

연료전지의 이해와 바이오에너지의 적용방안

Fuel Cell and Bioenergy Application

홍 성 구*
Hong, Seong Gu

1. 서론

연료전지는 물의 전기분해의 역반응에 기초하는 단순한 원리에 그 기초를 두고 있다. 1839년 William Grove가 간단한 장치를 이용하여 실험 장치를 소개한 이래로 지속적인 연구와 실용화 노력을 통해 연료전지는 화석에너지를 대체할 수 있는 에너지시스템 중의 하나로 평가되고 있다(Larminie and Dicks, 2003). 연료전지에서 일어나는 전기분해의 역반응에서는 연료로서 수소가 이용되고, 공기 중의 산소와 반응하여 전기와 물이 얻어진다. 기존의 화석연료와는 달리 오염물질을 전혀 유발하지 않는다. 이와 같은 장점 때문에 세계 각국에서는 시장 선점을 위하여 연료전지의 요소기술 개발 및 상용화 노력에 매진하고 있다. 국내에서도 수소와 연료전지의 중요성을 절감하여 정부는 차세대 성장동력의 하나로 결정하였으며, 2004년 1월 수소·연료전지 사업단을 출범시킨 바 있다.

본 글에서는 연료전지에 대한 기본적인 원리와 종류별 특성을 소개하고, 지금까지의 기술개발 및 보급 현황에 대해서 기술하고자 한다.

또한 연료전지를 가동하는데 필요한 연료 조건에 대해 살펴보고 농업 및 농업관련 분야에서 생산이 가능한 바이오가스와 목탄가스와 같은 바이오에너지의 연료전지에 적용 가능성을 간단히 소개하고자 한다.

2. 연료전지의 원리

그림 1은 물의 전기분해와 그 역반응에 대한 개념도를 나타낸 것이다. 그림 1 a)에서는 물을 전기분해하는 경우 수소와 산소가 발생하는 것을 나타내고 있다. 전기분해의 역반응으로서 그림 1 b)에서는 수소와 산소가 소모되면서 아주 약한 전류가 흐르는 것을 보이고 있다. 이러한 원리에 기초하여 연료전지와 같은 전기 공급을 위한 장치로 만들기 위해서는 충분한 전류가 흐를 수 있도록 하여야 한다. 연료전지는 전류발생량을 높이기 위하여 전해질과 전극이 접촉하고 있는 경계면을 극대화하고 전류 흐름에 저항이 최소화 될 수 있도록 전해질 내 전극간 거리를 최소화한 장치라고 이해할 수 있다.

수소와 산소의 결합은 다음과 같은 반응식으로 표현된다.

*한경대학교 지역자원시스템공학과 (seonggu@hankyong.ac.kr)

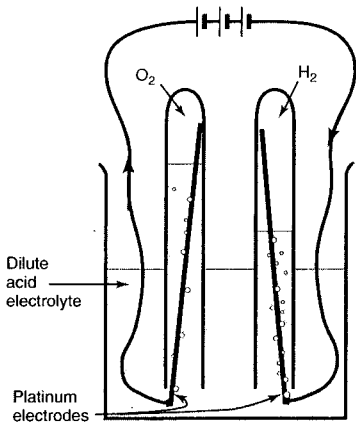


그림 1. a) 전류 흐름에 의한 물의 전기분해

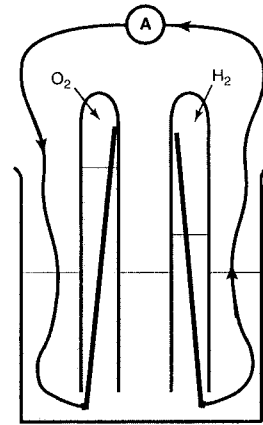
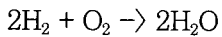


그림 1. b) 수소와 산소의 결합에 의한 전류흐름



일반적인 연소반응에서는 급격한 열을 발산하게 되나, 연료전지 내에서는 전기가 생산되는 전기화학적 반응이 일어나게 된다. 전자는 전해질 내에서 이동하게 되며, 전해질은 산 또는 알칼리 모두가 가능하다. 연료극인 양극에서는 수소가 전자를 방출하고 수소 이온으로 변하며, 산 전해질을 통해서 수소이온은 음극으로 이동하여 산소와 결합하여 물이 생성된다. 전자는 회로계통을 통해서 음극으로 이동하며 이로 인하여 전류가 발생하게 된다. 그림 2는 산 전해질을 이용하는 경우 반응을 나타내고 있다. 연료전지에서 양극과 음극에 대해 혼동하는 경우가 있으나 산화되는 전극을 양극으로 이해할 수 있다.

반면에 그림 3에서와 같이 알칼리를 전해질로 이용하는 경우에는 기본적인 원리가 그림 2와 유사하나 전극에서의 반응이 다르다. 알칼리 전해질 연료전지에서는 산소와 물이 반응하여 생성된 수산화이온(OH⁻)이 음극에서 이동하고

양극에서는 수소와 수산화이온이 반응하여 물이 생성되면서 전자가 방출된다.

연료전지에서의 반응을 촉진시키기 위해서는 일반적인 화학적 반응에서와 마찬가지로 촉매를 이용하거나 반응온도를 높이는 방법을 적용할 수 있으며, 전극의 면적을 증대시키는 것이 바람직하다. 전극면적을 증대시키는 방법은 연료전지 개발과 제작에 있어서 독특하고 대단히 중요한 부분이다. 이 때문에 연료전지의 성능을 나타낼 때 단위면적(cm²)당 전류를 이용하고 있다.

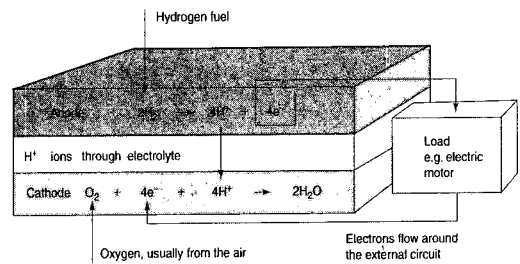


그림 2. 전해질이 산인 경우 연료전지의 작동 원리

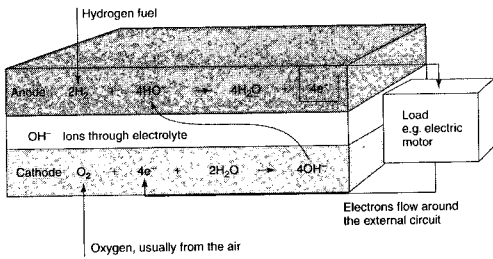


그림 3. 전해질이 알칼리인 경우 연료전지의 작동원리

3. 연료전지의 종류

연료전지의 재료와 제작과 관련된 내용 이외에 연료전지의 실용화를 위해 생각해야 할 또 다른 중요한 문제는 반응속도와 연료로 이용되는 수소의 공급이다. 이 문제를 해결하기 위하여 다양한 연료전지가 개발되었다고 볼 수 있으며, 지금까지 개발된 주요 연료전지의 종류별 특성은 표 1에 나타난 바와 같다.

알칼리형 연료전지는 수산화칼륨 등과 같은 알칼리를 전해질로 이용한다. 순수 수소와 산소를 연료와 산화제로 각각 이용한다. 연료에 이산화탄소가 포함되어 있는 경우 문제가 되므로 이를 경제적으로 제거하는 것이 필요하다.

고분자 전해질형 연료전지는 고체 고분자 중합체를 전해질로 이용하는 특징을 가지고 있다. 인산형 연료전지에 비해 뒤늦게 시작되었지만 출력밀도가 커서 소형화가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 고분자 전해질형 연료전지에서 사용되는 백금 촉매는 연료 중의 일산화탄소에 의한 부식이 발생하므로 일산화탄소 농도를 1,000ppm 이하로 유지하여야 한다.

직접 메탄올전지는 메탄올을 직접 전기화학반응시켜 발전하는 시스템이다. 연료 개질과정이 필요 없이 메탄올을 직접 이용할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 직접 메탄올 연료전지의 용량은 매우 작은 단점이 있으나 비교적 오랜 시간 작동이 가능하여 최근 소형 전자제품에 적용할 수 있는 종류로 각광을 받고 있다.

인산형 전지는 연료전지 가운데 가장 먼저 상용화되었으며, 널리 이용되고 있는 종류 중의 하나이다. 비교적 높은 온도에서 작동하며 연료 개질에 따른 비용이 문제가 될 수 있으나, 구조가 간단하고 특별한 유지관리가 필요 없다는 장점을 가지고 있다.

탄화수소를 직접 전기로 변환할 수 있다는 장점을 가지는 고체산화물형 연료전지는 600~1,000℃의 온도에서 작동한다. 따라서

표 1. 연료전지 종류별 특성 및 적용사례

종류	작동온도 (°C)	유동이온	적용 사례
알칼리형(AFC)	50-200	OH ⁻	우주선 (Appolo), 우주왕복선
고분자전해질형 (PEMFC)	30-100	H ⁺	자동차, 소형 열병합시스템
직접메탄올(DMFC)	20-90	H ⁺	저용량 휴대용 전원
인산형(PAFC)	~220	H ⁺	200kW 규모의 열병합시스템이 다수 가동 중
용융탄산염형(MCFC)	~650	CO ₃ ²⁻	중대규모 열병합시스템으로 MW 규모까지 가능
고체산화물형(SOFC)	500-1000	O ²⁻	다양한 규모의 열병합시스템에 적용가능

고가의 촉매를 사용할 필요가 없으며, 천연가스 등을 소위 내부 개질과정에 의해서 적용할 수 있다. 고온에서 작동하는 이유로 여러 가지 장점이 있으나 세라믹 재료를 이용해야 하므로 제작에 어려운 문제점을 가지고 있다.

고온에서 작동하는 또 다른 형태의 연료전지는 용융탄산염형 연료전지로서 이산화탄소를 이용하는 특징을 가지고 있다. 고온에서 작동하기 때문에 반응속도가 높고 고체 산화물형 연료전지와 마찬가지로 별도의 연료개질기 없이도 천연가스나 석탄가스를 직접 이용할 수 있다. 용융탄산염형 연료전지의 전해질은 탄산나트륨, 리튬, 칼륨 등의 혼합물로 부식성이 강하며 정상운전되는 동안 전해질이 증발되거나 결빙되어 수명에 영향을 미치는 단점이 있다.

4. 연료전지 시장 현황 - 고정설비형 중심으로

발전이나 열병합시스템과 같이 고정설비 형태로 2003년 말 현재 가동 중인 연료전지시스템은 약 650여개에 이른다(Cropper, 2003). 가장 규모가 큰 연료전지시스템은 일본에서 1991년부터 가동된 11MW 규모의 인산형 연료전지이다. 고정설비형 연료전지의 설치 건수는 1970년대 이후로 지속적으로 증가하고 있다. 2002년까지 인산형 연료전지의 보급 대수가 절대적으로 우위를 차지하고 있었으나 점차 용융탄산염형, 고분자전해질형, 그리고 고체산화물형 등 다양한 종류의 연료전지 보급이 확대되고 있다. 특히 용융탄산염형과 고체산화물형 연료전지는 작동온도가 높기 때문에 가스터빈이나 열병합시스템으로 이용될 수 있다는 장점 뿐만 아니라 효율이 높아서 더욱 주목을 받고 있다.

최근 연료전지의 보급과 관련하여 적용 연료 또한 다양해지고 있다. 물론 아직까지 천연가스가 절대 우위를 차지하고 있으나 점진적으로

바이오가스와 같은 대체연료의 적용이 시도되고 있다. 바이오가스는 음식물 쓰레기나 폐수처리 공정에서 얻어지는 부산물로서 메탄이 주성분이다. 실제로 일본 고오베에서는 100kW의 인산형 연료전지 가동에 혐기성 소화공정에서 발생된 바이오가스를 이용하고 있다. 목재를 열화학적으로 분해 또는 부분 산화시켜 얻어지는 소위 목탄가스 또한 연료전지의 연료로서 주목을 받고 있다. 예를 들어 미국 뉴욕주립대에서는 목재 가스화와 연계한 용융탄산염형 연료전지 설치를 추진하고 있다.

현재 가동 중인 연료전지의 대부분은 미국, 유럽, 일본 등의 일부 국가에 집중적으로 설치·가동되고 있는 실정이다. 또한 소수의 제작사가 전 세계 연료전지 공급을 담당하고 있다. 미국의 UTC와 Fuel cell energy, 일본의 Fuji 전기, 독일의 MTU, Siemens Westinghouse 가 대표적인 연료전지 공급사들이다.

연료전지의 상업화에는 내구성과 가격경쟁력이 중요한 요소이다. 현재 인산형 연료전지는 미화 \$4,500/kW, 1세대 용융탄산염 연료전지는 \$10,000/kW 수준이다. 연료전지가 상용화되어 보급되기 위해서는 \$1,500/kW 수준으로 낮아져야 한다. 그 동안은 정부의 보조 또는 지원 등에 의해서만 설치가 가능할 것으로 판단된다.

5. 바이오에너지의 적용가능성

앞에서 언급한 바와 같이 고온에서 작동되는 용융탄산염형이나 고체산화물 연료전지의 경우는 고분자전해질형이나 알칼리형 또는 인산형 전지와는 달리 일산화탄소가 문제가 되지 않고 오히려 연료로 활용할 수 있다. 따라서 유기성 폐기물을 혐기성 소화하는 공정에서 발생하는 바이오가스나 목질계 연료를 가스화하여 얻어지는 목탄가스는 이러한 유형의 연료전지에서 활용이 가능하다.

바이오가스의 조성은 일반적으로 60% 내외의 메탄과 38% 정도의 이산화탄소로 구성되어 있으며, 저위발열량은 약 21.5 MJ/Nm^3 이다. 산소가 부족한 상태에서 목질계 유기물을 연소하는 경우 얻어지는 소위 합성가스(목탄가스)는 CO가 30~40%, 수소가 5% 내외로 발열량은 약 5 MJ/Nm^3 이다.

이들 바이오에너지가 연료전지에 적용되기 위해서는 연료의 정제와 연료전지 설비의 적정한 가격이라는 두가지 조건이 만족되어야 한다. 바이오가스를 연료전지에 기초한 열병합시스템에 적용하는 것은 이론적으로 가능하나 내연기관을 이용한 열병합시스템에 비해 현재로서는 경제성이 없다(Scott and Minott, 2003). 그러나 소음, 온실가스 배출량 저감 등의 다양한 장점을 갖고 있기 때문에 연료전지의 설비가격이 적정선 이하로 낮아진다면 상당히 매력있는 시스템이 될 것으로 예측되고 있다. 또한 바이오가스 중에는 황화수소(H_2S)가 포함되어 있기 때문에 이를 제거하여야 한다. 실제 고온형 연료전지에서는 이들 황화수소가 문제가 되기 때문에 제거되어야 한다. 전통적인 탈황공정 뿐만 아니라 비교적 최근에 개발된 아연산화물을 이용한 탈황공정 등을 활용하면 문제가 되지 않는 수준 이하로 낮추는 것이 가능하다.

한편 바이오매스를 가스화하여 얻어지는 합성 가스는 기본적으로 CO와 H_2 등의 가연성분으로 구성되어 석탄가스와 유사한 조성을 가지고 있기 때문에 고온형 연료전지에서 충분한 활용이 가능하다. 또한 이러한 합성가스 중에는 연료전지에 유해한 황화수소가 거의 없고 연료로 이용되는 수소와 일산화탄소가 주성분이므로 가스 중에 포함되어 있는 분진이나 타르 등을 제거한다면 연료전지에 쉽게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 맺는말

차세대 에너지로 기대되고 있는 수소-연료전지는 오염물질을 유발하지 않고, 내연기관에 비해서 발전효율이 상대적으로 높은 특징을 가지고 있다. 연료전지의 원리와 지금까지 개발 또는 가동되고 있는 연료전지의 종류와 특성을 살펴보고, 농업관련 분야에서 생산이 가능한 바이오가스와 합성가스의 적용성을 간략히 살펴보았다.

현재까지는 연료전지 가격이 비싸기 때문에 내연기관 등을 이용한 발전 또는 열병합시스템에 비해 경쟁력이 떨어지나, 앞으로 기술개발 및 대량생산 등에 의해서 단위 용량당 연료전지 가격이 일정 수준이하로 낮아진다면 적용성이 충분히 있을 것으로 전망된다. 특히 유기성 폐기물을 처리하는 과정에서 얻어지는 바이오에너지를 연료전지에 활용할 경우 환경개선과 아울러 청정 에너지 생산이라는 두 가지의 효과를 동시에 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 음식물쓰레기나 축산분뇨의 처분, 그리고 주변 환경에 방치되는 목질계 부산물 등을 효율적으로 관리함과 동시에 이들을 활용한 에너지활용 체계는 농업 및 농촌지역의 새로운 형태의 생산기반 시설이 될 것으로 예측된다.

참고문헌

1. Cropper, M. 2003. Fuel Cell Market Survey: Large Stationary Applications, Fuel Cell Today (<http://www.fuelcelltoday.com>).
2. Larminie, J. and A. Dicks, 2003. Fuel Cell Systems Explained 2nd Ed. John Wiley and Sons Ltd.
3. Scott, N. R. and S. Minott, 2003. Feasibility of Fuel Cells for Energy Conversion on the Dairy Farm. The New York State Energy Research and Development Authority.