

연료전지 시스템의 기술 추이와 전망

배중면, 유영상*
 한국과학기술원 기계공학과, *한국전력연구원 신기술센터
 jmbae@kaist.ac.kr

지난해부터 정부에서는 한국의 21세기 국가 핵심 산업 경쟁력을 증진시키기 위해 이른바 “차세대 성장 동력 산업”을 선정하여 추진코자 노력하여 왔다. 이에 최종적으로 비중있는 11개 대 기술분야를 선정하였는데, 이중 2차 전지와 함께 연료전지가 차세대 전지사업으로 분류되어 정부(산업자원부) 집중적인 투자와 지원을 받게 되었다. 특히 연료전지기술은 21세기 청정·대체에너지사업으로 3E(Environment, Energy 및 Economy)문제를 동시에 추구 달성할 수 있는 기술로써 IT 및 HEV 등과 관련하여 그 중요성이 날로 더해지고 있다. 연료전지는 특성상 환경친화성 및 고효율성을 가짐으로 인해 기존의 연소를 통한 회전력에 의한 전자기식 발전방식을 대체할 수 있는 새로운 전원으로 주목 받고 있으며, 태양광 및 풍력에 의한 대체에너지와는 별도로 지속적이며 안정적인 환경친화형 분산전원으로 인지되고 있다. 즉, 연료전지는 연료가 갖는 화학에너지를 연소과정 없이, 전기화학적 반응을 통하여 직접 전기를 얻는 방식으로 가스상태의 연료의 공급에 의해 지속적인 발전이 가능한 시스템이다. 따라서, 연료를 연소과정과 달리 전기화학적 산화반응으로 소모하므로, 오염물질의 배출을 매우 줄일 수 있으며, 또한 기계적 회전부가 적다는 점에서 소음발생이 적고 그리고 직접 발전 방식으로 기존 화력발전 방식에 비하여 효율이 높다는 점을 특징으로 한다. 더욱이 발전시스템으로서 필요한 설비용량(규모)의 조절이 용이하고, 이러한 단위용량을 기본으로 모듈화하여 원하는 크기의 분산형 전원으로 제작이 가능하기 때문에 설치가 용이하며 건설공기가 단축되고, 또한 환경친화적 특성에 의해 발전소 부지에 대한 제약이 적어 수요지 근처에 설치가 가능함으로 송전손실이 적다는

점 등이 있다. 이외에도 전기적으로 부하 추종성이 뛰어나고 낮은 부하에서의 효율이 높아 차세대 발전(전원)시스템으로서 주목 받고 있다.

일반적으로 연료전지는 전해질 및 전극의 종류에 따라 알칼리형(AFC, Alkaline Fuel Cell), 인산형(PAFC, Phosphoric Acid Fuel Cell), 용융탄산염형(MCFC, Molten Carbonate Fuel Cell), 고체산화물형(SOFC, Solid Oxide Fuel Cell), 고체고분자형의 연료전지(PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell, or PEFC, Polymer Electrolyte Fuel Cell), 그리고 직접메탄올 연료전지(DMFC, Direct Methanol Fuel Cell)가 있다.⁴⁾ Table 1에 서와 같이 각각의 연료전지는 구성소재의 특성상 사용 범위나 운전조건 및 효율 등에서 차이를 갖는다. 이를 용도 관점에서 보면 발전용, 가정용, 이동용 및 수송용으로 구분할 수 있으며, 발전용 연료전지로서는 수백 kW급 이상으로 외국에서 이미 실증 및 상용화가 진행되고 있는 용융탄산염 연료전지(MCFC)와 고체산화물 연료전지(SOFC)가 그 대상이 되고 있다. 기존의 인산형 연료전지(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)는 상대적으로 낮은 효율 및 경제성으로 발전용 연료전지로서 시장점유율이 감소하는 추세이다. 가정용 또는 소규모 상업용 연료전지로는 수 kW급으로 고출력의 고분자 전해질 연료전지(PEMFC)와 고온의 열을 공급할 수 있는 고체산화물 연료전지(SOFC)가 적용가능하며, 이동용 연료전지로는 주로 액체 연료인 메탄올을 사용하여 시스템을 단순화시킨 직접 알코올 연료전지(DMFC)과 micro Fuel Cell분야의 PEMFC, SOFC가 대상이 되고 있다. 특히 수십 kW급으로 고출력의 소형 경량화가 가능한 PEMFC는 자동차에 탑재하기 위한 연구개발이 집중적

으로 수행되고 있는데, 수십 kW인 경우의 승용차용과 2~300 kW급의 버스용 등이 개발되고 있다.

PEMFC 및 DMFC(혹은 PAFC)와 같이 고분자 전해질과 백금(Pt)을 함유한 촉매를 전극으로 사용하는 소위 저온형 연료전지는 스택으로의 제작이 용이하고 기술적으로 가장 앞서 있다. 가스 기밀성을 갖게 한 Graphite재질의 bipolar plate의 값싼 제조공정의 개발과 함께 장수명의 백금 촉매 제어기술 및 연료 개질기술(Co제거 등) 등이 확보된다면 향후 몇 년 내에 실용화가 가능할 것으로 믿어진다. 이와 달리 작동온도가 비교적 고온인 고온형 연료전지에는 MCFC와 SOFC가 있는데 상대적으로 작동온도가 높아 고효율의 특징과 배기가스의 배열을 이용할 수 있는 장점이 있으며, 또한 백금(Pt)전극이 아닌 주로 고온에서 사용 가능한 비귀금속계(주로 Ni금속) 전극을 이용하므로 비용적인 면에서나 규모면에서 연료전지를 이용한 분산형(대형) 발전시스템으로의 개발이 기대되고 있다. 이중 용융탄산염형 연료전지(MCFC)는 알칼리(Li/K)계 탄산염 용액을 전해질로 사용하고 Ni계 금속을 전극으로 사용하므로 약 650°C의 정온에서 시스템(스택)을 유지해야만 용융염을 통한 전기화학반응과 MCFC 스택의 수명을 기대할 수 있는 단점이 있다.^{4,7)} 그리고 그 이상의 온도에서 사용되는 고체산화물 연료전지(혹은 고체전해질 연료전지, SOFC)가 있는데, 상대적으로 SOFC의 작동온도는 현재까지 알려진 바로는 500 ~ 1000°C로 매우 다양하다. 이는 사용될 수 있는 고체전

해질로서 도핑(doping)된 지르코니아(ZrO₂), 세리아(CeO₂), 페로브스카이트((LaSr)(GaMg)O₃) 등¹⁰⁻¹⁴⁾ 아직까지도 개발의 여지가 많고 또한 전극도 연료극에서는 NiO계 산화물이 주종을 이루지만, 여기에 혼합되는 전해질 분체의 성분 및 조성에 따라 그 특성이 달라진다. 더욱이 SOFC의 공기극 재료로서 널리 이용되는 페로브스카이트 화합물구조에서 A site와 B site 원소의 구성과 각각의 site에 도핑되는 원소의 종류와 조성에 따라 매우 다른 특성을 갖기에 현재까지도 개발이 진행중에 있다.

특히 연료전지는 적어도 40,000시간(5년)이상의 수명을 유지하여야 현재 이용되는 화력발전이나 원자력을 이용한 발전시스템과 비교할 때 경제성을 갖는 것으로 판단되며 그 외 아직까지 초기 투자설치비와 보수유지비 크고, 상대적으로 대량 양산 기술을 확보할 수 없어 실용화 또는 상용화에 어려움이 있다. 이중 고체산화물 연료전지(SOFC)는 전해질을 포함한 대부분의 구성요소가 고체의 세라믹스로 되어 있어 상대적으로 작동온도(약550~1000°C)는 높지만 단전지에서 이미 60,000시간(약 7년)의 내구성을 유지하는 것이 확인되었으므로 다른 방식의 연료전지에 비하여 이미 소재의 수명은 검증된 상태라 할 수 있고 또한 수소 외의 탄화수소계 가스를 직접 연료(Direct Electrochemical Oxidation)로 사용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 SOFC에서는 아직까지 단전지의 대면적화가 용이하지 않고, 밀봉재로 쓰이는 소재의 안정성과, 값싼 고전도성 내산화 분리판의 개발

Table 1. 연료전지의 종류

	<1세대> 인산형 (PAFC)	<2세대> 용융탄산염형 (MCFC)	<3세대> 고체산화물형 (SOFC)	<4세대> 고체고분자형 (PEMFC)	알칼리형 (AFC)
전 해 질	H ₃ PO ₄	Li ₂ CO ₃ /K ₂ CO ₃	ZrO ₂ +Y ₂ O ₃	프로톤교환막	KOH
전 극	Graphite+Pt	NiO/Ni(Cr)	LSM(YSZ) Ni(YSZ)	Graphite+Pt	Pt or Ni
작동온도	약 200°C	약 650°C	1000°C-650°C 600°C-350°C	상온 - 90°C	상온 - 100°C
전 도 종	H ⁺	CO ₃ ⁻²	O ⁻²	H ⁺	OH ⁻¹
사용연료	H ₂ H (개질기)	H ₂ , CO (개질기)	H ₂ , CO, CH ₄ Hydrocarbon (직접사용기)	H ₂ (개질기)	H ₂
발전효율	40%	45-55%	45-60%	40-50%	45-55%
활용분야	분산형전원	대형발전시스템	소수(대)형발전시스템	소형, 이동형 전원(자동차)	우주선전원 특수용도

이 미흡하여 전체적으로는 스택제작이 어렵다는 문제점이 있다.

그러나 최근 전력사업에서는 전력수요의 증가, 지구 환경공해, 에너지절약 등의 문제가 점진적으로 대두되며, 그 문제들의 해결에 적합한 신 분산형 전원방식으로 연료전지를 개발함으로써 전력공급의 안정화와 고품질에 기여하고자 노력하고 있다. 정부에서도 이러한 노력의 일환으로 대체에너지 기술 개발 및 보급을 위해 각 분야별 연료전지 개발사업을 추진해 왔으며, 특히 2003년에는 그 동안 제외되었던 SOFC분야에서도 가용용 연료전지 시스템을 개발하기 위해 "1 kW급 중온형 SOFC 모듈 및 시스템 개발"의 신규과제를 추진하게 되었다. 본 고에서는 차세대 분산형 발전시스템으로서의 연료전지 시스템에 대한 기본원리와 각 연료전지 별 기술개발 추이 그리고 주요 핵심 주변기기에 대해서 간단히 소개하고자 한다.

1. 연료전지의 개요

연료전지는 연료의 화학에너지를 전기에너지로 직접 변환시키는 에너지변환기이다. 가장 많이 쓰이는 수소와 공기 중의 산소를 사용하여 연료전지를 구동시키는 경우 아래의 식으로 표현할 수 있다. "연료전지"라는 이름에는 전지라는 이름이 들어가는데 전기화학반응을 이용하여 연료(전지의 경우 anode의 금속)의 화학에너지를 전기에너지로 변환시키는 원리는 같다.

Fig. 1은 연료전지와 전지를 비교하고 있다. 연료전지는 연속적으로 들어 오는 수소와 산소의 화학에너지를 변환시키며 전지는 내부에 저장되어 있는 납의 화학에너지를 변환시키고 있다. 따라서 같은 전기화학반응에 의

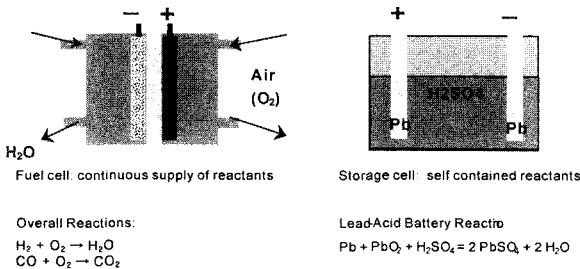


Fig. 1. 연료전지와 전지의 비교

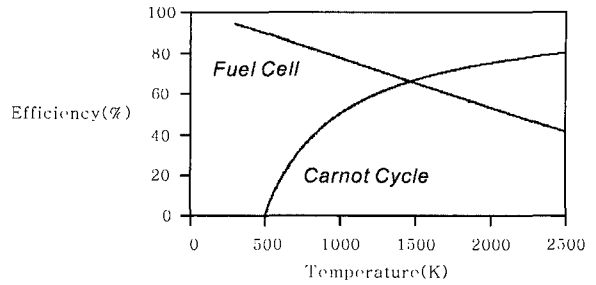


Fig. 2. 연료전지와 Carnot 기관의 열역학적 효율.

해 구동되는 연료전지와 전지이지만 연료전지는 에너지 변환기구이며, 전지는 에너지저장장치라고 할 수 있다. 이로 인해 연료전지를 전기화학엔진이라고 부르는 이들도 있다. 연료전지의 열역학적 효율과 기존의 에너지변환 기구인 내연기관의 열역학적 효율의 비교를 Fig. 2에서 볼 수 있다. 연료전지는 저온에서 높은 열역학적 효율을 보이며 내연기관은 고온에서 높은 열역학적 효율을 보인다. 이는 연료전지의 구동시스템은 등온반응에 의해 효율이 결정되며 Carnot 사이클로 대표되는 내연기관은 두개의 등온반응과 두개의 단열반응을 순환하는 순환 시스템이라서 생기는 차이로서 같은 열역학적 조건에서 같은 연료와 산화제를 사용하는 경우 열역학적 변환효율은 당연히 같은 값을 나타낸다. 그러나 현실적으로 내연기관은 재료의 한계로 인해 고온에서 작동시킬 수 없고 연료전지는 여러 촉매시스템이 잘 개발되어 있어 내연기관보다 높은 현실적인 변환효율을 가지고 있다.

Fig. 3은 연료전지를 탑재한 자동차와 내연기관자동차의 효율을 부하의 변화에 따라 표시한 효율로서 넓은 영역에서 내연기관보다 우수한 효율을 보이며, 특히 도시운전모드에서 더욱 높은 효율을 보이고 있다. 이로 인해 세

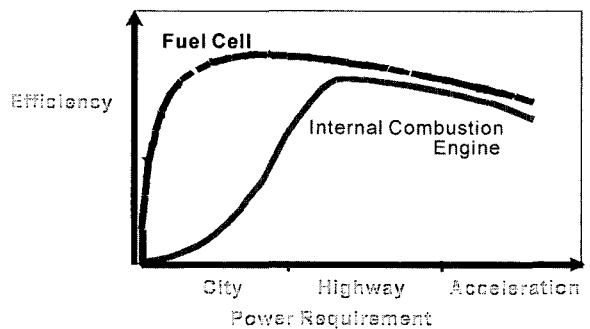


Fig. 3. 연료전지자동차의 효율.

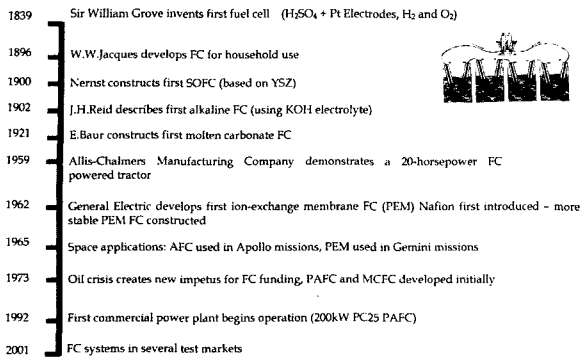


Fig. 4. 연료전지개발연표

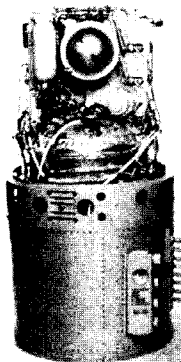


Fig. 5. Gemini 프로젝트에 공급된 1 kW급 PEMFC(GE).

계각국에서는 연료전지의 개발과 보급을 국가과학기술 개발사업에서 매우 중요한 사안으로 여기고 개발노력을 경주하고 있다.

이러한 연료전지는 1839년 영국의 Sir William Grove가 발표한 후 160여년의 세월이 흐르면서 여러 단계로 발전을 거듭하게 된다. Fig. 4는 연료전지의 간단한 연표를 통해 연료전지의 역사를 요약하고 있다.

양차 세계대전을 거치면서 내연기관이 비약적인 발전을 이루어 오늘날 에너지변환기구를 대표하는 시스템으로 자리잡기 전 Grove의 연료전지는 전기를 생산해 낼 수 있는 매우 획기적인 방법이었다. 이러한 시기동안 연료전지는 미국의 우주개발계획 등의 매우 제한된 범위 내에서 개발되어 사용되어 왔다. Fig. 5는 미국 GE사에서 개발하여 미국의 우주계획의 하나인 Gemini Project에 사용된 1 kW급의 Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) 로서 40일간의 우주계획에서 성공적으로 물과 전기를 공급하였다.

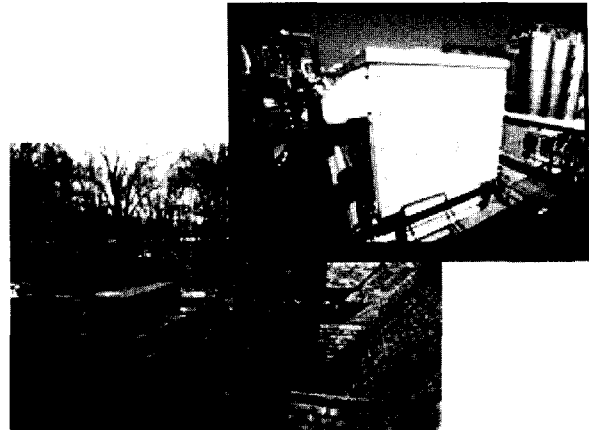


Fig. 6. 미국 ONSI사의 PAFC 시스템.

그러나 높은 가격과 PEMFC의 난제 중의 하나인 수분관리문제로 인하여 GE사는 이 연료전지시스템의 상용화를 포기하였으며 그 다음 우주계획인 Apollo project에서는 액체전해질을 사용하는 Alkaline Fuel Cell (AFC) 시스템을 사용하게 된다. 달착륙을 성공적으로 이끈 이 프로젝트에서 International Fuel Cells (IFC, 현 United Technologies Fuel Cells)는 Fig. 5에서 보이는 1.5 kW 급 AFC 시스템을 공급하여 성공적으로 사용하였다. 그러나 AFC내의 전해질인 Alkaline 용액(KOH 수용액)은 이산화탄소에 노출되는 경우 탄산 칼륨 침전이 전해질 내에 적출되어 문제가 발생하게 된다. 이로 인해 United Technologies사에서 spin-off 한 ONSI는 연료전지를 상용화하기 위하여 산성 용액인 phosphoric acid를 전해질로 사용하는 Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC) 시스템을 개발하였다. 특히 Fig. 6에서 보이는 ONSI사의 200 kW 급의 PC25 시스템은 수백기가 판매되어 상용화에 가장 근접한 연료전지 시스템으로 평가되고 있다.

그러나 여전히 일산화탄소에 대한 피독 문제와 고가의 백금 촉매 사용으로 인한 높은 기본가격이 문제점으로 남아 있었다. 한편 미국의 Fuel Cell Energy (Fig. 7)와 독일의 MTU 등에서는 molten carbonate를 전해질로 사용하는 Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)를 개발하여 발전설비로 이용하는 개발계획을 진행했다. 고온에 따른 고효율의 장점과 일산화탄소에 대한 내성, 그리고 대화학가 용이한 이점으로 개발이 진행되어 오고 있으나 이산화탄소를 순환시킴에 따라 장치가 복잡해지고 반응기체

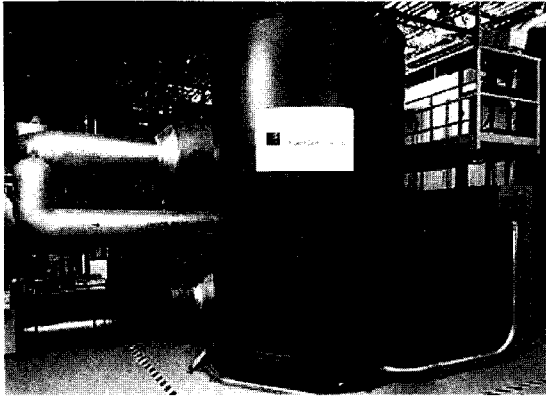


Fig. 7. 미국 Fuel Cell Energy사의 300kW급 MCFC 시스템.

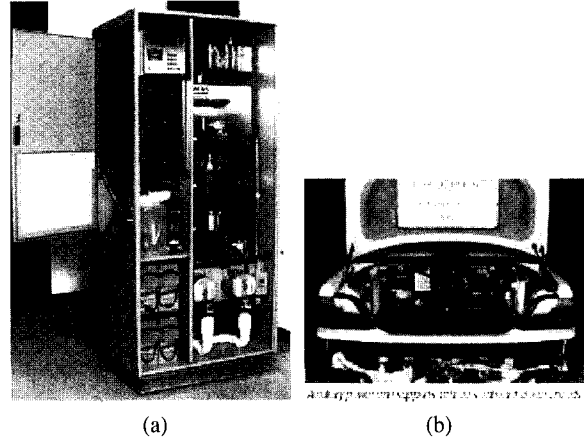
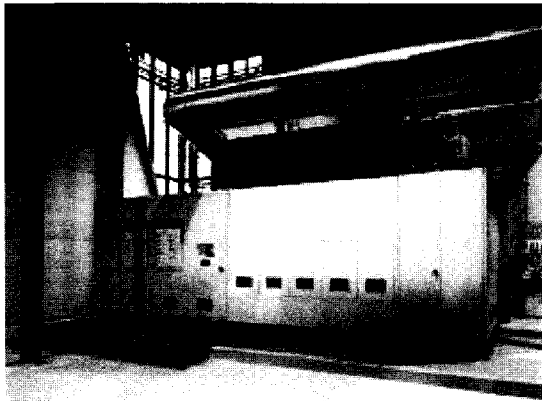
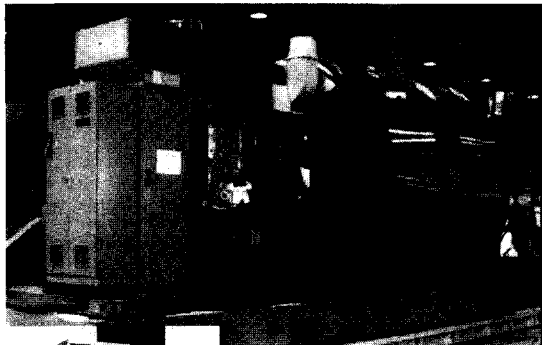


Fig. 9. SOFC를 이용한 RPG와 APU 시스템.
 (a) Fuel Cell Technology사의 5kW SOFC RPG
 (b) DelPhi사의 3kW SOFC APU



(a) 100 kW급 SOFC



(b) 250kW급 SOFC-GT

Fig. 8. Siemens-Westinghouse의 SOFC 시스템.

가 희석되어 단위면적당 출력이 저감되는 문제와 고온에서 지속적으로 부식성 전해질이 계속 전극과 기타 부위를 부식시키는 문제점들이 지적되고 있다. 또 다른 고온 연료전지로는 세라믹형태의 고체전해질을 사용하는 SOFC를 들 수 있다. Siemens-Westinghouse는 1970년대

후반부터 tube 형태의 SOFC 시스템을 개발하였다. 특히 Fig. 8(a)에서 보이는 100 kW 급의 시스템은 각각 미국과 네덜란드의 현장에서 성공적으로 운용되었고 장시간 성능테스트를 거쳤다. 또한 미국에서는 Vision21 프로그램 중 분산형 전원분야의 연료전지기술에 속한 4개 과제 중 2개의 SOFC 관련 대형프로젝트를 수행하고 있으며, 이중에 하나는 Siemens-Westinghouse (SWPC)사가 사업주관인 SOFC-GT(가스터빈) 프로그램(Fig. 8(b))과 또 다른 과제는 일명 SECA(The Solid-State Energy Conversion Alliance)조합에서 수행하는 프로그램으로 수kW급의 가정용(RPG, Residential Power Generation) SOFC 시스템과 자동차 보조전원 장치(APU, Auxiliary Power Units) 등을 추진하고 있다(Fig. 9).

하지만 여전히 제조공정의 문제점과 고온에서의 재료 문제(금속분리판의 산화 등) 그리고 운전, 정지 반복시의 문제점 등이 숙제로 남아 있으나 높은 효율과 장시간 안정성 등의 장점으로 인해 앞으로 계속적인 발전을 기대하고 있다.

연료전지 자동차의 개발계획으로 주요 자동차회사를 중심으로 개발이 진행되어 온 PEMFC는 지난 10여년간 부피와 무게 면에서 엄청난 발전을 이루어 왔다(Fig. 10). 2000년대 초반에 이미 1 kW당 1 kg 미만, 1 L 미만의 무게와 부피를 이루어 왔고 백금 사용량도 현재는 cm² 당 0.2 mg 정도로 초창기보다 100 배 이상 감소했다.

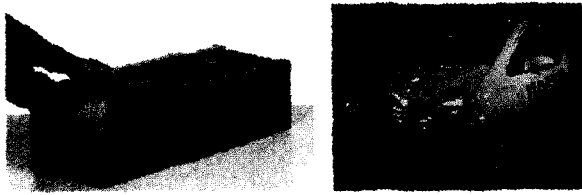


Fig. 10. Ballard사의 PEMFC 스택과 이를 이용한 연료전지 자동차(ZEV).

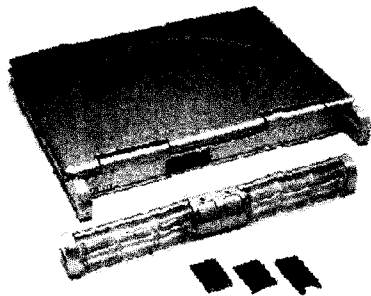


Fig. 11. 노트북용 DMFC.

그러나 여전히 가정용 자동차를 기준으로 (50 kW 급) 백금과 NAFION 막, 그리고 bipolar plate의 가격만으로도 US\$30,000이 넘는 가격의 문제와 수소저장시스템의 문제가 여전히 난제로 남아 있다.

PEMFC와 원리가 비슷하지만 수소를 연료로 사용하지 않고 가장 간단한 알코올인 메탄올물에 희석하여 이를 직접 연료로 사용하는 Direct Methanol Fuel Cell (DMFC)는 90년대 후반부터 현재의 배터리 대체 시스템으로 주목을 받아 왔다(Fig. 11). 현재까지 미국을 중심으로 많은 벤처회사들이 DMFC의 개발을 추구하고 있으나 아직 높은 가격, 메탄올의 crossover문제와 촉매의 피독문제, 그리고 낮은 power density 등 많은 난제들이 남아 있다.

2. 연료전지 연구개발의 추세

Fig. 12에서 보듯이 세계 시장 규모로 볼 때 미국의 Allied Business Intelligence (ABI)사는 2010년 경 약 12,000 MW 에서 22,000 MW 규모의 전기가 연료전지로부터 생산될 것으로 예상하고 있다.

국내시장의 경우 자가발전설비와 기력설비에서 약 1% 가 노후화력설비의 대체로 될 경우 이의 약 10% 정도가

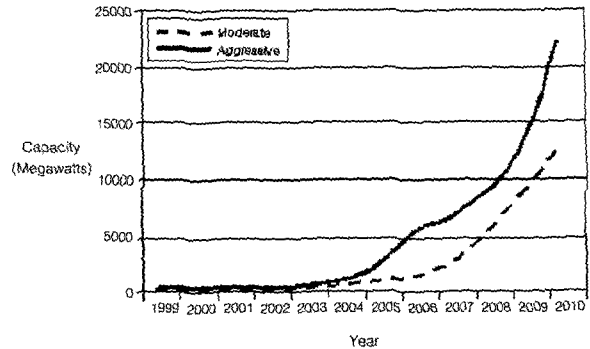


Fig. 12. 연료전지 시장전망.

향후 연료전지 설비로 대체될 것으로 예상되고 있다. 또한 국내(정부)에서도 2008년까지 약 10,000호의 가정용 (RPG) 발전시스템의 대체에너지원으로 보급계획을 갖고 있다. 이러한 발전설비 뿐만 아니라 가정 및 상용시장의 분산발전, 연료전지자동차 및 이동용 전원 등 연료전지의 중요성이 나날이 부각되어가고 있다. 수소에너지 경제의 경우 부시대통령이 연두교서에 그 중대성과 정부의 정책을 발표하면서 그 중요성이 부각되고 있다. 주요사안 중의 하나는 2010년 경에는 수소로 움직이는 자동차를 지금 현재의 내연기관자동차처럼 쉽게 구입할 수 있고 손쉽게 운용할 수 있도록 하겠다는 것이다. 수소를 사용하는 효율적인 방법으로 연료전지를 언급함으로써 연료전지자동차의 개발노력이 가속화할 것으로 기대하고 있다. SOFC의 경우 Solid State Energy Conversion Alliance (SECA)를 구성하여 분산용 발전(가정용, 상업용), 발전 설비 대체 및 자동차의 Auxiliary Power Unit (APU) 개발 등을 추진하고 있다.

일본의 경우 Millenium 프로젝트를 발족하여 Stationary PEMFC 시스템을 개발하여 가정용 분산발전시스템으로의 보급을 추진하고 있다.

3. 수소의 문제

3-1. 수소발생

연료전지는 수소를 연료로 사용하는 에너지 변환시스템이므로 연료전지를 실제 사용하기 위해서는 수소의 원활한 공급이 필요하다. 수소는 비단 연료전지의 연료

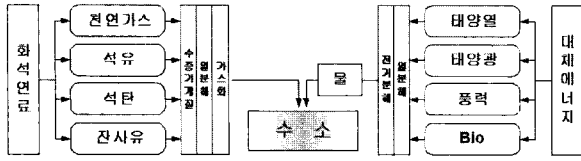


Fig. 13. 수소 공급도

Reforming Options

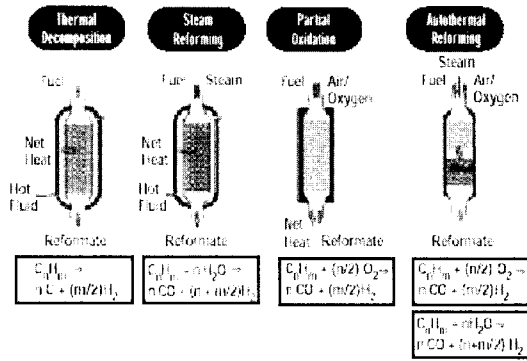


Fig. 14. 여러가지 수소 개질 방법.

로서뿐 아니라 현재의 화석연료를 대체할 미래의 에너지원으로 각광 받고 있다. 그러나 수소는 자연에서 바로 얻어질 수 있는 것이 아니므로, 수소를 효율적으로 발생시키는 방법은 연료전지 뿐 아니라 인류의 미래를 위해서 매우 중요한 문제라 할 수 있다. 수소를 발생시키는 방법은 크게 기존의 연료를 개질하는 것과 물을 분해해서 얻는 방법이다.

Fig. 13에는 두가지 방법의 모식도가 나타냈다(원자료를 이용한 열분해법은 제외함).

오른쪽에는 태양열, 태양광, 풍력, bio 등의 대체에너지를 통해 물을 분해하여 수소를 얻는 방법이 도식되어 있다. 이는 인류가 추구해야 할 궁극의 목표이고, 이런 기술들이 실용화되지 못하고, 그에 대한 기반시설이 없는 현 시점에서 왼편에 나타난 것과 같이 기존에 사용하던 화석연료를 화학반응을 통하여 수소를 생산하는 방법이 보다 현실적이다.

화석연료에서 수소를 얻어내는 개질 반응에는 크게 흡열반응인 Steam Reforming, 발열반응인 Partial Oxidation, 그리고 이 두반응의 열역학적 복합체라고 할 수 있는 Autothermal Reforming의 세 반응이 있다.

이 세 반응은 주로 촉매에 의존하는 방법이며, 고온에서 열에 의해 화석연료를 분해하여 수소를 추출하는

Thermal Decomposition 의 방법이 있다(Fig. 14). Steam Reforming 법은 지난 150년 이상 Syngas를 생산해 온 기술적으로 성숙한 방법으로 주로 Ni 촉매를 이용하고 있다. 높은 수소수율을 얻을 수 있으나 흡열반응이므로 열 전달문제 등에 의해 반응기의 크기가 매우 크고 시동시간이 크다는 단점이 있다. Partial Oxidation 방법은 화석연료와 공기를 적절히 섞어서 수소를 만들어 내는 방법으로 강한 발열반응으로 작은 용적의 반응기로도 많은 양의 수소를 생산해 낼 수 있으며 시동시간이 짧은 장점이 있으나 고온에 따른 반응기의 물질에 제한이 있으며 sooth가 반응기내에 생겨 반응을 멈출 수 있는 문제점이 상존한다. 위 두 반응의 열역학적인 복합반응인 Autothermal 반응은 적절한 반응온도로 효율이 높고 시동시간이 짧은 장점을 가지고 있으나 제어가 힘들다는 장점이 있다. Thermal Decomposition에 의한 수소추출법은 현재 연구가 진행 중에 있으나 실증범위의 개발연구는 아직 미미한 편이다.

3-2. 수소저장

수소를 저장시키는 방법엔 여러가지가 있다. 기존의 연료인 천연가스나, 가솔린 등도 하나의 수소의 저장매체로 볼 수도 있을 것이다. 그러나 이런 탄화수소 연료들은 앞서 언급한 대로 부피나 무게가 큰 개질기를 필요로 하기 때문에 특히 운송용, 휴대용 연료전지의 사용을 위해서 순수한 수소를 직접 저장하는 방법이 활발히 연구되고 있다.

수소를 저장하는 방법은 크게 물리적인 방법과 화학적인 방법으로 나눌 수 있을 것이다. 먼저 물리적인 방법들에 대해서 알아보자.

수소를 저장하는 방법으로는 먼저 기체상의 수소를 압력 용기에 저장하는 방법을 들 수 있다. 기체수소 탱크는

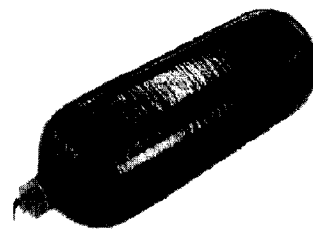


Fig. 15. 고압 수소 탱크

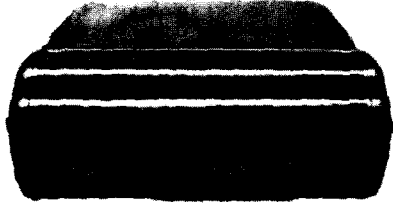
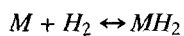


Fig. 16. 액체 수소탱크

구조 및 원리가 간단하고, 저장 시간에 제한이 없고, 수소의 순도에 제한이 없는 등의 장점이 있다. 이에 수소탱크는 예전부터 화학 실험용으로 유용하게 오랫동안 쓰이던 방법이지만 수소를 운송수단 즉 자동차의 연료로 사용할 시 저장 할 수 있는 수소의 양이 문제가 된다. 수소는 무게당 에너지 밀도가 가장 높은 물질이지만, 밀도가 너무 작기 때문에 기존의 수소탱크는 무게 혹은 부피당 저장할 수 있는 수소의 양이 너무 적다. 이를 극복하기 위해서는 매우 높은 압력으로 수소를 압축하여 저장하여야 하기 때문에 300bar 이상을 견디는 고압 탱크를 필요로 하게 된다. 따라서 가볍고 강도가 높은 탱크를 위한 디자인 및 재료 선택의 어려움이 따르고, 고압 수소를 저장한다는 점에서 안전상의 문제도 대두되고 있어 많은 연구가 이루어지고 있다.

다음으로 수소를 액화하여 저장하는 방법이 있다. 수소를 약 22K의 액체 형태로 저장하는 것은 대량의 수소를 저장하는 현재 거의 유일한 방법이다. 현재 액체 대용량 수소저장소는 석유정제 공정이나 암모니아 생산 등에 사용되고 있다. 저온 액체 수소의 문제점은 수소를 액화하는 것은 여러 단계로 이루어진 에너지 소모가 큰 공정이기 때문에 에너지의 효율면에서 약점을 지니며, 액체 수소의 기화를 막기 위해서 높은 수준의 진공 용기에서 저온을 유지시켜줘야 하며, 안전상 유의해야 할 사항이 많고, 더해서 연료전지에는 기체 수소를 공급하여야 하므로 저온의 액체 수소를 기화 해야 하는 과정이 필요하게 된다.

수소를 metal hydride의 형태로 저장하는 방법이 있다. 티타늄, 철 망간 등의 몇몇 금속의 합금은 수소와 반응하여 metal hydride 를 생성하고 이는 쉽게 조절할 수 있는 가역 반응이다. 일반적인 반응식은 다음과 같다.



이는 단위 부피당 수소 저장량이 가장 많은 방법중의



Fig. 17. 수소 흡착 합금 탱크

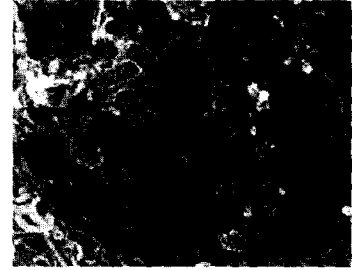
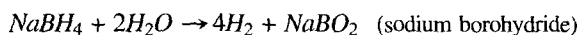
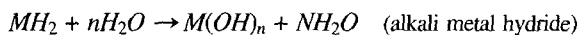


Fig. 18. 탄소 나노튜브

하나로 심지어 액체 수소보다 많은 양의 수소를 저장할 수 있다. 상압보다 약간 높은 압력에서 수소는 약간의 발열 반응으로 금속과 결합하여 metal hydride를 형성하고, 이는 2bar 정도의 압력으로 밀봉되었다가 필요시 상압에서 약간의 흡열반응으로 수소를 내놓게 된다. Metal hydride는 안전하고, 언급했듯이 부피당 수소 저장량이 많으나 상대적으로 무겁고 충전전에 긴 시간이 소요되며, 높은 순도의 수소만 사용가능하고, 충전전 횟수에 제한이 있는 등의 단점이 있다. 또한 충전시 가열해주고 방출시 냉각해주어야 하는 문제가 출력변화가 심한 자동차 등에서는 심각해 질 수 있다.

이밖에 수소를 carbon nanofiber에 저장하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행중이다. 이론적으로 아주 높은 수소 저장량을 가지나, 경제적인 수소 저장장치로서의 실용화 여부는 아직 논쟁상에 있다.

수소를 화학적 방법으로 저장하는 것은 어떻게 보면 인간이 만든 연료라고 볼 수 있을 것이다. 여기에는 Alkali metal hydride, Sodium borohydride 등이 있고 각각의 화합물에서 수소를 얻어내는 반응은 다음과 같다.



두 방법 모두 안전하고, 비교적 높은 수소저장 용량을 보이거나 원화합물을 만들어 내는데 드는 에너지가 수소

로부터 얻을 수 있는 에너지보다 더 크므로 특정 용도로 쓰일 수 밖에 없을 것이다.

4. 주변장치 문제

연료전지 시스템에서 전기를 생산하는 핵심인 스택(stack) 또는 모듈(module)과 마찬가지로 중요한 기기인 연료처리 및 개질기(Fuel Processor)에 대해서는 앞장에서 언급하였으며 다음으로 또한 핵심 주변기에 속하는 연료 및 공기 공급시스템과 전력변환기(power conditioner)에 관해서 논하기로 한다.

4-1. Gas Moving System

공기는 연료전지시스템의 cooling 뿐만 아니라 cathode에 산소를 공급하기 위해 공급되어야 하며, 연료가스도 연료전지의 anode측에 공급 되어야 한다. 이렇게 하기 위해서 pump, fan, compressor와 blower가 사용되어야 한다. 이런 장비들에 대한 기술은 아주 성숙되어 있으며, 연료전지 연구자들은 연료전지의 크기와 적용범위에 맞는 "gas moving devices"를 선정, 개발해야 할 것이다. 연료전지를 위한 gas moving devices 들을 먼저 간략히 살펴본다.

compressor는 매우 중요하면서도 그 종류가 다양하여 형태와 성능에 맞는 압축기를 선정해야 할 것이며, Turbine의 경우 연료전지에서 나오는 배출가스의 에너지를 이용하기 위하여 이용되며, Ejector는 pump의 가장 간단한 형태이며, 만약 수소가 고압의 저장고에서 공급된다면 이를 적절히 주입/순환하기 위하여 사용될 뿐만 아니라, anode 측의 가스들을 recycling하는데 사용되기도 한다. Fan과 Blower는 연료전지의 냉각을 위해서 사용되거나, 작은 연료전지의 cathode에 공기를 공급하는데 사용된다. Membrane이나 diaphragm pump는 작은 사이즈(200W)에서 중간(3kW)사이즈 정도의 PEMFC에 공기와 수소를 공급하기 위해 사용되기도 한다.

연료전지에서 압축기는 매우 중요한 기기이며 필요한 유량과 압축비를 위해서 정확한 선정이 필요하다. 특히 압축으로 인한 온도가 상승은 저온 연료전지의 경우 냉각이 필요하며, 이로 인해 intercooler가 필요할 것이다.

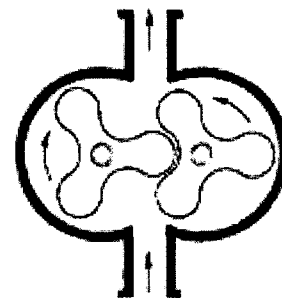
전형적으로 압축기에 요구되는 파워는 fuel cell capacity의 20%에 달할 것이다. 적합한 압축기의 선정으로 필요한 유량과 압축비를 얻는다. 전형적인 Lysholm 이나 screw compressor는 50 kW 보다 작은 시스템에는 너무 클 것이다. 현재 연료전지에 1.6 에서 3까지 적용할 압력비는 기존 상업제품으로는 어려우며, 50 kW 이상이거나 특히 100 kW이상에 대해서는 상업제품으로도 선택의 폭이 넓다.

언급된 몇가지 devices에 대해 자세히 살펴보면 다음과 같다.

가) Compressor

연료전지에 사용되는 압축기의 경우 다른 엔진(특히 디젤) 엔진에 사용되는 것과 같으며, 중요 4가지 형태로 분류할 수 있다.

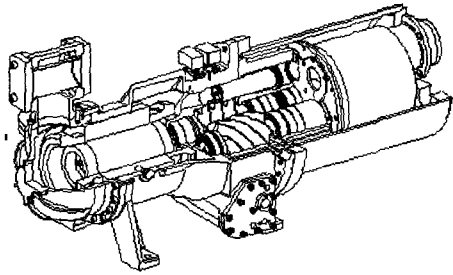
(1) Roots compressor



그림과 같이 2개의 회전자 돌면서 가스를 압축하는 방식으로 가격이 싸고 넓은 범위의 유량을 사용할 수 있는 반면, 입구와 출구의 pressure 차이가 적은 상황에서 이용될 경우 충분한 효율을 얻을 수 있고, 그렇지 않은 상황에서는 효율이 좋지 못하다.

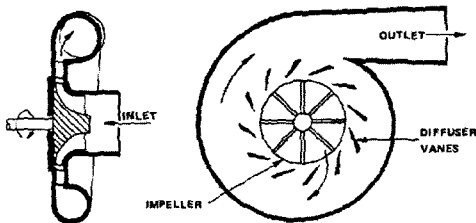
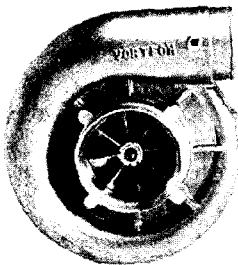
(2) Lysholm or screw compressor

일종의 헬리컬 기어를 케이싱 내에서 맞물리게 한 것으로 기체를 회전축의 방향으로 이송하는 기어 펌프의 변형이라고 생각하면 된다. 케이싱 내에서 서로 맞물려 있는 스톱터와 암로터의 회전에 의해 케이싱과 조성되는 밀폐공간의 증가와 감소가 밀봉선을 경계선으로 이루어져 가스의 흡입, 압축 및 토출 과정을 연속적으로



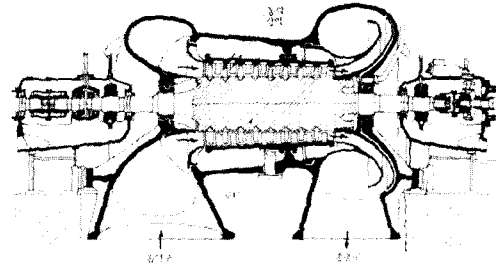
진행한다. 이 압축기의 장점은 넓은 범위의 압축비를 사용할 수 있으며, 출구의 압력이 입구의 압력에 비해 최대 8배까지 가능하며, 또한 넓은 범위의 유량에 대해서 효율이 좋다. 반면, 제작에 많은 비용이 드는 단점이 있다.

(3) Centrifugal or radial type compressor



가스가 압축기 중앙으로 흡입되어 높은 스피드로 출구로 배출된다. 이것은 가스의 kinetic 에너지가 압력을 증가시키며, 엔진의 터보차징과 같은 많은 분야에 이용되고 있다. 이런 타입의 압축기는 비용이 작고 넓은 범위의 유량을 사용할 수 있으며, 효율 또한 다른 압축기 만큼 좋다. 하지만 이것은 낮은 유량에서는 사용할 수 없으며, 큰 문제는 압축기의 로터가 80,000 rpm 정도의 높은 스피드로 회전해야 한다는 것이다. 이러한 사실은 베어링의 윤활 시스템이 잘 설계되어야 하는 것을 의미한다.

(4) Axial flow compressor



축류 압축기의 단면도에서와 같이 중심축 주변에는 동익과 정익이 교대로 배열되어 동익은 로터에, 정익은 케이싱에 고정되어 있다. 하나의 동익과 이것에 이어지는 정익에 의하여 1단락을 구성하고 1단락의 비속도는 800~1500 m³/min의 범위에 있으며 축류 속도는 110~120 m/s 정도 잡는다. 날개는 충분한 강도를 가져야 함과 동시에 내마모성, 내부식성을 가지며, 또 가공이 용이해야 하기 때문에 동익이나 정익은 모두 주로 스테인레스 강이 사용된다. 로터는 원주 속도 180 m/s 정도를 경계로 하여 이것보다 고속인 것은 원판식, 저속인 것은 원동식으로 사용한다. 원판식은 주로 항공용으로 사용한다. 원동식은 주로 지상용, 선박용으로 사용한다.

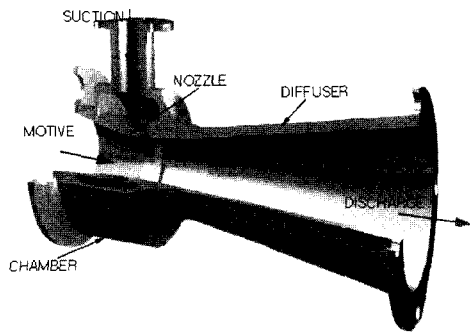
나) Turbines

연료전지는 보통 뜨거운 가스를 배출하는데, 이 에너지를 turbine과 연결하여 사용할 수 있다. 이 turbine은 종종 연료전지로 들어가는 공기와 연료가스를 압축하는 압축기를 구동하는데 사용되기도 한다. 고려해 볼만한 turbine의 종류로는 2가지가 있는데, 첫번째는 centripetal or radial이며 이것은 기본적으로 centrifugal compressor이다.

다) Ejector Circulators

Ejector는 가장 간단한 형태의 펌프이며, 실제 이것은 moving part가 없다. 이것들은 압력으로 저장되어 있는 수소를 사용하는 연료전지의 수소를 이용하기 위하여 널리 사용되고 있다.

몇몇의 Siemens Westinghouse SOFC의 경우에 연료가스를 재순환하기 위하여 이것을 사용한다. 이것은 가스의 mechanical energy에 의해 썰주위로 연료를 순환시



킨다.

이는 간단한 ejector의 모양을 나타낸 것으로 가스가 좁은 목의 유로를 지나면서 Suction line을 통해 유체가 흡입된다.

4-2. 전력변환시스템(Power Conditioning Systems)

앞에서 연료가 어떻게 공급되는지 또한 어떻게 유체를 주입하고 압축하는지에 대해서 언급하였다. 이제 어떻게 유용한 전기적 파워를 생산하는지에 대해 살펴보자.

Power conditioning 문제는 연료전지시스템에 관한 많은 관점과 다르게 전기적 문제는 standard technology를 통해 어느 정도 해결할 수 있다.

우리가 특히 언급할 필요가 있는 4가지 technology를 간단히 아래에 간단히 설명한다.

가) Regulation

연료전지에서 나오는 출력은 사용하기에 적당하지 않은 상태이며, 또한 voltage 값은 일정하지가 않다. 전기 화학반응 특성상 전류가 증가하게 되면, 전압이 떨어지게 되는데, 특히 연료전지의 경우 전압강하는 매우 심각하며, 이를 해결하기 위하여 전압 regulator, DC/DC converters, 그리고 chopper circuits가 전압을 고정된 값으로 유지되거나 전압상승을 위하여 사용된다.

나) Inverters

연료전지는 DC의 형태로 전기를 생산하게 되는데, 작은 시스템에 대해서는 이롭지만, main grid에 연결되어 있는 큰 시스템의 경우에는 DC를 AC로 inverting해야 한다.

다) Electric motors

수송수단에 적용될 연료전지의 경우 생산된 전기는 전지모터를 움직이는데 사용된다. 결국 효율이 높고 가격이 저렴한 motor를 제작하게 된다면, 이것은 연료전지의 상용화를 앞당기는데 충분히 기여할 수 있을 것이다.

라) Hybrid systems

Watt당 cost를 계산해 볼 경우 연료전지는 상당히 고가이며, 이것은 연료전지의 상용화에 있어 크나큰 걸림돌이 되고 있다. 수송수단으로 이용되는 연료전지의 경우 사용하는 평균파워는 기계가 요구하는 최대 파워보다 작다. 이런 경우 battery를 이용한 연료전지와 Hybrid type을 개발함으로써 저 비용의 연료전지 시스템을 개발할 수 있다.

5. 결 언

미국, 일본 및 EU 등 선진국들은 지구환경 및 에너지 고갈 문제를 해결할 방법의 일환으로 수소 및 연료전지 관련 기술들을 개발하고 있으며 국가가 주도가 되어 개발 및 실증 프로그램을 추진하고 있다. 우리나라의 경우 에너지 자원의 대부분을 수입에 의존하고 있는 상황에서 수소 에너지에 대한 기술력 확보를 통하여 앞으로 다가올 수소 경제에 대비할 수 있을 것이다. 연료전지 발전시스템이 가져올 기술적 효과로서는 종합적인 엔지니어링 기술로 스택 관련기술의 경우는 재료, 화공 공정 등의 새로운 기술 개척 및 이를 통한 고부가가치 산업의 창출이 가능하다. 또한 기계설비 및 엔지니어링 기술 개발을 통하여 새로운 전원 시스템 설계 및 운용 운전 기술 확보와 Plant 엔지니어링 분야의 개척이 이루어질 것이며, 기계 분야에서는 용접, 성형 가공 및 정밀 가공 코팅 등 기술 개발 및 적용을 통한 파생 기술 확보가 가능하고, 이에 따라 국내 기반이 취약한 연료전지 관련 시스템 엔지니어링 및 재료, 화공, 기계가공 분야의 발전이 기대된다.

연료전지 기술적 신뢰성 및 경제성이 확립되는 경우, 저공해 고효율의 발전특성으로 인하여 전기를 필요로 하는 광범위한 분야에서 이용이 급속하게 확대될 것으

로 기대된다. 우선 전력사업 분야에 있어서 지구 환경문제에 따른 전원입지 확보의 어려움 및 전원설비의 원격화, 대형화에 따른 문제점을 문제점의 해결 방안으로서 도입될 것이며, 또한 이외에도 전력수송, 공급형태의 다양화, 및 발전효율 향상이라는 면에서 연료전지 발전방식의 도입이 기대되고 있는 것이다. 수송용 연료전지의 경우, 지난 수년간 연료전지 자동차의 시연을 통해 연료전지 발전시스템을 차량의 주동력원으로 적용하고자 하는 연구가 진행되어 왔다. 향후 연료(수소)공급 인프라, 양산 체계 구축 등의 문제가 해결된다면 연료전지 자동차의 실용화 가능성이 높다고 할 수 있다.

이에 따라 2003년 정부에서는 대한민국의 21세기를 이끌어갈 국가의 핵심경쟁력을 제고하기 위한 10대 차세대 동력산업 중의 하나로 2차전지와 함께 연료전지를 선정하였다. 지금까지 대체에너지기술의 한 분야로 인식되어 온 연료전지가 21세기의 국가경쟁력향상에 필요한 기술 중의 하나로 그 중요성을 강조한 셈이다. 국내에서는 연료전지기술을 1985년부터 주요 국가 연구개발과제 중의 하나로 추진해 왔다. 특히 PAFC, MCFC 및 SOFC의 기초기술 개발에서부터 시스템 운전까지 다양한 경험을 축적해 왔다. 지난 12월에는 연료전지개발보급을 목표로 산업자원부의 추진과 에너지관리공단의 시행 하에 프로젝트형 수소, 연료전지사업단의 구성이 발표되어 더욱 체계적인 연료전지 개발보급계획을 실시할 것으로 기대하고 있다.

참고 문헌

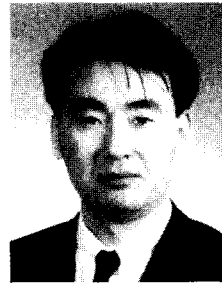
1. W. R. Grove, *Philos. Mag.*, **14**, 127 (1839).
2. W. Nernst, *Z. Electrochem.*, **6**, 41 (1899).
3. N. Q. Minh, *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**[3], 563 (1993).
4. L. J. M. J. Blomen and M. N. Mugerwa, *Fuel Cell Systems*, Plenum Press, New York, 1993.
5. N. Q. Minh and T. Takahashi, *Science, and Technology of Ceramic Fuel Cells*, Elsevier Science B.V., 1995.
6. J. H. Hirschenhofer, D. B. Stauffer, and R. R. Engleman, *Fuel Cells, A Handbook (Revision 3)*, Gilbert Commonwealth Inc., Reading, PA19603, 1994.
7. A. J. Appleby and F. R. Foulkes, *Fuel Cell Handbook*, Van Nostrand Reinhold, New York, p15, 1989.
8. D. A. Shores and J. R. Selman, *Fuel Cell Technology II*, Short Course by the Univ. Minnesota, Minneapolis, MN 25-27 March (Newsletter 6-11, Sec 3.19) 1993.
9. J. R. Macdonald, *Impedance Spectroscopy :Emphasizing Solid Materials and Systems*, John Wiley & Sons, 1987.
10. T. Takahashi, H. Iwahara, and Y. Nagai, *J. Appl. Electrochem.*, **2**, 97 (1972).
11. M. Miyayama, T. Nishi, and H. Yanagida, *J. Mater. Sci.*, **22**, 2624 (1987).
12. H. L. Tuller and A. S. Nowick, *J. Electrochem. Soc.*, **122**, 255 (1975).
13. T. Inoue, T. Setoguchi, K. Eguchi, and H. Arai, *Solid State Ionics*, **35**, 285 (1989).
14. R. Maric, S. Ohara, T. Fukui, H. Yoshida, M. Nishimura, T. Inagaki, and K. Miura, *J. Electrochem. Soc.*, **146**[6], 2006 (1999).
15. V. N. Chebotin, M. V. Glumov, A. D. Neuimin, and S. E. Pal'guev, *Sov. Electrochem.*, **7**, 55 (1971).
16. T. Kawada, N. Sakai, H. Yokokawa, M. Dokiya, M. Mori, and T. Iwara, *J. Electrochem. Soc.*, **137**, 3042 (1990).
17. D. W. Dees, U. Balachandran, S. E. Derris, J. J. Heiberger, C. C. McPheeters, and J. J. Picciolo, pp. 130-36 in *Proceeding of the Symposium on Fuel Cells*. Edited by R. E. White and A. J. Appleby, The Electrochemical Society. Pennington, NJ, 1989.
18. J. Guindet, C. Roux, and A. Hammou, pp. 55-59 in *Proceedings of the Second International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells(SOFC II)*. Ed. by F. Gross, P. Zegers, S. C. Singhal, and O. Yamamoto. Commission of The European Communities, Luxembourg, 1991.
19. J. Mizusaki, H. Tagawa, K. Tsuneyoshi, and A. Swata, *J. Electrochem. Soc.*, **138**, 1867 (1991).
20. K. Tsuneyoshi, K. Mori, A. Sawata, J. Mizusaki, and H. Tagawa, *Solid State Ionics*, **35**, 263 (1989).
21. Y.-S. Yoo, J.-H. Koh, J.-W. Park, and H. C. Lim, in *Proceedings of the Seventh International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC IIV)*, M. Dokiya, and S. C. Singhal, Editors, p590, The Electrochemical Society Proceedings Series, EPOCHAL Tsukuba, Japan 2001.
22. M. Dokiya and S. C. Singhal, Editors, *Proceedings of the Seventh International Symposium on Solid Oxide Fuel Cells (SOFC IIV)*, The Electrochemical Society Proceedings Series, EPOCHAL Tsukuba, Japan 2001.
23. Y.-S. Yoo, J.-H. Koh, J.-W. Park, and H. C. Lim, *5th European Solid Oxide Fuel Cell Forum*, edited by J. Huijsmans, Switzerland, Lucerne, p.191 (2002).
24. I. Honma, S. Hirakawa, K. Yamada, and J-M. Bae,

- Solid State Ionics*, **118**, 29-36 (1999).
25. J-M. Bae and B.C.H. Steele, *J. Electroceramics*, **3**, 37-46 (1999).
26. R. K. Ahluwalia, S. Ahmed, J-M. Bae, J. D. Carter, E. D. Doss, J. Kopasz, T. Krause, J. Krebs, M. Krumpelt, R. Kumar, S. H. Lee, D. Myers, C. Pereira, and X. Wang, *1st European Polymer Electrolyte Fuel Cell Forum*, (2001).
27. J-M. Bae, I. Honma, M. Murata, T. Yamamoto, M. Rikukawa, and N. Ogata, *Solid State Ionics*, **147**, 189 (2002).
28. J-M. Bae, S. Ahmed, R. Kumar, and E. Doss, *First International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology Rochester, ASME, USA, NY*, p.171 (2003)
29. J. D. Carter, T. A. Cruse, J-M. Bae, J. Ralph, C. Rossignol, D. Myers, R. Kumar, and M. Krumpelt, *American Ceramic Society ACS 105th Annual Meeting and Exposition*, (2003).



배종면

- 1989년 서울대학교 공과대학 학사
- 1991년 서울대학교 공과대학 석사
- 1996년 런던 Imperial College 박사
- 1996년 일본 전자기술총합연구소 (현재 AIST) NEDO 연구원
- 1999년 미국 Argonne 국립연구소
- 2002년 Staff Scientist
- 2002년 한국과학기술원 기계공학과 ~ 현재 조교수



유영성

- 1981년 서울대학교 무기재료공학사
- 1985년
- 1985년 서울대학원 무기재료 공학석사
- 1987년
- 1990년 서울대학원 무기재료 공학박사
- 1995년
- 1995년 서울대학교 신소재공동연구소
- 1996년 특별연구원
- 1996년 한전 전력연구원 선임연구원 ~현재 SOFC분야
- 2003년 산자부 대체에너지기술개발 ~현재 사업 SOFC분야 과제책임자