

## 연료전지 가속내구모드 개발

이용희<sup>†</sup> · 오동조 · 전의식 · 이종현  
현대자동차 연구개발총괄본부 연료전지시스템시험팀

### Development of An Accelerated Durability Test Mode for Fuel Cell

YONGHEE LEE<sup>†</sup>, DONGJO OH, UISIK JEON, JONGHYUN LEE

Fuel cell system Test Team, R&D Division, Hyundai Motors Company 17-5, Mabuk-ro 240beon-gil,  
Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do, 16891, KOREA

**Abstract** >> The fuel cell vehicle is a type of hydrogen vehicle which uses a fuel cell to produce electricity, powering its on-board electric motor. The fuel cell vehicle driving principle is completely different from the internal combustion engine vehicle. In order to ensure the durable quality of the fuel cell vehicle, durability test mode considering the characteristics of the fuel cell must be developed. In this study, we derived the durability test mode profile through collecting and analyzing fuel cell vehicle driving data. Then, the accelerated durability test mode is developed by adding degradation conditions and is experimentally validated to have an acceleration factor of 5~6.

**Key words** : Fuel cell(연료전지), Durability(내구성), Accelerated test mode(가속 시험 모드)

### Nomenclature

OCV : Open Circuit Voltage [V]  
MEA : Membrane Electrode Assembly  
RH : Relative Humidity [%]  
kph : Kilometer Per Hour [km/h]

### 1. 서 론

연료전지는 수소와 산소의 전기화학반응을 통해 전기를 생산하는 시스템이다. 이를 이용한 연료전지

자동차는 연료전지 시스템에서 생산된 전기로 모터를 구동하는 방식으로 기존의 내연기관 자동차와는 구동원리가 전혀 다른 시스템이다. 이러한 연료전지 자동차의 내구성능 검증을 위해서는 연료전지 시스템의 특성을 반영한 전용 내구모드 개발이 필요하다. 연료전지 시스템의 내구성능은 대부분 연료전지 스택의 화학적, 기계적 열화에 의한 성능 저하에 의해 결정되는데 이는 운전 상황에 따라 발생하는 열화 메커니즘에<sup>1)</sup> 차이가 있다. 때문에 연료전지의 내구성능 검증을 위해서는 실제 연료전지 차량의 운전상황을 반영한 연료전지 전용 내구모드의 개발이 필요하다. 또 실주행 상사 시험으로는 6개월 이상의 시간이 소요되기 때문에 시험기간의 단축을 위해 열화 속도를 가속시킨 가속내구모드의 개발이 필요하다.

본 연구는 연료전지 자동차 전용 내구모드의 개발

<sup>†</sup>Corresponding author : 5904777@hyundai.com

Received : 2015.10.2 in revised form : 2015.10.23 Accepted : 2015.10.30

Copyright © 2015 KHNES

을 위해 대표적인 운전상황이 반영된 구간을 선정하고 반복 주행을 통해 데이터를 수집했다. 이렇게 얻은 실주행 데이터를 구간별로 분리하여 구간별 주행 프로파일을 도출하였다. 여기에 연료전지의 운전 상황에 따른 연료전지 열화 조건들을 반영하고 강화하여 연료전지 전용 가속내구모드를 개발하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 실주행 데이터 수집

연료전지 자동차는 주행시 요구되는 출력에 따라 스택에 인가되는 전류량이 결정되고 연료전지 시스템은 스택이 필요한 전류를 생산하기 위한 조건으로 운전된다. 이 때 연료전지 시스템은 인가전류 변화에 따라 스택의 입출구 온도, 가습조건 등의 거동이 변화하는데 이러한 변화나 운전상태가 연료전지 촉매와 담지체, 멤브레인등의 주요 열화기구들에 영향을 준다. 그렇기 때문에 실제 차량의 주행 데이터로부터 내구모드를 도출하기 위해 첫 단계로 실주행 데이터를 수집했다.

일반적인 주행시 발생하는 실제 운전 조건으로부터 내구모드를 도출하기 위해 대표적인 운전상황이 반영된 주행루트를 선정하고 반복 주행하여 실주행 데이터를 수집하였다. 주행루트에는 고속구간, 정체 구간, 도심구간과 잦은 강/등판이 반복되는 평창동 구간이 포함되어 있다.

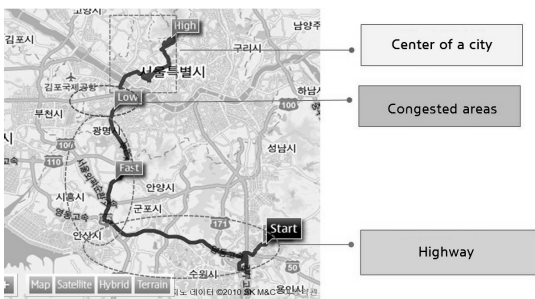


Fig. 1 The test driving route

선정된 루트를 총 18회 시험주행 하여 각 구간의 주행거리, 주행시간, 평균속도, 평균온도 등 평균 수치를 계산하고 전체 평균값과 가장 유사한 구간의 주행 데이터를 구간별 대표 데이터로 선택하였다.

### 2.2 구간별 속도 프로파일 도출

각 구간별 모드 프로파일을 도출하기 위해 각 구간별 속도 프로파일을 단순화 하여 모드 프로파일을 도출하였다. 주행 속도와 각 속도 구간에서 발생하는 가/감속 운전에 따라 달라지는 시스템의 운전 조건을 반영하기 위해 실주행 데이터의 속도프로파일의 속도를 일정간격 구간으로 분리하고 각 구간에서 발생하는 가속도의 발생 빈도수를 매칭하여 3차원 data로 정리하였다. 이것을 기준으로 각 구간별 주행특성을 반영하도록 임의의 속도 프로파일을 도출하였다.

고속구간은 초기 가속 이후 80~100kph를 유지한다(Fig. 3). 고출력 운전 구간으로 고온운전 상태가 되어 열충격 사이클과 RH사이클이 반복되어 촉매와 멤브레인의 열화가 모두 발생하는 구간이다<sup>2,3)</sup>.

정체구간은 20 kph의 저속구간에서 가/감속을 반복한다(Fig. 4). 공기가 과급되어 멤브레인의 기계적 스트레스에 의한 열화가 발생하고 시스템의 온도 저

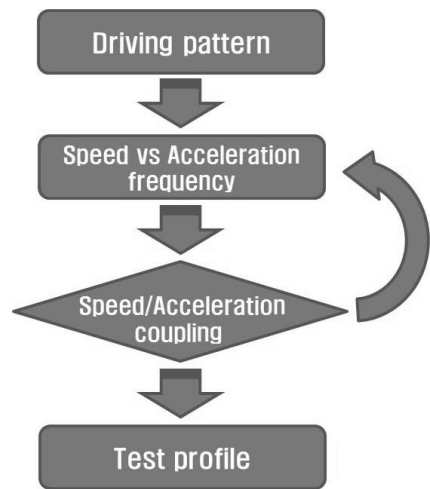
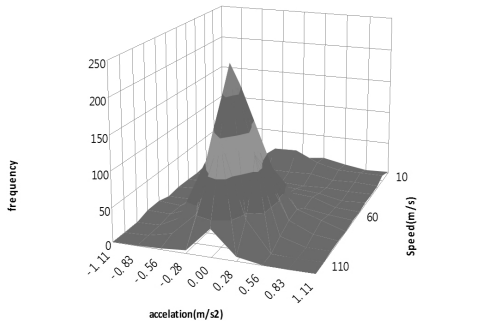
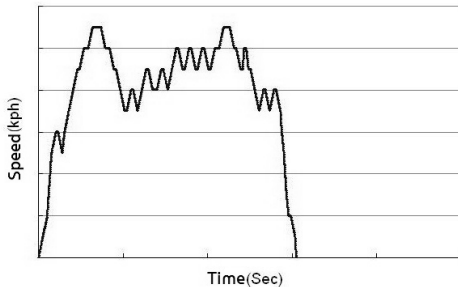


Fig. 2 The process of test profile development

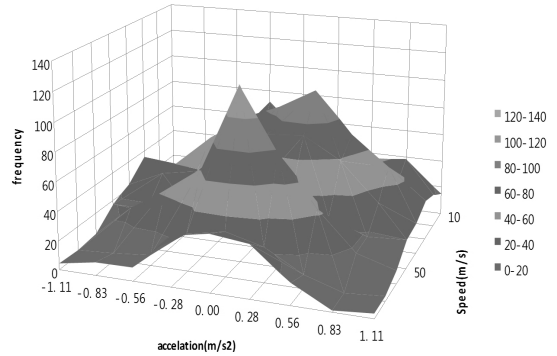


(a) Speed & Acceleration frequency

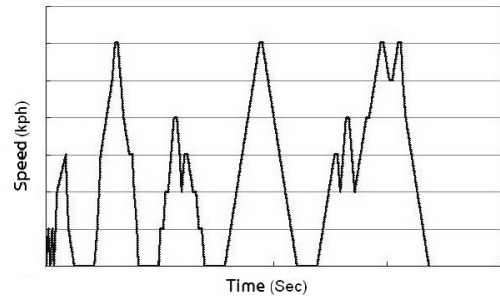


(b) Speed profile

Fig. 3 Draw the profile from highway driving

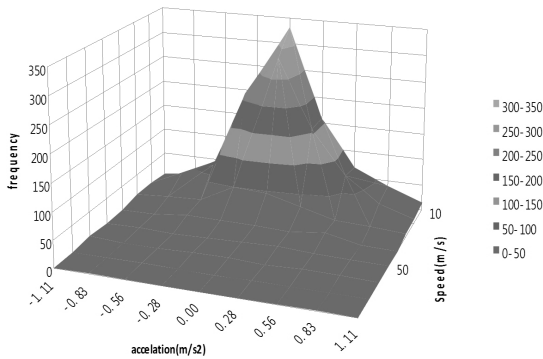


(a) Speed & Acceleration frequency

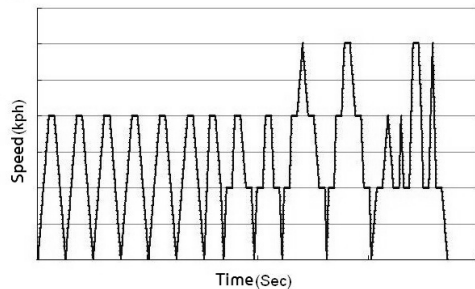


(b) Speed profile

Fig. 5 Draw the profile from center of a city driving



(a) Speed & Acceleration frequency



(b) Speed profile

Fig. 4 Draw the profile from congested areas driving

하와 유량 저하로 플러딩 발생에 의한 열화가 발생할 수 있다.

도심구간은 60kph이하의 구간에서 주행하고 신호 정차를 포함한다(Fig. 5). 신호정차 시 고전위 구간에서 라디컬 생성에 의한 멤브레인과 바인더 열화가 일어나고 촉매의 담지체 열화가 발생한다<sup>4)</sup>. 또 정차와 주행을 반복하며 RH 사이클에 의해 멤브레인에 기계적 스트레스도 가해진다.

이렇게 구간별로 도출된 속도 프로파일을 조합하면 내구모드 프로파일을 얻을 수 있다.

### 2.3 연료전지 스택 열화 조건

연료전지 시스템 성능 열화의 주요 부품인 연료전지 스택은 멤브레인, 촉매층, 가스 확산층으로 이루어진 MEA를 분리판과 적층해 제작한 것으로 연료

**Table 1** Fuel cell degradation condition

Operating condition	Fuel cell degradation effects
High temperature	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Radical generation</li> <li>•Particle size grow up and carbon corrosion</li> </ul>
Voltage cycle	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Decreasing active surface area increase the particle size</li> </ul>
RH cycle	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Mechanical stress by shrinking-swelling</li> <li>•Strain the membrane-electrode assembly</li> </ul>
High voltage	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Polymer membrane and binder decomposition</li> </ul>
Thermal shock	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Mechanical stress in membrane and binder</li> </ul>
Flooding	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Decreasing active surface area</li> <li>•Carbon corrosion</li> </ul>

전지 시스템의 운전 조건에 따라 고온운전, 저가속 운전, 열충격, 카본부식 등의 열화 메커니즘에 의해 MEA 각 부분의 열화가 일어난다. 앞에서 구간별로 정리된 내구모드는 Table 1과 같은 열화 조건을 포함하고 있는데 운전 구간에 따라 발생하는 운전조건에 의해 주요 열화 메커니즘이 달라진다.

이러한 열화 요인들은 발생조건과 정도에 따라 연료전지 스택의 열화 속도에 영향을 주게 된다. 또한 각각의 열화 조건들의 연속적인 상황에 따라서도 각 구간의 운전 조건이 달라지게 된다. 따라서 각 구간의 비율이나 운전 순서를 조절해 열화 속도나 전체 열화 메커니즘에 영향을 줄 수 있다.

**2.4 연료전지 열화인자 강화**

실주행 데이터로부터 도출된 구간별 내구모드를 조합한 실주행 모사 내구모드의 열화속도를 가속시키기 위해 Table 1의 연료전지 열화조건에 Table 2의 운전조건을 추가하여 열화조건을 강화하였다.

연료전지의 열화 메커니즘은 대부분 화학반응이기 때문에 운전온도의 영향은 대부분의 연료전지 열화 메커니즘을 가속시키는 효과가 있다. 가속내구모드에서는 연료전지 시스템의 운전온도를 58°C에서 63°C로 상향 하였다. 또한 사이클의 시작 부분에 고

**Table 2** Accelerated condition in durability test mode

Operating condition	Accelerated durability test mode
High temperature	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Operating temperature : 58°C → 63°C</li> </ul>
Voltage cycle	<ul style="list-style-type: none"> <li>•3 times start up-shutdown in 1cycle</li> </ul>
RH cycle	<ul style="list-style-type: none"> <li>•High power driving (<math>\Delta T \geq 10^\circ C</math>)</li> </ul>
High voltage	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Maintain OCV in idle section</li> <li>•Long-term parking (21% O<sub>2</sub>)</li> </ul>
Thermal shock	<ul style="list-style-type: none"> <li>•2 times cooling in 1cycle</li> </ul>
Flooding	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Cooling and then low power driving in low temperatur</li> </ul>

출력 연속운전 구간을 추가하여 고온운전에 의한 열화와 멤브레인의 열화조건을 강화하였다. 각 운전구간의 사이에는 연료전지 시스템의 시동정지를 추가하여 전위 사이클의 횟수를 내구모드 1cycle당 3회로 증가시키고 시동정지간에 시스템을 강제 냉각하여 시스템의 열충격 사이클을 추가하였다. 강제냉각 구간 후에는 저전류 운전 구간을 배치하여 플러딩을 유발하였다. 고전위에 의한 열화는 크게 두가지 상황이 있는데 운전중 저전류 구간이나 Idle 구간에서 OCV상태를 유지시키고 마지막으로 연료전지의 열화에 가장 큰 영향을 주는 장기주차 모사를 위해 cycle의 마지막 시동정지 후 수소공급계에 공기 (21%O<sub>2</sub>)를 주입하여 시동시 고전위 형성에 의한 담지체 열화를 추가하였다. 이를 정리하면 Table 2와 같다<sup>5-6)</sup>.

**2.5 가속내구모드 도출**

구간별 내구모드와 연료전지 열화인자 강화 조건을 조합하여 가속내구모드 A1.0을 개발하였다. 프로파일은 장등판-도심-고속-정체 구간 순으로 이루어져 있고 구간 사이에 시동정지-장기주차를 모사하고 있다. 프로파일 주행시 형성되는 운전 조건을 Table 2의 열화 가속 조건으로 강화하여 가속내구모드 A1.0을 도출하였다.

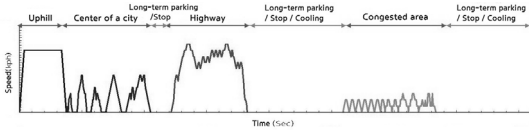


Fig. 6 The Accelerated durability test mode profile A1.0

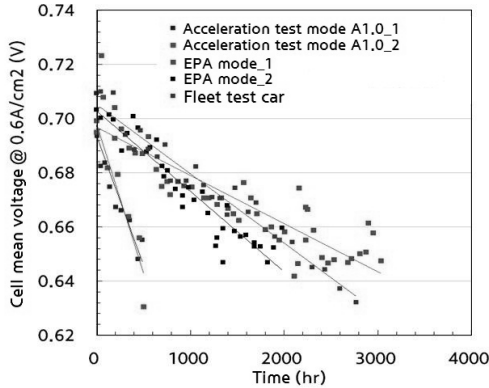


Fig. 7 The result of mode test

## 2.6 가속내구 시험 결과

Fig. 7에서 표현된 데이터 포인트 들의 추세선의 기울기는 기준 전류밀도에서의 시간당 셀 평균전압 감소 속도로 시스템의 내구성을 나타낸다. Fig. 7의 각각의 기울기는 실주행상사내구, 가속내구모드 A1.0, 실차량 데이터의 성능 열화 속도를 나타내는데, 실차량과 실주행상사내구의 성능 열화 속도 대비 가속내구모드A1.0 적용 가속 내구시험의 성능열화 속도가 약 5~6배 빠른 열화 속도를 보인다.

## 3. 결 론

연료전지 자동차 전용 내구모드 개발을 위해 실주행 데이터를 분석하고 연료전지 시스템의 특성을 반영하여 가속내구모드를 개발하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 대표적인 운전상황이 포함된 루트를 연료전지 자동차로 주행하여 실주행 데이터를 수집하고 각

구간의 내구모드 속도 프로파일을 도출하였다.

- 2) 내구모드 프로파일에 연료전지의 열화 조건을 강화하는 운전 조건을 추가 조합하여 가속내구모드 A1.0을 개발하였다.
- 3) 가속내구모드A1.0 적용 시험결과 실주행 상사 시험 대비 약5~6배 빠른 열화속도를 보이는 결과를 확인하였다.
- 4) 가속내구모드의 개발을 통해 내구시험 기간을 약 1/6로 단축시키고 내구개발 연구의 효율을 증가시켰다.

## 후 기

본 연구는 산업통상자원부 주관 2009~2013년 ‘수송용 연료전지 조기 상용화를 위한 기반기술 개발 및 실증’, 2015~2016년 산업통상자원부 재원인 ‘시스템 소형화를 위한 가변압력 PEMFC 핵심부품개발’로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 과제입니다(No. 20143010031840).

## References

1. F. A. de Bruijn\*, V. A. T. Dam, and G. J. M. Janssen, “Review: Durability and Degradation Issues of PEM Fuel Cell Components”, FUEL CELLS 08, 2008, No. 1, 3-22.
2. Mei Cai\*, Martin S. Ruthkosky, Belabbes Merzougui, Swathy Swathirajan, Michael P. Balogh, Se H. Oha “Investigation of thermal and electrochemical degradation of fuel cell catalysts”, Journal of Power Sources 160(2006):977-986.
3. Eiji Endoh\*, Shinji Terazono, Hardiyanto Widjaja, and Yasuyuki Takimoto, “Degradation Study of MEA for PEMFCs under Low Humidity Conditionse”, Electrochemical and Solid-State Letters, 7(7):A209-A211 (2004).
4. J. Healy\*, C. Hayden, T. Xie, K. Olson, R. Waldo, M. Brundage, H. Gasteiger and J. Abbott, “Aspects

- of the Chemical Degradation of PFSA Ionomers used in PEM Fuel Cells”, Fuel Cells 2005, 5, No.2.
5. S.J.C. Cleghorn\*, D.K. Mayfield, D.A. Moore, J.C. Moore, G. Rusch, T.W. Sherman, N.T. Sisofo, U. Beuscher, “A polymer electrolyte fuel cell life test:3 years of continuous operation”, Journal of Power Sources 162(2006):521-531.
  6. D. Liu, S. Case\*, “Durability study of proton exchange membrane fuel cells under dynamic testing conditions with cyclic current profile”, Journal of Power Sources 162(2006):521-531.