

# GDL을 고려한 고분자 전해질형 연료전지 모사 단위 유로 채널에서의 물방울 유동 특성에 대한 실험적인 고찰

김한상<sup>†</sup> · 지용휘 · 인지현 · 안지용  
서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

## Experimental Investigation of the Water Droplet Dynamics inside the Simulated PEMFC Single Flow Channel with GDL

HAN-SANG KIM<sup>†</sup>, YONG-WHI JI, JI-HYUN IN, JI-YONG AN

Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology,  
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

**Abstract** >> Polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) are regarded as a promising alternative to replace the existing automotive power sources. To get high performance and long-term durability for PEMFC systems, novel water management is essential. To this end, a comprehensive understanding of dynamics of the liquid water droplets within an operating PEMFC plays an important role. In this work, direct visualization of dynamic behaviors of the water droplet in the ex situ unit flow channel of a PEMFC including gas diffusion layer (GDL) is carried out as one of the fundamental studies for novel water management. Water droplet dynamics such as the movement and growth of liquid water droplets are mainly presented. Effects of GDL characteristics and inlet air flow rate on the water droplet transport and its removal from the flow channel are also discussed. The data obtained in this study can contribute to build up the fundamental operating strategy including balanced water removal capacity for automotive PEMFC systems.

**Key words** : Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자 전해질형 연료전지), Water management(물 관리), Water droplet(물방울), Flow channel(유로), GDL(기체 확산층)

### Nomenclature

$Bo$  : Bond number, dimensionless  
 $g$  : gravitational acceleration,  $m/s^2$   
 $h$  : characteristic length of system, m

### Greek letters

$\sigma$  : surface tension force between water and air,  $kg \cdot m/s^2$   
 $\rho$  : density of water droplet,  $kg/m^3$

## 1. 서 론

<sup>†</sup> Corresponding author : hskim1101@seoultech.ac.kr

[ 접수일 : 2013.2.4 수정일 : 2013.2.22 게재확정일 : 2013.2.28 ]

Copyright © 2013 KHNES

고분자 전해질형 연료전지(polymer electrolyte membrane fuel cell)는 타 연료전지 대비 다양한 장점(낮은

작동 온도, 높은 전류 및 출력 밀도, 짧은 시동 시간 등)들로 인해 자동차용 동력원으로 적합한 것으로 평가되어 상용화를 위한 많은 관심의 대상이 되고 있다.

하지만, 여러 장점들 중 하나인 낮은 작동 온도는 2상 유동과 관련된 복잡한 물 관리(water management) 문제를 야기한다. 이러한 고분자전해질형 연료전지의 물 관리는 연료전지 시스템 자체의 성능, 효율 나아가 내구성에도 큰 영향을 미치는 것으로 인식되어, 자동차용 연료전지의 상용화를 위해서는 필수적으로 극복되어야 할 문제로 대두되고 있다. 물 관리 연구의 기초는 연료전지 구성 요소들 내의 물 분포 및 이동 특성을 파악하는 것인데, 이는 물의 증발, 응축 등 2상 유동 현상과 밀접하게 연관되어 있어 복잡한 실험적 기법과 경험이 요구되는 것이 일반적이다<sup>1)</sup>.

특히, 2상 유동과 관련된 고분자전해질형 연료전지 연구의 경우 실제 작동 중인 연료전지에서 물 분포 데이터를 확보하는 것이 바람직하지만, 실험에 적용되는 기법의 내재적인 복잡성 및 기본적인 한계, 다양한 작동 조건에서 충분한 실험을 진행하기 힘든 점이 있다<sup>2-8)</sup>. 따라서, 보다 기본적이고 체계적인 연구의 진행을 위해 rig 상태 즉, ex-situ 상태에서 실험을 수행하여 물 관리 관련 기본 데이터를 확보하는 시도도 활발히 진행되고 있다<sup>9-16)</sup>.

최근 고분자전해질형 연료전지의 2상 유동 관련 물 관리 기본 연구 중 핵심적인 것으로 인식되어 활발한 연구가 진행되는 분야로 단일 유로 채널에서의 물방울 유동 특성 연구가 있다. 이 연구는 수치적인 접근 방법과 실험적인 접근 방법으로 다양한 연구 기관에서 연구가 진행되어 오고 있다<sup>9-16)</sup>. 특히, 실험적인 연구는 수치적인 해석 연구의 검증 및 채널 내 물 이동 특성을 보다 물리적으로 정확히 이해하는데 적합한 방법으로 인식되어 많은 관심이 집중되고 있는 분야이다. 이 중 고분자전해질형 연료전지의 기체 확산층(GDL)을 포함한 유로 채널에서의 실험적인 연구들 중 대표적인 연구로는 GDL 공극으로부터의 유로 채널 내로의 물방울의 형성에 대한 연구<sup>13)</sup>, 고분자전해질형 연료전지 마이크로(micro) 채널에서

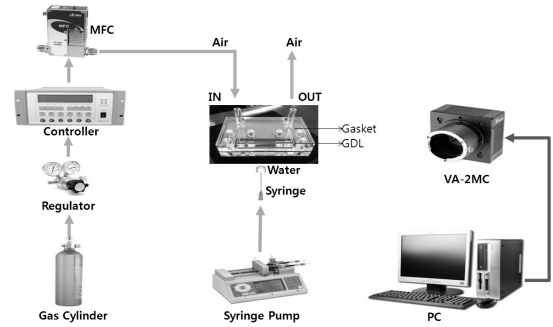


Fig. 1 Schematic diagram of the test apparatus for water droplet visualization

의 물방울의 진동 변형 현상에 대한 연구<sup>14)</sup>, 상용 GDL 표면에서의 미소 물방울의 접촉 직경의 pinning 연구<sup>15)</sup>, 미니(mini) 채널에서의 슬러그(slug) 형성과 물방울 축적 현상에 대한 실험 및 문헌 고찰 연구<sup>16)</sup>가 있다.

이들 연구들은 유로 채널의 단면 크기가 자동차용 연료전지에 적용되는 채널의 단면 크기와는 다른 것이 대부분이다. 따라서, 본 연구에서는 물 관리 ex-situ 기초 연구 중 하나로 자동차용 연료전지 스택을 구성하는 단위 연료전지의 단일 채널(단면 너비 및 높이 : 1-2mm)을 가시화가 가능하도록 아크릴로 제작하고 GDL을 포함한 연료전지의 작동을 모사한 작동 조건에서 유로 채널 내 물방울의 이동 및 변형 등 유동 현상을 카메라를 이용, 직접 가시화하였다.

이를 통하여 2가지 주요 작동 조건인 GDL 특성, 입구 공기 유량 변화에 따른 GDL 표면에 접해 있는 단일 유로 채널 내 물방울의 거동을 가시화하고 그 결과를 비교, 분석하였다.

## 2. 실험 장치

### 2.1 유로 채널 내 물방울 가시화용 실험 장치

Fig. 1에 단위 유로 채널 내 물방울 가시화 연구를 위해 적용된 실험 장치의 개략도를 나타내었다. 가시화를 가능하게 하기 위하여 특별히 설계, 제작된 유

로 채널을 적용하였다.

본 연구에서는 아크릴로 채널을 제작하였으며 사용된 모사 채널은 단일 유로 채널로 단면이 직사각형(너비: 1mm, 높이: 1.3mm, 너비: 2mm, 높이: 2mm)이고 길이는 43mm이다.

가스 실린더로부터 나오는 공기의 유량을 조절하며 유로 채널로 공급하기 위하여 질량 유량 조절기(MFC, mass flow controller)를 적용하였다. 공기는 불순물이 제거된 건조 공기 상태로 압력 조절기(pressure regulator)를 통하여 MFC로 공급된다. 본 연구에서는 가습된 공기가 물방울에 영향을 미치지 않게 하기 위해서 건조 공기를 사용하였다. 고분자전해질형 연료전지의 작동 모사를 위해서는 시린지(syringe) 펌프를 이용하였다. 시린지 펌프를 이용하여 단일 물방울이 단위 연료전지의 GDL 표면을 통해 유로 채널에 생성되도록 하였다.

GDL은 SGL사의 10BC, 35BC를 적용하여 실험을 진행하였다.

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 정적 접촉각(static contact angle)의 측정

GDL의 종류와 물방울 크기에 따른 정적 접촉각을 측정하기 위해 건조한 상태의 10BC, 35BC GDL 그리고 충분히 젖은 10BC, 35BC GDL에 시린지 펌프를 이용하여 각각 일정한 크기의 물방울을 올린 뒤, 물방울과 GDL 표면의 정적 접촉각을 측정하였다.

### 2.2.2 GDL 종류에 따른 물방울의 불안정성 분석

시린지 펌프를 이용해 단일 물방울을 유로 채널 내부에 생성하여 VM-2M 카메라로 유로 채널 내의 물방울 거동을 가시화하였다. 가시화된 물방울 이미지에서 물방울과 GDL 표면의 접촉각을 측정한 후 물방울의 불안정성을 비교, 분석하였다.

유로 채널 내에서 물방울의 효과적인 제거 측면에서 본 실험 결과를 고찰하기 위하여 물방울의 불안정성 측면에서 분석을 시도하였다. 물방울의 불안정

**Table 1** Detailed experimental conditions used for current study

Parameter	Value
Inlet air temperature (K)	298
Inlet air flow rate (lpm) (liter per minute)	0.2 - 3
Water flow rate ( $\mu$ l/s)	1 - 50
Outlet air pressure (bar)	ambient
GDL adopted	SGL10BC SGL35BC
Flow channel dimension (cross section (mm×mm))	1×1.3, 2×2

성은 전진 접촉각(advancing contact angle)과 후진 접촉각(receding contact angle)의 차이인 접촉각 히스테리시스(contact angle hysteresis)를 이용하여 나타내었다.

## 2.3 주요 실험 인자의 설정

고분자전해질형 연료전지의 단위 유로 채널 내 물방울의 성장, 변형, 이동에 영향을 미치는 인자는 매우 다양하다. 본 연구에서는 그 중 유로 채널 내 물방울 유동 특성에 실질적으로 가장 큰 영향을 미치는 인자 중 2가지 인자 (GDL 특성, 입구 공기 유량)를 선정하고 이에 대한 가시화 실험을 수행하였다.

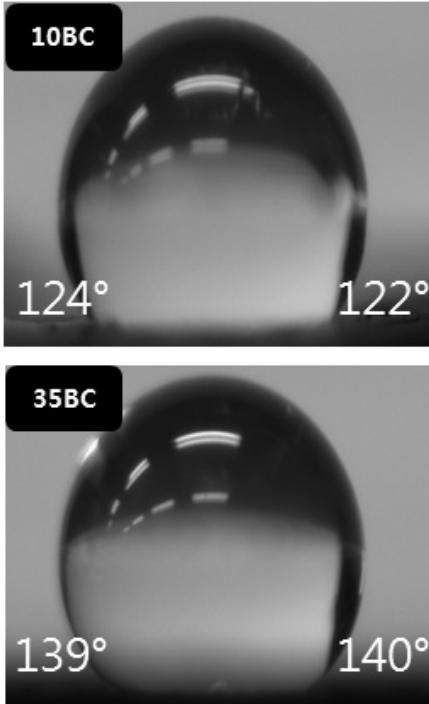
본 연구에 사용된 주요 실험 조건을 정리하여 Table 1에 나타내었다.

## 3. 결과 및 토론

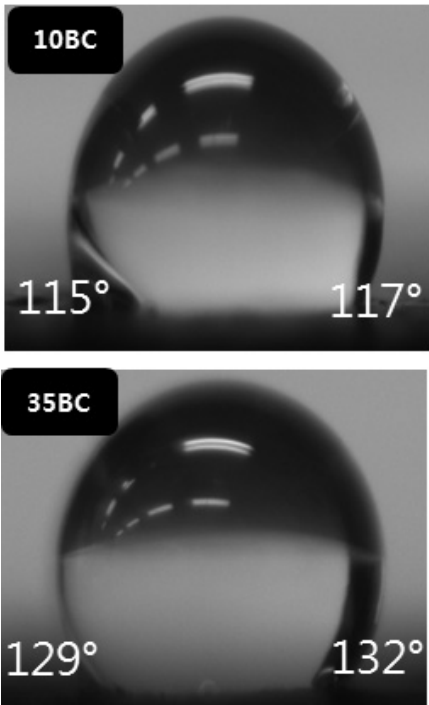
### 3.1 유로 채널 구성 요소들의 표면 젖음 특성 분석

유로 채널 내에서의 물방울 유동 특성을 효과적으로 분석, 파악하기 위해서는 채널 내에서 물방울이 이동하면서 접촉하는 각 표면의 젖음 특성에 대한 이해가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 각 표면의 젖음 특성을 평가하기 위해 일반적으로 연구에 많이 사용되는 정적 접촉각을 측정하여 비교, 분석하였다.

Fig. 2는 연구에 사용된 2가지 종류 (SGL 10BC,



(a) on dry GDL surface



(b) on wet GDL surface

Fig. 2 Measured contact angle of the adopted GDL surface under dry and wet surface conditions

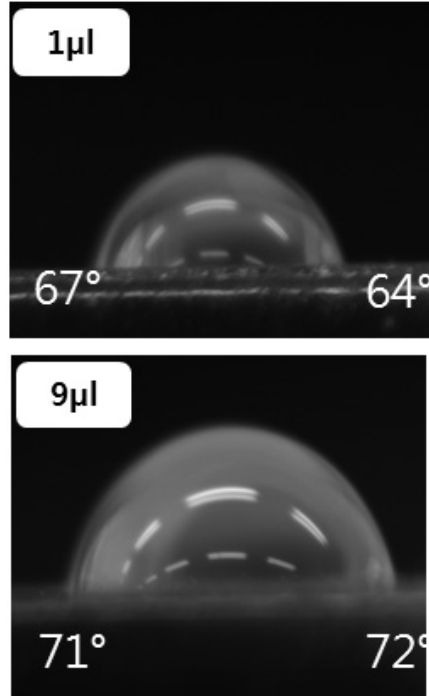


Fig. 3 Measured static contact angle of the acrylic surface for two different liquid water volumes

SGL 35BC)의 GDL의 표면 젖음 특성을 파악하기 위하여 정적 접촉각을 측정한 결과를 나타낸 것이다.

Fig. 2(a)의 경우와 같이 건조한 GDL 표면에서 물방울을 생성시켜 측정된 정적 접촉각은 10BC의 경우 122~124°이고, 35BC의 경우 139~140°로 소수성(hydrophobic) 특성을 나타냄을 알 수 있다. 반면, Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 충분히 젖은 GDL 표면의 경우 정적 접촉각은 10BC의 경우 115~117°, 35BC의 경우 129~132°로 나타난다.

이는 GDL 표면이 충분히 젖은 상태인 경우에는 표면에 존재하는 물의 영향으로 인해 GDL 표면이 건조한 경우에 비하여 보다 친수성(hydrophilic) 특성이 나타남을 나타낸다.

Fig. 3은 유로 채널을 제작하는 재료로 사용된 아크릴 표면에 대한 정적 접촉각을 측정한 결과이다. 아크릴 표면의 경우 정적 접촉각은 약 64~71°로 GDL과 비교할 때 매우 친수성 특성을 나타냄을 알 수 있다.

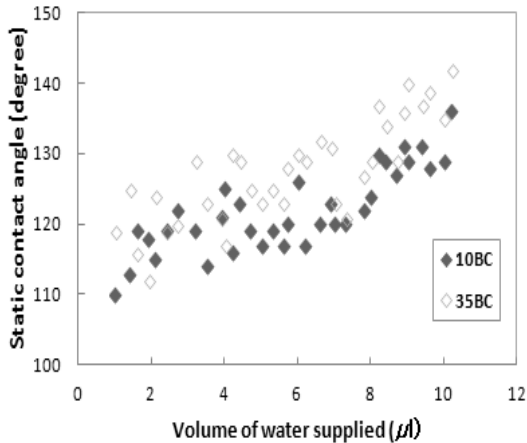


Fig. 4 Static contact angle with liquid water volume for two types of GDLs under dry surface conditions

Fig. 4는 건조한 조건에서의 물방울 크기에 따른 2 종류 GDL 표면에 대한 정적 접촉각을 나타낸 것이다. 물방울 크기가 증가할수록 정적 접촉각은 다소 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이는 물방울 크기가 증가함에 따라 보다 소수성 특성을 나타내는 경향임을 의미한다.

### 3.2 단위 유로 채널에서의 물방울 이동 특성 고찰

#### 3.2.1 GDL 종류에 따른 물방울 이동 특성

Fig. 5는 동일한 단면의 유로 채널 (높이 : 1.3mm,

너비 : 1mm)에서 3lpm의 공기를 공급한 경우 유로 채널에서 시간에 따른 물방울의 움직임을 촬영하고 그 이미지를 정리하여 나타낸 것이다.

물방울의 촬영은 0.028s 당 1 프레임씩 진행되었고, 시린지를 통하여 공급된 물의 양은 1.6μl/s이다. 단일 물방울은 입구 공기 유동에 의한 영향으로 유동 방향 쪽으로 그 모양이 변형되는 것을 알 수 있다. 하지만, 초기에는 공기 유동이 물방울을 이동시켜 유로 채널 밖으로 배출시킬 정도는 아니므로 물방울은 비교적 안정한 상태에서 그 모양만 채널 내에서의 압력 구배에 의해 변화함을 파악할 수 있다.

Fig. 5에서 위의 이미지들은 SGL 10BC GDL에 대한 결과이고 아래의 이미지들은 SGL 35BC GDL에 대한 측정 결과이다. 시간에 따른 물방울의 불안정성을 비교, 관찰할 수 있는데 35BC GDL 표면에서의 물방울이 더 불안정하였고 제거되는 시간 또한 10BC GDL의 경우보다 작음을 알 수 있다.

Fig. 6은 2 종류의 GDL 표면에서 시간에 따른 전진 접촉각(advancing contact angle)과 후진 접촉각(receding contact angle)의 차이를 그래프로 비교하여 나타낸 것이다.

이 결과를 통하여 35BC 표면에서 물방울이 더 불안정하여 제거가 잘 됨을 알 수 있다. 이는 10BC가 펠트(felt) 구조이고, 35BC는 carbon paper 구조에서 나타나는 표면 특성의 차이에 따른 효과로 판단된다.

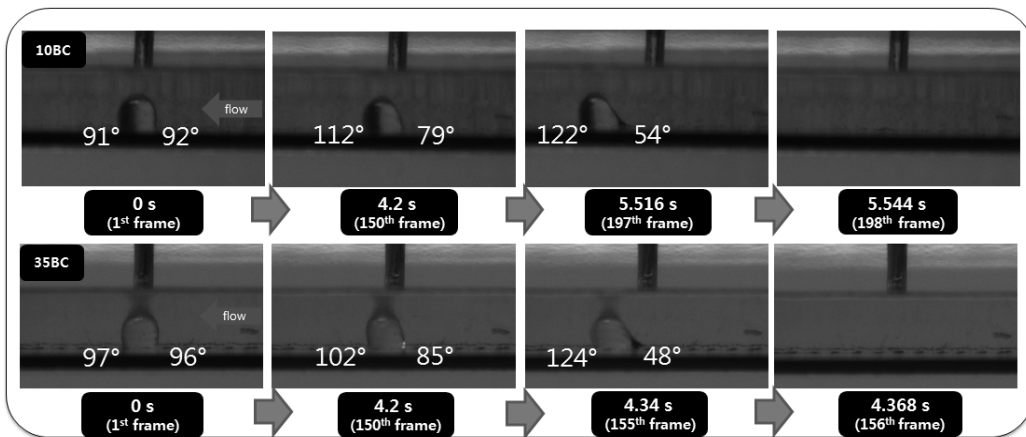


Fig. 5 Images of water droplet dynamics inside a simulated single flow channel for two types of GDLs (10BC, 35BC)

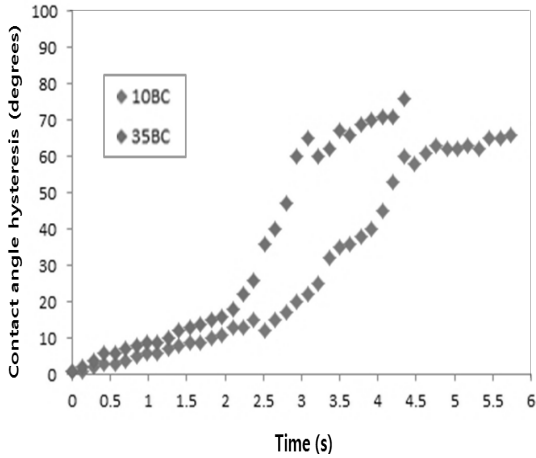


Fig. 6 Contact angle hysteresis for two types of GDLs

### 3.2.2 입구 공기 유속에 따른 물방울 이동 특성

Fig. 7은 공기 공급 유량을 2, 2.5, 3lpm으로 각각 변화시켰을 때, 단위 유로 채널 내 물방울의 이동 특성을 가시화한 결과를 나타낸다. 총 500 프레임을 촬영하였고 초당 35 프레임의 속도로 촬영을 진행하였다.

본 실험에서는 채널 높이 2mm, 너비 2mm의 유로를 적용하였고, 10BC GDL을 동일하게 실험에 사용하였다. 다른 모든 실험 조건들은 고정값으로 하고, 입구 공기 유량을 변화시키면서 카메라를 이용해 가시화하였다.

Fig. 7에서 볼 수 있듯이 입구 공기의 유속이 더 빠를수록 물방울은 더 신속히 제거됨을 알 수 있다.

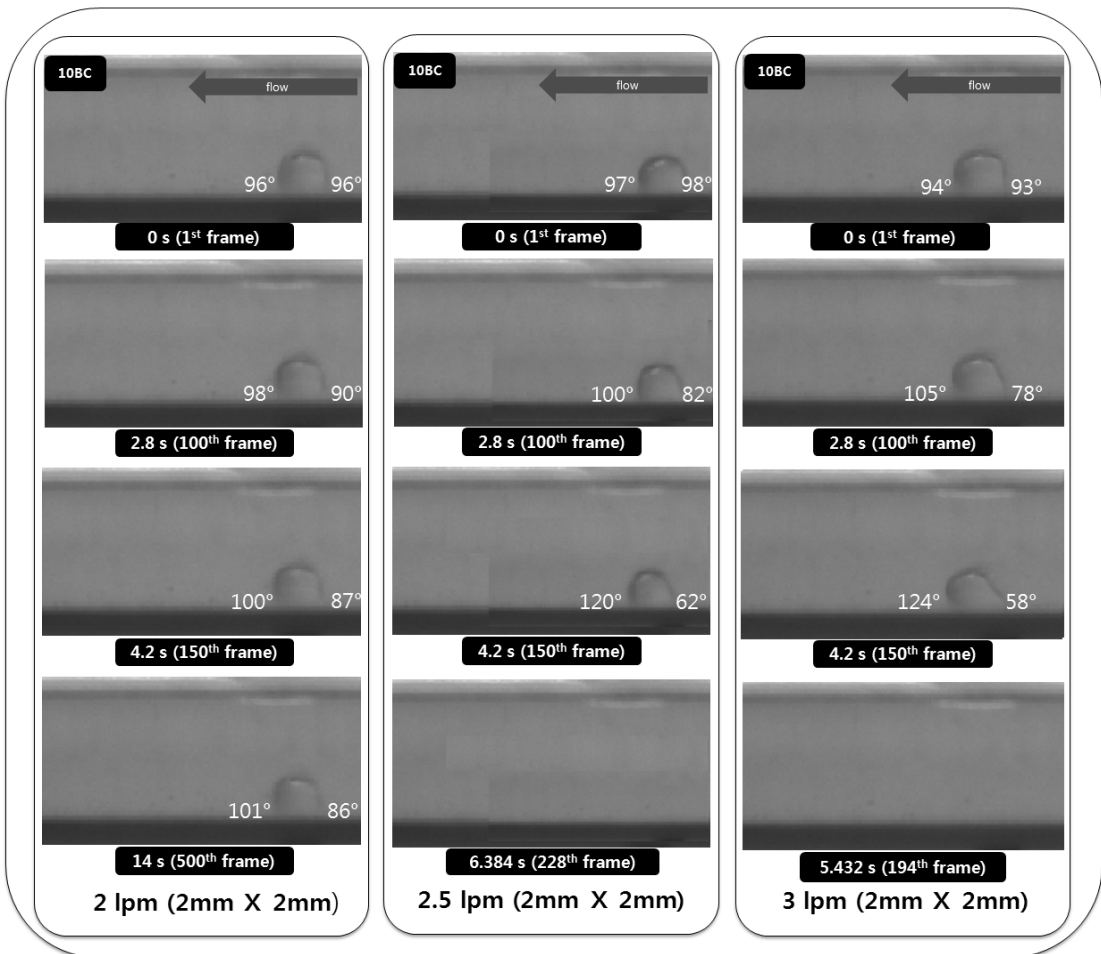


Fig. 7 Images of water droplet dynamics inside a simulated single flow channel for three different inlet air flow rates

본 실험에서는 2.5lpm부터 물방울이 제거됨을 알 수 있었다. 하지만 실제 연료전지 유로 채널에서 물방울을 더 효과적으로 빠른 시간 내에 제거하기 위해서 무턱대고 입구 공기의 속도를 증가시키는 것은 바람직하지 않다.

자동차용 연료전지 스택의 경우와 같이 큰 면적을 가진 유로 채널에서는 그만큼 공기 공급을 담당하는 블로워(blower)에 추가로 많은 동력이 소모되기 때문에 연료전지 시스템 전체의 효율이 떨어지기 때문이다. 따라서 단순히 공기 유속을 높이는 방법 이외에 다양한 방안들을 모색하는 데 본 연구가 효과적으로 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 물 관리 기초 연구 중 하나로 고분자 전해질형 연료전지의 단위 유로 채널을 가시화 가능하도록 아크릴로 제작하고 GDL을 포함한 연료전지 모사 작동 조건에서 유로 채널 내 물방울의 이동 및 변형 등 유동 현상을 직접 가시화하고 그 결과를 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 유로 채널 내 물방울은 공기 유동에 의해 성장, 그 형태가 변형되는데, 특히 채널 옆 벽면과 GDL 표면에서의 표면 장력에 의한 영향이 크게 작용함을 알 수 있다.  $Bo = \frac{\rho g h^2}{\sigma} = 7.7 \times 10^{-3}$ ,  $Bo \ll 1$  이므로 본 실험에서 중력의 영향보다 표면 장력의 영향이 지배적임을 알 수 있다.
- 2) 물방울의 유동 특성은 모사 유로 채널을 구성하는 각 요소들의 표면 젖음 특성에 큰 영향을 받는다. 특히, 충분히 젖은 GDL 표면은 건조한 상태의 GDL 표면보다 친수성의 특성을 나타낸다.
- 3) 물방울의 크기가 증가할수록 정적 접촉각은 증가하는 경향을 나타낸다.
- 4) 2종류의 GDL을 통한 실험 결과 표면 거칠기가 거친 SGL35BC(carbon paper type)가 SGL10BC(felt type)에 비하여 물방울이 더 잘 제거된다.

- 5) 입구 공기 유량이 증가할수록 물방울의 제거는 보다 용이해진다.(유로 단면 크기  $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 인 경우 공기 유량이 2.5lpm인 조건 하에서 물방울의 제거가 가능함을 확인하였다.)
- 6) 본 연구 결과는 실제 자동차용 연료전지시스템의 유로 채널 내부에서의 물방울 유동 현상을 이해, 예측하고 채널 내 물의 축적에 의한 연료전지 성능 저하를 효과적으로 예방하기 위한 연구의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

“이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비(일부) 지원으로 수행되었습니다.”

#### 참 고 문 헌

1. J. Larminie and A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons Ltd., UK, 2003.
2. A. Hakenjos, H. Muentner, U. Wittstadt, and C. Hebling, “A PEM fuel cell for combined measurement of current and temperature distribution”, Journal of Power Sources, Vol. 131, 2004, pp. 213-216.
3. K. Tüber, D. Pócza, and C. Hebling, “Visualization of water buildup in the cathode of a transparent PEM fuel cell”, Journal of Power Sources, Vol. 124, 2003, pp. 403-414.
4. X. G. Yang, F. Y. Zhang, A. L. Lubway, and C. Y. Wang, “Visualization of Liquid Water Transport in a PEFC”, Electrochemical and Solid-State Letters, Vol. 7, 2004, pp. A408-A411.
5. I. S. Hussaini and C.-Y. Wang, “Visualization and quantification of cathode channel flooding in PEM fuel cells”, Journal of Power Sources, Vol. 187, 2009, pp. 444-451.
6. A. Bazylak, “Liquid water visualization in PEM fuel cells: A review”, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, Issue 9, 2009, pp. 3845-3847.

7. F.-B. Weng, A. Su, and C.-Y. Hsu, "The study of the effect of gas stoichiometric flow rate on the channel flooding and performance in a transparent fuel cell", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 32, Issue 6, 2007, pp. 666-676.
8. H.-S. Kim and K. Min, "Investigation of Water Droplet Behaviour on GDL Surface and in the Air Flow Channel of a PEM Fuel Cell under Flooding Conditions", *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 23, No. 5, 2012, pp. 476-483.
9. K. S. Chen, M. A. Hickner, and D. R. Noble, "Simplified Models for Predicting the Onset of Liquid Water Droplet Instability at the Gas Diffusion Layer/Gas Flow Channel Interface", *International Journal of Energy Research*, Vol. 29, 2005, pp. 1113-1132.
10. S. Lister, D. Sinton, and N. Djilali, "Ex Situ Visualization of Liquid Water Transport in PEM Fuel Cell Gas Diffusion Layers", *Journal of Power Sources*, Vol. 154, 2006, pp. 95-105.
11. E. C. Kumbur, K. V. Sharp, and M. M. Mench, "Liquid Droplet Behavior and Instability in a Polymer Electrolyte Fuel Cell Flow Channel", *Journal of Power Sources*, Vol. 161, 2006, pp. 333-345.
12. B. Kim, H.-S. Kim, and K. Min, "Investigation on the Liquid Water Droplet Instability in a Simulated Flow Channel of PEMFC", *Transactions of KSAE*, Vol. 16, No. 2, 2008, pp. 93-98.
13. T.C. Wu and N. Djilali, "Experimental investigation of water droplet emergence in a model polymer electrolyte membrane fuel cell microchannel", *Journal of Power Sources*, Vol. 208, 2012, pp. 248-256.
14. A. Esposito, A.D. Montello, Y.G. Guezennec, and C. Pianese, "Experimental investigation of water droplet-air flow interaction in a non-reacting PEM fuel cell channel", *Journal of Power Sources*, Vol. 195, 2010, pp. 2691-2699.
15. J. G. Carton, V. Lawlor, A. G. Olabi, C. Hoehenauer, and G. Zauner, "Water droplet accumulation and motion in PEM (Proton Exchange Membrane) fuel cell mini-channels", *Energy*, Vol. 39, 2012, pp. 63-73.
16. J. Zachary Fishman, Hilary Leung, and A. Bazylak, "Droplet pinning by PEM fuel cell GDL surfaces", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, 2010, pp. 9144-9150.