

## 수소연료전지자동차의 충돌시 절연성능 평가방법에 관한 고찰

이기연<sup>†</sup> · 길형준 · 김동욱 · 김동우 · 강대철  
한국전기안전공사 전기안전연구원

### Study on the Evaluation Method of Electrical Isolation Property for Hydrogen Fuel Cell Vehicle in Post Crash

KIYEON LEE<sup>†</sup>, HYOUNGJUN GIL, DONGOOK KIM, DONGWOO KIM, DAECHUL KANG  
Electrical Safety Research Institute(subsidiary of Korea Electrical Safety Corporation), 27 Sangcheon-ri,  
Cheongpyeong-myeon, Gapyeong-gun, Gyeonggi-go, 477-814, Korea

**Abstract** >> In this paper, in order to prevent electric shock of high voltage system of HFCV after crash test, insulation performance measurement methods were studied.

Under conditions of in-use, insulation performance tests can be divided into measurement method using the vehicle's own RESS as DC voltage source and measurement method using DC voltage from off-vehicle sources. However, these tests can not be applied after a post-crash because parts of high voltage system cover should be removed, and insulation performance can be influenced during these tests.

Therefore, we proposed post-crash insulation performance test methods for preventing electric shock through problem analysis of previous post-crash insulation performance tests. Also, test equipment which can measure voltage absence and total energy was developed. We verified performance of the equipment through experiments with vehicle test.

**Key words** : Isolation Resistance(절연저항), Electrical Shock(감전), Voltage Absence(전압방전), Energy(에너지), Evaluation Equipment(평가장비), Evaluation Method(평가방법)

#### Nomenclature

R : resistance,  $\Omega$   
I : current, A  
V : voltage, V  
s : time, sec  
J : joule, J

#### Subscripts

Ri : isolation resistance  
Vb : working voltage  
TE : Total Energy  
EV : electric vehicle  
HFCV : hydrogen fuel cell vehicle  
UNECE : united nations economic commission for europe  
WP : working party  
GTR : global technical regulation  
AC : alternating current  
DC : direct current

<sup>†</sup>Corresponding author : lkycj@kesco.or.kr

[ 접수일 : 2012.11.26 수정일 : 2012.12.17 게재확정일 : 2012.12.31 ]

Copyright © 2012 KHNES

NEDO : New Energy and Industrial Technology  
Development Organization  
RESS : Rechargeable energy storage system

## 1. 서 론

환경오염이 세계적인 문제로 대두되면서, 환경오염의 원인을 감소시키기 위한 규제의 강화와 신재생에너지 및 환경친화기술이 개발되고 있다. 이러한 세계적 흐름에 따라 우리나라에서도 저탄소 녹색성장 전략을 국가발전 비전으로 제시하고, 자동차 배기가스의 감소를 위한 친환경 자동차의 연구를 신성장동력 육성 정책으로 추진됨에 따라 전기자동차(EV), 수소연료전지자동차(HFCV)가 두각을 나타내고 있다. 이에 따른 기존 엔진을 대체하는 전기장치의 성능 향상과 안전 확보를 위한 기술 개발의 필요성이 대두되고 있는 실정이다<sup>1-3)</sup>.

친환경 자동차의 구동을 위한 고전압 시스템은 구동에너지원의 구성에 따라 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 전기자동차(EV) 등과 같이 구동축전지의 전기에너지를 이용하는 시스템과 수소연료전지자동차(HFCV)와 같이 구동축전지의 전기에너지와 연료전지스택의 화학에너지에 의해 변환된 전기에너지를 같이 사용하는 시스템으로 구분할 수 있다. 이상과 같이 친환경자동차의 고전압시스템은 60Vdc(또는 30Vac) 이상의 전압원을 갖는 구동축전지와 연료전지스택을 사용함에 따라 인체에 직·간접 접촉에 의한 감전사고의 위험성이 존재하기 때문에 인체 감전사고 예방을 위하여 국내·외 안전기준 제정을 위한 노력을 기울이고 있다. 국내의 경우 수소연료전지자동차의 안전성 평가기술 개발 연구를 통하여 수소안전, 운행안전, 전기안전 분야 등의 성능과 안전확보를 위한 기술을 개발하고 있으며, 국외의 경우 미국은 정부 주도하에 2015년의 본격적 실용 가능성 검증을 위하여 노력하고 있다. 또한, 일본은 수소에너지 사회를 대비하기 위하여 국토교통성과 NEDO를 중심으로 연구개발을 수행하는 등 기술개발과 국제 기술 표준 및 국제 안전 규정을 확립하기 위하여 노

력하고 있다<sup>1)</sup>.

수소연료전지자동차에 대한 실증평가 중 전기안전 분야는 UNECE WP.29의 GTR draft에서 언급한 내용을 중심으로 수행되고 있으며, GTR draft에서는 인체 감전보호를 위하여 자동차의 충돌 전후의 안전 기준에 대하여 나타내고 있다. 안전기준에 대한 내용은 정의 및 절연저항, 전압, 에너지, 물리적 보호 등에 대한 요구사항과 일부 요구사항에 대한 평가방법을 명시하고 있다<sup>5)</sup>.

수소연료전지자동차는 다른 친환경자동차와 달리 연료전지스택 내부의 냉각수가 고전압 시스템의 버스 와 전기적새시 사이를 연결하는 매개체 역할을 하기 때문에 절연성능이 매우 중요한 요소로 작용하여 절연 성능이 저하되면 절연 성능이 저하되면 고전압 버스 양 단간의 단락 또는 고전압 버스와 전기적 새시 사이의 지락사고로 인하여 화재사고가 발생하거나 인체 접촉에 의해 감전사고가 발생할 수 있기 때문에 일반적인 사용 상태(In Use)와 교통사고 등 충돌이 일어났을 경우 운전자와 구조작업자 등의 안전 확보를 위한 충돌 후(Post Crash) 절연 성능이 확보가 가장 중요한 요소라 할 수 있다.

일반적인 사용 상태의 절연 성능은 절연성능 측정시 고전압 시스템의 외함을 제거하여 고전압 버스와 전기적 새시 사이에 측정 절차에 따라 절연 성능을 평가하며, 평가 방법은 절연성능 평가장비를 이용하는 방법과 전압 측정을 통하여 계산식을 통해 평가하는 두 가지 방법으로 나눌 수 있다. 하지만, 충돌 후 절연 성능은 충돌 시험 종류에 따라 차량 차체의 구조적인 소손 상태로 인하여 측정이 불가능한 경우가 발생한다. 절연성능 측정을 위하여 구조적 소손 상태에 물리적 변화를 주는 상황에 따라 고전압 시스템의 고전압 버스의 절연 성능에 영향을 줄 수 있다. 하지만, 현재의 측정 방법은 절연 측정을 위하여 고전압 시스템의 외함을 제거하는 등 물리적인 작업을 통하여 측정하기 때문에 충돌 후 차량의 절연 성능에 영향을 미칠 수 있기 때문에 현재의 측정방법은 정확한 절연성능 평가를 위하여 적용할 수 없다.

따라서, 본 연구에서는 GTR에서 제시하고 있는 충돌 후 절연성능 평가방법의 대안인 전압방전 및 에너지 측정을 통한 절연성능 평가 방법을 분석하고 전압방전 및 에너지 측정장치 개발에 따른 실차를 대상으로 한 충돌 후 절연 성능 평가 장비에 대한 검증을 통하여 감전보호를 위한 수소연료전지자동차의 충돌시 절연 성능 평가 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 절연성능 평가를 위한 기준 분석

### 2.1 In Use 상태의 절연성능 평가 방법 분석

#### 2.1.1 내부의 직류전원을 이용하여 측정하는 방법

내부의 직류전원을 이용하여 측정하는 방법은 고전압시스템을 통전시킨 상태에서 내부저항이 10[MΩ] 이상의 직류전압계를 사용하여 측정한다. 측정은 Fig. 1에 나타난 것과 같이 1단계로 Vb, V1, V2 전압을 측정한 후 V1이 V2보다 크거나 같으면 Fig. 2에 나타난 것과 같이 저항 Ro를 삽입하여 2단계로 V1' 전압을 측정한다. 1단계와 2단계에서 측정된 전압과 삽입 저항 Ro를 이용하여 식(1)을 통하여 절연저항 Ri를 구한다<sup>5-6)</sup>.

$$R_i = R_0 \times \left( \frac{V_b}{V_1'} - \frac{V_b}{V_1} \right) \quad (1)$$

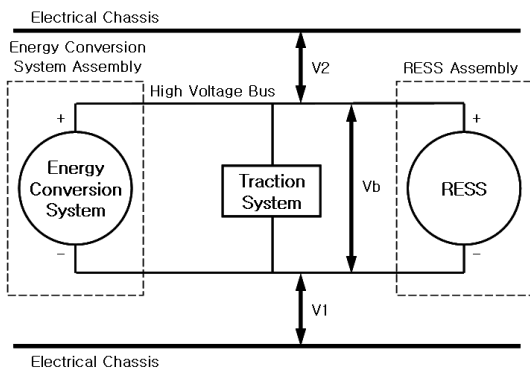


Fig. 1 Step 1 : Measurement of Vb, V1, V2<sup>6)</sup>

만약 1단계 전압을 측정후 V2가 V1보다 크다면, Fig. 2와 동일한 방법으로 삽입 저항 Ro를 이용하여 2단계 전압 V1'를 측정후 식(2)를 통하여 절연저항을 구한다<sup>5-6)</sup>.

$$R_i = R_0 \times \left( \frac{V_b}{V_1'} - \frac{V_b}{V_2} \right) \quad (2)$$

#### 2.1.2 외부로부터 직류전원을 인가하여 측정하는 방법

외부로부터 직류전원을 인가하여 측정하는 방법은 고전압시스템의 작동전압보다 높은 직류전압을 인가할 수 있는 장비를 이용하여 고전압시스템의 활선도체부와 전기적새시 사이에 절연저항계를 접속한 후 시험전압을 인가하여 측정한다<sup>5-6)</sup>.

### 2.2 Post Crash 상태의 절연성능 평가 방법 분석

#### 2.2.1 In Use 상태의 평가방법 적용시 문제점 분석

Post Crash 시험은 시험 종류에 따라 시험속도로 차량이 이동하여 고정벽에 충돌하는 방법과 대차가 이동하여 차량에 충돌하는 방법으로 시험을 실시한다. 특히 수소연료전지자동차는 수소가스 대신 헬륨 가스를 충전하여 시험하기도 하며, 충돌 후 차량의 상태는 전원이 차단되기 때문에 In Use 상태의 절연성능 평가방법을 적용하는데 문제가 있다.

먼저 내부의 직류전원을 이용하여 측정하는 방법

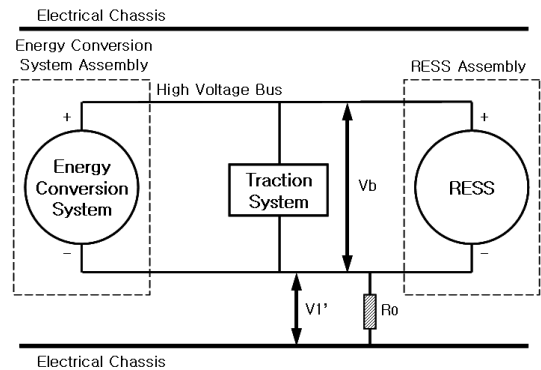


Fig. 2 Step 2 : Measurement of V1'<sup>6)</sup>



Fig. 3 The appearance of the vehicle after a post crash

은 충돌 시험시 수소가스 대신 헬륨가스를 사용하거나 충돌 후 차량 상태가 연료전지스택과 구동축전지의 전원이 차단되기 때문에  $V_b$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ 를 측정하지 못하여 절연성능을 평가할 수 없는 문제가 발생한다. 또한, 외부로부터 직류전원을 인가하여 측정하는 방법은 측정을 위하여 고전압시스템의 외함을 탈거하고 절연성능 측정기를 고전압시스템의 활선도체부에 연결하여 평가하여야 한다. 하지만 충돌 후 차량의 상태는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 외형이 많이 손상되어 있는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 외형이 손상된 상태에서 절연성능 평가를 위하여 고전압시스템의 외함을 제거할 경우 외형손상에 의한 절연성능이 저하된 요인을 제거할 수 있기 때문에 정확한 절연성능을 평가할 수 없는 문제가 발생한다.

### 2.2.2 Post Crash 상태의 평가방법 분석

Post Crash 상태의 절연성능 평가방법은 UNECE GTR에서 In Use 상태의 평가방법으로 제시한 두 가지 방법 외에 고전압버스의 에너지원 차단에 따른 전압 방전 측정과 출력에너지 측정을 통하여 평가하는 방법이 있다. Post Crash 상태에서 제시한 절연성능 평가방법은 충돌 후 고전압버스는 시스템과 인체 안전을 위하여 전기에너지 출력을 차단하여 절연 상태와는 별개로 안전을 확보하기 위한 평가방법을 제시하고 있다.

전압방전은 충돌시 고전압시스템의 전기에너지원인 연료전지스택과 구동축전지에 대하여 출력전압에 대한 차단여부를 측정하는 것으로, Fig. 1에 나타난 고전압시스템에 대하여  $V_b$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ 를 각각 측정한다. 평가기준은 충돌 후 고전압시스템의  $V_b$ ,  $V_1$ ,  $V_2$

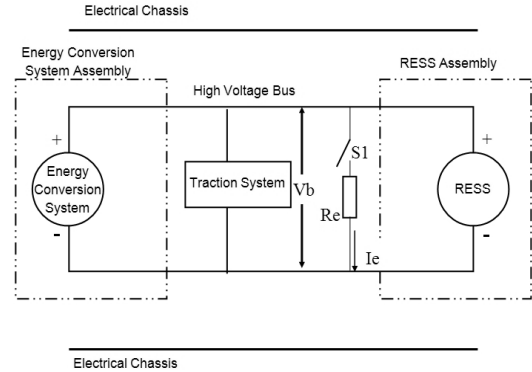


Fig. 4 Measurement of high voltage bus energy stored in X-capacitors<sup>6)</sup>

전압이 60초 이내에 각각 60Vdc 또는 30Vac 이하일 것으로 규정하고 있다<sup>6)</sup>.

출력에너지 측정은 Fig. 4에 나타난 것과 같은 회로에 대하여 시간에 따른 전압, 전류를 측정하여 식(3)과 같이 계산한다. 평가기준은 식(3)에 대하여 계산한 결과 2.0J 미만으로 규정하고 있다.

충돌시 데이터 측정은 충돌 후 5초 후 스위치 S1을 닫아  $V_b$  전압과 전류  $I_e$ 를 측정한다. 전압( $V_b$ )과 전류( $I_e$ )를 스위치 S1이 닫혔을 때(tc)부터 시작하여 고전압 한계값인 60Vdc로 떨어졌을 때(th)의 전압( $V_b$ )까지의 주기 동안 누적된 결과에 대한 전체 에너지를 측정하여 평가한다<sup>6)</sup>.

$$TE = \int_{tc}^{th} V_b \times I_e dt \quad (3)$$

## 3. Post Crash 상태의 절연성능 평가

### 3.1 Post Crash 상태의 절연성능 평가 장치 설계

Post Crash 상태의 절연성능 평가를 위하여 전압방전 측정과 에너지 측정 두 가지 기능을 포함하는 평가 장치를 설계하였다. 설계한 평가 장비의 측정 데이터는 전압( $V_b$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ )과 전류( $I_e$ ), 시간을 측정한다.

Fig. 5는 Post Crash 상태의 절연성능 평가 장치에 대한 구성도를 나타낸 것이다. 선택스위치를 통하여

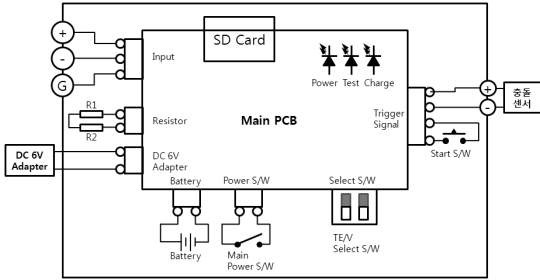


Fig. 5 Schematic of voltage absence and low level energy measurement device

전압방전 또는 에너지 측정 모드를 선택할 수 있다. 에너지 측정 모드를 선택하면 전압(Vb), 전류(Ie), 시간 데이터를 측정하게 된다. 이 때 측정데이터는 외부의 충돌 센서로부터 충돌 신호가 입력되고 5초 후부터 60초 동안 데이터를 측정한다. 또한, 전압 방전 측정 모드를 선택하면 외부의 충돌 센서로부터 충돌 신호가 입력되면 그 즉시 전압(Vb, V1, V2), 시간 데이터를 측정하게 된다. Fig. 6은 Fig. 5에 나타난 구성도에 대하여 실제 구성한 전압방전 및 에너지 측정 장치를 나타낸 것이다.

전압 방전 및 에너지 측정 모드에서 측정된 데이터는 MCU 내부 메모리에 측정 데이터를 저장하고 시험 종료 후 측정 장치에 삽입된 외부 메모리에 그 결과를 저장하는 프로세서로 설계되어 있기 때문에 시험 종료 후 측정 데이터를 외장 메모리로부터 읽어 데이터를 분석하여 적부판정을 결정한다.

전압은 (+), (-), (G) 세 개의 측정 단자가 내부적으로 절연된 상태로 (+)(-) 사이 전압 (Vb), (+)(G) 사이 전압(V1), (-)(G) 사이 전압(V2)을 측정한다. 전류 측정은 시간에 따른 Vb 전압에 대하여 측정기 내



Fig. 6 The appearance of voltage absence and low level energy measurement device

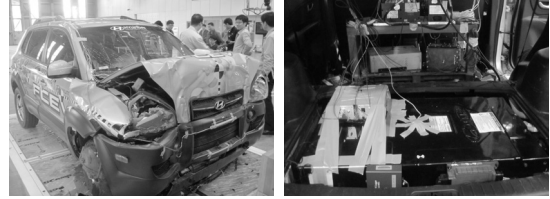


Fig. 7 The appearance of the vehicle after a post crash

부에 연결된 저항(Re)을 통해 흐르는 전류(Ie)를 측정하게 된다. 측정데이터는 전압 및 에너지의 변화 상태를 분석하기 위하여 2ms/point의 분해능을 갖도록 설계하였으며, 측정시간은 관련 기준에 적합하도록 80초간 측정이 가능하도록 설계하였다. 또한, 충돌 직후의 데이터를 저장하며, 충돌시점에 대한 판단을 위하여 충돌센서의 출력신호인 Active Low 신호를 트리거 신호로 이용하여 트리거 신호가 입력된 직후부터 전압, 전류, 시간에 대한 데이터를 저장하도록 설계하였다. 친환경자동차의 고전압시스템에 대한 평가를 위하여 전압 측정 범위는 AC/DC -512V ~ +512V 측정이 가능하도록 설계하였다.

### 3.2 실차 실험을 통한 절연성능 평가 장치 검증

Fig. 7은 본 연구에서 제시한 Post Crash 상태의 절연성능 평가장치의 성능 검증을 위한 실차 대상 실험

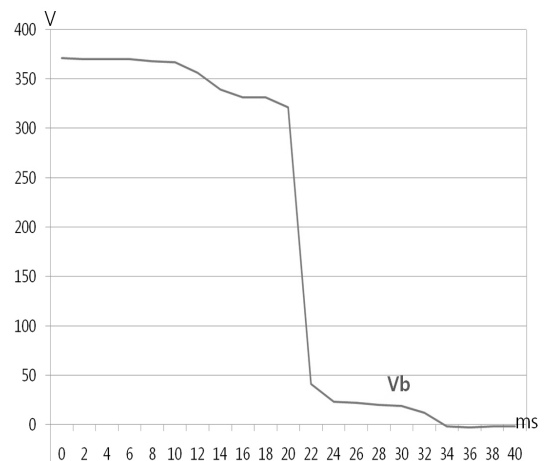


Fig. 8 Measurement results of the Vb in Post Crash

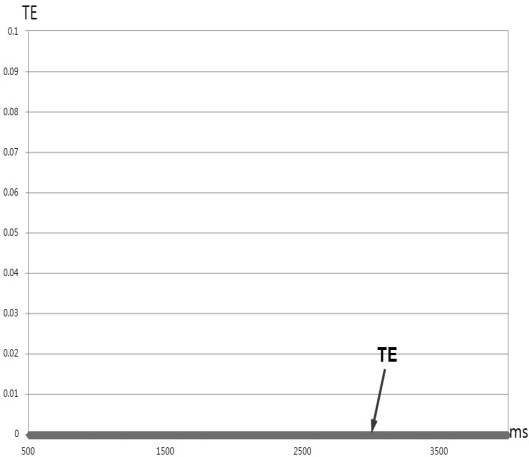


Fig. 9 Measurement results of the TE in Post Crash

험을 나타낸 것이다.

Fig. 8은 정면 충돌시 연료전지스택의 출력전압에 대하여 전압( $V_b$ )을 측정하는 것이며, Fig. 9는 내부 저항( $R_e$ )로 흐르는 전류( $I_e$ )에 대한 에너지(TE)를 계산 하한 것이다. Fig. 8과 Fig. 9에 나타난 측정결과를 분석해보면 충돌 후 40ms 이내에 연료전지스택의 출력전압이 0V로 수렴하는 것을 알 수 있다. 따라서 에너지 측정결과, 충돌 후 5초 후부터 에너지는 0J이기 때문에 토탈에너지는 0J로 측정되었다.

Fig. 10는 정면 충돌시 연료전지스택의 전압 방전

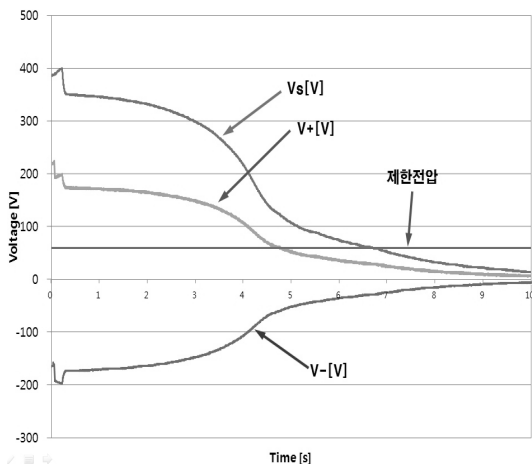


Fig. 10 Measurement results of the voltage absence in Post Crash

을 측정하는 것이다. 측정 전압은  $V_b$ ,  $V_1$ ,  $V_2$ 을 측정 하였으며, 측정결과 약 7s 이내에 제한전압인 60V 미만으로 전압이 방전되는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8과 Fig. 10의 측정결과를 비교하면 방전되는 시간이 차이가 나는 것을 알 수 있다. Fig. 8에서는 약 22ms 정도면 60V 미만으로 떨어지지만, Fig. 10에서는 약 7s 정도에서 60V 미만으로 떨어지는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 8과 같은 에너지 측정시에는 내부의 저항( $R_e$ )으로 인하여 전압강하가 비교적 빠르게 일어나는 것이며, Fig. 10과 같이 전압 방전의 경우 차량이 갖고 있는 내부 방전저항 등에 의해 방전되기 때문에 일정시간이 흘러야 전압강하가 일어나는 것을 알 수 있다. 하지만 Fig. 8과 Fig. 10의 측정결과로부터 측정하고자 하는 전기에너지원인 연료전지스택 또는 구동축전지가 충돌 후 출력이 차단되어 출력에너지(TE)와 전압방전 모두 평가기준 내에 수렴하는 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 수소연료전지자동차의 충돌시 절연성능 평가를 위한 방법을 제시하였으며, 실차 시험을 통하여 제시한 평가방법에 적합한 평가 장비의 설계 및 성능 검증을 실시하였다.

- 1) In Use 상태의 절연성능 평가 방법으로 내부의 직류 전원을 이용하여 측정하는 방법과 외부로부터 직류 전원을 인가하여 측정하는 방법에 대하여 분석하였다.
- 2) In Use 상태의 절연성능 평가 방법에 대하여 Post Crash 상태의 절연성능 평가방법에 적용시 문제점을 제시하였다.
- 3) Post Crash 상태의 절연성능 평가 방법인 전압 방전 및 에너지 측정 방법에 대하여 제시하였으며, UNECE GTR에서 제시하고 있는 방법에 적합한 평가장비를 설계하였다.
- 4) 설계된 전압 방전 및 에너지 측정장치에 대한 실차 시험을 통한 성능 검증 결과 Post Crash 조건

에서 시험 조건을 만족하며, 정확한 절연성능을 평가할 수 있다는 것을 확인하였다.

본 연구의 결과물인 충돌시 절연성능 평가 장비를 이용한 평가 방법을 활용하면 향후 수소연료전지자동차의 절연성능 평가 및 성능 향상에 도움이 될 것으로 판단된다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구비지원(07교통체계-미래02)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. K. Y. Lee, D. O. Kim, H. K. Kim, H. W. Moon, "A Study on the Insulation Resistance Measurement Technique for Electrical Safety of Green Car", Trans. of the Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 58P, No. 4, pp. 597-601, 2009.
2. J. C. Hong, S. J. Kang, S. J. Choi, S. Y. Park, J. W. Kim, "An Analysis on CO2 Emission and Cost Effects of Hydrogen Energy in Sedan Sector", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 20, No. 1, 2009, pp. 9-21.
3. J. S. Lim, H. W. Lee, Y. S. Hong, K. B. Lee, G. J. Yong, H. B. Kwon, "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, pp. 207-213.
4. C. Hwangbo, K. M. Lee, K. J. You, "Research on Standards for Protection against Electric Shock in Global Technical Regulations of Fuel Cell Vehicle", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 21, No. 3, 2010, pp. 167-183.
5. K. Y. Lee, D. O. Kim, H. K. Kim, "Study on the Evaluation Method of Electrical Isolation Property for Hydrogen Fuel Cell Vehicle", Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 22, No. 6, 2011, pp. 810-818.
6. UNECE, "Hydrogen vehicle Draft GTR SGS", 2011.