

100 kW급 용융탄산염 연료전지 시스템 개발 II(스택 및 시스템 설계)

임희천, 안교상  
한전 전력연구원 발전연구실

System Development of a 100 kW Molten Carbonate Fuel Cell II  
(Design of Stack and System)

Hee Chun Lim, Kyo Sang Ahn  
Power Generation Lab., Korea Electric Power Research Institute

**Abstract** - For developing a 100 kW MCFC power generation system, Several design parameters for a fuel cell stack and system analysis results by Cycle Tempo, a processing computer soft ware, were described. Approximately 170 cells are required to generate 100 kW at a current density of 125 mA/cm<sup>2</sup> with 6000 cm<sup>2</sup> cells. An overall heat balance was calculated to predict exit temperature. The 100 kW power is expected only under pressurized operation condition at 3 atm. Recycle of cathode gas by more than 50% is recommended to run the stack at 125 mA/cm<sup>2</sup> and 3 atm. Manifolds should be designed based on gas flow rates for the suggested operating condition. The fuel cell power generation system was designed conceptually with several choices of utilization of anode exhaust gas. Also system efficiency was calculated at various type of system and operation conditions.

1. 서 론

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. 현재 선진국에서는 MW급 실증플랜트 운전시험을 완료하고 상용 시스템 개발을 진행하고 있다. 국내에서도 1993년부터 선도기술개발 사업의 하나로 시작된 시스템 개발은 1996년에 1,000 cm<sup>2</sup>급 단위전지 20장을 적용한 2 kW급 MCFC 시스템을 개발 운전시험에 성공하였고, 이를 바탕으로 2단계로 100 kW급 발전 시스템 개발 연구가 진행되고 있다. 1997년부터 시작된 2단계 1차 사업에서는, 우선 25 kW급 시스템 개발을 추진하여, 성공적으로 운전함으로써 외부 개질 형 MCFC 스택의 상용 기초기반 기술을 확립하였다. 여기서는 지난해에 이어 2001년부터 본격적으로 추진되고 있는 2단계 2차 100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발 연구 결과를 바탕으로 100 kW MCFC 스택 상세 설계 그리고 전체 시스템 설계 내용을 소개하고자 한다.

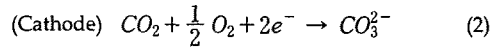
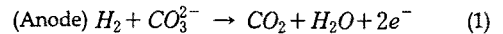
2. 본 론

2.1 MCFC 발전 시스템

2.1.1 MCFC 발전 원리

MCFC 연료전지는 다공성 연료극(anode)과 공기극(cathode) 층 사이에 전해질인 용융 탄산염을 지지하는 전해질 판으로 구성되어 있다. 두 전극 중 공기 극에서는 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>를 생성하는 산소의 환원 반응이 일어나고 연료극에서는 CO<sub>2</sub>를 소모하는 수소의 산화 반응이 일어난다. 양극에서 만들어진 CO<sub>2</sub>는 전해질을 통하여 확산, 전달되어 연료극 반응에 참여하고 산화에 의해 음극에

서 생성된 전자는 외부회로를 통해 공기 극으로 전달되어 환원 반응에 참여한다.



따라서 전지 전체에서의 총괄 반응은 다음과 같다.



2.1.2 MCFC 발전시스템 구성

연료전지 반응을 일으키는 전극 및 전해질 등 구성요소로 이루어진 부분을 단위전지라 하며 이를 여러 장 적층하여 필요로 하는 전력을 얻게 된다. 이를 적층 전지 혹은 스택(stack)이라 하며, 여러 장의 단위전지로 구성된 스택은 가스 공급 방식, 온도 분포, 연료와 공기의 흐름, 가스의 누출, 전해질의 이동 등을 고려하여 설계된다. 또한 연료전지 스택은 주변 기기와 연결되어 전체 시스템으로 구성된다. 전체 시스템은 연료 처리계, 스택 주변 계, 배열 회수 계 그리고 직 교류 변환 계 등으로 나누어진다. 연료 처리계는 연료 종류에 따라 석탄가스를 이용하는 경우 석탄 가스화 설비, 천연가스인 경우 천연가스 개질기 등을 필요로 하며 스택 주변계의 경우 전지에 공급되는 가스의 온도, 유량, 조성 등의 조정을 목적으로 공기 극, 연료 극 가스 재순환 시스템 등으로 구성된다. 배열 회수계의 경우 동력회수 및 가스 터빈, 증기 터빈과의 연계에 의한 복합 발전 기술 등을 포함한다. 이들 주변 기기들을 유기적으로 연결하여 종합시스템으로 구성하며 또한 시스템을 안전하고 안정적으로 운전하기 위하여 플랜트의 운영을 제어시스템이 필요하게 된다.

2.2 MCFC 스택 상세 설계

2.2.1 MCFC 스택 설계 요인 설정

MCFC 스택은 최적의 성능을 낼 수 있도록 가스의 공급 방식, 온도 분포, 연료와 공기의 흐름, 가스의 누출, 전해질의 이동 등을 고려한 매니폴드와 단위전지의 적층 후 발생되는 스택 내 및 외부 기기와의 절연, 스택의 냉각 방식 및 단열, 보온 등에 관한 고려가 필요하다. 100 kW급 MCFC 스택은 가스의 균일한 공급이 용이하며 전해질의 이동문제를 해결할 수 있고 대형화가 용이한 내부 매니폴드 형식의 적층 기술을 채택하고, 연료 가스가 외부에서 공급되는 외부 개질 형 스택으로 개발되고 있다.

100 kW급 MCFC 스택 설계에서는 사용되는 단위전지 전지 면적은 약 6000 cm<sup>2</sup>로서, 길이가 50~53 cm로 폭은 110~115 cm 로 설정하였다. 100 kW 전력을 얻기 위한 총 적층 수는 스택 성능 즉 전류-전압 데이터를 근거로 125 mA/cm<sup>2</sup>의 부하에서 약 0.8 V를 얻는다고 보고, 총 180장을 2개의 sub-stack으로 나누어 스택을 제

작하여 구성하는 것으로 설계하였다.

전지 반응에서는 전기 에너지 외 발생된 열에 의해 스택 온도가 상승하게 된다. Co-flow 형태를 취하고 있는 100 kW 스택은 출구 부분 온도가 최고로 상승하며 안정적 운영을 위해 온도를 700°C 이하로 조절하여야 한다. 출구 온도 조절은 공기 극에 공기를 주입하여 스택 출구를 냉각하게 되며, 공급량은 산소 이용률에 의해 결정된다. 전산 유체 코드를 이용한 Simulation 결과 125 mA/cm<sup>2</sup> 부하에서는 약 0.4의 recycle ratio, 150 mA/cm<sup>2</sup>에서는 약 0.5의 recycle ratio로 출구 온도를 680°C 이하로 유지할 수 있는 것으로 나타나고 있다. 한편 정상 운전 시 연료 이용률을 0.8로 운전 시 요구되는 공기량에 따라 발생하는 과도 차압을 방지를 위하여, 시스템 운전 압력을 높이고 공기 극 가스를 재 순환시켜 냉각유량을 확보하는 가압 운전 방식을 채택하게 된다.

분리 판은 단위전지들을 전기적으로 직렬로 연결하고 또한 각각 단위전지를 분리하며, 반응가스가 전달되는 통로가 설치된다. 내부 manifold 형 MCFC 스택에서는 분리판 면적이 전극 면적보다 커지게 되며 이의 설계는 아주 중요하다.

Anode와 Cathode의 전극크기는 전극 내 집중 응력 방지를 위하여 한 쪽 면적을 크게 한다. 분리판 폭은 manifold 크기와 wet seal 부 크기에 의해 결정된다. 전극 및 분리판 면적비와 관련된 주요 설계 변수는 전극 반응 면적/분리판 전체 면적, 매니폴드 총 면적/분리판 전체 면적, Aspect ratio (길이/폭), Wet seal 폭 등으로 생각된다. 분리판 면적에 대한 전극 면적 비는 클수록 좋는데, 이는 경제적면 뿐만 아니라 부식에 취약한 wet seal 부위를 줄일 수 있다. 매니폴드 면적은 클수록 유량 분배에 유리하지만, wet seal 부에서 matrix의 안정성은 줄어든다. 전극의 aspect ratio는 Aspect ratio가 커질수록 ΔP가 줄어들 수 있다. 다음 표 1은 스택 운전조건을 나타내고 있다.

표 1 스택 운전조건

변수	설정치 또는 예상치
Manifold 형태	내부 manifold
가스 흐름	Co-flow
전지 면적	6000 cm <sup>2</sup> (길이 53 cm)
스택 적층 수	85/stack × 2 stacks
연료극 가스	H <sub>2</sub> :CO <sub>2</sub> =4:1 + Steam 30%
공기극 가스	O <sub>2</sub> :CO <sub>2</sub> =1:2 (공기 사용)
수소 이용률	0.4 (상압시), 0.8 (가압시)
산소 이용률	0.3
공기극 가스 리사이클 비	0.5 (가압시)
부하 전류 밀도	50~75 mA/cm <sup>2</sup> (상압) 125 mA/cm <sup>2</sup> (가압)
입구 가스 온도	580°C
출구 가스 온도	680°C (목표치)
운전 압력	1~5 기압
예상 출력	46~66 kW (상압 운전시) 102 kW (가압 운전시)

### 2.2.2 MCFC 스택 구조물 설계

100 kW 스택을 구성하는 적층 수는 각 전지의 성능에 좌우되며, 대 면적 전지 성능은 작은 단위지 실험 결과

와 약간 차이가 있으며 편차가 존재한다. 전지 180장을 하나의 스택으로 구성하는 것은 설치 과정에서 위험 요소가 있으므로, 50 kW급 90장 스택을 2단으로 하나의 가압 용기 안에 설치하는 것이 바람직하다.

스택 내에서의 가스 흐름은 역 U-shape인 것으로 선정하여 매니폴드에서의 압력 강하가 작을 때에 유량 분배에 유리하고, 구조적으로는 간단하고 안정되게 설계하였다. 스택은 적층 후 clamping하여 일정한 압력을 가한 후에 단열재로 보온하고 별도의 설비에서 전 처리 한다. 스택 내 내부 접촉저항을 줄이기 위하여 주어지는 면압 장치들을 위한 pressing 방식은 both-end pressing으로 header를 스택 중앙에 고정시켜 자중에 의한 면압 증가 요인이 감소되도록 하였다.

내부 매니폴드 구조의 스택에서는 매니폴드 크기와 유량에 따라 ΔP가 변하며, 이에 의해 각 전지로의 유량 분배가 영향을 받는다. 일반적으로 적층 수가 50장 이내일 경우는 매니폴드 부분에서의 압력 변화가 크지 않으나 적층 수가 100장에 가까우면 매니폴드 크기에 따라 압력 변화가 커질 수 있다. 은 실제 매니폴드 구조에서의 압력 강하 요인을 고려하지 않으므로 정확한 계산이 어렵다. 매니폴드 형상은 직선부에서 matrix 균열이 잘 발생한다는 점 때문에 원형이 안정이지만 이 경우 분리 판에서 매니폴드 개수가 늘어나므로 용접 시간이 걸리며 wet seal 면적이 증가하게 된다. 따라서 길게 늘어진 원형(oblong) 형태가 많이 적용된다.

스택에 흐르는 전류 취출을 위한 단자는 스택 상하 판에 설치된다. 스택 내 걸리는 부하 전류량은 두개 sub stack을 직렬로 연결 시에는 최대 900A 병렬로 연결시에는 최대 1,800 A 가 된다. 전류단자 및 전기선은 이에 맞는 용량으로 결정되며 전류 및 전압 측정 단자 등은 전력 용기와 완전 절연될 수 있도록 설계하였다. 다음 그림은 100 KW급 MCFC 스택 상세 설계 모습이다.

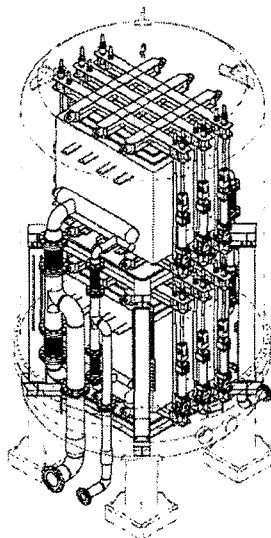


그림1. 100 kW급 MCFC 스택 조감도

## 2.3. MCFC 발전 시스템 상세설계

### 2.3.1 100 kW급 MCFC 공정 설계

100 kW급 MCFC 발전 시스템은 외부 개질형으로 연료로 천연가스를 사용하며, 전극 면적인 6,000cm<sup>2</sup>의 단위전지 170장으로 구성되며 5기압에서 650°C를 운전 조

건으로 하였다. 연료 및 공기 이용률은 각각 80%, 30%이며, 연료극 미반응 가스는 촉매 연소기의 연소용 연료로 공급되어 미 반응 가스를 최대한 활용하도록 구성되었다. 연료극과 공기 극에는 가스/가스 열교환기(HEN)가 설치되어 열 교환을 이용함으로써 시스템 전체 효율이 높아지도록 구성되었다. 특별히, 공기극인 경우 고온 블로어(HTB)를 설치하여 공기 극 리 싸이클을 통하여 스택 온도 조절이 용이하도록 구성하였다. 스택에서 발생된 공기 극 반응 가스는 turbo charger(T/C)를 통해서 공기 압축과 터빈 발전이 이루어지도록 구성하였다. 배출된 공기 극 가스는 HRSG를 통하여 개질기에 공급되는 스팀을 생산하는데 사용된다.

### 2.3.2 시스템 구성

한국 중부발전 보령화력에 설치될 100 kW급 외부 개질형 용융탄산염 연료전지 시스템 기본구성은 그림 2와 같다. 연료로 사용되는 천연가스는 외부 개질기를 통하여 수성가스 전이반응을 고려한 스팀 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 열교환기를 이용하여 배열회수 과정을 거치게 되며 리싸이클을 이용하여 스택 냉각과 연료 이용률을 증가시키는 시스템으로 구성하였다.

100 kW급 용융탄산염 연료전지 시스템은 천연가스를 스팀 개질하여 연료가스로 공급하며 사용되는 개질 연료량은 52.48 Nm<sup>3</sup>/h이다. 스택 운전 조건으로는 3 bar의 압력과 스택 입·출구 온도를 각각 580, 680°C로 유지하며 CO<sub>2</sub> 리싸이클 운전을 이용하여 연료 극에서 발생한 CO<sub>2</sub> 가스를 공기극에서 사용하게 된다. 전체적인 산화제의 이용률(U<sub>O<sub>2</sub></sub>)은 30%이며 연료 이용률(U<sub>F</sub>)은 60%, 연료극 가스는 100% 재사용하며 공기극인 경우 약 15%로 리싸이클 운전된다. 소형 개질기의 특성을 고려하여 개질된 연료의 출구 온도를 750°C로 설정하였으며 평판형 개질기가 도입될 것을 대비하여 시스템에 추가하여 실험할 수 있도록 운전의 다양성을 고려하였다.

한편 100 kW급 발전 시스템 이 설치될 중부발전 보령화력 발전소의 천연가스의 압력, 유량, 토양, 수질 조사에 대한 기본 자료를 수집 검토하였고 이를 바탕으로 건축 및 토목 분야 설계를 완료하였다.

100kW Externally Reforming MCFC Power Generation System

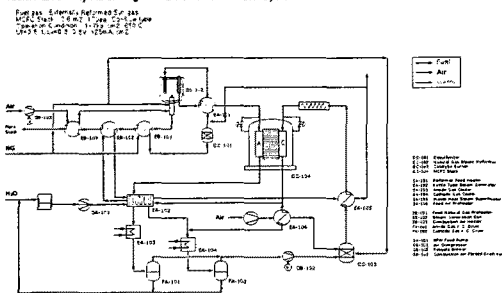


그림 2. 100 kW급 외부개질형 용융탄산염 연료전지 시스템 공정도

### 3.4 운전 조건에 따른 100kW 시스템 효율 변화

중부 발전 보령화력 발전소 내 설치 운전될 100 kW 용융탄산염 연료전지 시스템에 대하여 상용 소프트웨어인 CYCLE TEMPO를 이용하여 정밀한 시스템 모사를

실시하고 모사를 통한 전체 시스템 효율 분석을 실시하였다. 분석된 100 kW급 용융탄산염 연료전지 시스템에 대하여 시스템의 대형화, 시스템의 구성 변화, 단위 기기의 효율 변화 및 연료 및 공기 이용률 변화에 따라 시스템 전체 효율 변화를 계산하였다. 시스템의 대형화에 따라 시스템의 효율은 크게 변하지 않았으며 시스템의 구성 및 단위 기기의 효율에 따라 전체 시스템의 효율은 크게 변하였다. 주어진 시스템에서 운전 조건(연료 및 공기 이용률, 압력에 따라서도 시스템의 효율이 크게 변하였으며 이를 기준으로 시스템의 적정 운전 조건을 설정할 수 있었다. 이러한 분석은 향후 대형 연료전지 시스템의 설계 및 시스템 효율 설정에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

표2. 압력 변화에 따른 효율 비교

압력		3 bar	상압
효 율 (%)	gross	22.56	22.48
	net	15.3	20.13
	heat	44.9	44.9
	total	60.2	65.04

### 3. 결 론

본 연구에서는 향후 설치 운전될 100 kW MCFC 시스템 개발을 위하여 필요한 스택 설계 요건 검증 및 시스템에 대하여 상용 소프트웨어인 CYCLE TEMPO를 이용 시스템 모사를 통한 효율을 분석하여 보았다. 100 kW MCFC 스택은 6000 cm<sup>2</sup> 전지 180장이 필요하며, 정상운전을 위하여 시스템 압력은 3 기압으로 증가시켜야 하며, 이때 125 mA/cm<sup>2</sup>의 부하와 0.8의 수소 이용률에서 산소 이용률이 0.3, 그리고 공기극 가스 리싸이클 비는 0.5가 필요한 것으로 예상된다. 이러한 운전 조건을 기준으로 분리판의 설계를 완성하고 이를 기초로 스택 구조물 설계를 완성하였다.

현재 국내에서 개발 중인 100 kW 용융탄산염 연료전지 시스템에 대하여 정밀한 시스템 모사를 실시한 결과 효과적인 배열회수와 상압 운전으로 효율을 65%까지 증가시킬 수 있음을 살펴보았다. 시스템 대형화에 따라 시스템의 효율은 크게 변하지 않았으며 시스템의 구성 및 단위 기기의 효율에 따라 전체 시스템의 효율은 크게 변하였다. 주어진 시스템에서 운전 조건(연료 및 공기 이용률)에 따라서도 시스템의 효율이 크게 변하였으며 이를 기준으로 시스템의 적정 운전 조건을 설정할 수 있었다. 본 연구에서는 연료전지 발전 시스템의 효율에 미치는 영향을 파악하여 연료전지 시스템의 효율을 높이기 위해서는 시스템의 효과적인 구성이 필수적이며 특별히, 이러한 분석은 향후 대형 연료전지 시스템의 설계 및 시스템 효율 설정에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

### [참 고 문 헌]

- [1]Hiroo Yasue, et al, "Development of a 1000 kW-class MCFC pilot plant in Japan," Journal of Power Sources, 71, pp89-94,1998.
- [2]강병삼, "100 kW급 MCFC 발전시스템 공정의 개념설계," 전력연구원, TM00ES02.P2001.048.2000
- [3]Koh J.-H., Kang B.-S. and Lim H. C., 2000, J. Power Sources, Vol. 91, p161. 2000
- [4]강병삼, 고준호, 이충근, 임희천, "kW급 MCFC 스택에서의 유동 및 열분포 해석", 한국에너지공학회지, Vol. 8, No. 4, p592.(1999)