자동차용 고체산화물 연료전지 시스템

글 ■ 이 종 호 / 한국과학기술연구원 나노재료연구부, 선임 연구원
■ 박 진 호 / 주식회사 엔지비 기술개발팀, 팀장 e-mail ■ pjinho@ngvtek.com

이 글에서는 제3세대 연료전지인 고체산화물 연료전지의 작동원리에 대해 알아보고, 자동차용 주전원/보조 전원으로 활용하기 위한 연구개발 현황 및 그 병목기술들에 대해 살펴본다.

연료전지 자동차

최근 들어 자동차의 보급대수가 급격히 증가하면서 자동차의 내연기관을 대체할 새로운 동력장치에 대한 필요성이 점차로 늘어나고 있다. 현재 중동지역의 불안한 정세로 인한 유류공급의 불안정성과 한정된 석유자원 그리고 자동차 배기가스에 포함되어 있는 질소산화물 등의 유해물질과 온실효과를 유발하는 이산화탄소 등의 배출에 의한 환경오염 문제가 직접적으로 인류의 미래를 위협하게 되면서부터 기존의 유류 연료를 사용하는 내연기관을 대체해야 될 필요성이 절박해지고 있다.

현재 자동차 제조회사들은 이러한 배기가스 내의 유해성분들을 감소시키고자 하는 연구에 많은 투자와 노력을 기울이고 있다. 그 중에서도 연료전지는 에너지 효율이나 환경오염 측면에서 기존의 내연기관을 대체할 수 있는 대체 시스템으로 현재 가장 전력투구되고 있는 연구분야이다. 이미 자동차 동력원으로 일찍부터 연구되어왔던 2차전지의 경우, 일정한 에너지를 소모하면 외부로부터 충전을 받아야 할 뿐만 아니라, 충전시설에 대한 인프라가 구성이 되어 있지 않아 한계가 있는데 비해, 연료전지의 경우는 연료에 대한 인프라가 구성이 되어 있고, 연료가 공급되는 한 무한정으로 에너지를 발생시킬 수 있다는 장점 때문에 실효성에 있어서 훨씬 우위가 예상되고 있다. 대부분의 자동차 메이커들은 미래에 직면할 새로운 수요에 대처하기 위해 자동차에 사용할 고유의 연료전지 개발 프로그램을 독자적으로 또는 콘소시움을 이루어 진행시키고 있다. 대표적인 자동차 메이커인 다임러 크라이슬러와 GM 등은 2004년도에 승용차용 시제품을 개발할 계획을 가지고 있으며, 대다수의 메이커들도 2010년 이전에 연료전지를 장착한 자동차를 상용화한다는 데 목표를 두고 많은 투자를 하고 있다. 최근에 국내 자동차 메이커인 현대자동차도 다임러 크라이슬러 사와의 전략적 제휴를 통해 차세대 연료전지 자동차 개발에 뛰어든 바 있다.

현재 자동차용으로 사용하려는 연료전지는 주로 나피온 등의 플로톤 교환막을 전해질로 하는 고체고분자형 연료전지(PEFC :

Polymer Electrolyte Fuel Cell 또는 PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell)이다. PEMFC는 80°C 정도의 저온에서 작동한다는 장점 때문에 현재 연구되고 있는 여러 유형의 연료전지 중 가장 실용화 단계에 근접한 상태이다. 그러나 PEMFC는 연료로 고순도의 수소를 사용하므로 복잡한 연료개질 장치를 부착해야 한다는 점과 저온에서의 낮은 활성 때문에 고가의 귀금속 촉매를 사용하여야 한다는 단점을 가지고 있다. 일반적으로 PEMFC는 전극에 Pt계열 촉매를 이용하는데, 이런 활성을 유지하기 위해, 연료는 반드시 순수한 수소를 사용해야 하며, 일산화탄소의 농도는 수십ppm 이하로 억제해야 하는 어려움이 있다. 또한 수소는 가압수소로, 또는 수소흡장합금을 이용해 공급하는데, 전자는 체적/중량당 수소의 저장량이 작아 한 번 연료공급으로 주행할 수 있는 거리가 짧으며, 후자는 연료공급에 시간이 걸린다는 문제점이 있다. 또한, 수소공급을 위한 인프라구축 문제도 단기간에 해결될 부분이 아니기 때문에 PEMFC를 사용한 연료전지 자동차의 상용화에는 걸림돌로 작용된다. 이러한 이유로 연료전지 자동차를 시장에 무리 없이 투입하기 위해서는 액체연료, 가능하면 가솔린이나 경유를 사용해야 될 필요성이 제기된다. 이 때문에 현재 2010년 이전에 상용화를 목표로 개발하고 있는 자동차 메이커들은 PEMFC 이후의 차세대 연료전지 모델로 고체산화물 연료전지(SOFC : Solid Oxide Fuel Cell)를 염두에 두고 있다.

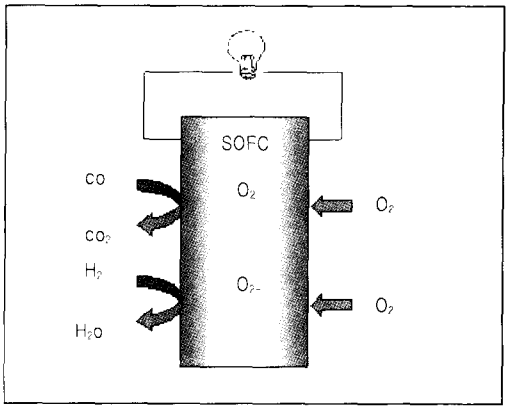


그림 1 고체산화물 연료전지의 동작원리

고체산화물 연료전지의 작동원리

고체산화물 연료전지의 작동원리는 그림 1과 같다. 고체산화물 연료전지는 고분자전해질 연료전지가 수소 이온 전도체를 사용하는 것과 달리 산소이온만을 전도하는 산소이온전도체를 사용하고 있다. 고체산화물 연료전지는 산소이온전해질을 격막으로 한 쪽에는 탄소나 수소를 포함하는 연료를 흘리고 다른 한 쪽으로는 공기를 흘리게 되는데 이때 공기 중의 산소가 전해질막을 통해 음극으로 이동해 가서 연료와 반응하며, 이산화탄소 또는 물을 생성하게 된다. 고체산화물 연료전지는 이러한 연료의 산화반응시 발생하는 화학반응에너지를 바로 전기에너

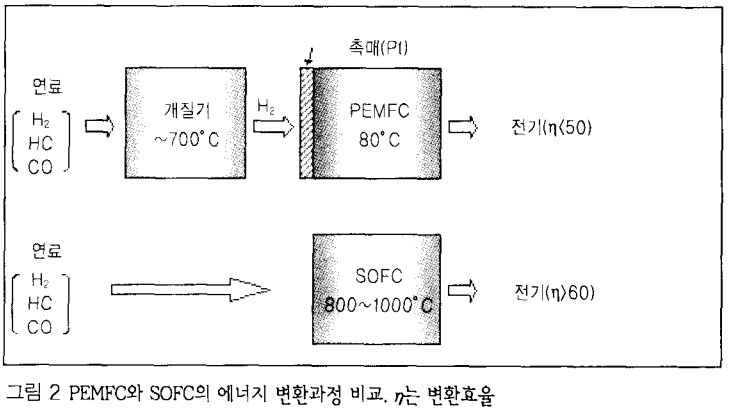
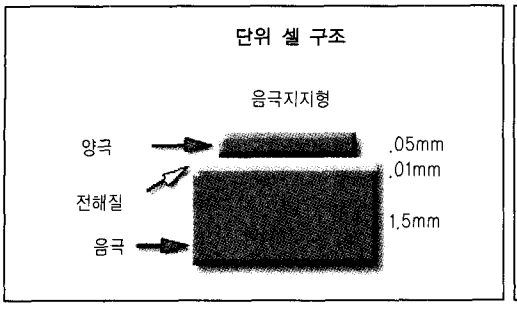


그림 2 PEMFC와 SOFC의 에너지 변환과정 비교. η는 변환효율



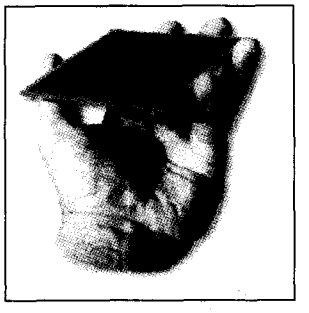


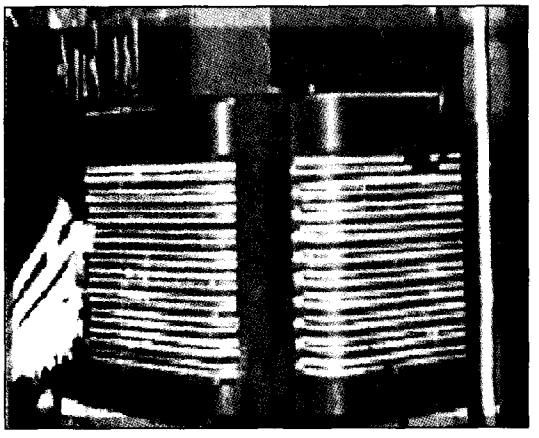
그림 3 단전지의 구조 (왼쪽)와 가공된 단전지의 실제 모양과 크기(오른쪽)

지로 변환시키며, 전기를 발생시키게 된다. 이러한 SOFC의 특징은 기존의 PEMFC와는 다르게 탄소나 수소 혹은 하이드로 카본계의 어떤 연료이든 모두 활용가능하기 때문에 연료 선택의 자유도가 높다는 장점을 가지고 있다.

그림 2는 기존의 PEMFC와 차세대 연료전지로 주목받고 있는 SOFC의 에너지 변환과정을 비교 그림이다. 그림에서 보듯이 기존의 PEMFC와 SOFC는 사용연료의 형태와 연료변환과정상 많은 차이를 보이고 있다.

자동차용 SOFC 연구개발 현황

현재 자동차용으로 개발되고 있는 SOFC는 주로 평판형 단전지를 사용하는 형태이며 단전지는 그림 3의 왼쪽 그림에 보는 것처럼 1.5mm 정도의 두꺼운 음극 위에 0.01mm 정도 두께의 산소이온전도체 전해질을 두고 그 위에 0.05mm 정도 두께의 양극을 붙인 구조를 가지고 있다. 구성소재로는 음극은 Ni/YSZ, 전해질은 YSZ(Yttria Stabilized Zirconia), 양극은 La1-xSrxMnO$_3$로서 모두가 고체산화물로 이루어져 있다. 그림 3의 오른쪽 그림은 실제 자동차용으로 개발된 10cm×10cm 크기의 고체산화물 연료전지 단전지의 실물을 나타내준다. 실제 그림에서 보이는 단전지는 약 1V 정도의 출력을 나타내므로 자동차에서 필요로 하는 전기를 발생하기 위해서는 여러 개의 단전지를 연결자를 사이에 두고 여러 층으로 적층하여 필요한 전력을 내도록 그림 4에서와 같이 스택을 구성하여 사용하게 된다.



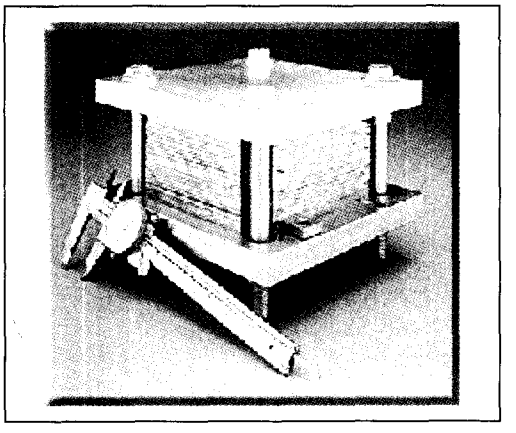


그림 4 1kW 스택의 실제 모양(왼쪽)과 단열제를 뜯어낸 후 내부의 스택모양(오른쪽)

한편 연료전지를 자동차의 주 동력원으로 사용하기 위해서는 최대출력 약 50kW 정도가 요구된다. 이러한 용량의 연료전지 시스템이 자동차의 엔진룸에 들어가기 위해선 무게나 부피에 제약이 있게 되는데 현재 요구되고 있는 규격은 1kW 당 체적은 1L 정도이다. 이러한 규격을 만족시키기 위해선 그림 3에 나타난 10cm×10cm의 SOFC에서 보고된 최대 출력을 감안하더라도 10cm 높이로 20단 정도 적층하여 1kW를 내야 하는 데 현재의 기술 수준으로는 이를 달성하기가 쉽지가 않다. 따라서 최근에는 SOFC를 주 동력원으로 활용하기에 앞서 자동차 보조기기용 전원(APU ; Auxiliary Power Unit)으로 활용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근 고급 차종을 위주로 에어컨, 액티브 서스펜션 및 각종 파워보조기능 등으로 인하여 차내에서의 전력수요가 매우 커지고 있는데 이를 기존의 배터리로 충당하기에는 기술적으로나 에너지 효율상 한계가 있어 이를 연료전지로 대체하려는 시도가 진행되고 있다. 이러한 자동차 보조전원용 연료전지는 기존의 자동차 주 동력원과 동일한 연료시스템 활용이 요구되어지므로 가솔린과 경유 등 액체 연료를 활용할 수 있는 SOFC가 그 유력한 후보로 주목받고 있다. 이미 자동차 주변기기 메이커인 Delphi Automotive 사는 BMW 사와 공동으로 APU용 SOFC 스택을 제작하여 테스트한 바 있다. 그들은 독일 Julich 국립연구소에서 개발한 단전지 제조 기술을 채택한 Global Thermoelectric 사의 10cm×10cm 크기의 평판형 단전지를 공급받아 연료전지 스택을 개발하였으며, 가솔린을 부분 산화시켜 연료로 사용하도록 설계하였다. 그러나 밀봉재 문제와 열적 안정성 등의 문제로 실용화 기술에는 이르지 못하고, 아직 연구 중에 있는 것으로 파악된다.

국내에서는 현대자동차와 (주)엔지비에서 서울대, 한국과학기술연구원, 명지대, 경북대 등과 함께 자동차용 보조동력원 SOFC 개발을 이미 시작하여, 단전지를 이미 개발하였으며, 한국산업기술진흥협회의 연구클러스터에서도 SOFC 개발을 위하여 지원을 하고 있다.

자동차용 SOFC 개발의 병목기술

고체전해질 연료전지는 PEMFC에 비해 작동온도가 높기 때문에 연료개질이나 촉매의 문제가 전혀 없으며, 연료개질이 필요한 경우에도 같은 용기 내에서 할 수 있어 시스템이 무척 간소해질 수 있다. 또한 SOFC는 PEMFC에서 문제가 되는 수증기 관리문제가 없음은 물론 작동 효율 또한 높기 때문에 차세대 연료전지 자동차의 핵심으로 등장할 가능성이 매우 높다. SOFC가 PEMFC 이후의 차세대 발전시스템으로 주목받고 있는 이유는 현재 SOFC의 제조과정이나 발전과정에 필요한 요소기술들이 현 단계에서는 아직 뒷받침되고 있지 못하나 이는 기술적인 문제로 PEMFC가 가지고 있는 여러 원론적인 제약들에 비해 해결될 가능성이 높은 것으로 예상되고 있기 때문이다.

이제까지 SOFC를 자동차용으로 적용하는데 있어 최대 걸림돌이 되었던 이슈는 자동차 동력원으로서 요구되어지는 급속한 기동/정지 상황에 의해 세라믹으로 이루어진 연료전지 구성성분들이 파손되는 부분이었다. 즉 전력용으로 개발되고 있는 SOFC에서는 통상, 기동/정지에는 몇 시간 이상의 시간이 걸려도 상관이 없기에 세라믹 재료의 열사이클에 대한 취약성이 큰 문제가 되지 않으나, 자동차용으로 활용되기 위해서는 최소한

수분내의 기동/정지 시간이 요구되어지기에 이러한 열사이클은 SOFC의 수명에 가장 심각한 영향을 미친다.

지금부터는 지난 10여 년 간의 개발 연구에도 불구하고 자동차용 평판용 SOFC가 실용화되지 못하고 있는 병목기술들에 대해 소개하고자 한다.

1) 단전지 적층기술 : 열팽창 계수 등 기계적 특성이 서로 다른 고체산화물 구성재료를 음극/전해질/양극, 3층으로 쌓은 것을 다시 연결자를 매개로 단전지/연결자/단전지의 순으로 여러 층을 쌓되 층간에 완벽한 기밀 밀봉을 유지하도록 쌓는다는 것은 현재의 세라믹스 가공 기술로는 그리 쉬운 일이 아니다. 기존의 재료로 연료전지를 개발함에 있어 가장 큰 기술적 난제이다.

2) 밀봉기술 : 단전지/연결자 사이는 연료와 공기가 서로 섞이지 않도록 완전히 밀봉되어야 한다. 이 기밀 밀봉제로 보통 유리를 사용한다. 그러나 이 유리소재는 스택작동온도에서 인근 구성재료와 화학적 반응을 하거나 부식을 시키지 말아야 한다. 부식이나 화학적 반응 없이 기밀밀봉을 할 수 있으나 이웃하는 구성재료에 걸리는 기계적 응력을 효과적으로 이완하는 유리소재를 찾는 일이 남아 있다.이 두 병목기술은 세라믹스 가공에 관련된 기술로서 SOFC 스택을 개발하는 데 있어서 가장 큰 기술적 난제이다. 이 두 기술이 개발되면 기존의 소재로 스택은 제조할 수 있게 된다. 그러나 여기에 중 · 장기적 관점에서 간과할 수 없는 재료관련 문제들이 있다. 위의 두 가공기술을 하드웨어 기술이라 한다면 다음의 재료관련 기술은 소프트웨어에 해당하는 기술이다.

3) 연결재료 : 연결재료는 전자전도도가 높고, 산소 투과도가 매우 낮으며, 공기와 연료사이에서 산소분압 차이로 인한 재료내물성 변화가 없어야 하며, 양 전극 및 밀봉재와 서로 반응을 하지 말아야 하며, 기계적 강도가 크되 반응가스가 흐르는 통로를 만드는 등 기계적 가공이 용이해야 한다. 현재로는 금속합금과 세라믹스산화물 두 후보소재가 세계적으로 사용되고 있으나 각자 상대적인 결점을 가지고 있다. 보다 경제적인 대체소재의 탐색이 요구되고 있다.

4) 최적재료 : 지금까지 가장 널리 채택되고 있는 단전지 구성재료는 전해질로서 Zr0.84Y0.16O1.92(YSZ), 양극으로 La1-xSrxMnO$_3$, 음극으로 Ni/YSZ이다. 그러나 소재가 항상 그러하듯이 서로 다른 소재를 서로 접촉하여 고온에서 사용하기 때문에 이들은 결코 이상적인 소재는 될 수 없다. 따라서 기존소재를 대체할 보다 이상적인 구성재료가 전 세계적으로 탐색되고 있다. 위에서 열거한 고체산화물 연료전지 개발을 위한 병목기술들은 차례대로 개발되리라 생각되며, 향후 가정용에서부터 상용화가 빠른 시일 내에 이루어질 것으로 사료된다. 자동차용 고체산화물 연료전지는 앞에서도 언급하였다시피, 소형화, 진동, 열적 안정성 및 내구성 등이 고려되어야 하며, 시스템 구성에 있어서도 아직은 많은 문제점을 가지고 있다. 그러나 이러한 문제점들은 기술적인 측면에서 다각적으로 고려된다면, 즉 기계전공자와 전기/전자 전공자, 그리고 세라믹전공자, 화학전공자가 서로 협력하여 연구한다면, 가까운 미래에 해결될 것이다. 그러기 위해서는 정부에서의 정책적인 지원뿐만 아니라, 관련되는 대기업들의 참여가 요구되며, 소재개발과 관련된 중소업체의 육성, 그리고 신소재개발과 관련된 끊임없는 대학 및 연구소들의 연구가 필요하다.