

수소연료전지 자동차 안전성 평가기술 개발

용기중¹ · 이광범^{2†}

¹경일대학교 기계자동차학부, ²교통안전공단 자동차안전연구원

Development of Safety Assessment for Hydrogen Fuel Cell Vehicle

GEE JOONG YONG¹, KWANG BUM LEE^{2†}

¹School of Mechanical & Automotive Engineering, Kyungil Univ. 50, Gamasligil Hayangup Gyeongsan, Gyeongbuk, 712-701, Korea

²Korea Automobile Testing & Research Institute, KOTSA, 200 Samjon-ro Songsan-myun Hwaseong-si Gyeonggi-do, 445-871, Korea

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 HFCV. Regulations and standards will help overcome technological barriers to commercialization. The development of Global Technical Regulation (GTR) for HFCV occurred under the World Forum for Harmonization of Vehicle Regulations. Development of a technique for safety assessment of HFCV include 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. KMVSS for HFCV was amended to June 10, 2014. including the results of the safety assessment technology for high-voltage and hydrogen characteristics.

Key words : GTR(국제안전기준), HFCV(수소연료전지 자동차), KMVSS(한국자동차안전기준)

Subscripts

GTR : global technical regulation
SOC : state of charge
MPa : gas pressure
TPRD : temperature pressure relief device

1. 서 론

세계 자동차산업은 환경, 에너지 및 안전문제를 해결하기 위하여 저공해·고효율의 첨단기술을 접목한 미래형자동차 시대로 급속히 전환되고 있다.

자동차기술의 급격한 발전으로 이미 하이브리드 자동차와 전기자동차는 시판 중이고 수소연료전지자동차는 양산 단계에 근접해 있으며, 일부 자동차 메이커는 소량 양산체제를 갖추고 생산하고 있다. 신기술 자동차의 시장진입 장애를 해소시키기 위하여 정

[†]Corresponding author : katrietf@ts2020.kr

[접수일 : 2014.09.24 수정일 : 2014.10.08 게재확정일 : 2014.10.31]

Copyright © 2014 KHNES

부는 자동차안전기준 등 안전성 확보를 위한 제도적 미비점을 지속적으로 보완하고 있다.

특히 수소연료전지 자동차는 무공해 자동차이지만 고압 수소가스, 고전압 등에 의한 안전도 확보가 필수적이다. 수소연료전지 자동차는 현재 고압수소를 연료로 사용함으로써 인하여 기존의 내연기관 자동차와는 전혀 다른 특성들을 나타내고 있으며 기존 자동차와는 다른 방향의 안전성 확보 문제가 대두된다.

정부는 신기술에 대한 장벽을 해소하기 위한 대응책의 일환으로 수소연료전지자동차 안전성평가 기술 개발에 2007년 12월부터 2012년 12월까지 5년동안 총 244억원(정부 122억원, 민간 122억원)을 투입하였다. 본 사업은 제도·정책 분야, 수소안전성 분야, 운행안전성 분야, 전기안전성 분야의 4분야로 구성되어 진행되었다. 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 및 안전성 평가기술을 개발하여 안전기준 국제조화 및 수소연료전지자동차 관리 정책에 반영하는 것이다.^{1,2)}

본고에서는 수소연료전지자동차 안전성평가 기술 개발사업의 최종 성과인 자동차 안전기준에 관한 규칙(이하 “안전기준”이라 한다.) 개정내용과 안전기준 시험 내용을 기술하고자 한다.

2. 자동차 안전관련 기준 제개정

수소연료전지자동차의 안전성 확보를 위하여 자동차관리법 시행규칙에 압축수소가스 내압용기에 대한 각인, 표시방법을 신설하였으며, “자동차 및 자동차부품의 성능과 기준에 관한 규칙”에 수소연료전지 자동차의 전기적 특성, 충돌특성, 구동축전지 성능 및 자동제어 등 안전성 평가 기술개발 결과를 반영

하여 ‘14년 6월 10일 개정하였으며, 주요 내용은 다음과 같다.

2.1 제2조 “정의”

수소연료전지자동차는 기존에 없던 개념의 자동차이므로 연료전지자동차, 연료전지에 대한 정의를 신설하고 고전원전기장치에 대하여 최고치를 설정하는 것으로 개정하였다.

2.2 제17조 “연료장치”

수소가스를 연료로 사용하는 자동차의 수소 누출 안전성 및 감지장치 안전기준을 신설하였다. 수소를 배출하는 배기구에 배출되는 수소 농도를 평균 4%, 순간 최대 8%로, 차단밸브 이후에서 수소가스 누출시 승객공간에는 1%로 제한하였다. 또한 수소가스 누출시 경고등 작동조건과 차단밸브 작동 조건을 마련하였다.

2.3 제18조의2 “고전원전기장치”

고전원전기장치는 수소연료전지자동차의 특성을 반영하여 개정하였다. 고전원 전기장치의 활선도체부 설치기준, 활선도체부와 전기적사시의 절연저항 기준, 절연저항 감시시스템 등을 마련하였다.

2.4 제33조 “가스운송장치”

수소가스를 연료로 사용하는 자동차뿐만 아니라 가스를 연료로 사용하는 모든 자동차의 가스용기 고정성, 누출시 격리, 도관 설치기준 등을 개정하였다. 특히 가스용기와 용기 밸브를 차체 최후단으로부터 300mm 이상, 차체 최외측면으로부터 200mm 이상의 이격거리를 명문화하여 가스 용기 및 용기 밸브 등 수소가스 배관시스템의 설계기준을 확립하였다.

2.5 제91조 “연료장치”

정면 및 측면충돌시 압축수소 누출안전성 등을 위하여 수소연료전지자동차의 연료장치 충돌시험방법 및 절차를 마련하고, 사고시 충격에 의한 누출방지를 위하여 압축수소 등의 연료탱크 및 그 부착장치에 대한 안전성 확인 기준을 마련하였다.


2.6 제111조 “원동기 출력”

수소연료전지의 출력 측정방법을 마련하고 전체적인 구성을 내연기관과 명확히 구분하여 정리하였고, 수소연료전지 최고출력에 관한 제원의 허용차를 명문화하였다. 또한 시행세칙에서 수소연료전지자동차의 연료소비율 시험에 대한 시험절차도 제정하였다.

3. 수소연료전지자동차 안전기준 시험

수소연료전지자동차의 안전기준 시험에 사용된 자동차는 투산 ix 이며 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of test vehicle

Model	Tucson ix	Maker	Hyundai	
Dimension (L×B×H)	4,410×1,820×1,670mm			
Max. Speed	160km/h			
GVW	2170kg			
Disti-bution	Unload		Front 1110kg Rear 735kg	
	Load		Front 1210kg Rear 960kg	
Fuelcell	95kW	H ₂ Tank	5.6kg(70 MPa)	
E-motor	100kW/ 300Nm	Mileage	594km/charge	
Battery	Li-polymer 24kW/ 180V/5.3Ah	Fuel Consumption (EU mode)	27.8km/l (Gasoline Eq.) 0.95kg/100km	

3.1 실차 충돌시험

수소연료전지자동차는 안전기준 제91조(연료장치)에 따라, 승용자동차 및 차량총중량 4.5톤 이하 승합자동차인 경우 별표 11의3의 고전원 전기장치의 충돌 시험기준 및 별표 11의5의 수소가스를 연료로 사용하는 자동차의 연료장치 충돌시험 기준에 적합하여야 한다.³⁾

3.1.1 정면충돌시험

정면충돌시험은 Fig. 1과 같이 48km/h 속도로 정면으로 충돌하였으며, 시험자동차에는 수소를 충전하였다. 시험결과, 충돌후 고전원 활선도체부와 노출도전부와의 절연저항은 100Ω/V [DC] 이상으로 확인되었다. 또한 연료전지의 잔류전압은 60초 이내에 0V로 계측되었고, 구동용 축전지는 전해액이 누출되지 않았으며 차실내로 침입하지 않았고, 충돌후 승객 거주공간, 화물공간에서 수소농도가 계측되지 않아 기준을 만족시켰다.

3.1.2 부분 정면충돌시험

부분 정면충돌시험은 Fig. 2와 같이 40% Offset 상태에서 56km/h 속도로 정면으로 충돌하였으며, 시험자동차에 수소를 충전하였다. 시험결과, 충돌후 60초 이내 30V/DC 미만으로 규정되어 있으나, 시험결과 3.71초가 소요됨을 확인하였다. 충돌 후 30분 동안



Fig. 1 The test vehicle of frontal impact test



Fig. 2 The test vehicle of 40% offset frontal impact test



Fig. 3 The test vehicle of rear impact test

측정결과, 수소는 누출되지 않았고, 압력변화가 없음을 확인하였다. 수소 연료라인의 손상은 발견되지 않았고, 고전압 전기안전성 또한 이상이 없음을 확인하였다.

3.1.3 후방추돌시험

후방추돌시험은 Fig. 3과 같이 이동대차를 이용하여 84km/h 속도로 후방에 추돌하였으며, 시험자동차에 수소를 충전하였다. 시험결과, 수소탱크내의 수소 압력은 낮아지지 않았고, 수소탱크는 파손되지 않았으며, 자동차의 부착지점으로부터 분리되지도 않았다.

3.2 원동기 출력시험

수소연료전지자동차에는 동력원과 관련된 장치로 구동전동기와 연료전지가 있으며, 구동전동기는 기존 안전기준 시행세칙을 준용하고 연료전지 출력과 관련된 시행세칙은 신규로 제정하였다.

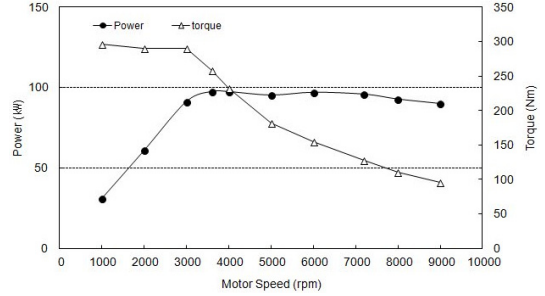


Fig. 4 The graph of power and torque

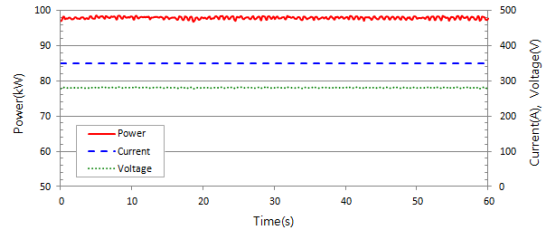


Fig. 5 The graph of power for fuel cell

3.2.1. 구동전동기

구동용전동기는 안전기준 제111조 제2호에 따라 최고 정미축출력과 최고 30분 출력을 Fig. 4와 같이 시험하였으며, 허용오차인 -5%를 만족하였다.

3.2.2 연료전지

연료전지는 안전기준 제111조 제3호에 따라 최고 출력을 Fig. 5와 같이 시험하였으며, 허용오차인 -5%를 만족하였다.

3.3 제동능력시험

수소연료전지자동차에는 전기제어식 제동장치가 장착되어 있으며, UN R 13H와 국제조화를 이루면서 전기제어식 제동장치의 안전성을 평가하였다. Fig. 6과 같은 전기제어식 제동장치에서 현재 양산중인 EHB에 대한 평가를 중점적으로 하였고, EMB는 시제품으로 평가하였다.⁴⁾

전기제어식 제동장치의 안전성평가는 가속페달

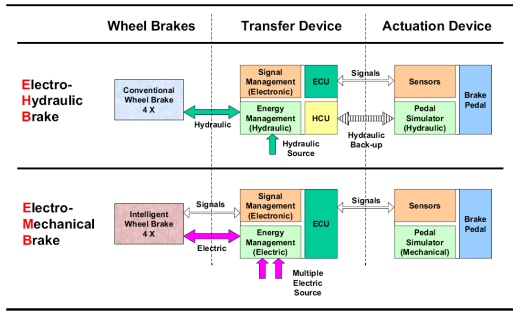


Fig. 6 System configuration of Brake-by-Wire

Table 2 Protection grade for high voltage device

High Volt Device	Determination	
	Protection Grade	
Electric Heater	IPXX D ²⁾	Congruence
Junction Box, etc	IPXX B ²⁾	Congruence

해제에 의한 전기회생제동장치의 제동등 점등조건을 확립하고, 제동장치 성능에 영향을 미치는 전기조절 전달장치 내부의 고장 및 전기적 단선·단락 영향성을 평가하였다.

평가 결과 각 고장 발생모드에서 정상적인 제동이 불가능한 경우, 백업모드 활성화에 의해 페달감은 이상 하지만 안전기준의 최소한 요구기준(제동거리 : 70m, 감속도 : 6.43m/s²)을 만족하였다.

3.4 고전원전기장치 안전성 시험

3.4.1 보호등급

고전압장치에 대한 보호등급을 시험한 결과는 Table 2와 같이 적합한 것으로 확인되었다.

3.4.2 고전압 커넥터

고전압 정선박스, 고전압 인버터, 공기블로워 등의 커넥터들은 잠금장치 및 공구를 사용하여 분해되는 구조를 가지고 있었다.

3.4.3 고전압 회로 차단장치

고전원장치의 점검 및 수리를 위하여 고전압회로를 차단하는 장치가 공구없이 개방되는 경우 IPXX B 보호등급을 만족시켰다.

3.4.4 경고표시 및 배선

직접 접촉이 가능한 고전원전기장치에는 경고표시가 부착되었고 배선은 주황색으로 설치되어 있었다.

3.4.5 전기연속성

연료전지, 고전압 정선박스 등의 전기연속성은 0.05Ω 이하로 측정되어 안전기준에 규정한 0.1Ω 이하를 만족시켰다.

3.4.6 절연저항

고전압 (+) 활선도체부와 전기적샤시, 고전압 (-) 활선도체부와 전기적샤시의 절연저항 평가에서 안전 기준에서 규정한 100Ω/V 이상을 만족시켰으며, 절연저항 모니터링 평가에서는 100Ω/V 이하시 계기판의 경고등이 점등되었다.

3.5 구동축전지 안전성시험

수소연료전지자동차는 보조 동력원으로 구동축전지를 갖추고 있으며, 구동축전지는 안전기준 제18조 제3호에 따라 7가지 안전성시험을 하여야 한다.

3.5.1 낙하안전시험

구동축전지를 Fig. 7과 같이 4.9m 높이에서 콘크리트 바닥 위에 자유 낙하시키며, 낙하 후 구동축전지의 발화 및 폭발 여부를 확인하고 전압을 측정한다.

3.5.2 액중투입안전시험

Fig. 8과 같이 구동축전지를 염수로 충분히 채운



Fig. 7 The experimental apparatus for drop test

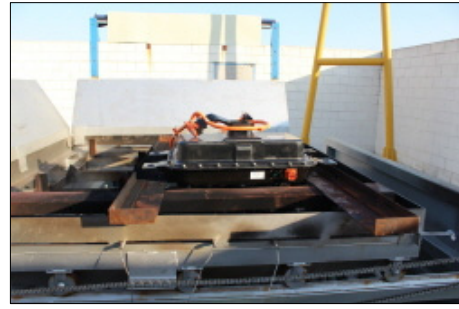


Fig. 9 The experimental apparatus for fire test



Fig. 8 The experimental apparatus for immersion test

수조에 완전히 침수시키고 1시간을 유지한다. 침수 상태에서 구동축전지의 발화 및 폭발 여부를 확인하고 수조에서 꺼내어 전압을 측정한다.

3.5.3 과충전안전시험

구동축전지를 상온에서 완전방전 후 SOC 150%에 도달하면 충전을 종료한다. 과충전 진행과정에서 구동축전지의 발화 및 폭발 여부를 확인하고 시험종료 후 전압을 측정한다.

3.5.4 과방전안전시험

구동축전지를 상온에서 완전 방전시켜 SOC 0% 상태를 유지하여 구동축전지를 1C(전체용량에 대하여 1시간 동안 충방전 할 수 있는 전류량) 전류로 방전시킨다. 과방전 진행과정에서 구동축전지의 발화 및 폭발 여부를 확인하고 시험종료 후 전압을 측정한다.

3.5.5 단락안전시험

구동축전지를 상온에서 완전방전 후 정격전류로 목표 SOC까지 충전하고, 단락 회로의 전체 저항은 $50\text{m}\Omega$ 이하로 구성하여 구동축전지를 단락시킨다. 단락상태에서 구동축전지의 발화 및 폭발 여부를 확인하고 시험종료 후 전압을 측정한다.

3.5.6 열노출안전시험

챔버 온도를 80°C 로 유지하면서 구동축전지를 챔버에 넣고 4시간 경과 후 시험을 종료한다. 열노출 상태에서 구동축전지의 발화 및 폭발 여부를 확인하고 시험종료 후 전압을 측정한다.

3.5.7 연소안전시험

구동축전지를 Fig. 9와 같이 설치하고 구동축전지 하단부를 직접 가열한다. 가열온도는 890°C 에서 $1,100^\circ\text{C}$ 로 하고 가열시점으로 부터 2분 경과 후 시험을 종료한다. 2분간의 가열과정에서 구동축전지의 발화 및 폭발 여부를 확인하고 시험 종료 후 전압을 측정한다.

3.6 연료전지자동차 수소 누출시험

수소연료전지자동차는 배기구, 승객거주공간에서 수소누출, 밀폐 및 반밀폐공간에서 수소누출감지기 작동시험을 하였으며, Fig. 10과 같이 안전기준 제17

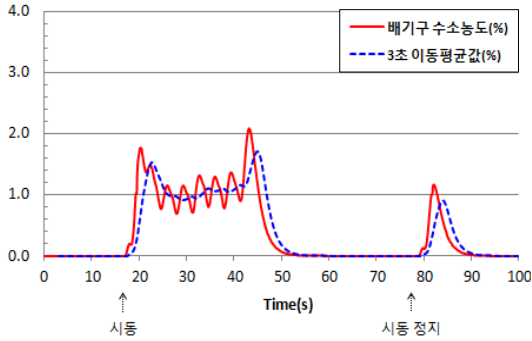


Fig. 10 The graph of hydrogen concentration at ventilation

Table 3 Test result of fuel consumption

Subject	Driving Mode	City (FTP-75)	Highway (HWFET)
Fuel Consumption (km/kg)		106.9	113.3
Combined Fuel Consumption (km/kg)		109.7	

조를 만족시켰다.

3.7 연료소비율 시험

연료소비율은 도심과 고속도로를 재현한 주행모드를 이용하여 각각의 연료소비율을 측정한 후 이를 복합하여 최종 연료소비율을 Table 3과 같이 산출하였으며, 연료 소모량은 중량 측정방법으로 측정하였다.⁵⁾

3.8 전자파적합성 시험

3.8.1 광대역 전자파 방사시험

모든 전장품은 정상동작 상태이며 공회전 상태에서 Blower 및 창닫이기 등은 최대 전력소모상태에서 Fig. 11과 같이 안전기준 제111조2를 만족시켰다.

3.8.2 협대역 전자파 방사시험

시험 자동차는 Ignition On 상태이며 기타 전장품은 정상 동작 상태에서 안전기준 제111조2를 만족시켰다.

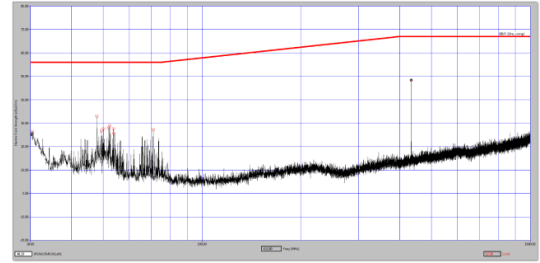


Fig. 11 The graph of broadband (left side)

3.8.3 전자파 내성시험

시험자동차는 50km/h ± 20% 주행상태로 하였으며 20MHz ~ 2GMHz 주파수 범위 내에서 최대 전계강도 24V/m 이상을 시험자동차에 인가하여 시험을 실시하였으며, 전 주파수 범위에서 어떠한 오작동 현상도 발생하지 않았다.

3.9 화재시험

3.9.1 고압수소저장시스템 국부화재시험⁶⁾

고압수소압축 방식의 연료전지자동차용 수소저장시스템에 대한 화재안전성 평가를 GTR에 준하여 평가하였고 시험결과는 아래와 같다.

- 1) 8분간 TPRD에서 가장 먼 부분을 국부화재 인가한 경우 탱크 파열 및 이상거동은 발생하지 않았으며, 전체 화재 인가시 TPRD는 정상 작동하였다.
- 2) 화재 인가시 탱크 내부 온도는 8°C 상승하였으며, 상대적으로 최외각층인 카본파이버층이 얇은 35MPa 154L 탱크는 31°C 상승하였다.
- 3) TPRD 작동 후 수소 방출시 65초~95초의 시간내에 탱크 내부 수소가 전부 방출되었다. 수소방출 초기부터 내부 수소가 전부 방출 때까지 중단없이 지속적으로 방출되었다. 방출시 소음은 126~128dB로 측정되었다.
- 4) 70MPa 압력 분출시 화염의 길이는 약 6m, 35MPa 압력분출시 화염의 길이는 5m로 관찰되었으며 폭은 1m 이내였다. 열화상카메라로 측정



Fig. 12 Fire status of the HFCV

한 방출화염의 최고온도는 900℃로 관찰되었다.

3.9.2 실차 화재시험

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 1m정도 되는 콘크리트 방벽이 설치되어 있어서 Fig. 12와 같이 안전하게 시험을 진행할 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.

104L 및 40L 수소탱크 내부의 가스온도는 TPRD 개방직전에 104L는 28℃, 40L는 35℃로 측정되었으며, TPRD 주변온도는 약 500℃로 측정 되었다.

4. 결 론

국제적으로 무공해 또는 저공해 자동차의 판매를 의무화하고 자동차배기가스에 대한 규제를 강화하는 등 환경 보전을 명분으로 한 각종 규제들이 강화되고 있다. 따라서 연료전지 자동차와 같은 친환경 자동차에 대한 관심 및 연구 지원이 날로 증대되고 있

으며 친환경자동차 시장은 지속적으로 성장할 것으로 예측된다. 또한 국내에서는 2012년 시범보급을 시작하고 2015년 소량생산을 목표로 개발을 완료한 상태이다. 따라서 “수소연료전지자동차 안전성 평가기술개발”은 선행연구를 통해 수소연료전지자동차 보급기반을 구축하고, GTR 제정에 적극 참여하여, 다음과 같은 성과물을 도출하였다.

- 1) 수소연료전지자동차의 연료장치 등 안전기준(안) 11개 항목 도출
- 2) 수소연료전지자동차의 정면충돌시험 방법 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 단품 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, 차량단위에서의 문제 발생시 안전성과의 연관성을 분석하고, 안전성 확인 평가기술 및 해석기술을 정립하여, 안전기준(안)을 도출함으로써 수소 연료전지 자동차의 안전성을 확보할 수 있는 설계기준을 제시되었다. 이는 향후 수소연료전지자동차 보급시 안전도 향상 기술개발과 관련된 세계적인 수준의 자동차기술 및 부품기술을 가질 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

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

References

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.