

# 연료전지차 스택 내 국부적 수소 부족에 기인한 셀 역전압 거동 모사에 대한 연구

박지연 · 임세준 · 한국일 · 홍보기<sup>†</sup>

현대자동차 연구개발본부 연료전지개발1팀

## A Study to Simulate Cell Voltage-Reversal Behavior Caused by Local Hydrogen Starvation in a Stack of Fuel Cell Vehicle

JI YEON PARK, SE JOON IM, KOOKIL HAN, BO KI HONG<sup>†</sup>

Fuel Cell Vehicle Team 1, R&D Division, Hyundai Motor Company,  
104, Mabuk-Dong, Giheung-Gu, Yongin-Si, Gyeonggi-Do, 446-912, Korea

**Abstract** >> A clear understanding on cell voltage-reversal behavior due to local hydrogen starvation in a stack is of paramount importance to operate the fuel cell vehicle (FCV) stably since it affects significantly the cell performance and durability. In the present study, a novel experimental method to simulate the local cell voltage-reversal behavior caused by local hydrogen starvation, which typically occurs only one or several cells out of several hundred cells in a stack of FCV, has been proposed. Contrary to the conventional method of overall fuel starvation, the present method of local hydrogen starvation caused the local cell voltage-reversal behavior in a stack very well. Degradation of both membrane electrode assembly (i.e., pin-hole formation) and gas diffusion layer due to an excessive exothermic heat under voltage-reversal condition was also observed clearly.

**Key words** : Hydrogen Starvation(수소 부족), Voltage-Reversal(역전압), Pin-Hole(핀 홀), Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell(고분자 전해질막 연료전지), Carbon Corrosion(탄소 부식)

### 1. 서 론

일반적으로 자동차용 연료전지로는 고분자 전해질막 연료전지(PEMFC: Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell)가 적용되고 있는데, 이 고분자 전해질막 연료전지가 자동차의 다양한 운전조건에서 최소 수십 kW 이상 높은 출력 성능을 정상적으로 발휘하려면, 넓은 전류 밀도 범위에서 안정적으로 작동 가능

해야 한다<sup>1)</sup>. 연료전지의 전기 생성을 위한 반응을 보면, 연료전지의 산화극인 애노드(Anode)에 공급된 수소가 수소 이온(Proton)과 전자로 분리된 후, 수소 이온은 고분자 전해질 막을 통해 환원극인 캐소드(Cathode) 쪽으로 이동하고, 전자는 외부 회로를 통해 캐소드로 이동하게 되고, 캐소드에서 산소 분자, 수소 이온 및 전자가 함께 반응하여 전기와 열을 생성함과 동시에 반응 부산물로서 물을 생성하게 된다. 연료전지 내 전기화학 반응시 생성되는 물은 적절한 양이 존재하면 막-전극 접합체(MEA: Membrane Electrode Assembly)의 가습성을 유지시켜 주는 바람

<sup>†</sup>Corresponding author : boki.hong@hyundai.com

[ 접수일 : 2013.7.4 수정일 : 2013.8.14 게재확정일 : 2013.8.31 ]

Copyright © 2013 KHNES

직한 역할을 하지만, 과량의 물 발생 시 이를 적절히 제거해 주지 않으면 “물 범람 또는 홍수(Flooding)” 문제가 발생하게 되고 이 범람된 물은 반응 기체들이 효율적으로 연료전지 셀 내부로 공급되는 것을 방해하는 역할을 하여 전압 손실이 더욱 더 커지게 된다.

이러한 연료전지 내 물 범람, 동결기의 얼음 생성 또는 반응 기체(Reactant Gas) 공급 장치 이상 등의 다양한 원인들에 의해 PEMFC에 사용되는 반응 기체들인 애노드의 수소 및 캐소드의 산소 또는 공기의 공급 부족 문제가 모두 발생할 수 있는데, 이 중 특히 애노드의 수소 연료 부족(Hydrogen Fuel Starvation)이 연료전지 셀 성능 및 내구성에 매우 치명적인 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다<sup>2-6)</sup>.

일반적으로 수소 공급 부족 현상은 크게 연료전지 셀 전체적으로 수소 공급이 부족해지는 “전체적인 수소 부족(Overall Hydrogen Starvation)” 현상과 셀 전체적인 수소 공급은 충분하나 불균일한 분배 (Uneven Distribution)로 인해 부분적으로 수소 공급이 부족해지는 “국부적인 수소 부족(Local Hydrogen Starvation)” 현상으로 분류할 수 있다<sup>7)</sup>. 이러한 수소 부족 현상은 특히 수소 기체의 불균일한 공급 및 분배, 갑작스러운 연료전지 로드(Load) 요구량 증가 및 연료전지 시동(Start-Up) 등의 운전조건에서 자주 발생한다. 이 중 전체적인 수소 부족 현상은 연료전지 운전 장치 (Balance of Plant) 등에서 센서를 사용하여 수소 공급 상태 등을 모니터링 함으로써 비교적 용이하게 검지할 수 있으나, 일부 셀에서의 국부적인 수소 부족 현상은 연료전지 스택(Stack)의 각 셀을 스택 전압 모니터링(Stack Voltage Monitoring) 장치 등으로 면밀하게 모니터링 해야만 검지할 수 있기 때문에 훨씬 많은 노력과 복잡한 제어 시스템을 요구하게 된다. 여기서 스택이라 함은 2개 이상의 다중 셀로 구성된 연료전지를 의미하고, 일부 셀이라 함은 1개 이상이되 스택 내 전체 셀 수의 50% 미만인 것을 의미한다.

Fig. 1은 실제 연료전지차량의 스택에서 발생한

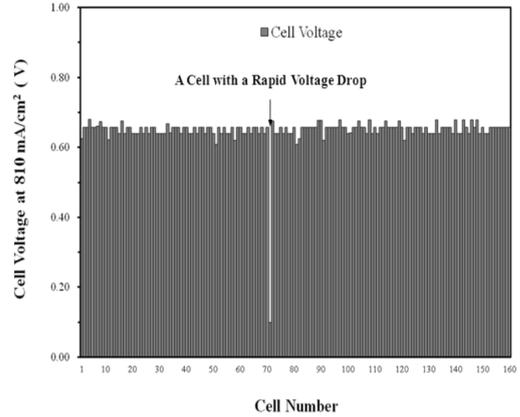
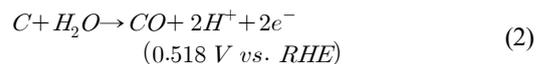
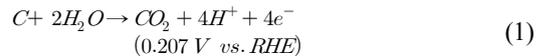


Fig. 1 A rapid drop of a cell voltage generated in a stack of an actual fuel cell vehicle

갑작스런 셀 전압 급락 현상을 예시한 것이다.

Fig. 1의 스택은 정상적으로 5분 이상 운전되던 도중 1개 셀의 전압이 갑자기 0.1V로 급락하는데 이러한 갑작스런 셀 전압 저하 현상이 발생하면 연료전지차량의 지속적인 운행을 위해 바로 차량 내 스택의 운전을 정지하고 해체하여 이러한 비정상 운전 셀을 교체, 수리해 주어야 한다. 이러한 현상은 대부분 국부적인 수소 공급 부족에 의해 발생하는데 이렇게 전압이 급락하는 셀을 방치하고 계속 차량을 운전할 경우 전압이 0V 미만이 되는 셀 역전압 상태에 빠르게 도달하여 MEA 촉매 담체(Catalyst Support)인 탄소의 부식을 가속화할 수 있다. 일반적으로 MEA 촉매 담체에 많이 사용되는 탄소는 PEMFC의 운전조건에서 열역학적으로 불안정하여 다음의 식 (1) 및 (2)와 같이 산화하여 부식될 수 있다<sup>8-10)</sup>.



여기서 RHE(Reference Hydrogen Electrode)는 표준수소전극을 의미한다. 위 식의 산화 반응들은 일반

적으로는 느리게 진행되나 연료전지의 고전압(High Voltage) 조건에서는 빠르게 진행될 수 있는데 이러한 고전압 조건은 수소 부족이나 연료전지차의 시동/정지(Shut Down) 조건에서 많이 유발된다. 또한 이러한 셀 역전압 조건이 지속되어 약 -2V 이하의 과도한 역전압 상태에 도달하게 되면 연료전지 셀의 발열이 과다해져서 MEA 및 기체확산층 등을 전반적으로 파손시키며, 특히 MEA에 핀 홀 (Pin-Hole)이 발생하고 셀이 전기적으로 단락되는 (Electrically Shorted) 심각한 문제들을 야기할 수 있다. 이렇게 되면 결국 더 이상 연료전지 셀을 정상적으로 운전할 수 없는 셀 고장 (Cell Failure) 상태에 도달하게 된다<sup>11)</sup>.

그러므로 이러한 역전압에 도달하기 전에 연료전지차량을 적절히 제어하여 안정적으로 운행할 수 있도록 하고, 또한 이러한 역전압에 대한 내구성이 우수한 연료전지 부품 및 시스템을 개발하는 것이 중요하다. 그러나 국부적 수소 부족에 의한 셀 역전압 현상은 연료전지차량 운행 전에 미리 이상 여부를 검지하기 어렵기 때문에 이러한 현상을 재현성있게 잘 모사할 수 있는 표준 진단 기법을 확보하는 것이 선행되어야 한다. 기존에 역전압 현상을 모사하기 위해 많이 사용되던 애노드에 수소 대신 질소를 공급하거나 또는 애노드의 수소 화학양론비(S. R. : Stoichiometric Ratio)를 감소시켜 전체적인 수소 공급량을 감소시키는 방법들로는 이러한 실제 연료전지차량 내 수백 개 셀로 구성된 스택에서 발생하는 일부 셀의 국부적 수소 부족에 의한 셀 성능 급락 및 역전압 발생 현상을 재현성있게 모사하는 것이 매우 어려웠다. 따라서 이러한 국부적 셀에서의 역전압 모사 방법의 부재로 인해 이를 해결하기 위한 연료전지차량 제어법이나 역전압 내구성이 우수한 연료전지 부품소재를 개발하는 것이 원활하지 않은 문제점들이 있었다.

본 연구에서는 실제 연료전지차량의 스택에서 발생하는 국부적 수소 부족에 의한 셀 역전압 현상을 재현성 있게 모사할 수 있는 방법을 제시하고, 이러한 제어된 조건에서 역전압에 노출된 연료전지 셀의

성능 및 MEA 미세구조 변화를 연구하였다.

## 2. 실험

### 2.1 수소 부족에 의한 역전압 발생 모사 시험

Fig. 2에 연료전지내 수소 부족에 의한 역전압 모사 방법들에 대해 서로 비교하였다. Fig. 2(a)는 기존에 많이 사용되던 방법으로 수소가 매우 부족하거나 또는 수소 공급이 전면 중단된 가혹한 상태를 모사하기 위한 것인데 연료전지 애노드에 수소 공급을 중단하고 대신 질소를 공급하여 연료전지를 운전하여 역전압을 유도하는 방법이다<sup>10-13)</sup>.

이렇게 할 경우 연료전지에 수소 공급이 중단된 매우 가혹한 조건에서 연료전지 스택 전체적으로 발

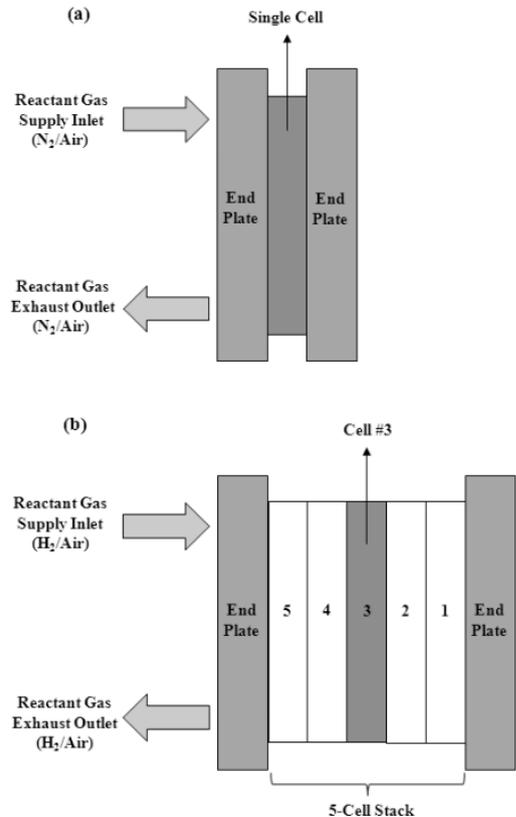


Fig. 2 Methodology to simulate experimentally the cell voltage-reversal behavior of fuel cells caused by either overall (a) or local (b) hydrogen starvation

생하는 역전압 현상을 모사할 수는 있으나, 실제 연료전지차량 스택에서와 같이 수백 개의 셀 중 일부 몇몇 셀들만 전압이 급락하는 국부적인 역전압 발생을 모사하기는 매우 어렵다. 또한 이러한 방법은 기존에 발표된 바와 같이 애노드에 수소대신 질소를 공급한 후 주로  $40 \sim 200\text{mA}/\text{cm}^2$ 와 같은 저전류밀도 영역에서만 운전이 가능한 단점이 있다<sup>12-13)</sup>. 본 연구에서 전체적인 수소 공급 차단시험은 단셀(Single Cell)을 사용하여 애노드에 수소 대신 질소를 공급하고 캐소드에 공기를 S. R.=2.0으로 공급한 후  $200\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 정전류밀도를 인가해 실시하였다.

Fig. 2(b)는 본 연구에서 제안하는 실제 연료전지차의 스택에서 발생하는 국부적 수소 부족 현상을 모사하기 위한 방법이다. 먼저 연료전지 5셀 스택의 전체 애노드에 수소를 정상적으로 공급하고  $480\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 중전류밀도를 가하면서 운전하되 5셀 스택 중 가운데 3번 셀의 수소 공급 입구부의 일부를 막아 이 셀에서만 국부적인 수소 부족을 유발한다. 이렇게 할 경우 연료전지차량 시동 이후 0V 이상 전압에서 최소 5분 이상 정상적으로 운전되다가 예상치 못하게 갑자기 발생하는 1개 셀의 국부적 역전압 현상을 모사할 수 있다. Fig. 3에 5셀 스택 중 국부적 수소 공급 부족에 의해 역전압이 유발되는 3번 셀의 구조를 상세히 나타내었다.

3번 셀을 구성하는 분리판 매니폴드(Manifold) 중 수소 공급 입구의 약 83%를 폴리이미드(Polyimide) 필름으로 차단하여 5셀 스택의 전체 애노드에는 S. R. = 1.5로 수소가 정상적으로 공급되지만 이 3번 셀에서만 국부적 수소 부족이 유발되도록 고안하였다. 캐소드에는 공기를 S. R.=2.0으로 공급하고  $480\text{mA}/\text{cm}^2$ 의 정전류밀도를 인가하여 각 셀들의 전압 변화를 관찰하였다.

전체적 수소 부족 및 국부적 수소 부족에 의한 역전압 발생 거동 모사 시험 모두 셀 입구 온도 =  $65^\circ\text{C}$ , 애노드/캐소드 상대 습도(R. H.: Relative Humidity) =  $50\%/50\%$  조건을 사용하였다.

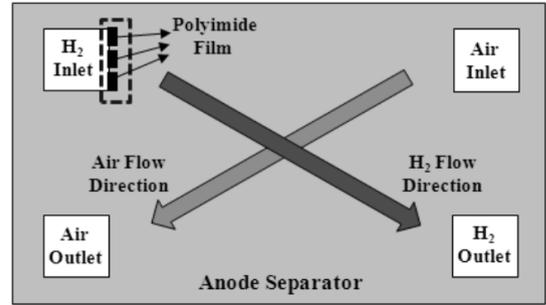


Fig. 3 A schematic illustration of an anode separator of a voltage-reversal cell (#3) in 5-cell stack caused by blocking about 83% of H<sub>2</sub> inlet manifold region with polyimide film

## 2.2 전기화학적 셀 성능 평가

연료전지 셀의 전기화학적 성능은 5셀을 기준으로 전압-전류밀도 분극(Potential-Current Density Polarization) 곡선을 측정하여 실시하였다. 셀 성능 측정은 한국 원아테크사의 1kW 급 상용화 장비를 사용하여 실시하였으며, 측정 시 사용한 조건은 본 연구에서 별도의 언급이 없는 한 다음과 같다: 셀 입구 온도= $65^\circ\text{C}$ , 반응 기체 압력=상압(Near Ambient Pressure), 애노드 수소/캐소드 공기 R. H.= $50\%/50\%$ , 애노드 수소/캐소드 공기 S. R.= $1.5/2.0$ .

## 2.3 MEA 분석

역전압 발생에 의한 MEA의 손상 정도를 형태학적으로 관찰하기 위하여 주사전자현미경(SEM: Scanning Electron Microscope, Inspect™, FEI Co., USA)을 사용하여 역전압 모사 평가 전후의 MEA 애노드 촉매층 표면 변화를 관찰하였다.

또한 에너지 분산형 X선 분광기(EDX: Energy Dispersive X-Ray Spectrometer, System-6, Thermo Noran Inc., USA)를 사용하여 MEA 촉매층 표면의 원소 분석을 실시하였다.

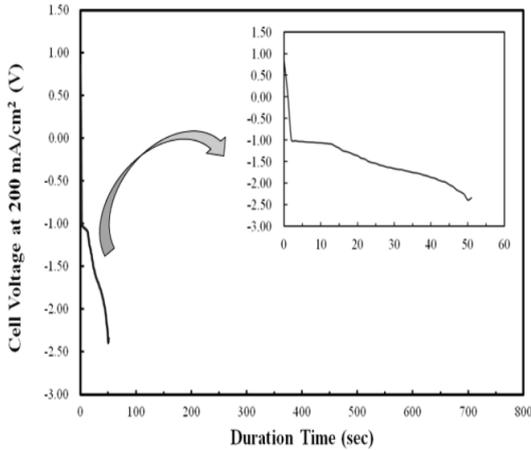


Fig. 4 A change in cell voltage under overall hydrogen starvation condition where nitrogen gas is supplied instead of supplying hydrogen to the anode.

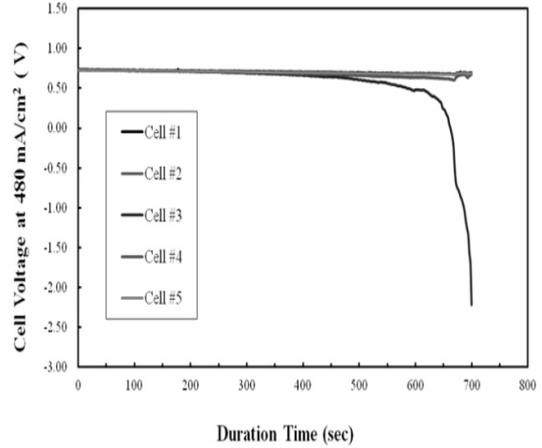


Fig. 5 A change in cell voltage under local hydrogen starvation condition

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 전체적 수소 부족에 의한 역전압 발생 모사

Fig. 4는 연료전지 애노드에 수소의 공급을 완전히 차단하고 대신 질소 기체를 공급하여 가혹한 수소 부족 조건에서 200 mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 인가했을 때의 셀 전압 거동을 모사한 결과를 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 연료전지가 정상적으로 운전되는 시간이 매우 짧아 200mA/cm<sup>2</sup>의 저전류밀도에서도 불과 약 2초 후 셀 전압이 0V 미만으로 급격히 감소하여 역전압이 발생하였고, 약 50초 후에는 셀 전압이 약 -2.4V까지 빠르게 감소하였다. 따라서 이와 같은 전체적인 수소 부족 모사법으로는 실제 연료전지차량 스택에서와 같이 정상적으로 5분 이상 운전되다가 국부적으로 1개 셀에서 역전압이 발생하는 현상을 모사하기가 매우 어려운 것을 알 수 있다.

#### 3.2 국부적 수소 부족에 의한 역전압 발생 모사

본 연구는 기존에 사용되던 수소 공급 중단 또는 전반적인 수소 S. R. 감소에 따른 전체적인 수소 공급 부족에 의한 역전압 발생과는 다르게, 수소 S. R.

은 정상적으로 유지하면서도 분리판의 수소 공급 입구가 과량의 액상 물, 얼음 또는 기타 이물질에 의해 국부적으로 막히는 경우를 모사한 것이다. 이 경우 국부적으로 수소 공급 문제가 발생한 연료전지 셀이 다른 정상 셀들(Normal Cells)과 마찬가지로 수 분 이상 정상적으로 운전되다가 수 분 후 역전압이 발생하게 되어, 실제 연료전지차량에서 발생하는 정상적인 운전상태에서 1개 또는 몇 개 셀에서 급격히 발생하는 국부적 역전압 현상을 모사할 수 있게 된다.

Fig. 5에 연료전지 5셀 스택의 3번 셀에서만 발생하는 국부적 수소 부족에 의한 역전압 발생 현상을 나타내었다.

5셀 스택에 480mA/cm<sup>2</sup>의 전류밀도를 인가한 경우 5셀 스택 중 국부적 수소 부족을 의도적으로 유발시킨 3번 셀은 다른 셀들과 마찬가지로 약 400초까지 약 0.73V에서 정상적으로 운전되다가 이후 셀 전압이 계속 하락하여 약 664초 이후 0V 미만의 셀 역전압 상태에 도달하고, 700초에서 약 -2.2V에 도달하여 결국 더 이상 운전이 불가능한 셀 고장 상태에 이르는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 국부적 수소 부족 모사 평가 시 5셀 스택의 각 셀의 역전압 시험 초기(0초) 및 종료(700초)시 셀 전압을 비교하여 나타낸 것이다. 정전류밀도 운전 시 1, 2, 4 및 5번 셀과 같은 정상 셀들은 셀 전압이

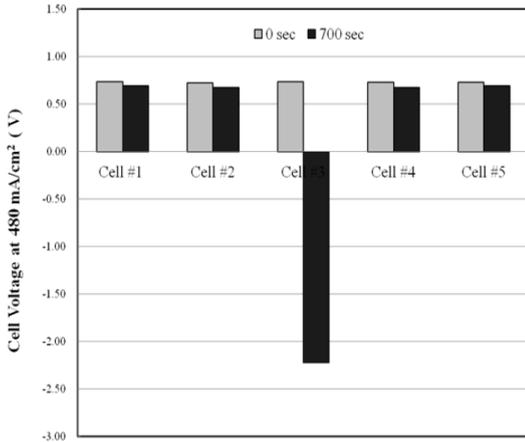


Fig. 6 Comparison of cell voltages at 480 mA/cm<sup>2</sup> of 5-cell stack between at start (0 sec) and at finish points (700 sec) under local hydrogen starvation condition

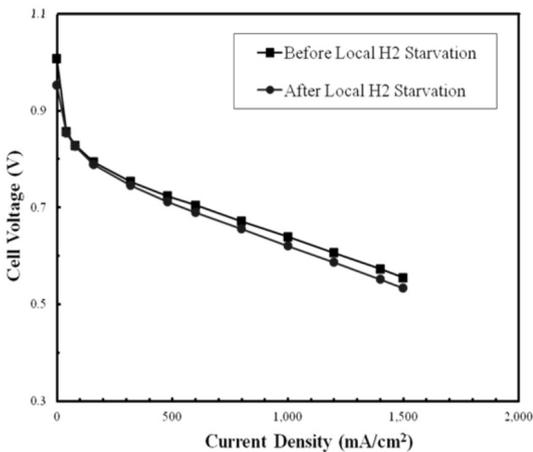


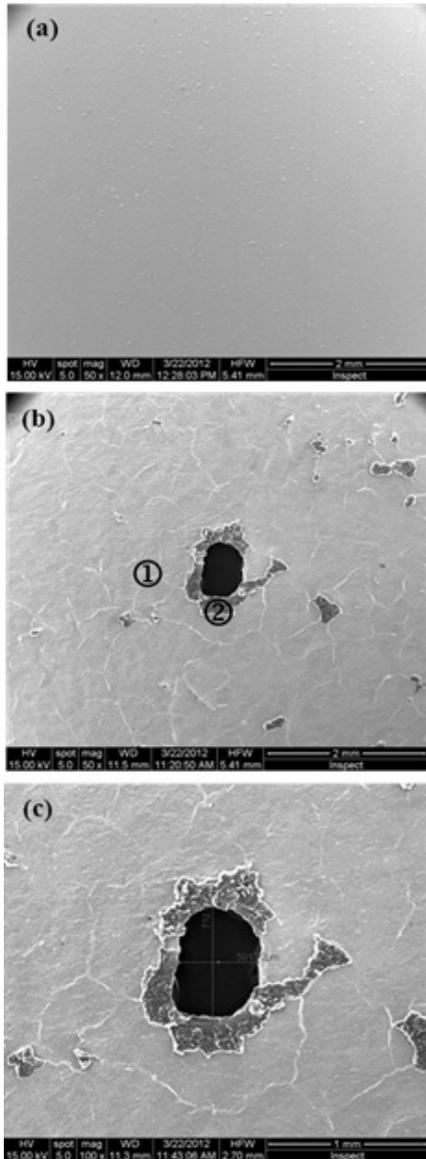
Fig. 7 I-V cell performances of the third cell of 5-cell stack before and after the local hydrogen starvation tests

크게 변화하지 않았으나, 의도적으로 국부적 수소 부족을 모사한 3번 셀은 전압이 크게 감소하여 뚜렷한 역전압 현상을 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 본 연구의 역전압 모사법은 연료전지차량의 스택에 수소가 전체적으로 S. R.=1.5로 정상 공급되고 있는 것 같지만 실제로는 예상치 못한 여러 이유들로 인해 셀 내부에서 국부적인 수소 부족 현상이 발생하고 이로 인해 일부 셀에서 역전압이 발생하는 것을 잘 모사하고 있다. 특히 기존의 전체적인 수소 공급 부족 조

건에서는 200mA/cm<sup>2</sup>의 저전류밀도만 가해도 셀 전압 감소 및 역전압 도달 속도가 너무 빨라서 실제 연료전지차량의 저속도 상태만 모사할 수 있는 단점이 있다. 그러나 본 연구에서 실시한 국부적 수소 공급 부족 방법은 480mA/cm<sup>2</sup>의 중전류밀도에서도 5분 이상 정상 운전된 후 역전압에 도달하기 때문에 연료전지차량의 중속도 이상에서의 현상을 보다 잘 모사할 수 있는 장점이 있다.

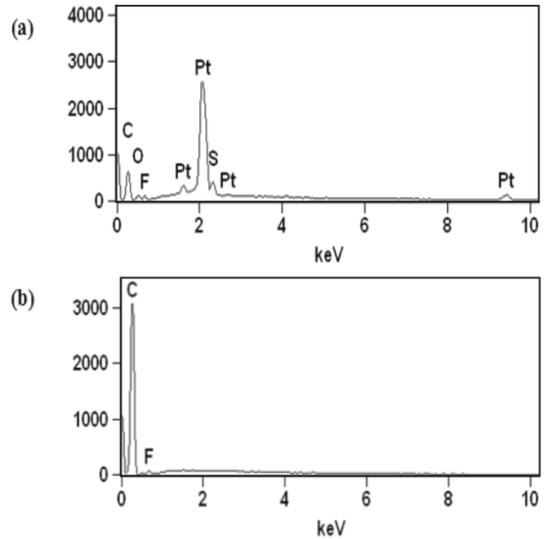
Fig. 7은 3번 셀의 국부적 수소 공급 부족에 의한 역전압 모사 시험 전의 초기 I-V 셀 성능과 시험 후의 I-V 셀 성능을 서로 비교한 결과이다. 역전압 발생으로 인해 모든 전류밀도 영역에서 I-V 셀 성능이 저하되었다. 특히 개회로 전압(OCV: Open Circuit Voltage)은 역전압 시험 전 1.007V에서 역전압 시험 후 0.952V로 5.5% 감소하였고 1500mA/cm<sup>2</sup>의 고전류밀도에서 셀 전압이 역전압 시험 전 0.555V에서 시험 후 0.533V로 4.0% 감소한 것을 관찰하였다. 이러한 I-V 셀 성능 감소는 역전압 조건에서 발생한 과다한 열로 인해 MEA 및 기체확산층이 많이 손상된 것에 기인한다고 판단된다.

Fig. 8은 국부적 수소 부족에 의한 역전압 모사 평가 전후의 MEA 애노드 촉매층 표면을 SEM을 통해 관찰한 결과이다. 일반적으로 MEA내 발생하는 핀홀은 연료전지의 내구성에 악영향을 미치는데<sup>14)</sup>, 역전압에 의한 과도한 열 발생 시 생성되는 MEA 내 핀홀의 크기는 최소 0.2mm × 0.2mm 이상의 크기로서, 심한 역전압 조건에 노출된 것은 그 크기가 수 mm × 수 mm 이상이 되기도 한다. 본 연구에서 적용한 셀 역전압 유발 조건은 충분한 열을 발생시키기에 생성된 핀홀이 MEA의 애노드 촉매층 뿐만 아니라 전해질 막 및 캐소드 촉매층까지 완전히 관통하였고 그 발생 핀홀의 위치를 육안으로도 관찰할 수 있다. Fig. 8(a)는 역전압 모사 평가전 신품 MEA 애노드 표면의 50배 확대 사진이고, Fig. 8(b) 및 (c)는 역전압 모사 평가한 후의 3번 셀에 있는 MEA 애노드 표면을 각각 50배 및 100배 확대한 사진이다. Fig. 8(b) 및 (c)에서 보는 바와 같이 역전압 조건에서 발



**Fig. 8** SEM photos of the anode catalyst surface of MEA: fresh MEA before voltage-reversal test ( $\times 50$ ) (a) and aged MEA after voltage-reversal test at low ( $\times 50$ ) (b) or high ( $\times 100$ ) magnification (c)

생한 과도한 열로 인해 MEA 애노드 표면에 약  $0.7\text{mm} \times 0.5\text{mm}$  크기의 핀 홀이 발생하였다. 또한 이러한 핀 홀 주위에 기체확산층의 미세기공층으로 추정되는 이물질이 부착되어 있음을 관찰할 수 있다. MEA 애노드 촉매 표면의 이물질에 대해 보다 자세히 분석



**Fig. 9** EDX analysis results on the anode catalyst surface of MEA after cell voltage-reversal tests: (a) anode surface region (region ① of Fig. 8(b)); (b) impurities attached nearby a pin-hole (region ② of Fig. 8(b))

하기 위해 EDX를 사용하여 원소 분석을 실시하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9(a) 및 (b)는 각각 MEA의 애노드 촉매층 표면 (Fig. 8(b)의 ①번 부위) 및 핀 홀 옆에 부착된 이물질(Fig. 8(b)의 ②번 부위)의 EDX 결과를 나타낸 것이다.

MEA의 애노드 촉매층의 경우 Fig. 9(a)에서와 같이 예상한 대로 백금(Pt), 불소(F) 등과 같은 전형적인 MEA 촉매층 원소들이 검출되었다. 그러나 핀 홀 옆에 부착된 이물질의 경우 Fig. 9(b)에서와 같이 과량의 탄소(C)와 일부 불소만이 검출되었는데 이는 전형적인 기체확산층의 미세기공층의 원소 구성과 일치하는 것이다.

따라서 역전압 조건에서 발생한 과도한 열로 인해 MEA에 핀 홀이 발생하고 또한 기체확산층의 미세기공층이 핀 홀 부위에 부착된 것을 알 수 있으며, 이러한 역전압 모사 조건이 실제 연료전지차량에서 발생하는 국부적 수소 부족에 의한 일부 셀들의 역전압 거동 뿐만 아니라 MEA 및 기체확산층의 파손 현상도 형태학적으로 잘 모사하는 것을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 실제 연료전지차량 내 수백 개 셀로 구성된 스택에서 발생하는 일부 셀의 국부적 수소 부족에 의한 역전압 발생 현상을 모사하는 새로운 실험적 기법을 제안하고, 이 기법에 의해 발생한 역전압에 의한 셀의 열화 현상을 분석하였다.

기존에 사용되던 애노드에 질소를 공급하여 유발된 전체적인 수소 부족 조건과는 다르게, 본 연구에서 사용한 5셀 스택에서 의도적으로 국부적 수소 부족에 의한 역전압을 유도한 3번 셀의 경우 실제 연료전지차량에서와 같이 수 분 동안 정상적으로 운전되다가 급격한 셀 전압 하락 및 역전압 현상이 발생하는 것을 관찰하였다. 이러한 역전압 모사 시험 전후의 I-V 셀 성능을 비교한 결과 개회로 전압은 역전압 시험 전 1.007V에서 역전압 시험 후 0.952V로 5.5% 감소하였고, 1500 mA/cm<sup>2</sup>에서의 셀 전압은 역전압 모사 시험 전 0.555V에서 시험 후 0.533V로 약 4.0% 감소하였다.

SEM을 사용하여 애노드 촉매층 표면을 분석한 결과 3번 셀에서 국부적 수소 부족에 의한 역전압 발생으로 인해 MEA내 핀 홀이 발생한 것을 관찰하였다. 또한 EDX로 원소를 분석한 결과 핀 홀 주위에 부착된 이물질은 역전압시 발생한 과도한 열로 인해 애노드 촉매층에 부착하게 된 기체확산층의 미세기공 침입을 확인하였다.

본 연구에서 제안한 역전압 모사 기법을 사용하면 실제 연료전지차량에서 발생하는 국부적 수소 부족에 의한 역전압 발생 현상을 잘 모사할 수 있기 때문에, 역전압 내구성이 우수한 연료전지 MEA 신소재 검증 평가에 활용시 연구개발을 가속화할 수 있는 장점이 있다.

## 후 기

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 2011301003008A, 과제명 “저

가형 고출력 스택 및 운전시스템 모듈화 개발”).

## References

1. F. Barbir, “PEM Fuel Cells: Theory and Practice” Elsevier Academic Press, UK, 2005, pp. 337-357.
2. A. Taniguchi, T. Akita, K. Yasuda, Y. Miyazaki, “Analysis of Degradation in PEMFC Caused By Cell Reversal During Air Starvation”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 33, 2008, p. 2323.
3. P. T. Yu, W. Gu, R. Makharia, F. T. Wagner, H. A. Gasteiger, “The Impact of Carbon Stability on PEM Fuel Cell Startup and Shutdown Voltage Degradation”, ECS Trans., Vol. 3, 2006, p. 797.
4. A. Taniguchi, T. Akita, K. Yasuda, Y. Miyazaki, “Analysis of Electrocatalyst Degradation in PEMFC Caused By Cell Reversal During Fuel Starvation”, J. Power Sources, Vol. 130, 2004, p. 42.
5. D. Liang, Q. Shen, M. Hou, Z. Shao, B. Yi, “Study of the Cell Reversal Process of Large Area Proton Exchange Membrane Fuel Cells Under Fuel Starvation”, J. Power Sources, Vol. 194, 2009, p. 847.
6. H. Lee, H. Song, J. Kim, “PEMFC Performance on Reverse Voltage by Fuel Starvation”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 17, 2006, p. 133.
7. N. Yousfi-Steiner, Ph. Mocotéguy, D. Candusso, D. Hissel, “A Review on Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Catalyst Degradation and Starvation Issues: Causes, Consequences and Diagnostic for Mitigation”, J. Power Sources, Vol. 194, 2009, p. 130.
8. G. Chen, H. Zhang, H. Ma, H. Zhong, “Electrochemical Durability of Gas Diffusion Layer Under Simulated Proton Exchange Membrane Fuel Cell Conditions”, Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 34, 2009, p. 8185.
9. K. S. Eom, G. H. Kim, E. A. Cho, J. H. Jang, H.-J. Kim, S. J. Yoo, S.-K. Kim, B. K. Hong, “Effects of Pt Loading in the Anode on the

- Durability of a Membrane-Electrode Assembly for Polymer-Electrolyte Membrane Fuel Cells During Startup/Shutdown Cycling”, *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 37, 2012, p. 18455.
10. T. R. Ralph, S. Hudson, and D. P. Wilkinson, “Electrocatalyst Stability in PEMFCs and the Role of Fuel Starvation and Cell Reversal Tolerant Anodes”, *ECS Trans.*, Vol. 1, 2006, p. 67.
  11. S. Ye, “PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers: Fundamentals and Applications”, Springer, 2008, Ch. 17.
  12. T. R. Ralph and M. P. Hogarth, “Catalyst for Low Temperature Fuel Cells”, *Plat. Met. Rev.*, Vol. 46, 2002, p. 117.
  13. S. D. Knights, D. P. Wilkinson, S. A. Campbell, J. L. Taylor, J. M. Gascoyne, T. R. Ralph, “Fuel Cell Anode Structure for Voltage Reversal Tolerance”, WO 01/15247 A2, 2001.
  14. T. Kim, H. Lee, T. W. Lim, K. Park, “Degradation of Membrane with Pinholes in PEMFC”, *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, Vol. 19, 2008, p. 103.