

# 未來의 高效率, 無公害 發電裝置 — 燃料電池

洪 性 安

〈韓國科學技術研究院 에너지·反應工程研究室長·化工博〉

연료전지는 전기화학 반응에 의하여 연료가 갖고 있는 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 발전장치이다.

따라서 원리상 열기관이 갖는 열역학적인 제한(Carnot 효율)을 받지 않기 때문에 기존의 발전장치보다 발전효율이 높고 무공해, 무소음으로 환경 문제가 거의 없으며 다양한 용량으로 제작이 가능하고 전력 수요지내에 설치가 용이하여 송변전 설비를 절감할 수 있는 등 전력계통의 운영측면에서도 기대가 큰 첨단기술이다.

연료전지의 개발은 처음에는 우주선이나 군사용의 목적으로 시작되었으나 70년대 초의 오일 파동 이후 본격적으로 민수용 개발이 진행되어 오고 있다.

알칼리 연료전지는 1965년 미국의 아폴로 우주계획에서 제미니 3호의 전원으로 채택되어 최초로 실용화되었고 현재 인산 연료전지는 민수용 발전용으로 그 실용화를 목전에 두고 있는 실정이다.

## 연료전지 발전시스템 구성

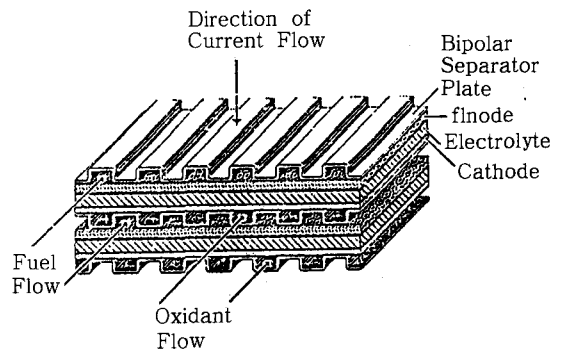
연료전지 발전시스템은 전기를 생산하는 연료전지 본체(Fuel Cell Stack)와 연료인 LNG, 석탄가스, 메탄올 등을 수소로 개질하여 수소가 많은 연료가스로 만드는 개질기(Reformer), 발전된 직류 전기를 교류로 변환시키는 직교류변환기(Inverter) 및 제어장치 그리고 배열이용시스템 등으로 구성되

어 있다.

연료전지 본체는 적층된 수백장의 Cell들로 구성되어 있으며 연료와 공기 등의 반응가스가 각 Cell로 공급되도록 설계되어 있다.

기본적으로 각 Cell은 전해질을 함유하고 있는 전해질판(Electrolyte Matrix)에 의하여 분리된 연료극(Anode), 공기극(Cathode)의 두 전극으로 구성되었고 각 Cell은 분리판(Separator)에 의하여 분리되어 있다(〈그림-1〉참조).

연료전지에 공급되는 반응가스를 공급하는 장치인 연료개질장치는 사용되는 연료 특성에 따라 개발되고 있으며 연료전지의 저전압, 고전류 특성에 맞는 직교류 변환장치 및 고온의 배열을 이용하여 열 효율을 향상시키는 배열이용시스템 등이 연료전지 발전시스템의 개발에 필요한 주요 기술들이다.



〈그림-1〉 연료전지 Stack 구성도

## 연료전지 종류

연료전지는 전해질의 종류 및 동작온도에 따라 분류되는데 인산 연료전지, 용융탄산염 연료전지, 고체산화물 연료전지는 민수용 전력 대체용으로 개발되고 있으며 알칼리 연료전지 및 고분자전해질 연료전지는 단위 무게당 에너지 출력이 커서 수송용, 군사용, 우주선 등의 특수용으로 개발되고 있다.

각 연료전지의 특징은 <表-1>에 요약하였다.

### 1) 인산 연료전지

인산 연료전지는 SiC Matrix로 지지되는 진한 인산을 전해질로 사용하며 200°C 정도에서 작동한다.

전극은 탄소와 Teflon 혼합체로 된 다공성 구조위에 50Å 정도 크기의 백금 알갱이들을 입혀 사용한다. 연료로는 천연가스 또는 납사에서 개질된 수소를 사용하며 발전효율은 35~40%이다.

전해질로 사용되는 진한 인산의 전기전도도가 낮은 점, 연료중 불순물에 존재하는 CO 및 H<sub>2</sub>S 등에 의한 전극 촉매의 비활성화 등이 이 연료전지의 문제점으로 지적되고 있다.

그러나 인산 연료전지는 어느 연료전지보다 기술 개발이 앞서 있으며 일본에서는 현재 11MW 규모의 실증실험을 수행중에 있고 미국, 일본을 중심으로 곧 사용화될 전망이어서 제1세대 연료전지라 불리기도 한다.

### 2) 용융탄산염 연료전지

용융탄산염 연료전지는 LiAlO<sub>2</sub> Matrix로 지지되는 용융탄산염을 전해질로 하여 650°C 정도에서 작동한다. 고온의 작동조건으로 전극에서 전기화학 반응속도가 빨라 백금 등의 비싼 촉매가 필요없이 Ni, NiO가 전극으로 사용된다.

용융탄산염 연료전지는 양질의 폐열을 얻을 수 있어 열병합발전으로 시스템의 효율을 증가시킬 수 있으며, 연료로는 수소 이외에 CO 가스가 사용가

연료전지 종류

<表-1>

	인 산	용융탄산염	고 체 산 화 물	알 칼 리	고 분 자
전 해 질	진한인산	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub> -Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 또는 ZrO <sub>2</sub> -CaO	KOH 용액	sulfonated Huorocarbon acidic ion exchange membrane
전 해 질 관	SiC	LiAlO <sub>2</sub>	고체전해질	Asbestos	고체전해질
전 극	Pt	Ni, NiO+	NiO-ZrO <sub>3</sub> - La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SrO, MnO <sub>3</sub>	Pt, Pt-Au 합금	Pt
연 료	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> -CO	H <sub>2</sub> -CO	H <sub>2</sub> (고순도)	H <sub>2</sub>
산 화 가 스	공기	공기+CO <sub>2</sub>	공기	O <sub>2</sub> (고순도)	O <sub>2</sub>
조업온도 (°C)	160~190	650	800~1,100	82~104	82
전지전압 (V)	<0.8	<0.85	<0.9	<0.97	<0.95
불순물허용치	<2,000ppm CO <1ppm H <sub>2</sub> S	No H <sub>2</sub> S	미결정	No CO, No Co <sub>2</sub>	<2,000ppm CO <1ppm H <sub>2</sub> S
개 발 단 계	1세대 연료전지	2세대 연료전지	3세대 연료전지	Apollo 우주선	Gemini 우주선
연 료 극 반 응	H <sub>2</sub> →2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> +CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> → H <sub>2</sub> O+CO <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> +O <sup>2-</sup> →H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup> CO+O <sup>2-</sup> →CO <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> +2OH <sup>-</sup> → 2H <sub>2</sub> O+2e <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> →2H <sup>+</sup> +2e <sup>-</sup>
공 기 극 반 응	2H <sup>+</sup> +1/2O <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> →H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub> +1/2O <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup> →CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	1/2O <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup> →O <sup>2-</sup>	H <sub>2</sub> O+1/2O <sub>2</sub> + 2e <sup>-</sup> →2OH <sup>-</sup>	2H <sup>+</sup> +1/2O <sub>2</sub> +2e <sup>-</sup> →H <sub>2</sub> O

능하여 석탄가스화 장치와 조합하여 대규모 발전시스템을 구성할 수 있다.

또한 고온 운전시 발생하는 열을 이용하여 천연 가스를 전지내부에서 개질하여 수소와 일산화탄소를 연료로 이용하는 내부개질방법이 가능하여 연료의 전처리 공정을 단순화하는 장점도 있다.

그러나 고온의 용융탄산염 분위기에서 구성재료의 부식문제가 있어 내식성 재료의 개발이 필요하며, 전해질인 탄산염은 상온에서 고체이고 연료전지 작동온도에서는 액체이므로 전지의 운전 중단 및 재작동시 열 사이클에 의한 체적변화에도 성능변화가 없는 내구성 재료 및 전지구성 요소개발이 필요하다.

인산 연료전지가 상용화 단계를 목전에 두고 있는데 비하여 용융탄산염 연료전지는 100kW급 Stack의 성능을 실험하는 수준이며 향후 5년쯤 상용화 규모의 Stack이 구성될 전망이다.

### 3) 고체산화물 연료전지

고체산화물 연료전지는  $ZrO_2$ 의 고체산화물을 전해질로 사용하기 때문에 액체 전해질 때문에 생기는 제반문제를 피할 수 있고 작동온도가 1,000°C로 높아 고온작동으로 용융탄산염 연료전지가 갖고 있는 모든 장점을 갖고 있다.

반면 고체산화물 연료전지는 높은 온도에서 내열성, 내구성, 내전도성을 가진 고온 재료의 개발이 필수적이며 이러한 재료의 개발 및 선정이 주요 연구대상이 되고 있다.

미국의 Westing House사에서 처음으로 원통형 형태의 연료전지 Stack이 개발되었으나, 원통형 형태의 연료전지는 제작비가 비싼 단점이 있어 일본이나 유럽에서는 평판형 고체산화물 연료전지를 개발하고 있다.

이 연료전지의 상용화 시기는 용융탄산염 연료전지보다 늦은 21세기에 가능하리라 평가되어 제3세대 연료전지라 불린다.

### 4) 알칼리 연료전지

알칼리성 수용액을 전해질로 사용하는 전지로서 연료가스 및 산화제조는 순수한 수소, 산소가 필요하다. 다른 연료전지에 비하여 높은 효율을 기대할

수 있어 저온에서 기전이 가능하다. 이러한 특징 때문에 우주선 및 잠수함 등의 특수한 분야에서 주로 이용되었다. 전극으로 백금 또는 Au/Pt 합금 환원 전극이 이용된다. 그러나 개질 반응시켜 얻은 수소연료를 사용하려 할 때는  $CO_2$ 를 사전 제거해야 하는 단점이 있다.

### 5) 고체고분자 연료전지

고체고분자 연료전지는 우주선용으로 개발되어 실용화되었으나 전해질로 사용되는 고분자 즉 이온 교환 수지의 높은 비용, 백금 사용량의 과다, 일산화탄소의 낮은 저항 및 조업온도가 낮은 점 등이 문제점으로 지적되고 있다. 우주선외에 해저작업선 전원이나 전기자동차 등에 응용하기 위해서는 전도성 및 안정성이 우수한 새로운 전해질개발이 우선되어야 할 것이다.

또한 백금 대신 사용될 수 있는 비귀금속 촉매개발 및 전극구조의 최적화 연구도 필요하다. 그러나 작금의 환경문제 심각성과 전기자동차 개발과 함께 고분자 전해질 연료전지의 개발도 활발히 진행되고 있다.

## 연료전지 개발현황 및 목표

미국에서는 1962년 제미니계획에 의하여 우주 및 군사용으로 알칼리 연료전지 연구를 시작하였으며 1967년 28개 가스회사가 중심이 된 TARGET 프로그램에 의하여 민수용 연료전지 개발이 본격화되었다.

현재 연료전지 개발연구는 에너지성(DOE), 전력회사(EPRI), 가스회사(GRI)를 중심으로 진행하고 있으며 우주 및 군사용 연료전지 개발은 국립항공우주국(NASA), 국방성(DOE)을 중심으로 개발되고 있다.

일본에서의 연료전지 개발은 1981년 통상산업성(MITI) 산하의 공업기술원 주도로 시작된 Moonlight 계획으로 본격화되었다.

정부 주도하의 Moonlight 계획에 의한 연료전지 자체 기술개발과 병행하여 민간기업에서는 미국 시제품의 도입 및 운전을 통한 기술축적을 추진하였다. 인산 연료전지의 경우 현재 상용화를 앞두고

연료전지 발전기술 개발사업의 단계별 최종 목표

(HAN 프로젝트)

〈表-2〉

연료전지	1단계(1992~1996) 목표	2단계(1997~2001) 목표
인산 연료전지	1) 50kW stack 및 시스템 구성 1,000시간 이상 운전 2) 50~200kW 시스템 도입, 실증시험	1) 현지설치형 50kW 시스템 실용화 2) 200kW급 시스템 구성 및 운전 3) MW급 시스템 도입 및 실증시험
용융탄산염 연료전지	2kW stack 구성 및 운전 (외부 및 내부 개질형)	1) 외부 개질형 100kW 시스템 구성 및 운전 2) 내부 개질형 20kW 시스템 구성 및 운전
고체산화물 연료전지	100W급 stack 구성 및 운전	2kW stack 구성 및 운전
고분자 연료전지	250W급 stack 구성 및 운전	2kW stack 구성 및 운전

MW급 발전시스템을 실증 시험단계이며, 용융탄산염 연료전지는 100kW급 Stack 개발 및 소규모 Plant 실증 시험단계 그리고 고체산화물 연료전지는 소규모 Stack 개발단계이다.

국내에서도 연료전지 기술개발의 중요성을 인식하여 한전기술연구원의 연료전지 중장기사업, 과기처 특정연구사업, 동자부 대체에너지 개발사업의 일환으로 소규모 Stack 개발을 추진중에 있으나 국내기술은 아직은 초보단계이고 선진 기술에 비하여 10년 이상 개발면에 뒤져 있는 상황이다.

이러한 관점에서 정부는 우리나라 과학기술 수준을 2000년대에 선진 7개국 수준으로 끌어 올리기 위한 “21세기 선도기술 개발사업(HAN 프로젝트)” 중에 “신에너지의 기술개발”을 포함시켜 연료전지의 향후 10년간 추진될 중·장기 연구개발계획을 수립하고 연구개발사업에 관련된 주요사항을 제시하였다.

범국가적으로 수행될 HAN 프로젝트의 연료전지 발전기술 개발사업의 단계별 최종 목표는 〈表-2〉와 같다.

인산 연료전지 개발의 경우 국내에서는 대체에너지 개발사업의 일부로 연료전지 본체를 포함한 주변 기술개발을 범국가적으로 이미 추진하고 있어 어느 정도의 기본기술이 확보되어 있으며 외국에서는 MW급 분산형 전원 및 수백 kW급 현지설치형으로 개발, 실용화단계에 이르렀으나 경제적인 이유로 본격적인 실용화가 지연되고 있음을 고려하여, 2001년까지의 개발 방침을 상용화를 위한 실용화

기기의 제작에 두고 50kW급 현지설치형 실용화 및 200kW급 분산형 개발을 위한 기반기술 확립을 최종 목표로 하고 있다.

용융탄산염 연료전지 및 고체산화물 연료전지는 기존의 화력발전 대체용으로 개발방향을 설정하였고 대형 발전시스템을 위한 기반기술의 확보에 중점을 두고 있다.

이 연료전지는 개발의 시작단계인 국내사정을 고려할 때 가능한 국제협력을 통한 기술제휴 및 기본기술 도입을 적극 추진하되 아직 상용화되지 않아 기술도입이 어려움을 고려할 때 자체 기술개발에 의한 국제경쟁력 배양을 목표로 기술개발을 추진하며, Stack 개발은 선진기술의 초기 추적을 목표로 하고, 실용화 문제점 해결기술은 국내자체개발을 목표로 하고 있다. 고체고분자 연료전지도 버스 등의 수송수단용으로 기술개발을 추진하되 Stack 개발은 선진기술의 초기 추적을 목표로 하고 있다.

결론적으로 연료전지는 고효율, 무공해 신발전장치로 2000년대 이후 본격적인 실용화가 예상되는 첨단기술 분야이다.

급속한 경제발전과 국민생활 향상에 따라 전기에너지 사용량이 급증하여 시설투자가 저렴한 고효율, 무공해 발전기술이 요구되고 있어 이에 부합되는 연료전지 발전시스템의 개발은 필수적이다.

선진 외국의 기술수준에 비하여 낙후된 우리의 기술수준을 최단시간내 향상시키기 위해서 막대한 개발투자비의 정부지원이 어느때보다 요구되고 있다.