

요 약 문

I. 연구개요

- 고품 바이오매스 및 도시 생활폐기물, 유기성폐기물을 이용한 바이오매스 가스화 및 발전의 최대 시장은 유럽, 북미, 중국으로 2022년 1천억 달러로 확대 전망됨. 국내의 경우 정부 및 지자체의 적극적인 투자 및 정책적 지원을 바탕으로 바이오가스화 기술 시장 규모의 지속적인 확대가 예측됨.
- 바이오가스화 공정은 유입찌꺼기의 특성, 공정운영조건과 소화조 내 미생물들의 생장 및 활성 등의 다양한 인자들의 인과관계에 의해 공정효율 및 안정성이 결정됨. 현재의 소화조 온도, pH, 유입량 등 입력과 산출물에 국한된 간접적 운영지표 모니터링에 기반한 공정 진단 및 운영법으로는 공정불안정화에 대한 예방이 어려워 공정 회복기간 내 소화가스량 감소, 음식물처리 어려움 등 많은 문제점을 야기함.
- 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(유입찌꺼기-소화조/미생물-가스생산)에 대한 통합데이터베이스 구축이 필요하며, 대상 공정의 공정상태를 보다 정확히 진단할 수 있는 미생물지표의 발굴이 필요함.

II. 연구의 필요성 및 목적

- 정부 온실가스 감축 강화(2030년 37%감축)에 따른 환경기초시설 에너지자립율 등의 목표달성과 부산시 관내 발생 음식물류폐기물 및 하수찌꺼기의 안정적 처리를 위해서는 이를 처리하고 바이오가스화 하는 실규모 혐기성소화(이하 바이오가스화)시설의 최적 운영을 위한 관련 기반 연구 진행이 요구됨.
- 바이오가스화 공정은 유입찌꺼기의 특성, 공정운영조건과 소화조 내 미생물들의 생장 및 활성 등의 다양한 인자들의 인과관계에 의해 공정효율 및 안정성이 결정됨. 현재의 소화조 온도, pH, 유입량 등 입력과 산출물에 국한된 간접적 운영지표 모니터링에 기반한 공정 진단 및 운영법으로는 공정불안정화에 대한 예방이 어려워 공정 회복기간 내 소화가스량 감소, 음식물처리 어려움 등 많은 문제점을 야기함.
- 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(유입찌꺼기-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 유입찌꺼기성상, 공정운영 조건, 공정효율 등의 정량 정보와 함께 데이터베이스화하여 부산시 혐기성 소화조 맞춤형 미생물지표를 발굴하고자 함. 이를 기반으로 미생물 관리, 제어 관점을 반영한 공정 진단, 원인분석을 통해 바이오가스 생산량 증대를 위한 공정 안정성 및 고효율화를 위한 운영전략을 발굴코자 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(주관 연구팀의 관련 연구사업 연계)을 추진하여 장기간 지속성 있는 지역 맞춤형 유기성 폐기물 바이오가스화 산학협력 체계를 구축하고자 함.

Ⅲ. 연구의 내용 및 범위

- 부산시 실규모 바이오가스화 소화시설 공정 데이터베이스 구축
 - 하수찌꺼기 단독소화 시설 1곳, 음식물류폐기물 통합소화 시설 1곳의 공정 운영데이터 확보, 유입찌꺼기, 소화조, 소화가스 등 정기적 시료 채취 및 분석
 - 데이터 QA/QC 및 데이터베이스 고도화
- 대상 소화조 맞춤형 미생물 분석 표준방법론 구축
 - Real-time qPCR용 대상 미생물 군집 특이적 탐침자 개발
 - 실험 검증 및 보완
- 바이오가스화 공정 진단용 미생물지표 발굴, 공정 진단 및 공정효율 개선방안 도출
 - 다변량 통계분석 및 공정인자, 효율-미생물 간 상관관계 도출
 - 미생물지표 발굴(5종 이상) 및 정량용 탐침자세트 확보
 - DB, 미생물지표 활용 현 공정 진단 및 해석 수행
 - 공정 안정성 및 바이오가스 생산량 개선 운영방안 제안

Ⅳ. 연구결과

- 부산시 실규모 바이오가스화 소화시설 공정 데이터베이스 구축
 - 부산시 하수처리장 바이오가스화 시설 중 하수찌꺼기 단독소화, 하수찌꺼기 및 음식물류 폐기물 통합소화 시설 각각 1곳으로 총 2곳 선정 (남부하수처리장, 수영하수처리장 소화 시설)

- 소화조 유입원물, 소화조, 소화가스 시료 정기적 채취 (1회/2주) 및 분석 수행
 - 운영자료, 이화학적, 분자생물학적 분석결과 기반 공정 전 과정(유입원물-소화조-가스) 데이터베이스 구축
 - 공정 운영인자: 투입량, 유량, 가스발생량
 - 이화학적분석: pH, 고형분(TS, VS, TSS, VSS), COD, VFAs (총 8종: acetic acid, propionic acid, n-butyric acid, iso-butyric acid, n-valeric acid, iso-valeric acid, n-caproic acid, iso-caproic acid), Alkalinity, 암모니아, 메탄 함량
 - 분자생물학적분석: 세균, 고세균 군집구조(Next generation sequencing), 대상 군집 정량 (Real-time qPCR)
 - 유입폐기물 유기물의 대부분이 부유물질 형태(VSS/VS = 83~100%)로 바이오가스화 증대를 위해 가용화 중요
 - 음식물류폐기물의 혼합 투입 전략에 따라 수영 유입폐기물의 유기물 농도 변동 유발
 - 시설 맞춤형 유입원물 관리 및 바이오가스 증대 전략 개발 필요
 - 남부, 수영 두 바이오가스화시설 모두 전단-후단 형태의 2단계 소화로 운영 중
 - 전단 소화조에서 전체 유기물처리율의 69~79%가량 처리되고 있는 것으로 분석됨.
 - 투입 유기물 증량 등 후단소화조 최적 운영을 통한 바이오가스 생산량 개선전략 개발 필요.
 - 수영 시설의 경우 음식물류폐기물 투입 유무에 따라 바이오가스, 메탄 생산량 및 메탄 수율이 큰 폭으로 차이 나는 것으로 관측됨. 음식물 투입 시 약 31~47% 가량 높은 바이오가스, 메탄 생산량 및 메탄 수율이 관측됨. 또한 음식물 투입 기간 동안 바이오가스 및 메탄 생산량 변동이 4~6배 큰 것으로 확인됨.
 - 요일별 음식물 투입량 최적 전략 및 소화조 안정화 전략 도출 필요.
 - 두 시설 소화조 모두 pH 변동 작음. 메탄생성균 최적성장 pH 조건 범위 (pH 6.8~7.8) 내 유지. pH 관점 소화 공정 안정성 높음.
 - 두 시설 소화조 모두 적정 알칼리도 범위 유지. 알칼리도 관점 소화 공정 안정성 높음.
 - 소화조 내 미생물 군집구조 분석은 16s rRNA amplicon 기반 차세대염기서열분석법을 활용하여 분석.
 - 수영소화조와 남부소화조 각각 개별 클러스터로 그룹화 확인 → 시설 별 특이적 미생물 군집구조 형성 확인
 - 대상 하수슬러지 단독 및 통합소화 공정의 우점세균 및 고세균 확인
 - Real-time qPCR 분석기법을 활용하여 미생물 정량 분석 수행 및 데이터베이스화
- 미생물 분석 표준방법론 구축
- 대상 부산시 바이오가스화 소화조의 주요 우점 균주를 정량 분석 대상 균주로 선정하고, 대상 균주를 특이적으로 탐침할 수 있는 Real-time qPCR, Taqman assay용 탐침자세트

(Forward primer, Reverse primer, Taqman probe)를 개발, 실제 시료에 검증 및 보완함.

- 대상 소화조 내 메탄생성균 중 상대우점도 상위 6종 및 유기산 산화 세균을 대상으로 하여 탐침자세트 제작. Computer simulation을 통한 검증 후 oligo 합성. 2 step fast qPCR 조건에서 실제 시료 대상 in-vitro 검증 테스트 수행
- qPCR 분석 전 과정(시료 전처리, DNA 추출 및 qPCR 분석, 결과 확인)은 2~3시간 이내 분석 가능 방법론 구축 완료
- 미생물 지표 발굴 및 이를 활용한 바이오가스화 공정 진단, 공정 효율 개선방안 모색
 - 공정인자-미생물 간 상관관계분석 (Spearman correlation test) 수행
 - 남부 소화조의 경우 Mcur, Mstc, Msth/ARC, Mstc/ARC는 COD 처리율과, Msth/ARC는 메탄생산량과 유의한 양의 상관관계가 확인됨에 따라 소화 공정 효율 진단을 위한 미생물 지표로 활용 가능할 것으로 판단됨. 총 고세균과 총 세균의 비율(ARC/BAC)은 알칼리도와 유의한 양의 상관관계가 확인됨에 따라 소화 공정 안정성 진단을 위한 미생물지표로 활용 가능할 것으로 판단됨
 - 수영 소화조의 경우 ARC는 COD 처리율과, ARC, Msth, Mcur, ARC/BAC은 메탄생산량과 유의한 양의 상관관계가 확인됨에 따라 소화 공정 효율 진단을 위한 미생물지표로 활용 가능할 것으로 판단됨. 총 고세균과 총 세균의 비율(ARC/BAC)은 알칼리도와 유의한 양의 상관관계가 확인됨에 따라 소화 공정 안정성 진단을 위한 미생물지표로 활용 가능할 것으로 판단됨
 - 본 연구를 통해 총 7개의 공정 진단용 미생물지표를 발굴함
 - 앞서 확보한 7개의 미생물지표들과 남부, 수영 소화조의 공정 데이터베이스 결과를 기반으로 다변량 통계분석을 통해 미생물지표들이 남부 소화조와 수영 소화조의 공정 진단용 미생물 지표로서의 활용 가능성 평가 완료
 - 본 연구의 미생물 지표를 활용한 공정 진단 가능성 확인
 - Msth, Msth/ARC 지표가 높은 경우, 메탄생산량, 메탄수율, COD 제거율이 높은 경향 확인
 - 수영, 남부 유입폐기물 대상 회분식 혐기성 소화 반응기 실험을 수행하여 각 유입폐기물의 생화학적 메탄잠재량(BMP)과 생분해도를 평가함
 - 수영, 남부 하수슬러지의 생화학적 메탄잠재량, 생분해도는 각각 225~234 mL CH₄/g COD와 57~59%인 것으로 확인
 - 음식물류폐기물은 하수슬러지 대비 64% 높은 생화학적 메탄잠재량 확인
 - 통합소화 시 실험기반 이론값 (283.5 mL CH₄/g COD) 대비 9.2% 높은 생화학적 메탄잠재량 확인
 - 본 연구에서 확보한 공정 데이터베이스 결과에 따르면 남부, 수영 소화조의 메탄수율은 각각 122, 193 mL CH₄/g COD로 확인됨. 이는 각 유입 폐기물의 생화학적 메탄잠재량 대비 54%, 62% 수준

- 바이오가스 생산량 개선을 위해서는 하수슬러지, 음식물류폐기물의 최적 혼합 투입량(유기물부하량, HRT 고려)과 혼합 비율에 대한 연구 필요

V. 연구결과의 활용계획

- 최신분자생물학적 분석기반 DB 구축으로 공정효율 개선을 위한 양질의 혐기성 소화 공정 운영데이터 Track Record 확보
- 부산시 혐기성 소화시설 맞춤형 미생물지표 발굴 및 공정 진단 기술 확보
- 소화조 진단 기술 및 운영기술 고도화
- 하수처리시설 내 혐기성소화설비의 가동률 및 바이오가스 생산량 개선을 위한 운영방안 제시
- 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
- 부산시 남부, 수영 하수처리시설 내 혐기성소화공정 진단 및 개선방안 도출(하수찌꺼기, 음식물류폐기물 최적 투입비율 등). 대상 소화시설의 바이오가스 생산량 개선 도모
- 대상시설의 장기간 모니터링 및 지속적인 생물지표 통합데이터 축적을 통한 공정 운영전략 고도화 도모
- 향후 추가 연구로 부산시 강변, 녹산하수처리시설 및 생곡 음식물자원화시설 확대를 통한 부산시 통합데이터베이스 구축 추진
- 미생물지표, 통계분석/기계학습을 기반으로 한 소화조 진단, 운영 최적화 컨설팅 지식산업화 추진
- 논문 게재를 통한 연구성과 검증. 후속 연구방안 모색(추후 관련 국책연구과제 제안 등)