

# 용융탄산염 연료전지 (Molten Carbonate Fuel Cell; MCFC) 기술개발 현황

## 1. 서론

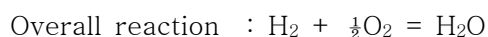
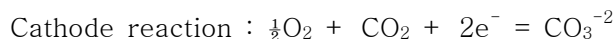
통상 제 2 세대 연료전지로 불리는 용융탄산염 연료전지는 다른 형태의 연료전지와 함께 높은 열효율, 높은 환경친화성, 모듈화 특성 및 작은 설치공간으로 대표되는 장점을 공유하는 동시에, 650℃의 고온에서 운전되기 때문에 인산형 또는 고분자 연료전지와 같은 저온형 연료전지에서 기대할 수 없는 다음과 같은 추가 장점들을 갖고 있다. 즉, 고온에서의 빠른 전기화학반응은 전극재료를 백금 대신 저렴한 니켈의 사용을 가능케 하여 경제성에서 유리할 뿐만 아니라, 백금전극에 피독물질로 작용하는 일산화탄소마저도 수성가스 전환 반응을 통하여 연료로 이용하는 니켈전극의 특성은 석탄가스, 천연가스, 메탄올, 바이오매스 등 다양한 연료 선택성을 제공한다. 그리고 HRSG (Heat Recovery Steam Generator) 등을 이용한 bottoming cycle로 양질의 고온 폐열을 회수 사용하면 전체 발전 시스템의 열효율을 약 60% 이상으로 제고시킬 수 있다. 또한, 용융탄산염 연료전지의 고온운전 특성은 연료전지 스택 내부에서 전기화학반응과 연료개질반응을 동시에 진행시키는 즉, 내부개질 형태의 채용이 가능하도록 하는 또 다른 장점을 제공한다. 이러한 내부개질형 용융탄산염 연료전지는 전기화학반응의 발열량을 별도의 외부 열교환기 없이 직접 흡열반응인 개질반응에 이용하므로 외부개질형 용융탄산염 연료전지보다 전체 시스템의 열효율이 추가로 증가하는 동시에 시스템 구성이 간단해지는 특성을 갖는다.

그러나 용융탄산염 연료전지는 수명 및 신뢰성 확보 등의 기술적 검증이 아직 끝나지 않아 본격적인 상업화는 2005년 이후에나 가능하리라고 생각된다. 미국, 일본 등을 비롯한 선진외국에서는 기초연구는 물론 시스템 데모에 이르는 개발연구에까지 적극적으로 투자하여 최근 급속도로 많은 발전이 이루어지고 있다. 국내에서도 한전 전력연구원을 중심으로 KIST, RIST 및 여러 대학이 참여하여 용융탄산염 연료전지의 자체 기술을 확보하기 위한 개발 연구를 대체에너지 사업의 하나로 진행하고 있다.

## 2. 용융탄산염 연료전지 발전 플랜트 개요

### 2-1. 기본원리

용융탄산염 연료전지는 일반적으로 Figure 1과 같이 다공성의 Ni 연료극(anode)과 NiO 공기극(cathode) 사이에 Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>와 K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>의 혼합 용융탄산염 전해질을 함유하는 역시 다공성의 LiAlO<sub>2</sub> 매트릭스로 구성된다. 수소가 주성분인 연료가스와 산소와 이산화탄소로 구성된 산화제가 각각 연료극과 공기극으로 공급되면 다음과 같은 전기화학반응에 의하여 용융탄산염 연료전지는 전기와 열 및 물을 생산한다.



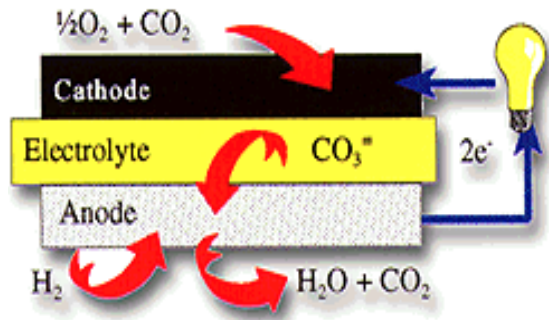


Figure 1 용융탄산염 연료전지 개념도

따라서 용융탄산염 연료전지에서 일어나는 전체 반응에 대한 Nernst 식은 아래와 같이 표시된다. 여기서  $E^{\circ}$ 는 표준 전위이고,  $E$ 는 평형 전위이다. 용융탄산염 연료전지 운전에서 실제로 얻어지는 전위는 분극 현상 때문에 평형 전위  $E$ 보다 작게 나타난다.

$$E = E^{\circ} + \frac{RT}{2F} \ln \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5} P_{CO_2, cathode}}{P_{H_2O} P_{CO_2, anode}}$$

일반적으로 가스의 crossover가 없는 상태에서 용융탄산염 연료전지의 개회로전압은 평형 전위  $E$ 에 거의 접근하는 것으로 알려져 있으며, 전류밀도는 경제성, 안정성 등을 고려하여 150-160mA/cm<sup>2</sup>을 기준으로 하고 있다. 현재 각 개발회사들은 이 전류밀도에서 단위전지 당 전압 0.7V 이상, 수명 40,000 시간 확보를 목표로 개발을 추진하고 있다.

### 2-2. 발전시스템 기술 개요

용융탄산염 연료전지 발전시스템은 연료전지 스택을 중심으로 반응가스 처리 장치, 직교류 변환 장치 및 폐열 회수 이용 장치 등으로 구성된다. 반응가스 처리 장치는 연료전지에 사용되는 반응가스를 공급하는 장치로서 석탄, 천연가스등을 스택에서 사용가능한 연료가스로 전환시키는 연료 처리 장치, 공기 공급 장치 및 정화 장치 등으로 구성된다. 반응가스 처리 장치에서 적절히 조절된 연료와 공기를 사용하여 전류와 열을 생성하는 연료전지 스택은 적층된 수백장의 단위전지로 구성되며, 반응가스가 각 단위전지로 균등하게 공급되도록 설계된다. 기본적으로 각 단위전지는 전해질 매트릭스에 의하여 분리된 연료극과 공기극의 두 전극으로 구성된다. 직교류 변환 장치는 연료전지에서 생성되는 직류 전기를 실제 사용가능한 교류로 변환시키는 역할을 한다. 스택에서 발생하는 고온, 양질의 폐열을 이용한 열병합 발전이 용융탄산염 연료전지에서는 가능하며, bottoming cycle을 이용하여 추가로 열효율을 높일 수 있다.

### 2-3. 용도

연료 선택의 다양성, 부하 크기에 무관한 열효율, 환경친화성 및 열병합 발전으로 대표되는 장점을 가진 용융탄산염 연료전지의 용도는 병원, 호텔, 아파트 단지 등에 직접 설치하는 수백 kw부터 수십 MW급 이하의 현장설치형 및 분산배치형 발전에서부터 기존 대형 화력 발전이나 원자력 발전을 대체하는 수백 MW급 이상의 중앙집중형 발전에 이르기까지 다양하게 적용될 수 있다. 발전 규모에 따른 시스템의 열효율을 도시한 Figure 2에서와 같이 석탄가스화와 연계가 가능한 외부개질형 용융탄산염 연료전지는 주로 대형 발전소를 목

표로 현재 개발이 진행되고 있는 반면, 천연가스가 주연료로 예상되는 내부개질형 용융탄산염 연료전지는 소규모의 열병합 발전을 주목표로 개발되고 있다.

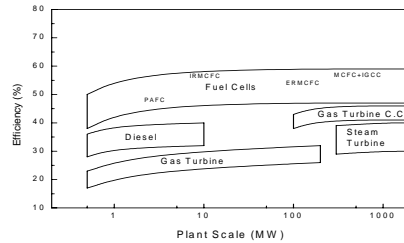


Figure 2. 발전용량에 따른 연료전지 및 경쟁 발전기술의 효율 비교

### 3. 국가별 기술 개발 동향

현재 전세계에서 용융탄산염 연료전지의 상용화를 목적으로 본격적으로 연구개발에 참여하고 있는 나라는 1996년에 2MW급 실증 공장을 건설 운전한 바 있는 미국을 필두로 하여 범국가적인 사업으로 추진하고 있는 일본, 이 두 나라와의 격차를 줄이기 위하여 EC 및 정부 프로그램으로 추진하고 있는 독일, 이태리를 중심으로 한 유럽 2개국, 그리고 역시 대체에너지 중점과제 사업으로 상용화를 추진하고 있는 한국의 5개국이며, 이외에 유럽의 덴마크, 스페인, 영국, 스웨덴 등이 부분적으로 참여하고 있는 실정이다. 이 중에서 kW급 이상 스택의 독자 제작 능력을 가진 나라는 미국, 일본, 이태리, 독일, 한국의 5개국이며, 대부분의 유럽 개발국들은 미국에서 제공받은 스택을 활용하는 시스템 개발에 중점을 두고 있다. 각국은 그 동안 개발된 기본기술을 바탕으로 250kW급 prototype 개발을 완료하고 분산형 또는 소형 열병합 발전에 적합한 250kW 또는 300kW급의 모듈 실증사업을 수행하고 있다. 현재 가장 큰 기술적 이슈인 구성요소들의 내구성 및 경제성 문제들이 해결되리라고 예상되는 2005년을 전후로 본격적인 시장진입을 추진하는 것이 각국의 개발 목표이다. 연구개발의 체제는 정부 및 utility 회사에서 제공한 연구비를 중심으로 개발주체, 생산주체 및 최종 사용자들로 이루어진 콘소시엄 형태로 추진되는 것이 일반적이다. 미국과 유럽에서는 내부 및 외부개질형 모두 분산배치형 시스템 개발을 목표로 전체 시스템이 컨테이너 트럭에 탑재 가능한 200-300kW 규모의 모듈 형태가 주 개발 대상이 되고있는 반면, 일본과 한국에서는 외부개질형은 석탄가스화와 연계된 300MW 이상의 중앙집중형 대형 시스템 개발에, 내부개질형은 분산배치형 및 현장설치형에 적합한 200kW 규모의 모듈 개발에 최종목표를 두고 진행되고 있다. 각국의 개발 내용을 간단히 정리하면 다음과 같다.

#### 4-1. 미국

1976년 DOE (Department of Energy) 주도로 여러 회사가 참여하여 용융탄산염 연료전지 개발을 본격화한 이래 1979년에 스택 개발에 착수하였고 1986년에 IFC (International Fuel Cells)가 25kW급 스택을 개발하여 운전시험에 성공하였다. 또한 미국공영전력연합 (American Public Power Association: APPA)이 Energy Research Corporation(ERC)가 개발한 100kW급 스택의 Pilot Plant를 전력회사인 PG&E (Pacific Gas & Electric Company)에 설치, 운전시험을 수행하여 용융탄산염 연료전지 발전시스템의 최초 실증 시험을 완료하였다. 이후 EPRI

(Electric Power Research Institute)와 Gas Research Institute도 DOE와 함께 연구비 지급 및 프로그램 운영 등으로 용융탄산염 연료전지 개발 계획을 지원하고 있으며 이와 같은 계획의 결과로 1996년 초반기부터 ERC에서 개발한 내부개질형 2MW급의 전시용 공장이 Santa Clara에서 운전되었으며, 또한 외부개질형을 개발하는 M-C Power 사에서는 1997년도에 San Diego의 Miramar 해군기지에서 250kW급 스택 운전 실험을 완료하였다.

이와 같은 일련의 개발을 통하여 미국 DOE는 그 동안 MCFC 개발의 두 축을 담당하였던 ERC (현재는 Fuel Cell Energy로 개명: FCE)와 M-C Power의 기술 개발 수준을 정밀히 평가하여 향후 상용화를 위한 시범사업 지원은 FCE로 일원화하기로 결정하였고, 2004년에 최초의 상용화 모델을 시판하기로 계획하고 있다. 상용화를 위한 FCE의 시범사업은 주로 250kW급 시스템 위주로 진행되는데, 북미에 17기, 일본에 3기 그리고 독일의 MTU와 공동개발한 'Hot Module' 8기 등 총 30기에 가까운 시범사업이 진행되고 있거나 예정되고 있으며, 이와 동시에 1MW급 모듈 및 2MW 모듈 시범 사업도 현재 추진 중이다. 또한 FCE는 석탄가스와 활용 시스템, 소형 가스터빈과 연계된 시스템 및 해군 구축함 엔진용 MCFC 개발 등을 활발히 추진하고 있다.

#### 4-2. 일본

통산성 공업기술원 산하 신에너지개발기구 (New Energy Development Organization : NEDO) 주도로 1981년에 시작된 Moonlight Project의 일부로 용융탄산염 연료전지의 요소기술 개발을 시작하여 1986년 10kW급 스택을 개발하였으며 1994년에는 내부개질형 및 외부개질형 100kW급 연료전지 스택을 Agaki 시험소에서 운전 평가하였다. 이와 같은 결과를 바탕으로 새로이 시작된 New Sunshine Project에서는 외부개질형 개발사업으로 Kawagoe에 1MW급 MCFC 플랜트 건설을, 내부개질형 개발사업으로는 200kW 발전 시스템 건설을 추진하여 1999년 말부터 운전을 실시하여 각기 약 5,000시간의 발전 실적을 기록하였다. 이 운전 기간 동안에 개질기 운전 및 가압운전에 따르는 문제점을 파악하여 새로운 설계 모델을 파악하였다.

2000년부터 새로이 시작된 MCFC 개발사업으로 300kW급 모듈 개발 및 소형 가스터빈과 연계된 700kW급 고성능 모듈 플랜트 개발을 추진하고 있으며, 2000년도의 NEDO 예산은 약 2,000만 달러에 이르고 있다. 또한, 2005년 일본 EXPO에 맞추어 석탄가스 및 opportunity 가스를 활용한 6MW급의 시범 플랜트 건설을 계획하여 현재 simulation 연구가 활발히 진행되고 있다. 일본의 궁극적 MCFC 개발 목표는 석탄가스화와 연계된 IG-MCFC 개념의 대형 발전 플랜트이나, 단기 목표로 열병합형 모듈 개발을 새로운 목표로 설정하여 추진하고 있다. 외부개질형 시스템 개발은 IHI에 집중되고 있으며, 내부개질형 시스템은 Mitsubishi Electric에서 AIR-IRMCFC란 이름의 독자 모델을 개발하고 있으며, 각 개발사의 스택 평가 및 초고압 운전 기술 개발은 CRIEPI에서 담당하고 있다.

#### 4-3. 유럽

네덜란드의 ECN에서는 기존의 전지구성요소의 문제점을 해결할 수 있는 새로운 전지구성요소로 구성되는 SMART 시스템이라 불리우는 차세대 내부개질형 시스템 개발을 위해 주로 전산모사 연구를 1997년부터 수행하고 있다. 또한 이태리의 Ansaldo에서는 스페인 등과 함께 유럽연합 과제인 Molecare project의 하나로 1998년까지 100kW급 시스템 개발을 성공리에 마친 후, 현재 2003년까지 500kW 시스템 개발을 진행 중이다. 이 새로운 과제를 위해 이태리의 Ansaldo, ENEA, FN 등과 스페인의 전력회사, 프랑스의 전력회사 등이 콘소시움을 구성하였다.

개발 예산으로 유럽연합에서 3년간 약 230만 달러 그리고 이태리 및 스페인 정부에서 각각 연간 5백만 달러 및 3백만 달러를 지원하기로 결정하였고, 여기에 민간 지원분까지 합치면 연간 약 1,000만 달러는 상회할 것으로 예상된다. 이외에도 Bio 가스를 활용하는 300kW급 시스템 개발도 유럽연합과 계약을 체결하였으며, 중전에 PAFC 시범공장으로 사용되었던 1.2MW 급 시범 공장을 MCFC 시범공장으로 활용하는 계획을 추진하고 있는 등 이태리의 MCFC 개발 노력은 최근 급증하고 있다. 이와 같은 개발사업의 원활한 추진을 위하여 이태리의 FN은 현재 약 수백kW/year의 생산 능력을 향후 3년 안에 50MW/year로 늘리는 작업을 추진하고 있다.

이외에도 독일의 MTU에서는 300kW 규모의 내부개질형 모듈을, 스웨덴에서는 simulation에 관한 연구를 그리고 British Gas에서는 내부개질용 촉매 개발 사업을 심도있게 진행하고 있다.

#### 4-4. 한국

국내에서는 정부의 프로젝트형 사업의 중점추진 과제로 용융탄산염 연료전지 발전시스템 개발 사업이 현재 진행 중에 있다. 한전에서는 전력대형 전원의 입지안 및 이에 따르는 전력 생산비의 증가와 기존 발전소의 공해에 의한 지구 환경 문제 등에 대한 대응책으로 고효율이며 환경 영향이 적어 전력사업에 적용 가능성이 큰 연료전지로, 용융탄산염 연료전지를 선정하여 용융탄산염 연료전지 개발을 신에너지 개발 중장기 사업의 일환으로 추진하여 오고 있다. 용융탄산염 연료전지 발전시스템 개발 사업의 최종목표는 석탄 가스를 이용하는 용융탄산염 연료전지 복합시스템의 국산화로 이와 같은 최종 목표를 달성하기 위해서 3단계의 목표를 설정해 놓고 있다. 즉 1단계 사업은 국내 보유 기술인 단위전지 제작 기술을 근간으로 하여 1992년부터 1996년까지 4년간 2kW급 용융탄산염 연료전지 스택을 제작 운전함으로써 스택 구성의 기반 기술을 확립하고, 2단계 사업은 1997년부터 2002년까지 6년간 100kW급 발전시스템을 개발하는 것으로 되어 있다. 그리고 3단계 사업은 용융탄산염 연료전지 발전시스템 기술의 대규모 상용화 전 단계로 구체적인 방향은 2단계 사업이 끝날 무렵 국내외 기술 현황 및 수준을 평가한 후 확정하도록 되어 있지만 잠정적으로 2000년대 초반에 전력 공급용 MW급 석탄가스화 용융탄산염 복합 발전시스템 개발의 상업화를 구체화하는 것을 목표로 잡고 있다. 이와 같은 중장기 사업은 한전이 총괄 주관하되, 1단계에서의 개발의 주체는 정부출연연구소인 KIST가 담당하고 삼성중공업 및 대학이 공동참여하며, 보다 규모가 큰 2, 3단계에서의 개발의 주체는 전력연구원이 담당하여 정부출연연구소 및 대학이 공동 참여하는 형식으로 계획하고 있다.

현재의 국내 기술 수준은 살펴보면 1996년에 1단계 사업의 목표인 2kW급 스택의 1,000시간 이상 운전이 달성된 후, 스택의 대형화 개발과 전지구성요소의 성능 개선 연구에 매진한 결과 1998년에 7kW급 스택의 5,000시간 이상 운전이라는 획기적인 기술 발전을 이루었으며, 1999년 말에는 전극면적 6,000cm<sup>2</sup>의 대형 스택과 가압, 가스 recycle을 할 수 있는 BOP를 갖춘 25kW 시스템이 운전되었다. 또한, 100kW 시스템의 점검용으로 제작된 새로운 25kW 스택이 2003년에 상압 및 가압 조건에서 약 5,000시간동안 운전되었으며 현재 충남 보령화력발전소 내에 100kW급 실증 시스템이 건설중에 있다. 이에 따라 국내의 기술 수준도 외국에서 인정하기 시작하여 일본의 경우, 통산성 제출 보고서에 한국의 동향을 알리는 난이 신설되었으며, 각 연료전지 관련 학회에서 한국의 개발 내용이 소개되는 등 세계에서 4번째로 독자기술로 kW급 이상 스택 및 시스템 제작 능력을 갖는 국가로서의 대접을 받고 있다. 그러나 이미 앞에서 언급한 바와 같이 궁극적인 연구 개발의 목표인 상용화를 달성하기 위해서는 경제성 제고와 함께 수명 및 신뢰성을 확보할 수 있도록 기술적 문제점을 극복하는 체계적인 연구가 요구되고 있다.

#### 4. 결론

이상에서 살펴본 바와 같이 선진 각국은 용융탄산염 연료전지 발전 기술의 높은 잠재력을 충분히 인지하고 정부 및 기업 차원에서 막대한 연구 자원을 장기간 지원해 왔으며, 앞으로도 계속할 전망이다. 향후 이러한 선진국들과의 치열한 용융탄산염 연료전지 시장 쟁탈 경쟁에서 승리하기 위한 국제 경쟁력을 갖추기 위해서 최근 우리나라 정부도 연료전지를 10대 성장산업의 하나로 선정하였으며 산업자원부 산하에 수소 연료전지 사업단을 발족하여 연구 개발비의 지원뿐만 아니라 구체적인 상용화 개발 전략수립하려고 하고 있다. 이러한 국가적인 지원과 뛰어난 개발 전략이 어우러질 때에 개발비의 절감, 조기 시장 진입이라는 단기적 성과와 함께 국내 용융탄산염 연료전지 기술개발의 궁극적 목표인 석탄가스화와 연계된 대형 발전소 건설을 앞당기는 장기적 성과도 가져올 것으로 기대된다.