

## 5 kW 용융탄산염 연료전지 스택내 운전특성 및 온도 변화 해석

임희천, 고준호, 류정인\*

한전 전력연구원,  
대전 유성구 문지동 103-1  
\*충남대학교 기계공학과  
대전 유성구 궁동 220

## Operation Characteristics and Analysis of Temperature Gradients in a 5-kW Molten Carbonate Fuel Cell Stack

Hee-Chun Lim, Joon-Ho Koh and Jeong In Ryu\*

Korea Electric Power Research Institute(KEPRI)  
\*Chungnam National University

### ABSTRACT

A 5-kW MCFC stack with 3,000cm<sup>2</sup> electrode area was tested to investigate cell performance and operation characteristics. The stack performance was evaluated based on electrical output and I-V change. The stack showed high cell performance (7.6 kW) than the design performance and operated for more than 5,760 hours, but a significant temperature gradient inside the stack was observed. A 3-dimensional mathematical model for molten carbonate fuel cell (MCFC) was

developed for the purpose of simulation of stack performance during the operation. The model was solved using PHOENICS, a computational fluid dynamics (CFD) code. The simulation result demonstrated a close prediction of the temperature gradient and stack performance.

### 초록

MCFC 발전 기술의 실용화를 위하여 3,000cm<sup>2</sup> 면적의 단위전지 20장으로 구성된 5 kW 급 MCFC 스택을 5,760 시간 동안 운전하여 그 운전특성을 파악하였다. 스택은 7.6 kW의 출력을 보여주어 설계치보다 높은 출력을 보여주었다. 아울러 스택 성능 및 스택내 운전온도 분포변화를 해석하기 위하여 열전달, 유동방정식 및 연료전지 반응특성을 고려한 수학적 모델을 완성하였다. 완성된 수학적 모델 전산 모사를 위하여 상용 CFD 코드를 이용한 프로그램을 개발하였고 개발된 스택 전산모사 코드는 실제 운전된 5 kW MCFC 스택 운전 자료와 이론적 계산결과와 비교하여 그 신뢰성을 확인하였다.

**Key Words** : MCFC, molten carbonate fuel cell, stack operation, computer simulation

## 1. 서론

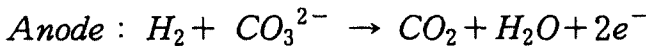
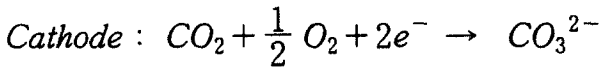
연료전지는 연료가 가지고 있는 화학에너지를 전기화학 반응에 의하여 직접 전기를 생산하는 저공해, 고효율의 새로운 발전방식이다. 용융 탄산염형 연료전지 (molten carbonate fuel cell, MCFC)는 동작온도가 650°C 고온으로 고온 연료전지로도 불리는데 석탄가스를 사용할 수 있고 고온의 배가스를 이용하여 복합발전이 가능하기 때문에 전력사업용으로 미국 및 일본등에서 상업화를 위한 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 국내에서도 한전을 중심으로 1990년대 초부터 연구가 시작되어, 현재 100kW급 개발을 위한 연구가 진행되고 있다. 1998년에 설치 운전한 5 kW 급 발전 시스템은 스택이 3,000 cm<sup>2</sup>의 면적을 갖는 단위 전지를 수직 방향으로 20장 적층한 평판형 구조로 이루어져있다.<sup>(1)</sup> 용융탄산염

형 연료전지의 실용화를 위하여 위와 같은 소형 스택을 이용하여 전지의 기본특성 파악, 운전기술 축적 및 고성능화를 위한 개발과제들을 검토할 필요가 있다. 본고에서는 위와 같은 목적으로 설치 운전된 5 kW 급 MCFC 시스템의 기본구성, 개요 및 시스템 운전을 통하여 얻어진 운전시험 결과에 대하여 서술하고 아울러 스택 성능 및 스택내 운전온도 분포변화를 해석하기 위한 수단으로 개발된 전산 모사 결과와 실제 운전된 운전 결과와의 비교 내용을 소개하고자 한다.

## 2. MCFC 스택의 구조 및 전지 반응

MCFC 스택은 단위전지들이 적층되어 있는 반복 구조로, 단위 전지는 양극, 음극, 전해질, 기체 통로, 그리고 분리판 등으로 구성된다. 현재 전력연구원에서 개발중인 MCFC 스택은 직사각형 단위 전지를 사용

하며 양극과 음극의 기체가 같은 방향으로 주입되는 co-flow 형태를 이용하고 있다. 그림 1은 20장의 단위 전지로 구성된 5 kW MCFC 스택의 모습을 보여주고 있다. 그림 1에서 분리판은 단위전지 사이에 위치하여 각각 단위전지에 필요한 가스의 공급 및 분리 역할을 하며 상하 끝 부분과 함께 모두 21매가 사용된다. 운전온도인 650°C에서 용융염(Li<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/K<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>)인 전해질은 γ-LiAlO<sub>2</sub> 지지체에 함침되어 있으며, 양쪽으로 각각 연료 기체와 산화 기체가 흐르면서 다음과 같은 전기 화학 반응이 진행된다.



양극에서 생성되는 탄산염 이온은 전해질을 통해 전달되어 음극에서 소모된다. 전체 전극반응은 수소 1몰과 산소 0.5몰이 반응하여 물 1몰이 생성되는 반응으로, 수소 반응 1몰에 대해 약 247 kJ의 엔탈피 변화가 수반한다. 스택 구성시 스택내 열을 공급하기 위하여 상 하판 히타가 설치되고 발전된 전기는 분리판에 집전 단자를 연결하여 전기를 인출하게 된다. 스택내 온도측정을 위하여 열전대를 5개 분리판 마다 삽입하였고 또한 가스흐름과 직각으로 분리판에 3곳의 온도를 측정할 수 있도록 설치하였다. 부하 전류량에 따라 반응에 필요한 수소와 산소의 양이 결정되지만 실제 운전은 이보다 많은 과량의 기체를 주입한다. 표준 조건으로는 150 mA/cm<sup>2</sup>의 전류를 발생하기 위하여 연료 기체의 이용률이 40%가 되도록 기체를 주입하는 것이 일반적이다.

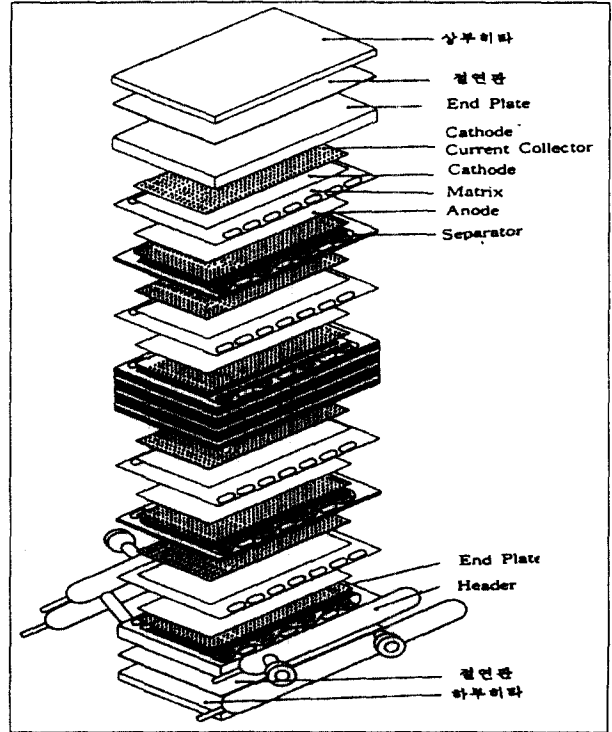


Fig. 1. Structure of the co-flow type, 5 kW MCFC stack

### 3. MCFC 스택 운전시험 설비

MCFC 스택 운전시험 설비는 몇 개의 블록으로 나눌 수 있다. 그림 2는 5 kW급 MCFC 스택운전시험 설비의 flow diagram을 보여주고 있다. 5 kW급 MCFC 운전설비는 가스공급부, 공급가스 예열부, 스택, 배가스 처리부와 제어 및 자료 수집부로 이루어져 있다. 가스 공급부는 천연가스 개질기에서 개질된 수소가스, 혹은 공기압축기로 부터 공기, 질소, 이산화탄소 등의 반응가스를 유량조절기(mass flow controller : MFC)를 통하여 스택내로 공급한다 이때 연료극 탄소석출 방지를 위하여 가습기를 설치하였다. 공급가스 예열부는 가스 예열기를 설치하여 동작온도가 650°C인 스택 내에 공급가스가 열충격을 받지 않도록 하는 설비이며, 스택은

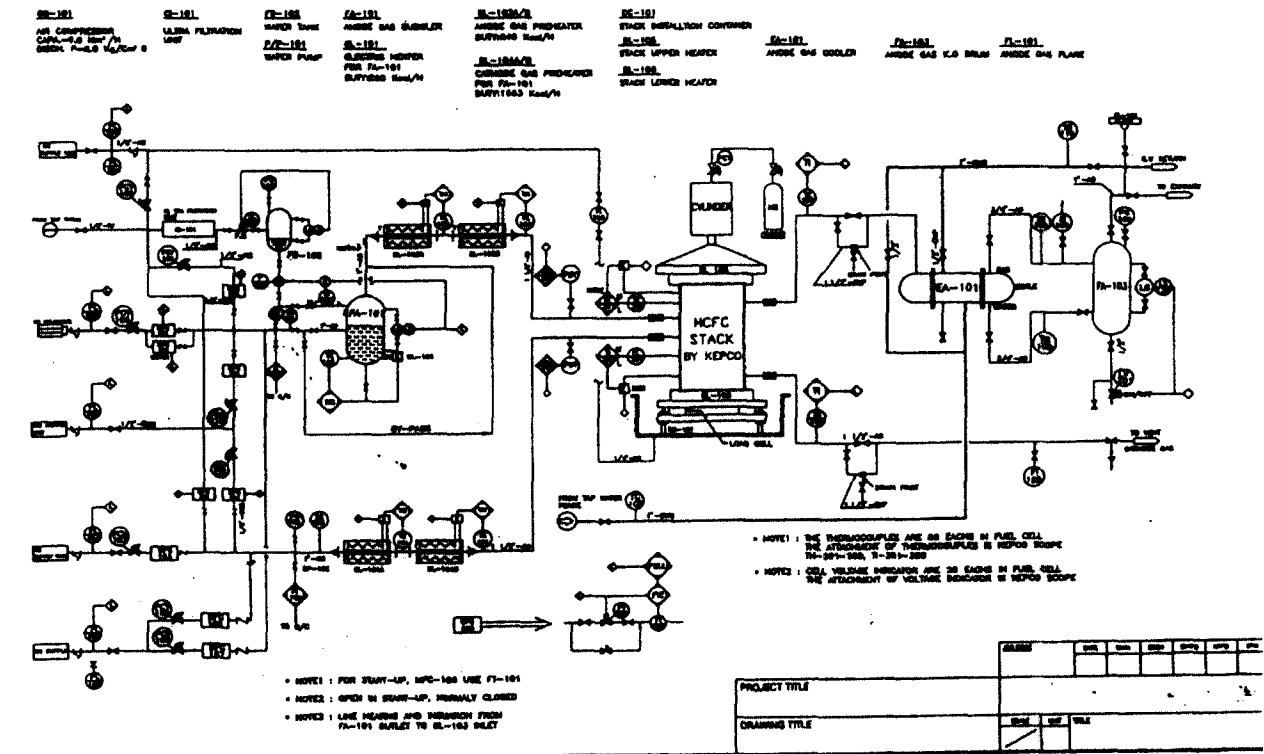


Fig. 2. Flow diagram of the 5-kW MCFC stack test facility

상·하판에 전기히터를 설치하여 열을 공급하였다. 배가스 처리부는 반응후 배출되는 가스를 냉각하기 위한 냉각기 그리고 기수 분리기 및 잉여수소 연소를 위한 flare stack등을 설치하였다. 5 kW급 MCFC 발전시스템의 제어 및 자료수집부는 제어판넬, PC, PLC 및 주변 측정기기들로 구성되어 있으며 PLC에 입력된 프로그램에 의하여 운전을 제어하였고 이때 자료수집 및 저장이 동시에 이루어지도록 되어 있다. 운전은 기동, 정지, 정상운전등 3 가지로 구분하였고 보호동작은 경고 및 보호조치로 나누어 운용하였으며 부분적 문제점 발생시는 수동운전으로 전환하여 운전되도록 하였다.

4. MCFC 스택의 수학적 모델  
MCFC와 관련한 수치 모사는 양극의 미세 구조에 대한 전극 모델, 단위전지 및 소규모 스택을 대상으로한 모델, 그리고 전체 시스템 공정 모델을 중심으로 연구되어 왔다. 열 및 물질 전달에 기초한 단위 전지 모델로 널리 알려진 것은 1980년 Sampath와 Samells가 제시한 것이며<sup>(2)</sup>, 이후에 발표된 연구들 대부분이 이와 유사한 모델을 이용하였다.<sup>(3-6)</sup> 전극과 전해질층은 하나의 전지층으로 간주하여 전극의 미세 구조에서 진행되는 전달 현상과 양쪽 극에서의 전기 화학 반응을 총괄 반응으로 묘사하는 것이 일반적이다. 이에 따라 전극에서의 확산 저항은 무시하고, 전지층에서는 에너지의 이동만을 고려하여 열전도 방정식과 전기에너지 보존을 나타내는 식을

정한다. 열전도 방정식에는 분리판으로의 복사열, 전지 반응열, 그리고 Joule 효과에 의한 발열을 포함한다.

$$\nabla \cdot (k_{cell} \nabla T) = -Q_{rad} - \Delta H_{r,e} - Q_{IR}$$

$$E = E_{OCV} - i(R_{ohm} + \eta_{anode} + \eta_{cathode})$$

분리판에서는 열전도에 의한 열에너지의 이동과 전지층으로부터의 복사열을 고려한 식을 사용한다.

$$\nabla \cdot (k_s \nabla T) = Q_{rad}$$

기체 연료의 이동은 정상 상태를 가정하고 continuum mechanics에 기초한 운동량, 열, 물질 수지식을 사용한다.<sup>(7)</sup> 열 보존 방정식에는 전도와 대류, 그리고 기상 반응열을 포함하고, 각 성분의 물질 수지식에는 확산, 대류, 기상 반응, 그리고 전극 반응에 의한 변화를 포함한다.

$$\nabla \cdot \rho \mathcal{U} = 0$$

$$\nabla \cdot \rho \mathcal{U} \mathcal{U} = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathcal{U})$$

$$\nabla \cdot \rho \mathcal{U} C_{p, gas} T = \nabla \cdot (k_{gas} \nabla T) - \Delta H_{r, gas}$$

$$\nabla \cdot \rho \mathcal{U} C_j = \nabla \cdot (\rho D_{j, mix} \nabla C_j) + r_{j, gas} + r_{j, e}$$

전지층/분리판과 기체 사이의 열전달은 conjugate heat transfer로 계산하였다.<sup>(8)</sup> 기체의 특성을 나타내는 열역학적 물성치들은 모두 온도의 함수로서, 기체 밀도는 이상기체 방정식, 기체 점도와 이성분(binary) 확산계수는 분자 운동론에 근거를 둔 Chapman-Enskog식, 그리고 열전도도는 Eucken식으로부터 계산하였으며, 이들을 다시 다성분 혼합물에서 조성의 함수로 나타내었다.<sup>(9)</sup> 면적이 작은 단전지에

서는 온도의 편차가 거의 없으므로 이와 같은 물성치의 온도/조성에 의한 변화가 무시될 수 있으나, 심한 경우 100°C 이상의 온도 차이가 나타나는 대면적 스택에서는 온도에 의한 물성 변화를 고려하기 위하여 위의 식들을 사용하였다. 전지층과 분리판에서 열전달 계수는 문헌치를 인용하였다. 외부 경계 조건으로서, 상하 분리판 일부 또는 전부가 일정한 온도로 가열된다고 가정하고, 스택 측면을 통해서는 일정한 속도로 열이 손실된다고 가정하였다. 이 때 스택 측면에서의 열 전달 계수는 단열 조건에 따라 결정되는데 완전한 단열 조건에서는 열 손실이 없어서 측면 방향으로의 변화가 존재하지 않으므로 사실상 2차원 모델이 된다. 기체출구에서는 유동압력이 0 이 되는 자연 경계조건을 적용하였고, 조성과 온도는 이용률 및 열전달식에 의하여 계산하였다. 내부 경계조건은 전지층 양 표면에 각각 CO<sup>2</sup>산화 및 수소환원 반응이 진행되며 이에 따른 전체 유속의 질량 유속 변화도 포함시킨다. 분리판과 전지층 표면에서의 기체속도는 0 인 것으로 가정한다.

위의 식들을 풀기 위해서 상용 CFD code인 PHOENICS (version 2.2)를 이용하였다. 선정된 스택 모델의 크기는 직사각형 3,000 cm<sup>2</sup> 면적 단위 전지 20장으로 구성된 스택이며 (그림 1), 각 구성 요소의 크기와 기술적 규격은 전력연구원에서 1998년 2월에 장착하여 5,000 시간의 운전 시험을 실시한 5 kW급 스택을 기준으로 하였다.<sup>(1,10)</sup> 이 경우 표준 조건에서 주입되는 기체의 유량은 양극에 86 SLM (O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>=15/55/30), 음극에 35 SLM (H<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O=72/18/10) 이며, 주입되는 기체의 온도는 550°C로 정하였다. 전체 계산 영역은 20×173×10 grid를 갖는 좌우 대칭의 3차원 구조로 구성하였으

며, 계산 시간은 Pentium PC (166 MHz)에서 3차원의 경우 약 12시간이 소요되었다.

## 5. 실험 결과 및 해석 결과

### 5-1. 5 kW MCFC 시스템 운전특성

스택은 1998년 1월 21일 운전시험을 시작하여 2월 11일에는 정격 출력운전 시험에 성공한 후 각종 특성시험을 마치고 9월 31일 총 5,760 시간의 운전시간과 4,860 시간의 부하운전 시간을 기록하면서 운전을 종료하였다. 스택은 성능시험시 7.6 kW 최대 출력으로 발전하여 본 스택이 목표로 한 충분한 성능을 보여주었고 운전기간 중 발전된 총 전력량은 23,202 kWh, 평균전력은 3,000 시간까지 5.6kW로 설계치보다 높은 출력을 기록하였다. 부분 부하특성을 살펴보면 450A 정부하에서 17.05V, 7.672 kW의 출력을 보여주었고 (그림 3), 300A일 경우에 18.20 V로 5.46 kW, 그리고 150 A일때 19.32 V로 2.38 kW를 보여주어 MCFC 연료전지의 전형적인 특성을 나타내었다. 공급된 연료중 사용된 연료의 비율을 연료이용률( $U_f$ )이라 부르며 연료이용률이 높을 경우 효율적이고 경제적인 운전이 가능하게 된다. 5 kW 스택에서 연료 이용률 변화에 따른 스택 성능변화는, 연료 이용률을 40%에서 80%까지 증가시킬 때, 스택전압이 17.05 V (7.6 kW)에서 15.94 V (7.1 kW)로 감소하였다. 수소가 갖는 열량을 LHV 기준으로 하여 에너지 변환효율( $\epsilon$ )은 발생전압과 연료이용률의 함수로 표시되는데, 5 kW 스택의 경우 80%이용률에서 에너지 변환효율은 50.86%를 보여주고 있다. 한편 공기이용률 변화에서 40%에서 70%까지 증가시키는 경우 17.06 V에서 16.97 V로 감소하였으나 연료이용률 변화보다는 적게 나타나

고 있다.

운전중 스택내 온도분포 변화에 있어서 온도가 가장 높은 부분은 스택의 중간부분인 No. 3 분리판 가스 출구 부분으로 680°C까지 온도가 상승하였고, 가장 낮은 온도부위는 No. 2 분리판의 가스 입구 부위로 592°C를 보여주었다. 전체적으로 볼 때 가스 공급부의 온도가 낮았고, 가스 흐름 방향으로 온도가 증가하였다. 스택이 150 mA/cm<sup>2</sup>의 전류 밀도에서 스택이 운전되는 경우 가장 높은 온도는 No. 3 분리판 가스 출구로 713°C 온도를 보여주었고, 가장 낮은 온도는 No. 2 분리판의 가스 입구부로 557°C를 보여주었다. 전류밀도 증가에 따라 전극반응 및 스택의 내부저항으로 인한 발열로 스택 온도가 증가하는 것을 확인할 수 있었고 또한 스택의 적층 수 증가에 따라 입·출구 온도차가 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있었다.

### 5-2 전산모사에 의한 전지 출력 분포 해석

온도 이외의 변수들, 즉 압력, 조성, 기체 속도, 전위차, 전류 밀도등은 내부의 변화를 측정하기가 곤란하며, 입출구의 가스 매니폴더 부분에서만 일부 측정이 가능하다. 수치 모사 결과는 이러한 정보의 획득을 가능하게 한다. 2차원 모델에서 계산한 발생 전류밀도 (power density, W/cm<sup>2</sup>)를 그림 4에 나타내었다. 그림 4는 전류밀도가 기체 흐름 방향으로 변하는 형태를 보여준다. 입구에서 약간 증가하여 최고치에 도달한 후 출구 방향으로 감소하는 곡선을 나타내는데, 입구 부분의 증가는 온도 상승에 기인하여 전지 성능이 약간 향상되기 때문일 것이며 그 이후의 감소는 온도 상승 효과에 비해 반응물 농도의 감소에 의한 효과 (Nernst loss)가 더 크기 때문일 것이다.

그림 5는 20개의 전지들에 대해 계산된 각 전지층의 평균 전위차를 나타내었다. 수치 모사의 운전 조건 대상으로 정한 40% 이용률에서 300 A ( $100 \text{ mA/cm}^2$ ) 부하를 걸었을 경우와 60% 이용률에서 450 A ( $150 \text{ mA/cm}^2$ ) 부하를 걸었을 때의 결과를 함께 나타내었다. 20개 전지의 평균 전위차는 각각 0.890 V와 0.801 V로 계산되었고, 스택 전압은 17.8 V와 16.02 V이다. 이 수치 모사 결과를 측정치와 비교하면 40%-300A에서의 계산 결과는 같은 조건의 1300 시간 운전시 측정 데이터와 일치하며, 60%-450A에서의 결과는 약 2500 시간 운전시의 데이터와 일치한다. 스택의 발전 용량도 5.3 kW와 7.2 kW로 계산되어 실제 설치 용량과 비슷하다. 현재 개발한 모델은 시간에 따른 전지 성능의 변화를 고려하지 않은 것으로서, 전력연구원의 5 kW 스택에 대해서는 대체로 약 3,000 시간 이전의 성능을 비슷하게 예측하는 것으로 해석된다. 다시 말하면 현 모델은 40,000 시간 운전이라는 스택 운전 목표에서 초기 운전 성능은 비교적 정확하게 예측할 수 있다고 보여진다. 여기에 전지 성능 열화를 수식으로 도출하여 모델에 포함시키면 장기 운전시의 성능을 예측할 수 있을 것이고, 초기 운전시의 온도 조절 방법을 개발하여 장기 운전 성능을 향상시키는 궁극적 목표를 달성할 수 있을 것이다. 그림 5에서 보듯이 두 운전 조건에서 모두 전지간의 전위차 변화는 미미한 것으로 계산되었다. 스택의 가운데 부분에 위치한 전지들에 비해 가장 윗쪽의 전지와 아래쪽의 전지가 약간 높은 전압을 나타내는데, 기체의 흐름과 반응 속도 및 조성은 일정하다고 가정하였으므로 각 전지층의 평균 온도 차이에 의해 얻어진 차이라고 보인다. 실제 운전한 5 kW 스택에서도 전지간 표준편차는 3 mV 이내로 아주 작은 것으로

나타나 있다.

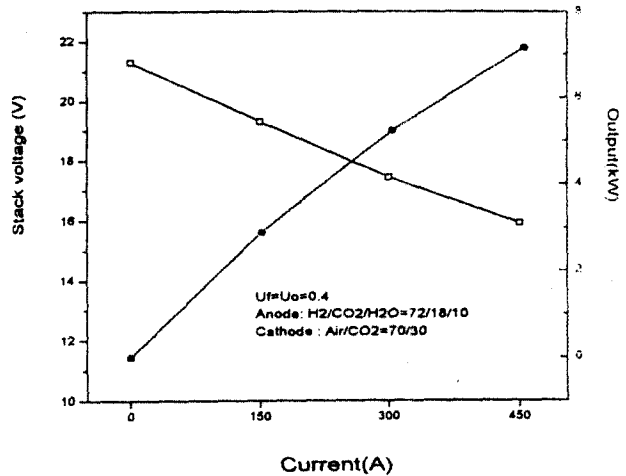


Fig. 3. I-V Characteristics of the 5 kW MCFC stack

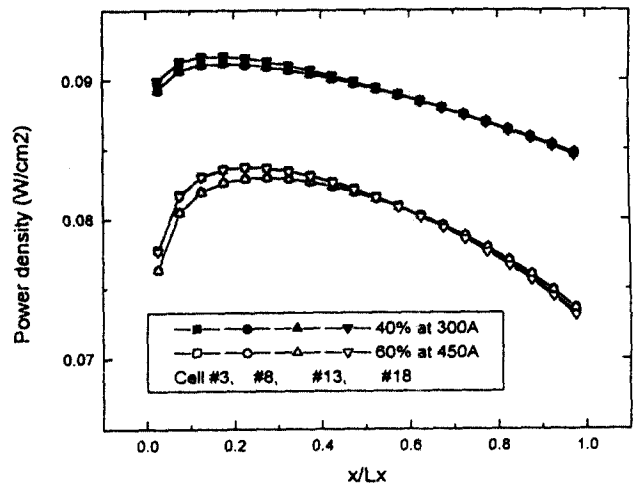


Fig. 4 Power density variation in the gas flow direction

### 5-3. 전산모사를 통한 스택 내부온도 해석

전산 모사를 통한 스택의 3차원 온도 분포를 그림 6에 나타내었다. 이 결과는 상하 분리판 외부가 일정한 온도( $650^{\circ}\text{C}$ ) 로 고르게 가열되고 주입되는 기체 온도는  $600^{\circ}\text{C}$ 인 경계 조건을 설정한 경우에 얻어진 것이다. 따라서 스택 외부 경계의 온도차가

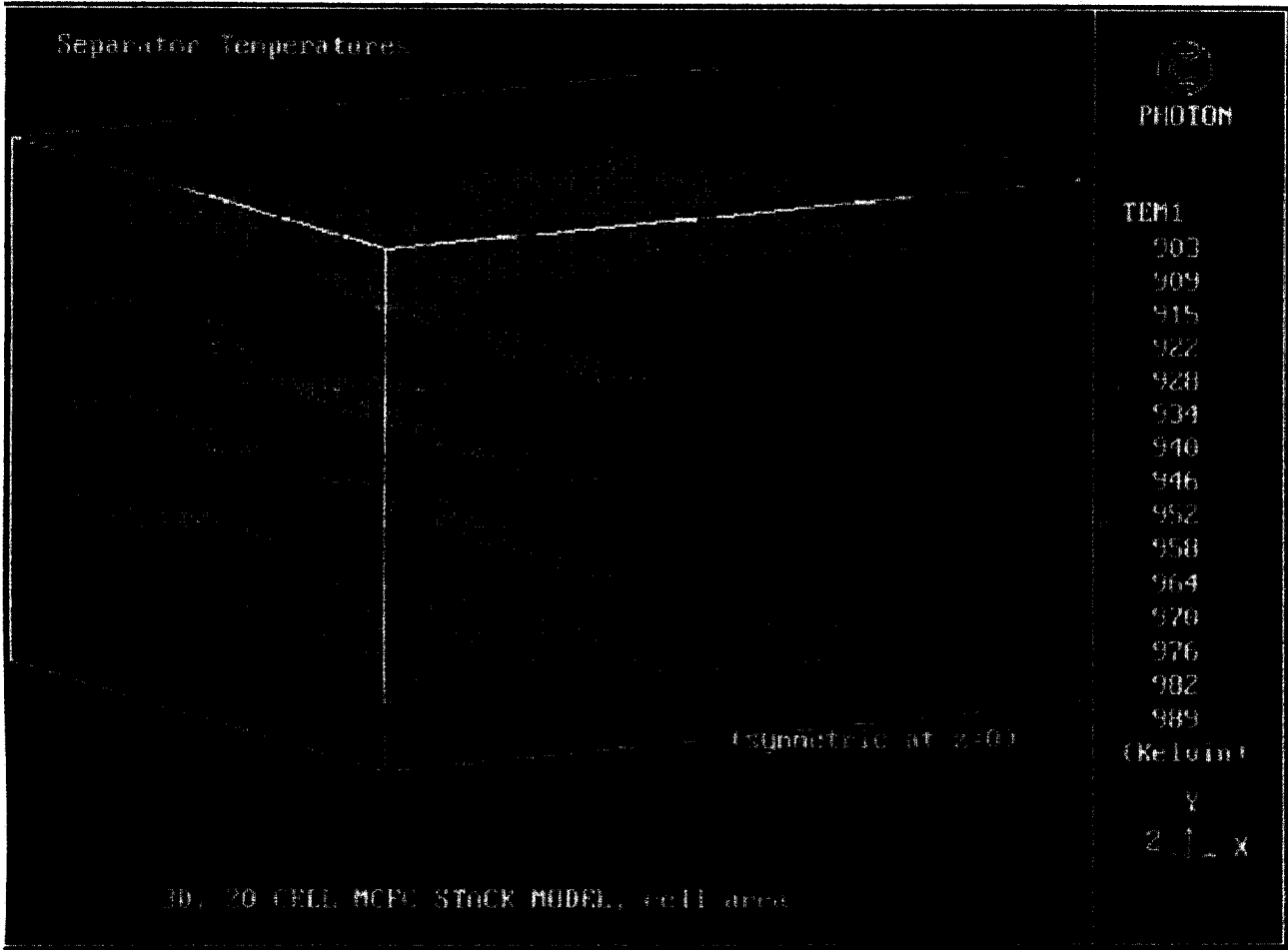


Figure 5. 3-D temperature distribution from MCFC stack simulation

크지 않고, 전체적으로 스택 입구 및 상하 외부로부터 출구에 가까운 내부 중앙 부분으로 온도가 완만하게 상승하는 분포가 얻어진다. 실제의 5 kW 스택 운전에서 측정된 온도 분포는 그림 6과 같은 형태는 아니다. 스택 상하판의 가열은 중앙 부분에서만 일정한 온도로 조절되므로 650°C의 고온 온도 분포가 나타나지 않으며, 5 kW 스택 운전시에 기체 주입 온도는 520-580°C의 범위 내에서 조절되었다. 또한 외부로의 열 손실은 내부 온도 분포에 큰 영향을 주는 변수임에도 정확한 예측이나 측정이 곤란하다. 이러한 실제 운전 상황을 고려한 변수들은 앞에서 언급하였듯이 측정된 데이

터의 해석과 수치 모사를 통한 결과와의 비교를 통해 어느 정도 파악이 가능하다. 그림 7은 5 kW 스택 운전시에 측정된 온도 분포 데이터에 근사한 결과를 얻기 위해 2차원 모델의 수치 모사를 반복하여 그 중 비교적 잘 일치하는 결과를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 수치 모사 결과의 경계 조건으로는 상하 가열판에서 중앙 부분만 650°C로 유지되고 나머지 면적에서는 일정한 속도( $h=0.75W/m^2K$ )의 열손실을 가정하였으며, 주입되는 기체 온도는 550°C로 설정하였다. 따라서 외부 온도 차가 심하고 이에 따라 입구 부분에서는 상하의 온도가 중앙보다 높고 출구 부분에서는 그 반대인

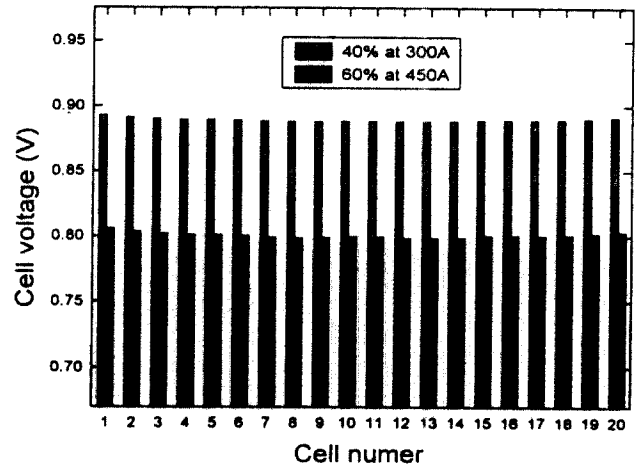


온도 분포 형태가 계산되었다. 스택 온도의 외부 경계 조건은 단일 상태에 따라 크게 변화하므로 스택의 장착 및 운전 조건에 따라 시스템에 맞는 경계 조건 변수들을 찾는 것이 중요하다.

그림 8은 2차원 모델의 수치 모사를 다른 운전 조건에서 행하여 측정 데이터와 비교한 것이다. 열 손실 및 가열 온도 영역의 설정은 그림 7과 같으며, 이용률이 40%에서 60%로 증가하였고 전류 밀도는 100에서 150 mA/cm<sup>2</sup>로 증가한 경우이다. 기체 주입 온도를 520°C로 낮추었는데, 이는 실제 운전시의 자료를 근거로 한 것이다. 결과는 스택의 중앙 부분에서 측정치와 잘 일치하나 입구 및 출구 부분에서는 10-30°C의 차이를 보이고 있다. 입구의 온도 측정치는 모사 결과보다 낮고 출구의 온도 측정치는 높은 것으로 나타났는데, 이는 스택 입구 및 출구 부분에서의 열손실이 모사 조건보다 더욱 큰 것을 의미한다. 따라서 열 손실 계수를 좀더 크게하여 모사하면 측정치와 더욱 가까워질 것으로 예상된다. 이와 같이 실제 운전시의 변수는 이론적으로 유추하는 것과 다르게 예상하기 힘든 값을 필요로 하는 경우가 많다. 개발된 모델 및 전산 코드의 유용한 활용을 위해서는 이러한 실제 운전 변수들을 이해하고 적절히 취급하는 지식과 경험이 필요하다.

그림 9는 그림 7의 온도 분포를 기체 흐름 방향으로 나타내고 측정치와 비교한 것이다. 최 하단 분리판(1번)과 가운데 분리판(11번), 그리고 그 사이에 위치한 6번 분리판 온도를 대상으로 하였다. 스택 내부에 위치한 분리판 6과 11은 입구와 출구 온도 차이가 크며 측정치와 계산 결과가 비슷한 변화를 보여준다. 하판 분리판인 1번은 입출구 온도가 크게 다르지 않은 것으로 계산되었으나 측정 결과는 특히 입구에서

이보다 매우 낮다. 이는 앞에서 설명한 바와 비슷하여 입구 부분에서의 실제 열 손실이 계산 조건보다 더욱 크다는 것을 의미한다.



#1 cell = Lowest position,  
#20 cell = Highest position

Fig. 6. Cell Potential of the 20 cells in the 5 kW MCFC stack

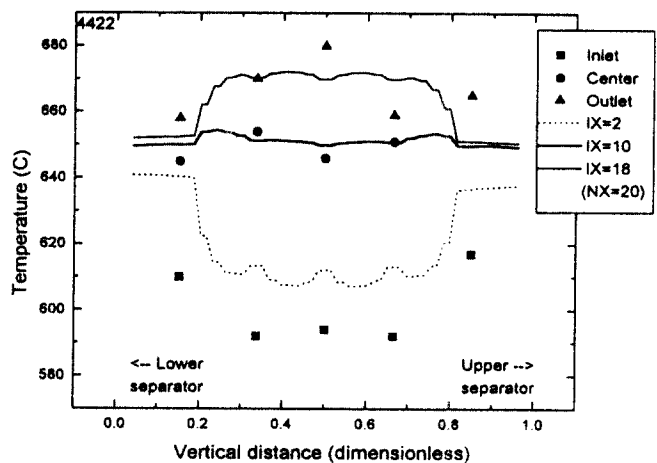


Fig. 7. Temperature distribution from 3-dimensional MCFC stack simulation(40% fuel utilization at 100 mA/cm<sup>2</sup>)

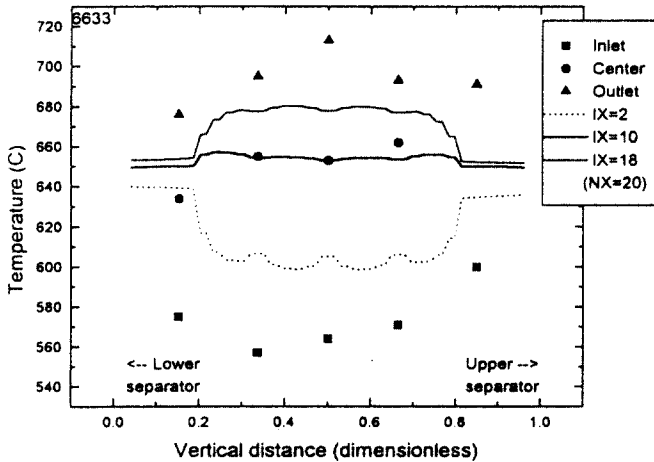


Fig. 8. Separator temperature of the 5 kW stack at 60% utilization and 150 mA/cm<sup>2</sup> : experimental data (points) vs. simulation result (lines)

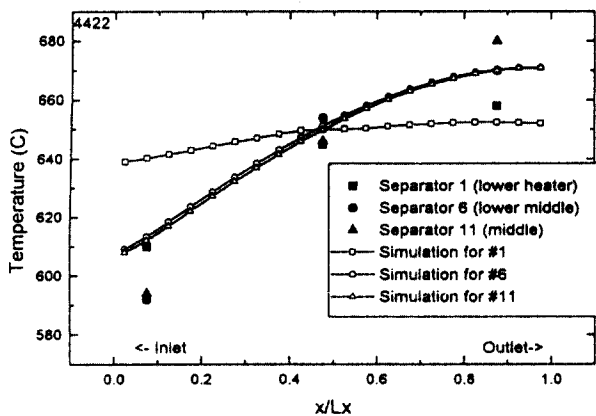


Fig.9 Temperature distribution in the gas flow direction of the 5 kW stack at 40% utilization and 100mA/cm<sup>2</sup> : Measured data and simulation results

## 6. 결론

MCFC 발전 기술의 실용화를 위하여 3,000cm<sup>2</sup> 면적의 단위전지 20장으로 구성된 5 kW급 MCFC 스택을 운전하여 그 특성을 파악하였고 아울러 스택 성능 및 스택내 운전온도 분포변화를 해석하기 위한 상용코드를 이용한 전산모사 코드를 개발 실제 운전된 운전 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 스택은 성능시험시 7.6 kW 최대 출력을 발전하여 본 스택 설계치 보다 높은 출력을 기록하였고 부분 부하특성을 살펴보면 450A 정부하에서 17.05V, 300A일 경우에 18.20 V, 그리고 150 A일때 19.32 V로 MCFC 전류 전압 특성을 보여주었다. 운전중 스택내 온도분포 변화에 있어서 온도가 가장 높은 부분은 스택의 중간부분 분리판 가스 출구 부분으로 680℃까지 온도가 상승하였고, 가장 낮은 온도부위는 가스 입구 부위로 592℃를 보여주었다. 전체적으로 볼 때 가스 공급부의 온도가 낮았고, 가스 흐름 방향으로 온도가 증가하였다. 전류밀도 증가에 따라 스택 온도가 증가하는 것을 확인할 수 있었고 또한 스택의 적층 수 증가에 따라 입·출구 온도차가 크게 나타났다.

2) 스택 성능 및 내부 온도해석을 위하여 열전달, 유동방정식 및 연료전지 반응특성을 고려한 수학적 모델을 완성하였다. 완성된 수학적모델의 전산 모사를 위하여 상용 CFD 코드를 이용한 프로그램을 개발하였다. 개발된 스택 전산모사 코드는 실제 스택 운전 자료와 비교하여 신뢰성을 확인하였다. 그러나 스택 외부 단열조건의 불규칙함으로 인하여 정확한 경계조건 변수 설정이 어려웠고 보다 정밀한 온도분포를 예측

하기 위하여는 개발된 모델과 코드의 변수들에 대한 경계조건 설정 기준을 실제 운전 상태에 맞게 보완하는 작업이 필요하다.

### 참고문헌

- (1) 임희천 외, 1999, 100 kW급 외부개질형 용융탄산염 연료전지 시스템 개발 (1단계 25 kW급), 전력연구원보고서 TM.97TJ38. M1999.20.
- (2) Sampath, V. and Sammells, A. F., 1980, J. Electrochem. Soc., Vol. 127(1), p79.
- (3) Blomen, L. J. M. J. and Mugerwa, M. N. (ed.), 1993, Fuel Cell Systems, Plenum Press.
- (4) Wolf, T. L. and Wilemski, G., 1983, J. Electrochem. Soc., Vol. 130, p. 48.
- (5) Yoshiba, F., Abe, T., Cao, G. and Watanabe, T., 1997, Trans. of the Japan Soc. of Mechanical Engineers, Vol. 63, No. 606B, p. 675.
- (6) Yoshiba, F., Ono, N., Izaki, Y., Watanabe, T. and Abe, T., 1998, J. of Power Sources, Vol. 71, p. 328.
- (7) Bird, R. B., Stewart, W. E., and Loghtfoot, E. N., 1960, Transport Phenomena, John Wiley & Sons.
- (8) Patankar, S. V., 1980, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, McGraw-Hill.
- (9) Reid, R. C., Prausnitz, J. M. and Sherwood, T. K., 1977, The Properties of Gases and Liquids (3rd ed), McGraw-Hill.
- (10) 고준호, 임희천, 1998, 전산모사를 이용한 용융탄산염 연료전지 스택내에서의 온도분포 해석, 한국기계공학회 춘계학술발표회 논문집 B pp. 225-228.

부호

$C_p$ [J/mol · K]	= molar heat capacity
$C_j$ [mol/m <sup>3</sup> ]	= concentration of species-j
$D_j$ [m <sup>2</sup> /sec]	= diffusivity of species-j
$E$ [volt]	= electrode potential
$E_{OCV}$ [volt]	= open circuit voltage
$\Delta H_{r,e}$ [J/mol]	= enthalpy change by electrode reactions
$\Delta H_{r,gas}$ [J/mol]	= enthalpy change by gas phase reactions
$i$ [A/m <sup>2</sup> ]	= current density
$k_{cell}$ [W/m · K]	= thermal conductivity of cell layer
$k_{gas}$ [W/m · K]	= thermal conductivity of gas
$k_S$ [W/m · K]	= thermal conductivity of separator plate
$P$ [kg/m · sec <sup>2</sup> ]	= total system pressure
$Q_{IR}$ [W/m <sup>3</sup> ]	= heat released by Joule heating
$Q_{rad}$ [W/m <sup>3</sup> ]	= heat transfer by thermal radiation
$R_{ohm}$ [ $\Omega$ · m <sup>2</sup> ]	= ohmic resistance
$r_{j,e}$ [kg/m <sup>3</sup> sec]	= rate of electrode reactions
$r_{j,gas}$ [kg/m <sup>3</sup> sec]	= rate of gas phase chemical reactions
$T$ [K]	= temperature
$\underline{u}$ [m/sec]	= velocity vector, $\underline{u} = (u_x, u_y, u_z)$
$\mu$ [kg/m · sec]	= viscosity
$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	= density
$\eta_a$ [ $\Omega$ · m <sup>2</sup> ]	= impedance of anode overpotential
$\eta_c$ [ $\Omega$ · m <sup>2</sup> ]	= impedance of cathode overpotential