

## 수소연료전지자동차 연료소비율 평가기술 개발에 관한 연구

임종순\*, 이현우\*, 홍윤석\*, 이광범\*, 용기중\*, 권해봉\*<sup>†</sup>

\*자동차성능연구소

### Development on Fuel Economy Test Method for Hydrogen Fuel Cell Vehicles

JONGSOON LIM\*, HYUNWOO LEE\*, YUNSEOK HONG\*, KWANGBUM LEE\*,  
GEEJOONG YONG\*, HAEBOUNG KWON\*<sup>†</sup>

\*Korea Automobile Testing & Research Institute (KATRI), #625 Samjon-Ri, Songsan-Myun,  
Hwaseung-Si, Gyeonggi-Do, 445-871, Korea

#### ABSTRACT

Fuel consumption measurement of hydrogen fuel cell vehicle is considerably different from internal combustion engine vehicle such as carbon balance method. A practical method of fuel consumption measurement has been developed for hydrogen fuel cell vehicles. There are three method of hydrogen fuel consumption testing, gravimetric, PVT (pressure, volume and temperature), and mass flow, all of which necessitate physical measurements of the fuel supply. The purpose of this research is to measure the fuel consumption of hydrogen fuel cell vehicles on chassis-dynamometer and to give information when the research is intended to develop test method to measure hydrogen fuel economy.

**KEY WORDS** : Hydrogen(수소), Fuel cell(연료전지), Fuel economy(연료소비율), SOC(충전상태)

#### 1. 서 론

유해배출가스가 없는 무공해이면서 고갈되지 않는 대체에너지로 각광받는 수소연료전지자동차(fuel cell vehicles)에 대한 관심이 커지고 있으며, 우리나라를 포함한 미국, 유럽, 일본 등 세계 각국에서 수소연료전지자동차에 대한 개발 및 실증평가가 이루어지고 있다.

이와 같이 수소연료전지자동차는 무공해 친환경 자동차로 각광받고 있지만 연료소비율 측정방법인 탄소균형법(carbon balance method)을 적용할 수 없는 문제점이 있다. 탄소균형법이란 연소하기 전 연료의 탄소 양과 연소 후 배출가스의 탄소 양이 같은 원리를 적용하여 연료소비율을 산출하는 방법이다. 수소연료전지자동차는 탄소균형법으로 연료소비율을 측정할 수 없기 때문에 별도의 연료소비율 시험방법이 필요하다<sup>2)</sup>.

수소연료전지자동차의 양산에 앞서 수소연료전지자동차 관련 법규와 평가 방법 등 제정이 준비되

<sup>†</sup>Corresponding author : jongsoon@kotsa.or.kr

[ 접수일 : 2010.5.31 수정일 : 2010.6.19 게재확정일 : 2010.6.25 ]

Table 1 Specification of balance for weight method

Maximum load	64.1kg
Readability	0.01kg
Repeatability of nominal load	25mg(60kg)
Repeatability of low load	10mg(5kg)

고 있으며, 이에 따라 본 연구에서 수소연료전지자동차의 연료소비율 평가기술을 위한 기초자료를 확보하고자 한다.

## 2. 연료소비율 측정방법과 주행모드

### 2.1 연료소비율 측정방법

연료소비율 측정방법은 크게 중량 측정방법, 유량 측정방법, 압력-체적-온도(PVT) 측정방법의 3가지로 구분된다<sup>5,6)</sup>.

#### 2.1.1 중량 측정방법

중량측정방법은 시험자동차의 연료소비율 시험 전후의 연료탱크 무게를 측정하여 수소 사용량을 산정하는 방법이다. 이 방법은 측정 원리상 수소 사용량의 측정방법과 계산방법이 가장 쉬우면서도 정확한 측정 결과를 얻을 수 있고, 현장에서 바로 표준 질량 등을 이용하여 장비의 교정이 가능한 장점이 있다. 중량계의 제원은 Table 1과 같다. 식 (1)은 중량측정방법 계산식을 나타낸다.

$$W = g_1 - g_2 \quad (1)$$

Where,

W : Hydrogen consumption(g),

gi : The weight of hydrogen tank at the start (or completion) of the test(g)

#### 2.1.2 유량 측정방법

유량 측정방법은 유량계를 사용하여 수소연료라인에서 직접 측정하는 방법으로 식 (2)는 유량측정방법 계산식을 나타낸다.

Table 2 Specification of hydrogen flowmeter

Sensor Type	Thermal MFC
Flow Range	0 slpm ~ 500 slpm
Accuracy	± 1 % of F.S.
Response Time	Under 0.5 sec
Linearity	0.2% of F.S.
Repeatability	0.2% of Reading

유량 측정방법의 장점은 실시간 수소 사용량의 측정이 가능하다는 것이다. 그러나 공급되는 수소 유량과 압력에 따라 적절한 유량 센서를 선택하여야 보다 정확한 측정 결과를 얻을 수 있기 때문에 수소 유량 센서의 선택이 중요하다. Table 2는 유량계 제원을 나타낸다.

$$W = (\sum b) \times \frac{m}{22.414} \quad (2)$$

Where,

W : Hydrogen consumption(g),

∑b : Integrated flow of hydrogen at standard conditions(273K, 101.3kPa)

m : Molecular weight of hydrogen(2.01588 g/mol)

#### 2.1.3 압력-체적-온도(PVT) 측정방법

이상기체상태방정식은 압력, 체적, 온도로부터 기체의 질량을 계산할 수 있다. 수소와 같은 실제기체인 경우 근사적으로 이 방정식을 따르거나 반데르발스 방정식을 사용한다. 본 연구에서는 수소 압축인자를 고려한 식 (3)과 같은 기체상태방정식을 적용하였다<sup>4)</sup>.

$$W = m \times \frac{V}{R} \times \left( \frac{P_1}{z_1 \times T_1} - \frac{P_2}{z_2 \times T_2} \right) \quad (3)$$

Where,

W : Hydrogen consumption(g)

m : Molecular weight of hydrogen (2.01588 g/mol)

V : Volume(ℓ) of hydrogen tank,

Table 3 Specification of pressure & temperature sensor

Pressure Sensor	
Range	0 ~ 35MPa
Accuracy	±1.5% of F.S.
Response Time	10 ms
Temperature Sensor	
Range	-50 ~ 150 °C
Accuracy	± 2 % of F.S.
Linearity	± 1 % of F.S.

R : Gas constant (0.008314472 MPa ℓ/molK),  
 n, P, T : Mol number, Pressure(MPa), Tem-  
 perature(K)

z : Compression factor at P, T

이 식을 적용하기 위해서 수소고압용기 내 시험 전·후 충분한 압력강하, 온도를 측정하는 위치와 안정화 시간 등 오차가 발생할 수 있어 측정에 주의와 시간이 필요하다<sup>3)</sup>.

중량 측정방법이나 유량 측정방법과는 달리 별도의 측정 장비가 필요 없이 수소고압용기의 온도 압력센서를 이용하기 때문에 실제 도로에서 운행을 하면서 수소 사용량을 측정할 수 있다는 장점이 있다. 수소연료탱크에 장착된 압력센서와 온도센서의

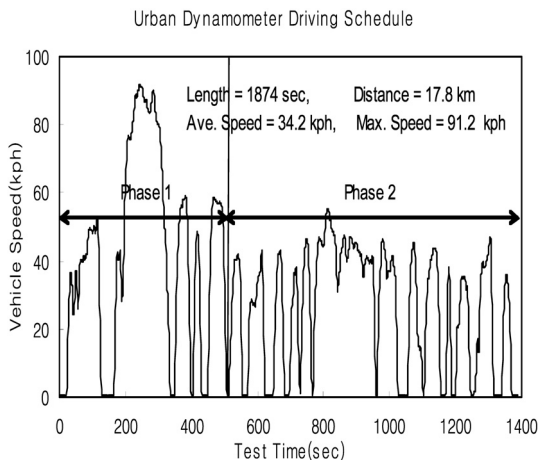


Fig. 1 Urban dynamometer driving schedule.

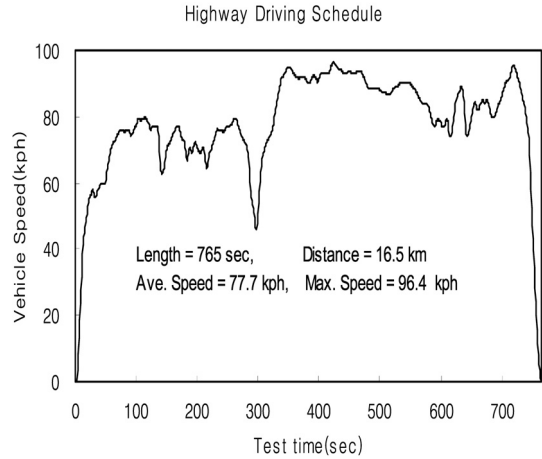


Fig. 2 Highway fuel economy test driving schedule.

제원은 Table 3과 같다.

## 2.2 주행모드

Fig. 1과 같이 시가지주행을 재현하는 UDDS(urban dynamometer driving schedule)모드는 2개의 Phase로 구성되어 있으며, FTP(federal test procedure)모드는 UDDS 주행 후 UDDS의 Phase 1을 다시 주행한다. 우리나라의 경우에는 FTP모드와 동일한 주행모드를 연료소비율 시험에 사용하고 있으며 CVS-75모드로 명명하고 있다.

Fig. 2는 HWFET(highway fuel economy test)모드이며 고속도로를 주행을 재현하고 있다<sup>7)</sup>.

## 2.3 실험장치 및 방법

중량 측정방법, 유량 측정방법, PVT 측정방법의 3가지 방법이 1개의 측정시스템에서 동시에 이루어질 수 있도록 Fig. 3과 같은 수소연료사용량 측정장비를 제작하였다.

시험에 사용된 수소연료전자자동차는 3.6kg 수소를 350bar 고압용기에 저장할 수 있고 100kW의 유도모터, 스택 및 슈퍼캐패시터(10F)가 장착되어 있다. 최고속도는 152km/h에 항속거리는 약 400km이다.

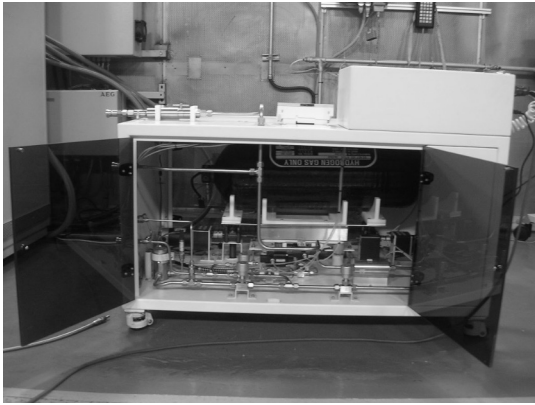


Fig. 3 Hydrogen fuel economy measurement system.

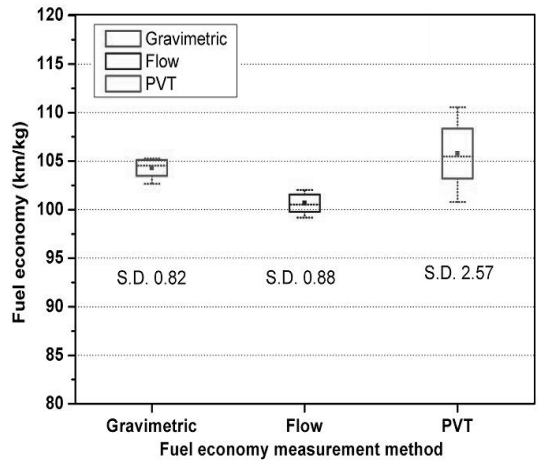


Fig. 5 Standard deviation by fuel measurement method.

### 3. 시험결과

#### 3.1 측정방법 차이에 따른 영향

연료소비율 실차 시험에 앞서 각 측정방법차이가 연료소비율에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수소연료소모량 측정 장비에서 시험을 실시하였다. Fig. 4는 수소 방출 설정유량은 40, 80, 120lpm으로 10분간 일정하게 수소를 대기 중으로 방출하여 각 측정방법에 대한 측정된 결과를 나타낸다. 중량측정방법 대비 유량측정 및 PVT측정방법의 차이는 2.0% 이내로써 각 측정방법간의 높은 상관성을 보여주고 있다.

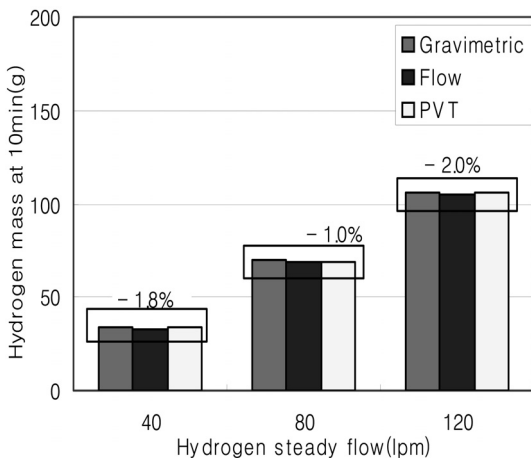


Fig. 4 Hydrogen mass of steady flow.

실차시험에서 각 측정방법차이가 연료소비율에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수소연료전지자동차를 UDSS모드로 10회 반복 시험하였다. 초기조건은 열간 상태이며 SOC(state of charge)는 60%로 동일하게 설정하였다. Fig. 5과 같이 중량측정방법의 경우 표준편차가 0.82로 나타나 측정결과의 재현성이 우수한 것으로 나타났다. 유량측정방법의 경우 표준편차는 0.88로 측정 결과의 재현성 측면에서만 보면 매우 우수한 것으로 나타났지만 중량측정방법 대비 유량측정방법은 연료소비율이 약 -3.5%

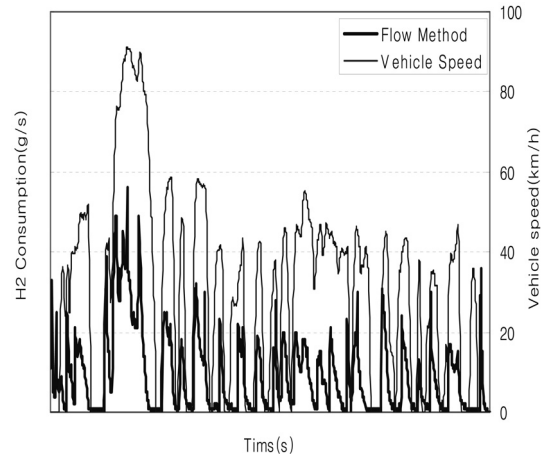


Fig. 6 Second by second hydrogen flow measured by UDSS.

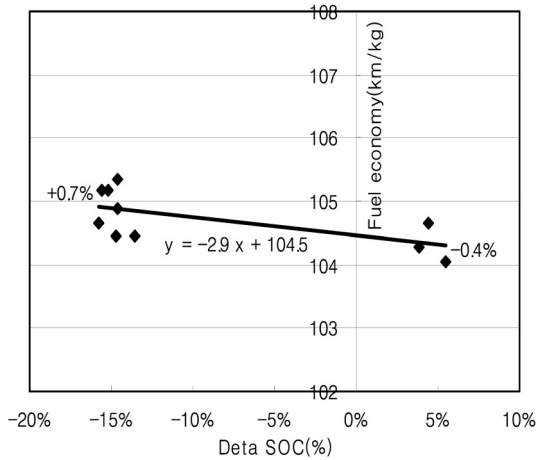


Fig. 7 Fuel economy according to delta SOC by UDDS.

낮게 측정되었다. 이는 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 수소유량이 일정하지 않고 차속에 따라 변화 것에 기인하는 것으로 판단된다.

PVT측정방법의 경우에는 연료소비율은 1.4%높게 측정되었고 표준편차가 2.57로 타 측정방법의 경우보다 측정값이 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 이와 같은 큰 편차의 발생은 실제 주행 상황에서 자동차에 탑재되는 수소연료탱크의 사용에 따른 압력·온도 센서의 정밀도와 압력 및 온도안정화 시간을 갖지 않고 측정을 하였기 때문이라 사료된다.

### 3.2 충전변화율에 따른 연비 영향

슈퍼캐패시터의 시험 전후 SOC 변화량이 연료 소비율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 UDDS 시험모드로 10회 반복 시험하였고 중량측정방법으로 연료소비율을 측정하였다. 시험자동차의 초기조건은 열간 상태이며 SOC는 60%로 동일하게 설정하였다.

Fig. 7는 슈퍼캐패시터 SOC변화량에 따른 연료 소비율을 보여준다. 슈퍼캐패시터의 SOC가 15%감소하여 방전된 경우 연료소비율은 0.7% 증가하고, SOC가 5%감소하여 충전된 경우 연료소비율은 0.4% 감소함을 볼 수 있다. 이를 충전변화량에 따른 연료 소비율 선형 관계식으로 나타내었다<sup>1)</sup>.

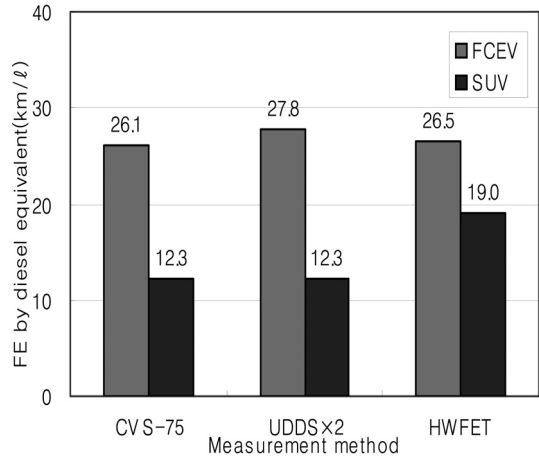


Fig. 8 Fuel economy of FCEV and SUV by measurement method.

### 3.3 주행모드에 따른 연비 영향

주행모드 차이가 연료소비율에 미치는 영향을 보기 위하여 공인연비시험모드인 CVS-75모드, 시가지모드를 두 번 주행한 UDDSx2모드<sup>6)</sup>, 고속도로모드를 사용하여 수소연료전지자동차 연료소비율을 측정하였다.

내연기관자동차와 비교하기 위하여 출력과 차체형상이 유사한 SUV(Sport Utility Vehicle 2.2L, 153PS) 자동차의 연료소비율을 측정하였다.

Fig. 8은 수소연료전지자동차를 중량측정방법으로 연료소비율을 측정하였고 이를 디젤 등가연비로 환산하였다.

내연기관자동차 경우 시가지모드인 CVS-75모드와 UDDSx2모드는 연료소비율 12.3km/l로 같고 고속도로 모드(HWFET)에서 19.0km/l로 시가지주행모드 대비 55% 높은 증가율을 보이고 있다.

그러나 수소연료전지자동차 경우 연료소비율이 CVS-75모드는 26.1km/l, UDDSx2모드는 연료소비율 27.8km/l, 고속도로 모드는 26.5km/l로 시가지모드에서 높은 연료소비율을 보여주고 있으며 시가지모드와 고속도로모드에서 연료소비율 변화가 크지 않음을 나타낸다. 이는 수소연료전지자동차 경우 tank to wheel의 효율이 60%로 기존의 내연기관의 효율인 18~35%보다 효율이 훨씬 높다.

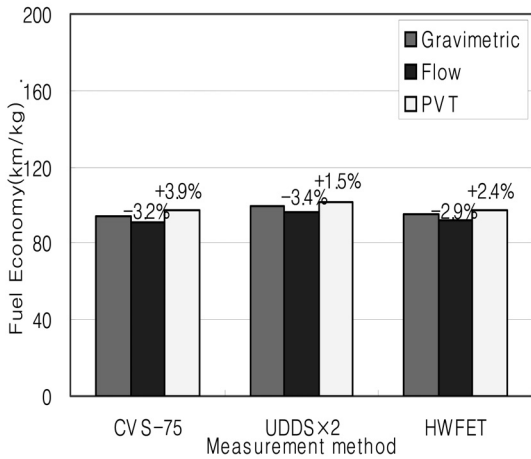


Fig. 9 Fuel economy according to driving schedules.

그리고 정차와 가감속이 빈번한 시가지모드에서 슈퍼캐퍼시터의 에너지보조역활로 UDDS×2모드에서 가장 좋은 연료소비율을 보이고 있다.

Fig. 9는 주행모드에 따라 각 측정방법 차이가 연료소비율에 미치는 영향을 보여준다. 중량측정방법 대비 유량측정방법과 PVT측정방법의 연료소비율을 보여준다.

유량측정방법 경우 중량측정방법 보다 연료소비율이 -2.9%~-3.4%로 낮게 측정되었다. PVT측정방법 경우 중량측정방법보다 연료소비율이 1.5%~3.9%로 높게 측정되었으며 유량측정방법보다 큰 편차를 보이고 있다. 시가지모드나 고속도로모드에 상관없이 측정방법 차이가 연료소비율에 미치는 영향은 Fig. 5와 같은 경향을 보이고 있다. 이는 앞서 비교한 각 측정방법의 특성에 기인하는 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

1) 측정방법차이가 연료소비율에 미치는 영향은 중량측정방법과 유량측정방법 경우 측정결과의 재현성이 우수한 것으로 나타났다. 다만 유량이 변동하는 경우 중량측정방법 대비 유량측정방법은 연료소비율이 약 3.5% 낮게 측정되었다. PVT측

정방법은 연료소비율이 1.4% 높게 측정되었고 표준편차가 타 측정방법의 경우보다 크게 나타나는 것을 볼 수 있었다. 수소연료전지자동차에 가장 적합한 연료소비율 측정방법은 중량측정방법으로 사료된다.

- 2) 슈퍼캐퍼시터 SOC변화량에 따른 연료소비율은 SOC가 15%감소하여 방전된 경우 연료소비율은 0.7% 증가하고 SOC가 5%증가하여 충전된 경우 연료소비율은 0.4% 감소하며 이를 충전변화량에 따른 연료소비율 선형 관계식으로 나타내었다.
- 3) 수소연료전지자동차 경우 연료소비율이 내연기관자동차와 다르게 시가지모드에서 고속도로 모드에 버금가는 연료소비율을 보여주고 있다. 이는 연료전지는 저부하 영역에서 변환효율이 높고 반대로 엔진은 고부하 영역에서 제동열효율이 높기 때문인 것으로 사료된다.

#### 후 기

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 교통체계 효율화 사업중 “수소연료전지자동차의 안전성 평가기술 개발”에 대한 연구 일환으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Oh Jung Kwon, In Su Jo, Deok Su Hyun, “A Study of Battery Charging Time for Efficient Operation of Fuel Cell Hybrid Vehicle”, Trans. of the Korean Society of Hydrogen Energy, Vol. 20, No. 1, 2009, pp. 38-44.
- 2) Yi Ding, John Bradley, Kevin Gady, Mith Bussineu, Tom Kochis, Ed Kulik and Virgo Edwards, “Hydrogen Consumption Measurement for Fuel Cell Vehicles”, 2004-01-1339, SAE World Congress.
- 3) Carl M. Paulina, Hydrogen Fuel Cell Vehicle “Fuel Economy Testing at the U.S EPA National Vehicle and Fuel Emissions Laboratory”, 2004-01-2900 Powertrain & fluid Systems Conference and Exhibition.

- 4) Eric W. Lemmon, Marcia L. Huber, Jacob W. Leachman, "Revised Standardized Equation for Hydrogen Gas Densities for Fuel Consumption Applications", Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Volume 113, No. 6, 2009, pp. 341-350.
- 5) ISO 23828, "Fuel cell road vehicles - Energy consumption measurement -- Vehicles fuelled with compressed hydrogen", 2008, International Organization for Standardization.
- 6) SAE J2572, "Recommended Practice for Measuring Fuel Consumption and Range of Fuel Cell and Hybrid Fuel Cell Vehicles Fuelled by Compressed Gaseous Hydrogen", 2006, SAE International.
- 7) "40 CFR (Code of Federal Regulation) Part 600 (Fuel Economy of Motor Vehicles)", Environmental Protection Agency of U.S.A, 2004.