

나노기술분석보고서 2008

ISBN 978-89-6211-305-1

연료전지용 나노소재

김경호·최봉기·소대섭·유재영·이영재

2008. 12



표 차례

[표 2-1] 투싼 SUV의 Tank to Wheel 자료.....	2
[표 2-2] 수소연료전지차 보급량에 따른 석유 소비 및 CO ₂ 감소량.....	2
[표 2-3] 연료전지의 종류.....	6
[표 2-4] 일본 NEDO의 가격 및 성능 목표(2006): 연료전지 차량.....	18
[표 2-5] Plug Power에서 판매 중인 5kW급 GenSys 사양.....	20
[표 2-6] 메탄올과 수소저장 기술에 관한 에너지 밀도의 비교.....	22
[표 2-7] DMFC의 MEA 관련 세부기술의 정량적 수준.....	25
[표 2-8] 휴대용 연료전지 MEA와 스택 구성 요소의 가격 비율.....	26

그림 차례

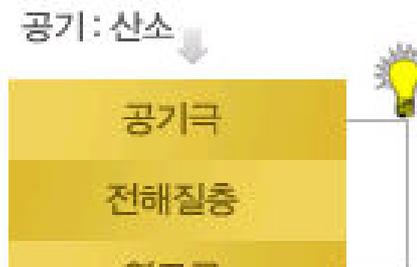
[그림 2-1] 연료전지 발전원리.....	1
[그림 2-2] PEMFC의 원리.....	12
[그림 2-3] 고분자 연료전지 차의 구조.....	12
[그림 2-4] 가정용 연료전지 시스템의 구조.....	14
[그림 2-5] DMFC의 원리.....	23
[그림 2-6] Bipolar형 스택과 Monopolar형 스택.....	27
[그림 2-7] MCFC의 원리	30
[그림 2-8] 용융탄산염 연료전지의 구성요소.....	31
[그림 2-9] MCFC 발전시스템의 구성.....	32
[그림 2-10] FCE 시스템의 스택 작동 원리.....	39
[그림 2-11] GenCell에서 개발한 40kW급 MCFC 스택 및 시스템.....	39
[그림 2-12] IHI 중공업의 300kW급 MCFC 발전 시스템.....	40
[그림 2-13] CFC-Solution에서 개발한 250kW급 MCFC 발전 시스템.....	41
[그림 2-14] SOFC의 원리.....	44
[그림 2-15] 가정용 연료전지 사용시 에너지 절감.....	45
[그림 2-16] 롤스로이스 SOFC 셀 구조.....	47

제2장 기술개발 동향 및 전망

1. 기술의 개요

가. 연료전지의 정의 및 기술개발의 필요성

연료전지(Fuel Cell)란 전기화학적 에너지 변환장치로서, 연료의 화학 에너지를 직접 직류 전기로 변환하는 장치로, 가동장치 없이 단 하나의 단계에서 전기를 발생시킨다는 점에서 기존 발전장치와 다른 기술원리를 가지고 있다. 즉, 닫힌 계내에서 전지반응을 하는 화학전지와 달리 연료와 산화물 등 반응물이 외부에서 연속적으로 공급되어, 반응생성물이 연속적으로 계외로 제거되는 시스템으로 구성된다.



[그림 2-1] 연료전지 발전원리

연료전지는 최근 이산화탄소 배출 증가에 따른 지구온난화와 환경오염물질의 배출 증가에 따른 대기질 개선을 위한 화석연료 발전의 대안으로 큰 관심을 받고 있어, 발전 및 자동차의 차세대 구동방식으로 많은 연구가 추진되어왔다. 특히, EU는 지금까지 업체의 자율에 맡겨오던 이산화탄소 배출량 감축을 의무화시켜 2012년까지 130 g/km(가솔린 기준 연비, 약 17.7 km/L)로 강화하여 현재 수준의 가솔린차 및 디젤차의 소형화, 경량화 및 연비 향상 기술만으로는 상기 기준을 충족시키기에 한계가 있고, 이에 따라 이산화탄소를 배출시키지 않는 자동차 동력원에 대한 뉴 패러다임이 필요할 것으로 판단된다. 또한, 미국에서는 캘리포니아주를 중심으로 무공해 친환경 자동차 판매를 의무화하여, 캘리포니아에 6만대 이상을 판매하는 업체는 2005년부터 판매량의 10%를 친환경 자동차로 판매해야 한다. 차량이 1년 동안 20,000 km를 주행한다고 가정할 때, 가솔린차 및 디젤차는 약 4~5톤의 이산화탄소를 배출하며, 만약 100,000대의 연료전지차가 운행된다면 약 5십만톤의 이산화탄소 배출이 저감될 수 있다.

[표 2-1] 투싼 SUV의 Tank to Wheel 자료

차종	연비	CO ² 발생량	20,000km/년 주행기준	
			연료소비량	CO ₂ 발생량
가솔린 A/T	9.8 km/L ¹⁾	237.7 g/km	2,041 L	4,754 kg
디젤 A/T	12.7 km/L ¹⁾	210 g/km	1,580 L	4,200 kg
연료전지	22.8 km/L ^{2),3)}	-	233 kg H ₂	-
	30 km/L ^{2),4)}	-	177 kg H ₂	-

Note: 1) 공인연비, 2) 혼합모드(UDDS 55% + HWFET 45%)시 가솔린 등가연비
 3) 80kW급 2006년도 연료전지차(모니터링사업 투입차량), 4) 연료전지차 목표값

상기 표 2-1은 투싼 SUV의 Tank to Wheel 자료를 나타내며, 표 2-2는 수소 연료전지차의 보급량에 따른 석유 소비 및 이산화탄소 발생 감소량을 대비하여 보여준다.

[표 2-2] 수소연료전지차 보급량에 따른 석유 소비 및 이산화탄소 발생 감소량

운행대수	1000대	10,000대	100,000대	1,000,000대
소비량 감소분 (L/년)	2,046,816	20,468,163	204,081,633	2,040,816,327
이산화탄소 발생량 감소분 (ton/년)	4,754	47,540	475,400	4,754,000

Note: 표 2-1에서의 가정과 값을 활용(1)

나. 연료전지의 역사

연료전지는 1839년경 William Grove와 Christian F. Shoenbein에 의해 그 작동원리가 발견되어 “기체 불타전지”로 명명되었으며(2-4), 1937년에 Francis T. Bacon에 의해 실용 연료전지의 운전을 시작되었다(5). 현대사회에서의 연료전지로 그 원리가 정립되고, 이용이 활성화된 것은 1950년대 말 부터이며, 이 시기에 6kW 연료전지가 개발되어 미국의 우주계획에서 응용되기 시작했다. General Electric은 최초의 고분자막 연료전지를 개발했으며, 1960년대 초 Gemini 계획에서 사용되었고, 이어서 Apollo 우주계획에서 연료전지를 사용해, 생명 유지, 유도 및 통신 장치용 전기가 생산되었다. 1960년대 중반 General Motors는 Union Carbide가 개발한 연료전지를 동력원으로 사용하는 밴(van)을 실험하였다. 이후 실용성 및 그 성능에 관해 의문이

제기됨에 따라 차량용으로는 1990년대 초까지 연구가 미흡하였으나, 1989년 Perry Technology의 Perry Energy Systems는 당시 캐나다의 신생 회사인 Ballard와 합작하여 고분자 전해질형(PEM)연료전지를 동력원으로 사용한 잠수형의 운항 실험에 성공하여, 연료전지의 연구에 불을 지폈으며, 1993년 Ballard Power Systems는 연료전지 동력 버스의 운행 실험에 성공하였다. Perry Energy Systems의 후계자인 Energy Partners는 1993년 PEM 연료전지로 움직이는 최초의 승용차를 시험운행하였으며(6), 미국 에너지부(DOE, Department of Energy)의 지원을 받은 자동차 회사들은 이러한 활동에 박차를 가해, 20세기 말에는 거의 모든 자동차 제조업자들이 연료전지 동력 자동차를 만들어 시험함으로써 “연료전지”라는 신사업이 태동하게 되었다.

다. 연료전지의 종류

연료전지는 사용되는 전해질과 용도에 따라 구분될 수 있으며, 우선 전해질의 종류에 따라서는 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC), 인산형 연료전지(phosphoric acid fuel cell, PFAC), 알칼리형 연료전지(alkaline fuel cell, AFC), 용융탄산염 연료전지(molten carbonate fuel cell, MCFC), 그리고 고체 산화물 연료전지(solid oxide fuel cell, SOFC)로 구분될 수 있다.

알칼리형은 1960년대 군사용(우주선 : 아폴로 11호)으로 개발되었으며, 순수소와 순수산소가 사용되고, 인산형은 1970년대 민간차원에서 처음으로 기술 개발된 1세대 연료전지로 병원, 호텔, 건물 등 분산형 전원으로 이용되며, 현재 가장 앞선 기술로 미국, 일본에서 실용화 단계에 있다. 또한, 용융탄산염형은 1980년대에 기술 개발된 2세대 연료전지로 대형발전소, 아파트 단지, 대형건물의 분산형 전원으로 이용되며, 미국, 일본에서 기술개발이 완료되고 성능평가 진행 중에 있다. 고체산화물형은 1980년대에 본격적으로 기술개발된 3세대로 MCFC보다 효율이 우수한 연료전지로 대형발전소, 아파트 단지, 대형건물의 분산형 전원으로 이용되며, 최근 선진국에서는 가정용, 자동차용 등으로도 연구를 진행하고 있으나 우리나라는 다른 연료전지에 비해 기술력이 가장 낮은 상태이다. 고분자전해질형은 1990년대에 기술 개발된 4세대로 가정용, 자동차용, 이동용 전원으로 이용되며, 가장 활발하게 연구되는 분야이며, 실용화 및 상용화도 타 연료전지보다 빠르게 진행되고 있다. 아래의 표 2-3은 연료전지의 전해질에 따라 이온전도체, 작동온도, 연료 및 연료원료, 효율, 출력범위 등을 나타내고 있다.

또한 연료전지는 상기에 기재된 전해질외에 용도에 따라서도 수송용, 가

정·상업용, 발전용, 휴대용 연료전지로 구분될 수 있다.

a. 수송용 연료전지

연료전지차에는 운전온도가 저온이며, 출력밀도 및 시동 특성이 우수한 고분자 전해질 연료전지가 주로 사용되며 연료전지에서 생성되는 전기로 모터를 구동시킨다. 연료전지차는 연료전지 스택, 수소저장탱크, 스택에 공기와 수소를 공급하는 운전장치, 전력변환기, 모터 및 감속기, 스택의 운전을 보조해주는 보조전원으로 구성되고, 보조전원은 스택의 운전을 도와 차량의 성능을 높이기 위하여 전지 또는 슈퍼캐패시터가 사용된다. 대표적인 수송용 연료전지 시스템으로는 연료전지 승용차와 연료전지 버스가 있으며 환경 및 에너지 문제가 심각하게 대두됨에 따라 향후 관련 시장의 급격한 성장이 예상된다. 수송용 연료전지 분야에서는 연료전지 스택을 포함하는 연료전지 시스템의 가격저감, 연료전지의 내구성 향상, 냉시동 운전, MEA를 포함함 핵심부품 및 주변기기 국산화, 수소저장 탱크 개발, 값싼 수소를 생산할 수 있는 수소인프라 구축이 주요 개발 이슈로 주목받고 있으며, 산업화 시기는 기술개발 속도 및 가격저감 정도에 달려있다.

b. 가정/상업용 연료전지

가정/상업용 연료전지 시스템은 연료전지에 의하여 생산되는 전기와 열을 함께 이용하여 온수와 난방을 공급하며, 고효율 열병합 발전(발전효율 35%, 종합효율 75%이상)으로 에너지 저감에 유리하고, 마이크로 가스터빈에 비하여 시스템의 소음 및 환경오염 배출이 적은 장점이 있다. 가정/상업용 연료전지 시스템의 연료로는 수소 인프라가 구축되기까지는 전국적인 배관망을 가지고 있는 천연가스가 주로 이용되고, 다양한 연료전지 중 고분자전해질 연료전지와 고체산화물 연료전지가 사용되어 왔다. LNG 화력발전 및 일반 보일러와의 비교시 가정용 연료전지 시스템은 전기 및 가스비의 약 12%가 저감되며, 온실가스의 주범인 이산화탄소의 경우에는 40% 수준까지 저감이 가능하고, 약 26%의 에너지가 절약될 수 있다. 가정/상업용 연료전지의 개발이슈로는 연료전지 스택·연료 프로세서의 가격절감 및 내구성 향상, MEA를 포함한 핵심 부품 및 주변기기 국산화를 들 수 있다.

c. 발전용 연료전지

발전용 연료전지는 수백 kw 이상의 전력을 생산하여 기존의 발전 설비를 대체할 수 있는 시스템으로 인산형 연료전지, 용융탄산염 연료전지, 고체산

화물 연료전지가 이용될 수 있다. 인산형 연료전지는 현재까지 대용량을 목적으로 가장 많은 연구가 이루어져 있으나, 가격 문제를 극복하지 못하여 시장진입에 어려움을 겪고 있고, 고체산화물은 기술적 결함으로 인해 아직은 연구개발 단계인데 반하여, 용융탄산염 연료전지는 기술 및 가격을 고려시 가장 상업화에 근접해 있다. 일례로 미국 FCE사의 내부개질형 용융탄산염 연료전지의 시스템 가격 및 내구성은 각각 \$5,000/kw, 20,000시간 이상으로 개발 목표인 \$1,000/kw, 40,000시간에 상당히 근접해 있다.

용융탄산염 연료전지는 사용연료의 개질 방식에 따라 내부개질형과 외부개질형으로 구분되며, 내부개질형은 천연가스, 메탄가스 등의 연료를 수증기와 함께 직접 스택으로 도입한 후 스택 내부의 개질 촉매를 이용하여 연료전지 발전에 사용하는 방식이고, 외부개질형은 사용연료를 스택 외부에 설치된 별도의 연료개질기에서 개질한 후 스택내부로 도입하여 연료전지를 가동하는 방식이다. 내부개질형은 별도의 개질기가 필요치 않으므로 설비 제조비용이 상대적으로 저렴하고 시스템 소형화라는 측면에서 유리한 점이 있고, 외부개질형은 연료개질기의 종류 및 형태에 대한 장도를 가지게 되므로 훨씬 다양한 연료를 적용할 수 있다는 점에서 장점을 가진다. 분산전원이라는 점에서 천연가스를 연료로 사용하는 경우에는 내부개질형이 상대적으로 유리하다고 할 수 있으나, 다른 연료를 사용해야 하는 경우에는 별도의 연료전처리 설비가 필요할 수 있으므로 내부개질형의 장점이 희석될 수 있다. 화력발전대체 집중전원에서는 석탄가스의 활용 가능성이라는 측면에서 외부개질형의 장점이 부각되고 있어, 내부개질형 용융탄산염 연료전지는 도시가스 인프라를 활용한 백업파워나 분산발전뿐만 아니라, 매립지나 하수처리장의 메탄을 주성분으로 하는 부생가스를 활용한 발전, LNG 선박의 보조전원 등 중소규모 독립발전 시장에 적합한 기술로 판단된다. 또한 외부개질 방식은 스택의 연료로 수소를 사용하기 때문에 화학공장이나 제철소 등지의 부생수소를 별도의 공정을 거치지 않고 직접 연료로 사용할 수 있을 뿐만 아니라 특히 석탄가스를 연료로 사용하는 연료전지 발전 시스템에 적합하며, IGFC를 구성할 경우 시스템의 구조가 매우 단순해지기 때문에 규모가 커질수록 경제성이 우수하다. 장기적으로 볼 때 외부개질형 용융탄산염 연료전지는 석탄가스화 기술(IGCC)과 연계하여 기존의 화력발전소를 대체하는 연료전지를 이용한 중앙 집중발전에 가장 유력한 발전방식으로 판단된다.

d. 휴대용 연료전지

휴대용 연료전지는 출력밀도가 낮으면서, 휴대가 간편하고 작동이 편리하

며 연료 교체가 용이한 수w에서 수십w급의 소형 전자기기용 전원·충전 시스템을 포괄하는 것으로, 적용 전자기기의 대상으로는 휴대폰, DMB폰, PDA, 캠코더, 노트북 등이 있고, 최근에는 국방용 전원으로도 그 활용성이 확대되고 있다. 연료전지 유형별로는 메탄올 연료전지, 저장 수소형 고분자 연료전지 혹은 개질가스형 고분자 연료전지 등이 있고, 휴대용임을 감안하여 마이크로 고체산화물 연료전지(Micro-SOFC, Micro Solid Oxide Fuel Cell)에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다. 휴대용 연료전지 시스템으로 가장 적합한 시스템이 어느 것인가에 대해서는 여러 가지 이견들이 있으나, 고분자 연료전지와 직접메탄올 연료전지가 유사한 수준으로 주목을 받고 있으며, 일부기업은 고체산화물 연료전지를 개발하고 있지만 소수에 그치고 있다.

[표 2-3] 연료전지의 종류

	PAFC	MCFC	SOFC	PEMFC	DMFC	AFC
전해질	인산	탄산리튬/ 탄산칼륨	지르 코니아	수소이온 교환막	수소이온 교환막	수산화 칼륨
이온전도체	수소이온	탄산이온	산소이온	수소이온	수소이온	수소이온
작동온도 (℃)	200	650	1000	< 100	< 100	< 100
연료	수소	수소	수소	수소	메탄올	수소
		CO	CO			
연료원료	도시가스 LPG	도시가스 LPG	도시가스 LPG	메탄올, 메탄	메탄올	수소
		석탄		휘발유, 수소		
효율 (%)	40	45	45	45	30	40
출력범위 (kW)	100 - 5,000	1,000 - 10,000	1,000 - 10,000	1 - 1,000	1 - 100	1 - 100
주요용도	분산 발전형	대규모 발전	대규모 발전	수송용 동력원	휴대용 전원	우주선용 전원
개발단계	실증- 실용화	시험-실증	시험-실증	시험-실증	시험-실증	우주선 적용

* <http://fuelcell.kist.re.kr/Teams/FuelCell/01.htm> 참조

라. 연료전지의 기본 구성

연료전지는 기본적으로 전지, 막, 전극, 기체확산층, 이극판으로 구성되며,

아래에 각 구성장치에 대한 설명이 기재되어 있다.

(1) 전지

연료전지의 핵심은 고분자물질인 양이온 전도성막이며, 이 막의 양쪽에 다공질 전극이 있다. 전극은 다공질로 만들어서 후면에서 공급한 기상 반응물이 전극과 막의 계면(촉매층)에서 전기화학 반응이 일어날 수 있도록 한다. 두 전극 사이에 샌드위치처럼 막을 끼운 다층 복합체를 막-전극 복합체라 하며, 여기에는 다시 집전체/분리판 사이에 샌드위치처럼 구성된다. 집전체는 전류를 모아서 전도하고, 다중 셀 구조에서 분리판은 인접한 셀의 기체를 분리한다.

(2) 막

연료전지 막은 양이온 전도성이 비교적 높고, 연료와 반응 기체가 잘 혼합되도록 적절한 방편이 제공되어야 하며, 연료전지 환경에서 화학적 기계적으로 안정적이어야 한다(7). 전형적으로 PEM 연료전지 막은 PSA 이오노머로 만드는데, 가장 상용적으로 이용되는 막 재료는 듀폰의 Nafion TM이다.

(3) 전극

연료전지 전극은 이오노머 막과 전기 전도성인 다공질 기판 사이에 압착한 얇은 촉매층이며, 이 부분에서 전기화학 반응이 일어난다. 반응에 참여하는 성분은 반응기체, 전자 및 양이온의 3가지로 전자는 촉매를 포함한 전기전도성 고체를 통해 이동하지만, 촉매 입자는 기판에 전기적으로 연결되어 있다. 양이온은 이오노머를 통해 이동하므로, 촉매입자는 이오노머와 밀접한 접촉을 유지해야 한다. 반응기체는 공극을 통해서만 이동하므로 전극이 다공질이어야 기체가 반응 부위로 이동할 수 있다. 상기 반응은 이오노머, 고체, 공극의 3상 경계에서 일어나며, 이 경계는 아주 막은 면적으로 전류밀도가 무한히 크고, 기체 일부가 고분자를 투과하므로 반응 영역은 하나의 3상 경계선보다 커질 수 있다. 반응 영역을 크게 할려면 막 표면을 거칠게 하거나, 촉매층에 이오노머를 결합하는 방법이 있다. PEM 연료전지에서 산소 환원 및 수소 산화에 가장 일반적으로 이용되는 촉매는 백금이며, 백금 사용량이 0.4 mg/cm^2 일 경우, 백금과 탄소의 비가 10%에서 40%로 변해도 전지 성능은 실질적으로 변하지 않으나, 백금과 탄소의 비가 40% 이상으로 증가시키면 성능이 감소된다(8).

(4) 기체확산층

촉매층과 이극판 사이의 층을 기체확산층, 전기기판 또는 확산/집전체라 한다. PEM 연료전지의 확산층은 전기화학 반응에 직접 참여하지는 않지만, 반응 기체가 흐름장 채널에서 촉매층으로 가는 통로를 제공하며, 채널 부근뿐 아니라, 전체 활성 면적에의 접근성을 높이고, 생성된 수분이 촉매층으로부터 흐름장 채널로 가는 통로를 제공하고, 촉매층과 이극판을 전기적으로 연결하며 전자가 전기회로를 완결하도록 하며, 촉매층에서 전기화학 반응에 의해 발생된 열이 이극판으로 전도되어 열이 제거되도록 하는 기능을 가지고 있다.

(5) 이극판

단위셀 구조에서는 이극판이 없으나, 각각의 연료전지 셀이 직렬로 연결된 다중셀 구조에서는 이극판이 필수적으로 구성되어야 하며, 이극판은 한 셀의 애노드를 인접한 셀의 캐소드와 전기적으로 연결되어 구성된다. 연료전지 스택에서 이극집진/분리판은 여러 셀을 직렬적으로 연결하며, 인접한 셀의 기체를 분리하고, 스택의 구조적 지지체 역할을 하고, 활성 셀에서 냉각 셀 또는 도관으로 열을 전도한다.

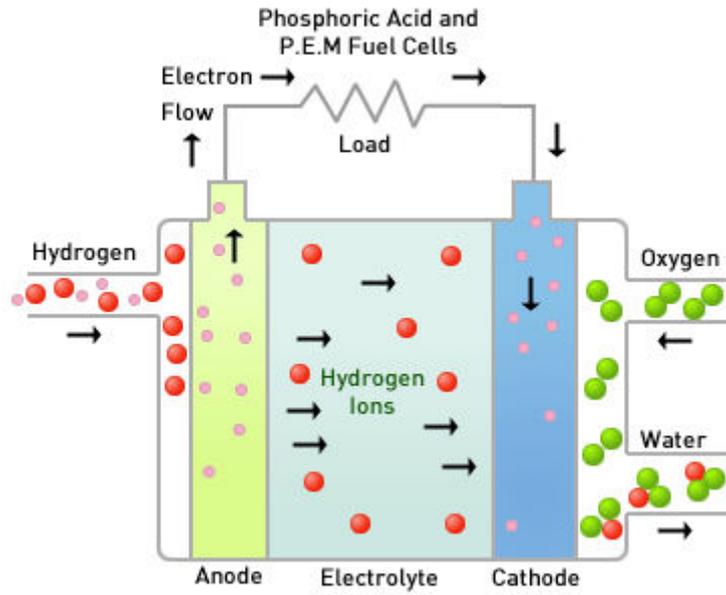
2. 연료전지 국내·외 연구 동향

가. 고분자 연료전지(PEMFC)

1) 개요

고분자 연료전지는 수소이온교환막 연료전지 또는 고체고분자 연료전지라고도 부르며, 1960년대 미국의 General Electric사가 NASA 최초의 유인우주선에 사용하기 위해 개발되었다.

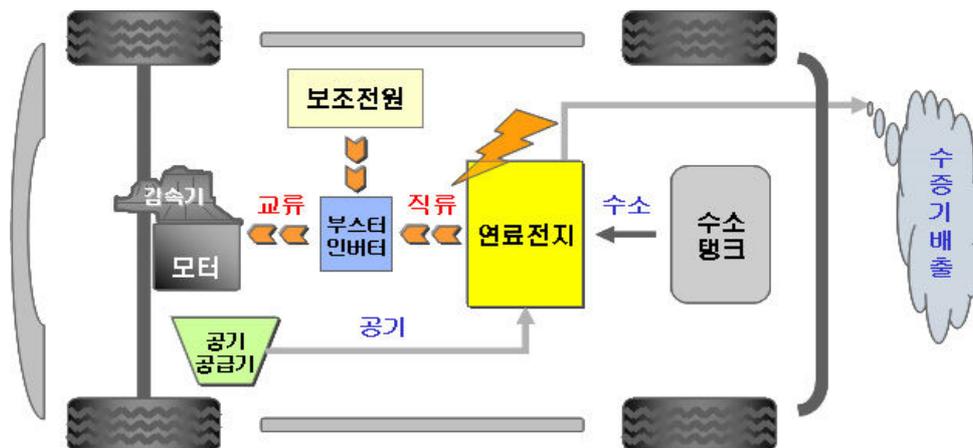
고분자 연료전지에는 이온전도성 고분자가 전해질로 이용되며, 전해질의 양측에는 촉매가 첨가된 다공질 전극이 접합되어 있다. 연료극(아노드)-전해질-공기극(캐소드)의 접합체는 아래의 그림에 나타나 있듯이 하나의 부품으로 인식되기에는 기계적으로 대단히 약한 강도로 구성되어 있다. 고분자 중을 이동하는 이온은 수소이온 또는 양자이며, 저온에서 동작하므로 고분자 연료전지를 빠르게 시동시킬 수 있다는 장점을 지니고 있다. 또한 부식의 위험이 있는 액체가 없으며, 셀을 전후 좌우 상하 어느 방향으로 놓아도 동작한다는 장점이 있다. 그러나 고분자 연료전지는 전해질의 수분관리에 대한 신뢰성을 유지하기가 매우 어려운 단점이 있으며, 이러한 이유로 NASA는 아플로 우주선용으로 알칼리 연료전지(AFC)를 선택한 바 있다(9). 그러나, 최근 연구 개발에 의해 전류밀도가 1 A/cm^2 이상으로 높아지고 동시에 백금 사용량은 100분의 1 이하로 감소하면서 출력 1kW당 비용이 대폭 저하되었으며, 출력 밀도도 크게 개선되어 현재에는 자동차와 버스는 물론이고, 휴대용 기기에까지 상당히 폭넓게 적용되고 있다(10). 또한, NASA에서도 다시 고분자 연료전지를 선호하고 있으며, 새로운 우주왕복선의 채택을 고려하고 있다(11). 기술의 구성에서 고분자 전해질막 또는 수소이온 교환막을 제조하는 기업은 고유의 특별한 기술을 가지고 있으나, 공통적으로 술폰산 플루오르 폴리머(플루오르에틸렌)를 사용하고 있으며, 이중 가장 널리 이용되고 있는 것이 나피온이 있다. 연료극과 공기극의 재료로는 백금이 널리 이용되고 있으며, 개발 초기에는 28 mg/cm^2 이 이용되었으나, 최근 0.2 mg/cm^2 수준으로 감소하였다.



[그림 2-2] PEMFC의 원리

1) 고분자 연료전지의 이용

연료전지 차량: 고분자 전해질 연료전지는 기타 다른 연료전지와 비교하여 운전온도가 저온이고, 출력밀도 및 시동특성이 우수하여 연료전지차의 에너지원으로 사용되어왔다.



[그림 2-3] 고분자 연료전지 차의 구조

연료전지차는 수소연료저장시스템, 연료전지스택, 스택에 공기나 수소를 공급하고 스택의 운전조건을 확보해주는 운전장치, 스택에서 생산된 전기를 변환시켜주는 전력변환기, 모터 및 감속기, 스택의 운전을 보조전원 등으로 구성되며, 현재는 보조전원을 함께 사용하는 시스템이 연료전지차에서는 보편화되어 있다. 연료전지차의 핵심인 고분자전해질 연료전지 스택은 수소와 산소의 전기화학반응이 일어나는 부품으로 1V내외의 전기를 생산하는 단위전지를 원하는 전압에 이르기까지 수백장이 적층되어 구성되며, 공기공급계, 수소공급계, 열 및 물관리계가 함께 구비되어 있다.

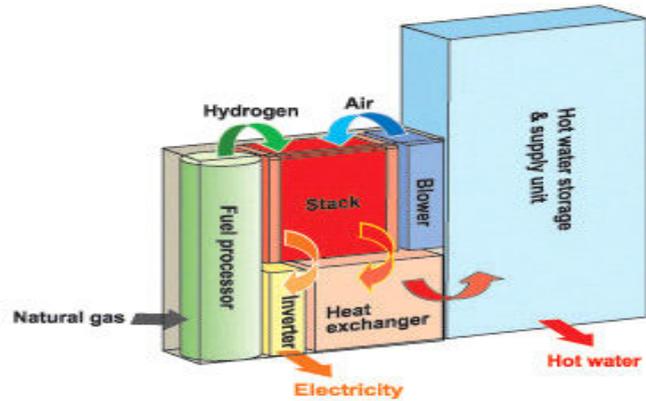
가정용 발전시스템: 가정용 연료전지 시스템은 천연가스나 탄화수소계의 연료가 수소로 전환되는 연료처리장치, 생산된 수소와 공기의 화학반응으로 전기를 생산하는 스택, 스택에서 생산된 DC 전기를 AC 전기로 전환하는 전력변환기, 펌프, 센서류 등의 BOP, 시스템을 안전정도로 운영하는 시스템 제어기술 및 시스템에서 생산된 열을 저장하고 공급하는 열공급 모듈로 구성된다.

a. 시스템 기술

가정용/상업용 연료전지 시스템은 전기를 발전시키는 연료전지 발전 모듈과 온수를 저장하고 발생시키는 열저장 모듈로 구분될 수 있으며, 시스템기술의 범위는 연료전지 시스템을 안정적으로 운영하고 시스템에 문제가 발생하였을 때 비상정지를 하게 하는 시스템 제어와 시스템의 주요부품인 스택, 연료처리 장치, 전력변환기 및 BOP를 구성하는 시스템 설계, 그리고 시스템 제어 및 설계를 바탕으로 시스템을 제작하는 기술로 구성된다.

b. 스택 기술

스택은 연료처리장치에서 발생한 수소와 대기 중 산소의 전기화학반응을 이용하여 DC 전력을 생산하는 부품으로 스택기술의 범위는 전극과 전해질의 조합인 MEA 기술, 스택의 효율 및 내구성을 증진시키는 스택 설계기술, MEA와 분리판 그리고 씰링제를 이용하여 스택을 제작하는 스택 제작기술, 전극촉매와 전해질 재료, GDL(Gas Diffusion Layer), 분리판, 씰링제의 소재에 관련된 소재기술로 구성된다.



[그림 2-4] 가정용 연료전지 시스템의 구조

c. 연료처리장치 기술

연료처리장치는 천연가스를 수소로 전환하는 기술로서 부취제를 제거하는 탈황기, 천연가스에서 수소를 생산하는 개질기, CO를 제거하는 HTS/LTS 및 PROX로 구성되며, 관련 기술의 범위로 연료처리장치의 효율 및 내구성을 개선시키고 부피를 줄이는 연료처리장치 설계기술, 탈황촉매, 개질촉매, HTS/LTS, PROX 촉매에 관련된 소재기술, 연료처리장치를 제작하는 연료처리장치 제작기술이 포함된다.

d. BOP 기술

BOP는 스택, 연료처리장치 등의 작동 및 유기적으로 연결을 하게 하는 펌프류, 열교환기, 가습기, 기타센서, 밸브, 배관 및 열을 저장하고 공급하는 열저장 모듈 등의 부품으로 고효율, 소형화, 저소음화, 내구성이 향상된 펌프류 설계 및 제작기술, 효율 및 내구성이 향상된 열교환기 설계 및 제작기술, 내구성이 향상된 가습기 설계 및 제작기술, 효율 및 내구성이 향상된 열저장 모듈의 설계 및 제작기술, 기타 센서, 밸브, 배관기술 등으로 구성된다.

3) 국내 기술수준 및 개발현황

연료전지 차량: 연료전지 차량의 기술동향은 스택과 운전장치별로 구분하여 검토될 수 있으며, 연료전지 스택의 경우, 운전압력에 따라 약 2~3기압에서 운전되는 가압형과 대기압 조건에서 작동하는 상압형 스택 그리고 약 1.5기압에서 작동하는 중압형으로 구분되어 개발되어왔다. 연료전지 스택의 작동압력은 스택의 차량 패키지 용이성 및 운전 손실을 고려하여 중압 형태

로 수렴하고 있으며 저출력 구간에서는 상압, 고출력 구간에서는 가압 조건에서 운전하는 가변 운전형 시스템도 연구되고 있다. 연료전지의 스택은 적층성을 고려하여 4개의 모듈로 구성된 스택이 많은 비중을 차지했으나 출력 밀도를 높이기 위해 2 모듈 시스템이 개발되고 있으며 참고로 최근 혼다는 금속 성형분리판을 적용하여 스택의 부피를 획기적으로 줄여 100kW급 스택을 1 모듈로 개발하였다. 스택을 구성하는 주요 핵심부품인 분리판은 흑연판을 기계 가공하여 제작되어 왔으나 높은 제작비용으로 현재는 양산성이 반영된 흑연 성형 분리판과 금속 성형 분리판이 개발 중에 있다. 전극막의 경우에는 아직도 90% 이상 불소계 전해질막을 사용한 전극막이 주류를 이루고 있으나 저가의 탄화수소계 전해질막 개발이 활발히 진행되고 있고, 연료전지용 촉매 기술은 백금사용량 저감, 백금 혼합 촉매 그리고 비백금계 촉매 개발로 이어지고 있는 실정이다. 가스확산층은 일반적으로 탄소섬유의 구조체로 만들어지며 PTFE를 함침시켜 소수성을 가지도록 만들어지고, 현재는 Micro Porous Layer라고 하는 탄소지지체 막을 도포시켜 스택의 성능을 월등히 향상시켰다. 향후에는 가스확산층의 기공도, 소수성, 탄소섬유의 3차원적 구조를 조절하여 최적의 성능을 구현하는 것뿐만 아니라 스택의 저온시동 성능을 개선할 수 있는 가스확산층의 설계기술이 개발될 것으로 예상된다.

상기에 기재된 연료전지 차량을 구성하는 스택기술의 수준을 살펴보면, 동 분야에 대한 장기간의 기술투자로 1.2kW/L의 100kW급 연료전지 스택이 개발되어 스택 제조기술은 선진국 수준에 도달한 것으로 볼 수 있다. 다만, 전기안전성, 수밀 및 내진동 특성에 대해서는 기술적인 검증이 필요하고, 선진국에 비해 스택 인클로저나 체계기구에 있어서도 완성도가 떨어진다. 스택의 작동 압력에 대해서는 전 세계적으로 1.5기압으로 수렴되어 가고 있어, 국내에서도 작동 압력을 상압에서 점차적으로 올려가는 방향으로 기술 접근이 이루어질 전망이다. 내구성 측면에서는 실험실 규모로 4,000 시간 이상을 달성하였고, 영하 30도의 저온시동을 목표로 현 수준에서는 영하 15도에서의 저온시동 기술이 확보되었다. 스택 요소 부품의 개발 현황을 살펴보면, 분리판은 국내 순수 기술로 설계 및 제작이 가능하나 금속 분리판에 대해서는 표면 코팅 기술 및 사출 캐스킷 개발이 요구되고, 전극막에 대해서는 국내에 연료전지 전극막을 제조할 수 있는 산업 기반이 없어, 일부 연구기관에 국한되어 전해질막 및 촉매에 의한 연구가 이루어지고 있다. 또한, 스택의 핵심 부품중 하나인 가스확산층도 전극막과 마찬가지로 국내의 산업기반이 전무한 형편이다. 따라서, 가스확산층의 제작은 일본 및 독일 업체가 독점하

고 있는 상황으로 국내에는 대학 및 일부 중소 업체에서 주 소재인 카본 펠트(Carbon Felt), 카본 종이, 카본 클로스(Carbon Cloth)를 수입하여 Micro Porous Layer를 제조하고 주 소재에 입히는 연구만을 수행하는 수준에 있다.

스택기술과 함께 연료전지 차량을 구성하는 운전장치 기술은 열 및 물 관리, 수소 및 공기 공급 기술로 구분하여 볼 수 있으며, 열 및 물 관리 시스템의 경우, 증류수를 이용하는 냉각 시스템 위주로 개발이 진행되었으나 2007년부터는 스택용 부동액을 이용하는 냉각 시스템도 함께 개발되었다. 공기 공급 시스템은 적용되는 스택의 운전 조건을 충족시켜 줄 수 있는 공기 블로워 및 가습기 개발을 중심으로 진행되어왔으나, 기존 생산 차량에 적용되는 부품과 연관성이 적어 국내 기술 개발에 어려움을 겪고 있다. 수소 공급 및 재순환 시스템도 또한 적용되는 스택의 운전 조건을 충족시켜줄 수 있는 수소재순환 블로워 및 이젝터 개발 및 수소 안전성 확보를 중심으로 개발이 이루어져 왔으나, 기존 생산 차량에 적용되는 부품과 연관성이 적어 국내 기술 개발에 어려움이 있는 것으로 판단된다.

운전장치의 기술수준을 살펴보면, 연료전지 차량의 운전장치는 출력밀도 650W/L의 64%, 415W/L를 목표로 기술개발이 진행되고 있으며, 저온시동성은 스택과 유사한 수준으로 진행되고 있다. 운전장치의 시스템 용량은 100kW급 개발을 목표로 현재에는 80kW급 수준에 도달해 있다.

가정용 연료전지 시스템: 가정용 연료전지 시스템은 상기에 살펴본 바와 같이 주요 구성품인 시스템, 스택, 연료처리장치, 전력변환, BOP에 따라 구분하여 살펴볼 수 있으며, 시스템 기술은 선진국 수준인 3,000kWh을 달성하여, 미국 및 일본의 수준에 근접한 수준인 것으로 볼 수 있다.

스택 기술은 국내기술을 기반으로 구축된 스택의 설계·제작 및 MEA 제작 기술을 바탕으로 기본적인 생산이 이루어지고 있으나, 가정용 연료전지 시스템의 소형화 및 내구성 증진을 위해 스택의 소형화와 단위부피 당 출력 증가가 필요하고 아울러 장기내구성 및 CO의 내구성 증진도 함께 필요한 것으로 판단된다. 따라서, 이러한 기술개발의 Needs를 해결하기 위해서는 스택의 핵심 구성품인 전해질 재료, 전극촉매, GDL, 분리판의 국산화가 선행되어야 할 것으로 판단된다.

연료처리장치는 국내 기술이 미흡하여 상당 부분 국외의 연료처리장치가 국내에서 이용되고 있고, 일본 오사카가스에서 제작된 가정용 연료전지용 연료처리장치가 90,000시간 수준의 내구성을 확보하고 있음을 감안할 때, 장

기 내구성에 대한 기술검증이 필요한 것으로 판단된다.

BOP 기술의 경우, BOP는 가정용 연료전지 시스템 고장의 주요 원인이 되고, 현재 국내에서는 연료전지에 적합한 BOP를 판매하는 업체가 거의 없어 수입에 의존하는 상황으로 이를 해결하기 위해서는 우선 연료펌프, 블로워, 물펌프류의 집중적인 개발을 통해 관련 산업의 발전을 이끌어내야 할 것으로 판단된다. 특히, 가정용 연료전지 시스템의 세부기술 중에 BOP 관련 기술이 선진국 대비 가장 뒤떨어져 있어 국내 BOP 개발 촉진이 시급한 상황임을 감안할 때, 국내의 BOP 개발이 이루어지지 않으면 일본과의 가격경쟁력 및 기술격차를 줄이는 것은 어려울 것으로 판단된다.

4) 해외 기술개발동향

4-1) 연료전지 차량

a. 미국

미국 DOE는 최대 효율 60%의 수소 연료전지 스택을 2010년까지 \$45/kW, 2015년까지 \$30/kW 생산을 목표로 기술을 개발하고 있으며, 에너지 효율 및 신재생에너지청(EERE, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy)을 주관으로 수소연료개발 프로그램 예산의 약 70%를 투자하고 있다. 미국은 이를 위하여 수송용 연료전지 분야에 집중하여, 어느 정도 기술수준이 성숙한 것으로 판단되는 시스템 분야보다 부품/소재 기술에 집중하고 관련 예산을 매년 증가시키고 있다.

스택을 구성하는 세부 장치별로 살펴보면, 전해질막은 성능과 내구성 및 경제성 확보에 주력하여 기술개발이 이루어지고 있으며, DuPont, 3M, ARKEMA를 중심으로 탄화수소계 전해질막, 신 고분자 합성 및 다공성 막을 이용한 강화막 개발에 치중하고 있다. 스택 가격의 80%를 차지하는 전극의 개발은 주로 Alloy/비백금계 촉매, 촉매 담지체, 백금 합금(PtCo/C) 촉매 적용을 중심으로 연구가 진행 중에 있으며, 향후에는 graphitized 담지체를 이용한 백금 합금 촉매 개발(GM, CCC, Cabot, tanaka 등)까지 확대될 것으로 예상된다.

운전장치 분야를 보면, 대기업을 중심으로 자동차용뿐만 아니라 정치형 외의 운전장치가 개발 중에 있으며 출력밀도 650W/L, 냉시동 영하 30도, 내구 5,000시간을 목표로 정부 기관, 대학, 연구소, 업체 등의 개발 콘소시움이 구성되어 있다.

b. 캐나다

캐나다는 975개의 연료전지 스택 관련 특허를 보유하고 있으며, 연간 1000대의 생산 능력을 보유하고 있다. 특히, 캐나다 발라드사가 제조한 85kW급 연료전지 스택 MK902는 DCX, 포드, 혼다의 차량에 탑재되었으며 가장 많이 생산된 모델로 3bar의 압력에서 작동되며 최근에는 MK1100이라는 110kW급 스택을 개발하여 2~3bar에서 가변적으로 작동된다.

c. 일본

일본은 경제 산업성(METI)의 연료전지 사업 수행 주체인 NEDO를 중심으로 기술개발을 추진하고 있으며, 특히, 일본의 대표적 자동차 업체들인 도요타는 연료전지 개발 초기부터 독자적으로 연료전지 스택을 개발하여 자사 제품에 탑재해 왔으며, 혼다는 초기에 발라드사의 MK902를 도입하였으나 현재는 독자적으로 금속분리판 및 탄화수소계 전극막을 적용한 스택을 개발하였고, 닛산은 개발 초기 UTC Power사의 스택을 도입하였으나 현재는 UTC Power로부터 이전 받은 기술을 바탕으로 독자적인 스택을 개발하고 있다.

[표 2-4] 일본 NEDO의 가격 및 성능 목표(2006): 연료전지 차량

구분	현재	2007 (초기차 실증)	2010 (초기차 한정 도입, 추정 10만대/년)	2015 (초기차 보급 및 차세대차 실증, 약 100만대/년)	2020~30 (차세대차 본격 보급, 약 100만대/년)
차량효율 LHV(HHV)	약 50%(42%)	50%(42%)	50%(42%)<	60%(51%)	60%(51%)
내구성	약 1000시간	200시간	3000시간	5000시간	5000시간
운전온도	약 80℃	-20~80℃	-30~90℃	-30~100℃<	-40~120℃<
제조가격	수십만엔/kW	-	5~6만엔/kW	약 1만엔/kW	약 4천엔/kW
스택	1.최적화/고성능화 2.평가해석 방법확립 3.열화및반응기구해명 4.내구성/신뢰성 향상 5.고효율화	1.고내구화 (가동정지 대응 등) 2.저비용화 3.평가해석 방법확립 4.양산화 대응	1.차세대기술을 기반으로 한 고성능/고효율화 및 스택 부자재 최적화 2.고내구화 기술 최적화 (고온화 대응)	1.장기적 과제 해결에 의한 고성능화 2.고성능 스택 부자재 대량생산기술확립 3.차세대 스택 고내구화 4.스택 양산기술 확립	비고 1.발전효율,내구성,제조 원가는 동시에 달성 기대되지만 상호 trade-off 관계에 있음 2.운전온도는 사동온도를 포함. 운전온도는 스택 이미지를 표현하는 것 으로 상기 세가지 지표를 만족시키는 것이 최우선 3.HHV 수치는 참고치
MEA		1.고온및저가습대응 2.양산화 대응			
기타	주변기기 부품 수 저감 및 재료비 저감	귀금속 촉매 저감	차세대 주변기기 최적화	차세대 주변기기 비용 절감(성능 유지)	
차세대 기술	고온 및 저가습 대응기술 개발 고온 및 저가습 대응 MEA 개발 고온대응 분리판 개발(저손실 가압계)	고온 및 저가습 대응기술(단셀 수준) 대응온도:90~100℃(<약 30%RH) 내구성:3000시간(저비용 가능할 것)	고온 및 저가습 대응기술(스택 수준) 대응온도:100~120℃(무가습) 내구성:5000시간(저비용 가능할 것)		
장기적 과제	무가습 MEA 개발, 백금대체기술확보, 저산소 과전압 촉매개발 등(성능 및 비용 확보가 전제)				

d. 중국

중국은 1986년경 차량용 연료전지 개발을 시작하였으며, 수송용 연료전지 개발과 스택 요소부품의 국산화, 연료전지차 시범 운영 등을 목표로 5개년 계획을 추진하고 있다. 2007년 정부 투자 예상액은 약 1,000억원 수준인 것으로 추정되며, 대련 화학 물리 연구소, 상해신력 과기 유한회사, 우한대학 등 3개 기관을 중심으로 연구가 진행되고 있다. 대련 화학 물리 연구소는 1970년부터 우주항공산업을 위해 알칼리 연료전지를 개발해 왔고, 상해신력 과기 유한회사는 30,000㎡ 규모의 연료전지 시스템 양산 조립 공장을 보유하고 있다. 우한대학은 후베이성 지방정부의 지원 하에 동풍자동차의 위탁을 받아 연료전지 차량 개발 중(25kW급 연료전지)에 있으며, MEA 양산 라인을 보유하고 있다.

e. 독일

독일은 유럽의 국가들 중 가장 적극적으로 연료전지 기술을 개발하고 있으며 기존의 원천 기술을 확보하고 있는 중소기업들을 중심으로 스택의 BOS(Balance of Stack) 부품들을 개발하여 탄탄한 부품 공급체계를 확보하고 있다. 대표적인 가스확산층 생산 업체로 SGL과 Freudenberg사가 있으며, BASF, Solvicore 등이 전극막과 전해질막을 생산하고 있다. 연료전지 스택 분야에서는 DCX가 가장 적극적으로 기술을 개발하고 있다.

(4-2) 가정용 발전시스템

a. 미국

미국은 뉴욕시와 같은 대도시를 제외하고는 도시가스 요금 대비 전기 요금이 저렴하여 가정용보다는 수소를 이용한 UPS 대체용 또는 비상전력용으로 연료전지를 개발하고 있다. 대표적인 업체로 Acumentrics사, Cummins사, Versa Power사, Delphi사, Altery Freedom사, Fuel Cell Technologies, Idatech사, Plug Power사, ReliOn사를 들 수 있다.

b. 일본

일본은 상대적으로 가정용 전기료의 가격이 높아 가스엔진 등 가정용 소규모 발전시스템에 대한 수요가 있었으며, 일본 정부에서는 가정용 연료전지 시스템을 자동차용 연료전지와 더불어 핵심 기술로 선정하여 기술개발과 보급에 많은 지원을 해 왔다.

[표 2-5] Plug Power에서 판매 중인 5kW급 GenSys 사양

Product Name	GenSys 5CS(Phase I)
Fuel	Natural Gas
Type of Fuel Cell	PEMFC
Type of Fuel Processor	Auto Thermal Reformer
Power Output	2.5~5kW
Unit Size	198L * 81W * 173H (cm)
Electrical Efficiency	26% @ 2.5kW 23.5% @ 5kW
Thermal Efficiency	34% @ 2.5kW 31.5% @ 5kW
System Start Time	90min
Installed Ambient Temp.	-17 to 40℃
Noise	60dB @ 1m
AC Output	120/240 VAC @ 60Hz
Certification	CSA, UL, FCC Class B

일본은 2000년부터 밀레니엄 프로젝트를 통해 연료전지의 상품화에 대한 인센티브 부여, 표준 성능 테스트 방법 및 안전코드 개발로 연료전지에 관한 기술개발을 촉진해 왔으며, 일본 통산성의 산하 기관인 신에너지재단(NEF)을 주관 기관으로 2003년에는 가정용 1kW, 상업용 5kW 용량의 31기의 고분자 연료전지 시스템을 개발하였다. 동 유닛들은 도시가스, 액화석유가스, 석유, 납사를 연료로 사용하고, Ebara Ballard, 히다치, 마쓰시다 전기, Kurita Water Industries, 마루베니, 미쓰비시 중공업, 일본 석유, 산요 전기, 도시바, 도요타 자동차가 함께 참여하였다.

주요 선도기업으로는 우선 Fuji Electric사를 들 수 있으며, 동 사는 1989년 연료전지 스택에 관한 연구를 시작하여, 개질기, 열회수, 인버터 제어를 비롯한 1kW급 가정용 고분자 연료전지 시스템을 개발하였으며, 발전효율 35%(LHV), 배열효율 51%(LHV), 배열온도 60~65℃를 달성하였다. Ishikawajima-Shibaura Machinery사는 2000년부터 가정용 1kW 고분자 연료전지 시스템을 개발해 왔으며, 2005년에 개발된 제품의 발전 효율은 35%(LHV), 배열효율 47%(LHV), 배열온도 75℃ 수준이다. 1998년 설립된 Ebara-Ballard사는 발전 효율 37%(LHV), 배열효율 56%(LHV), 배열온도 60℃ 이상이며, 약 224L(800(W)*350(D)*800(H))의 연료전지 시스템을 개발하였다. Nippon Oil(신일본석유)은 1986년부터 수소제조 및 촉매개발 기술

을 개발해 오고 있으며, 등유를 원료로 하는 업무용 10kW급 고분자 연료전지 시스템을 미츠비시 중공업과 공동으로 개발하여 2005년에는 호텔 및 편의점에 설치하고, 2006년에는 스포츠센터에 설치하여 실증 운전을 하였다. 2006년에 제작된 시스템은 AC 8.5kW급으로 발전효율은 36%(LHV), 배열효율 36%(LHV), 시스템의 크기는 약 2,490L(1900(W)*690(D)*1900(H))이다. Idemisu Kosan사는 열효율 75%(LHV)를 가지는 등유 개질기를 개발하여 코로나와 공동으로 1kW급 등유형 가정용 연료전지 시스템을 개발하였으며, 개발된 시스템의 발전출력은 AC 1kW급으로 발전효율은 36%(LHV), 배열효율 40%(LHV), 시스템의 크기는 약 277L(775(W)*468(D)*764(H))이다.

c. 독일

독일은 상기에 기재된 바와 같이 연료전지 부품 기술의 개발에 강점을 가지고 있으며, 여기에는 기술개발 능력이 우수한 중소기업의 기여가 크다, 가장 대표적인 업체로 Vaillant사를 들 수 있으며, 동 사는 미국의 Plug Power사와의 합작을 통해 유럽연합이 지원하는 버츄얼 연료전지 플랜트 프로젝트를 선도하고 있다. 또한, Baxi Innotech(Eropean Fuel Cell)사는 천연가스를 연료로 이용하는 1.5kW 고분자 연료전지 시스템을 개발하였으며, H.C. Starck사와 Webasto사는 보조전원용으로 활용할 5kW급 시스템을 개발하고 있다.

나. 직접메탄올 연료전지

1) 개요

직접메탄올 연료전지(DMFC)는 고분자 전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell, PEMFC)와 동일한 구성요소를 사용하지만 메탄올을 연료로 직접 사용할 수 있기 때문에 소형화가 가능하다는 장점으로 노트북과 같은 휴대용 전력기기의 전원으로 활용되어 왔다. 아래의 표는 메탄올과 수소저장 기술에 관한 에너지 밀도를 보여주고 있으며, 수소의 저장효율이 0.6% 수준인데 반하여 메탄올은 95%의 저장효율을 보여주고 있다.

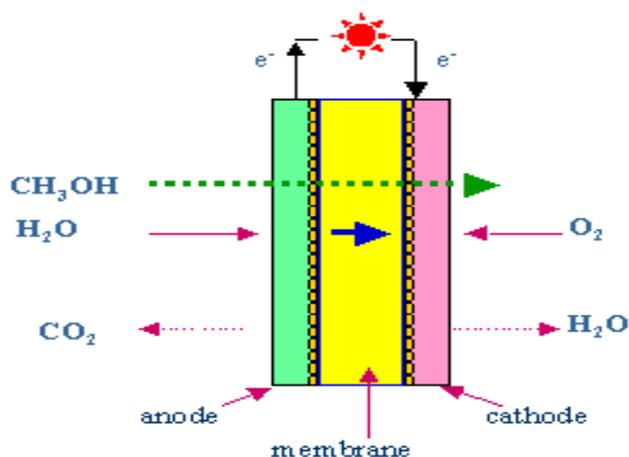
[표 2-6] 메탄올과 수소저장 기술에 관한 에너지 밀도의 비교

저장방법	연료의 에너지 밀도	저장효율 (%)	순수 에너지 밀도
300 기압에서 복합재료 탱크에 저장한 H ₂	119.9 MJ/kg	0.6	0.72 MJ/kg
	33.3 kWh/kg		0.20 kWh/kg
금속흡장합금 탱크에 저장한 H ₂	119.9 MJ/kg	0.65	0.78 MJ/kg
	33.3 kWh/kg		0.22 kWh/kg
메탄올에서 수소-간접 메탄올	119.9 MJ/kg	6.9	8.27 MJ/kg
	33.3 kWh/kg		2.3 kWh/kg
복합재료 탱크에 저장한 메탄올을 연료로써 직접 이용	19.9 MJ/kg	95	18.9 MJ/kg
	5.54 kWh/kg		5.26 kWh/kg

Note: 간접 메탄올의 경우 화학적 반응에 의해 수소를 제조하므로 추정된 개질기 질량이 포함되어 있음

그러나 직접메탄올 연료전지도 몇 가지 주요한 단점을 가지고 있으며, 그 중 가장 첫 번째로 지적되는 부분이 선택적 촉매의 이용에 있다. 직접메탄올 연료전지는 연료가 공기극에서 반응하는 것을 방지하고 혼합전위에 의한 전압강하를 제거할 수 있는 선택적 촉매를 사용하나, 연료의 산화를 촉진시키지 않는 촉매는 모두 산소 및 수소 이온과의 반응이 상당히 느리게 진행될 수 밖에 없고, 그 결과 공기극의 활성화 손실이 증대되어, 성능이 증가하지 않는다. 또한 혼합전위 문제가 해결된다고 하더라도 연료는 여전히 교차를 일으키고, 공기극에서 반응하지 않는 대신에 대부분 증발하게 되어 연료가 낭비되는 단점이 있다. 따라서, 상기의 문제점을 해결하기 위해서는 수소이온은 통과하지만 메탄올은 통과하지 못하는 전해질이 필요하며, 직접메탄올

연료전지의 기술개발은 이러한 전해질을 제조할 수 있는 재료의 개발이 중요한 부분을 차지해 왔다. 현재까지 연구된 기술은 나피온 막을 표면처리하거나 스퍼터리에 의해 팔라듐의 얇은 층으로 막을 코팅하는 것이며(12-13), 2개의 층으로 된 막을 이용하는 방법과 세슘 이온을 이용하는 방법(14), 표준 나피온형의 재료와는 다른 분자를 이용하여 두꺼운 막을 이용하는 방법(15), 통상의 술폰산(sulfonic acid) PTFE 재료에 첨가물을 가하는 방법(16)이 함께 언급되어왔다.



[그림 2-5] DMFC의 원리

또 다른 단점으로는 연료극의 반응이 수소 연료전지에 비해 천천히 진행되어, 수소의 산화는 쉽게 일어나는 반면에 메탄올의 산화는 상당히 복잡한 반응이고 느리게 진행되어 같은 크기의 수소 연료전지와 비교하여 출력이 낮고, 연료교차로 직접메탄올 연료전지에서 이용되는 수소이온교환막 전해질은 메탄올을 쉽게 흡수하고, 메탄올은 수분과 혼합되어 빠른 속도로 공기극에 도달하여 개회로전압이 감소함으로써 모든 전류값에 대해 연료전지의 성능에 악영향을 미치게 된다. 이러한 단점을 개선시키기 위하여 과량의 촉매를 이용하는 기술이 연구되어왔으며, 초기에는 수소 연료전지와 같이 백금 촉매, 1종만을 이용하여 왔으나, 최근에는 백금과 루테튬의 2가지 촉매를 혼합하여 이용하는 것이 성능 개선에 도움을 준다는 것이 보고되어, 상기 촉매에 인산 텅스텐을 부가하는 연구도 진행되고 있다(17-19). 직접메탄올 연료전지의 촉매 함유량은 활성화 손실을 합리적인 수준으로 감소시키기 위해 높은 함유량이 필요하고, 보다 활성화된 연료극 촉매를 이용하면 연료교차 문제가 감소될 수 있기 때문에 2 mg/cm² 수준으로 수소 연료전지의 0.2 mg/cm² 과 비교하면 10배나 크다(20).

2) 직접메탄올 연료전지를 이용한 휴대용 연료전지의 개발

휴대용 연료전지로 이용되기 위해서는 5,000 시간 이상의 내구성이 필요하며, 이를 위해서는 연속운전시간 및 전력밀도 등 MEA의 성능과 주변장치(BOP)를 구성하는 펌프, 콤프레서, 밸브, 센서, 열교환기의 성능이 기본적으로 확충되어야 한다. 상기에도 기재된 바와 같이 직접메탄올 연료전지는 휴대용 연료전지의 성능 조건에 가장 근접한 기술이나, 이를 더욱 개선하기 위해서는 고농도 메탄올이 사용 가능한 고분자막 개발, 촉매량 감소, CO 저항성 고효율 촉매를 비롯하여 MEA의 출력과 내구성 향상이 뒤따라야 한다.

국내에서는 LG 화학과 KIER 등이 공동으로 진공청소기용 200W급 시스템과 KIST에서 개발한 인간형 로봇에 장착한 700W급 시스템, 삼성종합기술원이 개발한 100W급의 휴대 전원용 연료전지 시스템이 있다. 국내의 삼성종합기술원은 1997년부터 휴대용 연료전지 개발을 시작하여 2000년에 2W급 DMFC를 장착한 휴대폰 시스템, 2005년에 PDA용 Hybrid 전원, 2006년 11월에는 하나의 연료 카트리지로 1.5W급 PMP를 4시간 동안 작동할 수 있는 2W급 DMFC를 개발하였다. 국내의 노트북 PC용 DMFC 기술 분야의 괄목할 만한 연구성과로는 삼성종합기술원과 LG 화학이 각각 2004년과 2005년에 개발한 노트북 PC용 DMFC 시스템이다. 삼성 SDI는 2005년 11월에 노트북 PC용 DMFC를 개발하였으며, 크기는 가로 23cm×세로 8.2cm×높이 5.3cm(부피 0.99L)이고 평균출력과 최대출력은 각각 20W와 50W이며, 에너지 밀도가 200Wh/L이며 연료탱크는 100cc이다. 시스템 소음은 38dB 정도이다. 또한 2006년 12월에는 노트북 PC에 장착한 1200Wh급 대용량 DMFC 시스템을 개발하였다. 출력 20W, 에너지 밀도 650Wh/L, 연료 100cc로 노트북 PC를 15시간, 대형 연료 카트리지(약 1L)로 노트북을 약 1달간 사용(주 5회, 8시간/일 기준) 가능하다. LG 화학이 개발한 노트북용 DMFC 시스템은 출력이 25W이고 중량이 1kg 이하이며, 200cc 연료 카트리지로 10시간 이상 작동이 가능하다. 진우 엔지니어링(주)는 2007년 1월 일본의 Fuel Cell Expo 2007 전시회에서 140W급 DMFC 시스템을 적용한 배터리 하이브리드 휠체어를 선보였다. 협진, 대주전자재료, 동진세미켄 등의 회사에서는 촉매 및 MEA 등의 소재 관련 연구를 수행 중이고, 프로파워 등의 중소기업에서 연료전지-배터리 하이브리드 시스템을 장착한 제품을 모색하고 있으며, 동부한농, 대우일렉트로닉스 등 대기업과 나노테크닉스, 나노카본, 디지털택 등 다수의 부품소재 기업에서 휴대용 연료전지에 대한 높은 참여 의지를 가지고 기술평가를 진행중이다.

3) 기술수준

우리나라의 DMFC 기술은 휴대폰용, 노트북 PC용, 휴대용 전원 충전용 연료전지를 중심으로 삼성 SDI, 삼성종합기술원, LG화학 등에서 기술개발이 진행되고 있으나, 현재까지도 상당 부분이 수입에 의존하고 있으며, 구체적으로 기술수준을 살펴보면, MEA의 연속운전 분야에서는 미국 및 유럽과 유사한 수준이나, MEA의 전력밀도, 이온전도로, 백금 함량 등에 있어서는 아직까지 그 기술수준이 미흡한 실정이다.

[표 2-7] DMFC의 MEA 관련 세부기술의 정량적 수준

평가항목 (주요성능 Spec)	단위	세계 최고 수준 (보유국/보유기업)	국내수준	비고
		성능수준		
MEA 성능 (전력밀도)	mW/cm ²	140 (영국/J-M) *Nafion 전해질막	120	60℃, 공기
		120 (미국/폴리퓨얼) *탄화수소계 전해질막	80	60℃, 공기
MEA 연속운전 (장기성능)	시간	4,000 (한국/KIER)	4,000	LG화학 MEA, 5-cell
		2,000 (미국/폴리퓨얼) *탄화수소계 전해질막	500 미만	단위전지
백금함량	mg/cm ²	2 (영국/J-M)	3~5	60℃, 공기
대량생산	g/batch	자료없음	-	-
전해질막 이온전도도	S/cm	0.09 S/cm (미국/Maxdem)	0.07 미만	전도도 실측
전해질막 메탄올 투과도	%	1/3 (미국/PolyFuel)	<50	메탄올 투과도 측정

4) MEA, 스택, 주변장치별 기술개발동향

직접메탄올 연료전지 분야의 기술개발은 가격 저감과 성능 향상, 내구성 향상, 탄소화를 중심으로 이루어지고 있으며, 특히 고분자연료전지 분야와 비교하여 상대적으로 초기 단계에 있어 국제적으로 추진되고 있는 표준화 규격과 연계하여 기술개발 활동이 진행되고 있다.

국내의 주요 기술개발은 직접메탄올 연료전지를 구성하는 핵심장치인 고분자막/전극 접합체(MEA), 스택, 주변장치로 구분되어 진행되어 왔으며, MEA의 경우, 140mW/cm² (DMFC, MeOH/Air, 80℃), 80mW/cm² (DMFC, 공

기호흡형 MeOH/Air, 상온)를 목표로 추진되어 왔고, 전체 비용 중 약 50~85%를 재료비가 차지할 만큼 소재의 가격 경쟁력을 구비할 수 있는 기술이 핵심을 차지하고 있다. 구체적으로 장치별 가격을 비교해 보면, 촉매의 비중이 가장 크고, 그 뒤를 이어 바이폴라 판, 전극의 순서로 비용을 차지한다.

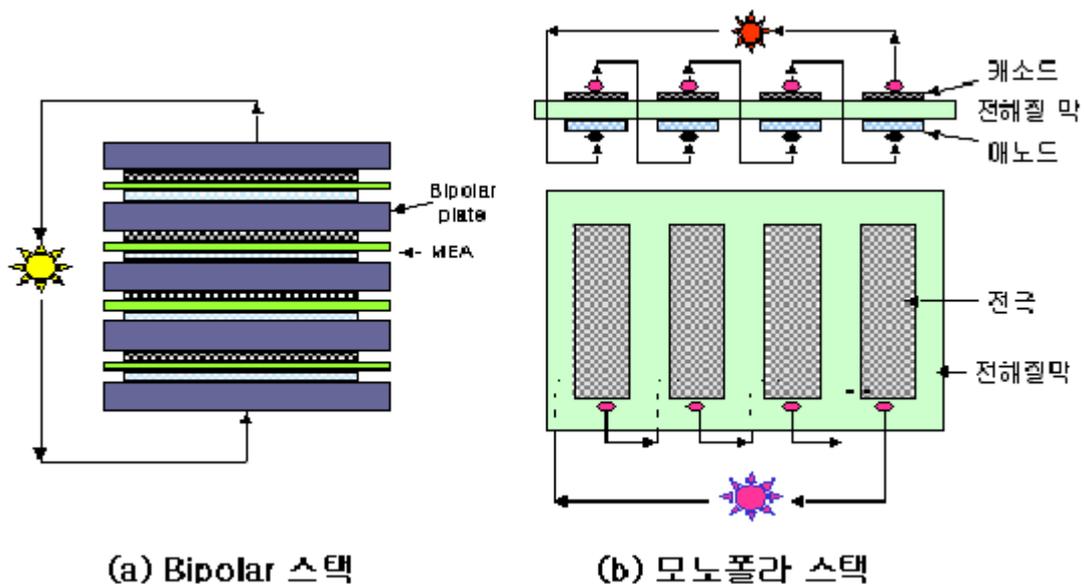
[표 2-8] 휴대용 연료전지 MEA와 스택 구성 요소의 가격 비율

구성 요소	가격 비율(%)
촉매	30 ~ 45
고분자막	2 ~ 10
전극	15 ~ 30
바이폴라판	15 ~ 25
냉각판	10 ~ 12
어셈블리	5 ~ 7

촉매는 MEA의 성능과 가격을 좌우하는 가장 중요한 요소로서, 주로 Pt/Ru 합금 촉매 또는 순수 백금 촉매가 이용되어 왔으나, 최근에는 가격 저감과 성능 및 내구성 향상을 위해 다양한 합금촉매와 카본담지체에 대한 개발이 진행되고 있으며, 그 성과로 Pt/Ru/OsIr, Ru/Sn/Mo/Se 등의 메탄올 산화성이 우수한 4성분계 촉매를 비롯하여 메탄올에 대한 저항력이 우수한 비백금계인 Ru/Sn/Se 계통의 산화 환원 촉매 등이 개발되었다. 또한, 촉매의 담지 능력과 분산성을 향상시키기 위해 CNT(Carbon Nanotube), CNH(Carbon Nano-Horn), 메조기공 탄소(Mesoporous Carbon)를 사용한 새로운 촉매의 개발도 추진되고 있다.

MEA를 구성하는 또 다른 주요 장치인 고분자 전해질막은 수소이온 전도성이 우수하고 반응물의 투과도가 적어야 하며, 형상안정성, 화학적 안정성 및 기계적 강도가 높아야 하며, 이를 달성하기 위하여 이온전도도와 면저항은 각각 $5\sim 10 \times 10^{-2} \text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ 와 $0.2\sim 2 \Omega\cdot\text{cm}^{-2}$ 수준이 되어야 한다. 현재까지는 이온전도도가 우수한 Nafion 멤브레인이 가장 널리 사용되어 왔으나, 메탄올의 투과도가 높은 단점이 있어 이를 개선할 수 있는 새로운 탄화수소계 및 복합 분리막의 개발이 진행되고 있다. Polyfuel사 등에서는 메탄올의 투과도를 Nafion에 비해 50% 이하로 감소시킨 탄화수소계 분리막을 시판중에 있으며, 이외에도 메탄올 투과도가 작고 물이 없어도 수소이온의 전달이 가능한 플러런계의 수소이온 전도체나 상온 용융염을 전해질로 응용하려는 연구도 진행되고 있다.

직접메탄올 연료전지 분야에서 스택은 단위전지를 수직 수평으로 연결하여 원하는 용량과 크기로 적층 또는 연결시킨 것으로 경량 고강도 고전도성 Bipolar Plate 기술, 바이폴라형 스택 제조기술, 모노폴라형 스택 제조기술, 경박단소화를 통한 출력밀도 향상기술을 중심으로 기술개발이 이루어져 왔으며, 주변장치(BOP)의 경우에는 고효율 DC/DC 컨버터(효율 90% 이상), 연료 및 공기 공급용 팬, 펌프, 연료 공급용 연료 탱크(Cartridge), 연료순환 및 물 회수 기술(연료혼합기 포함), 연료농도 제어용 센서, 열교환기(애노드용 및 캐소드용), 시스템 운전 및 제어용 Micro-Processor를 중심으로 기술개발이 중점 추진되어왔다.



[그림 2-6] Bipolar형 스택과 Monopolar형 스택

직접메탄올 연료전지의 운전시스템은 중대형 시스템용인 active형과 소형의 passive형으로 구분되어 개발되어 왔으며, active형은 메탄올 수용액 순환용 펌프, 공기 공급용 blower, 메탄올 수용액 농도 제어용 센서 등의 active 소자들로 구성되어 있고, 연료로는 에너지 밀도가 높은 순수메탄올을 탑재하며, 내부에서 메탄올을 적정 농도(3~10wt%)로 희석하여 스택에 공급하고, 공기극에서 발생하는 물은 회수하여 재사용하며 공기는 펌프 등으로 강제 공급한다. Passive형은 펌프, blower, 밸브 등의 active BOP를 사용하지 않으며, 메탄올은 카트리지로 연료극에 공급하고, 공기극에서는 자연 대

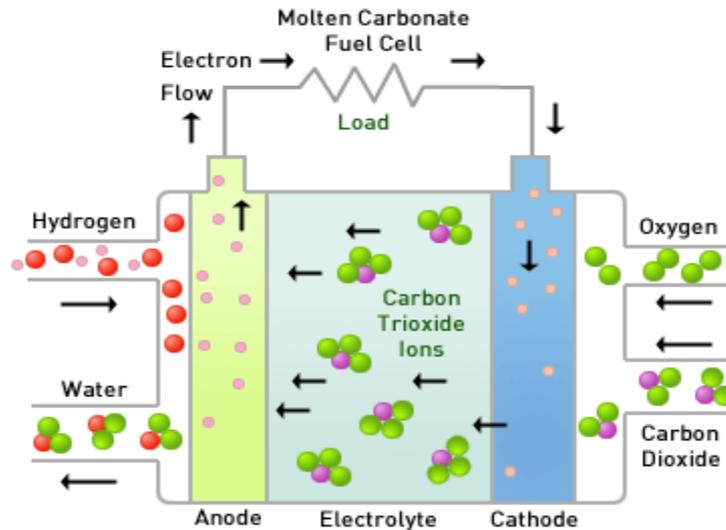
류의 공기를 이용하며, 공기극 생성수는 대기 중으로 자연 배출되도록 한다. Passive형은 시스템이 단순하고 소형이지만 출력밀도가 낮아 10~20wt%의 메탄올 수용액을 사용한다. 현재 Passive형은 휴대전화 외부 부착 충전기 형태와 휴대전화의 내장전원 형태로 개발되고 있다.

다. 용융탄산염 연료전지(MCFC)

1) 기술개요

용융탄산염 연료전지(Molten Carbonate Fuel Cell)는 공기극에서 산소 및 이산화탄소가 외부회로로부터 전달된 전자와 결합하여 탄산이온을 형성한 후 이 탄산이온이 용융탄산염으로 구성된 전해질을 통해 연료극으로 전달되어 연료극에서 연료전지의 연료인 수소와 결합하면서 물과 이산화탄소가 되고, 이때 유리된 전자가 외부 회로를 통해 흐르면서 전기를 생산한다. 용융탄산염 연료전지에서는 탄산이온이 연료극으로 전달되기 위해 600~700℃의 고온에서 용융탄산염이 전해질로 이용되고, 셀 구성 부품으로는 초기에 귀금속이 대부분 이용되었으나, 1980년대에 기술이 진보하면서 공기극로는 다공성의 리튬화된 산화 니켈, 연료극으로는 다공성의 크롬 또는 알루미늄이 함유된 니켈이 쓰이면서 전해질에는 리튬 탄산염과 포타슘 탄산염의 혼합물 또는 리튬 탄산염과 소듐 탄산염의 혼합물이 사용되어(21-23), 귀금속 촉매가 소요되지 않고, 전기화학적으로 일산화탄소를 직접 변환하고 내부적으로 탄화수소를 연료로 개질할 수 있는 특징이 있다. 따라서, 산 또는 알칼리 연료전지 보다 일산화탄소, 이산화탄소 및 수소에 관하여 내성이 있고, 이로 인해 일산화탄소와 이산화탄소를 분리하는 공정을 필요로 하는 다른 기술보다 초기 투자비가 낮고 시스템 설계가 매우 단순해질 수 있다.

용융탄산염 연료전지는 현 시점에서 볼때 여러 종류의 연료전지들 중 기술적 성숙도와 경제성이 가장 잘 조화되어 있어, 상용화에 근접한 기술로 판단되나, 전력 밀도가 다른 기술 대비 상대적으로 낮고 부하 추종 능력이 낮으며 고온에서 작동하기 때문에 초기 기동시간이 길고 작동 원리상 반드시 이산화탄소의 공급이 필요하여 작은 규모의 시스템 구성에는 적합하지 않은 단점이 있다.



[그림 2-7] MCFC의 원리

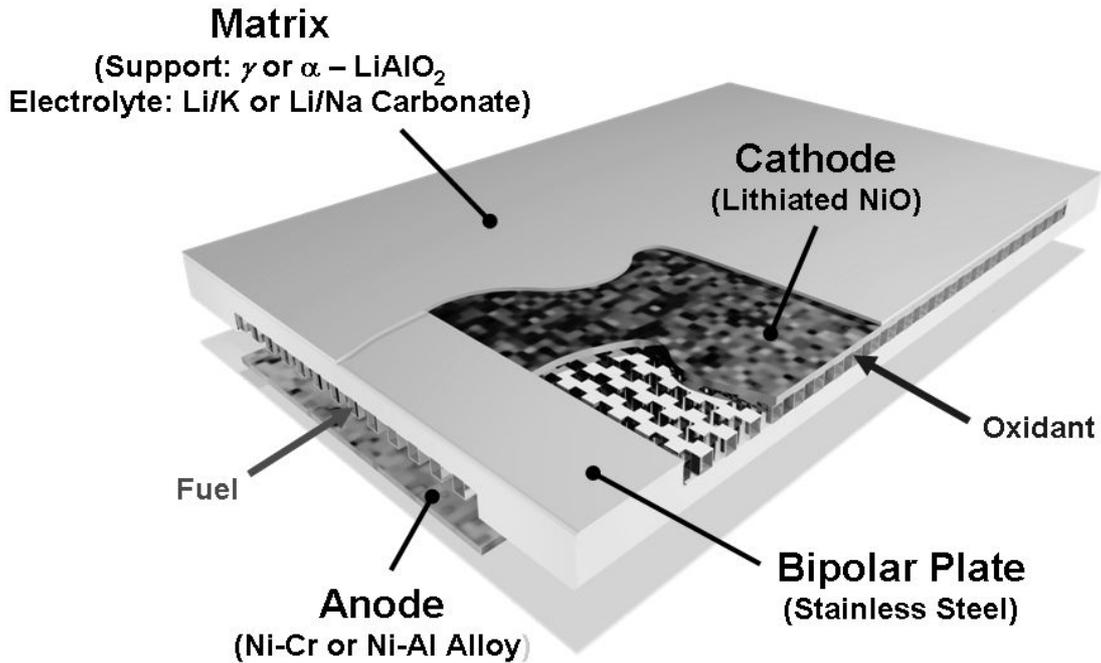
2) 용융탄산염 연료전지의 구성

2-1) 전해질

전해질은 스택을 구성하는 기본 요소로 공기극에서 생성된 탄산이온을 연료극으로 이동시켜 전위차를 형성함으로써 연료전지 외부 회로로 전자가 흘러서 전기에너지를 생산하는 역할을 한다. 전해질 분야의 주된 기술개발 대상은 단전지 성능 향상과 전해질 고갈 억제, 공기극 용출 억제로, 이를 해결하기 위하여 (Li/K)2CO₃, 또는 (Li/Na)2CO₃계 전해질의 혼합 비율을 조절하거나 첨가제를 첨가하는 방법이 이용되어왔다. 전해질 분야에서 특히 중요한 기술은 전해질 고갈 문제로서 MCFC 스택의 장수명화를 위해서는 전해질 고갈 억제, 또는 전해질 보충과 관련된 기술 개발이 필수적인 것으로 판단된다.

2-2) 매트릭스

매트릭스는 다공성 구조를 가지고 있어서 액상의 전해질을 고정시켜주는 동시에 분리판과 분리판 사이에서 기체의 밀봉을 제공하는 역할을 하며, 매트릭스 분야의 주된 기술개발 대상은 매트릭스의 기계적 강도 증진과 thermal cycle, 미세구조 제어로서, 이를 위하여 현재 매트릭스 제조에 널리 사용되는 테이프 캐스팅 공정의 최적화를 통한 미세구조 제어와 첨가제 및 강화물질 투여를 통한 기계적 강도 증진 및 thermal cycle 향상 분야에 집중되고 있다.



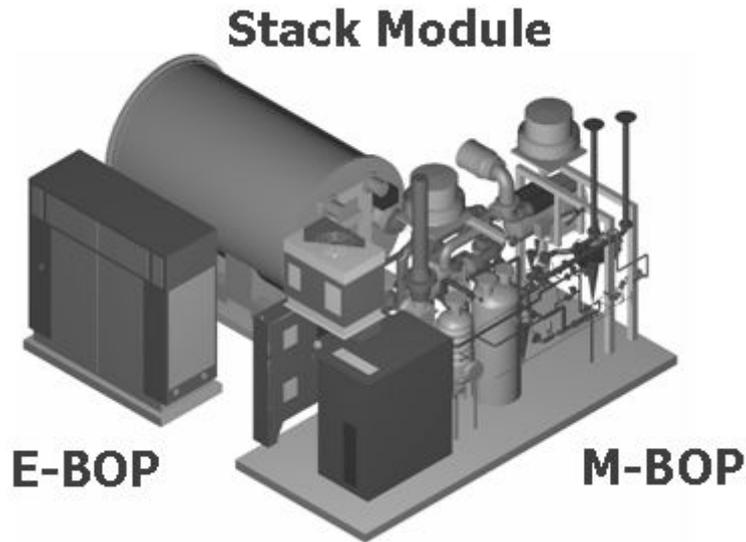
[그림 2-8] 용융탄산염 연료전지의 구성요소

2-3) 연료극

연료극은 전해질에서 전달된 탄산이온과 연료기체를 반응시켜 물과 이산화탄소를 생성하면서 전자를 유리시켜 외부회로로 전달해 주는 역할을 수행한다. 연료극 분야의 주된 기술개발 대상은 전해질 함침 전극 제조공정의 개발과 전극 미세구조 제어, 내크리이프 저항성 향상을 위한 합금 분말 제조공정이다. 연료극 제조를 위한 합금 분말로는 주로 Ni-10wt%Cr와 Ni-5wt%Al이 쓰이고 있으며, 내크리이프 저항성이 높은 Ni-5wt%Al 합금은 분말 제조공정에 대한 기술개발이 주목을 받아왔다.

2-4) 공기극

공기극은 외부에서 공급된 산소와 이산화탄소, 전자를 반응시켜 탄산이온을 형성해 전해질로 공급해 주는 역할을 수행한다. 공기극 분야의 주된 기술개발 대상은 전해질 함침 전극 제조공정의 개발과 전극 미세구조 제어, 공기극 용출이다. 공기극 용출의 경우 첨가제를 이용한 기술개발이 이루어지고 있으며, 전해질 함침 전극과 전극 미세구조 제어는 제조공정 분야에서 지속적인 기술개발이 요구된다.



[그림 2-9] MCFC 발전시스템의 구성

2-5) 분리판

분리판은 스택의 단위전지를 전기적으로 직렬로 연결시키는 동시에 공기와 연료기체를 분리시켜주고 기체 밀봉과 매니폴드를 제공한다. 코팅이나 신조성 합금 개발을 통한 현재 사용하고 있는 오스테나이트계 스테인리스 스틸의 용융탄산염에 대한 내부식성 증진이 분리판 분야의 가장 중요한 기술개발 주제이다. 이외에도 가공 정밀도 향상, 기체 분배구조 개선, 분리판 제조공정 개선을 통한 경제성 증진 등 다양한 분야에서 지속적인 기술개발이 요구되고 있다.

2-6) 스택 구조물

스택 구조물은 스택을 물리적으로 지지하면서 스택에 기체를 공급하고 스택에서 배출된 기체를 처리하며 스택에 면압을 제공하는 동시에 스택에서 생산된 전기를 외부에 연결시켜주는 중요한 역할을 한다. 스택 구조물은 대량생산 대상이 아니기 때문에 이상에서 기술된 여러 가지 기능을 효율적으로 수행하면서 단순한 구조를 갖도록 하는 디자인 기술이 요구된다.

2-7) MBOP

MBOP는 MCFC 스택에 연료와 용수, 공기를 공급해 주고 스택에서 배출된 배기가스를 처리해 주는 역할을 수행한다. 연료 공급 장치와 용수 공급 장치는 연료기체의 황성분을 제거하는 탈황기와 용수의 불순물을 제거하는

정수장치, 연료와 수증기를 혼합해 주는 수증기 발생장치로 구성되며 공기 공급 장치는 송풍기, 압축기로 구성된다. 스택의 배기가스는 미반응 연료를 연소시켜주는 촉매연소기와 공기극 배기가스 일부를 재순환하는 재순환 송풍기, 배기가스의 배열을 연료기체와 용수, 공기에 공급하는 다양한 열교환기를 거쳐 외부로 배출된다. 이외에도 외부개질형 MCFC의 경우 탄화수소에 포함된 수소를 분리하여 스택에 공급해 주는 별도의 외부 연료개질기가 설치되기도 한다.

2-8) EBOP

EBOP는 스택에서 생산된 직류전류의 전압을 일정하게 조절하는 컨버터와 직류전류를 교류전류로 전환해 주는 인버터, 교류전력의 물성을 제어하여 외부 계통 전력에 공급해주는 PCU로 구성된다. 이상의 EBOP는 구성요소도 개개의 구성품은 이미 다른 분야에서 상용화가 완료된 기술이지만 연료전지 시스템에 적용하기 위해서는 별도의 최적화 기술개발이 요구되며, 특히 산업적 응용분야에 따라 특화되어 최적화될 필요성이 있다.

2-9) HRU

HRU는 연료전지 발전시스템에서 배출되는 배기가스로부터 배열을 회수하여 전력을 생산하거나 냉난방에 활용하는 장치로써 이를 적용하면 시스템의 효율을 극대화할 수 있다. 가장 기본적인 HRU인 배열회수 보일러는 구조가 단순하기 때문에 경제적으로 활용할 수 있지만 온수나 난방 수요가 계절 및 시간에 따라 크게 변화하는 경우에는 기대한 효율 증가를 얻지 못할 수 있다. 흡열식 냉방 시스템은 배열을 이용하여 냉난방이 가능하기 때문에 온수나 난방 수요가 계절에 따라 크게 변화하는 경우에도 시스템 효율 증대를 기대할 수 있다는 장점이 있으나 시스템이 상대적으로 고가이고 충분한 신뢰성이 확보되지 않았다는 단점이 있다. 터보제너레이터(T/G)의 경우 폐열을 이용해 전기를 생산하기 때문에 시스템 효율을 가장 극대화할 수 있는 방안으로 손꼽히고 있으며, 지속적인 개발을 통해 그 동안 제기되었던 신뢰성 문제도 상당히 극복된 것으로 판단된다. HRU 연료전지 발전시스템의 효율을 향상시켜 경제적 확보에 도움을 줌으로써 결과적으로 연료전지 발전시스템의 상용화에 중요한 역할을 하기 때문에 시스템의 용도에 따른 최적 HRU 기술개발도 중요한 이슈로 지적되고 있다.

3) 용융탄산염 연료전지의 이용분야

3-1) 산업용 백업파워

백업파워란 계통 전원에 문제가 발생하였을 때 사용되는 비상 전원을 말하는 것으로 연료전지는 부하변동이 적은 IDC(Internet Database Center)나 중대형 건물의 PC 보안 전원 등에 적합한 것으로 판단된다. 우리나라의 경우 2002년 현재 IDC 시설의 백업파워 시장은 91.25MW 규모로 250kW급 연료전지 기준 365대의 보안 전력을 사용중이며, 2000년 이후 매년 25% 이상 성장 실적을 기록중이다. 연료전지 시스템은 배터리 UPS나 다이나믹 UPS와 비교해 부하추종 성능은 떨어지지만 지속성이 디젤 발전기 수준으로 우수하고 디젤 발전기 보다 정전시 응답성이 우수하므로 디젤 발전기와 마찬가지로 배터리 UPS와 결합하여 시스템을 구성하면 상호간의 단점을 보완하여 우수한 백업파워 시스템을 구성할 수 있다. 백업파워 시장에서 디젤 발전기와 연료전지를 비교해 보면 MCFC는 100kW 미만의 소형 시스템을 제외하고는 디젤발전기가 사용되는 모든 백업파워 시장에 적용될 수 있다. MCFC는 디젤 발전기에 비해 발전효율이 높을 뿐만 아니라 시스템 효율이 규모와 부하율에 크게 좌우되는 디젤 발전기와 달리 소규모 시스템 및 저부하 상태에서도 높은 발전효율을 제공한다. MCFC는 배열 회수를 통하여 건물의 냉난방이나 온수 공급이 가능하기 때문에 추가적인 경제성 확보가 가능하다. 미국 뉴욕주 롱아일랜드에 설치 예정인 Verizon Communications의 연료전지 백업파워 시스템의 경우 3MW의 디젤 발전기와 1.4MW의 PAFC로 구성되어 있으며, 이 시스템을 본격적으로 운전할 경우 30,000kWh의 폐열 회수와 50,000ton/year의 CO₂ 감소를 포함하여 연간 약 \$250,000의 수익이 발생하는 것으로 평가된다. MCFC는 위 경우에서 채택된 PAFC보다 발전효율이 높고 양질의 폐열을 활용할 수 있으므로 연료전지 백업파워 시스템의 경제성 확보에 보다 유리할 것으로 판단된다.

3-2) 분산-열병합발전

분산발전이란 기존의 대규모 중앙집중형 발전과는 달리 소규모로 수요지 주위에 분산 배치된 전원을 말하며, 디젤엔진, 가스엔진, 가스터빈, 마이크로터빈 등 화력발전뿐만 아니라 태양광, 풍력, 소수력 등 재생가능 에너지원과 연료전지도 적용 가능한 분야이다. 열병합발전시스템(Cogeneration System)이란 하나의 에너지원으로부터 전력과 열을 동시에 발생시키는 종합에너지 시스템으로 발전에 수반하여 발생하는 배열, 또는 폐열을 회수 이용하여 1차

에너지에서 연속적으로 2종류 이상의 2차 에너지를 발생시키는 시스템이다. 분산 열병합발전시스템은 전력 부하 분산에 따른 발전소 건립 부담 경감으로 100만kW 보급시 원자력발전소 1기 건설비용 1조 6천억원을 회피할 수 있고, 송배전 건설비 감소와 송배전 손실 저감을 가져올 뿐만 아니라 기존 화력이나 원자력 발전에 비해 건설기간이 짧아서 수요 변화에 신속하게 대처할 수 있다. 수요자 측면에서도 분산 열병합발전시스템은 동일한 전력 및 열량을 생산함에 있어서 에너지 소비를 38% 가량 절감할 수 있을 뿐만 아니라 이산화탄소 배출량을 25%까지 절감할 수 있다는 장점이 있다. 일본의 경우 1980년대 초반에 대규모 공장에서 가스터빈을 이용한 대형 열병합발전을 중심으로 전력 공급을 우선으로 하는 분산전원시스템을 구축하기 시작하였으며, 1980년대 후반에는 중소규모 공장에 가스터빈, 디젤엔진, 가스엔진 등을 이용한 중소형 열병합발전시스템이 보급되었다. 1990년대에는 열수요 증대에 따라 상가, 병원, 호텔 등 업무용 분야에서 디젤엔진, 가스엔진 등 소형 열병합발전시스템을 설치하기 시작하여 2001년말 기준으로 총 1,686대 244만kW가 설치되어 있으며, 2010년 가스 열병합발전 설치 목표가 464만 kW로 조사되고 있다. 유럽에서는 1993년 Cogen Europe(유럽 열병합발전 촉진 협회)을 설립하여 열병합발전 보급을 추진한 이래 덴마크, 네덜란드, 핀란드 등 3국에서 가장 활발하게 보급이 이루어져 현재 이들 국가에서는 열병합발전이 총 발전용량의 9%를 차지하고 있으며, 2010년까지 18% 보급을 목표로 한다.

◦우리나라는 2003년 32개소에서 일본의 4% 수준인 총 99,800kW 용량의 분산-열병합발전 시스템 60대가 설치되어 있었으나 2006년 9월에는 122개소에 총 145,072kW 용량의 시스템 176대가 설치되어 3년 동안 용량 대비 145%, 시스템 대비 293%의 시장 성장률을 보여준다.

3-3) 중앙집중발전

발전설비 기준으로 우리나라의 중앙집중발전은 원자력이 17,716MW, 유연탄이 17,340MW, LNG가 17,436MW를 차지하여 각각 전체 설비의 27.0%, 26.5%, 26.6%를 차지하고 있으며, 유류와 무연탄이 각각 7.3%, 1.7%를 차지한다. 2006년 국내 중앙집중발전 시장은 총 354,864GWh 규모로 연료별로는 원자력이 40.0%, 유연탄이 36.4%로 이들 두 발전 방식이 전체 발전시장의 76.4%를 차지하며, LNG 발전은 전체의 16.1%인 572,507GWh를 담당한다. 연료별 발전 비율을 고려해 보았을 때 MCFC 발전시스템이 중앙집중발전 시장에서 경제성 있는 규모의 시장을 확보하기 위해서는 시스템 가격

을 포함한 MCFC 발전시스템의 발전 단가가 최소한 전체 발전의 16.1%를 차지하는 LNG 발전 수준으로 낮아져야 하며, 발전 단가가 무연탄 수준으로 낮아진다면 유연탄과 무연탄의 발전 비율(37.94%)은 물론 경유와 중유 발전의 비율(4.3%)까지 시장 확보가 가능하다. MCFC는 기존 화력발전소에 비해 에너지 전환 효율이 높기 때문에 시스템의 경제성만 확보된다면 동일한 연료를 사용하는 화력발전소에 비해 상대적으로 낮은 발전 비용으로 전력 생산이 가능하다. 그러나 원자력 및 수력 발전을 제외한 화력발전의 경우 발전 단가는 주로 연료 단가에 좌우되므로 MCFC 발전 시스템이 무연탄 수준으로 낮아지기 위해서는 시스템 가격 하락 외에도 LNG에 비해 상대적으로 저렴한 석탄을 연료로 사용할 수 있어야만 하는 것으로 판단된다. 한편 세계 각국에서는 석탄가스화 복합발전(Integrated Coal Gasification Combined Cycle, IGCC) 기술을 개발하고 있으며, 이와 함께 석탄가스를 연료로 하여 연료전지 발전소를 운영하는 IGFC(IGCC+Fuel Cell) 기술개발도 동시에 진행 중이다. 석탄은 석유에 비해 단가가 낮을 뿐만 아니라 2002년 가채매장량을 기준으로 190년간 사용할 수 있으므로 석유에 비해 자원 고갈의 위험이 낮지만 이산화탄소 및 오염물질을 상대적으로 많이 배출한다는 문제점이 있으나 대용량 가스화 기술을 적용하면 에너지 효율이 향상됨은 물론이고 이산화탄소 회수가 용이하고 오염물질 배출을 저감할 수 있으므로 석탄의 청정 에너지화가 가능하다.

4) 국내 기술수준 및 기술개발 동향

현재 국내 MCFC 기술은 1993년부터 진행된 국책 연구과제의 성과를 기반으로 스택의 구성요소에 대한 기술 수준은 선진국 대비 80% 이상에 도달하였으며, 이에 대한 전문인력도 충분하지는 않지만 기술수준은 확보되었다고 파악되나 이를 위한 인프라 구축은 선진국 대비 50%를 밑도는 것으로 분석된다(24). 현재 스택과 달리 개질기를 포함한 연료전지 플랜트 전체를 포괄하는 시스템 분야에서는 선진국 대비 40~60% 정도의 기술수준을 보유하고 있으며, 이와 관련된 인프라도 부족한 것으로 판단된다.

전력연구원의 경우, 국책 연구과제를 기반으로 1993년부터 외부개질형 MCFC 발전 시스템 개발을 추진하였으며, 2005년까지 100kW급 스택 및 시스템을 제작하고 성능평가를 완료하였다. 2005년부터 2009년을 목표로 437억원의 예산으로 전력연구원 및 RIST의 주관하에 250kW급 열병합 MCFCM 시스템 개발 연구 및 MCFC 스택 양산화 연구에 착수하였다. 장기적으로 화력발전소를 대체할 규모의 중앙집중발전용 MCFC 시스템 개발을 목표로 하고 있으며, 이에 수반된 시스템 설계 및 제작기술과 분리판 및 구성요소 생산기술 등 핵심 기술 국산화를 추진중이다.

포스코파워는 2003년부터 FCE와 전략적 제휴를 맺고 FCE 시스템의 도입 및 기술제휴를 통한 국산화를 병행하여 MCFC 발전시장의 진입을 추진하였으며, 2004년부터 FCE의 DFC300 시스템 2기를 도입하여 도시가스 및 하수처리장 부생가스를 이용한 실증운전을 실시하였다. 2007년 FCE와 기술제휴 협상을 완료하고 2009년을 목표로 포스콘과 함께 DFC300MA 시스템의 국내 조립 생산 및 시스템 BOP 국산화를 추진하는 한편 6만여평의 시스템 조립공장 부지를 조성중이다. 한편 발전차액지원제도, 신재생에너지 개발협약, 지역에너지사업, 대체에너지 개발 및 이용보급촉진법 등 정부 및 지방자치단체의 신재생에너지 분야 지원대책을 활용한 MCFC 발전시스템의 보급에도 노력하여 2007년말까지 총 10MW 이상의 시스템을 보급할 예정이다.

두산중공업은 FCE의 기술을 벤치마킹하여 내부개질형 300kW급 MCFC 시스템을 정부과제 형태로 추진중이다. 2010년까지 300kW급 내부개질형 MCFC 시스템을 순수 자체기술로 독자 개발하여 MCFC 분산 발전시스템의 국산화 기술을 구축하며, 이를 통하여 국내 및 세계의 발전형 연료전지 시장에서 경쟁력 확보를 추진 중이다.

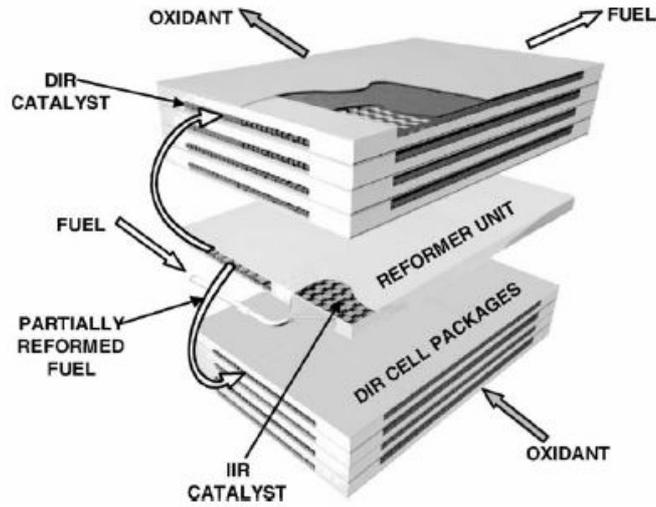
5) 해외 기술수준 및 기술개발 동향

5-1) FCE

FCE(Fuel Cell Energy)는 1969년부터 정부 지원금을 포함해 \$530,000,000 이상의 연구비를 투입하여 내부개질형 MCFC 발전 시스템을 개발해온 업체로 연구개발 단계를 넘어서 1996년부터 상업화를 추진하고 있으며, 현재 300kW급 DFC300MA, 1.2MW급 DFC1500MA, 그리고 2.4MW급 DFC3000을 시판 중이다. FCE 기술의 핵심은 직접 내부개질과 간접 내부개질을 동시에 채택한 스택 구조에 있으며, 이를 통하여 높은 발전효율을 구현하는 한편 스택의 온도구배를 제어하여 스택의 장수명화를 도모한다. 스택 제작에 대한 핵심 기술만을 배타적으로 보유하고 시스템 기술을 아웃소싱하여 제조단가 하향 및 신뢰성 향상을 추진할 목적으로 미국의 캐터필라, PPL, 에너지 플러스, 쉘브론 에너지 솔루션스, 얼라이언스 파워, 엔브릿지, 로간에너지, 파워하우스 에너지, 노던 파워, 리뉴어블 테크놀러지, 실버우드 에너지 뿐만 아니라 일본의 마루베니와 카와사키 중공업, 한국의 포스코파워, 유럽의 CFC-Solution 등과 생산 및 유통에 대한 전략적 제휴를 맺음으로써 글로벌 네트워크를 구축하고 연구개발 뿐만 아니라 제품 판매에도 주력하고 있다. FCE는 DFC300 및 DFC1500의 디자인을 DFC300MA 및 DFC1500MA로 교체하면서 스택 모듈의 구조를 개선하고 운송 및 조립의 간편화를 도모하여 경제성을 향상시키는 노력을 추구하고 있다. DFC3000의 경우 4개의 스택을 하나로 통합한 4-스택 모듈을 기본으로 시스템을 구성함으로써 향후 수MW급 이상의 대형시스템 개발을 위한 기본기술을 확보하고자 한다. 기술개발 측면에서도 2002년에 비해 2005년의 가동률이 10% 가량 증가하였고, 2007년에는 원자력발전소의 가동률에 근접하는 95%에 도달할 것으로 예측되는 등 경제성뿐만 아니라 시스템 신뢰성도 꾸준히 향상되고 있을 뿐만 아니라 현재 3년 미만인 스택의 수명을 5년으로 개선할 수 있는 기술을 개발하여 실용화를 추진하고 있으며, 향후 스택 수명을 7년으로 연장시키는 연구를 수행 중이다.

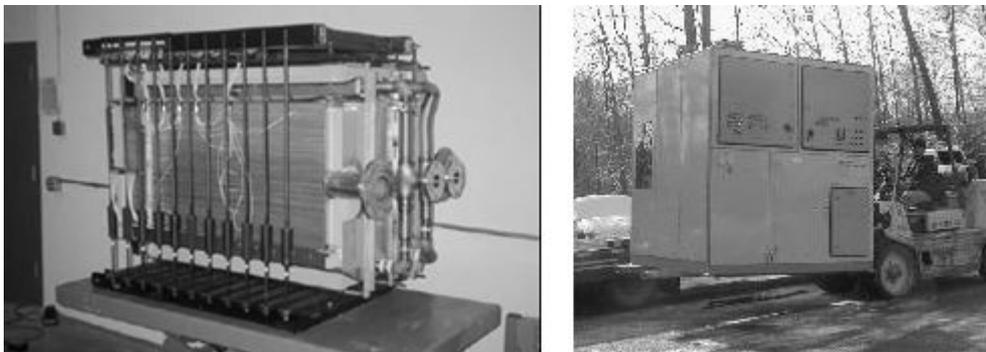
5-2) GenCell

GenCell은 듀얼 매니폴드라는 독특한 매니폴드 구조를 가지고 크기의 조절이 자유로우며 연속 생산이 가능한 고유의 분리판 기술에 기반을 두어 도시가스나 ADG 등 부생가스를 연료로 사용하는 40-125kW급 분산전원 시장을 목표로 내부개질형 MCFC를 비롯해 PEMFC와 SOFC를 개발하고 있다.



[그림 2-10] FCE 시스템의 스택 작동 원리(25)

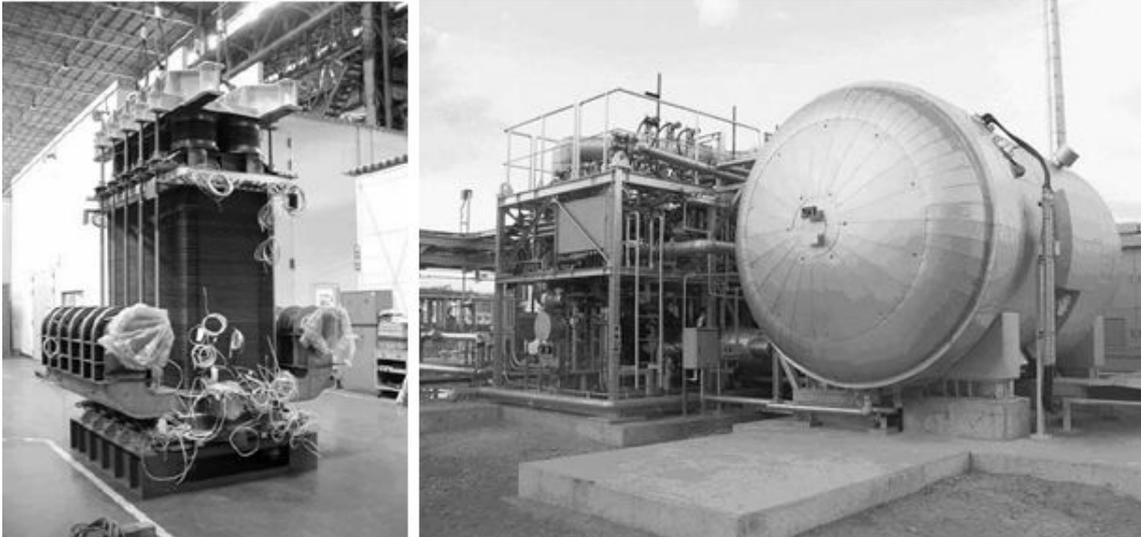
GenCell은 내부 매니폴드 구조로 공급되는 연료를 분리판 내부에 형성된 공간에서 간접 내부개질기만을 통하여 개질하는 방식을 채택하여 시스템을 제작함으로써 시스템의 부피를 감소시키는 한편 스택의 온도구배는 외부 매니폴드 구조로 공급되는 공기의 유동을 활용하여 조절한다. 2005년에 코네티컷 대학의 글로벌 퓨얼셀 센터에 40kW급 시스템을 설치하여 4,000시간 동안 수차례의 열순환을 포함한 운전을 성공하였다고 발표하였으나 자세한 운전 자료는 공개하지 않고 있다.



[그림 2-11] GenCell에서 개발한 40kW급 MCFC 스택 및 시스템(26)

5-3) IHI 중공업

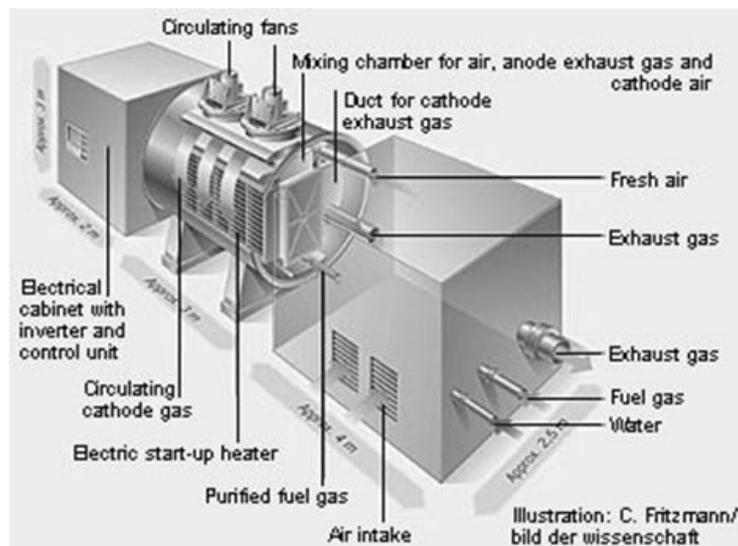
IHI중공업은 1993년부터 일본정부의 MCFC 개발계획에 참여하여 외부개질형 MCFC 발전 시스템을 개발하였으며, 초기에는 IGFC를 대비한 수MW급 화력발전소 대체규모의 발전 시스템 개발을 최종 목표로 하여 1999년 1MW급 MCFC 발전소 건설에 250MW급 스택 2기를 공급하는 등 주도적으로 참여하기도 하였으나 2000년 이후 300kW급 분산 전원용 시스템 개발에 연구 역량을 집중하고 있다. 독자 개발한 외부 연료개질기가 스택과는 별도로 설치되어 있으며, 스택의 온도구배는 1.2MPa의 가압 운전과 과량의 공기를 이용한 공냉운전 방식으로 해결하였으며, 외부 연료개질기 사용으로 인한 시스템 효율 저하는 선택사양인 고온, 고압의 배기가스를 이용한 마이크로터빈 발전기를 병합하여 상쇄 가능하다. 2005년 일본 AICHI 엑스포에서 IHI 중공업은 300kW급 시스템 2기를 추부전력과 토요다 자동차를 운영주체로 한 실증운전에 출품하였으며, 추부전력은 식물 쓰레기 처리가스를, 토요다 자동차는 폐목재 및 플라스틱을 처리하여 얻은 가스를 연료로 사용하였다. 추부전력의 시스템은 내부개질형 시스템인 FCE나 FCF-Solution의 발전 효율인 47%보다 상대적으로 낮은 41.5%의 발전효율을 보여준 반면, 토요다 자동차의 시스템은 마이크로터빈과 병합하여 내부개질형 시스템보다 높은 51.0%의 발전효율을 보인다.



[그림 2-12] IHI 중공업의 300kW급 MCFC 발전 시스템(27)

5-4) CFC-Solution(독일)

CFC-Solution(MTU)은 1989년부터 FCE의 스택을 도입하여 내부개질 기반의 독자 시스템 개발을 시작하여 1997년 Hot-Module이라는 이름의 독자 모델 시스템 개발을 완료하였으며, 1999년부터 독일과 유럽을 중심으로 실증보급을 시작하였다. 2003년 RWE 퓨얼셀과 공동으로 MTU CFC-Solution이라는 조인트 벤처를 설립한 이래 독일 Tognum 그룹의 중공업 관련 기업인 MTU에서 운영하다가 2007년부터는 MTU가 지분을 매각하여 CFC-Solution으로 사명을 변경하면서 Tognum 그룹의 에너지 관련 기업 부분으로 분류되었다. 덴마크의 에네르기 E2S/A, 독일의 루르 가스 AG, 독일의 RWE 에네르기 AG 등과 MCFC 연구개발 컨소시엄을 조직하였으며, 시스템 개발 외에도 유로셀이라는 이름의 독자적인 스택 개발 연구를 병행하고 있다. 연료배구 및 공기 입출기에 매니폴드가 없는 독특한 구조의 시스템을 채택함으로써 시스템 구조가 단순하고 폐열 회수량이 FCE 제품보다 상대적으로 높아 열병합에 특히 유리하다. 기술적으로는 고유의 핵심 시스템 기술을 배타적으로 보유하면서 스택을 아웃소싱하여 경제성 확보를 추진하는 전략을 추진하고 있으며, 지금까지는 자체 보급망을 적극 활용하여 300kW급 중형 시스템 보급에 주력하고 있으나 향후 1000kW급 대형 시스템 개발을 추진 중이다. 현재 250kW급인 시스템 출력을 2008년 및 2009년까지 각각 330kW 및 415kW로 끌어올리고 최종적으로 2010년에는 500kW까지 향상시킨 다음 2기의 스택을 통합한 1MW 시스템을 개발하고자 하는 Road Map을 보유하고 있다.



[그림 2-13] CFC-Solution에서 개발한 250kW급 MCFC 발전 시스템(28)

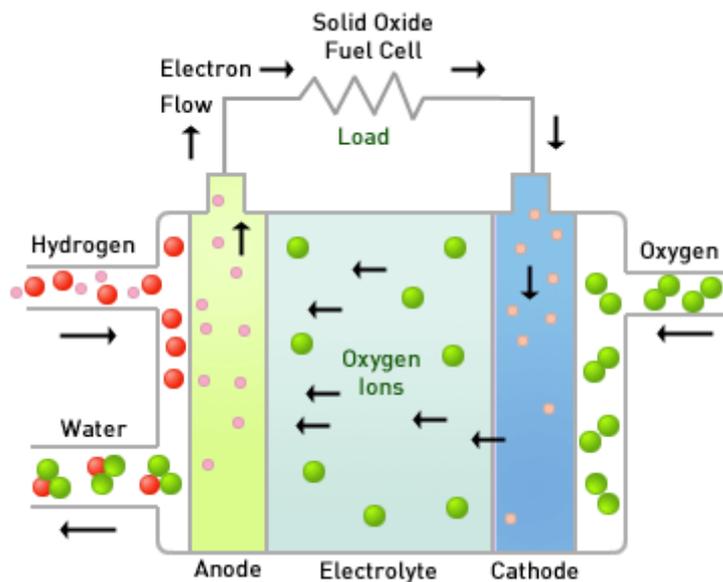
5-5) Ansaldo 퓨얼셀(이탈리아)

Ansaldo 퓨얼셀은 1986년부터의 연구개발 성과를 토대로 2001년에 설립된 회사로 2003년에는 스페인에서 100kW급 시스템인 Series 100을 준공하고 비공개로 운전한바 있으며, 2004년에 연산 최대 15MW급 MCFC 스택 제조 공장을 독자적으로 설립하고 현재 250kW급 외부개질형 스택 2기를 결합하여 운전하는 500kW급 Series 2TW 모델의 실증기 제작에 집중하고 있다. Ansaldo 시스템의 핵심은 개질기와 촉매연소기가 결합되어 스택에 부착되는 MIR(Modular Integrated Reformer)에 있는데 MIR은 촉매연소기 뿐만 아니라 스택으로부터도 열에너지를 공급받기 때문에 이론적으로 외부개질형임에도 불구하고 내부개질형에 필적하는 에너지 효율을 얻을 수 있으며, 스택의 온도구배는 가압운전을 통한 공냉 방식을 채택하여 해결한다. 현재 100kW급 및 500kW급 시스템뿐만 아니라 향후 개발을 계획 중인 MW급 시스템 10여기에 대하여 천연가스, 디젤, 바이오가스, 매립지가스, 하수처리 부생가스, 수소, 합성가스 등을 연료로 운전하는 실증 운전 계획을 유럽연합과 이탈리아 정부로부터 지원받아 진행 중에 있다.

라. 고체산화물 연료전지(SOFC)

가. 기술개요

고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell)는 산화물 이온전도 세라믹 재료를 전해질로써 사용하는 완전한 고체상태의 장치로 전해질의 관리문제에서 다른 연료전지와 비교하여 상대적으로 자유롭고, 고가의 촉매 귀금속을 이용할 필요가 없으며, 수소와 일산화탄소를 모두 연료로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 고체산화물 연료전지는 아래의 그림에서 볼 수 있듯이 음극으로 대전된 산소이온이 공기극에서 전해질을 통해 연료극으로 이동하며, 따라서 연료극에서 물이 생성된다. 고체산화물 연료전지의 전해질에는 소량의 이트리아를 첨가한 지르코니아 전해질을 기반으로 하고 있으며, 약 800도 이상의 온도에서 지르코니아가 산소이온의 전달체가 되기 때문에 고체산화물 연료전지는 통상적으로 800~1000도에서 동작한다. 고체산화물 연료전지의 연료극은 지르코니아 서멧(세라믹과 금속의 내열성 혼합물)이 이용되며, 금속 성분으로는 내부개질촉매로써 이용되어 연료극에서 직접 연료를 개질할 수 있는 니켈이 사용된다(29). 공기극의 재료로는 초기에 귀금속이 활용되었으나, 현재에는 스트론튬을 첨가한 란탄-망가나이트 화합물 계열이 활용되고 있다.



[그림 2-14] SOFC의 원리

나. 장치구성

고체산화물 연료전지는 상기 그림에서 알 수 있듯이 전해질, 연료극, 공기극, 인터커넥터 재료 및 밀봉재료로 구성된다. 전해질로는 초기에 고온 SOFC의 전해질로써 산화비스무스(Bi_2O_3), 산화세륨(CeO_2), 산화탄탈(Ta_2O_5)을 포함한 각종 재료가 시험되었지만, 8~10%의 이트리아(Y_2O_3)를 도핑한 지르코니아(이트리아 안정화 지르코니아, yttria-stabilized zirconia, YSZ)가 안정성 측면에서는 현재까지는 가장 발전된 전해질이다. 지르코니아는 연료전지의 연료극이나 공기극과 같은 환원 및 산화성 환경 하에서 극히 안정하다. 다소의 Zr^{4+} 이온이 Y^{3+} 이온으로 치환되는 지르코니아 불화물의 결정구조로 O^{2-} 이온을 전달하는 능력이 생기며, 이러한 이온교환이 일어날 때, 3개의 O^{2-} 가 4개의 O^{2-} 이온으로 치환되기 때문에 산화물 이온이 감소하게 된다. 특히 페로브스카이트(perovskite) 격자 내부에서 사면체의 비어있는 장소 사이에 산화물 이온의 수송은 원자 또는 분자 수준에서도 보고되고 있다(30). YSZ의 이온전도성(800 °C에서 0.02 S/cm, 1000 °C에서 0.1 S/cm)은 액체의 전해질과 비교하여 유사한 수준이며, 또한 YSZ는 상당히 얇게(25~50 μm) 만들 수 있으므로 SOFC의 저항손실은 다른 형태의 연료전지와 유사한 수준이다. YSZ에 소량의 알루미나(산화알루미늄)를 첨가하면 기계적인 안정도를 향상시킬 수 있으며, 사면체 지르코니아를 YSZ에 첨가하면 전해질의 구조를 강화할 수 있어 얇게 만들 수 있다.

두께 약 40 μm 의 얇은 전해질 구조는 테이프 주조나 다른 세라믹 처리기술은 물론이고 「전기화학증착(EVD: Electrochemical Vapour Deposition)」에 의해서도 제조될 수 있다. EVD법은 Siemens Westinghouse社에 의해 처음으로 개발된 것으로 다루기 힘든 산화물을 얇은 층으로 만들 수 있으므로, 관형 SOFC 설계시에 전해질, 연료극, 관의 상호 연결에 이용될 수 있으나, 현재 EVD는 전해질의 제조에만 이용되고 있을 뿐이다. 이 기술에서 첫 공정은 관 형태의 공기극을 만드는 것으로 전해질을 만드는데 적당한 금속 염화물의 증기를 관의 한쪽 표면에, 산소-증기의 혼합물을 다른쪽 표면에 분사한다. 관의 양쪽면에 가스가 공급되면 전기를 발생시킨다. 그 결과 관 표면에는 고밀도의 균일한 금속 산화물층이 형성되고, 증착속도는 이온의 확산속도와 전하 캐리어의 농도에 의해 제어할 수 있다.

지르코니아를 기반으로 한 전해질은 순수하게 음이온 전도성을 나타내므로 SOFC에 적합하다. CeO_2 , Bi_2O_3 와 같은 물질은 YSZ보다 산소이온 전도성이 높지만 SOFC의 연료극의 낮은 산소분압 하에서는 안정하지 못하다.

이 결과 산화물의 생성에 결함이 생기고 전자전도성이 증가하며, 내부 전류가 증가하여 셀 전압을 감소시킨다. 최근에는 지르코니아 제조에 필요한 온도보다 낮은 온도에서 산화물의 이온전도성을 증대시킨 것으로 LaSrGaMgo(LSGM)계가 보고된 바 있다(31-32).

연료극과 관련해서는 금속 니켈과 YSZ를 기본 골격으로 하여 만든 서멧(cermet)이 주로 활용되었다. 지르코니아는 금속입자의 소결을 막는 기능을 하고 열팽창계수는 전해질과 동등하다. 연료극은 반응물질과 생성가스의 수송을 방해하지 않도록 높은 기공률(20~40%)을 유지하고 있다. 연료극과 전해질 사이의 계면에는 다소의 저항 분극 손실이 있으므로 이것을 감소시키기 위해 개발자들은 연료극을 2층으로 하는 연구를 진행하고 있다. 소량의 산화세륨(CeO_2)을 연료극 서멧에 첨가하는 경우가 많다. 이것은 온도 사이클과 산화환원반응(연료극 가스를 환원성 가스에서 산화성 가스로 바꾸거나 그 逆)에 대한 연료극의 내구성을 향상시킨다. YSZ 입자의 크기를 조절하는 것 역시 산화환원 조건하의 연료극의 안정성을 향상시킨다. 최근에는 메탄의 직접 산화를 촉진시키는 새로운 세라믹 연료극에 개발자의 관심이 모아지고 있다. 그 예로는 지르코늄(Zr)과 이트륨(Y)을 혼합하고 가돌리늄(Gd)을 첨가한 산화세륨과 각종 산화티탄(TiO_2) 기반 계열 재료이다. 이러한 세라믹 연료극에서는 전자와 산소이온 양쪽을 혼합한 전도성이 있다. 혼합 전도체를 연료극으로 사용하는 경우의 또 다른 장점은 반응물질, 연료극, 전해질 사이에서 3상 계면을 확장시키는 수단을 제공할 수 있다는 것이다.

연료극과 마찬가지로 공기극은 반응가스와 생성가스를 빠르게 수송할 수 있는 다공질 구조로 되어 있다. 스트론튬을 도금한 란탄망가나이트($La_{0.84}Sr_{0.16}MnO_3$)는 p형 반도체로써 공기극에 가장 잘 이용되는 재료이며, 대부분의 SOFC에 적합하지만 다른 재료가 사용될 수도 있다. 특히 매력적인 것은 이온과 전자의 혼합전도도를 가지는 p형 전도 페로프스카이트(perovskite) 구조를 갖는 재료이다. SOFC이 온도가 저하하면 공기극의 분극이 상당히 증가하는데, 이것은 저온 운전에서 특히 중요하다. 혼합전도 산화물을 이용하는 장점이 확실히 나타나는 것은 약 650 °C에서 셀을 동작시킬 때이다. 페로프스카이트와 마찬가지로 란탄-스트론튬-페라이트(ferrite, 아철산염), 란탄-스트론튬-코발트 및 n형 반도체는 혼합전도체이기 때문에 최첨단 란탄-스트론튬-망가나이트 재료보다 양호한 전기촉매이다(33).

인터커넥터(interconnector) 재료에서 평판형의 연료전지는 양극판이 인터커넥터이다. 그러나 원통형 구조에서는 배치가 다르다. 인터커넥터에는 금속을 사용하는데, 특히 800 ~ 1000 °C에서 동작하는 스택에서는 고가의 인코

벨(inconel, 합금의 일종) 형태의 스테인리스 강을 사용하는 경우가 많다. 기존의 강철은 YSZ 전해질과 열팽창계수가 달라 적합하지 못하다. 이것을 극복하기 위해서 Siemens사 등은 Cr-5Fe-1Y₂O₃ Siemens/Plansee와 같은 새로운 합금을 개발하려는 시도를 하고 있는데, 이러한 합금은 크롬에 의해 공기극이 피독될 수 있다. 공기극의 상황에 따라 크롬은 인터커넥터부에서 증발하여 란탄-스트론튬-망가나이트(LSM)/YSZ/가스로 이루어진 3상 경계면에 증착하게 됨으로써 결과적으로 공기극의 활성을 급속하게 떨어뜨린다. 저온 SOFC의 장점은 오스테나이트(austenite) 강과 같이 크롬이 포함되지 않은 값싼 재료를 사용하는 것이다. 금속으로 만들어진 인터커넥터는 산화피막을 형성시켜 전기전도도를 제한하고 물질수송의 장애가 되기 쉽다.

원통형 설계시에 선호되는 인터커넥터의 대체물로서는 세라믹 재료를 이용하는 것으로 란탄 크로마이트(chromite, 아크롬산염)가 자주 사용된다. 그 중 다소의 란탄을 마그네슘이나 다른 알칼리 토류 원자와 대체하면 이 재료의 전기전도도가 향상된다. 아쉽게도 고밀도의 상(相)을 만들기 위해서는 재료를 상당한 고온(1625 °C)에서 소결할 필요가 있다. 이것이 SOFC의 주요한 문제 중의 하나이다. 모든 셀의 구성 부품은 화학적 안정성과 기계적 탄력성(예를 들어 열팽창계수) 등이 같을 필요가 있다. 너무 높은 소결온도로 인해 야기되는 문제인 재질의 열화 없이 양호한 접착을 얻을 수 있는 방법을 사용하여 다양한 층을 증착시킬 필요가 있다. 대부분의 제작법은 지적재산권이고 이 분야에서는 상당한 연구가 진행되고 있다.

상기에 강조되지는 않았으나, SOFC의 주요 문제가 가스가 새지 않도록 하기 위한 세라믹 구성부품을 밀봉하는 방법이며, 이러한 측면에서 MCFC에 사용된 습식 밀봉(wet seal) 방법을 이용하기에는 어려움이 있고, 온도 영역이 넓기 때문에 문제가 생긴다. 보통의 방법은 셀의 동작온도와 비슷한 천이온도를 가진 유리를 사용하는 것이었다. 셀이 가열되면 이 유리가 부드러워져서 셀 주위는 밀봉된다. 많은 셀이 하나의 층에 조립되는 평판형 스택 설계에서는 이것이 중요하다. 문제는 유리로부터 실리카가 이동하는 것이고, 이것이 특히 연료극으로 이동하면 셀 성능이 저하된다. 스택이 완전히 세라믹으로 만들어진 경우, 유리 세라믹이 밀봉재로 사용되지만 연료극과 공기극 모두에 실리카의 이동은 여전히 문제가 된다.

라. 이용분야

SOFC는 타 연료전지 시스템에 비하여 상대적으로 고온에서 운전함으로써 자체적인 전력 변환 효율이 높고, 가압 조건에서도 운전이 가능하여 연료전

지의 성능이 증가할 뿐만 아니라 고온, 고압의 배가스를 이용하는 가스터빈을 연계하여 전체 발전 시스템의 효율을 증가시킬 수 있다. 고온 작동으로 값비싼 촉매를 사용하지 않고도 반응을 가속화시킬 수 있으며, 연료극 측에서의 내부 개질 반응이 가능하여 개질기를 간략화 할 수 있을 뿐만 아니라 수소 이외에 천연가스 및 석탄가스 등의 다양한 연료를 사용할 수 있다. 온도 상승에 따라 이론 효율(등온 변화로 화학에너지에서 전기에너지로 변환할 수 있는 최대값)은 감소하지만, 온도 상승에 따라 전기저항, 전극반응 저항은 작아지므로 온도 상승에 따른 이온 효율의 감소를 보충할 수 있다. 따라서 고온에서 작동하는 SOFC의 효율이 저온형 연료전지 보다 높다.

SOFC는 연료전지 중에서 가장 높은 온도에서 작동하며, 높은 발전효율을 얻을 수 있으나 최근에는 작동온도를 650 °C까지 낮춘 저온 작동 SOFC의 개발 또한 진행되고 있다. 저온화에 따라 재료 선택의 폭이 넓어지므로 가격을 낮출 수 있고, 분리판으로 값이 싼 금속 재료를 사용할 수 있다. 저온화에 따라 구성 부재료의 열적 열화가 경감되어 신뢰성 및 수명이 증가하며, 시스템 전체의 내열 요구도가 완화되므로 배관등 설비의 저비용화도 가능하다.

1) 주거용

SOFC의 발전효율은 온수로 회수되는 열량까지 고려하여 80% 이상이므로 전력과 보일러를 이용하는 가정이 SOFC를 도입할 경우 16%의 에너지 절감 효과가 있어 주거용의 경우 계절별 온수 사용량의 변화가 크므로 상업용 건물(호텔, 병원, 찜질방 등)에 먼저 적용하는 것이 적합하다.

SOFC는 가스엔진 등과 비교하면 가동할 때 시간과 에너지를 필요로 하며, 기동정지를 반복하면 내구성이 저하되는 약점이 있으므로, 연속운전으로 베이스 전력 및 열을 공급할 수 있는 곳에 응용되는 것이 적합하다. 연속운전이 기본인 연료전지는 일반적으로 호텔이나 병원 등 야간전력 부하가 비교적 크고, 열부하가 큰 건물에 적합하다. 장차 건물의 인텔리전트화 등의 진행에 의해 소규모 건물의 전력소비 및 그에 수반하는 공조부하가 증가할 것으로 예상됨으로 연료전지의 적용범위가 넓어질 전망이다.

2) 분산전원

분산발전은 기존의 대규모 중앙집중형 발전과는 달리 소규모로 수요지 주위에 분산배치된 전원을 말하는 것으로 연료전지의 발전단위는 출력 규모가 매우 작은 셀이므로 출력 규모가 작은 영역에서도 높은 성능을 유지할 수

있으며, 열기관처럼 규모 증가에 따른 잇점이 적기 때문에 작은 규모에도 유리하며 분산형 전원으로 적합하다. SOFC는 기존의 다른 분산전원에 비해 소음이 적고 유지비용이 작은 장점이 있다.

연료전지 가운데 분산전원으로 적용 가능한 것은 PAFC, PEFC, SOFC이다. PAFC는 이미 상용화 단계에 있지만 단가가 높아 시장진입에 실패하였다. 전세계 에너지 소비량 중 전력부문의 비중이 급격히 증가하고 있으며, 세계 총에너지 소비 가운데 전력부문은 2000년 38% 정도를 점하고 있으나 향후 2020년에는 50%로 늘어나고 2050년에는 70% 수준에 도달할 것으로 예상되어 분산전원에 대한 요구가 증대될 것이다.

빌딩이나 병원, 상업용 건물 등에 쓰이는 대형 정지형의 경우 분산전원의 특성을 가장 잘 활용할 수 있으며, 현재는 정부의 지원에 크게 의존하는 형태이지만 병원, 데이터센터, 상업용 빌딩, 각종 산업용 플랜트의 보조전원용으로 적용 가능하다.

SOFC 분산전원은 기존의 대규모 중앙 집중형 발전과는 달리 소규모로 수요지 주위에 분산배치 가능하며 송배전 설비 저감, 전력 부하에 따른 대응력 강화, 친환경적 에너지원 이용에 따른 온실가스 및 공해 저감, 고효율에 따른 경제성 메리트, 상용전원과의 이중화에 의한 공급 신뢰성 향상 및 코제너레이션에 의한 배열회수로 에너지의 이용 효율이 향상된다.

은행, 공공기관, 그리고 반도체 공장 등 전자산업에서는 전력의 단가보다는 전력의 신뢰도가 중요한 요소로 작용하며, SOFC 분산발전과 상용전원과의 이중화에 의한 공급 신뢰성이 향상되어 전력의 품질에 민감한 산업을 중심으로 채택이 이루어질 것으로 기대된다.

기존의 화력발전은 설비용량이 커질수록 전력 생산단가가 낮아져 대규모 화력발전에 비해 소규모 발전은 경제성이 월등히 떨어졌기 때문에 전력산업은 '규모의 경제' 원리에 충실한 산업이었으나 SOFC 등과 같이 소규모이면서도 기술집약적인 고효율 발전기술의 발전으로 2015년경에는 SOFC 소규모 자가발전의 경제성 확보가 가능할 것으로 예상된다.

가정용, 업무용과 같은 소규모 설비에서는 초기 투자비용의 부담이 크며, 설비운전 관리자 확보에 따른 인건비, 설비의 관리비 등을 고려할 때 다소 비싸고 유지관리비의 상승으로 인해 운전비용의 변동이 심해 시설규모가 작을수록 초기 투자비용과 운전관리 부담이 크므로 시장 확대를 위해서는 초기 투자비 지원 등의 강력한 정부 정책이 필요하다. 환경면에서 우수하고 콤팩트하게 만들 수 있으므로 도시 내부를 포함한 어떤 장소에도 연료전지를 설치할 수 있으며, 현장식 발전(on-site-power)을 지향하며, 그 특성을 살려

재해에 강한 도시를 만들기 위해 연료전지의 이용이 논의되고 있다. 재해시 수도, 송전라인이 파괴되더라도 연료전지를 이용하여 전력과 열, 그리고 물을 공급할 수 있다.

송배전 설비 저감, 전력 부하에 대한 대응력 강화, 친환경적이라는 장점도 있지만 현재 기술수준을 고려할 때 비경제적이며, 기존 계통의 전력 품질 및 신뢰도 저하, 계통 운용상의 문제 또한 있으므로 SOFC 기술 개발 뿐만 아니라 기존 전력계통과의 연계에 대한 많은 연구가 필요하다.

3) 수송용

SOFC는 고온형이기 때문에 시동시간이 길어 자동차의 주동력 보다 보조전원에 적합하여 보조전원용으로 개발이 진행 중이다. 고유가 및 선박에 대한 대기오염 문제가 심해지면서 수송용 연료전지는 선박 추진 동력으로도 연구 개발 중이다. 국제해사기구(IMO)가 선박에 의한 대기오염을 막기 위해 지난 1997년 채택한 '국제해양오염방지협약(MARPOL)'의 '대기오염방지에 관한 부속서 IV'에 대한 엄격한 이행을 유도키로 하는 등 해양 환경문제 해결에 적극 나서고 있다.

선박 디젤 엔진기관의 오염물질 보면 NO_x는 전세계 배출량의 10~15%, SO_x는 4~6%, CO₂는 2%이며, 정제된 연료를 사용하면 오염물질을 줄일 수 있으나 선박운항 비용이 증가하며, 정제제품의 생산에 따른 시간과 비용의 증가가 예상된다. 따라서 고효율 선박 추진 동력에 대한 요구가 커지고 있으며, SOFC의 경우 정부하 특성이 요구되는 대형선박에 응용 가능할 것으로 보고 Wärtsilä는 Topsoe와 함께 선박 동력용 SOFC를 개발 중이다. SOFC 성능 만족시 선박용 SOFC의 사업화를 위해서 오염물질 다량 배출 선박에 대한 입항 제한 등의 규제가 전세계적으로 이루어져야 한다.

4) 휴대기기용

고온에서 동작하는 SOFC의 특성 때문에 구동 준비시간(약 15분 이하)이 필요하며 기존 2차 전지와 직접적인 경쟁보다는 보조전원으로 병용되거나 군사용으로 사용 가능할 것으로 예상된다.

다. 기술개발동향

고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell)의 주요 국내 연구기관으로는 한국과학기술연구원, 전력연구원, 한국에너지기술연구원 및 포항산업과학연구원이 있으며, 한국과학기술연구원(KIST)은 '90년대 초부터 평판형 SOFC

개발연구를 수행해왔다. 쌍용(주), 현대자동차, 포스코 등의 산업체와 연계하여 다층 세라믹 복합체 제조기술을 응용한 고온(>800 °C)용 전해질 지지체형 SOFC 개발, 중·저온(600 ~ 800 °C)용 음극 지지체형 SOFC 개발 등의 연구과제를 수행하였다. 평판형 SOFC 스택 구성에 필요한 단전지 및 밀봉재, 접속자, 집전자 등의 각종 요소부품 제조기술을 확보하고 이를 바탕으로 kW급 스택 제조기술을 축적하는 등 SOFC 관련 고유 원천기술들을 폭넓게 보유하고 있다. 현재 저온작동화를 통한 시스템의 안정성 및 경제성 확보와 이를 위한 저온성능 향상 연구에 주력하고 있으며, 열사이클 및 산화/환원 사이클에서의 안정성 문제를 해결하여 상용화 수준의 내구성을 확보하기 위한 기술개발에 초점을 맞추고 있다.

전력연구원(KEPRI)은 평판형 SOFC를 사용하여 가정용 kW급 시스템 개발을 진행 중이며, 고성능이면서 장기 성능을 신뢰할 수 있는 SOFC 스택 모듈 본체의 개발과 이의 RPG용으로서의 시스템화 관련기술을 개발 중에 있다. 2006년 연료극 지지체형 단전지를 이용한 1kW급 RPG용 중저온형 SOFC 발전시스템 개발을 완료하였으며, 현재 후속 연구로 5kW급 열병합 SOFC 발전시스템 개발 연구를 수행중이다. 향후 실증연구를 시작하여 가정용 연료전지 보급사업에 참여할 계획을 가지고 있다.

한국에너지기술연구원은 소형 원통형 SOFC 스택으로 수송기기/산업용 보조전원장치 및 가스터빈과의 하이브리드 대형복합발전시스템 개발에 주력하고 있으며, 평판형 SOFC 스택용 원천기술 개발도 추진 중에 있다. 보조전원(APU) SOFC 발전시스템 개발의 경우, 연료극 지지체식 튜브셀 및 이를 이용한 급속 기동형 SOFC 스택을 개발하였으며, 이와 더불어 SOFC 발전시스템용 디젤 개질 시스템, BOP 등 소형화 기술 개발을 추진 중에 있다. 가스터빈/연료전지 복합발전용 SOFC 발전시스템 개발의 경우, 5kW급 SOFC 스택 본체는 독일 울리히 연구소에서 도입했으며, 상압에서 연료로서 수소를 주입해 약 8.1kW의 출력을 발생시키는 SOFC 발전시스템을 개발하였다. 평판형 SOFC 스택 및 스택모듈 원천기술 개발의 경우, 적용 분야별 평판형 SOFC 스택제작에 필요한 스택 모듈 기술개발 및 스택 구성 부품들의 핵심 소재 원천기술을 개발하고 있다.

포항산업과학연구원(RIST)은 '90년대 후반부터 SOFC용 분리판 소재 개발, 고온형 연료전지 스택소재 제조기술 개발 연구를 통해 저비용·고기능 분리판 설계, 스택 구성요소 제작 및 공정기술 등의 기반기술을 확보하였으며, 이를 바탕으로 2006년 1kW급 SOFC 스택의 제작 및 운전평가 연구를 완료하였다. 분산전원/중앙 집중형 대형발전 시스템의 상용화를 위한 기반과제로써

2007년부터 150kW급 SOFC 스택 소재 핵심기술 및 발전시스템 개발을 수행 중이다.

해외기술개발동향과 관련해서는 미국, 일본, 유럽 등에서 SOFC는 활발히 연구되어 왔다.

1) Siemens Power Generation

SOFC 개발 초기 원통형 양극 지지형 cell을 개발하였으나 전력밀도 향상을 위해 cell 유효면적을 증가시키는 구조로 변경되었다. 연료전지의 가장 발전된 형태라고 할 수 있는 SOFC/GT 하이브리드 발전소는 마이크로터빈 압축기를 이용하여 연료전지를 약 3기압까지 가압하여 작동하며, 배기구에서 나오는 1,500 °F의 배기가스가 마이크로터빈을 구동시키는 기동력으로서 작용하고 마이크로터빈은 다시 압축기와 발전기를 구동한다. NETL 청정석탄 이용 프로그램에 의해 이산화탄소 분리공정이 포함된 석탄가스 이용 SOFC-가스터빈 하이브리드 시스템 개발에 ConocoPhillips(석탄 가스화 기술 제공), Air Products and Chemical Inc.(이온 전도성 분리막 설비)와 함께 참여하고 있다. 220kW(200kW SOFC + 20kW GT) SOFC/GT 하이브리드 발전소를 캘리포니아에 세계 최초로 설치하여 전기효율 약 55%를 확보하였다. 구동 결과를 바탕으로 1MW급에서는 전기효율 60%, 20MW급에서는 70%의 전기효율 확보가 예상된다.

2) GE

Honeywell의 개발 결과를 바탕으로 SOFC 하이브리드 시스템 개발을 목표로 하고 있다. SECA의 참여 기업으로서 평판형 SOFC를 완성 형태로 개발생산하기로 했다. 6-sigma 기법을 도입하여 최적의 미세구조를 얻기 위한 새로운 SOFC 증착 조건을 개발하고 현재의 공정을 최적화하려는 전략이다. 수MW급 석탄 이용 연료전지 발전시스템(IGFC, Integrated coal gasification fuel cell combined cycle)을 개발 중이다. NETL 청정석탄 이용 프로그램에 GE energy, GE global research, PNNL, Univ. South Carolina와 함께 참여하여 SOFC, 가스터빈, 석탄 가스화 기술을 융합한 연료전지 이용기술을 개발하기로 하였다. IGFC는 석탄가스화복합발전(IGCC, Integrated coal gasification combined cycle) 보다 한 단계 진화된 것으로 석탄에서 뽑아낸 가스를 활용, 수소를 뽑아 연료전지를 만드는 것으로 연료전지, 증기터빈, 가스터빈을 함께 이용하기 때문에 효율이 IGCC 보다 10% 정도 높은 것으로 알려져 있다. 현재 기술로는 여러 가지 주변기기 개발이 완료되지 않았고

일산화탄소 배출 등의 문제가 있지만 빠르면 2020년경 상용 가능한 기술을 축적할 수 있을 것이라는 것이 GE의 판단이다.

3) Acumentrics

1994년에 설립된 무정전 전원 공급장치(UPS, Uninterruptible Power Source) 제조회사로서 2000년부터 SOFC 개발을 시작하였다. 가정용 소규모 발전용 원통형 SOFC를 개발 중이며, 1 ~ 10kW의 가정용 소규모 발전용 연료전지 실증을 실험중이다. 2003년 Sumitomo와 함께 joint venture(Acumentrics Japan)을 설립하였으며, 합작 회사의 목적은 원통형 SOFC 전력 시스템을 일본에 판매하고 일본시장에 SOFC 발전시스템을 적용하기에 필요한 개발 작업을 수행하는 것이다. 2007년에는 FCT(Fuel Cell Technology Ltd., CA)를 인수하여 FCT의 BOP(Balance of Plant) 기술을 획득하였다. SECA 프로그램에 참여하여 천연가스, 프로판 등의 탄화수소를 직접 이용하는 2 ~ 10kW급 원통형 연료극 지지형 SOFC 시스템을 개발 중이다. Brazing 기술에 의해 전기적 연결방식을 향상시킴으로서 33%의 출력 향상을 얻었으며, 6000시간 운전시의 성능 감소는 0.25%/500h(2010년 SECA 목표 0.1%/50h)에 불과하다. 현재 작동온도(800 °C)를 650 ~ 700 °C로 낮추기 위한 기술을 개발 중이다.

4) Delphi

DOE(US Department of Energy)의 SECA(Solid State Energy Conversion Alliance) 프로젝트에서 설정한 효율, 내구성 등의 성능 목표를 만족시킨다.

<표 5-9> 고체 전해질 연료전지 개발 현황(Delphi)

	SECA	Delphi
최대 전력	3 ~ 10kW	4.24kW
전기 효율	35%	37%
전력 열화율	7%/1500hr	7%/1500hr
장비 및 설치 비용	US\$800/kW	US\$770/kW

※ 출처 : Delphi, <http://delphi.com>

1999년에 SOFC 시스템의 개발에 착수하여 대형 트럭의 보조 전원 등의

용도로 개발 중이며, BMW와 공동으로 승용 및 경량 트럭용, 군용 APU 시스템을 개발 중이다. 5kW APU용 가솔린 개질기술 및 3 ~ 10kW APU용 천연가스 개질을 포함하는 평판형 SOFC Cen3 cassette의 경우 모사연료를 사용하여 750 °C에서 0.5W/cm²(at 0.7V)의 성능을 보인다.

5) Zteck Corp

고성능 수증기 개질을 포함하는 SOFC 에너지 개발·생산·판매·서비스 산업에 종사하고 있는 기업으로서, 1kW급 연료전지 스택을 15,000시간 이상 성공적으로 운전하였다. 현재는 여러 개의 연료전지 스택과 천연가스 내부개질을 이용하는 25kW 시스템을 개발, 운전 중이며, 200kW SOFC-가스터빈 시스템을 건설 중이다.

6) PNNL(Pacific Northwest National Lab)

SECA 프로그램을 NETL(National Energy Technology Lab)과 함께 주도하고 있으며, 새로운 SOFC 시스템과 소재 개발 및 평가, 생산단가를 낮추기 위한 생산기술을 개발 중이다. Delphi Corp., Battelle Memorial Institute 등과 공동으로 SOFC를 이용한 차량 탑재용 APU 시스템을 개발 중이며, SPG와 고효율 저온 탈황시스템 개발 대응을 수행중이다. DOE EERE 프로그램에서는 중량 트럭용 고효율 동력 시스템 개발을, DARPA Palm Power 프로그램에서는 양극재료 개선과 전극의 미세구조 제어 등의 연구를 수행중이다. SECA 프로그램을 통해 SOFC 셀, 스택, 시스템을 분석하기 위한 모델 개발, 저렴한 밀봉재 개발, 중저온 SOFC를 위한 전극소재 개발에 참여 중이다.

7) NEDO

산업분야에서의 수소-연료전지 프로젝트는 METI의 지원을 받아 NEDO가 관할하여 수행한다. 2001년 연료전지 개발을 위해 FCCJ(Fuel Cell Commercialization Conference)가 설립되어 연료전지 상용화 및 보급을 위한 조사 등의 분과활동이 수행되고 있다. 2001 ~ 2003년 평판형, 원통형, 일체형 SOFC 모듈을 개발하여 왔으며, 2007년 현재 10 ~ 100kW급 SOFC 시스템을 개발 중이다. 2007년부터 NEDO 주도로 Osaka gas, Kyocera는 실증 실험을 시작하였으며, 1 ~ 5kW급 30 ~ 40대 설치 후 4년간 가동시킬 계획이다. 일본의 SOFC 시장규모는 2010년에는 380억엔으로 추정되며, 2020년에는 2000억엔 시장으로 확대될 것으로 예상된다.

8) Kyocera

2.5kW급 상압형 SOFC 발전 유닛을 개발하고, 세계 최고 레벨의 직류단 발전효율 56.1%(LHV)를 달성하였다. 하나의 세라믹 기판상에 다수의 음극 지지형 cell을 제조하여 각 cell을 기판상에 직렬로 접속한 구조로 되어 있다. 따라서 비교적 적은 수로도 용이하게 고전압을 얻을 수 있어 저전류 운전을 실현할 수 있다. 제조시 셀을 적층하는 공정이 불필요하고 저렴한 재료를 이용할 수 있다는 등의 특징이 있어 향후 양산에 의한 저비용화가 기대된다.

9) Mitsubishi Heavy Industry(MHI)

NEDO 지원의 R&D 프로그램에 의해 MOLB(Mono-block Layer Built)라는 독특한 평판형 all ceramic 연료전지와 원통형 SOFC 설계 및 제조기술을 개발하였다. MOLB형 SOFC 개발 프로젝트는 SOFC를 이용하여 200kW급 열병합 발전시스템 개발을 목표로 한다. 원통형 SOFC 개발 프로젝트는 마이크로 가스터빈과 연계하여 350kW급 시스템 기반기술 확립을 목표로 한다. Chubu Electric Power사와 공동으로 50kW MOLB-type SOFC CHIP를 개발하여 Aichi International Exhibition에 설치하여 1000 °C에서 4,000시간 실증 운전에 성공하였다. 일본 최초로 고체 산화물형 연료전지와 마이크로 가스터빈을 조합한 복합발전 시스템의 실증 운전에 성공, 신에너지·산업기술 종합개발기구(NEDO)로부터 위탁을 접수하여 2004년도부터 개발을 진행시키고 있던 것으로 미쯔비시 중공업 나가사키 조선소 내에서 최대 출력 75kW의 발전을 확인하였다. 지름 28mm, 길이 1,500mm의 원통형(양극지지) cell을 이용하였으며, 900 °C에서 셀 당 0.65V에서 151W의 출력을 구현한다.

10) Rolls-Royce

Rolls-Royce cell의 구조는 다공질 세라믹을 지지체로 하는 평판 튜브형이며, ceramic 집전체를 screen printing하여 사용하므로 생산이 용이하다는 장점이 있으나 아래/위 튜브를 연결하여 사용하므로 sealing이 용이한 튜브형 cell의 장점을 살릴 수 없으며, cell 유효면적이 전체의 50% 미만으로 대용량 발전을 위해서는 많은 수의 필요하다. 2007년 4월 all ceramic 평판형 SOFC를 개발 중인 SOFCo-EFS Holdings를 인수하였으며, Rolls-Royce SOFC의 제원 또는 특성이 거의 공개되지 않은 점을 고려하면 cell 구조에 대한 변경 검토가 있는 것으로 보인다. SOFCo-EFS Holdings는 세라믹 interconnect를 사용한 평판형 SOFC를 개발하던 업체로, 세라믹

interconnect를 사용한다는 측면에서 Rolls-Royce의 기존 기술과 공통점이 있다. 1 MW급 가압 SOFC/GT 하이브리드 시스템을 시장에 내놓기 위해 250 kW 연료전지 시스템 실증 실험 중이며, 전기효율은 53%이다.

11) Wärtsilä / Topsoe

분산전원, 선박용 동력에 대한 노하우가 있는 Wärtsilä는 평판형 SOFC의 선두주자 중 하나인 덴마크의 Topsoe와 협력하여 분산전원용, 선박 추진 동력용 SOFC 개발에 주력하고 있다. 2000년 SOFC 개발에 착수하여 2004년 1 ~ 5 kW급 SOFC 시스템 개발을 완료하였고, 현재 20 kW급 시제품을 개발 중이다. 2010년경 분산전원, 선박 추진 동력용 SOFC 시스템을 상용화할 예정이다.

참고문헌

- 1) 산업연구원, 환경친화적 자동차의 개발·보급 기본계획 수립 및 보급 지원 방안 연구, 2005.6
- 2) Grove, W. R., On Volatile Series and the Combination of Gases by Platinum, *London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science*, Series 3, 14, 127-130-420, 1839.
- 3) Bossel, U., *The Birth of the Fuel Cell 1835-1845*(European Fuel Cell Foeum, Oberrohrdorf, Switzerland, 2000).
- 4) Grove, W. R., On a Gaseous Volatile Battery, *London and Edinburgh Philosophical Magazine and Journal of Science*, Series 3, 21, 417-420, 1842.
- 5) Chen, E., History, in G. Hoogers(editor), *Fuel Cell Technology Handbook*(CRC Press, Boca Raton, FL, 2003).
- 6) Nadal, M. and Barbir, F., Development of a Hybrid Fuel Cell/Battery Powered Electric Vehicle, in D. L. Block and T. N. Veziroglu(editors), *Hydrogen Energy Progress X*, Vol. 3(International Association for Hydrogen Energy, Coral Gables, FL, 1994) pp. 1427-1440.
- 7) Gottesfeld, S. and T. A. Zawodzinski, Polymer Electrolyte Fuel Cells, in R. C. Alkire, H. Gerischer, D. M. Kolb, and C. W. Tobias (editors). *Advances in Electrochemical Science and Engineering*, Vol. 5 (Wiley-VCH, New York, 1997
- 8) Paganin, V.A.E.A. Ticianelli, and E.R. Gonzales, Development and electrochemical studies of gas diffusion electrodes for polymer electrolyte fuel cells, *Journal of Applied Electrochemistry*, Vol. 26, 1996, pp 297-304
- 9) Warshay M. and Prokopius P.R.(1990) "The fuel cell in space : yesterday, today and tomorrow", *Journal of Power Sources*, 29(1&2), 193-200
- 10) Prater K. (1990) "The renaissance of the solid polymer fuel cell", *Journal of Power Sources*, 29(1&2), 239-250
- 11) Warshay M., Prokopius P.R., Le M., and Voecks G. (1997) "NASA Fuel cell upgrade program for the space shuttle orbiter." *Proceedings of the Intersociety Energy Conversion Engineering*

Conference, Vol. 1, pp.228–231.

- 12) Choi W.C., Kim J.D., and Woo S.I. (2001) "Modification of proton conducting membrane for reducing fuel crossover in a direct methanol fuel cell," *Journal of Power Sources*, 96, 411~414.
- 13) Yoon S.R., Hwang C.H., Cho W.I., Oh I.H., Hong S.A., and Ha H.Y.(2002) "Modification of polymer electrolyte membrane for DMFC using Pd films formed by sputtering," *Journal of Power Sources*, 106, 215~223.
- 14) Trivoli V.(1998) "Proton and methanol transport in poly(perfluorosulphonate) membranes containing Cs^+ and H^+ cations," *Journal of the Electrochemical Society*, 145(11), 3798~3801.
- 15) Gieger A.B., Rager T., Matejeek L., Schere G.G., and Wokaun A.(2001) "Radiation grafted membranes for application in direct methanol fuel cells," *Proceeding of the First European PEFC Forum–Lucerne*, pp. 129~134.
- 16) Dimitrova P., Friedrich K., Stimming U., and Vogt B.(2001) "Recast Nafion–based membranes for methanol fuel cells," *Proceeding of the First European PEFC Forum–Lucerne*, pp. 97~107.
- 17) Hammet A. and Kennedy B.J. (1988) "Bimetallic carbon supported anodes for the direct methanol–air fuel cell", *Electrochimica Acta*, 33, 1613–1618.
- 18) Hogarth M. and Hards G. (1996) "Direct methanol fuel cells: technological advances and further requirements", *Platinum Metals Review*, 40, 150–159.
- 19) Otomo J., Ota T., Wen C–J., Eguchi K., and Takahashi H. (2001) "Heteropoly compound anode electrocatalysts for direct methanol fuel cell." *Proceeding of the First European PEFC Forum–Lucerne*, pp.29–37.
- 20) Havranek A., Klafki K., and Wippermann K. (2001) "The influence of the catalyst loading and the ionomer content on the performance of DMFC anodes. " *Proceeding of the First European PEFC Forum–Lucerne*, pp. 221–230.

- 21) Maru H.C., Paetsch L., and Pigeaud, A.(1984) in Proceedings of the Symposium on Molten Carbonate Fuel Cell Technology, R.J. Selman and T.D. Claar (eds) The Electrochemical Society, Pennington, NJ, P.20.
- 22) Petri R.J. and Benjamin T.G.(1986) in Proceedings of the 21st Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Volume 2, American Chemical Society, Washington, DC, p.1156.
- 23) Hirschehofer J.H., Stauffer D.B. and Engelman R.R.(1998) Fuel Cell handbook Fourth Edition, Report no. DOE/FETC-99/1076, Parsons Corporation, for U.S. Department of Energy.
- 24) RIST, 한국 국제전지 산업전시회, 서울, 대한민국, 2005
- 25) J. Doyon, et al., Int. J. Power Sources, 118, 8, 2003
- 26) GenCell, Fuel Cell Seminar, Honolulu, Hawaii, 2006
- 27) TOOI Masaaki, et al., IHI Engineering Review, 36(1), 5, 2003
- 28) CFC-Solution, Fuel Cell Seminar, Honolulu, Hawaii, 2006
- 29) Pointon K.D.(1997) "Review of work on internal reforming in the solid oxide fuel cell," ETSU report F/01/00121/REP, AEA Technology, Harwell UK.
- 30) Kahn M.S., Islam S., and Bates D.R. (1998) "Cation doping and oxide in zirconia: a combined simulation and molecular dynamics study", Journal of Material Chemistry, 8(10), 2299~2307.
- 31) Feng M., Goodenough J., Huang K., and Miliken C. (1996) Journal of Power Sources, 64, 47.
- 32) Ishihara T., Matsuda H., and Takita Y. (1994) "Loped LaGaO₃ perovskite type oxide as a new oxide ionic conductor", Journal of the American Chemical Society, 116(9), 3801~3803.
- 33) Han P. et al (1993) "Novel oxide fuel cells operating at 600~800 °C", An EPRI/GRI Fuel Cell Workshop on Fuel Cell Technology Research and Development, New Orleans, LA.