

플러딩 조건 하에서의 고분자 전해질형 연료전지 GDL 표면과 공극 유로 채널에서의 물방울 유동 특성 고찰

김한상^{1†} · 민경덕²

¹서울과학기술대학교 기계·자동차공학과, ²서울대학교 기계항공공학부

Investigation of Water Droplet Behaviour on GDL Surface and in the Air Flow Channel of a PEM Fuel Cell under Flooding Conditions

HANSANG KIM^{1†}, KYOUNGDOUG MIN²

¹Department of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National Univ. of Science & Technology,
172 Gongreung 2-dong, Nowon-gu, Seoul, 139-743, Korea

²School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Gwanak-ro 1,
Gwanak-gu, Seoul, 151-744, Korea

Abstract >> Proper water management is crucial for the efficient operation of polymer electrolyte membrane (PEM) fuel cell. Especially, for automotive applications, A novel water management that can avoid both membrane dry-out and flooding is a very important task to achieve good performance and efficiency of PEM fuel cells. The aim of this study is to investigate the liquid water behavior on the gas diffusion layer (GDL) surface and in the cathode flow channel of a PEM unit fuel cell under flooding conditions. For this purpose, a transparent unit fuel cell is devised and fabricated by modifying the conventional PEM fuel cell design. The results of water droplet behavior under flooding conditions are mainly presented. The water distributions in the cathode flow channels with cell operating voltage are also compared and analyzed. Through this work, it is expected that the data obtained from this fundamental study can be effectively used to establish the basic water management strategy in terms of water removal from the flow channels in a PEM fuel cell stack.

Key words : Water management(물 관리), Polymer electrolyte membrane fuel cell(고분자 전해질형 연료전지), Flooding(플러딩), GDL(가스 확산층), Flow channel(유로), Operating voltage(작동 전압)

1. 서 론

최근 친환경, 고효율 자동차에 대한 관심이 전 세계적으로 집중됨에 따라 차세대 청정 에너지원을 이용한 자동차에 대한 연구 및 개발이 필수적인 과제로 인식

되면서 수소 에너지를 이용한 연료전지가 차세대 무공해 자동차 동력원의 하나로 큰 관심을 얻고 있다. 산업계에서 이용되고 있는 연료전지의 종류는 다양하지만, 자동차용 연료전지는 높은 효율 및 출력 밀도, 짧은 시동 시간, 부하 변동에 따른 빠른 응답 특성 등을 보유하고 있어야 하기 때문에 이에 가장 실용화 단계에 근접한 것으로 평가되고 있는 고분자 전해질형 연료전지를 적용한 연료전지자동차의 상용화 연구가 각국 선진

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

[접수일 : 2012.9.28 수정일 : 2012.10.22 게재확정일 : 2012.10.26]

Copyright © 2012 KHNES

자동차 회사들에서 본격적으로 진행되고 있다¹⁾.

고분자전해질형 연료전지의 경우, 타 연료전지들에 비하여 비교적 낮은 온도(60-90°C)에서 작동하므로 자동차에 적용하기에 적합한 장점을 갖음과 동시에 적절한 성능과 내구성의 확보를 위해서는 전해질 막에 대한 적절한 가습과 전기화학 반응에서 생성되는 물이 2개의 상으로 존재할 수 있다는 물리적인 문제를 갖고 있어 효과적인 물 관리(novel water management)가 자동차용 연료전지의 개발에 매우 중요한 과제로 대두되고 있다¹⁾. 즉, 효과적인 물 관리를 통해 고분자전해질형 연료전지의 성능 및 내구성 향상을 구현하기 위해서는 가스 확산층 및 유로 채널에서의 플러딩(flooding) 현상과 전해질 막의 국부적인 마름(local drying) 현상을 동시에 방지할 수 있어야 한다.

더욱이 자동차용 연료전지의 경우는 운전 특성 상 매우 짧은 시간에 요구 출력이 급격하게 또한 자주 변화하므로 이에 효과적으로 대응하기 위해서는 다양한 조건, 특히 고 전류 밀도 하에서의 성능 특성이 우수하여야 한다. 이를 위해서는 고분자전해질형 연료전지의 성능 개선이 반드시 필요한데, 고 전류 밀도에서의 성능 개선에 연료전지 내 물의 분포 특성이 큰 영향을 미치는 것으로 인식되고 있다. 그러므로 연료전지 시스템 내의 물 분포 특성 파악을 통한 자동차용 연료전지의 최적 설계, 운전 조건 최적화, 제어 등을 효과적으로 구현하기 위한 일환으로 물 관리와 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다²⁻⁸⁾.

이들 대부분의 연구는 고분자전해질형 연료전지의 각 중요 요소들에서의 물 특성을 파악하는 연구에 집중되고 있다. 연료전지 스택을 적용한 실제 실험적인 연구에 의하면 작동하는 연료전지에서의 물 수송 특성은 이는 촉매 층에서의 물 생성, 가스 확산층(gas diffusion layer)에서의 물 전달 특성 및 열전달 과정과 직접 관련되어 있는 것으로 파악되고 있는데, 이런 현상들은 기존 수행, 발표된 연료전지 내 2상 유동 특성 등을 제대로 고려하지 않은 해석적 연구와 I-V 성능 곡선을 통한 분석 연구에서는 그 물리적인 현상을 제대로 파악하기 힘든 경우가 대부분이다⁹⁻¹⁴⁾. 그런데, 연료전지 내 물 분포 파악 연구를 보

다 어렵게 하는 요인 중 하나는 2상 유동과 관련된 물리적인 현상이다. 고분자전해질형 연료전지의 경우 물은 온도에 따른 포화 수증기압 변화에 따라 증발과 응축 현상을 통해 액체와 기체 상태로 존재하는데, 이러한 상변화는 물 분포를 해석적으로 파악하는데 어려움을 가중시킨다. 따라서, 해석적인 연구보다는 실험적인 연구를 통하여 연료전지 내의 물 이동 및 분포를 이해하려는 노력이 여러 실험적인 제한점에도 불구하고 많이 시도되고 있다. 그 중 하나가 직접 가시화 방법을 적용한 연구이다.

직접 가시화(direct visualization)를 이용한 실험적인 연구는 연료전지 채널이나 가스 확산층 표면에서의 물 이동 특성을 파악하는 데 매우 효과적인 방법으로 인식되고 있지만, 실제 연료전지 작동 환경과는 불가피하게 다른 조건에서 연료전지가 작동하게 되고 또한 물 분포의 정량적인 이해에는 그 기술적인 한계가 있는 것이 사실이다^{6,8)}.

하지만, 플러딩 현상 등을 포함한 복잡한 2상 유동과 관련된 고분자전해질형 연료전지의 물 분포 예측을 위한 다차원 물리적 모델의 개발 및 검증에 위한 채널 및 가스 확산층 표면에서의 유동 현상 및 물 이동 특성에 대한 기초 실험 자료를 제시하는 데 이 방법만큼 효율적인 것도 없으므로 여전히 다양한 연구기관에서 적극적인 관심을 갖고 적용하고 있다^{6,8)}.

본 연구에서는 고분자전해질형 연료전지의 유로 채널 내 물 관리 기초 데이터의 확보를 위해 직접 가시화 방법을 적용한 실험 연구를 수행하였다. 이를 위하여 공기극 유로 채널에 대한 가시화가 가능한 단위 연료전지를 설계, 제작하여 플러딩 조건 하에서 유로 채널과 가스 확산층 표면에서 물의 이동 특성을 파악하였으며, 작동 전압 변화에 따른 물 생성을 가시화하고 그 결과를 비교, 분석하였다.

2. 실 험

2.1 직접 가시화용 연료전지

물 분포 가시화 실험에 적용된 단위 연료전지를

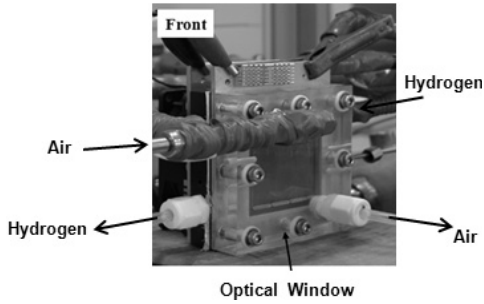


Fig. 1 The transparent unit PEM fuel cell adopted for direct visualization experiment

Fig. 1에 나타내었다. 단위 연료전지의 공기극 가시화를 가능하게 하기 위해서는 공기극 쪽에 유로 채널 내를 관찰할 수 있는 윈도우를 설치하는 것이 필요하다. 따라서 직접 가시화가 가능한 아크릴 재료로 제작된 윈도우를 설계, 적용하였다. 공기극 유로 채널의 경우 아크릴 윈도우와 체결되어 유로 채널을 형성하도록 탄소 복합판을 1mm 두께로 가공하여 사용하였다. 분리판에 적용된 탄소 복합판의 경우 따로 특별한 친수성 처리가 진행되지는 않았다.

유로 채널의 형상으로는 변형된 형태의 평행 사형(parallel-serpentine) 유로를 채용하였다. 이는 공기극 채널 및 수소극 유로 채널에 모두 사용되었다. 보다 원활한 물질 전달이 이루어질 수 있도록 하기 위하여 공기와 수소는 서로 대향류(counter flow)를 유지하면서 공급되도록 하였다.

본 연구에서 사용된 단위 연료전지의 전해질 막의 유효 면적(active area)은 25cm²이고, 전해질막으로는 Nafion® 112 기반의 전해질 막(두께: 50µm)을 사용하였다. 가스 확산층은 그 표면이 소수성 특성을 나타내는 carbon paper 기반의 재질이 적용된 것을 채택하였다. 공기극과 수소극에 황동 재질에 금으로 도금된 집전판(current collector)을 제작하여 각각 부착하여 전기적인 연결을 원활하게 하였다.

그리고, 가시화 연료전지의 작동 온도를 효과적으로 조절하기 위해서는 연료전지 작동 중 전기화학 반응에 의해 생성되는 반응열을 효과적으로 제거할 수 있어야 한다. 이를 위해서 연료전지 셀에 냉각 팬

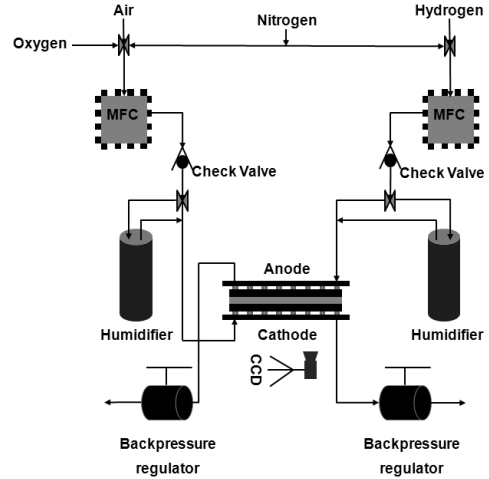


Fig. 2 Schematics of the experimental apparatus for the visualization of air flow channel used for the current study

을 부착하였고 추가적으로 핀을 설계, 장착하여 연료전지에서 방출되는 반응열의 방출 면적을 가급적 늘리고 이에 대한 온도 제어를 통하여 셀의 작동 온도가 유지되도록 하였다.

2.2 직접 가시화용 연료전지 실험 장치

고분자전해질형 연료전지의 직접 가시화 실험을 수행하기 위해서는 가시화 연료전지 이외에 이를 효과적으로 작동시키면서 실험하기 위한 제반 장치들이 추가로 요구된다. 이들 장치는 일반적인 연료전지 성능 시험 장치들과 유사하며 가스(공기 및 수소) 공급 장치, 가습 장치, 연료전지 부하기(loader), 각종 연료전지 작동 조건을 제어하고 모니터링하기 위한 온도, 압력, 습도 센서들로 구성되어 있다.

그리고, 직접 가시화 실험을 위해서는 데이터 처리 및 화상 데이터 분석을 위한 PC, 그리고 가시화용 카메라가 추가로 요구된다. Fig. 2에 본 연구에서 사용된 실험 장치들을 도시하여 나타내었다.

본 연구에서는 일반적으로 연료전지용 가습기로 많이 사용되는 버블러(bubbler) 형태의 가습기를 사용하였다. 또한 실험 중 연료전지의 성능 저하를 가급적 줄이고 원활한 실험 진행을 위하여 불순물(기

Table 1 Detailed experimental conditions used for current study

Case	Base	Modified
Cell temperature (°C)	40	40
Air flow rate (LPM) (m ³ /s)	0.75 (1.25×10 ⁻⁵)	0.75 (1.25×10 ⁻⁵)
H ₂ flow rate (LPM) (m ³ /s)	0.16 (2.67×10 ⁻⁶)	0.16 (2.67×10 ⁻⁶)
Relative humidity (RH) (%)	Fully humidified	Fully humidified
Operating cell voltage (V)	0.4	0.6
Average current (A)	22.3	15.4

름때 등 제거)과 습기가 제거된 건조 공기를 공기극에 공급하였고, 고순도(99.99%)의 수소를 수소극에 공급하였다. 공기 및 수소의 필요 유량은 유량 조절 장치(MFC, mass flow controller)에 의해 제어, 연료전지로 공급되었다.

공급 기체의 온도, 습도, 유량, 상대 습도, 단위 셀의 온도 등의 실험 변수들은 Labview™ 기반의 데이터 처리 시스템에 의하여 각각 저장되고 결과 분석에 사용된다.

2.3 실험 진행

고분자전해질형 연료전지 직접 가시화 실험을 위하여 기본 조건(base case)을 정하고 그 조건에서의 공기극 유로 채널에서의 물 분포를 가시화하였다. 본 연구에서는 작동 전압을 주요 작동 변수로 지정하였다. 작동 전압은 고 전류 밀도 하에서 공기극 플러딩이 발생할 수 있는 조건(0.4V)과 0.6V에 대한 가시화 실험을 수행하였다. 자세한 연료전지의 작동 조건을 포함한 실험 조건은 Table 1에 정리하여 나타내었다.

고분자전해질형 연료전지의 물 분포 가시화 실험은 다음과 같은 순서로 진행되었다.

- 주어진 기본 조건(작동 온도, 유량, 습도)에서 연료전지를 개회로 전압(OCV) 상태에서 일정 시

간(약 30~40분) 안정화되도록 작동시킨다.

- 부하기를 통해 선정된 작동 전압으로 유지시킨다(이 때, 나타나는 전류 밀도 값을 파악하고 정상 상태에 도달하는지를 면밀히 확인함).
- 부하기 작동과 동시에 카메라를 이용하여 공기극 유로 채널 부분에서 촬영을 준비한다.
- 가시화 영역에서 작은 물방울이 관측되었을 때 부터 촬영을 진행한다.

가시화 실험의 경우, 재 실험을 수행하거나 작동 조건이 변화하였을 경우 이전 작동 조건이 다음 실험 결과에 영향을 미치지 않도록 최소화하는 것이 필요하다. 이를 위해서 1 set의 실험이 완료된 다음에는 개회로 전압 조건으로 변경하여 연료전지 내의 물 분포를 가급적 초기화시키는 방향으로 진행하도록 고려하였다. 이러한 방법 중 하나로 1개 조건에 대한 실험이 끝난 후 질소를 바이패스(by-pass)시켜 단위 연료전지로 공급하여 물 분포를 초기화시키고 다음 실험을 진행하는 것으로 하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 연료전지 유로 채널 내의 물방울 이동 특성

본 연구의 연료전지 기본 운전 조건에서의 유로 채널 내 물 이동 특성을 직접 가시화하여 시간에 따라 이미지로 표시한 것을 Fig. 3에 나타내었다. 고분자전해질형 연료전지 채널 내 물은 전기화학 반응에 의하여 공기극 측 촉매층 경계면에서 생성되는데, 연료전지의 작동이 계속 진행되면 우선 촉매층 내에서 축적된 물은 공기극 가스 확산층 쪽으로 이동되고 가스 확산층 내의 불규칙하게 분포되는 공극을 채우게 된다. 그리고 공극(pore)을 채운 이후에는 국부적으로 유로 채널 쪽으로 물은 이동된다. 본 연구에서는 이와 같이 유로 채널로 나타난 물을 실험을 통해 직접 가시화한 것이다.

Fig. 3에서 보듯이 공기극 유로 내 물방울은 가스 확산층의 불규칙한 공극 구조로 인하여 유로 내의

Cathode/Cell/Anode(°C) = 40/40/40, A/C(LPM) = 0.16 / 0.75, Operating Voltage = 0.4 V

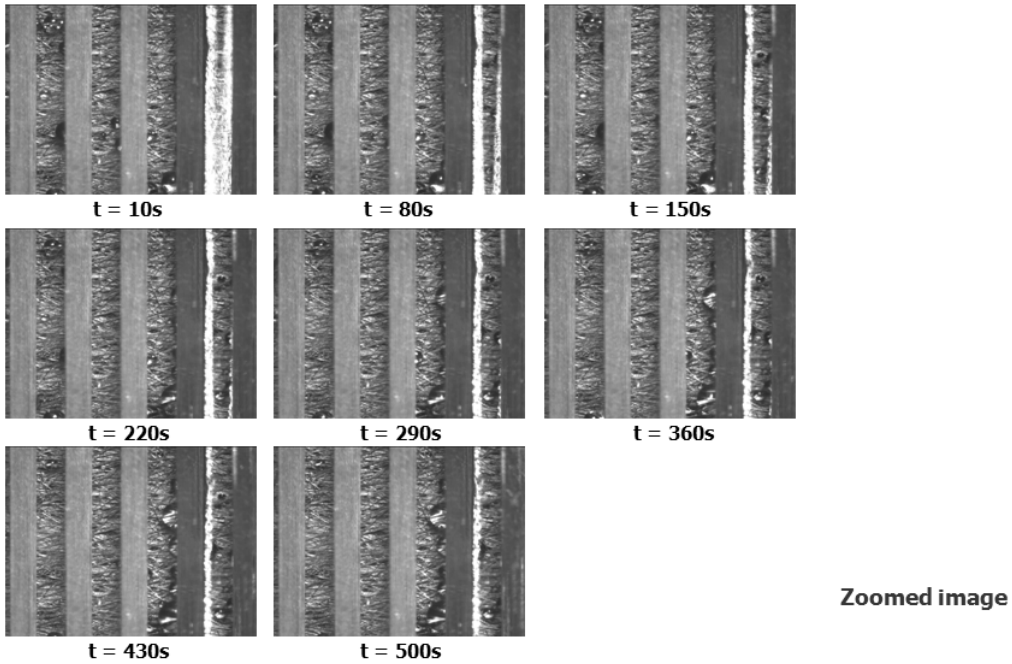


Fig. 3 Picture images of dynamics of water droplets in the cathode flow channels of transparent unit fuel cell at base condition

선택된 위치에서 주로 물방울이 나타남을 알 수 있다. 이는 유로 채널로 이동하는 물의 이동 경로가 실험에 사용된 가스 확산층의 구조에 따라 결정되는 것을 의미한다. 따라서 가스 확산층의 구조에 대한 이해가 물의 이동 특성을 이해하는 데 있어서 매우 중요한 과제임을 알 수 있다.

더욱이, 생성된 물방울의 위치에 따라 그 성장 및 변형 형태도 크게 달라짐을 본 실험을 통해 알 수 있다.

유로 채널의 가운데에 나타난 물방울은 채널 리브의 영향을 받지 않고 아크릴 윈도우 윗면에서 촬영된 2차원 단면 모양으로는 거의 원형에 가까운 형태로 성장함을 알 수 있다. 따라서, 그 크기도 유로 채널의 폭에 상응하는 크기까지도 성장함을 관찰할 수 있다. 하지만, 채널 리브 근처의 가스 확산층 표면을 통하여 나타난 물방울은 초기에는 원형 형태로 성장하지만, 채널 리브와 접촉하게 되면 채널 벽의 젖음 특성에 큰 영향을 받게 되어 그 형태가 변화하고, 채널 벽에서 2상 유동 형태의 필름 유동을 형성하는 등

유로 채널 가운데에서 나타난 물방울의 경우와는 매우 다른 성장 및 이동 특성을 나타냄을 효과적으로 파악할 수 있다.

3.2 작동 전압에 따른 유로 채널 내의 물 분포

3.2.1 작동 전압 0.4V에서의 직접 가시화 결과

작동 전압 0.4V에서 공기극 유로 채널 및 가스 확산층 표면에서의 물 분포 특성을 직접 가시화한 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

본 실험의 경우, 작동 전압 0.4V에서 약 22-23A의 작동 전류를 얻을 수 있었다. 이와 같이 비교적 고 전류 밀도 조건에서 연료전지를 구동시키면 저 전류 밀도의 경우에 비해서는 많은 물이 생성되므로 생성된 물이 연료전지 유로 채널 쪽으로 이동되어 채널 내에 많은 물이 축적되고 이러한 상황이 지속되면 공기극 플러딩이 발생하게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 고 전류 밀도 조건 하에서 연료전지 공기극 채

Cathode/Cell/Anode(°C) = 40/40/40, A/C(LPM) = 0.16 / 0.75, Operating Voltage = 0.4 V

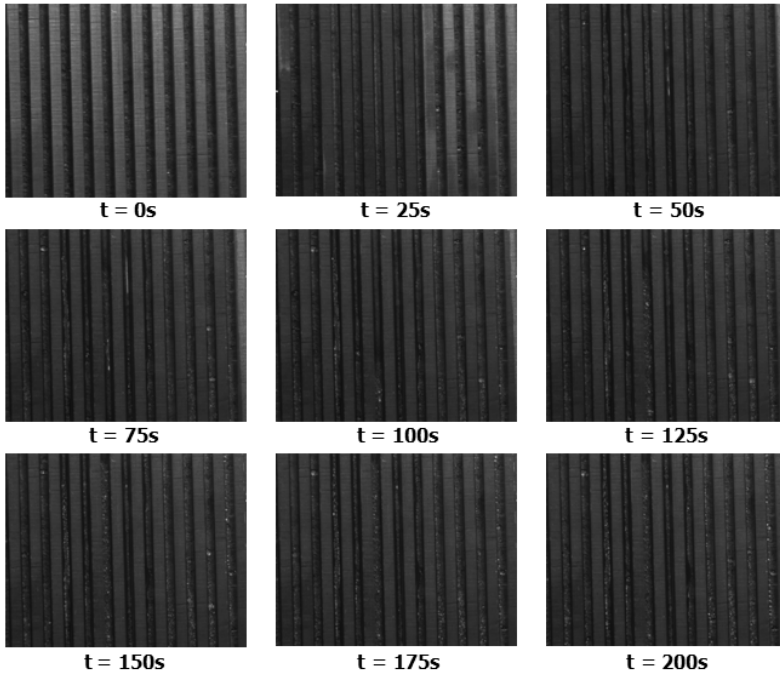


Fig. 4 Picture images of liquid water distribution in the cathode flow channels at the operating cell voltage of 0.4V

널에서 물 분포와 이동 특성 파악을 통하여 플러딩 현상의 발생도 함께 관찰할 수 있다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 비교적 고 전류 밀도인 조건에서 연료전지를 구동했을 때 시간이 지날수록 유로 채널 내에 많은 물이 축적됨을 알 수 있다.

실제로 고 전류 밀도 조건으로 연료전지 운전 조건이 변화하면 작동 전류 증가에 의한 증가된 물 생성량이 촉매층(catalyst)이나 전해질막의 물 분포에 영향을 미친 후 가스 확산층이나 유로 채널의 물 분포에 영향을 미치게 된다¹¹⁾. 실제로 작동 전류는 매우 짧은 시간(ms order)에 증가될 수 있지만, 연료전지 내 물 분포는 그와 같이 빨리 변화하지는 못하고 서서히 변화하여 주어진 작동 조건을 만족시킬 수 있게 연료전지 내에서 물 균형을 맞추어 가게 된다. 심지어, 정상 상태에서조차 연료전지 내의 주요 작동 조건 등이 조금씩은 변화하고 있어 촉매층이나 전해질막 물 분포에 영향을 미쳐 물의 양 변화를 나타낸

다고 알려져 있다.

특히, 연료전지 설계 측면에서는 이와 같이 축적된 물을 효과적으로 연료전지 밖으로 배출시키는 것이 고 전류 밀도 하에서의 성능 및 효율 개선에 필수적인데, 이를 위해 유로 채널로 흐르는 공기의 유량을 증가시켜 압력차에 의하여 채널 내의 물방울을 밀어 내어 배출시키는 방안, 작동 온도를 조금 높여 포화 수증기압을 증가시키고 이를 통해 물의 증발을 촉진시키는 등 다양한 방안이 활용되고 있다. 다만 다양한 물 분포 특성에 따라 적절한 방법을 강구하여야 하는 점이 물 관리 측면의 복잡한 문제를 야기하고 있는 상황이다.

3.2.2 작동 전압 0.6V에서의 직접 가시화 결과

Fig. 5는 작동 전압 0.6V에서 연료전지를 작동시킨 경우, 직접 가시화 기법을 통하여 공기극 유로 채널과 가스 확산층 표면에서의 물 분포를 촬영한 결

Cathode/Cell/Anode(°C) = 40/40/40, A/C(LPM) = 0.16 / 0.75, Operating Voltage = 0.6 V

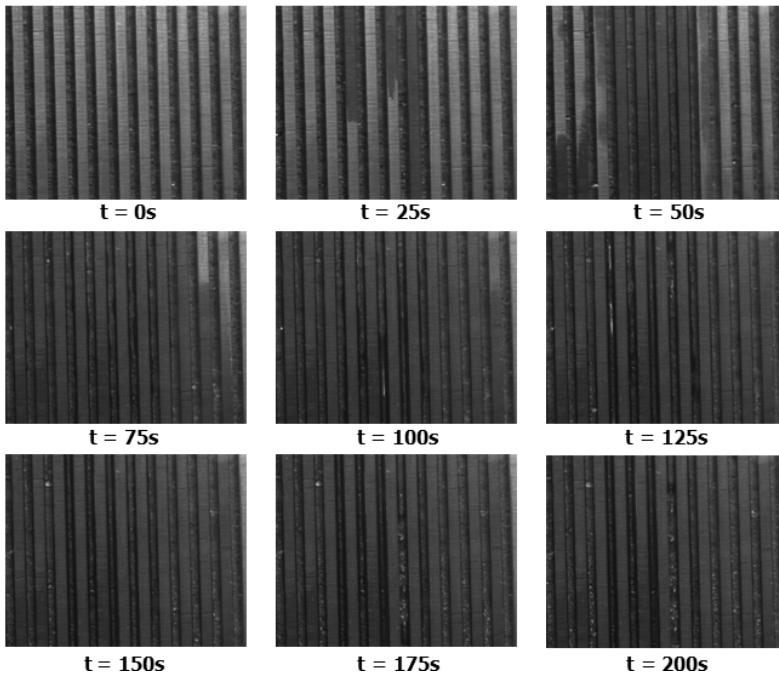


Fig. 5 Picture images of liquid water distribution in the cathode flow channels at the operating cell voltage of 0.6V

과이다.

연료전지의 작동 전압에 따라 전류 밀도는 변화하게 된다. 따라서, 0.4V의 경우에 비하여 작은 15A-16A의 평균 작동 전류를 나타내므로 생성되는 물의 양도 0.4V의 경우에 비하여 작아진다. 유로 채널 내에 존재하는 물의 양도 0.4V의 경우에 비해서는 작아짐을 Fig. 5에서 파악할 수 있다. 다만, 연료전지 내의 물 분포 특성의 변화가 정상 상태 작동 조건에서도 시간에 따라 조금씩 성능이 변화하는 현상을 초래하므로 연료전지의 전류 밀도 크기는 시간에 따라 조금씩 바뀔 수 있다.

4. 결 론

고분자전해질형 연료전지의 작동 시 유로 채널 내 물 이동 특성에 대한 기초적인 관찰을 위해 직접 가시화 방법을 적용한 실험 연구를 수행하였다. 이를 위하여 가시화용 연료전지를 설계, 제작하고 공기극

유로 및 유로와 가스 확산층 표면에서 물 분포 특성에 대한 실험적인 연구를 수행하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 연료전지 유로 채널 내에서 물방울은 가스 확산층 구조의 random 특성으로 인해 그 생성 위치는 불규칙적으로 생성되며, 그 형태와 성장은 물방울이 발생된 유로 채널에서의 위치에 따라 큰 영향을 받는다.
- 2) 유로 채널 중앙에 위치한 물방울은 유로 폭과 비슷한 크기로 성장하는 반면, 채널 구석 근처에서 발생한 물방울은 채널 옆 벽면의 영향을 받아 그 형태가 달라진다. 특히, 유로 채널 옆 벽면의 표면 젖음 특성에 따라 물방울의 변형 및 성장 형태가 크게 달라짐을 파악할 수 있다.
- 3) 작동 전압이 낮은 경우는 유로 채널 내 물이 보다 많이 존재함을 알 수 있다. 채널 플러딩과 같은 채널 막힘 현상이 국부적으로 나타나지만, 채널

대부분을 막을 정도는 아님을 알 수 있다. 또한 전류는 22A-23A 사이에서 변화하여 채널에서의 국부적인 채널 플러딩 현상이 연료전지 성능에 미치는 영향은 본 연구에서는 크지 않음을 간접적으로 확인할 수 있다.

- 4) 본 연구를 통해 파악한 물 분포 직접 가시화 기초 결과는 자동차용 연료전지의 효과적인 물 관리 실현을 통한 성능, 효율 향상과 주행 제어 전략 마련을 위한 연료전지자동차 시스템 모델의 구축 및 검증에 필수적인 물 관련 기초 데이터로 제공 될 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1. J. Larminie and A. Dicks, Fuel Cell Systems Explained, John Wiley & Sons Ltd., UK, 2003.
2. A. Hakenjos, H. Muentert, 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. M. I. Rosli, D. J. Borman, D. B. Ingham, M. S. Ismail, L. Ma, and M. Pourkashanian, "Transient PEM Fuel Cells for Direct Visualization Experiments", Journal of Fuel Cell Science and Technology, Vol. 7, Issue 6, 2010, pp. 061015-1-061015-7.
9. S. Kim, S. Shimpalee, and J.W. Van Zee, "Effect of Flow Field Design and Voltage Change Range on the Dynamic Behavior of PEMFCs", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 152, No. 6, 2005, pp. A1265-1271.
10. Y. Wang and C.-Y. Wang, "Two-Phase Transients of Polymer Electrolyte Fuel Cells", Journal of The Electrochemical Society, Vol. 154, No. 7, 2007, pp. B636-B643.
11. H. Wu, P. Berg, and X. Li, "Non-isothermal transient modeling of water transport in PEM fuel cells", Journal of Power Sources, Vol. 165, 2007, pp. 232-243.
12. J. Cho, H.-S. Kim, and K. Min, "Transient response of a unit proton-exchange membrane fuel cell under various operating conditions", Journal of Power Sources, Vol. 185, 2008, pp. 118-128.
13. H.-S. Kim and K. Min, "Experimental investigation of dynamic responses of a transparent PEM fuel cell to step changes in cell current density with operating temperature", Journal of Mechanical Science and Technology, Vol. 22, 2008, pp. 2274-2285.
14. S. Jeon and K. Kim, "Prediction of bypass flow rate through gas diffusion layer in PEMFC with serpentine flow channels", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, No. 4, 2012, pp. 293-299.