

고온형 고체 산화물 연료전지 개발 현황

송락현

한국에너지기술연구소

Development Status of High Temperature Solid Oxide Fuel Cell

Rak-Hyun Song

Korea Institute of Energy Research

1. 서론

고체산화물 연료전지(solid oxide fuel cell: SOFC)는 수용액을 전해질로 사용하는 저온형 연료전지인 인산형, 용융탄산염에 존재하는 부식문제, 고가 촉매, 전해질 제어, 개질기 도입 등의 단점은 없으나, 고체산화물 연료전지를 이루는 구성요소의 대부분이 세라믹으로 이루어져 있고 섭씨 1000도의 고온에서 작동되기 때문에 재료간의 반응문제 및 신소재 개발, 전극특성 향상, 단전지 기술, 스택 제조, 발전시스템 기술 및 운전시험 평가 등이 주요한 연구개발 과제들로 대두되고 있다. 본 고에서는 고체산화물 연료전지 기술 개발중심으로 최근의 고체산화물 연료전지의 제조 기술, 발전시스템 기술, 국내외 고온형 고체산화물 연료전지 제조 기술 분석 및 개발 전망 등을 토의하였다.

2. 고체산화물 연료전지 종류별 특성 및 발전시스템 구성

(1) 원통형 고체산화물 연료전지(Tubular solid oxide fuel cell)

단전지식 원통형 구조(Sealless tubular design)는 Westinghouse가 1980년에 개발하였으며, 현재 가장 기술이 앞선 구조이다. 이 구조의 단전지시험은 7만 시간까지 행하여졌으며, 안정하고 우수한 성능을 나타내었다. 현재 100 kW 본체가 Westinghouse 의해 개발되었다. 이 구조의 구성요소들은 한 끝이 막힌 지지관위에 얇은 층으로 형성되어 있으며, 각 원통관이 하나의 단전지이다. 초기에 단전지식 원통형 구조는 ZrO_2 관을 사용하였으나 단위전지당 성능을 높이기 위해 CaO-stabilized ZrO_2 관으로 개선하였으며, 현재는 지지관을 별도로 두지않고 공기극 자체를 지지체로 하는 공기극 지지체식 원통관을 사용하고 있다. 단전지식 원통형구조의 가장 큰 특징중의 하나는 전지간에 기체 밀봉체가 필요하지 않다는 것이며, 이로 인해 다른 연료전지에서 발생하는 세라믹 밀봉체의 문제점이 발생되지않는다는 것이다. 단전지식 원통형구조의 다른 특징은 각각의 전지가 견고한 지지체위에 형성되어 있기 때문에 연료전지 자체가 튼튼한 세라믹 구조를 이루고 있다는 점이다. 그리고 환원성 분위기에서 전지관사이의 접촉이 이루어지므로 전지관 연결이 용이하다. 반면에 단전지식 원통형구조는 전류흐름 경로가

길다는 단점을 갖는다. 게다가 공기극 지지관의 부피와 두께는 평판형의 것에 비해 크기 때문에 단위 부피당 전력 밀도를 감소시키며, 두꺼운 지지관은 산소의 이동속도를 제한 시킬 수 있다. 또한 EVD 공정 (Electrochemical Vapor Deposition)으로 제조되는 이러한 구조는 전해질과 연결재의 도핑원소 선택을 제한하며, 다공성 공기극위에 각층이 연속적으로 형성되기 때문에 각 구성요소의 제조조건을 독립적으로 변화시키기가 어렵다.

다전지식 원통형 구조 (Segmented-cell-in-series design)는 1960년대 초에 개발되었으며, 하나의 원통관에 단전지가 직렬로 여러개 배열된 구조를 갖는다. 전지는 얇은 띠 형태로 원통관 주위에 연결되며, 연결재가 연료극과 이웃 공기극사이의 전기적 이음선 및 밀봉제 역할을 한다. 이 구조에서의 전류의 흐름 경로는 전극의 크기에 의존하게 되며, 전극의 내부저항에 의한 전지성능 손실을 감소시키기 위해 전지의 길이는 가능한 짧아야 한다. 다전지식 원통형 구조는 단전지식 원통형 구조와 마찬가지로, 기계적 강도가 우수하고 열 응력에 대한 저항성이 뛰어나나, 높은 전지 내부저항, 지지관으로 인한 연료 확산의 장애가 문제점으로 대두되고 있다. 단전지식 원통형과는 달리 다전지식 원통형 구조는 원통관의 하부에서 기체 밀봉이 필요하며 모듈내에 스택 즉 원통관의 수가 증가할수록 기체 밀봉의 문제는 더욱 커진다.

(2) 평판형 고체산화물 연료전지 (Planar solid oxide fuel cell)

인산형 연료전지와 용융탄산염형 연료전지의 구조와 동일하며, 최근에 여러나라에서 연구개발이 활발히 진행되고 있다. 이 구조는 기하학적으로 매우 단순하며, 현재 10 kW급 연료전지본체가 독일 SIEMENS 사에서 개발되었으며, 100 kW 본체개발을 진행하고 있다. 평판형 연료전지는 각 구성요소들을 적층하여 스택을 만들며, 전류는 공기극, 전해질, 연료극, 연결재 순으로 각 구성요소들의 면에 수직 방향으로 흐른다. 그래서 원통형 구조에 비해 전류의 흐름경로가 짧다. 평판형 구조의 이점은 원통형구조에 비해 높은 성능과 전력밀도를 소유하며, 원통형에 비해 평판형구조는 사각형, 원형, 육각형 등 여러가지 형태로 쉽게 만들 수 있다. 또한 평판형 구조의 전해질과 연결재는 고밀도로 독립적으로 제조될 수 있어, 원통형에서 발생할 수 있는 공소결의 문제점을 해결할 수 있다. 지금까지 여러가지 크기의 평판형 단위전지와 스택을 제조하여 왔으며, 현재 제조된 평판형 전해질판의 최대 크기는 20×20 cm² 이며, 이보다 더 큰 크기로 전해질판을 만드는 데에는 어려움이 많을 뿐만 아니라 제조된 전해질판도 강도가 약해 다루기가 매우 어렵다.

(3) 고체산화물 연료전지 발전 시스템 구성

현재 개발되고 있는 고온형 고체산화물 연료전지 발전시스템은 가스터빈과 증기 터빈을 연계한 복합 발전시스템이다. 그림 1은 Westinghouse사가 개발중인 MW급 고온형 고체산화물 발전시스템의 개략적인 구성도를 나타내고 있다. 이 시스템의 출력은 총 3 MW로 가압형 고체산화물 연료전지출력은 1.8 MW이고

가스터빈출력은 1.2 MW이다. 시스템의 전기효율은 63 % 로 높은 값이고 고체산화물 연료전지와 가스터빈의 압력비는 6:1로 설계되었다. 고체산화물 연료전지는 3개의 모듈로 구성되어 있으며, 모듈당 전지수는 2496개이고 전지 직경 및 길이는 각각 2.2 cm, 150 cm이며, 전지당 출력은 6 기압에서 250 W이다. 이 발전시스템은 터빈펌프를 이용하여 압축된 공기와 압축 천연가스를 스택으로 공급한다. 압축된 천연가스는 prereformer를 통해 75% 정도 1차 개질된 후 스택에 공급되며, 반응후 배출된 고압 가스는 가스터빈에 공급된다. 이 발전시스템의 가격은 kW당 1300 달러 정도로 예측되고 있으며, 이 가격이면 기존 발전시스템과 충분한 경쟁성을 갖게 된다.

3. 국내의 고온형 고체산화물 연료전지 기술 개발 현황 및 전망

미국은 에너지성(DOE)와 전력연구소(EPRI)를 중심으로 연구개발 프로그램이 진행되고 있다. DOE의 경우 원통형 고체산화물 연료전지를 집중적으로 지원하고 있으며, DOE는 웨스팅하우스사의 25kW, 100 kW의 성공적인 개발에 힘입어 2002년까지 2억달러를 투자하여 고체산화물 연료전지/가스터빈 복합발전시스템인 가압형 250 kW, 1 MW, 2 MW 발전시스템을 개발하는 프로그램을 1997년부터 진행하고 있다. 또한 DOE는 대학과 연구소에 연구비를 지원하여 원통형 구조의 기본기술 개발을 진행시키고 있다. EPRI, GRI, DOD, NASA, NIST 등에서도 각자의 목적에 따라서 일정액의 연구개발비를 투자하여 고체산화물 연료전지 기술 개발을 추진하고 있는 상황이다.

일본의 고체산화물 연료전지 연구는 NEDO의 지원하에 뉴선사인 프로그램으로 진행되고 있다. 지금까지 주로 평판형 고체산화물 연료전지를 많이 연구개발하여 왔으나, 기술적인 문제점과 개발 속도 등을 감안하여 원통형 구조도 함께 개발하고 있는 상황이다. 일본은 미국 기술의 도입과 자체기술의 개발을 병행으로 추진하고 있다. 평판형 연료전지의 연구는 국립연구소, 전력회사, 가스회사, 세라믹 회사 등 많은 기업들이 추진하고 있는 상황이다. 현재 5 kW의 평판형 연료전지 개발이 이루어졌으며, 10 kW의 개발을 진행하고 있다.

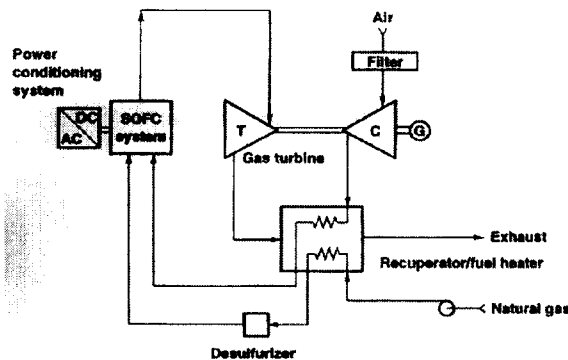
유럽은 독일을 중심으로 영국, 네덜란드, 덴마크, 스위스 등에서 연구개발이 진행되고 있다. 독일은 현재 10 kW, 20 kW의 평판형 고체산화물 연료전지를 제작하여 운전하였으며, 2000년초까지 100 kW의 발전시스템 개발을 추진하고 있는 상황이다. 이와 아울러 독일은 연료극 지지체식 평판형 구조 개발을 진행하고 있다. 또한 각 구성요소의 개발과 신형 구조 개발 등이 여러 나라에서 추진되고 있다. 최근에 호주는 고체산화물 연료전지 전문회사인 CFCL을 설립하였으며, 이 회사는 3-5 kW의 스택을 개발하였다고 보고하였다.

국내에서의 고체산화물 연료전지기술은 1994년에 대체에너지기술 개발 프로그램으로 진행되어왔으며, 각 연구소, 대학, 기업 등에서 기초기술 개발, 요소기술 개발, 단전지 기술, 스택 기술 개발 연구가 진행되고 있다. 연구 개발은 주로 평판형 기술 개발 연구가 진행되고 있고 개발된 요소기술의 크기는 100 cm²이

다. 스택 제조기술은 100 W 미만이나 단전지 제조기술 및 전극 기술등은 확보되어 있는 상황이다. 또한 국내에서 개발된 단전지의 성능은 0.77 V, 300 mA/cm²로 선진국과 비교해서 손색이 없을 정도로 높은 값이다. 이 기술을 바탕으로 2000년대 초까지 kW급 기술을 개발하고 이어 수십 kW급의 실용화 기술을 개발하는 연구개발 프로그램이 구성되어 있다.

고온형 고체산화물 연료전지는 시스템 성능의 우수성으로 대형 발전소용 뿐만 아니라 분산전원용 및 기관차 등 이동용 동력원으로 개발되고 있다. 미국, 일본, 독일 등 선진국들은 고체산화물 연료전지의 시장 진입은 인산형, 용융탄산염형 등 저온형 연료전지의 실용화 규모와는 비교가 되지않을 정도로 대규모일 것으로 예측하고 있다. 그 이유는 다단계 복합 발전시스템이기 때문에 발전소의 용량이 시장진입 초기에 수 MW에서 점차 수백 MW의 규모가 될 것으로 생각되기 때문이다. 또한 고체산화물 연료전지 발전시스템의 실용화 규모와 석탄가스화 시스템과의 연계 기술 개발 등에 의존하여 기존화력 발전소, 원자력 발전소 등의 대체가능성도 기대되고 있다.

현재의 기술 개발속도로 보아 2005년 이내에는 MW 급 고체산화물 연료전지 발전시스템이 실용화될 것으로 판단되며, 미국은 자체 기술을 확보하고 있기 때문에 기술적인 우위를 강점으로 내세워 일본, 독일 등으로부터 투자유치를 본격화하고 있다. 또한 미국 Westinghouse 사는 전력회사, 가스회사, 에너지 관련 회사 등을 중심으로 연간 수백 MW 이상의 고체산화물 연료전지 발전시스템의 생산을 목표로 세계 최대의 고체산화물 연료전지 제조 전문회사의 설립을 추진중에 있으며, 이를 포함하면, 전세계적으로 고체산화물 연료전지 발전시스템 제조를 위한 전문회사는 현재 3개이고 고체산화물 연료전지의 생산량은 더욱 늘어날 전망이다.



[그림 1] 미국 Westinghouse사에서 설계된 원통형 구조의 3 MW 고체산화물 연료전지-가스터빈의 2 단계 복합발전시스템의 구성도