

# 발전용 연료전지 국내외 기술 현황



**백형평**  
한국중부발전(주) 발전처 동반성장추진팀

## 1. 개황

우리나라에서 주 에너지원으로 사용하며 전적으로 수입에 의존하고 있는 석유가격은 2003년 이후 급등

하면서 고유가 행진이 계속되고 있다. 유가의 급반등은 석유를 주에너지원으로 사용하고 있는 우리나라의 산업 전반에 중대한 영향을 미칠 수 있는 위험요소를 내포하고 있으며, 국내의 발전시스템에도 큰 부담요소로 작용하고

있다. 따라서 세계 각국은 국제유가의 급격한 변동에도 에너지 수급에 안정적으로 대응할 수 있는 새로운 신재생 에너지원의 연구·개발에 총력을 기울이고 있으며, 에너지 대부분을 수입하고 있는 우리나라에서도 이에 대비한 광범위한 연구·개발을 추진하고 있다. 또한, 이산화탄소의 배출증가에 따른 지구온난화의 위험성이 날로 증가하는 등 기존의 화석연료 에너지원이 지구환경 변화에 부정적인 영향을 초래하여 보다 효율적이고 친환경적인 신재생에너지에 대한 요구가 증가하고 있다.

이러한 신재생에너지는 태양열, 태양광발전, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양에너지, 폐기물에너지, 연료전지, 석탄액화가스화, 수소에너지 등 총 11개 분야로 구분된다. 자연계 에너지원은 위치, 기상 등 자연조건에 의존하는 비율이 큰 반면 연료전지는 화석에너지를 수소로 변화하여 연료로 사용하기 때문에 위치선정과 발전량 조절이 용이하다는 장점이 있다. 연료전지는 작동 온도와 전해질의 종류에 따라 ▲인산형 연료전지 (Phosphoric Acid Fuel Cell; PAFC) ▲알칼리 연료

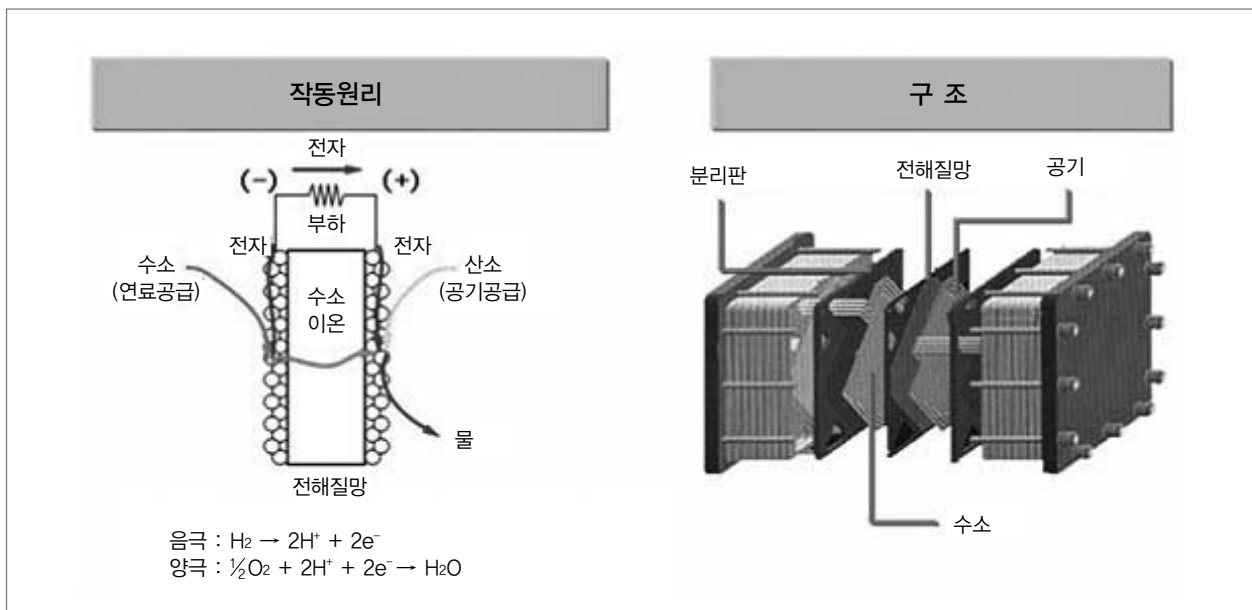
전지(Alkaline Fuel Cell; AFC) ▲용융탄산염 연료전지 (Molten Carbonate Fuel Cell; MCFC) ▲고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell; SOFC) ▲고분자 전해질 연료전지(Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell; PEMFC) 등으로 나눌 수 있다.

이 중 PEMFC의 경우 Mobile이나 Portable용으로 상업화단계에 다가서고 있으며, MCFC는 연료에서 개질된 수소와 공기 중의 산소와의 전기화학반응을 통하여 전기화 열을 생산하는 고효율의 친환경적 열병합 발전시스템이다. 현재 작계는 250kW에서 수MW까지의 분산형 발전시스템으로 상용화 초기단계에 있다.

## 2. 현황

### 가. 발전용 연료전지 개요

연료전지는 연료(LNG, LPG, 메탄올 등)와 공기의 화학 에너지를 전기화학적 반응에 의해 전기 및 열로 직접 변환시키는 장치이다. 기존의 발전기술은 연료의 전소로



[그림 1] 연료전지의 구성과 작동원리

증기를 발생시키고 발생된 증기에 의해 발전기를 구동함으로써 전기를 생산했다. 하지만 연료전지는 연소과정이나 구동장치가 없으므로 카르노사이클의 제한을 받지 않는 고효율의 발전이 가능하다.

또한 대기오염, 진동, 소음 등의 환경문제를 유발하지 않는 새로운 발전기술이라 할 수 있다. 이러한 연료전지의 작동원리는 근본적으로 같은 원리에서 이루어지지만 서로 다른 점은 연료의 종류, 운전온도, 촉매와 전해질 등에 의해 구분된다.

1) 인산형 연료전지

인산형 연료전지 기술은 20년 이상 개발되어 왔으며, 전기 생산에 비교적 순수한 수소(70% 이상)를 요구하고

있다. 인산형 연료전지 내의 전극은 탄소 지지체의 표면적 위에 촉매로서 백금이나 백금 혼합물을 포함한다. 운전 온도는 약 200℃ 이고 순수한 발전효율은 40~50% 정도이다.

2) 알칼리 연료전지

알칼리 연료전지는 전해질로서 수산화칼륨과 같은 알칼리를 사용하고 연료는 순수 수소를, 산화제로는 순수 산소를 사용한다. 운전 온도는 대기압에서 60~120℃ 이고 Anode의 촉매는 니켈망에 은을 입힌 백금-납을 사용하고, Cathode는 니켈망에 금을 입힌 금-백금을 사용한다. 이 연료전지는 주로 자동차 산업의 전원공급용이다.

[표 1] 연료전지의 종류 및 특성 비교

| 구 분          | 고온형 연료전지                       |                                | 저온형 연료전지                        |                 |                              |                   |
|--------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-----------------|------------------------------|-------------------|
|              | 용융탄산염 연료전지 (MCFC)              | 고체산화물 연료전지 (SOFC)              | 인산염 연료전지 (PAFC)                 | 알칼리 연료전지 (AFC)  | 고분자전해질막 연료전지 (PEMFC)         | 직접메탄올 연료전지 (DMFC) |
| 작동온도         | 550~700℃                       | 600~1000℃                      | 150~250℃                        | 50~120℃         | 50~100℃                      | 50~100℃           |
| 주 촉매         | Perovskites                    | 니켈                             | 백금                              | 니켈              | 백금                           | 백금                |
| 전해질의 상태      | Li/K Alkali Carbonates Mixture | YSZ GDC                        | H3PO4                           | KOH             | 이온교환막                        | 이온교환막             |
| 전해질 지지체      | Immobilized liquid             | Solid                          | Immobilized liquid              | -               | Solid                        | Solid             |
| 전하전달이온       | CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>  | O <sup>2-</sup>                | H <sup>+</sup>                  | OH <sup>-</sup> | H <sup>+</sup>               | H <sup>+</sup>    |
| 가능한 연료       | H <sub>2</sub> , CO (천연, 석탄가스) | H <sub>2</sub> , CO (천연, 석탄가스) | H <sub>2</sub> , CO (메탄올, 석탄가스) | H <sub>2</sub>  | H <sub>2</sub> , (메탄올, 석탄가스) | 메탄올               |
| 외부연료개질기의 필요성 | No                             | No                             | Yes                             | Yes             | Yes                          | Yes               |
| 효율 (%LHV)    | 50~60                          | 50~60                          | 40~45                           | -               | <40                          | -                 |
| 주용도          | 대규모 발전 중소사업소 설비                | 대규모 발전 중소사업소 설비                | 중소사업소 설비 바이오가스 설비               | 우주발사체 전원        | 수송용, 가정용, 휴대용 전원             | 휴대용 전원            |
| 특징           | 발전효율 높음 내부개질 가능 열병합 대응 가능      | 발전효율 높음 내부개질 가능 복합발전 가능        | CO 내구성 큼 열병합 대응 가능              | -               | 저온 작동 고출력 밀도                 | 저온 작동 고출력 밀도      |

### 3) 고분자 전해질 연료전지

고분자 전해질 연료전지의 전해질은 액체가 아닌 고체 고분자 중합체(Membrane)로서 다른 연료전지와 구별된다. 인산형 및 알칼리 연료전지 시스템과 비슷하게 중합체를 이용하는 연료전지는 백금을 촉매로 사용한다. 백금촉매는 일산화탄소에 의한 부식에 민감하게 반응하므로 일산화탄소의 농도는 100ppm이하로 유지하여야 한다.

### 4) 직접메탄올 연료전지

직접메탄올 연료전지는 메탄올을 직접적으로 전기 화학을 반응시켜 발전하는 시스템이다. 전해질은 이온 교환막에 인산을 담지 시킨 것으로 작동온도 150°C의 비교적 저온이다. 고체고분자형 연료전지와 비교하여 개질기를 제거할 수 있으며, 시스템의 간소화로 부하 응답성을 향상시킬 수 있는 장점이 있다.

### 5) 고체산화물 연료전지

고체산화물 연료전지의 특징은 탄화수소를 직접 전기로 변화시킬 수 있다는 점이다. 전해질은 안정화된 산화 이트륨으로 가스가 스며들지 않은 산 이온이 효율적으로 접촉하고 있는 얇은 산화지르코늄 층이다. Cathode는 지르코늄으로 만들어졌고 Anode는 니켈-지르코늄 세라믹 합금으로 만들어졌다. 운전 온도는 약 1,000°C로 매우 높다.

### 6) 용융탄산염 연료전지

용융탄산염 연료전지는 다공성이고 화학적으로 비반응성을 나타내는 세라믹인 Lithium Aluminum Oxide (LiAlO<sub>2</sub>) 매트릭스에 전해질인 용융탄산염 혼합물을 함침하여 650°C 정도의 고온에서 운전되는 고온연료전지이다.

### 나. 국내외 연료전지 기술개발 현황

연료전지는 연료의 산화에 의해서 발생하는 화학에너지를 직접 전기에너지로 변화시키는 시스템으로 연료 중의 수소와 공기 중의 산소가 전기화학 반응을 통해 전기, 물, 열 등을 생산한다. 이러한 연료전지는 Carnot Cycle의 제한을 받지 않는 고효율의 에너지 변환 장치로서 운전 중에 오염원을 전혀 방출하지 않기 때문에 미래를 대비하는 고효율 청정에너지원으로 인정되어 미국, 일본, 유럽, 등에서 활발한 연구가 이루어지고 있다.

MCFC 발전시스템의 경우, 기술 안정화로 2006년부터 전 세계적으로 MW급 제품 보급이 급증하고 있으며, 2012년까지 총 22MW 이상의 PAFC와 MCFC가 국내로 수입될 예정이다. 국내 시장의 잠식이 우려됨에 따라 해외에서 수입되고 있는 MW급 제품 대체를 위한 국산화가 요구되고 있다.

#### 1) 국외 연료전지 기술개발 현황

전 세계에서 MCFC를 이용한 발전시스템의 연구개발에 참여하고 있는 국가는 1996년에 2MW급 실증공장을 건설하여 운전한 바 있는 미국을 선두로 일본, 네덜란드, 독일, 이탈리아 그리고 우리나라 등 6개국이다.

그 밖에 덴마크, 스페인, 영국, 스웨덴 등이 부분적으로 참여하고 있으나 KW급 이상의 스택 독자 제작능력을 가진 나라는 미국, 일본, 네덜란드, 이탈리아, 우리나라 등 5개국이다. 다른 국가들은 미국에서 제공받는 스택을 활용하는 시스템 개발에 중점을 두고 있다. 세계 각국은 이미 개발되어 있는 기본적인 기술을 바탕으로 100kW급 Prototype 개발을 완료하고, 분산형 또는 소형 열병합 발전에 적합한 250kW 또는 300kW급의 모듈 개발을 수행하는 방법을 사용하여 구성요소들의 내구성 및 경제성 문제 해결을 통해 상용화를 위한 개발에 박차를 가하고 있다.

## 2) 국내 연료전지 기술개발 현황

국내에서의 용융탄산염 연료전지 개발은 1989년 한국과학기술원이 한국전력의 자금을 지원받아 소규모 단위 전지 제작 및 운전특성 시험 등 기본 기술개발을 시작하였다. 이어 1992년 정부의 21세기 선도 기술개발사업(G7)의 하나로 MCFC 시스템 개발이 선정됨으로써 본격적인 개발이 시작되었다. 1993년부터 시작된 선도 기술개발 1단계 사업은 한국전력 주관으로 삼성중공업과 KIST가 참여, 총 47개월 동안 2kW급 연료전지 스택을 개발하였다. 운전을 평가하는 사업으로 1996년 7월 전력연구원 내에 개발된 스택을 설치하여 2.5kW의 출력 시험 및 288시간 이상 장기 운전시험에 성공함으로써 이에 대한 기초 기반기술을 확립하였다.

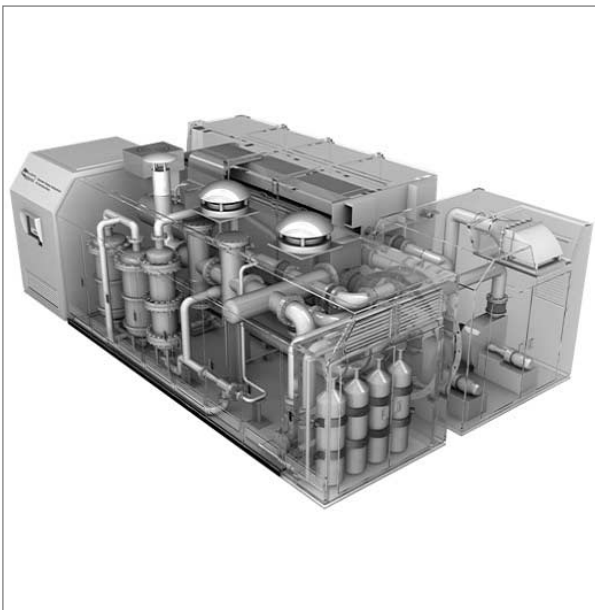
이어 2단계 사업(1997~1999년)으로 단위전지 대면적화 및 다적층 기술, 시스템 종합 및 운영기술, 고성능 장수명 기술 등을 중심으로 기술개발을 추진하여 1998년 7.6KW 규모의 스택을 5,860시간 운전하였다.

이어 1999년에는 유효면적 6000cm<sup>2</sup> 규모의 단위전지 40장을 적층한 25kW급 스택을 개발하여 운전시험에

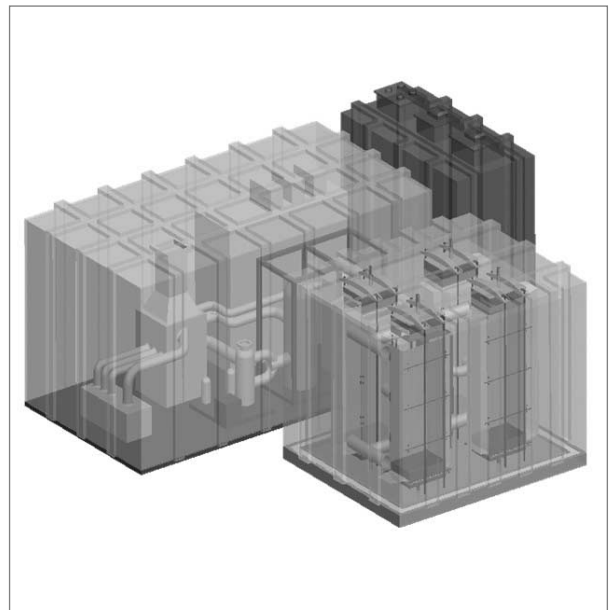
성공함으로써 MCFC 기술에 대한 상용 기초기반을 확립하였다.

2000년부터 2005년까지는 100kW급 MCFC 시스템의 개발을 진행하였으며, 에너지관리공단 지원, 한전 전력연구원의 주관 하에 효성중공업, 삼성 엔지니어링, KIST, RIST 및 다수의 대학이 참여하여 100kW급 MCFC 시스템을 제작하였다.

2004년부터 2009년까지는 250kW급 MCFC 열병합 Prototype 개발을 전력산업기반기금의 지원으로 착수하였으며, 한전 전력연구원의 주관으로 두산중공업, POSCO, 효성중공업, 삼성엔지니어링 등의 기업이 참여하였다. 삼성중공업은 250kW급 사업 참여 및 300kW급 사업의 플랜트 연계형 사업에 참여하고 있다. 포스코 에너지는 미국 FCE의 MCFC를 수입, 2005년 탄천하수처리장, 조선대병원, 남동발전소 등 세 곳에 250kW급을 설치하였으며, MW급까지 보급하여 진행 중에 있다. 최근에는 100kW급을 어린이대공원 등 2곳에 설치하여 시험 운영 중이다.



[그림 2] 300kW급 MCFC 모델



[그림 3] 1.2MW급 MCFC 모델

3) 국내 연료전지 기술개발 수준

현재 국내 MCFC 기술은 1993년부터 진행된 국책 연구과제의 성과를 기반으로 스택의 구성요소에 대한 기술 수준은 선진국 대비 80% 이상 도달하였다.

예를 들어 KIST에서 자체 기술로 제작한 MCFC 구성 요소로 단전지 장기운전 시험을 실시한 결과를 보면 150mA/cm<sup>2</sup>부하로 0.7V 이상에서 13,000시간 이상 운전할 수 있는 구성요소 제조기술을 확보하고 있음을 알 수 있다. 그러나 FCE사 기술수준과 비교해 볼 때 전지 성능 및 장기운전 시간은 비슷한 수준인 반면 전지성능 저하율 (FCE사 0.2%/1,000h, KIST 1%/1,000h) 저감 기술은 많이 떨어지는 것을 알 수 있다. 따라서 국내 구성요소 개발 방향의 경우, 가격 저감과 성능저하 개선 부분에 집중할 필요 있다. 그러나 현재 스택과 달리 개질기를 포함한 연료전지 플랜트 전체를 포괄하는 시스템 분야에서는 선진국 대비 40~60% 정도의 기술수준을 보유하고 있다. 따라서 시스템 설계 부분과 핵심 E-BOP 및 M-BOP 부품 개발에 집중할 필요가 있다.

4) 기타 연료전지 기술개발 현황

외부개질형 MCFC는 별도 개질기 설치에 따른 시스템 구성의 복잡성과 연계운전 신뢰성 확보 등의 기술적인 추가 연구개발이 요구되어 지고 있다. 이에 반해 내부 개질형 MCFC는 미국과 독일을 중심으로 실용화가 입증된 기술로서 국내의 대용량 플랜트 산업기술과 인프라를 적극 활용하여 짧은 개발기간을 투자하더라도 원천기술 확보가 가능한 산업이다.

플랜트 연계형 MCFC 발전시스템은 MCFC 기술과 기존 발전 플랜트를 연계하는 기술로서 연계하려는 구성기술이 상호간의 기술적인 접근성이 용이하여 기술적 시너지 효과가 크다.

우리나라는 세계 담수플랜트 시장을 선도하고 있으며, 화력발전과 복합화력 그리고 석탄화력과 같은 발전소를 설계 건설할 수 있는 EPC (Engineering, Procurement and Construction) 역량을 보유하고 있으므로 플랜트 연계 기술을 개발할 수 있는 높은 가능성을 갖고 있다.

담수 플랜트와 연계한 MCFC 발전시스템의 경우 5~12%의 효율향상을 기대할 수 있고, 담수와 전기를

[표 2] 국내 MCFC 기술 수준

| 기술내용                     | 개발목표                        |                             | 선진국 최고수준 (2015년)            | 선진국대비 목표달성도 [%] |
|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|
|                          | 현재 수준                       | 2015년                       |                             |                 |
| 스택 성능                    | 0.70V@120mA/cm <sup>2</sup> | 0.77V@130mA/cm <sup>2</sup> | 0.76V@140mA/cm <sup>2</sup> | 93              |
| 모듈(스택)용량                 | 25kW                        | 1.2MW                       | 1.2MW                       | 100             |
| 운전시간(Hr)                 | 1,000                       | 4,000                       | 22,000                      | -               |
| 분리판 면적(cm <sup>2</sup> ) | 5,500                       | 8,000                       | 7,800                       | 100             |
| 발전 효율(%)                 | 47 >                        | > 48                        | 47                          | 100             |
| 시스템 효율(%)                | 47                          | 80                          | 80                          | 100             |
| Availability(%)          | 85                          | 90                          | 95                          | 95              |
| 플랜트 연계 가능                | X                           | O                           | X                           | -               |

동시에 생산할 수 있는 장점을 가지고 있어 플랜트 연계 시 새로운 발전 플랜트의 패러다임을 추구할 수 있다.

화력발전과 연계한 MCFC 발전시스템은 화력발전의 배기가스를 전처리하여 이산화탄소를 공기극의 반응 가스로 사용이 가능하다. 따라서 사용 연료량을 저감하여 에너지 효율을 높일 수 있는 신중 기술로 자리매김할 수 있다.

발전용 연료전지 시스템은 기존산업과 연계된 배열 회수장치, 밸브 및 센서, 제어장치 및 IT등 다양한 제품들로 구성되므로 신성장동력으로 집중 육성하면 조기 기술개발 완료가 가능할 것으로 예상된다. 또한 고객 맞춤형 신모델 출시로 국내 산업인프라와 연계하여 국내 산업 활성화 및 풍부한 해외시장의 개척도 가능하다.

### 3. 전망

연료전지의 발전은 중·단기적으로 보았을 때 에너지 변환효율 및 저공해성 등의 특성과 열병합 분산형 전원 보급이 이루어졌기 때문에 성장한 것이다.

신재생에너지 의무 할당제(RPS) 법제화에 따라 발전사를 통한 연료전지의 수요가 증가될 전망이며, 석탄 및 천연가스 발전소와 연계한 대형 발전형 연료전지로 성장할 가능성이 매우 높다. 또한, 탄소배출권 및 기후변화 추세로 향후 이산화탄소 포집 기술을 응용한 MCFC-PCC가 국제 해상 규제에 부합하는 고효율 친환경 해상 선박 및 해상플랜트의 고부가가치 산업으로 미래의 새로운 시장 및 고용 창출에 이바지 할 것으로 예상된다. MCFC는 기존에 개발된 기술을 기반으로 원가절감 및 고부가가치 제품 개발에 주력하여 분산형 시장 확대를 추구 할 것으로 예상된다.

특히, 세계 최고 기술을 보유한 국내 선박제조 기술 및 담수화 설비기술 등과 융합하여 기술을 개발할 경우, 시장 확대는 물론 관련 산업의 동반성장도 기대할 수 있을 것으로 전망된다. KEA