

바이오가스 연료기반 연료전지발전 기술동향

이종규**, 전재호, 이종연

Technology Trends of Fuel Cell Power Plant Based on Biogas Fuel

Jong-Gyu Lee***, Jae-Ho Jeon and Jong-Yeon Lee

Abstract

The target for the reduction of CO₂ emissions, as specified in the Kyoto Protocol, can only be achieved by an extended use of renewable fuels and the increasing of the energy efficiency. The energy generation from waste gases with a reasonable content of methane like biogas can significantly contribute to reach this target. A further reduction of greenhouse gas emissions is possible by increasing the electrical efficiency using progressive technologies. Fuel cells can be highly energy conversion devices. Utilizing biogas as the fuel for fuel cell systems offers an option that is technically feasible, potentially economically attractive and greenhouse gas neutral. High temperature fuel cells that are able to operate with carbon monoxide in the feed are well suited to these applications. Furthermore, because they do not require noble metal catalysts, the cost of high-temperature fuel cells has the greatest potential to become competitive in the near future compared to other types of fuel cells.

Key words

Biogas(바이오가스), Fuel Cells(연료전지), Greenhouse gas(온실가스), Sustainability(지속가능), Methane(메탄)

(접수일 2008. 8. 20, 수정일 2008. 9. 11, 게재확정일 2008. 9. 12)

*** 포항산업과학연구원(RIST) 환경에너지연구본부

E-mail : jglee@rist.re.kr Tel : (054)279-6614 Fax : (054)279-6309

Subscript

SNG : synthetic natural gas

NG : natural gas

ADG : anaerobic digester gas

LFG : landfill gas

PEMFC : proton exchange membrane fuel cell

PAFC : phosphoric acid fuel cell

MCFC : molten carbonate fuel cell

SOFC : solid oxide fuel cell

BICEPS : biogas integrated concept a european program for sustainability

HRSG : heat recovery steam generator
 SMR : steam methane reforming
 POX : partial oxidation
 ICE : internal combustion engine

1. 서론

연료전지는 효율이 높고 이산화탄소의 배출을 크게 줄일 수 있기 때문에 최근의 지구온난화와 석유에너지 고갈문제의 유력한 해결방안으로 제시되어 여러 나라에서 연구가 진행되고 있다. 또한 소음이 적고 대기오염의 원인이 되는 NOx, SOx 및 매연이 매우 적은 장점을 가지고 있어 미래의 에너지 원으로 기대되고 있다. 하지만 연료전지는 배터리와는 달리 에너지 저장장치가 아니라 에너지 변환장치이므로 연료전지가 에너지를 생산하기 위해서는 계속적으로 수소연료를 공급 해주어야 한다.

전기처럼 에너지매개체인 수소는 클린에너지로 전환될 수 있어 이상적인 에너지화폐라고 한다.⁽¹⁾ 하지만 화석연료로부터 수소를 생산하기 위해서는 많은 양의 에너지를 필요로 하며, 수소생산으로 온실가스를 배출하게 되어 수소경제의 정의에 대한 재정립이 요구되고 있다.^(2~5)

그러므로 실질적인 에너지화폐는 지구상에 널리 분포하고 있는 수소를 함유한 탄수화물 또는 바이오매스이다. 바이오매스는 생장 기간 동안 이산화탄소가 태양에너지에 의해 유기물로 고정화되고 이를 연소시키거나 분해시켜 발생하는 이산화탄소가 자연으로 순환되는 탄소중립 에너지이다.⁽⁶⁾ 그러므로 재생에너지원인 바이오매스로부터 얻어지는 바이오가스는 가까운 장래에 수소를 얻는 가장 경쟁력 있는 에너지원이 될 것이다.^(7,8) 그러므로 재생에너지와 연료전지가 결합한 “지속가능한 에너지시스템”이 실현될 것이다.⁽⁹⁾

지구온난화 문제를 해결하기 위하여 바이오매스로부터 얻은 바이오가스를 연료로 하는 연료전지는 1998년에 세계 최초로 미국의 UTC Fuel Cell에서 LFG와 ADG를 연료로 하는 PAFC시스템을 설치하여 NG연료와 거의 동등한 수준의 전기 효율을 보이면서 안정적인 연료전지시스템을 개발하게 되었다. 또한 Fuel Cell Energy에서 ADG를 연료로 한 MCFC가 설치 및 운전되고 있다. 미국의 Fuel Cell Energy사는 현재

까지 설치 및 운영되고 있는 MCFC발전시스템중에서 바이오 가스 연료기반 MCFC발전시스템이 약 40%를 차지하고 있으며, King County하수처리장에 규모가 가장 큰 1MW급 MCFC 프로젝트를 수행하였다.

유럽의 RWE그룹에서도 ADG을 기반으로 하는 PAFC시스템 기반기술을 확보하였으며 최근에는 바이오가스기반의 MCFC 발전시스템개발에 주력하고 있다. 일본 도시바에서는 폐기물을 열분해하여 합성가스를 제조하는 열분해가스화 용융로와 연료전지를 조합시킨 시스템이 가와사키제철의 치바제철소에 도입되어 연료전지발전운전에 성공하기도 하였다. 국내에서는 처음으로 서울 탄천물재생센터에 ADG를 연료로 하는 250kW급 MCFC를 설치하여 운영하였다.

연료전지 개발 초기에는 비교적 동작온도가 낮은 저온형 연료전지인 PAFC와 PEMFC가 많았지만, 이것들은 코제너레이션에는 맞지 않고, 효율 향상에도 한계가 있다. 이에 비해 고온형 연료전지인 MCFC와 SOFC는 전기효율이 높고, 동작 온도도 높아 대규모 에너지 공급용으로 적합하다.

연료전지의 연료인 수소는 대부분 천연가스를 개질하여 얻어지고 있지만 최근 고유가 상승과 함께 천연가스 가격이 지속적으로 상승함에 따라 수소를 얻는 에너지원으로서 바이오가스를 이용하려는 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

그러므로 본고에서는 중대규모 에너지공급에 초점을 맞춰 바이오가스 연료기반의 연료전지발전 기술을 소개하고자 한다.

2. 바이오가스 생산과 에너지화 동향

2.1 바이오가스의 정의

태양에너지를 이용한 광합성 과정을 통하여 모든 식물과 미생물이 생성되며 이를 먹고 생물체가 만들어지며, 이와 같은 자연계 순환의 전 과정에서 생성된 유기성 생물체를 통틀어 바이오매스라고 하며, 바이오매스를 연료로 부터 얻어지는 에너지를 바이오에너지라고 한다.

바이오매스를 직접 또는 생화학적, 물리적 변환과정을 통하여 기체연료형태로 얻어지는 것을 바이오가스라고 하며, 바이오가스를 정제하여 화석연료인 천연가스와 같이 거의 대부분이 메탄으로 구성된 바이오가스를 바이오메탄(또는 바이

오천연가스)이라고 한다.

바이오가스는 하수슬러지, 매립쓰레기와 음식물쓰레기 등과 같은 유기성 폐기물인 바이오매스를 혐기성 미생물에 의한 혐기성 소화반응으로 메탄발효시킴으로써 얻을 수 있으며, 약 50-60%메탄과 약 40-50% 이산화탄소로 구성되어 있다. 이와 같이 혐기성 미생물에 의하여 발생하는 바이오가스를 1세대 바이오가스라고 하고, 목질계, 에너지작물 및 폐기물과 같은 고체 바이오매스나 액체 바이오매스로 부터 얻어지는 바이오가스를 2세대 바이오가스라고 한다.

2.2 바이오가스 생산 및 활용기술

1세대 바이오가스인 혐기성 소화기술은 예전부터 기술이 확립되어 발전되어 오고 있는 전통적인 기술로서 비교적 기온이 온난한 지역에서 액상 및 반 고상 폐기물의 처리에 이용되었다. 대부분의 공정에서 고형물의 함량이 10%이내인 것에 적용되고 있으며, 최근의 기술발전에 의하여 고형물이 25%전후인 고형상 폐기물에도 적용이 시도되고 있다. 혐기성소화기술은 일명 "메탄 발효"라고도 하며, 주된 목적은 폐수 혹은 폐기물처리와 동시에 메탄이라는 에너지를 회수하기 위하여 적용되고 있다. 혐기성소화라는 용어에 포함된 것과 같이 산소가 없는 무산소 분위기에서 분해 가능한 유기물을 분해시켜 메탄으로 전환시키는 것이다.⁽¹⁰⁾

국내에서는 주로 하수처리장의 하수슬러지로 부터 발생하는 ADG와 쓰레기 매립장에서 발생하는 LFG가 이에 해당되며, 대부분 발생하는 바이오가스는 대부분 가스엔진이나 스팀터빈의 연료로 공급하여 전기를 생산하고 있지만, 가스중 여러 불순물에 대한 성상이 제대로 파악되지 못해 미정제 바이오가스 공급으로 인해 거의 모든 바이오가스 이용설비에서 큰 문제점이 발생하고 있다.

우리나라보다 전기가격이 비싼 대부분의 EU국가에서도 바이오가스로 부터 전기 생산을 주목적으로 하였다. 하지만 EU에서는 분산형 연료전지 시장형성 및 개척을 위해, 또한 다음 세대의 일자리 창출을 위해 ADG와 LFG같은 바이오가스를 연료로 하는 고온형 연료전지인 수MW급 MCFC발전시스템개발을 진행하고 있다.

혐기성 소화기술과 같은 1세대 바이오가스기술은 현재 성숙단계이어서 전 세계적으로 널리 적용되고 있지만 탈리액

및 슬러지의 2차적인 처리문제로 인해 근본적인 유기성폐기물 처리기술이 출현하게 되었다.

고체 바이오매스 가스화방법인 열수가스화나 촉매가스화 기술, 액체 바이오매스 가스화방법인 초임계 수 기술을 이용하여 얻어지는 바이오가스를 2세대 바이오가스라고 한다. 2세대 바이오가스기술은 아직 개발 초기단계이지만 바이오가스의 에너지 전환율이 높고 환경적인 2차 처리문제가 없어 유럽에서 활발한 연구가 진행되고 있다.

2.3 국내 바이오가스 에너지화 정책

최근 국제 원유가격 상승에 따라 에너지 시장의 불안정성이 심화될 것이므로 화석연료를 대체할 수 있는 신·재생에너지 확보가 시급해지고 있다. EU의 경우 총에너지 소비량의 1,728TOE의 6.5%를 신·재생에너지에 의존('05년 기준)하고 있으며 이중 바이오에너지 생산 확대를 통하여 신재생에너지 보급률을 '10년까지 12%, '20년까지 20%달성을 목표로 하고 있다. 우리나라는 세계 10위의 에너지 소비국이나 에너지의 97%를 수입(연간 907억불 상당량 수입)에 의존하고 있다. '06년 현재 국내 총 1차 에너지 대비 신재생에너지비율은 2.24%에 불과하며, '11년까지 신재생에너지 보급률을 5%로 끌어올린다는 목표를 설정하여 추진 중이다.

2008년 5월에 발표한 환경부의 "폐기물 에너지화 정책"에 따르면 2013년부터 해양투기가 금지되는 유기성 폐기물의 처리 및 온실가스 감축의 유력한 수단으로 바이오가스 에너지가 포함되어 있다. 종전의 환경과 경제를 통합하는 환경관리에서 환경과 경제 그리고 에너지를 통합하는 3Es패러다임을 채택하였다. 장래 화석연료의 고갈 및 지구온난화에 대비한 대체에너지의 개발·보급이 시급함에 따라 폐기물을 새로운 자원으로 인식하고 이의 에너지화를 추구하는 3Es패러다임은 현시대가 처한 복합적 난제를 해결할 수 있는 유용한 정책 수단으로 활용되고 있다.

현재 국내에서 에너지화 대상 폐기물로는 하폐수슬러지, 가축분뇨 및 음식물쓰레기(음식물쓰레기 발생폐수)이며 모두 합쳐 20,491톤/일이 발생하고 있고, 바이오가스(LFG와 ADG) 생산량은 28만 TOE이다.

환경부는 온실가스 배출규제 강화 및 유가급등 추세에 능동적으로 대응하기 위해 하수슬러지, 가축분뇨 및 음식물쓰

레기등 유기성 폐기물에서 메탄등 바이오가스를 분리·추출해 전기를 생산하는 바이오가스화·열병합발전시설등의 계획을 수립하였다. 전국을 4대 권역(중부권, 호남권, 동부권, 영남권)으로 나누어 각 권역내 지역특성에 따라 소규모의 지역형 개별시설인 “폐기물 에너지타운”을 신설하여 유기성 폐기물 바이오가스화 시설과 연계한 열병합 발전시설을 설치할 계획이다.

3. 연료전지 활용기술 및 동향

3.1 연료전지의 정의

연료전지는 수소와 산소의 전기화학반응에 의해 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환하는 에너지변환 장치이다. 일반적으로 연료전지는 배터리와 같이 작동하지만, 전기의 충전 대신 연료공급을 필요로 한다. 수소가 연료전지에 계속적으로 공급될 때 공기중의 산소와 반응하여 전기와 열을 발생하게 된다. 순수한 수소를 연료원으로 공급하면 반응부산물로 물이 생성된다. 그러나 자연계에는 순수한 수소가 존재하지 않으므로 연료개질기를 이용하여 다른 여러 가지 연료로부터 수소 연료원을 얻게 된다. 그러므로 연료전지와 연료개질기는 일체형으로 만들어져서 연료개질기가 가솔린, 에탄올, 메탄올과 같은 탄화수소 연료와 천연가스 및 바이오가스와 같은 메탄가스로부터 수소를 만들어 연료전지에 공급하게 된다.⁽¹¹⁾

연료원으로 수소를 직접 공급할 경우, 도시가스와 바이오가스를 개질기를 통해 공급하는 경우가 있다. 또한 직류는 인버터를 사이에 두어 전력공급에, 열은 열원으로 사용하는 것으로 코제너레이션 시스템을 달성할 수 있다.

3.2 연료전지의 특성비교

연료전지는 기존 발전소와 비교하여 발전효율이 높고, 신뢰성이 우수하며 환경 친화적이고 모듈화특성을 가지고 있어 작은 설치공간을 차지하며 연료의 다양성, 저소음 및 분산전원공급이 가능하다는 장점을 가지고 있다.⁽¹²⁾

연료전지는 전해질에 따라 고분자전해질 연료전지(PEMFC),

Table 1. Characteristics of fuel cells

	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC
연료	도시가스, LPG 등	도시가스, LPG 등	도시가스, LPG, 바이오가스 등	도시가스, LPG, 바이오가스 등
전해질	이온 교환막	인산	탄산칼륨	안정화 질코니아
작동온도	100℃	200℃	650℃	1000℃
전기효율	35-40%	35-42%	45-60%	45-65%
개발현황	실용화	실용화	실용화	연구단계
용도	가전, 자동차등	업무용, 공업용	공업용 분산전원	공업용 분산전원

인산형전해질 연료전지(PAFC), 용융탄산염 연료전지(MCFC) 및 고체전해질 연료전지(SOFC)등으로 분류되며, Table 1에 서는 연료전지의 특성을 보여주고 있다.

저온형 연료전지의 차세대 연료전지인 고온형 연료전지는 작동온도가 650℃ 이상인 고온에서 운전되기 때문에 저온형 연료전지에서 기대할 수 없는 다음과 같은 추가적인 장점을 가지고 있다. 즉, 고온에서의 빠른 전기화학반응은 전극재료를 백금대신 저렴한 니켈 과 세라믹 사용을 가능케 하여 경제성에서 유리할 뿐만 아니라, 저온형 연료전지에서 사용되는 백금전극에 피독물질로 작용하는 일산화탄소마저도 수성가스 전환반응에 의하여 연료로 이용할 수 있어 도시가스, 석탄가스 및 바이오가스등 다양한 연료 선택성을 제공해주고 있다. 그리고 HRSG등을 이용한 bottoming cycle로 양질의 고온 폐열을 회수사용하면 전체발전시스템의 열효율을 80%이상까지 증가시킬 수 있다. 또한 고온형 연료전지의 고온운전특성은 연료전지 스택내부에서 전기화학반응과 연료개질반응을 동시에 진행시키는, 즉 내부개질 형태의 채용을 가능하도록 하여 별도의 열교환기 없이 흡열반응인 개질반응에 직접 이용할 수 있어 전체시스템의 효율이 추가로 증가하는 동시에 연료전지 시스템이 간단해지는 특성을 갖게 된다.

고온형 연료전지인 MCFC는 미국, 독일 및 일본 등을 중심으로 적극적으로 투자하여 최근 급속도로 많은 발전이 이루어져 연료전지 수명 및 신뢰성 확보 등 기술적 검증이 거의 끝나가고 있으며, 다른 연료전지에 비해 상업화에 가장 근접한 연료전지이다. 또한 SOFC는 MCFC보다 우수한 특성을 가지고 있어 차세대 연료전지로 개발되고 있다.

3.3 국내외 연료전지 연구동향(바이오가스를 중심으로)

바이오가스기반의 연료전지연구는 연료전지 개발초기에 PAFC가 대부분이었지만, 2003년 이후 고온형 연료전지인 MCFC가 고가인 백금촉매를 사용하는 PAFC를 대체하였다. 더군다나 고온형 연료전지 특성 때문에 사용되는 바이오가스도 하수슬러지와 축산분뇨등의 혐기성소화로 부터 얻어지는 ADG, LFG 및 폐기물 가스화에 의한 합성가스등 매우 다양화되었다.

PAFC는 ONSI fuel cells가 세계 최초로 개발하여 1997년에 200kW급 PAFC발전시스템을 미국 내 Yonker하수처리장에 설치하여 ADG를 연료로 운전하였다. Yonker 처리장은 세계 최초의 실증기로서 ADG정제공정 최적화에 많은 기간을 필요로 했지만, ADG내 불순물을 제거하는 가스정제공정 최적화, 연료전지와의 연동운전등에 많은 난관에 해결하느라 가동율은 초기 조정 기간이 다소 영향을 주어 60%를 넘는 정도이며 전기효율은 35%, 열병합효율은 87%를 달성하였다.

그 후 UTC Fuel Cells의 전신인 ONSI fuel cells은 미국 내 3개의 매립장에서 발생하는 LFG를 연료로 하는 40-200kW급 PAFC발전시스템을 설치하여 성공적인 실증사례를 보여주었고, 그 후 뉴욕 전력청은 1998년에 ADG를 연료로 하는 200kW급 PAFC발전시스템을 설치하였으며, 유럽의 RWE 그룹은 2000년부터 ADG를 연료로 하는 200kW급 PAFC를 설치하여 전력을 생산하였다. 한편 일본에서도 도시바와 후지전기가 주축이 되어 2000년 초반 PAFC를 개발하여 바이오

가스기반의 연료전지발전시스템을 설치하여 성공적인 결과를 얻어냈다.

하지만 고가의 백금을 사용하는 PAFC는 바이오가스에 함유된 H₂S뿐만 아니라 백금촉매의 피독물질인 일산화탄소 제거등 고온형 연료전지에 비해 연료가스 정제공정이 매우 복잡하여 PAFC발전시스템 설치비가 고가이고, 또한 효율이 낮아 고온형 연료전지로 관심이 모아지게 되었다.

세계 최초로 MCFC를 개발한 미국의 Fuel Cell Energy는 캘리포니아에 ADG를 연료로 하는 500kW급 MCFC를, 워싱턴주의 King County 하수처리장에는 1MW급 MCFC발전시스템을 설치하여 전력을 생산하고 있다(Fig. 2).

유럽에서는 재생에너지인 ADG, LFG를 연료로 사용하는 가장 효과적인 MCFC 발전시스템 개발을 목표로 EFFECTIVE 프로젝트가 2000-2004년에 추진되었다(Fig. 3). 이 프로젝트

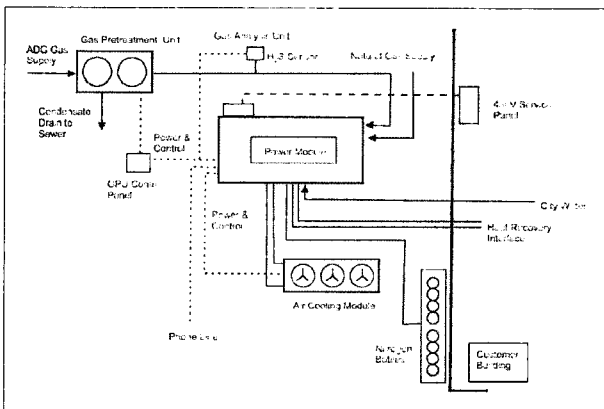


Fig. 1 PAFC power plant process.

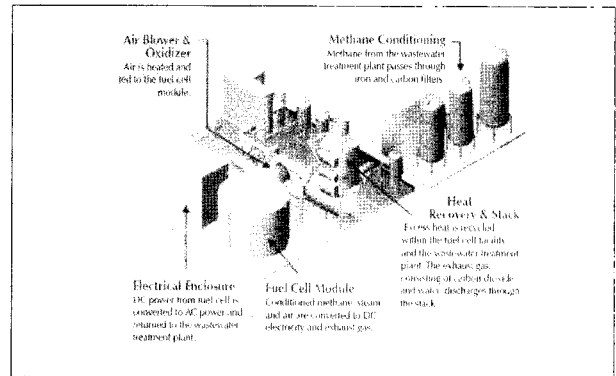


Fig. 2 1MW MCFC power plant.

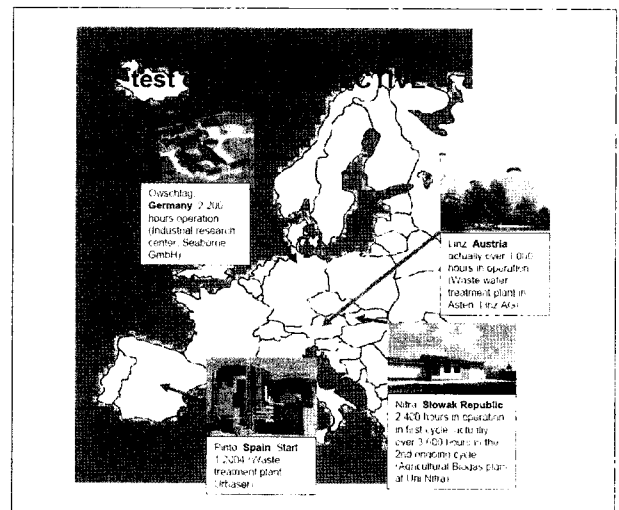


Fig. 3 Effective Project.

트에는 독일, 오스트리아, 스페인 및 슬로바키아가 참여하였으며, Profactor사에서는 바이오가스중 함유된 H₂S 및 실록산을 제거하는 가스 정제공정인 Biotrickling filter을 개발하였으며, 독일 CFC솔루션사가 천연가스 연료로 개발한 250kW급 MCFC 발전시스템의 내구성과 성능을 확인하였다.

대부분의 유럽 국가들은 정부 지원을 받으면서 바이오가스를 30-38%의 효율을 가진 내연기관에 공급하여 전기 생산에만 사용하고 있지만, 유럽내 재생에너지 시장형성과 경쟁력 있는 차세대기술개발을 위해 BICEPS프로젝트를 2007년 1월부터 시작되었다. 이 프로젝트는 이태리의 Ansaldo FC사와 독일의 CFC솔루션사의 1MW급 MCFC발전시스템을 대상으로 MCFC발전시스템을 위한 신개념의 바이오가스 정제시스템 개발을 목표로 하고 있다. 대상이 되는 바이오가스는 LFG와 ADG이며, 가스정제 공정개발은 BASF에서 주도하고 있다.

독일 CFC솔루션사의 1MW급 MCFC발전시스템에는 스페인의 CESPA사의 LFG를 연료로 공급하고, 이태리의 Ansaldo FC사의 1MW급 MCFC발전시스템에는 이태리의 Terni 하수처리장의 ADG를 연료로 공급한다. BICEPS에 미국의 Fuel Cell Energy사도 참여함으로써 전 세계의 연료전지개발을 주도하는 미국과 유럽 연료전지 회사들이 참여하는 "실제적인 개발 및 실증프로젝트"이다.

그러므로 연료전지의 단위부품개발 및 스케일업과 신개념의 바이오가스정제 공정개발을 통하여 바이오가스기반 연료전지의 총비용을 줄이고자 한다.⁽¹⁴⁾

한편 SOFC분야에서 Bio-SOFC프로젝트는 5kW급 SOFC 발전시스템을 이용하여 에너지절감과 환경친화성을 보여주기 위한 프로젝트로서,⁽¹⁵⁾ 가축분뇨와 매립쓰레기와 같은 유기성 폐기물의 혐기성 소화로 발생하는 바이오가스를 연료로 사용한다. SOFC발전시스템은 바이오가스연료로 부터 전기와 열을 생산하여 환경친화적으로 전력을 생산하여 에너지 수요처에 공급하여 유기성 폐기물과 매립쓰레기의 청정처리에 의해 환경부하를 줄이고자 한다.

최근에는 연료전지의 연료로서 바이오가스로 부터 얻어진 바이오메탄과 같은 새로운 자원의 결합이라는 신개념의 융·복합화가 보고되고 있으며, 다음과 같은 특징을 갖는다. 첫째로 바이오메탄은 천연가스 공급 시스템을 이용함으로써 생산 지역에 상관없이 모든 지역에서 이용할 수 있고, 둘째로 황성분이 적기 때문에 연료전지 모듈의 핵심 구성요소인 연료개질 니켈촉매들에 대한 훼손을 방지할 수 있다.

이산화탄소 중립 자원인 바이오메탄을 연료전지와 결합시키려는 시도가 독일 CFC Solutions사에서 바이오메탄으로 구동되는 신개념 MCFC발전시스템을 이용하여 컴퓨터 센터에 전력을 공급하게 된다. MCFC발전시스템에 주입되는 연료가스는 가스 분배 장치를 거쳐서 음극의 흐름과 수직으로 되어 있는 라인을 통해서 이동한다. 수평으로 설치되는 연료전지 스택은 밀봉된 상태이다. 운전 온도는 650°C이며 수소는 내부에 존재하는 개질기를 통해서 만들어진다. 음극 상부를 통해서 배출되는 반응후의 가스는 공기와 혼합되며 최종적으로는 촉매 산화되어 청정한 배가스로 부터 고온의 열을 회수한 후 대기로 배출된다.⁽¹⁶⁾

국내에서는 산업자원부 에너지관리공단 지원 하에 2004년부터 3년간 250kW급 MCFC발전시스템에 연료가스로서 ADG를 공급하는 실증연구를 처음으로 수행하였다. 연료전지에서 요구하는 연료가스 품질확보를 위하여 가스에 함유된 황화수소 및 실록산 정제공정을 설치 및 운영하였다(Fig. 4).

연료전지는 45%의 전기효율과 40%의 열효율을 보이면서 220kW의 전력을 약 10,000시간 동안 발전하였다. 또한 연료전지를 3000시간 운전 후 연료전지 배가스 성분분석결과 CO, NO_x, SO₂가 1ppm이하이고, 배열을 회수하여 생산되는 온수(≈75°C)는 소화조 가온용으로 공급하였다.

미국의 Fuel Cell Energy사와 독일의 CFC솔루션사는 MCFC 발전시스템 개발당시에는 NG을 기반으로 하였지만 MCFC상업화를 촉진하기 위하여 ADG, LFG 및 유기성 폐기물로 부터 얻어지는 바이오가스를 연료로 하는 MCFC발전시스템이 설치 및 운영되고 있으며, 설치된 전체 MCFC발전시스템중 거의 40%가 바이오가스 연료로 운영되고 있다.

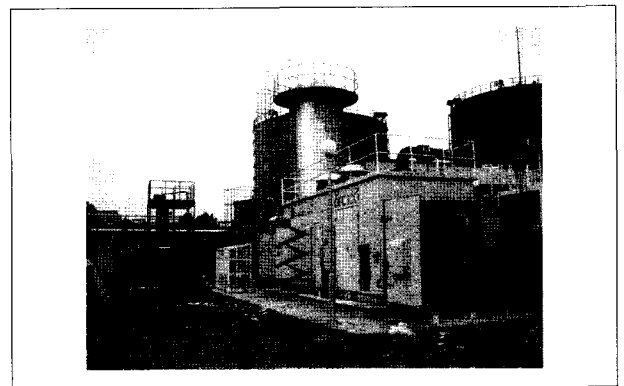


Fig. 4 MCFC power plant.

바이오가스는 장소와 시간에 따라 가스에 함유된 미량 불순물인 H₂S 및 실록산 함량이 달라지므로 실증연구동안 고유 모델의 바이오가스 정제공정을 개발하기도 하였다.^(17~19)

4. 연료전지 성능비교 및 경제성분석

4.1 연료전지의 성능비교

저온형 연료전지인 PEMFC와 PAFC에 대한 바이오가스 연료에 대한 연료전지 성능을 보고한 자료는 거의 찾아볼 수가 없어서 여기서는 고온형 연료전지인 MCFC와 SOFC로 한정하고자 한다.

바이오가스기반의 연료전지에 대한 많은 실증연구가 성공적이었지만, 다양한 바이오매스원으로 부터 발생하는 바이오가스를 효과적으로 연료전지의 연료가스로 사용하기 위해서는 극복해야 할 기술적인과제들이 많이 남아있다. 주요 문제점으로는 바이오매스원의 바이오가스로의 전환기술, 바이오가스 정제기술 및 연료전지의 연료가스 처리기술등이다. 이 중에서 연료전지의 성능에 큰 영향을 미치는 것은 연료가스 처리기술이다.

바이오가스의 연료개질방법인 SMR, POX에 따라서 연료전지의 성능인 셀 전압, 전류밀도 및 전기효율이 POX에 비해 SMR이 우수한 성능을 Table 2에서 보이고 있다.

연료가스 처리기술로는 SMR이 널리 적용되고 있지만, CH₄과 CO₂을 함유한 바이오가스 연료처리공정인 SMR에서 CO₂가 반응에 관여하는 건식개질공정(CO₂개질)에서 생성된 CO의 Boudouard반응으로 개질공정의 촉매에 카본부착 형성으

로 연료전지 성능에 영향을 끼치게 된다.⁽²⁰⁾ 카본부착을 억제하기 위하여 스팀과 건식개질공정을 결합한 바이오가스기반의 연료전지시스템이 보고되었다.⁽²¹⁾

R. Bove *et al.*은 이태리의 Ansaldo Fuel Cell사의 MCFC에 공급되는 연료를 ADG 및 NG로 다양화하여 연료전지 성능을 보고하였으며⁽²²⁾ 이를 Fig. 5에서 보여주고 있다.

연료전지에 공급되는 연료가스는 SMR를 거쳐 수소로의 메탄 전환율을 97%로 일정하게 하여 연료가스를 수소 및 기타 성분으로 개질하였다. 개질한 ADG의 성분은 39.17% H₂, 18.59% CO₂, 9.1% CO 및 H₂O이고, 개질한 NG의 성분은 54.92% H₂, 6.9% CO₂, 8.58% CO 및 H₂O이다. Fig. 4에서 연료전지 특성은 연료전지의 연료이용률에 따라 NG와 바이오가스인 ADG의 전압이 감소하고 있지만, 연료 이용률이 증가할수록 NG보다 ADG가 우수한 특성을 보여주고 있다.

J. Van herle *et al.*은 100kW급 SOFC의 연료가스로 하수처리장 혐기성 소화조에서 발생하는 ADG에 대한 연료전지의 특성을 보고하였는데⁽²³⁾ 바이오가스중 CO₂농도가 증가할수록 전압 및 전기효율이 증가함을 Fig. 6에서 보여주고 있다.

M.Ormerod *et al.*은 850°C에서 원통형 SOFC에 바이오가스중 메탄함량에 따른 연료전지 성능테스트 한 결과, Fig. 7에서 보는 와 같이 메탄함량이 증가함에 따라 SOFC전력이 꾸준히 증가하다가 메탄함량이 45%에서 최대의 전력을 발생하고, 그 후 메탄함량증가에 따라 전력이 감소하다가 70% 메탄함량에서 최소값의 전력을 보여주고 있다.⁽²⁴⁾

메탄함량이 45%에서 최대 출력을 보이는 것은 연료전지에서 바이오가스중 메탄이 CO₂와 반응하는 건식개질반응이 일어나 메탄의 수소 전환율을 증대시키기 때문이다.

Table 2. Fuel reforming of biogas⁽²⁰⁾

Parameter	SMR	POX
steam-to-carbon ratio	0.5	-
O ₂ -to-CH ₄ ratio	-	0.3
Cell voltage (V)	0.648	0.682
Current density (A/cm ²)	0.239	0.203
Gross electric power (kWel)	134.2	120.3
Net electric power (kWel)	131.1	115.65
Gross electric efficiency (%)	49.84	44.67
Net electric efficiency (%)	48.66	42.94

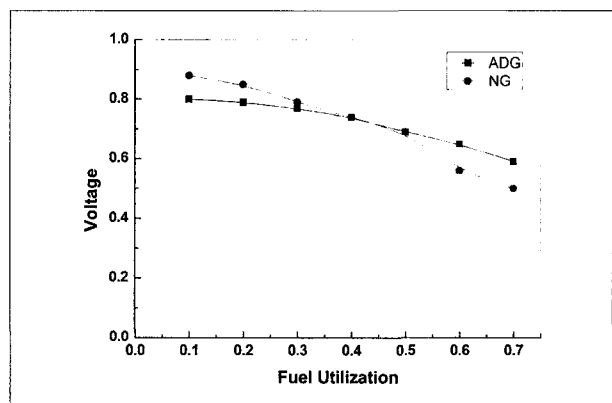


Fig. 5 Performance of Fuel cell⁽²²⁾.

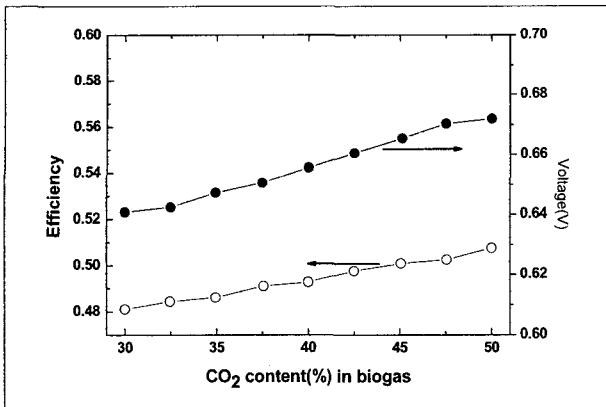


Fig. 6 SOFC performance of CO₂ content⁽²³⁾

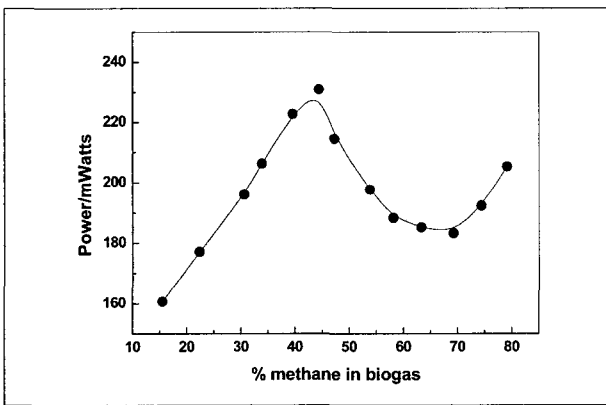


Fig. 7 SOFC Power of CH₄ content⁽²⁴⁾

4.2 경제성 분석

바이오가스를 연료로 사용하여 전기를 발생하는 PEMFC 발전시스템은 열효율이 38%이고 낮은 메탄의 수소 전환율을 보이는 연료처리공정이 매우 큰 장애요인이다. 그러므로 바이오가스를 연료로 공급하기 위해서는 효율적이고 신뢰성이 있는 PEMFC 발전시스템에 적합한 바이오가스 연료처리공정개발이 요구되고 있어서 PEMFC 발전시스템에 연료가스로 바이오가스를 공급하는 것은 적합하지 않다고 보고하고 있다.⁽²⁵⁾

PAFC 발전시스템은 ADG 나 LFG를 연료로 하여 10년 이상 연구되었지만 경제성분석에 대해 거의 보고되지 않았다. Hahn에 따르면⁽²⁶⁾ 오레곤 포틀랜드에 있는 하수처리장에 설치된 200kW PAFC 발전시스템의 초기투자비는 1.3백만달러이고, 발전된 전기 판매액은 연간 92,000달러로서 투자회수기간은 14-18년이라고 한다.

Buccarella *et al*에 의하면, ADG을 연료로 하는 MCFC 발전

시스템과 ICE 발전시스템의 경제성 분석에서 MCFC 발전시스템의 초기투자비가 ICE 발전시스템에 비해 1.3배 높지만 전체 운영비가 ICE 발전시스템이 1.4배 가량 높아 8년간 운영했을 때 MCFC 발전시스템의 열에너지와 전기에너지 판매액이 ICE 발전시스템에 비해 1.3배 가량 높은 것으로 평가하고 있다.⁽²⁷⁾

산업자원부의 지원 하에 2004년부터 3년간 MCFC 발전시스템 실증연구결과를 토대로 서울시정개발연구원의 2006년 보고서에 의하면 서울 탄천하수처리장의 ADG를 연료로 한 MCFC 발전시스템의 경제성분석에서 발전차액(234원/kWh)을 고려하였을 때 투자회수기간은 8.7년이고, 30%의 국고 보조시 투자회수기간은 5.9년이다.⁽²⁸⁾

SOFC은 아직까지 개발초기단계로서 대용량의 SOFC 개발이 이루어지고 있어 바이오가스 기반 SOFC 발전시스템의 경제성분석은 보고되지 않고 있다.

IEA에서는 PAFC 발전시스템이 중대규모 발전시스템의 선두주자이었던, 현재는 고효율이며 경제성이 좋은 MCFC와 SOFC 발전 시스템이 널리 보급될 것으로 전망하고 있다. 또한 2006년 현재 200-300kW급 MCFC와 SOFC가 가격이 kW당 12,000-15,000달러이지만, 대량생산과 기술개발로 MW급 연료전지는 kW당 1,500-1,600달러로 떨어져 향후 수년 내에 경쟁력 있는 분산전원장치로 전망하고 있다.⁽²⁹⁾

5. 결론

연료전지가 개발된 후 연료전지 발전은 주로 화석연료인 천연가스 기반의 연구가 수행되었지만, 천연가스 가격상승에 의한 연료가격부담 및 지구온난화 가스인 이산화탄소 저감을 위하여 다양한 연료를 사용하는 연료전지 발전시스템의 연구개발이 적극적으로 이루어지고 있다.

고온형 연료전지는 저온형 연료전지보다 효율이 높고 지속적인 연구개발로 수명이 증가함에 따라 차세대 발전시스템으로 입증되고 있다. 특히 바이오가스 연료기반의 고온형 연료전지 발전시스템은 유가상승에 따른 연료가격의 부담을 줄일 수 있어 경제성을 확보할 수 있고 환경을 고려한 에너지를 개발하는 3Es 패러다임에 적합한 발전시스템이다. 또한 재생에너지인 바이오가스와 신에너지인 연료전지의 융·복합화하는 새로운 개념의 에너지 이용 기술은 높은 잠재력을 가지게 될 것이다. 하지만 바이오가스를 연료로 사용하기 위해서는 가

격이 저렴하고 성능이 우수한 바이오가스 정제공정, 바이오가스에 적합한 연료개질기와 같은 단위부품개발 및 바이오가스기반의 연료전지 발전시스템 운전기술에 대한 국내고유 기술개발이 하루 빨리 이루어져야 할 것이다.

References

- [1] F. Barbir, Elsevier Academic Press (2005) 399-426.
- [2] M. Dresselhaus, G. Crabtree, M. Buchanan, Report on the Basic Energy Sciences Workshop on Hydrogen Production, Storage, and Use. Report prepared by Argonne National Laboratory under contract W-31-109-Eng-38.
- [3] R. Hirsch, CEP Magazine. November (2004).
- [4] J. Hykawy, Why Hydrogen Won't Work. National Post (2005), March 24.
- [5] U. Bossel, E. Baldur, T. Gordon, Cogeneration and Distributed Generation Journal, 18 (2003) 29-70.
- [6] H. J. Gilzen, Wat. Sci. Tech., 45 (2002) 321-328.
- [7] G. Marban, T. Valdes-Solis, Int. J. of Hydrogen Energy, 32 (2007) 1625-1637.
- [8] N. Meng, Y. C. Dennis, K. H. Michael, L. K. Sumathy, Fuel Processing Technology, 87 (2006) 461-472.
- [9] J. H. Reith, R. H. Wijffels, H. Barten, Dutch Biological Hydrogen Foundation (2003) 9-13.
- [10] 김남천, 유기영, 안중우, 김영준, 허관, 정연구, 배재근, 유기성자원학회지, 10 (2002) 7-23.
- [11] Q. Aidu, B. Peppleyb, K. Karan, Fuel Processing Technology, 88 (2007) 3-22.
- [12] EG & G Technical Services, Inc., Fuel Cell Handbook, Sixth Edition (2002).
- [13] N. Sammesa, R. Bovea, and K. Stahl, Current Opinion in Solid State and Materials Science, 8 (2004) 372-378.
- [14] F. Federici, Hydrogen and Fuel Cell Review Days 2007, Brussels 10th-11th October.
- [15] <http://www.biosofc.info/project.php>
- [16] www.press-n-relations.de/download/docs/CFC/CFC_PASM_Pliening_FINAL_GB.pdf
- [17] Greenhouse Gas Technology Center, EPA, Environmental Technology Verification Report (2004).
- [18] 이종규, 전재호, 박규호, 최두성, 박재영, 한국수소및신에너지학회 논문집, 18 (2007) 164-170.
- [19] S. Trogisch, J. Hoffmann, L. Daza Bertrand, J. Power Sources, 145 (2005) 632-638.
- [20] M.E.E. Abashar, Int'J. Hydrogen Energy, 29 (2004) 799-808.
- [21] I. R. Wheeldon, C. Caners and K. Karan, Proc BIOCAP, First National Conference, Ottawa, February 2005.
- [22] R. Bove and P. Lunghi, J. of Power Sources, 145 (2005) 588-593.
- [23] J. Van herle, F. Maréchal, S. Leuenberger, Y. Membrezb, O. Bucheli and D. Favrat, J. Power Sources, 131 (2004) 127-141.
- [24] M. Ormerod, Green Chemistry, Oct. (2001) G61-G63.
- [25] R. Schmersahl and V. Scholz, Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Vol. VII. Manuscript EE 05 002. September (2005).
- [26] W. Hahn, EPA Workshop; Analysis of Fuel Cell Applications Workshop Agenda, Cincinnati, Ohio June 26-27th (2001).
- [27] M. Buccarella, D. Caruso, A. Casalegno, E. Cerluini, V. Cigolotti, L. De Lorenzo, F. Lucia, F. Pavoni, 1st European Fuel cell technology & Applications conference, December 14-16, 2005, Rome, Italy
- [28] 조항문, 김근숙, 김상희, 서울시정개발연구원 (2006).
- [29] [leonardo-energy.org/drupal/files/essentials6-Fuel cells.pdf?download](http://leonardo-energy.org/drupal/files/essentials6-Fuel%20cells.pdf?download)

이종규



1991년 인하대학교 화학공학과 공학사
1994년 인하대학교 화학공학과 공학석사
2006년 고려대학교 화공생명공학과 공학박사

현재 포항산업과학연구원(RIST) 환경에너지연구본부 책임연구원
(E-mail : jglee@rist.re.kr)

전재호



1987년 서울대학교 금속공학과 공학사
1992년 포항공과대학교 재료·금속공학과 공학석사
2003년 포항공과대학교 신소재공학과 공학박사

현재 포항산업과학연구원(RIST) 연료전지연구단 책임연구원
(E-mail : jaeho@rist.re.kr)

이종연



1988년 인하대학교 환경공학과 공학사
2008년 부경대학교 지구환경공학과 공학석사

현재 환경관리공단 바이오매스팀 팀장
(E-mail : leejongy@emc.or.kr)