

HFCV의 감전보호를 위한 전기안전 평가기법에 관한 연구

이기연\*, 김향곤, 김형준, 김동욱, 유병열, 박용선  
한국전기안전공사 전기안전연구원

Research on evaluation technique concerning electrical safety for electrical shock protection of HFCV(Hydrogen Fuel Cell Vehicle)

Ki-Yeon Lee, Hyang-Kon Kim, Hyoung-Jun Gil, Dong-Ook Kim, Byeong-Yeol Yu, Yong-Sun Park  
Korea Electrical Safety Corporation Electrical Safety Research Institute

**Abstract** - 본 논문에서는 수소연료전지자동차의 고전압 시스템에서 직·간접 접촉에 의한 인체 감전사고를 방지하기 위한 전기안전 평가기법인 절연저항과 전기적연속성 등에 대하여 분석하였다. ISO, UNECE, Japan Attachment 등의 외국 규격에서는 감전보호를 위한 평가 기준을 제시하고 있지만 세부적인 평가방법에 대해서는 명확하게 규정하고 있지 않기 때문에 전기안전 평가를 위한 측정방법 및 측정장비에 대한 최소한의 기준 정립이 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 전기안전 평가기법에 대한 HFCV 실차 상태의 실험을 통하여 나타난 문제점 분석을 통하여 감전보호를 위한 전기안전 평가기법 중 전기적 연속성 및 절연저항에 대한 측정방법과 측정장비의 사양에 대하여 제시하고자 한다.

1. 서 론

세계적으로 환경오염을 줄이고자 점차 규제가 강화되고 있으며, 각국에서 환경오염의 저감을 위한 다양한 방안을 강구하고 있다. 이러한 대책의 일환으로 신재생에너지와 환경친화기술의 개발에 박차를 가하고 있으며, 우리나라에서도 정부의 국가발전 비전으로 저탄소 녹색성장 전략을 추진하고 있다. 이에 맞춰 정부의 신성장동력 육성 정책으로 환경친화형의 미래형자동차에 대한 연구개발이 적극적으로 추진 중에 있으며, 업계에서도 2012년 상용화를 목표로 개발이 가속화됨에 따라 기존의 엔진을 대체하는 전기장치의 성능 향상과 안전 확보를 위한 기술개발이 필요하다.

최근 국토해양부에서는 하이브리드자동차 및 전기자동차에 있어 전기적인 주요 구성요소인 고전원 전기장치(구동축전지, 전력변환장치, 구동전동기, 고전원 전기배선 등)에 대한 구조적인 안전기준을 제정하였으며, HFCV와 관련된 고전압 시스템과 수소관련 안전기준은 연구가 진행 중에 있으며, 국제적으로도 이에 대한 기준 정립회의가 진행 중에 있기 때문에 친환경자동차 산업의 발전과 안전성 확보를 위하여 안전을 고려한 설계 및 시험 기준이 필요한 상황이다[1-3].

친환경자동차 고전압 시스템의 전기안전을 위한 외국의 규격은 ISO 6469-3, ISO 23273-3, FMVSS305, UNECE R100, Japan Attachment 101 등에서 주로 언급하고 있다. 이러한 각 규격에서는 주로 인체의 직·간접 접촉에 의한 감전사고를 예방하기 위한 고전압 시스템에 대한 구조기준과 절연저항, 전기적 연속성 등의 성능기준을 주로 언급하고 있지만, 구조기준과 성능기준을 평가하기 위한 방법과 사용장비에 대하여는 자세하게 언급되어 있지 않은 실정이다[4].

따라서, 본 연구에서는 국외의 규정들을 비교, 분석하고 성능기준 평가에 필요한 전기적 연속성과 절연저항 측정에 있어 HFCV 실차 대상의 실험을 통하여 나타난 문제점 분석을 통하여 인체 감전보호를 위한 전기안전

평가방법 정립과 측정장비의 기본적인 사양을 정립하는데 도움을 주고자 한다.

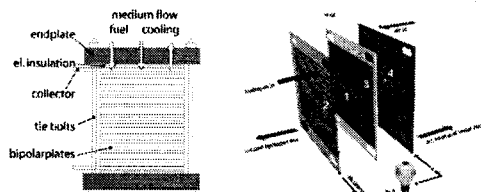
2. HFCV의 구조 및 기준 분석

2.1 연료전지스택의 구조

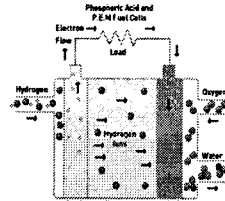
연료전지 자동차는 연료전지를 동력원으로 하는 차세대 무공해 자동차로 평가받고 있으며, 연료전지의 종류, 사용 연료, 연료 개질방법, 연료저장 방법 등에 따라 여러 가지 형태로 구분되고 있다.

연료전지는 사용되는 전해질에 따라 고분자 전해질 연료전지(PEMFC), 인산형 연료전지(PAFC), 용융탄산염 연료전지(MCFC), 고체산화물 연료전지(SOFC), 알칼리 연료전지(AFC) 등이 있지만 효율이 높고 전류밀도 및 출력밀도가 크며, 시동시간이 짧은 동시에 부하 변화에 대한 응답특성이 빠른 특성이 있는 PEMFC가 연료전지 자동차에 주로 사용되고 있다. 이러한 연료전지 스택은 수소에너지의 화학적 에너지를 전기에너지로 직접 변환시켜 직류 전류를 발생하는 발전장치로서 차량의 동력을 공급하는 역할을 한다.

그림 1은 연료전지스택의 구성 및 동작원리를 나타낸 것으로 외측의 End Plate와 수십장 이상의 Cell, 체결밴드 등으로 구성되어 있다. 스택은 수소와 공기의 화학적 반응으로 전기에너지를 발생시키며, 물(H<sub>2</sub>O)이 부산물로 생산된다.



(a) 연료전지스택의 구성 (b) 전기화학적 반응(cell)



(c) PEMFC의 동작원리

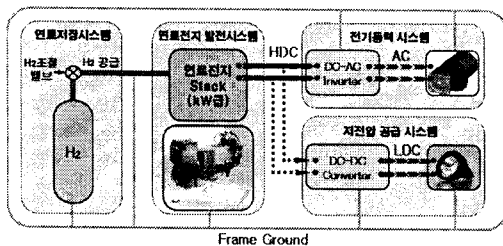
<그림 1> 연료전지스택의 구성 및 동작원리

2.2 HFCV의 구조

수소연료전지자동차의 고전압시스템은 그림 2에 나타난 것과 같이 연료저장시스템, 연료전지 발전시스템, 전

기동력시스템, 저전압 공급 시스템으로 구동을 위한 고전압시스템이 구성되어 있으며, 에너지효율을 높이기 위한 하이브리드시스템인 배터리/슈퍼커패시터 등으로 구성되어 있다. 연료전지시스템은 고전압과 대전류의 전기에너지를 생산하고 인버터와 컨버터에서는 차량 운행에 필요한 에너지를 변환하여 사용하는 시스템이기 때문에 시스템 이상에 의한 화재, 감전사고 등이 발생할 수 있으며, 외부의 충격이나 온도 및 습도의 영향으로 절연이 파괴되어 전기재해를 일으킬 수 있다. 또한, PEMFC의 동작원리에서 나타난 것처럼 전기에너지와 함께 물이 생성되기 때문에 절연파괴로 인한 감전사고의 위험성이 존재하게 된다.

HFCV는 연료전지시스템의 출력 특성이 고전압 대전류인 시스템을 사용하고 있기 때문에 직·간접 접촉에 의한 감전사고가 발생할 수 있으므로 인체 감전사고 예방을 위하여 절연저항, 전기적 연속성 등의 안전을 확보하여야 한다.



<그림 2> HFCV의 고전압시스템 구성도

### 2.3 전기안전 평가기법에 관한 국제 기준 분석

고전압 시스템의 전기안전 평가기법 관련 국제 기준으로는 UNECE R 100, ISO 6469-3, ISO 23273-3, Japan Regulation Attachment 101 등이 있으며, 주요내용은 작동전압이 직류 60[V] 또는 교류 25 [V]를 초과하는 고전압 시스템에 대하여 인체로부터 직·간접 접촉에 의한 감전사고를 예방하기 위한 구조 기준과 절연저항, 전기적 연속성, 내전압 등의 성능기준, 그리고 충돌시의 안전기준 등에 대하여 언급하고 있다.

구조기준의 경우 고전압시스템에 대한 케이블의 색상, 경고표시, 보호기구 등과 관련된 구조기준이 언급되어 있으며, 성능기준의 경우 절연저항, 전기적 연속성 등의 평가 기준값은 제시되어 있지만, 측정방법 및 측정위치에 대해서는 자세하게 언급되어 있지 않은 실정이다.

절연저항의 경우 인체에 흐르는 전류의 크기와 시간에 좌우되기 때문에 IEC 60479-1에서 제공하는 시간/전류 영역에 대한 인체의 생리학적인 영향을 적용하여 일반적으로 전기 생리학적으로 해롭지 않은 영역에 해당되는 감전 전류값으로 적용하고 있기 때문에 절연저항 값을 100Ω/V[DC], 500Ω/V[AC] 이상으로 유지하도록 규정하고 있지만, 측정 방법에 대해서는 외부로부터 직류전압을 인가하여 측정하는 방법과 내부의 직류전원을 이용하여 측정하는 방법 중 두가지 방법을 제시하고 있는 경우와 내부의 직류전원을 이용하여 측정하는 방법만을 제시하는 경우로 나누어지고 있다.

전기적 연속성의 경우 고전압 시스템의 외함을 포함한 노출 도전부(exposed conductive part)의 등전위저항은 25[A]의 시험전류에서 두 노출도전부에 5초간 인가하였을 때 또는 전기적 새시와 모든 노출 도전부 사이에 최소 0.2[A]의 전류로 측정했을 때 0.1[Ω] 초과하면 안 된다고 규정되어 있다[5-8].

## 3. HFCV 차량 레벨의 실측에 관한 고찰

### 3.1 HFCV 차량 레벨의 전기적 연속성 측정

HFCV 차량 레벨의 전기적 연속성을 그림 3(a)와 같

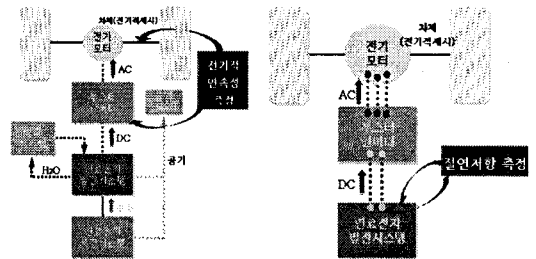
은 방법으로 측정할 수 있다. 전기적 새시인 차량 프레임과 수소공급장치의 외함, MCU Junction Box 외함, Stack 외함 등 사이의 전기적 저항을 초저항 측정기(C.A 6250, Chauvin Arnoux, France)를 이용하여 각각 측정하여야 하며, 이 때의 시험 전류는 0.2[A] 이상으로 시험하여야 한다.

고전압 시스템의 활선도체부는 전기적으로 차체와 분리(절연)되어 있지만, 기본 절연에 이상이 발생한 경우 인체 감전의 위험이 있기 때문에 인체 감전에 대한 안전확보를 위하여 차체와 고전원 전기장치의 외함을 전기적으로 접속하여 전기적 연속성의 확보가 필요하다.

### 3.2 HFCV 차량 레벨의 절연저항 측정

HFCV 차량 레벨의 절연저항은 그림 3(b)와 같은 방법으로 측정할 수 있으며, 내부의 직류전원을 이용하여 측정하는 방법과 외부로부터 직류전원을 인가하는 방법 중 한가지로 측정할 수 있다. 외부로부터 직류전원을 인가하는 방법은 절연저항계를 이용하여 측정하며, 절연저항 측정시 측정기는 고전압 시스템의 작동 전압보다 높은 직류 전압을 인가할 수 있는 절연저항 시험기(절연저항계)를 사용하여야 하며, 절연저항은 활선도체부와 전기적 새시 사이에 절연저항 시험기의 리드선을 접속한 후 고전압 시스템의 작동 전압보다 높은 직류전압을 인가하여 절연저항을 측정한다.

절연저항은 Stack의 외함과 Stack 출력단자(+, - 단자) 사이의 절연저항, 구동축전지 외함과 구동축전지 출력단자(+, - 단자) 사이의 절연저항 등 고전압 시스템의 전압원에 대하여 절연저항을 측정하여야 한다.



(a) 전기적 연속성 (b) 절연저항  
<그림 3> HFCV 실차대상 시험 방법

### 3.3 HFCV 차량 레벨 실측에 따른 결과 분석

HFCV 실차를 대상으로 차량 레벨의 실측결과, 전기적 연속성의 경우 판정 기준값 이하의 값이 측정되었다. 하지만, HFCV가 아직 상용화된 차량이 아니기 때문에 제작 공정에서 차이가 발생할 수 있기 때문에 향후 설계 단계에서 전기적 연속성 확보를 위한 고전압 시스템의 전기적 접속이 요구된다. 또한, 전기적 연속성 측정을 위한 시험방법과 조건이 규격마다 조금씩 다르기 때문에 규정이나 기준의 일원화가 필요하며, 시험절차와 측정부분에 대한 명확화가 되어 있지 않아 현장에서 혼란을 초래할 수 있을 것으로 생각된다. 이를 위해서는 시험전류 및 시험전압을 일원화할 필요가 있으며, 실차에 대한 고전압 시스템의 실제 장착 구조를 고려한 측정 대상점의 선정이 필요할 것이다. 또한, 이번 시험에서는 초저항 측정기를 사용하여 측정하였지만, 시험방법 및 조건에 부합하는 사양의 장비를 사용하여 측정할 수 있을 것이다. 이를 위해서는 최소 0.01[Ω]의 해상도를 갖고 있으며, 일원화된 시험방법에 따라 시험할 수 있는 측정장비의 측정 시스템 검증이 필요할 것이다.

절연저항의 경우 정상상태에서는 특이점이 발견되지 않았지만, 절연에 이상이 있는 경우 측정장비의 사양에 따라 절연저항이 정확하게 측정되지 않을 수도 있기 때문에 주의해야 한다. 절연상태가 우수한 정상적인 시스

템에서는 측정시스템의 설정된 인가전압이 인가된 후 절연저항값의 측정이 가능하지만, 절연상태에 이상이 발생한 경우 절연저항계의 인가전압이 설정값까지 인가되지 않고 측정될 수 있다. 따라서 현재 상태의 절연저항 측정시스템의 경우 절연상태가 이상이 있는 경우 어느 정도의 절연이 파괴되었는지 판단하기 힘들기 때문에 측정시스템의 검토가 필요하다.

국제 기준에 따르면 절연저항 값을  $100\Omega/V(DC)$ ,  $500\Omega/V(AC)$  이상으로 유지하도록 되어 있기 때문에 연료전지스택의 출력전압이  $V_s$ 라고 하면  $V_s$  이상의 시험전압을 인가할 수 있으며, 최소  $V_s \times 100[\Omega]$ 이 측정 가능해야 한다. 연구 개발되고 있는 HFCV의 연료전지스택의 출력전압이  $500[V]$ 라고 하면  $0.05[M\Omega]$  이하의 절연저항이 측정 가능해야 하지만, 현재 사용되고 있는 절연저항 측정시스템의 경우 자동차용이 아닌 전기설비에 사용되고 있는 장비이기 때문에  $0.1[M\Omega]$  이상 측정 가능한 장비들이 대부분이다. 향후 HFCV가 상용화되면 자동차용의 절연저항 측정시스템은 차량의 동작특성에 맞는 인가전압과 측정범위를 갖는 측정시스템이 추가로 개발되어야 할 것으로 판단된다.

현재 HFCV가 연구개발 단계이기 때문에 연료전지스택의 구조 및 설치 위치가 미확정되어 있기 때문에 구조적 문제가 발생하였다. 각 시스템에 대한 Junction Box가 없는 경우 구조적인 문제 때문에 절연저항 측정이 어려운 경우도 있었으며, 절연상태를 점검해야 하는 측정 대상점에 대한 부분에 대한 결정되지 않았기 때문에 고전압시스템의 구조를 고려한 측정 대상점을 결정해야 할 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

이상과 같이 수소연료전지자동차(HFCV)의 고전압시스템에서 직·간접접촉에 의한 인체 감전사고를 방지하기 위한 전기안전 평가방법에 대한 국제 기준 및 규격을 분석하고, 전기안전을 위한 성능기준인 전기적 연속성과 절연저항에 대한 실차 레벨의 실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) UNECE R 100, ISO 6469-3, ISO 23273-3 및 Japan Attachment 101 등에서 작동전압이 직류 60[V] 또는 교류 25 [V]를 초과하는 고전압 시스템에 대하여 인체로부터 직·간접 접촉에 의한 감전사고를 예방하기 위한 구조 기준과 성능기준, 그리고 충돌시의 안전기준 등에 대하여 언급하고 있다. 성능기준의 전기적 연속성의 경우  $0.1[\Omega]$  이하, 절연저항의 경우  $100\Omega/V(DC)$ ,  $500\Omega/V(AC)$  이상으로 유지하도록 하고 있지만, 측정을 위한 조건은 약간의 차이가 있어 규정이나 기준의 일원화(unification)가 필요하다.
- (2) HFCV 차량 레벨의 전기적 연속성의 측정방법에 대한 검토 결과, 규격화된 시험 인가 전류의 설정이 필요하며, 상용화시 노출도전부의 일정한 전기적 연속성의 확보를 위한 전기적 연속성을 고려한 차량의 차체 설계 및 제작공정을 고려할 필요가 있다.
- (3) 절연저항의 경우 절연상태에 이상이 있는 경우 절연상태의 정도를 판단하기 위해서는 시험 인가전압 및 최소 측정범위가 HFCV 고전압 시스템의 동작특성에 맞는 측정시스템의 개발이 필요하다.
- (4) 현재 인체 감전보호를 위한 전기안전 평가방법과 관련하여 국제 규격 등에 대하여 시험방법 및 절차에 대한 구체적인 사항이 명시되어 있지 않아 혼란을 초래할 수 있기 때문에 규격화된 시험방법 및 시험장비에 대한 보완이 필요하다.

향후, HFCV 고전압시스템에 대한 전기안전 평가방법에 대하여 시스템에 맞는 측정방법 및 측정장비의 명확화와 고전압시스템의 모델링을 통한 측정 시스템 구축

을 통하여 전기안전을 위한 안전성 및 효율성을 고려한 측정방법 및 판단기준의 제시에 도움을 주고자 한다.

#### 감사의 글

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

#### [참 고 문 헌]

- [1] 국토해양부령, "자동차안전기준에 관한 규칙", 제4호, 2008.
- [2] 이기연 외 5, "하이브리드 자동차용 고압 케이블의 온도 특성에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, Vol.57P, No.3, pp.338-342, 2008.
- [3] 김향곤 외 4, "하이브리드자동차의 전기적 연속성 측정 방법에 관한 연구", 대한전기학회 전기설비전문위원회 추계 학술대회 논문집, pp.273-275, 2008
- [4] 이기연 외 5, "HEV의 전기안전을 위한 절연저항 측정기법에 관한 연구", 대한전기학회 전기설비전문위원회 추계 학술대회 논문집, pp.276-278, 2008
- [5] ISO 6469-3, "Electric road vehicles-Safety specifications-Part3:Protection of persons against electric hazards", 2001.
- [6] ISO 23273-3, "Fuel cell road vehicles-Safety specifications-Part1:Protection of persons against electric hazards", 2001.
- [7] 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.
- [8] Attachment 101, "Technical standard for protection of occupants against high voltage in fuel cell vehicles", 2007.