

축산 분뇨 기반 바이오가스화 기술의 전력 생산 가능성 연구

정현창, 이명훈*

*국립순천대학교

jhc0829@s.scnu.ac.kr, leemh777@scnu.ac.kr*

A Study on the Power Generation Potential of Livestock Manure-Based Biogasification Technology

Jeong Hyeon Chang, Lee Meong Hun*

*Sunchon National Univ.

요약

양돈 농가에서 발생하는 축산 분뇨를 활용한 협기소화 기반 바이오가스화 기술의 전력 생산 가능성과 자원화 타당성을 실험적으로 분석하였다. 전처리, 협기소화, 정제, 발전의 단계로 구성된 공정을 통해 바이오가스를 안정적으로 생성하고, 이를 열병합발전(CHP) 시스템에 연계하여 전기 및 열 에너지로 전환하였다. 실험은 중온 조건과 적정 부하율에서 약 8주간 수행되었으며, 발전 효율, 에너지 수지, 자가 소비 가능성 등이 함께 평가되었다. 그 결과, 축산 분뇨의 에너지화 공정은 기술적 안정성과 경제성을 동시에 확보할 수 있는 구조임이 확인되었으며, 생성된 전력은 실험동 운영에 활용되고 회수된 열은 소화조 온도 유지에 재활용되었다. 이러한 결과는 축산 분뇨를 재생에너지원으로 활용할 수 있는 실용적 가능성을 뒷받침하며, 향후 농가 단위의 에너지 자립 및 온실가스 저감을 위한 전략 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서 론

축산업은 식량 자원 공급에 필수적인 산업이지만, 그 과정에서 발생하는 가축 분뇨는 수질오염, 온실가스 배출, 악취 등 다양한 환경 문제를 야기한다. 특히 돼지 분뇨 슬러리와 같은 유기성 폐자원은 처리 과정에서 상당한 비용과 환경적 부담을 동반한다[1]. 기존의 퇴비화나 액비화 방식은 처리 효율이 낮고, 악취 저감이나 온실가스 감축에도 한계가 있다[2].

이러한 문제 해결을 위해 최근에는 축산 분뇨를 에너지 자원으로 전환하려는 기술이 주목받고 있으며, 그 대표적인 방법이 협기소화 기반의 바이오가스화 기술이다. 이 기술은 분뇨 내 유기물을 미생물 반응을 통해 메탄 중심의 바이오가스로 전환하고, 이를 전기와 열로 활용함으로써 에너지 생산과 환경 부담 저감을 동시에 실현할 수 있다.

유럽은 바이오가스화를 농업 에너지 전략으로 적극 도입하고 있으며, 특히 덴마크는 전체 가축 분뇨의 약 25% 이상을 바이오가스로 전환해 지역 난방과 전력 생산에 활용하고 있다[3]. 반면, 국내는 수익성 확보 및 기술 표준화 측면에서 아직 도입률이 낮은 상황이다[4].

이에 따라, 본 연구는 축산 분뇨 기반 바이오가스화 기술이 전력 생산에 실질적으로 기여할 수 있는지를 실험적으로 분석하고, 이를 통해 농가 단위 또는 지역 단위의 에너지 자립 가능성을 기술적으로 고찰하고자 한다.

II. 연구 방법

II.1 분뇨 전처리 공정

본 연구에서는 전남 무안에 양돈 농가에서 발생한 돈분을 실험 대상으로 하였다. 수집된 가축 분뇨는 스크리닝 필터를 통해 이물질을 1차 제거한 후, 균등조 내에서 약 12시간 동안 기계식 교반을 실시하여 입자 크기를 균일화하였다. 이후 원심 탈수기를 이용하여 고형물 농도를 약 6% 수준으로 조절하였다. 추가적으로, 전 시료에 대해 80°C에서 2시간 동안의

열 전처리를 실시함으로써 협기소화 반응성과 메탄 수율의 향상을 도모하였다.

이러한 전처리 단계는 분뇨 내 유기물의 생분해성을 높이고 미생물의 접근성을 향상시켜, 후속 소화 공정에서의 바이오가스 생산성을 극대화하기 위한 목적을 갖는다.

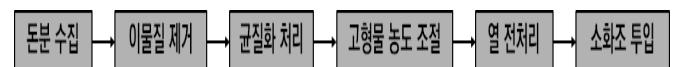


그림 1. 가축 분뇨 전처리 공정 흐름도

Fig 1. Livestock Manure Pretreatment Process Flowchart

II.2 협기소화 반응 운영

전처리를 거친 분뇨는 연속식 교반 반응조(CSTR, Continuous Stirred-Tank Reactor)에 주입되었다. 본 반응조는 내부 교반기를 통해 기질과 미생물의 접촉을 균일하게 유지하며, 운영 온도는 중온 조건인 $33\pm1^{\circ}\text{C}$ 로 설정하였다. 실험은 총 35일간 진행되었고, 체류 시간은 30일, 유기물 부하율은 $1.2 \text{ kg VSS/m}^3\cdot\text{day}$ 로 유지하였다. 반응조 내부 pH는 6.9~7.1 수준을 유지하도록 탄산수소나트륨(NaHCO_3)을 주기적으로 투입하였다.

이러한 조건에서 매일 바이오가스 발생량을 유량계(MFM, Mass Flow Meter)로 측정한 결과, 평균 $0.88 \text{ m}^3/\text{kg VS}$ 의 바이오가스가 생성되었다. GC-TCD(Gas Chromatography - Thermal Conductivity Detector)를 이용한 성분 분석 결과, 메탄(CH_4)은 평균 68.3%, 이산화탄소(CO_2)는 29.5%, 황화수소(H_2S)는 0.9%로 확인되었다.

이 단계는 분뇨 내 유기물을 메탄 중심의 바이오가스로 전환하는 핵심 과정으로, 전체 에너지 생산 시스템의 근간을 이룬다.

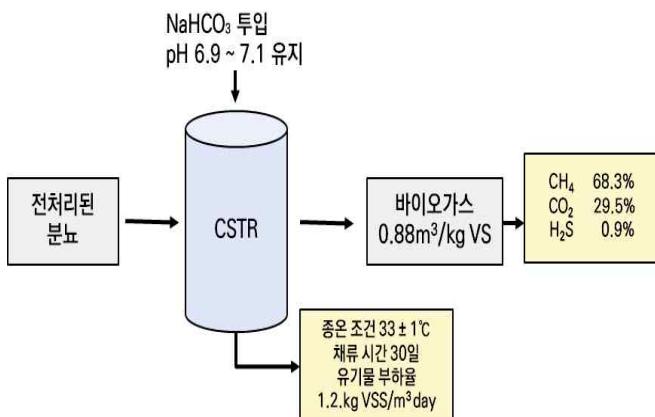


그림 2. CSTR 내 협기소화 운전 조건 및 바이오가스 생성 흐름도

Fig 2. Schematic of anaerobic digestion operating conditions and biogas production in a CSTR

II.3. 바이오가스 정제 및 에너지 전환

생성된 바이오가스는 정제 과정을 거쳐 열병합발전(CHP, Combined Heat and Power) 시스템에 투입되었다. 우선 응축기와 드레인 트랩을 통해 수분을 제거한 후, 2단계 철분 필터를 통과시켜 황화수소를 제거하였다. 이 과정을 통해 메탄 농도는 90% 이상으로 정제되었으며, 이는 발전 효율 향상에 기여하였다.

정제된 바이오가스는 5kW급 CHP 시스템에 주입되었으며, 발전기는 주 6일, 1일 8시간 기준으로 3주간 가동되었다. 전력 출력은 평균 4.82kW를 기록하였고, 총 발전량은 약 1,008kWh에 달하였다. 시스템의 전력 생산 효율은 약 26%, 열 회수 효율은 49%로 측정되었으며, 회수된 열은 다시 소화조의 온도 유지에 사용되었다. 생성된 전력은 부하저항기를 통해 계측되었고, 일부는 실험동 내부 전원 공급에 활용되었다.

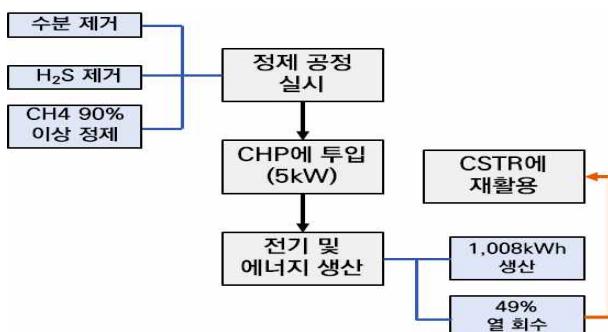


그림 3. 바이오가스의 정제 및 CHP를 통한 에너지 전환 흐름도

Fig 3. Flow Diagram of Biogas Purification and Energy Conversion via CHP System

생산된 전력량 1,008kWh는 3인 가구 기준 월간 평균 전력 사용량에 해당하는 수준으로, 소규모 농가의 에너지 자립 가능성을 시사한다.

이 공정은 축산 분뇨를 활용해 화석연료 없이 전기와 열을 생산하는 탈탄소형 에너지 시스템의 가능성을 실험적으로 입증한 사례라 할 수 있다.

III. 결 론

본 연구는 양돈 농가에서 발생한 돈분을 활용하여, 협기소화 기반 바이오가스화 기술이 전력 생산 가능성을 실증적으로 검토하였다. 열 전처리를 포함한 전처리 과정을 거친 축산 분뇨는 중온 조건(33±1°C)과 유기물 부하율 1.2 kg VSS/m³·day로 설정된 연속식 교반 반응조(CSTR)에서 35일간 소화되었으며, 평균 0.88 m³/kg VS의 바이오가스를 안정적으로

생성하였다. 생성된 바이오가스는 수분 및 황화수소 제거를 포함한 정제 과정을 거쳐 메탄 농도 90% 이상으로 향상되었고, 이를 5kW급 열병합발전(CHP) 시스템에 투입해 총 1,008kWh의 전력을 생산하였다.

공정별 전력 소비량은 전처리 48kWh, 협기소화 35kWh, 정제 및 발전 공정 420kWh로 총 503kWh로 추정되며, 그럼 4와 같이 생산된 전력이 이를 초과하여 순전력 생산이 가능한 구조로 확인되었다. 이는 3인 가구의 월간 평균 전력 사용량에 해당하며, 자가소비 중심의 에너지 자립형 시스템으로 실용 가능성을 입증하였다.

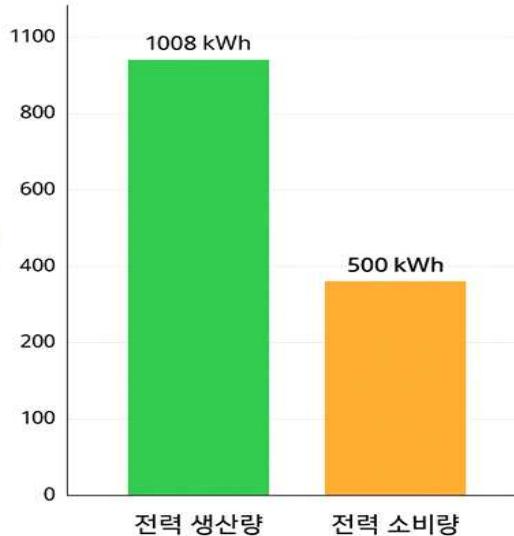


그림 4. 전력 생산량과 전력 소비량 비교

Fig 4. Comparison of Electricity Generation and Consumption

해당 공정은 축산 분뇨를 단순한 폐기물이 아닌 재생에너지원으로 활용해 전기와 열을 동시에 생산할 수 있는 탈탄소형 농업 에너지 시스템으로, 소규모 농가의 에너지 자립과 온실가스 저감, 약취 저감 등 다양한 환경 문제 해결에 기여할 수 있다. 회수된 열은 소화조 온도 유지에 재활용되었고, 일부 전력은 실험동 전원으로 활용되어 자가 순환형 에너지 체계의 가능성도 확인되었다.

향후, 바이오가스화 설비의 운영 지원, 기술 표준화, 경제성 기반 인센티브 제도 등이 병행된다면, 본 시스템은 축산 농가의 에너지 자립 모델로 확산될 수 있으며, 지속 가능한 농축산업과 지역 에너지 정책 수립의 기초자료로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

“본 결과물은 농림축산식품부 및 과학기술정보통신부, 농촌진흥청의 재원으로 농림식품기술기획평가원과 재단법인 스마트팜연구개발사업단의 스마트팜다부처 평가기지 혁신기술개발사업의 지원을 받아 연구되었음(RS-2024-00406426)”

참 고 문 현

- [1] M. G. Jung, Y. G. Lee, J. Y. Choi “Environmental impact of livestock industry: Analysis and policy tasks”, pp. 1-10, 2021
- [2] G.H. Jung, “Development of biogas production system for livestock manure”, pp. 3 - 16, 2009
- [3] Biogas Danmark, “Biogas Outlook 2024: Production and use of biogas in Denmark 2023 - 2045”, vol. 1, no. 1, pp. 1 - 65, 2024.
- [4] T. S. Kim, “Research on Expanding Biogas Production and Promoting Utilization”, pp. 1 - 4, 2024