

사행 유로를 갖는 고분자 전해질 연료전지의 기체확산층 내부에서의 우회 유동 예측

전세계 · 김경연[†]
한밭대학교 기계공학과

Prediction of Bypass Flow Rate through Gas Diffusion Layer in PEMFC with Serpentine Flow Channels

SEGYE JEON, KYOUNGYOUN KIM[†]

Department of Mechanical Engineering, Hanbat National Univ. 125 Dongseo-daero Seo-gu, Daejeon 305-719, Korea

Abstract >> The serpentine flow channel is widely used in polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) to prevent flooding phenomena because it effectively removes liquid water in the flow channel. The pressure drop between inlet and outlet increases as compared with straight channels due to minor losses associated with the corners of the turning configurations. This results in a strong pressure gradient between adjacent channels in specific regions, where some amount of reactant gas can be delivered to catalyst layers by convection through a gas diffusion layer (GDL). The enhancement of the convective flow in the GDL, so-called bypass flow, affects fuel cell performance since the bypass flow influences the reactant transport and thus its concentration over the active area. In the present paper, for the bipolar plate design, a simple analytic model has been proposed to predict the bypass flow in the serpentine type flow channels and validated with three-dimensional numerical simulation results.

Key words : PEMFC(고분자전해질연료전지), Serpentine flow channel(사행 유로), Bypass flow(우회유동), Gas diffusion layer(기체확산층)

1. 서 론

고분자전해질 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell; PEMFC)는 화학반응으로 부터 직접적으로 전기에너지를 생산하는 전기화학장치이며, 높은 전력밀도와 빠른 시동 특성 때문에 가정용, 차량용 및 수송용에 적합한 것으로 여겨지고 있다¹⁾. 수소와 공기를 연료로 하는 양성자 이온 교환막을 이용하는

연료전지는 높은 전력 밀도, 빠른 시동, 고효율 등과 같은 다양한 장점을 지니고 있어 유망한 청정에너지원으로 각광받고 있어 최근 많은 연구가 PEM 연료전지 기술개발에 집중되고 있다. 그 결과, 촉매 로딩양이 줄었으며, 전력 밀도가 증가하였고, PEM 연료전지 자동차의 프로토타입에 대한 실증이 여러 국가에서 성공적으로 수행되었다²⁾. 이러한 성공적인 연구 성과에도 불구하고, 여전히 현재의 PEM 연료전지의 성능을 더 향상시켜야 할 필요가 있다. PEM 연료전지 내의 물 및 열관리, CO와 같은 불순물에 대한 저 내구성, 양극에서의 느린 전기화학 반응 및 높은 가격과 같은 다양한

[†]Corresponding author : kkim@hanbat.ac.kr

[접수일 : 2012.7.25 수정일 : 2012.8.3 게재확정일 : 2012.8.24]

Copyright © 2012 KHNES

기술적인 제한으로 인해 수송용이나 정치형 연료전지의 상업적 확산에 장애물로 작용하고 있는 실정이다³⁾.

상용화를 위해 해결해야 할 중요한 문제들 중의 하나는 화학반응으로 인해 생성되는 액상의 물의 배출이다. 산소환원 반응의 결과물로 생성되는 물이 연료 공급 채널에서 제대로 배출되지 않을 경우, 공급되는 연료가 촉매층으로 효과적으로 전달되지 못하여 반응 사이트에서의 농도 손실을 야기하며, 결과적으로 연료전지의 전체 성능을 저하시킨다. 효율적인 물 배출을 위해, 여러 형태의 분리판 유로가 개발되었는데, 그 중 사행 유로 형상이 우수한 물 배출 성능을 보인다고 알려져 있다⁴⁾.

대면적 분리판의 유로를 사행으로 채택할 경우, 유로의 길이가 길어지고 다수의 유로 꺾임부로 인해 큰 압력 손실을 야기하게 된다. 또한, 인접한 유로 간에 큰 압력차가 발생하는 부분이 존재한다. 이러한 인접한 유로 사이의 큰 압력 구배는 유로 아래에 위치한 다공성 물질로 이루어진 가스확산층(gas diffusion layer: GDL) 내부의 강제 대류를 유발시킨다. 즉, 상대적으로 높은 압력을 가지는 상류측 유로의 연료가 하부의 GDL 를 통과하여 낮은 압력을 가지는 인접한 하류 측 유로로 유입된다¹⁾. 이러한 GDL을 통한 우회 유동은 GDL 및 화학반응이 발생하는 촉매층에서의 반응 가스 농도 분포에 영향을 미치므로 연료전지의 성능과 밀접한 관련이 있다.

Kanekaci et al.⁵⁾은 단일 사행 유로에 대해 단순화된 2차원 모델을 적용한 결과, 반응 가스가 촉매층으로 확산되는 방향과 동일한 방향으로 GDL 우회 유동이 발생하여 연료 전지의 성능 향상에 도움을 준다고 보고하였다. 한편, Shimpalee et al.⁶⁾은 단일 사행 유로 형상의 PEMFC에 대한 3차원 전산해석을 수행하여 GDL 내부에서의 우회 유동이 음극 측에서 수소의 전달을 촉진 시키는 반면, 양극 측에서는 우회 유동의 방향이 산소의 확산 방향과 반대임을 보고하였다. 또한, Kim et al.⁷⁾은 평행 사행 유로 형상의 PEMFC에 대한 3차원 전산해석을 수행하여 GDL 우회 유동은 반응 면적 중 특정 영역에서 반응 가스의 공급 부족을 유발하게 되고 이로 인해 그 영역에서 낮은 전류 밀도

가 발생하고, 우회 유동이 증가할수록 전류 밀도의 분포는 불균일하게 된다고 보고하였다.

기존의 연구를 통해 GDL 내부의 우회 유동은 공급 연료의 전달에 영향을 주게 되고 이는 반응 영역에서의 연료 기체의 농도에 변화를 줌을 확인할 수 있다. 따라서 사행 유로 형상의 분리판 설계 시에는 연료의 전달과 관련이 깊은 우회 유동에 대한 고려가 필수적이라 할 수 있다. 그러나 우회 유동의 영향은 간소화된 소면적 분리판의 전산 해석으로는 예측이 어렵기 때문에 대면적 분리판에 대한 대규모 병렬 전산해석이 요구되며 이는 막대한 계산 자원 및 시간을 필요로 한다⁸⁾. 이에, 본 논문에서는 사행 유로 형상의 분리판 설계 시 GDL을 통한 우회 유동을 미리 예측하기 위한 단순한 모델식을 제안하였으며 3차원 전산해석을 통해 모델의 정확성을 검토하였으며 개선 방안에 대해 논의 하였다.

2. 이론적 모델링

Fig. 1은 사행유로 형상의 연료공급채널 및 GDL을 나타낸다. 유로 형상에 따른 우회유동을 파악하기 위해 가장 단순한 경우로 하나의 턴(turn)만 존재하는 채널 형상을 고려하였다. 이러한 단순한 유로형상에 대해서도 채널의 가로 길이(l), 채널의 높이(d), 채널 사이의 간격(s)과 같은 기하학적 설계변수가 존재한다. 또한, 채널 아래 부분에 위치하는 기체확산층(GDL)의 두께(t_{GDL}) 및 기체투과도(K)에 의해서도 우회유동은 영향을 받게 된다. 이 절에서는 단순화된 해석적 모델을 이용하여 이러한 각 설계 변수가 GDL 내부의 우회

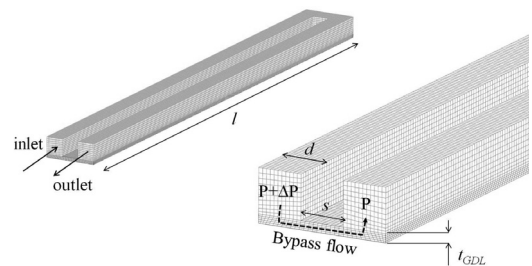


Fig. 1 Geometrical configurations of the serpentine flow channel and gas diffusion layer

유동에 미치는 영향을 파악하였다.

연료공급 채널 내부를 흐르는 유동에서 점성에 의한 마찰손실로 인한 압력 강하는 아래와 같다.

$$\frac{\Delta P}{\rho g} = f \frac{2l}{D_h} \frac{V^2}{2g} \quad (1)$$

여기서 ΔP 는 압력강하, ρ 는 연료 기체의 밀도, g 는 중력가속도, D_h 는 연료 공급 채널의 수력직경, f 는 마찰계수, V 는 연료공급 채널 입구에서 연료 기체의 주입속도이다.

연료공급 채널의 길이가 큰 경우에 대해선 턴 부분에서 발생하는 압력 강하는 점성 마찰 손실에 의한 압력 강하에 비해 매우 작기 때문에 무시하였으며, 채널 내부의 유동은 층류로 가정하였다.

식 (1)은 아래와 같이 표현될 수 있으며,

$$\Delta P = (f Re_{D_h}) \mu \frac{l}{D_h^2} V \quad (2)$$

본 논문에서 다루는 단면이 정사각형 채널의 경우에는 $f Re_{D_h} = 56.91$ 이다⁹⁾. 여기서 μ 는 연료기체의 점성계수이며, Re_{D_h} 는 레이놀즈 수이다.

연료공급 채널 아래에 위치한 GDL 내부에서의 through plane 방향으로 압력의 변화는 일반적으로 매우 작기 때문에 무시하면, 연료공급채널의 입구 아래 부분의 GDL 의 압력과 출구 아래 부분의 GDL 압력의 차이는 아래와 같이 근사될 수 있다.

$$\Delta P_{GDL} \approx \Delta P \quad (3)$$

이러한 압력 차이에 의해 발생하는 유동은 아래와 같이 Darcy 법칙을 이용해서 모델링된다¹⁰⁾.

$$\begin{aligned} v_0 &= -\frac{K}{\mu} \nabla P = \frac{K}{\mu} \frac{\Delta P_{GDL}}{s} \\ &= (f Re_{D_h}) \frac{l}{s} \frac{K}{D_h^2} V \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 K 는 GDL의 투과도(permeability)이며, v_0 는 채널 입구 및 출구 사이의 아래 부분에 위치한 GDL 내부에서의 우회유동의 속도이다. 입구에서 턴 지점으로 갈수록 인접한 채널 사이의 압력 차이는 감소할 것이며 결국 턴 부분에서는 0이 된다. 또한 압력 강하는 채널의 길이에 비례하므로, 인접한 채널 사이 부분 아래에서의 GDL 에서의 우회유동 속도 또한 선형적으로 변화한다고 가정할 수 있다. 또한, GDL 내부에서 through plane 상에서 평균된 우회유동의 속도는 위에서 구한 속도의 절반으로 가정하면 ($\int_0^{t_{GDL}} v dz \approx \frac{v_0}{2}$) GDL을 통과해서 발생하는 우회유량은 아래와 같은 식으로 표현 가능하다.

$$\dot{m}_{bypass} = \frac{1}{4} (f Re_{D_h}) \rho K \left(\frac{l}{D_h} \right)^2 \frac{t_{GDL}}{s} V \quad (5)$$

참고로 채널 입구에서 공급되는 질량 유량은 아래와 같다.

$$\dot{m}_{inlet} = \rho V A_{ch} \quad (6)$$

여기서 A_{ch} 는 채널의 단면적이다.

따라서 입구에서 공급되는 공급유량에 대한 우회유동의 비율은 아래와 같다.

$$\gamma = \frac{\dot{m}_{bypass}}{\dot{m}_{inlet}} = \frac{1}{4} (f Re_{D_h}) \frac{K}{A_{ch}} \left(\frac{l}{D_h} \right)^2 \frac{t_{GDL}}{s} \quad (7)$$

우회유량의 비율이 커질수록 GDL 내부를 통해 인접한 채널로 이동하는 유량이 증가함을 의미하며, 사행 유로 형상의 턴 부분에서 이동하는 유량은 이 우회유량을 제외한 유량만 이동하게 된다. 즉, 채널입구에서는 충분한 연료를 공급하는 경우라도, 우회유량의 비율이 큰 경우에는 턴 부분에서 연료의 공급이 부족해질 수 있음을 의미한다. 따라서 턴 부분에서의 충분한 연료공급을 위해선 우회유량 비율이 낮도록 하는 설계 인자를 선정해야 한다. 그리고 흥미로운 점은 우회 유량의 비율이 연료전지의 작동 조

건에 상관없이 채널 및 GDL 의 기하학적인 형상 및 GDL 의 기체투과도에만 의존한다는 점이다. 이는 Feser et al.¹¹⁾의 해석 결과와도 일치한다.

3. 3차원 전산해석(CFD)

앞 절에서 제시한 우회 유동의 유량 예측식의 정확도를 검증하기 위해 한 번의 턴이 있는 사행유로와 GDL을 포함한 형상에 대해 3차원 전산해석을 수행하였다. 지배방정식은 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식과 연속 방정식이다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j) = 0 \tag{8}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \tag{9}$$

다공성 매질로 이루어진 GDL 영역에서는 식(9) 대신 아래의 Darcy 법칙을 사용하여 운동량 방정식을 해석하였다.

$$u_i = -\frac{K}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x_i} \tag{10}$$

10cm²의 활성 면적을 가지는 소형 연료전지 분리판을 대상으로 채널의 길이는 3cm 이며 채널의 폭은 1mm 이며 두 채널 사이의 간격은 1mm 에 대해서 해석을 수행하였다. 평균 전류밀도 400mA/cm²의 작동 조건에서 공급되는 수소의 양은 당량비가 3인 경우에 해당하는 연료의 유량을 채널 입구에서 경계조건으로 부과하였다. 이 경우 레이놀즈 수는 $Re_{D_h} = 0.13$ 이며, 이는 층류 유동 영역에 해당한다. 계산 격자 및 영역은 Fig. 1에서 나타내었다. 각 지배방정식은 2차 정확도를 갖는 유한차분법을 사용하여 해석 되었으며, SIMPLE 알고리즘을 사용하여 각 운동량 방정식 및 연속 방정식의 relative residual이 10⁻⁷ 이하가 될 때까지 반복계산을 수행하여 수렴된 해석 결과를 얻었다.

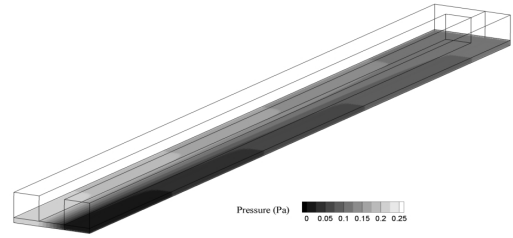


Fig. 2 Pressure contours in the gas diffusion layer

Fig. 2는 GDL 내부에서의 압력 분포를 나타낸다. 채널을 따라 이동하는 유동의 경로에서 발생하는 압력 손실로 인해 채널 입구와 출구 부분 사이에 위치한 GDL 에서의 압력 구배가 크게 발생함을 확인할 수 있다. GDL 내부에서의 채널 입구에서 출구 방향으로의 압력 구배는 GDL을 통한 우회 유동을 유도하게 된다. Fig. 3은 GDL 중심 부분에서의 우회유동

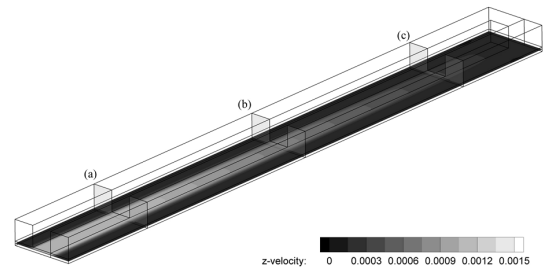
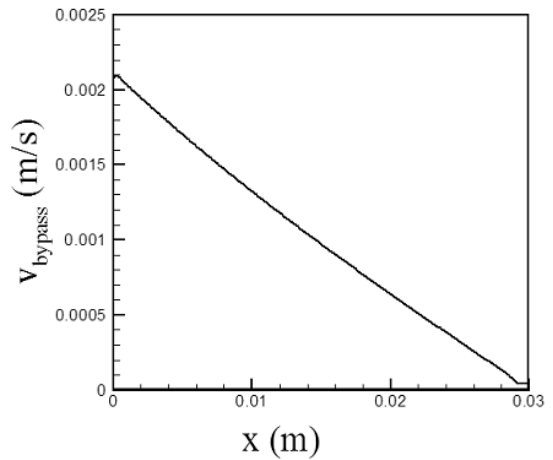


Fig. 3 Distribution of bypass flow velocity in the GDL. Variation of the bypass velocity at the GDL center along the streamwise direction (inset)

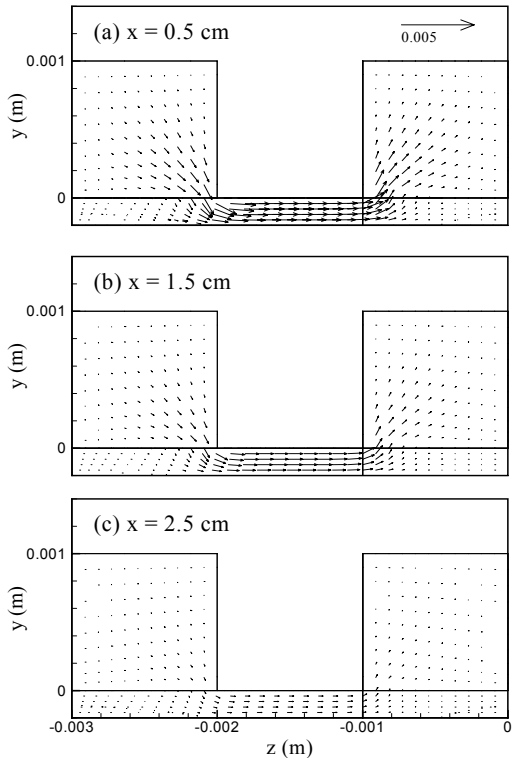


Fig. 4 Velocity vectors in the cross section (a)~(c) marked in Fig. 3

의 크기를 나타내었으며, 입, 출구 부분에서 가장 큰 우회 유동이 발생하고 턴 부분으로 갈수록 감소함을 알 수 있다. Fig. 3에 삽입된 1-d 그래프에서는 채널 사이의 GDL 중심에서의 우회 유속을 x 방향에 따라 도시하였다. 입, 출구 사이의 부분에서 턴 부분으로 가면서 거의 선형적으로 감소함을 확인할 수 있다. 이를 통해 모델식 유도에 사용하였던 가정이 타당함을 확인하였다.

GDL 내부에서의 우회 유동의 패턴을 보다 구체적으로 파악하기 위해 Fig. 3에서 표시한 각 단면 (a)~(c)에서의 속도 벡터의 분포를 Fig. 4에서 나타내었다. 속도 벡터의 크기를 비교하기 위해, Fig. 4(a)의 우측상단에 0.005m/s 에 해당하는 크기의 벡터를 나타내었다. 입, 출구 부분에 근접한 영역에서 발생하는 강한 우회 유동으로 인해 입구에서 공급되는 연료의 일부가 출구 부분의 유로로 유입됨을 명확히

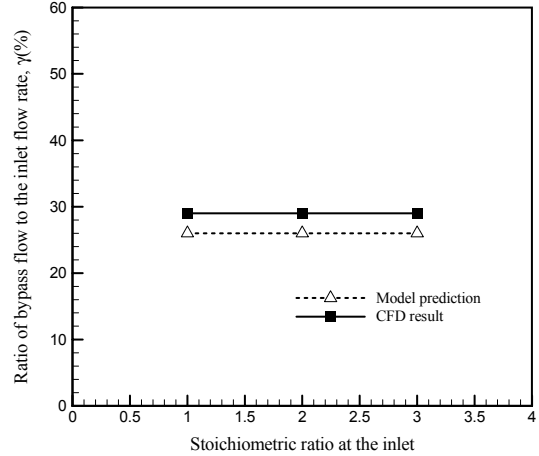


Fig. 5 Comparison of the present model with CFD result for different inlet stoichiometry

확인할 수 있다. 이러한 GDL 내부의 우회 유동으로 인한 연료의 이동으로 인하여, 입구에서 공급되는 연료가 코너 부분 아래에 위치한 반응 면적을 충분히 거치지 않고 바로 출구로 배출될 수 있다.

3차원 CFD 결과와 앞 절에서 제시된 예측식의 결과를 비교하면, CFD 결과는 채널의 입구와 출구에서의 압력 차이는 0.219Pa 이며, 식 (2)는 0.289Pa 로 예측식이 다소 높은 값을 보여준다. 이러한 차이는 예측식의 유도 과정에서 우회 유동으로 인해 채널에서 손실되는 유량을 무시한 결과로 판단된다. 채널에서 공급한 유량 대비 GDL을 통해 이동한 수소 유량의 비율은 CFD 결과와 예측식 결과가 각각 29%와 26%로 유사하게 나타났다.

연료 공급 채널의 입구 유량에 따른 우회 유동의 변화를 파악하기 위해 입구에서 수소 기체의 당량비를 1, 2, 3으로 변화시켜 CFD 를 수행하였으며 그 결과를 식 (7)과 비교하였다 (Fig. 5). 본 논문에서 제시한 예측식은 우회 유동의 비율은 입구 유량에 관계 없으며, 이는 CFD 결과를 통해서도 확인할 수 있다. 마지막으로 우회 유동과 밀접한 관련이 있는 GDL의 기체투과도에 따른 우회 유량의 변화를 파악하기 위해 다양한 기체 투과도에 대한 CFD 결과를 예측식과 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. GDL의 기체투과

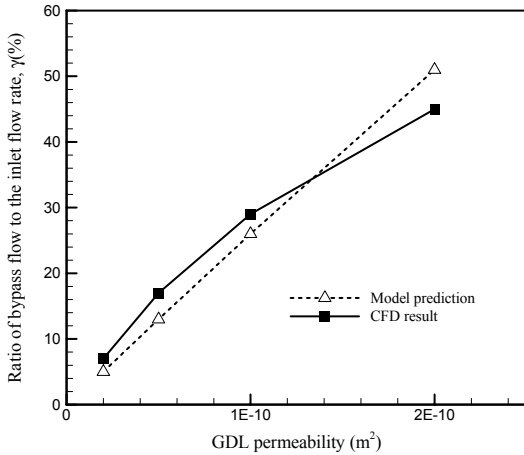


Fig. 6 Comparison of the present model with CFD result for different inlet stoichiometry

도가 증가할수록 우회 유동의 비율이 증가한다. 식 (7)은 우회 유동의 비율은 기체투과도에 선형적으로 비례하여 증가한다고 예측하고 있으나, CFD 결과는 기체투과도가 클수록 우회 유동 비율의 증가폭이 둔화된다. 기체투과도가 커지면, 입구 부근에서 우회 유동을 통해 출구로 이동하는 유량이 증가하고 (Fig. 4a), 채널을 따라 진행하는 유량은 감소하게 된다. 그 결과 입구에서 멀리 떨어진 영역에서 인접한 유로 간의 압력 구배가 감소하여 우회 유량의 비율 또한 줄어들게 된다. 따라서 보다 정확한 예측을 위해선 입구 근처에서 우회유동으로 인해 채널 내부에서 감소한 유량을 반영하여 인접한 유로간의 압력강하식의 보정이 필요하다.

4. 결 론

사형 유로 형상의 분리판은 연료 공급 채널에서 액상의 물을 효과적으로 제거하기 때문에 플러딩 현상을 방지하기 위해 고분자 전해질 연료 전지에서 널리 사용된다. 이 경우 인접한 유로 간에 큰 압력차가 발생하는 부분이 존재하며 이 영역에서의 큰 압력 구배는 유로 아래에 위치한 GDL 내부에서 공급 연료의 강제 대류를 유발시켜 연료 전달 현상에 영향을 준다. 그 결과 반응 면적에서의 전기화학 반응의 활성화에

영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 이러한 연료전지의 GDL을 통한 우회 유동을 미리 예측하기 위한 단순한 모델식을 제안하였으며 3차원 전산해석을 통해 모델의 정확성을 검증하였다.

본 논문에서 제시한 이론 모델식은 매우 단순한 경우에 대해서만 적용이 가능하므로 보다 실제적인 분리판 설계에의 적용을 위해서는 다음과 같은 보다 현실적인 요소들이 보완되어야 할 것으로 판단된다.

- 1) 우회유동으로 인해 감소한 유량으로 인해 초래되는 압력강하식의 보정이 필요하다.
- 2) 실제 연료전지가 작동될 때에는 채널을 통해 이동하는 연료기체가 촉매층에서 소비되어 유량이 감소하게 된다. 이러한 전기화학반응으로 인한 유량 감소 효과 또한 반영되어야 할 것이다.
- 3) 또한, 연료전지 작동 시 GDL 내부에서 응축되는 수분으로 인한 GDL 기체투과도의 변화 영향도 고려할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 2009년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

참 고 문 헌

1. Mench, M.M., Fuel cell engines. 2008: Wiley.
2. Wang, Y., Chen, K.S., Mishler, J., Cho, S.C., and Adroher, X.C., 2011, "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research," Applied Energy, Vol. 88, No. 4, pp. 981-1007.
3. Cheng, X., Shi, Z., Glass, N., Zhang, L., Zhang, J., Song, D., Liu, Z.-S., Wang, H., and Shen, J., 2007, "A review of PEM hydrogen fuel cell contamination: Impacts, mechanisms, and mitigation," J. Power Sources, Vol. 165, No. 2, pp. 739-756.
4. Li, X. and Sabir, I., 2005, "Review of bipolar plates in PEM fuel cells: Flow-field designs," Int.

- J. Hydrogen Energy, Vol. 30, No. 4, pp. 359-371.
5. Kanezaki, T., Li, X., and Bashuk, J.J., 2006, "Cross-leakage flow between adjacent flow channels in PEM fuel cells," J. Power Sources, Vol. 162, pp. 415-425.
 6. Shimpalee, S., Dutta, S., Lee, W.K., and Van Zee, J.W., 1999, "Effect of humidity on PEM fuel cell performance Part II - Numerical simulation," in ASME IMECE. Nashville, TN.
 7. Kim, K., Sohn, Y.-J., Kim, M., Cho, C.-W., and Lee, W.-Y., 2008, "Numerical study on performance of PEMFC with different permeability of gas diffusion layer," in KSME Spring Annual Meeting, Fluid and Thermal Engineering Part. Kangwon, South Korea.
 8. Gwak, G., Chippar, P., Kang, K. and Ju, H., 2011, "Parallel computing simulation of large-scale polymer electrolyte fuel cells," Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 22, No. 6, pp. 868-877.
 9. White, F.M., Viscous fluid flow. Vol. 2. 1991: McGraw-Hill New York.
 10. Nield, D.A. and Bejan, A., Convection in porous media. 1999: Springer.
 11. Feser, J.P., Prasad, A.K., and Advani, S.G., 2006, "On the relative influence of convection in serpentine flow fields of PEM fuel cells," J. Power Sources, Vol. 161, No. 1, pp. 404-412.