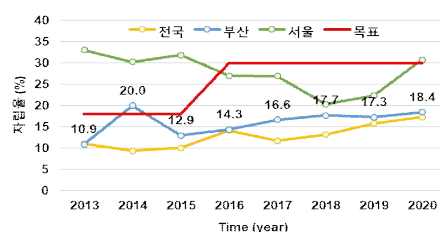


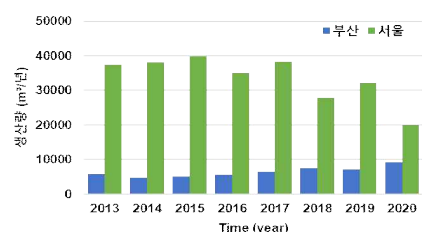
연구과제명	미생물분석기법 도입을 통한 바이오가스 생산량 증대 연구		
연구기간	2022 년 2 월 ~ 2022 년 11 월(10 개월)		
연구비	총 연구비 60,000 천원 (참여기업부담금: 30,000천원(현금))		
연구사업 구분	연구분야 및 세부연구분야(해당사항 1군데 ■표)		
	하폐수 처리	상수도 및 정수	수질관리
<input type="checkbox"/> 정책연구 <input type="checkbox"/> 조사연구 <input type="checkbox"/> 기술개발연구 <input checked="" type="checkbox"/> 산학연협력연구 (해당사항 1군데 ■표)	<input type="checkbox"/> 물리화학적 처리 <input type="checkbox"/> 생물학적 처리 <input type="checkbox"/> 막처리 및 재이용 <input type="checkbox"/> 하수처리 시스템 <input type="checkbox"/> 질소 및 인 제거 <input type="checkbox"/> 하폐수 처리 기타 <input type="checkbox"/> 축산폐수 처리 <input type="checkbox"/> 기타	<input type="checkbox"/> 막분리 <input type="checkbox"/> 정수처리 및 수질관리 <input type="checkbox"/> 고도정수처리 <input type="checkbox"/> 상수관망 <input type="checkbox"/> 기타	<input type="checkbox"/> 수질오염 <input type="checkbox"/> 수질모델 <input type="checkbox"/> 수질관리기타 <input type="checkbox"/> 기타
	자연환경분야	폐기물관리	대기관리
	<input type="checkbox"/> 환경정책 <input type="checkbox"/> 생활환경 <input type="checkbox"/> 건강위해성 <input type="checkbox"/> 생태관리 <input type="checkbox"/> 환경오염사고대비 <input type="checkbox"/> 소음관리 <input type="checkbox"/> 청정기술개발 <input type="checkbox"/> 기타	<input type="checkbox"/> 매립 및 침출수 처리 <input type="checkbox"/> 슬러지 처리 <input type="checkbox"/> 소각 및 열분해 <input checked="" type="checkbox"/> 재활용 및 자원화 <input type="checkbox"/> 음식물 쓰레기 처리 <input type="checkbox"/> 폐기물 관리 기타	<input type="checkbox"/> 대기오염측정 및 관리 <input type="checkbox"/> 대기오염모델링,위해도 <input type="checkbox"/> 대기오염 처리기술 <input type="checkbox"/> VOCs 및 악취 처리 <input type="checkbox"/> 기타
	토양지하수오염	기후변화대응분야	기타환경분야
	<input type="checkbox"/> 오염토양처리관리 <input type="checkbox"/> 폐광토양오염,지하수처리 <input type="checkbox"/> 지하수 환경관리 <input type="checkbox"/> 기타	<input type="checkbox"/> 온실가스배출량산정 <input type="checkbox"/> 온실가스배출량감축연구 <input type="checkbox"/> 배출권거래 <input type="checkbox"/> 기타	<input type="checkbox"/> 기타
연구의 목적 및 필요성	<p>○ 연구 배경 및 필요성</p> <ul style="list-style-type: none"> - 정부 온실가스 감축 강화(2030년 37%감축)에 따른 환경기초 시설 에너지자립율 등의 목표달성과 부산시 내 안정적인 음식물류폐기물(2019년 279천톤) 안정적 처리를 위한 혐기성소화(이하 바이오가스화) 기술에 대한 지속적 연구 진행 요구되나 지역 내 바이오가스화 연구는 부진한 실정임. - 현재의 소화조 온도, pH, 유입량 등 입력과 산출물에 국한된 간접적 운영지표로 공정운영차질 예방이 어려우며 복구기간 내 소화가스량 감소, 음식물처리 어려움 등 많은 문제점을 야기함. 		

연구의 목적 및
필요성
(계속)

- 바이오가스화 기술은 특히 고농도 유기성 폐기물의 처리에 경제성의 이점을 가지고 있어 2012~2013년 이후 해양투기가 금지된 국내 대표 발생 유기성 폐기물인 하수슬러지와 음식물류폐기물의 육상처리 방법의 현실적 대안으로 고려되어 있음. 또한 하수처리장의 생산에너지 부분에서 가장 높은 비중을 차지하는 기술로 하수처리장의 에너지자립을 개선을 위해 정부 및 지자체 주도하에 설비 건설 등 지속적인 투자가 진행되어 있음. 현재 국내의 경우 고농도 유기성 폐기물/폐수를 처리하는 110기 이상의 중앙집중형 실규모 바이오가스 시설이 하수처리장 및 발생원에 건설되어 운영 중으로, 매년 1,952만톤의 폐기물이 바이오가스화 공정으로 처리 중임 (폐자원에너지 종합정보관리시스템, 2021).
- 그럼에도 불구하고 하수처리장 에너지자립율은 2020년 기준 전국 평균 12.8%로 환경부에서 2010년에 제시한 ‘에너지자립화 기본계획’의 목표자립율인 2020년 30%에 비해 매우 낮은 실정임. 이를 개선하기 위해서는 에너지 생산 공정인 바이오가스화 공정의 정상 운영이 필수적이거나, 국내 바이오가스 생산 공정의 경우 유입 원물의 농도 및 성상변동에 대응 가능한 안정적 운영기술의 부재와 비표준화된 진단 기반의 운영으로 인해 미국 등 선진국 대비 54% 수준의 낮은 가동률로 운영되고 있는 실정임 (국립환경과학원, 유기성폐자원의 고효율 바이오가스화를 위한 최적 운영방안 연구, 2016).



하수처리장 에너지 자립 현황

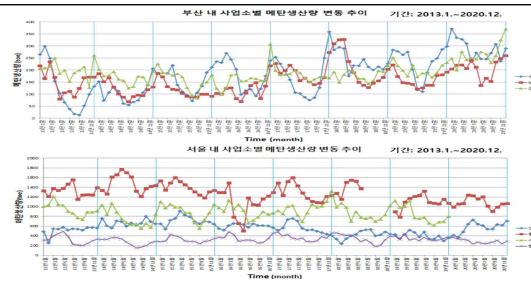


바이오가스 생산량

1) 한국환경공단, 국가하수도정보시스템

- 특히 부산시 소재 하수처리장 바이오가스화 시설의 경우 바이오가스화 공정 불안정성을 대변하는 인자인 메탄생산량의 변동계수가 서울시 소재 하수처리장 바이오가스화 시설보다 1.7배 높은 것으로 나타나 안정적 공정운영을 위한 개선방안 모색이 필요한 상황임 (부산: 35.5%, 서울: 20.8%).

연구의 목적 및
필요성
(계속)



부산 내 사업소 (단위: ton)			
메탄생산량	수명	남부	강변
평균	185.50	157.54	189.46
최소값	13	68	83.1
최대값	372.12	327.5	371
표준편차	85.04	56.51	46.82
표준편차(%)	45.84	35.87	24.71

서울 내 사업소 (단위: ton)			
메탄생산량	남지	중랑	서남
평균	558.21	1260.04	881.26
최소값	238	503.07	554.46
최대값	912.25	1766.47	1324.11
표준편차	133.83	225.03	162.73
표준편차(%)	23.97	17.86	18.46

- 바이오가스화 공정은 유입원물의 특성, 공정운영조건과 소화조 내 미생물들의 성장 및 활성 등의 다양한 인자들의 인과관계에 의해 공정효율 및 안정성이 결정됨. 따라서, 현재의 단순화된 소화조온도, pH 등 운전지표 외 보다 정확한 공정 진단과 효과적인 공정 안정성 및 효율 개선방안의 발굴을 위해서는 대상 소화조 내 미생물 군집 변화에 대한 양질의 데이터를 포함한 바이오가스화 공정 전 과정(유입원물-소화조/미생물-가스생산)에 대한 통합데이터베이스 구축이 필요하며, 대상 공정의 공정상태를 보다 정확히 진단할 수 있는 미생물지표의 발굴이 필요함.
- 이에 본 연구에서는 최신분자생물학적 분석기법을 활용하여 대상 소화조 내 주요 미생물에 대한 정량적인 정보를 확보하고 이를 유입원물성상, 공정운영 조건, 공정효율 등의 정량정보와 함께 데이터베이스화하여 부산시 혐기성 소화조 맞춤형 미생물지표를 발굴하고자 함. 이를 기반으로 미생물 관리, 제어 관점을 반영한 공정 운영 진단, 원인분석을 통해 공정 안정성 및 고효율화를 위한 운영 전략을 발굴코자 함.

○ 연구의 목적

- 부산시 내 운영 중인 혐기성소화시설의 공정 운영인자, 이화학/가스생산 정보, 미생물 정보(생물지표)를 모두 포함한 통합데이터베이스(DB) 구축하고자 함. 또한 다양한 공정 조건에 따른 미생물 군집과의 인과관계 분석을 통해 대상 소화조 맞춤형 생물지표를 발굴하고, 이를 활용하여 공정 진단 및 공정 안정성/효율 개선방안을 도출하고자 함
- 또한, 부산시 관내의 바이오가스 생산 플랜트의 고유한 미생물 군집구조에 특화된 분자생물학적 정성/정량 분석 지원 및 미생물 관리/제어 공정운영 지원을 위한 특성화 산학협력 연구실 조성하고 관련 전문인력 양성(지역대학의 관련 연구사업 연계)을 추진하여 장기간 지속성 있는 지역 맞춤형 유기성 폐기물 바이오가스화 산학협력 체계를 구축하고자 함.

연구의 목적 및
필요성
(계속)

- 국내외 선행연구 및 동향 기술
 - 고품 바이오매스 및 도시 생활폐기물, 유기성폐기물을 이용한 바이오매스 가스화 및 발전의 최대 시장은 유럽, 북미, 중국으로 2022년 1천억 달러로 확대 전망됨. 바이오가스의 세계 시장 규모는 2013년 114억 달러 규모이며, 14.0%의 높은 성장률과 함께 2018년에는 시장 규모가 223억 달러에 이를 것으로 전망됨 (중소기업청, 2015, 중소기업 전략기술로드맵 2016-2018)
 - 국내의 경우 정부 및 지자체의 적극적인 투자 및 정책적 지원을 바탕으로 바이오가스화 기술 시장 규모의 지속적인 확대가 예측됨. 국내 바이오가스화 시설 개보수의 경우 2010년대부터 지속적으로 증가하는 추세이며 2020년 기준으로 110기의 정부투자 설비가 전국적으로 건설되어 운영 중에 있음. 특히 통합소화 기술의 경우 각 유기성폐기물 단독소화의 한계점들을 혼합 소화를 통해 보완해줄 수 있는 기술로 공정 안정성 및 바이오가스 생산량 증대를 위해 기술 개발 및 보급이 가속화되고 있으며, 특히 기존의 하수처리장 내 하수찌꺼기 단독소화 바이오가스화 설비에 음식물류폐기물을 추가 투입하여 통합소화를 추진하는 사례들이 늘어나고 있음. 통합소화 시설은 2012년 19개소에서 2020년 46개소로 증가하였으며, 같은 기간 통합처리되는 유기성 폐기물량은 5,520천톤/년에서 11,249천톤/년으로, 바이오가스 생산량은 178,510천 m^3 /년에서 362,326천 m^3 /년으로 증가함.
 - 최근 유럽 및 미국 등 바이오가스 선도 국가에서 개최되는 바이오가스화 기술 관련 학회 및 저널들의 논문들을 살펴보면 과거에 비해 바이오가스화 공정 내 미생물 군집에 대한 분석 및 해석 연구, 진단 및 모델링 연구가 급격히 증가하는 추세임. 기존의 Black-box식 운영에서 벗어나 미생물 복잡성을 이해하고 수치화하여 공정운영 최적화, 공정 이상상황 대응 및 공정 고율화 기술을 개발하는 방향이 현지 바이오가스화 분야의 최신 기술개발의 추세인 것으로 사료되며 또한 복잡한 바이오가스화 공정의 진단, 예측, 최적화를 위한 양질의 빅데이터 확보 및 생물지표 발굴의 중요성 대두되는 실정임 (Carballa et al., 2015, Current Opinion in Biotechnology; Lee et al., 2018, Bioresource Technology; Tian et al., 2019, Bioresource Technology).
 - 최근 연구들에 따르면 혐기성 소화조 내 특정 미생물 군집 정보의 변동이 소화조의 바이오가스 생산효율 및 안정성과 유의미한 상관관계가 있어 이를 기반으로 각 소화 공정에 특화된

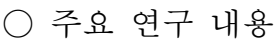
연구의 목적 및
필요성
(계속)

- 미생물지표의 발굴과 활용을 통해 혐기성 소화조의 공정 안정화 및 최적 운영에 활용 가능할 것으로 제안됨(Vanwonterghem et al., 2014, ISME J; Lee et al., 2018, Bioresource Technology). 또한 혐기성 소화시설의 다양한 조건(유입원물의 종류/특성, 운영조건, 접종원 등)에 따라 해당 소화조의 우점 미생물이 결정됨을 보고하여(De Vrieze, J., et al., 2016, Water Research; Lee et al., 2021, Bioresource Technology), 이에 대상 소화조의 맞춤형 미생물지표 발굴 및 최적 운영 전략 개발이 요구됨.
- 국외의 경우 생물지표 정보를 활용하여 공정 효율 개선, 최적화 및 안정화를 달성한 다양한 연구사례들이 보고되어옴.
 - 포르투갈 민호대학 연구팀은 혐기성 소화 시운전 단계에서 유기성 폐기물 처리에 적합한 미생물 군집을 포함한 접종원을 선정 및 활용하여 스타트업 기간을 대조군 대비 20% 수준으로 단축함(Goncalves et al., 2011, Energy).
 - 중국농업대학 연구팀은 혐기성 소화조 내 미생물 정보 분석 및 진단을 기반으로 한 미생물 생접종 전략을 적용하여 고단백질 함유 고농도 유기성 폐기물 혐기성 소화 시 발생하는 암모니아 및 프로피온산 축적에 의한 공정 불안정화 및 실패사례를 효과적으로 회복함(Ying et al., 2017, Bioresource Technology). 또한 베이징화학기술대학 연구팀은 주요 공생세균 및 메탄생성균의 생접종 전략을 개발 및 적용하여 대조군 소화조 대비 60~70% 개선된 메탄생산량 달성을 보고함(Yang et al., 2019, Water Research).
 - 국내의 경우 2014년경부터 최신분자생물학적 분석기법을 활용한 실규모 혐기성 소화조의 미생물 정보 데이터베이스 구축연구, 이를 기반한 소화조 진단 및 운영 최적화 사례들이 보고되어옴(Lee et al., 2014, Bioresource Technology, Lee et al., 2016, Chemical Engineering Journal; Lee et al., 2017, Bioresource Technology; Lee et al., 2018, Bioresource Technology; Michal et al., 2020, Journal of Hazardous Materials).
 - 실제로, 국내 A시의 하수처리장 내 하수찌꺼기 단독 소화 시설의 경우 음식물류폐기물의 추가투입을 통한 통합소화 운영을 추진하였으나 잦은 공정 불안정화로 인한 낮은 가동률로 운영 정상화에 어려움을 겪음. 국내 P연구팀은 미생물 통합데이터베이스 기반의 소화조 진단 및 주요 지표 미생물의 정량 분석 기반으로 한 음식물류폐기물 증량 투입전략을 적용하여 공정 정상화를 성공적으로 달성함. 또한 병렬 소화조들에 생접종 전략을 활용하여 음식물류폐기물 증량투입운영의 안정화 기간을 기존 대비 30% 이상 단축하였으며 최종적으로 원 공정개선 목표 바이오가스 생산량 대비 32% 개선된 목표를 달성한 바 있음.

주요 연구내용

- 부산시 소재 부산환경공단 운영 바이오가스화 시설의 공정 운영인자, 이화학/가스생산 정보, 최신분자생물학적 분석기반 미생물 정보를 포함한 바이오가스화 공정 통합데이터베이스 구축
- 구축한 DB를 활용하여 공정 조건과 미생물 군집과의 인과관계 분석 및 미생물지표 발굴. 공정 진단을 통한 공정 안정성 및 바이오가스 생산량 개선방안 도출

- 지역대학 관련 학과, 연구실과 바이오가스화 시설 운영 주체인 부산환경공단과의 긴밀한 협의와 주기적인 연구교류를 통한 연구개발 성공률 극대화 추진
- 하수찌꺼기 단독소화와 음식물류폐기물 통합소화 공정의 비교분석을 위해 단독소화 및 통합소화 시설 각 1곳씩 선정하고 장기 모니터링 계획 수립
- 대표성 있는 시료 확보를 위한 시료 채취 전략 수립
- 양질의 데이터 확보를 위한 분석 프로토콜 정립, 데이터 QA/QC 전략 수립
- DB 및 분자생물학적 정성/정량 분석 활용 대상 바이오가스화 공정 진단 및 운영 개선 지원 체계 구축
- 연구결과의 공유 간담회 개최를 통한 지속적인 DB 활용방안 및 고도화 계획 논의



- 6 -

주요 연구내용
(계속)

- 통합 데이터베이스 구축
 - 대상 혐기성소화설비 공정 운영 데이터 확보
 - 정기적 시료 채취 (1회/2주, 9개월 이상) 및 분석
 - 이화학적 분석 수행
 - pH, Solids, COD, VFAs, Alkalinity, 암모니아, 메탄 함량 등
 - 미생물 분석 표준방법론 구축 및 분석 수행
 - 미생물 분석 표준방법론 구축 및 지표 미생물 정량분석용 탐침자 in-silico 확보 및 in-vitro 검증
 - 미생물 군집분석: Bacteria, Archaea 대상 Next Generation Sequencing 분석
 - 미생물 정량분석: Bacteria, Archaea 대상 Real-time qPCR 분석
- 데이터 QA/QC 및 DB 고도화
- 상용 소프트웨어(Excel) 기반 핵심정보 시각화



- 미생물지표 발굴, 공정 진단 및 해석
 - 다변량 통계분석 기법 활용 빅데이터 분석 (Clustering analysis, NMDS/PCoA, RDA, Correlation tests 등)
 - 각 대상 공정 맞춤형 미생물지표 발굴 (5종 이상 정성·정량 분석)
 - DB 및 미생물지표 활용 공정 진단/해석 수행
 - 공정 안정성 및 바이오가스 생산량 개선 운영방안 도출

○ 연구결과의 기대 및 파급효과

- 최신분자생물학적 분석 기반 DB 구축으로 공정효율 개선을 위한 양질의 혐기성 소화 공정 운영데이터 Track Record 확보
- 부산시 혐기성 소화시설 맞춤형 미생물지표 발굴 및 공정 진단 기술 확보
- 하수처리시설 내 혐기성소화설비의 가동률 및 바이오가스 생산량 개선을 위한 운영방안 제시

연구성과
활용방안

- 하수찌꺼기, 음식물류폐기물의 안정적인 처리방안 수립 및 바이오가스 생산을 통한 부산시 탄소중립 자원순환형 폐기물관리체계 개선 도모
- 지역 내 맞춤형 유기성 폐기물 바이오가스화 산학협력 체계 구축 및 관련 전문인력 양성

○ 연구 성과 지표 및 목표

성과 지표 및 목표
1. 부산시 혐기성소화시설 생물지표 데이터베이스 구축 1건 및 미생물지표 5종 발굴
2. 남부하수처리시설 소화가스발전설비 신규설치 및 녹산하수처리시설 내 소화조 신설운영 관련 기초자료 확보 1건
3. 논문 게재(SCIE급 또는 KCI등재지 1편 이상)

○ 연구 성과 활용내용(계획)

활용내용(계획)
- 부산시 남부, 수영 하수처리시설 내 혐기성소화공정 진단 및 개선방안 도출(하수찌꺼기, 음식물류폐기물 최적 투입비율 등)
- 대상시설의 장기간 모니터링 및 지속적인 생물지표 통합데이터 축적을 통한 공정 운영전략 고도화 도모
- 부산시 강변, 녹산하수처리시설 및 생곡 음식물자원화 시설 확대를 통한 부산시 통합데이터베이스 구축 추진

과제 담당부서	부산환경공단 신기술안전처
과제 담당자(감독원)	정련화 차장(tel : 051-760-3252)