

## kW급 MCFC 스택에서의 기체 유동 압력 및 열 분포 해석

고준호, 강병삼, 서혜경, 임희천  
 한국전력공사 전력연구원

### Analysis of gas pressure and heat distribution in a kW-scale MCFC stack

Joon-Ho Koh, Byoung-Sam Kang, Hai-Kung Seo, Hee Chun Lim  
 Korea Electric Power Research Institute, KEPCO

#### 1. 서론

용융탄산염 연료전지 (MCFC) 스택의 운전시에 가장 문제가 되는 사항들 중의 하나는 전지 반응에 의해 생성되는 많은 열량으로서, 이로 인해 내부 온도가 상승하고 심한 온도 분포가 존재하게 되며 이는 출력 전압 또는 전류의 불균일을 초래하는 동시에 전지 성능 열화 (degradation)를 가속시켜 장기 운전에 큰 장애 요인이 된다. 현재 국내에서 개발중인 100 kW급 MCFC 발전 시스템의 스택은 전극 면적이 6,000 cm<sup>2</sup> 혹은 그 이상에 이르며 25 kW 모듈당 적층되는 전지는 40장으로서 운전시의 발열량 조절이 매우 큰 문제로 등장한다. 새로운 형태의 스택 설계가 이루어지지 않는한 현재의 기술로 발전용 MCFC 스택 내부의 열을 제거하는 수단은 과량의 압축 공기를 산소극에 주입하는 공냉식 방법이다. 이 때에는 필연적으로 연료극과의 차압이 발생하며 이로 인해 전지층에서 가스 누출등의 문제가 발생하는데, 이를 해결하기 위해 가압 운전을 통한 압력 조절이 효과적이다. 본 연구에서는 이와 같은 문제들을 해결하기 위한 기초 단계로서 최근에 운전을 마친 kW급 MCFC 스택에서의 온도 및 유동 압력 측정 결과를 분석하고 스택 모델 및 전산 모사를 이용한 이론적 해석 결과와 비교하였다.

#### 2. 이론

그림 1은 co-flow 형태의 MCFC 스택 모델의 단면도를 보여준다. 전극과 전해질층은 양극 및 음극 반응이 각각 표면에서 일어나는 하나의 전지층으로 가정하였다. 전지층 양쪽의 연료 및 산소 기체 통로와 분리판이 하나의 반복 구조를 이루어 수십장의 전지층이 수직 방향으로 적층된 대형 스택을 모사할 수 있다. 이와 같은 모델에서 기체의 유동 및 반응을 계산하는 지배 방정식은 다음과 같다.

$$\blacktriangleright \text{연속 방정식: } \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = r_{CO_2}$$

$$\blacktriangleright \text{유동 방정식: } \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u})$$

$$\blacktriangleright \text{물질 수지식: } \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{m}_j = \nabla \cdot (\rho D_j \nabla m_j) + r_{j, gas} + r_{j, cell}$$

$$(j = O_2, N_2, CO_2 \text{ for cathode ; } j = H_2, CO_2, CO, H_2O \text{ for anode})$$

반응 소모량은 Faraday 식에 의해 계산되며, 전류 밀도와 전위차 관계는 평형 전위로부터 Nernst loss, 분극 손실, 내부 저항을 감안 전위차 수지식으로 나타난다.

$$E_{cell} = E_{OCV} - \frac{RT}{zF} \ln \prod \frac{P_{j, product}^{\nu_j}}{P_{j, reactant}^{\nu_j}} - z_j N_j F (R_{ohm} + \eta_{anode} + \eta_{cathode})$$

전지 반응에 의한 발열량과 열 분포 해석을 위한 열전달 지배 방정식들은 다음과 같다.

$$Q_{cell} = (-\Delta H_{f,H_2O}) \frac{i}{zF} - i \cdot E_{cell}$$

- ▶ 열에너지 보존식 (전지층):  $\nabla \cdot (k_{cell} \nabla T) - Q_{rad} + Q_{cell} = 0$
- ▶ 열에너지 보존식 (분리판):  $\nabla \cdot (k_s \nabla T) + Q_{rad} = 0$
- ▶ 열에너지 보존식 (가스 혼합물):  $\nabla \cdot (\rho u C_{p, gas} T) = \nabla \cdot (k_{gas} \nabla T) + Q_{shift}$

위의 식들은 각 반복 구조마다 필요한 것들로서 반복 구조가 증가할수록, 즉 적층수가 증가할수록 필요한 식의 수는 크게 증가한다. 이 모델의 해를 구하기 위해서 finite volume method를 이용한 유체 해석 코드인 PHOENICS(v2.2)를 이용하였다.

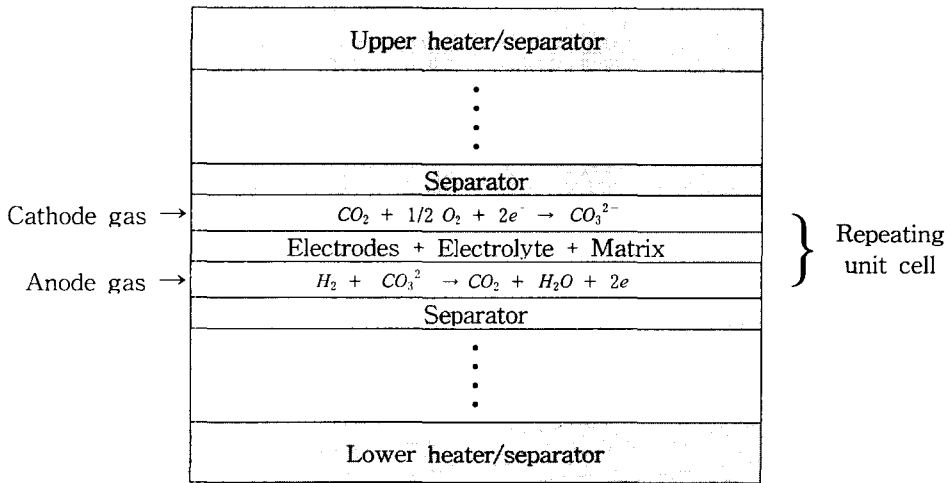


Figure 1. Schematic of the MCFC stack model.

### 3. 실험 및 해석 결과

전력연구원에서 1998년 2월에 장착하여 7월까지 약 5,000 시간 운전 시험한 5~7 kW급 MCFC 스택은 3,000 cm<sup>2</sup> 전극으로 구성된 전지 20장을 적층한 것으로서 부하 150 mA/cm<sup>2</sup>에서 최고 약 7 kW의 성능을 안정적으로 보여주었다. 상하부 가열분리판을 포함한 총 21개의 분리판 중에서 5개는 중간에 온도 측정용 thermocouple을 삽입하여 운전시 온도를 측정할 수 있게 하였다. 실제 운전시에는 650℃의 온도를 유지하기 위한 단열재의 사용으로 thermocouple 일부가 손상되어 온도 측정 위치가 제한되었다. 기체 압력은 스택의 입출구에 양극 및 음극 기체 압력 측정을 위한 manometer를 설치하여 정기적으로 눈금으로부터 확인하였다. 그림 2는 여러 가지 조건에서 측정된 압력을 비교한 것으로서 (a)는 출구 부분에서의 압력을, (b)는 입구와 출구 사이의 압력 차이를 나타내었다. 출구의 압력은 양극 기체의 경우에 부하 변화에 민감하지 않으며 이용률에 영향을 약간 받는 것으로 보인다. 음극 기체의 출구 압력은 부하 증가에 따라 증가하는 것이 뚜렷한데 이는 전지 반응시 음극에서는 기체가 생성되어 부피 유속이 증가하기 때문인 것으로 보인다. 전체적으로 이 스택 구조에서의 출구 압력은 80 mmH<sub>2</sub>O (약 0.008 기압) 이하인 것을 알 수 있다.

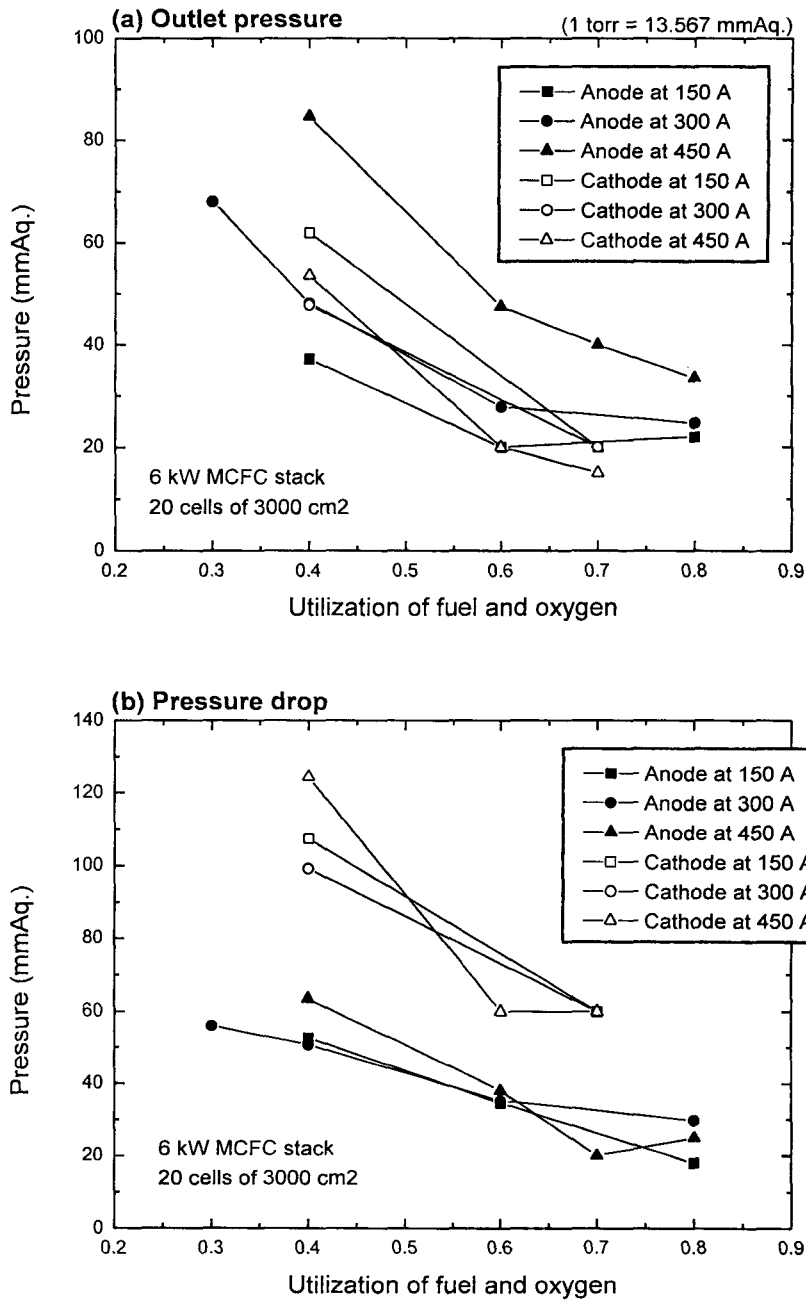


Figure 2. Measured gas pressure during the stack operation.

실제 운전시에 중요한 변수는 입구와 출구 사이, 양극과 음극 사이, 그리고 가압시에 스택 내부와 외부 사이의 압력 차이이다. 그림 2의 (b)에서 보는 입구와 출구 사이의 압력 강하

는 양극이 음극보다 매우 크다. 이는 유량의 차이에 따라 나타난 당연한 결과인데, 여기에 나타난 최고 압력 강하는 40% 이용률의  $150 \text{ mA/cm}^2$  조건에서 약  $124 \text{ mmH}_2\text{O}$ (약  $0.012 \text{ 기압}$ )이다. 이 때의 양극과 음극간 차압은 약  $61 \text{ mmH}_2\text{O}$ 로서, 일반적으로 제시하는 최대 허용 차압인  $80 \sim 100 \text{ mmH}_2\text{O}$  보다는 약간 낮다. 이 결과를 바탕으로 추산하면  $3,000 \text{ cm}^2$ 의 kW급 스택 규모에서는 압력 조절 없이도 차압이 큰 문제가 되지 않으나, 상용화 규모에 가까운  $100 \text{ kW}$ 급 스택에서는 전극 면적이 두 배 이상이 되어 가압 및 압력 조절 장치의 사용이 불가피함을 예측할 수 있다.

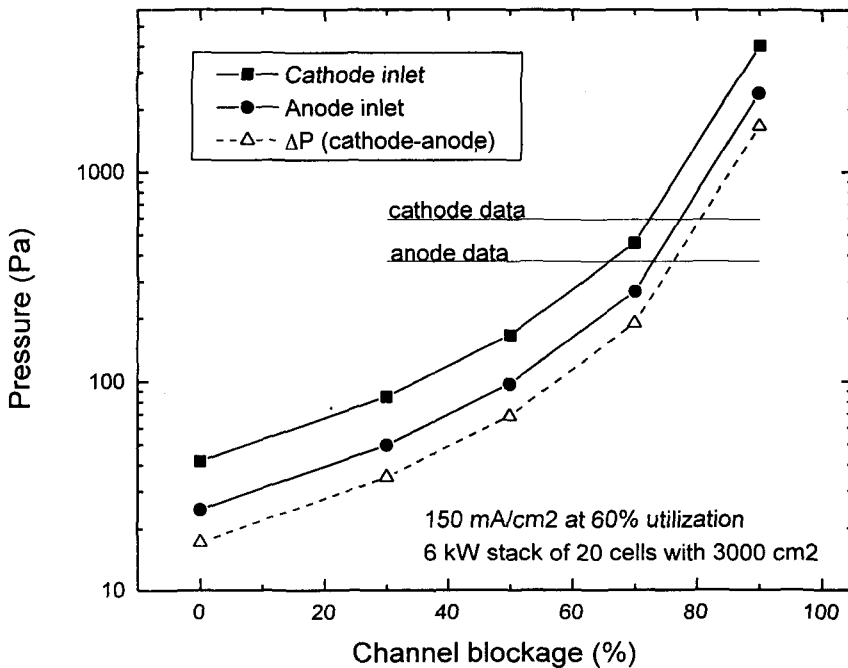


Figure 3. Simulation of the stack model for inlet gas pressure at different values of channel blockage and comparison with the measured data.

그림 1과 같은 MCFC 스택 모델에서는 출구 부분의 압력을 일정하게 하고 입구와 출구 사이의 압력 분포를 계산하게 된다. 이 때의 압력 분포는 기체의 밀도등과 같은 물성치 및 기체 통로의 기하학적 구조에 의해 계산되는데, 약  $1 \text{ mm}$ 인 기체 통로 높이에 대해 통로 내부가 완전히 열린 공간이라고 가정하고 계산하면 그 결과로 얻는 입구 압력은 그림 2의 측정 결과에 비해 매우 낮다. 이는 실제 스택에서 기체 통로 내부에 측면 방향으로 균일한 유체 흐름을 위한 장애물이 형성되어 있어서 유체 흐름에 대한 저항(drag)으로 작용하기 때문이다. 따라서 모델을 이용하여 실제 측정치와 비슷한 결과를 얻기 위해서는 이를 고려하여야 하는데, 간단한 방법으로서 기체 통로의 일정 부분이 균일하게 막혀 있다는 가정을 하면 된다. 이 때 막힌 부분의 전체 통로에 대한 비율은 계산 결과를 측정치와 비교하여야 알 수 있다. 그림 3은 기체 통로중에서 막힌 부분의 비율(blockage)을 변화하면서 계산한 결과를 나타내는데, x-축의 0은 완전히 열린 공간(open channel)을 나타내며 100%는 기체 통로가 완전히 막힌 상황을 의미한다. 그림에는 이 조건에서의 측정 데이터를 함께 나타내

어 약 70%의 기체 통로가 장애물로서 유체 흐름을 저항할 때 측정 결과가 계산과 일치함을 알아 내었다. 이 수치는 스택의 기하학적 구조 및 크기에 따라 변화하게 된다.

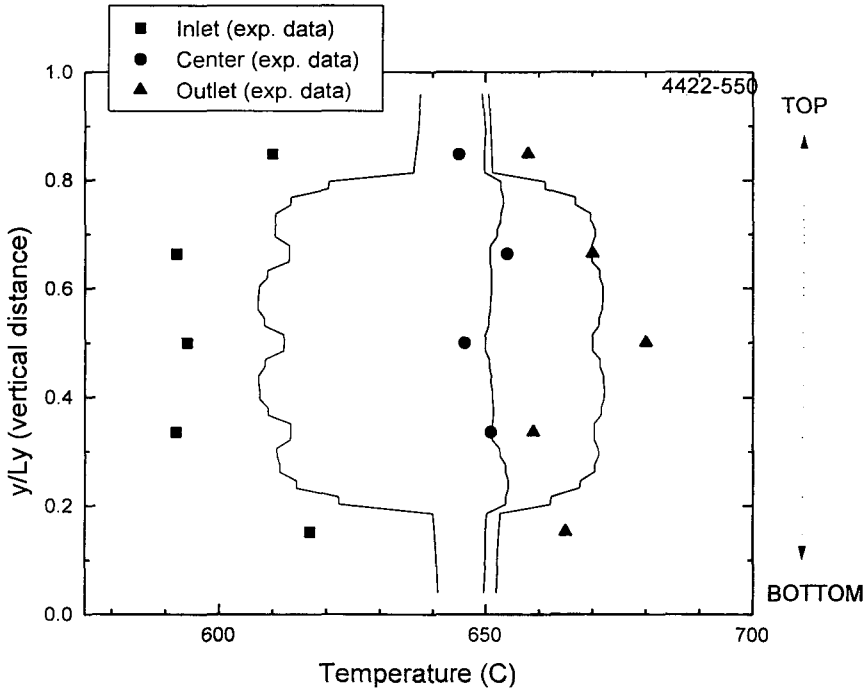


Figure 4. Separator temperature of the 6 kW MCFC stack at 40% gas utilization and 100 mA/cm<sup>2</sup>: measured data (points) vs. simulation results (lines).

그림 4는 중간 분리판에서 측정된 온도 분포를 스택 모델의 전산 모사 결과와 비교한 것이다. 모델의 경계 조건을 변화하며 측정 결과와 비슷한 조건을 얻어낸 결과로서 온도의 변화 분포가 측정 결과와 잘 맞음을 알 수 있다. 입구의 온도 계산치보다 측정치가 낮은 것은 주입 기체의 실제 온도가 계산 조건보다 낮았음을 의미한다. 이와 같은 온도 분포의 예측은 최고 온도 상승 부위와 전체 스택 내부의 열 분포를 예측하여 적절한 운전 조건을 찾는 데 도움을 주며, 더 효율적인 스택 설계의 자료를 제공할 것이다. 한편 본 연구에서 주로 사용한 열전달 지배 방정식보다 간단한 열역학적 에너지 수지를 이용하면 스택 기체 온도 상승을 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$Q_{cell} = (\rho u C_p T)_{in} - (\rho u C_p T)_{out}$$

여기서는 스택의 구조와 열전달 및 외부 손실을 무시하고 주입된 기체가 배출되면서 반응열을 완전히 흡수할 때의 기체 온도 상승을 계산할 수 있으며, 이때 필요한 것은 입구 기체 온도와 입출구 기체의 밀도, 유속, 그리고 열용량 상수이다. 이 간단한 계산과 CFD 코드를 이용한 모델 계산 결과를 그림 5에서 비교하였다. 이 결과들은 기체 이용률을 변화할 때 온도 상승치를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 간단한 열역학적 계산으로는 높은 이용률에서의 온도가 매우 크게 예측됨을 알 수 있다. 이는 이용률이 증가하면 기체를 이용한 냉각 효과에 한계가 있어서 열전달에 의한 외부로의 열 손실이 매우 커지는데, 이를 해석하기 위해서는 본 연구에서 사용한 것과 같은 열전달 모델이 사용되어야 함을 보여준다.

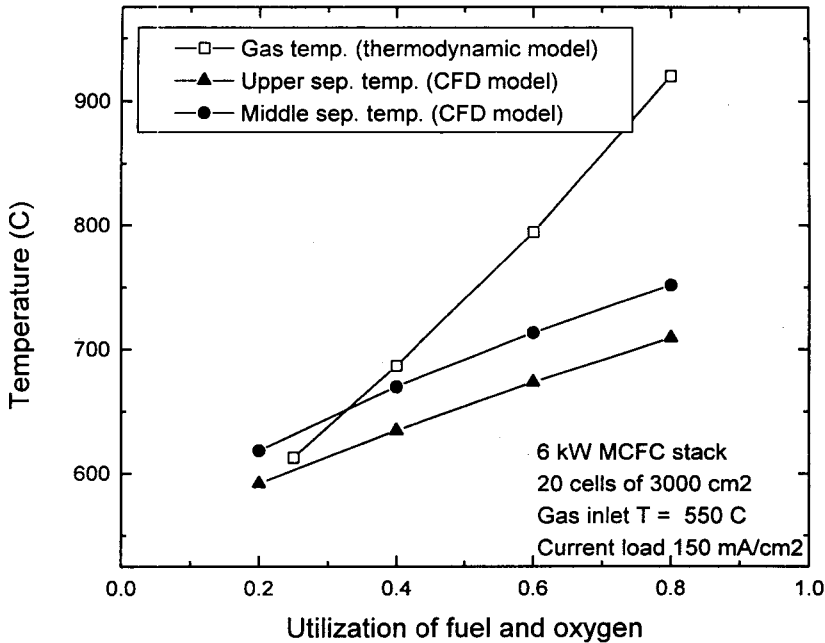


Figure 5. Comparison of temperature rises predicted from a simple thermodynamic model and the heat transfer model with a CFD solver.

#### 4. 결론

5~7 kW 출력을 나타낸 3,000 cm<sup>2</sup> 크기의 MCFC 스택에서 양극과 음극간 차압은 최대 약 61 mmH<sub>2</sub>O로서 정상 장기 운영을 위한 일반적 허용치보다 약간 낮은 수준이었다. 이로 미루어 상용화 규모의 수백 kW급 스택에서는 가압 및 압력 조절 장치의 사용이 필요할 것을 예측할 수 있었다. 이러한 압력 분포의 예측을 위해 전산 모사를 위한 스택 모델의 기체 통로에 대한 장애물 설정이 효과적임을 확인하였는데, 본 연구에서 사용한 스택에서는 70%의 block을 가정할 때 측정 결과와 계산이 일치하였다. 한편 본 스택 모델은 스택 내부의 열 분포를 정확히 예측할 수 있었고, 이에 비해 간단한 열역학적 계산은 스택 운전 조건에 따라 제한적으로만 사용할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 5. 참고문헌

1. Blomen, L. J. M. J. and Mugerwa, M. N. (ed.): "Fuel Cell Systems," Plenum Press, New York (1993).
2. 고준호, 임희천, "전산 모사를 이용한 용융 탄산염 연료 전지 스택에서의 온도 변화 해석," 대한기계학회 추계학회 논문집 B, pp225-228 (1998).
3. 임희천, 고준호, "5 kW 용융탄산염 연료전지 운전특성 및 스택내 온도 변화 해석," 대한기계학회 춘계학회 논문집 B, pp767-770 (1999).