

# 용융탄산염 연료전지 발전시스템 개발 현황

용융탄산염 연료전지 (Molten Carbonate Fuel Cells) 발전시스템의 국내외 개발 현황에 대해 소개한다.

한 종 희

한국과학기술연구원 연료전지연구센터(jhan@kist.re.kr)

임 태 훈

한국과학기술연구원 연료전지연구센터(thlim@kist.re.kr)

## 서론

최근 환경 및 자원 고갈 문제의 인식이 확산됨에 따라 연료전지에 대한 관심이 증폭되고 있으며 우리나라를 비롯한 세계 각국들은 막대한 재원을 투입하여 미래 에너지 확보 차원에서 경쟁적으로 연료전지 관련 기술을 개발하고 있다. 연료전지는 그 종류도 다양할 뿐만 아니라 응용분야도 대형 발전에서부터 휴대용까지 매우 다양하며 세계 각국은 자국의 이해에 따라 몇 가지 연료전지 기술을 집중적으로 연구 개발하고 있다.

여러 가지 종류의 연료전지 중, 용융탄산염 연료전지는 분산형 발전 또는 대형 발전용으로 개발되고 있는 발전용 연료전지이다. 용융탄산염 연료전지는 650℃의 고온에서 작동되기 때문에 높은 효율, 환경친화성, 모듈화 특성 및 작은 설치 공간 등 다른 형태의 연료전지와 공통으로 갖는 장점 이외에도 상대적으로 저렴한 전극 재료를 사용할 수 있고 일산화탄소를 비롯한 다양한 연료를 사용할 수 있다는 또 다른 장점을 가지고 있다. 또한 양질의 폐열을 회수, 이용함으로써 시스템의 효율을 더 증대시킬 수 있고 스택 내부에서 연료개질을 진행하는 내부 개질 형태의 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

따라서 미국을 비롯한 여러 나라에서는 용융탄산염 연료전지의 개발에 많은 노력을 기울여왔으며 미국의 경우에는 거의 상용화 단계에 진입하고 있다고

알려져 있다. 이에 따라 미국 이외의 국가에서도 상용화 경쟁에 뒤처지지 않도록 용융탄산염 연료전지의 개발에 더욱 박차를 가하고 있어 용융탄산염 연료전지의 시장 진입이 가시화되고 있는 실정이다.

본 고에서는 개발 경쟁이 심화되고 있는 용융탄산염 연료전지의 기본 개요와 국가별 개발 현황을 소개하고자 한다.

## 용융탄산염 연료전지 발전 시스템 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, 천연가스 등을 스택에서 사용 가능한 연료가스로 전환시키는 연료 처리 장치, 공기 공급 장치 및 정화 장치 등으로 구성된다. 용융탄산염 연료전지와 같은 고온형 연료전지용 연료 처리 장치는 그 위치에 따라 외부 개질형과 내부 개질형으로 나눌 수 있다. 외부 개질형은 연료 처리장치를 연료전지 스택 외부에 독립적으로 설치하여 스택에 연료가스를 공급하는 방식으로 다양한 연료를 사용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 한편 내부개질형은 스택 내부에 개질실을 설치하거나 연료극에서 직접 개질을 하는 방식으로 흡열 반응인 개질반응이 발열 반응인 전극 반응에서 나온 반응열을 흡수하여 스택



냉각에 매우 유리하다는 장점을 가지고 있다.

연료 처리 장치에서 적절히 조절된 연료와 공기를 사용하여 전류와 열을 생성하는 연료전지 스택은 적층된 수백장의 단위전지로 구성되며, 반응가스가 각 단위전지로 균등하게 공급되도록 설계된다. 각 단위전지로 가스를 배분하는 위치에 따라 외부 manifold 및 내부 manifold 형태로 스택을 구분지을 수 있다. 외부 manifold는 분리판 외부에서 가스켓을 사용하여 가스를 공급하는 방식으로, 분리판의 구조가 간단하여 제작 및 조립이 간편한 이점이 있다. 그러나 cross-flow만 가능한 가스흐름 형식의 제한, 고온에서 가스 밀봉과 전기적 절연 역할을 하는 가스켓 제작의 어려움과 운전 중 스택 양단간의 전압차에 의해 전해질이 이송되어 전해질 조성이 변하는 단점이 있다. 반면에 내부 manifold 형태는 분리판의 wet seal 부분을 통하여 가스가 공급되므로 설계 및 제작이 어려우며, 넓어진 wet seal 면적과 함께 증가한 부식에 의해 전해질 손실이 증가하는 단점이 있지만, 가스흐름 형식 선택 및 운전 중 스택 높이 변화에 자유로우며, 전해질 이송 현상이 없는 장점이 있다.

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.

### 국가별 개발 동향

현재 전세계에서 용융탄산염 연료전지의 상용화를 목적으로 본격적으로 연구개발에 참여하고 있는 나라는 250 kW급 분산 발전형 시스템을 판매하고 있는 미국을 필두로 하여 일본, 독일, 이탈리아 그리고 대체에너지 및 전력기반 사업으로 상용화를 추진하고 있는 한국 등 5개국이며, 이외에 유럽의 덴마크, 스페인, 영국, 스웨덴 등이 부분적으로 참여하고 있는 실정이다. 이 중에서 kW급 이상 스택의 독자 제작 능력을 가진 나라는 미국, 일본, 독일, 이탈리아, 한국 등 5개국이며, 이외의 국가들은 미국에서 제공

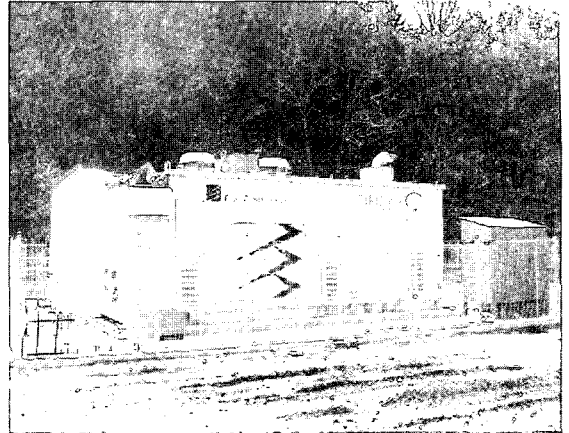
받은 스택을 활용하는 시스템 개발에 중점을 두거나 연구 중심의 재료 개발에 힘쓰고 있는 실정이다. 각국은 그 동안 개발된 기본기술을 바탕으로 250 ~ 500 kW급 분산발전용 시스템 개발을 완료하였거나 준비 중에 있으며, 구성요소들의 내구성 및 경제성 문제들을 지속적으로 향상시켜 가며 시장진입을 시도하고 있다. 각국의 개발 내용을 간단히 정리하면 다음과 같다.

### 미국

미국은 1960년대부터 기본기술 개발을 시작하였으며, 1976년에 DOE (Department of Energy) 주도로 여러 회사가 참여하여 용융탄산염 연료전지 개발을 본격화한 이래 1979년부터 스택개발에 착수하였고 1986년에 IFC (International Fuel Cells)가 25 kW급 외부개질형 스택을 개발하여 운전시험에 성공한 바 있다. 또한 미국공영전력연합 (American Public Power Association: APPA) 이 Energy Research Corporation(ERC)가 개발한 100 kW급 스택의 Pilot Plant를 전력회사인 PG&E (Pacific Gas & Electric Company)에 설치, 운전시험을 수행하여 용융탄산염 연료전지 발전시스템의 최초 실증 시험을 완료하였다. 또한 EPRI (Electric Power Research Institute)와 Gas Research Institute도 DOE와 함께 연구비 지급 및 프로그램 운영 등으로 용융탄산염 연료전지 개발 계획을 지원하여 1996년 초반기부터 ERC에서 개발한 내부개질형 2 MW급의 전사용 공장이 Santa Clara에서 운전되었으며, 또한 외부개질형을 개발하는 M-C Power 사에서는 1997년도에 San Diego의 Miramar 해군기지에서 250 kW급 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 결정하여 내부개질형, 내부 manifold형 스택의 개발에만 전념하게 되었다. FCE는 분산발전용으로 사용되는 250 kW급 시스템 및 대용량 발전용으로 개발될 수 있는 MW급 모듈을 개발하고 있으며 이들 시스템들은 현재 국가의 보조 없이 독자적인 시장 진입을 위한 보급 단계에 있다. FCE의 시스템의 시장



(a)미국 New Jersey의 Sheraton Hotel



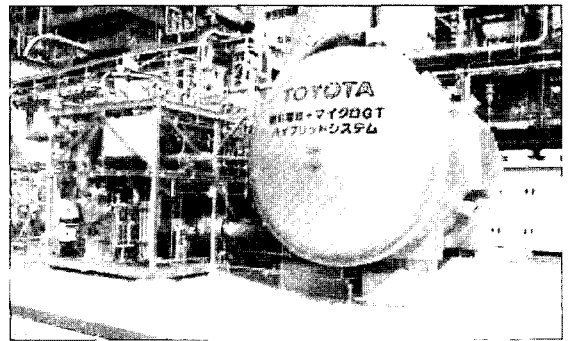
(b)우리나라의 포항산업과학연구원

[그림 1] 미국 FCE사의 250 kW급 MCFC 발전 시스템

진입은 주로 250 kW급 시스템 위주로 진행되는데, 이 시스템의 가격은 약 \$5,000 정도이며 수명은 약 20,000 시간 정도로 알려져 있어 완전한 시장 진입을 위해서는 가격 저감 및 고수명화가 필수적인 것으로 판단된다. 현재 전 세계적으로 약 50기 정도가 보급되어 시범운전 중에 있으며 우리나라에도 포항 산업과학연구원 내에 1기가 운전되고 있으며 향후 2기가 더 설치 운전될 예정에 있다(그림 1).

**일본**

일본은 통산성 공업기술원 산하 신에너지개발기구(New Energy Development Organization : NEDO) 주도로 1981년에 시작된 Moonlight Project의 일부로 용융탄산염 연료전지의 요소기술 개발을 시작하여 1986년 10 kW급 스택을 개발하였다. 이후 1994년에는 내부개질형 및 외부개질형 100 kW급 연료전지 스택을 Agaki 시험소에서 운전 평가하였으며, 이 결과를 바탕으로 새로이 시작된 New Sunshine Project에서는 외부개질형 개발사업으로 Kawagoe에 1 MW급 MCFC 플랜트 건설을, 내부개질형 개발 사업으로는 200 kW 발전 시스템 건설을 추진하여 1999년 말부터 운전을 실시하여 각기 약 5,000 시간의 발전 실적을 기록하였다. 이 운전 기간 동안에 개질기 운전 및 가압운전에 따르는 문제점을 파악하여 새로운 설계 모델을 파악하였다. 2000년부터 새로이 시작된 MCFC 개발사업은 IHI의 주관으로 300 kW

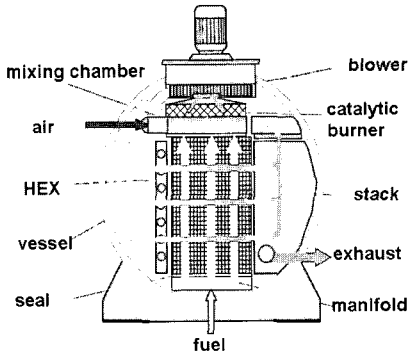


[그림 2] 일본 Toyota에 설치된 300 kW급 가스터빈과 연계된 MCFC 발전 시스템

급 모듈 개발 및 소형 가스터빈과 연계된 700 kW급 고성능 모듈 플랜트 개발을 추진하였다. 가스터빈과의 연계에 따라 이 시스템은 가압형으로 개발되며 연료의 다양성을 갖는 외부개질형, 내부 manifold형이 채택되었다. 하지만 고적층 스택의 가스 분배 문제로 가스터빈이 연계된 300 kW급 시스템만이 운전 완료된 것으로 알려져 있다. 이후, IHI 단독으로 가스터빈이 연계된 가압형 용융탄산염 연료전지 시스템을 개발하고 있다(그림 2).

**독일**

독일의 MTU사는 Ruhrgas와 덴마크의 Hald-Topsoe, Elcraft 등은 1989년부터 콘소시움을 형성하

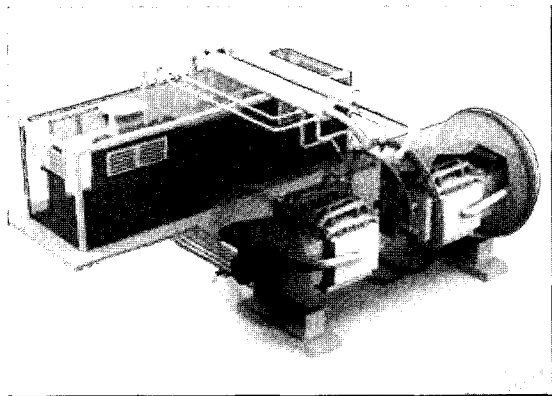


[그림 3] 독일 MTU CFC Solution사의 Hot Module 시스템

여 전체 시스템이 하나의 모듈로 구성되는 직접내부 개질형 280 kW 시스템을 개발하였다. 이후, 독일의 MTU사는 미국의 FCE에서 제공한 스택을 사용하여 Hot Module 시스템을 개발하였다. 이 내부개질형 시스템은 전기 및 프로세스용 스팀의 동시 생산이 목적인 열병합 발전이며, 제조원가 감소를 위해 연료 입구 이외의 manifold는 생략되고, 전체 시스템이 하나의 용기에 수납되어 파이핑 등이 매우 간단해지는 특징을 갖고 있다. MTU는 2002년부터 Hot Module을 상용화하기 위하여 MTU CFC Solution이라는 venture회사를 설립하고 Hot Module 시스템을 시범 운전하고 있다. 현재 FCE의 스택을 사용한 Hot Module 시스템이 독일 전역에 10기 이상 운전되고 있다. 또한 MTU CFC Solution사는 FCE에서 제공된 스택이 아닌 자사 제품의 스택을 개발하기 위하여 구성요소 기술을 개발하고 있다고 알려져 있다(그림 3).

**이탈리아**

1970년대 후반부터 MCFC를 개발하기 시작한 이탈리아의 Ansaldo는 유럽 연합 프로그램인 Molecare project의 일환으로 외부개질형 발전 시스템을 개발하였다. 미국 IFC의 스택 기술을 도입하여 1998년 5월부터 스페인 마드리드에 조립된 100 kW급 스택을 약 1,000 시간 정도 운전하였다고 알려져 있다. 이러한 결과를 바탕으로 Ansaldo는 2001년에 Ansaldo Fuel Cell (AFCo)이라는 독립된 회사를 설립하고 현재 Series 2TW라는 500 kW급 발전 시스템을 개발



[그림 4] 이탈리아 Ansaldo사의 500 kW급 TwinStack의 개념도

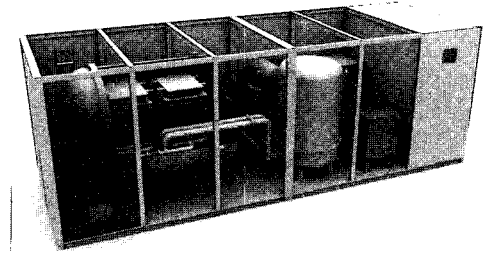
중에 있다. Ansaldo의 500 kW급 발전 시스템은 그림 4에 나타낸 바와 같이 250 kW급 두 개의 substack으로 구성되어 있으며 외부 개질형 및 외부 manifold형을 채택하고 있으며 현재 실증 실험을 위한 4기가 건설 중에 있으며 가까운 시일 안에 시스템 가동을 목표로 하고 있다.

**한국**

국내에서의 용융탄산염 연료전지 개발사업은 용융탄산염 연료전지의 개발 잠재성 및 효율성을 인식한 정부 및 한전의 주도로 진행되고 있다. 1989년 대체에너지 사업의 하나로 시작된 이 사업은 국내에서 처음으로 KIST에 의해 전지구성요소 제작 기술개발, 소형 단위전지 운전 같은 기본기술 확보에 성공하여



(a) 100 kW급 시스템



(b) 250 kW급 시스템 개념도

[그림 5] 우리나라의 MCFC 시스템

1993년 G7 사업의 하나로 채택되면서 본격적인 개발이 추진되었다. 이후, 한전, KIST, 삼성중공업 및 6 개의 대학이 산학연 형태로 참여하여, 1996년에는 1000 cm<sup>2</sup> 단위전지 20 장을 적층한 2 kW 스택의 제작 및 운전이 순수 국내 기술로 성공적으로 이루어졌고, 내부개질형 스택도 같은 기간 동안 삼성전자(후에 삼성중공업으로 이전) 주관으로 진행되어 직접개질형 2 kW 스택이 개발되었다. 이어 1998년에는 3000 cm<sup>2</sup> 단위전지 20 장을 적층한 5 kW급 스택이 5,800 시간 이상 연속 운전되었고, 1999년에는 6000 cm<sup>2</sup> 단위전지 40 장을 적층한 25 kW 시스템의 제작 운전에 성공하여 상용화에 필요한 기반기술을 확립하였다. 이들 기술을 바탕으로 2005년 현재 보령 화력발전소 내에 외부개질형, 내부 manifold형 100 kW급 시스템이 운전 중에 있다. 이 시스템은 스택의 성능 향상 및 냉각을 효율적으로 수행하기 위하여 3 atm까지 가압하여 운전하도록 설계 되어있다. 한편, 전력산업연구개발 사업의 일환으로 상용

250 kW급 compact 시스템의 개발이 2004년부터 전력연구원 주관으로 진행되고 있다.

### 결 언

이상에서 살펴본 바와 같이 용융탄산염 연료전지 발전 기술은 다른 연료전지에 비해 상용화에 훨씬 더 근접해 있다고 생각된다. 따라서 용융탄산염 연료전지 분야에서 앞선 국가들은 용융탄산염 연료전지 시장 쟁탈 경쟁에서 승리하기 위해 치열한 경쟁을 벌일 것으로 예상된다. 우리나라도 그 동안 많은 관심과 지원으로 용융탄산염 연료전지 분야에서 상당히 많은 발전을 이룩하였다. 하지만 이 분야의 치열한 경쟁에서 생존하기 위해서는 정부의 확고한 개발 의지 및 지원뿐만 아니라 보다 구체적인 상용화 개발 전략이 절실히 요구된다. 이러한 국가적인 지원과 뛰어난 개발 전략이 어우러질 때에만 비로소 용융탄산염 연료전지의 상용화를 우리 손으로 이룩할 수 있을 것이다. ㉠