

발전용 용융탄산염 연료전지 기술 개발 (시스템 운전결과 및 개발현황)

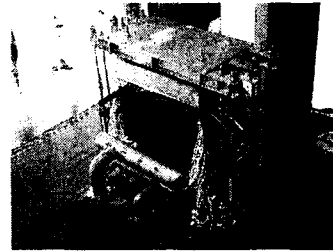
임 희천, 안 교상
한전 전력연구원

**System Development of Molten Carbonate Fuel Cell for Power Utility
(Test Results and Development Status)**

Hee Chun Lim and Kyo Sang Ahn
KEPRI, Korea Electric Power Corp.

Abstract - 분산형 전원 및 석탄 가스화와 연계한 복합 발전이 가능한 용융탄산염 연료전지(MCFC: Molten Carbonate Fuel Cell)는 천연가스, 석탄가스 등 다양한 연료를 사용할 수 있고, 공해요인이 적고, 높은 에너지 변환효율을 가지고 있어 전력사업 분야에 적용 가능성이 가장 큰 새로운 발전방식이다. 국내에서도 1993년부터 선도기술개발 사업의 하나로 시작하여 현재 250 kW급 발전시스템 개발 연구가 진행되고 있다. 250 kW개발 전 수행한 100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발 연구에서는 6,000cm²급 단위전지 90장으로 구성된 50 kW급 MCFC 스택 2기로 구성된 100 kW MCFC 스택과 이를 운전 평가를 위한 시스템을 완성하였다. 2005년부터 스택 운전 전에 필요한 시스템 내 단위기기들에 대한 시운전을 진행한 후 장착된 100 kW MCFC 스택 운전에서는 시스템 단위 기기의 고장으로 전 부하 운전을 실시하지 못했지만 상압 상태에서 AC 50 kW 전력을 계통과 연계 운전 시험을 진행하였다. 향후 100 kW MCFC 시스템 보완후 재 운전 시험을 진행할 예정이다. 한편 병행하여 진행되는 250 kW 열병합 발전 시스템 개발에서는 시스템 상세설계 및 신행 분리판을 이용한 새로운 형태의 스택을 개발 운전시험을 진행하고 있다. 여기에서는 MCFC 발전 시스템의 개요와 시스템의 운전을 위한 운전 모드 그리고 스택 운전 내용을 요약하여 소개하고자 한다.

별도의 설비에서 전 처리 한다. 스택 내 걸리는 부하 전류량은 두개 sub stack을 병렬로 연결시켜 최대 900A 로 되도록 하였다.



〈그림 1〉 50 kW MCFC sub stack

1. 서 론

용융탄산염 연료전지 기술개발은 1993년부터 국가 G7 신 에너지 개발 사업으로 "2 kW급 MCFC 시스템 개발" 연구에 착수하여 기초 기반기술 개발에 성공하였고, 이어 100 kW급 MCFC 개발 1단계 사업으로 25 kW급 MCFC 발전시스템을 건설 운전시험 완료. 세계 4 번째 자체기술에 의한 수 kW급 스택 제작 및 운전기술 확보하였다. 확립된 상용 기초 기반 기술을 바탕으로 발전분야 신기술로 보급이 예상되는 MCFC 발전기술 선점을 통하여 기력 발전기술 향상을 도모하고 세계 연료전지 기술을 리드하며, 아울러 100 kW급 MCFC 발전시스템의 설치 운전평가를 통한 차세대 저공해 에너지절약형 MCFC 발전시스템의 전력사업 적용을 위한 상용 기반기술 확보를 목표로 하고 있다. 현재에는 분산형 전원으로 250 kW 열병합 발전 시스템의 기술 개발을 진행하고 있으며, 향후 석탄 가스화와 연계한 복합 발전이 가능한 중앙 집중형 MCFC 발전 시스템 개발이 진행될 예정이다.

2. 본 론

2.1 100 kW MCFC 발전 시스템 개요

MCFC 연료전지는 다공성 연료극(anode)과 공기극(cathode) 층 사이에 전해질인 용융 탄산염을 지지하는 전해질 판으로 구성되어 있다. 두 전극 중 공기극에서는 CO₂를 생성하는 산소의 환원 반응이 일어나고 연료극에서는 CO₂를 소모하는 수소의 산화 반응이 일어난다. 양극에서 만들어진 CO₂는 전해질을 통하여 확산, 전달되어 연료극 반응에 참여하고 산화에 의해 음극에서 생성된 전자는 외부회로를 통해 공기극으로 전달되어 환원 반응에 참여한다. MCFC 발전 시스템 구성은 연료전지 반응을 일으키는 전극 및 전해질 등 구성요소로 이루어진 단위전지라 및 이를 여러 장 적층하여 스택(stack)을 구성한다. 연료전지 스택은 주변 기기와 연결되어 전체 시스템으로 구성되는데 전체 시스템은 연료 처리계, 스택 주변 계, 배열 회수 계 그리고 직 교류 변환 계 등으로 나누어진다. 연료 처리계는 연료 가 천연가스인 경우 천연가스 개질기를 필요로 하며 배열 회수계 및 전력변환장치 등으로 구성되어 이들 기기들이 유기적으로 연결되어 종합시스템으로 구성된다. 또한 시스템을 안전하고 안정적으로 운전하기 위하여 플랜트의 운전을 제어시스템이 필요하게 된다. 이번 개발되는 100 kW급 MCFC 발전 시스템은 천연가스를 연료로 하는 외부 개질형 내부 매니폴드 방식의 발전시스템이다.

2.2 MCFC 스택 제작 및 시스템 건설

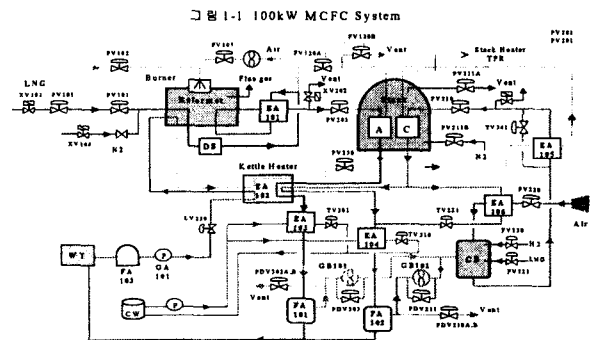
2.2.1 MCFC 스택 설계 및 제작

100 kW급 MCFC 스택은 내부 매니폴드 형식 및 연료가스가 외부에서 공급되는 외부 개질형 스택으로 설계하였다. 100 kW급 MCFC 스택에서는 단위전지 전지 면적은 약 6000 cm² 단위전지가 90장으로 구성된 50 kW급 sub-stack으로 2기로 제작되었다. 스택 내에서의 가스 흐름은 역 U-shape 이고 적층 후 clamping하여 일정한 압력을 가한 후에 단열재로 보온하고

2.2.2 100 kW급 MCFC 시스템 건설

100 kW급 MCFC 발전 시스템은 외부 개질형으로 연료로 천연가스를 사용하며 운전압력 3기압에서 650℃조건에서 운전된다. 연료 및 공기 이용률은 각각 60%, 30%이며, 연료극 미반응 가스는 촉매 연소기의 연소용 연료로 공급되어 미 반응 가스를 최대한 활용하도록 구성되었다. 연료로 사용되는 천연가스는 외부 개질기를 통하여 수성가스 전이반응을 고려한 스택 개질 방식을 이용하여 다량의 수소가 포함된 탄산가스 연료로 공급된다. 반응 후 남은 연료극 가스는 촉매 연소 시에서 연소되어 공기극 연료에 이산화탄소 및 열에너지 공급원으로 사용된다. 연료전지 스택에서 반응한 가스들은 열 교환기를 이용하여 배열회수 과정을 거치게 되며 리싸이클을 이용하여 스택 냉각과 연료 이용률을 증가시키는 시스템으로 구성하였다. 100 kW급 MCFC 발전 시스템 건설은 2003년 8월에 착공하여 2004년 12월 모든 설비를 완성하였다. 설비는 충남 보령에 있는 중부발전 보령화력본부 내 복합발전 단지 내에 건설되었다. 약 400 평의 부지위에 도목 및 건축설비 그리고 기계설비로는 천연가스 개질기, 공기압축기, 증기발생기, 촉매연소기 및 각종 Blower가 있고 전기설비로는 수 배전반, 전력변환기 등이 설치되었다. 이외 전기 및 시수 가스 등을 공급 할 수 있는 유틸리티 설비들을 갖추고 있다.

2.3 100 kW MCFC 발전시스템 운전



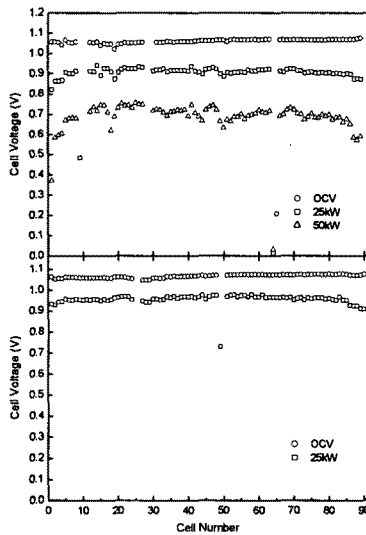
〈그림 2〉 MCFC 발전 시스템 구성

2.3.1 MCFC 운전모드

100 kW MCFC 발전 시스템은 현재 기술 개발 중으로 체제화되고 표준화된 운전형태는 없다. 시스템의 운전모드는 표 1-1 과 같이 상압 운전 Mode와 가압 운전Mode의 운전형태로 나눌 수 있다. 운전Mode의 전환 방법은 상압운전형태에서 가압운전형태로 이루어지며, 기동 시는 그림1-2에서 보는바와 같이 NS(I)→ NS(II) → PS→PR 로 되며, 정지 시는 그 역순이 된다.

2.3.2 MCFC 운전 및 운전 결과

MCFC 스택은 8월4일 보령 MCFC 운전 현장에서 장착되었다. 스택을 운전하기 전 Stack 내 단위전지 제작 시 사용된 바인더 및 용매를 제거하고, 공기 극 Nickel 전극을 산화시켜 NiO로 만들어 주기위한 전 처리 과정을 해 주어야한다. 전 처리 총 시간은 약 800 시간 정도를 소요하였다. 전 처리 시험 완료 후 최초의 부하 운전 시험은 9월16일 실시하였다. 전 처리용 가스를 이용한 부분 부하 운전 시험에서 최대 출력은 50 kW 발전 전력을 기록하였고, 이는 상압 상태에서의 공기 극에 주어지는 가스 유량이 제한되기 때문이다. 25 kW 출력에서 하부 스택의 단위전지 평균 전압은 0.91V이고 상부 스택은 0.96 V를 나타내었다. 50 kW 출력에서 하부 스택의 단위전지 평균 전압은 0.66 V이고, 상부 스택은 0.82 V를 나타내었다. 상부 스택은 매우 양호한 출력 성능을 보이는 반면에 하부 스택의 경우는 전체적으로 성능이 떨어지는 것으로 나타났다. 부분 부하 운전 시험에서 최대 출력은 50 kW AC 발전 전력을 기록하였고, 이는 상압상태에서의 공기극에 주어지는 가스 유량이 제한되었기 때문이다. 그러나 유감스럽게도 보조기기의 고장으로 전 출력 운전시험을 실시하지 못하였다. 특히 시스템적으로 스택의 운전조건을 만족시키지 못하여 스택의 전부하 운전시험을 실시하지 못했다. 향후 이를 보완하기 위하여 별도의 연구개발과정을 거친후 2006년 말 설비 보완 후 새로운 스택을 장착 스택에 들어가는 가스 유량과 운전온도를 확보한 후 2006년 12월말 재 운전시험을 실시 할 계획이다.



〈그림 3〉 MCFC 스택 운전 특성

2.4 문제점 및 개선 방안

100 kW급 MCFC 발전시스템에서 운전이 불가능하게된 것은 스택 운전 온도확보의 미비가 가장 큰 과제이다. 우선 연료 극에 필요로 하는 운전온도인 580℃를 맞추기 위한 개질기 외부온도 확보가 충분하지 않았고 또한 이산화탄소의 공급원과 함께 공기극 운전온도 확보의 가장 중요한 역할을 담당하는 촉매연소기의 고장이 시스템의 정상적인 운전에 커다란 장애를 제공하였다. 이외 시스템 내 열 분포 해석 미흡하여 시스템 Line 상 Heat Loss 부분의 미반영이 시스템 운전을 불가능하게 한 요인이 되었다.

전체적으로 시스템 설계 시 초기운전에 대한 Heat and Mass 고려가 부족하였고 또한 단위기기(개질기, 촉매연소기 및 공기 송풍기) 등에 대한 충분한 기술을 확보하고 있지 않아 성능확보가 어려운 것이 큰 문제점으로 나타나고 있다. 이와 같은 문제점을 개선하기 위하여 단기적으로는 현재 개발 중인 신형 MCFC 스택을 보령 100 kW MCFC 발전시스템 내에서 재 운전할 예정으로 MCFC 스택 운전조건 개선의 위하여 시스템 내 Heater를 보완하여 시스템의 열 유동을 개선한 후 운전시험을 진행할 예정이다. 이를 위하여 2006년 6월 시스템 보수에 착수 2007년 3월 시스템 재가동 운전시험을 예상하고 있다. 장기적으로는 시스템 내 단위기기의 성능 향상과 시스템 신뢰성 확보를 위하여 보조기기에 대한 연구개발을 진행하고 있다. 특히 개질기의 컴팩트화 및 성능개선을 위한 연구 및 촉매연소기에 대한 기술 개발이 별도로 진행되고 있으며, 향후 진행될 250 kW MCFC 발전 시스템에서는 단순화된 시스템으로 설계하여 제작 할 예정이다.

2.5 250 kW MCFC 열병합 발전시스템 개발

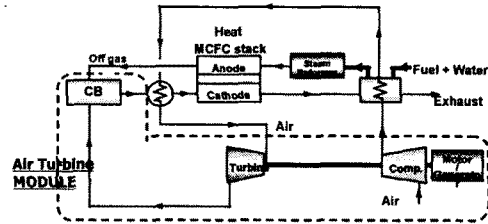
2.5-1 250 kW MCFC 개발 개요

발전용 MCFC 기술개발의 실용화를 위한 중간 단계로 분산형 전원이 가장 큰 가능성을 가지고 있다. 분산형 전원으로 MCFC의 활용에 있어 중요한 점은 수백kW급의 소 용량에서도 기존의 시스템에서는 얻을 수 없는 고효율이 가능하다는 것이다. 기존의 터빈발전방식의 경우 소 용량의 경우, 열손실 등의 이유로 고효율이 어려운 데에 반해, MCFC의 경우는 약 250 kW급 이상의 발전시스템에서도 50%에 가까운 발전효율을 보이고 있다. 이

러한 MCFC의 고효율 특성은 소형 분산형 열병합 발전시스템으로의 용도를 제공한다. 이러한 바탕에서 250 kW급 MCFC 열병합 Proto Type 개발은 실제 상용화를 위한 열병합 발전 설비로서 보급 가능성 및 실증을 위한 설비로서, 고성능 MCFC 스택 모듈 성능 평가, 열병합 능력을 갖는 고효율 분산 발전 시스템의 실증 그리고 저 코스트화 및 고성능 발전 시스템의 기반을 구축하여 장래 실증 보급을 목표로 한다. 기본적으로 시스템의 단순화를 위하여 상압형 열병합 발전 시스템을 고려하고 있으며, 기존의 100 kW급 MCFC 발전 시스템에서 얻은 연구결과를 바탕으로 하여 저 코스트 단위전지 구성요소 개발 실증 및 시스템의 기본 구성을 통하여 고 적용 전지, 고효율 개질기 연계 운전 실증을 진행 할 예정이다. 주요한 기술적 개발 목표로는 출력 : 250 kW AC (송전단) 압력은 상압을 기본으로 가압 시에도 0.3 Mpa 미만으로 운전하며, 목표 운전시간은 10,000 시간으로 연료는 천연가스 그리고 발전효율은 40% (시스템 효율 60%)를 목표로 한다.

2.5-2 250 kW MCFC 발전시스템 개발 현황

250 kW MCFC 발전시스템 개념설계에서폐열 회수로서 전체 시스템의 열효율을 65.9% 이상, 발전효율을 40% 이상 확보하는 결과를 얻었다. 시스템은 Anode exhaust gas를 burner 로 연소하여 Cathode inlet로 송부하여 시스템을 단순화시키고 아울러 연료전지 시스템의 발전효율을 높이는 방안으로 검토되고 있다. 아울러 촉매연소기를 개발하여 개질기내 온도를 촉매 연소기로 가열하는 방안에 대한 검토를 동시에 진행하고 있다. 공기극 배 가스 와 개질기 열량을 스팀으로 회수하고 Steam turbine을 설치함으로써 시스템 전체적인 에너지 효율을 증대 시키는 방향으로 개발이 진행되고 있다.



〈그림 4〉 250 kW MCFC 시스템 개념설계

250 kW MCFC 스택 구성요소 제작 및 스택 개발을 위하여 분리판용 새로운 소재 선정 및 분리판 코팅 및 열처리 설비를 보완하였다. 아울러 구성요소 제조공정 분석 및 경제성 평가를 통하여 구성요소 제조공정의 개선점을 찾아 성능 개선 방안을 도출하고 있으며 이를 바탕으로 구성요소 제작 인프라구축을 도모하고 있다. 현재 구성요소 제조 일관공정을 위하여 Tape Caster 와 연속 소결로를 포함한 총 18종의 MCFC 구성요소 제조설비를 선정/도입 설치하였다. 한편 Gas channel 형상 및 manifold configuration을 포함한 고유모델의 MCFC 분리판 개념을 확립하고 이에 대한 전산 유체역학 모사를 수행하여 분리판 설계를 완료한 후 2,500cm²급 분리판을 설계 제작하였다. 이번 분리판은 지난 100 kW급에 사용되었던 분리판을 개선한 것으로 이전 5 Piece에서 3 piece로 그리고 공기극 유동을 개선한 형태로 설계하였고 제작에 있어서도 평탄도의 개선과 함께 용접에 의한 변형을 최소화 하였다. 한편 스택에 있어서도 메니폴드의 형태를 개선하고 유동을 단순화하며, 면압 장치의 개선과cm² 단위효과를 증대되도록 설계하였다. 현재 개선된 분리판 및 스택구조물을 반영한 25 kW급 MCFC 스택(2500cm²급 단위전지 100장 적층)을 제작 운전시험을 진행하고 있다.

3. 결 론

MCFC 기술은 현재 250 kW급 열 병합 Proto Type 개발 연구가 진행되고 있다. 이 전 수행한 100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발 연구에서는 100 kW MCFC 스택과 이를 운전 평가를 위한 시스템 완성 운전시험을 실시하였다. 장착된 100 kW MCFC 스택 운전에서는 시스템 내 단위 기기의 고장으로 전 부하운전을 실시하지 못했지만 상압 상태에서 AC 50 kW 전력을 계통과 연계 운전 시험을 진행하였다. 향후 100 kW MCFC 시스템 보완 후 재 운전 시험을 진행할 예정이다. 한편 병행하여 진행되는 250 kW 열병합 발전 시스템 개발에서는 시스템 상세설계 및 신형 분리 판을 이용한 새로운 형태의 스택을 개발 운전시험을 진행하고 있다. 시스템 개념에서는 시스템의 단순화와 더불어 발전효율을 높이는 방안으로 검토되고 있다. 아울러 250 kW MCFC 스택 구성요소 제작 인프라구축을 위한 구성요소 제조 설비를 선정/도입 설치하였다. 이어 고유모델의 MCFC 분리판 개념을 확립하고 이에 대한 전산 유체역학 모사를 수행하여 분리판 설계를 완료한 후 2,500cm²급 분리 판을 설계 제작하였고 이를 이용한 25 kW급 MCFC short stack 운전 시험을 진행하고 있다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] 임회천, 안교상 영영창: " 100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발 II, 2004년도 대한전기학회 학계 학술대회 논문집, 2004
- [1] 임회천, 외 : " 250 kW급 MCFC 발전 시스템 개발, 2006 MCFC Workshop Proceedings, 전력연구원, 2006.5.25