

수소연료전지자동차에 대한 안전기준 고찰

용기중* · 이광범** · 권해봉**

Study of KMVSS for Hydrogen Fuel Cell Vehicle

Gee Joong Yong*, Kwang Bum Lee**, Hae Boung Kwon**

Key Words : KMVSS(한국자동차안전기준), Hydrogen Fuel Cell Vehicle(HFCV, 수소연료전지자동차)

ABSTRACT

In the ongoing debates over the need to identify new sources of energy and to reduce the emissions of greenhouse gases. Hydrogen has emerged as one of the most promising alternatives due to its emissions from the vehicle being virtually zero. The governments have identified the development of regulations and standards as one of the key requirements for commercialization of hydrogen-fueled vehicles. Regulations and standards will helpful in overcoming technological barriers to commercialization. Developments of a technique for safety assessment of Hydrogen Fuel Cell Vehicle(HFCV) includes four tasks, research for regulation system and policy, hydrogen safety, vehicle operation safety and protection against high-voltage. The objective is to establish a technique for safety assessment and amend safety standards for HFCV and consequently reflect research results to vehicle management policy. We devised safety standards and evaluation techniques with regard to high-pressure gas and high voltage of hydrogen fuel cell vehicle. Korean Motor Vehicle Safety Standards(KMVSS) for HFCV was amended to June 10, 2014. including the results of the safety assessment technology for high-voltage and hydrogen characteristics.

1. 서론

자동차기술의 급격한 발전으로 하이브리드자동차와 전기자동차는 이미 시판 중에 있으며, 수소연료전지자동차는 양산 단계에 근접해 있다. 신기술 자동차의 시장진입 장애를 해소시키기 위하여 정부에서는 안전성 확보를 위한 제도적 미비점을 지속적으로 보완하여 왔다.

특히 수소를 연료로 사용하는 수소연료전지 자동차는 유해배출가스가 없는 무공해 자동차이지만 고압 수소가스, 고전압 등에 의한 안전도 확보가 필수적이다.

수소연료전지 자동차는 고압수소를 연료로 사용함으로써 액체연료를 사용하는 기존의 내연기관 자동차와는 전혀 다른 특성들을 나타내고 있으며 기존 자동차와는 다른 방향의 안전성 확보 문제가 대두된다.

수소연료전지자동차 안전성평가 기술개발사업은 정부의 신기술에 대한 장벽을 해소하기 위한 대응책의 일환으로 2007년 12월부터 2012년 12월까지 5년동안 총 244억원(정부 122억원, 민간 122억원)을 투자하여 진행되었다. 본 사업은 제도·정책 분야, 수소안전성 분야, 운행안전성 분야, 전기안전성 분야의 4분야로 구성되었다. 또한 본 사업의 목표는 수소연료전지자동차에 대한 정부의 자동차관리 효율화를 위하여 수소연료전지자동차의 사고위험성 및 사고시 피해 최소화를 위한 안전성 평가기술을 확보하고, 수소연료전지자동차에 대한 고전압장치, 수소 안전성 등에 대한 안전기준

* 경일대학교

** 교통안전공단 자동차안전연구원

E-mail : dragon@kiu.kr

및 안전성 평가기술을 개발하여 자동차 관리 정책에 반영하는 것이다.^(1,2)

2. 수소연료전지자동차관련 법규 제개정 현황

수소연료전지자동차의 안전성 확보를 위하여 자동차관리법 시행규칙에 압축수소가스 내압용기에 대한 각인, 표시방법을 신설하였으며, “자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙(이하 “자동차 안전기준”이라 한다.)”에 수소연료전지자동차의 전기적 특성, 충돌특성, 구동축전지 성능 및 자동제어 등 안전성 평가 기술개발 결과를 반영하여 '14년 6월 10일 개정하였다.

2.1 자동차 안전기준

현재 시행중인 자동차 안전기준과 관련하여 수소연료전지자동차의 안전성 확보와 관련된 11개 조항을 신규로도출해서 최종적으로 10개 조항이 개정되었다.

- 제13조 조종장치 등
- 제15조 제동장치
- 제17조 연료장치
- 제18조의2 고전원 전기장치
- 제87조 가속제어장치
- 제91조 4항 충돌시 고전원 전기장치
- 제91조 5항 충돌시 연료장치장치
- 제91조 6항 연료장치 고정성
- 제111조 원동기 출력
- 제111조의2 전자파적합성
- 제111조의5 전기식 제어전달장치 <도출>

2.2 자동차안전기준 시행세칙

2.1항에서 도출된 조항에 구체적인 시험방법 등을 규정한 시행세칙은 14개 항목을 도출하였으며, 최종적으로 13개 항목을 신설 및 개정하였다.

- 기체연료 내압용기 고정성시험 <신설>
- 수소가스 누출확인 시험 <신설>
- 고전원 전기장치 안전성 시험<개정>
- 가속제어장치 복귀능력 시험<개정>
- 승용자동차의 제동능력 시험<개정>
- 충돌시 연료누출 방지 시험<개정>
- 충돌시 고전원 전기장치 안전성 시험<개정>

- 시계확보장치 시험<개정>
- 구동전동기 출력 시험<개정>
- 구동축전지 출력 시험<개정>
- 연료전지 출력 시험 <신설>
- 연료소비율 시험<개정>
- 전자파 적합성 시험<개정>
- 시스템출력 시험 <도출>

3. 안전기준 시험

3.1 충돌시험

수소연료전지자동차는 안전기준 제91조(연료장치)에 따라, 승용자동차 및 차량총중량 4.5톤 이하 승합자동차인 경우 별표 11의4의 수소가스를 연료로 사용하는 자동차의 연료장치는 Fig 1과 같이 정면, 후면, 측면 충돌시험 기준에 적합하여야 한다.

- 충돌시 연료 탱크와 연료 라인에 적용하며 수소가스의 누출은 충돌 후 60분간 분당 평균 118 NL을 초과하지 않을 것.
- 누설된 가스가 차실내승객거주공간이나 수화물 적재공간에서의 체적당 농도가 2% 미만일 것
- 연료탱크의 부착지점이 최소한 1군데 이상 차량에 부착되어 남아 있을 것
또한 별표 11의5의 고전원 전기장치의 충돌 시험 기준에도 Fig 1과 같이 정면, 후면, 측면 충돌시험시 만족하여야 한다.⁽³⁾
- 충돌 후 30분까지 전해액이 승객거주공간으로 침입하지 말아야 하며, 전해액 누출량은 7% 이하여야 할 것
- 승객거주공간내부에 설치된 구동축전지는 설치된 위치에 남아 있어야 하며 그 구성요소들은 구동축전지 경계구역내에 남아 있어야 함. 또한, 승객거주공간 외부에 설치된 구동축전지의 구성요소들중 일부라도 승객거주공간내로 침입하지 않을 것
- 충돌후 60초내에 고전압 회로 Vb, V1, V2의 전압이 교류는 30V 이하일 것, 직류는 60V 이하일 것
- 직류와 교류 회로가 별도로 구성된 전기동력전달장치의 고전압회로와 전기적 사시와의 절연 저항은 직류회로에 대해서는 구동전압의 100Ω/V 이상, 교류회로에 대해서는 구동전압의 500Ω/V 이상이어야 하며, 직류와 교류 회로가 결합된 전

기동력전달장치의 고전압회로와 전기적샤시와의 절연저항은 구동전압의 500Ω/V 이상이거나 구동전압의 100Ω/V 이상이고 교류회로는 다항 및 마항을 만족할 것



Fig. 1 The test vehicle of frontal and rear impact test

- 고압의 활선도체부에 대한 직접접촉으로부터 보호를 위해 보호등급 IPXX B가 제공되어야하며, 간접접촉으로부터 보호를 위해 모든 노출된 도전부와 전기적 샤시와의 저항은 0.2 암페어 이상의 전류에서 0.1Ω 이하 유지할 것

3.2 가속제어장치 복귀능력시험

가속제어장치는 가속페달 및 출력관련 시그널을 절단하면서 주행중 발생할 수 있는 고장에 대한 평가를 하도록 하였고 단일 고장발생시 1초 이내에 공회전 상태로 복귀하도록 하였다.

3.3 원동기 출력시험

원동기의 범주에 연료전지를 포함시켰으며, 연료전지의 최고출력은 Fig 2와 같이 제원의 -5% 이내 이어야 한다.

3.4 제동능력시험

전기제어식 제동장치는 가속페달 해제에 의한 전기회생제동장치의 제동등 점등 조건을 확립하고 제동장치 성능에 영향을 미치는 전기조절 전달장치 내부의 고장 및 전기적 단선 또는 단락 영향성에 항목이 추가되었다. 특히, 각 고장 발생모드에서 최소한의 제동거리를 확보하도록 하였다.⁽⁴⁾

3.5 고전원전기장치 안전성시험

고전원전기장치는 구동축전지, 전력변환장치, 구동전동기, 연료전지 등 작동전압(실효치)이 직류 60V 초과

를 하고 1,500V 이하이거나, 교류 30V 초과하고 1,000V 이하인 전기장치를 말한다.

3.5.1 직접접촉에 대한 보호기준

- 승객거주 또는 수화물공간의 고전원전기장치 활선도체부는 Fig 3의 IPXX D의 보호등급을 만족
- 이외 공간의 고전원전기장치 활선도체부는 Fig 3의 IPXX B의 보호등급을 만족

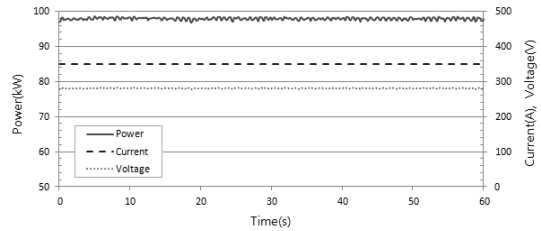


Fig. 2 The graph of power for fuel cell

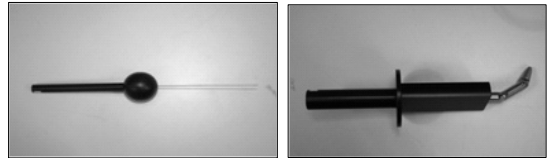


Fig. 3 IPXX D (test wire) and IPXX B (test finger)

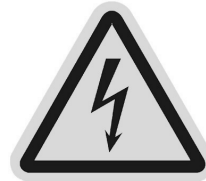


Fig. 4 Marking of high voltage equipment

- 고전압 정선박스, 고전압 인버터, 공기블로워 등의 커넥터들은 잠금장치 및 공구를 사용하여 분해되는 구조를 가지고 있어야 한다.
- 고전원장치의 점검 및 수리를 위하여 고전압회로를 차단하는 장치가 공구없이 개방되는 경우 IPXX B 보호등급을 만족하여야 한다.
- 직접 접촉이 가능한 고전원 전기장치에는 Fig 4와 같은 경고표시가 부착되어야 하고 고전압 배선은 주황색으로 설치되어야 한다.

3.5.2 간접접촉에 대한 보호기준

연료전지, 고전압 정선박스 등의 노출 도전부는 전

기적 사시와 케이블, 용접 또는 볼트 등으로 접속되어야 하고, 노출 도전부와 전기적 사시 사이의 저항(전기 연속성)은 0.1 Ω 이하이어야 한다.

3.5.3 절연저항

고전압 (+) 활선도체부와 전기적사시, 고전압 (-) 활선도체부와 전기적사시의 절연저항은 직류는 작동전압에 100Ω/V 이상, 교류는 작동전압에 500Ω/V 이상이어야 한다. 또한 절연저항 감시시스템을 설치하여 100Ω/V 이하로 떨어지는 경우 운전자에게 경고를 줄 수 있도록 계기판의 경고등이 점등되어야 한다.

3.6 구동축전지 안전성시험

수소연료전지자동차는 보조 동력원으로 구동축전지(리튬폴리머)를 갖추고 있으며, 구동축전지는 총 7가지 안전성시험을 만족시켜야 한다.

3.6.1 낙하안전시험

구동축전지를 Fig 5와 같이 4.9m 높이에서 콘크리트 바닥 위에 자유 낙하시키며, 낙하 후 구동축전지의 발화 및 폭발이 발생하지 않아야 한다.

3.6.2 액중투입 안전시험



Fig. 5. The experimental apparatus for drop test



Fig. 6 The experimental apparatus for immersion test

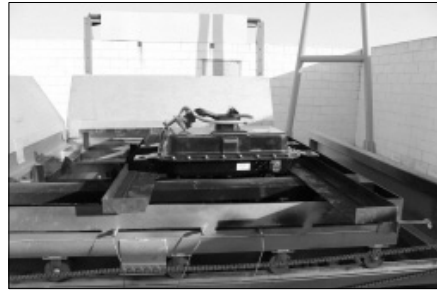


Fig. 7. The experimental apparatus for fire test

Fig 6과 같이 구동축전지를 염수로 충분히 채운 수조에 완전히 침수시키고 1시간을 유지한다. 침수상태에서 구동축전지의 발화 및 폭발이 발생하지 않아야 한다.

3.6.3 과충전 안전시험

구동축전지를 상온에서 완전방전 후 SOC 150% 까지 충전하면서, 과충전 진행과정에서 구동축전지의 발화 및 폭발이 발생하지 않아야 한다.

3.6.4 과방전 안전시험

구동축전지를 상온에서 완전 방전시켜 SOC 0% 상태를 유지하여 구동축전지를 1C(전체용량에 대하여 1시간 동안 충·방전 할 수 있는 전류량) 전류로 방전시켰을 때, 구동축전지의 발화 및 폭발이 발생하지 않아야 한다.

3.6.5 단락 안전시험

구동축전지를 상온에서 완전방전 후 정격전류로 목표 SOC까지 충전하고, 단락 회로의 전체 저항은 50mΩ 이하로 구성하여 구동축전지를 단락시킨다. 단락상태에서 구동축전지의 발화 및 폭발이 발생하지 않아야 한다.

3.6.6 열노출 안전시험

챔버 온도를 80℃로 유지하면서 구동축전지를 챔버에 넣고 4시간 경과 후 시험을 종료한다. 열노출 상태에서 구동축전지의 발화 및 폭발이 발생하지 않아야 한다.

3.6.7 연소 안전시험

구동축전지를 Fig 7과 같이 설치하고 구동축전지

하단부를 직접 가열한다. 가열온도는 890℃에서 1,100℃로 하고 가열시점으로 부터 2분 경과 후 시험을 종료한다. 2분간의 가열과정에서 구동축전지의 발화 및 폭발이 발생하지 않아야 한다.

3.7 수소 누출시험

수소연료전지자동차는 배기구, 승객거주공간에서 수소누출, 밀폐 및 반밀폐공간에서 수소누출 농도의 최고치를 규정하고 또한 수소감지기, 계기판 경고등 작동기준을 만족시켜야 한다.

- 배기구에서 배출되는 가스 내 수소농도는 정상운행상태(시동, 가동중지 상태를 포함)에서는 3초간 측정치의 평균값이 4%를 초과하지 않아야 하며, 순간 최고 농도가 8%를 초과하지 않아야 한다.
- 누출되거나 투과된 수소는 승객거주 공간, 수화물 공간, 밀폐공간 등을 향해서 배출되어서는 안된다.
- 수소저장장치에서 발생하는 수소 누출 또는 침투는 다음 각 호의 공간을 향하지 않아야 한다.
 - 가. 승객거주 공간, 수화물 공간
 - 나. 밀폐된 공간 또는 절반 이상 밀폐된 공간
 - 다. 노출된 점화원이 있는 임의의 위치
- 주 차단밸브 고장으로 인한 수소누출시 승객거주 공간 내에서는 공기중 수소농도가 2%를 초과하지 않아야 한다.
- 운행상태 중 밀폐공간 또는 절반 이상 밀폐된 공간내에서 공기중 수소농도가 2%를 초과할 시, 계기판 경고등이 점등되어야 하며, 공기중 수소농도가 4%를 초과할 시에는 차단밸브가 동작하여 수소저장시스템을 차단하여야 한다.
- 계기판 경고등은 시각적인 그림 또는 문구를 포함하며, 다음 각 호의 기준에 적합하여야 한다.
 - 가. 운전자가 안전띠를 착용한 상태에서 식별 가능해야 한다.
 - 나. 수소연료장치의 고장이 감지된 경우 노란색으로 표시하며, 임의의 밀폐공간 등에서 수소농도가 2% 이상 감지되었을 경우에는 빨간색으로 표시하여야 한다.
 - 다. 경고등은 점등되었을 경우 운전자가 주간 및 야간에 모두 식별이 가능하여야 한다.
 - 라. 고장(고장 또는 수소농도 2% 감지)상태가 지속되는 경우와 점화잠금장치가 작동중일 경우, 경고등의 점등상태는 유지되어야 한다.

마. 고장원인이 정상으로 고쳐졌을 경우, 구동이 시작될 때 경고등이 소등되어야 한다.

3.8 연료소비율 시험

수소연료전지자동차의 연료소비율은 시가지와 고속도로를 재현한 주행모드를 이용하여 각각의 연료소비율을 측정정한 후 이를 복합하여 최종 연료소비율을 산출하였다. 다만, 연료소비율은 산출하는 방식이 기존의 탄소발판스법이 아닌 소비된 수소 중량을 직접 측정하였다.⁽⁵⁾

- 시가지 주행 연료소비율 (km/kg)
 $0.7 \times$ 시가지 주행모드(FTP-75)에서 시가지 동력계 주행시험계획(UDDS) 2회 반복주행에 따른 연료소비율
- 고속도로 주행 연료소비율 (km/kg)
 $0.7 \times$ 고속도로 주행모드(HWFET) 주행에 따른 연료소비율

3.9 전자파적합성 시험

수소연료전지자동차의 전자파 시험은 일반 내연기관자동차와 동일한 규제치를 만족하여야 한다. 다만, 시험조건은 기어중립상태를 40km/h 정속주행상태로 변경하였다. 일반 내연기관보다 많은 전기 및 전자제어장치를 탑재한 수소연료전지자동차는 일반 내연기관자동차 수준의 전자파 방사 및 내성시험을 만족시켜야 한다.

3.10 화재시험

고압압축수소방식의 수소저장시스템 및 실차상태의 화재안전성 평가는 안전기준에 도입되지는 않았지만, 고압가스관련법규에는 반영되어야 한다. 왜냐하면 화재시험과 관련된 사항은 실제 상용화를 위하여 반드시 거쳐야 하는 평가항목이라고 생각되기 때문이다.⁽⁶⁾

수소연료전지 자동차에 대한 실차 화재시험은 고압 수소저장시스템 및 수소탱크의 안전장치 동작여부, 화염의 형상 및 온도 분포를 확인하여 고압 수소저장시스템 및 수소탱크의 화재 안전성을 확인하는 것이다.

화재시험 장소는 경기도 포천시에 위치한 포탄 시험장을 임대하여 사용하였고, 화재시험을 하기 위한 곳은 두께가 1m 정도 되는 콘크리트 방벽이 설치되어



Fig. 8. Fire status of the HFCV

있어서 Fig 8과 같이 안전하게 시험을 진행 할 수 있었다. 시험결과, 화재 시험 시작 후 13분 23초에 40L 수소탱크에서 TPRD가 작동하여 내부가스를 방출하였고, 이어서 31초 후에 104L TPRD가 작동하여 내부가스를 방출하였으며, 탱크의 폭발 등 이상 현상은 발생하지 않았다.

4. 결론

국제적으로 무공해 또는 저공해 자동차의 판매를 의무화하고 자동차배기가스에 대한 규제를 강화하는 등 환경 보전을 명분으로 한 각종 규제들이 강화되고 있다. 따라서 수소연료전지자동차와 같은 친환경 자동차에 대한 관심 및 연구 지원이 날로 증대되고 있으며 친환경자동차 시장은 지속적으로 성장할 것으로 예측된다. 또한 국내에서는 2012년 시범보급을 시작하였고 2014년부터 소량생산을 하고 있는 상태이다. 따라서 “수소연료전지자동차 안전성 평가기술개발”은 선행연구를 통해 수소연료전지자동차 보급기반을 구축하고, GTR 제정에 적극 참여하여, 다음과 같은 성과를 도출하였다.

- 가. 수소연료전지자동차의 연료장치등 안전기준(안) 11개 항목 도출
- 나. 수소연료전지자동차의 충돌시험방법 등 시행세칙(안) 14개 항목 도출

그리고 정부는 이러한 연구결과를 반영하여 “자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙”을 ‘14년 6월 10일 개정하였다.

본 과제를 통해서 부품 및 차량의 각 조건에서 안전성에 대해 검토하였고, 안전과의 연관되는 요소를 도출하여 안전설계를 위한 평가를 진행하였으며, 최종적으로 국제동향을 분석하여 한국의 특성에 맞는 안전기준(안)을 도출하였다. 또한 부품단위, 시스템단위, 차

량단위에서의 문제 발생시 안전성과의 연관성을 분석하고, 안전성 확인 평가기술 및 해석기술을 정립하여, 안전기준(안)을 도출함으로써 수소연료전지자동차의 안전성을 확보할 수 있는 설계기준을 제시하였다. 이는 향후 수소연료전지자동차 보급시 안전도 향상 기술 개발과 관련된 세계적인 수준의 자동차기술 및 부품기술을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통부가 출연하고 국토교통과학기술진흥원에서 위탁 시행한 국가교통핵심기술개발사업인 “수소연료전지자동차 안전성 평가기술 개발”(07공통체계-미래02) 연구과제로 진행되었습니다.

참고문헌

- (1) J. W. Lee, K.B. Lee and G. J. Yong, “Review of Rule-making Activities on Hydrogen Fuel Cell Vehicle”, Proceeding of the KSAE annual conference, 2008.
- (2) K.B. Lee, J.W. LEE and G. J. Yong, “A Study of Fuel System Integrity and Electric Safety of HFCV” ESV 22, 2011
- (3) J.M. Lim, H.J. Chang and G.H. Kim, “Trends on Crash and Fire Safety Research of Hydrogen Fuel Cell Vehicles”, Proceeding of the KSAE 30th anniversary conference, 2008.
- (4) I.S. Choi, J.H. Lee, “A Consideration on The Safety Evaluation Method of Braking System with Electric Control Transmission”, Proceeding of the KSAE annual conference, 2011.
- (5) J.S. Lim, H.W. Lee, “Development on Fuel Economy Test Method for Hydrogen Fuel Cell Vehicles”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 21, No 3, 2010.
- (6) S. H. Kim, Y. M. Choi, “The Evaluation of Fire Reliability for the High Pressure Hydrogen Storage System of Fuel Cell Vehicle”, Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 22, No 4, 2011.