



# 연료전지 개론

정용수, 문성모 | 한국기계연구원

## 1. 연료전지의 역사 및 중요성

연료전지는 1839년 영국의 William Robert Grove 에 의해서 수소가스와 산소가스를 발생시키는 전기분해장치의 역반응을 이용하여 수소가스와 산소가스로부터 전기를 발생시키는데 성공하여 처음 발견되었으며, 가스로부터 전기를 발생시킨다 하여 “Gas Battery”라 명명되었다. 이후 “Fuel Battery”로 불리어지다가 1889년 화학자 Ludwig Mond와 Charles Langer 에 의해 “Fuel Cell”로 명명되어 오늘날까지 불리어지게 되었다. 연료전지의 원리가 이론적으로 체계화된 것은 1893년 물리화학의 창시자로 불리는 Friedrich Wilhelm Ostwald 에 의해서이다. 그는 연료전지의 구성요소인 전극과 전해질, 양이온, 음이온, 산화제 및 환원제들의 역할을 실험적으로 규명하였다<sup>[1]</sup>.

연료전지를 가장 성공적으로 개발하여 산업적으로 응용한 사람은 영국의 Francis Thomas Bacon이다. 그는 처음으로 알칼리 전해질을 이용하여 성공적으로 연료전지를 만들었고 1949년에는 double-layer sintered 전극을 개발하여 연료전지의 성능을 획기적으로 개선하였다. 1959년에는 40개의 단위전지를 연결하여 6 kW의 알칼리 연료전지를 만들었고 이를 용접장치에 사용하였다<sup>[1]</sup>. 이러한 Bacon의 기술을 미국의 Pratt & Whitney 사에서 도입하여 미국의 NASA에서 지원한 우주선용 연료전지 개발에 참여하였고, 1966년 처음으로 아폴로 우주선에 성공적으로 적용할 수 있었다. 이후 연료전지의 개발에 많은 연구비가 투입되었고, 고분자전해질 연료전지를 비롯하여 고체산화물 연료전지, 용융탄산염 연료전지, 인산형연료전지 및 직접메탄올 전지 등 다양한 연료전지의 개발이 이루어졌다.

고분자전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC)는 1963년 General Electric (GM)사에 의해서 처음 개발되었으며, 개발 초기에는 우주선용으로 그리고 1980년대에는 잠수함용으로 개발되었다<sup>[2]</sup>. 1980년대 중반에는 정치형으로 개발되기 시작하였으며 1989년 캐나다의 발라드사에 의해서 5kW의 PEMFC 스택이 개발되고 1991년에는 발라드사와 GPU와 함께 250kW의 PEMFC를 만들어 인디애나 주에서 가동하였다. 1998년에는 Plug Power사에 의해서 가정용 5kW의 PEMFC가 개발되어 설치되었다.

고체산화물 연료전지 (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) 와 용융탄산염 연료전지 (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) 는 1930년대부터 1950년대 말까지 주로 고성능 전해질을 찾는 연구로부터 시작되었다<sup>[2]</sup>. 1950년대 말 고체 전해질은 높은 내부저항과 반도체적 성질에 의한 short-circuiting의 문제가 대두되었고 그 대안으로 응용된

탄산염이 선택되었다. MCFC는 1960년대 리튬탄산염과 칼슘탄산염을 섞은 전해질을 다공성 마그네슘산화물 소결체내에 함침 시켜서 만들어졌다. 1964년 Texas Instruments사는 100W ~ 1kW MCFC를 만들어 성능시험을 행하였다. 그 후 일본에서 문 라이트 계획으로 1MW MCFC가 개발되어 성능시험이 이루어졌고, 1990년대 초에는 일본의 이시가와지마 중공업에서 1kW MCFC를 개발하여 공급하였다. 1997년에는 M-C Power Corporation사에서 만든 250kW, 1997년에는 Fuel Cell Energy사에서 제작한 2 MW급이 개발되어 사용되고 있다. SOFC의 경우 상대적으로 늦게 개발되었으나 높은 효율과 고온의 작동온도에 기인한 장점들을 이유로 현재 가장 활발하게 연구되고 있는 연료전지이기도 하다. SOFC는 2000년 Siemens Westinghouse사에 의해서 220 kW급이 개발되어 시험되고 있다.

인산형연료전지(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)는 1961년에 G.V. Elmore 와 H.A. Tanner에 의해 중온에서 작동하는 연료전지로 제안되었다<sup>[2]</sup>. 그러나 상업화가 가장 빨리 이루어진 연료전지이기도 하다. 1969년에는 Pratt & Whitney사와 American Gas Association사 공동으로 15 kW급 PAFC를 개발하였다. 1981년 일본에서는 200 kW 및 1 MW PAFC를 개발하여 성능시험을 행하였으며, 1983년에는 미국에서 5 MW PAFC가 개발되어 건물의 전력 공급원으로 사용되고 있다. 1994년에는 Fuji Electric 사의 50 kW PAFC가 미국에서 버스용으로 도입되었고, 1998년에는 International Fuel Cells Corporation사로부터 100 kW PAFC가 버스용으로 도입되어 미국에서 사용된 바 있다. 그러나 PAFC는 운전에 필요한 대기시간이 길어서 차량용 동력원로서는 부적합한 반면, 정지형 전원용으로는 현재 가장 많이 보급되어 있으며, 2003년 8월 북미에 대형 정전사태가 일어났을 때 전력의 공급을 원활하게 공급하여 그 중요성을 증명한 바 있다.

직접메탄올연료전지(Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)는 가장 최근에 개발된 연료전지의 한 종류로서 액체 상태의 메탄올을 연료로 사용하기 때문에 안정성 및 휴대성에서 우수하여 휴대용 전자기기의 전원용으로 많은 관심을 받고 있다. DMFC는 1990년대 초반 California Institute of Technology의 Dr. Rao Surumpu의 주도 아래 DTI Energy Inc.와 공동으로 개발되었다<sup>[3]</sup>.

현재 전 세계적으로 화석연료의 고갈 및 가격 상승에 따른 대체에너지 개발의 필요성이 크게 대두되고 있고 또한 화석연료의 연소반응에 기인한 환경오염 문제, 지구 온난화에 따른 기후변화 협약 등에 따른 청정에너지 개발의 필요성으로 인하여 연료전지에 대한 관심이 점점 더 커지고 있다. 연료전지는 오염물질의 배출이 거의 없을 뿐만 아니라 기존의 연소를 이용한 엔진에 비해 효율이 높고 용량을 쉽게 증가시킬 수 있으며 전기사용량의 변화에 따른 대응이 빠른 장점이 있다. 연료전지의 시장은 PAFC 및 DMFC가 발전용으로 상용화가 이루어져 있고 휴대용으로 DMFC가 상업화에 근접해 있다. 또한 수송용 및 가정용 온수 및 보조전원용으로 사용가능한 연료전지의 개발은 경제적으로 매우 큰 시장을 형성할 것으로 전망된다. 휴대용 전자기기의 경우 점차 고에너지 밀도의 전원 공급 장치가 필수적으로 요구되고 있는 실정이며, 이는 경제적 발전 뿐만 아니라 문화적, 사회적 발전에 이르기까지 광범위하게 영향을 미칠 것이다. 또한 연료전지의 개발에 수반되는 관련기술의 발전은 앞으로 국내산업의 발전에 지대한 영향을 미칠 것으로 예상된다.

## 2. 연료전지의 구성 및 특징

연료전지는 전기화학반응을 통하여 연료의 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환시키는 전기화학 장치이다.

전기화학 전지반응은 산화반응과 환원반응이 일어나는 두개의 전극이 공간적으로 분리되어 존재하고 이 전극들을 서로 연결해주는 전자의 이동통로와 이온의 이동통로가 각각 존재할 때 연속적으로 일어날 수 있다. 전기화학 전지반응을 일으키기 위한 기본 구성요소를 그림1에 나타내었다. 그림1에서 연료의 산화반응이 일어나는 전극을 애노드 (Anode) 라 하며, 산소의 환원반응이 일어나는 전극을 캐소드 (Cathode), 그리고 전기화학 반응에 의해서 생성된 이온들이 이동할 수 있는 매체를 전해질 (electrolyte) 이라고 한다.

전기화학 전지반응을 이용하는 전기에너지를 공급하는 대표적인 장치로는 배터리 (battery)와 연료전지 (Fuel cell)가 있다. 연료전지와 배터리의 차이점은 그림 2에서 보는 것처럼 배터리의 경우에는 전기의 생산에 필요한 화학에너지를 전극의 내부에 저장하는 반면, 연료전지는 전기를 생산하는데 필요한 화학에너지를 전기화학 전지의 내부가 아니라 외부에 저장한다는 점이다. 배터리는 전극 내부에 에너지를 저장하기 때문에 다양한 장점과 단점을 나타낸다. 장점으로는 연료의 운송이나 공급장치가 필요하지 않아서 장치가 간단해진다는 점이다. 단점으로는 제한된 부피 속에 에너지를 저장하기 때문에 1회 사용가능한 에너지의 양이 제한되어 있고 충전에 소요되는 시간이 길어지며, 충 방전시 전극내부에 발생하는 응력에 의해서 전극의 퇴화가 쉽게 일어나 수명이 짧아진다는 점들이 있다. 또한 자체방전에 의한 에너지의 손실이 일어난다는 단점들이 있다.

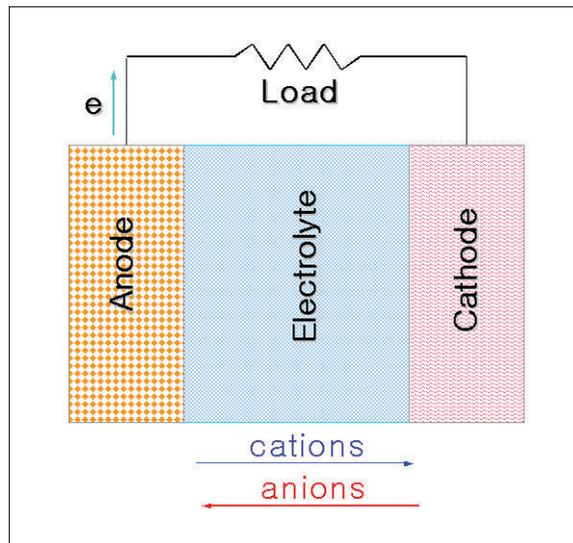


그림 1. Schematic representation of electrochemical cell

반면에 연료전지는 에너지를 전극의 내부가 아니라 외부에 저장하기 때문에 다양한 장단점을 가진다. 단점으로는 그림 2(b)에서 보는 것처럼 전기화학 전지의 외부로부터 연료와 산소를 공급해주는 장치가 필요하며 그에 따라 장치의 구조가 복잡해진다는 점이 있다. 연료전지의 장점으로는 전극내부에 발생하는 응력이 상대적으로 작아서 수명이 길며, 전극의 외부에 에너지를 저장하므로 1회 사용 가능한 에너지의 양을 크게 할 수 있는 점이 있다. 또한 자체방전에 의한 손실이 없으며, 연료의 재공급이 매우 빠르고 용이하다는 장점들이 있다.

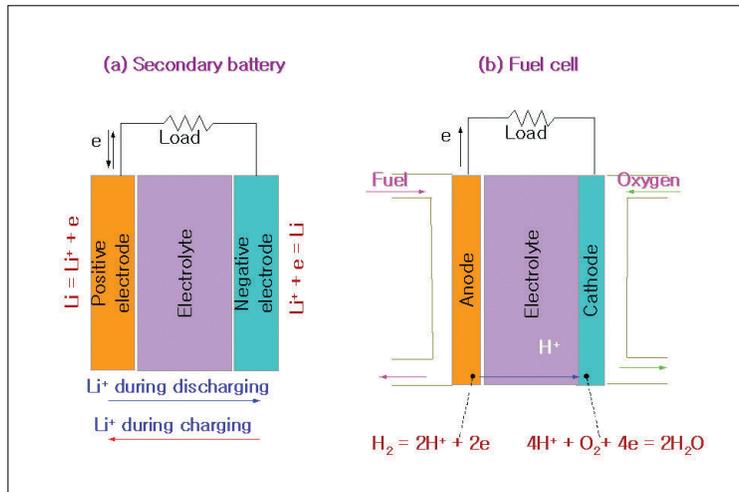


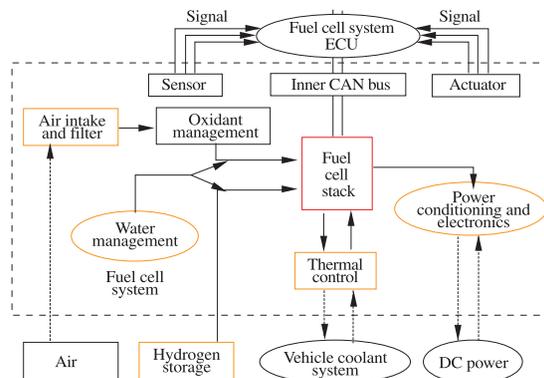
그림 2. Schematic representations of battery and fuel cell

## 2.1 연료전지 스택

그림 2(b)에서처럼 각각 1개의 애노드와 캐소드 그리고 전해질로 구성된 전지를 단위전지(unit cell) 이라고 부른다. 단위전지의 경우 수소를 연료로 그리고 공기 중의 산소를 산화제로 사용할 경우 전압을 1.2 V 이상 얻을 수 없다. 따라서 높은 전압을 얻기 위해서는 단위전지들을 여러 개 필요한 개수만큼 직렬로 연결시켜야 한다. 단위전지를 여러 개 적층하여 놓은 것을 연료전지 스택이라고 한다. 연료전지의 스택을 제조함에 있어서 스택의 내구성의 확보 및 단위전지들이 모두 균일한 성능을 나타내도록 적층하는 기술이 매우 중요하다.

## 2.2 연료전지 시스템

연료전지 시스템은 그림 3에 나타낸 것처럼 연료전지의 작동에 필요한 모든 요소들을 포함하며, 크게 전기를 생산하는 연료전지 스택과 스택의 운전에 필요한 설비를 총칭하는 BOP(Balance of plant)로 나뉘어 진다. BOP는 연료의 운반 및 공급에 필요한 장치와 생성물인 물이나 열, 전력을 처리하는 장치들로 구성된다.

그림 3. Typical fuel cell system<sup>[4]</sup>

### 3. 연료전지의 분류

#### 3.1 전해질의 종류에 따른 분류

연료전지의 종류는 표 1에서 보는 것처럼 사용되는 전해질의 종류에 의해서 AFC (Alkaline Fuel Cell), PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell), MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell), PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell) 과 SOFC (Solid Oxide Fuel Cell) 등 5가지로 일반적으로 구별되어진다. 액체전해질을 사용하는 연료전지는 AFC, PAFC 및 MCFC이고, 고체전해질을 사용하는 연료전지는 PEMFC 및 SOFC이다. 그리고 현재 연구가 진행되고 있는 PCFC (Protonic Conducting Fuel Cell) 에서는 고체전해질을 사용한다.

DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) 는 PEMFC와 마찬가지로 고체고분자전해질을 사용하지만 기체상태의 연료를 사용하는 기존의 연료전지들과는 달리 액체상태의 메탄올 용액을 연료로 사용하기 때문에 전지반응 기구가 다르고 운전특성이나 휴대특성이 달라 PEMFC와 구별하여 부르고 있다. DMFC는 소형으로 제작이 가능하고 운반이 용이하고 상대적으로 안전하여 소형 전자기기에 사용할 목적으로 많은 연구가 진행되고 있다.

액체전해질을 사용하는 연료전지의 경우 액체전해질을 공간적으로 원하는 위치에 담아두기 위해서 다공성 담체를 이용한다. 담체로는 주로 전해질의 작동조건에서 안정한 세라믹 재료를 사용한다. 액체전해질의 단점은 전해질의 위치제어가 어렵고, 휘발성이 있어서 전해질 양이 시간에 따라 감소함으로써 성능이 감소하며 전해질 자체의 부식성이 있어서 주변 소재의 퇴화를 촉진하는 점들이 있다.

고체전해질은 상대적으로 전해질의 위치제어가 쉽고, 전해질의 위치가 고정되어 있어서 전해질 고갈의 위험성이 없으며, 부식성이 약하여 소재의 수명이 길어지는 장점들이 있다. 고분자전해질의 경우 수분이 어느 함량 이상 내부에 존재할 때 수소이온 전도도를 나타내므로 액체전해질과 고체전해질의 중간성격을 띤다. 즉 고분자전해질은 액체전해질에서 전해질을 담아두는 구조가 필요한 것처럼 마찬가지로 수분을 고분자전해질 내에 담아줄 수 있는 장치가 추가로 필요하다. 그러나 한편 고체전해질과 마찬가지로 전극 내에서의 전해질의 위치가 고정되어 있는 특징이 있다.

표 1. Classification of fuel cells with electrolyte types.

	Electrolyte	Mobile ions	Phase	Operating Temp. (°C)
1. AFC	KOH solution (30 ~ 85wt%)	OH <sup>-</sup>	L (asbestos matrix)	80 ~ 250
2. PAFC	100%H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sup>+</sup> or H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	L (SiC matrix)	~ 220
3. MCFC	Li <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> or K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	L (LiAlO <sub>2</sub> matrix)	~ 650
4. PEMFC	Polymer(Nafion)	H <sup>+</sup> or H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	S + L	< 100
5. SOFC	Oxide (YSZ)	O <sup>2-</sup>	S	600 ~ 1000
PCFC	Solid protonic conductor	H <sup>+</sup>	S	100 ~ 500
DMFC	Polymer(Nafion)	H <sup>+</sup> or H <sub>3</sub> O <sup>+</sup>	S + L	< 100

연료전지의 출력은 단위전지의 반응면적과 적층된 단위전지의 수에 비례한다. 각각의 연료전지는 종류에 따라 증가시킬 수 있는 단위전지의 반응면적과 적층할 수 있는 단위전지의 수가 달라진다. 예를 들어 DMFC의 경우 연료가 액체상태이므로 전극내부의 촉매표면으로 연료의 이동이 기체상태의 연료에 비해 어렵다. 따라서 큰 면적이거나 적층된 복잡한 구조의 스택에서는 액체연료의 공급과 제어가 용이하지 않아서 그림3 에서 보는 것처럼 DMFC는 출력의 증가에 따라 효율이 감소되는 특성을 나타낸다.

반면에 기체연료를 사용하는 다른 연료전지들의 경우에는 출력의 증가에 따라 효율이 감소되는 특성이 나타나지 않는다. SOFC 나 MCFC 그리고 PAFC의 경우에 효율은 출력의 증가에 무관한 특성을 나타내고, PEMFC의 경우에는 출력의 증가에 따라 효율이 조금 증가하는 경향을 나타낸다. 용량에 따른 적절한 연료전지의 종류는 그림 4에서 보는 것처럼 대용량의 발전용으로는 MCFC나 SOFC가 적합하며, 수송용이나 가정용의 중용량에는 대체적으로 PEMFC가 적절한 것으로 알려져 있다<sup>6)</sup>. 대용량에 적합한 연료전지는 대체적으로 작동온도가 높은 MCFC나 SOFC인데, 그 이유는 고온에서 열병합에 의한 발전이 가능하여 효율이 높아지기 때문이다. 연료전지의 작동온도는 효율의 측면 뿐만 아니라 선택 가능한 소재의 종류 및 가공방법의 제한 그리고 열응력의 문제 등의 측면에서 매우 중요하다.

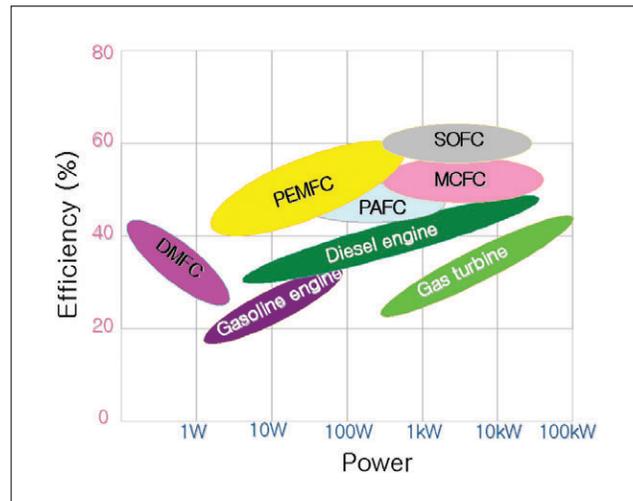


그림 4. Efficiency of fuel cells with power

### 3.2 용도에 따른 분류

연료전지를 용도에 따라 분류하면 표 2에서 보는 것처럼 움직이지 않고 고정된 장치나 건물에 전기를 공급해 주는 고정형 연료전지와 움직이는 기기나 장치에 전기에너지를 공급해 주는 이동형 연료전지로 크게 나뉘어 질 수 있다. 고정형의 경우 수 킬로와트의 용량을 필요로 하는 가정용에서부터 수십 ~ 수백 킬로와트(W)의 용량이 필요한 상업용, 그리고 수백 킬로와트~ 수 메가 와트의 용량이 필요한 발전소 대용의 분산발전용이 있다. 고정형에 사용되는 연료전지는 이동이 필요하지 않기 때문에 무게가 무거워도 문제가 되지 않으며 수송용이나 휴대용에 비해 기계적 충격에 대한 문제가 적다. 현재 상용화되어 상업용 및 분산발전용으로 사용되고 있는 연료전지로는 PAFC

와 MCFC 가 있다. 이동형에 사용되는 연료전지는 무게가 가벼워야 하며 기계적 충격이 반복적으로 일어날 수 있기 때문에 충격에 견딜 수 있어야 한다. 이동형에는 승용차나 버스 트럭 등의 구동에 사용되는 수송용 연료전지와 휴대폰이나 노트북 등에 사용되는 휴대용, 그리고 로봇이나 보트 등에 사용되는 이동전원용 연료전지가 있다. 이동형에 사용되는 연료전지로는 비교적 무게가 가벼운 PEMFC 와 DMFC가 현재 개발 중에 있으며 상용화에 매우 근접해 있는 실정이다.

표 2. Classification of fuel cells with their usages.

	용도별 분류	용 도	적용가능한 연료전지
고정형	분산발전용	발전소 (250kW ~ 수 MW)	MCFC, PAFC, SOFC
	상업용	병원, 호텔, 공장 (10 ~ 100kW)	PEMFC, MCFC, PAFC, SOFC
	가정용	주택 (3 ~ 10kW)	PEMFC, SOFC
이동형	수송용	승용차 (70 ~ 90kW) 버스 (180 ~ 250kW)	PEMFC, DMFC
	휴대용	휴대폰 (~ 2kW), 노트북 (~ 50W) 디지털카메라, 캠코더, DMB, PMP	DMFC
	이동전원용	센서, 배터리충전용, 전동공구, 로봇, 보트, 무인비행선 등	PEMFC, DMFC

#### 4. 연료전지용 소재 및 부품

연료전지 스택은 그림 5에서 보는 것처럼 전기화학전지를 구성하는 Anode, cathode, 전해질이 있고 그 외에 전극내부로 균일하게 가스를 공급시켜주며 전자의 이동 통로를 제공하는 집전체 (current collector), 각각의 전기화학전지를 서로 분리시켜주며 가스의 공급통로 역할을 하는 분리판 (separator or bipolar plate) 그리고 전체스택을 지지해주는 End plate 로 구성된다.<sup>[6,7]</sup>

##### 4.1 전극과 촉매 소재

전기화학반응이 일어나는 Anode와 Cathode 를 총칭하여 전극 (Electrode) 이라 부른다. Anode 는 산화반응이 일어나는 전극을 뜻하고 Cathode 는 환원반응이 일어나는 전극을 의미한다. 전극은 각각전기화학반응이 빠르게 일어날 수 있는 자리를 제공해주는 촉매 재료 (Catalyst material) 와 촉매재료가 적절한 위치를 차지할 수 있도록 지지해주는 역할을 하는 지지체 (Supporting material) 로 구성된다.

전극에서 지지체는 기계적 강도를 유지해줄 뿐만 아니라 전기화학 반응에 필요한 전자의 이동이 쉽게 이루어지도록 전자전도도 (Electronic conductivity) 가 높아야 한다. 또한 반응가스의 공급이 이루어지도록 다공질로 구성되어야 하며, 사용 환경에서 화학적으로 안정하여야 한다. 위의 모든 조건들을 만족시키는 지지체 물질로는 탄소 입자들과 전자전도성 세라믹 입자들이 있다.

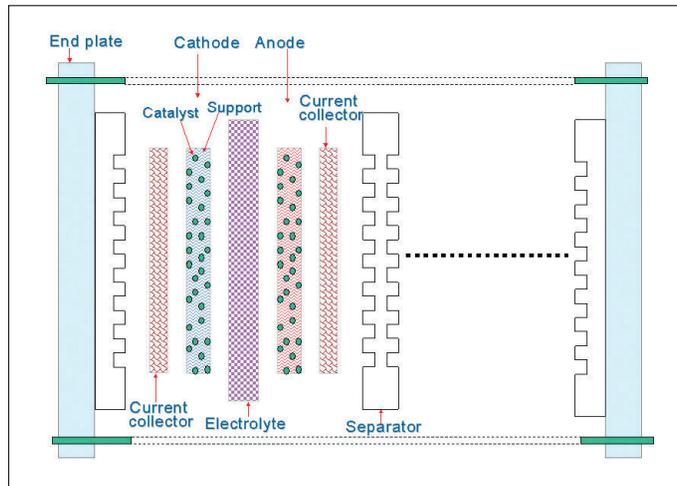


그림 5. Schematic representation of a fuel cell stack

전기화학반응이 일어나는 자리를 제공해 주는 촉매 재료들은 연료전지의 종류에 따라 다를 수 있다. 표 3은 각 연료전지에서 주로 사용되는 촉매 재료들을 보여주고 있다. 저온에서는 백금 (Pt) 이 촉매로 주로 사용되고 있으며, 고온에서는 Ni, NiO 나 세라믹재료가 촉매로 사용될 수 있다. DMFC의 경우 메탄올의 산화과정에서 발생된 일산화탄소 (CO) 가 자신은 더 이상 산화 되지 않으면서 촉매표면에 강하게 흡착하여 촉매의 기능을 저하시키는 피독효과(Poisoning effect) 가 나타난다. 따라서 DMFC의 경우 CO 의 빠른 산화를 돕는 Ru 이 포함된 촉매가 Anode catalyst 로 사용된다.

표 3. Catalyst materials for fuel cells.

	Catalyst(anode)	Catalyst(cathode)
1. AFC	Pt/Ni	Pt/Ag
2. PAFC	Pt catalysts	Pt catalysts
3. MCFC	Ni	NiO
4. PEMFC	Pt/Pt alloys	Pt/Pt alloys
5. SOFC	Ni-YSZ cermet	Perovskite materials
PCFC	Pt/Ni	Pt/NiO
DMFC	Pt-Ru	Pt/Pt alloys

## 4.2 전해질 소재

연료전지에 사용되는 전해질의 종류는 연료전지의 작동온도를 결정하는 매우 중요한 인자이다. 연료전지 개발 초기에는 주로 액체전해질이 사용되었고, 연료전지의 연구가 진행됨에 따라 점차 고체전해질로 변환되는 경향을 보이고 있다. 고체전해질은 액체전해질이 갖는 강한 부식성과 휘발성의 문제가 없고 위치제어가 상대적으로 쉬워서 고효율의 특성을 나타낸다. 지금까지 개발된 고체전해질로는 100℃ 이하에서 작동하는 고분자전해질과 600

℃ 이상에서 작동하는 산화물 전해질이 있다 (표1 참조). 100℃ 이하의 저온의 작동온도는 전기화학반응속도가 느리고 사용 가능한 촉매재료가 값비싼 백금계에 국한된다는 단점이 있고, 600℃ 이상 고온의 작동온도는 전기화학반응 속도가 빠른 장점이 있지만 고온에 견디는 재료를 사용해야 하기 때문에 상대적으로 재료의 가격이 높아지고 열 충격 문제가 발생하는 단점을 나타낸다. 따라서 저온과 고온의 문제를 최소화 할 수 있는 중온형 고체전해질의 개발이 매우 중요하다. 현재 연구되고 있는 중온형 고체전해질은 수소이온전도성 고체전해질로서 금속산화물 및 수산화물 그리고 고체 산이나 다양한 무기물들이 있다.

### 4.3 집전체

연료전지에서 집전체는 촉매층과 분리판층을 전기적으로 연결시키는 본 기능 외에 공급된 가스를 촉매층으로 균일하게 분산시켜주는 기능과 생성된 물을 쉽게 배출되도록 돕는 기능을 한다. 촉매층과 분리판층 사이에 집전체를 사용하지 않을 경우 접촉저항이 커지고 반응물과 생성물의 원활한 공급과 제거가 일어나지 않아 성능이 저하되는 현상이 일어날 수 있다. 널리 사용되고 있는 집전체로는 발수 처리된 다공성 탄소 종이 (Porous carbon paper) 나 탄소 천 (carbon cloth), 혹은 금속 망 (metal mesh) 등이 있다.

### 4.4 분리판

연료전지 스택에서 분리판 (separator) 은 그림 6에서 보는 것처럼 단위전지들 사이를 격리하는 역할을 한다. 단위전지들 사이의 격리는 연료가스과 산소가스의 혼합을 막기 위함이다. 또한 분리판은 연료전지의 모양을 유지하는 내구성을 확보하는데 이용될 뿐만 아니라 연료의 공급에 필요한 유로 (Flow channel) 를 제공하는 역할도 수행하고 있다. 분리판의 유로 형태는 연료전지의 성능을 좌우하는 중요한 인자로서 현재 많은 연구자들에 의해서 연구가 진행되고 있다.

### 4.5 End plate

여러 개의 단위전지가 서로 연결되어 연료전지 스택을 이루고 완성된 스택은 최종적으로 End plate에 의해서 모든 단위전지 부품들이 기계적으로 균일한 접촉을 하여 내부 전기저항을 최소화하고 전체적으로 안정된 모양이 유지된다. End plate에는 가스의 공급 및 온도를 측정할 수 있는 장치들이 고정되기도 한다. End plate재료로는 무게를 줄이고 기계적 강도를 부여할 수 있는 알루미늄 합금 재료가 널리 사용되고 있으며, 내식성을 부여하기 위하여 양극 산화처리 후 사용되고 있다.

## 5. 국내 · 외 연료전지 연구개발 현황

현재 전 세계는 각국 정부의 주도하에 연료전지를 포함한 대체에너지의 개발에 천문학적인 연구개발비를 투자하고 있다. 상업적 목적으로 연구개발이 시작된 것은 1960년대에 시작하여 1980년대에 본격적으로 시작되었다. 현재 연료전지 관련기술이 가장 앞서 있는 국가로는 미국을 비롯하여 일본, 캐나다 그리고 유럽의 국가들이 있다. 미국에서는 DOE (Department of Energy)의 주도하에 연구개발에 박차를 가하고 있으며, 새로운 개념의 연료전지의 개발에 필요한 기초 연구 뿐만 아니라 기존의 PEMFC 및 SOFC의 응용연구에 이르기까지 광범위한 연구가

진행 중이다. 일본에서는 경제산업성의 주도아래 많은 연구 개발 투자가 이루어지고 있고, 그 외에 캐나다, 독일, 영국, 이탈리아, 스위스, 스페인, 터키, 벨기에, 인도, 호주, 뉴질랜드, 브라질, 스웨덴, 네덜란드, 프랑스, 러시아, 오스트리아, 중국 등에서도 실증 연구가 현재 진행 중이다. 연료전지 자동차 시판 1호는 2002년 12월 일본에서 만들어졌고, 2003년 1월에는 미국 부시 대통령 수소 프로그램에 5년간 12억 달러 투자를 발표하였다. 2003년 11월에는 일본, 미국, 유럽 등 15개국과 유럽위원회가 참가한 수소경제를 위한 국제파트너십 (International Partnership for Hydrogen Economy, IPHE) 이 발효되었고, 2005년부터는 실용화 연구에 대한 본격적인 연구개발이 시작되었고 그 발전속도는 점차 빨라지고 있다.

## 5.1 국내 연료전지 연구개발 현황

국내에서의 연료전지에 대한 연구는 1987년부터 한국에너지기술연구원 (KIER)에서 인산형 연료전지스택 개발을 수행함으로써 시작되었고 1992년에 1kW 급 인산형 연료전지 본체를 개발하였다. 고분자 연료전지에 대한 연구는 1987년 대체에너지 개발 촉진법에 의해 연료전지 개발 기본계획이 확정되면서부터 1988년부터 시작되었다. 1단계에서는 포항공대에서 기초연구를 수행하다가 2단계인 1994년부터는 한국가스공사에서 주관하여 연구개발이 이루어졌으며, 1996년부터 한국에너지기술연구원이 주관이 되어 1998년 5kW PEMFC 를 개발하였으며 현재까지 연구개발을 진행해오고 있다. 한국과학기술연구원 (KIST) 에서는 1996년 수송용 PEMFC 개발을 목적으로 연구를 시작하였으며 1998년에 1kW, 2000년에는 7 kW PEMFC를 개발하였다. 1998년부터 선도기술개발 사업으로 현대자동차와 한국과학기술연구원이 공동으로 연구개발에 착수하여 2000년에는 10 kW PEMFC를 이용한 연료전지/배터리 하이브리드 자동차"스포티지"를 개발하였다. 한국기계연구원에서는 연료전지용 BOP (Balance of Plant)를 2004년부터 연구를 시작하였고, 연료전지용 고성능 전극개발에 대한 연구를 2002년부터 진행해 오고 있다. 국내 기업체의 경우 삼성종합기술원에서는 1997년부터 휴대용 전원용으로 PEMFC에 대한 연구개발을 자체적으로 시작하였고, 그 외에 퓨얼셀파워, GS퓨얼셀 등 많은 기업체에서도 PEMFC를 개발하고 있다.

한편 분산발전용으로 사용하기 위한 용융탄산염 연료전지 (MCFC)의 개발은 KIST, 한국전력연구원, 포항산업과학연구원 (RIST), 두산중공업 및 대학 등이 다수 참여 하여 현재 많은 투자가 이루어지고 있으며, 실증실험을 진행하고 있는 단계이다. 반면에 SOFC 의 경우에는 기초 연구단계로서 KIST, KIER, 한국전력연구원 및 많은 대학에서 주도적으로 연구를 진행하고 있다. DMFC 는 휴대용 전자기기의 전원용으로서 기업체에서 특히 많은 관심을 가지고 투자하고 있는 분야로서 현재 삼성 SDI, 삼성 전기, LG 화학, 한국화학연구원 및 다수의 대학들에서 연구개발을 진행하고 있다. 그 외에도 연료전지 부품을 연구하고 있는 국내 기관들로는 고분자 전해질 제조 (한화), 산업용 스팀개질기의 개발 (유공), 금속 분리판 개발 (한국타이어), 수소 스테이션 개발 (SK) 등 다수의 기업체들이 연구개발에 투자하고 있다.

현재 국내 연료전지의 연구개발은 정부의 주도하에 이루어지고 있으며, 2005년 8월 "친환경 수소 마스터플랜"을 수립함으로써 구체적인 발전전략이 윤곽을 드러내었다. 계획에 따르면 표 4에 나타난 바와 같이 2020년에는 전체에너지의 3% 그리고 2040년에는 전체에너지의 15%를 수소연료전지에서 공급하는 것으로 되어 있다. 예측되는 국내 시장의 규모는 2010년에는 메모리반도체 시장의 두 배에 달하고 2040년에는 산업규모 109조원에 고용효과는 100만 명으로 예상되고 이산화탄소 배출량은 현재보다 20% 감축될 것으로 예측되었다.

표 4. 분야별 · 단계별 추진 목표

연 도		2020	2040
산 업	· GDP중 수소연료전지산업 비중	4%	8%
	- 총 자동차 중 연료전지 자동차 비중	8%	54%
	- 총 전력설비 중 발전용 연료전지 비중	7%	22%
	- 총 주거전력설비 중 가정용 연료전지 비중	5%	23%
	- 총 모바일기기 중 연료전지 비중	80%	100%
에너지	· 최종 에너지 중 수소에너지 비중	3%	15%

국내 연료전지의 연구개발 투자현황을 보면 산자부의 주도하에 2004년에 350억원, 그리고 2005년에는 400억원이 투자되었다. 과기부의 경우 프론티어 사업으로 2009년까지 총 900억원을 투자할 예정이다. 현재 국내의 연료전지 연구 개발은 “수소연료전지사업단”의 주관아래 이루어지고 있다. 수소연료전지사업단은 2004년 5월 출범하여 현재 제 1단계 (2004 ~ 2012) “연구개발 및 보급초기”로 정부의 지원 하에 실증, 보급을 하는 단계이며, 제 2단계 (2013 ~ 2020) 는 “연료전지 시장 형성기”, 제 3단계 (2021 ~ 2030) 는 “연료전지 시장 확대기”, 그리고 제 4단계 (2031 ~ 2040) 는 “수소경제 진입기” 로 나누어 연구개발을 진행하고 있다<sup>[8]</sup>. 수소연료전지사업단에서 제시하는 수소연료전지 관련 로드맵을 그림 6 에 나타내었다.

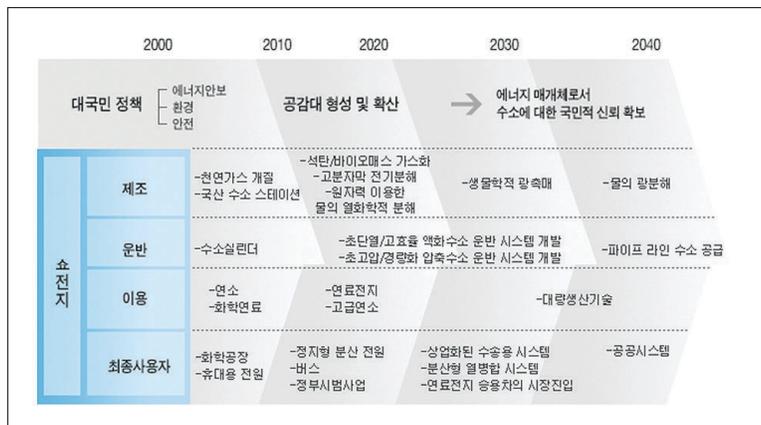


그림 6. 수소연료전지 개발 로드맵<sup>[8]</sup>

## 5.2 일본의 연구개발 현황

일본은 한국에 비해 빠른 1981년에 “Moonlight Plan”을 세워 연료전지의 연구개발을 시작하여 PAFC, MCFC 및 SOFC에 대한 연구개발을 하였고 개발결과 200 KW PAFC 및 1 MW의 초기 형태의 MCFC 를 제작하였으며, SOFC는 2 ~ 3 kW의 기초연구용으로 제작되었다. 1992년부터는 “New Sunshine Plan”이 시작되어 기존의 연구 개발 내용을 지속적으로 발전시켰으며, 추가적으로 PEMFC 에 대한 연구개발을 시작하였다. 2001년 이후에는 PEMFC 에 대대적인 연구비가 투자되었고, 2002년 연료전지 자동차, 수소 스테이션 실증실험을 시작 (JHFC 프

로젝트) 하여 2004년에 48대의 연료전지 자동차 및 10개의 수소 스테이션을 설치하여 시험하였다. 정치형 연료전지의 경우 2002년 실증실험을 시작하여 2002년에 12개소, 2003년에는 31개소에 시범적으로 설치 운영하고 있다. 2004년에는 MCFC 개발 프로젝트를 완료하고 실용단계의 실증실험단계로 이행하였다. 또한 2004년에는 SOFC 신규 프로젝트를 시작하였으며, 2006년에는 가칭 “수소 첨단 과학기술센터”를 설립하여 7년 동안 수소내구성 합금 개발을 위한 연구개발을 진행할 예정이다.

일본의 연료전지관련 연구개발은 주로 METI (Ministry of Economy, Trade and Industry) 및 MLIT (Ministry of Land, Infrastructure and transport) 등의 정부기관에서 지원되며, NEDO (New Energy and Industrial Technology Development Organization)에서 에너지 관련 연구개발 프로그램 주도하고 있다. 일본 내 기업들은 2001년에 FCCJ (Fuel Cell Commercialization Conference of Japan) 컨소시엄을 만들어 연료전지 개발에 박차를 가하고 있다. 일본에서 제안된 PEMFC 관련 로드맵을 보면 1단계 (2000 ~ 2005)는 시작기로 분류되고, 2단계 (2005 ~ 2010)는 시장 형성기로 일본 내에 50,000대의 연료전지 자동차와 2.1 GW의 전력을 정치형 연료전지를 이용하여 공급하고, 그리고 3단계 (2010 ~)는 성장기로 일본 내에 5백만대의 연료전지 자동차와 10 GW의 전력을 연료전지를 이용하여 공급하는 것을 목표로 하고 있다<sup>9)</sup>.

### 5.3 미국의 연구개발 현황

미국의 Pratt & Whitney 사는 1959년 영국의 Francis Thomas Bacon에 의해서 개발된 알칼리 연료전지 특허권을 확보하여 미국의 NASA에서 지원한 우주선용 연료전지 개발프로그램에 참여하였고, 1966년 처음으로 아폴로 우주선에 성공적으로 적용함으로써 연료전지의 연구에 큰 기여를 할 수 있었다. 1963년에는 General Electric (GM) 사에 의해서 Gemini 우주선에 탑재할 목적으로 고분자 전해질 연료전지 (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell, PEMFC) 가 처음으로 개발되었고, 1970년대에는 Dupont사에서 개발한 Nafion 전해질 막 개발로 PEMFC의 발전이 크게 이루어졌다. 1969년 28개 가스회사를 중심으로 주거용, 상업용 연료전지 개발을 위한 9개년 계획 TARGET (Team to Advanced Research for Gas Energy Transformation)이 수립되어 연구개발이 진행되었다. 1990년 ~ 1996년에는 DOE (Department of Energy) 의 지원 아래 50 kW 연료전지 자동차 개발에 대한 연구 및 1993년부터는 고분자 연료전지 시스템 개발을 위한 “The Partnership for a New Generation of Vehicles, PNGV” 프로그램이 시작되었다. DoD (Department of Defence) 는 2001년 주거용 PEMFC 실증실험을 3600만 달러를 투입하여 시작하였고, 2004년까지 총 1억 3700만 달러의 연구개발비를 투자하였다. PAFC 도 1994년부터 1997년까지 30군데의 군 숙소용으로 건설되었다.

1970년대와 1980년대 초까지는 연방정부의 지원 아래 주로 PAFC 에 대한 연구가 이루어졌다. 1980년대 후반에 이르러 고온형 연료전지인 MCFC와 SOFC의 연구개발로 초점이 이동하였으며, 1999년에는 DOE의 지원 아래 3 ~ 10 kW SOFC 개발을 목표로 정부와 산업체, 학계를 연결한 SECA (The Solid State Energy Conversion Alliance) program이 출발되었다.

2005년 DOE에서 제시한 수송용 PEMFC의 목표는 2010년까지 kW당 45달러이하로 그리고 2015년까지는 kW 당 30달러 이하로 내리며 5,000시간 동안 견디는 연료전지를 개발하는 것이다. 수송용 연료전지 시스템의 단가를 살펴보면 1990년 \$3000/kW 이었던 것이 2002년에는 \$275/kw 그리고 2004년 \$200/kw로 크게 감소되었다. 분산발전용 PEMFC 의 경우 DOE에서 제시한 목표는 2010년까지 kW당 400 ~ 750달러이고 40,000 시간의

표 5. Fuel Cell Financing/Equity Investment

Company	Amount Secured (in US dollars)	Date	Type of Financing	Investment Partner(s)	Application
Ballard Power Systems	\$ 100 million	Winter 2002	Equity Financing	RBC Capital Markets, CIBC World Markets, BMO Nesbitt Burns, National Bank Financial, TD Securities, UBS Bunting Warburg	Planned operations beyond 2007
ECD Ovonics	\$ 87.8 million	Winter 2004/2005	Private Placement financing	-	Double the manufacturing capacity of United Solar Ovonics' products, general corporate purposes, including research and development investments
Plug Power	\$ 58.5 million	Fall 2003	Common stock offering	Citigroup Global Markets and Stephens	R&D, manufacturing
ReliOn (formerly Avista Labs)	\$ 25 million	Fall 2004	Equity financing	Oak Investment Partners, Enterprise Partners Venture Capital, Wall Street Technology Partners, Chrysalix Energy, and Buerk Dale Victor, and Avista Corp.	Increase engineering, sales, and marketing resources
PolyFuel, Inc.	\$ 18.4 million	Summer 2004		CDP Capital Private Equity, Mayfield, Ventures West, Technology Partners, Intel Capital Chrysalix Energy, Conduit Ventures, KTB Ventures, Hotung Venture Partners, Yasuda Enterprise Development and BiNEXT.	Direct methanol fuel cell technology—membranes
PolyFuel, Inc.	\$ 15.6 million	Summer 2002		Ventures West, Chrysalix Energy, Intel Capital, Mayfield and Technology Partners	Direct methanol fuel cell technology
Neah Power Systems	\$ 12 million	Summer 2004	Equity funding	Castile Ventures, WestAM, Frazier Technology Ventures, Alta Partners and Intel Capital	Support the company's development and commercialization programs
Jadoo Power Systems	\$ 11 million	Spring 2005	New venture financing	MDV—Mohr Davidow Ventures, Venrock Associates and Sinclair Broadcast Group	Expand research and development and accelerate its product development roadmap
Millennium Cell	\$ 10 million	Spring 2004	Private Placement financing	Through sale of debentures convertible into common stock	Consumer electronics, standby power, military portable power

운전시간이다. 보조전력원으로 사용될 SOFC의 목표치는 2010년까지 kg당 100 W, 또는 ℓ 당 100 W 이다. 휴대용 DMFC의 경우 목표치는 2010년까지 ℓ 당 1 kW이다. 2005년 DOE에서 지원한 연구비 7500 만 달러의 주요 사용처를 보면 스택용 부품 연구개발에 43%인 3200만 달러를 사용하였으며, 연료전지 기술 실증시험에 24%, 연료 개질 분야에 13%, 수송용 시스템에 10%, 분산발전 시스템에 9% 그리고 프로그램 운영에 1%를 각각 사용하였다. 현재 미국의 경우 40% 정도의 연구개발비가 기업체로부터 공급되고 있으며 표 5는 2002년부터 2005년 사이에 투자된 연구개발비의 상위 10개의 기업체를 나타내었다.

## 6. 맺음말

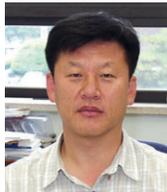
현재 전 세계는 화석연료의 고갈에 따른 대체에너지의 개발의 필요성뿐만 아니라 환경오염과 지구 온난화 문제의 해결을 위하여 청정에너지의 개발의 필요성이 무엇보다 절실한 실정이며, 이를 달성할 수 있는 방법으로 연료전지를 이용할 수소에너지의 이용이다. 연료전지는 전기화학반응을 이용하여 연료의 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환시키는 장치로 오염물질을 거의 생성하지 않는 고효율 미래의 에너지원이다. 연료전지에서 단위전지는 Anode 와 Cathode 를 통칭하는 전극과 이온의 이동통로가 되는 전해질로 구성되며, 스택은 적층된 단위전지들을 격리해주는 분리판과 전체를 지지해주는 End plate 로 구성되어 있다. 연료전지의 종류는 사용되는 전해질의 종류에 따라 알칼리 연료전지(alkaline fuel cell, AFC), 고분자연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC), 인산염 연료전지(phosphoric acid fuel cell, PAFC), 용융탄산염 연료전지(molten carbonate fuel cell, MCFC) 그리고 고체산화물연료전지(solid oxide fuel cell, SOFC) 등 보통 5가지로 나뉘어 진다. 그 외에 PEMFC 와 마찬가지로 고분자전해질을 사용하지만 기체상태의 연료를 사용하는 다른 연료전지들과는 달리 액체상태의 메탄올 용액을 연료로 사용하는 직접메탄올 연료전지(direct methanol fuel cell, DMFC)가 있다. 본 기고에서는 연료전지의 역사를 발달과정의 관점에서 개략적으로 정리하였고, 연료전지의 종류 및 특징, 구성요소, 그리고 국내의 연료전지 연구개발 현황을 역사적 순서 및 연구개발 주도기관에 따라 정리하였다. 이를 기초로 하여 연료전지의 상용화를 위한 성능개선, 생산가격의 저하, 소재의 국산화, 경량화, 소형화 혹은 대용량화 등 부품 및 소재관련 기술개발에 큰 진전이 있기를 기대한다.

## ❁ 참고 문헌

- [1] A. Hamnett, 2003, "Handbook of Fuel Cells", Vol. 1, John Wiley & Sons Ltd., England, pp.36 ~ 43.
- [2] "Smithsonian Institution" 홈페이지 (<http://americanhistory.si.edu/fuelcells/>)
- [3] "DTI Energ Inc." 홈페이지 (<http://www.dtienergy.com/>)
- [4] Tsinghua Science & Technology, Vol. 10, 2005, Pages 610-617
- [5] G. Cacciola, V. Antonucci and S. Freni, 2001, "Technology Up Date and New Strategies on Fuel Cells", Journal of Power Sources, Vol. 100, pp. 67~ 79.
- [6] S. M. Haile, 2003, "Fuel Cell Materials and Components", Acta Materialia, Vol. 51, pp. 5981 ~ 6000.
- [7] L. C. Klein, 2002, "Opportunities for Sol-Gel materials in Fuel Cells", Materials Science, Vol. 20, No.1,

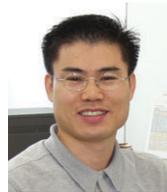
pp.81 ~ 93.

- [8] “수소연료전지 사업단” 홈페이지 (<http://www.h2fc.or.kr/>)
- [9] A. Maeda, presented in International Conference on Innovation in Energy Technologies, Washington DC., Sep. 23 – 30, 2003.
- [10] “The online fuel cell information resource” (<http://fuelcells.org/>)



정 용 수

- 한국기계연구원 표면기술연구센터 책임연구원
- 관심분야 : 양극산화, 생체재료, 연료전지
- E-mail : yjeong@kmail.kimm.re.kr



문 성 모

- 한국기계연구원 표면기술연구센터 선임연구원
- 관심분야 : 금속 표면처리, 연료전지
- E-mail : sungmo@kmail.kimm.re.kr