

고체산화물 연료전지의 원리와 개발 현황

글 ■ 김재동 / 한국가스공사 연구개발원 이용기기연구센터, 선임연구원
■ 박달령 / 한국가스공사 연구개발원 이용기기연구센터, 선임연구원

e-mail ■ nature@kogas.or.kr
e-mail ■ drpark@kogas.or.kr

이 글에서는 고체산화물 연료전지(SOFC)의 소개 및 작동원리에 대하여 알아보고, 세계적인 개발현황을 살펴본다.

연료전지(SOFC)는 산화제와 연료의 전기 화학반응을 이용한 발전장치로서 연료의 화학에너지를 열·기계적인 에너지로 전환되는 과정을 거치지 않아 기존 장치에 비하여 발전 효율이 높고, 환경 보존성이 우수하여, 미래의 전원으로 현재 많은 연구가 진행되고 있다. 다양한 종류의 연료전지가 개발되고 있으며, 사용되는 전해질에 따라 인산형 연료전지(PAFC), 고분자전해질형 연료전지(PEMFC), 용융탄산염 연료전지(MCFC), 고체산화물 연료전지(SOFC) 등으로 나눌 수 있다. 이들 연료전지는 PEMFC가 약 80°C 부근, PAFC가 약 200°C 부근, MCFC는 약 650°C 부근, 고체산화물 연료전지는 800°C 부근의 작동범위를 갖는다. 이 중에서 구성소재가 모두 세라믹과 금속의 고체로 이루어진 SOFC는 효율이 가장 높을 뿐만 아니라, 연료선택의 다양성 및 폐열의 사용에도 장점을 가지고 있어, 1~5kW의 가정용 연료전지 및 200kW급 이상의 가스터빈과의 열병합발전에 적용될 수 있다.

SOFC의 작동원리

SOFC는 전기화학적 에너지 변환장치로서

전기를 생산하는 기본적인 단위전지는 전해질, 공기극(cathode), 연료극(anode)으로 구성된다. 그림 1은 SOFC의 작동원리를 나타내는 그림으로서 전자현미경 이미지는 단위전지의 단면을 보여주고 있다. 단위전지는 공기극, 전해질, 연료극으로 구성이 되고, 전자현미경 이미지와 같이 공기극과 연료극은 공기나 수소가 쉽게 확산될 수 있도록 약 30% 정도의 기공률을 보이고, 전해질은 수소와 공기의 직접적인 반응을 억제하기 위하여 치밀한 구조를 보이고 있다. SOFC의 작동원리는 다음과 같다. 공기가 공기극에서 전기화학적으로 환원되면서 산소이온을 생성되고, 생성된 산소이온은 전해질의 공공을 통하여 확산되고, 수소가 연료극에서 산소이온과 결합하여 전기화학적으로 산화되면서 전자를 내어놓고, 물을 생성시킨다. 연료극의 산소분압을 10^{-17} 기압 정도로 예상하고, 공기의 산소분압을 0.21기압으로 하면 한 개의 단위전지에서 약 1V의 전압을 얻을 수 있다. 그림 1에서와 같이 가스유로가 형성되어 있는 인터커넥터를 이용하여 단위 전지를 직렬로 적층하면, 약 3V의 전압을 얻을 수 있고, 전류는 전극의 면적에 비례하여 증가하게 된다.

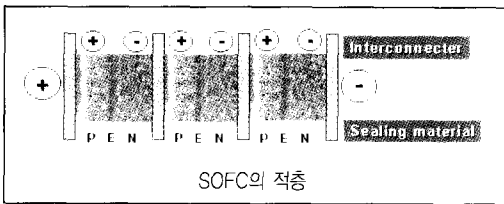
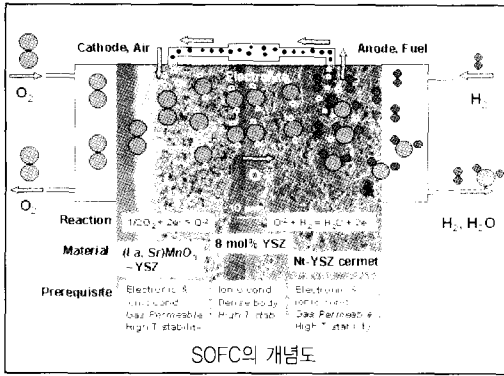


그림 1 SOFC의 작동원리

SOFC의 각 구성성분이 갖추어야 할 물성을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고체 전해질(electrolyte)
 - 산소 이온의 전도성은 크나 전자전도성은 거의 없어야 한다.
 - 공기극·연료극과 잘 접합하여야 하고, 가스가 통과하지 않도록 치밀해야 한다.
 - 고온(800°C~1000°C)의 산화·환원 조건에서 화학적 안정성이 우수해야 한다.
 - 대표적인 재료는 YSZ(Yttria stabilized Zirconia)이다.
- 2) 공기극(cathode)
 - 산소가 확산되도록 다공성이고, 전자 및 산소이온 전도성이 우수해야 한다.
 - 산소의 환원반응에 분극저항이 작고, 고온의 산소기류하에 상안정성이 우수해야 한다.
 - 전해질과의 계면에서 화학적으로 안정해야 하며, 열팽창률이 다른 재료와 유사해야 한다.

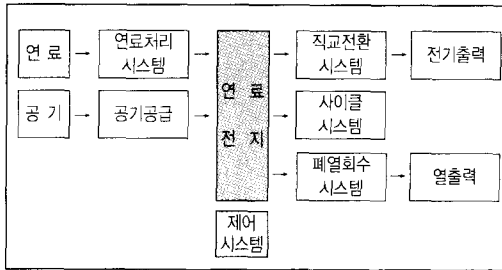


그림 2 SOFC의 시스템

- 대표적인 재료는 (La,Sr)MnO₃와 YSZ의 복합전극이다.
- 3) 연료극(anode)
 - 수소가 확산되도록 다공성이고, 전자 및 이온 전도성이 좋아야 한다.
 - 수소의 산화반응에 분극저항이 작고, 고온의 수소기류하에 상안정성이 우수해야 한다.
 - 전해질과의 계면에서 화학적으로 안정해야 하며, 열팽창률이 다른 재료와 유사해야 한다.
 - 대표적인 재료는 Ni과 YSZ의 서멧이다.
 - 4) 인터커넥터(interconnect)
 - 고온의 산화·환원에 대한 화학안정성이 크고 전자전도성이 우수해야 한다.
 - 가스가 통과하지 않도록 치밀해야 하고, 기계적강도 및 다른 재료와 접착력이 좋아야 한다.
 - 대표적인 재료는 LaCrO₃와 inconnel이다.

SOFC의 시스템 구성

연료가스를 도입하고, 최종으로 AC 전력을 생산하기 위해서는 SOFC 스택뿐만 아니라, 스택에 가스를 공급하는 연료처리장치, SOFC에서 생산된 DC전류를 AC로 전환할 직교전환시스템 등의 주변장치들이 필요하다. 그림 2는 SOFC 시스템의 전체적인 구성에 대한 그림이다. 수소가 연료로 사용





될 때, 연료극에 수소가 직접 공급되어 스택이 작동되지만, 도시가스를 연료로 사용될 때는 연료처리 시스템이 필요하다. SOFC의 연료처리 시스템은 탈황장치와 reformer로 구성된다. 도시가스는 대부분 CH_4 로 구성되어 있으나, 도시가스의 누출을 후각으로 감지하기 위하여, 두 종류의 부취제가 첨가된다. 두 종류는 석탄가스 냄새가 나는 THT(Tetra hydro thiophene)과 달걀 썩는 냄새가 나는 TBM(Tertiary Butyl Mercaptan)으로, THT와 TBM은 모두 황성분을 포함하고 있다. 이 같은 황 성분이 제거되지 않고, reformer에 공급되면, reformer의 금속 성분이 황으로 피독되고, reformer의 성능이 점차 감소되는 문제점이 있다. 그래서 탈황장치를 이용하여 도시가스에 함유된 황성분을 제거하고, reformer에 공급된다. reformer은 CH_4 가 주성분인 hydrocarbon성분을 촉매를 이용하여 수소로 전환하는 장치이다. CH_4 가 직접 스택으로 공급되면, 연료극의 Ni이 CH_4 의 C성분으로 덮여, 성능이 감소되는 문제점이 있다. 그래서 CH_4 와 H_2O 를 동시에 공급하는 steam reforming 방법이나, CH_4 와 O_2 를 동시에 공급하는 catalytic partial oxidation(CPO) 방법을 이용하여 CH_4 를 H_2 로 전환시킨다. 즉 도시가스는 탈황장치에서 황성분인 부취제가 제거되고, reformer에서 CH_4 가 H_2 로 전환된 후, 스택의 연료극에 공급된다. reformer에서 나온 가스에는 CO가스가 포함되는데, PEMFC와 PAFC의 경우, 수십 ppm의 CO가스로도 스택의 연료극부분이 CO로 피독되어, 성능이 감소하는 문제점이 있다.

그래서 PEMFC 와 PAFC는 CO를 10ppm 이하로 제거하는 CO 제거장치가 요구된다. 그러나 SOFC의 경우, CO가스도 수소와 마찬가지로 연료로 사용되기 때문에 CO 제거장치가 필요하지 않아, 연료처리 장

치가 단순해지는 장점이 있다. 또한 최근에는 reformer를 사용하지 않고, 직접 CH_4 을 연료극에 사용하여 작동시키려는 연구가 진행 중에 있다. 위와 같은 방법으로 도시가스에서 수소를 생산하여, 연료극에 공급하고, 공기는 대기 중의 공기를 이용하여 공기극에 공급된다. 공급된 수소와 공기를 이용하여 SOFC 스택에서 DC 전기를 생산하고, 생산된 DC 전기는 직교류 인버터에서 AC 전기를 생산하여 가정에서 사용하게 된다. SOFC 스택의 온도는 $800^{\circ}C \sim 1000^{\circ}C$ 로, SOFC 스택에서 반응되고 배출되는 가스는 고온이기 때문에, 배가스를 이용하는 폐열처리 시스템이 존재한다. 각 연료전지의 작동 온도는 PEMFC가 $80^{\circ}C$ 부근, PAFC가 약 $200^{\circ}C$ 부근, MCFC는 약 $650^{\circ}C$ 부근이어서, SOFC는 고온의 폐열을 가장 잘 이용할 수 있는 장점이 있다. SOFC 스택에서 배출되는 가스는 공기극에 공급되는 공기를 예열하는 등, 내부의 모든 예열장치를 예열하는 데 사용된다. 또한 이 폐열을 이용하여 가정에 공급되는 온수를 사용할 수 있고, 배가스와 물의 온도차가 크기 때문에 열교환기가 매우 작아지는 장점이 있다.

SOFC의 발전시스템의 개발 현황

고온에서 작동하는 SOFC는 크게 세 분야로 적용 가능하다. 가정에 전기를 공급하는 가정용 연료전지(RPG)와 가스터빈과 SOFC의 복합발전을 이용한 대형발전(FC-GT) 그리고 자동차의 보조전원(APU)으로 이용될 수 있다.

가정용 발전(RPG)

열과 전기를 동시에 필요로 하는 수 kW급 소규모 발전시스템의 경우, 대량 생산에 의한 원가절감 효과가 빨리 나타나 가장 시장 진

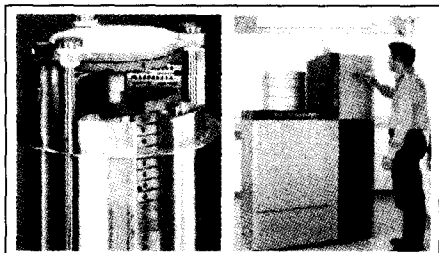
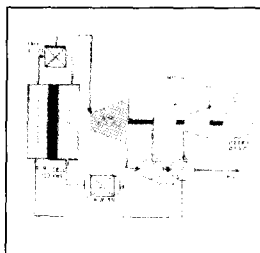


그림 3 Sulzer Hexis 사의 1kW급 가정용 SOFC의 스택과 시스템



그림 4 Siemens-Westinghouse 사의 220kW급 복합발전



입이 빠르게 진행될 것으로 예상되고 있다.

그림 3은 가정용 SOFC 시스템이다. SOFC 가정용 시스템의 선두주자인 Sulzer Hexis는 2010년 미국과 유럽의 분산형 발전 시스템의 사장규모를 12billion USD로 예상하며, '90년대 초부터 개발을 시작하였다. 가정용 SOFC 시스템은 기존의 도시가스의 인프라를 그대로사용하여 가정에 열과 전기를 공급할 수 있으며, 현재 전 세계에서 현장시험이 진행되고 있다. 그림 3의 Sulzer Hexis 사의 가정용 SOFC도 그림 2와 같이 SOFC 스택, 연료처리장치, 폐열처리시스템, 직교류인버터, 제어장치 등으로 구성되어 있다.

대형발전

대형발전에서는 SOFC과 가스터빈의 병합발전이 주요한 대안으로 받아들여지고 있고, SOFC-가스터빈(FC-GT) 하이브리드 시스템은 고효율 저공해 발전 방식으로 인정되어 미국의 21세기 연료전지 개발 프로그램의 일부로 개발이 추진 중에 있다.

그림 4는 SOFC 원통형스택과 가스터빈을 연계시킨 220kW Siemens-Westinghouse 사의 발전시스템으로 실증시험을 진행 중에 있다. SOFC 내의 반응은 고압에서 이루어지며, 가압공기는 압축기(가스터빈의 구성부)에서 공급된다. 연료전지에서는 직류전력이 생산되며, 인버터를 통하여 교류로

전환된다. SOFC의 작동온도는 약 1,000°C로, 반응을 끝낸 가스는 터빈으로 보내져서 동력을 발생시키고, 발생된 동력으로 압축기를 구동하고 여분은 교류전력을 생산한다. 이와 같이 SOFC와 터빈은 단순결합이 아닌, 서로 구성부를 나누는 복합(hybrid)에 의하여 고효율화를 달성한다.

자동차 보조전원(APU)

SOFC의 자동차 용도로는 보조기기용 전원 APU(Auxiliary Power Unit)이 고려되고 있다. 최근의 자동차에는 에어컨을 비롯 각종 파워보조기능, 액티브 서스펜션 등 차

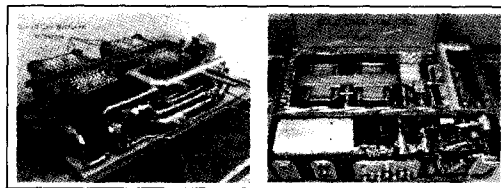


그림 5 Delphi 사의 5kW급 APU시스템

내의 전력수요가 커지고 있고, 이를 배터리로 충당하려면 용량이 커지는 단점이 있어 SOFC가 유력한 후보가 되고 있다.

그림 5는 5kW급 Delphi Automotive System 자동차 보조전원의 구조와 사진으로, Delphi는 BMW와 함께 자동차 보조전원용 SOFC를 1999년부터 개발 중에 있다. 자동차 보조전원 시스템도 그림 2와 유사한 시스템을 가지고 있으며, 연료로는 자동차에