

<학술논문>

DOI:10.3795/KSME-B.2009.33.2.85

고분자 전해질 연료전지 유로의 수분배출 특성의 실험 및 해석적 평가

김현일* · 남진현** · 신동훈** · 정태용† · 김영규***

(2008년 9월 1일 접수, 2008년 12월 19일 수정, 2009년 1월 19일 심사완료)

Experimental and Numerical Assessment of Liquid Water Exhaust Performance of Flow Channels in PEM Fuel Cells

Hyun-il Kim, Jin Hyun Nam, Donghoon Shin, Tae-Yong Chung and Young-Gyu Kim

Key Words : Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell(고분자 전해질 연료전지), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Flow Channel(유로), Two-Phase Flow(이상유동), Hydrophilic(친수성), Hydrophobic(소수성),

Abstract

Polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cells are a promising technology for short-term power generation required in residential and automobile applications. Proper management of water has been found to be essential for improving the performance and durability of PEM fuel cells. This study investigated the liquid water exhaust capabilities of various flow channels having different geometries and surface properties. Three-pass serpentine flow fields were prepared by patterning channels of 1 mm or 2 mm width onto hydrophilic Acrylic plates or hydrophobic Teflon plates, and the behaviors of liquid water in those flow channels were experimentally visualized. Computational fluid dynamics (CFD) simulations were also conducted to quantitatively assess the liquid water exhaust capabilities of flow channels for PEM fuel cells. Numerical results showed that hydrophobic flow channels have better liquid water exhaust capabilities than hydrophilic flow channels. Flow channels with curved corners showed less droplet stagnation than the channels with sharp corners. It was also found that a smaller width is desirable for hydrophobic flow channels while a larger width is desirable for hydrophilic ones. The above results were explained as being due to the different droplet morphologies in hydrophobic and hydrophilic channels.

1. 서 론

화석연료 사용에 의한 환경오염의 심화와 온실가스 부산물로 인한 기후변화의 문제가 전세계적으로 관심의 대상이 되고 있다. 또한 미래의 화석연료 고갈에 대비하기 위하여 대체에너지에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 전문가들은 친환경적이고 재생 가능한 수소를 기반으로 하는 수소경제 시대가 향후 도래할 것으로 전망하고 있다.

연료전지는 수소를 기반으로 하는 경제체제에서 가장 효율적이고 친환경적인 동력발생 장치이다. 연료전지는 수소와 산소의 직접 전기화학 반응을 통해 전기를 생산하며, 부산물로 열과 물을 배출한다. 특히, 고분자 전해질(PEM) 연료전지는 가정용이나 차량용 동력원으로서 현재 상용화에 가장 근접한 연료전지 기술이다.^(1~3)

PEM 연료전지는 여러 개의 단위전지를 적층한 스택구조로 만들어지며 적층 개수를 달리하여 다양한 용량으로 제작된다. 각각의 단위전지는 전기화학 반응이 일어나는 전극막접합체(MEA), 기체 확산을 돕는 확산층(GDL), 연료와 산화제의 분배 및 전류 수집을 담당하는 분리판으로 구성된다. 일반적으로 PEM 연료전지의 운전시 연료와 산화제의 가습조건은 매우 중요한 인자이다. 가습량이 충분하지 못한 상태로 운전되는 경우 전극막접합

† 책임저자, 회원, 국민대학교 기계자동차공학부
E-mail : tychung@kookmin.ac.kr
TEL : (02)910-4674 FAX : (02)910-4839

* 국민대학교 대학원 기계공학과

** 국민대학교 기계자동차공학부

*** 한국가스안전공사 가스안전연구원

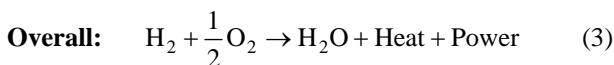
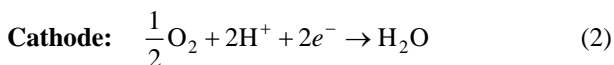
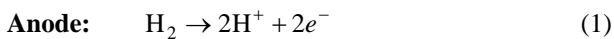
체가 건조(dry-out)해지면서 수소이온 전도도가 낮아져 연료전지의 성능이 저하된다. 따라서 PEM 연료전지는 많은 경우 높은 수준의 수소이온 전도도를 얻도록 연료와 산화제를 완전 가습한 상태로 공급하여 운전한다.

그러나 PEM 연료전지의 운전시 공기극에서는 전기화학 반응에 의하여 지속적으로 수분이 생성된다. 이렇게 생성된 수분이 적절하게 배출되지 못하면 확산층에서 기체의 확산을 간섭하거나 유로에서 유동을 방해함으로써 연료전지의 성능을 저하(flooding)시킨다. 따라서 PEM 연료전지에서 수분 관리는 열관리와 더불어 연료전지의 효율 및 내구성을 향상시키는데 매우 중요한 인자이다. 게다가 실외에 설치되어 운전되는 PEM 연료전지의 경우 잔류 수분에 의한 동파를 방지하기 위해서도 유로를 통한 수분의 원활한 배출이 매우 중요하다.

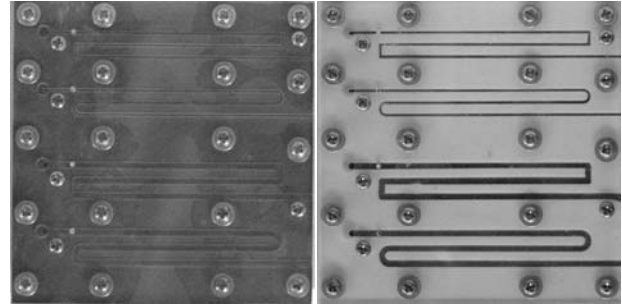
본 연구에서는 가시화 실험을 통하여 다양한 표면과 형상을 가진 유로의 수분배출 거동을 관찰하였다. 또한, 전산해석을 통하여 가시화 실험과 유사한 유로 내에서의 이상유동(Two-phase flow)을 해석하였으며, 이를 통해 유로의 수분배출 능력에 대한 정량적인 평가를 수행하였다. 본 연구의 결과는 수분을 원활하게 배출시키고 수분 잔류량을 최소화하는 유로를 설계하는데 활용되어 PEM 연료전지의 효율 향상 및 동파에 의한 스택 파손의 방지에 기여할 것이다.

2. 실험

식 (1)과 (2)는 PEM 연료전지의 연료극(anode) 및 공기극(cathode)에서의 전기화학 반응식이다. 연료극에서 환원 반응에 의해 수소가 수소이온과 전자로 분리되며, 이 수소이온은 고분자 전해질막을 통해 공기극으로 이동한다. 공기극에서는 수소이온과 산소 및 외부 회로를 통해 전달된 전자와 반응하여 수분이 생성된다. 따라서, 식 (3)에서와 같이 PEM 연료전지의 전체 반응은 수소와 산소가 전기화학 반응에 의해 전기를 생산하고 또한 열과 수분을 부산물로 생성하게 된다.



본 연구에서는 PEM 연료전지 내에서 생성된 수분이 유로를 통해 배출되는 거동을 파악하기 위하여 일반적으로 사용되는 사형(serpentine) 유로를



(a) Acrylic flow channel (b) Teflon flow channel

Fig. 1 Three-pass serpentine flow fields for two-phase flow visualization experiments

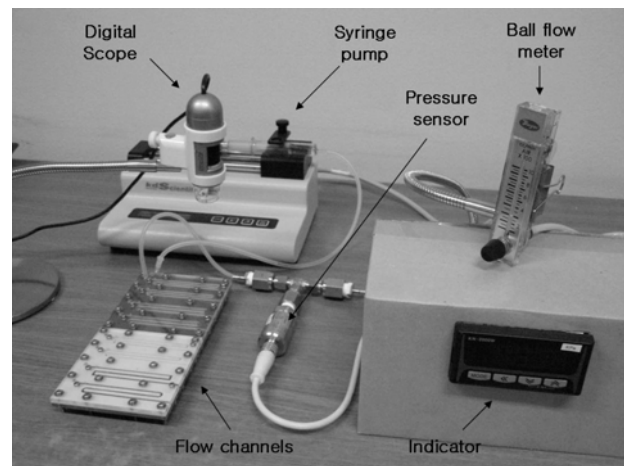


Fig. 2 Experimental equipment

구성하여 가시화 실험을 수행하였다. 실험에서 사용된 사형 유로가 Fig. 1에 제시되어 있다.

본 실험에서는 유로를 아크릴판 및 테프론판에 생성하여 유로의 표면특성이 수분의 거동에 미치는 영향을 파악하였다. Fig. 1(a)에서 보여진 아크릴은 접촉각이 약 81°인 친수성 표면이며, 반대로 Fig. 1(b)의 테프론은 약 106°의 접촉각을 가지는 소수성 표면이다. 또한 발수 처리된 탄소지(carbon paper)를 유로 바닥면에 위치시켜 실제 소수성 확산층(GDL)의 표면 효과를 고려하였다. 발수 처리된 탄소지의 경우 물의 겹보기 접촉각은 표면조도의 영향으로 약 130~150° 정도인 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

각각의 재질에 대해 유로 폭 (1 mm, 2 mm) 및 굴절 부분의 형상(직각, 곡선)이 서로 다른 4 개의 유로 형상을 제작하여 가시화 실험을 수행하였다. 실험에서 사용된 아크릴판과 테프론판은, 그 재질의 한계로 인해 표면이 완벽하게 매끄러운 상태로 제작되지는 못하였다. 그러나 이러한 문제점은 유로 내 수분 거동 특성을 파악하는데 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다.

유로를 포함하여 전체적인 가시화 실험장치의

구성을 Fig. 2 에 나타내었다. 실험은 압축기에서 가압된 공기를 유로를 통해 유동시키며 시작된다. 이 때 불유량계를 조절하여 유로를 통한 공기의 속도를 설정된 값(5 m/s, 10 m/s)으로 제어하였다. 공기의 속도가 안정화된 것을 확인한 후에 주사기 펌프(syringe pump)를 이용하여 수분을 유로 내로 정량(0.66 cc/min) 주입한다. 본 실험은 실제 반응셀을 사용하지 않았으며, 대신 100 cm² 면적에서 0.6 A/cm² 의 전류밀도에 해당하는 단위전지를 가정하여 주입되는 수분의 유량을 결정하였다.^(7,8) 또한, Fig. 2 에서는 수분의 거동을 관찰하기 위한 디지털현미경(AM313, Dino-digital)과 유로에서의 압력강하를 측정하는 디지털 압력계를 보여주고 있다.

3. 해석

본 연구에서는 유로의 표면 특성, 유동 속도, 유로의 폭 및 코너 부분의 형상이 PEM 연료전지 내의 수분 배출에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 CFD 전산해석을 수행하였다. 전산해석을 위한 기하학적 모델은 실험에서 고려한 사형 유로를 기본으로, 길이 30 mm 의 2 개의 채널이 U 자형 코너로 연결된 총 60 mm 의 유로로 설정하였다. 유동이 180°로 돌아나가는 U 자형 코너 부분의 이상유동이 복잡할 것으로 예상되므로 이 부분에서 수분의 거동을 집중적으로 관찰하였다. 유로의 높이를 1 mm 로 고정하였으며 유로의 폭은 가시화 실험과 동일하게 1 mm 와 2 mm 의 2 가지로 설정하였다. 또한 코너 부분의 형상을 직각과 완만한 곡선의 2 가지 형태로 변화시켜 수분의 영향을 평가하였으며, 친수성과 소수성의 표면 변화는 해석상에서 접촉각(contact angle)을 다르게 하여 고려하였다.

유로를 흐르는 공기와 수분, 즉 기상/액상의 이상유동은 Navier-Stokes 방정식에 volume of fluid(VOF) 방법을 적용하여 해석하였다. Hirt 와 Nichols⁽⁹⁾에 의하여 제안된 VOF 방법에서는 검사 체적 내에 존재하는 서로 섞이지 않는 유체의 조성을 체적분율로 설명한다. 따라서 VOF 방법에서의 연속방정식은 아래와 같이 대류방정식의 형태로 정리된다.⁽¹⁰⁾

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q) \right] = 0 \quad (4)$$

여기서 α_q 와 ρ_q 및 v_q 는 각각 q 유체의 체적분율, 밀도 및 속도를 의미한다. 표면을 통한 체적분율의 정확한 전달량의 계산을 위해 형상 재구성(geometric reconstruction) 기법이 고정격자계(Eulerian mesh)에 적용되어 계면을 추적하는데 사용된다.

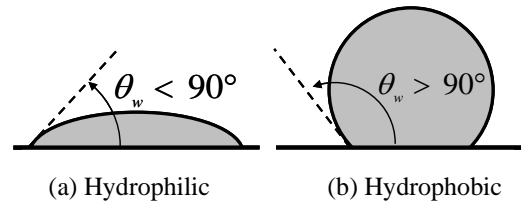


Fig. 3 Morphology of liquid water droplets on top of (a) hydrophilic and (b) hydrophobic surfaces

VOF 방법에서는 속도장의 해석 결과를 각각의 유체가 서로 공유하므로 운동량 방정식은 다음과 같이 ρ , μ 등의 혼합유체의 물성에 관한 식으로 표현된다.⁽¹¹⁾

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \bar{v}) + \nabla \cdot (\rho \bar{v} \bar{v}) = -\nabla \rho + \nabla \cdot [\mu (\nabla \bar{v} + \nabla \bar{v}^T)] + \rho \bar{g} + \bar{F}_s \quad (5)$$

여기서 \bar{F}_s 는 각 유체 사이의 계면에서의 표면장력(surface tension) 및 유체와 고체벽면 사이에서의 접촉각을 고려한 부착력(adhesion force)의 표면력을 나타낸다. VOF 방법에서는 일반적으로 체적분율의 공간적 구배에 따라 표면장력의 효과를 나타내는 연속체 힘 접근법(continuum force approach)에 의하여 표면력을 고려한다.⁽¹²⁾

서로 섞이지 않는 두 유체가 고체벽면에 접하여 이루는 각을 접촉각이라 한다. 어떤 표면에서 액상의 물이 Fig. 3(a)처럼 90° 이하의 접촉각을 가질 때 이를 친수성(hydrophilic)이라 하며, 반대로 Fig. 3(b)처럼 90° 이상일 때를 소수성(hydrophobic)이라 한다. 이러한 표면 특성은 미세 유로 내 물이 거동할 때 물방울의 형상을 변화시켜 유동 특성에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 연구에서는 VOF 방법과 함께 표면장력과 접촉각에 의한 부착력을 고려하여 해석을 수행하였다.^(13,14)

본 연구에서는 상용 CFD 코드인 FLUENT 6.2 를 사용하여 전산해석을 수행하였다. 유로에서 액상의 물과 기상의 공기에 의한 이상유동 특성을 파악하기 위해 VOF 방법을 적용하였으며, 형상 재구성(geometric reconstruction) 기법을 설정하여 격자 경계를 통한 보다 정확한 유량 해석을 수행하도록 하였다. 공기의 유입 속도는 일반적인 PEM 연료전지의 운전조건에 해당하는 5 m/s 와 10 m/s 로 선정하였다. 물의 표면장력은 상온을 기준으로 0.07 N/m 로 설정하였으며, 접촉각은 친수성 유로 표면에서 30°로 소수성 유로 표면에서 150°로, 확산층에 해당하는 바닥면은 150°로 설정하여 접촉각의 영향을 더 명확하게 확인하고자 하였다.⁽¹⁵⁻¹⁸⁾

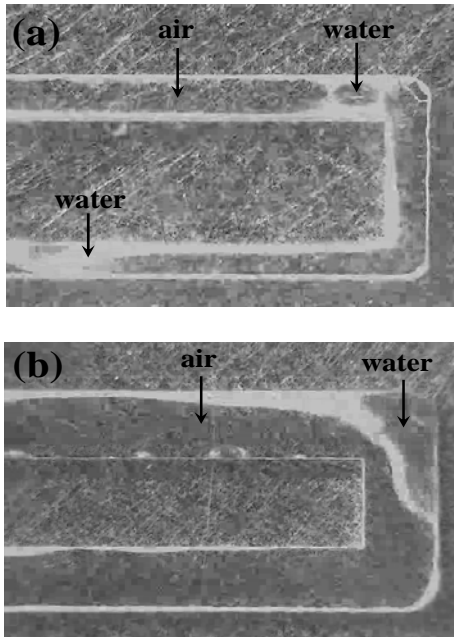


Fig. 4 Visualization of water/air two-phase flow in acrylic channels: (a) 1 mm and (b) 2 mm width.

4. 실험 결과

PEM 연료전지 유로로 사용되는 흑연계 분리판의 접촉각은 90° 정도이다. 본 연구에서는 친수성과 소수성 표면이 수분 배출에 미치는 영향을 파악하기 위해 아크릴과 테프론을 선정하여 모델 유로를 제작하였다. 여러 조건에 따른 수분 거동 특성을 파악하기 위해 유로의 폭, 코너 형상 그리고 공기의 유입 속도에 변화를 주어 실험하였다. Fig. 4는 아크릴로 제작된 유로로서 표면에서 물의 접촉각은 약 81° 로 친수성 특성을 가진다. Fig. 4에서처럼 물은 유로의 벽면에 붙어 액막의 형태로 유동하는 경향이 관찰되었으며, 이는 친수성인 아크릴의 표면 특성 때문인 것으로 판단된다.

또한, 유로를 통한 이상유동은 매우 불규칙적이었으며, 특히 코너 부분에서는 물이 정체되고 다른 물방울과 합쳐진 후에 배출되는 현상이 관찰되었다. 폭이 1 mm인 유로에서 물의 배출은 2 mm인 유로에 비해 원활한 것으로 관찰되었다. 이는 코너 부분에서의 정체되는 물의 양이 2 mm인 유로에서 현저히 많아지기 때문이다. Fig. 5에서 보여진 테프론 유로는 약 106° 의 접촉각인 소수성 특성을 가지며, 그 결과 물의 거동은 물방울의 형태로 부유하듯 유동하는 것이 관찰되었다. 테프론 유로를 통한 이상유동도 불규칙적이었지만, 코너 부분에서의 물의 정체는 Fig. 4의 아크릴 유로에서보다 상당히 적었으며 물의 유동 속도 또한 매우 빠른 것으로 관찰되었다.

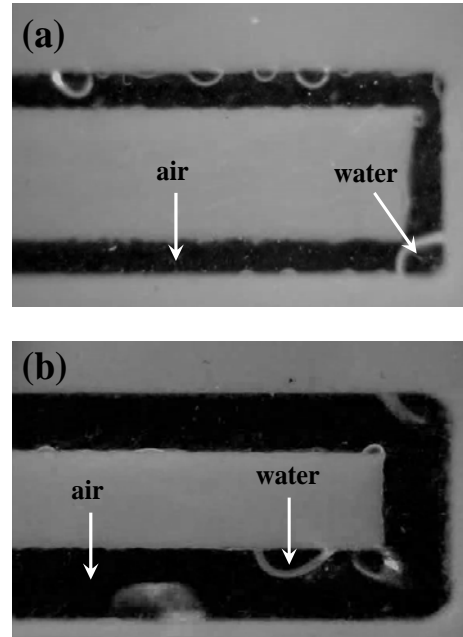


Fig. 5 Visualization of water/air two-phase flow in Teflon channels: (a) 1 mm and (b) 2 mm width.

5. 해석 결과

선행 연구⁽⁷⁾에서는 유로의 표면 특성에 따른 수분의 일반적인 거동을 전산해석으로 예측하는 연구를 수행한 바 있다. 본 연구에서는 이전의 연구를 확장하여 CFD 전산해석을 통해 다양한 설계 인자가 유로의 수분 배출 특성에 미치는 영향을 정성적, 정량적으로 평가하였다. 물이 지속적으로 주입되는 가시화 실험 조건과는 다르게, 전산해석에서는 입구에서 5 mm 및 15 mm 떨어진 지점에 체적 $0.512 \mu\text{l}$ 인 물방울 2개(전체 $1.024 \mu\text{l}$)가 처음부터 존재한다고 가정하였다.

5.1 정성적 평가

본 연구에서는 공기의 유입 속도를 5 m/s와 10 m/s로 변화시키며 전산해석을 수행하여, 공기 유속이 수분 배출에 미치는 영향을 확인하였다. 해석 결과, 공기의 유속이 10 m/s로 매우 빠른 경우에는 유로의 표면 특성 및 형상의 차이가 수분 배출에 미치는 영향이 적게 나타났다. 이러한 경향은 빠른 유속에 의해 물은 작은 방울로 깨어져 유로를 통해 원활히 움직이기 때문에 다른 효과들의 중요성이 상대적으로 줄어들기 때문이다. 반면에 유속이 5 m/s인 Fig. 6에서 Fig. 9까지의 결과에서는 비교적 느린 속도에 의해 유로의 형상과 표면에 따라 수분 배출 거동이 크게 달라지는 것을 확인할 수 있다.

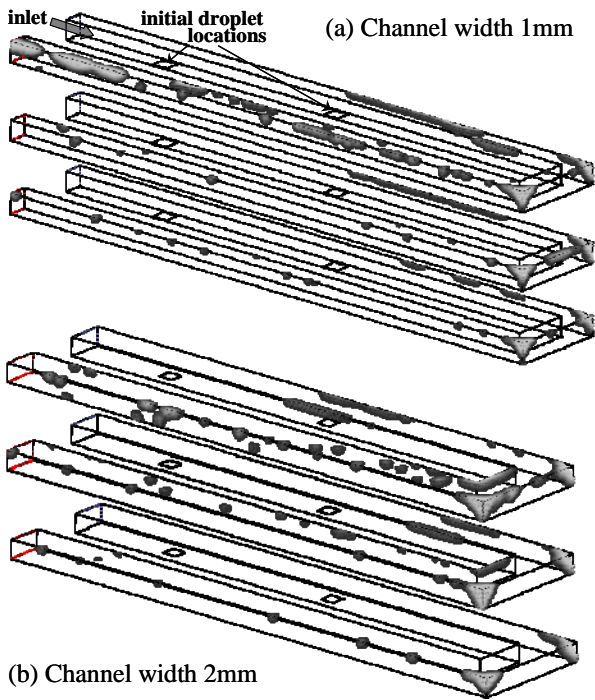


Fig. 6 Three consecutive snapshots of liquid water flow in hydrophilic channels with a sharp corner

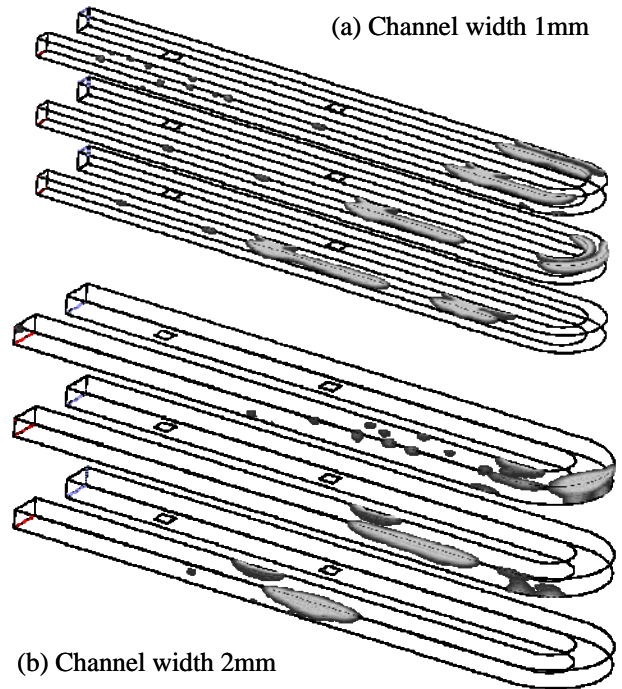


Fig. 8 Three consecutive snapshots of liquid water flow in hydrophilic channels with a curved corner

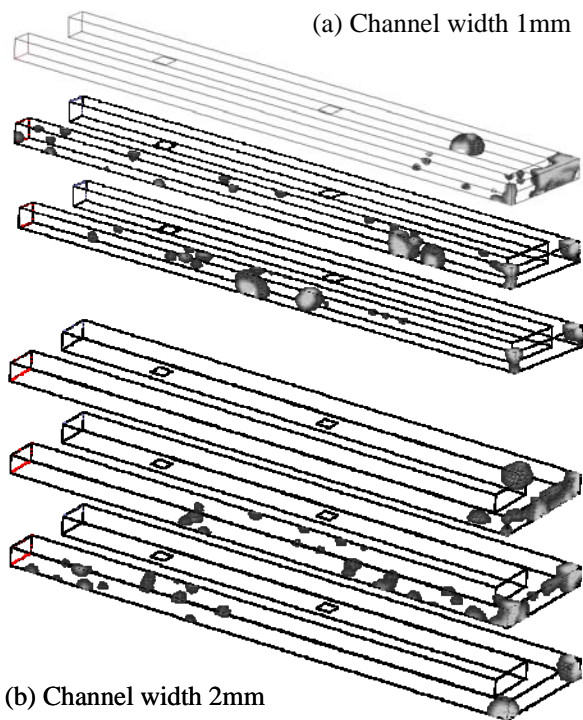


Fig. 7 Three consecutive snapshots of liquid water flow in hydrophobic channels with a sharp corner

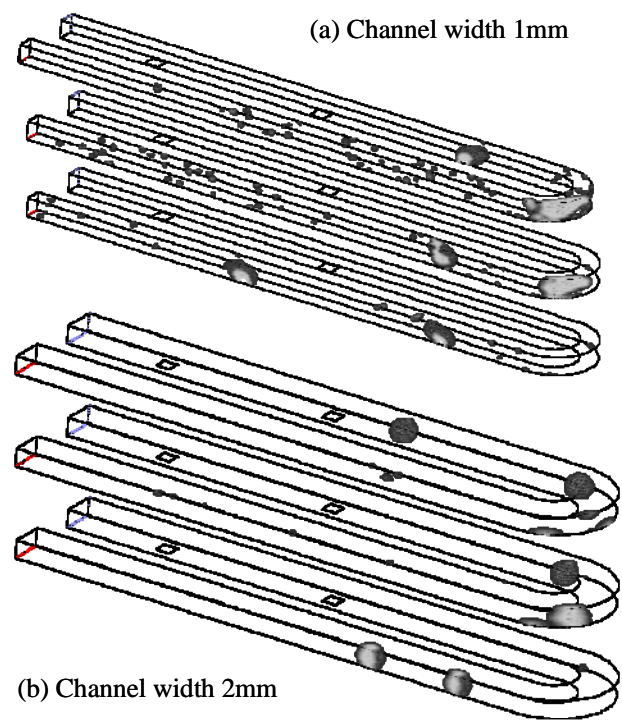


Fig. 9 Three consecutive snapshots of liquid water flow in hydrophobic channels with a curved corner

Fig. 6 과 Fig. 8 은 친수성 표면의 유로에 대한 해석 결과를 Fig. 7 과 Fig. 9 는 소수성 표면의 유로에 대한 해석 결과를 보여주고 있다. 가시화 실험에서 관찰된 경향과 유사하게, 친수성 표면에서 액막의 형태로 모서리에 붙어서 흐르고 소수성 표면에서는 물방울의 형태로 움직이는 수분의 거동이 전산해석의 결과에서도 확인되었다. 일반적으로 친수성 표면에 비해 소수성 표면의 유로에서 물방울의 이동 속도가 훨씬 빠르게 나타났다.

Fig. 6 과 Fig. 8 은 동일한 친수성 표면에서 코너 형상을 직각과 곡선으로 변화시켜 해석한 결과로, 수분의 배출이 직각 형상의 코너에 비해 곡선 형상의 코너에서 더 원활한 것을 확인할 수 있다. 유로의 형상이 완만하게 변화될수록 코너 부분에서의 공기의 재순환 영역이 작아지고 그 결과 코너에서 물의 정체량이 적어지는 것으로 판단된다. 반면에 직각 유로에서는 재순환 영역이 커지고 동시에 코너 부분에 정체된 물은 쉽게 배출되지 못한다.

Fig. 6 에서 Fig. 9 까지의 결과에서 (a)와 (b)는 유로의 폭을 각각 1 mm 와 2 mm 로 설정하여 해석한 결과이다. Fig. 6 과 Fig. 7 의 직각 형상의 코너에서의 결과를 살펴보면, 유로의 폭이 증가할수록 친수성 및 소수성 표면 모두에서 코너 부분에 정체되는 물의 양이 증가함을 확인할 수 있다. 반면에 Fig. 8 과 Fig. 9 에서는 유로 폭에 관계없이 코너 부분에서 물의 정체가 거의 나타나지 않는다. 따라서 유로 폭의 변화는 코너의 형상이 직각인 유로일 경우, 수분 배출에 있어서 중요한 인자로 작용할 것으로 판단된다.

Fig. 7(a)와 Fig. 9(a)를 제외한 전체적인 해석 결과에서, 곡선 유로에 비해 직각 유로에서 물방울이 잘게 부서지는 현상이 더 많이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 코너 형상이 완만한 곡선인 경우 물방울이 공기 유동에 의해 유로를 부드럽게 진행하는 반면, 직각 유로에서는 물방울이 코너 벽면에 강하게 충돌하여 부서지는 효과 때문인 것으로 판단된다.

5.2 정량적 평가

정성적인 평가를 통해 가시화 실험과 일치하는 수분의 거동 특성을 전산해석의 결과로서 얻었으며, 이로써 본 해석의 타당성을 확인할 수 있었다. Fig. 10 과 Fig. 11 은 유로 내 잔류하는 물방울의 체적비율의 시간에 따른 변화를 나타낸 그래프로, 전체 계산영역에서 VOF 값을 체적적분하여 얻어진 물의 양 V 를, 초기조건으로 설정한 물의 양 $V_0(1.024 \mu\text{l})$ 로 나누어 얻어진 값이다.

공기의 유입 속도가 5 m/s 인 경우에 대한 Fig. 10 을 살펴보면, 친수성 표면인 Fig. 10(a)에서는 배출시간은 비교적 오래 걸리지만, 정체량은 적게

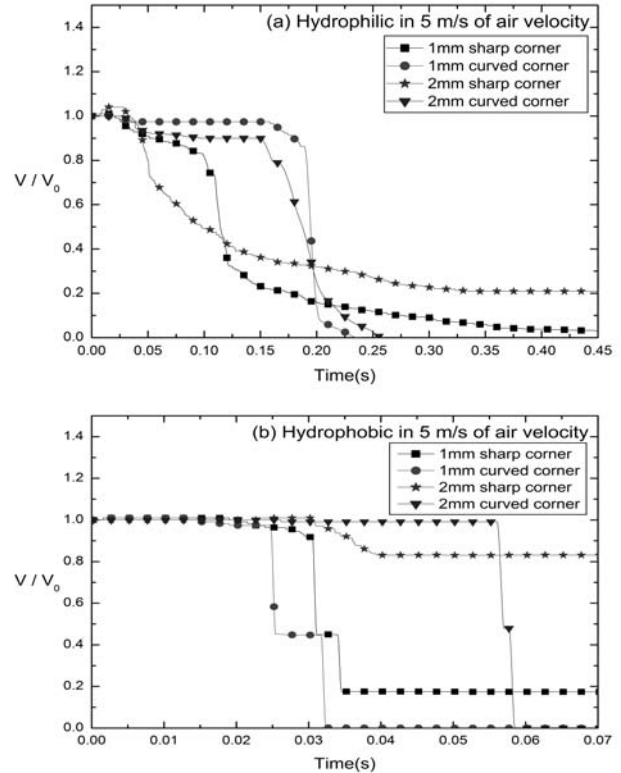


Fig. 10 Volume fraction of remaining liquid water in flow channels for 5 m/s air velocity

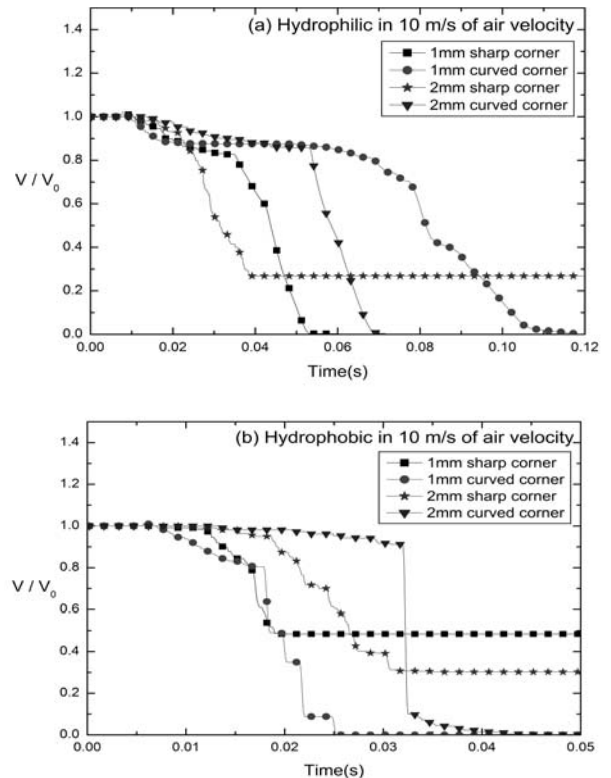


Fig. 11 Volume fraction of remaining liquid water in flow channels for 10 m/s air velocity

나타났다. 반면에 Fig. 10(b)의 소수성 표면에서는 배출시간은 매우 빨랐지만 직각의 코너 형상에서 정체량이 매우 크게 나타났다. Fig. 10(a)의 친수성 표면만을 비교하면 곡선 유로에서 수분의 정체량은 친수성 표면보다 큰 것으로 확인되었다.

Fig.10 과 Fig. 11 에서 곡선 유로의 경우 어떤 시점에서 수분 잔류량이 급격히 감소하는 현상이 관찰된다. 이는 물방울이 벽면에 충돌하여 잘게 부서지는 현상과 밀접하게 관련이 있는 것으로 판단된다. 완만한 곡선 유로 형상으로 인해 물방울이 작게 쪼개지는 현상이 줄어들고, 그 결과 물방울이 유로 밖으로 배출되는 순간 일시에 수분 잔류량이 감소한다. 반면에 직각 유로에서는 코너 부분의 급격한 유로 변화로 인해 물방울이 벽면에 강하게 충돌하여 부서지는 현상이 증가한다. 이렇게 잘게 쪼개진 물방울은 공기의 유동에 의해 빠르게 배출되어 잔류량은 지속적으로 감소하는 경향을 보인다.

공기의 유입 속도가 10 m/s 로 매우 빠른 경우인 Fig. 11 의 결과에서도 5 m/s 의 경우와 전반적으로 유사한 경향을 보이며 배출시간이 짧아지는 것으로 확인되었다. Fig. 11(a)와 Fig. 11(b)의 시간 축에서 알 수 있듯이 표면 특성의 영향이 수분 배출 시간에 미치는 영향이 5 m/s 인 경우에 비해 적게 나타났다. 이러한 결과는 공기 유속이 증가할수록 수분 배출 특성이 유로 형상이나 표면 특성에 크게 영향을 받지 않는다는 가시화 실험의 결과와 일치하는 것을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 PEM 연료전지의 수분 배출 특성에 영향을 미치는 인자로서 공기 유입 속도, 유로 형상 및 표면 특성의 효과를 가시화 실험 및 CFD 전산해석을 통해 평가하였다. 이러한 실험 및 해석적 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 유속이 10 m/s 정도로 충분히 빠른 경우 형상이나 표면 특성과 같은 인자들의 영향은 작아지는 것으로 나타났다. 그러나 유속이 5 m/s 인 경우 이러한 인자들에 의해 수분 배출 특성은 크게 영향을 받는다.

(2) 가시화 실험과 전산해석 모두에서 친수성 표면보다는 소수성 표면에서 수분의 배출이 원활한 것으로 나타났다. 따라서 분리판 표면은 소수성의 특성을 가지도록 제작, 가공하는 것이 유로에서의 수분 배출에 있어 유리하다.

(3) 공기 유속 5 m/s 및 10 m/s 모두에서 직각 형상의 유로에서는 코너 부분에서 수분의 정체가 빈번하게 발생하였으나, 곡선 형상에서는 적게 발

생하는 것을 실험 및 전산해석에서 확인하였다. 따라서 PEM 연료전지 내 잔류 수분량을 줄이기 위해서는 유로의 제작 시 급격한 코너 형상을 피하는 것이 바람직하다.

(4) 유로 폭이 1 mm 에서 2 mm 로 넓어진 경우 코너 부분에서 수분의 정체량이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 유로의 폭은 2 mm 보다 1 mm 가 수분배출에 있어서 유리하다.

이상으로 가시화 실험 및 전산해석을 통해 PEM 연료전지 유로 내의 수분 배출 특성에 영향을 미치는 다양한 인자들의 효과를 평가하였다. 본 연구의 결과는 향상된 수분 배출 성능을 갖춘 유로 및 분리판을 설계하고 제작하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 국민대학교 교내 연구 지원비와 산업자원부 신재생에너지기술개발사업의 일환(2006-N-HY12-P-01)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Barbir, F., 2005, PEM Fuel Cells Theory and Practice, Elsevier.
- (2) Larminie, J. and Dicks, A., 2003, Fuel Cell Systems Explained, 2nd ed., John Wiley & Sons.
- (3) Li, X., 2006, Principles of Fuel Cells, T&F Informa.
- (4) Kim, J. H., Kim, H. Y., Kang, B. H. and Lee, J. H., 2001, "A Study of Rivulet Flow on an Inclined Solid Surface," *Kor. J. Air-Cond. Refrig. Eng.*, Vol. 13(10), pp. 1042~1048.
- (5) Zhu, X., Sui, P. C. and Djilali, N., 2008, "Three-Dimensional Numerical Simulations of Water Droplet Dynamics in a PEMFC Gas Channel," *J. Power Sources*, Vol. 181(1), pp. 101~115.
- (6) Jiao, K. and Zhou, B., 2008, "Effects of Electrode Wettabilities on Liquid Water Behaviours in PEM Fuel Cell Cathode," *J. Power Sources*, Vol. 175(1), pp. 106~119.
- (7) O'Hayre, R., Cha, S. W., Colella, W. and Prinz, F. B. P., 2006, Fuel Cell Fundamentals, John Wiley & Sons, pp. 188-192.
- (8) Kim, H. I., Nam, J. H., Shin, D., Chung, T. Y. and Kim, Y. G., 2007, "CFD Analysis on Two-Phase Flow Behavior of Liquid Water in Cathode Channel of PEM Fuel Cell," *New & Renew. Energy*, Vol. 3(4), pp. 8~15.
- (9) Hirt, C. W. and Nichols, B. D., 1981, "Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," *J. Comput. Phys.*, Vol. 39, pp. 201~225.
- (10) Riley, N., 2006, The Navier-Stokes Equations: A Classification of Flows and Exact Solutions, Cambridge.

- (11) Cai, Y. H., Hu, J., Ma, H. P., Yi, B. L. and Zhang, H. M., 2006, "Effects of Hydrophilic/Hydrophobic Properties on the Water Behaviors in the Micro-Channels of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell," *J. Power Sources*, Vol. 161(2), pp. 843~848.
- (12) Ha, M. Y., Kim, C. H., Jung, Y. W. and Heo, S. G., 2006, "Two-Phase Flow Analysis in Multi-Channel," *J. Mech. Sci. Tech.*, Vol. 20(6), pp. 840~848.
- (13) Quan, P., Zhou, B., Sobisiak, A. and Liu, Z. S., 2005, "Water Behavior in Serpentine Micro-Channel for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Cathode," *J. Power Sources*, Vol. 152, pp. 131~145.
- (14) Kumbur, E. C., Sharp, K. V. and Mench, M. M., 2006, "Liquid Droplet Behavior and Instability in a Polymer Electrolyte Fuel Cell Flow Channel," *J. Power Source*, Vol. 161(1), pp. 333~345.
- (15) White, F. M., 2008, *Fluid Mechanics*, 6th ed., McGraw-Hill, pp. 31~33.
- (16) Liu, X., Guo, H., Ye, F. and Ma, C. F., 2008, "Flow Dynamic Characteristics in Flow Field of Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 33(3), pp. 1040~1051.
- (17) Tuber, K., Pocza, D. and Hebling, C., 2003, "Visualization of Water Buildup in the Cathode of a Transparent PEM Fuel Cell," *J. Power Sources*, Vol. 124(2), pp. 403~414.
- (18) Lim, C. and Wang, C. Y., 2004, "Effects of Hydrophobic Polymer Content in GDL on Power Performance of a PEM Fuel Cell," *Electrochim. Acta*, Vol. 49(24), pp. 4149~4156.