

마이크로채널이 적용된 고분자 전해질 연료전지 가스확산층의 물 이송에 대한 전산해석 연구

우아영 · 차도원 · 김보성 · 김용찬*

고려대학교 기계공학과

(2012년 7월 31일 접수 : 2013년 2월 27일 채택)

Numerical Simulation of Water Transport in a Gas Diffusion Layer with Microchannels in PEMFC

Ahyoung Woo, Dowon Cha, Bosung Kim, and Yongchan Kim*

Department of Mechanical Engineering, Korea Univ., Seoul 136-713, Republic of Korea

(Received July 31, 2012 : Accepted February 27, 2013)

초 록

물 관리는 저온에서 작동하는 고분자전해질 연료전지의 성능에 큰 영향을 미친다. 가스확산층 (gas diffusion layer, GDL)은 반응 가스를 촉매층의 반응영역으로 확산시키는 역할을 한다. 연료전지의 작동온도가 60~80°C이기때문에, 고전류 밀도에서 생성된 물은 액적을 형성한다. 만약 생성된 물이 적절하게 제거되지 않는다면, GDL 내의 기공을 막게 되고 연료전지 성능이 저하된다. 본 연구에서는 플러딩 현상을 막기 위해 마이크로채널 GDL 을 제안하였다. 기존 GDL 과 마이크로채널 GDL을 3차원으로 구현하여 공기 속도, 물속도, 접촉각의 변화에 따른 물의 이송을 연구하였다. 전산해석 결과를 통해 마이크로채널 GDL에서는 낮은 유동 저항으로 인해 물이 빠르게 제거되는 것으로 나타났다. 그러므로, 마이크로채널 GDL이 가스채널과 GDL 내부의 물 제거에 효율적임을 알 수 있다.

Abstract : The water management is one of the key issues in low operating temperature proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs). The gas diffusion layer (GDL) allows the reactant gases flow to the reaction sites of the catalyst layer (CL). At high current density, generated water forms droplets because the normal operating temperature is 60~80°C. If liquid water is not evacuated properly, the pores in the GDL will be blocked and the performance will be reduced severely. In this study, the microchannel GDL was proposed to solve the flooding problem. The liquid water transport through 3-D constructed conventional GDL and microchannel GDL was analyzed varying air velocity, water velocity, and contact angle. The simulation results showed that the liquid water was evacuated rapidly through the microchannel GDL because of the lower flow resistance. Therefore, the microchannel GDL was efficient to remove liquid water in the GDL and gas channels.

Keywords : Gas diffusion layer, Microchannel GDL, PEMFC, VOF simulation, Water transport

*E-mail: yongckim@korea.ac.kr

1. 서 론

현재 세계는 환경문제와 화석연료 고갈로 인해 대체에너지 기술에 관심이 높다. 특히 수소의 화학에너지를 바로 전기에너지로 변환하는 연료전지는 오염물질 배출이 거의 없고 효율이 높아 각광받고 있다. 특히 얇은 이온 전도성 고분자 막을 사용하는 고분자전해질 연료전지(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)는 작동온도가 낮고 부피를 줄일 수 있다는 장점 때문에 다양한 산업분야에서 응용되고 있다.¹⁾

저온 작동 고분자전해질 연료전지는 작동온도가 60~80°C이기 때문에 촉매층(catalyst layer, CL)에서 생성되는 물이 액체 상태로 응축된다. 가스확산층(gas diffusion layer, GDL)의 기공 구조를 통해 반응가스가 촉매층으로 흐르게 되는데, 고전류 영역에서 과도한 양의 물이 생성되어 GDL의 기공을 막으면 반응가스가 촉매층까지 흐르지 못해 연료전지 성능이 감소하는 플러딩(flooding) 현상이 발생한다. 고분자전해질 연료전지의 효율적인 운전을 위해서는 플러딩을 감소시키기 위한 적절한 물관리가 필수적이다.

기존의 GDL 구조를 개선해 플러딩을 해결하려는 연구가 진행되어 왔다. Wu 등은²⁾ 마이크로기공층(microporous layer, MPL) 코팅을 한 GDL을 기공 단위로 모델링 하여 MPL이 물 분포에 미치는 영향을 전산해석 하였고, Lee 등은³⁾ 유로가 가공된 GDL 모델 내부의 물 분포를 전산해석 하였다. Jiao 등은⁴⁾ 기존의 불규칙적인 구조가 아닌 일정한 모양의 기공이 정렬된 구조를 가지는 새로운 GDL 모델을 제안하였다. 전산해석을 통해 물과 공기의 흐름 패턴을 관찰하고 압력 강하와 물 배출 특성을 고찰하였다. Litster 등은⁵⁾ GDL 내부 가시화 실험을 통해 물 이송이 채널링과 핑거링(channeling and fingering) 메커니즘에 의한 것이라고 밝혔다. 최근에는 자유표면 추적 기법인 VOF(volume of fluid) 방법이 GDL과 가스 채널에서 물의 이동에 관한 연구에 많이 이용되고 있다. Hir t 등,⁶⁾ Ding 등과⁷⁾ Zhu 등은⁸⁾ VOF 방법을 통하여 연료전지 내부 GDL에서 물의 이송 변화를 관찰하였다.

그러나 이러한 노력에도 고분자전해질 연료전지의 플러딩 문제는 아직 명확히 해소되지 않았다. 특히 플러딩 해소를 위한 GDL 개선 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 마이크로채널을 가진 새로운 GDL을 제안하여 모세관 효과로 물의 배출을 유도해 플러딩을 감소시키는 것을 목적으로 하였다. 3차원(3D) 전산해석 모델로 마이크로채널이 없는 기존 GDL과 물 이송 현상을 비교, 분석하였다. 또한, 공기속도, 물 주입속도, 그리고 GDL의 접촉각이 물 이송 현상에 어떻게 영향을 미치는지 분석하였다.

2. 전산해석 모델

2.1. 전산해석 모델

본 연구에서는 기존 GDL과 마이크로채널 GDL 내부의 물 이송을 고찰하기 위해 GDL의 기공 구조를 모델링하여 전산해석 하였다. Fig. 1과 같이 마이크로채널 GDL은 물이 생성되는 공기극 촉매층과 맞닿는 면에 마이크로채널을 설계하였다. 대칭 형상이므로 마이크로채널의 절반, 그 주위를 둘러싼 GDL 환경, 그리고 공기극 채널 일부를 해석 범위로 설정했다. Fig. 2(a)는 모서리 길이가 10 μm 인 정육면체 모양의 단일 기공을 나타낸 것이다. 기공은 모서리 5 μm 의 정육면체 통로로 서로 연결되어 있으며 전체 길이 245 μm 의 3D 모델을 제작하였다. Fig. 2(c)와 (d)는 각각 기존 GDL과 마이크로채널 GDL을 나타낸 것이다. 각 모델의 단면은 62.5 \times 100 μm 이고 마이크로채널의 단면은 27.5 \times 55 μm 이다. GDL의 공극률은 70.4%이다. 공기는 Fig. 2(b)와 같이 모델 앞면에 15 μm 간격으로 정렬된 GDL기공의 통로와 상단의 공기채널로 주입되고, 촉매층에서 생성되는 물은 GDL 바닥면의

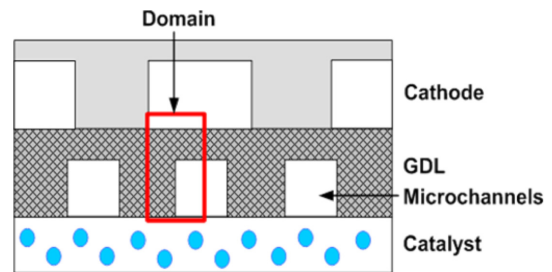


Fig. 1. Simulation domain of the microchannel GDL.

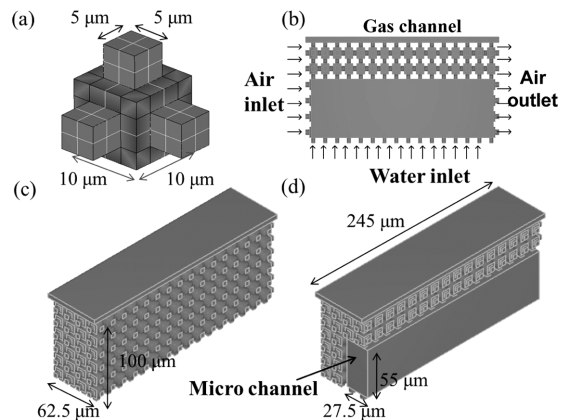


Fig. 2. Schematic of the computational model: (a) a single pore, (b) right view, (c) the conventional GDL and (d) the microchannel GDL.

GDL 기공 통로로 주입된다. 공기와 물은 Fig. 2(b)에서 공기의 출구 방향과 윗면의 공기극 채널을 출구로 설정하였다. 도메인 전체는 정렬 격자로 모델링 하였고, 기공 단면에는 16개의 격자가 존재한다. 기존 GDL은 44,288개, 마이크로채널 GDL은 56,128개의 셀로 구성되었다.

2.2. 전산해석 방법

본 해석에 사용된 VOF 방법은 혼합되지 않는 두 유체의 부피 비율을 계산하고, 유체 사이의 경계면을 추적하는 방법이다. 해석에 적용된 질량보존과 운동량 보존 법칙은 각각 식 (1), (2)와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = (-\nabla \cdot p + \nabla [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)]) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

위 식에서 \vec{v} 는 유체의 속도, p 는 정압력을 나타낸다. 표면장력 효과는 식 (2)의 \vec{F} 항에서 고려되며 다음과 같다.

$$\vec{F} = \sigma_{12} \frac{\rho \kappa_2 \alpha_2}{(1/2)(\rho_1 + \rho_2)} \quad (3)$$

위 식에서 σ 은 물과 공기 사이의 표면장력이다. κ 는 액체 표면의 곡률로써, 식 (4)와 같이 벽면의 접촉각 θ 로 정의된다.

$$\kappa_2 = \nabla \cdot (\vec{n} \cos \theta + \vec{t} \sin \theta) \quad (4)$$

단위전지에서 공급되는 공기의 양과 공기극 촉매층에서 생성되는 물의 양은 각각 식 (5), (6)과 같다.

$$\dot{m}_{Air} = \frac{1}{0.21} S_{Air} \frac{1}{4F} M_{O_2} \quad (5)$$

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{1}{2F} M_{H_2O} \quad (6)$$

공기의 화학양론비(stoichiometry)가 3이고 전류밀도가 1 A/cm²일 때, 공기 유량은 3.7 cm³/s이고 공기채널 안에서 속도는 9.0 m/s이다. 공기의 화학양론비가 2, 4, 5로 바뀔 때 따라 공기속도를 각각 6.0 m/s, 12.0 m/s, 15.0 m/s로 변화시켜 해석하였다. 같은 조건에서 전기화학반응을 통해 생성되는 물의 양은 3.36 g/h이다. 이에 따른 물 주입 속도는 1.2 m/s이다. 전류밀도가 0.33 A/cm², 0.66 A/cm², 1.33 A/cm²로 바뀔 때 따라 물 주입 속도를 각각 0.4 m/s, 0.8 m/s, 1.6 m/s로 변

Table 1. Properties of reactant gases

| Item | Air | Water |
|------------------------------|--------------------------|----------------------|
| Density (kg/m ³) | 1.1614 | 996 |
| Viscosity (kg/m·s) | 1.846 × 10 ⁻⁵ | 1 × 10 ⁻³ |
| Surface tension (N/m) | 0.0725 | |

Table 2. Simulation conditions

| Item | Values |
|-------------------------------|----------------------|
| Air velocity (m/s) | 6.0, 9.0, 12.0, 15.0 |
| Injected water velocity (m/s) | 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 |
| Contact angle (°) | 90, 120, 150, 180 |

화시켜 해석하였다. GDL 기공 표면의 접촉각은 90°, 120°, 150°, 180°로 변경하며 해석하였다. 해석에 적용된 공기와 물의 물성치는 Table 1, 해석조건은 Table 2에 나타내었다.

3. 결과 및 토의

3.1. 마이크로채널의 영향

Fig. 3은 기존 GDL(Fig. 3(a))과 마이크로채널 GDL(Fig. 3(b)) 내부의 물 유동 분포를 나타내고 있다. 기존 GDL에서는 물 주입 초기에 공기 입구에서 공기의 흐름에 의해 물이 수직 방향으로 이동하는 경향이 있다. 유동이 불안정해지지만 수직 방향 유동저항 때문에 크게 진동하지 않고 안정되며 시간이 지나면서 물 높이가 상승하고 특정 높이에 수렴하게 된다.

마이크로채널 GDL의 모델은 마이크로채널과 그 주위를 둘러싼 GDL 기공구조를 포함한다. 마이크로채널의 유동저항이 GDL 기공구조보다 작아서 물 유동 분포가 기존 GDL과 다르게 나타난다. 물 주입 초기에 기존 GDL에서와 같은 유동 이외에 GDL 기공 부분에 주입된 물이 마이크로채널과 연결된 기공의 통로로 그림에서 x축 방향으로 이동하게 된다. 따라서 초기에는 마이크로 채널 내부의 물 높이가 GDL 기공 구조보다 높다. 마이크로채널은 수직 방향 유동저항도 작아서 공기 흐름 방향으로 진동이 많이 생기고 유동이 불안정해진다. 초기에는 물 유량이 적어서 공기의 영향으로 유동이 쉽게 불안정해지지만 시간이 지나 주입된 물 유량이 증가하면 공기의 영향이 줄어들면서 진동이 감소하고 물 높이가 일정해진다. 유동이 안정된 이후에는 평균 물 높이가 기존 GDL에 비해 69% 높이를 유지하며 물이 배출되는 속도가 기존 GDL에 비해 빠르다.

GDL 출구에서의 시간에 따른 GDL 수직 방향 물

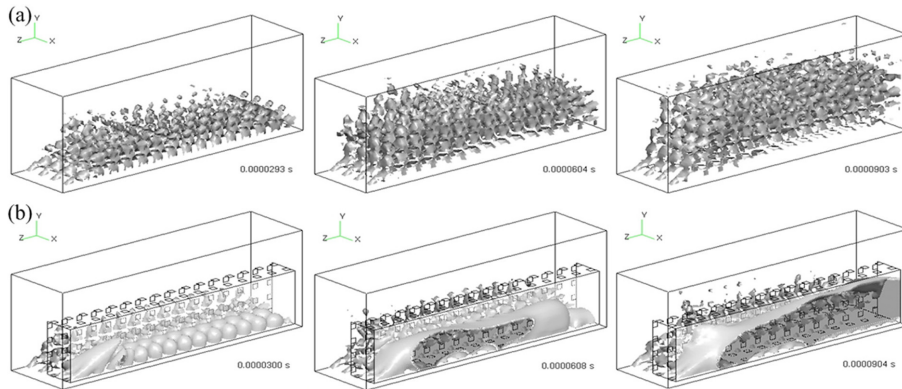


Fig. 3. The liquid water height of (a) conventional GDL and (b) microchannel GDL according to time.

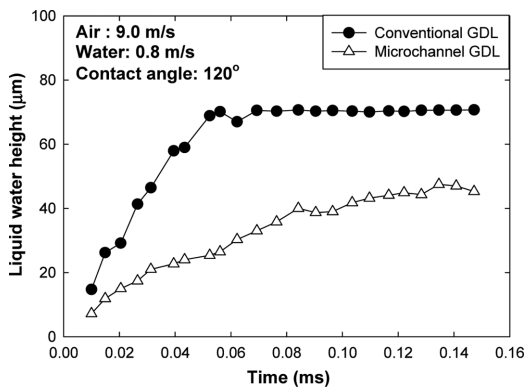


Fig. 4. The liquid water height of the conventional GDL and the microchannel GDL according to time.

높이를 Fig. 4에 나타내었다. 기존 GDL은 시간이 지남에 따라 물 높이가 증가해서 시간이 0.06 ms일 때 물 높이가 70 μm 가 되며 그 높이를 계속 유지하게 된다. 마이크로채널 GDL은 물 높이가 상승하는 속도가 기존 GDL에 비해 느리며 시간이 0.09 ms일 때 48 μm 로 더 낮은 높이를 유지하게 된다. 기존 GDL은 기공 구조가 물을 수월하게 배출시키지 못해 물이 수평 방향보다 수직 방향으로 빠르게 차오른다. 그러나 마이크로채널 GDL은 낮은 유동저항 때문에 마이크로채널을 통해 물 배출 속도가 빠르며 수직 방향으로 물이 차오르는 속도가 느리다.

Fig. 5는 GDL 출구에서의 시간에 따른 물 배출 속도를 나타낸다. 물이 배출되는 기공 단면의 모든 격자에서의 물 속도의 평균값을 물 배출 속도로 정의하였다. 기존 GDL에서 물 배출 속도가 평균 0.06 m/s로 시간이 지남에 따라 크게 변하지 않는다. 반면, 마이크로채널 GDL에서는 시간이 지남에 따라 물 배출 속도가 0.31 m/s까지 증가해 기존 GDL보다 5.2배 빠

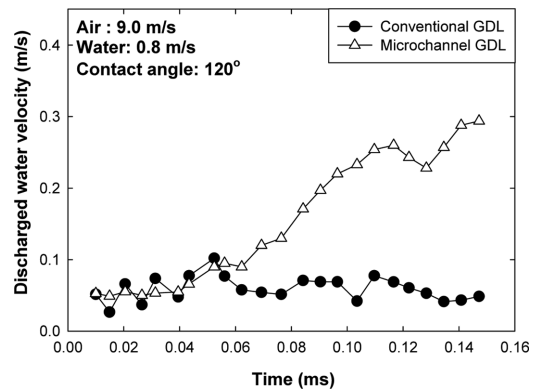


Fig. 5. The discharged water velocity according to time.

르다. 물 배출 속도는 시간이 0.06 ms에서부터 증가 폭이 커지는데, 이는 마이크로채널 내부의 물 높이가 최대가 되면서 마이크로채널 내부의 압력이 증가하여 물 배출이 급격히 증가했기 때문으로 보인다. 물 배출 속도가 빠르면 마이크로채널 GDL 내부에 빈 기공이 더 많아지고, 따라서 물 제거에 더 효과적이다.

3.2. 공기속도의 영향

연료전지로 유입되는 반응 가스의 유량은 실제 전기화학 반응으로 소비되는 양보다 많아야 한다. 공기의 유량이 많으면 가스 채널과 GDL에서의 물 제거에 용이하며 반응 가스 농도가 높게 유지되어 연료전지 성능이 향상된다. 본 연구에서는 공기의 화학양론비가 2, 3, 4, 5로 증가함에 따라 공기 속도를 6.0 m/s, 9.0 m/s, 12.0 m/s, 15.0 m/s로 설정하였다.

Fig. 6은 공기 속도에 따른 GDL 출구에서의 수직 방향 물 높이의 최대값을 나타내었다. 기존 GDL과 마이크로채널 GDL 모두 공기 유량의 증가에 따라 물 높이가 감소하였다. 공기의 양이 늘어남에 따라 물 제

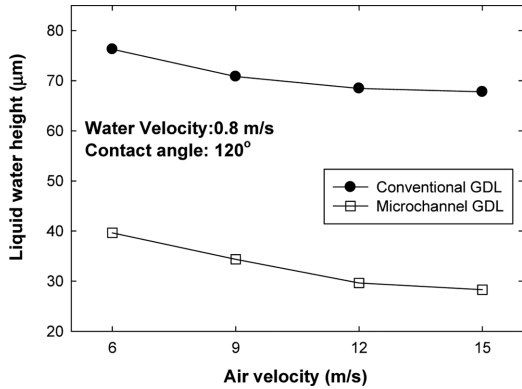


Fig. 6. The liquid water height of the conventional GDL and the microchannel GDL according to air velocity.

거량이 증가하기 때문이다. 기존 GDL에서 물 높이의 변화가 더 작게 나타났으며 이는 기공의 유동저항이 크기 때문에 공기 속도의 증가가 물 배출 높이에 대한 영향이 적기 때문으로 판단된다.

공기속도의 변화에 따른 GDL 내부에서의 물 분포를 관찰하기 위해 GDL 출구인 단면과 마이크로채널을 포함한 GDL 옆면 부분 단면에서 물의 면적비(water coverage ratio)를 측정하였다. Fig. 7은 공기속도에 따른 출구와 옆면에서의 물의 면적비 변화를 나타낸다. 옆면에서의 물의 면적비는 마이크로채널 GDL에서 더 크게 나타났으며 기존 GDL의 경우 물 면적비가 매우 낮았다. 이는 마이크로채널 GDL의 옆면에 포함된 마이크로채널이 다른 기공에 비해 물 면적비가 더 크기 때문이다. 마이크로채널 GDL 옆면에서는 공급 공기의 속도가 6.0 m/s에서 15.0 m/s로 커짐에 따라 물 제거량이 늘어나 물 면적비가 48% 감소하였다. 출구에서 물의 면적비는 기존GDL이 마이크로채널 GDL보다

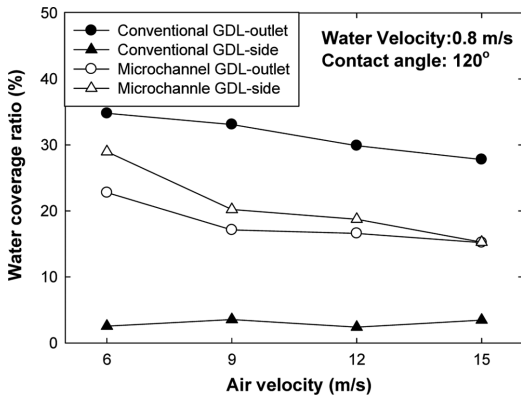


Fig. 7. The water coverage ratio of the conventional GDL and the microchannel GDL according to air velocity.

더 크게 나타났으며 이는 물 높이에서의 결과와 같다.

3.3. 물 주입 속도의 영향

전기화학반응을 통해 생성되는 물의 양은 작동 전류밀도에 따라 달라진다. 고전류 영역에서는 과도한 양의 물이 생성되어 플러딩이 발생한다. 본 연구에서는 작동 전류밀도가 0.33 A/cm², 0.66 A/cm², 1.0 A/cm², 1.33 A/cm²로 증가함에 따라 물 주입 속도를 0.4 m/s, 0.8 m/s, 1.2 m/s, 1.6 m/s로 변경하며 해석하였다.

Fig. 8은 물 주입 속도에 따른 출구에서의 물 높이 변화를 나타내고 있다. 기존 GDL은 물 주입속도가 0.4 m/s에서 1.6 m/s로 증가함에 따라 물 높이가 계속 증가하게 된다. 물 주입 속도가 작은 조건에서는 주입되는 물의 유량이 작아 공급 공기에 의해 물 제거가 잘 되기 때문에 출구에서 물 높이가 낮게 형성된다. 마이크로채널 GDL은 물 주입속도가 증가함에 따라 출구의 물 높이가 증가하다가 물 주입 속도가 1.2 m/s가

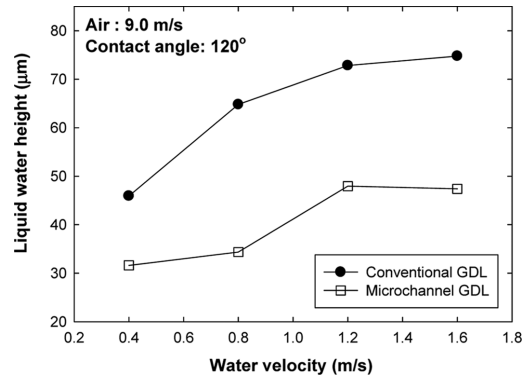


Fig. 8. The liquid water height of the conventional GDL and the microchannel GDL according to injected water velocity.

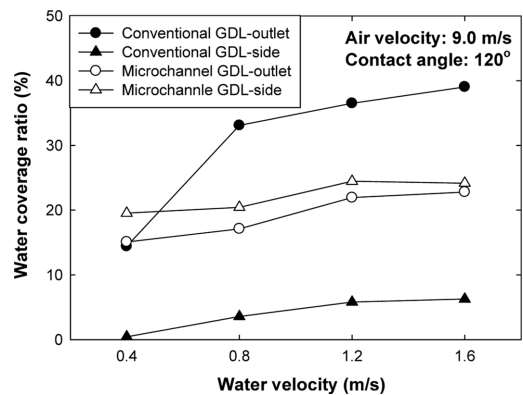


Fig. 9. The water coverage ratio of the conventional GDL and the microchannel GDL according to water velocity.

되면 물 높이가 증가하지 않는다. 이는 물 주입속도가 일정 속도 이상이 되면 물 배출 시 수직 방향으로 차오르는 높이가 더 증가하지 않고 출구방향으로 물이 제거되는 양이 늘어나기 때문이다.

Fig. 9는 물 주입 속도에 따른 GDL 출구와 옆면에서의 물의 면적비 변화를 나타낸다. 3.2절에서의 결과와 마찬가지로 출구에서는 기존 GDL의 물 면적비가 더 높았고 옆면에서는 마이크로채널 GDL의 물 면적비가 더 높았다. 기존 GDL의 경우 물 주입속도가 증가함에 따라 출구에서의 물 면적비의 증가가 컸는데 이는 기존 GDL이 마이크로채널 GDL에 비해 내부저항이 크기 때문에 수직 방향으로의 물의 이동이 많기 때문이다. 반면, 마이크로채널 GDL의 경우 마이크로채널에서의 내부저항이 작아서 상대적으로 물 주입속도에 따른 영향도가 작게 나타났다.

3.4. 접촉각의 영향

GDL의 발수도는 PTFE(polytetrafluoroethylene) 함량을 통해서 조절할 수 있다. GDL의 발수 표면은 연료전지 내부의 물 이송에 영향을 미치지만 그 현상이 아직 정확히 밝혀지지 않았다. 본 연구에서는 기공의 표면 접촉각을 90°, 120°, 150°, 180°로 변경시키며 접촉각이 GDL 내부의 물 이송에 미치는 영향에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 10은 접촉각에 따른 물 높이의 변화를 나타낸다. 기존 GDL에서는 접촉각이 증가함에 따라 물 높이가 증가하는 경향을 보인다. 이는 접촉각이 증가할수록 물의 유동저항이 증가하여 수직 방향으로 물의 높이가 증가하는 경향을 보이기 때문이다.⁹⁾ 마이크로채널 GDL에서도 기존 GDL과 마찬가지로 접촉각이 증가함에 따라 GDL 내부의 물 높이가 증가하며 기존 GDL에 비해 증가하는 폭이 더 크게 나타났다. 이는

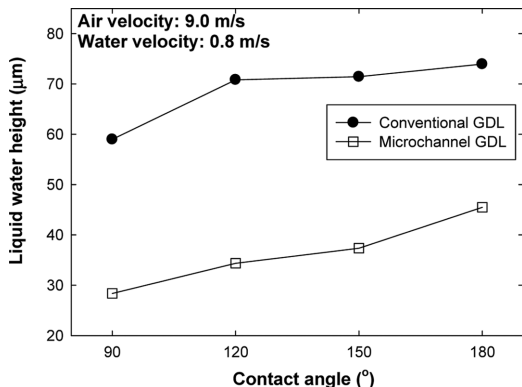


Fig. 10. The liquid water height of the conventional GDL and the microchannel GDL according to contact angle.

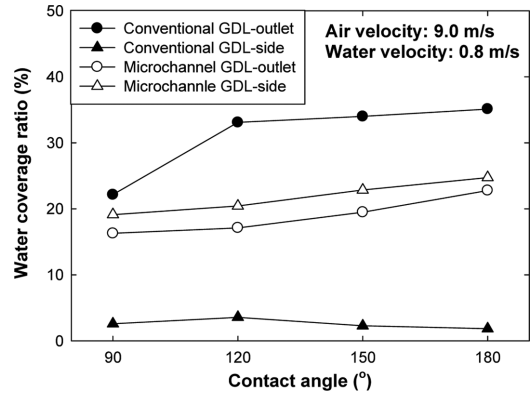


Fig. 11. The water coverage ratio of the conventional GDL and the microchannel GDL according to contact angle.

발수성인 접촉각 180°가 될 때 주입된 물이 마이크로채널 내부에서 큰 액적을 형성하게 되고 수직방향 단면적이 커지면서 물 배출을 방해하기 때문이다. 반면 접촉각이 친수성인 90°일 때, 주입된 물이 액적을 형성하지 않고 표면에 넓게 퍼진다. 물 유동은 안정되고 물 높이가 상대적으로 낮게 형성된다.

Fig. 11은 접촉각에 따른 출구와 옆면에서의 물 면적비의 변화를 나타낸다. 기존 GDL에서 접촉각이 증가함에 따라 출구에서의 물 면적비가 증가하였으며 특히 90°에서 120°로 변화함에 따라 물 면적비가 크게 증가하였다. 마이크로채널 GDL에서의 기존 GDL과 마찬가지로 접촉각이 증가함에 따라 물 면적비가 증가한다.

4. 결 론

본 연구에서는 VOF 해석을 통해 시간에 따른 GDL에서의 물 이송 메커니즘에 대해 관찰하였다. 또한 물 이송을 향상하기 위해 마이크로채널 GDL을 제안하여 물 이송 특성을 기존 GDL과 비교하여 분석하였다. 작동조건인 공기속도, 물 주입 속도, 그리고 GDL 기공 표면의 접촉각을 변화시키며 물 이송에 대한 영향을 관찰하였다.

마이크로채널 GDL 출구에서의 물 높이는 기존 GDL 보다 낮았다. 마이크로채널 GDL에서는 기존 GDL에 비해 상대적으로 유동저항이 작은 마이크로채널을 통해 물이 더 빨리 배출되기 때문이다. 마이크로채널 GDL에서 물 주입 초기에 작은 유동저항 때문에 기공구조에서 마이크로채널 쪽으로 물이 이동하고 진동으로 불안정한 유동이 발생한다. 시간이 흘러서 물 유량이 증가하면 유동이 안정되며 물 배출 속도가 기

존 GDL에 비해 5.2배 상승하며 출구에서의 물 높이는 기존 GDL의 69%를 유지하게 된다.

마이크로채널 GDL에서 공기속도에 따른 물 높이의 변화는 기존 GDL보다 크게 관찰되었으며 이는 기존 GDL의 유동저항이 더 크기 때문이다. 물 주입 속도가 작은 조건에서 물이 GDL의 수직 방향으로 차올라 유동이 쉽게 불안정해지는 경향을 보였다. 마이크로채널 GDL에서 물 주입속도가 1.2 m/s 조건 이상에서 물 높이가 더 증가하지 않았다. 물 주입 속도가 커짐에 따라 유동이 진동하지 않고 빨리 안정되고 유동이 안정됨에 따라 물 높이가 일정하게 유지되기 때문이다. 마이크로채널 GDL에서 접촉각이 증가함에 따라 물 높이는 증가하게 된다. 이는 접촉각이 커질수록 GDL의 발수 표면이 주입된 물을 밀어내 큰 액적을 형성하면서 물 이송을 방해하기 때문으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 중견연구자지원사업(No. 2009-0086642)과 2012년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20124010203250)입니다.

참고문헌

1. H. Kim and S. Na, *New Renewable Energy and Fuel Cell*, Haksul Intelligence, Seoul (2006).
2. R. Wu, X. Zhu, Q. Liao, H. Wang, Y. Ding, J. Li and D. Ye, 'A pore network study on water distribution in bi-layer gas diffusion media: Effects of inlet boundary condition and micro-porous layer properties', *J. Power Sources*, **35**, 9134 (2010).
3. K. Lee, J. H. Kang, J. H. Nam and C. Kim, 'Steady liquid water saturation distribution in hydrophobic gas-diffusion layers with engineered pore paths: An invasion-percolation pore-network analysis', *J. Power Sources*, **195**, 3508 (2010).
4. K. Jiao and B. Zhou, 'Innovative gas diffusion layers and their water removal characteristics in PEM fuel cell cathode', *J. Power Sources*, **169**, 296 (2007).
5. S. Litster, D. Sinton and N. Djilali, 'Ex situ visualization of liquid water transport in PEM fuel cell gas diffusion layers', *J. Power Sources*, **154**, 95 (2006).
6. C. W. Hirt and B. D. Nichols, 'Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries', *J. Computational Physics*, **39**, 201 (1981).
7. Y. Ding, H. T. Bi and D. P. Wilkinson, 'Three-dimensional numerical simulation of water droplet emerging from a gas diffusion layer surface in micro-channels', *J. Power Sources*, **195**, 7278 (2010).
8. X. Zhu, P. C. Sui, and N. Djilali, 'Numerical investigation of water droplet dynamics in a low-temperature fuel cell microchannel: Effect of channel geometry', *J. Power Sources*, **195**, 801 (2010).
9. Y. L. He, Z. Miao, T. S. Zhao and W. W. Yang, 'Numerical study of the effect of the GDL structure on water crossover in a direct methanol fuel cell', *Int. J. Hydrogen Energy*, **37**, 4422 (2012).