



기울어진 그루브 믹서가 고분자 전해질 연료전지 성능에 미치는 영향에 대한 기초연구

윤성찬,¹ 박재완,² 강관형^{*3}

A PRELIMINARY STUDY ON THE EFFECT OF SLANTED GROOVE MIXER (SGM) ON THE PERFORMANCE OF A PEM FUEL CELL

S.C. Yun,¹ J.W. Park² and K.H. Kang^{*3}

In the cathode channel of a PEM fuel cell, the local concentration of oxygen near the gas diffusion layer (GDL) decreases in streamwise direction due to chemical reactions, which degrades the efficiency of the oxygen consumption and overall fuel cell efficiency. We numerically studied the influence of the swirling flow generated by a slanted groove mixer (SGM) on the concentration distribution of oxygen. We found that the swirling flow can increase the concentration of oxygen near the GDL, and subsequently improves the oxygen consumption rate.

Key Words : 고분자 전해질 연료전지(PEM fuel cell), 기울어진 그루브 믹서(Slanted Groove Mixer), 카오스 혼합 마이크로믹서(Chaotic Micromixer), 산소 농도(Oxygen Concentration)

1. 서 론

연료전지는 연료내의 저장되어 있는 에너지를 수소와 공기 중 산소의 전기 화학 반응에 의하여 전력으로 변환해 주는 장치로서, 에너지 변환 과정 중에 유해 배출물이 생성되지 않는 장점을 가지고 있다. 여러 종류의 연료전지 중 고분자 전해질 연료전지는 낮은 작동 온도, 내연기관 대비 높은 효율, 높은 출력 밀도 및 부하 변동에 따른 빠른 응답성 짧은 시동 시간 및 긴 수명 등으로 인하여 실용화를 위한 가장 적합한 자동차의 동력원으로 여겨지고 있다

연료전지의 효율을 향상시키기 연료를 효율적으로 사용하는 방법이 고려되었다. 수소극(anode)에서 공급되는 연료인 수소와 공기극(cathode)에서 공급되는 공기의 당량비(stoichiometry)가 항상 1보다 큰 값이므로 미반응 산소나 수소

가 그대로 배출된다. 수소극(anode)에서 배출되는 수소의 경우, 반응하지 않은 미 반응 수소에 대한 재활용이 필요하다 [1]. 산소의 경우, 공기극(cathode)으로부터 확산되어 반응하지 만 유로에 있는 산소의 양을 효율적으로 소모하지 못한 채 미 반응 산소는 배출된다. 이러한 입구단과 출구단의 산소 농도 차이로 인해 분리판의 활성면적에서 불균일한 반응 일어나고 결국 출구에 가까워질수록 전류밀도(current density)가 떨어진다. 따라서 이러한 연료를 재순환하는 시스템과 산소의 확산을 촉진하는 연구가 진행되고 있다. 하지만 최적의 효율과 성능을 위한 운전조건에 대한 연구는 아직 미비한 상태이다.

본 연구에서는 고분자 전해질 연료전지 채널 내부에 카오스 혼합을 유도하여 산소 소모의 효율성을 정성적 정량적으로 분석하고 이것이 연료 전지의 효율에 미치는 영향에 대해 예측하여 본다.

2. 카오스 마이크로 믹서(Chaotic Micromixer)

마이크로 채널의 내부 유동이 가지는 레이놀즈 수(Re)가

1 비회원, 포항공과대학교 대학원 기계공학과

2 비회원, University of California, Davis, 기계공학과

3 비회원, 포항공과대학교 기계공학과

* Corresponding author, E-mail: ohzhangg@postech.ac.kr

작기 때문에 난류를 이용한 두 유체의 혼합은 기대하기 어렵다. 따라서 공간적으로 벽으로부터 유동을 교란시키거나 또는 시간 주기적인 교란을 두어 비정상 유동을 유도하여 혼합할 수 있다. Stroock 등[2]은 기울어진 그루브 믹서(SGM)과 엇갈린 오니 구조(staggered herringbone structure; SHM)를 채널 벽면에 도입하여 혼합을 유도하였다 혼합 성능에 있어서는 기울어진 그루브 믹서(SGM) 보다는 엇갈린 오니 구조(SHM)가 두 반대 방향 회전 유동을 유도하여 카오스 혼합에 더 유리하다.

본 연구에서는 고분자 전해질 연료전지 공기극(cathode)에 마이크로 믹서를 도입하여 채널 내부의 산소를 혼합하였다

3. 수치해석 방법

상용 전산 프로그램인 FLUENT 6.3을 이용하여 3차원 정상 상태에 대한 유동을 해석하였다 이산화(discretization)는 2차 상류 도식(Second-order upwind scheme)을 적용하였다

공기극(cathode)에서, 내부의 층류 유동 ($Re \sim 1$) 을 지배하는 비압축성 유체에 대한 정상 상태의 연속방정식 (1), 운동량 방정식(식 (2))이 사용된다. 산소는 화학 반응이 이루어짐에 따라 농도가 낮아지게 되므로 이것을 해석하기 위해서 물질의 전달 방정식이 사용되었다(식 (3)). 다성분계(multi-component)의 확산은 Fick's law를 만족한다.

정상 상태의 연속방정식

$$\nabla \cdot (\rho \underline{V}) = 0 \tag{1}$$

정상 상태의 운동량 방정식(Navier-Stokes equations)

$$\nabla \cdot (\rho \underline{V} \underline{V}) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \underline{V} \tag{2}$$

정상 상태의 물질의 전달 방정식(Fick's law)

$$\nabla \cdot (\rho \underline{V} \phi) = \Gamma \nabla^2 \phi \tag{3}$$

위 식에서 ϕ 는 산소 농도(부피백분율)이고, Γ 는 물질 확산 계수이다. 한편 밀도 ρ 는 산소, 질소, 수소 및 수증기 등 혼합 기체의 평균 밀도이다

본 연구에서는 격자 구성의 효율을 위해 채널 아랫면에 그루브(groove)를 내는 것을 대신하여, 벽면에 접선 방향으로 슬립 속도를 적용하여 긴 채널에서의 기울어진 그루브 믹서(SGM)의 영향을 확인하였다. 기존의 혼합을 위한 연구[3]에서 보듯이 그루브의 기하학적인 형상을 고려하여 그루브 주변의

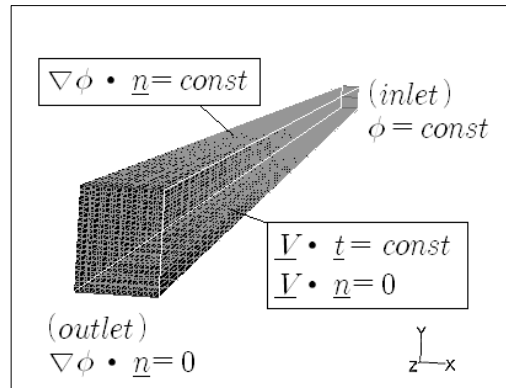


Fig. 1 Computational grid for the cathode channel and applied boundary conditions.

격자는 매우 조밀하게 구성해야 했다. 이 영역은 채널 내의 스웰 유동장을 유도하는 형상이 복잡한 영역이며 따라서 해석의 정확도를 확보하기 위하여 격자밀도를 높게 설정해야 한다. 실제 해석 모델의 설정에도 그루브 부분의 격자 생성이 가장 오랜 시간을 요하며 특히 긴 채널의 해석에 있어서는 큰 부하가 걸리게 된다.

이렇게 적용된 벽면의 접선 방향의 슬립 속도 조건(slip condition)의 타당성을 입증하기 위해 카오스 믹서의 영향을 수치 해석한 Kang 등[3]의 결과와 비교하였다. 여기서 0.085(mm) x 0.2(mm) x 1.5(mm)의 직사각형 채널에 170,000개의 육면체 셀(hexahedral cell)을 구성하고 채널 아랫면에 슬립 속도 조건을 적용하였다. 그리고 색입자 추적 방법(colored particle tracking method)과 주기적 혼합 방법(periodic mixing protocol)을 적용하여 색입자의 분포로 혼합 성능을 가시화하여 해석 타당성을 검증하였다.

공기극(cathode) 채널에 접선 방향의 슬립 속도 조건이 적용될 때 산소 농도 분포를 예측하기 위하여 Dutta.(2001) [4]와 동일한 기하학적 모델인 0.8(mm) x 1(mm) x 100(mm)의 직사각형 채널에 32,000개의 육면체 셀을 구성하였다. 채널 내의 산소 농도 분포를 얻기 위하여 다음과 같은 경계 조건을 주었다(Fig. 1). 가스 확산층(GDL)과 가까운 채널의 윗면에는 일정한 농도의 유속 조건을 출구에는 농도의 유속이 없는 조건을 가하였다. 채널의 아랫면에는 그루브 대신에, 접선 방향의 속도 조건을 주었다.

4. 결 과

4.1 기울어진 그루브 믹서(SGM)의 유사 모델

Fig. 2(a)는 Kang 등[3]이 기울어진 그루브 믹서(SGM)의 3차원 혼합 패턴을 수치해석한 결과이다. 채널 내의 완전 발달

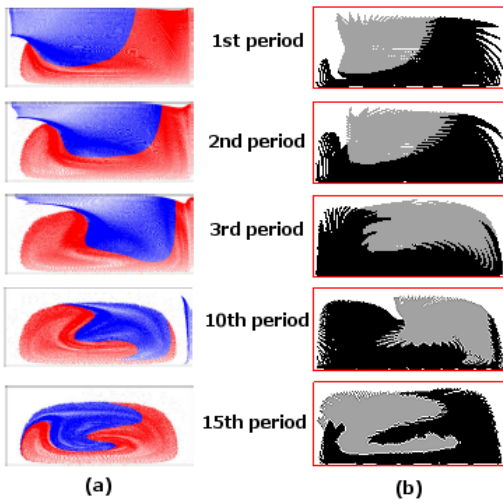


Fig. 2 Visualization of the mixing pattern of the slanted groove mixer(SGM) (a) numerical simulation by Kang, et. al (2004) [3] (b) colored particle distributions by applying tangential velocity condition to a bottom wall. The number of initial particles is 1,100 for tracking a swirling flow.

된 속도장에 색입자 (colored particle)를 분사하여 카오스 혼합의 정도를 가시화하였다

이러한 채널 벽면의 공간 주기적인 교란의 영향을 더 연구하고 적용하기 위해서는 유동의 특성을 잘 모사할 수 있는 모델이 요구된다. 특히 유동 혼합의 효율은 유동 물질 요소(material element)의 재배열(reorientation) 정도에 달려있으므로, 공간 내에는 교란을 일으키는 장애물들이 많아야 하고 해석을 위해서 격자 생성의 효율성 문제 또한 수반될 수 밖에 없다.

기울어진 그루브 믹서(SGM)의 경우, 그루브의 리딩엣지(leading edge)와 트레일링 엣지(trailing edge)가 각각 소스와 싱크처럼 압력분포를 바꾸면서 유동의 흐름을 결정하여 주위 유동에 국부적으로 영향을 주지만 유동의 특성은 그루브가 있는 벽면으로부터 전달되어 발달하므로 벽면에 경계 조건을 주어 스윙 유동(swirling flow)을 대신 모사할 수 있다

본 연구에서는 그루브 대신에 채널의 바닥 면에 접선 방향의 속도의 조건을 주었다 Fig. 2(b) 와 같이 색입자 추적 방법(colored particle tracking method)을 통하여 혼합 패턴을 가시화 하였다 Fig. 2(b)의 결과 또한 주기가 반복됨에 따라 색입자들의 분포가 달라지고 이것은 Fig. 2(a)의 혼합 패턴과 거의 일치한다고 볼 수 있다. 채널의 바닥 면에서 접선 방향의 속도를 도입한다는 것은 바닥 면이 움직이는 것(moving wall)과 같은 물리적인 의미를 가진다 즉 바닥 면에서 그루브가 있는 것보다 유체 요소를 강제적으로 이송하므로 속도가 더

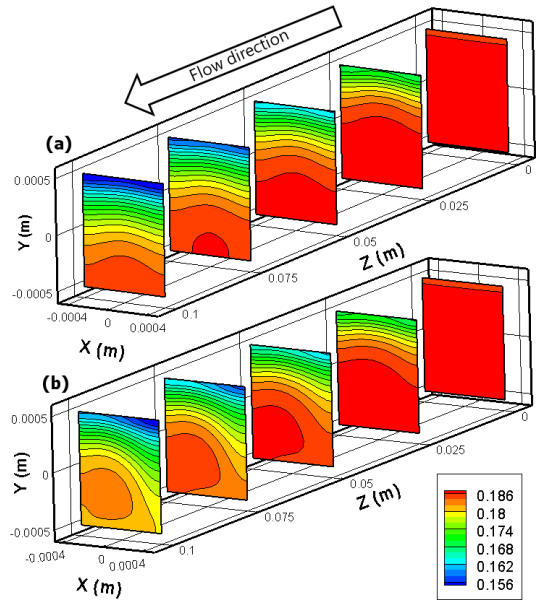


Fig. 3 Oxygen concentration contour at longitudinal slices. (a) the cathode channel (b) the channel applied tangential velocity at a bottom wall.

빠르고 넓은 범위에 걸쳐 색 입자들(colored particles)이 분포하게 된다.

결국 Fig. 2(a),(b)는 각 주기에 따라 유동의 특성과 혼합의 정도의 유사성을 지니므로, 벽면에 적절한 수치해석 조건을 주면 기울어진 그루브 믹서(SGM) 뿐만 아니라, 복잡한 카오스 믹서 해석에 있어서 혼합 정도를 쉽게 예측할 수 있고 다양한 물리학적 문제에 적용하는 데 유리한 발판을 마련할 것이다.

4.2 기울어진 그루브 믹서(SGM)가 있는 공기극(cathode)에서의 산소 농도 분포의 예측

고분자 전해질 연료전지(PEM fuel cell)의 공기극(cathode) 채널에서 가스 확산층(GDL)과 가까운 영역에는 산소가 확산되어 전달될 확률이 크고, 그에 따라 채널 안에 편중된 산소 농도 분포가 생긴다. 산소가 확산되면서 채널 바닥 근처에 있는 국부적인 산소의 경우, 입구로 들어와 거의 소모되지 않고 출구에 그대로 배출하게 된다(Fig. 3(a)). 이 경향은 채널 길이 방향으로 갈수록 더 커지는 데, 이에 따라 전류밀도(current density)가 감소하게 된다. 즉 채널의 거의 앞부분에서 연료전지의 효율이 정해진다고 해도 과언이 아니다[5].

채널 내부의 산소 소모 효율을 올리기 위해기울어진 그루브 믹서(SGM)를 도입하여 바닥면에 있는 상대적으로 농도가 큰 산소를 가스 확산층(GDL) 근처로 끌어올린다. 앞서 언급

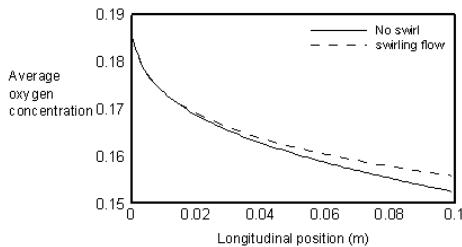


Fig. 4 Average oxygen concentration near gas diffusion layer along the channel.

한 바와 같이, 그루브 대신에 벽면의 접선 방향의 속도 조건을 주어, 스월 유동(swirling flow)을 유도한다. 이 때, 스월 유동으로 채널 내부의 결핍된 산소와 풍부한 산소의 영역을 회전하여 교체할 수 있도록 해야 하며 이는 Fig. 2(a)의 10번째 이상의 주기와 같은 혼합의 정도 해당된다. Fig. 3(a)의 채널의 경우, 페클릿 수가 대략 $Pe \sim 50$ 정도일 때, 같은 성능을 기대할 수 있었다.

Fig. 3(b)에서 보듯이, 산소 농도 분포는 스월 유동의 영향을 받는다. 채널 길이의 중간까지는 농도 변화가 크게 나타나지 않지만, 출구로 갈수록 가스 확산층(GDL) 근처의 영역에서 평균적인 산소 농도가 약 4% 정도 향상된다는 것을 확인할 수 있다(Fig. 4).

Fig. 1에서 채널 윗면에 일정한 농도의 유속 조건을 주었기 때문에 농도가 큰 산소가 잘 보충되더라도 전기화학적 반응에 산소가 얼마나 더 참여하게 되고 또 전류밀도(current density)를 얼마나 올릴 수 있을지는 모르지만 분명한 것은 산소 소모의 효율성을 높였기 때문에 전기 화학적 반응을 더 도모하여 기존에 출구 근처에서 급속하게 감소했던 전류밀도에 대한 향상을 기대를 할 수 있다.

채널의 단면의 형상에 따라라도 스월 유동의 세기가 달라진다. Fig. 2와 같이 단면이 가로로 길 경우에 바닥의 그루브의 영향을 충분히 받는다. 하지만 Fig. 3과 같이 단면이 세로로 길 경우에는 그루브의 영향이 작아서 스월의 세기는 상대적으로 작다. 전류밀도에 있어서, 폭이 좁은 채널일 경우에 폭이 넓은 채널보다 국부적인 전류밀도가 더 크다고 알려져 있다[6].

기울어진 그루브 믹서(SGM)가 도입된 마이크로 채널 내부에서 더 큰 혼합율과 운송량 전달을 위해 속도와 채널의 스케일을 크게 하면서 대류항을 크게 하면 산소 농도를 더 활성화 시킬 수는 있겠지만 상대적으로 그루브에 의한 큰 압력 손실을 피하기는 힘들다. 특히 채널의 길이가 길수록 그러한 현상이 더 크게 나타날 것이다. 따라서 산소의 확산과 대류를 잘 절충하여 최적의 연료전지 성능을 도출해내는 것이 중요

할 것이다.

본 연구에서 더 나아가 채널 출구 근처에는 수분의 체적 분율이 커지는데, 물이 그루브를 메울 경우 그루브가 유동에 주는 영향과 수분이 산소 전달에 끼치는 영향에 대한 연구가 더 필요하다.

5. 결 론

기울어진 그루브 믹서(SGM)가 고분자 전해질 연료전지에 도입될 때 산소 소모 효율성이 (4% 정도) 커지는 것을 확인하였다. 채널의 출구로 갈수록 가스 확산층(GDL) 근처의 영역에서 평균적인 산소 농도가 커지고 전기화학적 반응에 참여하는 산소의 양을 증대하여 이에 따른 전류밀도의 향상을 기대한다.

후 기

본 연구는 방위사업청 지정 국방MEMS특화연구센터의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 2006, BAO, C., "Modeling and control of air stream and hydrogen flow with recirculation in a PEM fuel cell system," *International journal of hydrogen energy*, Vol.13, pp.1879-1896.
- [2] 2002, Stroock, A.D., "Chaotic mixer for microchannels," *Science*, Vol.295, pp.647-651.
- [3] 2004, Kang, T.G., "Colored particle tracking method for mixing analysis of chaotic micromixers," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol.14, pp.891-899.
- [4] 2001, Dutta, "Numerical prediction of mass-exchange between cathode and anode channels in a PEM fuel cell," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol.44, pp.2029-2042.
- [5] 2009, Dawes, J.E., "Three-dimensional CFD modelling of PEM fuel cells : An investigation into the effects of water flooding," *Chemical Engineering Science*, Vol.64, pp.2781-2794.
- [6] 2003, Berning, T., "Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in a PEM fuel cell—a parametric study," *Journal of Power Sources*, Vol.124, pp.440-452.