

# 고체산화물 연료전지 (Solid Oxide Fuel Cell; SOFC) 기술개발 현황

## 1. 서론

제3세대 연료전지라 불리는 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)는 600~1000℃의 고온에서 작동되므로 기존의 연료전지 중 가장 전력 변환 효율이 높다. 따라서 SOFC가 실용화될 경우 화석연료를 전기에너지로 변환시키는 과정에서 CO<sub>2</sub>의 배출을 기존의 발전 방식에 비해 획기적으로 낮출 수 있으며, 이에 따라 미국에서 제시하는 미래 에너지 시스템 Vision 21에도 고온 연료전지로서 SOFC가 사용될 수 있을 것이라 예상하고 있다. SOFC는 고온 작동으로 인하여 200℃ 이하의 온도에서 작동되는 인산 연료전지 또는 고분자전해질 연료전지와는 달리 비싼 백금 촉매를 사용하지 않고도 반응을 가속화시킬 수 있으며, 고온에서 연료극 측에서의 내부 반응이 가능하여 수소 이외에 천연가스 및 석탄가스 등의 다양한 연료를 사용할 수 있다는 장점이 있다. 또한 배출되는 양질의 폐열을 이용한 배열회수 및 복합발전이 가능하여 전체 발전 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다. 특히 고체산화물 연료전지는 용융탄산염 연료전지와는 달리 액체전해질을 사용하지 않으므로 재료의 부식 문제 및 전해질 손실, 보충 문제가 없다는 장점도 있다.

이러한 장점을 인식하여 선진국에서는 SOFC에 대한 연구 개발을 지속적으로 추진한 결과 현재 가장 진보된 형태의 경우 100kW급 발전 시스템의 실증 시험 단계에 이르러 있으며, 다른 형태의 SOFC는 나라별로 구체적인 목표를 설정하여 체계적인 연구 개발을 수행하고 있다. 반면 국내에서는 지난 경제 한파의 영향으로 SOFC 연구 개발이 크게 위축되었다가, 2003년부터 다시 본격적인 연구 개발이 진행되고 있다. SOFC는 앞에서 언급하였듯이 화석연료의 변환에 있어서 기존의 발전 방식 또는 다른 연료전지 발전 방식에 비해 여러 장점이 있어 가까운 장래에 선진국에서 실용화에 이를 전망이다. 이에 따라 기술 종속을 면하려면 반드시 국내 기술을 확보하여야 한다. 따라서 현 상태에서 국내 연구 역량을 결집하여 보다 체계적인 연구 개발을 추진함으로써 국내 고유 기술을 단시일 내에 확보하는 것이 필요하다고 판단된다.

## 2. 고체산화물 연료전지 시스템 개요

### 2-1. 기본원리

일반적인 고체산화물 연료전지의 원리는 Figure 1에 나타난 바와 같다. 산소 이온전도성 전해질과 그 양면에 위치한 공기극(cathode) 및 연료극(anode)으로 이루어져있는 단위전지의 각 전극에 공기와 연료를 공급하면, 공기극에서는 산소의 환원 반응이 일어나 산소이온이 생성되며, 전해질을 통해 연료극으로 이동한 산소 이온은 다시 연료극에 공급된 수소와 반응하여 물을 생성하게 된다. 이때, 연료극에서는 전자가 생성되고 공기극에서는 전자가 소모되므로 두 전극을 서로 연결하면 전기가 흐르게 된다. 고체산화물 연료전지에서 일어나는 반응에 대한 Nernst식은 다음과 같이 표현되며, 여기서 E°는 표준 전위이고, E는 평형전위를 나타낸다.

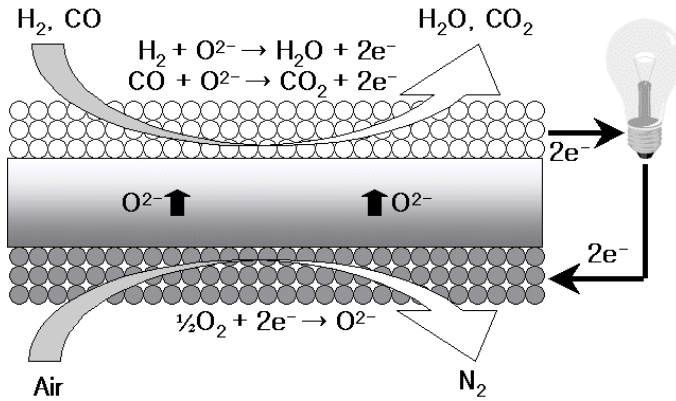


Figure 1. 고체산화물 연료전지의 원리

$$E = E^o + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \quad (1)$$

실제로 고체산화물 연료전지에서 얻어지는 전압  $V$ 는 비가역적 전압 손실에 의하여 평형 전위  $E$ 보다 작게 나타나며 다음과 같은 표현이 가능하다.

$$V = E - (\eta_{ohmic} + \eta_{electrode} + \eta_{Nernst\ loss}) \quad (2)$$

여기서  $\eta_{ohmic}$  은 각 구성요소의 전자 및 이온 전도에 의한 저항분극이며,  $\eta_{electrode}$  는 공기극(  $\eta_{cathode}$  )과 연료극(  $\eta_{anode}$  )쪽에서 발생하는 전극분극으로 이는 다시 전극 재료의 영향을 주로 받는 활성분극 (  $\eta_{act}$  )과 전극의 미세구조에 영향을 받는 농도분극 (  $\eta_{con}$  )으로 세분될 수 있다.  $\eta_{Nernst\ loss}$  는 Nernst 손실로서, 각 구성요소의 전기화학적 특성과는 관계없이 스택 또는 단전지의 구조 그리고 연료기체의 흐름속도 또는 연료 이용율 등에 영향을 받는 분극이다. 이처럼 고체산화물 연료전지에서의 전압 손실은 여러 가지 경로를 통해 일어나며, 일반적으로 전해질의 저항분극과 전극분극에 의한 전압 손실이 가장 큰 비중을 차지한다고 알려져 있다.

## 2-2. 작동 조건

고체산화물 연료전지의 작동 조건은 전지의 출력, 안정성 등의 전지 성능에 큰 영향을 미친다. 따라서, 온도와 압력을 포함한 여러 작동 조건은 구성요소, 연료, 주변 장치와 같은 발전 시스템의 구성요소뿐만 아니라 연료전지의 안정성 및 그 응용분야에 따라서 결정되어진다.

고체산화물 연료전지는 주로 600-1000℃에서 작동되며, 이는 현재까지 알려진 연료전지의 작동온도 중 가장 높은 것이다. 작동온도가 높은 주된 이유는 고체산화물 연료전지의 전해질 및 전극이 고온에서만 충분한 전기전도도를 나타내기 때문이다. 고체산화물 연료전지에서 일어나는 전체 반응 ( $H_2 + 1/2 O_2 = H_2O$ )에 대하여 열역학적 효율 ( $\Delta G/\Delta H$ )을 계산하면 온도가 높아질수록  $\Delta G$ 가 감소하여 효율이 낮아짐에도 불구하고, 실제 시스템의 효율은 온도가 높아질수록 증가하는 경향을 보인다. 그 이유는 온도가 높아질수록 전기화학반응이 가속화되고, 각 구성요소의 저항이 감소하여 비가역적 손실에 해당하는 식 (2)의 분극 저항을 감소시키기 때문이다. 또한 고체산화물 연료전지에서 얻어지는 출력은 다른 연료전지와 마찬가지로 전류밀도에 따라 증가하다가 최대점을 지나 다시 감소하는 경향을 나타내는데, 이는 식 (2)의 분극 분극저항에 의한 손실이 커지기 때문이다. 따라서 작동온도 및 전류밀도가 높아질수록 연료전지의 효율은 증가한다. 그러나 이와 같은 운전 조건하에서는 고체산화물 연료전지의 각 구성요소의 구조적, 화학적 안정성에 악영향을 미치기 때문에 스택의 안정적인 장시간 운영을 위하여 0.2-0.4 W/cm<sup>2</sup>의 출력밀도를 유지하는 범위에서 적합한 온도와 전류밀도를 채택하여 운전하고 있다.

고체산화물 연료전지는 상압뿐만 아니라 가압 조건에서도 운전이 가능하여 다음과 같은 많은 장점을 가진다. 즉, 고체산화물 연료전지의 작동 압력이 증가하면 평형 전위가 증가할 뿐 아니라 전극 반응에서 발생하는 전압 손실이 감소하여 전체적으로 연료전지의 성능이 증가뿐만 아니라 고온, 고압의 배가스를 이용하는 가스터빈을 연계하여 전체 발전 시스템의 효율을 증가시킬 수도 있다. 그러나 가압 운전에는 우수한 성능의 밀봉이 필요하기 때문에 상대적으로 밀봉기능이 취약한 평판형보다는 원통형 고체산화물 연료전지에서 가압 운영을 하며, 원통형 고체산화물 연료전지는 15기압까지 성능 평가가 수행된바 있다.

### 3. 국가별 기술 개발 동향

현재 본격적으로 고체산화물 연료전지 개발에 참여하고 있는 나라는 Westinghouse SOFC의 상용화를 추진중인 미국을 선두로 하여 범국가적인 사업으로 추진하고 있는 일본, 그리고 EC 및 정부 프로그램으로 소규모 개발 사업을 추진하고 있는 스위스, 영국, 덴마크 등의 유럽 국가가 있다. 각 나라별 SOFC 개발 현황을 간략히 요약하면 다음과 같다.

#### 3-1. 미국

미국에서 현재 DOE의 지원은 Westinghouse의 원통형 고체산화물 연료전지에만 집중되고 있다. 원통형 SOFC는 가장 오랜 기간 연구 개발이 진행되어 현재 100kW 발전 시스템의 실증 시험이 수행되고 있으며 최근 Siemens의 발전 분야를 흡수하여 250kW급 열병합 발전 모듈을 개발하고 있다. 미국의 연료전지 개발 목표는 2015년까지 경제성 있는 연료전지 발전 시스템을 실용화시킨다는 것이며, 구체적인 목표로 스택 제조 가격 \$100/kW, 발전 시스템 제조 가격 \$400-600/kW, 전체 효율 70-80%를 제시하고 있는데, Siemens Westinghouse에서도 제조 원가를 절감하여 실용화를 앞당길 수 있도록 기술 개발을 추진하고 있다. 한편 평판형 SOFC의 경우 미국에서는 GRI 및 국방성 등의 지원으로 소규모 특수 목적의 발전 시스템 개발 사업이 진행 중에 있다.

### 3-2. 일본

일본은 범국가사업으로 SOFC 개발을 추진하여 왔으며 평판형 SOFC 개발에 집중하였으나 1997년 중간 평가를 통하여 보다 신뢰성 높은 원통형 SOFC 개발을 병행하도록 하였다. 현재 SOFC 모듈 개발 및 재료 기초 기술 개발로 나뉘어 연구가 추진 중에 있는데, 모듈 개발에는 TOTO, 구주 전력 등의 참여 하에 wet process에 의한 원통형 SOFC가 개발 중에 있다. 재료 및 기초 기술 개발 분야에는 그동안 문제가 되었던 평판형 SOFC스택의 신뢰성 시험 및 셀 재료의 원가 절감을 위한 방안이 강구되고 있으며 다수의 전력회사, 가스회사 및 셀 제작회사들이 참여하고 있다. 현재 진행되는 뉴선샤인 프로젝트에서는 용량 2-3kW의 SOFC 모듈을 개발할 계획이며, 성능 감소율은 1%/1000시간을 넘지 않도록 설정하고 있다.

### 3-3. 유럽

90년대 유럽에서는 EC 및 국가사업으로 SOFC 개발을 추진하였으나 현재 본격적인 SOFC 개발에 참여하는 회사는 영국의 Rolls-Royce와 스위스의 Sulzer-Hexis이다. Rolls-Royce에서는 1992년부터 평판형 및 원통형 SOFC의 장단점을 보완한 집적형 SOFC 개념을 이용하여 연구 개발을 추진하고 있으며, 현재 1kW급 스택의 성능 향상 및 제작 원가 절감을 목표로 개발을 진행하고 있다. 스위스의 Sulzer-Hexis에서는 열 및 전기를 동시에 생산하는 가정용 열병합 발전 시스템의 실용화 기술을 개발하고 있으며, 수년 내에 가정용 1kW 발전 시스템을 시판할 예정에 있다. 한편 독일의 Siemens는 1998년까지 10kW급 평판형 SOFC 스택을 집중 개발한 바 있으나 1999년 초 개발을 중단하였으며, 현재 미국 Westinghouse와 발전 분야를 합병하여 보다 대용량의 발전 시스템 개발이 가능한 원통형 SOFC 개발을 추진하고 있다. 네덜란드 및 덴마크에서도 국가 지원으로 셀 및 스택 개발이 추진되었으나 현재에는 고성능 셀 개발에만 연구를 집중하고 있다.

### 3-4. 한국

국내에서의 고체산화물 연료전지 개발은 1994년 시작된 대체 에너지 개발 사업으로 정립되어 현재 제 1단계 사업이 종료된 상태이다. 1단계 사업(1994-1997)은 쌍용중앙연구소 주관으로 여러 연구소 및 대학의 참여 하에 추진되었으며, 공소결에 의하여 10cm×10cm 크기의 평판형 셀을 제작하고, 소형 스택을 구성하여 운전하는 수준에서 연구 사업이 종료되었다. 이후 전력연구원, KIST 및 에너지기술연구소에서는 자체적으로 다양한 방법에 의하여 셀을 제작하고 성능을 평가하는 연구가 수행되어오다가 2003년부터 대체 에너지 개발 사업으로 본격적인 개발을 다시 시작했다. 현재 1kW급의 평판형 스택을 제작 운전하는 수준에 이르렀다. 각 연구 기관별로 현재 기술 현황을 살펴보면 다음과 같다.

#### ○ 전력연구원

중저온형 고체산화물 연료전지를 개발하기 위한 목적으로 전해질의 두께를 20 $\mu$ m이하로 조절한 연료극 지지형 평판형 셀을 개발하고 있으며 현재 10×10 cm<sup>2</sup> 크기의 셀을 이용한 1kW급 스택을 제작하여 700-800℃에서 성능을 측정하고 성능을 개선하고 있다. 가정용 고체산화물 연료전지를 개발하고 있다.

#### ○ KIST

KIST 세라믹스부에서는 전력연구원의 경우와 마찬가지로 연료극 지지형 평판형 셀을 개발하고 있으며, 10×10 cm<sup>2</sup> 크기의 셀을 제작하여 800-900℃에서 성능을 평가한 바 있고

최근에는 1kW급 스택을 제작하여 실험한 바 있다.

○ 에너지기술연구소

에너지기술연구소에서는 저온에서 작동하는 원통형 셀을 개발하고 있으며 현재 원통 지지체 제작 및 전해질 코팅 기술이 완료단계에 있다. 전해질 지지형 평판형 셀 개발도 아울러 추진 중에 있다.

○ 기타

서울대를 비롯한 대학에서는 고체산화물 연료전지 구성 요소의 특성에 대한 연구가 이루어 졌으며 진극 재료 및 반응에 관한 좋은 연구 결과를 산출한 바 있다. 그 이외에도 밀봉 재료, 저온형 전지 재료에 대한 기본 연구가 대학에서 수행된 바 있다.

이상에서 알아본 바와 같이 대용량 발전용으로 원통형 SOFC, 소규모 특수 목적으로 평판형 SOFC 개발이 추진되고 있다. 현재 각 연구 기관별 SOFC 스택 개발 현황은 표 1과 같으며, SOFC 형태별 연구 동향을 보다 구체적으로 다음에 정리하였다.

#### 4. 결론

이상에서 살펴본 바와 같이 선진 각국은 고체산화물 연료전지의 개발을 위해 정부 및 기업 차원에서 막대한 연구 자원을 장기간 지원해 왔으며, 앞으로도 계속할 전망이다. 이에 비해 국내 SOFC 기술은 전반적으로 낙후되어 있으나 일부 기술 격차가 작은 기술들을 효율적으로 보완하고 개발한다면 국내 연구 개발 역량으로 미루어 단시일 내에 좋은 성과가 기대된다. 특히 다른 연료전지에 비해 소규모로도 시장 진입이 가능하고 이 경우 경쟁 기술에 비해 특성이 우수할 것으로 예상되므로 보다 체계적인 연구 개발 사업을 추진하여 기술 개발을 가속화시킬 필요가 있다.

표 1 SOFC 스택 개발 현황.

스택 제작 기관	국가	스택 구조		작동 온도	개발 현황
		단위전지 형태	연결 재료		
Siemens Westinghouse	미국	원통형 (공기극 지지형)	LaCrO <sub>3</sub> Ni felt	1000℃	100kW system 250kW FC/GT system
Ztek	미국	원반형	-	900 ~ 1000℃	가압 25kW module 250kW FC/GT system
Misubishi 중공업	일본	원통형 (band cell 연결형)	NiAl/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	900℃	가압 10kW module
Chubu 전력 Misubishi 중공업	일본	평판형 (Mono block layer built type)	LaSrCoO <sub>3</sub>	1000℃	5kW module 25kW 개발 예정
TOTO, Kyushu 전력	일본	원통형 (공기극 지지형)	LaCrO <sub>3</sub>	1000℃	1kW stack wet process
Tokyo Gas	일본	평판형	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> LaCrO <sub>3</sub>	1000℃	1.5kW stack
Sulzer Hexis	스위스	평판형	Cr5Fe1Y2O3	950 ~ 1000℃	1kW급 가정용 system
SOFCo	미국	평판형	LaCrO <sub>3</sub>	800 ~ 1000℃	천연가스 및 액체연료 사용 2kW급 stack
AlliedSignal	미국	평판형 (연료극 지지형)	금속	600 ~ 800℃	군용 500W system
TMI	미국	평판형	금속	1000℃	군용 500W system
Osaka Gas Murata,	일본	평판형	(LaSr)CrO <sub>3</sub> Ni felt	950 ~ 1000℃	1kW 스택
Ceramic Fuel Cell	호주	평판형	CrFeY <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	900 ~ 1000℃	1kW 스택
Riso 연구소	덴마크	평판형	La(Sr)Cr(V)O <sub>3</sub>	1000℃	0.5kW stack
Julich 연구소	독일	평판형 (연료극 지지형)	Cr5Fe1Y2O3	750 ~ 950℃	10-cell (10×10 cm <sup>2</sup> ) stack
Fuji 전기	일본	평판형 (연료극 집전판 지지형)	Ni-Cr LaSrMnO <sub>3</sub>	950℃	600 cm <sup>2</sup> 셀 3kW 스택
Murata	일본	평판형 (동시소결형, multiple cell array)	LaCrO <sub>3</sub> or Ni-Cr alloy	1000℃	5-cell (10×10×4 cm <sup>2</sup> ) stack
Tonen	일본	평판형	LaSrCoO <sub>3</sub>	1000℃	5kW system
Sanyo	일본	평판형	Inconel	1000℃	2kW module
NTT	일본	평판형 (연료극 지지형)	LaCaCrO <sub>3</sub>	1000℃	2-cell (6 cm <sup>2</sup> ) stack
Siemens	독일	평판형 (multiple cell array)	CrFeY <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	850 ~ 950℃	20kW system 1999 개발 중단
Donier	독일	평판형	LaCrO <sub>3</sub>	1000℃	2kW module 1997 개발 중단
쌍용	한국	평판형 (동시소결형)	Inconel CrFeY <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1000℃	80W stack 1998 개발 중단