

수소연료전지자동차의 절연성능 평가방법에 관한 고찰

이기연[†], 김동욱*, 김향곤*

*한국전기안전공사 전기안전연구원

Study on the Evaluation Method of Electrical Isolation Property for Hydrogen Fuel Cell Vehicle

KIYEON LEE[†], DONGOOK KIM*, HYANGKON KIM*

**Electrical Safety Research Institute(subsidiary of Korea Electrical Safety Corporation), 27 Sangcheon-ri, Cheongpyeoung-myeon, Gapyeong-gun, Gyeonggi-go, 477-814, Korea*

ABSTRACT

This paper analyzed the suitability about the isolation performance criteria which was based on human impedance and effect of current in IEC 60479-1 on the safety of human being was examined. The method of evaluation by megger and DC voltmeter was analyzed. The differences of isolation performance according to design of high-voltage system were analyzed. The factors which affect the insulation performance were analyzed for HFCV, EV, HEV, etc. through analysis of the isolation performance evaluation method. Finally, design for improved isolation performance was proposed.

KEY WORDS : HFCV(수소연료전지자동차), Electrical safety(전기안전), Electric shock(감전), Isolation resistance(절연저항), Evaluation method(평가방법)

Nomenclature

R : resistance, Ω
C : capacitor, F
I : current, A
V : voltage, V
 ρ : resistivity, $\Omega \cdot m$
 ϵ : permittivity, F/m
l : length, m
A : area, m^2

d : distance, m
S : area, m^2

Subscripts

Ri : isolation resistance
EV : electric vehicle
HEV : hybrid electric vehicle
PHEV : plug-in hybrid electric vehicle
NEV : neighborhood electric vehicle
HFCV : hydrogen fuel cell vehicle
UNECE : united nations economic commission for europe

[†]Corresponding author : lkycj@kesco.or.kr

[접수일 : 2011.11.22 수정일 : 2011.12.19 게재확정일 : 2011.12.27]

- WP : working party
- IEC : international electro-technical commission
- GTR : global technical regulation
- AC : alternating current
- DC : direct current
- Y-Cap : line-bypass capacitor

1. 서 론

세계적으로 환경오염 저감을 위한 전략으로 환경친화형의 미래형자동차에 대한 연구개발이 적극적으로 추진됨에 따라 전기자동차(EV) 및 수소연료전지자동차(HFCV)가 두각을 나타내고 있다. 이에 따른 기존 엔진을 대체하는 전기장치의 성능 향상과 안전 확보를 위한 기술 개발의 필요성이 대두되고 있는 실정이다¹⁾. 특히 수소연료전지자동차의 경우 2010년대에 국내 상용화 예정으로 2040년에 약 16%의 에너지 소비 감축 효과를 나타낼 것으로 분석되었으며, 유해 배출가스가 없는 무공해 자동차로 관심이 커지고 있다. 또한 우리나라를 비롯한 세계 각국에서 수소연료전지자동차에 대한 개발 및 실증평가가 이루어지고 있는 실정이다^{2,3)}.

수소연료전지자동차에 대한 실증평가 중 전기안전분야는 UNECE WP.29의 GTR draft에서 언급한 내용을 중심으로 수행되고 있다. GTR draft에서는 인체 감전보호를 위하여 자동차의 충돌 전후의 안전기준에 대하여 나타내고 있으며, 안전기준에 대한 내용은 정의 및 절연저항, 전압, 에너지, 물리적 보호 등에 대한 요구사항을 설명하고 있다. 일부 요구사항에 대한 평가방법을 명시하고 있다⁴⁾.

친환경 자동차의 구동을 위한 고전압 시스템은 구동에너지원의 구성에 따라 크게 두 가지 방식으로 구분할 수 있다. 전기자동차(EV)와 하이브리드 자동차(HEV 또는 PHEV)와 같이 구동축전지의 전기에너지를 이용하는 자동차는 고전압 버스가 전기적새시와 물리적으로 절연된 상태이다. 수소연료전지자동차는 전기자동차와는 달리 연료전지스택과 구동축전지의 전기에너지를 이용하기 때문에 연료전지스택의 구조에 따라 냉각수로 인하여 고전압버

스와 전기적새시가 물리적으로 연결될 수 있다 (Fig. 4 참조-냉각수가 R_0 와 같이 물리적으로 연결될 수 있음). 이러한 고전압 시스템의 구조적 차이는 인체 감전보호를 위한 중요한 요소인 절연성능에 영향을 끼칠 수 있으며, 자동차의 절연성능 평가 방법에도 차이가 나타날 수 있다.

본 연구에서는 IEC 60479-1을 통하여 인체 감전사고 예방을 위한 절연성능 평가 기준과 평가방법에 대하여 분석하였다. 절연성능 평가 기준 및 평가방법에 대한 분석과 모의실험을 통하여 실제 수소연료전지자동차에서 절연성능에 영향을 끼치는 요소와 친환경자동차의 고전압시스템의 설계방식에 따른 절연성능 평가방법의 차이점에 대하여 분석하였다.

2. 이론적 분석

2.1 절연성능 평가 기준 분석

작동전압이 직류 60V 또는 교류 30V를 초과하는 고전압 시스템은 직접 접촉 및 간접 접촉에 의해 인체의 통전시간과 통전경로에 따라 위험할 수 있다⁴⁾. 현재 수소연료전지자동차는 440VDC의 고전압시스템을 사용하기 때문에 고전압시스템에 직접 접촉하게 되면 통전전류에 대한 인체 감전전류 및 영향으로 가벼운 경직 또는 마비 현상부터 심실세동에 의한 사망까지 이를 수 있다.

또한, 정상상태의 고전압시스템에 간접 접촉하게 되면 인체에는 영향을 끼치지 못한다. 하지만 일정 성능 이하로 절연 성능이 저하된 상태에서 인체가 자동차의 노출도전부와 다른 고전압 시스템의 외함 등을 접촉하였을 때 발생된 전위차에 의해 감전사고가 발생한다. 때문에 감전사고를 예방하기 위해서는 활선도체부와 노출도체부 사이의 절연 상태를 일정 수준 이상으로 유지해야 한다.

이와 같이 간접접촉에 의한 감전사고 예방을 위한 절연성능의 평가 기준은 ISO, IEC, GTR 등에서 100[Ω/VDC], 500[Ω/VAC] 이상을 유지하도록 규정하고 있다.

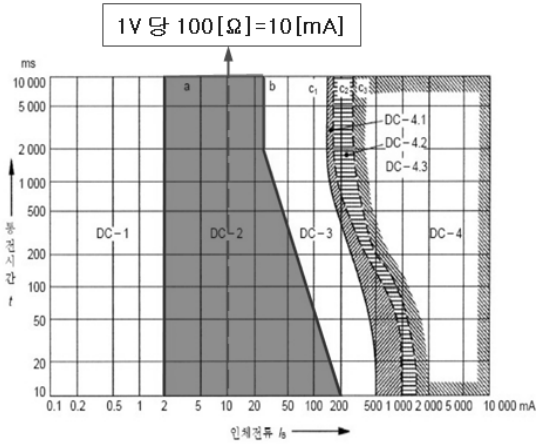


Fig. 1 Conventional time/current zones of effects of a.c. currents (15 Hz to 100 Hz) on persons for a current path corresponding to left hand to feet⁵⁾

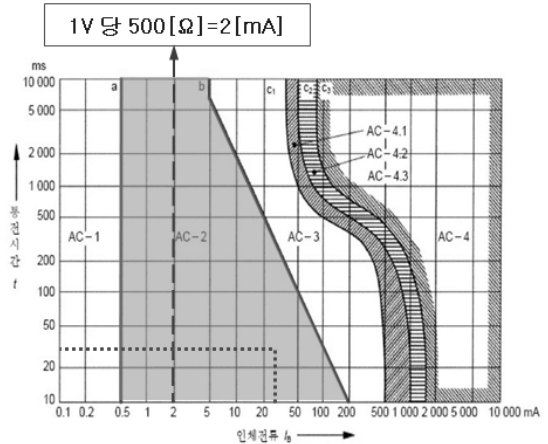


Fig. 2 Conventional time/current zones of effects of d.c. currents on persons for a longitudinal upward current path⁵⁾

IEC 60479-1에서는 인체 감전은 전원의 종류 (AC/DC)에 따라 인체 반응 곡선이 다르기 때문에 사고시 Fig. 1과 Fig. 2에 나타난 시간/전류에 대한 인체의 생리학적인 영향에 따른 인체 반응 곡선에서 AC-2 또는 DC-2에 해당하는 영역에 포함되는 인체통전전류가 흐르도록 절연상태를 유지해야 한다⁵⁾. 또한, 자동차에서는 전기설비의 누전차단기와 같은 보호장치를 설치하기가 쉽지 않기 때문에 시간 영역에 가능한 영향을 받지 않는 범위 내의 절연성능을 유지해야 한다. 전원의 종류에 따른 절연성능 기준인 100[Ω/VDC], 500[Ω/VAC]는 감전보호를 위한 최소한의 절연성능으로 분석되었다.

이상과 같이 절연성능에 대한 기준은 전원별 전격 안전 기준을 적용해야 하며, AC/DC 시스템에 따라 각각 100[Ω/VDC], 500[Ω/VAC] 이상을 유지하도록 적용해야 한다.

2.2 절연성능 평가방법 분석

수소연료전지자동차 등 친환경자동차의 절연성능 평가방법은 ISO, ECE에서 외부로부터 직류전압을 인가하여 측정하는 방법과 내부의 직류전원을 이용하여 측정하는 방법을 제시하고 있다.

2.1 절연저항계를 이용한 측정방법

절연저항계를 이용한 측정방법은 외부로부터 직류전원을 인가하여 측정하는 방법으로 고전압 버스의 작동전압보다 높은 직류전압을 인가할 수 있는 절연저항계를 사용하여, 고전압 버스의 활선도체부와 전기적새시 사이에 절연저항계를 접속한 후 시험전압을 인가하여 측정한다⁶⁾.

이 방법에 의한 시험은 비교적 간단하지만, 규격에 따라 시험전압에 대한 논란의 여지가 있는 실정이다. GTR에서는 작동전압의 최소 1/2 이상을 인가하여 시험하도록 규정하고 있지만, 고전압 시스템의 절연성능 확보를 위해서는 작동전압 이상의 시험전압을 인가하여 시험하는 것이 적절하다고 판단된다.

절연저항은 직류 전압을 인가했을 때 생기는 전류에 대하여 그 절연물에 의해 주어지는 저항값을 말한다. 즉, 절연된 두 물체 간에 전압을 가했을 때에 표면과 내부를 작은 누설전류가 흐를 때의 전압과 전류의 비이다. 절연저항 측정은 측정하고자 하는 시스템의 작동전압 이상을 인가하여 시험하여야 시스템이 작동상태에서 누설전류가 규정값 이상 흐르지 않는 성능을 검증하는 것이다. 만약 시험전압이 작동전압 보다 낮게 인가하여 시험하는 것은 절

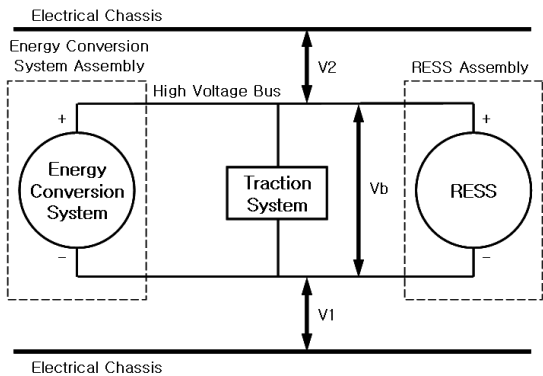


Fig. 3 Measurement of V_b , V_1 , V_2 ⁶⁾

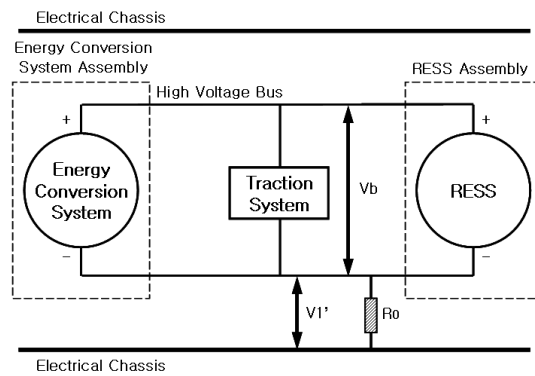


Fig. 4 Measurement of V_1' ⁶⁾

연성능이 시험전압 미만의 시스템에서는 측정값을 그대로 적용 가능하지만, 시험전압 이상의 시스템에서는 절연성능이 측정값을 적용하여 적부판정을 할 수 없는 것이다. 따라서 감전보호를 위한 절연성능 평가시 시험전압은 작동전압 이상을 인가하여 시험해야 할 것이다.

2.1.2 전압계를 이용한 측정방법

전압계를 이용한 측정방법은 내부의 직류전원을 이용하여 측정하는 방법으로 시험 조건은 내부의 직류전원을 이용하여 측정하기 때문에 고전압 시스템을 통전시킨 상태로 측정한다. 측정에 사용되는 전압계는 계측기 내부 저항값이 10[MΩ] 이상의 직류 전압계를 사용하여 측정한다.

측정은 Fig. 3에 나타낸 측정점의 전압(V_1 , V_2)을 측정한 후 V_1 이 V_2 보다 크거나 같으면, Fig. 4에 나타낸 것과 같이 저항 R_0 를 삽입하여 2단계 전압 V_1' 를 측정한다. 1단계와 2단계에서 측정된 전압값과 Fig. 4에서 삽입한 R_0 값을 이용하여 다음의 산출식을 통하여 절연저항 R_i 를 구한다⁶⁾.

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

만약 1단계 전압을 측정한 후 V_2 가 V_1 보다 크다면, Fig. 4와 동일한 방법으로 저항 R_0 를 삽입하여

2단계 전압 V_2' 를 측정한 후 다음의 산출식을 이용하여 절연저항을 구한다⁶⁾.

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

3. 시험 및 평가

고전압 시스템의 절연성능 평가를 위한 모의실험은 Fig. 5와 같이 모델링을 통하여 실시하였다.

수소연료전지자동차와 전기자동차 등은 연료전지시스템 또는 구동축전지의 전기에너지에 의해 구동하는 고전압 시스템이며 내부의 직류전원을 이용한 절연성능 평가시 구동에너지원에 대한 평가를 실시

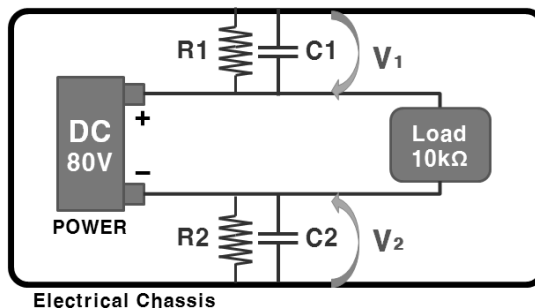
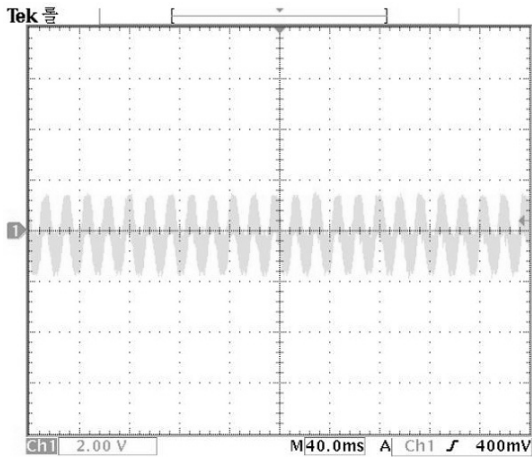
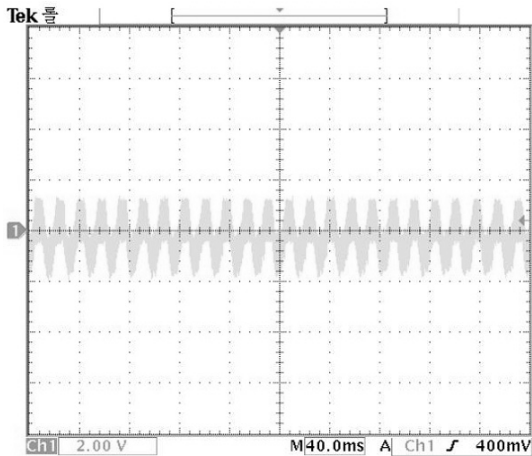


Fig. 5 Block diagram of modeling circuit for high voltage system



(a) V1



(b) V2

Fig. 6 Measurement result of V1 and V2 for condition I

하기 때문에 Fig. 5와 같이 직류전원과 부하로 간략하게 모델링 하였다.

수소연료전지자동차와 같은 경우 냉각수의 영향으로 Fig. 5의 저항(R) 성분이 존재하는 것과 같은 조건이 되며, 하이브리드자동차와 전기자동차에서는 전자파 특성 향상을 위한 Y-Cap 설치를 Fig. 5의 콘덴서(C) 성분이 존재하는 것을 모의한 것이다.

모델링에 의한 모의실험을 위하여 직류전원공급기(XDC150-40, Xantrex, USA)는 80[VDC]로 설정하였다. 부하는 10kΩ(10W)를 이용하여 회로를

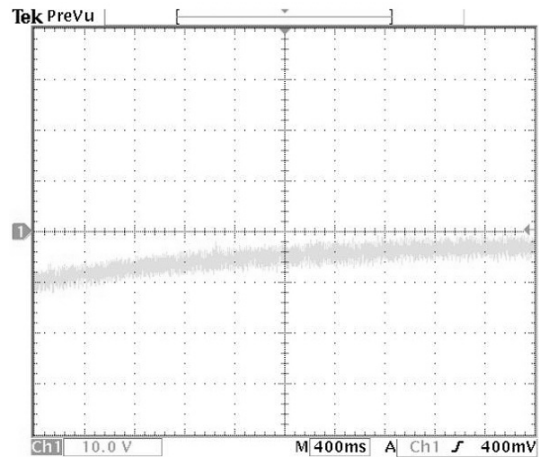


Fig. 7 Measurement result of V2 transients for condition I

구성하였으며 모델링에 따른 전압은 오실로스코프(TDS-3052, Tektronix, USA)를 이용하여 측정하였다.

시험조건은 다음의 3가지 모델에 대하여 시험하였으며, 콘덴서가 연결된 회로는 DC/AC 용 콘덴서를 이용하여 각각의 회로에 대하여 측정하였다.

조건 I) R, C 없는 경우 - DC전원 플로팅 상태

조건 II) R1, R2만 있는 경우(R1, R2 : 5kΩ)

조건 III) C1, C2만 있는 경우(C : DC/AC 용)

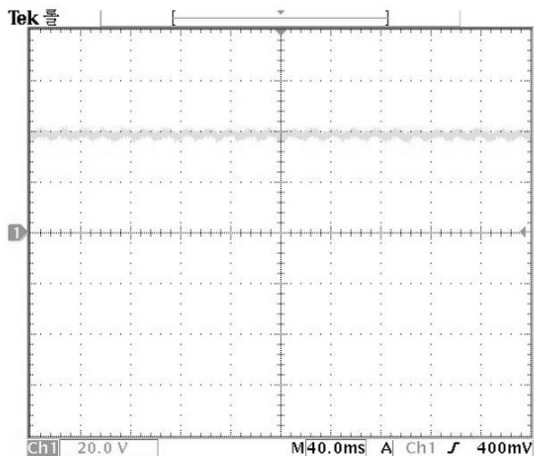
(C1, C2 : 3.3μF / C3, C4 : 0.15μF)

3.1 DC 전원 플로팅 상태(조건 I)

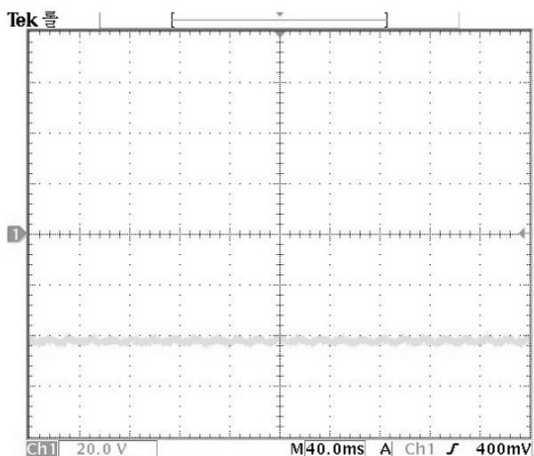
DC 전원 플로팅 상태는 저항과 콘덴서가 연결되어 있지 않은 상태로 이상적인 고전압시스템은 고전압버스와 전기적새시가 전기적으로 완전 절연상태이기 때문에 DC 전원이 플로팅 상태가 되며 초기 HEV 모델의 고전압시스템의 구성에 해당되는 모델이다.

측정결과 Fig. 6에 나타낸 것과 같이 직류전원이 아닌 교류 전원과 같은 전압이 측정되었다. 이것은 전압 측정 원리에 따른 전기적인 폐회로가 구성되지 않았기 때문에 발생하는 것으로 실전압이 아닌 허전압으로 분석된다.

또한, Fig. 7은 V2 전압의 과도현상으로 기준 전



(a) V1



(b) V2

Fig. 8 Measurement result of V1 and V2 for condition II

압이 시간이 흐름에 따라 변하는 형태로서 시간이 흐르면 기준전압이 0으로 수렴하여 Fig. 6(b)와 같은 형태로 측정되는 것을 알 수 있었다.

이상과 같은 결과로부터 고전압버스와 전기적새시가 물리적으로 완전 절연된 고전압시스템의 절연성능 평가는 전압계를 이용한 방법으로는 평가할 경우 V1, V2 전압이 측정되지 않기 때문에 평가가 불가능한 것을 알 수 있었다. 이러한 시스템에서는 절연저항계를 이용한 평가를 실시하여야 할 것이다.

3.2 저항만 연결된 상태(조건 II)

저항만 연결된 상태는 Fig. 5에서 저항 R1과 R2만 회로로 구성되어 있는 상태로서 수소연료전지자동차의 연료전지스택 상태를 모델링한 것이다. 수소연료전지자동차는 조건 I 과는 다르게 연료전지스택 내부의 냉각수가 고전압시스템의 고전압버스와 전기적새시 사이를 연결하는 매개체 역할을 하기 때문에 냉각수의 조건에 따라 절연성능에 영향을 끼치게 된다. 또한, 냉각수의 저항성분을 모델링하면 R1과 R2와 같은 역할을 하기 때문에 조건 II로 모델링하였다.

측정결과는 Fig. 8에 나타내었다. 조건 II에서는 조건 I 과는 다르게 전기적인 폐회로가 구성되기 때문에 전압 측정이 가능하다는 것을 알 수 있다. 또한, R1과 R2의 저항값에 대하여 전압이 비례하여 분배되는 것을 알 수 있다.

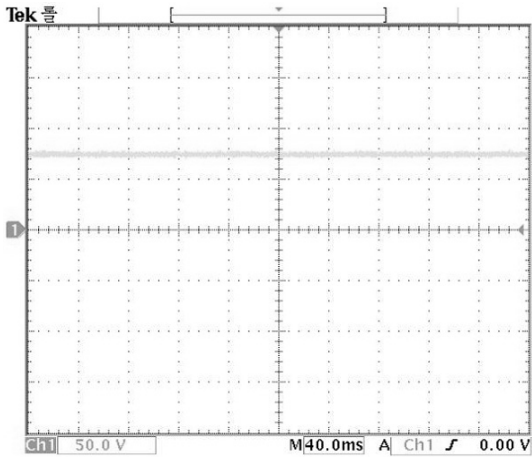
연료전지스택 내부의 냉각수는 동일한 특성을 가진 상태로 고전압버스와 전기적새시 사이를 연결하기 때문에 냉각수의 저항값은 식 (3)과 같이 계산할 수 있기 때문에 냉각수의 저항율이 절연성능에 영향을 끼치게 된다.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (3)$$

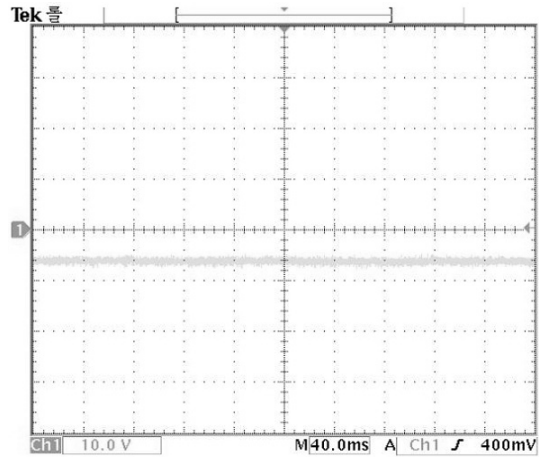
냉각수의 초기 저항율 ρ 는 매우 높은 상태로 유지가 되겠지만, 운행에 따른 냉각수의 상태변화와 전자유입 등에 의해 저항율이 낮게 되면 수소연료전지자동차의 절연성능을 저하시키는 요인이라 할 수 있다.

3.3 콘덴서만 연결된 상태(조건 III)

콘덴서만 연결된 상태는 Fig. 5에서 콘덴서 C1과 C2만 회로로 구성되어 있는 상태로서 전기자동차와 하이브리드전기자동차 등에서 고전압시스템의 고전압버스와 전기적새시 사이에 EMI, EMC 등 전자파 특성을 향상시키기 위한 Y-Cap을 시설한 것을 모의한 것으로 Y-Cap의 종류에 따라 DC용, AC용 두 가지에 대하여 모델링하였다.



(a) V1



(b) V2

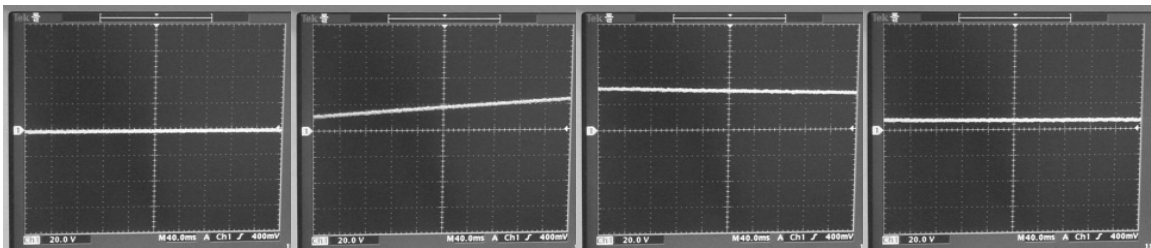
Fig. 9 Measurement result of V1 and V2 for condition III

DC용 Y-Cap에 대한 측정결과는 Fig. 9에 나타내었으며, DC용 Y-Cap이 연결된 회로는 전기적인 폐회로가 구성되어 전압 측정이 가능한 것을 알 수 있다. 하지만, 동일한 사양의 콘덴서를 사용하였지만, V1과 V2가 다르게 나타난 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 V1은 74[V], V2는 6[V]가 되어 식 4가

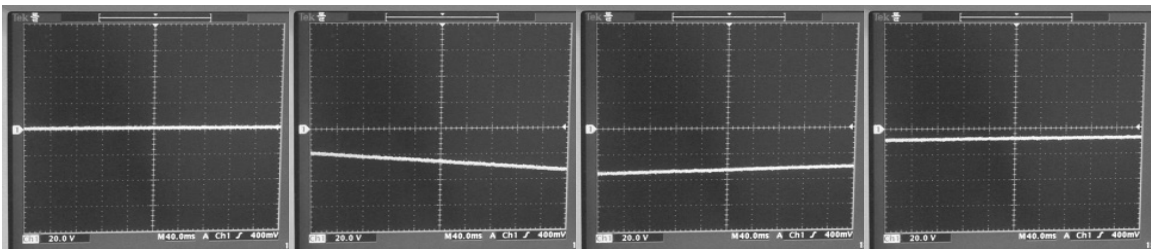
성립하는 것을 확인하였다.

$$V_b = V1 + V2 \quad (4)$$

AC용 Y-Cap에 대한 측정결과는 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 10은 조건III의 V1에 대한 측

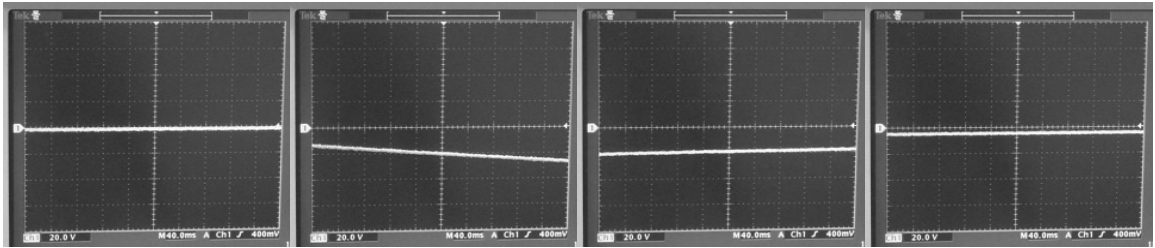


(a) from OFF to ON

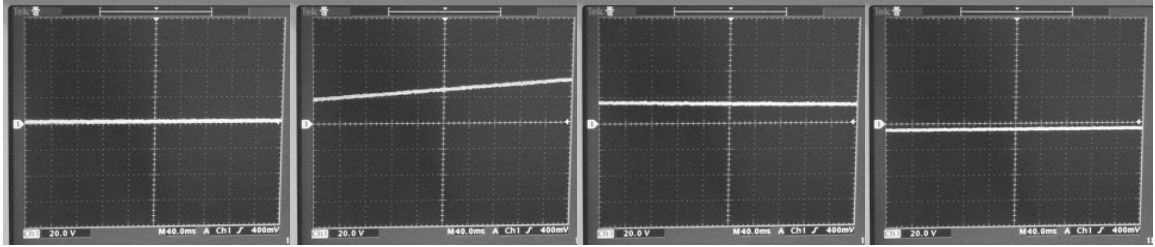


(b) from ON to OFF

Fig. 10 Measurement result of V1 for condition III



(a) from OFF to ON



(b) from ON to OFF

Fig. 11 Measurement result of V2 for condition III

정 파형이다. 직류전원에 대하여 AC용 콘덴서를 설치하였기 때문에 (a)와 같이 전원을 off 상태에서 on되었을 때 콘덴서에 충전되는 과도현상으로 전압이 상승하였다가 일정시간이 지나면 0[V]로 수렴하는 것을 확인할 수 있었으며, (b)에서도 동일한 현상이 발생한 것을 알 수 있었다. Fig. 11은 조건III의 V2에 대한 측정 파형으로 V1과 유사한 형태로 나타난 것을 알 수 있었다.

Fig. 10과 Fig. 11의 측정 결과로부터 V1과 V2의 과도현상에 대한 최대값은 식 (4)가 성립함을 확인할 수 있었으나 시간이 경과함에 따라 0[V]로 수렴되어 식 (5)와 같이 되는 것을 알 수 있었다.

$$V_b \neq V1 + V2 \quad (5)$$

이상과 같이 조건III에 대한 모델링 시험결과 EMI, EMC 등 전자파 특성을 향상시키기 위한 Y-Cap 설치시 전원특성을 고려하여 부품을 선정하여 설치하면 전기적인 폐회로가 구성되어 전압계를 이용한 절연성능 평가가 가능한 것을 알 수 있었다. 콘덴서의 정전용량은 식 (6)과 같이 결정되며, $\epsilon = \epsilon_s \epsilon_o$ 로

계산된다. 이때, ϵ_o 는 진공유전율($\epsilon_o = 8.854 \times 10^{-12}$ [F/m])이며, ϵ_s 는 콘덴서를 구성하는 물질의 비유전율이다. 따라서 Y-Cap 설치시 콘덴서의 유전율에 따라 고전압시스템의 절연성능에 영향을 끼치게 된다.

$$C = \epsilon \frac{S}{d} \quad (6)$$

Fig. 9와 같이 모델링에 의한 시험결과에서 알 수 있듯이 동일한 사양의 콘덴서를 사용했다고 하더라도 여러 주변 조건에 따라 C1과 C2에 분배되는 전압이 다르기 때문에 고전압시스템 설계시 Y-Cap의 사양 결정에 있어 고전압버스의 작동전압 이상의 내압을 갖는 콘덴서를 사용해야 한다.

4. 결 론

본 연구는 절연성능 평가기준 및 평가방법에 대한 분석과 모델링을 통한 실험을 통하여 실제 수소연료전지자동차에서 절연성능에 영향을 끼치는 요소와 친환경자동차의 고전압시스템의 설계방식에 따른 절

연성능 평가방법의 차이점에 대하여 분석하였다.

- 1) 고전압시스템의 감전보호를 위한 절연성능 평가 기준은 100[Ω/VDC], 500[Ω/VAC] 이상을 유지하도록 하고 있으며, 이는 IEC 60479-1에 나타난 감전에 대한 인체 반응 곡선과 시간 영역에 대한 분석을 통하여 감전사고 예방을 위한 기준임을 확인하였다.
- 2) 외부로부터 직류전원을 인가하여 절연성능을 평가방법은 시험인가전압에 대한 명확한 정립을 통하여 작동전압 이상의 시험인가전압에 대한 기준을 제시하였다.
- 3) 내부의 직류전원을 이용한 절연성능 평가방법은 고전압시스템의 구조에 따라 전기적인 폐회로가 구성이 되어야 측정이 가능한 것을 확인하였다.
- 4) 수소연료전지자동차에서 고전압버스와 전기적 채시 사이의 절연성능에 영향을 끼치는 중요한 요소는 냉각수의 유전율로서 냉각수의 유전율 관리가 중요한 것을 확인하였다.
- 5) EMI, EMC 등 전자파 특성을 향상시키기 위한 Y-Cap을 시설할 경우 절연성능 측정 방법에 따른 콘덴서의 내압을 고려해서 설계해야 평가 중 시스템 이상에 의한 고장 및 사고를 예방할 수 있는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구

비지원(07교통체계-미래02)에 의해 수행 되었습니다.

참 고 문 헌

- 1) 이기연, 김동욱, 김향곤, 문현욱, “친환경 자동차의 전기안전을 위한 절연저항 측정에 관한 연구”, 대한전기학회 논문지, Vol. 58P, No. 4, 2009, pp. 597-601.
- 2) 홍종철, 강승진, 최상진, 박상용, 김종욱, “수소에너지의 승용차부문 도입에 따른 CO₂ 배출 감축 및 비용효과 분석 연구”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 20, No. 1, 2009, pp. 9-21.
- 3) 임중순, 이현우, 홍윤석, 이광범, 용기중, 권해봉, “수소연료전지자동차 연료소비율 평가 기술 개발에 관한 연구”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 21, No. 3, 2010, pp. 207-213.
- 4) 황보천, 이규명, 유경준, “연료전지 자동차 세계기술규정의 감전보호기준 연구”, 한국수소 및 신에너지학회 논문집, Vol. 21, No. 3, 2010, pp. 167-183.
- 5) 지식경제부 기술표준원, “인체와 가축에 대한 전류의 영향-제1부 : 일반적인 양상”, KS C IEC 60479-1, 2007.
- 6) UNECE, “Hydrogen vehicle Draft GTR SGS”, 2011.