

# 수소 연료전지 시대로의 발전 방향



글 | **심재홍** | 한국남부발전 미래성장동력실 과장 || 전화 : 070-7713-8322 || E-mail : sim@kospo.co.kr

## 1. 머리말

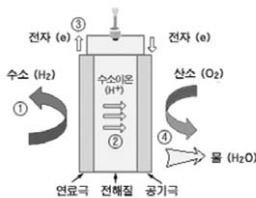
연료전지는 수소에너지로부터 전기에너지를 발생시키는 미래의 환경친화적 에너지 시스템이다. 신재생에너지의 하나로 분류된 연료전지는 수소와 산소의 화학반응으로 생기는 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 기술이다. 온실가스 배출이 전혀 없는 무공해 에너지원으로 주목 받고 있는 연료전지의 원리, 종류, 개발 현황 등을 소개한다.

## 2. 연료전지의 원리

연료전지는 연료가 가지고 있는 화학적 에너지를 전기에너지로 전환하는 발전 장치로 효율이 뛰어나며 공해물질의 배출도 거의 없다.



아래 그림과 같이 연료극과 공기극의 두 전극에 연료인 수소(H<sub>2</sub>)와 산소(O<sub>2</sub>)를 공급해 주면 수소와 산소는 각각 이온화 하며 전기 회로에는 전자(e)의 흐름이 생겨 전기에너지를 발생하고 수소와 산소 이온은 결합하여 물을 생성한다. 이는 물의 전기분해 역반응과 같다.



연료극에서 수소는 수소이온(H<sup>+</sup>)과 전자(e)로 분해되고, 수소이온은 전해질을 거쳐 공기극으로 이동한다. 전자는 외부회로를 이동하면서 전류를 발생하고, 공기극에서는 수소이온(H<sup>+</sup>)과 전자와 결합한 산소이온(O<sup>2-</sup>)가 결합하여 물이 된다.

## 3. 연료전지의 분류

연료전지는 기본적으로 사용되는 전해질의 종류에 따라 고분자 전해질 연료전지(PEFC), 알칼리성 연료전지(AFC), 인산 연료전지(PAFC), 용융탄산염 연료전지(MCFC), 고체산화물 연료전지(SOFC) 등으로 나눌 수 있으며, 수소의 개질 방법에 따라 외부 개질형과 내부 개질형으로 나눌 수 있다. 또한, 그 규모나 용도에 따라 대규모 발전용, 수송용, 휴대용 등으로 나눌 수 있으며, 온도에 따라 고온형과 저온형으로 구분하기도 한다. 여기서는 전해질의 종류와 수소의 개질 방법에 의한 분류를 살펴본다.

### 3-1. 전해질의 종류에 따른 분류

전해질의 종류는 연료전지에서 일어나는 화학반응의 종류, 요구되는 촉매의 종류, 연료전지가 동작할 온도범위, 연료의 요구사항 및 기타 요소들에 따라 다르다. 대체로, 전해질의 선택은 연료전지의 적용 온도범위에 따라 정해진다. 연료전지의 적용온도 및 수명에 대해서는 전지의 구성요소들(즉, 전극, 전해질, 상호연결기, 집전장치 등)에 사용된 물질들의 물리화학적 특성과 열 및 기계적인 특성에 따라 달라질 수 있다.

수성의 전해질들은 약 200℃ 이하로 제한되는데, 온도가 높아지면 증기압이 높아져 그 성질이 급격히 나빠지기 때문이다. 온도는 연료처리의 정도를 어떻게 할 것인가에도 영향을 미친다. 저온 연료전지에서는 연료가 연료전지에 들어가기 전에 개질되어 수소를 분

리하여야 한다. 또한 저온 연료전지에서의 양극촉매(주로 백금)는 일산화탄소(CO)에 아주 약하다. 고온 연료전지에서는, 일산화탄소(CO)와 메탄가스(CH<sub>4</sub>)가 직접 이온으로 변환되거나 전기화학적으로 산화될 수도 있다.

다음 표는 전해질에 따라 분류한 연료전지의 특성을 살펴본 것이다.

	PAFC	MCFC	SOFC	PEMFC	DMFC	AFC
전해질	인산	탄산리튬/ 탄산칼륨	지르코 니아	수소이온 교환막	수소이온 교환막	수산화 칼륨
이온 전도체	수소 이온	탄산 이온	산소 이온	수소 이온	수소 이온	수소 이온
작동 온도 (°C)	200	650	1000	< 100	< 100	< 100
연료	수소	수소 일산화 탄소	수소 일산화 탄소	수소	메탄올	수소
연료 원료	도시 가스 LPG	도시 가스 LPG 석탄	도시 가스 LPG	메탄올, 메탄, 휘발유, 수소	메탄올	수소
효율 (%)	40	45	45	45	30	40
출력 범위 (kW)	100 - 5,000	1,000 - 10,000	1,000 - 10,000	1 - 1,000	1 - 100	1 - 100
주요 용도	분산 발전형	대규모 발전	대규모 발전	수송용 동력원	휴대용 전원	우주선용 전원
개발 단계	실증- 실용화	시험- 실증	시험- 실증	시험- 실증	시험- 실증	우주선 적용

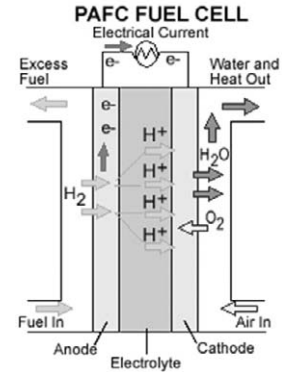
### 1) 인산 연료전지(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)

100% 농축된 인산이 전해질로 사용되며, 일반적인 작동온도는 150°C~220°C 이다. 이보다 낮은 온도에서는, 인산의 특성이 좋지 않아 양극에 있는 백금 전기 촉매의 일산화탄소 활성화를 방해하게 된다. PAFC는 산 온도범위의 초고온도(100-220°C)에서도 작동할 수 있으며 농축 산(100%)을 사용하게 되면 수증기압을 최소화할 수 있어 셀 내에서의 물 관리가 쉬워진다.

산을 얻을 수 있는 가장 많이 사용되는 매트릭스는 실리콘 카바이드이며, 양극과 음극에서의 전기촉매제는 백금을 사용한다.

PAFC는 대개 발전용으로 개발된다. 미국과 일본에서는, 현장 시험 및 시연에서 수백 개의 PAFC 시스템이 생산, 판매 및 사용되고 있다.

최근 10년간 비용과 효과 측면에서 더 나은 성능의 PEFC를 개발하기 위한 노력은 계속되고 있다.



PAFC는 PEFC 및 AFC보다 CO에 대하여 덜 민감하다. PAFC는 CO 1%에 대하여 견딜 수 있는 능력을 가지고 있다. 작동온도는 낮아서 일반적인 건축자재의 사용이 가능하다. 적어도 BOP 부품에서의 건축 자재 사용이 가능하다. 적용온도에 관한 상당한 설계 융통성을 발휘할 수가 있다.

PAFC의 발전효율은 37-42%이며(천연가스연료 LHV에 기초한 효율), 이는 PEFC 시스템이 달성할 수 있는 것보다 높은 수치이다(SOFC 및 MCFC 시스템보다는 낮은 수치임). 또한, PAFC에서 나오는 열은 대부분의 상업 및 산업 열병합 발전용으로 사용할 수 있다.

### 2) 용융탄산염 연료전지 (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)

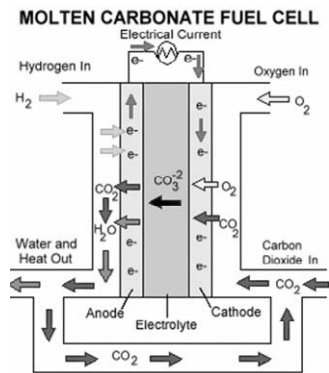
통상 제2세대 연료전지로 불리는 용융탄산염 연료전지는 다른 형태의 연료전지와 함께 높은 열효율, 높은 환경친화성, 모듈화 특성 및 작은 설치공간으로 대표되는 장점을 공유하는 동시에, 650°C의 고온에서 운전되기 때문에 인산형 또는 고분자 연료전지와 같은 저온형 연료전지에서 기대할 수 없는 다음과 같은 추가 장점들을 갖고 있다. 즉, 고온에서의 빠른 전기화학반응은 전극재료를 백금 대신 저렴한 니켈의 사용을 가능케 하여 경제성에서 유리할 뿐만 아니라, 백금전극에 피독물질로 작용하는 일산화탄소마저도 수성 가스 전환반응을 통하여 연료로 이용하는 니켈전극의 특성은 석탄 가스, 천연가스, 메탄올, 바이오매스 등 다양한 연료 선택성을 제공한다. 그리고 HRSG (Heat Recovery Steam Generator) 등을 이용한 bottoming cycle로 양질의 고온 폐열을 회수 사용하면 전체 발전 시스템의 열효율을 약 60% 이상으로 제고시킬 수 있다.

또한, 용융탄산염 연료전지의 고온운전 특성은 연료전지 스택 내

부에서 전기화학반응과 연료개질반응을 동시에 진행시키는 내부 개질이 가능하도록 하는 장점을 제공한다.

이러한 내부개질형 용융탄산염 연료전지는 전기화학반응의 발열량을 별도의 외부 열교환기 없이 직접 흡열반응인 개질반응에 이용하므로 외부개질형 용융탄산염 연료전지보다 전체 시스템의 열효율이 추가로 증가하는 동시에 시스템 구성이 간단해지는 특성을 갖는다.

그러나 용융탄산염 연료전지는 고온에서 부식성이 높은 용융탄산염을 사용하기 위한 내식성 재료의 개발에 따르는 경제성 문제 및 수명, 신뢰성 확보 등 기술적 검증이 지속적인 과제로 남아있다. MCFC 발전시스템 개발은 소재, 화공, 기계, 전기, 전자, 화학, 엔지니어링 등 다분야가 망라된 복합기술개발이므로 개발 단계에서부터 광범위한 산업 연관성을 가지고 있다.



전해질은 칼리 탄산염의 복합체이며, 이는 세라믹 매트릭스인  $\text{LiAlO}_2$ 에서 얻을 수 있다.

이 연료전지는 600-700℃에서 작동하며, 이러한 온도에서 알칼리 탄산염은 아주 높은 전도성 용융염을 형성하게 되는데, 이때 탄산염 이온은 이온 전도 역할을 수행한다. MCFC의 높은 작동온도에서 Ni(양극)과 산화니켈(음극)은 반응을 일으키기에 적합한 환경이 조성된다.

촉매를 위한 귀금속이 필요하지 않으며 보다 많은 탄화수소 연료를 전기로 변환할 수 있어 효율이 좋다.

MCFC 개발의 초점은 대형 발전용 및 선박용이었으며, 이러한 온도에서는 MCFC가 비교적 대형 사이즈이고 중량이 큰 것은 별로 문제가 되지 않는다. MCFC는 다양한 재생연료의 활용이 가능하다. MCFC는 BOP를 단순화하여 시스템 효율을 최고 40%까지 향상시킬 수 있으며 고온의 폐열이 발생하며 열병합 발전을 통해 시스

템 효율을 추가적으로 높여 발전효율을 50% 후반에서 60% 초반까지 끌어올릴 수 있다.

MCFC 개발자들의 주요 과제는 높은 부식과 전해질 이동을 방지하는 것으로, 셀 하드웨어로서 니켈 및 고등급의 스테인레스 스틸이 사용되어야 한다는 점이다(이는 흑연보다는 싸지만, 페라이트 강보다는 비쌌). 높은 온도는 재료상의 문제점을 야기하고 기계적 안정성과 스택의 수명에도 영향을 미친다. 또한 탄산이온을 형성하기 위하여 음극에  $\text{CO}_2$  공급이 필요하며, 이로 인하여 부가적인 BOP 부품이 필요하게 된다.

높은 접촉저항과 음극저항으로 인하여 전원 밀도는 실제작용 전압에서 100-200mW/cm<sup>2</sup> 정도로 한정된다.

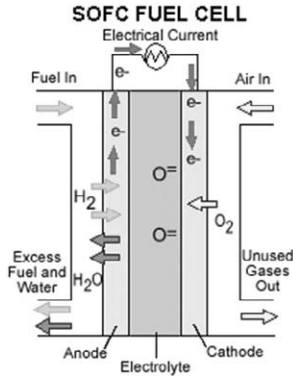
### 3) 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)

3세대 연료전지로 불리는 고체산화물 연료전지는 산소 또는 수소 이온전도성을 띄는 고체산화물을 전해질로 사용하는 연료전지로서 1937년에 Bauer와 Preis에 의해 처음으로 작동되었다. 고체산화물 연료전지는 현존하는 연료전지 중 가장 높은 온도(600 - 1000℃)에서 작동하며, 모든 구성요소가 고체로 이루어져있기 때문에 다른 연료전지에 비해 구조가 간단하고, 전해질의 손실 및 보충과 부식의 문제가 없으며, 귀금속 촉매가 필요 없고 직접 내부 개질을 통한 연료 공급이 용이하다.

또한, 배출되는 고온의 가스열을 이용한 열병합발전이 가능하다는 장점도 지니고 있다. 이러한 장점 때문에 고체산화물 연료전지에 관한 연구는 21세기 초 상업화를 목표로 미국, 일본 등 선진국을 중심으로 활발히 이루어지고 있다.

일반적인 고체산화물 연료전지는 산소 이온전도성 전해질과 그 양면에 위치한 공기극(Cathode) 및 연료극(Anode)으로 이루어진다. 작동원리는 공기극에서는 산소의 환원 반응에 의해 생성된 산소이온이 전해질을 통해 연료극으로 이동하여 다시 연료극에 공급된 수소와 반응함으로써 물을 생성하게 되고, 이때, 연료극에서는 전자가 생성되고 공기극에서는 전자가 소모되므로 두 전극을 서로 연결하면 전기가 흐르게 되는 것이다.

SOFC는 고온에서 작동되기 때문에 고가의 귀금속 재료가 필요치 않고 기존 탄화수소 연료를 별도의 개질기 없이 직접 사용할 수 있다는 장점으로 소형 발전에서 대형 발전에 이르기까지 폭 넓게 연구되고 있다.



전해질은 고체의 비공극 산화금속이며, 보통은 Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>로 안정화된 ZrO<sub>2</sub>를 사용한다. 이 셀은 600-1000℃에서 작동하는데, 이 상황에서는 산소 이온에 의한 이온전도가 발생한다. 일반적으로 양극은 CO-ZrO<sub>2</sub> 혹은 Ni-ZrO<sub>2</sub> 도성합금(Germet)이고, 음극은 Sr 또는 LaMnO<sub>3</sub>을 사용한다.

원래, 고체형 전해질의 전도성 한계로 인해 셀 작동은 1000℃에서 가능하였지만, 최근에 성능이 향상된 음극을 가진 박막 전해질 셀이 개발되어 작동 온도 범위가 650-850℃로 낮춰질 수 있었다. 개발자들은 SOFC의 작동온도 범위를 이보다 더 낮게 하려고 노력하고 있으며 과거 10년 동안, 이 같은 노력들로 인하여 소형의 고성능 SOFC 개발이 가능하게 되었고 상대적으로 저원가의 재료를 사용할 수 있게 되었다. 전해질이 고체이므로, 전지는 다양한 형태로 제작할 수 있다. 즉, 관형, 판형 혹은 모노리식 형태로 제작이 가능하다. 고체 세라믹으로 전지를 제작하게 되면 전지 내의 부식문제를 완화시킬 수 있다. 고체 전해질은 또한 three phase boundary를 정확하게 제작하는 것을 가능하게 해주며, 전극 내에서 전해질 이동 혹은 플래딩이 없다. 전지 내의 운동이 비교적 빠르게 되며 MCFC에서의 경우와 같이 CO는 직접적으로 사용할 수 있는 연료가 되며 MCFC의 음극에서는 CO<sub>2</sub>를 필요로 하지 않는다.

발생열은 열병합발전용으로 이용할 경우 약 40%(단순 사이클의 소형 시스템에서 50%(하이브리드 시스템)에 이르는 효율을 나타내고 있으며, MCFC에서와 같이 60% 이상의 효율을 보일 가능성도 존재한다.

SOFC의 고온은 단점이라고 할 수 있다. 재료들 간에는 열팽창 차이가 있어 평면 구성에서 전지 간의 밀폐가 어렵다. 고온에 적당한 재료 선택이 어려우며, 제작과정도 어렵고 금속 스택 구성품의 부식도 문제가 된다. 이러한 요인들로 인하여 스택의 전력 밀도가 제한되며 열 사이클링과 스택 수명도 제한되는 단점이 있다.

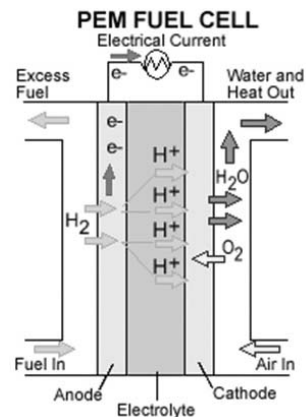
#### 4) 고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)

수소이온교환 특성을 갖는 고분자막을 전해질로 사용하는 고분자 전해질 연료전지는 메탄올이나 수소 등의 화학연료를 전기에너지로 직접 바꾸는 고효율, 무공해, 무소음의 미래형 발전기술의 일종으로서, 기존의 내연기관에 비해 1.5배 이상의 에너지변환 효율을 갖고 있을 뿐만 아니라 유독한 대기오염 물질을 전혀 배출하지 않는 장점을 갖고 있다.

특히 고분자전해질 연료전지는 다른 형태의 연료전지에 비하여 전류밀도가 큰 고출력 연료전지로서 100℃ 미만의 온도에서 작동되고 구조가 간단하며 빠른 시동과 응답특성, 우수한 내구성을 가지고 있는 동시에 수소 이외에도 메탄올이나 천연가스를 연료로 사용할 수 있어 자동차의 동력원으로서 적합한 시스템이다. 이와 같은 고분자전해질 연료전지는 무공해자동차의 동력원 외에도 분산형 발전, 군수용 전원, 우주선용 전원 등으로 응용될 수 있는 등 그 응용범위가 매우 다양하다.

고분자전해질 연료전지에 대한 연구는 1955년 미국의 GE에서 처음으로 시작되어 1962년에 이미 1 kW급 고분자전해질 연료전지 스택 2개로 이루어진 모듈을 Gemini 우주선 3호부터 12호에 사용하였다. 이후로 고분자전해질 연료전지를 연료전지자동차 등 민수용으로 응용하기 위한 연구가 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있다.

우리나라에서는 1990년대부터 대학을 중심으로 단위전지에 대한 기초연구를 시작하였으며 KIST 연료전지연구센터에서도 1996년부터 고분자전해질 연료전지 원천기술 개발을 시작한 후 2000년 5kW급 스택을 제작하여 연료전지/배터리 하이브리드 골프카트에 적용한 바 있다.



전해질은 하나의 우수한 양자 도체가 되는(불소화 술폰산 고분자 또는 다른 유사한 고분자로 되어 있는) 이온교환막으로 되어 있다. 이러한 연료전지에서의 유일한 액체는 물이며, 그래서 부식 문제들은 최소한으로 할 수 있다. 전형적으로, 백금전극촉매를 가진 탄소전극들이 양극 및 음극 양쪽 모두에 대해, 그리고 탄소나 금속으로 된 상호연결기들과 함께 사용된다.

막(Membrane)에 대한 물 관리가 효율적인 성능을 위해 매우 중요하며, 연료전지는 막이 수화되어야 하기 때문에 부산물로서의 물이 생성되는 것보다 더 빨리 증발하지 않는 경우의 조건 하에서 작동하는 것이어야 한다. 고분자가 가지는 작동온도상의 제약사항 때문에, 일반적으로 100 °C 미만이며, 전형적인 것으로는 대략 60에서 80°C 사이가 된다.

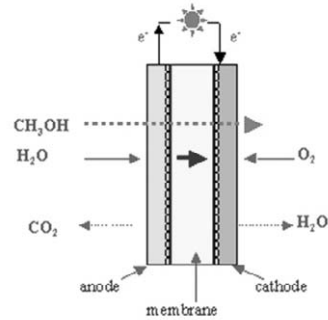
일산화탄소(CO : 저온에서 유독물질)가 함유되지 않은 수소(H<sub>2</sub>)가 풍부한 기체를 연료로 사용해야 하며 양극 및 음극 양쪽 모두에 대해 PAFC들에서 사용되는 것보다는 더 많은 촉매(대부분의 경우 백금)를 필요로 한다. 일산화탄소(CO)나 유황종류 및 할로겐 등에는 양극이 쉽게 약화되기 때문에 다른 연료들에 대해서는 광범위한 연료처리가 필요하다. PEMFC는 폭넓은 용도로 개발되고 있으며, 특히 연료전지 차량들(FCVs)에 대한 일차적 동력으로서의 개발이 활발하다. FCVs 및 할로겐에 대한 높은 관심의 결과로서, 지난 10년간의 PEMFC에 대한 투자가 많았다. 비록 발전용의 용도들에 대해 PEMFC가 두드러지게 개발되어오긴 했지만 많은 개발자들은 이제는 자동차나 휴대를 위한 용도들에 초점을 맞추고 있다.

PEMFC는 기체로의 전환에 대한 탁월한 저항성을 갖추고 있는 고체 전해질을 가지고 있다. PEFC의 낮은 작동온도는 부식성의 전지 구성물들이 없음에도 재빠른 시동이 가능하며, 스택에서나 보조장치(BoP) 모두에서 색다른 자재들을 요구하지는 않는다. 시험 결과에서는 PEMFC가 2kW/l 및 2W/cm<sup>3</sup>를 초과하는 높은 전류 밀도를 수용하는 것으로 나타났다.

물의 관리는 PEMFC 설계에 있어서의 또 하나의 중요한 사안이 되고 있으며, 전해질에 넘쳐나게 하지 않으면서 전해질의 수화가 충분히 되도록 하는 것이 필요하다. PEMFC는 일산화탄소(CO)나 유황종류 및 암모니아를 포함하는 오염물질에 약하다. 어느 정도까지는 작동 전류밀도를 낮추어주고 전극촉매 양을 증가시켜 이러한 불리한 점들에 대한 대응조치가 될 수 있지만, 양쪽 모두가 시스템의 비용을 증가시키게 한다. 만약 탄화수소 연료들이 사용된다면 광범위한 연료처리로 말미암아 시스템 크기와, 복잡성, 효율 및 시스템 비용 등에 대해 나쁜 영향을 주게 된다. 또한, 수소 PEMFC에

대해서는, 수소공급용 기반시설의 개발에 대한 필요성이 상업화하는 것에 대한 하나의 장벽으로 되고 있다.

### 5) 직접 메탄올 연료전지(Direct Methanol Fuel Cell, DMFC or DAFC)



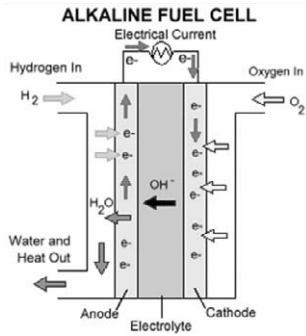
직접메탄올 연료전지(DMFC)는 도시된 바와 같이, 고분자 전해질 막을 사이에 두고 양쪽에 각각 애노드와 캐소드가 위치한다. 애노드에서는 메탄올과 물이 반응하여 수소이온과 전자를 생성하며 생성된 수소이온은 전해질 막을 통해 캐소드 쪽으로 이동하고, 캐소드에서는 수소이온과 전자가 산소와 결합하여 물을 생성시킨다. 이때 전자는 외부회로를 통과하게 되어 전기에너지를 생성한다. 실제 사용시에는 출력을 높이기 위해 이러한 단위전지를 여러 개 묶어서 스택을 만들어 사용하는데, 일반적인 연료전지의 스택에서는 Bipolar Plate를 사용하지만 마이크로 연료전지에서는 Monopolar Plate를 사용하게 된다.

직접메탄올 연료전지(DMFC)는 고분자 전해질 연료전지 (PEMFC)와 똑같은 구성요소를 사용하지만 메탄올을 연료로 직접 사용할 수 있기 때문에 소형화가 가능하다. 직접 메탄올 연료전지(DMFC)는 PEMFC에 비해 출력밀도는 낮지만, 연료의 공급이 용이하고 배터리에 비해 높은 출력밀도를 갖기 때문에 배터리를 대체할 수 있는 가능성이 매우 높은 것으로 알려져 있다.

현재 PDA나 휴대폰, PalmTop PC 등과 같은 휴대용 전자 기기에 리튬이온 배터리가 주로 사용되고 있다. 그러나, 휴대폰의 경우 통화시간이 160분(표준형 배터리의 경우)에 불과하고, 재충전(Recharge) 속도가 느리기 때문에 (90% 충전에 30-60분 소요) 사용하는데 불편한 점이 많다. 또한, 리튬이온 배터리는 무겁고, 비싸며, 폐기시 공해를 유발하는 문제점이 있다. 이에 비해, 마이크로 연료전지는 에너지밀도가 배터리에 비해 3배정도 크며, 폭발 위험

성이 전혀 없고, 폐기시 공해를 발생시키지 않으며, 카트리지 형태의 메탄을 저장용기를 교환함으로써(Refuel) 거의 무제한으로 사용 가능하게 한다.

**6) 알칼리성 연료전지(Alkaline Fuel Cell, AFC)**



전해질로는 고온(>250 °C)에서 작용하는 연료전지에서의 농축된 (85 wt%) 수산화칼륨(KOH)이 되거나 저온(<120 °C)에서의 작용을 위한 덜 농축된(35 내지 50 wt%) 수산화칼륨(KOH)이 된다. 어떤 담체(일반적으로 석면)에 보유되어 있는 전해질과 다양한 전기촉매들이 사용될 수 있다(예를 들면, 니켈, 은, 금속산화물들, 첨정석 및 귀금속들). 연료공급은 수소를 제외하고는 비-반응 성분들로 제한된다. 일산화탄소(CO)는 유독물질이며 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)는 수산화칼륨(KOH)과 반응하여 탄산칼륨(K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)을 형성시키게 됨으로써 전해질을 변질되게 한다. 공기 중에 있는 적은 양의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)까지도 알칼리성 전지에 대해서는 하나의 잠재적인 유독물질로 간주된다.

AFC는 1960년 아폴로 우주선 탑재용으로 개발되었다. 우주상에서 상당한 성공을 거두었지만 지구상에서의 용도는 그것이 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)에 대해 민감하다는 것 때문에 도전을 받아왔다. AFC는 활성산소(O<sub>2</sub>)의 전극 동역학 및 광범위한 전기촉매 사용의 융통성이 뛰어나, 다른 연료전지들과 비교해 볼 때 수소(H<sub>2</sub>) 및 산소(O<sub>2</sub>)에 대해 탁월한 성능을 가지고 있다. 하지만 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)에 대하여 전해질이 아주 민감하므로 고순도의 수소(H<sub>2</sub>)를 연료로 사용할 필요가 있다. 결과적으로, 매우 효과적인 일산화탄소(CO) 및 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 제거용 개질기가 필요하며, 게다가, 만약 주위 공기가 산화제로 사용된다면, 공기 중의 이산화탄소(CO<sub>2</sub>)는 반드시 제거될 필요가 있다. 이것은 기술적으로는 불가능하지 않지만 시스템의 크기 및 비용에 대해서는 현저한 영향을 주는 것이 된다.

**3-2. 개질 방법에 따른 분류**

일반적으로 수소는 자연 상태에서 그 자체만으로는 존재하지 않으며, 연료전지의 연료로 사용하기 위해서는 어떤 형태로든 수소를 분리하여 포집하여야 한다. 이 때 수소를 분리하여 포집하는 것을 개질이라 한다. 화석연료로부터 수소를 분리하여 이용하는 방법으로는 연료전지 시스템과는 별개의 외부시스템에서 수소를 분리하여 확보하는 방법과 연료전지 시스템 내에서 수소를 직접 분리하면서 연료전지 연료로 사용하는 방법이 있다. 전자를 외부 개질이라 하고 후자를 내부 개질이라 한다.

**1) 외부 개질형**

외부 개질형은 연료로부터 수소를 분리하는 설비와 연료전지를 분리하여 적용한 설비를 말한다. 화석연료로부터 수소를 분리할 경우 분리한 수소를 저장할 수 있고 연료전지에 보내는 수소량을 조절함으로써 출력조절이 가능하다. 그러나 내부 개질형에 비해 부가적인 설비가 필요하여 설비가 복잡하다.

수소는 화석연료로부터만 얻을 수 있는 것은 아니다. 무인도나 사막 등지에서 태양광이나 풍력 등의 에너지를 이용하여 수소를 확보할 수 있다면 화석연료를 사용한 경우의 개질기는 필요 없게 된다. 이런 형태로 수소를 대량 확보할 수 있다면 개질기와 연료전지는 분리하여 생각할 수도 있는 것이다.

**2) 내부 개질형**

천연가스 또는 혐기성 소화가스 등을 연료전지의 연료로 사용할 때, 이들 가스연료로부터 수소를 분리하고, 분리된 수소를 곧바로 연료전지의 연료로 사용할 때 이들 시스템은 동일시스템으로 구성되어 이용하는 것이 효율적이다. 이는 분리한 수소를 별도로 보관할 필요 없이 곧바로 연료전지의 연료로 사용함으로써 설비가 간단하다. 그러나 출력조절이 어려우며, 동일한 시스템으로는 한 가지 연료만을 사용할 수밖에 없는 것이 단점이다.

**4. 수소연료의 확보**

흔히 수소연료전지를 저공해, 저소음성, 고효율 설비라 한다. 그러나 수소는 1차적인 에너지원이 아니다. 어느 곳에도 수소는 자연 상태로 우리가 사용할 수 있는 만큼 대량으로 존재하지 않는다. 그렇다면 우리가 수소를 연료로 사용하기 위해 확보하기 위한 별도의 공정을 고려해야만 하고 별도의 에너지 투입을 필요로 한다. 따

라서 수소를 1차적인 에너지원으로 생각한다면 연료전지를 효율이 높다고 할 수 있을는지 모른다. 수소 확보를 위한 공정을 고려한다면 결코 친환경적이며 효율이 높다고 볼 수만은 없다.

연료전지의 전제조건은 다량의 수소를 쉽게 확보할 수 있어야 한다는 것이다. 연료전지 기술의 개발과 더불어 어떻게 수소를 확보할 수 있는가 하는 것도 향후 과제라 할 수 있다.

#### 4-1. 수소의 특징

수소는 지구상 존재하는 물질 중 가장 가볍다. 분자의 질량으로 볼 때 산소의 16분의 1, 공기의 대략 14분의 1 정도 된다. 즉 가볍기 때문에 이동이 간편한 특성을 지닌다. 전기 화학적인 반응성도 좋고 에너지 발생량도 커 연료전지의 연료로 사용하기 좋다. 수소는 연료전지를 통해 산소와 결합하면서 가장 고급에너지인 전기에너지를 생산하고 또한 우리 지구상 가장 소중한 물을 생성한다. 따라서 수소를 쉽게 대량으로 확보할 수 있다면 지구상에 에너지와 물 걱정은 덜 수 있을 것이다.

수소는 물속에 산소와 결합하여 있어 지구상에 물이 존재하는 만큼 아주 많이 존재한다. 이를 자연적이든 인위적이든 분리할 수 있다면 유용한 에너지원으로 사용 가능하다.

#### 4-2. 수소의 확보 방법

물로부터 수소를 분리해 내는 데는 수소가 산소와 결합하여 물로 변할 때 얻을 수 있는 이상의 에너지가 필요하다. 일반 발전소에서 생산한 전기를 소비하여 물에서 수소와 산소를 분리하고 여기서 분리된 수소로 연료전지의 연료로 사용한다면 시스템 전체 이용효율은 감소하기 때문에 자칫 연료전지의 의미를 찾을 수 없게 될 지도 모른다. 하지만 직접 사용이 어려운 전기에너지를 이용한다면 효율 측면을 떠나서 수소 생산이 유용할 수 있다.

연료전지는 신재생에너지와 연계하여 생각할 수 있다. 즉, 육지와 떨어진 무인도 등 오지에서 전기를 쉽게 생산할 수 있지만 생산한 전기를 실제 사용하는 곳까지 전달하기가 쉽지 않을 수 있다. 이러한 경우 발전되는 전기를 이용하여 수소를 생산하여 비축하고 이를 실제 에너지 사용처로 이동하여 사용한다면 또 하나의 에너지원으로 표현할 수도 있을 것이다. 이는 전기에너지의 직접적인 저장성보다 수소의 저장성이 월등히 우월하기 때문에 가능한 것이다.

아직까지 전기에너지를 효과적으로 저장하고 사용할 수 있는 획기적인 방법이 없기 때문이다. 또 다른 수소의 생산법은 수소를 함유하고 있는 화석연료로부터 분리하는 것이다.

천연가스(LNG, 분자식 : CH<sub>4</sub>)는 다량의 수소를 함유하고 있는데 최근 연료전지의 연료로 많이 사용하고 있다. 천연가스에 포함된 수소는 개질기의 격막을 통과하면서 분리되는데 이 방법은 다량의 수소를 가장 손쉽게 얻을 수 있는 방법 중 하나이다. 분리된 수소는 보관할 필요 없이 바로 연료전지의 연료로 활용될 수 있는 장점도 가진다. 이렇듯 천연가스, 혐기성 소화가스 등 다양한 연료로부터 수소를 분리하여 연료로 사용이 가능하다.

### 5. 연료전지의 개발 현황

#### 5-1. 국내 기술 개발 현황

##### 1) 포스코 파워

포스코파워는 2003년 미 FCE와 전략적 제휴 후 FCE 시스템의 도입 및 기술제휴 시작으로 2004년 DFC300 시스템 3기를 도입하여 실증운전을 실시하였으며, 2007년 한전과 기술제휴 협상하였고, 2007년 11월 연간 50MW 규모 BOP 생산공장을 착공하여 2008년 9월 준공했다. 2008년 말까지 총 7.5MW 시스템 보급 예정으로 2009년 목표 DFC300MA 국내 조립생산 및 BOP 국산화 추진 중이나 최근 연료인 LNG 가격의 폭등으로 연료전지 발전사업의 경제성 저하로 수요가 없어 주춤한 상태이다.

##### 2) 두산중공업

2007년 10월 산자부(현 지경부)의 300kW급 발전용 연료전지 기술개발을 위한 연구과제의 총괄기관으로 선정 기술개발 착수하였으며, 2010~2011 R&D센터 완공, 2010년까지 300kW급 발전용 연료전지 시스템 독자모델 개발 기술제휴 협상 완료 계획이며 2012년 본격적 국내외 시장 진입을 목표로 두고 있으며, 2015년부터 대형 상용화 모델인 MW급 열병합용 제품 생산 예정이다.

##### 3) 전력연구원(외부 개질형)

1993년부터 외부 개질형 MCFC 발전시스템 개발을 추진하여 왔으며, 2005~2009년 Rist 주관 하에 25kW급 열병합 MCFC 시스템 개발연구 및 MCFC 스택 양산화 연구에 열중이다.

#### 5-2. 해외 기술 개발 현황

##### 1) Fuel Cell Energy(FCE, USA)

1969년부터 고효율 내부 개질형 MCFC 발전시스템 개발하여 왔으며, 1996년 사업화를 추진하여 2006년 이후 300kW급 DFC300MA, 1.2MW급 DFC1500MA, 2.4MW DFC3000 시판 중이다. 2007년 1.2MW급 DFC1500B에 대한 기술평가 완료, 양산

품 생산 돌입하였고, 2008년 일본 가와사키 중공업, 한국 포스코 파워 등 전략적 파트너와의 BOP 생산을 통한 시스템 경제성 확보에 주력하였다. 2008년 양산품 상용화를 목표로 4-스택 모듈을 적용하여 시스템 경제성 확보를 위해 연구개발 추진했다.

- 4-스택 모듈 : 4개의 스택을 하나로 통합
- 최근 가동률 95% 도달, 수명은 5년, 7년으로 순차적 연장 연구 중

## 2) CFC Solution(Germany)

1989년 FCE 스택을 도입하여 내부개질 기반의 독자 시스템 개발 추진하였으며, 1997년 Hot-Module 이라는 이름의 독자모델 시스템 개발을 완료하였으며, 1999년 첫 번째 Hot-Module 설치 운전, 독일과 유럽 중심으로 실증 보급을 시작(2007년 기준 20기 이상 설치) 했다. 2003년 RWE 퓨얼셀과 공동으로 MTU CFC-Solution 이라는 조인트벤처를 설립(MTU에서 운영)하였고, 2007년부터 MTU가 지분매각하여 CFC-Solution으로 사명을 변경했다. 2008년 선박용 Hot-Module 설치 계획이며, 300kW급 중형시스템 보급에 주력하고 있으나 향후 1~2MW급 대형시스템 개발 추진 예정이다.

## 3) Ansaldo Fuel Cell(AFCo, Italy)

2001년 회사 설립(1986년 연구개발 성과 토대) 하였고 2003년 스페인에서 100kW급 시스템인 Series100을 준공하여 비공개 운전 하였고 2004년 연간 생산 최대 15MW급 MCFC 스택 제조공장을 독자적으로 설립하였다. 현재 250kW급 외부 개질형 스택 2기 결합하여 운전하는 500kW급 Series 2TW 모델 실증하여 제작에 집중하고 있으며, 100kW급 및 500kW급 시스템 개발 진행 중이며, MW급도 개발 계획이다.

2009년 새로운 FA200 스택이 설치된 0.5MW 플랜트가 이탈리아 Livorno시에 위치한 ENEL의 실험용 시설에 설치될 예정이며 2011년 FA400 스택 제원의 1MW급 플랜트로 발전할 것을 기대한다.

## 4) Isikawajima - Harima Heavy Industries(IHI, Japan)

1993년부터 정부의 MCFC 개발계획에 참여하여 외부 개질형 발전시스템을 개발 중이다. 1999년 1MW급 MCFC 발전소 건설에 250kW 스택 2기를 공급하였고 2000년 이후 300kW급 분산전원용 시스템 개발에 연구역량을 집중하여 2005년 일본 Aichi 엑스포에서 300kW급 시스템 4기를 추부전력 실증 운전에 출품하였다.

## 5) GenCell Corporation(USA)

2002년 FCE에서 이탈한 기술진을 흡수해 설립하였으며, 40~125kW급 분산전원 시장을 목표로 내부 개질형 MCFC, PEMFC, SOFC 개발 중이다. 2005년 코네티컷 대학 글로벌 퓨얼 셀 센터에서 40kW급 시스템을 설치하였다.

## 6. 맺음말

연료전지의 개발 의의는 크게 2가지로 볼 수 있다. 청정에너지 시스템이라는 것과 이동 연료원으로 이용 가능하다는 것이다.

최근 국제사회에서 국가 간 피할 수 없는 의무사항으로 대두되고 있는 지구온난화 가스 배출 억제와 관련하여 탄산가스 규제가 강화되고 화석연료 연소 규제의 압박을 받고 있다. 화석연료의 연소 중 상당부분을 차지하는 발전소는 연소가스 중의 탄산가스를 포집하는 방법에 대한 연구를 거듭하면서 그 가닥을 잡아가고 있지만 자동차의 연소에 관한 해결책은 수소 연료전지밖에 없다고 표현한다.

대기 오염의 주원인인 내연기관 차량을 대체할 수 있는 무공해 자동차로는 원래 배터리를 동력원으로 하는 전기자동차를 생각할 수 있는데, 배터리를 전기자동차 동력원으로 사용할 경우 충전에 많은 시간을 요구하고, 에너지 밀도가 낮아 주행가능 거리가 짧으며, 배터리의 수명이 짧은 등의 문제점이 있다. 전기자동차가 상용화 되면 많은 전기 충전소의 설치가 필요하며 여기서 사용되는 전기는 대규모 발전소에서 공급되어 결국 오염원의 이동에 불과하다고 볼 수 있다. 따라서 전기자동차 동력원으로서의 배터리에 대한 단점을 보완하기 위하여 연료전지 구동방식이나 또는 배터리와 연료전지를 동시에 사용하는 혼합형(Hybrid)을 구성하는 방법이 최근에 각광을 받고 있다. 이 때 연료인 수소는 쉽게 안전한 방법으로 쉽게 확보할 수 있다는 것을 전제로 한다.

아직까지 연료전지는 그 기술의 개발이 완전하지 못하며 지속적인 개발이 필요하다. 그 효율성이나 안전성 등이 실생활에서 경제적으로 사용이 가능할 수 있을 때까지는 시간이 더 필요하다. 또한 연료전지에 사용하는 수소는 1차적인 에너지원이 아니며, 자연 상태에서 수소 분리를 위한 처리과정을 필요로 한다. 수소는 화석연료, 원자력, 수력 등의 여러 일차 에너지에 의해서 제조할 수 있다. 우리가 청정 에너지원으로 연료전지를 사용하기 위해서는 원자력발전 또는 재생에너지의 유휴 에너지와 연계하는 등의 수소 분리시스템의 개발연구도 필요할 것이다. 또한 수소의 제조뿐 아니라 병행하여 저장, 수송 등의 기술개발도 필요할 것이다. **S**

### 참고문헌

1. "전기협회보", 2007, 7.
2. 한국과학기술연구원 "연료전지 기술동향"
3. 포스코파워 "R&D 특집-연료전지 유형"
4. 딜로이트 인진회계법인 "연료전지 사업보고서"