

# 바이오가스 고효율 에너지화 연료전지시스템의 현재와 미래

지상훈 KICT 환경연구본부 수석연구원

## 들어가며

유기성 폐기물 자원순환은 한국건설기술연구원에서 수행하는 환경-에너지 연구 분야이다. 최근 시행된 바이오가스법과 현 정부 재생에너지 활성화 기조에 따라 해당 기술력의 진보가 필요하며, 이에 바이오가스 에너지화 효율 향상 및 탄소 저감 기술개발 방향을 제안하고자 한다.

## 바이오가스 에너지화

음식쓰레기, 하수찌꺼기, 분뇨와 같은 유기성 폐기물(주로 탄소가 포함된 버려지는 화합물)은 지구상에서 발생하며 인간의 활동으로 다량 생성되고 있는 물질이다. 이러한 유기성 폐기물은 과거엔 해양에 제재 없이 버려졌으나 심각한 생태계 파괴에 따라 현재는 내륙에서 처리되어야 한다. 이러한 유기성 폐기물은 혐기성 소화(산소가 없는 상태에서 유기물 분해하는 미생물 처리) 적용 시 상당량 무게가 감축되며, 이때 메탄과 이산화탄소가 다량 함유된 바이오가스가 발생한다. 특히, 메탄의 대기 방출은 지구 온난화를 크게 가속할 수 있으므로 이에 대한 적절한 대응이 필수적이다.

메탄 분자는 탄소 1개와 수소 4개 원자로 이루어짐에 따라, 수소(산소와 결합하여 고에너지 발생) 함량이 높은 편이다. 따라서 이러한 메탄을 다량 함유한 바이오가스는 대체 에너지로서의 활용 가능성이 높은 연료이다. 바이오가스의 에너지화에 활용할 수 있는 시스템(이하 바이오가스 에너지화 시스템)은 대표적으로 엔진, 터빈, 연료전지시스템이 있으며, 이들의 특징은 표 1과 같다. 엔진은 피스톤을 주요 부품으로 하며, 연료의 연소를 통한 회전력으로 에너지를 발생시키며, 소형화에 유리한 장점이 있지만 피스톤 움직임에 의한 소음/진동 발생의 단점이 있다. 에너지화 효율에 큰 영향을 미치는 기계적 마모 관리 또한 중요하다. 터빈은 블레이드를 주요 부품으로 하며, 연료의 연소를 통한 회전력으로

[표 1] 바이오가스 에너지화 시스템 비교

구분	엔진	터빈	연료전지시스템
주요 부품	피스톤	블레이드	전해질, 전극
반응 특성	연소	연소	전기화학
에너지화 과정	연료 → 연소 → 회전	연료 → 연소 → 회전	연료 → 산화/환원
특장점	소형화	대용량	고효율
소음/진동	고	중	저
유지보수 이슈	기계적 마모	열적 변형	소재 열화

로 에너지를 발생시킨다. 대용량화에 유리한 장점이 있지만 소형화에는 불리한 단점이 있다. 고온에 노출되는 부품 변형의 관리 또한 중요하다. 연료전지시스템은 전해질과 전극을 주요 부품으로 하며, 연료의 전기화학 반응(산화/환원)으로 에너지를 발생시킨다. 타 바이오가스 에너지화 시스템과 비교하여 효율이 높고 소음/진동이 적은 장점이 있지만, 전해질 및 전극 내구성을 확보하기 위한 정교한 소재 제작과 시스템 운전 기술이 요구되는 단점이 있다.

## 바이오가스 에너지화 연료전지시스템

바이오가스 에너지화에 활용되는 연료전지시스템은 크게 두 종류(고분자전해질/고체산화물 연료전지시스템)가 있으며, 이들의 특징은 표 2와 같다.

고분자전해질 연료전지시스템에는 고분자 기반 전해질을 핵심 부품으로 하는 연료전지가 적용된다. 고분자전해질 연료전지시스템은 낮은 온도(50 ~ 80°C)에서 작동하여 시스템 시동(start-up)이 빠른 장점이 있다. 하지만 백금과 같은 귀금속을 연료극 촉매 소재로 사용하기에 고가이고 연료전지 내 액체 상태 물로 기인한 성능 불안정 현상이 발생할 수 있는 단점이 있다. 또한 해당 작동 온도와 촉매로는 바이오가스의 직접 연료 활용이 어렵기 때문에 바이오가스 내 메탄

으로부터 고순도 수소를 추출하기 위한 별도의 개질 장치가 요구된다. 특히 연료극에 공급되는 수소의 일산화탄소 함유량은 수 ppm 수준으로 매우 낮아야 하며, 이에 따라 고사양의 수소정제 설비 또한 요구된다. 고분자전해질 연료전지시스템의 수소-전기 변환효율은 35% 이내로 내연기관과 비교하여 높지만 타 연료전지시스템과 비교해서는 낮은 편이다. 반면, 고분자전해질 연료전지시스템은 상대적으로 가장 높은 기술 성숙도를 보이며 다양한 상용화 실적을 보여주고 있다. 고분자전해질 연료전지시스템의 출력 규모는 250 kW 이내로, 휴대용 장치 및 소규모 설비에 주로 적용된다. 농촌 지역이나 폐기물 처리시설에서 활용도가 높으며, 차량 및 백업 전력 공급을 위한 에너지원으로도 활용된다.

고체산화물 연료전지시스템에는 고체산화물 기반 전해질을 핵심 부품으로 하는 연료전지가 적용된다. 고체산화물 연료전지시스템은 높은 온도(600 ~ 1,000°C)에서 작동하여 타 연료전지시스템과 비교하여 시동이 느린 단점이 있다. 하지만 고온 작동을 통한 반응성 확보로 니켈과 같은 비귀금속을 연료극 촉매 소재로 사용할 수 있고, 연료전지 내 물이 기체 상태로 존재하여 물관리가 쉽다. 또한 해당 작동 온도와 촉매로 바이오가스의 직접 연료 활용이 가능하여 바이오가스 내 메탄으로부터 수소를 추출하기 위한 별도의 개질 장치가 요구되지 않는다. 더불어 수소 또한 연료로 활용이 가능하며, 나아가 바이오가스 에너지화 시 생성되는 이산화탄소의 일산화탄소 전환 후 연료로 활용이 가능한 장점이 있다. 특히, 고체산화물 연료전지시스템을 통한 수소-전기 변환효율은 50% 내외로 상당히 높다. 고체산화물 연료

전지시스템의 기술 성숙도는 고분자전해질 연료전지시스템 보다는 낮지만, 높은 전기 효율을 바탕으로 점진적 상용화 실적을 보여주고 있다. 고체산화물 연료전지시스템의 출력 규모는 1 ~ 3,000 kW로 소/중/대규모 설비에 다양하게 적용된다. 농촌 지역, 폐기물 처리시설, 중대형 상업 및 주거시설 등 다양한 곳에서 활용할 수 있고, 타 연료전지시스템과 비교하여 양질의 폐열(높은 작동 온도로 인한)을 제공하여 열병합 분산 발전원으로서의 활용도 또한 높다.

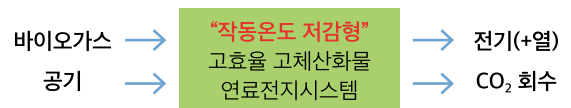
### 향후 연구 방향

기존 바이오가스 에너지화 고체산화물 연료전지시스템은 높은 전기 효율에도 불구하고, 지나치게 높은 작동 온도로부터 기인한 경제성(예. 제한된 소재, 복잡한 열관리) 및 실용성(예. 느린 시동) 측면의 약점이 있다. 이에 따라 기존보다 작동 온도를 낮추기 위한 노력(600°C 이하 운전)이 활발히 이루어지고 있으며, 작동 온도 저감 시 요구되는 반응성(예. 전기 효율) 및 내구성(예: 소재 수명) 확보를 위한 기술개발이 요구된다. 한편, 고체산화물 연료전지시스템 또한 타 에너지화 시스템과 마찬가지로 바이오가스 에너지 전환 시 이산화탄소가 생성된다(전기화학 반응 시 메탄에 포함된 탄소와 외부 공급 산소 반응 결과물). 탄소중립 미래상 구현을 위하여 에너지화 과정에서 생성된 이산화탄소는 회수하여 시스템 내에서 활용하거나 외부에서 활용 또는 저장할 필요가 있다. 이에 따라, 차세대 바이오가스 에너지화 고체산화물 연료전지시스템의 기술개발 방향으로 1) 작동 온도 저감과 2) 이산화탄소 회수를 제안한다(그림 1). **KICT**

[표 2] 바이오가스 에너지화 연료전지시스템 비교

구분	고분자전해질 연료전지 시스템	고체산화물 연료전지 시스템
전해질 종류	고분자	고체산화물
작동 온도 (°C)	50 ~ 80	600 ~ 1000
연료극 촉매	백금	니켈
물관리 난이도	고	저
공급 연료	수소	메탄, 수소, 일산화탄소
개질 설비 유무	O	X
일산화탄소 허용 한계	수 ppm	-
전기 효율 (%)	25 ~ 35	50 내외
기술 성숙도	고	중
출력 규모 (kW)	1 ~ 250	1 ~ 3,000

[그림 1] “차세대” 바이오가스 고효율 에너지화 고체산화물 연료전지시스템



### 참고자료

- Stephen J. McPhail, Luigi Leto, and Carlos Boigues-Muñoz (2013) International Status of SOFC deployment 2012-2013
- Chad W. Blake and Carl H. Rivkin (2010) Stationary Fuel Cell Application Codes and Standards: Overview and Gap Analysis