

## 고체산화물 연료전지 발전시스템의 최근 연구 개발 동향

표성수 · 임탁형 · 이승복 · 박석주 · 송락현\* · 신동렬

한국에너지기술연구원 연료전지연구단

(2009년 2월 27일 접수: 2009년 3월 31일 채택)

### Recent R&D Trends of Solid Oxide Fuel Cell Power Generation System

Seong-Soo Pyo, Tak-Hyoung Lim, Seung-Bok Lee, Seok-Joo Park, Rak-Hyun Song\*, Dong-Ryul Shin

Fuel Cell Research Group, Korea Institute of Energy Research, Yuseong, Daejeon, 306-110, Korea

(Received February 27, 2009 : Accepted March 31, 2009)

#### 초 록

본 논문에서는 고체산화물 연료전지의 스택 제조 및 시스템 연구개발의 최근 연구동향을 살펴보고 있다. 고체산화물 연료전지는 연료의 화학적 에너지를 전기적 에너지로 변환시킬 수 있는 친환경, 고효율의 전기화학장치이다. 고체산화물 연료전지 발전시스템은 응용분야에 따라 중대형 분산발전, 가정용 열병합 발전, 보조전원 및 휴대용 발전 시스템으로 구분할 수 있으며, 10 kW급 이상의 SOFC 발전시스템의 경우 원통형 셀로 구성된 발전시스템이 연구개발의 주를 이루고 있다. 더불어, SOFC 발전시스템 연구개발의 경우 매년 증가하는 세계 전력소비량에 대응하기 위해 발전시장에 진입 가능한 고성능, 장수명의 SOFC 소재 및 발전시스템에 R&D 노력이 집중되고 있다.

**Abstract :** This article reviews recent R&D trends in SOFC development with an emphasis on industries that can produce the SOFC stack and power generation system. SOFC is an electrochemical device that can convert the chemical energy of fuel into the electrical energy with environment friendly system and high efficiency. SOFC power generation system could be classified as the portable power generation system, auxiliary power unit(APU), residential power generation(RPG) and large size distributed power generation. In the case of more than 10kW system, the major R&D trends are focused on the tubular type SOFC system with high efficient and long term stability to meet the commercialization of SOFC power generation system.

**Keywords :** SOFC, Tubular, R&D, Power generation system

#### 1. 서 론

세계적으로 전력발전설비는 고효율화와 함께 규모의 거대화를 통한 집중 관리방식이 선호되었으며, 이를 목적으로 동력장치의 기술 개발이 이루어져 왔다. 이러한 대규모 설비를 중심으로 구성된 중앙관리 시스템은 효율적 시스템 관리라는 측면에서는 큰 장점을 가지고 있으

나, 근래에 들어서는 몇 가지 결정적인 문제점들로 인하여 더 이상의 규모 확대에 대한 당위성에 의문이 던져지고 있다. 대표적인 문제점으로 대규모 설비는 건설 기간 등을 고려할 때 폭발적으로 증가하는 전력 수요를 정확히 예측하여 대처하기 힘들고, 장거리 송전 등으로 인한 부가적 손실이 크며, 순간적 부하 증가 등에 대처하기 힘들다는 것이다. 이러한 문제점을 보여주는 예로는 최근 미국 캘리포니아 주에서 일어난 바 있는 대규모 정전사태이다. 이 사태에는 물론 여러 가지 다른 사회적, 경

\*E-mail: rhsong@kier.re.kr

제학적 문제가 내포되어 있긴 하지만, 근본적으로 대규모 발전 및 송전 설비에 의존한 시스템이 지니고 있는 위와 같은 한계들이 실제로 큰 문제를 야기할 수 있음을 단적으로 보여주는 예라고 하겠다.

이에 따라 앞에 언급된 문제점을 극복하고자 전력 공급 구조도 중앙 집중 발전형으로부터 분산 발전형으로 변화되고 있다. 이러한 차세대 전력원의 요구 조건으로는 기존의 전력원에 비하여 열효율이 높아 경제성이 우수하여야 하며, 친환경적이어야 한다. 공해 배출물이 적어야 한다는 것은 이미 대규모 발전설비를 비롯한 모든 산업 현장에서 지켜져야 할 필수 사항이지만, 특별히 전력의 수요처에 가깝거나 바로 수요처에 위치하여야 하는 소형 시스템에서는 그 요구조건이 더욱 강화될 것은 자명하다.

연료전지의 기본원리는 탄화수소계열의 연료에 포함된 수소와 공기 중의 산소를 전기 화학적 반응을 통해 직접 전기를 생산하는 것으로, 1960년대 미국의 우주선 전력공급용 연료전지 발전기 개발이 기술개발의 동기가 되었으며, 미국, 일본 등의 선진국에서는 1970년대 초기부터 실용화를 위한 연구개발을 본격적으로 시작하였다. 선진국의 경우 현재까지 SOFC 발전시스템은 주로 분산 전원용, 대형발전소용으로 기술이 개발되어 왔으나 최근에는 가정용 소형 열병합 발전시스템, 자동차용 및 이동전원용으로도 많은 연구개발이 진행되고 있다.<sup>1)</sup>

특히 3세대 연료전지인 SOFC는 첫째, 종래의 다른 연료전지에 비해 복잡한 외부 개질 시스템이 필요 없으며, 둘째, 백금 등의 귀금속 전극촉매를 사용하지 않고 셋째, 액상 전해질에 의한 부식문제가 발생하지 않는 등 저온형 연료전지에서 발생하는 여러 가지 운전상의 문제점을 최소화시킬 수 있다는 장점과 동시에 발전시스템으로 3단계 복합발전(고체산화물 연료전지 발전-가스터빈 발전-증기터빈 발전)이 가능하다. 전기발전온도는 500°C 이상에서 이루어지며, 적절한 단열을 통해 운전온도 유지가 가능할 뿐 아니라 다양한 연료를 사용할 수 있으며 운전온도 범위가 넓다. 더욱이 가스터빈과 복합발전시 거의 70%에 가까운 전기발전효율을 가지고 있기 때문에 미국, 일본 등 선진국에서 기술개발에 박차를 가하고 있다. 이러한 다양한 장점을 갖고 있는 반면에 대부분의 구성요소들이 세라믹과 고온 금속소재로 구성되어 있고, 고온에서 운전되는 전기 화학적인 신 발전 기술이기 때문에 전극, 전해질, 연결재 등의 구성요소 및 전지의 설계요소와 관련되어 여러 가지 기술적인 문제점을 갖고 있다. 또한 선진국에서 실증중인 발전시스템의 경우 전극, 전해질, 연결재의 제조가 EVD, 플라즈마분사법 등 고가의 건식공정으로 이루어져 있어 실용화시 경제성 확보에 어려움을 겪을 것으로 판단되며, 실용화를 앞당기기 위해서는 저가의 제조공정 기술이 개발되어야 할 것이다.<sup>2)</sup>

이와 관련된 국내의 기술은 선진국과 상당한 격차를 나타내고 있으며, 특히 SOFC는 기반기술 연구 수준에 머물고 있는 상태이다. 더욱이 한국 연료전지의 요소기술, 연료전지의 설계 및 제작 기술, 발전시스템을 일본과 비교해 볼 때 약 10년 정도의 차이가 나는 것으로 판단되며, 선진국과의 기술격차를 빠른 시간 내에 줄이기 위해서는 이들 핵심기술의 개발이 시급히 이루어져야 할 것이다.

본 원고에서는 SOFC의 발전시스템 기술내용을 중심으로 국내의 기술개발 현황 및 전망 등을 기술하였다.

## 2. 고체산화물 연료전지의 원리 및 특성

### 2.1. 고체산화물 연료전지의 원리

SOFC는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 중앙에 전해질이 있고, 양쪽에 전극이 있는 구조로 되어있다. 전해질은 치밀하여 가스를 투과시키지 않아야 하며, 전자전도성은 없으나 산소이온 전도성은 높아야 한다. 반면에, 전극은 가스가 잘 확산되어 들어갈 수 있는 다공질이어야 하며 높은 전자전도성을 가지고 있어야 한다. 이처럼 치밀한 전해질을 사이에 두고 연료극에는 수소를 함유한 연료 가스를, 반대극에는 공기를 흘려주어 산소 분압의 차이를 유지해 주면, 전해질을 통해 산소가 이동하려는 구동력이 형성된다. 전해질은 전자전도성이 없고 이온전도성만 가지고 있으므로, 공기극 쪽에서 전자를 받아 이온화된 수소이온이 전해질 막을 통과하여, 연료극 쪽에서 전자를 방출하고 수소가스와 반응하여 수증기로 된다. 이러한 반응이 계속 일어나도록 산소와 수소를 계속 흘려주면, 전자는 전극을 통하여 외부의 도선으로 흐르게 된다. 이때 전기에너지가 발생하며, 전기에너지를 인출하여 사용하는 것이 SOFC의 작동원리이다.<sup>3)</sup>

### 2.2. 고체산화물 연료전지의 특성

SOFC는 고온(600~1000°C)에서 운전함으로써 자체적인 발전 효율이 높고(작동온도의 상승에 따라 이론효율은

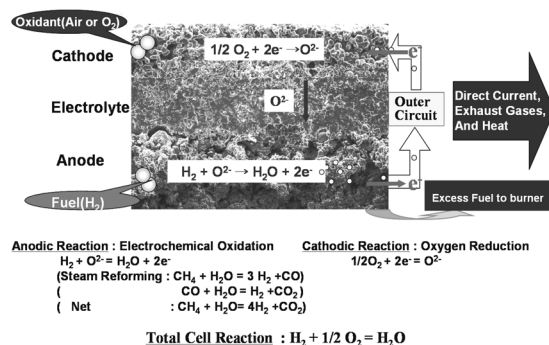


Fig. 1. 고체산화물 연료전지의 기본원리.

감소하지만, 온도상승에 따라 전기저항, 전극반응저항은 작아지므로, 온도 상승에 따른 이론 효율의 감소를 보충할 수 있기 때문에 SOFC의 효율이 저온형 연료전지보다 높다.), 기압 조건에서도 운전이 가능하여 연료전지의 성능이 증가할 뿐만 아니라 고온, 고압의 배가스를 이용하는 가스터빈을 연계하여 발전할 경우 전체 발전시스템의 효율을 70% 이상 증가시킬 수 있다는 장점이 있다. 고온에서 작동되므로 다른 연료전지에서 필요한 귀금속 전극촉매를 사용하지 않고도 반응을 가속화시킬 수 있으며, 연료극 측에서의 내부 개질 반응이 가능하여 개질기를 간략화 할 수 있을 뿐만 아니라, 수소 이외에 천연가스 및 석탄가스 등의 다양한 연료를 사용할 수 있는 특징이 있다.<sup>4)</sup>

SOFC 발전은 전기화학 반응에 의해 발전이 되므로 기존의 연료를 태워서 발전하는 석탄 화력발전에 비하여 NO<sub>x</sub> 배출량이 약 1/38 이며, SO<sub>x</sub>의 배출량도 매우 적고, 소음이 거의 없는 저공해 발전이다. 또한 고효율 발전이므로 기존의 화력발전소에 비하여 CO<sub>2</sub>의 배출량을 50% 정도 줄일 수 있다. SOFC는 모듈화 하여 대량생산이 가능하기 때문에 장소의 제약을 받지 않고, 전력수요지에 적합한 SOFC 발전소를 건설할 수 있다.<sup>5)</sup>

### 3. 국내외 기술개발 동향 및 기술 수준

#### 3.1. 국내 기술동향

1980년대 후반부터 서울대, KAIST 등의 대학과 국책 연구소인 한국에너지기술연구원(KIER), KIST를 중심으로 SOFC 구성요소의 물성에 대한 기초연구가 이루어 졌으며, YSZ를 기본으로 하는 전해질 재료 및 전극반응에

관한 기초 연구결과를 산출한 바 있다.

1994년에 시작된 대체 에너지 개발 사업으로 쌍용중 앙연구소가 기술개발을 추진하여 10 × 10 cm 크기의 평판형 셀을 제작하고 소형 스택을 구성하여 운전하였으나 1997년에 개발을 중단하였다. 이후 국내 SOFC 기술개발은 각 연구소, 대학, 기업 등에서 기초 기술개발, 요소 기술개발, 단전지 기술, 스택기술개발 연구가 독자적으로 진행되었다.

2002년부터는 KIER, KARI, KIMM 을 중심으로 SOFC-마이크로가스터빈 하이브리드 발전시스템 개발이 진행되었으며, 5 kW급 기압 SOFC 발전시스템을 개발하고 마이크로가스터빈과 하이브리드화 하여 성공리에 운전하였으며 2012년까지 대면적(> 1000 cm<sup>2</sup>), 고성능(> 0.6 W/cm<sup>2</sup>) 셀 제조기술 및 양산공정 개발과 고효율(>60%, DC), 고신뢰성(<0.1%/kh) 스택 및 발전시스템 개발을 목표로 연구 중에 있다.

2003년에는 전력연구원(KEPRI)을 주축으로 소용량 가정용 SOFC 개발이 본격적으로 추진되기 시작하였으며 1단계로 2006년에 1kW급 중온형 SOFC 모듈 및 시스템 개발을 완료하였다. 현재 후속 연구로 5 kW급 상업용 열병합 SOFC 발전시스템 개발연구를 수행중이다.

2004년부터는 KIER를 중심으로 자동차 보조전원용 SOFC 발전시스템 개발과제를 수행 중에 있다. KIER은 1 kW급 APU용 SOFC 발전시스템 BOP 개발, 급속기동 APU용 SOFC 스택 기술개발, 1kW급 디젤 리포머 개발 연구를 수행하였으며 2008년 2kW급 평판형 SOFC 시스템 개발에 성공하였다.(Table. 1 참고)

최근에는 저온작동 SOFC 핵심기술 개발과제를 바탕으로 연세대, POSTECH, 고려대, 명지대 등에서 중저온

Table. 1. 국내 SOFC 연구개발 연혁 및 현황

업체	발전용량	형태	비고
한국에너지 기술연구원 (KIER)	5 kW 급 SOFC 발전시스템 개발 (2002-2005)	평판형 스택 (울리히 도입)	산업자원부 신재생 프로젝트형 개발사업
	1 kW 급 APU 용 SOFC 발전시스템 개발 (2004-2007)	원통형 cell	참여기관 : 효성, SAC, 승림카본, 단단, 씨에프
	2 kW 급 관형 SOFC 스택 모듈 개발 (2006-2008)	관형 cell	지식경제부 사업 연구원 기본 사업
삼성전기	원통형 5 kW SOFC 시스템 개발 (2006-2009)	원통형 cell	지식경제부, 차세대사업 자체 개발 과제
삼성 SDI	원통형 수 kW 급 SOFC 스택 모듈개발 (2008-2011)	원통형 cell	자체 개발 과제
포항산업과학연구원 (RIST)	150 kW 급 SOFC 셀 / 스택 제조기술 개발 (2007-2012)	평판형 cell	POSCO 사업 참여기관 : KIST, KIMM, KIER
전력연구원 (KEPRI)	열병합발전용 5 kW 급 SOFC 발전시스템 개발 (2003-2010)	평판형 cell	신재생 에너지 사업 참여기관 : KIER, KIST, KAIST, KICET, 효성 등
한국과학기술연구원 (KIST)	대면적 전극 및 스택 적층 기술 (2004-2012)	평판형 cell	POSCO 사업 지식경제부 핵심원천사업

용으로 활용 가능한 대체 전해질 및 전극재료, 밀봉재, 연결재 개발 및 특성평가에 대한 기초연구가 수행되고 있다. 작동온도의 저온화는 재료선택의 폭을 넓혀 생산 가격을 낮추고, 저렴한 금속분리판 재료를 사용할 수 있다는 장점이 있으며 구성 재료의 열적 열화가 경감되어 시스템의 신뢰성 및 수명을 증가시켜 전체 시스템의 내열 요구도가 완화되므로, 배관, 등 설비비용의 절감효과를 기대하고 있다.

### 3.2. 국내 SOFC 기술수준

SOFC는 고온에서 운전되는 전기화학 발전기술이기 때문에 셀과 스택의 제작 및 운전에 필요한 BOP 등 기술적으로 고려할 점이 많다. SOFC 셀의 경우 700°C 이상의 높은 작동온도로 인한 셀 구성요소의 내구성 문제 및 소재의 선택이 제한적이기 때문에 실용화에 기여하기 위해서는 저온형 고효율 SOFC 셀 제작 기술 개발이 필요하다. 국내 SOFC 기술 수준은 kW급의 스택 및 시스템 제작기술 정도만 보유하고 있으며 발전용 대형 스택을 개발하기 위해서는 안정되고 값싼 공정으로 대형 셀을 제조할 수 있는 기술 및 대형 셀을 제작하기 위한 기반시설이 필요하다.

#### 구성요소 기술

현재, 국내 단전지 제조기술은 많이 확립된 상태이나, 대면적 셀 제조에 어려움을 겪고 있고, 전극 및 전해질 제조 시 사용되는 원료의 대부분을 수입에 의존하고 있기 때문에 대면적 셀 제조공정의 기술개발과 원료의 국산화기술이 필요하다. 현재 실용화 규모의 대면적 단전지 제조기술과 5년 이상의 장기 특성평가기술에 관한 연구개발이 진행될 전망이다.

SOFC는 장기 안정성을 고려할 때 600~800°C에서 작동될 수 있는 중저온형 SOFC의 개발이 필요하다. 그러나 작동온도를 낮추면 내부저항 및 전극분극 증가로 전지성능 감소하는 점이 있기 때문에 ZrO<sub>2</sub>계 전해질보다 산소이온전도도가 더 높은 BiO<sub>2</sub>계, CeO<sub>2</sub>계, LaGaO<sub>3</sub>계 등에 대한 연구와 YSZ를 사용하되 전해질 두께를 줄여 박막화하는 방법으로 내부저항을 낮추려는 연구가 진행되고 있다. 또한 전극분극을 낮추기 위해 전기전도도가 높은 연료극 재료로 Ru-YSZ와 Ni-SDC, 공기극 재료로 La<sub>1-x</sub>Sr<sub>x</sub>CoO<sub>3</sub>에 대한 연구와 LSM-YSZ의 복합체로 삼상계면을 확대하여 물질전이와 전하전이를 증가시킬 수 있는 전극물질 개발 등의 연구가 진행 중이다.

#### 스택기술

현재 SOFC의 국내 기술수준은 5kW가 최고 수준으로 선진국의 250kW급에 비해 매우 낙후된 상태다. 대형 스택이 효율적으로 발전하기 위해서는 스택을 구성하는

각각의 셀에 연료와 공기의 흐름이 균일하게 공급 되어야 하며, 스택 내부의 온도도 균일하게 유지되어야 하므로 이를 위한 연료공급용 매니폴드 및 챔버에 공급되는 가스공급 장치의 적절한 설계 및 제작기술, 전류집전기술, 밀봉기술, 기압시스템 기술 및 여러 분야의 기술이 개발될 전망이다. 또한 스택규모의 증가에 따라 시뮬레이션 설계 기술과 스택의 정상운전에 필수적인 운전온도 제어 기술, 스택설계 개선, 구조 단순화, 효율 개선, 운전 간소화 등의 기술 개발이 진행될 예정이다. SOFC를 대용량 발전용 전원으로 상용화하기 위해서는 스택의 무거운 하중과 충격에 견딜 수 있는 고강도 셀 지지체 제작기술이 요구되며 전류 집전 효율을 증가시키기 위한 집전 및 전기적 연결 기술이 확보되어야 할 것이다.

#### BOP (Balance Of Plant: 주변기기(연료전처리, 전력변환기))관련 기술

BOP 기술은 고온에서 작동하는 SOFC 특성에 적합한 재료 및 부품선정에 주의가 필요하며, 스택의 용도에 맞게 설계 제작되어야 한다. SOFC 개질기는 LNG 연료의 약 75% 정도를 연료극 전단계에서 개질시켜 주는 장치로 저온형 연료전지에 요구되는 90% 이상의 연료 개질기에 비해 제작에 큰 문제는 없으나 개질 조건의 최적화 및 장치 설계 제작 등의 연구가 수행될 전망이다. 전력 변환기 기술 면에서는 연료전지가 대전류 저전압 특성을 가지고 있기 때문에 전력변환 효율을 개선시키는 연구 및 열교환기와 연료전지의 적용기술 시험연구가 진행될 전망이다.

#### 발전 시스템 기술

국내 연료전지 발전 시스템 기술은 아직 개발단계로 종합시스템 설계 및 제작기술과 종합시스템 구성 후 운전 기술 및 계통연계 기술 등에 관한 연구가 진행될 전망이다.

### 3.3. 국내 연구기관 현황

국내의 SOFC 관련 산업은 아직 초보적인 단계이며 상용화된 제품이 없는 실정이다. 따라서 본 절에서는 연구 개발 기관을 중심으로 기술하였다.

#### 한국에너지기술연구원(KIER)

소형 원통형 SOFC 스택으로 수송기기/산업용 보조전원장치 및 가스터빈과의 하이브리드 대형복합발전 시스템 개발에 주력하고 있으며, 평관형 SOFC 스택용 원천기술 개발도 추진 중에 있다. 가스터빈/연료전지 복합발전용 SOFC 발전시스템 개발의 경우, 5kW급 SOFC 스택 본체를 울리히(독일)에서 도입하여, 상업에서 연료로서 수소를 주입해 약 8.1kW의 출력을 발생시키는 SOFC 발전시스템을 개발한 이력이 있다(Fig 2). 평관형 SOFC 스택 및 스택모듈

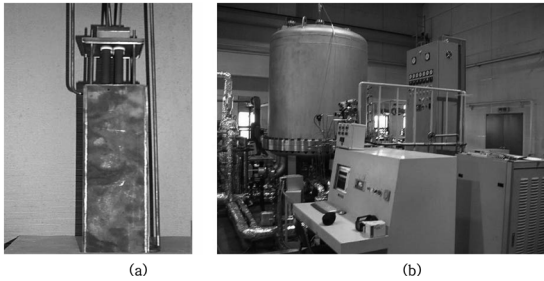


Fig. 2. (a) 관형 SOFC 스택 원천기술 개발 및 (b) 하이브리드용 가압 SOFC 시스템 개발 (KIER).

원천기술개발의 경우, 적용분야별 평판형 SOFC 스택 제작에 필요한 스택모듈기술 개발 및 스택 구성부품들의 핵심소재 원천기술을 개발하고 있으며 압출법(extrusion)에 의하여 제조된 원통형 셀 및 평판형 셀 개발과 습식법을 이용한 전해질 및 전극 코팅기술 보유하고 있다.

보조전원(APU) 발전시스템으로서 급속기동형 튜브형 SOFC 스택, 디젤 연료 개질기 개발 및 운전 및 전체 시스템 통합과정을 위한 BOP 개발을 완료하였으며 최근에는 1kW, 2kW급 평판형 SOFC 스택 및 1kW급 원통형 SOFC 스택 개발에 성공, 대용량 SOFC 스택 개발에 주력하고 있다(Fig. 3).

**한국과학기술연구원(KIST)**

90년대 초부터 평판형 SOFC 개발연구를 수행해왔으며 쌍용(주), 현대자동차, 포스코 등의 여러 산업체와 연계하여 다층 세라믹 복합체 제조기술을 응용한 고온(> 800°C)용 전해질 지지체형 SOFC 개발, 중저온(600~800°C)용 음극 지지체형 SOFC 개발 등의 연구과제를 수행하였다. 평판형 SOFC 스택 구성에 필요한 단전지 및 밀봉재, 접속자, 집전체 등의 각종 요소부품 제조기술을 확보하였으며, 이를 바탕으로 kW급 스택 제조기술을 축적하는 등 SOFC 관련 고유 원천기술들을 폭넓게 보유하고 있다.

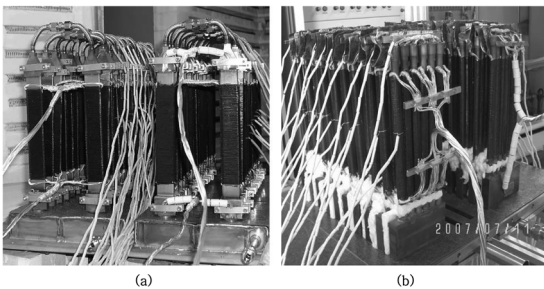


Fig. 3. (a) 2kW 급 평판형 SOFC 스택형상 및 (b) 1kW 급 평판형 SOFC 스택형상 (KIER).

현재 저온작동화를 통한 시스템의 안정성 및 경제성 확보와 이를 위한 저온성능 향상연구에 주력하고 있으며, 열사이클 및 산화/환원 사이클에서의 안정성 문제를 해결하여 상용화 수준의 내구성을 확보하기 위한 기술 개발에 초점을 맞추고 있다. 다공성 실리콘을 사용한 MEMS-based SOFC의 경우 50 mW/cm<sup>2</sup>의 성능을 가지고 있음이 보고되고 있으며, MEMS-based 마이크로 연료전지의 경우 국내의 기술수준은 선진국 대비 약 50% 정도라 판단된다.

**전력연구원(KEPRI)**

평판형 SOFC를 사용하여 가정용 kW급 시스템 개발을 진행 중이며, 고성능이면서 중저온에서도 장기성능을 신뢰할 수 있는 SOFC 스택 모듈 본체의 개발과 이의 RPG용으로서의 시스템화 관련기술을 개발 중에 있다.

2006년에는 연료급 지지체형 단전지를 이용한 1kW급 RPG용 중저온형 SOFC 발전시스템개발을 완료하였으며, 현재 후속 연구로 5kW급 열병합 SOFC 발전시스템 개발연구를 수행중에 있다. 향후 실증연구를 시작하여 가정용 연료전지 보급사업에 참여할 계획을 갖고 있다.

**삼성전기 및 삼성 SDI**

삼성전기는 2006년부터 지식경제부 차세대개발 사업의 일환으로 원통형 kW급 스택 및 시스템 개발을 진행하고 있으며, 삼성SDI는 자체 개발 사업으로 관형 SOFC 스택 개발을 진행하고 있다. 현재 분산발전 연료전지 사업에 연구 개발을 집중하고 있다.

**포항산업과학연구원(RIST)**

90년대 후반부터 SOFC용 분리판 소재 개발, 고온형 연료전지 스택소재 제조기술 개발연구를 통해 저비용 고기능 분리판 설계, 스택 구성요소 제작 및 공정기술 등의 기반기술을 확보하였으며, 이를 바탕으로 2006년 1kW급 SOFC 스택의 제작 및 운전평가 연구를 완료하였다. 분산전원/중앙 집중형 대형발전시스템의 상용화를 위한 기반과제로 2007년부터 150kW급 SOFC 스택 소재 핵심기술 및 발전시스템 개발을 수행중이다.

**4. 국외 기술동향 및 기술수준**

SOFC는 형태에 따라 크게 원통형(Tube type)과 평판형(Planar type)으로 나뉘어 기술 개발이 진행되고 있다. 전 세계에서 발전용 SOFC를 개발하고 있는 업체 중 기술이 가장 앞선 주요 5개사인 Siemens, MHI(J. Power와 공동), 어큐먼트릭스, Rolls-Royce, TOTO 에서 사용하는 SOFC 셀 구조는 원통형(Tubular) 또는 개선된 원통형인 평판형(Flat tube) 셀을 개발하고 있으며 이는 가스밀봉이 용이하

고, 용량 대형화에 유리하기 때문에 판단된다. 용량은 모두 200~300kW 수준이며, 평균 10,000시간 정도의 운전 결과를 가지고 있다. 상용화 시기는 회사에 따라 조금씩 다르지만, 2013~2015년경을 목표로 하고 있다.<sup>1)</sup>

미국의 경우 DOE, DOD, GRI를 중심으로 SOFC 기술 연구개발 프로그램(SECA)에 많은 투자가 진행되고 있으며, 2007년 한해 DOE가 SOFC사업에 투자한 예산은 약 6천3 백억 불에 달한다. 또한 Vision 21 프로그램에도 SOFC를 포함시켜 실용화에 박차를 가하고 있으며 NETL과 PNNL에 의해 형성된 SECA 프로그램에서는 3~10 kW SOFC 발전시스템의 상용화, \$400/kW 이하의 경제성 확보, 고출력, 장수명 기술 개발에 집중 투자하고 있다. 현재는 MW급 석탄가스화 사용가능한 SOFC 스택 개발을 진행하고 있다.<sup>6,7)</sup>

일본의 SOFC 개발은 NEDO 프로그램과 민간기업들의 독자 프로그램에 의해 기술개발이 추진되고 있으며, 2008년 200 kW급 원통형 SOFC 혼합발전시스템 기술 개발 성공 등 발전용 SOFC는 원통형에 집중하고 있다. 또한 수십 kW급 스택 모듈 개발과 셀의 고출력화, 장수명화, 경제성 확보에 노력하고 있으며, 2007년 NEDO SOFC 연구개발비는 22.9억 엔에 달한다.

4.1. 미 국

미국의 연료전지 개발은 DOE(Department of energy)와 DOD(Department of defense)에 의해 주도되는 두개의 클러스터로 나눌 수 있으며 DOD의 국방용 연료전지 프로그램은 주로 디젤이나 JP-8과 같은 연료의 이용에 초점을 두며, DOE는 청정 석탄, 천연가스, 수소 등을 중심으로 구성된다는 차이점이 있다.<sup>8)</sup>

SECA 프로그램(Fig. 4) - 1999년에 발족한 민관 협력 파트너십으로 가정용, 발전용, 보조전원용 연료전지 사업의 실용화에 주력하고 있으며, 2012년까지 \$400kW의 경제성을 확보하여 저가 SOFC를 개발하여 사업화하는데 목적을 두고 있다.(주요 참여기관은 NETL(National Energy Technology

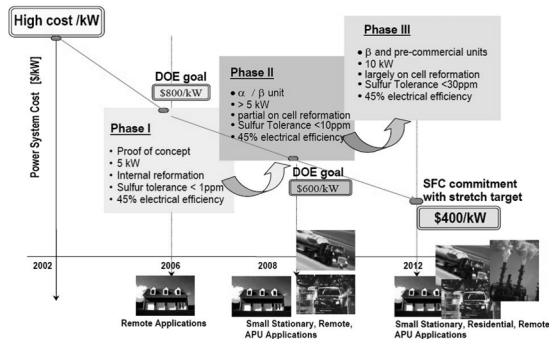


Fig. 4. SECA SOFC Road Map ( 출처 : SECA, www.seca.doe.gov/).

Table. 2. 미국 SECA 산업 연구팀들의 연구 개발 현황

기 관	특 징	공 정
Cummins-SOFCo	• 전해질 지지체 - 평판형 • 작동 온도 : 825°C • 열팽창 일치 소재 • 밀봉 제어 방법	• 테입 캐스팅 • 스크린 프린팅 • 공소결
Delphi-Battelle	• 연료극 지지체 평판형 • 작동 온도 : 750°C • 울트라 콤팩트 • 급속 기동 가능	• 테입 캐스팅 • 스크린 프린팅 • 2 단 소결법
General Electric Company	• 연료극 지지체 원반형 • 작동 온도 : 750°C • 하이브리드 특성 • 내부 개질	• 테입 칼렌더링 • 2 단 소결
Siemens Westinghouse Power Corp.	• 공기극 지지체 평판형 • 작동 온도 : 800°C • 밀봉 간편 스택	• 압출 • 플라즈마 용사
Acumentrics Corporation	• 연료극지지체 관형 • 작동 온도 : 750°C • 열팽창 일치 소재 • 급속 기동 가능	• 압출 • 딥코팅 공정 • 용사 증착 • 공소결
Fuel Cell Energy, Inc.	• 연료극지지체 평판형 • 작동 온도 < 700°C • 저비용 급속 • 열 통합 용이	• 테입 캐스팅 • 스크린 프린팅 • 공소결 • 정전기 증착

Laboratory), PNNL(Pacific Northwest National Laboratory), SPG(Siemens Power Generation), GE (General Electric), CPG(Cummins Power Generation), FCE(Fuel Cell Energy), Acumentrics, Delphi 등, Table. 2 참고)<sup>9-12)</sup>

4.2. 일 본

일본의 SOFC 개발은 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)에 의해 1989년부터 통산산업성(현. 경제산업성)의 지원을 받아 실시하고 있으며 그 동안의 연구를 살펴보면 다음과 같다.(Table. 3, Fig. 5 참고)<sup>2)</sup>

제1기(1989-1991년, 3년)

셀 제조기반기술을 중심으로 한 요소기술개발(100 W급) 실현, 구체적으로는 셀 구성요소의 제조기술 중에 소결제조공정 및 용사법 등에 의한 제조기술 탐색과 발전성능의 검증 실시하였다.

제2기(1992-2000년, 9년)

제1기의 요소기술에 근거, 수백W급 모듈개발에 의한 요소기술을 연구하고, 수 kW급 모듈(원통형, 3 kW)을 개발하고 신뢰성 및 내구성 향상 연구에 주력했으며, 평판형(MOLB 형)에 의한 단위셀 및 셀 스택에 대한

Table 3. 일본 SOFC 개발 수준

SOFC 단위셀 형태	개발회사	셀 스택 특성	기술 수준
원통형 (중호형)	동도기기	사출성형해서 LaMnO <sub>3</sub> 기본관을 제작, 슬러리법으로 치밀 박막 전해질, 다공질 연료극을 제조해서 동시소결 (900 °C 이상 고온 작동)	10 kW 급 천연가스 모듈을 개발 중, 1.6 kW 시스템에서 0.12 W/cm <sup>2</sup> , 연료 이용률 70 %, LHV 40 % 달성, 열화를 0.3%/1000hr 이하
원통형 (황호형)	원전개발 - 미쓰비시 시중공업	기체관위에 황호상으로 단셀이 슬러리법으로 제막 (900 °C 이상 고온 작동)	가압 10 kW 급 스택 7000 시간 이상 운전
평판형 (MOLB)	중부전력 - 미쓰비시 시중공업	단셀이 린플상으로 평판의 인터컨넥터와 접속, 트레이인 접속 (T-MOLB) 을 개발, 고온 작동형 (900~1000 °C)	수 kW 급 스택 5000 시간 이상 운전, 연구개발 중단 (2008)
평판형 (디스크형)	관서전력 - 미쓰비시 시 머티리얼	LaGaO <sub>3</sub> 를 전해질로서 단셀, 800 °C 이하의 작동 온도, Sealess 구조로 금속 인터컨넥터 채용 (700~800 °C 중온 작동형)	1 kW 급 열자립 시스템, AC 발전단 효율 45 % HHV 을 달성, 수 10 kW 발전 시스템의 실용화 / 상품화 목적
평판형 (디스크형)	동방가스, 쓰미토모 정밀, 제일회 원소, 일본촉매	Sc-ZrO <sub>2</sub> 자립막형 전해질, 800 °C 작동, 저가습 CH <sub>4</sub> 에서 작동 가능	1 kW 급 시스템, 최대 1.5 kW 달성
평판형	Kyocera (독자), 동경가스, 린나이, 가스터	Ni-YSZ 써메트의 전극 지지형, 인터컨넥터는 세라믹 계통, 접속부는 합금을 사용, 750 °C 정도의 작동 온도	1 kW 시스템, 750 °C 작동, 내부개질로 열자립 달성
평판, 평판형	NTT	공기극 지지체, 중공형	기초연구
평판형, 원통	전력중앙연구소	Ni-YSZ 써메트의 전극 지지형, YSZ 입자는 린과 미립이 혼합 (900 °C 이상 고온 작동)	조 20 W 정도의 소형스택 연구, 0.6 W/cm <sup>2</sup> 달성
원통형	Acumentrics Nippon Steel	튜브형 (800 °C 이하 작동 온도)	1 kW 에서 열자립, 100 kW 시스템 제작, 4 개 번들군으로 1 MW 출현, 가압형

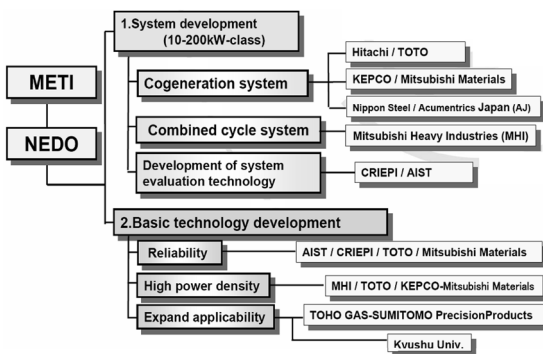


Fig. 5. 일본 NEDO 과제에 참여하는 연구기관 및 기업.

연구도 동시에 진행하였다.

**제3기(2001-2004년, 4년)**

실용 시스템에 적용 가능한 열자립 모듈의 기술개발과 SOFC 적용성 확대에 관한 요소연구를 수행하였다. 열자립 모듈의 기술개발은 출력 규모를 열자립이 가능한 10 kW급 용량의 원통형 셀과, MOLB형 평판셀 개발을

실시한 결과, 연료로서 천연가스를 사용해서 열자립을 달성, 평균 셀 전압 0.7V 이상(조건: 전류밀도 200 mA/cm<sup>2</sup>, 연료 이용률 75% 이상)을 얻었으며, 전압 저하율 0.25%/1000hrs을 얻었으며, 적용성 확대에 관한 요소연구, 즉 가압 시스템을 지향한 진보형 원통형 셀의 연구에서는 0.4MPa 이라는 기압하에서 발전면적을 기준으로 0.21 W/cm<sup>2</sup>의 출력밀도를 달성하고, 고온하에서 금속과 세라믹 셀의 밀봉기술을 확립하였다. 또한 저온 작동을 목표로 내열 충격성 평판형 셀 스택 연구에서는 작동온도 750°C에서 평균 전압 0.7 V 이상(조건: 전류밀도 200 mA/cm<sup>2</sup>, 연료 이용률 75% 이상)을 실현함과 동시에 0.25%/1000hrs 의 전압 저하율을 달성하였다.

**제4기(2004-2007년, 4년)**

상기 제3기 성과를 활용하여, 천연가스, 석탄가스 등 다양한 연료에 대응 가능한 소규모 분산형에서부터 대규모 화력 대체 시스템까지 넓은 적용성을 가진 SOFC에 대하여, 중소 규모 분산형 전원 시장 등에 투입 가능한 고체 산화물형 연료전지시스템 개발 사업을 추진하고 있으며, 2005년 이후 부터는 본격적인 시장도입을 위해

**Table 4. SOFC 시스템 실증 현황 (2008 년도 기준)**

시스템 제공자	정격출력	연료종류	실증대수
Kyocera(주)	1 KW 급	도시가스	25
신일본석유(주)	1 KW 급	LPG	1
신일본석유(주)	1 KW 급	등유	1
TOTO(주)	2 KW 급	도시가스	2

높은 신뢰성과 가격 경쟁력, 그리고 편리성 확보를 위한 요소기술개발 진행되었다.

#### 제5기(2008-2010년, 3년)

현재 SOFC의 발전효율이 높고, 고가인 백금촉매를 필요로 하지 않으며, 일본이 축적한 세라믹 기술의 활용이 가능하다는 장점을 살려, 분산형 전원으로서 내구성 및 실증 데이터(운전, 고장, 효율에 관한 데이터)의 축적을 위해 실증사업을 추진하고 있다. 향후 평가 분석 및 실용화를 위한 과제 추출 등에 의해 SOFC 실용화 촉진할 예정이다. 2008년 기준 실증사업 규모는 Table. 4와 같으며, 약 7.5억 엔(1 kW급 2000만 엔대), 1~10 kW급 약 30대에 대해 일본 전역(29 site) 에서 도시가스, LPG 등 탄화수소 적용 약 6개월 이상 운전효율 데이터를 수집하고 있다.

#### SOFC 실증 실험 및 향후 계획

2009년 현재 일본의 실증 실험은 큰 착오 없이 계획한 대로 진행되고 있으며, 데이터 취득하는데 어려움이 없는 것으로 판단된다. SOFC는 열발전효율이 우수하기 때문에 일차 에너지 절감효과도 보이고 있으며 지금까지의 결과는 열(급탕) 수요가 작은 조건에서 측정했기 때문에 열이용률이 낮았지만, 향후 열수요 증가에 따라 열이용 효율도 증가하게 될 것으로 예상되며, 2011년부터는 본격적으로 상용화/사업화에 진입 할 것으로 예상하고 있다.

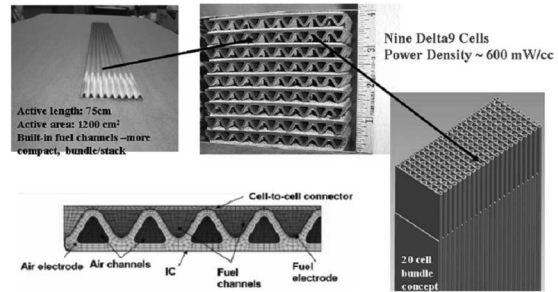
#### 4.3. 유럽<sup>13,14)</sup>

1974년 1차 오일쇼크 이후에 SOFC 연구개발이 시작되었으며, 평판형과 800°C 부근에서 운전되는 중온형 SOFC 연구개발에 중점을 두었다.

○독일 Siemens社 : 10~20 kW급 SOFC 개발, Westinghouse社의 원통형 SOFC 개발관련 기업과 기술을 인수하였으며, 최근 Juelich 연구소를 중심으로 연료극 지지체형 SOFC 단전자 제조와 10 kW급 중저온형 평판스택 개발이 진행 중.

○덴마크 Risoe 연구소 : 대학 및 기업과 공동으로 중저온 평판형 SOFC를 개발, 수 kW의 스택 제작.

○네덜란드 ECN : Cell 제조사 InDEC를 지원, 스위스의 Sulzer사에 cell을 공급, 상용화용 40 kW급 SOFC-GT 개발 중.



**Fig. 6. Siemens의 Delta-9**(출처 : Siemens Power Generation, <http://www.powergeneration.siemens.com>).

○ 영국 British gas와 6개 연구소, 공동으로 복합 평판형(integrated planar)으로 개발 중. Rolls-Royce : 2000년 1 kW급 스택 제작 및 시험, 현재 80 kW급 스택 상용화를 위한 설계 및 개발 중. ALSTOM : Juelich 및 ECN과 공동으로 5 kW, 20 kW급 스택을 개발 중.

○ 프랑스 프랑스가스사(GdF), 프랑스전력(EDF) : EC에서 지원하는 1 MWe SOFC/Gas Turbine 프로젝트 참여. 프랑스 전력 : Rhodia, CEA 및 대학 등과 공동으로 저온형 SOFC 개발, modelling 분야에 관한 연구를 추진 중.

○스위스 Sulzer-Hexis社 : ceramic/metal Hybrid design 개발 중, 1993년 40개의 단전지를 적층한 1 kW급 스택 개발, 세라믹/금속접합과 열 시스템 개발, 현재 평판 원반형 SOFC를 기본 구조로 하는 3 kW급 스택으로 난방과 발전을 겸하는 소형 주거용(RPG, Residential Power Generation) SOFC 시스템 개발을 추진 중(Ceramatec社에서 세라믹 구성요소 제작).

## 5. 선진국 산업체 현황

### 5.1. 미국

#### Siemens Power Generation

SOFC 개발 초기에는 원통형 양극 지지체 cell을 개발 하였으나 전력밀도 향상을 위해 cell 유효면적을 증가시키는 Delta-9(Fig. 6.) 구조로 변경하였다. 이 구조를 적용할 경우 원통형 cell 대비 전력 밀도를 약 50% ( $0.23 \text{ W/cm}^2 \rightarrow 0.35 \text{ W/cm}^2$ ) 증가시킬 수 있다.

NETL의 청정석탄이용 프로그램에 의해 이산화탄소 분리공정이 포함된 석탄가스를 이용한 SOFC-GT(gas turbine) 하이브리드 시스템 개발에 ConocoPhillips(석탄 가스화 기술 제공), Air Products and Chemical Inc. (이온전도성 분리막 설비)가 함께 참여하고 있다. 220 kW (200 kW SOFC + 20 kW GT) SOFG/GT 하이브리드 (Fig. 7.) 발전소를 California에 세계 최초로 설치하여 전기 효율 약 55% 확보하였으며, 이 결과를 바탕으로 1 MW

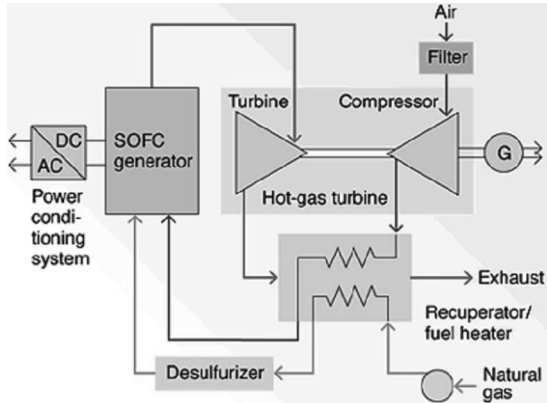


Fig. 7. SOFC/GT 하이브리드 발전 개념도 (출처 : Siemens Power Generation, <http://www.powergeneration.siemens.com>).

급에서는 전기효율 60%, 20 MW급에서는 70%의 전기 효율 확보를 예상하고 있다.<sup>15)</sup> Tube형태이므로 가스 sealing 문제 발생 확률은 작지만, 전류 이동 경로가 길어져서 Joule 손실이 커지는 단점이 있으며, 압출법으로 제조된 공기극 위에 전기화학 증착법(EVD: Electrochemical Vapor Deposition)으로 치밀한 박막을 제조하기 때문에 제조 비용이 높다는 단점이 있다. 비용 감소를 위해 일부 기관에서는 tube형 지지체 위해 slurry coating, 동시 압출(co-extrusion)등의 연구를 진행하고 있으며, 발전용 SOFC 상용화에 가장 근접한 기관으로 평가되고 있다.

**Acumentrics**

1994년에 설립된 무정전 전원 공급장치(UPS, Uninterruptible Power Source) 제조회사로서 2000년부터 SOFC 개발에 착수하였다. 그 후, 2003년 Sumitomo 과 함께 joint venture (Acumentrics Japan) 설립하였으며, 합작 회사의 목적은 원통형 SOFC 전력 시스템을 일본에 판매하기 위한 것이었다. 2007년에는 FCT(Fuel Cell Technology Ltd., CA)를 인수, FCT의 BOP 기술 획득하였다.

현재, SECA program에 참여하여 천연가스, 프로판 등의 탄화수소를 직접 이용하는 2~10 kW급 원통형 연료극 지지형 SOFC 시스템을 개발 중에 있으며 작동온도를 낮추기 위한 기술을 개발 중이다.

**Delphi**

Delphi사는 1999년에 SOFC 시스템의 개발에 착수하여 대형 트럭의 보조 전원(Fig. 9.) 등의 용도로 개발 중이며, BMW와 공동으로 승용 및 경량 트럭용, 군용 APU 시스템을 개발 중에 있다. 5 kW APU용 가솔린 개질기술 및 3~10 kW APU용 천연가스 개질을 포함

하는 평판형 SOFC Gen3 cassette의 경우 모사연료를 사용하여 750°C에서 0.5 W/cm<sup>2</sup>(at 0.7 V)의 성능을 보고하였다.(Fig. 8 참고)<sup>16)</sup>

**VPS (Versa Power System)**

VPS는 구 Global Thermolectric Inc.의 SOFC 부문을 판매한 Fuel Cell Energy 기술을 바탕으로 2001년에 설립된 Joint Venture로서, SECA 프로젝트에 참여하여 SOFC 개발을 진행하고, FuelCell Energy와 제휴해서 MW급의 석탄 발전 프로젝트용 SOFC 개발을 진행 중이다. 향후 셀의 대형화(33 × 33 cm) 및 시스템 대형화(10 kW 시스템, 30 kW 시스템) 추진 중이다(Fig. 9.).

**PNNL (Pacific Northwest National Lab)**

SECA 프로그램을 NETL (National Energy Technology Lab)과 함께 주도하고 있으며, 새로운 SOFC 시스템과 소재 개발 및 평가, 생산단가를 낮추기 위한 생산 기술

**DELPHI**

**Generation 3 SOFC**



Fig. 8. 보조전원용 SOFC 발전시스템.

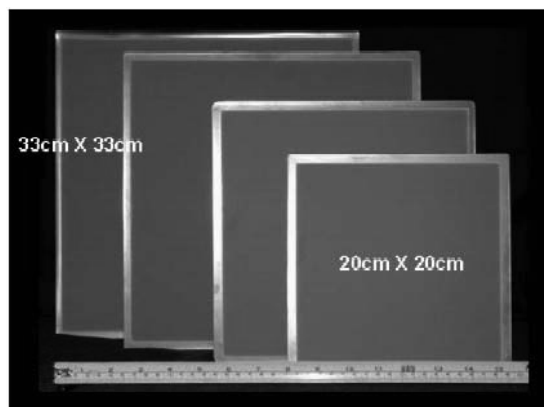


Fig. 9. VPS사에서 개발한 평판형 SOFC 셀 및 대용량 셀 형상.

개발 중에 있다. 현재, Delphi Corp., Battelle Memorial Institute 등과 공동으로 SOFC를 이용한 차량 탑재용 APU 시스템 개발 중이며, SPG와 고효율 저온 탈황시스템 개발 등을 수행 중이다. 또한 DOE의 EERE 프로그램에서는 중량 트럭용 고효율 동력 시스템 개발을, DARPA Palm Power 프로그램에서는 양극재료 개선과 전극의 미세구조제어 등의 연구를 수행 중이며 SECA 프로그램에서 SOFC 셀, 스택, 시스템을 분석하기 위한 모델 개발, 저렴한 밀봉재 개발, IT SOFC를 위한 전극 소재 개발에 참여하고 있다.<sup>17)</sup>

#### Zteck Corp.

고성능 수증기발전기를 포함하는 SOFC 에너지 개발, 생산, 판매, 서비스 산업에 종사하고 있는 기업으로서, 1 kW급 연료 전지 스택을 15,000시간 이상 성공적으로 운전하였다.

현재, 여러 개의 연료전지 스택과 천연가스 내부발전기를 이용하는 25 kW 시스템을 개발하여 운전 중이며, 200 kW SOFC-가스터빈 시스템을 건설 중에 있다.

#### 5.2. 일본<sup>18,19)</sup>

##### Kyocera

Kyocera社는 2.5 kW급 상압형 SOFC 발전 유닛을 개발하고(Fig. 10.), 세계 최고 레벨의 직류단 발전효율 56.1%(LHV)를 달성하였다. 하나의 세라믹 기판 상에 다수의 음극 지지형 cell을 제조하여, 각 cell을 기판 상에 직렬로 접속한 구조로 되어 있으며, 따라서 비교적 적은 수로도 용이하게 고전압을 얻을 수 있어, 저전류 운전을 실현할 수 있는 장점이 있다. 또한 제조 시 셀을 적층하는 공정이 불필요하고 저렴한 재료를 이용할 수 있다는 특징이 있어, 향후 양산에 의한 저비용화를 기대하고 있다.

##### MHI (Mitsubishi Heavy Industry)

MHI社는 NEDO 지원의 R&D 프로그램에 의해 MOLB(Mono-block Layer Built)라는 독특한 평판형

all ceramic 연료전지와 원통형 SOFC 설계 및 제조기술을 개발하였다. MOLB형 SOFC 개발 프로젝트는 SOFC를 이용하여 200 kW급 열병합 발전시스템 개발을 목표로 하고 있으며 원통형 SOFC 개발 프로젝트는 마이크로 가스터빈과 연계하여 350 kW급 시스템 기반기술 확립을 목표로 진행 중이다.

Chubu Electric Power사와 공동으로 50 kW MOLB-type SOFC CHP를 개발, Aichi International Exhibition에 설치하여 1000°C에서 4,000시간 실증 운전이 성공하였다. 또한 일본 최초로 SOFC/MGT(micro gas turbine)을 조합한 복합발전 시스템의 실증 운전이 성공하였다. 그 후 신에너지·산업기술 종합 개발 기구(NEDO)로부터 위탁을 접수, 2004년도부터 개발을 진행시키고 있던 것으로 미쯔비시 중공업 나가사키(Nagasaki) 조선소 내에서 최대 출력 75 kW의 발전을 확인하였다(지름 28 mm, 길이 1500 mm의 원통형(양극지지) cell을 이용하였으며 900°C에서 셀 당 0.65 V에서 151 W의 출력을 구형).

2007년 1월부터 Chigashiki 연구소에서 상압에서 150 kW(출력 25 kW의 모듈 6 세트)로, 2,500개의 튜브가 조립되어 연료 입구와 출구를 직선으로 묶는 구조로 SOFC 시스템의 시험 운전 중이며 장기 운용성이나 부분 부하 성능 등의 시험 운전은 2008년 3월까지 진행되었다. 원통형 SOFC는 J Power 그룹과의 협력에 의해 테스트 설비를 운전하고 있으며, NEDO의 지원으로 350 kW 시스템을 공동개발하고 있다(Fig. 11).

##### TOTO

TOTO社는 슬러리 코팅을 이용한 저가의 원통형 SOFC 제조 기술을 이용하여 NEDO의 지원으로 마이크로 튜브형 SOFC를 개발하고 있다. LPG와 DME(dimethyl ether)를 연료로 사용할 수 있도록 개발되었으며, 1단계 목표는 30 W이나 최종 100 W를 목표로 하고 있다. 현재까지 저온작동에 적합한 전해질 재료는 존재하고 있지만 소성공정에서 전해질이 연료극과 화학반응함에 따라 내부 저항이 증가하여 효율적인 기전력을 얻을 수 없었다.

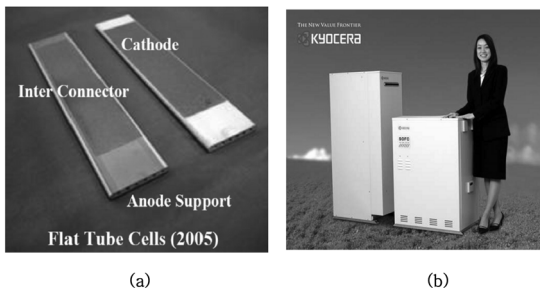


Fig. 10. (a) 연료극 지지체 평판형 SOFC 셀 형상, (b) 평판형 SOFC 발전시스템.

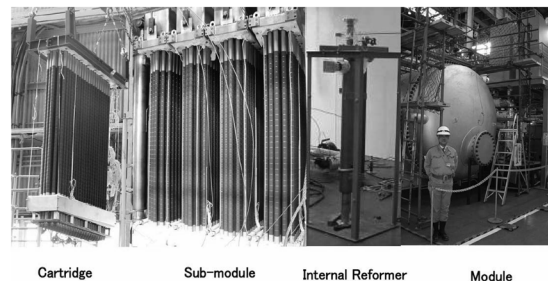


Fig. 11. 150 kW 급 SOFC 카트리지, 서브모듈, 내부 개질기, 통합 모듈의 실제 형상

TOTO의 SOFC 셀은 전해질과 연료극의 계면반응을 최소화함으로써 내부저항을 줄이고 저온작동특성을 안정시킨 것이 특징이다.

직경 5 mm, 길이 110 mm로서 셀당 17.3 cm<sup>2</sup>의 전극 면적을 가지며 30 W의 출력을 얻기 위해 15개의 셀이 소요되었다. 2005년의 발표에 의하면 LaGaO<sub>3</sub>계 전해질을 사용하여 500°C에서 작동 가능하도록 제작되었으며, 20 kW급 원통형 SOFC 개발을 목표로 하고 있다. 현재 10 kW급 기술 개발이 완료된 상태이며, 20 kW급 실증 연구가 실시될 예정이다(Fig. 12).

**AIST(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)**

기초 연구의 산업화 응용을 지원하기 위해 산업 인프라 기술, 에너지-환경 기술 분야에서 일본 내 산업 경쟁력을 높이기 위한 활동을 수행하고 있으며, SOFC 분야에서는 SOFC용 소재, 장기 운전에 따른 성능저하 기구 평가, 셀의 구성 재료간 반응에 의한 열역학적 분석 및 예측, 평판형 및 원통형 셀 제조기술 개발 등의 연구를 수행하였다.

500~600°C의 저온 영역에서도 동작하는 튜브형 SOFC를 개발하였으며, 이 연료전지의 직경은 밀리미터에서 서브 밀리미터의 수준으로, 전극의 미세 구조를 최적화함으로써 세리아계(CeO<sub>2</sub>) 세라믹 재료로는 처음으로 570°C에서 1 W/cm<sup>2</sup>의 전력 밀도를 달성하였다. 이 마이크로 튜브의 개발에 의해 내열 충격성이 비약적으로 향상되어, 급속 기동 정지 운전에도 대응 가능한 콤팩트형 SOFC 모듈의 개발이 가능할 전망으로 보인다.

또한 AIST는 SOFC를 마이크로 사이즈의 튜브 형태로 만들어 연료전지 시스템의 소형화와 열변형에 의한 파손 문제를 동시에 해결하였다. 연료전지 시스템의 총출력 전력은 전극의 단위면적당 성능과 전극의 표면적의 곱

으로 결정되며, 소형화, 즉 체적당 총출력을 향상시키기 위해서는 전극 자체의 성능 향상과 함께 체적당 전극 표면적을 증가시키는 것이 효과적이므로, SOFC를 마이크로 튜브의 형태로 제작하면 체적당 표면적이 크게 증가하기 때문에 소형화가 가능하고 동시에 기계적 강도를 높일 수 있어 열변형에 의한 파손 문제도 해결할 수 있는 장점이 있다.

**SOFC 실증연구**

일본의 SOFC 실증연구는 NEDO가 경제산업성으로부터 수탁 받아, 신에너지재단이 재위임을 받아서 실시하고 있으며 운전 데이터, 효율 데이터, 고장 데이터를 측정함으로써 SOFC 시스템의 기술과제를 추출하는 것이 목적이다. 현재 진행 중인 실증연구현황을 Table. 5에 나타내었다.

**5.3. 유럽 Real-SOFC**

FZJ, Topsoe, Rolls-Royce등 26개 기관이 참여하고 있으며, SOFC 스택의 열화현상 (공기극의 Cr poisoning, 연료극의 sulphur poisoning) 및 내구성을 개선하는데 중점을 두고 있다.

**Rolls-Royce**

Rolls-Royce cell의 구조는 다공질 세라믹을 지지체로 하는 평판 튜브형이며 세라믹 집전체를 screen printing 하여 사용하므로 생산이 용이하다는 장점이 있으나, 아래/위 튜브를 연결하여 사용하므로 sealing이 용이한 튜브형 cell의 장점을 살릴 수 없으며, cell 유효면적이 전체의 50% 미만으로 대용량 발전을 위해서는 많은 수의 스택 필요하다. 2007년 4월에는 all ceramic 평판형 SOFC를 개발 중인 SOFCo-EFS Holdings를 인수하였으며, Rolls Royce SOFC의 제원 또는 특성이 거의 공개되지 않는



Fig. 12. TOTO 社の 공기극 지지체 원형 셀로 구성된 변형형상.

Table 5. SOFC 실증 연구현황 (2007)

설치운전 실험자	연료종류	시스템 제작자	설치장소 수	설치조건
오사카 가스	도시가스	Kyocera	20	1 호 건설주택
동경가스	도시가스	Kyocera	3	1 호 건설주택
후가이도 가스	도시가스	Kyocera	1	1 호 건설주택
서부 가스	도시가스	Kyocera	1	1 호 건설주택
신일본 석유	LPG	신일본 석유	1	일반주택
신일본 석유	등유	신일본 석유	1	일반주택
TOTO	도시가스	TOTO	2	업무용 설치

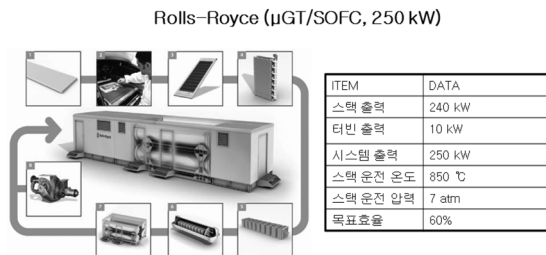


Fig. 13. 롤스로이스사에서 개발된 SOFC 스택 형상 및 발전시스템.

점을 고려해 볼 때 셀 구조에 대한 변경, 검토가 있을 것으로 예상된다. SOFCo-EFS Holdings는 세라믹 interconnect를 사용한 평판형 SOFC를 개발하던 업체로, 세라믹 interconnect를 사용한다는 측면에서 Rolls-Royce의 기존 기술과 공통점이 있다.

Rolls-Royce는 1 MW급 가압 SOFC/GT 하이브리드 시스템을 시장에 내놓기 위해 250 kW 연료전지 시스템 (Fig. 13) 실증 실험 중에 있다.<sup>20)</sup>

#### Topsoe Fuel Cell/RisNational Laboratory

덴마크의 RisNational Laboratory의 연구성과를 바탕으로 촉매 메이커인 Haldor Topsoe 의 완전 자회사인 Topsoe Fuel Cell에서 SOFC 개발 진행. 연료극 지지체의 셀 스택을 75단(12 × 12 cm의 경우) 및 50단(18 × 18 cm의 경우) 적층해서 1 kW 이상의 출력 실현. 현재 제작 가능한 최대 셀의 크기는 22 × 50 cm이며, 75단 스택의 수명은 3,500시간까지 상당히 안정하며 우수한 수명 특성. 현재 덴마크에 5 MW 의 제조 능력을 가진 공장을 운전하고 있으며, 2008년에는 50 kW 시제품에 의한 시스템 개발 추진 예정이다.

## 6. 결 론

발전용 연료전지 산업은 국가의 기간산업이며, 산업의 특성상 국가경제에 미치는 직접적 효과뿐만 아니라 관련 산업의 생산유발효과 등 간접적 기여도가 매우 높은 산업 분야이다. 특히, SOFC 발전기술은 기존 전력발전의 대체용이 아닌, 새로운 분산형 전원 시장에 대한 신기술이며 소용량에서 대용량발전에 이르기까지 전 분야에서 활발하게 개발되고 있다. SOFC 연구개발은 미국의 SECA 프로그램, 일본의 NEDO 프로그램, 유럽의 Real SOFC 프로그램 및 선진 각국의 대학, 민간기업들의 프로그램에 의해 추진되고 있으며, 국내의 경우, 국책 연구소(KIER, KIST 등)와 대학(서울대, 연세대, KAIST 등)

을 중심으로 연구개발이 진행되다가, 최근 POSCO, 삼성, 한국전력 등이 개발에 착수하였지만 경쟁력은 아직 미흡한 실정이다. 현재의 기술 개발추이로 보아 2015년까지는 MW 급 고체산화물 연료전지 발전시스템이 실용화될 것으로 판단된다. 미국의 경우, 현재 SOFC에 대한 자체 기술을 확보하고 있기 때문에, 기술적인 우위를 강점으로 내세워 일본, 유럽 등으로부터 투자유치를 본격화하고 있다. 이와 더불어 선진국들은 고체산화물 연료전지 발전 기술을 전략적으로 보호하고 있기 때문에 이를 고려하여 국내에서도 빠른 시일 내에 SOFC 발전 시스템의 시장 진입에 따른 대책을 세워야 할 것으로 사료된다. 또한, SOFC 발전 시스템의 고효율화와 저가격화 및 내구성을 증가시킬 수 있는 방법을 모색한다면 21세기 신에너지 시장에서 SOFC 발전시스템은 중요한 역할을 수행하고 국내 에너지 시장에 높은 파급효과를 이룰 것으로 기대된다.

## 참고문헌

- DOE, <http://www.doe.gov>.
- NEDO, <http://www.nedo.go.jp>.
- S. C. Singhal and K. Kendall, Editors, High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications, Elsevier, Oxford, UK (2003).
- Siemens Power Generation Inc., European Fuel Cell Forum, Lucern, Swiss (2006).
- FCE, Fuel Cell Expo 2005, Tokyo, Japan (2005).
- Fuel Cell Energy, Inc., Company Overview (2007).
- ICCEPI & UNEP, Fuel Cell Market Prospects and Intervention Strategies (2002).
- DOE, Fuel Cell Report (2003).
- DOE, Fuel Cell Seminar, Farm Springs, California (2005).
- SECA, [www.seca.doe.gov](http://www.seca.doe.gov).
- RIST, Fuel Cell Forum, Lucern, Swiss (2006).
- FCE, <http://www.fce.com>.
- Fuel Cell Energy, Fuel Cell Seminar, Honolulu, Hawaii (2006).
- Fuel Cell Energy, Fuel Cell Seminar, San Antonio, Texas (2007).
- Siemens Power Generation, <http://www.powergeneration.siemens.com>.
- Delphi, <http://delphi.com>.
- CFC-Solution, Fuel Cell Seminar, Honolulu, Hawaii (2006).
- CRIEPI, International Conference on Clean coal Technology and Fuel Cells, Yokosuka, Japan (2006).
- ENEA, International Conference on Clean coal Technology and Fuel Cells, Yokosuka, Japan (2006).
- Rolls-Royce, <http://www.rolls-royce.com>.