

100 kW급 용융탄산염 연료전지 시스템 개발 III (시스템 제어 및 운전모드)

임희천, 안교상, 서해경, 임영창  
한전 전력연구원 신기술센터

System Development of a 100 kW Molten Carbonate Fuel Cell II  
(System Control and Operation Mode)

Hee Chun Lim, Kyo Sang Ahn, Hai Kyung Seo and Yeong chang Eom  
New Technology Center, 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 two substacks with 90 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.

To operate and evaluate the MCFC system, control and measurement system and operation mode are designed before 100 MCFC system construction. In system control schematics, OS, PLC and MMI were consisted and have roles for MCFC system control. For operation of 100 kW MCFC system, NS, PS PR mode were considered step by step and simulated.

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 2 kW급 MCFC 시스템을 개발 운전시험에 성공하였고, 이를 바탕으로 2단계로 100 kW급 발전시스템 개발 연구가 진행되고 있다. 1997년부터 시작된 2단계 1차 사업에서는, 우선 25 kW급 시스템을 개발 MCFC 스택의 상용 기초기반 기술을 확립하였다. 또한 2001년부터 본격적으로 추진되고 있는 2단계 2차 100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발 연구에서는 100 kW MCFC 스택 및 시스템에 대한 상세 설계를 완료하고 시스템에 대한 운전 평가를 위하여 스택 및 시스템의 건설이 준비 되고 있다. 여기에서는 시스템 건설 전 시스템의 운전을 위한 제어의 개념 및 운전 모드에 대한 내용을 소개하고자 한다.

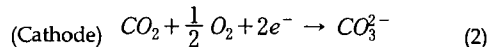
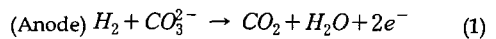
2. 본 론

2.1 MCFC 발전 시스템 개요

2.1.1 MCFC 발전 원리

MCFC 연료전지는 다공성 연료 극(anode)과 공기 극

(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 연료 극에서는 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>를 소모하는 수소의 산화 반응이 일어난다. 양극에서 만들어진 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>는 전해질을 통하여 확산, 전달되어 연료 극 반응에 참여하고 산화에 의해 음극에서 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 구성 요소로 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 조절을 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 및 시스템 상세 설계

2.2.1 MCFC 스택 설계

100 kW급 MCFC 스택은 가스의 균일한 공급이 용이하며 전해질의 이동문제를 해결할 수 있고 대형화가 용이한 내부 매니폴드 형식 및 연료 가스가 외부에서 공급되는 외부 개질 형 스택으로 설계하였다. 100 kW급 MCFC 스택에서는 단위전지 전지 면적은 약 6000 cm<sup>2</sup> (50X110 cm)로 설정하였고 100 kW 전력을 얻기 위한 총 적층 수는 총 90장의 sub-stack으로 2기로 제작하여 구성하는 것으로 설계하였다.

스택 내에서의 가스 흐름은 역 U-shape인므로 선정하였고 적층 후 clamping하여 일정한 압력을 가한 후에

단열재로 보온하고 별도의 설비에서 전 처리 한다. 내부 매니폴드 구조의 스택에서는 매니폴드 크기와 유량에 따라  $\Delta P$ 가 변하며, 이에 의해 각 전지로의 유량 분배가 영향을 받는다. 일반적으로 적중 수가 50장 이내일 경우는 매니폴드 부분에서의 압력 변화가 크지 않으나 적중 수가 100장에 가까우면 매니폴드 크기에 따라 압력 변화가 커질 수 있다. 매니폴드 형상은 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 병렬로 연결시켜 최대 900A 로 되도록 하였다. 전류단자 및 전기선은 이에 맞는 용량으로 결정되며 전류 및 전압 측정 단자 등은 압력 용기와 완전 절연될 수 있도록 설계하였다. 다음 그림은 100 KW급 MCFC 스택 상세 설계 모습이 다.

### 2.2.2 100 kW급 MCFC 시스템 설계

100 kW급 MCFC 발전 시스템은 외부 개질형으로 연료로 천연가스를 사용하며 운전압력 3기압에서 650°C 조건에서 운전된다. 연료 및 공기 이용률은 각각 80%, 50%이며, 연료극 미반응 가스는 촉매 연소기의 연소용 연료로 공급되어 미 반응 가스를 최대한 활용하도록 구성되었다. 한국 중부발전 보령화력에 설치될 100 kW급 외부 개질형 용융탄산염 연료전지 시스템 기본구성은 그림 2와 같다.

100kW Externally Reforming MCFC Power Generation System

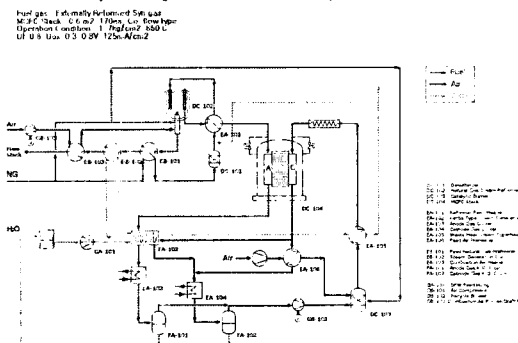


그림 1. 100 kW급 외부개질형 용융탄산염 연료전지 시스템 공정도

연료로 사용되는 천연가스는 외부 개질기를 통하여 수성 가스 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 열 교환기를 이용하여 배열회수 과정을 거치게 되며 리싸이클을 이용하여 스택 냉각과 연료 이용률을 증가시키는 시스템으로 구성하였다.

### 2.3 MCFC 제어 및 운전모드 설계

#### 2.3.1 MCFC 발전시스템 제어 설비개요

감시 및 계측 제어설비는 MMI Software를 이용한 OS(일명 OT:Operating Terminal)와 PLC 등으로 구성하였다. 현장 설치는 계측센서(Instrument Sensor)로부터 계측 값을 입력받아 정해진 Process에 맞게 PLC와 MMI 내부 Program에 의해 자동으로 제어대상(Contrl Valve, MOV, Electric Heater 등)을 제어하는 역할을 하고, 또한 각종 자료 수집 및 저장, Display되도록 구성하였다. 제어시스템은 안전성 및 경제적인 System으로 구성되도록 역점을 두었다.

OS 설비는 OS 1,2,3 (Operating Terminal)로 구성

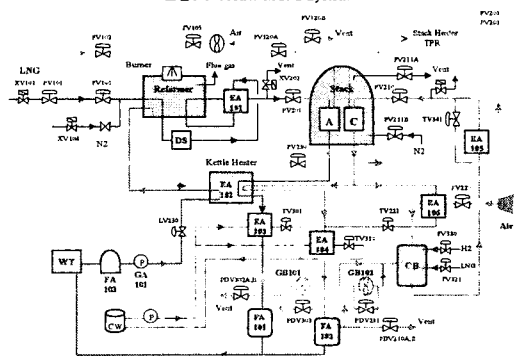
된다. 각각의 OT는 공히 Process 운전상황을 감시 및 운전할 수 있다. No.1 및 2 OT는 Process공정 파악을 위한 Process Viewer용으로 활용하며, No.3 OT는 PLC Program 수정을 위한 Engineering Work Station 기능과 평상시는 Trend 및 Alarm Monitoring, 자료 수집용으로 활용되도록 구성하였다. MMI 개방형 구조의 Windows-NT 환경에서 사용하며 이를 Internet Web Server를 통하여 원격지에서 현황을 감시 및 제어할 수도 있다. 개방형 구조의 MMI Software을 이용함으로써 서로 다른 통신 Protocol을 가진 Package성의 제어설비라도 Main OS에 접속하여, 기존 OS 및 PLC를 연계하여 Process Control 에 적용할 수 있도록 하였다.

PLC System은 다양한 control logic을 함유하고 있으며, On-line/Off-Line시 Program 수정 및 Down Loading을 설비를 정지시키지 않고 수행되도록 하였고, System구성의 경제성 고려, 센서 및 밸브와 컨트롤러의 Data 전송을 위하여 PLC I/O Port를 현장에 분산 배치하여 신호용 전선 량을 줄임과 동시에 현장에서 유지보수가 가능하게 하였다. Main PLC는 중앙제어실에 위치 Stack을 제외한 공정신호와 연결되어 운전 및 제어를 하고 Remote PLC는 Stack과 가장 가까운 곳에 위치하며, Cell 온도 센서, Cell 전압 센서와 연결되어 이들 Main PLC의 CPU에 전달된다. Main PLC에는 연료전지에서 전기를 발생할 수 있도록 Control하는 온도, 유량, 압력, 레벨 등의 Loop가 Process에 배치되어 있어 각종 제어 알고리즘에 응용된다.

Remote PLC는 감시전용 Point인 Open Loop로, 다수의 Analog Point로 구성되어 시스템 전체 Scan Time을 저하하고, Stack과 관련하여 PLC Card의 손상으로 인한 Main PLC에의 영향이 있을 수 있다. 연료전지 스택의 전압, 온도감시용 PLC는 이러한 영향을 방지하기 위하여 Remote PLC를 현장에 설치하고 Main PLC와 Remote PLC간에 통신을 통해 정보를 주고, 받도록 하였다. 이러한 현장설치는 향후 설비증설시 제어 Loop를 간단히 구성할 수 있는 장점이 갖고 있다.

한편 PLC Analog I/O Module은 Process feedback 제어를 하는 Close Loop의 경우 Isolated Input Type의 Module을 채택하여 현장과의 전기적으로 분리하여 부분적인 고장이 계통 전체로 파급되지 않도록 하였다. 반면 센서로부터 계측 값을 읽어 자료 수집이나 감시만을 목적으로 설치되어 있는 Open Loop에 있어서는 Single Ended Type을 채용하여 안정적이고 경제적인 System이 되도록 구성하였다. 그 밖의 I/O Module에 대해서는 특성 및 System 전체구성, 제어 판넬 크기 등을 고려하여 선정하였다.

그림 1-1 100kW MCFC System



OS와 PLC간 통신방식 사용 Protocol은 RS-485통신 방식을 채택하였다. 이를 Net-DDE가 지원되는 Server를 사용하여 전력변환장치(Inverter) 입출력 Data를 변환시켜 Main OS Program에 접속하며, OS와 PLC간의 통신 Network와 PLC System은 각각 Data 전송속도가 빠

큰 Industrial Ethernet(10Mbps)과 Hot Stand-by System을 채택하여 Auto Fail-Over기능이 가능하도록 이중화 (Redundancy)하였다. 제어를 담당하는 PLC의 Hot Stand-by System은 이중 화 전용 CPU와 Parallel 통신 Module로 구성되며 Master CPU에서 운전되고 있는 Data를 Stand-By CPU에 동기화(Synchro)하여 항상 같은 Data가 자동적으로 저장되도록 하였다. 그리고 PLC의 CPU와 I/O Module간은 Genius Lan 또는 Control Net(5Mbps)을 채택하고 이를 이중화로 설계하였다.

### 2.3.2 MCFC 발전시스템 제어 및 운전모드

#### 2.3.2-1 MCFC 운전 개요

100 kW MCFC 발전 시스템은 현재 기술 개발 중으로 체계화되고 표준화된 운전형태는 없다. 따라서 현재는 개발자의 설계방식에 따라 운전형태를 선정하여 운전을 준비 중에 있다. 그림1-1은 100kW MCFC 시스템의 Process Flow 및 Control Diagram을 보여준다. 시스템의 운전모드는 상압 운전Mode와 가압 운전Mode의 운전형태로 크게 나누고, 다시 상압운전은 NS(I) Mode와 NS(II) Mode, 가압운전은 PS Mode 및 PR Mode로 분류하여 설계하였고, 그 운전형태의 개요는 다음 표1-1과 같다.

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.

표1-1 MCFC 운전Mode

분 류	운전 Mode	주요 운전기기	비 고
상압 운전	Normal Single I	NS(I)	Header gas Station gas
	Normal Single II	NS(II)	RF: Reformer CB: Catalytic
가압 운전	Pressurized Single	PS	Combusstor
	Pressurized Recycle	PR	RB: Recycle Blower

#### 2.3.2.2 MCFC 운전 모드형태

NS(I) Mode는 상압 운전형태로서 Stack 전처리 및 직후 MCFC 운전형태로, Station gas에 의해 반응가스가 공급되는 형태이다. NS(II) Mode는 Reformer 및 촉매 연소기를 운전, Stack을 가압운전(PS Mode)으로 전환하기까지 운전이다. Anode가스는 Reformer gas로 전환되며, 증기는 증기발생기에서 Kettle heater로 전환된다.

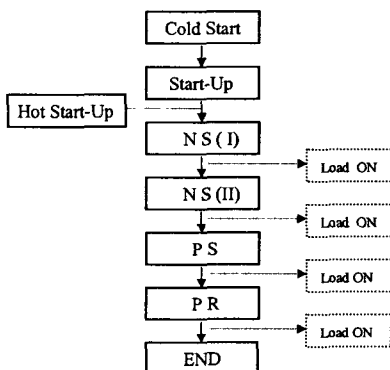


그림1-2 운전Mode의 전환

Anode 가스공급은 Reformer온도가 750℃ 정도로 충분히 올라가면 천연가스로 전환한다. 또한 Cathode용 가스는 Stack온도 550℃정도에서 촉매 연소기를 가동시켜 촉매연소기는 초기 운전 시 수소를 그리고 일정 온도 이상이 되면 천연가스로 전환한다.

PS Mode는 Cell Stack을 정상운전압력으로 운전하는 형태로서, Anode, Cathode 및 Stack Vessel을 각각 3kg/cm<sup>2</sup>abs의 가스압력으로 가압한다. 이때 Anode gas는 Carbon deposition을 방지하기위하여 Reformer 입구 측에 110℃의 포화증기를 넣어 운전한다.

PR Mode는 MCFC 시스템 정상운전형태로, Stack에서 1차 반응하고 배출된 가스 중에서 미 반응 가스는 Recycle Blower를 이용하여 Cathode측으로 재순환시킴으로서 연료이용을 극대화시켜 시스템의 효율을 높일수 있도록 한 운전Mode이다. 한편 Stack Cell의 내부온도조절을 위해 Recycle Blower의 Bypass MOV를 설치, Cathode측으로 재순환되는 gas flow량을 조절하도록 설계하였다.

### 3. 결 론

본 연구에서는 향후 설치 운전될 100 kW MCFC 시스템 개발을 위하여 필요한 스택 및 시스템에 대한 개념설계를 근거로 하여 상세 설계를 완성하였다.

시스템 상세설계를 근거로 하여 100 kW급 MCFC 시스템의 운전 및 계측을 위한 감시 제어 시스템에 대한 설계를 완성하고 하드웨어적인 제어 설비 및 운전모드를 설계하였다.

100 kW MCFC 스택은 6000 cm<sup>2</sup> 전지 900장으로 구성된 2개의 Sub stack 으로 구성되며 이를 운전하기 위한 조건으로 시스템 압력은 3 기압으로 증가시켜야하며, 이때 125 mA/cm<sup>2</sup>의 부하와 0.8의 수소 이용률에서 산소 이용률이 0.3, 그리고 공기극 가스 리사이클 비는 0.5가 필요한 것으로 예상된다. 이러한 운전 조건을 기준으로 시스템의 제어 및 운전 조건을 설정하였고 제어기기를 설계하였다. 감시 및 계측 제어설비는 MMI Software를 이용한 OS(일명 OT:Operating Terminal)와 PLC 등으로 구성하였다. 현장 설치는 계측센서(Instrument Sensor)로부터 계측 값을 입력받아 정해진 Process에 맞게 PLC와 MMI 내부 Program에 의해 자동으로 제어대상(Contrl Valve, MOV, Electric Heater 등)을 제어하는 역할을 하고, 또한 각종 자료 수집 및 저장, Display되도록 구성하였다. 제어시스템은 안전성 및 경제적인 System으로 구성되도록 역점을 두었다.

시스템의 운전모드는 상압 운전Mode와 가압 운전 Mode의 운전형태로 크게 나누고, 다시 상압운전은 NS(I) Mode 와 NS(II) Mode, 가압운전은 PS Mode 및 PR Mode로 분류하여 설계하였다. 운전Mode의 전환 방법은 상압 운전형태에서 가압 운전형태로 이루어지며, 기동 시는 NS(I)→NS(II)→PS→PR 로 되며, 정지 시는 그 역순으로 하였다.

지금 까지 MCFC 시스템의 스택 및 상세설계, 그리고 운전모드의 개발을 통하여 MCFC 시스템 운전평가를 위한 기본적인 준비를 완료하였다. 향후 이들 설비에 대한 제작 및 건설을 통하여 100 kW급 MCFC 발전 설비의 운전 및 평가를 진행할 예정이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1]임희천, 안교상, "100 kW급 MCFC 발전 시스템 개발 I,II, 2003년도 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, 2001,2002.
- [2]염영창, 임희천, "100 kW급 MCFC 발전 시스템 전기 및 제어 시스템 설계", 전력연구원, TM00EC01.P2003. 048, 2003
- [3]임희천외, "100 kW급 외부개질형 MCFC 발전 시스템 개발 중간 보고서, 전력연구원, 2000