

PEMFC 기체확산층 열화에 의한 내부 물 분포 변화 연구

서한빈* · 박한욱** · 정성용†

Effect of gas diffusion layer degradation on the internal water distribution in PEMFC

Han Been Seo*, Hanwook Park** and Sung Yong Jung†

Abstract This study explores the effect of gas diffusion layer (GDL) degradation on the performance and water management of polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFCs) through in-situ accelerated stress tests involving humidification/dehumidification cycles. Using synchrotron X-ray imaging, the research reveals that GDL degradation increases water retention and alters water transport behavior, leading to flooding and mass transport losses. The aged GDLs show larger pores and reduced hydrophobicity, impairing water drainage and gas transport. This contributes to performance loss, particularly at higher current densities. The findings highlight the importance of enhancing GDL durability to maintain stable PEMFC performance and meet lifespan targets, particularly in automotive applications requiring long-term reliability under fluctuating conditions.

Key Words : Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자 전해질 막 연료전지), Mechanical degradation (기계적 열화), Gas diffusion layer(기체확산층), Water distribution(물 분포), Synchrotron X-ray imaging(가속기 X선 영상기법)

1. 서론

수소는 탄소 배출을 줄여서 온실가스 배출 증가에 따른 지구 온난화 문제를 해결하기 위한 유망한 에너지 운반체로 여겨져 왔다⁽¹⁾. 이에 따라 내연기관의 대안으로 수소와 산소의 전기화학적 반응을 이용하여 전기를 생산하는 연료전지가 대두되고 있다⁽²⁾. 연료전지 중에서

고분자막을 이용하는 polymer electrolyte membrane fuel cell(PEMFC)는 높은 효율, 빠른 기동, 낮은 작동 온도 덕분에 고정형, 휴대형, 운송 장치에 적합한 전력원으로 여겨진다. 그러나 연료전지 기술, 특히 PEMFC는 상업적 시장 진출을 확대하기 위해 비용, 성능, 내구성 등의 과제에 직면해 있다. 특히 자동차 응용 분야에서는 운전 조건이 자주 변화하기 때문에 내구성 문제가 반드시 해결되어야 한다⁽³⁾. 미국 에너지부(U.S. Department of Energy)에 따르면 PEMFC의 수명 목표는 경량 차량의 경우 5,000시간, 대형 차량의 경우 25,000시간으로 설정되어 있다⁽⁴⁾. 따라서 장기적인 PEMFC의 성능 안정성을 확보하기 위해 PEMFC의 성능 저하 메커니즘을 이해하는 것이 필수적이다.

† Department of Mechanical Engineering,
Chosun University, Professor
E-mail: syjung@chosun.ac.kr

* Department of Mechanical Engineering,
Chosun University, MS student

** Department of Biomedical Engineering,
Soonchunhyang University, Associate Professor

PEMFC는 막 전극 집합체(membrane electrode assembly, MEA), 기체확산층(gas diffusion layer, GDL), 그리고 양극판으로 구성된다. PEMFC의 열화는 열적, 화학적, 기계적 열화 등 다양한 측면에서 연구되어 왔다⁽⁷⁾. 이러한 열화 연구는 최대 3년의 긴 시간이 소요되기 때문에, 전압 사이클링과 같은 in-situ 가속 열화 시험(accelerated stress test, AST)이 주로 사용되며, 대부분의 연구는 MEA와 촉매의 열화에 초점이 맞춰져 있다⁽⁸⁾. GDL은 전기화학 반응 중 생성된 물을 관리하고 반응물의 확산을 촉진하며, MEA에 구조적 지지를 제공하고 전자 및 열 전달을 보조하는 중요한 구성 요소이다⁽⁹⁾. GDL의 물 관리 능력은 성능에 기여할 뿐만 아니라 열화를 촉진 및 완화에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다^(10,11). 따라서 GDL의 열화를 이해하는 것은 PEMFC의 내구성을 향상시키기 위해 필수적이다.

PEMFC 내부의 물의 이동 및 분포를 분석하는 것은 GDL 특성과 성능 및 내구성의 상관관계를 이해하기 위해서는 필수적으로 요구된다. PEMFC 내부의 물 분포는 중성자 영상 및 X선 영상과 같은 비침습적 기법을 통해 연구되었다. Owejan과 Trabold는 in-situ 중성자 방사선을 이용해 GDL 내부에서 채널보다 리브 아래에서 더 많은 물이 축적된 것을 정량화하였다⁽¹²⁾. 방사광 X선 영상은 높은 해상도를 가지고 있어 중성자 영상보다 연료전지 내 물의 가시화에 자주 사용되며, 방사광 X선 영상 기법을 이용하여 in-plane⁽¹³⁾과 through-plane 방향⁽¹⁴⁾에서 물의 시간적 변화를 가시화하는 연구가 수행된 바 있다.

방사광 X선 영상 기법은 열화된 GDL 내 물의 거동을 가시화하기 위하여 활용되기도 하였다. 방사광 X선 영상 기법을 이용하여 열화된 GDL의 양극에서 물 축적이 크게 증가하는 것이 관찰되었으며⁽¹⁵⁾, 열화된 GDL은 초기 GDL에 비해 높은 물 포화도를 보였고, 이로 인해 가스 전달이 제한되어 연료전지의 성능이 저하되었다⁽¹⁶⁾. 또한, 최근 방사광 X선 영상 기법을 이용하여 GDL 내부 물의 동적 움직임을 가시화하고,

GDL 열화에 의해 GDL 내부 국소 물 거동 메커니즘이 snap-off 형태에서 piston-like displacement 형태로 변화한다는 것이 확인되었다⁽¹⁷⁾.

앞서 소개한 GDL 열화에 의한 PEMFC 내부 물 거동 특성 변화에 대한 연구는 주로 과산화수소 담금법을 이용하는 ex-situ AST가 사용되었다. 이러한 ex-situ AST를 이용한 방식은 GDL 열화의 이해에 도움을 주지만, 실제 PEMFC 운전 조건과 차이가 크기 때문에 열화 메커니즘에 불일치가 발생한다. 따라서 실제 운전 조건을 재현할 수 있는 in-situ AST를 활용한 GDL 열화와 내부 물거동에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 PEMFC 실제 운전 조건과 유사한 환경인 가습/비가습 사이클에서 기계적 스트레스에 의한 GDL 열화를 유발하고, GDL 내부 물 거동에 대한 GDL 열화의 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

2.1 가습/비가습 AST

GDL의 기계적 열화를 유발하기 위하여 Fig. 1과 같이 가습/비가습 사이클을 수행하였다. 가습/비가습 사이클은 전기화학 반응의 효과를 배제하기 위하여 anode와 cathode 양쪽 모두에 500 ccm의 질소 가스를 2 분 건조, 2 분 가습된 상태로 공급하는 것을 한 사이클로 구성하고, 사이클 수를 높여가며 성능을 분석하였다.

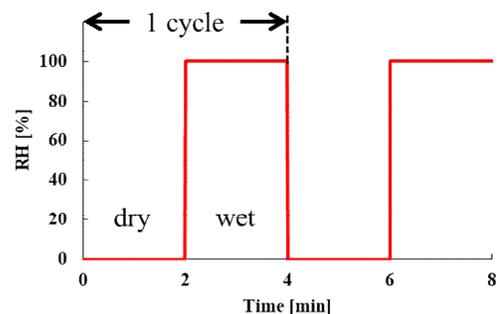


Fig. 1. Profile of wet/dry accelerated stress test (AST) cycles

2.2 전기화학 성능 측정

전기화학 성능은 연료전지 테스트 시스템 (SMART2 PEM, WonATech Co., Korea)에서 활성 면적 $5 \times 5 \text{ cm}^2$ 면적을 가지는 단일 셀을 이용하여 측정하였다. 촉매층이 코팅된 MEA (Pt/C $0.21 \text{ mg}_{\text{Pt}}/\text{cm}^2$ on the anode, PtCo/C $0.37 \text{ mg}_{\text{Pt}}/\text{cm}^2$ on cathode, Dongjin Semichem Co., Korea)와 상용 GDL (Sigracet 39BB)을 이용하였다. 조립 후 셀은 내부가 건조하여 이온 전도도가 떨어지기 때문에 성능 측정 전 활성화 과정이 필수적으로 요구된다. 셀 내부의 반응성 가스를 제거하기 위해서 가습된 질소 가스로 purge를 진행한 후 $0.4 \text{ V} - 0.8 \text{ V}$ 로 전압을 변화시켜가며 활성화를 수행하였다. 활성화는 각각의 전압을 7 분 30 초씩 주기적으로 인가하는 방법으로 총 2 시간 30 분 동안 진행하였다. 가습된 수소와 산소/공기를 각각 anode와 cathode로 공급하고 전류밀도를 0 부터 $0.1 \text{ A}/\text{cm}^2$ 씩 5분 마다 전류밀도를 증가시키면서 셀 성능을 측정하였다.

2.3 물질 전달 손실 계산

PEMFC의 전기화학 반응은 전류가 증가함에 따라 더 많은 반응물의 공급이 필요하며, 이에 따라 물 축적이 증가한다. 이는 물질 전달과 밀접한 관련이 있는 GDL의 영향이 PEMFC 물질 전달손실에 중요한 요소임을 의미한다. 가습/비가습 사이클로 인한 GDL 열화가 전압 강하에 미치는 영향을 조사하기 위해 물질 전달 과전압을 분석하였다. 이를 위해 cathode로 동일 유량의 산소와 공기를 공급하고 성능을 각각 측정하였다. 측정된 성능을 바탕으로 Nernst 방정식(1)을 이용해 물질 전달 과전압을 계산하였다.

$$\eta_k(O_2 - air) = V_{cat, O_2} - V_{cat, air} - \frac{RT}{zF} \ln \frac{p_{O_2}}{p_{air}} - \gamma \frac{RT}{\alpha F} \ln \frac{p_{O_2}}{p_{air}} \quad (1)$$

여기에서, 기체 상수 $R=8.314\text{JK}^{-1}\text{mol}^{-1}$, 절대 온도 $T=353.15\text{K}$, 반응에 관여하는 전자 수 $z=4$,

Faraday상수 $F=96486\text{Cmol}^{-1}$, 산소와 공기의 분압 비 $p_{O_2}/p_{air}=4.76$, cathodic transfer coefficient $\alpha=1$ 이고 kinetic reaction order $\gamma=0.5$ 이다.

2.4 GDL 내부 물 분포 가시화

GDL 내부 물의 거동을 비교하기 위해 Fig. 2(a)와 같이 방사광 X선 영상 기법을 활용하였다. 실험은 포항가속기연구소의 6C biomedical imaging 빔라인에서 수행되었으며, 빔 저장 에너지는 3 GeV , 빔 전류는 360 mA 였다. 본 연구에서는 14 keV 의 에너지를 가지는 단색광 X선을 사용하였다. 영상은 Zyla 카메라(Andor Zyla, 아일랜드)로 촬영되었고, 카메라 앞에는 5배 확대 렌즈가 부착되었다. 이에 따라 field of view는 $3.0 \text{ mm} \times 2.6 \text{ mm}$ (2560×2160 픽셀)로 설정되었다.

Fig. 2(b)에 나타낸 것처럼, 촉매층에서 음극 채널로의 실제 물 이동을 모사하기 위해 가시화 셀을 특별히 설계하였다. 물을 균일하게 공급하고 실제 작동 조건과 유사한 모세관 압력 구배를 재현하기 위해 촉매층이 코팅된 가스 확산 전극(GDE)을 물 채널과 GDL 사이에 추가로 위치시켰다. 샘플은 10% 두께로 압축되었으며, 단일 serpentine 형태의 채널을 사용하여 물과 공기를 공급하였다. 물은 GDE 측 채널에서 주입되었고, 공기는 cathode 채널 내 가스 흐름을 모사하기 위해 GDL 측 채널로 공급되었다. 채널과 리브의 너비는 0.8 mm 이며, 물과 공기 채널의 높이는 각각 0.8 mm 와 0.4 mm 로 제작하였다. 물과 공기의 유량은 $1.2 \text{ A}/\text{cm}^2$ 조건에서의 생성량과 가스 유속을 고려하여 결정하였으며, 물과 공기의 유량은 각각 $0.015 \text{ ml}/\text{min}$ 와 $9.284 \text{ ml}/\text{min}$ 로 공급하였다.

3. 실험 결과

Fig. 3은 AST 사이클 수에 따른 PEMFC 성능 변화를 나타낸다. AST 2000 사이클까지는 초기 성능이 유지되며 성능 감소의 기울기가 조금 변화하는 것을 볼 수 있다. 일반적으로 AST를

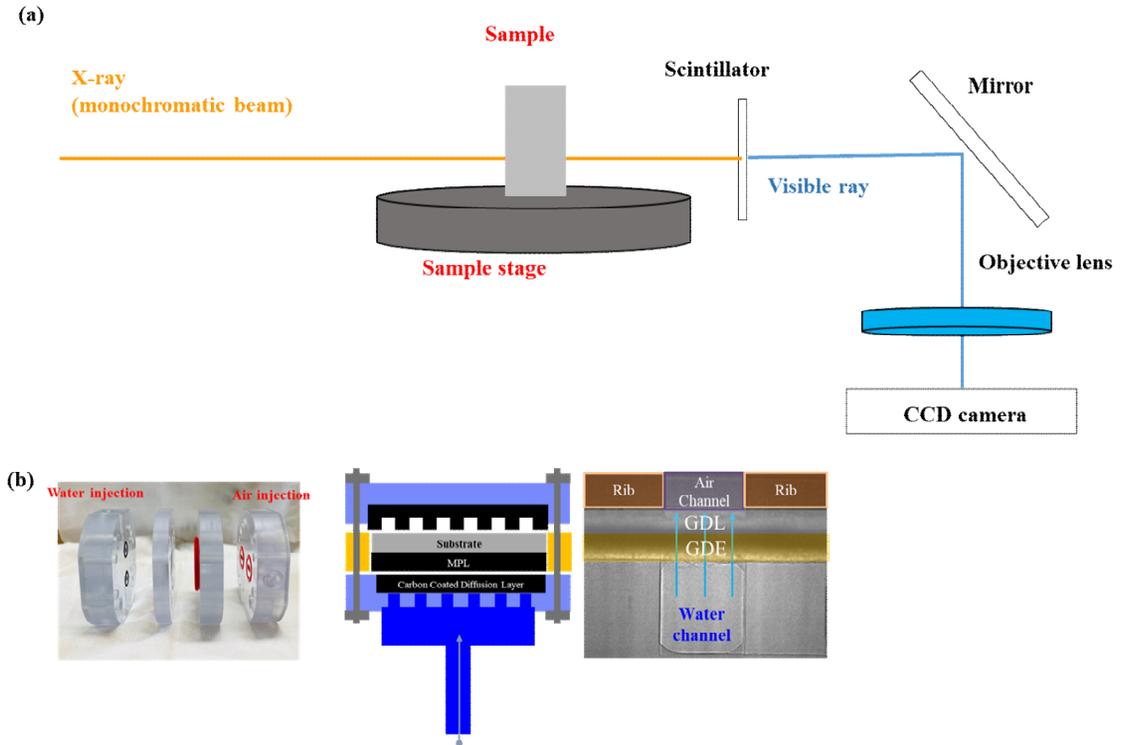


Fig. 2. (a) Experimental setup for synchrotron X-ray imaging. (b) Schematics and picture of visualization cell designed for investigating water management ability of GDL. Schematic illustration inside the cell and typical X-ray raw image was represented.

적용하는 경우 AST 초기에는 열화 메커니즘이 작동하지 않고 활성화를 오히려 돕는다고 알려져 있다. 본 연구에서 적용한 가습/비가습 AST는 멤브레인의 반복적인 swelling과 deswelling을 발생시킨다. 이러한 과정에서 촉매층과 GDL의 접촉이 일부 증가하여 접촉 저항이 감소한다. 이로 인하여 Fig. 3에서 보는 바와 같이 AST 초기 성능 감소 곡선의 기울기 변화와 고전류 밀도에서의 성능 향상이 관찰되었다. 이후 사이클 수가 증가함에 따라 전압 손실이 점점 증가하고 최대 전류 밀도 역시 감소하는 것을 볼 수 있으며 가습/비가습 AST에 의하여 3000 사이클부터 PEMFC 성능이 크게 저하되는 것을 확인 할 수 있다.

PEMFC의 작동 전압은 일반적으로 활성화 (activation loss), 옴(Ohmic loss), 농도(concentration loss) 손실에 의하여 결정된다. 활성화 손실은

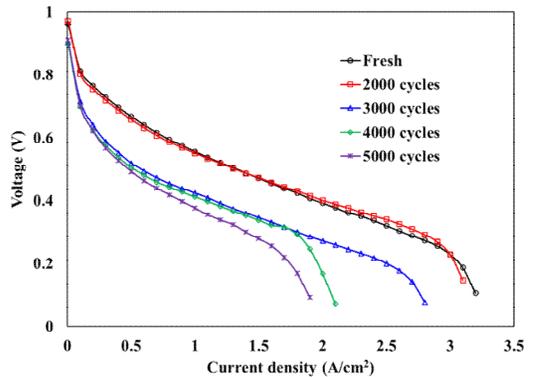


Fig. 3. Comparison of I-V curves according to the number of wet/dry AST cycles

전극에서 반응물의 반응 속도와 연관되어 있고, 저전류밀도에서 전압의 급격한 강하를 일으킨다. 옴 손실은 연료전지 내부 구성요소의 전기전도성과 관련되어 있으며, 옴의 법칙으로

손실이 표현되며 I-V 곡선의 선형 기울기의 변화를 야기시킨다. 농도 손실은 물질 전달 손실로도 부르며 물의 내부 축적에 의한 flooding으로 인하여 반응면에서의 가스 부족에 의해 발생하며 고전류밀도에서 전압의 급격한 저하를 야기한다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 3000 사이클 이후부터는 3가지 손실이 모두 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히, 4000 사이클 이후에는 물질전달손실의 급격한 증가가 관찰되며 이는 PEMFC 내부 물 관리의 문제로 인하여 flooding이 발생한다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서 적용한 in-situ 가습/비가습 AST 방식은 MEA와 촉매의 열화 뿐만 아니라 GDL의 열화도 유발한다는 것을 유추할 수 있다.

가습/비가습 AST에 의한 물질 전달 손실을 보다 정량적으로 비교하기 위하여 AST전과 5000 사이클 이후의 물질 전달 손실을 식 (1)을 이용하여 계산하고 Fig. 4에 나타내었다. 기존에 알려진 바와 같이 AST 전에는 전류 밀도가 낮은 영역에서는 활성화 및 음 손실이 지배적이며 물질전달손실의 영향은 매우 작다. 전류 밀도가 0.6 A/cm^2 이상에서 물질전달손실의 영향이 급격하게 커지는 것을 볼 수 있다. 반면, AST 5000 사이클 이후에는 전류 밀도가 낮은 영역에서도 물질 전달 손실이 발생하는 것을 볼 수 있으며, 전류 밀도가 상승함에 따라 물질 전달 손실이 점진적으로 증가한다.

PEMFC 내부 물의 발생량은 전류밀도에 비례하여 증가한다. AST 전의 결과로부터 0.6 A/cm^2 이하의 전류밀도에서 생성되는 물은 효과적으로 배출되어 반응물의 전달이 방해되지 않는다는 것을 알 수 있다. 반면, AST 이후에는 발생하는 물의 양이 작은 저 전류밀도에서도 물질 전달 손실의 영향이 있는 것을 볼 수 있다. 이는 전기화학반응 중 발생하는 물의 양이 소량인 경우에도 GDL 열화로 인하여 물 배출이 제대로 되지 않고 내부 flooding이 발생한다는 것을 나타낸다. 물질 전달 손실 결과로부터 가습/비가습 AST에 의해 GDL의 열화가 발생하고 이는 PEMFC 내부 유동의 변화도 유발

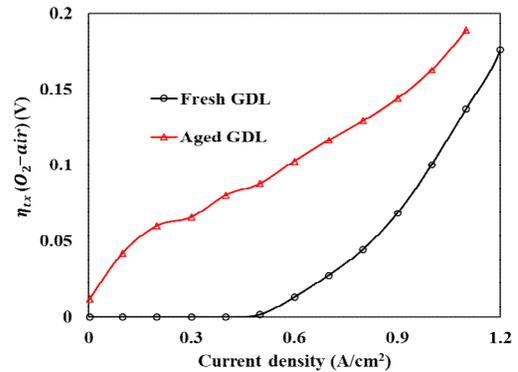


Fig. 4. Mass transport losses before AST and after AST 5000 cycles

한다는 것을 알 수 있다.

물질을 통과할 때 X선 에너지는 Beer-Lambert 법칙에 따라 감소된다:

$$I = I_0 \exp(-\mu x) \quad (2)$$

여기서 μ 는 물질의 흡수 계수이며, I_0 와 I 는 각각 입사된 X선 빔의 세기와 투과된 세기를 나타낸다. X선 투과 방향으로의 물질의 두께 x 는 아래의 $I^* = -\ln(I/I_0)$ 에 비례한다. 물을 공급하기 전과 후에 측정된 영상의 동일한 픽셀 위치에서 빔의 세기를 추출하고, I^* 를 계산하여 물 분포를 Fig. 5에 정량화하였다.

가습/비가습 AST에 의한 GDL 열화 및 그에 따른 내부 물 거동을 분석하기 위하여 AST 5000 사이클 이후 전기화학분석을 하고 셀을 분해하여 GDL을 분리하였다. 이후 Fig. 2에 나타난 특수 설계된 가시화 셀을 이용하여 GDL 내부 물 분포를 측정하였다. 시간 및 물의 투과 방향에 따른 물 분포 변화를 확인하기 위하여 Fig. 5에 시간 및 위치에 따른 I^* 를 contour로 나타내었다. Fig. 5에 보는 바와 같이 GDE를 거쳐 GDL로 물이 투과되고 채널로 물이 배출된 후(150-200초)에는 열화에 관계없이 내부 물 분포가 크게 변화하지 않는 것을 볼 수 있다. 또한, GDL 열화에 의해 내부 물의 공간적 분포가 달라진다.

시간 및 위치에 따른 물 분포 특성을 명확하

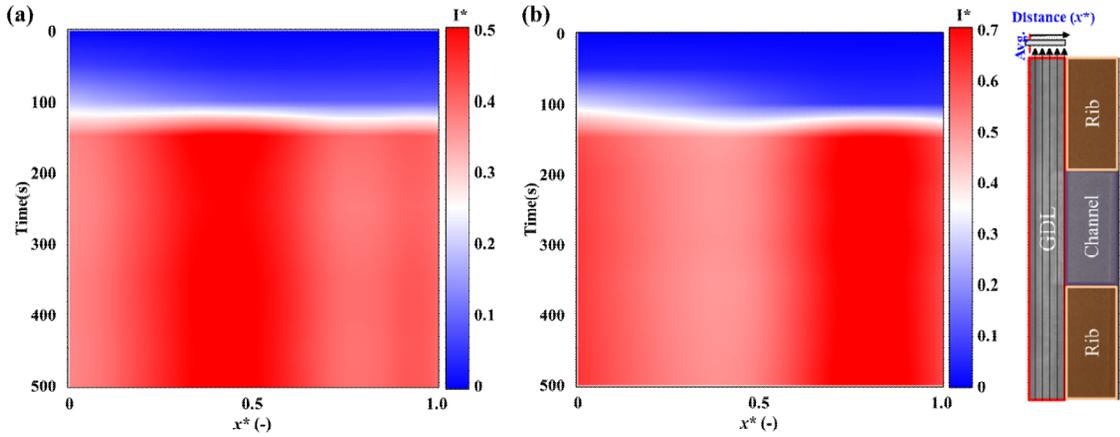


Fig. 5. Spatiotemporal map of I^* for (a) fresh GDL and (b) aged GDL. $I^* = -\ln(I/I_0)$ and x^* is normalized distance with GDL thickness

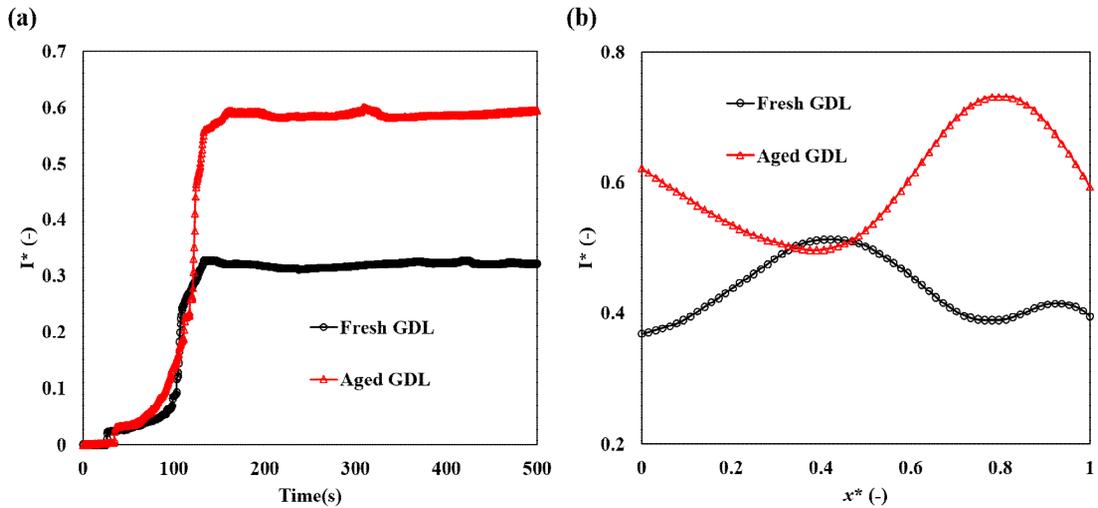


Fig. 6. (a) Time variations of averaged I^* in entire GDL and (b) comparison of I^* distributions along the through-plane direction at $t = 500$ s

게 비교하기 위하여 시간에 따른 GDL 내부의 I^* 와 through-plane 위치에 따른 I^* 를 Fig. 6에 나타내었다. 열화 전과 후의 GDL모두에서 물 함유량이 150초 부근에서 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 시점은 GDL 다공구조를 지나서 채널로 물이 최초로 침투하는 breakthrough가 발생하였음을 의미한다. Breakthrough 이후 GDL 내의 수분 함량은 다르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 기존에 알려진 바와 같이 GDL 열

화로 인하여 GDL 내부 물의 양이 증가한다^(15,16).

Fig. 6(b)에서와 같이 through plane 위치에 따른 물 분포가 GDL 열화에 보다 크게 영향을 받는다. GDL내부로 액체 물이 투과될 때 GDL 내부의 크기가 큰 pore에서 물은 일차적으로 모이고 저항이 낮은 pore 통로를 통하여 물은 채널로 배출이 된다. 따라서 Fig. 5에서 보는 바와 같이 물이 채널로 배출이 된 이후에도 물 함유량이 높은 영역이 GDL 내부에 형성된다. Fresh

GDL에서는 x^* 가 0.1~0.6영역에서 높은 I^* 이 나타나며 이는 큰 pore가 상대적으로 많이 분포한다는 것을 보여준다. AST 이전과 비교할 때 AST 이후 GDL에서는 물 함유량이 높은 영역이 채널 아래에서 형성되는 것을 볼 수 있다.

GDL이 열화가 되면 크기가 큰 pore의 비율이 증가하며 GDL 표면의 소수성 성질이 줄어드는 것으로 알려져 있다⁽¹⁷⁾. 상대적으로 크기가 큰 pore의 비율 증가는 물 함유량이 높은 영역의 I^* 값의 증가를 가져온다. 또한 GDL 표면 소수성 감소로 인하여 cathode 채널에서 물의 제거가 저하되며 GDL 표면에 물이 상대적으로 많이 존재한다고 알려져 있다⁽¹⁸⁾. GDL 표면에서 물이 효과적으로 제거되지 않고 잔류하여 있기 때문에 열화 GDL에서는 열화 전 GDL에 비하여 채널에 가까운 영역에서 높은 물 함유량을 가지는 것을 볼 수 있다. 또한 x^* 가 0에 가까워지면서 I^* 가 증가하는 것은 물 축적에 따른 GDL 내부 저항 증가로 인하여 GDE와 MPL사이에 물의 함유량이 증가하게 되는 것을 보여준다. 이처럼 GDL 내부 높은 물 함유량은 채널에서 GDL을 통하여 전기화학반응이 일어나는 촉매층까지 연료가 전달되는 과정에 있어서 높은 저항을 유발할 수 있으며 이는 Fig. 3 & 4에서 보는 바와 같이 물질 전달 손실의 증가를 야기한다.

4. 결론

본 연구에서는 가습/비가습 사이클을 통한 기계적 스트레스로 PEMFC의 GDL 열화를 유발하고, 이에 따른 GDL 내부 물 거동과 PEMFC 성능 저하를 분석하였다. 가습/비가습 3000 사이클 이후 전압 손실과 최대 전류밀도 감소가 급격히 진행되었으며, 4000 사이클 이후에는 물질 전달 손실이 크게 증가하였다. 이는 내부 flooding으로 인한 가스 전달 저하를 의미한다. GDL 열화 후의 물 거동을 방사광 X선 영상 기법으로 분석한 결과, 열화된 GDL에서는 pore 구조의 변화로 인하여 물의 함유량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한, GDL 표면의 소

수성 감소로 인하여 물 배출 성능이 감소하여 물이 축적되는 위치가 채널 부근으로 변화하는 것을 확인할 수 있다. 본 연구는 실제 운전 조건을 반영한 in-situ AST를 통해 GDL 열화와 물 거동 간의 상관관계를 규명함으로써, 향후 PEMFC의 내구성 향상을 위한 물 관리 전략 개발에 기여할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 수행되었습니다(2024).

참고문헌

- 1) O'Malley, M.J., Anwar, M.B., Heinen, S., Kober, T., McCalley, J., McPherson, M., 2020, Multicarrier Energy Systems: Shaping Our Energy Future. Proceedings of the IEEE, 108, 1437-1456.
- 2) Cano, Z.P., Banham, D., Ye, S., Hintennach, A., Lu, J., Fowler, M., Chen, Z., 2018, Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets, Journal of Nature Energy, 3, 279-289.
- 3) Wang, Y., Diaz, D.F.R., Chen, K.S., Wang, Z., Adroher, X.C., 2020, Materials, technological status, and fundamentals of PEM fuel cells-a review, Materials today, 32, 178-203.
- 4) Olabi, A.G., Wilberforce, T., Abdelkareem, M.A., 2021, Fuel cell application in the automotive industry and future perspective, Energy, 214, 118955.
- 5) Zhao, J., X. Li, 2019, A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability for vehicular applications: Degradation modes and experimental techniques, Energy Conversion and Management, 199, 112022.
- 6) Cullen, D.A., Neyerlin, K.C., Ahluwalia, R.K., Mukundan, R., More, K.L., Borup, R.L., Weber, A.Z., Myers D. J., Kusoglu, A., 2021, New roads and challenges for fuel cells in

- heavy-duty transportation, *Nature energy*, 6, 462-474.
- 7) Yamashita, Y., Itami, S., Takano, J., Kakinuma, K., Uchida, H., Watanabe, M., Iiyama A., Uchida, M., 2017, Degradation mechanisms of carbon supports under hydrogen passivation startup and shutdown process for PEFCs, *Journal of The Electrochemical Society*, 164, F181.
- 8) Perrot C, Meyer G, Gonon L, Gebel G., 2006, Ageing mechanisms of proton exchange membrane used in fuel cell applications, *Fuel Cells*, 6, 10-15.
- 9) Okonkwo, P.C., Otor, C., 2021, A review of gas diffusion layer properties and water management in proton exchange membrane fuel cell system, *International Journal of Energy Research*, 45, 3780-3800.
- 10) Kim, S., Ahn, B.K., Mench, M., 2008, Physical degradation of membrane electrode assemblies undergoing freeze/thaw cycling: Diffusion media effects, *Journal of Power Sources*, 179, 140-146.
- 11) Lee, S., Kim, C., Lee, E., Choi, Y.Y., Jung, S.Y., Sohn, Y.J., Oh, H., 2024, Effects of Gas-Diffusion Layers and Water Management on the Carbon Corrosion of a Catalyst Layer in Proton-Exchange Membrane Fuel Cells, *International Journal of Energy Research*, 2024, 7961519.
- 12) Owejan, J.P., Trabold, T.A., Mench, M.M., 2014, Oxygen transport resistance correlated to liquid water saturation in the gas diffusion layer of PEM fuel cells, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 585-592.
- 13) Hinebaugh, J., Lee, J., Mascarenhas, C., Bazylak, A., 2015, Quantifying percolation events in PEM fuel cell using synchrotron radiography, *Electrochimica Acta*, 184, 417-426.
- 14) Hartnig, C., Manke, I., Kuhn, R., Kardjilov, N., Banhart, J., Lehnert, W., 2008, Cross-sectional insight in the water evolution and transport in polymer electrolyte fuel cells, *Applied Physics Letters*, 92, 134106.
- 15) Arlt, T., Klages, M., Messerschmidt, M., Riesemeier, H., Scholta, J., Banhart, J., Manke, I., 2014, Influence of artificial aging of gas diffusion layers on the water management of PEM fuel cells, *ECS electrochemistry letters*, 3, F7.
- 16) George, M.G., Liu, H., Muirhead, D., Banerjee, R., Ge, N., Shrestha, P., Lee, J., Chevalier, S., Hinebaugh, J., Messerschmidt, M., 2017, Accelerated degradation of polymer electrolyte membrane fuel cell gas diffusion layers, *Journal of The Electrochemical Society*, 164, F714.
- 17) Park, J., Oh, H., Park, H., Moon, J.W., Lee, S.J., Jung, S.Y., 2022, Water transport in polymer electrolyte membrane fuel cell: Degradation effect of gas diffusion layer, *International Journal of Energy Research*, 46, 9058-9070.
- 18) Moon, J.W., Kim, S.K., Jung, S.Y., 2024, In-situ visualization of cathode flow channel in polymer electrolyte membrane fuel cell: Effect of GDL degradation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 51, 1255-1263.