되어, 열교환 후 73.2℃로 배출되며, 이때의 열 교환량은 4,335.1 Mcal/일, 유량은 94.0 m³/일로 산출
- 150℃의 연소 배가스는 전열교환기에서 34.4℃의 전열 교환수와 열 교환하여 전열 교환수의 온도를 46.0℃까지 가온하며, 최종적으로 배출되는 배가스 온도는 30.8℃로 산출
- 이때, 전열 교환수의 유량은 79.5 m³/일, 현열 회수에너지는 443 Mcal/일로 산출되며, 응축수 발생량은 890.0 kg/일, 잠열 회수에너지는 479.6 Mcal/일로 산출
- 본 시나리오에서 회수가능한 폐열 에너지는 엔진 열 교환수 (94.0 m³/일, 4,335 Mcal/일) 및 전열 교환수 (80.4 m³/일, 923 Mcal/일)로, 총 174.5 m³/일, 5,258 Mcal/일의 온수를 공급 가능
- Case 2는 Case 1 시나리오 대비 약 465 Mcal/일의 폐열 에너지를 추가로 회수 가능하여 에너지 회수 측면에서 더 유리한 장점이 있으나, 배가스 전열 교환수의 배출온도가 46℃로 낮아 축열에는 적합하지 않고, 시설 온실에 난방에너지로 직접 공급하는 용도로만 사용이 가능할 것으로 판단됨



그림 55. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 2)에 따른 상세 물질·에너지 수지

○ 시설 온실 공급 시나리오

- 바이오가스 발전시스템에서 회수된 폐열(온수)은 발전소 인근(0.5 km 이내)에 설치된 시설 온실(구아바 및 파프리카)의 난방을 위해 공급되며, 시설 온실 공급 후 남은 잉여 에너지는 바이오가스 발전소와 연계된 액비저장조를 축열조로 활용하여 축열 하는 공급/저장 시나리오를 가정
- 시설 온실의 난방을 위한 목표 온도는 상기 절에서 조사된 재배작물의 생육조건에 따라 구아바 30℃, 파프리카 25℃를 유지하는 것으로 가정

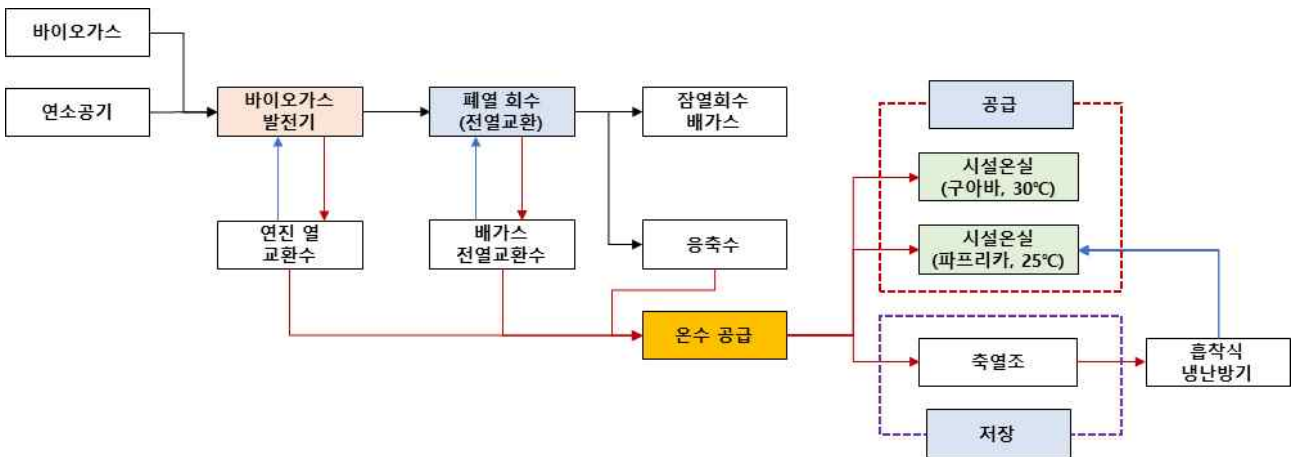
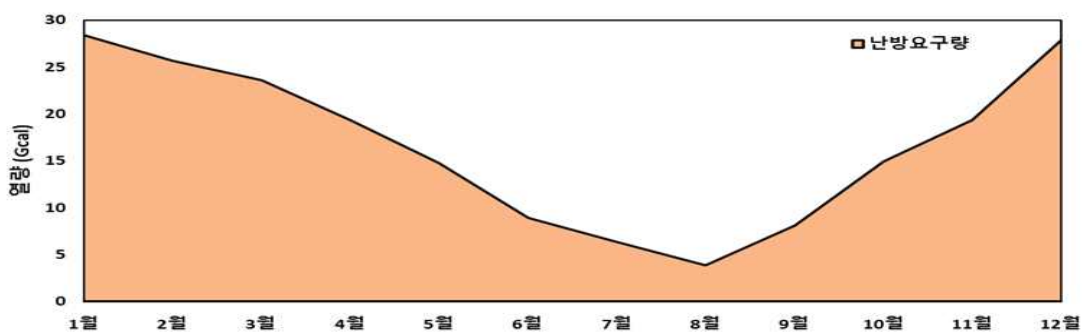


그림 56. 폐열 회수에너지의 공급/저장 시스템 구성도

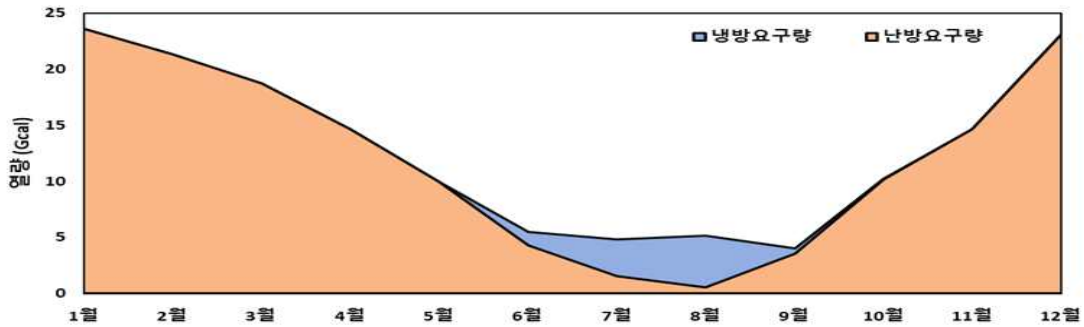
- 구아바 시설 온실의 경우 1년 중 별도의 냉방 에너지는 필요하지 않으며, 0.1 ha당 총 201.4 Gcal/년의 난방에너지의 공급 필요
- 난방에너지 수요는 동절기인 10월~3월까지 가장 많이 요구되는 것으로 산출되었으며, 1월의 경우 28.4 Gcal/월로 가장 많은 난방에너지가 요구되는 반면, 하절기인 8월에는 3.8 Gcal/월의 난방에너지만 요구되는 것으로 산출



	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
난방 요구량	28.44	25.70	23.56	19.35	14.79	8.95	6.34	3.84	8.10	14.95	19.32	27.96
냉방 요구량	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
총 수요량	28.44	25.70	23.56	19.35	14.79	8.95	6.34	3.84	8.10	14.95	19.32	27.96

그림 57. 구아바 시설온실(0.1 ha)의 월별 냉·난방 에너지 요구량

- 파프리카 시설 온실 0.1 ha의 경우 총 146.1 Gcal/년의 난방에너지의 공급이 필요하며, 하절기인 5월~10월까지 총 9.8 Gcal/년의 냉방 에너지가 요구되어, 총 155.87 Gcal/년의 냉·난방에너지가 요구되는 것으로 산출
- 난방에너지 수요는 동절기인 10월~4월까지 가장 많이 요구되는 것으로 산출되었으며, 1월의 경우 23.6 Gcal/월로 가장 많은 난방에너지가 요구되는 반면, 하절기인 8월에는 0.5 Gcal/월의 난방에너지만 요구되는 대신 4.7 Gal/월의 냉방 에너지가 요구되는 것으로 산출



	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
난방 요구량	23.61	21.33	18.73	14.67	9.95	4.27	1.56	0.52	3.58	10.14	14.64	23.12
냉방 요구량	-	-	-	-	0.05	1.22	3.28	4.66	0.47	0.08	-	-
총 수요량	23.61	21.33	18.73	14.67	10.00	5.49	4.84	5.18	4.04	10.22	14.64	23.12

그림 58. 파프리카 시설온실(0.1 ha)의 월별 냉·난방 에너지 요구량

- 본 연구에서는 0.5 ha 규모의 시설 온실에 냉·난방 에너지를 공급할 경우를 가정하여 시설 온실에 요구되는 폐열 에너지를 산정하였으며, 시설 온실 공급 후 잉여에너지를 축열할 경우 요구되는 축열조의 용량을 산정하였음
- 또한, 다양한 규모의 구아바와 파프리카 시설 운영을 가정하여 다음과 같이 총 6개의 시나리오로 시설 온실 냉·난방 에너지 공급 및 축열조 요구량을 산정함

- Case *-1 : 파프리카 0.5 ha
- Case *-2 : 구아바 0.1 ha + 파프리카 0.4 ha
- Case *-3 : 구아바 0.2 ha + 파프리카 0.3 ha
- Case *-4 : 구아바 0.3 ha + 파프리카 0.2 ha
- Case *-5 : 구아바 0.4 ha + 파프리카 0.1 ha
- Case *-6 : 구아바 0.5 ha

- 바이오가스 발전시스템의 배가스 폐열을 시설 온실 및 주민복지시설에 안정적으로 공급하기 위해서는 회수된 온수를 최소한의 열 손실로 공급할 수 있는 배관 및 이송거리 산정이 필수적임
- 일반적인 온수배관의 설계 시 열 손실률은 10% 이내로 고려되며, 본 연구에서는 안정적인 열 공급을 위하여 열 손실률 5% 이내로 공급이 가능한 범위에서의 온수 배관 및 이송거리를 산정함
- 바이오가스 발전시스템의 배가스로부터 회수된 폐열(온수)을 인근의 시설 온실 및 축열조까지 이송하는 동안 발생하는 배관 열 손실은 다음 식을 사용하여 산출됨

$$Q = (1 - e) \times K \times F \times (t_2 - t_1) \times L \quad (16)$$

여기서, Q = 단위 방사열량 (kcal/h)
 e = 보온재의 효율 (%)
 K = 전열계수 (kcal/m·hr·°C)
 F = 배관 1 m당 표면적 (m²/m)
 t₂ = 배관내의 온수온도 (°C)
 t₁ = 관 외부 공기온도 (°C)
 L = 이송거리 (m)

- 상기 식에 따라 산출된 배관 재질 및 보온재의 보온효율에 따른 열 손실률의 변화를 그림 59에 제시함

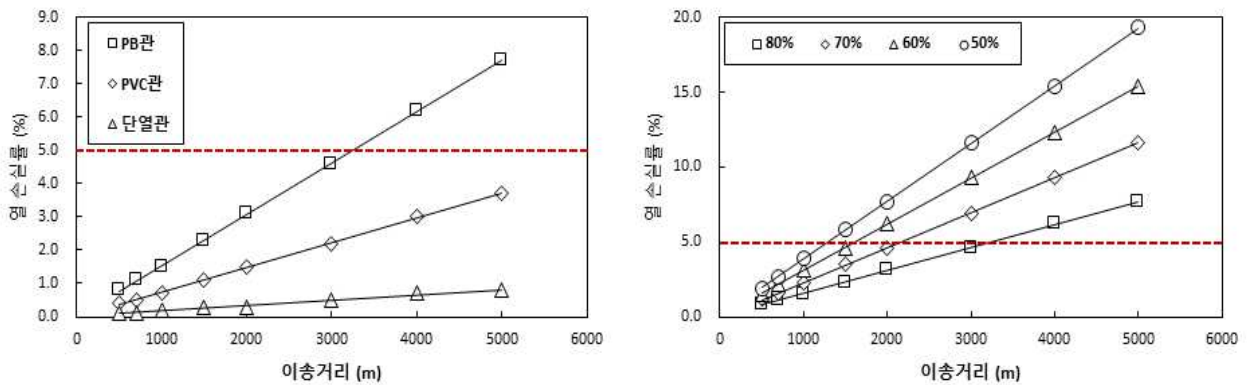


그림 59. 배관재질(a) 및 보온재의 보온효율(b)에 따른 열 손실률 변화

- 온수 배관의 재질은 긴 이송거리에 대한 열 손실을 고려하여 열전도율이 낮은 단열관 (K=0.036 kcal/m·hr·°C), PVC관 (K=0.16 kcal/m·hr·°C), PB관 (K=0.33 kcal/m·hr·°C)의 적용을 고려함
- 5% 이하의 열 손실률 달성을 위하여 PB관의 경우 최대 3 km 반경에서 적용 가능하며 PVC관의 적용 시 최대 5 km 반경에서 시설 온실의 설치가 가능함
- 단열관을 사용할 경우 5 km 반경 이상에서도 1% 이내의 낮은 열 손실 확보가 가능하나, 배관 단가 및 거리에 따른 배관 매립 비용이 상승하여, 실제 활용은 어려울 것으로 판단됨

- PB 배관의 경우 1 km 반경 이내에서 보온재의 보온효율 50% 이상 시 5% 이내의 열 손실을 확보가 가능하며, 보온효율 80% 이상의 보온재를 사용할 경우 최대 1% 이내의 열 손실을 달성이 가능함
- 따라서, 바이오가스 배가스 폐열의 시설온실 및 주민복지시설 공급을 위한 온수 배관의 재질은 250A 규격 ($F=0.78 \text{ m}^2/\text{m}$)의 PB관 ($K=0.33 \text{ kcal}/\text{m}\cdot\text{hr}\cdot^\circ\text{C}$) 및 보온재의 보온효율(e) 80%를 가정하였음
- 시설 온실에 난방에너지를 공급한 후, 축열조로 유입되는 공급 열량은 500°C 의 배가스로부터 전열 교환한 폐열 에너지(Case 1)의 경우 665.4~941.3 Gcal/년의 범위로 산출되었으며, 150°C 의 배가스로부터 전열 교환한 폐열 에너지(Case 2)의 경우 888.4~1164.3 Gcal/년의 범위로 산출
- 시설 온실 난방에너지 공급 후 축열조로 유입되는 열량은 파프리카 시설 온실의 규모가 크고, 구아바 시설 온실의 규모가 작아질수록 축열조로 유입되는 공급 열량이 증가하는 경향을 보였으며, 이는 구아바의 생육온도인 30°C 를 유지하기 위한 난방에너지 요구량이 하절기 파프리카 시설 온실의 난방 에너지 요구량보다 많아 더 많은 열량이 시설 온실에 투입되기 때문으로 판단됨
- 잉여에너지의 축열을 위한 축열조 1개 cell의 부피는 415 m^3 , 축열 성능은 본 연구의 최종 목표인 $60 \text{ kW}/\text{m}^3$ 를 가정하였을 때 축열조 1개 cell당 축열 용량은 21.4 Gcal로 산출
- 시설 온실의 난방에너지를 공급 후, 잉여에너지를 전량 축열조에 저장할 때 요구되는 축열조의 부피는 Case 1의 경우 12,896~18,243 m^3 /년의 축열조가 필요하며, 이는 약 31~44개의 cell에 해당
- 단, 구아바 시설 온실 0.5 ha 이상 규모(Case 1-6)의 경우 동절기(1월~2월) 요구되는 난방에너지가 공급 열량보다 높아, 해당 시기에는 잉여에너지의 축열이 불가능하며, 11~12월에 축열된 에너지를 소모하여 난방에너지를 추가로 공급하여야 하는 것으로 판단됨
- Case 2의 경우 17,216~22,563 m^3 /년의 축열조가 필요하며, 이는 약 41~54개의 cell에 해당함. 단, Case 2의 경우 바이오가스 발전시스템으로부터 회수되는 폐열 에너지가 Case 1보다 많아 모든 기간에서 충분한 양의 난방에너지 공급이 가능한 것으로 산출

표 32. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 1)에 따른 월별 축열조 요구 용량

기간	Case 1-1				Case 1-2				Case 1-3			
	공급열량		축열용량		공급열량		축열용량		공급열량		축열용량	
	Gcal	m ³	개	m ³	Gcal	m ³	개	m ³	Gcal	m ³	개	m ³
1월	24.0	652.5	1.1	464.5	19.1	520.8	0.9	370.8	14.3	389.2	0.7	277.1
2월	21.6	587.5	1.0	418.3	17.2	468.6	0.8	333.6	12.8	349.7	0.6	249.0
3월	48.4	1,316.5	2.3	937.3	43.5	1,184.9	2.0	843.6	38.7	1,053.3	1.8	749.9
4월	64.1	1,744.2	3.0	1,241.8	59.4	1,616.8	2.8	1,151.1	54.7	1,489.4	2.6	1,060.4
5월	92.2	2,510.6	4.3	1,787.5	87.4	2,379.0	4.1	1,693.7	82.6	2,247.3	3.9	1,600.0
6월	116.1	3,159.3	5.4	2,249.3	111.4	3,031.9	5.2	2,158.6	106.7	2,904.6	5.0	2,067.9
7월	134.2	3,653.3	6.3	2,601.0	129.4	3,523.2	6.0	2,508.4	124.7	3,393.0	5.8	2,415.7
8월	139.4	3,794.2	6.5	2,701.3	136.1	3,704.0	6.4	2,637.1	132.8	3,613.7	6.2	2,572.8
9월	119.5	3,253.8	5.6	2,316.6	115.0	3,130.7	5.4	2,228.9	110.5	3,007.5	5.2	2,141.2
10월	91.3	2,485.4	4.3	1,769.5	86.5	2,354.5	4.0	1,676.3	81.7	2,223.6	3.8	1,583.1
11월	64.2	1,748.1	3.0	1,244.6	59.5	1,620.7	2.8	1,153.9	54.9	1,493.3	2.6	1,063.2
12월	26.4	718.3	1.2	511.4	21.6	586.7	1.0	417.7	16.7	455.0	0.8	324.0
총계	941.3	25,623.7	44.0	18,243.1	886.2	24,121.7	41.4	17,173.7	831.0	22,619.7	38.8	16,104.3
기간	Case 1-4				Case 1-5				Case 1-6			
	공급열량		축열용량		공급열량		축열용량		공급열량		축열용량	
	Gcal	m ³	개	m ³	Gcal	m ³	개	m ³	Gcal	m ³	개	m ³
1월	9.5	257.6	0.4	183.4	4.6	125.9	0.2	89.7	- 0.2	- 5.7	0.0	- 4.1
2월	8.5	230.8	0.4	164.3	4.1	111.9	0.2	79.7	- 0.3	- 7.0	0.0	- 5.0
3월	33.9	921.6	1.6	656.2	29.0	790.0	1.4	562.4	24.2	658.3	1.1	468.7
4월	50.0	1,362.0	2.3	969.7	45.4	1,234.6	2.1	879.0	40.7	1,107.2	1.9	788.3
5월	77.7	2,115.7	3.6	1,506.3	72.9	1,984.1	3.4	1,412.6	68.1	1,852.4	3.2	1,318.8
6월	102.0	2,777.2	4.8	1,977.2	97.3	2,649.8	4.5	1,886.5	92.7	2,522.4	4.3	1,795.8
7월	119.9	3,262.9	5.6	2,323.1	115.1	3,132.8	5.4	2,230.4	110.3	3,002.6	5.2	2,137.7
8월	129.4	3,523.5	6.0	2,508.6	126.1	3,433.2	5.9	2,444.3	122.8	3,343.0	5.7	2,380.1
9월	106.0	2,884.4	4.9	2,053.6	101.4	2,761.2	4.7	1,965.9	96.9	2,638.1	4.5	1,878.2
10월	76.9	2,092.8	3.6	1,490.0	72.1	1,961.9	3.4	1,396.8	67.3	1,831.0	3.1	1,303.6
11월	50.2	1,366.0	2.3	972.5	45.5	1,238.6	2.1	881.8	40.8	1,111.2	1.9	791.1
12월	11.9	323.4	0.6	230.2	7.0	191.7	0.3	136.5	2.2	60.1	0.1	42.8
총계	775.8	21,117.7	36.2	15,034.9	720.6	19,615.6	33.7	13,965.5	665.4	18,113.6	31.1	12,896.1

표 33. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 2)에 따른 월별 축열조 요구 용량

기간	Case 2-1				Case 2-2				Case 2-3			
	공급열량		축열용량		공급열량		축열용량		공급열량		축열용량	
	Gcal	m ³	개	m ³	Gcal	m ³	개	m ³	Gcal	m ³	개	m ³
1월	42.9	1,201.6	2.0	831.5	38.1	1,066.1	1.8	737.8	33.2	930.7	1.6	644.0
2월	38.7	1,083.4	1.8	749.7	34.3	961.1	1.6	665.0	29.9	838.7	1.4	580.4
3월	67.3	1,884.8	3.1	1,304.2	62.5	1,749.4	2.9	1,210.5	57.6	1,613.9	2.7	1,116.8
4월	82.4	2,307.7	3.8	1,596.9	77.7	2,176.6	3.6	1,506.2	73.0	2,045.5	3.4	1,415.5
5월	111.2	3,113.4	5.2	2,154.4	106.3	2,977.9	5.0	2,060.7	101.5	2,842.5	4.7	1,966.9
6월	134.4	3,763.7	6.3	2,604.4	129.7	3,632.7	6.1	2,513.7	125.0	3,501.6	5.8	2,423.0
7월	153.1	4,289.1	7.2	2,967.9	148.4	4,155.2	6.9	2,875.3	143.6	4,021.3	6.7	2,782.6
8월	158.3	4,434.1	7.4	3,068.3	155.0	4,341.2	7.2	3,004.0	151.7	4,248.4	7.1	2,939.8
9월	137.9	3,860.9	6.4	2,671.7	133.3	3,734.2	6.2	2,584.0	128.8	3,607.5	6.0	2,496.3
10월	110.2	3,087.4	5.1	2,136.4	105.4	2,952.8	4.9	2,043.2	100.6	2,818.1	4.7	1,950.1
11월	82.5	2,311.8	3.9	1,599.7	77.9	2,180.7	3.6	1,509.0	73.2	2,049.6	3.4	1,418.3
12월	45.3	1,269.3	2.1	878.3	40.5	1,133.9	1.9	784.6	35.6	998.4	1.7	690.9
총계	1,164.3	32,607.1	54.4	22,563.4	1,109.1	31,061.7	51.8	21,494.0	1,053.9	29,516.3	49.2	20,424.6
기간	Case 2-4				Case 2-5				Case 2-6			
	공급열량		축열용량		공급열량		축열용량		공급열량		축열용량	
	Gcal	m ³	개	m ³	Gcal	m ³	개	m ³	Gcal	m ³	개	m ³
1월	28.4	795.3	1.3	550.3	23.6	659.8	1.1	456.6	18.7	524.4	0.9	362.9
2월	25.6	716.4	1.2	495.7	21.2	594.1	1.0	411.1	16.8	471.7	0.8	326.4
3월	52.8	1,478.5	2.5	1,023.1	48.0	1,343.1	2.2	929.4	43.1	1,207.6	2.0	835.6
4월	68.4	1,914.5	3.2	1,324.8	63.7	1,783.4	3.0	1,234.1	59.0	1,652.3	2.8	1,143.4
5월	96.7	2,707.1	4.5	1,873.2	91.8	2,571.6	4.3	1,779.5	87.0	2,436.2	4.1	1,685.8
6월	120.3	3,370.5	5.6	2,332.3	115.7	3,239.4	5.4	2,241.6	111.0	3,108.4	5.2	2,150.9
7월	138.8	3,887.4	6.5	2,690.0	134.0	3,753.5	6.3	2,597.3	129.2	3,619.6	6.0	2,504.7
8월	148.4	4,155.5	6.9	2,875.5	145.1	4,062.6	6.8	2,811.3	141.7	3,969.8	6.6	2,747.0
9월	124.3	3,480.8	5.8	2,408.7	119.8	3,354.1	5.6	2,321.0	115.2	3,227.4	5.4	2,233.3
10월	95.8	2,683.5	4.5	1,856.9	91.0	2,548.8	4.2	1,763.7	86.2	2,414.1	4.0	1,670.5
11월	68.5	1,918.6	3.2	1,327.6	63.8	1,787.5	3.0	1,236.9	59.1	1,656.4	2.8	1,146.2
12월	30.8	863.0	1.4	597.2	26.0	727.5	1.2	503.4	21.1	592.1	1.0	409.7
총계	998.7	27,970.9	46.6	19,355.3	943.6	26,425.5	44.1	18,285.9	888.4	24,880.1	41.5	17,216.5

- 축열조로 저장된 폐열 에너지는 흡착식 냉·난방기를 이용하여 하절기 시설 온실에 냉방 에너지를 공급
- 흡착식 냉·난방기의 열에너지 및 전기에너지 소비량은 각각 60 kW와 0.11 kW, 최대 출력에너지는 30 kW를 가정하였으며, 이때의 에너지 효율(Coefficient of Performance, COP)은 0.5로 산출
- 상기 표 30과 31에서 제시된 축열량에서 냉방 에너지를 공급한 후 축열조의 월별 잔여 열량과 용량을 표 32과 33에 제시
- 축열조에 저장된 에너지를 하절기 시설 온실의 냉방 에너지로 공급 후, 잔여 에너지의 열량은 Case 1의 경우 665.4~843.6 Gcal/년으로 산정되었으며, 이때의 축열조 용량은 12,896~16,348 m³/년으로 산출되었으며, 이는 31~39개의 cell에 해당
- 마찬가지로, Case 2의 경우 축열조 잔여 에너지의 열량은 888.4~1,066.5 Gcal/년으로 산정되었으며, 이때의 축열조 용량은 17,216~20,668 m³/년으로 산출되었으며, 이는 41~49개의 cell에 해당
- 냉방 에너지가 공급되는 5~10월에는 난방에너지의 요구량이 감소하여, Case 1, 2와 관계없이 별도의 축열 에너지 소모 없이도 냉·난방 에너지를 충분히 공급할 수 있는 것으로 산출

표 34. 시설온실 냉방 에너지 공급 후 잔여 축열 용량 (Case 1)

기간	Case 1-1				Case 1-2				Case 1-3			
	사용량	잔여량	축열용량		사용량	잔여량	축열용량		사용량	잔여량	축열용량	
	Gcal	Gcal	개	m ³	Gcal	Gcal	개	m ³	Gcal	Gcal	개	m ³
1월	0	23.97	1.1	464.5	0	19.13	0.9	370.8	0	14.30	0.7	277.1
2월	0	21.58	1.0	418.3	0	17.21	0.8	333.6	0	12.85	0.6	249.0
3월	0	48.37	2.3	937.3	0	43.53	2.0	843.6	0	38.69	1.8	749.9
4월	0	64.08	3.0	1,241.8	0	59.40	2.8	1,151.1	0	54.72	2.6	1,060.4
5월	0.5	91.74	4.3	1,778.0	0.4	87.01	4.1	1,686.2	0.3	82.27	3.8	1,594.3
6월	12.2	103.87	4.9	2,013.0	9.8	101.63	4.7	1,969.6	7.3	99.39	4.6	1,926.1
7월	32.8	101.36	4.7	1,964.4	26.3	103.15	4.8	1,999.1	19.7	104.94	4.9	2,033.7
8월	46.7	92.67	4.3	1,795.9	37.4	98.70	4.6	1,912.8	28.0	104.73	4.9	2,029.6
9월	4.7	114.85	5.4	2,225.7	3.8	111.26	5.2	2,156.2	2.8	107.67	5.0	2,086.7
10월	0.8	90.47	4.2	1,753.2	0.7	85.83	4.0	1,663.3	0.5	81.19	3.8	1,573.4
11월	0	64.22	3.0	1,244.6	0	59.54	2.8	1,153.9	0	54.86	2.6	1,063.2
12월	0	26.39	1.2	511.4	0	21.55	1.0	417.7	0	16.72	0.8	324.0
총계	97.8	843.6	39.4	16,348.1	78.2	807.9	37.7	15,657.7	58.7	772.3	36.1	14,967.3
기간	Case 1-4				Case 1-5				Case 1-6			
	사용량	잔여량	축열용량		사용량	잔여량	축열용량		사용량	잔여량	축열용량	
	Gcal	Gcal	개	m ³	Gcal	Gcal	개	m ³	Gcal	Gcal	개	m ³
1월	0	9.46	0.4	183.4	0	4.63	0.2	89.7	0	- 0.21	0.0	- 4.1
2월	0	8.48	0.4	164.3	0	4.11	0.2	79.7	0	- 0.26	0.0	- 5.0
3월	0	33.86	1.6	656.2	0	29.02	1.4	562.4	0	24.19	1.1	468.7
4월	0	50.04	2.3	969.7	0	45.36	2.1	879.0	0	40.68	1.9	788.3
5월	0.2	77.53	3.6	1,502.5	0.1	72.79	3.4	1,410.7	0	68.05	3.2	1,318.8
6월	4.9	97.15	4.5	1,882.7	2.4	94.91	4.4	1,839.3	0	92.66	4.3	1,795.8
7월	13.1	106.73	5.0	2,068.4	6.6	108.52	5.1	2,103.1	0	110.31	5.2	2,137.7
8월	18.7	110.76	5.2	2,146.4	9.3	116.78	5.5	2,263.2	0	122.81	5.7	2,380.1
9월	1.9	104.09	4.9	2,017.2	0.9	100.50	4.7	1,947.7	0	96.92	4.5	1,878.2
10월	0.3	76.55	3.6	1,483.4	0.2	71.91	3.4	1,393.5	0	67.27	3.1	1,303.6
11월	0	50.18	2.3	972.5	0	45.50	2.1	881.8	0	40.82	1.9	791.1
12월	0	11.88	0.6	230.2	0	7.04	0.3	136.5	0	2.21	0.1	42.8
총계	39.1	736.7	34.4	14,276.9	19.6	701.1	32.7	13,586.5	0	665.4	31.1	12,896.1

표 35. 시설온실 냉방 에너지 공급 후 잔여 축열 용량 (Case 2)

기간	Case 2-1				Case 2-2				Case 2-3			
	사용량	잔여량	축열용량		사용량	잔여량	축열용량		사용량	잔여량	축열용량	
	Gcal	Gcal	개	m ³	Gcal	Gcal	개	m ³	Gcal	Gcal	개	m ³
1월	0	42.90	2.0	831.5	0	38.07	1.8	737.8	0	33.23	1.6	644.0
2월	0	38.68	1.8	749.7	0	34.32	1.6	665.0	0	29.95	1.4	580.4
3월	0	67.30	3.1	1,304.2	0	62.46	2.9	1,210.5	0	57.63	2.7	1,116.8
4월	0	82.40	3.8	1,596.9	0	77.72	3.6	1,506.2	0	73.04	3.4	1,415.5
5월	0.5	110.68	5.2	2,144.9	0.4	105.94	4.9	2,053.1	0.3	101.20	4.7	1,961.3
6월	12.2	122.19	5.7	2,368.1	9.8	119.95	5.6	2,324.7	7.3	117.71	5.5	2,281.2
7월	32.8	120.30	5.6	2,331.3	26.3	122.09	5.7	2,366.0	19.7	123.87	5.8	2,400.7
8월	46.7	111.60	5.2	2,162.9	37.4	117.63	5.5	2,279.7	28.0	123.66	5.8	2,396.5
9월	4.7	133.17	6.2	2,580.8	3.8	129.58	6.1	2,511.3	2.8	126.00	5.9	2,441.8
10월	0.8	109.40	5.1	2,120.2	0.7	104.76	4.9	2,030.2	0.5	100.12	4.7	1,940.3
11월	0	82.54	3.9	1,599.7	0	77.86	3.6	1,509.0	0	73.18	3.4	1,418.3
12월	0	45.32	2.1	878.3	0	40.49	1.9	784.6	0	35.65	1.7	690.9
총계	97.8	1,066.5	49.8	20,668.5	78.2	1,030.9	48.1	19,978.1	58.7	995.2	46.5	19,287.7
기간	Case 2-4				Case 2-5				Case 2-6			
	사용량	잔여량	축열용량		사용량	잔여량	축열용량		사용량	잔여량	축열용량	
	Gcal	Gcal	개	m ³	Gcal	Gcal	개	m ³	Gcal	Gcal	개	m ³
1월	0	28.40	1.3	550.3	0	23.56	1.1	456.6	0	18.72	0.9	362.9
2월	0	25.58	1.2	495.7	0	21.21	1.0	411.1	0	16.84	0.8	326.4
3월	0	52.79	2.5	1,023.1	0	47.96	2.2	929.4	0	43.12	2.0	835.6
4월	0	68.36	3.2	1,324.8	0	63.68	3.0	1,234.1	0	59.00	2.8	1,143.4
5월	0.2	96.46	4.5	1,869.4	0.1	91.72	4.3	1,777.6	0	86.99	4.1	1,685.8
6월	4.9	115.47	5.4	2,237.8	2.4	113.23	5.3	2,194.4	0	110.99	5.2	2,150.9
7월	13.1	125.66	5.9	2,435.3	6.6	127.45	6.0	2,470.0	0	129.24	6.0	2,504.7
8월	18.7	129.69	6.1	2,513.3	9.3	135.72	6.3	2,630.2	0	141.75	6.6	2,747.0
9월	1.9	122.41	5.7	2,372.3	0.9	118.83	5.5	2,302.8	0	115.24	5.4	2,233.3
10월	0.3	95.48	4.5	1,850.4	0.2	90.84	4.2	1,760.5	0	86.20	4.0	1,670.5
11월	0	68.50	3.2	1,327.6	0	63.82	3.0	1,236.9	0	59.14	2.8	1,146.2
12월	0	30.81	1.4	597.2	0	25.98	1.2	503.4	0	21.14	1.0	409.7
총계	39.1	959.6	44.8	18,597.3	19.6	924.0	43.1	17,906.9	0	888.4	41.5	17,216.5

○ 주민복지시설 공급 시나리오

- 시설 온실의 냉·난방 에너지 공급 후 축열조에 잔류하는 잉여에너지는 바이오가스 발전소 인근(10 km 이내)의 주민시설(수영장, 목욕탕 등)에 공급하여 주민복지를 향상하는 방안을 모색함
- 수영장 용수는 연중 26℃를 유지하기 위한 열에너지를 공급하고, 목욕탕의 경우 급탕 보일러(60℃) 가온을 위한 열에너지를 공급하는 것을 가정하여 공급가능한 온수량 산출

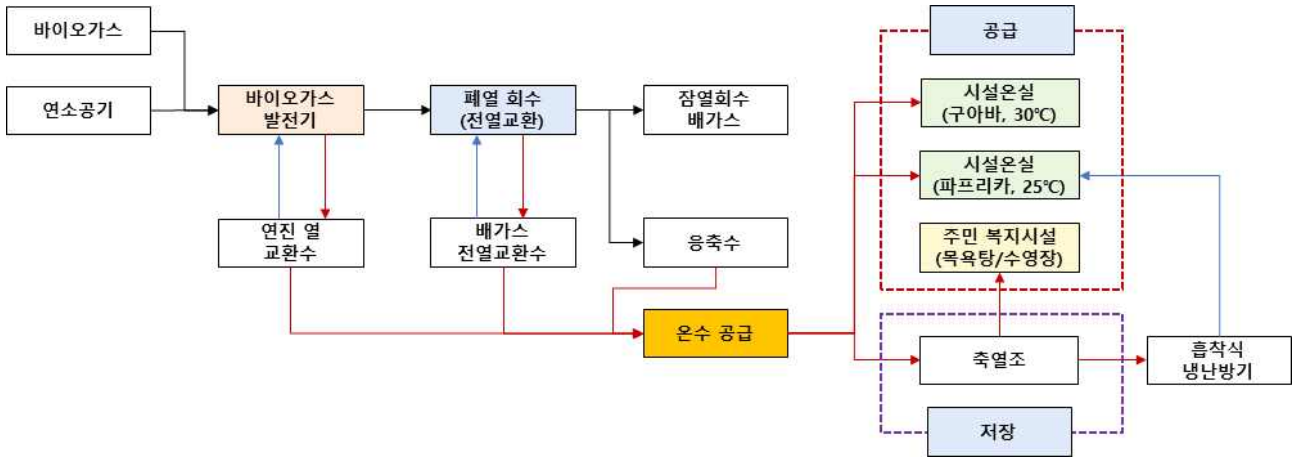


그림 60. 폐열 회수에너지의 시설온실 및 주민복지시설 공급 시스템 구성도

- 축열조에서 공급되는 폐열(온수)을 인근의 주민복지 시설까지 이송하는 동안 발생하는 배관 열 손실은 상기 식 14와 동일하게 산정하였으며, 이송 거리 10 km 이내에서 배관 열 손실은 10% 내외로 산정
- 500℃의 배가스로부터 전열 교환 된 발전 폐열을 활용(Case 1)하는 경우 총공급 가능한 열량 1,671.9 Gcal/년 중 시설 온실의 냉·난방에너지로 사용되는 열량은 시설 온실의 규모에 따라 828.3 ~ 1,006.5 Gcal/년일 때, 주민시설에서 활용가능한 잉여에너지는 665.4 ~ 843.6 Gcal/년으로 산출
- 이는, 수영장에 전량 공급 시 275.0~348.6 m³/일의 수영장 용수를 가온할 수 있으며, 목욕탕에 전량 공급 시 41.2~52.3 m³/일의 급탕 온수를 가온할 수 있는 용량으로 산출

표 36. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 1)별 주민시설 온수 공급량

항목	단위	Case 1-1	Case 1-2	Case 1-3	Case 1-4	Case 1-5	Case 1-6	
총공급량	(Gcal/yr)	1,732.1	1,732.1	1,732.1	1,732.1	1,732.1	1,732.1	
시설 온실 공급량	(Gcal/yr)	828.3	864.0	899.6	935.2	970.8	1,006.5	
주민시설 사용량	(Gcal/yr)	903.8	868.2	832.5	796.9	761.3	725.7	
	(Mcal/d)	2,476.1	2,378.5	2,280.9	2,183.3	2,085.7	1,988.1	
주민 시설	수영장	(m ³ /d)	373.5	358.8	344.0	329.3	314.6	299.9
	목욕탕	(m ³ /d)	56.0	53.8	51.6	49.4	47.2	45.0

- 바이오가스 발전 폐열(500℃)을 회수하여 시설 온실 및 주민복지시설 공급 시나리오에 따른 축열조의 월별 용량 변화를 표 35에 제시
- 바이오가스 발전 폐열을 축열조에 저장이 가능한 시기는 하절기가 시작되는 5월부터 10월까지이며, 시설 온실 규모별 시나리오에 따라 최대 7.9~10.4개의 축열조가 필요한 것으로 산출
- 동절기 난방이 본격적으로 시작되는 11월부터는 축열조에 저장된 에너지를 사용함으로써 축열조의 누적 용량은 점차 감소하며, 4월에 축열조에 저장된 에너지를 전량 소비 가능한 것으로 판단됨

표 37. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 1)에 따른 월별 축열조 가동 개수

(단위: 개)

	Case 1-1	Case 1-2	Case 1-3	Case 1-4	Case 1-5	Case 1-6
5월	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
6월	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3
7월	3.9	4.1	4.3	4.5	4.6	4.8
8월	4.9	5.5	6.1	6.7	7.3	7.9
9월	7.0	7.6	8.2	8.8	9.3	9.9
10월	7.9	8.4	8.9	9.4	9.9	10.4
11월	7.7	8.1	8.5	8.9	9.3	9.7
12월	5.6	5.9	6.2	6.6	6.9	7.2
1월	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6
2월	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.2
3월	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
4월	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

- 150℃의 배가스로부터 전열 교환 된 발전 폐열을 활용(Case 2)하는 경우 공급가능한 열량 1,894.8 Gcal/년 중 시설 온실의 냉·난방에너지로 사용되는 열량은 시설 온실의 규모에 따라 828.3 ~ 1,006.5 Gcal/년일 때, 주민시설에서 활용가능한 잉여 에너지는 888.4 ~ 1,066.5 Gcal/년으로 산출
- 이는, 수영장에 전량 공급 시 367.1 ~ 440.7 m³/일의 수영장 용수를 가온할 수 있으며, 목욕탕에 전량 공급 시 55.1 ~ 66.1 m³/일의 급탕 온수를 가온할 수 있는 용량으로 산출

표 38. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 2)별 주민시설 온수 공급량

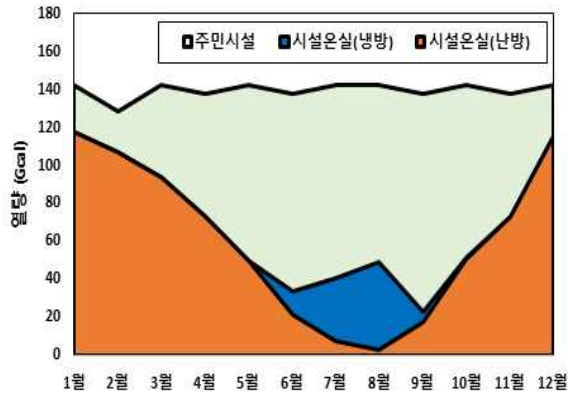
항목		단위	Case 2-1	Case 2-2	Case 2-3	Case 2-4	Case 2-5	Case 2-6
총공급량		(Gcal/yr)	1,899.8	1,899.8	1,899.8	1,899.8	1,899.8	1,899.8
시설 온실 공급량		(Gcal/yr)	828.3	864.0	899.6	935.2	970.8	1,006.5
주민시설 사용량		(Gcal/yr)	1,071.5	1,035.9	1,000.3	964.6	929.0	893.4
		(Mcal/d)	2,935.7	2,838.1	2,740.5	2,642.9	2,545.3	2,447.6
주민 시설	수영장	(m ³ /d)	442.8	428.1	413.4	398.6	383.9	369.2
	목욕탕	(m ³ /d)	66.4	64.2	62.0	59.8	57.6	55.4

- 바이오가스 발전 폐열(150℃)을 회수하여 시설 온실 및 주민복지 시설 공급 시나리오에 따른 축열조의 월별 용량 변화를 표 35에 제시
- 바이오가스 발전 폐열을 축열조에 저장이 가능한 시기는 하절기가 시작되는 5월부터 10월까지이며, 시설 온실 규모별 시나리오에 따라 최대 7.9~10.4개의 축열조가 필요한 것으로 산출
- 동절기 난방이 본격적으로 시작되는 11월부터는 축열조에 저장된 에너지를 사용함으로써 축열조의 누적 용량은 점차 감소하며, 4월에 축열조에 저장된 에너지를 전량 소비 가능한 것으로 산출되어, Case 1과 동일한 축열조 용량이 요구되는 것으로 판단됨

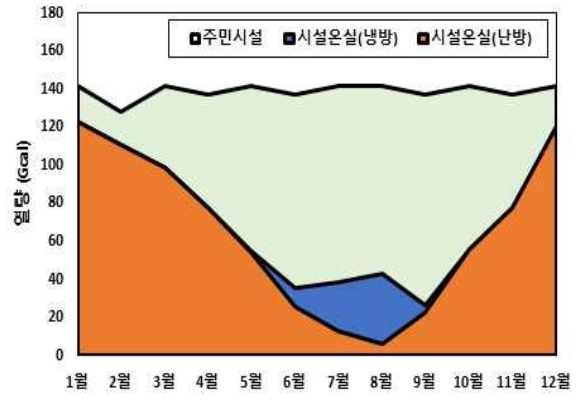
표 39. 바이오가스 발전 폐열 회수 시나리오(Case 2)에 따른 월별 축열조 가동 개수

(단위: 개)

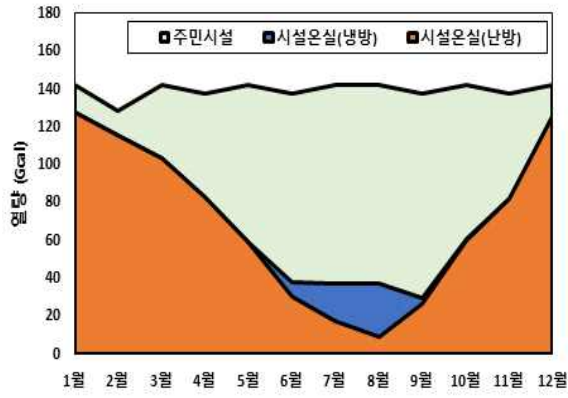
	Case 2-1	Case 2-2	Case 2-3	Case 2-4	Case 2-5	Case 2-6
5월	0.9	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
6월	2.6	2.5	2.5	2.4	2.4	2.3
7월	3.9	4.1	4.3	4.5	4.6	4.8
8월	4.9	5.5	6.1	6.7	7.3	7.9
9월	7.0	7.6	8.2	8.8	9.3	9.9
10월	7.9	8.4	8.9	9.4	9.9	10.4
11월	7.7	8.1	8.5	8.9	9.3	9.7
12월	5.6	5.9	6.2	6.6	6.9	7.2
1월	3.3	3.6	3.8	4.1	4.3	4.6
2월	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.2
3월	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
4월	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



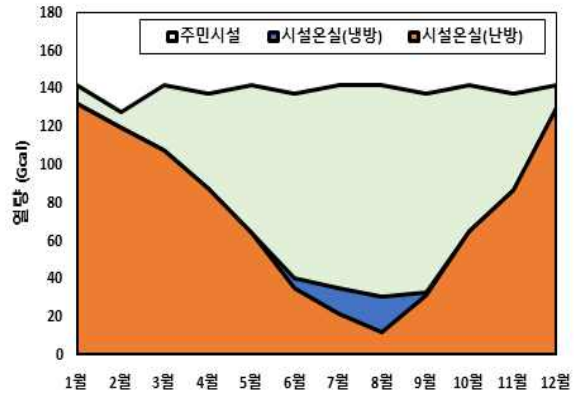
Case 1-1



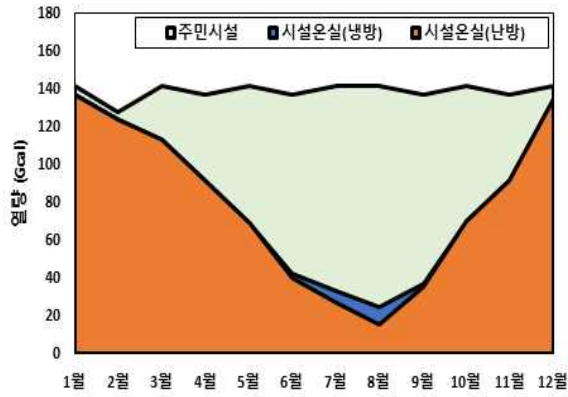
Case 1-2



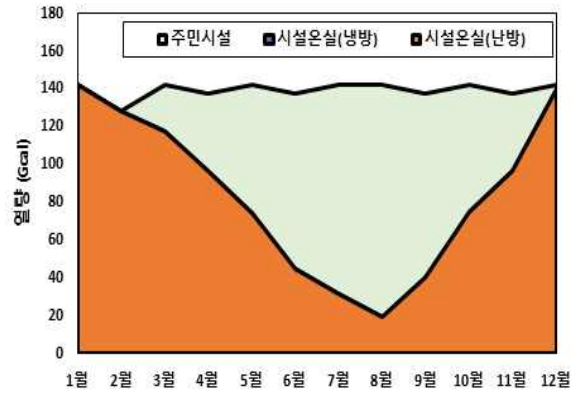
Case 1-3



Case 1-4

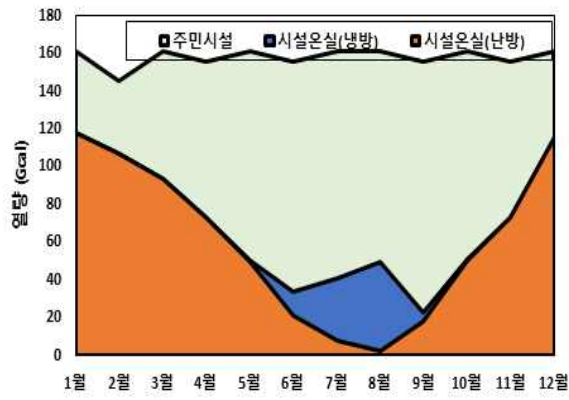


Case 1-5

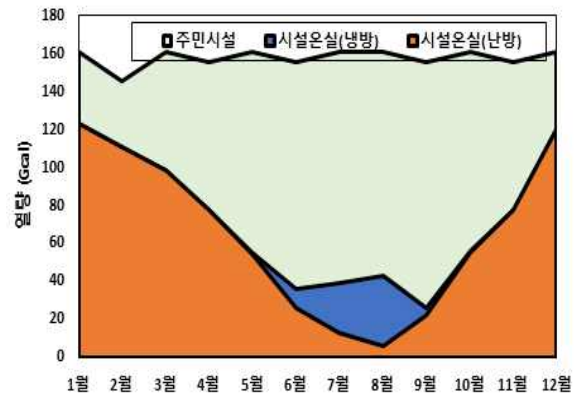


Case 1-6

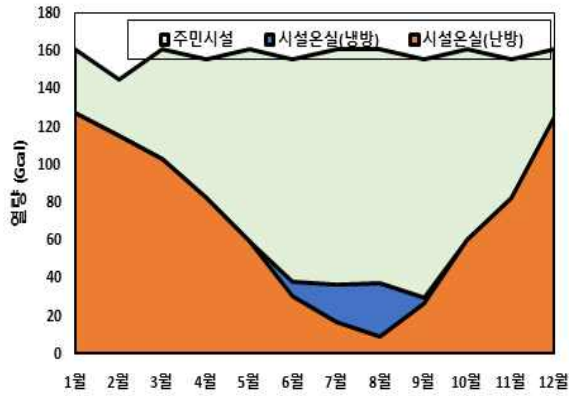
그림 61. 바이오가스 발전 폐열 회수(Case 1)에 따른 월별 에너지 공급 시나리오



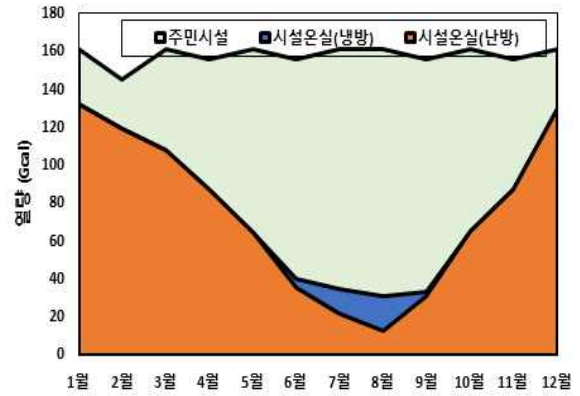
Case 2-1



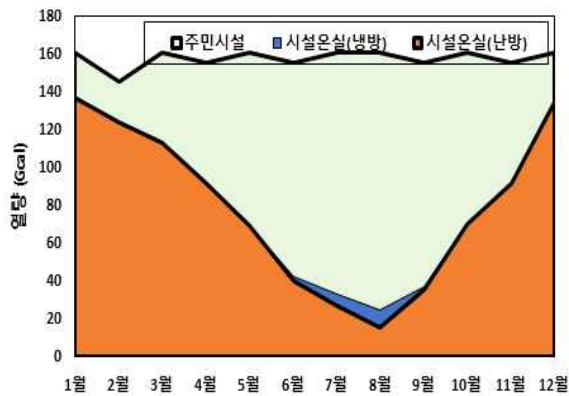
Case 2-2



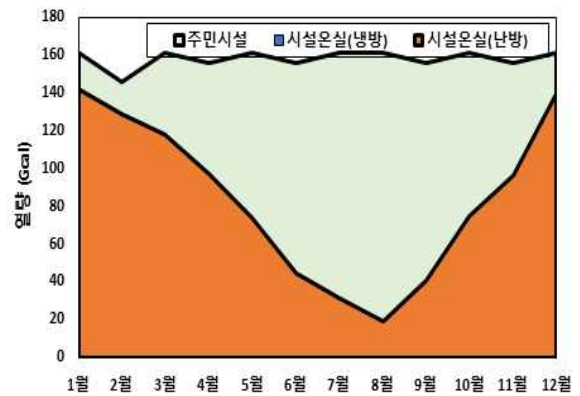
Case 2-3



Case 2-4



Case 2-5



Case 2-6

그림 62. 바이오가스 발전 폐열 회수(Case 2)에 따른 월별 에너지 공급 시나리오

▣ 바이오가스 발전폐열 배가스 시설온실 활용 및 주민복지 증대 기술 연구 목표 도출

- 본 연구에서 수행된 실증 대상지역의 바이오가스 플랜트 발전폐열 회수율에 따른 연간 에너지 공급량 및 시설온실 공급 가능 면적을 다음과 같이 산출함
- (배기열 회수 시스템) 바이오가스 플랜트에서 회수 가능한 에너지는 배기열로부터 회수되는 에너지와 엔진열로부터 회수되는 에너지로 구분됨
 - ① 108.1 kWe급 바이오가스 발전엔진 기준 엔진열 회수에너지는 937.5 Gcal/년으로 가정함
 - ② 실증플랜트에서 발생하는 배기열 중 본 기획연구에서 활용되는 에너지는 1,000 Gcal/년이며, 배기열 전열회수량은 전열회수 효율 30~90% 범위에서 300~900 Gcal/년에 해당
 - ③ 본 연구에서 수행된 실험실 규모 습식 세정탑형 전열회수 시스템의 전열회수 효율은 75.9~83.6% 범위로 산정됨
 - ④ 이에 따라, 후속연구에서의 전열회수 효율은 80%로 산정하였으며, 이때 실증플랜트의 배기열 회수 시스템에서 회수 가능한 총 에너지는 1,737.5 Gcal/년으로 산출
- (주민복지시설 공급 시스템) 실증플랜트 인근 지역의 주민 복지 향상을 위한 목욕탕 시설 온수 공급에 필요한 열량은 50명 규모 시설을 기준으로 51.6 m³/일의 온수 공급이 요구되며, 이때의 공급 열량은 832.5 Gcal/년으로 산출
- (시설온실 공급 가능 면적) 시설온실 냉난방에너지 공급을 위한 에너지는 실증플랜트에서 회수된 에너지에서 주민복지시설 공급 에너지를 제외한 양을 기준으로 산출됨
 - ① 시설온실의 냉난방에너지 요구량은 구아바 농장 0.1 ha 기준 201 Gcal/년, 파프리카 농장 0.1 ha 기준 156 Gcal/년으로 산출되었으며, 구아바와 파프리카 혼합 구성 시 0.1 ha 기준 174 Gcal/년으로 산출
 - ② 본 연구에서 목표로 하는 전열회수 효율 80%를 기준으로 공급 가능한 시설온실의 냉난방 면적은 구아바 농장 전용 시 0.45 ha, 파프리카 농장 전용 시 0.58 ha이며, 구아바와 파프리카 혼합 구성 시 최대 0.52 ha 면적의 농장에 공급이 가능한 것으로 산출됨

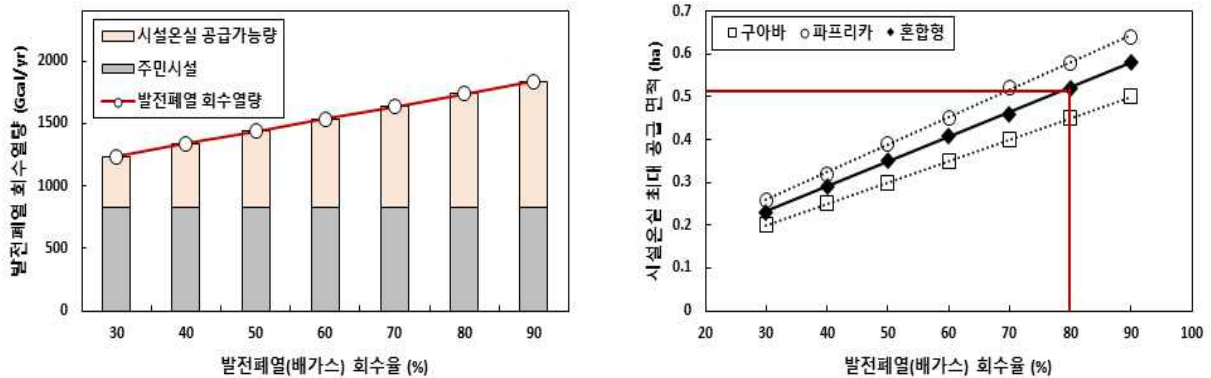


그림 63. 발전폐열(배가스) 회수효율에 따른 발전폐열 회수열량 및 시설온실 공급 가능 면적

- 상기 산출 결과에 따라 후속 연구는 실증 대상 지역의 바이오가스 플랜트에서 1,000 Gcal/년의 배기열을 80% 효율로 회수하여 0.5 ha의 고부가가치 작물 시설온실 냉난방에너지 공급 및 50인 규모 주민복지시설(목욕탕) 온수 공급을 목표로 산정함

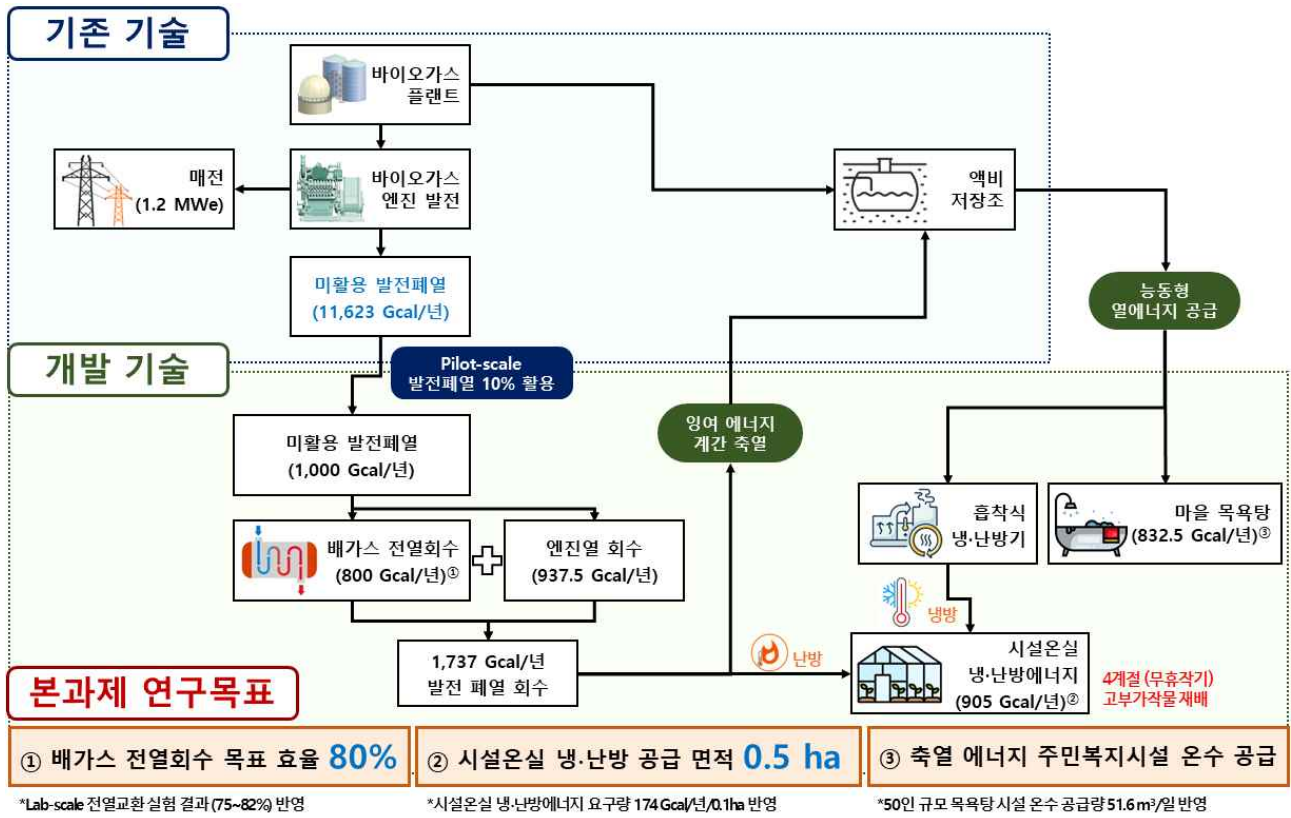


그림 64. 바이오가스 발전폐열 배가스 활용 농가소득 및 농촌복지 향상 기술 연구 목표

□ 온실가스 배출 감축량 산정 및 배출량 저감을 위한 중탄산암모늄 전환 검토

- 미활용 바이오가스 발전 폐열 활용 사업의 온실가스 감축량 산정을 위하여 다음과 같이 온실가스 저감 시나리오를 구성

- ① 바이오가스 발전에 의한 온실가스 감축
- ② 바이오가스 발전 배가스 내 CO₂ 회수·전환을 통한 온실가스 감축
- ③ 미활용 열을 냉난방으로 공급함으로써 화석연료 대체에 의한 온실가스 감축

- 3단계의 시나리오에 대해서 화석연료 대비 온실가스 배출량 저감효과를 산정

- 이 때, 온실가스 배출계수 및 방법론은 한국환경공단에서 발행한 「지자체 온실가스 배출량 산정지침(ver.4.1), 2017」와 국가 배출계수 공고를 참조함

○ 바이오가스 발전에 의한 온실가스 감축

- ① 발전에 의한 온실가스 배출량 산정

- 방법론 : 1A1a(1A1ai~1A1aiii, 발전 및 열생산시설)

- 고정연소에 의한 온실가스 배출량을 산정하며, CO₂의 경우 일부 연료에 대해 국가 배출계수가 있으므로 이를 활용하여 배출량을 산정함.

- 먼저, 바이오가스 발전에 의해 배출되는 온실가스의 양을 산정하였으며, 비교를 위해 베이스로 연료용 유연탄 이용 발전에 의한 온실가스 배출량을 산정하였음.

- 온실가스 배출량은 각 연료에 대하여 연소된 연료의 양, 배출계수의 곱으로 산정됨.

- 이때, 발전효율은 연료와 관계없이 35%로 가정하였으며, 미량 배출되는 CH₄ 및 N₂O에 대한 배출량 제외하였으며, 상세 연구를 통해 보완 예정임.

- 온실가스 배출량 산출결과, 108.1 kWe급 전력 생산 시, 화석연료 발전에 의한 이산화탄소 배출량은 연간 921톤이며, 바이오가스 발전에 의한 배출량은 531톤으로 42%의 절감효과가 있는 것으로 나타남.

표 40. 화석연료 및 바이오가스 발전에 따른 온실가스 배출량 비교

항목	단위	값	비고
발전량	kW _e	108.1	물질 에너지 수지
발전효율	%	35	물질 에너지 수지
열 공급량	Gcal/일	6.37	물질 에너지 수지
	TJ/일	0.027	물질 에너지 수지
	TJ/년	9.73	물질 에너지 수지
바이오가스 발전 온실가스 배출계수	ton-CO ₂ /TJ	54.6	IPCC 국가 인벤토리 가이드라인 배출계수
바이오가스 발전에 의한 온실가스 배출량	ton-CO ₂ /일	1.46	
	ton-CO ₂ /년	531	
화력(유연탄) 발전 온실가스 배출계수	ton-CO ₂ /TJ	94.6	IPCC 국가 인벤토리 가이드라인 배출계수
화력(유연탄) 발전에 의한 온실가스 배출량	ton-CO ₂ /일	2.52	
	ton-CO ₂ /년	921	
온실가스 배출 저감량	ton-CO ₂ /년	389	
온실가스 배출 저감효과	%	42	

② 바이오가스 생산에 의한 온실가스 배출량

- 방법론 : 4B(고형폐기물의 생물학적 처리)
- 고형폐기물의 생물학적처리 과정에서 발생하는 온실가스 배출량을 산정하는 것으로 혐기성 소화 과정이 이에 포함됨.
- 혐기성 소화 과정에서 발생하는 온실가스는 CO₂를 대상으로 하며 폐기물의 처리량, 메탄 발생량에 대한 자료의 분리·수집이 필요함.
- 2단계 연구 수행을 통해 실증 대상지의 바이오가스 생산시설 내 고형폐기물의 종류, 유입량, 메탄 발생량 등의 자료를 수집하여 상세 도출 수행 예정임.

○ 바이오가스 발전 배가스 내 CO₂ 회수·전환을 통한 온실가스 감축

① 발전에 의한 배가스 내 CO₂ 발생량 산출

- 108.1 kW_e급 바이오가스 발전기 운전조건은 바이오가스 1,241 Nm³/d (바이오메탄 함량 60%기준), 공기량 9,928 Nm³/d로 공기비 1.4인 희박연소(lean-burn)가 됨.
- 이때, 시스템에서 발생하는 배기가스의 양은 11,169 Nm³/d이며, 기체 조성은 CO₂ 11.1%, H₂O 13.3%, O₂ 5.3%, N₂ 70.2%으로 구성됨.
- 이 중 이산화탄소의 발생량은 일 2,438 kg으로 연간 890톤으로 산출되며, 흡수 및 전환을 통해 온실가스 추가 감축이 가능함.

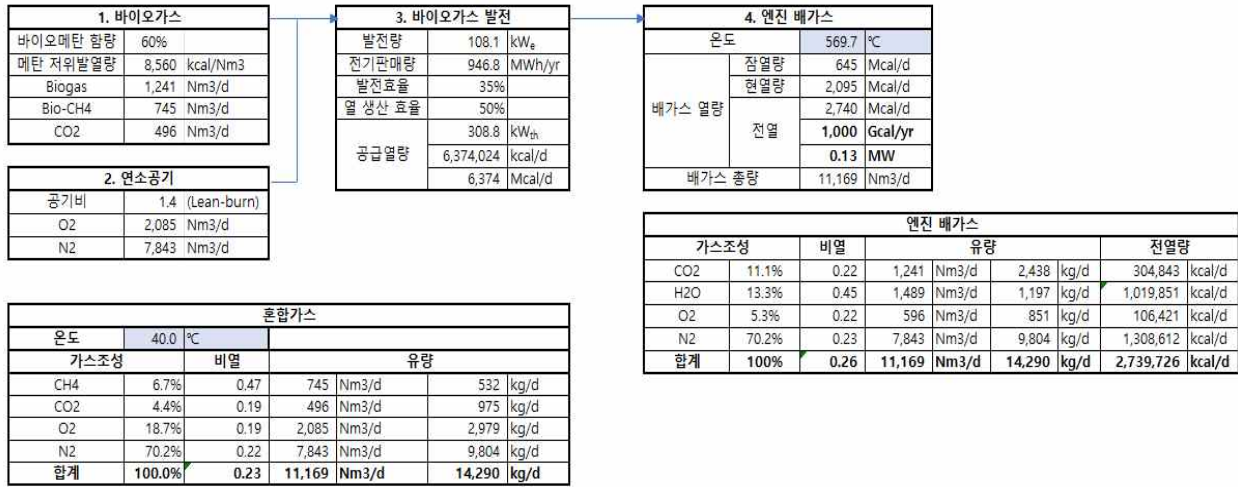


그림 65. 배가스 내 이산화탄소 발생량 산출결과

② 이산화탄소의 흡수 및 전환 방법

- 이산화탄소를 흡수하기 위한 가장 효과적인 방법은 화학 흡수법임
- 이는 염기성 물질을 매개로 산성가스인 이산화탄소를 흡수하는 것임
- 대표적인 흡수제는 아민 계열이며, MEA, DEA, TEA 및 혼합물질에 대한 많은 연구가 수행 중임[24]
- 아민 흡수제의 경우, 재생 후 발생하는 고농도 이산화탄소를 촉매로 전환하여 자원화가 가능함
- 다른 흡수제로는 암모니아가 있으며, 물 당 흡수량이 MEA보다 높은 반면 재생 에너지 사용이 적다는 장점이 있음[25]
- 암모니아 흡수제의 경우, 재생을 통해 이산화탄소 기체형태로 자원화하거나 중탄산암모늄 및 미량의 탄산암모늄 생성이 가능함
- 본 연구에서는 실증 대상 부지 내 바이오가스 시설과 액비화조 설비를 고려하여, 시설에서 발생하는 암모니아를 활용한 이산화탄소 흡수 및 (중)탄산암모늄의 전환에 대해 검토하였음.

③ 중탄산암모늄 전환 검토

- 중탄산암모늄 생산을 위해서는 이산화탄소와 암모니아가 1:1 몰 비로 반응해야 하며, 용해도 이상 농도에서 석출하여 회수가 가능함.
- 용해도 고려 시, 중탄산암모늄의 회수를 위해서는 용액 내 암모니아의 농도를 최소 5% 이상 유지해야 하며, 그 이하 조건에서는 석출되지 않음.
- 또한, 중탄산암모늄의 녹는점 및 분해온도는 42°C으로 반응 온도 설정이 중요함.
- 암모니아 휘발 방지 및 이산화탄소의 흡수효율 향상을 위해서는 반응 온도의 냉각 및 제어가 필요함.

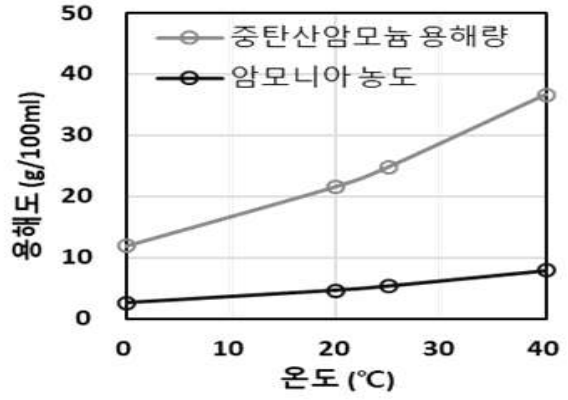
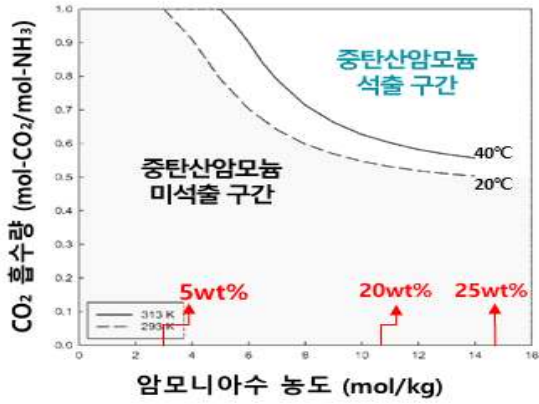


그림 66. 중탄산암모늄 생성조건 비교 - 암모니아수 농도 및 온도

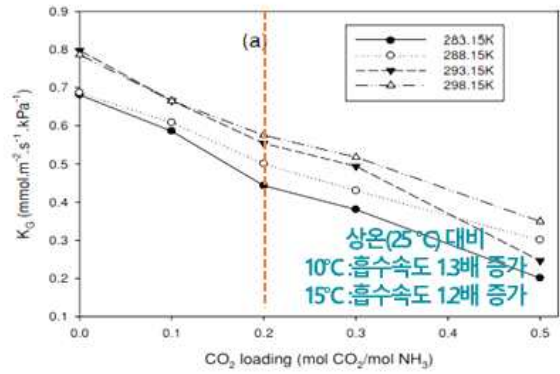
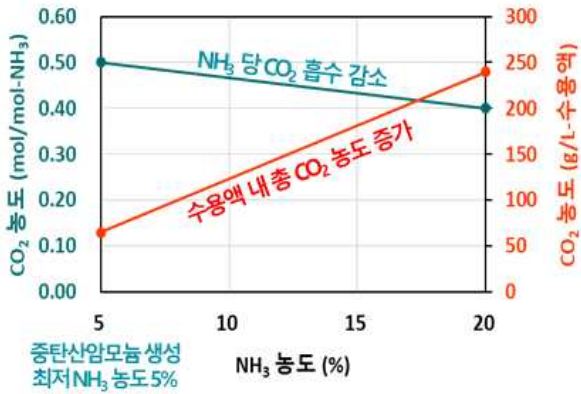


그림 67. 암모니아 농도에 따른 이산화탄소 흡수효율

- 중탄산암모늄 회수효율 평가를 위해 10~40°C 조건에서 0% 암모니아수에 배가스 흡수 실험을 수행하였으며, 흡수 실험을 수행하였음
- 선행연구 결과, 10~30°C 조건에서 중탄산암모늄이 석출되었으며, 40°C 조건에서는 중탄산암모늄 석출이 되지 않음
- 또한, 20°C 이상에서는 중탄산암모늄 회수율이 급격하게 감소하였음. 따라서, 반응 온도를 10~20°C 수준 유지하는 것이 필요함

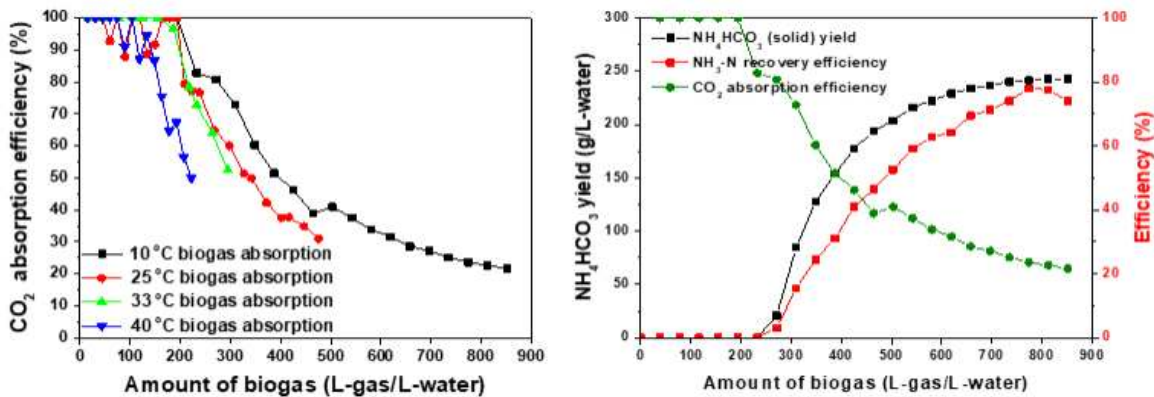


그림 68. 암모니아수 - 배가스 흡수 실험을 통한 중탄산암모늄 생성결과

- 또한, 혐기소화 시설에서 발생하는 암모니아 농도를 조사하기 위해 가축분뇨 또한, 혐기소화 시설에서 발생하는 암모니아의 농도를 분석한 결과, 암모니아 농도 3,300~5,500 mg/L로 분석됨
- 액비화조의 암모니아 농도가 5,000 mg/L 이므로 중탄산암모늄 생성을 위해서는 외부 암모니아 원인 암모니아수 사용이 필요할 것으로 판단되며, 투입되는 양을 산정하였음
- 따라서, 배가스의 이산화탄소로부터 중탄산암모늄을 생산하기 위한 공정에서는 암모니아수의 사용, 냉각을 위한 전기에너지 사용량을 고려한 온실가스 배출 저감량 및 운영비 산출이 필요함
- 108.1 kW_e급 바이오가스 발전시스템에서 발생하는 이산화탄소의 양은 연간 890톤이며, 선행연구 결과의 반응 전환율을 고려하여 60% 적용 시(반응온도 10℃), 연간 959톤의 중탄산암모늄 생산이 가능함
- 전기 사용의 경우, 흡착식 냉동기 및 칠러 사용에 따른 온실가스 발생량 및 운전 전기 비용을 비교하였음
- 최종적으로, 108.1 kW_e급 바이오가스 발전 배가스의 중탄산암모늄 전환에 의한 온실가스 저감량은 534톤-CO₂/년으로 산출됨. 그러나, 온실가스 배출권거래제 및 중탄산암모늄 판매 가격보다 암모니아수 사용에 의한 약품비가 크며, 중탄산암모늄의 외부 판매를 고려하더라도 경제성이 없는 것으로 판단됨

표 41. 중탄산암모늄 전환에 의한 온실가스 저감효과 및 경제성 비교 산출 근거

항목	단위	값	비고
암모니아수 농도	%	25	외부 암모니아수 이용
암모니아수 단가	원/kg	490	25% 암모니아수 거래단가
온실가스 배출권	원/톤	10,401	최근 6개월 평균 거래가격 (배출권시장 정보플랫폼)
중탄산암모늄 단가	원/kg	240	
전력단가	원/kWh	120	
전력배출계수	tCO ₂ /MWh	0.4781	IPCC 국가 인벤토리 가이드라인 배출계수
반응온도	℃	10	
전환율	%	60	
반응기 용량	kg/일	5,650	
냉각 전 온도	℃	25	
냉각 후 온도	℃	10	
냉각 에너지	kcal/일	84,749	
냉각 에너지	kW	4.1	

표 42. 중탄산암모늄 전환에 의한 온실가스 저감효과 및 경제성 비교 산출 결과

항목	단위	흡착식 냉동기 이용 냉각	칠러 이용 냉각
중탄산암모늄 생산량	톤/년	959	959
중탄산암모늄 판매가	원/년	+ 230,161,227	+ 230,161,227
암모니아수 사용량	톤/년	825	825
암모니아수 약품비	원/년	- 404,195,131	- 404,195,131
냉각장치 열사용량	kW	4.8	0.0
냉각장치 전기사용량	kW	0.0088	11
연간 전기사용량	kwh/년	77	93456
연간 전력비	원/년	- 9,251	- 11,214,683
온실가스 저감량	톤/년	533.8	489.2
배출권 판매가	원/년	5,552,807	5,552,807
공정 운전비	원/년	- 169,692,095	-180,897,527

④ 탄산암모늄 전환 검토

- 탄산암모늄의 경우, 녹는점이 58℃로 중탄산암모늄에 비하여 높으나, 중탄산암모늄과 유사하게 자연 분해되는 특징을 지님
- 탄산암모늄 반응 시, 암모니아 및 이산화탄소가 이온화되어 NH_4^+ 와 CO_3^{2-} 형태로 반응함
- 그러나 각 이온의 pH 조건은 NH_4^+ pH≤9, CO_3^{2-} pH>10 조건으로 pH 제어 없이 대량 생산에 어려움이 있음
- 또한, CO_2 1몰을 반응시키기 위해 필요한 NH_3 이 2몰이므로 외부 암모니아 source인 암모니아수를 활용할 경우, 경제성이 없다고 판단됨.

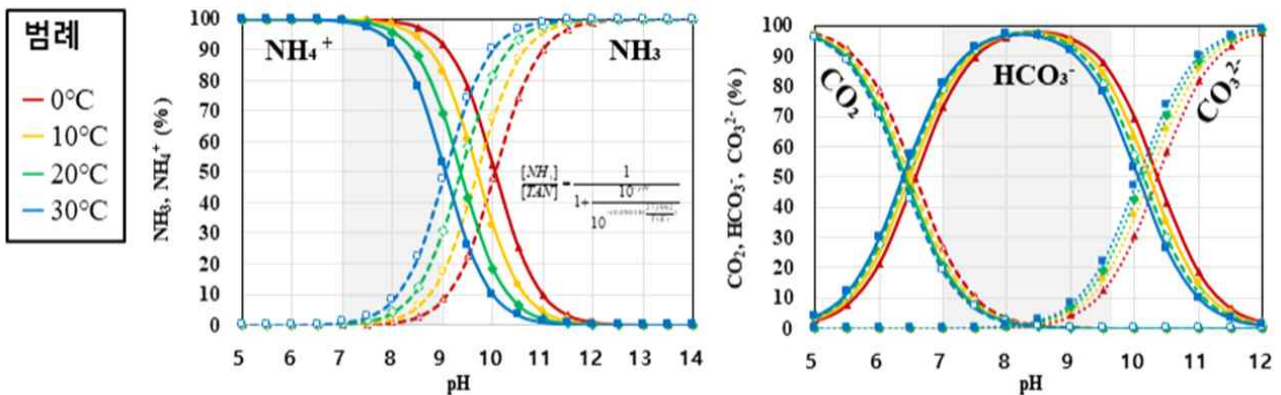


그림 69. 온도 및 pH에 따른 이온 분율 산출결과

○ 미활용 열을 냉난방으로 공급함으로써 화석연료 대체에 의한 온실가스 감축

① 시설온실 온실가스 감축효과

- 연구결과를 통해 도출한 구아바 0.2 ha, 파프리카 0.3 ha의 시설온실에 대하여 냉난방 대체에 따른 온실가스 감축량과 배출권 판매가격을 산출함.
- 기존 시설온실 냉난방의 경우, 가장 많이 사용되는 화석연료인 등유를 기준으로 온실가스 배출량을 산정하였으며, 연간 253톤의 이산화탄소가 배출됨.
- 따라서, 미활용 열을 회수하여 활용할 경우 온실가스를 연간 253톤 감축할 수 있으며, 배출권 263만원에 해당하는 경제적 가치가 있음.

표 43. 미활용 열 회수 공급을 통한 시설온실 냉난방 대체에 따른 온실가스 감축효과

항목	단위	값	비고
시설온실 냉난방 요구량	Gcal/년	841	구아바 0.2 ha + 파프리카 0.3 ha
	TJ/년	3.52	
등유 온실가스 배출계수	ton-CO ₂ /TJ	71.9	IPCC 국가 인벤토리 가이드라인 배출계수
화석연료 사용에 따른 온실가스 배출량	ton-CO ₂ /년	253	
미활용 열 공급에 의한 온실가스 배출량	ton-CO ₂ /년	0	
온실가스 감축량	ton-CO ₂ /년	253	
온실가스 배출권 거래가격	원/톤	10,401	최근 6개월 평균 거래가격 (배출권시장 정보플랫폼)
온실가스 배출권 판매가격	원/년	2,631,147	

② 주민시설 온실가스 감축효과

- 미활용 열을 공급하기 위한 시설로 소규모 목욕탕을 선정하였으며, 온수 생산을 에너지를 미활용 열로 대체함에 따른 온실가스 감축효과를 산정하였음.
- 소규모 목욕탕 기준 에너지 사용량은 연 803 Gcal이며, 이를 LNG를 연료로 사용할 경우 연 173톤의 이산화탄소가 배출됨.
- 미활용 열을 공급하여 온수를 가온할 경우, 연간 173톤의 온실가스 감축효과가 있으며, 배출권 180만원에 해당함.

표 44. 미활용 열 회수 공급을 통한 주민시설(목욕탕) 온수 공급에 따른 온실가스 감축효과

항목	단위	값	비고
주민시설 온수 가온 에너지 요구량	Gcal/년	803	소규모 목욕탕 온수 공급 기준
	TJ/년	3.36	
LNG 온실가스 배출계수	ton-CO ₂ /TJ	51.6	IPCC 국가 인벤토리 가이드라인 배출계수
화석연료 사용에 따른 온실가스 배출량	ton-CO ₂ /년	173	
미활용 열 공급에 의한 온실가스 배출량	ton-CO ₂ /년	0	
온실가스 감축량	ton-CO ₂ /년	173	
온실가스 배출권 거래가격	원/톤	10,401	최근 6개월 평균 거래가격 (배출권시장 정보플랫폼)
온실가스 배출권 판매가격	원/년	1,803,151	

○ 전과정 평가에 따른 온실가스 감축효과

- 미활용 바이오가스 발전 폐열 활용 사업에서 바이오가스 발전, 발전 배가스 이산화탄소의 중탄산암모늄 전환, 미활용 열 냉난방 대체에 따른 온실가스 감축량 산정
- 108,1 kW_e급 발전에 대한 전과정의 온실가스 감축효과 및 온실가스 배출권 판매가를 하기 표에 나타냄. 이대, 온실가스 배출권 거래가격은 10,401원/톤-CO₂로 산정(최근 6개월 평균 거래가격, 배출권시장 정보플랫폼)
- 바이오가스 발전 배가스 내 CO₂의 중탄산암모늄 전환 공정의 온실가스 감축효과는 크나, 온실가스 배출권 거래제보다 공정의 운전비가 크므로 실효성이 없는 것으로 판단
- 중탄산암모늄 전환공정을 제외한 본 사업의 온실가스 감축효과는 연간 816톤CO₂이며, 배출권 판매 수익은 8,487,216원으로 산정

표 45. 전과정 평가에 따른 온실가스 감축효과 (108.1 kW_e 발전 기준)

항목	단위	베이스라인 온실가스 배출량 ㉑, ton-CO ₂ /년	프로젝트 온실가스 배출량 ㉒, ton-CO ₂ /년	온실가스 배출 저감량 ㉓ = ㉑ - ㉒, ton-CO ₂ /년
① 바이오가스 발전에 의한 온실가스 감축효과	발전에 의한 온실가스 배출량 산정	921		389
	바이오가스 생산에 의한 온실가스 배출량		531	
② 바이오가스 발전 배가스 내 CO ₂ 회수·전환을 통한 온실가스 감축	중탄산암모늄 전환에 의한 온실가스 저감효과	0	-534	534
③ 미활용 열을 냉난방으로 공급함으로써 화석연료 대체에 의한 온실가스 감축	화석연료 사용에 따른 온실가스 배출량	426		426
	미활용 열 공급에 의한 온실가스 배출량		0	
총 계	중탄산암모늄 전환공정 제외	1,347	531	816 (60% 저감) 배출권 판매수익 8,487,216원/년
	중탄산암모늄 전환공정 포함	1,347	-3	1,350 (100% 저감) 배출권 판매가 < 공정 운전비

□ 미활용 바이오매스 발전 폐열 활용 통합공정 사업화 평가

- 본 기술개발을 통해 바이오매스 발전 폐열 회수/저장하여 바이오가스 플랜트 반경 1 km 이내 에너지자립형 시설 온실 0.5 ha 구현 가능
 - ① 시설 온실 및 주민 복지시설 예상 후보지
- 바이오가스 플랜트: 전라북도 정읍시 '친환경대현그린(주) 바이오가스 플랜트'
- 시설 온실: (1안) 바이오가스 플랜트 인접(50m 이내) 부지 0.5 ha 시설 온실 신축
(2안) 바이오가스 플랜트 반경 700m 이내 기존 시설 온실 활용
- 주민복지시설: 바이오가스 플랜트 반경 700m 이내 마을 주민시설(목욕탕) 신축
- 바이오매스 발전 폐열 회수/저장 시나리오 Case 1-3을 참조하여 500℃ 발전 배가스 전열 교환 에너지 회수 및 0.5 ha 시설 온실(구아바 0.2 ha + 파프리카 0.3 ha) 냉·난방에너지 공급, 주민복지시설(목욕탕) 온수 공급을 가정하여 사업화 평가



그림 70. 바이오가스 플랜트 인근 시설온실 및 주민복지시설 예상 후보지



그림 71. 바이오가스 플랜트 인근 시설온실 예상 후보지 현장 사진

② 바이오가스 발전 폐열 연계 에너지자립형 시설 온실 운영 수익 산출

- 에너지자립형 시설 온실의 신축을 위한 건설비는 한국농업시설협회에 공시된 ‘광폭(보온재) 비닐하우스 예정 공사비’를 기준으로 산출하였으며, 바이오가스 발전 폐열에서 회수된 온수 난방장치 설치비용은 농촌진흥청에 공시된 일반 온수배관 설치비용 19,6천원 (0.1 ha 기준)으로 가정
- 이에 따른 시설 온실 0.1 ha 신축에 소요되는 순공사비는 93,270천원 (재료비 68,611천원 + 노무비 22,735천원 + 기타경비 1,923천원)으로 산정

표 46. 바이오가스 발전폐열 연계 에너지자립형 시설 온실 건설비 산출

[시설온실 면적: 0.1 ha 기준] (단위: 원)

품명	규격	재료비	노무비	경비	합계
1. 기초공사		454,656	1,294,834	7,482	1,756,972
2. 철골공사		17,449,815	5,312,740	1,915,739	24,678,295
3. 피복공사		5,688,912	2,292,703	0	7,981,616
4. 보온재설치공사		15,133,233	5,436,069	0	20,569,302
5. 온수난방장치		19,600,000	4,300,000	0	23,900,000
6. 측장개폐장치공사		610,760	208,219	0	818,979
7. 환기구개폐장치공사		6,016,750	2,760,098	0	8,776,848
8. 제어공사		1,658,912	1,130,693	0	2,789,605
9. 기타 자재비	(자재비의 3%)	1,998,391	0	0	1,998,391
합계		68,611,429	22,735,356	1,923,221	93,270,006

- 실증 시설 온실의 설비구축비, 농가 수입 및 운영비를 산정하여 총 농가 소득을 산정하였으며, 시설 온실 운영비는 농촌진흥청에서 발표한 ‘2020 농축산물 소득자료집’의 파프리카 농가 소득 현황을 참조하여 본 연구의 실증시설 온실 규모인 0.5 ha를 기준으로 환산하여 산출
- **(설비 구축비)** 본 연구의 실증 시설 온실 규모인 0.5 ha 신축 시 소요되는 시설 온실 구축비는 총 595,350천원(시설 온실 466,350천원, 열공급 배관(온수난방) 98,000천원, 전열교환기 7,000천원, 흡착식 냉방기 24,000천원)으로 산출되어 기존 시설온실 구축비 340,909천원 대비 74.6% 증액될 것으로 예상됨. 단, 기존 시설 온실에 폐열을 공급하는 경우(2안) 시설 온실 구축비를 제외하고 열 공급 및 냉각시스템 구축 비용 129,000천원이 소요되는 것으로 산출
- **(작물판매 수익)** 바이오가스 발전 폐열을 연계하여 시설 온실 냉·난방에너지를 공급할 경우 휴지기 없이 연중 재배가 가능하여, 작물 재배량은 구아바의 경우 2배, 파프리카의 경우 1.8배 증산될 것으로 예상되며, 이에 따른 작물 판매 수익은 총 317,402천원으로 산출
- **(배출권 거래 수익)** 본 연구의 실증 시설 온실 규모인 0.5 ha (구아바 0.2 ha+파프리카 0.3 ha) 운영 시 미활용 바이오매스 발전 열을 이용한 냉·난방 에너지로 활용함에 따라 기존 시설온실에서 화석연료(등유)를 사용한 난방 에너지 대비 연간 253톤의 CO₂ 배출을 감축시킬 수 있는 것으로 산출. 이에 대한 탄소배출권 판매가격은 연간 2,631천원에 해당하는 부가수익을 창출할 수 있음
- **(중간재비)** 기존 시설 온실 운영비 중 수도·광열비는 31,705천원으로 중간재비의 22%에 해당하며, 에너지자립형 시설 온실의 경우 이를 전량 바이오가스 발전 폐열로 대체 가능. 단, 휴지기 없이 재배가 이루어짐에 따라, 무기질/유기질 비료비, 농약비가 각각 18,336천원, 76천원, 7,852천원으로 증액되며, 설비 구축비의 증가로 영농시설 감가상각비 및 수리·유지비 금액은 각각 35,022천원, 9,728천원으로 증액. 이에 따른 중간재비는 연간 118,241천원으로 기존 시설온실 118,366천원과 유사한 수준으로 산출
- **(운영비)** 운영비 중 시설온실 투입 노동비는 휴지기 없이 재배가 이루어짐에 따라 기존 시설 온실 대비 80% 증가한 39,700천원으로 추산되며, 열 회수설비의 운영에 추가로 투입되는 노동비는 20,000천원으로 산정. 이에 따른 총운영비는 연간 148,213천원으로 기존 시설 대비 4% 증액된 수준으로 예상됨
- **(농가 소득)** 총 농가 소득은 총수입에서 운영비를 제외한 값으로 산정되었으며, 에너지자립형 시설 온실의 연간 농가 소득은 137,516천원(소득율 43.3%)으로 산출되어 기존 시설 온실 대비 약 4.1배 증가하는 것으로 예상됨

표 47. 바이오가스 발전폐열 연계 에너지자립형 시설 온실 운영비 산출

[시설온실 면적: 0.5 ha 기준]

		단위	기존 시설온실		실증시설		
미활용열 회수량		(Gcal/년)	0		1,689		
에너지 투입			등유 보일러		미활용 발전폐열		
설비구축비	시설 온실	(천원)	340,909	100%	466,350	78%	
	냉각시스템	(천원)	0	0%	24,000	4%	
	전열교환기	(천원)	0	0%	7,000	1%	
	열공급배관	(천원)	0	0%	98,000	16%	
	소계	(천원)	340,909		595,350		
수입 (A)	작물판매 수입	(천원)	176,334	100%	317,402	99%	
	(생산량)	(kg/년)	62		112		
	(단가)	(원/kg)	2.8		2.8		
	배출권 거래	(천원)	0	0%	2,631	1%	
	소계	(천원)	176,334		320,033		
지출 (B)	중 간 재 비	종자·종묘비	(천원)	10,356	7%	10,356	6%
		(무기질)비료비	(천원)	10,186	7%	18,336	10%
		(유기질)비료비	(천원)	42	0%	76	0%
		농약비	(천원)	4,362	3%	7,852	4%
		수도·광열비	(천원)	31,705	22%	0	0%
		기타재료비	(천원)	26,805	19%	26,805	15%
		소농구비	(천원)	75	0%	75	0%
		대농구상각비	(천원)	8,607	6%	8,607	5%
		영농시설상각비	(천원)	23,330	16%	35,022	19%
		수리·유지비	(천원)	1,515	1%	9,728	5%
		기타비용	(천원)	1,384	1%	1,384	1%
	소계	(천원)	118,366	83%	118,241	66%	
	농기계 임차료	(천원)	385	0%	385	0%	
	토지 임차료	(천원)	1,499	1%	1,499	1%	
	위탁 영농비	(천원)	61	0%	61	0%	
	시설온실 노동비	(천원)	22,055	15%	39,700	22%	
	열회수 설비 노동비	(천원)	0	0%	20,000	11%	
	소계	(천원)	24,001	17%	41,645	34%	
	소계	(천원)	142,367		179,886		
	농가소득 (A-B)		(천원)	33,967		140,147	
소득율 (B/A)		(%)	19.3		43.8		

③ 바이오가스 발전폐열 연계 주민복지시설(목욕탕) 운영비 산출

- 보건복지부에서 발표한 건강증진연구사업 보고서(주관연구기관: 중앙대학교)[26]를 참조하여 대중목욕탕의 평균 물 사용량 및 온수 공급 방법을 산정함
- 해당 문헌에 따르면, 대형 목욕업소를 제외하고 대부분 지하수와 상수도를 통해 직접 주입식의 급수 방식을 사용하고 있으며, 온수 관리는 가스보일러를 이용하여 60℃ 이상의 온수를 온수 탱크에 보관 후 탱크로 주입하는 방법을 사용
- 대중목욕탕의 1일 물 사용량은 규모에 따라 55~532 m³로 큰 차이를 보이며, 이는 대규모 업소일수록 평균 고객수가 많고 24시간 영업 형태가 많기 때문으로 판단됨

표 48. 대중목욕탕 규모별 평균 물 사용량

규모	1일 평균 고객 (인)	1일 평균 물 사용량 (m ³)
대규모 (1,000m ² 이상)	604	532
중규모 (500~1,000m ²)	162	90
소규모 (500m ² 미만)	62	55

- 본 연구에서는 마을 주민복지를 위한 소규모 목욕탕 시설로 급탕 탱크의 용량을 55 m³/일로 가정하여 운영 수익을 산출함
- 20℃ 용수 55 m³를 60℃까지 가열하기 위한 급탕 열량은 2,200 Mcal이며, LNG 보일러로 가온 시 요구되는 LNG 요구량은 168.5 kg/일로 산출됨
- LNG 단가는 전력통계정보시스템(epsis.kpx.or.kr)에 공시된 2023년 1월~8월 LNG 평균가인 1,441원/kg를 참조하였으며, 한국가스연맹(www.kgu.or.kr)에 고시된 발열량 (13,060 kcal/kg)을 참조하여 연간 소요되는 급탕비를 산정
- 주 1회 휴무를 가정하여 연간 313일 목욕탕 시설을 운영한다고 가정하였을 때, 소요되는 급탕비는 84,420천원/년으로 산출됨
- 바이오매스 발전폐열을 연계할 경우 공급가능한 열량은 772.3 Gcal/년 (Case 1-3 참조)이며, 이때 폐열 보일러로 공급가능한 급탕 온수량은 49.3 m³/일로 산출됨
- 따라서, 바이오매스 발전폐열의 잉여에너지를 주민복지시설에 공급할 경우 폐열 보일러를 이용한 급탕 공급량을 제외한 LNG 보일러 급탕비는 8,675천원/년으로, 연간 75,745천원의 급탕 비용을 절감할 수 있는 것으로 예상됨

표 49. 바이오가스 발전폐열 연계 주민복지시설(목욕탕) 급탕비 절감액

항목	세목	내용	단위	비고
급탕 보일러 (LNG)	급탕 탱크 용량	55.0	m ³ /일	
	가열온도	40.0	℃	20℃ → 60℃
	급탕 열량	2,200,000	kcal/일	
	LNG 단가	1,441	원/kg	전력통계정보시스템(epsis.kpx.or.kr) 2023년 1월~8월 평균 단가
	LNG 열량	13,060	kcal/kg	한국가스연맹 (www.kgu.or.kr)
	보일러 효율	90	%	
	운영 일수	313	일	주1회 휴무
	급탕비	84,420	천원/년	
폐열 보일러	공급 열량	772.3	Gcal/년	Case 1-3 참고
	열교환 효율	80	%	
	급탕 열량	1,973,930	kcal/일	
	급탕 공급량	49.3	m ³ /일	
급탕비 (폐열 보일러 대체 시)		8,675	천원/년	
급탕비 절감액		75,745	천원/년	

④ 에너지자립형 시설 온실 경제성 종합평가

- 본 연구에서 산출된 시설온실 건설비 및 운영비를 바탕으로 바이오가스 에너지자립형 시설 온실의 경제성 평가를 수행함
- 시설온실 운영 기간은 15년으로 가정하였으며, 해당 기간의 실증플랜트 시설 온실의 순현재 가치(NPV)는 1,506,855천원으로 기존 시설 온실 대비 약 9배 수익향상이 가능함
- 이에 따른 실증플랜트 시설 온실의 내부수익률(IRR)은 22%로 산출되었으며, 설비구축을 위한 투자비 회수 기간은 약 4년 2개월로 산출됨

표 50. 바이오가스 발전폐열 연계형 시설온실 경제성 평가

항목	단위	기존 시설 온실	에너지자립형 시설 온실	증감액
1. 설비구축비	(천원)	340,909	595,350	△ 254,441
2. 매출액 (농가수익)	(천원)	176,334	320,033	△ 143,699
3. 매출원가 (운영비)	(천원)	119,037	144,864	△ 25,827
4. 감가상각비	(천원)	23,330	35,022	△ 11,692
5. NPV	(천원)	168,596	1,506,855	△ 1,338,259
6. IRR	(%)	6%	22%	-
7. 투자비 회수 기간	(년)	10년	4년 2개월	-

▣ 흡착식 냉방 시스템 적용 타당성 검토

전문가 자문 요청서

○ 자문내용 : 흡착식 냉방 시스템 적용 타당성 검토

1. 흡착식 냉방 시스템 적용 가능 소재 검토
 - 흡착-탈착시 수분 흡착 용량 요구 사항
 - 탈착 온도에 증가에 따른 성능 계수 영향
 - 흡착 및 탈착시 수분 흡착 탈착 속도에 의한 열 성능 계수 및 냉방 출력 영향
 - 적용 소재의 경제성 (생산성, 흡착제 가격 및 열 교환기 모듈 제조 용이성)

2. 시스템 구성 방안 및 냉방 출력 측정
 - 시스템 설계에 따른 열 성능 계수 및 냉방 출력 향상 가능성
 - 시스템 스케일에 따른 설비 가격 및 열 성능 계수 및 냉방 출력 변동성
 - 외부 조건 (온도, 습도)에 따른 냉방 시스템 출력에 대한 영향
 - 시스템 냉방 출력 테스트를 위한 운전 비용 및 필요 자원
 - 시스템 출력 공인 시험 테스트 방법 및 인증 기관

3. 협력 연구 진행 가능성
 - 화학연 개발 소재 적용 열교환기 테스트를 위한 협력 연구 가능성 (위탁, 용역 또는 분석 방식)
 - 소재의 성능 만족 시 기술 사업화 가능성

○ 연구 수행 내용

1. 수분 흡착제 후보군 탐색 및 도출
 - AIPO 수분 흡착제 및 MOF 수분 흡착제 후보군 도출
 - 소재 내구성, 대량 생산성, 경제성을 고려 대상 흡착제 도출
 - 흡착식 냉방 시스템 적용 조건 이론적 냉방 성능계수 및 흡착 용량

2. 수분 흡착제 성능 평가 방법 및 소재 요구 사항 검토
 - 흡착식 냉방 시스템 냉방 출력 달성을 위한 흡착 속도 관련 연관 데이터 도출 (냉방 출력 연관)

자 문 의 건 서

○ 건 명: 흡착식 냉방 시스템 적용 타당성 검토

의 건

- 흡착식 냉방 시스템 적용 가능 소재에 대한 기술현황 및 연구개발 방향 자문회의를 수행함
장소 / 회의일시 : 한국화학연구원 디딤돌플라자 3층 회의실/2023. 09. 19 (10:30 ~ 12:00)
참석자 : 화학연 (조경호, 이우황, 이수경, 조동희, 윤지웅) 및 구성이앤드씨 (윤석구 대표)



- 흡착식 냉방 시스템 적용 가능 소재에 대한 검토
 - 현재 흡착식 냉방 소재에 주로 활용되고 있는 상업용 흡착제인 실리카겔을 활용하는 이유는 흡착식 냉방 소재로 상업화가 이뤄진 유일한 소재이며 가격적인 이점이 있음. 하지만, 다국적 회사로부터 생산되는 실리카겔의 수분 흡착성능의 균일성은 차이가 있으며 이로 인해 흡착식 냉방 시스템에 적용 시 열효율 및 출력 저하 문제가 발생함.
 - 따라서 수분 흡착 성능의 균일성이 확보된 새로운 수분 흡착제 소재의 발굴이 필요한 시점이며, 흡착식 냉방시스템의 보급확산을 위한 상용화에 기여할 수 있는 연구 분야로 판단하고 있음.
 - 화학(연)에서 수행하고자 하는 신규 수분 흡착 소재의 발굴 및 검증과 관련된 연구는 흡착식 냉방시스템의 소형화를 가능하게 할 수 있으며, 폐열, 재생열 및 신재생에너지를 활용할 수 있는 분야를 확대할 수 있음.
 - 다만, 신규 소재의 선정에 있어서 다음과 같은 특성을 만족할 수 있어야 될 것으로 판단됨.
 - 1) 높은 수분 흡착 용량
 - 2) 높은 흡착제 밀도
 - 3) 흡착제 생산 공정에서의 잔유 불순물 배제
 - 4) 높은 흡착제 강도
 - 5) 흡착 용량의 유지성 (30년 주기)
 - 6) 열 교환기 모듈화에 따른 성능 저하 최소화
 - 7) 빠른 흡착 속도
 - 8) 저온 탈착 및 짧은 탈착 시간
 - 9) 높은 열전도도
 - 10) 가격 경쟁력 확보
 - 화학(연)에서 흡착식 냉방시스템 적용을 위해 도출한 흡착제 후보의 경우 흡착제 요구조건에 대부분 만족하나 실제 열교환기 모듈화를 통해 냉방 성능과 관련된 다양한 지표들에 대한 평가가 검증되어야 할 것으로 판단됨.

- 수분 흡착 특성에 따른 시스템 운전 모드 조건 등 다양한 변수가 발생할 수 있으므로 소재 개발과 시스템 운전 조건 및 구성과 관련된 연구가 상호보완적으로 연구되어야 함.
- 현재 단계에서는 냉방 출력 확보 가능성이 큰 수분 흡착성능의 균일성있는 소재 개발이 우선시 되어야 될 것으로 판단됨.

○ 흡착식 냉방시스템 적용에 대한 구성 방안 및 냉방 성능 지표 측정

- 흡착식 냉방 성능 평가를 위한 시스템 운전이 가능한 국내 업체는 상당히 제한적임.
- 현재 구성이앤드씨에서는 자체적으로 개발한 냉난방기용 구동을 위한 흡착식 냉난방 평가시스템을 확보하고 있으며, 자체 평가를 통해 냉방 출력 및 열효율을 측정하고 있음
- 냉방기 성능 지표에서 열효율 (COP)의 경우 0.4~0.6 수준일 경우 상업용으로 활용이 가능하고 소형화를 위해서는 흡착 소재의 냉방 출력이 더 중요한 지표이며 저온 재생성이 중요함.
- 해당 시스템의 개발을 위한 비용 및 시간을 고려하여 현재는 새로운 시스템을 개발하기 보다는 흡착 소재 발굴에 더 중점적인 연구개발이 필요한 시점이라 판단하여 해당 시스템을 표준화 시스템으로 활용하여 흡착제의 냉방 성능을 평가하고 있음.
- 스케일-업 관련하여 소형 시스템의 병렬식 운전을 통한 결합을 통해 냉방 출력을 달성 가능함. 하지만, 대형화 시스템 개발을 위해서는 시스템 구성 및 운전을 통해 검증이 필요함. 해당 분야 개발을 위해서는 상당한 연구 비용과 시간이 필요할 것으로 판단됨.

○ 종합의견

- 해당 연구과제를 통해 확보된 수분 흡착제를 활용하기 위해서는 흡착식 냉방시스템에 적용 가능한 열 교환기 모듈 제조 기술이 중요할 것으로 판단되며, 수분 흡착제의 흡착속도 촉진 및 열교환 효율 향상을 위한 전도도 개선이 중요할 것으로 판단됨. 따라서, 해당 과제 수행을 통해 해당 기술을 개발하고 냉방 성능 검증을 통해 기술 개발 완료가 이뤄져야 할 것으로 판단됨.

2023년 09월 19일
 자문위원: 윤석구 (서명)

4. 발전 시스템

3 / 19



가스엔진



엔진 모델	GV(DP)220TI
제조사/제조국	두산인프라코어/대한민국
엔진 형식	4 사이클, V 타입
Aspiration	터보차저 & 인터쿨러
연소방식	린번(Lean-burn)
실린더 수	12
보어 X 행정 (mm)	128 X 142
배기량 (cc)	21.9
압축비	10.5
연속 출력(kWm)	316
밸브 형식	오버 헤드 밸브
제어시스템	디엔지비㈜
크기 (LXWXH)mm	1,924 X 1,243 X 1,626
중량 (kg)	1,620

4. 발전 시스템

4 / 19



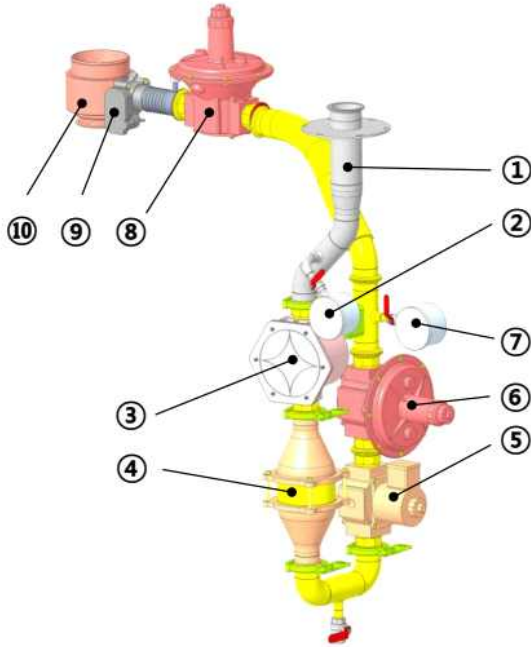
동체



동체 모델	MJB315
제조사/제조국	마렐리모토리/이태리
출력 (kVA/kW)	375/300
전압 (V)	380
주파수 (Hz)	60
효율 (%)	93.2
at Cos φ	0.8
고정자 결선방식	Star
최대 주변온도(°C)	40
방수 등급	IP23
베어링 형식	Single Bearing

- ※ Cummins등 OEM 공급
- ※ 2~10,000kAV Full Line up 구성
- ※ High Efficiency

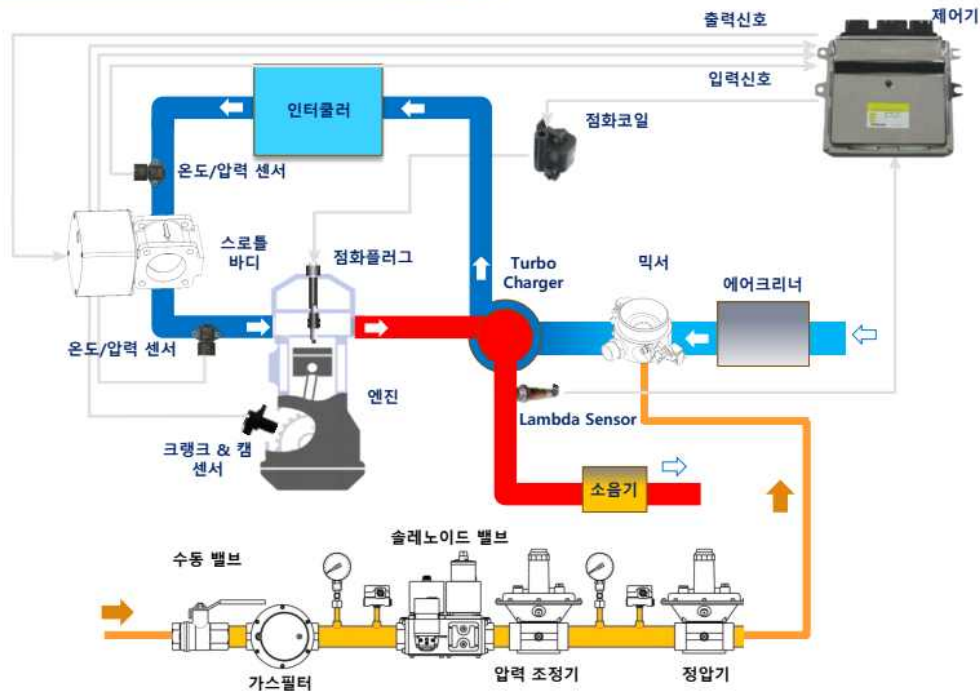
연료 공급 장치



순번	품목	순번	품목
1	연료 인렛	6	레귤레이터
2	압력 게이지(고압)	7	압력 게이지(저압)
3	연료 필터	8	제로가버너
4	역화방지기	9	연료제어밸브
5	슬레노이드 밸브(방폭)	10	믹서

- ✓ 전자식 연료 밸브 적용에 따른 공연비 정밀 제어
- ✓ 방폭형 연료차단 밸브 적용으로 안전성 확보
- ✓ 역화 방지기 적용으로 폭발위험 제거
- ✓ 드레인 밸브 적용으로 수분 제거 용이

전자제어시스템 (Engine Management System)



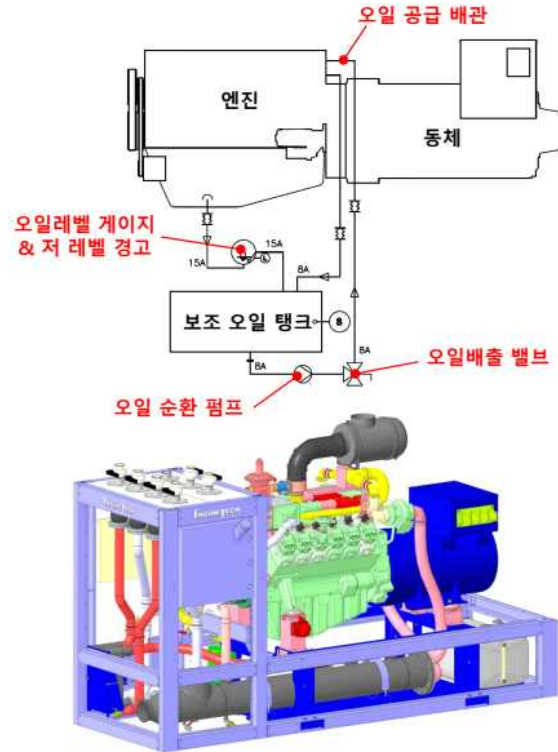
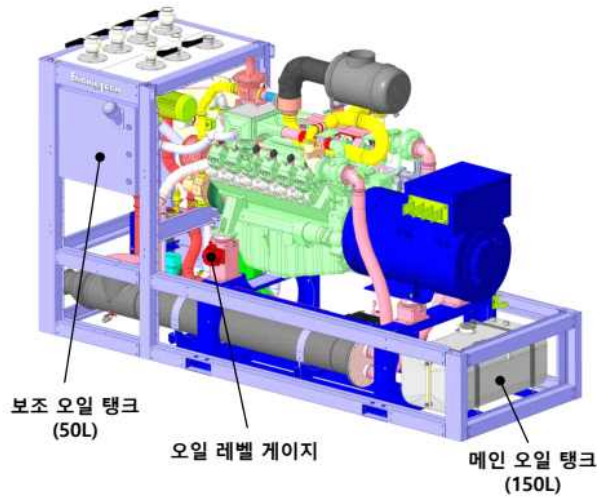
4. 발전 시스템

7 / 19



윤활 장치

- 보조 오일 탱크 용량 : 200L (150L + 50L)
- 재 질 : SACC (Seam Weld Type)
- 오일 순환 펌프 유량 : 50L/min



5. 열병합 시스템

8 / 19



Heat Balance

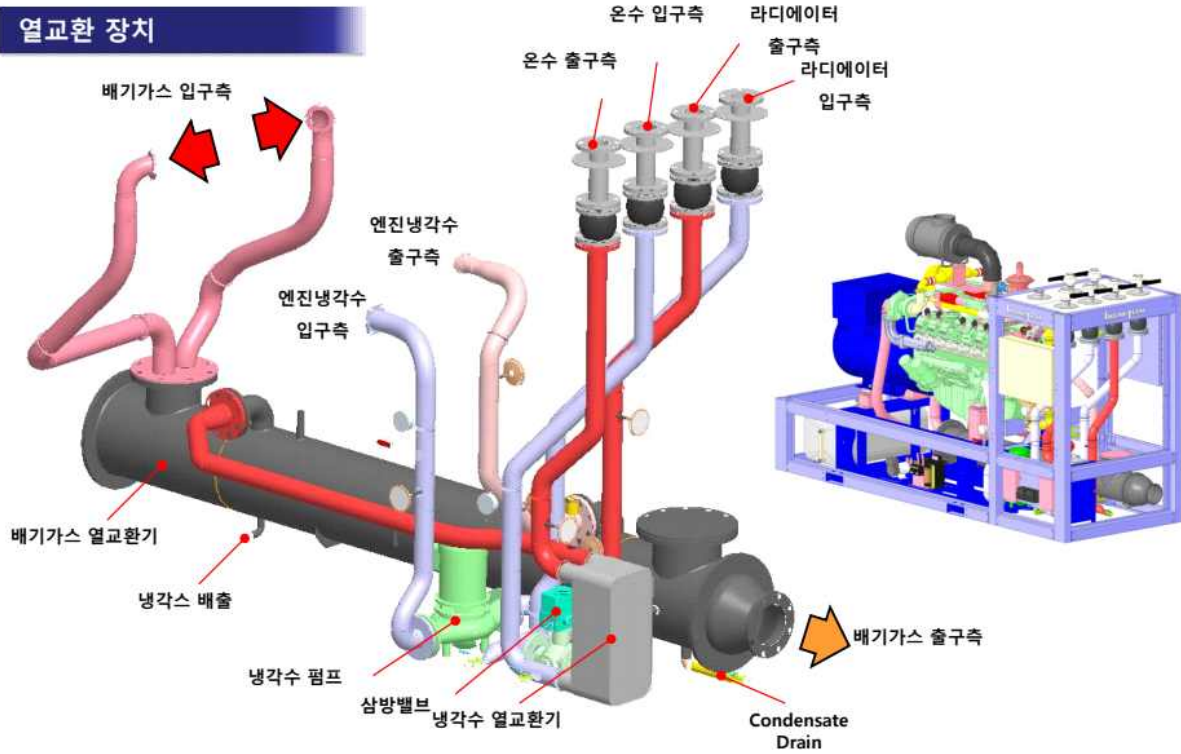
※ 연료중에 포함된 H₂S 농도에 따라 배기가스 온도관리 및 배기가스 열교환량 제한

출력 부하율	%	100%	90%	80%	60%	50%
발전 출력	kW _e	300	270	240	180	150
엔진 효율	%	35.8	35.3	34.5	33.2	28.5
발전기 동체 효율	%	94.9	95.1	95.2	95.2	94.5
엔진 출력	kW _m	316	284	252	221	159
발전 효율	%	34.0	33.6	32.8	31.6	26.9
가스 소모량	Nm ³ /hr	148	135	122	111	93
종합 에너지	kW	883	804	731	664	557
열회수 출력	kW	418	384	354	328	296
열회수 효율	%	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4
열회수측 유량	Nm ³ /hr	18.0	16.5	15.2	14.1	12.7
종합 효율	%	81.3	81.3	81.2	81.0	80.1

NOTE

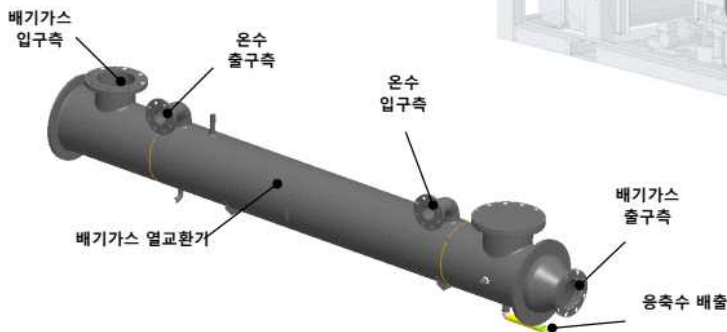
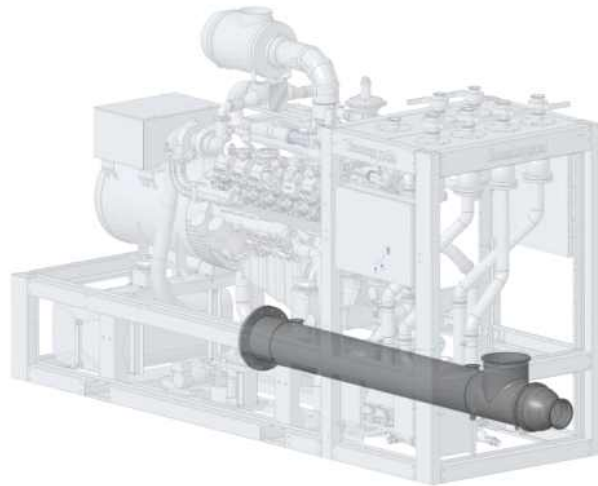
- ※ Electrical Efficiency : Engine Efficiency X Electrical Efficiency
- ※ Gas Fuel Consumption : Electrical Power / Electrical Efficiency / (5,136/860)
- ※ Bio Gas Low Heat Value : 5,136kcal/m³ (CH₄ 60%, CO₂ 40%)
- ※ Generator Power Factor : 0.9
- ※ Exhaust Gas Temperature : 180°C after Exhaust Heat Exchanger

열교환 장치



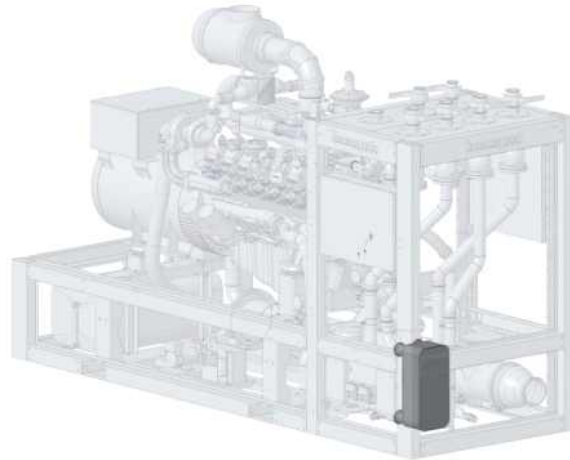
배기가스 열교환기

- 형식 : Shell & Tube
- 재질 : STS316L
- 배기가스 압력 저하 : 1.4kPa
- 최대 가스 유입 압력 : 0.5bar
- 최대 냉각수 유입 압력 : 4bar
- 최대 가스 유입 온도 : 700°C
- 최대 냉각수 유출 온도 : 110°C



냉각수 열교환기

- 형식 : Brazed Weld Plate
- 제조사 : KTC
- 재질 : STS304
- 압력 저하: 50kPa
- 포트 사이즈: 65A



배출가스 허용기준에 따른 배출량

※ 적용법령 : 대기환경보전법 시행규칙

배출시설 분류

발전시설 (수력, 원자력 제외)	가) 화력발전시설	
	나) 열병합발전시설(120kW 이상)	
	다) 120kW 이상인 발전용 내연기관(도서지방용·비상용, 수송용을 제외한다)	
	라) 120kW 이상인 발전용 매립·바이오가스 사용시설	
	마) 120kW 이상인 발전용 석탄가스화 연료 사용시설	
	바) 120kW 이상인 카본블랙 제조시설의 폐가스재이용시설	
	사) 120kW 이상인 린변엔진 발전시설	
매립/바이오가스를 사용하는 린변엔진	사) 120kW 이상인 린변엔진 발전시설	
매립/바이오가스를 사용하는 이론평연비 엔진	라) 120kW 이상인 발전용 매립·바이오가스 사용시설	
매립/바이오가스를 사용하는 열병합 린변엔진	사) 120kW 이상인 린변엔진 발전시설	
매립/바이오가스를 사용하는 열병합 이론평연비 엔진	라) 120kW 이상인 발전용 매립·바이오가스 사용시설	

발전시설의 대기오염물질 배출허용기준

사용연료	구분	SO ₂	NO ₂	Dust
천연가스	(열병합)린변 엔진	20(15)	50(15)	10(15)
	(열병합)이론평연비 엔진	↑	20(15)	↑
매립 / 바이오가스	(열병합)린변 엔진	180(4)	95(15)	↑
	(열병합)이론평연비 엔진	180(4)	160(4)	↑

※ 농도 환산식

$$C = Ca \times (21 - Os) / (21 - Oa)$$

C : 오염물질 농도 (mg/Sm³ 또는 ppm)

Os : 표준산소농도 (%)

Oa : 실측산소농도 (%)

Ca : 실측오염물질농도 (mg/Sm³ 또는 ppm)

2023년 7월 20일

자문위원: 이 용 균

□ 미활용 에너지 축열 및 공급 기술 검토

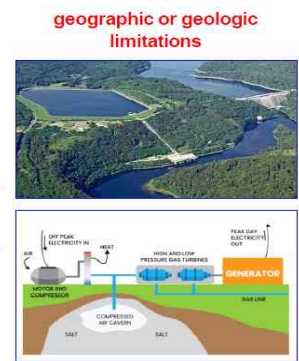
- 정읍시 미활용 바이오가스 발전폐열을 이용한 시설온실 활용 방향 자문회의를 수행함
장소 / 회의일시 : 고등기술연구원 6층 Conference room(On-line) / 2023.09.20. (10:00 ~ 12:00)
참석자 : 고기연(이은실, 한성국, 최오경, 송은혜, 김은주, 이원배, 이용호) 및 KAIST(장대준 교수)

○ 자문내용 : 미활용 에너지 축열 및 공급 기술

① 에너지 저장 시스템(ESS) 비교

- 리튬배터리: 에너지 밀도가 높은 장점이 있으나 고비용로 인한 경제성 문제, 소규모 저장 용량에 적합하며 주기적 교체 필요
- 액화공기: 복잡한 구성과 심냉 조건을 유지하기 위한 비용 문제, 소규모-중규모 용량에 적합
- 양수 및 압축공기: 가장 경제적이지만, 지리적/지질적 한계로 국소적인 지역에 적용 가능
- 용융염: 수력만큼 경제적인 장점으로 전력부문에서 상용화된 기술임. 대규모 설비 구축을 위한 연구개발 진행중

Technology	Energy density (kWhr/m3)	Typical capacity (MWhr)	Cost of storage (\$/kWhr)*	Challenges
Li battery (리튬 배터리)	250 ~ 500	< 100	0.27 ~ 0.42	• High cost • Fire & explosion risk • Regular replacement
Liquefied air (액화 공기)	120 ~ 200	25 ~ 1,200	0.24 ~ 0.75	• High cost • Complicated configuration • Keeping cryogenic state
Pumped hydro (양수)	0.1 ~ 1.5	500 ~ 8,000	0.10 ~ 0.13	• Use of huge land • Geographic limitation • Environmental damage • Public acceptance
Compressed air (압축 공기)	3 ~ 6	< 1,000	0.11 ~ 0.16	• Geographic limitation • Public acceptance
Molten salts (용융염)	100 ~ 250	1,000 ~ 6,000	0.11 ~ 0.16	• Complicated configuration • Huge footprint • Molten salt freezing

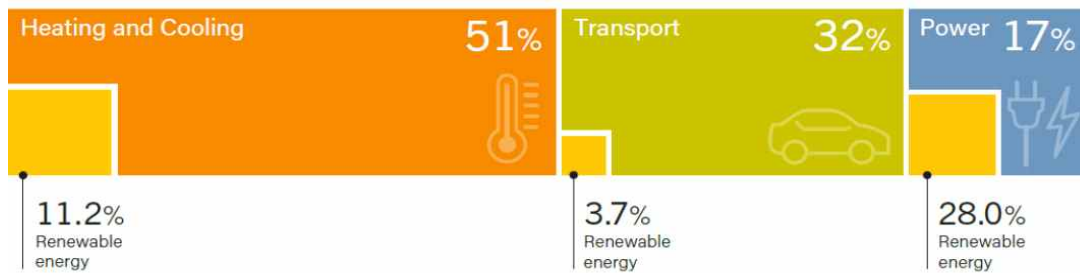


* U.S. Department of Energy, K. Mongird, V. Viswanathan, J. Alam, C. Vartanian, V. Sprenkle, R. Baxter, Technical Report: Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment, 2020.

[에너지 저장 시스템의 비교]

② 열 에너지 저장 시스템

- 전체 에너지 수요 분포는 냉·난방 분야가 51%를 차지하며, 수송 32%, 발전 17% 순
- 재생에너지의 활용은 주로 전력 분야에 집중되며 28%에 달함
- 에너지 수요 중 가장 큰 분율을 차지하는 냉·난방에서의 재생에너지 적용은 11% 수준

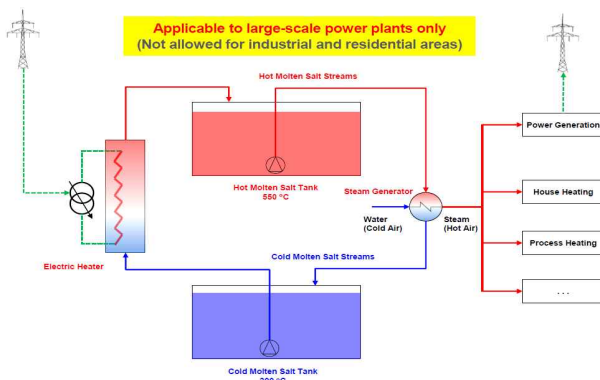


[전체 에너지 수요 중 재생에너지 활용 분율]

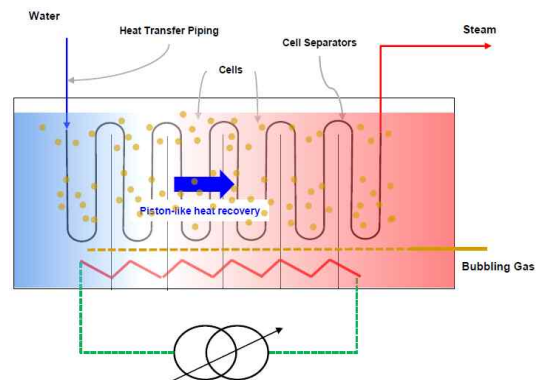
- 재생에너지의 경우 변동이 발생하여 열을 지속적으로 공급하기 어렵다는 단점이 있으며, 이를 극복하기 위해서는 열 에너지 저장 시스템 개발이 필요
- 대표적인 열 저장 시스템으로는 상용 축열조가 있으나, 온도가 낮고, 소규모 용량에 적합함
- 대규모 및 고온의 열을 저장하기 위한 시스템으로 용융염 방식 존재
- 용융염 열 저장장치의 경우, 물질의 종류에 따라 운전온도가 다르나, 일반적으로 ~550℃ 까지 운전이 가능하며, 열 저장 용량이 큰 장점 보유

③ 용융염 시스템의 열전달 특성

- 재생에너지 등 변동이 심한 에너지 저장을 위하여 용융염 축열 시스템 개발 연구 수행중이며, 용융염의 열 저장용량이 높아 열 손실량을 최소화하여 열 에너지 저장이 가능함
- 기존 용융염 시스템은 두 개의 조로 구성되며 용융염을 이동하여 에너지를 전달하는 방식으로 용융염이 응고되지 않게 주의가 필요함. 따라서, 대규모 발전소에 적용이 가능하고 산업 및 주거 지역에는 부적합
- 개선된 용융염 시스템의 경우, 하나의 조에 Cell을 구성하여 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝으로 열을 전달하며, 항온증기 등 고품질 열에너지 회수 가능
- 이때, 용융염 응고되더라도 시스템 운전이 문제가 발생하지 않으며, 고품질 증기 및 냉방 열 공급이 가능하여 주거지, 생산설비, 플랜트에 열 공급이 가능
- 0.1MWh 시스템 기준, 시스템 용량은 0.4 m³, 열 저장 용량은 0.12 MWh_{th} 수준이며, 스택화를 통하여 용량 증설이 가능



[기존 용융염 에너지 저장 시스템의 구성]



[용융염 에너지 저장 시스템의 구성]

④ 액비화조 이용 축열 조건 검토 결과

- 현재 액비화조의 경우, 용융염 시스템과 유사하게 단위 Cell로 구성이 되어 있어 단계적으로 에너지 저장이 가능할 것으로 판단
- 이때, 액비화조 내 액비에 직접적으로 온수나 배가스를 공급하여 에너지를 저장할 경우, 액비 성상 변화가 예상됨
- 액비화조 내 축열 물질을 첨가한 후, 배관을 통한 간접식 열 전달 시스템 구성 필요
- 열 저장매체는 작동 온도에 따라 다르며, 추가적인 조사가 필요
- 액비 축열 조건이 60~80°C의 저온으로 열 손실량은 적을 것으로 판단되나, 상온에 대한 온도 차가 크지 않아 열 저장 효율은 추가 검토 필요함
- 액비 축열의 경우, 저온 열 저장으로 열 손실이 되면 열 퀄리티가 감소하므로 계간 축열을 위해 단열이 가장 중요한 조건이며, 단열재 20~30cm 보강이 필요할 것으로 판단됨
- LNG 이용 테스트 시, 단열재(스티로폼) 20~30cm 보강으로 손실되는 열은 0.2%/일 수준

⑤ 열 저장 시스템 제언

- 현재 시스템에서 바이오가스 발전 배가스(500°C)를 용융염 시스템에 공급하는 축열 방식의 검토 필요
- 고온의 열로부터 스팀, 냉 난방 활용이 가능하며 수요처 요구 열량에 따른 고온 축열 검토
- 배가스 열 에너지 저장과 관련하여 공기 기준 선행 테스트 결과, 압력강하 0.5~1 bar 발생하였으며, 브로워 이용 시 기체의 유동이 정상적으로 진행하여 시스템 구성에 문제 발생하지 않음

2023년 9월 20일

자문위원: 장 대 준

☐ 미활용 바이오가스 발전폐열의 시설온실 활용 가능성 검토

○ 정읍시 미활용 바이오가스 발전폐열을 이용한 시설온실 활용 방향 자문회의를 수행함

장소 / 회의일시 : 고등기술연구원 6층 Conference room / 2023.09.25. (14:30 ~ 16:00)

참석자 : 고기연(김호, 이은실, 한성국, 최오경, 송은혜, 김은주, 이원배, 이용호) 및 한경대학교(윤영만 교수)

자 문 의 건 서

○ 건 명: 정읍시 바이오갓 플랜트 미활용열 이용 토마토 축성재배 방안

의 건

- 전라북도 시설채소 농업 생산 현황 조사 결과 토마토(반축성재배)의 소득이 15,684천원/10a로 가장 높은 소득을 보이는 작물(작형)으로 나타남, 따라서 정읍에 위치하는 바이오가스 발전 미활용열 이용 시설채소 작물로 토마토를, 적정 작형으로는 반축성 재배를 추천함
- 시설토마토 축성재배 난방용 에너지사례는 지역별, 농가별 다양하게 나타나고 있으나, 총님 부여의 사례(등유 5,423L/10a/1작기)를 기준으로 하여 영농순기에 따른 시설채소 하우스 에너지 수요를 분석함
- 1년단위 영농계획은 아래와 같으며, 1년 2작기로 구성함

월	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	1작기											
영농순기	파종						성출하기	파종				성출하기

- 1작기 10a당 열에너지 수요는 44,197Mcal로 나타났으며, 1°C 당 난방에너지는 19.8 Mcal, 1°C 당 냉방에너지는 39.6 Mcal로 나타났으며, 1년 2작기 기준 연간 총난방에너지수요는 54,215Mcal/10a, 연간 총냉방에너지 수요는 21,486 Mcal/10a로 나타남, 따라서 연간 총냉난방에너지 수요는 75,700 Mcal/10a로 나타남, 경제성은 다음과 같음.

비목별		B(미활용열 이용 반축성재배)					
		수량	단가 (원)	금액 (원/10a)	생산비 비중 (%)	경영비 비중 (%)	
총수입	주산물가액	17550kg	2,434	42,716,700	100.0		
	부산물가액				0.0		
	계			42,716,700	100.0		
생산비	경영비	중자중도비			1,212,611	2.8	11.0
		중자					
		중도	2,899주	418			
		무기질비료비			1,352,044	3.2	12.2
		유기질비료비			33,667	0.1	0.3
		농약비			394,430	0.9	3.6
		수도광열비			0	0.0	0.0
		기타재료비			3,523,315	8.2	31.9
		소농구비			16,713	0.0	0.2
		대농구상각비			933,291	2.2	8.4
		영농시설상각비			3,542,862	8.3	32.0
		수리유지비			21,955	0.1	0.2
	기타비용			30,509	0.1	0.3	
		계			11,061,397	25.9	100.0
		임차료			79,834	0.2	
		위탁영농비					
		고용노동비	388.3시간		4,383,416	10.3	
		남	193.4시간	12,389			
		여	194.9시간	11,556			
		계			15,524,647	36.3	
	자가노동비	329.1시간		6,682,255	15.6		
	남	240.6시간	20,305				
	여	88.4시간	20,305				
	유동지분용역비			356,807	0.8		
	고정지분용역비			1,929,281	4.5		
	토지지분용역비			356,605	0.8		
	계			24,849,595	58.2		
	부가가치			20,147,398	47.2		
	소득			27,192,053	63.7		
	부가가치율(%)			47.2			
	소득율(%)			63.7			

자료) 2021 지역별 농산물소득자료(농촌진흥청, 2022) 기준
 수량 : 동하절기 냉난방 및 수확기연장에 따른 중수효과 120%적용, 수도광열비 : 냉난방지립 효과 기준 수도광열비 100% 대체

2023년 09월 25일

자문위원: 윤영만

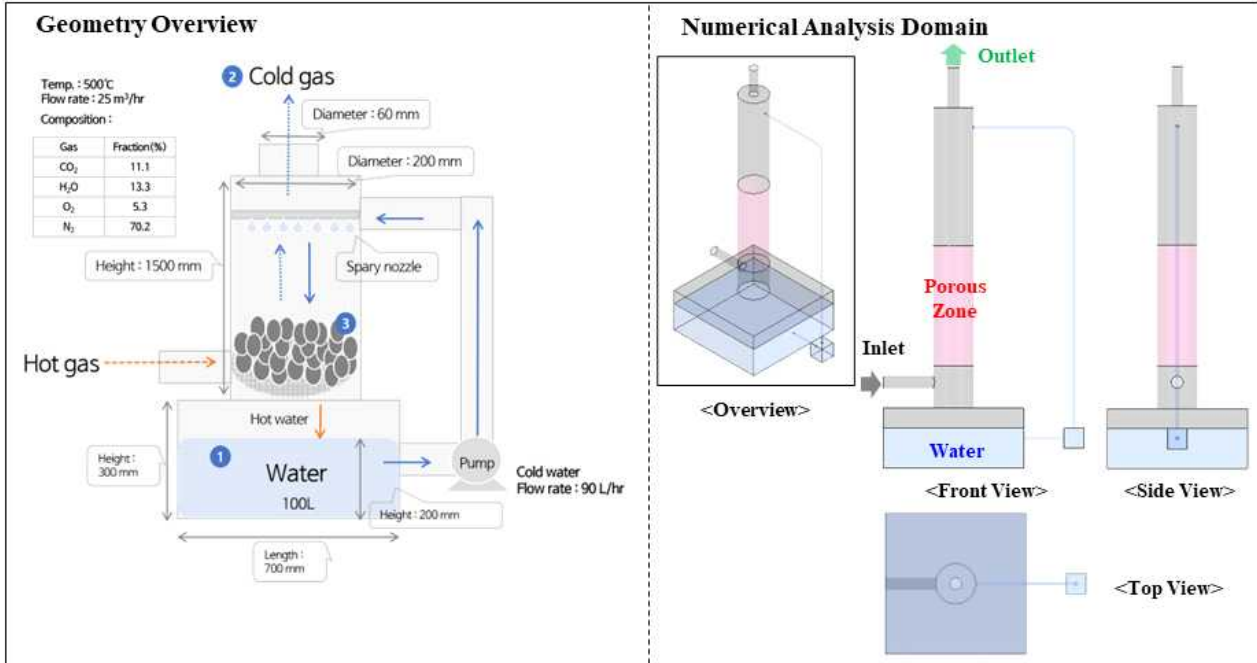
□ 미활용 바이오가스 발전폐열의 직접 접촉식 전열교환기 적용 타당성 검토

○ 미활용 바이오가스 발전폐열 전열회수를 위한 전산 해석 전문가 자문 수행

장소 / 회의일시 : 고등기술연구원 / 2023.09.26.

참석자 : 고기연(한성국, 최오경, 김은주, 송은혜, 이원배, 이용호) 및 (노정훈 책임연구원)

❖ 해석 모델의 형상



❖ 지배 방정식

- Mass Conservation Equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

- Momentum Conservation Equation

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{u}) + S_u$$

- Transport Equation for k (k - ω SST Model)

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{u}) = \nabla \cdot (\Gamma_k \nabla \vec{u}) + G_k - Y_k + S_k$$

- Transport Equation for ω (k - ω SST Model)

$$\frac{\partial (\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \omega \vec{u}) = \nabla \cdot (\Gamma_\omega \nabla \vec{u}) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega$$

- Energy Equation

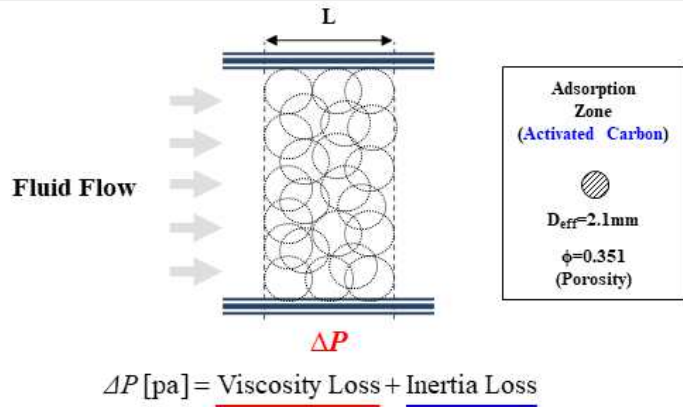
$$\frac{\partial (\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho C_p T \vec{u}) = -\nabla \cdot (k \nabla T)$$

❖ 경계 조건 및 물성

Boundary	Condition		Value	Unit
Inlet	Velocity Inlet	Velocity	2.46 (25)	m/s (CMH)
		Temperature	500	°C
Outlet	Pressure Outlet	Gauge Pressure	0	Pa

1 atm, 293 K	CO ₂	H ₂ O	N ₂	O ₂
Density [kg/m ³]	1.66	0.68	1.06	1.21
Viscosity [kg/m-s, 10 ⁻⁵]	1.61	1.08	1.87	2.19
Thermal Conductivity [W/m-K]	0.019	0.020	0.027	0.029
Specific Heat [J/kg-K]	867	1,874	1,042	922
Mass Fraction [-]	0.0368	0.1008	0.7286	0.1247

Ref. : ANSYS Fluent Theory Guide 18.0, ANSYS Inc., PP. 187-214, 2018



▪ **Nomenclature**

- D : Diameter of catalyst [m]
- L : Length [m]
- P : Pressure [Pa]
- R_i : Inertial resistance [1/m]
- R_v : Viscosity resistance [1/m²]
- θ : Sphericity of the catalyst making the medium [-]
(assume 0.75)
- μ : Viscosity [Pa · s]
- v : Average velocity [m/s]
- ρ : Density [kg/m³]
- ϕ : Porosity of the medium [-]

▪ Ergun Equation :
$$\frac{dP}{dL} = \frac{150 \mu (1-\phi)^2}{\theta^2 D^2 \phi^3} v + \frac{1.75 \rho (1-\phi)}{\theta \cdot D \cdot \phi^3} v^2$$

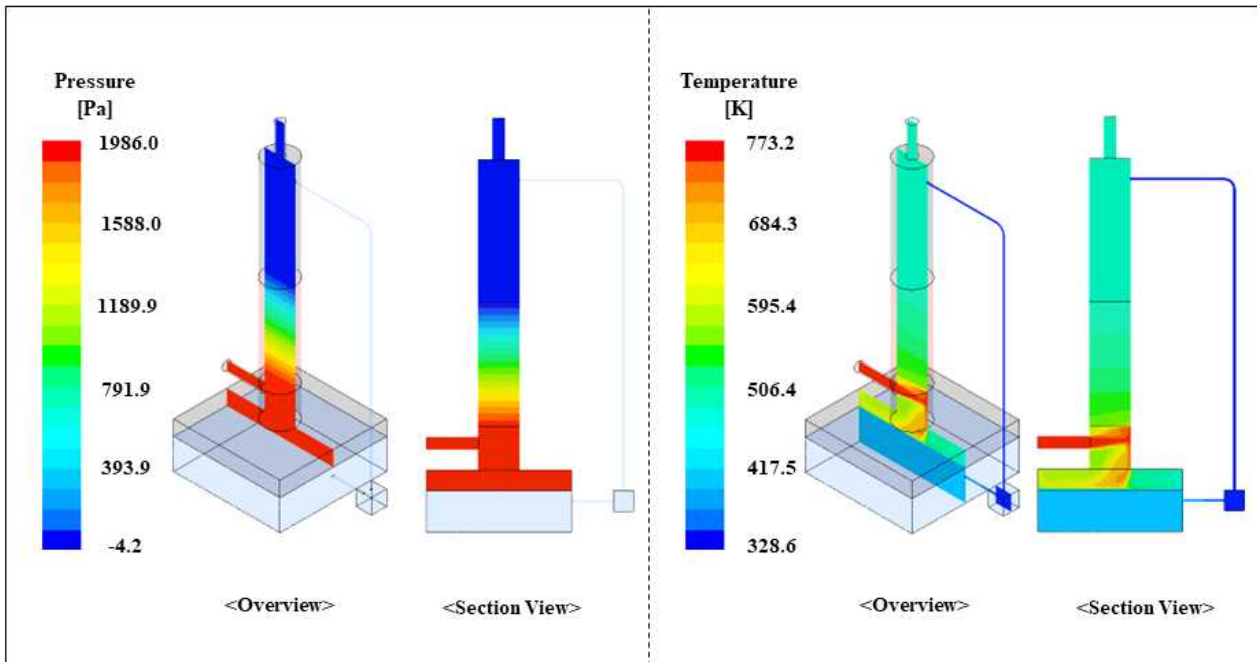
▪ Fluent Expression :
$$\frac{dP}{dL} = R_v \mu v + R_i \frac{\rho}{2} v^2$$

$$\therefore R_v = \frac{150(1-\phi)^2}{\theta^2 D^2 \phi^3}, \quad R_i = \frac{2 \cdot 1.75(1-\phi)}{\theta \cdot D \cdot \phi^3}$$

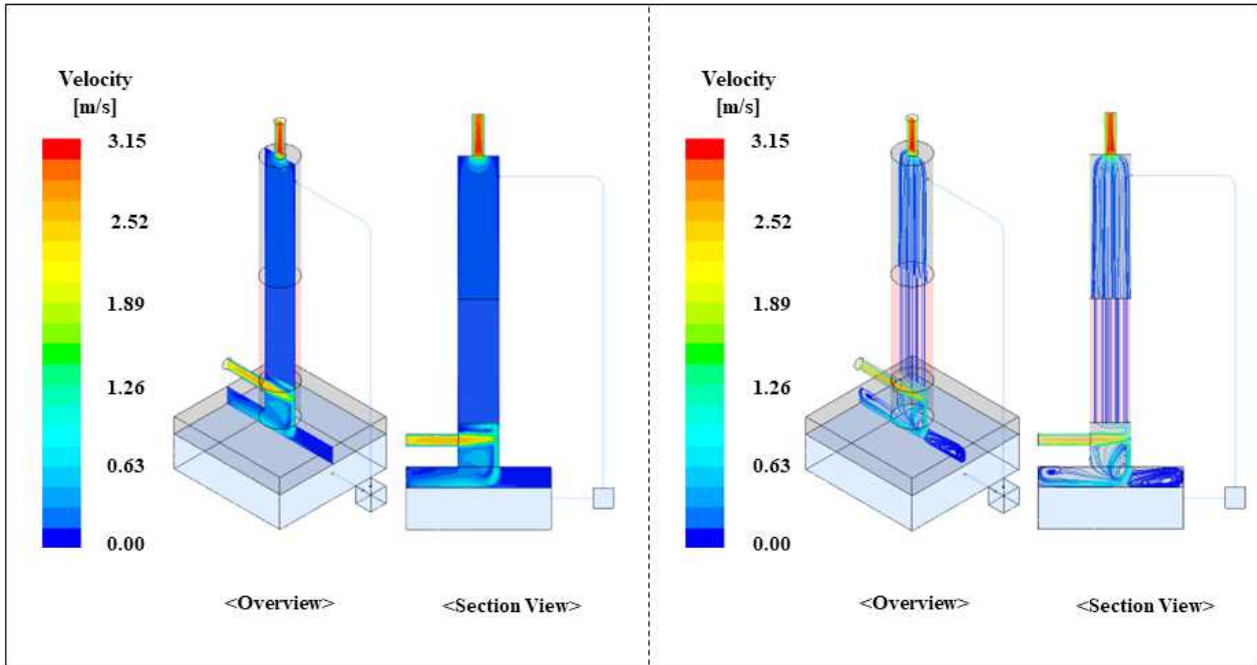
	Symbol	Active Carbon	Unit
Porosity	ϕ	0.351	-
Diameter	D	2.1	mm
Inertial Resistance	R_i	33,867	1/m
Viscosity Resistance	R_v	6.1×10^8	1/m ²

Ref. : Ergun, Sabni. "Fluid flow through packed columns." Chem. Eng. Prog. 48, 1952

❖ **해석 결과 (Pressure & Temperature Distributions)**



❖ 해석 결과 (Velocity & Streamline Distributions)



2023년 9월 26일

자문위원: 노 정 훈

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

성과 목표	연구 개발 성과
에너지 다소비형 시설하우스 에너지 공급/수요 특성 조사	<ul style="list-style-type: none"> 전라북도 정읍시 시설하우스 냉·난방에너지 요구량 도출 구아바 시설온실(0.1ha) 냉·난방 에너지 요구량 201.4Gcal/년 파프리카 시설온실(0.1ha) 냉·난방 에너지 요구량 155.9Gcal/년
미활용 바이오가스 발전폐열 발생 현황 조사	<ul style="list-style-type: none"> 바이오가스 1,241 Nm³/d 바이오가스 발전 시 엔진 배가스 및 엔진 열 냉각수 폐열 회수량 500℃ 배가스 : 1,688.8 Gcal/년 150℃ 배가스 : 1,913.9 Gcal/년 (물질-에너지 수지 기준)
직접 접촉식 전열 회수장치 열교환 효율 조사	<ul style="list-style-type: none"> 바이오가스 발전폐열 500℃ (투입열량: 8,253.9 kcal) 전열회수 효율 75.9% (회수열량: 6,264.6 kcal) 바이오가스 발전폐열 150℃ (투입열량: 4,342.3 kcal) 전열회수 효율 83.6% (회수열량: 3,630.8 kcal)
흡착식 냉방 시스템 요구 성능 검토	<ul style="list-style-type: none"> 냉방용량(SCP) 1.0 kW/kg 기준 흡착제 요구량 60 kg 이상 흡착속도 300초 기준 유효 수분흡착 용량 0.2 g/g 필요 도출
수분 흡착제 후보군 도출	<ul style="list-style-type: none"> AIPO-40, AIPO-50 구조에 대한 흡착제 활용 가능성 확인 Al-MOF 이외의 전이금속 (Fe 또는 Zn)으로 이루어진 MOF 구조에 대한 흡착제 활용 가능성 비교
액비저장조 축열조 활용방안 도출	<ul style="list-style-type: none"> 실증시설 생산 액비 성상 조사 (TCOD 1.85 g/L, TP 0.032 g/L, TN 0.75 g/L, NH₃-N 0.63 g/L) 축열조 열전달매체 특성 조사

(2) 정량적 연구개발성과

- 해당 없음

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율

국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표자	발표 일시	장소	국명

기술 요약 정보

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

보고서 원문

연도	보고서 구분	발간일	등록 번호

생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

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

[기술적 성과]

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

번호	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원				등록			기여율	활용 여부
			출원인	출원일	출원 번호	등록 번호	등록인	등록일	등록 번호		

○ 지식재산권 활용 유형

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

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

저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록 번호	저작권자명	기여율

신기술 지정

번호	명칭	출원일	고시일	보호 기간	지정 번호

기술 및 제품 인증

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

표준화

○ 국내표준

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

* 1) 한국산업규격(KS) 표준, 단체규격 등에서 해당하는 사항을 기재합니다.

* 2) 제안 또는 인증 중 해당하는 사항을 기재합니다.

* 3) 신규 또는 개정 중 해당하는 사항을 기재합니다.

○ 국제표준

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

* 1) 국제표준 단계 중 신규 작업항목 제안(NP), 국제표준초안(WD), 위원회안(CD), 국제표준안(DIS), 최종국제표준안(FDIS), 국제표준(IS) 중 해당하는 사항을 기재합니다.

* 2) 국제표준화기구(ISO), 국제전기기술위원회(IEC), 공동기술위원회1(JTC1) 중 해당하는 사항을 기재합니다.

* 3) 국제표준(IS), 기술시방서(TS), 기술보고서(TR), 공개활용규격(PAS), 기타 중 해당하는 사항을 기재합니다.

[경제적 성과]

시제품 제작

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

기술 실시(이전)

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

* 내부 자금, 신용 대출, 담보 대출, 투자 유치, 기타 등

□ 사업화 투자실적

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

□ 사업화 현황

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

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

□ 매출 실적(누적)

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

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

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

□ 고용 창출

순번	사업화명	사업화 업체	고용창출 인원(명)		합계
			yyyy년	yyyy년	
합계					

□ 고용 효과

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

□ 비용 절감(누적)

순번	사업화명	발생연도	산정 방법	비용 절감액(천원)
합계				

□ 경제적 파급 효과

(단위: 천원/년)

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

산업 지원(기술지도)

순번	내용	기간	참석 대상	장소	인원

기술 무역

(단위: 천원)

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

[사회적 성과]

법령 반영

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

정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

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

전문 연구 인력 양성

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

산업 기술 인력 양성

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

다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비

국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

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

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

[그 밖의 성과]

- 해당 없음

(4) 계획하지 않은 성과 및 관련 분야 기여사항

- 해당 없음

2) 목표 달성 수준

추진 목표		달성 내용	달성도(%)
(주관기관) 고등기술 연구원	<ul style="list-style-type: none"> 미활용 바이오가스 발전 폐열 회수/저장기술 조사 시간별 열수요 패턴 관리를 이용한 주요 열 수요처의 열 공급 특성 조사/분석/평가 	<ul style="list-style-type: none"> 에너지 다소비형 시설온실 에너지 공급/수요 특성 조사 미활용 바이오가스 발전 폐열 발생 현황 조사 미활용 바이오가스 발전 폐열 활용 사업 타당성 평가 	100
(공동기관) 한국화학 연구원	<ul style="list-style-type: none"> 바이오가스 발전폐열 활용 수분 흡착식 냉방 시스템 에너지 절감 가능성 검토 핵심 소재 적용을 위한 수분 흡착제 요구 성능 검토 	<ul style="list-style-type: none"> 바이오가스 발전 폐열 활용 수분 흡착식 냉방 시스템 적용 타당성 검토 흡착식 냉방 시스템 핵심 소재 요구 성능 검토 수분 흡착제 후보군 도출 	100
(공동기관) 포항산업과학 연구원	<ul style="list-style-type: none"> 액비저장조 축열 시스템 활용을 위한 계간 축열조 기술 조사 액비저장조 축열 시스템 활용방안 도출 	<ul style="list-style-type: none"> 기존 액비저장조와 신규 액비저장조 현황 파악 액비의 열전달매체로서의 물리화학적 물성 조사 액비저장조 개선을 통한 축열성능 향상방안 도출 	100

4. 목표 미달 시 원인분석

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 해당 없음

2) 자체 보완활동

- 해당 없음

3) 연구개발 과정의 성실성

- 해당 없음

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

[과학·기술적 측면]

○ 바이오가스 발전폐열 에너지 활용 기술 개발

- 미활용 바이오가스 엔진발전 폐열 활용 1.1 (MW-열회수/MW-발전) 이상 회수 기술 개발

○ 바이오 수열 이용 저온구동 흡착식 냉방시스템 개발

- 저온(회수온도 60℃) 조건에서의 전열 교환 시스템(열교환 효율 80%) 개발

○ 저 에너지 구동형 수분 흡착제 발굴 및 대량 합성 기술 개발

- 유효 수분 흡착량 확보 및 저온 재생(80℃ 이하)을 위한 신소재 흡착소재 Metal-organic framework(MOF) 및 실증 적용화 기술 개발

○ 열교환기 코팅모듈 제조기술 개발

- MOF 흡착제를 활용한 흡착식 냉방 시스템 적용 열교환기 모듈 제조 기술 개발

○ 액비조 활용 계간 축열 플랜트 및 열관리 최적화 개발

- 액비저장조 활용 분할 축열조(DTES: Division Thermal Energy Storage) 모델 및 열관리 시스템 개발

[경제적·사회적 측면]

○ 개발기술 사용처 측면

- 본 과제 참여기관과 지자체가 연구개발사업을 통하여 개발된 열회수 기술을 통해 지속적인 운영사업 수행 및 농촌 재생에너지 변동성 및 불안전성 해결
- 재생에너지를 활용한 농촌의 에너지 자립화 구축 및 에너지 공급을 통해 에너지 다소비형 시설온실 고부가가치 작물 생산
- 열회수를 이용한 난방을 통해 농촌 및 지역내 온수를 공급하여 농촌 복지 향상 (75,745천원/년 및 미활용열 활용 난방 및 액비저장조 축열 에너지 활용을 통해 작물 증산률 및 내부 수익률 증가
 - 작물 증산율: 보급형 시설온실 평균 1.8배
 - 농가 소득율: 보급형 시설온실 평균 43.8% (기존 시설온실(19.3%) 대비 약 2.2배 증가)

[시설온실 면적: 0.5 ha 기준]

		단위	기존 시설온실		실증시설		
미활용열 회수량		(Gcal/년)	0		1,689		
에너지 투입			등유 보일러		미활용 발전폐열		
설비구축비	시설 온실	(천원)	340,909	100%	466,350	78%	
	냉각시스템	(천원)	0	0%	24,000	4%	
	전열교환기	(천원)	0	0%	7,000	1%	
	열공급배관	(천원)	0	0%	98,000	16%	
	소계	(천원)	340,909		595,350		
수입 (A)	작물판매 수입	(천원)	176,334	100%	317,402	99%	
	(생산량)	(kg/년)	62		112		
	(단가)	(원/kg)	2.8		2.8		
	배출권 거래	(천원)	0	0%	2,631	1%	
	소계	(천원)	176,334		320,033		
지출 (B)	중 간 재 비	종자·종묘비	(천원)	10,356	7%	10,356	6%
		(무기질)비료비	(천원)	10,186	7%	18,336	10%
		(유기질)비료비	(천원)	42	0%	76	0%
		농약비	(천원)	4,362	3%	7,852	4%
		수도·광열비	(천원)	31,705	22%	0	0%
		기타재료비	(천원)	26,805	19%	26,805	15%
		소농구비	(천원)	75	0%	75	0%
		대농구상각비	(천원)	8,607	6%	8,607	5%
		영농시설상각비	(천원)	23,330	16%	35,022	19%
		수리·유지비	(천원)	1,515	1%	9,728	5%
		기타비용	(천원)	1,384	1%	1,384	1%
	소계	(천원)	118,366		118,241		66%
	농기계 임차료	(천원)	385	0%	385	0%	
	토지 임차료	(천원)	1,499	1%	1,499	1%	
	위탁 영농비	(천원)	61	0%	61	0%	
	시설온실 노동비	(천원)	22,055	15%	39,700	22%	
	열회수 설비 노동비	(천원)	0	0%	20,000	11%	
소계	(천원)	24,001		41,645		34%	
소계	(천원)	142,367		179,886			
농가소득 (A-B)		(천원)	33,967		140,147		
소득율 (B/A)		(%)	19.3		43.8		

- 수분 흡착식 냉방기 활용 방안

- 저온 재생형 MOF 흡착제는 신재생에너지 또는 폐열을 활용한 가정용/상가/업무용/산업용/군용 건물의 냉방/냉각 또는 제습과 더불어 모빌리티 (자동차, 선박), 공기 중 물 수확 시스템, 열저장 배터리 등의 기술로 확대 가능하고, 에너지 및 환경 분야에 다양하게 적용 가능함.
- 화학(연)에서 개발한 원천소재 기술과 대량합성, 성형/코팅 등 제품화 관련 핵심기술은 수분 흡착 응용 기술뿐만 아니라 이산화탄소 포집, 가스 분리, 저장, 촉매, VOCs 제거용 흡착제 등과 같은 다양한 분야에 spin-off 기술로 활용 가능함.

○ 바이오가스 시장 확대 측면

- 국내 바이오가스 플랜트 시설수 및 바이오가스 생산량이 지속적으로 증가하는 추세이며, 유기성 폐자원을 활용한 바이오가스의 생산 및 이용 촉진법(바이오가스법, 23.12월 시행)에 따라, 의무적으로 유기성폐자원(음식물류폐기물, 하수슬러지, 가축분뇨 등)의 바이오가스 생산 활용 비율을 확대해야 함.



- 공공 및 민간 의무생산자의 생산 목표율은 2050년까지 지속적으로 증가(의무 생산목표율 80%)하며, 이에 따라, 바이오가스 플랜트 시설 구축이 활발하게 진행될 것으로 예상되며, 바이오가스 및 발전폐열 발생량이 증가할 것으로 전망됨

년도		'25-30년	'35년	'40년	'45년	'50년
목표율	공공	50%	60%	70%	80%	80%
	민간	10%	50%	60%	70%	80%

- 본 연구는 발생하는 미활용 바이오가스를 활용한 에너지 회수를 통해 바이오가스 플랜트 설치 지역내 회수 에너지 공급 및 에너지 자립화를 구현할 수 있으며, 기술을 바탕으로 하여 기존 및 신규 바이오가스 플랜트에 적용 가능할 것으로 판단되어 시장의 확대성이 확보되어 있음

• 시장의 정의

- ① 잠재시장: 2021년 기준 운영 중인 전국 바이오가스 플랜트 111개소
- ② 핵심시장: 잠재시장 중 가축분뇨 유입 및 5km 반경 시설온실 설치 가능 지역 34개소
- ③ 확장시장: 잠재시장 중 5km 반경 시설온실 설치 가능지역(폐열 활용 가능지역) 55개소

• 시장의 규모

항목	단위	핵심 시장	확장 시장
바이오가스 플랜트 개소수	(개)	34	55
바이오가스 플랜트 처리용량	(톤/일)	9,464	30,681
회수 가능한 폐열 에너지	(Gcal/년)	241,593	699,598
시설온실 적용 가능 면적	(ha)	120.8	349.8
기대수익	(억원/년)	257.3	745.1

- 본 과제의 잠재 시장은 2021년 기준 운영 중인 전국 바이오가스 플랜트 111개소임.
- 바이오가스 플랜트별 메탄 생산량은 각 시설용량과 기질별 메탄 생산 계수를 곱하여 산출
- 바이오가스 발전에서 발생하는 폐열 중 실제로 회수할 수 있는 폐열은 열 회수율 38.5%를 감안하여 도출되었음
- 시설온실 적용가능 면적은 앞서 도출한 회수 가능한 폐열 에너지 수치를 이용하였고, 0.5 ha 시설온실 운영을 위해서는 1,000Gcal/년의 열에너지가 필요하다는 가정을 적용하였음
- 이때, 시설온실 운영에 따른 연간 기대수익은 1 ha 당 2.137억원.

○ 바이오가스 활용 및 화석연료 사용 감소에 따른 이산화탄소 감축효과

- 시설온실 난방열 대체에 따른 주민 수용성 확보 및 님비문제 해소
- 폐기물 에너지화 설비의 효과적 운영을 위한 지역사회 거버넌스 구축
- 온실가스 저감량 426 톤-CO₂/년 (0.1 MW 발전 기준)

기대 및 파급 효과 항목	실증 부지 폐열 전량 적용 규모	본 연구 실증 규모	현 농업 활용가능 34개소 적용 규모 (핵심 시장)	현 농업 확장가능 55개소 적용 규모 (확장 시장)
[1] 기술개발에 의한 정량 효과				
열에너지 회수량	(Gcal/년)	11,623	1,688	310,722
냉/난방비 절감액	(백만원/년)	213	31	5,706
시설온실 적용가능 규모	(ha-온실면적)	3	0.5	92
온실가스 저감량	(톤-CO ₂ /년)	2,933	426	78,417
작물 증산에 의한 매출 증가액	(백만원/년)	258	38	6,903
[2] 지역 수용성 증대				
회수 폐열 중 마을복지 활용량	(Gcal/년)	5,318	772	142,163
[3] 농촌 복지 증대				
마을복지 활용에 의한 에너지 절감액	(백만원/년)	516	75	13,806

□ 시설온실 냉난방 대체에 따른 이산화탄소 저감량

항목	단위	값	비고
시설온실 냉난방 요구량	Gcal/년	841	구아바 0.2 ha + 파프리카 0.3 ha
	TJ/년	3.52	
등유 온실가스 배출계수	ton-CO ₂ /TJ	71.9	IPCC 국가 인벤토리 가이드라인 배출계수
화석연료 사용에 따른 온실가스 배출량	ton-CO ₂ /년	253	
미활용 열 공급에 의한 온실가스 배출량	ton-CO ₂ /년	0	
온실가스 감축량	ton-CO ₂ /년	253	
온실가스 배출권 거래가격	원/톤	10,401	최근 6개월 평균 거래가격 (배출권시장 정보플랫폼)
온실가스 배출권 판매가격	원/년	2,631,147	

□ 미활용 열 주민시설 온수 공급에 따른 이산화탄소 저감량

항목	단위	값	비고
주민시설 온수 가온 에너지 요구량	Gcal/년	803	소규모 목욕탕 온수 공급 기준
	TJ/년	3.36	
LNG 온실가스 배출계수	ton-CO ₂ /TJ	51.6	IPCC 국가 인벤토리 가이드라인 배출계수
화석연료 사용에 따른 온실가스 배출량	ton-CO ₂ /년	173	
미활용 열 공급에 의한 온실가스 배출량	ton-CO ₂ /년	0	
온실가스 감축량	ton-CO ₂ /년	173	
온실가스 배출권 거래가격	원/톤	10,401	최근 6개월 평균 거래가격 (배출권시장 정보플랫폼)
온실가스 배출권 판매가격	원/년	1,803,151	

- 본 과제 연구개발을 통해 농식품부 온실가스 감축량 목표 중 총 17.3% (2030년)에 해당하는 온실가스 감축에 기여할 수 있음.

□ 이산화탄소 감축 목표 기여율

2050 농식품부 온실가스 감축량 목표 (천톤CO ₂)		온실가스 감축 목표 기여율		
		현 농업 활용가능 34개소적용규모 (핵심시장)	현 농업 확장가능 55개소적용규모 (확장시장)	총 규모
2030년	5,809	4.4%	12.8%	17.3%
2040년	6,460	4.0%	11.5%	15.5%
2050년	8,012	3.2%	9.3%	12.5%

6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획

○ 연구개발성과 활용방안

- 본 기술개발을 통해 “미활용 바이오가스 발전 폐열에너지와 수열 융복합 연계 에너지자립형 시설온실” 구현이 가능

○ 파급 시장규모

• 시장의 정의

- ① 잠재시장: 2021년 기준 운영 중인 전국 바이오가스 플랜트 111개소
- ② 핵심시장: 잠재시장 중 가축분뇨 유입 및 5km 반경 시설온실 설치 가능 지역 34개소
- ③ 확장시장: 잠재시장 중 5km 반경 시설온실 설치 가능지역(폐열 활용 가능지역) 55개소

• 시장의 규모

항목	단위	핵심 시장	확장 시장
바이오가스 플랜트 개소수	(개)	34	55
바이오가스 플랜트 처리용량	(톤/일)	9,464	30,681
회수 가능한 폐열 에너지	(Gcal/년)	241,593	699,598
시설온실 적용 가능 면적	(ha)	120.8	349.8
기대수익	(억원/년)	257.3	745.1

- 본 과제의 잠재 시장은 2021년 기준 운영 중인 전국 바이오가스 플랜트 111개소임
- 바이오가스 플랜트별 메탄 생산량은 각 시설용량과 기질별 메탄 생산 계수를 곱하여 산출
- 바이오가스 발전에서 발생하는 폐열 중 실제로 회수할 수 있는 폐열은 열 회수율 38.5%를 감안하여 도출되었음
- 시설온실 적용가능 면적은 앞서 도출한 회수 가능한 폐열 에너지 수치를 이용하였고, 0.5 ha 시설온실 운영을 위해서는 1,000Gcal/년의 열에너지가 필요하다는 가정을 적용하였음
- 이때, 시설온실 운영에 따른 연간 기대수익은 1 ha 당 2.137억임

• 핵심시장 시장규모

- 핵심시장: 잠재시장 중 가축분뇨 유입 및 5km 반경 내 시설온실 설치 가능 플랜트 34개소

시도	시군	시설명	회수 가능한 폐열 에너지 (Mcal/일)	시설온실 적용면적 산출 (ha)	기대 수익 (억원)
충남	아산시	농업회사법인 (주) 바이오에너지팜아산	24,470	12.2	26.1
경기	고양시	고양 바이오매스 에너지화 시설	21,914	11.0	23.4
경북	칠곡군	구미하수처리장	20,413	10.2	21.8
경기	포천시	포천바이오가스플랜트	14,763	7.4	15.8
강원	원주시	유기성폐기물을 이용한 바이오메탄 자동차 연료화시설	12,496	6.2	13.4
경남	사천시	삼천포공공하수처리시설	11,414	5.7	12.2
경북	영천시	영천유기성폐기물광역에너지화시설	10,277	5.1	11.0
전남	나주시	나주공공하수처리장	9,897	4.9	10.6
울산	울주군	울산온산바이오에너지센터	9,516	4.8	10.2
전북	익산시	익산공공하수처리시설	9,201	4.6	9.8
전북	정읍시	농업회사법인 (유) 친환경대현그린	8,728	4.4	9.3
충남	서산시	자원순환형바이오가스화시설	8,211	4.1	8.8
경기	구리시	구리 하수처리시설	8,091	4.0	8.6
강원	속초시	속초시 음식물 하수병합처리시설	6,580	3.3	7.0
경남	양산시	양산시바이오가스화시설	6,362	3.2	6.8
충남	청양군	영농조합법인-칠성에너지	5,481	2.7	5.9
경북	문경시	문경시하수도사업소	5,372	2.7	5.7
충북	제천시	제천시 환경사업소 하수슬러지 처리시설	4,861	2.4	5.2
충남	논산시	논산계룡축협자연순환센터	4,513	2.3	4.8
제주	서귀포시	농업회사법인 (주) 한라산 바이오	3,507	1.8	3.7
제주	제주시	제주시가축분뇨공공처리장	3,263	1.6	3.5
경남	창녕군	우포월드바이오가스플랜트 (농업회사법인-이지바이오)	3,263	1.6	3.5
강원	원주시	원주공공하수처리장	3,116	1.6	3.3
경기	이천시	농업회사법인 (주) 제이케이이앤이	3,034	1.5	3.2
경기	연천군	농업회사법인 (주) 틱옴	2,969	1.5	3.2
충남	홍성군	(주)기반 (농업회사법인)	2,969	1.5	3.2
강원	홍천군	홍천친환경에너지타운 (홍천가축분뇨자원화시설)	2,719	1.4	2.9
경북	울진군	환경순환형 가축분뇨 병합처리 바이오가스화시설	2,719	1.4	2.9
경기	파주시	축분혼합공공처리시설	2,719	1.4	2.9
전남	고흥군	고흥군환경순환형가축분뇨공공처리시설	2,175	1.1	2.3
경북	안동시	안동공공하수처리시설	2,099	1.0	2.2
충남	홍성군	농업회사법인 (주) 성우	1,794	0.9	1.9
전남	보성군	보성가축분뇨공공처리시설	1,544	0.8	1.7
경남	양산시	흙마음영농조합법인	1,142	0.6	1.2
합계			241,593	120.8	257.3

- 시장규모

- 가축분뇨/가축분뇨 병합처리 34개소, 처리용량: 9,464 톤/일
- 시설온실 전용면적: 120.8 ha

- 기대수익 : 257.3억원 (2.13억원/ha·년)

- 이때, 시설온실 운영에 따른 연간 기대수익은 1 ha 당 2.137억

• 확장시장 시장규모

- 확장시장: 잠재시장 중 5km 반경 시설온실 설치 가능 지역 (폐열 활용 가능 지역) 55개소

시도	시군	시설명	회수 가능한 폐열 에너지 (Mcal/일)	시설온실 적용면적 산출 (ha)	기대 수익 (억원)
경기	고양시	서울특별시난지물재생센터	188,541	31.1	66.5
경남	창원시	창원MH에탄올 (혐기성분해시설)	142,370	23.5	50.2
경기	안양시	안양시박달하수처리장 바이오발전사업	124,475	20.5	43.9
경기	동두천시	동두천시환경사업소	95,704	15.8	33.7
경기	부천시	부천시 굴포 공공하수처리시설	92,837	15.3	32.7
대전	유성구	대전바이오에너지센터	92,277	15.2	32.5
대구	북구	대구신천공공하수처리시설	91,552	15.1	32.3
대구	서구	대구 상리 음식물류폐기물 처리시설	79,094	13.1	27.9
전북	전주시	전주종합리싸이클링타운	79,094	13.1	27.9
울산	남구	음폐수 바이오가스화시설 (BIT)	79,094	13.1	27.9
광주	서구	광주제1하수처리장	72,075	11.9	25.4
울산	남구	울산용연 음식물-하수병합처리시설	64,594	10.7	22.8
경기	안산시	안산 공공하수처리장	57,343	9.5	20.2
경기	평택시	평택에코센터	55,366	9.1	19.5
부산	강서구	생곡 음식물쓰레기 자원화시설	52,730	8.7	18.6
광주	서구	광주광역시 음폐수 바이오가스화시설 (광주환경공단제2음식물자원화시설)	51,016	8.4	18.0
대구	달서구	대구환경시설공단 서부공공하수처리시설	45,347	7.5	16.0
경기	고양시	일산수질복원센터	41,195	6.8	14.5
충북	청주시	유기성폐기물에너지화시설	39,547	6.5	13.9
전북	군산시	군산 공공하수처리장	39,547	6.5	13.9
전북	군산시	호기성. 혐기성분해시설	35,592	5.9	12.6
경북	안동시	안동시 음식물자원화시설	31,638	5.2	11.2
강원	춘천시	춘천공공하수처리시설	29,990	4.9	10.6
경기	의정부시	의정부시 음식물류폐기물 자원화시설	29,660	4.9	10.5
경기	화성시	수원공공하수처리시설	25,870	4.3	9.1
광주	광산구	광주광역시 제1 음식물 자원화시설	23,728	3.9	8.4

세종	세종	세종크린에너지센터	23,069	3.8	8.1
대구	서구	대구환경시설공단 북부공공하수처리시설	22,839	3.8	8.1
경남	창원시	덕동하수처리장에너지자립화설비	22,575	3.7	8.0
광주	광산구	광주제2하수처리장	21,949	3.6	7.7
경남	진주시	진주시 음폐수바이오가스화 시설	21,751	3.6	7.7
충북	충주시	음식물바이오에너지센터	21,092	3.5	7.4
전남	순천시	순천공공하수처리시설	20,103	3.3	7.1
경남	진주시	진주공공하수처리시설	19,905	3.3	7.0
경남	김해시	김해시 음폐수 바이오가스 에너지화시설	19,774	3.3	7.0
경남	김해시	화목공공하수처리시설	17,302	2.9	6.1
경기	평택시	평택장당공공하수처리시설	14,929	2.5	5.3
제주	제주시	제주 공공하수처리장	14,600	2.4	5.1
충북	충주시	충주하수슬러지처리시설	14,435	2.4	5.1
경남	김해시	장유맑은물순환센터	13,281	2.2	4.7
전북	여수시	여수시 도시형폐기물 종합처리시설	10,875	1.8	3.8
충북	제천시	제천시 음식물폐수 바이오가스화시설	10,282	1.7	3.6
강원	강릉시	강릉공공하수처리시설	10,117	1.7	3.6
경북	김천시	김천하수처리종말처리장	8,667	1.4	3.1
충북	청주시	청주시신재생에너지공정	7,909	1.3	2.8
충남	아산시	아산공공하수처리시설	7,778	1.3	2.7
전북	남원시	남원음식물바이오가스화시설	6,954	1.1	2.5
경기	평택시	평택통복공공하수처리시설	6,855	1.1	2.4
경남	밀양시	밀양음식물쓰레기병합처리시설	5,273	0.9	1.9
경북	경산시	경산공공하수처리시설	5,009	0.8	1.8
전북	정읍시	정읍공공하수처리시설	3,526	0.6	1.2
경북	영천시	영천하수처리장	3,296	0.5	1.2
충북	옥천군	옥천공공하수처리시설	2,538	0.4	0.9
경기	과천시	과천시환경사업소	1,714	0.3	0.6
전북	완주군	삼례공공하수처리시설	1,318	0.2	0.5
합계			2,119,994	349.8	745.1

- 시장규모

- 가축분뇨/가축분뇨 병합처리 55개소, 처리용량: 30,681 톤/일,
- 시설온실 전용면적: 349.8 ha

- 기대수익 : 745.1 억원 (2.13억원/ha·년)

< 연구개발성과 활용계획표 >

구분(정량 및 정성적 성과 항목)		연구개발 종료 후 5년 이내	
국외논문	SCIE	2	
	비SCIE	-	
	계	2	
국내논문	SCIE	-	
	비SCIE	2	
	계	2	
특허출원	국내	3	
	국외	-	
	계	3	
특허등록	국내	2	
	국외	-	
	계	2	
인력양성	학사	-	
	석사	-	
	박사	-	
	계	-	
사업화	상품출시	-	
	기술이전	1	
	공정개발	1	
제품개발	시제품개발	1	
비임상시험 실시		-	
임상시험 실시 (IND 승인)	의약품	1상	-
		2상	-
		3상	-
	의료기기	-	
진료지침개발		-	
신의료기술개발		-	
성과홍보		2	
포상 및 수상실적		-	
정성적 성과 주요 내용		-	

< 별첨 자료 >

중앙행정기관 요구사항	별첨 자료
1.	1) 자체평가의견서
	2) 연구성과 활용계획서
2.	1)
	2)

7. 참고문헌

- [1] 농촌진흥청, 2021, 2020 농축산물소득자료집(전국), 2021
- [2] 기상청 날씨누리 (<http://www.weather.go.kr>)
- [3] 농촌진흥청, 2016, 농업경영관리길잡이
- [4] 농촌진흥청, 2021.07.06., 보도자료
- [5] 농림축산식품부, 2021, 시설원에 온실현황 및 에너지 이용현황
- [6] 박지연, 김연중 2019, 농업분야 신재생에너지 보급현황 및 파급효과 분석. 한국산학기술학회 논문지 20(1), 224-235
- [7] 김연중, 이상민, 김배성, 2010, 농업부문 신재생에너지 이용 활성화 방안
- [8] H. Satyavada, S. Baldi, 2016, A novel modeling approach for condensing boilers based on hybrid dynamical systems. *Machines*, 4(2), 10
- [9] 김성종, 한승탁, 김종보, 1991, 직접접촉식 LNG 기화기 응용을 위한 칼럼 열교환기 기포 특성에 관한 연구. *설비공학논문집*, 3(2), 142-151
- [10] 이금배, 1992, 직접접촉식 열교환기내에서 물과 배기가스의 직접접촉에 의한 열 및 물질 전달. *대한기계학회 논문집*, 16(6), 1171-1178
- [11] A. Cadiou, J. S. Lee, D. D. Borges, P. Fabry, T. Devic, M. T. Wharmby, C. Martineau, D. Foucher, F. Taulelle, C.-H. Jun, Y. K. Hwang, N. Stock, M. F. Lange, F. Kapteijn, J. Gascon, G. Maurin, J.-S. Chang, and C. Serre, 2015, Design of hydrophilic metal organic framework water adsorbents for heat reallocation. *Advanced Materials* 27(32), 4775-4780
- [12] S. T. WILSON, B. M. LOK, C. A. MESSINA, T. R. CANNAN, and E. M. FLANIGEN, 1982, Aluminophosphate molecular sieves: a new class of microporous crystalline inorganic solids. *Journal of the American Chemical Society*, 104(4), 1146-1147
- [13] P.B. Malla, S. Komarneni, 1991, Synthesis And Water Sorption Properties Of Aluminophosphate (AlPO₄) And Silicoaluminophosphate (Sapo) Molecular Sieves. *MRS Online Proceedings Library (OPL)* 233, 237
- [14] S. Komarneni, R. Pidugu, V.C. Menon, 1996, Water adsorption and desorption isotherms of silica and alumina mesoporous molecular sieves. *Journal of Porous Materials*, 3, 99-106
- [15] A. Krajnc, J. Varlec, M. Mazaj, A. Ristić, N. Z. Logar, G. Mali, 2017, Superior Performance of Microporous Aluminophosphate with LTA Topology in Solar-Energy Storage and Heat Reallocation. *Advanced Energy Materials*, 7(11), 1601815
- [16] Z. Liu, J. Xu, M. Xu, C. Huang, R. Wang, T. Li and X. Huai, 2022, Ultralow-temperature-driven water-based sorption refrigeration enabled by low-cost

zeolite-like porous aluminophosphate. *Nature Communications*, 13(1), 193

- [17] X. Liu, X. Wang, F. Kapteijn, 2020, Water and Metal-Organic Frameworks: From Interaction toward Utilization. *Chemical Reviews*, 120(16), 8303-8377
- [18] M. V. Solovyeva, L. G. Gordeeva, T. A. Krieger, Yu. I. Aristov, 2018, MOF-801 as a promising material for adsorption cooling: Equilibrium and dynamics of water adsorption. *Energy Conversion and Management*, 174, 356-363
- [19] D. Lenzen, P. Bendix, H. Reinsch, D. Fröhlich, H. Kummer, M. Möllers, P. P. C. Hügenell, R. Gläser, S. Henninger, N. Stock, 2018, Scalable Green Synthesis and Full-Scale Test of the Metal-Organic Framework CAU-10-H for Use in Adsorption-Driven Chillers. *Advanced Materials*, 30(6), 1705869
- [20] E. Gkaniatsou, C. Chen, F. S. Cui, X. Zhu, P. Sapin, F. Nouar, C. Boissière, C. N. Markides, J. Hensen, C. Serre, 2022, Producing cold from heat with aluminum carboxylate-based metal-organic frameworks. *Cell Reports Physical Science*, 3(2)
- [21] P. M. Schoenecker, C. G. Carson, H. Jasuja, Christine J. J. Flemming, K. S. Walton, 2012, Effect of Water Adsorption on Retention of Structure and Surface Area of Metal-Organic Frameworks. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(18), 6513-6519
- [22] 박정욱, 박도현, 최병희, 한공창, 2012, 지하공동 열에너지 저장을 위한 축열 매질의 기술 현황 검토, 터널과 지하공간, 22(4), 243-256
- [23] 국립환경과학원, 2017.12., 병합처리 바이오가스화 시설의 운영관리 기술지침서 (2차개정판)
- [24] J. Gabrielsen, H.F. Svendsen, M.L. Michelsen, E.H. Stenby, G.M. Kontogeorgis, 2007, Experimental validation of a rate-based model for CO₂ capture using an AMP solution. *Chemical Engineering Science*, 62(9), 2397-2413
- [25] H. Bai, A.C. Yeh, 1997, Removal of CO₂ greenhouse gas by ammonia scrubbing. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 36(6), 2490-2493
- [26] 보건복지부, 2017, 공중위생영업소(목욕장업소) 관리방안 마련을 위한 연구, 건강증진연구사업 보고서(중앙대학교)

주 의

1. 이 보고서는 농림축산식품부에서 시행한 현장문제해결형 연구개발사업 미활용 바이오가스 발전열 이용 농촌복지 및 농가소득 증대 기술 개발 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 농림축산식품부(농림식품기술기획평가원)에서 시행한 현장문제해결형 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.