

왕복 유동을 통한 확산증대 효과가 연료전지 성능에 미치는 영향에 대한 수치해석

김종민* · 강경식*

*명지대학교 산업경영공학과

Numerical Simulation of the Oscillating Flow Effect in the Channel of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell

Jongmin Kim* · Kyung-Sik Kang*

*Department of Industrial & Management, Myongji University, Yongin

Abstract

This study investigates the enhancement of the oxygen diffusion rate in the cathode channel of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) by pure oscillating flow, which is the same as the mechanism of human breathe. Three-dimensional numerical simulation, which has the full model of the fuel cell including electrochemical reaction, ion and electronic conduction, mass transfer and thermal variation and so on, is performed to show the phenomena in the channel at the case of a steady state. This model could analysis the oscillating flow as a moving mesh calculation coupled with electrochemical reaction on the catalyst layer, however, it needs a lot of calculation time for each case. The two dimensional numerical simulation has carried on for the study of oscillating flow effect in the cathode channel of PEMFC in order to reduce the calculation time. This study shows the diffusion rate of the oxygen increased and the emission rate of the water vapor increased in the channel by oscillating flow without any forced flow.

Keywords : Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell(PEMFC), Cathode, Diffusion, Oscillating Flow, Numerical Simulation

1. 서론

전 세계적으로 원유 고갈에 따른 에너지난을 극복하며, 국내의 경우 97% 수입에 의존하는 탄화수소계 연료의 의존도를 낮추기 위한 대체에너지로의 전환 노력으로, 이차 전지 및 수소연료전지와 같은 친환경 시스템의 개발이 활발히 진행 중이다. 이중 수소 연료전지는 수소에너지를 사용하여 화학에너지를 전기화학반응에 의해 전기에너지로 직접 변환하는 발전장치이다. 특히 연료전지 시스템은 에너지 변환과정이 필요 없어 전기효율이 최대 40%, 열효율을 최대 50%로 에너지 이용율이 최대 90%에 육박하며, 발전 시 연소과정이 아닌 전기화학반응을 통해 연료를 직접 에너지 변환을 하여 전기를 생산하기 때문에 기존 기술 대비 오염원의 배출이 거의 없는 무공해 에너지 시스템이

다[1-3].

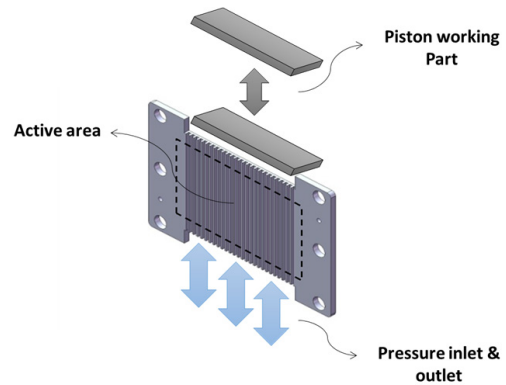
이러한 연료전지는 스택은 수소와 공기 또는 수소와 산소를 이용하여 직접 전기를 생산하는 연료전지 스택부와 연료 공급, 열관리 등 M-BOP(Mechanical Balance of Plant) 그리고 생성된 직류 전기를 최종 사용자가 사용하는 교류 또는 직류 형태로 변경하는 E-BOP(Electrical Balance of Plant)로 구성되어진다[1-3]. 그 중 전기를 직접 생성하는 연료전지 스택이 전체 시스템의 성능을 결정하는 핵심부품이며, 스택의 성능을 높이기 위해서 전 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다[4]. 그 중 스택의 성능을 높이기 위해서 채널의 형상을 최적화 하여 내부 확산을 증대시키는 연구와 채널 내 생성된 물을 잘 배출시키기 위한 연구 등 스택 내부의 전달현상에 관련된 많은 연구가 진행되어왔다[5-6].

이러한 내부 전달 현상의 최적화 연구 중 Choi. et. al.[7-8] 및 Hwang et. al.[9]은 채널 내 왕복 유동 현상을 통하여 내부에 연료 및 공기의 전달력을 향상시키거나 물의 원활한 배출을 통하여 버려지는 수소를 최소화 하여 최적화 운전을 할 수 있는 방안에 대해 연구하여 왔다. 이러한 왕복 유동 현상은 유체를 일정 주파수를 가지고 흔들 어주게 되면 유체 자체의 확산 증대 효과가 있게 되는데 이러한 전달 현상의 증대를 이용하여 스택 내 연료나 산소의 공급을 원활히 하고 생성되는 물의 배출을 통하여 스택의 운전 효율을 극대화 할 수 있다.

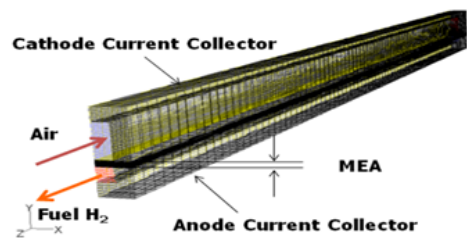
본 논문에서는 왕복유동을 스택 내부에 적용할 때 일어나는 물리적 현상을 파악하기 위해서 기존 Hwang et. al.[9]이 실험한 실험 조건을 이용하여 간략화된 2차원 수치모델을 개발하고, 개발된 수치모델을 이용하여 스택의 채널 내부에 왕복 유동을 적용함으로써 산소의 공급이 증대되는 현상에 대해 수치적 관점에서 계산하고 분석할 것이다. 또한, Choi et. al.[7-8]의 연구 결과에서 볼 수 있듯이 왕복 유동 시 수소를 버리는 주기를 줄여 연료전지 효율을 극대화 할 수 있는 연구 결과에 대해 2차원 수치모델을 이용하여 채널 내부에 생성된 물의 거동에 대해 계산하고 분석하여 왕복 유동을 연료전지 스택에 적용 시 채널 내에서 일어나는 물리적 현상에 대해 이해하고 분석하여 실험의 결과가 일어나는 원인을 파악한다.

2. 연료전지 수치 모델링

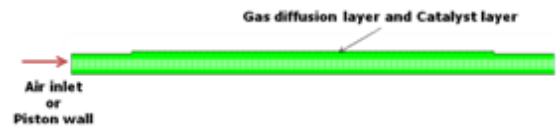
본 연구에서 사용한 2차원 및 3차원 수치모델을 [Figure 1]에 나타내었다. [Figure 1] (a)는 연구에서 사용한 분리판의 형상을 나타내었으며, [Figure 1] (b)는 분리판 형상 중 한 개 채널의 3차원 수치 모델을 나타내며, [Figure 1] (c)는 간략화된 2차원 수치 모델을 나타내었다. [Figure 1]에서 나타난 모델은 기존 Hwang et. al.[9]의 연구 논문에서 사용한 고분자 전해질막 연료전지 단위셀을 모델링화 한 것으로 단위셀 내에 채널 중에서 하나의 채널을 모사하여 모델을 만들었다. 3차원 모델의 경우 완전한 1개의 채널 중 채널 중심을 기준으로 양면에 동일한 계산 결과가 나오기 때문에 계산의 효율성을 위해서 한 개의 전체 채널 모델 중 모델의 센터부를 기준으로 한 개 채널의 반쪽 모델을 사용하여 계산을 수행하였다. 또한, 공기극과 수소극의 흐름 방향은 엇갈림 흐름으로 가정하여 계산을 수행하였다. 즉, 공기의 입구측은 수소의 출구측이며, 공기의 출구측은 수소의 출구측으로 계산을 수행하였다. 모델은 수소극 집전체, 수소극 가스채널, 수소극 가스확산층, 수소극 촉매층, 전해질막, 공기극 촉매층, 공기극 가스확산층, 공기극 가스 채널, 공기극 집전체로 이루어져 있다. 각 요소의 치수를 <Table 1>에 나타



(a) Separator figure



(b) 3 Dimensional model



(c) 2 Dimensional model

[Figure 1] Channel model for PEMFCs

<Table 1> Specifications

Description	Value	units
Geometry		
Cell height	0.00222	m
Thickness of GDL	0.00021	m
Thickness of catalyst	0.01	mm
Thickness of separator plates	0.002	m
GDL porosity	0.5	
Thermodynamic properties		
Saturation pressure of the water vapor	10.625	kPa
Temperature on the catalyst layer	320.15	K
Operating temperature	313.15	K
Molecular diffusivity	0.21×10^{-4}	m ² /sec
Polarization constants		
Exchange current density (j^0)	0.02	A cm ⁻²
Contact resistance	0.17275	Ohm-cm ²
Reference mass fraction of the oxygen(c^0)	0.1901	
Electrochemical parameter		
Inlet oxygen mass fraction	0.2062	
Inlet water vapor mass fraction	0.01833	

내었다. 수소극과 공기극의 집전체 경계조건을 일정 전압 조건으로 선정하여 계산을 수행하였으며, 해석은 Fluent 연료전지 패키지를 사용하여 수행하였다.

본 연구에서 사용된 지배방정식은 아래와 같이 정의된다.

Mass conservation:

$$\frac{\delta(\rho\epsilon)}{\delta t} + \nabla(\epsilon\rho u) = S_m \quad (1)$$

여기서, ρ 는 밀도이며, ϵ 은 다공도, t 는 시간, u 는 속도, S_m 은 생성부를 나타낸다.

Momentum conservation:

$$\frac{\delta(\epsilon X_k)}{\delta t} + \nabla(u X_k) = \nabla(D_k^{eff} \nabla X_k) + S_k \quad (2)$$

여기서, X_k 는 k 종의 농도이며, D_k^{eff} 은 k 종의 유효확산 계수를 나타낸다.

Charge conservation:

$$\nabla(\sigma_e^{eff} \nabla \phi_e) + S_\phi = 0 \quad (3)$$

$$\nabla(k \nabla \phi_m) = 0 \quad (4)$$

여기서, σ 는 이온 전도도이며, ϕ 은 전압을 나타낸다.

Energy conservation:

$$\frac{\delta(\rho c_p T)}{\delta t} + \nabla(\rho c_p u T) = k^{eff} \nabla T - \sum_j h_j j_j + (\tau_{eff} V) + S_T \quad (5)$$

여기서, c_p 는 비열이며, T 는 온도, h 는 엔탈피, S_T 는 에너지 생성부를 나타낸다. 본 지배방정식에서 사용되는 확산계수는

$$D_{eff} = \epsilon^\tau D_{mol} \quad (6)$$

여기서, τ 는 다공도를 나타낸다.

[Figure 1] (c)의 2차원 수치 모델은 무빙 메쉬를 이용하여 왕복유동의 특성을 확인하기 위하여 공기극 특성만을 볼 수 있도록 공기극만을 계산 할 수 있는 간략화된 과도 모델을 만들었다. [Figure 1] (b)의 3차원 모델 역시 무빙 메쉬의 적용이 가능하나, 3차원 무빙 메쉬를 이용하여 과도 모델을 계산하게 된다면 계산과 분석에 많은 시간을 소모하게 될 것이다. 따라서 본 연구에서는 효율적인 계산과 분석을 위하여 단순화된 2차원 모델을 개발하여 왕복 유동시의 연료전지 채널 내 물리적 현상을 분석할 수 있는 틀을 개발하였다.

[Figure 1] (c)의 2차원 수치 모델은 공기극 채널, 공기극 가스확산층, 공기극 촉매만을 모사하였으며, 좌측에 공기가 들어갈 수 있는 입구를 구성하고, 좌측의 끝단에 왕복 운동을 하는 무빙 메쉬를 구성하였다. 2차원 모델 결

과의 타당성을 보기 위한 계산에서는 모델의 좌측을 입구 측 우측을 출구측으로 하여 왕복유동이 없을 경우에 대해 계산하였다. 대부분의 보존 방정식은 3차원 모델의 지배 방정식과 동일한 방정식을 사용하였으며, Over voltage 에 대해서는 아래와 같이 계산을 하였다.

Over voltage:

$$\eta_{all} = \eta_{act} + \eta_{oh} \quad (7)$$

여기서, η 는 과전압이며, act 는 활성화 저항을 나타내며, oh 는 옴 저항을 나타낸다.

Activation loss:

$$\eta_{act} = \frac{RT}{\alpha_{ch} F} \ln \frac{j c_R^o}{j_o c_R^*} \quad (8)$$

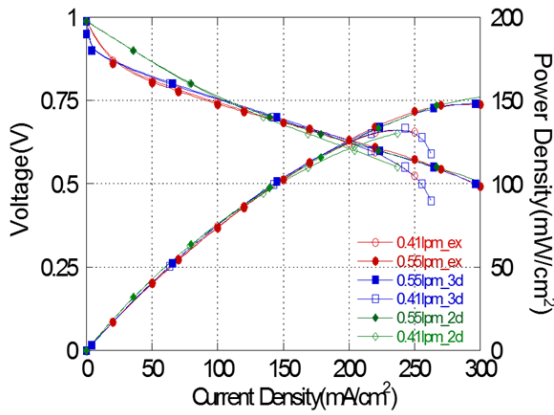
여기서, R 은 이상기체상수, α_{ch} 는 전달계수, j 는 전류 밀도를 나타낸다.

PEMFC 연료전지 모델 중 간략화 하기 위해 공기극만을 계산한 2차원 수치모델의 해를 얻기 위해 다음의 가정을 하였다.

- (1) 전체 모델 중 공기극의 확산 현상만을 파악하기 위해서 공기극의 요소만 포함되는 반쪽모델을 만들었다.
- (2) 채널 내 물의 상태는 기체 상태로 존재한다.
- (3) 에너지 생성을 위하여 사용되는 산소의 농도는 촉매층에서 소모되며, 반응 시 생성되는 물 증기는 촉매층에서 생성된다.
- (4) 작동 온도는 기존 Hwang et. al.[9]연구를 모사하기 위해서 40°C로 설정한다.
- (5) 본 모델은 수소극의 활성화 에너지가 공기극 활성화 에너지에 비해 상당히 낮은 수준이므로, 수소극 활성화 에너지에 대한 고려를 하지 않았다.

3. 수치 모델링의 검증

[Figure 2]에 본 연구에서 사용한 수치모델과 기존 Hwang et. al.[9]논문 결과를 비교하였다. 각 비교 운전 조건은 공기 공급량이 각 0.41 lpm과 0.55 lpm으로 설정하였으며, Hwang et. al.[9]의 실험결과와 2차원 수치결과, 3차원 수치결과를 각각 나타내었다. 수치 계산은 전류 밀도를 증가시키며 수행하였으며, 각 전류밀도마다 수렴된 전압과 파워 밀도의 값으로 실험 측정 포인트와 유사한 전류 밀도 영역에서 계산을 수행하였다. [Figure 3]에서 붉은색은 Hwang et. al.[9]의 실험결과를 나타내며, 초록색은 2차원 실험결과, 파란색은 3차원 실험 결과를 각각 나타내고 있다. [Figure 2]의 결과에서 알 수 있듯이 실험



[Figure 2] Comparison data between the experiment and numerical results

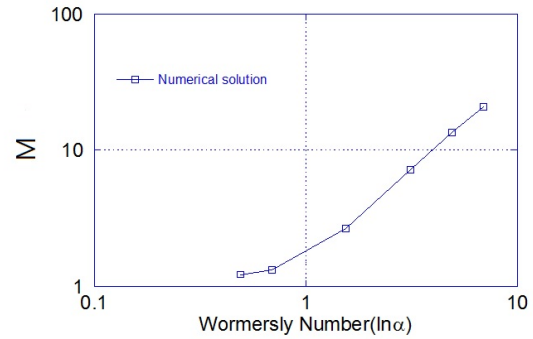
결과와 3차원 수치결과가 거의 일치하는 것을 알 수 있다. 즉, Fluent 연료전지 모듈의 3차원 계산결과가 실험에 대한 결과를 모사하여 나타낼 수 있음을 본 결과를 통해 알 수 있게 되었다. 하지만 2차원 수치결과의 경우 2차원 수치 모델의 가정에서 수소극 활성화 에너지 부분을 제외시키고 계산함으로써 $100\text{mA}/\text{cm}^2$ 보다 낮은 전류밀도 영역에서 실험결과와 3차원 수치결과와의 차이가 존재함을 볼 수 있다. 하지만 전류밀도가 $100\text{mA}/\text{cm}^2$ 이상의 영역에서는 수소 촉매층의 활성화 에너지의 영향이 극히 미미하기 때문에 2차원 수치결과와 3차원 수치결과, 실험결과간의 차이가 거의 없는 것을 볼 수 있었다. 특히, 본 논문에서 고려하는 계산 영역은 농도 분극 저항을 겪는 높은 전류밀도 부분을 주로 계산하기 때문에 $100\text{mA}/\text{cm}^2$ 이하의 영역에서 다소 존재하는 오차는 본 논문의 계산 결과 분석에 미치는 영향이 상당히 낮아 무시할 수 있는 수준의 값을 가진다.

본 수치모델 검증 결과 2차원 수치모델을 이용하여 고전류 밀도 구간에서의 전기화학반응에 의해 발생하는 물질전달 현상 분석을 하는데 있어 실험 결과와의 결과 차이가 거의 없어서 물리적 현상을 규명하는데 어려움이 없는 것을 확인하였다.

4. 수치 해석 결과

4.1 물질전달 확산증대 효과

[Figure 3]에 왕복유동에 의한 물질전달 증대 효과를 나타내었다. 왕복유동 주파수에 대한 물리적 함수는 Womersly(α) 수를 사용하였으며, 물질전달 증대효과는 물질전달 증대량에 대한 무차원 수(M)를 정의하여 나타내었다. [Figure 4]의 x축에 나와있는 Womersly(α) 수는



[Figure 3] Enhanced diffusion rate with respect to Womersly number

$$\alpha = \frac{d_h}{2} \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (9)$$

으로 정의 된다. 여기서, d_h 는 채널의 수력 직경을 나타내며, ω 는 왕복유동의 각속도를 ν 는 포화 흡공기의 동점성 계수를 나타낸다. Womersly(α)수는 Stoke's 경계층과 채널 수력직격사이의 비를 나타내는 수로서 물리적으로는 왕복 유동 시 채널 내 유체의 점성과 관성의 비를 표현하는 유체 왕복 유동의 대표적인 무차원 수이다. 또한, 본 논문에서 정의한 물질전달 증대효과를 나타내는 무차원 수는

$$M = \frac{\dot{m}}{m_{mol}} \quad (10)$$

으로 정의한다. 여기서, \dot{m}_{mol} 은 채널 내 대류의 영향이 없을 때 확산 계수에 의해 발생하는 기본 확산량을 나타내었으며, \dot{m} 은 실제 수치 계산 결과에서 나온 확산량을 나타내었다. 즉, 왕복유동을 적용하였을 때 기본 확산량 대비 얼마나 많은 확산 증대효과를 가지고 왔는지를 나타낼 수 있는 무차원수로 정의하였다.

[Figure 3]의 x 축은 왕복유동 주파수가 증대될수록 동시에 증가하는 Womersly 수이며, y 축은 채널내 기본 확산량일 때 1을 나타내고 확산량이 증대될수록 커지는 무차원 수 M 을 나타내고 있다. [Figure 3]에서 Womersly 수에 대해 무차원 수인 M 의 변화를 보게되면, Womersly 수가 1이하에서는 M 이 서서히 증대되며, Womersly 수가 1 이상이 되면 증대되는 기울기가 커지는 것을 알 수 있다. 즉, Womersly 수가 1 이하에서는 물질이 증대되는 기울기가 약 $\sqrt{\omega}$ 에 비례하여 증대되며, 1이상에서는 ω 와 유사하게 비례되며 증대되는 것을 볼 수 있다.

4.2 채널 내 산소 농도변화

[Figure 4]에 Womersly 수의 변화에 따른 채널 내 산소의 농도변화에 대한 결과를 나타내었다. [Figure 4]

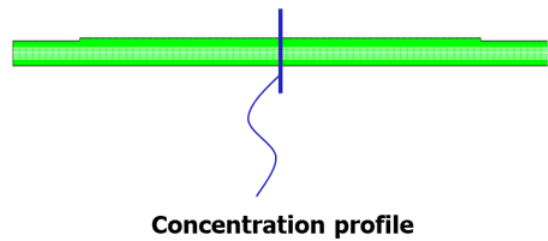
(a)는 [Figure 4] (b), (c), (d)의 x 축인 채널 깊이 방향, 즉, 본 절에서 Womersly 수 변화에 따른 산소의 몰 농도 분포 변화를 분석한 분석위치를 나타내었다. 본 수치 해석 결과는 채널 정 중앙의 위치에서 왕복유동을 적용 시에 몰 농도 분포의 분포가 시간에 따른 주기변화에 대해 어떠한 산소 몰 농도 분포 분포 변화를 갖는지에 대해 계산을 수행하였다. 채널의 깊이는 벽면 부분을 0m로 나타내었으며, 공기극 촉매층부를 0.0025m로 나타내었다. y 축은 산소의 몰 농도 분포를 나타내고 있으며, 각 Womersly 수에 따른 산소 몰 농도 분포의 크기가 변화함으로써 Womersly 수에 따른 y 축 산소 몰 농도 분포의 절대값은 동일하게 표기하기 어려우나, 각 Womersly 수에 따른 y 축에서 나타내는 몰 농도 분포값은 동일한 크기로 나타내었다.

[Figure 4] (b)부터 [Figure 4] (d)까지는 Womersly 수가 0.692, 0.1546, 4.890으로 변화시키며 산소 몰 농도 분포 변화를 관찰하였다. [Figure 4]에서 알 수 있듯이 Womersly 수가 증가하면 할수록 시간 주기에 따른 산소 몰 농도 분포 변화율이 급격히 줄어드는 것을 알 수 있다. 즉, Womersly 수가 0.692로 1보다 작을 경우에는 채널 정 중앙에서의 시간주기에 따른 산소 몰 농도 분포 변화는 거의 0.05에서 0.1까지 변화하는 것을 볼 수 있으나, Womersly 수 4.89에서는 시간 주기에 따른 산소 몰 농도 분포 편차가 거의 없는 것을 볼 수 있었다. 또한 낮은 Womersly 수에서 채널 정 중앙의 산소 몰 농도 분포는 0.1이하로 유지되고 있으나, Womersly 수가 4.89에서는 0.18로 대기중 산소 농도의 몰분율인 0.21에 근접하게 커지는 것을 알 수 있다. 채널 깊이방향으로는 외곽쪽 벽면에서는 평평한 기류의 농도 분포를 갖고, 산소가 소모되는 촉매층으로 갈수록 농도의 기울기가 점차 커지는 것을 볼 수 있다.

본 해석 결과에서는 왕복 유동 주파수가 늘어날수록 채널 내 산소 농도가 증대되며, 왕복유동에 의해 발생하던 시간주기에 따른 농도 분포 변화가 급격히 줄어드는 것을 보여주었다. 이러한 결과에 의해 기존에 채널 내 산소가 잘 공급되지 않아 운전할 수 없는 높은 전류밀도 영역에서도 연료 및 산소의 공급을 원활하게 하여 운전영역을 확장할 수 있음을 알 수 있게 되었다.

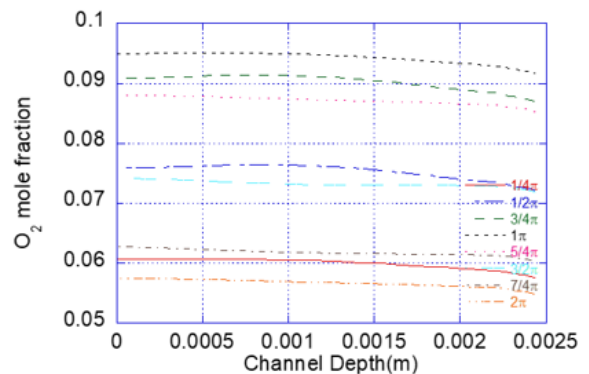
4.3 채널 내 수증기 농도변화

Choi et. al.[7-8]의 결과에서 알 수 있듯이 전기 화학 반응이 진행되면서 수소와 산소는 소모되고 반응 부산물로 물이 증기형태로 생성되게 된다. 이렇게 증기형태로 생성된 물은 일정 양 이상이 쌓이게 되면 액체 형태로 변화

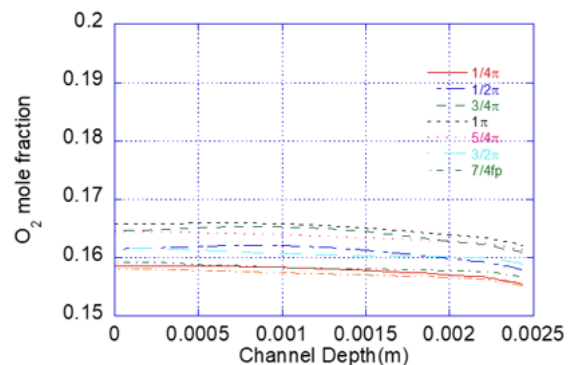


Concentration profile

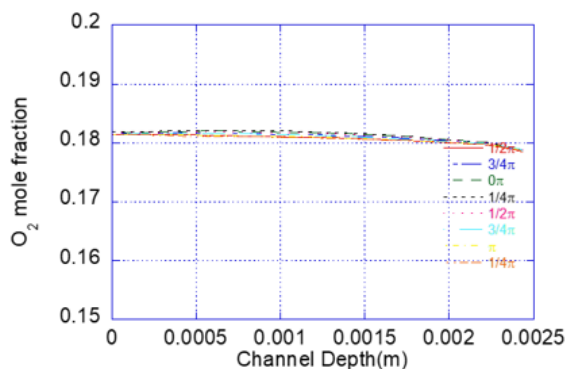
(a) Calculating region of oxygen concentration



(b) $\alpha = 0.692$



(c) $\alpha = 1.546$



(d) $\alpha = 4.890$

[Figure 4] Variation of the oxygen concentration in the channel

되고 변화된 물 액적은 연료 및 공기가 통과하는 채널을 막게 된다. 막힌 채널은 수소와 공기의 흐름을 방해하여 촉매층에서 필요한 전류를 생성하기 위하여 공급되는 연료를 사용할 수 없게 만든다. Choi, et. al[7-8]은 연료전지 운전 시 왕복유동을 적용하여 이러한 채널 내 물의 액적이 쌓이는 문제를 해결하였다. 본 논문에서는 이러한 왕복유동이 채널 내 생성되는 물을 어떻게 효율적으로 제거할 수 있는지에 대한 해석을 수행하였다. [Figure 5]에 연료전지 운전 시 왕복유동을 적용할 때 Womersly 수의 변화에 따른 물의 물 농도 분포가 어떻게 변화되는지를 나타내었다. [Figure 5] (a)에는 [Figure 5] (b)에서 나타내는 채널의 길이방향이 즉, 계산이 수행된 위치를 나타내고 있다. 계산은 공기극 촉매층 위에서 생성되는 물 증기의 물 농도 분율의 분포를 채널 길이방향을 기준으로 계산하였다. 시간 주기에 따른 모든 결과를 적분평균을 내어 물의 물 농도 분율을 계산하였다. [Figure 5] (b)는 Womersly 수가 증대됨에 따라 촉매층 위에서의 물 증기의 물 농도 분율의 분포 변화를 나타내었다. Womersly 수가 1.546, 2.396, 3.093, 4.890의 4가지 케이스에 대해서 계산을 수행하였으며, 계산 영역은 공기극 촉매층면으로 외부랑 연결이 가장 먼 부분이 0.01m 부근이며, 0.07m 부분이 외부와 가장 근접한 부분으로 계산이 수행되었다. [Figure 5] (b)에서 볼 수 있듯이 Womersly 수가 증대됨에 따라 채널 내 촉매층 위에서의 물의 물 농도

분율이 감소하는 것을 볼 수 있다. Womersly 수가 1.546일 경우에는 입구에서 가장 먼 부분과 입구 부분간의 농도 분율 차이가 크고 최고 물의 물 농도 분율이 0.22 부근까지 쌓이는 것을 알 수 있었으나 Womersly 수가 증대되어 4.890까지 올라가게 될 때는 입구에서 가장 먼 부분과 입구 사이의 물 농도 분율의 변화가 거의 없으며, 물 농도 분율의 크기가 0.05까지 낮아지는 것을 알 수 있다. 본 해석 결과를 통하여 Choi, et. al[7-8]의 실험에서 왕복 유동을 적용 시 물 배출을 주기적으로 하지 않더라도 연료전지의 운전이 계속 될 수 있는 물리적 원리가 왕복 유동 시 채널 내에 생성되는 물의 배출을 원활히 함으로써 이루어짐을 알 수 있었다.

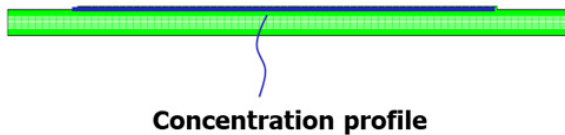
5. 결론

본 연구에서는 기존의 연료전지 연구 중 왕복 유동을 적용 시 산소의 공급이 증대되어 연료전지의 성능이 향상되며 내부에 쌓이는 물배출을 원활히 하여 효율을 향상시키는 실험 결과에 대해 효율적인 계산을 위해서 간략화된 2차원 수치모델을 개발하여 현상에 대해 분석을 수행하였다. 2차원 수치모델의 검증을 위하여 기존의 Fluent 연료전지 패키지 모델을 이용하여 3차원 수치모델링을 수행하였으며, 실험결과, 2차원 및 3차원 수치모델 모두 동일한 조건에서 일치하는 결과를 가짐을 보여주었다.

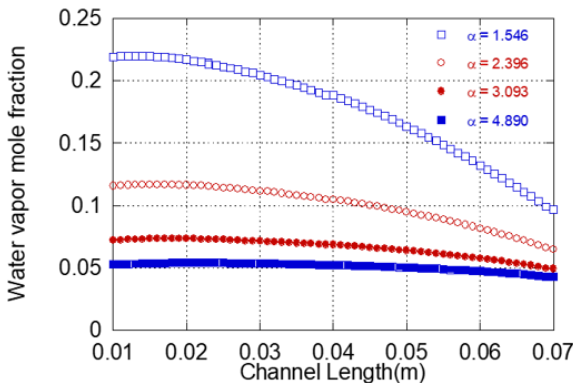
간략화된 2차원 수치해석의 결과 왕복유동의 적용 시 Womersly 수가 증대될수록 물질전달 확산효과가 증대되어 채널 내 산소의 농도가 증가하며, 내부에 생성되는 수증기의 배출량이 증대됨을 알 수 있었다. 채널의 정 중앙의 산소 물 농도 분율의 경우 Womersly 수가 0.692일 때 0.1이하였으나, Womersly 수가 4.890으로 증가 시 0.18까지 올라가서 연료전지의 운전 전류 밀도를 높일 수 있음을 보여주었다. 또한, 채널 내 수증기의 경우 Womersly 수가 1.546인 경우 최대 0.22정도의 물의 물 농도 분율을 갖는 상황에서 Womersly 수를 4.890까지 늘렸을 때 채널내의 수증기 물 농도 분율을 0.05까지 낮출 수 있음을 수치 결과를 통해 알 수 있었다.

6. References

- [1] Vijay Ramani(2006), "Fuel Cells." The Electrochemical Society Interface, 41-44
- [2] Ministry of Trade, Industry and Energy(2016), "New & Renewable Energy White Paper."
- [3] EG&G Technical Services, Inc.(2004), "Fuel Cell Handbook." U. S. Department of Energy



(a) Calculating region of water vapor concentration



(b) Variation of water vapor concentration according to the channel length

[Figure 5] Variation of water vapor concentration according to the channel length

- [4] Corinna Harms, et. al.,(2015), "Study of the influence of key test parameters on the performance of a PEMFC stack." *Solid State Ionics*, 275:75-79
- [5] T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, S. Gottesfeld (1991), "Polymer electrolyte fuel cell model." *Journal of Electrochemical Society*, 138(8):2334-2342
- [6] S Dutta, S Shimpalee, JW Van Zee(2000), "Three-dimensional numerical simulation of straight channel PEM fuel cells." *Journal of Applied Electrochemistry*, 30:135-146
- [7] J. W. Choi, Y. S. Hwang, et. al.,(2010), "Experimental study on enhancing the fuel efficiency of an anodic dead-end mode polymer electrolyte membrane fuel cell by oscillating the hydrogen." *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(22):12469-12479
- [8] J. W. Choi, Y. S. Hwang, et. al.,(2010), "An experimental study on the purge characteristics of the cathodic dead-end mode PEMFC for the submarine or aerospace applications and performance improvement with the pulsating effects." *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(8):3698-3711
- [9] Y. S. Hwang, et. al.,(2010), "Enhanced Diffusion in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Using Oscillating Flow." *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(8):3676-3683

저자 소개



김종민

대림대학교 공과대학 소방공학과 학사 취득. 명지대학교 일반대학원 산업경영공학과 석·박사과정 중. 현재 주식회사 대명건설 재직 중. 관심분야 : 건설안전, 산업재해조사, 건설안전 특론, 안전, 안전성, 중대재해조사 등
주소: 경기도 용인시 처인구 남동 산 38-2 명지대학교 산업경영공학과



강경식

인하대학교 산업공학과에서 학사석사박사와 연세대학교·경희대학교에서 경영학 석사박사 취득. North Dakota State Univ.에서 Post-Doc 과 Adjunct Professor 역임. 현재 명지대학교 산업경영공학과 교수로 재직 중. 주요 관심분야는 생산관리, 물류관리, 안전경영 등이다.
주소 : 경기도 용인시 처인구 남동 산 38-2 명지대학교 산업경영공학과