수소연료전지자동차용 절연저항 측정시스템 개발에 관한 연구

논 문
60-5-26

Study on Development of the Isolation Resistance Measurement System for Hydrogen Fuel Cell Vehicle

이 기 연† · 김 동 욱* · 문 현 욱** · 김 향 곤***
(Ki-Yeon Lee · Dong-Ook Kim · Hyun-Wook Moon · Hyang-Kon Kim)

Abstract - Hydrogen Fuel Cell Vehicle(HFCV) is system that uses electrical energy of fuel cell stack to main power source, which is different system with other vehicles that use high-voltage, large-current. Isolation performance of this system which is connected with electrical fire and electrical shock is important point. Isolation resistance of electric installation is divided according to working voltage, it follows criterion more than 100Ω/VDC (or 500Ω/VAC) about system operation voltage in a hydrogen fuel cell vehicle. Although measurement of isolation resistance in a hydrogen fuel cell vehicle is two methods, it uses mainly measurement by megger.

However, the present isolation resistance measurement system that is optimized to use in electrical facilities is unsuitable for isolation performance estimation of a hydrogen fuel cell vehicle because of limit of maximum short current and difference of measurement resolution.

Therefore, this research developed the isolation resistance measurement system so that may be suitable in isolation performance estimation of a hydrogen fuel cell vehicle, verified isolation performance about known resistance by performance verification of laboratory level about developed system, and executed performance verification through comparing results of developed system by performance verification of vehicle level with ones of existing megger. Developed system is judged to aid estimation and upgrade of isolation performance in a hydrogen fuel cell vehicle hereafter.

Key Words : Isolation resistance, Short current, Electrical shock, HFCV

1. 서 론

세계적으로 환경오염 저감을 위하여 각종 규제가 강화되고 있으며, 이러한 대책의 일환으로 각국에서 신재생에너지와 환경친화기술의 개발에 박차를 가하고 있다. 우리나라에서도 정부의 국가발전 비전으로 저탄소 녹색성장 전략을 추진하고 있다. 이에 맞춰 정부의 신성장동력 육성 정책으로 업계에서는 환경친화형의 미래형자동차인 전기자동차와 수소연료전지자동차(HFCV)에 대한 연구개발이 적극적으로 추진 중에 있으며, 2012년 상용화를 목표로 개발이 가속화되고 있으며 이에 따라 기존의 엔진을 대체하는 전기장치의 성능향상과 안전 확보를 위한 기술개발이 필요하다[1-2].

산업계의 기술개발과 함께 세계 각국 및 정부에서는 관련 기술에 대한 국내외 안전기준을 제정하기 위한 노력을 기울이고 있다. 국내의 경우 HFCV의 안전성 평가기술 개발 연구를 통하여 HFCV의 수소안전, 운행안전, 전기안전 분야에 대하여 성능과 안전 확보를 위한 기술을 개발하고 있으며, 국외의 경우 에너지 독립을 위하여 정부(미국 에너지성-DOE 등) 주도하에 2015년의 본격적 실용 가능성 검증을 위하여 노력하고 있다. 일본은 수소에너지 사회를 대비하기 위하여 국토교통성과 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)를 중심으로 연구개발을 수행하는 등 각국에서는 기술개발과 국제기술 표준 및 국제 안전 규정을 확립하기 위하여 노력하고 있다[3-5].

환경친화기술의 미래형자동차에 대한 전기안전 관련 국내기준은 2009년 1월 국토해양부령인 "자동차안전기준에관한 규칙"에서 인체의 감전보호를 위한 고전원 전기장치(구동축전지, 전력변환장치, 구동전동기, 고전원 전기배선 등)에 대한 구조적인 안전기준을 제정하였으며, 현재, 국제 기준분석과 연구를 통하여 구조적 안전기준 뿐만 아니라 성능적 안전기준 제정을 위하여 노력하고 있다. 또한, 국제적으로도 고전압 시스템과 관련하여 ISO 6469-3, ISO 23273-3, FMVSS 305, UNECE R100, Japanese Attachment 101, ELSA 등에서 지속적으로 개발하고 있다. 이러한 국내외적으로 개발하고 있는 고전압시스템에 대한 안전기준은 주로 인체로부터 직·간접 접촉에 의한 감전사고를 예방하기 위한 고전압시스템에 대한 구조 기준과 절연저항, 전기적 연속성, 내전압 등의 성능기준, 그리고 충돌시의 안전기준 등이 있다[6-10].

HFCV는 연료전지스택과 구동축전지(또는 슈퍼커패시터),

† 교신저자, 정회원 : 전기안전연구원 주임연구원
E-mail : lkycj@kesco.or.kr
* 정 회 원 : 전기안전연구원 선임연구원
** 정 회 원 : 전기안전연구원 주임연구원
*** 시니어회원 : 전기안전연구원 책임연구원
접수일자 : 2011년 4월 8일
최종완료 : 2011년 4월 18일

구동전동기 등 고전압 시스템으로 구성된 시스템이지만, 고전압 시스템의 구조가 유사한 전기자동차나 하이브리드 자동차와 다르게 연료전지스택 내부의 냉각수로 인하여 고전압 시스템의 고전압 버스와 전기적섀시 사이의 절연성능이 매우 중요한 요소로 작용한다. 연료전지 스택의 냉각수는 연료전지스택 내부의 연료극(수소)과 공기극(산소)의 화학적 에너지를 전기에너지로 변환할 때 발생하는 열을 냉각시키기 위하여 막-전극 어셈블리(MEA) 내부에 냉각수가 순환되며 냉각수가 순환되는 장치의 외함이 연료전지스택의 외함과 전기적섀시와 연결되어 있기 때문에 냉각수의 전기적 상태에 따라 고전압 시스템의 버스와 전기적섀시의 매개체 역할을 하기도 한다. 이로 인하여 HFCV는 일정 수준 이하의 절연성능이 되면 고전압 출력을 차단하는 기능을 갖는 절연저항 모니터링 시스템을 설치하여 운영하고 있다[3-5].

이와 같이 고전압시스템의 절연성능은 고전압 버스의 절연 설계와 냉각수에 영향을 많이 받기 때문에 인체 감전보호를 위하여 정상상태(In Use)와 충돌시(Post Crash) 절연성능이 중요한 요소로 작용하고 있다. 고전압 시스템의 절연성능 평가를 위하여 내부의 직류전원을 이용하여 측정하는 방법과 외부로부터 직류전원을 인가하여 측정하는 방법 두 가지 방법을 이용한다. 내부의 직류전원을 이용하여 측정하는 방법은 측정하는 방법이 외부로부터 직류전원을 인가하여 측정하는 방법보다 복잡하기 때문에 현장에서는 외부로부터 직류전원을 인가하여 측정하는 방법인 절연저항계를 이용하여 측정하고 있다.

하지만, 기존의 절연저항계는 일반적인 전기설비의 절연성능 측정에 사용되도록 최적화된 측정 장비이기 때문에 HFCV의 절연성능 측정을 위한 기본 시험 조건을 만족하지 못하는 문제점이 발생한다. 기존의 절연저항계는 HFCV의 절연성능 측정을 위한 최대단락전류로 인하여 시험인가전압이 제한되며, 절연저항계의 측정 해상도는 0.1[MΩ] 이상 측정이 되기 때문에 HFCV의 적합여부의 판단기준인 100[Ω/VDC] 이상의 측정에 적합하지 않은 문제가 있다.

따라서, 본 논문에서는 HFCV의 절연성능 평가 방법을 분석한 후, 기존의 절연저항계에 의한 절연성능 평가결과를 바탕으로 HFCV 절연저항 측정시스템을 개발하고, 개발한 측정시스템의 절연성능 평가결과에 대한 실차 상태의 비교를 통하여 적합성을 검증하였다.

2. 절연저항계에 의한 절연저항 측정

UN/ECE/WP.29와 전기안전 법규를 제정하고 있는 ELSA (Electric Safety) 등 현재까지 GTR(Grobal Technical Regulation) 및 관련 국제 규격 등에서 제정된 절연저항에 대하여 언급되어 있는 내용을 분석해 보면 다음과 같다.

작동전압이 직류 60[V] 또는 교류 30[V]를 초과하는 고전압 시스템 및 배선에서 인체의 직접 접촉 및 간접 접촉에 의한 인체에 대한 위험은 주로 인체에 흐르는 전류의 크기와 시간에 좌우되기 때문에 IEC 60479-1(Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects)에서 제공하는 시간/전류 영역에 대한 인체의 생리학적 영향을 적용하여 일반적으로 전기 생리학적으로 해롭지 않은 영역에 해당되는 감전 전류값으로 적용하여 절연저항 값을 100[Ω/VDC], 500[Ω/VAC] 이상으로 유지하도록 규정하고 있다[7-10].

외부로부터 직류전원을 인가하여 측정하는 방법인 절연저항계에 의한 절연저항 측정 방법은 고전압 시스템의 작동전압보다 높은 직류 전압을 인가할 수 있는 절연저항 시험기를 사용하며, 고전압 버스와 전기적 섀시와의 사이에 절연저항 시험기를 접속하여 작동전압보다 높은 직류 전압을 인가하여 절연저항을 측정하도록 하고 있다.

HFCV의 절연성능 측정은 연료전지스택의 (+), (-) 출력단자와 연료전지스택의 외함 사이의 절연저항을 측정하였으며, 절연저항 측정을 위한 절연저항계는 Fluke사의 1587모델과 Hioki사의 3455모델을 이용하여 측정하였다. 측정을 위한 차량은 시동 off, 퓨즈 on(key on) 상태로 하였으며, 연료전지스택의 동작전압은 440[V]인 HFCV에 대하여 시험하였다. 측정결과는 표 1에 나타내었다.

표 1 HFCV의 절연저항 실측 및 분석

Table 1 Isolation resistance measurement and analysis for HFCV

측정대상점		시험전압	인가전압	절연저항	비고
전기적 섀시	연료전지스택의 + 출력단자	500[V]	186[V]	0.180 [MΩ]	HIOKI 3455
	연료전지스택의 - 출력단자	500[V]	188[V]	0.175 [MΩ]	
전기적 섀시	연료전지스택의 + 출력단자	500[V]	174[V]	0.1 [MΩ]	FLUKE 1587
	연료전지스택의 - 출력단자	500[V]	178[V]	0.1 [MΩ]	

절연성능 평가결과 기준값 이상의 절연저항값이 측정되었지만, 측정결과보다는 500[V]의 시험전압을 설정하여 전압을 인가하였을 때 실제 인가되는 시험인가전압이 설정된 시험전압에 미치지 못했다는 것을 확인할 수 있다. 절연저항계에 의한 절연성능은 실제 시험 인가전압이 낮게 인가된다고 해서 절연저항값이 차이가 발생하는 것은 아니지만, 실제 작동하는 전압에 대한 절연상태가 안정적인지는 실제 작동전압 이상의 전압을 인가하여 검증해야 한다.

또한, 두 가지 모델의 절연저항계로 측정한 측정결과를 살펴보면 Fluke 1587 모델은 시험전압 500[V]일 때의 절연저항값의 측정 범위가 0.1[MΩ] 이상에 대하여 0.1[MΩ] 단위로 측정되는 것을 알 수 있다. 측정에 사용된 HFCV 연료전지스택의 작동전압이 440[V]이기 때문에 안전기준에 만족하기 위해서는 0.044[MΩ] 이상이 측정되어야 하며 절연성능의 적합여부를 판단하기 위해서는 최소 측정범위에 맞는 해상도를 갖는 장비를 사용해야 한다.

3. HFCV 절연저항 측정시스템 개발

기존의 절연저항계는 일반적인 전기설비의 적합여부를 판단하기 위한 장비로 일반적인 전기설비에 맞게 구성되어 있다. 대부분의 절연저항계의 경우 시험전압은 직류 50[V], 125[V], 250[V], 500[V], 1000[V], 2500[V], 5000[V] 등 설비

의 사용전압(대지전압)에 맞게 선택하여 시험할 수 있게 되어 있으며, 최대시험단락전류는 1mA에서 5mA까지 출력되도록 구성되어 있다. 또한, 측정범위는 시험전압이 직류 50[V], 125[V], 250[V] 이하인 경우에는 보통 10[kΩ] 이상 측정이 가능하도록 되어 있으며, 시험전압이 직류 500[V] 이상인 경우에는 0.1[MΩ] 이상 측정이 가능하도록 되어 있다.

전기설비와는 다른 친환경자동차는 구동을 위한 축전지, 모터, 인버터 등의 전력시스템으로부터 인체 감전보호를 위한 절연저항을 국내 자동차안전기준과, 국제기준 및 규정인 UNECE R 100 및 FMVSS305, ISO 6469-3, ISO 23273-3, Japanese Attachment 101 등에서 100[Ω/VDC], 500[Ω/VAC] 이상으로 규정하고 있기 때문에 국내외의 자동차 제작사 및 검사기관 등에서는 기준에 맞는 시험장비가 필요한 실정이다.

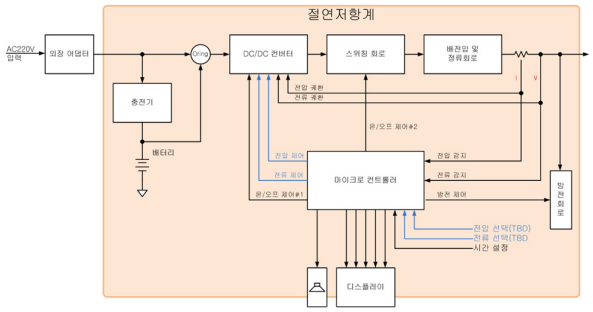
HFCV에서 감전보호를 위하여 요구하고 있는 100[Ω/VDC], 500[Ω/VAC] 이상의 절연저항값은 구동을 위한 축전지의 전압이 직류 200[V]인 경우 차량의 절연상태를 20[kΩ] 이상으로 유지하여야 하며, HFCV의 경우 연료전지스택의 출력전압이 440[V]인 경우 차량의 절연상태를 44[kΩ] 이상을 유지하여야 한다.

만약 HFCV의 절연상태가 좋을 경우 기존의 전기설비에서 사용하는 절연저항계를 사용하여 측정하였을 때 문제없이 시험이 가능하지만, 절연상태가 기준 등에서 규정하고 있는 값에 근접해 있을 경우 결과의 판정 문제가 발생한다. HFCV의 절연기준인 100[Ω/V]를 측정하기 위해서는 10[mA]의 시험전류가 필요하지만, 기존의 절연저항계는 최대 5[mA]의 시험전류로 구성되어 있기 때문에 요구하고자 하는 시험인가 전압에서 측정을 못하는 문제가 발생한다. 또한, 시험전압이 500[V] 이상의 시스템에서도 측정값의 범위가 시스템의 전압에 맞는 범위로 측정되어야 한다. 예를 들면, HFCV는 약 440[V]의 연료전지스택 전압이 출력되기 때문에 규정에 적합하기 위해서는 44[kΩ] 이상의 절연저항값을 유지해야 한다. 또한, 연료전지버스의 경우 약 880[V]의 연료전지스택 전압이 출력되기 때문에 88[kΩ] 이상의 절연저항값을 유지해야 하는데, 기존의 절연저항계로 시험하였을 때는 측정범위가 규정에 적합한 해상도가 아니기 때문에 정확한 판정을 할 수 없는 경우가 발생하며, 최대시험단락전류가 규정과 비교하였을 때 작기 때문에 시험인가전압이 실제 인가전압에 부족한 경우도 발생하여 인체 감전보호를 위한 적합한 시험이 이루어지지 못하는 경우가 발생한다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 HFCV에 적합한 절연저항 측정시스템을 개발하였다. HFCV 절연저항 측정시스템은 자동차 안전기준의 규정에 맞도록 구성하기 위하여 시험인가전압의 경우, 기존의 절연저항계와 유사하게 전압별(125[V], 250[V], 500[V], 1000[V])로 선택하여 전압을 인가하는 방식으로 설계하였다. 또한, 기존 절연저항계의 시험전류는 측정 대상의 절연상태에 따라 자동으로 결정되기 때문에 개발된 절연저항 측정시스템의 최대시험단락전류 이상이 필요할 경우 이를 제한하기 위하여 시험인가전압을 낮추어 최대시험단락전류 이상으로 전류가 흐르지 못하게 하는 방식으로 되어 있기 때문에 개발된 절연저항 측정시스템에서는 우선 측정하고자 하는 시스템의 보호를 위하여 최대시험단락전류를 사용자 설정을 통하여 제한할 수 있도록 1[mA], 5[mA], 10[mA], 20[mA]까지 선택할 수 있도록 구성하였다. 사용자가 최대시험단락전류의 선택을 통하여 시험시 최대시험단락전류의 제한으로 인하여 시험인가전압이 실제로 인가되지 못하는 경우 최대시험단락전류의 용량을 큰 것으로 선택하여 시험할 수 있도록 설계하였다. 최대시험단락전류의 선택은 적용하고자하는 시스템의 규정에 맞는 시험에 적합하도록 설계된 것이라 할 수 있다. 또한, 10[mA] 이상의 시험전류가 인가될 때에는 알람을 통하여 시험자의 감전위험을 경고하는 기능을 삽입하여 설계하였다.

절연저항의 측정범위는 친환경자동차의 관련 기준 및 규격에 맞도록 최소 기준인 100[Ω/VDC] 기준에 대하여 HFCV의 전압구성을 고려하여 10[kΩ]이상 측정가능하며 측정 해상도는 1[kΩ]으로 설계하여 HFCV의 정확한 절연저항을 측정할 수 있도록 설계하였다.

그림 1은 HFCV의 절연저항 측정시스템 개발을 위한 블록도와 개발된 측정시스템을 나타낸 것이다.



(a) Designed block diagram

(b) Developed measurement system

그림 1 HFCV 절연저항 측정시스템

Fig. 1 Block diagram of isolation resistance measurement system for HFCV

절연저항 측정을 위하여 시험인가전압과 최대단락시험전류를 선택 후 시험전압을 인가하면 DC-DC컨버터/스위칭회로/배전압 및 정류회로에서는 직류 12[V]의 전압을 시험인가전압에 맞게 변환하여 전압을 인가하고 실제 인가되는 전압과 전류을 검출하여 DC-DC컨버터와 MCU에 실제 인가전압과 전류에 대한 정보를 전송하게 된다. 실제 인가되는 전압과 전류는 DC-DC컨버터와 MCU에서 인가전압과 전류에 대한 제어를 위한 정보로 활용하게 되며, MCU에서는 디스플레이장치에 디스플레이하기 위하여 정보를 활용하게 된다.

HFCV 절연저항 측정시스템은 일반적인 전기설비가 아닌 친환경자동차에 맞게 최적화되어 있는 시험기로서 최대단락시험전류의 크기가 1[mA]에서부터 20[mA]까지 폭넓게 설정해야 하며, 측정범위가 비교적 높은 시험전압인 500[V] 이상의 인가전압에서도 10[kΩ]이상 1[kΩ]의 해상도를 갖기 때문에 전류검출부에서 MCU로 데이터를 전송할 때 22-Bit의 ADC를 사용하여 측정범위의 폭을 넓게 구성하였다.

또한, 시험의 조건에 따라서 최대단락전류가 10[mA] 이상의 전류를 사용하기 때문에 감전사고의 위험성이 존재하게 되며, 시스템 구동시 갑자기 큰 전류가 흐름으로서 측정하고자하는 자동차에 영향을 줄 수 있기 때문에 이를 보호하기 위한 Inrush Current Limit 회로를 적용하였다.

개발된 절연저항 측정시스템과 기존 절연저항계의 기능 및 성능에 대한 차이는 표 2에 나타내었다.

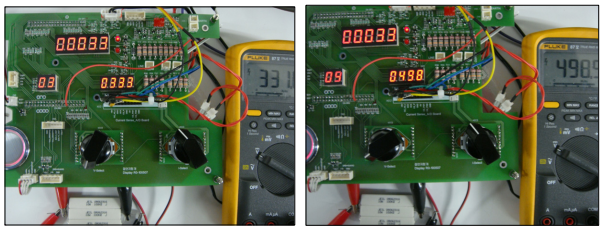
표 2 절연저항 측정시스템과 절연저항계 사양 비교
Table 2 Comparison of isolation resistance measurement system and megger specifications

	기존 절연저항계	개발된 절연저항 측정시스템
시험 인가전압	125V, 250V, 500V, 1000V 등 선택가능	125V, 250V, 500V, 1000V 등 선택가능
최대시험 단락전류	1mA 또는 5mA 고정	1mA부터 20mA까지 선택가능
측정범위	250V 이하 : 10kΩ 단위 500V 이상 : 0.1MΩ 단위	시험전압에 상관없이 10kΩ 이상 1kΩ 단위
기타		10mA 이상 흐를시 경고 알람

4. 개발된 절연저항 측정시스템의 검증 결과

개발된 HFCV 절연저항 측정시스템의 성능 검증을 위하여 실험실 수준의 검증과 실차 상태의 절연성능 측정을 통하여 검증을 실시하였다.

우선 실험실 수준의 검증을 위하여 33.3[kΩ]의 저항에 대하여 최대시험단락전류를 10[mA]와 20[mA]일 때의 시험인가 전압 및 측정값을 확인하는 방법으로 검증을 실시하였다. 측정결과는 그림 2와 표 3에 나타낸 것과 같이 최대시험단락전류를 10[mA]로 설정한 후, 시험 인가전압을 500[V]로 하여 시험하였을 때는 최대시험단락전류가 10[mA]로 제한되기 때문에 시험 인가전압이 500[V]가 인가되지 못하고 전압강하로 333[V]의 시험 인가 전압이 인가된 것을 확인하였다. 하지만, 최대시험단락전류를 20[mA]로 설정한 후, 시험 인가전압을 500[V]로 하여 시험하였을 때는 최대시험단락전류가 20[mA]까지 흐를 수 있기 때문에 시험 인가전압이 제한되지 않고 498[V]가 인가된 것을 확인하였으며, 두 가지 경우 모두 측정값은 33[kΩ]으로 측정된 것을 확인하였다.



(a) short current : 10[mA] (b) short current : 20[mA]

그림 2 전류제한에 따른 절연저항 측정 결과
Fig. 2 Insulation resistance measurements result of current -limiting

표 3 저항에 대한 절연저항 측정결과
Table 3 Isolation resistance measurement results for resistance

시험전압	최대시험 단락전류	인가전압	측정값	비고
500[V]	10[mA]	333[V]	33 [kΩ]	저항 33.3[kΩ]
500[V]	20[mA]	498[V]	33 [kΩ]	

실차상태의 검증을 위하여 HFCV 연료전지스택의 (-) 출력단자와 연료전지스택의 외함 사이를 측정하였으며, 절연저항 측정값을 비교하기 위하여 Hioki사의 3455모델과 개발된 측정시스템의 측정값을 비교하였다. 측정을 위한 차량은 시동 off, 퓨즈 on(key on) 상태로 유지하였으며, 연료전지스택의 동작전압은 440[V]인 HFCV에 대하여 시험하였다. 측정결과는 표 4에 나타내었다.

표 4 실차상태에 대한 절연저항 측정결과
Table 4 Isolation resistance measurement results for vehicle

측정대상점		시험전압	인가전압	절연저항	측정기기
전기적 새시	연료전지스택 - 출력단자	500[V]	186[V]	0.18 [MΩ]	HIOKI 3455
	연료전지스택 - 출력단자	500[V]	495[V]	0.175 [MΩ]	개발 시스템

실차상태의 검증 결과 시험설정전압과 측정값을 비교해보면, 개발된 시스템의 경우 설정된 시험인가전압에 가까운 값이 실제 인가되는 것을 확인할 수 있었으며, 측정값을 기존에 사용되는 절연저항계와 비교하였을 때 보다 정확하게 높은 해상도로 측정되는 것을 확인하였다.

5. 결 론

이상과 같이 HFCV 절연저항 측정시스템에 대한 설계사양과 성능 검증을 실시하였다. 기존의 일반적인 전기설비에서 사용하는 절연저항계는 최대시험단락전류와 측정범위 및 해상도의 문제로 인하여 HFCV에 적용하는데 문제가 있었지만 HFCV에 적합한 절연저항 측정 시스템의 부재로 인하

여 지속적으로 사용되어 왔다. 하지만, 기존의 절연저항계의 문제점인 최대시험단락전류와 측정범위 등의 문제를 해결한 본 연구 결과물인 절연저항 측정시스템을 사용하면 HFCV의 절연성능 평가시 시험조건을 만족하며, 정확한 절연성능을 측정할 수 있는 것으로 실험실 수준의 검증 결과와 실차 상태의 검증 결과를 통하여 알 수 있었다.

개발된 절연저항 측정 시스템은 기존의 절연저항계와 같은 시험전압 선택을 통하여 시험을 실시하지만, 최대시험단락전류의 문제로 인하여 인가전압이 제한이 걸리는 경우 더 큰 최대시험단락전류를 선택함으로써 인가전압이 제한되는 문제점을 해결하였다. 또한, 시험기준에 맞는 측정범위와 해상도인 0.01[㏁]이상 측정이 가능하며, 0.001[㏁](1[kΩ]) 단위로 측정 가능하도록 설계하였다. 본 연구의 결과물인 절연저항 측정 시스템을 활용하면, 향후 HFCV의 절연성능 평가 및 성능 향상에 도움이 될 것으로 판단된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

[1] 김호기, "하이브리드 전기자동차의 전기동력기술", 전기의 세계 제 54권 제 5호, pp.26-34, 2005.

[2] 이현동, 최종률, "전기, 하이브리드 및 연료전지 자동차의 향후 동향", 전기학회지 제 49권 5호, pp.4-10, 2000.

[3] 이기연 외 3, "친환경 자동차의 전기안전을 위한 절연저항 측정에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol.58P, No.4, pp.597-601, 2009.

[4] 이기연 외 5, "HFCV의 감전보호를 위한 전기안전 평가기법에 관한 연구", 대한전기학회 전기설비전문위원회 춘계학술대회 논문집, pp.200-202, 2009

[5] 이기연 외 3, "HFCV 고전압 시스템의 사고모델에 대한 전기안전성 평가에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.2169 -2170, 2010.

[6] 국토해양부령, "자동차안전기준에 관한 규칙", 제94호, 2009.

[7] ISO 6469-3, "Electric road vehicles-Safety specifications- Part3:Protection of persons against electric hazards", 2001.

[8] ISO 23273-3, "Fuel cell road vehicles-Safety specifications -Part1:Protection of persons against electric hazards", 2001.

[9] UN ECE Regulation 100, "Uniform provisions concerning the approval of battery electric vehicles with regard to specific requirements for the construction and functional safety", UN, 1997.

[10] Japan Attachment 101, "Technical standard for protection of occupants against high voltage in fuel cell vehicles", 2007.

저 자 소 개

이 기 연 (李 璣 燕)

1975년 5월 12일생. 2002년 시립인천대 공대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년~현재 전기안전연구원 화재감전예방팀 주임연구원

Tel : 031-580-3039

Fax : 031-580-3045

E-mail : lkycj@kesco.or.kr

김 동 욱 (金 桐 郁)

1971년 1월 6일생. 1998년 시립인천대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2000년~현재 전기안전연구원 화재감전예방팀 선임연구원

Tel : 031-580-3035

Fax : 031-580-3045

E-mail : dokim@kesco.or.kr

문 현 욱 (文 鉉 旭)

1975년 2월 14일생. 2000년 8월 경북대 공대 전자전기공학부 졸업. 2004년 University of Florida, Electrical & Computer Engineering 졸업(석사). 2006년~현재 전기안전연구원 화재감전예방팀주임연구원.

Tel : 031-580-3038

Fax : 031-580-3045

E-mail : hwmoom@kesco.or.kr

김 향 곤 (金 珦 坤)

1970년 12월 14일생. 1996년 조선대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 2008년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1996년~현재, 한국전기안전공사 전기안전연구원 화재감전연구부 부장/책임연구원.

Tel : 031-580-3031

Fax : 031-580-3045

E-mail : kon0704@kesco.or.kr