

수소연료전지 자동차용 고전압 배선 시스템 평가 기술 개발

임지선 · 이정훈[†] · 이효정 · 나주란
유라코퍼레이션

High Voltage Wiring System Evaluation Method of FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)

JISEON LIM, JEONGHUN LEE[†], HYOJEONG LEE, JOORAN NA

KYURA R&D Center, 686-1, Sampyeong-dong, Bundang-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do, 463-400, Korea

Abstract >> FCEV uses 250 ~ 450 V instead of using 12 V battery. High voltage vehicle can cause electric shock, fire and explosion accident. Therefore, it has potential factors that can cause hazard of safety for users. United states of America and Europe legislate regulations such as ECE R100, FMVSS 305 for regulating electrical safety during driving or after collision. The company manufacturing high voltage components must do advanced R&D about Method for improving and confirming the safety of high voltage. We develop the specific hardware components of high voltage wiring system for the power train system and power supply system of Hyundai Motors FCEV. This paper shows test method of insulative performance for securing the electrical safety of high voltage components such as power cable, connectors and buss-bar, and proposals the guide line value for human safety of FCEV according to the test result of our development components.

Key words : Fuel cell electric ehicle(수소연료전지 자동차), Wiring system(배선 시스템), High voltage(고전압), Safety evaluation method(안전성 평가 방법)

Definition

JIS : japanese industrial standards
JASO : japanese automotive standards organization
SAE : society of automotive engineers
ECE : coordinating european council
IP : ingress of protection

Subscripts

AHHEX-BS 50 : AHHEX-BS 50sq cable

AHEX 3 : AHEX 3sq cable

AHEX 5 : AHEX 5sq cable

1. 서 론

최근 국제적 고유가 문제로 인한 연비 개선과 함께 화석연료 사용에 따른 대기 오염 등의 환경문제 해결을 위한 환경 규제 강화가 새로운 이슈로 떠오르면서 우리나라를 포함한 미국, 유럽, 일본 등 세계 각국에서 수소연료전지 자동차에 대한 개발 및 실증 평가가 이루어지고 있다.

수소연료전지 자동차는 자동차 일반 배터리인 12 V보다 높은 250-450V의 전압을 사용하는 자동차로

[†]Corresponding author : esthoony@yura.co.kr

[접수일 : 2012.5.30 수정일 : 2012.6.11 게재확정일 : 2012.8.24]

Copyright © 2012 KHNES

감전, 화재 및 폭발 사고 등의 사용자의 안전에 위협을 줄 수 있는 잠재적 요인을 가지고 있다¹⁾.

현재 유럽과 북미에서는 전기적 안전성 확보하기 위하여 각각 ECE R100(economic commission for europe regulation 100), FMVSS 305(federal motor vehicle safety standard 305) 등의 법규를 제정하여 차량 운전상태 혹은 충돌 후의 전기적 안전성에 대해서 규제하고 있다²⁾. 차량 상태에서의 전기적 안전성을 확보하기 위해서는 우선 고전압 부품에서 먼저 안전성을 확보할 수 있는 수준이 되어야 한다. 고전압 부품을 제조 판매하는 부품사에서 부품 상태에서 고전압 안전성을 향상 시키고 이를 확인 할 수 있는 방법에 대한 연구 개발이 선행 되어야 한다^{3,4)}.

본 연구에서는 고전압 부품의 전기적 안전성을 확보하기 위한 전기 안전 설계 기준 및 고전압 부품의 평가 기준을 제시하고자 한다.

2. 시험 평가

2.1 고전압 시험 평가 주의사항

본 시험 평가는 실제 수소연료전지 자동차에 사용되는 전압을 고려한 450V 이상의 전압을 사용한다. 그러므로 시험 평가 전 측정자는 고전압 시스템에 대한 충분한 지식과 주의사항에 대한 교육이 선행되어야 한다. 고전압에 사용되는 케이블의 선택은 오랜 지색이며, 고전압 부품들은 ‘고전압’ 주의 경고로 취급 시 주의하도록 한다. 시험 평가전 절연 장갑 및 안면마스크, 보호안경, 안전화 및 고무장갑, 앞치마 등의 보호 안전 장구 착용 후 시험 평가를 실시한다. 추가로 시험 평가전 고전압 측정 장비의 측정 범위 및 사양을 충분히 조사 후 사용하도록 한다.

2.2 고전압 케이블

케이블은 자동차 내 전력과 신호를 공급을 하는 역할로 배선시스템에서 가장 중요한 역할을 하고 있다. 본 연구에서는 수소연료전지 자동차의 고전압 케이블을 사용하여 케이블의 적합성과 사용자의 안전성을

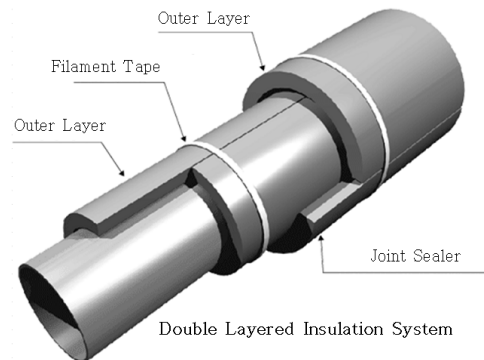
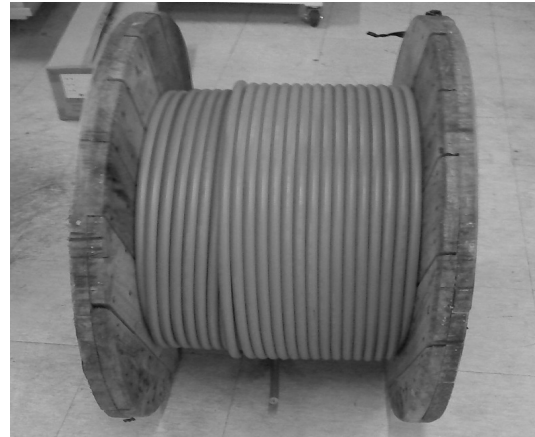


Fig. 1 High-voltage cable insulation systems and test samples

확보하기 위한 전기적인 시험평가를 실시하였다.

2.2.1 시료 사양

고전압 케이블의 시험 평가로 사용된 시료는 고내열성 케이블 종류인 AHHEX, AHEX을 사용하였으며, 이 케이블은 현재 개발 중인 수소연료전지 자동차에 사용되고 있다. AHHEX, AHEX 케이블은 도체부가 주석도금 연동선인 고내열성 케이블로 AHHEX - BS 종류의 50sq와 AHEX 3sq, 5sq 세 가지 종류 시료에 대하여 시험 평가를 실시하였다(Fig. 1). 50sq는 인버터와 구동모터를 연결하는 파워케이블에 적용되며, 5sq와 3 sq는 고전압 정선박스 내부와 PTC 히터 등 고전압 전장품에 사용된다. 시험 조건은 별도지시가 없는 한, 표준 외기 조건은 KS A0006(시험장소 표준

상태)에 명시된 온도 조건, 15급($20 \pm 5^\circ\text{C}$)과 표준습도 조건, 20급($65 \pm 20\%$)으로 시험평가를 실시한다⁵⁾.

2.2.2 도체 저항 시험

도체 저항 측정은 고전압 케이블의 도체 저항을 측정하여 케이블을 구성하는 도체부에 대한 고유 저항 값을 측정하는 시험이다.

시험 평가 방법은 도체 저항 측정기(TINSLEY, QJ84)를 사용하여 도체의 저항 값을 측정한다(Fig. 2). 측정 기준이 되는 온도 20°C , 전선 길이 1m의 저항을 이용해 온도 변화 및 길이가 변경된 경우의 도체 저항 값을 구할 수 있다. 기준이 되는 전선의 단위 길이(1m)당 저항을 고정 저항으로 고려하고, 시험 온도에서 케이블 시료와 장비의 가변저항을 이용한다. 가변저항을 조정하여 기준이 되는 저항(온도 20°C , 길이 1m의 저항)과 시료 및 장비의 가변저항 값의 대각 곱이 같음을 이용한 휘트스톤 브리지(Wheatstone Bridge)법을 이용하여 식 (1)로부터 20°C 일 때의 선 길이 1m에 대한 값으로 환산한다.

$$R_{20} = \frac{R_t}{L[1 + 0.0393(T - 20)]} \quad (1)$$

R_{20} : conductor resistance value equivalent to the length of 1 m at 20°C ($\text{m}\Omega/\text{m}$)

R_t : measured values of T $^\circ\text{C}$

L : the length of the wires (m)

T : measured temperature ($^\circ\text{C}$)

2.2.3 절연 저항 측정 시험

절연저항 측정시험은 수소연료전지자동차 고전압 케이블의 절연저항을 측정하여 안전성의 이상 유무를 확인하는데 목적이 있다. 절연 저항 측정 시험 평가 방법은 KS C IEC 60811(과거 KS C 3004)규격을 참고하여 실시하였다. 시료를 약 5m 정도를 취하여 250mm를 수면위로 나오게 한 후, 수온 약 $70 \pm 2^\circ\text{C}$ 에서 1시간 침수시킨다. 절연저항 측정기(TOA, SM-8220)



Fig. 2 Conductor resistance tester

를 이용하여 물과 도체 사이에 DC 100V에서 500V의 전압을 1분간 가하여 절연 저항을 측정한다(Fig. 3). 이 때 시료의 체적 저항은 측정된 절연 저항 값을 이용하여 식 (2)에 의하여 산출한다⁶⁾.

$$Q_0 = 2.725 \times L \frac{R}{\log(D/d)} \quad (2)$$

Q_0 : insulator volume resistivity ($\Omega \cdot \text{mm}$)

L : length of the immersed sample (mm)

R : the measured insulation resistance (Ω)

D : the outer diameter of the test samples (mm)

d : conductor outer diameter of the test sample (mm)

2.2.4 내전압 시험 : 수중시험

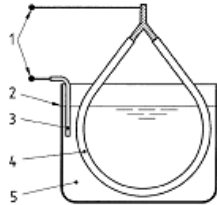
내전압 시험은 수중에서의 내전압 측정으로 KS C IEC 60811과 JASO D 618을 참고하여 시험 평가를



Fig. 3 Insulator resistance tester

Table 1 AC voltage of Withstand voltage

Division	AHEX 3	AHHEX-BS 50		AHHEX 5
		Insulation wire	Final set	
Test voltage	2500V	2500V	1000V	2500V



1. Test voltage
2. A non-conductive container
3. Electrode
4. Test sample
5. Salt aqueous solution

Fig. 4 Withstand voltage underwater test

실시하였다. 케이블 시료의 길이를 약 600mm로 준비하고 양 끝단의 절연체를 약 25mm 정도 제거한다. 절연체를 제거한 케이블의 양 끝단의 도선을 서로 꼬아 시료 중앙부를 기준으로 약 300mm를 5% 염수 속에 넣어 5시간 유지한다. 그 후 50~60Hz 파형을 가진 교류 전압을 하단의 Table 1과 같이 1분간 가하여 시료의 상태를 관찰한다(Fig. 4).

2.3 고전압 커넥터

2.3.1 시료 사양

수소연료전지 자동차에서 사용되는 전압을 견딜 수 있는 300A급 14파이(Ø) Male, Female 단자를 사

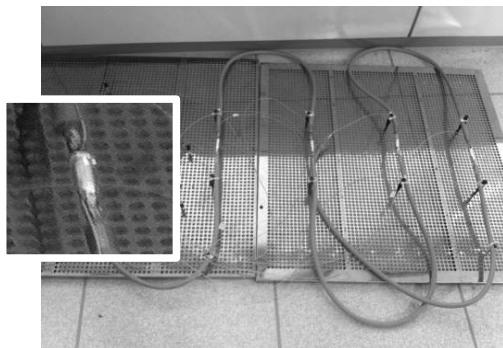


Fig. 5 High-Voltage Connector sample

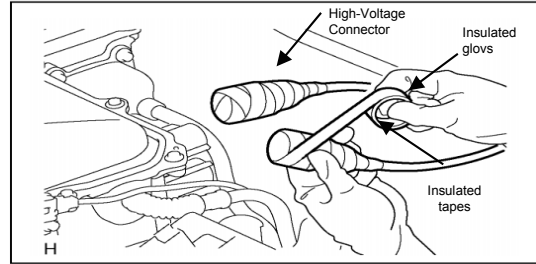


Fig. 6 Insulation method of connectors

용하여 시험 평가를 실시하였다(Fig. 5). 별도지시가 없는 한 표준 외기 조건은 KS A0006(시험장소 표준 상태)에 명시된 온도 조건, 15급(20±5℃)과 표준 습도 조건, 20급(65±20%)으로 시험평가를 실시하였다. 시험 평가시 전원을 인가하고 고전압 시스템을 점검해야 하는 경우, 시험에 사용하지 않는 커넥터는 절연 테이프로 절연 처리 후 진행하도록 한다(Fig. 6).

Table 2 Results of conductor resistance test

Samples	Standards	Measured results		
		×1	×3	X
AHHEX-BS 50	0.42(Ω/km) ↓	0.350	0.338	0.341
AHEX 3	5.65(Ω/km) ↓	5.131	5.118	5.123
AHEX 5	3.72(Ω/km) ↓	3.298	3.283	3.284

Table 3 Results of insulation resistance test

Samples	Standards	Measured results		
		×1	×3	X
AHHEX-BS 50	Resistivity 10 ⁹ Ω·mm ↑	1.7×10 ¹⁴	2.0×10 ¹⁴	1.7×10 ¹⁴
AHEX 3		4.5×10 ¹⁸	4.5×10 ¹⁸	4.5×10 ¹⁸
AHEX 5		5.7×10 ¹⁸	5.8×10 ¹⁸	5.7×10 ¹⁸

Table 4 Results of underwater withstand voltage test

Samples	Standards	Measured results		
		×1	×3	X
AHHEX-BS 50	Withstand 2500V for 1 minute	OK	OK	OK
	Withstand 1000V for 1 minute	OK	OK	OK
AHEX 3	Withstand 2500V for 1 minute	OK	OK	OK
AHEX 5		OK	OK	OK

2.3.2 온도 변화 시험

300A급 고전압 커넥터 Male, Female 부분을 체결한 후 30~330A까지 전류(부하)를 인가하여 8회 시험 평가를 실시한다. 고전압 커넥터의 온도 변화를 온도 레코더(YOKOGAWA, MV200)를 이용하여 온도 변화를 측정한다(JIS C0704 규격 참고).

3. 결과 및 결과 분석

3.1 고전압 케이블

도체 저항시험, 절연저항 시험, 내전압 수중 시험에 대하여 5회 이상의 시험 평가 결과 작성 기준에 만족하였다(Table 2, Table 3, Table 4).

3.2 고전압 커넥터

고전압 커넥터의 시험 평가는 커넥터에 300A를 기준으로 전류(부하) 인가 시 주변 온도와의 온도 변화차이가 60℃ 보다 낮게 측정되어야 한다는 기준을 작성하였다(JIS C 0704 참고). 준비한 시료에 대하여 시험 평가한 결과 300A 전류(부하) 인가 시 58.6℃로 시험 결과가 나왔다(Fig. 7).

3.3 고전압 버스바(bus bar)

고전압 버스바는 전선과 동일한 기능을 하는 부품으로 장착 공간이 협소하거나 고정 후 탈 부착이 빈번하지 않은 위치에 볼트 등으로 고정하는 부품이다. 기존에는 절연성을 확보하기 위해 플라스틱 재질 또

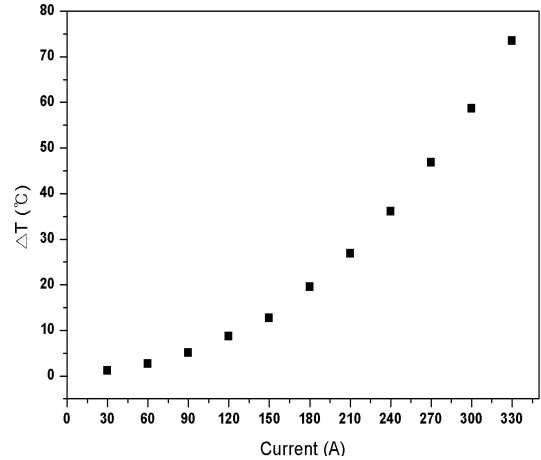


Fig. 7 Temperature changes of high-voltage connector according to current(Load) injection

는 PVC 재질을 사용하여 절연성을 확보했으나 연료 전지차량의 경우 기존 전력 설비와는 다른 가혹한 환경에 놓여진다. 따라서 온도 및 습도 등의 조건이 산업기준대비 엄하다. 따라서 절연성능 확보를 위한 절연 코팅 기술에 대한 연구 개발이 선행 되어야 한다.

절연 성능을 좌우하는 주요 인자로는 코팅 재질과 코팅 두께가 주요한 영향을 줄 수 있으며, 성능에 영향을 주는 잡인 요소는 온도와 습도가 상대적으로 영향이 크다.

본 연구에서 PVC 재질과 에폭시 재질에 대해서 각각 절연 두께를 변화시키면서 절연 성능을 측정하였다(Table 5).

제어인자를 절연체 재질과 두께로 선정하였다. 재질은 PVC와 에폭시, 두께는 0.3t와 0.5t로 그 수준을 정하여 시험하였다. 결과에 영향을 미칠 잡음인자로 온도와 습도를 고려하였다. N1은 온도 25℃/습도 30%,

Table 5 Insulation performance test of high-voltage bus bar

L4	Control factors		Noise factors				S/N ratio	average
	Insulation material	Insulation thickness	N1	N2	N3	N4		
1	PVC	0.3	223	1	1	1	1.24936	56.50
2	PVC	0.5	1640	1	1	1	1.24939	410.75
3	Epoxy	0.3	7140	1350	1000	171	50.4858	2415.25
4	Epoxy	0.5	9990	2080	2780	2210	68.4217	4265.00

Table 6 Results of insulation performance test of high-voltage bus bar

Humidity\ temperature	25℃	55℃	80℃
30%	99.9GOhm	71.4GOhm	9.26GOhm
50%	99.9GOhm	38.7GOhm	7.69GOhm
80%	994MOhm	603MOhm	171MOhm

N2는 온도 25℃/습도 80%, N3는 온도 80℃/습도 30%, N4는 온도 80℃/습도 80%의 조건 하에 시험하였다.

PVC 재질로 0.3t를 도포한 결과 56MOhm 수준의 절연 성능일 보이는데 이는 기준인 100MOhm에 못 미치는 결과며, 도포량을 0.5t로 증가 시킬 경우는 실온 조건에서 기준을 만족하는 성능이 나왔다. 하지만 고온 다습한 조건에서는 급격하게 절연성능이 저하되는 문제가 있어 연료전지 자동차용 버스바에 절연 코팅 재질로 PVC를 사용하는 것은 성능 확보에 어려움이 있다. 시험 결과 에폭시 재질에 0.5t 수준의 제품으로 정하는 것이 에폭시 도포 공정이나 절연 성능 면에서 최적의 조합이라 할 수 있다. 코팅이 두꺼우면 더 좋은 성능을 나타낼 수 있겠지만 현재 도포 기술로는 균질한 도포를 할 수 없으며 두께가 두꺼워질 경우 산포가 증가해 제조상에서 불량률이 증가하는 문제가 있다. 최적 조합의 에폭시 코팅 제품에 대해 검증 평가를 진행한 결과 AC 2500V의 전압을 가했을 때도 절연파괴가 일어나지 않았으며, 온도/습도 조건에서 절연저항 테스트를 진행한 결과도 악조건인 80℃, 80%의 습도에서도 171MOhm의 성능을 확인 할 수 있었다(Table 6).

3.4 결과 정리

본 연구에서 시험 평가 방법 및 결과는 KS C 3311, KS C IEC 60811 규격을 포함한 JASO D616, JASO D 618, JIS C 0704, SAE J 1742 등의 규격을 참고하여 작성하였다(Table 7). 고전압 안전 사항은 규격 ECE R100, IP6K9K, KS A ISO 3894, ISO 6469-1, ISO 23273-3, IP2X, 자동차안전기준에 관한 규칙(국토해양부 02-2110-8692)을 참고하였다⁷⁻¹¹⁾.

Table 7 Wiring system test standard

Division	Test	Test standard
High-voltage cables	Conductor resistance	Resistance value is less than 0.42 (Ω / km) at 50sq, 5.65 at 3sq and 3.72 at 5sq.
	Underwater withstand voltage	Withstand 2500V/1000V for 1 minute.
	Insulation resistance	Volume resistivity would be $109\Omega \cdot \text{mm}$ or more.
High-voltage connector	Temperature changes	Temperature difference between air and connector is less than 60℃ at 300A current(load).

4. 결 론

본 연구는 차량 배선 시스템에 구성되는 가장 기본적인 케이블과 커넥터에 대한 고전압 평가 기술에 관한 연구이다.

- 1) 고전압 케이블의 도체 저항, 수중 내전압, 절연저항 시험 측정 평가 결과 AHEX 3sq를 기준으로 하였을 때 도체 저항은 $5.123\Omega/\text{km}$ 로 기준인 $5.65\Omega/\text{km}$ 보다 작은 값으로 측정 되어 평가 기준을 만족하였다. 절연저항 시험 평가는 고유 수중 내전압 $4.5 \times 1018 \Omega \cdot \text{mm}$ 로 기준 값 $109\Omega \cdot \text{mm}$ 보다 큰 값을 가지기에 만족한다. 수중 내전압 시험 평가는 2,500V에서 1분간 제품의 변형이나 변질이 없는 결과로 수소 연료 전지 자동차에 사용되는 케이블 시료에 대하여 모든 시험 평가에 만족한다.
- 2) 고전압 커넥터의 300A급 전류(부하) 인가 시 주변 온도와의 차이를 평가 결과 58.6℃로 60℃보다 낮은 온도 차이를 보였다. 이는 JIS C 0704 규격을 참고하였을 때 사용하는 데 문제가 없는 것으로 판단된다.
- 3) 본 시험 결과는 현 개발 중인 수소연료전지자동차에 사용 되고 있는 사양의 시료를 사용한 것이다. 그렇기에 추후 수소연료전지자동차를 포함한 고전압을 사용하는 차량에 적용될 수 있는 배선 시스템에 대하여 평가 혹은 기준이 될 수 있는 최소

사양에 대한 평가 기준으로 사용 될 수 있을 것이라 판단된다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. V. M. Schmidt, U. Stimming ; “hydrogen and methanol proton exchange membrane fuel cells.”, Proceedings of the 11th world Hydrogen Energy Conference Stuttgart, Germany 23-28 June 1996, Vol. 3 pp. 1717-1726.
2. Ho, Seizaburo. Electrical Materials, 4th Edition. Kyoritu Shuppan.
3. Miyata, Takahiro, ed. Basics of Electricity and Electronics. Gijutu Hyoronsha.
4. Kyujin Chang, Yeongmin Choli, Byeongki An, Teawon Lim, “High-pressure hydrogen storage system of the fuel cell vehicle”, Transaction of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 19, No. 4, 2008, pp. 266-275.
5. Automotive parts-current capacity of low tension cable, JASO D609, 2001.
6. Jeonghan Yu, Dukhwan Kim, Juhan Kim, Guisung Jeong, Youngbum Kum, Sehun Kim, Dekgyun An, “Study on the characteristics of electrical isolation of fuel cell vehicles”, Transaction of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 23, No. 2, 2012, pp. 150-155.
7. Ilgu Kim, Chency, Jaehong Park, “The written methodology of electrical safety regulations of Fuel cell vehicle”, Transaction of the Korean Hydrogen and New Energy Society, Vol. 20, 1999, No. 2, pp. 134-141.
8. John O’M. Bockris, Amulya K. N. Reddy, “Modern Electrochemistry1”, PLENUM, 1998, pp. 35-98.
9. Matthew M. Menchm “Fuel Cell Engine”, WILEY, 2008, pp. 191-209.
10. KS C IEC 60811, Electric and optical fibre cables - Test methods for non-metallic materials.
11. SAE J 1742, Connections for High Voltage On-Board Road Vehicle Electrical Wiring Harnesses - Test Methods and General Performance Requirements.