직접 메탄올 연료 전지를 위한 마이크로 채널의 특성 평가

Evaluation of characteristics of micro-channel for direct methanol fuel cell

현민수, 김상경, 백동현, 최종민, 김태진, 이병록, 정두환

한국에너지기술연구원

1. 서론

직접 메탄올 연료 전지의 성능은 유로 형상에 매우 큰 영향을 받는다. 연료극에서는 연료 농도 분포를 균일하게, 공기극에서는 물 배출을 쉽게 하는 것이 유로 설계의 핵심이다. 따라서 serpentine 형상을 중심으로 이를 변형한 형상이 일반화 되고 있으며, 특히 최근에 마이크로 채널이 전극 표면에서의 연료 농도 분포를 고르게 하며 MEMS (Micro-Electro-Mechanical-Systems)를 이용하여 제작할 수 있는 장점 때문에 많은 주목을 받고 있다. 그러나 마이크로 채널은 큰 압력 손실을 유발하여 연료 전지 시스템의 보조 동력의 부담을 증가시킨다. 따라서 압력 강하를 예측하여 성능 증가와 압력 강하에 따른 손실분이 적절하게 보상되도록 최적점을 찾는 것이 중요하다.

본 연구에서는 마이크로 채널의 형상별, 채널 크기별 특징을 알아보기 위하여 1×1㎠의 연료극을 지오메트리로 하여 3차원 시뮬레이션을 수행하였다. Navier-stokes 방적식과 Darcy's law가 각각 유로와 backing 레이어에서 사용되었으며 메탄올 산화반응에 의한 전류밀도를 계산하기 위하여 Tafel 식을 사용하였다. 압력 강하, 연료 농도 분포, 전류 밀도 분포를 유로 형상 및 크기에 따라 분석하였다.

2. 실험방법

유로 내에서의 압력과 유속을 구하기 위하여 Navier-Stokes 방정식을 사용하였으며 모멘텀 방정식과 연속방정식은 아래와 같다.

$$\rho\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t}-\nabla\cdot\mu\left(\nabla\mathbf{u}+(\nabla\mathbf{u})^{T}\right)+\rho(\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u}+\nabla P=\mathbf{F}$$

$$\nabla\cdot\mathbf{u}=0$$

또 확산층에서의 모멘텀 밸런스는 Darcy's law를 사용하여 해석이 가능하다.

$$\mathbf{u} = -\frac{k}{\mu}\nabla P$$

점도와 투과도는 일정하므로 확산층에서의 속도는 압력 그라디언트에 의해 결정되며 이것은 Navier-Stokes 방정식으로부터 유도된다.

한편, 메탄올의 물질전달 방식은 유체의 벌크한 속도로부터 기인하는 convection과 농도차로부터 유발되는 diffusion의 경우를 모두 포함하고 있으며 이를 식으로 나타나면 아래와 같다.

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot (D\nabla c - c\mathbf{u})$$

촉매층에서는 그 두께를 0으로 하여 오직 전기화학 반응만이 고려되었다. 메탄올의 산화반응은 메탄올의 농도가 0.1M 이상인 경우 그 농도에 무관한 0차반응으로, 0.1M 미만인 경우 1차반응으로 해석되는 Tafel 식을 사용하여 계산하였다.

$$I = I_0^{\mathrm{MeOH}} \exp\left(\frac{\alpha_a F}{RT}\eta_a\right)$$

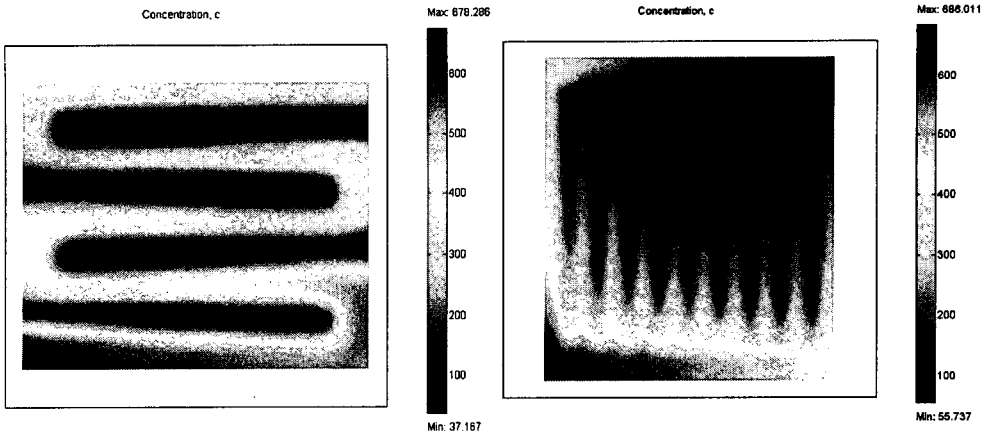
$$I_0^{\mathrm{MeOH}} = I_{0,\mathrm{ref}}^{\mathrm{MeOH}}\left(\frac{c^{\mathrm{MeOH}}}{c_{\mathrm{threshold}}^{\mathrm{MeOH}}}\right)^n$$

$$n = \begin{cases} 0; & (c^{\mathrm{MeOH}} \geq c_{\mathrm{threshold}}^{\mathrm{MeOH}}) \\ 1; & (c^{MeOH} < c_{\mathrm{threshold}}^{\mathrm{MeOH}}) \end{cases} \qquad c_{\mathrm{threshold}}^{\mathrm{MeOH}} = 0.1\ M$$

메탄올 초기 농도는 1M, stoichiometry는 4, 온도는 80℃ 조건으로 가정하였다. 시뮬레이션의 수행은 상용코드인 FEMLAB을 이용하였다.

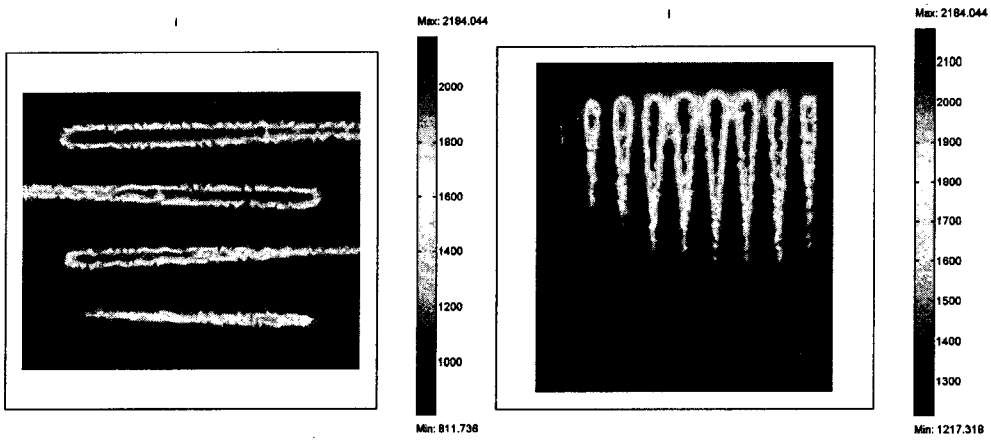
3. 결과 및 고찰

그림 1에 serpentine과 500㎛의 micro-parallel의 경우 0.4V의 과전압 부가시 전극 표면에서의 메탄올 농도 분포를 나타내었다. 각각 267(mol/㎥), 222(mol/㎥)의 평균 농도를 보여주었지만 0.1M 이하의 농도 분극 부분은 micro-parallel의 경우가 더 적었으므로 그림 2의 전류 밀도 분포에서는 각각 2038(A/㎡), 2095(A/㎡)의 비슷한 평균 전류 밀도를 나타내었다. 그러나 압력강하는 각각 1.384(Pa), 0.423(Pa)로 micro-parallel이 더 작았다.



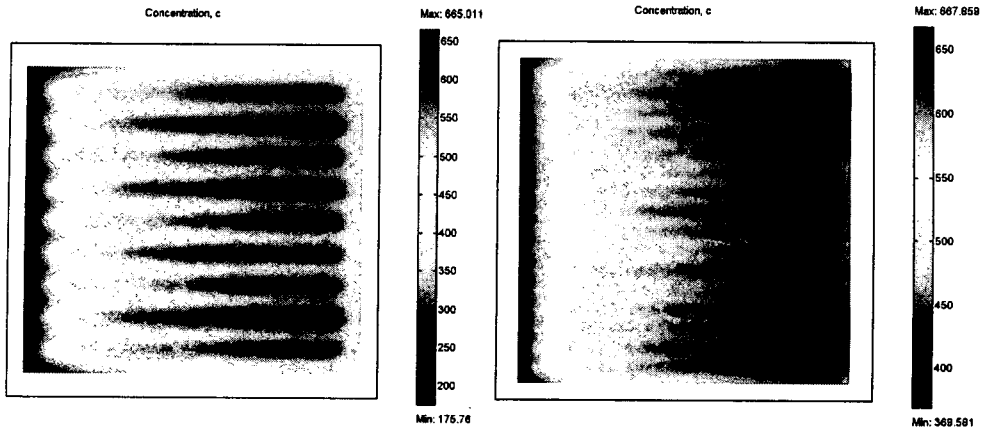
< serpentine(1㎜) > < micro-parallel(0.5㎜) >

그림 1. 0.4V의 과전압 부가시 전극 표면에서의 메탄올 농도 분포 (mol/m³), serpentine vs. micro-parallel.



< serpentine(1㎜) > < micro-parallel(0.5㎜) >

그림 2. 0.4V의 과전압 부가시 전극 표면에서의 전류 밀도 분포 (A/m²), serpentine vs. micro-parallel.



< micro-multi-flow(0.5㎜) > < micro-multi-flow(0.3㎜) >

그림 3. 0.4V의 과전압 부가시 전극 표면에서의 메탄올 농도 분포 (mol/㎥), serpentine vs. micro-parallel.

그림 3은 각각 500㎛와 300㎛의 multi-flow 형상의 유로에서 0.4V의 과전압 부가시 전극 표면에서의 메탄올 농도 분포를 보여준다. 평균 메탄올 농도는 각각 383(mol/㎥), 477(mol/㎥)로 계산되었다. 채널 폭이 좁아질수록 rib 부분에서의 dead zone 형성이 억제되는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

직접 메탄올 연료 전지의 연료극에 마이크로 채널을 적용할 경우 dead zone의 형성이 억제되어 상대적으로 전극 표면에서의 균일한 연료 농도 분포를 유지하는 것으로 확인되었다. 이러한 장점에도 불구하고 채널 길이의 증가, 생성 가스의 발생, 기-액 흐름 등으로 인한 부가적인 압력 손실이 예측되었으며, 따라서 유로 성능 평가시 전지 성능뿐만 아니라 압력 손실도 같이 고려하여야 한다.

serpentine 형상은 압력 손실이 크므로 마이크로 채널 구성이 효과적이지 못했다. multi-flow 형상의 경우 압력 강하가 비교적 작아 마이크로 채널 구성이 용이하였으며 마이크로 채널 구성시 상당한 성능 증가가 예상되었다. 하지만 별도의 매니폴드가 장착되어야 하므로 추가적인 압력 강하가 필요하다. dot 형상의 경우 multi-flow 형상과 비슷한 성능을 예상할 수 있었지만 rib 부분의 면적이 다른 형상들에 비하여 작았으므로 전지의 저항 증가를 유발할 수 있다.

참고문헌

1. Z. H. Wang, C. Y. Wang, J. Electrochem. Soc. 150 (2003) A508-A519.