

수소연료전지차 연비 평가기술 개발

정 영우¹⁾, 박 정규²⁾, 예 창환³⁾, 박 종진⁴⁾, 오 형석⁵⁾

Development of Fuel Economy Measurement Technology for Fuel Cell Electric Vehicle

Youngwoo Jung, Jeongkyu Park, Changhwan Ye, Jongjin Park, Hyungseuk Oh

Key words : Fuel Cell Electric Vehicle(연료전지자동차), Hydrogen Gas Consumption(수소사용량), Weight Method(중량변화법), Chassis Dynamometer(샤시다이노모)

Abstract : Fuel cell electric vehicles (FCEVs) using hydrogen gas are zero emission vehicles, thus emission measurement for combustion vehicles is not applicable. The hydrogen gas consumption for fuel economy will be measured by the stabilized pressure/temperature method, mass flow method and electrical current method, etc. In this research, weight method with a newly manufactured test equipment is applied to measure the hydrogen consumption because above 3-methods have a deviation. The hydrogen consumption is directly calculated by the weight differences of the external hydrogen tank before and after the chassis dynamometer test. Ultimately the fuel economy for FCEVs is obtained with a deviation less than 1% in all chassis dynamometer tests.

Nomenclature

F : faraday constant, C
G1 : the weight of tank at the start of the test, g
G2 : the weight of tank at the completion of the test, g

subscrip

ZEV : zero emission vehicle
PEMFC : proton exchange membrane fuel cell
UDDS : urban dynamometer driving schedule
HWFET : highway fuel economy test

가지로 분류되며 수소탱크의 온도/압력 변화에 의한 측정, 공급되는 수소가스 유량에 의한 측정 및 연료전지 발생 전류에 의한 측정등이 있다. 그러나, 상기의 방법 적용시 각종 측정값의 대표성 확보의 어려움, 센서류의 오차 발생 및 이상 기체의 특성을 적용할 수 없기 때문에 정밀성과 재현성을 확보하기 어려운 단점이 있다. 본 연구는 차량에 탑재된 수소탱크를 사용하지 않고 별도 외부 수소탱크를 사용하여 80kW급 연료전지차의 샤시 다이노모 평가 전, 후에 사용된 수소사용량을 수소탱크의 중량변화로 정밀하게 측정하여 1% 이하의 연비 편차를 갖는 정밀성과 재현성을 확보하는 방법을 제시하고자 한다.

1. 서론

고유가에 의한 높은 연비 및 환경오염에 의한 이산화탄소 저감이 강조됨에 따라서, 내연기관차에 비해 고효율과 친환경성을 갖는 수소연료전지차가 더욱 부각되고 있다. 연료전지차는 수소가스를 에너지원으로 ZEV로 분류되어 내연기관차의 연비분석법인 배기가스에 포함된 탄소화합물 중 탄소의 함량으로 분석하는 방법을 적용할 수 없으므로 새로운 연비 평가 방법이 필요하다. 현재 적용중인 연료전지차의 연비 평가 방법은 주로 세

- 1) 현대자동차
E-mail : ywj1375@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3227 Fax : (031)899-3331
- 2) 현대자동차
E-mail : gooya78@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3189 Fax : (031)899-3331
- 3) 현대자동차
E-mail : yech87@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3136 Fax : (031)899-3331
- 4) 현대자동차
E-mail : jjpark@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3168 Fax : (031)899-3331
- 5) 현대자동차
E-mail : yech87@hyundai-motor.com
Tel : (031)899-3190 Fax : (031)899-3331

2. 연료전지차 연비 측정법

2.1 연료전지차 연비 산출법

연료전지차의 연비를 측정하기 위해서는 수소 탱크의 수소사용량을 정밀하게 측정해야 하며, 수소가 갖는 에너지와 가솔린이 갖는 에너지를 도입하여 내연기관차에 해당하는 연비인 가솔린 등가연비를 산출할 수 있다. 차량 효율성과 직결되는 중요한 요소인 수소이용률은 스택수소소모량과 탱크수소사용량의 비율로 표현된다.

$$\text{가솔린등가연비} = \frac{\text{주행거리} \times 8.8\text{kWh}}{\text{수소사용량} \times 33.33\text{kWh}} [\text{km/L}] \quad (1)$$

$$\text{스택수소소모량} = \frac{(\text{스택전류}) \times \text{스택셀수} \times \text{수소분자량}}{2F} [\text{g}] \quad (2)$$

$$\text{수소이용률} = \frac{\text{스택 수소소모량}}{\text{탱크수소사용량}} \times 100[\%] \quad (3)$$

2.2 연료전지차 연비 측정방법

연료전지차의 연비를 측정하는 방법은 4가지로 분류할 수 있으며, 수소탱크의 중량변화에 의한 측정, 수소탱크의 온도/압력 변화에 의한 측정, 공급되는 수소가스 유량에 의한 측정 및 연료전지 발생 전류량에 의한 측정법이 있으며, 각각 방법에 따른 장, 단점은 Table1과 같다.

Table 1 연비측정방법에 따른 장,단점 비교

측정방법	장점	단점
수소탱크 중량	수소사용량 정밀 측정	측정장치 구축
탱크온도, 압력	온도 및 압력 측정 용이 수소퍼지 고려	Soaking 필요 측정위치에 따라변화
수소공급 유량	수소퍼지 고려	유량계 오차
연료전지 전류	반응성 우수	수소퍼지량 고려 불가

현재 적용중인 수소탱크의 온도, 압력 변화에 의한 방법으로 연비 평가시 탱크 내부 온도 센서의 측정 위치에 따라 온도가 변화하며, 수소 충전 전/후 또는 연비 평가 전/후 시간에 따라서 온도 및 압력이 변화하여 Fig1과 같이 연비편차가 발생하여, 연료전지차의 연비 편차 1% 이하를 만족시키기 위해 시험조건을 일정하게 유지하는데 있어 추가적인 노력이 요구되기 때문에 본 연구에서는 1% 이하의 편차를 갖는 정밀성을 확보하기 위해 수소탱크의 중량변화에 의한 연비 평가 개념도를 Fig2과 같이 수립하였다.

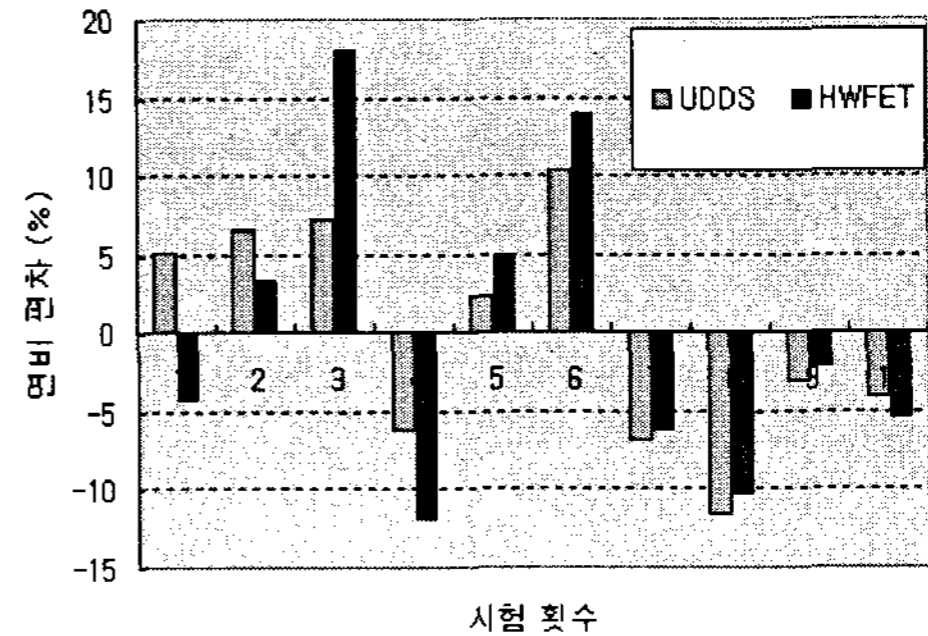


Fig.1 수소탱크 온도/압력법에 의한 연비 편차

3. 중량변화에 의한 연비 측정평가

3.1 중량변화에 의한 연비 측정 개념

중량변화에 의한 연비 측정 방법은 연료전지차량에 탑재된 수소탱크의 솔레노이드 밸브를 차단하고 정밀전자저울 상부에 위치한 외부수소탱크로부터 수소를 공급하여 샤시 다이아모 주행 전, 후의 탱크 수소사용량을 연비로 산출하는 것이다. 본 연구에서는 차량의 구조적 변경 없이 측정시스템을 적용하였으며, 이는 연료전지차에 공통으로 적용할 수 있는 장점을 갖는다.

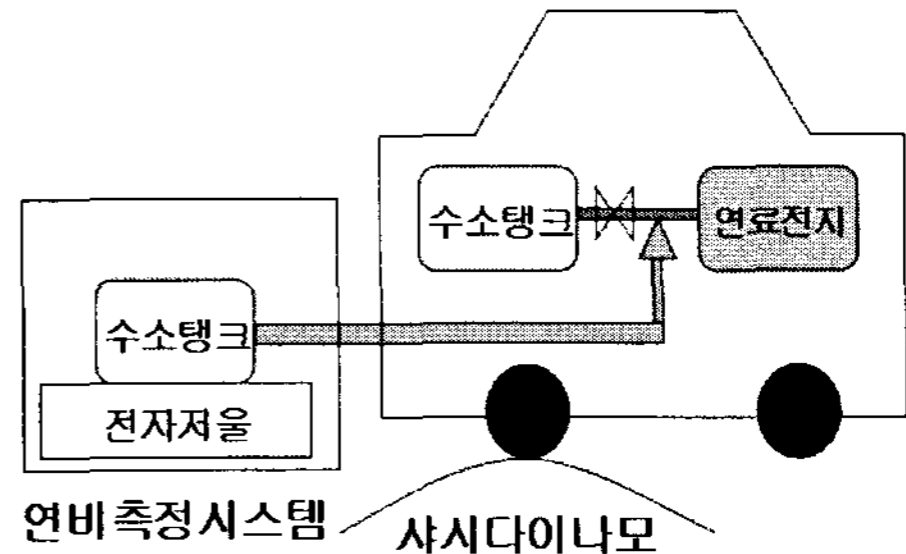


Fig.2 중량변화에 의한 연비 평가 개념도

3.2 연비평가 장치 설계

3.2.1 연비평가장치 하드웨어 개발

중량법에 의한 연비 평가를 위해 차량에 탑재된 수소탱크를 사용하지 않고, 외부에 별도로 수소탱크를 정밀성을 갖는 전자저울 상부에 설치하는 시스템을 제작하여 적용하였다. 연비평가 장치는 크게 탱크의 수소사용량을 측정하는 부분과 차량 연결시 배관 내부에 존재하는 공기 제거 및 수소 안전을 고려하는 안전장치로 구성되어 있으며, 장치 구성은 Fig3과 같다.

수소사용량 측정을 위해 사용된 39L 수소 탱크는 현재 차량에 적용중인 350bar 탱크로서 정밀 전자저울 상부에 위치시켰으며, 수소 공급시 고압 레귤레이터를 거쳐서 연료전지에 적합한 운전압력으로 감압되어 차량에 공급된다. 고압레귤레이터 고장시 350bar의 고압 수소 공급을 차단하여 연료전지 보호를 위한 안전밸브, 차량의 이탈시 수소 차단을 위한 브레이크어웨이(break-away), 수소

가스의 누설을 감지하기 위한 수소 감지센서를 설치하여 안전성을 확보하였다. 본 연구에서 사용되는 정밀 전자저울의 사양은 Table2와 같다.

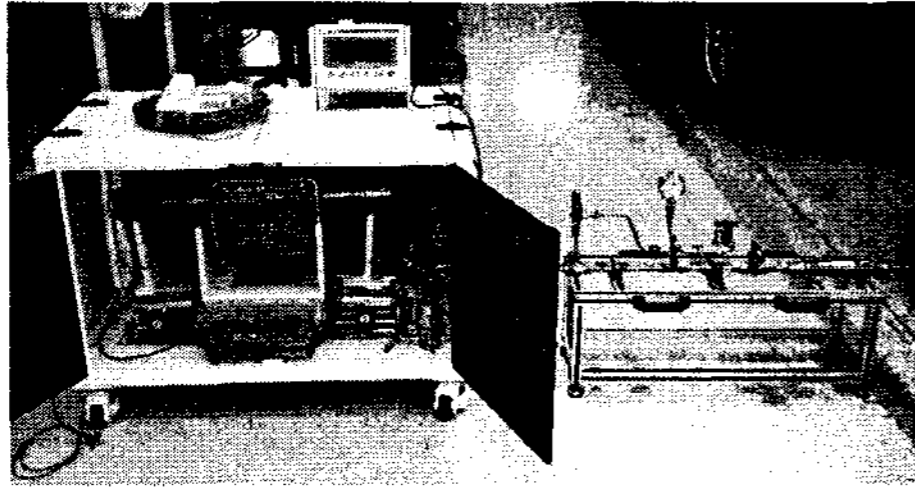


Fig.3 연비평가장치 하드웨어

Table 2 정밀 전자저울 사양

허용중량	Resolution	Repeatability
31kg	0.1g	0.1g

3.2.2 모니터링 프로그램 개발

수소탱크 내부의 중량 변화, 온도/압력 변화, 연료전지 발생 전류를 모니터링하고 고압솔레노이드 밸브 구동, 수소 누설시 밸브의 자동 차단을 위한 프로그램을 Labview로 Fig4와 같이 구현하였다.

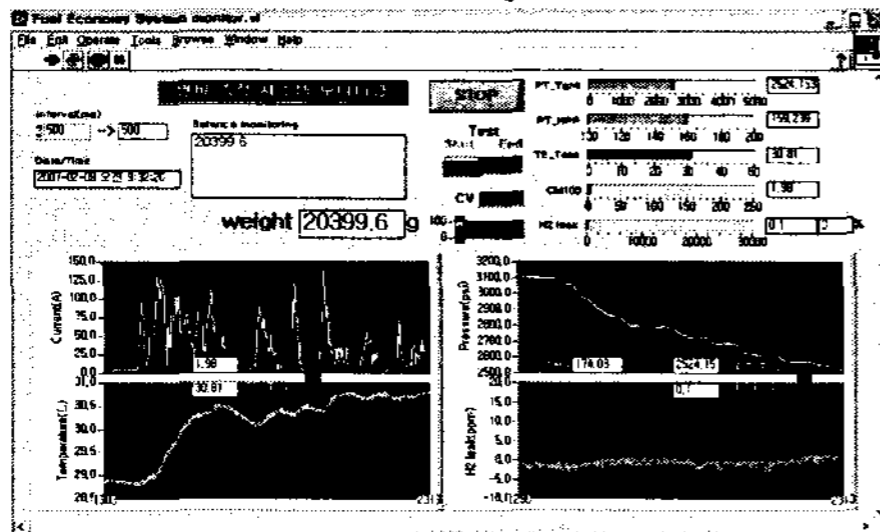


Fig.4 연비평가장치 모니터링 프로그램

3.2.3 스택수소소모량 정밀측정법

정밀한 수소이용률을 측정하기 위해서는 탱크 수소사용량 뿐만 아니라 스택 수소소모량을 정밀하게 측정해야 한다. 스택 수소소모량은 (식2)와 같이 스택에서 사용한 전류를 전기화학적으로 환산하여 계산할 수 있다. 따라서, 직접적으로 영향을 미치는 인자는 스택 전류이므로 정밀한 전류 센서를 도입해야 한다. 현재 차량에 적용된 전류 센서와 정밀 전류센서의 사양은 Table3과 같다. 두 종류의 센서를 적용하여 스택 수소소모량 차이를 분석하였다.

Table 3 전류센서 사양 비교

센서종류	Range	Accuracy	Resolution
차량센서	900A	1%	10bit
정밀센서	300A	0.4%	12bit

3.3 샤시 다이내모 연비 평가

3.3.1 연료전지차량 제원

샤시 다이내모 연비 평가를 위해 사용된 차량은 80kW급 고분자전해질 연료전지를 탑재한 연료전지차이며 시스템 구성 및 상세사양은 Table4, Fig5와 같다.

Table 4 연료전지차량 제원

시스템	사양
연료전지	80kW PEM 연료전지
연료가스	수소 / 공기
보조동력원	20kW급 리튬폴리머 배터리
구동모터	80kW AC Induction
수소저장	3.6kg @350bar, 15C

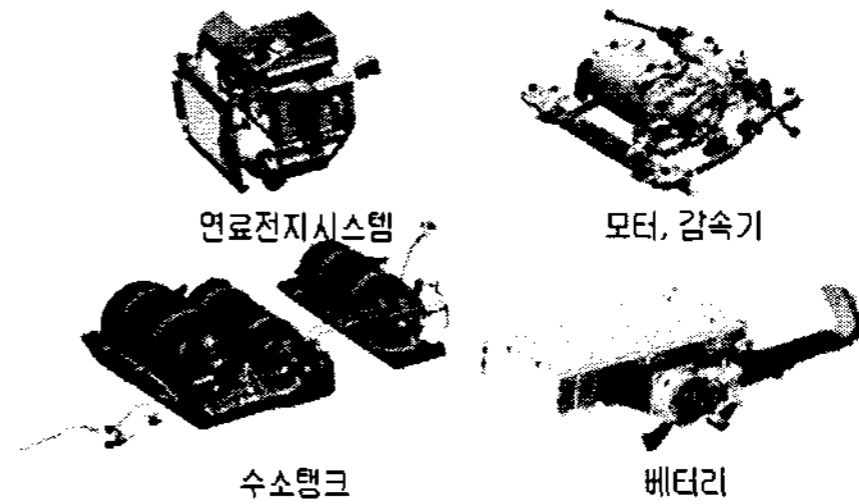


Fig.5 연료전지차 구성

3.3.2 샤시다이내모 평가 모드

연료전지차에 적용되는 샤시다이내모 평가 모드는 도심주행모드(UDDS)와 고속주행모드(HWFET)이며, UDDS는 FTP72를 cold 주행, 10분 soaking, hot 주행하여 내연기관차와 상이하하며, HWFET는 내연기관차의 평가모드와 동일하게 구성되어 있다. 온도/압력법 적용시 soaking을 필요로하므로 cold와 hot으로 구성된 모드는 차량 탱크를 사용하기 어렵다.

3.3.3 중량법에 의한 연비 평가 절차

샤시 다이내모 연비 평가를 위한 시험 방법은 아래와 같다. (1)외부 수소탱크의 무게를 측정한다(G1). (2)연료전지차에 연비평가장치를 연결한 후 연결시 수소 공급 배관에 잔존하는 공기를 차량에 탑재된 탱크의 수소로 퍼지하며 수소 공급 배관을 수소누설감지기로 누설 여부를 점검한다. (3)샤시 다이내모 모드 주행 전 외부 수소탱크의 솔레노이드밸브를 열고, 차량의 탱크 밸브를 닫는다. (4)샤시 다이내모 주행을 한다. (5)주행 완료 후 외부 수소탱크의 밸브를 닫고, 차량의 탱크 밸브를 열어 차량의 시스템 정지를 방지한다. (6)외부 수소탱크의 무게를 측정한다(G2). (7)주행 전, 후의 외부 수소탱크의 중량 변화

(G1-G2)로 탱크수소사용량 및 연비를 산출한다.

3.3.4 수소사용량 보정

연료전지 하이브리드차는 배터리 및 슈퍼캐프을 제2의 동력원으로 사용하기 때문에 샤시 다이내모 평가 전, 후의 입력/출력 에너지량을 고려해야 한다. 즉, 평가 후 제2동력원이 충전 되었을 경우 연료전지의 전력공급 및 모터의 회생제동에 의한 것이므로 연료전지에서 사용된 수소소모량을 탱크 수소사용량에서 제외해야 한다. 이와 반대로 제2 동력원이 방전 되었을 경우 모터를 구동하기 위해 연료전지외에 에너지를 공급한 것이므로 스택수소 소모량을 탱크수소사용량에 추가해야 한다.

식4와 같이 탱크수소사용에너지와 제2동력원의 입/출력에너지의 비율이 1% 이상일때 필히 보정을 해야 한다.

$$|\Delta E| > 0.01 * (G1 - G2) * 119.6 \text{ kJ} / \text{g} \quad (4)$$

3.3.5 중량법에 의한 연비평가 결과

연료전지차의 샤시다이내모 모드인 UDDS, HWFET의 연비 평가 결과는 Fig6, Fig7와 같다. 수소탱크의 온도/압력 변화법과 중량법을 적용하여 탱크수소사용량 비교시 온도/압력 변화법의 사용량이 증가하며 편차가 발생하였다. 이러한 탱크수소사용량의 차이로 인해 UDDS의 가솔린등가 연비 편차가 1% 이상이 되어 신뢰성을 확보할 수 없었으나, 중량법 적용시 UDDS, HWFET 모드의 연비 편차는 1% 이하를 달성하였다.

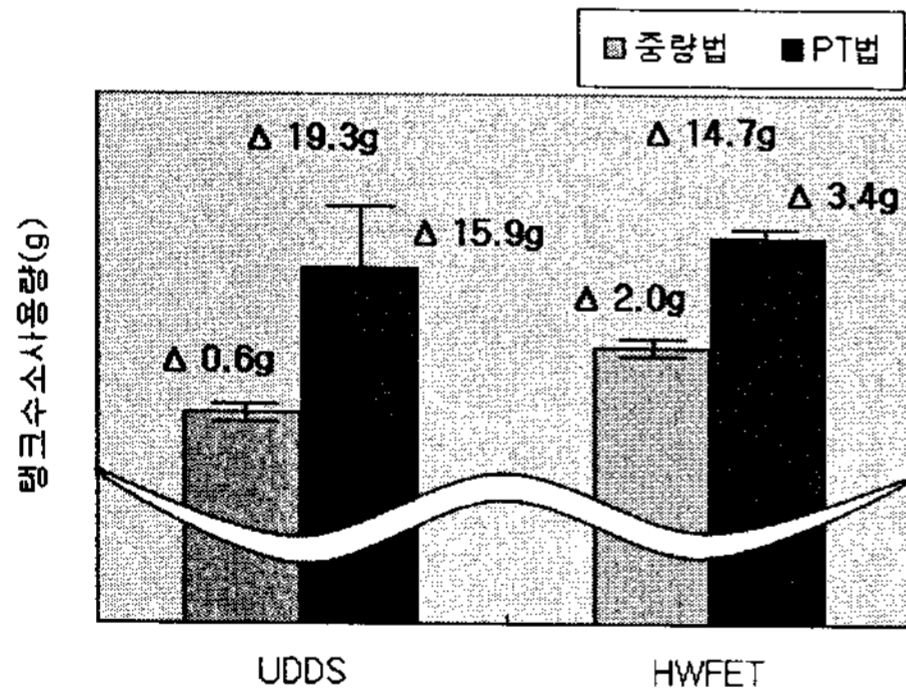


Fig.6 측정법에 따른 탱크수소사용량 비교

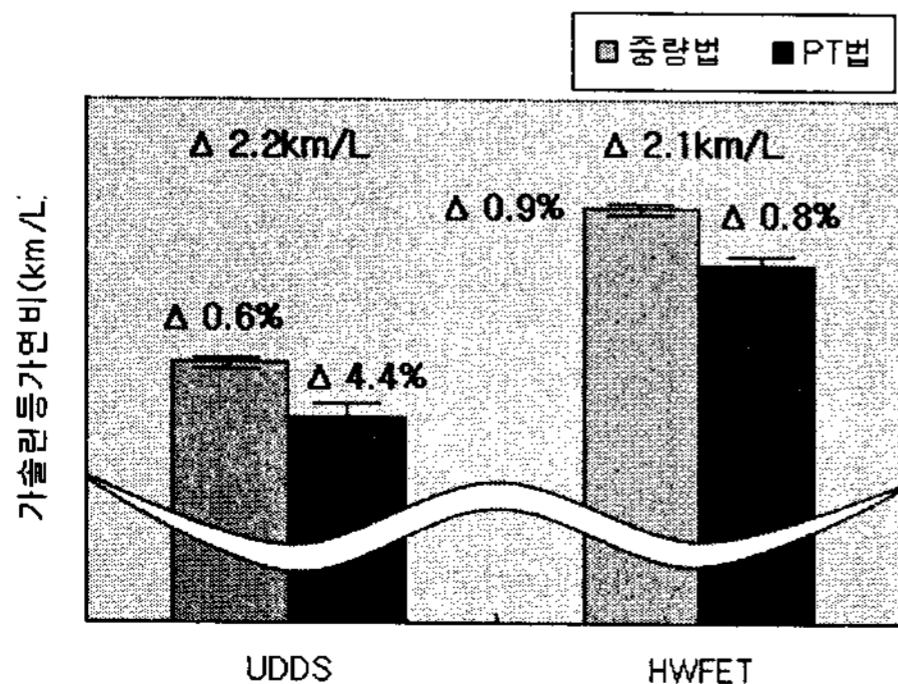


Fig.7 측정법에 따른 가솔린등가연비 비교

수소이용률 산출 인자인 스택 수소소모량을 정밀 전류센서를 이용하여 측정하여 중량법과 온도/압력변화법에 의해 산출된 탱크수소사용량을 적용하여 Fig8과 같이 수소이용률 결과를 도출하였다.

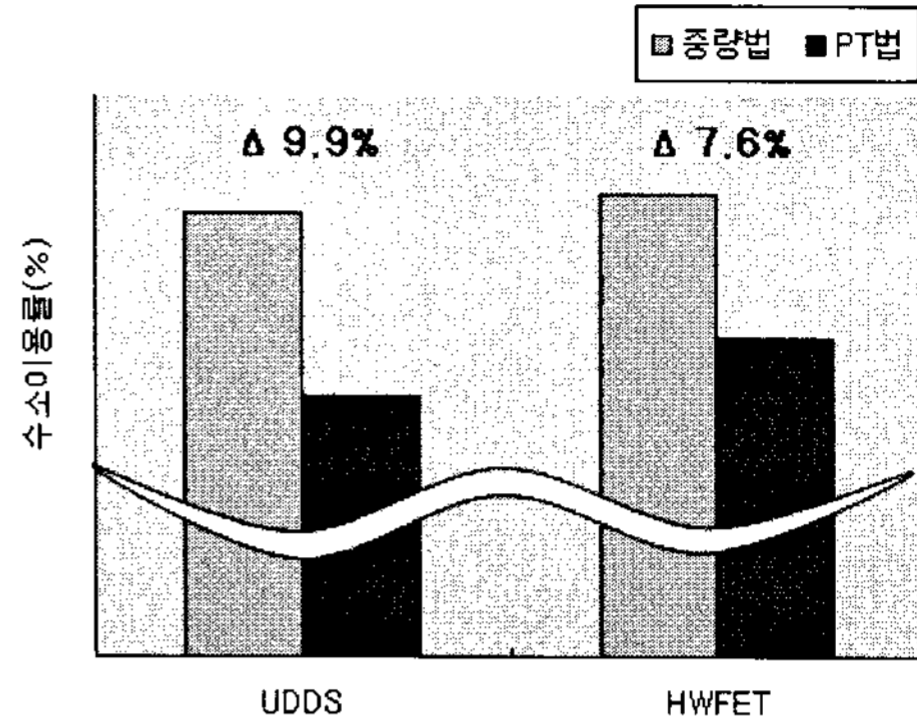


Fig.8 연비측정방법에 따른 수소이용률 비교

4. 결론

연료전지차의 다양한 연비 평가 방법 중 현재 적용중인 수소탱크의 온도/압력 변화를 적용한 방법과 정밀성과 재현성을 확보하기 위해 부각되고 있는 수소탱크의 중량 변화를 적용한 방법과의 비교를 위해 평가시스템 구축하여 적용함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 중량변화법 적용시 탱크 수소사용량을 정밀하게 측정함으로써 연비 편차를 1% 이하로 달성하였다.
- (2) 정밀한 전류센서를 적용하여 탱크수소 사용량과의 비율을 통해 산출된 수소이용률 비교시 중량법에 의해 평가된 수소이용률이 높음을 확인하였다.
- (3) 탱크 온도/압력 변화에 의한 연비 평가시 측정 데이터의 대표성을 확보하기 위한 방안이 필요하다.

후기

본 연구는 산업자원부 신,재생 에너지기술개발 사업의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] "Recommended Practice for Measuring Fuel Consumption and Range of Fuel Cell Hybrid Fuel Cell Vehicles Fuelled by Compressed Gaseous Hydrogen", SAE J2572, 2005.