

1. 서론

이창래 선임연구원
(한국기계연구원 재료기술연구소)

양철남 선임연구원
(한국기계연구원 재료기술연구소)

문성모 선임연구원
(한국기계연구원 재료기술연구소)

정용수 책임연구원
(한국기계연구원 재료기술연구소)

인간이 불을 발견한 후 인류의 역사는 에너지 변천의 역사와 함께 해왔다. 인류의 에너지원은 나무와 석탄과 같은 고상의 연료에서, 석유와 같은 액상의 연료를 거쳐 천연가스와 같은 기상의 연료로 변천되어 왔다. 산업 발전과 더불어 화석연료의 수요가 급증함으로써 인류는 갈수록 심각해지고 있는 지구 환경오염과 화석원료의 고갈이라는 두 가지 큰 문제에 봉착하고 있다. 그 해결 대안으로 새로운 청정에너지원 개발에 대한 관심이 전 세계적으로 높아지고 있는 실정이다. 신재생에너지는 태양열, 태양광, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양에너지(조력)와 같이 자연 상태에서 계속 제공되어 자원의 고갈을 걱정할 필요가 없는 재생 가능한 에너지와 수소에너지 및 연료전지와 같이 신기술에 의하여 청정에너지로 전환할 수 있는 신에너지로 나눌 수 있다[1]. 재생에너지의 가장 큰 문제점은 자원이 지역적으로 시간적으로 불균등하다는 것이다. 이에 반하여 신에너지원인 수소(H₂)는 어디서나 거의 무한정 사용할 수 있는 청정 에너지원으로서 화석연료, 바이오매스 및 물에서 추출하여 이용할 수 있다.

인류 산업발전 역사에서 보면 에너지 변환장치는 이용되는 에너지원에 따라 새로운 시스템이 출현되어 왔다. 석탄을 에너지원으로 하는 시대에는 증기기관이, 석유 에너지원에서는 내연기관이 핵심적인 변환시스템이었다. 수소·연료전지 기술은 수소를 에너지원으로 하는 수소경제(The Hydrogen Economy)[2]를 구현하는 핵심 변환시스템이다[3]. 연료전지는 수소를 전기화학적 반응을 통하여 전기에너지로 직접 변환하는 발전시스템으로 도래하는 수소경제 산업시대에서 새로운 고효율 청정에너지 발전 시스템으로 주목받고 있다. 오늘날의 수소·연료전지기술은 1839년 영국 London W. Grover경[4]에 의해서 처음으로 구현되었지만 여러 가지 기술적 문제로 실제 응용분야에 적용되지 못하다가 1950년대 후반에 미국 우주개발 사업에서 우주선의 새로운 에너지원을 찾는 과정에서 다시 주목받기 시작하였다. 수소·연료전지가 본격적인 실용화 단계에 진입하기 위해서는 고성능화(High Performance), 내구성(Durability), 신뢰성(Reliability) 등의 많은 기술적 문제뿐만 아니라 높은 제조단가를 극복해

야한다. 본고에서는 가장 실용화에 근접하고 있는 고분자연료전지(Polymer Electrolyte Fuel Cell, PEFC)의 핵심 부품·소재 및 그 주변기기(BOP, Balance of Plant)들의 기술개발의 동향과 그 방향에 대하여 고찰해 보고자 한다.

2. 고분자 연료전지(PEFC) 기술의 개요

수소·연료전지는 기존의 발전시스템보다 높은 에너지효율과 환경친화성을 가지고 있어 21세기 유망산업기술로서 성장 잠재력이 주목받고 있다. 이러한 연료전지는 물의 전기분해 반응의 역반응으로 그림 1에서 나타낸 것처럼 외부에서 공급된 수소와 공기 중의 산소를 전기화학적으로 반응시켜 직접 전기 에너지와 열로 변환시키는 발전시스템이다. 그 반응의 생성물로서 물(H₂O)이 생성된다.

연료전지에는 다양한 종류가 있지만 일반적으로 전극반응에 사용되는 전해질의 종류에 따라 아래 표 1과 같이 분류된다. 연료전지의 응용분야로는 크게 발전용, 자동차용, 이동전원용 등 세 개 부문으로 나눌 수 있다. 현재 연구개발이 가장 활발히 진행되고 있는 연료전지는 고체의 전해질 막을 이용하는 DMFC, PEFC 및 SOFC이다. 이 중에서 SOFC는 고체 산화물인 세라믹 전해질을 사용하는 것으로 800 ℃ 이상의 고온에서 작동하고 대규모 발전용에 적합한 연료전지[6-7]로 본고의 범위 밖이기 때문에 생략한다.

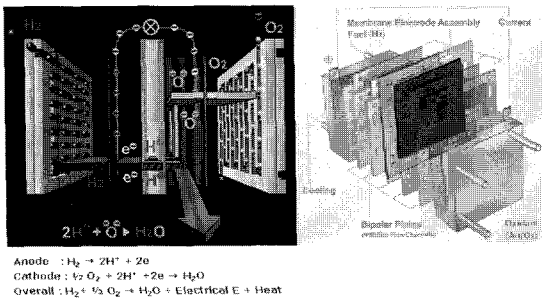


그림 1. 고분자 연료전지의 작동원리 및 그 기본 구조 개략도[5].

PEFC 기술은 전해질로서 고체 고분자막을 사용하는 연료전지로 처음 우주 및 군사용 등의 특수목적으로 개발되었다. 1950년 후반 GE(General Electric)에서 미국 우주선용 전원으로 1 kW급 SPEFC (Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell) 개발(1959-1982)을 시작하여 1965년 제미니 우주선에 실제 탑재되었다. 이후 GE의 PEFC 기술은 1980년대 중반 UTC-Hamilton Standard Division과 Siemens AG에 이전되었으며 독일의 Siemens社에서는 GE의 기술을 사용(1983-1984)하여 잠수함용 AIP 시스템으로 PEFC를 개발하기 시작하였다[8]. 이러한 PEFC 기술이 민간 발전용 및 자동차용 동력시스템으로 큰 관심을 받게 된 것은 유가문제와 환경문제가 이슈화되기 시작한 1990년대 이후부터이다. 현재 PEFC 기술의 상업적인 실용화에 많은 기술적 문제가 있으며 전 세계적으로 이를 극복하기 위한 요소기술개발이 다양한 연구기관의 참여하에 이루어지고 있는 실정이다.

미국에서는 DOE(Department of Energy)가 주관하는 연구개발 프로그램[9]에 다양한 기업들이 참여하고 있고, 캐나다에서는 Ballard Power Systems Inc.가 PEFC 스택 개발을 주도하고 있다. 특히 일본은 경제산업성(METI) 산하 신에너지개발기구(NEDO)의 주도로 1992년부터 PEFC 개발을 시작하였으며 정부와 산학연이 유기적이고 체계적인 기술개발 전략을 가지고 실용화를 준비하고 있는 실정이다[10]. 일본 정부의 New Sunshine Project(1992-2000)에 9개社(Toshiba, Mitsubishi Electric, Sanyo Electric, Asahi Chemical, Asahi Glass, Hitachi, Sumitomo Electric, Aisin Seiki, Imura Material)가 참여하여 PEFC용 각 요소기술을 개발을 담당하였고 1996년에 1 kW Module을 개발하였다. 일본에서 자동차용 PEFC 기술개발은 1990년대 초반에 자동차 회사(Toyota, Honda, Nissan 등) 주도로 시작되어 현재(2006년) 정부나 지자체 등의 제한된 시장에 상업용 연료전지 자동차가 출시되고 있고 있는 실정이다.

국내에서 PEFC 기술개발은 2001년 산업자원부에서 '신재생에너지 기술개발 3대 중점 분야'로 선정함으로써 시작되었고 지속적인 기술개발을 바탕으

표 1. 각종 연료전지와 주요 특징.

연료전지 형식	저온형				고온형	
	알칼리형 (AFC)	직접 메탄올형 (DMFC)	고체 고분자형 (PEFC)	인산형 (PAFC)	용융 탄산염형 (MCFC)	고체 산화물형 (SOFC)
전해질	KOH (6N)	고체고분자막	고체고분자막	인산	탄산염	고체산화물
이온전도체	OH ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺	CO ₃ ²⁻	O ₂
작동온도 (°C)	80	상온~80	상온~100	170~210	600~700	800~1000
발전효율 (HHV) (시스템 규모)		20~30% (~100 W)	~35% (~100 kW)	35~42% (100 W~1 MW)	50~65% (1 MW~100 MW)	50~65% (100 W~100 MW)
폐열형태	온수	온수	온수	온수, 증기	증기	증기
통합효율 (LHV)	60%		70~80%	70~80%	70~80%	70~80%
산화제	Pure O ₂	공기 (O ₂)				
환원제	Pure H ₂	H ₂ (CH ₃ OH)	H ₂	H ₂	H ₂	HC, H ₂
주원 원 연료	수소(H ₂)	메탄올(MeOH)	LNG, LPG, 메탄올, 나프사, 등유, 석탄가스			
원 연료 처리	-	-	개질기	개질기	개질기	개질기
연료 내의 CO 허용농도	NO		< 10 ppm	< 1%	OK	OK
실용화 수준	실용화 단계	실증 시험	실증 시험~ 실용화 개발	실용화 단계	실증플랜트~ 실용화 단계	실증플랜트~ 실용화 단계
가능한 용도	• 해중 탐사용 • 잠수함용 • 우주선용	• 가변 소전원 • 2차전지 대체	• 가정용정치형 • 자동차용	• 업무용정치형	• 업무용정치형 • 발전플랜트	• 업무용정치형 • 발전플랜트
비 고	• 미국 아폴로 우주선 탑재 • 독일 잠수함 (초기)탑재		• 저온 시동 • 고전류밀도 • 잠수함 AIP용 (독일)	• 폐열을 급탕, 난방에 이용	• 폐열을 복합 발전에 이용 • 연료 내부개질가능	• 고전류밀도 • 폐열을 복합 발전에 이용 • 연료의 내부개질 가능
<ul style="list-style-type: none"> • AFC : Alkaline Fuel Cell • DMFC : Direct Methanol Fuel Cell • PEFC : Polymer Electrolyte Fuel Cell (PEMFC) (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) 				<ul style="list-style-type: none"> • PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell • MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell • SOFC : Solid Oxide Fuel Cell 		

로 시제품 제작단계까지 진입하였다. 현재는 수송용과 가정용 연료전지를 중심으로 기술개발과 실증사업(2006년)이 진행되고 있다. 그러나 국내의 연료전지 기술수준, 특히 PEFC 기술은 일부 기술영역에서 선진국 대비 80-90% 이상의 기술수준까지 근접하였지만 핵심 요소기술 및 부품·소재의 국산화 등의 기술적인 내용면에서는 아주 취약한 상태이다.

일본, 미국 등의 선진국에서는 2010년경 PEFC의 보급을 목표로 상품화 연구개발에 주력하고 있으며 핵심 요소기술의 확보 및 차세대 핵심기술 개발이 진행 중이다. 국내에서 PEFC 기술개발에 대한 재정적 지원이나 연구인력 규모에서 선진국 대비 아주 부족한 실정이다. 또한 기술적 측면에서도 일부 기

술영역에서는 선진국에 근접하고 있지만 실질적으로 PEFC에 이용되는 핵심 부품이나 원천소재는 대부분 국외에 의존하고 있는 상황이므로 도래할 수소경제 산업사회에서 기술 및 시장경쟁력을 확보하기 위해서 실용화 가능성이 높은 PEFC의 핵심 부품소재 기술 개발이 아주 절실히 필요한 시점이다.

3. 수소경제사회와 연료전지산업

3.1 수소경제시대의 새로운 핵심 산업

에너지관점에서 산업경제의 패러다임이 기존의 화석연료에서 청정의 수소가스를 주요 연료로 하는

새로운 방향으로 전환되고 있다. 기존 화석 연료의 사용으로 인해 야기되는 지구환경 문제와 에너지 자원의 고갈 문제를 해결하기 위한 한 방안으로 그림 2와 같은 수소의 이용 체계가 제시되었다. 기존의 화석연료 또는 물에서 친환경적 청정에너지원인 수소를 제조하고 그 수소를 활용하여 인간의 경제생활에 유용한 전기에너지로 변환하여 사용하는 것이 수소경제의 큰 골격이다. 수소를 이용하여 전기에너지를 만들어내는 핵심 발전시스템인 연료전지는 수소에너지를 기반으로 하는 수소경제사회(Hydrogen Economy Society)의 핵심으로 그 관련 기술은 수소경제시대에서 새로운 유망한 신산업분야이다.

연료전지는 에너지, 전자, 자동차 등 기존의 다양한 산업분야에 혁신적 변화를 가져올 것으로 기대되고 있다. 에너지 분야에서는 석유중심의 에너지 체계가 수소중심으로 전환될 것이고, 자동차 분야에서는 화석연료를 사용하는 내연기관에서 연료전지 발전시스템으로 전환될 것이다. 현재 사용하고 있는 휴대용 기기에 연료전지를 탑재할 경우에 전원용량의 한계를 극복할 수 있어 IT 산업 발전과 더불어 광범위한 새로운 휴대기기의 출현이 기대된다. 또한 우리가 이용하는 전력을 공급하는 인프라 체계도 중앙 집중적 전력생산방식에서 누구나 전력을 생산,

판매, 소비하는 분산형 구조로 전환될 것으로 예상된다[11].

3.2 수소에너지 이용체계 관련기술

수소경제시대의 주 에너지원인 수소는 그림 3에 나타낸 것처럼 열화학반응, 전기화학반응, 광화학반응으로 기존의 화석연료, 바이오매스와 물에서 제조되고, 고압탱크, 수소저장재료, 수소스테이션, 파이프라인 등으로 운송, 저장된 후 연료전지나 수소엔진, 터빈 및 기타 산업에 이용된다. 본격적인 수소경제 산업시대 진입하기 위해서는 연료전지뿐만 아니라 수소제조, 운송 및 저장분야에서도 다양한 혁신적인 소재, 부품, 장치 및 인프라 구축 산업에 관련된 요소기술 개발이 요구되고 있다. 수소에너지 이용체계에서 보면 연료전지기술 이외에도 화석연료에서 수소 생산하는 개질 장치나 물을 전기분해하여 수소를 제조하는 장치 및 그 구성 부품·소재도 중요한 기술 분야 중 하나이다. 또한 수소 운송, 저장분야에서는 350-700기압 정도의 고압탱크, 수소저장재료 및 수소스테이션에 관련된 부품·소재 기술도 중요한 산업기술 분야이다.

3.3 21세기 유망산업

21세기 핵심 유망산업으로 부상하고 있는 연료전지는 미국, 일본, 유럽, 중국 등 주요 선진국 및 우리나라에서도 범정부차원에서 첨단 핵심기술 선점 및 에너지 안보측면에서 경쟁적으로 집중육성하고 있는 신산업분야이다.

- 한림공학원: 10대 미래 산업으로 '연료전지' 선정 (2005.10.27)
- 한림공학원: 한국을 먹여 살릴 25가지 기술에 '연료전지' 선정 (2006.12.18)
- 2020 한국 유망산업으로 41 유망품목 선정 (2005.12)
: 차세대에너지 분야 - '수소에너지', 차세대 자동차 분야 - '연료전지 자동차' 선정
- 한중일의 미래 성장동력산업에 수소·연료전지 분야 공동으로 포함.

우리 정부는 수소·연료전지 기술개발과 산업육성을 위하여 수소에너지 산업 육성 프로그램과 로드맵을 만들어 집중 지원하고 있다.

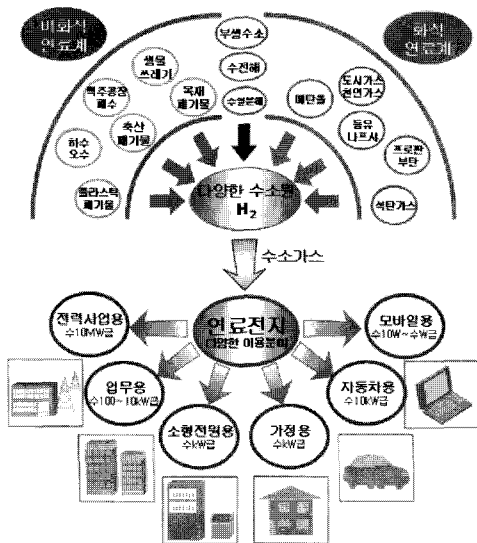


그림 2. 수소경제 산업사회에서 수소·연료전지 이용체계 [12].

수소에너지 이용 체계

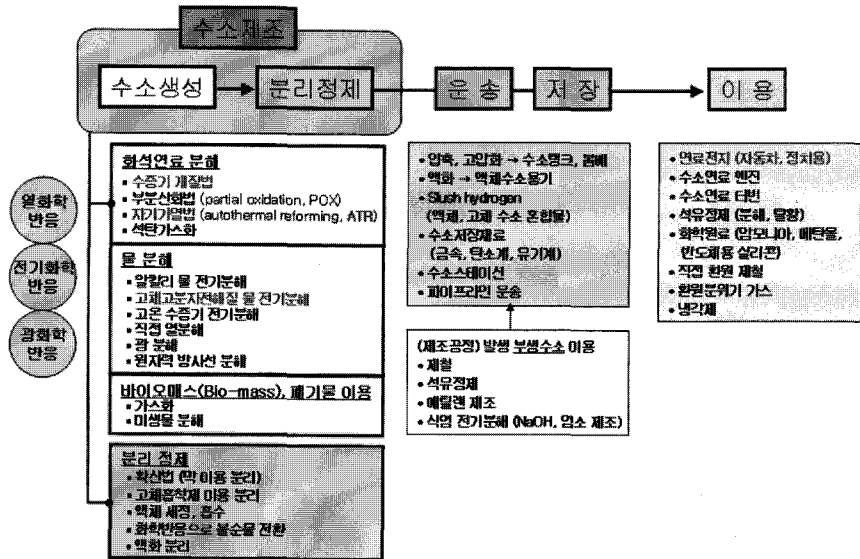


그림 3. 수소에너지 이용체계와 관련 요소기술.

- 수소에너지 사업단 (www.h2.re.kr)
: 2003년 10월 출범
- 수소연료전지 사업단 (www.h2fc.or.kr)
: 2003년 12월 출범
- 원자력 수소 사업단 (www.hydrogen.re.kr)
: 2004년 3월 시작
- 2040 수소경제 로드맵 (정부안) 발표
: 2005년 9월

3.4 다양한 산업이 융합된 복합 인프라산업

수소·연료전지는 연구 및 기술 개발 측면에서 재료, 화학, 전기, 기계, 제어 등의 다양한 산업기술이 융합된 복합 산업이고 에너지의 이용 면에서는 전력, 발전, 가스, 가전/정보통신, 자동차, 기타 수송 분야 등의 다양한 산업 군들이 관련된 인프라 산업이다.

3.5 고도의 기술이 요구되는 기술집약적인 산업

수소·연료전지 기술 분야는 강한 기술적 폐쇄성과 비밀주의 때문에 관심 있는 신규 중소기업체들에게 기술 진입 장벽이 높고 대기업도 단기간의 대규모 투자로 양산화가 어렵고 기술력이 앞선 기업으로부터 기술도입도 힘든 분야이다. 이러한 여건에서는

관련분야의 기술경쟁력을 갖춘 전문적인 기업에서 연구개발 사업을 수행하는 것이 유리하며 본격적인 시장이 형성되기까지 충분한 시간과 지속적인 연구 개발비의 투자가 필요한 분야이다. 따라서 본격적으로 연료전지가 성장기에 접어들어 이익을 창출하게 되는 시점까지 기업을 유지할 수 있도록 다른 제품을 통한 수익창출 능력을 보유하는 것도 중요하다 [13].

4. 고분자 연료전지의 구성과 핵심 부품소재

4.1 수소·연료전지의 기술영역

수소·연료전지는 그림 4에 나타낸 것처럼 연료 공급방식에 따라 수소를 스택에 공급하여 전기를 생산하는 순수 수소 연료전지 시스템과 개질기에서 화학 연료를 개질 후 스택에 공급하여 발전하는 개질형 연료전지 시스템으로 크게 나눌 수 있다. 수소·연료전지에서 핵심 부품·소재기술 개발 방향은 고성능, 내구성, 신뢰성 및 가격저하에 관련된 요소기술이다. 수소·연료전지 기술이 상업적으로 실용화되

기 위해서는 나노기술을 이용한 나노 촉매 및 소재, 나노 구조제어 및 다공성 구조제어 기술개발을 기반으로 하여 관련 부품·소재의 성능향상을 꾀하고 또한 고성능, 고내구성 및 신뢰성을 담보할 수 있는 값싼 신소재, 신 공정 개발 및 부품설계 통합기술이 요구된다.

4.2 기능별 모듈화 된 부품·소재 개발

PEFC 발전시스템은 크게 (1)연료전지본체 (스택), (2)주변장치 (BOP), (3)시스템 제어장치의 3가지 하부시스템으로 구성되어 있다. BOP는 다시 연료공급 관련 장치, 물 및 열관리 시스템과 같은 기계적인 M-BOP와 전력변환 시스템과 같은 전기제어장치인 E-BOP로 나눌 수 있다.

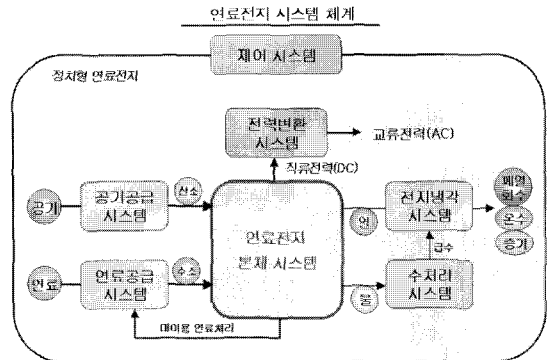
연료전지 시스템은 다양한 부품·소재로 구성되어 있다. 연료전지 관련 부품·소재 기술의 가장 큰 특징은 시스템 의존성이 강하다는 것이다. 이들 부품에 요구되는 특성은 시스템의 응용분야나 부품을 사용하는 메이커의 시스템 사양에 따라 다르기 때문에 부품개발 주체들이 독자 개발한 부품의 특성은 시장에서 요구되는 다양한 특성과 신뢰성을 충족시키기 어렵다. 따라서 중소기업이나 벤처기업들은 상업화가 가능한 부품·소재를 단독으로 개발하기 보다는 시스템 메이커와 연계하여 개발하거나 몇몇 기업들이 공동으로 부가가치가 높은 기능별 모듈화부품을 개발하는 것이 중요하다. 모듈화된 부품은 개

별 부품을 블록단위로 개발함으로써 시스템에 대한 의존성을 낮출 수 있을 뿐만 아니라 고부가가치를 창출할 수 있어 유리하다. 정치형 PEFC 연료전지 발전시스템은 그림 5와 같이 기능별로 7~8개의 모듈화가 가능한 기술영역으로 나눌 수 있다. 표 2는 각 핵심부품을 기능별 기술로 분류한 것이다.

- 연료전지 본체 시스템 (스택)
: 촉매, GDL, 전극, MEA, 분리판 등
- 연료공급 시스템: 개질기 등
- 공기공급 시스템: 블로어, 밸브, 압력계 등
- 수처리 시스템: 폐열회수 등
- 전지냉각 시스템: 스택 열관리
- 전력변환 시스템: 인버터 등
- 제어 시스템

4.3 PEFC 주요 부품·소재의 공급현황

PEFC 발전시스템은 가장 상업화에 근접한 연료



연구 핵심기술

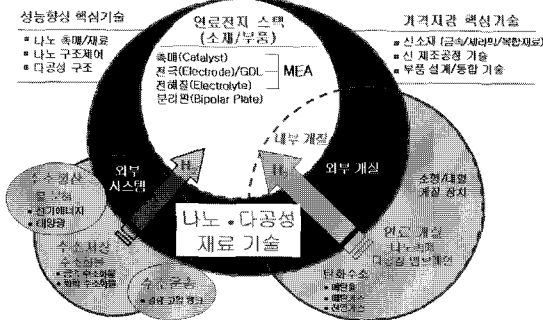


그림 4. 수소·연료전지 발전시스템을 구성하는 핵심부품·소재의 기술영역[14].

PEFC System

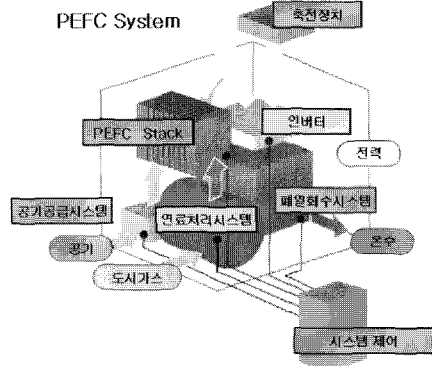


그림 5. 수소·연료전지 발전시스템 구성 체계.

전지기술 분야로서 국외에서는 요소 부품·소재에 대한 기술개발이 어느 정도 이루어져 다양한 형태의 상품화된 시제품이 나오고 있다. 다양한 분야에 연료전지 전원을 탑재한 응용연구가 진행되고 있고, 요소기술이 안정화 단계에 진입할 것으로 기대되고 있어 각 응용분야의 운전조건에 적합한 촉매, 전해질, GDL, MEA 및 분리판의 수요는 증대될 것으로

예상된다. 따라서 국내에서도 이에 대한 요소기술 확보가 시급한 실정이다. 현재 PEFC를 구성하는 원천소재 및 핵심 부품소재는 그림 6에서 알 수 있는 것처럼 거의 대부분 국외에 의존하는 실정이고 일부 부품·소재의 경우 국내에서 기술개발이 진행되고 있다.

표 2. PEFC 발전시스템의 주요 부품과 기술요소 분류.

주요부품 및 기술	주요 기능
스택(stack)	연료전지 본체
MEA	전극과 전해질 막의 일체화
전극	촉매층과 GDL을 일체화
촉매	전극반응이 일어나는 장소
GDL	가스(수소, 공기) 투과와 물의 원활한 배출을 가능, 촉매의 접촉
전해질 막	수소이온의 선택적 투과 (Anode에서Cathode로)
분리판	반응가스의 혼합방지, 가스공급/물 배출 유로, 집전된 전기의 경로
BOP	개질기 및 스택과 조립되어 연료전지 운전시 보조 역할을 수행하는 장치들
조립/접합체	가스의 집합/분배하는 출입구, 냉각수 패턴, 셀 조립 구조 등 관련 기술
개질기	탄화수소(연료)이용 수소 제조
운전조건/방법	개질기 및 스택의 운전기술
연료전지 시스템	개질기, 스택, 제어기기 등을 통합하는 기술

4.4 핵심 부품·소재의 기술

4.4.1 촉매 (Catalyst)

수소/공기 발전시스템에서는 MEA용 전극 촉매로 Pt/C 촉매가 주로 이용하지만 개질용 가스를 이용하는 시스템에서는 개질 가스내 잔존하는 CO에 의한 Pt 피독을 억제하기 위하여 주로 PtRu/C 합금 촉매가 사용되고 있다. Pt 촉매는 주로 미국의

표 3. 미국 DOE의 연료전지 자동차용 Pt 촉매의 기술 목표 (2006년 판).

주요 요구 특성	2005 상황	2010	2015
• Pt Specific Stack-power Density (g/kW rated)	0.6 (cell) 1.1 (stack)	0.3	0.2
• Pt Total Loading (mg Pt/cm ² Electrode Area)	0.45 (cell) 0.8 (stack)	0.3	0.2
• Cost (\$/kW)	9 (cell) 55 (stack)	5	3

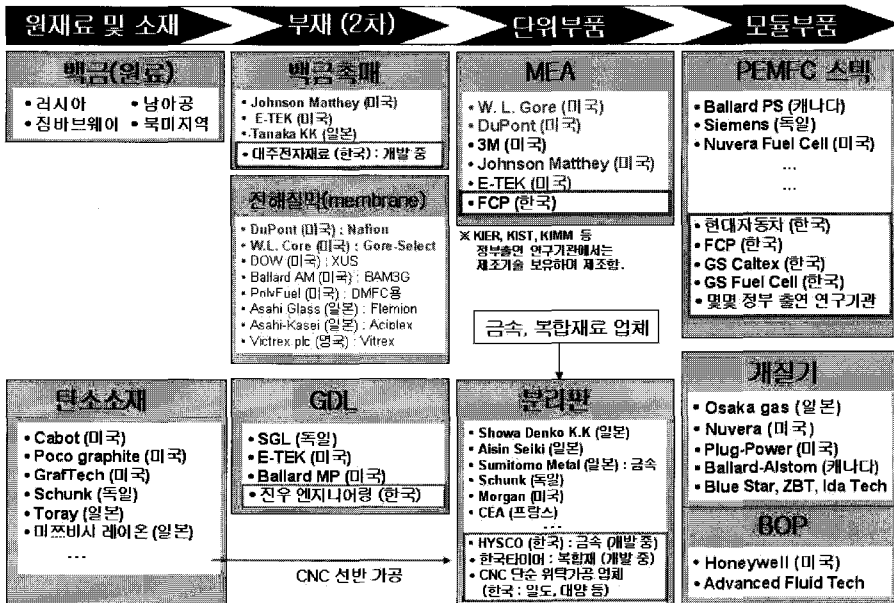


그림 6. PEFC 발전시스템의 핵심 부품소재의 수급 및 개발현황.

Johnson Matthey, E-TEK, 일본의 Tanaka KK 등에서 전 세계에 공급되고 있다. 현재 국내에서는 대주전 자재료(주)에서 연료전지용 Pt 촉매 개발에 관심을 보이고 있는 것으로 알려지고 있지만 실제 거의 대부분 국외 메이커에서 공급하고 있다.

Pt 촉매는 PEFC 같은 저온형 연료전지의 전극반응에 직접 참여하는 핵심 소재로서 연료전지 전문가 및 비전문가 사이에서 PEFC 상업화 전망에 있어 가장 큰 논란은 연료전지에 요구되는 대량의 Pt 촉매를 어떻게 공급할 수 있겠는가 하는 것이다. 특히 연료전지 자동차의 경우 실용화를 위해서는 현재 기술 수준에서 사용되는 촉매 사용량을 급격히 줄이는 것이 큰 이슈이다.

미국 GM(General Motors)의 분석[15]에 따르면 DOE(2005년)의 촉매 성능의 기술목표인 0.2 g/kW를 달성한다는 가정 하에 계산해보면 75 kW급 연료전지 자동차 한 대에 사용되는 Pt량은 15 g/vehicle이 소요되고 연간 1000만대를 생산할 경우 총 150톤의 백금이 요구된다. (현재 일반 자동차 연소기의 Pt 촉매 사용량은 3-5 g/vehicle 수준 임.) 전 세계 백금 광산에서 생산량이 170톤 정도이고 또한 현재의 생산규모를 어느 정도 확대할 수 있으므로 연료전지 자동차에서 백금 소요량을 충족할 수 있을 것으로 보고하고 있다. 이러한 계산이 가능하기 위해서는 Pt 촉매 이용률, 전극구조 개선 및 MEA/스택 성능의 향상으로 통하여 표 3에 제시된 DOE 기술목표 0.2 g/kW를 만족해야한다. 따라서 적은 Pt 촉매 사용량 조건에서 촉매/전극/MEA의 성능향상 기술개발이 매우 중요하다.

대량으로 요구되는 Pt 촉매의 공급문제에 대해 제안된 다른 해결책으로는 Pt에 전이계열 금속 등을 합금화 하여 순수 Pt의 이용량을 낮추는 방안과 전혀 Pt를 사용하지 않는 Pt-free 대체 촉매를 개발하는 것이다. 현재까지 기술개발이 진행되고 있지만 아직까지는 Pt 대체 촉매의 성능이 Pt의 성능을 크게 미치지 못하는 실정이다.

일본의 촉매 제조업체인 Tanaka KK에서는 Pt 리사이클 공정을 이용하면 사용된 폐 MEA에서 96~98%까지 Pt를 회수 할 수 있으므로 2~3% 정도의 손실분만 추가로 공급하면 Pt 문제는 해결할 수 있는 것

으로 보고 있다. 또한 Pt 촉매 가격에 대한 소비자 부담은 연료전지 자동차에 사용되는 Pt를 리스형태로 소비자에게 공급하고 사용 후 Pt 촉매의 리스 금리, 재가공비, 회수공정에서 손실분만 부담하도록 하면 소비자가 Pt 귀금속의 시장 가격변동에 민감하게 반응하지 않고 사용할 수 있을 것이라는 분석을 하고 있다.

※연료전지 자동차의 백금 촉매 해결 시나리오

- Pt Specific Stack Power Density
: < 0.2 g Pt/kW(@E_{cell}>0.6 V) (성능 향상으로 통하여)
- 합금촉매 및 Pt 대체 촉매 개발 (Pt 촉매 성능과 동등한 성능 요구)
- Pt 회수공정 이용 및 Pt 리스 형태 이용으로 소비자 부담 감소

4.4.2 고분자 전해질 막 (Membrane)

고분자 전해질 막은 불소계의 플루오르술폰산(Perfluorosulfonic Acid)계 이온교환막 (이온전도율: 0.1~0.2 S/cm) 폴리머로 Nafion (DuPont)이 주로 이용되고 있다. 이외에도 국외 화학계열 회사를 중심으로 XUS (Dow), Flemion (Asahi Glass), Aciplex (Asahi-Kasei), Gore-Select (W. L. Gore) 등의 다양한 전해질 막이 개발되었다. 최근에는 비불소계 전해질 막으로 탄화수소(Hydrocarbon Base Membrane)계 전해질 막 등이 개발되고 있다. 일본의 Honda 자동차는 JSR[16]과 공동으로 탄화수소계 분리막을 개발하여 연료전지 자동차인 Honda FC Stack에 적용함으로써 기존 스택에 비하여 4배 이상의 발전성능을 달성하고 고온 운전(95 °C)과 저온 시동성(-20 °C)을 실현하였다. 현재 고분자 전해질 막의 기술적 요구는 저가습 조건에서 양호한 이온 전도성을 갖는 저가습막, 기계적 강도를 지닌 강화막, 고온 운전조건에서 사용할 수 있는 고온막의 개발이다.

4.4.3 가스확산층 (GDL, Gas Diffusion Layer)

일반적으로 고분자 연료전지(DMFC, PEFC)의 전극용 가스확산층(GDL)은 전극의 기계적 강도와 전기 전도성을 유지하기 위하여 표면 처리된 Carbon Paper나 Cloth가 이용된다. 실제 사용되는 GDL에는 연료/산화 가스의 공급과 전극 반응으로 생성된 물

의 배출이 원활할 수 있게 하기 위하여 미세기공층(MPL, Micro-porous Layer)을 구비하고 있다. GDL 주요 기능은 생성된 전기 전도 및 원활한 가스의 공급과 생성된 물의 배출 기능 등이다.

GDL용 소재를 생산판매하고 있는 대표적인 회사로는 일본의 Toray Carbon, 독일의 SGL 정도이고 미국의 Ballard, E-TEK의 경우 카본회사에서 생산된 Carbon Paper를 발수처리 및 Micro-porous Layer를 코팅 처리하여 판매하는 정도이다. 국내의 모든 고분자 연료전지 연구개발에서 이용되는 전극용 가스 확산층(GDL) 및 Pt/C 촉매는 대부분 국외에서 수입되고 있는 실정이며 단지 국내에서는 Pt/C 잉크 조성을 제어하여 국외 GDL에 코팅하여 전극을 제작하고 있는 실정이다. 최근에는 국내의 진우엔지니어링(주)에서 상업용 GDL의 기술개발을 시작하고 있어 국내 GDL 기술의 향상이 기대된다.

4.4.4 막전극접합체(Membrane Electrode Assembly, MEA)

MEA는 고분자 전해질 막 양면에 촉매층이 코팅된 전극이 부착된 다층 형태로 스택을 구성하는 부품 중에서도 전극반응에 직접 참여하여 발전이 이루어지는 핵심 부품으로 고성능의 장수명이 요구된다. MEA는 Pt 촉매를 Membrane이나 GDL중 어디에 코팅하는가에 따라 두 가지 방식으로 나눈다. GDL 표면에 촉매잉크(Pt/C 와 Nafion 용액의 혼합액)를 다양한 방법으로 코팅하여 전극을 제조한 후 Hot Press Lamination 공정으로 MEA를 제조하는 방법과 전해질 막에 직접 코팅하거나 간접적으로 PTFE

표 4. 미국 DOE의 연료전지 자동차용 MEA 기술목표 (2006년 판).

주요 요구특성		2005년 상황	2010년	2015년	
Operating Temp. (°C)		≤ 80	≤ 120	≤ 120	
Cost (\$/kW)		60	10	5	
Durability (h)	@ < 80 °C	~2000	5000	5000	
	@ > 80 °C	na	2000	5000	
Unassisted Start From (Start Temp.) °C		-20	-40	-40	
Performance	@ 1/4 rated power (0.8V)	(mA/cm²)	200	300	300
		(mW/cm²)	160	250	250
	@ rated power	(mW/cm²)	600	1000	1000

와 같은 Blank Sheet에 촉매잉크를 코팅한 후 전해질 막에 부착하는 전사공정(Decal Process)을 사용하여 제조하는 CCM(Catalyst Coated Membrane) 형태 MEA가 있다. MEA 성능은 촉매잉크의 조성, 코팅 방법 및 MEA 제조공정 등 다양한 변수에 따라 성능이 좌우 된다. 따라서 단위면적당 출력성능 및 내구성 향상을 위해 MEA를 제조하는 공정의 최적화 기술 및 MEA를 구성하는 전해질 막과 전극간의 접착 기술을 향상시키려는 연구가 필요하다. 현재 PEFC용 MEA 제조공정에 사용되는 Nafion Membrane의 두께는 약 25~50 μm 내외이다. DMFC의 경우 메탄올의 전해질 막 Crossover 현상을 억제하기 위하여 100 μm이상의 Nafion Membrane이 사용되고 있다.

4.4.5 분리판 (Bipolar plate 또는 Separate)

분리판은 스택 내부에 가스 및 냉각수의 유로를 제공함과 동시에 두 반응가스의 혼합을 방지하고 전극반응으로 생산된 전기가 흐르는 통로 역할을 수행한다. 분리판은 소재 및 제조단가가 저렴하고, 고내식성 및 우수한 전기 전도성이 요구된다. PEFC용 분리판은 크게 기계가공의 의한 탄소(Graphite) 소재 분리판, 탄소분말과 폴리머 수지 이용한 복합소재 몰드형 분리판과 금속 분리판으로 크게 나눌 수 있다. 초기에는 Graphite 기판을 이용하여 CNC 기계가공으로 가스유로를 형성한 분리판이 주류를 이루었지만 기계적 충격 강도에 약하고 고가의 가공비로 인해 실용화의 장애가 되었다.

표 5. 미국 DOE의 연료전지 자동차용 금속 분리판 기술목표 (2006년 판).

주요 요구 특성	2005 상황	2010년	2015년	비고
• Bulk Conductivity (S/cm)	> 600 (Carbon Plate)	> 100	> 100	ASTM C-661
• Contact Resistivity (mΩ • cm)	< 20	< 10	< 10	
• H ₂ Permeability (cm ³ /cm ² • sec)	< 2x10 ⁻⁶	< 2x10 ⁻⁶	< 2x10 ⁻⁶	@ 80 °C, 3 atm
• Corrosion Rate (μA/cm ²)	< 1	< 1	< 1	ASTM G5
• Cost (\$/kW)	10	5	3	< 1 kg/kW

이러한 가격 문제점을 해결하기 위하여 몰드성형 탄소-수지 복합재 분리판이나 금속재 분리판 개발이 진행되고 있다. 특히 연료전지 자동차용 분리판에는 기계적 강도 확보, 경량화와 박형화가 가능한 스테인리스강 등의 금속재 분리판의 개발이 대세를 이루고 있다. 그러나 스테인리스강 (316L, 310S, 904L 등) 금속 분리판은 내식성과 표면 산화물에 의한 계면 전기저항의 증가가 큰 문제가 되고 있다. 일본 혼다 (Honda) 자동차는 스미토모 금속(Sumitomo Metals)과 공동으로 새로운 스테인리스 금속재 분리판 개발하였다. 이 금속 분리판은 기존의 스테인리스강 표면의 산화 피막으로 인해 계면저항이 증가하는 단점을 보완하기 위하여 미세한 전도성의 석출물을 스테인리스강 기지 내에 석출시켜 표면에 노출된 석출물이 전기적인 통로역할을 하고 스테인리스강 표면에 형성된 산화층으로 내식성이 확보되도록 설계되었다[17]. 일반적으로 금속 분리판 기술개발에서 내식성과 전도성 향상을 동시에 확보하기 위하여 스테인리스강 표면에 질화처리(Nitride)와 같은 표면개질을 실시하고 있다. 연료전지의 가격 저하를 위해서는 금속 분리판의 부품·소재 개발에 있어서 고려대상의 소재가격은 대략 316 스테인리스강보다

낮은 가격대를 유지해야한다. 따라서 고가의 표면개질공정이나 금속 합금소재는 금속 분리판 소재 연구 개발에 이용할 수 없다.

4.4.6 스택 (Stack)

연료전지 스택은 상기에서 기술한 각 부품들의 다양한 기능이 실제 구현되는 단계로 여러 개의 단위전지가 다층으로 적층되어 하나의 큰 발전 모듈을 이루고 있는 부품이다. 스택 자체의 주요 구성품은 그림 1에서 나타낸 것처럼 크게 MEA, 분리판 (Bipolar Plate), 집전체(Current Collector) 및 엔드플레이트(End Plate)이다. 연료전지 스택기술에는 다양한 고도의 엔지니어링 기술이 집약되어 있다. 따라서 실질적인 스택개발을 위해서는 다양한 기술 분야의 지식과 경험을 가진 인력들을 필요로 한다. 스택 핵심기술로는 균일한 막전극접합체(MEA)의 제조 기술뿐만 아니라 다층의 단위 셀 내에서 전극반응이 균일하게 일어날 수 있도록 반응가스를 공급하는 스택 설계기술 및 분리판의 가공기술, 공급된 가스나 냉각수가 외부로 누설되지 않도록 하는 실링일체화기술과 체결기술, 스택 내에서 발생된 열을 관리하는 열관리 기술 등 고도의 다양한 엔지니어링

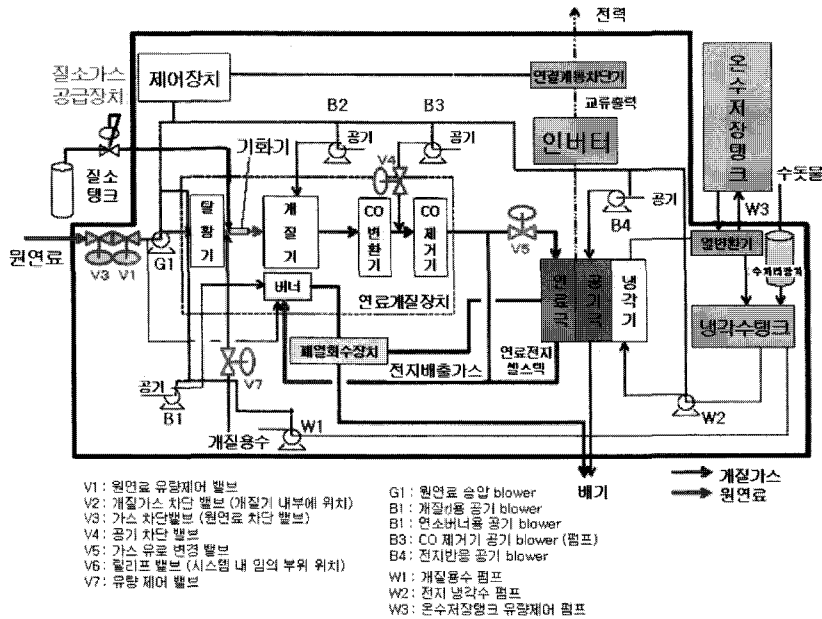


그림 7. 정지형 연료전지 Co-generation 장치 개요 및 각종 주변장치 (BOP).

기술 등이 있다. 또한 성공적인 스택개발을 위해서는 각 부품·소재의 고성능화 및 최적화 기술, 전체 시스템 설계 및 통합기술과 평가기술도 함께 요구된다.

4.4.7 주변장치 (BOP)

BOP는 연료전지 발전시스템을 운전하기 위해서 필요한 부품으로 펌프, 블로어, 밸브, 각종 센서류와 같이 기계적인 부품인 M-BOP와 인버터, 컨버터 등 전력변환과 시스템 제어 등 전기적인 부품의 E-BOP로 나누어진다. 그림 7은 정치형 PEFC 발전시스템의 개요 및 필요한 주변장치를 표시한 것으로 다양한 주변장치들이 전체 시스템 구성에 요구된다. BOP는 스택의 실질적인 운전에 필요한 부품으로 성능에 영향을 미치기 때문에 연료전지의 응용 분야 및 발전규모에 맞는 부품개발이 필요하다. 일본에서는 연료전지의 실용화를 위한 가격저하 방안으로 연료전지 시스템에서 요구하는 BOP의 성능과 사양 및 가격을 공표하여 혁신적인 아이디어와 기술력을 가진 중소기업 및 벤처기업들이 기술 개발에 적극 참

표 6. PEFC의 실용화 연구에서 고려할 기술 사항.

분야	세부 고려 기술 사항
연료전지 스택	<ul style="list-style-type: none"> 출력밀도의 향상, 내구성의 향상 (1) 자동차용 > 5,000 h, SS cycles 3-6만회/10년 (2) 가정용 > 40,000 h 전해질 막: 고온화, 저가습 및 무가습화, 내구성 향상 백금촉매: 담지량 저감 및 대체촉매 개발 분리판: 경량화, 박형화, 고내식성, 저가격화
연료전지 시스템	<ul style="list-style-type: none"> 시스템 구성의 최적화 내구성 및 신뢰성 향상 저온대책 기동성 운전부하추종성 폐열회수효율 향상 BOP 효율 향상 등
개질기	<ul style="list-style-type: none"> 내구성 향상 사이클 수명 향상 기동성 및 부하추종성 향상 소형화 및 경량화 자동차용 가솔린 개질기 개발 정치용의 경우 열효율 향상
수소저장장치 (자동차용)	<ul style="list-style-type: none"> 승용차: 1회 충전 주행거리 500 km 이상 (수소 5 kg 저장기술 필요) 압축수소탱크: 고압화 (700 bar) 액체수소탱크: Boil-off 가스 대책 수소저장합금: 수소저장합금 (Metal Hydride), 수소저장화합물 (Chemical Hydride), CNT 등
수소안전, 수소 연료공급 인프라 등 주변기술	<ul style="list-style-type: none"> 수소 인프라의 원활한 구축과 정비를 위하여 현재 사용되는 수소압축기, 전자밸브, 고압탱크 등 관련 기술의 국산화가 필요함. 수소 안전성을 확보하기 위한 기술 개발도 중요함.

여할 수 있도록 유도하고 있다. BOP에 관련하여 요구되는 상세한 사양은 참고문헌[18]을 참고하기 바란다.

5. 결론

현재 PEFC는 매우 우수한 특성과 장점을 가지고 있지만 실용화 및 보급화에 있어서는 여전히 해결해야 할 과제가 많이 있다. 수소·연료전지 기술이 비즈니스가 가능한 산업규모로 발전하기 위해서는 새로운 혁신적인 아이디어를 가진 신규 연구자, 중소기업, 벤처기업 및 대기업들의 참여가 필요하다. PEFC 기술에 관련한 시스템 및 부품·소재 개발에 새롭게 관심을 가지고 있는 신규 연구자, 기업체는 연구개발 목표를 설정할 때 표 6에 나타난 PEFC 실용화의 기술과제에 대한 여러 사항 등을 충분히 고려하여 계획을 수립하는 것이 바람직하다.

수소·연료전지는 앞에서 언급한 것처럼 다양한 산업의 관련기술이 융합된 복합산업의 특성을 가지고 있어 연료전지 스택 시스템과 같은 기술개발에 직접 참여하지 못하는 중소기업체 등의 기업군들도 아래 리스트에 있는 수소·연료전지기술과 관련된 다양한 부품·소재 및 장치분야에서 새로운 비즈니스 영역을 찾을 수 있을 것이다. 수소·연료전지 실용화는 몇몇 연구기관이나 기업에 의하여 이루어질 수 없을 뿐만 아니라 수소·연료전지에서 부품·소재는 연료전지 시스템 및 부품 상호간에 의존성이 강하기 때문에 다양한 개발 주체들의 적극적인 참여와 활발한 정보교류가 이루어질 필요가 있다. 또한 중소기업 단독으로 기술개발에는 한계가 있고 부가가치가 낮은 단품의 부품·소재 개발보다는 각 개발 주체들의 고유한 독자적인 기술을 바탕으로 여러 주체들이 컨소시엄을 이루어 고부가가치를 창출할 수 있는 모듈단위 부품 및 시스템 개발을 추진하는 것이 더 바람직할 것이다.

- 수소제조
 - 1) 개질장치 및 기술
 - 2) 수소제조장치 기술

- 3) 순수소 (Pure H₂)
- 4) 매탄 (천연가스)/ 프로판/ 부탄/ 메탄올
- 5) 가솔린/ 등유(Kerosenes)/ 나프타(Naphthas)
- 6) 바이오매스 시스템
- 7) 기타 수소제조장치 및 기술

● 연료 저장 및 공급

- 1) 수소저장탱크/용기
- 2) 수소저장합금
- 3) 화학 수화물 (Chemical Hydride)
- 4) 카본 나노튜브 (CNT)
- 5) 콤프레샤
- 6) 디펜서
- 7) 밸브/배관
- 8) 펌프
- 9) 수소스테이션
- 10) 기타 저장, 공급 연관 제품 및 기술

● 연료전지 스택관련분야

- 1) 전해질/이온교환막
- 2) 전극/촉매
- 3) 가스화산층 (GDL)
- 4) MEA (막/전극접합체)
- 5) 분리판/유로설계
- 6) 기타 스택관련 부품소재

● 연료전지 시스템 제품

- 1) 고분자형 연료전지 (PEFC)
- 2) 직접 메탄올형 연료전지 (DMFC)
- 3) 고체산화물연료전지 (SOFC)
- 4) 인산형 연료전지 (PAFC)
- 5) 용융탄산염 연료전지 (MCFC)
- 6) 연료전지 자동차/버스/모토 바이클
- 7) 연료전지 모바일 기기
- 8) 연료전지 플랜트/주력
- 9) 기타 연료전지 시스템 제품

● 제조/가공기술

- 1) 프레스 가공기 및 기술
- 2) 롤 가공기 및 기술
- 3) 코팅 가공기 및 기술
- 4) 정밀 미세가공기술 (MEMS)
- 5) 가열로 / 소성로 / 진조로
- 6) 분쇄기
- 7) 기타 제조장치 및 부품
- 8) 기타 가공기술

● 관련기기

- 1) Co-generation 시스템
- 2) 열교환기
- 3) 공기공급장치/Blower
- 4) 순수제조장치
- 5) 흡수식냉동기 (냉온기)

- 6) 배출 (H₂O, CO₂)증기/온수 보일러
- 7) 가스터빈/증기터빈
- 8) 인버터/컨버터
- 9) 커패시터 (전기이중층 콘덴서 등)
- 10) 이차전지 (니켈수소, 리튬전지 등)
- 11) 나노기술
- 12) 기타 연료전지 연관 제품 및 기술

● 평가/측정/해석 장치

- 1) 전기특성 평가 장치
- 2) 단전지 시험장치
- 3) 전기화학(임피던스) 측정 장치
- 4) 전압부하장치
- 5) 가스분석장치
- 6) 수소센스
- 7) 유량계
- 8) 노점, 습도, 온도, 압력계
- 9) 해석(구조, 전열, 자장, 유체, 음향) 프로그램
- 10) 각종 교정기기/검지기
- 11) 기타 평가, 측정, 분석 장치

참고 문헌

- [1] 장이화, "대체 에너지 산업 활성화 시급하다", LG 주간경제, 872호 (2006).
- [2] Jeremy Rifkin, "The Hydrogen Economy", Tarcher (2002).
- [3] 김재운, "수소 에너지 혁명을 주도하는 연료전지", 삼성경제연구소, 제432호 (2003).
- [4] L.J.M.J. Blomen, M.N. Mugerwa, "Fuel Cell System", p. 19, Plenum Press, N.Y. (1993).
- [5] SGL Carbon Group : web site fuel cell animation 자료 (http://www.sglcarbon.com/sgl_t/fuelcell/index.html).
- [6] S. C. Singhal, K. Kendal, "High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications", ELSEVIER, N.Y. (2003).
- [7] 田川博章, "固体酸化物燃料電池と地球環境", アグネ承風社 (1998).
- [8] G. Sandstede, E.J. Cairns, V.S. Bagotsky and K. Wiesener, "Handbook of Fuel Cells", W. Vielstich, A. Lamm, H. A. Gasteiger (eds.) Vol.1, Ch.12, p.146-218 (2003).
- [9] 현재 미국 수소연료전지 관련 프로그램
 - DOE Hydrogen Program(<http://www.hydrogen.energy.gov/offices.html>).
 - Hydrogen, Fuel Cell Infrastructure Technologies

Program(<http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/fuelcells/>).

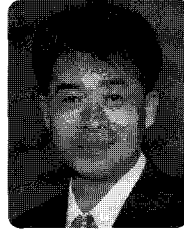
- [10] 일본의 기술개발 프로그램
 - New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO)(<http://www.nedo.go.jp/>).
- [11] 김재운, "에너지혁명: 연료전지사업의 현황과 전망, 삼성경제연구소 보고서 (2004).
- [12] 일본 연료전지 개발정보센터(FDIC) 자료.
- [13] 노현숙, 고병열, 권영일, "(KISTI 보고서) 연료전지 재료-기술혁신을 통한 코스트다운 방안 (2004.6).
- [14] 한국기계연구원 중장기발전 계획 (2006).
- [15] H. A. Gasteiger, M. F. Mathias, "Fundamental Research and Development in Polymer Electrolyte Cell Technology" in Workshop "Materials for High Temperature PEM Fuel Cells", Materials Research Institute, The Pennsylvania State University (Dec. 11, 2003).
- [16] JSR 자료 (<http://www.jsr.co.jp/wnew/wn060125.html>).
- [17] Sumitomo Metals web site.(<http://www.sumitomometals.co.jp/e/news/news2003-10-28.html>)
- [18] 家庭用燃料電池システム関連周辺機器(補機類)の仕様リスト, 燃料電池実用化推進協議会の仕様リスト, 燃料電池実用化推進協議会 (2005) (<http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/mokuji.html>)(<http://www.meti.go.jp/press/20050421002/20050421002.html>).

저자|약력



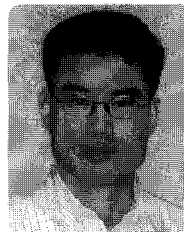
성명 : 이창래
 ◆ 학력
 · 2000년
 한양대 재료공학과 공학박사

◆ 경력
 · 2000년 - 2001년
 LBNL (US) Postdoc.
 · 2002년 - 현재
 한국기계연구원 재료기술연구소 선임연구원



성명 : 양철남
 ◆ 학력
 · 1996년
 한양대 재료공학과 공학석사

◆ 경력
 · 1996년 - 1998년
 대우자동차 연구원
 · 1998년 - 2001년
 대우고등기술연구원 주임연구원
 · 2001년 - 2005년
 (주)퓨얼셀파워 선임연구원
 · 2006년 - 현재
 한국기계연구원 재료기술연구소 선임연구원



성명 : 문성모
 ◆ 학력
 · 1997년
 한국과학기술연구원 공학박사

◆ 경력
 · 1998년 - 1999년
 UMIST (UK) Postdoc.
 · 1999년 - 2001년
 Hokkaido Univ. JSPS 특별연구원
 · 2001년 - 2003년
 NRC (Canada) 방문연구원
 · 2003년 - 현재
 한국기계연구원 재료기술연구소 선임연구원



성명 : 정용수
 ◆ 학력
 · 1994년
 UMIST (UK) 공학박사

◆ 경력
 · 1982년 - 현재
 한국기계연구원 재료기술연구소 책임연구원
 · 1992년 - 1993년
 Univ. Salford, 객원연구원