

유동방향 변화에 따른 고분자 전해질 연료전지의 성능 및 전달특성에 대한 3차원 수치해석적 연구

이필형 · 한상석 · 황상순*

인천대학교 기계공학과

(2008년 1월 15일 접수 : 2008년 2월 13일 채택)

Three Dimensional Computational Study on Performance and Transport Characteristics of PEMFC by Flow Direction

Pil Hyong Lee, Sang Seok Han, and Sang Soon Hwang*

Department of Mechanical Engineering, University of Incheon, Incheon 402-749, Korea

(Received January 15, 2008 : Accepted February 13, 2008)

초 록

고분자 전해질 연료전지의 성능향상을 위한 방법으로 유동채널의 형상을 변경한 많은 연구가 진행되어 왔으나 동일한 유동채널 형상에서 유동방향 변경에 따른 연구는 많이 진행되지 못하였다. 본 연구에서는 동일한 반응면적과 동일한 유동채널의 고분자 전해질 연료전지의 수소와 산소의 유동방향을 Co-flow에서 Counter-flow로 변경될 경우의 연료전지의 성능변화를 분석하기 위하여 연료극과 공기극이 포함된 3차원 수치해석모델을 개발하였다. 개발된 수치해석모델을 활용하여 Co-flow와 Counter-flow의 유동채널 내부의 압력손실, 반응물질의 농도분포, 고분자 전해질 막을 통한 Water Transport, 고분자 전해질 막의 이온전도도 및 I-V 성능곡선을 비교하였다. 그 결과 반응물질의 농도분포, Water Transport, 고분자 전해질 막의 이온전도도가 우수한 Counter-flow 유동조건에서의 성능이 Co-flow 유동조건에 비하여 더욱 우수하였다.

Abstract : Many researches for effects of different flow configurations on performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cell have extensively been done but the effects of flow direction at the same flow channel shape should be considered for optimal operation of fuel cell as well. In this paper a numerical computational method for simulating entire reactive flow fields including anode and cathode flow has been developed and the effects of different flow direction at parallel flow was studied. Pressure drop along the flow channel and density distribution of reactant and products and water transport, ion conductivity across the membrane and I-V performance are compared in terms of flow directions(co-flow or counter-flow) using above numerical simulation method. The results show that the performance under counter-flow condition is superior to that under co-flow condition due to higher reactant and water transport resulting to higher ion conductivity of membrane.

Keywords : Proton exchange membrane fuel cell, Co-flow, Counter-flow, Water transport, Ion conductivity.

1. 서 론

화석연료의 고갈과 대기오염문제가 날로 심각해지고 있는 실정이며 이를 해결하기 위하여 친환경에너지원에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 친환경에너지원 중 유력한 후보로 거론되고 있는 고분자 전해질 연료전지는 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환하여 높은 에너지 변환 효율을 나타내며 가동온도가 낮고, 응답속도가 빨라 자동차의 동력장치 및 가정용 보일러에 적용을 위한 많은 연구가 진행되고 있다.¹⁻³⁾

고분자 전해질 연료전지는 Fig. 1과 같이 고분자막 (Membrane)

을 중심으로 촉매층 (Catalyst Layer), 가스확산층 (Gas Diffusion Layer), 분리판 (Bipolar Plate)이 샌드위치 구조로 적층되어 있으며 전기화학적 반응을 높이기 위하여 평면 구조로 구성되어 있다.⁴⁾

고분자 전해질 연료전지의 성능향상을 위한 방법으로는 유동채널의 형상을 Parallel 유동채널에서 Serpentine 유동채널 또는 Interdigitated 유동채널로 변경하여 가스확산층을 통한 반응물질의 공급방법을 확산에서 대류와 확산의 복합과정으로 변경하여 성능을 향상시키는 방법들이 실험과 수치해석을 통하여 많이 연구되었다.⁵⁻⁷⁾ 기존의 연구결과에 의하면 유동채널의 형상을 Parallel 유동채널에서 Serpentine과 Interdigitated 유동채널로 변경할 경우 고분자 전해질 연료전지의 성능은 향상되지만 유동

*E-mail: hwang@incheon.ac.kr

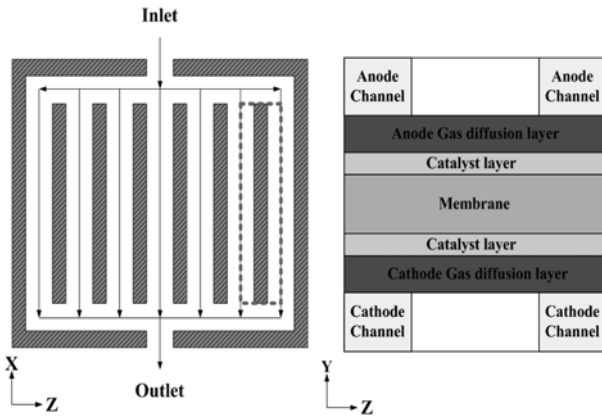


Fig. 1. Schematic of the parallel flow channel structure.

채널 내부의 압력손실이 크게 발생하여 고분자 전해질 연료전지의 성능향상과 압력손실간의 상호 Trade-off가 필요한 실정이다.⁸⁾

고분자 전해질 연료전지에 적용되는 여러 종류의 유동채널의 조합에서 보다 높은 성능향상을 위해서 수소와 산소의 유동방향을 Co-flow에서 Counter-flow로 변경하여 실험 및 수치해석이 진행되어 왔는데 그 중 Kim과 Ha⁹⁾에 의해 2005년에 수행되어진 50W DMFC의 실험결과에 따르면 Co-flow에 비하여 Counter-flow에서 연료전지의 온도와 산화제가 연료전지 전부분에 걸쳐 일정하게 분포되어 연료전지의 성능이 약 20% 상승된다고 보고되어있다. 또한 Jang과 Shin¹⁰⁾은 2차 모델을 활용하여 Co-flow와 Counter-flow 유동조건에서의 성능변화를 수치해석하였으며 수치해석결과 Co-flow에 비하여 Counter-flow에서 고분자 전해질 연료전지의 성능이 향상되며 성능향상의 원인을 가스확산층의 물의 함유를 통하여 설명하였다.

지금까지의 연구에서는 Co-flow에서 Counter-flow로 유동방향 변화에 따른 성능의 향상원인을 실험과 2차원 수치해석 모델을 통하여 간단하게 적용하였으나 본 연구에서는 공기극과 연료극을 포함한 3차원의 고분자 전해질 연료전지 모델을 적용하여 공기극과 연료극의 3차원 상호작용에 의한 효과를 감안한 유동방향 변경에 따른 성능향상의 전반적인 원인을 알아보고자 하였다. 3차원의 고분자 전해질 연료전지의 수치해석을 위하여 상용코드인 Fluent® (Version6.3)를 본 연구에 맞게 개조하여 적용하였으며,¹¹⁻¹⁶⁾ 이 모델을 활용하여 Co-flow와 Counter-flow에서의 I-V 성능비교와 압력손실 그리고 유동채널에서 반응물질의 농도분포, 고분자 전해질 막에서 반응물질의 분포와 이온전도도를 비교 분석하였다.

2. 지배방정식과 수치해석 모델

2.1 지배방정식

지배방정식은 질량보존방정식과 화학종보존방정식, 운동량보존방정식으로 구성되며 다음과 같은 가정을 한다.

- (1) 온도는 일정하게 유지된다.
- (2) 비압축성, 층류유동을 한다.
- (3) 이상가스의 유동이다.
- (4) Membrane, 촉매층, 가스확산층의 다공성 크기는 같다.

2.1.1 질량 보존 방정식

$$\nabla \cdot (\varepsilon \rho \vec{u}) = S_m \quad (1)$$

여기에서 ε 은 다공성물질의 다공성이고, ρ 는 밀도를 나타낸다. S_m 은 고분자 전해질 연료전지의 전기화학반응에 의해 발생하는 질량변화를 나타내는 생성항이며 다음과 같이 표현된다.

$$S_m = S_{H_2} + S_{aw} : \text{Anode Side} \quad (2)$$

$$S_m = S_{O_2} + S_{cw} : \text{Cathode Side} \quad (3)$$

2.1.2 운동량 보존방정식

Darcy's 법칙에 기초하여 다음과 같이 표현된다.

$$\nabla(\varepsilon \rho \vec{u}) = -\varepsilon \nabla p + \nabla(\varepsilon \mu \nabla \vec{u}) + S_u \quad (4)$$

여기서 μ 는 점성계수이며, S_u 는 다음과 같다.

$$S_{ux} = -\frac{\mu \mu}{\beta_x}, S_{uy} = -\frac{\mu \nu}{\beta_y}, S_{uz} = -\frac{\mu w}{\beta_z} \quad (5)$$

2.1.3 화학종 보존방정식

$$\nabla(\varepsilon \vec{u} C_k) = \nabla(D_k^{eff} \nabla C_k) + S_k \quad (6)$$

여기서 D_k^{eff} 는 확산계수이고 생성항 S_k 는 다음으로 표현한다.

$$S_k = \begin{cases} -\frac{I(x, y)}{2F} M_{H_2} A_{cv} : S_{H_2} \\ -\frac{\alpha(x, y)}{F} I(x, y) M_{H_2 O} A_{cv} : S_{aw} \\ -\frac{I(x, y)}{4F} M_{O_2} A_{cv} : S_{O_2} \\ \frac{1 + 2\alpha(x, y)}{2F} I(x, y) M_{H_2 O} A_{cv} : S_{cw} \end{cases} \quad (7)$$

2.2 물의 이동과 관련된 방정식

2.2.1 Electro-osmotic drag flux

$$J_{H_2 O} = 2 \times n_d \times \frac{I(x, y, z)}{2F} : \text{Electro-osmotic drag flux} \quad (8)$$

n_d 는 Electro-osmotic drag계수로서 각각의 수소이온에 의해 이동하는 물분자의 수로 정의되며 다음과 같이 표현된다. 여기서 λ 는 고분자 전해질 막의 수분함유량을 나타낸다.

$$n_d = 0.0029\lambda^2 + 0.05\lambda - 3.4 \times 10^{-19} \quad (9)$$

2.2.2 Back diffusion flux

$$J_{H_2 O \text{ back diffusion}} = -\frac{\rho_{m, dry}}{M_{m, dry}} * D_w * \frac{d\lambda}{dz} : \text{Back diffusion flux} \quad (10)$$

여기서, $\rho_{m, dry}$ 와 $M_{m, dry}$ 는 건조상태에서 고분자 전해질 막의 밀도와 중량을 나타내며 D_w 는 수분확산계수로 고분자 전해질 막에서 수분함유량 λ 에 크게 영향을 받는다.

2.3 수치해석모델

수치해석모델은 Fig. 2와 같이 Parallel 유동채널의 유동방향을 변경하여 구성하였으며 각각의 유동방향에서 반응면적을 동

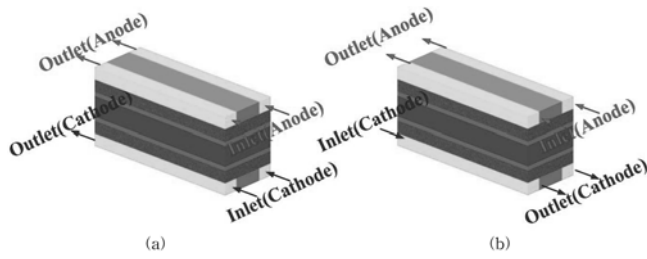


Fig. 2. Schematic of the parallel flow channel structure (a) Co-flow and (b) Counter-flow.

일하게 만들기 위하여 동일한 면적의 고분자 전해질 막을 사용하였고 연료극과 공기극에 각각의 촉매층과 가스확산층을 적용하여 구성하였다. 유동채널의 입구와 출구의 단면적은 $0.762 \text{ mm} \times 0.762 \text{ mm}$ 이며 유동채널의 길이는 40 mm 이고 가스확산층과 촉매층의 두께는 0.254 mm , 0.00287 mm 이다. 수치해석에 적용된 고분자 전해질 연료전지 모델의 격자구조는 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 격자구조를 살펴보면 유동해석에 가장 적합한 사각형의 격자를 적용하였으며 격자의 개수는 48,000개이다. 유동채널 입구에서의 경계조건은 질량유량으로 설정하였고 출구에서의 경계조건은 압력조건으로 설정하였다. 수치해석 프로그램은 상용화된 전산유체 프로그램인 Fluent® (version 6.3)를 사용하였으며 고분자 전해질 연료전지의 전기화학반응을 해석하기 위하여 사용자 정의 방정식(User Define Function: UDF)을 사용하여 전기화학반응식을 도입하였고 수치해석 기본조건은 Table 1과 같다.

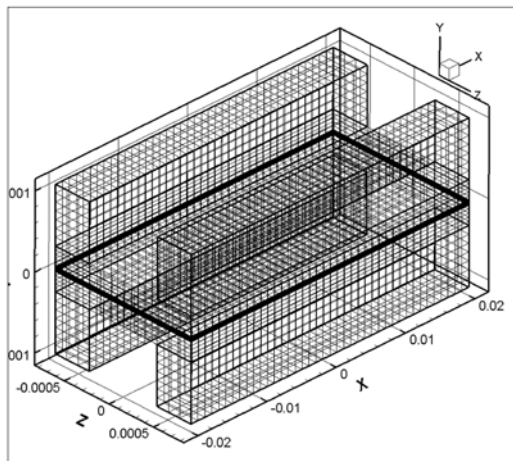


Fig. 3. Computational grids.

Table 1. Physical parameters

Description	Value	Description	Value
Channel length (mm)	40	Cathode side pressure (atm)	1
Channel width (mm)	0.762	Anode stoichiometric number	1.5
Channel height (mm)	0.762	Cathode stoichiometric number	2
GDL thickness (mm)	0.254	O_2/N_2 ratio	0.21/0.79
Catalyst layer thickness (mm)	0.00287	H_2 inlet mass fraction, anode (%)	11.54
Inlet temperature ($^{\circ}\text{C}$)	80	H_2O inlet mass fraction, anode (%)	88.46
Anode side pressure (atm)	1	O_2 inlet mass fraction, cathode (%)	23.3

3. 결 과

수치해석 결과의 비교에 앞서 본 연구에 사용된 수치해석 모델의 정확성을 확인하기 위하여 Fig. 4에 Wang과 Liu¹⁷⁾의 의해 Serpentine 유동채널에서 수행된 실험결과와 본 연구의 수치해석결과를 비교하였다. Fig. 4의 그래프를 살펴보면 저전류밀도와 중간전류밀도($V \geq 0.55$) 부분에서는 수치해석결과와 실험결과가 경향이 비교적 일치함을 확인 할 수 있었다. 고전류밀도($V \leq 0.55$) 부분에서는 실험결과와 수치해석 결과의 차이가 발생함을 알 수 있는데 이것은 실제 연료전지의 조건에서는 고전류밀도($V \leq 0.55$) 부분에서 연료전지 공기극 유동채널 내부의 유동상태가 이상유동상태 (Two-Phase)로 변경되어 유동채널내의 플러딩(Flooding)이 발생하여 고분자 전해질 연료전지의 성능이 감소하게 되지만 본 논문에 적용된 수치해석 모델은 단상유동 (Single-Phase)만을 고려하였기 때문에 Fig. 4와 같이 고전류밀도($V \leq 0.55$) 부근에서 실험결과와 수치해석 결과의 차이가 발생하는 것으로 판단된다.

개발된 수치해석 모델을 활용하여 Parallel 유동채널에서 수소/공기 유입조건으로 연료극에 상대습도 100%의 가습조건을 적용하고 공기극에서는 공기 무가습조건과 운전조건 80°C 에서 수치해석을 수행하였다.

Parallel 유동채널의 물질전달 현상을 파악하기 위하여 Fig. 5에 유동채널에서의 속도벡터를 표시하였다. Fig. 5의 속도벡터를 살펴보면 고분자 전해질 막을 기준으로 Y축 방향으로 향하고 있어 공급되는 수소와 산소가 확산과정을 통하여 가스확산층을 통과하여 고분자 전해질 막에 공급되는 것을 확인 할 수 있으며 속도벡터는 Y축의 중앙선을 기준으로 좌우대칭을 이루

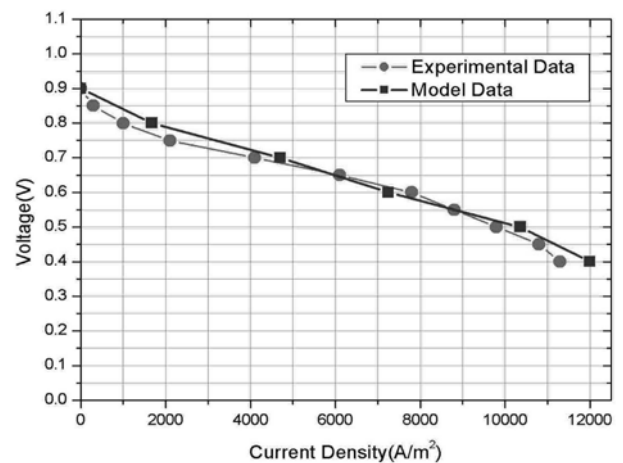


Fig. 4. Comparison of experimental and simulated polarization curves.

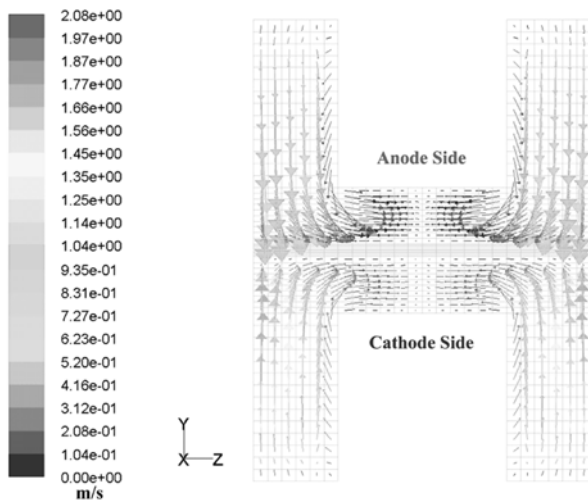


Fig. 5. Two-dimensional velocity field in the parallel flow channel at $X=L/2$.

고 있음을 알 수 있었다.

고분자 전해질 연료전지의 Parallel 유동채널에서 수소와 공기

의 공급방향 변화에 따른 성능을 분석하기 위하여 Fig. 2와 같이 수소와 산소의 공급방향을 정반대로 설정하여 Co-flow와 Counter-flow 조건을 설정하여 수치해석을 실행하였다.

Parallel 유동채널의 Co-flow와 Counter-flow 조건에서 유동채널의 압력손실의 크기를 확인하기 위하여 Fig. 6에 Co-flow와 Counter-flow 조건에서 압력손실을 비교하였다. Fig. 6의 압력손실을 살펴보면 Co-flow에서 Counter-flow로 유동방향으로 변경되어도 유동채널내부의 압력손실은 연료극에서 11 Pa, 공기극에서 22.5 Pa로 동일하게 나타나 유동방향 변경이 고분자 전해질 연료전지의 압력손실에 미치는 영향이 없는 것을 확인 할 수 있었다.

유동방향의 변경이 고분자 전해질 연료전지의 반응물질 분포에 미치는 영향을 확인하기 위하여 Fig. 7에 유동채널에서의 산소의 농도분포를 비교하였으며 Fig. 8에서 고분자 전해질 막에서의 산소의 농도분포를 비교하였다. Fig. 7을 살펴보면 Co-flow 조건과 Counter-flow 조건에서 산소의 농도분포는 공기극의 입구에서 0.007 kmol/m^3 의 산소농도분포를 나타내며 유동채널을 따라 점차적으로 감소하다 출구에서 산소농도분포가 0.002 kmol/m^3 로 Co-flow와 Counter-flow에서 동일하게 감소되고 있음을 확인 할 수 있었다. 하지만 고분자 전해질 막에서의 산소의 농도분포를 나타낸 Fig. 8을 살펴보면 Counter-flow조건에서

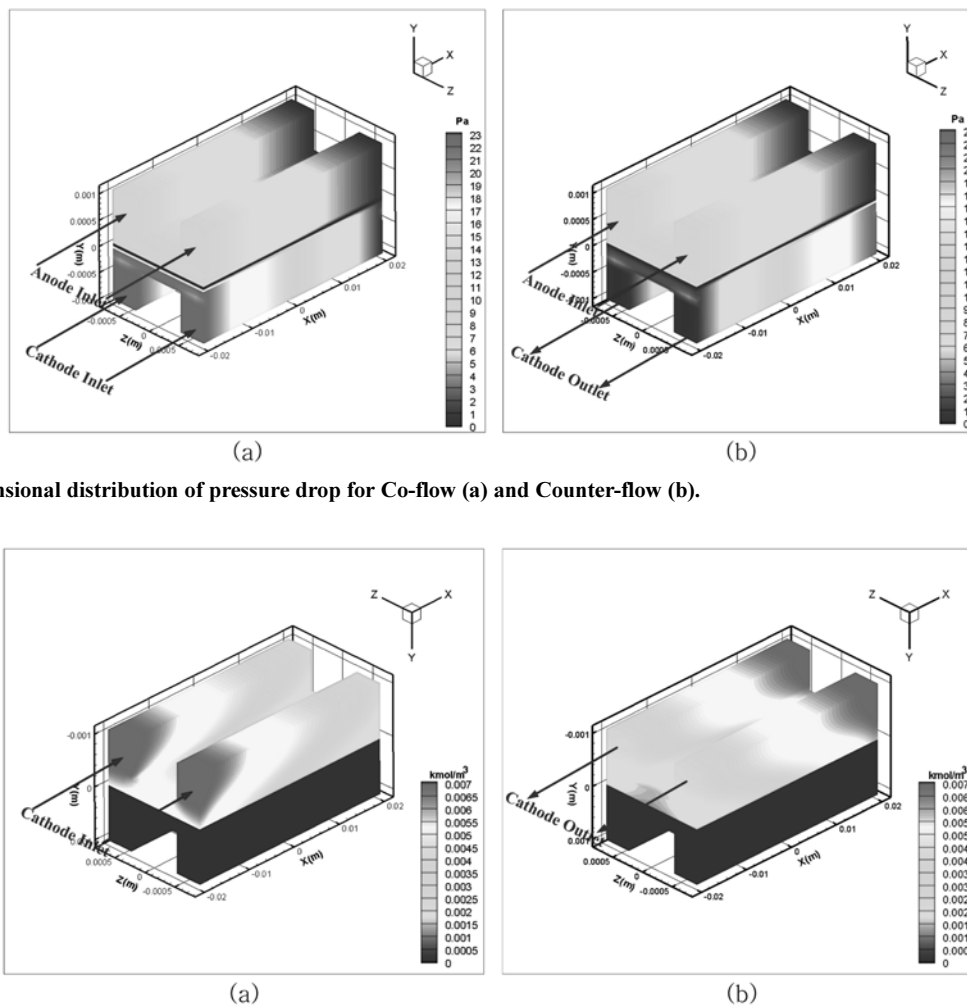


Fig. 6. Three dimensional distribution of pressure drop for Co-flow (a) and Counter-flow (b).

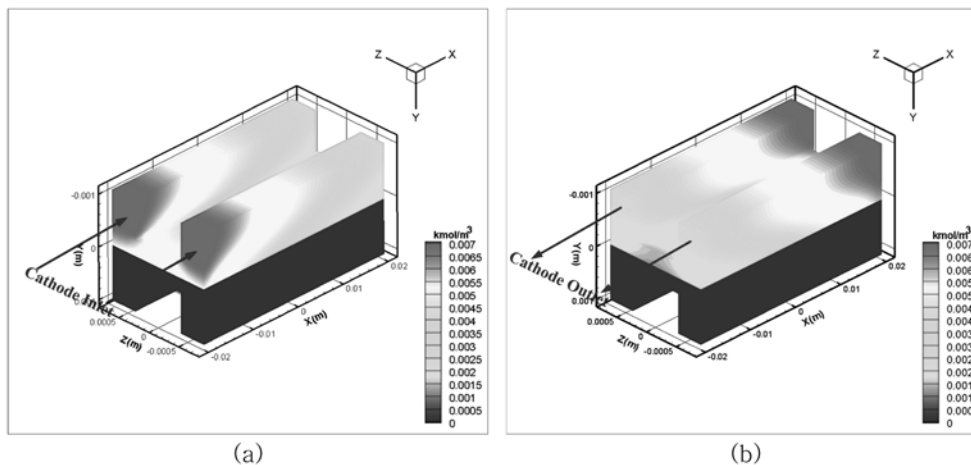


Fig. 7. Molar concentration at flow channel for Co-flow (a) Counter-flow (b).

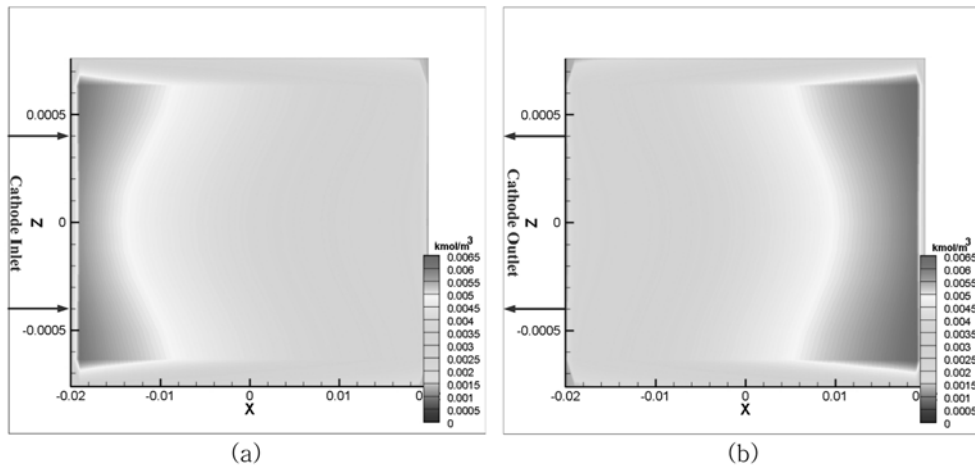


Fig. 8. Molar O_2 concentration on membrane for Co-flow (a) and Counter-flow (b).

의 산소의 농도분포가 Co-flow조건 보다 높고 넓게 유지되는 것을 확인 할 수 있으며 Co-flow와 Counter-flow에서 산소농도의 평균은 각각 0.00388 kmol/m^3 , 0.00402 kmol/m^3 로 나타나 Counter-flow에서 고분자 전해질 막에서 산소의 농도분포가 높게 유지됨을 확인 하였다.

연료극과 공기극에 동시에 존재하는 물의 농도분포를 비교하기 위하여 Fig. 9에 유동채널에서의 물의 농도분포를 Fig. 10에서는 고분자 전해질 막에서의 물의 농도 분포를 비교하였는데 고분자 전해질 막에서의 물의 농도분포는 이온전도도와 직접적으로 비례되기 때문에 간접적으로 이온전도도의 분포를 알아낼 수 있다. 유동채널의 물의 농도분포를 비교한 Fig. 9를 살펴보면 Co-flow조건에서 연료극의 입구와 출구에서 물의 농도는 각각 0.0161 kmol/m^3 , 0.0135 kmol/m^3 이고 Counter-flow 조건에서 연료극의 입구와 출구에서 물의 농도는 각각 0.0161 kmol/m^3 , 0.0133 kmol/m^3 이다. 또한 Co-flow조건에서 공기극의 입구와 출구에서 물의 농도는 각각 0 kmol/m^3 , 0.0095 kmol/m^3 이고 Counter-flow 조건에서 공기극의 입구와 출구에서 물의 농도는 각각 0 kmol/m^3 , 0.0097 kmol/m^3 로 나타나 Co-flow와 Counter-flow 조건에서 물의 농도분포가 비슷함을 확인 하였다. 하지만 고분자 전해질 막에서의 물의 농도 분포를 비교한 Fig.

10을 살펴보면 Co-flow 조건과 Counter-flow 조건에서 농도 분포의 차이를 보이고 있음을 확인 할 수 있었다. Fig. 10-(a)의 Co-flow 조건에서 연료극의 고분자 전해질 막의 물의 농도분포의 평균은 0.0136 kmol/m^3 이고 Fig. 10-(c)의 공기극의 고분자 전해질 막에서의 평균 물의 농도 분포는 0.00799 kmol/m^3 이었으며 Fig. 10-(b)의 Counter-flow 조건에서 연료극의 고분자 전해질 막의 물의 농도분포의 평균은 0.0137 kmol/m^3 이고 Fig. 10-(d)의 공기극의 고분자 전해질 막에서의 평균 물의 농도 분포는 0.00857 kmol/m^3 로 나타나 Counter-flow 조건에서 물의 농도분포가 고분자 전해질 막에서 Co-flow 조건에 비해 공기극에서 7.25% 높게 나타남을 알 수 있었다.

Co-flow 조건의 경우 100% 기습된 수소가 연료극에 공급되고 무기습조건의 산소가 공기극에 공급되어 수소와 산소의 공급방향이 동일하게 된다. 수소와 산소의 동일한 공급방향으로 인하여 연료전지의 유동채널 입구에서부터 원활한 전기화학 반응이 일어나게 되어 유동채널의 출구로 이동하면서 연료극의 물의 농도는 낮아지고 공기극의 물의 농도는 증가함을 확인하였다. 하지만 Counter-flow의 경우 수소와 산소의 공급 방향이 반대로 설정되어 있어 산소의 출구 방향에서 산소 농도가 낮아지게 되는데 Co-flow의 경우는 수소의 농도가 같이 낮아지는데

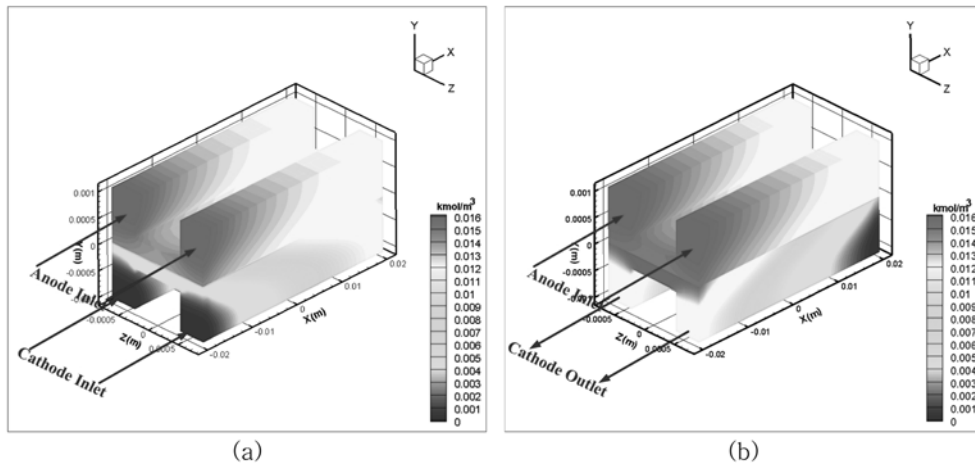


Fig. 9. Molar H_2O concentration at flow channel for Co-flow (a) and Counter-flow (b).

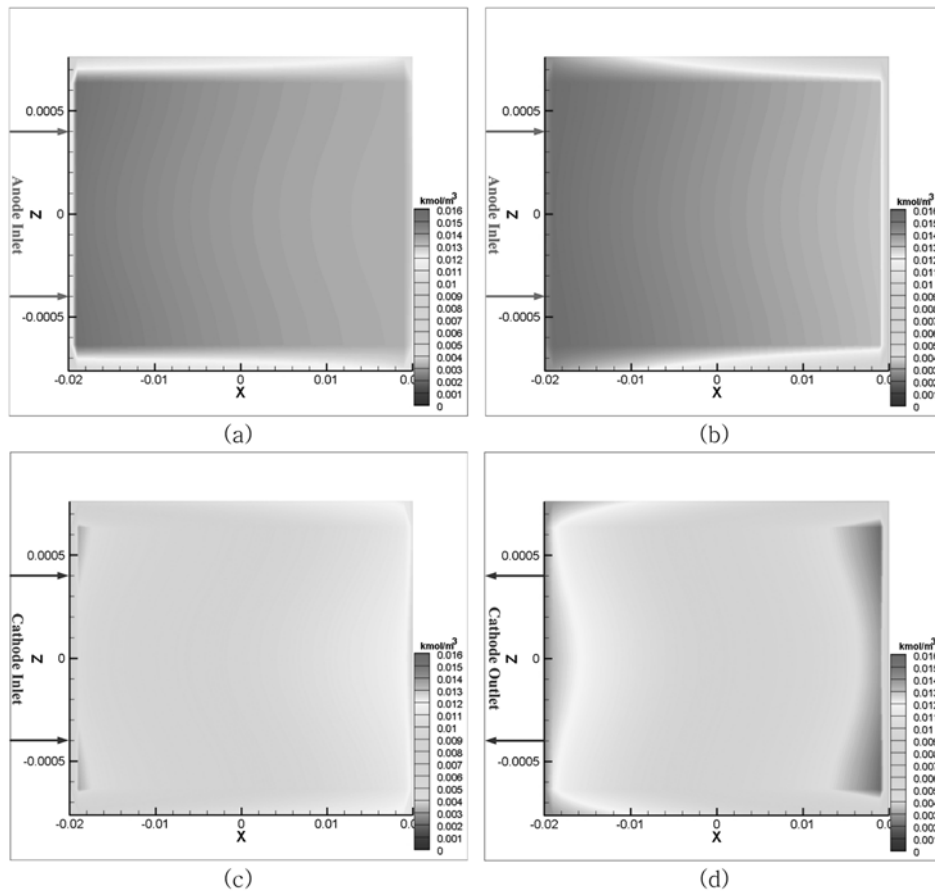


Fig. 10 Molar H₂O concentration on membrane for anode side Co-flow (a), anode side Counter-flow (b), cathode side Co-flow (c) and cathode side Counter-flow (d).

반해 Counter-flow의 경우 수소의 농도가 입구(산소의 출구)조건으로 높은 값을 가지기 때문에 보다 반응이 원활히 일어나 물의 생성이 높게 나타나는 것으로 생각된다.

고분자 전해질 막에서 물의 농도분포가 Water transport에 미치는 영향을 비교하기 위하여 Fig. 11에 유동방향 변화에 따른 고분자 전해질 막에서의 Electro-osmotic drag, Back diffusion, Net water flux를 비교하였다. Fig. 11의 그래프를 통하여 각각

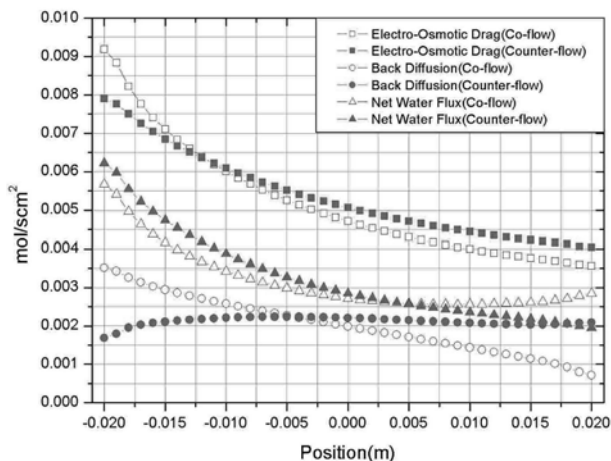


Fig. 11 Water transport on the Membrane at $V_{cell}=0.7$ V.

의 유동방향에서 연료극에서 Electro-osmotic drag효과에 의해 공기극으로 이동하는 물의 양을 비교하면 Co-flow의 입구부분을 제외한 유동채널의 전부분에서 Electro-osmotic drag 효과가 Counter-flow에서 높게 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Back diffusion을 통하여 공기극에서 연료극으로 이동하는 물의 양을 비교해보면 Counter-flow에서의 유동채널의 전부분에 걸쳐 Co-flow에 비하여 높게 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. 또한 고분자 전해질 막을 통과하여 이동하는 Electro-osmotic drag와 Back diffusion의 효과를 더한 절대적인 물의 이동량을 비교하면 Co-flow의 경우 채널의 입구부분에서는 높은 물의 이동량을 나타내지만 출구로 갈수록 물의 이동량이 작아져 기울기가 급격하게 감소하는 것을 확인할 수 있지만 Counter-flow의 경우는 입구와 출구의 물의 이동량의 감소가 작아 평균적으로 높게 나타남을 알 수 있었다. 고분자 전해질 막을 통한 물의 이동이 고분자 전해질 막의 전도성에 미치는 영향을 비교하기 위하여 Fig. 12에 Co-flow 조건과 Counter-flow 조건에서의 고분자 전해질 막의 이온전도도를 비교하였다. Fig. 12의 고분자 전해질 막에서의 이온전도도를 비교해 보면 Co-flow 조건에 비하여 Counter-flow 조건에서 이온전도도가 유동채널의 출구부분(0.075-0.02 m)을 제외한 전 부분에서 높은 것을 확인할 수 있었다. Co-flow에서 평균 이온전도도는 1.03이고 Counter-flow에서 평균 이온전도도는 1.06으로 나타나 Counter-flow 에서 유동채널의 출구부분(0.075-0.02 m)에서 이온전도도가 감소되는 부분을 출구부분을 제외한 유동채널의 전 부분(-0.02-0.075 m)의 이온

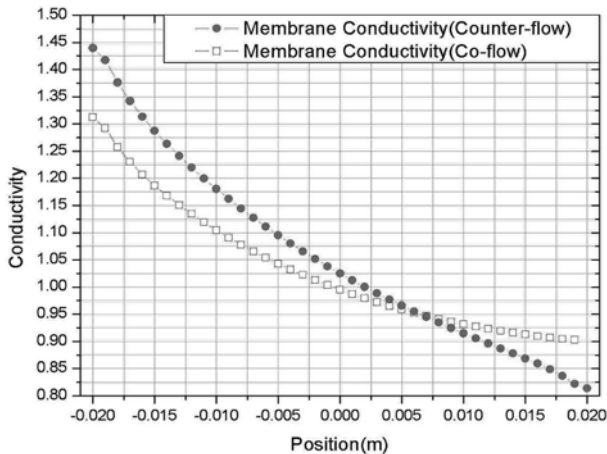


Fig. 12. Membrane Conductivity on the Membrane at $V_{cell}=0.7$ V.

전도도 상승으로 보완한다고 판단된다. 고분자 전해질 막의 이온전도도 상승은 고분자 전해질 막을 통과하는 이온의 이동을 수월하게 만들어 전기화학반응이 원활히 이루어지게 함으로 인 고분자 전해질 연료전지의 성능이 향상된다고 판단된다.

4. 결 론

1) Parallel 유동채널의 유동방향을 Co-flow에서 Counter-flow로 변경하여도 유동채널내부의 압력손실은 연료극과 공기극에서 각각 11 Pa, 22.5 Pa로 동일하게 발생하여 유동방향 변경이 고분자 전해질 연료전지의 압력손실에 미치는 영향이 없다고 판단된다.

2) 고분자 전해질 막에서의 물의 농도분포 및 산소의 농도분포가 Co-flow 조건에 비하여 Counter-flow 조건에서 각각 3.6%, 7.25% 높게 분포되는 것을 확인 하였으며 고분자 전해질 막을 통한 물의 이동현상 또한 Co-flow 조건에 비하여 Counter-flow 조건에서 높게 발생함을 확인할 수 있었다.

3) Counter-flow 조건에서 고분자 전해질 막의 이온전도도가 Co-flow 조건에 비하여 높게 형성되는 것을 확인할 수 있어 고분자 전해질 연료전지의 가동에 있어 Co-flow 조건에 비하여 Counter-flow 조건의 적용이 유리함을 확인하였다.

Nomenclature

- A_{cv} Specific surface area of the control volume [m^2]
 F Faraday constant, 96,487 [C/mol]
 a_K Activity of water in stream K, dimensionless
 n Number of electrons in electrochemical reaction
 P Pressure [Pa]
 u, v, w Velocities in and direction respectively [m/s]
 C Condensation rate [S^{-1}]
 D_w Diffusion coefficient of water [m^2/s]
 I Local current density [A/m^2]
 $M_{m,dry}$ Equivalent weight of a dry membrane [kg/mol]
 n_d Electro-osmotic drag coefficient
 T Temperature [K]
 S Source term
 M Molecular weight of species [kg/mol]

Greek Symbol

- α Net water flux per proton flux
 k ionic conductivity [S/m]
 μ Dynamic viscosity [$kg \cdot s/m^2$]
 $\rho_{m,dry}$ Density of a dry membrane [kg/m^3]
 β Permeability
 ε Porosity
 λ water content in the membrane
 ρ Density of the mixture [kg/m^3]
 σ_m Membrane conductivity [S/m]

Superscripts and Subscripts

- a Anode
 eff Effective value in porous region
 m Membrane
 H_2 Hydrogen
 H_2O Water
 c Cathode
 aw Anode side water
 cw Cathode side water
 k k species
 N_2 Nitrogen

참고문헌

1. A. Kazim, H. T. Liu, and P. Forges, 'Modeling of performance of PEM fuel cells with conventional and interdigitated flow fields', *J. Appl. Electrochem.*, **29**, 1409-1416 (1999).
2. T. V. Nguyen, "Modeling two-phase flow in the porous electrodes of proton exchange membrane fuel cells using the interdigitated flow fields", Presented at the 195th Meeting of Electrochemical Society, 47. May 1999, Seattle.
3. D. L. Wood, J. S. Yi, and T. V. Nguyen, 'Effect of direct liquid water injection and interdigitated flow field on the performance of proton exchange membrane fuel cells', *Electrochem. Acta*, **43**, 3795-3809 (1998).
4. P. H. Lee, S. A. Cho, S. S. Han and S. S. Hwang, 'Performance characteristics of proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) with interdigitated flow channel', *International J. Automotive Technology*, **8**, 761-769 (2007).
5. T. V. Nguyen and R. E. White, 'A water and heat management models for Proton Exchange Membrane fuel cells', *J. Electrochem. Soc.*, **140**, 2178-2186 (1993).
6. J. S. Yi and T. V. Nguyen, 'Multicomponent transport in porous electrodes of proton exchange membrane fuel cells using the interdigitated gas distributors', *J. Electrochem. Soc.*, **146**, 38-45 (1999).
7. H. J. Ju and C. H. Wang, 'Experimental validation of a PEM fuel cell model by current distribution data', *J. Electrochem. Soc.*, **151**, A1954-A1960 (2004).
8. P. H. Lee, S. A. Cho, S. H. Choi and S. S. Hwang, 'Numerical analysis on performance characteristics of PEMFC with parallel and interdigitated flow channel', *J. Korean Electrochem. Soc.*, **9**, 170-177 (2006).
9. D. J. Kim, J. Y. Lee, T. H. Lim, I. H. Oh and H. Y. Ha, 'Operational characteristics of a 50W DMFC stack', *J. Power Soc.*, **155**, 203-212 (2006).
10. J. H. Jang, W. M. Yan and C. C. Shin, 'Numerical study of reactant

- gas transport phenomena and cell performance of proton exchange membrane fuel cells', *J. Power Soc.*, **156**, 244-252 (2006).
11. S. Um, "Computational modeling of transport and electrochemical reaction in proton exchange membrane fuel cell". Ph.D. Thesis. Penn State University, 2003.
 12. S. Shimpalee, S. Dutta, W. K. Lee, and J. W. Van Zee, "Effect of humidity on PEM fuel cell performance part II-numerical simulation", Proceeding of ASME IMECH, TN, HTD 364-1, 367-374 (1999), Nashville.
 13. W. K. Lee, J. W. Van Zee, S. Shimpalee, and S. Dutta, "Effect of humidity on PEM fuel cell performance part I-experiments", 1999 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, TN - November 14, Nashville.
 14. W. K. Lee, C. H. Ho, J. W. V. Zee, and M. Murthy, 'The effects of compression and gas diffusion layers on the performance of a PEM fuel cell', *J. of Power Soc.*, **84**, 45-51 (1999).
 15. S. Shimpalee, S. Dutta, and J. W. Van Zee, "Numerical prediction of local temperature and current density in a PEM fuel cell", 2000 IMECE, in Session of Transport Phenomena in Fuel Cell System, paper no, 2-6-3-2, Orlando.
 16. S. Dutta, S. Shimpalee, and J. W. Van Zee, 'Numerical prediction of mass-exchange between anode and cathode channels in a PEM fuel cell', *International J of Heat and Mass Transfer*, **44**, 2029-2042 (2001).
 17. L. Wang, A. Husar, T. Zhou and H. Liu, 'A parametric study of PEM fuel cell performances', *International J of Hydrogen Energy*, **28**, 1263-1272 (2003).