고분자전해질형 연료전지의 단순 채널 리브 형상에서의 물방울 가시화 연구

최민욱¹ · 김한상^{2†}

¹서울과학기술대학교 자동차공학과 대학원, ²서울과학기술대학교 기계·자동차공학과

Visualization of Water Droplets in the Simple Flow Channel and Rib Geometry for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFCs)

MIN WOOK CHOI¹, HAN-SANG KIM^{2†}

¹Grad. School of Department of Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

²Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology,
232 Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

Abstract >> The effective water management in a polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC) is one of the key strategies for improving cell performance and durability. In this work, an *ex situ* measurement was carried out to understand the water droplet behavior on the surface of gas diffusion layer (GDL) as a fundamental study for establishing novel water management. For that purpose, simplified cell including one rib and two flow channels was designed and fabricated. Using this *ex situ* device, the water droplet emergence through the GDL of the PEMFC was emulated to understand liquid water transport through the porous diffusion medium. Through the visualization experiment, the emergence and growth of water droplets at the channel/GDL interface are mainly observed with the surface characteristics of GDL (SGL 10BA, 24BA) and rib when the liquid water passes through the GDL and is expelled to the flow channel. It is expected that the results obtained from this study can contribute to the better understanding on the water droplet behavior (emergence and removal) in the flow channels of PEMFC.

Key words : Flow channel(유로), Gas diffusion layer(기체 확산층), Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자 전해질형 연료전지), Rib(리브), Water droplet(물방울)

Nomenclature

I : Cell current, A

1. 서 론

연료전지는 화석 연료를 연소하여 얻어진 동력으로 구동되는 기존 내연기관에 비해 효율이 높다. 특히 연료전지의 종류 중 하나인 고분자전해질형 연료전지(PEMFC, Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)는 알칼리 연료전지(AFC) 등 타 연료전지에 비해 비교적 낮은 온도(60~90°C 이하)¹⁾에서 작동되어 시동

[†]Corresponding author : hskim1101@seoultech.ac.kr

[접수일 : 2014.08.01 수정일 : 2014.08.21 게재확정일 : 2014.08.31]

Copyright © 2014 KHNES

시간이 짧고, 저항이 낮아 높은 출력 밀도를 얻을 수 있어, 소형·경량화가 가능하므로 자동차의 동력원으로 적합한 것으로 알려져 있다. 이에 따라 고분자전해질형 연료전지를 적용한 연료전지 자동차의 상용화 및 이를 보다 효율적으로 개발하려는 노력이 세계 각국 자동차 회사들에서 적극적으로 이루어지고 있다. 그러나 고분자전해질형 연료전지의 실용화를 위해 해결해야 할 여러 문제 중 하나는 채널 내 물 관리이다. 수소와 산소의 화학 반응으로 연료전지 내에서 생성된 물은 연료전지 내에서 이동하므로 이러한 물의 관리는 성능 및 내구성 확보 측면에서 매우 중요하다. 고분자전해질형 연료전지의 전해질막으로 흔히 사용되는 Nafion[®]은 물의 함량에 비례하여 전하 전도도가 증가하기 때문에 가습 상태를 적절히 유지해야 반응이 효과적으로 일어나게 된다. 반면 생성된 물이 연료전지 내에서 적절히 제거되지 못하고 GDL (Gas Diffusion Layer) 및 유로 채널에 축적되면 수소와 산소의 이동을 방해하여 반응 면적이 축소되는 결과를 유발하는 플러딩(flooding) 현상이 나타난다. 연료전지의 경우 양이온이 공기극에서 산소 이온과 결합하여 물이 생성되기 때문에 주로 공기극 채널에서 플러딩 현상이 발생한다. 따라서 채널 내의 물방울 거동 분석의 연구²⁻⁴⁾는 고분자전해질형 연료전지의 물 관리 연구 중 중요한 연구 분야로 인식되어 활발하게 진행되고 있으며, 다양한 연구 결과가 제시되고 있다. 그러나 타 연구들과 비교하면 GDL 내를 통과한 수분이 GDL 표면에서 물방울을 형성하는 물리적인 현상에 대한 기본적인 연구는 미비한 상황이며, 실험적인 연구보다는 효율적이고, 비용 대비 경제적이란 이유로 수치해석적 연구가 이루어지고 있다. 예를 들어 GDL을 X-ray 단층 촬영을 통하여 스캐닝 후 다공 구조를 구현하여 Stokes 식 또는 격자볼츠만 방법(LBM, Lattice Boltzmann Method)을 통하여 기체 투과도(permeability)의 계산을 진행하는 선행 연구⁵⁾와 변형되지 않은 GDL을 사용하여 체결압에 의

한 구조 변화 실험과 유한 요소 해석 프로그램을 통한 해석 연구 그리고 GDL의 유로 채널 침투에 따른 채널 내 유동 흐름을 분석한 연구 등이 선행되었으나 GDL 내 물 공급에 의한 GDL 표면에서의 물방울 거동 현상 분석과 관련된 연구는 미흡한 실정이다⁶⁾.

본 논문에서는 물 관리 기초 연구의 개념으로 고분자전해질형 연료전지에 적용되는 채널을 모사한 단위 채널 리브 형상을 설계, 제작하여 실제 연료전지의 작동 상황과 유사한 조건에서 물을 GDL에 공급하여 GDL 내부를 통과한 수분이 GDL과 유로 채널 표면에서 물방울 형태로 발생, 성장하는 것을 관찰하였다.

2. 실험 장치

2.1 물방울 가시화용 실험 장치

고분자전해질형 연료전지의 GDL 내로 공급된 물에 의해 GDL 표면에서 물방울의 발생 위치와 성장 과정을 가시화하기 위해 실험 장치를 구성하였으며, 개략도는 Fig. 1과 같다. 고분자전해질형 연료전지에 실제 적용되는 유로 채널을 모사하기 위해 채널 크기 및 폭을 고려하여 설계 및 제작하였으며, 외부 공기 유동이 채널 내에 영향을 미치지 않도록 실험 환경을 구축하였다.

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

Table 1 Experimental conditions

Case	Gas diffusion layer	Flow rate of the water supplied ($\mu\ell/\text{min}$)
Case 1-1	10BA	1.0
Case 1-2		10.0
Case 2-1	24BA	1.0
Case 2-2		10.0

2.3 실험 방법

본 가시화 실험에서는 SGL 社의 GDL 10BA와 24BA를 이용하여 실험을 진행하였다. GDL로 공급되는 물의 양은 실제 고분자전해질형 연료전지에서 단위 면적당 $2A/\text{cm}^2$ 의 전류 발생에 해당하는 활성 영역 0.09cm^2 와 0.9cm^2 의 물 발생을 고려하여 아래의 식 (1)을 이용하여 계산하였다.

$$\text{물 발생량 } (\ell/\text{min}) = 9.34 \times 10^{-8} \cdot I \cdot 60 \quad (1)$$

GDL 표면에서 물방울의 생성 및 성장을 관찰하기 위해 Table 1과 같은 실험 조건에서 가시화 실험을 진행하였다. GDL을 통과한 수분이 GDL 표면에 물방울 형태로 나타나 성장하는 동안 물방울의 증발이 발생되지 않는 조건에서 실험을 진행하였으며, 본 연구에서는 약 20°C 의 온도 조건에서 실험을 수행하였다. 할로겐 램프를 이용하여 채널 앞, 뒤쪽에서 선명한 이미지 확보를 위한 충분한 조명을 제공하였으며 촬영은 CCD 카메라를 이용하였다.

(a)

(b)

Fig. 4 Static contact angles for two types of GDL samples for dry surface conditions (a: SGL10BA, b: SGL 24BA)⁶⁾

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 GDL 표면의 정 접촉각 측정

10BA와 24BA GDL의 표면 젖음 특성을 파악하기 위하여 건조한 표면 상태의 GDL에 물방울을 생성시켜 정 접촉각을 측정하여 실험의 기본 데이터로 활용하였다. Fig. 4는 10BA와 24BA의 정 접촉각을 측정한 결과이다. 10BA의 정 접촉각은 $133.2^\circ \sim 133.7^\circ$ 로 나타났으며, 24BA의 경우 정 접촉각은 $135^\circ \sim 136^\circ$ 로 나타났다. 본 측정 결과로부터 2 종류 GDL의 친수성(hydrophilic) 및 소수성(hydrophobic) 특성에는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

3.2 채널 재료 표면의 정 접촉각 측정

채널 재료의 표면 젖음 특성도 파악하기 위하여 정 접촉각 측정을 진행하였다. Fig. 5(a)는 채널 상판 표면(테프론 코팅)에서의 정 접촉각 측정 이미지이며, Fig. 5(b)는 채널 하판 표면(테프론 코팅 안 됨)에서의 정 접촉각 측정 이미지이다. 알루미늄 표면에서의 정 접촉각은 $97^\circ \sim 98^\circ$ 로 나타나 소수성 특성을 나타내지만 테프론(teflon) 코팅된 알루미늄 표면에서의 정 접촉각 측정 수치 $112^\circ \sim 113^\circ$ 와 비교할 때 테프론 코팅을 통하여 보다 소수성 특성이 나타나는 것을 알 수 있었고, 측정된 GDL과 두 재료의 표면 젖음 특성을 비교할 때 채널 표면이 GDL보다는 친

Fig. 5 Static contact angles for channel surfaces (a: Teflon-coated aluminum surface, b: Aluminum surface)⁹⁾

Fig. 6 Liquid water droplet behavior under test condition Case 1-1 (10BA GDL, 1.0 $\mu\text{l}/\text{min}$)

Fig. 7 Liquid water droplet behavior under test condition Case 1-2 (10BA GDL, 10 $\mu\text{l}/\text{min}$)

수성에 가까운 것을 확인할 수 있다⁶⁾.

3.3 물방울 성장 측정

Fig. 6은 10BA GDL에 시린지 펌프를 통하여 1.0 $\mu\text{l}/\text{min}$ 의 유량으로 물을 공급한 경우 GDL 표면에서 물방울의 발현과 성장을 가시화한 것이다. GDL 내

수분이 유입되어 탄소 섬유 간 빈 공간(pore)에 물이 채워져 물방울의 이동 통로가 형성되어 유체가 흐르는 유로 채널부로 물방울이 발생하여 성장하는 현상을 파악할 수 있다. 채널 리브 중앙부에서 약 1.24mm 떨어진 곳에서 물방울이 발생하였으며, 물방울이 성장하면서 1초 경과한 후 채널 옆면 벽(side wall)에 붙어 성장하였으며, 이 때 물방울이 0.1mm 이동하여

성장하였다. 0.55초에서 물방울이 옆면 벽에 붙기 전 1.05초까지 물방울의 높이는 0.27mm에서 0.42mm로 증가하였음을 알 수 있다.

Fig. 7은 10BA GDL의 아래쪽 면에 $10.0\mu\text{l}/\text{min}$ 로 물을 공급할 때 물방울의 성장을 나타낸 것이다. 공급된 물 유량이 10배 증가하여 왼쪽 유로 채널에서 뿐만 아니라 오른쪽 유로 채널부에서도 물방울이 발생하여 성장하는 것을 확인할 수 있었다. 리브 중앙으로부터 1.05mm 떨어진 유로 채널 부에서 물방울이 발생하여 성장하였다. 1.45초 후에는 오른쪽 유로 채널에서 채널 리브와 1.11mm 떨어진 곳에서 급격하게 물방울이 발생하여 성장한 후 0.15초 후 옆면 벽면에 붙어 성장함을 나타내고 있다. 10BA의 경우, GDL로 공급되는 물의 양이 증가함에 따라 GDL 표면에서 물방울이 생성되는 위치가 유로 채널 중앙

쪽으로 이동하는 경향임을 파악할 수 있다.

Fig. 8은 24BA GDL에 시린지 펌프를 통하여 $1.0\mu\text{l}/\text{min}$ 유량 조건으로 물을 공급할 때 물방울의 성장을 나타낸 것이다. 유로 벽면과 GDL의 경계점에서 물방울이 생성되어 0.05초 동안 물방울이 급속하게 성장한 후 물방울의 높이와 옆면 벽과의 접촉면 높이는 시간이 지남에 따라 완만하게 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 9는 24BA GDL에 시린지 펌프를 통하여 $10.0\mu\text{l}/\text{min}$ 로 일정한 유량을 공급할 때 물방울의 성장을 측정한 이미지이다. GDL 내로 공급되는 수분의 양이 크게 증가하여 Case 2-1에 비하여 물방울의 크기가 짧은 시간에 급격하게 증가하지만, 초기에 GDL 표면 위에 물방울이 발생하기 시작하는 위치에는 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

Fig. 8 Liquid water droplet behavior under test condition Case 2-1 (24BA GDL, $1.0\mu\text{l}/\text{min}$)

Fig. 9 Liquid water droplet behavior under test condition Case 2-2 (24BA GDL, $10\mu\text{l}/\text{min}$)

4. 결 론

본 연구에서는 고분자전해질형 연료전지의 GDL 표면과 유로 채널의 경계면에서 물방울의 발생과 성장을 실험적으로 파악하기 위한 가시화 연구를 진행하여 아래와 같은 결과를 도출하였다.

- 1) GDL 내부를 통과한 수분이 GDL과 유로 채널 표면에서 물방울 형태로 발생, 성장하는 것을 직접 가시화하는데 적합한 모사 리그 장치를 설계하였고, 이를 이용하여 GDL 종류와 공급 물량의 변화에 따른 GDL 및 유로 채널 경계면에서 물방울의 발생 및 성장을 분석할 수 있었다.
- 2) 10BA (carbon felt)의 경우, 물방울의 발생 위치가 유로 채널 GDL 표면에서 주로 생성되지만, 24BA (carbon paper)의 경우는 유로 벽면 근처 GDL 표면에서 물방울이 발생함을 알 수 있다. 이는 GDL 내부 구조의 차이와 24BA의 경우 GDL 두께가 얇은 영향으로 판단된다.
- 3) 10BA의 경우 GDL로 공급되는 물의 양이 증가할수록 채널 중앙 쪽 GDL 표면에서 물방울이 생성되지만(Case 1-1의 경우 리브 옆 벽면과 0.24mm 떨어진 곳에서 물방울이 발생되고 Case 1-2의 경우 옆면 벽과 0.45mm 떨어진 곳에서 물방울이 발생됨) 24BA의 경우는 물방울의 발생 위치에는 큰 변화가 없음을 알 수 있다.

이와 같은 기본적 연구 결과는 유로 채널을 고려한 GDL 표면에서 물방울의 발생과 성장 특성을 이해하는 데 도움이 될 것으로 판단된다. 앞으로 연료전지 주요 작동 조건을 고려한 다양한 실험 조건 하에서 가시화 실험이 활발히 이루어지면 GDL이 존재하는 유로 채널 형상에서 물방울의 생성 및 성장 특성을 보다 체계적으로 이해할 수 있는 기초를 마련할 수 있으며 이러한 결과는 유로 채널에서의 효과적인 물 제거 전략 마련을 위한 기초 데이터로 고분

자전해질형 연료전지의 효율적인 물 관리 구현에 이바지할 수 있을 것으로 사료된다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. 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.
2. H.-S. Kim, Y.-W. Ji, J.-H. In, and J.-Y. An, "Experimental Investigation of the Water Droplet Dynamics inside the Simulated PEMFC Single Flow Channel with GDL", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 24, No. 1, 2013, pp. 76-83.
3. S.-K. Lee, K. Ito, and K. Sasaki, "A Cross-Sectional Observation of Water Behavior in the Flow Channel in PEFC", ECS Transactions, Vol. 33, No. 1, 2010, pp. 1457-1463.
4. T. Hellstern, E. Gauthier, M. J. Cheah, and J. B. Benziger, "The role of the gas diffusion layer on slug formation in gas flow channels of fuel cells", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, 2013, pp. 15414-15427.
5. H. S. Jeong, J. I. Kim, S. H. Lee, C. H. Lim, B. K. Ahn, and C. J. Kim, "Analysis of Mass Transport in PEMFC GDL", Transactions of the KSME "B", Vol. 36, No. 10, 2012, pp. 979-988.
6. Minwook Choi, "Visualization of Water Droplets in the Simple Flow Channel and Rib Geometry for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFCs) with GDL Characteristics", Master's Thesis, Dept. Auto. Eng., SNUST, 2014.